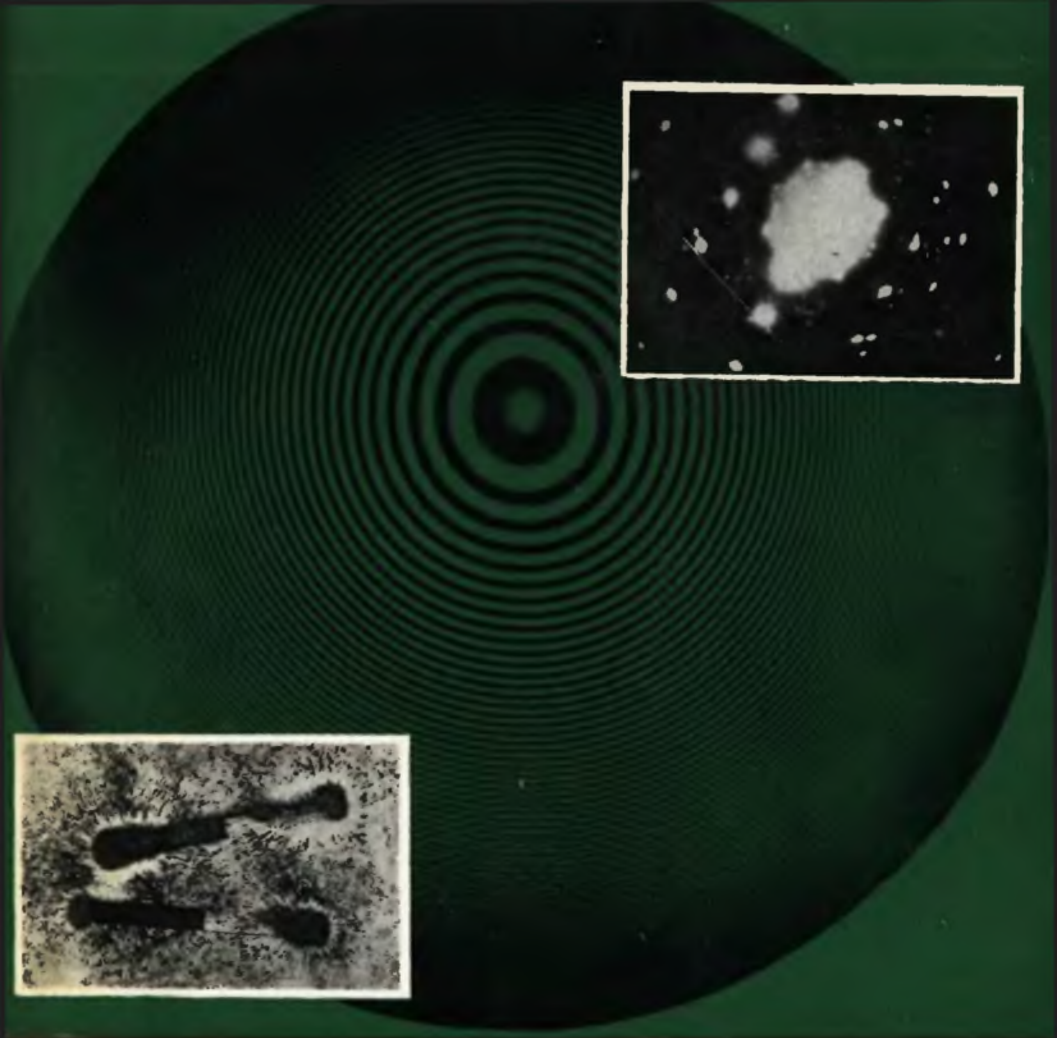


G. GAMOW

A fizika története

George Gamow

A FIZIKA TÖRTÉNETE

GEORGE GAMOW

A FIZIKA TÖRTÉNETE

A szerző rajzaival

GONDOLAT

BUDAPEST, 1965

Az eredeti mű címe:

BIOGRAPHY OF PHYSICS
Harper & Row, New Jork and Evanston

Fordította:

KISS ISTVÁN

A fordítást átnézte:

PÓCS LAJOS

A verseket fordította:

BÁRÁNY GYÖRGY

PERKYNEK AJÁNLOM

TARTALOMJEGYZÉK

ELŐSZÓ

Kétféle fizikakönyv van. Az egyik a tankönyv. Ennek az a célja, hogy olvasóját megtanítsa a fizikára. A tankönyvek rendszerint nem foglalkoznak a tudomány fejlődésével, történetével. A múlt és a jelen jelentős tudósairól éppen csak születésük, és ha már nem élnek, haláluk évét közlik zárójelben a nevük után. A másik fajta fizikakönyv lényegében történelmi beállítottságú. A történelmi adatokkal és a tudomány nagy embereinek jellemrajzával foglalkozik, felfedezéseiket egyszerűen felsorolja, feltételezve, hogy az olvasó már ismeri a tanulmányozott tudományt.

Ebben a könyvben igyekeztem a kettő között maradni. Ugyanúgy tárgyaltam Galilei pörét, mint a mechanika általa felfedezett alaptörvényeit, vagy elmondtam személyes visszaemlékezéseimet Niels Bohrról és ugyanakkor részletesen ismertettem a Bohr-féle atommodellt. A tárgyalás mind a nyolc fejezetben egy vagy legfeljebb két jelentős személy köré csoportosul, a kor többi fizikusa és eredményeik csupán a hátteret képezik. Ezért mellőztem sok olyan nevet, amelyet a legtöbb fizika-történet könyvben megtalálhatunk. És ezért hagytam el sok olyan témát, amelyek a szokásos fizikai tankönyvekben „kötelező módon" megvannak. Ennek a könyvnek az a célja, hogy az olvasónak fogalmat adjon arról, *mi* a fizika és *milyen emberek* a fizikusok, és ilyen módon felkeltse benne az érdeklődést tanulmányai folytatására, a tárgyról szóló rendszeresebben megírt munkák elolvasására.

Ha a múlt vagy a jelen nagy embereiről olvasunk, mindig felmerül az a kívánság, hogy megismerjük külső megjelenésüket. Mivel a könyv melléklet-lapjainak száma korlátozott, úgy határoztam, hogy valamennyit fizikai jelenségekről, pl. színképekről, elektrondiffrakcióról készült fényképek, ködkamra-felvételek bemutatására használom. Így a fizikusok arcképét csak rajzban közölhetjük. Minthogy nem vagyok művész, segédeszközöket kellett használnom, például fényképlemezek rajzpapírra vetítését. Ez a módszer elég jó hasonlóságot eredményezett ahhoz, hogy a rajzokat a könyvben közöljem.

Remélem, hogy ez a könyv az ifjú olvasóknak (és talán idősebbeknek is) ösztönzést ad a fizika tanulmányozására. Ez fő célja.

GEORGE GAMOW

Colorado Egyetem

A FIZIKA TÖRTÉNETE

A FIZIKA HAJNALA

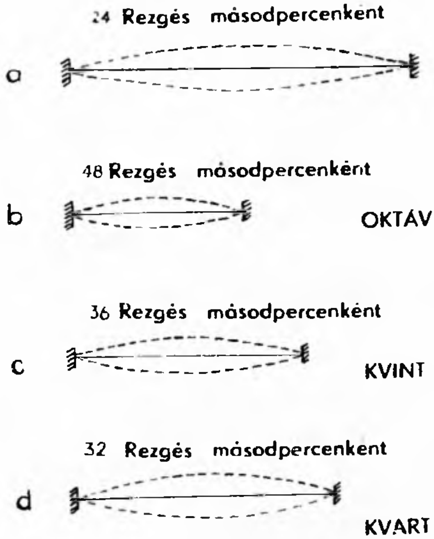
Nehéz a fizika tudományának eredetét kinyomozni, mint ahogy sok nagy folyó eredetét is nehéz megtalálni. Néhány parányi forrás buggyan ki a trópusi növények zöld levelei, vagy a csupasz északi tájak mohafedte sziklái alól. Néhány kis ér és csermely nyargal lefelé a hegyek lejtőin patakokká egyesülve, amelyek azután „folyó" nevet megérdemlő nagyobb vízfolyássá alakulnak. A folyók egyre szélesebbek, számos mellékfolyó táplálja őket, végül hatalmas folyammá dagadnak – lehet ez a Mississippi vagy a Volga, a Nílus vagy az Amazonas –, amely a vizet az óceánba hordja.

A források, amelyek a fizika tudományának nagy folyóját létrehozták, elszórtan mindenütt ott vannak a földön, ahol a *Homo sapiens*, vagyis a gondolkozó ember él. Úgy látszik azonban, hogy legnagyobb részük a Balkán félsziget déli csücskére összpontosul, amelyet a „régi görögök" néven ismert nép lakott. Vagy legalábbis így látjuk ezt mi, akik ezeknek a korai „értelmiségieknek" a kultúráját örököltük. Érdekes megemlíteni, hogy más régi nemzetek, például Babilónia vagy Egyiptom népe a fizika fejlődésében teljesen terméketlen volt, ugyanakkor, amikor nagymértékben hozzájárult a matematika és a csillagászat korai fejlődéséhez. Ennek – a görög tudományhoz hasonlítva – talán az a magyarázata, hogy a babilóniai és az egyiptomi istenek fent, a csillagok között éltek, míg a régi görögök istenei csupán 3–4000 méter magasságban, az Olümposz hegy tetején, és így sokkal közelebb álltak a földi problémákhoz. A legenda szerint a mágnesség kifejezés egy görög pásztor, *Μάγνης*, nevéből származik, aki meglepetéssel tapasztalta, hogy vashegyű botjának végét egy útszélen heverő kő (mágnesvas-érc) magához ragadja. Az „elektromosság" kifejezés is görög eredetű, az $\eta\lambda\varepsilon\varkappa\tau\varrho o\nu$ szóból származik, ami borostyánkövet jelent. Talán egy másik hellén pásztor, aki egy darab borostyánkövet tisztított egyik birkája gyapjához dörzsölve, azt tapasztalta, hogy a kő titokzatos képességet nyert, fadarabkákat ragadott magához.

PITHAGORÁSZ HANGTANI FELFEDEZÉSE

Ezek a legendás felfedezések aligha lennének védhetők egy prioritási perben. *Pithagorász* felfedezését azonban adatok bizonyítják. Pithagorász görög filozófus volt, aki az időszámításunk előtti VI. század közepén élt. Meggyőződése volt, hogy a világot a számok kormányozzák. Ezért megvizsgálta, milyen arány áll fenn a hangszerek húrjai között, amikor harmonikus hangkombináeiókat hoznak létre. A vizsgálathoz monochordot használt, vagyis egyetlen húrt, amelynek a hossza változtatható, és ráakasztott súlyokkal különbözőképpen feszíthető meg. Azt találta, hogy ha a súlyt nem változtatta, csak a húr hosszát, olyankor hall harmonikus hangzatot, ha a húrok hossza egyszerű arányban áll egymással. A 2 : 1 hosszúságarány oktávot ad, a 3 :2 arány kvintet, a 4 : 3 arány kvartot. Ez volt talán egy fizikai törvénynek az első matematikai megfogalmazása. Az első lépésnek tekinthető abban. amit manapság elméleti fizikának nevezünk. A modern fizika terminológiájával Pithagorász felfedezését úgy fogalmazhatjuk, hogy a frekvencia, vagyis a másodpercenkénti rezgések száma egy adott húrnál, adott feszítőerő esetén, fordítva arányos a húr hosszával. Ha a második húr (1b. ábra) fele olyan hosszú, mint az első (1a. ábra), akkor rezgési frekvenciája kétszer akkora. Ha a két húr hossza 3 : 2 vagy 4 : 3 arányban áll egymással, akkor rezgési frekvenciájuk aránya 2 :3 vagy 3 : 4 (1c, 1d. ábra). Az emberi agynak az a része, amely az idegjelzéseket a fültől átveszi, olyan szerkezetű, hogy az egyszerű frekvenciaarányok, például 3 : 4 „kellemes" érzést okoznak, míg a bonyolultabb arányok, például 137 : 171, „kellemetlen" érzést. (Hogy miért, azt az agyfiziológusoknak kell majd megmagyarázniok.) Így aztán a tökéletes akkordot adó húrok hossza egyszerű számarányban áll egymással.

Pithagorász megkísérelte, hogy egy lépéssel továbbmenjen. Mivel azt képzelte, hogy a bolygók mozgásának harmonikusnak kell lennie, feltette, hogy a Földtől való távolságuk ugyanolyan arányban áll egymással, mint azok a húr-hosszak, amelyek a görög nemzeti hangszeren, a lanton a hét alaphang megszólaltatásához kellenek (természetesen egyenlően megfeszített húrokkal). Ez volt talán első példája annak, amit manapság gyakran „patologikus fizikai elképzelésnek" nevezünk.



1. ábra.
Pithagorász hangtani felfedezése

AZ ATOMISTA DÉMOKRITOSZ

A másik jelentős fizikai elméletet, amelyet modern kifejezésmóddal „kísérleti megalapozás nélküli elmélet"-nek neveznének, de amely végül „valósággá lett álom"-nak bizonyult, egy másik ógörög filozófus, *Démokritosz* alkotta. Ő az időszámításunk előtti 400. év körül élt, gondolkozott és tanított. Az volt az elképzelése, hogy minden anyagi test számtalan olyan kicsiny részecskének a halmaza, amelyeket kicsiségük miatt emberi szem nem láthat. Ezeket a részecskéket *atomok*nak, oszthatatlanok-nak (görögül ἄτομος) nevezte, mert azt gondolta, hogy ezek az anyagi testek mind kisebb és kisebb részekre való osztásának utolsó lépcsőfokai. Azt hitte, hogy négyféle atom létezik. A kő-atomok szárazak és nehezek, a víz-atomok nedvesek és nehezek, a levegő-atomok hidegek és könnyűek, a tűz-atomok pedig mozgékonyak és forrók. Feltételezte, hogy minden ismert anyag e négy különféle atom kombinációjából áll. A föld: a kő- és a víz-atomok kombinációja. A növények, amelyek a Nap sugarainak hatására nőnek ki a földből, a talaj kő- és víz-atomjaiból, valamint a Napból származó tűz-atomokból jönnek létre. A száraz fahasáb elvesztette valamennyi víz-atomját, ezért aztán el tud égni. Az égés folyamán kibocsátja tűz-atomjait (lángol), és visszamaradnak a kő-atomok (hamu). Ha bizonyos köveket (fémérceket) lángba teszünk akkor a hő-atomok egyesülnek a tűz-atomokkal, és a fémnek nevezett anyagokat hozzák létre. Az olcsó fémek, amilyen például a vas, igen kis mennyiségű tűz-atomot tartalmaznak, és ezért meglehetősen sötétek. Az aranyban van a legtöbb tűz-atom, ezért olyan ragyogó és értékes. Ha tehát az egyszerű vashoz tűz-atomokat tudnánk még adni, akkor értékes aranyat nyerhetnénk belőle.

Ha ma egy diák a kémia vizsgán mondaná el ezt, nyilván elégtelent kapna. A kémiai átalakulások említett példái természetesen hibásak. Mégis az alapvető elképzelés, az, hogy néhány kémiai elem kombinációja által szinte korlátlan számú különböző anyagot nyerhetünk, kétségkívül helyes. A mai kémia is ezen alapszik. Huszonkét évszázad telt el Démokritosztól Daltonig, amíg a helyes felfogás kialakult.

ARISZTOTELÉSZ FILOZÓFIÁJA

Arisztotelész egyike volt az ógörög világ óriásainak. Két okból lett nevezetes: először, mert valóban zseni volt; másodszor, mert makedóniai Nagy Sándor nevelője és később pártfogoltja volt. Időszámításunk előtt 384-ben született az Égei-tenger partján Sztagira görög gyarmati városban, mint a makedon királyi család volt udvari orvosának a fia. 17 éves korában Athénba ment, csatlakozott Platón filozófiai iskolájához. Platónnak i. e. 347-ben bekövetkezett haláláig lelkes híve és tanítványa maradt. Utána az utazások korszaka következett. Végül visszatért Athénba, és megalapította a peripatetikusnak nevezett filozófiai iskolát, amelyet a Lükeionban tartott fenn. Arisztotelész fennmaradt műveinek legnagyobb részét a „tanulmányok" képezik, minden valószínűség szerint azoknak az előadásoknak a szövegei, amelyeket Lükeionban tartott a különböző tudományágakról. Vannak ezek között logikai és pszichológiai tanulmányok. E tudományágaknak ő volt a megalkotója. Vannak aztán politikai tudományokkal és különböző biológiai problémákkal, főleg a növények és állatok osztályozásával foglalkozó tanulmányok. E területeken Arisztotelész teljesítménye óriási; az emberi gondolkodást két évezreden át befolyásolta. A fizika területén azonban talán az volt a legfontosabb eredménye, hogy megalkotta e tudomány nevét, amely a görög phüszisz (φύσις), természet szóból származik. Az arisztotelészi filozófia tökéletlensége a fizikai jelenségek tanulmányozása terén annak tulajdonítható, hogy Arisztotelész gondolkodása, sok más görög filozófussal ellentétben, nem volt matematikai irányú. Az égitestek és a földi tárgyak mozgásáról vallott felfogása inkább ártott a tudomány haladásának, mint segítette azt. A tudományos gondolkodás újjászületésekor, a reneszánsz korában, Galileinek és más nagy gondolkodóknak keményen kellett viaskodniuk, hogy lerázzák az arisztotelészi filozófia igáját. Azt ugyanis abban az időben végső szónak tekintették minden ismeretet illetően, amely a dolgok természetébe való minden további behatolást feleslegessé tesz.

ARKHIMÉDÉSZ EGYENSÚLYI TÖRVÉNYEI

Arisztotelész után egy évszázaddal élt Szürakuszában, egy szicíliai görög gyarmat fővárosában Arkhimédész (2. ábra), az ókor másik nagy görög gondolkodója, a mechanika tudományának apja. Csillagász fia volt, így korán felébredt benne a matematika iránti érdeklődés és hajlam. Élete folyamán több igen fontos felfedezést tett a matematika különböző ágaiban. Legfontosabb matematikai eredménye a gömb és a köréje írt henger felszíne és térfogata közötti arány meghatározása volt. Kívánságának megfelelően, sírját hengerbe zárt gömbbel jelölték meg. ψαμμιτης (Pszammitész) vagyis *A homokszámlálás*ról című könyvében ismerteti módszerét, amelyet az igen nagy számok leírására alkotott.*

* Ezt a módszert használjuk ma is a számok felírására a decimális rendszerben: vagyis ennyi egyes, ennyi tizes, ennyi százas, ennyi ezres stb.

Minden számnak, helyének megfelelően különböző nagyságrendet tulajdonít. Módszerét a Föld nagyságának megfelelő gömbbe férő homokszemek számának leírására alkalmazza.

Arkhimédész a *Síkok egyensúlyáról* című híres kétkötetes könyvében írja le az emelő általa felismert törvényeit, és itt tárgyalja azt is, hogy hogyan lehet a testek súlypontját megtalálni.

2. ábra.
Arkhimédész és a korona

A mai olvasó számára Arkhimédész írásainak a stílusa nehézkes és hosszadalmas, sok tekintetben Euklidész geometriakönyveihez hasonló. Arkhimédész idejében a görög matematika csaknem teljes egészében a geometriára korlátozódott; az algebrát az arabok találták fel, sokkal később. Így a mechanikában és a fizika más ágaiban is a bizonyításokat többnyire geometriai ábrák segítségével végezték el; ma erre algebrai egyenleteket használunk. Ugyanúgy mint Euklidész a geometriájában, Arkhimédész is „posztulátumok" és az ezekből levezetett „tételek" által fogalmazza meg a statika (vagyis az egyensúlyok) alaptörvényeit. Az első kötet így kezdődik:

1. Egyenlő távolságban levő egyenlő súlyok egyensúlyban vannak. Nem egyenlő távolságban levő egyenlő súlyok nincsenek egyensúlyban, hanem a nagyobb távolságban levő súly felé billennek.
2. Ha bizonyos távolságban egyensúlyban levő súlyok egyikéhez még hozzáadunk valamit, akkor azok nem lesznek többé egyensúlyban, hanem afelé billennek, amelyhez hozzáadtunk valamit.
3. Hasonlóképpen, ha az egyik súlyból elveszünk valamit, akkor a súlyok nem lesznek egyensúlyban, hanem afelé billennek, amelyből nem vettünk el semmit.
4. Ha egyenlő és hasonló síkbeli alakzatok egymásra illesztve egybevágnak, akkor súlypontjuk ugyancsak egybeesik.
5. Ha az alakzatok egyenlőtlenek, de hasonlóak, akkor a súlypontjuk helyzete is hasonló lesz. Hasonló alakzatokhoz képest hasonlóan elhelyezett pontokon olyan pontokat értek, amelyeken át egyenlő szögben húzott egyenes vonalak egyenlő szögeket alkotnak a megfelelő oldalakkal.
6. Ha két adott távolságban levő súly egyensúlyban van, akkor két másik ezekkel egyenlő súly szintén egyensúlyban lesz ugyanolyan távolságban. (Ez nyilván világos?)
7. Belülről nézve konkáv (homorú) mértani alakzat súlypontja az alakzaton belül van.

E posztulátumok után 15 tétel következik, amelyek az előzőkből egyenes logikai lépésekkel következnek. Az első 5 tételt bizonyítás nélkül közöljük, de idézzük a 6. tétel pontos bizonyítását, mert ez foglalja magában az *emelő* alapvető *törvényét.*

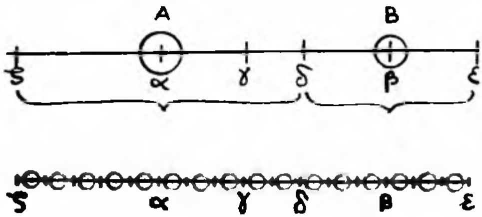
Tételek:

1. Egyenlő távolságban egyensúlyban levő súlyok egyenlőek . . .
2. Egyenlő távolságban levő nem egyenlő súlyok nincsenek egyensúlyban, hanem a nagyobb súly felé billennek . . .
3. Egyenlőtlen súlyok egyenlőtlen távolságban vannak egyensúlyban, oly módon, hogy a nagyobb súly van közelebb . . .
4. Ha két egyenlő súlynak nem ugyanaz a súlypontja, akkor együttes súlypontjuk a súlypontjaikat összekötő vonal középpontjában van . . .
5. Ha három egyenlő súlynak a súlypontjai egy egyenesen vannak, egyenlő távolságban, akkor a rendszer súlypontja egybeesik a középső súlyéval . . .

Most rátérünk a 6. tétel bizonyítására, az olvasó kedvéért kissé modernizálva:

6. Két súly egyensúlyban van, ha távolságuk fordítva arányos súlyukkal.

Tegyük fel, hogy az A és B súlyok összemérhetők* és az α, β pontok a súlypontjukat jelölik (3. ábra):



3. ábra.
Az emelő törvényének Arkhimédész-féle bizonyítása

Húzzunk α-n β-n át egyenes vonalat, amelyet a γ pont úgy oszt, hogy

$$A : B = \overline{\beta\gamma} : \overline{\gamma\alpha}$$

legyen. Bizonyítanunk kell, hogy γ a két súly közös súlypontja. Minthogy A és B összemérhető, ezért a $\overline{\beta\gamma}$ és $\overline{\gamma\alpha}$ távolság szintén összemérhető. Legyen $\overline{\mu\nu}$ $\overline{\beta\gamma}$-nak és $\overline{\gamma\alpha}$-nak közös osztója. Legyen $\overline{\beta\delta}$ és $\overline{\beta\varepsilon}$ is egyenlő $\overline{\alpha\gamma}$-val és legyen $\overline{\alpha\varsigma} = \overline{\gamma\beta}$. Akkor $\overline{\alpha\delta} = \overline{\gamma\beta}$, mivel $\overline{\beta\delta} = \overline{\gamma\alpha}$. Ezért $\overline{\varsigma\delta}$-t α, $\overline{\delta\varepsilon}$-t β két egyenlő részre osztja. Eszerint $\overline{\varsigma\delta}$ és $\overline{\delta\varepsilon}$ páros számszor foglalja magában a $\overline{\mu\nu}$ távolságot.

Vegyünk egy olyan Ω súlyt, amely annyiad része A-nak, ahányad része $\overline{\mu\nu}$ a $\overline{\varsigma\delta}$-nak. Ekkor

$$A : \Omega = \overline{\varsigma\delta} : \overline{\mu\nu}.$$

De

$$B : A = \overline{\gamma\alpha} : \overline{\beta\gamma} = \overline{\delta\varepsilon} : \overline{\varsigma\delta}.$$

Hasonló következtetéssel adódik, hogy $B : \Omega = \overline{\delta\varepsilon} : \overline{\mu\nu}$ vagyis Ω annyiszor van meg B-ben, ahányszor $\overline{\mu\nu}$ megvan $\overline{\delta\varepsilon}$-ban. Így tehát Ω közös osztója A-nak és B-nek.

* Vagyis, hogy a két súly arányát racionális tört, például 5/3, 117/32 fejezi ki.

Osszuk $\overline{\varsigma\delta}$-t és $\overline{\delta\varepsilon}$-t $\overline{\mu\nu}$ hosszúságú részekre, A-t és B-t pedig Ω nagyságú részekre. A ekkor ugyanannyi részt tartalmaz, mint $\overline{\varsigma\delta}$, B pedig ugyanannyit, mint $\overline{\delta\varepsilon}$. Helyezzük A részeit $\overline{\varsigma\delta}$ $\overline{\mu\nu}$ hosszúságú részeinek a középpontjába, B részeit pedig $\overline{\delta\varepsilon}$ $\overline{\mu\nu}$ hosszúságú részeinek középpontjába (3b. ábra).

Ekkor A $\overline{\varsigma\delta}$-n egyenlő távolságra elhelyezett részeinek a súlypontja α-nál lesz, $\overline{\varsigma\delta}$ középpontjánál. B $\overline{\delta\varepsilon}$ mentén egyenlő távolságban elhelyezett részeinek a súlypontja pedig β-nál, $\overline{\delta\varepsilon}$ középpontjánál. Ámde az A és B részei által együtt alkotott rendszer, páros számú egyenlő súly rendszere, amely súlyok $\overline{\varsigma\varepsilon}$ mentén egyenlő távolságban vannak egymástól. Mivel $\overline{\varsigma\alpha}= \overline{\gamma\delta}$ és $\overline{\alpha\gamma}=\overline{\beta\varepsilon}$, ezért $\overline{\varsigma\gamma}=\overline{\gamma\varepsilon}$, úgy hogy γ a középpontja $\overline{\varsigma\varepsilon}$-nak. Ezért γ a $\overline{\varsigma\varepsilon}$ mentén elhelyezkedő rendszernek a súlypontja. Vagyis az α-nál ható A és a β-nál ható B súlyok a γ pont körül lesznek egyensúlyban.

E tétel után következik a hetedik tétel, amely ugyanezt az állítást arra az esetre bizonyítja, ha az A és B súlyok összemérhetetlenek.*

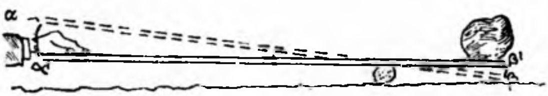
Az emelő elvének felfedezése és különböző alkalmazásai szenzációként hatottak a régi világban. Ezt jól láthatjuk Plutarkhosz *Marcellus élete* című könyvének egy részletéből. Marcellus római tábornok volt, aki a második pun háborúban elfoglalta Szürakuszát, és részben felelős Arkhimédész lemészárlásáért, aki ötletes hadigépek építése által nagymértékben hozzájárult városa védelméhez. Plutarkhosz a következőket írja:

Arkhimédész, Hierónnak, Szürakusza királyának rokona és barátja, közölte a királlyal, hogy bármilyen adott erővel bármilyen súlyt lehet mozgatni. Mint mondják, bizonyításának ereje által annyira felbátorodott, hogy kijelentette, ha van egy másik világ, és ő el tud menni oda, akkor azt is el tudja mozdítani. Hierón igen meglepődött, és kérte Arkhimédészt, valósítsa meg állítását, mutasson be neki egy csekély erővel elmozdított nagy súlyt. Arkhimédész kiválasztott a királyi flottából egy háromárbocos szállítóhajót, amelyet sok ember nagy fáradsággal vonszolt a partra, és miután sok utast és a szokásos rakományt elhelyezték a fedélzeten, a hajótól egy kissé távolabb leült a partra, és minden nagyobb erőfeszítés nélkül, kezével bonyolult csigarendszert mozgatva, a hajót simán és egyenletesen húzta magához, mintha az a vízen siklott volna tova.

Az emelő elvének fontos szerepe van az élet minden mozzanatában, attól kezdve, hogy a földműves emelőrudat használ a

* Vagyis, a két súly aránya irracionális szám, például $\sqrt{2}$.

súlyos kő elmozdításához, egészen a modern műszaki élet bonyolult gépeiig. Az Arkhimédész által megfogalmazott emelő törvénye lehetővé teszi a mechanika igen fontos fogalmának, az erő által végzett *munká*nak a bevezetését. Tegyük fel, hogy egy nehéz követ akarunk felemelni (4. ábra) olyan emelővel, amelynél a karok aránya $\overline{\alpha\gamma} : \overline{\gamma\beta} = 3 : 1$. Az emelő karját háromszor kisebb erővel kell nyomnunk, mint amekkora a kőre ható gravitációs erő. Az ábrából világosan látható, hogy ha a követ a földről, mondjuk 10 cm ($\overline{\beta\beta'}$) magasságra emeljük, akkor az emelő másik karja 30 cm-t ($\overline{\alpha\alpha'}$) süllyed. Ebből azt a következ-



4. ábra.

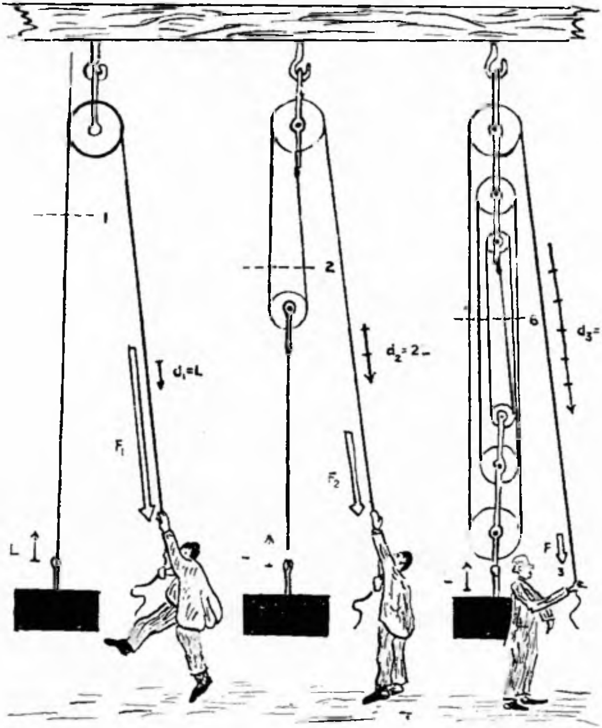
Ha az emelő bal karja háromszor hosszabb a jobb karjánál, akkor a bal kar végének elmozdulása ($\alpha\alpha'$) háromszor akkora, mint a jobb kar végének ($\beta\beta'$) elmozdulása

tetést vonhatjuk le, hogy az erő, amellyel az emelő karját nyomjuk, és a lefelé irányuló elmozdulás szorzata egyenlő a kő súlyának és a kő felfelé irányuló elmozdulásának szorzatával. Az erő és az erő támadópontja elmozdulásának a szorzatát az erő által végzett munkának nevezzük. Tehát, Arkhimédész emelő-törvénye szerint, *az emelő hosszú karját lenyomó kéz által végzett munka egyenlő az emelőnek a követ felemelő rövid karja által végzett munkával.* Ezt a meghatározást ki lehet terjeszteni bármilyen mechanikai munkára. Így például az a munka, amelyet a bútorszállítók végeznek, ha három emelet magasságra visznek fel egy zongorát, ugyanannyi, mint három zongorának az első emeletre történő szállításánál végzett munka.*

Az emelő két karja által végzett egyenlő munka elvét egy másik, hasonló eszközre is lehet alkalmazni, a csigára, és a csigasorra, amellyel Arkhimédész Hierón király nagy meglepetésére

* Hivatásos bútorszállítók kétségbe vonhatják ezt az állítást, azzal érvelve, hogy három zongora esetében több dolguk van a hevederek elhelyezésével és egyebekkel. Mi azonban itt csak a nehéz tárgy tényleges emelésével kapcsolatos munkáról beszélünk.

a nehéz hajót elmozdította. Ha egy nehéz követ úgy emelünk fel, hogy a kőhöz erősített kötelet egy farúdhoz erősített keréken vetjük át, (5a. ábra), a súly akkora (l) magasságra emelkedik, amennyit a kötélen húztunk (d). A mozgatáshoz akkora erővel kell a kötelet húzni (F_1), mint a kő súlya. Ha azonban, az 5b. ábrán látható módon, két kereket helyezünk el, akkor kétszer



5. ábra.
A csiga elve

annyit kell húznunk a kötélen, mint az előbb, de a kifejtendő erő csupán a fele a súlynak. Az 5c. ábrán látható elrendezésben az emeléshez szükséges erő csak egyhatoda az eredetinek, a súly pedig a mozgatott kötél hosszának csupán egyhatodára emelkedik.

Arkhimédésznek talán legismertebb felfedezése a folyadékba merült testek súlyveszteségére vonatkozó törvény. Vitruvius* így írta le e felfedezés történetét:

Noha Arkhimédész nevéhez sok különböző csodálatos felfedezés fűződik, mégis a következő, amelyet elmondandó vagyok, határtalan ötletesség eredményének tűnik. Hierón, miután elnyerte Szürakuszában a királyi hatalmat, úgy határozott, hogy sikeres vállalkozásának emlékére az egyik templomban arany koronát helyez el, amelyet a halhatatlan isteneknek ajánl fel. A korona elkészítésére megállapodott valakivel egy meghatározott árban, és pontosan leméretette neki a hozzávaló aranyat. A megállapodott időben az illető, a király nagy megelégedésére, rendkívül finom és szép munkát szállított, és úgy látszott, hogy a korona súlya pontosan megfelel a lemért arany súlyának. Később azonban a készítőt azzal vádolták, hogy az arany egy részét megtartotta, és azt megfelelő súlyú ezüsttel pótolta a korona készítésénél. Hierón felháborítónak találta, hogy rászedték, de nem tudta hogyan bizonyítsa be a lopást. Arkhimédészhez fordult ezzel a problémájával. Arkhimédész, miközben gondolatban az esettel foglalkozott, éppen a fürdőbe ment és észrevette, hogy minél jobban merül bele teste a kádba, annál több víz csordul ki belőle. Mivel ez rávezette a kérdés megoldására, túláradó örömében egy pillanatnyi késedelem nélkül kiugrott a kádból, és meztelenül futott haza, hangosan kiáltva, hogy megtalálta amit keresett: futás közben görögül ismételten kiáltotta: „εὕρηκα, εὕρηκα".

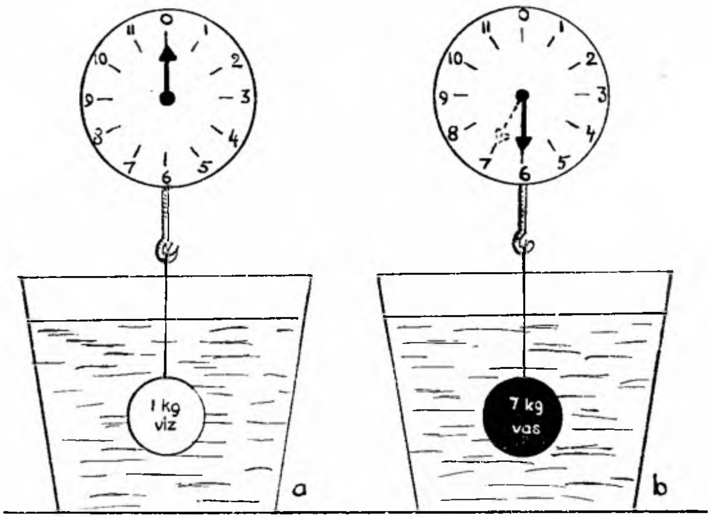
Ez volt felfedezésének kezdete. Azt mondják, két tömeget készített, amelynek súlya egyenként a korona súlyával volt egyenlő. Az egyiket aranyból, a másikat ezüstből. Miután ezeket elkészítette, egy nagy edényt egészen pereméig megtöltött vízzel, és belemerítette az ezüst-tömeget. Annyi víz ömlött ki, amelynek a térfogata egyenlő volt a vízbe merült ezüstével. Azután kivette az ezüstöt, egy pintes mérővel visszatöltötte a kifolyt vízmennyiséget, addig, amig a víz színe elérte a peremet, úgy mint előzőleg. Így megállapította az ezüst súlyának megfelelő vízmennyiséget.

A kísérlet után aranytömeget merített a tele edénybe. Kivéve, és ugyanolyan mérést végezve mint előzőleg, azt találta, hogy nem ugyanannyi víz ömlött ki, hanem egy kisebb mennyiség: annyival kevesebb, amennyivel az arany tömege kevesebb az azonos súlyú ezüst tömegénél. Végül, az edényt újra megtöltve, és magát a koronát ugyanolyan mennyiségű vízbe merítve, úgy találta, hogy több víz csorgott ki, mint amennyi azonos súlyú aranynak felelne meg. Így, abból a tényből következtetve, hogy a korona esetében több víz folyt ki, mint az arany darab esetében, bebizonyította, hogy a készítő ezüstöt kevert az aranyhoz, és a lopás kétséget kizáróan kiderült.

Arkhimédész *Az úszó testekről* című könyvében közli törvényének bizonyítását, elég nehézkes módon, de hibátlanul. Mi a bizonyítást modern nyelven írjuk le. Megvizsgáljuk, mi törté-

* Vitruvius: Az építészetről.

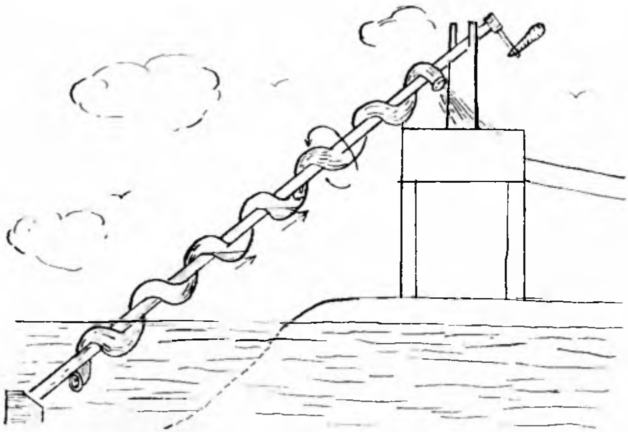
nik, ha tömör fémgömböt merítünk egy vödör vízbe (6. ábra). Vegyünk először vasgömb helyett egy ugyanolyan átmérőjű, vízzel töltött vékony műanyaggömböt (6a. ábra). Mivel a műanyagtartály súlya elhanyagolható, a helyzet ugyanaz, mintha a tartályban levő víz a vödör vizének egy része volna. Így a skála mutatója nullára mutat. Tegyünk a műanyaggömbben levő víz helyére vasat (6b. ábra), ami hétszer nehezebb, mint az



6. ábra.
Arkhimédész törvényének a bizonyítása

ugyanolyan térfogatú víz. Mivel 1 kg vizet a tartályban levő többi víz tartott fenn, hiszen a mutató zérón állt, ezért a víz kicserélése vassal csak $7-1=6$ kg súlynövekedést okoz, amint azt a skálán leolvashatjuk. Így a vasgömb, amelynek a súlya (a levegőben) 7 kg, 1 kg-ot veszít a vízbemerülés alkalmával, vagyis a kiszorított víz súlyát. Ez Arkhimédész törvénye, amely kimondja, hogy *folyadékba merült bármely szilárd test a súlyából annyit veszít, amennyi az általa kiszorított víz súlya.*

Arkhimédész, azonkívül, hogy nagy matematikus volt és a mechanika tudományának megalapítója, modern kifejezéssel, még „az ipar és a fegyveres erők tanácsadója" is volt. Műszaki találmányai közül legismertebb az úgynevezett „Arkhimédész-féle csavar" (lásd a 7. ábrát), amelyet víz emelésére használnak.



7. ábra.

Az Arkhimédész-féle csavar vizet szivattyúz fel, ha a csavart forgatjuk. Működésének megértéséhez gondoljuk el, mi történik a cső alsó részeivel, ha a cső forog. Azt találjuk, hogy ezek az alsó részek felfelé mozognak; nem maga a cső, hanem vizet tartalmazó „minimumainak" a helyzete. Elősegíti az elképzelést, ha drót-spirálist veszünk, és megfigyeljük, mi történik, ha a tengelye körül forgatjuk.

Ezt a készüléket, amelynek a működése magyarázat nélkül is nyilvánvaló, gyakran használták öntözésnél, és bányákban talajvíz eltávolítására.

Arkhimédész, úgy látszik, akkor kezdett a hadimunkában részt venni, amikor bemutatta a csigát Hierón királynak. Egy drámai rész Plutarkhosz *Marcellus élete* című művéből:

Hierónt bámulatba ejtette Arkhimédész ügyessége, és megértette munkájának jelentőségét, rábírta őt, hogy készítsen számára támadó és védekező gépeket, amelyeket mindenfajta ostromló hadjáratban használni lehet. Ezeket Hierón maga soha nem alkalmazta, mert élete legnagyobb részét háború nélkül és a béke ünnepi szertartásai között töltötte, azonban készüléke és annak alkotója nagy becsben állt Szürakusza népénél.

Amikor azután a rómaiak tengeren és szárazföldön megtámadták őket, a szürakuszaiakat félelem kerítette hatalmába; azt hitték, hogy semmi nem tud ilyen hadak heves ostromának ellenállni. Arkhimédész azonban alkalmazni kezdte gépeit. A támadók szárazföldi erőit mindenfajta lövedékkel és hatalmas kövekkel bombázta, amelyek hihetetlen robajjal és sebességgel hullottak le. Semmi sem tudta ezeknek súlyát kivédeni, mindent legázoltak, ami útjukban állt, és a hadsorokat szétzilálták. Ugyanakkor a hajókra nagy gerendákat vetettek a falakról, amelyek közül több elsüllyedt a zuhanó súlyok hatására; más hajókat vaskarmokkal vagy a daruk csőreihez hasonló rudakkal ragadtak meg a hajóorrnál, és a hajót a levegőbe rántották, azután, tattal lefelé, a mélységbe merítették. Gyakran előfordult, hogy a hajót a vízből a légbe emelték, ott táncoltatták, borzalmas látványt nyújtván, amíg a legénység minden irányba kizuhant, akkor aztán a hajó üresen hullott a falakra, vagy kicsúszott a szorításból. Marcellus a hajóhídon egy gépet helyezett el, amelyet „sambuca"-nak nevezett, mert hasonlított az ugyanilyen nevű hangszerre; a gépre még távol a falaktól 10 talentum* súlyú kő zuhant, azután egy második és egy harmadik. Ezek közül egynéhány, amikor nagy robajjal és morajlással rázuhant, szétmorzsolta a gép talpazatát, megrendítette a vázát, és leválasztotta tartólapjáról, úgy hogy Marcellus tanácstalanságában parancsot adott, hogy a hajók a legnagyobb sebességgel vonuljanak vissza, szárazföldi erőit pedig szintén visszaparancsolta.

Azután egy haditanácsban elhatározták, hogy még az éj folyamán újra a falak alá vonulnak, ha tudnak, mert úgy gondolták, hogy a kötelek, amelyeket Arkhimédész gépeiben használt, minthogy a lövedékeknek igen nagy sebességet adtak, most fejük felett fogják a lövedékeket elröpíteni, és a közvetlen közelben hatástalanok lesznek, ahol nincs hely a hajításhoz. Arkhimédész azonban, úgy látszik, már előzőleg készített ilyen esetre is tetszőleges távolságra hordó hadigépeket és kis hatósugarú lövedékeket. A falakban levő sok apró nyílásban skorpiónak nevezett gépeket helyezett el, amelyek közeli tárgyakat céloztak, anélkül, hogy az ellenség számára láthatók lettek volna.

Ezért, amikor a rómaiak a falak alá jöttek, gondolva, hogy nem veszik őket észre, ismételten a lövedékek zápora fogadta őket, a hatalmas kövek csaknem függőlegesen zuhantak rájuk és a falnak minden pontjáról nyilakkal árasztották el őket, ezért visszavonultak. Amikor egy bizonyos távolságra eljutottak, újból lövedékek hullottak rájuk; sok hajójuk összeütközött, és ők nem tudták ezt megtorolni az ellenségen. Mivel Arkhimédész a legtöbb gépet közvetlenül a fal mögött állította fel, a rómaiak azt hitték, hogy istenek ellen harcolnak, mert a sorozatos csapások láthatatlan forrásból érték őket.

Marcellus azonban megmenekült, és tréfásan így szólt saját embereihez: „Ne harcoljunk", mondta, „ez ellen a mértantudós Briareus** ellen, aki hajóinkat csészeként használja, hogy kimerje a vizet a tengerből, és a mi sambucánkat semmivé tette. Sok lövedékével, amelyeket egyszerre zúdít ránk, felülmúlja a mitológia százkarú szörnyeit." Mert valóban, a szürakuszaiak csupán a testet képezték Arkhimédész tervei számára, és ő volt a mindent mozgató és irányító

* 1 talentum = 26,2 kg.

** A görög mitológia ötvenfejű, százkarú óriása, aki fellázadt Zeus ellen. (A fordító) lélek. Az összes többi fegyverek használatlanul hevertek, csak az ő fegyvereit használta a város támadásra és védekezésre. A rómaiak végül már attól is megijedtek, hogy ha a falból egy darab kötelet vagy gerendavéget láttak kinyúlni, s felkiáltottak, „Nézzétek, Arkhimédész újabb gépet irányít felénk", utána hátatfordítottak és menekültek. Ezt látva, Marcellus beszüntette a harcot, és hosszú ostromra rendezkedett be.

Amikor két évi ostrom után, az i. e. 212 évben Szürakuszát végül elfoglalták a római légiók, egy csapat római katona betört Arkhimédész házába, aki az udvaron bonyolult mértani ábrákat rajzolt a homokba.

„Noli tangere circulos meos!" („Ne bántsd köreimet!") kiáltotta Arkhimédész csekély latin tudását felhasználva, amikor az egyik katona rátaposott a rajzra. Válaszul a katona dárdájával átdöfte az agg filozófus testét.

Amikor Cicero mint a római birodalom quaestora i. e. 137-ben Szicíliába látogatott, az agrigentumi kapu közelében, bozóttal és gyommal benőve találta Arkhimédész sírját. „Görögországnak ez a leghíresebb és egykor legműveltebb városa", írja Cicero, „nem vett volna tudomást legtehetségesebb polgára sírjáról, ha azt nem fedezi fel egy arpinumi férfi".*

AZ ALEXANDRIAI ISKOLA

Athén politikai és gazdasági hatalmának hanyatlása után Alexandria lett a görög kultúra központja. Alexandriát i. e. 332-ben alapította Nagy Sándor, s a város az Európa és a Kelet közötti kereskedelem fő kikötőjévé vált. Erre az időre Alexandria gyöngyörű szép várossá fejlődött „. . . 4000 palotával, 4000 fürdővel, 12 000 kertésszel, 40 000 adófizető zsidóval és 400 színházzal meg egyéb szórakozóhellyel." Kiváló egyeteme és híres nagy könyvtára volt. Az utóbbit, sajnos, tűz semmisítette meg a város leégése alkalmával. A tüzet Cézár parancsa okozta, aki elrendelte hogy az egyiptomi flottát gyújtsák fel az alexandriai kikötőben. Itt írta Euklidész *A geometria elemei*-t, és itt szerezte meg Arkhimédész természettudományi ismereteit, mint fiatal szürakuszai diák.

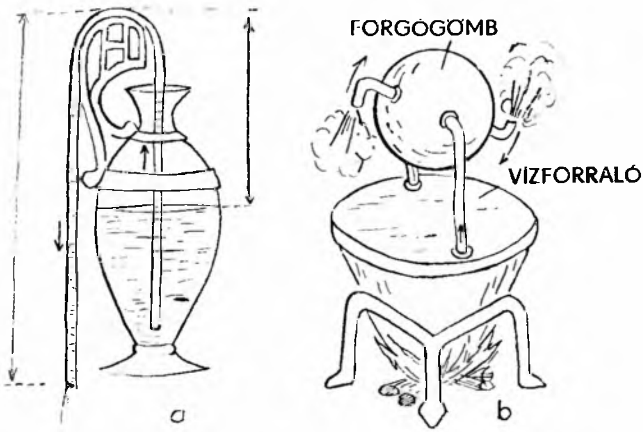
A csillagászatban Alexandriát *Hipparkhosz* képviselte, aki i. e. a második század közepén élt. Hipparkhosz az akkori időben

* Vagyis Cicero (A fordító).

lehetséges legnagyobb pontosságig fejlesztette a csillagok helyzetének megfigyelését. 1080 csillagról állított össze katalógust, amelyet a csillagászok még ma is használnak a csillagok helyzetére vonatkozó régi adatok forrásmunkájaként. Felfedezte továbbá a tavaszpont mozgásának, precessziójának jelenségét. A tavaszpont az éggömbnek az a pontja, ahol a Nap a csillagok közötti évi mozgása során keresztezi az égi egyenlítőt. A tavaszpont precessziója annak a következménye, hogy a Föld forgástengelye, amely szöget zár be a földpálya síkjával, 26 000 éves periódussal kúpot ír le a térben a földpályára merőleges tengely körül. Ennek a mozgásnak az okát csaknem ezer évvel később Newton találta meg.

A fizika területén az alexandriai iskolát *Hérón* képviselte, aki nemcsak fizikus volt, hanem még inkább mérnök-feltaláló. *Mechanika* című könyve sok helyes megállapítást, de sok matematikai tévedést is tartalmaz.

Az alapvető problémák matematikai tárgyalásának hiányai ellenére Hérón mechanikáról szóló könyve sok hasznos készülék



8. ábra.

Két, Héron által feltalált készülék: (a) A szifon lehetővé teszi, hogy a víz a tartályból egy hajlított csövön át magától kifolyjon. A kifolyás oka az, hogy a cső baloldali, hosszú részében nagyobb a víz súlya, mint a cső jobboldali részében, amelyet csak a tartályban levő víz felszinétől a cső legfelső pontjáig kell kiüríteni. (b) Héron gőzsugárgépe. A gömböt a kinyúló csövekből kiáramló gőzsugár hozza forgásba.

leírását tartalmazza, így például összetett csigákét, különféle hajtószerkezetekét, fogaskerék-mechanizmusokét stb. A „pneumatikáról'' szóló művében írja le a szifon elvét (8a. ábra), és egy gőzsugárgépét (8b. ábra), amely az egyszerű pázsitöntözőhöz hasonló, de a modern sugárhajtású motor elődjének is tekinthető.

Hérón *Katoptrika* című könyvében a tükör elméletét és gyakorlati alkalmazását írja le. Itt a következőket olvashatjuk:

Nyilvánvaló, hogy a katoptrika tanulmányozásra érdemes tudomány, és egyúttal olyan látványosságokat lehet vele létrehozni, amelyeken elcsodálkozik a szemlélő. Ennek a tudománynak a segítségével olyan tükröket lehet szerkeszteni, amelyek a jobb oldalt jobb oldalnak mutatják, hasonlóképpen a bal oldalt bal oldalnak, míg a közönséges tükrök természetüknél fogva az ellenkező oldalukat mutatják.

E hatást úgy éri el, hogy két keret nélküli tükröt élénél derékszögben illeszt össze (9. ábra).

Héron így folytatja:

Tükrök segítségével saját hátunkat is láthatjuk (mint ahogy a borbély megmutatja a hajvágást a tarkónkon), és láthatjuk magunkat fordítva, fejünkön állva, három szemmel és két orral, eltorzult vonásokkal, mintha bánat marcangolna (mint a Vidám Park tükörpavilonjában).*

Ki ne tartaná érdekesnek, hogy alkalomadtán háza belsejében tatózkodva megfigyelhesse, hány ember van az utcán és mit csinálnak?

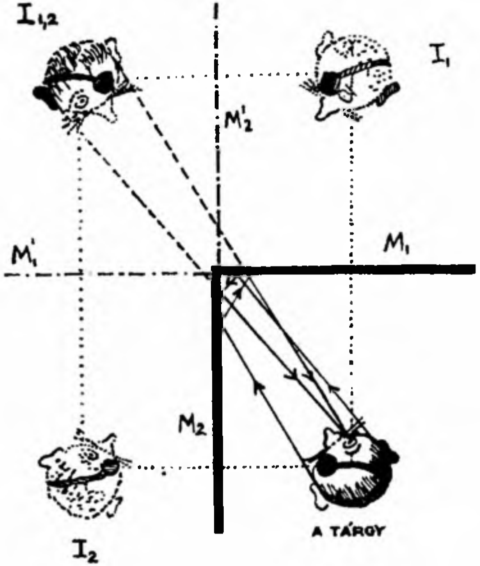
Hérónnak a fényről vallott felfogása kitűnik a következő idézetből:

Úgyszólván mindenkinek, aki optikáról írt, kétsége van afelől, hogy a szemünkből kiinduló sugarakat miért verik vissza a tükrök és miért történik a visszaverődés egyenlő szögekben. Nos, a következőképpen lehet indokolni azt a tételt, hogy látásunk egyenesvonalú, s ez az egyenes vonal a látás szervéből indul ki. Mindaz, ami változatlan sebességgel mozog, egyenes vonalban mozog. Példaként vehetjük az íjakból kilőtt nyilakat. A hajtóerő miatt a mozgó tárgy a lehető legrövidebb úton igyekszik mozogni, mert nincs ideje lassú mozgásra, vagyis hosszabb pályán végbemenő mozgásra. A hajtóerő nem engedi meg az ilyen késedelmet. És így sebessége következtében a tárgy a legrövidebb úton igyekszik mozogni. De valamennyi, azonos végponttal bíró vonal között a legrövidebb az egyenes vonal. Hogy a szemünkből kiinduló sugarak végtelen sebességgel haladnak, azt a következő megfontolásból láthatjuk. Ha behunyjuk szemünket, és aztán kinyitjuk, és az égre nézünk, akkor nem telik időbe, hogy a fénysugarak elérjék az eget. Valóban, a csillagokat meglátjuk, mihelyt felnézünk, annak ellenére, hogy a távolság, mondhatnánk, végtelen. Ha a távolság még nagyobb volna, az eredmény megint csak ugyanaz lenne, és így világos, hogy a

* A ( ) részek a szerző megjegyzései az idézetben!

sugarak végtelen sebességgel távoznak. Ezért se meg nem szakadnak, se nem görbülnek, se nem törnek, hanem a legrövidebb úton, egyenes vonalban mozognak.

Ez a bekezdés érdekesen mutatja, hogy Hérón, és nyilván valamennyi kortársa, azt hitte, hogy a látás a szemből kibocsátott sugaraknak tulajdonítható, amelyeket a tárgy visszaver, és így ugyanazon az elven alapul, mint a mai radar.



9. ábra.

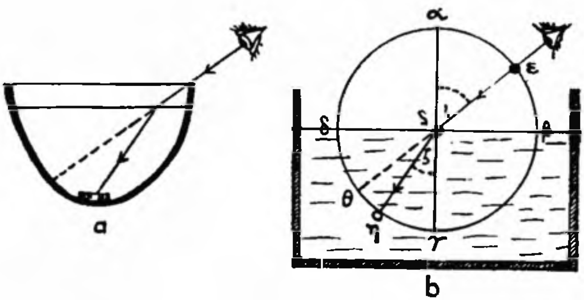
Illesszük az M_1 és M_2 síktükröket élüknél derékszögben egymáshoz. Ha ebbe az összetett tükörbe nézünk, akkor képmásunkat kétszeresen visszaverve látjuk: először M_1 tükörben és azután az M_2 tükörnek képzelt M_2' folytatásában, vagy először az M_2 tükörben és azután az M_1 tükör képzelt M_1' folytatásában. A kettős visszaverődés következtében a jobb oldal jobb oldal marad, a bal oldal pedig bal oldal marad. A tényleges fénysugarakat a folytonos vonalak mutatják

Egyik másik kiemelkedő alexandriai volt Claudius *Ptolemaiosz* csillagász, aki időszámításunk II. évszázada első felében élt és működött. (Nem tévesztendő össze a Ptolemaiosz dinasztia tagjaival, akik sok évvel a keresztény korszak előtt uralkodtak Egyiptomban.) Ptolemaiosz *Almagest* című könyvében közreadott megfigyelései a csillagokról és a bolygókról jelentős mértékben bővítették Hipparkhosz két évszázaddal régebbi adatait. *Optika* című könyve tartalmazza fizikai felfedezéseit. Ez a könyv az eredeti görög kézirat elveszett arab verziójának latin fordításában maradt ránk. Ebben a könyvében Ptolemaiosz, egyebek között, az egyik közegből a másikba átmenő fénytörés fontos témáját tárgyalja. A következőket írja:

A fénysugarakat kétféle módon lehet változtatni: *visszaveréssel*, vagyis visszapattanással a tükörnek nevezett tárgyakról, amelyek nem teszik lehetővé a behatolást, és hajlítással (vagyis *töréssel*) olyan közegek esetében, amelyeknél lehetséges a behatolás, ezeknek közös elnevezése van („átlátszó anyagok"), mert a fénysugár keresztülhatol rajtuk.

A törés jelenségét a következő egyszerű kísérlettel szemlélteti: „baptistir"-nak* nevezett egyszerű edény fenekére egy érmét helyezett. (10a. ábra.)

Tételezzük fel, hogy a szem helyzete olyan, hogy a belőle kiinduló és pontosan a baptistir pereme felett haladó fénysugár az érménél magasabban fekvő pontot ér el. Akkor az érmét helyén hagyva, óvatosan vizet öntünk a baptistirba, amíg az él felett elhaladó sugár lefelé hajlik, és az érmére esik. Ekkor az előző-



10. ábra.

Ptolemaiosz kísérletei a fénytörésre vonatkozóan: (a) A vízzel töltött tartály alján levő érme *magasabb helyzetben* levőnek tűnik, mint a valóságban van. (b) A fénytörés, tanulmányozására szolgáló készülék. Ptolemaiosz megmérte a vízben mérhető $\delta\varsigma\eta$ szög és a levegőben mérhető $\alpha\varsigma\varepsilon$ szög egymáshoz való viszonyát, és a kettő közötti összefüggést táblázatba foglalta.

* Feltételezhetően templomokban használták gyermekek megkeresztelésére.

leg nem látott tárgyat a szemtől a tárgy valódi helyzete feletti pontig terjedő egyenes vonal mentén látjuk. A megfigyelő ekkor nem azt tételezi fel, hogy a fénysugár hajolt a tárgy felé, hanem, hogy maga a tárgy lebeg és emelkedik a sugár felé. A tárgy ezért a tárgytól a víz felszínéig vont függőleges mentén jelenik meg.

A szöveg későbbi részében Ptolemaiosz kísérletet ír le, amelynek célja a fénytörés törvényeinek részletes tanulmányozása:

A vízben végbemenő és megfigyelhető törés mértékét ahhoz hasonló kísérlettel határozhatjuk meg, amelyben a rézkorong segítségével vizsgáltuk a tükrök törvényeit. Rajzoljunk a korongra egy $\alpha\beta\gamma\delta$ kört (10b. ábra) ς középponttal és két egymást derékszögben metsző $\alpha\varsigma\gamma$ és $\delta\varsigma\beta$ átmérővel. Osszunk minden körnegyedet 90 egyenlő részre, és helyezzünk a középpont fölé egy igen kicsiny jelzést. Utána felállítjuk a korongot egy kis medencében, és egy kevés vizet töltünk bele, amely a látást nem akadályozza. A víz felszínéhez képest függőleges helyzetben álló korongot ossza a víz felszíne két egyenlő részre oly módon, hogy a körnek a fele és csakis a fele, vagyis $\beta\gamma\delta$ legyen teljes egészében a víz alatt. $\alpha\varsigma\gamma$ átmérő legyen függőleges helyzetben a víz színéhez.

Vegyünk most az α ponttól kezdve egy megmért ívet, mondjuk $\alpha\varepsilon$-t a korongnak a víz felszíne fölötti két körnegyed egyikében. Helyezzünk ε fölé egy kicsiny színes jelzést. Nézzünk egy szemmel, és állítsuk be a szemünket úgy, hogy mindkét jelzés, ε és ς, a szemből kiinduló egyenes vonal mentén jelenjék meg. Mozgassunk ugyanakkor egy kicsiny vékony rudat a szemközti, víz alatt levő körnegyed $\gamma\delta$ íve mentén, amíg a rúd vége az ív ama pontjánál jelenik meg, amely az ε-t és ς-t összekötő vonal folytatása. Ha most megmérjük az ívet a γ pont és az η pont között, amelynél a rúd az előbb említett vonalon jelenik, akkor azt találjuk, hogy a $\gamma\eta$ ív mindig kisebb lesz, mint az $\alpha\varepsilon$ ív.

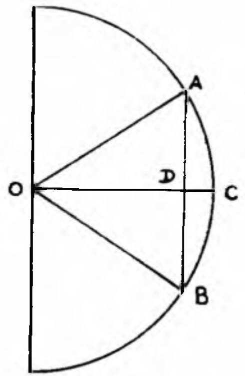
Ha szemünket az $\alpha\varsigma$ függőleges mentén állítjuk be, akkor a fénysugár nem hajlik meg, hanem γ-ra fog esni, α-val szemben, és ugyanabban az egyenes vonalban, mint $\alpha\varsigma$. Minden más helyzetben azonban, az $\alpha\varepsilon$ ív növekedésével $\gamma\eta$ is növekszik, de a sugár eltérésének mértéke fokozatosan nagyobb lesz.

Ha $\alpha\varepsilon$	10°,	akkor $\gamma\varepsilon$	8°	az eltérés	2°
	20°		15½°		4½°
	30°		22½°		7½°
	40°		29°		11°
	50°		35°		15°
	60°		40½°		19½°
	70°		45½°		24½°
	80°		50°		30°

Ennek a módszernek a segítségével fedeztük fel a fénytörés mértékét vízben.

Ptolemaiosz hasonló módszerrel tanulmányozta a fénysugarak törését a levegő és az üveg határfelületén, és azt találta, hogy ebben az esetben a sugár hajlása nagyobb. Nem kísérelte meg azonban (vagy ha tette, akkor eredménytelenül), hogy megfigyeléseinek eredményét matematikai képlettel fejezze ki. A fénytörés törvényének matematikai megfogalmazását csak a XVII. században találták meg. Az a különös, hogy ezt könnyen megtehette volna, mert a törvény megfogalmazásához szükséges matematikai eszköz: az ívek és a húrok közti összefüggés törvénye. És ezt Plutarkhosz már másfél évszázaddal előbb ismertette, és ő maga is bőven tárgyalta az Almagestben a csillagászati megfigyelésekkel kapcsolatban.

A probléma abban állt, hogy megtalálják annak az ADB húrnak a hosszát, amely az egységnyi sugarú kör ACB ívének megfelel (11. ábra). Ptolemaiosz ötletes matematikai módszerek fel-



11. ábra.

Plutarkhosz „húr-táblázatai"-nak és a modern trigonometriai táblázatoknak az összefüggése. Plutarkhosz táblázatba foglalta az ADB húrok hosszát különböző ABC ívekre. A modern trigonometriában AD (fél húr) hosszát vesszük fel a táblázatba AC ív esetében. AD hosszát az AOC szög *sinus*ának nevezzük, OD hosszúságot pedig ugyanazon szög *cosinus*ának.

használásával összeállított egy táblázatot. Lássunk belőle egy részletet:

Ív	Húr	Ív	Húr	Ív	Húr
116°	1.014557	117½°	1.023522	119°	1.032344
116½°	1.020233	118°	1.025137	119½°	1.033937
117°	1.021901	118½°	1,030741	120°	1.035523

Ez a táblázat megfelel a mai sinus táblázatnak, csupán az a különbség, hogy ma fél íveket (*AOC* szöget) és *AD* fél húrokat használunk. Az *AD* hosszát, egységsugarú körben sinus *AOC*-nek nevezzük, az *OD* távolságot pedig cosinus *AOC*-nek. A trigonometriai függvények rendkívül hasznosak olyan mértani problémák megoldásánál, amelyekben távolságok és szögek is előfordulnak.

Ha Ptolemaiosz a fény törésére vonatkozó kísérleteinek eredményeit összehasonlítja sinus-táblázatával, akkor nyilván azt találja, hogy *a beesési szög és a törési szög sinusának aránya bármely adott anyagpár esetében állandó.* Ezt azonban elmulasztotta, és e törési törvényt csak 14 évszázaddal később fedezte fel Willebrord *Snell* (vagy Snellius) holland csillagász és matematikus. Mint később látni fogjuk, Snell törvénye kimagasló jelentőségű a fény természetének megértésében.

Ptolemaiosz munkája a görög kultúra utolsó nagy teljesítménye a természettudományok területén. Halála után Alexandriában a kutatás hamarosan elsorvadt. Talán az utolsó név, amelyet az alexandriai iskolával kapcsolatban megemlíthetünk: Hüpatia, aki Theón matematikus leánya, és maga is a természettudományok és a filozófia oktatója volt. Az alexandriai Kürillosz püspök által szervezett görög ellenes felkelés idején 415-ben Hüpatiát a fanatizált keresztény tömeg darabokra szaggatta és a város könyvtárának maradványait megsemmisítette.

A NÉPVÁNDORLÁS KORA ÉS A RENESZÁNSZ

A görög kultúra hanyatlása idején a természettudományok fejlődése, köztük a fizikáé is gyakorlatilag megszűnt. A rómaiak, akik az emberiség történetének eme szakaszában a világ urai voltak, keveset törődtek az absztrakt gondolkodással. Az ő civilizációjuk az üzletember civilizációja volt és, bár a tanulást elősegítették, elsősorban annak gyakorlati alkalmazása érdekelte őket. A római birodalom bukása után a helyzet még rosszabbra fordult. E korszakban, amely több mint ezer éven át tartott, a keresztény egyház volt a tudomány képviselője. Az apátságok és a kolostorok lettek a szellemi élet központjai. Ennek következtében az érdeklődés elsősorban a teológiai problémákra irányult, és ha a régi görög kultúra megszünte után még maradt valami tudományos elképzelés, az az egyház diktatúrájának volt alávetve. A ptolemaioszi világrendszert, amelynek központjában a Föld nyugodott, a Nap, a bolygók és a csillagok pedig körülötte keringtek, megdönthetetlen dogmaként fogadták el.

Szerencsére a görög tudomány menedéket talált az újszülött arab birodalomban, amely a VII. században elnyelte a Földközi-tengertől délre eső országokat, és a Gibraltári-szoroson átjutott Spanyolországba. Harun Al-Rasid, az „Ezeregyéjszaka" történetének jóindulatú uralkodója i. sz. 800. éve körül megalapította Bagdadban a természettudományi iskolát, a spanyolországi Cordoba pedig az Arab Birodalom európai tudományos középpontja lett. Az arab tudósok a nagyrészt megsemmisült hellén könyvtárak megmentett görög kéziratait tanulmányozták, sok művet arabra fordítottak, és az utókor számára átmentették a régi tudományok eredményeit. Európa ugyanakkor a középkori skolasztika karmai között vergődött. A tudomány történetének arab korszakáról, egyebek között, a ma is használatos tudományos kifejezések tesznek tanúbizonyságot: *al*gebra, *al*kohol, *al*káli, *am*algam, *al*manach, *An*tares. Az arabok jelentékeny mértékben fejlesztették a matematikát az algebra megteremtésével, amelyet a görögök nem ismertek, az arab számok bevezetésével pedig megkönnyítették a számolást, amely a római számokkal meglehetősen nehézkes volt. De, talán Seherezádé tündérmeséinek hatására, a csillagászatban és a kémiában lényegében fantasztikus célokat követtek: az emberek jövőjét jósolták meg a csillagok állásából (asztrológia), és azt kutatták, hogyan lehet közönséges fémeket értékes arannyá változtatni (alkímia). A fizika területén eredményeik nem voltak, hacsak nem tekintjük az alkímiát a modern elemátalakítás előfutárjának. A XII. században az arab birodalom gyorsan szétesett Dzsingisz kán betörése és az állandó szentföldi kereszteshadjáratok következtében.

Ebben az időben az európai államokban ismét terjedőben volt a tanulás. Nagy Károly, a frank birodalom uralkodója, elrendelte, hogy az alája tartozó nagy terület összes apátságainak legyenek iskolái. A XII. század közepén megalapították a Párizsi és a Bolognai Egyetemet. Oxford és Cambridge egyetemeit nem sokkal később létesítették, és ezek hamarosan a skolasztika művelésének elismert központjai lettek. A szokásos tanterv a „trivium”-ból és a „quadrivium”-ból állt. Az első latin grammatikából, retorikából és logikából, a második aritmetikából, geometriából, zenéből és asztronómiából állt. A tanítás azonban még az egyház éber felügyelete alatt állt és (a keresztény országok egyetemeinek a pápa hozzájárulását kellett elnyerniök ahhoz, hogy tevékenységüket folytathassák) zömmel Arisztotelész tanain alapult, amelyek arab fordításban kerültek Európába. Mint fentebb megjegyeztük, Arisztotelész igen sok területen kiemelkedő egyéniség, a fizikai tudományokban azonban nem volt túlságosan erős, és így nem sokkal járult hozzá ahhoz, hogy a fizika megújuljon az ezer éves álmából ébredező Európában.

Az ismeretek elterjedésének egyik fontos tényezője volt a könyvnyomtatás feltalálása. A XV. században az első nyomda egy Fust nevű férfi tulajdonában volt, a németországi Mainzban. Az első nyomdákból kikerülő egyik legfontosabb könyv Nikolaus Kopernikusz *De revolutionibus orbium coelestium* (Az égitestek mozgásáról) című műve volt (Nürnbergi Nyomda, 1543). Ebben írta le az új világrendszert, amelynek középpontjában a Nap áll. Az egyházzal való összeütközés elkerülése céljából a könyvhöz egy előszó is készült (amelyet, feltételezhetően Kopernikusz tudta nélkül, Andreas Osiander, a kiadó készített). Az előszó kifejtette, hogy a könyvben foglalt valamennyi elképzelés tisztára hipotetikus jellegű és inkább matematikai konstrukció, mint a valóság leírása.

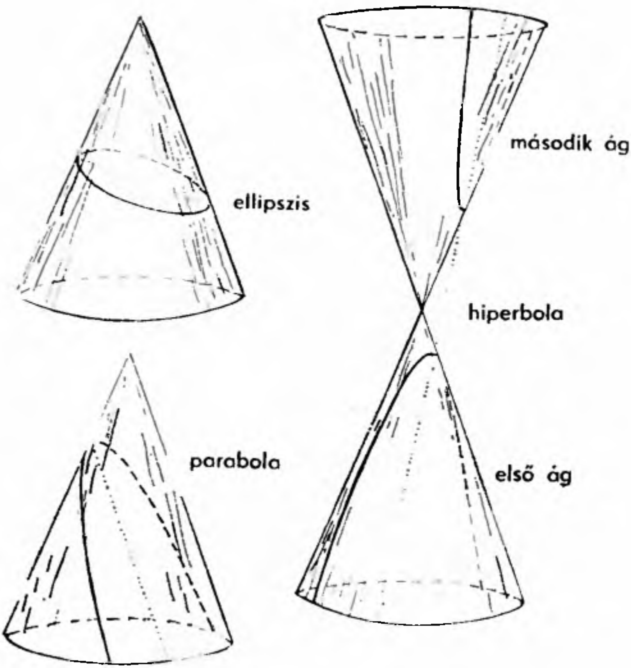
KEPLER ÉS TÖRVÉNYEI

Kepler volt a bolygómozgás alaptörvényeinek a felfedezője. *Mysterium Cosmographicum* (1596) című írásából a következő részletet idézzük:

> Azt, hogy az egész világot egy gömb veszi körül, már behatóan tárgyalta Arisztotelész (az Egekről szóló könyvében). aki bizonyítását elsősorban a gömbfelület különleges jelentőségére alapítja. Ezért van az, hogy az álló csillagok legkülső gömbje mindmáig megtartotta ezt az alakot, annak ellenére, hogy nem tulajdoníthatunk neki mozgást. A Napot tartalmazza, mint középpontot, legbelső méhében. Hogy a többi pálya kerek, azt a csillagok köralakú mozgásából lehet látni. Így nincs szükség további bizonyítékra arra vonatkozóan, hogy ezt a görbét a világ ékesítésére alkották. Amíg azonban a világon háromféle mennyiség van, mégpedig a testek alakja, száma és tartalma, a görbületet csak az alakban találjuk. Ebben a tartalom nem lényeges, mert egy alakzatba koncentrikusan beírt hasonló alakzat (például gömb gömbben vagy kör körben) vagy mindenütt érintkezik, vagy sehol. A gömböt, mivel abszolút egyedülálló mennyiséget képvisel, csak a Hármas szám uralhatja.

E művében még keveredik a teológia és a valódi tudomány, ami e korban szokásos volt, de ugyanakkor keményen dolgozott egy komoly problémán: a bolygók mozgásának egzakt törvényén.

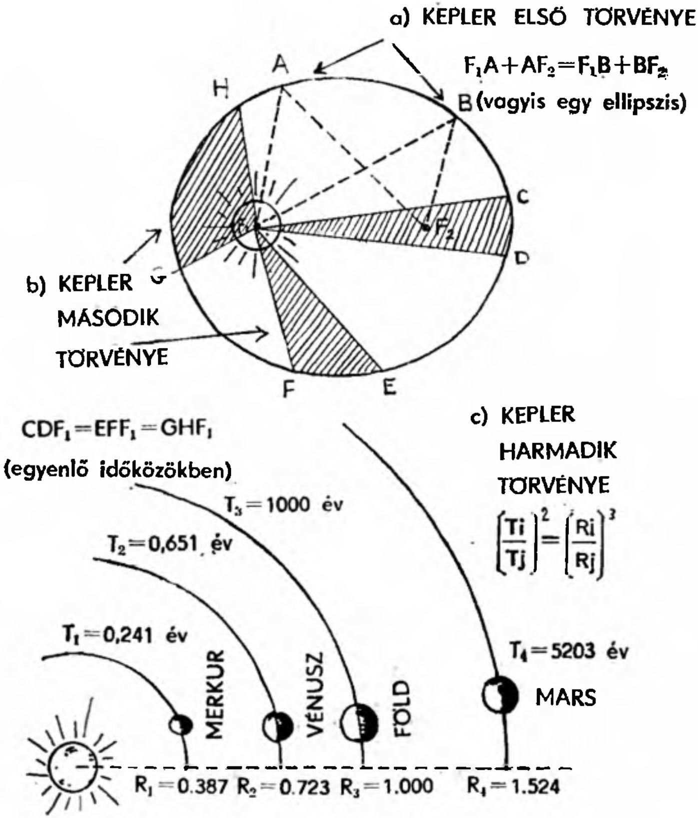
A kopernikuszi rendszer, amint az a *Revolutionibus*ban olvasható – a görög filozófia régi hagyományának megfelelően, amely a kört tekintette a tökéletes görbének és a gömböt a tökéletes testnek – feltételezte, hogy a bolygók pályája köralakú. Ez a feltevés azonban nem egyezett eléggé azokkal a pontos mérésekkel, amelyeket Tycho Brahe dán csillagász végzett a bolygók mozgására vonatkozóan az Uranienborg csillagvizsgálóban (ezt II. Frigyes dán király építtette számára Koppenhága közelében, egy kis szigeten). Kepler Tycho tanítványa és segédje volt, jelentékeny matematikai ismeretekkel rendelkezett, amelyeket Euklídész és más görög klasszikusok olvasásából merített. Azt tűzte ki céljául, hogy megtalálja a bolygópályák pontos alakját és a mozgásukat kormányzó törvényeket. Több évi munka után jutott el első fontos felfedezéséhez. Úgy találta, hogy a bolygók Nap körüli mozgásukban nem pontosan köralakú pályát írnak le, hanem másféle görbéket, amelyek ugyanolyan nevezetesek, mint a kör a régi euklidészi geometriában. E görbéket *kúpszeleteknek* nevezik. Úgy állíthatók elő, hogy egy kúpot különböző helyzetű síkokkal metszünk (12. ábra). Ha a sík merőleges a kúp tengelyére, akkor a metszet természetesen kör alakú. Ha



12. ábra

Kúpszeletek, amelyek kúpnak egy különböző helyzetben álló síkkal való metszésével keletkeznek.

azonban a síkot kissé megdöntjük, akkor hosszúkás zárt görbéket, *ellipszis*eket kapunk. Ha a metsző sík párhuzamos a kúp egyik alkotójával, akkor az ellipszis egyik vége eltűnik a végtelenbe, és a *parabola* néven ismert nyitott görbét kapjuk. Még nagyobb hajlásnál a parabola „kinyílik" és *hiperbola* keletkezik. Meg kell jegyeznünk, hogy a hiperbola esetében két nem összefüggő ágat kapunk, a második ágat a síknak a kúp második, fejtetőre állított részével való metszete képezi. Az ellipszist definiálhatjuk még úgy is, mint olyan pontok sorát, amelyek két adott ponttól, a *fókuszoktól* mért távolságainak összege mindig ugyanaz (13. ábra). Úgy rajzolhatunk tehát ellipszist, hogy egy papírlemezbe nyomott két rajzszöghöz fonalat erősítünk, és a ceruzánkat úgy mozgatjuk, hogy a fonal mindig feszes legyen. Hasonlóképpen a hiperbola olyan pontok sora, amelynél a két fókusztól való távolságok *különbsége* állandó. Ez



13. ábra.
A bolygómozgás három Kepler-féle törvénye

azonban nem szolgáltat gyakorlati módot e görbe megrajzolására.

Kepler Tycho Brahenak a bolygók csillagok közötti helyzetére vonatkozó adatait elemezve arra a következtetésre jutott, hogy minden szépen egyezik, ha feltételezzük, hogy *valamennyi bolygó olyan ellipszis alakú pályát ír le, amelynek egyik gyújtópontjában a Nap van.* Úgy találta továbbá, hogy a bolygók Nap körüli keringésük közben gyorsabban mozognak, amikor közelebb vannak a Naphoz *(perihélium)* és lassabban, ha távolabb vannak *(afélium)*. A bolygó sebességének és Naptól való távolságának viszonya a pálya különböző pontjaiban olyan, hogy *a Napot és a bolygót összekötő képzelt vonal egyenlő időközökben egyenlő területeket súrol* (13. ábra). A bolygók mozgásának ezt a két alapvető törvényét Kepler 1609-ben tette közzé. Ezeket első és második Kepler-törvény néven ismerjük.

Miután Kepler megtalálta az egyes bolygók mozgásának törvényeit, a különböző bolygók közötti viszonyt kutatta, és kilenc évi munka után meg is találta. Megkísérelte a legkülönbözőbb lehetőségeket. Így például megpróbált összefüggést találni a bolygók pályái és a szabályos testek között, ami azonban nem sikerült. Végül munkáját ragyogó felfedezés koronázta, amelyet manapság harmadik Kepler-törvény néven ismerünk. Ez kimondja, hogy a *különböző bolygók Nap körüli keringési időinek négyzetei úgy aránylanak egymáshoz, mint a Naptól való középtávolságuknak a köbei.* A 13b. ábra az úgynevezett belső bolygók – Merkur, Venus, Föld, Mars – pályájának a vázlata, a távolságukat a földpálya sugarával (az úgynevezett csillagászati egységgel) fejezzük ki, keringési idejüket pedig években. Ha a *keringési idők négyzeteit* vesszük, akkor a következő sort kapjuk:

0,058, 0,378, 1,000, 3,540.

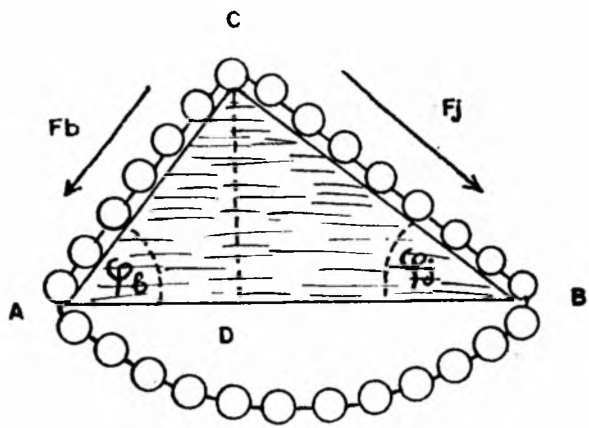
A *távolságok köbei* ezt a sort adják:

0,058, 0,378, 1,000, 3,540.

A két sor azonos volta bizonyítja a harmadik Kepler-törvény helyességét.

Ezek szerint a XVII. század tudományos kutatói felismerték *hogyan* mozognak a bolygók a Nap körül, de még több mint egy fél évszázad eltelt, amíg választ találtak arra a kérdésre, *miért* van ez így.

Míg Keplert elsősorban az égi szférák érdekelték, addig kortársának, Simon *Stevinus* flamand mérnöknek az érdeklődése inkább földi dolgokra irányult. Arkhimédésznek a mechanikai egyensúlyra, mai szóval statikára vonatkozó munkáit bővítette ki. Fő teljesítménye a lejtőn való egyensúly problémájának megoldása volt, amivel Arkhimédész nem foglalkozott, és amelyet, mint előbb láttuk, Hérón téves módon értelmezett. Stevinus statikáról szóló könyvének fedelén látható rajzot mutatja a 14. ábra. Ez a rajz mutatja az egyensúly-problémák megértésében



14. ábra.
Stevinus végtelen lánca, amely az egyensúly törvényét mutatja lejtőn

elért nagy haladást. Nagyszámú fémgolyóból álló lánc nyugszik egy igen sima („súrlódásmentes”) oldalú gúla alakú támaszon. Mi történik a lánccal? Minthogy a gúla jobboldali (hosszabb) oldalán több golyó van, mint a baloldali (rövidebb) oldalon, azt gondolhatnók, hogy a súlykülönbség miatt a lánc balról jobbra mozogni kezd. De mivel a lánc folytonos, ez a mozgás soha nem szűnne meg, és a lánc örökké körben forogna. Ha ez igaz volna, akkor ehhez az eszközhöz fogaskerekeket és hajtókarokat lehetne kapcsolni, és mindenfajta gépet járatni vele végtelen időkig, minden ráfordítás nélkül. Munkateljesítményt kapnánk semmiért, és az emberiségre ebből sokkal nagyobb előny származnék, mint az atomenergia békés felhasználásából.

Minthogy azonban Stevinus józan gyakorlati gondolkodású ember volt, elutasította ezt a lehetőséget, és feltételezte, hogy a láncnak egyensúlyban kell lennie. Ez viszont azt jelenti, hogy a golyó húzóereje a lejtőn a lejtő és a vízszintes sík által bezárt szöggel csökken, ami teljes mértékben megegyezik azzal, hogy egy sík felületen levő golyóra semmi erő nem hat. Minthogy a lejtő jobb és bal oldalán levő golyók száma nyilván arányos e lejtők hosszával, a következő egyenlőséget írhatjuk fel (F_b és F_j az egyes golyókra ható erőt jelöli a két oldalon):

$$F_b \cdot \overline{AC} = F_j \cdot \overline{CB}$$

vagy

$$F_b / F_j = \overline{CB} / \overline{AC}.$$

Ha bevezetjük a két lejtő jellemzésére a φ_b és φ_j szögek sinusát, akkor a következő összefüggések érvényesek:

$$\sin \varphi_b = \overline{CD} / \overline{AC}, \quad \sin \varphi_j = \overline{CD} / \overline{CB},$$

úgy hogy az előző kifejezést a következő alakban is írhatjuk:

$$F_b / F_j = \sin \varphi_b / \sin \varphi_j$$

Szavakban kifejezve ez azt jelenti, hogy *egy lejtőn elhelyezett tárgyra a lejtő irányában ható gravitációs erő egyenes arányban áll a lejtési szög sinusával.*

AZ INGA

Stevinus jelentékeny haladást ért el a statika tanulmányozásában. A dinamika tudományában, vagyis az anyagi testek mozgásának tanulmányozásában azonban az első lépések megtételének dicsősége egy Vicenzio *Galilei* nevű elszegényedett firenzei nemes fiát illeti. Bár Signor Vicenziót nagyon érdekelte a matematika, fiának Galileónak mégis az orvosi pályát szánta, ami jövedelmezőbb foglalkozás. Így Galileo 1581-ben, 17 éves korában megkezdte az orvostudományok tanulmányozását a pisai egyetemen. Úgylátszik azonban, hogy a holttestek boncolását nem találta különösebben érdekfeszítő foglalkozásnak, és nyugtalan szelleme más problémákat keresett.

Egy alkalommal, miközben a pisai székesegyházban misét hallgatott, szórakozottan figyelt egy csillárt, amelyet a sekrestyés megmozdított, amikor gyertyáit meggyújtotta. A lengések állandóan kisebbedtek, és a csillár lassan megállt. Minthogy nem volt stopperórája – mert akkor még nem találták fel –, Galilei elhatározta, hogy az egymásra következő lengések időtartamát saját érverésén méri. Valószínűleg nagy meglepetéssel fedezte fel, hogy bár a lengések mindig rövidebbek lettek, időtartamuk mégis pontosan ugyanaz maradt. Hazaérve megismételte a kísérletet fonal végére kötött kővel, az eredmény ugyanaz volt. Felfedezte azt is, hogy adott fonalhosszúságnál a lengési idő ugyanaz, akár nehéz, akár könnyű követ használt a kísérlethez. Így keletkezett a ma inga néven ismert műszer. Galilei, aki félig még az orvosi hivatásának élt, megfordította felfedezését, és azt javasolta, hogy egységnyi hosszúságú ingát használjanak a betegek érverésének mérésére. Ez a műszer, pulsometer néven, igen népszerű lett az akkori idők orvosi gyakorlatában. Ez volt azonban Galilei utolsó tette az orvostudományban, mert az ingának és más mechanikai eszközöknek a tanulmányozása teljesen megváltoztatta érdeklődésének irányát. Az apjával folytatott némi vita után szakot változtatott, és hozzáfogott a matematika és a fizika tanulmányozásához.

Érdeklődése éveken át a *dinamikára*, vagyis a mozgás törvényeinek tanulmányozására irányult. Miért független az inga lengési ideje az „amplitúdó"-tól, vagyis a kilengéstől? Miért leng az ugyanazon fonálhoz kötött könnyű és nehéz kő ugyanannyi ideig? Galilei soha nem oldotta meg az első problémát, mert annak a megoldása olyan számítási mód ismeretét feltételezi, amelyet Newton közel egy évszázaddal később fedezett fel. De a második problémát sem oldotta meg, amelynek Einstein általános relativitáselméletére kellett várnia. Azonban nagymértékben hozzájárult mindkét probléma megfogalmazásához, habár nem a megoldáshoz. Az inga mozgása a nehézségi erő által okozott esés speciális esete. Ha elengedünk egy követ, amely nincs semmihez kötve, akkor az egyenesen esik a földre. Ha azonban a kő a mennyezetre erősített fonálhoz van kötve, akkor kénytelen körívben esni. Ha egy fonálhoz kötött könnyű kő és egy nehéz kő ugyanannyi idő alatt éri el a legalacsonyabb helyzetet (az inga lengésének egy negyedrésze alatt), akkor a két kőnek ugyanannyi időre van szüksége abban az esetben is, ha az előző magasságban elengedve, a földre esik. Ez a következtetés ellentétben áll az arisztotelészi filozófiának Galilei idejében általánosan elfogadott álláspontjával, amely szerint a nehéz tárgyak gyorsabban esnek, mint a könnyűek. Galilei állításának bizonyítására egy fa- és egy vasgömböt ejtett le a pisai ferde toronyból, és a hitetlen szemlélők lent látták, hogy a két gömb ugyanabban a pillanatban ért földet. A történelmi kutatások sejtetni engedik, hogy ez a demonstráció a valóságban nem történt meg és csupán színes legenda. Az sem biztos, hogy Galilei az inga törvényét ima közben fedezte fel a pisai székesegyházban. De bizonyos, hogy különböző magasságból ejtett le tárgyakat, lehet, hogy háza tetejéről, és hogy fonálra kötött köveket lengetett, talán a háza udvarában.

AZ ESÉS TÖRVÉNYEI

Ha követ engedünk el, akkor az egyre gyorsabban esik. Galilei azt kívánta tudni, hogy milyen matematikai törvényt követ a gyorsuló mozgás. A tárgyak szabad esése azonban túl gyors ahhoz, hogy részletesen lehessen tanulmányozni modern felszerelések, például gyors fényképezés nélkül. Galilei ezért elhatározta, hogy „felhígítja a gravitációs erőt" oly módon, hogy a golyót lejtőn engedi le (15. ábra). Minél meredekebb a sík, annál gyorsabban gördül a golyó, a függőleges sík határesetében pedig szabadon esik a sík mentén. A kísérlet elvégzésénél a fő nehézség annak az időnek a megmérése volt, amely alatt a golyó a különböző távolságokat megtette. Galilei az időt vízórával mérte meg. Ennél az időt annak a víznek a mennyisége méri, amely a tartály fenekének közepében levő kicsiny nyíláson át kicsurog. Megjelölte a golyó helyzetét egyenlő időközökben, az indulástól kezdve, és azt találta, hogy az egyenlő idő alatt megtett távolságok 1 : 3 : 5 : 7 stb. arányban állnak. Ha a sík meredekebb volt, akkor a megfelelő távolságok hosszabbak lettek, de arányuk ugyanaz maradt. Így, következtette Galilei, a törvénynek érvényesnek kell lennie a szabadesés határesetében is. A fenti eredményt más matematikai formában is ki lehet fejezni: mondhatjuk, hogy a meghatározott idő alatt megtett távolság arányos az idő négyzetével, vagy amint Galilei annak idején kifejezte, „kétszeresen arányos" az idővel. Valóban, ha egységnyi hosszúságnak azt a távolságot vesszük, amelyet a golyó az első időszakaszban megtett, akkor az egymásra következő időközök végén megtett teljes távolság az egész számok négyzetének (négyzetes törvénynek) megfelelően, 1^2, 2^2, 3^2, 4^2 stb., vagyis 1, 4, 9, 16 stb. Így az egymásra következő időszakaszok mindegyike alatt a következő távolságokat teszi meg:

$$1;\ 4-1=3;\ 9-4=5;\ 16-9=7 \text{ stb.*}$$

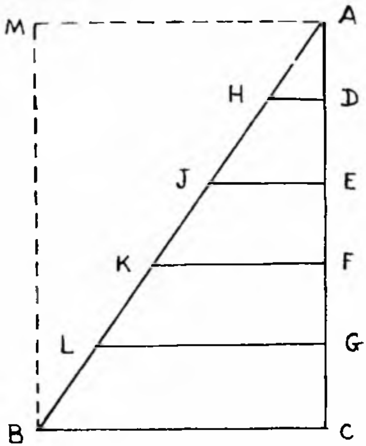
15. ábra.
Galilei a lejtőn lefelé gördülő golyó gyorsuló mozgását vizsgálja

A megtett távolság megfigyelt idő-függéséből Galilei azt a következtetést vonta le, hogy a mozgás sebességének az idővel egyenes arányban kell növekednie. E megállapítás bizonyítását Galilei szavaival adjuk vissza**:

* Az algebra kifejezésmódján, ha az n-ik időtartam végig megtett teljes távolság n^2, akkor az utolsó időköz alatt megtett távolság $n^2-(n-1)^2= =n^2-n^2+2n-1=2n-1$.

** Galileo Galilei *Párbeszédek*, Európa Könyvkiadó, 1959.

Gyorsuló mozgásnál, minthogy (a sebesség) növekedése folytonos, a sebesség fokai (mai nyelven: „a sebesség nagysága"), amelyek folyamatosan nőnek bármely meghatározott számig, nem oszthatók, mert minthogy minden pillanatban változnak, mindig végtelenek. Ezért jobban szemléltethetjük állításunkat egy *ABC* háromszög lerajzolása által (16. ábra). Az *AC* oldalon annyi *AD, DE, EF, FG, GC* egyenlő részt veszünk, amennyit akarunk, és a *BC* alappal párhuzamos vonalakat rajzolunk a *D, E, F. G* pontokhoz. Képzeljük, hogy az *AC* vonalon megjelölt részek egyenlő idők, és a *D, E, F* és *G* pontokhoz rajzolt



16. ábra.
Galilei bizonyítása arra, hogy a nyugalmi állapotból kiindulva (egyenletesen) gyorsuló mozgás esetén a mozgó test által megtett távolság a fele annak a távolságnak, amelyet a test megtett volna, ha egész idő alatt az állandó végsebességgel mozgott volna

párhuzamosak a gyorsuló és egyenlő időközökben egyenletesen növő sebesség fokai. Legyen *A* a nyugalmi állapot, amelyből kiindulva a test, például *AD* idő alatt, *DH* sebességi fokig jutott, a második időszakaszban feltételezzük, hogy gyorsasága *DH*-ról *EJ*-re növekedett, és így tovább a következő időszakaszokban, az *FK, GL* stb. vonalak növekedésének megfelelően. Minthogy azonban a gyorsulás pillanatról pillanatra folytonosan és nem ugrásszerűen történik egyik pillanattól a másikig, az *A* pontot véve a legkisebb sebességnek, vagyis a nyugalmi állapotnak, és *AD*-t a következő időszakasz első pillanatának, nyilvánvaló, hogy mielőtt a test elérte volna a *DH* sebességet az *AD* időpontban, addig végtelen sok egyre kisebb fokon kellett keresztülhaladnia végtelen sok pillanatban, minthogy a *DA* időszakaszban végtelen sok pont van. Ezért, ahhoz, hogy elképzeljük a gyorsaság végtelen sok fokát, amely a *DH* fokot megelőzi, fokozatosan mind kisebbnek kell képzelnünk azokat a vonalakat, amelyekről feltételezzük, hogy a *DA* vonal végtelen sok pontjához rajzoljuk *DH*-val párhuzamosan. Ez a végtelen sok vonal képviseli számunkra az AHD háromszög területét. Ily módon elképzelhetünk a test által megtett bármely távolságot, olyan mozgással, amely a nyugalmi állapotnál kezdődik, és egyenletesen gyorsul miközben a sebesség végtelen sok fokán haladt át, annak a végtelen sok vonalnak megfelelően növekedve, amelyekről feltételezzük, hogy A pontból kiindulva párhuzamosan vannak rajzolva a HD vonallal és azután a többi vonallal, IE-vel, KF-fel és LG-vel, a mozgás pedig folytatódhat, ameddig akarjuk.

Rajzoljuk most meg a teljes $AMBC$ paralelogrammát, és hosszabbítsuk meg a BM oldalig nemcsak a háromszögben megjelölt párhuzamosokat, hanem a végtelen sok többit is, amelyeket az AC oldal valamennyi pontjából kiindulva képzelünk felrajzolva. A BC, a háromszög e végtelen sok párhuzamosának a legnagyobbika, a mozgó test által a gyorsuló mozgásban elért legnagyobb sebességi fokot jelképezi. Az említett háromszög egész területe, annak a teljes sebességnek a mértéke, amellyel az AC időtartam alatt egy bizonyos távolságon keresztülhalad. A paralelogramma tehát hasonló számú olyan sebesség mértéke, összege, amelyek mindegyike a legnagyobb BC vonallal egyenlő. A sebességek mértéke a kétszerese a növekvő sebességek mértékének a háromszögben, ugyanúgy, mint ahogy az említett paralelogramma a kétszerese a háromszögnek. Ezért, ha a test, amely esés közben a különböző sebességi fokozatokon ment keresztül, az ABC háromszögnek megfelelően, ennyi idő alatt tett meg ennyi távolságot, akkor ésszerű és valószínű, hogy a paralelogrammának megfelelő egyenletes sebességeken keresztül menve, egyenletes mozgással ugyanannyi idő alatt kétszer annyi távolságon halad át, mint gyorsuló mozgással.

A fenti idézet nyelvezete hosszadalmas, nehézkes és nehezen érthető, de vegyük figyelembe, hogy 1632-ben íródott. Azonkívül, hogy a *Discorsi* fenti részlete a szabadesés törvényének első fogalmazása, az úgynevezett integrálszámítás kialakulásának kezdeti lépését is tartalmazza. Az integrálszámításban az eredményt végtelen sok végtelen kis mennyiség összeadásával nyerjük. Modern matematikai jelöléssel az egyenletesen gyorsuló mozgás Galilei-féle törvényét a következőképpen írhajtuk fel:

$$\text{sebesség} = \text{gyorsulás} \cdot \text{idő}$$

és

$$\text{út} = 1/2 \text{ gyorsulás} \cdot \text{idő}^2.$$

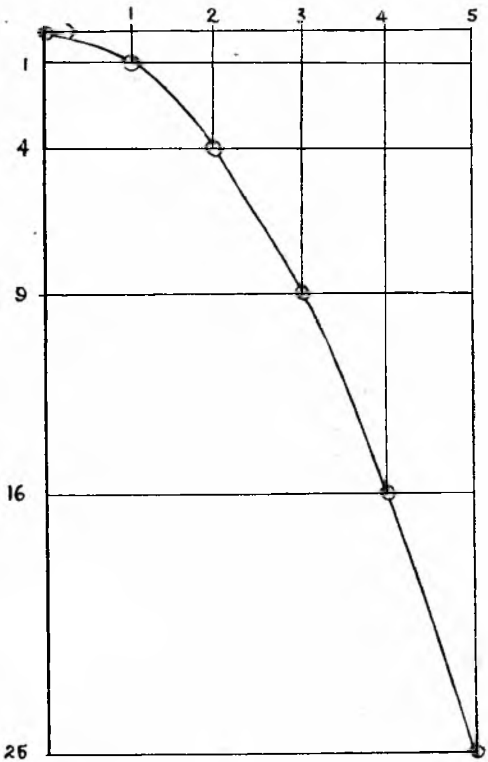
A szabadesés gyorsulása, amelyet rendszerint g betűvel (gravitáció) jelölünk, 981 cm per sec per sec $\left(\frac{\text{cm/sec}}{\text{sec}} = \frac{\text{cm}}{\text{sec}^2}\right)$, ami azt jelenti, hogy a test sebessége a mozgás kezdetétől számított minden másodpercben 981 cm/sec-mal növekszik. Nézzünk egy példát: a repülőgépről leejtett kő sebessége 10 másodperc múlva

$$981 \cdot 10 = 9810 \frac{\text{cm}}{\text{sec}} = 98{,}1 \frac{\text{méter}}{\text{sec}} \text{ és ezalatt}$$

$$\tfrac{1}{2} \cdot 981 \cdot 10^2 = 49\,050 \text{ cm} = 490 \text{ m-t esik.}$$

Galilei másik fontos felfedezése a dinamika területén az összetett mozgás gondolata volt, amelyet a következő egyszerű példával szemléltethetünk:

Tegyük fel, hogy egy követ 150 cm-re tartunk a talaj felett, és azután elengedjük. A fenti képletnek megfelelően, a kő a földet 0,96 másodperc alatt éri el. Mi történik, ha a kő elengedésekor mondjuk 30 cm vízszintes sebességet is adunk neki? Mindenki tudja saját tapasztalatából, hogy ebben az esetben a kő görbe pályát ír le, és az elhajító lábától bizonyos távolságra esik a földre. Ha meg akarjuk rajzolni a kő által megtett pályát,



17. ábra.

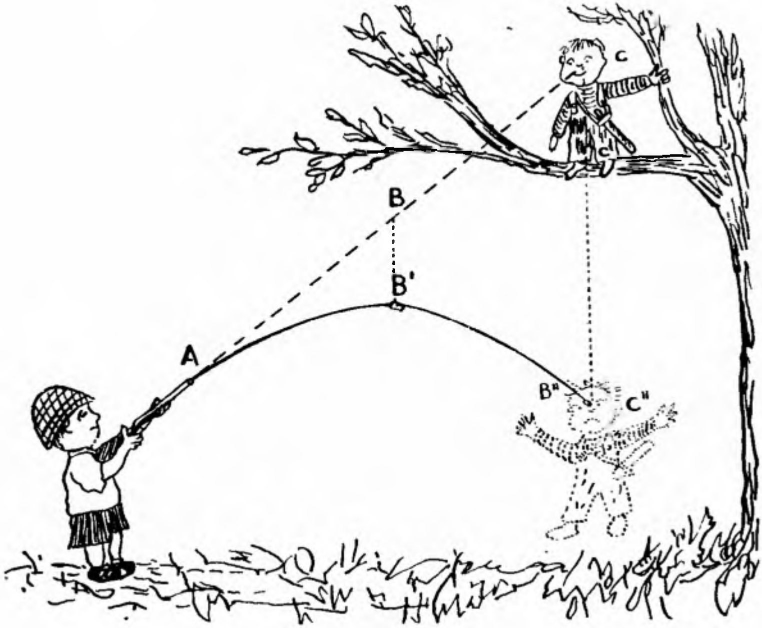
Vízszintes irányú egyenletes mozgás és gyorsuló függőleges irányú mozgás összetevése. Az eredő görbe parabola.

ezt úgy tehetjük, ha elképzeljük, hogy a kő két független mozgást végez: 1. vízszintes mozgást azzal az állandó sebességgel, amelyet az elbocsátás pillanatában nyert, 2. a szabadesést függőlegesen, amelynek sebessége az idővel arányosan növekszik.

E két mozgás összeadásának eredményét mutatja a 17. ábra. A vízszintes tengelyen a golyó által az első másodpercben, a második másodpercben stb. megtett távolságoknak megfelelő egyenlő távolságokat jelöltünk meg. A függőleges tengelyen azokat a távolságokat jelöltük meg, amelyek a szabadesés törvényének megfelelően az egész számok négyzetének arányában nőnek. A golyó tényleges helyeit a görbén levő kis körök jelzik, a görbe parabola. Ha a golyót kétszeres vízszintes sebességgel hajítjuk el, akkor a vízszintes mozgásban kétszer olyan nagy távolságot tesz meg, függőleges mozgása azonban ugyanaz marad. Az eredmény az, hogy lábunktól kétszer olyan távol fog leesni, de az esés időtartama változatlan marad. (Ezekben a megfontolásokban elhanyagoljuk a levegő súrlódását, amely az elhajított kő pályáját egy kevéssé megváltoztatja.)

Ugyanennek az elvnek egyik érdekes alkalmazását láthatjuk, amikor két fiú katonásdit játszik. (18. ábra). Az egyik gyerek egy faágon áll, a másik pedig rálő egy játékpuskával. Tegyük fel, hogy a puskás gyerek egyenesen a faágon álló fiút célozza meg, és hogy abban a pillanatban, amikor lenyomja a ravaszt, a másik lelép az ágról, és a földre esik. Segít-e a földreesés? Nem, mégpedig a következő okból. Ha nem volna nehézkedés, akkor a golyó folytatná útját az *ABC* egyenes vonal mentén addig a helyig, ahol a fiú eredetileg állt. A gravitáció miatt azonban a golyó lefelé kezd esni abban a pillanatban, amikor elhagyja a puska csövét, és kettős mozgás jön létre: egyenletes mozgás az *ABC* vonal mentén és gyorsuló mozgás függőlegesen lefelé. Minthogy az összes anyagi testek egyforma gyorsulással esnek, azért a golyó függőleges mozgása és a fiú esése azonos. Így mialatt a golyó elért volna a *B* pontig, félúton az eredeti célhoz, azalatt *BB*' távolságra esett volna, amely egyenlő a fiú által ez esetben megtett *CC*' távolsággal. Mialatt a golyó elérte volna a *C* pontot gravitáció hiányában, azalatt *CB*'' távolságra esett volna (a *BB*' távolságnak kétszeresére), ami egyenlő a leeső fiú által megtett *CC*'' távolsággal. A fiút a golyó egyenesen orron találja. (Itt persze feltettük, hogy a golyó vízszintes sebessége éppen a távolságnak és az esési időnek megfelelő.)

Kődobás vagy golyókilövés helyett leejthetünk egy tárgyat mozgó járműről. Tegyük fel, hogy gyorsan mozgó gőzhajó árbocának a tetején ejtünk el egy követ (Galilei idejében evezőkkel hajtott gályán). Az elengedés pillanatában a kő vízszintes sebessége ugyanaz, ami a hajóé. Így ezzel a vízszintes sebességgel mozog tovább az elengedés után, ezért az egész idő alatt az árboc alapzata fölött marad. Természetesen ugyanaz történik, ha a tárgyat mozgó vonat kocsijában vagy mozgó repülőgép



18. ábra

Minthogy minden test ugyanazzal a gyorsulással esik, ha egy katonásdit játszó kisfiú „golyót" lő ki egy játékpuskából egyenesen az ágon levő „ellenségre", akkor a „golyó" az ellenséget egyenesen orron találja, ha az ellenség a lövés pillanatában leugrik.

kabinjában ejtjük el, függetlenül attól, milyen sebesen mozognak ezek a járművek.

Mindez igen egyszerűnek és magától értetődőnek látszik manapság, de nem volt az Galilei korában. Ebben az időben Arisztotelész tanítása uralkodott a kor tudományos gondolkodásán. Ennek megfelelően az hitték, hogy a tárgy csak addig mozog, ameddig tolják, és megáll, mihelyt az erő megszűnik. E felfogásnak megfelelően az árboc tetején elengedett kő függőlegesen esik le, amíg a hajó folytatja útját előre. Így azt várták, hogy a leeső kő a fedélzetet a hajó tatjához közelebb éri el. Jellemző a középkori skolasztikára, hogy az ilyesfajta problémákon a végtelenségig vitáztak, de senkisem gondolt arra, hogy felmásszon egy mozgó hajó árbocára, és onnan leejtsen egy követ.

Élénken szemléltetik az akkori helyzetet Galilei *Párbeszédek a két legnagyobb világrendszerről, a ptolemaiosziról és a kopernikusziról* című könyvének a következő részletei. A könyv 1632-ben jelent meg Firenzében. Galilei a régi görög írók hagyományait követve, a könyvet a csodálatos Velence városának három lakosa között folytatott beszélgetés formájában írta meg. A három személy: *Salviati*, aki a szerző helyett beszél; *Sagredo*, az értelmes laikus; és *Simplicio*, az arisztotelészi iskola egy nem túlságosan kiváló képviselője. Lássunk néhány szemelvényt a mozgó hajó árbocáról leeső kőről és a (Kopernikusz szerint) mozgó földön álló toronyból leejtett tárgy sorsáról folytatott vitákból:

Salviati: ... Arisztotelész tehát azt állítja, hogy a legbiztosabb érv a Föld mozgása ellen az a megfigyelés, hogy a függőlegesen felfelé hajított testek ugyanazon a pályán keresztül esnek vissza ugyanarra a helyre, ahonnan azokat felhajították; még akkor is, ha a mozgás igen messze jutott fel a magasba. De ez nem történhetnék meg, ha a Föld mozogna, mert az alatt az idő alatt, míg a felhajított test a levegőben a Földtől elszakadva, fölfelé és lefelé mozog, az elhajított test kiindulópontja a Föld forgása következtében lényeges darabbal távolodnék el kelet felé, és a leeséskor a testnek ekkora távolsággal odább kellene a Földre érnie. Ide tartozik az ágyúból kilőtt golyó esete is, valamint az Arisztotelésztől és Ptolemaiosztól származó megfigyelés, hogy a Földre jelentékeny magasságból eső súlyos testek merőleges egyenes mentén érik el a Földet. — Mármost ennek a csomónak a kibogozása céljából megkérdem Simpliciót: hogy ha valaki Ptolemaiosztól és Arisztotelésztől el akarta volna vitatni, hogy a szabadon eső súlyos testek merőleges egyenes mentén érik a Földet. azaz a középpont felé irányuló egyenes mentén esnek, milyen segédeszközöket használna fel a bizonyításhoz?

Simplicio: Az érzékelés, amely arra tanít, hogy a torony egyenes és merőleges, és amely megmutatja, hogy a leejtett kő szorosan mellette halad, anélkül, hogy hajszálnyit is eltérne egyik vagy a másik irányba, és a torony lábához érkezik, pontosan az alatt a hely alatt, ahonnan leejtették.

Salviati: De ha a Föld forogna, és ennek következtében a tornyot is magával vinné, a megfigyelés mégis azt mutatná, hogy a lehulló kő szorosan a torony vonala mellett esik le, ebben az esetben milyennek kellene lennie a kő mozgásának?

Simplicio: Ebben az esetben inkább úgy kellene mondani, hogy a „mozgásainak". Mert az egyik mozgás az lenne, amelynek következtében a föntről leér, a másiknak pedig saját mozgásának kellene lennie, amellyel a torony mozgását követni tudja.

Salviati: Mozgása tehát két mozgásból tevődne össze: abból, amellyel a torony mentén előrehalad, és abból, amely a torony mozgását követi. Ebből az összetételből annak kellene adódnia, hogy a kő nem írja le többé az egyszerű, függőleges egyenes vonalat, hanem ferde, sőt görbült pályán halad.
Simplicio: Hogy görbe lenne-e, ezt nem tudom, azt azonban nagyon is megértem, hogy a pályának szükségképpen ferdének kell lennie, és különböznie kell attól az egyenes vonaltól, melyet a Föld mozdulatlansága esetében leírt.

Salviati: Tehát abból, hogy a lehulló követ a torony mentén látod leesni, még nem következtethetsz teljes biztonsággal arra, hogy egyenesen és függőlegesen mozog; előbb még azt is fel kell tenned, hogy a Föld nyugalomban van.
Simplicio: Így van. Mert ha a Föld mozogna, a mozgás ferde és nem függőleges volna.

Salviati: Arisztotelész védelme tehát annyiban áll, hogy lehetetlen, vagy legalábbis szerinte lehetetlen, hogy a kő egyenes vonalú mozgásból és körmozgásból összetett mozgást végezzen. Mert ha Arisztotelész nem tartotta volna lehetetlennek, hogy a kő egyidejűleg a középpont felé és a középpont körül mozogjon, akkor belátta volna, hogy a kő éppúgy eshet a torony mentén, akár mozog a Föld, akár áll; továbbá észre vehette volna, hogy a kőnek a torony mentén való eséséből egyáltalán nem lehet sem a Föld mozgására, sem a mozdulatlanságára következtetni. Mindez tehát egyáltalában nem menti Arisztotelészt, nemcsak azért, mert bizonyításának ilyen lényeges pontján nyomatékosan ki kellett volna emelnie, ha ez a nézete, hanem azért sem, mert egy ilyen tényt nem szabad lehetetlennek tartani, sem pedig azt hinni, hogy Arisztotelész lehetetlennek tartotta. Lehetetlennek tartani azért sem szabad, mert mint azonnal ki fogom mutatni, nemcsak lehetséges, hanem szükséges is, de az utóbbit sem szabad állítani, mert Arisztotelész maga is elismeri, hogy a tűz természete folytán egyenes vonalban fölfelé mozog, ugyanakkor azonban résztvesz a naponkénti körmozgásban, amelyet az Ég közvetít a tűzhöz, mint elemhez és a levegő legnagyobb részéhez. Ha tehát nem tartja lehetetlennek. hogy a fölfelé irányuló egyenes vonalú mozgás összekeveredik a körmozgással, amelyet a Hold szférája közvetít a tűznek és a levegőnek, akkor még kevésbé szabad tagadnia a kőnél felfelé irányuló, egyenes vonalú mozgás keveredését a körmozgással, az utóbbi lehet az egész földgolyó sajátossága is, amelynek a kő egy része.

Később a *Párbeszédek*ben Salviati igen érdekes kísérlet elvégzését javasolja, amelynek célja az előző vitákban kifejtett álláspont bizonyítása:

Salviati: Ha (Simplicio) e példával szemben több aggodalmat mutat, mint a többivel szemben, akkor ez, ha nem tévedek azért van, mert a madarak élnek, és ezért tetszés szerint tudják használni erejüket a földi testekben levő kezdeti mozgással szemben. Látjuk őket például felfelé repülni, ami teljesen lehetetlen az égi testeknél; holtan azonban csak lefelé eshetnek. Ezért Simpliciónak az a véleménye, hogy a fent említett lövedékekre vonatkozó érvek nem vonatkoznak a madarakra. Ez nagyon is igaz, és mert igaz, ezért láthatjuk, hogy a madarak magatartása más, mint az eső tárgyaké. Ha egy torony tetejéről egy holt és egy élő madarat engedünk el, akkor a holt madár, ugyanúgy viselkedik mint a kő, vagyis először követi az általános napi mozgást, és azután a lefelé irányuló mozgást. Ha azonban a leengedett madár él, mi akadályozza őt abban, hogy (megtartva a napi mozgást) szárnyai segítségével felfelé repüljön a horizont bármely pontjáig? És ez az új mozgás, amely a madárnak a sajátossága, és amelyre mi nem vagyunk képesek, szükségképpen számunkra látható. Röviden, a madarak reptének hatása semmivel sem különbözik a kilőtt vagy hajított lövedékektől a világ bármely részében, kivéve hogy a lövedékeket egy külső taszító erő mozgatja, a madarakat pedig egy belső mozgató erő.

A pillanat alkalmasnak látszik arra, hogy annak kimutatása során, hogy a felsorolt kísérletek nem érnek semmit, feltegyem a koronát azzal, hogy megmutatom, miképpen lehet azokat a lehető legkisebb fáradsággal kipróbálni. Zárkózzál be egy barátod társaságában egy nagy hajó fedélzete alatt egy meglehetősen nagy terembe. Vigyél oda szúnyogokat, lepkéket és egyéb röpködő állatokat, gondoskodjál egy apró halakkal telt vizes edényről is, azonkívül akassz fel egy kis vödröt, amelyből a víz egy alája helyezett szűknyakú edénybe csöpög. Most figyeld meg gondosan, hogy a repülő állatok milyen sebességgel röpködnek a szobában minden irányban, míg a hajó áll. Meglátod azt is, hogy a halak egyformán úszkálnak minden irányban, a lehulló vízcseppek mind a vödör alatt álló edénybe esnek. Ha társad felé hajítasz egy tárgyat mind az egyik, mind a másik irányba egyforma erővel kell hajítanod, feltéve, hogy azonos távolságokról van szó. Ha, mint mondani szokás, páros lábbal ugrálsz, minden irányba ugyanolyan messzire jutsz. Jól vigyázz, hogy mindezt gondosan megfigyeld, nehogy bármi kételyed támadjon abban, hogy az álló hajón mindez így történik. Most mozogjon a hajó tetszés szerinti sebességgel, azt fogod tapasztalni, ha a mozgás egyenletes és nem ide-oda ingadozó —, hogy az említett jelenségekben semmiféle változás nem következik be. Azoknak egyikéből sem tudsz arra következtetni, hogy mozog-e a hajó vagy sem. A jelenségek ez egyformaságának az az oka, hogy a hajó mozgásában minden rajta levő tárgy részt vesz, beleértve a levegőt is. Azért is mondtam, hogy a fedélzet alatt kell elhelyezkednetek, nem fent; ha azonban ezek a tárgyak a fedélzeten vannak, a szabad levegőn, mely nem kíséri a hajó mozgását, az előbb említett jelenségektől többé-kevésbé észrevehető eltéréseket tapasztalhatnátok. Így például a füst épp úgy elmaradna, mint a levegő. A szúnyogok és a lepkék sem tudnák követni a hajót a levegő ellenállása miatt, ha a hajótól jelentékeny távolságra kerülnének, de ha a közelben maradnak, minden akadály és erőfeszítés nélkül utólérhetnék a hajót, mert az, mint szabálytalan építmény, a szomszédos légrétegeket magával viszi. Hasonló okokból láthatjuk azt is, hogy a kellemetlen szúnyogok és bögölyök követni tudják a gyorsan vágtató lovakat, és majd az egyik, majd a másik testrészükön helyezkednek el. A lehulló cseppeknél azonban a különbség egészen csekély, az ugrásnál és súlyos testek hajításánál észrevehetetlen lenne.

Sagredo: Bár még sohasem jutott eszembe a tengeren, hogy a felsorolt megfigyeléseket ebből a célból végrehajtsam, több mint bizonyos vagyok benne, hogy valóban az adott eredményre vezetnek. Így például arra is emlékszem, hogy fülkémben tartózkodva, igen sokszor vetettem fel magamnak azt a kérdést, hogy mozog-e a hajó vagy áll-e, és gondolataimba elmerülve sokszor hittem azt, hogy az egyik irányba megy, pedig éppen az ellenkező irányba haladt. Ezért teljesen meg vagyok most elégedve és szilárdan meg vagyok róla győződve, hogy hiába való minden olyan kísérlet, amely a Föld forgása mellett vagy az ellen döntő módon szólna.

Még egyetlen ellenvetést kell elintézni, mely azon a tapasztalaton alapszik, hogy azok a tárgyak, melyek egy forgó gépen vannak, a gyors forgás következtében lerepülnek róla. Ezért gondolták sokan, köztük Ptolemaiosz is, hogy ha a Föld akkora sebességgel forogna a tengelye körül, akkor a kövek és az állatok egészen a csillagokig repülnének és az épületeket a mégoly erős malter sem tudná a talajhoz kötni, hogy megmentse ettől a pusztulástól . . .

Azt a megállapítást, hogy lehetetlen bármely, a zárt kabinban lefolytatott mechanikai kísérlettel megállapítani, vajon a hajó le van-e horgonyozva, vagy mozog-e a tengeren, ma a „Galilei-féle relativitási elv"-nek nevezzük. A fizika fejlődésében három évszázad volt szükséges ahhoz, hogy ezt az elvet Albert *Einstein* kiterjessze a zárt, egyenletesen mozgó kabinban megfigyelt optikai és elektromágneses jelenségekre. Ennyit Galilei szerepéről a mechanikában.

GALILEI, A CSILLAGÁSZ

Galilei azon kívül, hogy egyike volt az első kísérleti és elméleti fizikusoknak, hatalmas mértékben hozzájárult a csillagászat fejlődéséhez is, a körülöttünk levő világegyetem korlátlan távlatait tárta fel az emberiség előtt. Figyelme 1604-ben irányult először az ég felé, amikor egyik éjjel hirtelen egy ragyogó új csillag tűnt fel az évszázadokon át változatlannak ismert csillagképek között (ma ezeket „nová"-nak nevezzük). Galilei, aki akkor 40 éves volt, kimutatta, hogy az új csillag valóban csillag és nem meteor a Föld légkörében, és azt állította, hogy fokozatosan el fog halványodni. Az új csillag megjelenése az égen, amelyről, Arisztotelész filozófiájának és az egyház tanításának megfelelően, azt hitték, hogy tökéletesen változatlan, sok ellenséget szerzett Galileinek tudós társai és az egyházi emberek között. Alig néhány évvel az első csillagászati felfedezése után forradalmasította a csillagászatot az első csillagászati távcső megszerkesztésével. Ezt a következőképpen írja le:

Mintegy tíz hónappal ezelőtt jutott el hozzánk a hír, hogy egy hollandus optikai műszert dolgozott ki, amelynek segítségével a tárgyak, bármilyen messze legyenek is a megfigyelő szemétől, olyan határozottan felismerhetők, mintha kézügyben volnának. E csodálatos eredményről többféle történet járt szájról szájra, amelyet egyesek hisznek, mások pedig tagadnak. Néhány nappal később megerősítette ezt egy levél, amelyet Párizsból kaptam, Jacob Badovere francia nemestől. Nagyjából ez indította arra, hogy ama eszközök elméletének és felfedezésének kutatásával foglalkozzam, amelyek által elérhetném egy hasonló műszer feltalálását. E célt valamivel később értem el a fénytörés elméletének felhasználásával. Először ólomcsövet készítettem, amelynek végeibe két üveglencsét illesztettem, mindkét lencse egyik oldala sík volt, a másik oldal pedig az egyik lencsénél szférikusan konvex, a másiknál pedig konkáv.

Amikor Galilei elkészítette a műszert, az ég felé fordította, és szeme elé tárultak a világegyetem csodái. A Holdat nézve, a következőket találta:

A Hold felszíne nem teljesen sima egyenetlenségektől mentes, és nem pontosan gömb alakú, amint azt a filozófusok egy nagy iskolája hiszi, nemcsak a Holdról, hanem más égitestekről is. Ellenkezőleg, a Hold tele van egyenetlenségekkel, mélyedésekkel és kidudorodásokkal, akár a Földnek a felszíne, amelyen magas hegyek és mély völgyek váltakoznak.

A bolygókról ezeket mondotta:

A bolygók korongjai tökéletesen kereknek látszanak, mintha körzővel rajzolták volna őket, megannyi kis jól megvilágított, gömb alakú holdnak tűnnek. Az állócsillagok azonban nem úgy tűnnek a puszta szemnek (Nyilván első alkalommal használták ezt a kifejezést!), mintha kerületüket kör határolná, hanem inkább tündöklő fényeknek, amelyek minden irányban sugarakat bocsátanak ki, és a teleszkóppal ugyanolyan alakot mutatnak, mint amikor egyszerűen szemlélték őket.

Galilei 1610. január 7-én szemügyre vette a Jupitert és:

A bolygó közelében három kis csillag volt, bár aprók, de nagyon fényesek. És noha azt hittem, hogy az állócsillagok közé tartoznak, mégis meglepetést okoztak, mert úgy láttam, hogy pontosan egy egyenes mentén helyezkednek el, amely párhuzamos a nappályával, és fényesebbek, mint a többi hasonló nagyságú csillag . . . A keleti oldalon két csillag volt, nyugaton csak egy . . . Mikor azonban január 8-án, mintegy a végzettől vezetve, pillantásomat ismét az ég ugyanama része felé fordítottam, egész más helyzetet találtam, mert három kis csillag volt a Jupitertől jobbra, és közelebb egymáshoz, mint az előző éjjel.

Galilei megállapította, hogy:

Az égen három csillag kering a Jupiter körül, mint a Venus és a Merkur a Nap körül.

Szemügyre vette a Venust és a Merkurt, és felfedezte, hogy néha növekvő alakjuk van, mint a Holdnak, amiből arra következtetett, hogy:

A Venus és a Merkur, valamint a többi bolygó is a Nap körül kering. Ezt vallotta Pithagorász iskolája, Kopernikusz és Kepler, de soha nem igazolta ezt érzékeink tanúbizonysága, amint most igazolja a Venus és a Merkur esetében.

Szemügyre vette a Tejutat, és azt találta hogy:

. . . nem egyéb, mint megszámlálhatatlan, összecsoportosult csillag.

Galileinek a távcső segítségével tett felfedezései cáfolhatatlanul bizonyították a kopernikuszi világrendszer helyességét, és Galilei diadalmasan beszélt erről mindenfelé. Ez minden bizonynyal több volt annál, mint amit a Szent Inkvizíció megengedhetett. Letartóztatták, hosszú időn át magánzárkában tartották, és kérdésekkel gyötörték, ami azonban nem változtatta meg harcos szellemét. 1633. január 15-én néhány hónappal a végső tárgyalás előtt, Galilei barátjának, Diodatinak ezt írta:

Ha kérdem: kinek a műve a Nap, a Hold, a Föld, a csillagok, mozgásuk és helyzetük, akkor valószínűleg azt fogják mondani, hogy Isten műve. Ha ezt kérdem továbbá, kinek a műve a Szentírás, akkor bizonyosan azt fogják mondani, hogy a Szentlélek műve, tehát szintén Isten műve. Ha most kérdem, ha a Szentlélek olyan szavakat használ, amelyek nyilván ellentmondanak a valóságnak, hogy azokat az általában tanulatlan tömegek megértsék, akkor meg vagyok győződve róla, azt fogják mondani, sok idézettel a szent íróktól, hogy ez valóban előfordul a Szentírásban, amely olyan részek százait tartalmazza, amelyek szó szerint véve nem volnának egyebek, mint eretnekségek és istenkáromlás, mert Istent itt gyűlölködő, bűnös és feledékeny lénynek tüntetik fel. Ha most kérdem, vajon Isten, abból a célból, hogy a tömegek megértsék, megváltoztatta-e valaha művét, vagy ha a természet, amely változhatatlan és hozzáférhetetlen az emberi kívánságok számára, megtartotta-e a Világegyetem mozgásának, alakjainak és részeinek mibenlétét, akkor bizonyosan azt fogják mondani, hogy a Hold mindig kerek volt, még ha hosszú ideig laposnak tekintették is. Mindezt egy mondatba foglalva: senki sem fogja fenntartani, hogy a természet valaha megváltozott azért, hogy műveit az emberek számára elfogadhatóvá tegye. Ha ez így van, akkor kérdem, miért van az, hogy nekünk – a világ különböző részeinek megértése céljából, – Isten Szavait kell vizsgálnunk, és nem az ő Műveit. Talán a Mű kevésbé tiszteletre méltó mint a Szó? Ha valaki eretnekségnek tartotta azt az állítást, hogy a Föld mozog, és ha később a kísérletek és következtetések mutatják, hogy mégis mozog, vajon jelentene-e ez nehézségeket az egyház számára? Ha a műveket és az Igét nem tudjuk összeegyeztetni, és a Szentírást tekintjük másodrendűnek, nem éri azt sérelem. mert gyakran megváltoztatták, hogy alkalmazkodjék a tömegekhez, és mert gyakran hamis tulajdonságokat ruházott Istenre. Ezért kérdeznem kell, miért ragaszkodunk ahhoz, hogy ha a Napról vagy a Földről szól a Szentírás, akkor teljességgel csalhatatlan legyen?

1633. június 12-én, 69 éves korában, Galileit az Egyház Szent Hivatalának bírái elé állították, itt térden állva „vallotta”:

Én, Galileo Galilei, néhai Vicenzio Galilei firenzei polgár fia, aki 70 éves* vagyok, az egyházi bíróság elé állítva eretnek eltévelyedés miatt, előttetek Eminenciás és Főtisztelendő Bíboros Uraim, az Egyetemes Keresztény Közösség Főinkvizítorai előtt, térden állva, szemem előtt a Szent Evangéliumokkal, amelyeket saját kezemmel érintek, esküszöm, hogy mindig hittem, és Isten segítségével a jövőben is hinni fogok minden cikkelyben, amelyet Róma Szent Katolikus és Apostoli Egyháza vall, tanít és hirdet. De mivel ez a Szent Hivatal a lelkemre kötötte, hogy hagyjam el a tévhitet, amely azt állítja, hogy a Nap

* Ez Galilei vallomásának eredeti szövege. A valóságban 69 éves múlt akkor négy hónappal és 7 nappal.

a központ és mozdulatlan, és megtiltotta, hogy bármilyen módon valljam, védjem és tanítsam az említett téves tant . . ., ezért el akarom távolítani Eminenciátok és minden Katolikus Keresztény szelleméből ezt az ellenem irányuló gyanút, ezért őszinte szívvel és igaz hittel megtagadom, elvetem és megvetem az említett tévedéseket és eretnekségeket és minden más tévedést és elpártolást, amely ellenkezik az említett Szentegyházzal; és esküszöm, hogy a jövőben nem fogok bármit is mondani vagy állítani, szóban vagy írásban, ami okot adna hasonló gyanúra ellenem vagy velem szemben, de ha tudnék eretnekről, vagy eretnekséggel gyanúsíthatóról, akkor jelentem ennek a Szent Hivatalnak, vagy tartózkodási helyem Inkvizítorának és az Egyházfőnek. Esküszöm továbbá, és ígérem, hogy teljesítem és megtartom mindazt a bűnbánatot, amelyet a Szent Hivatal rámrótt, és a jövőben rám fog róni. Ha azonban megtörténne, hogy megsértem az említett ígéretek, esküdk és fogadalmak bármelyikét (amitől Isten óvjon!), akkor alávetem magam mindazoknak a kínoknak és büntetéseknek, amelyeket a Szent Kánonok és a többi általános és különleges rendeletek a fent meghatározott bűnösökre előírnak. Úgy segéljen engem Isten, és az Ő Szent Evangéliumai, amelyeket saját kezemmel érintek, Én, fent nevezett Galileo Galilei, esküdtem, ígértem és köteleztem magam, mint fent, és ennek tanúbizonyságaképpen saját kezemmel aláírtam a fenti megtagadásról szóló írást, amelyet szó szerint idéztem.

Mondják, hogy közvetlenül a „vallomás" után Galilei felkiáltott: „Eppur si muove!" (Mégis mozog!). Ez azonban nem felel meg a valóságnak. Galileit elítélték eretnekség miatt és Firenze közelében, Arcetriben levő villájában való tartózkodásra „házi fogságra" kötelezték. 1642. január 8-án, teljesen vakon és az életbe belefáradva halt meg.

III. FEJEZET

ÉS MONDÁ ISTEN, „LEGYEN NEWTON"*

Abban az évben, amikor Galilei firenzei száműzetésében meghalt, egy Newton nevű Lincolnshire-i farmer családjában koraszülött gyermek jött a világra, aki az Izsák nevet kapta. Az iskola első éveiben a kis Newton jövendő nagyságának semmi jelét sem mutatta. Beteges, félénk kisfiú volt, a tanulásban elég gyenge. Ebből az állapotból egy iskolatársával folytatott ökölharc zökkentette ki. Az iskolatárs az osztály egyik legjobb tanulója volt, és igen agresszívan viselkedett a többi fiúval szemben. Ez a vadóc (akinek a neve a történelem számára elveszett), hasba rúgta a kis Newtont, aki azonban birokra kelt vele, és le is gyűrte, mert „lélekben és elszántságban különb" volt nála. Miután a testi erő frontján győzött, elhatározta, hogy győzelmét teljessé teszi az értelem csatájában is. Kemény munkával sikerült az osztály első tanulójává lennie. De győztes lett egy másik ütközetben is. Ezt anyjával vívta, aki azt akarta, hogy a fia farmer legyen. Newton azonban 18 éves korában belépett a Trinity College-be, ahol matematikát kezdett tanulni. 1665-ben elérte a baccalaureatusi fokozatot anélkül, hogy különösebben kitűnt volna.

NEWTON A PESTISJÁRVÁNY IDEJÉN

1665 nyarán kiütött a nagy pestisjárvány Londonban, amelynek néhány hónapon belül minden tizedik londoni lakos áldozatául esett. Ősszel bezárták a cambridge-i egyetemet, amely közel volt a járvány gócához, és minden diákot hazaküldtek.

* Alexander Pope (1688–1744) verséből: „A természet rejtve őrzi törvényeit; Mondá Isten, legyen Newton! S ő mindent felderít"

Newton visszatért a Lincolnshire-i szülői házba, és ott maradt tizennyolc hónapig, amíg az egyetemet újra meg nem nyitották.

Ez a falusi elszigeteltségben eltöltött tizennyolc hónap volt Newton életének legtermékenyebb szakasza, és elmondhatjuk, hogy gyakorlatilag ebben az időben gondolta ki valamennyi elképzelését, amelyekért az utókor hálás neki.

Idézzük saját szavait:

1655 elején találtam meg ... a binomok (hatványai) sorba fejtésének a szabályát*. Ugyanaz év májusában a tangensek módszerét ... novemberben pedig a fluxiók direkt módszerét (vagyis mai néven a differenciálszámítás elemeit), a következő év januárjában a színelméletet, májusban a fluxiók fordított módszerét (vagyis az integrálszámítást), és még abban az évben foglalkozni kezdtem a holdpályáig terjedő gravitáció gondolatával ... és ... összehasonlítottam a Holdat pályáján tartó erőt a Föld felszínén levő gravitációs erővel.

További tudományos pályafutását a Lincolnshire-ben kigondolt eszmék kifejtésének szentelte.

26 éves korában kinevezték a cambridge-i egyetem tanárává, 30 éves korában pedig a Royal Society tagjává választották, ami Angliában a legnagyobb tudományos kitüntetés. Életrajzírói szerint, Newton tökéletes példája volt a szórakozott professzornak. „Soha nem szánt időt üdülésre vagy kikapcsolódásra, nem lovagolt ki a szabad levegőre, nem sétált, nem tekézett, más sport sem érdekelte, mert minden percet elveszettnek tartott, amit nem tanulmányaira fordított." Gyakran dolgozott hajnalig, elfelejtett enni, és ha néha megjelent az egyetem éttermében, „letaposott sarkú cipőben volt, harisnyáit nem erősítette fel, a talár** rajta maradt, és haja fésületlen volt". Mivel mindig gondolataiba merült, igen naiv maradt, és a mindennapi élet problémáival szemben hiányzott minden gyakorlati érzéke. Beszélték, hogy egyszer nyílást vágott háza kapuján, hogy a macskája ki-be járhasson; amikor a macskának kiscicái lettek, akkor még apró nyílásokat is vágott, minden kismacskának egyet.

Személyes érintkezésben Newton nem volt valami kellemes. Gyakran voltak ellentétei kollégáival, ami talán a gyermekkori iskolatársával folytatott viaskodás következménye volt. Elke-

* Az ún. Newton-féle binomiális tételt, amit ma már a középiskolában is tanítanak

** Az angol egyetemi tanárok öltözete, melyet csak az előadó-teremben viseltek. (A fordító megjegyzése.)

seredett vitái voltak egy másik cambridge-i fizikussal, Robert Hooke-kal (a rugalmasság elméletének megalapítójával) színelmélete miatt és az általános gravitáció törvénye felfedezésének a prioritása végett. Prioritási harca volt még Gottfried Leibniz német matematikussal a differenciálszámítás feltalálása és a holland Christian Huygens-szel a fényelmélet miatt. John Flamsteed csillagász, aki alig volt beszélő viszonyban Newtonnal, úgy jellemzi őt, mint aki „áskálódó, törtető és rendkívül dicsvágyó ember, nem tűr ellentmondást . . . alapjában véve jószándékú ember, de természeténél fogva gyanakvó".

Cambridge-i évei alatt Newton azokat a káprázatos ötleteit fejlesztette tovább, amelyeket huszonharmadik és huszonötödik életéve között gondolt ki, de felfedezéseit többnyire titokban tartotta. Ez magyarázza azt, hogy teljes beszámolója sokkal később került nyilvánosságra: a mechanikára és gravitációra vonatkozó munkája 44 éves korában, az optikára vonatkozó pedig 65 éves korában.

NEWTON *PRINCIPIÁ*-JA

Principia mathematica philosophiae naturalis (A természetfilozófia matematikai elvei)* című munkája előszavában (1686. május 8-i kelettel) a következőket írta Newton:

Mivel a régiek a mechanika tudományát igen lényegesnek tartották a természet tanulmányozásában, és a maiak, elvetve az anyagi formákat és a rejtett tulajdonságokat, arra törekszenek, hogy a természet jelenségeit a matematika törvényeinek vessék alá, ebben a tanulmányban matematikával foglalkozom, már amennyiben az a (természet) filozófiára vonatkozik. A régiek a mechanikát kétféle szempontból nézték; elvileg, amikor pontos bizonyításokkal fejlesztették, vagy a gyakorlat szempontjából. A gyakorlati mechanikához tartozik minden manuális tevékenység (gépészet), ahonnan a mechanika a nevét is nyerte. Minthogy azonban a kézművesek nem dolgoznak tökéletes pontossággal, ezért az a helyzet állt elő, hogy a mechanikát megkülönböztetik a geometriától, oly módon, hogy ami tökéletesen pontos, azt geometriának nevezik, ami kevésbé az, azt mechanikának. A tévedések azonban nem a tudományban vannak, hanem a kézművesekben. Az, aki kevésbé pontosan dolgozik az nem tökéletes mechanikus; és aki tökéletes pontossággal dolgozik, az lesz valamennyi között a legtökéletesebb mechanikus . . .

Főleg a (természet) filozófiával foglalkozom, nem a kézművességgel és nem a manuális, hanem a természeti erőkkel. Elsősorban azokkal a dolgokkal foglal-

* Abban az időben a „természetfilozófia" a természet törvényeinek tanulmányozását jelentette.

kozom, amelyek a gravitációval, a felhajtóerővel (úszással), a rugalmas erőkkel, a folyadékok ellenállásával és más hasonló erőkkel állnak kapcsolatban, legyenek ezek akár vonzó, akár taszító erők. Ezért ezt a munkát a (természet) filozófia matematikai elveinek nevezem. Mert úgy látom, ebben áll a filozófia egész feladata – a mozgás jelenségei alapján vizsgálni a természet erőit, és azután ezekből az erőkből levezetni a többi jelenséget . . .

Célom, . . . hogy a természet jelenségeit . . . mechanikai elvekből vezessük le, mert sok ok miatt feltételezem, hogy valamennyi jelenség bizonyos erőktől függ, amelyek a testek részeit, mostanáig ismeretlen okokból, egymás felé taszítják, úgy hogy azok szabályos alakokban kapcsolódnak egymáshoz; vagy pedig taszítják e részeket, és azok egymástól távoznak. Minthogy ezek az erők ismeretlenek, ezért a természetfilozófusok mostanáig hiába kísérelték meg a természet kutatását; de remélem, hogy az itt lefektetett elvek némi világosságot derítenek a (természet) filozófiának vagy erre, vagy valamely más igazabb módszerére.

Az idézett szavakban Newton a fizikai jelenségek ún. *mechanikai felfogásának* a programját fekteti le. Ez a szempont a jelen század elejéig irányította a fizikát, és mint uralkodó elv csak a relativitáselmélet és a kvantumelmélet hatása alatt szűnt meg. Célja megfogalmazása után Newton hozzáfogott a mechanikai jelenségek matematikai tárgyalásához, olyan világosan, pontosan, hogy azt bármely modern klasszikus mechanikakönyvben változatlanul használni lehet. A Newton-féle *Principia* kezdeti részeit közöljük itt néhány magyarázattal (zárjelben), amelyek megvilágítják a XVII. századi tudományos terminológia mai jelentését.

DEFINÍCIÓK

I. Definíció. Az anyag mértéke a mennyisége (tömege); *ezt a mennyiséget az anyag sűrűsége és terjedelme* (térfogata) *együttesen határozza meg.*

Így kétszer akkora sűrűségű levegő kétszer akkora térben (térfogatban) négyszeres mennyiségű; háromszor akkora térben (térfogatban) hatszoros mennyiségű. Ugyanez érvényes a hóra és a finom porra, amelyeket nyomás vagy folyósítás által sűrítünk, és minden testre, amelyek sűrűsége bármely okból különböző lehet . . . (Mai nyelven: egy adott tárgy tömege a sűrűségének és a térfogatának a szorzata.)

II. Definíció. A mozgás mértéke a mozgás mennyisége; ezt az anyag sebessége és mennyisége együttesen határozza meg. (Mai nyelven: a mozgás mennyisége, melyet rendszerint impulzusnak nevezünk. a mozgó tárgy sebességének és tömegének a szorzata.)

Az egész mozgás az összes részek mozgásának összessége, és ezért kétszeres mennyiségű (kétszeres tömegű) testben ugyanolyan sebesség mellett, a mozgás (impulzus) ugyancsak kétszeres; kétszeres sebesség esetén pedig négyszeres.

III. Definíció. A vis insita, vagyis az anyag veleszületett ereje az ellenállóképessége, melynek következtében minden egyes test, amennyiben magára hagyatik, megtartja nyugalmi állapotát, vagy egyenletes egyenes vonalú mozgását.

Ez az erő mindig arányos azzal a testtel (a test tömegével), amelynek az erejéről van szó, és semmiben sem különbözik a tömeg inaktivitásától, csupán a mi fogalmazásunk más. Egy testet, az anyag tehetetlen természeténél fogva, nem lehet nehézség nélkül nyugalmi vagy mozgási állapotából kimozdítani. Ennélfogva ezt a *vis insita*-t „inertia"-nak (*vis inertiae*) vagy tehetetlenségi erőnek nevezhetjük . . .

IV. Definíció. A külső erő a testre kifejtett hatás, amely megváltoztatja annak nyugalmi vagy egyenes vonalú egyenletes mozgási állapotát.

Ez az erő csak addig van, amíg hat, és nem marad meg a testben, amikor a hatás elmúlt. Ugyanis a test minden újonnan elért (mozgás) állapotát csak a tehetetlenség által tartja meg. A testre ható erők azonban különböző eredetűek lehetnek, származhatnak lökésből, összenyomásból, centripetális erőből.

Newton a *tömeg*, *impulzus*, *tehetetlenség* és az *erő* fogalmának definiálása után a mozgás alaptörvényeinek megfogalmazásával folytatja:

I. törvény. Minden test megmarad nyugalmi állapotában vagy egyenes vonalú egyenletes mozgása állapotában, hacsak külső erő nem kényszeríti ennek az állapotnak az elhagyására. (19a. ábra)

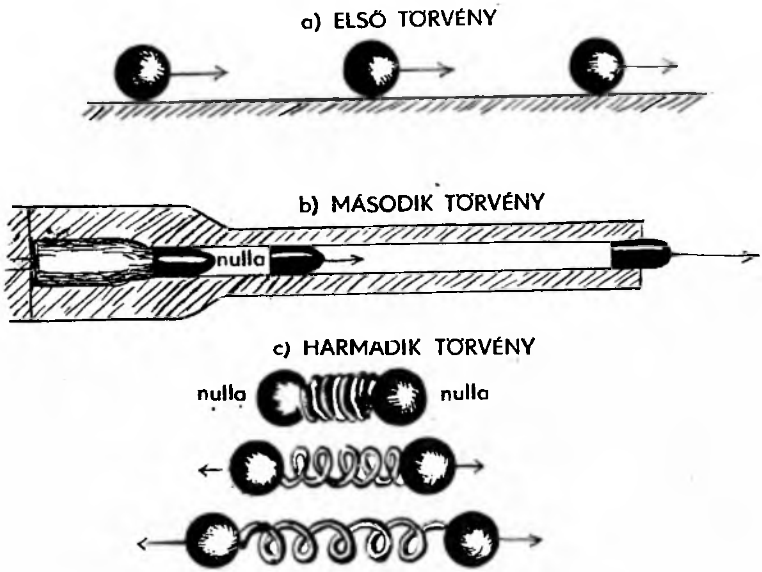
A lövedékek folytatják mozgásukat, ha a levegő ellenállása nem lassítja őket, vagy a gravitációs erő nem vonzza őket lefelé. Egy pörgettyű, amelynek részeit a kohézió állandóan eltéríteni törekszik az egyenes vonalú mozgástól, nem szűnik meg forogni, csak ha a levegő lassítja a mozgást. A nagytömegű bolygók és üstökösök, amelyek a szabad térben kevesebb ellenállásra találnak, sokkal hosszabb ideig tartják meg előrehaladó vagy köralakú mozgásukat.

II. törvény. A mozgás (impulzus) megváltozása arányos a külső mozgató erővel, és mindig annak az egyenes vonalnak az irányában történik, amelyben az erő hat (19b. ábra).

Ha valamilyen erő mozgást hoz létre, akkor kétszer akkora erő kétszeres mozgást, háromszoros erő pedig háromszoros mozgást hoz létre, akár együttesen és egyszerre hatnak a külső erők, akár fokozatosan és egymásra következően. És ez a mozgás (amely mindig ugyanolyan irányú, mint a mozgást létrehozó erő), ha a test már mozgott, hozzáadódik az előző mozgáshoz vagy levonódik belőle, aszerint, hogy ugyanolyan irányú-e, vagy ellenkező irányú; vagy ferdén kapcsolódik hozzá, ha ferdék egymáshoz képest. Így új mozgás jön létre, amely a kettőből tevődik össze.

Newton második törvényét másképp is megfogalmazhatjuk. Minthogy a mozgásmennyiség a mozgó tárgy tömegének és sebességének szorzata, ezért a mozgás változásának nagysága a tömegnek- és a sebességváltozásnak, vagyis a gyorsulásnak szorzatával egyenlő. Ebből az következik, hogy egy tárgy adott erő által előidézett gyorsulása egyenesen arányos ezzel az erővel és fordítva arányos a tárgy tömegével. E törvény alapján bevezethetjük az erő egységét, ez legyen az az erő, amely 1 gramm tömegű tárgyra hatva 1 cm per másodperc · másodperc gyorsulást okoz. Ezt az egységet *din*nek nevezzük. Ez igen csekély erő, körülbelül ekkora erővel húzza a hangya a terhét. A műszaki életben gyakran használnak ennél 10^5-ször nagyobb egységet; ezt *newton*nak nevezik.

Ha valamilyen tárgyra ható erő ezt egy bizonyos távolságra elmozdítja, akkor az erőnek és a távolságnak szorzatát az erő által végzett *munká*nak nevezzük. Ha az erőt din-ben fejezzük



19. ábra.

Newton három törvénye: (a) Vízszintes felületen levő golyó, melyre mozgása irányában nem hat erő, egyenes vonalban mozog állandó sebességgel. (b) A puskacsőben a lőporgázok által taszított lövedék folytonosan növekvő sebességgel mozog. (c) Két golyót egy kettőjük közé helyezett összenyomott rugó egyenlő erővel taszít. Ha a golyók tömege egyenlő, akkor egyenlő sebességgel mozognak ellenkező irányban.

ki, a távolságot pedig centiméterben, akkor a munkát az *erg*nek nevezett egységben kapjuk. Műszaki célokra sokkal nagyobb energiaegység használatos, a *joule,* egy joule 10^7 erg. Bevezethetjük a teljesítményegységet is, ami azt fejezi ki, mennyi az időegységben végzett munka; ezt rendszerint erg/mp-ben mérik, és nincs külön neve. A műszaki életben a *watt*ot használják, ami 1 joule másodpercenként vagy 10^7 erg másodpercenként; továbbá a lóerőt, ami 735 watt, vagy 0,735 kilowatt.

III. törvény. Minden hatással (akcióval) egyenlő nagyságú hatás (reakció) áll szemben: vagy két testnek egymásra gyakorolt kölcsönös hatása mindig egyenlő és ellentétes irányú. (19/c ábra)

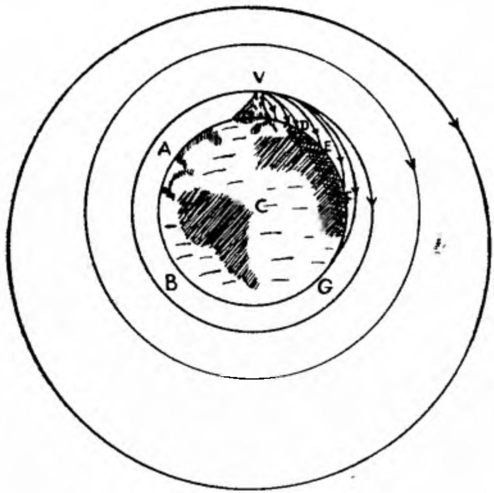
Ha egy tárgy egy másik tárgyat húz vagy nyom, akkor a másik tárgy azt ugyanolyan mértékben húzza vagy nyomja. Ha valaki követ nyom az ujjával, akkor a kő is nyomja az ujját. Ha egy ló kötélre kötött követ húz, akkor a lovat (ha szabad így kifejezni) ugyanúgy húzza vissza a kő; mert a megfeszített kötél, mivel igyekszik magát kiszabadítani vagy lazulni, a lovat ugyanolyan mértékben húzza a kő felé, mint amennyire a követ húzza a ló felé, és ugyanolyan mértékben gátolja az egyiknek haladását, mint amennyire a másikét elősegíti...

Kérdezhetné valaki, miért húzza el mégis a ló a követ és nem a kő a lovat? A válasz természetesen az, hogy ennek a talajhoz történő súrlódás az oka. A négy lópatkó erősebben tapad a talajhoz, mint a kő, amelyet a ló húz, és ha nem így volna, akkor a kő a helyén maradna, és a lópaták siklanának vissza. Ha hengereket teszünk a kő alá, ez csökkenti a súrlódást a talajon, és lényegesen megkönnyíti a lónak a munkáját. Ha nincs súrlódás, ami közelítőleg előfordul egy befagyott tó jégtakaróján, akkor két egymást húzó vagy taszító tárgy mozgása szintén nem egyenlő, kivéve, ha pontosan egyenlő a tömegük, mert adott erő esetén a gyorsulás fordítva arányos a tömeggel. Ha egy sovány ember és egy nagy kövér ember állnak egymással szemben a jégen és taszítják egymást, akkor a sovány sokkal gyorsabban siklik hátrafelé, mint a kövér. Hasonlóképpen egy puska visszalökődésének sebessége sokkal kisebb, mint a (sokkal könnyebb) golyóé, amely kirepül a puskacsőből.

A visszalökődés elvét használják fel a különféle rakéták szerkesztésénél. A rakéta tüzelőanyagának elégéséből származó gázok nagy sebességgel áramlanak visszafelé a csővégződéseken keresztül, aminek következtében a rakéta teste előretaszítódik. A rakéta végsebessége a tüzelőanyag teljes elégése után a rakéta és a tüzelőanyag súlyának arányától függ. Jó hatásfok elérése céljából ezt az arányt a lehető legkisebbé kell tenni. Modern rakétákban az üres rakéta és a tüzelőanyag súlyának az aránya körülbelül olyan, mint egy üres tojáshéjnak és a tojás belső részének a súlyaránya.

Visszatérve azonban Newtonhoz, anélkül, hogy elhagynánk az űrrepülés problémáját, meg kell említenünk, hogy ő volt az első, aki a Föld mesterséges holdjának az ötletét felvetette. A *Principia* harmadik részében a következőket olvashatjuk:

Könnyen megérthetjük, hogy a bolygókat a centrifugális erő meghatározott pályán tartja, ha a lövedékek mozgására gondolunk. Ugyanis az elhajított követ saját súlya mozdítja ki arról az egyenes vonalú pályáról, amelyet a kezdeti dobás miatt követne. Így azonban görbe vonalat ír le a levegőben, és a görbe pályán végül eléri a talajt. Minél nagyobb az elhajítás sebessége, annál messzebbre jut, mielőtt a Földre esik. Ezért elképzelhetjük, hogy a gyorsaság úgy növekszik, hogy 1, 2, 5, 10, 100, 1000 mérföldes ívet ír le, mielőtt a Földre ér, míg végül, elhagyva a Föld határát, az űrbe jut a Föld érintése nélkül. Jelentse *AFB* a Föld felszínét (20. ábra), *C* a középpontját, *VD*, *VE*, *VF* a



20. ábra.
Mesterséges hold pályája, mint a magas hegytől, a kilövés helyétől egyre messzebb és messzebb leeső lövedékek pályáinak határesete.
(Newton *Principiá*jában levő eredeti rajza után)

görbe vonalat, amelyet a test mind nagyobb sebességgel ír le, ha vízszintes irányban hajítják el egy magas hegy tetejéről. Minthogy az égitestek mozgását az űrnek csekély (vagy semmi) ellenállása alig lassítja, ezért hogy a két eset egyenlő feltételek mellett menjen végbe, tételezzük fel, hogy a Föld körül sincs levegő, vagy legalábbis hogy az ellenállása csekély vagy semmi, és hogy a kisebb sebességgel elhajított test a kisebb *VD* ívet, a nagyobb sebességnél a nagyobb *VE* ívet írja le, és a sebesség növelésével mindig messzebb ér, *F*-ig és *G*-ig, ha pedig a sebesség egyre növekednék, akkor végül a Föld kerületét is elhagyja s visszatér a hegyhez, amelyről elhajították.

De ha most elképzeljük, hogy testeket a horizonttal párhuzamos irányban nagyobb magasságból hajítanánk el, mondjuk 5, 10, 100, 1000 és több mérföldnyiről, vagy akár a Föld ugyanannyi félátmérőjének a magasságából, akkor ezek a testek a különböző sebességnek és a különböző magasságokban uralkodó gravitációs erőnek megfelelően vagy a Földdel koncentrikus, vagy különféleképpen excentrikus íveket írnak le, és azután magasan az égben keringenek ezeken a pályákon, ugyanúgy, mint a bolygók a saját pályájukon.

A *Principiá*nak ez a része magában foglalja azt a gondolatot, hogy ugyanaz az erő, a nehézségi erő okozza a kő esését és az égitestek mozgását. Ez a gondolat, állítólag, akkor ötlött fel Newton agyában, amikor egy almát látott egy fáról lehullni.

Sir Isaac egyszer sétálni ment, és éppen
A gravitációs törvény járt a fejében,
Midőn szomszédja, egy paraszt, elébe állt.
S beszélgetésre invitálta, hisz nem árt,
Mondván, ha megpihen kicsit. Az almafákról
Szellő lopott le szirmokat, s e szép virágból
– Véges-végig, amerre csak az út vezet –
Terített a földre hófehér szőnyeget.

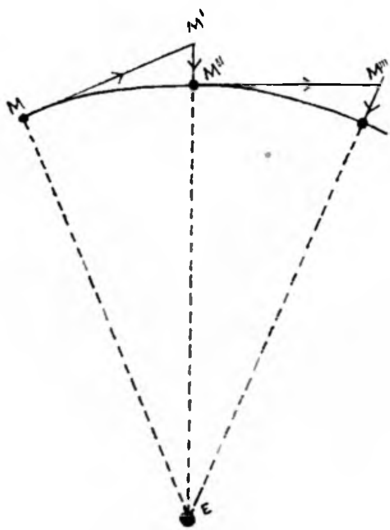
És szólt a paraszt Newtonhoz szerényen:
„Ha meg nem sérteném, már régen
Olyasmit hallottam, hogy holmi hírnevet
Tulajdonítnak Önnek itt az emberek,
Mert megfigyelte, hogyan hullik le az alma.
Jó volna tudni, mi ennek a magva."

„A magva egyszerű; megérti minden ember,
Hogy egyazon erő, amely az *r*-rel,
A távolság négyzetével – a tétel ez –
Fordítottan arányos, és amely a fényes
Öreg Holdunkra is hat, nem kivételez
Az almával sem, kiváltképp, ha férges."

„Ne folytassa, uram – szólott a szomszéd –
Kíváncsi én bizony nem erre volnék.
Az alma engem, higgye el,
Csak egy szempontból érdekel:
Piacra hogy' viszem . . . látom, nem ért,
Szóval, azt mondja meg, mit kér egy fuvarért!"

Newton meg akarta állapítani, hogyan függ a gravitációs erő a Föld középpontjától mért távolságtól. Ezért elhatározta, hogy összehasonlítja a kő (alma) esését a Föld felszínén a Hold mozgásával, amelyet a fentebbi megfontolás alapján szintén véget nem érő esésnek lehet tekinteni. Ily módon Newton össze tudta hasonlítani a Holdra ható „csillagászati" erőt a mindennapi életünkben szereplő tárgyakra ható „földi" erővel.

Az ő elgondolását mutatja, kissé módosított formában a 21. ábra, amelyen a Hold az *E* Föld körül kering, megközelítőleg



21. ábra.

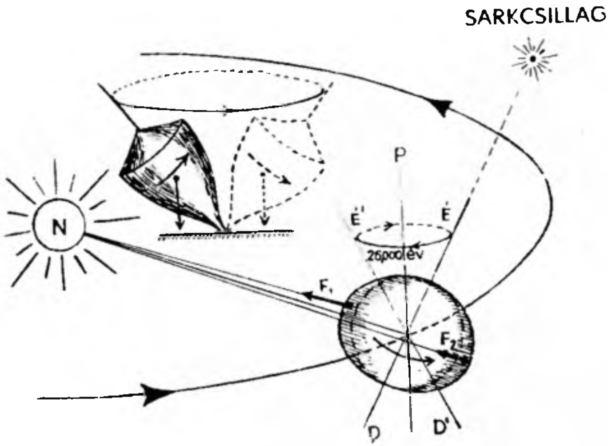
Newton a Hold Föld körüli keringését folytonos esésnek tekintette (v. ö. 20. ábra), és ily módon kiszámította a Holdra ható gravitációs erő által okozott gyorsulást

köralakú pályán. Az *M* helyzetben a Hold meghatározott sebességgel bír, amely merőleges a kör sugarára. Ha nem hatna rá erő akkor a Hold egyenes vonal mentén mozogna és egységnyi idő alatt az *M'* pontig érne. Minthogy azonban az *M''* helyhez ér, ezért az *M'M''* szakaszt a Hold Föld felé irányuló szabadesésében egységnyi idő alatt megtett távolságnak kell tekintenünk. Pithagorász tétele szerint $M'M''=\sqrt{(EM)^2+(MM')^2}-EM$ (mivel $EM''=EM$). Erről algebrai módszerrel ki lehet mutatni, hogy majdnem pontosan egyenlő (mert $MM' \ll EM$-nél) a következő kifejezéssel:

$\frac{(MM')^2}{2EM}$ vagy $\frac{1}{2}\left(\frac{MM'}{EM}\right)^2 \cdot EM$, ahol MM'/EM nyilvánvalóan a Hold Föld körüli keringésének szögsebessége, vagyis a Hold szöghelyzetének változása a pályáján egy másodperc alatt. Mivel a Hold egy hónap alatt egy teljes kört ír le, ezért a szögsebesség 2π osztva a hónap másodpercben kifejezett hosszával. Az eredmény $2{,}66 \cdot 10^{-6}$. A gyorsuló mozgás megbeszélésénél azonban már láttuk, hogy az első másodpercben megtett út a „gyorsulás"-nak nevezett mennyiség felével egyenlő. Ebből az következik, hogy $(MM'/EM)^2 \cdot EM$ fejezi ki azt a gyorsulást, amelynek okozója a Holdat körpályáján tartó erő. Newton a szögsebességre a fenti értéket használta, a Hold távolságát 384 400 km-nek vagyis, $3{,}844 \cdot 10^{10}$ cm-nek vette, és ily módon a gravitáció által a Hold távolságában érvényes gravitációs gyorsulásra a 0,27 cm/sec^2 értéket kapta, ami sokkal kisebb, mint a gravitációs gyorsulás a Föld felszínén (981 cm/sec^2) Azonban igen egyszerű összefüggés áll fenn egyrészt e két mennyiség, másrészt a Hold—Föld távolság és a leeső almának a Föld középpontjától való távolság között. 981 és 0,27 aránya 3640. Ez pontosan egyenlő annak a számnak a négyzetével, amely a holdpálya sugarának és a Föld sugarának arányát fejezi ki. Newton ily módon ahhoz az eredményhez jutott, *hogy a földi gravitációs erő a Föld középpontjától mért távolság négyzetének reciprok értékével csökken.*

Ezt a felfedezést a világegyetemben található minden anyagi testre kiterjesztette, és megfogalmazta az általános tömegvonzás törvényét, amely szerint: *az anyagi testek valamennyien vonzzák egymást, a vonzó erő egyenesen arányos a tömegükkel, fordítva arányos a közöttük levő távolság négyzetével.* E törvényt a bolygók Nap körüli mozgására alkalmazva, matematikailag levezette az előző fejezetben leírt három Kepler-törvényt.

Newton munkáját a XVIII. és XIX. század nagy matematikusai továbbfejlesztették, s így megszületett a csillagászat „égi mechaniká"-nak nevezett nagy ága. Ez lehetővé teszi, hogy nagy pontossággal kiszámítsuk a Naprendszer bolygóinak a kölcsönös gravitációs vonzás által megszabott mozgását. Az égi mechanika egyik legnagyobb diadalát 1846-ban aratta egy új bolygónak, a Neptunusnak a felfedezésével. Ennek létezését U. J. J. *Leverrier* francia és J. C. *Adams* angol csillagász egymástól függetlenül előre megjósolta, és pályáját is kiszámította, abból a zavarból, amelyet az Uranus mozgásában az akkor még ismeretlen bolygó gravitációs vonzása okozott. Hasonló eset történt 1930-ban, amikor a Neptunuson túli, később Plutónak elnevezett bolygót fedezték fel elméleti számítások eredményeképpen. Newton, gravitációs törvényét a Föld mozgására alkalmazva, elsőnek magyarázta meg a Plutarkhosz óta ismert, „napéjegyenlőség precesszió"-jának nevezett jelenséget. Kimu-



22. ábra.

Newton magyarázata a földtengely precessziójára. Minthogy a gravitációs erő a távolsággal csökken, a Nap felé forduló egyenlítői kidudorodásra ható F_1 erő nagyobb, mint a Nappal ellenkező irányú kidudorodásra ható F_2 erő. A kettőnek egyesített hatása a Föld tengelyére „irányítóerőt" igyekszik gyakorolni, vagyis igyekszik merőlegessé tenni a földpálya síkjára. A helyzet hasonló ahhoz, amellyel ferde tengelyű pörgettyűnél, pl. búgócsigánál találkozunk. A gravitációs erő, vagyis a csiga súlya a csiga tengelyét vízszintes helyzetbe törekszik hozni. És ugyanúgy, mint ahogy a forgó csiga nem esik oldalára, amíg pörög, hanem megmarad ferde helyzetében, oly módon, hogy a tengelye kúpfelületet ír le egy függőleges körül, a Föld tengelye sem lesz merőleges a pályára, hanem kúpfelületet ír le eme irány körül tatta, hogy mivel a Föld forgástengelye szöget zár be a pályasíkjával (az ekliptikával), a Nap gravitációs erejének a Föld egyenlítőtáji kidudorodására gyakorolt hatása a földtengely lassú forgását idézi elő az ekliptikára merőleges egyenes körül. Egy teljes fordulat mintegy 26 000 évig tart (22. ábra). Ez a magyarázat erős ellenzést váltott ki az akkori csillagászokból, mert abban az időben azt hitték – hibás mérések alapján –, hogy Földünk alakja nem belapult, tehát nem az egyenlítőnél szélesebb, hanem alakja megnyúlt, és a sarkok közötti távolság nagyobb, mint az egyenlítő átmérője. A kérdés eldöntése céljából P. L. M. *de Maupertuis* francia matematikus expedíciót szervezett a Lappföldre, hogy megmérjék, milyen hosszú a délkör egy foka a Föld északi részén. Itt nemegyszer félelmetes kalandjai voltak a farkascsordákkal. Mérései azt mutatták, hogy Newton felfogása helyes. Voltaire tréfásan a következőt írta neki:

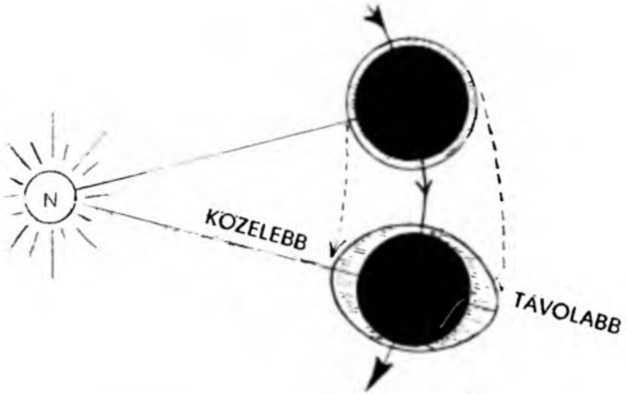
Vous avez confirmé dans les lieux pleins d'ennui
Ce que Newton connut sans sortir de chez lui.*

Hasonló módon magyarázta meg Newton az óceán ár-apályának a jelenségét. Ezt az okozza, hogy a Föld Nap felé eső és az ellentétes oldalon levő félgömbjére nem egyforma nagy gravitációs erő hat. (23. ábra)

Newton *Principiá*jának 626 oldala tele van a szilárd és folyékony testek dinamikájának minden ágára vonatkozó ismeretekkel. Itt azonban már csak egy problémát vizsgálunk meg, mert egyszerű és szórakoztató. Ez a meghatározott kezdősebességgel kilőtt lövedékek valamilyen közegben, pl. levegőben vagy vízben történő mozgására vonatkozik. Milyen messzire jutnak ezek, mielőtt megállnak?

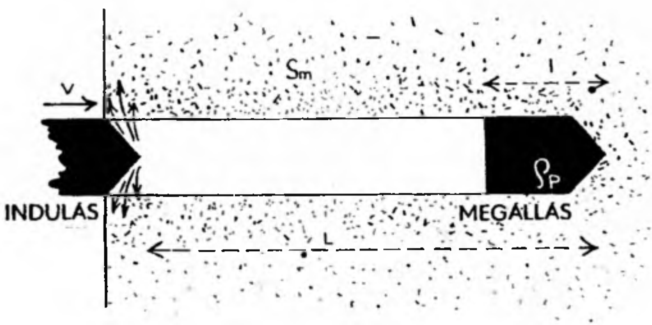
A 24. ábra mutatja vázlatosan a helyzetet. Egy ágyúból kilőtt lövedék levegőben vagy vízben halad. A közegen való áthaladás alatt a löveg nyilvánvalóan oldalra taszítja az anyagot, hogy alagutat fúrjon a továbbhaladáshoz. Nagy sebességnél a súrlódási erők viszonylag csekély jelentőségűek, a lövedék energiaveszteségének nagyobb része annak tulajdonítható, hogy nagy sebességet kell adnia az oldalra taszítandó közegnek. Könnyen beláthatjuk, hogy a közeg oldalra irányuló sebessége nagyjából ugyanakkora, mint az előre haladó lövedéké. Ezért a lövedék megáll, ha az oldalra taszított tömeg ugyanolyan nagyságrendű.

* Ön vért izzadt, hogy felfedezze azt, mit Newton hanyattfekve megismert.



23. ábra.

Newton magyarázata az óceán ár-apályára. A gravitációs erő a Naptól való távolsággal csökken. Ezért a Föld nappali oldalán levő tenger vizére *nagyobb* erő hat, mint a Föld szilárd részére. Hasonlóképpen a Föld éjszakai oldalán levő tengerek vizére *valamivel kisebb* gravitációs erő hat, mint a szilárd rétegre. E különbségek eredményeképpen, a víz felszíne a napos oldalon a tengerfenék fölé magasabbra igyekszik emelkedni, míg az éjszakai oldalon a tenger mélyén levő víz kifelé nyomódik. A két hatás eredménye a két vízkidudorodás képződése, amelyeket a Földnek tengelyforgása miatt mint két ár-apály-hullámot észlelünk, amelyek 24 órás periódussal kerülik meg a Földet.



24. ábra.

Newton elmélete lövedékek közegbe való behatolásáról.

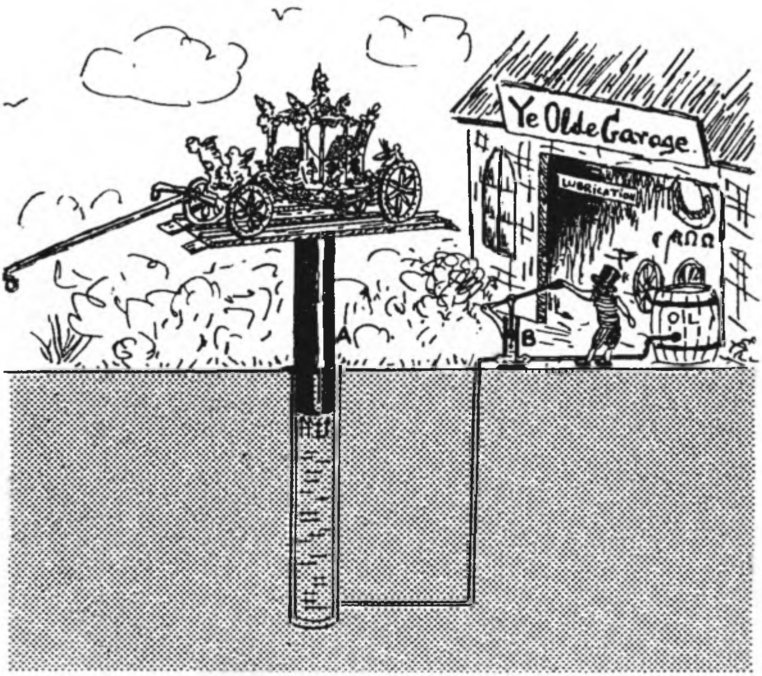
mint a saját tömege. Ebből arra következtetünk, hogy az alagút hossza úgy aránylik a lövedék hosszához, mint a lövedék anyagának sűrűsége a közeg sűrűségéhez.

$$\frac{L}{l} = \frac{\varrho_p}{\varrho_m} \text{ (megközelítőleg)},$$

ami természetesen csak nagy megközelítéssel érvényes. De még így is érdekes eredményhez jutunk. Ha acéllövedéket (amelynek súlya tízszerese a víz súlyának) a levegőbe lövünk (amelynek sűrűsége ezerszer kisebb a vízénél), akkor azt várjuk, hogy a lövedék megáll, ha saját hosszának tízezerszeresét megtette (persze ha nem ér földet, mielőtt ez bekövetkeznék). Így pl. a hadihajók másfél méter hosszú vagy még hosszabb gránátjai 15 kilométert vagy ennél is többet tesznek meg. Másrészt egy pisztoly 1 centiméter hosszú golyója alig tesz meg 100 méternél többet. Vízben, amely csak tízszer olyan sűrű, mint a fém, a golyó energiája nagy részét elveszíti, ha saját hosszának a tízszeresét megtette. A könnyű búvárok ezért hosszú fémnyílakkal vadásznak vízalatti zsákmányukra. Figyelemre méltó, hogy a behatolás hossza nem függ a lövedék kezdősebességétől (feltéve, hogy ez a sebesség elég nagy). Ez hozta zavarba az Egyesült Államok katonai szakértőit, amikor különböző magasságból dobtak le robbanó lövedékeket, hogy mélyen a talajba fúródva robbanjanak fel. A behatolás mélysége nem változott a ledobás magasságának változtatásával (vagyis a talaj elérésének sebességével). A szakemberek csodálkoztak, amíg valaki fel nem világosította őket, utalva Newtonnak a *Principiá*ban olvasható idevágó elméletére.

FOLYADÉKOK STATIKÁJA ÉS DINAMIKÁJA

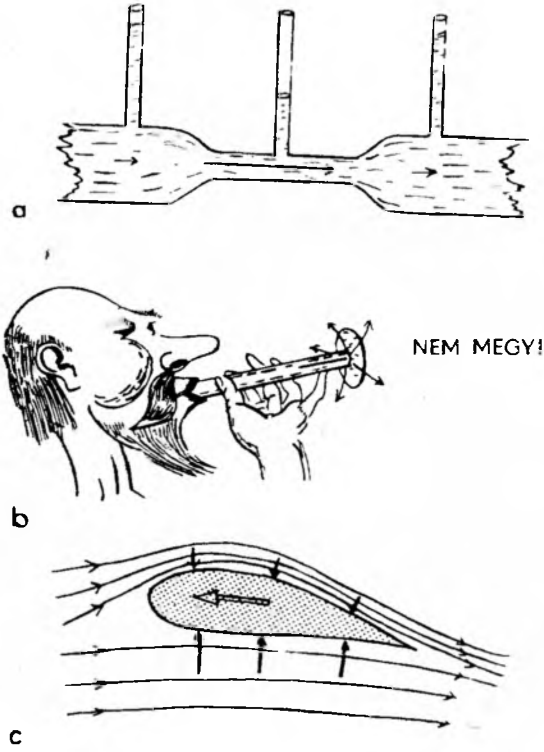
Sir Isaac Newton folyadékok egyensúlyával és mozgásával foglalkozó tanulmányait Blaise *Pascal* francia matematikus egészítette ki, és Daniel *Bernoulli* svájci fizikus folytatta. Pascal tizenkilenc éves volt Newton születésekor, Bernoulli pedig Newton halálakor volt huszonhét éves. Pascal törvénye Arkhimédész törvényével együtt a hidrosztatika alapja. Kimondja, hogy egy zárt edényt kitöltő folyadék vagy gáz egyenlő nyomással hat a tartály minden részére. Pascal elvét többféleképpen lehet alkalmazni hidraulikus eszközök szerkesztésére. Legyen két különböző átmérőjű *A* és *B* hengerünk (25. ábra), amelyeket vékony cső köt össze, és amelyekben mozgatható dugattyúk vannak. A dugattyúra ható teljes erő a szélesebb hengerben annyiszor nagyobb, mint a szűkebb hengerben, ahányszor a dugattyú felü-



25. ábra.
A Pascal-elv szerint nehéz kocsit is felemelhetünk kezünk erejével

lete nagyobb a másik dugattyúénál. Ezért ha a szűk hengerben levő dugattyúra aránylag csekély erőt fejtünk ki, a szélesebb dugattyúra sokkal nagyobb erő hat, olyan nagy, amely súlyos kocsit is fel tud emelni. Ezzel szemben azonban a széles dugattyú elmozdulása ugyanolyan arányban kisebb a szűkebb dugattyú elmozdulásánál.

Bernoulli törvénye, vagy amint gyakran nevezik, Bernoulli elve, különböző átmérőjű csövekben mozgó folyadékokra vonatkozik. Első pillanatban úgy tűnik, hogy ellentmond a józan észnek. Képzeljünk el egy széles vízszintes csövet, amely valahol összeszűkül, és azután ismét szélesebb lesz (26a. ábra). A csövön víz folyik keresztül, a víz nyomását az egyes szakaszokban a kis



26. ábra.

Bernoulli elve. (a) Egyszerű szemléltetés. (b) A fortélyos cső. (c) Hogyan működik a repülőgép szárnya?

függőleges csövekben levő vízoszlopok magassága mutatja. Első pillantásra úgy tűnhet, hogy a nyomás a cső szűk szakaszaiban nagyobb, mert a víznek át kell „nyomulnia" azokon. A közvetlen kísérlet azonban azt mutatja, hogy ennek éppen az ellenkezője következik be: a víz nyomása a szűk szakaszban kisebb, mint a tágabban. Ezt megértjük, ha megfigyeljük hogyan, változik az áramlási sebesség a cső különböző részeiben. A tág részben a víz aránylag lassan mozog, de meggyorsul, ha belép a szűkebb részbe. Hogy a víz mozgása gyorsuljon, ehhez *erőnek* kell hatnia abban az irányban, és az egyetlen erő, amelyre itt gondolhatunk – a tág és a szűk csövek közötti *nyomáskülönbség*. Mivel a víz sebessége növekszik a szűkebb csőbe hatoláskor, ezért az erőnek a folyás irányában kell hatnia, így a nyomásnak a tágabb csőben nagyobbnak kell lennie, mint a szűkebb csőben.

Ezt kipróbálhatjuk anélkül, hogy csőszerelőt hívnánk, csak egy darab üvegcsövet (vagy esetleg cigarettaszipkát), egy kartonkorongot és egy tűt kell szereznünk (26b. ábra). Szúrjuk át a tűt a korong középpontján és helyezzük a csőbe, amint az ábrán látható, úgy hogy a korongot súlya a cső széléhez nyomja. Ha most belefújunk a cső másik végébe, azt várhatnánk, hogy a korongot könnyen el lehet fújni. Próbáljuk meg, és azt látjuk, hogy ez nem így van, és hogy minél erősebben fújunk, annál erősebben nyomódik a korong a cső végéhez. A magyarázatot Bernoulli elve adja. A csőbe fújt levegőnek a cső és a hozzátapadó korong közötti keskeny kör alakú résen át kell távoznia. Ez a rés sokkal szűkebb, mint maga a cső, úgy hogy a levegő nyomása itt kisebb, mint a légköré. Ezért a külső levegő a korongot a cső végéhez szorítja.

A Bernoulli-effektus magyarázza meg a mozgó repülőgép szárnyait tartó erőt is. Amint azt a 26c. ábrán látjuk, a szárny keresztmetszete úgy van kialakítva, hogy az eleje és a vége közötti távolság nagyobb, ha a levegő a szárny fölött mozog, mint alatta. Ebből az következik, hogy a szárny fölött mozgó levegőtömegeknek a sebessége is nagyobb, és Bernoulli elve alapján, nyomása kisebb mint az alatta mozgó levegőé. A két nyomás közötti különbség idézi elő a repülőgép emelkedését.

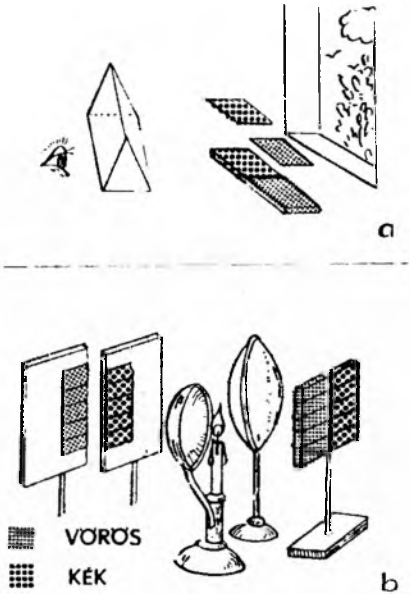
OPTIKA

Most már igazán be kell fejeznünk a newtoni mechanika megbeszélését, hogy maradjon még az optika számára is hely. Ezen a területen Newton fő eredménye a színek tanulmányozása volt, és annak első bizonyítása, hogy a fehér fény a valóságban különböző – a vöröstől az ibolyáig terjedő – színű sugarak keveréke. Newton optikai tanulmányai megelőzték a *Principiá*ban leírt alapvető mechanikai munkáját. 23 éves korában egy üvegprizmát vásárolt, hogy „ezzel tanulmányozza a színjelenségeket", és minden valószínűség szerint alapvető felfedezései az optika terén életének erre a szakaszára esnek. 1692 februárjában azonban égve hagyta a gyertyát a szobájában, amíg a kápolnába ment, és a véletlenül keletkező tűz megsemmisítette iratait, egyebek között optikáról szóló nagy tanulmányát is, amely húsz évi kísérleteinek és kutatásainak eredményét tartalmazta. Ily módon Newton *Optiká*jának első kiadása csak 1704-ben jelent meg. Nem tudhatjuk, hogy ez a késedelem valóban a tűz következménye volt-e, és nem Newton idegenkedése attól, hogy gondolatait közölje, tekintettel Robert *Hooke* makacs szembenállására. Hooke pontosan egy évvel azelőtt halt meg, hogy Newton nyomdába adta *Optika, avagy a fény tükrözésének, törésének, hajlásának és színeinek tanulmányozása* című művét. A könyv elején egyszerű kísérletet ír le, amely bizonyítja, hogy különböző színű fénynek különböző a *törése*.

Ennek bizonyítására vett egy hosszú papírlemezt, amelynek egyik fele vörösre, a másik kékre volt festve. Ezt az ablak közelébe helyezte, és üvegprizmán át nézte (27. ábra). Saját szavai szerint azt „találta, hogy ha a hasáb törőszöge felfelé mutat, úgy hogy az látszik, mintha a papírt a törés felfelé emelné, akkor a kék felét a törés magasabbra emeli, mint a vörös felét. Ha azonban a hasáb törőszögét lefelé fordítjuk, úgy hogy azt látjuk, mintha a törés a papírt lejjebb vitte volna, akkor a kék fele valamivel mélyebbre kerül, mint a vörös fele." E kísérlet alapján megállapította, hogy a prizma a kék fényt erősebben töri, mint a vöröset. Ebből azt következtette, hogy a lencsék, a kék és a vörös sugarakat különböző távolságban gyűjtik fókuszukba. Következtetése bizonyítására vett egy darab papírt, amelynek egyik oldala kékre, a másik vörösre volt festve, és amelyet egy gyertya világított meg („ mert a kísérletet éjjel akarta folytatni") és megkísérelte, hogy erről egy lencsével éles képet kapjon egy papírdarabon (27b. ábra). Hogy a kép élességét megítélhesse, több fekete fonalat feszített a papírra. Amint várta, nem sikerült a színes papír mindkét oldalát egyidejűleg fókuszba állítania. „Lehető pontosan megfigyeltem a helyeket, ahol a színes papír vörös és kék fele a legélesebben jelent meg, és azt találtam, hogy ahol a papír vörös fele élesnek látszott, ott a kék fél elmosódott, úgy hogy a fekete szálakat alig lehetett rajtuk látni; és viszont ahol a kék fél volt a legélesebb, ott a vörös fél volt elmosódott, és a rajta levő fekete vonalakat nem lehetett kivenni."

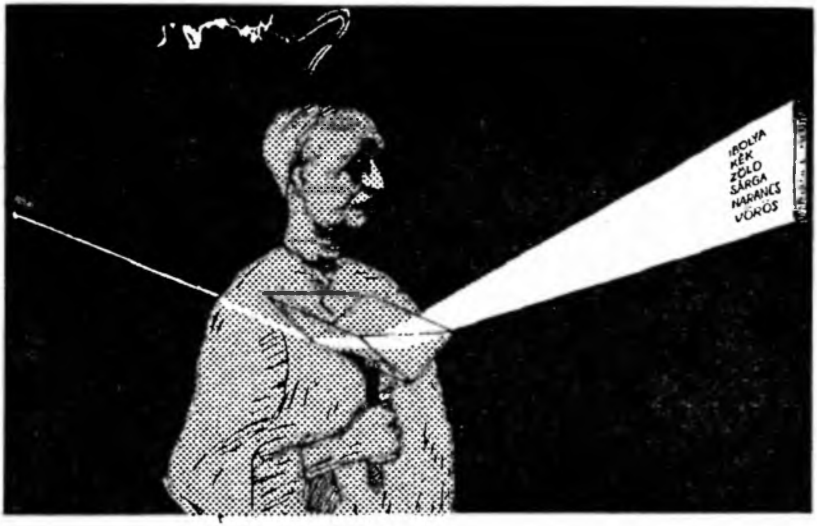
Várakozásának megfelelően a papír kék felének a képe kisebb távolságon látszott élesen, mint a vörös rész képe.

A következő kísérletben azt akarta megtudni, hogy mi történik, ha fehér napfény hatol át a prizmán. Newton egy kis lyukat vágott az ablakfüggönyön, a prizmát a lyukon áthaladó keskeny napfény-nyalábba helyezte, valamivel mögé egy fehér ernyőt



27. ábra.
Newton fénytörési kísérletei

állított. Az ernyőn a Napnak nem kerek (camera obscura által létrehozott) képmása jelent meg, mint a prizma nélkül, hanem egy hosszúkás kép, amelynek felső része halványkék árnyalatú, alsó része pedig gyenge vöröses árnyalatú volt. Ez adta Newtonnak azt az ötletet, hogy a fehér napfény különböző színű sugarakat tartalmazhat: a legerősebben törő kék sugaraktól a leggyengébben törő vörös sugarakig. Ha ez így van, akkor az ernyőn megjelenő hosszúkás képet a Nap különböző színű, egymást fedő képmásai alkotják, és csak a két végén tiszta kék és tiszta vörös. Hogy a Nap képmásainak átfedését megszüntesse, egy lencsét helyezett a fénynyaláb útjába. Ez a függöny kicsiny nyílásának a képmását élesen az ernyőre rajzolja (28. ábra). Ekkor megelégedésére, függőleges sávban ragyogó színeket észlelt: vöröset, narancsot, sárgát, zöldet, kéket és ibolyaszínt, valamint az összes közbeeső árnyalatokat. Ez volt az első „spektroszkóp”,

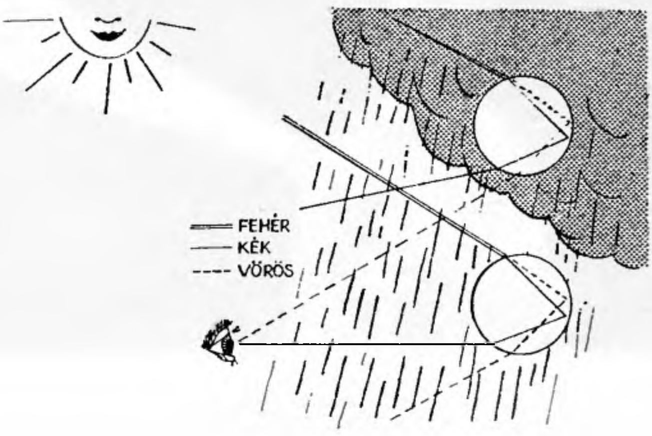


28. ábra.
Sir Isaac Newton bemutatja a fehér fény sok színre történő szétbontását

és az első bizonyítéka annak, hogy a fehér fényt különböző színű sugarak alkotják, amelyek különböző mértékben törnek meg.

A mai olvasó előtt Newton prizma-kísérletei talán gyermekeseknek tűnnek. Valóban minden gyerek könnyen meg tudja azokat ismételni. A helyzet azonban abban az időben egészen más volt. Akkor általánosan hitték, hogy a régi székesegyházak gyönyörű színes üvegablakain áthatoló fehér napfény színeződése valami olyan, mint amikor egy fehér kendőt különböző festékoldatokba mártanak. Manapság tudjuk, hogy az emberi szem recehártyája háromféle színérzékeny idegsejtet tartalmaz, amelyek a vörös, a zöld és a kék fényt érzékelik. Ha a színkép valamennyi színe olyan arányban van jelen, mint a napfényben, amelynek hatása alatt a látás szerve az élő szervezet többszáz millió éves fejlődése alatt kialakult, akkor „rendes", vagyis „fehér" fényt észlelünk.

Newton ama felefedezésének, hogy különböző színű sugaraknak különböző a törése, egyik fontos alkalmazása a Newton-féle szivárványelmélet volt. E gyönyörű színes jelenség akkor tűnik fel az égen, ha az egyik oldalon süt a nap, a másik oldalt pedig nehéz esőfelhők borítják. Newton magyarázata szerint, ebben az esetben a felhőkben vagy a felhők alatt levő parányi cseppek által visszavert napsugarakat látjuk. A 29. ábra – amely eredeti



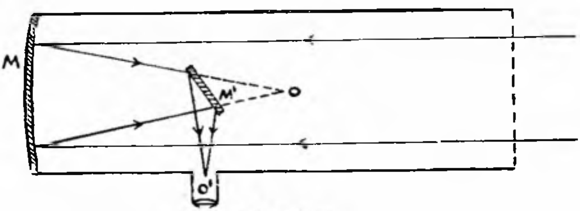
29. ábra.
A szivárvány színeinek magyarázata Newton szerint

Newton-rajz, s az *Optikából* vettük át – mutatja, hogy mi történik. A Napból kiinduló fehér fénysugarak (az ábrán fekete vonalak*) az esőcseppeket érik és megtörnek, amikor áthaladnak

* A fehér sugarakat azért ábrázoljuk fekete vonalakkal, mert a fehér vonalak nem láthatók a fehér papiron. Azonkívül, amint azt később látni fogjuk, a fehér fényt a fizikusok gyakran nevezik „fekete sugárzás"-nak, mert leginkább a fehéren izzó fekete testek (pl szén) bocsátják ki őket.

a cseppeken. Ezt belső visszaverődés követi, majd a második törés a csepp elhagyásakor. Ennek eredményeképpen a különböző színű sugarak a cseppből kilépve legyezőszerűen széttárulnak, és a Földön a Napnak háttal álló megfigyelő szeme különböző színeket érzékel az égbolt különböző irányaiból. A többszörös ívű szivárványok létezését azzal a feltevéssel magyarázza, hogy a fénysugarak egy esőcseppben nem egyszer verődnek vissza, hanem többször. Meg kell említenünk itt az ún. „haló"-t vagy „udvar"-t, e színtelen ívet, amelyet néha a Nap, de különösen a Hold körül figyelhetünk meg. A szivárvánnyal ellentétben ezeket a fénysugaraknak a nagy magasságban levő *cirrus*-felhőket alkotó parányi kristályokról való visszaverődése (és *nem* a törése) okozza.

Newton, miután kimutatta, hogy különböző színű fénynek különböző a törése, tévesen azt következtette, hogy a lencséknek elkerülhetetlen belső hibája akadályozza, hogy a tárgyak éles képét mutassák, mivel a különböző színű sugarakat nem lehet a lencsétől egyenlő távolságban fókuszolni. Ezért azt hitte, hogy a lencsés távcsövek, mint például amilyet Galilei készített, nem tökéletesíthetők tovább, és a színtől független visszaverődésen alapuló teleszkópokat kell csinálni helyettük. 1672-ben tükrös teleszkópot (reflektort) készített, amelyet a 30. ábrán látunk.



30. ábra.
Newton tükrös távcsöve

Ennek *M* parabola alakú tükre az égi tárgyat valamilyen, a cső belsejében levő *O* pontba képezi le. Mielőtt a fénysugarak az *O* pontban egyesülnének, a cső tengelyében elhelyezett kis *M'* tükör a csövön kívül *O'* pontba tükrözi őket. Ott észlelhetjük a képet.

Newton tévedése abból a helytelen felfogásból származott, hogy a különböző átlátszó anyagok egyformán törik az egyes színeket. Csak halála után jöttek rá, hogy ez a feltevés nem helyes és hogy a valóságban a vörös és a kék fényt össze lehet gyűjteni ugyanabba a pontba több különféle üvegből (koronaüveg, flintüveg stb.) készült összetett lencsével. De a tükrös távcsöveknek, amelyekben lencsék helyett parabola alakú tükrök vannak, sok más gyakorlati előnyük van. Jelenleg is a két legnagyobb csillagászati távcső (a 250 cm átmérőjű Wilson-hegyi és az 500 cm átmérőjű Palomar-hegyi távcső) tükrös távcső.

Newton másik megkapó felfedezése, az ún. „Newton-féle gyűrűk". Ezek a sík üveglap és a ráhelyezett konvex lencse érintkezési pontja körül tűnnek fel. Munkáját a következőképpen írja le:

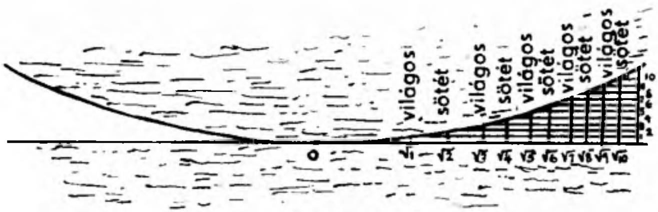
Megfigyelték, hogy átlátszó anyagok, például üveg, víz, levegő stb., ha buborékokká fújva, vagy más módon elvékonyodnak, különböző színeket mutatnak aszerint, hogy milyen vékonyak, annak ellenére, hogy nagyobb vastagság esetén kristálytiszták és színtelenek. E színekkel nem foglalkoztam könyvem előző részeiben, mert úgy láttam, hogy ez nehezebb terület, és nem szükséges a fény ott tárgyalt tulajdonságainak felderítéséhez. Minthogy azonban további felfedezésekhez vezethetne a fény elméletének teljes kialakításánál, különösen a testek ama részeinek szerkezeténél, amelyekről színük és átlátszóságuk függ; az alábbiakban számolok be róluk . . .

Két tárgylencsét vettem, egy 450 cm-es távcsőhöz való sík-konvexet és egy 16 m-es távcsőhöz való nagy, kétszeresen konvex lencsét. A másodikat sík oldalával lefelé fordítva, lassan összenyomtam őket, hogy a színek egymásután tűnjenek fel a körök közepén, majd pedig a felső üveget lassan emelve távolítottam el az alsótól, hogy ugyanazon a helyen egymásután ismét eltűnjenek. Az a szín, amely a lencsék összenyomásánál utolsónak tűnt fel a többi szín közepén, első megjelenésénél színes körnek látszott, amely a kerülettől a középpontig csaknem egyenletes és, ha a lencséket még jobban összenyomtam, folytonosan szélesebb lett mindaddig, amíg új szín tűnt fel a középpontjában. És így tovább, amíg egy harmadik, negyedik, ötödik stb. új szín tűnt fel, és mindegyik gyűrűként vette körül a legbelső színt; az utolsó a fekete volt, és az új színt körülvevő gyűrűvé lett. Ha viszont a felső lencsét emeltem, akkor a gyűrűk átmérője csökkent, és szélességük nőtt, amíg a színek el nem érték a középpontot. Ekkor olyan jelentékeny szélességűek voltak, hogy könnyen fel tudtam őket ismerni és megkülönböztetni. Ily módon megfigyeltem egymásrakövetkezésüket és mennyiségüket, amint azt itt közlöm.

A lencsék érintkezése által keletkezett tiszta középső foltra kék, fehér, sárga és vörös következett. A kék olyan kisterjedelmű volt, hogy a prizma által keletkezett körökben nem tudtam megkülönböztetni, hasonlóképpen ibolyaszínt se, sárga és vörös azonban bőségesen volt látható, és terjedelme ugyanannyi volt mint a fehéré, viszont 4–5-ször annyi, mint a kéké. A színek sorrendjében a legközelebbi, ezeket körülvevő kör ibolyaszínű volt, azután kék, zöld, sárga és vörös; ezek valamennyien élénken és jól látható mennyiségben tűntek fel, kivéve a zöldet, amelyből csak kevés látszott és az is halványabb, elmosódottabb, mint a többi szín. A többi négyből az ibolya fordult elő a legkisebb mennyiségben, és a kékből is kevesebb volt, mint a sárgából vagy vörösből. A harmadik szín bíbor volt, kék, zöld, sárga és vörös; ebben a bíbor szín vörösesebb árnyalatú volt, mint az előző körben az ibolya, a zöld pedig sokkal élénkebb volt, ugyanolyan tisztán kivehető és ugyanolyan terjedelmű, mint a többi színek, kivéve a sárgát, a vörös azonban egy kissé fakóbbá vált, és közeledett a bíborszínhez. Utána következett a negyedik kör, amely zöld és vörös volt. A zöld élénk volt és nagyterjedelmű, egyik oldalon kékbe hajlott, a másik oldalon sárgába. A negyedik körben azonban nem fordult elő ibolyaszín, kék és sárga, a vörös pedig tökéletlen és piszkos volt. A következő színek mindig elmosódottabbak voltak, és három vagy négy körrel kijjeb teljes fehérségben végződtek.

(Az I. melléklet-oldal felső részén monokromatikus, egyetlen hullámhosszat tartalmazó fénnyel létrehozott Newton-gyűrűk fényképét láthatjuk.)

Newton megmérte az első hat gyűrű sugarát (a gyűrűk legfényesebb részénél) és megállapította, hogy négyzeteik a páratlan számokból álló számtani sort alkotnak: 1, 3, 5, 7, 8, 11. A sötét gyűrűk sugarainak négyzetei viszont a páros számokból álló sort alkotnak: 2, 4, 6, 8, 10, 12. A 31. ábra mutatja a viszo-



31. ábra.

A Newton-féle gyűrűk

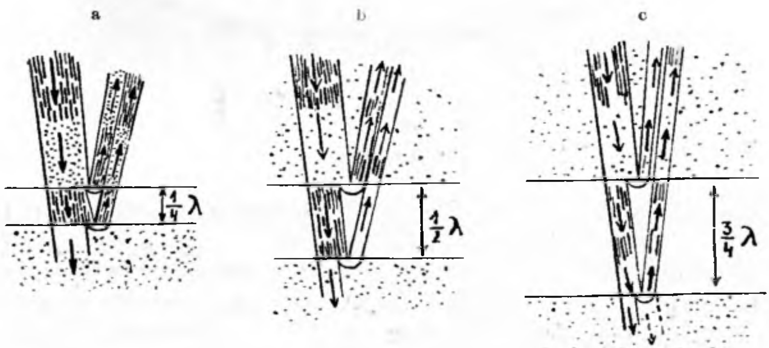
nyokat. A konvex és sík lencse keresztmetszetét látjuk az érintkezési pont közelében. A vízszintes tengelyen az egész számok négyzetgyökének megfelelő távolságok vannak feltüntetve: $\sqrt{1}=1$; $\sqrt{2}=1{,}41$; $\sqrt{3}=1{,}73$; $\sqrt{4}=2$; $\sqrt{5}=2{,}24$ stb. Ezeken a helyeken Newton felváltva fény-maximumot és minimumnt figyelt meg. Az ábrából látjuk, de matematikai úton is bebizonyítható, hogy a két lencse közötti függőleges távolságok egyszerű számtani sornak megfelelően nőnek: 1, 2, 3, 4, 5, 6 stb. A konvex lencse sugarát ismerve, Newton könnyen kiszámította a levegőréteg vastagságát azokon a helyeken, ahol a világos és sötét gyűrűk feltűnnek. A következőket írja:

. . . a függőleges sugarak által alkotott első sötét gyűrű legsötétebb részénél egy inch* $\frac{1}{89\,000}$ része a levegőréteg vastagsága; ennek a vastagságnak a

* 1 inch = 2,54 cm

fele, megszorozva az 1, 3, 5, 7, 9, 11 stb. sorral megadja a levegő vastagságát a világos gyűrűk legfénylőbb részeinél. Ezek a vastagságok 1/178 000, 3/178 000, 5/178 000, 7/178 000 stb., számtani közepük pedig: 2/178 000, 4/178 000, 6/178 000 stb., ez a sötét gyűrűk legsötétebb helyeinél mérhető vastagság.

Newton idézett állításával ellentétben, amely szerint a vékony rétegek szivárványszínei „nem szükségesek a fény tulajdonságainak meghatározásánál", a Newton-féle gyűrűk a fény hullámtermészetének egyik legjobb bizonyítékát szolgáltatták. Ennek helyességét Newton haláláig nem volt hajlandó elismerni. A gyűrűk a két üvegfelület különböző távolságra levő pontjaiból visszavert fénysugarak közti „interferencia" eredményeképpen jönnek létre. Ha keskeny fénynyaláb éri felülről a felső lencse és a két lencse közötti levegőréteg határát, akkor egy része visszaverődik, a többi pedig behatol a levegőbe. További részleges visszaverődés megy végbe, amikor a nyaláb bejut az alsó lencse üvegébe. A két visszavert nyaláb együttesen halad felfelé a megfigyelő szemébe. A 32. ábra mutatja, hogy mi történik ekkor.



32. ábra.
A Newton-féle gyűrűk magyarázata Young szerint

Hogy egyszerűbb legyen rajzolni, a hullámokat a hullámhegyeknek és hullámvölgyeknek megfelelő árnyékolt és fehér szakaszok ábrázolják. Azonkívül a fénynyalábok a rajzon nem pontosan merőlegesek az elválasztó felületre, az átfedés elkerülése céljából. A valóságos megfigyelésnél is ez az eset áll fenn, mert a fényforrás és a megfigyelő feje nem lehetnek ugyanazon az egyenesen. A 32a. ábrán látjuk, mi történik, ha a légréteg vastagsága egyenlő a beeső fény negyed hullámhosszával. (Az ábrán a hullámhossz egy fehér és egy árnyékolt szakasz együttes hossza.) Ebben az esetben az alsó lencse felületéről visszavert hullám a felső lencséről visszavert hullámmal oly módon egyesül, hogy az első hullám csúcsa a másodiknak az aljával esik egybe és viszont. Ha a hullámok intenzitása egyenlő, akkor tökéletesen megsemmisítik egymást, ha nem egyenlő, az intenzitás jelentékeny mértékben csökken. A 32b. ábra azt az esetet mutatja, amikor a levegő vastagsága egyenlő a hullámhossz felével. A két visszavert nyaláb most oly módon terjed, hogy hullámhegy hullámheggyel és hullámvölgy hullámvölggyel találkozik, az intenzitás pedig növekszik. A 32c. ábrán a légréteg vastagsága 3/4 hullámhossz, a helyzet pedig a 32a. ábrán láthatóhoz hasonló. A légréteg vastagságát növelve felváltva fényt és árnyékot kapunk, valahányszor a vastagság 1/4 hullámhosszal növekszik. A Newton-féle elrendezésnél a vastagság az érintkezési ponttól kifelé folyamatosan növekszik. Így váltakozva látunk sötét és világos gyűrűket. Mivel a különböző színű fény hullámhossza különböző, a különböző színű gyűrűk sugarai kissé különböznek, és ugyanúgy mint Newton, szivárványszínű gyűrűket látunk. Ha a levegő vastagságát a fenti Newton-féle ábrából meghatározzuk, akkor azt találjuk, hogy a gyűrűket létrehozó fény hullámhossza 4/178000 inch, azaz $0{,}58 \cdot 10^{-4}$ cm. Amint ma már tudjuk, ez pontosan a sárga fénynek, a látható színkép legfényesebb színének a hullámhossza.

Newton azonban élesen szembenállt a fény hullámelméletével főként azért, mert nem látta be, hogy ez miként magyarázhatná meg a fénysugarak egyenes vonalú terjedését. Ragaszkodott ahhoz a felfogásához, hogy a fény a térben nagy sebességgel száguldó részecskék áramlása. Az interferencia-gyűrűk jelenségének magyarázatára a „könnyű visszaverődéshez és áthatoláshoz való illeszkedés" komplikált elméletét találta ki, amely szerint:

... minden fénysugár törőfelületen való áthaladásakor bizonyos átmeneti állapotba vagy helyzetbe kerül, amely a sugár mozgása folyamán egyenlő közökben visszatér, és amely minden visszatérésekor felruházza a sugarat azzal a tulajdonsággal, hogy könnyen átjusson a törőfelületen, visszatérései között pedig könnyen visszaverődjön a felületen.

A Newton által használt „illeszkedési hossz" fogalma nyilván megfelel annak, amit ma hullámhossznak nevezünk. Ő azt következtette, hogy ez a hosszúság a vörös fény esetében nagyobb, a kéknél kisebb. A következőket írja azonban:

... nem vizsgálom itt, hogy ez milyen hatás vagy hajlam, vajon a sugár körben való vagy rezgő mozgása, vagy hogy a sugárnak, a közegnek vagy valami másnak a mozgása-e.

A fény természetéről szóló vitában Newton opponense Christian *Huygens*, a nála 13 évvel idősebb holland fizikus volt, akinek elmélete később győzött. Huygens 1690-ben megjelent könyve, a *Traité de la lumière* foglalja össze azokat az okokat, amiért Huygens a fényt nem gyorsan mozgó részecskék nyalábjának, hanem az egész világűrt kitöltő közegben terjedő hullámoknak fogta fel. A következőket írta:

A fénysugarak egyenes vonalú terjedéséről

A bizonyítási eljárás az optikában, épp úgy mint valamennyi más tudományban, amelyben a geometriát használják fel, kísérletekből levezetett igazságokon alapul. Így például azon, hogy a fénysugarak egyenes vonalban terjednek, hogy a visszaverődés szöge egyenlő a beesés szögével, és hogy a törés sinus-szabály szerint történik, amely manapság általánosan ismert, és ugyanolyan biztos, mint bármely más törvény.

Akik az optika egyik vagy másik ágáról írtak, azoknak többsége megelégedett azzal, hogy ezeket az igazságokat magától értetődőnek fogadta el. A kutató szelleműek néha igyekeztek e jelenségek eredetét és okát felfedezni, ezeket a természet csodálatos hatásának tekintették. Minthogy azonban kinyilvánított véleményeik, bár igen ötletesek, mégsem olyanok, hogy értelmesebb emberek ne kívánnának további, kielégítőbb magyarázatokat, közlöm itt e tárgyra vonatkozó gondolataimat úgy, hogy legjobb tehetségem szerint hozzájáruljak a természettudomány ama részének megoldásához, amelyet, nem ok nélkül tekintenek az egyik legnehezebb tudományágnak. Elismerem, hogy rendkívül sokat köszönhetek azoknak, akik elsőnek kezdték szétoszlatni az e jelenségeket körülvevő homályt, és akik reményt keltettek, hogy azokat racionálisan meg lehet magyarázni. Másrészt azonban nem kevéssé meglepett, hogy gyakran bebizonyítottnak és eldöntöttnek vettek olyan következtetéseket, amelyek túlságosan felületesek voltak, mert biztos tudomásom szerint senki nem magyarázta meg eddig kielégítően a fény első és legfontosabb tulajdonságát, mégpedig azt, hogy miért terjed szigorúan egyenes vonalban, és hogy a legkülönbözőbb irányból érkező fénysugarak hogy keresztezhetik egymást anélkül, hogy egymás terjedését gátolnák.

Ebben a könyvben ezért a mai természettudomány elveinek megfelelően megkísérlem világosabb és valószínűbb okait adni ezeknek a tulajdonságoknak, először a fény egyenes vonalú terjedésének, másodszor pedig a fény más testekbe ütközésekor bekövetkező visszaverődésének. Azután ama jelenségeket magyarázom meg, amelyek a sugarak különféle átlátszó testeken való áthaladásakor észlelhetők, az úgynevezett fénytörést. Tárgyalni fogom a levegőben végbemenő törés jelenségeit is, amelyek a légkör sűrűségének különbségeiből keletkeznek.

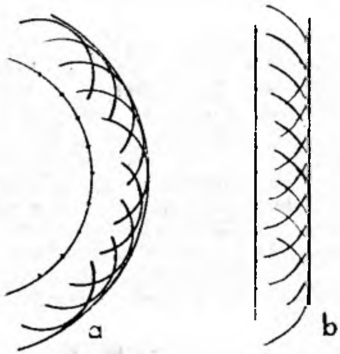
Ezután megvizsgálom egy Izlandból hozott kristály különleges fénytörését. Végül olyan átlátszó és tükröző testek különböző tulajdonságait fogom tárgyalni, amelyek segítségével a sugarak egy pontba gyűlnek össze, vagy különböző módon térnek el irányuktól. Láthatjuk, hogy új elméletünk milyen könnyen elvezet nemcsak az ellipszisekhez, hiperbolákhoz és más görbékhez, amelyekről már Descartes feltételezte, hogy e jelenségek törvényei segítségükkel írhatók le, de azokhoz a más alakzatokhoz is, amelyek akkor képezik a lencse felületét, ha a másik határfelület szférikus, sík vagy bármilyen más alakú . . .

A mostani felfogás szerint biztosnak tartják, hogy a látás érzését egy anyagnak a szemidegre gyakorolt hatása idézi elő. Ez további ok arra, hogy azt higyjük: a fény a köztünk és a világító test között levő anyag mozgásából áll. Ha továbbá figyelembe vesszük és mérlegeljük azt a rendkívüli sebességet, amellyel a fény minden irányban terjed és azt is, hogy különböző és ellenkező irányból érkezve a sugarak egymáson kölcsönösen keresztülhatolnak anélkül, hogy egymást gátolnák, akkor megértjük, hogy mindannyiszor, amikor fényes tárgyat látunk, ez nem tulajdonítható olyan anyag terjedésének, amely a tárgytól jut el hozzánk, mint például ahogy a lövedék vagy egy nyíl repül a levegőn keresztül, mert ez túlságosan ellentmondana a levegő két tulajdonságának és különösen a másodiknak. Ezért tehát más módon kell terjednie, és éppen a hang terjedésétől való ismeretünk vezethet minket ennek a terjedési módnak a megértésére.

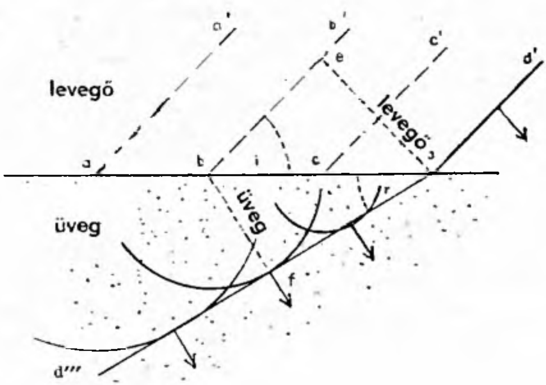
Tudjuk, hogy a levegőn át, amely láthatatlan és tapinthatatlan test, a hang a hangforrást körülvevő egész téren át olyan módon terjed, hogy a mozgás fokozatosan halad egyik levegőrészecskétől a következőig, és mivel e mozgás minden irányban egyenlő sebességgel terjed, gömbfelületet kell képezniök, amelyek mindig tovább haladnak és végül elérik a fülünket. Kétségtelen, hogy a fény is világító testektől jut el hozzánk olyan mozgás révén, amely a közbenső anyagon át történik. Már láttuk, hogy ez nem történhet olyan test helyváltoztatása útján, amely onnan ér el minket. Ha most, amint azt mindjárt megvizsgáljuk, a fénynek időre van szüksége az út megtételéhez, akkor az következik, hogy az anyaggal közölt mozgásnak fokozatosnak kell lennie és a hanghoz hasonlóan gömbfelületben vagy hullámokban kell terjednie. Hullámoknak nevezem, mert nyilvánvaló a hasonlóságuk azzal, ami a vízben képződik, ha követ dobunk bele, és mert lehetővé teszik, hogy körökben történő terjedésüket megfigyeljük, annak ellenére, hogy más ok idézi elő és csak sík felszínen képződnek . . .

Huygens a hullámok terjedését a víz felszínén, a levegőben, vagy a titokzatos „éterben", a fényhullámok hordozójában arra az egyszerű elvre alapította, amely most a nevét viseli. Vegyük most a legmegszokottabb és nyilvánvaló esetet, amikor követ dobunk egy tó mozdulatlan felszínére. Kör alakú hullámokat, vagy helyesebben hullámok sorát látjuk, amely ama pont körül terjed, ahol a kő a felszínt érte. Ha a hullám helyzete egy meghatározott időpontban adva van, hogyan határozhatjuk meg helyzetét rövid idővel később? Huygens elve szerint *a terjedő* *hullám legszélső vonalának minden pontját új hullám vagy hullámocska forrásának tekinthetjük. A hullámfront új helyzete az előző hullámfront pontjaiból kiinduló kis hullámok közös burkolója.* Ezt a gondolatot szemlélteti a 33. ábra a legegyszerűbb esetre, kör- és síkhullám esetére.

A Huygens-elv legragyogóbb alkalmazása a fénytörés 34. ábrán látható magyarázata. Tegyük fel, hogy a síkhullámok



33. ábra.
A hullámterjedés Huygens-féle elve



34. ábra.
A fénytörés magyarázata Huygens szerint

hullámfrontja a felső bal oldalról érkezik a levegő és a víz (vagy két más közeg) határához. Ha ez a hullámfront az *aa'* helyzetben van, és a határfelületet az *a* pontban éri, akkor ebből a pontból egy kis hullám indul el gömbalakban az üveg belsejébe. Ahogy a hullámfront a levegőben tovább halad, más kis hullámok indulnak ki egymásután a *b*, *c* stb. pontokból. A rajz azt a pillanatot ábrázolja, amikor az előrehaladó hullámvonal *dd'* helyzetben van, és a kis hullám az üvegben éppen elindul a *d* pontból. Hogy az üvegbeli hullámfront helyzetét megtaláljuk, az összes kis hullámok burkolóját kell megrajzolnunk. Ez, ebben az esetben egyenes vonal. Ha a fény sebessége az üvegben, amint azt a rajzon feltételezzük, kisebb mint a levegőben, vagyis ha az üvegben terjedő kis gömbhullámok sugarai kisebbek, mint a hullámfront egymásra következő helyzetének távolságai a levegőben, akkor az üvegbeli hullámfront lefelé hajlik, és a megtört sugarak közelebb lesznek a függőleges sugarakhoz, mint a beesőkhöz. Valóban ez történik, amikor a fény átmegy a levegőből az üvegbe. Ha a fény sebessége az üvegben nagyobb volna, mint a levegőben, akkor ennek az ellenkezője következnék be. Az *i* beesési szög és az *r* törési szög* kapcsolatának meghatározásához vizsgáljuk a *bde* és *bdf* közös átfogójú háromszögeket. A sinus definíciója szerint

$$\sin i = \frac{ed}{bd}; \qquad \sin r = \frac{bf}{bd}.$$

Ha az első egyenletet a másodikkal osztjuk, akkor a következő kifejezéseket kapjuk:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{ed}{bf} = \frac{V_{levegő}}{V_{üveg}},$$

ahol $V_{levegő}$ és $V_{üveg}$ a fény sebessége a két közegben. Ez pontosan a Snellius-féle törvény, azzal a kiegészítéssel, hogy a két sinus aránya, amit *törésmutatónak* nevezünk, egyenlő a két közegben fennálló fénysebesség arányával. Ebből az következik, hogy a fény sebessége sűrű közegben (üveg) kisebb, mint ritkább közegben (levegő). Meg kell itt jegyezni, hogy Newton korpuszkuláris fényelmélete pontosan az ellenkező következtetést vonná maga

* A két szöget definiálhatjuk akár úgy, mint a sugarak iránya és a két közeg határára merőleges vonal közötti szögeket, akár pedig mint a hullámfrontok és e határ által képezett szögeket.

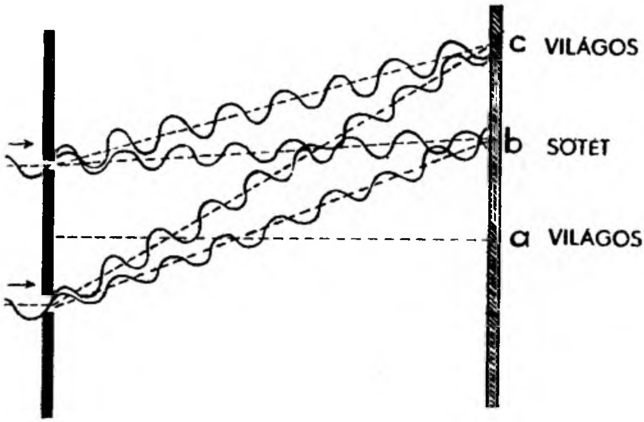
után. A levegőből a vízbe lépő sugarak elhajlásának a korpuszkuláris elmélet alapján történő megmagyarázásához fel kellene tételeznünk, hogy a választófelületre merőlegesen valamilyen erő hat, amely a fényrészecskéket megtöri, amikor ezek a felületen áthaladnak. Ebben az esetben természetesen a sebesség az üvegben nagyobb volna, mint a levegőben.

A FÉNY HULLÁMELMÉLETÉNEK GYŐZELME

A fény Huygens-féle hullámelmélete nyilvánvaló fölényben volt Newton korpuszkuláris elméletével szemben. Mégis hosszú ideig nem részesült az őt megillető elismerésben. Ez részben Newton kortársai előtti nagy tekintélyének tulajdonítható, részben pedig annak, hogy Huygens nem tudta elméletét matematikai pontossággal kiépíteni, ami azt minden támadással szemben sebezhetetlenné tette volna. Ily módon a fény természetének kérdése egy évszázadon át eldöntetlen maradt, mindaddig, amíg 1800-ban Thomas *Young* angol fizikus a *Kísérletek és kutatások a hangról és a fényről* című tanulmánya meg nem jelent. Ebben a tanulmányban Young a Newton-féle gyűrűk jelenségét a fény hullámelmélete alapján magyarázza meg, és leírja saját kísérletét, amely két fénynyaláb interferenciáját elemi módon szemlélteti. E kísérleténél (35. ábra) a sötét szoba ablakát fedő függönybe két lyukat vágott egymás közvetlen közelében. Ha a lyukak aránylag nagyok, a rajtuk keresztülhaladó napfény két fényfoltot képez, egy bizonyos távolságra elhelyezett másik ernyőn. Ha azonban a lyukak igen kicsinyek, akkor a rajtuk keresztülhaladó fénynyaláb, a Huygens-elvnek megfelelően, szétterül, a két folt nagyobb lesz, és részben átfedi egymást. Azon a területen, ahol a lyukakból érkező fény az ernyőt éri, Young szivárványszínű finom sávok sötét közök által elválasztott sorozatát figyelte meg, amelyek Newton gyűrűire hasonlítottak. Ha a lyukak az ernyőn 1 mm-nyi távolságra voltak egymástól, és a másik ernyő 1 m távolságban, akkor a sávok mintegy 0,6 mm szélesek voltak. Ennek a jelenségnek a magyarázata a fényhullámok interferenciáján alapul, ugyanúgy, mint a Newton-gyűrűk ese-

* A két szöget definiálhatjuk akár úgy, mint a sugarak iránya és a két közeg határára merőleges vonal közötti szögeket, akár pedig mint a hullámfrontok és e határ által képezett szögeket.

tében. Az *a* pont, amely az ernyőn pontosan féltávolságra van a két képmás középpontja között, egyenlő távolságban van *O* és *O'* nyílásoktól. A fényhullámok ide „fázisban” érkeznek, vagyis hullámhegy hullámhegyhez és hullámvölgy hullámvölgyhöz ér. A két hullámmozgás összegeződik, és a fény erősödik. Ugyanez érvényes a *c* pontra vonatkozóan, amelynek *O*-tól és *O'*-tól mért



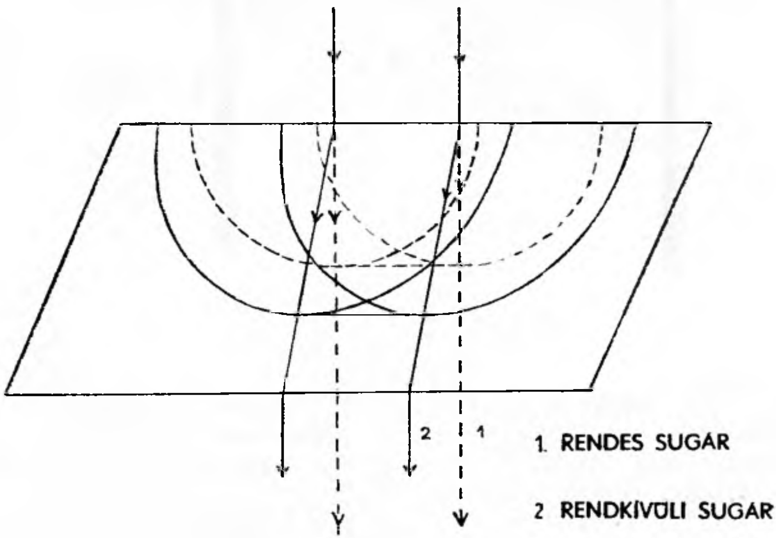
35. ábra.
Young interferencia-kísérlete

távolságai éppen egy hullámhosszal különböznek. Másrészt a *b* pontban amelynél *bO* és *b'O* fél hullámhosszal különbözik, az érkező fényhullámok ellentétes fázisban vannak, a hullámhegyek a hullámvölgyeket fedik. Itt sötét sávot látunk.

Thomas Youngnak és nagy kortársának, Augustin Jean *Fresnel* francia fizikusnak a munkái szilárdan megalapozták a fény hullámelméletét, és így, haláluk után, Huygens maradt felül Newtonnal élethossziglan folytatott vitájában.

AZ IZLANDI KRISTÁLY

Egy másik probléma, amellyel Newton és Huygens is viaskodott anélkül, hogy megoldották volna, a fény polarizációja volt. 1669-ben Erasmus *Bartholinus* dán filozófus felfedezte, hogy az izlandi pátnak nevezett átlátszó ásvány kristályai a rajtuk meghatározott irányban áthaladó fénysugarakat két külön sugárra bontják (Az I. melléklet-oldal alsó része). Ha a kristály a beeső fénysugár iránya körül forog, akkor a két keletkező sugár egyike, amelyet *rendes sugárnak* nevezünk, mozdulatlan marad, míg a másik, a *rendkívüli sugár*, körben mozog a forgó kristállyal együtt. Huygens ezt a jelenséget azzal a feltevéssel magyarázta, hogy az izlandi pát kristályába (és még néhány másik kristályba) belépő fényhullám két hullámra szakad, az egyik ezek közül minden irányban egyenlő sebességgel terjed a kristályon keresztül, a másiknak sebessége pedig a kristálytengelyhez viszonyított iránytól függ. A 36. ábra mutatja Huygens elképzelését afelől,



36. ábra.
A kettős törés magyarázata Huygens szerint

hogy a terjedési sebességeknek ez a különbsége milyen módon okozza két sugár keletkezését. Az elképzelés természetesen a Huygens-elven alapszik. Ha a fénynyaláb merőlegesen esik az izlandi pát felszínére, akkor kétféle kis hullámok keletkeznek, szférikusak és ellipszoidálisak. A szférikus kis hullámok hullámfrontja ugyanabban az irányban halad tovább, mint a beeső hullámfront, míg az ellipszoidális kis hullámok olyan hullámfrontot adnak, amely folytonosan oldalra tolódik el, ilyen módon rendkívüli sugarat képez. Miután a két sugár kilép a kristályból, a levegőben csak szférikus hullámok képződnek, és a két nyaláb párhuzamos lesz. Huygensnek ez a magyarázata tökéletesen helyes volt, mégsem tudta megmagyarázni, miért terjednek a fényhullámok a kristályban két különböző módon. Nem tudhatta, mert úgy képzelte, hogy a rezgések a fényhullámokban a terjedés irányában történnek (longitudinális rezgés), mint a hangnál, amikor nem okoz különbséget, ha a kristály a beeső nyaláb iránya körül forog. Newton viszont, aki nem hitt Huygens hullámaiban, ezt a jelenséget („kettős törést") annak feltevésével igyekezett magyarázni, hogy a rendes és rendkívüli sugarat képező részecskék különbözőképpen helyezkednek el a sugárra merőleges irányban. Optikájának második kiadásában a két sugár közötti különbséget két hosszú rúd közötti különbséggel hasonlítja össze, az egyiknek kör alakú, a másiknak négyszögű a keresztmetszete. Ha az első rudat tengelye körül forgatjuk, akkor nem észlelünk különbséget, ami természetesen nem érvényes a második rúdra. „Minden fénysugárnak", írja Newton, „két szembenlevő oldala van, amelyek a szokatlan törést okozó képességgel rendelkeznek, míg a két másik, szembenlevő oldal nem rendelkezik ezzel a tulajdonsággal."

Newton világosan látta, hogy a fénysugaraknak transzverzális (vagyis a terjedés irányára merőleges) tulajdonságaik vannak, de nem tudta vizuálisan elképzelni, miként lehetséges ez.

Csak sokkal később Étienne *Malus* francia fizikus (1775–1812) és mások munkája eredményeképpen alakítottak ki Huygens és Newton elképzeléseiből egy egyesített felfogást. Nem kétséges, hogy a fény nem más, mint a hullám terjedése a térben, a közeg rezgése azonban nem a terjedés irányában történik, amint azt Huygens gondolta, hanem arra merőlegesen. Az izlandi pátban haladó rendes és rendkívüli sugár közötti különbség abban áll, hogy az első esetben a rezgések a sugarat és a kristály tengelyét értintő síkban történnek, a második esetben pedig arra merőlegesen.

A fény transzverzális természetének felfedezése véget nem érő fejfájást okozott a következő nemzedék fizikusainak. Transzverzális rezgések csak szilárd testekben fordulhatnak elő, amelyek nyírással és hajlással szemben ellenállók. Ez azt jelenti, hogy az éter, a fény hipotetikus hordozója, nem erősen ritkított gáz, mint ahogy Huygens elképzelte, hanem szilárd test. Ha a mindenen áthatoló éter szilárd, akkor hogyan mozoghatnak benne az égitestek, gyakorlatilag minden ellenállás nélkül? És még ha feltételeznénk is, hogy az éter igen könnyű és morzsolható szilárd anyag, az égitestek mozgása ebben az esetben is annyi csatornát fúrna benne, hogy hamarosan elveszítené azt a képességét, hogy a fényhullámokat nagy távolságra szállítsa. Ez a fejfájás generációkon át gyötörte a fizikusokat, míg végül Einstein megszabadította őket tőle, amikor az étert kihajította a fizika-tantermek ablakán.

NEWTON ALKONYA

50 éves korában Newton elhatározta, hogy otthagyja az egyetemi életet, és körülnézett valami több jövedelmet biztosító pozícióért. Felajánlották a londoni Charterhouse* igazgatói állását, de ezt nem tartotta sokra, és az állást elhárította magától.

1696-ban, 54 éves korában kinevezték a londoni pénzverde felügyelőjévé, majd igazgatójává. 1705-ben lovagi rangot kapott, Sir Isaac lett, és sok más kitüntetésben is részesült. Élete utolsó negyedében azonban (1727-ben halt meg 85 éves korában) semmi említésre méltó felfedezést nem tett, ami pedig 25 éves korában úgy áradt belőle, mint a bőség szarujából. Némelyik életrajzírója ezt szenilitásnak tulajdonítja, mások azt mondják, hogy kimerített minden elképzelhető gondolatot, ami az ő idejében felmerülhetett. Akár így, akár úgy, mindenképpen igen sokat alkotott.

* A brit arisztokrácia divatos iskolája.

IV. FEJEZET

A HŐ

A hő jelenségét elsőnek a történelem előtti időben élő barlanglakó tanulmányozta, aki rájött arra, hogyan lehet tűzhelyet építeni, hogy melegben legyen olyankor is, amikor a Nap nem szolgáltat elég meleget. Közvetlen munkatársa, a történelem előtti barlanglakó asszony további fontos felfedezést tett, mégpedig: a különböző ételek, ha egy ideig láng fölött, vagy forró vízben tartjuk őket, jobb ízűek lesznek, és könnyebben emészthetők. A „forró" és „hideg" fogalmak veleszülettek az emberrel, ugyanúgy mint minden élőlénnyel. A környező közeg hőmérsékletét a bőr felszínén levő idegvégződések milliárdjai jegyzik fel, és jelentik az agynak. A hő fiziológiai reakciója azonban megtévesztő is lehet, és a bekötött szemű ember nem tudja megállapítani, hogy a kezét vörösen izzó vas égeti, vagy egy darab száraz jég fagyasztja-e. Mindkét esetben ugyanazt érzi, mert mindkettő a szövet sérülésének fiziológiai reakciója.

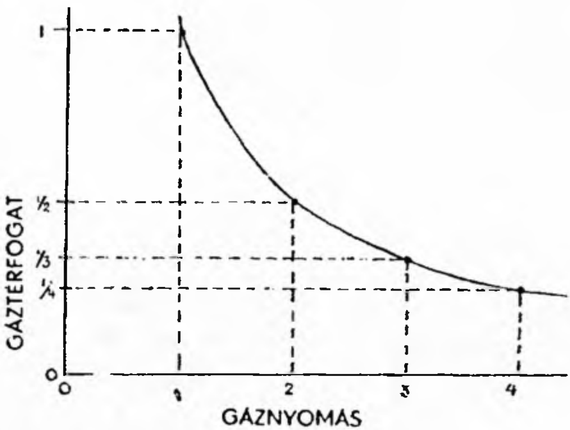
HŐMÉRŐK

A hő mérésére szolgáló első, valóban tudományos műszert Galilei találta fel 1592-ben, aki e célra igen szűknyakú gázpalackot használt. A palackot félig megtöltötte festett vízzel, és fejjel lefelé állította egy ugyancsak színes vízzel töltött edénybe. A hőmérséklet változásával a palackban levő levegő kiterjed vagy összehúzódik, és az üveg nyakában levő vízoszlop lefelé vagy felfelé mozog. Galilei nem vezetett be hőmérsékletskálát, úgy hogy ezt a műszert inkább „termoszkóp"-nak nevezhetnők, mint hőmérőnek, „termométer"-nek. Galilei termoszkópját *Ray* módosította 1631-ben. Ez egyszerűen a megfordított Galilei-palack, amelyben a melegedést és a lehűlést a víz kiterjedése mutatja.

1635-ben Ferdinand, Toscana természettudományok iránt érdeklődő hercege egy hőmérőt készített, amely alkoholt tartalmazott (ez kisebb hőfokon fagy, mint a víz), a cső tetejét elzárta, hogy az alkohol ne párologjon el. Végül 1640-ben az Olasz Akadémia tagjai megalkották a modern hőmérő prototípusát: higanyt alkalmaztak, és részben eltávolították a levegőt a lezárt cső felső részéből. Figyelemre méltó, hogy ez a fejlődés körülbelül fél évszázadig tartott, azzal a néhány évvel szemben, amely az elektromágneses hullámok felfedezése és az első rádió-távíró megszerkesztése, vagy az uránhasadás felfedezése és az első atombomba között eltelt.

A GÁZOK MECHANIKAI TULAJDONSÁGAINAK TÖRVÉNYEI

Amíg Newton Cambridge-ben a fényről és a gravitációról elmélkedett, addig egy másik angol fizikus, Robert *Boyle* Oxfordban a levegő és a többi gáz mechanikai tulajdonságaival és összenyomhatóságával foglalkozott. Miután tudomást szerzett Otto *Guericke* találmányáról, a légszivattyúról, lényegesen meg-



37. ábra.

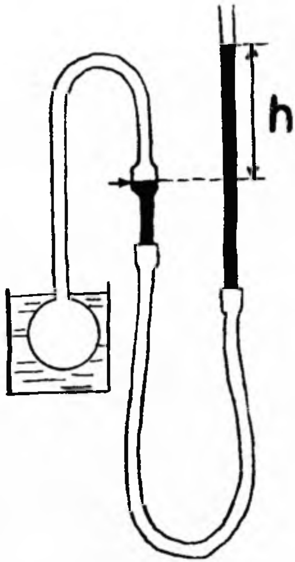
A gáztérfogat és a gáz nyomása közötti fordított arány Boyle-féle törvényének grafikus ábrázolása.

javította ennek szerkezetét, és hozzáfogott egy kísérletsorozathoz, amelyben a levegő térfogatát mérte különböző kis és nagy nyomásokon. A munka eredménye, amint ma nevezzük, a „Boyle-törvény" volt, amely kimondja, hogy *bármely gáz adott mennyiségének térfogata, adott hőmérsékleten fordítva arányos a nyomással, amelynek alávetjük* (37. ábra).

Csaknem egy évszázaddal később Joseph *Gay-Lussac* francia fizikus azt tanulmányozta, hogyan terjednek ki a gázok melegítéskor. Így egy másik fontos törvényt talált, amely szerint egy adott térfogatban levő bármely gáz nyomása eredeti értékének 1/273-ad részével növekszik minden Celsius foknyi hőmérsékletnöveléskor. Ugyanezt a törvényt két évvel hamarabb egy másik francia, Jacques *Charles* is felfedezte, és ezért néha „Charles-törvény"-nek is nevezik.

GÁZHŐMÉRŐ ÉS ABSZOLÚT HŐMÉRSÉKLET

E két törvény aláhúzza a gázok belső szerkezetének egyszerűségét, mert a folyadékok és a szilárd testek összenyomhatósága és hőkiterjedése bonyolultabb törvények szerint megy végbe, és lényegében az anyag összetételétől függ. A gázok magatartását kifejező, a gáz kémiai természetétől független törvények egyszerűsége az oka annak, hogy a Galilei által készített „gáz-termoszkop" sokkal célszerűbb eszköz a hőmérséklet mérésére, mint minden más, később alkotott műszer. A különböző folyadékok, víz, alkohol, higany stb. (és a szilárd testek is, amelyeket szintén fel lehet használni hőmérők szerkesztéséhez) kissé eltérő módon terjednek ki a hőmérséklet emelkedésekor. A víz pl. kiterjedés helyett összehúzódik, amikor hőmérséklete néhány fokkal a fagypont fölé emelkedik. Ha két hőmérőt készítünk más-más folyadékkal, és megjelöljük a folyadékoszlop végét két különböző hőmérsékletnél (mondjuk a víz fagyás- és forráspontjánál), és a két jel közötti távolságot egyenlő részekre osztjuk (a Celsius-skálában 100°-ra), akkor a két hőmérő a két végpont közti helyen valamennyire eltérő értéket fog mutatni. Másrészt viszont, mivel valamennyi gáz pontosan egyformán terjed ki melegítéskor, sokkal alkalmasabbak a hőmérséklet mérésére. Ha gázhőmérőt használunk, mint Galilei, akkor nem kell megmondani, hogy a gáz vajon levegő-e vagy hidrogén, hélium vagy valami más. Modern gázhőmérőt látunk a 38. ábrán. Ez nyomásmérésen alapul, nem a melegített gáz térfogatának a mérésén. Ha a hőmérséklet növekszik, a gáz kiterjed, és a baloldali üvegben lenyomja a higanyt. A jobboldali üvegcsövet felemelve, a gázt eredeti térfogatára nyomhatjuk össze. A hőmérsékletet a két higanynívó közötti h különbségből határozhatjuk meg. Ha a gázhőmérő alapján megalkottuk a hőmérsékletskálát,

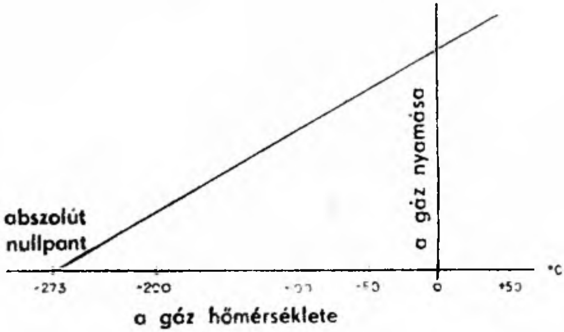


38. ábra.

A gázhőmérő elve. Minél nagyobb a bal oldali tartályban levő folyadék hőmérséklete, annál magasabb kell legyen a higany h szintje a jobb oldali mozgatható csőben ahhoz, hogy a higanyszint a középső csőben állandóan a nyíl által megjelölt helyen maradjon.

akkor ezt alapul véve, elkészíthetjük minden más hőmérő beosztását is. Végezzünk egy kísérletet a gázhőmérővel. A légköri nyomásnál kezdjük (amikor a két higanyoszlop az üvegcsőben egyforma magas). Ha a hőmérséklet 1 C°-kal emelkedik vagy süllyed, mint már említettük, azt találjuk, hogy a gáz nyomása az eredeti érték 1/273-ad részével növekszik, vagy csökken. Ha 0 C°-nál (a víz fagyáspontjánál) kezdjük a kísérletet, és a gázt 273°-kal ez alá hűtjük, akkor azt várjuk, hogy a gáz nyomása

0 legyen, és 0 a térfogata (39. ábra). Azt a pontot, ahol e feltételezés szerint ennek be kellene következnie, *a hőmérséklet abszolút 0 pontjának* nevezik, az ettől a ponttól számított hőmérsékletet *abszolút hőmérsékletnek*, amelyet Kelvin-fokban ($K°$) mérünk ($T_{KELVIN} = 273 + T_{CELSIUS}$). A hűtött gázok természetesen soha-



39. ábra.

Adott térfogatban levő gáz nyomásának a hőmérésklettől való függése. A víz fagypontja alatti 273 C° hőmérsékletnél a gáznyomás 0.

sem zsugorodnak össze térfogat nélküli matematikai ponttá. Kevéssel az abszolút 0 pont elérése előtt folyadékká kondenzálódnak, amelyet nem lehet tovább összenyomni. A hőmérséklet abszolút 0 pontjának mégis fontos szerepe van a hő fizikájában, mint annak a hőmérsékletnek, amelynél a gáz matematikai ponttá zsugorodása bekövetkezne, ha a gázmolekulák mérete végtelen kicsiny volna, és nem lenne a molekulák között vonzóerő. (A „nemesgázok"-nál, a héliumnál, neonnál, argonnál stb. nagyjából fennállnak ezek a feltételek.)

A HŐ-FLUIDUM

Annak ellenére, hogy emberemlékezet óta beszélnek a hőről — talán a déli országokban túl sokat is, az északiakban meg nem eleget —, az első ember, aki a hőről mint fizikai mennyiségről beszélt, olyan valamiről, amelynek a mennyiségét ugyanúgy megmérhetjük, mint a víz vagy a petróleum mennyiségét, valószínűleg James *Black*, a fizika és kémia iránt is érdeklődő skót orvos volt (1728–1799). A hőt valami, általa „calor"-nak nevezett súlytalan folyadéknak, fluidumnak képzelte, amely minden anyagi testbe be tud hatolni, és ezzel a hőmérsékletüket növeli. Egy gallon ($4^1/_2$ liter) forrásban levő vizet kevert egy gallon jeges vízzel és megfigyelte, hogy a keverék hőmérséklete pontosan a középen van a két kezdeti hőmérséklet között. Ezt úgy magyarázta, hogy keveréskor a forró vízben levő „calor" fölös mennyisége megoszlik a két rész között. A hő egységét úgy definiálja, mint azt a mennyiséget, amely 1 font (kb. 0,45 liter) víz hőmérsékletének 1 Fahrenheit fokkal (azaz kb. 0,6 C°-kal) történő növeléséhez szükséges. A mai méter-rendszerben kalóriának nevezzük az egységet, ez az a hőmennyiség, amely 1 gramm víz 1 C°-kal való felmelegítéséhez szükséges. Black arra a következtetésre jutott, hogy ha különböző anyagokból egyenlő mennyiséget ugyanarra a hőmérsékletre hevítünk, akkor azok különböző „calor"-mennyiségeket tartalmaznak. Hiszen például egyenlő súlyú forró víz és hideg higany keverékének hőmérséklete sokkal közelebb van a víz eredeti hőmérsékletéhez, mint a higanyéhoz. Eszerint, folytatta érvelését, ha egy bizonyos mennyiségű vizet 1 °-kal hűtünk, akkor több hő válik szabaddá, mint amennyi ugyanolyan súlyú higany 1 °-kal való hevítéséhez szükséges. Ez vezette a különböző anyagok *hőkapacitásának* a fogalmához. Ez az a hőmennyiség, amely valamely anyag hőmérsékletének 1°-kal való emeléséhez szükséges. A másik fontos fogalom, amelyet Black vezetett be, a *latens* (rejtett) *hő*, vagyis az a hőmennyiség, amely 0 fokos jég 0 fokos vízzé változtatásához, vagy 100 fokos forró víz 100 fokos vízgőzzé változtatásához szükséges. Azt gondolta, hogy ha meghatározott mennyiségű súlytalan hőfluidumot adunk egy darab jéghez, ez fellazítja a jég szerkezetét, folyékonnyá teszi. Hasonló módon, ha forró vízhez további hőt adunk, ez még jobban fellazítja a víz szerkezetét, és gőzzé alakítja azt.

A hő és a folyadékok közötti analógiát továbbfejlesztette egy Sadi *Carnot* nevű fiatal francia (40. ábra), aki 1832-ben halt meg 36 éves korában. A gőzgépben a forró kazánból kiáramló hő alakul mechanikai munkává. Ezt Carnot egy vízikerékkel hasonlította össze, amelyben a magasról lezúduló víz végez munkát. Ez az analógia arra a következtetésre vezette, hogy amint a vízi keréknél annál nagyobb az adott mennyiségű víz által végzett munka, mennél nagyobb a kerék fölötti és alatti vízszintek közötti különbség, ugyanúgy a gőzgépben keletkező mechanikai energiának azzal a hőmérsékletkülönbséggel kell arányosnak lennie, amely a gőzt fejlesztő kazán és a gőzt lecsapó hűtő között fennáll. Ő azonban azt hitte, hogy a vízikerékhez hasonló-

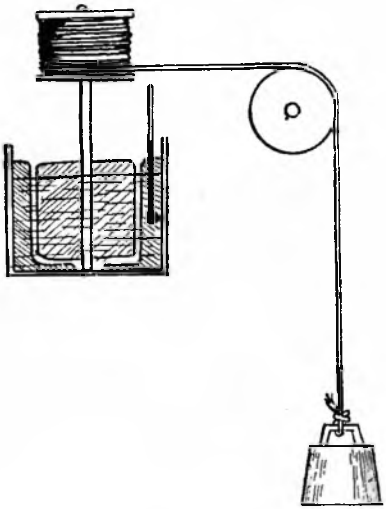
40. ábra.
Ludwig *Boltzmann* (bal oldalt), Sadi *Carnot* (középen) és Josiah *Gibbs* (jobb oldalt), a modern hőelmélet megalapozói.

an, a hűtőbe kerülő hőmennyiség egyenlő a kazánból távozó hőmennyiséggel, és hogy a mechanikai munka úgy keletkezik, hogy egy bizonyos mennyiségű hő a magasabb hőmérsékletű helyről az alacsonyabb hőmérsékletűre „száll" le. Manapság tudjuk, hogy ez a feltevés téves volt. A gőzgép a rajta keresztüláramló hő egy részét mechanikai energiává alakítja, és így a hűtőbe kerülő hő az ily módon átalakított hőmennyiséggel kevesebb.

A HŐ: MOZGÁS

Az a gondolat, hogy a hő az anyagi testek belső mozgása és nem valami különleges anyag, mint azt Black és mások gondolták, először egy hivatásos katonában merült fel, aki azt egy ágyúgyárban végzett kísérleteivel támasztotta alá. Benjamin *Thompson* Massachusettsben született. Ifjú korában részt vett a függetlenségi háborúban. Később átállt az angolokhoz, és hamarosan al-államtitkár lett a gyarmatügyi minisztériumban. Azután Bajorországba ment, itt hadügyminiszter lett, és a Rumford gróf címet kapta a bajor hadsereg újjászervezéséért. Hadi tevékenységei közben is erősen érdekelték a természettudományok, különösen a hő természete. Nem elégítette ki korának felfogása, hogy a hő egy bizonyos fajta anyag, akárcsak a többi kémiai anyag, amely jéggel egyesülve vizet hoz létre (jég + hő = víz), vagy különböző égési folyamatokban szabaddá válik. Kételkedésének oka az volt, hogy a súrlódási folyamatokban, amelyeknek nyilván nincs közük a vegyi átalakulásokhoz, a „semmiből" keletkezik hő. Megfigyelte az ágyúcsövek fúrását a müncheni ágyúgyárban, és elcsodálkozott azon, hogy az öntvény olyan forró lesz, különösen ha tompa fúrót használnak. Arra gondolt, hogy az anyagi testek hőfolyadékot befogadó képessége nagyobb, ha szilárd tömbben vannak, mintha apró részekre vannak töredezve. Ez magyarázná, hogy az ágyú fúrása alatt, amikor nagymennyiségű fémforgács keletkezik, hő válik szabaddá. Gondosan megmérte egy fémtömb és azonos súlyú fémforgácsok hőkapacitását, és úgy találta, hogy ezek pontosan egyeznek. Megkísérelte a felszabaduló hő-fluidum súlyának a megmérését, úgy hogy forró testek súlyát próbálta összehasonlítani hideg súlyokkal. Az eredmény azonban negatív volt. A londoni *Philosophical Transactions*-ban 1799-ben megjelent cikkében közölt adatok szerint 1 kalóriának a súlya nem lehet több 0,000013 mg-nál. Manapság tudjuk, hogy az energia minden fajtájának van súlya, amelyet a híres Einstein-féle összefüggés szerint megkapunk, ha az energiát a fénysebesség négyzetével osztjuk. Egy kalóriának a súlya a valóságban 0,000 000 000 04 mg, ami jóval a mérhetőség határa alatt van. Rumford mindezek alapján arra a következtetésre jutott, hogy a hő nem lehet anyag, hanem valamiféle mozgás kell legyen. A következőket írta: „Mi a hő? Nem lehet anyagi test. Számomra nehezen, vagy egyáltalában nem képzelhető el, hogy a hő más lehessen, mint az, amit e kísérletben (az ágyúfúrásnál) folytonosan vezetünk a fémdarabhoz, amikor a hő keletkezik, vagyis mozgás."

Rumford gróf elképzelését néhány évtizeddel később Julius Robert *Mayer* német orvos fejlesztette tovább, „Megjegyzések az Élettelen Természet Erőiről" című 1842-ben megjelent cikkében. Mayer egy papírgyárban végzett kísérletet, ahol körbejáró ló által hajtott mechanizmus kavart egy nagy üstben levő pépet. Megmérte, mennyivel emelkedik a pép hőmérséklete. Ebből meghatározta a ló ismert nagyságú mechanikai munkája által létrehozott hő mennyiségét. Orvosi tevékenysége túlságosan elfoglalta, és ezért nem végzett további pontosabb kísérleteket. A hő mechanikai egyenértéke pontos megmérésének dicsősége angol férfi, James Prescott *Joule* nevéhez fűződik. Joule a 41. ábrán látható készüléket használta kísérleteiben. Ez vízzel töltött edény; az edényben forgó tengely van, amely több kavaró lapátot mozgat. Az edényben levő vizet terelőlapok akadályozták abban, hogy szabadon együtt forogjon a lapátokkal.



41. ábra.

Joule kísérlete a mechanikai energia hővé alakulására. A leereszkedő súly egy vízzel telt tartályban lapátokat forgat. A víz felmelegszik a belső súrlódás következtében. Joule összehasonlította a leereszkedő súly által végzett munkát a víz hőtartalmának növekedésével, és ily módon kapta meg a hő mechanikai egyenértékét.

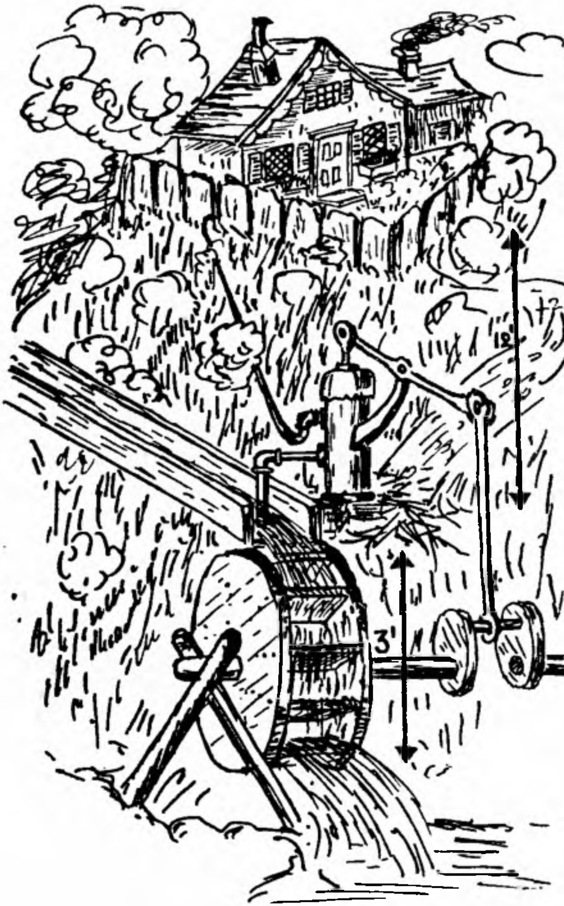
Ezek a belső súrlódást növelő lapok az edény falához voltak erősítve. A lapátokat forgató tengelyt csigán át ráakasztott súly hajtotta. A leereszkedő súly által végzett munka súrlódási hővé alakult át, amelyet a víz vett fel. Joule, minthogy ismerte az edényben levő víz mennyiségét, és megmérte a hőmérséklet emelkedését, ki tudta számítani a keletkező teljes hőmennyiséget. Másrészt a hajtó súlynak és a süllyedési hossznak a szorzata megadta a mechanikai munkát. Joule a kísérletet sokszor megismételte különböző feltételek mellett és megállapította, hogy a végzett munka és a keletkező hő között egyenes arány áll fenn. 1843-ban hozta nyilvánosságra kísérletei eredményét. Egyebek között, a következőket írta: „Egy font* súly által 778 láb* távolságon a víz súrlódása által végzett munka, ha hő létrehozására használódik fel, egy font víz hőmérsékletét egy Fahrenheit fokkal emeli." Ezt a számot használjuk ma is általánosan, akár ebben, akár más egységekben kifejezve, mindannyiszor amikor hőt számítunk át mechanikai energiává vagy fordítva.

TERMODINAMIKA

Amikor a hő és a mechanikai energia azonosságának tétele, amit manapság a termodinamika első föltételének nevezünk, szilárdan meg volt alapozva, elkövetkezett az ideje, hogy kiterjesszék Sadi Carnot egyik energiafajtának a másikká történő átalakulására vonatkozó munkáját. Ebben Rudolf *Clausius* német és lord *Kelvin* angol fizikus volt az úttörő, a múlt század második felében. A mindennapi tapasztalatból tudjuk, hogy a hő mindig a melegebb testekből áramlik a hidegebbe, és sohasem fordítva. Tudjuk azt is, hogy a mechanikai energia teljes egészében hővé alakulhat át, például súrlódás által, viszont a hő teljes egészében mechanikai energiává való átalakulása fizikai lehetetlenség. Mint már Sadi Carnot felismerte, mechanikai munka létrehozása mindig egy bizonyos mennyiségű hő melegebb helyről hidegebb helyre áramlásával van egybekötve. Carnot (tévesen) azt hitte, hogy a hő érintetlenül kerül a kazánból a hűtőbe. A termodinamika első főtétele azonban azt mondja, hogy egy része elvész, és egyenértéke a gép által végzett mechanikai munkaként jelenik meg. A helyzet hasonló egy dombon levő

* 1 font = 0,45 kg; 1 láb = 31,38 cm.

házhoz, amely egy lent futó patakból meríti vízkészletét. A ház lakói nem villanymotorral, hanem vízi kerékkel hajtott szivatytyút használnak, amelyet ugyanaz a patak mozgat (lásd 42. ábrát). A patak vizének egy része lefelé zuhan, és a kereket for-



42. ábra.

Hőerőgépnek hidrodinamikai analógiája. A berendezés egy olyan gépet modellez, amely a nagyobb hőmérsékletű helyről alacsonyabb hőmérsékletű helyre áramló hő egy részét mechanikai energiává alakítja át.

gatja, a másik részt a szivattyú felszállítja a házba. Világos, hogy nem lehet a patak teljes vízhozamát felszivattyúzni, mert akkor nem lesz víz a szivattyú üzembentartásához. A zuhanó víz által végzett munka, ugyanúgy, mint ami a víz emeléséhez szükséges, egyenlő a víz mennyiségének és a magasságnak a szorzatával. A legkedvezőbb, amit tehetünk, a dolgot úgy rendezni, hogy a patakban maradó vízmennyiség éppen elegendő legyen a többi víznek a házba történő szivattyúzásához. Ha például a part magassága 3 méter, a ház pedig 12 méterrel van a szivattyú fölött, akkor a következő kifejezést írhatjuk fel, amelyben x a víznek a házba szivattyúzott részét jelenti:

$$12x = 3(1-x),$$

amiből

$$x = \frac{3}{12+3} = \frac{1}{5}.$$

Eszerint az ilyen berendezés a víznek legfeljebb 1/5-ét tudja a házba szivattyúzni. Amint később látjuk majd, ha a hő oly módon áramlik a forró helyről a hidegre, hogy részben mechanikai energiává változik, a hőnek azt a töredékét, amely munkává alakul mutatja a következő kifejezés

$$\frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

ahol T_1 és T_2 a kazán, illetve a hűtő abszolút hőmérséklete. A kazán hőmérséklete 100 C°, vagyis 373 K°, és ha a hűtőt (kondenzátort) jéggel hűtjük, akkor a hőmérséklete 0 C°, vagyis 273 K°. A gőzgép legnagyobb hatásfoka ennélfogva 100/373 = = 26 %. A valóságban a gőzgép hatásfoka, hőveszteségek és egyéb gyakorlati okok miatt, még alacsonyabb.

Azt a megállapítást, hogy *hőt nem lehet mechanikai energiává átalakítani anélkül, hogy hő ne „szállna" le a forróbb helyről a hidegebbre*, a „termodinamika második főtételének" nevezzük. Ez egyenlő értelmű azzal az állítással, hogy a *hő nem áramlik magától hidegebb helyről melegebbre*. Valóban, ha a hőt rávehetnénk arra, hogy magától áramoljék a hűtőből a kazánba, akkor hő-circulus-vitiosusunk volna, és a gőzgépek tüzelő nélkül működnének. A mechanikában a magától fölfelé áramló víz volna ehhez hasonló, amely azután lefelé folyna a vízimalom kerekére.

A termodinamika matematikai tárgyalásába bevezetik az „entrópia" fogalmát, amelyet rendszerint S-sel jelölnek. Ennek a definíciója: a test által felvett vagy elveszített hőmennyiség, osztva a test (abszolút) hőmérsékletével. Az entrópia fogalmának felhasználásával újra fogalmazhatjuk a termodinamika fentemlített második főtételét, olyan formán, hogy egy *„izolált rendszer"* entrópiája (vagyis egy olyan rendszer entrópiája, amely nem áll termikus vagy mechanikai kölcsönhatásban a környezettel) *csak növekedhet vagy állandó maradhat.* Ha jégkockát teszünk egy pohár meleg vízbe, akkor a hő a jégből a vízbe áramolhatna, lehűtve a jégkockát 0° alá, és felmelegítve a vizet forráspontig. A termodinamika második főtétele szerint, ez nem következik be, mert akkor a jégkocka-víz-rendszer entrópiája csökkenne.

Legyen ugyanis T_1 a meleg víz, T_2 a jégkocka hőmérséklete, vagyis $T_1 > T_2$. Tegyük fel, hogy egy bizonyos hőmennyiség, Q spontán átáramlik a jégkockából az őt körülvevő meleg vízbe. A víz $+Q$ hőmennyiséget vesz fel, entrópiájának megváltozása pedig $\Delta S_1 = +\frac{Q}{T_1}$. A jégkocka által felvett hőmennyiség $-Q$, mert a jég hőt veszít, és így a jégkocka entrópiájának megváltozása $\Delta S_2 = -\frac{Q}{T_2}$. A víz-jég-rendszer entrópiájának teljes megváltozása $\Delta S_1 + \Delta S_2 = \frac{Q}{T_1} - \frac{Q}{T_2} = Q\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)$. Mivel $T_1 > T_2$, az következik, hogy $\frac{1}{T_1} < \frac{1}{T_2}$, és ezért a zárjelben levő kifejezés negatív. Így a hőnek a jégkockából a vízbe áramlása az entrópia csökkentését jelentené, ami ellentmond a termodinamika második főtételének. Ha azonban a meleg vízből áramlik a hő a jégbe, akkor az előjelek megváltoznak, az entrópia megváltozása pozitív, és a folyamat megfelel a termodinamika szabályainak. Ez az érvelés természetesen csak „izolált" rendszerekre érvényes, vagyis olyan rendszerekre, amelyekbe nem jut be kívülről energia. Hűtőszekrénynél vagy levegőkondicionálónál a hőt a jégtartályból vagy a szobából átszivattyúzzuk a külső melegebb levegőbe. Ebben az esetben azonban az entrópia csökkenését a motort hajtó elektromos áram munkája egyenlíti ki.

A növekvő entrópia törvénye lehetővé teszi számunkra azt is, hogy egyszerű módon levezessük a hőgép hatásfokának a 106. oldalon említett kifejezését. Legyen a kazán és a hűtő hőmérséklete T_1 és T_2, és tegyük fel, hogy a kazánból Q_1 mennyiségű hőt elveszünk. A hűtőbe valamilyen kisebb Q_2 hőmennyiség jut el, a Q_1-Q_2 különbség mechanikai energiává alakul. Így a kazán entrópiája $\frac{Q_1}{T_1}$ mennyiséggel csökken, a hűtőé pedig $\frac{Q_2}{T_2}$-vel növekszik. Mivel a hűtő entrópianövekedésének nagyobbnak vagy legalábbis egyenlőnek kell lennie a kazán entrópiacsökkenésével, vetkező kifejezést írhatjuk fel:

$$\frac{Q_1}{T_1} \leq \frac{Q_2}{T_2}.$$

Ebből az következik, hogy

$$\frac{Q_1}{Q_2} \leq \frac{T_1}{T_2}, \text{ vagy } \frac{Q_2}{Q_1} \geq \frac{T_2}{T_1}.$$

Egyszerű algebrai átalakítással a fenti kifejezést a következőképpen is írhatjuk:

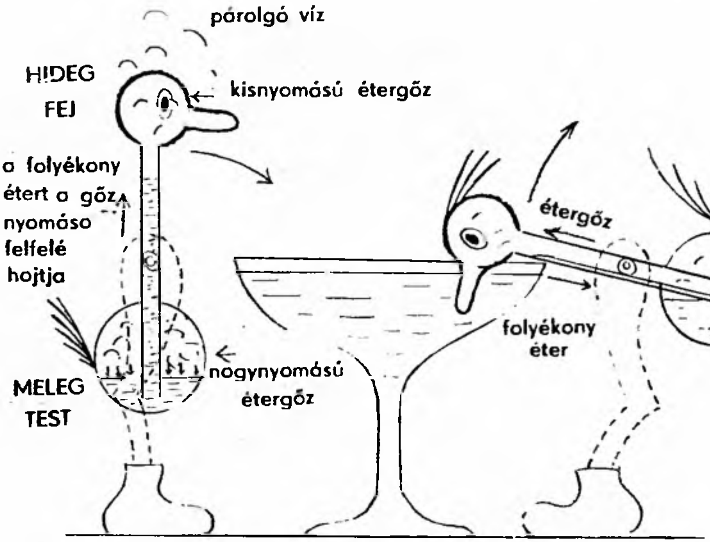
$$\frac{Q_1-Q_2}{Q_1} \leq \frac{T_1-T_2}{T_1},$$

ami azonos az említett képlettel.

VÍZSZIPPANTÓ MADARAK

A hőgép elvén alapuló ötletes játék a japán vízszippantó madár (43. ábra). Ez légritkított üvegtartály, amely hosszú csővel összekötött két gömbből áll. A tartályban egy kevés éter van, amely szobahőmérsékleten gyorsan elpárolog. Az eredetileg a test gömbjét betöltő étergőz a fej gömbjébe száll. Ez hűtő, mert az őt borító higroszkopikus réteg állandóan nedvesen tartja. A lecsapódó éter a fej-gömb alsó részén gyűlik össze. Nem folyhat le, mert a cső a gömb közepéig ér. Ha elegendő éter halmozódott fel, a fej nehezebb lesz, mint a test, és a madár a tengely csuklóján csaknem vízszintes helyzetbe lendül. Így az éter vissza tud csurogni a test-gömbbe. Ekkor a madár újra felegyenesedik. Valahányszor a madár lehajol, az orra a vízbe merül, ami a fejét állandóan hidegen tartja.

Ha a pohárba víz helyett vodkát, vagy ami még jobb, tiszta alkoholt töltünk, akkor a fej hűtése erősebb lesz, és a madár gyorsabban fog mozogni. Ha viszont a madarat üvegburával fedjük be, akkor a levegő belül gyorsan telítődik vízzel, és a mozgás megszűnik. A madarak rosszabbul működnek, ha a lég-



43. ábra.
Vizet szippantó japán madarak.

kör nagyon nedves. A szerző egyáltalában nem volt képes őket mozgásba hozni egy erősen párás napon Washingtonban.

Ezzel a víz párolgásán alapuló játékkal kapcsolatban érdekes fizikai kérdést vethetünk fel. Ha fogaskerékszerkezetet kapcsolunk a tengelyhez, amely körül a madár leng, akkor bizonyos mennyiségű mechanikai energiát nyerünk. Ezzel szivattyút működtethetünk, amely a tengerből vizet szivattyúzhat az üvegpohárba. Milyen magasra helyezhetjük a madarat a tenger színe fölé, hogy az még működjék? Hőgépnek tekinthetjük, amelyben a hő a madár melegebb testéből a hidegebb fejbe áramlik, és részben mozgási energiává alakul. A víz latens hője (a madár hideg fejéből történő) elpárolgáskor 539 cal/g, ami $2{\cdot}27{\cdot}10^{10}$ erg mechanikai energiával egyenlő. Ez egyúttal az a hőmennyiség, ami a meleg levegőből a madár testébe áramlik, amikor 1 g víz elpárolog a fejéből (mert a madár testében nem halmozódik fel és nem vész el a hő). A hőerőgép hatásfoka a hőnek mechanikai energiává történő átalakításánál $\frac{T_1-T_2}{T_1}$. A mi esetünkben T_1 és T_2 300 K° (szobahőrméséklet) körül van, a T_1-T_2 különbség csupán néhány fok. Ha ezt a különbséget, mondjuk, 3 C°-nek vesszük, akkor azt látjuk, hogy a hatásfok kb. 1%. Úgy hogy 1 gramm víz elpárolgása a madár fejéből kb. $2{\cdot}10^8$ erg-et hoz létre. Ahhoz, hogy 1 grammot 1 cm magasra emeljünk, a gravitációs gyorsulással egyenlő munkát kell kifejtenünk, amelynek értéke kb. 1000 (pontosan 981) $\frac{\text{cm}}{\text{sec}^2}$. Tehát a madár fejéből elpárolgó 1 g víz annyi mechanikai munkát eredményez, amennyi ennek pótlására egy másik gramm vizet $2{\cdot}10^5$ cm vagyis 2 km magasságra tud felhozni a tengerből a tengerszint fölé. A fenti számítások természetesen egészen durvák, és különféle energiaveszteségek lényegesen csökkentik ezt a számot. Annyi azonban bizonyos, hogy a szippantómadarak még nagy magasságból is tudnak vizet inni a tengerből.

ELSŐ ÉS MÁSODFAJÚ ÖRÖKMOZGÓK

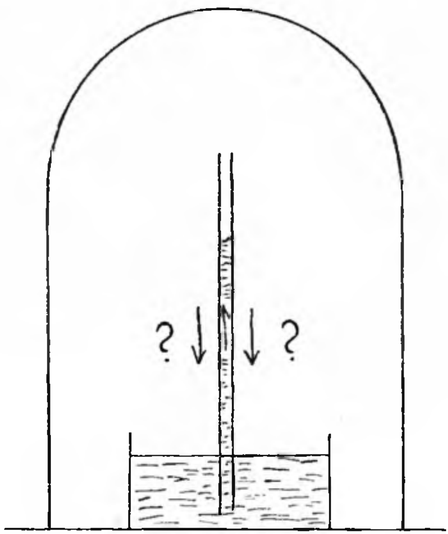
Régebben az emberek olyan gépekről álmodoztak, amelyek végnélkül mozognak tüzelőanyag vagy bármely külső energia nélkül. A II. fejezetben ismertetett Stevinus-féle végtelen lánc gyakran szerepelt az ilyen tervekben, mielőtt az említett Stevinus kimutatta volna, hogy ezt nem használhatja senki, ha a mechanikai egyensúly törvényeit korrektül alkalmazza a lejtőre.

Az első fajú örökmozgó a termodinamika első törvényével, vagyis az energia megmaradása elvével áll ellentétben. El lehet azonban képzelni olyan örökmozgót is, amely a termodinamika második törvényébe ütközik. Ezt nevezik másodfajú örökmozgónak. Ha a hő 100%-át mechanikai energiává tudnánk alakítani, akkor a mechanikai gépek magasan fölötte állnának az összes eddig hirdetett atomenergiaterveknek. Óceánjáró hajókat tudnánk építeni, amelyek beszívnák a tengervizet, kivonnák belőle a hőt gépeik mozgatására, és a fennmaradó jégtömböket bedobnák a tengerbe. Gépkocsikat és repülőgépeket tudnánk építeni, amelyek levegőt szívnának be, ennek hőjét hajtóerővé alakítanák, és jéghideg sugarat fújnának ki kipuffogóikból. Tudnánk még . . .

Mindeme csodálatos lehetőségeket azonban megakadályozza a termodinamika második törvénye, az állandóan növekvő entrópia törvénye.

TERMODINAMIKAI ÉRVELÉSEK

Ha elfogadjuk a termodinamika törvényeit, akkor felhasználhatjuk őket különböző fizikai jelenségek vizsgálatára és ezekkel kapcsolatos állítások bizonyítására. Vegyünk például egy vízzel telt edényt, amelyből kapilláris nyúlik ki függőlegesen a víz színe fölé (44. ábra). Fedjük be üvegburával és szivattyúzzuk ki



44. ábra.

Példa termodinamikai érvelésre. Ha a hajszálcső konkáv meniszkusza fölött ugyanakkora volna a gőznyomás, mint az edényben levő víz sík felszine fölött, akkor a víz a nyilakkal jelölt irányban örökös mozgásban volna a levegőt, hogy a rendszert a környezettől elszigeteljük. Tudjuk, hogy a víz a hajszálcsőben felemelkedik és homorú (konkáv) meniszkuszt képez. Most feltesszük a kérdést, mi történik ezután. Mindenekelőtt az edényben levő víz egy része vízgőzzé változik, és betölti az üvegtartályt. A nehézkedési erő következtében a gőz sűrűsége és nyomása az edény alján nagyobb, a tetején kisebb, ugyanúgy mint a légkörben. Tudjuk, hogy minden hőmérséklethez meghatározott gőznyomás tartozik, amelyen a gőz a folyadékkal „egyensúlyban" van. Ha a gőz nyomása túl nagy, akkor egy része lecsapódik; ha túl kicsi, akkor a folyadék egy része elpárolog és további gőzt képez. Termodinamikai érveléssel fogjuk most bebizonyítani, hogy a hajszálcsőbeli konkáv folyadékfelszín fölött kisebb a gőznyomás, mint a lapos felszín fölött. Tegyük fel, hogy ez az állítás helytelen, és a gőznyomás független a folyadék görbületétől. Mi történik ilyenkor? Minthogy a gravitáció következtében a gőznyomás a magasabban levő meniszkusz felszínén kisebb, mint az edényben levő víz felszínén, a hajszálcsőben elpárolog a víz, és lecsapódik az edényben. Ez vízáramlást okoz felfelé, és ez a mozgás végnélkül folytatódnék. Vízimalom-szerkezetet helyezhetnénk a hajszálcsőbe és ezt a készüléket végnélkül működtethetnők, a termodinamika második törvényével ellentétben. Minthogy e törvény alól nincs kivétel, azt kell következtetnünk, *hogy a gőznyomás a konkáv folyadékfelszín fölött kisebb, mint a lapos felszín fölött*. Hasonlóképpen (ha viasszal bevont hajszálcsövet veszünk, amiben a meniszkusz a tálban levő víz felszíne alatt van és konvex), azt következtethetjük, hogy *a gőznyomás a konvex folyadékfelszín fölött nagyobb, mint a lapos felszín fölött*. Minél szűkebb a hajszálcső, annál nagyobb a magasságok közötti különbség, és ezért annál nagyobb a gőznyomás változása. A felületi feszültség állandójának (ami a hajszálcsőbeli vízoszlop magasságát határozza meg) és a vízgőz sűrűségének (ami az edény szintje és a hajszálcső szintje közötti nyomáskülönbséget határozza meg) számértékéből megkaphatjuk a gőz nyomásának a vízfelszín görbületétől való függését kifejező képletet. Ha ez a képlet nem volna helyes, akkor folytonosan víz áramlana a hajszálcsövön keresztül, és másodfajú örökmozgónk volna.

A fenti meggondolás segít az eső jelenségének megértésében. A magasan fent lebegő felhőket számtalan apró vízcsepp (köd) képezi, amelyek olyan kicsinyek és könnyűek, hogy gyakorlatilag nem esnek lefelé. Némelyik csepp nagyobb, mások kisebbek.

Mi a következménye a cseppek méreteiben mutatkozó különbségnek? Mint láttuk, a konvex felszín fölött a gőznyomás nagyobb, mint a lapos felszín fölött, és a nyomáskülönbség a csökkenő görbületi sugárral növekszik. Így a gőznyomás a kis cseppek felszíne fölött nagyobb, a nagyobbak felszíne fölött pedig kisebb. E nyomáskülönbség eredményeképpen a gőz a kisebb cseppekből a nagyobbak felé áramlik, lecsapódik ezek felszínén, és tovább növeli azok méretét. A kisebb cseppek fokozatosan elpárolognak, és végül elenyésznek. A növekedő cseppek hamarosan túl nagyok lesznek ahhoz, hogy lebegjenek a levegőben, és leesnek a fejünkre és esernyőnkre.

A HŐ KINETIKUS ELMÉLETE

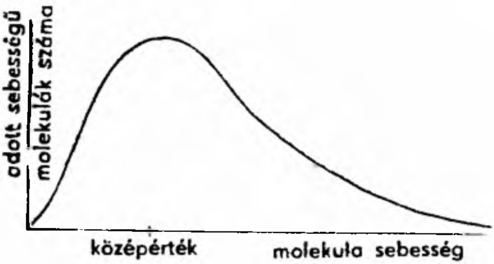
A hő elméletének továbbfejlesztését és a termodinamika alaptörvényének összekapcsolását azzal az elgondolással, hogy a hő apró részecskék, a minden testet felépítő molekulák mozgásának az energiája, a múlt század utolsó negyedében Ludwig *Boltzmann* (Németország), James Clerk *Maxwell* (Anglia) és Josiah *Gibbs* (Egyesült Államok) végezték el (40. és 66. ábra). Ha az anyagi testeket alkotó számtalan mozgásban levő apró molekulát vizsgáljuk, természetesen lehetetlen (és céltalan) minden egyéni részecske pályáját pontosan követni. A molekulák *átlagos* magatartását kell ismernünk különböző fizikai feltételek mellett, és erre a statisztika törvényeit használjuk. A statisztikai módszereket mindig alkalmazzák az emberekre is, ha sok emberről van szó. Biztosítótársaságok vagy pl. olyan állami intézmények, amelyek a farmerek élelmiszertermelésével foglalkoznak, statisztikai adatokra építik politikájukat és nem érdekli őket, hogy milyen körülmények közt halt meg Mr. John Doe, vagy hogy milyen módon vezeti a farmját Jeremiah Smith. Tekintetbe véve, hogy az Egyesült Államok lakossága megközelítőleg 170 000 000, a molekulák száma pedig 1 cm^3 levegőben 20 000 000 000 000 000 000, láthatjuk, hogy a statisztika törvényei sokkal pontosabban alkalmazhatók a molekulákra, mint az emberekre.

Legkönnyebb a statisztikai módszerek alkalmazása gázokra, amelyekben, a folyadékoktól és a szilárd testektől eltérően, a molekulák szabadon száguldanak a térben, folyton egymásnak és az edény falának ütköznek. A gázt tartalmazó edény fala a molekulák állandó bombázásának van kitéve. A molekulák visszapattannak a falról, ami átlagban állandó erőt jelent, a gáz nyomását. Tételezzük fel, hogy ugyanolyan gázmennyiség félakkora térfogatú edényben van. Mivel ebben az esetben a térfogategységre eső molekulák száma kétszeres, másodpercenként kétszer annyi molekula pattan vissza a fal egy megadott felületéről, és így a gáz nyomása is mégegyszer akkora lesz. Ez magyarázza, hogy a gáznyomás és a gáztérfogat fordítottan arányosak, amint azt Robert *Boyle* megállapította.

Nézzük most, mi történik, ha a molekulák gyorsabban mozognak. Ennek két hatása lesz: 1. A fal minden egyes részét több molekula éri másodpercenként. 2. Minden ütközés ereje, amelyet a molekulák impulzusa (Newton elnevezése szerint „mozgásmennyisége") határoz meg, növekszik. Mivel mindkét hatás arányos a molekulák sebességével, ezért a nyomás a sebesség négyzetével arányosan növekszik, vagy ami ugyanaz, a molekulák kinetikus energiájával. Láttuk, hogy a Charles—Gay-Lussac-törvény szerint az állandó térfogatú gáz nyomása abszolúthőmérsékletével arányos, amiből következik, hogy *az abszolút hőmérséklet egyszerűen a molekulák hőmozgása energiájának a mértéke*. Közömbös, hogy milyen molekulákról beszélünk, mert a statisztikus mechanika egyik alaptörvénye, az „energia egyenletes eloszlásának törvénye" (ekvipartició-törvény) kimondja, hogy *a különböző tömegű részecskékből álló gázkeverékben, ha elég sok részecske van összesen, az egyes részecskékre eső átlagos kinetikus energia minden részre azonos*. Így például hidrogénmolekulák és a náluk tizenhatszor súlyosabb oxigénmolekulák keverékében az oxigénmolekulák sebessége négyszer kisebb a hidrogénmolekulákénál. Így aztán a tömegnek és a sebesség négyzetének a szorzata mindkettőnél ugyanaz. Szobahőmérsékleten, vagyis 300 K°-nál a hőmozgás energiája körülbelül 0,000 000 000 000 000 2 erg, ami levegőmolekulák esetében 50 000 cm/sec (kb. 1600 km/óra) sebességnek felel meg.

A hőmozgás abszolút hőmérséklet által meghatározott energiája, természetesen, csak nagyszámú részecske energiájának az átlaga. Mint mindig statisztikai jelenségnél, itt is erősen eltérhet az egyes részecskék energiája a középértéktől. Mivel az ütközések találomra történnek, némelyik molekula rövid időre sokkal nagyobb sebességet érhet el, mások pedig időnként lelassulnak. A statisztikus mechanika törvényeinek felhasználásával kiszámíthatjuk azoknak a molekuláknak a százalékos arányát, amelyek sebessége különböző mértékben tér el az átlagos sebességtől. Ez a sebességeloszlási függvény, amelyet először Maxwell számított ki, és azért az ő nevét viseli, a 45. ábrán látható.

A gázok statisztikus elméletének egy másik lényeges fogalma az „átlagos szabad úthossz", vagyis a molekulák által két ütközés között átlagosan megtett út. Egy atmoszféra nyomású



45. ábra.
A Maxwell-féle sebességeloszlás.

levegőben a molekulák átlagos úthossza igen rövid, csupán körülbelül 0,000 01 cm, a csillagok közötti teret kitöltő igen ritka gázban viszont kilométereket tehetnek meg a molekulák anélkül, hogy egymásba ütköznének. A szabad úthossz rövid voltának tulajdonítható, hogy a molekulák, gyors mozgásuk ellenére hosszú idő alatt érnek el a szoba egyik végétől a másikhoz. Hasonlítanak a labdarúgóhoz, aki a labdával a kapu felé száguld, és minden lépésnél feltartják az ellenfél játékosai. A futballistának a kapu a célja, és afelé igyekszik futni. A molekulák ezzel szemben vaktában mozognak, és minden új ütközés után bármely irányban elpattanhatnak. Matematikai úton ki lehet mutatni, hogy ilyen mozgásnál („véletlen bolygásnál") a sok lépés után megtett átlagos út egyenlő a lépéshossznak és a lépésszám négyzetgyökének a szorzatával. Tehát nem a lépések számával szorzunk, mint ahogy kellene, ha valamennyi lépés ugyanabban az irányban történnék. Vagyis a következő képlet érvényes:

$$\text{megtett út} = \text{lépéshossz} \cdot \sqrt{\text{lépésszám}}.$$

Levegőmolekuláknál a lépéshossz 0,000 01 cm, és ha, mondjuk, 10 m-es utat (1000 cm) kell megtenni, akkor a fenti képlet azt mondja nekünk, hogy a (véletlen) lépések száma

$$\left(\frac{1000}{0{,}000\,01}\right)^2 = 10\,000\,000\,000\,000\,000.$$

50 000 cm/sec sebességnél minden lépés $\frac{0{,}000\,01}{50\,000} = 0{,}000\,000\,000\,2$ másodpercig tart, így a teljes mozgási idő

$$10\,000\,000\,000\,000\,000 \cdot 0{,}000\,000\,000\,2 = 2\,000\,000 \text{ sec, azaz 23 nap.}$$

Hogyan magyarázza a hő kinetikus elmélete a termodinamika alaptörvényét, amely szerint az entrópiának minden hőfolyamatban növekednie kell? Mi egyáltalában az entrópia értelme a molekulamozgás statisztikus elmélete szempontjából? Miért áramlik a hő mindig a forróbb testből a hidegebbe, és miért nem tudunk egy bizonyos mennyiségű hőt teljes mértékben mechanikai energiává átalakítani, amikor a mechanikai energia hővé alakítása nem jelent problémát? Mindeme kérdésekre természetes módon kapunk választ, ha megpróbáljuk elképzelni, mi történik ilyenkor a molekulákkal. Vegyünk egy hőszigetelő fallal körülvett két egyenlő félre osztott tartályt. Töltsük meg az egyik felét forró, a másik felét hideg gázzal, és távolítsuk el a válaszfalat. Mi történik most? A forró gáz gyorsan mozgó molekulái nyilván energiát vesztenek a hidegebb gáz lassúbb molekuláival történő összeütközésekkor, és ez a folyamat mindaddig tart, amíg az energia egyenletesen el nem oszlik a molekulák között, vagyis a tartály két felének hőmérséklete ki nem egyenlítődik. Hasonló a helyzet egy vödörnél, amelynek az alsó fele fekete gyöngyökkel van töltve, a felső része pedig fehérekkel. Ha a vödröt rázzuk, a gyöngyök összekeverednek, úgy hogy a fehérek és a feketék egyenletesen oszlanak el a vödör fenekétől a tetejéig. Elválaszthatjuk-e őket további rázással? Elméletben igen. Nincs olyan ok, amely a szétválasztást lehetetlenné tenné; de nagyon valószínűtlen, hogy ez megtörténjék. Évszázadokon vagy akár évmilliókon át rázhatjuk a vödröt, amíg puszta véletlenségből a fekete gyöngyök újra a vödör alján gyűlnek össze egyszer, a fehérek pedig a tetején. Ugyanez érvényes a gázmolekulákra is. Elvben lehetséges, hogy a molekulák fele véletlen összeütközések által jóval az átlagos sebesség alá lassúbbodik, a másik fele pedig megfelelően gyorsul. De ez nagyon valószínűtlen.

Hasonló a helyzet, ha mechanikai energia alakul át hővé vagy fordítva. Képzeljünk egy golyót, amely acélfalra pattan. Amíg a golyó a cél felé repül, addig összes molekulái ugyanabban az irányban mozognak, ugyanazzal a sebességgel. (A molekuláknak ez a közös mozgása természetesen elfedi a golyó kezdeti hőmérsékletének megfelelő szabálytalan hőmozgását.) Ha a golyót a fal megállítja, akkor ez a rendezett mozgás az egyes részecskék szabálytalan mozgásává válik, amely növeli a golyó és a fal molekuláinak eredeti hőmozgását. Most is elképzelhetjük e folyamat fordítottját, amikor a lángban hevített fémrúd egyik végét képező molekulák hőmozgása, puszta véletlenségből, azonos irányú lesz, és a fémrúd elrepül, mintha puskából lőtték volna ki. De ez megint rendkívül valószínűtlen. Látjuk tehát, hogy a növekvő entrópia törvénye egyszerűen azt állítja, hogy a *természetben lejátszódó minden folyamatban a molekulák rendezett mozgása igyekszik rendezetlen, véletlen mozgássá változni.* Minden folyamat olyan irányban halad, hogy közben a molekulamozgás kevésbé valószínű formája valószínűbbé alakuljon. Az entrópia növekedése valószínűbb molekulamozgásfajta kialakulásának felel meg.

Egy adott típusú molekulamozgás valószínűsége és az entrópia közötti összefüggést, amelyet először Ludwig *Boltzmann* talált meg, a következő egyszerű módon lehet levezetni. Vegyünk két, A és B termodinamikai rendszert, amely lehet például két különböző fajtájú és nyomású gázzal töltött tartály, vagy akár más bonyolultabb rendszer, amely folyadékokat, ezek gőzeit, szilárd kristályokat, ezek oldatait stb. tartalmazza. Ha a két rendszer hőmérséklete (T) ugyanaz, akkor ha termikus kapcsolatba hozzuk őket egymással, egyik irányban sem fog hő áramlani. Ezért mindkét rendszer ugyanabban az állapotban marad, amelyben külön volt. Tételezzük fel, hogy kívülről egy bizonyos mennyiségű hő áramlik a rendszerekbe, úgy, hogy az A rendszer Q_A kalóriát, a B rendszer pedig Q_B kalóriát vesz fel. Ha a két rendszert külön nézzük, entrópianövekedésük $\frac{Q_A}{T}$ és $\frac{Q_B}{T}$. Ha egyetlen összetett rendszernek tekintjük, akkor az entrópia összes növekedése $\frac{Q_A+Q_B}{T}$. Mivel $\frac{Q_A}{T}+\frac{Q_B}{T}=\frac{Q_A+Q_B}{T}$, ezért arra következtetünk, hogy *az összetett rendszer entrópiája egyenlő a részek entrópiájának összegével.*

Mi a helyzet a különböző valószínűségű molekulamozgásokkal? Hogyan fejezhetjük ki az A-ból és B-ből összetett rendszer valószínűségét a különálló A és B valószínűségével? A valószínűségszámítás szerint *egy összetett* (vagyis több független feltételt kielégítő esemény) *esemény valószínűségét ama egyes események valószínűségeinek a szorzata adja, amelyekből összetevődik.* Ha pl. egy leányka tetszőleges időben elindul, és reméli, hogy akivel találkozik, az „magas termetű, sötéthajú és csinos" lesz, akkor annak a valószínűsége, hogy reménye teljesedik, azoknak a valószínűségeknek a szorzata, hogy az ifjú magas, hogy sötéthajú és hogy csinos. Ha annak az esélye, hogy egy férfi magas, 1/4 (vagyis négyből valószínűleg egy ilyen), annak az esélye, hogy sötéthajú 1/3, és annak az esélye, hogy csinos 1/50, akkor mindhárom feltétel teljesülésének a valószínűsége:

$$1/4 \cdot 1/3 \cdot 1/50 = 1/600,$$

vagyis egy a 600-hoz.

Látjuk, hogy összetett termodinamikai rendszerben az entrópiákat össze kell adni, a valószínűségeket viszont össze kell szorozni. Milyen matematikai összefüggésnek kell fennállni két mennyiség között, hogy kielégítse ezt a feltételt? Természetesen logaritmikus összefüggésnek, mert hogy két számot összeszorozzunk, ahhoz a logaritmusukat össze kell adni. Az entrópia tehát a P valószínűség logaritmusával arányos, és így azt írhatjuk, hogy

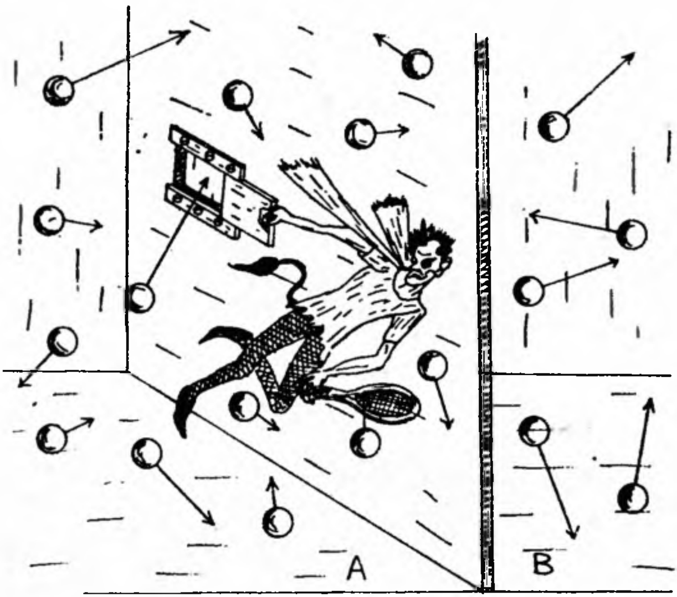
$$S = k \log P,$$

ahol a k egy Boltzmannról elnevezett állandó.

A fenti képlet a híd a klasszikus termodinamika és a hő kinetikus elmélete között, és lehetővé teszi valamennyi termodinamikai mennyiség kiszámítását statisztikai megfontolások alapján.

A MAXWELL-FÉLE DÉMON

A statisztikus fizikában igen fontos személy a Maxwell-féle „démon", a tudomány e területét oly nagy mértékben fejlesztő James Clerk *Maxwell* képzeletének a szülötte. Képzeljünk el egy parányi és igen tevékeny démont (46. ábra), aki az egyes molekulákat is látja, és elég gyors ahhoz, hogy azokkal úgy bánjon, mint egy teniszbajnok a labdákkal. Egy ilyen démon segítségünkre lehet a növekvő entrópia törvényének megdöntésében azzal, hogy az *A* és *B* dobozt elválasztó falban egy kis ablakot nyit és zár. Az ablakot elzáró lemezről feltételezzük, hogy súrlódás nélkül nyílik. A démon kinyitja, ha azt látja, hogy egy különösen gyors molekula tart az ablak felé, és bezárja, ha lassú molekula



46. ábra.
A Maxwell-démon, aki állítólag szét tudja választani a gyors és a lassú molekulákat

közeledik. Így a Maxwell-eloszlás gyors molekulái valamennyien a *B* dobozba kerülnek, és csak a lassúak maradnak *A*-ban. *B* forróbb lesz, *A* pedig hidegebb, vagyis, a termodinamika második főtételével ellentétben, a hő fordított irányban áramlik.

Miért nem történhet ez meg, természetesen nem egy valóságos démon, hanem valami ugyanilyen módon működő apró, ötletesen szerkesztett fizikai készülék segítségével? A helyzet megértése céljából emlékeztetünk a híres osztrák fizikus Erwin

Schrödinger rejtélyes kérdésére, amelyet *Mi az élet?** című könyvében tett fel: „Miért olyan kicsik az atomok?” Első pillantásra a kérdés egészen értelmetlennek tűnik, de értelmet kap és lehet rá válaszolni, ha megfordítjuk és azt kérdjük: „Miért vagyunk mi olyan nagyok (az atomokkal összehasonlítva)?” A válasz az, hogy egy olyan bonyolult szerkezet, mint az ember, agyával, izmaival stb. nem állhat mindössze néhány tucat atomból, mint ahogy egy gót székesegyházat sem lehet néhány kőből felépíteni.

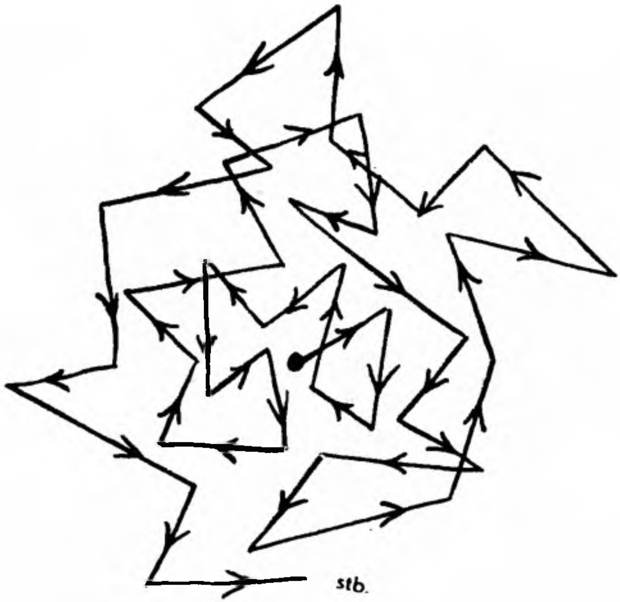
A Maxwell-démont és bármely mechanikus készüléket, amely azt pótolná, néhány atomból kellene felépíteni, és nem tudná a ráruházott bonyolult feladatot teljesíteni. Minél kisebb a részletek száma, annál nagyobb a magatartásukban mutatkozó statisztikus ingadozás. Az olyan autó, amelyben a négy kerék egyike egyszeriben magától felugrik és kormánykerék lesz, a hűtő pedig benzintartállyá alakul és fordítva, nem megbízható jármű. Hasonlóképpen Maxwell démonja, akár valóságos, akár gépi, annyi statisztikus tévedést követne el a molekulák kezelésénél, hogy az egész terv csődöt mondana.

MIKROSZKOPIKUS HŐMOZGÁS

A molekulák világában érvényes fenti igen nagy és igen kicsiny számokat számolás eredményeként kapjuk, mert a molekulák és mozgásuk túl kicsi ahhoz, hogy akár a legjobb mikroszkóppal is megfigyelhetnők őket. A láthatatlan molekulák és a nagy testek közötti szakadékot azonban áthidalhatjuk, ha megfigyeljük ama parányi, körülbelül 1 mikron (μ) átmérőjű részecskék viselkedését, amelyek egyrészt elég kicsinyek ahhoz, hogy észlelhető hőmozgást végezzenek, másrészt viszont elég nagyok ahhoz, hogy egy jó mikroszkópban láthatók legyenek. Robert *Brown* angol botanikus figyelte meg először, hogy a vízben lebegő virágporszemek soha sincsenek nyugalomban, hanem „tarantella”-szerű mozgást végeznek. Szabálytalanul ide-oda ugrálnak, mintha egy láthatatlan valami állandóan rángatná őket (47. ábra). Brown és korának más természettudósai nem tudták megmagyarázni a parányi részecskék ugrálását. Csaknem egy évszázad telt el, amíg Jean *Perrin* francia fizikus ezt a mozgást hőmozgást végző víz-

* Cambridge University Press, 1944.

molekuláktól kapott sok-sok lökés eredményeként megmagyarázta. Perrin Brown-mozgásra vonatkozó tanulmányai kétségtelenül bebizonyították a kinetikus hőelmélet helyességét, és lehetővé tették a fizikusok számára, hogy a mozgás statisztikus törvényeit,



47. ábra.

„Véletlen bolyongás" az olyan mozgás, amelyben a mozgás iránya gyakran és szabálytalanul változik más testekkel való összeütközés eredményeképpen. Ez lehet egy molekula ütközése más molekulákkal. vagy egy ittas ember összeütközése a lámpaoszlopokkal. Nyilvánvaló, hogy az ilyen bolyongásban a test kevesebbet halad előre, mintha egyenes vonalban menne. Ki lehet mutatni, hogy ebben az esetben a kiindulási ponttól mért átlagos távolság az egyenes lépések hossza szorozva a lépések számának a négyzetgyökével

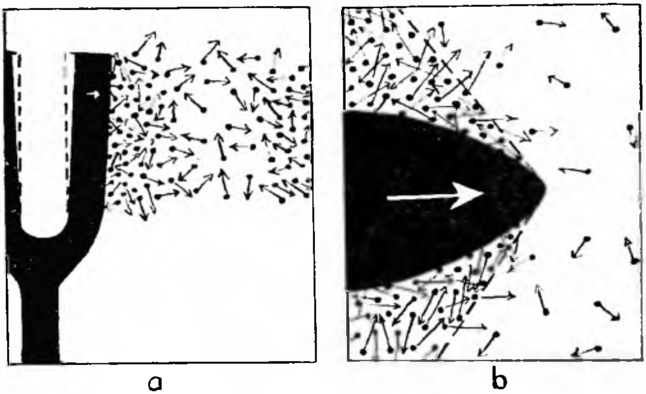
amelyek azelőtt csak elméleti megfontolások voltak, közvetlenül megfigyeljék. A Brown-mozgás egzakt matematikai elméletét a fiatal Albert *Einstein* dolgozta ki az 1905-ben közzétett három cikke egyikében. A másik kettő a fénykvantumok elméletével és a relativitás elméletével foglalkozott. Manapság a hő statisztikus elmélete, amelyet rendszerint sokkal általánosabban „statisztikus fiziká”-nak neveznek, teljessége és világos felépítése tekintetében csak a newtoni mechanikával hasonlítható össze.

A HŐMOZGÁS ÉS A HANG TERJEDÉSE

Közismert tény, hogy a hang nem egyéb, mint a levegőben és más anyagban terjedő nyomáshullám. Kísérletek tárták fel azt a mulatságos tényt, hogy a hang sebessége független a levegő sűrűségétől, és hogy a tenger színén ugyanannyi, mint az atmoszféra felső ritka rétegében. Másrészt azonban ez a sebesség függ a levegő hőmérsékletétől, egyenesen arányos az abszolút hőmérséklet négyzetgyökével. Hogyan magyarázhatjuk ezt meg a molekulaszerkezet és a hőmozgás alapján?

Emlékeznünk kell arra, hogy a levegő nagyszámú molekulából áll, amelyek vaktában száguldoznak a térben, nagyobb hőmérsékleten nagyobb sebességgel. Ha valami, például egy rezgő hangvilla hanghullámot bocsát ki, akkor a villa száraihoz legközelebb eső levegőmolekulák a mozgás irányában kapnak egy lökést. A legközelebbi vékony levegőrétegben levő molekulába ütközve, ezt a lökést továbbadják. Ezek a molekulák viszont a hozzájuk legközelebb eső réteg molekuláit taszítják, és az összenyomódás így továbbterjed a levegőben, hanghullám alakul ki. Mivel a levegőmolekuláknak aránylag hosszú távolságot kell megtenniük (egy ún. *szabad úthossznyit*), mielőtt a legközelebbi réteg molekuláiba ütköznek, ezért a terjedés sebességét lényegében a molekulák termikus sebessége határozza meg. Ez a dinamikus kép megmagyarázza a hang sebességére vonatkozó két fenti tényt. A molekulák termikus sebessége adott hőmérsékleten változatlan, függetlenül attól, hogy a gáz mennyire nyomódik össze vagy mennyire ritkul. Másrészt viszont, mivel a molekulák kinetikus energiája arányos az abszolút hőmérséklettel, a sebességük a hőmérséklet négyzetgyökével növekszik. Ami molekulák sebességére érvényes, az érvényes a hangsebességére is.

Egészen más a helyzet, ha a gáz összenyomódását előidéző tárgy sebessége felülmúlja a molekulák adott feltételek melletti hőmozgásának a sebességét. Ez történik például akkor, ha robbanás folyamán keletkező forró gázok taszítják a környező levegőt, vagy ha a levegőt szuperszónikus repülőgép vagy rakéta szárnyai és teste taszítja. Ebben az esetben a molekulák termikus sebessége nem elég nagy ahhoz, hogy elkerülje a közeledő „taszítót", a molekulák egymásra torlódnak, és ez a sűrűség növekedését okozza. A mostani és az előző eset különbségét mutatja vázlatosan a 48. ábra. Az erősen összenyomott gáz



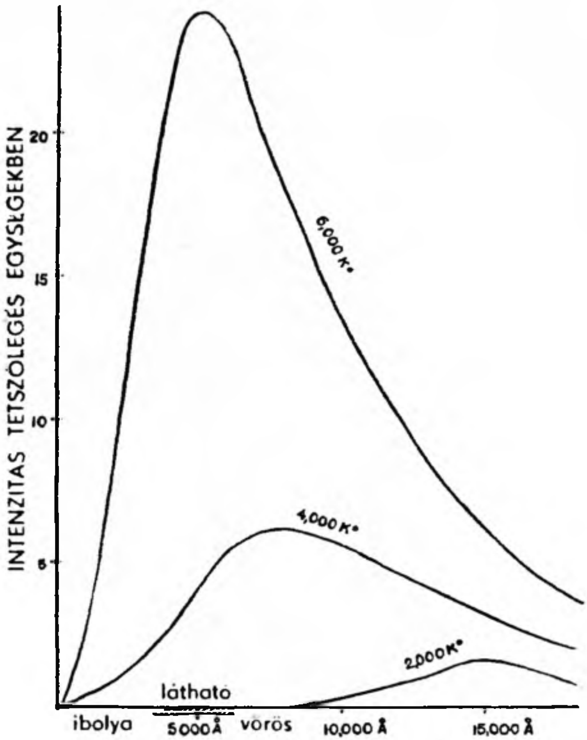
48. ábra.

Hanghullám képződése. (a) A hangot létrehozó test lassabban mozog. mint a molekulák. (b) A mozgótesttel együtt haladó hullám képződik, ha a test a molekulák sebességénél gyorsabban mozog

előrehaladó frontja ún. *lökéshullámot* képez. A sűrűség nagymértékű megnövekedése következtében a lökéshullámok nyomása is igen nagy. Ez okozza romboló hatásukat. Robbanáskor a forró gázok kiterjedése egyszer csak lelassul, a levegő összenyomódása elválik a mozgó testtől, és továbbhalad mint lökéshullám. Szuperszónikus repülőgépnél és rakétánál, amelyeket a motorjuk állandó sebességgel taszít előre, a lökéshullám a mozgó testhez képest változatlan helyzetű, a test „magával viszi".

FORRÓ TESTEK FÉNYKIBOCSÁTÁSA

Tudjuk, hogy minden anyagi test világít, ha elég nagy a hőmérséklete. Így kelt fényt a régimódi gázégő lángja, és így hoz létre fényt a modern villanykörte izzó szála is. Kozmikus mértékben a Nap és a csillagok is azért bocsátanak ki fényt, mert felszínük nagyon forró. Mindenki tapasztalta, hogy már aránylag kis hőmérsékletű testek is, például a fűtőtestek, hőt sugároznak, de nem világítanak. A kályhaajtó ha 600 – 700 C°-ra melegedett „vörösen izzik": gyenge vörös fényt ad. A villanykörte szála több mint 2000 fokon izzik, és erős fényt bocsát ki. Ámde még ez is sárgás színűnek tűnik a 3 – 4000° hőmérsékletű elektromos ívfénnyel összehasonlítva. A Nap felszíne kb. 6000 C° hőmérsékleten olyan fényt bocsát ki, amely kék sugarakban gazdagabb. mint valamennyi említett fényforrás fénye. *A hőmérséklet növekedésével a kibocsátott sugárzás intenzitása rohamosan erősödik és egyre gazdagabb a rövid hullámhosszakban.* A 49. ábra a különböző hőmérsékletű testek sugárzásának megfigyelt



49. ábra.
Az energia eloszlása három különböző hőmérsékletű test által kibocsátott, folytonos színképű sugárzásban

intenzitás eloszlását mutatja a hullámhossz függvényében. 2000 K°-on csak nagy hullámhosszúságú hősugarak formájában sugároz energiát a test, a látható fénynek megfelelő, a rajzon vonalkázott tartományban az intenzitás nulla. 4000 K°-on a test már kibocsát egy kevés látható fényt is, de a vörös sugarak intenzitása jelentékenyen felülmúlja a sárga, zöld és kék sugarak intenzitását. 6000 K°-on (ami a Nap felületének hőmérséklete) a színkép sárga területén maximális az intenzitás. Az ilyen színkeveréket észleljük fehér fényként. Még nagyobb hőmérsékleteken az intenzitás maximuma a láthatatlan ibolyántúli sugarak tartományába kerül. Van néhány olyan forró (több százezer fokos) csillag, hogy az általa kibocsátott fény legnagyobb része a láthatatlan ibolyántúli részre jut.

A forró testek fénykibocsátásának, a hőmérsékleti sugárzásnak, két fontos törvénye van, amelyeket a múlt század második felében fedeztek fel.

A *Wien-törvény* Wilhelm *Wien* német fizikustól (1864–1928) származik. Eszerint *az a hullámhossz, amelyiknél a színképben maximális az intenzitás, fordítva arányos a kibocsátó forró test (abszolút) hőmérsékletével.* A 49. ábrából látható, hogy míg 6000 K°-nál 5000 Å-nél van a maximális intenzitás, 2000 K°-nál 15 000 Å-re tolódik.

A *Stefan–Boltzmann*-törvényt Josef *Stefan* német fizikus (1835–1893) fedezte fel, és a már említett Ludwig *Boltzmann* vezette le elméleti úton, termodinamikai érvelések alapján. Ez a törvény kimondja, hogy *egy forró test által kibocsátott összes energia a test (abszolút) hőmérsékletének negyedik hatványával arányos.* A 49. ábrán a 6000 K°-os görbe alatti terület $3^4=81$-szer nagyobb, mint a 2000 K°-os görbe alatti terület.

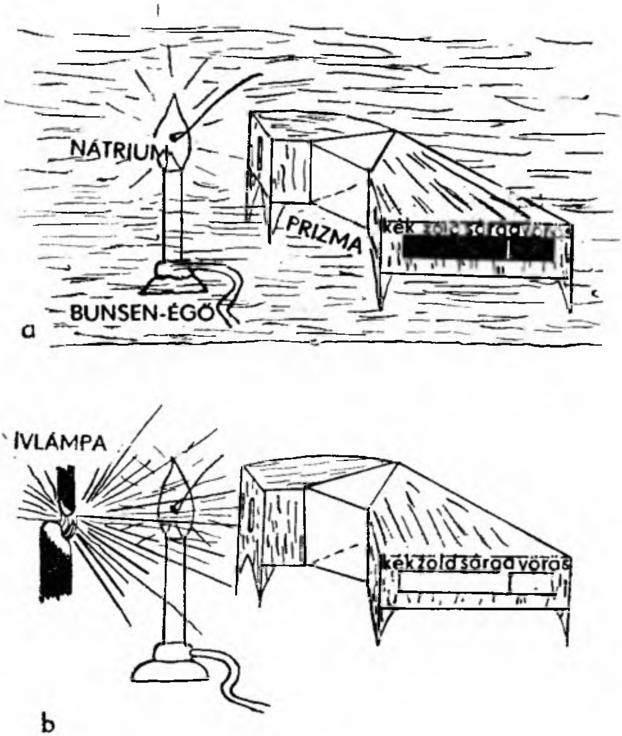
FORRÓ GÁZOK FÉNYKIBOCSÁTÁSA

Amiket a forró testek fénykibocsátásáról az előző szakaszban mondottunk, az szilárd és folyékony anyagokra vonatkozik. Például a villanykörte wolfram-szálára, vagy az öntödében megolvasztott vasra.* Egészen más a helyzet ha forró gázok

* A Nap anyaga a rendkívül nagy hőmérséklet miatt (a Nap felszínén 6000 K°, közepén 16 millió K°) gázállapotban van. Azonban a Napot alkotó gázok, a kromoszférának nevezett vékony réteg kivételével, annyira össze vannak nyomva, hogy sűrűségük a rendes szilárd és folyékony anyagokéval egyenlő, és ezért folytonos színképet bocsátanak ki.

bocsátanak ki fényt. Gáz- vagy petróleum-lámpa fényét prizmán át nézve a vöröstől az ibolyáig terjedő folytonos spektrumot látunk. Ki lehet azonban mutatni, hogy ez a folytonos színkép nem a lángban levő forró gázoktól származik, hanem a lángban levő parányi szilárd koromrészecskéktől. Ugyanis, ha sikerül a gázt teljesen elégetni, például a Robert Wilhelm *Bunsen* német fizikus (1811–1899) által kifejlesztett Bunsen-égőben, akkor nagyon forró, de nagyon kevés fényt kibocsátó lángot kapunk. Bunsen arra használta égőjét, hogy megvizsgálja, különböző anyagok gázalakban hogyan bocsátanak ki fényt. Ha egy Bunsen-égő lángjába (nátriumklorid, vagyis közönséges konyhasó alakjában) egy kevés nátriumot teszünk, akkor a láng fényes sárga színben világítani kezd. Ha ezt a fényt, a régi Newton-féle módon, prizmával elemezzük, akkor azt találjuk, hogy a színkép egyetlen sárga vonalból áll, az összes többi hullámhosszak hiányoznak (50. ábra). Ha káliummal végzünk hasonló kísérletet, akkor a kálium a lángot világos vörösre festi, a színképében pedig távolabb jobbra egy vörös vonal látható. Más olyan anyagok, amelyek a Bunsen-égő forró lángjában, miután gőzzé válnak, ismét más vonalakat hoznak létre. Néha egyetlen vonalat, máskor több vonalat.

Mi az oka annak, hogy a forró gázok csak pontosan megszabott hullámhosszúságú (vagy más szóval pontosan megszabott frekvenciájú) fényt bocsátanak ki, a forró szilárd vagy folyékony anyagok viszont mindenféle hullámhosszat, amelyek aztán folytonos színképet adnak? Mint később látni fogjuk, az atomokat vagy molekulákat a hangszerekkel lehet összehasonlítani. azzal a különbséggel, hogy az előbbiek fényhullámokat, nem pedig hanghullámokat bocsátanak ki. A hangszerek szerkezete olyan, legyen szerény hangvilláról vagy a nagy zongoráról szó, hogy csak meghatározott hangfrekvenciákat tudnak megszólaltatni (a hangvilla egyetlen egy frekvenciát, a zongora sokat). Az egymásután megszólaltatott hangok adják azután a dallamot. Az atomok és molekulák szintén csak meghatározott, az atomra, molekulára jellemző hullámhosszúságú fényt bocsátanak ki. A gázok atomjai vagy molekulái szabadon repülnek a térben, és időnként egymásba ütköznek. Az összeütközésnél „gerjesztett" állapotba kerülnek (ha a hőmérséklet elég nagy) és tovább repülve, rezegnek, és rájuk jellemző fényhullámokat bocsátanak ki. A nátrium, a vörösréz, a vas vagy más fém gőze jellegzetes vonalas spektrumot bocsát ki. A színkép alapján a kibocsátó atomot fel lehet ismerni. A szilárd testekben viszont az atomok szorosan egymás mellett helyezkednek el. A helyzet leginkább egy nagy zsákra emlékeztet, amelyben egy szimfonikus zenekar összes hangszerei egymásra vannak halmozva. Ha megrázzuk a zsákot, akkor zajt hallunk, amely az összes hallható frekvenciákat tartalmazza, de nem mutatja az egyes hangszerek sajátos tulajdonságait. Hasonlóképpen egy darab fémben vagy más szilárd (vagy folyékony) anyagban a felhalmozódott atomok



50. ábra.

(a) Forró lángba tett nátrium jellegzetes sárga vonalat bocsát ki. (b) Ha az ívlámpa minden hullámhosszat tartalmazó fehér fénye nátriumot tartalmazó lángon halad át, akkor egy sötét elnyelési (abszorpciós) vonal jelenik meg ott, ahol előzőleg fényes emissziós vonal volt teljesen elveszítik hangoltságukat. A vörösen izzó vas fénye nem sokban különbözik a vörösen izzó réz vagy más vörösen izzó test fényétől.

A különböző anyagok által kibocsátott fény jellegzetességén alapul a színképelemzés. Ez igen fontos módszer, ami lehetővé teszi, hogy az anyag vegyi összetételét megállapítsuk, egyszerűen a gőze által kibocsátott fény megfigyelésével.

A FÉNYELNYELÉS

Most visszatérünk előző, Bunsen-égős kísérletünkhöz (50a. ábra). A láng egy kevés nátriumot tartalmaz. Tegyük fel, hogy a láng mögé igen erős fényforrást helyezünk, amelynek folytonos színképe van. Például egy ívlámpát (50b. ábra). Az ív fehéren izzó elektródájának fénye áthatol a lángon, és a résre esve, szivárvány színű sávot hoz létre a spektroszkópban. Megfigyelhetjük, hogy a színek folytonosságát keskeny sötét vonal szakítja meg, pontosan azon a helyen, ahol a nátrium sárga vonala volt. Ez a hatás a *rezonanciának* nevezett fontos jelenségnek tulajdonítható, amely mindannyiszor fellép, amikor valamiféle rezgéssel van dolgunk. Nézzünk egy hintázó gyereket, akit a játszótéren az apja hintáztat. Ha az apa a hintát ritmikusan löki, a hinta saját rezgési periódusával egyenlő időközben, akkor a mozgás kilengése egyre nagyobb lesz és a gyerek vagy örül, vagy fél. Ha azonban az apa figyelmét egy csinos nő vonja magára, és ezért nem a megfelelő időközökben lendíti a hintát, akkor fáradozása hiábavaló lesz. Néha a hintát akkor taszítja, amikor az távozik tőle, ez hasznos; néha viszont olyankor, amikor a hinta közeledik, ez hátráltatja a mozgást. Hogy egy rezgés kilengését növeljük, ahhoz a rezgő tárgy saját periódusával egyenlő időközökben kell alkalmazni az erőt. Ha két egyformán hangolt hangvillát helyezünk el közel egymáshoz, és az egyiket egy rámért kalapácsütéssel rezgésbe hozzuk, akkor a hangvillából kiinduló hanghullámok hamarosan a másik hangvillát is mozgásba hozzák. Ha azonban a két hangvillának a rezgési periódusai különböznek, akkor ilyen hatás nem következik be. Hasonlóképpen, ha egy rádió- vagy televízió-készüléket a kívánt állomásra akarunk hangolni, akkor a forgatógombbal a vevőkészülék rezgési frekvenciáját az adóállomáséval kell egyenlővé tenni.

A nátriumtartalmú lánggal végzett kísérletünk ugyanebbe a kategóriába tartozik. A nátrium atomjai az ívfény folytonos színképéből azokkal a hullámhosszakkal rezonálnak, amelyeket ők is ki tudnak bocsátani. Így ezeket a hullámokat minden irányba szétszórják, ez legyöngíti az eredeti nyalábot. A fekete elnyelési vonal ebben az esetben, természetesen, nem teljesen fekete. Előfordulhat az is, hogy fényesebb, mint az eredeti emissziós vonal, de az ívfény folytonos színképének többi részéhez képest nagyon sötétnek látszik. Azt a törvényt, hogy *minden anyag ugyanazokat a frekvenciákat nyeli el, amelyeket kibocsát*, Gustav *Kirchhoff* (1824–1887) német fizikus fedezte fel, és az ő nevét viseli. Ez a törvény igen fontos a fizika, a kémia és a csillagászat több ágában. Egyik legfontosabb alkalmazása a Nap és a többi csillag kémiai összetételének vizsgálata.

A XIX. század elején Joseph von *Frauenhofer* (1787–1826) német fizikus megismételte Newton kísérleteit a Nap színképével, de sokkal jobb minőségű prizmát használt. Meglepetéssel látta, hogy a színes szivárványt nagyszámú igen keskeny vonal szakítja meg. E „Frauenhofer-vonalak" eredetét könnyen megérthetjük abból, amit e szakaszban elmondottunk. Megállapítottuk, hogy bár a Nap teljes egészében gáznemű anyag, mégis folytonos színképet bocsát ki. Ugyanis atomjai nagyon szorosan vannak egymás mellett, nem tudnak egymás zavarása nélkül mozogni. Azonban a Nap legkülső, kromoszférának nevezett rétegét nagyon ritka, forró gázok alkotják. Ez a réteg tiszta optikai rezgéseket hoz létre. Amikor a *fotoszférából* (a Nap sűrűbb részéből) jövő folytonos színképű fény áthatol a kromoszférán, akkor a benne levő kémiai elemeknek megfelelő hullámhosszakat elnyeli. Ezek a sugarak így szétszóródnak, és az eredetileg folt nélküli színképben megjelennek a sötét Frauenhofer-vonalak. A színképelemzés csillagászati alkalmazása rendkívül nagymértékben fejlesztette a Napra és a csillagokra vonatkozó ismereteinket, és bepillantást engedett az emberi szemnek a minket körülvevő világegyetem határtalan perspektíváiba. A II. táblán a Nap Frauenhofer-színképét mutatjuk be, a látható részt (a–d) és a modern műszerekkel kimutatott távoli ibolyántúli részt (e).

V. FEJEZET

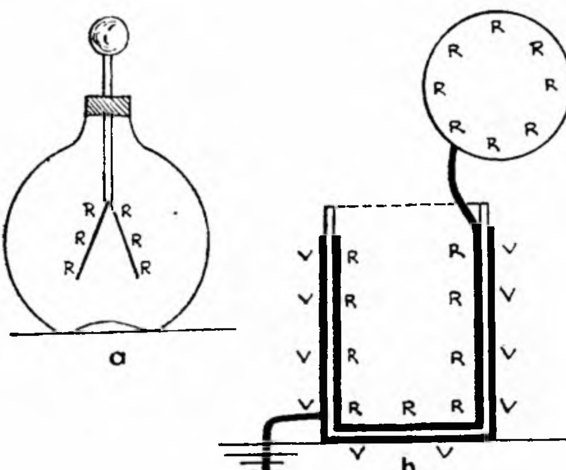
AZ ELEKTROMOSSÁG KORA

AZ ELSŐ FELFEDEZÉSEK

Mint az első fejezetben említettük, az elektromosság és a mágnesség jelenségét már a régi görögök is ismerték és valószínűleg az antik világ többi népei is. E jelenségek rendszeres tanulmányozásához azonban csak a művészetek és tudományok reneszánszának kezdetén fogtak hozzá. Sir William *Gilbert,* aki I. Erzsébet angol királynő udvari orvosa és Galilei kortársa volt, gondos kísérleteket végzett a mágnesek kölcsönhatására vonatkozóan. Eredményeit *De Magnete* című könyvében tette közzé. A könyv a mágnesek összes lényeges kvalitatív tulajdonságainak a leírását tartalmazza. Gilbert lelkes híve volt a kopernikuszi világrendszernek, és azt remélte, hogy a bolygókat Nap körüli pályájukon tartó erőket a mágneses vonzással lehet megmagyarázni. E problémák közelebbi tanulmányozása céljából magnetitből (mágneses vasércből) golyókat készített és az ezeket körülvevő mágneses teret a gömbök körül különböző helyeken és különböző távolságra elhelyezett parányi iránytűkkel tanulmányozta. Azt találta, hogy van a gömbnek egy olyan pontja, amely minden más pontnál erősebb vonzóerőt fejt ki az iránytű egyik végére. Az átellenes pont pedig maximális vonzóerőt gyakorol az iránytű másik végére. A gömb felszínének különböző pontjain a tű mindig meghatározott helyzetbe áll be, éspedig a maximális vonzások pontjait, azaz a gömb mágneses pólusait összekötő főkör irányába. Ez feltűnően hasonlít ahhoz, ahogyan az iránytűk a Föld felszínének különböző pontjain beállnak. Gilbert ebből azt következtette, hogy a mi földgolyónkat óriás mágnesnek lehet tekinteni, amelynek mágneses pólusai a földrajzi északi és déli sarkok közelében vannak. Ez a felfogás évszázadokon át fennmaradt, és miután Karl Friedrich *Gauss,* a nagy német matematikus matematikailag alátámasztotta, manapság a földmágnesség elméletének egyik alapeszméje. Másrészt azonban Gilbert ama kísérletei, hogy a mágneses erőket tekintse a bolygók Napkörüli mozgása okozójának, teljesen sikertelen volt. Több, mint egy fél évszázaddal később Newton ezt a mozgást az általános tömegvonzással magyarázta meg, amelynek semmi köze a mágnesességhez.

Otto von *Guerickét* leginkább a magdeburgi félgömbökkel (két félgömbbel, amelyekből összeillesztés után a levegőt kiszivatytyúzták, és akkor több ló se tudta széthúzni) folytatott kísérleteiről ismerik. Guericke akkor, amikor Newton már megalkotta, de még titokban tartotta elképzelését az általános gravitációról, a bolygók és a Nap közötti vonzást elektromos kölcsönhatással igyekezett megmagyarázni. Annak ellenére, hogy ez neki, ugyanúgy mint Gilbert-nek nem sikerült, sok fontos felfedezést tett az elektromos töltés tulajdonságaira vonatkozóan. Azt találta, hogy a megdörzsölt borostyánkő könnyű tárgyakat, például papírdarabokat magához ragad, majd elejti őket. Két könnyű test viszont, amelyeket megdörzsölt borostyánkő érintett, mindig taszítja egymást. Azt találta továbbá, hogy az elektromos töltést át lehet vinni egyik testről a másikra, nemcsak közvetlen érintkezés útján, hanem őket összekötő fémdróttal vagy nedves kötéllel is. Az elektromos jelenségeket később a XVIII. század elején *Du Fay* tanulmányozta. Megállapította, hogy kétféle elektromosság van. Az egyik borostyánkő, pecsétviasz, keménygumi és más gyantaszerű anyagok dörzsölése útján keletkezik, a másik pedig üvegszerű anyagok, például üveg vagy csillám dörzsölése útján. E kétféle elektromos folyadékot, fluidumot „gyanta-elektromosság"-nak és „üveg-elektromosság"-nak nevezték és megállapították, hogy az azonos elektromos töltések taszítják, a különbözők pedig vonzzák egymást. Az elektromosan semleges testekről feltételezték, hogy mindkét elektromos fluidumot egyenlő mennyiségben tartalmazzák, míg az elektromosan töltött testekben vagy a gyanta- vagy az üveg-elektromosság van túlsúlyban. Az Otto von Guericke által megfigyelt jelenségeket kezdetben úgy fogták fel, hogy azok a kétfajta elektromos fluidum közötti kölcsönhatásnak tulajdoníthatók. Tegyük fel, hogy keménygumi-gömböt dörzsölünk, és az ennek következtében gyantaelektromossággal töltődik fel. Ha egy kicsiny, töltés nélküli testet viszünk a közelébe, amelyben a kétféle elektromosság egyenlő mennyiségben van jelen, akkor a gyanta-elektromosság a test távoli végéhez taszítódik, az üveg-elektromosság pedig a közeli végébe kerül. Minthogy az elektromos kölcsönhatások a távolsággal csökkennek, ezért az üveg-elektromos töltésre ható vonzó erő nagyobb lesz, mint a gyanta-elektromos töltésre ható taszító erő. Ennek eredményeképpen a két test vonzani fogja egymást. Ha a keménygumi-gömb helyett üveggömböt veszünk, az eredmény ugyanaz, csak az üveg- és a gyanta-elektromosság felcserélődik. Így tehát a semleges testeket a töltött testek mindig vonzzák. Az eredetileg nem-elektromos test töltései szétválasztásának a jelenségét elektromos „polarizáció"-nak vagy „indukció"-nak nevezzük. Ha most két kis testet érintünk egy elektromosan töltött nagy testhez, akkor azonos elektromossággal töltődnek fel, így ha elvesszük őket a nagy töltött testtől, akkor taszítják egymást.

Az elektromos jelenségekkel folytatott első kísérletek idején két igen fontos elektromos műszert szerkesztettek, a *lemezes elektroszkópot* és a *leydeni palackot.* Az elektroszkópot (51a. ábra), vagyis az elektromos töltés jelenlétét kimutató műszert 1705-ben szerkesztette *Haukesbee.* Ez két szalmaszálból áll, amelyek egy fémrúd alsó végén egymás mellett vannak felfüggesztve. Ha a rúdba akár gyanta-, akár üveg-elektromosságot vitt, a

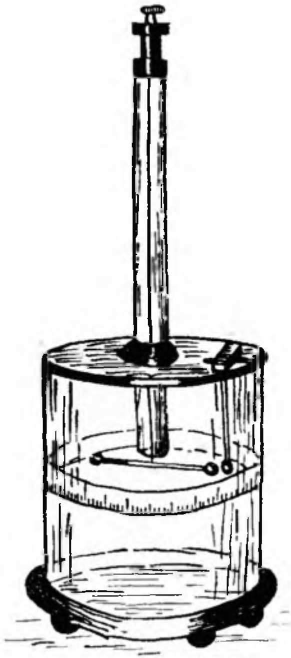


51. ábra.
(a) Lemezes elektroszkóp, (b) leydeni palack

szalmaszálak azonos elektromossággal töltődtek fel. és így egymástól elváltak. Ma is használjuk ezt a műszert, csak a szalmaszálak helyére sokkal könnyebb aranylemezkék kerültek. A leydeni palackot (51/b ábra) 1745-ben alkotta meg a leydeni (Hollandia) egyetemen egynéhány kutató abból a célból, hogy nagy mennyiségű elektromosságot gyűjtsenek egybe. Közönséges henger alakú üvegpalackból készült, amelynek külső és belső oldalát vékony ezüstfólia borította. Ha a külső fólia földelve van (vagyis össze van kötve a földdel), a belsőhöz pedig elektromosan töltött testet érintünk, vagy fordítva, akkor az elektromosság (akár gyanta-, akár üveg-elektromosság) igyekszik a földbe kerülni, de az üvegréteg megállítja az áramlást. Ily módon nagy mennyiségű elektromosság gyűlik össze a palackban, és hatásos szikrákat lehet létrehozni, ha a belső és külső fóliát dróttal kötjük össze. A régimódi leydeni palackból ma különféle kondenzátor-típusok fejlődtek ki, amelyek sok vékony levegő-, üveg- vagy csillámréteggel elválasztott fémlapból állnak. Az ilyen kondenzátorokat, amelyek igen nagy mennyiségű elektromosságot képesek tárolni, a fizika és az elektrotechnika minden területén alkalmazzák. Az első részecskegyorsító, amelyet 1930-ban John *Cockroft* és E. T. S. *Walton* a cambridge-i egyetemen szerkesztett, kondenzátorokkal működött, amelyeket 1 millió voltra is fel lehetett tölteni. Ha a kondenzátorok hidrogént tartalmazó üvegcsövön át kisültek, akkor nagy energiájú „atomlövedék"-et hoztak létre, amelyek ha a cső végére helyezett lítium-darab atomjait eltalálták, szétrombolták.

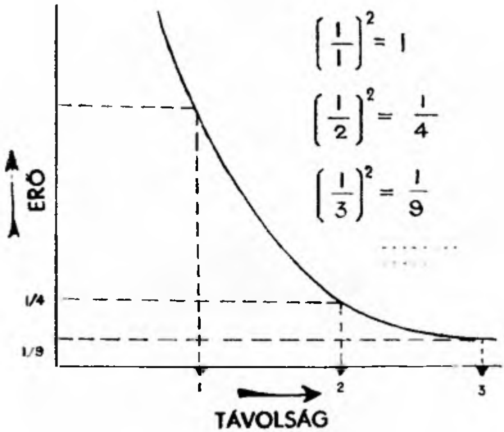
Ugyancsak a XVIII. században folytatta kísérleteit Benjamin *Franklin*, a nagy amerikai államférfi és író, aki meglett korában, 40 évesen kezdett érdeklődni a fizika iránt. Nem elégedett meg a parányi szikrákkal, amelyeket úgy kapott, hogy sárcipőt dörzsölt prémes kabátjához. Sokkal nagyobb szikrákkal akart játszani, olyanokkal, amilyeneket Zeusz szór le a felhőkből égiháború idején. Ezért sárkányokat küldött fel a viharfelhőkbe, hogy azokból nyerjen elektromosságot. A sárkányt tartó nedves kötél tökéletes elektromos vezető volt, ennek segítésével fel tudta tölteni leydeni palackját, amiből aztán szikrákat kapott. Tanulmányait könyvben gyűjtötte össze *Kísérletek és megfigyelések az elektromosság köréből, amelyeket Philadelphiában, Amerikában végeztek (Experiments and Observations on Electricity Made at Philadelphia in America)* címmel, 1753-ban. Ennek alapján a Londoni Royal Society tagjává és a párizsi Academie Royale de la Science tagjává választották. Kísérleteivel versenyre tudott kelni Zeusszal, de nem volt ilyen eredményes az elektromos jelenségek elméleti magyarázatában, amikor bevezette az elektromos egy-fluidum hipotézist. Feltételezte, hogy az „üveg-elektromosság" az egyetlen elektromos fluidum, és az elektromos állapot két különböző fajtája e súlytalan fluidum *fölös mennyiségének* vagy *hiányának* tulajdonítható. A fölös mennyiségű üveg-elektromosságot tartalmazó testet (például a megdörzsölt üvegbotot) pozitív töltésűnek nevezte el, amelyikből hiányzott (például a megdörzsölt gumirudat), azt negatív töltésűnek. Ha két olyan test kerül össze, melyek egyike fölös, másika pedig hiányos mennyiségű elektromos fluidumot (üveg-elektromosságot) tartalmaz, akkor az elektromos áram az első testből, ahol fölös mennyiségben van, átáramlik a másikba, ahol hiányzik. Benjamin Franklin eme elképzeléséből alakult ki a modern terminológia, amely szerint az elektromos áram a pozitív elektródtól (az anódtól) áramlik a negatívhoz (a katódhoz). Manapság tudjuk, hogy Du Fay két elektromos fluidumot feltételező felfogása közelebb áll a valósághoz, mint Frankliné, bár a helyzet sokkal bonyolultabb mindkettőjük elképzelésénél. Vannak pozitív és negatív töltésű részecskék és minden normálisan pozitív vagy negatív töltésű részecskéhez tartozik egy „anti-részecske", amely éppen ellenkező töltésű. A fémdrótokban folyó elektromos áram esetében Franklin elképzelése állt közelebb az igazsághoz. Itt az elektromosság áramlása kizárólag az elektronok mozgásának tulajdonítható. Az eltérés csak az, hogy az elektronok gyanta-, és nem üveg-elektromosságot tartalmaznak. Mostanában felmerült az a javaslat, hogy a pozitív és a negatív elektromosság elnevezését cseréljék fel, hogy az áram konvencionális iránya a plusz pólustól a mínusz felé egybeessék az elektronok mozgásának az irányával. Ebben az esetben azonban azoknál a részecskegyorsítóknál volna baj az elnevezésekkel, amelyek nagyenergiájú protonokat lövellnek atomi célpontok felé: az elektromos áram így nem a részecskegyorsítók torkolatából indulna ki, hanem a célpontból. Folyadékok esetében, ahol az elektromosságot pozitív és negatív töltésű ionok szállítják ellenkező irányban, a terminológiának a változtatása semmit sem jelentene.

A XVIII. század második felében sok országban foglalkoztak fizikusok az elektromos és mágneses erők kvantitatív tanulmányozásával. Az egyik fontos felfedezés ezen a téren Charles Auguste de *Coulomb* francia fizikus nevéhez fűződik, aki megszerkesztette az úgynevezett „torziós mérleg"-et az igen csekély erők mérésére. Az 52. ábrán Coulomb műszerének vázlata látható.



52. ábra
Coulomb „torziós mérlege"

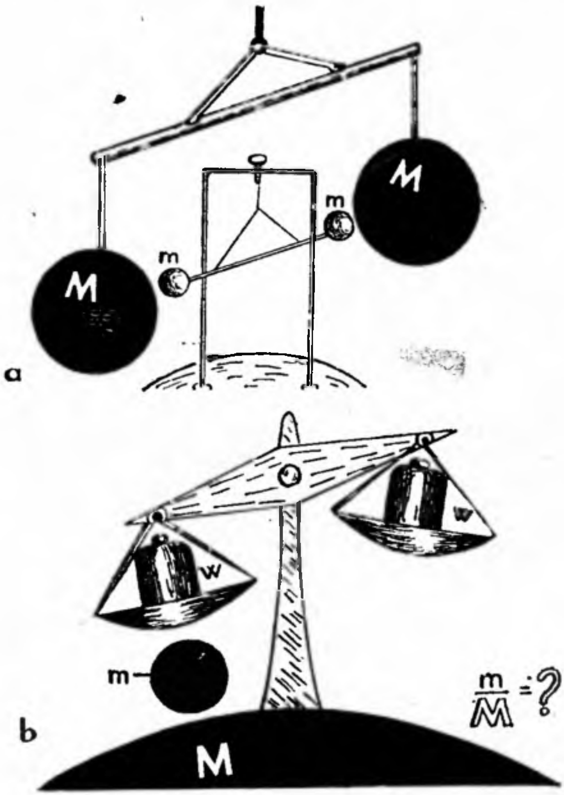
Főrésze hosszú vékony szálra függesztett rúd, melynek két végén két egyenlő nehéz gömb van. Ha nem hat erő a gömbökre, akkor a rúd beáll valamilyen egyensúlyi helyzetbe. Ha az egyik gömbön elektromos töltés van, és közelébe egy másik töltött gömböt helyezünk, akkor az elmozgatható gömbre ható elektromos erő a rudat a felfüggesztési pont körül addig forgatja, amíg a szál forgatónyomatéka ki nem egyensúlyozza a hatóerőt. Mivel a szál nagyon vékony, a gömbre ható kis erő is jelentékenyen elfordítja a rudat eredeti helyzetéből, mégpedig úgy, hogy az elfordulási szög arányos az erővel. Coulomb a mozgó és mozdulatlan gömböket különböző elektromos mennyiséggel feltöltve, és a köztük levő távolságot változtatva, felfedezte a róla elnevezett törvényt. Eszerint, az elektromos vonzó és taszító erő egyenesen arányos a két töltés szorzatával, és fordítva arányos a köztük levő távolság négyzetével (53. ábra). E törvény alkalmazásával a



53. ábra
A Coulomb-törvény grafikonja

töltés elektrosztatikus egységét, a *franklint* úgy definiálhatjuk, mint azt a töltést, amely 1 din erővel hat 1 cm-nyi távolságban levő ugyanolyan töltésre. A gyakorlatban a *coulomb*-ot használjuk az elektromos töltés egységéül, amely a fentebb definiált elektrosztatikus egységnél, a franklinnál 3 milliárdszor nagyobb. Coulomb ugyanezt a torziós mérleget használta a mágnesek kölcsönhatásának vizsgálatára. Egy mágnest függesztett a szálra, a műszert körülvevő üvegedény tetején keresztül pedig egy másik mágnest dugott be függőlegesen. Kimutatta, hogy ugyanaz a törvény érvényes a mágneses kölcsönhatásra is. A mágneses póluserősség egysége ezért úgy definiálható, mint annak a mágneses pólusnak az ereje, amely 1 din erővel vonz vagy taszít egy 1 cm távolságra elhelyezett ugyanolyan erejű pólust.

Nagyjából ugyanebben az időben élt Angliában egy igen különc és zárkózott jellemű férfi, Henry *Cavendish*, egy angol fő-



54. ábra.

A gravitációs vonzás mérésére szolgáló Cavendish-készülék hasonló volt az elektromos erőket mérő Coulomb-féle készülékhez. Ha megváltoztatjuk a mennyezetről függő két *M* tömeg helyzetét (a), akkor igen vékony szálra függesztett két kisebb *m* tömeg elmozdul. (b) A módosított Cavendish-módszer. Két *W* súly, amely azelőtt a földi gravitáció (*M* földtömeg) hatása alatt egyensúlyban volt, elmozdul, ha az egyik alá további *m* tömeget helyezünk nemes fia. Nem voltak barátai, félt a nőktől, Clapham Common-ban levő nagy háza cselédlányainak azt parancsolta, hogy ne mutatkozzanak előtte, az étkezésre vonatkozó utasításait naponta a hall asztalán hagyott cédulán találják meg. Nem érdekelte sem a zene, sem más művészet. Minden idejét a palotája magánlaboratóriumában végzett fizikai és kémiai kísérletekkel töltötte. Munkáját csak a hagyományos egészségügyi séták szakították félbe, vagy pedig a Royal Society Club vacsorái, amelyeken hébe-hóba részt vett, hogy tájékozódjék afelől, min dolgozik a többi fizikus és kémikus. 79 éves korában halt meg, s hosszú élete folyamán csak néhány aránylag jelentéktelen tanulmányt tett közzé. Halála után azonban 1 millió fontot találtak a bankszámláján és 20 kötetnyi feljegyzést a laboratóriumában. A feljegyzések hosszú ideig rokonai kezében maradtak. Amikor, mintegy 100 évvel később, nyilvánosságra hozták őket, kitűnt, hogy Henry Cavendish egyike volt a legnagyobb kísérleti fizikusoknak és kémikusoknak, akik valaha éltek. Coulombbal egy időben fedezte fel az elektromos és a mágneses kölcsönhatások törvényeit, a kémia terén végzett munkássága pedig egyenrangú Lavoisier teljesítményével. Mérleg segítségével tanulmányozta a kis tárgyak közti rendkívül gyenge gravitációs erőt, és kísérletei alapján meghatározta a Föld tömegének egzakt értékét (54. ábra). Fizikai egység ugyan nincs róla elnevezve, a cambridge-i Cavendish Laboratórium azonban egyike a világ legnagyobb hírű tudományos központjainak.

AZ ÁRAMÜTÉST OKOZÓ ANGOLNA

Afrika és Dél-Amerika bennszülöttei hosszú idő óta ismernek egy különös trópusi édesvízi halat, amely fájdalmasan megrázza azt, aki hozzányúl. A XVIII. század közepén egy brit hajó több ilyen halat hozott Londonba, ezeket a biológusok tanulmányozni kezdték. Megállapították, hogy a hal csak akkor ráz, ha feje tetejét és testének alsó részét két kézzel érintették. Ez és a rázás érzése a leydeni palack hatására emlékeztetett, amelyet akkoriban találtak fel. A halat ezért *Gymnotus electricus*-nak vagy elektromos angolnának nevezték el. Amikor bebizonyosodott, hogy a halat leydeni palack töltésére lehet használni, nem volt többé kétséges, hogy villamos kisüléssel állnak szemben. A hal által létrehozott elektromosság felkeltette Luigi *Galvani* olasz fiziológus érdeklődését. Galvani a békacombok izomösszehúzódását tanulmányozta – a békacomb kedvelt csemege a bolognai éttermekben. Egyszer észrevette (így szól a történet), hogy az erkélye vasrácsán rézhorgon lógó levágott békaláb úgy rángatózott mint az élőé, amikor hozzáért a rács vasához. Hogy „kontrollált feltételek mellett" folytathassa megfigyelését, Galvani kísérletet végzett – laboratóriumi jegyzőkönyve tanúsága szerint 1786. szept. 20-án –, amelyben egy vas-ággal és egy réz-ággal bíró villával megérintette a békaláb idegét és izmát. A békaláb minden érintésnél azonnal összehúzódott. Galvani bizonyosra vette, hogy ez az elektromos angolna által okozott elektromos ütésekhez hasonló jelenség. Feltevése azonban téves volt. Barátja, Alessandro *Volta* olasz fizikus hamarosan bebizonyította, hogy a békaláb összehúzódását okozó villamos áram tisztára szervetlen eredetű jelenség, amelyet mindig megfigyelhetünk, ha kétféle fémből összeforrasztott drót végét vizes sóoldatba mártjuk. Volta ezt a jelenséget fiziológus barátja tiszteletére *galvanizmusnak* nevezte el. Szerkesztett egy, ma „Volta-oszlop"-nak nevezett eszközt, amely nagyszámú, váltakozóan egymásra következő réz- és vas- vagy cinkkorongból áll, köztük sóoldatba mártott szövetrégetekkel. A Volta-oszlop az olyan modern villamos elemek prototípusa, amelyeket ma is használunk a zseblámpában és sok más készülékben. 1800 márciusában Volta beküldte a felfedezését leíró kéziratot közlésre a londoni Royal Society-nek, amely akkor a tudományos eszmecserék nemzetközi centruma volt. Tanulmányában a következőket írja:

Igen, a készülék, amelyről beszélek és amely kétségkívül meg fogja lepni Önöket, nem egyéb, mint különféle jó vezetők gyűjteménye, amelyek meghatározott módon vannak elhelyezve. 30, 40, 60 vagy több darab réz vagy inkább ezüst, mindegyik óndarabra van helyezve (a cink még jobb) és ugyanilyen számú vízréteg vagy más olyan folyadékréteg, ami jobb vezető a tiszta víznél, például sós víz, lúg stb., de lehet papírlemez, vagy bőrdarab stb. jól átáztatva ezekkel a folyadékokkal. Ilyen, különböző fémek közé helyezett rétegek, váltakozó egymásrakövetkezésben és ugyanabban a sorrendben, ez minden, amiből az új készülék áll. Ez, mint mondtam, a leydeni palack vagy a villamos telepek hatását utánozza, mert ugyanazokat az ütéseket adja. Azonban távolról sem éri el az erősen feltöltött telepek hatását, a robbanások erejét és zaját, a szikrát, és a távolságot illetően, amelyen a kisülés végbemegy stb. Csak a kismértékben feltöltött telep hatását éri el, mivel a telepnek igen nagy a kapacitása. Azonban végtelenül túlhaladja ezeknek az elemeknek a hatékonyságát és erejét abban, hogy nem kell előre feltölteni külső elektromosság segítségével, mint a telepeket, és abban, hogy mindig ütést ad, ahányszor megérintik, bármilyen gyakran következnek be ezek az érintések. A készülék és hasonló berendezéseknek részletesebb leírását adom itt, valamint a velük végezhető legfigyelemreméltóbb kísérleteket is."

Az oszlop Volta által készített eredeti rajzát mutatja az 55. ábra.

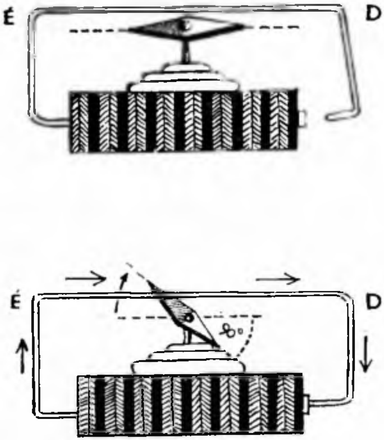
Ekkor igen szerencsétlen dolog történt. *Carlisle* és *Nicholson*, akik a Royal Society kiadványainak intézésével voltak megbízva, félretették a kéziratot, megismételték Volta kísérleteit, és az

55. ábra.
Volta-oszlop.

eredményeket saját nevükkel közölték. Mesterkedésük azonban nem járt sikerrel. Volta vizsgálatait más forrásokból már ismerték, Carlisle-t és Nicholsont tudományos plagizálással vádolták, és ők eltűntek a feledés homályában. Manapság a *Volta-oszlop* és a *volt*, az elektromos potenciál (feszültség) egysége örökíti meg a nagytehetségű olasz természettudós nevét. Az *elektromos potenciál* a töltött testek elektromosságának a mértéke. Tegyük fel, hogy van egy nagy gömbalakú vezetőnk, bizonyos elektromos töltéssel, amelyet növelni kívánunk. Ezt megtehetjük úgy, hogy szigetelt fogóval kis meghatározott töltésű fémgömböt a nagy gömbtől elég nagy távolságból (elméletben végtelen távolból) a nagy gömbhöz hozunk, és hozzá érintjük. A két gömb között ható Coulomb-taszítás miatt bizonyos munkát kell végeznünk, hogy a két gömböt összehozzuk. Azt a munkát, amelyet így végezni kell ahhoz, hogy a nagy gömb töltését egységnyivel növeljük, a gömb elektromos potenciáljának nevezzük. Ha az elektromos töltést *coulombban* mérjük, a munkát pedig *jouleban*, akkor az elektromos potenciált *voltban* kapjuk.

ELEKTROMÁGNESSÉG

Az elektromos és mágneses jelenség első kutatói nyilván érezték, hogy a két jelenségcsoport között valami mélyebb összefüggés van, de nem tudták ezt kideríteni. Az elektromos töltések nem befolyásolták a mágneseket, ugyanígy a mágnesek hatástalanok voltak az elektromos töltésre. Az elektromosság és a mágnesség közti kapcsolat felfedezésének dicsősége Hans Christian *Oersted* dán fizikusé, aki, miután Volta munkájáról hallott, szintén szerkesztett egy elektromos oszlopot, és ezzel különböző kísérleteket végzett. 1820-ban egy reggel, amikor a koppenhágai egyetem felé indult, hogy megtartsa előadását, a következő gondolata támadt. A statikus elektromosság semmiképpen sem befolyásolja a mágneseket. Talán más lesz a helyzet, ha próbát tesz a Volta-oszlop két pólusát összekötő drótban mozgó elektromossággal. Mikor megérkezett a fiatal diákokkal telt előadóterembe, az asztalra helyezte Volta-oszlopát, két végét platinadróttal kötötte össze, és egy mágnestűt helyezett el a közelében. A tű, amely különben mindig észak-déli irányba áll be, elfordult, és a drótra merőlegesen állt meg. (56. ábra). A hallgatóságot nem nagyon érdekelte a dolog, de Oerstedet annál inkább. Előadás után a teremben maradt, és megkísérelte az általa éppen felfedezett szokatlan jelenség ellenőrzését. Először azt gondolta, hogy a mágnestű mozgását az elektromos áram által fűtött drótból kiinduló léghuzat is okozhatja. Hogy igazolja, hogy nem így van, papírlemezt helyezett a drót és a mágnestű közé, hogy megállítsa a légáramlást. A helyzet ugyanaz maradt. Azután 180°-kal elfordította a Volta-oszlopot, hogy a drótban az áram ellenkező irányban mozogjon. A mágnestű ekkor szintén elfordult 180°-kal, északi pólusa most abba az irányba mutatott, ahová azelőtt a déli pólus. Világossá vált előtte, hogy a mágnes és a *mozgó* elektromosság között valóban van kölcsönhatás. A mágnestű elhelyezkedésének iránya attól függ, hogy az elektromos áram melyik irányban folyik a dróton keresztül. A felfedezésre vonatkozó valamennyi megfigyelését leírta, és közlés céljából beküldte



56. ábra
Oersted felfedezése: az elektromos áram és a mágnes kölcsönhatása

az *Annales de Chimie et de Physique* francia folyóiratnak. A cikk 1820 végén jelent meg, a szerkesztőség következő megjegyzésével:

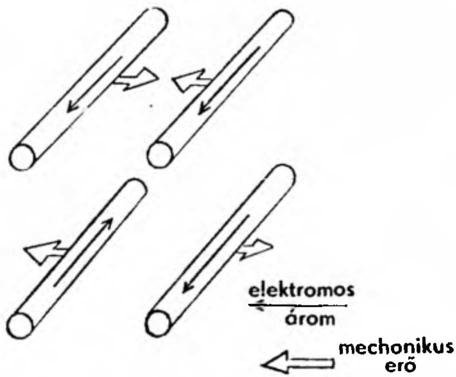
Az *Annales* olvasói meggyőződhettek már arról, hogy nem túl szívesen közlünk rendkívüli felfedezésekről szóló közleményeket*, és ez az elv mindeddig helyesnek bizonyult. Oersted úr tanulmányát azonban és az általa elért eredményeket, bármilyen különlegesnek tűnnek is, sokkal több részlet támasztja alá annál, hogy tévedésre lehetne gyanakodni.

Az *elektromágnesség*, amint azt Oersted elnevezte, valósággá vált!

Amikor Oersted felfedezésének híre eljutott Párizsba, itt magára vonta André Marie *Ampère* francia matematikus és fizikus

* Valószínűleg azért, mert azok többnyire valamilyen rögeszmében szenvedő embertől származtak.

figyelmét. Néhány héten belül kimutatta, hogy nemcsak az elektromos áram hat a mágnestűre, hanem két elektromos áram is hat egymásra. Ha két párhuzamos drótban ugyanabban az irányban folyik áram, akkor a két drót vonzza egymást, ha pedig a két áram iránya ellenkező, akkor taszítják egymást (57. ábra). Kimu-



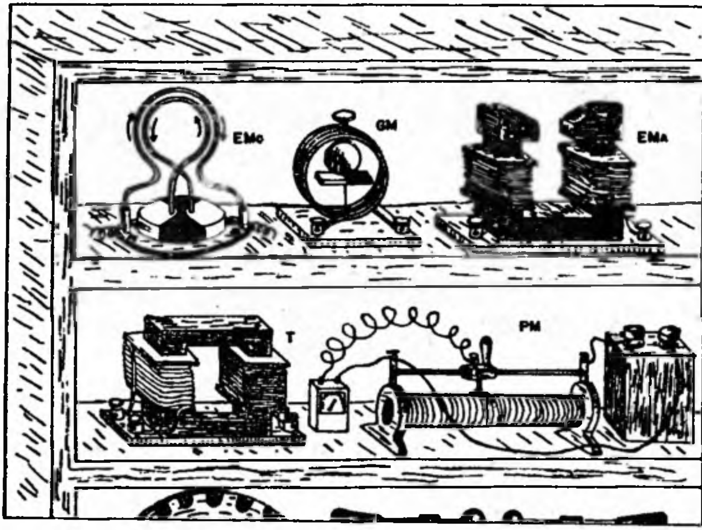
57. ábra.
Az áramok közötti kölcsönhatás Ampère-féle törvénye

tatta továbbá, hogy ha egy rézdróttekercsen, amely függőleges tengely körül foroghat, áram folyik át, akkor az mindig északdéli irányba áll be, ugyanúgy, mint az iránytű. Azt is kimutatta, hogy két ilyen tekercs ugyanolyan módon hat egymásra, mint két rúd alakú mágnes. E kísérletek vezették őt arra a gondolatra, hogy a természetes mágnességet a mágneses testekben folyó elektromos áram okozza. Elképzelte, hogy a mágneses anyag minden molekulájában köráram folyik, amely parányi elektromágnest képez. Ha az anyag nincs mágnesezve, akkor az egyes molekuláris elektromágnesek rendszertelenül helyezkednek el minden irányban, és az eredőjük nulla lesz. Mágnesezett testekben a molekuláris mágnesek, legalábbis részben, ugyanabba az irányba állnak be, így jön létre a mágneses vonzás vagy taszítás. Ampère eme felfogását a modern fizika teljes mértékben megerősítette. Az atomok és molekulák mágneses tulajdonságait az atommag körül keringő és saját tengelyük körül gyorsan forgó elektronok hozzák létre. Mivel Ampère volt az első, aki az elektromos áram fogalmát mint a vezetőben mozgó elektromosságot világosan meghatározta, az elektromos áram egységét róla nevezték el. Egy *amper* akkora áram, amely másodpercenként egy coulombot visz át egy vezető keresztmetszetén.

Ampère tudományos eredményei kimagaslók, de a szórakozott professzor klasszikus példája is volt. Mondják, hogy előadásai közben gyakran a táblatörlő rongyba fújta az orrát. Egy másik történet szerint egyszer Párizs utcáin járva, a járdaszélen állomásozó bérkocsi oldallapját fekete táblának nézte, és matematikai képleteket írt rá. Amikor a kocsi elindult, utána ment azután pedig vele futott, hogy befejezze a levezetést. Egyszer, amikor Bonaparte Napóleon látogatást tett a Párizsi Akadémián, Ampère nem ismerte meg őt. Napóleon mosolyogva jegyezte meg: „Látja Uram, mennyire zavaró, ha az ember nem látogatja meg gyakran a kollégáit. Én sem látom önt a Tuilleriákban, de tudom, hogyan vehetem rá, hogy eljöjjön és üdvözöljön engem!" Meghívta másnap ebédre a palotába. Másnap azonban az étkezőasztalnál széke üres maradt; Ampère elfelejtette a meghívást!

AZ ELEKTROMOS ÁRAMKÖR TÖRVÉNYE

Ampère-t elsősorban az elektromos áram mágneses hatása érdekelte. George Simon *Ohm* német fizikus viszont, aki abban az időben tanító volt Kölnben, azt kívánta tudni, mi az összefüggés az elektromos áram, az áramot vezető drót anyaga, valamint az áramot mozgásban tartó elektromos potenciál között. Több Volta-oszlopot alkalmazott, amelyeket sorba kapcsolva, különböző feszültséget állított elő. Ezen kívül egy Ampère által szerkesztett galvanométert használt, amelyben az elektromos áram erősségét a mágnestűnek az áram által okozott kitérése méri. Különböző fémekből készült különböző hosszúságú és keresztmetszetű drótok vizsgálatával megállapította, hogy az áram erőssége egyenesen arányos a drót keresztmetszetével, fordítva arányos a hosszával, és függ a drót anyagától is. Megállapította azt is, hogy egy adott drótnál az áramerősség arányos a két vég közötti *elektromos potenciálkülönbséggel*, a feszültséggel, amelyet az áramot a drótan mozgató, sorbakapcsolt Volta-oszlopok száma határoz meg. Az eset hasonló ahhoz, amikor a folyadék szabad áthatolását gátló üvegrosttal töltött csövön vizet szivattyúzunk át. A vízáram erőssége itt is a szivattyú által létrehozott nyomással és a cső keresztmetszetével nő, a cső hosszával pedig csökken, és a csőbe helyezett víz szabad áthaladását gátló anyag természetétől és mennyiségétől is függ.*



58. ábra.

Különböző elektromos műszerek.

Elektromotor (E. Mo.) Egy álló és egy mozgatható köralakú dróton ellenkező irányban halad át az elektromos áram. A keletkező Ampère-féle taszítás a mozgatható drótot tengelye körül forgatja. Az alsó korongon levő csúszó kontaktus közben az áram irányát megfordítja, és így a drót tovább mozdul.

Galvanométer (G. M.) Ha a tekercsen elektromos áram halad keresztül, akkor egy vékony dróton felfüggesztett kis mágnes elfordul normális helyzetéből. Minél erősebb az áram, annál nagyobb a kis tükörről visszavert fénysugárral mérhető elfordulási szög.

Elektromágnes (E. Ma.) Ha a tekercsen egyenáram halad át, a két pólus között erős mágneses tér van.

Transzformátor (T.) Ha a (baloldali) kis menetszámú tekercsen meghatározott feszültségű váltóáram halad át, akkor a (*jobboldali*) nagy menetszámú, vékony drótból készült tekercsen sokkal nagyobb feszültség jön létre.

Potencióméter (P. M.) Egy szabályozható ellenálláson telepből kiinduló áram halad keresztül. A csúszó kontaktushoz kapcsolt drót feszültsége változik, ha a kontaktust jobbra vagy balra mozgatjuk.

* Ez az analógia összefér a fémdrótban folyó elektromos áram modern felfogásával. Eszerint az ún. szabad elektronok által okozott áram az elektromos feszültség hatására utat tör magának a fémet alkotó szoros atomok között.

Ohm így bevezette a különböző drótok elektromos *ellenállásának* fogalmát, megállapítva, hogy az áramerősség egyenesen arányos az áramot létrehozó elektromos potenciálkülönbséggel, és fordítva arányos a drót ellenállásával, amely viszont a drót anyagától függ, és egyenesen arányos a drót hosszával, és fordítva arányos annak keresztmetszetével. Felfedezéseit 1827-ben tette közzé *A galvanikus áramkör matematikai szempontból* címen. Ebben lefektette az elektromos áramkörök jövőbeni tanulmányozásának az alapjait. Az Ohm-törvényt két egyszerű képlettel lehet kifejezni:

$$\text{áramerősség} = \frac{\text{elektromos potenciálkülönbség}}{\text{ellenállás}}$$

és

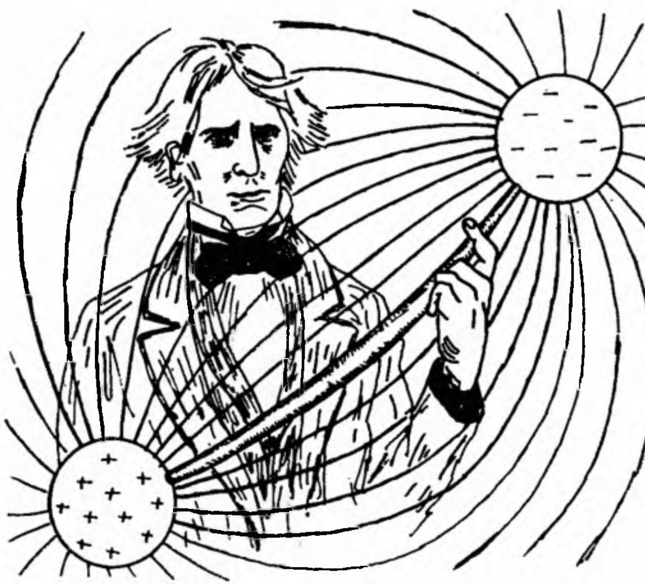
$$\text{ellenállás} = C\,\frac{\text{drótkeresztmetszet}}{\text{dróthosszúság}},$$

a C a használt anyagra jellemző állandó. Az elektromos ellenállás egységét Ohm tiszteletére *1 ohm*-nak nevezzük, ez az az ellenállás, amely 1 volt potenciálkülönbségnél 1 amper áramot hoz létre. Néha elektromos ellenállás helyett elektromos vezetőképességről beszélünk, ami annak a reciproka. Az elektromos vezetőképesség egységét egy *mho*-nak nevezzük, ami az ohm szó fordítottja, vagy siemensnek. Az 58. ábrán különböző elektromos műszerek láthatók, amelyek az elektromos jelenségekkel kapcsolatos kísérletekben használatosak.

FARADAY FELFEDEZÉSEI

Michael *Faraday* (59. ábra), aki az elektromos és mágneses jelenségekre vonatkozó klasszikus kutatásokat betetőzte, és új korszakot tárt fel, amelyet ma „modern fiziká"-nak nevezünk, 1791-ben született London közelében, egy kovácsmester fiaként. Családja szegény volt ahhoz, hogy iskoláztassa, ezért 13 éves korában kifutó lett Mr. Riebau könyvesboltjában. Egy évvel később Riebau könyvkötőinasnak szerződtette hét évre. Faraday nemcsak bekötötte a könyveket, amelyek a boltba kerültek, hanem sokat közülük elejétől végéig el is olvasott, ami szenvedélyes érdeklődést keltett benne a természettudományok iránt. Faraday a következőket írta ifjú koráról:

Inaskoromban szerettem a kezembe kerülő tudományos könyveket elolvasni, és ezek közül különös örömet okozott Marcet *Conversations in Chemistry* című könyve és az *Encyclopaedia Britannica* villamossággal foglalkozó cikkei. Egyszerű kísérleteket végeztem, amelyek hetenként néhány fillérbe kerültek, és villamos gépet is szerkesztettem, először üvegfiolával, azután pedig valódi hengerrel, és még más hasonló villamos készüléket is.



59. ábra.
Michael *Faraday* és erővonalai

Utolsó tanoncévében, amikor éppen húsz éves volt (és amikor Galvani és Volta felfedezései még újdonságok voltak), a következőket írta régi barátjának, Benjamin Abbottnak:

Nemrégiben néhány egyszerű galvanikus kísérletet végeztem csupán azért hogy magam előtt is szemléltessem a tudomány alapelveit. Knightékhez mentem, hogy egy kis pénzhez jussak, és emlékeztem rá, hogy formálható horganyuk van. Vásároltam ebből egy keveset. Vajon láttál-e már horganyt? Az első adagot a létező legvékonyabb darabokban kaptam, laposra hengerelve. Ez elég vékony volt elektromos pálcának, amint mondták, vagy De Luc elektromos oszlopnak, amint én azelőtt azt neveztem. Ebből korongokat alakítottam, ezekből és vörösrézből egy kis telepet készítettem. Az első telep hét pár lemezt tartalmazott!!! Ezek mérete egyenként félpennys érme nagyságú volt!!!

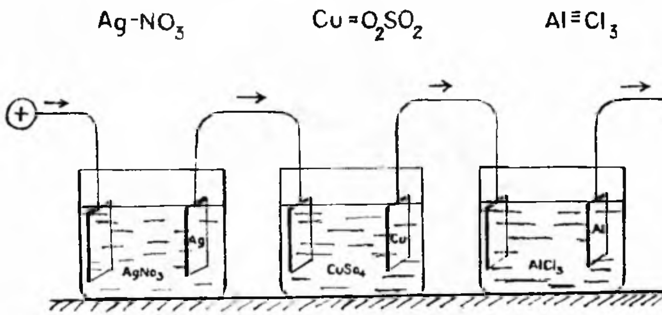
Én, Uram, én saját magam hét darab egyenként félpenny nagyságú korongot vágtam ki. Hét darab félpennyssel fedtem be ezeket, és közéjük hét vagy helyesebben hat nátrium-kloridoldattal átitatott papírdarabot helyeztem!!! De ne nevess, kedves Abbott, inkább figyeld, hogy mi volt a hatása ennek az egyszerű készüléknek. Elegendő volt magnézium-szulfát szétbontásához – ami a legnagyobb mértékben meglepett, mert nem volt, nem lehetett fogalmam arról, hogy ez az anyag erre használható. Egy gondolat villant fel agyamban, elmondom. Összekötöttem az oszlop tetejét, az alját és az oldatot rézdróttal. El tudod-e képzelni, hogy a réz bontotta szét a szulfátot – vagyis annak az oldatba merített részét? Biztosra veszem, hogy ez galvanikus folyamat volt, mert mindkét drótot rövid időn belül gázbuborékok fedték, és apró részecskékhez hasonló igen kicsi buborékok folytonos áramlása járta át az oldatot a negatív drótból kiindulva. Hogy a szulfát bomlott szét, azt az bizonyította, hogy a világos oldat két óra alatt zavarossá vált: magnézium volt benne szuszpendálva.

Ez volt az elektromos áram által bekövetkező kémiai bomlásnak, vagy – ahogy Faraday elnevezte – az *elektrolízis*nek a felfedezése. Faraday folytatta e jelenség vizsgálatát, és az utána következő évek folyamán két róla elnevezett alaptörvényt fedezett fel. Az első Faraday-törvény kimondja, hogy: *egy meghatározott oldatnál az elektródákon lecsapódó (vagy felszabaduló) anyag mennyisége arányos az oldaton áthaladt teljes elektromosság mennyiségével (vagyis az idővel szorzott áramerősséggel)*. Ez annyit jelent, hogy az elektromosságot az oldatban szállító töltéssel bíró molekuláknak (amelyeket később *ionok*nak neveztek el) szigorúan meghatározott elektromos töltésük van (60. ábra).

A második Faraday-törvény szerint *különböző anyagok egy vegyértékű ionjai egyenlő mennyiségű elektromosságot szállítanak, a két, három stb. értékű ionok pedig arányosan nagyobb töltéseket.* Ez az elektromos töltés univerzális egységének a létezését bizonyítja, amiről Faraday idején csak azt tudták, hogy a különböző atomokhoz van kötve. Később azonban a téren keresztül repülő szabad elektronok alakjában is észlelték.

Faraday-nek, az elektrolízis felfedezése után, állás után kellett néznie, mert tudta, hogy állása az üzletben már csak néhány hónapig tart. Leghőbb vágya volt, hogy Sir Humphry *Davy*nél, a neves kémikusnál dolgozhasson, akinek előadásait inaskorában is hallgatta. A Davy előadásairól készített jegyzeteit kalligrafikusan lemásolta, mesterien elkészített rajzokkal egészítette ki, elegáns kötetet készített belőlük, és elküldte neki, azzal a kéréssel, hogy munkát kapjon laboratóriumában. Sir Humphry *Davy* a Royal Institution of Great Britain egyik igazgatója volt, és az intézet egyik felügyelőjétől kért tanácsot a fiatal könyvkötő alkalmaztatása ügyében. Az a következőket mondta: „Mossa az edényeket! Ha értékes fiú, akkor elfogadja ezt a munkát; ha nem fogadja el, akkor semmire se való!"

Faraday elfogadta, és az intézetben maradt élete további 45 éve folyamán, először mint Davy segédje, azután mint munkatársa és végül, Davy halála után, mint utódja. Számos közelemé-



60. ábra.

Az elektrolízis Faraday-féle törvényei. Ha ezüstnitrát-, réz-szulfát- és alumínium-klorid-oldaton áramot eresztünk át, a fémek a negatív elektródákon csapódnak le. A lecsapódott fém mennyisége arányos az áthaladó elektromos töltéssel (Faraday első törvénye). Ha a lecsapódó ezüst mennyisége 108 g (az ezüst atomsúlya 108), akkor a lecsapódó réz mennyisége csak 31,7 g (a réz atomsúlyának a *fele*), a lecsapódó alumínium mennyisége pedig csak 9 g (az alumínium atomsúlyának *harmada*). Mivel az összes edényeken ugyanakkora töltés halad keresztül, azt következtethetjük, hogy a rézion az ezüstatom által vitt elektromos töltés kétszeresét, az alumínium pedig háromszorosát viszi magával. Ez megfelel e három elem vegyértékének, amint azt a vázlat fölötti képből láthatjuk. Ez Faraday második törvénye.

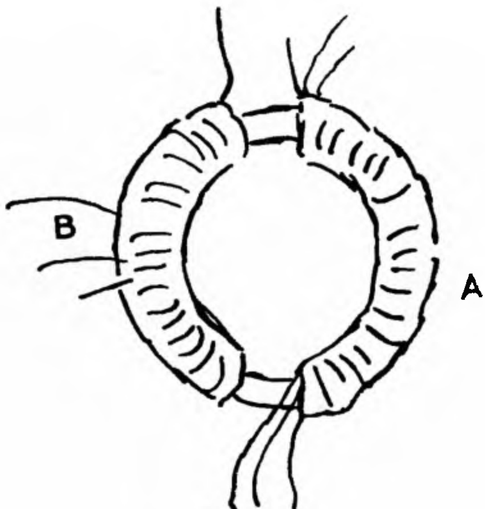
nye jelent meg tudományos folyóiratokban, de a tanulmányaival kapcsolatos legfigyelemreméltóbb dokumentum a *Napló*ja, amelyet 1820-tól 1862-ig folyamatosan vezetett. Ezt a Royal Institution nemrégiben (1932) hét vaskos kötetben adta ki, összesen 3230 oldalon, több ezer lapszéli rajzzal.

A *Napló*ból szó szerint idézzük Faraday talán legfontosabb felfedezésének, az elektromágneses indukciónak a leírását:

1831. aug. 29.

1. Kísérletek az elektromosságnak mágnességből való létrehozására vonatkozóan stb. stb.

2. Lágyvas-gyűrűt készítettem gömbvasból, mely 7/8 inch vastag, a külső átmérője pedig 6 inch (61. ábra). Egyik felére sok rézdrótmenetet csavartam a meneteket madzag és kalikó választja el – három drót volt, mindegyik 24 láb hosszú, ezeket össze lehetett kötni egybe, vagy mint külön darabokat használni. Mindegyik szigetelve volt a másiktól. A gyűrűnek ezt az oldalát nevez-



61. ábra.

Rajz Faraday *Napló*jából, amely az elektromágneses indukció felfedezését illusztrálja. Ha az *A* tekercsben megindul vagy megszűnik az áram, rövid ideig tartó elektromos áram indukálódik a *B* tekercsben

zük *A*-nak. A másik oldalon, de térközzel elválasztva, két darab volt felcsavarva, együttes hosszúságuk 60 láb volt, irányuk ugyanaz, mint az előző tekercseké, ezt az oldalt nevezzük *B*-nek.

3. Megtöltöttem egy, 10 négyinches négyzetalakú lemezből álló telepet. A *B*-oldalon levő tekercsekből egy tekercset csináltam, végeit pedig összekötöttem rézdróttal, amely közvetlenül egy mágnestű fölött haladt el (3 láb távolságra a vasgyűrűtől). Azután összekötöttem az *A* oldali egyik tekercs végeit a teleppel; azonnali hatás mutatkozott a tűn. Rezgett, és végül az eredeti helyzetben került nyugalmi állapotba. Mikor megszakítottam az *A*-oldal kapcsolását a teleppel, ismét jelentkezett a tű ingadozása.

Vagyis az egyik tekercsen áthaladó elektromos áram egy, a közelben elhelyezett másik tekercsben áramot indukál, ugyanúgy, mint ahogy egy test elektromos töltése elektromos polarizációt indukál egy másik közeli testben. Míg azonban az elektromos polarizáció esetében a hatás statikus, és mindaddig tart, amíg a két test egymás közelében marad, addig az elektromos áram indukciója dinamikus folyamat. A második tekercsben csak azokban az időközökben folyik áram, amíg az első tekercs árama 0-tól normális értékig növekszik, vagy amikor ettől az értéktől ismét 0-ra csökken.

Nem egészen 3 hónappal e korszakalkotó felfedezés után további fontos eredményeket ért el Faraday az elektromosság és mágnesség összefüggésével kapcsolatos tanulmányaiban. Itt közöljük *Napló*jából, hogyan történt ez:

1831. okt. 17.

56. Üres hengert készítettem papírból 8 rézdróttekerccsel, amelyek valamenynyien egy irányban haladnak, és méretük a következő:

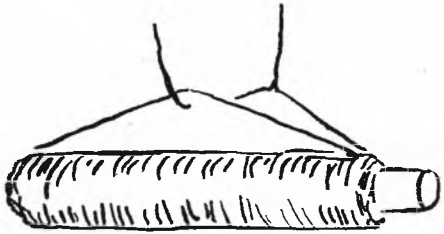
	láb	hüvelyk
1 vagyis a legkülső	32	10
2	31	6
3	30	
4	28	
5	27	
6	25	6
7	23	6
8 vagyis a legbelső	22	
	220 láb,	

a kiálló végeket bele nem értve, valamennyit fonal és kalikó választja el egymástól. A papírhenger belső átmérője 13/16 hüvelyk volt, a külső átmérő 1 1/2 hüvelyk, a réztekercsek (hengeralak) hossza 6 1/2 hüvelyk.

57. Kísérletek 0-val. A henger egyik végén levő 8 tekercsvégződést megtisztítottam, és nyalábbá kötöttem össze. Ugyanígy a másik 8 végződést is (62. ábra). Ezeket az összekötött végeket azután hosszú rézdrótok segítségével a galvanométerrel kötöttem össze – azután egy 3/4 hüvelyk átmérőjű és 8 1/2 hüvelyk hosszú hengeralakú rúdmágnes egyik végét bedugtam a hengeralakú tekercs végébe – utána gyorsan egész hosszában beledugtam, amire a galvanométer tűje megmozdult, amikor kihúztam a tű ismét megmozdult az ellenkezőirányban. Ez a hatás minden alkalommal megismétlődött, ha a mágnest a hengerbe tettem, vagy onnan kivettem, és ennek következtében elektromos hullám keletkezett pusztán a mágnes közelítése miatt, nem pedig attól, hogy ott van a mágnes.

58. A tű nem maradt meg elfordult helyzetében, minden alkalommal visszatért a helyére. A mozgások sorrendje a fordítottja volt az előző kísérletek sorrendjének – a mozgás iránya megfelelt az előző kísérleteknek, vagyis a tű igyekezett a gerjesztő mágnessel párhuzamos helyzetbe kerülni, mivel a drót-

nak és az azonos nevű pólusoknak ugyanazon oldalán volt, ugyanabban az irányban.
59. Ha a 8 tekercsből egy hosszú tekercset csináltam, a galvanométerre gyakorolt hatás nem volt olyan erős, mint azelőtt, valószínűleg még a fele sem. Így a legjobb, darabokban és a végén összerakva.
60. Ha a 8 tekercs közül csak egyet használtam, alig volt észlelhető hatás.



62. ábra.
Rajz Faraday *Napló*jából, annak a kísérletnek illusztrálására, melyben elektromos áramot indukált a tekercsben a mágnes bedugásával vagy kihúzásával.

Az elektromos áram indukálása a tekercsben itt is dinamikus jelenség. Az áram csak addig létezett, ameddig a mágnest betolta vagy kihúzta a tekercsből. Az a gondolat, hogy a mágnességnek elektromos áramot kell létrehoznia, mert az elektromos áram is hoz létre mágnességet, Faraday idejében már a levegőben volt. Sok fizikus igyekezett ezt a hatást megfigyelni. De félrevezette őket az elektrosztatikus indukcióval való analógia, és csak statikusan elrendezett mágnesekkel és drótokkal próbálkoztak. Vettek például két mágnesrudat, amelyre drótot tekertek. Ez azonban makacsul megtagadta, hogy szikrát hozzon létre a két drótvég összeérintésekor. Faraday zsenijének köszönhető és talán annak, hogy nap mint nap roppant mennyiségű kísérletet végzett, hogy kiderült: az elektromos áram létrehozása *dinamikus* folyamat, amelyhez vagy a másik áram erősségének a változása, vagy a mágnes helyzetének a változása szükséges. Ugyanez a gondolat felmerült egy másik fizikusban, az amerikai Joseph *Henry*ben is, aki azonban addig halogatta a közzétételt, amíg a felfedezés prioritása az Atlanti Óceán másik partján levő férfié lett.

Michael Faraday kutató szelleme nem állt meg, amikor kibogozta az elektromosság és a mágnesség rejtett összefüggését. Azt is tudni kívánta, hogy az optikai jelenségeket befolyásolják-e a mágnesek. Ezirányú fáradozásainak eredménye az a fölfedezés, hogy mágneses térbe helyezett átlátszó anyagokban a fény polarizációs síkja elfordul (lásd 95. oldal). Itt szóljon ismét Faraday a felfedezéséről:

1845. szept. 13.

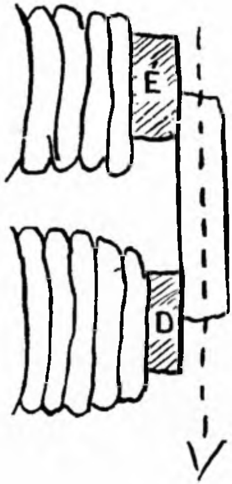
7498. Ma több (különbözően átlátszó) testen átvezetett mágneses erővonalakkal dolgoztam. Miközben polarizált fénysugarat bocsátottam rajtuk keresztül, megvizsgáltam a sugarat Nichol-prizmával vagy másképpen. A mágnesek elektromágnesek voltak, az egyik a nagy hengeralakú elektromágnesünk, a másik pedig kereten levő tekercsbe helyezett vasmag — amely azonban egyáltalán nem volt olyan erős, mint az előbbi. A Grove-telep 5 cellájának áramát egyszerre bocsátottam át a két tekercsen, és a tekercsek mágnesesek lettek, és megszűntek mágnesesek lenni az elektromos áram bekapcsolásával és kikapcsolásával.

Több negatív eredményt ír le olyan kísérletekről, amelyeknél a levegőn és néhány más anyagon hatolt át a fény. Ezután a következőket írta a Naplóba ugyanazon a napon:

7504. *Nehézüveg.*

2·1,8 hüvelyk nagyságú, 0,5 hüvelyk vastag nehézüveg-darabbal kísérleteztem. Anyaga szilícium, bór és ólom vegyülete, a két legrövidebb éle csiszolva. Nem mutatkozott hatás sem állandó sem szaggatott árammal, ha *azonos mágneses pólusok* vagy *ellenkező* pólusok a szemben levő oldalakon voltak (a polarizált fény irányához képest) — akkor sem, ha azonos pólusok voltak ugyanazon az oldalon — *DE*, ha ellenkező mágneses pólusok voltak ugyanazon az oldalon (63. ábra), akkor *hatást gyakorolt a polarizált sugárra*, és így bebizonyosodott, hogy a mágneses erő és a fény hatással vannak egymásra. Nagyon valószínű, hogy ez a megállapítás rendkívül termékeny és nagyértékű lesz a természeti erő eme két megnyilvánulásának vizsgálatában.

Valóban így is lett. A „Faraday-effektus", a mágneses erővonalak mentén terjedő fény polarizációs síkjának a forgása (az igen rövid elektromágneses hullámokból álló) fényhullámok és az egyes atomokon belüli elektromos áramok közötti belső kapcsolatot mutatja. Ezeket a parányi áramköröket, amelyek létezését Ampère tételezte fel elsőnek (145. old.), ma úgy tekintjük, mint az atomi elektronok keringését a központi mag körül. Nézzünk két azonos atomot, amelyek oly módon helyezkednek el a mágneses térben, hogy az egyik elektron az óramutató járásával egyező, a másik pedig azzal ellenkező irányban kering (64. ábra). Az első esetben a mágneses tér a mozgó elektronra a mag felé irányuló erőt gyakorol, a második esetben ellenkező irányút. Így az egyik esetben az elektronpálya átmérője csökken, a másik esetben nagyobbodik. Az atomon belüli áramok viselkedésének a különbözősége az óramutató irányával megegyező, és ellentétes keringésnél befolyásolja az elektromágneses (fény-) hullám anyagbeli terjedését, és ki lehet mutatni, hogy ennek eredménye a polarizációs sík Faraday által megfigyelt elfordulása.



63. ábra.

Rajz Faraday *Napló*jából, amely a mágneses térnek a fényre gyakorolt, Faraday által felfedezett hatását szemlélteti. A mágneses erővonalak mentén áthaladó polarizált fény polarizációs síkja a térerősséggel arányos szöggel elfordul

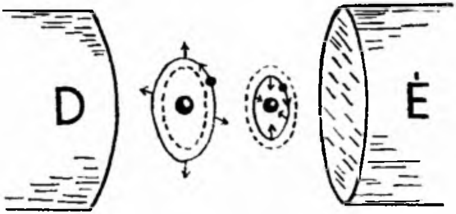
Faraday meg volt győződve arról, hogy a fizikai világban megfigyelt valamennyi jelenség valamilyen módon összefügg egymással. Ezért összefüggést igyekezett találni az elektromágneses erők és a newtoni gravitációs erők között. 1849-ben a következőket írta laboratóriumi *Napló*jába:

Gravitáció. Ez az erő biztosan alkalmas arra, hogy kísérleti kapcsolatba hozzuk az elektromossággal, a mágnességgel és más erőkkel, mint ami belőlük épül fel, kölcsönös hatásban van velük és azonos eredményeket ad. Nézzük egy pillanatra, hogyan lehet elkezdeni ennek tényekkel és kísérlettel való vizsgálatát.

Ezeknek az összefüggéseknek a felfedezésére irányuló kísérletei azonban eredménytelenek voltak, *Napló*jának ezt a részét a következő szavakkal fejezi be:

Kísérleteim itt egyelőre véget érnek. Az eredmények negatívak. Nem rendítik meg erős meggyőződésemet a gravitáció és az elektromosság közötti összefüggés létezésében, akkor sem, ha nem bizonyítják az összefüggést.

Egy évszázaddal később egy másik zseni törte a fejét évtizedeken keresztül az elektromágneses és gravitációs jelenségeket összefogó „egységes térelmélet" megalkotásán. De, mint Michael Faraday, Albert *Einstein* is meghalt anélkül, hogy a feladatot megoldotta volna.

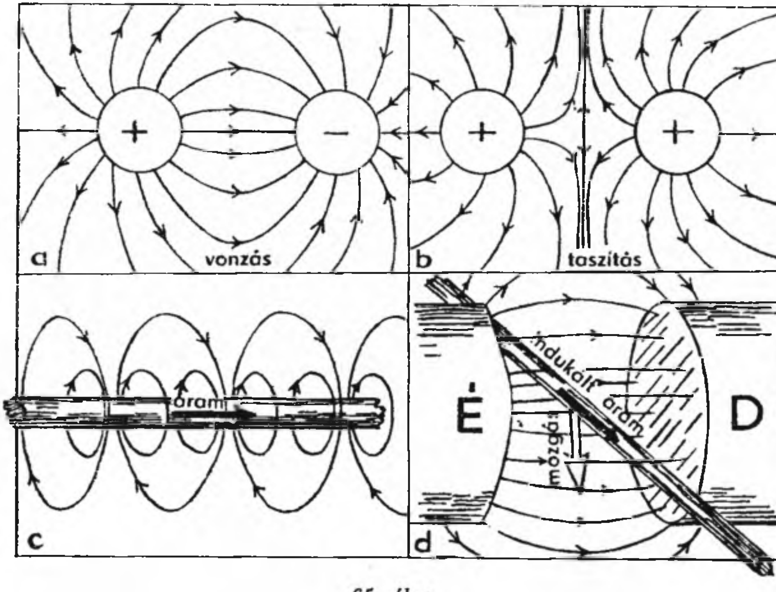


64. ábra.

A Faraday-effektus magyarázata. A mágneses térben keringő atomi elektronra ható erő a mozgás irányától függ. Az óramutató járásával ellenkező forgás esetén (baloldalt) az erő növeli a pálya sugarát, és csökkenti a frekvenciát. Az óramutató irányával egyező forgás esetén (jobboldalt) az erő csökkenti a sugarat, és növeli a frekvenciát. Ha a kétféleképpen keringő elektronok kölcsönhatásba lépnek a fénnyel, elfordítják annak a polarizációs síkját

AZ ELEKTROMÁGNESES TÉR

Bármily jelentősek voltak is Faraday kísérletei, felfedezései, elméleti elgondolásai sem maradnak el mögöttük. Igen kevéssé volt iskolázott, és a matematikából gyakorlatilag semmit sem tudott, ezért nem lehetett – mint ma mondanánk – elméleti fizikus. A helyzet azonban az, hogy fizikai jelenségek elméleti képének megalkotásánal a felsőbb matematika ismerete gyakran szükségtelen, néha még káros is. A kutató könnyen eltéved a bonyolult képletek sűrűjében és, mint a közmondás tartja, nem látja a fáktól az erdőt. Faraday előtt az elektromos és mágneses, valamint a gravitációs erőkről azt képzelték, hogy azok a testeket elválasztó üres téren át hatnak. Faraday egyszerű gondolkozásmódja számára azonban úgy tűnt, hogy ennek a „távolbahatásnak" nincsen fizikai értelme. Ha azt látta, hogy egy teher egyik helyről a másikra mozdul, látni akarta a kötelet is, amely azt húzza, vagy a botot, amely azt taszítja. Hogy az elektromos töltések és a mágnesek között ható erőket szemléletesen maga előtt lássa, a közöttük levő teret úgy képzelte el, hogy azt „valami" kitölti, ami húzni és taszítani képes. Beszélt valamiről, ami mint egy csomó gumicső, a két egymással szemben álló elektromos töltés vagy mágneses pólus között feszül (65. ábra), és azokat összehúzza. Azonos előjelű töltések vagy



65. ábra.

Faraday erővonalai különböző elektromágneses kölcsönhatások esetén. (a) Két szemben levő elektromos töltés közötti elektromos erővonalak. (b) Egyenlő előjelű elektromos töltések közötti erővonalak. (c) Áramot vivő drótot körülvevő mágneses erővonalak. (d) Mágneses erővonalakat átszelve mozgó drótban (*fehér nyíl*) indukált elektromos áram. A kis *fekete nyilak* mutatják az erővonalak konvencionális irányát: mindig a pozitív töltéstől a negatív töltéshez, az északi pólustól a déli pólushoz irányulnak

pólusok esetében ezek a gumicsőszerű valamik másképpen haladnak (65b. ábra), és széttaszítják egymást. A Faraday-csöveket vagy erővonalakat mágnes esetében ki lehet mutatni.

ha finom vasreszeléket szórunk az üveglapra, amelyen a mágnes van. A reszelék mágneses lesz, és a csövek (erővonalak) mentén ható mágneses erők irányában helyezkedik el, amiből a III. táblán látható minták keletkeznek. Elektromos tér esetében elektromos polarizáció alkalmazásával kaphatunk hasonló eredményeket, ezt a kísérletet azonban nehezebb elvégezni. Faraday megmutatta: az elektromos és a mágneses csövek (erővonalak) okozzák a különböző elektromágneses jelenségeket. Ha dróton áram folyik át, akkor a drótot köralakban erővonalak veszik körül (65c. ábra), amelyek a mágnestűre hatást gyakorolnak, és azt meghatározott irányba mozdítják el. Ha egy vezető drótot egy mágneshez képest mozgatunk (vagy fordítva), akkor az mágneses csövek útját keresztezi (65d. ábra), és ennek eredményeképpen áram indukálódik benne.

Faraday ezen elképzelései bizonyos tekintetben elég naivak voltak, és nagyrészt kvalitatívak, mégis új korszakot nyitottak meg a fizika fejlődésében. A testek között nagy távolságra ható misztikus erők helyébe a testek között és körül a térben folytonosan elosztott „valami" lépett, „valami", aminek minden egyes pontban meghatározott értéket lehet tulajdonítani. Ezzel bevezette a fizikába az elektromos, mágneses vagy gravitációs kölcsönhatásra egyaránt az „erőtér", vagy egyszerűen a „tér" fogalmát. Az üres tér által elválasztott anyagi testek közötti erőt úgy lehetett felfogni, mint a testeket körülvevő terek közötti „közelhatások" eredményét.

Faraday elképzeléseinek matematikai megfogalmazását a híres skót James Clerk *Maxwell* (66. ábra) adta meg. Maxwell Edinburghban született, néhány hónappal azután, hogy Faraday közzétette felfedezését az elektromágneses indukcióról. Faraday-vel ellentétben, igen jó matematikus volt. Tíz éves korában az Edinburgh Academy tanulója lett, és kénytelen volt idejének egy részét a görög rendhagyó igéknek és a „humanista tudományok" más ágainak a tanulmányozására fordítani. Ő azonban inkább matematikával akart foglalkozni, és első eredménye ezen a téren, saját szavai szerint, azt volt, hogy „egy tetraédert, egy dodekaédert és még két más »édert« készítettem, amelynek nem tudtam a nevét". Tizennégy éves korában elnyerte az Akadémia matematikai érmét egy tanulmányáért, amelyben megmutatta, hogyan lehet tűvel és fonállal tökéletes ellipszist szerkeszteni. Néhány évvel később, Maxwell két tanulmányt nyújtott be a Royal Societynek, az egyik címe „Gördülő görbék elméletéről", a másiké „Rugalmas szilárd testek egyensúlyáról". Mindkét tanulmányát másvalaki olvasta fel a Societyben, mert „nem volt ildomos, hogy egy blúzos kisfiú lépjen az előadói emelvényre". Maxwell 1850-ben, 19 éves korában beiratkozott a

$$\operatorname{div}\vec{E}=4\pi\rho\,;\ \operatorname{div}\vec{H}=0$$

$$\operatorname{rot}\vec{E}=-\frac{1}{c}\frac{\delta\vec{H}}{\delta t}$$

$$\operatorname{rot}\vec{H}=\frac{1}{c}\frac{\delta\vec{E}}{\delta t}+\frac{4\pi}{c}\rho\vec{v}$$

66. ábra.
James Clerk *Maxwell* és az elektromágneses tér Maxwell-féle egyenletei

cambridge-i egyetemre. Négy évvel később megkapta a diplomáját, 1856-ban pedig kinevezték az aberdeeni Marischal College természetfilozófiai tanszéke vezetőjének. Itt maradt 1874-ig, akkor visszahívták Cambridge-be, az akkor újonnan alapított Cavendish Laboratórium igazgatójának.

Maxwell kezdetben csak a tiszta matematika iránt érdeklődött, de hamarosan élénken érdekelni kezdte a matematikai módszerek alkalmazása különböző fizikai problémákra. Igen jelentősen hozzájárult a hő kinetikus elméletének kifejlesztéséhez (lásd a IV. fejezetet), de legjelentékenyebb munkája kétségkívül az volt, hogy a matematika nyelvén fogalmazta meg Faraday elgondolásait az elektromágneses tér természetéről és törvényeiről. Általánosította azokat az empirikus tényeket, hogy a változó mágneses tér elektromotoros erőt és elektromos áramot indukál a vezetőkben, valamint hogy a változó elektromos tér és az elektromos áram mágneses teret hoz létre. Az általánosítás eredményképpen megalkotta a később róla elnevezett híres egyenleteket. Ezek a mágneses tér időbeli változását az elektromos tér térbeli eloszlásával kapcsolják össze és fordítva.

Ha a mágnesezett testek, töltött vezetők és az elektromos áramok eloszlását ismerjük, akkor Maxwell-egyenletekkel minden részletében ki tudjuk számítani az elektromágneses teret és annak időbeli változását. Maxwell kimutatta, hogy bár az elektromos és mágneses terek rendszerint elektromosan töltött és mágnesezett testekhez vannak kötve, szabad elektromágneses hullámokként is létezhetnek és terjedhetnek a térben. Hogy ezt világosan lássuk, vegyünk két gömb alakú vezetőt, amelyek közül az egyik pozitív, a másik negatív elektromossággal van töltve (67a. ábra). A két gömböt körülvevő térben sztatikus elektromos tér van, amely a töltések elektromos energiáját valami olyan módon tárolja, mint ahogy egy erősen meghajlított rugó tárolja a mechanikai energiát. Ha a két gömböt dróttal összekötjük, akkor áram folyik egyikből a másikba. Így a gömbök töltése, és ezzel az őket körülvevő elektromos tér is, gyorsan csökken (67b. ábra), végül eltűnik (67c. ábra). Az áram azonban mágneses teret hoz létre a drót körül. Abban a pillanatban, amikor az elektromos tér 0, a rendszer egész energiája ebben a mágneses térben van felhalmozva. A folyamat azonban nem áll meg, az elektromos áram, bár csökkenő intenzitással, de tovább folyik a drótban, és újra feltölti a két gömböt ellenkező előjelű elektromossággal (67d. ábra). A mágneses tér energiája újra az elektromos tér energiájává alakul. Végül megszűnik az áram, a gömbök újra fel vannak töltve ugyanannyira, mint kezdetben, de ellenkező előjellel. A folyamat aztán újra megindul, ellenkező irányban. Az elektromos rezgések folytatódnak oda-vissza, amíg a töltést hordó drót felmelegedése által okozott fokozatos energiacsökkenés meg nem állítja a rezgéseket. Az egész hasonló az ingához, ahol a mozgás kinetikus energiája, amely a lengések közepén éri el a maximumát, a két szélső helyzetbe érve, potenciális energiává alakul.

Maxwell egyenleteiből le tudta vezetni, hogy a leírt rezgő elektromágneses tér az oszcillátort körülvevő téren át energiát magával vivő hullámok alakjában szétterjed. Mivel az elektromos erővonalak a dróton átmenő síkban fekszenek, a mágneses erővonalak viszont merőlegesek rá, a hullám elektromos és mágneses vektorai merőlegesek egymásra és a terjedési irányra is (68. ábra). 1888-ban, röviddel azután, hogy Maxwell tanulmánya megjósolta, Heinrich *Hertz* német fizikus bebizonyította e hullámok létezését. Ez vezetett azután a rádiótechnika kifejlődéséhez, ami manapság az ipari civilizáció nagy részét alkotja.

Maxwell elméletének egyik igen fontos eredményét kívánjuk most részletesebben tárgyalni, az elektromágneses hullámok terjedési sebességének a kiszámítását. Ha az elektromos és mágneses terek kölcsönhatásával foglalkozunk, felmerül a kér-

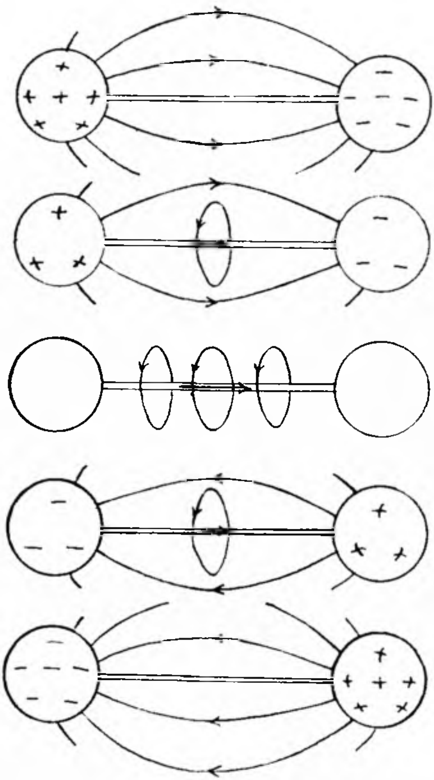
a

b

c

d

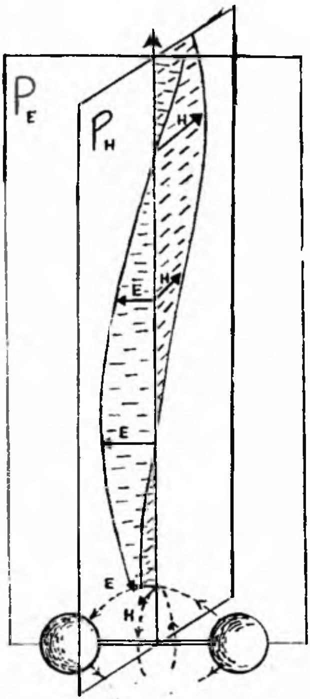
e



67. ábra.

Elektromágneses rezgések két vezető között. Az elektromos tér (a) energiája periodikusan átalakul mágneses tér (c) energiájává, majd visszaalakul elektromos energiává (e).

dés, hogy milyen eszközöket használjunk a különböző elektromágneses mennyiségek mérésére. Előzőleg láttuk, hogy az elektromos töltés egységét úgy definiálták, mint amely a tőle 1 cm távolságra levő, vele egyenlő töltést 1 din erővel taszítja. Ennek megfelelően az elektromos térerősség egységét úgy kell definiálnunk, mint azt a teret, amely 1 din erővel hat egy benne levő egységnyi elektromos töltésre. Hasonlóképpen definiálták a



68. ábra.
Elektromágneses hullám kialakulása két vezető közötti töltés oszcillációjának az eredményeképpen

mágneses pólus egységét és a mágneses térerősség egységét Mi történik azonban, ha olyan jelenségekkel foglalkozunk amelyekben elektromosság is, mágnesség is előfordul? Ilyen például az elektromos áram által létrehozott mágneses tér.

Tegyük fel, hogy áram hatását vizsgáljuk a dróttól 1 cm távolságban levő mágneses pólusra. Az elektromos áram egységét úgy definiálhatjuk. mint azt az áramot, amely egy másodperc alatt a fentebb definiált töltésegységet szállítja. Ebben az esetben azonban a hatóerő, amely az áram által létrehozott mágneses térben az 1 cm távolságban levő egységnyi pólusra hat, nem szükségszerűen 1 din. Valóban nem is annyi. Másrészt viszont az egységnyi áramot definiálhatjuk úgy is, mint olyan mágneses teret létrehozó áramot, amely 1 din erővel hat az 1 cm távolságban levő egységnyi pólusra. Ekkor azonban a dróton egységnyi áram esetén áthaladó töltés nem egyenlő a fent definiált elektrosztatikus töltésegységgel. A fizikusok nem választották az egyik lehetséges definiciót, elvetve a másikat, hanem mindkettőt használják, úgy hogy egy konstans tényezőt vezetnek be az egységek egyik rendszerből a másikba való átszámítására. – A helyzet hasonlít a hő mérésénél fennállóhoz, ahol a kalóriát is, az erget is lehet használni ($4{,}2 \cdot 10^7$ átszámítási faktorral). Az elektromos vonzás és taszítás Coulomb-féle törvényével definiált töltésegységét (a fenti két definíció közül az elsőt) *elektrosztatikus egység*nek (esu) vagy franklinnak (Fr), az Oersted-féle törvény (az elektromos áram mágneses pólusra gyakorolt hatása) segítségével definiált egységet pedig *elektromágneses egységnek* (emu) nevezzük. Egy elektromágneses egység egyenlő $3 \cdot 10^{10}$ elektrosztatikus egységgel. Vagyis a másodpercenként 1 elektrosztatikus egységet vivő áram csupán $1/3 \cdot 10^{10}$ din erővel hat az 1 cm távolságra levő egységnyi pólusra. Két test viszont, amelynek mindegyike 1 elektromágneses egységnyi töltést tartalmaz, és amelyek 1 cm távolságra vannak, egymást $3 \cdot 10^{10}$ din erővel taszítják.

Amikor Maxwell az egyenleteit megalkotta, az elektromos térnél elektrosztatikus egységeket kellett használnia, a mágneses térnél pedig elektromágneses egységeket. Ezért az egyik oldalon elektromos teret, a másik oldalon pedig mágneses teret tartalmazó képletekbe becsúszott a $3 \cdot 10^{10}$ tényező. Amikor a tovaterjedő elektromágneses hullámok leírására alkalmazta az egyenleteket, kiderült, hogy a terjedési sebesség számértéke éppen a két egység hányadosa, vagyis $3 \cdot 10^{10}$ cm/sec. És íme, ez a szám pontosan megegyezik a fény vákuumbeli sebességével, amit már Maxwell születése előtt különböző módszerekkel megmértek. Áhá – gondolta Maxwell valószínűleg –, ez azt jelenti, hogy a fényhullámok a valóságban igen rövid elektromágneses hullámok. Ez a gondolat vezetett a fizika egy igen fontos ágának, *a fény elektromágneses elméletének* a kifejlődéséhez. A fény és anyag egymásrahatását, beleértve a fény kibocsátását, terjedését és elnyelését, ma úgy tekintjük, mint a térben terjedő rövid elektromágneses hullámok és a parányi elektromosan töltött részecskék, a pozitív töltésű atommag körül keringő elektronok között ható erők eredményét. A Maxwell-egyenletek felhasználásával az optika összes jelenségeit és törvényeit a legapróbb részletekig meg tudjuk magyarázni.

Látszólag össze nem függő fizikai mennyiségek közti számbeli egyezések gyakran vezettek alapvető új felfedezésekhez és széles körű általánosításokhoz a fizikában. Ilyen volt az elektrosztatikus és elektromágneses egységek arányának egyezése. Később látni fogjuk, hogy a forró testek által kibocsátott fény- és hőhullámokra vonatkozó konstans megegyezése azzal a konstanssal, ami az ibolyántúli sugarak által megvilágított testből kibocsátott elektronokkal kapcsolatos, igen jelentősnek bizonyult a kvantumelmélet kifejlődésében.

VI. FEJEZET

A RELATIVITÁSELMÉLET FORRADALMA

Mint az előző fejezetben láttuk, a mindenen áthatoló és az anyagi testek közötti és azokon belüli teret is betöltő univerzális közeg fogalma a XIX. század végére szilárdan kialakult a fizikában. Ez a közeg a fényhullámok terjedésének hordozójaként szerepelt, és mint ilyet, Huygens világéterének nevezték. Az elektromosan töltött és a mágneses testek között ható erők okozójának is ezt tartották, és ebben az összefüggésben a Faraday-féle erővonalak nevet kapta. Maxwell munkája a két hipotetikus közeg szintéziséhez vezetett; Maxwell kimutatta, hogy a fény nem egyéb mint tovaterjedő elektromágneses hullám. Elegáns matematikai elmélettel kapcsolta össze a fény, az elektromosság és a mágnesség jelenségeit. Az eredmények ellenére azonban a fizikusok képtelenek voltak a titokzatos univerzális közeg tulajdonságait azokkal a fogalmakkal leírni, amelyeket az ismert anyagi testek: gázok, szilárd testek és folyadékok leírására használtak. Minden ilyen kísérlet éles ellentmondásra vezetett.

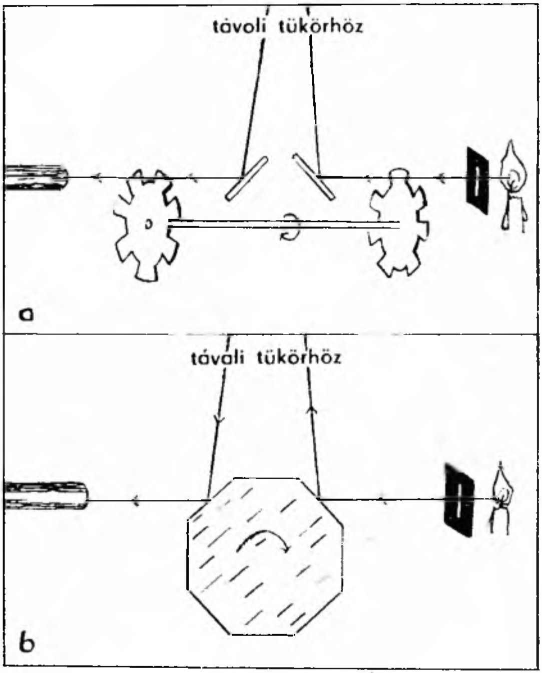
A KLASSZIKUS FIZIKA VÁLSÁGA

A polarizáció jelensége kétségkívül bebizonyította, hogy a fény transzverzális rezgés, amelyben az anyag a terjedés irányára merőlegesen mozog oda-vissza. Transzverzális rezgések azonban csak szilárd anyagban fordulhatnak elő, amelyek a folyadékoktól és gázoktól eltérően, minden alakváltoztatási kísérletnek ellenállnak. Így az étert szilárd anyagnak kellett tekinteni. De ha ez így van, és ha az éter kitölti a körülöttünk levő teret, hogyan mozoghatunk a Földön, és hogyan keringhetnek a bolygók évmilliárdokon keresztül a Nap körül, anélkül, hogy bármiféle ellenállásba ütköznének?

Lord *Kelvin*, a híres angol fizikus azzal kísérelte meg az ellentmondás feloldását, hogy az éternek a cipész csirizéhez, vagy a pecsétviaszéhoz hasonló sajátságokat tulajdonított. Ezek az anyagok ***képlékenyek.*** Hirtelen ható nagy erő hatására ugyan üvegdarabhoz hasonlóan törnek, azonban hosszú idő alatt már csekélyebb erő (például saját súlyuk) hatására is folyadékként viselkednek. Kelvin úgy érvelt, hogy mivel a fényhullámokban az erő iránya másodpercenként millió milliárdszor változik, az éter rugalmas szilárd anyagként viselkedik vele szemben. A sokkal lassabban mozgó emberekre, madarakra, bolygókra vagy a csillagokra viszont gyakorlatilag nem fejt ki ellenállást. Ha azonban az éterben a Faraday-féle erővonalak hozzák létre a húzó-nyomó feszültséget, akkor permanens mágnesek és statikus elektromos töltések nem létezhetnének megfigyelhető időn át, mivel a mechanikus feszültség a képlékenység miatt gyorsan megszűnne ebben a titokzatos közegben. Könnyű fölényesen bírálni valakit hibás következtetéseiért akkor, amikor már ismerjük a helyes választ. Mégis meglepő, hogy a múlt század nagy fizikusai nem ismerték fel, hogy ha létezik éter, akkor ennek egészen más tulajdonságai vannak, mint az általunk ismert közönséges anyagi testeknek. Ismeretes volt, hogy a gázok összenyomhatósága, a folyadékok folyékonysága, a szilárd testek rugalmassága és a közönséges anyagi testek minden egyéb tulajdonsága e testek molekuláris szerkezetének tudható be, a molekulák mozgásának és a közöttük ható erőknek a következménye. Úgy látszik, hogy talán, az éternek az elemek periódusos rendszerében a nulla rendszámot adó Dmitrij Mengyelejev orosz kémikuson kívül, senki nem gondolta, hogy az éternek saját külön molekulaszerkezete van, és hogy ez a hipotézis csak további komplikációkkal járna. Ha a mágneses és elektromos erőket és a fény terjedését valamiféle anyagi közeg létezésével kell magyarázni, akkor ennek semmiképpen sem szabad hasonlítania az általunk ismert közönséges anyagi testekhez. Az emberi szellemet azonban gyakran korlátozza a hagyományos gondolkodás. Einstein zsenialitására volt szükség, aki a régimódi és ellentmondásos éter-fogalmat kihajította az ablakon, és azt az átfogóbb elektromágneses tér-fogalommal pótolta. Einstein ennek ugyanolyan fizikai realitást tulajdonított, mint bármely anyagi testnek.

Galilei végezte az első fénysebességmérési kísérletet. Egy este segédjével kimentek a szabadba. Két elzárható lámpát vittek magukkal. Egymástól olyan távol helyezkedtek el, hogy még éppen lássák egymást, és így végezték a kísérletet. A segéd felvillantotta a lámpát, amint Galilei lámpáját felvillanni látta. A visszajelzés érkezésének késedelme mutatta volna, hogy a fény véges sebességgel terjed, és egyúttal lehetővé tette volna e sebesség megmérését. A kísérlet eredménye azonban negatív volt, mert, mint ma már tudjuk, a fény olyan roppant sebességgel terjed, hogy a várt késedelem nem lett volna több egy másodperc százezred részénél. Galilei kísérletét több mint két évszázaddal később Armand Hyppolite *Fizeau* francia fizikus ismételte meg javított formában. Ő a 69. ábrán látható berendezést használta. Ez egy hosszú tengely két végére szerelt két fogaskerékből állt. A kerekek úgy helyezkedtek el, hogy az egyiknek a fogai szembenálltak a másik fogai közti nyílásokkal. Így a jobboldali fényforrásból eredő fénysugarat a bal oldalon levő megfigyelő nem láthatta a kerék semmilyen helyzetében. Azt várta azonban Fizeau, hogy ha a kerekeket gyorsan forgatja, olyan gyorsan, hogy a kerekek a szomszédos fogak közötti távolság felével fordulnak el, mialatt a fény egyik keréktől a másikig jut, akkor a fény akadály nélkül áthalad a fogközökön. A fény útját a két kerék között szándékosan meghosszabbította három tükör segítségével. A háromból az egyiket a készüléktől nagy távolságra helyezte el, amint az ábrán látható. Amikor a kerék elérte a másodpercenként többezres fordulatszámot, akkor Fizeau örömmel vette észre, hogy a fény simán áthalad a rendszeren. A megfigyelt adatokból azt következtette, hogy a fény sebessége elég pontosan $3 \cdot 10^{10}$ cm másodpercenként. Ez egyezett azzal, amit Olaf *Römer* dán csillagász alig három évtizeddel Galilei halála után kapott. Ő a Jupiter-holdak fogyatkozásainak látszólagos késését figyelte meg, aminek nagysága attól függött, hogy a bolygó a Földtől milyen messze volt.

Fizeau módszerét csak a fény levegőbeli terjedési sebességének a mérésére lehetett használni. (Ez gyakorlatilag ugyanannyi, mint a vákuumbeli sebesség.) Ugyanis a fény útjának hosszabbítására használt tükröt messzire kellett helyezni, hogy a hatás megfigyelhető legyen. Fizeau barátjának és munkatársának, Jean *Foucault*nak (mindketten 1819-ban születtek, ők voltak a francia tudomány Castor és Polluxa) sikerült a távolságot csökkentenie oly módon, hogy a fogaskerekek helyett forgótükröt alkalmazott. Az ő készüléke, amely a 69b. ábrán látható, és magyarázat nélkül is érthető, lehetővé tette az optikai út alig néhány méterre való rövidítését. Így a fény egész útja alatt vízben vagy más átlátszó anyagon haladhatott át. A kísérletek szerint a fény sebessége anyagi testekben *kisebb*, mint

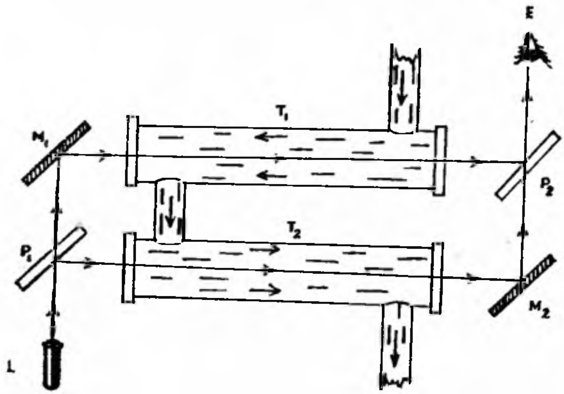


69. ábra.
Fizeau (a) és Foucault (b) fénysebesség-mérése

vákuumban. Ez, ha késve is, mégis hatásosan igazolta Huygens felfogását Newtonével szemben. A fény sebessége vízben, üvegben stb. pontosan annyinak adódott, amennyinek a hullámelmélet megjósolta, vagyis a vákuumbeli sebesség osztva a kérdéses anyag törésmutatójával.

A XIX. század fizikusai, amikor már pontosan tudtak fénysebességet mérni, különféle fényterjedési kísérletekbe kezdtek. Abban reménykedtek, hogy némi világosságot derítenek a feltételezésük szerint a fényt hordozó titokzatos anyagnak, az éternek a tulajdonságaira. Igen fontos kísérletet végzett 1851-ben Fizeau. Kísérlete igazi jelentőségét azonban csak Einstein első cikkeinek a megjelenése után ismerték fel. Fizeau elképzelése az volt, hogy megvizsgálja, hogyan befolyásolja a fény sebességét annak a közegnek a mozgása, amelyben terjed. A levegőben terjedő hanghullámok terjedési sebességét, természetesen, közvetlenül befolyásolja a levegő mozgása. A széllel vagy a szél ellenében haladó hang sebessége annyival növekszik vagy csökken, amennyi a szél sebessége. Ez nem kétséges, de vajon így van-e ez a mozgó közegben terjedő fénynél is? E kérdés eldöntése céljából Fizeau elhatározta, hogy megméri a fény terjedési sebességét egy csőben, amiben igen gyorsan víz áramlik. Vajon hozzá kell-e adni a fény vákuumbeli terjedési sebességéhez a víz sebességét ebben az esetben? A fénysebesség várható megváltozása a kísérletben természetesen igen csekély, mert a technikailag elérhető legnagyobb vízáramlási sebesség igen kicsiny a fénysebességhez képest. Ezért a fénysebesség előző paragrafusban leírt direkt Fizeau-, vagy Foucault-féle módszere nem mutatna különbséget. Mivel azonban ebben az esetben csupán a fény mozgó vagy álló vízben megfigyelhető sebessége közötti *különbséget* kívánjuk ismerni, használhatunk sokkal pontosabb módszert, amely a két fénysugár interferenciáján alapszik. E kísérlet elvét a 70. ábra mutatja.

Az L higanylámpából monokromatikus fény esik a nagyon vékony ezüstréteggel bevont P_1 üveglapra. A réteg olyan vastag, hogy a fény felét visszaveri, a másik fele áthalad rajta és az M_1 tükörről verődik vissza. Ily módon két egyenlő intenzitású párhuzamos sugarat kapunk, amelyek rezgései szinkronizálva vannak, ugyanúgy mint a III. fejezetben leírt Young-féle kísérletben. A két fénynyaláb áthalad a T_1 és T_2 csövön, azután a P_2 üveglap és az M_2 tükör újra egyesíti őket. Ha a víz mindkét csőben mozdulatlan, akkor a két sugár azonos fázisban (vagyis hullámhegy hullámheggyel, hullámvölgy hullámvölggyel találkozik) kerül a megfigyelő E szemébe, és a két sugár összeadódik az eredeti intenzitású sugárrá. Ha azonban a víz a csövekben ellenkező irányban mozog, és a fényhullámokat magával „vontatja", akkor az alsó nyaláb hullámai hamarabb érkeznek E-hez, mint a felső nyaláb megfelelő hullámai. Ha a különbség éppen fél hullámhossz (hullámhegy hullámvölggyel és hullámvölgy hullámheggyel találkozva), akkor a sugarak interferencia miatt gyengítik egymást. Becsüljük meg nagyjából, hogy



70. ábra.
Fizeau kísérlete a mozgó közegben terjedő fény sebességváltozásának megfigyelésére

milyen sebesen kell a víznek mozognia, hogy ilyen fáziskülönbséget hozzon létre. A csövek hossza Fizeau kísérletében 1,5 m vagyis 150 cm, a használt fény hullámhossza pedig mintegy 0,5 μ ($5 \cdot 10^{-5}$ cm) volt, tehát a cső hosszában $3 \cdot 10^6$ teljes hullám fér el. Hogy ezt a számot fél hullámhosszal változtassuk, a fény mozgó vízbeli sebességét $\frac{0,5}{3 \cdot 10^6} = 1,7 \cdot 10^{-7}$-szeresével kell növelni vagy csökkenteni. Minthogy a fény sebessége a vízben körülbelül $2 \cdot 10^{10}$ cm/sec, az ehhez szükséges vízáramlás sebessége mintegy $2 \cdot 10^{10} \cdot 1,7 \cdot 10^{-7} = 3400$cm/sec $= 34$ m/sec. Ez elég sok, de ez a vízáramlási sebesség a csőben megvalósítható. Így tehát a fénysebesség remélt változása kimutatható e kísérletben az interferenciacsíkok megfigyelésével.

Fizeau különböző áramlási sebességek mellett pontosan elvégezte a mérést. Olyan eredményhez jutott, amely a két várható lehetőség között a középúton volt. A fény sebessége áramló vízben *más* volt, mint mozdulatlan vízben, a különbség azonban *kisebb* volt, mint a vízáramlás sebessége. Az interferenciacsíkok megfigyelt eltolódásából azt látta, hogy a vízáramlás irányában terjedő fény sebessége a vízáramlás sebességének 44%-ával növekedett, az ellenkező irányban terjedő fény sebessége pedig ugyanennyivel csökkent. Ha más folyadékokat alkalmazott, akkor úgy találta, hogy a folyadékokban terjedő fényre gyakorolt „vontató" hatás is más: kiderült, hogy a fény sebességét mozgó közegben a következő tapasztalati képlet* fejezi ki

$$V = \frac{c}{n} \pm \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) v,$$

n a kérdéses folyadék törésmutatója, v pedig az áramlás sebessége. Sem Fizeau, sem más abban az időben nem tudta elképzelni, mit jelenthet ez a képlet. A kérdés felderítetlen maradt, míg fél évszázaddal később Einstein ki nem mutatta, hogy a titokzatos empirikus képlet a relativitáselmélet egyenes következménye.

A FÉNY SEBESSÉGE A MOZGÓ FÖLDÖN

1887-ben, amikor Einstein nyolcéves volt, A. A. *Michelson* amerikai fizikus és asszisztense, E. W. *Morley* egy másik figyelemre méltó kísérletet végeztek. Ha Fizeau meg tudta figyelni a gyors vízáramlás befolyását a benne terjedő fényre, akkor talán meg lehet figyelni a térben mozgó Föld mozgásának hatását a felszínén mérhető fénysebességre. A Föld Nap körüli pályáján körülbelül 30 km/sec sebességgel mozog, és ezért a felszínén, és valószínűleg testén keresztül is, éter-szélnek kell fújnia, hasonlóan ahhoz, mint amikor az autós nyitott kocsit vezet szélcsöndes napon. Michelson és Morley kísérlete ugyanazon az elven alapszik, mint Fizeau-é, de módosítaniuk kellett, mert ebben az esetben nem áll rendelkezésre a két párhuzamos csővel egyenértékű olyan berendezés, amelyben ellenkező irányokban fúj az éter-szél. Ehelyett oda-vissza menő fénysugár visszatérésének az idejét mérték, egyik esetben a várt éter-szél

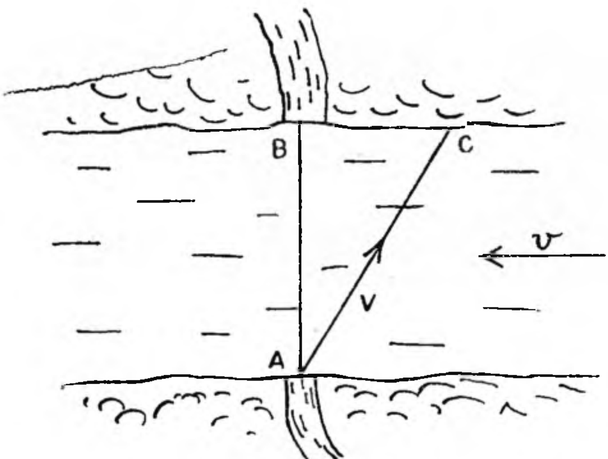
* Tapasztalati (empirikus) képlet az olyan, amelyet nem valamilyen elméletből vezetünk le matematikai úton, hanem egyszerűen a tapasztalati adatok alapján alkotjuk meg úgy, hogy lehetőleg jól egyezzen azokkal.

irányában, másik esetben pedig arra merőleges irányban. Hogy a kísérlet elvét megértsük, tekintsünk egy motoros hajót, amely oda-vissza közlekedik egyszer egy széles folyó hosszában, azután keresztben a folyón. Az első esetben az út egyik részében a vízáramlás irányában halad a hajó, $V+v$ sebességgel, V a hajó vízhez viszonyított sebessége, v pedig a folyó sebessége. Visszafelé haladva ár ellen halad a hajó, sebessége pedig $V-v$. Ha a két partmenti kikötő távolsága L, akkor az oda-vissza utazás ideje

$$t_{\leftrightarrows}=\frac{L}{V+v}+\frac{L}{V-v}=\frac{2LV}{V^2-v^2}=\frac{2L/V}{1-\dfrac{v^2}{V^2}}.$$

$2L/V$ volna az oda-vissza utazás ideje mozdulatlan vízben. Látjuk, hogy áramló vízben az idő mindig hosszabb. Nevezetesen ha v egyenlő vagy nagyobb mint V, akkor a hajó soha nem tér vissza, és $t_{\leftrightarrows}$ végtelen lesz.

Nézzük most a folyót keresztben átszelő hajót (71. ábra). Ha az A pontból indul és az átellenben levő B ponthoz kell érkeznie, akkor a hajó egy kevéssé ár ellen kell haladjon, hogy a víz sodrását kiegyenlítse. Amíg a vízhez képest megteszi az



71. ábra.
Átkelés a folyón

AC távolságot, azalatt CB távolsággal viszi lefelé a víz sodra. Látható, hogy a BC/AC arány egyenlő a víz és a hajó sebességének arányával. Ha a Pithagorász-tételt alkalmazzuk az ABC háromszögre, akkor a következő kifejezést kapjuk:

$$\overline{AB}^2 + \left(\overline{AC}\cdot\frac{v}{V}\right)^2 = \overline{AC}^2$$

vagy

$$\overline{AB}^2 = \overline{AC}^2\cdot\left(1-\frac{v^2}{V^2}\right),$$

vagy

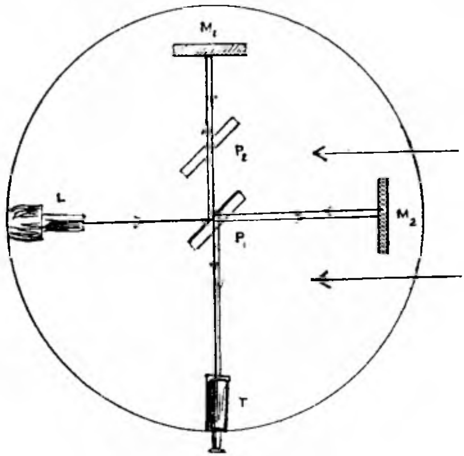
$$\overline{AC} = \frac{\overline{AB}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{V^2}}}.$$

Ha AB$=L$, akkor az átkelés és a visszatérés idejét a következő kifejezés adja meg:

$$t_{\uparrow\atop\rightarrow} = \frac{2\overline{AC}}{V} = \frac{2L/V}{\sqrt{1-\frac{v^2}{V^2}}}.$$

Ugyanúgy mint az előző esetben, az idő hosszabb, mint volna álló vízben, de a $\sqrt{1-\frac{v^2}{V^2}}$ korrekciós tényező kisebb, mint az előzőleg kapott $1-\frac{v^2}{V^2}$ tényező.

Az áramló folyó helyére tegyünk most éter-szelet, a hajó helyére pedig fényhullámot, és akkor megkapjuk a Michelson—Morley kísérletet. Az általuk használt berendezést vázlatosan a 72. ábrán láthatjuk. Higanyon úszó márványlapra volt szerelve, úgy hogy nagyobb nehézség és rázkódás nélkül lehetett tengelye körül forgatni. Az L lámpából fénynyaláb esett a lap közepén elhelyezett üveglemezre. Az üveglemezt vékony ezüst réteg fedte, amely a beeső nyaláb egyik felét visszaverte, a másik felét pedig átengedte. A két nyalábot a középponttól egyenlő távolságra elhelyezett M_1 és M_2 tükör verte vissza. Az M_1-ről visszavert sugár az ezüstözött lemezhez visszaérkezve részben keresztülment rajta (azzal nem törődtek, hogy mi történt a másik felével). Az M_2-ből érkező sugár részben visszaverődött (azzal nem törődtek, hogy mi történt a másik felével). A két sugár belépett a T távcsőbe. Ha nem volna éter-szél, akkor a két sugár azonos fázisban lenne, és a távcső látómezején maximálisan meg lenne világítva. Ha fújna éter-szél, mondjuk jobbról balra, akkor a szélre merőlegesen menő sugár kevesebbet



72. ábra.

Michelson és Morley készüléke. Berajzoltuk a fénysugarak útját. Az M_1 és M_2 tükörre eső és onnan visszaverődő sugarakat az ábra az áttekinthetőség céljából egymáshoz képest kissé eltolódva mutatja. Az M_2 felé haladó sugár áthalad a P_1 üveglemezen és ez is útkülönbséget okozhat. Ezt egyenlíti ki a P_2 üveglemez

késne, mint a széllel vagy a széllel szemben haladó, és akkor a sugarak legalább részben kioltanák egymást az interferencia miatt. Becsüljük meg nagyjából a helyzetet számszerűen. A két egymásra merőlegesen haladó fénysugár menetidejének aránya az előbbi képletek szerint

$$\frac{1-\frac{v^2}{c^2}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}=\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}},$$

itt V helyére a c fénysebesség került. A $\left(\frac{v}{c}\right)^2$ arány ebben az esetben $\left(\frac{3\cdot10^6}{3\cdot10^{10}}\right)^2 = 10^{-8}$ vagy 0,000 000 01. Ki lehet mutatni*, hogy a v^2/c^2 ilyen kicsi, a $\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$ gyök nagyon jó közelítéssel helyettesíthető az $1-\frac{1}{2}\frac{v^2}{c^2} = 1-0{,}000\,000\,005 = 0{,}999\,999\,995$ értékkel.

Így a két hullám érkezésében várható különbség csupán az 1 %₀ 5 tízmilliomod része. Ez azonban elég nagy ahhoz, hogy érzékeny optikai műszerekkel észlelni lehessen. Ha a márványlap átmérője 3 m (nagyjából ennyi volt), akkor a fény teljes futási ideje a lemeztől a tükörig és vissza $\frac{300}{3\cdot10^{10}} = 10^{-8}$ sec. Így a két hullám távcsőhöz való megérkezésének időkülönbsége

$$5\cdot10^{-9}\cdot10^{-8} = 5\cdot10^{-17}\ \text{sec}.$$

A $6\cdot10^{-5}$ cm hullámhosszú fény rezgési ideje

$$\frac{6\cdot10^{-5}}{3\cdot10^{10}} = 2\cdot10^{-15}\text{sec}.$$

Így az érkezési idő-különbség $\frac{5\cdot10^{17}}{2\cdot10^{-15}} = 2{,}5\cdot10^{-2}$ periódus.

vagyis a rezgési periódus 2, 5 %₀-a. Ennek már észrevehető gyengítést kell okoznia interferencia révén. A tényleges kísérletnél nem az intenzitás csökkenését, hanem az interferenciacsíkok eltolódását figyelték meg. A csíkoknak a köztük levő távolság 2,5 %₀-ával kell eltolódni. Ha a készüléket 90°-kal elfordítjuk (ezért kell higanyon lebegnie), és így az M_1 és M_2 tükrök szerepét felcseréljük, akkor ugyanazt az eltolódást várhatjuk az ellenkező irányban. Vagyis a szélek teljes eltolódása a köztük levő távolság 5 %₀-a. Ez az eltolódás, ha észlelnénk, kimutatná, hogy a Föld sebessége a térben 30 km másodpercenként.

A kísérletet elvégezték, de semmi eltolódást nem találtak. Hogy lehetséges ez? Vajon a mozgó Föld 100 %₀-ban magával vitte a fény-étert? Michelson kísérletét megismételték magasan

* Ezt tartalmazza Sir Isaac *Newton* első matematikai tanulmánya.

a Föld felszíne fölött lebegő ballonban. Ez a kísérlet bebizonyította, hogy ez a feltevés nem állja meg a helyét. A fizikusok minden fejtörésük ellenére sem tudták ennek a magyarázatát adni. G. F. *Fitzgerald* brit (és nagyon ír) fizikus igen forradalmi felfogást kockáztatott meg. Szerinte minden anyagi test, amely v sebességgel mozog az éterben, a mozgás irányában $\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$ arányában összehúzódik. Ez az összehúzódás, amelyről feltételezték, hogy a fizikai szerkezetétől függetlenül minden testnél ugyanaz, a Michelson-kísérletben a középponti lemez és az éter-szél irányában levő tükör közötti távolságot pontosan annyival csökkenti, hogy az érkezési idők egyenlők lesznek, így az interferenciacsíkok nem tolódnak el. Számos kísérletet tettek, hogy ezt a hipotetikus „Fitzgerald-összehúzódás"-t az anyagi testeket alkotó atomok közötti elektromos és mágneses erők egymásrahatásával megmagyarázzák, de mindez hasztalan volt. Ebből az időből való ez a kis rigmus:

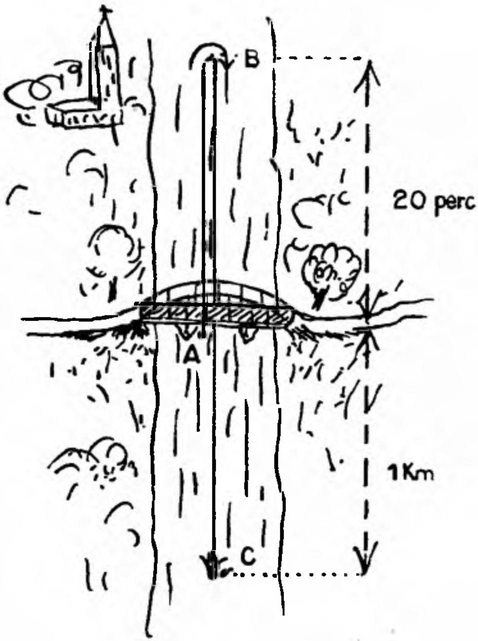
Ismertem egy Fiske nevű titánt,
Aki oly gyors vívó hírében állt,
Hogy egy-egy heves közbeszúrás, –
S a Fitzgerald-összehúzódás
Tőréből korongot csinált.

De a Fitzgerald-kontrakció még csak féligazság.

INTERMEZZO

Mielőtt a Michelson–Morley kísérlet negatív eredményeinek Einstein-féle magyarázatával behatóbban foglalkoznánk, jó lesz megbeszélni egy problémát, amely ugyan nem relativitáselmélet, de mégis relativisztikus zamata van. Egy férfi a folyón ár ellen halad csónakjával (73. ábra), és a csónak farában félig üres whiskys üveg van. Amikor a csónak átmegy a híd alatt, az egyik hídpillérről visszaverődő hullám megingatja a csónakot, és a palack a vízbe csik. A csónakos nem veszi észre, és 20 percig folytatja útját az ár ellen, a palack pedig az árral lefelé csorog. 20 perc múlva a férfi észreveszi, hogy a palack eltűnt, megfordul a csónakkal (elhanyagoljuk az ehhez szükséges időt), és most lefelé halad, a vízhez képest ugyanolyan sebességgel, mint azelőtt. A híd alatt egy kilométerrel veszi fel a palackot. Az a kérdés, mekkora a folyó sebessége? Az olvasó kísérelje megoldani a problémát, mielőtt tovább olvasna, és látni fogja, hogy ez milyen bonyolult. Nem egy jó matematikust hozott zavarba ez a kérdés.

A feladat azonban igen egyszerű, ha ahelyett, hogy az eseményeket a parthoz viszonyítva írnánk le, amint az természetes volna, a folyó vizéhez viszonyítjuk. Tegyük fel, hogy az árral lefelé úszó tutajon ülünk, a víz hozzánk képest nyugszik, a partok

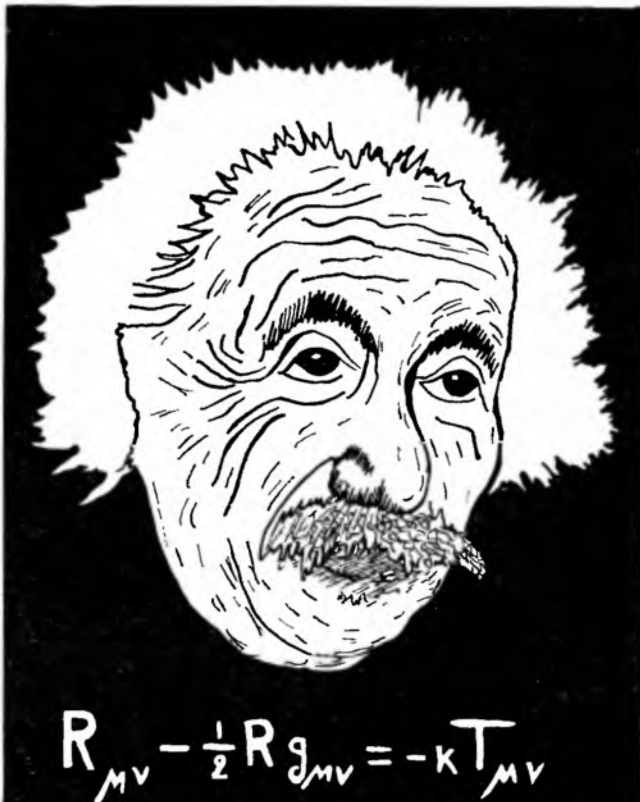


73. ábra.
Hogyan szerezzük vissza az elvesztett palackot?

és a híd azonban meghatározott sebességgel mozognak. Elhalad mellettünk egy csónak, és whiskys palack esik a vízbe. A csónak folytatja útját, a palack azonban mozdulatlanul lebeg azon a helyen, ahol kiesett. (Ne felejtsük el, hogy a víz hozzánk képest *nem* mozog.) 20 perc múlva látjuk, hogy a csónak megfordul és visszaindul, hogy a palackot felvegye. Természetesen újabb 20 perc alatt ér vissza a csónak. Eszerint a palack 40 percig volt a vízben, a partvonal és a híd pedig ez idő alatt egy kilométerrel mozdult el. Tehát a híd sebessége a vízhez viszonyítva, vagy, ami ugyanaz, a víz sebessége a hídhoz és a parthoz képest 40 perc alatt egy kilométer, vagyis óránként 1 1/2 kilométer. Ugye milyen egyszerű?

ÉLETRAJZ-TÖREDÉK

Itt közbevetőleg feljegyezzük, hogy Albert *Einstein* (74. ábra)



74. ábra.
Albert Einstein

1879. március 14-én született Ulmban, a München közelében fekvő kicsiny, de (mesterdalnokairól) nevezetes, német városban. Apja itt egy elektromos üzem tulajdonosa volt. Gyermekkorát Münchenben töltötte, majd Svájcba ment, hogy a zürichi műegyetemen tanuljon. A megélhetésre valót kevésbé tehetséges diákok fizikára és matematikára tanításával kereste meg. 1901-ben megnősült, és nyugodt, de nem túl jövedelmező állást vállalt Bernben, mint a Svájci Szabadalmi Hivatal szabadalomvizsgálója. 1905-ben, 26 éves korában az *Annalen der Physik* című német folyóiratban 3 cikket tett közzé, amelyek megrázkódtatták a tudományos világot. A három cikk a fizika három különböző nagy területéhez tartozott: a hőtanhoz, az elektromosságtanhoz és a fénytanhoz. Az egyik, amelyet a IV. fejezetben már említettünk, a Brown-mozgás részletes elméletét tartalmazta, és alapvető jelentőségű volt a hőjelenségek mechanikai magyarázatának a fejlődésére. A másikban a fotoeffektus törvényeit magyarázta meg az akkor még fiatal kvantumhipotézis alapján, bevezette a sugárzó energia csomagjainak, a fotonoknak a fogalmát. Ezt a következő fejezetben fogjuk leírni. A harmadiknak, amelyik a fizika fejlődése szempontjából a legfontosabb volt közülük, meglehetősen unalmas a címe: „Mozgó testek elektrodinamikájáról". Ebben a fénysebességmérésekkel kapcsolatos paradoxonokkal foglalkozott. Ez volt az első cikk a relativitáselméletről.

A MOZGÁS RELATIVITÁSA

Az elektromágneses kölcsönhatásokat közvetítő, a fényhullámokat szállító hipotetikus anyag természetével kapcsolatos nehézségek és ellentmondások egyre halmozódtak. Lassan kibogozhatatlan, a legendás gordiuszi csomóhoz hasonló éteri csomóba bonyolódtak. Az ősi görög parasztkirály, Gordiusz kocsiján egy háncs-csomó kötötte össze a rudat a járommal. A jóslat, amely szerint az fog uralkodni Ázsia fölött, aki ki tudja bontani azt a csomót, betelt, miután Nagy Sándor kardcsapással kettévágta. Hasonlóképpen, Albert Einstein a modern fizika uralkodója lett, miután az éter-csomót éles logikájával szétvágta, és a világéter tört darabjait kihajította a fizika épületének ablakán.

De ha nincs az egész világegyetemet betöltő éter, akkor nem lehet abszolút mozgás sem, mert a semmihez képest nem lehet mozogni. Így, mondotta Einstein, csak egyik anyagi test a másik testhez, vagy egyik vonatkozási rendszer a másik vonatkozási rendszerhez viszonyított mozgásáról lehet beszélni. Mindkét rendszerben egyaránt jogosan mondja az ottlevő megfigyelő: „Én nyugalomban vagyok, a másik mozog.” Ha nincs éter, amelyik a térben végbemenő mozgás egyetemes vonatkozási rendszere volna, akkor nincs olyan módszer, amellyel ilyen mozgást észlelhetünk. Akkor minden, ilyen mozgásra vonatkozó állítást fizikai képtelenségnek kell bélyegeznünk. Ezért nem csoda, hogy Michelson és Morley, amikor laboratóriumukban különböző irányban mérték a fény sebességét, nem tudták megállapítani, hogy a laboratórium és a Föld maga mozog-e a térben, vagy sem. Emlékezzünk Galilei szavaira (e könyv 56. oldalán):

Zárkózzál be barátod társaságában egy nagy hajó fedélzete alatt egy meglehetősen nagy terembe. Vigyél oda szúnyogokat lepkéket, és egyéb röpködő állatokat, gondoskodjál egy apró halakkal telt vizes edényről is, azonkívül akassz fel egy kis vödröt, melyből a víz egy alája helyezett szűknyakú edénybe csöpög. Most figyeld meg gondosan, hogy a repülő állatok milyen sebességgel röpködnek a szobában minden irányba, amíg a hajó áll. Meglátod azt is, hogy a halak egyformán úszkálnak minden irányban, a lehulló vízcseppek mind a vödör alatt álló edénybe esnek. Ha társad felé hajítasz egy tárgyat, mind az egyik, mind a másik irányba egyforma erővel kell hajítanod, feltéve, hogy azonos távolságokról van szó. Ha, mint mondani szokás, páros lábbal ugrasz minden irányba, ugyanolyan messzire jutsz. Jól vigyázz, hogy mindezt gondosan megfigyeld, nehogy bármi kétely támadhasson abban, hogy az álló hajón mindez így történik. Most mozogjon a hajó tetszés szerinti sebességgel: azt fogod tapasztalni – ha a mozgás egyenletes és nem ide-oda ingadozó –, hogy az említett jelenségekben semmiféle változás nem következik be. Azoknak egyikéből sem tudsz arra következtetni, hogy mozog-e a hajó vagy sem.

Galilei szavait a következőképpen alkalmazhatjuk a Michelson–Morley-kísérletre: zárkózz be segítőtársaddal egy nagy laboratóriumba a Földön, és gondoskodj arról, hogy legyenek ott fényforrások, tükrök és más optikai eszközök. Legyenek ott továbbá más műszerek is, elektromos és mágneses erők, áram és egyebek mérésére. Azután győződj meg arról logikai érvekkel, hogy ha a Föld mozdulatlan volna, akkor a fénysugarak terjedése, a töltések, mágnesek és az elektromos áram kölcsönhatása nem függene a laboratórium falaihoz viszonyított relatív helyzetüktől és irányuktól. Azután tételezd fel, amint az a valóságban is van, hogy a Föld mozog a Nap körül és a Nappal együtt a Tejutat alkotó csillagrendszer középpontja körül. Nem leszel képes legkisebb változást sem észlelni a nevezett hatásokban, és egyikből sem állapíthatod meg, hogy mozog-e a Föld vagy mozdulatlan-e.

Ami érvényes volt a Földközi-tenger kék vizén vitorlázó Galilei-féle hajó szúnyogjaira, halaira, vízcseppjeire és elhajított tárgyaira, az érvényes a térben mozgó, Földön megfigyelhető fényhullámokra és más elektromágneses jelenségekre is. Galilei természetesen könnyen megállapíthatta, hogy hajója mozog-e a Földhöz képest vagy sem, ha kabinjáról felment a fedélzetre és a vizet vagy a partot nézte. Ugyanilyen módon mi is megállapíthatjuk, hogy a Föld mozog a Nap körül és a Nap a csillagokhoz képest, ha a csillagokra nézünk, és megfigyeljük látszólagos helyzetük változását (a parallaxisukat) és a tőlük kiinduló fény hullámhosszváltozását (a Doppler-effektust). Ha azonban nem nézünk ki, akkor elektromágneses jelenségek megfigyelésével nem tudjuk a térbeli mozgást észlelni, mint ahogy mechanikai jelenségek megfigyelésével sem.

A TÉR ÉS AZ IDŐ EGYESÍTÉSE

Einstein felismerte, hogy a Galilei-féle relativitási elv e bővített formája a térre és időre vonatkozó alapvető elképzeléseink drasztikus megváltozását vonja maga után. A teret és az időt emberemlékezet óta két teljesen független valaminek tekintették. A nagy Newton a *Principia*-ban a következőket írja:

Az abszolút tér, magában véve, bármely külső valamihez való vonatkoztatás nélkül, mindig hasonló és mozdulatlan marad.

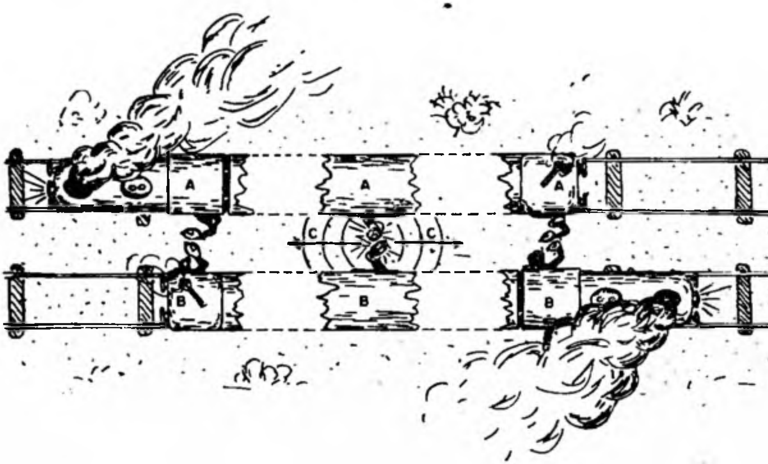
Az abszolút, igazi és matematikai idő, magában véve és természeténél fogva egyenletesen folyik bármely külső valamihez való vonatkoztatás nélkül.

A tér Newton-féle definíciója magában foglalja a benne végbemenő mozgás abszolút vonatkozási rendszerének létezését. Az idő Newton-féle definíciója pedig abszolút időrendszer létezését tételezi fel, amelyet nagyszámú szinkronizált kronométer, vagy egyszerűen óra szolgáltathat. Ezek az egyetemes tér különböző részein vannak elhelyezve, és mind a standard univerzális időt mutatják. A fény sebességének kísérletekkel bizonyított állandósága az abszolút tér fogalmát ásta alá, de egyúttal megbolygatta az univerzális időzítési rendszert is. Az univerzális idő eme katasztrófájának megértése céljából tegyük fel a kérdést, vajon mi a legjobb módja két, egymástól bizonyos távolságra elhelyezett óra szinkronizálásának. Az Egyetemes Idő Társaság egy alkalmazottja természetesen elutazhat a standard időt mutató kronométerrel egyik helyről a másikra, hogy beállítsa a helyi órákat. Pontosan ezt tették a régi idők navigátorai, akik a hajón kronométert vittek magukkal. De ki biztosíthat afelől, hogy a kronométer nem fog szállítás közben rosszul járni? A modern időzítésrendszer természetesen rádiójeleken alapszik, amelyek az időinformációt fénysebességgel közlik. A Földön minden gyakorlati esetben elhanyagolhatjuk a fény véges sebessége által okozott csekély késést. De a bolygóközi időegyeztetés esetében, ahol a késedelem több órát is kitehet, ez már természetesen fontos. Ezt a nehézséget azonban könnyen meg lehet kerülni oda-vissza haladó jellel, amelyet a vevőállomás (késedelem nélkül) visszatükröz. Ha az időjelzést a t_1 időpontban bocsátották ki és az a t_2 időpontban ért vissza, akkor a vevőállomás órájának helyes beállítása a jel érkeztekor $(t_1+t_2)/2$. Mivel a Michelson–Morley-kísérlet szerint a fény sebessége vakuumban mindig ugyanaz, függetlenül a mozgás körülményeitől, ezért a leírt módszert föltétlenül pontosnak és kifogástalannak kell tekintenünk. Alternatívája az lenne, ha a két állomás között pontosan félúton levő pontból két fényjelet bocsátanánk ki ellenkező irányban, és a két órát akkor tekintenők szinkronizáltnak, ha a jel megérkezésekor ugyanazt az időt mutatják.

A következő lépés az volna, hogy két egymáshoz képest egyenletesen mozgó rendszeren igazítjuk össze az órákat. Például két ellenkező irányban egymás mellett elhaladó vonaton. Azért választottunk vonatot példának, mert a vasutasok rendkívül büszkék órájukra, amelyik mindig a pontos időt mutatja. A fenti szinkronizálás végrehajtása céljából a fékezőnek a lámpát a vonat közepén levő pontban kell lengetnie, míg a mozdonyvezetőnek és a kalauznak a mozdonyból és az utolsó kocsiból kihajolva akkor kell az órájukat beállítani, amikor a fény érkezését látják.

A leírt eljárás Galilei kísérletére emlékeztet, aki a fény sebességét lámpa felvillantásával akarta mérni. Természetesen nem gondoljuk, hogy ezt a kísérletet két vonat személyzetének valóban el kell végeznie. Ez inkább – mint Einstein nevezni szerette – gondolatkísérlet, amelyben csak elképzeljük a helyzetet, és a kísérletek ismert eredményei (például a Michelson- és Morley-féle kísérlet) alapján igyekszünk következtetni arra, hogy itt mi történik.

Ha a módszert az A és a B vonaton is felhasználjuk, mindkettőn szinkronizálni tudjuk az órákat. Ezután a két vonaton különkülön történt szinkronizálás összehasonlításának problémája áll előttünk. Ezt abban a pillanatban tehetjük meg, amikor a vonat mozdonya éppen elhalad a B utolsó kocsija, a B mozdonya pedig az A utolsó kocsija mellett (75. ábra). Ebben a pillanatban az A mozdonyvezetője és a B kalauza közvetlenül összehasonlíthatják óráikat, ha kihajolnak az ablakból, és az órájukat egymás mellé helyezik. Ugyanez érvényes az A kalauzára és a B mozdonyvezetőjére.



75. ábra.
Órák szinkronizálása két egymáshoz képest mozgó vonaton

Ezt a közvetlen óraösszehasonlítást összekapcsolhatjuk az előző fényhullámmal való összehasonlítással. Az A és a B vonat fékezője csak akkor lengesse a lámpáját, amikor egymás mellett elhaladva pontosan szemben vannak egymással. Ebben az esetben természetesen csak egy fényhullám van, mert a két lámpa gyakorlatilag egybeesik.

Mi lesz ennek az eljárásnak az eredménye? Mivel a fény véges sebességgel terjed, ezért időbe telik, amíg a vonat két végét eléri és amikor végül megérkezik, akkor az A mozdony már a B vonat végétől balra lesz, míg az A vonatvég balra lesz a B mozdonytól. Így a fényhullámnak a B vonatvég elhagyása után még bizonyos időre lesz szüksége, hogy elérje az A mozdonyt. Ezért, ha a fényjeles órabeállítási szabály szerint az A mozdonyvezető és a B kalauz órájukat ugyanarra az időre igazították be a fény megpillantásakor, az *A* mozdonyvezető órája *késni* fog a *B* kalauz órájához képest, amikor egymás mellett elhaladnak. Ugyanilyen ok miatt az *A* kalauz órája a találkozás pillanatában *sietni* fog a *B* mozdonyvezető órájához viszonyítva. Mivel pedig a *B* vonat emberei biztosak abban, hogy órájuk pontosan van szinkronizálva, hiszen a fényjel-módszert használták, ragaszkodni fognak ahhoz, hogy az *A* vonat órabeállítása rossz, hogy az *A* mozdony órája *késik* ugyanazon vonat kalauzának órájához képest. Ugyanígy az *A* vonat emberei saját órabeállításukat tekintve helyesnek, kétségbe fogják vonni a *B* órabeállítás helyességét. Az *A* mozdonyvezetője azt fogja mondani, hogy a *B* kalauzának az órája *siet* a helyes időhöz képest, az *A* kalauza pedig azt fogja állítani, hogy a *B* mozdonyvezetőjének az órája *késik*. Mindketten egyetértenek abban, hogy a *B* vonat órabeállítása végképp helytelen és hogy a *B* mozdony órája *késik* a *B* kalauzi órájához képest. A vitát soha nem lehet eldönteni, mert sem az *A*, sem a *B* vonatnak nincs elsőbbsége a másikkal szemben. Arra kell tehát következtetnünk, hogy *az egyik rendszerben szinkronizált órák nem-szinkronizáltnak látszanak, ha a rendszerhez képest mozgó másik rendszerből figyeljük őket és megfordítva.* Más szóval *két eseményt, amelyek az egyik rendszerben bizonyos (vonathossznyi) távolságban egyidejűleg történnek, nem-egyidejűnek látszanak egy másik rendszerről, amely az elsőhöz képest mozog.* Azaz a tér, legalábbis részben, felcserélhető az idővel. Két esemény egyik rendszerbeli tisztára térbeli szétválása időbeli különbséget eredményez egy másik mozgó rendszerről szemlélve.

Ennek az állításnak a szemléltetésére gondoljunk egy mozgó vonat étkezőjében ebédelő emberre. Először megeszi a levest, aztán a sültet és végül a desszertet. Ezek az események a vonathoz viszonyítva ugyanazon a helyen (ugyanannál az asztalnál) mennek végbe, de különböző időben. A földön levő megfigyelő szempontjából azonban utasunk a levest és a desszertet több kilométernyi távolságban fogyasztja el. Ezt a tényt így lehetne fogalmazni: *azok az események, amelyek egyik rendszerben ugyanazon a helyen, de különböző időben történnek, egy másik, az elsőhöz képest mozgó rendszerből megfigyelve, különböző helyeken mennek végbe.* Most helyettesítsük az előző mondatban a „tér" szót „idő"-vel és megfordítva. A következőt kapjuk: *Azok az események, amelyek egyik rendszerben egyidejűleg, de különböző helyeken történnek, egy másik, az előzőhöz képest mozgó rendszerből megfigyelve különböző időben mennek végbe.* Ez pontosan az előbbi eredményünk.

Ha a nulla időtartam, mozgó rendszerből tekintve, nullánál nagyobb lesz, *akkor ugyanabból a mozgó rendszerből nézve, a két esemény közötti véges időtartamnak is növekednie kell.* Ez a híres *idő-tágulás*, vagyis az órák (és minden más fizikai, kémiai és biológiai folyamat) lassúbbodása, ha mozgó rendszerből figyeljük meg őket. Mint minden relativisztikus jelenség, az időtartamok megnövekedése is szimmetrikus két egymáshoz képest mozgó rendszerben. Az A vonat óráinál az elhaladó B vonat emberei késést figyelnek meg. De ugyanígy az A vonat emberei azt fogják állítani, hogy a B vonat órái lassúbbodnak. Ki lehet mutatni, hogy az órák várt relativisztikus lassúbbodását a

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

képlet fejezi ki. Ez hasonló a Fitzgerald-féle összehúzódás képletéhez, azzal az eltéréssel, hogy a gyök a nevezőben van.

A gyorsan mozgó rendszerekben lezajló összes fizikai folyamatok lelassulását a „mezon"-bomlás esetében figyelték meg közvetlenül. Ezek nem stabilis elemi részecskék, amelyek az óriási sebességgel a Föld felszínére érkező kozmikus sugarak lényeges részét képezik. Ezt a könyv utolsó fejezetében tárgyaljuk részletesebben. Azt is kigondolták, hogy a Föld körül keringő mesterséges holdon atomórát helyeznek el. Ez igen pontos időmérő, melyben a mutatók mozgása a benne levő gáz molekuláinak rezgésével van szinkronizálva. Ha a mesterséges holdon elhelyezett és a Földön hagyott ugyanolyan óra járását rádiójelekkel összehasonlítjuk, akkor az időtágulási effektus érvényességét nagy méretekben igazolni tudjuk.

RELATIVISZTIKUS MECHANIKA

A mozgó rendszerből megfigyelhető távolságösszehúzódás és időtágulás szükségessé teszi az egyik koordináta-rendszerben végzett tér- és időméréseket és az ehhez képest mozgó rendszerből történő méréseket összekapcsoló képletek drasztikus megváltoztatását. Vegyünk két egymáshoz képest v sebességgel mozgó (x, y) és (x', y') koordinátarendszert, és mérjük az időt mindkét rendszerben attól a pillanattól kezdve, amikor kezdőpontjuk O, illetve O' egybeesik. Vegyünk most egy, a vesszős koordináta-rendszerben az O' kezdőponttól x' távolságra mozdulatlanul elhelyezett P tárgyat. Mi lessz ennek a tárgynak az x-koordinátája a vesszőtlen rendszerben a t időpontban, vagyis mekkora az O kezdőponttól mért távolsága? A klasszikus newtoni felfogás alapján a válasz igen egyszerű: t idő alatt a két koordináta-rendszer kezdőpontja vt távolságra jut egymástól, így

$$x' = x + vt.$$

Hozzávehetjük még a

$$t' = t$$

képletet, amely nem egyéb mint az abszolút idő Newton-féle definíciójának megismétlése.

Einstein előtt e két képletet, amelyeket ma a „Galilei-féle koordináta-transzformációk"-nak neveznek, a józan ész követelményének tekintették, a másodikat pedig le sem írták. A térbeli távolságok időbeli távolságokká történő részleges átalakításának a lehetősége azonban szükségessé teszi, hogy ezeket a triviálisnak látszó képleteket bonyolultabbakkal helyettesítsük. Ki lehet mutatni, hogy ahhoz, hogy kielégítsük a fénysebesség állandóságának feltételét, és az előbb tárgyalt relativisztikus effektusoknak megfeleljünk, a régi Galilei-transzformációt a következő újjal kell helyettesíteni:

$$x' = \frac{x + vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

$$t' = \frac{t + \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

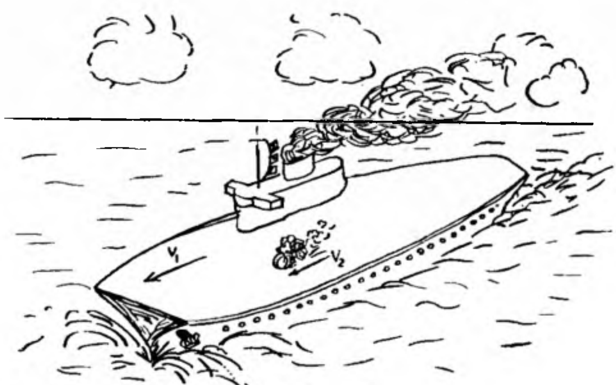
Ezeket a kifejezéseket, amelyeket Lorentz-transzformációnak nevezünk, H. A. *Lorentz* holland fizikus vezette le nem sokkal a Michelson—Morley kísérletek eredményeinek közlése után. Szerzőjük azonban és korának többi fizikusai sem tekintették egyébnek, mint többé-kevésbé szórakoztató, tisztára matematikai játéknak. Einstein jutott először annak tudatára, hogy a Lorentz-transzformáció ténylegesen a fizikai valóságot írja le, és megköveteli a régi módi, magától értetődő tér-, idő- és mozgás-fogalom drasztikus megváltoztatását.

Látjuk, hogy a Galilei-transzformáció nem szimmetrikus a tér- és idő-koordinátákban, a Lorentz-transzformáció viszont az. Amikor az új t' időt számítjuk, akkor t-hez még hozzá kell adnunk egy, a v relatív sebességtől függő tagot, amely hasonló ahhoz, amelyet a régi x tér-koordinátához kell adni, hogy megkapjuk az új x' koordinátát. A mindennapi életben előforduló esetekben az összes szereplő sebességek sokkal kisebbek, mint a fénysebesség ($v \ll c$). Így az időtranszformáció számlálójának második tagja gyakorlatilag nulla, és mindkét képlet nevezője gyakorlatilag egy. Ez visszavezet a régi Galilei-transzformációhoz. Ha azonban az előforduló sebességek összemérhetők a fénysebességgel, akkor az időtranszformáció második tagja az abszolút egyidejűség fogalmának a felborulását eredményezi, a négyzetgyök alatti kifejezések pedig a hosszúságok csökkenésére és az időtartamok tágulására vezetnek.

Meg kell említenünk egy félreértést a távolság relativisztikus összehúzódásával kapcsolatban. Ez a félreértés 54 évig tartott a fizikusoknál, Einstein eredeti cikkének 1905-ben történt megjelenésétől mindaddig, amíg J. *Terrell* fiatal amerikai fizikus 1959-ben közzétett rövid kritikai tanulmányában nem tisztázta a kérdést. Azelőtt azt hitték, hogy a távolságok $\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}$ tényezővel történő lecsökkenését valóban észlelnénk, ha olyan mozgó tárgyra néznénk, amelynek sebessége megközelíti a fény sebességét. Így például egy sugárhajtású repülőgépen ülő utas azt látná, hogy a (minden közlekedési szabállyal ellentétben) közvetlen közelében vele szemben száguldó másik sugárhajtású repülőgép hosszában összehúzódik. A szembe jövő gép utasa ugyanezt észleli az első gépre vonatkozóan. Terrell kimutatta, hogy ez a felfogás helytelen, és hogy *vizuálisan* megfigyelve a gyorsan mozgó tárgy nem látszik rövidebbnek, mint nyugalmi állapotban. Ez annak a következménye, hogy a fény véges sebessége miatt a repülőgép orrától és farkától érkező fényt különböző késedelemmel látjuk, és hogy ez az időbeli különbség kiegyenlíti a hosszúság relativisztikus összehúzódásának a hatását. Ha fény végtelen nagy sebességgel terjedne, akkor ez az észlelési hiba nem léteznék, de $c = \infty$ esetén a távolságok összehúzódása mindig nulla lenne bármilyen is a két rendszer relatív sebessége.

Terrel szerint a hosszúság relativisztikus összehúzódását egyéni megfigyelő nem láthatja, de le lehet fényképezni, feltéve, hogy a lencse nagyobb, mint a mozgó tárgy hossza. El lehet képzelni egy speciális fényképező repülőgépet, amelyen a gép orrától a farkáig fényképezőgép van. A fényképezőgépen hosszú henger alakú lencsének kell lenni és „szimultán zár"-nak, vagyis olyannak, amelyik a gép teljes hosszában egyidőben zár (a repülőgépen érvényes időszinkronizációs rendszerben). Ha a repülőgép elhalad egy ellenkező irányban gyorsan mozgó tárgy mellett, és arról felvételt készít, akkor a fényképen a relativisztikus hosszúságösszehúzódás minden hatása látható. Magától értetődő, hogy ha a tárgy felvételt tudna készíteni a fényképező repülőgépről, akkor a pilótával rádió útján közölhetné: „Halló, Ön is rövidebb lett!".

Ebben a könyvben nincs helyünk arra, hogy a Lorentz-transzformáció matematikai következményeit levezessük. Csupán néhány fontosabb eredményt ismertetünk, amit így kaphatnánk meg. Az egyik legfontosabb eredmény az, amelyik két sebesség összeadására vonatkozik. Tegyük fel, hogy egy repülőgépanyahajó óránként 35 csomó, vagyis mintegy 60 kilométer/óra sebességgel szeli át az óceánt, és egy motoros a fedélzeten a hajó tatjától az orráig 90 kilométeres óránkénti sebességgel robog (76. ábra). Mennyi a motor sebessége a vízhez képest? A klasszikus mechanikában egyszerű a felelet: 60+90, vagyis 150 kilo-



76. ábra.
Relativisztikus sebességösszeadás

méter óránként. Ez az egyszerű sebességösszeadási szabály azonban nem helyes a relativisztikus mechanikában. Ha a hajó és a motor sebessége egyformán, mondjuk, 75%-a a fénysebességnek (ami elvben lehetséges), akkor a motor sebessége a vízhez képest 50%-kal nagyobb volna a fénysebességnél. A v_1 és v_2 sebesség összeadásának relativisztikus képlete

$$V = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}}.$$

V az eredő sebesség. Könnyen belátható, hogy ha v_1 és v_2 mindketten kisebbek, mint c, akkor V szintén kisebb mint c. Ha azt feltételezzük, hogy $v_1 = c$, még akkor is a következő kifejezést kapjuk:

$$V = \frac{c + v_2}{1 + \frac{cv_2}{c^2}} = \frac{c + v_2}{1 + \frac{v_2}{c}} = \frac{c(c + v_2)}{c + v_2} = c,$$

ami annyit jelent, hogy a fény sebességéhez járuló további sebesség nem növeli a fény sebességét. Ha $v_1 = c$ és $v_2 = c$, ismét

$$V = \frac{c + c}{1 + \frac{c \cdot c}{c^2}} = \frac{2c}{1 + 1} = c.$$

A relativisztikus sebességösszeadási képlet megmagyarázta Fizeau egy fél évszázaddal azelőtt végzett fentebb leírt kísérletét. Ha v_1 helyére a fény vízbeli sebességét, azaz c/n-t helyettesítjük, v_2 helyett pedig egyszerűen v-t írunk, a víz áramlási sebességét a csőben, akkor azt kapjuk, hogy

$$V = \frac{c/n + v}{1 + \frac{cv}{nc^2}} = \frac{c/n + v}{1 + \frac{v}{nc}}.$$

Ha a számlálót és a nevezőt megszorozzuk $\left(1 - \frac{v}{nc}\right)$-vel, akkor

$$V = \frac{(c/n + v)(c/n - v)}{1 - v^2/n^2c^2} = \frac{c/n + v - v/n^2 + v^2/nc^2}{1 - v^2/n^2c^2}.$$

Mivel v sokkal kisebb mint c, ezért (v/c) igen kicsiny szám, és

$(v/c)^2$ még kisebb. Ha a fenti képletben a v^2/c^2-et tartalmazó tagokat elhagyjuk, akkor azt kapjuk, hogy

$$V = \frac{c}{n} + v - \frac{v}{n^2} + \frac{c}{n} + v\left(1 - \frac{1}{n^2}\right),$$

ami pontosan a Fizeau-féle tapasztalati képlet. Tehát nem „vonszolja magával az étert" a mozgó folyadék. Az eredő sebesség egyszerűen a folyadékbeli fénysebesség és a csőben áramló folyadék sebességének relativisztikus összege.

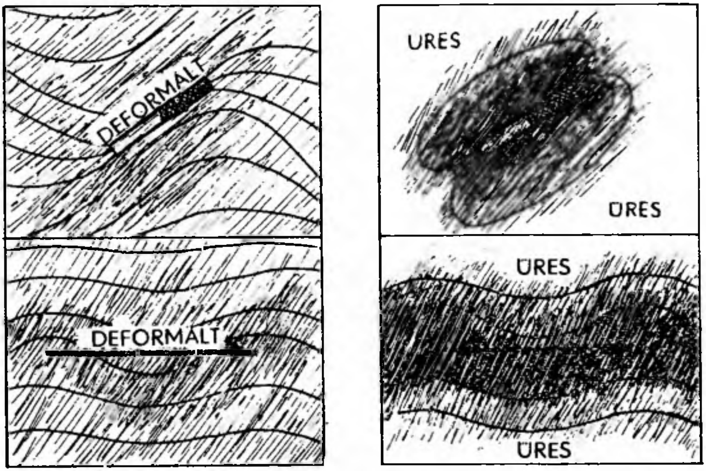
A relativisztikus mechanika egy másik fontos következménye, hogy a mozgó részecskék tömege nem állandó, mint a newtoni mechanikában, hanem a sebesség növekedésével növekszik. A mozgó testek tömegének megváltozásában ugyanaz a tényező szerepel, mint a távolságok megrövidülésének és az időtartamok meghosszabbodásának kifejezésében. A v sebességgel mozgó test tömege:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

ahol m_0 az ún. „nyugalmi tömeg", vagyis a kezdetben nyugalomban levő részecskét éppen megmozdító erővel szemben megnyilvánuló tehetetlenség. A fénysebességhez közeledve egyre nehezebb a részecske sebességének növelése. Végül ha $v = c$, akkor végtelen nagy a további gyorsítással szembeni ellenállás. Ez újabb oldalát mutatja a relativitáselmélet ama alapvető megállapításának, hogy egyetlen anyagi test sem mozoghat a fénynél gyorsabban. Azt látjuk ugyanis, hogy a megnövekedett tehetetlenség miatt végtelen nagy energia kellene a test fénysebességre történő felgyorsításához.

A TÖMEG ÉS AZ ENERGIA EGYENÉRTÉKŰSÉGE

Amikor Einstein elvetette az éter fogalmát és visszaadta a csillagközi térnek előző, üres állapotát, tennie kellett valamit, hogy visszakapja a fényhullámok és általában az elektromágneses terek fizikai realitását. Ha nincs éter, *mi* veszi körül az elektromos töltéseket és a mágneseket, *mi* terjed a vákuumban, amikor elér hozzánk a Nap és a csillagok fénye? Csak azt tehetjük, hogy az elektromágneses teret valamiféle anyagi közegnek tekintjük. Olyannak, amely teljesen különbözik a közönséges, jól ismert anyagi közegektől. A fizikában az „anyagi" jelző egyenlő a „súlyos"-sal, vagyis tömeggel bíróval. Ezért az elektromos töltést, a mágnest, valami nagyon könnyű, de mégis valamilyen súllyal rendelkező szubsztanciának kell körülvennie. Ez a szubsztancia a töltés vagy mágnes közelében sűrűbb, és ahol az elektromos és mágneses erők már megszűnnek, ott nullává ritkul. A fénysugarakat úgy képzelhetjük el, hogy a világító testek rezgő sugarakat bocsátanak ki ebből az anyagból, (mint ahogy a kerti öntöző kilövelli a vízsugarat). Ezek a sugarak a teljesen üres téren átszáguldanak. A régi és az új felfogás közötti különbséget a 77. ábra mutatja vázlatosan. Azelőtt úgy gondolták, hogy



EINSTEIN ELMÉLETE ELŐTT EINSTEIN ELMÉLETE UTÁN

77. ábra.

Az elektromágneses tér régi és új elképzelése. Einstein előtt azt hitték, hogy a mindent kitöltő éter deformálódik ott, ahol elektromágneses tér van. Most azt hisszük, hogy az elektromágneses tér fizikai (súllyal bíró) valami, ami az üres térben, önmagában létezik.

az éter egyenletesen oszlik el a térben, az elektromos és a mágneses tér pedig az éter deformációja. Az új „éteri" anyagról viszont azt tételezzük fel, hogy csak olyan helyeken létezik, ahol elektromos és mágneses erők vannak jelen. Nem az erők hordozója, hanem azonos magukkal a materializálódott erőkkel. A fizikai tulajdonságait nem írhatjuk le az olyan régi fogalmakkal, mint merevség, rugalmasság stb. Ezeket csak atomokból és molekulákból álló anyagi testek esetében használhatjuk. Most az elektromágneses kölcsönhatásokat minden részletükben leíró Maxwell-egyenleteket kell használnunk. Az új szemlélet megszokása időt és erőfeszítést kíván, de megszabadítja gondolkodásunkat a fény régi, „materomorfikus" felfogásától (a szót az antropomorfikus szó mintájára alkottuk, anyaghoz kötött szemléletet jelent).

De milyen érvek szólnak amellett, hogy az új „éteri" szubsztanciának súlyos tömeget tulajdonítsunk, és mekkora legyen a tömege? A kérdésre legkönnyebben úgy válaszolhatunk, ha megfontoljuk, mi történik, ha fénysugár esik egy tükörre, és a tükör visszaveri azt. A fizikában hosszú idő óta ismeretes, hogy a visszavert fény a tükörre bizonyos nyomást gyakorol. Ez a nyomás nem elég ahhoz, hogy egy gyertya elé állított tükröt felborítson. A Nap közelébe jutó üstökösökből viszont ki tud lökni gázmolekulákat. Ezek a gázmolekulák alkotják az égen végighúzódó fényes üstökös-csóvát. A fénynyomást laboratóriumban P. N. *Lebegyev* orosz fizikus mutatta ki először. Bebizonyította, hogy ez a nyomás egyenlő a visszavert energia kétszeresével, elosztva a fénysebességgel.

A tükörről visszavert fény nyomásának mechanikai analógiája a locsolócsőből kilövellt vízsugár nyomása, amelyet az útjában álló deszkára kifejt (78. ábra). A klasszikus mechanika törvényei szerint az áramló anyagi részecskék által az őket visszaverő falra kifejtett nyomás egyenlő impulzusuk vagy, newtoni terminológia szerint, „mozgásmennyiség"-ük egy másodperc alatti megváltozásával (l. IV. fejezet). Ha m a v sebességű áramlás által az időegység alatt elvitt víz tömege, akkor az impulzus megváltozása $2mv$, mivel $+mv$-ből $-mv$-re változik $(mv-(-mv)=mv+mv=2mv)$.

Hasonló meggondolás alapján a tükör által visszavert fénysugárnak is mechanikai impulzust kell tulajdonítanunk. Ez egyenlő az egységnyi idő alatt a tükörre eső m „fénytömeg" és a c fénysebesség szorzatával. Így tehát a fénynyomás

$$P_{fény}=2mc.$$

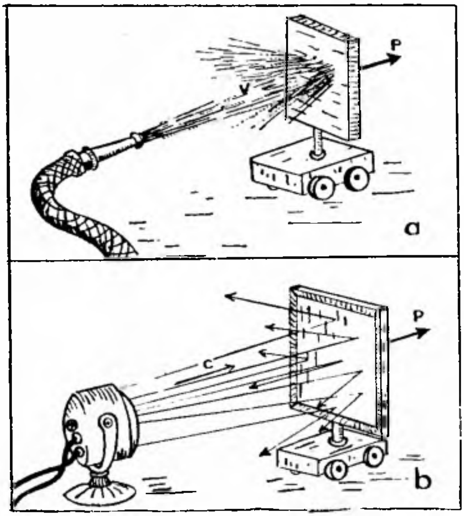
Ha ezt a kifejezést a fent említett

$$P_{fény}=\frac{2E}{c}$$

tapasztalati összefüggéssel egybevetjük, akkor arra a következtetésre jutunk, hogy

$$m=\frac{E}{c^2} \text{ vagy } E=mc^2.$$

Ez Einstein híres „tömeg-energia egyenértékűség törvénye" amely a klasszikus fizika „súlytalan" sugárzó energiáját egyen-



78. ábra.

Vízsugár visszaverődése egy mozgó deszkáról (a), és fénynyaláb visszaverődése mozgó tükörről (b)

lővé teszi a közönséges súlyos anyaggal. Minthogy c^2 igen nagy szám, $9\cdot10^{20}$, ezért igen nagy sugárzó energia tömege is igen kicsiny a szokásos egységekben kifejezve. Egy 10 wattos égőjű zseblámpa pl., amely percenként $6\cdot10^9$ erg fényt bocsát ki, $6\cdot10^9/9\cdot10^{20}=7\cdot10^{-12}$ grammal lesz könnyebb minden percben. A Nap viszont $4\cdot10^{11}$ tonnát veszít naponta azzal, hogy sugárzását a környező térbe ontja.

A fény és az energia közötti összefüggést, természetesen, minden energiafajtára általánosítani kell. Az elektromosan töltött testeket és a mágneseket körülvevő elektromos és mágneses tér súlya fizikai realitás, még akkor is, ha egy 1 m átmérőjű, 1 kV potenciálra feltöltött rézgömböt körülvevő elektromos tér súlya csak $2 \cdot 10^{-22}$ gramm, közönséges laboratóriumi mágnes tere pedig csupán 10^{-15} grammal nyomná le a mérleget.

A hőenergiának szintén van súlyos tömege. 1 liter 100 C°-os víz 10^{-20} grammal nehezebb az ugyanolyan mennyiségű hideg víznél. Egy 20 kilotonnás atombomba robbanásánál felszabaduló összes energia súlya pedig 1 gramm.

Szólnunk kell néhány szót egy állításról, amely sokszor szerepel az újságok és népszerű folyóiratok cikkeiben. Eszerint, Einstein energia-tömeg relációja volt az atombomba felfedezésének az alapja. Ez egészen helytelen. Ugyanilyen joggal mondhatnók, hogy ez a reláció az alapja annak, hogy Nobel feltalálta a nitro-glicerint, vagy Watt feltalálta a gőzgépet. Minden olyan esetben, amikor energia felszabadulásával járó fizikai vagy kémiai átalakulás megy végbe, a keletkező termékek tömege a felszabadult energia tömegével kisebb a kezdeti tömegnél. A nitro-glicerin robbanásánál keletkező gázok súlya kisebb, mint a robbanóanyagé volt. A gőzgépből kiáramló gőz súlya kisebb, mint a kazánban levő forró vízé. A fa égésénél felszabaduló gáz és hamu súlya kisebb, mint az eredeti fahasábé. De mindezen esetekben a felszabadult energia olyan csekély az eredeti anyag súlyához képest, hogy még a legpontosabb mérleggel sem mérhető meg. Nincs olyan fizikus, aki észrevenné a különbséget egy edény forró és hideg víz súlya között. Egy kémikus sem mutatta még ki a víz és a vizet alkotó gáz alakú hidrogén és oxigén súlya közti különbséget.

Az atommag-reakcióknál felszabaduló energia sokkal nagyobb. Az lehetetlen volna, hogy a bomba összes hasadási termékeit összegyűjtsük és bebizonyítsuk, hogy ezek éppen egy grammal könnyebbek mint az eredeti plutónium. A magfizika precíz kísérleti módszereivel azonban nagyon pontosan meghatározhatjuk az egyes atomok tömegét és így a magreakció előtti és utáni tömeg különbségét is. Csak a precizitásban van eltérés. Einstein szerepe az atombomba kifejlesztésében nem az $E=mc^2$ törvény megfogalmazása volt, hanem Roosevelt elnökhöz intézett levele, amely Einstein tekintélyének súlyával elindította a Manhattan Terv nevű atombomba-programot.

A mozgó anyagi test magával viszi a mozgás kinetikus energiáját. Ennek az energiának a tömege hozza létre a tömeg relativisztikus növekedését. Einstein egyenértékűségtörvénye az elemi részecskék átalakulására is vonatkozik. Egy elektron-antielektron pár (vagy egy proton-antiproton pár) létrehozásához együttes tömegüknek megfelelő energia kell. Egy ilyen részecskepár találkozásakor a részecskék mint részecskék eltűnnek, és ugyanilyen mennyiségű energia szabadul fel, nagy frekvenciájú sugárzás formájában.

A NÉGYDIMENZIÓS VILÁG

A tér relativisztikus összehúzódása matematikai szempontokból ekvivalens a mozgó tárgyak Fitzgerald-féle összehúzódásával. Fitzgerald azonban a testek éterbeli mozgása által okozott valóságos fizikai hatásnak gondolta az összehúzódást. A relativitáselmélet viszont a távolságok mozgó rendszerből megfigyelhető látszólagos összezsugorodásának tekinti. A tér összehúzódása is, az idő tágulása is szimmetrikus az egymáshoz képest mozgásban levő két rendszerből nézve. Mindannyiszor, amikor a térbeli távolságok összezsugorodnak, az időtartamok meghosszabbodnak. Ez bizonyos szempontból analóg egy L hosszúságú bot függőleges és vízszintes vetületével. Ha a bot függőleges helyzetben van, akkor függőleges vetülete 0, vízszintes vetülete L. Ha vízszintes helyzetben van, akkor függőleges vetülete L, víszintes vetülete 0. Ha pedig valamilyen ϑ szögben áll a bot, akkor sem vízszintes, sem függőleges vetülete nem nulla.

Azonban a ϑ szög nagyságától függetlenül mindig érvényes Pithagorász tétele:

$$\Delta x^2 + \Delta y^2 = L^2.$$

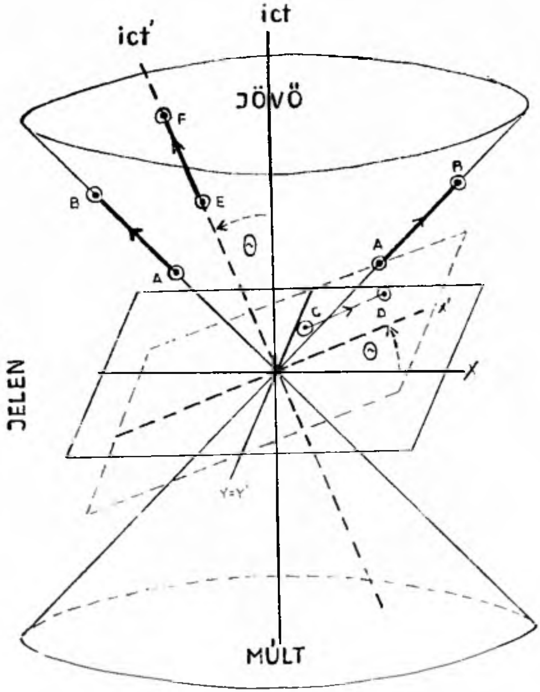
Ez az analógia vezette Einstein korai publikációihoz kapcsolódó munkájában H. *Minkowski* lengyel matematikust arra a következtetésre, hogy az időt, valamilyen módon, a három térkoordinátát kiegészítő negyedik koordinátának lehet tekinteni, és hogy az egyik rendszer mozgását a másikhoz képest a négydimenziós koordináta-rendszer forgásaként lehet felfogni.

A mindennapi életben a különböző eseményeket helyük és időpontjuk megadásával határozzuk meg. Azt mondjuk, hogy a gyűlés a Hatodik Avenue és a Harminckettedik utca sarkán, a 15. emeleten lesz este 8 órakor. Grafikonokat szoktak készíteni, amelyeken valaminek a helyzete az idő függvényében van feltüntetve. Ezek a grafikonok azonban nem egyebek, mint két mennyiség összefüggésének grafikus ábrázolása. Semmilyen szempontból sem lehet azt mondani, hogy valamilyen geometriai szabály vagy művelet alkalmazható rájuk. Ha az időt igazi negyedik koordinátának akarjuk tekinteni, akkor ugyanolyan egységgel kell mérnünk, mint a három tér-koordinátát. Ez úgy történhet, hogy az eredetileg másodpercben megadott időt valamilyen standard sebességgel megszorozzuk. Ez cm-ben kifejezett távolságra vezet, ugyanarra, mint amiben a három tér-koordinátát is mérjük. Nem volna célszerű erre valami önkényes egységet választani, például a közutakon érvényes sebességhatárt (ami a helyi törvényhozástól függ), vagy akár a hang sebességét (ami az anyagtól és a hőmérséklettől függ). Világos, hogy a legjobb választás a fény vákuumbeli sebessége, ami nyilván összefügg a természet alaptörvényeivel, és amely a Michelson–Morley kísérlet bizonysága szerint állandó. Tehát az első három (tér-) koordinátát x, y és z-vel jelöljük, a negyedik (idő-) koordinátának pedig a ct mennyiséget választjuk. Ez azonban éppen csak a kezdete annak, amit tenni kell. Az x, y és z tér-koordináták kölcsönösen felcserélhetők. Egy fadoboz hossza a doboz magasságává lesz, ha oldalára fordítjuk. Világos, hogy ez a teljes felcserélhetőség nem állhat fenn az idő- és tér-koordináták között. Hiszen akkor egy órát méterrúddá lehetne változtatni és megfordítva! Ha tehát az időt negyedik koordinátának kell tekinteni, akkor nem csak c-vel kell megszoroznunk, hanem még valami olyan tényezővel is, amely a négydimenziós koordinátarendszer harmóniájának megzavarása nélkül a három tér-koordinátától fizikai szempontból *különböző* idő-koordinátát képez. A matematikusok adnak nekünk egy éppen ilyen tényezőt. Ez az i betűvel jelölt „képzetes" vagy „imaginárius egység". Ezt a képzetes egységet úgy definiáljuk, mint -1 négyzetgyökét:

$$i=\sqrt{-1}.$$

Mivel az elemi algebra szerint $(+1)^2=+1$ és $(-1)^2=1$, ezért az i számnak nincs helye a rendes pozitív és negatív számok között. Ezért nevezik képzetes (imaginárius) egységnek. A mindennapi számolásban nem használjuk, mert az „1 dollárja van", annyit jelent, hogy 1 dollár van a bankszámláján, „-1 dollárja van" pedig annyit jelent, hogy 1 dollárral tartozik, viszont i dollár semmit sem jelent a bankműveletekben.

A matematikusok és elméleti fizikusok számára azonban igen hasznos, hogy az *i*-t számításaikban használhatják, feltéve, hogy az olyan végeredményekből, amelyeknek fizikai jelentéssel kell bírniuk, kiesnek. Ez mindig bekövetkezik, amikor a végeredmény csak *i* négyzetét tartalmazza, mert $i^2 = -1$, ez rendes negatív szám. Használjuk tehát a képzetes egységet a még hozzáírandó szorzónak, és írjuk a negyedik koordinátát *ict*-nek. Mivel lehetetlen négy egymásra kölcsönösen merőleges koordinátát rajzolni, ezért elhagyjuk a harmadik *z* koordinátát, és helyette az *ict* új idő-koordinátát használjuk. Az eredmény a 79. ábrán látható rajz, ahol az *x* és *y* tér-koordináta tengelyek (az olvasóhoz



79. ábra.

Az *x* és *y* tér-koordinátákból és az (*ict*) idő-koordinátából létrejövő téridő-kontinuum. A fény terjedését ábrázoló $x^2+y^2-c^2t^2=0$ kúp (a „fénykúp") a kontinuumot „jelen"-re, „múlt"-ra és „jövő"-re osztja képest) vízszintes síkban vannak, az imaginárius időtengely pedig függőleges. A rajz minden pontja egy *eseményt* jelöl, vagyis valamit, ami meghatározott helyen, meghatározott időben történik. A rajzon ábrázolt vonatkoztatási rendszerben egyidejű eseményeket az időtengelyre merőleges síkokon levő pontok ábrázolják. Azok az események, amelyek különböző időben, de ugyanazon a helyen történnek (ismét ebben a megadott vonatkozási rendszerben), az időtengellyel párhuzamos egyenes vonalakon vannak. A 90°-os nyílás-szögű kúpfelület, amelyet „fénykúpnak nevezünk, a fényjel által összeköthető eseményeknek felel meg. Ha például az A pont (esemény) egy fényhullámot kibocsátó felvillanást jelöl, akkor a B pont egy, a térben másutt elhelyezett tárgynak a fény által történő megvilágítását jelöli.

Mint előbb már beszéltünk róla, a hosszúságok és az időtartamok mozgó rendszerről történő megfigyelése geometriai szempontból a négydimenziós koordináta-rendszer elfordulásaként interpretálhatók. Az időtengely egy bizonyos szöggel elfordul (pontozott vonalak a 79. ábrán). Mivel azonban a mozgás sebessége soha sem múlhatja felül a c fénysebességet, ezért a ϑ szög, amelylyel az ict-tengely elfordul, soha nem lehet 90°-nál nagyobb. Ennek alapján két különféle eseménypárt tudunk egymástól megkölönböztetni.

1. Olyan eseménypárt, amelynél az őket összekötő vonal 90 foknál kisebb szöget képez az időtengellyel. Ilyen az $E-F$ eseménypár. Ebben az esetben találhatunk egy koordináta-rendszert, amely az eredetihez képest olyan sebességgel mozog, hogy mindkét esemény az új ict' időtengelyen lesz, és térbeli távolságuk nulla. A tér- időtengelyeknek ilyen elfordulása triviális, találkozunk vele a mindennapi életben is. Ha például labdarugómérkőzést akarunk megnézni, hétfőn az egyik városban, kedden egy másikban, amely többszáz kilométerre van az elsőtől, akkor az első mérkőzés után autóba ülünk, és továbbmegyünk kocsinkkal, hogy megérkezzünk a második mérkőzés kezdete előtt. A két stadion helyzete az egyenlítőhöz és a greenwichi délkörhöz képest különböző, de az autóhoz kapcsolt koordináta-rendszerhez képest gyakorlatilag ugyanazon a helyen lesznek. A fenti két sportesemény tér-időbeli távolságát *idő-szerinti* távolságnak nevezzük, mert megfelelő sebességgel haladva térbeli távolságukat nullára csökkenthetjük, és ugyanarról a helyről (a kocsi üléséről) szemlélhetjük őket különböző időben (egy nap különbséggel).

2. Olyan eseményeket, amelyeknél az összekötő vonal és az időtengely közötti szög *nagyobb* 90 *foknál*. Ilyen a $C-D$ eseménypár. Ebben az esetben nem juthatunk el az első látnivalótól a másodikhoz, csak ha a fénynél gyorsabban mozgunk. Így például nem vehetünk részt 1 órakor ebéden a Merkuron és aznap 5 órakor koktélpartin a Plutón, mivel a fény 5 óra és 20 perc alatt teszi meg a Merkur és a Pluto közötti távolságot. Azonban mindig választhatunk olyan mozgási sebességet, amelynél a két esemény közötti időkülönbség nullára csökken, vagyis a választott tér-időbeli koordináta-rendszerben egyidejűek lesznek. Az ilyen eseménypárok tér-időbeli távolságát *tér-szerűnek* nevezzük, mert, ha megfelelő módon mozgunk, az időkülönbséget nullára csökkenthetjük.

A „múlt, jelen és jövő" régi fogalmának most új definicióját adhatjuk. Képzeljük magunkat a 79. ábrán látható koordinátarendszer kezdőpontjába. Azt mondhatjuk: „Itt ($x=0$, $y=0$, $z=0$) vagyok most ($t=0$)". A kúp felső részében (t pozitív) levő események képezik a jövőt, mivel, függetlenül attól, hogyan mozgunk, egy bizonyos idő telik el, mielőtt meglátjuk őket. Ezekre az eljövendő eseményekre befolyást gyakorolhatunk, ha valamit teszünk ennek érdekében, de azok nem lehetnek hatással miránk. Hasonlóképpen a kúp alsó részében (t negatív) végbemenő események képezik a múltat, mert bármilyen gyorsan mozgunk is, nem láthatjuk azokat. Lehetetlen például olyan gyorsan kirepülni a világűrbe, hogy elérjük az első atombomba robbanásának vagy Róma égésének fényhullámait. Ezek az elmúlt események hatással lehetnek ránk, de mi nem fejthetünk ki hatást rájuk! A fénykúp felső és alsó része közt van a „senki földje", amit közönségesen „jelen"-nek nevezünk. Ez azokat az eseményeket foglalja magában, amelyek vagy egyidejűek a mi számunkra, vagy egyidejűvé tehetők, ha valamilyen, a fénynél kisebb sebességgel mozgó vonatkozási rendszerről szemléljük őket. Hogy a 79. ábrán olyan nagy teret foglal el a „jelen", az természetesen annak tulajdonítható, hogy az idő mérésére ct-t választottuk t helyett. Ha ct helyett t lenne a választott mérték, akkor a függőleges skála $3 \cdot 10^{10}$-ed részére zsugorodna össze, a fénykúp felső és alsó részei kitágulnának, és ezzel a közöttük levő tér gyakorlatilag semmivé zsugorodna össze. Ezt látjuk a mindennapi életben olyan sebességeknél, amelyek a fény sebességével összehasonlítva elhanyagolhatóak.

Térjünk vissza a háromdimenziós térhez, és vezessük be a z

koordinátát. Az „imaginárius egység" felhasználásával néhány matematikai trükköt alkalmazhatunk a negyedik koordináta kifejezésében. Tegyük fel, hogy fényjelet indítunk el a koordináta-rendszer kezdőpontjából, vagyis az $x=0$, $y=0$, $z=0$ pontból a $t=0$ időpontban. A fényjel a t időpontban az x, y és z térkoordinátájú pontba ér el. A pontnak a koordinátarendszer kezdőponjától való távolsága Pithagorász tétele szerint

$$\sqrt{x^2+y^2+z^2}.$$

Mivel a fény mindig c sebességgel terjed, ennek a távolságnak ct-vel kell egyenlőnek lennie. Ezért írhatjuk, hogy

$$\sqrt{x^2+y^2+z^2}=ct,$$

vagy

$$x^2+y^2+z^2=(ct)^2,$$

vagy

$$x^2+y^2+z^2-(ct)^2=0.$$

De mivel $-1=i^2$, ezért a fenti kifejezést a következőképpen alakíthatjuk át:

$$x^2+y^2+z^2+(ict)^2=0,$$

ahol a bal oldal a négydimenziós térbeli távolságnégyzetek pithagoraszi összege. Az elsőhöz képest mozgó vesszős koordináta-rendszerben a következő kifejezést kapjuk:

$$x'^2+y'^2+z'^2+(ict)'^2=0,$$

vagyis a *négy* négyzet összege nem változik meg a négydimenziós koordináta-rendszer elfordulásakor. A Lorentz-transzformáció alkalmazásával kimutathatjuk, hogy ugyanez érvényes az (x, y, z, ict) tér bármely két, eseményt jelölő pontjának tér-időbeli távolságára. Így az

$$x^2+y^2+z^2+(ict)^2$$

kifejezés invariáns (vagyis változatlan), független attól, hogy melyik vonatkozási rendszerből nézzük a két eseményt. Háromdimenziós térbeli és egydimenziós időbeli távolságuk megváltozik, de a fenti kifejezés által megadott négydimenziós távolságuk mindig ugyanaz marad. Így tehát ict negyedik koordinátaként való felhasználásával az időt és a teret matematikai szempontból egységesítjük. Minden fizikai eseményt a négydimenziós tér-idő világban történőnek tekinthetünk. Ne felejtsük el azonban, hogy ezt csak az „imaginárius egység" felhasználásával érhetjük el, ami megbízhatatlan segítség, mert ha a kártyákat felfedjük és a reális értékeket nézzük, akkor a tér és az idő nem pontosan azonosak.

A GRAVITÁCIÓ RELATIVISZTIKUS ELMÉLETE

Mint fentebb már megbeszéltük, Einstein relativitáselméletét Galileinek a simán haladó hajó kabinjában végzett mechanikai kísérletekre vonatkozó érvei ragyogó betetőzésének tekinthetjük. Az elméletnek a nem-egyenletes mozgás esetére való kiterjesztése, amelyet rendszerint általános relativitáselméletnek neveznek, de amelyet inkább nevezhetnénk a gravitáció relativisztikus elméletének, szintén Galileinek egy kísérletében gyökerezik. Abban, amelyben egy könnyű és egy nehéz testet ejtett le a pisai ferde torony tetejéről. Az a tapasztalati tény, hogy a könnyű és a nehéz testek pontosan azonos gyorsulással esnek, századokon keresztül rejtélyes maradt, amíg 1914-ben Einstein közzé nem tette cikkét a gyorsuló mozgás és a gravitációs erő összefüggéséről.

Ebben a cikkben Einstein a csillagok közötti térben szabadon lebegő kamra belsejében lefolyó gondolatkísérleteket ír le. Minthogy itt nincs nehézkedési erő, a tárgyak nem igyekeznek semmilyen irányban sem mozogni. Ha azonban a kamrát valami, mondjuk néhány, az aljára szerelt rakéta gyorsítja, akkor a helyzet belül egészen más lesz. Az összes tárgyak a kamra padlóját nyomják, mintha gravitációs erő volna jelen, amely őket lefelé húzza. Az egyenletes a gyorsulással mozgó világűr-laboratórium padlóján álljon egy ember, mindkét kezében egy-egy gömböt tartva, az egyikben könnyűt, a másikban nehezet. Az egész rendszer gyorsulása miatt az ember lába erősen nyomja a padlót, a két gömb pedig a tenyerét. Mi történik most, ha egyszerre elengedi a két gömböt? A két gömb, mivel nincs többé kapcsolatban a rakéta testével, azzal a sebességgel folytatja mozgását, amellyel az elengedés pillanatában mozgott, és ezért egymás mellett marad. Másrészt azonban, a rakéta sebessége mindig nagyobb, mivel mozgása gyorsul. Így a kamra padlója hamarosan utoléri a két gömböt, és egyszerre ütközik beléjük. Az ütközés után a két gömb továbbra is nyomja a padlót, mivel a rendszer többi részével együtt gyorsul. A kamrában tartózkodó megfigyelő azonban azt látja, hogy a két gömb, melyet elengedett, egyenlő gyorsulással kezd esni, és így egyszerre ütközik a padlóba. Ez a gravitáció és a gyorsulás egyenértékűsége, ami a mi időnkben, a „világűr-korszakban" már közismert tény.

De vajon tisztára véletlen-e a gyorsuló űrhajó belsejében és a Föld nagy tömege által létrehozott gravitációs térben végbemenő mechanikai jelenségek hasonlósága, vagy pedig mélyebb összefüggésben van a gravitációs erők természetével? Einstein biztosra vette, hogy az utóbbi a helyes, és feltette magának a kérdést, hogy ebben az esetben a fénysugár hogyan viselkedik a gyorsuló kamrában. Képzeljük el, hogy a falhoz erősített lámpából fénysugár halad át a kamrán. A fénysugár útjának megfigyelése céljából egyenlő távolságban fluoreszkáló üveglapokat helyezhetünk az útjába (80. ábra). Ha a kamra nem gyorsul, akkor azok a pontok, ahol a sugár áthalad az üveglapokon, természetesen egyenes vonal mentén vannak, és lehetetlen eldönteni, hogy a rakéta nyugalmi állapotban van-e, vagy egyenletesen mozog, mondjuk, a csillagokhoz képest. Más azonban a helyzet, ha a kamra a egyenletes gyorsulással mozog. Az az idő, amelyre a fénynek szüksége van az első, második, harmadik stb. üveglap elérésére, az 1, 2, 3 stb. számtani sor szerint nő. Az állandó gyorsulással mozgó rakéta elmozdulása viszont az 1, 4, 9 stb. geometriai sor szerint növekszik. Így a fénysugár nyoma a fluoreszkáló üveglapokon a vízszintesen elhajított kő pályájához hasonló parabolát rajzol ki. Ezért tehát, ha a gyorsulás és a gravitáció egyenértékűsége az elektromágneses jelenségekre is kiterjed, akkor a gravitációs tér is elhajlítja a fénysugarakat. A fény nagy sebessége miatt azonban a fény elhajlása a Föld gravitációs terében túl kicsi ahhoz, hogy meg lehessen figyelni. Ha egy vízszintes fénynyaláb, mondjuk, 30 m utat tesz meg mielőtt eléri az ernyőt, akkor a távolságot $3\cdot 10^3/3\cdot 10^{10}=10^{-7}$ másodperc alatt teszi meg. Mivel a nehézségi gyorsulás a Föld felszínén körülbelül 10^3 cm/sec^2, ezért azt várhatjuk, hogy a fénysugár függőleges eltolódása az ernyőn

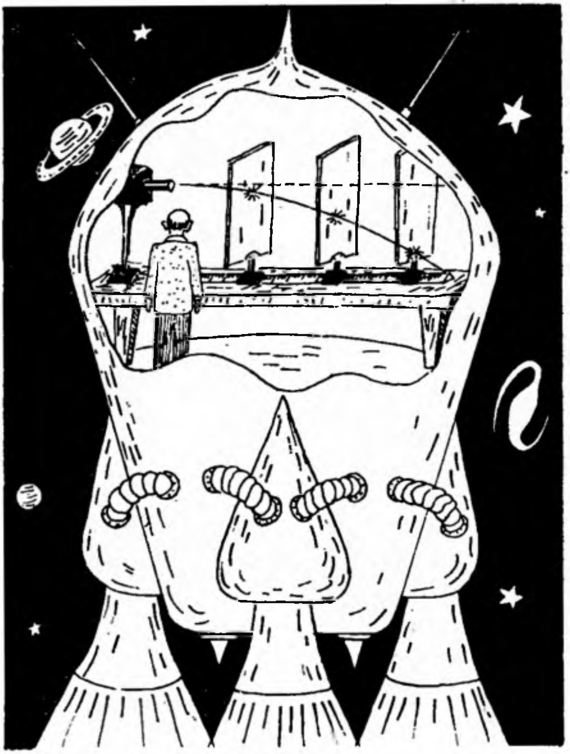
$$\frac{1}{2}\cdot 10^3\cdot (10^{-7})^2=5\cdot 10^{-12}\ \text{cm},$$

ami nagyjából annyi, mint egy atommag átmérője!

Einstein azonban felismerte, hogy a Nap felszínének közelében elhaladó fénysugaraknál észlelhető elhajlást várhatunk. Becsüljük meg nagyjából a várható eltérést. A Nap felszínének közelében a nehézségi gyorsulás a gravitációs állandó ($6{,}7\cdot 10^{-8}$) szorozva a Nap tömegével ($2\cdot 10^{33}$) és elosztva a Nap rádiuszának ($7\cdot 10^{10}$ cm) négyzetével:

$$\frac{6{,}7\cdot 10^{-8}\cdot 2\cdot 10^{33}}{(7\cdot 10^{10})^2} = 3\cdot 10^4 \text{ cm/sec}^2.$$

A Nap gravitációs terében megtett út nagyjából annyinak vehető,



80. ábra.

Gyorsuló rakétában végzett optikai kísérlet, amelyből arra következtethetünk, hogy a gravitációs térben el kell hajolniuk a fénysugaraknak mint a Nap átmérője ($1{,}4\cdot 10^{11}$). Ekkora út megtételéhez szükséges idő $\frac{1{,}4\cdot 10^{11}}{3\cdot 10^{10}} = 5$ sec. Ez alatt a fénysugár

$$\frac{1}{2}\cdot 3\cdot 10^4\cdot 25 = 3{,}7\cdot 10^5 \text{ cm-t}$$

„esik", az elhajlás szöge pedig

$$\frac{3{,}7\cdot 10^5}{7\cdot 10^{10}} = 6\cdot 10^{-6} \text{ radián},$$

vagyis körülbelül 1 szögmásodperc.

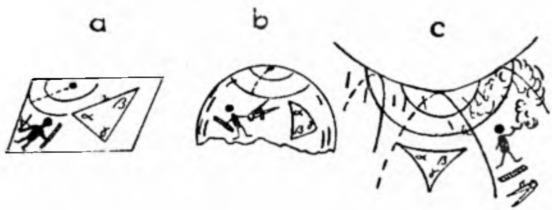
A napkorongot érintő fénysugár elhajlása, pontosabb számítások szerint, 1,75 szögmásodperc. Mivel a Nap közelében levő csillagokat csak teljes napfogyatkozás alatt lehet látni, brit csillagászati expedíció utazott 1919-ben Afrikába, ahol napfogyatkozás volt. (Német csillagászok nem mehettek a háborús blokád miatt). Az eredmények teljesen megegyeztek azzal, amit Einstein jósolt. Mikor beszámoltak neki az eredményekről, csak mosolygott, és azt mondta, hogy a negatív eredmény lett volna számára nagy meglepetés. Ez a mérés és az eredmény többi megerősítése kétség kívül bebizonyította a gravitációs térben és a gyorsuló rendszerben végbemenő jelenségek összefüggését.

GRAVITÁCIÓ ÉS GÖRBÜLT TÉR

Mindenki tudja mit értünk görbe vonalon vagy görbe felszínen. Ahhoz azonban bizonyos képzelőerő szükséges, hogy megértsük, mit jelent a háromdimenziós görbe tér. A görbe tér fogalmának kialakítását az nehezíti meg, hogy míg a görbe felszínt kívülről nézhetjük és láthatjuk, hogy az sima-e vagy görbe, addig a térben benne élünk, nem léphetünk ki belőle, hogy szemügyre vegyük. A görbe tér tulajdonságainak szemléltetésére legjobb egy analógia használata. Képzeljünk el kétdimenziós lényeket, akik egy felületen élnek, és fogalmuk sincs arról, hogy az ő felületükre merőleges irány is létezik. Hogy tudják eldönteni a felület elhagyása nélkül, hogy a felület, amelyen élnek sík, gömbfelület, vagy valami más? A válasz természetesen az, hogy tanulmányozniuk kell a geometriát saját felületükön, oly módon, hogy különféle ábrákat rajzolnak, szögeket mérnek stb. A 81.

ábrán ilyen kétdimenziós mértantudósokat látunk, akik síkra, gömbre és ún. „nyeregfelületre" rajzolt háromszöget tanulmányoznak.

Ha a felület sík (*a*), akkor azt állapítják meg, hogy az Euklidész-féle síkgeometria törvényei érvényesek, és a háromszögek szögeinek összegét mindig 180 foknak találják. Gömbfelületen

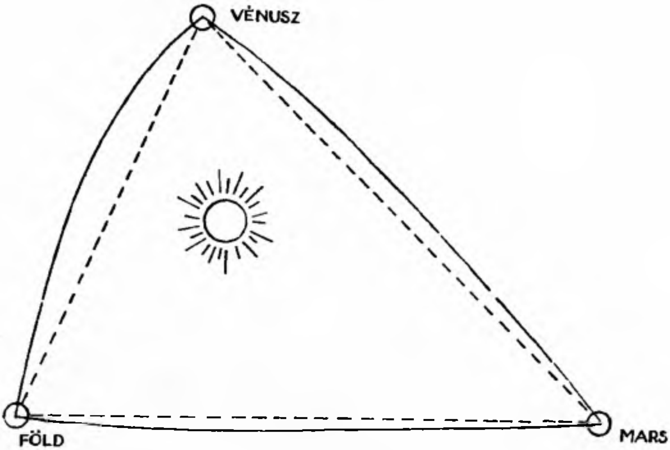


81. ábra.

Három különböző típusú kétdimenziós görbült felület. (a) Sík felület: nulla görbület. (b) Gömbfelület: pozitív görbület. (c) Nyeregfelület: negatív görbület. A három eset közötti különbséget értelmes lények akkor is felfedezhetik a körök és háromszögek geometriájának tanulmányozásával, ha ők is kétdimenziósak

(*b*) a három szög összege mindig nagyobb 180 foknál. Ezt könynyen beláthatjuk, ha egy földgömbre olyan háromszöget rajzolunk, amelyet két délkör és az egyenlítő általuk bezárt szakasza képez. Mivel a délkörök az egyenlítőt derékszögben metszik, a gömbháromszögünk alapján levő két szög összege mindig 180 fok. Ehhez hozzá kell adnunk a Föld valamelyik pólusánál levő harmadik szöget, amely szintén nagy lehet. Kisebb gömbháromszögeknél a három szög összege közelebb lesz 180 fokhoz, de a különbség csak akkor tűnik el, ha a háromszög végtelenül kisebb, mint a gömb, amelyre rajzoltuk. Nyeregfelületen (*c*) a helyzet más, a három szög összege kevesebb, mint 180 fok. A gömbfelületre azt szokás mondani, hogy pozitív görbülete van, a nyeregfelületre, hogy negatív görbülete.

Ezeket a következtetéseket kiterjeszthetjük a háromdimenziós térre. Azt mondhatjuk, hogy a tér nem görbült, vagy pozitív, vagy negatív görbülete van, aszerint, hogy e tér bármely három pontja között rajzolt háromszög szögeinek összege egyenlő, nagyobb, vagy kisebb 180 foknál. Képzeljünk el egy nagy távolságokon elvégzett háromszögelési kísérletet. Helyezkedjék el egy-egy teodolittal felszerelt csillagász a Földön, a Vénuszon és a Marson, és mérje meg a FVM háromszög szögeit (82. ábra). Mivel, amint azt az előző fejezetben megbeszéltük, a fénysugarak a Nap gravitációs terében elhajlanak (mégpedig a nehézkedést okozó test *felé*), ezért a háromszöget képző három sugár olyan lesz, amint azt a 82. ábra mutatja, és a három szög-

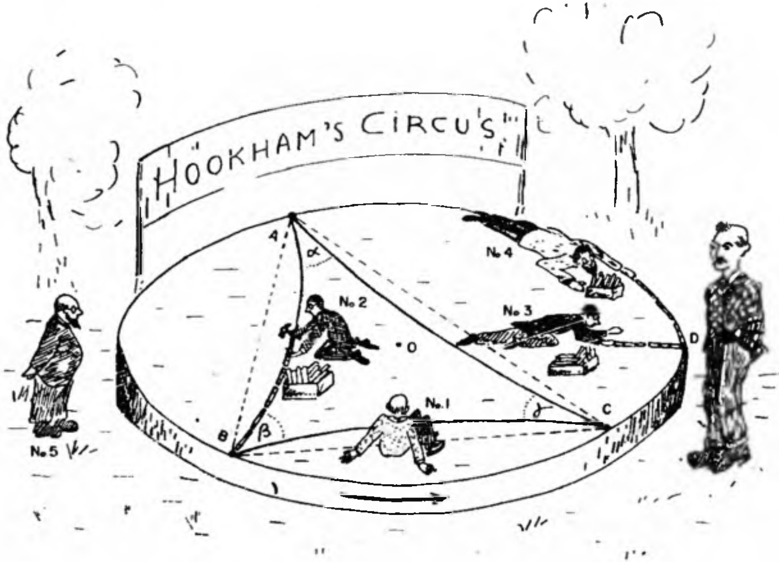


82. ábra.
Háromszögelés a Nap körül

ről a csillagászok megállapítják, hogy összegük *több*, mint 180 fok. A csillagászok ebből azt következtetik, hogy a Nap körüli tér görbült, éspedig pozitív görbületű. Ha a mérést a Naptól messzebb levő Jupiter, a Saturnus és az Uranus bolygók felhasználásával ismétlik meg, akkor a Nap gravitációs tere kisebb mértékben téríti el a fénysugarakat és a három szög összege közelebb lesz 180 fokhoz. Ez azt mutatja, hogy a Nap körüli tér görbülete a Naptól való távolsággal csökken. A fenti méréssel szemben azt az ellenvetést tehetnők, hogy a csillagászok a valóságban nem szabályos háromszöget mértek, mert az oldalak nem egyenes vonalak. De *mi* az egyenes vonal? Az egyetlen értelmes definiciója: „a látási vonal"; a látási vonal azonban nem egyéb mint a fény terjedésének vonala az üres térben. Az egyenes vonalat úgy is definiálhatjuk, mint „a két pont közötti legrövidebb távolságot". Azonban az optika egész tudománya azon a posztulátumon alapszik, hogy a fény mindig a legrövidebb úton halad. Ha a kérdést komolyan megfontoljuk, akkor azt találjuk, hogy az egyenes vonal egyetlen értelmes definiciója, hogy a 82. ábra folytonos vonalait tekintjük „egyenes" vonalnak a „görbe" térben és, hogy az ábrán látható szaggatott vonalaknak semmi fizikai jelentésük nincs. Az elnevezések zavarának elkerülése céljából az „egyenes" vonal kifejezést csupán a síkgeometria legrövidebb távolságaira tartjuk fenn, görbe felületen vagy görbe térben ehelyett „geodéziai vonalakról" beszélünk. Eszerint, egy gömb felszínén az egyenes vonalak megfelelői a főkörök ívei, ezekből kell a gömbháromszögeket megalkotni. Meg kell itt jegyeznünk, hogy a gömbi geometriában az euklidészi geometria régi állítása, amely szerint „párhuzamos vonalak sohasem találkoznak", nem áll fenn többé, hiszen *bármelyik* két főkör mindig metszi egymást két pontban. Két repülőgép, amely az egyenlítő két pontjából egymással párhuzamosan, vagyis az egyenlítőre merőleges irányban elindul, és irányváltoztatás nélkül repül, a sarok elérésekor összeütközik.

A gravitációs tér és a térgörbület egyenértékűségét a következő kétdimenziós példa még jobban megvilágítja. Ha sima vízszintes asztalon biliárdgolyót gurítunk, akkor az természetesen a konvencionális egyenes vonal mentén mozog. Ha azonban az asztalon a golyó pályája mentén valami miatt kis mélyedés és kiemelkedés van, akkor a golyó eltér „egyenes" útjáról, a mélyedés közepe felé halad, a kiemelkedéstől távolodik. Ha a golyó mozgását felülről (a mennyezetben levő lyukon keresztül) figyeljük, akkor nem vesszük észre az asztal felületén levő hibát, és hajlandók leszünk azt hinni, hogy valamilyen erő működik, amely a golyót az asztal felületének egyik pontjához vonzza, a másiktól taszítja. Hasonlóképpen a fénysugarak vagy mozgó anyagi testek elhajlását a Nap közelében vagy úgy magyarázhatjuk, hogy erő hat rájuk, vagy úgy, hogy a nagy tömegek szomszédságában meggörbült tér hozta létre.

Tekintsük most a problémát más oldalról. Vizsgáljuk meg, hogyan látják a fizikai jelenségeket egy nagy forgó korongon levő megfigyelők (83. ábra). Ez a gondolatkísérlet hasonlít Einstein dobozos gondolatkísérletéhez, amellyel az előző szakaszban foglalkoztunk. A különbség az, hogy lineáris gyorsulás (vagyis a sebesség nagyságának irányváltozás nélküli változása) helyett itt körmozgásból származó (vagyis csak a sebességek irányát, de nagyságát nem változtató) gyorsulás van. A forgó korongot leboríthatjuk egy vele együtt forgó félgömb alakú kupolával, hogy a benne levő emberek ne lássák, hogy a házak és fák körülöttük keringenek. Amint azt mindenki tudja, a forgó korongon levő emberek a középponttól eltaszító centrifugális



83. ábra.
Mértani vizsgálatok forgó korongon

erőt fognak észlelni. Ezt valami speciális nehézkedési erőként tudják magyarázni, amely nem vonz, hanem taszít. A gravitációval való analógiát megerősíti az a tény, hogy ha az egyik ember szilárdan elhelyezkedve a korongon, arra két gömböt helyez, egy nehezet és egy könnyűt, akkor a gömbök együtt gördülnek, mint ahogy a toronyból leejtett tárgyak is egymás mellett esnek le. Minthogy a korongon levő emberek képzett fizikusok, és ismerik az e fejezetben már megbeszélt összes tételt, ezért ezt a „pszeudogravitációs teret" a térgeometriával hozzák kapcsolatba, és megkísérlik néhány geometriai mérés elvégzését. Először is megpróbálnak egy *A*, *B* és *C* csúcsú háromszöget megalkotni és a szögek összegét megmérni. A 2. sz. fizikus (az 1. sz. fizikus a főnök, aki felügyel a munkára) felhasználva az egyenes vonalnak azt a definicióját, hogy az a két pont közötti legrövidebb távolság, vesz egy doboz pontosan azonos standard hosszúságú pálcikát, és megkísérli azokat az *A* és *B* pontok közé egy vonalban oly módon leszögezni, hogy ehhez a lehető legkevesebb pálcikát használja fel. Ha a korong nem forogna, akkor erre a legmegfelelőbb mód az ábrán látható szaggatott vonal menti elhelyezés lenne. Forgó korongnál azonban más a helyzet. A pálcikák most hosszúságuk irányában mozognak, és így alá vannak vetve a Fitzgerald-féle összehúzódásnak. Legalábbis, a földön álló 5. sz. fizikus meg van győződve arról, hogy a pálcikák összehúzódnak. A középső pálcika pontosan saját hosszirányában mozog, és teljes mértékű Fitzgerald-összehúzódást szenved. A kerülethez közelebb levő pálcikáknak is van valamekkora hosszirányú sebességkomponensük. Az összehúzódás miatt a pálcikák között üres térközök lesznek. A 2. sz. fizikusnak ezért további pálcikákat kell odahelyeznie, hogy a vonal folyamatos legyen. A zavart azonban részben orvosolni lehet: ha a pálcikákat valamivel közelebb toljuk a korong központjához, akkor lineáris sebességük és így összehúzódásuk is kissé csökken, és kevesebb pálcikát kell hozzátenni. Ezért a 2. fizikus a pálcikákat úgy fogja elhelyezni, amint az az ábrán látható, és ugyanezt kénytelen tenni a háromszög másik két oldalán is. A szögek összege így *kevesebb* 180 foknál. Ebből a korongon levő fizikusok arra következtetnek, hogy az ő terük negatív görbületű.

Meg kell jegyeznünk, hogy ha a fizikusok optikai módszerekkel ellenőrzik ezeket az eredményeket, akkor ugyanazt fogják megállapítani. Mivel a centrifugális erők tere minden tekintetben hasonlít a taszító gravitációs térhez, ezért az *ABC* csúcsokat összekötő fénysugarak a korong középpontjától *kifelé* hajlanak, és a lefektetett fapálcikák útján haladnak.

A korongon van még két személy, a 3. és a 4. számú. Ők mást csinálnak. Megkísérlik megmérni a kerület és az átmérő arányát. Ezt a síkgeometriában a görög π betűvel jelölik. A korong forgása itt is bajt okoz. A 3. fizikusnak nincsenek nehézségei, mert az általa használt pálcikák hosszúságukra merőleges irányban mozognak. Így vékonyabbak lesznek, anélkül, hogy hosszúságuk megváltozna. A 4. fizikus által felhasznált pálcikákon azonban maximális Fitzgerald összehúzódás következik be, és így sok pálcikát kell használnia. Ezért a kerület és az átmérő aránya a korongon mérve nagyobb a síkgeometriában érvényes 3,1416 . . .-nál. Ez az eredmény megerősíti a tér negatív görbületére vonatkozó következtetést.

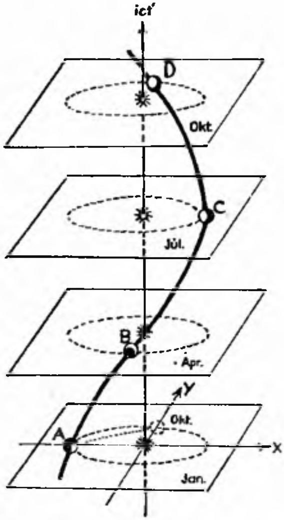
Térjünk vissza egy percre a kétdimenziós görbe felületekhez. Nézzük meg, mi történik, ha köröket rajzolunk rájuk. A földgömbön azokat a köröket, amelyek központjában az egyik pólus van, „párhuzamos köröknek" nevezzük. Nyilvánvaló, hogy egy párhuzamos kör kerületének és (a délkör mentén mért) átmérőjének az aránya kisebb, mint π. Az egyenlítő (0-dik párhuzamos kör) hossza a délkör hosszával osztva valóban csak 2. A párhuzamos körök hossza sokkal lassabban növekszik, mint a délkör mentén mért rádiuszuk. A 80, 70, 60 stb. foknál átmenő (szögben kifejezve 10, 20, 30 stb. fok sugarú) párhuzamos körök kerülete lassabban növekszik, mint 1, 2, 3 stb. A párhuzamos körökön belüli felület ugyancsak lassabban növekszik, mint 1, 4, 9 stb. Nyeregfelületen ennek az ellenkezőjét látjuk. Ott a körök átmérője *gyorsabban* növekszik, mint a sugaruk, és a felületük gyorsabban, mint a sugaruk négyzete. Ha egy futball-labdából köralakú bőrdarabot vágunk ki, és azt az asztalra helyezzük, az a középen kidudorodik. Meg kell nyújtanunk a kerületén, ha ki akarjuk egyenesíteni. Ha viszont nyeregből vágunk ki egy bőrdarabot, akkor túl sok bőr lesz a peremen, és azt zsugorítani kell, hogy a kivágott darab simán feküdjék. Ezen analógia alapján megint csak negatív görbülettel kell felruházni a forgó laboratóriumon belüli teret.

Háromdimenziós térben, pozitív görbület esetén, a gömb felülete lassabban növekszik, mint r^2, és a térfogata lassabban, mint r^3. Viszont ennek az ellenkezője következik be negatív görbület esetén. Ez a matematikai eredmény volt az alapja annak az igen érdekes csillagászati vizsgálatnak, amelyet Edwin *Hubble* a Mt. Wilson csillagvizsgálóban végzett jónéhány évvel ezelőtt. Hubble kiváló szakértője a galaxisoknak, amelyekből a nagy teleszkópok hatótávolságán belül több milliárd van szétszórva a világűrben. Elhatározta, hogy megvizsgálja, vajon a tőlünk különböző távolságra levő galaxisok száma egyenes arányban növekszik-e a távolságok köbével, vagy annál lassabban, vagy gyorsabban. Ha az első lehetőség az igaz, akkor azt kell következtetnünk, hogy az univerzumban a tér euklidészi.

A második esetben a tér pozitív görbületű és önmagában zárt. A harmadik esetben a tér negatív görbületű és minden irányban nyitott. Sajnos a galaxis-távolságok mérésének a technikája akkor még nem volt eléggé fejlett, és Hubble eredményei önmaguknak ellentmondóak voltak. Így nem lehetett következtetést levonni belőlük. Remélhető, hogy ha a Hubble „galaxisszámlálását" jobb megfigyelési eszközökkel megismétlik, választ kapunk a kozmológia e fontos problémájára.

Einstein, a fenti megfontolásoktól vezettetve, kialakított egy elméletet, amely szerint az összes gravitációs kölcsönhatásokat a tér görbületével magyarázzuk. Einsteint az a szerencsés helyzet várta, hogy Bernhard *Riemann* német matematikus már évtizedekkel azelőtt kidolgozta a tetszőleges dimenziószámú görbült terek részletes matematikai elméletét. Einsteinnek nem volt egyéb teendője, mint hogy a már meglevő matematikai képleteket a fizikai szempontból reális görbült térre alkalmazza. Ez természetesen négydimenziós tér volt, az ebben a fejezetben már tárgyalt y, x, z és ict koordinátákkal. Einstein a tér-idő kontinuum ún. „görbületi tenzor"-át a tömegek eloszlásával és mozgásával hozta összefüggésbe (ezt az alapvető képletet a 74. ábrán látjuk, Einstein képe alatt). Ebből első közelítésként megkapta Newton gravitációs elméletének összes eredményét. Pontosabb számítások azonban arra utaltak, hogy kisebb eltérések állnak fenn Newton eredeti gravitációs elméletéhez képest. Ezeknek az eltéréseknek a felfedezése bizonyítaná Albert Einstein felfogásának a fölényét Isaac Newton nézetével szemben. Einstein gravitációs elméletének egyik következményét, a fény pálya elhajlását gravitációs térben, már tárgyaltuk. Egy másik lényeges kérdés a bolygók mozgása a Nap körül. Newton kimutatta, hogy az ő gravitációs törvénye szerint a bolygóknak ellipszis alakú pályán kell mozogniuk a Nap körül, a Kepler által felfedezett empirikus törvényeknek megfelelően. Einstein elméletében minden mozgást a négydimenziós térben (x, y, z, ict) képzelünk el, amely gravitációs tér jelenléte esetén görbült. Az anyagi test „mozgás-történetét", a négydimenziós térben ábrázoló vonalat e test „világvonalának" nevezzük. A világvonalnak „geodetikus" vagyis legrövidebb vonalnak kell lennie. Hogy milyen ez a vonal, azt a gravitációs tér relativisztikus elmélete alapján lehet kiszámítani.

A 84. ábrán a Föld Nap körüli mozgásának világvonalát látjuk. Az x és y tér-koordináta az ellipszis-pálya síkjában van, a harmadik pedig az *ict* idő-koordináta. A tér-idő kontinuum a Nap közelében görbült, és a Föld világvonala a legegyenesebb (vagyis geodetikus) vonal ebben a görbült térben. Az *ABCD* vonal a legrövidebb távolság az *A* és *D* pontok (események) között ebben a háromdimenziós tér-idő kontinuumban. Az (x, y) síkra való vetülete a Föld Nap körüli pályája. Egzakt



84. ábra.

A Nap körül keringő Föld világvonala az x,y,ict koordináta-rendszerben. A Föld januári és októberi helyzete között a berajzolt tér-időbeli szakasz a legrövidebb távolság. A januári helyzet és az októberi helyzetnek a január-síkon levő vetülete (Okt') közötti távolság természetesen nem a legrövidebb

számítások azonban kimutatták, hogy az ellipszis helyzete nem marad állandó a térben, amint azt Newton elmélete kívánja, hanem lassan elfordul, nagytengelye minden keringés alatt egy kis szöggel odébb fordul. Az effektust a legjobban a Merkur pályán lehet észlelni, mert ez nyújtottabb, mint a többi bolygó pályája, és ez van legközelebb a Naphoz. Einstein kiszámította, hogy a Merkur pályájának minden évszázadban 43 szögmásodperccel kell elfordulnia. Ezzel megoldotta az égimechanika egy régi rejtélyét. A csillagászok már jóval Einstein születése előtt kiszámították, hogy a Merkur-pálya nagytengelye lassan körben forog, a Naprendszer többi bolygója által okozott perturbációk, vagyis gravitációs zavarások miatt. De a számítás és a megfigyelések között egy évszázadban 43 szögmásodpercnyi eltérés állt fenn. Ezt nem tudták megmagyarázni. A gravitáció Einstein által megalkotott relativisztikus elmélete kitöltötte ezt a hézagot, és kétségkívül győzedelmeskedett a régi Newton-féle elmélet fölött.

AZ EGYSÉGES TÉRELMÉLET

Albert Einstein életműve a fizika nagy részének geometrizálásában érte el tetőpontját: az idő a három tér-koordináta elismert negyedik társa lett (eltekintve az *i* tényezőtől) és a gravitációs erő a négydimenziós világ görbületeként értelmezhető. Az elektromos és mágneses erők azonban kívül maradtak e geometriai hódításokon. Einstein, miután idáig eljutott, minden energiáját arra fordította, hogy a makacs elektromágneses teret szigorú geometriai zabolának vesse alá. Mi lehet ennek a négydimenziós térnek az a mostanáig felderítetlen tulajdonsága, amely az elektromos és mágneses kölcsönhatások okának tekinthető? Einstein maga is és sok más „szimpatizáns", így például Hermann *Weyl*, a neves német matematikus, minden lehetőt elkövettek, hogy megalkossák az elektromágneses tér tisztán geometriai magyarázatát. Azonban William Clerk Maxwell gyermeke, az elektromágneses tér, igazi skót makacssággal ellenállt a geometrizálásnak. Einstein csaknem négy évtizeden keresztül, egészen 1955-ben bekövetkezett haláláig dolgozott az ún. „egységes térelméleten", vagyis azon az elméleten, amely a gravitációs és az elektromágneses teret azonos geometriai alapon akarta egyesíteni. Az évek múltával azonban a feladat egyre reménytelenebbé vált. Valahányszor Einstein újabb képletekkel állt elő, amelyek az egyesített térelmélet rejtélyét oldották volna meg, a *New York Times* és más újságok szerte a világon mindig az első oldalon közölték a komplikált tenzor-kifejezéseket. De mindannyiszor kiderült, hogy a képletek nem tudják a feladatot elvégezni, és csend volt egészen a legközelebbi nyilatkozatig. Az elméleti fizikusok, öregek és fiatalok, lassanként elvesztették a bizalmukat abban a lehetőségben, hogy az elektromágneses tér tisztán geometriailag értelmezhető. Nagyszerű lett volna, ha ezt meg lehetett volna tenni, a természetet azonban nem lehet adottságainak meg nem felelő formulákba belekényszeríteni. Másrészt a fizika rohamosan haladt újonnan feltárt a területeken. A klasszikus gravitációs és elektromágneses térhez a hullámmechanika révén újabb terek járultak, amelyek erősen megvetették a lábukat a tudományban. Ha az elektromágneses teret tisztára geometriailag lehet értelmezni, akkor a mezon-tereket, hiperon-tereket és a sok más új teret is ennek a törvényszerűségnek kellene alávetni, hogy azt mondhassuk: a fizika nem egyéb, mint geometria. Einstein maga egyre érzékenyebb lett ezen a ponton, és mindig kevésbé volt hajlandó ezeket a problémákat fizikusokkal megbeszélni. A harmincas években egyik Nagy-Britanniában tett látogatása folyamán előadást tartott az egységes térelméletről egy észak-angliai leányiskolában (a bonyolult tenzor-képleteket tartalmazó táblát az iskolában megőrizték). A cambridge-i egyetemen azonban nem volt hajlandó beszélni. Figyelmét mindinkább a cionizmus és a világbéke problémái kötötték le, a tudomány terén azonban ugyanolyan lángelme volt, mint mindig. Mikor e könyv szerzője Einsteint a II. világháború folyamán többször meglátogatta nyugodt otthonában, Princetonban, ugyanolyan elbűvölőnek találta, mint bármikor. A szerző sok, a fizika különböző ágairól folytatott tanulságos és érdekes beszélgetésre emlékszik vissza. Az íróasztalon bonyolult tenzor-képletekkel teleírt papírdarabok voltak szétszórva. A képletek nyilván az egységes térelméletre vonatkoztak. Erről azonban Einstein sohasem beszélt.

VII. FEJEZET

KVANTUM—FIZIKA

AZ ANYAG OSZTHATÓSÁGA

Amint mindenki tudja, az *atom* fogalmát (atom görögül „oszthatatlan"-t jelent) Démokritosz használta először. Ő mintegy 23 évszázaddal ezelőtt Athénben élt és tanított. Elképzelhetetlennek tartotta, hogy az anyagi testeket vég nélkül egyre kisebb részekre lehessen bontani. Feltételezte, hogy kell létezniök végső részecskéknek, amelyek olyan kicsinyek, hogy tovább már nem bonthatók szét. Empedoklész pedig úgy gondolta, hogy négyféle atom van — a föld, a víz, a levegő és a tűz atomjai —, és azt hitte, hogy minden ismert anyag e négy elem különböző kombinációja. Nézeteiket a XIX. század elején John *Dalton* angol kémikus elfogadta, és szilárd kísérleti alapra helyezte. Ezek képezik a modern kémia alapját, annak ellenére, hogy ma már tudjuk: az atomok egyáltalán nem oszthatatlanok, hanem igen bonyolult belső szerkezetük van. Démokritosznak a végső elemi részecskékről való elképzelését most az atomokat alkotó sokkal kisebb részecskékre visszük át. Remélhetjük, hogy az elektronok, protonok és a többi úgynevezett „elemi részecskék" valóban elemi részek és oszthatatlanok a szó régi jó démokritoszi értelmében. Lehet, hogy ez az elképzelés onnan származik, hogy ezeket az aránylag újonnan felfedezett részeket még kevésbé ismerjük. Lehet, hogy ugyanazt a tévedést követjük, el, mint a XIX. század fizikusai és kémikusai, akik szerint az anyag oszthatósága az atomnál megszűnik. Megeshet, természetesen, az is, hogy az sem jelenti még az út végét, ha a mai elemi részecskék a jövőben bonyolult szerkezetűeknek bizonyulnak, és alkotórészeik számára megint új neveket találnak ki. Lehet, hogy évek múlva új távlatok nyílnak a még kisebb részecskék felé. Nem bocsátkozhatunk jóslásokba a jövőbeli tudományos fejlődésről. Azt a kérdést, hogy Démokritosz eredeti filozófiai felfogása az oszthatatlanságról helyes-e vagy sem, sohasem fogják empirikus úton eldönteni. Sok kutató azonban, ezek között magam is, boldogabbnak érzi magát abban a reményben, hogy az anyag tanulmányozásában „elérünk majd egy végső pontot", és a jövő fizikusai minden tudhatót tudni fognak az anyag belső szerkezetéről. És valószínű, hogy a modern fizika elemi részecskéi teljes mértékben megérdemlik ezt az elnevezést, mert tulajdonságaik és viselkedésük sokkal egyszerűbbnek látszik, mint amilyennek az atomokét valaha is hitték.

A RÉGI ATOM EGY SZILÁNKJA

A XIX. század vége felé a fizikusok a gázokon átáramló elektromosságra fordították figyelmüket. Századok óta tudták, hogy az egyébként nagyon jó elektromos szigetelő gázon néha a nagy elektromos feszültség átüt. A kisülés ereje az ajtókilincs és a gumitalpú cipőben szőnyegen járó ember keze között átütő parányi szikrától az égi háború hatalmas villámáig terjed. Azonban Sir William *Crookes*, akinek tudományos teljesítményét csak részben homályosítja el a spiritizmusban és a természetfölöttiben való hite, kimutatta, hogy az elektromosság sokkal békésebb módon halad át a gázon, ha annak nyomását jóval egy atmoszféra alá csökkentjük. A Crookes-csövek nyugodt fénnyel világítanak a gáz fajtájától függő színben. Ma is láthatók a városi utcákon mint szállodák, mulatók és ezer egyéb dolog reklámjai. Ha a csőre nagy feszültséget kapcsolunk és a gáz nyomása elég kicsi, akkor a katódtól az anód felé tartó, élesen körülhatárolt nyalábot látunk, amely beleütközik a cső túlsó végébe, ha egy huncut fizikus eltávolítja az anódot a nyaláb útjából. Ha a katódból kisugárzó titokzatos nyaláb az üvegfalba ütközik, akkor az szórt zöld fénnyel világít. Minden, a nyaláb útjában levő tárgy jól körülhatárolt árnyékot vet. Crookes megfigyelte, hogy ha mágnest helyez a cső közelébe, a nyaláb eltér, mintha elektromos áram vagy negatív töltésű részecskék raja repülne a katódtól. Nagyjából ugyanekkor Jean *Perrin* Franciaországban azt találta, hogy a nyaláb útjába helyezett fémlap negatív töltést nyer. Mindez azt mutatja, hogy ezeknek negatív töltésű részecskéknek kell lenniük, amelyek ugyanúgy haladnak át a ritkított gázon, mint Faraday ionjai a folyadékokon elektrolíziskor. A lényeges különbség természetesen az, hogy elektrolíziskor az ionoknak lassan kell utat törniük a szorosan elhelyezett folyadékmolekulák között, és soha nem tévesztik el az utat a szemben levő elektródákhoz, viszont a *katódsugarak* (ahogy elnevezték) a ritkított gázban egyenesen röpülnek, és beleütköznek mindenbe, ami az útjukban áll.

Talán ezzel szemben állt *Lénárd* Fülöp (magyar származású) német fizikus felfogása. Ő azt találta, hogy a katódsugár könnyen áthatol az útjába helyezett különféle ernyőkön anélkül, hogy kilyukasztaná őket, amint azt minden anyagi részecske tenné. Így csak hullámok viselkedhetnek, nem pedig anyagi részecskék nyalábja, állította Lénárd. Manapság már tudjuk, hogy métervastagságú betonfalakat kell az atommáglya köré építeni a neutronok környezetbe hatolásának megakadályozására, nehogy sugárzási betegséget okozzanak a kezelőknél. Így persze Lénárd érvelése meglehetősen gyengének hat. Annak idején azonban igen hatásos volt.

A kísérleti ellentmondások megoldásával, vagyis annak a kimutatásával, hogy a katódsugarak *valóban* áramló részecskék (és mik e részecskék fizikai jellemzői) a Tudomány-fejlesztés Legfelső Tanácsa Joseph John *Thomson* manchesteri születésű fizikust bízta meg (85. ábra). Thomson, a későbbi Sir Joseph,

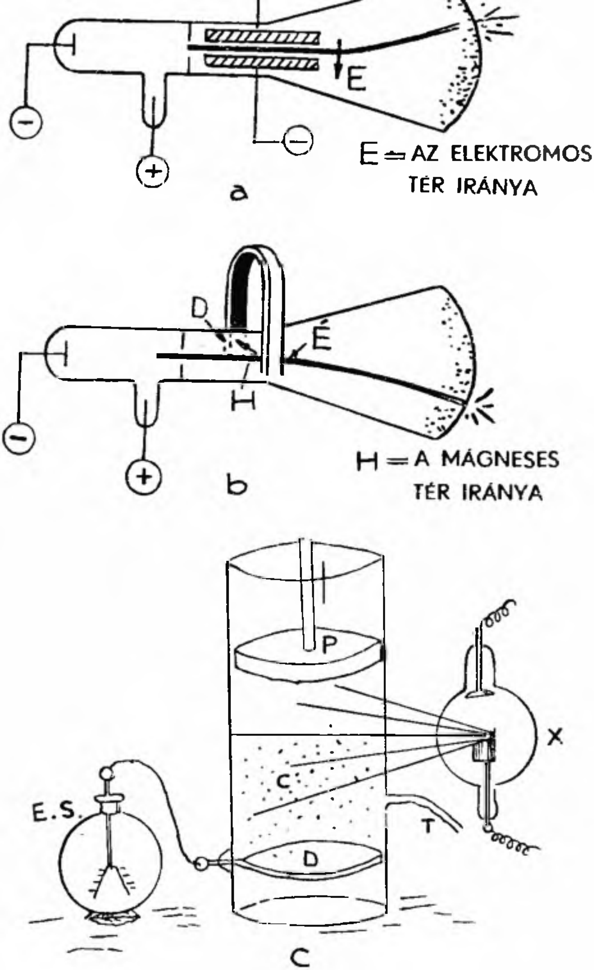
85. ábra.
Rutherford (balról) és Sir J. J. Thomson

abban az időben 40 éves volt és a neves cambridge-i Cavendish Laboratóriumnak, az akkori fizika egyik nagy központjának az igazgatója. Elhatározta, hogy megméri a katódsugárban sebesen repülő feltételezett részecskék tömegét és elektromos töltését. E mennyiségekre bizonyos felvilágosítást adott a katódsugarak mágneses térben megfigyelt eltérése (86b. ábra). Ez az eltérés nem csupán a száguldó részecskék töltésétől és tömegétől függ hanem sebességüktől is. Az eltérést megmérve csak a $\frac{\text{tömeg}\cdot\text{sebesség}}{\text{töltés}}$ vagyis a szokásos jelöléssel az $\frac{mv}{e}$ kifejezés értékét kapjuk meg. Az elméletből azonban az következett, hogy az elektromos tér által okozott eltérés (86a. ábra) ugyanezen mennyiségek másfajta kombinációjától függ, mégpedig az $\frac{mv^2}{e}$ szorzattól. Thomson mindkét eltérést megmérve és az eredményeket kombinálva megkapta külön a mozgás v sebességét és külön a töltés és tömeg $\frac{e}{m}$ arányát. A v a csőre kapcsolt feszültségtől függött, az $\frac{e}{m}$ azonban mindig $5{,}28\cdot 10^{17}$ $\frac{esu}{g}$* volt.

Majdnem bizonyos volt, hogy e nagysága ugyanakkora, mint az elemi töltés, amit Faraday talált kísérleteiben a folyadékok elektrolízisekor. Thomson mégis külön kísérletet végzett, hogy megmérje ezt az értéket a gázionok esetében is. Módszere C.T.R. *Wilson* felfedezésén alapult, aki szintén a Cavendishben dolgozott („C.T.R. ragyogó csillag!" – mint a régi Cavendishbeli dal mondja). Wilson megállapította, hogy ha vízgőzzel telített portalan levegőt expanzió által hirtelen lehűtünk, akkor a bennelevő ionokon parányi vízcseppek képződnek.** Csekély kiterjesztés esetén (30% alatt) csak a negatív ionok képeznek kondenzációs magokat, erősebb expenzióknál azonban a vízgőz a pozitív és a negatív ionokon egyaránt lecsapódik. Thomson kísérletét a 86c. ábra mutatja vázlatosan. A kísérleti berendezés a C üveghengerből, a P dugattyúból és az elektroszkóppal összekötött D fémkorongból áll. A hengert a T csövön át ned-

* Az esu az elektrosztatikus töltésegység, amint az V. fejezetben olvasható. a g pedig a tömeg egysége, gramm.

** Ha a levegőben por van, akkor a gőz először a porrészecskéken csapódik le, ami zavarja a kísérletet.



86. ábra.

Thomson berendezése az elektron tömegének megmérésére. (a) Az elektromos térbeli eltérítésből az $\frac{m \cdot v^2}{e}$ értékét kapjuk meg. (b) A mágneses térbeli eltérésből megkapjuk az $\frac{m \cdot v}{e}$ mennyiség értékét. A két eredmény kombinálásával megállapíthatjuk $\frac{m}{e}$ értékét. (c) A gázionokon képződő cseppek esésének sebességét mérve megkapjuk e értékét. Ha e/m és e ismert, akkor m értéke könnyen meghatározható ves levegővel töltik meg, és röntgen sugarakkal sugározzák be. Ha a dugattyút hirtelen felhúzzuk és ez a levegő (30%-nál kisebb) expanzióját okozza, akkor a negatív ionokon történő vízlecsapódás következtében köd keletkezik, amely betölti a kamrát. A köd lassan leülepedik a *D* korongra. A képződött ionok összes elektromos töltését megmérjük az elektroszkóppal. Ha a hengerben levő vízgőz kezdeti mennyiségét és a ködcseppek átlagos méretét ismerjük, akkor megkapjuk a keletkező cseppek teljes számát, vagy ami ugyanaz, az ionok teljes számát. Mivel a cseppeket kicsiny méretüknél fogva nem lehetett látni, Thomson a méretüket abból a sebességből határozta meg, amellyel a köd a korongra leülepedik. Minél kisebbek a cseppek, annál lassabban csapódik le. Stokes levezetett egy képletet, amely megadja az esési sebesség, a csepp sugara és a levegő viszkozitása közötti összefüggést. E módszer alkalmazásával és az elektroszkóp által kimutatott töltést a cseppek számával elosztva, Thomson meghatározta az egyes cseppek töltését. Erre a $4{,}77 \cdot 10^{-10}$ esu értéket kapta, ami ugyanaz, mint a folyadékok elektrolízise esetében.

Most már az előzőleg mért $\frac{e}{m}$ arányból Thomson meghatározhatta m értékét. Ez $0{,}9 \cdot 10^{-27}$ g, vagyis 1840-szer kisebb, mint a hidrogénatom tömege.

Igen fontos felfedezés volt ez: egy részecske, amely közel kétezerszer könnyebb a legkönnyebb atomnál! Thomson azt következtette, hogy míg Faraday ionjai elektromos töltést vivő atomok, a katódsugarat alkotó részecskék nem egyebek, mint elektromos töltések magukban véve, és ezeknek az *elektron* nevet adta. Az atomot pozitív töltésű tömör gömbnek képzelte, amelyben parányi elektronok vannak elszórva, mint a fekete magvak a görögdinnye piros húsában. Ez, mint mondani szokták, „statikus modell” volt, vagyis feltételezték, hogy az elektronok nyugalmi állapotban vannak az atomban, bizonyos egyensúlyi helyzetekben. Az egyensúlyi helyzeteket a negatív töltésű elektronok közötti elektrosztatikus taszítóerő, és az elektronok és az atom pozitív töltésű testének központja közötti elektrosztatikus vonzóerő egyensúlya határozza meg. Ha egy atom gerjesztett állapotba kerül, vagyis fölös energiát kap kívülről, akkor a belsejében levő elektronok – az elképzelés szerint – egyensúlyi helyzetük körül rezegnek, miközben különböző hullámhosszúságú elektromágneses (fény) hullámokat bocsátanak ki. Fáradságos számításokat végeztek, hogy különböző elektronelrendezések rezgési frekvenciáját a különböző kémiai elemek megfigyelt vonalas színképével kapcsolatba hozzák. Ez a munka azonban hiábavaló volt, és a probléma megoldatlan maradt mindaddig, míg Rutherford meg nem alkotta atommodelljét.

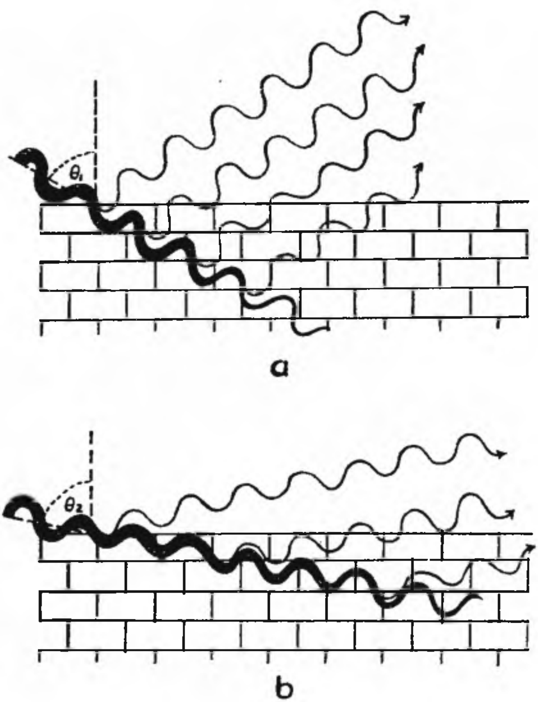
A TITOKZATOS X-SUGARAK

A XIX. század végének számos fontos, a fizikát „klasszikus" alakjából „modern" alakjára hirtelen átváltoztató felfedezése véletlenül történt. Ezekhez a felfedezésekhez azonban mindig éleseszű kutatókra volt szükség, akik elég figyelmesek voltak ahhoz, hogy észrevegyék a szokatlan jelenségeket, és a vizsgálatokat mindaddig folytassák, amíg a fontos tények napvilágra nem kerülnek. 1895. november 10-én Wilhelm Konrad *Röntgen* német fizikus (87. ábra) a Crookes-cső katódsugaraival

87. ábra.
Max von Laue (balról) és Wilhelm Röntgen

folytatott kísérletei közben észrevette, hogy egy fluoreszkáló ernyő, amely véletlenül volt a közelben az asztalon, ragyogó fényes lett, amikor elektromos áram járta át a csövet. Röntgen egy darab fekete papírral fedte be a csövet, de a fluoreszcencia nem tűnt el. Egy fémlap azonban határozottan megszüntette a hatást. A csőből tehát újfajta sugárzás áramlott ki, amely könnyen áthatolt a rendes fény számára áthatolhatatlan anyagon. Az első fénykép, amelyet Röntgen az újonnan felfedezett és általa X-sugaraknak nevezett sugárzással készített, feleségének a kezéről készült. A felvételen tisztán látszottak a csontok és a karikagyűrű. A további vizsgálatok megmutatták, hogy ez az átható sugárzás az üvegcsőnek a katódsugarak nyalábja által érintett végéből indult ki. Az X-sugarak intenzitását lényegesen növelni lehetett azzal, hogy a katódsugár útjába nehézfémből készült lemezt helyezett, amelyet „antikatód"nak nevezett el (87. ábra). Az X-sugarak (mai nevükön röntgensugarak) emisszióját a katódsugarakat alkotó, gyorsan mozgó elektronoknak az útjukba helyezett lemezbe való ütközése hozza létre. (Az olvasó emlékezni fog, hogy az elektronokat Sir J. J. Thomson két évvel azelőtt fedezte fel.) Ha az elektronokat valami hirtelen megállítja, akkor mozgási energiájukat igen rövid hullámhosszúságú elektromágneses hullámok alakjában bocsátják ki. Ez a golyók márványlapba ütközésekor keletkező hanghullámokra emlékeztet. És, ugyanúgy mint a a golyók esetében, a kibocsátott hang minden lehető frekvenciát tartalmaz. Inkább „zaj", mint tiszta zenei hang. A röntgensugarak folytonos hullámhosszú sugarak keverékéből állnak. Ezt fékezési sugárzásnak nevezik.

Mivel az X-sugarakat a mágneses tér nem térítette el útjukból, Röntgen kezdettől fogva feltételezte, hogy ezek a fényhez hasonló rezgések. Ha ez így van, akkor a törés jelenségét is mutatniuk kell. Röntgen éveket töltött eredmény nélkül azzal, hogy ezt megkísérelje bebizonyítani. Nagy felfedezése után 12 évvel, amikor már a müncheni egyetem fizika professzora volt, egy fiatal (33 éves) elméleti fizikus, Max von *Laue*, aki ugyanazon az egyetemen tanított, megmutatott neki néhány felvételt, amelyeket asszisztensei, W. *Friedrich* és P. *Knipping* készítettek. Röntgen első pillantásra felismerte hogy pontosan az van előtte, amit éveken át keresett: gyönyörű diffrakciós képek, amelyeket kristályon áthatoló röntgensugarak hoztak létre (IV. tábla, *fent*). Lauenak tisztára elméleti megfontolás alapján támadt az az ötlete, hogy kristályokat használjon diffrakciós rácsként. Mivel a röntgensugarak a szokásos optikai rácsokkal nem mutatnak diffrakciós jelenségeket, nyilván sokkal kisebb a hullámhosszúságuk. A kristályrácsot azonban egymástól mintegy 10^{-8} cm távolságra elhelyezkedő atom- és molekularétegek alkotják. Ha röntgensugarak esnek egy kristály felszínére, akkor mélyen behatolnak a kristályba. Minden egyes réteg, amelyen áthatolnak, részben visszaveri őket (88. ábra). Ha a beesési szög olyan, hogy a visszavert



88. ábra.

A röntgensugarak és a de Broglie-hullámok visszaverődése kristályfelületről. (a)-ban a hullámok a (téglákkal ábrázolt) kristályrács egymásra következő rétegeiből visszaverődve ellentétes fázisban vannak, és megsemmisítik egymást. (b)-ben a hullámok azonos fázisban vannak, ami az intenzitás növekedését okozza sugarak azonos fázisúak (b), akkor a visszavert nyaláb intenzitása növekszik. A másik szögnél, amelyben a hullámok ellentétes fázisúak (a), sötétséget várhatunk. Ugyanúgy, mint az optikai rácsok esetében, a diffrakciós képet itt is akár a visszavert, akár a primér nyalábban meg lehet figyelni. A helyzetet még bonyolultabbá teszi, hogy a kristályoknak sokféle párhuzamos molekularétegük van, úgy hogy a képek bonyolultabbak, mint a rendes fénynél. A VI. táblán *fent* a Bell Telephone Laboratory-ban készült felvétel röntgensugarak nikkel-vas ötvözetben bekövetkező diffrakcióját mutatja.

Később felfedezték, hogy a folytonos fékezési sugárzáson kívül a röntgensugarakban éles vonalakból álló sorozatok is vannak. Ezek hasonlóak az optikai színképekhez, és az atom mélyében bekövetkező elektronátmenetekből származnak. A röntgensugarak vonalas spektrumával sokat foglalkozott W. *Bragg* (apa) és W. L. *Bragg* (fia), akik kidolgozták a röntgenspektroszkópia módszereit.

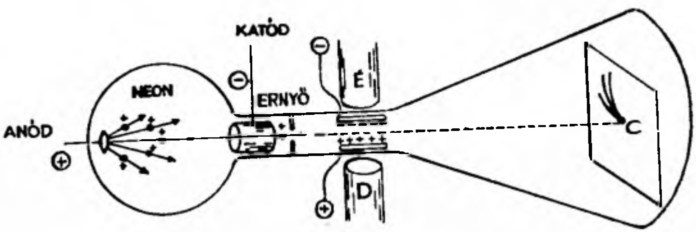
IZOTÓPOK

A XIX. század elején W. *Prout* angol kémikus felfigyelt arra, hogy a különböző elemek atomsúlya, a hidrogén atomsúlyában kifejezve, jó közelítéssel egész szám. E megfigyelés alapján alkotta meg azt a hipotézist, hogy a különböző kémiai elemek atomjai nem egyebek, mint különböző számú hidrogénatom halmazai: a hélium = 4 hidrogén; a szén = 12 hidrogén; az oxigén = 16 hidrogén stb. Kortársai nem fogadták el nézeteit, hanem sürgősen kimutatták, hogy számos tény ellentétben áll ezzel a merész hipotézissel. Így például a klór és a kadmium atomsúlyát 35,457-nek, illetve 112,45-nek találták, ami éppen középen van két egész szám között. Még abban az esetben is, amikor az elemek atomsúlya közelebb van egy egész számhoz, az értékek valamivel mindig kisebbek, mint várható volna, ha az atomokat hidrogénatomok alkotnák. Mivel a hidrogén atomsúlya 1,0080*, a hélium atomsúlyának $4 \cdot 1{,}0080 = 4{,}0320$-nak kellene lennie, míg a valóságban 4,003, vagyis 0,8 %-kal kevesebb. Hasonlóképpen 12 hidrogénatom

* A kémikusok az atomsúlyokat régebben úgy állapították meg, hogy az oxigén atomsúlya 16,000 000 000 legyen.

együttes súlya $12 \cdot 1{,}0080 = 12{,}096$ lenne, míg a szén kémiai úton nyert atomsúlya csupán 12,010. Prout hipotézisét e „nyilvánvaló" eltérések miatt elvetették, és csaknem fél évszázadra feledésbe merült, egészen 1907-ben bekövetkezett dicsőséges feltámadásáig, ami J. J. Thomson vizsgálatainak volt az eredménye.

Thomson, miután bebizonyította az elektron létezését és az elektronnyaláb elektromos és mágneses térben való eltéréséből megmérte tömegét és töltését, figyelmét az elektromos kisülési csőben ellenkező irányban mozgó részecskék felé fordította. E pozitív töltésű részecskék nyalábjait „csősugarak"-nak nevezték, mert először úgy észlelték őket, hogy a katódlemezbe nyílásokat (csöveket) fúrtak, és ezeken keresztül a részecskék a mögöttük levő térbe jutottak. A Thomson által a csősugarak tanulmányozására használt készüléket a 89. ábra



89. ábra.

Thomson készüléke a csősugarak tanulmányozására. Az anódtól a katód felé repülő pozitív ionok a katódba fúrt lyukon haladnak keresztül, és miután keresztülhaladtak egy blendén, olyan részbe érnek, ahol egyirányú elektromos és mágneses tér van. Mivel a (vízszintes irányú) mágneses eltérítés a részecskék sebességétől függ, az (függőleges irányú) elektromos eltérítés pedig a sebesség négyzetétől, ezért az ugyanolyan tömegű, de különböző sebességű részecskék a *C* ernyőn egy parabola mentén csapódnak be

mutatja. Az elv ugyanaz volt, mint az elektronnyalábok tanulmányozásakor. A gázkisülésben az anód és katód között keletkező pozitív töltésű részecskék áthaladtak a katódba fúrt nyíláson (csövön), és beléptek abba a részbe, ahol azonos irányú elektromos és mágneses tér hatott rájuk. Mint fentebb láttuk, a nyaláb elektromos térbeli eltérése $\frac{e}{m}v^2$-mel, a mágneses térbeli vízszintes eltérés pedig $\frac{e}{m}v$-vel arányos. Ezért, az azonos töltés/tömegaránnyal bíró, de különböző sebességű részecskék függőleges eltérése vízszintes eltérésük négyzetével arányos. Az S fluoreszkáló ernyőn megfigyelt görbéknek ezek szerint paraboláknak kell lenniük.

Pontosan ezt figyelte meg J.J. Thomson, de egy parabola helyett kettő vagy több volt (akkor is, ha egyféle elem volt a csőben). Ez különböző tömegű atomok jelenlétére utalt. A klórban például 34,98 és 37,98 atomsúlyú klóratomoknak megfelelő két parabolát kaptak. Mindkét szám igen közel van egy-egy egész számhoz. Az egy és ugyanazon elem különböző atomsúlyú atomjait „izotópok"-nak nevezték el, ami arra utal, hogy ugyanazt a helyet foglalják el a Mengyelejev-féle periódusos rendszerben. Azt találták, hogy a különböző súlyú klóratomok relatív száma 75,4 % ill. 24,6 %. (Ezt a fényképezőlemez feketedése alapján becsülték.) Az átlagos atomsúly eszerint $34{,}98 \cdot 0{,}754 + 36{,}98 \cdot 0{,}946 = 35{,}457$, ami pontosan megegyezik a klór kémiai úton meghatározott atomsúlyával. F. W. *Aston* későbbi vizsgálatai azt mutatták, hogy ugyanez érvényes a többi kémiai elemre is. Így például a kadmium nyolc különféle atomból áll, amelyek atomsúlya 106, 108, 110, 111, 112, 113, 114, 116, relatív mennyiségük pedig 1,4, 1,0, 12,8, 13,0, 24,2, 12,3, 28,0, 7,3 %; az átlagos atomsúly 112,41, ami tökéletesen megegyezik a kémiai mérésekkel. Prout régi elképzelése tehát ismét előtérbe került.

De még az izotópok felfedezése után is maradt némi eltérés. Például a klór két izotópjának pontos atomsúlya 34,98 és 36,98 volt 35,280 ($=35 \cdot 1{,}0008$) és 37,296 ($37 \cdot 1{,}008$) helyett. Ez alkalommal azonban ez nem okozott zavart, inkább örömöt. Ugyanis Einstein tömeg-energia egyenértékűségi törvénye szerint több részecske együttese kisebb súlyú, mint az eredeti részek. A különbség a teljes kötési energia osztva c^2-tel. Így az összetett atom tömege és alkotórészeinek együttes tömege közötti különbség felvilágosítást ad a képződési folyamatban szereplő energia felől. Vegyük például a $_6C^{12}$ szénatomot, amely 6 protonból és 6 neutronból áll. A hidrogénatom pontos tömege 1,008 131, a neutroné pedig 1,008 945. A teljes tömeg eszerint $6 \cdot 1{,}008\,131 + 6 \cdot 1{,}008\,945 = 12{,}102\,456$ volna. Pontos mérések szerint azonban a szénatom tömege 12,003 882, vagyis 0,098 546 egységgel kisebb. Ez az ún. *tömegdefektus* a szénatommag neutronokból és protonokból történő képződése folyamán felszabadult energia tömegével azonos. Einstein szerint ez $0{,}0986 \cdot 1{,}66 \cdot 10^{-24}$* $\cdot 9 \cdot 10^{20} = 1{,}48 \cdot 10^{-4}$ erg vagy 92,5 MeV energiának felel meg.

RUTHERFORD ATOMMODELLJE

Ernest *Rutherford* (85. ábra) 1871-ben született az Új-Zeland déli szigetén levő Nelson város közelében. Sok évvel később tudományos érdemei elismeréséül a Lord Rutherford of Nelson címet kapta. 24 éves korában Cambridge-be ment, hogy J. J. Thomsonnál tanuljon a Cavendish Laboratóriumban. Miután tudományos fokozatot nyert, tanszéket kapott a montreali MeGill Egyetemen. Itt születtek első lényeges felfedezései az újonnan felfedezett radioaktivitás jelenségével kapcsolatban. Később a manchesteri egyetemre ment, J. J. Thomson nyugalombavonulása után pedig a Cavendish Laboratórium igazgatója lett. Kollégái „Krokodilus" néven emlegették, amit egyik kedvenc tanítványa, Pjotr Kapica orosz fizikus adott neki. Meg kell jegyezni, hogy az angoloknál, akik gyakran mennek (vagy inkább mentek) Egyiptomba, és akiket a krokodilusok megharaptak, vagy megettek —, ez az elnevezés elég kellemetlennek tűnhet. Az oroszoknál azonban, akik hazájukban sohasem látnak krokodilust, az a duzzadó erő szimbóluma. Rutherford előtt senki sem merte említeni ezt a becenevet, de ő ismerte és titokban büszke volt rá. Annak az új épületnek a falát, amelyet Kapica igen erős mágneses terekkel folytatott kísérletei számára emeltek, minden hivatalos indokolás nélkül egy krokodilus domborműve díszíti.

(A szerzőnek eszébe jut egy Cambridge-i eset a „Krokodil"-lal kapcsolatban . . .)

. . . e jóképű, szivélyes szőke lord
Nem más, mint a brit Ernest Rutherford.
Egy új-zélandi farmer volt az apja,
S paraszti voltát le sem tagadhatja;
Mikor „halkan" beszél, vagy „lágyan" énekel,
Hangját a párnázott ajtó se fogja fel,
Hát még ha bosszantják, és bősz haragra gerjed,
Elképzelni se jó a súlyos dörgedelmet,

* $1{,}66 \cdot 10^{-24}$ g az oxigén tömegének 1/16 része.

Amelyet osztogat; s hogy ő a föld fia,
E stílussal nem sikerül titkolnia.
De hadd mesélek el inkább egy esetet.

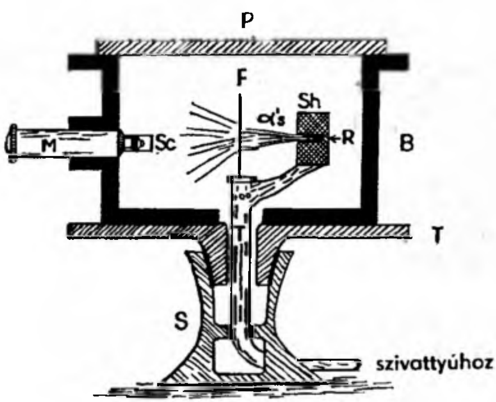
Egy ízben Gamowot teára hívta meg,
Amelyet Bohr tiszteletére rendezett
(Bohr nevéről tán hallott már az olvasó).
A társaságban sok mindenről folyt a szó:
A férfiaknál golf s krikett a téma,
A nők pedig – még erre nem volt példa –
Divatról beszéltek; csak Bohr unatkozott,
S szólt Gamowhoz, az ablakra mutatva: „ott
Az udvaron motorkerékpárt láttam . . .
A működését megmutatná? Nos, utánam!"

S már ment is lefelé, a társa meg
Követte, hisz mi mást is tehetett?!
És lenn az udvaron Gamow sorjában
Elmondta, mi mire való, s a lázban
Égő Bohr úgy pattant nyeregbe, mint aki
Motorversenyre készül hajtani.
Az utcán gázt adott és – fel a járdakőre;
Ember, állat riadtan menekült előle.
De a lendület biz hamar alábbhagyott,

Bohr nem jutott el messzire, s ahogy
Úgy ötven yardnyi út után keresztben
Megállt a járdán, s akár egy veretlen
Hadvezér, kihúzta magát a motoron –
Az egész Queen Roadon megállt a forgalom.

Közben Gamow is odaért, és mindent megtett,
Hogy helyreállítsa a tömegben a rendet,
S azon fohászkodott: inkább az ördögöt,
Mint Rutherfordot most! De máris dörmögött
A mély hang mögötte: „Gamow, az istenit!
Ha még egyszer od' adja Bohrnak ezt a járgányt,
Hogy botrányt csináljon itt az utcán, hát
„Esküszöm, kitaposom a belit!"

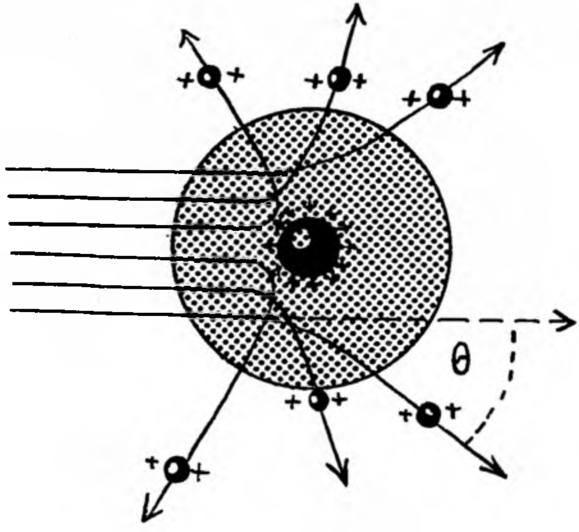
Rutherford nem szerette Thomson görögdinnyeszerű atommodelljét. Elhatározta, hogy az atom belsejét lövedékek belövésével kutatja ki. Olyan új lövedékekkel, amelyek a radioaktivitás felfedezésével kerültek a fizikusok kezébe. Már McGill-i éveinek kezdetén kimutatta, hogy a különböző radioaktív elemek által kibocsátott ún. alfa-részecskék instabil atomokból roppant nagy energiával kilövellt pozitív töltésű héliumionok. Az alfa-részecskéknek le kell térniök eredeti pályájukról, ha kölcsönhatásba kerülnek az atom töltéssel bíró részeivel. A nyalábok ebből eredő szóródása felvilágosítást ad arról, hogy hogyan oszlik el az elektromos töltés az atomok belsejében. Rutherford ezért alfa-részecske nyalábot ejtett különféle vékony fémfóliákra (90. ábra) és megszámlálta a fólián való áthaladáskor



90. ábra.

Az első készülék, amellyel alfa-sugarak szóródását vizsgálták. A *B* evakuált doboz a *T* forgó asztalra szerelve, *P* felső lapja levehető. Az *Sh* árnyékoló ólomtokban elhelyezett *R* radioaktív forrás és az *F* szóró lemez az *S* állványhoz van rögzítve. Az *Sc* szcintilláló ernyő és a mikroszkóp a dobozhoz van erősítve, és függőleges tengely körül forgatható

különböző irányba szóródott részecskéket. Abban az időben a részecskék számlálása igen fáradságos művelet volt. Manapság a fizikus beállíthat egy automatikus Geiger-számlálót, ő pedig sétálni vagy moziba mehet. Rutherfordnak azonban mikroszkópon kellett néznie a nyaláb útjába helyezett fluoreszkáló ernyőt, és az ujjain kellett számolnia a szcintillációkat, azokat a parányi villanásokat, amelyek egy nagy energiájú részecske ernyőbe ütközésekor keletkeztek. Volt olyan atomfizikus abban az időben, aki belladonnát vett be, hogy pupillája kitáguljon. A vizsgálatok alapján Rutherford úgy találta, hogy a fémfóliákon áthatoló alfa-részecskék erősen szóródnak. A beeső részecskék többsége megtartotta eredeti mozgásirányát, egynéhány közülük azonban több fokkal eltért, és voltak olyanok is, amelyek visszafelé szóródtak. Ez az eredmény semmiképpen sem egyezett azzal, amit Thomson modellje alapján várni lehetett. Abban ugyanis a tömeg és a pozitív töltés csaknem egyenletesen oszlik szét az egész atomban. Így a beeső részecske töltése és az atombeli töltések közötti kölcsönhatás soha sem lehetne elég erős ahhoz, hogy az alfa-részecskéket nagy szögben térítse el eredeti irányától, nem is szólva a visszafelé szórásról. Az egyetlen lehetséges magyarázat az, hogy az atom pozitív töltése és tömege igen kis térrészre koncentrálódik, gyakorlatilag az atom közepén egy pontba (91. ábra). Annak megállapítására,



91. ábra.
Atom és az atommag

hogy vajon ez a feltevés egyezik-e a megfigyelt szórással, a taszítási központtól különböző távolságban haladó részecskék elhajlására a mechanika törvényein alapuló képletet kellett felállítani. Rutherford, mint sok más nagy kísérletező is, nem szerette a matematikát, és legalábbis a fáma szerint, ezt a képletet egy fiatal matematikus vezette le számára, R. H. *Fowler*, aki később nőül vette Rutherford leányát. A Rutherford-formula szerint az eredeti mozgásirányuktól ϑ szögben eltérő alfa-részecskék száma fordítva arányos $\sin \frac{\vartheta}{2}$ negyedik hatványával, és ez igen szépen egyezett a megfigyelt szórási görbékkel. Így egészen új kép alakult ki az atomokról. Parányi, de súlyos és nagy töltéssel bíró központi magja van, amelyet Rutherford *atommagnak* nevezett el. A mag körül az elektronok raja kering a Coulomb-vonzás hatására. Ez a kép bolygórendszerünkre emlékeztet, ahol a bolygók a Nap körül keringenek és a Newton-féle gravitációs erő tartja őket pályájukon. Később Rutherford tanítványai, H. *Geiger* és E. *Marsden* megállapították, hogy az atommag pozitív töltése, és ami ugyanaz, a körülötte keringő elektronok száma, egyenlő a kérdéses elemnek a Mengyelejev-féle periódusos rendszerbeli sorszámával, vagy más szóval az atom *rendszámával*. Ezzel kezdett kialakulni az atomszerkezet jelenlegi képe.

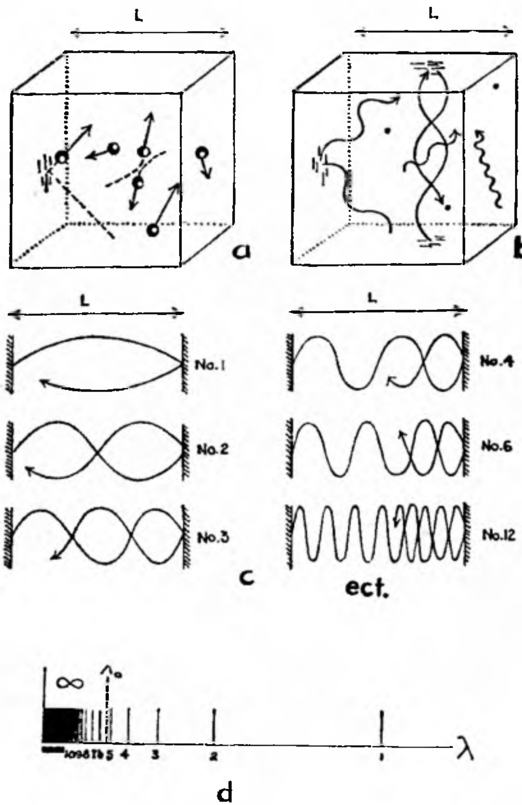
AZ IBOLYÁNTÚLI KATASZTRÓFA

Most egy kissé vissza kell mennünk a történetben a XIX. század utolsó évtizedébe, amikor a fizika a klasszikus lárvából modern lepkévé válás metamorfózisában vajúdott. Ebben az időben *Boltzmann*, *Maxwell* és mások munkái alapján már kialakult a hő kinetikus elmélete. Nem volt kétséges, hogy amit „hő"-nek nevezünk, az az anyagi testeket alkotó számtalan molekula szabálytalan, véletlen mozgásának az eredménye. A legegyszerűbb esetben, a gázoknál, ahol a molekulák szabadon repülnek a térben, egyszerű matematikai kifejezéseket lehet levezetni a sebességeloszlásra, a molekulák közötti ütközések számára és a termikus jelenségek többi molekuláris jellemzőire. És ilyen előzmények után Sir James *Jeans*, a neves angol fizikus, csillagász és népszerű könyvek írója, elhatározta, hogy a molekulák hőmozgásának tanulmányozásában igen eredményesnek bizonyult statisztikus módszereket alkalmazza a hősugárzás problémájára is.

A IV. fejezetben láttuk, hogy a forró testek folytonos spektrumú fényt bocsátanak ki, amely mindenféle frekvenciájú és hullámhosszúságú rezgéseket tartalmaz. Azt is láttuk, hogy minden hőmérsékleten meghatározott módon oszlik el a rendelkezésre álló energia a különböző hullámhosszak között, és hogy az a hullámhossz, amelynél a test a legnagyobb energiát sugározza ki, változik, ha a hőmérséklet változik (49. ábra). Jeans feltette a kérdést, hogy vajon a sugárzó energia különböző hullámhosszak közötti eloszlása ugyanazoknak a statisztikai törvényeknek van-e alávetve, mint a gázmolekulák energiaeloszlása. Tekintsünk egy ún. „Jeans-kockát", ez egy „ideális tükrökkel" bélelt doboz; az ideális tükrök a rájuk eső fény 100%-át visszaverik. Természetesen minden tükör elnyel valamit a beeső fényből, mielőtt visszaverné. Itt azonban „gondolatkísérletről" van szó, mint az Einstein-féle doboznál is, a gravitáció relativisztikus elméletében. Ha van egy ilyen Jeans-kockánk, az oldalán kis redőnyös ablakkal, akkor kinyithatjuk a redőnyt, beengedhetünk egy kevés fényt egy lámpából, és a fényt bezárhatjuk a redőny becsukásával. Mivel a tartály falai nem nyelhetik el a fényt, az számtalanszor visszaverődik, és ha egy vagy két órával később ismét kinyitjuk a redőnyt, akkor kifut a tartályból, mint ahogy a gáz kiáramlik az autó kerekének nyitott tömlőjéből.

A 92. ábrán két tartályt hasonlítunk össze, az egyik termikus mozgásban levő molekulákat tartalmaz, a másik különféle hullámhosszúságú hősugárzást. Az első esetben a molekulák minden lehető irányban és minden lehető sebességgel száguldanak a térben, visszaverődnek a tartály faláról, és néha röptükben egymásba ütköznek. A második esetben minden lehetséges irányban különböző hosszúságú fényhullámok terjednek, amelyeket a tükörfalak visszavernek.

A második képből hiányzik a „hullámok összeütközése", ami lehetővé tenné az energiacserét köztük. Bármilyen hullámnak, legyen az az óceán hulláma, hanghullám vagy rádió- és fényhullám, alapvető tulajdonsága, hogy nem zavarják egymást, ha találkoznak. A hullámok, akár két egymás mellett vitorlázó hajó hullámai, akár több ember beszélgetését vivő hanghullámok egy szobában, vagy rádióhullámok ugyanannak a városnak két adóállomásáról, vagy két fénynyaláb az eget pásztázó fényszóróból, úgy haladnak keresztül egymáson, mint a régi jó középkori kísértetek. Hogy mégis analógia legyen a gázokkal, képzeljük azt, hogy a Jeans-féle kockában van néhány parányi szénporszemcse, amelyek az egyik hullámhosszból valami energiát



92. ábra.

Zárt edényben levő gázmolekulák (a) és Jeans-kockában levő hullámok (b) rendezetlen mozgásának összehasonlítása. A fekete pontok (b)-ben parányi szénporrészecskéket jelentenek, amelyek a hullámok közt energiacserélőkként szerepelnek. (c) különféle rezgéseket mutat a Jeans-kockában (az egyszerűsített egydimenziós esetben), míg (d) a rezgéseknek megfelelő spektrumot mutatja elnyelnek, és más hullámhosszúságban kisugározzák. Szénporról beszélünk, mert az fekete, és tudjuk, hogy a fekete testek (vagy helyesebben az *ideális* fekete testek, a Jeans-kocka *ideális* tükreinek megfelelően), bármely hullámhosszúságú sugárzást elnyelhetnek és kibocsáthatnak. Ezeket a szénpor-részecskéket azért vezetjük be a gondolatkísérletbe, hogy a különböző hullámhosszúságú fényrezgések között energiacserét hozzanak létre. Ez lehetséges anélkül, hogy a szénpor energiát vonna el a rendszerből, mert a porszemek rendkívül kicsinyek, és ezért hőkapacitásuk is megfelelően csekély.

Lássuk most, hogyan oszlik szét a rendelkezésre álló energia a Jeans-kockában végbemenő különböző rezgések között. A statisztikus fizikának van egy alapvető szabálya, amelyet ekvipartíció-törvénynek, „az energia egyenletes eloszlása törvényének" neveznek. Ez kimondja, hogy ha igen nagyszámú rendszer (pl. gázmolekulák) között statisztikus kölcsönhatás áll fenn, akkor az energia átlagban egyenletesen oszlik el közöttük. Ha tehát összesen N gázmolekula van a tartályban, és a teljes rendelkezésre álló energia E, akkor minden molekula átlagos energiája

$$\varepsilon=\frac{E}{N}.$$

Ugyanez az egyszerű törvény alkalmazható a Jeans-doboz belsejében levő különféle hullámokra. De hányféle hullám lehet ott? Ha az egyszerűség kedvéért csak a doboz jobb és bal fala között vízszintes irányban mozgó hullámokat tekintjük (92c. ábra), akkor azt találjuk, hogy a helyzet hasonló egy mindkét végén rögzített hegedűhúrhoz (emlékezzünk Pithagorász I. fejezetben leírt munkájára). A leghosszabb lehetséges hullámot az 1. sorszámmal jelöljük. Hullámhossza a falak közötti L távolság kétszerese. Hosszúságban utána következik a 2. számú, amelynek hosszúsága L vagy ami ugyanaz, $2L/2$. Sorban következnek az egyre rövidebb hullámhosszak:

$$\frac{2L}{3},\ \frac{2L}{4}\left(\text{vagy } \frac{L}{2}\right),\ \frac{2L}{5},\ \frac{2L}{6}\left(\text{vagy } \frac{L}{3}\right),\ \ldots\ldots,\ \frac{2L}{100},\ \frac{2L}{101},$$

$\ldots\ldots,\ \dfrac{2L}{1\,000\,000},\ \ldots\ldots$ A lehetséges elektromágneses rezgések hullámhosszának nincs alsó határa. Ha a fenti sort folytatjuk, akkor átmegyünk a látható fényen, az ibolyántúlin, a röntgensugarakon, a gamma-sugarakon stb. A lehetséges rezgések száma tehát végtelen. Ha ezt a meggondolást általánosítva mindhárom irányban terjedő hullámokra alkalmazzuk, akkor természetesen ugyanazt az eredményt kapjuk. Az ekvipartíció klasszikus törvényét követve és a rendelkezésre álló energiát nagyságától függetlenül az összes lehető hullámok között szétosztva, azt kapjuk, hogy

$$\varepsilon = \frac{E}{\infty} = 0.$$

A kifejezés fizikai jelentése a következő. Ha a 92d. ábrán látható valamennyi hullámhosszat a λ_0-lal jelölt függőleges vonallal két csoportra osztjuk, akkor a λ_0-tól jobbra mindig véges számú lehetséges rezgést találunk, λ_0 és a nullpont között azonban végtelen számú rezgés van. Az egyenletes eloszlás elve szerint ezért minden rendelkezésre álló energia a λ_0-nál rövidebb hullámhosszúságú rezgéseké, bármilyen kicsiny is λ_0. Ha tehát a Jeans-kockát vörös fénnyel töltjük meg, akkor ez a fény (a szénpor által történő elnyelés és újrakibocsátás következtében) ibolyántúli sugarakká, röntgensugarakká, gamma-sugarakká stb. kezd változni. Ami érvényes a hipotetikus Jeans-kockára, az érvényes általánosságban is. Ezért, ha a konyhai tűzhely ajtaját vagy a mozdony kazánjának az ajtaját kinyitjuk, halálos rövidhullámú sugarak érnének bennünket, amelyek ott rögtön megölnének. Ez a következtetés nyilván képtelenség, azonban a klasszikus fizika alapvető törvényeinek a sugárzó energiára való alkalmazásából ez következik.

Jeans tanulmányának közzététele után éveken keresztül sem Jeans, sem más nem tudta ezt a paradox eredményt megmagyarázni. Az elmúlt évszázad utolsó éve utolsó hetében aztán Max *Planck* német fizikus (93. ábra) a Német Fizikai Társaság karácsonyi ülésén a táblához lépett, és rendkívüli megoldást javasolt. Elgondolása az volt, hogy a fény és minden más elektromágneses sugárzás, amelyet mindig folytonos hullámsornak tekintettek, valójában egyes energiacsomagokból áll, ahol minden csomagnak pontosan meghatározott energiája van. A csomagok energiája a ν rezgési frekvenciától függ, azzal egyenesen arányos. Így azt írhatjuk, hogy

$$\varepsilon = h\nu,$$

ahol a h egy univerzális állandó. Planck ezeket az energiacsomagokat *fénykvantumoknak* (vagy általánosságban *sugárzáskvantumoknak*), a h állandót pedig *kvantumállandónak* nevezte el. Hogyan küszöböli ki Planck forradalmi elgondolása Jeans ibolyántúli katasztrófáját? Hogy az olvasónak valami fogalmat adjunk erről, vegyük példának azt az esetet, hogy valaki meg-

93. ábra.
Niels Bohr (balról) és Max Planck és a kvantumátmenetek hidrogén atomban

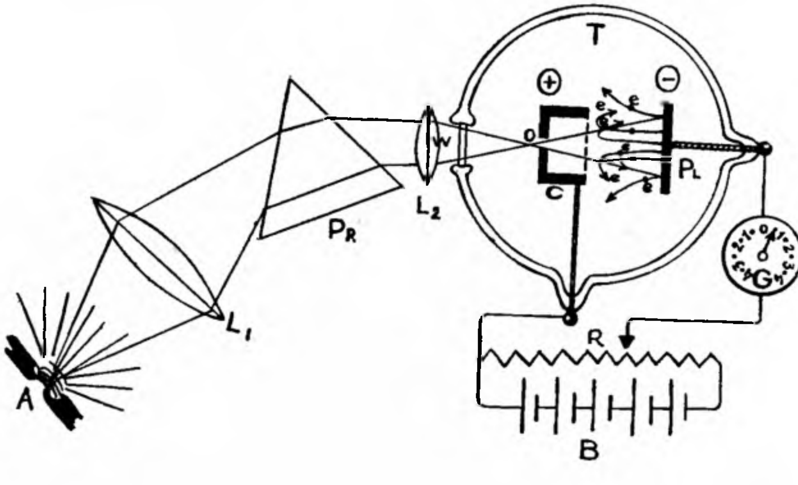
hal, és mondjuk 600 dollárt hagy hátra. Nincsenek örökösei, csak öt hitelezője: egy kocsmáros, egy mészáros, egy patikus egy fűszeres és egy szabó. Valamennyien meg akarják kapni a pénzüket, de a teljes adósság lényegesen több, mint a hátrahagyott pénz. Egyszerű megoldás volna az „egyenletes elosztás törvényének" alkalmazása, vagyis mindegyik hitelező 120 dollárt kapna. A dolgot azonban az teszi bonyolulttá, hogy mindegyik hitelező vagy a neki járó teljes összeget akarja, vagy semmit. A kocsmáros a neki járó 600 dollárt akarja, a mészáros és a patikus egyenként 300-at, a fűszeres 200-at, a szabó pedig 100-at. Mivel nincs elég pénz az összes adósság fedezésére, ezért a bírónak jogászok között „méltányosság elvének" nevezett megoldáshoz kell folyamodnia, vagyis ahhoz, amit a józan ész is diktál. Nyilván oktalanság lenne a teljes 600 dollárt a kocsmárosnak adni, és a többi hitelezőt teljesen kisemmizni. Ésszerűbb megoldás a pénzt a kisebb hitelezők kielégítésére fordítani és elutasítani azok kérését, akik túl sokat követelnek. Így például a szabó 100 dollárt kaphatna, a fűszeres 200-at és (pénzfeldobással eldöntve) vagy a mészáros, vagy a patikus 300-at, a kocsmáros pedig semmit. (Meg kell jegyezni, hogy ezt a pénzelosztási elvet a valóságban is alkalmazza a Nemzeti Tudományos Alap, amelynek nagyon kevés pénze van és azt méltányosan igyekszik elosztani a különböző igénylők között). Kétséges, hogy a méltányosság elve adja-e az ilyen problémák egyedüli megoldását, de a statisztikus fizikában ez érvényes. Mihelyt Plancknak a különböző hullámhosszúságú fénykvantumok legkisebb energiájára vonatkozó hipotézisét bevezették, a matematikai statisztika egzakt törvényei léptek érvénybe. Ezek sok rövidhullámú rezgést minden energiától megfosztanak, méltánytalanul nagy követeléseik miatt. Így aztán olyan képletet kapunk a hősugárzás energiájának eloszlására, amelyben az energia legnagyobb része az átlagos hullámhosszúságúaknak jut, a sokat követelő rövidhullámú rezgések pedig nagyon keveset, vagy semmit sem kapnak.

Planck fénykvantum hipotézise alapján levezetett képlete tökéletesen egyezett a hősugárzás minden ismert törvényével. Azonban az egyes energiacsomagok gondolatának bevezetésére a fény hullámszerű terjedésének klasszikus képébe olyan forradalmat okozott, amely csak a Michelson—Morley kísérlet hatásával hasonlítható össze.

A FÉNYKVANTUMOK REÁLIS LÉTEZÉSE

Planck eredeti elképzelése a sugárzás energiacsomagjairól meglehetősen bizonytalan volt, és csupán a spektrum különböző hullámhosszai közötti statisztikus energiaeloszlás megmagyarázására szolgált. Öt évvel később azonban Albert Einstein elgondolásában határozottabb alakot öltött. Einstein az általa 1905-ben* közzétett három cikk egyikében a fénykvantum fogalmát az ún. „fotoelektromos effektus" magyarázatára alkalmazza. Abban az időben már ismeretes volt, hogy fémfelületre eső fény (különösen az ibolyántúli) a fémnek pozitív elektromos töltést ad. Az elektronok felfedezése után bebizonyították, hogy ez az effektus a megvilágított felületekből történő elektronkilépés.

A fotoelektromos effektus tanulmányozására szolgáló szokásos berendezést a 94. ábrán láthatjuk. Az *A* ívlámpából ibolyán-



94. ábra.

Fotoelektromos effektus tanulmányozására szolgáló berendezés. A *Pl* lemezből a *C* henger felé emittált fotoelektronokat az elektromos tér megállítja, ha a *Pl* és *C* közötti potenciálkülönbség elég nagy

túli sugarakat is tartalmazó fény lép ki, majd áthalad egy két kvarclencséből és egy prizmából álló rendszeren („monokromátoron") amely a különböző hullámhosszakat szétválasztja. A kiválasztott nyaláb (amelyet a prizma forgatásával változ-

* Mint említettük, a másik kettő a Brown-mozgással és a relativitáselmélettel foglalkozott.

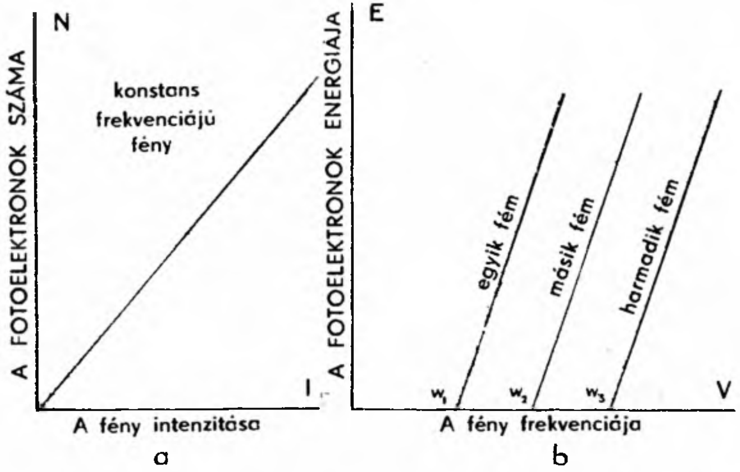
tathatunk) a W kvarcablakon át belép a T légüres csőbe, keresztülmegy a C vörösréz henger alján levő nyíláson és a Pl fémlemezre esik, amely különböző anyagból készülhet. A lemez és a henger közötti változtatható feszültség lelassítja a kibocsátott fotoelektronok mozgását. (A B telep és az E változtatható ellenállás szolgáltatja az elektromos feszültséget, G pedig az áramot méri.) Ha az elektron töltésének és a feszültségnek a szorzata eléri az elektronok kinetikus energiáját, akkor az áramkörben megszűnik az áram. A beeső fény erősségének és hullámhosszának változtatásával és annak a feszültségnek a mérésével, amelynél az áram megszűnik, megkapjuk a fény intenzitása és frekvenciája és a fotoelektronok sebessége közötti összefüggést. A fotoelektromos effektus kísérleti tanulmányozása két törvényre vezetett:

I. Adott frekvenciájú beeső fény esetén a fényerősség változtatásakor a kilépő elektronok energiája nem változik, számuk azonban a fényerősséggel arányosan nő.

II. A beeső fény frekvenciájának változtatásakor (növelésekor), egy bizonyos (a fémtől függő) frekvenciaküszöb eléréséig nem lépnek ki elektronok. Ennél nagyobb frekvenciáknál viszont a fotoelektronok energiája egyenes arányban növekszik az alkalmazott frekvencia és a frekvenciaküszöb különbségével.

Ezt a két törvényt szemléltetik a 95. ábra grafikonjai. Ezek az egyszerű törvények azonban semmiképpen sem egyeztek azzal, amit a fény klasszikus elektromágneses elmélete alapján várni lehetett volna. A klasszikus elmélet szerint a fény *intenzitásának* a növekedése a rezgő elektromos erő növekedését jelenti a hullámban. Ha ez az erősebb elektromos erő a fém felszíne közelében levő elektronokra hat (ezek azok az elektronok, amelyek az elektromos áramot szállítják a fémdrótokban), akkor nagyobb mozgási energiával löki ki őket. A kísérlet azonban azt mutatta, hogy ha a fény intenzitása akár százszorosára is növekszik, a kilépő fotoelektronok sebessége nem változik. Másrészt, a 95. ábra görbéje határozott összefüggést mutat az elektronok sebessége (vagy mozgási energiája) és a beeső fény *frekvenciája* között. Ezt az összefüggést a fény klasszikus elektromágneses elmélete nem indokolja.

A meghatározott frekvenciával arányos energiájú fénykvantumok alapján viszont egész természetes módon megkapjuk a két empirikus törvény magyarázatát. Ha egy beeső fénykvantum a fém felszínébe ütközik, és valamelyik elektronnal kölcsönhatásba kerül, akkor minden energiáját átadja ennek az elektronnak, mert egy kvantumnál kisebb energia nem létezhet. A beeső fény nagyobb intenzitása több, azonos frekvenciájú fénykvantumot és így arányosan több azonos kinetikus energiájú elektront jelent. Ha a beeső fény frekvenciája növekszik,



95. ábra.

A fotoelektromos effektus kísérleti úton talált törvényei. (a) A fotoelektronok számának függése a fényerősségtől. (b) A fotoelektronok energiájának függése a fény frekvenciájától

akkor más a helyzet. Most minden fénykvantumnak nagyobb az energiája, és ha ezt egy elektronnak adja át, akkor az nagyobb sebességgel hagyja el a fémet. A fém felszínén való áthatoláskor az elektron elveszíti a fénykvantumból nyert energiájának egy bizonyos részét. Ez az energia a fém természetétől függ, és (nagyon helytelenül) kilépési munkának nevezik. A fotoelektron energiáját egy igen egyszerű képlet adja:

$$E = h\nu - W,$$

ahol W a kérdéses fém kilépési munkáját jelenti. Mindaddig, amíg $h\nu < W$ (vagyis $E < 0$), az elektronok nem kapnak a fénykvantumoktól elegendő energiát ahhoz, hogy átmenjenek a felszínen, és semmi nem történik. Mihelyt $h\nu$ nagyobb, mint W, megkezdődik a fotoelektronok emissziója, és az elektronok energiája lineárisan növekszik ν-vel. A 95b. ábra görbéi meredekségének egyenlőnek kell lennie a h kvantumállandóval, és valóban így is van. Einstein egy csapásra megmagyarázta a fotoelektromos effektus titokzatos törvényeit, és erőteljesen alátámasztotta Plancknak a sugárzó energiacsomagokról alkotott eredeti elképzelését.

A fénykvantum-hipotézis, amely ez idő szerint már az elmélet nevet is megérdemelte, újabb másik hatalmas támaszt nyert Arthur *Compton* amerikai fizikus munkája nyomán, aki hawaiigitár játékos, teniszbajnok és a kozmikus sugárzás kutatója volt. Ez utóbbi vizsgálatainak köszönhette, hogy egész Mexikóban őt tartották a legerősebb embernek. Ennek oka, amint azt a szerzőnek maga Compton elbeszélte, a következő volt. Compton a kozmikus sugarak intenzitásának változását tanulmányozta a sarkoktól az egyenlítőig. Egyszer valahol Dél-Mexikóban kellett intenzitásméréseket végeznie. A mérések a városon kívül történtek, hogy elkerüljék a nagyfeszültségű áramok és a forgalom okozta zavarokat, de amellett olyan helyre volt szükség, amely megfelelő elektromos áramszolgáltatással rendelkezik. A választás egy Mexikótól délre fekvő katolikus kolostorra esett, amelynek saját erőműve és akkumulátortelepei voltak, továbbá olyan apátja, aki elő kívánta segíten a tudomány haladását. Compton 12 tudományos felszereléssel megrakott ládával érkezett a kolostorhoz legközelebb eső állomásra. Ládái két fogóval ellátott elegáns fadobozok voltak, nagyjából akkorák, min egy közepes koffer. Két ládában 4 Kohlrausch-féle elektrométer volt — fekete fémgömbök kis ablakokkal, amelyeken át meg lehetett figyelni az elektromos töltést mutató vékony szálat. A többi ládában ólomlapok voltak a sugárzás árnyékolására.

Mexikó minden látogatója tudja, hogy ha az utasok az állomásra érkeznek, akkor rögtön mezítlábas férfiak és fiúk veszik őket körül „*Llevo su equipaje, señor?*" kiáltással, akik kiveszik az útitáskát az érkező kezéből. Compton azt a két fadobozt fogta meg, amiben a Kohlrausch-féle elektrométerek voltak, és intett a mexikóiaknak, hogy vigyék a többit. És ott haladt a menet: egy előkelő amerikai, aki könnyedén sétált a peronon, két műszerdobozt lóbálva kezében, utána sorban a mexikóiak, minden doboz súlya alatt kettő görnyedt. De itt még nincs vége a kalandnak. Amikor a teherautó Comptonnal és a műszeres dobozokkal megérkezett a kolostor kapujához, két mexikói katona állította meg, akik a poggyászt akarták megvizsgálni. Ebben az időben ugyanis Mexikó kormánya harcban állt a katolikus egyházzal, és minden katolikus intézmény köré őröket állított. A katonák kinyitották a dobozokat és „négy fekete bombát és rengeteg ólmot" találtak, nyilván tölténykészítésre. Comptont letartóztatták, és órákig kellett várakoznia az őrszobán, amíg a Mexikó városban levő amerikai követséggel telefonon tisztázták a kérdést. Különben a kozmikus sugarak intenzitása a kolostorban pontosan annyinak mutatkozott, mint ahogy várták.

De térjünk vissza a Compton-effektushoz. Compton makacs kísérletező volt, és a fénykvantumok és az elektronok közötti ütközéseket úgy szerette elképzelni, mint a biliárdgolyók ütközését. Azzal az eltéréssel persze, hogy míg a biliárdgolyók (a színüktől eltekintve) pontosan egyformák, a fénykvantumokat és az elektronokat különböző tömegű golyóknak tekinthetjük. Compton úgy érvelt, hogy bár az atom bolygórendszerét képező elektronokat elektromos vonzóerő köti az atommaghoz, ezek az elektronok mégis pontosan úgy fognak viselkedni, mintha teljesen szabadok volnának, hacsak a beléjük ütköző fénykvantumok elég nagy energiájúak. Tegyük fel, hogy egy fekete golyó (elektron) fekszik egy biliárdasztalon és egy zsineggel az asztalba vert szöghöz van kötve. Egy játékos, aki nem látja a zsineget, a golyót a sarokba igyekszik lökni a beléje ütköző fehér golyóval (fénykvantum). Ha a játékos a golyót aránylag csekély sebességgel löki meg, akkor a zsineg a golyót az ütközéskor megtartja, és ebből a próbálkozásból semmi jó nem származik. Ha a fehér golyó valamivel gyorsabban mozog, akkor a zsineg elszakadhat, és ezzel mindenféle zavart okoz, és így a fekete golyó egészen rossz irányba megy. Ha azonban a fehér golyó mozgási energiája jóval felülmúlja a fekete golyót tartó zsineg erejét, akkor a zsineg jelenléte nem változtat a helyzeten, és a két golyó közötti ütközés eredménye ugyanaz lesz, mintha a fekete golyó teljesen szabad lenne.

Compton tudta, hogy az atom külső elektronjainak kötési energiája összemérhető a látható fény kvantumainak energiájával. Ezért, hogy az ütközést rendkívül erőssé tegye, kísérleteihez a nagyfrekvenciájú röntgensugarak nagyenergiájú kvantumait választotta. A röntgensugarak kvantumai és a (gyakorlatilag) szabad elektronok közötti ütközés eredményét nagyjából ugyanúgy lehet tárgyalni, mint két biliárdgolyó összeütközését. Telitalálatnál a nyugvó golyó (elektron) nagy sebességgel elindul az ütközés irányában, míg a beeső golyó (röntgensugárkvantum) elveszíti energiájának nagy részét. Ha oldalt találja el a beeső golyó, akkor kevesebb energiát veszít, és kissé eltér eredeti irányától. Ha a két golyó csupán érinti egymást, akkor a beeső golyó gyakorlatilag eltérés nélkül megy tovább, és eredeti energiájának csupán kis részét veszíti el. A fénykvantumok nyelvére lefordítva, ez annyit jelent, hogy a szóródáskor *nagyobb szögben eltérített röntgensugarak kvantumainak energiája kisebb, és következésképpen hullámhosszúsága nagyobb lesz.* Compton kísérletei az elméleti várakozásokat minden részletükben megerősítették, és így a sugárzó energia kvantumos természetének hipotézisét újra alátámasztották.

A BOHR-FÉLE ATOMMODELL

1911-ben egy fiatal (25 éves) dán fizikus érkezett Manchesterbe, név szerint Niels *Bohr* (93. ábra), aki koppenhágai egyetemi évei alatt országosan ismert labdarúgóként szerzett tapasztalatait az alfa-részecskéknek az őket lefékezni igyekvő atomok közötti „bolyongására" alkalmazta. Ebben az időben végezte Rutherford azokat a korszakalkotó kísérleteit, amelyek az atommag felfedezéséhez vezettek. Bohrnak tetszett Rutherford elképzelése. Rutherford viszont egyszer azt mondta egyik barátjának: „Ez a fiatal dán a legintelligensebb fickó, akivel valaha találkoztam." Így barátok lettek, és mindvégig azok maradtak.

Gyakorlatilag lehetetlen Niels Bohrt olyanok előtt jellemezni, akik nem dolgoztak vele. Legjellemzőbb tulajdonsága talán lassú felfogása és gondolkozása volt. Amikor a könyv szerzője a húszas és a harmincas évek elején egyike volt a „Bohr-fiúk"-nak, akik a koppenhágai intézetben dolgoztak Carlsberg (ez a világ legjobb söre!) ösztöndíjjal, akkor sokszor volt alkalma ezt megfigyelni. Este, amikor Bohr néhány tanítványa a Paa Blegdamsvejen-en levő intézetben „dolgozott", a kvantumelmélet legújabb problémáit beszélték meg, vagy a könyvtár asztalán pingpongoztak, amelyen még kávéscsészék is álltak, hogy a játék nehezebb legyen, akkor rendszerint megjelent Bohr. Panaszkodott, hogy fáradt, és mondta, hogy jó lenne „valamit csinálni". Az hogy „valamit csinálni" feltétlenül azt jelentette, hogy moziba menni. Bohr csak az olyan filmeket szerette, hogy „Szólnak a pisztolyok", vagy „A magányos lovas és a sziu lány". De nehéz volt a moziban Bohr mellett ülni; nem tudta követni a cselekményt, és folyton kérdezett, a többi néző nagy bosszúságára: „Ez annak a cowboynak a nővére, aki lelőtte azt az indiánt, aki el akarta lopni a nővére sógorának a marhacsordáját?"

Ugyanez a lassú reagálás jellemezte őt tudományos előadásokon is. Akárhányszor előfordult, hogy egy jelenlevő fiatal fizikus (a legtöbb Koppenhágába látogató fizikus fiatal volt) ragyogó beszámolót tartott a kvantumelmélet valamelyik bonyolult problémájával összefüggő számításairól. Rendszerint mindenki tisztán megértette a gondolatmenetet, csak Bohr nem. Ilyenkor mindenki magyarázni kezdte Bohrnak, amit az nem értett meg, és a keletkező hangzavarban már senki sem értett semmit. Végül, jó idő múlva Bohr kezdte megérteni az előadást, és akkor kiderült, hogy amit ő megértett a hallgató által előadott problémából, az egészen más volt, mint amit a látogató gondolt, de az volt a helyes és az előadó felfogása helytelen.

Annak, hogy Bohr kedvelte a vadnyugati filmeket, egy elmélet lett az eredménye, amit csak egykori mozilátogató társai ismernek. Mindenki tudja, hogy a vadnyugati filmekben (legalább is a hollywoodi stílusúakban) mindig a gazfickó veszi elő elsőnek a fegyvert, de a hős gyorsabb, és mindig lelövi a gazfickót. Bohr ezt a szándékos és kikényszerített cselekvés közti különbségnek tulajdonította. A gazfickónak el kell döntenie, mikor nyúl a fegyverhez, ez lassítja cselekvését, a hős pedig gyorsabban cselekszik, mert ezt gondolkodás nélkül teszi, amikor látja, hogy a gengszter a puskához nyúl. Egyikünk se fogadta el ezt az elméletet, de másnap reggel a szerző egy játékboltba ment, hogy ott két játékpisztolyt vásároljon. Bohr játszotta a hőst, kilőttük a pisztolygolyókat és ő valamennyiünket megölt.

Bohr lassú gondolkodásának másik példája, hogy képtelen volt gyorsan megfejteni egy keresztrejtvényt. Egy este a szerző Tisvilelejebe (Észak-Jütland), Bohr vidéki házához hajtott autójával. Bohr egész nap dolgozott asszisztensével, a belga

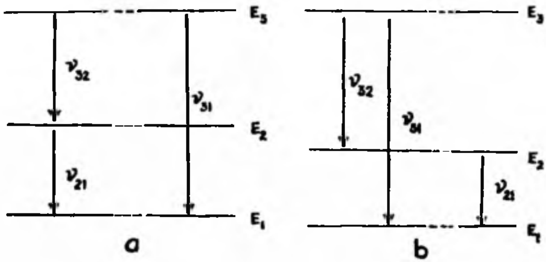
Leon *Rosenfeld*del egy tanulmányon, melynek tárgya a határozatlansági reláció (lásd később) alkalmazása az elektromágneses térre. Bohr és Rosenfeld teljesen kimerültek a napi munkától. Vacsora után Bohr „pihenésképpen" azt javasolta, fejtsük meg valamelyik angol képeslap keresztrejtvényét. A rejtvényfejtés nehezen haladt. Egy óra múlva Bohrné azt javasolta, hogy menjünk aludni. Éjjel egyszercsak Rosenfeld és a szerző, akik együtt laktak egy emeleti vendégszobában, ajtódörömbölésre ébredt. Felugrottunk a sötétben, „Mi az, mi történt?" kiáltottuk. Tompa hang hallatszott kívülről: „Én vagyok, Bohr. Nem akarom zavarni magukat, csak meg akartam mondani hogy a 7 betűs angol ipari város, amely ich-re végződik: Ipswich!"

„Nem akartam ... csak ...", ez volt Bohr kedvenc kifejezése. Gyakran járt újsággal a kezében, mondván: „Nem akarok kritizálni, csak azt szeretném megérteni, hogy írhat valaki ilyen badarságot!"

Még egy megtörtént eset Bohrról, mielőtt rátérünk atomelméletére. Egyszer késő este (kb. 11 órakor) Bohr, Bohrné, és Cas *Casimir* holland fizikus, a szerzővel együtt vacsoráról jöttek Bohr intézetének egyik tagjától. Cas jól tudott falra felmászni. Gyakran lehetett látni az intézet könyvtárában közel a mennyezethez, könyvvel a kezében, két lába a könyvespolcok tetején. Elhagyott utcán jártunk, és egy bank épülete előtt mentünk el. A bank homlokzati fala nagy cementtömbökből állt, köztük olyan részek, amelyeket az alpinisták egymás között lábtámasznak hívnak. Ez magára vonta Casimir figyelmét és felmászott két emelet magasságra. Amikor lejött, Bohr sem akart elmaradni mögötte, és lassan megindult felfelé az épület falán. Bohrné, Casimir és a szerző kissé ijedten figyelték Bohr lassú kapaszkodását. Ebben a pillanatban két éjjeli őrjáraton levő rendőr közeledett gyors lépésben, beavatkozásra készen. Felnéztek az első és második emelet között lebegő Bohrra, és az egyik azt mondta: „Hiszen ez csak Bohr professzor!" és a törvény és a rend két őre teljesen megnyugodva folytatta útját.

Mindezek előrebocsátásával térjünk rá Bohr atomelméletének megbeszélésére. Ez 1913-ban jelent meg és Rutherford ama felfedezésén alapult, hogy az atomoknak tömör, pozitív töltésű magja van, amely körül az elektronok raja kering, mint egy parányi bolygórendszerben. Az első nehézség, amelybe ez az elképzelés ütközött, az volt, hogy atomok így csupán a másodperc egy igen kis tört részéig létezhetnének. A pályáján keringő elektron ugyanis tulajdonképpen elektromos oszcillátor, így elektromágneses hullámokat bocsát ki, ezzel energiáját gyorsan elveszíti. Könnyen ki lehetett számítani, hogy ekkor az atom elektronjai spirális pályán mozognak, és egy másodperc százmilliomod része alatt belehullanak az atommagba. Ezt mégsem teszik, hiszen az atomok tartósan léteznek. A helyzet ugyanolyan paradox, mint Jeans ibolyántúli katasztrófája, és Bohr előtt nyilvánvaló volt, hogy a megoldást is ugyanabban az irányban kell keresni, mint ott. Ha a sugárzó energia csak bizonyos minimális mennyiségben vagy ennek többszörösében létezhet, miért ne lehetne ugyanazt feltételezni az atommag körül keringő elektronok mechanikai energiájáról? Ebben az esetben az elektronok mozgása az atom normális állapotában ezeknek a minimális energiamennyiségeknek felelne meg, a gerjesztett állapotok pedig több mechanikai energiakvantumnak. Az atom mechanizmusa eszerint úgy viselkednék, mint az autó sebességváltója, be lehet állítani az első sebességre, a másodikra, harmadikra és direktre, de nem lehet közbensőre állítani. Ha az atom elektronjainak mozgása és a kibocsátott fény kvantálva van, akkor az elektron átmenete az atomban egy magasabb kvantált energiaszintről az alacsonyabbra szükségképpen egy olyan fénykvantum kibocsátásával jár, amelynek $h\nu$ energiája a két szint közötti energiakülönbséggel egyenlő. Fordítva, ha egy beeső fénykvantum $h\nu$ mennyisége egyenlő az atom alapállapota és gerjesztett állapota közötti energiakülönbséggel, akkor a fénykvantum elnyelődik, és az elektron az alacsonyabb szintről a magasabb szintre megy át. Ezt az anyag és a sugárzás közötti energiacserét mutatja vázlatosan a 96a, b. ábra. Az ábra alapján fontos következtetésekre juthatunk. Amikor az elektron az E_3 energiaállapotból átmegy az E_2 energiaállapotba, egy $h\nu_{32}$ energiájú fénykvantumot emittál. Az E_2-ből E_1-be való átmenet $h\nu_{21}$ energiájú fénykvantum kibocsátását eredményezi. Ekkor legalábbis néhány esetben az E_3-ból E_1-be történő közvetlen átmenetnek megfelelő $h\nu_{32}+$ $+h\nu_{21}=h(\nu_{32}+\nu_{21})$ energiájú fénykvantumot is megfigyelhetünk. Hasonlóképpen $h\nu_{31}$ és $h\nu_{32}$ energiával bíró fénykvantum kibocsátása alapján $h\nu_{31}$ — $h\nu_{32}=h(\nu_{31}-\nu_{32})$ fénykvantum kibocsátásának a lehetőségét várhatjuk. Ha h-t töröljük, akkor azt mondhatjuk, hogy ha egy adott atom spektrumában két emissziós frekvenciát figyelünk meg, akkor összegüket és különbségük észlelését is várhatjuk. Ez azonban pontosan az ún. „Rydberg-féle kombinációs elv",* amelyet az e nevet viselő német fizikus empirikus úton fedezett fel, még mielőtt a kvantumelmélet létezett volna.

A leírt tények után nem volt kétséges, hogy Bohr alapvető koncepciója a mechanikai energia kvantálását illetően helyes,



96. ábra.

A Rydberg-féle kombinációs elv szemléltetése. (a) Ha egy elektron az E_3 energia-szintről ν_3 frekvencia kibocsátásával ugorhat az E_2 energiaszintre és E_2-ről ν_{21} frekvencia kibocsátásával E_1-re, akkor lehetségesnek kell lennie közvetlen átmenetnek E_3-ról E_1-re $\nu_{31}=$ $=\nu_{32}+\nu_{21}$ frekvencia kibocsátásával. (b) Ha egy elektron az E_3-ról E_2-re ugorhat ν_{32} frekvencia kibocsátásával vagy E_1-re ν_{31} frekvencia kibocsátásával, akkor lehetségesnek kell lennie átmenetnek E_2-ről E_1-re $\nu_{21}=\nu_{31}-\nu_{32}$ frekvencia kibocsátással

és csupán az marad hátra, hogy megtalálják a kvantálás szabályait. Bohr e célra valamennyi atom közül a legegyszerűbbet, a hidrogénatomot választotta. Ez, az előző fejtegetések szerint egyetlen, a mag körül keringő elektronból áll. A magnak, amelyről ma már tudjuk, hogy egy protonból áll, egy pozitív töltése van. A hidrogén látható spektruma négy vonalból — egy vörösből, egy kékből és két ibolyaszínűből — áll, azonban az ibolyántúli spektrum tanulmányozása nagyszámú rövid hullámhosszú vonalat tárt fel. Ezt a spektrumot a II. tábla mutatja, amelyen a színkép vonalai a növekvő rezgési frekvencia sorrendjében láthatók. Az ilyen vonalcsoportokat, amelyek a nagyfrekvenciájú

* A kombinációs elvet Ritz-féle vagy Rydberg—Ritz-féle kombinációs elvnek is nevezik. (Szerk. megj.)

oldalon egyre szorosabbak lesznek, és egy meghatározott határhoz közelednek, a spektroszkópiában *sorozat*nak nevezik. Ezek között a hidrogénsorozat a legjellemzőbb és a legszabályosabb. 1885-ben J. J. *Balmer* svájci gimnáziumi tanár felfedezte, hogy a hidrogén színképének a látható vonalait (amelyet ma Balmer-sorozatnak neveznek) igen egyszerű képlettel lehet kifejezni:

$$\nu = R\left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2}\right),$$

ahol R egy állandó, n pedig rendre a 3, 4, 5, 6 stb. értékeket veszi fel (n nyilvánvalóan nem lehet 1 vagy 2, mert ebben az esetben ν negatív vagy zéró lenne). Ha ezt a képletet h-val szorozzuk, hogy a baloldalon a kibocsátott fénykvantum energiája álljon, akkor azt kapjuk, hogy

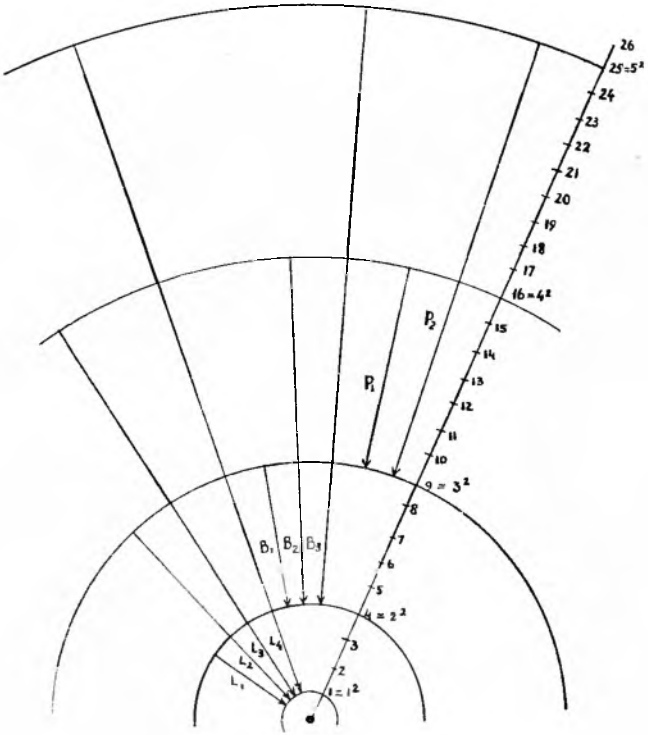
$$h\nu = Rh\left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2}\right),$$

amelyen Bohr a következő elemi átalakítást hajtotta végre:

$$h\nu = Rh\left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2}\right).$$

Az előző meggondolásokból következik, hogy $-\frac{Rh}{n^2}$ a hidrogénatom elektronjának azokat az energiaszintjeit kell jelentse, amelyek között a Balmer-vonalak kibocsátásával járó átmenetek végbemennek. Mindkét mennyiség elé mínusz jelet teszünk, mert az elektronok energiája az atomban negatív. Ez egyszerűen azt jelenti, hogy mozgási energiájuk kisebb, mint az elektromos térbeli potenciális energiájuk, és ezért nem hagyhatják el az atomot. Milyen mag körüli mozgás felel meg ezeknek az energiaértékeknek?

A kérdésre legegyszerűbben úgy kapunk választ, ha arra gondolunk, hogy a Coulomb-erő potenciális energiája fordítva arányos a középponttól mért távolsággal. Mivel a Balmer-formulában szereplő kifejezések az n egész szám négyzetével fordítva arányosak, azt következtetjük, hogy az egymásra következő elektronpályák sugarai n^2 arányában növekednek. A Bohr által először tárgyalt körpályák relatív nagyságát a 97. ábra mutatja. A Balmer-sorozat vonalainak a külsőbb pályákról a másodikra történő átmenetek felelnek meg. De mi felel meg a többinek? A 2, 3, 4 stb. pályáról az elsőbe történő átmeneteknek a Balmer-sorozat vonalaihoz hasonló vonalsorozatot kell alkotniuk, amely azonban messze a színkép ibolyántúli részében van. A külsőbb pályákról a harmadikra történő átmeneteknél viszont a távoli infravörösben kell keletkeznie egy vonalsorozatnak.



97. ábra.

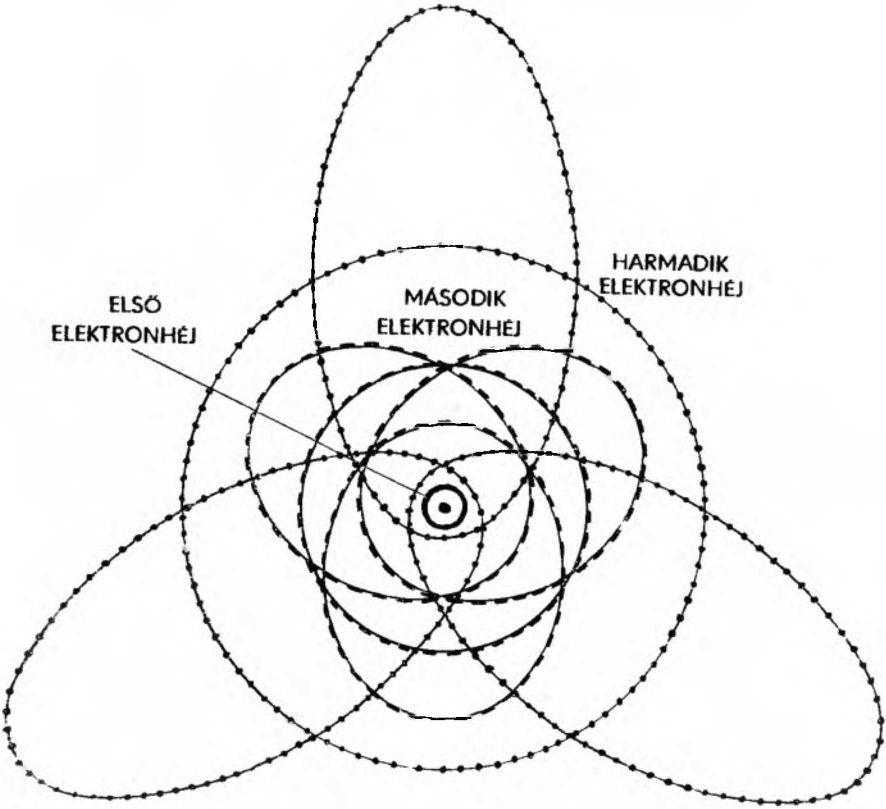
A hidrogénatom Bohr-féle modelljének első négy körpályája. Sugaraik az egész számok négyzeteinek arányában nőnek. Az L_1, L_2, L_3, L_4, átmenetek az első pályára a Lyman-sorozat vonalait adják. A B_1, B_2, B_3 ..., és a P_1, P_2 ... átmentek a második, illetve harmadik pályára alkotják a Balmer- illetve Paschen-sorozat vonalait. Az első kvantumpálya sugara $5 \cdot 10^{-9}$ cm

Mindkét sorozatot Theodore *Lyman* és Friedrich *Paschen* fedezte fel. Létezésük alátámasztotta Bohr elektronugrási elméletét.

Bohr tudva, hogy a (körnek feltételezett) elektronpályák sugarai az egész számok négyzetének arányában növekednek, meg tudta állapítani, hogy mely mechanikai mennyiségek „kvantált"-ak, vagyis melyek azok, amelyek értéke egyik pályáról a másikra áttérve, mindig ugyanannyival változik. Kiderült, hogy az elektron impulzusának és a pálya hosszának a szorzata ilyen, vagyis az a mennyiség, amelyet a klasszikus mechanikában „hatás"-nak neveznek. Kiderült, hogy a „hatás" megváltozása egyik kvantumpályáról a másikra átmenve pontosan egyenlő a h kvantumállandóval, amelyet Planck a hősugárzási elméletében, Einstein pedig a fotoelektromos effektus általa alkotott magyarázatában használt.

Hamarosan kitűnt, hogy Bohr eredeti, koncentrikus körökből álló modelljét bizonyos kvantált ellipszisekből álló elektronpályák hozzátevésével kell általánosítani. Ezt az általánosítást Arnold *Sommerfeld* német fizikus végezte el. A 98. ábra a hidrogénatom elektronjának lehetséges pályáit mutatja. Az első köralakú pálya (*folytonos* vonal) érintetlen maradt. A második köralakú pályát (*pontozott* vonal) Sommerfeld három ellipszis-pályával egészítette ki, a rajtuk mozgó elektronok energiája ugyanakkora, mint a köralakú pályán. A harmadik köralakú pályát nyolc ellipszis-pályával kell kiegészíteni (ezekből csak három látható a rajzon), mindegyiken ugyanakkora az energia, mint a körpályán. Ezen túl pedig a magasabb rendű körpályákhoz mindig több ellipszis-pálya járul. A helyzet egyre bonyolultabbá vált, ami azonban elég figyelemre méltó, egyre jobban egyezett a megfigyelt tényekkel. Az atom most már nem hasonlított a bolygórendszerhez, hanem olyan absztrakt rajzzal lehetett ábrázolni, amely csak távoli vonatkozásban áll a klasszikus mechanika köreivel és ellipsziseivel.

A Bohr-elmélet fejlődése első évtizedében hatalmas sikert ért el az összetettebb atomok tulajdonságainak, optikai színképének, valamint kémiai kölcsönhatásának a magyarázatában. Az elméletnek azonban, minden sikere ellenére, megmaradt eredeti vázlatossága és minden kísérlet, amely arra irányult, hogy az elektronok egyik energiaállapotból a másikba való átmenetét a maga eleven valóságában leírják, és az átmenetek eredményeképpen kibocsátott spektrumvonalak intenzitását kiszámítsák, eredménytelen maradt.



98. ábra.

Kör- és ellipszis-pályák a hidrogénatomban. Az első kör alakú pályán (folytonos vonal) a legkisebb az elektron energiája. A következő négy pályán, egy kör- és három ellipszis-pályán (szaggatott vonalak) egyforma az elektronok energiája, de nagyobb, mint az első pályán. A következő 9 pályán (pontozott vonalak), amelyek közül csak 4 látható az ábrán, még nagyobb az energia, de mind a 9-en azonos

(Ezt a helyzetet színesen eleveníti meg egy vers, a Cromwell-korabeli himnuszok és egyházi dalok ritmusában, amelyet Vlagyimir A. Fock orosz fizikus szerzett a húszas évek elején.)

ÉLJEN NIELS BOHR

Töltsünk nedűt az ezüst serlegekbe!
Emeljük rá és köszöntsük fel őt,
S modern lantunknak húrjait pengetve,
Énekeljük meg Bohrunkat, a hőst:
        Éljen korunknak nagy fia,
        Fejét övezze glória!
Niels Bohr, meghajolunk nagy lángelméd előtt!

Érdemeidnek, valljuk, nincs határa,
S elméletid bár nem világosak,
Feltétel nélkül elhisszük, akárha
Isten hirdetne igazságokat!
        Apollónk vagy te, Niels, egünk,
        Alázatosan követünk.
Törvényeid örök időkre szólanak!

A mechanika engedelmes szolgád.
Nincs olyan szakága, mely nélküled
Bizton megáll. S ha úgy gondolod, hát
Az energia-törvény is a pokolba mehet.
        Csak ülsz a trónon, mint koros
        Király, és köpsz a folytonos
Mozgásra, bár ez óriást legyőzheted.

Az oksági törvény is, melyet válság
Fenyeget, kegyeidért esdekel,
S egy szép napon, ha nem kap tőled áldást,
Pokolra kerül, s tűz égeti el.
        Aztán beszélik szüntelen,
        Hogy van kilencvenkét elem,
S szerinted ez elmélet kutyának se kell!
        S véred lázítja a konok,
        Balga beszéd a Sorok
Divergenciájáról, hogyha lábra kel.

A kvantum tisztel téged. Minden zsenge
Elektron viselkedését parancsszavad
Rendeli el: arra rohan, amerre
A pálya kényszeríti általad.
És hogy mikor milyen a szint,
Azt nagyszerűen tudja mind,
És arról álmodik – tudva, merre halad –,
Hogy pályájáról majd letér,
S másikra ugrik; így remél
Menekülést, nem értve meg hatalmadat.

Éljen hát Bohr, köszöntsük tisztelettel!
Elméletedben sok még a homály,
Mi mégis követünk – te vagy a Mester –
Mint büszke pásztorát a balga nyáj.
Lásd, akkor sem ellenkezünk,
Ha felmérni azt nincs eszünk,
Amit te kiagyalsz, s azt mondod rá: szabály.
Koccanjanak a serlegek,
Nyuljon hosszúra életed,
Kolosszusunk, te nagy tudós-király!

A BOHR-MODELL ÉS AZ ELEMEK PERIÓDUSOS RENDSZERE

A hidrogénatom egyetlen elektronjának mozgását megbeszéltük. Fordítsuk most figyelmünket arra, mi történik a 2, 3, 4 és még több elektront tartalmazó atomban. Az elektronpályák általánosságban ugyanolyanok, mint a hidrogénatomban, azzal az eltéréssel, hogy a mag nagyobb elektromos töltése által kifejtett nagyobb vonzóerő következtében az összes pályák átmérői annál kisebbek lesznek, minél nagyobb rendszámú elemhez érünk.

Hogyan helyezkedik el a nehezebb elemek atomjainak egyre több elektronja ezeken az egyre kisebbedő pályákon? A klasszikus fizika alapján csaknem triviális a válasz e kérdésre. Az összes mechanikai rendszerek közül az a legstabilabb, amelyben a rendszer már nem veszíthet energiát még alacsonyabb energiaszintre való eséssel. Így feltételezhetjük, hogy a nehezebb atomok elektronjai beesnek az első elektronpályára, és ott körtáncot lejtenek a mag körül. És mivel tudjuk, hogy e kör átmérője a nehezebb elemekben egyre kisebb, azt is megjósolhatjuk, hogy mindig sűrűbben lesz megrakva elektronokkal. A valóságban ez nem következik be. Az atomok teljes nagysága, a magtöltéstől függetlenül, megközelítőleg ugyanakkora.

Ez a probléma magára vonta Wolfgang *Pauli* (99. ábra) német fizikus figyelmét, akinek testes alakját jól ismerték Bohr elméleti fizikai intézetében, és szívesen látták ott őt.

99. ábra.
Enrico Fermi (balról) és Wolfgang Pauli

Pauli igen kiváló elméleti fizikus volt. Neve barátai körében mindig elválaszthatatlan lesz a Pauli-effektus néven ismert titokzatos jelenségtől. Közismert, hogy az elméleti fizikusok valamennyien rendkívül nehézkesen bánnak a kísérleti eszközökkel és a drága és bonyolult készülékeket, mihelyt hozzáérnek, összetörik. Pauli olyan kitűnő fizikus volt, hogy már akkor is összetörtek a műszerek, ha csak belépett a laboratóriumba. A Pauli-effektus legmeggyőzőbb példája az volt, amikor a göttingeni egyetemen James Frank fizikai intézetében valamilyen készülék minden látható ok nélkül váratlanul felrobbant és darabokra tört. A lefolytatott vizsgálat kiderítette, hogy a baleset pontosan akkor történt, amikor a göttingeni vasútállomásra befutott az a vonat, amelyen Pauli Zürichből Koppenhágába utazott.

Pauli az elektronok atomon belüli mozgásán gondolkozva megfogalmazta híressé vált elvét, (amelyet ő maga kizárási elvnek nevezett). E szerint minden elektronpályán legfeljebb két elektron tartózkodhat. Ha mindkét hely be van töltve, akkor a következő elektron más pályára kerül. Ha egy héj összes pályái be vannak töltve, akkor a következő (nagyobb energiaszintnek megfelelő) héj kezd feltöltődni.

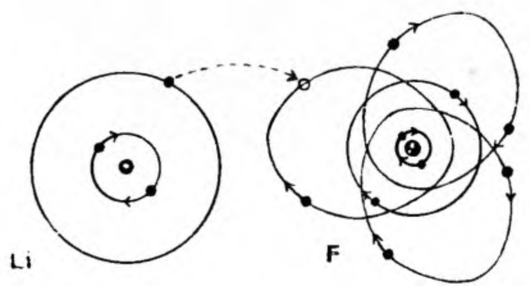
Ahogy az elemek természetes sorrendjében egyre nehezebb atomok felé haladunk, az elektronpályák sugarai a mag növekvő töltése következtében egyre kisebbek lesznek. Másrészt azonban az elektronok egyre több pályát foglalnak el. Így az atom nagysága átlagban ugyanaz marad a legkönnyebb elemektől kezdve a legnehezebbekig. Kisebb változások azonban vannak az atomok nagyságában, ahogy az egyik teljesen betöltött héjtól (nemesgáz-szerkezet) a másikig megyünk. Ez az elemek sűrűségének csekély periodikus változásait okozza, amely párhuzamos a kémiai tulajdonságok periodikus változásával.

A periodikus rendszer atomjainak elektronhéjai az energiaállapotok ily módon rögzített hierarchiája szerint vannak betöltve. A legkisebb energiájú első elektronhéj telik meg elsőnek. A héliumatomban ezt a héjat teljesen betölti a 2 elektron, amely egymást kergeti körben az első elektronpályán. A legközelebbi elemnek, a lítiumnak 3 elektronja van, amelyek közül egyik, a kizárási elvnek megfelelően, már a második héjba kerül. Ez a héj egy kör- és három ellipszis-pályából áll. Mivel ezen a négy pályán összesen 8 elektron lehet, a belső pályán pedig 2, ezért az első és a második héj csak a neonatomnál töltődik be, amelynek 10 elektronja van. A még nehezebb elemek további elektronjai a harmadik kör és ellipszis pályasorozatba jutnak, és így tovább. Pauli kizárási elve ilymódon az elemek belső szerkezetét egymás utáni elektronhéjaik fokozatos betöltődésével magyarázza meg. Ez az elv szabályozza az atomok külső, vagyis kémiai tulajdonságait és a kémiai tulajdonságoknak az elemek Mengyelejev-féle táblázatában megnyilvánuló periódusos voltát is. Ezeket a tulajdonságokat az atom külső héján levő elektronok száma határozza meg, azoké az elektronoké, amelyek az atomok összeütközésekor megteremtik a kapcsolatot köztük.

A Pauli-elv megfogalmazásának idején azt hitték, hogy az elektronok pontszerű negatív elektromos töltések. Hamarosan felfedezték azonban, hogy az elektronokat parányi mágneseknek kell tekinteni. Mágneses momentumuk van, mert gyorsan forognak az atommag körüli keringésük közben. Ha pedig az elektronokat parányi mágneseknek kell tekintenünk, számításba kell vennünk a pályán való mozgást elsősorban létrehozó elektromos erőkön kívül a forgásuk (spinjük) révén keletkező mágneses erőket is.

Az elektron kétféle módon foroghat: vagy pályájamenti keringésével egyezően, vagy az ellenkező irányban. Kimutatták, hogy az azonos pályán keringő két elektron ellenkező irányban forog (spinje ellenkező irányú). E felfedezés alapján a Pauli-elvet az előzőtől kissé eltérő módon kell megfogalmaznunk. Minthogy az ellentétes spinű elektronok gyenge mágneses tere az elektronok pályáját kölcsönösen kissé megváltoztatja, azt mondhatjuk, hogy a két elektron, amelyet eredetileg ugyanazon a pályán keringőnek gondoltak, a valóságban két különböző (bár nagyon hasonló) pályán kering. Ezért ésszerűbb a megengedett pályákat egymáshoz közelálló pároknak tekinteni, amelyeket a gyenge mágneses kölcsönhatás távolít el egy kissé.

Az atom héjszerkezetével egyszerűen magyarázhatjuk meg a különböző elemek vegyértékét. A kvantumelmélet alapján kimutathatjuk, hogy azok az atomok, amelyeknek csaknem teljesen betöltött elektronhéjuk van, szívesen befognak néhány elektront, hogy ezt a héjat teljesen betöltsék. Az olyan atomok pedig, amelyek éppen megkezdtek egy új elektronhéjat, hajlamosak arra, hogy megszabaduljanak ezektől a többlet-elektro-



100. ábra.

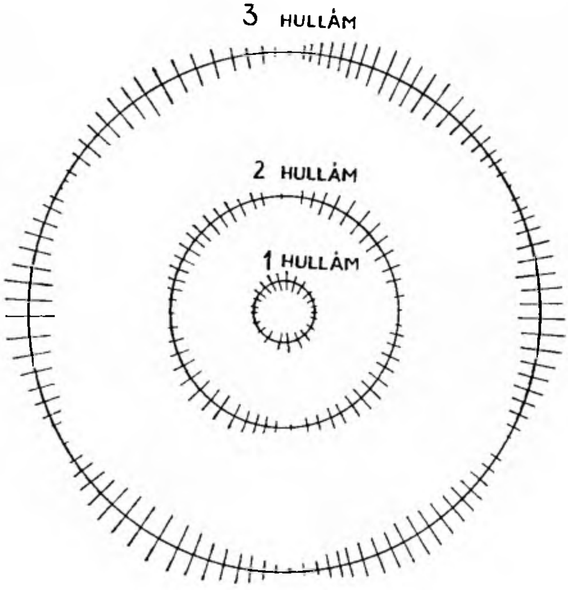
Kémiai kötés egy lítium- (Li) és egy fluor- (F) atom között a lítiumfluorid (LiF) molekulában. A Li-atom majdnem üres héjában levő egyetlen elektron átugrik az F-atom zsúfolt héjának egyetlen szabad helyére noktól. Így például a 17-es rendszámú klórban 2 elektron van az első héjban, 8 a másodikban és 7 a harmadikban. A külső héjból tehát hiányzik egy elektron ahhoz, hogy teljes legyen. Másrészt viszont a 11-es rendszámú nátriumatomban 2 elektron van az első héjban, 8 a másodikban, és csak 1 elektron a harmadikban. Ha klóratom nátriumatommal találkozik, akkor annak a magános külső elektronját „adoptálja” és Cl^- lesz belőle, a nátriumatomból pedig Na^+. A két iont pedig az elektrosztatikus erők összetartják, és azok stabilis konyhasómolekulát képeznek. Hasonlóképpen az az oxigénatom, amelynek 2 elektronja hiányzik a külső héjból (rendszáma $=8=2+6$), 2 elektront igyekszik befogadni egy másik atomból, és így 2 egyértékű atomot (H, Na, K stb.) köthet vagy egy kétértékű atomot, például egy magnéziumot (rendszáma $=12=2+8+2$), amely 2 elektront tud átadni. Az ilyen kémiai kötésre mutat példát a 100. ábra. Az is világos, hogy a nemesgázok, amelyekben az összes héjak be vannak töltve és nincs átadható vagy befogadható elektronjuk, vegyileg teljesen inaktívak.

ANYAGHULLÁMOK

1924-ben Louis *de Broglie* herceg, 32 éves francia arisztokrata (101. ábra), aki tudományos pályafutását a középkori

101. ábra.
P. A. M. Dirac (balról) és Louis de Broglie

történelem tanulmányozásával kezdte, és csak később kezdett érdeklődni az elméleti fizika iránt, rendkívüli gondolatokat tartalmazó doktori disszertációt terjesztett a párizsi egyetem elé. De Broglie véleménye szerint az anyagi részecskék mozgását bizonyos, a térben a részecskékkel együtt terjedő „vezető hullámok" kísérik és irányítják. Ha ez így van, akkor Bohr atommodelljének elektronpályáit olyan keringési pályákként lehet felfogni, *amelyek kerületén éppen egész számú vezető hullám fér el*; egy hullám az első elektronpályán, kettő a másodikon stb. (102. ábra). Előzőleg láttuk, hogy az egyszerű köralakú



102. ábra.
A Bohr-pályákon körbeszáguldó de Broglie-hullámok

mozgás esetében Bohr elektronpályái eleget tesznek annak a feltételnek, hogy kerületük szorozva a mozgó elektron impulzusával (ami tömeg·sebesség), egyenlő az első pályánál h-val, a másodiknál $2h$-val, a harmadiknál $3h$-val, és így tovább.

E két állítás azonos, ha feltételezzük, a vezető hullám hullámhossza egyenlő h-nak és a részecske impulzusának a hányadosával

$$\frac{h}{mv}.$$

És de Broglie éppen ezt tételezte fel. A közbeeső pályasugaraknál a vezető hullám „nem foghatja meg a saját farkát", következésképpen ilyen mozgás nem létezhet. De Broglie így egyetlen merész csapással orgonasípok, rezgő dobok eleven rendszerévé változtatta Niels Bohr vázszerű elektronpályáit. A részecskék kvantummechanikáját a hang vagy fényhullámokéhoz hasonló tulajdonságokkal ruházta fel.

Ezt a forradalmi elméletet ellenőrizni kellett kísérletileg. Ha atomokon belüli mozgásukban de Broglie-hullámok kísérik az elektronokat, bizonyos hullámtermészettel akkor is kell rendelkezniük, amikor egyenes vonalban repülnek a térben. A laboratóriumokban előállított, néhány kilovolttal felgyorsított elektronnyaláboknál a de Broglie-hullámok hosszát kb. 10^{-8} cm-nek várták. Ez nagyságrendben megegyezik a röntgensugarak hullámhosszával, így a röntgensugár-diffrakciós mérésnek technikáját lehetett felhasználni annak eldöntésére, léteznek-e az elektronokat kísérő hullámok vagy sem.

Ilyen kísérletet végzett 1927-ben Sir J.J. *Thomson* George nevű fia (a későbbi Sir George) és C. J. *Davisson* és L. H. *Germer* amerikai fizikus. Egy kristályra elektromos térben felgyorsított elektronnyalábot irányítottak. Az eredmény olyan volt, mint ami a IV. táblán *lent* látható. Minden kétséget kizáróan mutatja, hogy hullámok diffrakciójával állunk szemben. A diffrakciós gyűrűk átmérői alapján becsült hullámhossz pontosan egyezett a de Broglie-féle h/mv képletből számított hullámhosszal. A hullámhossz csökkent, és növekedett ha az elektronok gyorsultak vagy lassultak. Néhány évvel később Otto *Stern* német fizikus megismételte Davisson és Germer kísérletét. Elektronok helyett hidrogénmolekulákat és héliumatomokat használt. Azt találta, hogy a de Broglie képlete által leírt diffrakciós jelenség itt is végbemegy. Ily módon kétségtelenné vált, hogy a kis részecskéket, elektronokat és atomokat, mozgásukban „vezető hullámok" irányítják, amelyeknek mibenléte azonban abban az időben még teljesen homályos volt.

De Broglie elméletét Erwin *Schrödinger* osztrák fizikus

(103. ábra) 1926-ban általánosítva és szigorú matematikai alapra helyezve a híres Schrödinger-egyenletben foglalta össze. Ez a részecskék bármilyen erőtérben végbemenő mozgására alkalmazható. A Schrödinger-egyenlet a hidrogén és a bonyolultabb atomok esetén is megadja Bohr elektronpálya-elméletének összes eredményét, és ezenfelül olyan kérdésekre is

103. ábra.
Werner Heisenberg (balról) és Erwin Schrödinger

választ ad (mint például a spektrumvonalak intenzitása), amelyekre a régi elmélet nem mond semmit. Az atom belsejét kör vagy ellipszis alakú elektronpályák helyett most az ún. ψ-függvény (pszi-függvény) írja le, ami az atommagot körülvevő térben kialakuló különböző de Broglie-hullámoknak felel meg.

Schrödinger első tanulmánya az előkelő német folyóiratban, az *Annalen der Physik*-ben jelent meg. Ezzel egyidőben egy rivális folyóirat, a *Zeitschrift für Physik* is közölt egy cikket a kvantumelméletről, amelyet Werner *Heisenberg* (103. ábra) a fiatal (akkor 24 éves) német fizikus írt. Heisenberg elméletét nehéz valamennyire is népszerűen ismertetni. Fő gondolata az, hogy a mechanikai mennyiségeket, a helyet, sebességet, erőt stb. nem közönséges számokkal, mint pl. 5 vagy $7\frac{1}{2}$ vagy

13 5/7 kell ábrázolni, hanem a „mátrix"-nak nevezett elvont matematikai mennyiségekkel. A mátrixok keresztrejtvényszerü hálózatba rendezett közönséges számokból állnak, de végtelen sok soruk és oszlopuk van. A mátrixok összeadására, kivonására, szorzására és osztására szabályokat lehet alkotni; és ezek hasonlóak az ismert algebrai szabályokhoz, de van egy lényeges kivétel. A mátrix-algebrában ugyanis az $A \cdot B$ szorzat nem mindig egyenlő a $B \cdot A$ szorzattal. Ez a mátrix-szorzás bonyolultabb voltából következik. A legkézenfekvőbb analógiája ennek az emberi nyelvben található, amelyben Péter János nem ugyanaz, mint János Péter és a szövetruha nem azonos a ruhaszövettel. Heisenberg kimutatta, hogy ha a klasszikus mechanika egyenleteiben előforduló valamennyi mennyiséget mátrixként fogjuk fel, és még egy további feltételt szabunk meg, azt, hogy impulzus$\cdot$hely – hely$\cdot$impulzus$=hi$, ahol h a kvantumállandó és $i=\sqrt{-i}$ régi ismerősünk, az imaginárius egység, akkor olyan elméletet kapunk, amely az összes ismert kvantumjelenségeket helyesen írja le.

A két tanulmány egyidejű megjelenése, amelyek két különböző módszer felhasználásával pontosan ugyanarra az eredményre jutnak, felkavarta a fizikusok világát. Hamarosan megállapították, hogy a két elmélet matematikai szempontból azonos. Heisenberg mátrixai tulajdonképpen a Schrödinger-egyenlet táblázatba foglalt megoldásai. A kvantumelmélet különféle problémáinak megoldásában felváltva lehet a hullámmechanikát és a mátrixmechanikát alkalmazni.

A HATÁROZATLANSÁGI RELÁCIÓK*

Mi a de Broglie-hullámoknak, az anyagi részecskék mozgása vezetőinek a fizikai jelentése? Valóságos hullámok ezek, mint a fényhullámok, vagy csupán matematikai fikciók, amelyeket a mikrokozmosz fizikai jelenségeinek kényelmesebb leírása céljából vezettek be? Ezt a kérdést néhány évvel a hullámmechanika megfogalmazása után Heisenberg oldotta meg. Azt vizsgálta meg, hogy a sugárzó és mechanikai energia leg-

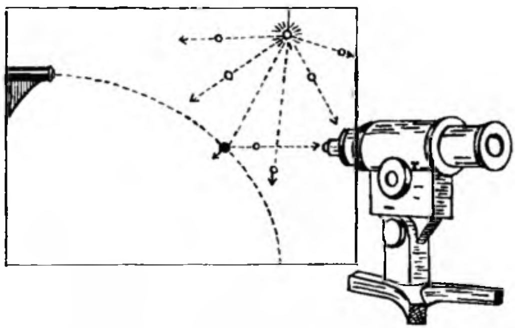
* Ez a fejezet a szerző *The Uncertainty Principle* című, a *Scientific American* 1958. januári számában megjelent cikke alapján készült.

kisebb mennyiségeit bevezető kvantumtörvények hogyan befolyásolják a klasszikus mechanika alapvető fogalmait.

Heisenberg a probléma gyökeréig nyúlt vissza: hogyan lehet a megfigyelés szokásos szabályait és módszereit atomméretben lezajló jelenségekre alkalmazni? A mindennapi életben bármely jelenséget megfigyelhetünk vagy megmérhetünk anélkül, hogy a jelenséget számottevően befolyásolnánk. Ha egy fél csésze kávé hőmérsékletét fürdő-hőmérővel mérjük meg, akkor a hőmérő annyi hőt von el a kávétól, hogy az a kávé hőmérsékletét lényegesen megváltoztatja. Kicsiny kémiai hőmérővel azonban kielégítő pontossággal mérhetjük. Miniatür hőelemmel, amelynek a hőkapacitása csaknem elhanyagolható, egészen kis tárgy hőmérsékletét is megmérhetjük, akár egy élő sejtét is. Az atomok világában azonban soha nem szabad szem elől téveszteni a mérőműszer zavaró hatását. Az atomi energiák olyan kicsinyek, hogy a legóvatosabban végzett mérés is lényegesen megzavarhatja a megfigyelt jelenséget. Ilyenkor aztán nem lehetünk bizonyosak afelől, hogy a mérés eredménye valóban azt mutatja-e, ami a mérőeszköz távollétében is lett volna. A megfigyelő és műszerei a vizsgált jelenség lényeges részévé válnak. Még elvben sem létezik fizikai jelenség magában véve. Minden esetben teljességgel elkerülhetetlen kölcsönhatás van a megfigyelő és a jelenség között.

Heisenberg ennek szemléltetésére részletesen tárgyalta, hogyan lehet megpróbálni az anyagi részecskék mozgásának nyomon követését. A mindennapi jelenségek világában követni tudjuk egy pingpong labda röptét, anélkül, hogy ez a pályát parányit is befolyásolná. Tudjuk, hogy a fény nyomást fejt ki a labdára, mégsem kell sötét helyiségben pingpongozni (még ha ez egyáltalán lehetséges volna is), mert a fény nyomása túl kicsiny ahhoz, hogy a labda röptét bármiként is megváltoztassa. Ha azonban a labda helyére elektront teszünk, akkor a helyzet azonnal megváltozik. Heisenberg „gondolatkisérlettel" vizsgálta meg a helyzetet, vagyis azzal a gondolkozási módszerrel, amelyet Einstein is alkalmazott a relativitáselmélet tárgyalásakor.

Az ilyen gondolatban elvégzett mérésnél feltételezzük, hogy a kísérletezőnek „ideális műhely" áll rendelkezésére, amelyben bármiféle műszert vagy szerszámot elkészíthet – feltéve, hogy annak szerkezete és működése nem áll ellentétben a fizika alapvető törvényeivel. Például lehet olyan rakétánk, amely csaknem fénysebességgel mozog, de nem mozoghat a fénysebességnél gyorsabban. Vagy használhatunk olyan fényforrást, amely egyetlen fotont bocsát ki, de nem bocsáthat ki fél fotont. Heisenberg az elektron röptének megfigyelésére ilyen ideális berendezésről gondoskodott (104. ábra). Elképzelt egy olyan elektronágyút, amely egyetlen elektront tud kilőni vízszintesen egy teljesen evakuált kamrába, amelyben tehát egyetlen levegő-



104. ábra.

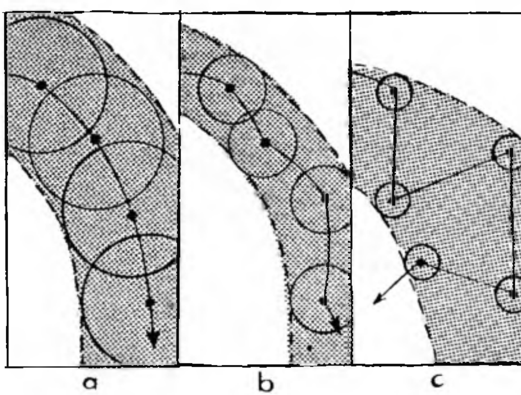
Heisenberg idealizált kísérlete a részecskepályák megfigyelésére

molekula sincs. A kísérlethez használt fény ideális forrásból érkezik, amely tetszőleges hullámhosszú fotonokat tud kibocsátani bármely kívánt mennyiségben. Az elektron mozgását a kamrában ideális mikroszkóppal figyeli meg, amelyet tetszés szerint be lehet állítani a teljes spektrum bármelyik részére, a leghosszabb rádióhullámoktól kezdve a legrövidebb gammasugarakig.

Mi történik, ha belövünk a kamrába egy elektront? A mechanika klasszikus tankönyvei szerint a részecske parabola-pályán repül. A valóságban azonban abban a pillanatban, amikor foton éri az elektront, az meglökődik, és megváltoztatja sebességét. Ha a részecskét pályája egymás utáni pontjaiban megfigyeljük, azt látjuk, hogy zegzugos vonalban halad a fotonok beleütközése következtében. Mivel ideálisan változtatható műszerrel dolgozunk, megtehetjük, hogy az ütközéseket minimumra csökkentjük, a fotonok energiájának csökkentésével, vagyis kis frekvenciájú fény alkalmazásával. Végtelenül kis frekvenciák felé haladva (ami készülékünknél lehetséges) az elektron mozgásának megzavarását olyan kicsinnyé tehetjük, ahogy csak akarjuk. Ekkor azonban újabb nehézség merül fel. Minél nagyobb a fény hullámhossza, annál kevésbé tudjuk a tárgy helyét definiálni, a fény diffrakciója miatt. Így már nem tudjuk bármely pillanatban megállapítani az elektron pontos helyzetét. Heisenberg kimutatta hogy a helyzet határozatlanságának és a sebesség határozatlanságának a szorzata soha sem lehet kisebb, mint a részecske tömegével osztott Planck-állandó,

$$\Delta v \Delta x \geqq \frac{h}{m}.$$

Igen rövid hullámokkal pontosan meghatározhatjuk a mozgó részecske helyzetét, de erősen befolyásoljuk a sebességét, hosszú hullámokkal pedig meghatározhatjuk a változatlan sebességet, de bizonytalanságban leszünk a helyzete felől. Középmegoldást is választhatunk a határozatlanságok között. Ha valamilyen jól kiválasztott közepes hullámhosszúságú fényt használunk, akkor csak mérsékelten zavarjuk meg a pályát, és elég jól meg tudjuk határozni a részecske útját (105. ábra). A megfigyelt út



105. ábra.

Egy részecskepálya Heisenberg elképzelt kísérletében. (a) A hullámhossz túl nagy, minden helyzetmérés igen pontatlan. (b) Optimális feltételek. (c) A frekvencia túl nagy, a részecskét túl sokszor lökdösik nem klasszikus értelemben vett éles vonal, hanem elmosódott szélű sáv. Az elektronpálya ilyen leírása nem okoz nehézséget, mondjuk a televíziós képcsőnél, ahol az ernyőhöz vezető elektronpálya „vastagsága" sokkal kisebb, mint az ernyőn megjelenő, az elektronnyaláb által előidézett folt. Itt kielégítően lehet az elektronpályát vonallal ábrázolni. Az elektron atombeli pályáját azonban nem tudjuk ugyanilyen fogalmakkal leírni. A határozatlansági sáv itt kb. ugyanolyan széles, mint az elektronpálya távolsága a magtól!

Tegyük fel, hogy a részecske mozgását nem próbáljuk tovább fénnyel követni, ehelyett a ködkamra-módszert kíséreljük meg. Hipotetikus műhelyünkben „ideális ködkamrát" építünk, amelyből minden anyagi részecskét eltávolítottunk, de megtöltjük parányi elképzelt „indikátorokkal", amelyeket a zorosan mellettük elhaladó elektron „aktivál". Az aktivált indikátorok megmutatják a mozgó részecske útját, ugyanúgy, mint a vízcseppek a valóságos ködkamrában.*

A klasszikus mechanika fogalmai szerint az indikátorokat elvben olyan kicsinyre készíthetjük, és olyan nagy érzékenységgel ruházhatjuk fel, hogy nem vonnak el számottevő energiamennyiséget a mozgó részecskéktől, és a részecske útját a kívánt pontossággal figyelhetjük meg. A kvantummechanika azonban a folyamattal szemben alapvető kifogást emelhet. Egyik szabálya azt mondja: minél kisebb a mechanikai rendszer, annál nagyobbak energiakvantumai (vagyis legkisebb energiaadagjai). Amint tehát az „indikátorok" mérete egyre csökken (hogy pontosabban határozhassuk meg az elektron helyét), ezek egyre több energiát vonnak el az elhaladó részecskékből. A helyzet teljesen analóg azzal a fatális nehézséggel, amely a részecske fénnyel való nyomonkövetésekor fellép. Ismét eljutunk a helyzet és a sebesség határozatlansági relációjához.

Mi következik mindebből? Heisenberg azt következtette, hogy *atomi szinten fel kell adnunk egy tárgy megfigyelt pályájának, mint matematikai (vagyis végtelenül vékony) vonalnak a fogalmát.* Ez a fogalom elég pontos, amíg mindennapi jelenségekkel van dolgunk, ahol azt képzelhetjük, hogy a mozgó tárgyat valami vágány-féle tartja meg útvonalán. Az atomon belüli elektronok világában azonban az egyéni mozgások és

* Az atomfizikusok által használt ködkamrát a következő fejezetben ismerjük meg.

események nincsenek ilyen szilárdan előre meghatározva. A kicsiny anyagi részecskék, az elektronok, a protonok hullámok vezetésével mozognak, amelyeket a klasszikus mechanika kiszélesített vonal-pályáinak tekinthetünk. A lényeges itt az, hogy ez a vezetés nem szigorúan *determinisztikus*, hanem *sztohasztikusan* (véletlenszerűen) történik. Mi csak annak a *valószínűségét* tudjuk kiszámítani, hogy egy elektron az ernyő egy meghatározott pontját éri, vagy hogy egy másik anyagi részecskét egy készülék meghatározott helyén megtalálunk, de nem láthatjuk előre, hogy milyen lesz az útja egy adott erőtérben.

Tisztán kell látnunk, hogy a „valószínűség" szót itt más értelemben használjuk, mint ahogy a klasszikus fizikában és a mindennapi életben szokás érteni. Ha azt mondjuk, hogy pókerezéskor ennyi a valószínűsége annak, hogy éppen royal flush-ünk legyen, ezen csak azt értjük, hogy fel kell mérnünk az esélyeket, mert nem ismerjük a kártyák elrendezését a kártyacsomagban. Ha pontosan tudnánk, hogy vannak a kártyák egymásra rakva, akkor előre pontosan meg tudnánk mondani, lesz-e royal flush-ünk, vagy sem. A klasszikus fizikában feltételezzük, hogy ez az eset áll fenn a gázmolekulák esetében is: a molekulák viselkedését azért kellett a statisztikus módszerekkel leírni, mert ismeretünk nem volt teljes. Ha az összes részecskék helyzetét és sebességét ismernénk, akkor a gázban az eseményeket minden részletükben pontosan előre látnánk. A határozatlansági reláció kihúzza az alapot az ilyen elképzelés alól. Az egyes részecskék mozgását azért nem tudjuk előre megmondani, mert a kezdeti feltételeket soha sem ismerhetjük pontosan. *Elvileg* lehetetlen atomi szinten egyidejűleg pontosan megmérni egy részecske helyzetét és sebességét.

Vajon a ψ-hullámfüggvény (vagy helyesebben ennek a négyzete), amely az anyagi részecske útvonalát megszabja, határozott „fizikai valóság"-e, amely ugyanabban az értelemben *létezik*, mint ahogy a nátriumatomok vagy az interkontinentális ballisztikus rakéták léteznek? A válasz attól függ, hogy mit értünk a „létezés" szón. A hullámfüggvények ugyanúgy léteznek, mint az anyagi testek pályái. A Föld pályája a Nap körül, vagy a Hold pályája a Föld körül *létezik* matematikai értelemben, vagyis mint olyan pontok kontinuuma, amelyeken a mozgó anyagi test egymásután végig halad. De *nem létezik* abban az értelemben, mint ahogy a vonat mozgását irányító vasúti vágányok léteznek. A hullámfüggvénynek nincs tömege, mert nem egyéb, mint elmosódott pálya.

A klasszikus fizikából vett legközelebbi analógia valószínűleg az entrópia fogalma. Az entrópia matematikai függvény, amelyet az elméleti fizikusok találtak fel, és amely a különféle molekulamozgások matematikai valószínűségével függ össze. Ez a valószínűség határozza meg a termodinamikai folyamatok szokásos lejátszódásának az irányát: a kisebb entrópiájú állapotból a nagyobb entrópiájú felé. Az entrópia azonban nem „fizikai valóság" abban az értelemben, mint a tömeg vagy az energia, és amíg 1 gramm anyagról vagy (Einstein óta) 1 gramm energiáról beszélhetünk, nincs értelme 1 gramm entrópiáról beszélni. Ugyanígy értelmetlen volna 1 gramm de Broglie-hullámról vagy 1 gramm Schrödinger-függvényről beszélni.

Egy pillantás Heisenberg képletére megmutatja, hogy miért hanyagolhatjuk el a határozatlansági összefüggést, és bizhatunk nyugodtan a régi jó determinizmusban, ha makroszkopikus méretű anyaggal foglalkozunk. A helyzet határozatlanságának és a sebesség határozatlanságának a szorzata egyenlő a h Planck-állandónak és a részecske tömegének a hányadosával. A Planck-állandó rendkívül kicsiny mennyiség: számértéke a centiméter-gramm-szekundum rendszerben csupán 10^{-27}. Ha egy mg súlyú részecskét tekintünk, akkor elvben egyidejűleg meghatározhatjuk a helyzetét egy trilliomod cm, sebességét pedig 1 cm/trillió másodperc vagyis 30μ (mikron)/évszázad pontossággal.

A Heisenberg-elvet Bohr a fizika új filozófiájává fejlesztette. Ez az elv az anyagi világról alkotott felfogásunk alapos megváltoztatását kívánja – a mindennapi tapasztalatok révén kora gyermekkorunktól kialakított felfogásunk megváltoztatását. Azonban lehetővé tette az atomfizika sok rejtélyének megoldását.

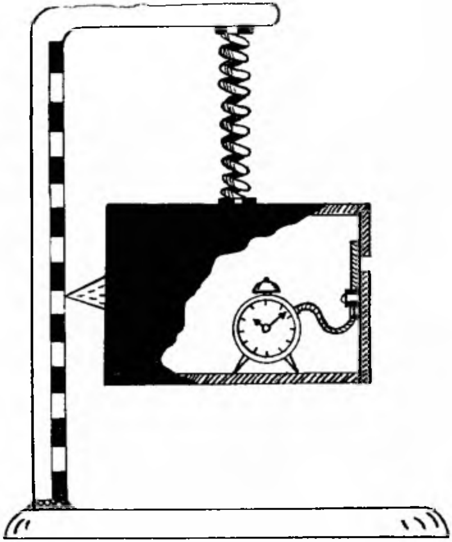
Sok fizikus könnyedén elfogadta az új nézeteket. Másoknak azonban semmiképpen sem tetszett. Ezekhez tartozott Albert Einstein is. Determinista filozófiai meggyőződése lehetetlenné tette számára a határozatlanság elvvé emelését. Ugyanúgy, mint ahogy a szkeptikusok ellentmondásokat keresnek az ő relativitáselméletében, Einstein is ellentmondásokat igyekezett felfedezni a kvantumfizika határozatlansági elvében. Igyekezete azonban végül még erősítette is a határozatlanság elvét. Ezt érdekesen szemlélteti egy esemény, amely 1930-ban a Hatodik Nemzetközi Fizikai Solvay Kongresszuson történt Brüsszelben.

Egy vitában Einstein, Bohr jelenlétében, „gondolatkísérletet” végzett. Úgy érvelt, hogy az idő a tér-idő negyedik koordinátája. Az energia pedig a négyes impulzus (tömeg·sebesség) negyedik komponense, és azt mondta, hogy így Heisenberg határozatlansági egyenletének azt is kell tartalmaznia, hogy az idő határozatlansága összefüggésben van az energia határozatlanságával, vagyis a kettő szorzata nagyobb vagy egyenlő a h Planck-állandóval. Einstein igyekezett bebizonyítani, hogy ez nem így van – hanem az időt és az energiát határozatlanság nélkül meg lehet mérni. Vegyünk, mondta, egy tökéletes tükrökkel bélelt ideális dobozt, amely a sugárzó energiát végtelen ideig képes megtartani. Mérjük meg a dobozt. Aztán valamivel később, egy meghatározott pillanatban egy időzített bombához hasonló óramű kinyit egy ideális csapóajtót, hogy egy kevés fényt kibocsásson. Most mérjük meg újra a doboz súlyát. A tömeg változása felvilágosítást ad a kibocsátott fény energiájáról. Ily módon, mondotta Einstein, a kibocsátott energiát és a kibocsátás idejét tetszőleges pontossággal megmérhetjük, ellentmondásban a határozatlansági elvvel.

Másnap délelőtt Bohr egy álmatlanul eltöltött éjszaka után halálos csapást mért Einstein cáfolatára. Ugyancsak gondolatkísérlettel érvelt, amelyben szintén szerepel egy ideális készülék (amelyet később a szerző, mint Bohr tanítványa, valóban felépített fából és fémből, hogy azt Bohr az e tárgyra vonatkozó előadásaiban felhasználja, 106. ábra). Bohr az Einstein-doboz súlyának mérésével kezdte. Függőleges oszlopon elhelyezett skálával és a súly leolvasására szolgáló mutatóval ellátott rugós mérleg tökéletesen megfelel erre a célra, mondta. Mármost, mivel a doboznak súlya változásakor függőlegesen kell mozognia, határozatlan lesz függőleges sebessége, és ezért ugyancsak határozatlan lesz az asztal fölötti magassága is, fejtette ki Bohr. Továbbá a Föld felszínétől mért magasságának határozatlanságából az óra járásának a határozatlansága is következik, mert a relativitáselmélet szerint, az óra járása függ a gravitációs térbeli helyzetétől. Bohr kimutatta, hogy az időnek és a doboz tömegváltozásának a bizonytalansága egymással éppen abban a kapcsolatban van, amelyet Einstein cáfolni igyekezett.

A saját érveivel legyőzött Einstein elismerte, hogy a Bohr–

Heisenberg-féle elképzelés nem tartalmaz belső ellentmondást, de élete végéig vonakodott elfogadni a határozatlansági összefüggést, és remélte, hogy a fizika egykor majd visszatér a determinisztikus felfogáshoz.



106. ábra.
Einstein – Bohr-mérleg a fény súlyának mérésére

LYUKAK A SEMMIBEN

Paul Adrien Maurice *Dirac* (101. ábra) a húszas évek elején nyerte el villamosmérnöki diplomáját, és egyelőre állás nélkül maradt. Mivel nem talált munkát saját szakmájában, tanársegédi állásra pályázott a cambridge-i egyetemen, és azt meg is kapta. Nem egészen tíz év múlva megkapta a fizikai Nobel-díjat a kvantummechanikában végzett alapvető munkájáért. Dirac tipikusan „elefántcsonttorony”-tudós. Mindig szívesen beszélt társaival keleti utazásáról, vagy bármely mindennapi témáról, munkáját azonban magában végezte. Tudományos üléseken elhangzott megjegyzései viszont ragyogóan éles elmére vallottak, amelyek fején találták a szöget. Egy alkalommal, egy koppenhágai elméleti fizikai konferencián Y. *Nishina* japán fizikus előadását hallgatta, aki a táblát teleírta számításokkal, és végül a rövidhullámú sugárzás szabad elektronokon történő szóródására vonatkozó igen fontos képlethez jutott. Dirac felhívta Nishina figyelmét arra, hogy az általa levezetett képletben a zárójelben a harmadik tagnak negatív előjele van, az eredeti kéziratban pedig pozitív. „A kézirat előjele a helyes," válaszolt Nishina, „a táblán néhány helyen eltévesztettem az előjelet". „*Páratlan* számú helyen", egészítette ki Dirac. Valóban, három, öt, hét stb. tévedés az előjelben ugyanazt eredményezi.

Egy másik alkalommal, amikor a torontoi egyetemen tartott előadást és a hallgatókat felszólították, hogy intézzenek kérdéseket az előadóhoz, egy kanadai professzor emelte fel a kezét. „Dr. Dirac," mondotta, „nem értem, hogyan vezette le a tábla bal felső sarkában levő képletet." „Ez állítás és nem kérdés", mondta Dirac. „Kérem a következő kérdést."

A gyors szellemi tornára való képességét mutatta egy rejtvény-feladat szokatlan megoldásával. A probléma éppen akkor foglalkoztatta a göttingai egyetem matematikusait és fizikusait, amikor Dirac oda látogatott. A feladat az volt, hogy 1-től 100-ig valamennyi számot fel kell írni, de egyedül a 2-es számjegy segítségével. Az összes algebrai jelek, $+$, $-$, hatvány, gyök stb. felhasználhatók. Az 1-et például a következőképpen lehet felírni:

$\frac{2\cdot 2}{2\cdot 2}$: a 2-őt pedig így: $\frac{2}{2}+\frac{2}{2}$, 3-at és öt-5 a következőképpen:

$2^2-\frac{2}{2}$, $2^2+\frac{2}{2}$.

Amikor feladták a kérdést Diracnak, nagyon gyorsan általános megoldást talált arra, hogy miként lehet *bármely* számot csupán három 2-es számjeggyel leírni. A megoldás a következő:

$$N = -\log_2 \log_2 \sqrt{\sqrt{\sqrt{\cdots\sqrt{2}}}},$$

a gyökjelek száma egyenlő az adott N számmal. Azok számára, akik jártasak algebrában, a képlet helyessége magától értetődő.

Matematikai felfedezései közül Dirac egyikre különösen büszke volt. Ez azonban nem járult hozzá hírnevének növeléséhez. Egyszer egyik kollegájának a feleségével beszélgetett és nézte, hogy az sálat köt. Tanulmányaihoz visszatérve, igyekezett gondolatban felidézni a kötőtűk gyors mozgását a hölgy kezében és rájött, hogy más módja is van a tűk mozgatásának. Visszasietett, hogy elmondja felfedezését és nagy csalódással vette tudomásul, hogy mindkét módszert, a sima és a fordított kötést már évszázadok óta ismeri minden nő.

Miután Dirac ezzel a fontos topológiai felfedezéssel elkésett, a relativisztikus kvantumelmélet területén dolgozott tovább. A hullámmechanikát, amely abban az időben még csak néhány éves volt, Schrödinger eredetileg a nem-relativisztikus mozgás esetére, vagyis a fény sebességéhez képest kicsiny sebességű részecskék mozgására fogalmazta meg. Az elméleti fizikusok azon törték a fejüket, hogy a két nagy elméletet, a relativitáselméletet és a kvantumelméletet egyesítsék. Ezen kívül Schrödinger hullámelmélete az elektront pontnak tekinti. Valamennyi arra irányuló kísérlet, hogy az elméletet a kis mágnesként viselkedő forgó elektronra alkalmazzák, eredménytelen volt.

Dirac 1930-ban megjelent híres cikkében új egyenletet állított fel, amely most az ő nevét viseli. Ez az egyenlet lehetővé teszi, hogy két legyet üssünk egy csapással. Kielégíti az összes relativisztikus követelményeket, minden elektronra alkalmazható, bármily gyorsan mozogjon is az. Ugyanakkor automatikusan arra a következtetésre vezet, hogy az elektronnak úgy *kell* viselkednie, mint egy kicsiny mágneses pörgettyűnek. Dirac relativisztikus hullámelmélete túlságosan bonyolult, és azért itt nem ismertethetjük, de az olvasó nyugodtan elhiheti, hogy az egyenlet tökéletesen helytálló.

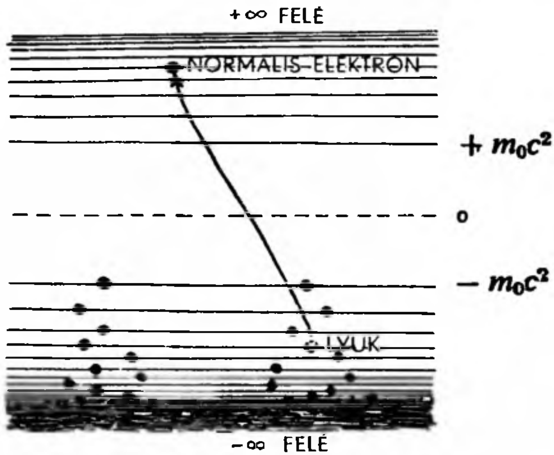
Dirac egyenlete jó volt, mégis komoly komplikációra vezetett, éppen azért, mert eredményesen egyesítette a relativitás- és a kvantumelméletet. A baj abból a (a VI. fejezetben nem tárgyalt) tényből származik, hogy a relativisztikus mechanika matematikailag két különböző világ létezésének lehetőségére vezet. Az egyik a „pozitív világ", amelyben élünk, a másik pedig különös „negatív" világ, amely csak képzeletünket foglalkoztathatja. Ebben a „negatív" világban minden tárgynak *negatív tömege* van, ami annyit jelent, hogy ha meglökjük valamerre, éppen az ellenkező irányba kezd mozogni. Különös dolgok történhetnek a negatív tömeg világában. Ha egy tárgyat előre akarunk mozgatni, akkor vissza kell húznunk, és ha meg akarjuk állítani, akkor előre kell taszítanunk. Vegyünk két egymás közelében nyugvó elektront. Elektromos töltésüknél fogva taszító erők hatnak közöttük. Ha mind a két elektron „rendes”, akkor ezek az erők ellenkező irányú gyorsulást kölcsönöznek nekik és az elektronok nagy sebességgel szétrepülnek. Ha azonban a két elektron egyike negatív tömegű, akkor a taszítóerő következtében a másik elektron felé fog mozogni, az pedig menekülni fog előle. Mivel a két gyorsulás számszerűen egyenlő, a két elektron egyre növekvő sebességgel fog repülni, a negatív tömegű kergeti a normális elektront. Ez nincs ellentmondásban az energiamegmaradás törvényével. A rendes elektron mozgási energiája

$$\frac{1}{2}mv^2, \text{ a negatív tömegűé pedig } -\frac{1}{2}mv^2.$$

A rendszer teljes energiája $\frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv^2 = 0$, azaz pontosan annyi, mint nyugalmi állapotban volt.

Senki nem látott még negatív tömegű köveket, vagy negatív tömegű bolygókat, ez az Einstein-féle mechanikai egyenletek fiktív megoldása csupán. Mielőtt Dirac egyesítette a relativitást és a kvantumelméletet, nem volt semmi baj. A nyugalmi állapotban levő normális elektron energiája m_0c^2, és ha v sebességgel mozog, akkor ehez hozzá kell adni a mozgási energiáját is. Másrészt a negatív tömegű nyugalmi energiája $-m_0c^2$ és mozgása *negatív* kinetikus energiát eredményez. A kétfajta elektron energiaviszonyai eszerint olyanok lesznek, amint azt a 107. ábra mutatja. Két részre oszlik a diagram, a felső a rendes elektronok része, az alsó a negatív tömegű elektronoké. A két részt a $+m_0c^2$ és a $-m_0c^2$ közötti űr választja el, amely semmiféle lehetséges mozgásnak nem felel meg. *Ha a részecskék mozgása folytonos*, nincs mód arra, hogy a felső részből az alsóba kerüljenek. A nehézséget egyszerűen elkerülhetjük, ha azt mondjuk: „a mi elektronjaink pozitív tömegű, jól viselkedő részecskék, és szikrát sem törődünk a másik matematikai lehetőséggel!”.

Ámde nem szabadulunk ki ilyen könnyen a nehézségből ha a relativitáselméletet és a kvantumelméletet egyesítjük. A kvantumelmélet szerint az elektronok igenis szeretnek *átugrani* egyik energiaszintről a másikra, úgy, hogy a két mozgási állapot között nincs folytonos átmenet. Ha az elektronok az egyik Bohr-pályáról a másikra ugranak, energiának fénykvantumok alakjában történő kibocsátásával, miért ne ugorhatnának a 107. ábra felső energiaszintjeiről az alsókra? Ha azonban ez lehetséges volna, akkor minden normális elektron leugrana a



107. ábra.

Az elektronok Dirac-féle óceánja. Elektronpár (egy pozitív és egy negatív elektron) képződését látjuk

negatív energiájú negatív tömegű állapotba és egyre több és több energiát veszítene sugárzással, egyre gyorsabban mozogna, folytonosan negatív mozgási energiát nyerve ... Ez természetesen nem történik meg, de miért nem?

Az egyetlen mód, amivel Dirac urrá lehetett a nehézség fölött, az a feltevés volt, hogy az összes negatív energiaszinteket teljesen kitöltik a negatív töltésű elektronok, és így a Pauli-féle kizárási elv értelmében a pozitív energiaállapotban levő elektronok nem jöhetnek le. Ez természetesen azt jelentette, hogy a vákuum többé nem vákuum, hanem szorosan megtöltik a negatív töltésű elektronok, amelyek minden irányban, mindenféle sebességgel mozognak. A vákuum minden egységnyi térfogatában *végtelen soknak* kell lenni ezekből a az önmaguknak ellentmondó részecskékből. Miért nem észleljük ezt soha? A magyarázat inkább csak példázat. Képzeljünk el egy mélyvízi halat, amely soha nem kerül az óceán felszínére, és ezért nem tudja, hogy a víz valahol fölötte véget ér. Ha ez a hal elég értelmes ahhoz, hogy a környezete felől elmélkedjék, akkor még csak nem is gondol a vízre mint „közegre", hanem „szabad tér"-nek tekinti azt. Hasonlóképpen feltételezhetjük, hogy a fizikusok nem észlelik a negatív töltésű elektronok végtelenül sűrű nyájának a jelenlétét, mert ezek egészen egyenletesen vannak elosztva a térben. Ezen az elképzelésen a régimódi éter illatát lehet érezni, de érdemes a megvizsgálásra. Visszatérve intelligens mélyvízi halunkhoz, elképzelhetjük, hogy kialakult nála a gravitáció fogalma üres söröspalackok és más hulladékok, sőt az óceán fenekére süllyedő hajók megfigyelése által. De aztán egy szép napon az egyik elsüllyedt hajóba szorult levegő kiszabadult, és a mi intelligens mélyvizi halunk az óceán felszíne felé szálló, ezüstösen csillámló buborékok raját figyelte meg. A hal természetesen nagyon meg volt lepve, és kellő megfontolás után arra a következtetésre jutott, hogy ezeknek az ezüstgömböknek negatív tömegük van. Mert hát hogy mozoghatnának egyébként felfelé, amikor a nehézkedés mindent lefelé húz?

Diracnak valami hasonló elképzelése volt a negatív energiaállapotú elektronokkal teljes mértékben kitöltött óceánjáról. Tegyük fel, hogy Dirac óceánjában van egy buborék, azaz a negatív tömegű elektronok egyike hiányzik. Hogy észlelné ezt a fizikus? Mivel a negatív töltés hiánya egyenértékű egy pozitív töltés jelenlétével, pozitív töltésű részecskének látná azt. A buborékanalógiának megfelelően, a tömeg előjele is fordított lesz. A negatív tömeg hiányát pozitív tömeg jelenléteként észleli. Lehetséges-e, hogy Dirac óceánjának az ilyen buborékja egy rendes proton? Ez ragyogó ötlet volt, de nem vált be. Dirac megpróbálta, hogy a protonnak képzelt buborék nagyobb tömegét a negatív tömegű elektronok közti súrlódással magyarázza meg, de ez nem sikerült neki. A pozitív töltésű buborék-részecske tömege mindig makacsul pontosan egyenlőnek adódott a közönséges elektron tömegével. A nehézségeket még fokozta Pauli, aki kimutatta, hogy ha a proton valóban buborék volna Dirac óceánjában, akkor a hidrogénatom csak egy másodperc elenyésző törtrészéig létezhetne. Ha a hidrogénatom „buborék körül keringő csepp" volna, akkor a csepp beesne, és betöltené a buborék üregét, és így a hidrogénatom egy pillanat alatt megsemmisülne. Ezzel kapcsolatban Pauli tett egy javaslatot, amelyet a „második Pauli-elv”-nek neveznek. E szerint az elméleti fizikusok új elképzeléseit rögtön alkalmazni kell a fizikus testét alkotó atomokra. Ennek az elvnek megfelelően Dirac teste egy mikromásodperc csekély törtrészén belül megsemmisülne, mihelyt kigondolta elképzelését, és a többi elméleti fizikus megmenekülne attól, hogy azt kénytelen legyen meghallgatni . . .

Carl *Anderson* amerikai fizikus 1931-ben azokat a nyomokat tanulmányozta, amelyeket kozmikus sugár-záporok nagyenergiájú elektronjai hoznak létre a ködkamrában. Az elektronok sebességének mérése céljából a ködkamrát erős mágneses térbe helyezte. Nagy meglepetésére, a fényképek azt mutatták, hogy az elektronok egyik fele az egyik irányba tért el, a másik fele pedig az ellenkező irányba. 50% pozitív töltésű és 50% negatív töltésű elektron keverékét találta, de mindkétfajta elektronnak ugyanakkora volt a tömege. Ezek voltak a lyukak Dirac óceánjában, amelyeket nem sikerült a protonokkal azonosítani, és amelyek most önálló részecskékként léptek fel. A pozitív elektronokkal vagy amint azokat gyakran nevezik, *pozitronokkal* folytatott kísérletek megerősítettek minden következtetést, amely Dirac óceán-lyukakra vonatkozó elméletén alapult. Az egy pozitív és egy negatív elektronból álló párokat nagyenergiájú kvantumok (gamma-sugarak vagy kozmikus sugarak) és atommagok ütközése hozza létre. Ezeknek az eseményeknek a valószínűsége pontosan egybeesett a Dirac-elmélet alapján számított értékkel. Megfigyelték, hogy az anyagon áthaladó pozitronok a rendes elektronokkal való ütközésük során megsemmisültek, miközben a tömegükkel egyenértékű energia nagyenergiájú fotonok alakjában szabadult ki. Minden egyes részlet *valóban* pontosan annyi volt, amennyinek a Dirac-elmélet jósolta.

Hogyan áll azonban az a fantasztikus elmélet, amely a pozitív elektronokat lyukaknak tekinti a negatív tömegű elektronok végtelen sűrűségű tömegében? Az elmélet elmélet, és azt a kísérlet eredményével fennálló egyezés igazolja, akár tetszik nekünk. akár nem. Dirac eredeti tanulmányának megjelenése óta kimutatták, hogy *valójában* még sem szükséges feltételezni a negatív tömegű elektronok végtelenül sűrű óceánjának a létezését, hanem a pozitronokat minden gyakorlati célra úgy foghatjuk fel, mint lyukakat az abszolút üres térben.

A pozitív elektronok felfedezése után a fizikusok olyan negatív protonokról álmodoztak, amelyek ugyanúgy viszonyulnak a rendes pozitív protonokhoz, mint a pozitronok az elektronokhoz. Mivel azonban a protonok csaknem kétezerszer súlyosabbak az elektronoknál, ezért a létrehozásukhoz szükséges energia eléri a több milliárd elektronvoltot. Több nagyigényű tervet készítettek olyan részecskegyorsítók* építésére, amelyek az atommaglövedékeknek tudnának ekkora energiát adni. Az Egyesült Államokban két szupergyorsító alapköveit rakták le. A *Bevatron*-ét a Radiation Laboratory of the University of California-ban, Berkeley-ben és a *Cosmotron*-ét a Brookhaven National Laboratory-ban, Long Islandban, New York államban. A versenyt Emilio *Segré*, O. *Chamberlain* és társaik, a kaliforniai fizikusok nyerték meg. 1955 októberében közölték, hogy negatív protonokat figyeltek meg, amelyek 6,2 GeV (6,2 milliárd elektronvolt) energiájú atomi lövedékekkel bombázott anyagokban keletkeztek.

A bombázott célban, a targetban keletkező negatív protonok megfigyelésének legfőbb nehézsége az volt, hogy feltételezték, hogy a protonokat több tízezer más részecske (nehézmezon) kíséri. Ezek szintén az ütközés folyamán képződnek. A negatív protonokat tehát ki kellett szűrni, és el kellett különíteni a kísérő részecskéitől. Ezt mágneses terek, keskeny rések stb. által alkotott bonyolult labirintussal érték el, amelyen csak az anti-protonok várt tulajdonságaival rendelkező részecskék tudtak keresztülhatolni. Ha a (a Bevatron bombázó nyalábjában elhelyezett) targetből érkező részecskék raja keresztülment ezen a „labirintuson”, akkor a feltételezés szerint az csak negatív protonokból állhat. Amikor a berendezés működni kezdett, a négy kísérletező gyors részecskéket figyelt meg, amelyek a készülék nyílásán távoztak, kb. minden 6 percben egy. Amint a további vizsgálatok igazolták, a részecskék valóban negatív protonok voltak, amelyek a nagyenergiájú Bevatron-nyaláb által bombázott targetban képződtek. Úgy találták, hogy tömegük egyenlő 1840 elektron tömegével, vagyis annyi, mint a rendes pozitív proton tömege.

Ugyanúgy, mint ahogy a mesterségesen előállított pozitív

* Lásd a VIII. fejezetben a Gyorsítók című részben.

elektronok megsemmisülnek nagyszámú rendes, negatív elektront tartalmazó anyagon áthaladva, a negatív protonoktól is azt várjuk, hogy megsemmisüljenek, ha az atommagban, amelybe beleütköznek, pozitív protonokra találnak. Mivel a proton-antiproton megsemmisülési folyamatában kiszabaduló energia csaknem kétezerszeresen felülmúlja az elektron-antielektron ütközéskor felszabaduló energiát, ezért a megsemmisülés folyamata itt sokkal hevesebben játszódik le, és sok kilövellt részecskéből álló „csillag"-ot hoz létre.

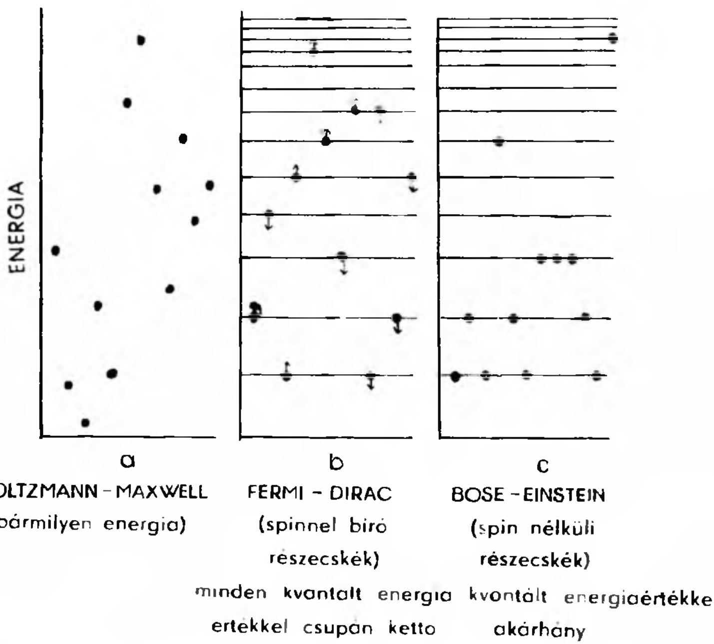
A negatív protonok létezésének bizonyítása kitűnő példa az anyag tulajdonságaira vonatkozó elméleti megállapítások kísérleti megvalósítására olyan esetben, amikor az elmélet, megalkotásakor, még egészen hihetetlennek látszott. 1956-ban felfedezték az anti-neutronokat, azokat a részecskéket, amelyek az addig ismert neutronokkal ugyanolyan vonatkozásban állnak, mint a negatív protonok a pozitív protonokkal. Mivel ebben az esetben nincs elektromos töltés, ezért a neutronok és anti-neutronok közötti különbséget csak megsemmisülésük alapján lehet észlelni.

Mivel a rendes anyag atomjait képező protonok, neutronok és elektronok az anti-állapotban is léteznek, azért ilyen részecskék által alkotott anti-anyagot is elképzelhetünk. Az anti-anyag összes fizikai és kémiai tulajdonságainak ugyanolyanoknak kell lenniük, mint a rendes anyagéinak. Az egyetlen mód annak eldöntésére, hogy két kő egymáshoz képest anti-anyag-e, az, hogy összeérintjük őket. Ha semmit nem észlelünk, akkor azonos fajtájú anyagok; ha pedig hatalmas robbanásban semmisülnek meg, akkor anti-anyagok. Az anti-anyag létezésének lehetősége nagy jelentőségű problémákat vet fel a csillagászat és a kozmológia szempontjából. Vajon a világegyetemben levő minden anyag egyfajta-e, vagy pedig a mi anyagunkból és anti-anyagból álló szigetek vannak szabálytalanul szétszórva a végtelen térben? Erős érvek szólnak amellett, hogy a mi csillag-rendszerünkön, a Tejútrendszeren belül minden anyag egyfajta. Ha ez nem így volna, akkor a csillagok és a szétszórt intersztelláris anyag megsemmisülési folyamata erős, megfigyelhető sugárzást hozná létre. De vajon a legközelebbi szomszédunk a világűrben, a Nagy Androméda Köd és más tejutak százmilliói, amelyek a Palomar-hegyi obszervatórium 200 hüvelykes (5 méteres) teleszkópjának látókörében szét vannak szórva a világűrben, egyfajta anyagból állnak-e, vagy pedig 50–50%-os keveréket képeznek? Ha a világegyetemben levő minden anyag egyfajta, miért van ez így? És ha részben rendes anyag, részben anti-anyag, hogyan különül el egymástól ez a két egymást kölcsönösen kizáró rész? Egyik kérdésre sem tudunk választ adni, csak azt remélhetjük, hogy a következő fizikus és csillagász-generáció meg fogja oldani ezt a rejtélyt.

KVANTUM-STATISZTIKÁK

A mozgás kvantumelméletének erős hatása volt a kinetikus hőelméletre, amelyet a IV. fejezetben tárgyaltunk. Ha az atomon belül mozgó elektronok csak meghatározott diszkrét kinetikus energiaértékkel rendelkezhetnek, akkor ugyanez vonatkozik a zárt edényen belül mozgó gázmolekulákra is. Ezért a gáz molekuláinak energiaeloszlásáról nem tételezhetjük fel, hogy a gázmolekuláknak tetszőleges nagyságú kinetikus energiájuk van (108a. ábra), amint azt a Boltzmann, Maxwell, Gibbs és mások által alkotott klasszikus elméletben feltételezzük. Ezzel szemben meghatározott kvantált energiaszinteknek kell létezniük, amelyeket az edény mérete szab meg, és e szintek közötti energiával nem rendelkezhet egyik részecske sem. A helyzetet még bonyolultabbá tette, hogy egyes részecskék (pl. az elektronok) a Pauli-elvet követik, amely megtiltja, hogy e részecskékből több mint kettő foglalja el ugyanazt az energiaszintet, míg más részecskék (pl. a levegőmolekulák) nincsenek ennek a korlátozásnak alávetve. Ez két különféle statisztikus eloszlásra vezet: az ún. *Fermi—Dirac statisztikára*, amely a Pauli-elvnek alávetett részecskékre, és a *Bose—Einstein statisztikára*, amely az elvnek alá nem vetett részecskékre alkalmazandó. A 108b, c. ábra a kétféle statisztika közötti különbséget szemlélteti. A kvantumstatisztika egész fejlődése igen érdekfeszítő, de igen nehezen magyarázható meg „speciális” terminológia alkalmazása nélkül.

Itt csak annyit állapíthatunk meg, hogy a két újfajta statisztika a mindennapi életben előforduló esetekben, pl. a légköri levegő esetében a gyakorlatban nem különbözik a régi jó klasszikus statisztikától. Eltérések csak akkor várhatók és csak akkor figyelhetők meg, ha például a fémekben levő elektron-gázról vagy az ún. „fehér törpecsillagokról” van szó, ahol a Fermi—Dirac szabályok érvényesek, vagy a rendes gázoknál az abszolút nullpontot megközelítő hőmérsékletnél, ahol a Bose–Einstein törvények uralkodnak. Reméljük, hogy e könyvnek azok az olvasói, akiket e tárgy eléggé lelkesít, tovább folytatják a modern fizika tanulmányozását magasabb síkon. Ebben az esetben a kvantumstatisztika problémái kristálytiszták lesznek számukra már alig féltucat évi tanulmányozás után.



108. ábra.

12 gázrészecske energiájának háromféle statisztikus tárgyalása

VIII. FEJEZET

AZ ATOMMAG ÉS AZ ELEMI RÉSZECSKÉK

A RADIOAKTIVITÁS FELFEDEZÉSE

1896 elején Henri *Becquerel* francia fizikus, miután hallott a röntgensugarak nemrégiben történt felfedezéséről, elhatározta, hogy megvizsgálja, vajon rájuk eső fény hatására világító fluoreszkáló anyagok is emittálnak-e valami röntgensugárhoz hasonlót. E vizsgálatra az uranil nevű ásvány (urán és kálium kettős szulfátja) kristályait választotta ki, amelyeket már előzőleg tanulmányozott erős fluoreszkáló tulajdonságuk miatt. Mivel Becquerel azt hitte, hogy a sugárzás külső megvilágítás eredménye, uranilkristályt helyezett egy fekete papírba göngyölt fényképlemezre, és az egészet az ablakpárkányra helyezte. Amikor a lemezt néhány órai napfényen történt megvilágítás után előhívta, tisztán látszott egy fekete folt az uránilkristály helye alatt. A kísérletet többször megismételte, és a fekete folt akkor is ott volt, amikor fekete papírba burkolta a fényképlemezt.

1896. február 26-án és 27-én a párizsi eget nehéz felhők borították, időnként az eső is esett és a bulvárok élete a kávéházakba és az éttermekbe húzódott. Becquerel professzor a begöngyölt fényképlemezt a rajta levő uránilkristállyal együtt íróasztala fiókjába tette, jobb időt várva. A nap nem sütött ki, csak március 1-én, és még akkor is átvonuló felhők homályosították el. Becquerel ennek ellenére kitette a napra dolgait, majd bement a sötétkamrába, hogy megnézze az eredményt. Hihetetlen, ami történt! A sötétes foltok helyett, amiket akkor kapott, amikor a lemez a kristállyal egész napon át ragyogó napsütésnek volt kitéve, szénfekete folt volt az uránilkristály helye alatt. A lemez sötétedésének nyilván semmi köze nem volt az uránilkristály napsugarakkal való megvilágításához, a sötétedés megszakítás nélkül folytatódott az alatt, amíg az uranildarab Becquerel íróasztalának zárt fiókjában hevert.

Valami, a röntgensugarakhoz hasonló, átható sugárzás volt ez, de az atomokból, külső gerjesztés nélkül, sajátmagától áradt, valószínűleg Becquerel kristályának urániumatomjaiból. Becquerel felhevítette a kristályt, lehűtötte, porrá őrölte, savakban feloldotta, és minden elképzelhetőt megtett vele, de a titokzatos sugárzás intenzitása kitartóan mindig ugyanaz volt. Így világos lett, hogy az anyagnak ez az új tulajdonsága amelyet *radioaktivitásnak* neveztek el, független attól, hogy az atomok fizikai és kémiai szempontból hogyan kapcsolódnak össze, ez a tulajdonság mélyen az atomon belül rejlik.

RADIOAKTÍV ELEMEK

A radioaktivitás felfedezését követő első években sok kémikus és fizikus tanulmányozta szorgalmasan az új jelenséget. Marie Skłodowska-Curie asszony, lengyel születésű vegyész, Pierre Curie francia fizikus felesége, az összes kémiai elemeket és vegyületeiket megvizsgálta a radioaktivitás szempontjából. Azt találta, hogy a tórium az urániuméhoz hasonló sugárzást bocsát ki. Összehasonlította az uránércek és az uránfém radioaktivitását és azt észlelte, hogy az ércek radioaktivitása ötször erősebb annál, mint amennyire urántartalmából következtetni lehetne. Ez azt mutatta, hogy az ércek kis mennyiségű olyan radioaktív anyagot is tartalmaznak, amely aktivabb, mint maga az urán. Kiválasztásához azonban igen nagy mennyiségű drága uránércre volna szükség. Curie asszony kapott az osztrák kormánytól 1 tonna (az idő szerint) értéktelen maradékot a joachimstali (jelenleg Jachimov) állami uránművektől. Ez az urántartalom kivonása után még mindig megtartotta radioaktivitásának túlnyomó részét. Curie asszony az átható sugárzás Ariadné fonalától vezetve, elkülönítette egy bizmuthoz hasonló kémiai tulajdonságokkal rendelkező anyagot, amelyet hazája tiszteletére *polónium*nak nevezett el. Még több munka eredményeképpen kémiai szempontból a báriumhoz hasonló anyagot nyert, amelynek a *rádium* nevet adta. Ennek kétmilliószor olyan erős a radioaktivitása, mint az uránnak.

Új és ismeretlen országok és új tudományterületek úttörői gyakran rejtett veszélyeknek esnek áldozatul. Curie asszony halálát 67 éves korában fehérvérűség okozta. Erről a betegségről ma már tudjuk, hogy átható sugárzás következménye. Amikor a fizikusok megtanulták, hogy a sugárzással vigyázni kell, filmet helyeztek Curie asszony laboratóriumi naplójának lapjai közé. Az előhívott filmek számos ujjlenyomatot mutattak, amelyeket radioaktív lerakódások okoztak a Curie asszony ujjai által érintett lapokon.

A polónium és a rádium felfedezését egyre több radioaktív anyag felfedezése követte. Ezek között volt az aktínium, a hasítható uránium közeli rokona, amelyet *Debierne* és *Giesel* választott el, a *radiotórium* és a *mezotórium*, amelyeket az az Otto *Hahn* vont ki, aki mintegy 40 évvel később az uránhasadás jelenségét felfedezte.

RADIOAKTÍV SOROK

Fizikai részről, az átható sugárzás tulajdonságainak a tanulmányozásával folyt tovább a munka. 1899-ben a 24 éves Ernest *Rutherford* megállapította, hogy három különféle sugárzás van:

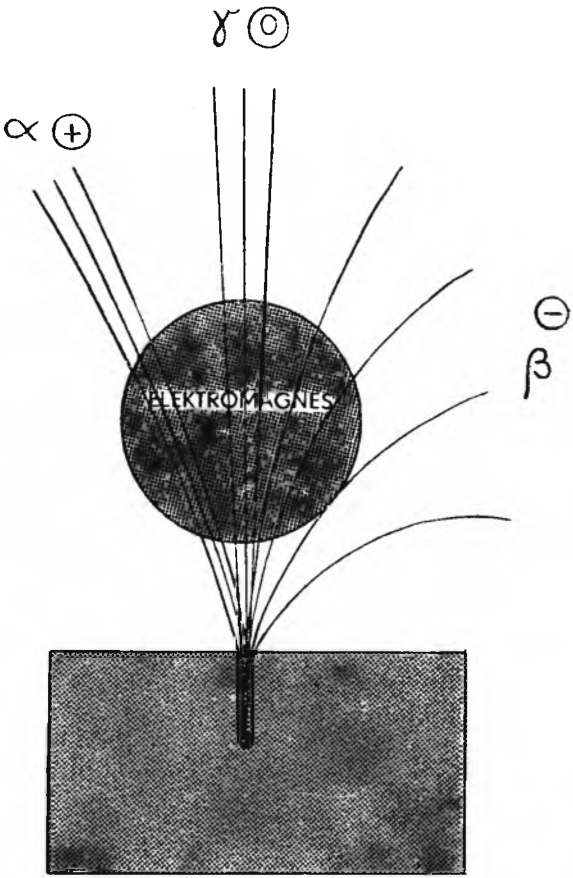
1. Alfa- (α) sugarak, amelyeket egy darab papírral meg lehet állítani. Ezekről bebizonyosodott, hogy héliumionok. (Valójában héliumatomok magjai, de Rutherford nem tudta ezt, amíg 12 évvel később el nem végezte szóráskísérleteit.)

2. Béta- (β) sugarak, amelyek néhány milliméter vastagságú alumíniumfólián képesek áthatolni. Erről kiderült, hogy igen gyorsan mozgó elektronnyaláb.

3. Gamma- (γ) sugarak, amelyek több centiméter vastagságú ólomlemezeken is áthatolnak. Hasonlóak a röntgensugarakhoz, de hullámhosszuk sokkal kisebb.

A fizika tankönyvekben, beleértve a szerző egy régebbi könyvét is, a 109. ábrán láthatóhoz hasonló rajzot szoktak közölni, amely mágneses (vagy elektromos) téren áthatoló α, β, és γ sugarak elhajlását mutatja. Az alfa-nyaláb balra hajlik (pozitív töltésű), a béta-nyaláb jobbra (negatív töltésű), a gammanyaláb nem hajlik el (elektromágneses hullámok). Kétséges azonban, hogy ilyen kísérletet végeztek-e a radioaktivitás tanulmányozásának kezdetén (az alfa-részecskék számottevő eltérítéséhez rendkívül erős elektromágnesek szükségesek, amilyeneket csak sokkal később szerkesztettek). Az alfa- és bétarészek közti különbséget csak sokkal bonyolultabb indirekt módszerekkel állapították meg.

Rutherford és munkatársa, Frederick *Soddy* elsőként jutott arra a következtetésre, hogy a radioaktivitás jelensége egyik kémiai elem másikká való spontán átalakulásának a következménye. A +2 töltésű, 4-es tömegű alfa-részecske kibocsátása olyan elem képződésével jár, amely a Mengyelejev-rendszerben



109. ábra.
Alfa- béta- és gamma-sugarak

két lépéssel balra van, atomsúlya pedig 4 egységgel kisebb. Egy béta-részecske (negatív elektron) emissziója az elemet egy lépéssel jobbra viszi a Mengyelejev-rendszerben, az atomsúlyt pedig nem változtatja meg. A gamma-sugarak kibocsátása egyszerűen az atom zavarásának a következménye, amelyet pozitív vagy negatív töltésű részecske kilövellése okoz.

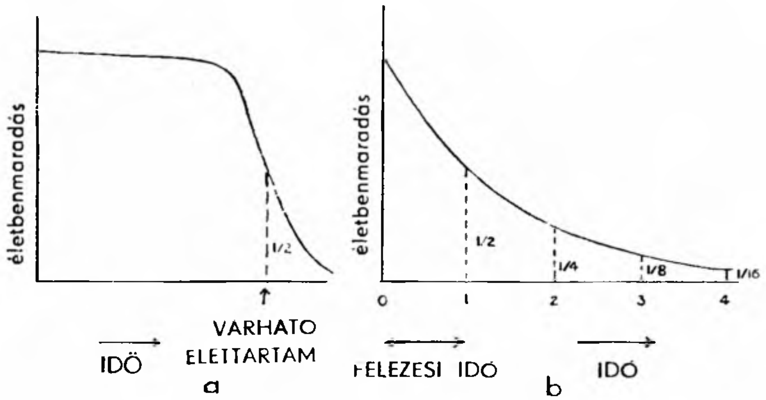
Az egymásra következő alfa- és béta-bomlások sora a radioaktív elemek nem stabil atomjait egyre lejjebb viszi, rendszámukat és atomsúlyukat mindaddig csökkenti, míg végül stabil állapotot érnek el. Ez a stabil állapot egy ólomatom. Mivel az alfa-bomlás az atomsúlyt 4 egységgel csökkenti, a bétabomlás viszont semmivel sem változtatja meg, ezért négyféle radioaktív elemekből álló sorozat létezhet:

1. olyan elemek, amelyek atomsúlya négynek a többszöröse, 4n,
2. olyan elemek, amelyek atomsúlya 4n+1,
3. olyan elemek, amelyek atomsúlya 4n+2,
4. olyan elemek, amelyek atomsúlya 4n+3.

Az uránium atomsúlya 238, vagyis 4·59+2. Így az uránium és sorozatának összes, alfa- és béta-bomlással leszármazott tagja a fenti harmadik csoportba tartozik. A tórium atomsúlya 232, 4·58, úgy hogy a tórium-sor az első csoportot alkotja. A protaktíniumnak, amely aktíniummá bomlik, és az aktíniumsor több tagjának az atomsúlya 231, vagyis 4·57+3, tehát a harmadik csoportba tartoznak. A 4n+1 atomsúlyú radioaktív sor (második csoport) a természetben nem fordul elő, de atommáglyákban mesterségesen előállítható. A radioaktivitás első kutatóinak kemény munkája révén meg lehetett szerkeszteni a létező radioaktív sorok származási táblázatát. A következő oldalon az urán-sor bomlása sémáját látjuk, amely a régismert uránium 238-cal kezdődik, és nyolc alfa- és hat béta-bomlás után a stabil ólom-206-tal végződik.

Az egyes radioaktív elemek neve mellett látható két szám az elem rendszámát és atomsúlyát jelenti, az alatta levő szám pedig a felezési idő évben, napban, órában, percben vagy másodpercben. Hasonló bomlási sorokat lehet felépíteni a tóriumsorra, a protaktínium-sorra és a mesterségesen előállított (névtelen) negyedikre is.

Ha kiskutyák, kismacskák vagy más állatok ugyanazon a napon született kicsinyeinek élettörténetét követjük, azt látjuk, hogy nem ugyanazon a napon halnak meg. Ha azoknak az egyedeknek százalékos arányát rajzoljuk fel grafikonban, akik egy meghatározott kort megérnek, akkor egy jellegzetes élettartamgörbét kapunk, amit a 110a. ábrán látunk. A grafikon azt mu-



110. ábra.
Életbenmaradási görbék állatoknál (*a*) és atommagoknál (b)

tatja, hogy van egy meghatározott „várható élettartam”, amely embernél kb. 75 év, kutyánál 15, kacsánál pedig csak néhány év. A görbe azt mutatja, hogy csekély a valószínűsége annak, hogy valaki egy bizonyos kor előtt hal meg, és hasonlóképpen csekély az esélye annak, hogy sokkal tovább éljen.

A radioaktív atomok esetében a helyzet egész más. A radioaktív családok elődjeikből alfa- vagy béta-bomlások útján frissen „született” tagjainak az esélye arra, hogy a család következő tagjában „újjászülessenek” teljesen független a keletkezésük óta eltelt időtől. Hasonló a helyzet azokhoz a katonákhoz, akik állandóan harcban állnak az ellenséggel. A folytonos csatában minden nap egy bizonyos százalék pusztul el, de nem lehet megmondani, hogy másnap kikre kerül sor. Ebben az esetben nem

							$_{90}UX\ 1^{234}$ 245 nap	$_{92}U\ 1^{238}$ $4{,}5 \cdot 10^{9}$ év
							$_{91}UX\ 2^{234}$ 11 perc	
		$_{82}RaB^{214}$ 27 perc	$_{84}RaA^{218}$ 3 perc	$_{86}Rn^{222}$ 3,8 nap	$_{88}Ra^{226}$ 1590 év	$_{90}Io^{230}$ $8{,}3 \cdot 10^{4}$ év	$_{92}UII^{234}$ $2{,}7 \cdot 10^{5}$ év	
	$_{81}RaC''^{210}$ 13 perc	$_{83}RaC^{214}$ 20 perc	B É T A - B O M L Á S					
	$_{82}RaD^{210}$ 22 év	$_{84}RaC'^{214}$ 10^{-4} sec			ALFA-BOMLÁS			
	$_{83}RaE^{210}$ 50 nap							
$_{82}Pb^{206}$ stabil	$_{84}Po^{210}$ 137 nap							

beszélhetünk „várható élettartamról", hanem a „felezési idő" fogalmát kell bevezetni, vagyis azt az időtartamot, amely alatt a katonák fele elpusztul, vagy a nem-stabil radioaktív atomok fele szétbomlik. Az e folyamatot ábrázoló görbét mutatja a 110b. ábra, amelyet a matematikusok „exponenciális görbé"-nek neveznek. A különböző radioaktív elemek felezési ideje nagyon különböző. Az uránium mennyisége 4,5 milliárd év alatt csökken a felére, a rádium 1590 év alatt, míg a RaC' atomok fele már a másodperc egy tized része alatt elbomlik. A három természetes radioaktív sor létezése őseik, az urán-I vagy ($92U^{238}$), a tórium ($1{,}3 \cdot 10^{10}$ év) és a protaktínium ($5 \cdot 10^{8}$ év)* hosszú életének tulajdonítható. Ezek az idők már összemérhetők a Világegyetem korával.

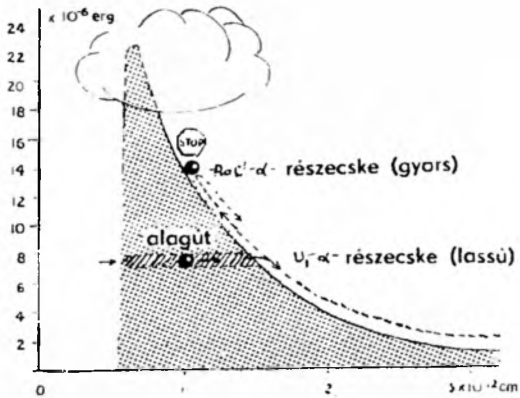
A $4n+1$ típusú sor a természetben nem létezik. Amikor ezeknek az atommagjait mesterségesen előállították atommáglyában, megállapították, hogy a család ősének lényegesen rövidebb az élete, és így az egész sornak már régen teljesen szét kellett bomlania.

A LYUKAS GÁTAK

Az alfa-bomlások lassúságát e könyv szerzője, aki az idő szerint Németországban dolgozott, és tőle függetlenül Roland *Gurney* (Ausztrália) és Edward *Condon* (Egyesült Államok) magyarázta meg. A magyarázat a hullámmechnikán alapul. Akkor már ismeretes volt, hogy az atommagokat magas gáttal veszi körül az elektromos taszító erő. Ezt először Rutherford vizsgálta meg az α-szórási kísérleteiben. Ha egy alfa-részecske közeledik a maghoz, akkor taszító erő hat rá, amelynek nagysága a magtöltés (Ze) és az alfa-részecske töltésének ($2e$) szorzata, osztva a kettőjük közötti távolság négyzetével. Ha az α-rész érintkezésbe kerül az atommaggal, akkor az α-részt a közte és a magot alkotó részecskék között ható kohéziós erők behúzzák, és bent

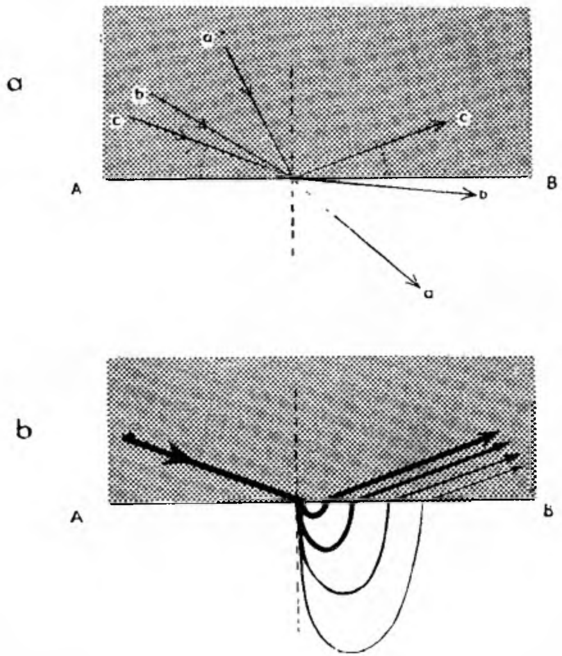
* A protaktínium felezési ideje csak 12 000 év, de az aktínium-sor előfutárjának, amelyből a protaktínium egy α- és egy β- bomlás által származik, élettartama 1/2 milliárd év. Nincs olyan neve, amely az aktínium-sor származási táblájára utalna, de mivel az urán izotópja, egyszerűen $U-235$-nek nevezik. A $_{92}U^{235}$ egy α-rész kibocsátásával $_{90}U^{231}$-re változik, amelyből viszont β-bomlás útján $_{91}Pa^{231}$ lesz. Az $U-235$, amely az urán-sor nevét viseli, de valóságban az aktíniumsorhoz (a $4n+3$ típushoz) tartozik, azonos a híres „hasadó" uránnal, amely az atombombák és atomreaktorok megalkotását lehetővé tette.

erősen megtartják. A kétfajta erőnek megfelelő potenciálgörbét a 111. ábra mutatja. A görbe egy gáthoz hasonlít, amelynek belső fala meredek, kívülről pedig enyhén lejt lefelé. Hogy a beérkező alfa-részecskék a magba kerülhessenek, ahhoz a gát tetejére kell kúszniuk, és azután belehullaniuk a mag belsejébe.



111. ábra.
Az uránmag körüli potenciálhegy Rutherford-szórási kísérletek alapján

Hasonlóképpen a magot elhagyó minden részecskének fel kell kúsznia a gát belső falára, és azután gurulnia a külső lejtőn. Rutherford az alfa-részecskéknek az uránon végbemenő szóródását tanulmányozva, azt találta, hogy az uránmagot körülvevő gát magassága legalább $14 \cdot 10^{-6}$ erg, mivel a RaC'-ből kibocsátott, ekkora energiájú alfa-részecskék semmi jelét nem mutatják annak, hogy a gát tetejét elérnék. Másrészt, az urán által kibocsátott alfa-részecskék energiája csupán $8 \cdot 10^{-6}$ erg. Hogy tudtak a magból távozó, ilyen csekély energiájú részecskék a többszörös olyan magas gáton átjutni? A klasszikus mechanika szerint ez természetesen lehetetlen. Ha az asztalon fagátat építünk, és olyan golyót gördítünk felé, amelynek energiája csak a fele a gát tetejének eléréséhez szükséges energiának, akkor a golyó mindig a lejtő közepéig ér fel, és azután visszagurul. A hullámmechanika azonban más következtetésre jutott. Ennek megértéséhez gondoljunk a de Broglie-hullámok és a fényhullámok közti analógiára. A geometriai optikából ismeretes a „teljes visszaverődés” fogalma. Ha üvegen áthatoló fénysugár (112b. ábra) aránylag kis beesési szöggel esik az üveget és a levegőt



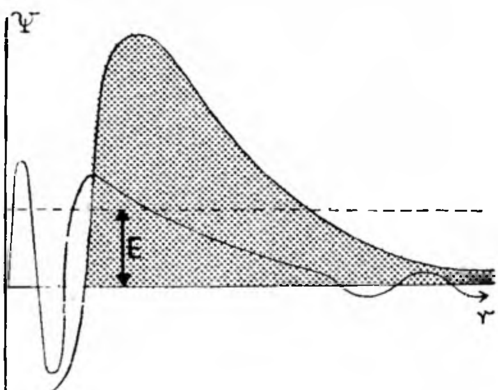
112. ábra.
A fény totálreflexiója a geometriai optika (*a*) és a hullámoptika szerint (*b*)

elválasztó AB felületre, akkor a levegőbe lépésekor megtörik, és új iránya közelebb lesz az AB határfelülethez. Ha azonban a beesési szög nagyobb egy meghatározott kritikus értéknél, akkor nem megy át fény a levegőbe, a sugár a határfelületről teljes egészében visszaverődik.

Ha ezt a jelenséget a fény hullámtermészetének szempontjából vizsgáljuk, akkor más következtetésre jutunk. Kiderül, hogy a fény egy része az AB határfelületen át *bejut* a levegőbe, de nem jut messzire, egy vékony, csupán néhány hullámhossz vastagságú levegőréteg visszaveri. A 112b. ábra, amelyben a vonalak nem a fényhullámokat, hanem az áramló energiákat jelentik, megmutatja, mi történik. Ha egy másik üvegdarabot hozunk az *AB* határfelület közelébe, akkor néhány, a levegőn áthatoló áramvonal belép a második üvegdarabba. Ezt a jelenséget kísérletileg is megfigyelhetjük, ha a határfelületek közötti távolság csak néhány fényhullámhossznyi (néhány mikron).

Mint ahogyan a hullámoptika megenged olyan behatolást, amelyet a geometriai optika teljességgel tilt, ugyanúgy teszi lehetővé a hullámmechanika az anyagrészecskék számára olyan tettek véghezvitelét, amelyek lehetetlenek volnának, ha a klasszikus mechanika teljességgel helyes volna.

A mag belsejében levő alfa-részecskék állandóan igen gyors mozgásban vannak. Folyton nekiütköznek az őket körülvevő potenciálfalnak. A részecskék mozgását kísérő de Broglie-hullám lassan átszivárog a gát falán, lehetővé téve, hogy az alfa-részecskék akkor is áthatoljanak, ha nem érhetik el a tetőt (113. ábra).



113. ábra.
Alfa-részecske hullámmechanikai áthatolása az atommag potenciálhegyein

A mag potenciálgátján való áthatolás lehetősége rendkívül csekély. Például az uránmagnál 10^{38} kísérletből csak egy lesz eredményes. Mivel az alfa-részecske a csupán 10^{-12} cm-es távon 10^9

cm/sec sebességgel halad át, a részecske másodpercenként 10^{21}-szer ütközik a gát belső falába, és így $10^{38}/10^{21} = 10^{17}$ másodpercbe, tehát több milliárd évbe telik, amíg sikerül átjutnia a gáton. A RaC' magjánál a gáton való áthatolás lehetősége nagyobb, és itt már minden 10^{17} kísérletből egy eredményes lesz. Az ennek megfelelő élettartam $10^{17}/10^{21} = 10^{-4}$ sec, ami egyezik a megfigyeléssel. A különböző radioaktív elemek felezési idejének az elmélet alapján számított értéke tökéletesen egyezik a megfigyelt adatokkal.

Magától értetődő, hogy az ilyesfajta hullámmechanikai jelenségeknek csak az atomok és atommagok világában van jelentősége. A leírt kísérletnél, amelyben a lejtőn felfelé gördülő golyó sebessége nem elég ahhoz, hogy a tetőre jusson, még mindig megvan a lehetősége annak, hogy a potenciálgáton áthatoljon, úgy mint ahogy egy régimódi kísértet átmegy a vár falán. A számítás szerint ez az esély mintegy $10^{-10^{27}}$, olyan szám, amelynél a tizedespont után 10^{27} nulla után következik egy egyes. Ha megkíséreljük ezt a számot leírni, az első nullától különböző számjegy valahol az 5 méteres teleszkóppal látható legtávolabbi galaxisok közelében lesz. Ezért nem érdemes a golyót a lejtőn felfelé gördíteni!

AZ ATOMMAG SZERKEZETE ÉS A NEUTRON

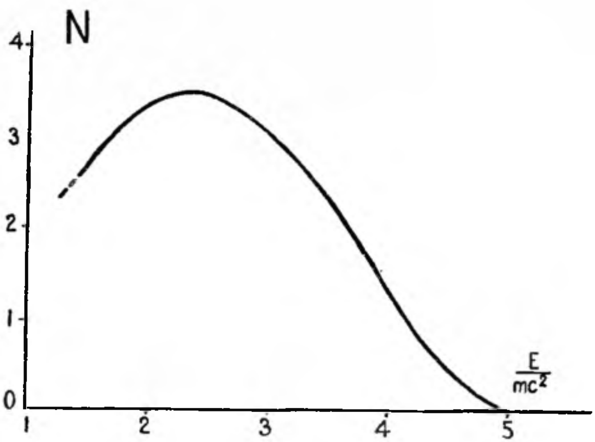
A radioaktivitás jelenségének oly módon való magyarázata, hogy az az atommag spontán bomlása, nem hagyott kétséget afelől, hogy az atommagok sok részecskéből álló összetett mechanikai rendszerek. Hogy az elemek izotópjainak atomsúlyai az egész számokhoz igen közel állnak, ez azt mutatja, hogy a magok egyik alkatrésze a proton. A protonok azonban magukban nem voltak elegendők. A 12-es atomsúlyú szén magjának 12 protont kellene tartalmaznia. Mivel azonban a szénmag töltése csak 6, ezért 6 negatív töltésnek is kellene az atommagban lenni. Feltételezték, hogy ezt a 6 negatív töltést 6 elektron szolgáltatja, amely a 12 protonnal együtt alkotja a szén magját. Elektronok jelenlétének feltételezése az atommagban azonban igen komoly nehézségekkel jár a kvantumelmélet szempontjából, ugyanis az elektron kvantumállapotainak az energiája gyorsan nő ama térfogat méreteinek csökkenésével, amelybe az elektron be van zárva. Ezért azt lehetne várni, hogy az atommagon belül mozgó elektronok energiája több milliárd eletkronvolt. Ez közvetlen következménye a kvantumelméletnek, de igen különösnek látszott. Ilyen nagyságrendű energiák ugyan megfigyelhetők a kozmikus sugaraknál, magfizikai jelenségeknél fellépő energia viszont csak néhány millió (és nem milliárd!) elektronvolt. Mikor Niels Bohr Ernest Rutherforddal erről a problémáról beszélt, arra a következtetésre jutottak, hogy az egyetlen megoldás *töltés nélküli protonok* létezésének a feltételezése, amelyeket ideiglenesen „neutronnak" neveztek el. Ha ezt feltételezzük, akkor nem kell elektronoknak lenniük az atommagon belül. A szénmag szerkezete például a következő: ${}_6C^{12} = 6$ proton $+ 6$ neutron.

A huszas évek közepén a Cavendish Laboratórium programjába vette, hogy ezeket a feltételezett neutronokat kilökik néhány könnyű elem magjából, és így közvetlenül bebizonyítják a neutronok létezését. Az eredmény azonban negatív volt, a munkát félbehagyták és a neutronok felfedezése néhány évvel váratott magára. 1932-ben Rutherford egyik tanítványa, J. *Chadwick* azt a titokzatos és erősen áthatoló sugárzást tanulmányozta, amelyet először W. *Bothe* figyelt meg berillium alfa-bombázásánál. Chadwick kimutatta, hogy ez a sugárzás semleges részecskékből áll, amelyek tömege jó közelítéssel megegyezik a proton tömegével. Ily módon született meg végül a neutron a Cavendish Laboratórium falai között, több előző sikertelen kísérlet után.

A BÉTA-BOMLÁS ÉS A NEUTRINO

Az alfa-részecskék kibocsátása valóságos magbomlás, amely kisebb súlyú atommagot eredményez. A béta-sugarak kibocsátása viszont nem más, mint az atommagnak elektromos átrendeződése egy vagy több alfa-részecske kibocsátása után. Az előző szakaszban láttuk, hogy az atommagok protonokból és neutronokból állnak. A nehezebb elemekben a neutronok száma felülmúlja a protonok számát. Így például a ${}_{88}Ra^{226}$-ban a neutronok száma $226-88=138$, a protonoké pedig csak 88, az arány tehát $\frac{138}{88}=1{,}568$. A rádium alfa-bomlása során keletkező ${}_{88}Rn^{222}$ magjának viszont 136 neutronja és 86 protonja van, arányuk $\frac{136}{86}=$ 1,581. Tehát, az alfa-bomláskor növekszik a neutron-proton arány. Több alfa-lépés után az arány már nagyobb lehet annál, ami a kétfajta részecske békés együttélésének megfelelne. Ebben az esetben egy neutron protonná alakul, egy negatív elektron, vagyis egy béta-részecske kibocsátásával. A 287. oldalon levő táblázatból kitűnik, hogy a béta-bomlások mindig párosával történnek. Ez azért van így, mert a magban levő neutronok és protonok ugyanúgy a Pauli-elvnek vannak alávetve, mint az atom elektronjai. Így minden kvantált energia-szinten legfeljebb kettő (ellenkező spinű) lehet belőlük. Ha egy energia-nívó instabilissá lesz, akkor két részecskében megy végbe béta-átalakulás egymás után.

1914-ben James Chadwick fiatal angol fizikus Berlinben dolgozott Fritz *Geiger* német fizikus (a Geiger-számláló feltalálója) vezetése alatt. Feladata a különböző radioaktív anyagok által kibocsátott béta-sugarak spektrumának a tanulmányozása volt. Ez igen lényegesen különbözik az alfa- és gamma-sugaraktól, mert mozgási energiájuk folytonos eloszlású, a nulla közelétől igen nagy értékig terjed (114. ábra). Amikor Chadwick bevégezte



114. ábra.

In^{114}- béta-spektruma. Az elektronok számának (N) és mc^2 egységekben mért energiájának (E) összefüggése

munkáját, és a beszámolót közlésre elküldte, még abban az évben kitört az első világháború, és őt mint ellenséges idegent, elfogták és fogolytáborba vitték. Az első év a táborban unalmas volt, mert a fiatal és tehetséges fizikus utazóügynök, kereskedő és más hasonló fogolytársai közt nem nagyon találhatott barátokat. Később az egyik nagy franciaországi ütközet után új fogoly jelent meg a táborban, C. D. *Ellis*, Őfelsége Skót Ezredének egyik kitűnő tisztje, akit a csatatéren ejtettek foglyul. A két brit összebarátkozott és Chadwick időtöltés céljából elkezdte tanítani Ellist a magfizikára. A háború után mindketten visszatértek Angliába, és Ellis a cambridge-i egyetemre ment tanulni, ahol Chadwick adott elő. Néhány évvel később Ellis tanulmányt tett közzé, amelyben Chadwick munkáját lényegesen kiterjesztette.

A béta-sugarak folytonos energiaspektrumának egyik lehetséges magyarázata az volt, hogy nagy energiaveszteséget szenvednek a béta-részecskék, amikor eltávoznak a radioaktív anyagból, amelyben keletkeztek. Ellis igen elmés kísérletet gondolt ki, amelyben a radioaktív anyag által kibocsátott béta-sugarakat egy ólomdarab nyeli el, és a keletkező hőt gondosan mérik. E kísérlet eredménye az volt, hogy az egy részecskére jutó felszabaduló energia pontosan egyenlő a folytonos spektrum elektronjainak átlagos energiájával, bizonyítva, hogy nem történt az anyagban energiaveszteség. A fizikusok így paradox helyzettel álltak szemben. A radioaktív alfa-bomlás során kibocsátott részecskéknek mindig élesen meghatározott energiájuk van: az anya-mag és a leány-mag belső energiájának különbsége. A bétarészecskék energiája viszont tág határok között lehet. Mi okozhatja az energiakülönbséget amikor valamilyen radioaktív anyag egyik magja gyors béta-részecskét, a másik pedig lassút bocsát ki? Niels Bohr, akit nagyon izgatott ez a paradoxhelyzet, odáig is elment, hogy feltételezze, hogy az energia megmaradásának törvénye nem érvényes a radioaktív béta-bomlásnál. A lassú béta-részecske kibocsátásakor az energia egy része eltűnik a levegőben, az igen gyors béta-részecske kibocsátásakor viszont energia keletkezik a semmiből. E hipotézis szerint az energia megmaradásának törvénye az elemi nukleáris folyamatokban csak *átlagban* érvényes. Ez persze még nem tenné lehetővé, hogy a radioaktív bomlási folyamatok segítségével elsőfajú perpetuum mobilét (lásd a IV. fejezetet) szerkeszthessünk.

Wolfgang Pauli, aki felfogásában konzervatívabb volt, más megoldást javasolt. Olyat, amely a bomlási folyamatok energiamérlegét nem borítja fel. Lehetségesnek tartotta, hogy a béta-részecske kibocsátását mindig egy másik „titokzatos részecske” kibocsátása kíséri, ami megszökik a megfigyelés elől. Ez a részecske állítja helyre az energiaegyenleget. Ha feltételezzük, hogy ezeknek a nukleáris „bagdadi tolvajoknak" nincs elektromos töltésük, tömegük pedig olyan kicsiny, mint az elektroné vagy még kisebb, akkor valóban könnyen elillanhat a fizikusok által eddig felállított leggondosabb úttorlaszokon át is, a nekik jutott energiával együtt. Pauli ezeknek a hipotetikus „tolvajoknak" a „neutron" nevet adta. (Ez még annak előtte történt, hogy Chadwick 1932-ben felfedezte azt a részecskét, amit ma neutronnak nevezünk.) Ezek az elgondolások azonban csak társalgásban és magánlevelezésben szerepeltek, és így a név nem nyerte el a „copyright" (szerzői jogvédelem alatt) jelzést tudományos folyóiratban való megjelenés által. Miután Chadwick felfedezte a neutronokat, Enrico Fermi (99. ábra), aki akkor a római egyetem professzora volt, ismertette Chadwick cikkét a fizikai szemináriumon. Az egyik hallgató megkérdezte, hogy Chadwick neutronjai azonosak-e a Pauli-félékkel. Fermi erre így válaszolt: *No, le neutroni di Chadwick sono grande. Le neutroni di Pauli erano piccole; egli devono star chiamato neutrini.*" (olaszban a „neutríno" a „neutron" kicsinyített alakja.)*

E könyvben több kis történet is van nagy fizikusokról. Fermi egyike volt korunk legnagyobb fizikusainak, azért itt közlünk róla is egy történetet, saját elbeszélése nyomán. A fizika területén elért első felfedezései után az Olasz Tudományos Akadémia tagjává választották és Mussolini az *Eccellenza* címet adta neki. Egy alkalommal kis Fiat kocsiján ment az Akadémia ülésére. Ott Mussolini tartotta a megnyitó beszédet, és ezért az udvarra vezető főbejáratot két *carabinieri* őrizte. Megállították Fermi kocsiját és megkérdezték, kicsoda. „Nem hiszik el, ha azt mondom, hogy kegyelmes úr vagyok", gondolta Fermi, „mert a kegyelmes urak sokkal méltóságteljesebbek és nagy kocsiban járnak, amelyet sofőr vezet. Rámosolygott a carabinierikre és azt mondta, hogy *Excellenza* Fermi sofőrje. Ez hatott, megengedték, hogy behajtson és várjon, amíg a gazdája kijön az ülésről.

Most visszatérünk a neutrínókhoz. Elmondhatjuk, hogy ez a részecske valóban igen csalóka. A rá vadászó atomfizikusok hosszú ideig csak az általa okozott károkat látták, de nem tudták megfogni. Csak 1955-ben sikerült Fred *Reines*-nek és Cloyd *Cowan*-nak a Los Alamos-i laboratóriumban a neutrínót elcsípni.

* „Nem, Chadwick neutronjai nagyok. Pauli neutronjai kicsinyek, őket kellene neutrínónak nevezni."

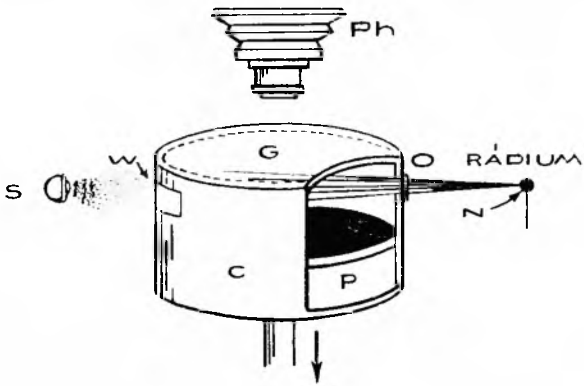
A legerősebb neutrínó-forrás az atommáglya. Ezekben a láncreakciókban képződő hasadási termékek béta-bomlásának eredményeként légiónyi neutrínó keletkezik. Még a legáthatolóképesebb gamma-sugarakat és a leggyorsabb neutronokat is hatásosan megállítja a máglyát körülvevő vastag betonárnyékolás. A neutrínók viszont olyan könnyedén repülnek át a betonon, mint egy szúnyograj a tyúkketrecen. Reines és Cowan a neutrínók észlelésére az árnyékoló betonfal külső oldalánál hidrogénnel töltött és sok különféle részecskeszámlálóval körülvett nagy tartályt helyezett el. Azt várták, hogy a gyors neutrínók protonba ütközve azt neutronná változtatják, és egy pozitív elektront taszítanak ki: $p+\nu\rightarrow n+e^+$. A folyamat elméletileg számított valószínűsége azonban rendkívül csekély volt. Hogy mégis regisztrálni tudják, összekapcsolt neutron- és pozitronszámlálókat használtak, amelyek csak akkor adtak jelt, ha egyidejűleg találta el őket egy neutron, illetve egy pozitron. Mivel két találat véletlen egybeesésének valószínűsége rendkívül kicsi volt, a két számláló egyidejű eltalálása csak a fent leírt reakció következménye lehetett. Amikor a teljes intenzitással működő máglya mellett végezték a kísérletet, néhány jelet kaptak percenként. A jelek rögtön megszűntek, ha a máglyát kikapcsolták. Megfigyeléseik alapján megállapították, hogy a neutrínó protonná alakulásának hatáskeresztmetszete csupán 10^{-43} cm^2. Ez azt jelenti, hogy a neutrínónyaláb intenzitásának a felére csökkentéséhez többszáz fényév vastagságú vízrétegre volna szükség.

A neutron$\rightarrow$ proton átalakulásának, amelynél egy elektron és egy neutrínó emittálódik, Fermi-féle elmélete kitűnően egyezik a béta-bomlásra vonatkozó összes kísérleti eredményekkel. Egyúttal valamennyi, az elemi részecskék között végbemenő különböző átalakulási folyamatokra később megalkotott bomlási elmélet számára mintául szolgált.

AZ ELSŐ RÉSZECSKEGYORSÍTÓK

Mióta Rutherford felismerte, hogy a radioaktivitás egyik kémiai elemnek a másikká való spontán átalakulása, állandóan arra törekedett, hogy valamelyik stabil elem atommagját „feltörje”, és más elemmé alakítsa át. ily módon megvalósítva az alkimisták régi álmát. Mikor 1914-ben kitört az első világháború, a brit admiralitás felkérte Rutherfordot, mint a Cavendish Laboratórium új igazgatóját, hogy intézetét hadi kutatóintézetté alakítsa át, amelyben a német tengeralattjárók elhárításának módszereit fejlesztenék ki. Rutherford tiltakozott, arra hivatkozva, hogy sokkal fontosabb dolga van: az atommag feltörése. Az igaz, hogy Rutherfordnak ez a munkája készítette elő az utat a leghatalmasabb és legborzalmasabb fegyver, az atom- és hidrogénbomba kifejlesztéséhez, de Rutherford ezt a fejlődést nem látta előre. Röviddel 1937-ben bekövetkezett halála előtt heves vitát folytatott *Szilárd* Leó magyar fizikussal arról, hogy fel lehet-e szabadítani az atommag energiáját nagy méretekben. Rutherford ragaszkodott ahhoz a véleményéhez, hogy ez soha nem következhetik be. Szilárd álláspontja bizonyítására a Szabadalmi Hivatalba ment, és szabadalmat kapott a nagy méretekben létrehozott magreakciókra. Három évvel később felfedezték az uránmag hasadását, újabb hat év eltelte után pedig felrobbant az első A-bomba Hirosima felett, és befejeződött a második világháború. Rutherford az égi felhőkön ülve és az égi hárfák zenéjét hallgatva nyilván figyelhette ezt a fejlődést és valószínű, hogy az öreg ember ilyesmit gondolt: „Nohát! Ezek a . . . fickók most az én találmányomat arra használják fel, hogy egymást öljék!"

Visszatérve az 1919-es évhez, nézzük, mit tett Rutherford az atommagokkal. Mivel az atommagot körülvevő a Coulomb-taszításból kialakuló gát annál magasabb, mennél tovább haladunk az elemek Mengyelejev-féle periódusos rendszerében, a legtöbb esélyt a könnyebb magok bombázása nyújtja. Másrészt a gyorsan bomló radioaktív elemekből származó nagyenergiájú alfa-részecskék alkalmasabbak, mint a lassú részecskék. Ezért Rutherford azt határozta, hogy első kísérleteinél RaC'-ből származó alfa-részecskéket lő nitrogéngáz atommagjaira. Nagy megelégedésére, a nitrogénmagokon szóródott sok alfa-részecskén kívül néhány másfajta, gyorsmozgású részecskét talált, amelyek protonnak bizonyultak. Rutherford első megfigyeléseit a szcintillációs módszerrel végezte. De nemsokára lényegesen megkönnyítette a magátalakulások, magreakciók tanulmányozásait egy ragyogó találmánynak, C. T. R. *Wilson* ködkamrájának az alkalmazása. Ezt már egy előző fejezetben J. J. Thomson kísérleteivel kapcsolatban említettük. A ködkamra működése azon alapszik, hogy ha elektromosan töltött részecske halad gyorsan a levegőben (vagy bármely más gázban), ionokat hoz létre pályája mentén. Ha a levegő vízgőzzel van telítve, akkor az így keletkező ionok kicsiny vízcseppek lecsapódásának központjai lesznek, és a részecskék pályája mentén hosszú, vékony ködnyomot látunk. A ködkamra vázlatos rajzát mutatja a 115. ábra. A *C* fémhengert a *G* átlátszó



115. ábra.
A Wilson-féle ködkamra vázlata

üveg tető fedi, benne van a *P* dugattyú, amelynek felső lapja feketére van festve. A dugattyú és az üvegtető közötti levegő kezdetben csaknem telítve van vízgőzzel. Az *S* fényforrás erősen megvilágítja a *W* oldalablakon át. Az *N* tű végén egy kevés radioaktív anyag van az *O* nyílás közelében elhelyezve.

A radioaktív atomok által kilövellt részecskék a kamrán keresztülszáguldva útjuk mentén ionizálják a levegőt. Mivel azonban a levegő nincs teljesen telítve vízgőzzel, nem történik lecsapódás, és így az elhaló részecskék által létrehozott pozitív és negatív ionok gyorsan újra semleges molekulákká egyesülnek. Tegyük fel azonban, hogy a dugattyút hirtelen lefelé rántjuk egy bizonyos távolságra. A dugattyú és az üvegtető közötti levegő kiterjedése csökkenti a levegő hőmérsékletét, és ezért a vízgőz lecsapódik ugyanúgy, mint ahogy a légkörben a nedves levegő felfelé áramlásának következtében a felhők képződnek. Mivel azonban a vízgőz lecsapódását jelentékenyen elősegítik a kiterjedés pillanatában a kamrán áthatoló töltött részecskék által létrehozott ionok, a részecske-pályák mentén megindul a ködképződés. Vékony, hosszú ködcsíkok rajzolódnak ki a fekete háttér előtt a megvilágító fénysugárban. Ezt a képet közvetlenül is láthatjuk, ha keresztülnézünk az üvegtetőn, de a *Ph* fényképezőgéppel le is fényképezhetjük.

Az V. tábla felső részén az első felvételt láthatjuk, amelyet mesterségesen létrehozott magreakciókról készítettek. 1925-ben vette fel Rutherford tanítványa, P. M. S. Blackett. Sok nyomot láthatunk a képen, amelyek a kép szélén túl elhelyezett radioaktív anyagból indulnak ki. Az anyag RaC és RaC' keveréke, az utóbbi a RaC-ból képződött alfa-bomlás révén. Az RaC-ből származó alfa-részecskék aránylag lassan mozognak, a levegő a felvétel közepe táján megállítja őket. Az RaC' alfa-részecskéi a leggyorsabbak közé tartoznak azok között, amelyeket radioaktív elemek kibocsátanak. Így vastag levegőrétegen is áthatolnak. Nyomuk a kép jobb szélénél végződik. A kép jobb felén elágazást látunk. Ez a nitrogénmagba ütköző alfa-rész hatására bekövetkező magreakciót mutatja. A balra felfelé haladó vékony hosszú nyom a magból kilökött protoné, a jobbra tartó vastag nyom gyorsan mozgó oxigénmag nyomának bizonyult. Az itt végbemenő „alkímiai" átalakulást a következő képlettel fejezhetjük ki: ${}_7N^{14} + {}_2He^4 \rightarrow {}_8O^{17} + {}_1H^1$. Itt megállapodás szerint az alsó index a rendszámot jelenti, a felső pedig az atomsúlyt. Az ${}_8O^{17}$ atom a rendes ${}_8O^{16}$ oxigén nehezebb izotópja és kisebb mennyiségben az atmoszférában is jelen van. Ha a reakcióban keletkező ${}_1H^1$ és ${}_8O^{17}$ energiáját megmérjük nyomuk hossza alapján, akkor azt találjuk, hogy az 1,26 MeV-tal kisebb az alfa-részecske kezdeti energiájánál. A fenti reakció-egyenlet két oldalán levő részecskék tömegének összege:

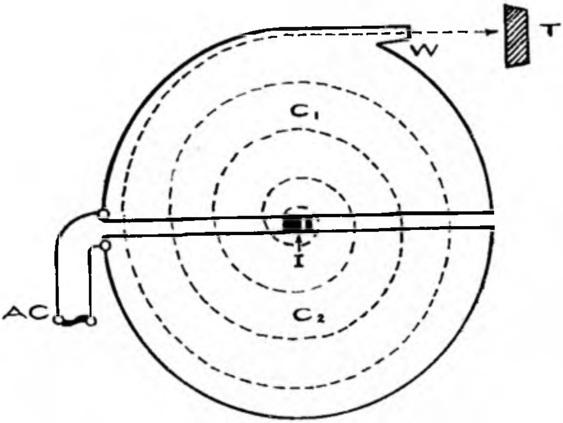
$He^4 =$	4,003 88	$H^1 =$	1,008 13
$N^{14} =$	14,007 55	$O^{17} =$	17,004 53
	18,011 43		18,012 66

Az energiamérleg tehát ebben az esetben negatív: $-0\,001\,25$ egység, ami $-1{,}16$ MeV-tal egyenértékű. Ez az érték a kísérleti bizonytalanságon belül egyezik a reakció energiaveszteségére fentebb megadott értékkel. Ilyen mérések szolgáltatták az energia és a tömeg egyenértékűsége Einstein-féle törvényének első közvetlen kísérleti bizonyítékát. Ebben a reakcióban tehát nem felszabadul, hanem elvész atomenergia. Más esetekben azonban, így például ha alumíniumot bombázunk alfa-részecskékkel, tekintélyes mennyiségű atomenergiát nyerünk.

Az alfa-részecske az egyetlen nehéz lövedék, amit a természetes radioaktív elemek kibocsátanak. Ezért kezdetben a mesterséges magreakciók vizsgálata a fenti típusú reakciókra korlátozódott. 1929-ben e sorok írója, aki Lord Rutherfordnál dolgozott Cambridge-ben, potenciálgát-elmélete alapján kiszámította, hogy a protonok sokkal jobb lövedékek lennének egyrészt kisebb töltésük, másrészt kisebb tömegük miatt. A számítások azt mutatták, hogy csupán egy millió volt elektromos ponetciállal felgyorsított és így a RaC'-ből származó alfa-részecskéknél többszörösen kisebb energiával mozgó protonok a könnyű elemeken észlelhető mértékben hoznak létre raekciót. Rutherford megbízta két tanítványát, J. *Cockroft*ot (most Sir John) és E. T. S. *Walton*t, hogy szerkesszenek olyan nagyfeszültséggel működő berendezést, amely ilyen energiájú protonnyalábot hoz létre. Az első „atomrombolót", részecskegyorsítót 1931-ben helyezték üzembe. Cockroft és Walton a protonnyalábot lítiumra irányította. Kimutatták, hogy minden eredményes ütközésnél két újonnan keletkező alfa- részecske indul ki ellenkező irányban az ütközési pontból. Nyílvánvalóan a következő reakció ment végbe: ${}_3Li^7 + {}_1H^1 \rightarrow 2\ {}_2He^4$. Ha lítium helyett bórt vettek, akkor hármas elágazást figyelhettek meg (V. tábla lent). Ez azt mutatta, hogy ha bórmagba proton ütközik, akkor a mag három egyenlő részre törik: ${}_5B^{11} + {}_1H^0 \rightarrow 3{}_2He^4$.

Cockroft és Walton úttörő munkája nyomán egyre nagyobb részecskegyorsítók épültek. Ezek különféle ötletes elképzeléseken alapultak. Az egyik fajtát feltalálója után Van de Graaff-gyorsítónak nevezik. Ez egyszerű elektrosztatikai elven alapszik, azon, hogy ha üres félgömb belsejébe nyílásán keresztül elektromos töltést viszünk, akkor az a gömb felszínén oszlik szét. A bevitt elektronok, kölcsönös taszításuk következtében olyan távol mennek egymástól, amennyire csak lehetséges. A Van de Graaff-generátor nagy szigetelőkön álló fémgömbökből és egy szigetelő anyagból készült szalagból áll, amely külső oldalán állandóan töltést kap, és a gömbbe való belépése után leszedik róla a töltést. Annak ellenére, hogy a Van de Graaff-generátor feszültsége néhány millió volt is lehet, jól kezelhető készülékké fejlesztették ki, amely igen alkalmas többféle laboratóriumi munkára.

Ernest Orlando *Lawrence*, akiről később a Kaliforniai Egyetem Sugárzási Laboratóriumát elnevezték, még ötletesebb részecskegyorsítót fejlesztett ki. Készüléke, a ciklotron, egészen más elven alapul. Töltött részecskéket többszörösen gyorsít, miközben mágneses térben körben futnak. A ciklotron működési elvét mutatja a 116. ábra. A készülék lényegében egy erős elektromágnes két pólusa közé helyezett kör alakú fémkamra. Ez a C_1 és C_2 egyenlő részekre van osztva. A C_1 és C_2 félkamrák az AC váltakozó nagyfeszültséget adó generátorhoz



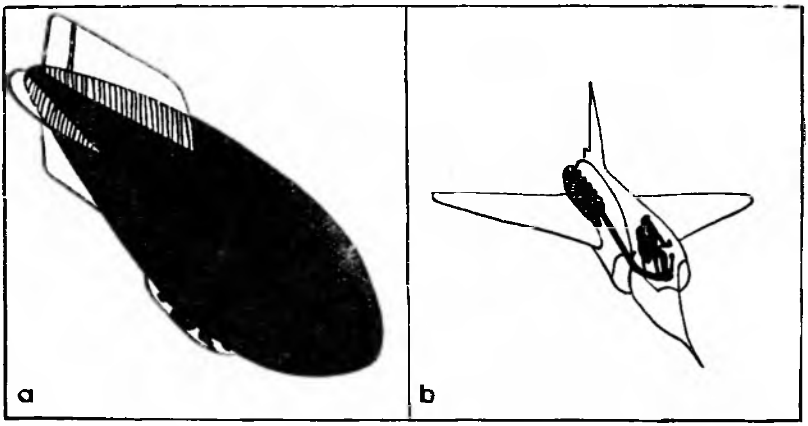
116. ábra.
A ciklotron elve

vannak kötve, így az őket elválasztó részben az elektromos tér periódikusan változtatja irányát. Az atomi lövedékként felhasználandó elem ionjai a középen levő I ionforrásból indulnak el, aránylag kis sebességgel. Pályájukat a mágneses tér kis körökké hajlítja. A ciklotron működése azon alapul, hogy adott mágneses térben a töltött részecskék körmozgásának periódusa független a részecske mozgási sebességétől. Mivel a pálya sugarának és a körpálya hosszának növekedése pontosan arányos a sebesség növekedésével, az egy keringéshez szükséges idő változatlan.

Ha olyan az elrendezés, hogy a mágnes terébe belőtt ionok keringési periódusa egyenlő az AC-generátor váltakozó feszültségének periódusával, akkor a C_1 és C_2 félkamrák közti részhez érkező részecskékre mindig mozgásuk irányában hat az elektromos erő. Ezért valahányszor az ion itt átlép, tovább gyorsul, és a sebessége fokozatosan növekszik. Az ionok, ahogy nő a sebességük, legombolyodó spirális pályán mozognak, míg végül a W ablakon át a T cél irányában elhagyják a kamrát.

A VI. táblán látható felső felvétel a Colorado Egyetem ciklotronját mutatja építés közben. Protonok mintegy 30 MeV energiára való gyorsítására tervezték. A nagy elektromágnes felső részét láthatjuk a képen. A californiai egyetem Bevatronja (a VI. tábla alsó része) és Long Island-i Cosmotron az eredeti ciklotron-elv továbbfejlesztésével épültek.

A fizikusok gyors lövedékek bombázásával különböző anyagokon létrehozott magreakciók leírásakor mindig ,,hatáskeresztmetszetről" beszélnek. E fogalom megértése céljából figyeljünk meg egy légelhárító üteget, amely közeledő ellenséges légijárművet igyekszik lelőni. Ha az ellenség annyira oktalan, hogy egy kis felderítő léghajót küld ki (117a. ábra), akkor minden



117. ábra.
Egy léghajó (*a*) és egy repülőgép (*b*) „halálos keresztmetszete" (fekete terület)

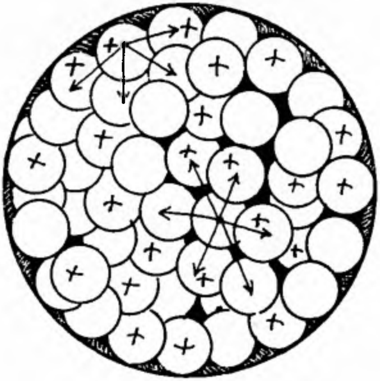
találat, amely a testét éri, végzetes lesz. A ,,hatáskeresztmetszet" egyenlő a jármű geometriai keresztmetszetével. Ha azonban repülőgépet küld (117b. ábra), akkor a gránátszilánkok a gép sok részén átmehetnek ,,halálos" eredmény nélkül. Csak egy néhány olyan rész van, a motor vagy a pilóta teste és a kormány valamelyik fontos része, amit ha eltalálnak, a gép lezuhan. Ezeknek a részeknek az együttes felénk mutatott felületét nevezzük „hatáskeresztmetszetnek”. Ez lényegesen kisebb lehet, mint maga a tárgy. Például Akhillész „halálos keresztmetszete” néhány négyzetcentiméter volt a bal lába sarkán.

Ha akár repülőgép, akár atommag „megölésének” valószínűségét vizsgáljuk, csak az érdekel minket, a teljes látható felület hányad része az, amelyet el kell találni, nem pedig az, hogy hol vannak ezek az érzékeny helyek. A helyzet hasonló annak a két párbajozónak a helyzetéhez, akik közül az egyik nagyon sovány, a másik nagyon kövér. A kövér azt mondja, hogy ő méltánytalan helyzetben van, mert sokkal nagyobb felületet nyújt a pisztolygolyónak, mint ellenfele. „Helyes”, mondja a sovány, „kérje meg a segédjét, hogy rajzolja a kabátjára krétával a körvonalamat, és akkor csak a vonalon belüli találatok számítanak.”

Az atommag sugarának nagyságrendje 10^{-12} cm, így geometriai keresztmetszete kb. 10^{-24} cm^2. A pontosan 10^{-24} cm^2-es keresztmetszetet „barn”-nak nevezték el. Ez a szó nagy csűrt, istállót jelent. Az elnevezés oka az, hogy ekkora hatáskeresztmetszet nagyon nagy. Ha a mag minden alkalommal felbomlik, ha találat éri, akkor kb. 1 barn a hatáskeresztmetszet. Ha azonban valamilyen okból száz találatból csak egy halálos, akkor azt mondjuk, hogy a hatáskeresztmetszet 0,01 barn, vagyis 10^{-26} cm^2. A továbbiakban az olvasó még kisebb keresztmetszetekkel s fog találkozni különböző reakciókkal kapcsolatban.

MAGSZERKEZET ÉS STABILITÁS

Az atomok elektronjai szabadon száguldanak a térben, olyan távolságban egymástól, amely több ezerszerese az átmérőjüknek. Az atommagokat alkotó protonok és neutronok viszont olyan zsúfoltan vannak elhelyezve, mint a heringek a hordóban (118 ábra). Az atom esetében elektronatmoszféráról beszélhetünk, amely a rendes gáz sok tulajdonságával rendelkezik. A mag anyagát inkább folyadék cseppjével lehet összehasonlítani, amelyben a molekulákat kohéziós erők tartják össze. A mag „csepp-modellje”, amelyet e könyv szerzője harminc évvel ezelőtt alkotott meg, a mag sok tulajdonságának megértését teszi lehetővé. Mindenekelőtt, a gázok a részecskék közötti nagy szabad tér miatt könnyen összenyomhatók, a folyadékok térfogata viszont csak kis mértékben változik, bármekkora nyomásnak vannak is alávetve. Már előzőleg láttuk, hogy amikor a periódusos rendszeren végigmegyünk, az atomok térfogata változatlan, habár egyre több elektron van az egyre kisebb átmérőjű kvantumpályára zsúfolva. Másrészt, viszont a mérések azt mutatják, hogy az atommag sugara tömegének köbgyökével növekszik, azaz térfogata a tömegével arányos, a sűrűség pedig változatlan. A magfolyadék, amelynek cseppjei alkotják az atommagokat, igen sűrű, sűrűsége a vizének 10^{14}-szerese. A vele megtöltött



118. ábra.

Protonokból és neutronokból álló atommag. Az atom belsejében levőkre nem hat erő, a felszínen levőkre befelé húzó erő hat

pohár súlya 5 milliárd tonna volna! Ugyanúgy mint bármely más folyadéknak, a magfolyadéknak is van felületi feszültsége, mert a felszínén levő nukleonokat a többi nukleon kohéziós ereje vonzza, és így a felszínt minimálisra igyekszik csökkenteni. De a magfolyadéknak nemcsak sűrűsége, hanem felületi feszültsége is összehasonlíthatatlanul nagyobb, mint a rendes folyadékoké. Ha egy U-alakú drót és egy rajta keresztbe tett egyenes drótdarab által alkotott keretre szappanbuborékhártyát teszünk, akkor a mozgó drótra ható felületi feszültség centiméterenként 70 mg súlyt képes megtartani. Ha ugyanezt tennénk a magfolyadékkal, akkor az erő 10 milliárd tonna volna. A felületi feszültség miatt az atommagok alakja nagyon közel van a gömbalakhoz, ugyanúgy mint az esőcseppéké. E parányi cseppek többféle rezgése és forgása okozza a gerjesztett magok gamma-sugárzását.

John *Wheeler* princetoni fizikus azonban kimutatta, hogy a magfolyadéknak nem kell feltétlenül gömbök alakjában léteznie, hanem elvben különféle alakokat is ölthet. Ez azzal magyarázható, hogy az összetartó magerőkön kívül a Coulomb-féle taszító erő is hat a protonok között, pozitív töltésük miatt. Wheeler egy nem publikált cikkében kimutatta, hogy e taszító erő létezése miatt a magfolyadék gyűrűalakú is lehet. Ebben az esetben a gyűrűt gömbbé összezárni igyekvő felületi feszültséget a gyűrű szembenlevő oldalai közti elektromos taszítás ellensúlyozza és az egész alakzat tökéletesen stabil. Az ilyen gyűrű-magot, amelynek lényegesen nagyobbnak kell lennie, mint az urán magja, atomsúlyának több ezernek kell lennie, felszínéhez közel mozgó elektronok veszik körül, pályájuk olyan, mint a köralakú elektromágnes tekercse.* Ilyen gyűrűalakú magok a természetben nem léteznek, és alig hihető, hogy ezeket a jövőben akár a legügyesebb magfizikusok is el tudnák készíteni. Ha azonban ez mégis lehetséges volna, mondja Wheeler, akkor fel lehetne őket használni láncszemekként hosszú láncok készítésére. Az ilyen atommag-láncokból készült fonal rendkívül erős volna, és bár pókhálószál-vékonyságú, elbírná egy csatahajó súlyát. De nagyon nehéz is lenne, egy méternyi darabja néhány ezer tonnát nyomna.

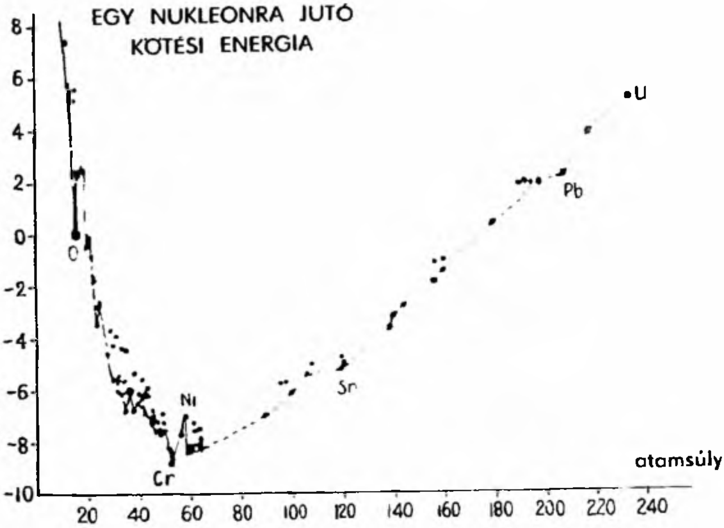
Nem látszik valószínűnek, hogy Wheeler gyűrű-magjait valaha is gyakorlati célra lehetne használni. Azonban néhány egyszerűbb magalak, amelyeket ugyanazon két erő hoz létre, megnyitotta számunkra az atomenergia korszakát. Vizsgáljuk meg az atommag felületi feszültségének és elektromos energiájának az egyensúlyát. A teljes felületi energia természetesen a felülettel arányos, és növekszik, ha a magok nagyobbak lesznek. Mivel a magfolyadék sűrűsége állandó, a térfogat a tömeggel (atomsúllyal), a sugár pedig a tömeg köbgyökével arányos. Így, a teljes felületi energia, mivel a felszínnel arányos, a tömeg köbgyökének négyzetével, vagy más szóval, a tömeg kétharmadik hatványával növekszik. A Coulomb-energia kiszámításához az az elektrosztatika egyik törvényét kell felhasználnunk, amely szerint egy töltött gömb energiája egyenesen arányos töltésének négyzetével, és fordítva arányos a sugarával. A mag elektromos töltését az atomszám adja meg, amely megközelítőleg arányos az atomsúllyal. Mivel, mint láttuk, a sugár az atomsúly köb-

*Lásd a 62. rajzot.

gyökével arányos, a Coulomb-energia közelítőleg az atomsúly $1^2/_3$ hatványával növekszik. Ez sokkal gyorsabb növekedés, mint a felületi feszültségből származó energiáé. Ebből azt következtetjük, hogy míg a könnyű magban az elektromos taszítóerők szerepe csekélyebb, a nehéz magokban igen fontos. Mivel a felületi feszültség a folyadékcseppeket igyekszik egybentartani, és két egymással érintkezésbe kerülő cseppet egyetlen nagy cseppé összeolvasztani, azt várhatjuk, hogy a könnyű elemeknél a magok összeolvadása, fúziója energiafelszabadító folyamat. A nehéz magok esetében viszont a széttaszító Coulomb-erők kerülnek túlsúlyba és a magok széthasadása az energiafelszabadító folyamat. A számítások azt mutatják, hogy a „fúziós tartomány" mintegy a periódusos rendszer harmadáig tart. A várható felszabaduló energia egyre kisebb és kisebb, amint a határhoz közeledünk. A „hasadási tartomány" ezen a ponton kezdődik. Az energiafelszabadulás kezdetben elég csekély, azonban gyorsan növekszik, és legnagyobb értékét a nehéz elemeknél éri el. Így tehát minden kémiai elem potenciálisan magenergia forrása. A kérdés csupán az, hogyan indítsuk meg és tartsuk fenn a magreakciókat.

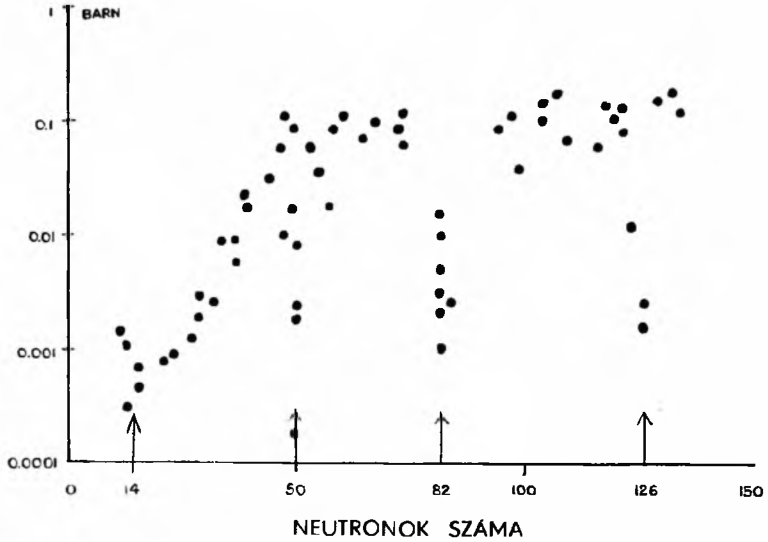
Az atommag folyadékcsepp-modellje igen jól megközelíti a valóságot. Nem szabad azonban elfelejtenünk, hogy a protonok és a neutronok a mag belsejében ugyanazoknak a kvantumtörvényeknek vannak alávetve. mint az elektronok az atomban. Emiatt némi eltérést várhatunk a fenti egyszerűsített képtől. Találtak is eltéréseket, amikor a magok tulajdonságait részletesebben tanulmányozták. A 119. ábra az egy nukleonra jutó kötési energiát mutatja a legkönnyebb magoktól kezdve a legnehezebbekig. Az első részben a kötési energia szabályosan csökken, később lassan növekszik. Az első a fúziós, a második a hasadási tartomány. Megfigyelhetjük azt is, hogy a görbe nem egészen sima, több kiugrás van rajta, amelyek a nukleonok közötti különösen erős kötésre vallanak. Ezek a helyek a magon belül lezárt nukleonhéjaknak felelnek meg, az atomok lezárt elektronhéjainak az analógjai. Az atomok esetében a lezárt elektronhéjú elemek (nemes gázok) kémiailag közömbösek, mert „teljesen" ki vannak elégítve az elektronokkal. Hasonló a helyzet a magnál is, ezt mutatja a 120. ábra. Ezen a különböző elemek atommagjainak relatív neutronbefogási valószínűségét látjuk. Ha a magban bizonyos (50, 82, 126) számú neutron van, egy újabb neutron befogásának a valószínűsége hirtelen leesik.

Ez azt mutatja, hogy ezeknek a magoknak lezárt neutronhéjuk van. Ennek és a magok tulajdonságaiban található egyéb szabálytalanságoknak a vizsgálata alapján azt következtetjük, hogy a magban erősen kötött belső héjak képződnek, ha vagy a neutro-



119. ábra.
Az egy nukleonra jutó kötési energia az atomsúly függvényében

nok, vagy a protonok száma 2, 8, 14, 20, 28, 50, 82, vagy 126. Meg kell azonban jegyezni, hogy míg az atomokban minden új elektronhéj az előző héjon kívül helyezkedik el, tehát hagymaszerű szerkezete van, addig a mag neutron- és protonhéjai kölcsönösen egymásba hatolnak, és mindegyik a mag teljes térfogatát foglalja el. A geometriai szétválaszthatóság hiánya a nukleonhéjak hatását kevésbé kifejezetté teszi és tanulmányozásukat és magyarázatukat megnehezíti. Ezt a nehézséget azonban két kutató, Maria *Goeppert-Mayer* Chicagóban és Hans *Jensen* Heidelbergben egyidejűleg és egymástól függetlenül legyőzte. A maghéjak olyan teljes rendszerét alakították ki, amely mindenben egyezik a megfigyelésekkel. Amikor eredményeik összehasonlítására találkoztak egymással, rájöttek, hogy ugyanazon év ugyanazon napján születtek, és igen jó barátok lettek.



120. ábra.
A neutronok „befogási hatáskeresztmetszete” a magban levő neutronok számának függvényében

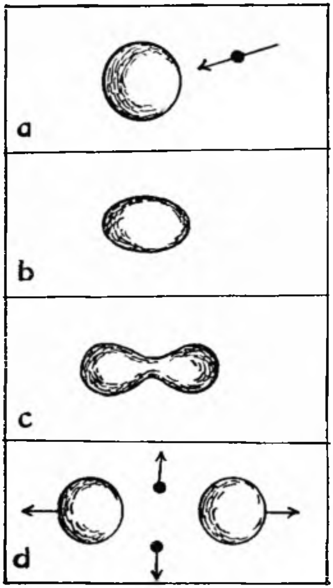
MAGHASADÁS, LÁNCREAKCIÓ

1939. január 27-én a George Washington Egyetem (ahol a szerző abban az időben tanított) és a washingtoni Carnegie Intézet Washingtonban együttesen megrendezett elméleti fizikai konferenciája ugyancsak elhúzódott. Niels Bohr, egyike a jelenlevő tekintélyeknek, ezen a napon levelet kapott Lise *Meitner* német fizikusnőtől, aki abban az időben (Hitler miatt) Stockholmban dolgozott. Közölte, hogy levelet kapott Berlinből volt kollégájától, Otto *Hahntól,* amelyben tudatja, hogy asszisztensével Fritz *Strassman*-nal uránt neutronokkal bombázva, bárium jelenlétét állapították meg. Ez az elem a periódusos rendszer közepén található. Meitner és unokaöccse, Otto *Frisch* (a második Otto ebben az ügyben!), aki vele együtt ment Stockholmba, úgy vélte, hogy ez az uránmag neutrontalálatra bekövetkező hasadásának, azaz kettéválásának az eredménye. Amint Bohr felolvasta a táviratot a konferencia résztvevőinek, eltértek a nem túl érdekes napirendtől, s azonnal heves vita indult meg, hogy vajon az uránmag hasadása lehetővé teszi-e a magenergia nagymértékű felszabadítását. Enrico *Fermi*, aki szintén részt vett a konferencián, a táblához ment és néhány, a hasadásra vonatkozó képletet írt fel. Az egyik washingtoni napilap tudósítója, aki az ülésen egészen addig boldogan szundikált, felébredt és jegyezni kezdett. Merle *Tuve*, a Carnegie Intézet egyik magfizikusa azonban gyorsan kivezette őt az ajtón, azzal, hogy a vita újságíró számára túlságosan speciális. Ez volt az első biztonsági rendszabály az „atomenergiával" kapcsolatban. Később sorozatosan sok más követte. Amit azonban a riporter meghallott, mielőtt még kivezették volna, az bekerült az újságokba. A szerzőt másnap reggel Robert *Oppenheimer* távolsági telefonhívása ébresztette fel Kaliforniából. Mindent tudni akart, ami történt. Hát így kezdődött.

1939 szeptemberben jelent meg Niels Bohr és John Wheeler cikke a maghasadás elméletéről a *Physical Review*-ben. Ez volt az első és utolsó közlemény e témára vonatkozóan a biztonsági függöny lehúzása előtt. A cikk az atommag fent megbeszélt cseppmodelljén alapult. Amikor a beeső neutron eltalál egy magot, az rezegni kezd. Rezgés közben különböző megnyúlt alakokon megy át. A felületi feszültség és az elektromos erők közötti egyensúly megváltozik, az első igyekszik a magot eredeti gömb-alakjába visszahúzni, az utóbbi igyekszik növelni a megnyúlást. Ha az ellipszoid nagy és kis tengelyének aránya túlhalad egy bizonyos határt, akkor az egyenlítő síkja mentén széthasad, a mag szépen két részre oszlik szét. (121. ábra) Hamarosan megállapították, hogy az uránmag hasadását két (pontosabban átlagban 2,5) neutron kiszabadulása követi. Ezek két mellettük álló újabb magot találhatnak el és hasíthatnak. Ebből viszont négy új neutron keletkezhet, amelyek további négy magot hasíthatnak . . . Ily módon láncreakció fejlődhet ki, amely hamarosan elnyeli az egész urándarabot, miközben hatalmas mennyiségű magenergia szabadul fel.

Nehéz arról a tárgyról írni, amit rendszerint „atomenergiá"-nak neveznek. Kezdetben, amikor a legtöbb rávonatkozó adatot súlyos biztonsági függöny rejtette el, nem sokat lehetett írni róla.

Most pedig, amikor a felvilágosítások tömegét találhatjuk könyvekben, folyóiratokban és újságokban, a tárgy már színtelenné és elcsépeltté válik. Azonkívül, annak ellenére, hogy a maghasadást igen érdekes fejezetnek (de csak egy fejezetnek) tekinthetjük a fizika történetében, az atombombák, reaktorok fejlesztése inkább a technológiához tartozik. Ezért a VII. táblán található



121. ábra.
Nehéz mag hasadása neutronütközés következtében

két szép fénykép közlésén kívül csak a legfontosabb szakaszokat fogjuk tárgyalni. A képek különösen akkor volnának szépek, ha színesen közölhetnénk őket. Az egyik atombombát, a másik pedig („úszómedence típusú") reaktort ábrázol.

Először csalódást keltett, mindjárt az említett washingtoni konferencián, hogy nem az urán fő izotópja mutatja a hasadás jelenségét, hanem az igen ritka U^{235}-ös izotóp, amely az uránban csak 0,7 %-ban fordul elő. Ezenkívül, az U^{238}-as izotóp, amely a természetes urán 99,3 %-át teszi ki, nem valami ártalmatlan alkatrész, hanem igen éhes a neutronokra. Olyan nagy mértékben fogja be őket, hogy minden láncreakciót elfojt, amely az U^{235}-ben megindul. Csak két módja volt a feladat megoldásának. Az egyik az U^{235} elválasztása a káros U^{238}-tól, a másik valamilyen módon megkísérelni a reakció lefolytatását természetes uránban, és a falánk U^{238}-at távol tartani zsákmányától.

Mindkét módszert megkísérelték. Egy igen titkos üzemben Oak Ridge-ben, Tennessee-ben kipróbálták a különböző uránizotóp szétválasztási módokat. Végül a termelést diffúziós módszerrel végezték. Ez azon a jelegségen alapul, hogy a könnyű izotópot tartalmazó uránvegyületek valamivel gyorsabban mennek át porózus hártyákon, mint a nehéz izotópokat tartalmazó vegyületek.

A reakció természetes uránban történő lefolytatásához szükséges módszereket és készülékeket legnagyobbrészt Enrico *Fermi* fejlesztette ki. Ez a lassítás elvén alapul. Azt találták ugyanis, hogy a nehéz uránizotóp főleg a viszonylag gyorsan mozgó neutronokra éhes, míg a könnyű izotóp jobban szereti a lassú neutronokat. Mivel az uránmag hasadásakor kibocsátott neutronok sebessége nagyon nagy, le kell őket lassítani az U^{235} étvágyának a szintjére olyan gyorsan, hogy az U^{238} közben el ne nyelje őket. Ezt úgy érhetjük el, hogy a természetes uránt nagymennyiségű „lassító"-val (moderátorral) keverjük, vagyis olyan elemmel, amelynek atomjai éhesek a neutronra, de a neutron mozgási energiájának egy részét ütközések révén átveszik. Kiderült, hogy a két legjobb moderátor a deutérium (nehéz hidrogénizotóp) atomja és a szénatom. A ma használatos máglyáknak is ez a két fő típusa, a szén és a nehézvíz moderátoros. Az első atommáglyában szén moderátort (grafitkockát) használtak. Ez Fermi vezetése alatt épült a chicagói egyetem stadionjának tribünje alatt. 1941. december 2-án helyezték üzembe. A moderátoros máglyákban természetesen igen lassan folyik le a láncreakció. A felszabaduló energiát nem lehet sem katonai sem békés célokra felhasználni. De van egy fogás, ami ezt lehetővé teszi. Mialatt az U^{235}-ös magokban a láncreakció zajlik, az U^{238}-as magok, amelyeket a lassító általában megfoszt a lucullusi lakomától, mégis elnyelnek néhány neutront. Hogy mi történik, ha az U^{238} mag neutront nyel el, azt a következő „alkímiai" egyenlet mutatja:

$$
\begin{aligned}
{}_{92}U^{238} + {}_{0}n^{1} &\rightarrow {}_{92}U^{239} + \gamma,\\
{}_{92}U^{239} &\rightarrow {}_{93}Np^{239} + e^{-},\\
{}_{93}Np^{239} &\rightarrow {}_{94}Pu^{239} + e^{-}.
\end{aligned}
$$

Az Np és a Pu a *neptúniumot* és *plutóniumot* jelenti, az atommáglyában keletkező két „transzurán elemet". A neptúnium csak átmeneti állapot, a plutónium azonban reális valami! Ugyanazokkal a jó tulajdonságokkal rendelkezik, mint az U^{235}, csak sokkal nagyobb mértékben. Sokkal könnyebben hasad, ha eltalálja egy neutron, és a hasadását több szekunder neutron kíséri. És ami, természetesen, a legfontosabb, a plutóniumot, amelynek kémiai tulajdonságai mások, mint az uráné, könnyebben lehet a maradék urántól elválasztani, amikor véget ért a máglyában a „főzési" folyamat.

Manapság az Egyesült Államokban is, a Szovjetunióban is évente több tonna hasadóanyagot termelnek, de hogy mennyit, azt senki sem tudja.

ATOMBOMBA ÉS REAKTOR

A láncreakcióval kapcsolatban a legfontosabb fogalom: a *kritikus méret.* Ha egy darab tiszta U^{235}-ben vagy Pu^{239}-ben egyetlen hasadás megy végbe, akkor több (uránnál átlagban 2,5, plutóniumnál átlagban 2,9) hasadási neutron repül ki. Az átlagos távolság, amelyet egy hasadási neutronnak az anyagban meg kell tennie, hogy másik magba kerüljön, kb. 10 cm. Ha a kérdéses anyag mérete kisebb ennél, akkor a hasadási neutronok legnagyobb része elhagyja az anyag felszínét, és tovább száguld, mielőtt újabb hasadást okozhatna és neutronokat hozhatna létre. Ezért nem fejlődhet ki önfenntartó láncreakció, ha az anyag mérete túl kicsi. Ha mind nagyobb anyagot választunk, azt látjuk, hogy egyre több, az anyag belsejében keletkező neutronnak van esélye újabb hasadás előidézésére, magba való ütközésre, mielőtt elhagyná az anyag felszínét. Megfelelő méretű anyagnál az anyagon belül újabb hasadást létrehozó hasadási neutronok száma elég nagy ahhoz, hogy a reakciók száma hirtelen megnőjön. Azt a hasadóanyag-méretet, amelyben a további hasadási folyamatokat előidéző neutronok száma elég nagy az önfenntartó láncreakció biztosításához, az adott anyag *kritikus* méretének nevezik. Mivel a neutronok száma hasadásonként a plutónium esetében nagyobb, mint az U^{235} esetében, ezért a plutónium kritikus mérete kisebb, mint az U^{235}-é, mert az első nagyobb neutronveszteségeket viselhet el.

Atomrobbanás létrehozása céljából a hasadóanyagból a kritikus méretnél jóval többet kell összehozni olyan rövid idő alatt, mialatt még nem fejlődik ki túl erős láncreakció. Ezt például oly módon érhetjük el, hogy kritikus méreten aluli tömeget lövünk be egy másik kritikus méreten aluli (szubkritikus) tömegbe, olyan sebességgel, hogy ne fejlődhessék ki számottevő méretű láncreakció, mielőtt a teljes tömeg együtt nincs. További ötletesebb, (de titkos) módszerek is léteznek a cél elérésére.

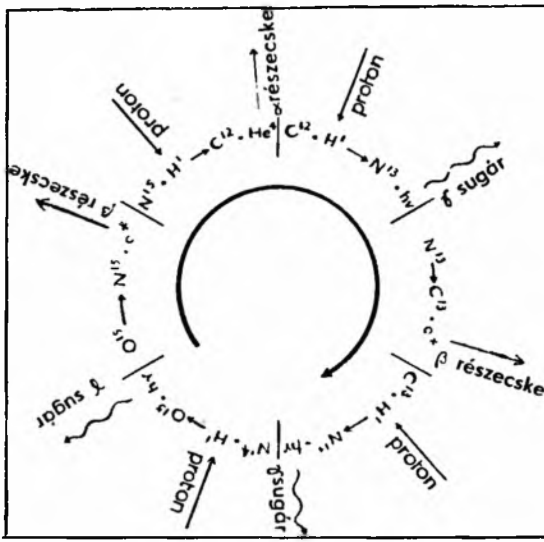
Ha energiatermelés céljára irányítható feltételek mellett akarunk láncreakciót elindítani és fenntartani, akkor egész idő alatt olyan közel kell lennünk a kritikus mérethez, amennyire csak lehetséges. Szem előtt kell tartanunk, hogy a láncreakció természeténél fogva robbanó reakció, és hogy minden arra irányuló kísérlet, hogy azt állandó ütemben folytassuk le, ahhoz hasonlítható, mintha kemencében trinitro-toluollal tüzelnénk. Mégis meg lehet ezt tenni, hogy a baleseti veszély igen csekély legyen. Neutronelnyelő anyagokat (pl. bórt) tartalmazó „szabályozó rudakat" kell használni, amelyek automatikusan beljebb-kijebb húzódnak a hasadó anyagba fúrt vékony csatornákban, mihelyt a neutrontermelés üteme a kívánt színvonal fölé emelkedik vagy az alá süllyed.

Manapság eredményesen használnak reaktorokat erőművekhez olyan országokban, ahol hiány van szénben és olajban, például Nagy-Britanniában, vagy hajók hajtására, például „atomhajtású" tengeralattjárókhoz az Egyesült Államokban vagy „atomhajtású" jégtörőkhöz a Szovjetunióban.

TERMONUKLEÁRIS REAKCIÓK

A csillagászok és a fizikusok évszázadokon keresztül nem tudtak rájönni, mi okozza, hogy a Nap (és a többi csillag) világít. Nyilvánvaló volt, hogy közönséges „égés" nem elegendő ehhez, mert ha a Nap anyaga a legjobb repülőgép-benzinből állna is, akkor sem tartana égése az egyiptomi piramisok idejétől máig. Mintegy száz évvel ezelőtt a német Hermann von *Helmholtz* és az angol Lord *Kelvin* felvetették azt a gondolatot, hogy a Nap teste lassú összehúzódásának eredményeképpen tudja fenntartani fény- és hősugárzását. A számítások azt mutatták, hogy a Nap összehúzódása igen nagy kezdeti méretből a mai méretére annyi energiát szabadítana fel, amennyi néhány száz millió éves sugárzáshoz elég. A Naprendszer korának újabb becslései azonban kimutatták, hogy még ez sem elég, mert a Nap legalábbis több milliárd év óta világít. A Nap hosszú életét csak úgy magyarázhatjuk meg, ha feltételezzük, hogy energiáját valamilyen magreakcióból meríti. 1929-ben Robert *Atkinson* angol csillagász és Fritz *Houtermans* oszták fizikus együttesen azon törték a fejüket, hogy ez miként lehetséges. Elgondolásuk az volt, hogy az atomok hőmozgás miatti összeütközései a Nap forró belsejében olyan magreakciókat indíthatnak el, amelyek aztán megfelelő energiamennyiséget szolgáltatnak. Sir Arthur *Eddington* angol csillagász számításai azt mutatták, hogy a Nap belsejének hőmérséklete 20 millió fok körül van, ami azt jelenti, hogy mintegy $4 \cdot 10^{-9}$ erg/részecske a hőmozgás energiája. Ez az energiamennyiség több százszor kisebb annál, ami az elemek mesterséges átalakításánál az atomi lövedékek energiája szokott lenni. De számításba kell venni, hogy míg a mesterségesen gyorsított atomlövedékek kezdeti energiájukat gyorsan elveszítik, és csak kis valószínűséggel találnak el egy magot mielőtt eltávoznak, addig a hőmozgás a végtelenségig folytatódik, és a benne résztvevő részecskék határtalan időn át ütköznek egymással. Houtermans és Atkinson a mag potenciálgátján való áthatolás, alig egy évvel azelőtt megalkotott, hullámmechanikai elméletének felhasználásával kimutatta, hogy a Nap belsejében uralkodó hőmérsékletnél és sűrűségnél a hidrogénmagok (protonok) és más könnyű elemek magja között végbemenő termonukleáris reakciók felszabadítanak annyi energiát, amennyi a Nap megfigyelt sugárzásához elegendő. Ezt az elméletet Cockroft és Walton protonbombázással létrehozott magreakció-kísérletei előtt alkották meg. Akkor még egész kevés adat állt rendelkezésre arról, hogy mi történik, ha protonok különféle könnyű magokba ütköznek. Houtermans és Atkinson azt állította, hogy kell olyan könnyű magnak léteznie, amely protonokat képes befogadni, és azokat bizonyos ideig megtartja. A negyedik proton befogása után, elméletük szerint, alfa-részecske képződik a „proton-csapdául" szolgáló magban és ennek kilépésekor nagymennyiségű magenergia szabadul fel. A cikknek, amely 1929-ben jelent meg a *Zeitschrift für Physik* című német folyóiratban, a „Wie kann man einen Heliumkern in einem Potencialtopfe kochen?" (Hogy lehet héliummagot főzni potenciálfazékban?) címet adták. A lap szerkesztőjének azonban nem volt elég humorérzéke, és valamilyen konvencionális címet adott a tanulmánynak.

Mintegy tíz évvel később, amikor már elegendő adat állt rendelkezésre a protonokkal bombázott könnyű magok átalakulásáról, Atkinson és Houtermans a „proton-csapda magját” a szénmaggal azonosították. Az Egyesült Államokbeli Hans *Bethe* és a német Carl von *Weizsäcker* egymástól függetlenül gondolták ki a 122. ábrán látható szén-ciklust. Eme reakció-sorozatban a



122. ábra.

A csillagokban termonukleáris energiát termelő szén-ciklus

szénatom magja egymás után négy protont fog be, amelyek, miután kettő közülük neutronná alakult át, alfa-részecske formájában távoznak. A ciklus teljes lezajlásának ideje 6 millió év, a felszabaduló energia pedig $4 \cdot 10^{-5}$ erg. Mivel a Nap kémiai összetételére vonatkozó ez idő szerint rendelkezésünkre álló adatok szerint a Nap anyaga grammonként mintegy 0,0001 g szenet ($5 \cdot 10^{18}$ szénatomot) tartalmaz, a szén-ciklus energiatermelése másodpercenként 1 erg/g. Ez csak 1%-a annak, amennyi a Nap belsejében termelődik.

Charles *Critchfield* a George Washington Egyetem doktorandusa ugyanebben az időben egy másik folyamatot írt le. Elgondolása az volt, hogy ha két proton összeütközésekor az egyik proton pozitív elektron kibocsátásával neutronná alakul, akkor deutérium-(nehézhidrogén-izotóp)mag képződhet. Az utána következő reakciókban a deutérium héliummá alakul át, és ily módon ugyanazt éri el, amit a szén-ciklus, de sokkal gyorsabban. E folyamat (H-H folyamatnak is nevezik) reakció egyenletei a következők:

$$ {}_1H^1 + {}_1H^1 \rightarrow {}_1D^2 + e^+ + \nu, $$

$$ {}_1D^2 + {}_1H^1 \rightarrow {}_2He^3 + \gamma, $$

$$ {}_2He^3 + {}_2He^3 \rightarrow {}_2He^4 + 2{}_1H^1. $$

20 millió fokos hőmérsékleten a reakció $3 \cdot 10^9$ évig tart és protononként $4 \cdot 10^{-5}$ erg-et szabadít fel. Mivel a hidrogén a Nap anyagának kb. a felét alkotja ($2 \cdot 10^{23}$ atom/g), az energiafelszabadulás másodpercenként 100 erg/g. Ez jól egyezik a megfigyelt értékkel.

A H-H reakció Nap-beli túlsúlya a C-ciklussal szemben azonban nem általános érvényességű. Sok csillagban ennek a fordítottját találjuk. E két különböző termonukleáris reakció-sor hőmérséklet-mértéke más. A C-ciklus energiafüggése T^{17}-el arányos, a H-H reakcióé T^4-el. Így a Napnál fényesebb csillagoknál, amilyen pl. a Sirius, amelynek központi hőmérséklete nagyobb, a C-ciklus kerül túlsúlyba a H-H reakcióval szemben. Viszont a Napnál halványabb csillagokban – és a csillagok többsége ilyen – az energiatermelés teljes egészében a H-H reakciónak tudható be.

Az olvasó nagyon meglepődik, ha megkísérli a Napon belüli energiatermelést összehasonlítani az elektromos eszközök, például a villamos kávéfőző hőtermelésével. Másodpercenkénti száz erg/gramm körülbelül másodpercenkénti $2 \cdot 10^{-5}$ kalória/grammal egyenértékű, és így $5 \cdot 10^7$ másodperc, vagyis másfél év telne el, amíg 1 gramm hideg vizet ilyen hőtermeléssel forrpontig hevítünk! Ha olyan villamos kávéfőzőt használnánk, amelynél a fűtőtest hatásfoka ugyanaz, mint a Napbeli termonukleáris reakcióké, akkor évekig kellene várnunk, amíg a víz felforr. Feltéve természetesen, hogy az edény tökéletes szigetelésű és nincs hővesztesége. Hogy a Nap az ilyen nyomorúságosan csekély hőtermelés ellenére olyan forró, azt nagysága okozza. Mivel a teljes hőtermelés a térfogattal (vagyis R^3-al) arányos, a hőveszteség pedig a felülettel (vagyis R^2-tel), ezért az igen nagy testek nagyon forrók lesznek akkor is, ha a térfogategységre eső hőtermelés a belsejükben igen csekély.

A fentiekből nyilvánvaló, hogy a Világegyetemet megvilágító csillagok energiáját szolgáltató C-ciklus és H-H reakció nem megfelelő a becsvágyó *Homo sapiens* számára, aki a magenergiát saját céljára akarja használni. A probléma megoldásának kulcsát a hidrogén nehéz izotópjai adják, a deutérium, $_1D^2$, amelyet Harold *Urey* amerikai kémikus fedezett fel, és egy még nehezebb izotóp, a trícium, $_1T^3$. A deutérium a természetben is előfordul, habár csekély mennyiségben. Háromezer vízmolekulából egy tartalmaz deutériumatomot. Az izotópok elválasztási módszereinek fejlődése következtében azonban a deutérium ára a drága francia parfümök árától az olcsó whisky áráig csökkent, és sok víz van az óceánban. A trícium, amely nem stabilis izotóp, a természetben nem található(kivéve azt a csekély mennyiséget, amelyet az atmoszférában a kozmikus sugarak hoznak létre), és nagy költséggel atommáglyában kell előállítani. Túl drága ahhoz, hogy tartósan tüzelőanyagként használják, de alkalmazható mint „nukleáris gyújtós" a termonukleáris reakció elindítására deutériumban.

A nehéz hidrogénizotópok közt a következő reakciók lehetségesek:

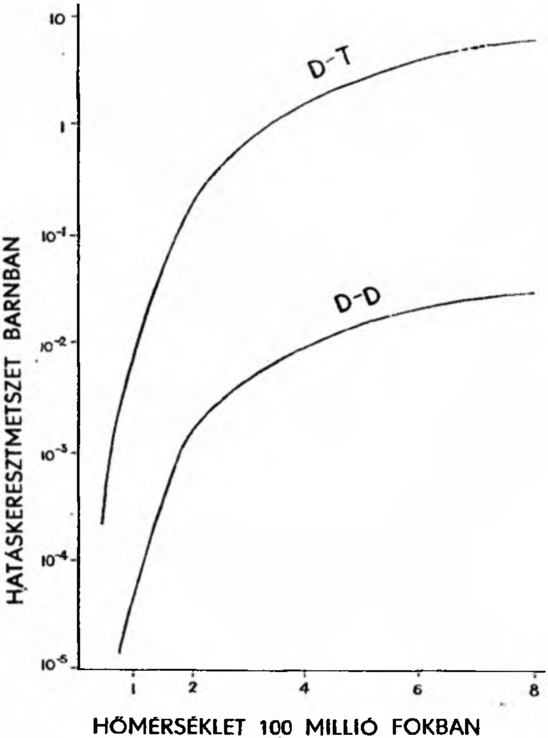
$$_1D^2 + {_1D^2} \rightarrow {_2He^3} + {_0n^1} + 3{,}25\ \text{MeV},$$

$$_1D^2 + {_1D^2} \rightarrow {_1T^3} + {_1H^1} + 4\ \text{MeV},$$

$$_1D^2 + {_1T^3} \rightarrow {_2He^4} + {_0n^1} + 17{,}6\ \text{MeV}.$$

Az egyes folyamatok alagút-effektus alapján számított hatáskeresztmetszetét a 123. ábra mutatja. Ha termonukleáris reakciót kívánunk létrehozni a nehéz hidrogénizotópok között, akkor nem kell egyebet tennünk, mint ezeket néhány 100 millió fokra felhevíteni. Ezt tették a Los Alamos-i kutatók 1952. november 1-én, amikor az első hidrogénbombát felrobbantották Elugelabon, a Csendes-óceán egyik korall-szigetén. A szigetet másfél km átmérőjű és mintegy 70 m mély vízmedencévé változtatták. Ezt megfelelő mennyiségű nehézhidrogén összenyomása és hevítése útján érték el, amit hatalmas atombomba robbantásával csináltak.

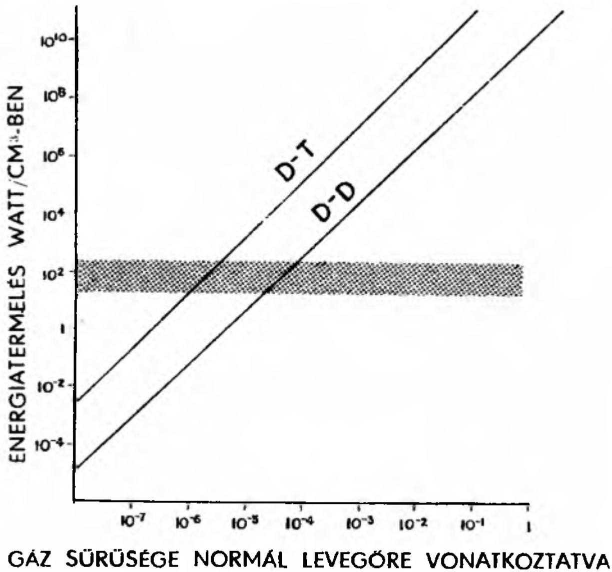
A helyzet azonban sokkal bonyolultabb, ha irányított és szabályozható feltételek mellett kívánunk termonukleáris reakciót létrehozni, és a felszabadult energiát építő és nem romboló célokra kívánjuk felhasználni. Világos, hogy ebben az esetben a termonukleáris reakció feltételeit radikálisan meg kell változtatnunk. Mindenekelőtt a reakciónak igen kis sűrűségű anyagban kell végbemennie. Különben a több száz millió fokos hőmérsék-



123. ábra.

D – D és D – T reakciók hatáskeresztmetszete, abszolút hőmérsékletben kifejezett hőenergiájuk függvényében

letnél elviselhetetlenül nagy gáznyomás állna elő. Ezen a hőmérsékleten normális levegő-sűrűségű deutérium-gáz nyomása megközelítené az 5 millió atmoszférát. Nincs olyan tartály, amely ezt meg tudná tartani. A 124. ábra a termonukleáris energiatermelést mutatja tiszta deutériumnál és deutérium-trícium keveréknél különböző sűrűségű gázban. Látjuk, hogy ha kb. 100 watt energiát kívánunk termelni cm^3-ként, ami nagyságrendben annyi, mint a mai hasadási reaktorok teljesítménye, akkor a deutérium sűrűségét az atmoszférikus levegő sűrűségének tízezred részére

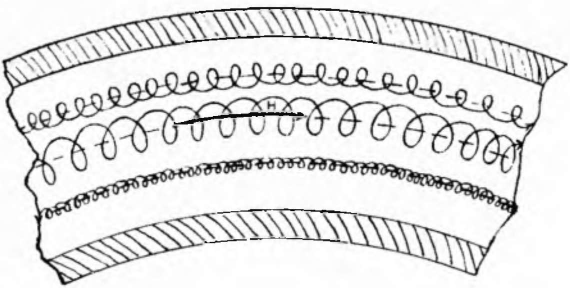


124. ábra.

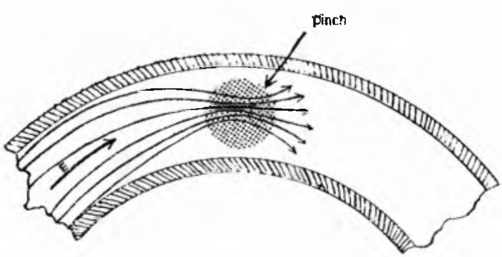
A $4 \cdot 10^7 K°$ hőmérsékleten (kb. a Nap belső hőmérsékletének kétszeresén) felszabaduló magenergia a gázsűrűség függvényében. Az árnyékolt sáv az ez idő szerint létező urán- és plutonium-reaktorokban termelt energiát mutatja

kell csökkenteni, ami körülbelül annyi, mint a laboratóriumban előállítható jó vákuum. A második probléma: e forró, ritkított gázt távol kell tartani a tartály falától, mert egyébként a falba történő hővezetés folyamata a deutériumgáz hőmérsékletét a termonukleáris reakcióhoz szükséges minimális érték alá nyomná.

Ez többféle módon történhet, de mindegyik módszer lényegében erős mágneses tér felhasználásán alapul. A szükséges igen nagy hőmérsékleten az edényben levő deutériumgáz teljesen ionizálódik, teljes egészében negatív töltésű elektronokból és pozitív töltésű deuteronokból áll. (Az anyagnak ezt az állapotát manapság „plazmá”-nak nevezik.) Tudjuk, hogy ha elektromos töltésű részecske mágneses térben mozog, akkor mozgási irányára és a mágneses térre merőleges erő hat rá. Ez az erő arra kényszeríti a részecskéket, hogy a mágneses erővonalak mentén spirális pályán mozogjanak, amint az a 125. a. ábrán látható. Ily módon,



a



b

125. ábra.

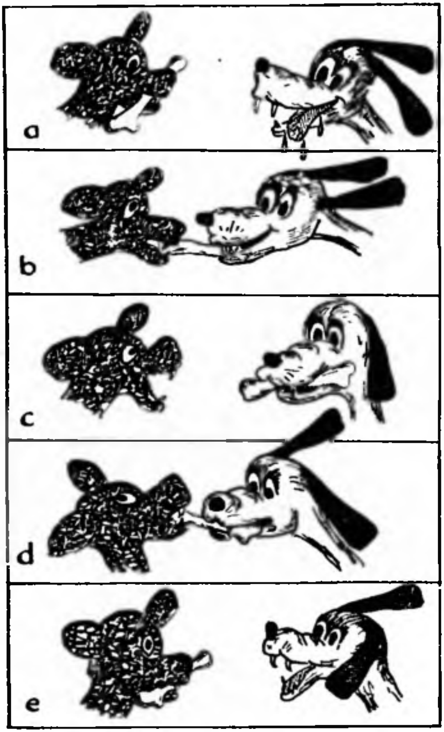
Két fontos módszer, amelyekkel szabályozott termonukleáris reakciókat próbálnak létrehozni. A „Stellarator” Princetonban és a „Perhapsotron” Los Alamosban ha erős axiális mágneses teret hozunk létre az edényben, megakadályozhatjuk, hogy a szabad deuteronok és tritonok a fal közelébe kerüljenek. Ha ezt elérjük, akkor a cső mentén spirálisan mozgó részecskék összeütközéseinek eredménye D – D vagy D – T reakció lesz, melyben egyidejűleg magenergia és nagymennyiségű neutron szabadul fel. A folyamat megindításához természetesen a csőben levő gázt előzőleg kívülről valamilyen módon igen nagy hőmérsékletre kell hevíteni.

A második lehetőség a csőben végbemenő rövid, de erős elektromos kisülések mágneses terének a felhasználása volna. Tudjuk, két, ugyanabban az irányban folyó párhuzamos elektromos áram egymást mágnesesen vonzza. Ezért elég erős áram esetén a gáz (helyesebben a plazma) a csövön belül a falaktól elkülönülni törekszik, és a tengely mentén vékony nyalábbá alakul. A 125 b. ábra mutatja hogyan működik ez az ún. „pinch-effektus", vagyis „szorító hatás". Az előbbi módszertől eltérően a „szorító hatáson" alapuló készülék impulzusokban működik, mint az autó motorja. Megvan viszont az az előnye, hogy a csőben levő gáz az elektromos kisülések következtében automatikusan felmelegszik, és nincs szükség külső fűtésre. Kiszámították, hogy néhány mikromásodpercig tartó több százezer amperes áram elég erős „szorítást" hoz létre. Ilyen irányú kísérleti munkát szerte a világon sok laboratóriumban folytatnak, és lehetséges, hogy az irányított termonukleáris reakciók problémáját rövidesen megoldják.

MEZONOK ÉS HIPERONOK

A harmincas évek elején a fizikusok elégedettek voltak azzal a kevés részecskével, amiből az anyag felépül. Protonokból és neutronokból áll az atommag, elektronokból ezek burka és itt van még, sajnos, a neutrínó, e korszak problematikus gyermeke. 1932-ben azonban egy cikk jelent meg Hideki *Yukawa* japán fizikus tollából, amely sok fejfájást okozott mindenkinek, akit a magerők természete érdekelt. Yukawa felvetette azt az ötletet, hogy ezeket az erőket egy új részecske okozza, amely folytonosan cserélődik a protonok és neutronok között. Nagyon nehéz, ha ugyan egyáltalán lehetséges a „kicserélési erő" bonyolult fogalmát egyszerű módon leírni. Talán a legjobb, ha két éhes kutyát képzelünk, amelyek egy zamatos csont birtokába kerültek, és azt folyton elkapkodják egymástól, hogy haraphassanak belőle.

Ez az ízes csont állandóan vándorol az egyik kutya szájából a másikéba, és a viaskodásban a két kutya elválaszthatatlanul összekapcsolódik. Yukawa elképzelése az volt, hogy a nukleonok közötti vonzóerő az új ízes részecske birtokáért folytatott hasonló viaskodás következménye. Az új részecske lehet elektromosan semleges, vagy lehet pozitív vagy negatív töltésű. A kicserélődés folyamata olyan lehet, amint az a 126. ábrán látható.



126. ábra.

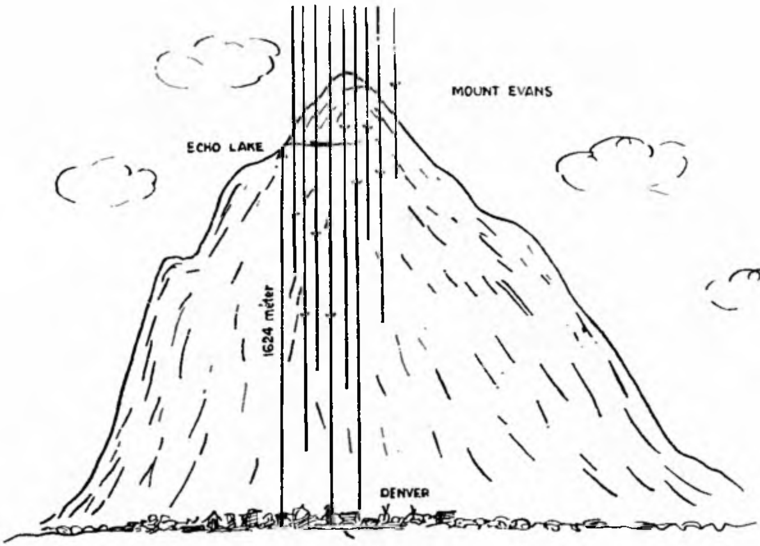
Mezon- (csont)-csere két nukleon között

Yukawa kimutatta, hogy ha a magerők megfigyelt tulajdonságait meg akarjuk magyarázni, akkor fel kell tételezni, hogy ennek a részecskének a tömege a proton és az elektron tömege között van. Tízszer könnyebb a protonnál, 200-szor nehezebb az elektronnál. Senki nem hitt e részecskék létezésében, amelyeket egyenlőre „yukonok”-nak neveztek, mígnem néhány évvel később Carl *Anderson*, a Kaliforniai Technológiai Kutatóintézet fizikusa éppen ekkora tömegű pozitív és negatív részecskéket figyelt meg a légkör felső részéből a földre záporozó kozmikus sugárzásban.

Az új részecske neve felfedezése óta többször is megváltozott. Hol „nehézelektronnak” nevezték, hol „könnyűprotonnak”, azután valaki a görög *mesos* ($\mu\varepsilon\sigma o\sigma$) szóból levezetett mezotron (középső) nevet ajánlotta. De Werner Heisenberg édesapja, aki a klasszikus nyelvek tanára volt, ezt kifogásolta. Szerinte a „tr” betűknek nincs helye ebben a névben. Valóban az „elektron” név a görög *elektrá*-ból (borostyánkőből) származik, a *mesos* görög szóban viszont nincs „tr”. Így a francia fizikusok tiltakozása ellenére, akik nem akarták, hogy az új részecskét összetévesszék a francia *maison*-nal, a Yukawa-féle részecske végérvényesen a „mezon” nevet kapta.

A mezonok kezdettől fogva sok fejfájást okoztak a fizikusoknak. Úgy látszott ugyanis, hogy valami nincs rendben a mezonok elnyelődésével a föld légkörében. Az ilyen rendkívül nagy (több milliárd elektronvolt) energiájú részecskéktől azt lehetne várni, hogy különböző anyagokban történő elnyelődésük kizárólag az anyag mennyiségétől (tömegétől) függ. Valóban az ilyen energiánál az atomi elektronokat, amelyekkel ezek a gyors részecskék összeütköznek, szabad elektronnak lehet tekinteni (lásd a Compton-effektusnál), így csak az elektronok száma jöhet tekintetbe és nem az, hogy hogyan vannak a különböző atommagokhoz kötve. Ha egy kozmikus sugárnyaláb intenzitását megmérjük egy magas hegy tetején és a hegy aljánál, akkor az intenzitáscsökkenést csak az alsó és felső hely közti levegőoszlop *súlya* határozza meg. Ha a két hely közötti légnyomáskülönbség, mondjuk 100 hgmm, akkor a levegőoszlop súlya egyenlő egy 100 mm magas higanyoszlop súlyával. Ezért a kozmikus sugarak 100 mm vastag higanyrétegben ugyanúgy nyelődnek el, mint a levegőben a hegy csúcsa és az alja között. Ez a szabály bevált a kozmikus sugarak elektronjainál, de úgy látszott, nem érvényes az újonnan felfedezett részecskéknél.

Ennek a tisztázására fontos kísérletet végzett Brunó *Rossi* munkatársaival 1940-ben, a 3240 méter magasságban levő Echo-tónál, ami az 1616 méter magasan fekvő Denver város melletti Evans-hegy csúcsa közelében van (127 ábra). A két hely közötti légnyomáskülönbség 14,5 hgmm, vagy ami ugyanaz, 2 m víz nyomása. Két egyforma mezon-számlálót használt, az egyiket Denverben, a másikat a hegyen, az utóbbi két méterre volt a tó felszíne alatt.* Mivel a tó vizének ebben az esetben ugyanolyan



127. ábra.
A mezonok bomlása az Echo-tó és Denver közötti úton

mértékben kellene elnyelnie a sugarakat, mint a hegyi tó és a denveri utcák közötti levegőréteg, ezért azt várták, hogy mind a két számláló ugyanazt az eredményt mutatja. A kísérlet azonban nem erősítette meg ezt a feltevést. A denveri számláló állandóan sokkal kevesebb mezont jelzett. Az egyetlen lehetséges magyarázat az volt, hogy nem a légköri abszorpció, hanem más körülmény csökkentette a talajhoz érkező mezonok számát. Enrico Fermi nézete szerint ezt a mezonok belső instabilitása okozza. Ha egyes mezonok röptükben szétesnek, akkor a továbbhaladók száma attól függ, mennyi ideig vannak úton. Minthogy a

* Azaz a valóságban egy 2 méternyi vízrétegnek megfelelő vastagságú vaslap alatt. (Persze sokkal költőibb lett volna tényleg a gyönyörű tó vizét használni.)

Denverbe leérkező mezonok még külön 1624 métert tettek meg, és mivel gyakorlatilag fénysebességgel mozognak, a szükséges idő $\frac{1{,}6 \cdot 10^5}{3 \cdot 10^{10}} = 5 \cdot 10^{-6}$ sec. Ebből a számból és a talaj szintjén megfigyelt intenzitáscsökkenésből ki lehet számítani a mezonok élettartamát. Azt találták, hogy ez a sebességüktől függ. Az igen gyors, 250 MeV energiájú mezonok élettartama mintegy $2 \cdot 10^{-3}$ sec, a lassúbbak, 100 MeV energiájúak, megfigyelt élettartama csupán $5 \cdot 10^{-4}$ sec. Ezek a megfigyelések szolgáltatták az Einstein féle időtágulás első kísérleti bizonyítékát. A kísérleti eredmények igen szépen egyeztek a

$$\Delta t' = \Delta t / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

képlettel. Későbbi kísérletekben valamilyen elnyelő anyagban megállított mezonok élettartamát is meg tudták mérni. Azt találták, hogy az nem több, mint $2{,}5 \cdot 10^{-6}$ sec. Ha a kozmikus sugarak gyors mezonjainak is csak ennyi lenne az élettartama, akkor már rég megsemmisültek volna magasan fent a légkörben. és soha nem tudtuk volna őket a Föld felszínén megfigyelni.

Mi történik egy mezonnal, amely megszűnik létezni? Erre csak úgy tudunk válaszolni, ha a mezon pályáját és bomlási termékeit lefényképezzük. Az olyan nagy áthatoló képességű részecskéknél, mint a kozmikus sugarak mezonjai, nem szükséges ködkamrát használni. Az túl nagy terjedelmű és nehézkes ahhoz, hogy rakétában vagy ballonban fel lehessen küldeni. Az ilyen vizsgálatokhoz vastag emulziós rétegű fényképező lemezeket szoktak használni. Sok ilyen lemezt raknak egy oszlopba, és ha egy nagy energiájú részecske végig megy egy ilyen oszlopon, akkor az útjában levő emulzió fényérzékeny szemcséit megfeketíti. Ha az előhívott lemezeket mikroszkópban nézzük, akkor a részecskék pályáját jelző hosszú sötét szemcsesorokat látunk. A VIII. tábla felső részén levő vastag emulzióréteggel készült felvétel egy eseménysorozatot mutat. Egyelőre csak a képen látható utolsó nyomokat vizsgáljuk meg. Az utolsóelőtti alulról balra felfelé haladó sötét nyom egy mezon nyoma. Ezt a pálya egységnyi hosszán látható sötét szemcsék számából lehet megállapitani. Az utolsó (baloldalon felülről lefelé haladó) nyom egy rendes elektroné, amely ott keletkezett, ahol a mezon nyoma végződik. Az, hogy az elektron az ellenkező irányba lökődött, azt mutatja, hogy a folyamatban még egy vagy több olyan részecskének is részt kell vennie, amelyek balra repültek el. Hogy más nyom nem látható, ez viszont azt mutatja, hogy ezek a részecskék elektromosan semlegesek. A nyomok irányának és az egyes részecskék energiájának alapos vizsgálata alapján arra következtethetünk, hogy itt még két részecske volt, és ezek az általunk jól ismert neutrínók. A mezonbomlást tehát a következő egyenlet írja le:

$$\mu^{\pm} \rightarrow e^{\pm} + 2\nu,$$

ahol a + és a − jel a pozitív és a negatív töltésű mezonnak felel meg. Minthogy a mezon tömege 206 elektrontömeg, az elektroné pedig természetesen egy elektrontömeg és a neutrínónak gyakorlatilag nincs tömege, ezért 205 elektrontömeggel nem tudunk elszámolni. Az Einstein-féle tömeg–energia egyenértékűségi elv szerint ez a fölös tömeg kb. 100 MeV energiává alakul, amely a bomlásban képződő részecskék között oszlik szét.

Amikor a mezonokat felfedezték, úgy üdvözölték őket, mint amelyek a Yukawa-féle kicserélődési elmélet szerint a nukleonok között ható erők okozói. Hamarosan kiderült azonban, hogy a dolog nem ilyen egyszerű. A nehézség azzal kapcsolatban merült fel, hogy hogyan viselkednek a mezonok, amikor valamilyen anyagtömbben lelassulnak. Azt várták, hogy a pozitív és a negatív mezonok sorsa különböző. A pozitív mezonokat, az őket lassító anyag pozitív töltésű atommagjai taszítják, ezért páriaként ide-oda bolyonganak és néhány mikromásodperc múlva egy gyors pozitív elektronná és egy neutríno-párrá bomlanak. A nagyenergiájú pozitív elektron pedig kirepül a tömbből, átmegy valamelyik számlálón a sok közül, amelyekkel a mezon-vadászok körülvették a tömböt, és így jelzi egy pozitív mezon halálát.

A lelassult negatív mezon viszont befogódik valamelyik mag egyik Bohr-pályájára és ideiglenesen az atomi rendszer tagja lesz. Enrico *Fermi* és *Teller* Ede kimutatták, hogy ez igen gyorsan bekövetkezik, jóval azelőtt hogy a lelassult mezon széteshetett volna. Mivel a Bohr-pályák sugara fordítva arányos a részecskék tömegével, ez a mezonpálya mintegy kétszázszor kisebb a legbelső elektronpályáknál. A befogott mezon a mag felszínéhez igen közel mozog. Valahogy úgy, mint egy Föld körül keringő szputnyik. A befogott mezon számára két lehetőség van: gyors negatív elektronná és két neutrínóvá bomolhat, a tömb körül elhelyezett számláló ilyenkor a negatív mezon halálát jelzi. Másrészt, mivel igen közel mozog a maghoz, az el is nyelheti a mezont. Ha a protonok és neutronok közötti erőket a közöttük állandóan végbemenő mezoncsere okozza, akkor a következő reakciónak kell végbemennie:

$$p^{\pm} + \mu^{-} \rightarrow n^{0} + \nu^{0}.$$

A magerők erősségéből ki lehet számítani, hogy ez igen gyors reakció, amely csupán 10^{-22} mp-ig tart. Mivel a mezon természetes bomlásához 10^{-6} sec kell, azt következtetjük, hogy gyakorlatilag minden mezont jóval természetes haláluk előtt elnyelnek a magok, 10^{16} mezonból legfeljebb egynek van esélye arra, hogy egy elektronná és két neutrínóvá bomoljék, mielőtt felfalták volna. E szerint a mezonlassító tömbből nem repülnének ki negatív elektronok. A kísérletek sehogy sem egyeztek meg ezzel a következtetéssel. Kevesebb negatív elektron repült ugyan ki a lassító tömbből, mint pozitív elektron, némelyik anyagoknál kétszer, másoknál tízszer, de semmi esetre sem 10^{16}-szor. Ez annyit jelent, hogy a magok mezonétvágya több millió milliárdszor kisebb, mint amennyi a Yukawa-féle képben a kicserélődési erőkhöz szükséges. Mit lehetett itt tenni? A mezonok létezését előre megjósolták, a mezonokat felfedezték, de ezek nyilván nem megfelelő mezonok voltak. Az atommagokat annyira sem érdekelték, mint egy oroszlánt a széna.

A megoldást egy vastagemulziós fénykép hozta meg. Ez 1947-ben ama ballonok egyikén készült, amelyeket C. F. *Powell* brit fizikus küldött fel az atmoszféra felső rétegébe. A fényképen két nyom látszott, amelyeknek a vége összeért. Egyikük egy rendes, 206-os könnyűmezon pályája volt, a másikat azonban ugyanolyan töltésű, de 273 tömegű részecske hozta létre. A nehezebb részecskét először „nehézmezon”-nak nevezték el, de hamarosan átkeresztelték π-mezonná (vagy „pion”-ná), a korábban felfedezett könnyűmezon pedig a μ-mezon (vagy „müon”) nevet kapta.

Később kimutatták, hogy a pozitív vagy negatív pion egy (pozitív vagy negatív) müonná és egy neutrínóvá bomlik az alábbi egyenlet szerint:

$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu^{0}.$$

A pionok az atmoszféra felső rétegében keletkeznek a primer kozmikus sugarak (lényegében igen nagy energiájú protonok) atommagba ütközésének eredményeképpen. Felezési idejük ($2{,}6 \cdot 10^{-8}$ sec.) olyan rövid, hogy még az Einstein-féle időtágulás segítségével sem érkezhet egyikük sem a Föld felszínére. A VIII. tábla felső része pionok keletkezését mutatja az eredeti kozmikussugárbeli protonnak az emulzió valamelyik atommagjába való ütközésekor. A képen láthatjuk az egyik pion pályáját is és müonná, majd elektronná való átalakulását. Csak kétféle müon van, μ^+ és μ^-, de háromféle pion: π^+, π^- és π^0. Az utolsó 10^{-16} sec-nél kisebb felezési idővel két nagyenergiájú sugárzási kvantummá bomlik:

$$\pi^0 \rightarrow 2\gamma.$$

A következő évek folyamán egyre több újat találtak a fizikusok fejére záporozó részecskék között. Megjelent a K-mezon, amelynek tömege 965 elektrontömeg. Több, a protonnál nehezebb részecske, melyek a „hyperon” összefoglaló nevet kapták. A részecskék nevét, bomlásuk módját és felezési idejüket az 1. táblázat mutatja. Nincs azonban biztosítékunk arra, hogy a közeljövőben nem fedeznek-e fel még többet.*

1. táblázat. Az anyag elemi részecskéinek tulajdonságai

Név és jel	Tömeg (elektrontömegben kifejezve)	Közepes élettartam (másodpercben)	Bomlástermékek	Tömeg 137 m_e-ben kifejezve
Kszi: $\Xi\pm$	2585	10^{-10}	$\Lambda^0+\pi\pm$	18,88
Szigma: $\Sigma\pm$	2330	10^{-10}	$n+\pi\pm$	17,02
Lambda: Λ°	2182	$2{,}7\cdot10^{-10}$	$p^++\pi^+$ vagy $n+p^+$	15,92
Neutron: n	1838,6	10^3	$p^++e^-+\nu$	13,40
Proton: p	1836,1	stabilis		
Tauon: $\tau\pm$	966,5	10^{-8}	$\pi\pm+\pi^0+\pi^0$ stb.	7,05
Theton: Θ^0	965	10^{-10}	$\pi^0+\pi^0$ vagy $\pi^++\pi^-$	
Pion: $\pi\pm$	273,2	$2{,}6\cdot10^{-8}$	$\mu\pm+\nu$	1,995
Pion: π^0	264,2	10^{-16}	2γ	1,928
Müon: $\mu\pm$	206,7	$2{,}2\cdot10^{-6}$	$e\pm+2\nu$	1,511
Elektron: e±	1	stabilis		
Neutrínó: ν	0	stabilis		

* Az utóbbi években valóban igen sok újabb részecskét fedeztek fel. (Szerk.)

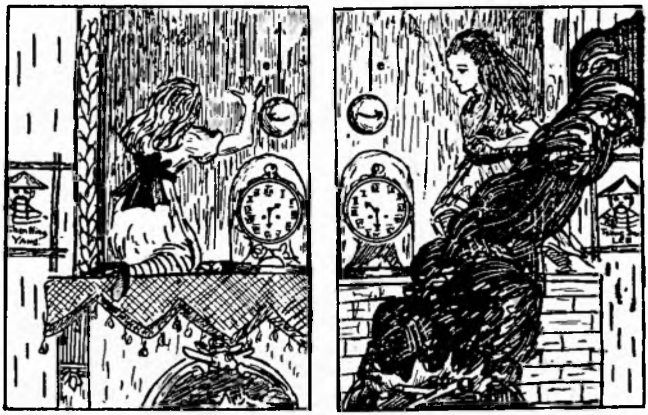
Az elemi eseményekről készült felvételek egyre bonyolultabbak, amint azt a VIII. tábla alsó ábrája is mutatja. Ezt a felvételt a „buborékkamrá"-nak nevezett új berendezés segítségével vették fel. Ez bizonyos szempontból a ködkamra fordítottja. Gázban képződő folyékony cseppek helyett itt folyékony közegben, pl. folyékony hidrogénban keletkező gázbuborékokat használnak. Annak ellenére, hogy az elemi részecskékre vonatkozó ismereteink rohamosan növekszenek, sziklába ütközünk, ha meg akarjuk érteni őket. Ma minden ilyen elmélet tisztán leíró természetű.

TÜKÖRKÉPEK

Ha valaki egy ballábas cipőt talál, biztos lehet benne, hogy a jobblábas cipő is ott van valahol az ágy vagy a heverő alatt. Ugyanez áll a kesztyűre és sok más tárgyra is. De az emberek szíve bal oldalukon van, vakbele pedig a jobb oldalon. A biológia egyik alapvető ténye, hogy minden élőlényt, az amőbát, az embert, a heringet vagy a rózsabokrot alkotó proteinmolekuláknak balkezes szimmetriájuk van. „Jobbos" növények és állatok nincsenek a Földön. Ez igen különös. Ha ugyanis a szerves kémikus az elemekből szintézis útján hoz létre proteint, akkor ennek 50%-a balos és 50%-a jobbos molekula. Lehetséges, hogy az élet bolygónkon való kifejlődésének kezdeti szakaszán kétféle élőlények voltak, jobbosak és balosak. De valahogy egymással összeférhetetlenek vagy egymást mérgező hatásúak voltak, ezért lehet, hogy olyan harcot vívtak egymással, amelyben az egyik oldal teljesen megsemmisült.

A közönséges fizikában azonban a tükörszimmetria elve („paritás-elv") mindig érvényesült. Minden fizikai folyamathoz lehetett egy másik folyamatot találni, amely az elsőnek pontos tükörképe volt. 1956-ban két fiatal kínai–amerikai fizikus, Chen-Ning *Yang* és Tsung-Dao *Lee*, elméleti megfontolások alapján azt állították, hogy az elemi részecskéknél ez nem állhat fenn.

Mint már előbb többször említettük, az elemi részecskéket, köztük a neutronokat is, tengelyük körül forgó kicsiny pergőcsigáknak lehet tekinteni. Ez a forgás lehet az óramutató járásával egyező vagy ellenkező irányú. A két mozgásállapotot fel lehet cserélni úgy, hogy a csigát megfordítjuk, és a teteje kerül alulra. A neutron bomlásakor kibocsátott elektron többnyire a forgási tengely mentén mozog. Azt hitték régebben, hogy az elektronok mindkét irányban, vagyis (mondhatjuk az északi és a déli pólus irányában) egyenlő valószínűséggel repülnek ki a bomló neutronból. Ha ez így volna, akkor a paritás elve érvényes volna, és a bomló elektron tükörképe azonos volna az eredetivel. A kettő egybeesésének elérése céljából nem kellene egyebet tenni, mint az egyiket fejtetőre állítani. Ha azonban az elektron mindig csak az egyik irányba emittálódik (128a. ábra), akkor a helyzet



128. ábra.
A neutronbomlás tükörképe

egész más. Ha egy bomló elektron képét a tükörben nézzük (128b. ábra), akkor azt találjuk, hogy nem lehet úgy forgatni, hogy az eredetivel egybeessék. Ha az elektron mindkét esetben felfelé emittálódik, mint a 128. ábrában, akkor a két neutron ellenkező irányban forog. Ha (gondolatban) vagy a tükörképet vagy az eredetit megfordítjuk, akkor a két elektron ellenkező irányban emittálódik. A paritás elve nem volna érvényes, és a tükör másik oldalán levő elemi részek viselkedése nem volna azonos a tükör előttiekével.

Yang és Lee hipotézisének megvizsgálása céljából közvetlen kísérletet végeztek annak megállapítására, hogy van-e összefüggés a neutron forgása és az elektronemisszió iránya között.

β-bomlású radioaktív anyagot igen kis hőmérsékletre lehűtve igen erős mágneses térbe helyeztek. Ilyen feltételek mellett, amikor a hőmozgás gyakorlatilag megszűnik, minden atom azonos irányba áll be, a másneses erővonalak irányába. Ha a neutron forgási tengelye mentén mindkét irányba emittálódnának elektronok, akkor ugyanannyi elektront figyelnénk meg az elektromágnes északi pólusa felé mozogni, mint a déli pólus felé. A kísérlet azonban az ellenkező eredménnyel járt, és, amint azt Yang és Lee előre megmondták, valamennyi elektron ugyanabban az irányban mozgott. Hamarosan hasonló eredményt kaptak a μ-mezon bomlásánál is.

Ez a paritás-elv bukását jelentette; bebizonyult, hogy az elemi részecskék világa féloldalas. Hol van a másik fele, amely a tükörben látható fizikának felel meg? Nem tudjuk és nem fogjuk tudni mindaddig, amíg az elemi részecskék alaptermészetét meg nem értjük.

A FIZIKA JÖVŐJE

Az előzőkből világosan kitűnik, hogy a fizika jövőjét az elemi részecskék további tanulmányozása és megértése határozza meg. Míg azonban a kísérletek szempontjából jó úton van a haladás e területe, az elmélet jóformán semmit nem halad előre. 25 évszázaddal ezelőtt Démokritosz feltette, hogy az anyag diszkrét (egymástól elkülönített) legkisebb részekből áll. Ma egyre inkább meggyőződünk állításának helyességéről. Alig egy fél évszázada tudtuk meg, hogy az energiának szintén „atomos szerkezete” van, és manapság energiakvantumokról beszélünk. Az utolsó 60 év folyamán a fizikusok megtanulták, hogyan kell a különböző energiafajtákat kvantálni. Az elektromágneses sugárzás esetében az energia csak az $nh\nu$ értéket veheti fel, ahol ν a rezgési frekvencia, n pedig egész szám. A hidrogénatomban a különböző kvantumállapotok energiája $1/n^2$-tel arányos, ahol n egész szám. Más bonyolultabb esetekben Schrödinger és Dirac egyenletei adják meg a helyes választ. Ami az anyagi részecskéket illeti, itt még a teljes tudatlanság állapotában vagyunk. Nem tudjuk, hogy miért van az elektromos töltésnek mindig ugyanakkora értéke: $4{,}8 \cdot 10^{-10}$ elektrosztatikus egység. Halvány fogalmunk nincs arról, hogy miért kvantáltak a részecskék tömegei, amelyek relatív értékét az 1. táblázat mutatja. És éppen úgy nincs jobb elképzelésünk, mint Démokritosznak volt, hogy miért áll az anyag osztatlan részekből, és miért nem folytonos?

Az e kérdésekre adandó válaszok képezik a jövő fizikáját, de az elmúlt évtizedekben egy lépést sem haladtunk ez irányban, és senki sem látja előre, mikor lehet itt eredményt elérni. Ha nem is tudjuk a helyes választ, ne hibáztassunk senkit, aki ezen a problémán elmélkedik. Vegyük például az e elemi töltést. Tudjuk, hogy e^2 elosztva a c fénysebesség és a h Planck-állandó szorzatával: tiszta szám, vagyis *dimenzió nélküli állandó*. Ez azt jelenti, hogy attól függetlenül, hogy az e, c és h mennyiségeket a cm-gramm-sec egységekben vagy inch-font-óra egységekben, vagy bármilyen egység-rendszerben fejezzük is ki (feltételezve, hogy ezeket következetesen használjuk) –, ez a hányados mindig ugyanaz marad. Ezt a hányadost a „finomszerkezet állandó"-jának nevezik, mert akkor kerül elő, amikor a Balmer-sorozat vonalait több egymáshoz igen közel álló vonalra bontjuk fel. A hányados számbeli értéke 1/137. Miért 137 és nem 75 vagy 533? A fizikai képletekben az együtthatóknak mindig van valami matematikai jelentőségük. Ha például az inga T periódusának, l hosszának és g gravitációs gyorsulásnak az összefüggését vizsgáljuk, mindig az alábbi képletet kapjuk, függetlenül attól, hogy milyen egységeket használunk:

$$T = 6{,}283\sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Mi ez a 6,283-as szám? Ha a matematika különböző számaival próbáljuk kapcsolatba hozni, akkor rájövünk, hogy nem egyéb, mint 2π. Ha az elméleti mechanika egyenleteit használjuk a képlet levezetésére, akkor azt találjuk, hogy az együtthatónak 2π-nek *kell lennie*. Hasonlóképpen, ha az elemi töltésre a relativisztikus kvantumelméletnek a c és h állandókat tartalmazó egyenleteiből vezetnénk le egy kifejezést, akkor arra a következtetésre jutnánk, hogy hc/e^2 arányt (a finomszerkezet állandójának reciprokát) olyan matematikai kifejezés adja, amelynek számértéke 137. De ez idő szerint senki nem tud ilyen elméletet felépíteni. Azt könnyű kitalálni, hogy 6,238 az $2 \cdot 3{,}1416\ldots$, sokkal nehezebb azonban arra rájönni, hogy vajon miféle ez a 137-es szám!

Sir Arthur *Eddington*, aki felbecsülhetetlen módon járult hozzá a csillagok belső szerkezete elméletének kiépítéséhez, jónéhány évvel ezelőtt bátor kísérletet tett a 137-es szám magyarázatára.

Gondolatmenete nagyjából a következő volt: az (x, y, z, ict) koordinátájú négydimenziós világban élünk, és $4 \cdot 4 = 16$. Képezzünk egy *mátrixot*, vagyis egy négyzet alakú táblázatot 16 sorral és 16 oszloppal. Tegyük fel továbbá, hogy ez a mátrix szimmetrikus az átlójára nézve, vagyis a négyzet n-edik sorában az m-edik oszlopban ugyanaz van, mint az m-edik sor n-edik oszlopában. Hány független számunk lesz? Ezt nem nehéz kiszámítani. A mátrix-ban összesen $16 \cdot 16 = 256$ négyzet lesz. Ezek közül 16 tartozik az átlóhoz; marad 240. Az átló két oldalán mindegyik háromszögű területen 120 négyzet lesz. Mivel a négyzetek az átló mindkét oldalán azonosak, marad 120 független négyzet, ami az átlón levő 16 négyzettel 136-ot tesz ki. Amikor Eddington eljutott ehhez a relációhoz, akkor a tapasztalati értéket 136-nak vették. Csak néhány évvel később lett belőle 137, miután a mérések pontosak lettek. Ez arra kényszerítette Eddingtont, hogy egy „javított elmélet"-et dolgozzon ki, amely a további egység hozzáadását is indokolja.

Eddington elgondolását G. *Beck*, H. *Bethe* és W. *Riezler* egy rövid cikkben kigúnyolta. A cikk a *Naturwissenschaften* című német folyóirat 1931. január 9-i számában jelent meg, és azt igyekezett megmutatni, hogy milyen veszélyes dolog számokkal zsonglőrködni. A következőképpen hangzott:

„Néhány megjegyzés
a nullpont-hőmérséklet kvantumelméletéről."

„Vegyünk egy hexagonális kristályrácsot. Abszolút nullpontját összes szabadsági fokának befagyása jellemzi, ami természetesen lehetetlenné teszi az elektronok mozgását a Bohr-pályákon. Eddington szerint minden elektronnak $\frac{1}{\alpha} = 137$ szabadsági foka van. Az elektronokon kívül a kristályrács ugyanannyi protont is tartalmaz. Hogy a nullpont-hőmérséklethez eljussunk, minden neutron (vagyis egy proton plusz egy elektron) számára $\frac{2}{\alpha} - 1$ szabadsági fokot kell feltételeznünk, mivel egy szabadsági fok az elektronpályán történő mozgása alatt befagyott. Ily módon a nullpont-hőmérsékletre a következő kifejezést kapjuk:

$$T_0 = -\left(\frac{2}{\alpha} - 1\right) \text{ fok.}$$

Mivel feltételezzük, hogy $\frac{1}{\alpha}=137$, a nullpont-hőmérsékletre a következőt kapjuk:

$$T_0=-273 \text{ fok},$$

ami jól egyezik a kísérleti értékkel. Megjegyezzük, hogy ez az eredmény független a kristályrács választásától."

Természetesen ez a 137 és 273 közötti számszerű reláció tiszta véletlen, mivel míg 137 valóban tiszta szám, addig az abszolút nullpontot különböző számok fejezhetik ki, aszerint, hogy Celsius, Réaumur vagy Fahrenheit-skálát használunk. A cikk megjelenése után a folyóirat szerkesztőjét egy berlini fizikus felvilágosította arról, hogy a cikk beugrató volt. A szerkesztő kemény hangú levelet írt a szerzőknek, akik abban az időben a cambridgei egyetemen dolgoztak. Igen szerény és alázatos választ kapott; a szerzők sajnálják a félreértést, de ők biztosak voltak abban, hogy a cikket paródiának fogják fel arról, hogy *némelyik* fizikus hogyan alkotja meg elméletét. A *Naturwissenschaften* legközelebbi számában a szerkesztő megjegyzése volt olvasható, arról, hogy reméli minden olvasó megértette, hogy Beck, Bethe és Riezler cikke paródia volt. És ekkor Sir Arthur Eddington dühöngött. (V. A. Fock versének részlete, amelyet abban az időben írt.)

137—1840

Akárhogy mérünk, számolunk utána
— Ernyed a kéz, s felforr az agy —
Az *egy-száz-harminc-hét* továbbra
Sötét, rejtélyes szám marad.
Ám Eddington nem érti: hogy lehet
Ésszel nem érni fel e számjegyet.
Mert ez a szám (azt mondja ő, a dőre fej)
A világ-dimenziók száma. Higgyük el?!
Azé a világé, amelyben élni kell
Nekünk s neked, Sír Arthur Eddington, s amely
Minden érzékszervünkre hat? No menj,
Ez nem lehet komoly beszéd!

Ím az én számaim — nem tévhit
(Ne töprengj sokáig, elárulom):
Az *egy-ezer-nyolc-száz-negyvenet* én itt

A helyérték szerint ábrázolom.
– Sír Athur, tartsd meg magadnak satnya számod,
Talán feltárja néked majd a másvilágot,
Mert erre a miénkre nem való.
Erre az *egy*, a *nyolc*, a *négy* s a *nulla* jó,
Ezekkel itt minden feltárható,
Mi van, s mi lesz. Ezért én e négy ragyogó
Számot családfámra írom; nem látható
Ugyan, de elűzi tőlem az ördögöt.

Mindez harminc évvel ezelőtt történt, de még ma sem tudjuk, hogy ez a szám miért 137 és nem más, és vajon Eddington „magyarázata" tiszta véletlen-e, vagy pedig van benne valami a valóságból is. Eddington törekvését természetesen „numerológiának", „szám-játéknak" is nevezhetjük, aminek rossz mellékíze van. De van egy hasonló eredetű szó, „számelmélet", ami a tiszta matematika nagy és elismert ága. A fizikusok, mikor a természet titkait igyekeztek megfejteni, gyakran vették igénybe a tiszta matematikát, és sok esetben attól kaptak segítséget. Amikor Einstein a gravitációt mint a négydimenziós téridő-kontinuum görbületét kívánta megmagyarázni, már készen kapta a sokdimenziós görbült tér Riemann-féle elméletét. Amikor Heisenbergnek a matematika egyik szokatlan ágát kellett felhasználnia az elektron atomon belüli leírására, a nem-kommutatív algebra készen állt számára. Csak a számelmélet és topológia maradt tiszta fizikai alkalmazás nélküli matematikai tudományág. Lehet, hogy egykor ezeket is felhasználják a természet titkainak megértéséhez.

De térjünk vissza a holnap fizikájának problémáihoz. Az elemi részecskék tömegének megmagyarázása valószínűleg több nehézséget fog okozni, mint e részecskék elektromos töltése. Bármely képletnek, amely a tömeget a sebességgel (c), hatással (h) és egy konstanssal fejezi ki, szükségképpen tartalmaznia kell a *hosszúságot* is. Ezért így írhatjuk

$$\text{tömeg} = A \cdot \frac{\text{hatás}}{\text{sebesség} \cdot \text{hosszúság}},$$

ahol A valami értelmes szám, például $1, \sqrt{2}, \frac{3}{5}\pi, \frac{1}{2}\pi^2$ stb. Ha A-t kb. 1-gyel vesszük egyenlőnek, a hatást pedig h-nak ($6{,}6 \cdot 10^{-27}$), a sebességet c-nek ($3 \cdot 10^{10}$), és az anyagi részecskék átlagos tömegét, vagyis a mezon-tömeget ($2 \cdot 10^{-25} g$) kívánjuk megkapni, akkor a hosszúságot kb. 10^{-12} cm-nek kell vennünk. Természetesen, ha A nem 1, hanem mondjuk $1/2\pi$ ($\approx 1/6$) vagy $1/\pi^2$ ($\approx 1/10$), akkor a hossz 10^{-13} cm is lehet. Az ilyen nagyságrendű hosszúságok az elemi részecskék fizikájában megszokottak. Az elektronnak a klasszikus elektrodinamika alapján számított „sugara" $2{,}8 \cdot 10^{-13}$ cm, az a távolság pedig, amelynél a magerők két részecske között hatni kezdenek, mint tudjuk $1{,}4 \cdot 10^{-13}$ cm. Eszerint úgy látszik, hogy a néhányszor 10^{-13} cm-es távolságnak alapvető jelentősége van az elemi részecskék problémáiban.

Néhány évtizeddel ezelőtt az elméleti fizikusok azt remélték, hogy a 10^{-13} cm nagyságrendű hosszúságnak, amelyet rendszerint λ-vel jelölnek, *elemi hosszúság* szerepe van az elmélet jövő fejlődésében. Ugyanúgy, amint c a *lehető legnagyobb sebesség* a relativitáselméletben és h a *legkisebb lehetséges hatás* a kvantumelméletben, λ-nak jut a *lehető legkisebb távolság* szerepe az anyag jövő elméletében. Mondhatjuk, hogy „a matematikai pont átmérője" lesz, és ennél kisebb távolságnak nem lesz értelme. Ez a lehetőség igen érdekes és izgalmas álom, amely valószínűleg valóra válik, de ma még senki sem tudja, hogy mikor.

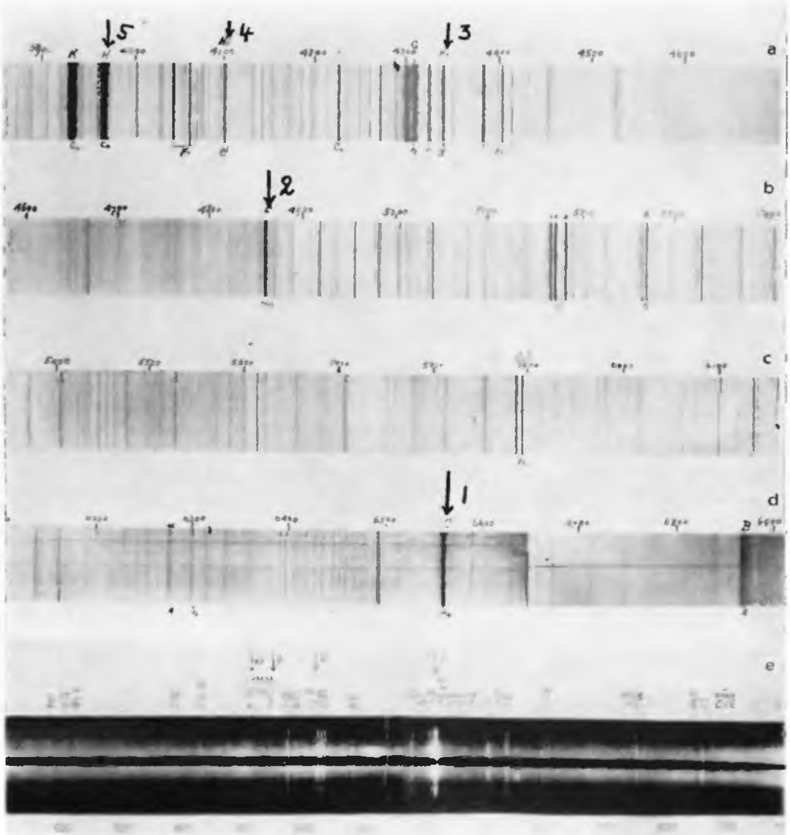
E kötet drámai befejezéséhez közeledve még egy „numerológiai" példát mutatunk az elemi részecskék világából. Nem értjük mit jelent a 137, de fejezzük ki az összes elemi részecskék tömegét 137 elektron tömegével. Az eredményt az 1. táblázat mutatja (329. old.). Láthatjuk, hogy az összes számok igen közel vannak valamilyen egész számhoz, kettő kivételével, amelyek viszont igen közel vannak egy egész plusz egy félhez. Ez lehet véletlen, de ilyen véletlennek a valószínűsége egy a sok milliárdhoz! Ha pedig nem véletlen, mi a jelentősége? Meg lehet-e a „szent számok"

$$19 \quad 17 \quad 16 \quad 13\tfrac{1}{2} \quad 7 \quad 2 \quad 1\tfrac{1}{2}$$

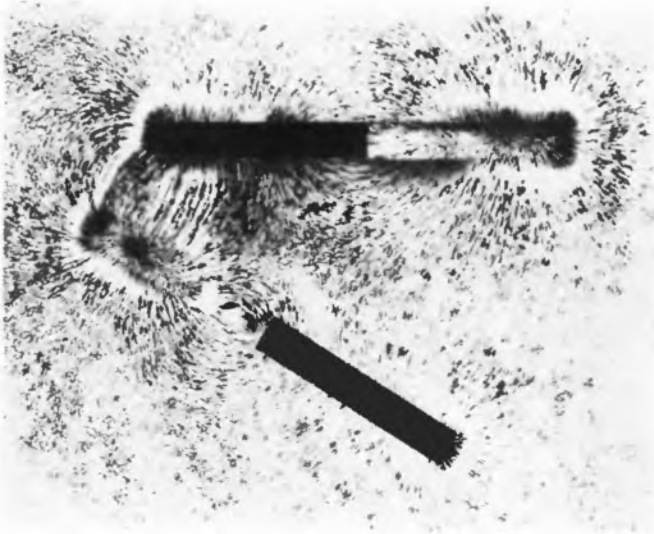
sorozatát valamilyen értelmes elmélet alapján magyarázni? Lehet-e például valamilyen vonatkozásban a számelmélettel, oly módon, hogy a prímszámok sorával vagy valamennyi bonyolultabb számsorral van kapcsolatban? Vagy talán inkább a topológiával, talán a négydimenziós poliéder csúcsainak, éleinek és határoló testeinek a számával van összefüggésben? Nem tudjuk. De reméljük, hogy a jövő nemzedékek fizikusai ezeket a problémákat diadalmasan megoldják.

NÉV- ÉS TÁRGYMUTATÓ

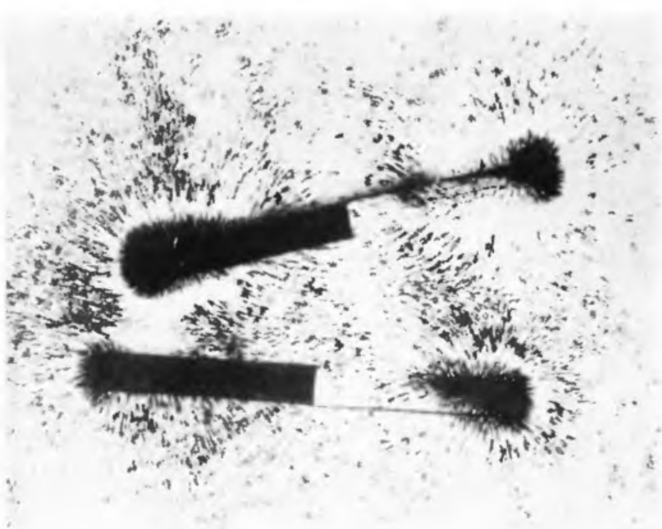
I. TÁBLA (fent) A Newton-féle interferencia-gyűrűk.
(lent) Kettős törés az izlandi pátban

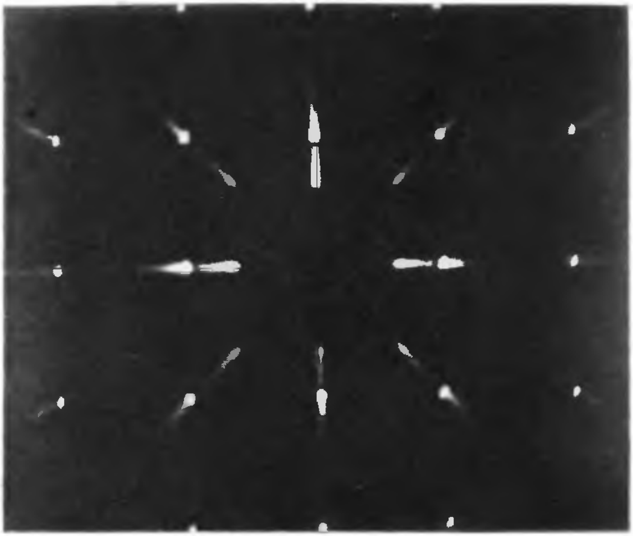


II. TÁBLA (a. b, c, d) A Nap színképének a látható része, 4 m-es heliospektográffal felvéve. A számozott vonalak a hidrogén Balmer-vonalai. A *Mt. Wilson Observatory felvétele.* (e) A Napnak távoli ibolyántúli színképe magasan repülő rakétából felvéve. A számozott vonalak a hidrogén Lyman-vonalai A *Naval Research Laboratory felvétele*

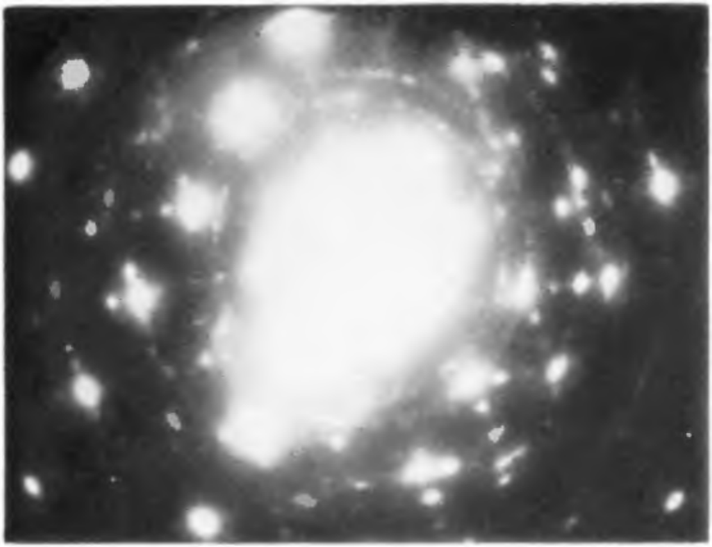


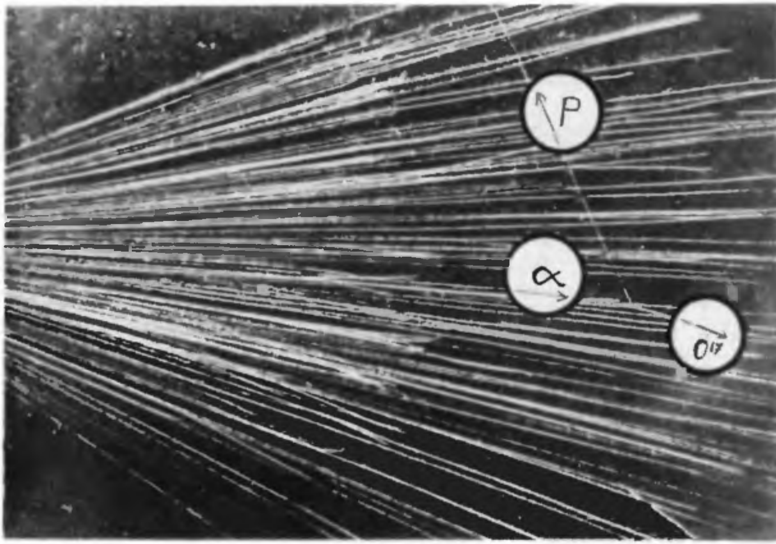
III. TÁBLA. Mágneses erővonalak ellenkező irányú (fent) és azonos irányú (lent) mágnesek között. *R. Conklin (University of Colorado) felvétele*



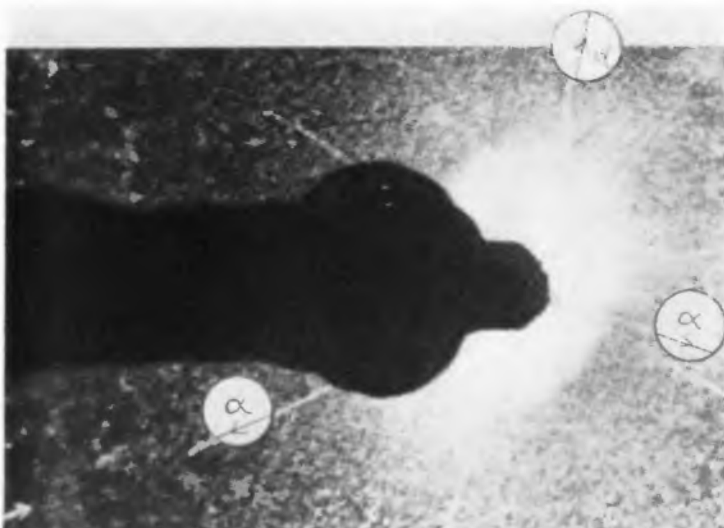


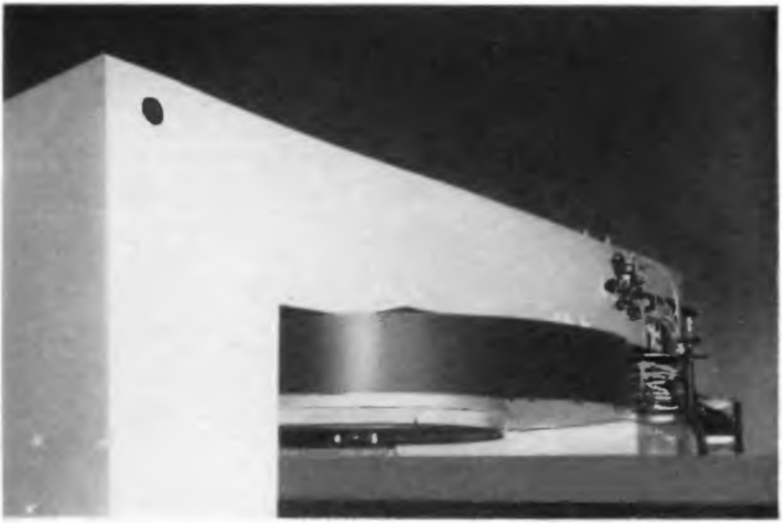
IV. TÁBLA (fent) Röntgensugarak diffrakciója nikkel-vas ötvözetben. (lent) 100 kV-os elektronok diffrakciója ugyanabban az ötvözetben. *R. D. Heidenreich (Bell Telephon Laboratory) felvétele*





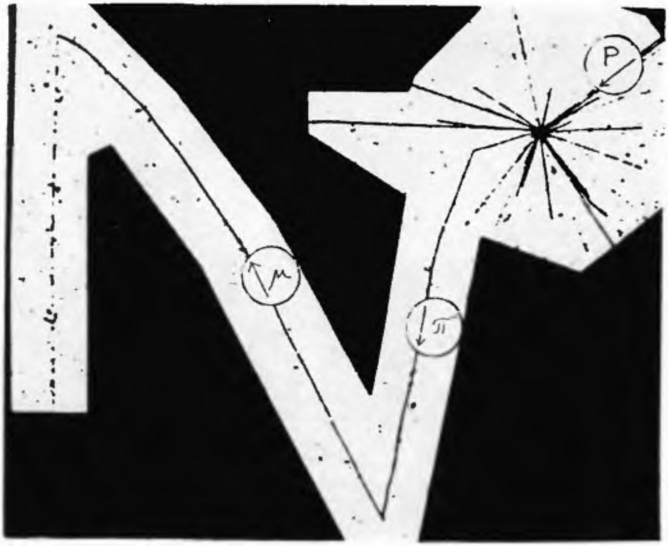
V. TÁBLA (fent) Az első ködkamra felvétele mesterségesen létrehozott magreakcióról. *P. M. S. Blackett (Cambridge University felvétele).* (lent) Bórmag szétesése három alfa-részre. *P. Dee és C. Gilbert (Cambridge University felvétele)*



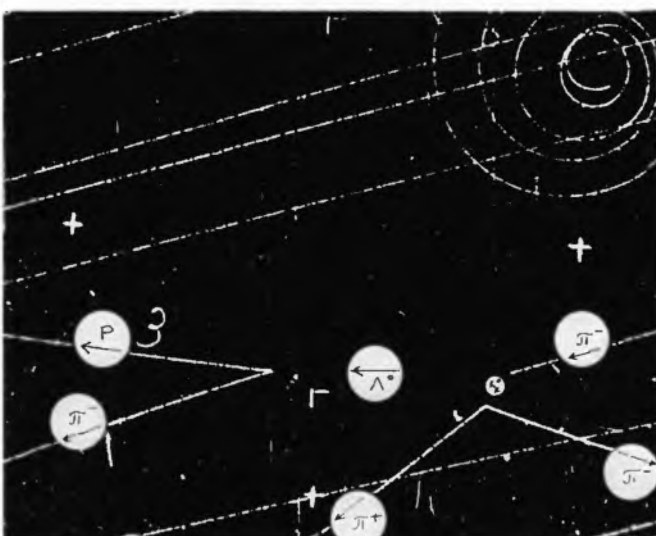


VI. TÁBLA (fent) A Colorado Egyetem ciklotronja. Az elektromágnes egyik pólusa és a nyaláb látható. *Nuclear Research Laboratory felvétele* (lent) A kaliforniai egyetem Bevatronjának egyik része. *Lawrance Redidiation Laboratory felvétele*

VII. TÁBLA (fent) Atombomba-kísérlet Nevadában. (lent) Úszómedence tipusú reaktor Oak Ridge-ben. *Az U. S. Atomic Energy Commission felvételei*



VIII. TÁBLA (fent) Pion képződése és elbomlása müonná és elektronná. Vastag emulzióval készült felvétel E. Pickup *(Canadian National Research Council felvétele* (lent) Különböző események buborék-kamrában. *L. Alvarez (University of California) felvétele*



Kiadja a Gondolat, a TIT Kiadója
Felelős kiadó a Gondolat Kiadó igazgatója
Felelős szerkesztő: Baktai Józsefné
Műszaki vezető: Kálmán Emil
Műszaki szerkesztő: Kende Frigyes
A borító és kötésterv Erdélyi János munkája
Megjelent 6000 példányban,
21,75 (A/5) ív + 8 oldal melléklet terjedelemben
Ez a könyv az MSZ 5601—59 és 5602—55 szabványok szerint készült

GO 354 – f – 6668

65.2139/1. — Zrínyi Nyomda, Budapest. — Fv.: Bolgár I.

George Gamow:

A FIZIKA TÖRTÉNETE

George Gamow Oroszországban, Ogyesszában született. Diplomáját a leningrádi egyetemen szerezte. Sok éven át tanított a George Washington Egyetemen, 1956 óta a fizika professzora a Colorado Egyetemen, Boulderban. – 1956-ban elnyerte a Kalinga díjat, amelyet az UNESCO tűzött ki a tudomány népszerűsítésének elismeréséül. – A szerző, mint Rutherford és Bohr tanítványa, majd munkatársa maga is aktív együttműködője volt a modern atom- és atommag fizika létrejöttének, s a személyes élmény varázsa érződik e kor ismertetésénél. – A mű célja a fizika történetének bemutatásán kívül, hogy a fizika világának további, mélyebb megismerésére ösztönözze az olvasót

GONDOLAT

ELŐKÉSZÜLETBEN

Max Planck

VÁLOGATOTT TANULMÁNYOK

*

A KVANTUMMECHANIKA KLASSZIKUSAI

*

Heisenberg

VÁLOGATOTT TANULMÁNYOK

GONDOLAT

41,– Ft