

## Gyorsító energiahitelesítés $Al(p,\gamma)Si$ magreakcióval

Gyakorlatvezető:

Gyürky György, tudományos főmunkatárs  
MTA Atomki, 4026 Debrecen, Bem tér 18/c  
IX. épület 105. szoba  
Tel.: 52-509246  
e-mail: gyurky@atomki.mta.hu

Az alábbiakban az ELTE *Részecske-, mag- és asztrofizikai laboratórium* kurzusa keretében meghirdetett *Gyorsító energiahitelesítés  $Al(p,\gamma)Si$  magreakcióval* gyakorlat rövid leírása található. A szövegben található hivatkozások a leírás végén felsorolt (esetenként angol nyelvű) weboldalakra utalnak, ahol részletesebb információ található az adott témáról.

### Bevezetés

A Magyar Tudományos Akadémia debreceni Atommagkutató Intézetében (Atomki [1]) működik egy Van de Graaff típusú részecskegyorsító (VdG), melyet legfőképpen atom és magfizikai, valamint nukleáris analitikai kutatásokra alkalmaznak [2]. A gyorsító egyik fontos paramétere a szolgáltatott részecskenyaláb pontos energiája, illetve az energia bizonytalansága. Ezek az értékek jól ismert tulajdonságú magreakciók, például ismert energiájú, éles rezonanciát mutató reakciók vizsgálatával meghatározhatók. Egy ilyen, energiahitelesítésre használható reakció a  $^{27}Al(p,\gamma)^{28}Si$  reakció, melyben több alkalmas rezonancia is található. Ezek közül az egyik legerősebb az  $E_p = 992$  keV-es rezonancia. A laborgyakorlat elsődleges célja az Atomki VdG gyorsítójának energiahitelesítése ennek a rezonanciának a mérésével.

A rezonancia mérését a  $^{28}Si$  mag legerjesztődése során kibocsátott gamma-sugárzás detektálásával lehet elvégezni. Amennyiben ismerjük a használt gamma-detektor abszolút határfokát, valamint a gyorsítóból a céltárgyra jutó protonok számát, egy adott rezonancia erőssége meghatározható. A gyakorlat másodlagos célja a  $^{27}Al(p,\gamma)^{28}Si$  reakció 992 keV-es rezonanciája erősségének a meghatározása.

### A Van de Graaff gyorsító

Az egyik legrégebben használt alacsony energiás részecskegyorsító a Van de Graaff típusú elektrosztatikus gyorsító [3]. Az egyvégű (tehát nem tandem) elektrosztatikus gyorsítók esetén a részecskenyaláb gyorsítására a gyorsító a nagyfeszültségű terminálja és a föld közötti potenciálkülönbséget használja ki. Az Atomki VdG gyorsítója esetén ennek a feszültségnek a maximuma névlegesen 5 millió Volt (a valóságban az elérhető maximum 4 millió Volt körüli). Így egyszeres töltésű ionok (például az itt leírt mérésekben használt protonok) esetén a maximális energia 4 MeV.

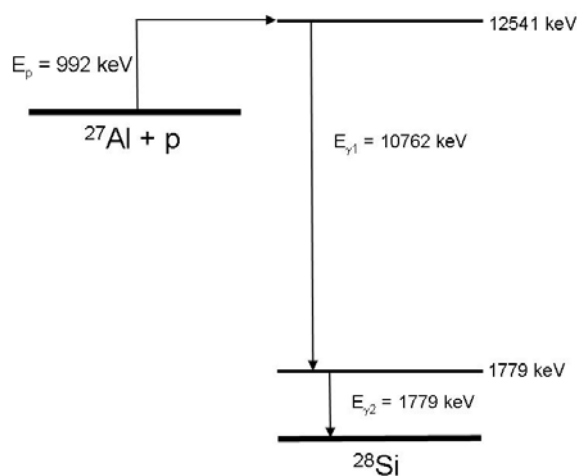
A részecskenyaláb energiájának pontos (keV pontosságú) meghatározására nem elegendő a gyorsító által előállított potenciálkülönbség mérése, annak ugyanis általában elég nagy a bizonytalansága, valamint a gyorsítócsövön végigfutó primer nyalábnak nagy az energiaszórása is. Jól meghatározott energiájú részecskenyaláb előállításához általában analizátor mágneset használnak, amiben mágneses tér révén a részecskenyaláb adott sugarú pályán eltérül. A mágneses tér erősségének mérésével és a mágnes geometriájának ismeretében elvben meghatározható a nyaláb energiája.

Az Atomki VdG gyorsítója esetén az analizátor mágnes 90°-ban (függőlegesből vízszintes irányba) téríti el a nyalábot. A mágneses tér erőssége a tekercsekben folyó áram segítségével szabályozható. A térerősséget NMR szondával [4] mérjük.

A mágnes geometriájának korlátozott ismerete miatt a térerősségből csak úgy tudjuk megadni a nyaláb energiáját, ha a gyorsítót hitelesítjük, azaz hozzárendeljük az adott energiaértékekhez a megfelelő mágneses térerősségeket. A VdG gyorsítóhoz rendelkezésre áll egy táblázat, mely adott részecske esetén tartalmazza a kívánt energiának megfelelő mágneses tér értéket. A gyorsító üzemeltetői ezt a táblázatot felhasználva állítják be a felhasználó által kért energiát. A gyorsítócső, s főként a mágnes geometriájában beállt bármilyen változás azonban elronthatja ennek a táblázatnak a pontosságát. (Ilyen változás tipikusan a mágnes kilépő és belépő réseinek módosítása.) Ezért minden, pontos energiaismeretet igénylő felhasználás esetén célszerű a táblázat adatainak ellenőrzése, azaz a gyorsító energiahitelesítésének elvégzése.

### Rezonanciák a $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$ reakcióban

A gyorsító energiahitelesítésére többek között rezonáns magreakciók használhatók. Egy sugárzásos befogási reakció rezonanciát mutat, azaz a befogási hatáskeresztmetszet jelentősen megnő, amennyiben a befogódó részecske energiája éppen megfelelő arra, hogy a keletkező végmag egy adott gerjesztett állapotban jöjjön létre. Ezt szemlélteti a  $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$  reakció 992 keV-es rezonanciája esetén az 1. ábra.



**1. ábra.** Az  $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$  reakció 992 keV-es rezonanciája és a keletkező gerjesztett állapot bomlása.

A reakció Q-értéke, azaz a befogott proton kötési energiája a  $^{28}\text{Si}$  magban 11585 keV. A  $^{28}\text{Si}$  mag egyik gerjesztett állapotának energiája 12541 keV. Ennek megfelelően a  $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$  reakció rezonanciát mutat a következő protonenergiánál:

$$E_p = \frac{28}{27}(12541\text{keV} - 11585\text{keV}) = 992\text{keV}$$

ahol az első hányados a tömegközépponti rendszerről laborrendszerre való átszámításhoz szükséges. Ha tehát a reakció hatáskeresztmetszetét mérjük a protonenergia függvényében, akkor 992 keV energiánál egy ugrást kell tapasztalnunk. Az ugrás helyének a táblázat alapján mért energiáját összevetve az irodalmi, 992 keV-es energiával, a gyorsító energiahitelesítése (legalábbis közelítőleg 1 MeV energiájú protonnyaláb esetén) elvégezhető.

A rezonanciában keletkező gerjesztett állapot bomlása szintén látható az 1. ábrán. A gerjesztett állapot legvalószínűbben az ábra szerinti két egymást követő gamma-foton kibocsátásával bomlik a  $^{28}\text{Si}$  mag alapállapotába. Elsőként egy 10762 keV energiájú gamma-sugárzás kibocsátása révén a mag 1779 keV-es első gerjesztett állapota jön létre, majd ez egy 1779-es gamma-foton kibocsátásával bomlik alapállapotba. Ennek a két gamma-sugárzásnak a detektálásával lehet a reakció hozamát mérni, s így a rezonancia helyét meghatározni.

### Al céltárgy készítése

A  $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$  reakció kiváltásához alumínium céltárgyat kell bombáznunk protonnyalábbal. A rezonancia helyének pontos mérése érdekében célszerű vékony céltárgyat használnunk. Az  $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$  reakcióban ugyanis a vizsgálandó 992 keV-esen kívül még számos más energiájú rezonancia is található. Amennyiben a céltárgy anyagában fékeződő protonnyaláb energiája megegyezik egy adott rezonancia energiájával, akkor létrejön a rezonancia. Egy „végtelen vastag”, azaz a protonnyaláb energiáját teljesen elnyelő Al rétegben például minden, a beeső protonnyaláb energiájánál alacsonyabb energiájú rezonancia gerjesztődik.

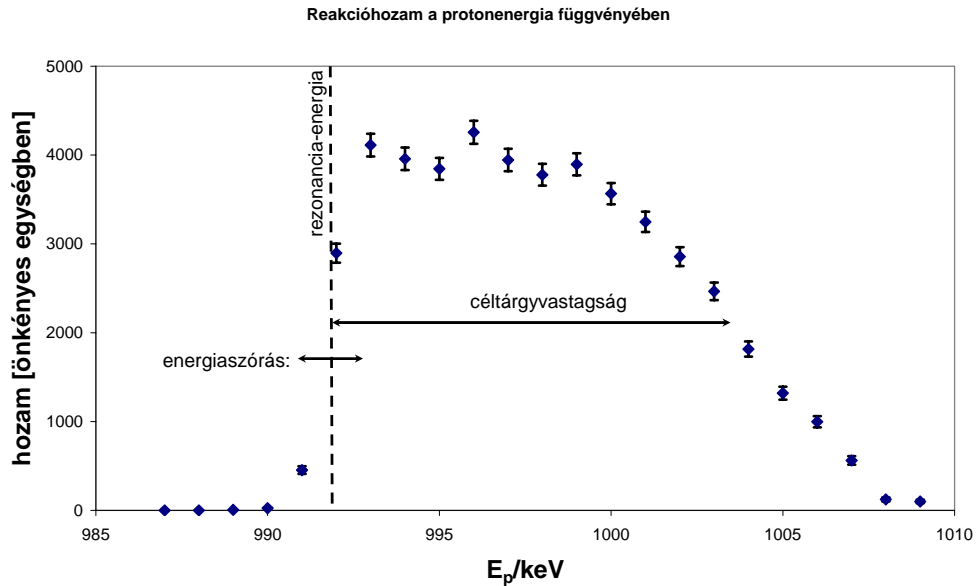
992 keV alatt a  $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$  reakció következő rezonanciája 937 keV-nél található, tehát mintegy 55 keV-vel alacsonyabb energián. Célszerű ezért olyan céltárgyat használni, melyben a protonnyaláb energiavesztesége kisebb, mint 55 keV. Így a 992-keV-es rezonancia gerjesztése esetén más, alacsonyabb energiás rezonanciák nem gerjesztődnek. Egy 1 MeV körüli energiájú protonnyaláb fajlagos energiavesztesége alumíniumban mintegy 50 keV/ $\mu\text{m}$  (az energiaveszteség például a SRIM programmal számítható [5]), azaz 1  $\mu\text{m}$ -nél vékonyabb céltárgy használata szükséges.

Ilyen vastagságú rétegek előállítására alkalmas a vákuumpárolgatás módszere. Vákuumtérben wolfram szálra elhelyezett alumínium darabka a wolfram szál izzítása hatására megolvad és elpárolog. A közelében elhelyezett hordozó felületén az elpárolgott Al felfogható és így létrehozható a kívánt vékonyréteg. A használt alumínium mennyiségéből és a párolgatás geometriájából a rétegvastagság jó közelítéssel meghatározható, illetve a kívánt értékre szabályozható.

Az Atomkiban több vákuumpárológató is található. A laborgyakorlat első feladata az Al céltárgy elkészítése.

### A rezonanciagörbe felvétele

Az elkészített céltárgyakat a VdG gyorsító egyik nyalábcatornájának vákuumkamrájába helyezve megkezdődhet a tényleges gyorsítóhitelesítés. A reakció relatív hozamát (azaz az egy beeső részecskére jutó reakciók számát) a protonenergia függvényében ábrázolva a rezonanciagörbe felvehető. Egy ilyen tipikus görbe látható a 2. ábrán.



**2. ábra** A 992 keV-es rezonancia hozamgörbéjének várható alakja és a belőle nyerhető információk

A felvett hozamgörbéből több különböző információ is kinyerhető. A görbe felfutó élének pozíciója (pontosabban a felfutó élre illesztett hibafüggvény [6] inflexiós pontjának helye) adja meg a rezonancia energiáját, azaz ennek az értéknek az irodalmi értékkel (992 keV) való összevetése jelenti a tényleges energiahitelesítést. A felfutó él szélessége (általában az  $\frac{1}{4}$  és  $\frac{3}{4}$  magasság között energiatávolságot véve) adja a nyaláb energiaszórását. Ez azért lehetséges, mert a vizsgált rezonancia természetes szélessége igen kicsi (eV nagyságrendű), tehát a felfutó él véges szélességét csak a nyaláb energiaszórása okozhatja. A hozamgörbe teljes szélességéből pedig a céltárgy vastagságára következtethetünk, s így ellenőrizhetjük a párológatókor beállított érték pontosságát.

A relatív hozam méréséhez ismernünk kell a lejátszódó reakciók számának és a céltárgyra jutó protonok számának a hányadosát. A protonok számát a céltárgyra jutó töltés mérésével tudjuk meghatározni. Ehhez a VdG nyalábáram-integrátorát használjuk. A lejátszódó reakciók száma pedig arányos a mért gamma-spektrumban az 1779 keV-es, vagy pedig a 10762 keV-es csúcsok területével, így ezek meghatározása szükséges (a gamma-detektálásról részletek alább).

## Abszolút rezonanciaerősség-mérés

A gyorsító energiahitelesítése során, mintegy a mérések melléktermékeként lehetőség van a  $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$  reakció 992-es rezonanciája abszolút erősségének a meghatározására. Egy  $(p,\gamma)$  reakció esetén a rezonanciaerősséget ( $\omega\gamma$ ) a következő formulával definiálhatjuk:

$$\omega\gamma = \frac{2J+1}{(2j_p+1)(2j_t+1)} \frac{\Gamma_p\Gamma_\gamma}{\Gamma}$$

ahol  $j_p$ ,  $j_t$  és  $J$  rendre a bombázó részecske (proton), a céltárgymag ( $^{27}\text{Al}$ ) valamint a keletkező közbenső mag ( $^{28}\text{Si}$ ) spinje. A  $\Gamma$  mennyiségek pedig a rezonanciára jellemző szélességek ( $\Gamma$  a teljes,  $\Gamma_p$  és  $\Gamma_\gamma$  pedig a proton és gamma parciális szélességek).

Vastag céltárgy esetén (tehát ahol a rezonanciagörbe egy határozott platóval rendelkezik) a rezonanciaerősség kiszámítható a reakció hozama alapján a következő formulával:

$$\omega\gamma = \frac{2\varepsilon}{\lambda_r^2} \frac{A_t}{A_t + A_p} \frac{Y}{\eta b}$$

ahol  $A_t$  és  $A_p$  a céltárgy és bombázó részecske tömegszáma,  $\varepsilon$  a céltárgybeli fajlagos energiaveszteség,  $\lambda_r$  pedig a proton de Broglie hullámhossza a rezonancia energiájánál. Az utolsó tényező a reakció hozamát adja meg.  $Y$  a „mért” hozam, azaz a kiválasztott gamma-átmenet esetén a gamma csúcs területének és a mérés időtartama alatt beeső protonok számának a hányadosa (a rezonanciagörbe platóján mérve). A  $b$  mennyiség az adott gamma-átmenetre jellemző elágazási arány, azaz annak a mértéke, hogy a rezonancia lejátszódását hány százalékban követi az adott gamma-sugárzás. A vizsgált rezonanciára, illetve a két, 1. ábrán feltüntetett legnagyobb valószínűségű átmenetre ezek az értékek a következők:

$$b_{1779\text{keV}} = 0,931 \pm 0,022$$

$$b_{10762\text{keV}} = 0,750 \pm 0,015$$

A képletben szintén szereplő  $\eta$  mennyiség a gamma-detektor adott energiás gamma-sugárzásra vonatkozó abszolút hatásfoka. Ez a hatásfok függ a mérési geometriától (a forrás és a detektor távolságától), így az adott kísérleti elrendezésben kell meghatározni. Erről a következő alfejezet lesz szó.

## A gamma sugárzás detektálása

A reakcióban keletkező gamma-sugárzás detektálására egy 40% relatív hatásfokú Canberra gyártmányú nagy tisztaságú germánium félvezető detektort (HPGe [7]) használunk. A detektorból (illetve az azzal egybeépített előerősítőtől) származó, a gamma-sugárzás detektorban leadott energiájával arányos amplitúdójú elektromos jeleket egy spektroszkópiai erősítő után egy ADC-be vezetjük, ami után a mérésvezérlő számítógépen megjeleníthető a gamma-spektrum. A spektrumok felvételére az ORTEC

MAESTRO szoftvert használjuk [8]. A spektrum gyűjtésén kívül a szoftver néhány alapvető kiértékelési művelet, mint például energiakalibráció, vagy csúcsterület-meghatározás is alkalmas.

A mérendő gamma-vonalak beazonosításához szükséges a detektor energiakalibrációja. Ezt a laboratóriumi háttérsugárzás legintenzívebb vonalai, vagy radioaktív kalibráló források segítségével lehet elvégezni (lásd alább). Az abszolút rezonanciaerősség mérésekhez szintén szükséges a detektor abszolút hatásfokának ismerete a vizsgált gamma-energiák esetén. Ehhez meg kell mérnünk ismert aktivitású hitelesítő források segítségével a detektor energia-hatásfok függvényét az adott mérési geometriában (azaz a forrásokat oda helyezve, ahol az Al céltárgy is található a mérés során).

A hatásfok-méréshez rendelkezésre áll egy több forrásból álló kalibráló készlet, amelyek közül a kérdése energiatartományban három használata célszerű ( $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ). A források jellemző adatait a jelen leírás végén található függelék tartalmazza. A források kezdeti ( $t_0$ ) aktivitása és felezési ideje alapján ki kell számítani a források „jelenlegi” (a mérés idejére számított,  $t_1$ ) aktivitását az exponenciális bomlás jól ismert formulája alapján:

$$A_{t_1} = A_{t_0} \cdot e^{-\lambda(t_1-t_0)}, \quad \lambda = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}}$$

Egy adott  $E$  energián a detektor hatásfoka a következő összefüggés alapján adódik:

$$\eta(E) = \frac{T(E)}{A_{t_1} \cdot t \cdot I(E)}$$

ahol  $T(E)$  az  $E$  energiás csúcs területe,  $A_{t_1}$  a forrás aktivitása,  $t$  a spektrumgyűjtés ideje másodpercben,  $I(E)$  pedig az adott gamma-átmenet relatív intenzitása (azaz kibocsátásának bomlásonkénti valószínűsége).

A detektor hatásfoka a 200keV - 3 MeV energiatartományban általában jól leírható egy log-log skálán egyenes függvénnyel, azaz a

$$\eta(E) = a \cdot E^b$$

formulával, ahol  $E$  a gamma energia,  $a$  és  $b$  pedig szabad paraméterek. A mért pontokra egy ilyen függvényt illesztve a hatásfok a kívánt energián kiszámítható. Mivel a detektor hatásfoka magasabb energián jelentősen eltér ettől a formulától, így a rezonanciaerősség meghatározásához csak az 1779 keV-es gamma vonalat használjuk, a 10762 keV-eset nem.

## Összefoglalás

A jelen leírásban ismertetet gyakorlat során a következő feladatok elvégzése szükséges:

1. Vékony Al céltárgy készítése vákuumpárolgatással.
2. A HPGe detektor üzembe helyezése, a gamma-spektrum energiakalibrációja.

3. Spektrumok felvétele a hitelesítő gamma-forrásokkal.
4. A forrásokkal felvett spektrumokban csúcsterületek meghatározása, a detektor hatásfokfüggvényének felvétele, a hatásfok meghatározása a lényeges, 1779 keV-es energián.
5. Az  $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$  reakció 992-es rezonanciának mérése: spektrumok gyűjtése különböző protonenergiáknál 1 keV-es lépésekkel, a spektrumok kiértékelése, a rezonanciagörbe felvételével.
6. A rezonanciagörbe alapján a gyorsító energiahitelesítése, az energiaszórás meghatározása, a céltárgy vastagságának meghatározása és összevetése a párologtatási adatokkal.
7. A hozamgörbe és a detektor abszolút hatásfokának ismeretében a 992 keV-es rezonancia erősségének meghatározása. A kapott érték összevetése az irodalmi adattal.
8. A mérés jegyzőkönyvének elkészítése.

#### Hivatkozások

- [1] <http://www.atomki.hu/>
- [2] <http://www.atomki.hu/atomki/Accelerators/VDG/>
- [3] [http://hu.wikipedia.org/wiki/Van\\_de\\_Graaff-gener%C3%A1tor](http://hu.wikipedia.org/wiki/Van_de_Graaff-gener%C3%A1tor)
- [4] [http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear\\_magnetic\\_resonance](http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_magnetic_resonance)
- [5] <http://www.srim.org/>
- [6] <http://hu.wikipedia.org/wiki/Hibaf%C3%BCggv%C3%A9ny>
- [7] <http://www.canberra.com/products/465.asp>
- [8] <http://www.ortec-online.com/Solutions/applications-software.aspx> → MAESTRO-32

#### Függelék: a használandó hitelesítő gamma-források adatai:

Izotóp:	$^{60}\text{Co}$
Forrás jele:	2009-028
Referencia-aktivitás:	8,81 kBq
Referencia-dátum:	2009. július 1.
Felezési idő:	5,271 év

Gamma-energiák és a megfelelő relatív intenzitások:

$E_\gamma$ [keV]	$I(E_\gamma)$ %
1173,2	99,97
1332,5	99,98

Izotóp:  $^{137}\text{Cs}$   
 Forrás jele: 2009-030  
 Referencia-aktivitás: 8,36 kBq  
 Referencia-dátum: 2009. július 1.  
 Felezési idő: 30,07 év

Gamma-energia és a megfelelő relatív intenzitás:

$E_\gamma$ [keV]	$I(E_\gamma)$ %
661,7	85,1

Izotóp:  $^{152}\text{Eu}$   
 Forrás jele: 2009-031  
 Referencia-aktivitás: 8,47 kBq  
 Referencia-dátum: 2009. július 1.  
 Felezési idő: 13,54 év

Fontosabb gamma-energiák és a megfelelő relatív intenzitások:

$E_\gamma$ [keV]	$I(E_\gamma)$ %
121,8	28,6
244,7	7,58
344,3	26,5
367,8	0,86
411,1	2,23
778,9	12,94
867,4	4,25
1085,9	10,21
1089,7	1,73
1112,1	13,64
1212,9	1,42
1299,1	1,62
1408,0	21,01