

113333

KINCSESTAR

A MAGYAR SZEMLE TÁRSASÁG
KIS KÖNYVTÁRA

85. SZ.

A MODERN FIZIKA VILÁGKÉPE

ÍRTA

M. ZEMPLÉN JOLÁN

BUDAPEST
MAGYAR SZEMLE TÁRSASÁG



K I N C S E S T Á R



86.550213

A MODERN FIZIKA
VILÁGKÉPE

ÍRTA

M. ZEMPLÉN JOLÁN



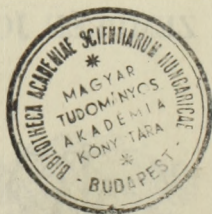
MTA
KIK



BUDAPEST 1941

KIADJA A MAGYAR SZEMLE TÁRSASÁG

113333



Kiad: Dobosy Tibor.

Tipográfiai Műintézet, V., Báthory-utca 18.

A MODERN FIZIKA VILÁGKÉPE

BEVEZETÉS

A természeti világ, mely az embert körülveszi, tele van csodálatosnál-csodálatosabb jelenségekkel. Ragyogó napsütést pillanatok alatt mennydörgés és villám-lás követhet; kemény tél, mosolygó tavasz, forró nyár és hervadó ősz váltják egymást. Az elhajított kő rövid emelkedés után visszahull a földre; a napsugár csakhamar felszárítja a nedves utcát; bizonyos vasfajták más, kisebb fémdarabokat magukhoz vonzanak, ha megcsavarunk a falon egy kapcsolót, vakító fény árasztja el a szobát; ha meghúzzuk a harang kötelét, zengő, messzire ható hangot hallunk; egyszóval: a környező világ színes, hangos és változatos. Az emberek ősi tulajdonsága, hogy nem fogadja el egyszerűen az eléjétáru-
ló tényeket, hanem azokra magyarázatot keres. Minden történeti kornak megvoltak a maga legégetőbb kérdései és ezekre igyekezett is megadni a választ, hol babonával, hol egyéb rejtélyes okokkal magyarázva meg a világ csodálatos, vagy egyszerű dolgait. E magyarázatok összessége az, amit általában világgépnek nevezünk.

A világgép tehát az az elképzelés, melyet az egyes ember a környező világról alkot. Mindig voltak azonban kiválasztottak, akik nem elégedtek meg valamilyen felületes, általánosan bevett magyarázattal, hanem igyekeztek a dolgok mélyére tekinteni, a jelenségeket tervszerűen megvizsgálni és a vizsgálatok eredményeit

rendszeres egységbe foglalni. Az ilyen tervszerűen és rendszeresen felépített világképet tudományos világképnek nevezzük. Ha az ilyen világkép kizárólag természeti jelenségekre vonatkozik, szólunk természettudományos világképről.

A természettudományos világkép fogalma nem túlságosan régi. A görögök még nem ismerték a mai értelemben vett természettudományos kutatást. Céljuk egységes, átfogó világmagyarázat volt, melyben igyekeztek megtalálni az ember helyét a világban, az istenség szerepét, valamint a természeti jelenségek magyarázatát. A görögség nem ismert különböző tudományokat, ők csak a tudományt ismerték. Ez a tudomány a világ egészére vonatkozó ismeretek egységes rendszere volt: filozófia. A világ elméleti megragadásának ez a módja egészen a renaissance-ig tartott. Az újkor hajnalán kezdődött el a tudományban a specializálódási folyamat, mely napjainkban szinte hihetetlen méreteket öltött. A tudósok egy csoportja most már lemondott arról, hogy megismerje az egész világot, megelégedett a részletekkel, sőt még e részletekből is csak a *tapasztalat* által hozzáférhető *tényeket* kutatta. A főkérdés, melyet felvetettek, ellentétben a görögséggel, nem a „mi” és „miért” volt, hanem a „hogyan”. Galilei pl. már nem azt kérdezte, hogy az elhajított testek *miért* esnek vissza a földre, hanem hogy *hogyan* esnek, vagyis az esés milyen törvényszerűségeket mutat. A tények vizsgálatából született meg a természettudomány. Az egykor egységes természettudomány is ma már számtalan ágra bomlik. Természettudomány az állattan, a növénytan, a csillagászat, az élettan, a vegytan, a fizika stb. Mindezek ősrégi kutatási területek. Mégis — mint mondtuk — az újkor forradalmat jelentő probléma-felvetése (a „hogyan”) e tudományok közül szinte kizárólag a fizikát (illetve részben a kémiát) érintette. Miért? Azért, mert pl. a növénytan és állattan túlnyomórészt leíró tudományok, vagyis főkérdésük a legrégebb időkben épp úgy, mint ma is, a „milyen” volt. A fizika

viszont a külső természeti világ *folyamataira* vonatkozó tudomány és feladata felkutatni azokat a *törvényszerűségeket*, melyek e folyamatokon leolvashatók. Ez magyarázza meg azt is, hogy a fizika — bár a görögség is sok értékes részleteredményt tudott felmutatni — aránylag fiatal, tipikusan nyugati és újkori tudomány. Mindaddig, míg a tudósok nem látták meg azt a probléma-felvetést, mely a fizikai tudomány haladását elősegítette, nem sikerülhetett olyan átfogó természeti törvények felállítása, mely a jelenségek egész csoportjának egységes magyarázatát adta volna. Az újkorban ez valóban sikerült és így ma már beszélhetünk *fizikai* világképről. Fizikai világképen mindazon adatok összeségét értjük, melyek segítségével a természeti világ jelenségeit átfogó egészbe foglalhatjuk.

Napjainkban lépten-nyomon halljuk e kifejezést: modern fizika. A fizika azonban — mint mondtuk — teljes egészében modern tudomány; vajjon nem fölösleges szószaporítás-e akkor a „modern” fizika világképéről” beszélni? A tudomány általában nem ismeri az ugrásokat, eredményeit fokozatos fejlődés, lassú, szorgalmas kutató munka útján nyeri. Így első értelemben modern fizikán a legújabb, leg-„modernebb” fizikai eredményeket értjük. Ha azonban csupán ennyiről volna szó, valóban nem lenne érdemes e jelzőt állandóan használni. Hiszen az természetes, hogy még a tudományos érdeklődésű átlagember sem tarthat lépést a tudomány haladásával és új, jelentős felfedezésekről csak később, kisebb érdeküekről pedig egyáltalában nem értesül. Ha azonban fizikáról van szó, a „modern” jelző nemcsak az új felfedezések által kibővült fizikát jellemzi, hanem egy, a hagyományos fizikai elképzelésekkel szemben újszerű szemléleti módra utal. Az elmúlt évtizedekben ugyanis a fizikában oly nagy forradalom ment végbe, mely a tudomány történetében úgyszólván egyedül áll. Ilymódon a „modern” jelző nemcsak a jelenlegi helyzetet jellemzi, hanem megkülönböztetésül szolgál az ú. n. „klasszikus” fizikával szemben, aho-

gyan ma az újkorban kialakult és egészen napjainkig egyenes vonalban haladó tudományt nevezzük. A modern fizika világképe elvi jelentőségben ma már szinte túllépte a szaktudomány korlátait, általános érdekre tett szert és ezért a mai művelt ember nem lehet közömbös azokkal a lényeges elvi eltérésekkel szemben, melyek a klasszikus és modern fizika között mutatkoznak.

Új tudományos elméleteket nem pusztán az emberi elme öncélú működése hoz létre, ezek rendszerint a kényszerítő szükségből fakadnak. A tudományos elmélet célja a jelenségek bizonyos csoportjának átfogó magyarázata. Ha az elmélet nem tud minden e csoportba tartozó jelenséget megmagyarázni, új elméletet kell találni. Hogy megérthessük, melyek voltak azok a kényszerítő mozzanatok, melyek a klasszikus fizika elméleteinek átépítését, vagy módosítását követelték, mindenekelőtt a klasszikus fizika elvi alapjaival és ma már lezártnak tekinthető szellemi építményével, azaz világképével kell megismerkednünk.

1. A KLASSZIKUS FIZIKA VILÁGKÉPE

Egyszerű példán felismerhetjük, hogy mit jelentett az újkori tudományos gondolkodás az ókori és középkori megismerés módszereihez képest. Aristotelesnek, a görögség legnagyobb filozófusának rendszere a tudomány minden ágát, így a fizikát is felölelte. Tanításából azonban itt csupán egyet említünk meg. Aristoteles az összes testeket két csoportba osztotta: szerinte nehéz és könnyű testek vannak. A görög gondolkodásban hagyományossá vált 4 elem közül nehezek a föld- és víz-jellegű anyagok, könnyűek a tűz és a levegő. A világmindenség szerkezete olyan, hogy a nehéz testek annak közepén, a könnyűek pedig a szélén helyezkednek el. Ez a magyarázata annak, hogy a nehéz testek a Föld középpontja felé esnek, mégpedig egyenletes sebesség-

gel, a könnyűek pedig ugyancsak egyenletes sebességgel attól eltávolodni igyekeznek. Az egyenletes sebességet azzal magyarázta, hogy a testek csupán természetes helyük felé mozognak egyenletesen, minden más mozgáshoz erő szükséges. Szépen láthatjuk tehát, hogy Aristoteles főkérdése az volt: *miért* esnek le a súlyos testek. Ezt pedig nem *tapasztalati* úton törekedett megállapítani, hanem a világegyetemről való apriori elképzelésébe igyekezett az esés tényét belehelyezni.

Galilei (1564—1642) egészen másképp fogott az esés problémájának megoldásához. Mivel szerinte fizikai tudásunk alapjait a tapasztalatból merítjük, ha meg akarunk tudni valamit az esésről, meg kell azt *figyelnünk*. A megfigyelni óhajtott jelenséget magunk is előidézhetjük, azaz *kísérletezhetünk*. Ahelyett tehát, hogy az egész világegyetem kozmikus összefüggéseit próbálnók filozófiai előfeltevésekből levezetni, fogjunk meg egy tárgyat, ejtsük le és mérjük meg órával kezünkben a sebességet, azaz az időegység alatt megtett utat. Galilei ily módon *megmérve* a különböző sebességeket, legelőször is azt állapíthatta meg, hogy Aristoteles tétele az állandó sebességről téves, mert hiszen a szabadon eső test nem állandó, hanem változó sebességgel esik, azaz gyorsul. Még pedig minden másodpercben ugyanannyival növekszik sebessége. A mérési eredményeket összeállítva most már meg kellett fogalmaznia, *hogyan* is történik az esés. E megállapításnak olyannak kellett lennie, mely nem csupán arra az egy megfigyelt esetre vonatkozik, hanem *minden* szabadesésre. E ponton hívta Galilei segítségül a matematikát: általános törvényszerűséget mérhető mennyiségek között csupán a matematika segítségével állíthatunk fel. „A természet a matematika nyelvén szól hozzánk” — mondta Galilei és a fizika további fejlődése során talán ennek a felismerésnek van a legnagyobb jelentősége. Galilei a szabadesésben megnyilvánuló természeti törvényt matematikailag úgy fogalmazta meg, hogy a megtett út arányos az idő négyzetével, azaz a leejtett test kétszer ak-

kora idő alatt négyszer akkora utat tesz meg és pedig úgy, hogy sebessége közben az idővel arányosan növekedik.

A fenti példából kiderül immár az újkori fizika módszerének lényege. A kiindulópont — és ez minden természettudományra vonatkozik — a tények pontos megfigyelése, avagy fizikai kikísérletezése. Ámde itt nem elégszünk meg a puszta minőségi megfigyeléssel, hanem mérünk is, azaz a szereplő fizikai fogalmakat (út, sebesség, sebességváltozás, idő stb.) elsősorban mennyiségileg akarjuk megismerni. Mikor előttünk áll számokban a mérés eredménye, a számokat matematikai jelképekkel helyettesítjük és leolvassuk a közöttük fennálló mennyiségi összefüggést. Ha ezt az összefüggést azután ismét a fizika nyelvére fordítjuk, megkapjuk a természeti törvényt.

A matematika fontossága a fizikában egyébként is kézenfekvő. Ha a fizikai jelenségeket meg akarjuk vizsgálni, tájékozódnunk kell a térben. Ehhez pedig a tér alakzatainak pontos ismerete szükséges. Ezeket az ismereteket a geometria szolgáltatja. A geometria mint tudomány eredetileg a tapasztalat alapján alakult ki. Kr. e. az V. században Euklides, görög matematikus az akkor ismert tapasztalati tényeket egységes rendszerbe foglalta. Ez az ú. n. euklidesi geometria. A rendszer egységét szilárdan lefektetett alapigazságainak (axiómáinak) köszönheti. Ennek a geometriának tere — amely különben az ember térszemléletével megegyezik — az ú. n. Euklides-féle tér. Jellemző rá, hogy egy pontjában három egymásra merőleges egyenes húzható — azaz a tér „háromdimenziós” — és hogy benne a párhuzamos egyeneseknek kitüntetett szerepük van.

Az euklidesi geometria — bár nagy mértékben megkönnyíti a térben való tájékozódást — önmagában még nem lett volna elegendő a fizika XVIII. századbeli nagyméretű fejlődéséhez, ha Descartes nem találja fel az euklidesi térnek mintegy gerincét jelentő derékszögű koordinátarendszert. A derékszögű koordinátarendszer

3 egymásra merőleges egyenes: a tér egy pontjának helyét három számadat jellemzi: a három tengelytől való merőleges távolság, a pont ú. n. koordinátái. A pont mozgása a térben vonalakat ír le és a vonalak matematikai egyenlettel jellemezhetők. A koordináta-rendszer segítségével tehát összekapcsolhatjuk a geometriát és az algebrát. Így jött létre az analitikai geometria, a fizikai törvények leírásának legalkalmasabb eszköze.

* * *

Mivel célunk tulajdonképpen a modern fizika világképének felrajzolása, ezért nem követhetjük lépésről-lépésre a Galilei fellépését követő szédületes, a tudomány történetében szinte egyedülálló fejlődést, csupán összefoglaló képet próbálunk adni a fizika nagy elméleteiről, melyek a XVIII. és XIX. sz. folyamán alakultak ki.

Miután Galilei felismerte a módszert: tapasztalat és elmélet szoros kapcsolatát, valóban nem volt más hátra, mint e módszerrel a fizika törvényeit felkutatni és azokat alkalmazni. A legegyszerűbb, illetve legszembe-tűnőbb fizikai jelenség a mozgás. Így természetes, hogy az a terület, mely a kutatásra elsőnek kínálkozott, a mozgások tana, a mechanika volt. Descartes felfedezte a koordináta-rendszert, Leibniz és Newton pedig felfedezte a differenciál- és integrálszámítást: a végtelen kicsi, folytonos változások leírására szolgáló matematikai eljárásokat. Így épült fel lassan a mechanika impozáns épülete, kialakultak a mechanikai mennyiségek: sebesség, gyorsulás, erő, tömeg, munka, energia, stb. definíciói.

Hogy megérthessük a mai fizika „modern” voltát a klasszikushoz viszonyítva, nem annyira a tárgyi eredmények, mint az elvi megállapítások ismerete fontos.

Ha a mindennapi életben egy tárgy mozgását megfigyeljük, akkor a mozgó tárgy helyzetét mindig valamely más, szintén mozgó, vagy nyugvó tárgy helyzeté-

hez viszonyítva jellemezzük. Az előttem elhaladó autó felém közeledik, majd tőlem távolodik el. Lehet, hogy én magam nem mozgok, de az is lehet, hogy sétálok. Két szembetalálkozó vonat először közeledik egymáshoz, majd távolodnak, tehát az egyik mozgását a másikra vonatkoztatjuk. A fizikában tehát meg szokás különböztetni relatív és abszolút mozgást. Az előbbiről akkor beszélünk, ha a tárgy, melyhez képest a mozgást vizsgáljuk, szintén mozog, míg az utóbbiról akkor, ha az nyugalomban van. Mivel Földünk maga is mozgásban van a Naphoz és a Naprendszer többi tagjához képest, a Földön abszolút mozgásról nem igen beszélhetnénk. A newtoni dinamika mégis feltételezte, hogy a rendszer, melyre a mozgás törvényeit vonatkoztatjuk, az abszolút nyugalom állapotában van. Ez a 3 egymásra merőleges merev tengely a mozgó Földdel nem lehet összeköttetésben; ha törvényeinket a Földre is érvényesnek akarjuk tekinteni, azok a Föld forgó mozgása következtében némiképen módosulni fognak. Newton szerint e rendszer az állócsillagok rendszerével (melyeket ő nyugalomban levőknek képzelt) esik össze. Ez egy tehetetlenségi rendszer, mivel benne az egyenletesen mozgó és a nyugvó testekre vonatkozó törvények között különbségeket nem találunk, sőt egymáshoz képest egyenesvonalú, egyenletes mozgást végző tehetetlenségi rendszerek között sem tudunk különbséget tenni. Észrevehető változást akkor tapasztalunk, ha a test sebessége megváltozik: azaz gyorsul. A gyorsulás okát erőnek nevezzük. Ha ismerjük egy test helyzetét és sebességét egy adott pillanatban („kezdeti feltételek”) és ismerjük a ható erő törvényét, vagyis azt a matematikai kifejezést, amely az erőhatás kvantitatív mértékét kifejezi: anélkül, hogy az erő mibenlétéről bármit állítanánk, ezekből az adatokból a test minden múlt- és jövőbeli helyzete megállapítható.

A fenti megállapítás tulajdonképpen a klasszikus fizika egyik legalapvetőbb elvét, az okság törvényét tartalmazza. A fizikai kauzalitás szerint ok és okozat

között a kapcsolatot a természeti törvények nyújtják. Az ok a rendszer kezdeti állapota, az okozat a jövőbeli állapot. Mivel a kapcsolatot a törvény fejezi ki, mely mindig érvényes, nyilván ugyanannak az oknak mindig ugyanazt az okozatot kell előidéznie. A mozgásoknál szerepet játszik az idő is. A newtoni dinamika szerint az idő abszolút, állandóan és egyenletesen folyik, független a rendszertől, melyben megfigyeléseinket végezzük.

Tehát: az abszolút térben és abszolút időben lefolyó mozgások a matematikai alakban kifejezhető természeti törvények szerint történnek, az okság szigorú szabályainak megfelelően. Hozzá kell még tennünk — bár ennek fontosságát csak később fogjuk látni, — hogy az abszolút térben az euklidesi geometria érvényes. A fizikusnak tehát csupán gyakorlati vagy matematikai nehézségeket kell leküzdenie, hogy a múlt és jövő minden történése ismertté legyen előtte. Lehetnek ez akadályok gyakran leküzdhetetlenek, de elvi nehézség nem áll útjában annak, hogy „mindent tudjunk”.

A XVIII. század nagy matematikusa, Pierre Simon de Laplace (1749—1827) fejezte ki leghatározottabban a klasszikus fizika ezen alap gondolatát. A tudomány mindenhatóságát Laplace szavai szinte gögösen hirdetik és azokat ma a kauzalitás körül folyó vitákban annyit idézik, hogy érdemes szószerint ideiktatni: „Így a világmindenség jelen állapota az előző állapot okozatának és az eljövendő állapot okának tekintendő. Az olyan értelem, mely egy bizonyos pillanatban a természet összes erőit és az azt összetevő egységek helyzetét ismerné, mely továbbá elég mélyreható volna ezen adatok elemzésére, egyazon képletbe foglalhatná a világ legnagyobb testének és legkönnyebb atomjainak mozgását. Semmi sem volna bizonytalan előtte; a jelen módjára látná a jövőt, épp úgy, mint a múltat... Az igazság érdekében kifejtett minden erőfeszítés arra irányul, hogy minél jobban megközelítse a fent elképzelt értelmet.” Nem lényeges, hogy ilyen értelem nincs, a

fontos az, hogy *elvben* a múlt és jövő titkai megismerhetők.

Nézzünk most meg közelebbről egy másik ilyen természeti törvényt, Newton felfedezéseinek legfontosabbikát: az általános tömegvonzás törvényét. Már Galilei sejtette, hogy a testek esésének okát a Földben kell keresnie, de ő még úgy látta, hogy a Föld felszínén a testekre ugyanaz az erő hat. Newton távolabbra, a többi égitest, a bolygók és a Föld felé fordította figyelmét és feltette, hogy két tömeg mindig vonzza egymást és a közöttük működő vonzóerőt a két test tömegének nagysága és a köztük levő távolság négyzete határozza meg, még pedig úgy, hogy az erő az utóbbival fordítottan arányos. (Azaz: kétszer nagyobb távolságnál az erő négyszer kisebb.) Newton számításait a Föld sugarára és a Földnek a Holdtól való távolságára vonatkozó pontos mérések igazolták.

Elvi szempontból a leglényegesebb Newtonnak ebben az elméletében az volt, hogy a földi mozgásokra ugyanazok a törvények érvényesek, mint a bolygók mozgására. A mechanika tehát egységes rendszerbe foglalja a világegyetemet: amire a görögség és Aristoteles törekedett, most megvalósult.

A mechanika a matematika rohamos fejlődésével egyre több probléma megoldását tette lehetővé. A Newton-féle abszolút térrel és a kauzalitással kapcsolatban merültek fel ugyan aggályok, de ezek egyelőre nem mutattak elvi nehézségeket. Az idő még nem érett meg a csodálatos sikereket felmutató rendszerben való kételkedésre, inkább arra törekedtek, hogyan lehetne a fizika többi területén is a mechanikához hasonló tökéletes rendszert létrehozni. Sőt nemcsak a fizika, hanem egyéb tudományok, főképp a filozófia is részben a fizikai okság merev törvényszerűségeit próbálta pl. a lelki élet területén is elfogadtatni (determinizmus).

* * *

A mozgás mellett a világban való tájékozódásunkat legnagyobb mértékben a látás teszi lehetővé: a látás

fizikai oka a fény. A XVIII. században a fény mibenlétének problémája is előtérbe került. Ekkor már aránylag nagyon sok tapasztalati ismeret állt a tudósok rendelkezésére. Hogy a fény egyenes vonalban terjed, ezt már a látásról való legprimitívebb elképzelés mellett is tudták; a fény egyenesvonalú terjedése hozza létre az átlátszatlan testek mögött keletkező árnyékot. Ismerték a fényvisszaverődés, a fénytörés jelenségeit és törvényeit (ha a fénysugár egyik közegből másikba, pl. levegőből vízbe jut, irányát megváltoztatja). Ismerték a lencsét, tükröt, tudtak nagyítót és messzelátót készíteni; ismerték azt a jelenséget is, hogy az üvegprizmán áthaladó fehér fény a szivárvány (spektrum) színeire bomlik, stb. A fény mibenlétéről azonban keveset tudtak.

Newton szerint (emissziós elmélet) a fényt a világító testek lövelik ki magukból, mint apró, gyorsan mozgó részecskéket (korpuzszkulák). Ez érthetővé teszi az egyenesvonalú terjedést. Nem magyarázza azonban meg a már Leonardo da Vinci által is felfedezett fényelhajlást; hogy t. i. kis tárgyak árnyékának belsejében világos csíkokat látunk. Newton álláspontjával szemben Hook és Huyghens a rezgési v. undulációs elméletet képviselték. Eszerint a fénysugárban bizonyos — egyelőre ismeretlen természetű — szabályos rezgések terjednek tova. E rezgési elmélet azonban egyelőre nem tudott kielégítő magyarázatot adni a fény egyenesvonalú terjedéséről. E nehézséget a XVIII. század végén Young (1773—1829) és Fresnel (1788—1827) véglegesen eloszlatták. Ha ugyanis a fény nem egyenes vonalban repülő részecskékből, hanem rezgésekből, hullámokból áll, akkor a fénynek is mutatnia kellett a mechanikából már ismeretes rugalmas rezgések sajátosságait. Képzeljünk el pl. egy kifeszített gumizsinórt, amelynek egyik végét megrángatjuk: ekkor a zsinór végén levő részecskék rezgésbe jönnek és a rezgés lassankint végigterjed az egész zsinóron, úgy hogy a zsinór hullámvonal alakot ölt. Egy hullámhegy és -völgy kez-

deti és végpontja közötti „légvonaltávolságot” a rezgés hullámhosszúságának, magasságukat pedig a rezgés amplitudójának (tágasságának) nevezzük. Most képzeljük el, hogy az előbb említett zsinórnak nemcsak az egyik, hanem ugyanakkor a másik végét is meg-rántjuk: két ellentétes irányú rezgés indul el és valahol a zsinór közepe táján találkoznak. Aszerint, hogy hullámhegy hullámheggyel, vagy hullámvölgygel találkozik, a keletkező rezgés amplitudója növekszik, illetve csökken, vagy esetleg éppen megszűnik. Ezek a helyek, ahol az amplitudó zérus, az ú. n. csomópontok. A hullámzást ilyenkor „álló” hullámnak nevezzük. Egyirányú rezgéseket is elindíthatunk egymásután: a keletkező hullám képe attól fog függni, hol éri utól egyik hullám a másikat. (A hintázásnál sem jutnánk soha magasabbra, ha a következő lökést felfelé éppen akkor adnánk, amikor a hinta már lefelé halad.) Ezt a jelenséget hullámtalálkozásnak, interferenciának nevezik.

A fény rezgési elméletének igazolására tehát interferenciát kellett fénysugarakkal létrehozni. Ennek azonban aránylag nagy kísérleti nehézségei voltak. Az interferencia legbiztosabb jele u. i., ha a találkozó hullámok éppen megsemmisítik, kioltják egymást. De ki látta már, hogy ha egy szobában még egy lámpát meggyújtunk, akkor sötét lett volna? A kísérletileg előállítandó feladat ez volt: fény + fény = sötétség. A nehézséget az okozta, hogy interferencia csak egészen speciális feltételek mellett jöhet létre. E feltétel az, hogy a két hullám pontosan ugyanabból a pontból és ugyanolyan fázisban induljon (ez azt jelenti, hogy ha az egyik pl. a hullámhegy csúcspontjánál kezdi a rezgést, a másik is ugyanott kezdjen rezegni). Két különböző fényforrás esetében ez a feltétel nem volt teljesíthető. Fresnel egy szellemes berendezés segítségével elérte, hogy ilyen interferenciaképes (koherens) fénysugarakat állítson elő. Ugyanazon igen kicsi, pontszerű fényforrásnak a képét kettős tükrök, vagy prizma segítségével két részre bontotta, úgyhogy látszólag két fény-

forrást kapott, a belőlük kiinduló sugarak azonban már koherensek voltak. Ezeket azután bizonyos távolságra egy ernyőn felfogta. Nyilván az ernyőnek egész csomó olyan pontja volt, ahová mindkét látszólagos fényforrásból jutott fény, e fénysugarak azonban természetesen különböző utakat tettek meg és így különböző fázisban találkoztak. S valóban az ernyőn világos és sötét csíkok váltakoztak egymással: egyes helyeken tehát valóban fény és fény találkozásának sötétség lett a következménye. Ez az eredmény a fény hullámtermészetét fényesen igazolta. Fresnel e berendezése a fény hullámhosszúságának megmérést is lehetővé tette. Ez igen kis számnak bizonyult. Ha a mm milliomodrészét egy $\mu\mu$ (millimikron) nevű egységgel jelöljük, a vörös fény hullámhosszára nagyjából 800 $\mu\mu$, az ibolyáéra 400 $\mu\mu$ adódik (a spektrum többi színe: narancs, sárga, zöld, kék, ezek közé esik). A fény hullámhosszának rendkívül kicsiny voltából érthető, hogy az egyenesvonalú terjedéstől csak akkor tapasztalunk eltérést, ha a fény útjába kerülő akadály igen kicsi. Az árnyék úgy keletkezik, hogy a sötét test mögé behatoló fényhullámok egymást megsemmisítik (Huyghens elve).

Hogy a fényhullámok terjedését megmagyarázzák, azt kellett feltenni, hogy a világmindenséget egy súlytalan, rugalmas, szilárd anyag: az éter tölti ki. A fényrezgéseket az éter közvetíti. E hipotetikus anyag bevezetése azonban a fény mibenlétének problémáját nem sokkal vitte előbbre. Emellett az összes fényjelenségek értelmezése csak úgy volt lehetséges, ha az éternek a legkülönfélébb, sokszor egymásnak ellentmondó sajátosságokat tulajdonítottak. A hullámoptika teljes kiépítése csak az elektromos jelenségek behatóbb vizsgálata után következett be.

* * *

A testek elektromos sajátosságait már a görögök is ismerték. Tudták, hogy az állati szőrrel megdörzsölt borostyánkő (*ἤλεκτρον*) apró testeket képes magához vonzani, de azokat rögtön el is taszítja. A dörzsölés

által tehát a test ú. n. elektromos töltést nyert, ezt átadta a másíknak; miután ekkor már annak is volt töltése, a két azonos töltés egymást taszította. Tehát kétféle elektromosság van: nevük pozitív és negatív elektromosság. Az egyformák taszítják, a különbözőek pedig vonzzák egymást.

A nyugalomban levő elektromos töltésre vonatkozóan Coulombnak sikerült empirikus úton törvényt találnia (1784), mely a Newton-féle gravitációs törvény pontos megfelelője volt. Ennek alapján az elektromos vonzó- és taszítóerőt is távolbaható erőnek tartották, bár ez a felfogás a fizikusokat nem elégítette ki. Maga Newton sem szívesen fogta fel a gravitációs erőt ilyennek, inkább tartózkodott a közelebbi magyarázattól („Hypotheses non fingo.”). Az elektromos áram felfedezése (Galvani 1786 és Volta 1800) és az árammal végzett különböző kísérletek nyomán (az áram vegyi, mágneses és hőhatása) azonban egyre inkább előtérbe került az erőhatás terjedésének problémája. Faraday (1791—1867) volt az első, aki megpróbálta a közeg szerepét vizsgálni. Faraday úgy képzelte el, hogy minden elektromos töltéssel bíró testhez a térnek egy része tartozik, melyen belül elhelyezett más töltésekre az illető test még elektromos hatást gyakorol. Ez a térrész az elektromos töltés erőtere. A hatást Faraday szerint az erőteret betöltő szigetelő anyag közvetíti. Kérdés: milyen gyorsan terjed e hatás az erőter egyik pontjából a másíkg? E kérdésre Faraday (aki autodidakta volt) nem rendelkezvén a szükséges matematikai készséggel, nem tudott választ adni. Elgondolásait azonban James Clark Maxwellnek (1831—1879) matematikai számításal sikerült igazolnia. Ezekből azután az is kiderült, hogy a szigetelőben az elektromos és mágneses hatások véges, bár igen nagy sebességgel terjednek. A szigetelő szerepe tehát valóban lényeges az erőhatás terjedése szempontjából, mert a hatásnak időre van szüksége, hogy a tér egyik pontjából a másíkba jusson. Maxwell számításainak szenzáció erejével ható ered-

ménye az volt, hogy az elektromágneses hatások terjedési sebessége éppen a fény terjedési sebességével egyenlő. (Ez utóbbit Römer Olaf mérte meg először 1676-ban; légüres térben $c = 300.000$ km másodpercenként.) Innen már csak egy lépés volt annak feltevése, hogy a fény maga is elektromágneses hullám, azaz, hogy az éterben az elektromos és mágneses térerősség szabályszerű váltakozásai terjednek tova. Mikor azután Heinrich Hertznek (1887) sikerült kísérletileg is elektromágneses hullámokat előállítani és azokon a törés, visszaverődés, interferencia, kettős törés, egyszóval az ú. n. geometriai és fizikai fénytán jelenségeit bemutatni, kétségtelenné vált, hogy a drótnélküli távirónál szereplő hullámok és fényhullámok azonos természetűek, csupán hullámhosszúságban különböznek. Ma már az elektromágneses hullámok egész sorozata ismeretes a legrövidebb hullámhosszúságú γ sugártól a néhány km hosszúságú rádióhullámokig.

Tudjuk, hogy az elektromosság törvényeinek megismerése mily mérhetetlen hatással volt a technika fejlődésére; tudományos szempontból pedig a Faraday-Maxwell-Hertz-féle elektromágneses elmélet a klasszikus fizikának a newtoni dinamika mellett másik alappillére lett.

* * *

A determinizmust megalapozó dinamika és az elektromágneses fényelmélet mellett a klasszikus fizika korának legátfogóbb jelentőségű felfedezése az energia megmaradásának elve volt. Ha kizárólag mozgásjelenségekre szorítkozunk, a testek kétféle okból végezhetnek munkát: vagy helyzetüknél, vagy sebességüknél fogva. A munkavégzésre való képesség neve energia. Az energia mértéke a végzett munka (erőkifejtés). Kétféle mechanikai energia van tehát: helyzeti v. potenciális és mozgási v. kinetikus energia. Egyszerű számítás segítségével igazolható, hogy e kétféle energia összege egy mozgás folyamán mindig ugyanaz. Pl. a földtől 5 m

magasra felfüggesztett 2 kg súlyú kődarab helyzeténél fogva akkora munkát tud végezni, mint egy ember, ha 2 kg súlyt 5 m magasra felemel. Ha a követ elengedjük, helyzeti energiája a földről való távolsággal állandóan csökken, ennek rovására azonban, mivel gyorsuló mozgást végez, növekedik sebessége és ezzel mozgási energiája. Ez az energia megmaradásának elve mechanikai rendszerre. Átfogó természeti törvénynek azonban még nem tekinthető, csupán egy egyszerű összefüggést ad meg a mechanikai energia két fajtája között. Átfogó elvet csak akkor kaphatunk, ha az említett két energiafajtán kívül más energiákat is számításba veszünk. A történeti fejlődés során a hőre vonatkozó kutatások eredménye szolgáltatta azokat az eredményeket, melyek segítségével a fizika legáltalánosabb elve megszerkeszthető volt.

A hőt a XVII. században a fényhez, elektromossághoz, mágnességhez hasonlóan finom súlytalan anyagnak tartották, melyből a melegebb testekben több, a hidegebbekben kevesebb van. Ezzel az alapfelfogással egészen jól lehetett értelmezni a hőkölés, halmazállapotváltozások, stb. jelenségeit. Ez a hő ú. n. kalorikus elmélete. Gondoljunk azonban arra, hogy már az ősember és gyermekkori barátunk, Robinson, a lakatlan szigeten, úgy gyújtottak tüzet, hogy két különböző keménységű fadarabot dörzsöltek össze. Ha a kalorikus elmélet szerint mindkét fadarabban bizonyos mennyiségű meleg volt, honnan keletkezett az a nyilván sokkal nagyobb hőmennyiség, mely a fadarabok lángralobbanásához szükséges? Általában is tudjuk, hogy két különböző anyag dörzsölésekor, azaz surlódáskor mindig hő keletkezik. Bármily sok jelenséget tud is tehát a kalorikus elmélet magyarázni, mégsem lehetett övé az utolsó szó a hő mibenlétére.

Robert Meyernek (1840) sikerült először számszerűleg kimutatnia, hogy a hő bizonyos mennyiségű mechanikai munkával egyenértékű. Tőle függetlenül hasonló kísérleteket végzett Joule (1818—1889);

Helmholtz (1821—1894) pedig híres, nagy munkájában számolt be a hő és a munka közötti összefüggés kérdéséről. Mégis elég soká tartott, míg általánosságban elfogadták azt az elvet, hogy a hő és a mechanikai energia ugyanazon energia két különböző fajtája. Így alakult ki a fizikai tudomány egyik legfontosabb ága: a termodinamika.

A termodinamika első alaptörvénye éppen az energia megmaradásának elve: az ú. n. első főtétel. Eszerint valamely zárt rendszer összes energiáinak összege állandó. Energia semmiből nem keletkezhetik, az energia nem semmisülhet meg, legfeljebb egyik energiatípus alakulhat a másikba. Így tudományos megfogalmazást nyert az örökmozgó, azaz a „perpetuum mobile” lehetlenségének elve: lehetetlen olyan gépet szerkeszteni, amely „befektetés nélkül”, semmiből, munkát termelne. Fennmaradt azonban még az a kérdés: lehet-e olyan tökéletes gőzgépet szerkeszteni, mely a közölt hőt elvileg teljes egészében munkává alakítja? A tapasztalat szerint ugyanis a gőzgépnél a hő nagy része arra feccsérlődik, hogy a hidegebb környezetet melegíti fel. Energiamegsemmisülésről nincs ugyan szó, de a hasznosítható energia nagy része kárbavész. Clausiusnak (1857) sikerült kimutatnia, hogy az energia ezen szétszóródása nem véletlen, hanem épp oly alapvető törvény szerint történik, mint amilyen az energia megmaradásának elve volt. Ez a tartalma a termodinamika második főtételének, amelynek következménye a másodfajú örökmozgó, vagyis a befektetett hőt teljes egészében munkává alakító gép lehetlensége. Clausiusnak sikerült e törvényre matematikai kifejezést találnia, az ú. n. „entrópia” törvényt. A második főtétel szerint a természetben minden változás úgy jön létre, hogy a hő melegebb testről hidegebbre megy át, ilyenkor pedig az entrópia mindig növekszik. Ha egy rendszeren belül hőmérsékletkülönbség nincs, az ilyen rendszer entrópiája a lehető legnagyobb.

Clausius fejtegetéseiben először használta a fiziká-

ban a „valószínűség” fogalmát. A második főtétel indokolása Clausius szerint u. i. úgy hangzik, hogy azért nem mehet a hő hidegebb testről melegebbre, mert ennek valószínűsége igen kicsi. Általában tehát a természeti folyamatok a hőkiegyenlítődé, vagyis az ú. n. termodinamikai egyensúly: a maximális entrópia irányában folynak be. Az entrópia növekedése mellett igen nagy valószínűség szól, ez pedig azt jelenti, hogy a világ összes hasznosítható energiája állandóan csökken és így elkövetkezhetik egy olyan állapot, amikor az entrópia eléri maximális értékét, a világegyetem minden hőkülönbsége kiegyenlítődik, nincs többé hasznosítható energia: ez a hőhalál állapota.

2. A RELATÍVITÁS ELMÉLETE

Nem akartunk a XVIII. és XIX. század fizikájáról pontos és kimerítő képet adni, annak csupán körvonalait szemléltettük: a modern fizika ismertetése során még módunkban lesz számos eddig nem említett és nem részletezett jelenségre és fogalomra visszatérni. Láthatuk eddig, hogy már az elektromágneses fényelmélet és a termodinamika sem voltak pusztán mechanikai módszerekkel értelmezhetők. Newton felfogása már vereséget szenvedett akkor, amikor Faraday az elektromos és mágneses erőkről kimutatta, hogy nem távolbaható erők, mint ahogy azt a gravitációról hitték. Maxwell elméletét viszont nem sikerült közös nevezőre hozni más, az elektromosságra vonatkozó újabb felfedezésekkel (l. később). Mégis, ezek az ellentétes, sokszor egymásnak ellentmondó felfogások mintegy 100 évig békességben éltek egymás mellett, míg végül a XIX. század végén, illetve a XX. század elején a newtoni rendszer alapjaiban rendült meg és nem lehetett többé az ellentmondások mellett behunytt szemmel elmenni, vagy oly közvetítő megoldásoknál megállni, melyek a régi felfogást is megtartják.

Newton dinamikájának ismertetésénél megemlékezünk az ú. n. tehetetlenségi rendszerről és az abszolút térről. Egymáshoz képest egyenletes sebességgel mozgó párhuzamos ter-~~vezeték~~ rendszerekben a mozgási alaptörvények ugyanazok, azaz e rendszerek között nincs ú. n. „kitüntetett” rendszer. Az áttérés az egyikből a másikba az ú. n. Galilei-transzformáció szerint történik, mely megmutatja, hogy a mozgó test helyzetét hogyan lehet az új rendszerben — a rendszerek kölcsönös sebességét ismerve — a régi rendszerben elfoglalt helyzetéből kiszámítani. Így pl. ismerve egy mozgó vonat sebességét, kiszámíthatom, hogy a vonat végéről elinduló kalauz meghatározott idő alatt mekkora utat fog adott sebesség mellett megtenni, egy a földhöz rögzített koordináta-rendszerből nézve. H. A. Lorentz (1853—1928) a Galilei-transzformációt az elektromágneses teret leíró Maxwell-féle egyenletekre akarta alkalmazni, de számításai azt mutatták, hogy ezek — ellentétben Newton törvényeivel — a Galilei-transzformációval bevezetett másik rendszerben más alakot öltenek. Mivel az elektromágneses hullámok terjedési sebessége a fény terjedési sebességével egyenlő, kézenfekvő volt a feltevés, hogy a fény szempontjából kell lennie valamely „kitüntetett” tehetetlenségi rendszernek. Máskép a mozgó Föld az étert magával ragadja, tehát a fény terjedési sebessége a „nyugvó” rendszerben más lesz, aszerint, hogy az éterrel egy vagy azzal ellentétes irányban mozog. Megint más lesz a terjedési sebesség, ha a fény az éter mozgására merőlegesen terjed, mint ahogy gyorsabban lehet egy folyón keresztül oda-vissza úszni, mint ugyanakkora távolságot a folyó sodra irányában és azzal ellentétes irányban megtenni.

A jelenség kísérleti megvizsgálására Michelson és Morley vállalkoztak. A híres Michelson-Morley-féle kísérlet (1887) azonban negatív eredménnyel zárult. Forgatható berendezésük segítségével próbálták eldönteni, hogy a fény terjedési sebessége változik-e valamilyen kitüntetett irányban, de a nagy gonddal végre-

hajtott kísérlet számos megismétlése sem vezetett eredményre. A fény terjedési sebessége tehát minden irányban változatlannak mutatkozott.

Lorentz e jelenség magyarázatára a Galilei-transzformációt vizsgálta fölül. Ha a fényterjedés szempontjából nincsenek kitüntetett rendszerek, a Maxwell egyenleteknek egyformán érvényeseknek kell lenniök minden egymáshoz képest egyenletesen mozgó rendszerben. A hiba a Galilei-féle transzformációban ott van, hogy míg a test helyzete különböző rendszerekben különböző távolságokkal jellemezhető, az időt mindkét rendszerben egyformán mérjük. Lorentz feltette, hogy az idő is más lesz az új rendszerben (Lorentz-transzformáció) és e feltevessel sikerült a Maxwell-egyenletek változatlanságát (invarianciáját) megőriznie.

Lorentz azonban nem látta meg e feltevés alapvető fontosságát, hanem a Michelson-Morley-kísérlet negatív eredményét Fitzgerald-dal és Larmor-ral a következő feltevessel magyarázta: a mozgásban lévő anyag elektromos természeténél fogva sebességétől függő módon az éterben összehúzódik (Lorentz-kontrakció). Ez az összehúzódás nem észlelhető, mert mérőeszközeink ugyanilyen mértékben összehúzódnak. A Michelson-Morley-féle kísérleti berendezés forgás közben hasonló megrövidülést szenved és így a fény sebességében változás nem észlelhető.

Albert Einstein (1905) felismerte e kísérlet és a Lorentz-transzformáció elvi jelentőségét, meglátta, hogy a részletek magyarázata soha nem fogja a kétségtelen ellentmondásokat kiküszöbölni és a problémát a newtoni abszolút idő és abszolút tér fogalmainál fogta meg.

Már említettük, hogy az állócsillagok rendszerét csak első közelítésben lehetett abszolút nyugalomban levőnek tekinteni. Az asztronómiai ismeretek fejlődésével kiderült, hogy az „álló” csillagoknak is van saját mozgásuk. A klasszikus „newtoni” dinamika ezért még nem vetette el az abszolút tér fogalmát, hanem tauto-

lógikusan hangzó meghatározása szerint az abszolút teret éppen az jellemzi, hogy benne a newtoni mozgástörvények érvényesek. Einstein rámutatott, hogy az abszolút tér és idő fogalmai csupán elménk fikciói; semmi tapasztalati alapjuk nincsen. A térről csak hosszmerések, az időről csak a csillagok járása szerint beállított órák révén veszünk tudomást. Ha a Lorentz-kontrakció a nagy sebességgel mozgó testeken valóban létrejön, azt csak az a megfigyelő veheti észre, aki nem mozog együtt az illető testtel, különben ő is és mérőeszközei is ugyanolyan mértékű megrövidülést szenvednek. Hasonlóképen az idő is a megfigyelő helyzetétől függ. „A különböző rendszerekben másképp járnak az órák.”

Van-e vajon ebben az új világban olyan mennyiség, mely változatlan? Hossz és idő, e két alapfogalom relatívok, a megfigyelő helyzetétől függő mennyiségek. A fizika harmadik alapmennyisége, melynek egysége a tudományos mértékrendszer (C. G. S. rendszer, azaz egy oly mértékrendszer, melyben a hosszúságot cm-rel, a tömeget gr-mal, az időt secundummal mérjük) harmadik alapegysége: a tömeg. A kémia alaptétele, az anyag megmaradásának elve, azt mondja ki, hogy minden kémiai változásnál a benne résztvevő anyagok mennyisége, azaz tömege ugyanannyi marad. A speciális relativitás elve szerint azonban nagy sebességek esetén a testek tömege megnövekedik. Ilyen nagy sebességgel haladó részecskéket kísérletileg is sikerült megvizsgálni. Ilyenek pl. a radioaktív sugárzások egyik fajtájában fellépő kistömegű, negatív elektromos töltésű β részecskék, azaz elektronok. A relativitás elméletéből számítással kimutatható tömegnövekedést ezeknél a kísérlet is igazolja. A relativitás elméletének is van azonban egy semmi másra vissza nem vezethető alapfeltevése. Einstein szerint u. i. nem kell magyarázatot keresni arra, hogy a Michelson-Morley és más kísérletek is miért mutatják a fény terjedési sebességét változatlannak. Ez axióma, amelyet el kell fogadnunk, mint általános érvényű, abszolút igazságot. Egyetlen abszolút dolog van

tehát a világban: ez a fény terjedési sebessége. Ennél nagyobb sebességet hiába is próbálunk elképzelni, mert ha a fény terjedési sebességéhez megpróbálunk egy másik sebességet (mely c -vel egyenlő) adni, egyszerű matematikai számítás alapján arra az eredményre jutunk, hogy $c+c$ nem $2c$ -vel, hanem ismét csak c -vel egyenlő.

Felmerül még a kérdés: ha nem érvényes többé az anyag megmaradásának elve, vajjon nem dőlt meg az energia megmaradásának elve is? A relativitás elmélete érdekes és más oldalról is alátámasztott választ ad e kérdésre. Tömeg és energia alapján nem különböző mennyiségek, a tömeg mindig bizonyos energiát képvisel és megfordítva. Fennáll a következő összefüggés: $E = m \times c^2$, azaz az energia egyenértékű a tömeg és a fénysebesség négyzetének szorzatával. Ha nagy sebesség következtében valóban létrejön a tömeg növekedése, ugyanakkor az energia is megnövekedik. Nem kell azt mondanunk, hogy az anyag megmaradásának elve megdőlt, csupán az eddig két különbözőnek hitt alapelv eggyé redukálódott.

Évezredek folyamán kialakult szemléletes fogalmaink tehát helyesbítésre szorulnak. Kiderült, hogy csak képzeletünk hitette el velünk, hogy a háromdimenziós euklidesi tér az egyetlen, melyben természeti törvényeink kifejezhetők. Más geometriák lehetőségét már jóval Einstein előtt felfedezte a nagy magyar matematikus: Bolyai János (1802—1860). Bolyai és tőle függetlenül Lobacsevszkij (1793—1856) kimutatták, hogy nem a tapasztalatunk alapján megismert ú. n. euklidesi geometria az egyetlen lehetséges geometriai rendszer. Lehet felépíteni olyan geometriát is, melyben pl. a háromszögek szögeinek összege 180° -nál nagyobb, a párhuzamosak tétele nem érvényes, stb. Ennek az euklidesi geometria csupán határesetje. Hasonlóképpen Riemann is szerkesztett az euklidesitől különböző geometriát, melyben két pont között nincs egyenes, hanem ú. n. geodetikus görbe vonal a legrövidebb út. Szemléltetni ezt talán a Földgömb példáján lehetne. Gömbfelületen egyenesese-

ket nem húzhatunk, de itt is kikereshető 2 pont között a legrövidebb út, nyilván azonban görbült felületen minden geometriai alakzat más lesz, mint a síkban. Ha azonban egy igen nagy gömbfelület igen kis darabjáról van szó, az síknak fog látszani és rajta a görbe vonalak egyeneseknek. Noha e geometriák már a XIX. század elején ismereteseek voltak, a kutatók csak később gondoltak arra, hogy szerepük a fizikában is jelentős lehet. Főhátrányuk gyakorlati szempontból a szemléletesség hiánya és ez a hiány vonatkozik az egész relativitás elméletére is. Minkowski (1908) a következőképpen fogalmazta meg tér és idő relativitását: Látszat az, hogy mi egy háromdimenziós világban élünk. Minden eseményt négy adat határoz meg: 3 adat a térbeli helyzetre vonatkozik, a negyedik dimenzió az idő. Egyidejűnek csak akkor nevezhetünk két eseményt, ha a tér és idő koordinátái egybeesnek. Az új világban egy másodperc nem a középnap 86.400-ad része, hanem az az idő, amennyi alatt a fény 300.000 km-t megtesz.

Ismételjük, a Minkowski-világ nem szemléletes, elképzelése igen nagy nehézségekbe ütközik. Megkíséreljük ezért néhány példával megvilágítani az új és régi felfogás közti különbséget. Tudjuk, pl., hogy az euklidesi geometria egyik alaptétele szerint két nyugvópont távolsága a térben mindig ugyanaz. Ennek megfelel a Minkowski-világban a következő tétel: két „esemény” közti intervallum mindig ugyanaz. Csakhogy az eseményt helye és ideje egyaránt jellemzi, míg az euklidesi geometria tételeit az időtől függetlennek gondolták. Mindennapi elképzelésünk szerint a háromdimenziós euklidesi tér teljes egészében megy át a „multból” a „jövőbe”. Ha azonban jobban meggondoljuk, a közönséges szóhasználat „most”-ja nyilvánvalóan relatív fogalom. Tudjuk, hogy a fény véges sebességgel terjed, azaz nagyobb — csillagászati — távolságokat nullánál nagyobb idő alatt fut be. Így pl. egy távoli csillagról a Földre a fény esetleg csak akkor érkezik, amikor a csillag már megszűnt létezni. Mi a fényt „most” látjuk

ugyan, de amit látunk, az nem a mi észlelésünkkel egyidejű esemény, hanem mult. Az abszolút „jelent” így kell módosítanunk: „most látható”.

Általában tér és idő relativitása mindig akkor tűnik élesen szemünkbe, ha a fénysebességhez hasonló nagy sebességekről van szó. Képzeljük el pl., hogy repülőgépre ülünk, mely a fény sebességével rohan velünk a csillagok közé. Tömegünk végtelen nagy lesz a Földi szemlélő számára, méreteink pedig összehúzódnak. Mi ebből mit sem veszünk észre, mert míg a földi megfigyelő számára eltelt egy év, mi az idő mulását nem is észleltük. Mult, jelen és jövő, ezek csupán kis sebességeknél jelentenek valamit, egyébként a szubjektív időfogalomnak, melyet öntudatunk észlel, a fizikában nincs jelentősége.

Kérdés, vajjon valóban nincs-e mód olyan mennyiséget találni, melynek segítségével objektíve megállapítható, hogy valamilyen esemény előbb, vagy utóbb történik-e. A termodinamika tételeinél megemlítettük az állandóan növekedő entrópiát. Ezek szerint tehát, ha adva van két állapot, a kettő közül az a későbbi, amelyikben az entrópia, azaz a hasznosítható energia szétosztottsága nagyobb. Másszóval: az a későbbi időpont, mely közelebb van a világegyetem teljes hőtani egyensúlyához. Amikor a világegyetemben minden test hőmérséklete egyenlő, az entrópia értéke az elképzelhető legnagyobb: ez lenne a „világ vége”. . . — Erre a kérdésre még lesz alkalmunk részletesebben visszatérni, itt csak arra akartunk rámutatni, hogy az alapjaiban megrendült régi helyén épülő új világban, minden relatív ugyan és benne óvatosan kell közlekednünk, mert nem bízhatjuk magunkat érzékeinkre — még mindig maradt néhány állandónak tekinthető pont, melyre támaszkodhatunk. Ilyenek a fény terjedési sebessége és az entrópia. Sajnos az entrópia ismét nem szemléletes fogalom. Ha kerülni akarjuk a magasabb matematika szimbólumait, csupán a fenti határozatlan körülírásra szorítkozhatunk. Még más nehézség is van az entró-

piával: minden rá vonatkozó tételünk csak mint valószínűség igazolható, úgy hogy e téren a newtoni dinamika egyik alapelvével, a kauzalitással gyülik meg a bajunk (ld.: kinetikus gázelmélet).

* * *

Faraday és Maxwell vizsgálatai megoldották az elektromágneses hatások terjedésének problémáját, rámutatva a közeg szerepére ezen hatások közvetítésénél. Még mindig sűrű homály borította azonban a gravitációs erő mibenlétét. Jobb magyarázat híján el kellett fogadni, hogy a tömegvonzás „távolbaható erő”, azaz, hogy a gravitációs hatásoknak nincs szükségük terjedési időre. Ezt az elgondolást a következőképen lehetne szemléltetni: tegyük fel, hogy hirtelen egy új, nagytömegű égitest keletkezik a Naprendszerben. A kérdés ez: e nagy tömeg megjelenése *azonnal* megváltoztatja-e a Naprendszer szerkezetét, azaz tömegeinek egyensúlyi helyzetét, vagy csak egy bizonyos idő múlva? A gravitációs erő problémája mindaddig nem került azonban előtérbe, míg a relativitás elmélete ezt a megállapítást nem tette, hogy a fénysebességnél nagyobb sebesség nem képzelhető el. Ha tehát a gravitáció valóban távolbaható erő, a gravitációs hatások, épp úgy, mint az elektromágneses hullámok, nem terjedhetnek a fény sebességénél gyorsabban. Ennek kísérleti eldöntése azonban nem áll módunkban és Einstein a problémát egészen más oldalról közelítette meg. Szerinte felesleges feltenni az általános tömegvonzásról, hogy ezt valamilyen erő jellegű mennyiség idézi elő. Hiszen maga az erő fogalma sem teljesen tisztázott dolog. Ez csak bonyolultabbá teszi a problémát; a gravitáció nem egyéb, mint a tér, helyesebben a tér-idő sokaság metrikai tulajdonsága. Mit jelent ez?

Fitzgerald már 1894-ben megpróbálta a gravitációt úgy felfogni, hogy valamely anyag jelenléte megváltoztatja az éter szerkezetét. Ennek a gondolatnak Einstein 1915-ben pontosabb megfogalmazást adott a relativitás

elméletében megállapított 4 dimenziós tér-idő sokaság segítségével. Einstein rájött, hogy e rendszerben a fizikai törvények nem-euklidesi geometriák, (pl. az ú. n. Riemann-féle geometria alapján) jobban értelmezhetők.

A 3 dimenziós euklidesi térben a magára hagyott test egyenesvonalú egyenletes mozgást végez (Newton I. mozgási törvénye). Az Einstein-féle tér-idő sokaságban is vannak ilyen természetes utak és a föld felé gyorsulva mozgó testek ilyen természetes úton mozognak. Pályájuk azonban nem egyenes, hanem görbült. A görbületet az anyag jelenléte idézi elő. Ha a testet meg akarjuk akadályozni, hogy a tér természetes görbületét követve mozogjon, erőt kell kifejtenünk és ezt az erőt a test „saját” súlyának tulajdonítjuk.

Hangsúlyozzuk, hogy mindaz, amit az általános relativitás elméletéről a magasabb matematika igénybevétele nélkül mondhatunk, csak durva közelítés lehet. A négydimenziós tér „görbületét” pl. nem tudjuk semmi módon elképzelni és így nem is szemléltethetjük. Hogy azonban az, amit a régi fizikában és a mindennapi életben a testek „súlyá”-nak nevezünk, az épp úgy elménk fikciója, mint ahogy annak bizonyult az abszolút tér és idő is: ezt a következő, részben gondolati kísérlettel talán sikerül megvilágítanunk. Képzeld magunkat egy gyorsulva felfelé haladó liftben. Ha itt egy húzó-rúgós mérlegre egy tárgyat helyezünk, annak súlya mérhetően nagyobb, mintha a lift nem gyorsulna, a rúgó kitágul. Ha a lift lassulva mozog, a test súlya csökkenni látszik. Ebből máris kiderül az, hogy nem csupán az egyenletes mozgások relatívak, mint azt a speciális relativitás megállapította, hanem a gyorsulás és így a gyorsulás okának tartott erő is relatív. Míg ugyanis a liftbeli észlelő a nehézségi erő változásait figyeli meg, addig a liften kívüli megfigyelő nem lát egyebet, mint a tehetetlenség megnyilvánulásait. Előállhat azonban a fordított eset is. Ha a lift leszakad és szabadon esik lefelé, a lift belsejében minden súly megszűnni látszik. A liftben elejtett alma pl. a levegőben maradna és a megfigyelő maga is

súlytalannak érezné saját testét. Ezzel szemben a kívülálló megfigyelő a jelenségben most a nehézségi erő megnyilvánulását látja. A gyorsuló mozgások tehát relatívok és a gyorsulás egyszerűen — mint mondtuk — a tér-idő geometriai szerkezetéből következik, a görbületeket pedig a tömegek jelenléte okozza. Tömegekből nagy távolságban a tér ismét euklidesinek tekinthető, „kiegyenesedik” és kis sebességek esetén még szét is bontható a háromdimenziós euklidesi térre és az időre. Ekkor a newtoni dinamika törvényei érvényeseknek látszanak. A matematikus pontosan végig tudja követni az utat, melyen az új törvényekből ismét „klasszikus” törvények lesznek.

Első pillanatban tehát úgy látszik, hogy a relativitás elmélete nem több, mint a newtoni elméletnek egy matematikailag pontosabb és különleges viszonyokra (nagy sebességek, nagy tömegek) kidolgozott általánosítása, mely megszünteti a régi elmélet minden ellentmondását. A nem szakember számára valóban nincs különösebb jelentősége annak, hogy amit eddig így mondtunk: „a testek súlyuknál fogva szabadon esnek”, azt most így mondjuk: „a testek a négy méretű térben geodetikus vonalakon mozognak.” Nem látszik jelentősnek azért sem, mert hiszen ez utóbbi az előbbihez képest sokkal nehezebben is érthető. A relativitás elméletének fő jelentősége nem is ebben keresendő. Bármily nagy horderejű is a tér és idő relatív voltának felismerése és ezek alapján a természeti törvényeknek egészen újszerű értelmezése, a modern fizikát a régigtől döntő módon az különbözteti meg, hogy a relativitás elmélete az egész fizikai világot matematikai, nem szemléletes alakban fogja fel. Míg azelőtt éles határvonalat voltak valóság és absztrakció között, azaz a matematikai kifejezést mint a konkrét anyag mellé rendelt szimbólumokat kezelték, most e szimbólumok teljesen átvették az anyagnak tartott dolgok szerepét és a fizikus számára ezek képviselik magát a „valóság”-ot. Ha majd megismerkedünk a modern fizika másik fejezetével, a

kvantumelmélettel, illetve a hullámmechanikával, ott még világosabban fogjuk látni, hogyan tűnik el az anyag minden anyagszerűsége és megfoghatósága, ha értelmezni akarjuk az atom mélyén lefolyó jelenségeket.

Míg tehát matematikai szempontból a relativitás-elméletet úgy foghatjuk fel, mint a klasszikusnál „jobb közelítés”-t, az elvi különbség a két felfogás között szinte felmérhetetlen. Nincs módunkban, hogy ezen elvi átalakulás filozófiai vonatkozásait végig kövessük, már csak azért sem, mert a relativitás elmélete — bármily egységes és ellentmondásmentes is a belőle folyó világmagyarázat — még nem tekinthető lezártnak. Nem sikerült ugyanis még véglegesen közös nevezőre hozni az elektromágneses jelenségekkel és a kvantummechanikával. Míg ugyanis a gravitáció körüli fogalomzavar az erő fogalmának teljes kikapcsolásával megszűnt, az elektromágneses jelenségeknél még fenn kellett tartani az „erő” és „erőtér” fogalmait. Mint látni fogjuk, a kvantummechanikával is vannak közös érintkezési pontok, de mindkét irányban folynak még a kísérletek egyetlen nagy átfogó elmélet kiépítésére, melyben nem kellene a különböző jelenségcsoportokat különböző szempontok szerint értelmezni. Az alapokban azonban, azaz a fizikának a teljes absztrakcióra való törekvésében nincs különbség a modern fizika különböző területein, ha céljukat más eszközökkel érik is el.

3. AZ ANYAG SZERKEZETE

A tudomány ősi problémája az a kérdés, vajjon az anyag folytonosan tölti-e ki a teret, azaz, hogy az anyag végnélkül osztható-e vagy pedig apró, tovább már nem osztható részecskékből (korpuszkulákból) áll, melyek között „hézagok” vannak. Már az ókorban találkozunk az anyag ez utóbbi felfogásával az ú. n. atomisták tanításában. Aristoteles azonban elvetette felfogásukat és

így sokáig, az egész középkoron át, az anyagot folytonosnak és végnélkül oszthatónak tekintették. Az atomisták felfogása azonban kényszerítő erővel támadt fel újra és újra.

A renaissance tudósainál találkozunk ismét az anyag korpuszkuláris felfogásával, Newton pedig rendszerének felépítéséhez kénytelen az anyag folytonosságának gondolatát feladni. A newtoni dinamikában azonban nem mint az anyag szerkezetére vonatkozó végső megfontolás szerepel az anyag korpuszkuláris felfogása, hanem mint matematikai absztrakció. A newtoni dinamika ugyanis részben ú. n. anyagi pontok (tulajdonképpen matematikai segédfogalom: kiterjedés nélküli, mint a pont a geometriában, de fizikai sajátságokat, tehát tömeget és súlyt tulajdonítunk neki), részben merev testek (anyagi pontok rendszere, melyben a pontok távolsága mindig ugyanaz) között állapít meg összefüggéseket. Még az égitestekre is alkalmazhatók voltak e tételek, mert azoknak a kiterjedése a nagy távolságok miatt elhanyagolható, úgy hogy szintén anyagi pontoknak voltak tekinthetők.

Az első indítást a fizika a korpuszkuláris elmélet rendszeres kiépítésére a Lavoisier felfedezése óta (anyag megmaradása) hatalmas fejlődésnek indult kémiától nyerte. Proust (1754—1826) fedezte fel a kémiának azt az alapvető törvényét, amely szerint az egyes vegyületekben az alkotó elemek mindig ugyanazon arányban fordulnak elő. Ez az ú. n. állandó súlyviszonyok törvénye. Innen már közeli volt az a következtetés, hogy ezek a súlymennyiségek azért állandóak, mert egyenlő számban tartalmazzák az anyag legkisebb részeit: az atomokat. A mérési eljárások tökéletesítése során sikerült is az egyes elemek atomsúlyát megmérni, azaz azt a legkisebb vegyületsúlyt, melynek egész számú sokszorosai az egyes vegyületekben előfordulnak. Mint ahogy az egyes anyagok sűrűségét az egységnyinek választott víz sűrűségéhez viszonyítjuk, úgy választhatunk az elemek közül is egyet, melyre az összes többi

atomsúlyt vonatkoztatjuk. Első pillanatra alkalmasnak látszott a hidrogén atomsúlyát választani egységnek és erre vonatkoztatni a többi elem atomsúlyát. (Ma már az oxigén atomsúlyát választjuk önkényesen 16-nak, s így a hidrogén atomsúlya 1.008.)

Még valószínűbbé tette az anyag atomos felépítését Avogadro törvénye. E szerint egyenlő térfogatú gázok azonos körülmények között egyenlő számú gázmolekulát tartalmaznak. A molekula a vegyületekben előforduló legkisebb egység, de ez még tovább osztható, felbontható az anyag — akkori felfogás szerint — legkisebb részeire: atomokra. Vannak 1, 2 vagy többatomos molekulák. A nemesgázok pl. egyatomosak, az oxigénmolekula két atomból áll. Egy vízmolekula keletkezéséhez pl. 2 hidrogén és egy oxigénmolekula szükséges. Ez másképen úgy fejezhető ki, hogy míg a hidrogén vegyértéke egy, az oxigéné kettő: a vegyérték tehát az a szám, mely megmutatja, hogy valamely elem molekulája a vegyületekben hány hidrogénatomot tud lekötni, miután a hidrogén vegyértékét választották egységnek. A hidrogénnek nemcsak a vegyértékét, hanem atomsúlyát is egységnyinek vették és így minden elem atomsúlya a hidrogén atomsúlyának egész számú többszöröse kellett volna, hogy legyen, mivel Prout hipotézise szerint minden anyag hidrogénatomokból van felépítve. Nagymértékben megerősítette Prout hipotézisét a Lothar Meyer (1830—1895) és Mendelejeff (1834—1907) által felfedezett ú. n. periódusos rendszer, (l. 53. lap), melyben az akkor ismert elemeket a következő sorrendben rendezték: az elemek balról jobbra növekvő atomsúlyaik szerint következtek egymás után, viszont felülről lefelé haladva egymás alá hasonló fizikai és kémiai sajátságokat mutató elemek kerülnek. A periódusos rendszer segítségével lehetséges volt sok akkor még ismeretlen elem fizikai-kémiai sajátságait, atomsúlyát a rendszerben mutatkozó üres helyekből előre megállapítani és ez nagyban hozzájárult új elemek felfedezéséhez. Egyetlen szépséghibája az egész elgondo-

lásnak az volt, hogy akadtak elemek, pl. a klór, melyek atomsúlyára a legpontosabb mérések alapján is csupán tört érték adódott. Fél századnak kellett eltelnie, míg e nehézséget sikerült kiküszöbölni. Kiderült ugyanis, hogy az egyszerű elemnek gondolt klór (atomsúlya 35.45) valójában keverék, még pedig két különböző „klór”-nak a keveréke. A kétféle klór semmi másban nem különbözik egymástól, csak atomsúlyban. Egyszerű kémiai vagy fizikai eljárással nem is lehet a kettőt a közönséges tört atomsúlyú klórban szétválasztani. Csak a modern fizika felfedezései tették lehetővé olyan eljárás kidolgozását, amely e különös tüneményre fényt derített (l. később). Több elemről kiderült azután, hogy különböző atomsúlyú elemek keveréke. Mivel ezek a periódusos rendszerben ugyanazt a helyet foglalják el, görög szóval „izotop”-oknak (izos = egyenlő, topos = hely) nevezték el őket. Ma már ismerik pl. a hidrogénnek izotopját is, az ú. n. „nehéz hidrogén”-t és a „nehéz víz”-et, az oxigénnek a nehéz hidrogénnel alkotott vegyületét, azaz a közismert hidrogéntől és víztől csupán atom-, ill. molekulasúlyban különböző anyagokat. A periódusos rendszer tapasztalati úton készült és az a tört atomsúlyokon kívül még más rendellenességeket is mutatott. Ezeket a modern felfedezéseknek többé-kevésbé sikerült rendezniük. Erre még alkalmunk lesz visszatérni.

* * *

Mint láttuk, az atomizmus a XIX. század kémiájában véglegesen diadalt aratott. A kémikus azonban mérleggel kezében csupán a vegyületekben fellépő súlyviszonyok iránt érdeklődött és következtetései így vezettek elkerülhetetlenül a molekula és atom fogalmaihoz. A fizikus feladatává lett, hogy az anyag szerkezetébe mélyebben próbáljon behatolni. A fizikus számára azonban molekula és atom nem volt kézzelfogható valóság, kísérleteiben a folytonosnak látszó anyaggal dolgozott és így természetesen olyan törvényeket keresett először, amelyek nem egyetlen részecskére, ha-

nem nagyon sok részecskét tartalmazó rendszerre vonatkoztak. A kémia felfedezései segítségével már élesen meg tudták egymástól különböztetni az anyagok három különböző halmazállapotát: a szilárd, cseppfolyós és légnemű állapotot. Ezek közül az utóbbi látzott a fizikus számára legkönnyebben megközelíthetőnek. A gázokban ugyanis — mint feltehető volt — az egyes molekulák aránylag nagy távolságra vannak egymástól és így a gázok viselkedéséből lehetett aránylag a legjobban következtetni a molekulák egyéni sajátosságaira. Így alakult ki az ú. n. kinetikus gázelmélet, mely a gázmolekulákat igen gyors mozgásban levő rugalmas golyóknak tekinti, mozgásuk okozza a gáznak az edény falára gyakorolt nyomását. A hő rezgési elmélete nyomán a gázok hőmérsékletét a molekulák sebességével hozták kapcsolatba. Minél gyorsabb a mozgás, annál nagyobb az illető gáz hőmérséklete. A gázokra vonatkozó törvényszerűségek megállapítását az tette bonyolulttá, hogy míg a fizikusok szeme előtt a newtoni dinamika rendszere lebegett, a rugalmas golyóknak tekintett gázmolekulák viselkedését igen nagy számuk, ill. az ebből következő számítástechnikai nehézségek miatt nem lehetett oly egyszerű kauzális törvényekkel értelmezni, mint pl. kevés számú rugalmas golyóból álló rendszer ütközéseit. Így került be már a klasszikus fizikába egy merőben új, a modern fizikának is nélkülözhetetlen eszköze: a statisztikai módszer. A mindennapi életben is, ha a nagy tömegekre akarunk törvényszerűségeket felállítani, a statisztikai adatokat hívjuk segítségül és ezekből vonunk le következtetéseket.

Ezeknek a következtetéseknek azonban csak valószínűségi értékük van. Éppen úgy a kinetikus gázelmélet is csak a gázok legvalószínűbb viselkedésére tudott törvényeket felállítani. Maxwell és Boltzmann pl. megállapították, hogy egy adott térfogatú és hőmérsékletű gázban milyen a legvalószínűbb sebességeloszlás, azaz melyik az a sebesség, amelyet az egyes gázmolekulák sebességei több-kevesebb valószínűséggel megközelíte-

nek. E tétel azért igen fontos, mert sikerült matematikailag megtalálni a kapcsolatot a termodinamika második főtételével. E szerint a legvalószínűbb eloszlás esetén az entrópia maximális, ami megegyezik a második főtétel tartalmával, amely szerint a természetben végbenő változások mindig a növekedő entrópia, illetve a növekedő energiaszétoszódás irányában történnek. E megállapítás tehát megerősíthetné a már említett felfogást, amely szerint a világegyetem a „hőhalál” felé tart. Viszont éppen a kinetikus gázelmélet mutat rá arra, hogy mindezek a következtetések csak valószínűségi értékűek és még mindig kérdés az, vajjon jogunk van-e véges földi rendszerekre tett megállapításokat az ismeretlen elemeket és energiafajtákat tartalmazó világegyetemre kiterjeszteni? Ez utóbbi ellenvetések mindenesetre lehetetlenné teszik, hogy a „vég” időpontját még csak hozzávetőleges valószínűséggel is megjósolhassuk.

Az anyag szerkezetéről azonban — mint láttuk — sem a mechanika, sem a hőelméletek, sem az elektromágneses elmélet nem tudott közelebbi magyarázatokat szolgáltatni, helyesebben ezek az elméletek anélkül értelmezték a jelenségek egy-egy csoportját, hogy az anyag szerkezetének problémája felmerült volna. Ugyancsak nem volt fontos a kérdés a relativitás elmélete szempontjából sem. Ezért is áll közelebb a relativitás elmélete minden újszerűség mellett a klasszikus fizikához, mint pl. a kvantumelmélet. Ma használatos kifejezéssel úgy szokták mondani, hogy a fenti elméletek (beleértve a relativitást) a makrokozmoszra, tehát az összefüggő, vagy nagyon sok részből felépített anyagra vonatkoznak, míg a kvantumelmélet az atomvilágának, a mikrokozmosznak elmélete. Természetesen mindaddig, míg kísérletileg nem tudunk egyetlen mikroszkopikus részecskét megfigyelni, nincs értelme a mikrokozmosz fizikájának sem. Ezzel érveltek a mechanisztikus-korpuszkuális irány ellenzői, az ú. n. fenomenológus elmélet hívei is. Szerintük a fizikának csak mérhető és megfigyelhető mennyiségek közti törvény-

szerűségek felállításával kell foglalkoznia, nincs értelme tehát a korpuszkulákra vonatkozó elvont spekulációknak. A fenomenológiai irány (melynek legszebb példája a termodinamika volt) ma is igen termékenynek bizonyuló felfogás, azonban legerősebb érve a korpuszkulák megfigyelhetetlenségéről már megdőlt. Megdőlt tulajdonképpen már akkor, amikor 1827-ben felfedezték a Brown-féle mozgást, vagyis azt a jelenséget, hogy az ú. n. kolloid oldatokban az egyes individuális molekulák mozgása mikroszkóppal megfigyelhető.

A mikrokozmosz fizikája a modern fizika alkotása ugyan, de azok a felfedezések, melyek során mélyebb bepillantást nyerhetünk az anyag szerkezetébe, szintén a XIX. századba, a klasszikus korszakba nyúlnak vissza. Az optikai és elektromos jelenségek vezettek a mikrokozmosz, az oszthatatlannak hitt atom belsejének megismeréséhez, illetve ezek tették lehetővé, hogy az atom felépítésére nézve következtetéseket vonjunk le.

Az elektromos áramra vonatkozó kutatások két irányban ágaztak el. Maga Faraday indította el mindkét kutatássort. Az elektromos előtérre vonatkozó megfontolásai teremtették meg a Maxwell-féle elektromágneses fényelméletet, míg az áram kémiai hatására vonatkozó vizsgálatai először a kémiának adtak hatalmas lökést, majd az elektromosság mibenlétére vonatkozó problémákat tolták előtérbe.

Ismeretes, hogy ha kénsavval gyengén savanyított vizen (sőt tiszta, de nem desztillált vizen is) elektromos áramot vezetünk keresztül, az áram be- és kilépési helyein, az ú. n. elektródokon, gázbuborékokat látunk fejlődni. Ha ezeket felfogjuk, kiderül, hogy az egyik az oxigén, másik a hidrogén néven ismert gáz, ezeknek vegyülete a víz. Az elektromos áram tehát a vizet látszólag alkotórészeire bontotta. Faraday szerint az elektromos áram hatására a folyadékban olyan kémiai változás megy végbe, hogy az ú. n. pozitív elemek (a fémek és a hidrogén) és a negatív elemek, vagy elem-

csoportok különválnak és ezek közvetítik az elektromos töltést a két elektród között, mégpedig úgy, hogy a negatív töltést hordozó részecskék a pozitív elektród (anód), a pozitív töltéssel bírók a negatív elektród (katód) felé vándorolnak. A jelenség pontos értelmezése azonban Arrheniustól származik: az oldatok azért vezetnek az áramot, mert ezekben a molekulák már bomlott (disszociált) állapotban vannak és ezek a bomlott részek (ionok) az anód és katód közötti elektromos térben a megfelelő töltésű elektród felé vándorolnak és töltésüket leadva semleges, valamint töltéssel bíró állapotban kiválnak. Faraday pontos törvényeket is állított fel a kivált ionok mennyiségére. E szerint ez arányos az áram erősségével és az idővel (Faraday I. törvénye), azonkívül az ugyanazon áram által kiválasztott különböző ionok mennyiségei úgy aránylanak, mint atomsúlyaik és vegyértékeik hányadosai (Faraday II. törvénye). Elvi szempontból e törvényekben legfontosabb az volt — mint arra annak idején már Helmholtz is rámutatott, — hogy az elektrolízis jelenségeinek alapján az elektromosságot sem lehetett folytonos mennyiségnek felfogni, hanem annak is atomos szerkezetet kellett tulajdonítani. Nyilván az elektromos töltés sem osztható végnélkül, hanem kell olyan legkisebb elektromos töltésnek lennie, melynek minden más előforduló töltés egészszámú többszöröse. Ez a legkisebb elektromos töltés a legkisebb ion, a hidrogénion töltése. Az új. n. elemi töltés nagysága $4,77 \cdot 10^{-10}$ elektrosztatikai egység (1 elektrosztatikai töltésegység az a töltés, mely 1 cm távolságból a vele egyenlő töltést egységnyi erővel taszítja. Az elemi töltést megkapjuk, ha ezt 4,77-tel szorozzuk és tízezermillióval elosztjuk: ezt fejezi ki a 10^{-10}).

Az ismertetett jelenség (elektrolízis) megismerése után megpróbálták az elektromos áramot gázokon is keresztülvezetni. Ismeretes, hogy a gázok normális nyomáson szigetelők, azaz az áramot nem vezetik. Ha azonban egy üvegcsövet ritkított, tehát alacsony nyomású

gázzal töltünk meg, a gáz vezetővé válik. Már a XIX. század hatvanas éveiben végeztek ilyen kísérleteket Faraday, Hittorf, Geissler, Goldstein, Crookes és J. J. Thompson. E kísérletekből arra következtettek, hogy áram hatására a gáz épp úgy mint a folyadék, részekre bomlik és ezek a gázionok (elektromos töltéssel bíró részecskék) közvetítik az áramot egyik elektródtól a másikig, csodálatos fénytünemények kíséretében. Lényeges különbség van azonban — mint arra már Thompson és Rutherford is rámutatott — az elektrolitek és a gázok vezetése között. Míg a folyadékionok valóban léteznek, azaz az anyag az áram megszűntével is diszszociált állapotban marad, a gázionok léte csak addig tart, míg az áram.

Az elektromos kisüléseket a gázban gyönyörű fénytünemények kísérik. Ezek jellege a ritkítás fokával változik. Az alig néhány század Hg m/m nyomású gázzal töltött Crookes-csőben a katódról halványzöldesszínben fluoreszkáló sugárzás indul ki, melyet kiindulási helye után katódsugárzásnak (1876) neveznek. Megvizsgálva a katódsugarakat, arra az eredményre jutottak, hogy e sugarak a fényhez hasonlóan egyenes vonalban terjednek, elektromos és mágneses térben pedig úgy viselkednek, mintha negatív töltésű elemi elektromos részecskék röpnélnek bennük. E részecskéket nevezték Lorentz után elektronoknak. Az eddig ismert legkisebb elektromos töltés a hidrogénion töltés volt. A katódsugaraknak elektromos és mágneses térben való vizsgálatából az elektronoknak sebességük mellett csupán fajlagos töltését, azaz töltésük és tömegük hányadosát (e/m) lehetett megmérni és ez kereken 1850-szer akkorának adódott, mint a hidrogén-ion fajlagos töltése. Törtről lévén szó, azonos számlálót (töltés) tételezve fel, a nevezőnek kellett a hidrogén-ion tömegénél 1850-szer kisebbnek lennie. Mivel a hidrogénion tömege (1.66×10^{-24} gr) már maga is hihetetlenül kicsi, az addig ismert legkisebb elemi részecskének, az elektronnak úgyszólván nincs is tömege (9×10^{-28} gr),

legalább is nagyságrendje a mindennapi élet szempontjából nulla.

A katódsugarakban feltételezett elektronok létezését Millikan mutatta ki híres, Nobel-díjjal jutalmazott kísérletével (1909).

Csakhamar sikerült, ha nem is magát az elektront, de annak pályáját lefényképezni, a későbbi kutatásokban is lényeges szerepet játszó Wilson-kamra segítségével. A Wilson-kamra vízgőzzel töltött cella; ha elektromos töltésű sugarakat (pl. katódsugarakat) bocsátunk bele, a vízgőz bizonyos eljárás hatására a sugár mentén lecsapódik és a lecsapódott vízgőz részecskék lefényképezhetők. Ha a kamrát elektromos vagy mágneses térbe helyezük, szépen látható az elektronok elhajlított pályája.

Miután ilyen módon az elektron léte kétségekívül beigazolódott, bizonyos lett, hogy az atom sem lehet az anyag végső, oszthatatlan és legkisebb építőköve, hanem az anyag szerkezetében az elektronnak is szerepe van. Mivel azonban a legtöbb elem elektromosan semleges viselkedik, az atomon belül pozitív töltéseket is fel kellett tételezni, még pedig ugyanannyi pozitív töltést, ahány elektron egy atomban található (ha az elektron töltését, mint legkisebb létező elektromos töltést egységnek vesszük). Az elképzelés tehát ez volt: adva van a bizonyos meghatározott pozitív töltésű atommag és ugyanannyi számú negatív elektron, ahány egység a mag töltése. Tudjuk azonban, hogy az ellentett előjelű elektromosságok vonzzák egymást és így az elektronok egyszerűen belepotyognának a magba. Ezen a nehézségen az a feltevés segít, hogy az elektronok a mag körül keringenek és így a centrifugális erő nem engedi, hogy pályájukról letérjenek. Az egész atom tehát parányi naprendszerhez hasonlít: az atommag a Nap és az elektronok a bolygók (a bolygókat is a centrifugális erő akadályozza meg abban, hogy a jóval nagyobb tömegű Napba zuhanjanak). Ez az ú. n. Rutherford-féle atommodell (1911). Szép és szemléle-

tes elképzelés; egyetlen hibája, hogy a valóságnak — mint később kiderült — nem felel meg. Egyelőre mégis elégedjünk meg ezzel a képpel, hogy a továbbiakat könnyebben megérthessük.

Rutherford atommodellje csak akkor nyújthatta a valóság valószínű képét, amikor a fizikusok felelni tudtak a következő kérdésre: ha találkozunk szabad elektronokkal, vajon nincsenek-e szabadon járkáló atommagok is? A kérdésre a választ Goldstein adta meg, aki kísérletei során arra a felfedezésre jutott (1886), hogy nemcsak a katódról az anód felé indulnak ki sugarak, hanem ha a katódot átfúrjuk, a másik irányban észlelünk sugárzást (csősugarak). A mérések arra az eredményre vezettek, hogy ezekben a sugarakban is elektromos töltésű anyagi részek röpdülnek, de az elektronokénál lényegesen kisebb sebességgel; emellett töltésük is pozitív előjelű. Ha beeresztjük őket a Wilson-kamrába, azt tapasztaljuk, hogy sokkal nehezebben téríthetők el, mint az elektronok. Ezt úgy magyarázhatjuk, hogy tömegük lényegesen nagyobb az elektron tömegénél. A csősugarakban található részecskékről kiderült, hogy pozitív töltésű elemi részecskék, még pedig a legkönnyebb atom, a hidrogénatom magjának egész-számú többszörösei. A hidrogén-atommag neve proton. Ez az elektron mellett az atom másik alkotórésze. A mérések ugyanis azt mutatták, hogy a különböző elemekhez tartozó csősugarakban található részecskék tömege az illető elemek atomsúlyával egyezik. A mag tömegét könnyen azonosíthatjuk az atom tömegével, hiszen az elektron tömege annyira kicsi, hogy hozzájárulása nem okoz észlelhető különbséget.

* * *

A pozitív és negatív töltésű sugarak mellett Röntgen felfedezett 1895-ben egy harmadik sugárzás-fajtát, a róla elnevezett Röntgen-sugárzást. Észrevette, hogy ha katódsugarak egy lemezre esnek, a lemezről újfajta, különös sugárzás indul ki. E sugarak láthatatlanok ugyan, de vegyi hatásukról észrevehetőek. Egyenes vo-

nalban terjednek, az elektromos és mágneses hatásokra azonban érzéketlenek, töltéssel bíró anyagi részecskék tehát nincsenek bennük. Így ez a sugárzás az eddig ismert sugárzások közül leginkább a fényhez hasonlít. Ebben az esetben tehát újfajta elektromágneses hullámokról volt szó, melyek hullámhosszúsága a mm tízmilliomod része körül van.

Ha pontosan megvizsgáljuk a katódsugarak szóródásakor keletkező Röntgen-sugárzást, azt tapasztaljuk, hogy ez a sugárzás nem homogén, azaz különböző áthatolóképességű (vagy ami ugyanaz: különböző hullámhosszúságú) sugarakból áll. Más szempontból kétféle sugárzást különböztetünk meg. Egyik az ú. n. fékezési, a másik az ú. n. jellemző sugárzás. Ez utóbbi elnevezés onnan ered, hogy míg a fékezési sugárzás az illető fém (melyre a katódsugár esett) anyagi minőségétől független, azaz hullámhossza változatlanul ugyanaz lesz, akármilyen fémeket használunk is a Röntgensugár előállításához, addig a jellemző sugárzás hullámhosszúságának nagyságát a fém anyagi minősége dönti el. Kézenfekvő tehát az a feltevés, hogy ezek a Röntgen-sugarak az atom belsejéből hoznak üzenetet. Ez az üzenet azonban számunkra egyelőre titkos írással van írva és hogy megfejthessük, még további felfedezésekkel kell megismerkednünk. Azt a feltevést azonban, hogy a jellemző sugárzás fellépte valóban az atom szerkezetével függ össze, megerősíti a rádioaktív sugárzások vizsgálata is.

Már 1896-ban észrevette Becquerel, hogy egyes anyagok, mint pl. az urán, minden külső hatás nélkül sugarakat bocsátanak ki. E sugarak az akkor már ismert Röntgen-sugarakhoz hasonlítottak. 1910-ben a Curie házaspárnak sikerült felfedeznie egy új elemet, mely még erősebben sugárzott, mint az urán. Ezt a nagy atomsúlyú új elemet rádiumnak nevezték el. Utána még egész sor, a rádiumhoz hasonló elemre sikerült rábukkani, ezek közös néven az ú. n. rádioaktív elemek.

Tanulmányozva a rádioaktív sugárzásokat, azt ta-

pasztalták, hogy a sugárzó elemek kémiai szerkezete megváltozik, sugárzás közben hihetetlen nagy energiámmennyiségek szabadulnak fel. Sokkal nagyobbak ezek az energiámmennyiségek, mint bármely más pl. hőleadással járó energiáfelszabadulás. Sugárzás közben tehát az anyag elbomlik, még pedig nemcsak molekulákra vagy atomokra (mint pl. az elektrolízisnél), hanem a bomlás az atomon belül történik; így alakul át egyik elem a másikba. A felszabaduló nagy energiákból látható, miért tartották oly soká az atomot az anyag legkisebb alkotóelemének. Hiszen ilyen nagy energiát előállítani, mellyel az atommagokat szét lehet bontani eleinte szinte lehetetlennek látszott. Ezért volt utópia az „aranycsinálók” álma a középkorban. Úgy látszott, hogy emberi eszközökkel lehetetlen az anyag belsejébe hatolni, de a természet ismét üzenetet küldött a rádioaktív sugárzásokban az anyag szerkezetének titkairól.

A kísérletek azt mutatták, hogy a rádioaktív átalakulásoknál 3 különböző sugárzás lép fel. Az egyik a csősugarakhoz hasonló, azaz pozitív töltésű anyagi részeket tartalmazó α -sugárzás, a másik a katódsugarakhoz hasonló, ú. n. β -sugárzás, végül a harmadik a Röntgen-sugaraknak megfelelő töltés nélküli, igen rövid hullámhosszú γ -sugárzás.

A tudósok pontosan meg tudták állapítani azon elemek sorát, melyek rádioaktív sugárzás folytán egymásba átalakulnak. Meg tudták mérni azt is, hogy mennyi ideig tart egy-egy elem teljes bomlása, de a sugárzás lényege — épp úgy mint a Röntgen-sugárzásnál — titkos írással volt írva és még néhány évtizednek kellett eltelnie, míg a fizikusok nagyjában ki tudták azt betűzni, vagy legalább is oly kulcsot tudtak találni, amellyel a titkos írás legtöbb jegye megfejthető volt. A kutatás azonban más oldalról, az eddig tárgyalt sugárzásoknál nagyobb hullámhosszúságú fényhullámok ismételt vizsgálatából indult ki és vezetett a mikroszkopikus világ feltárásához, sőt az egész modern fizikához.

A különböző sugárzások felismerése az elektromágneses fényelmélet kereteit tágította hihetetlen nagyra. Gondoljuk csak meg, mit jelent ez: ha pl. rádiókat bekapcsoljuk, akkor ugyanolyan természetű hullámok közvetítik a zene hangjait, mint amilyen hullámokban a látható fény hozzánk érkezik a Napból, vagy mint azok, amelyek a fényképező lemezt megfeketítik, vagy amelyek segítségével törött karunkat a klinikán átvilágítják. Mindezek között csupán hullámhosszbeli eltérések vannak: a kilométerektől le egészen a cm ezermilliomod részéig, sőt még tovább. Mert ma már a Röntgen, illetve a γ -sugaraknál kisebb hullámhosszúságú sugarak is ismeretesek. Ezek az ún. kozmikus sugarak. Valahonnan a sztratoszférán át érkeznek hozzánk e hihetetlen keménységű (nagy áthatolóképességű) sugarak, kimutatásuk Wilson-kamrával lehetséges.

Végigtekintve az összes, eddig felsorolt elektromágneses sugárzásokon, látszólag csakugyan valamennyien közös eredetre vezethetők vissza. Felmerültek azonban a kutatások során oly jelenségek, melyek arra mutattak, hogy valamennyi sugárzás természete nem kényszeríthető bele minden további nélkül az elektromágneses fényelmélet keretei közé, mint ahogy már az elektrolízis jelensége is újabb feltevést követelt az elektromosság szerkezetére vonatkozólag. Mert pl. a γ - és Röntgen-sugarak anyagi részeket nem tartalmaznak, tehát ebből a szempontból a fényhez — mint éterrezgéshez — hasonlítottak, addig az α -, cső-, β - és katódsugarakban anyagi sugarak elektronjait végtelen kis tömegük miatt nem is tekintjük anyagi részeknek. Az egész sugárzás-sor egyrészt tehát nem volt egységes, másrészt nem tudtak a fizikusok kielégítő magyarázatot találni a sugárzások forrására vonatkozólag. Csakhamar azonban olyan tapasztalati tények is merültek fel, melyek az elektromágneses hullámokról eddig alkotott képünk valódiságát is vitássá tették.

4. A BOHR-FÉLE ATOMMODELL

Az utóbbi fejezetben felsorolt jelenségek: Röntgen-sugárzás, radioaktivitás, stb. mind értelmezésre vártak. Az utat a modern fizika felé ezek a felfedezések nyitották meg. Első pillanatra az új sugárzásfajták az elektromágneses fényelméletet szépen kiegészítették, felmerültek azonban olyan jelenségek is, melyeket ezen az alapon nem lehetett megmagyarázni.

Ilyen volt az *ú. n.* fényelektromos jelenség. Ha csiszolt fémlapra fény, vagy más elektromágneses sugárzás esik, a fémből a sugárzás hatására elektronok lépnek ki és a fémlemez pozitív elektromos föltést nyer. E jelenség csupán úgy értelmezhető, hogy a fény átadja energiáját a fématomok elektronjainak, ezek felhasználva ezt az energiát, kiszabadulnak és a visszamaradt atomokban — mivel negatív töltésű részek távoztak el — túlsúlyban lesz a pozitív töltés. Idáig mindenben is volna a dolog. Ha azonban a kísérleteket különböző erősségű fénnel végezzük, azt tapasztaljuk — minden várakozás ellenére, — hogy a fényerősség változása csupán a kilépő elektronok számát változtatja meg: erősebb fény több elektront csal elő a fémből, mint a gyöngébb, a jelenség azonban — bármily gyöngye fényt használunk is — azonnal bekövetkezik. Pedig joggal gondolhatnók, hogy míg a fénysugár energiájából az igen kicsi atom területén annyi összegyűlik, hogy egy elektron kiszabadításához elég legyen, hosszú idő szükséges.

Einstein e probléma megoldásánál kénytelen volt az örökre elavultnak vélt Newton-féle korpuszkuláris elmélethez visszanyulni. A fényelektromos jelenséget csak úgy értelmezhetjük, ha feltesszük, hogy a fényenergia nem egyenletesen oszlik el a fénysugárban, hanem abban apró kis részecskébe: *ú. n.* fotonokba tömörül. A fémből az elektronokat a fotonokkal való ütközés csalja elő. Így természetes, hogy a kilépő elektronok sebessége független marad a fény intenzitásától (a fotonok szá-

mától), csupán azok számát fog módosulni, mert több foton több elektronnal ütközik. E feltevés így első látásra szinte kézzelfoghatóan egyszerűnek látszik. Nem szabad azonban elfelejtenünk, hogy szó sincsen a Newton-féle korpuszkuláris elmélethez való teljes visszatérésről. A fotonokat nem a klasszikus fizika anyagi részeinek mintájára kell elképzelnünk! Csupán energiájuk van, de nyugalmi tömegük nincs. Egy foton energiáját a fény rezgésszáma határozza meg és egyenlő a rezgésszámnak ν -nek és a fizika egy fontos állandójának h ($= 6,547 \cdot 10^{-27}$)-nak szorzatával, azaz $\varepsilon = h \times \nu$. A h az ú. n. Planck-féle állandó (l. az alábbiakat), vagy hatáskvantum, rendkívül kicsiny szám, mégis a modern fizika mikroszkopikus világában igen jelentős szerepet tölt be. Szinte nincs képlet, melyben elő ne fordulna éppen azért, mert a fényrészecske energiáját is ezzel állították elő. De ha nincs tömege a fotonnak, miért nevezzük mégis „részecskének”? Gondoljunk csak vissza a relativitáselméletnél mondottakra a tömeg és az energia egyenértékűségéről. Klasszikus értelemben vett tömege a fotonnak valóban nincsen, de az energia mégis tömeget képvisel. Hiszen minden tömeghez tartozik energia és viszont minden energiához tartozik „tömeg”. Hogy „nyugalmi” tömege nincs a fotonnak, azt úgy értettük, hogy a sebesség következtében megnövekedett energiával ($E = m \cdot c^2$) együtt már az eddig elhanyagolhatóan kicsi „tömeg” is számottevő lesz. Itt ismét látható, hogy csupán rendkívüli viszonyok (jelen esetben nagy sebesség) között szükséges a modern megállapításokhoz betű szerint ragaszkodni. A hangsúly azon van, hogy az új felfogás szerint a fénysugárban az energia eloszlása nem egyenletes, hanem abban ilyen apró sűrűsödési pontok vannak.

Tegyük fel, hogy nagynehezen belenyugszunk e furcsa és elképzelhetetlen fotonok létezésébe. Nem tehetünk mást, mert a bárkinek szemei előtt lejátszódó fotoelektromos jelenség csak így magyarázható. De további, szinte áthághatatlan nehézségek tornyosulnak

elénk. Mi van akkor az interferenciával? Hiszen a szintén könnyen hozzáférhető szemléletes Newton-féle színes gyűrűk, a rácsok színeképei stb. épp oly letagadhatatlanul mutatják a fény hullámtermészetét, mint az előbbi jelenség a „korpuszkuláris” szerkezetet. A fény e kettős természete a modern kvantummechanika egyik kiinduló pontja lett.

* * *

Láttuk, hogy milyen hatalmas felfedezések adtak új lökést a fizikai gondolkodásnak a századfordulón. Ismeretlen terület tárult a fizikusok elé: az atomon belüli csodálatos világ, mely nyilván kézzelfogható valóság, hiszen az elektronok, protonok és más, még mélyebb kapcsolatokra mutató sugárzások mérhetőek és fényképezhetőek voltak. Hiányzott azonban az az egységes és átfogó elmélet, melybe mind az új, mind pedig a már régebben felfedezett tények ellentmondásmentesen illeszkedtek volna. Rutherford már említett atommodellje szép és szemléletes konstrukció volt, de még a legegyszerűbb dolgokat sem sikerült vele megmagyarázni, mint pl. a fénykibocsátás és fényelnyelés jelenségeit.

Köztudomású, hogy testek elég magas hőmérsékleten sugarakat bocsátanak ki magukból. Ha e sugarakat prizmán, vagy rácson bocsátjuk át, az összetett színek alkotóelemekre bomlanak és így keletkezik a színekép (szivárvány). Az izzó szilárd és cseppfolyós testek színeképe folytonos, azaz bennük az egyes színek fokozatosan olvadnak egymásba. Izzó gázok és gőzök azonban ú. n. vonalas színeképet adnak, melyben a vonalak egymástól meghatározott távolságra jelentkeznek jellegzetes színekben. Ez az ú. n. színeképelemzés alapja: valamely vegyület vonalas színeképéből a vegyületben előforduló elemekre lehet következtetni. A vonalak hullámhossza igen pontosan határozható meg. A színeképek empirikus elmélete már széleskörű és kiépített volt, amikor a színekép létrejöttének körülményeiről még nagyon keveset tudtak. A vonalas színeképekben szabályszerűségeket fedeztek fel, sőt az ú. n. sávós spektru-

mokban is (látszólag folytonos színeképek, de finomabb felbontás esetén látható, hogy nagyon sűrű és finom vonalakból állnak: a vonalas spektrumot az atomnak, a sávosat a molekulának tulajdonítjuk). E szabályszerűségeket igen nagy pontossággal igazolták, felfedezésük azonban inkább véletlen volt és semmi mélyebb magyarázatot nem ismertek arra nézve, hogy pl. a hidrogénatom spektrumában miért éppen az illető vonalak jelentkeznek és éppen az illető sorrendben.

Rutherford atommodelljével a klasszikus elektrodinamika alapján igyekezett a fénykibocsátást értelmezni. A „klasszikus fényforrásmodell” (azaz a fényforrás, melyet a klasszikus fizika alapján elképzelték) egy rezgő elektron volt. Ennek mechanikai rezgései alakulnak át fényenergiává, így jön létre a sugárzás. Rutherford azzal a hallgatólagos feltevessel élt (melyet azonban semmi sem igazolt), hogy az atomon belül az elektronokra és atommagokra a klasszikus elektrodinamika törvényei érvényesek. Rutherford atommodelljében tehát a keringő elektronnak állandóan sugároznia kellene, u. i., ha a rezgő elektron sugárzik, a keringőnek is sugároznia kell, mert a mechanika tanítása szerint rezgés és keringés közös eredetű mozgások: a körpályán egyenletesen keringő pontnak az átmérőre vonatkoztatott derékszögű vetülete harmonikus (szabályos) rezgőmozgást végez. Sugárzás közben mindig több és több mechanikai energiája alakul át fényenergiává, tehát energiája csökkenésével egyre kisebb sugarú pályát írhatna csak le, azaz csavarvonalban végezné körülforgását a mag körül s végül is beleesne a magba. Másrészt a sugárzás a valóságban csak meghatározott körülmények (adott hőmérséklet) között következik be, a fentiek szerint pedig minden atomnak mindig sugároznia kellene.

Niels Bohr volt az, aki egy forradalmasító feltevessel e nehézségeket — legalább is egy időre — legyőzte. Feltevésének alap gondolata tulajdonképpen Plancktól származik és rokon Einsteinnek a fotonokra

vonatkozó megfontolásaival. Planck 1900-ban az ú. n. abszolút fekete test sugárzásával foglalkozott és ennek leírására a tapasztalattal egyező elméleti megoldást igyekezett találni. Olyan testet nevezünk abszolút fekete testnek, mely minden sugárzást elnyel. E téren nem Planck volt az első kísérletező, de az összes addigi képletek nem voltak kielégítőek. Planck ekkor alkalmazta először azt a feltevést, hogy a sugárzás valójában nem is folytonosan, hanem kis ugrásokban történik. Más szóval a leadott energia nem osztható minden határon túl, hanem annak is, akárcsak az anyagnak és elektromosságnak, van egy legkisebb része. Minden energiamennyiség, melyet a sugárzó test lead vagy fölvesz, ennek a legkisebb energiaegységnek egészszámú többszöröse. Ez az ú. n. Planck-féle energiakvantum $h \times \nu$, mellyel már a fotonokkal kapcsolatban találkozunk. (ν = frekvencia). E feltevással Plancknak valóban sikerült a keresett formulát megtalálnia. Planck szerint tehát a harmonikus oscillátor (így is nevezték a klasszikus fényforrásmodellt) rezgés kibocsátása nem folytonos, hanem szakadozott. E feltevés ellentétben állt az elektromágneses hullámok (rezgések) folytonos terjedésével, ezért Planck úgy próbálta e nehézséget eltüntetni, hogy szerinte az elektromágneses energia csupán az oscillátor közvetlen közelében nem folytonos, a térben azonban igen. Nyilvánvaló, hogy ez csak félmegoldás volt és a korabeli fizikusok körében Planck elmélete nem is örvendett nagy népszerűségnek. Planck tehát tulajdonképpen csak az ötletet adta az új „kvantumelmélet”-hez, de az ötlet összes következményeinek szabatos végiggondolása és így a kvantumelmélet igazi megteremtése is Bohr nevéhez fűződik.

Bohr elsősorban a fény kibocsátás és fényelnyelés jelenségeit igyekezett Planck alapfeltevése segítségével megmagyarázni. Így jött létre az ú. n. Bohr-féle atommodell (1912). Bohr az elektronoknak nem tulajdonított tetszésszerűt, hanem csak bizonyos meghatározott pályákat. E korlátozott számú pályákat az ú. n. Bohr-

féle kvantumfeltételek határozzák meg, melyek az elektron sebességére, helyesebben impulzusmomentumára (tömeg, sebesség és a pálya sugarának szorzata) és ennek következtében az atom energiájára tesznek kikötéseket. Másszóval ez azt jelenti, hogy az atom csak meghatározott energiaértékekkel bírhat és minden ilyen energiaértékhez a kvantumfeltételek által meghatározott elektronpálya tartozik. A kvantumfeltétel

Bohrnál így hangzik: az impulzusmomentum $\frac{h}{2\pi}$ egész-számú többszöröse. Hogy ez az egész szám 1, 2, 3, ... stb.-e, azt az energia határozza meg.

A forradalmi újítás abban állt, hogy Bohr elmélete szerint — ellentétben a klasszikus elektrodinamikával — az elektron keringés közben nem sugárzik, sugárzás csak akkor jön létre, ha az elektron egyik pályáról a másikra ugrik. Mivel a különböző sugarú pályáknak különböző energia felel meg, a nagyobb sugarúak nagyobb, a kisebb sugarúak kisebb energiaértékhez tartoznak. Ha az elektron egy szélső energiaértéknek megfelelő pályán, azaz n . gerjesztett állapotban van és innen átugrik egy alacsonyabb energianívónak megfelelő pályára, energiát ad le, tehát sugárzik.

Bohr a hidrogén-atom jól ismert spektrumára alkalmazta elméletét először. Már régen ismeretes volt, hogy az egyes elemek színekében a vonalak hullámhosszúságai (vagy rezgésszámok: $\nu = \frac{c}{\lambda}$) bizonyos szabályos csoportokba, n . szérieszekbe rendezhetők. E szérieszek vonalai mint bizonyos számok különbségei adódtak, melyeket „term”-eknek neveztek (pl. $\nu = T_1 - T_2$), de hogy egy ilyen term mit jelent, azt nem tudták. Bohr elmélete azután megadta a választ erre a kérdésre is, felhasználva Franck és Hertz kísérleteinek eredményeit. Ha elektronok (pl. egy katódsugárból) kerülnek valamely gázba és a gázt tartalmazó tartályba néhány

volt feszültséget (potenciálkülönbséget) kapcsolunk, az elektronok — mivel negatív töltéssel bíró részecskék — mind a pozitív elektród (az áram belépési helye) felé igyekeznek. Útjukat azonban nem folytathatják zavar-talanul, mert vagy egymással (egy katódsugárban különböző sebességű elektronok vannak), vagy a gáz atomjaival összeütköznek. A potenciálkülönbség nagysága szerint az elektronok meghatározott sebességgel mozognak és általában rugalmas golyók módjára ütköznek. Egyenlő tömegű golyók rugalmas ütközésénél a sebességek kicserélődnek. (Gyakran láthatjuk pályaudvarokon, hogy ha egyik vasúti kocsi összeütközik egy másik ugyanolyan kocsival, az előbb még mozgó kocsi megáll és a másik az előbbiével egyenlő sebességgel elindul.) Viszont ha a tömegek között nagy a különbség, a kistömegű rugalmas golyó a nagyobb tömegűről — sebességét és energiáját megtartva — viszszapattan. Ha azonban növeljük a potenciálkülönbséget, az ütközés rugalmatlanná válik, tehát az elektronok ütközés után energiájukat elveszítik, átadják a gázatomoknak, mint ahogy pl. az öreg gumilabda már nem ugrik vissza a földről, hanem sebességét és mozgási energiáját is elveszítve a földön marad. Hogy ez mekkora feszültségnél következik be, azt általában a gáz minősége szabja meg, azaz ez a potenciálkülönbség a gázra jellemző állandó: úgynevezett kritikus potenciál. Ugyanekkor azonban egy más, kézzelfoghatóbb jelenség is bekövetkezik. A kritikus potenciálkülönbségnél a gáz sugározni kezd, kisugározza az elektronoktól kapott energiát. Ezt úgy mondjuk, hogy a feszültség hatására nagy sebességgel mozgó elektronok a gázt „gerjesztik”. A gerjesztett atom tehát energiátöbbletét sugárzás formájában adja le. Természetes, hogy fokozva a potenciálkülönbséget, lesznek még magasabb energiaértékkel bíró gázatomok is, melyek energiájukat szintén (nem feltétlenül látható) sugárzás alakjában adják le. Jellemző, hogy minden egyes kisugárzott frekvenciához (rezgésszámhoz) meghatározott potenciál-

különbség tartozik, azaz minden gázra a kritikus potenciálok egész sorát állapíthatjuk meg. A sugárzás rezgésszáma egyenlő éppen a potenciálkülönbség és a Planck-féle állandó hányadosával. Mint említettük, tapasztalati úton már régebben rájöttek, hogy minden egyes vonal mint *különbség* állítható elő. Most már értelmezni lehetett az eddig misztikus szerepet játszó „term”-eket. A term-ek különbsége nem más, mint a megfelelő potenciálkülönbség, melynél a gáz éppen az illető frekvenciát sugározza ki, (illetve ennek a különbségnek *h*-adrésze). És itt kitűnik az is, hogy Bohr feltevése mennyire jogosult volt, amikor továbbmenve Planck-nál, nemcsak azt tette fel, hogy a sugárzó energia az energiakvantum valamely egészszámú többszöröse, hanem azt is, hogy az egyes atomok energiaértékei nem folytonosan következnek egymás után, hanem minden spektrumvonalnak két ú. n. diszkrét (elkülönített) energia (potenciál) nívó felel meg.

Kérdés most már, hogy ha Franck és Hertz kísérletével meg tudjuk állapítani, milyen energianívói vannak valamely atomnak, ki tudjuk-e azok kombinációiból az összes spektrumvonalat számítani? A helyzet az, hogy így még olyan spektrumvonal frekvenciáját is ki tudjuk számítani, amilyen a valóságban nincs. Másszóval: egyetlen atom spektrumában sem fordulnak elő az összes átmenetek. Vannak ú. n. tiltott átmenetek, vagyis oly energiaértékek, melyeknek *h*-val osztott különbségével egyenlő kisugárzott frekvencia nincs. Ezeket a „tiltott” átmeneteket állapítják meg az ú. n. „kiválasztási szabályok”. „Tiltott” állapotokat zár ki a Pauli-féle elv. Ez legegyszerűbb megfogalmazásában így hangzik: két elektron nem lehet egyszerre ugyanazon a pályán. Az egyes pályákat bizonyos állandókkal jellemezhetjük, ezek a kvantumszámok. Kvantumszámokul különböző mennyiségek választhatók (energiaérték, pálya sugara stb.) és a kvantumelmélet egyes szakaszain belül a kvantumszámokat különféleképpen állapították meg. Tény azonban, hogy számuk újabban 4 és Pauli elve

szerint nem lehet két elektronnak egyszerre mind a négy kvantumszáma megegyező.

Lássuk most közelebbről, hogy Bohr elmélete milyen képet nyújt az atom szerkezetéről. Kezdjük — mint Bohr is tette — a periodusos rendszer első elemével, (lásd a táblázatot) a hidrogénatommal. A hidrogén spektruma egyike a legrégebben és legjobban ismert színeképeknek. A színeképvonalak itt is szabályos sorozatokba, serieszekbe rendezhetők, melyeket megkülönböztetésül — rendszerint felfedezőjük neve szerint — különböző nevekkel (Balmer-, Paschen-, Lyman-seriesz stb.) jelöltek meg. Még jóval Bohr elmélete előtt sikerült e színeképvonalak rezgésszámaira tapasztalati úton olyan képletet találni, melynek segítségével pl. a Balmer sorozat minden egyes színeképvonalának hullám-száma (a hullámhossz reciprokok értéke) kiszámítható

volt ($\nu = 109.677.70 \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$); n helyére egész szá-

mokat kell helyettesíteni, de mindig úgy, hogy n nagyobb legyen, mint 2 és így megkapjuk a Balmer-sorozat összes ismert vonalait). Bohr feladata most az volt, hogy a tapasztalati úton nyert képletet alapfeltevéseiből kiindulva igazolja. Az alapfeltevés az volt, hogy a hidrogénatom egy nehéz pozitív töltésű magból és egy elektrontól áll. A mag mozgását nem kellett figyelembe vennie, mert ennek tehetetlen tömege az elektréhoz képest túl nagy. Az elektron csak olyan pályán keringhet, amely pályára vonatkozóan a tömegnek, a sebességnek és a pálya

sugarának szorzata $\frac{h}{2\pi}$ egész számú többszöröse,

n -szerese. Hogy ez az egész szám, n mekkora, az attól függ, milyen messze van az elektron a magtól, vagyis milyen nagy az energia értéke. Ez az n szám tehát az energiát jellemzi, neve ezért főkvantumszám.

Sommerfeld Bohr elméletét úgy módosította, hogy nem körpályákat, hanem ellipszis alakú pályákat tulaj-

Az elemek periodusos rendszere

Peri- ódus	I. Csoport		II. Csoport		III. Csoport		IV. Csoport		V. Csoport		VI. Csoport		VII. Csoport		VIII. Csoport	
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
I.	1 H 1,008															2 He 4,002
II.	3 Li 6,94	4 Be 9,02	5 B 10,82	6 C 12,00	7 N 14,008	8 O 16,000	9 F 19,00	10 Ne 20,18								
III.	11 Na 23,00	12 Mg 24,32	13 Al 26,97	14 Si 28,06	15 P 31,04	16 S 32,07	17 Cl 35,46	18 Ar 39,88								
IV.	19 K 39,10 29 Cu 63,57	20 Ca 40,07 30 Zn 65,37	21 Sc 45,10 31 Ga 69,72	22 Ti 48,1 32 Ge 72,60	23 V 51,0 33 As 74,96	24 Cr 52,0 34 Se 79,2	25 Mn 54,93 35 Br 79,92	26 Fe 27 Co 28 Ni 55,84;58,97;58,68 36 Kr 82,9								
V.	37 Rb 85,5 47 Ag 107,88	38 Sr 87,6 48 Cd 112,4	39 Y 89,0 49 In 114,8	40 Zr 91,2 50 Sn 118,7	41 Nb 93,5 51 Sb 121,8	42 Mo 96,0 52 Te 127,5	43 Ma 97,8 53,0 126,92	44 Ru 45 Rh 46 Pd 101,7;102,9;106,7 54 X 130,2								
VI.	55 Cs 132,8 79 Au 197,2	56 Ba 137,4 80 Hg 200,6	La + ΣCe 138,9 81 Tl 204,4	72 Hf 178,6 82 Pb 207,2	73 Ta 181,5 83 Bi 209,0	74 W 184,0 84 Po 210	75 Re 188,7 85 — —	76 Os 77 Jr 78 Pt 190,9;193,1;195,2 86 Rn 222								
VII.	87 — —	88 Ra 226,0	89 Ac —	90 Th 232,1	91 Pa —	92 U 238,2										
VIII.	A ritka földfémek: 58 Ce 59 Pr 60 Nd 61 Il 62 Sm 63 Eu 64 Gd 65 Tb 66 Dy 67 Ho 68 Er 69 Tu 70 Yb 75 Cp 140,2; 140,9; 144,3; 146 ; 150,4; 152,0; 157,3; 159,2; 162,3; 163,5; 167,7; 169,4; 173,5; 171,0															

Rend- szám	Vegy- jel	Elem	Rend- szám	Vegy- jel	Elem
1	H	hidrogén	41	Nb	niob
2	He	helium	42	Mo	molibden
3	Li	litium	43	Ma	mazurium
4	Be	berillium	44	Ru	ruténium
5	B	bór	45	Rh	rhodium
6	C	szén	46	Pd	palládium
7	N	nitrogén	47	Ag	ezüst
8	O	oxigén	48	Cd	kadmium
9	F	fluor	49	In	indium
10	Ne	neon	50	Sn	ón
11	Na	nátrium	51	Sb	antimon
12	Mg	magnézium	52	Te	tellur
13	Al	aluminium	53	J	jód
14	Si	szilícium	54	X	xenon
15	P	foszfor	55	Cs	cézium
16	S	kén	56	Ba	bárium
17	Cl	klór	57	La	lantán
18	Ar	argon	58	Ce	cer
19	K	kálium	59	Pr	prezeodim
20	Ca	kalcium	60	Nd	neodim
21	Sc	szkandium	61	Il	illinium
22	Ti	titán	62	Sm	szamárium
23	V	vanádium	63	Eu	europium
24	Cr	króm	64	Gd	gadolinium
25	Mn	mangán	65	Tb	terbium
26	Fe	vas	66	Ds	diszprozium
27	Co	kobalt	67	Ho	holmium
28	Ni	nikkel	68	Er	erbium
29	Cu	réz	69	T	tulium
30	Zn	cink	70	Yb	itterbium
31	Ga	gallium	71	Cp	kassziopeum
32	Ge	germánium	72	Hf	hafnium
33	As	arzén	73	Ta	tantal
34	Se	szelén	74	W	wolfram
35	Br	bróm	75	Re	rénium
36	Kr	kripton	76	Os	ozmium
37	Rb	rubídium	77	Ir	iridium
38	Sr	stroncium	78	Pt	platina
39	Y	ittrium	79	Au	arany
40	Zr	cirkon	80	Hg	higany

Rend- szám	Vegy- jel	Elem	Rend- szám	Vegy- jel	Elem
81	Tl	tallium	87	—	ekacézium
82	Pb	ólom	88	Ra	rádium
83	Bi	bizmut	89	Ac	aktinium
84	Po	polonium	90	Th	tórium
85	—	ekajód	91	Pa	protaktinium
86	Rn	rádon	92	U	urán

donított az elektronoknak; így már több kvantumszámot kapott, mert ellipszispályán a mozgás már kétszeresen periodikus, nem csak egyszeresen, mint körpályán.

Később, nagyobb felbontású rácsok segítségével, felfedezték, hogy a hidrogén spektrum vonalai tulajdonképpen nem egyes vonalak, hanem valójában további finom vonalrendszerre bonthatók, ez az ú. n. finomszerkezet. Ezekről a vonalokról a Bohr-féle pályák alapján nem lehetett számot adni. Sommerfeld azzal magyarázta a finomszerkezet megjelenését, hogy tekintetbe kell venni az elektron nagy sebessége miatt a tömegében beállott relativisztikus változást is, hiszen tudjuk, hogy nagy sebességek esetén a mozgó részek tömege a relativitáselmélet értelmében megnövekedik. Sommerfeld korrekciója azonban nem volt elegendő, hogy a más spektrumokban is jelentkező és a Bohr-elméletből ki nem számítható vonalokról számot adjon.

Ha a periodusos rendszerben a következő elem spektrumára térünk át (hélium), máris nagy nehézségekkel találkozunk. A hidrogénatom egy protonból és egy elektrontól állt, azaz itt csupán két test kölcsönös mozgását kellett számításba venni. Az égi mechanikából tudták azonban a fizikusok, hogy már három test mozgásának vizsgálata szinte áthághatatlan feladat matematikai szempontból. Úgy látszott tehát, hogy bármily szép eredményeket hozott is Bohr elmélete a hidrogénatomra vonatkozólag, továbbmenni már nem lehet, mert hiszen minden más elemnél több elektron

egyidejű mozgásáról kellene számot adni, még ha a mag mozgásától eltekintettünk is, pedig pontosabb számításoknál ezt is számba kellene venni. Lehet azonban bizonyos atomok szerkezetére nézve olyan, a tapasztalattal összhangban levő egyszerűsítő feltevést találni, melynek segítségével a többi elem spektruma is értelmezhető. Ha ugyanis egy atomban pl. 10 elektron kering a mag körül mind különböző pályákon (Pauli elve!), ezek közül csak egy lesz olyan, melynek energiája a legmagasabb, vagyis a legszélső pályán kering. Ha ez az $ú. n.$ optikai elektron a legszélső pályáról valamelyik belső, tehát alacsonyabb energiaértéknek megfelelő pályára ugrik át, csak ilyenkor következik be sugárzás. Az elektronok ugyanis igyekeznek mindig a belső pályákon elhelyezkedni, itt tehát ugrások nem történhetnek, mert „minden hely megtelt”. Ha tehát az atomot ily módon két részre bontjuk, az atommagra, az azt szorosan körülvevő elektronfelhővel és a külső elektronra: nagyon sok elem spektruma a hidrogén-atomhoz hasonló módon tárgyalható. Ilyenek az úgynevezett alkáliák (litium, nátrium, kálium, rubidium, cézium). Nem okozott különösebb nehézséget a periodusos rendszer második oszlopában található $ú. n.$ földalkáliák spektrumának értelmezése sem, némi korrekcióval ugyanis ezek is Balmer-szerű formulával írhatók le. Az $ú. n.$ szikraspektrumok vizsgálata vezetett ezek felismerésére. A spektroszkópiában ugyanis kétféleképpen szokták a színeképet előállítani: fényívvel vagy szikrával. A fényív az illető atom színeképet mutatja, a szikra azonban az atomot ionizálja, azaz egy elektront leszakít és a színekép, mely keletkezik, a pozitív töltésű ion spektruma lesz. A szikraspektrumok vizsgálata nyomán az empirikus úton felfedezett periodusos rendszer és a kémiai vonzás alapjaira derült fény. Az ion spektrumának előállításához különböző atomoknál különböző nagyságú ionizációs munka szükséges. Vannak elemek, melyek nagyon könnyen ionizálhatók, vagyis külső elektronjukat könnyen elveszítik. Az ilyen szikraspektrum a neut-

rális atomot a periodusos rendszerben eggyel megelőző atom spektrumához lesz hasonló. Tehát pl. az ionizált nátrium (jele Na^+) a neon nevű nemes gáz spektrumával mutat hasonlóságot, mert a periodusos rendszerben a neon előzi meg a nátriumot. Ha a nátrium 11 elektronjából egy újabbat sikerült leszakítani, már a neont megelőző fluor spektrumához hasonló színeképet kapunk. Úgy látszik tehát, hogy a periodusos rendszerben az elemek egymásutánját nem is annyira az atomsúly, mint inkább az elektronok száma (vagy ami ugyanaz: a mag töltéseinek száma) dönti el. Ezt a számot rendszámoknak szokás nevezni. Már említettük annak idején, hogy a tört atomsúlyokon kívül a periodusos rendszer más szabálytalanságokat is mutatott. Ilyen volt az, hogy egyes elemeknél a kémiai sajátságok és az atomsúly szerinti helyek nem estek egybe. Így pl. a kobalt atomsúlya nagyobb, mint a nikkelé, mégis a kobalt előbbre került: ma már tudjuk, hogy ez azért történt, mert a nikkel rendszáma nagyobb.

A rendszám döntő voltát egyébként a Röntgen-spektrumok vizsgálata is igazolta. Megfigyelték, hogy az egyes atomok színeképvonalai nem mind esnek a látható színeképbbe. A kis atomsúlyú (kis rendszámú) elemek színeképvonalainak rezgésszámai általában kicsik (hullámhosszaik nagyok), s így vonalaik a vörösön túl, a látható színeképbbe, vagy legfeljebb az ibolyántúl vannak. Amint a periodusos rendszerben a növekvő atomsúly szerint egyre nehezebb elemek felé haladunk, a színeképvonalak hullámhossza csökken és csakhamar a Röntgen-sugarak rezgésszámának megfelelő frekvenciákra is bukkanunk, mégpedig a jellemző sugárzás frekvenciáira. Ez a frekvencianövekedés azonban nem véletlen, hanem matematikai alakba foglalt törvénnyel is kifejezhető: a jellemző Röntgen-sugárzás egy meghatározott vonalának frekvenciája a rendszámmal (és nem az atomsúllyal!) fokozatosan csökken. Most már érthető az is, hogy az izotop elemeket miért kell a periodusos rendszer ugyanazon helyére tenni. Az izotópok

csupán atomsúlyban különböznek, rendszámban nem. A Röntgen-spektrumok vizsgálata tehát valóban az atom szerkezetének sajátságairól ad számot, azonkívül hiányzó elemek felkutatására is alkalmas. 1913-ban, mikor Moseley híres törvényét feltalálta, a periodusos rendszerben még számos rendszámnak megfelelő helyen hézagok voltak. Ma már kettő kivételével 1—92-ig az összes elemek ismeretesek.

Visszatérve az ionizációs spektrumokra, a könnyen ionizálható atomok (mint pl. az alkáliák) vizsgálata során egyszeres ionizáció után a nemes gázokhoz jutunk (hélium, neon, argon, kripton, xenon). Melléknevük onnan származik, hogy nem vegyülnek más elemekkel, ionizálni pedig csak igen nagy munkával lehet őket. Valóban ők képviselik a periodusos rendszer elit társadalmát. Külső elektronjukat nagyon nehéz leszakítani, tehát elektronrendszerük rendkívül zárt. Ha viszont pl. a 17-es rendszámú klórt vizsgáljuk meg, azt találjuk, hogy itt hiányzik a külső elektron, éppen ezért a klór boldogan fogadja el a nátrium lazán kötött külső elektronját. Így lesz a nátriumból és klórból NaCl, közönségesen: konyhasó.

Végeredményben azonban, ha magát a Bohr-elméletet nézzük, azt látjuk, hogy csupán a lazán kötött külső elektronnal rendelkező atomok spektrumait lehetett a Bohr-elmélet alapján értelmezni. Azonban az eredeti elmélet még itt is számos lényeges kiegészítésre szorult. Nem részletezhetjük a matematikai tárgyalás híján amúgy is nehezen érthető kvantumszámok szerepét, csupán néhány lényeges módosításra hívjuk fel a figyelmet.

Így például nem igaz, hogy csupán a külső elektron ugrásainál lép fel sugárzás. Kiderült, hogy a belső, ú. n. atomtörzs elektronjai is ugorhatnak, ha véletlenül akad egy szabad hely és ilyenkor mindig Röntgen-frekvenciák jelentkeznek. A Röntgensugárnál még rövidebb hullámhosszú γ -sugárzás pedig az atom legbelsejéből jön. A fizikusok figyelme így az atommag felé fordult.

5. AZ ATOM SZERKEZETÉRE VONATKOZÓ FELFOGÁS A MODERN FIZIKÁBAN

Annyit már tudunk, hogy az atommag töltéseinek száma, a rendszám dönti el valamely atom helyét (tehát kémiai sajátságait is) a periodusos rendszerben. Kérdés: milyen elemi részecskékből épül fel az atommag?

A rádioaktív átalakulások vizsgálata a már említett izotópok felfedezéséhez vezetett. Ezek létezése megmagyarázta az egésszámú atomsúlytól való eltéréseket, de még mindig maradt megmagyarázni való. Ha ugyanis az oxigén atomsúlya 16, akkor — Aston legújabb mérései szerint — a hidrogéné 1,0081 lesz. Ha az atommag, — mint azt feltételezték — protonokból van felépítve, a héliummagnak négy proton tömegével kellene egyenlőnek lennie, amihez hozzájön még az elektronok tömege, amit nagy pontosságú méréseknél nem lehet elhanyagolni. A mérések viszont azt mutatták, hogy a héliummag tömege 4 proton tömegénél kisebb, ami az anyagmegmaradás elvének ellentmond. Ezt nemcsak a héliummagnál tapasztalták, hanem általában minden atomról kiderült, hogy tömege kisebb, mint az alkotórészek tömegének összege. E jelenség neve tömeghiány.

A tömeghiány jelensége már-már megdönteni látszott az anyag megmaradásának elvét, amikor Einstein relativitás-elméletének azt a már több ízben idézett tételét hívták segítségül, amely szerint minden tömeg energiát képvisel ($m = E : c^2$) és megfordítva. Az a tömeg tehát, amely elveszett akkor, amikor négy proton és két elektron héliummaggá egyesült (a hélium rendszáma kettő, magja tehát — úgy látszik — négy pozitív protonból és 2 negatív elektrontól áll), átalakult az Einstein-féle tétel értelmében energiává. Sőt, ez a feltevés lehetővé tette az atommag alkotórészeit összetartó erők kiszámítását is. Így kiderült, hogy pl. a héliumnál mutatkozó tömeghiány megfelel körülbelül azon munka (energia) milliószorosának, melyet egy elektron végez, ha egy volt potenciálkülönbségen halad

át (ennek a neve elektronvolt, jele eV). Ha ezt az energiaértéket átszámítjuk hőenergiára és összehasonlítjuk egyes vegyületek keletkezésénél felszabaduló hőenergiával, azt találjuk, hogy az atommag részei kb. egymilliószor szorosabban vannak kötve, mint a molekulák atomjai. Ez magyarázza meg azt, miért nem lehet közönséges fizikai és kémiai eljárásokkal atomot rombolni. Bizonyos körülmények között az atomrombolás mégis sikerrel járhat és ez vezetett az atom szerkezetének mélyebb megismeréséhez.

Rutherfordnak sikerült először atomot átalakítania, 1919-ben. Tudjuk, hogy a rádioaktív sugárzások egyik fajtája a csősugarakkal rokon jellegű α -sugárzás. Az α -részek is pozitív töltésű elemi részek és pedig, mint a pontosabb vizsgálat kimutatta, kétszeresen ionizált héliumatomok, vagyis héliummagok. Tömegük tehát az elektronéhoz képest igen nagy. A Wilson-kamrában lefényképezett pályájuk egyenes vonal és ha pl. elektronokkal ütköznek össze, az ütközés nem tudja őket útjukból eltéríteni. Csak akkor kapunk az egyenesvonalú pályától észrevehető eltérést, ha egy atomnak mennek neki. Ezért alkalmas az α -részekkel való bombázás atomrombolásra, sőt az ilyen kísérletek egy új elemi rész felfedezéséhez is vezettek.

1930-ban Bothe és Becker az ú. n. könnyű elemeket (litium, berillium, bór) α -sugarakkal bombázták és azt észlelték, hogy a bombázás hatására többek közt erős γ -sugárzás lép fel. Hasonló kísérleteket végzett 1932-ben Curie és Jolliot. Észrevették, hogy a sugarak a Wilson-kamrában hidrogén, hélium és nitrogénmagokat erős mozgásba hoznak. Ez a hatás nem származhatik a γ -sugaraktól, mert hiszen azokban csak az egészen kis tömegű, helyesebben tömegnélküli fotonok repülnek és ha egy foton pl. egy nitrogénmaggal ütközik, azt útjából el nem térítheti. Valószínűnek látszott tehát, hogy a γ -sugárzás mellett egy másik sugárzás is fellép, melynek átható képessége a γ -sugarakéval egyenlő, de ezek a sugarak elektromos és mágneses hatásokkal nem térít-

hetők el, tehát töltésük nincsen; részben ez is magyarázza meg nagy átható képességüket. Chadwick mutatta ki azután, hogy ha e sugarakban repülő korpuzszkulák centrálisan egy pozitív töltésű atommagba ütköznek, az atommag az ütközéstől nagy sebességet nyer és így pályája a Wilson-kamrában lefényképezhető. Az ütközésnél azért tud az atommagnak oly nagy sebességet adni, mert tömege a proton tömegével egyenlő.

Ennek az újonnan felfedezett elemi részecskének neve neutron. Tömege — mint az atombombázási mérések alapján kiszámították — a proton tömegével majdnem egyenlő (a protoné 1,0075, a neutroné 1,0084, az oxigénre vonatkoztatva).

Ugyancsak 1932-ben fedezett fel Anderson még egy elemi részecskét, az ú. n. pozitront. A kozmikus sugarakban előforduló nagy sebességű elektronok pályáját vizsgálta elektromos és mágneses térben Wilson-kamrával és azt találta, hogy vannak olyan pályák, melyek az elektronéhoz egészen hasonlóak, de mágneses térben éppen ellenkező irányban hajlanak el, mint az elektronpályák; ez pedig pozitív töltésre mutat. Pontos mérésekkel sikerült kimutatnia, hogy ennek az új részecskének töltése és tömege az elektronéval egyenlő. Megtalálták tehát végre a természetben az elemi pozitív elektromosságot is. Annak idején u. i. amikor a kétféle elektromosságot felfedezték és elnevezték, teljesen véletlen volt, hogy az állati szőrrel dörzsölt ebonit elektromosságát negatívnak, a foncsorozott bőrrel dörzsölt üveg elektromosságát pozitívnak tekintették. Minthogy az elektron felfedezése jóval később történt, amikor már a hagyományos megjelöléseken változtatni nem lehetett, bele kellett nyugodni, hogy az elemi elektromosság éppen a negatív töltés. A pozitron felfedezése ezt a bántó asszimetriát megszüntette.

Eddig tehát találkoztunk a protonnal, neutronnal, elektronnal és pozitronnal. Korábbi felfogás szerint az atommag (a hidrogént kivéve, melynek atommagja egyetlen proton) protonokból és elektronokból épül fel.

E felfogásnak azonban több kísérleti tény és elméleti megfontolás ellentmond. Ha feltesszük, hogy az atommag pozitív protonokból és semleges neutronokból áll (kivéve ismét a hidrogénmagot, mely megmarad protonnak), ezek a nehézségek megszűnnek. A feltevés jogos, mert hiszen neutronok atommagok bombázásakor keletkeznek. Így pl. a héliummag — a régi felfogás szerint — 4 protonból állt, de mivel rendszáma csak 2, fel kellett tenni, hogy a magban még két elektron is van, mely 2 proton pozitív töltését közömbösíti. Az új felfogás szerint a hélium atommagja két protonból és két neutronból áll, így a pozitív töltés (a rendszám) valóban kettő és a tömeg is megfelel négy proton tömegének. Az izotópokról feltették, hogy az egymást közömbösítő protonok és elektronok számában különböznek egymástól; az új felfogás szerint viszont egyszerűen a mag neutronjainak száma különbözteti meg az izotóp elemeket.

Lássuk most ebben a világításban a rádióaktív sugárzásokat. A rádióaktív átalakulásoknál felszabaduló nagy energiák és az a tény, hogy a sugárzás folytán az elemek átalakulnak, arra mutat, hogy e sugárzások az atom legbelsejéből jönnek, így ezek tanulmányozása az elemi részek és az atom közötti kapcsolat megvilágítására vezethet.

Az α -sugárzással azaz α -részek kibocsátásával járó ú. n. α -átalakulásnál a rendszám kettővel csökken, úgyhogy a keletkezett új elem a régihez képest balra két hellyel tolódik el. Az α -sugárzás rendszerint γ -sugárzással kapcsolatban történik. Ennek magyarázata a következő. Megfigyelték, hogy az atomból kilépő α -részek különböző sebességgel távoznak, mégpedig a nagy sebességekkel kilépő α -részek esetén rövid, a kis sebességeknél hosszabb élettartamú elem keletkezik. Ha sebességek különbözőek, különbözőek az energiák is (összefüggés mozgási energia és sebesség között). Tehát éppúgy mint az elektron, az α -rész is különböző

energianívókat foglalhat el az atomban; ha megvizsgáljuk a kilépő α -részek energiáját, azt találjuk, hogy ezek különbsége adja a γ -sugár frekvenciáját, épp úgy, mint ahogy a Bohr-féle frekvencia-feltétel az elektronok energianívóiból adja meg a spektrumvonalak rezgésszámát. A γ -sugár akkor keletkezik, ha egy α -rész magasabb energiájú nivóból alacsonyabbra kerül, ez a nyert energiakülönbség sugárzik ki γ -sugár formájában. Ha maga az α -rész lép ki, ennek energiájában nyilvánul meg az energiakülönbség. A periodusos rendszerben való eltolódás nyilvánvaló, ha az α -részt — mint mondtuk — két protonból és két neutronból gondoljuk felépítve. A két pozitív töltés távozásával a rendszám kettővel csökken, a hiányzó tömeg pedig a 2 helytel balra fekvő kisebb atomsúlyú elem keletkezésének felel meg.

Míg az α -átalakulások és az ezzel kapcsolatos sugárzás ily módon aránylag könnyen értelmezhető, a β (elektronokat tartalmazó) sugárzás magyarázata már nem volt ennyire egyszerű. A tapasztalat szerint β -sugárzással kapcsolatban kétféle átalakulással találkozunk. Az egyik csoportba tartozóknál a β -sugarak is elkülönített, ú. n. diszkrét energiákkal lépnek ki, a másik esetben azonban a kilépő sugarak energiája u. n. folytonos, összefüggő spektrumot ad. Az első eset magyarázata még mindig egyszerű. Úgy képzeljük, hogy a magból jövő γ -sugár áthalad a külső elektronok rendszerén és azokon fotoelektromos effektust létesít, azaz a γ -sugár fotonjai összeütköznek a külső, lazán kötött elektronokkal és azokat a magból β -sugárzás formájában kilöki. Láttuk, hogy a külső elektronok nem egyforma erősen vannak kötve, tehát kilökésükhöz hol több, hol kevesebb munka szükséges. A belső pályákról nehezebb, a külsőkről könnyebb elektronokat kiszakítani. A különböző energiaértékek onnan származnak, hogy a könnyen leszakított elektronokat tartalmazó sugár energiája kisebb, mint a belső pályákról jövő

sugárzásé. Ugyanezeket az energiakülönbségeket a megfelelő Röntgen-spektrumban is észlelhetjük, vagyis a Röntgen-spektrum is — mint láttuk — a belső elektronok ugrásainak tulajdonítható.

Nehezebb az eset az ú. n. folytonos β -spektrumnál. A folytonos β -sugárzásnak a magból kell jönnie, mert ha ezt észleljük, az atom rendszáma megváltozik, eggyel nagyobb lesz és az elem a periódusos rendszerben eggyel jobbra tolódik el. Ha csak arra gondolunk, hogy egyetlen β -rész távozásával egy elektronnal, tehát egy negatív töltéssel kevesebb lesz a magban, a jelenség még könnyebben érthető. Ha eggyel megnövekedik a pozitív töltések száma, azaz a rendszám, a periódusos rendszerben a régi elem után következő magasabb rendszámú elemhez jutunk. Lényeges különbség van azonban a β - és α átalakulások között. Az α -részek távozása esetén a különböző energiáknak megfelelően különböző élettartamú, esetleg csak a másodperc milliomod részéig élő elem keletkezett; a β -átalakulásoknál az elektronok energiája széles skálában változik ugyan, a keletkezett új elem energiája mégis mindig ugyanaz. Vagyis ha megértjük, hogy egy nagysebességű β -rész távozása létrehozott egy új elemet és az átalakulásnál feltesszük, hogy az energiatétel érvényben maradt, hová lett a fölösleges energia, ha csupán kis sebességű β -rész távozott és az átalakulás ugyanúgy ment végbe?

A modern fizikával való ismerkedésünk során már nem először láttuk az energiatételt veszedelemben. Már a tömeghiány jelenségénél is komoly nehézségek merültek fel, de ezeket Einstein tétele áthidalta. Nyugodtak lehetünk most is, hogy a fizikusok valahogyan módját ejtik majd, hogy a fizika legfőbb alapelvét megtarthassák, még akkor is, ha az ehhez szükséges feltevés talán kissé túlságosan mesterkéltnek is látszik. Mindenesetre tény az, hogy az energiafelesleg úgy távozik, hogy kimutatni lehetetlen. Úgy látszik, ez a felesleges energia valami olyanféle sugárzás alakjában távozik, mely — még mielőtt bármit tehetnénk — azonnal el-

nyelődik. Ilyen könnyen abszorbeálódó (elnyelődő) korpuzkuláris sugárzás Pauli szerint a hipotetikus neutrino nevű részecskét tartalmazná. Erre vonatkozólag Fermi dolgozott ki egy elméletet, melynek segítségével a sugárzásnál eltűnő energiáról — kissé kínosan — de mégis számot lehetne adni. Hangsúlyozzuk, hogy a neutrino hipotetikus korpuzkula, azaz oly részecske, melynek létezéséről egyelőre semmiféle bizonyítékunk nincsen. Létét csupán az támasztja alá, hogy az energia-tételnek érvényben *kell* maradnia és ez egyelőre más-képen, mint a neutrínóra vonatkozó feltevessel, nem látszik biztosítottnak.

A neutrínonak töltése nincs, tömege kisebb, mint az elektroné, esetleg nincs is tömege! Fermi elmélete szerint már most a β -sugárzás következőképen történik: az atomban protonok és neutronok vannak. β -bomláskor egy neutron bomlik fel: protonra, elektronra és neutrínóra. A proton visszamarad és növeli az új elem plusz töltéseinek számát, az elektron és neutrino együtt távoznak. A neutrínók sebességei különbözőek ugyan, de az energiák összege állandó, mégpedig egyenlő a legnagyobb sebességű elektron energiájával. Mivel azonban a neutrínók rögtön abszorbeálódnak, kimutatásuk eddig még nem volt lehetséges, mindenesetre a ki nem mutatható energiafölösleget egyelőre az ő szám-lájukra írjuk.

A neutrínóra vonatkozó feltevés nem az első, mely a fizika története folyamán a jámbor olvasót, sőt még a fizikus kortársakat is meghökkentheti. De éppen a fizika története tanít arra, hogy sokszor még a leg-meghökkentőbb, látszólag erőszakkal előrángatott munkahipotézist is igazolhatja a valóság.

Látjuk, hogy — a neutrínók kimutathatatlanságától, mint egyetlen szépséghibától eltekintve — már meglepően sok, jól bizonyítható tény áll rendelkezésünkre az atom felépítésére vonatkozólag. Azonban még mindig nem lehetett az elméletet e ponton lezártnak tekin-

tenl, mert még egy igen fontos kérdés maradt függőben: milyen erők tartják össze olyan hihetetlen stabilitással az atomokat? A neutronok semleges, a protonok pozitív töltésű részecskék. Ezek között a fizika nem ismer más vonzóerőt, mint a tömegvonzást, ez pedig aligha elég nagy. Heisenberg, a kvantummechanika másik nagy, szintén Nobel-díjas megalapítója a vonzóerőt azzal magyarázta, hogy a protonok és neutronok közötti kölcsönhatás úgy jön létre, hogy a neutron kibocsát egy elektront, ezáltal ő maga protonná alakul át. Ezt a kibocsátott elektront elnyeli egy proton, ezáltal viszont abból neutron lesz. Ehez a „kicserélődési” folyamathoz kvantumelméleti számítások értelmében fűződő energiát látjuk mi mint kötési energiát megnyilvánulni. Fermi elmélete Heisenbergével úgy függ össze, hogy a Heisenberg-féle kicserélődés is felfogható úgy, hogy pl. a proton nem csupán neutronra és elektronra, hanem neutronra, elektronra és neutrínóra bomlik. A feltevés azért logikus, mert míg a β -bomlás észlelhető jelenség, addig Heisenberg kicserélődési folyamata csupán feltevés. Ha tehát a β -bomlásnál elfogadtuk a neutrínót, innen sem zárhatjuk ki.

A baj nem is ott van. Heisenberg elmélete nagyon tetszetősnek és észszerűnek látszott, csakhogy a számított energiaértékek, vagyis az atommag stabilitását jellemző energiák sokkal kisebbek voltak, mint a valóságban. Yukawa japán tudós ezen nehézség megoldására még egy újabb elemi rész létezését tétélezte fel, melynek szintén negatív töltése van, de tömege 2—300-szor nagyobb, mint az elektroné. A proton és neutron tehát nem a kicsi és könnyű elektronnal, hanem evvel a sokkal nagyobb tömegű részecskével labdázna és így azután az ettől számított vonzóerő is éppen megfelelőnek adódott.

A fizikusok ebben ez esetben szerencsésebbek voltak, mint a neutrínónál. A Yukawa által feltételezett elemi részt u. i. valóban megtalálták Neddermayer és Anderson (a pozitron felfedezője) amerikai fizikusok,

1937-ben, a kozmikus sugarakban. E tudósoknak a Wilson-kamrában olyan vonalakat sikerült fényképezniök, melyek sem a vékony elektron-, sem a vastag proton-pályáknak nem felelhettek meg. E pályát oly részecskének kellett tulajdonítaniok — mint számításaik mutatták — melynek töltése negatív és kb. akkora mint az elektroné, de tömege 2—300-szor nagyobb. E részecske neve az irodalomban mezon, mezotron, vagy ritkábban Yukon.

Miképp lehet, hogy csak ilyen későn sikerült a fizikusoknak a mezotronnal találkozniok? Ennek magyarázata az, hogy e részecske általában igen rövid életű, hasonlóan a pozitronhoz. A kozmikus sugaraknak nagy vastagságú levegőrétegen kell áthaladniok és a levegőréteg a kozmikus sugarakban levő részecskéből, így a mezonból is igen sokat elnyel (a levegő atomjai átveszik ütközéskor a részecske energiáját). Mint ahogy Rossi, chicagói egyetemi tanár kimutatta, a mezonnal nemcsak ez történik, hanem e részecskék igen hamar el is bomlanak. Mint ahogy a radioaktív elemek között is vannak igen rövid élettartamú elemek, úgy a mezon az elemi részek közül a legrövidebb élettartamú. Williams és Roberts angol fizikusok oly Wilson-kamrát készítettek, melynek segítségével — hosszas kísérletezés után — sikerült egy olyan pillanatot eltalálni, melyben egy mezon éppen felbomlik és ezt le is fényképezték. És e ponton találták az első halvány bizonyítékot a neutrino létezésére is. A feltevés szerint ugyanis a mezon egy elektronra és egy neutrínóra bomlik. A fényképen látható a mezon pályáját jelölő vastag vonal, mely azonban hirtelen megszakad és más irányban egy vékonyabb vonalban folytatódik. Ez az elektron pályája. Ha nem lett volna jelen a neutrino is, az elektronnak a mezon pályájának irányában kellett volna tovább haladnia, de úgylátszik, neutrino is volt jelen. A mezon tömege sokkal nagyobb, mint az elektroné és neutrínóé együttvéve. Ez a hiányzó tömeg mozgási energiává alakult, ezért mind a neutrínónak, mind az elektronnak sebessége

rendkívül nagy, az elektroné pl. akkora, mintha 50 millió volt feszültségkülönbségen haladt volna keresztül.

Láthatjuk tehát, hogy ma már aránylag elég valószínű feltevésekkel rendelkezünk az atommag felépítésére vonatkozólag. Ismételjük, hogy igen nagy energiák tartják össze az atommag alkotórészeit (erre a tömeghiányból következtethetünk), de mivel részben radioaktív preparátumokból, részben mesterségesen igen nagy sebességű elemi részeket tudunk előállítani, ezekkel majdnem minden atomot sikerült már átalakítani atomrombolással, vagy atomépítéssel. A középkori aranycsinálók álma már nem álmom többé. Elvileg semmi akadály sincs az „aranycsinálás”-nak, csak éppen a költségei haladják meg milliószerosan az előállított arany értékét. A radioaktivitást ma már mesterségesen is elő tudják állítani. A mesterséges radioaktivitás előidézésekor keletkező elemek egyrészt ismert izotópok, de sikerült eddig még ismeretlen izotópot is találni. A keletkező elemek hosszabb-rövidebb élettartamúak, néhány másodperc és több nap között váltakoznak. A mesterséges radioaktivitás módszereinek részletezésére nem térhetünk ki; az eljárások lényege: valamilyen elemet α -részekkel vagy neutronokkal bombáznak, az elem felbomlik, de ugyanakkor új elem is keletkezik a bombázó és bombázott elemi részekből. A kísérletek célja ma már persze nem az aranycsinálás, nem a „bölcsek követ” kutatják a fizikusok, hanem az aranynál számukra jóval értékesebb és maradandóbbat találtak: az emberi elme diadalát a természet fölött. Sikerült bepillantánunk a természet legtitkosabb műhelyébe és az atom szerkezetére vonatkozó valószínűtlenül elvont spekulációkat szinte kézzelfoghatóan igazolni. A tulajdonképeni „modern” fizika, a kvantummechanika azonban — mint látni fogjuk — gondoskodik arról, hogy az ember ne bízza el magát túlságosan: megismerésünk határai végesek és — legalább egyelőre úgy látszik — nincs is rá mód, hogy e határokon valaha túljussunk.

6. A KVANTUMMECHANIKA

Bohr elmélete kétségkívül szakított a klasszikus fizikával, lemondva a természetben uralkodó folytonosság hirdetéséről, többszörösen megsértve a klasszikus elektromágneses elmélet lezárt és megmásíthatatlannak gondolt törvényeit. Mint Franck és Hertz kísérletei, a fotoelektromos effektus, a hidrogén és a hidrogénszerű atomok spektrumai és még számos a fizika egyéb területén előforduló jelenség mutatta, az elmélet termékeny volt és a tapasztalat is alátámasztotta. A nagy eredmények mellett azonban az elméletnek nagy hiányai is voltak.

Kérdés, vajjon hol volt az alapvető hiba? A hiba ott volt, hogy Bohr elmélete modern, de nem eléggé modern. Forradalmi gondolatait a tudomány régi formanyelvére próbálja lefordítani és a régi mechanisztikus gondolkodás fogalmaival igyekszik az atom parányi részecskéi között lejátszódó eseményeket magyarázni. Pedig ha a régi fizikának (melyben a természetben uralkodó folytonosság gondolata volt a vezető) megvoltak a maga matematikai eszközei e folytonosság kifejezésére, akkor az új fizikának is szüksége volt oly matematikára, mellyel a természetben általa feltételezett ugrások kifejezhetők. Ezen új matematikai módszer felkutatására két különböző úton indultak el a fizikusok. A két út, mint látni fogjuk, ugyanoda vezetett és ez a találkozás talán a modern fizika legnagyobb diadala volt.

Bohr kvantumelméletének legfőbb fogyatkozása az volt, hogy nem állt a maga lábán. Sok pontban kénytelen volt szakítani a klasszikus fizikával, de annak eredményeire minduntalan szüksége volt. Másrészt Bohr elméletében az elektron mint rugalmas kis golyó szerepel, ugrik egyik pályáról a másikra, ütközik fotonokkal stb. Ha elektrónról van szó, ez egyelőre még nem volna túl nagy baj, de már fotonoknál nem lehet tisztán korpuszkuláris alapon az interferencia-jelenségeket értelmezni.

Egyelőre odáig jutottunk, hogy a fény pl. a fotoelektromos effektusnál mint korpuszkuláris sugárzás, az interferencia-jelenségeknél mint hullámzás viselkedik. A modern fizikus feladata azonban az volt, hogy ezt a különös kettősséget valamilyen egységes képbe foglalja, melyből nem csupán esetlegesen kell kiválasztanunk a nekünk éppen megfelelő „fényfajtát”. Különösen égető volt ez a kérdés azért is, mert kiderült, hogy e kettősség nem csupán a látható fénynek, hanem más elektromágneses sugárzásoknak is alapvető tulajdonsága, így pl. a Röntgen-sugaraké.

1923-ban vette észre Compton, hogy ha fémlapra Röntgen-sugárzás esik, az ott szóródik és a szórt sugár hullámhosszúsága nagyobb lesz, mint a beeső sugaré. E jelenséget — mint a fotoelektromos effektust is — csupán korpuszkuláris alapon lehetett megmagyarázni. A Röntgen-sugár fotonjai összeütköznek a fém szabad elektronjaival, energiájuk egy részét átadják azoknak. Mivel egy foton energiája a rezgésszám és a Planck-féle h szorzata ($h\nu$), energialeadáskor a rezgésszám kisebb, ennek megfelelőleg pedig a hullámhossz nagyobb lesz.

Mindezeket a jelenségeket figyelembe véve De Broglie abból indult ki, hogy nemcsak a fotonokat, hanem minden elemi részecskét, így az elektront is hullámok kísérik. De Broglie feltevését csupán a fotonokra vonatkozólag támogatták tapasztalati eredmények, de nem sokkal ezután Davisson és Germer kísérletileg is igazolták De Broglie alapvető feltevését (1927).

Önkéntelenül is felmerül itt az a kérdés, hogyan lehetséges, hogy az anyag hullámszerű sajátságait csak újabban fedezték fel, míg a fény hullámtermészete már több mint egy évszázad óta ismert volt. Ennek magyarázata a De Broglie-hullámok mikroszkópikusan kis hullámhosszúságában található, míg a fénysugarak hullámhosszúsága elegendő nagy aránylag ahhoz, hogy fényinterferencia jelenségeket is lehessen előállítani.

Mindenesetre tény az, hogy De Broglie elméletét

még Davisson és Germer említett kísérletei előtt állította fel, sőt matematikailag is kidolgozta. A De Broglie-féle hullámok és a korpuszculák között az az összefüggés áll fenn, hogy a hullámhosszúság egyenlő h -nak és a részecske impulzusának hányadosával. Tehát (mivel az impulzus $m \times v$) a hullámhossz és tömeg között számszerű összefüggés áll fenn.

De Broglie eredeti elméletét, míg a kvantummechanika mai formáját elérte, Schrödinger, Born, Bohr, Heisenberg, Jordan és Dirac módosították.

Sajnos, mint a modern fizika legtöbb területén, itt sem nélkülözhető a magas matematika és így nem hatolhatunk be mélyen e modern elméletekbe. Azonban már maga ez az akadály is jellemzően világítja meg előttünk a modern fizika egyik leglényegesebb vonását. Newton óta a fizikusnak, főképpen az elméleti fizikusnak, mindig többé-kevésbé jó matematikusnak kellett lennie, de soha nem állított a fizika oly magas matematikai követelményeket a fizikus elé, mint ma. A kvantummechanika területén matematika, mégpedig a legmagasabb matematika nélkül mozdulni sem lehet. Ha ez így van, azt hihetnők, hogy szemlénk végére is értünk és a „modern fizika világképé”-nek vázlatát egyszerűen azzal fejezzük be, hogy most még következniék a kvantummechanika, de azt már úgy sem érti, aki nem szakember.

Szerencsére a helyzet ennyire nem reménytelen. Ha nem is hatolhatunk be a kvantumfolyamatok mélyére kellő előkészültség nélkül, talán mégis sikerül éppen azokat az alapvető mozzanatokat kihámozni, melyek a fizikai világkép arculatát oly lényegesen, a régítől elütő módon megváltoztatják.

Visszatérve De Broglie elméletére, nézzük meg közelebbről De Broglie hullámait, illetve azoknak tökéletesített alakját. Vegyük szemügyre az atomot De Broglie elképzelése szerint. Bohr elméletének — amellet, hogy egyes részletkérdésekre nem tudott kielégítő választ adni — legfőbb szépséghibája az volt, hogy a

kvantumelméletben felbukkanó egész számok szerepét nem tudta megfelelően magyarázni. Az egyes energianívókhöz tartozó egész számok misztikus módon tűnnek fel és az új fizika legfőbb feladata ezek tisztázása volt.

Ha a klasszikus fizika egyéb területein ilyen egész számok után kutatunk, ezekkel az ú. n. álló hullámok rezgéseinél találkozunk. Álló hullámok — mint már említettük — keletkezhetnek pl. egy a két végén rögzített kötélen vagy húron. A hullámot állónak azért nevezik, mert egyes pontjai, az ú. n. csomópontok, mindig nyugalomban vannak. Egy meghatározott hosszúságú kötélen pedig csak olyan hullámok keletkezhetnek, melyek fél hullámhossza a kötel hosszában (tehát általában a rezgő mechanikai rendszer méreteiben) egész számsor foglaltatik, mert a kötel két végén mindig csomópontnak kell lennie. A leghosszabb hullám az, melynek félhullámhossza éppen a kötel hosszával egyenlő.

Ezek után kézenfekvő volt az a feltevés, hogy az atomon belül az elektronokhoz rendelt hullámok ilyen álló hullámok, az elektron pályája pedig a fenti mechanikai rendszer szerepét veszi át: csak oly pályák lehetségesek, melyeknek méretei a megfelelő álló hullám félhullámhosszúságának egész számú többszörsei. Az elektron ugrásainak pedig a De Broglie-frekvencia (ill. hullámhossz) megváltozása felel meg. Más frekvenciához más pálya tartozik.

Látható, hogy ez a kép már nem olyan szemléletes, mint Bohr pályái, de lassan hozzá kell szoknunk, hogy a modern fizikában — mint a relativitásnál is láttuk — a szemléletesség mindinkább háttérbe szorul.

De Broglie követői azonban még egy lépéssel továbbmentek: a klasszikus mechanika helyett egy új mechanikát kell találni az atomon belüli folyamatok leírására: a hullámmechanikát. Régi mechanikát említve, jelen esetben nem csupán a newtoni mechanikára gondolunk, hanem a relativisztikus mechanikára is. Ebben az értelemben szoktuk azt mondani, hogy a relativitás

elmélete még lényegében a klasszikus fizikához tartozik. Természetesen szoros értelemben véve nem beszélhetünk kétféle mechanikáról. Mechanika csak egy van: a kvantummechanika. A kvantummechanika törvényei minden fizikai folyamatra érvényesek, csak hogy általában — ha nem az atomon belüli mikroszkópikus világról van szó — egy durvább közelítéssel, vagyis a klasszikus mechanikával is megelégedhetünk.

Tulajdonképen nem is egészen jogos szóhasználat a kvantum-„mechanika” kifejezés, mert a kvantummechanika sok fogalmat megfoszt fizikai jelentésétől, melynek pedig a klasszikus mechanikában valóságjellegük volt. A kvantumjelenségek leírására azért nem elég megfelelő még a relativisztikus mechanika sem, mert a relativitáselmélet az anyagi pontokhoz meghatározott pályákat rendel, ilyenekről pedig a kvantummechanikában le kell majd mondanunk.

Láttuk ugyanis, hogy nincs olyan klasszikus alapon álló modell, mely az atomról — különösen a nehezebb atomokról — a tapasztalattal egyező értelmezést adna. Kérdés most már, hogyan kell megválasztani az új mechanikát? Egy bizonyos: a hullámoknak — ezt eddig a tapasztalat és az elmélet is kétségtelenül igazolta — döntő szereppel kell bírniok az elméletben. A hullámok viselkedéséből kell levezetni a megfelelő mechanikai folyamatokat és a mérhető energianívókat.

Nézzük meg először, hogyan értelmezi a hullámelmélet az intenzitást. Hullámok és korpuszculák összekapcsolásának értelmében ott, ahol a hullám rezgésének tágassága nagyobb, ott a részecskék sűrűbben, ahol az intenzitás kisebb, ott ritkábban vannak. Így pl. ha keskeny résen elektronnyalábot bocsátunk át, a rés széle, épp úgy, mint fénysugarak esetében, elhajlítja az elektronsugarakat, úgy hogy a rés után elhelyezett ernyőn egyes helyeken erősebben, más helyeken gyöngébben látjuk az elektronok nyomát, aszerint, hogy az elektront kísérő hullámok erősítették, vagy gyöngítették egymást. E szerint a hullám intenzitása tulajdonképen

annak a valószínűségnek mértéke, hogy a tér valamely helyére kerültek-e elektronok, vagy sem. Ugyanez az elgondolás fotonokra és fényhullámokra is átvihető.

Az új kvantummechanika tehát a fényt, helyesebben a sugárzást és anyagot közelebb hozza egymáshoz. Sugárzásnak és anyagnak e szerint hullámszerű és korpuszkuláris aspektust kell tulajdonítanunk. Ezáltal mind az anyag, mind a hullám sokat veszít kézzelfogható fizikai realitásából: a De Broglie-hullámok nem kézzelfogható, fizikai hullámok, mint a hang, vagy a viharos tenger hullámai, hanem csupán matematikai szimbólumok, melyek valószínűséget mérnek. De nem kézzelfogható részecske az elektron sem, mely meghatározott pályákon kering, ugrik és ütközik, hanem egy többékevésbé elmosódó valami, melynek helyéről csak valószínűségi fogalmaink vannak. Így tehát az sem lehetetlen, hogy az elektron egyszerre két helyen legyen, illetve e két helynek valószínűsége a megfigyelés előtt teljesen egyenlő lehet.

Most már azt is értjük, hogy miért nem lehetett csupán a Bohr-féle pályák alapján a tapasztalattal jó egyezésben levő adatokat kapni az energiákra. Mint Heisenberg kifejezte: „túlsokat tételeztünk fel az atómról”. Hogyan is kaphatnánk jó eredményt, ha pályákról beszélünk, melyek a valóságban nincsenek is, vagy ha vannak, nem figyelhetjük meg azokat.

Hogyan lehetséges azonban, hogy a klasszikus és relativisztikus mechanika a tapasztalattal jó egyezésben levő eredményeket kapott akkor, amikor anyagi részeckek határozott pályát tulajdonított? E kérdésre a választ a De Broglie-hullámok hullámhosszúsága adja meg. A hullámhossz h -nak és a részecske impulzusának hányadosa. Nagyon kicsi szám ez, de — az atomok világában különösen — mégis véges mennyiség. Ha egy olyan világban élnénk, melyben h még tényleges értékénél is kisebb, azaz nulla lenne, nem fedezhetnők fel az anyag hullámsajátságait sem. Ha h eltűnne, eltűnnének

a kvantumfolyamatok is, ezeknek okozója tehát nyilván az anyag hullámtermészetében rejlik.

Az elektron pályájára vonatkozó bizonytalanságot először Heisenberg fogalmazta meg 1927-ben a róla elnevezett és az egész modern fizika egyik alapját képező Heisenberg-féle határozatlansági vagy bizonytalansági relációban.

Heisenberg nem azt állítja, hogy az elektron helyére vonatkozólag teljesen bizonytalanok vagyunk, a bizonytalanság csak a megfigyelés előtti időre vonatkozik. Mielőtt az elektron pontos helyét megállapítottuk volna, valóban nem elektron, hanem elektronfelhő van előttünk, melynek bármely pontján tartózkodhat az elektron több-kevesebb valószínűséggel. Ha meghatározzuk az elektron helyét úgy, hogy pl. egy alkalmasan választott koordináta-rendszerben megadjuk az elektron koordinátáit, akkor ehhez szükséges mérés — Heisenberg szerint — szükségképpen befolyásolta az elektron impulzusát, vagy ami ugyanaz, sebességét. Ha tehát ismerem pontosan az elektron helyét, már nem ismerhetem meg pontosan a sebességét, vagy megfordítva: a sebesség pontos mérése megakadályozza a pontos helyhatározást.

Heisenberg a következő gondolati kísérlettel világította meg a helyzetet. Képzeljük el, hogy meg akarunk figyelni egy elektront. Választunk erre a célra egy alkalmas mikroszkópot. Hogy az elektront megfigyelhessük, meg kell azt világítanunk. Hogy a mérési hiba minél kisebb legyen, legyen a megvilágító sugár lehetőleg kis hullámhosszúságú, pl. egy γ -sugár. Az elektront akkor fogjuk észlelni, ha a γ -sugár egy fotonja összeütközik az elektronnal. E pillanatban tehát a hely ugyan pontosan megmérhető, de már az eredeti sebesség nem, mert hiszen a fotonnal való ütközés folytán megváltozott az elektron sebessége.

Kérdés, mekkora e bizonytalanság mértéke? Heisenberg a hullámelméletből és a fenti kísérletből is levette ezt. Ha egész pontosan meghatározom a helyet,

a sebességet illetőleg teljes bizonytalanságban maradok és fordítva; ha azonban lemondok mindkét esetben a teljes pontosságról, a hiba mindkét oldalon aránylag kisebb lesz. Nem jelenti azonban a bizonytalansági reláció azt, hogy pl. két pont között nem határozhatom meg az elektron sebességét. Ha meghatározom a helyet pl. A-ban és B-ben, mérem az időt, míg az elektron egyenletes sebességgel eljut A-ból B-be, az út és idő hányadosa az ismert módon szolgáltatja a sebességet. Itt tehát lehetségesnek látszott mégis az, amit Heisenberg lehetetlennek mondott. Ha azonban azt hisszük, hogy ellentmondásba kerültünk a határozatlansági relációval, nem értettük meg világosan annak tartalmát. A fenti mérésből nem tudtunk meg semmi olyat, amit már azelőtt is ne tudtunk volna. Nem tudjuk pl. hogyan mozgott a részecske az A pont előtt, vagy hogyan fog mozogni a B pont után. A mérés sem a multról, sem a jövőről nem adott új adatot.

Ha még emlékezünk Laplace idézett szavaira a klasszikus fizika determinizmusát illetőleg, érdemes idézni Heisenberg saját szavait is, mely a modern fizika indeterminizmusát fejezi ki.

Visszatérve ugyanis az előbbi mérésre, ha megmértük az elektron helyét A-ban, már nem következtethetünk a mérés előtti sebességre, mert hiszen sebességét a mérés megváltoztatta; hasonlóképen a B-ben való mérés már nem tudhatja velünk, hogy mi lett volna a részecske sebessége egy következő pontban a mérés nélkül. Heisenberg a következőket mondja erre vonatkozólag: „A multról való ezen ismeretünk tehát pusztán spekulatív természetű, mivel ezt soha (a mérés miatt) nem használhatjuk mint kezdeti feltételt az elektron jövőbeli pályájára vonatkozólag és így nem vethetjük alá tapasztalati igazolásnak sem. Egyéni hit dolga, hogy az elektron multjára vonatkozó ilyen számításnak valaki fizikai realitást tulajdonít-e vagy sem.”

Talán már az eddigiekből is kitűnt, fontossága miatt azonban nem lesz fölösleges ismételten hangsúlyozni,

hogy a Heisenberg-féle bizonytalanságot nem szabad összetévesztenünk a gyakorlatban mindenféle mérésnél előforduló mérési hibával, melyet az ember érzékszerveinek gyarló volta okoz. Ilyen hibák többé-kevésbé minden mérésnél adódnak, de a klasszikus fizika álláspontja az volt, hogy teoretikus megfontolásokból e hibákat ki lehet kapcsolni, azaz a fizikai mennyiségekkel úgy számolhatunk, mintha azoknak exakt pontossággal való meghatározása lehetséges volna. Ezt az álláspontot a modern fizika is teljes egészében magáénak vallja. Heisenberg elve csupán arra figyelmeztet, hogy vannak fizikai mennyiségek, amelyeknek szimultán, egy időben történő, pontos mérése lehetetlen. Ilyenek: helykoordináta és impulzus (sebesség); energia és idő. Hogy ezeket szimultán megmérni nem lehet, az nem a mi tudatlanságunkból folyik, hanem természeti alaptörvény. A természet pedig nem rosszindulatból tagadja meg tőlünk az adatokat, melyekből a jövő történésnek megismerése lehetővé válnék (Laplace: „Ha ismernők minden részecske helyét és sebességét...”), hanem egyszerűen azért, mert a jövő h nagyságú határon belül bizonytalan.

Ezzel körülbelül elérkeztünk ahhoz a ponthoz, ahol a kvantummechanika közönséges szavakkal való ismeretése lehetetlenné válik. Mindenesetre a fenti megfontolásokon alapult a további kutatás. Meg kellett találni a megfelelő matematikai módszert, melynek segítségével a már ismert és értelmezett jelenségeket le lehetett írni, de amely arra is alkalmas volt, hogy olyan jelenségeket is értelmezzen, melyekről a régi elmélet nem tudott számotadni. Két utat is találtak erre, melyek egész más szempontból indultak ki, de matematikailag egyenértékűek voltak.

Az egyik út a De Broglie elméletének továbbfejlesztése. Ezt választotta Schrödinger. Schrödinger azonban már ez elveknek megfelelően megfosztja a Bohr-féle pályákat minden pontos jelentésüktől. Az elektron itt is hullámhoz kapcsolódik, de Schrödinger a hullámok

eloszlását már nem csupán a mag közelében, hanem az egész térben vizsgálja. Az atom állandó nívójú állapotait sokkal nehezebb a hullámmechanika alapján értelmezni, mint a Bohr-féle atommodellel. Schrödinger szerint a stacionárius állapotoknak úgynevezett álló hullámok felelnek meg és ezekre az álló hullámokra állít fel Schrödinger egy differenciálegyenletet: ez a híres Schrödinger-féle hullámegyenlet.

Ha a hullámegyenletet a hidrogénatomra alkalmazzuk, még látszólag elég szemléletes képet kapunk. Itt ugyanis — ha a mag mozgásától eltekintünk — egyetlen elektronnal van szó, melynek három szabadsági foka van, azaz a háromdimenziós térben háromfelé mozoghat. Hozzávéve azonban a mag mozgását is, a szabadsági fokok száma már 6, a 6 dimenziós tér pedig már nem szemléletes. Schrödinger elmélete tehát a magasabb rendszámú atomok tárgyalásánál végkép elszakad a valóság talajától, amikor már a $2n$ dimenziós, ú. n. konfigurációs térben vagyunk.

Éppen ezért nem éri nagy veszteség a szemléletességet, ha már kezdetben is egy egyáltalában nem szemléletes módszert, az ú. n. matrixelméletet használjuk a kvantummechanikában. A matrix-módszer kiépítése Heisenberg, Born, Jordan és Dirac érdeme. Matrixnak a matematikában számok meghatározott sorrendjét, egy szkémát nevezünk. Ezekre a szkémákra bizonyos műveleti szabályok érvényesek. Fizikai mennyiségeknek matrixokkal való reprezentálása a kvantummechanika szempontjából igen előnyösnek mutatkozott, mert jól lehet velük kifejezni az atom energiaértékeiben mutatkozó diszkontinuitást. Mint ahogy a differenciál- és integrálszámítás a newtoni dinamika folytonos, végtelen kis változásainak megfelelő kifejezője volt, úgy fejezik ki a modern fizikában a folytonosság hiányát a matrix különálló elemei.

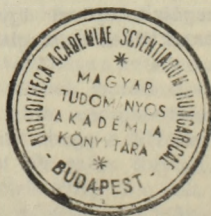
Mint mondtuk, a hullámmechanika és a matrixelmélet matematikailag egyenértékű teóriák és részben az adott probléma, részben a fizikus ízlése dönti el,

melyiket fogja a kettő közül használni. Mégis a matrix-módszernek talán az az előnye, hogy nem is csábít semmiféle szemléletességgel, mint a hullámmechanika. Felhívja a figyelmet a modern fizika azon alaptételére, mellyel már a relativitás elméletében találkozunk: a fizikai valóság szemléletes eszközökkel nem ismerhető meg. Amit mi közönségesen megismerünk, az a valóságnak durván leegyszerűsített képe csupán, a mögötte rejlő „igazi” valóság azonban a szemléletes megismerés határain kívül esik.

A modern fizikus igényei látszólag kisebbek, mint a görögöké, vagy a klasszikus filozófusoké. Állításaiban óvatosan kerüli a bizonyosság szót, csupán valószínűségeket ismer. Ma még távoli, de végső célja mégis ugyanaz: az egységes világmagyarázat. A modern fizika a „nagy szintézist” még nem érte el, csupán az utat jelölte meg, melyen a további kutatásoknak haladniuk kell. Ezen az úton ma még áthághatatlan nehézségek tornyosulnak, de ezek az igazi kutató szellemet inkább serkentik, semmint visszariasztják. Amint De Broglie mondja: „Valahányszor sikerült az emberi szellemnek a természet könyvének egy lapját kibetűznie, rögtön kitűnt, hogy mennyivel nehezebb a következő lap szövegének megfejtése. De egy belső ösztön mégsem hagyja, hogy bátorságunkat elveszítsük, hanem arra ösztönöz, hogy megújult erővel igyekezzünk még előbbre jutni a természet titkainak megismerésében.”

TARTALOM

	Lap
Bevezetés	3
1. A klasszikus fizika világképe	6
2. A relativitás elmélete	20
3. Az anyag szerkezete	30
4. A Bohr-féle atommodell	44
5. Az atom szerkezetére vonatkozó felfogás a modern fizikában	59
6. A kvantummechanika	69



Magyar Tudományos Akadémia
 Könyvtára 3646/1951 sz.



KINCSESTAR

Az ország egyetlen, a tudományok minden ágát felölelő és népszerűsítő könyvsorozata. 150 kötetes keretében az ismeretek teljes enciklopédiáját nyújtja, úgymint :

MAGYARSÁGISMERET
TÖRTÉNELEM
AZ ÚJ EURÓPA
IRODALOMTÖRTÉNET
EMBER ÉS TERMÉSZET
MŰVÉSZET, KÖNYV
KÖZGAZDASÁG, STATISZTIKA
VALLÁS ÉS FILOZÓFIA
TERMÉSZETTUDOMÁNY
ORVOSTUDOMÁNY
HADTUDOMÁNY, SPORT
FÖLDRAJZ
TÁRSADALOMTUDOMÁNY
ÉLETRAJZOK



„A MAGYAR SZEMLE KÖNYVEI”

önálló nagyobb monografiák a következő szerzőktől :

*Szekfü Gyula, Weis István, Hóman Bálint,
Horváth János, Farkas Gyula, Babits Mihály,
Julier Ferenc, Gratz Gusztáv, Genthon István.*

KÉRJEN RÉSZLETES PROSPEKTUST.

Kiadóhivatal : Budapest, VI., Vilmos császár út 26. sz.