

ÚT AZ ELSŐ BOHR-FÉLE ATOMMODELLHEZ – SCHRÖDINGER ÉS PAULI NÉLKÜL

Angeli István

Debreceni Egyetem, Kísérleti Fizikai Tanszék

Ernest Rutherford 1911 februárjában a Manchesteri Irodalmi és Tudományos Társaság (*The Manchester Literary & Philosophical Society*) ülésén megteszi történelmi bejelentését: a nagyszögű α -szórás nem sok kisszögű szórás összegződésének eredménye, hanem egyetlen nagyszögűé [1, 19. old.]. Ennek értelmezéséhez pedig fel kell tételezni, hogy az atom egy *pontszerű* elektromos töltésből és azt egyenletes gömbszimmetrikus eloszlással körülvevő, azonos mennyiségű ellentétes töltésből áll:

– “In order to explain these and other results, it is necessary to assume ... a type of atom which consists of a central electric charge concentrated at the point and surrounded by a uniform spherical distribution of opposite electricity equal in amount.”

1911 áprilisában beküldi a részletes cikket a *Philosophical Magazine*-nak [2]. Ebben már a szórási hatáskeresztmetszetre vonatkozó számítások részleteit is közli. Számszerű becslést ad az α -rész legkisebb megközelítési távolságára ($b = 3,4 \cdot 10^{-12}$ cm) [2, 671. old.]; ami egyúttal felső határ a magsugárra. A számításokhoz – egyszerűsítő feltételként – a magot *pontszerűnek* fogadja el, de már számol azzal a lehetőséggel, hogy *a mag kiterjedt és összetett*, és hogy ez további vizsgálat tárgya lehet [2, 686. old.]:

– “It is of interest to examine how far the experimental evidence throws light on the question of the extent of the distribution of the central charge.”

Előbb azonban más feladat vár megoldásra: a „*magos atom*” (*nuclear atom*) *szerkezetének felderítése*.

Előzmények: Maxwell köpenyéből

1856-ban a 25 éves *James Clark Maxwell* elnyeri a Cambridge-i Egyetem által meghirdetett kitüntető Adams-díjat a Szaturnusz bolygó gyűrűinek stabilitásáról készített munkájával: *On the Stability of the mo-*

Megköszönöm *Zolnai Dóra* könyvtárosnak az évszázados források beszerzésében nyújtott segítségét.



Angeli István a Debreceni Egyetem ny. egyetemi tanára. Az ELTE TTK fizikus szakán végzett 1955-ben. Részt vett azon kísérletekben, amelyek a magyarországi szénak urántartalmának elődúsítására irányultak. Munkatársaival totális neutron-hatáskeresztmetszeteket mért; az értelmezéshez kifejlesztették az optikai modell félklasszikus változatát. A töltéssugárban héj- és deformációs effektusokat tártak fel. 2004-ben és 2013-ban magsugártáblázatokat közölt az *Atomic Data and Nuclear Data* folyóiratban.

tion of Saturn's Rings [3]. A bevezető részben Maxwell kiemeli, hogy a kérdés megoldása elvi jelentőségű: vagy meg lehet magyarázni a Szaturnusz-gyűrűket a mechanika alapján, vagy eddig ismeretlen törvényeket kell feltételezni [3, 291. old.]:

– “We must either explain its motion on the principles of mechanics, or admit that, in the Saturnian realms, there can be motion regulated by laws which we are unable to explain.”

Mintha csak egy mai szöveget olvasnánk a standard modellen túli új fizika kereséséről!

A jelentős matematikai apparátust alkalmazó, 89 oldalas pályamunka következtetése két pontban foglalható össze [3, 372. old.]:

A Szaturnusz körül látható gyűrű nem lehet egyetlen összefüggő, szilárd szerkezet, mert – amint a számítás kimutatta – ahhoz csak egyetlen stabil helyzet tartozik. Ha a szilárd gyűrű ebből a helyzetéből egy külső hatás bármilyen kis mértékben is eltérítene, akkor az eltérés rohamosan növekedne, és a gyűrű végül a bolygóba csapódna.

Ha a gyűrű sok kis szilárd „szatellitből” áll, amelyek mozgását elsősorban a központi bolygó határozza meg, és csak kis mértékben az egymás közötti vonzás, akkor ezek mozgása különböző lehet, azonban az általuk alkotott teljes *gyűrű csaknem változatlan marad!* Maxwell szükségesnek látja kiemelni az impulzusmomentum megmaradásának fontosságát: érvényes a stabilitás akkor is, ha a szatellitek esetleg ütköznek egymással; az impulzusmomentum akkor is megmarad [3, 352. old.]:

– “Such collisions however will not affect what is called the Angular Momentum of the system about the planet, which will therefore remain constant.”

Nagaoka atommodellje

Csaknem fél évszázaddal később, 1903. december 5-én, a Tokiói Matematikai és Fizikai Társulat ülésén *Hantaro Nagaoka* ismerteti atommodelljét, amelyet vonal- és sávspektrumok értelmezésére dolgozott ki [4–6]. A modell szerint egy *nagy tömegű, pozitív töltésű központ körül keringő sok elektron* oszcillációjával magyarázhatók az atom által kibocsátott spektrumvonalak. Nagaoka egyenletei hasonlók Maxwell Szaturnusz-gyűrűit leíró egyenleteihez, azzal a különbséggel, hogy itt nemcsak vonzás, hanem taszítás is fellép a relatív töltéseknek megfelelően [6]:

– “Small oscillations of this kind have already been treated by Maxwell in his essay, on the stability of Saturn's rings; the system will be the same if the re-

pling particles of the present system be substituted by the attracting satellites.”

Több ilyen elektrongyűrűt is fel kell tételezni, a különböző elemek atomjaiban. Cikke végén még utal arra, hogy az atomok kapcsolódásával a molekula-képződés és a radioaktivitás is értelmezhető. Kérdésre válaszolva megerősíti, hogy az ő modelljében az atom elektronjainak száma jóval nagyobb, mint a központi pozitív töltés, tehát *az atom elektromosan nem semleges* [7]. Egy későbbi közleményében ezt részletesebben is kifejti: könnyű elemek atomjaiban több száz, a nehéz elemekében pedig százezer is lehetséges [8, 518. old.]:

– „...ein chemisches Atom mit Elektronen verbunden ist, welche in dem leichtesten Element sich auf mehrere Hunderte belaufen, während ihre Anzahl in schweren Atomen hunderttausend erreichen kann.“

Ez a sokelektronos atom a Maxwell-féle Szaturnusz-gyűrűkre emlékeztet.

Nagaoka munkásságának összefoglalását megtalálhatjuk *Takashi T. Inamura* 2016-os cikkében [9]. Itt jegyezzük meg, hogy Nagaoka többször hivatkozik a kor ismert európai fizikusaira (*Balmer, Kayser, Runge, Rydberg, Hertz*), de *nem említi Planck nevét*, pedig ő három évvel azelőtt közzétette a kvantumos hő-sugárzás-elméletet (1900).

A Thomson-féle atommodell

Joseph John Thomson az elektron felfedezése (1897) után időszerűnek látja egy kvantitatív atommodell kidolgozását [10]. A Thomson-féle atommodell alapfeltevései közé tartozik, hogy az atom pozitív része nagyjából egyenletesen tölti ki az atom teljes térfogatát. Ez teszi lehetővé, hogy stabil elektrópályák alakuljanak ki. *Planckról és az energia kvantáltságáról ő sem tesz említést.* (A Thomson-modell részletesebb ismertetése a *Fizikai Szemle* 2021. július–augusztusi számában olvasható [11]).

Ad astra:

Nicholson klasszikus és kvantumos modellje

John William Nicholson, angol csillagász és matematikus, a portsmouth-i brit tudományos társaság (The British Association for the Advancement of Science, Portsmouth) 1911. őszi találkozásán beszámol arról a munkájáról, amellyel értelmezte a különböző kémiai elemek atomjainak összetételét és atomsúlyát [12]. A héliumot előbb fedezték fel a Nap spektrumában, mint a laboratóriumban; ez vezette Nicholson-t arra a gondolatra, hogy az égitestek spektrumának vizsgálatával új elemeket lehet felfedezni. Szerinte minden atom négy alapvető egységből, „protíl”-ből épül fel. Ezek néhány nagy tömegű pozitív részt és két, három, négy, illetve öt elektront tartalmaznak. A két-elektronos protíl könnyebb, mint a hidrogénatom, feltételezhetően nemes gáz; ez a *Coronium*, amely a

napkoronában található. A három-elektronos protíl a hidrogén. A négy-elektronos a *Nebulium* [13], amelynek spektruma a kozmikus ködökben, például az Orion-ködben található; az öt-elektronos pedig a *Protofluorin*. A szokatlan – és nagyrészt kihalt – kémiai elnevezések iránt érdeklődő olvasó bőséges gyűjteményt talál [14]-ben. A nebulium spektrumáról később kiderült, hogy kétszeresen ionizált oxigén- és nitrogénatom vonalairól van szó; a protofluorinnak tulajdonított vonalak pedig erősen ionizált vasatomokból származnak. Egy-elektronos protíl nem létezhet, mert a sugárzási veszteség miatt nem lehetne stabil.

A rövid szóbeli ismertetést egy részletesebb, de még mindig előzetesnek mondott folyóiratcikk követi [15]. Ebben, több elektron esetére, a sugárzási veszteségre vonatkozó kérdést azzal hárítja el, hogy a kör mentén egyenletesen elosztott, azonos gyorsulású elektronok gyorsulásvektorának eredője zérus, tehát nincs kisugárzás [15, 866. old.]:

– „...if n electrons are rotating at equal distances round the same circle, they each have an acceleration of the same amount towards the centre, and the vector sum of these accelerations is zero. This is Larmor's condition for the absence of radiation.”

Mérlegeli, hogy az atomban lévő pozitív töltés vajon milyen térbeli eloszlás esetén vezet helyes eredményre. A Thomson-féle egyenletes térfogati eloszlást csak mint ideiglenes, számítást megkönnyítő feltevésnek tekinti. Szerinte kis méretű és nagy tömegű pozitív részt kell feltételezni, mert meg van győződve arról, hogy *a tömeg kizárólag elektromos eredetű*:

$$m = \frac{2}{3} \frac{e^2}{a c^2},$$

ahol e a részecske töltése, a a sugara és c a fénysebesség [16, 165. old.]; tehát a kis sugárhoz nagy tömeg tartozik – és viszont.

Nagyon érdekes, ahogyan Nagaoka szaturnuszi rendszerére (*Saturnian system*) utal, mint amit Rutherford új életre keltett. Itt érdemes őt magát idézni [15, 866. old.]:

– “Evidently the difficulty is extreme on Sir J. J. Thomson's view of the atom, which, it must borne in mind, was only a provisional one, adopted mainly for purposes of mathematical simplicity. It is none the less extreme on Rutherford's more recent view, a revival of the suggestion of Nagaoka, of a simple Saturnian system in the atom, involving only a single positive nucleus.”

Próbálkozik egyenletes sűrűségű felületi eloszlással is, de az nem vezet használható eredményre.

Még a bevezető részben utal arra, hogy elméletének alapfeltevéseit a ködök és a napkorona spektrumának vizsgálata igazolja. A nebuláris spektrumokban, például az Orion-ködben találtak olyan vonalakat, amelyeket nem lehetett a már ismert hidrogén- vagy héliumspektrumhoz rendelni. Modellje és a Thomson-modell dinamikája alapján számításokat

végez az atom rezgési frekvenciáira. Az eredmények azt mutatják, hogy a nebuláris vonalak a *szabad nebuliumhoz* rendelhetők (*in uncompounded form*) [17, 64. old.]:

– "...it is possible to say that the element nebulium as defined is a probable source of the nebular lines."

A protofluorinra utaló vonalat nem talál a nebuláris spektrumokban, azonban a napkoronáéban valószínűsíthető volt [18], ezért további vizsgálatot tervez.

„Sir J. J. közbelép...”

Ez nem egy Rejtő-regény fejezetcíme, hanem egy fizikatörténeti jelentőségű esemény: 1912 tavaszán Thomson – éppen a klasszikus atommodell kidolgozója! – előadást tart az akadémián (Royal Institution), amelyben, Planck munkájára utalva, azt fejtegeti, hogy *a kvantum jelleg az átalakuló atom tulajdonsága, nem pedig az energiáé*. Egy későbbi közleményben ezt le is írja [19, 792. old.]:

– "...Planck's relation depends on the properties of the atom, the agent by which the energy is transformed, rather than upon the existence of a structure in the energy itself."

(Marx György találó hasonlata szerint: ahogy a hordóból kifolyó bort palackozzák: *kvantálják*.)

Feltehetően ez motiválja Nicholson [16, 171. old.], hogy amikor újra, részletesebb vizsgálat alá veszi a protofluorin spektrumát, akkor *figyelembe veszi Planck kvantumelméletét*. Számításaival előre jelez egy eddig még nem észlelt nebulium-vonalat, amelyet még ugyanebben az évben két obszervatórium is megfigyel. Elmélete számára ez a siker drámai megerősítést jelent. És ezzel fontos felismerésre jut: az ő modellatomjai, mint rezgő rendszerek, *ugyanolyan törvényszerűséget követnek, mint a Planck-féle oszcillátorok* [20]:

– "It is evident that the model atoms with which we deal have many of the essential characteristics of Planck's 'resonators'."

Ezt tudomásul véve, további munkája során történelmi jelentőségű szabályosságot fedez fel: *egy atom impulzusmomentuma a sugárzási átmenet során csak diszkrét értékekkel változhat* [20, 679. old.]:

– "...the angular momentum of an atom can only rise or fall by discrete amounts."

A folytatásban kiemeli, hogy ha az atom kvantumokban veszít energiát, akkor a sugárzás nem folytonos spektrumú, hanem éles vonalokból áll [21, 730. old.]:

– "If it loses energy by definite amounts, instead of in a continuous manner, it should show a series spectrum with lines corresponding to each of the stages."

W. M. Wilson nekrológja [22] szerint a kvantált impulzusmomentum-változás felismerése tekinthető Nicholson legjelentősebb tudományos eredményének. Megtudjuk a nekrológból azt is, hogy *ez az eredmény inspirálta tanítványát, Niels Bohrt*:

– "There is no doubt that this work inspired his pupil, Niels Bohr, to explore the consequences..."

Nicholson atomelméletéről a [16] közleményben található bőszéges tájékoztatást az érdeklődő olvasó. A nekrológ szerzőjétől pedig olvashatunk egy részletes életrajzi ismertetést is [23], amelyből itt csak egy momentumot emelünk ki – Nicholson tudományos kvalitásának jellemzésére: kétszer is elnyerte az Adams-díjat, 1913-ban és 1917-ben – amit Maxwell 1856-ban.

Az első Bohr-féle atommodell

Rutherford ösztönzésére Niels Bohr vállalkozik egy új atommodell megszerkesztésére [24]. Emlékeztetünk arra, hogy még *nincs Schrödinger-egyenlet* (1926); a 13 éves *Wolfgang Pauli* és a 12 éves *Werner Heisenberg* pedig még csak a gimnázium padját kopatja. A modell felépítésénél az egyetlen megkötést a *Planck-féle energiakvantálás* jelenti, amit Nicholson nyomán Bohr is bevezet. Egyébként azonban *az első Bohr modell csaknem klasszikus mini bolygórendszer*.

Bohr szembesül a klasszikus elektrodinamika alkalmazhatóságának korlátaival: sugárzásmentes elektronállapotok az atomban? A megoldást a Planck-féle kvantum sugárzáselmélet alkalmazása adja. Ennek alapján elfogadja, hogy az atomi kisugárzás nem folyamatosan, hanem *hν* energiaadagokban történik. Magyar szempontból nem érdektelen feljegyezni a kezdeti lépést (1913. február 7.) [16, 178. old.]:

– "In a letter to his friend G. Hevesy..., Bohr gave a full description of the foundations of his theory..."

Az új atommodellben minden sugárzásmentes elektronállapothoz egy τ kvantumszám tartozik, amely meghatározza az állapot tulajdonságait. Ezeket a tulajdonságokat Bohr a klasszikus, nem-relativisztikus mechanika alapján számítja ki ($v_{el} \ll c$), és a tapasztalt hidrogénatom-spektrummal jó egyezést talál. A W ionizációs energia a $\tau = 1$ értéknél a legnagyobb; ez a rendszer legstabilabb állapota. Tehát a Planck-féle kvantum sugárzáselmélet alkalmazásának hatására *a rendszer mechanikai leírása is kvantumossá vált*. A minibolygó-modellt a hidrogén atomra alkalmazva, az átmeneti frekvenciákra a

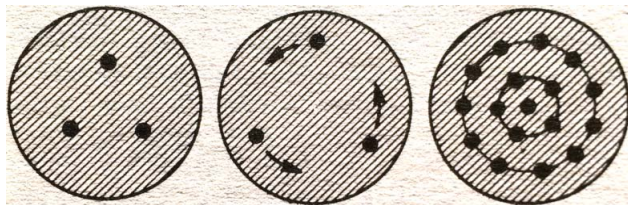
$$\nu = \frac{2\pi m e^4}{h^3} \left(\frac{1}{\tau_2^2} - \frac{1}{\tau_1^2} \right)$$

kifejezést kapja, a tapasztalattal (Balmer-sorozat) egyezésben. Ez egyúttal jóslás az akkor még nem mérhető ultrabolya és infravörös átmenetek frekvenciáira is.

Elvi fontosságú eredmény, hogy Bohr *észreveszi*, hogy a stacionárius pályák egy egyszerű feltételt teljesítenek: a mag körül keringő elektron M impulzusmomentuma egy univerzális állandó egész számú (τ) többszöröse:

$$M = \tau M_0,$$

ahol



1. ábra. A Thomson-féle atommodell [25, 326. old.].

$$M_0 = \frac{h}{2\pi}$$

– “...the angular momentum of the electron round the nucleus in a stationary state of the system is equal to an entire multiple of a universal value” [24, 15. old.].

Bohr ezzel megerősíti J. W. Nicholson korábbi észrevételét, mely szerint az atom impulzusmomentuma csak diszkrét értékeket vehet fel.

Több-elektronos rendszert vizsgálva feltételezi, hogy az elektronok egy kör kerülete mentén, egyenlő szögintervallumokkal helyezkednek el, és ezek együttes stabil mozgását vizsgálja. Az egyelektronos esethez hasonlóan itt is *azt kapja, hogy minden egyes elektron impulzusmomentuma $h/2\pi$!*

– “As for the case of a single electron we get that the the angular momentum of each of the electrons is equal to $h/2\pi$...” [24, 22. old.].

Amint növekszik az elektronok száma, fellépnek olyan konfigurációk, amelyekben az elektronok nem egyetlen gyűrűben rendeződnek el, 1. ábra [25, 326. old.], ez emlékeztet a Thomson-modellre.

Itt az egyetlen megkötés a Planck-féle energiakvantálásból eredő *impulzusmomentum-kvantálás*, amit a korábbi tapasztalatok alapján – és Nicholson nyomán – a sugárzásmentes stacionárius állapot feltételül Bohr most már *posztulátumként előír!* Ehhez járul még az a követelmény, hogy stabil állapotban *valamennyi elektron a legalacsonyabb energiájú állapotban* ($\tau = 1$) legyen [24, 23. old.]; hiszen még nincs Pauli-elv!

Következő munkájában kitér arra, hogy ha az elektron sebessége nem elhanyagolható a fénysebességhez képest, akkor az impulzusmomentum-követelményből nem következik pontosan az energia körfrekvenciával való arányossága [26, 479. old.]; azonban megszűnik ez a probléma, ha az m elektrontömeg helyett

$$\frac{m}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

értéket használ.

Részletes táblázatban közli a könnyű atomok elektronrendeződését [26, 497. old.]. A táblázatot szemlélve érthető, hogy Bohrnak is feltűnik az a periodicitás, amely az elemek kémiai tulajdonságaiban érvényesül. Érdekes ezt a Bohr-féle táblázatot összehasonlítani a modern kvantummechanikai számítások eredményével, 2. ábra [27, 280. old.].

Itt érdemes idézni Bohr cikkének utolsó, összefoglaló bekezdését:

1 (1)	1	H	1				
2 (2)	2	He	2				
3 (2, 1)	3	Li	2	1			
4 (2, 2)	4	Be	2	2			
5 (2, 3)	5	B	2	2	1		
6 (2, 4)	6	C	2	2	2		
7 (4, 3)	7	N	2	2	3		
8 (4, 2, 2)	8	O	2	2	4		
9 (4, 4, 1)	9	F	2	2	5		
10 (8, 2)	10	Ne	2	2	6		
11 (8, 2, 1)	11	Na	2	2	6	1	
12 (8, 2, 2)	12	Mg	2	2	6	2	
13 (8, 2, 3)	13	Al	2	2	6	2	1
14 (8, 2, 4)	14	Si	2	2	6	2	2
15 (8, 4, 3)	15	P	2	2	6	2	3
16 (8, 4, 2, 2)	16	S	2	2	6	2	4
17 (8, 4, 4, 1)	17	Cl	2	2	6	2	5

2. ábra. Elektronelrendeződések: balra az első Bohr-modell szerint [26, 497. old.]; jobbra mai ismereteink szerint [27, 280. old.].

– “In the present paper it has been attempted to show that the application of Planck’s theory of radiation to Rutherford’s atom-model through the introduction of the hypothesis of the universal constancy of the angular momentum of the bound electrons, leads to results which seem to be in agreement with experiments.”

Mester és tanítványa

Különösen érdekes az az időszak, amikor a sikeres Nicholson és a négy évvel fiatalabb, a témával éppen csak foglalkozni kezdő Niels Bohr párhuzamosan dolgozik [16, 173. old.]. Figyelik egymás munkáját, tapintatos kritikai megjegyzéseket tesznek; próbálják megfogalmazni, hogy megközelítésük miben egyezik és miben különbözik [16, 184. old.].

– “After 1913 the interaction between Bohr and Nicholson was no longer one-way. It was now Nicholson’s turn to come to terms with another’s ideas, seemingly so close to his own at times, and at other times so at odds.”

Gyökeres a különbség a kisugárzás mechanizmusának elképzelésében. Nicholson klasszikus felfogása szerint a sugárzás frekvenciája az atomokban mozgó töltések keringési frekvenciájával egyezik meg. Ezzel ellentétben Bohr a sugárzásmentes állapotok között történő átmenet $\varepsilon = h\nu$ energiának megfelelő ν frekvenciákkal jut a kísérletekből kapott Balmer-formulára. A formulában szereplő Rydberg-állandó az ismert e , m és h értékekkel kifejezhető; nincs szükség illesztendő paraméterre. Ez elméletének nagy sikere.

Epilógus

Az 1913-at követő években egy ideig még megoszlik a fizikus és csillagász közösségek véleménye a kétféle atommodellről. 1913-ban *Jeans* a British Association egy ülésén kedvezően nyilatkozik Bohr elméletéről.

W. M. Hicks viszont 1914-ben az ausztráliai találkón rámutat, hogy a Nicholson által számított frekvenciák az első megnyugtató elméleti leírást adják a csillagászok által mért spektrumokról [16, 183. old.]. Ezen az ülésen Nicholson is részt vesz, és magabiztosan így nyilatkozik Bohr elméletéről:

– “...the balance of experimental evidence is against Bohr’s theory at present.”

A Nicholson által továbbra is alkalmazott „protil”-kép egyre kevésbé tartható. Ezt azonban ő nem hajlandó tudomásul venni. A negatív jelzések alapján úgy érzi, hogy nem akarják elismerni munkájának jelentőségét. Valamiféle ellene irányuló összeesküvésre gyanakszik, és ez végül is teljes testi-lelki leromláshoz, depresszióhoz vezet. 1930-ban megválnak az egyetemtől, hamarosan kórházba kerül, és 25 év szenvedés után, mindenkitől elfeledve, a warnefordi kórházban meghal [14, 480. old.]:

– “Nicholson had unwisely dragged in nonexistent primary substances on which he based part of his theoretical work. Consequently, his scientific credibility was greatly diminished and his academic career, to use an astronomical term, was as brief as a meteor.

– ...he began to nurse a growing resentment toward the founding fathers of quantum mechanics. He maintained that he had been the victim of a conspiracy for not having received adequate recognition for his contributions to physics, and he pointed the finger at the most influential people in the discipline. He found consolation at the university tavern so much so that, by 1930, he was no longer able to accomplish his academic duties, and he lost his job. Nicholson fell into a profound state of depression and alcoholism; he passed the last 25 years of his life, practically forgotten, in the hospital at Warneford.”

Kiváló tudós volt, Bohrra gyakorolt hatása fizika-történeti jelentőségű. Jobb sorsot érdemelt volna.

Az atommag töltése

Az új atommodellhez tudni kell, mekkora a központi mag elektromos töltése. Rutherford [2] cikkében azt írja, hogy egy atom elektronjainak száma közel fele az atomsúlynak: $A/2$. Itt *kémiai atomsúly* értendő, az $A = N + Z$ tömegszám csak a neutron 1932-es felfedezése után lett értelmezhető. Ugyanebben az évben – a méltatlanul elfeledett – *Antonius van den Broek*, holland amatőr fizikus azt állítja, hogy az elemek lehetséges száma egyenlő a lehetséges atomi töltések számával, vagyis minden lehetséges atomi töltéshez egy lehetséges elem tartozik [28]:

– “...the number of possible elements is equal to the number of possible permanent charges of each sign per atom, or to each possible permanent charge (of both signs) per atom belongs a possible element.”

1913-ban a Manchesteri Egyetemen – Rutherford javaslatára – *Johannes Wilhelm Geiger* és az egyetemi hallgató *Ernest Marsden* részletes mérésorozatot végez a Rutherford-formula kísérleti ellenőrzésére

[29]. A bevezető részben megjegyzik, hogy bár a vékony fóliákon történő szóródás többsége leírható sok, egymás után következő ütközés összegeként, de körülbelül $1/8000$ része semmiképpen nem magyarázható többszörös ütközéssel. A szóródás szögeloszlása és a beeső α -részek sebességétől való függése megfelel a Rutherford-modell által jósoltak. Megjegyzik végül, hogy az atom központi töltése az atomsúly felével egyenlő ($A/2$); ez az eredmény azonban körülbelül $\pm 20\%$ bizonytalanságú.

Rutherford és *Nuttall* [30] gázokon (H, He, CH₄, CO₂, SH₂) végez α -szórás-kísérletet. Ezt nehezebb végrehajtani, mint szilárd fóliákon; azonban az elérhető pontosságon belül azt kapják, hogy ha a Geiger–Marsden-kísérlet alapján elfogadják, hogy a szénatom elektromos töltése $n_C = 6$ egység, akkor a hidrogéné $n_H = 1$, a héliumé pedig $n_{He} = 2$. Ez utóbbit támasztja alá az a korábbi tapasztalat is, hogy az α -részek eltéréseiből $|n| = 2$ adódott. Ebben a közleményben Rutherford már határozottan *pozitív töltésű atommagról* beszél; kezdetben ugyanis még mindkét szereposztást lehetségesnek tartotta [2]. A cikk végén Niels Bohr munkájára [24] hívja fel a figyelmet:

– “This simple structure for hydrogen and helium atoms has been assumed by Bohr in a recent interesting paper on the constitution of atoms, and has been shown by him to yield very promising results.”

Van den Broek egy újabb rövid közleményben [31] azt állítja, hogy jobb az egyezés a Rutherford-féle szórás-kísérlet és az elmélet között, ha a mag töltése nem $A/2$ -vel, hanem M -mel arányos, ahol M az adott elem Mengyelejev-rendszerben elfoglalt helyét jelöli. Részletesebben tárgyalja ugyanezt a kérdést egy későbbi cikkében [32], ahol megemlíti, hogy *Moseley* mérései szerint a karakterisztikus röntgensugárzás sem A -tól, hanem M -tól függ. Egy évvel később Van den Broek ismét foglalkozik a magban lévő töltések M számával [33]. Pontokba foglalja ma is érvényes állításait:

– “ $M =$

- (1) the charge on the nucleus on Rutherford’s theory;
- (2) the number of electrons surrounding that nucleus;
- (3) the atomic number of an element in Mendeléeff’s series.”

Rutherford és munkatársai az α -szórás-kísérletekből eddig arra következtettek, hogy a mag töltése közelítőleg a (kémiai) atomsúly fele [34, 496. old.]:

– “We have seen that from an examination of the scattering of α -particles by matter, it has been found that the positive charge on the nucleus is approximately equal to $\frac{1}{2}Ae$, when A is the atomic weight and e the unit charge.”

De rögtön azt is megemlíti, hogy van den Broek javaslata szerint a mag töltése és így az atomi elektronok száma, a periódusos rendszer szerinti sorszám kellene, hogy legyen:

– “...an interesting suggestion by van den Broek that the number of units of charge on the nucleus, and consequently the number of external electrons, may be equal to the number of the elements when arranged in order of increasing atomic weight.”

Ez utóbbi javaslat később nagyon hasznosnak bizonyult, mert Bohr már ezt fogadta el modelljének kidolgozásához:

– “This view has been taken by Bohr in his theory of the constitution of simple atoms and molecules.”

A kérdés fontossága miatt a háború után Chadwick újabb, pontosabb α -szórás kísérleteket végez platina-, ezüst- és rézfóliákon. Az eredményül kapott magtöltések értéke [35, 745. old.]: Pt: 77,4 (78) [98], Ag: 46,3 (47) [54], Cu: 29,3 (29) [32].

Az első szám a Chadwick által mért érték; kerek zárójelben a Van den Broek és Moseley javaslata szerinti atomszám, míg a szögletes zárójelben a megfelelő fél-atomsúly ($A/2$) egészre kerekített értéke. Chadwicknek ez a precíz ($\pm 1\%$) mérése eldöntötte a kérdést – Van den Broek javaslatát igazolva.

Irodalom

1. E. Rutherford: The Scattering of the α and β Rays and the Structure of the Atom. *Manchester Mem.* 55 (1911, March, 7th) 18.
2. E. Rutherford: The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom. *Phil. Mag. Ser. 6*, 21 (1911, April/May?) 669.
3. J. C. Maxwell: On the Stability of the motion of Saturn's Rings. *Collected Papers*, I (1856) 288.
4. H. Nagaoka: Motion of particles in an ideal atom illustrating the line and band spectra and the phenomena of radioactivity. *Proc. Tokyo Math. Phys. Soc.* 2 (1904) 92.
5. H. Nagaoka: Kinetics of a System of Particles illustrating the Line and the Band Spectrum and the Phenomena of Radioactivity. *Phil. Mag. Ser. 6*, 7/41 (1904) 445.
6. H. Nagaoka: On a Dynamical System illustrating the Spectrum Lines and the Phenomena of Radio-activity. *Nature* 69 (1904, Feb. 25.) 392.
7. H. Nagaoka: A Dynamical System illustrating the Spectrum Lines. *Nature* 70 (1904, Jun. 9.) 124.
8. H. Nagaoka: Über ein die Linien- und Bandenspektren, sowie die Erscheinungen der Radioaktivität veranschaulichendes dynamisches System. *Phys. Zeitsch.* 5 (1904) 517.
9. T. T. Inamura: Nagaoka's atomic model and hyperfine interactions. *Proc. Jap. Acad.* B92 (2016) 121.
10. J. J. Thomson: On the Structure of the Atom: an Investigation of the Stability and Periods of the Oscillation of a number of Corpuscles arranged at equal intervals around the Circumference of a Circle; with Application of the results to the Theory of Atomic Structure. *Phil. Mag. Ser. 6*, 7 (1904) 237.
11. Angeli István: Út a nagyszögű α -szóráshoz. *Fizikai Szemle* 71/7–8 (2021) 190. ([10] magyar nyelvű ismertetése.)
12. J. W. Nicholson: On the Atomic Structure of the Elements, with Theoretical Determinations of their Atomic Weights. *Rep. 80th Meeting British Assoc. Advancement. Sci. Portsmouth* (1911, Aug. 31. – Sept. 7.) 320.
13. M. L. Huggins: Teach me how to name the ... light. *Astrophys. J.* 8 (1898) 54.
14. M. Fontani, et al.: *The Lost Elements: the Periodic Table's Shadow side*. Oxford University Press, 2015.
15. J. W. Nicholson: *A Structural Theory of the Chemical Elements*. *Phil. Mag. Ser. 6*, 22 (1911) 864.
16. R. McCormach: The Atomic Theory of John William Nicholson. *Archive for History of Exact Sciences* 3/2 (1966. Aug. 25.) 160.
17. J. W. Nicholson: The Spectrum of Nebulium. *Monthly Not. Roy. Astr. Soc.* 72 (1912) 49.
18. J. W. Nicholson: The Constitution of the Solar Corona. *Monthly Not. Roy. Astr. Soc.* 72 (1912) 139.
19. J. J. Thomson: On the Structure of the Atom. *Phil. Mag. Ser. 6*, 26 (1913, Sept.) 792.
20. J. W. Nicholson: The Constitution of the Solar Corona. II. *Monthly Not. Roy. Astr. Soc.* 72 (1912) 677.
21. J. W. Nicholson: The Constitution of the Solar Corona. III. *Monthly Not. Roy. Astr. Soc.* 72 (1912) 729.
22. W. M. Wilson: Dr. J. W. Nicholson, F.R.S., Obituary. *Nature* 176 (1955) 1051.
23. W. M. Wilson: John William Nicholson, 1881–1955. *Biogr. Mem. Roy. Soc.* 2 (1956) 209.
24. N. Bohr: On the Constitution of Atoms and Molecules. I. *Phil. Mag. Ser. 6*, 26 (1913, July) 1.
25. Simonyi Károly: *A fizika kultúrtörténete*. Gondolat Kiadó, Budapest, 1978.
26. N. Bohr: On the Constitution of Atoms and Molecules. Part II. – Systems containing only a Single Nucleus. *Phil. Mag. Ser. 6*, 26 (1913, July) 476.
27. Marx György: *Kvantummechanika*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1964.
28. A. Van den Broek: The number of Possible Elements and Mendeleeff's "Cubic" Periodic system. *Nature* 87 (1911, July. 20) 78.
29. H. Geiger, E. Marsden: The Laws of Deflexion of a Particles through Large Angles. *Phil. Mag. Ser. 6*, 25 (1913) 604.
30. E. Rutherford, J. M. Nuttall: Scattering of a Particles by Gases. *Phil. Mag. Ser. 6*, 26 (1913) 702.
31. A. Van den Broek: Intra-atomic Charge. *Nature* 92 (1913, Nov. 27) 372.
32. A. Van den Broek: Intra-atomic Charge and the Structure of the Atom. *Nature* 92 (1913, Dec. 25) 476.
33. A. Van den Broek: Atomic Models and Regions of Intra-atomic Electrons. *Nature* 93 (1914, March) 7.
34. E. Rutherford: The Structure of the Atom. *Phil. Mag.* 27 (1914, March) 488.
35. J. Chadwick: The Charge on the Atomic Nucleus and the Law of Force. *Phil. Mag.* 40 (1920) 734.

SZÁMÍTUNK RÁD, LÉGY



A FIZIKA BARÁTJA!

Támogasd adód 1%-ával az Eötvös Társulatot!

Adószámunk: 19815644-2-43