



Országos Szilárd Leó fizikaverseny II. forduló,
2017. április 8.
Szimulációs feladat

Gamma sugarak rezonancia abszorpciója

A szimulációs feladat során egy olyan összeállítást kell készítenünk, amivel megmérjük a gamma kibocsátás- és elnyelés során az atommag visszalökéséből származó energiavesztést, és megvizsgáljuk a gamma-energia spektrum hőmérsékleti kiszélesedését.

Optikából ismert, hogy az anyagok elnyelik azt a fényt, amit gerjesztett állapotból alapállapotra bomlásakor kibocsátanak. Elgondolkoztunk már valaha azon, hogy a gamma-bomló anyagokból miért tud egyáltalán kilépni a sugárzás, és miért nem nyelődik el újra?

Energia-eltolódás gamma-sugárzás kibocsátásakor és elnyelődésekor

Gamma-bomlásakor az E_g kiinduló és E_0 végső magállapot közötti $\Delta E = E_g - E_0$ energiakülönbség áll rendelkezésre. A lendület-megmaradás miatt azonban ezen az energián a kibocsátott gamma-foton, és a visszalökődött atommag „osztózik”. Ezért a kibocsátott foton energiája az atommag δE visszalökődési energiájával kisebb: $E_\gamma = \Delta E - \delta E$. Hasonló a helyzet a gamma-foton elnyelődésekor: a mag képes ugyan az E_g és E_0 energiaszintek különbségének megfelelő ΔE energiájú foton elnyelésére is (gerjesztett állapotba kerülve), ám az elnyelt fotonnal együtt az atommag megkapja a foton lendületét is, meglökődik, és így egy kis δE mozgási energiája lesz. Mivel a gerjesztő fotonnak ezt a kis többletenergiát is szolgáltatni kell, ezért itt egy kicsit nagyobb energiájú fotonra van szükség ahhoz, hogy a **rezonancia abszorpció** megvalósulhasson: $E_\gamma = \Delta E + \delta E$. Más szóval: az abszorpcióhoz $2 \cdot \delta E$ -vel nagyobb energiájú fotonra lenne szükség, mint amit az atommagok kibocsátanak. Ennek köszönhető, hogy a gamma-sugarak ki tudnak lépni a radioaktív anyagból. **Az egyik feladatunk ennek a δE visszalökődési energiának a megmérése lesz.**

Hőmérsékleti vonal-kiszélesedés

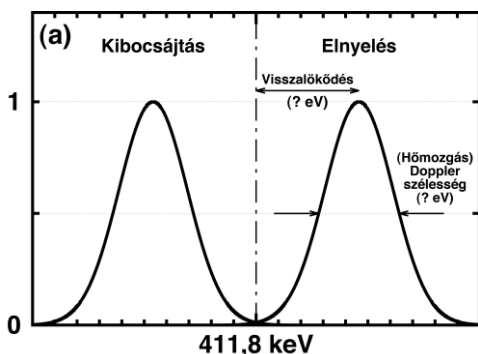
Gamma sugárzások kibocsátásakor az anyagból kilépő fotonok energiája nem pontosan a fenti E_γ , még akkor sem, ha csak egyetlen gerjesztett állapotból történik bomlás. Ettől két effektus miatt is történik véletlenszerű eltérés. Egyrészt a gerjesztett állapot élettartamából származó határozatlanság miatt megjelenik egy ún. természetes vonalszélesség. Ez milliomod eV nagyságrendű, és túl kicsiny ahhoz hogy a versenyfeladatban jelentősége legyen. Másrészt pedig a hőmozgás miatt mind a kibocsátó- mind az elnyelő magok mozognak, így a kibocsátás és elnyelés mozgó atommagokkal történik, ami Doppler-effektust okoz. A véletlenszerű ide-oda mozgás miatt lesznek fotonok, amelyek kisebb, más fotonok pedig nagyobb energiával bocsátódnak ki, illetve nyelődhetnek el. Ezt a





**Országos Szilárd Leó fizikaverseny II. forduló,
2017. április 8.
Szimulációs feladat**

jelenséget hívják **Doppler-kiszélesedésnek**¹. A kiszélesedés függ a kibocsájtó és elnyelő magok hőmérsékletétől, és a számunkra érdekes körülmények között pár tized eV nagyságrendű. A szimulációban szobahőmérsékletű mintákkal dolgozunk, ezért a Doppler-kiszélesedés nem elkerülhető.

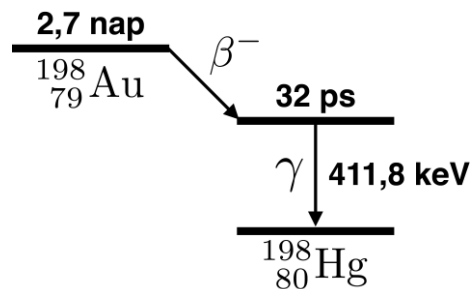


1. ábra

A másik feladatunk ennek kimérése lesz, de amint mindjárt látni fogjuk, a jelenség segít nekünk a első feladatban is. Az 1. ábra mutatja a kibocsájtott és az elnyelhető fotonok energia eloszlását, illusztrálva a **visszalökődési energiát**, illetve a hőmozgásból adódó **kiszélesedés félérték-szélességét** (a görbe „szélessége“ a maximum érték felénél). A mérés célja ennek a két, „?“-el jelölt mennyiségnek a meghatározása.

A Moon-féle kísérlet ötlete

A szimuláció során – W.G. Davey és P.B. Moon 1953-as kísérletének ötlete alapján – az ^{198}Au radioaktív izotópból keletkezett ^{198}Hg gerjesztett állapotát használjuk. Az ^{198}Au negatív béta-bomló, ám a béta-bomlást szinte azonnal egy gamma-bomlás is követi, 411,8 keV energiával. A bomlási sémát mutatja a 2. ábra. Ha nem lenne visszalökődés, akkor az egyik ^{198}Hg atommag által kibocsátott gamma-fotont a többi ^{198}Hg atommag el



2. ábra

tudná nyelni. Ezért a szimuláció során ^{198}Au forrást, és ^{198}Hg abszorbenst fogunk használni.

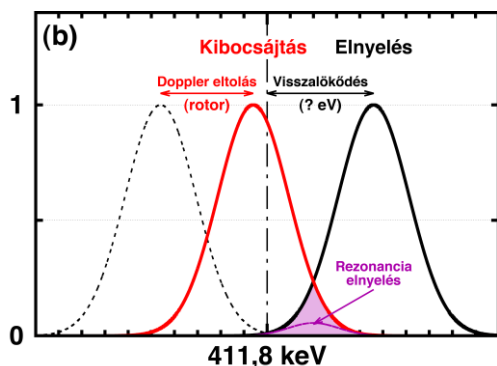
Hogyan lehet a kibocsátott E_γ és az abszorpcióhoz szükséges E_γ között meglévő $2 \cdot \delta E$ különbséget áthidalni? Ehhez is a Doppler-effektust hívjuk segítségül: a forrást nagy sebességgel közelíteni kell az abszorbenst, hogy az érzékelt frekvencia – és ezzel a foton energiája – megnövekedjen. Ilyen nagy sebességet úgy tudunk előállítani, hogy a forrást egy nagy sebességű (max. 2000 fordulat/másodperc) ultracentrifuga rotorjára rögzítjük. A rotor kerülete a hangsebességnél jóval nagyobb sebességgel mozog, emiatt az ultracentrifugát vákuumban kell üzemeltetni. A rotor a kerületi sebességének megfelelő ΔE_D Doppler-eltolást okoz a forrásból a tér minden irányába egyenletesen szétrepülő

¹ Nukleáris energetikában különös jelentősége van, mert ennek is köszönhető hogy egy jól tervezett atomreaktor nem tud túlmelegedni, a hőmérséklet növekedésével ugyanis megnő a hasadással nem járó neutron elnyelés gyakorisága.



Országos Szilárd Leó fizikaverseny II. forduló,
2017. április 8.
Szimulációs feladat

gamma-fotonokra: $\Delta E_D = E_\gamma \cdot \frac{v}{c}$. Itt v a rotor kerületi sebességének a minta irányába vett sebességkomponense! Moon-ék kísérlete alapján a szimulációkban szereplő rotor sugara is $r = 7,62 \text{ cm}$ (= 3 hüvelyk).



3. ábra

A 3. ábrán láthatjuk azt az esetet, amikor a rotor segítségével „eltoljuk” a kibocsájtott fotonok energiáját. Az elnyelés valószínűsége arányos a két görbe „átfedésével”², amit lila színnel szemléltetünk. A hőmérsékleti kiszélesedés segít: e nélkül μeV precizitással kellene a két görbét fedésbe hozni! A 2. és 3. ábrákon a visszalökődés és kiszélesedés egymáshoz viszonyított aránya a valóságnak megfelelő

A Doppler-kiszélesedett kibocsájtási és elnyelési spektrum alakja jól közelíthető a 2. és 3. ábrán is látható Gauss-görbével³. Itt nem részletezett számításokból következik, hogy az elnyelési valószínűség alakja szintén Gauss-görbe lesz, **ami maximumát akkor éri el, amikor a Doppler-eltolt kibocsájtott és elnyelési profil teljes fedésben van, félérték-szélessége viszont négyzetgyök kétszerese ($\sqrt{2}$) a hőmozgásból származónak.**

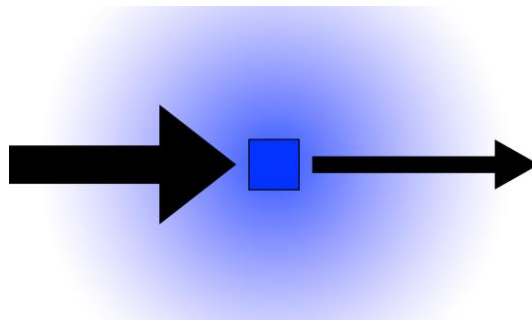
A mérés során a rotor fordulatszámának a változtatásával növelhetjük az ^{198}Au forrásból kibocsájtott foton energiáját. Ennek köszönhetően a két görbe „átfedése” nő, ezzel arányosan megnő a ^{198}Hg mintában elnyelt fotonok száma. **Mivel a gerjesztett állapot élettartama rendkívül rövid, ez az energia szinte azonnal újra kibocsájtásra kerül egy újabb gamma-foton formájában, a tér minden irányába egyforma valószínűséggel. Függetlenül a beérkező foton irányától.** Ezt a folyamatot gyakran rezonancia-szórásnak is nevezik, mivel úgy tűnik, mintha az energia-feltétel teljesülésekor – „rezonanciában” – a bejövő foton szétszóródna a tér minden irányába. A Hg elnyelése és újasugárzása miatt a rotorból származó foton-nyaláb intenzitása a Hg minta mögött csökken, míg a Hg mintából származó sugárzás a minta körül a térben egyenletesen sugárzódik szét. Ezt illusztrálja (nem arányosan!) a 4. ábra:

² Precízebben: a két eltolt görbe szorzatának integráljával.

³ $G(E) \sim \exp\{-(E-E_0)^2/(2\sigma^2)\}$, a félérték szélesség pedig $D = \sigma\sqrt{8 \cdot \ln 2}$



Országos Szilárd Leó fizikaverseny II. forduló,
2017. április 8.
Szimulációs feladat



4. ábra

A sugárzási térben jelen lévő (a rotorból ÉS a Hg-ből származó) fotonokat egy detektor méri. A detektor a ^{198}Hg bomlásából származó 411,8 keV-es energia közelébe eső fotonok beütésszámát méri, de nem tudja megkülönböztetni az ettől csak kicsivel eltérő energiájú fotonokat. Rendelkezésünkre állnak még ólom téglák, amelyekkel a nem kívánatos gamma sugarakból származó háttér csökkenthető. A mérési feladat során egy olyan geometriai elrendezést kell építenünk, amivel a jelenség megfelelő statisztikával vizsgálható (azaz a beütésszám gyökével arányos $\Delta N \approx \sqrt{N}$ szórás kellően kisebb, mint a jelenség maga).

A mérés során **nem szükséges** (de nem is tilos) Gauss-görbét illeszteni, elegendő a fordulatszám függvényében meghatározni a görbe **maximumát és annak félértékszélességét** (azt a pozíciót, ahol a görbe értéke a maximum fele), amiből a visszalökődési energia és a hőmérsékleti kiszélesedés **kiszámítandó**.

Mivel a nukleáris folyamatok bekövetkezését valószínűségi törvények írják le, ezért a detektor beütésszáma valószínűségi eloszlás szerint véletlenszerűen ingadozik egy várható érték (átlag) körül. A mérés szórásának – és ezáltal a mérés **statisztikai bizonytalanságának** – a csökkentése érdekében minden beállítás mellett szükség van egy minimális mérési időre, aminek meghatározása a mi feladatunk. **Próbáljunk optimalizálni**, és gondoljuk meg: ha túl hosszú ideig mérünk egy pontot, kicsi lesz ugyan annak a pontnak a szórása, de csak kevés pont megmérésére jut idő, és nem biztos, hogy kevés pontból a megméréendő mennyiségek meghatározhatók lesznek. Ha pedig túl rövid ideig mérünk egy pontot, akkor lehet, hogy a statisztikus ingadozás el fogja fedni a mérendő jelenséget.



Országos Szilárd Leó fizikaverseny II. forduló,
2017. április 8.
Szimulációs feladat

A végrehajtás javasolt lépései:

- 1) **Gondosan olvassuk végig a teljes mérésleírást!**
- 2) **Gondoljuk végig**, hogy eddigi tanulmányaink és a leírás alapján mit várunk a visszalökődési energia **nagyságrendjére**? Milyen görbe alakot várunk, és nagyjából milyen fordulaton várjuk az effektus maximumát?
- 3) A mérés elején helyezzük be a két, pontosan azonos tömegű ^{198}Au forrást a rotorba (vajon miért kell kettő?), zárjuk le a fedelet, és kezdjük meg az ultracentrifuga leszívását, a vákuum létrehozását (**ennek idő kell**).
- 4) Helyezzük be a detektort a sugárzási térbe (gondoljuk meg, hova érdemes!), és mérjük meg a beütésszámot **álló** rotor mellett. Ezek után indítsuk el a rotort **100/s** fordulatszámra, és mérjük meg így is a beütésszámot. **Mit tapasztalunk, mi lehet ennek az oka?**
- 5) Ólom árnyékolás felhasználásával próbáljuk meg a lehető legjobban **leárnyékolni** a detektort a rotortól, és vizsgáljuk meg, hogy így mekkora „háttér” kapunk.
- 6) Következő lépésben helyezzük be a ^{198}Hg céltárgyat is. Törekedjünk olyan mérési elrendezésre, ahol a Hg-t jól éri a rotorból jövő – lehetőleg egy irányú – sugárnyaláb, míg a detektort inkább csak a Hg-ből jövő sugárzás éri. Emlékeztető: a Doppler-eltolódásba a rotor kerületi sebességének a Hg irányú komponense (vetülete) számít bele!
- 7) **Legalább 10 különböző rotorsebesség mellett mérjük meg a beütésszámokat, ügyelve a megfelelő beütési statisztikára.** Milyen görbét kapunk és miért?
- 8) Készítsünk **ábrát** (papíron vagy számítógéppel) a mért eredményekről!
- 9) Állapítsuk meg a rezonancia maximumának a helyét és a mért görbe félérték szélességét rotorsebesség értékekben.
- 10) **Számítsuk ki** a δE visszalökődési energiát és a Doppler-kiszélesedés mértékét eV egységekben. Hogyan viszonyulnak a mért eredmények az előzetes várakozásainkhoz? (Ne ijedjünk meg, ha eltérést tapasztalunk. Próbáljuk **végiggondolni és leírni**, hogy mi lehet ezeknek az oka, és ha van időnk, korrigáljunk!)
- 11) Értékeljük a lehetséges **szisztematikus és véletlen hibák, illetve a statisztikus bizonytalanságok** hatását és nagyságát!
- 12) Minden olyan konfigurációt amit a jegyzőkönyvben említünk, mentsünk el a „Mentés” gombbal. A fájlnev megadása mellé **ne adjunk** fájlnev kiterjesztést, a program az azonosítónkat úgyis hozzáfűzi! Ezek a fájlok kiértékeléskor megkönnyítik a versenybizottság munkáját.
- 13) Készítsünk jegyzőkönyvet a mérésről, gondolatmenetünkről, tapasztalatainkról. Ha számítógépes fájlt is használunk, a fájlt az „Asztal”-ra tegyük, a fájlnev pedig XX.yyy, ahol XX a versenyző kódja, yyy a kiterjesztés (pl. „84.xls”).





Országos Szilárd Leó fizikaverseny II. forduló,
2017. április 8.
Szimulációs feladat

A pontozás alapja a jegyzőkönyv minősége: annak rendezettsége, a mért és számított adatok közlési formája, a gondolatmenet követhetősége, valamint az, hogy a mérés a jegyzőkönyv alapján megismételhető-e. A logikus, és a jegyzőkönyv alapján követhető gondolatmenet fontosabb, mint az abszolút pontos mérési eredmény!

Megjegyzések:

- **Ne habozzunk segítséget kérni, ha valami furcsaságot észlelünk a szimuláció során!** Előfordulhatnak programhibák vagy egyéb problémák.
- Elektronikus fájljainkat mentsük gyakran!
- Az idő rövideje miatt nem célszerű rengeteg konfigurációt véletlenszerűen kipróbálni, törekedjünk a logikus munkára.

A program leírása:

A programot az Asztalon lévő „Moon_experiment” ikonra kattintva lehet elindítani. **Az indítás után meg kell adni az azonosító kódot.** A program kezelőfelülete több fő részből áll:

- Alul található a mérési tér, bal oldalon a rotossal (a rotor „fizikai” sugara Moon-ék kísérletének megfelelően $r = 7,62 \text{ cm}$), ettől jobbra a tereppel, ahova az elemeket helyezhetjük. A jobb szélén pedig egy „tárolótér” van, ahol a felhasználható kísérleti elemek vannak kezdetben.
- Az elemeket a tárolóból tudjuk a mérőasztalra vinni „fogd és vidd” (drag and drop) technikával. Az elemek megfogása az elem bármely helyén történhet, de a letevéskor az elem bal felső sarka kerül a kurzor helyére. A program ügyel arra, hogy elemeket ne helyezhessünk egymásra. Az elemre jobb gombbal kattintva előhívható egy menü, amivel pixel-pontos mozgás lehetséges, illetve az adott elem visszatehető a helyére a tárolótérbe.
- A bal felső sarokban tudjuk kezelni a vákuumszivattyút és a rotorsebességet, illetve tudunk konfigurációkat menteni és betölteni (lásd fent 12. pont).
- Középen két műszer található. A baloldali a nyomásmérő. A rotor nagy sebessége miatt az ultracentrifuga csak alacsony nyomáson üzemeltethető, $5 \cdot 10^{-5}$ mbar nyomás alatt. A jobb oldali műszer a fordulatszámkijelző. A fordulat érték megváltoztatása után kis idő kell a beállított új fordulatszám eléréséhez. **Figyeljünk arra, hogy a kijelzés normálalakban történik! ($x \cdot 10^y$)**
- Jobb felső sarokban tudjuk megadni az automata mérési időtartamot, alatta található a beütésszámláló és a mérési időt mérő stopper, itt tudjuk a mérést indítani és leállítani, illetve az állást törölni.

