

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

Gyakorlatvezető:

Gyürky György, tudományos tanácsadó
Atomki, 4026 Debrecen, Bem tér 18/c
IX. épület 105. szoba
Tel.: 52-509246, 20-2475466
e-mail: gyurky@atomki.mta.hu

Az alábbiakban az ELTE *Részecske-, mag- és asztrofizikai laboratórium* kurzusa illetve a Debreceni Egyetem *Magfizikai mérések* 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 az Eötvös Loránd Kutatási Hálózat debreceni Atommagkutató Intézetében (Atomki [1]) működik egy Tandetron típusú részecskegyorsító, melyet számos kutatási témára, köztük 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 $E_p = 991.76$ keV-es rezonancia. A laborgyakorlat elsődleges célja az Atomki Tandetron 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 991.76 keV-es rezonanciája erősségének a meghatározása.

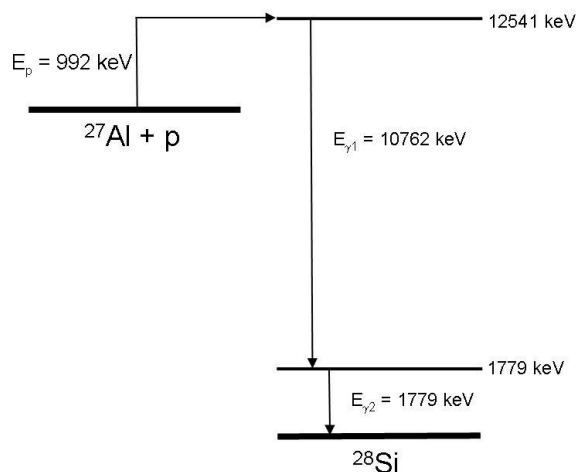
A Tandetron gyorsító

A Tandetron egy modern, tandem elvű elektrosztatikus gyorsító típus [3]. A tandem elvű elektrosztatikus gyorsítók esetén a részecskenyaláb gyorsítására a gyorsító a nagyfeszültségű terminálja és a föld közötti potenciálkülönbséget kétszeresen használja ki. Az Atomki Tandetron esetén ennek a feszültségnek a maximuma névlegesen 2 millió Volt. Így egyszeres töltésű ionok (például az itt leírt mérésekben használt protonok) esetén a maximális energia körülbelül 4 MeV.

A részecskenyaláb nominális energiája a gyorsító terminálfeszültségéből számítható, amit a Tandetron esetében egy úgynevezett Generating Voltmeter (GVM) [4] segítségével mérünk. A GVM által szolgáltatott érték azonban nem feltétlenül egyezik meg a valós feszültséggel, így a nyaláb tényleges energiája sem fog megegyezni a nominális energiával. A gyorsító energiakalibrációja pontosan a két mennyiség közötti kapcsolat feltárását jelenti, azaz a nominális energiából a tényleges energia kiszámításának a lehetőségét.

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 991.76 keV-es rezonanciája esetén az 1. ábra.



1. ábra. Az $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$ reakció 991.76 keV-es rezonanciája és a keletkező gerjesztett állapot bomlása.

A reakció Q -értéke, azaz a befogott proton kötési energiája a ^{28}Si magban 11585 keV. A ^{28}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 991.76 keV energiánál egy ugrást kell tapasztalnunk. Az ugrás

helyének a nominális GVM feszültség által kiszámított energiáját összevetve az irodalmi, 991.76 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}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 991.76 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.

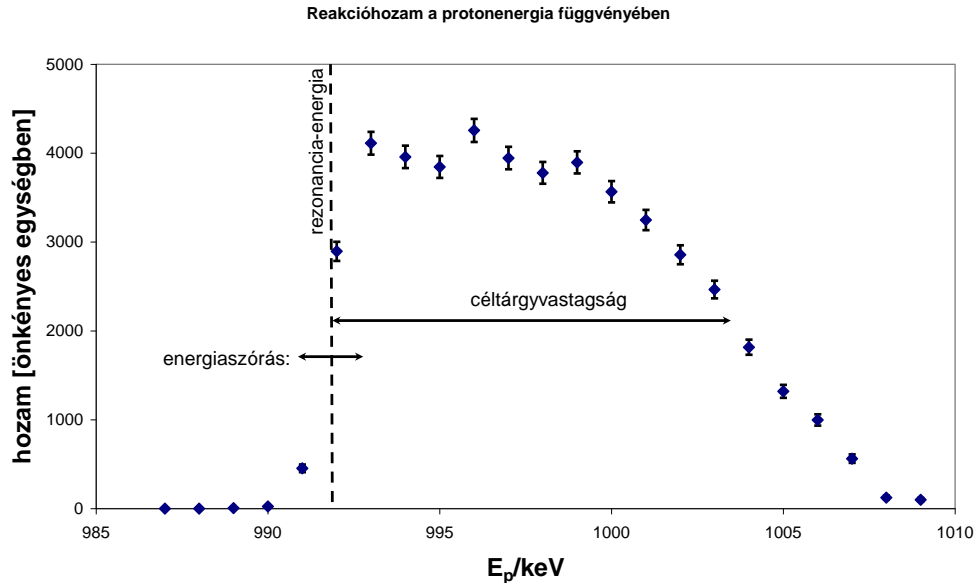
991.76 keV alatt a $^{27}\text{Al}(p,\gamma)^{28}\text{Si}$ reakció következő rezonanciája 937 keV-nél található, tehát mintegy 55 keV-vel alacsonyabb energián. Célszerű ezért olyan céltárgyat használni, melyben a protonnyaláb energiavesztesége kisebb, mint 55 keV. Így a 991.76-keV-es rezonancia gerjesztése esetén más, alacsonyabb energiás rezonancia nem gerjesztődik. Egy 1 MeV körüli energiájú protonnyaláb fajlagos energiavesztesége alumíniumban mintegy 50 keV/ μm (az energiaveszteség például a SRIM programmal számítható [5]), azaz 1 μm -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 vákuumpárolgató is található. A laborgyakorlat első feladata az Al céltárgy elkészítése.

A rezonanciagörbe felvétele

Az elkészített céltárgyakat a Tandetron 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 991.76 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 (991.76 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 párolgotatáskor 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 egy nyalábáram-integrátort használunk. 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 991.76 keV-es rezonanciája abszolút erősségének a meghatározására. Egy (p, γ) 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}Al) valamint a keletkező közbenső mag (^{28}Si) spinje. A Γ mennyiségek pedig a rezonanciára jellemző szélességek (Γ a teljes, Γ_p és Γ_γ pedig a proton és gamma parciális szélességek).

Vastag céltárgy esetén (tehát ahol a rezonancia görbe egy határozott platóval rendelkezik) a rezonanciaerősség kiszámítható a reakció hozama alapján a következő formulával [9]:

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

ahol A_t és A_p a céltárgy és bombázó részecske tömegszáma, ε a céltárgybeli fajlagos energiaveszteség, λ_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 rezonancia görbe 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 η 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 100% relatív hatásfokú Canberra gyártmányú nagy tisztaságú germánium félvezető detektort (HPGe [7]) használunk. A detektorból (illetve az azzal egybeépített előerősítőből) 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 kérdéses energiatartományban három használata célszerű (^{60}Co , ^{137}Cs , ^{152}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 (hatványfüggvény), 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-est nem.

Összefoglalás

A jelen leírásban ismertetett 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 991.76 keV-es rezonanciájának mérése: spektrumok gyűjtése különböző protonenergiáknál, 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 991.76 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/instruments/view/43>
 [3] http://www.highvolteng.com/media/Brochures/Tandetron_broch.pdf
 [4] <https://www.eeguide.com/generating-voltmeter-principle-and-construction/>
 [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
 [9] <https://journals.aps.org/rmp/pdf/10.1103/RevModPhys.20.236> (illetve különböző magfizika-tankönyvek))

Függelék: a használandó hitelesítő gamma-források adatai:

Izotóp:	^{60}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_γ [keV]	$I(E_\gamma)$ %
1173,2	99,97
1332,5	99,98

Izotóp:	^{137}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_γ [keV]	$I(E_\gamma)$ %
661,7	85,1

Izotóp: ^{152}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_γ [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