

FIZIKAI SZEMLE

AZ EÖTVÖS LORÁND FIZIKAI TÁRSULAT LAPJA

VI. évfolyam

I. szám

1956. február

Az atommag nélküli atom: a pozitronium*

Napjainkban a fizika alapvető problémáit kutató vizsgálatok közül legaktuálisabb az elemi részek kölcsönhatásának tanulmányozása. Az elemi részek jelentik az anyag ma ismert legkisebb építőegységeit, ezért az elemi részecskékre vonatkozó törvényekből elvben minden fizikai jelenségnek levezethetőnek kell lennie. Ebben rejlik az elemi részek fizikájának központi fontossága.

Az atomfizikában a részecskék kölcsönhatását kétféleképpen lehet tanulmányozni: Az első régebbi módszer a kötött állapotokat vizsgálja. A kötött állapotban levő részecskék által emittált sugárzás vonalas spektruma és így a kialakult diszkrét energianívók nagy pontossággal észlelhetők, ezek ismerete pontos felvilágosítással szolgál az anyag mozgástörvényeire vonatkozólag. A másik módszer a kötetlen, szabad részecskék egymásra való hatásának vizsgálata. A kölcsönhatást jellemző hatáskeresztmetszet a szóráskísérletekből jóval bizonytalanabban határozható meg, meg sem közelíti a spektroszkópiai méréseknek minden fizikai kísérlet példaképpül szolgáló precizitását. Ezért finomabb hatásokról elsősorban a kötött állapotok, szinképek tanulmányozása tud számot adni.

A természetben előforduló kötött elemirészrendszerek az atommagok és az atomok. (A molekulák és kristályok atomokból felépültek tekinthetők.) Az atomok és magok elektronokból, protonokból és neutronokból épülnek fel, tehát tanulmányozásuk csak erre a három elemi részecskére vonatkozólag szolgálhat felvilágosítással. Ezért a többi részecskére (pozitronok, mezonok, hyperonok) vonatkozólag csak kevésbé pontos, vagy erősen közvetett megfigyelési adatok jutottak a fizikusok birtokába.

Ezen a helyzeten jelentett döntő változást az a felfedezés-sorozat, mely az utóbbi években megmutatta: mindenfajta elemi részből kialakulhat többé-kevésbé stabilis kötött rendszer, és az megfelelő finom kísérleti technikával hozzáférhető a megfigyelés számára. A μ -mezont az atom befoghatja egy elektron-pályára, a μ -mezont itt kvantumugrásokot végezve szinképet sugározhat ki, míg végül a legbelső pályáról 10^{-8} sec után a

mag elnyeli.¹ (A μ -mezont-atomok Röntgen-színképét kísérletileg észlelték, és az az atommag kiterjedésére vonatkozó ismereteink jelentős módosulását eredményezte.) Hasonló körülmények közt jön létre a π -mezont-atom is.² A legutóbbi években sikerült kimutatni, hogy a legnehezebb részecske, a hyperon helyet foglalhat az atommag kötelékében, ott a neutron helyettesíti.³ A hyperon-atommagok észlelése a nukleonok mibenlétére, szerkezetére vonatkozólag szolgált döntő jelentőségű ismeretgyarapodással. Körülbelül ezekkel egyidőben, 1951-ben felfedezték a pozitroniumot⁴ is, az egymás körül keringő elektronból és pozitronból álló kötött rendszert.

Tudjuk, hogy a pozitron a legelsőnek felfedezett elemi részek közé tartozik: 1933-ban észlelte a kozmikus sugárzásban Anderson. Ott azáltal jön létre, hogy a nagyenergiájú γ -foton egy atommag terében elektron-pozitron-részecskepárrá alakul át. Ezt a »párkeltést« vagy »materializációt« ködkamrában megfigyelték. A pozitron létét még évekkel felfedezése előtt Dirac elméleti úton megjósolta. A várakozás szerint a pozitron és elektron töltése ellenkező előjelű, de abszolút értékük egzaktul megegyezik, ugyanúgy tömegük és spinjük is. A megfigyelések mindezt a legteljesebb mértékben megerősítették. Page mérései szerint az elektron és pozitron fajlagos töltése (előjeltől eltekintve) 0,01% eltérést sem mutat (1953). Lindström a pozitron által keltett γ -sugárzás energiáját megmérve kimutatta, hogy az elektron és pozitron tömege 0,01% pontossággal megegyezik. Ezekből levonhatjuk a következőt, hogy Dirac elmélete az elektron és pozitron egységes és helyes leírását szolgáltatja.

A pozitron észlelése, felfedezése azért volt nehéz feladat, mert a pozitron nagyon rövid ideig létezik a természetben. Ez nem azt jelenti, hogy a pozitron talán nem stabilis. A γ -kvantum által keltett vagy radioaktív atommagok által emittált részecske magárahagyatva, vákuumban tetszőlegesen hosszú ideig fennmarad, akárcsak testvére, az elektron. A pozitronnak megvan azonban az a hajlandósága, hogy elektronnal

¹ Fizikai Szemle 4. 63. 1954.

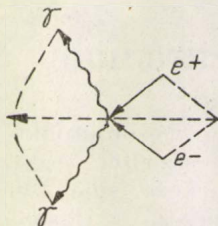
² Fizikai Szemle 3. 165. 1953.

³ Fizikai Szemle 4. 40. 1954.

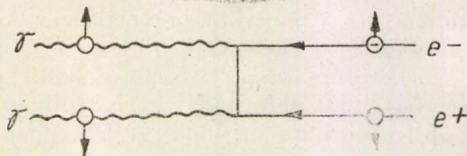
⁴ Fizikai Szemle 3. 165. 1953.

* A IV. Magyar Fizikus Vándorgyűlésen, Egerben előadva.

találkozva együtt elektromágneses sugárzássá alakuljanak át. Mivel környezetünkben minden anyag atomokból áll, az atomok pedig elektronokat tartalmaznak, a pozitronnak sok alkalma van az elektronnal való találkozásra és a szétsugárzásra.⁵ (Ha egy távoli térrészben olyan atomok léteznének, melyek negatív magjai körül pozitronok keringenének, akkor itt az elektron volna ritka vendég: most az elektronnak volna nagy



1. ábra. Kétfotonos szétsugárzás impulzusviszonyai



2. ábra. A kétfotonos szétsugárzás »gráfja« és a spinviszonyok

esélye valamelyik atom pozitronjával való összecsapódásra és szétsugárzásra. A pozitronok viszont ezen az elektron-szegény vidéken hosszú életkort élnek meg.) Vizsgáljuk meg ezt a »szétsugárzásnak« nevezett folyamatot részletesebben. A v_- sebességű elektron és a v_+ sebességgel beléütköző pozitron energiája együtt alakul át a keletkező foton $h\nu$ energiájává, impulzusaik eredője adja a foton $h\nu/c$ impulzusát:

$$\frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v_-^2}{c^2}}} + \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v_+^2}{c^2}}} = h\nu,$$

$$\frac{mv_-}{\sqrt{1 - \frac{v_-^2}{c^2}}} \cos \delta_- + \frac{mv_+}{\sqrt{1 - \frac{v_+^2}{c^2}}} \cos \delta_+ = \frac{h\nu}{c}.$$

Könnyű belátni, hogy az energia- és impulzus-egyenlet egyidejűleg nem állhat fenn. Ehhez ui. az volna szükséges, hogy ($h\nu$ -t kiküszöbölve)

⁵ Hangsúlyoznunk kell, hogy az elektron és pozitron szétsugárzásánál nincs arról szó, hogy anyag megsemmisülne, tömeg »eltűnne« és energia »keletkeznék«. Mindössze az történik, hogy a nyugalmi tömeggel rendelkező részecskébe tömörült anyag átalakul egy másik anyagformává: sugárzássá. Energia is, tömeg is szigorúan megmarad az átalakulás során: a kezdeti részecskék nyugalmi és kinetikus energiája egyenlő a keletkezett sugárzás energiájával, az elektron és pozitron tehetetlen tömege a keletkezett fotonok tehetetlen tömegével.

$$\frac{c}{\sqrt{1 - \frac{v_-^2}{c^2}}} + \frac{c}{\sqrt{1 - \frac{v_+^2}{c^2}}} =$$

$$= \frac{v_-}{\sqrt{1 - \frac{v_-^2}{c^2}}} \cos \delta_- + \frac{v_+}{\sqrt{1 - \frac{v_+^2}{c^2}}} \cos \delta_+$$

legyen, azaz $v_{\pm} > c$, már pedig a relativisztikus mechanika ismert tétele értelmében az elektron és pozitron v_{\pm} sebessége mindig kisebb, mint a c fénysebesség. Ezért a szétsugárzás egy fotonra nem történhet meg, mert nem áll rendelkezésre a fotonemisszióhoz szükséges impulzus. Két fotonra való szétsugárzás már végbemegy, mert kellőképpen szétartó fotonok impulzusa elég kicsiny lehet, fedeződhetik az elektron-pozitron-pár eredő impulzusából. Látható ebből, hogy a szétsugárzás ún. másodrendű folyamat: két emissziós aktusból épül fel. Az elektromágneses tér kvantumelmélete alapján kiszámítható a folyamat hatáskeresztmetszete is. Erre a következő képlet adódik:

$$\sigma = r_0^2 \pi \frac{c}{v_+}.$$

Itt $r_0 = 2,8 \cdot 10^{-13}$ cm a »klasszikus elektronsugár«, $r_0^2 \pi$ tehát az elektron »klasszikus keresztmetszete«. Az e mellett szereplő c/v_+ szorzót is megérthetjük: minél kisebb a pozitron v_+ sebessége, annál tovább tartózkodik az elektron közelében, tehát annál több alkalma van a szétsugárzásra. A szétsugárzás valószínűsége a pozitron elektron közelében való tartózkodásának valószínűségével arányos.

A szétsugárzási hatáskeresztmetszet még mérsékelt sebességeknél is elég kicsiny. A pozitron az anyagon való áthaladás során sokszor ütközhetik szabad elektronokkal, atommagokkal, a nélkül, hogy a szétsugárzódásra sor kerülne. A közel fénysebességgel születő pozitronnak általában van elég ideje ahhoz, hogy a gázmolekulákkal ütközve lefékeződjék az anyag hőmozgásából adódó csekély sebességre. Csak ezután sugárzódik szét, mikor már nincsen számottevő kinetikus energiája. Ezt a következtetést megerősíti a tapasztalat: A megfigyelés szerint a két keletkező foton nagyjából 180° alatt repül szét, jeléül annak, hogy az elektron-pozitron-pártól számottevő impulzust nem kaptak.

A fentiek ismeretében merült fel még húsz évvel ezelőtt Mohorovicic horvát fizikusban a következő gondolat: Ha a szétsugárzás nem következik be szükségszerűen, amint egy elektron és egy pozitron egymást 10^{-8} – 10^{-10} cm távolságra megközelíti, akkor a két részecskéből az elektromos Coulomb-vonás folytán hidrogénatomhoz hasonló rendszer alakulhat ki. A pozitron az elektront befoghatja és az keringhet a pozitív töltésű rész körül. A különbség a hidrogénatommal szemben csak annyi, hogy a nehéz proton

helyét a könnyű pozitron foglalja el. (Az ilyen módon tartósan egymás közelében maradó két részecske közt csakhamar bekövetkezik a szétsugárzás.) Mohorovicic ennek a rendszernek az »elektrum« nevet adta és azt új elemnek tekintette. Rámutatott annak lehetőségére, hogy színképét esetleg a Napkoronában észlelni lehet.

A feltételezett elektrontól és pozitrontól álló képződményt később pozitroniumnak nevezték el. A pozitroniumot olyan atomnak tekinthetjük, melynek csak buroka van, a magja hiányzik: csupa könnyű részecskéből áll és Coulomb-erők tartják együtt. Ebben rejlik a pozitronium elméleti érdekessége: benne mag-részecskék nincsenek, felépítésében kizárólag az elektromágneses térnek van szerepe, tehát kiválóan alkalmas ezen tér mikro-törvényeinek, a kvantumelektrodinamikának zavartalan tanulmányozására.

Gondoljuk meg, milyenek a pozitronium várható sajátosságai? Az energia-nívók hasonlóak a hidrogénatom Balmer-féle energia-nívóihoz, mivel itt is a Coulomb-vonzás által összetartott két töltésről van szó:

$$E_n = -\frac{2\pi^2\mu e^4}{h^2 n^2}, \quad \mu = \frac{m}{1 + \frac{m}{M}}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

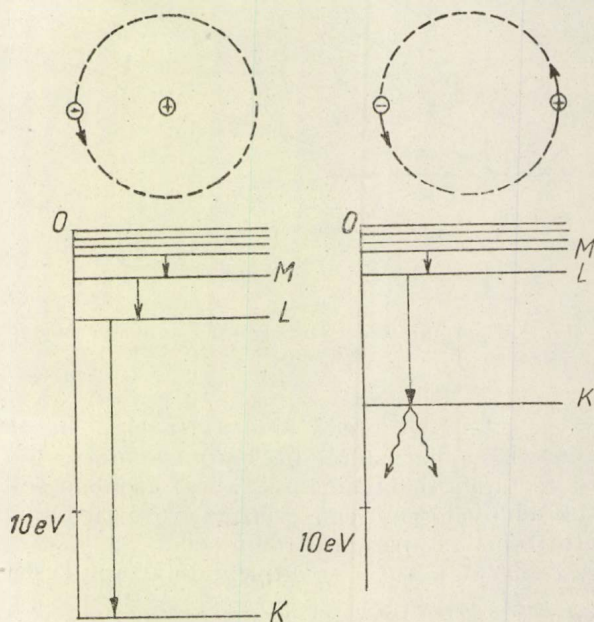
csak most a mag M tömege helyébe a pozitronnak elektronnal egyező m tömege irandó. Ezért amíg a hidrogénatomban a μ »redukált tömeg« nem tért el lényegesen az m elektrontömegtől, addig a pozitroniumnál $\mu = m/2$. Ennek következtében minden pozitronium-energianívó a megfelelő hidrogén-energia felénél fekszik. A pozitroniumszínkép egy hullámhossza tehát kétszerese lesz a megfelelő hidrogén-vonalénak. A jelenség szemléletes magyarázata az, hogy amíg a hidrogénatomban a proton gyakorlatilag nyugalomban van, addig a pozitroniumnál a pozitronnak is részt kell vennie az elektronnal együtt a keringésben, hogy kettejük közös tömegközéppontja nyugalomban maradjon. Másik fontos következmény: a pozitroniumban a pályasugár kétszerese a hidrogén-atom Bohr-féle pályasugarának. A nagyobb távolság magyarázza a kisebb kötési energiát.

Ha az elektront a pozitron nagy impulzusmomentummal (nagy mellékvantumszámmal) rendelkező pályára fogja be, akkor a szétsugárzás nem következik be, mert az állapotfüggvények nem fedik egymást, a két részecske nem tartózkodhatik egy helyen. (Ezt az impulzusmomentum zérustól különböző értéke kizárja.) Ilyenkor az elektron kvantumugrásokkal, optikai színkép kisugárzásával megy át az alapállapotba. (Egy gerjesztett állapot élettartama kb. 10^{-7} sec.) Ha a pozitronium olyan állapotba jut, ahol az elektronnak nincs impulzusmomentuma (s -állapot), bekövetkezik néhány száz 10^{-10} sec-on belül a szétsugárzás.

A pozitronium rövid élettartama és ritkasága miatt a kisugárzott színképvonalakat még nem

sikerült észlelni. Ennek kimutatása nagyon szép feladat volna. Itt természetesen a spektroszkópai problémához nagyon kis fényintenzitás, egyes fotonok kimutatásának feladata járul. Megfelelő optikai ráccsal és elektronsokszorozóval azonban ez nem látszik lehetetlennek. Ha a pozitronium színképét nem sikerült felfedezni, kérdés, miként észlelhető egyáltalán a pozitronium? Ennek megválaszolásához finomabb megfontolások szükségesek.

Már a hidrogénatomnál is különbséget jelentett az, hogy a keringő elektron és a központi

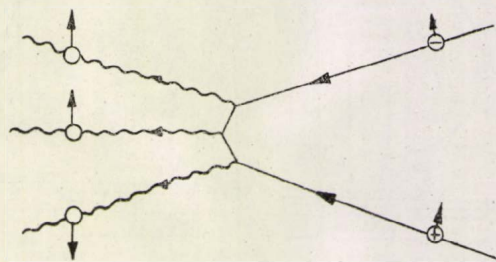


3. ábra. Hidrogénatom és pozitronium

proton mágneses momentuma (spinje) miként helyezkedik el egymáshoz viszonyítva. Ez a különbség fokozottabban fellép a pozitroniumnál, hiszen a pozitronnak 1000-szer akkora mágneses momentuma van, mint a protonnak. Azt a pozitroniumot, ahol a két momentum párhuzamos, ortopozitroniumnak nevezik ($\frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$ eredő spin, tripllett állapot). Az ellentétes spinbeállítás neve parapozitronium ($\frac{1}{2} - \frac{1}{2} = 0$ eredő spin, szingulett állapot). Az előbbi energianívója magasabban áll, az utóbbi mélyebben, az alapállapot felhasadása néhány tízezred elektrontolt.⁶ A pozitronium kötési energiája 6,8 eV.) A két állapot közt tiltott az átmenet, külső beavatkozás nélkül a magasabban fekvő ortoállapot is csak szétsugárzással szűnhetik meg. A szétsugárzás le-

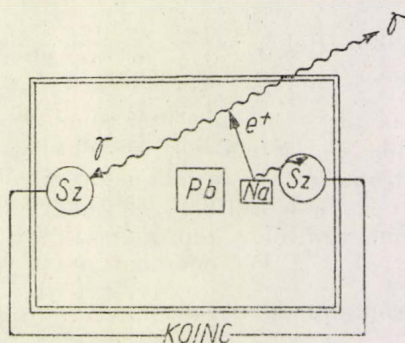
⁶ A hidrogénatomnál is fellép az alapállapot két nagyságrenddel kisebb felhasadása. A két közeli nívó közt (igen ritkán) bekövetkező átmenet alkalmával kibocsátott sugárzás vezetett el a Tejútrendszer spirális szerkezetének felfedezéséhez.

folyása a két alapállapotban azonban nagyon különböző. A 0 spinű parapozitronium szétsugárzódik két fotonra, melyek 1-es spinje ellentétesen áll, és így az impulzuszórány megmaradásának megfelelően szintén 0 eredőt ad (2. ábra). A kétfotonos, másodrendű folyamatnak megfelelő élettartam $1,25 \cdot 10^{-10}$ sec. Más a helyzet az egyes spinű ortopozitroniumnál. A szétsugárzaskor ezt az 1-es spint a két 1-es spinű foton semmilyen spinbeállással ($1+1 \neq 1$) nem viheti magával. Az egy-fotonos szétsugárzás energetikailag tiltott. Egyedüli lehetőségnek a három (vagy több) fotonra való szétsugárzás ma-



4. ábra. A háromfotonos szétsugárzás »gráfja« és a spinviszonyok

rad. ($1+1-1=1$ eredő spint visz el a három foton.) Ez a harmadrendű, három emissziós aktust tartalmazó folyamat (4. ábra) azonban sokkal kisebb valószínűségű, ezért az ortopozitronium élettartama a parapozitroniuménál 1115-szöröse hosszabb: $1,4 \cdot 10^{-7}$ sec. Ilyeni időtartam kísér-



5. ábra. A pozitronium létezését igazoló kísérlet

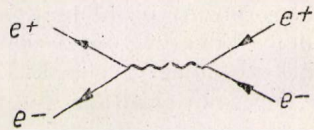
tett koincidenziaberendezéssel, elektronikus úton kimutatható. Ez tette lehetővé a pozitronium felfedezését. Martin Deutsch 1949-ben méréseket végzett gázban a pozitronium élettartamára vonatkozólag. Na^{22} -izotópot tartalmazó készítményt gáztérben helyezett el. A Na^{22} -atommag bomlása gyakorlatilag egyidejű pozitron- és γ -foton kibocsátásával jár. A foton szcintillációs számlálóval regisztrálva ismeretessé vált a pozitron születésének pillanata. A pozitron hosszabb-rövidebb idő után a gáz egy elektronjával egyesülve szétsugárzik, az ekkor keletkező γ -fotonok

a radioaktív készítménytől leányékolt számlálóval észlelhetők. Utóbbiból megtudható a pozitron halálának pillanata. Az 1949-es mérés rámutatott arra, hogy a pozitron élettartama nem egyszerűen a gázsűrűségtől (azaz elektronsűrűségtől) függ. A döntő kísérletet, mely a pozitronium felfedezéséhez vezetett, Deutsch 1951-ben hajtott végre. CF_2Cl_2 - (freon-) gázban észlelte a 10^{-7} sec nagyságrendű pozitron-élettartamokat. Ezután a gázhoz nitrogénoxidot kevert. Az NO-molekulában egy szabad, páratlan elektron van. Ez a pozitroniummal ütközve helyet cserélhet a pozitronium elektronjával. Megfelelő találkozás esetén az új elektron spinje a régivel ellentétes lett, azaz az ütközéssel a hosszúélettartamú ortopozitronium parapozitroniummá alakul át, ami rögtön szétsugároz. Normális nyomáson és hőmérsékleten 10^{-12} sec-onként következik be egy pozitroniumnak gázmolekulákkal való ütközése. Várható tehát, hogy az NO-molekulák jelenléte az orto \rightarrow para átalakulást katalizálva megszünteti a hosszúélettartamú komponensét. A kísérlet teljes sikerrel járt: a freonba NO-t adagolva a 10^{-7} sec-os kísérletet koincidenziák elmaradtak. (Hasonló »mérgező« hatást idéz elő az oxigén is. Ilyenkor az O_2 -molekula mágneses tere hozza létre a vele ütköző pozitroniumban a spin átugrását.) Ebből nyilvánvalóvá vált, hogy a kísérletet koincidenziák nem szabad pozitronok, hanem a pozitronium szétsugárzásából származnak.

Deutsch kísérletei után más módon is igazolták a pozitronium létezését. Deutsch és Pond a szétsugárzás energia- és irány-eloszlását, Benedetti a hármas γ -koincidenziákat, a háromfotonos szétsugárzás irányeloszlását észlelte. (Ez volt az első harmadrendű folyamat, melynek az észlelése sikerült: egy lépésben három kvantum-aktus, három foton emissziója következik be.)

A pozitronium-atom szinképek durvaszerkezete a kettes szorzófaktorától eltekintve megegyezik a hidrogénszinképekével. A finomszerkezet azonban fontos és jellegzetes eltérést mutat. Első nevezetes sajátosság az, hogy a relativisztikus okokból fellépő finomszerkezet és a mágneses momentumok kölcsönhatásából származó hiperfinomszerkezet (a pozitron nagy mágneses momentuma miatt) egyező nagyságrendű. Ezekhez járul még egy harmadik effektus is, melynek a hidrogénatom esetében nincs megfelelője, de az ortopozitroniumnál módosulást okoz. Láttuk azt, hogy a spinviszonyok megengedik az ortopozitroniumnak egyetlen fotonra való szétsugárzását, az energiamegmaradás tétele azonban ennek bekövetkezését a valóságban megtiltja. A kvantumelektrodinamika szerint azonban virtuális, közbenső állapotként létrejöhethet a szétsugárzás és utána rögtön a [pozitron-elektron-pár újból való testetöltése. A virtuális, egy fotonra sugárzott állapot külön nem észlelhető, azonban ennek az orto-állapothoz való keveredése annak energiáját módosítja. Mivel ebben a virtuális

helyzetben az elektron és pozitron töltésmentes, rejtett formában van jelen, köztük a Coulomb-



6. ábra. Az ortopozitronium virtuális szétsugárzása (Bakha-féle kölcsönhatás).

vonzás kimarad. Ezért a virtuális állapotnak az ortoállapothoz való keveredése annak kötési energiáját csökkenti. (6. ábra.)

	Orto-alapállapot	Para-alapállapot
Relativisztikus effektus (finomszerkezet)	$-0,11 \cdot 10^{-3} \text{ eV}$	$-0,11 \cdot 10^{-3} \text{ eV}$
Mágneses kölcsönhatás (hiperfinomszerkezet)	$+0,12 \cdot 10^{-3} \text{ eV}$	$-0,36 \cdot 10^{-3} \text{ eV}$
Virtuális szétsugárzás (kötés-gyengülés)	$+0,36 \cdot 10^{-3} \text{ eV}$	0
Teljes finomszerkezet alapállapotban	$+0,37 \cdot 10^{-3} \text{ eV}$	$-0,47 \cdot 10^{-3} \text{ eV}$

A felsorolt hatások az orto- és parapozitronium alapállapotának $0,854 \cdot 10^{-3} \text{ eV}$ nagyságú szétválását eredményezik. (Maga az alapállapot $-6,8 \text{ eV}$ mélyen fekszik tehát $1 : 10\,000$ arányú felhasadásról van szó.) A pontosabb számításoknál még figyelembe kell venni további kvantumelektrodinamikai effektusokat, a vákuum-polarizáció és az elektromágneses zéruspont-fluktuáció hatását.⁷ Ezek még $-0,005 \cdot 10^{-3} \text{ eV}$ szétválást okoznak, tehát a felhasadás $0,849 \cdot 10^{-3} \text{ eV}$, ami hullámhosszban $1,5 \text{ mm}$, frekvenciában $20,337 \cdot 10^{10}$ hertz nivótávolságnak felel meg.

A pozitronium-színkép finomszerkezetének tanulmányozása és a pozitronium alapállapota felhasadásának kiszámítása Landau és Bereszteckij nevéhez fűződik. (Tőlük függetlenül, de egy évvel később Ore és Powel is meghatározták a várható felhasadást.) 1948 óta a finomszerkezetet is öt tizedes jegyig elméletileg ismerjük, de még a tízezerszer erősebb durvaszerkezetet, egyáltalán a pozitronium színképét sem sikerült megfigyelni. Azonban a fizikai kutatás már nem egyszer oldott meg első pillanatban teljesen megközelíthetetlennek látszó problémákat. A pozitronium-finomszerkezet pontos észlelése a fizikai kutatás olyan diadala, melyhez hasonló az utolsó évtizedekben sem sok található. Ismerjük meg ezt a szellemes, klasszikus szépségű kísérletet.

A kísérlet alap gondolata emlékeztet a hidrogén-színkép Lamb-féle vonaleltolódásának mérésére. Erős mágneses térrel az átmenet tiltott voltát megszüntetik és az ortopozitronium triplett állapotát felhasítják. Egyidejűleg szabályozható frekvenciájú rádióhullámmal sugározzák be azt a gázteret, ahol a β -aktív preparátum pozitron-sugárzásának hatására a pozitronium létrejön.

Ha az elektromágneses hullám frekvenciája olyan, hogy a megfelelő $h\nu$ fotonenergia éppen elegendő a két közeleső nívó közt az átmenet létrehozására, akkor bekövetkezik a hosszúélettartamú komponensnek rövidélettartamúvá való átalakulása. Ezt a késő koincidenziák kimaradása árulja el. Mivel a rádióhullám frekvenciája igen pontosan megállapítható, megkapjuk belőle a nívófelhasadás értékét is. Deutschnak és munkatársainak méréséből $20,3350 \pm 0,0050 \cdot 10^{10}$ hertz adódott, az elméleti értékkel ezreléknyi egyezésben! Pontosabb mértést a kérdéses energianívók természetes szélessége sem enged meg. (Ez az energianívó-szélesség a pozitronium korlátos élettartamának folyo-

mánya.) Az eredmény a kísérleti technika nagy sikerét jelenti, de egyben a kvantumelektrodinamika diadalát is. Mutatja, hogy az elektromágneses tér kvantumelmélete a sugárzási folyamatokat nemcsak fő vonásaiban, hanem részleteiben is helyesen írja le. A vákuumpolarizáció (a vákuumnak igen kis elektromos permeabilitású dielektrikumhoz hasonló viselkedése) és az elektromágneses tér zéruspontrezgéseit tapasztalatilag igazolt fizikai jelenségeknek tekintendők.⁷ Ma már a kvantumelektrodinamikát az elméleti fizika jól kiépített és kísérletileg igazolt, egzakt fejezetének mondhatjuk. A hidrogénatom mellett a pozitronium a legegyszerűbb és legpontosabban ismert kvantumelméleti rendszer. A pozitronium felépítésében a jól ismert elektromágneses térnek jut csak szerep, a nukleonok, magerók ma még hiányosan ismert törvényeinek nem. Ezért a pozitronium a kvantumelektrodinamika legtisztább próbakövüül, sőt mondhatjuk: bizonyítékaül szolgál. Ebben rejlik a pozitronium jelentősége az elvi kutatások szempontjából.

A pozitronium-kutatás lehetőségei nem mérülnek ki az alapvető, elemi részekkel kapcsolatos problémák tisztázásában. Gázban vagy szilárd anyag belsejében a pozitronium atomként viselkedik. Olyan atomként, mely kitűnik különösen egyszerű szerkezetével. Mintegy a hidrogén 0 atomsúlyú izotópjának nevezhető. Létrehozásának és kimutatásának újszerű, többiekétől eltérő módja, más atomokkal és molekulákkal való jellegzetes kölcsönhatása a molekula- és kristályszerkezeti kutatások értékes kiindulópontjává teszik. A pozitronium létét minden ütközés nagy-

⁷ Román Pál, Fizikai Szemle 5. 50. 1955.

mértékben veszélyezteti. Más atomok közelében mindig fenyeget az ortopozitroniumban a spin-átugrás, parapozitroniummá való átalakulás és ebből az állapotból gyorsan bekövetkező szét-sugárzás. Ezért az első kísérletek nem nagyon nagy nyomáson levő gázok pozitron-besugárzásával történtek. Már a pozitronium felfedezésekor kiderült, hogy a gázmolekulák sajátságai döntő befolyást gyakorolnak a pozitronium születésére és halálára. A freon-gáz (CF_2Cl_2) különösen alkalmas arra, hogy elősegítse a pozitron elektronbefogását, pozitroniummá való átalakulását. Nitrogénben, hidrogénben, héliumban, argonban a besugárzott pozitronok 20%-ából képződik pozitronium. Említettük, hogy a páratlan elektront tartalmazó NO és a mágneses térrel rendelkező O_2 mérgezőleg hatnak: elősegítik az ortopozitroniumban a párhuzamos spineknek ellentétes irányúvá való ugrását és ezáltal a pozitronium halálát. Elektrosztatikus tér viszont növeli a pozitronium-születések számát. Argonban 300 volt/cm tér alkalmazásával elérhetjük, hogy minden egyes besugárzott pozitronból pozitronium keletkezzék. Ennek a jelenségnek a magyarázata a következő: A pozitronnak egy gázatomról elektront kell leszakítania ahhoz, hogy pozitronium keletkezhesse. Az ehhez szükséges ionizációs energia rendszerint nagyobb, mint a pozitronium képződésekor felszabaduló 6,8 eV. A különbséget a pozitron kinetikus energiájának kell biztosítania. A termikus mozgást végző pozitronnak általában nincs meg a szükséges kinetikus energiája, de az elektrosztatikus tér gyorsító hatása pótolni tudja az ütközések által okozott kinetikus-energia-csökkenést.⁸ Széndioxid hozzáadás akadályozza a pozitroniumképződést: a CO_2 -molekulákon a pozitron rugalmatlan ütközést szenvedhet és így lecsökken a kinetikus energiája a küszöb alá. Különösen érdekes és nem eléggé tisztázott a klór és bróm mérgező szerepe. Valószínűleg ezek hatására pozitroniumklorid és pozitroniumbromid molekulák keletkeznek, melyekben a pozitron szétsugárzás számára kedvező feltételek vannak.

A kémiai jellegű megfigyelések fizikai kísérletek mellékeredményeként jöttek létre. Elméleti vizsgálat e területen még nagyon kevés van. Tudjuk, hogy a pozitroniummolekula, molekulai-ion, pozitroniumhidrid stabilis, bár észlelésük mindeddig nem sikerült. A megkezdett munkát tervszerűen a kémikusoknak kell folytatniok, ki kell dolgozni az új elemnek vagy újszerű izotópnak tekintendő pozitronium kémiáját, meg kell állapítani kémiai tulajdonságait. Mivel az ortopozitronium atomhoz hasonló szerkezetű és élettartama egy mikroszekundumot elérhet, részt vehet kémiai folyamatokban. (Kedvező körülmények közt egy ortopozitronium millió gázmolekulával is ütközhetik élete során, tehát megérheti a kémiai egyensúly beállását.) A pozitroniumot egyszerű felépítése mellett a szétsugárzás pillanatában adott γ -jelzés teszi további kvantum-

kémiai, reakciókinetikai vizsgálatokra alkalmassá. A kémia új fejezete születik napjainkban: a pozitronium-kémia.

A molekulaszervezeti problémáknál bonyolultabbak, de nem kevésbé érdekesek a szilárd anyagra vonatkozó megfigyelések. A pozitron kristályban is elég soká él ahhoz, hogy lefékeződ-hessen. A kisebbességű pozitront az atommagok eltaszítják, ezért az az elektront csak a külső atompályákról, fémekben a szabad vezetési elektronok közül rabolhatja el. Az ilyen elektronok energiája 10 eV körül, impulzusa $mc/137$ körül van. Mint már Pomerancsuk 1949-ben rámutatott, a szétsugárzásokról fémekben keletkező γ -kvantumok impulzusának nagysága és bezárt szöge is ilyen nagyságrendű szórást kell, hogy mutasson. Arannyal, rézzel végzett kísérletek során ezt az irányaszórást sikerült is kimutatni. Látható ebből, hogy fémekben a lassú pozitronok energiáját nem a hőmozgás, hanem az ott levő vezetési elektronok Fermi-statisztikából következő zéruspontmozgása szabja meg. A szétsugárzás pontosabb tanulmányozása megadja annak lehetőségét, hogy a γ -kvantumok szögeloszlásából a fémek vezetési elektronjainak sebesség-eloszlására következtessünk. Ilyen irányban rendszeres mérések még nem történtek, noha a kísérlet követelményei nem nagyon nehezek, és hazánkban is elérhetőeknek látszanak.

Érdekes megfigyelés, hogy a fémekben a pozitron élettartama kisebb, mint az az elektron-sűrűség alapján várható. Ennek oka az lehet, hogy a kristályszerkezetből adódó periodikus elektromos tér a pozitron-hullámfüggvényre is olyan alakot kényszerít, amilyennel a vezetési elektronok hullámfüggvényei rendelkeznek. Ez az átfedés elősegíti az elektron-pozitron-találkozást, a szétsugárzást. Még nyitott kérdés, hogy fémekben is kialakulhat-e pozitronium. Ezt látszik támogatni az a megfigyelés, hogy a különböző alkálifémekben a pozitronok élettartama kb. ua., megegyezik a parapozitronium élettartamával, noha az elektronsűrűség az egyes alkálifémeknél számottevő módon különbözik. A sűrűbben épült kristályokban már nincs elég szabad hely a pozitronium-atom számára. Valószínű, hogy ezekben a pozitronium nem sztatikus alakzat, hanem benne az elektron folytonosan cserélődik. Érdekes és megmagyarázatlan megfigyelés, hogy ugyanazon fém szupravezető módosulatában az ortopozitronium kialakulására kedvezőbb feltételek állnak fenn, mint közönséges vezető-állapotban.

Amíg fémekben a szabad vezetési elektronok gyors orto \rightarrow para-átmenetet létesítenek és ezért ortopozitronium ritkán lép fel, addig szigetelőkben az ortopozitronium tovább él. Szigetelőkben

⁸ Nagyon erős tér alkalmazása már nem előnyös. Ha ui. a pozitron kinetikus energiája túlszárnyalja a gázatom ionizációs energiáját, akkor inkább egyszerű ionizáció következik be, nem befogás. Látható, hogy a pozitronium képződése elég kis energiásvá van kötve.

két pozitron-élettartam figyelhető meg: a pozitronok egy része 10^{-10} sec-os élettartammal közvetlenül, vagy parapozitronium-állapoton keresztül szétsugároz. Másik részükből ortopozitronium keletkezik, de általában ez sem éli meg természetes életkorát. Ütközések révén előbb-utóbb, a kristályszerkezettől függő mértékben parapozitroniummá alakul át, és így bomlik el. Ez egy másik élettartam felléptét eredményezi, melynek nagysága jellemző a kristályra, az elektronsűrűségen kívül a kristályformától is függ. A második élettartam különböző ömlesztett kvarcban és kristályos kvarcban. Az anyagstruktúra-kutatás a pozitronokkal csak a legutóbbi évben indult meg, de napjainkban már fokozódó mértékben folyik.

Megismertük a pozitroniumot, ezt a legkönnyebb, 0 atomsúlyú »atomot«. Láttuk, hogy csak öt éve tudunk létezéséről, de elmélete teljesen

kiépült, az ellenőrző mérések alapján a kvantum-elektrodinamika fontos támaszává vált. A pozitronok segítségével történő anyagkutatás a radioaktív izotópok új alkalmazási területét jelenti, melynek hazánkban is megvan a lehetősége. Az én szememben van még a pozitronium-kutatásnak egy külön szépsége: megkapó módon bizonyítja az elmélet, kísérlet és gyakorlat szoros, elválaszthatatlan egységét. Egy kis területen, kiindulva az elméleti fizika egyik legelvontabbnak tekintett fejezetéből, a frappáns eleganciájú atomfizikai kísérleteken át eljutottunk az anyagvizsgálat, sőt kémia gyakorlatilag is fontossá válható új fejezetéhez. Kicsiben látjuk az egészet: a fizika különböző kutatási formáinak szoros egymásra utaltságát.

Marx György

Eötvös Loránd Egyetem Elméleti Fizikai Intézete
Budapest

Maxwell elektrodinamikája mai szemszögből*

1954 november 5-én volt 75 esztendeje annak, hogy a XIX. század legnagyobb fizikusa, James Clerk Maxwell alig 48 éves korában eltávozott az élők sorából. Nem mehetünk el ezen dátum mellett anélkül, hogy néhány szóval ne emlékezzünk meg a tudomány ezen kimagasló hőroszának életéről és főművéről.

Maxwell 1831-ben született Edinburghban. Érdekes megemlíteni, hogy ugyanezen esztendőben mutatta be Faraday a Royal Institution-ban az elektromágneses indukcióra vonatkozó döntő fontosságú kísérleteit. Maxwell atyja gyakorló ügyvéd volt és egy kis majorról rendelkezett. Itt, Glenlairben töltötte Maxwell gyermekéveit. Pajtásai közül egészen szokatlan kíváncsiságával és szinte kielégíthetetlen kérdezősködéseivel tűnt ki. Atyja technikai irányú érdeklődését követve, maga is sok apró mechanikai játékot és modellt készített saját szórakozására. Középfokú tanulmányait Edinburghban végezte. Míg az első 2–3 évben tanuló társaiban és tanáraiban általában véve igen rossz benyomást keltett, 14 éves korától kezdve hirtelen kitűnt elsőrangú előmenetelével, különösen matematikából és angol irodalomból. Még nem volt 15 éves sem, amikor az ovális görbékkel foglalkozó első értekezése az edinburghi Tudományos Akadémia Értesítőjében megjelent. 17 éves korában megismerkedett Nicol-lal és ennek ösztönzésére maga is készített és tanulmányozott egy polarizálópot.

Felsőfokú tanulmányait az edinburghi egyetemen kezdte meg, 16 éves korában. Ez alatt az idő alatt két további értekezést publikált. 19 éves korában Cambridge-be ment, ahol záró-

vizsgáit 1854-ben tette le, egészen kiváló eredménnyel. Érdekes, hogy egyik, Stokes által felállított vizsgatétele éppen az a nevezetes integrálösszefüggés volt, mely később az elektromágnesesség elméletében oly fontos szerepet játszott.

Ezután néhány esztendeig Cambridge-ben tanított. 1855-ben a Trinity College tagjává választotta és ugyanezen évben közölte híres értekezését Faraday erővonalairól.

A következő esztendőben Aberdeen-ben a fizika professzora lesz. Három évig tanít itt, s különös súlyt fektet előadásainak alapos demonstrálására. Ugyanezen időszakban oldja meg a Saturnus gyűrűjének problémáját, miáltal neve máris az élvonalbeli tudósok közé kerül.

1860-ban a londoni Királyi Kollégium fizika és csillagászat professzorává választják. Öt esztendő alatt itteni működése alatt nagyfokú oktatási elfoglaltsága mellett számos nagy horderejű publikációt közöl, részben a színek elméletével, részben az elektromágneses térrel, részben a gázok dinamikus elméletével kapcsolatban.

Ezután néhány esztendőre váratlanul visszavonul birtokára. Ezen időszak alatt írja meg főművét, a híres »*Treatise*«-ot. Fontos megemlíteni, hogy az elektromágneses térre vonatkozó kutatásainak nagy lendületet adott az a korábbi megbízatás, mely szerint az elektromos ellenállás abszolút egységét kellett meghatározni.

1871-ben a cambridge-i egyetem elhatározza, hogy a fizikai képzés megjavítására egy különleges intézményt, az azóta vilá hírvé vált Cavendish Laboratóriumot kell létrehozni. Ennek szervezésével és vezetésével a legalkalmasabb egyéniséget, Maxwellt bízták meg. Nagy buzgalommal és körültekintéssel lát munkához. Az intézet

* Az Eötvös Loránd Fizikai Társulatban 1954. nov. 13-án tartott ünnepi megemlékezés.