

Dr. Lente Gábor

Sugárzó bizmut

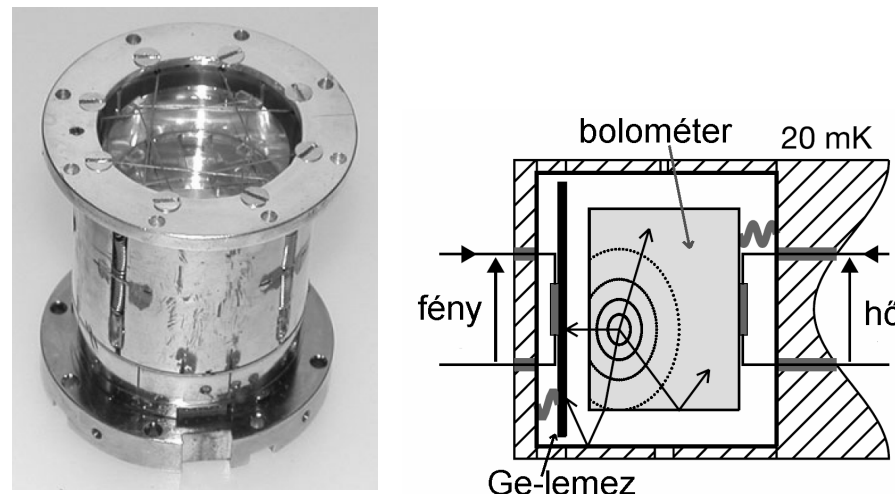
A tudomány hosszú ideig a bizmutnak a természetben előforduló egyetlen, 209-es izotópját tartotta a legnagyobb tömegszámú stabil atommagnak. 2003-ban ez a kitüntetett cím azonban az ólom 208-ra szállt át, mert a jelenlegi csúcstechnológiát képviselő műszerekkel sikerült kimutatni, hogy a ^{209}Bi valójában nagyon lassú radioaktív alfa-bomlás megy át.¹ A detektálás fő nehézsége az volt, hogy a bomlások nagyon ritkák, ezért a hagyományos módszerekkel nem mutathatók ki. A siker kulcsa egy újonnan készített eszköz, a szcintillációs bolométer volt. Ez két, egy évszázadnál is régebben ismert eszközt egyesít.

A szcintillációs detektorokat radioaktív részecskék kimutatására használják. Néhány szilárd anyagban a töltéssel rendelkező, nagy energiájú részecskék elnyelődése apró felvillanásokat okoz. A felvillanások megszámlálásával a radioaktív sugárzás intenzitása megbecsülhető. Ilyen elven működött Ernest Rutherford (1871-1934) híres kísérletében az aranyfólián áthaladó alfa-részecskék kimutatására használt cink-szulfid-erényő.

A bolométer elektromágneses sugárzás energiájának mérésére alkalmas eszköz, Samuel Pierpont Langley (1834-1906) csillagász találta fel. Működésének lényege, hogy egy abszolút nulla fok közelébe hűtött szilárd testben (az abszorberben) az elnyelődő sugárzás által okozott hőmérsékletemelkedést mérik. Természetesen ez csak egy nagyon költséges hűtőrendszer üzemeltetésével lehetséges, ezért a legtöbb esetben a bolométert ritkán használják, és akkor is csak olyan hullámhossztartományú (200 μm – 1 mm) sugárzás intenzitásának mérésére, amelyre nem ismeretes érzékenyebb detektor.

E két eszközt egyesítették mintegy 20 éve nagyon ritka radioaktív bomlások tanulmányozására. A ^{209}Bi alfa-bomlásának kimutatását az a felismerés tette lehetővé, hogy a $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ kettős oxid kristályai jól szcintillálnak, és bolométeranyagok is alkalmasok. Egy ilyen bolométer

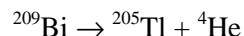
¹ P. de Marcillac, N. Coron, G. Dambier, J. Leblanc, J. P. Moalic *Nature* **2003**, 422, 876.



1. ábra A bizmut-209 radioaktivitásának kimutatására használt szcintillációs bolométer fényképe és elvi sémája

fényképét és elvi sémáját mutatja be az 1. ábra. Az eszköz átmérője és magassága egyaránt 20 mm, s egy fényvisszaverő ezüstbevonattal ellátott kamrában van, amelyet egy 0,020 K hőmérsékletű speciális hűtőbe helyeznek. Az elvi ábrán bal oldalon lévő, 25 mm átmérőjű és 0,10 mm vastag Ge-lemezben a ráeső fény fotoáramot kelt, így segítségével a felvillanásokat észlelni lehet. A jobb oldalon lévő, speciálisan adalékolt Ge-darab ellenállásán keresztül a hőmérsékletre lehet következtetni. Így aztán az eszközzel a benne elnyelődő ionizáló részecskék számát és energiáját is meg lehet határozni. A szcintillációs bolométert minden külső hatástól a lehető legjobban el kell szigetelni, hogy a természetes háttérsugárzás a lehető legkevésbé zavarja a méréseket. A ^{209}Bi a kristály anyagában van, ezért radioaktív bomlásai magában a kristályban történnek, és a szcintillációs detektálás nagy hatékonysága biztosítja azt is, hogy egyetlen egy bizmutatom sem bomolhat el észrevétlenül. A kísérlet során azt tapasztalták, hogy kb. öt nap alatt több tucat, külső hatásokkal nem értelmezhető bomlás történt, amelyeknél az ionizáló részecske energiája 503 fJ ($5,03 \times 10^{-13}$ J) volt.

Hogyan lehet ellenőrizni, hogy ez lehet a Bi-209 alfa-bomlásának következménye? Tömegspektrométerrel egyes izotópok relatív atomtömegét igen nagy pontossággal meg lehet határozni: a ^{209}Bi -é 208,980374, a ^{205}Tl -é 204,974401, a ^4He -é pedig 4,00260324. Ha a Bi-209 valóban alfa-bomlásra megy át, akkor ennek egyenlete:



A keletkező ^{205}Tl és ^4He tömegének összege 208,9770042, vagyis kisebb, mint a kiindulási ^{209}Bi tömege. A különbséget ($\Delta m = 0,003370$) tömeghiánynak nevezik, és az Einstein-féle tömeg-energia ekvivalenciaelv segítségével kiszámolható belőle, hogy mennyi energia szabadult fel:

$$\Delta E = \Delta mc^2 = \frac{3,37 \times 10^{-6} \text{ kg/mol}}{6,02 \times 10^{-6} \text{ mol}^{-1}} (3,00 \times 10^8 \text{ m/s})^2 = \underline{503 \text{ fJ}}$$

Vagyis a várt bomláshoz tartozó energiafelszabadulás éppen megegyezik a kísérletileg tapasztalttal. A ^{209}Bi felezési idejét is ki lehetett számolni a mért adatok alapján. A 45,7 g tömegű $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ bolométerben 100 óra alatt 41 bomlást regisztráltak. A kristályban lévő Bi-209 atomok száma:

$$n_{\text{Bi}} = 4 \times \frac{45,7 \text{ g}}{1245,74 \text{ g/mol}} (6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}) = 8,84 \times 10^{22}$$

A bomlási állandó ilyen körülmények között kiszámolható az elbomlott atomok hányada és az eltelt idő osztásával:

$$\lambda = \frac{41}{8,84 \times 10^{22} \times 100 \text{ h}} = 4,6 \times 10^{-24} \text{ h}^{-1}$$

A felezési idő pedig:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{4,6 \times 10^{-24} \text{ h}^{-1}} = 1,5 \times 10^{23} \text{ h} = 1,7 \times 10^{19} \text{ év}$$

A francia kutatócsoport készített egy másik, 91,2 g tömegű szcintillációs bolométert is. Ebben 114 óra alatt 77 bomlást detektáltak. Az összes adatot együtt kiértékelve a ^{209}Bi felezési idejére $(1,9 \pm 0,02) \times 10^{19}$ év adódott. Ez a felezési idő a világegyetem ma ismert koránál kilenc nagyságrenddel nagyobb, vagyis annak egymilliárdszorosa. Azt gondolhatnánk, hogy hosszabbat már elvileg is lehetetlen mérni. Azonban ez sem teljesen így van. Az 1. táblázat a ma ismert, kivételesen hosszú (10^{15} évnél nagyobb) felezési idejű izotópokat tünteti fel. Látható, hogy a ^{128}Te a csúcstartó, felezési ideje még kb. 5 nagyságrenddel nagyobb, mint a ^{209}Bi -é. A természetes tellúrban a ^{128}Te gyakorisága csak 31,7%, így a radioaktivitás felfedezése óta eltelt bő egy évszázad alatt egy nagynak elképzelt, 1 kg tömegű, tiszta tellútból álló mintában nagyjából 50 db ^{128}Te -bomlás történt volna. Hogyan lehet hát meghatározni a felezési idejét? Az eljárás kulcsa az, hogy a kísérletet nem kell feltétlenül tudósoknak elkezdniük: néhány szerencsés esetben a természet maga gondoskodott erről. A ^{130}Te β -bomlásra megy át, amelynek közvetlen terméke a ^{130}I , amely gyorsan, 12 óra felezési idővel stabil ^{130}Xe -á alakul. Ismeretes néhány tellúrt nagy mennyiségben tartalmazó ásvány, pl. a tellurobizmutit (Bi_2Te_3), amelyben a gázzárványok összetételét tömegspektrometriás módszerrel elemezni lehet.

1. táblázat Kivételesen hosszú felezési idejű radioaktív izotópok

| izotóp | felezési idő (év) | izotóp | felezési idő (év) |
|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|
| ^{48}Ca | $5,3 \times 10^{19}$ | ^{130}Te | $7,9 \times 10^{20}$ |
| ^{50}V | $1,5 \times 10^{17}$ | ^{144}Nd | $3,3 \times 10^{15}$ |
| ^{76}Ge | $1,6 \times 10^{21}$ | ^{148}Sm | 7×10^{15} |
| ^{82}Se | $9,7 \times 10^{19}$ | ^{150}Nd | $6,7 \times 10^{18}$ |
| ^{96}Zr | $2,4 \times 10^{19}$ | ^{174}Hf | $2,0 \times 10^{15}$ |
| ^{100}Mo | $8,5 \times 10^{18}$ | ^{180}W | $1,8 \times 10^{18}$ |
| ^{113}Cd | $7,7 \times 10^{15}$ | ^{186}Os | $2,0 \times 10^{15}$ |
| ^{116}Cd | $3,0 \times 10^{19}$ | ^{209}Bi | $1,9 \times 10^{19}$ |
| ^{128}Te | $2,2 \times 10^{24}$ | | |

Ismeretes, hogy bizonyos körülmények között ezen kőzetbe zárt gázok még földtörténeti korok alatt sem távoznak el. Egy ilyen típusú kőzetből származó, 210 mg tömegű Bi_2Te_3 minta zárvényaiban 29,8 amol ^{130}Xe (1 amol = 1 attomol = 10^{-18} mol) és 56,9 amol ^{132}Xe volt.² A minta közelében talált, tellúrt nem tartalmazó kvarcminta 38,2 mg-jában a ^{132}Xe anyagmennyisége 51,5 amol, a ^{130}Xe -é pedig 7,81 amol volt. A kvarcban csak a kristályosodás kezdetekor belezárt levegő miatt van Xe, izotópjainak aránya jól egyezik a mai levegőben mérhető $^{132}\text{Xe}:^{130}\text{Xe} = 6,6:1$ aránnyal. A Bi_2Te_3 mintában a ^{130}Xe két forrásból származik: a bezárt levegőből és a ^{130}Te bomlásából. A levegőből származó mennyiségnek $56,9 \times 7,81 / 51,5 = 8,63$ amol-nak kell lennie, így a radioaktív bomlás során $29,8 - 8,63 = 21,2$ amol keletkezett. A 210 mg Bi_2Te_3 mintában összesen 787 μmol Te van, a ^{130}Te gyakorisága pedig 34,08 %, vagyis a ^{130}Te anyagmennyisége 268 μmol . Most már csak az ásványok keletkezésének idejét kellene ismerni a ^{130}Te felezési idejének a meghatározásához. Ehhez egy másik nemesgáz, az Ar kőzetekben mért mennyiségét lehet felhasználni. A vizsgált kőzetben találtak biotit nevű, $\text{K}(\text{Mg},\text{Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{F},\text{OH})_2$ általános képletű ásványt is. A ^{40}K izotópból $1,3 \times 10^9$ év felezési idővel, β^- -bomlással ^{40}Ar keletkezik. Így az Ar-zárvényok mérése alapján meg lehetett határozni, hogy az ásvány 93 millió éve keletkezett. Tehát a ^{130}Te felezési ideje:

$$t_{1/2} = \frac{268 \mu\text{mol} \times \ln 2}{21,2 \text{ amol}} \times 9,3 \times 10^7 \text{ év} = 8,1 \times 10^{20} \text{ év}$$

Az 1. táblázatban megadott szám több hasonló kísérlet átlagából származik, és a ma legmegbízhatóbbnak tekintett adatot jelenti. A ^{128}Te felezési idejét hasonló gázzárvényokban lévő ^{128}Xe és ^{130}Xe mennyisége alapján számították ki.

² N. Takaoka, Y. Motomura, K. Nagao *Phys. Rev. C* **1996**, 53, 1557.