

100 éves a nukleáris fizika
140 éve született Ernest Rutherford
100 éve kapta Marie Curie a rádiumért a Nobel-díjat

Történeti morzsák a magfizika hőskorából

Összeállította: Dr. Tóth Eszter

I.

1909. szeptember – 1911. március

Az atommag felfedezésének bejelentése

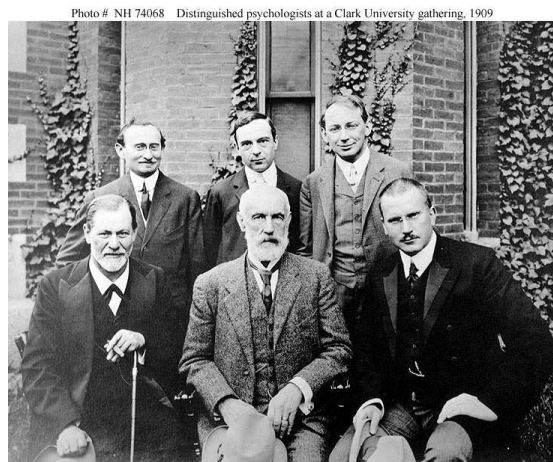
Sigmund Freud és Ferenczi Sándor reggelente az egyetemi vendégháztól induló fasorban sétáltak. Freud előadásorozatának aznapki témáját beszéltek meg.



1909. szeptember 7-ét írunk. És a Massachusetts állambeli Worcesterben vagyunk. A Clark University 20 éves fennállását ünnepli. Neves előadókat hívtak meg szerte a világból.

Ebben az időben a pszichológiának és a Freud által népszerűsített pszichoanalízisnek egész Amerikában, de különösen a Clark Universityn komoly szerepe volt. Az egyetem akkori rektora *Granville Stanley Hall* alapította meg az Amerikai Pszichológiai Egyesületet (az American Psychological Association-t, 1892-ben a Clark Egyetemen). Így a fő vendég Sigmund Freud volt. Vele érkezett az Egyesült Államokba *Carl Jung* és Ferenczi Sándor.

A képen balról jobbra ül Sigmund Freud, Granville S. Hall és Carl Jung; hátul áll Abraham A. Brill, Ernest Jones és Ferenczi Sándor. Worcesterben, 1909 szeptemberében.



Sigmund Freud (1856. Freiberg – 1939. London) a lélekelemzés, a pszichoanalízis megteremtője. Szerinte az elfojtásuk miatt tudattalanná váló emlékek befolyásolják az ember viselkedését. Különösen a szexuális és agresszív elfojtások vezethetnek neurózishoz, ami a tudatalattiak felszínre hozásával kezelhető. Felfedezte, hogy az elfojtott, tudattalanná vált emlékek szabad asszociáció révén is felszínre hozhatóak. Ez pedig megoldható az álomfejtéssel is. Fontos diagnosztizáló szerepet velt a „véletlen elszólások”, a tévesztések felismerésében.

Ferenczi Sándor (1873. Miskolc – 1933. Budapest) 1908-tól Freud tanítványa és barátja. 1913-ban megalapította a Magyar Pszichoanalitikai Társaságot, egyike volt a Nemzetközi Pszichoanalitikai Társaság alapítóinak, illetve 1918-tól majd egy évig annak elnöke lett. Rokona *Neumann János*nak, és nagyon valószínű, hogy Neumannt ő kezelte 5 éves korában, akit háromévesen egy kakas nagyon kellemetlen helyen kapott meg. És ezért gyakran kukorékkolt. Ferenczi közeli barátja *Ortvy Rudolf*, aki fizikusként jó viszonyban volt szinte minden, akkor a világban fizikát művelővel. Így Ferenczi első kézből értesült a nagy felfedezésekről az atom- és magfizikában. Az csak valószínűsíthető, hogy Ferenczi a nála 12 évvel fiatalabb *Hevesy György*nek is barátja volt. Sok közös ismerősük volt. Ortvyon kívül például a Polányi

család, köztük *Polányi Mihály* kémikus. Ferenczi és Hevesy Budapesten csupán egy kilométerre laktak egymástól, valamint mindketten ugyanazon a napon kapták és veszítették el professzori kinevezésüket a Budapesti Tudományegyetemen.

Az 1900-as évek elején az Egyesült Államokban még nem volt igazán komoly érdeklődés a természettudományok iránt. Az első amerikai Nobel-díjas (1907), *Albert Michelson* történetesen éppen a Clark University egyik első tanára volt. A Nobel-díjat precíz optikai berendezéseiért, és az azokkal végzett kísérletekért kapta. Híres kísérlete, a Michelson–Morley-kísérlet 1887-ben azt kívánta megállapítani, hogy a Föld milyen sebességgel halad az éternek nevezett (képzelt) abszolút nyugvó térhez képest. A sebesség nagyon sok irányban megmérve nullának adódott. Ez vezette el Einsteint ahhoz, hogy ilyen abszolút nyugvó izé nincsen, a geometriai teret a testek „feszítik ki” maguk között.



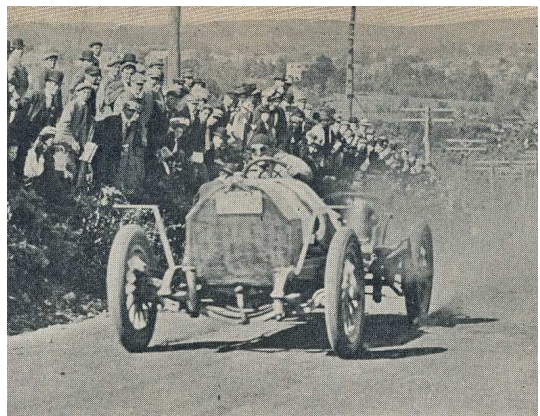
Talán Michelson volt az, aki kiverekedte, hogy az ünnepi hétre hívják meg a következő, 1908-as év egyik Nobel-díjasát is. Így került *Ernest Rutherford* Worcesterbe. Rutherford 1908-ban kémiai Nobel-díjat kapott az atommag bomlásainak és a radioaktív anyagok kémiajának vizsgálataért. (Rutherford egyébként fizikus volt, meg is lepte, hogy kémiai Nobel-díjat kapott.)

Baloldalon a Clark Egyetem főépülete az 1800-as évek végén.

Itt tartották az előadásokat 1909 szeptemberében.

A városka amúgy örömmámorban úszott az ünnepi héten. Még autóversenyt is rendeztek a fizika vagy a pszichoanalízis iránt kevésbé érdeklődő néptömegnek.

Egyik nap Rutherford és a Ferenczivel sétálgató Freud véletlenül összetalálkoztak. Meglehet, Ferenczi ekkor kérte meg Rutherfordot, hogy fogadja el fiatal kutatótársának Hevesy Györgyöt. Mindenesetre Hevesy jelentkezett Rutherfordnál, és nemsokára ezt a választ kapta (lásd a következő oldalon):



Dr. G. von Hevesy
Karlsruhe

June 25, 1910

Dear Sir,

I have received your letter asking for permission to work at the Physical Laboratory of the University of Manchester on radioactivity.

I shall be pleased to consider favourably your proposal, provided you are able to spend at least a University year in the Laboratory. Some little time is required to become acquainted with the methods of measurement and it is not possible to hope to accomplish even short research under that period.

I may mention for your guidance that you could probably be admitted as a „Research Student”. This entails a fee of £900 per year to the University and cover the greater part of the University expenses. The Laboratory provides all the apparatus and facilities for research free of charge.

I shall be glad to hear from you whether you will be able to come under these conditions.

Yours sincerely

E. Rutherford

Magyarul:

Tisztelt Uram!

Megkaptam levelét, amelyben engedélyt kér, hogy a Manchester Egyetem Fizikai Laboratóriumában a radioaktivitás témában dolgozhasson.

Örömmre fog szolgálni, ha kedvezően bírálhatom el javaslatát, feltéve, ha Ön képes legalább egy egyetemi évet eltölteni a Laboratóriumban. Valamennyi idő szükséges, hogy megismerkedjen a mérési módszerekkel, és az nem remélhető, hogy akár egy rövid kutatást is végre lehessen hajtani ebben az időszakban.

Tájékoztatására megemlítem, hogy Önt valószínűleg „kutató hallgatónak” tudjuk felvenni. Ez évi 900 font tandíjat von maga után, ami fedezi az Egyetem költségének legnagyobb részét. A Laboratórium minden eszközét és lehetőségét ingyenesen ajánlja fel a kutatásra.

Örülnek, ha azt a hírt kapnám Öntől, hogy tudja vállalni ezeket a feltételeket.

Tisztelettel

E. Rutherford



Hevesy György (a kép balra) 1911 januárjában lázas betegen érkezett meg Manchesterbe, ahol később élete legboldogabb éveit töltötte Rutherforddal dolgozva. Nagy valószínűséggel jelen volt 1911. március 7-én a Manchester Literary and Philosophical Society (Irodalmi és Filozófiai Társaság) által rendezett összejövetelen. A fizikatörténet szerint Rutherford itt mondta el először nyilvánosan, hogy a kísérletek azt igazolják, hogy az atomnak egy piciny méretű, de nagy tömegű magja van, amely az atom teljes pozitív elektromos töltését tartalmazza. Ezt a napot tartjuk ma a nukleáris fizika születésnapjának. A hallgatóság az irodalom és a tudományok iránt érdeklődő manchesteri üzletemberek és fiaik. (Például az akkor húsz éves *James Chadwick*, aki 21 év múltán majd felfedezi a neutronot.) Amúgy az első előadást egy zöldséggyümölcs nagykereskedő tartotta egy különlegesen ritka kígyóról, amit egy jamaikai banánszállítmányában talált. Természetesen a kígyót be is mutatta. Utána következett Rutherford. Nem lehetett könnyű helyzetben. Egy ritka kígyó

után. Chadwick később így emlékezett vissza: „*ez volt a legmegrázóbb előadás számunkra, fiatal fiúk számára, akik akkor voltunk ... Tudatában voltunk, hogy ez a nyilvánvaló igazság, ez Az!*”¹ (A lábjegyzetbe mindig leírom az eredeti angol verziót.)

De térjünk vissza Worcesterbe 1909. szeptember 10-én. Rutherford előadására dugig megtelt a terem. Ott volt persze, Ferenczi és Freud is. (A pszichológusokat és hasonlókat nagyon felizgatta, hogy olyan láthatatlan dolgokról, mint a sugárzás, tudományt lehet csinálni. A lélek sem látható...) Az előadás címe: „*A radio-aktív anyagokból származó alfa-részecskék természete*”².

Rutherford kiment a közönség elé. Mozdulatlanul megállt előttük. Szigorúan nézett körül kék szemével bozontos szemöldöke alól, majd rideg hangon megszólalt:

„*A radio-aktív anyagok α -sugárzásának természete és tulajdonságai, amelyet most prezentálok, a legfontosabb és legérdekesebb problémák a radio-aktivitás területén.*” (A radio-aktivitás magyarul: sugárzó tevékenység. Rutherford nem írta még egy szóba – angolul sem – a radioaktivitást.) „*A sugárzások e típusának gondos tanulmányozása jelentős szerepet játszik sok, nagyon fontos tény felderítésében, amelyek jelentősen bővítik tudásunkat nemcsak a sugárzásról, de a radio-aktív átalakulások természetéről is.*”³

Majd szinte monoton hangon ismertette az addig felismert radioaktív sugárzásokat. Az α -, β - és γ -sugárzást.

Talán Rutherford a huszadik században az a fizikus, aki számára a kísérleti megtapasztalás volt igazán döntő érv bármilyen vitában. Nagyon egyszerűre tervezett, átláthatóvá megépített eszközei segítségével szinte együtt élt a vizsgált anyaggal, amellyel éppen kísérletezett. Tisztelte a Természetet, tisztelte a tényeket.

Személyiségének ez a tényekhez való szigorú ragaszkodása adott hitelt minden mondatának. Amint előadásában az α -részecskékkel végzett kísérletei és az azokból levont követ-

¹ it was „a most shattering performance to us, young boys that we were ... We realized this was obviously the truth, this was it.”

² „The Nature of the Alpha Particle from Radio-active Substances”

³ „The nature and properties of the α rays from radio-active substances have presented one of the most important and interesting problems in the field of Radio-activity. A careful study of this type of radiation has been instrumental in bringing to light a number of very important facts which have added much to our knowledge not only of the radiation itself, but also of the nature of radio-active transformations.”

keztetések felé közeledett, merevsége oldódott, szemei csillogni kezdtek. Belelendült. És ezzel az intellektuális örömmel fertőzte meg hallgatóit is.

„Geiger és Marsden azt a meglepő tényt figyelték meg, hogy egy nehéz fémre, mint például az aranyra beeső 8000 α -részecske közül átlagosan 1 úgy térül el a molekulákkal [értsd a fém alkotóival] való találkozásakor, hogy újra a beesés irányában tűnik fel.”⁴

Nem tudom, hogy aki most olvasta az előbbi mondatot, megérezte-e ennek hátborzongató voltát. Akkor, abban az időben hátborzongató voltát. Mert akkoriban minden, az átlagosnál kicsit műveltebb ember számára többé-kevésbé már elfogadott volt, hogy atomok léteznek. Hogy vannak bennük leheletkönnyű negatív elektronok, és azok egy atomméretű pozitív masszában úszkálnak.



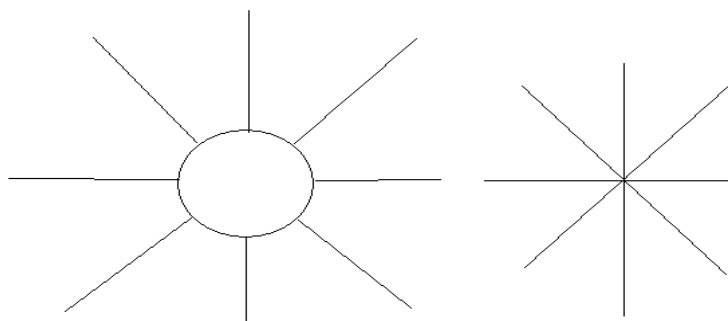
Az elektront 1897-ben **Joseph John Thomson** (Manchester, UK 1856 – 1940) fedezte fel. Megmérte töltését, tömegét, pontosabban ezek hányadosát, a fajlagos töltést (e/m). Az elektron elektromosan negatív töltésű, ($Q = -e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ C), tömege a legkisebb atom tömegének csaknem 2000-ed része, ($m = 0,9 \cdot 10^{-30}$ kg), fajlagos töltése: $e/m \approx 1,8 \cdot 10^{11}$ C/kg. Felfedezésért 1906-ban kapott Nobel-díjat. Thomson az elektron felfedezése után úgy képzelte el az atomot, mint egy gömbölyű pudingot. A mazsolák az elektronok. A puding pedig az atom elektromosan pozitív töltésű anyaga, amelynek tömege csaknem a teljes atom tömegével megegyező, (azaz az atomtömegnél az elektronok piciny tömegével kevesebb).

Valószínű, hogy a Worcesterben, az előadóteremben összegyűlt tömeg (Ferenczit kivéve) sem hátborsózkodott eléggé. Mert Rutherford nagyon lassan és tagoltan így folytatta:

„Egy ilyen eredmény hatalmas intenzitású elektromos mezőre hívja fel a figyelmet az atom környezetében vagy az **atomon belül** (kiemelés tőlem, mindjárt mondom, hogy miért), különben lehetetlenség volna, hogy az oly nagy sebességgel mozgó és oly nagy tömegű részecske ekkora nagy szögben megforduljon.”⁵

Ahhoz, hogy egy nagy sebességű és nagy tömegű, tehát óriási lendületű részecske mozgása ekkora nagyot változzon, ahhoz óriási taszító erő, tehát óriási elektromos térerősség szükséges. (Gondold el, mintha pingponglabda helyett medicinlabdával pingpongoznál!)

Egy ponttöltés keltette elektromos mező térerőssége ($E = k \cdot Q/R^2$) a ponttöltéshez közeledve növekszik. Az egyenletesen töltött gömb pontszerűnek tekinthető a gömbön kívül. A gömb felületénél azonban elérjük a maximális térerősséget, azon belül a térerősség lineárisan



csökken a középpontig nullára. Ha az atom pozitív töltése atomméretű, (aranyatom $R \approx 0,144 \cdot 10^{-9}$ m), akkor a felületéig eljutva a térerősség nem elegendő a nagy sebességű α -részecske lendületének megfordításához. Ahhoz, hogy az α -részecske lendületének iránya a kísérletben tapasztalt csaknem 180 fokot

⁴ „Geiger and Marsden observed the surprising fact that about 1 in 8000 α particles incident on a heavy metal like gold is so deflected by its encounters with the molecules that it emerges again on the side of incidence.”

⁵ „Such a result brings to light the enormous intensity of the electric field surrounding or within the atom, for otherwise it would not be possible for such a massive particle moving with such great velocity to be turned through such a large angle.”

elérje, az atom pozitív töltésének az atom méreténél százezerszer kisebb sugarú gömbben kell tartózkodnia. Ekkor a felületnél a tízmilliárdszor nagyobb télerősség már visszafordítja az α -részecskét. (Ez munkatétellel hamar ellenőrizhető. A kísérletben szereplő α -részecskék mozgási energiája kb. $1 \text{ pJ} = 10^{-12} \text{ J}$ volt. Az atom pozitív töltésének elektromos mezője által végzett munka, amíg azt az α -részecske R távolságra megközelíti $W = -k \cdot Q_1 \cdot Q_2 / R$, ahol Q_1 az α -rész, Q_2 az aranyatom pozitív töltése, az R pedig az a sugár, amilyen picinynek kell legalább lennie a pozitív „pudingnak” ahhoz, hogy a felületéhez érkező α -részecske teljes mozgási energiája éppen elfogyjon. $W = E_m$. Mennyi lett az R ? Hányszor kisebb, mint az aranyatom sugara?)

Rutherford már ekkor, 1909. szeptember 10-én Worcesterben azt mondta, hogy az **atomon belül** találkozhatott az α -részecske nagyon erős elektromos mezővel. És bár nyilvánosan még nem mondta ki, de mint az előbb láttuk, ez minden fizikus számára nyilvánvalóvá tehető, hogy az atom pozitív töltését NEM egy atomméretű puding hordozza, hanem ennél jóval kisebb geometriai méretbe kell összpontosulnia. Ezt a piciny geometriai méretű, nagy tömegű pozitív anyagdarabot nevezzük ma atommagnak, angolul nucleusnak. Mondhatnánk, hogy a nukleáris fizika 1909. szeptember 10-én született meg.

De nem mondom. Csak elgondolkodtam rajta. A fenti idézetek Rutherford 1909 szeptemberi előadásából valók abban az értelemben, hogy az elhangzott előadások szövegét a Clark University könyv alakban megjelentette. A könyv 1912-ben jelent meg. Benne Rutherford cikkének beérkezési idejéül 1910. szerepel. (Ezek az éves eltéréseken nem kell csodálkozni. Akkoriban a publikálások még nem interneten át száguldoztak, a publikációk megjelenésének sebessége a postahajók sebességén, a nyomdászok ügyességén múlt.) Mivel Rutherford cikke 1910-ben érkezett meg Worcesterbe, feltehetnénk, hogy valóban előbb született meg a magfizika. Ugyanakkor Rutherford akár 1911. március 7-dike után is belecsempészhetette a cikkbe a kérdéses mondatokat. Mert megint csak akkoriban a nyomdászok által kiszedett és tördelt, úgynevezett kefelevonatot mindig visszaküldték a szerzőnek (postahajón!), hogy olvassa át és javítsa, ahol hibát talál (korrektúrázza). Ilyenkor kevés mondatot, de még ekkor is bele lehetett írni a cikkbe. Így lehetséges, hogy a nukleáris fizika születésnapja mégiscsak 1911. március 7. A ritka kígyó bemutatása után.

Rutherford elkötelezett becsületessége a kísérleti tények megszerzésében és értelmezésében mégis inkább azt sugallja, hogy a fent idézett mondatok valóban elhangzottak már 1909-ben Worcesterben. A hozzávezető kísérletek természetesen jóval korábban történtek. Geiger és Marsden Manchesterben 1907-ben nem véletlenül kezdte vizsgálni az α -részecskék áthaladását az aranyfólián. Rutherford még 1906-ban a kanadai McGill Egyetemen dolgozván tapasztalta az α -részecskék közel 2 fokos eltérülését, szóródását egyik kísérletében, amikor csillámpalát helyezett a sugárzás útjába. Már ez a két fokos eltérülés is nagyon meglepte. Olyannyira, hogy már akkor kiszámította, hogy milyen nagy elektromos télerősséggel kellett találkoznia a nagy lendületű α -részecskének, hogy ekkora eltérülés lehetséges legyen. Életrajzírója szerint már ekkor leírta: „*Ilyen eredmény világosan mutatja a tényt, hogy az anyag atomjai nagyon erős elektromos mezőnek a székhelyei.*”⁶ 1907-ben visszaköltözve Angliába (Manchesterbe) listát készített a megvizsgálandó jelenségekről. A listán a hetedik az „ α -sugárzás szóródása”⁷ volt.

⁶ „Such results bring out clearly the fact that the atoms of matter must be the seat of very intense electrical forces.” N. Feather (1940) Lord Rutherford, 131. oldal

⁷ „Scattering of alpha rays” N. Feather (1940) Lord Rutherford, 117. oldal



A kísérlet kivitelezését Rutherford *Geigerre* és *Marsdenre* bízta. A képen Hans Geiger és Ernest Rutherford a manchesteri laboratóriumban. 1907-ben vagy 1908-ban. Kettőjük között valószínűleg az *ős-Geiger-cső* van, fenn látszik az az elektroszkóp, amely kilendülésével jelezte, ha a csőbe nagy energiájú, radioaktivitásból származó, ionizáló részecske érkezett.



1909-ben csoportkép készült Manchesterben a Fizika Tanszék dolgozóiról. Ebből a képből vágtam ki az atommag felfedezésében kulcsszereplő három fiatait. Alul balra Rutherford (38 évesen), a középső sorban jobbra Geiger (27 évesen) és felül jobbra Marsden (20 évesen).

Hans Geiger (1882 Neustadt-an-der-Haardt, Németország – 1945 Potsdam, Németország) 1907-től néhány évig Rutherfordnál dolgozott Manchesterben, ahol kifejlesztette a ma Geiger–Müller-számlálócsőnek nevezett eszköz őseit abból a célból, hogy a radioaktív részecskéket egyesével meg lehessen számlálni. Miután kiderítette, hogy a csővel és a szcintillációs ernyőn mikroszkópot használva ugyanannyi α -részecskét lehet megszámolni, az utóbbival kezdték megfigyelni az aranyfólián áthaladó α -részecskék szóródását. Mert a szcintillációs ernyőn a beérkező α -részecske helyét is meg lehetett határozni. Ebben a kísérletben vállalt tevékeny részt az akkor 18 éves Ernest Marsden.

Ernest Marsden (1889 Rishton, UK – 1970 Wellington, Új Zéland) Az arany, ezüst, platina és alumínium fóliákon áthaladó α -részecskék zöme a két fokos elhajlási tartományban volt. De Marsden alkalmanként „elkószált” α -részecskét is észrevett. Marsden így emlékezett vissza: Egy délután bejött hozzájuk Rutherford, és sokat beszélgettek az elkószáló α -részecskékről. Azután elmentében Rutherford visszafordult hozzá: „*Nézd meg, hogy látsz-e a fém felületéről visszaverődő α -részecskéket.*”⁸ Megnézte. Pedig sem ő, sem Geiger, sőt, talán még Rutherford sem hitte, hogy találni fog élesen hátraszóródó α -részecskét.

⁸ „*See if you can get some effect of alpha particles directly reflected from a metal surface.*” E. Marsden *Rutherford in Manchester*, in J. B. Birks, ed. *Rutherford in Manchester* (1962) 8. oldal

II.

Marie Curie, Ernest Rutherford és a radioaktivitás Néhány történet 1871-től 1907-ig

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



Rutherford 1871. augusztus 30-án született Új-Zélandon, Christchurchtól 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, és angoltanár lett. Rutherfordnak 11 testvére volt. Nagyon szerény körülmények között éltek. Noha Ernest kitűnő tanuló volt elemtől 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. 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!”⁹ 1895 szeptemberében elhajózott Angliába.

Rutherford szegény volt. Szerette volna feleségül venni az új-zélandi Mary Newtont. De ehhez pénzre kellett volna valami módon szert tennie. Cambridge-i ösztöndíjának első évében az elektromágneses hullámok vizsgálatával, lényegében Marconi előtt, felismerte és csaknem megvalósította a rádió adás-vételt. (*Elektromos hullámok egy mágneses érzékelője és annak néhány alkalmazása*¹⁰, 1896. június 18., Royal Society, London.) Rutherford úgy érezte, hogy ez a munkája hozna elég pénzt a házasodáshoz. Jól érezte. Marconi, aki nagyon gazdag olasz családból származott, a rádióból csakugyan még jobban meggazdagodott.



1896 januárjában¹¹ érkezett a hír Cambridgebe, hogy a német *Wilhelm Röntgen* felfedezett egy nagy áthatolóképességű sugárzást. (Röntgen kapta 1901-ben 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 katódsugár elektromágneses sugárzás volna, és e sugárzás miben létét vizsgálta. Míg Röntgen szentül hitte, hogy a katódsugár elektromágneses hullám, és azt figyelte meg, hogy a katódsugár az anódra érkezésekor milyen

⁹ „That’s the last potato I’ll dig.”, A.S. Eve, *Rutherford*, 1939., 11. oldal

¹⁰ *A magnetic detector of electrical waves and some of its applications*, Rutherford Collected Papers I., 1962

¹¹ „Eine neue Art von Strahlen”, December 28, 1895, Würzburg Orvosfizikai Társaság folyóirata. Majd Stanton, Arthur. „Wilhelm Conrad Röntgen On a New Kind of Rays: translation of a paper read before the Würzburg Physical and Medical Society, 1985” *Nature* 53 (1369), 1896. január 23., 274–276 oldalak.

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, szerette volna azt Rutherfordra bízni. Hogyan érte ezt el, azt egy kicsit később mondom.

1897-ben végre lett annyi kísérleti bizonyítéka Thomsonnak, hogy bejelentse: a katód-sugár nagy sebességű, piciny tömegű, elektromosan negatív töltésű részecskék sokasága. Azaz felfedezte az **elektron**okat. Érdekes, hogy az elektron elnevezés hat évvel korábban született. Az ír *G. J. Stoney* (1826 – 1911) „*az elektromos töltés alapegységét*”¹² nevezte el 1891-ben elektronnak. (Az elektron szó eredete görög: ἤλεκτρον és borostyánt jelent. A gazdag görög férfiak a Balti- és Északi-tenger partján gyűjtött, import borostyánt előszeretettel viselték ékszer gyanánt szőrös keblükön. A borostyán szőrrel dörzsölődve negatív elektromos töltésűvé válik. Apró testeket így magához ránt, majd eltaszít. Ezért ezt az elektrosztatikus jelenséget már a görögök a borostyánról nevezték el.) Az valójában hősi tett volt Stoneytól, hogy az „*elektromosság atom*”-járól beszélt. Mert a fizikusok nagy része még 1900 tájékán sem fogadta el igazán az atomok létét, arról azután nem is beszélve, hogy az elektromosságnak is atomjai volnának. Ami tulajdonképpen érthető. *Michael Faraday* (1791 – 1867) elektromos és mágneses kísérletei alapján *James Clerk Maxwell* (1831 – 1879) 1873-ban írta meg értekezését az elektromosságról és mágnesességről¹³. Ebben a kísérletekkel és mérési eredményekkel gyönyörűen összecsendülő matematika, az elektromos és mágneses mezőt egy szonett tömörségével leíró négy Maxwell-egyenlet sokáig bővületében tartotta a fizikusokat. A folytonos mező volt az igazán tiszta fizikai alapfogalom. Az atomok, molekulák csak a maszatos kémia hipotetikus fogalmai. (Amikor én jártam egyetemre, ami azért egy kicsit később volt, 1970 tájékán, az egyszerűbb lelkű egyetemi fizikusoktatók még mindig leszólták a piszkos kémiát a gyémántcsillogású tudománnyal, a fizikával szemben. Érdekes, hogy ez már akkor is zavart, pedig matematika-fizika szakos hallgató voltam.)

Azt, hogy Röntgen hogyan ismerte fel a röntgen-sugárzást, sokan és sokféleképpen mondják el. Az egyik legérdekesebb verzió szerint midőn Röntgen otthoni laboratóriumában kísérletezett, asztalának egyik alsóbb fiókjában tárolt, fekete papírba csomagolt fotópapíron meglepő módon egy kulcs árnyékképe jelent meg az előhívás után. Az egész szobában egyetlen kulcs volt; az asztal felső fiókjában. Röntgen felismerte, hogy az asztalon lévő katódsugárcső, a fiókokban lévő kulcs és fotópapír közel egy egyenesbe estek. Az ismeretlen sugárzás tehát átment az asztal fáján, a fekete papíron, csak a vaskulcson nem. Ezután tervezetten kísérletezett a csőből kilépő sugárzással. Amikor a sugárzás útjába vaslemezt tartott, nem az lepte meg, hogy a vaslemeznek árnyéka van, hanem az, hogy az ernyőre kezének 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 balkezéről.



¹² „*the fundamental unit of electrical charge*”, *G. J. Stoney*, például: *Of the „Electron”, or Atom of Electricity*, *Philosophical Magazine*, S5V38, 1894, 418-420 oldal

¹³ *Treatise on Electricity and Magnetism*, *J. C. Maxwell*, 1873.

Egy másik történet szerint Röntgen fekete papírba csomagolta katódsugár csövét, hogy a benne akkor még elektromágneses hullámnak gondolt katódsugárzást leárnyékolja. (Ugye, a katódsugárzás elektron voltát Thomson majd csak két év múlva fogja felfedezni.) Legnagyobb meglepetésére a körülbelül 1 méterre lévő másik, de be nem kapcsolt katódsugárcső fluoreszkáló képernyője villódzni kezdett. Valami ebben a történetben is igaz lehet. Például a fluoreszkáló¹⁴ képernyő használata.

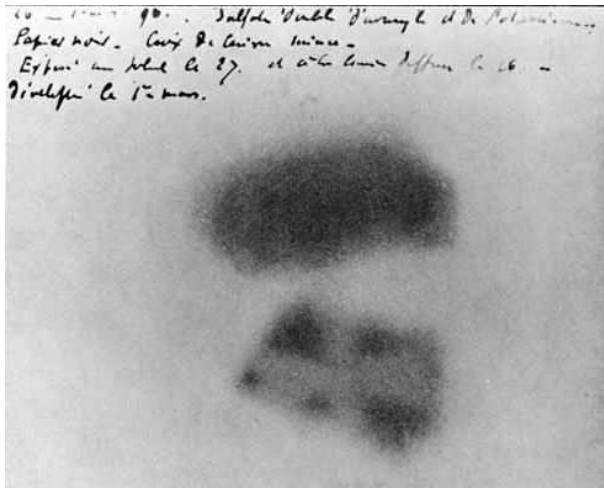
1896 januárjában Párizsba is megérkezett a röntgensugárzás felfedezésének híre. *Henri Becquerel*, mint apja és nagyapja is, ásványok, kristályok foszforeszkálásával¹⁵ és fluoreszkálásával foglalkozott. Ekkoriban éppen urán-sókat vizsgált. Az urán-sókat egyébként már időszámításunk előtt is használták üvegek színezésére, (közülük egyesek tündöklően sárga színűek). Az 1800-as évek elejéig úgy vélték, hogy csak egyetlen olyan hely van, ahol e festékre szert lehet tenni: a joachimsthal ezüstbánya. (Joachimsthal ma Jáchymov Csehországban, Prágától nem messze.) 1518-ban itt verték az újkor első ezüst pénzérméit. (Joachimsthal németül Joachimsthaler, majd thaler, majd magyarul tallér, angolul dollar. A dollár neve valóban innen származik.) 1789-ben Berlinben a vegyész M. H. Klaproth Joachimsthalból származó szurokércből választott le egy fekete port, amiről felismerte, hogy egy új elem oxidja. Az új elemet nevezte el urániumnak (U).



Henri Becquerel (1852. Párizs – 1908. Le Croisic, Bretagne, Franciaország) csodálatosan egyszerű kísérletet tervezett, hogy az urán-sóból hasonlóan varázsoljon elő röntgen-sugarakat, mint azt tette Röntgen a katódsugárzással. Még mindig 1897 előtt vagyunk, tehát Becquerel is azt gondolta, hogy a katódsugárzás elektromágneses sugárzás, mint a fény. 1896. január 30-án Becquerel fotópapírt fekete papírba csomagolt. A fekete papírra hintette az urán-sót. Az egészet kitétte a párkányra, hogy süsse azt a Nap. Amikor a fotópapírt előhívta, látta, hogy a só-szemcsékből kisugárzott „röntgen-sugárzás” megfeketítette a filmet. Természetesen boldogan elkönyvelte, hogy ő is felfedezte a röntgen-sugárzást, mégpedig olyan egyszerűen, hogy a napfény segítségével az urán-sót rábírta annak kibocsátására. (Pedig nem.)

¹⁴ *Fluoreszkál* az az anyag, amely nagy energiájú fotont nyel el, és kisebb energiájú fotont bocsát ki. Ilyennel találkozol a diszkóban, amikor ultraibolya fényvel (nagy energiájú fotonok) megvilágítják a csápoló tömeget, és a nők sötét pólója alól feltűnik a hófehér melltartó kékes színben tündökölni (kisebb energiájú, látható fotonok). A többi fehérneműről 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.

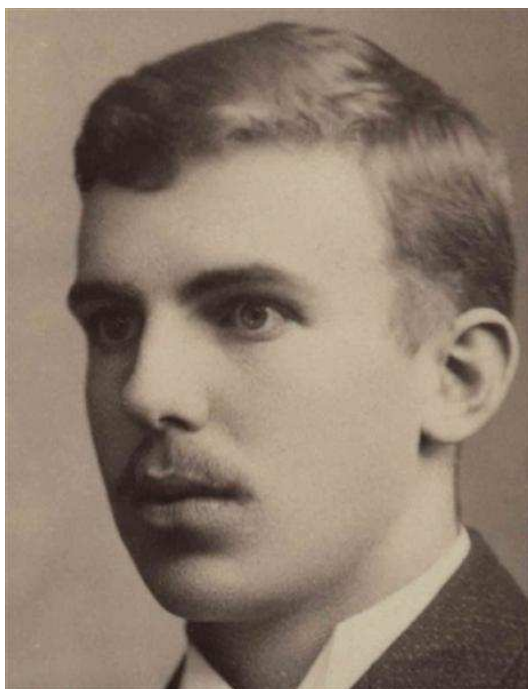
¹⁵ *Foszforeszkál*: az anyag elnyeli a fényt, és csak később – esetleg melegítés hatására – bocsátja ki újra. Ilyen volt régen az órák mutatójára, számaira kent foszforeszkáló anyag. Nappal elnyelte a fényt, éjjel meg kisugárrota. Ha ezt a jelenséget látni akarod, nem túl nehéz. Például egy Kalmopyrin kell hozzá. Menj be a fürdőszobába, szoktasd a szemedet a koromsötétethez. 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.



Becquerel 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 még egy fémet, egy Máltai keresztet is tett. Ezzel akarta bizonyítani, hogy a napfény által kiváltott röntgen-sugárzás a papíron átmegy, de a fém nem. Csakhogy ezen a napon nem sütött ki a Nap. Még másnap sem. Február 26-án Becquerel mégis előhívta a filmet, amitől persze, nem várt semmit. De kapott! Lásd a képet! (Azt, hogy miért hívta elő, senki sem tudta kinyomozni, de állítólag Becquerel

híres volt érthetetlen, de jelentős eredményre vezető ötleteiről.) Szóval: 1896. február 26-án Becquerel felismerte, hogy az uránérc magától sugárzik. Felfedezte a radioaktivitást. A sugárzást, ami az anyag belsejéből jön, anélkül, hogy azt külső behatás érné.

Ekkoriban Cambridgeben Rutherford éppen meg akart gazdagodni a rádió feltalálásából, hogy feleségül vehesse Mary Newtont. Thomson pedig éppen az elektront akarta felfedezni, de izgatta a Röntgen-féle sugárzás is. Hogy tanítványát (aljas módon ☺) Thomson befolyásolja, levelet írt a 72 éves *Lord Kelvin*nek, az akkor legnagyobb tartott angol fizikusnak. (Kelvinről nevezték el az abszolút hőmérsékleti skála egységét.) 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 szolgálhatod a Jóistent és Mammont egyszerre.*”¹⁶ Így fordult Rutherford a rádió aktív kutatása felől a radioaktivitás kutatása felé. Először a röntgen-sugárzás felé persze, majd 1897-től a Marie Curie által akkorra már radioaktivitásnak elnevezett jelenség felé. (Jobbra Rutherford ekkoriban készült fotója.)



¹⁶ „*You cannot serve God and Mammon at the same time.*” Szergej Kapitza *Experiment, Theory, Practice*, 1980 267. oldal – *mammon* arameusul pénz, nyereség, gazdagság – *arameus* a Biblia egyik nyelve.

Marie Skodlowska Curie (1867. november 7. Varsó – 1934. július 4. Passy, Franciaország) Édesapja fizikatanár volt, innen ered a fizika iránti érdeklődése. 24 évesen Párizsba ment, a Sorbonne-on tanult. Férje, *Pierre Curie* fizikus, gyerekeik: *Irène* (1897 – 1956) és *Eve* (1904 – 2007).



1903-ban kapott férjével és Henri Becquerellel közösen fizikai Nobel-díjat a Becquerel által felfedezett sugárzás vizsgálatáért. (Férje 1906-ban balesetben halt meg.) 1911-ben kémiai Nobel-díjat kapott (egyedül) a polónium és rádium felfedezéséért, a radioaktív anyagok kémiai elválasztásának módszeréért. A radioaktivitás vizsgálatát kezdetben egyedül, férje nélkül végezte. Először például azt ismerte fel, hogy az uránérc az urán-sónál lényegesen aktívabb. (Ma már tudjuk: az ércben az urán bomlássorozatának minden eleme jelen van, radioaktív egyensúlyban, tehát azok sugárzását is észlelte. Míg a frissen készült urán-só lényegében *csak* uránt tartalmaz, annak két radioaktív izotópját a 238-as és a 235-ös izotópot.) 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 Curienek akarták adni. Pierre azzal utasította el, hogy a

munka, amit díjazni akarnak, a felesége munkája volt. Az első Nobel-díjat végül is Röntgen kapta. Az 1903-as Nobel-díj 1905-ben történt átvételekor Marie Curie *nem* mondott Nobel-előadást. Talán ő volt szerény, talán nehezen viselték volna el az urak, hogy egy nő is érthet a fizikához.

Marie Curie tipikus sugárbetegségben, csontvelő-rákban halt meg. *Illyés Gyula* (1902 – 1983, író, költő) *Naplójegyzetek* írásában olvashatjuk: „*És hogy mi a sugárzás, erről félelmesen szép példázatot hallottam Zsebők Zoltán barátomtól, a röntgenprofesszortól. Párizsban járva két ízben is felkereste a sceaui temetőben a Curie-házaspár sírját. Már évtizedek óta fekszenek a nedves földben, sejtjeiket régen elbomlasztotta a halál. De a sok évtizedes munka közben a rádiumsugárzás végleg beépült csontjaikba, ma is ott van, és jelzi sírhelyüket. Ha senki nem lenne a temetőben, hogy megmutassa, merre van a sír: egy egyszerű Geiger-Müller-számláló élenkülő lökötése odavezetné a látogatót. Az ionizáló sugárzás törvényei szerint 1580 esztendőnek kell eltelnie ahhoz, hogy a Curie-házaspár sírjából érkező jelek erőssége felére csökkenjen.*”

A „*rádiumsugárzás beépülését*” nyilván úgy kell érteni, hogy radioaktív anyag épült be a csontokba és nem a sugárzás. A sugárzás maga elnyelődik az anyagban, de ettől aligha váltak radioaktívvá a csontok. Azon is érdemes elgondolkodni, a közel 2 méter mélyről milyen radioaktivitás érzékelhető a földfelszínen. α - vagy β -sugár biztosan nem jut el a felszínig. Az α -sugárzást már egy vékony papír is elnyeli, a β -sugárzást meg például néhány milliméter vastag alumínium lemez. Csak a gamma-sugárzás érkezhett meg – esetleg – a temetőlátogatóig. Egyébként a Curie-házaspár hamvait 1995-ben Sceaux-ból átszállították a párizsi Pantheonba. (Amelynek homlokzatán az írás: „*Aux grands hommes la patrie reconnaissante*”, magyarul: „*A kiemelkedő embereknek a hálás hazá.*” Franciául az homme, (ejtsd omm) éppúgy, mint magyarul az ember, sokáig a férfi szinonimája volt. Mitterand francia elnök közbenjárására Marie Curie volt az első nő, akinek hamvait saját jogán helyezték el a Pantheonban.) A Pantheonban lévő szarkofágok néhány centiméter vastag

márványból (vagy márványszerű anyagból) készültek. Rajtuk áthatolhatna a gamma-sugárzás. (Egyesek szerint a márványon belül ólomkoporsó van. Az ólom elnyeli a gamma-sugarat.)

Az 1580 évet nem tudom megfejtetni. Ha csak nem arra gondolt Zsebők Zoltán, hogy a rádium felezési ideje 1602 év, és ebből levonta Marie Curie halála és az ő temetőlátogatása



között eltelt időt. Ebben az esetben a temetőlátogatás 1956-ban volt. De azt, hogy hogyan került a csontokba a rádium, nem tudom. Hacsak nem az történt, hogy a rádiummal való kísérletek során kézmosás nélkül étkezett Madam Curie, s kezéről, ha egyszerre igen kicsiny mennyiség is, de hosszú éveken át így bejuthatott a testébe. A rádium pedig a kalciumhoz hasonlóan két vegyértékű, ezért épülhet be a csontba.) Még a rádium bomlásából származó radon belélegzése miatt a radon utódainak, a polóniumnak, bizmutnak, ólomnak a hamvakban való jelenlétét inkább el lehet képzelni. De ezen radioaktív elemek felezési idői közül a leghosszabb is csak 22 év. (Én nem hiszem, hogy a szarkofágon kívül a háttérnél nagyobb sugárzás mérhető lenne. De azért szívesen megnézném egy Geiger-számlálóval.)

Felezési idő, a sugárzások át- és behatoló képessége, radon és utóelemei. Mind olyan fogalmak, amelyek Rutherfordhoz vezetnek. (Meg még a Geiger-számláló is, amint azt az előző fejezetben már láttuk.)

Az 1899-es egyetemi tanévtől Rutherford Angliából Kanadába költözött. Egy kanadai dohánykereskedő nagylelkű adományából a montreali 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 behatoló tulajdonságú, aminek neve legyen β -sugárzás”¹⁷. A később felfedezett, az előbbiektől óriási áthatoló képességében különböző sugárzást Rutherford javaslatára nevezték el gamma-sugárzásnak. Felfedezője 1900-ban a francia P. U. Villard (1860 – 1934) volt.

¹⁷ “...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.” Rutherford, 1899 *Uranium radiation and the electrical conduction produced by it*, Phil. Ma. 47. 116. oldal

Rutherford 1908-ban tartott Nobel-beszédéből sugárzik, hogy élete addig 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 -rész tömegét, töltését vizsgálta, de még energiájukat is. Persze, először azt is fel kellett ismernie, hogy függetlenül attól, hogy 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. Ennek megállapításához, hogy milyen anyagok jönnek létre a radioaktív bomlás után, már képzett kémikusra van szüksége. 1900-ban ráveszi az Oxfordban dolgozó, akkor 23 éves Frederick Soddyt, hogy dolgozzon vele Montrealban.



éves Frederick Soddyt, hogy dolgozzon vele Montrealban.

Rutherford Soddyval (jobbra a kép Soddy) közösen fedezi fel, hogy a radioaktív anyagokat körülölelő radioaktív anyag a radon (Rn) nemesgáz. Soddy 1902-ben visszatér Angliába. Még spektroszkópiai úton bizonyítja, hogy az α -sugárzó anyagokban hélium található, bár nem állítja, hogy a hélium az α -részecskékből származna (1903). Azután még felismeri, hogy az α -bomlás után visszamaradó atom a periódusos rendszerben az eredeti atomtól kettővel balra lévő atom (1910 körül), és még 1913-ban orvos sógornője által inspirálva izotópoknak nevezi el a periódusos rendszer azonos helyén lévő, de tömegükben különböző atomokat¹⁸. Azután 1914-től jön az első világháború. Kutatásai megakadnak. És bár 1919-től 1937-ig az Oxford University professzora, soha többet nem tér vissza a radiokémia területére. Soddy 1921-ben kémiai Nobel-díjat kapott a radioaktív anyagok kémiájához való hozzájárulásáért, és az izotópok kutatásáért.

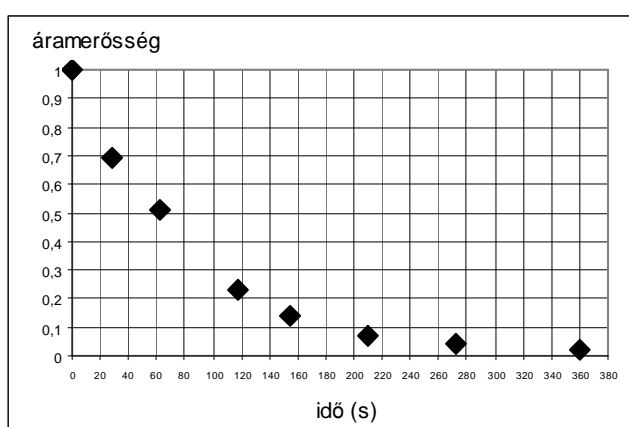


¹⁸ Nagyon nehéz volt mai fejjel leírni, hogy mit értett Soddy izotópon. Mennyivel könnyebb ma: azok az atommagok, amelyekben ugyanannyi a protonok száma, de neutronjaik számában különböznek. De az atommagot majd 1911-ben, a neutront meg majd csak 1932-ben fedezik fel. Vagy a periódusos rendszerbeli balra ugrás ma: mivel az α -rész két protonból és két neutronból összetett hélium atommag, ezért alfa bomláskor a rendszám kettővel, a tömegszám négygyel csökken.

III.

Az eredeti Rutherford-kísérletek Fizika iránt érdeklődőbbeknek

Rutherford a McGill Egyetemen többek között a tóriumot körülvevő radioaktív gázt is vizsgálta. Ezt a gázt ő tórium emanációnak nevezte, ma toronnak vagy ^{220}Rn -nak, olvasd 220-as radonnak nevezzük. Felismerte, hogy a toron α -sugárzó. Tehát minden egyes atomja bomlásakor pozitív töltésű héliumatomot lövell ki. Ha van ion a levegőben, akkor az vezeti az áramot. Még hozzá ugyanazon feszültség mellett annál nagyobb áramot, 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 burába beengedte a tórium emanációt tartalmazó levegőt, majd lezárta azt. Ezután mérte az áramerősséget az idő függvényében¹⁹. Eredményeit a következő ábrán és táblázatban látjuk.



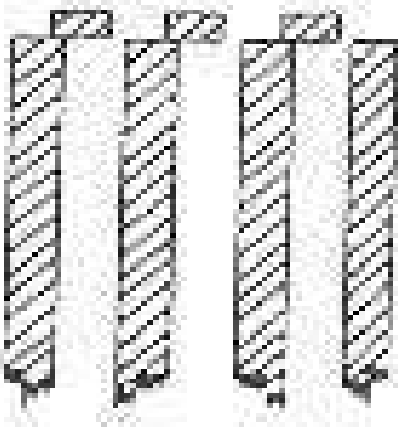
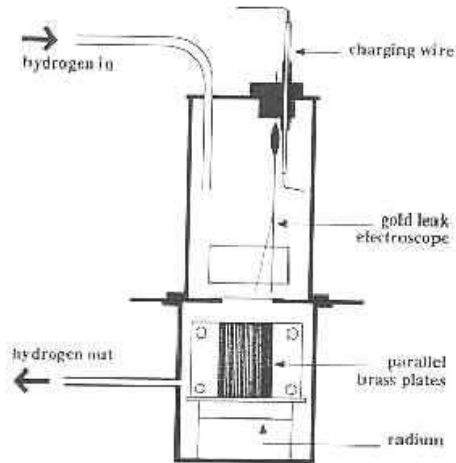
| Time (s) | Current (relative) |
|----------|--------------------|
| 0 | 1 |
| 28 | 0,69 |
| 62 | 0,51 |
| 118 | 0,23 |
| 155 | 0,14 |
| 210 | 0,067 |
| 272 | 0,041 |
| 360 | 0,018 |

A táblázatban Time (s) a bezárás után eltelt idő másodpercben mérve. A második oszlopban 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. Majd megint ugyanannyit, hogy a negyedére, stb. Azaz a bomlások száma a felére csökkenjen, majd még egyszer annyi időt várva a negyedére, stb. Ez a kísérlet vezette el Rutherfordot a felezési idő fogalmának bevezetéséhez. Egyébként a toron ma ismert felezési ideje 55,6 s. Rutherford a fenti adatokból ennél kicsit hosszabb felezési időt kapott. Aminek egyik oka természetesen a mérési hiba lehetett, a másik pedig talán az, hogy némi radon (^{222}Rn) is bekerülhetett a csőbe. Ez utóbbi felezési ideje 3,8 nap, tehát ha ez a radon is bomlik a csőben, az hosszabbnak mutathatja a mért felezési időt.

Annak, akinek nehézségei voltak/vannak a középiskolás matematikával és fizikával, nem kell elolvasnia az alábbiakat. A végén majd összefoglalom, hogy miket ismert fel Rutherford munkatársaival. De a kísérletek tervezése, kivitelezése olyan gyönyörűen egyszerű, hogy nem bírom ki, hogy ne írjam le nektek. ☺ Az ábrák az eredeti Rutherford cikkekből származnak.

¹⁹ „A Radioactive Substance emitted from Thorium Compounds”, Rutherford, 1900. Philosophical Magazine 49 1-14 oldalak

Ha egy Q töltésű részecske a \mathbf{B} indukciójú mágneses mezőbe v sebességgel lép be a mágneses mezőre merőlegesen, akkor a rá ható erő $F = QvB$ nagyságú, és merőleges \mathbf{B} -re is és a sebességre is. Tehát a részecske körpályára áll. A körpálya R sugarát a Newton II. törvénye alapján számolhatjuk: $F = ma$, azaz $QvB = mv^2/R$. 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.²⁰

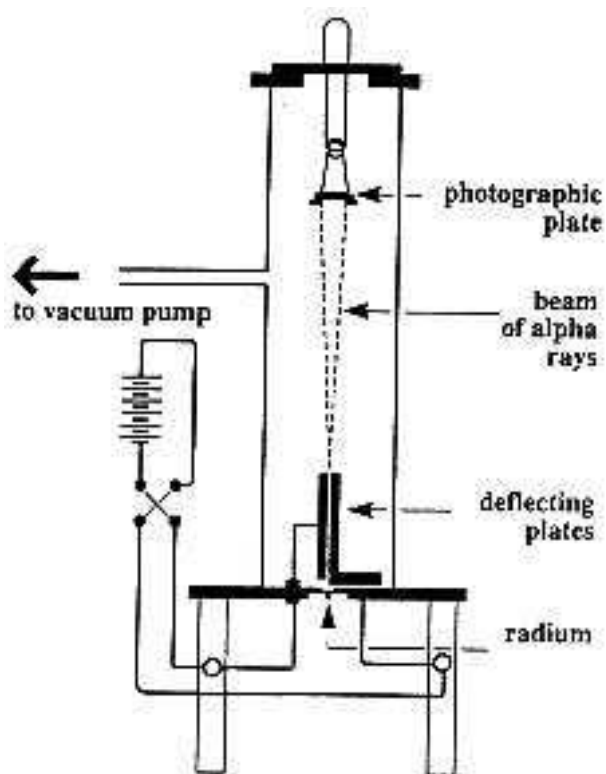


A zárt edény alsó részében helyezte el a rádiumot. (Egy lemezre öntött rádium-só oldatából elpárologtatta az oldószert). Fölötte párhuzamos rézlemezek sokasága volt. A kép alatt kinagyítva látod. Az edényben jobbra fentebb van a rendkívül érzékeny elektroszkóp, ami már kevés számú ion beérkezését is jelezte: az eredetileg feltöltött elektroszkóp arany fóliája mérhető mértékben közeledett az őt tartó rúdhoz. Annak érdekében, hogy a vizsgálatot a rádiumból előbb-utóbb létrejövő radon α -bomlása ne befolyásolja, az egész berendezést folyamatosan átmosták hidrogéngázzal. A rézlemezek síkjával párhuzamos, függőleges indukciójú mágneses mezőt hoztak létre az edényen kívülről.

A rádiumból kisugárzott α -részek egy része eljutott a rézlemezek közötti légterbe, 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 rézlemezekéket helyezett el, akkor a balkanyaros részecskék nekimentek ezeknek, és nem jutottak fel az elektroszkóp légteréig. Ha pedig jobbkanyarosak voltak, akkor feljuthattak a kicsiny lyukon át. Az, hogy adott irányú \mathbf{B} esetén balra vagy jobbra térülnek az α -részek, az a töltésük előjelén múlik. Rutherford e kísérlet alapján állapíthatta meg, hogy **az α -részek pozitív töltésűek.**

Az előbbi kísérleti elrendezés geometriájából még a körpálya R sugara is becsülhető. Így a Newton II. törvényből $mv/Q = RB$ miatt mérve R -et és B -t, az mv/Q hányados megmérhető.

²⁰ „The magnetic and electric deviation of the easily absorbed rays from radium.”, Rutherford, 1903, Phil. Mag., Ser. 6, 5: 177-187 oldalak



Az kezdetben nem volt nyilvánvaló, hogy a különböző radioaktív anyagokból, mint például a tórium, urán, rádium, stb., ugyanazok a részecskék jönnek-e, mint α -sugárzás. Ennek vizsgálatához Rutherford e részecskék tömegegységre jutó töltését, azaz fajlagos töltésüket, a Q/m hányadost akarta megmérni.²¹ A fenti anyagokból származó α -sugárzást elektromos mezőbe vezette. Az α -részecskék sebessége merőleges volt a két, egymással párhuzamos fémlemez (az ábrán: deflecting plates) 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. A levákuumozott (to vacuum pump) edényben alul volt a rádium, fölötté a két függőleges lemez, amelyek között az α -részecskék átszaladhattak, és a vízszintes irányú elektromos mező hatására eltérülhettek. Ha a baloldali lemez volt a pozitív, akkor az

α -részecske jobbra tért el, amikor pedig a jobboldali lemez volt pozitív, akkor balra. Fent egy vízszintes síkú fotólemezt helyeztek el (photographic plate). És napokig hagyták, hogy az α -részecskék fenn beérkezzenek. A lemezeknek mind a két polaritását 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: $a = QE/m$. Ezzel a gyorsulással t idő alatt $x = \frac{1}{2}QE/m \cdot t^2$ távolsággal tér el balra (vagy jobbra), amíg a lemezek közül kikerkezik. A töltött lemezek közül kilépve a részecske lényegében egyenes pályán halad az ernyőig. (A gravitáció hatásától eltekintünk, mert ilyen gyors részecskékénél a gravitáció okozta sebességváltozás ilyen kicsiny utakon elhanyagolható.) 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 $x = QUy^2/(2dmv^2)$. Innen mv^2/Q kiszámolható.

Az előző (rézlemez) kísérletből Rutherford megbecsülhette az mv^2/Q értékét, a most leírt kísérletből pedig az mv^2/Q értékét. A 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 -részecskék sebességei különbözőnek adódtak. De a fajlagos töltés a mérési hibán belül ugyanaz az érték volt! Az még ekkor nem volt világos, hogy az α -részecske Q töltése $1,6 \cdot 10^{-19}$ C, vagy ennek kétszerese. Ha csak $1,6 \cdot 10^{-19}$ C, akkor az α -részecskék lehetnek egy kétszeresen ionizált hidrogénmolekula. „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.

²¹ „The mass and velocity of the α particles expelled from radium and actinium”, Rutherford, 1906, Phil. Mag., Ser. 6, 12: 348-371 oldalak

Az nagyon valószínűtlennek tűnik, hogy egy atomi bomlás (szó szerint robbanás) eredményeként kilövellt hidrogén molekuláris és nem atomi állapotban volna.”²²

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. Gondoltam, én is kiszámolom ezt az 1280 évet. Nagyon nem ment. Végül kétnapi gyötrődés után levelet írtam a honlap felelős szerkesztőjének, hogy segítene-e abban, hogy Rutherford eredeti adatait megtaláljam. Még aznap választ kaptam az egyetem egy professzorától, Jaen Barrette-től. Beszkennelte nekem Rutherford 1905 márciusában írt cikkét²³.

Rutherford 1905-ben azt feltételezte, hogy az α -rész egyszeres pozitív töltésű részecske. Ekkor az elemi töltés mért értékét is $1,13 \cdot 10^{-19}$ C-nak tudták a ma ismert $1,6 \cdot 10^{-19}$ C helyett. Mondjuk, ez nem túl meglepő. Az elektront még csak 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 az Avogadro-számot! És majd csak Millikan 1910-ben végzett méréseiben fog az elemi töltés pontosabb meghatározásánál az Avogadro-szám a mai értékéhez 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 -részek áramát mérve jutott arra a következtetésre, hogy 1 g rádiumot 1 másodperc alatt $6,2 \cdot 10^{10}$ α -részecske hagyja el. Ma ezt úgy mondanánk, hogy 1 g aktivitása $6,2 \cdot 10^{10}$ Bq = 62 GBq. Amúgy a mai mérések szerint 1 g rádium aktivitása 36 GBq. Igaz, ha Rutherford akkor már tudta volna, hogy az α -rész kétszeresen pozitív, akkor a 31 GBq aktivitás már egészen jól megközelítette volna a ma mértet.

Rutherford most idézett cikkében lényegében az

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

összefüggést használta a rádium felezési idejének meghatározására. Itt N az 1 g rádiumban lévő Ra-atomok száma: $N = N_A/M_{Ra}$, ahol M_{Ra} a rádium mól tömege, A 1 g rádium aktivitása.

| | 1905 (Rutherford) | 2011 (én, a ma ismert adatokkal) |
|--------------|-------------------------|----------------------------------|
| N_A | $8,1 \cdot 10^{23}$ | $6,02 \cdot 10^{23}$ |
| M_{Ra} | 225 g | 226 g |
| A (1 g Ra) | $6,2 \cdot 10^{10}$ 1/s | $3,6 \cdot 10^{10}$ 1/s |
| T | 1280 év | 1620 év |

²² „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 átvételekor mondott beszédében az 1902-ben végzett kutatásairól.

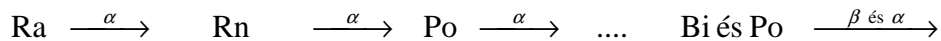
²³ „Charge carried by the alfa és béta Rays of Radium”, Rutherford, 1905, Philosophical Magazine 6. 193 – 208 oldalak.

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 α -aktivitása ($6,2 \cdot 10^{10}$ 1/s) a mérési hibán belül megegyezzen az egyik leányelem béta-aktivitásával ($7,3 \cdot 10^{10}$ 1/s). 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 kétszeres pozitív töltése miatt: $3,1 \cdot 10^{10}$ 1/s. A béta-aktivitást pedig nem egy, hanem két radioaktív elem béta-aktivitásából kapjuk.

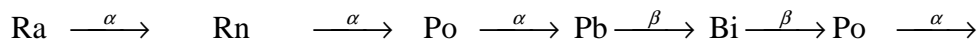
Bomlássor 1905-ben Rutherford szerint:



Mai jelöléssel:



Mai tudásunk szerint



Ha a mért $7,3 \cdot 10^{10}$ 1/s béta-aktivitásról tudta volna Rutherford, hogy az két elem aktivitása, akkor a felével számolva, és persze a ma ismert Avogadro-számot használva a rádium felezési idejére 1604 évet kapott volna. Azt gondolhatnánk, hogy a béta-aktivitást nagyon pontosan mérte. 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 kaphatott volna.

Az előbbieket összefoglalva:

A döbbenetes az, hogy Rutherford megállíthatatlanul tört előre a radioaktivitás megértésében annak ellenére,

- hogy viszonylag nagy hibával mért, mert akkor még nem volt ismert az elemi töltés és az Avogadro-szám viszonylag pontos értéke,
- hogy még nem ismerte fel béta-bomló ólmot (a rádium bomlássorának 4-dik elemét),
- hogy az α -résznek még csak egy pozitív töltést tulajdonított.

Mégis: kristálytisztán megfogalmazta például a radioaktív egyensúly fogalmát: *„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.”*²⁴ (Kiemelés tőlem.)

²⁴ : „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 alfa és beta Rays of Radium”, 1905, Philosophical Magazine 6. 193 – 208 oldalak.