

## Az atommagok energiája

Az atommagok energiája és tömege szoros kapcsolatban van egymással Einstein ismert képlete alapján:  $E = mc^2$ . Itt  $c$  a fény sebessége vákuumban. Az energiaviszonyok fontosak az atommagok bomlásakor, hiszen bomláskor a bomlástermékek valamekkora mozgási energiára tesznek szert, és ez csak akkor valósulhat meg, ha a kezdeti állapot energiája (tömege) valamivel nagyobb, mint a végállapot energiája (tömege).

### Energia-megmaradás (bomláskor)

A bomláskor felszabaduló energia tehát:

$$Q = E_{\text{kezdeti}} - E_{\text{vég}} = (m_{\text{kezdeti}} - m_{\text{vég}}) \cdot c^2. \quad (1)$$

$Q$  neve: bomlási energia. Természetesen, ebben a képletben lévő tömegek a bomlásban részt vevő összes részecske teljes tömegét jelentik. Azaz például alfa-bomláskor, amikor a végállapotban egy leánymag és egy alfa-részecske keletkezik, akkor  $m_{\text{vég}} = m_{\text{leánymag}} + m_{\text{alfa}}$ .

### Atommagok tömegének meghatározása

A jelenleg ismert, 2000-nél is több (stabil és radioaktív) atommag tömegét (és energiáját) több módon határozták meg. Vannak atommagok, amelyek tömegét valamilyen közvetlen módszerrel – például tömegspektroszkópiával – meg lehet mérni. Sok más atommag tömegét pedig az „ismert” atommagtömegek segítségével bomlási, vagy atommagreakció-energiák méréséből közvetett módon lehet meghatározni. Vannak olyan – általában nagyon rövid felezési idejű, mesterségesen előállított – atommagok, amelyek tömegét még így sem lehet pontosan meghatározni, hanem valamilyen atommagmodell, vagy valamilyen egyéb szisztematikus viselkedés alapján lehet megbecsülni.

A több mint 2000 atommag nagyon sokféle magreakciója, és a rajtuk végrehajtott sokféle mérés elképesztő mennyiségű, különböző pontosságú adatot szolgáltatott. Ezeket áttekinteni, ezek egymással való kapcsolatát, korrelációját, ellentmondásosságát, vagy ellentmondás-mentességét ellenőrizni, ezekből a legvalószínűbb értékeket kihámozni különleges, kutatók csoportjait éveken keresztül foglalkoztató feladat. Ezeknek a kutatásoknak az eredményeképpen születnek táblázatok, amelyek a kísérletileg elérhető adatokból kiolvasható, leginkább konzisztens értékeket tartalmazzák.

A jelen program alapja *G. Audi and A.H. Wapstra: Experimental Atomic Masses, Nucl. Phys. A595 (1995) 409.* cikkben található táblázat.

### Nukleonszám-megmaradás

Atommag-átalakulásokban többféle fizikai mennyiség is „megmarad”. Az előbb már említettük az energia-megmaradást (1). Egy másik fontos megmaradási törvény a nukleonszám-megmaradás<sup>1</sup>.

Ez azt fejezi ki, hogy bármely átalakulás végén pontosan ugyanannyi nukleonnak kell lenni a végállapotban, mint amennyi nukleon a kezdeti állapotban volt. Azaz

$$A_{\text{vég}} = A_{\text{kezdet}} \quad (2)$$

---

<sup>1</sup> Az atommagot alkotó protonokat és neutronokat közös néven nukleonoknak nevezzük. A **nukleonszám** tehát a protonok és neutronok **együttes** száma. Hagyományosan  $A$  betűvel jelöljük.

Természetesen, itt is össze kell adni például a végállapotban található összes nukleon számát. Azaz, például alfa-bomláskor a végállapotban:  $A_{\text{vég}} = A_{\text{leánymag}} + A_{\text{alfa}}$ .

### Kötési energia és tömeghiány

Első pillanatban úgy tűnik, hogy itt ellentmondás van. Ha a kezdeti és a végállapotban mindig azonos számú (pl.  $A$ ) nukleon van, és egy nukleon tömege  $m_{\text{nukleon}}$ , akkor a kezdeti és a végállapot tömege meg kellene egyezzen!  $m_{\text{kezdeti}} = A \cdot m_{\text{nukleon}} = m_{\text{vég}} = A \cdot m_{\text{nukleon}}$ . Ebből viszont (1) alapján annak kellene következnie, hogy  $Q = 0$ , azaz nem lenne energia arra, hogy bármely atommag elbomoljon!

A helyzet az, hogy az atommagot alkotó nukleonok nemcsak szorosan egymás mellé tett részecskék (mint egy ház téglái), hanem erősen vonzó kölcsönhatás köti őket össze! Ezért egy atommag tömege általában kisebb, mint az őt alkotó nukleonok tömegének összege!

$$m_{\text{atommag}} = Z \cdot m_{\text{proton}} + (A - Z) \cdot m_{\text{neutron}} - \Delta m \quad (3)$$

Ebben a képletben  $Z$  a protonok száma,  $A$  pedig a nukleonszám. Ez a képlet már figyelembe veszi azt is, hogy a két nukleon – a proton és a neutron – tömege kicsit különböző. A képletben szereplő  $\Delta m$  neve: **tömeghiány**. Ez jellemző arra, hogy milyen erősen vannak kötve ezek a részecskék az atommagban. A  $B = \Delta m \cdot c^2$  mennyiséget az atommag **kötési energiájának** nevezzük. Ezt az energiát be kell fektessük, ha az atommagot szét akarjuk bontani az őt alkotó protonokra és neutronokra. Az ennek megfelelő tömeggel kisebb az atommag tömege, mint az őt alkotó részek tömegeinek összege!

### A program által megjelenített adatok

#### Az atommag kiválasztása

Egy atommag összetételét KÉT adatával határozhatjuk meg: meg kell adjuk az  $A$  nukleonszámot és a protonok  $Z$  számát. Nyilván a neutronok száma =  $A - Z$ . A protonszámot megadhatjuk közvetlenül, vagy megadhatjuk az atom kémiai vegyjelével is, hiszen ez egyértelműen meghatározza a protonok számát is. Azaz, a programban három „bemeneti” mező van:  $A$ ,  $Z$  és kémiai (vegy)jel. Bármelyikkel kezdhetjük az atommag kiválasztását. Amikor ezek egyikét megadtuk (és ENTER gombbal lezártuk az adatbevitelt), a program felsorolja, hogy az adatbázisában milyen atommagokat talált, amelyek a megadott feltételnek megfelelnek. Ebből a listából kiválaszthatjuk azután azt az atommagot, amelyik energiaviszonyait szeretnénk megjeleníteni.

#### Az energiaviszonyok megjelenítése

A képernyő bal oldalán egy táblázatban numerikusan, a képernyő jobb oldalán pedig grafikusán láthatók az energiaviszonyok. Minden energiaérték keV (kiloelektronvolt) egységben van megadva.  $1 \text{ keV} = 1.60217733 \cdot 10^{-16} \text{ J}$ . A mikrofizikában az eV – elektronvolt –, és annak a többszörösei a használatos energiaegységek. További egyszerűsítést jelent az „atomi tömegegység” bevezetése. Az atomi tömegegység jele: u, (régebben amu = atomic mass unit), és definíciója pedig: a 12 tömegszámú szénatom tömegének a tizenketted része. Azaz

$$1 \text{ u} = \frac{m(^{12}\text{C}_{\text{atom}})}{12} = 931493.614838934 \text{ keV}/c^2 \quad (4)$$

Látható, hogy ez milyen pontosan megmért (ismert) mennyiség.

- **Tömegettöbblet (keV).** Mivel az atommag-folyamatokban a tömegszám állandó, ezért az atommag-folyamatok során az  $A \cdot u \cdot c^2$  mennyiség megmarad. A túl nagy energiaértékekkel való számolások (és a nagy számok különbségképzésekor fellépő hibák) elkerülése érdekében célszerű minden atommagnál csak az ettől való eltérést megadni. Ezért a táblázatban megadott érték:

$$E_x = m_{ex} \cdot c^2 = m_{mag} \cdot c^2 - A \cdot u \cdot c^2 \quad (5)$$

Vegyük észre, hogy ez nem ugyanaz, mint a tömeghiány, ami a kötési energia kifejezésében szerepelt, hiszen itt MINDEN nukleont azonos,  $u$  tömeggel veszünk figyelembe! Eszerint, ha egy mag teljes energiájára (tömegére) vagyunk kíváncsiak, akkor ezt a következőképpen kaphatjuk meg:

$$m_{mag} \cdot c^2 = A \cdot u \cdot c^2 + E_x \quad (6)$$

Ezért – megkülönböztetésképpen – ezt **tömegettöbbletnek** (angolul mass excess) nevezzük. Természetesen,  $E_x$  értéke lehet pozitív és lehet negatív (sőt nulla) is.

- **Kötési energia (keV)** Ezt a fogalmat már az előzőkben érintettük. Kiszámítása:  $B = [Z \cdot m_{proton} + (A - Z) \cdot m_{neutron} - m_{atommag}] \cdot c^2$ . Mivel az atommag mindig kötött rendszer (ha nem lenne az, nem maradnának együtt a nukleonok), ezért a kötési energia mindig pozitív, azaz  $B > 0$ .
- **Energia/nukleon (keV)** Az  $E = mc^2$  képlet alapján az energia akkor nulla, ha  $m = 0$ . Más szóval, az energiatengely kezdőpontja (origója) a „semminél” van. Ebben a rendszerben minden létező objektum energiája mindig pozitív. Ugyanakkor kötött rendszerek vizsgálatakor szokásos az energiatengely nulla pontját oda helyezni, amikor a rendszert alkotó részek már léteznek (létre vannak hozva a „semmiből”), de még nincsenek kötött állapotban (pl. nagyon távol vannak egymástól). Ilyenkor a már létrehozott, de még nem-kötött rendszer energiáját vesszük nullának. A kötött rendszer energiája ennél kisebb – azaz negatív. Könnyen látható, hogy ilyen koordináta-rendszerben a rendszer energiája és a kötési energia között a következő összefüggés áll fenn  $\tilde{E} = -B$ , hiszen éppen a  $B$  kötési energiát kell befektetni ahhoz, hogy a rendszert nem-kötött – azaz nulla energiájú – állapotba hozzuk ( $\tilde{E} + B = 0$ ). Az energia/nukleon azt mutatja meg, hogy egyetlen nukleon átlagosan milyen „mélyen” van kötve az atommagot összetartó vonzó potenciálban. Ezek alapján tehát a megjelenített **Energia/nukleon**  $= \frac{\tilde{E}}{A} = -\frac{B}{A}$ .
- **Q-beta, Q-EC, Q-alfa** Ezek az értékek az (1) képlet alapján adják meg rendre a negatív béta-bomlás, elektronbefogás, és alfa-bomlások bomlási energiáját. Természetesen, ha ismerjük a tömegeket, akkor minden esetben ki lehet számítani ezeket az értékeket, amelyek lehetnek pozitívak vagy negatívak. A bomlások létrejöttének szükséges (de nem elégséges) feltétele, hogy  $Q > 0$  legyen. A táblázat a negatív béta-bomlás és elektronbefogás (EC) esetén csak akkor tüntet fel értékeket, ha azok ténylegesen létre is jönnek. Ilyenkor azonban általában *a kísérletileg mért értékek* szerepelnek a táblázatban, nem pedig a tömegkülönbségekből számítottak! Előfordul ugyanis, hogy a kiindulási és a végállapotbeli atommagok tömegei jóval kevésbé pontosan ismertek, mint a tömegkülönbségük – amelyet a bomlási energia pontos mérésével meg lehet határozni.
- **S-neutron, S-proton** Ezek a neutron, ill. proton **szeperációs energiái**. A szeperációs energia megmutatja, hogy mennyi energiát kellene befektetni ahhoz, hogy egy neutront vagy

egy protont kiszakítsunk az atommagból. Itt jegyezzük meg, hogy a táblázatban több esetben is látunk  $Q_{\text{alfa}} < 0$  értékeket is. Természetesen, ilyenkor alfa-bomlás nem jöhet létre, de a feltüntetett értéknek mégis adhatunk értelmezést. A  $Q_{\text{alfa}} < 0$  érték azt mutatja meg, hogy mennyi energiát kellene befektetni egy alfa-részecske kiszakításához az atommagból. Ez tehát az alfa-részecske **szeparációs energiája**. Azaz  $S_{\text{alfa}} = -Q_{\text{alfa}}$ , ha  $Q_{\text{alfa}} < 0$ .

A táblázatban feltüntetett értékek mellett feltüntettük – a fent említett adatbázis alapján – azokat a bizonytalanságokat is, amelyek a mérésekből kiszámíthatók voltak. Ezek az értékek szerepelnek a +/- oszlopban. Vannak azonban olyan esetek, amikor közvetlen mérési eredmények nem álltak rendelkezésre (az adatbázis készítésekor), de az ismert tömegadatok – vagy nukleáris modellek – alapján egy becsült érték megadható volt. Ilyenkor a **Megj.** (megjegyzés) oszlopban egy SY jel áll.

### Grafikus megjelenítés

A képernyő jobb oldalán a numerikus adatoknak megfelelően grafikusan is megjelenítjük az energiaviszonyokat. A függőleges tengelyen az energiakülönbségek vannak a vizsgált atommag alapállapotú energiájához viszonyítva. A grafikus megjelenítés – többletinformációként – feltünteti az egyes bomlások, illetve szeparációk után létrejövő **leánymagokat** is. Az egyes bomlásokat eltérő színnel is jelöljük: a negatív béta-bomlást zöld, az elektronbefogást lila, az alfa-bomlást pedig kék szín jelzi. A kiindulási atommag mindig piros. A **pozitív béta-bomlást** külön nem jelöli sem a táblázat, sem a program. Pozitív béta-bomlás akkor jöhet létre, ha az elektronbefogásra (EC) rendelkezésre álló energia  $Q_{\text{EC}} > 2m_e c^2 = 1022 \text{ keV}$ . Itt  $m_e$  az elektron tömege,  $c$  pedig – szokásosan – a fény sebessége vákuumban. Pozitív béta-bomlás után a leánymag összetétele ugyanaz, mint elektronbefogás (EC) után. Ezért sincs szükség külön jelölésre.