

ÚT A NAGYSZÖGŰ ALFA-SZÓRÁSHOZ

– Hogyan készült a kutatóárok a kincskereséshez?

Angeli István

Debreceni Egyetem, Kísérleti Fizikai Tanszék

Ernest Rutherford a Geiger–Marsden-féle kísérlet eredményének, az α -részek nagyszögű szóródásának magyarázatára alkotta meg modelljét. De miért éppen ezt a jelenséget vizsgálta a két szorgos munkatárs? Hiszen a történet kicsit olyan, mintha a kincskereső előre tudná, hol kell ásni. Hasonlóan más felfedezések előzményeihez, ez az út sem buktatók, mellékágak nélküli, és egyben nagyon tanulságos: kis eltéréseknek is érdemes következetes, alapos munkával utána járni!

A titokzatos, új sugárzás nyomában

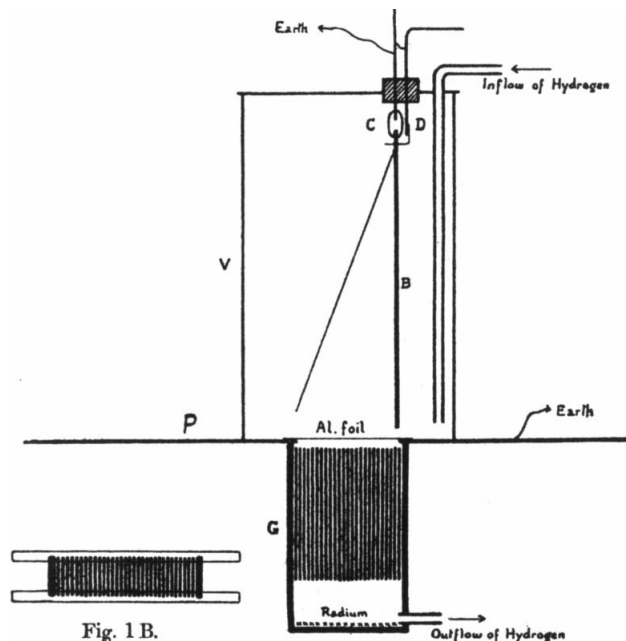
A 20. század elején az 1896-ban felfedezett radioaktivitás (Henry Becquerel, Maria Salomea Skłodowska-Curie, Pierre Curie, Nobel-díj: 1903) volt a fizikusok érdeklődésének gyújtópontjában. Rutherford is ezt az új jelenséget vizsgálta. Ez az ifjú montreali professzor Kanadából küldi cikkeit Angliába, a *Philosophical Magazine*-nak. 1903-ban arról számol be [1], hogy a tóriumot és rádiumot követő emanációk további új radioaktivitás forrásai. Aktivitásukat sem a hőmérséklet, sem drasztikus kémiai kezelés nem befolyásolja. Nem ért egyet Becquerellel, a nála 19 évvel idősebb és már nagy tekintélynek örvendő francia tudóssal, aki szerint az emanációk pozitív ionokból állnak [2], hiszen akkor elektromos térben kirakódnának a katódra, márpedig ez nem történik meg: az eredeti térfogatban akármeddig megmaradnak. Rutherfordnak később is van több – szakszerű és udvarias – pengeváltása Becquerellel. E közleményében nevezte el a radioaktív sugárzások két fajtáját [1, 113. old.]:

„One type is not appreciably deviable by a magnetic or an electric field, and is very easily absorbed in matter. These will be called the α rays. The others are deviable and more penetrating in character, and will be called the β rays. In addition I have shown that thorium and radium

Köszönet illeti Zolnai Dóra könyvtárost az évszázados források beszerzésében nyújtott segítségével.



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 magsugárábrázolókat közölt az *Atomic Data and Nuclear Data* folyóiratban.



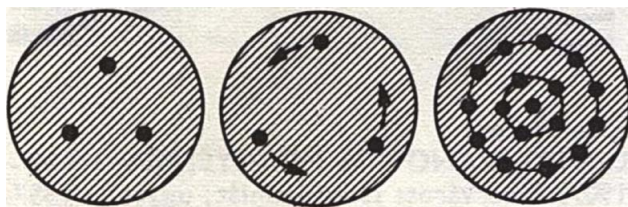
1. ábra. Rutherford első mérőberendezése az α -sugarak mágneses térben történő eltérésének kimutatására [3, 179. old.].

emit some rays nondeviable in character, but of very great penetrating power.”

A γ -sugárzásnak csak egy hónappal későbbi közleményében ad nevet [3, 177. old.]. A továbbiakban az α -sugarak természetét kívánja tisztázni, mágneses és elektromos térben mutatott viselkedés vizsgálatával. Ez azonban nem egyszerű, mert az eltérés – az akkor rendelkezésre álló eszközökkel – rendkívül kicsi [3, 178. old.]:

„The magnetic deviation, even in a strong magnetic field, is so small that very special methods are necessary to detect and measure it.”

Első kísérleti berendezése az 1. ábrán látható. A berendezés alján szétterített vékony rádiumrétegből kiinduló α -sugarak, a G résrendszeren – és egy 0,00034 cm vastag Al-fólián – áthaladva, felfelé irányuló párhuzamos nyalábot alkotnak. A V kamrában egy aranylemezes elektroszkóp helyezkedik el. A sugarak által okozott ionizáció mértékét az aranylemez mozgási sebességével határozza meg, ezt mikroszkóppal méri. Hidrogéngáz-áramoltatással gondoskodik arról, hogy a kamrában ne gyűljön fel a Ra-ból kiszabaduló emanáció, ami zavaró háttérionizációt okozna. A mágneses tér az ábrára merőleges. A mérési eredmények igazolják várakozását. Az elektroszkóp kisülési sebessége mágneses tér nélkül: 8,33 V/perc és a mágneses teret bekapcsolva: 1,72 V/perc.



2. ábra. A Thomson-féle atommodell [8, 326. old.].

Ez azt mutatja, hogy az α -sugarak a mágneses térben eltérülnek, tehát elektromos töltéssel rendelkeznek. Különböző télerősségekhez különböző kisülési sebesség tartozik, ebből az α -pályák R görbületi sugarára következtet, és még az e/m értékre is kap egy közelítő becslést. Azt is valószínűnek látja, hogy a vizsgált α -sugarak különböző sebességgel mozgó részecskékből állnak. Megoldandó feladatnak tartja e részecskék által hordozott töltés meghatározását.

Becquerel elismeri Rutherford eredményét, de a módszert nem tartja elég megbízhatónak; a maga részéről egy másik, fotografikus detektáláson alapuló eljárást alkalmaz [4]. Folytatja a Ra α -sugárzására vonatkozó vizsgálatait, amelyek során forrásként néhány darabka rádiumsót helyez el egy ólomtömbben [5, 1517. old.]. Erre nagyon vékony Al-fóliát helyez, hogy a fény ne jusson el a fényérzékeny lemezre – feltehetően a Cserenkov-sugárzásról van szó. Azt tapasztalja, hogy az RH szorzat – tehát vm/e – a pálya mentén növekszik [5, 1519. old.]. Mivel a sebesség növekedése nehezen elfogadható, tehát vagy az m tömeg nő, vagy az e töltés csökken [5, 1520. old.]:

„On peut au contraire envisager les hypothèses d'une augmentation de la masse m , ou d'une diminution de la charge e .”

Ami a töltés csökkenését illeti, közel jár a megoldáshoz, a *töltéscserélő* folyamatok feltételezéséhez, de később mégis a *tömeg növekedése* mellett dönt [6, 486. old.].

A későbbi fejlemények szempontjából fontos körülmény, hogy 1904-ben *J. J. Thomson* részletes számításokat végez pozitív töltésű gömbben körpályán mozgó negatív részecskék által alkotott rendszer (2. ábra) tulajdonságaira és stabilitási feltételeire [7]. Eredményeit alkalmazza atomszerkezeti modell megfogalmazására, elemek kémiai tulajdonságainak értelmezésére, molekulák képződésére és még a radioaktív α -bomlás magyarázatára is [8]. Tehát a Thomson-modell sokkal több, mint a közismert *mazsolás pudding* ábra. Ezért az alábbi fejezetben kivonatossan ismertetjük Thomson eredeti cikkét [7].

A Thomson-modell

Ez a fejezet az 1904-es 29 oldalas Thomson-cikk [7] kivonatos ismertetése. Az eredeti mű jelentékeny matematikai apparátussal dolgozik [7, 238–253. old.], azonban a mai olvasó számára lényeges tartalom ennek mellőzésével is követhető.

Egyenletes sűrűségű pozitív gömbön belül helyezzünk el a középponttól a távolságra egy negatív részecskét. Erre a részecskére a középpont felé irányuló, a -val arányos vonzóerő fog hatni. Hogy a részecske megmaradjon az eredeti távolságban, egy kifelé irányuló taszító erőre van szükség. Ezt létrehozhatja egy másik negatív részecske a középpont felől, vagy/és a vizsgált részecske körpályán történő, megfelelő sebességű mozgása. A feladat megoldásához Thomson a *klasszikus elektromosságban és a mechanika törvényeit* használta fel.

A feladatot több részecskére kiterjesztve, kérdezhetjük: mi a feltétele annak, hogy a sokrészecske-rendszer stabil legyen. Szimmetriameggondolások alapján gömbhéjak menti elrendezésre gondolhatunk. Thomson is lehetségesnek tartotta ezt, de rámutatott, hogy számítási könnyebbséget jelent, ha csak két dimenzióra szorítkozik, tehát héjak helyett gyűrűk mentén osztja el a részecskéket egyenletesen, n részecske esetén $2\pi/n$ szögintervallumonként [7, 237. old.].

„The analytical and geometrical difficulties of the problem of the distribution of the corpuscles when they are arranged in shells are much greater than when they are arranged in rings, and I have not as yet succeeded in getting a general solution. We can see, however, that the same kind of properties will be associated with the shells as with the rings; and as our solution of the latter case enables us to give definite results, I shall confine myself to this case.” [7, 255. old.]

Azt is vizsgálta, milyen erő hat egy olyan részecskére, amely kissé eltér az egyensúlyi helyzetétől [7, 238. old.].

A részecskék számát fokozatosan növelve azt találta [7, 253. old.], hogy *egyetlen központi részecske elegendő a gyűrű stabilizálásához, amíg a gyűrűt alkotó részecskék száma legfeljebb nyolc*. Ennél több gyűrűrészecske esetén azonban már egyetlen központi részecske nem elég, $n = 9$ -nél már kettő kell; ezek a középpont két átellenes oldalán helyezkednek el, illetve keringenek; $n = 10$ esetén három belső részecske helyezkedik el egy egyenlő oldalú háromszög csúcsain. A háromszög síkja nem feltétlenül esik egybe a gyűrű síkjával, de mindig párhuzamos vele. *A számítások azt mutatták, hogy a külső részecskék n számának növelésével rohamosan növekedik a stabilitáshoz szükséges belső részecskeszám* [7, 254. old.]:

n	5	6	7	8	9	10	15	20	30
p	0	1	1	1	2	3	15	39	101

Ha $p > 1$, akkor ezek nem lehetnek együtt a középpontban, hanem *kezd kialakulni egy belső gyűrű*, és ez így folytatódik. Ha például összesen 19 részecske van, akkor 12 alkot egy külső gyűrűt, 6 egy belsőt, egy részecske pedig a középpontban helyezkedik el. A gyűrűk síkja merőleges a keringés tengelyére. A különböző gyűrűk síkjai nem feltétlenül esnek egybe. A keringés biztosítja, hogy a gyűrű akkor is stabil, ha a részecskék a gyűrű síkjára merőlegesen eltávolodnak [7, 255. old.].

Alkalmazás az atomok szerkezetére [7, 255. old.]

Azt találjuk, hogy az ilyen gyűrűkből álló rendszerek sok tekintetben hasonlóak a kémiai elemek atomjaihoz, nevezetesen: *a tulajdonságok nagyon hasonlóan függenek az atomsúlytól, mint ahogyan azt a periódusos rendszer leírja*. Tegyük fel, hogy az összesen N darab e töltésű részecske a lehető legegyszerűbben tölti ki a gyűrűket; ezen azt értjük, hogy minden gyűrűben a lehető legtöbb (n) részecskét helyezük el [7, 256. old.].

Az így kiszámított rendszert a következő táblázat mutatja [7, 257. old.]:

N	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5
n	20	19	18	17	16	16	15	13	12	10	8	5
n	16	16	15	14	13	12	10	9	7	5	2	–
n	13	12	11	10	8	6	5	3	1	–	–	–
n	8	7	5	4	3	1	–	–	–	–	–	–
n	3	1	1	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Vizsgáljuk meg a kapcsolatot ezen eredmények és a kémiai elemek atomjainak tulajdonságai között [7, 258. old.]. Az $N=60$ csoportjai – a legkülső 20-as gyűrűtől eltekintve – azonosak az $N=40$ csoportjaival. Látható, hogy *az atomok különböző csoportjaikat sorozatokba tudjuk osztani* úgy, hogy a sorozat minden tagja leszámaztatható az előző tagból oly módon, hogy egy részecskegyűrűt adunk hozzá [7, 259. old.]. Ez olyan, mint *Mengyelejev* táblázata.

Kiszámította azokat a sorozatokat is, amelyekben a legkülső gyűrű 20 részecskét tartalmaz; ezekben a teljes N részecskeszám: $59 \leq N \leq 67$ [7, 258. old.]:

N	59	60	61	62	63	64	65	66	67
n	20	20	20	20	20	20	20	20	20
n	16	16	16	17	17	17	17	17	17
n	13	13	13	13	13	13	14	14	15
n	8	8	9	9	10	10	10	10	10
n	2	3	3	3	3	4	4	5	5

$N=59$ -nél a belső gyűrűk még éppen csak elegendők a külső gyűrű stabilizálásához [7, 260. old.], a csoport pontosan az instabilitás szélén áll, ezért könnyen veszíthet el részecskét, tehát pozitív lesz. Ekkor viszont a környezetében lévő negatív részecskékre vonzást gyakorol. Ez a rendszer tehát nem lehet tartósan töltött [7, 261. old.]. Egy ilyen atom *sem elektropozitív, sem elektronegatív*. A 60 részecskét tartalmazó csoport a leginkább elektropozitív a sorozatban. Egy részecske elvesztésével még mindig stabil rendszer marad, úgy viselkedik, mint egy 1-vegyértékű elektropozitív elem atomja. Hasonlóan, a 61-es és 62-es csoport kettő, illetve három részecskét tud elveszíteni, tehát 2-, illetve 3-vegyértékű elektropozitív elem atomjaként viselkedik.

Tekintsük most a sorozat utolsó csoportja, a 67-es tulajdonságait! Ha ez felvesz egy részecskét, 21-es külső gyűrűt alakít ki, ami nagyon instabil, könnyen újra elveszíti a részecskét. Tehát – hasonlóan az 59-hez – ez sem lehet permanensen töltött; úgy viselkedik, *mint egy vegyérték nélküli elem atomja*. A 66-os a sor leginkább elektronegatív tagja, de csak egyetlen negatív részecskét tud megtartani. Ez a *66-os csoport tehát úgy viselkedik, mint egy 1-vegyértékű elem atomja* [7, 262. old.]. Hasonló gondolatmenettel belátható, hogy a 65-ös 2-, a 64-es csoport pedig 3-vegyértékű elem atomjaként viselkedik. A tulajdonságok e sorozata nagyon hasonló ahhoz, amit az elemek atomjai esetében megfigyeltek. Az elemek sorozatai:

He	Li	Be	B	C	N	O	F	Ne
Ne	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar

Mindegyik sorozat első és utolsó eleme vegyérték nélküli, a második egyvegyértékű elektropozitív elem, az utolsó előtti egyvegyértékű elektronegatív elem, a harmadik kétvegyértékű elektropozitív elem stb.

Ha elektronegatív atomok elektropozitívokkal keverednek, az elektronegatívok részecskét vesznek fel, tehát negatívok lesznek és vonzani fogják a pozitív töltésűeket, és így *vegyület alakul ki*.

Másodlagos részecskecsoportok az atomon belül [7, 263. old.]

Ha a nehezebb elemek atomjait könnyebb elemek atomjaiból – *szub-atomokból* – összetettnek tekintjük [7, 264. old.], akkor jogosan feltételezhető, hogy *a nehezebb atomok részecskéi másodlagos csoportokba, szub-atomokba rendezhetők*, ezen csoportok mindegyike egységként viselkedik.

„If we regard the atoms of the heavier elements as produced by the coalescence of lighter atoms, it is reasonable to suppose that the corpuscles in the heavier atoms may be arranged in secondary groups or *sub-atoms* [ezen és a többi idézetben is kiemelés tőlem, A.I.] ...”

Ha a részecskék ilyen csomókba tömörülnek, elérhető a stabilitás, ha ezek a csomók egyenletesen gyűrűbe rendeződnek – középen kisebb számú részecskével. Vegyünk példának egy 30 részecskéből álló gyűrűt, ha ezeket egyenletesen rendezzük el, akkor 101 részecskére van szükség középen, hogy a gyűrűt stabilizálja. Ha viszont a 30 részecskét tíz hármass csomóba rendezzük, akkor csak $3 \times 3 = 9$ belső részecskére lenne szükség, hogy a rendszer stabil legyen [7, 265. old.].

Radioaktív elemek atomjainak szerkezete [7, 265. old.]

Vannak részecskekerendszerek, amelyek stabilak, ha a forgási sebesség nagyobb egy bizonyos értéknél, és instabilak, ha a sebesség ezen értéknél kisebb. Példa [7, 249. old.]: négy részecske egy négyzet négy csúcán stabil lehet, ha a négyzet a síkban egy bizonyos sebességnél gyorsabban forog, azonban e sebesség

alatt a rendszer instabil, és tetraéder alakzatba – csúcsain a részecskékkel – rendeződik át.

Tekintsük most egy olyan atom tulajdonságait, amelynek részecskéi eredetileg a kritikus sebességnél gyorsabban forogtak. A mozgó részecskék által kibocsátott sugárzás következtében a sebesség – nagyon lassan – csökken, hosszú idő után eléri a kritikus értéket, a részecskék szétrobbannak és messzire eltávolodnak. A kinetikus energia elegendő lehet arra, hogy a rendszer elhagyja az atomot és – mint a rádium esetében – az atom egy része kilöködik. Mivel a sugárzási energiaveszteség nagyon lassú, az atom élettartama nagyon hosszú. *Minden ilyen rendszer, amelynek stabilitásához forgás kell, a fokozatos sugárzási energiaveszteség következtében radioaktív tulajdonságokkal rendelkezik.*

„We have taken the case of the four corpuscles as the type of a system which, like a top, requires for its stability a certain amount of rotation. Any system possessing this property would, in consequence of the gradual dissipation of energy by radiation, give to the atom containing it radioactive properties similar to those conferred by the four corpuscles.”



Angliában különös érdeklődést keltettek Rutherford azon eredményei, amelyekkel kimutatta, hogy a sok, látszólag különálló aktivitás néhány nagy sorozatba rendezhető. Ezekért a vizsgálatokért kapja meg 1904-ben a Royal Society rangos kitüntetését, a Baker-érmet. A kitüntetés átvétele alkalmából tartott előadás anyaga nyomtatott formában is megjelenik [9], egy rövid összefoglalót a *Nature* is közöl [10]. Az 52 oldalas közlemény addigi munkásságának átfogó ismertetése, ezért néhány részletet érdemes kiemelni.

Matematikai leírást ad az egymáshoz kapcsolódó aktivitásokra, a radioaktív bomlási sorokra. Ábrán és táblázatban is közli a megállapított kapcsolatokat a különböző radioaktív elemek között. Az uránt és a rádiumot még külön sorozatban helyezi el, bár kifejezi azt a gyanúját, hogy közös sorozatba tartoznak. Erre azonban még nincs kísérleti bizonyítéka.

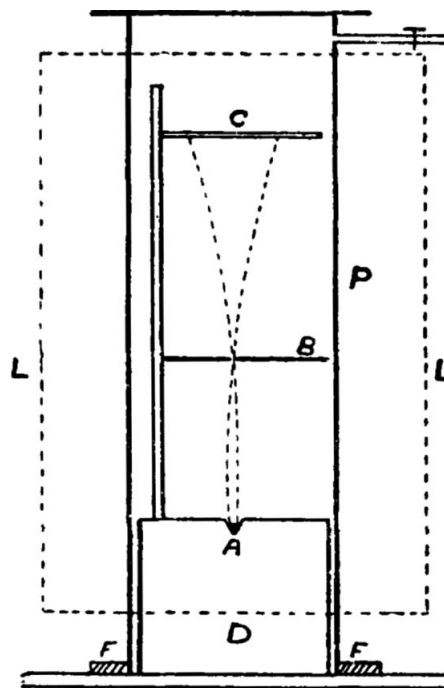
Becslést ad a radioaktív α -bomlásból származó energiára, és felhívja a figyelmet, hogy ez nagyságrendekkel nagyobb az ismert kémiai reakció-energiáknál, érdemes őrtenézni [9, 210. old.]:

„The amount of energy liberated, weight for weight, is over 100,000 times greater than has previously been observed in any chemical reaction.”

Gyanítja – de bizonyítania még nem sikerül –, hogy az α -részek valójában elektromos töltésű héliumatomok (*atommagot* akkor még nem ismertek!).

„The α particles, in all probability, consist of helium atoms expelled at the successive stages of the disintegration.”

De még gondja van a töltés kísérleti meghatározásával, ennek okát egy feltételezett *másodlagos sugárzás* kompenzáló hatásának tulajdonítja [9, 212. old.]:



3. ábra. Rutherford tökéletesített mérőberendezése az α -sugarak mágneses térben történő eltérésének mérésére [11, 166. old.].

„The failure to detect the charge carried by the α rays is probably due in part to a strong secondary ionization set up by the α rays.”

Ez a feltételezés később is felmerül.

Új technika, új eredmények

Rutherford következő munkája során még részletesebb vizsgálat alá veszi az α -sugárzást [11]. Ismeri Bragg és Kleeman kísérletének eredményét, amelyben – nagyon vékony rádium-bromid réteget alkalmazva – megmutatták, hogy négy, különböző sebességű α -sugár lép ki. A vastag Ra-preparátumokban a fékezés és önabszorpció révén még ez az energiaeloszlás is elmosódik, ezért vastag rádiumpreparátumból nem várható monoenergiás α -sugárnyaláb. Ezen akar változtatni: későbbi kísérleteiben vékony és monoenergiás forrást alkalmaz.

Új kísérleti berendezését – amely egy 1903-ban Becquerel által alkalmazott elrendezés tökéletesített változata – a 3. ábra mutatja [11, 166. old.]. Egy 1 cm hosszú, 0,5 mm átmérőjű drótdarabra rádiumemanációból képződő RaC-t csapat ki (^{214}Bi , a rádium bomlási sorának negyedik tagja); ennek α -sugárzása egyetlen energiával rendelkezik. A réteg vékonysága miatt nincs önabszorpció, sem fékezés. Ezt a drótdarabot a berendezés alján lévő A vályúban helyezi el. E felett 2 cm-re lévő B fémlapon egy keskeny rés alakítja ki azt a vékony α -nyalábot, amely a további 5 cm-re elhelyezett C fényérzékeny lemezre esik.

Az egész berendezés egy vákuumra szívható hengeres tartályban helyezkedik el. Az elrendezésre mérőleges, közel homogén mágneses teret egy elektro-

mágnes két pólusával alakítja ki, a szaggatott vonallal jelzett I térfogatban.

A nagy légrés miatt a mágneses tér értéke csak mérsékelt volt, ezért a nyaláb elhajlása kicsi, néhány milliméter nagyságrendű. Ezt oly módon kétszerezi meg, hogy nem a térmentes helyzettől méri az eltérést, hanem a mágnesező áram irányát változtatja meg. Ezért az előhívott fényérzékeny lemezen látható két csík távolságának fele adja az eltérést, ebből számítja az R görbületi sugarat. A 4. ábra (egy későbbi közleményből [12]) annak eredményét mutatja, hogy a forrásnál vékony csillámlemezzel kettéválasztott nyaláb felső részén nyolc vékony alumíniumfóliát helyezett el; az alsó rész pedig fedetlen. Jól látható, hogy a fóliák által lefékezett részecskék jobban, körülbelül 4 mm távolságra térülnek el.

Az

$$e v H = \frac{m v^2}{R}$$

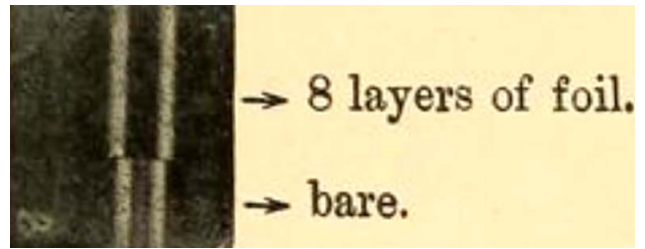
egyenletből a

$$H R = \frac{m v}{e}$$

összefüggést kapjuk, H és R ismeretében a jobb oldal értéke is ismert. Rutherford az e/m és a v szétválasztására elektrosztatikus eltérítést kívánt volna alkalmazni, de technikai nehézségek miatt e helyett megelégedett a sebesség – hőtermelésből kapható – becslésével. Az eredmények egyre inkább alátámasztották azt a feltevést, hogy az α -sugarak tulajdonképpen héliumatomok, amelyek a kibocsátáskor valami módon töltést és sebességet kapnak a bomló magtól.

Rutherfordnak azonban volt egy nyugtalanító megfigyelése is, amikor a különböző vastagságú alumíniumrétegeken áthaladt α -részek sebességváltozását vizsgálta. Azok a részecskék, amelyek sebessége az eredeti érték körülbelül $2/3$ részére csökkent, már nem hagytak nyomot a fényképező lemezen. Ugyanilyen csökkenést tapasztalt a gázionizációban és a szcintillációnál is. Ezt a jelenséget valamiféle, eddig ismeretlen *másodlagos hatásnak* tulajdonítja. Nem ért egyet Becquerellel, aki a szcintilláció megszűnését a kristály – α -bombázás miatti – sérülésével magyarázza. A vitába belépett W. L. Bragg és Kleeman is. (Ma feltételezhetjük, hogy itt is a sebesség csökkenésével járó *töltésváltozásról* van szó: a kétszeres pozitív töltésű He^{++} -ionok lefékeződve felvesznek egy elektront. Az így képződött egyszeres töltésű He^{+} -ion már sokkal kevésbé ionizál. Ezek a *töltéscsere-folyamatok* ma lényeges szerepet játszanak a nagyenergiájú nehézion-gyorsítóknak.)

Ezzel csaknem azonos időben Becquerel – vastag rádiumpreparátummal és levegőben mérve – nem állandó, hanem a pálya mentén fokozatosan növekvő R görbületi sugarat, tehát folyamatosan növekvő HR értéket tapasztal. Ő ezt úgy értelmezi, hogy az α -részecske a pálya mentén a levegővel érintkezve, abból



4. ábra. Az α -sugárnyalábok által hagyott nyomok a fényképező lemezen. A felső részen az alumíniumfóliák fékzése miatt a sebesség kisebb, ezért az eltérés nagyobb [12, 1. ábra].

valamilyen anyagrészeket szed fel, és ez az m tömeg megnövekedésére vezet [6, 486. old.]. Rutherford szerint azonban nem ez a helyes magyarázat, hanem az, hogy a heterogén energiájú rádiumforrás, a vastag réteg önabszorpciója, valamint a levegő fékzése nagyon széles α -energia-spektrumot hoz létre, és végül ezért adódik a nagy görbületi sugár. Becquerel azonban – kísérleti eredményeire hivatkozva – vitatja Rutherford fenti álláspontját [6, 488. old.]:

„Cette nouvelle expérience, confirmant les conclusions que j'avais déduites de mes premières observations, conduit à rejeter les interprétations de MM. Bragg, Kleeman et Rutherford.”

Rutherfordnak végre sikerül kísérlettel igazolnia azt a régi sejtését, hogy az α -sugárzás pozitív töltésű részecskékből áll, és azt is, hogy e részecskék már keletkezésük pillanatában töltéssel rendelkeznek, nem a környező anyagi közegben ionizálódnak [13, 200. old.]. A mérést zavaró elektronáramot mágneses térrel téríti el. Azonban még mindig nem sikerül tisztázni, hogy ezen elektronok is a radioaktív bomlás során keletkeznek-e, vagy az α -sugárzás hatására a kísérleti berendezés elektródáiból lépnek ki. Ezt a jelenséget *másodlagos sugárzásnak* nevezi [13, 201. old.]:

„It seems probable that these electrons constitute a type of secondary radiation which results from the impact of the α particles on matter.”

Első 1906-os cikke is [12] a rádium α -sugárzásának tulajdonságaival foglalkozik, különös tekintettel a Becquerellel vitatott mérésekre. Átvesszi Becquerel technikai ötletét: a keskeny α -nyalábot egy csillámlemezzel megfelezi, és e két részen különböző elnyelő rétegeken áthaladt sugárnyaláb mágneses térben történő eltérülését vizsgálja. Így készült – a már fentebb bemutatott – fénykép vákuumban(!): a felső rész nyolc Al-fólia-takarással, az alsó rész pedig takarás nélkül, 4. ábra [12, 1. ábra]. Jól látható, hogy a fóliák által lefékezett nyalábot a mágneses tér jobban eltéríti.

Egy kis anomália, amely történelmet ír

Mivel Becquerel minden mérését levegőben végezte, Rutherford ellenőrzésképpen meg akarja vizsgálni, vajon milyen hatással van a levegő a felvételekre. Ezért egy olyan kísérletet végez el, ahol a nyaláb felső

része levegőn, alsó része vákuumban halad át [12]. A bonyolult kísérlet végrehajtása több lépésben történt, a részletes leírást mellőzzük. Az 5. ábrán nemcsak az látható, hogy a felső részen a csíkok távolsága kissé nagyobb, mint az alsó részen – tehát a levegőben a nyaláb kissé fékeződik –, hanem az is, hogy a felső csíkok kevésbé élesek!

Ez azt jelenti, hogy az α -sugárzás nemcsak eltérül a mágneses tér hatására, hanem *szóródik* is a levegőn történő áthaladásakor [12, 176. old.].

És itt lép be a zseniális nyomozó megérzése: Rutherford ezt az alig észlelhető effektust olyan lényegesnek tartja, hogy a cikk összefoglalójának (5) pontjában külön meg is fogalmazza:

„(5) There is evidence of a distinct scattering of the rays from radium C in their passage through air.”

Ez a megfigyelés volt az atommag felfedezésének kiindulópontja, a „kutatóárok” kezdete!

A következő feladat: meg kell vizsgálni, hogy szilárd fékező közegben is fellép-e a szóródás?

Experiments are in progress to see whether this scattering also occurs in the passage of the rays through a solid substance.” [12, 174. old.]

Csillámlemezrel fedi be az *S* rés alsó felét; a felső részen pedig a részecskék vákuumban, szabadon mozogva eltérülnek a mágneses térben (bal oldalt a 6. ábrán) tér nélkül egyenes vonalban terjedve egyetlen vonalat adnak (6. ábrán jobbra). Most a szóródás hatása sokkal jobban kivehető, mint a teljes térfogatban elosztott levegő esetén, a felvétel önmagáért beszél, 6. ábra [14, 3B ábra].

A berendezés geometriai adatai alapján a szóródás szögére is becslést tud végezni; eredményül azt kapja, hogy egyes α -részek a csillámfólián történt áthaladásakor 2° -os eltérést szenvednek [14, 144. old.]:

„Some of the α rays in passing through the mica have been deflected from their course through an angle of about 2° .”

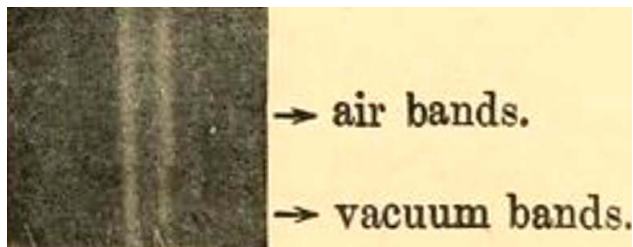
Ez a kis szög – a Thomson-modell alapján – már nagy eltérésnek számított! És gondolatban máris továbblép [14, 145. old.]:

„It is possible that some were deflected through a considerably greater angle; but, if so, the atoms of matter must be the seat of very intense electrical forces.”

Közjáték

A Rutherford által megfigyelt két új jelenség – a *másodlagos sugárzás* és az α -részek *szóródása* – másik érdeklődését is felkeltette, váltakozó következtetésekkel.

Prágában *B. Kučera* és *B. Mašek* vizsgálatokat folytattak a másodlagos sugárzás kimutatására. Arra következtetésre jutottak, hogy másodlagos sugárzás nincs, hanem az α -részek a levegőben vagy fémfóliában szóródást szenvednek [15]:



5. ábra. Az első – levegőben történt – α -szóródást kimutató felvétel [12, 3. ábra].

„Die α -Strahlen beim Durchgang durch eine Luftschicht eine diffuse Zerstreuung erleiden (scattering of the α -rays).”

1907 januárjában W. H. Bragg előadást tart egy ausztrál tudományos társaság előtt. Itt kifejti, hogy sem a Rutherford-féle *másodlagos sugárzást*, sem a Kučera-féle α -szórást nem szükséges feltételezni, hanem csak alkalmazni kell már ismerős törvényszerűségeket [16].

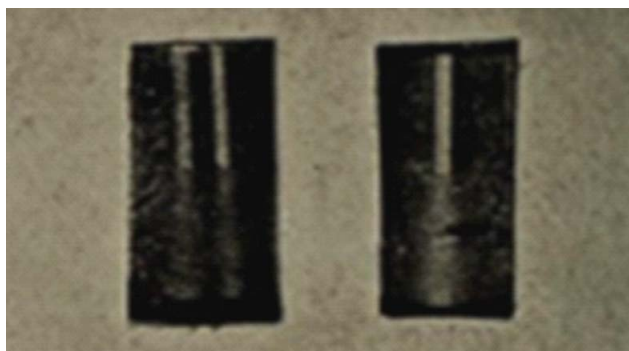
Edgar Meyer méréseket és számításait is végzett α -sugarak elnyelődésére két különböző anyagú, egymás mögött elhelyezett abszorbensfóliával, annak vizsgálatára, hogy a teljes elnyelés mennyiben függ a fóliák sorrendjétől (például $\text{Al} \rightarrow \text{Sn}$, majd $\text{Sn} \rightarrow \text{Al}$). Arra a következtetésre jutott, hogy az eredmények értelmezéséhez sem a másodlagos sugárzás, sem az α -szórás feltételezésére nincs szükség [17]:

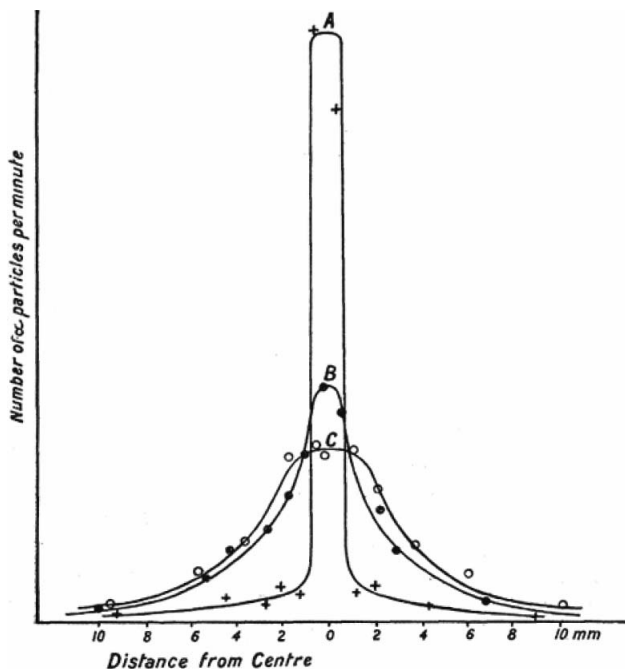
„Nach einer älteren Anschauung von Rutherford sollten an der Hinterseite der ersten absorbierenden Schicht Sekundärstrahlen auftreten. Kučera und Mašek glauben die erscheinung auf eine diffuse Zerstreuung der α -Strahlen in den Metallen zurückführen zu können. Nach meiner Auffassung braucht man keine dieser Hypothesen anzunehmen.”

Lise Meitner 1907-ben tudományos továbbképzésre Berlinbe megy, elsősorban azért, hogy *Max Planck* előadásait hallgassa. De beszámol kísérleti munkájáról is [18], és arra a következtetésre jut, hogy az α -szóródás valóban létrejön:

„Es ergibt sich demnach, dass die von Kučera und Mašek angenommene Zerstreuung der α -Strahlen beim Durchgang durch Metalle wirklich vorhanden ist.”

6. ábra. Vákuumban haladó (felső rész), illetve csillámlemezrel szóró (alsó rész) α -nyalábot mutató felvétel kétirányú mágneses térben (bal oldali ábra), illetve tér nélkül (jobb oldali) [14, 3B ábra].





7. ábra. Vákuumban (A), illetve aranyfóliákon történt α -szóródást mutató ábra. B görbe: egy fólia, C görbe: két fólia alkalmazásával [19, 176. old.].

Út a megoldás felé

Rutherfordot 1907-ben meghívják Angliába, a manchesteri Victoria Egyetemre. A már itt dolgozó *Hans Geiger* asszisztens nagy segítséget jelent későbbi kutatásai során. Rutherford javaslatára 1908-ban Geiger részletes vizsgálat alá veszi az α -szóródást [19]. A radioaktív forrásból származó α -nyalábot vákuumban, vékony résen engedi át egy szcintillációs ernyőre, amelyen mikroszkóppal számolja a látótérbe eső felvillanások számát. Ez a módszer sokkal érzékenyebb és pontosabb – de fárasztóbb – a Rutherford által eredetileg használt fényképező lemeznél. Elvégzi a mérést úgy is, hogy a forrást különböző vastagságú aranyfóliákkal fedi. A kísérlet során Geiger a 7. ábra szerinti eloszlásokat kapja [19, 176. old.].

A vízszintes tengely a mikroszkóp helyzetét mutatja a réssel szembeni középponthez képest. A rés és az ernyő távolsága 54 cm; tehát még a legnagyobb, 10 mm-es eltérés is nagyon kis szórési szögnek felel meg. Az A görbe a vákuumban felvett eloszlást mutatja. A B görbe egy vékony aranyfóliával fedett réssel készült, míg a C görbe pontjainak felvételénél két aranyfólia volt a rés felett. A cikk záró bekezdésének egy figyelemre méltó mondata [19, 177. old.]:

„It will be noticed that some of the particles after passing through the very thin leaves were deflected through quite an appreciable angle.”

Éppen ezért, hogy a – csak gyanított – nagyszögű szórást is detektálni lehessen, Geiger 1909-ben egy felsőéves hallgató, *E. Marsden* bevonásával olyan új kísérleti berendezést épít, amellyel még a 90° -nál nagyobb szögben szóródott α -részek is észlelhetők, és ezzel az

eszközzel végeznek újabb méréseket. Az eredmények egyre érdekesebbek [20, 498. old.]:

„It seems surprising that some of the α -particles can be turned within a layer of 6×10^{-5} cm gold through an angle of 90° and even more.”

Tehát a *visszaszóródás* most már nem pusztán gyanú, hanem kísérleti tény! Rutherford erre így emlékezik vissza [21, 38. old.]:

„It was quite the most incredible event that happened to me in my life. It was almost as incredible as if you had fired a 15-inch shell at a piece of tissue paper and it came back and hit you.”

Ez a hihetetlen esemény foglalkoztatta Rutherfordot 1910–11 telén. A fejleményről Geiger számolt be *Chadwick*hez írt levelében:

„One day, obviously in the best spirits, he came into my room and told me that he now knew what the atom looked like and how the large deflections were to be understood. On the very same day I began an experiment to test the relation expected between the number of particles and the angle of scattering.”

1910-ben Geiger egy újabb kísérletsorozatot végez [22], amelynek során különböző aranyréteg-vastagságokhoz tartozó szóródási szögek gyakoriságát veszi fel, 8. ábra. De még mindig csak *többszörös szórás* feltételezéséről van szó, tehát arról, hogy a kísérletileg mért nagy szögek több, egymás után következő, kisebb szögű esemény összegződéséből alakulnak ki. De most Geiger az új mérési eredmények, valamint a korábbi, Marsdennel végzett mérésük adatai alapján becslést végez, és arra a következtetésre jut, hogy *nagyon kicsi a valószínűsége annak, hogy ez a szórás sok kis eltérés összege legyen*. Egy sejtelmes mondattal zárja a fejezetet:

„It does not appear profitable at present to discuss the assumption which might be made to account for this difference.”

Talán sejtí, de nem meri kimondani, hogy *egyetlen ütközésben történhet ilyen nagy eltérés!*

8. ábra. Különböző vastagságú aranyfóliákon szórt α -részek szögeloszlása [22, 497. old.].

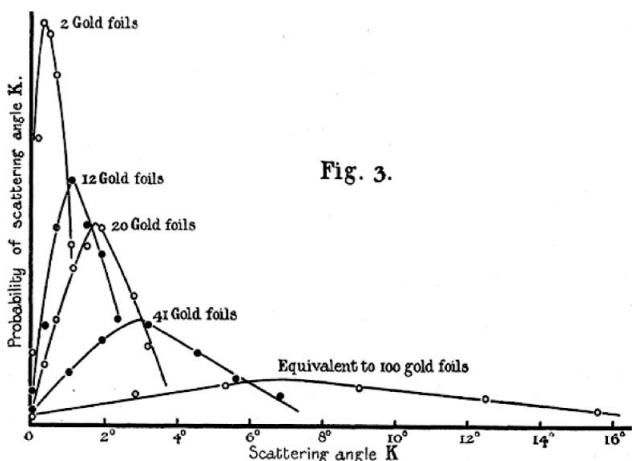
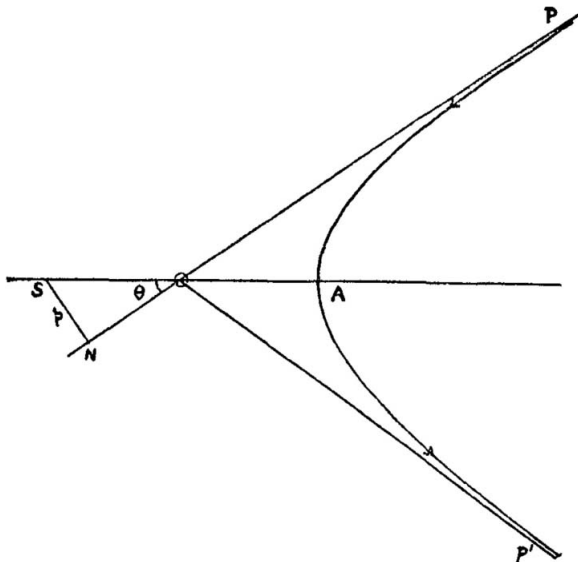


Fig. 3.



9. ábra. Rutherford 1911-es *Philosophical Magazine*-beli cikkének 1. ábrája, amelyen megjelenik a pontszerű mag által hiperbolapályára kényszerített α -részecske [25, 672. old.].

Egy új, más világ!

De Geiger helyett kimondja Rutherford: 1911 februárjában a Manchesteri Irodalmi és Tudományos Társaság (The Manchester Literary & Philosophical Society) ülésén Rutherford megteszi történelmi bejelentését [23, 19. old.]:

„It seems certain that these large deviations of the particle are produced by *a single atomic encounter*.”

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.”

Modellje alapján kvantitatív előrejelzést ad a szórási hatáskeresztmetszet szögfüggésére, hogy tudniillik az arányos az

$$\frac{1}{\sin^4(\theta/2)}$$

értékkel. Szükségesnek tartja még hozzátenni, hogy a vázolt atommodell megmagyarázza a kísérleti eredményeket, függetlenül attól, hogy a központi töltés pozitív vagy negatív [23, 20. old.]:

„The main results of large scattering are independent of whether the central charge is positive or negative.”

Ugyanezen alkalommal, közvetlenül Rutherford előadása után számol be Geiger arról a mérésorozatról, amelynek során a 30° és 150° szögtartományban el-

lenőrizte a Rutherford-formula érvényességét egy aranyfólián történő szórással, szcintillációs detektálással, és hibahatáron belül egyezést talált a számított és mért értékek között [24].

1911 áprilisában Rutherford beküldi a részletes – húsz oldalas – cikket a *Philosophical Magazine*-nak¹ [25]. A bevezetőben kitér arra is, hogy a Thomson-féle atommodell [7] által jósolt kisszögű szórás nehézségeire már *Crowther* elektronszórási kísérlete is rávilágított [26]: ha a Thomson modell igaz, akkor a kísérleti szórás értelmezéséhez háromszor annyi elektronnak kell lennie az atomban, mint ami az atomsúlya. (Az eredeti Crowther-cikk tanulmányozva pedig azt látjuk, hogy ez még csak egy alsó határ: a két vizsgált modell közül a jobbnak elfogadott érték.)

Ebben a cikkében Rutherford 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) [25, 671. old.]. Ez tehát egyúttal felső határ a magsugárra. Közleménye 1. ábráján berajzolja a hiperbolapályát, a magtól számított ütközési paraméterrel – akárcsak egy mai tankönyv ábráját látnánk (9. ábra).

Epilógus

Rutherford 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 [25, 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.”

Az eddigi kísérleti anyag alapján mindenesetre úgy véli, hogy a nagyszögű szórást a teljes központi töltés egésze okozza és nem az összetevők:

„It is simplest to suppose that the *large single deflexions are due to the central charge as a whole*, and not to its constituents.”

És itt már egy másik téma kezdődik: az atommag mérete és szerkezete.

Irodalom

1. E. Rutherford: Excited Radioactivity and the Method of its Transmission. *Phil. Mag.* 5 (1903) 95.
2. H. Becquerel: Sur la radioactivité de luranium. *Comptes Rendus* 133 (1901) 977.
3. E. Rutherford: The Magnetic and Electric Deviation of easily absorbed Rays from Radium *Phil. Mag.* 5 (1903) 177.
4. H. Becquerel: Sur la déviabilité magnétique et la nature de certains rayons émis par le radium et le polonium. *Comptes Rendus* 136/1 (1903) 199.
5. H. Becquerel: Sur une propriété des rayons α du radium. *Comptes Rendus*, 136 (1903) 1517.

¹Ernest Rutherford történelmi cikke megnézhető-letölthető a http://fizikaiszemle.hu/extra/Angeli2106/E_Rutherford_PhilMag_21_669_1911.pdf helyről.

6. H. Becquerel: Sur quelques propriétés des rayons α du radium. *Comptes Rendus* 11 (1905) 485.
7. 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.* 7 (1904) 237.
8. Simonyi K.: *A fizika kultúrtörténete*. Gondolat Kiadó, Budapest, (1978).
9. E. Rutherford: The Succession of Changes in Radioactive Bodies. Bakerian Lecture. *Phil. Trans. Roy. Soc. A204* (1904) 169.
10. E. Rutherford: The Succession of Changes in Radioactive Bodies. *Nature* 70 (1904) 161.
11. E. Rutherford: Some Properties of the α -Rays from Radium. *Phil. Mag.* 10 (1905) 163.
12. E. Rutherford: Some Properties of the α -Rays from Radium. *Phil. Mag.* 11 (1906) 166.
13. E. Rutherford: Charge carried by the α and β Rays of Radium. *Phil. Mag.* 10 (1905) 193.
14. E. Rutherford: Retardation of the α -Particle from Radium in passing through Matter. *Phil. Mag.* 12 (1906) 134.
15. B. Kučera, B. Mašek: Über die Strahlung des Radiotellurs III. Die Sekundärstrahlung der α -Strahlen. *Physikalische Zeitschr.* 7 (1906) 650.
16. W. H. Bragg: The Influence of the Velocity of the α particle upon the Stopping Power of the Substance through which it passes. *Phil. Mag.* 13 (1907) 507.
17. E. Meyer: Die Absorption der α -Strahlen in Metallen. *Physikalische Zeitschr.* 8 (1907) 425.
18. L. Meitner: Über die Zerstreung der α -Strahlen. *Physikalische Zeitschr.* 8 (1907) 489.
19. H. Geiger: On the Scattering of α -Particles in Matter. *Proc. Roy. Soc.* 81 (1908) 174.
20. H. Geiger, E. Marsden: On a Diffuse Reflection of the α -Particles. *Proc. Roy. Soc.* 82 (1909) 495.
21. W. E. Burcham: *Nuclear Physics. An Introduction*. 2nd Ed. Longman (1973).
22. H. Geiger: The Scattering of the α -Particles by Matter. *Proc. Roy. Soc.* 83 (1910) 492.
23. E. Rutherford: The Scattering of the α and β Rays and the Structure of the Atom. *Manchester Mem.* 55 (1911) 18.
24. H. Geiger: The Large Scattering of the α Particles. *Manchester Mem.* 55 (1911) 20.
25. E. Rutherford: The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom. *Phil. Mag.* 21 (1911) 669.
26. J. A. Crowther: On the Scattering of Homogeneous β -Rays and the Number of Electrons in the Atom. *Proc. Roy. Soc.* 84 (1910) 226.

A FIZIKA TANÍTÁSA

SZABADULÓSZOBA A FIZIKAÓRÁN

– tanteremben és online

Nógrádi Zsófia

ELTE Radnóti Miklós Gyakorló Általános Iskola
és Gyakorló Gimnázium

Sokszor hallani, hogy a pedagógusok hétköznapi tapasztalataikat is beleszővik a tanításba. Ha ezt halljuk, elsősorban a mindennapi életből vett feladatokra, alkalmazásokra, eszközökre gondolunk, de ennél jóval többről van szó. Pár éve ismerkedtem meg a szabadulósobák világával, ami olyannyira magával ragadott, hogy gyakorló tanárként úgy döntöttem, ezt az élményt a diákjaimmal is megosztom.

Hazánkban a szabadulósobák, a szórakoztatóipar egy új ágának számítanak, hiszen az első 2011-ben nyitotta meg kapuit. A játék jelentősége az, hogy adott idő alatt logikai, ügyességi feladatokat kell elvégezni, hogy kijussunk egy bezárt szobából, vagy megoldjunk egy rejtélyt. Az idő sürgetése, a feladatok

érdekessége, a rejtély felderítése okozta izgalom serkenti a feladatmegoldók hatékonyságát.

A szabadulósobák fejlesztik a kreatív, sokoldalú gondolkodást, és a különböző dolgok közti összefüggések keresését szorgalmazzák, így jelentős fejlesztő tulajdonságokkal rendelkeznek a szórakozás mellett.

A nemzetközi irodalomban a szabadulósobák használatának ötlete a tanításban mindössze 9 éve jelent meg *Hoellwarth, Moelter* írásában [1]. A magyar nyelvű oktatásban cikkeivel *Vörös Alpár* kolozsvári tanár hívta fel rá a figyelmet [2, 3]. Egészen más témakörökben az elmúlt tanévben 8., 9. és 10. évfolyamon tartottam 5 ilyen foglalkozást (45 perces terjedelemben). Az alábbiakban ezekkel kapcsolatos tapasztalataimról számolok be.

Pedagógiai jelentőségei

A fentiekben túl jelentősen támogatja az oktatásban egyre nagyobb helyet kapó gamifikációt,¹ amelynek hatékonyságáról és pozitív hozadékairól többen szá-

¹Játékelemek felhasználása az oktatásban, vagy más munkafolyamatok során.



Nógrádi Zsófia az ELTE Radnóti Miklós Gyakorló Általános Iskola és Gyakorló Gimnázium matematika–fizika szakos tanára. Az ELTE-n 2020-ban végzett okleveles középiskolai matematika- és fizikatanárszakra, valamint fizikus diplomát szerzett informatika specializációval.