

MORZSÁK A MAGFIZIKA HŐSKORÁBÓL – 2. RÉSZ

Tóth Eszter
Vác

Ernest Rutherford legkésőbb 1911. március 7-én bejelentette a világnak, hogy kísérleti tapasztalatai szerint az atom pozitív töltése és csaknem teljes tömege az atom közepén egy picinyke térfogatban van jelen. Ekkor már majdnem 40 éves.

Rutherford 1871. augusztus 30-án született Új-Zélandon, Christchurch-től nem messze, Brightwaterben. Édesapja (*James*) kisgyerekként 1842-ben érkezett Új-Zélandra, ahol később farmer és kerékgyártó lett. Édesanyja, *Martha Thompson* gyerekként, 1855-ben érkezett özvegy édesanyjával, felnőttként az angol irodalom tanáraként dolgozott. Rutherfordnak 11 testvére volt. Nagyon szerény körülmények között élt. Noha Ernest kitűnő tanuló volt elemitől az egyetem elvégzéséig, rendszeresen részt vett a farm fenntartásában, magyarul a kemény paraszti munkákban. 1893-ban a christchurch-i Új-Zéland Egyetemen maradt a nagyfrekvenciájú áram mágnesező hatásának vizsgálatára, és persze az – akkor a fiatalok fantáziáját izgató – Hertz-féle hullámokkal (lényegében rádióhullámokkal) foglalkozott. Közben megpályázott egy angliai ösztöndíjat a Cambridge Egyetemre. Az ösztöndíjat elnyerte. 1894 végén (a déli féltekén nyár) éppen a krumplit ásta ki, amikor édesanyja a táviratot lobogtatva, a jó hírt messziről kiabálva szaladt ki hozzá a krumpliföldre. Rutherford odavágta az ásót, és széles mosollyal kiabált vissza: „Ez az utolsó krumpli, amit kiások!”¹² 1895 szeptemberében elhagyott Angliába.

Rutherford szegény volt. Szerette volna feleségül venni az új-zélandi *Mary Newtont*. De ehhez valami módon pénzre kellett volna szert tennie. Cambridge-i ösztöndíjának első évében az elektromágneses hullámok vizsgálatával – lényegében *Marconi* előtt – felismerte és csaknem megvalósította a rádió adás-vételt (*Elektromos hullámok mágneses detektora és annak néhány alkalmazása* – 1896. június 18., Royal Society, London¹³). Rutherford úgy érezte, hogy ez a munkája hozna elég pénzt a házasodáshoz. Jól érezte... *Marconi*, aki nagyon gazdag olasz családból származott, a rádióból még jobban meggazdagodott.

1896 januárjában érkezett a hír Cambridge-be, hogy a német *Wilhelm Röntgen* felfedezett egy nagy

áthatoló képességű sugárzást.¹⁴ (1901-ben Röntgen kapta az első Nobel-díjat.) Rutherford cambridge-i főnökét, *J. J. Thomsont* izgalomba hozta a hír. Ő éppen olyan kísérleti berendezéssel, a katódsugárcsővel foglalkozott, mint Röntgen. Csak ők ketten egészen másra figyeltek. Thomson megkérdőjelezte, hogy a katódsugárcsőben elektromágneses sugárzás volna, és e sugárzás miben létét vizsgálta. Míg Röntgen szentül hitte, hogy a katódsugár elektromágneses hullám, és azt figyelte, hogy a katódsugár az anódra érkezésekor milyen másik sugárzást vált ki. A katódon kiváltott sugárzás valóban elektromágneses anyag, ma röntgen-sugárzásnak, vagy Röntgen eredeti javaslatára (és angolul) X-ray-nek nevezzük. Szóval: Thomson nem ért rá a röntgen-sugárzással foglalkozni, az elektront készült éppen felfedezni, ezért szerette volna azt Rutherfordra bízni. Egy kicsit később mondom el, hogy ezt miként érte el.

Azt, hogy Röntgen hogyan ismerte fel a röntgen-sugárzást, sokféleképpen mesélik. Az egyik legérdekesebb verzió szerint midőn Röntgen otthoni laboratóriumában (8. ábrán balra) kísérletezett, asztalának egyik alsóbb fiókjában tárolt, fekete papírba csomagolt fotópapíron meglepő módon egy kulcs árnyéképe jelent meg az előhívás után. Az egész szobában egyetlen kulcs volt; az asztal felső fiókjában. Röntgen felismerte, hogy a katódsugárcső, a kulcs és a fotópapír közel egy egyenesbe estek. Az ismeretlen sugárzás tehát átment az asztal fáján, a fekete papíron, csak a vaskulcsra nem. Ezután tervezetten kísérletezett a csőből kilépő sugárzással. Midőn a sugárzás útjába vaslemezt tartott, nem az lepte meg, hogy a vaslemeznek árnyéka van, hanem az, hogy az ernyőre kezeinek csontjai is árnyékot vetettek. (Ma tudjuk, hogy a csont kalciuma nyeli el a röntgen-sugárzást, míg a lényegében szén-, hidrogén-, nitrogén- és oxigéntartalmú húson a röntgen-sugárzás áthalad.) Röntgen 1895 karácsonya előtt két nappal készítette el az első röntgen-felvételt, felesége gyűrűs bal kezéről (8. ábrán jobbra).

1896 januárjában Párizsba is megérkezett a röntgen-sugárzás felfedezésének híre. *Henri Becquerel*, mint apja és nagyapja is, ásványok, kristályok foszfo-

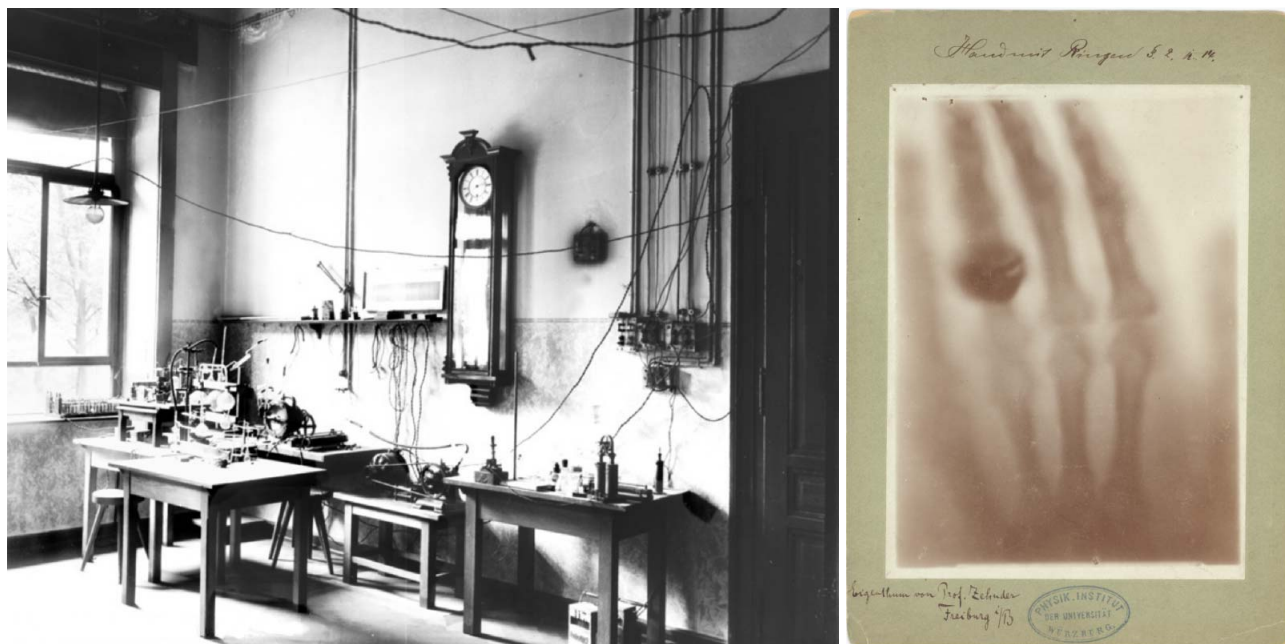


Tóth Eszter – Rátz Tanár Úr életműdíj, 2014 – nyugdíjas fizikatanár, de még tanít iskolában. Írt fizikatankönyveket, amelyek megjelentek kínai, japán, angol, spanyol nyelven is, volt a fizikatanárok nemzetközi egyesületének titkára, félszáz országban tartott előadást fizikatanításról. De vallja: nem ezek a dolgok hitelesítik, hanem tanítványai sikerei az OKTV, TUDOK, a KöMaL versenyeken, és elsősorban felelős, szabad Emberré válásukban.

¹²“That’s the last potato I’ll dig.” – in A. S. Eve: *Rutherford: Being the Life and Letters of the Rt Hon. Lord Rutherford*, O.M. Cambridge University Press (1939) 11. oldal.

¹³A magnetic detector of electrical waves and some of its applications. in J. Chadwick (szerk.): *The collected papers of Lord Rutherford of Nelson, Volume One: New Zealand–Cambridge–Montreal*. Routledge, London and New York, 1962.

¹⁴W. C. Röntgen: *Ueber eine neue Art von Strahlen*. Sonderabdruck aus den Sitzungberichten der Würzburger Physik.-medic. Gesellschaf 1895. és *Wilhelm Conrad Röntgen: On a New Kind of Rays*, read before the Würzburg Physical and Medical Society, 1895. (Translated by Arthur Stanton) *Nature* 53 (1896) 274–276.



8. ábra. Röntgen würzburgi laboratóriuma balra, felesége gyűrűs kezéről készített röntgen-képe jobbra (1895).

reszkálásával¹⁵ és fluoreszkálásával¹⁶ foglalkozott. Ekkoriban éppen uránsókat vizsgált. Az uránsókat egyébként már időszámításunk előtt is használták, akkor üvegek színezésére (közülük egyesek tündöklő sárga színűek). Az 1800-as évek elejéig úgy vélték, hogy csak egyetlen olyan hely van, ahol e festékre szert lehet tenni: a joachimsthalai ezüstbánya.¹⁷ 1789-ben Berlinben a vegyész *M. H. Klaproth* Joachimsthalból származó szurokérből leválasztott fekete porról felismerte, hogy egy új elem oxidja. Az új elemet urániumnak (U) nevezte el.

Henri Becquerel (1852. Párizs – 1908. Le Croisic, Bretagne, Franciaország, 9. ábra, balra) csodálatosan egyszerű kísérletet tervezett, hogy az uránsóból ha-

sonlóan varázsoljon elő röntgen-sugarakat, mint azt tette Röntgen a katódsugárázásnál. Még mindig 1897 előtt vagyunk, tehát Becquerel is azt gondolta, hogy a katódsugárázás elektromágneses sugárzás, mint a fény. 1896. január 30-án Becquerel fotópapírt fekete papírba csomagolt, majd arra uránsót hintett. Az egészet kitétte a párkányra, hadd süsse a Nap. Amikor a fotópapír előhívta, látta, hogy a sószemcsékből kisugárzott „röntgen-sugárzás” megfeketítette a filmet. Természetesen boldogan elkönyvelte, hogy ő is felfedezte a röntgen-sugárzást, mégpedig olyan egyszerűen, hogy a napfény segítségével az uránsót annak kibocsátására bírta rá. (Pedig nem.)

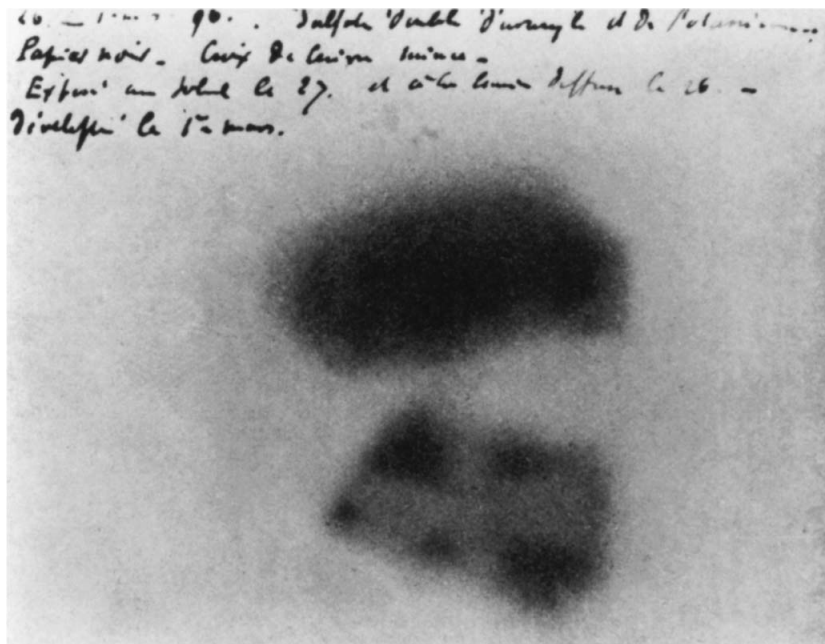
Becquerel 1896. február 24-én számolt be kísérletének eredményéről a Francia Tudományos Akadémián. Másnap ellenőrző kísérletet akart végrehajtani. Mindent előkészített. Az uránérc és a fekete papír közé tett még egy fémot, egy Máltai keresztet is. Ezzel akarta bizonyítani, hogy a napfény által kiváltott röntgen-sugárzás a papíron átmegy, de a fémen nem. Csak-hogy ezen a napon nem sütött ki a Nap. Meg másnap sem. Február 26-án Becquerel mégis előhívta a filmet, amitől persze nem várt semmit. De kapott! Lásd a 9. ábra jobb oldalát! (Miért hívta elő a filmet? Senki sem tudta kinyomozni, de Becquerel állítólag híres volt érthetetlen, mégis jelentős eredményre vezető ötleteiről.) Szóval 1896. február 26-án Becquerel felismerte, hogy az uránérc magától sugárzik. Felfedezte a radioaktivitást. A sugárzást, ami az ércből jön, anélkül, hogy azt külső hatás érné.

Ekkoriban Cambridge-ben Rutherford (10. ábra) éppen meg akart gazdagodni a rádió feltalálásából, hogy feleségül vehesse Mary Newtont. Thomson pedig az elektront akarta felfedezni, de izgatta a Röntgen-féle sugárzás is. Thomson, hogy (aljas módon ☹) befolyásolja tanítványát, levelet írt a 72 éves *Lord Kelvinnek*, a kor

¹⁵Foszforeszkál: az anyag elnyeli a fényt, és csak később – esetleg melegítés hatására – bocsátja ki újra. Ilyen volt régen az órák mutatójára, számaira kent foszforeszkáló anyag. Nappal elnyelte a fényt, éjjel meg kisugározta. Ha ezt a jelenséget látni akarod, nem túl nehéz. Például egy Kalmopyrin kell hozzá. Menj be fürdőszobába, szoktasd a szemedet a koromsötétbe. Tedd a Kalmopyrint közel a lámpához. Majd jól becsukott, akár még befogott szemmel, kapcsold fel a lámpát, várj egy-két percet. Kapcsold ki a világítást, és nézz a Kalmopyrin felé. Nagyon hamar világítani látod.

¹⁶Fluoreszkál az az anyag, amely nagy energiájú fotont nyel el, és kisebb energiájú fotont bocsát ki. Ilyennel találkozol a diszkóban, amikor ultraibolya fénnel (nagy energiájú fotonok) megvilágítják a csápoló tömeget, és a nők sötét pólója alól feltűnik a hőfóhérr melltartó kékes színben tündökölvé (kisebb energiájú, látható fotonok). A többi fehéreneműről nem is beszélve. – A *foton* az adott frekvenciájú elektromágneses sugárzás legkisebb energiaadagja. Létét majd 1900-ban *Max Planck* fogja felfedezni az infravörös sugárzások esetében, illetve 1906-ban *Albert Einstein* nevezi el ezeket az adagokat fotonoknak a fényelektromos hatás magyarázatakor. Einstein 1921-ben veszi át ezért a Nobel-díjat. Nem az elnevezésért, hanem a magyarázatért.

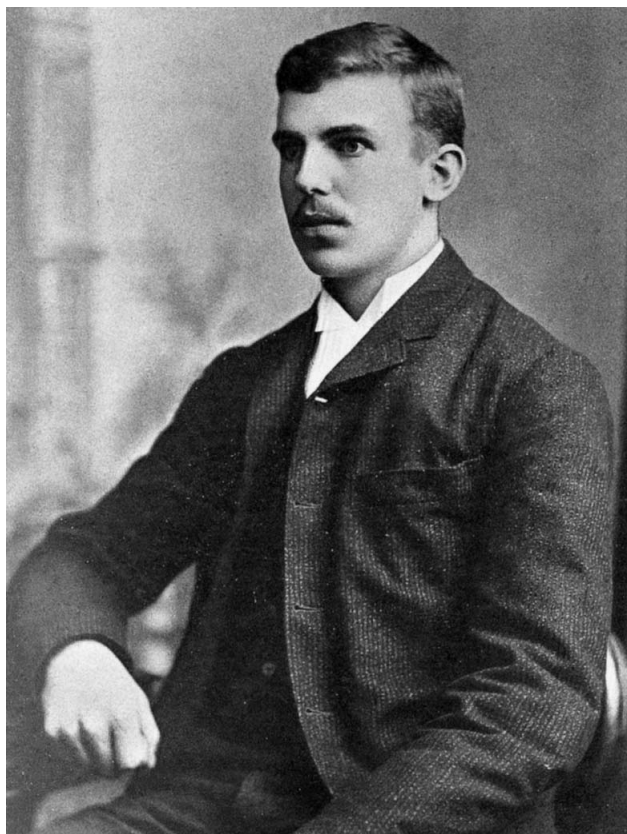
¹⁷Joachimsthal – ma Jáchymov – Csehországban, Prágától keletre, 150 km-re fekszik. 1518-ban itt verték az újkor első ezüst pénzérméit. Joachimsthalí, németül Joachimsthaler; majd Thaler, majd magyarul tallér, angolul dollár lett belőle.



9. ábra. Henri Becquerel (balra) és az uránérből jövő sugárzás által létrehozott fénykép (jobbra).

legnagyobbak tartott angol fizikusának. Lényegében a nagy ember válaszával stresszelte Thomson Rutherfordot, a távoli gyarmatról érkezett parasztyereket: a rádiózás helyett válassza inkább a röntgen-sugárzást kutatási témának. Talán ekkor hangzott el először a később Rutherford által gyakran hangoztatott mondás: „Nem

10. ábra. Rutherford 1896 körül



szolgálhatod a Jóistent és Mammont egyszerre.”¹⁸ Így fordult Rutherford a rádió aktív kutatása felől a radioaktív anyagok kutatása felé. Először a röntgen-sugárzás felé, persze, majd 1897-től a Marie Curie által akkorra már radio-aktivitásnak elnevezett jelenség felé.

Marie Skłodowska Curie (1867. november 7., Varsó – 1934. július 4., Passy, Franciaország, 11. ábra) édesapja fizikatanár volt. 24 évesen Párizsba ment, a Sorbonne-ra. Férje, Pierre Curie fizikus. 1903-ban férjével és Henri Becquerellel közösen fizikai Nobel-díjat kapott a Becquerel által felfedezett sugárzás vizsgálatáért. 1911-ben kémiai Nobel-díjat kapott (egyedül) a polónium és rádium felfedezéséért, a radioaktív anyagok kémiai elválasztásának módszeréért. A radioaktivitás vizsgálatát kezdetben önállóan, férje nélkül végezte. Először például azt ismerte fel, hogy az uránérc az uránsónál lényegesen aktívabb. (Ma már tudjuk: az érben az urán bomlássorának minden eleme – radioaktív egyensúlyban – jelen van, és azok sugárzását is észlelte. Míg a frissen készült uránsó lényegében csak uránt tartalmaz.) Férje akkor csatlakozott kutatásaihoz, amikor megértette, hogy Marie valami nagyon újat fedezett fel. Mindezek ellenére 1901-ben, amikor az első Nobel-díjat osztották, először csak Henri Becquerelnek és Pierre Curie-nek akarták adni. Pierre azzal utasította el, hogy a munka, amit díjazni akarnak, a felesége munkája volt. Az első Nobel-díjat végülis Röntgen kapta. Az 1903-as Nobel-díj 1905-ben történt átvételkor Marie Curie nem mondott Nobel-előadást. Talán ő volt szerény, talán nehezen viselték volna el az urak, hogy egy nő is érthet a fizikához.

¹⁸“You cannot serve God and Mammon at the same time.” – P. L. Kapitza: *Experiment, Theory, Practice*. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht / Boston / London (1980) 267. oldal – mammon arameusul pénz, nyereség, gazdagság; arameus – a Biblia egyik nyelve.



11. ábra. Marie Skłodowska Curie



12. ábra. Frederick Soddy

Felezési idő, a sugárzások át- és behatoló képessége, a radon és utódelemei mind olyan fogalmak, amelyek Rutherfordhoz vezetnek.

Az 1899-es egyetemi tanévtől Rutherford Angliából Kanadába költözött. Egy kanadai dohánykereskedő nagylelkű adományából a montreáli McGill Egyetem új fizikai laboratóriumot épített. Ide csábították el Rutherfordot 500 fontos (akkor igen jó!) fizetéssel. Rutherford 27 évesen egyetemi tanárrá lett. És hamarosan végre feleségül vehette Mary Newtont.

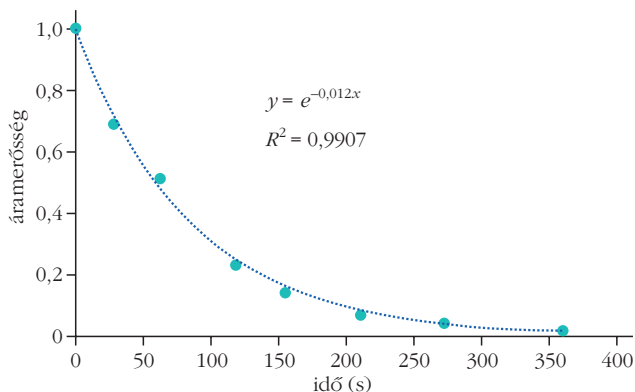
Mielőtt Rutherford áthajózott az Atlanti-óceánon, kísérleteiben felismerte, hogy a radioaktív sugaraknak legalább két, lényegesen különböző fajtája van. „...az egyik nagyon könnyen elnyelődik, ezt egyszerűen α -sugárzásnak fogjuk nevezni, a másik sokkal inkább áthatoló tulajdonságú, aminek neve legyen β -sugárzás”.¹⁹ A kicsit később azonosított, az előbbiektől óriási áthatoló képességében különböző sugárzást Rutherford javaslatára nevezték el gamma-sugárzásnak. Felfedezője 1900-ban a francia *Paul Ulrich Villard* (1860. szeptember 28., Saint-Germain-au-Mont-d'Or – 1934. január 13., Bayonne) volt.

Rutherford 1908-ban tartott Nobel-előadásából sugárzik, hogy élete addigi legnagyobb élménye annak

kísérleti bizonyítása volt, hogy az α -sugárzás részecskéi kétszeresen ionizált héliumok. (Majdnem azt írtam, hogy hélium atommagok, pedig hol vagyunk még ekkor az atommagok felfedezésétől.) Nem csak az α -részek tömegét, töltését vizsgálta, de még energiájukat is. Persze, először azt is fel kellett ismernie, hogy attól függetlenül, milyen anyagból (urán, tórium, rádium stb.) származik az α -sugárzás, részecskéi nem különböznek másban, csak sebességükben, azaz mozgási energiájukban. Mindezt olyan „zavaró” körülmények között, hogy az általa használt α -sugárzó anyagokat (a sugárforrásokat) valami ismeretlen sugárzó anyag veszi körül a levegőben. Annak megállapításához, hogy milyen anyagok jönnek létre a radioaktív bomlás után, már képzett kémikusra volt szüksége. 1900-ban rávette az Oxfordban dolgozó, akkor 23 éves angol *Frederick Soddyt*, hogy kutasson vele Montréalban.

Rutherford Soddyval (1877. szeptember 2., Eastbourne – 1956. szeptember 22., Brighton, 12. ábra) közösen fedezte fel, hogy a radioaktív anyagokat körüllegő radioaktív anyag a radon (Rn) nemesgáz. Soddy 1902-ben visszatért Angliába. Még spektroszkópiai úton bizonyította, hogy az α -sugárzó anyagok környezetében hélium található, bár nem állította, hogy a hélium az α -részecskékből származna (1903). Később még felismerte, hogy az α -bomlás után visszamaradó atom a periódusos rendszerben az eredeti atomtól kettővel balra lévő atom (1910 körül), és 1913-ban orvos sógornője által inspirálva *izotópoknak*

¹⁹ „...one that is very readily absorbed, which will be termed for convenience the α -radiation, and the other of a more penetrative character, which will be termed the β -radiation.” – E. Rutherford: Uranium radiation and the electrical conduction produced by it. *Philosophical Magazine* 47 (1899) 116. oldal.



13. ábra. Rutherford felismeri a felezési időt.

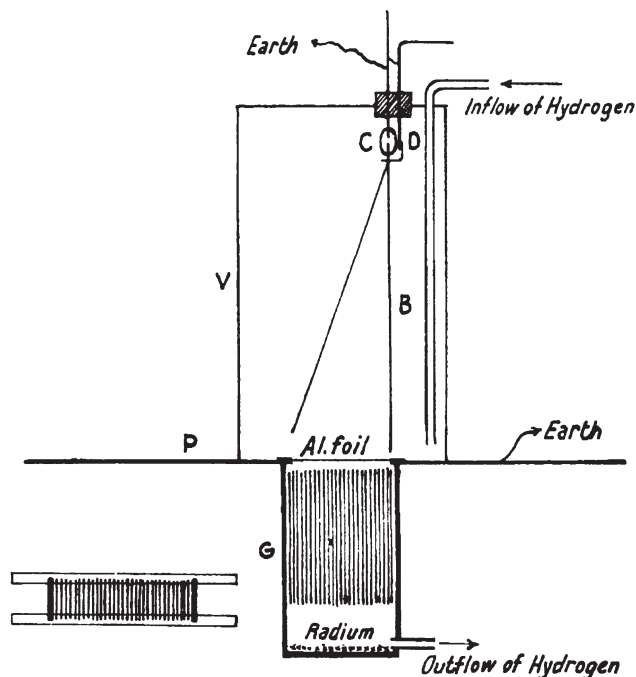
nevezte el a periódusos rendszer azonos helyén lévő, de tömegükben különböző atomokat.²⁰ Azután 1914-től jött az első világháború. Kutatásai megakadtak. Bár 1919-től 1937-ig az Oxford University professzora volt, soha többet nem tért vissza a radiokémia területére. Soddy 1921-ben kémiai Nobel-díjat kapott a radioaktív anyagok kémiájához való hozzájárulásáért, és az izotópok kutatásáért.

Rutherford a montreali McGill Egyetemen többek között a tóriumot körülvevő radioaktív gázt is vizsgálta. Ezt a gázt tóriumemanációnak nevezte, ma toronnak vagy ²²⁰Rn-nak nevezzük. Felismerte, hogy a toron α -sugárzó. Tehát minden egyes atomja bomlása-kor pozitív töltésű α -részt lövell ki. Ha van ion a levegőben, akkor az vezeti az áramot. Méghozzá ugyanazon feszültség mellett annál nagyobb az áram, minél több ion van a levegőben, azaz minél több radioaktív bomlás történt. Rutherford nagyon egyszerű kísérletet tervezett a bomlások számának mérésére. Két, egymással párhuzamos fémlamezt üvegburába hegesztett. A lemezekre 100 V feszültséget kötött. A bűrába beengedte a tóriumemanációt tartalmazó levegőt, majd lezárta azt. Ezután az idő függvényében mérte az áramerősséget.²¹

A 13. ábrán az időtengely a bezárás után eltelt idő, a függőleges pedig az áramerősség a kezdeti áramerősséget egységnyinek véve. A csodálatos az volt, hogy bármikor is kezdte a mérést, mindig ugyanannyi időt kellett várnia, hogy az áram a felére csökkenjen. Azaz ahhoz, hogy a radioaktív bomlások száma a felére csökkenjen mindig ugyanannyi idő kellett. Ez a kísérlet vezette el Rutherfordot a *felezési idő* fogalmának bevezetéséhez.²¹ Eredeti mérési eredményeit felhasználva készült a 13. ábra, ahol exponenciális görbét illetve a mérési pontokra a felezési időre 58 s adódik. A toron

²⁰Nehéz volt mai fejjel leírni, hogy mit értett Soddy izotópon. Mennyivel könnyebb ma: azok az atommagok, amelyekben ugyanannyi a protonok száma, de neutronjaik számában különböznek. De az atommagot majd 1911-ben, a neutront meg majd csak 1932-ben fedezik fel. Vagy a periódusos rendszerbeli balra ugrás ma: mivel az α -rész két protonból és két neutronból összetett hélium atommag, ezért alfa-bomláskor a rendszám kettővel, a tömegszám négygyel csökken.

²¹Rutherford: A Radioactive Substance Emitted from Thorium Compounds. *Philosophical Magazine* 49 (1900) 1–14.



14. ábra. Az α -részecskék mágneses eltérése Rutherford eredeti cikkéből²² (Earth = földelés, Inflow of Hydrogen = a hidrogén befűvási helye, Outflow of Hydrogen = a hidrogén távozási helye, Al. foil = nagyon vékony alumíniumfólia, ami a fentről lefelé áramló hidrogén mellett szintén a rádiumbomlás után létrejött, alfa-bomló radon feláramlását akadályozta meg).

ma ismert felezési ideje 55,6 s. Rutherford a fenti adatokból ennél kicsit hosszabb felezési időt kapott. Aminek oka, természetesen, a mérési hiba lehetett.

A következőkben leírt két Rutherford-kísérlet tervezése és kivitelezése gyönyörűen egyszerű. Az ábrák az eredeti (1903 és 1906) Rutherford-cikkekből származnak. E két kísérlettel Rutherford eldöntötte az α -részecske töltésének előjelét, és meghatározta az α -részecske fajlagos töltését, sőt, a különböző bomlásokból származó α -részek energiáját is.

Ha egy Q töltésű részecske a B indukciójú mágneses mezőbe, arra merőleges v sebességgel lép be, akkor a rá ható erő nagysága

$$F = QvB,$$

és iránya merőleges B -re és a sebességre is, tehát a részecske körpályára áll. A körpálya R sugarát Newton II. törvénye alapján számolhatjuk: $F = ma$, azaz

$$QvB = \frac{mv^2}{R}.$$

Ha a részecske pozitív töltésű, akkor (mondjuk,) jobbra kanyarodik rá a körpályára, ha negatív töltésű, akkor meg balra. Rutherford az α -rész töltésének előjelét a következő kísérleti berendezéssel határozta meg.²²

A zárt edény alsó részében helyezte el a rádiumot (14. ábra). (Egy lemezre öntött rádiumsó oldatából

²²Rutherford: The magnetic and electric deviation of the easily absorbed rays from radium. *Philosophical Magazine* 6/5 (1903) 177–187.

elpárologtatta az oldószert). Fölötte párhuzamos rézlemezek sokasága volt (G). Az edényben jobbra fentebb van a rendkívül érzékeny elektroszkóp, ami már kevés számú ion beérkezését is jelezte: az eredetileg feltöltött elektroszkóp arany fóliája mérhető mértékben közeledett az őt tartó rúdhoz (B). Annak érdekében, hogy a vizsgálatot a rádiumból előbb-utóbb létrejövő radon α -bomlása ne befolyásolja, az egész berendezést hidrogéngázzal fentről lefelé folyamatosan átmosták. A rézlemezek síkjával párhuzamos, vízszintes indukciójú mágneses mezőt hoztak létre az edényen kívülről.

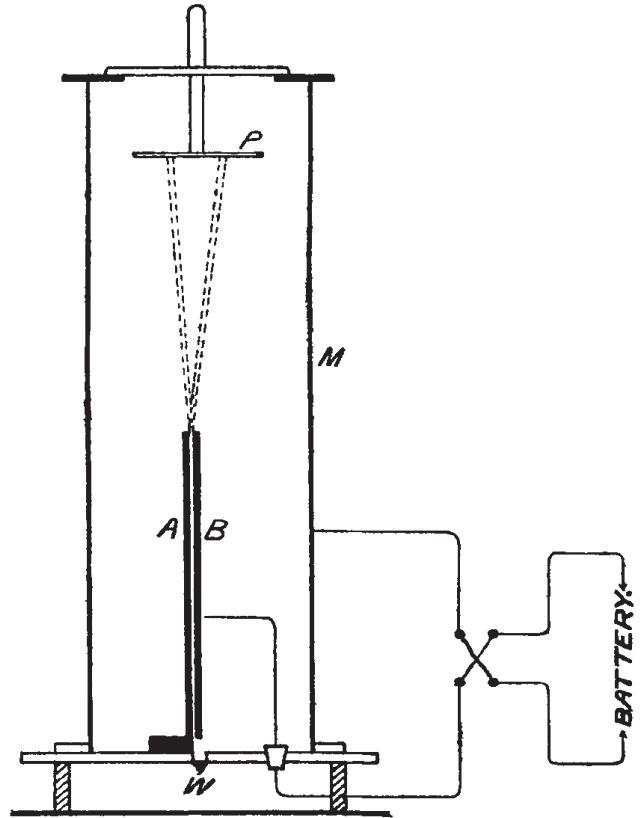
A rádiumból kisugárzott α -részecskék egy része eljutott a rézlemezek közötti légtérbe, sőt, kijutott az elektroszkóphoz. A mágneses mezőt alkalmazva, mondjuk, ezek a részecskék enyhe balkanyarral haladtak végig a rézlemezek közötti résen. Amikor Rutherford fölül a rézlemezeket vízszintes, a rés felét kitakaró rézlemezkeket helyezett el, akkor a balkanyaras részecskék nekimentek ezeknek, és nem jutottak fel az elektroszkóp légtéréig. Ha pedig jobbra kanyarodtak, akkor a kicsiny lyukon át feljuthattak. Adott irányú B esetén balra vagy jobbra térülnek el az α -részecskék, csak a töltésük előjelen múlik. Rutherford e kísérlet alapján állapíthatta meg, hogy az α -részecskék pozitív töltésűek.

Az előbbi kísérleti elrendezés geometriájából még a körpálya R sugara is becsülhető. Newton II. törvényéből:

$$\frac{mv}{Q} = RB,$$

így megmérve a B -t is, az mv/Q hányados kiszámolható.

Kezdetben nem volt nyilvánvaló, hogy a különböző radioaktív anyagokból, mint például a tórium, urán, rádium stb., ugyanazok a részecskék repülnek-e ki, mint ami az α -sugárzás. Ennek vizsgálatához Rutherford e részecskék tömegegységre jutó töltését, az az fajlagos töltésüket, a Q/m hányadost akarta megmérni.²³ A fenti anyagokból származó α -sugárzást elektromos mezőbe vezette (15. ábra). Az α -részecskék sebessége merőleges volt a két, egymással párhuzamos fémlemez (az ábrán: A és B) között kialakított homogén elektromos mező E térerősségének irányára. A két fémlemez távolsága $d = 0,21$ mm, a két lemez közé $U = 500$ V feszültséget kötött (BATTERY). A levákuumozott rézedényben (M) alul volt a rádium (W), fölötte a két függőleges lemez, amelyek között az α -részecskék átszaladhattak, és a vízszintes irányú elektromos mező hatására eltérültek. Ha a bal oldali lemez volt a pozitív, akkor az α -részecske jobbra térült el, amikor pedig a jobb oldali lemez volt pozitív, akkor balra. Fent egy vízszintes síkú fotólemezt helyeztek el (P). És napokig hagyták, hogy az α -részecskék fenn beérkezzenek. A lemezeknek mindkét polaritását



15. ábra. Az α -részecskék elektromos eltérítése Rutherford eredeti cikkéből.²³

használva az előhívott fotópapíron egymástól 2 milliméterre két elsötétedés látszott.

Legyen a vízszintes irány az x irány, a függőleges pedig az y . A lemezek közé alulról felfelé érkező részecske y irányú sebességét az elektromos mező nem befolyásolja, t idő alatt a lemezek mentén $y = vt$ utat tesz meg. A lemezekre merőlegesen a részecske gyorsulása a Newton II. törvény miatt:

$$a = \frac{QE}{m}.$$

Ezzel a gyorsulással t idő alatt

$$x = \frac{QE}{2m} t^2$$

távolsággal térül el balra (vagy jobbra), amíg a lemezek közül kiérkezik. A töltött lemezek közül kilépve a részecske lényegében egyenes pályán halad az ernyőig. Az elrendezés geometriájából az ernyőn tapasztalt eltérést megmérve (1 mm) vissza lehet következtetni az x értékére. Az y értéke a lemezek függőleges irányú hossza, a térerősség pedig $E = U/d$. Mivel $t = y/v$, ezért

$$x = \frac{QUy^2}{2dmv^2}.$$

Innen mv^2/Q kiszámolható. Az előző (rézlemezkes) kísérletből Rutherford megbecsülhette az mv/Q értéket, a most leírt kísérletből pedig az mv^2/Q értékét. A

²³Rutherford: The mass and velocity of the α particles expelled from radium and actinium. *Philosophical Magazine* 6/12 (1906) 348–371.

két értékből meghatározható a vizsgált α -részecske sebessége, valamint a Q/m fajlagos töltése. A különböző α -források (tórium, urán, rádium stb.) esetében az α -részecsek sebességei különbözőnek adódtak. De a fajlagos töltés a mérési hibán belül ugyanazon érték volt!

Ekkor még nem volt világos, hogy az α -részecske Q töltése az elemi töltés, vagy ennek kétszerese. Ha csak az elemi töltés, akkor az α -részec egy kétszeresen ionizált hidrogénmolekula lehetne (sic!). Ezt Rutherford így írta le: „Ha az α -részecske ugyanazt a pozitív elemi töltést hordozná, mint a hidrogénatom, akkor az e/m értéke az α -részecske tömegére kétszer akkora értéket jelezne, mint a hidrogénatom tömege, azaz annyit, mint egy hidrogénmolekula tömege. Az nagyon valószínűtlennek tűnik, hogy egy atomi bomlás (szó szerint robbanás) eredményeként kilövellt hidrogén molekuláris és nem atomi állapotú volna.”²⁴

Amikor az előbbi sorokat írtam, találtam rá a McGill Egyetemen működő Rutherford Múzeum honlapjára. Ott olvastam, hogy az általuk idézett adatokból Rutherford a rádium felezési idejére 1280 évet kapott a ma ismert 1620 év helyett. Gondoltam, én is kiszámolom ezt az 1280 évet. Nagyon nem ment. Végül két napos gyötördés után levelet írtam a honlap felelős szerkesztőjének, hogy segítene-e Rutherford eredeti adatait megtalálnom. Még aznap választ kaptam az egyetem egy professzorától, *Jean Barrette*-től. Beszkenelte nekem Rutherford 1905 márciusában írt cikkét.²⁵

Rutherford 1905-ben azt feltételezte, hogy az α -részecske egyszeresen pozitív töltésű. Az elemi töltés értékét akkor még $1,13 \cdot 10^{-19}$ C-nak tudták a ma ismert $1,6 \cdot 10^{-19}$ C helyett. Mondjuk, ez nem túl meglepő. Az elektront még csupán 8 éve fedezte fel Thomson. De azért az már érdekes, hogy az Avogadro-szám ma ismert $6 \cdot 10^{23}$ értéke helyett Rutherford 1905-ben még $8,1 \cdot 10^{23}$ értéket használt. *Avogadro* már 1811-ben definiálta a róla elnevezett számot! Mégis, majd csak *Millikan* 1910-ben végzett méréseiben fog az elemi töltés pontosabb meghatározásakor az Avogadro-szám a mai értékéhez is jelentősen közeledni. Nem volt véletlen, hogy nem sikerült Rutherford mérési adataiból megkapnom a mai Avogadro-számmal, és a kétszeres pozitív töltésű α -rész feltételezésével az 1280 évet.

Rutherford a rádiumból kilépő α -részec áramát mérve kapta, hogy 1 g rádiumot $6,2 \cdot 10^{10}$ α -részecske hagy el másodpercenként. Ma azt mondjuk, 1 g aktivitása 62 GBq. Amúgy a mai mérések szerint 1 g rádium aktivitása 36 GBq. Ha Rutherford már tudta volna, hogy az α -rész kétszeresen pozitív, akkor a 31 GBq aktivitás már egészen jól megközelítette volna a napjainkban mértet.

²⁴“If the α -particle carried the same positive charge as the hydrogen atom, the value of e/m for the α -particle would indicate that its mass was twice that of the hydrogen atom, i.e. equal to the mass of a hydrogen molecule. It seemed very improbable that hydrogen should be ejected in a molecular and not an atomic state as a result of the atomic explosion.” – Rutherford 1908-ban, a Nobel-díj átvételkor mondott beszédében az 1902-ben végzett kutatásairól.

²⁵Rutherford: Charge carried by the α and β Rays of Radium. *Philosophical Magazine* 6/10 (1905) 193–208.

Rutherford most idézett cikkében lényegében az

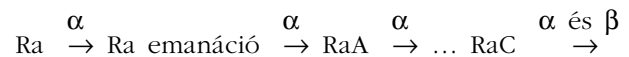
$$A \approx \frac{N}{T} \ln 2 \rightarrow T \approx \frac{N}{A} \ln 2$$

összefüggést használta a rádium felezési idejének meghatározására. Itt N az 1 g rádiumban lévő Ra-atomok száma: $N = N_A/M_{\text{Ra}}$, ahol M_{Ra} a rádium móltömegének számértéke, A az 1 g rádium aktivitása, N_A az Avogadro-szám.

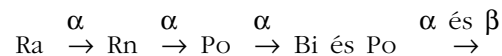
Behelyettesítve a Rutherford által 1905-ben ismert ($N_A = 8,1 \cdot 10^{23}$, $M_{\text{Ra}} = 225$ g és $A_{(1 \text{ g Ra})} = 6,2 \cdot 10^{10}$ 1/s) értékeket, a felezési idő $T_{1/2} = 1280$ év. Ha a ma ismert adatokkal ($N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$, $M_{\text{Ra}} = 226$ g és $A_{(1 \text{ g Ra})} = 3,6 \cdot 10^{10}$ 1/s) számolunk, akkor $T_{1/2} = 1620$ év.

Rutherford ugyanekkor megmérte a rádiumból érkező béta-részecskék számát is. 1 g rádiumra vonatkoztatva 1 s alatt $7,3 \cdot 10^{10}$ béta-részecskét észlelt. Ennek nagyon örült. Mert azt már tudta, hogy radioaktív egyensúlyban az anyaelem aktivitása megegyezik minden egyes leányelem aktivitásával. Tehát azt várta, hogy a tiszta rádium aktivitása (62 GBq) a mérési hibán belül megegyezzen az egyik leányelem béta-aktivitásával (73 GBq). És úgy tűnt, hogy a mérési eredmények ezt jó közelítésben igazolják. A „két hiba egymást kiolthatja” gyönyörű példáját látjuk. Hiszen a tiszta rádium α -aktivitása az α -rész *kétszeresen* pozitív töltése miatt: 31 GBq lenne. A béta-aktivitást pedig nem egy, hanem *két* radioaktív elem béta-aktivitásából kapjuk, amit 1905-ben még nem látott Rutherford.

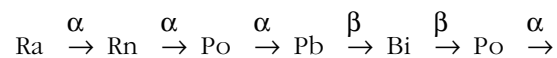
A bomlássor 1905-ben, Rutherford szerint:



Mai jelöléssel:



Mai tudásunk szerint:



Ha a mért 73 GBq béta-aktivitásról tudta volna Rutherford, hogy az két elem aktivitása, és persze a ma ismert Avogadro-számot használva a rádium felezési idejére 1604 évet kapott volna. Azt gondolhatnánk, hogy a béta-aktivitást nagyon pontosan ismerte. De sajnos, nem. Mert a mért áramból az elemi töltés akkor ismert értékével számolt aktivitást, tehát a ma ismerttel számolva már nem olyan szép eredményt kapott volna.

Az előbbieket összefoglalva döbbenetes, hogy Rutherford megállíthatatlanul tört előre a radioaktivitás megértésében annak ellenére,

- hogy még nem volt ismert az elemi töltés és az Avogadro-szám viszonylag pontos értéke,
- hogy még nem ismerte fel a béta-bomló ólmot (a rádium bomlássorának 4-ik elemét),
- hogy az α -részecnek még csak egyszeres pozitív töltést tulajdonított.

Rutherford tisztelte a Természetet. Nagyon egyszerű, célratoró kísérleteivel faggatta a Természetet. Elfogadta mások jól megtervezett kísérleteinek eredményét. És annak ellenére, hogy az akkori eszközök nem mindenütt adtak pontos eredményeket (lásd Avogadro-szám, elemi töltés), valamint még az atommag felfedezése előtt, 1905-ben Rutherford felismerte (például) a radioaktív egyensúly létét, sőt, majdnem úgy írta le, ahogyan azt ma is megfogalmazzuk:

„Radioaktív egyensúlyban a rádium négy anyagot tartalmaz, úgymint magát a rádiumot, az emanációt, a rádium-A-t és a rádium-C-t, amelyek α -részecskéket

bocsátanak ki. Másrészt a béta-részecskék csak egy termékből lövellnek ki, a rádium-C-ből. *Ezek az anyagok a rádium egymást követő termékei, és amikor az egyensúly bekövetkezik, minden egyes termék atomjaiból ugyanazon számú bomlik el másodpercenként.*”²⁶ (Kiemelés tőlem.)

²⁶“Now radium in radioactive equilibrium contains four substances, viz. radium itself, the emanation, radium A and radium C, which emit alfa particles. On the other hand, beta particles are only expelled from one product, radium C. These substances are successive products of radium, and, when equilibrium is reached, the same number of atoms of each break up per second.” – Rutherford: Charge carried by the α and β ...

A HIGGS-BOZON KUTATÁSA: BEFEJEZETT VAGY CSAK MOST KEZDŐDIK?

Veszprémi Viktor

Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest

A részecskefizikában az anyagot felépítő részecskék tulajdonságait és viselkedését a standard modell (röviden SM) segítségével írjuk le. A részecskék spinjük szerint két csoportra oszthatók: a feles spinűeké, amelyekre az anyag tégláiként és az egész spinű részecskéké, amelyekre az azokat összekötő malterként gondolhatunk. A feles spinű részecskék – fermionok – között az egész spinű bozonok közvetítik a kölcsönhatásokat. Négy alapvető kölcsönhatást különböztethetünk meg: az elektromágnesest (EM), a gyengét, az erőt és a gravitációt. Ezeket rendre a foton (jele γ), a gyenge bozonok (W^\pm és Z^0), a gluon (g) és az egyelőre hipotetikus graviton nevű részecskék közvetítik.

Általános törekvés, hogy e kölcsönhatásokat egyazon hatás különböző megjelenési formáiként tudjuk felfogni. Az elektromágneses kölcsönhatás, amelyet *Maxwell* 1865-ös munkájában foglalt össze, már az első konzisztens leírásakor, bizonyos értelemben, egyesített elmélet volt, hiszen egyesített formában kezelte a korábban más-más úton megfigyelt elektrostatikus és mágneses kölcsönhatásokat.

Készült a 30. Magyar Fizikus Vándorgyűlésen (Sopron, 2019. augusztus 21–24.) elhangzott előadás alapján.



Veszprémi Viktor a Wigner Fizikai Kutatóintézet főmunkatársa, a Standard Modell Ellenőrzése és Új Fizika Keresése kutatócsoport vezetője. Fő kutatási területe új részecskefizikai folyamatok, mint például a szuperszimmetria kísérleti kutatása, valamint félvezető-alapú nyomkövető detektorok építése, beüzemelése és adatrekonstrukciója. Jelenleg a CMS kísérlet nyomkövető detektorai projektjének vezetőhelyettese.

Az SM elméleti keretei között lehetőség van a gyenge kölcsönhatás leírására is az EM-hez hasonló képletekkel, az explicit tömegtagok azonban sértik az elmélet konzisztenciáját. Ez nem meglepő, hiszen a foton nem rendelkezik nyugalmi tömeggel. A gyenge bozonokról viszont ismert, hogy nehezek, hiszen például a W-bozon által közvetített béta-bomlás tulajdonságait, a kölcsönhatás rövid hatótávolságát és gyengeségét, valamint a közvetítő részecske rövid élettartamát ezzel magyarázhatjuk.

A Higgs-mechanizmus, vagy ahogy mostanában pontosabban hivatkozunk rá, az Brout–Englert–Higgs-mechanizmus úgy oldja meg az egyesítés problémáját, hogy a gyenge bozonoknak – az azonos formalizmus megtartása mellett – tömegük is lesz. Ehhez szükséges bevezetni egy új négykomponensű részecsketeret, amely komponenseiből három – beolvadva a gyenge bozonokba – a tömegeket generálja. A negyedik komponens egy tömeggel rendelkező skalár részecskét ír le, a Higgs-bozont, amelynek tömegét az elméletből nem lehet kikövetkeztetni. Nem csak a gyenge bozonok tömegére adódik magyarázat. A fermionok tömegét is leírhatjuk az új részecskével való kölcsönhatásuk eredményeként. A Higgs-bozon ugyanis pontosan a tömeggel rendelkező részecskékhez csatolódik, fermionok esetében a tömeg nagyságával arányos mértékben. A részecske közvetlen kísérleti bizonyíthatóságának bonyolultságát tanúsítja, hogy a megoldást jelentő elméleti alapok publikációja és a részecske felfedezése között közel fél évszázadnak kellett eltelnie. A közvetlen megfigyeléshez vezető utolsó évtizedben az SM összes többi részecskéjének tulajdonságait egyre pontosabban sikerült megmérni, és azokkal az elmélet jóslatait egyre pontosabban bizonyítani.