

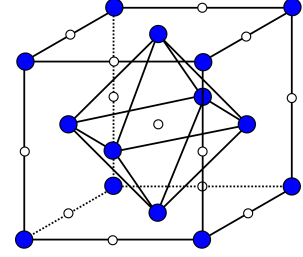
Olimpiai szakköri feladatok

2017. március 27.

Müonspin-rotáció

A müonok töltött elemi részecskék, amelyek elsősorban a kozmikus sugárzás hatására keletkeznek a légkör felsőbb rétegeiben. A tömegük 206-szor nagyobb az elektron tömegénél, töltésük szempontjából pedig kétfélek lehetnek: létezik pozitív müon (μ^+) és negatív müon (μ^-), melyek egymás antirészecskéi, töltésük nagysága pedig az elemi töltés. A kísérleti szilárdtestfizikában a pozitív müonoknak jóval nagyobb jelentőségük van, mint antirészecskéiknek.

A feladatban a müonspin-rotációnak nevezett kísérleti módszerrel ismerkedünk meg, amelynek segítségével a kristályos anyagok belsőjében jelenlévő mágneses teret lehet megmérni a μ^+ részecskék segítségével. Ha egy kristályos szerkezetű, szilárd anyagba μ^+ részecskét juttatunk, akkor a müon (a kristályt alkotó, pozitív töltésű rácsonok hatására) a rácspontok közötti, ún. intersticiális (rácsközi) helyekre kényszerül (lásd az 1. ábrát). Ezen a helyen a müon mágneses momentuma kölcsönhatásba lép a rácsközi helyen jelenlévő, a környező rácsonok által keltett mágneses térrel, így a müon mikroszkopikus magnetométerként használható. A kristályban jelenlévő hosszú távú rend miatt a rácsközi helyek egyenértékűek, ezért a mágneses tér nagysága és iránya minden intersticiális helyen azonos.



1. ábra. A nikkell kristály elemi cellája. A teli körök jelzik a Ni atomokat, az üres körök pedig az intersticiális (rácsközi) helyeket, ahova a müonok beülhetnek.

1. Tekintsünk egy klasszikus, homogén tömegeloszlású, egyenletesen töltött, tömör szigetelő golyót, melynek tömege M , töltése pedig Q ! Ha a golyót a tömegközéppontja körül forgásba hozzuk, a golyó \mathbf{m} mágneses momentumra tesz szert, melynek nagysága arányos a golyó \mathbf{S} sajátperdületével:

$$\mathbf{m} = \gamma \mathbf{S}.$$

Adjuk meg a γ tényező értékét Q és M segítségével!

2. A forgó, töltött golyót homogén, $\mathbf{B} = (0, 0, B_0)$ indukciójú mágneses térbe helyezük úgy, hogy kezdetben mágneses momentuma

$$m(0) = m_0(\sin \varphi, 0, \cos \varphi)$$

legyen, ahol φ a mágneses tér iránya és a mágneses momentum iránya által bezárt szög. Határozzuk meg a golyó mágneses momentumát a mágneses térbe helyezést követően t idő múlva, azaz az indukciójú mágneses térbe helyezük úgy, hogy kezdetben mágneses momentuma

$$m(t) = (m_x(t), m_y(t), m_z(t))$$

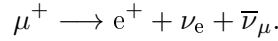
mennyiséget! A választ γ , B_0 , m_0 és φ felhasználásával adjuk meg! (Útmutatás: Homogén, \mathbf{B} indukciójú mágneses térbe helyezett \mathbf{m} mágneses momentumra $\mathbf{m} \times \mathbf{B}$ forgatónyomaték hat.)

3. A μ^+ részecske mágneses térbeli viselkedése úgy írható le, mintha egy klasszikus, töltött, forgó golyó lenne \mathbf{S} sajátperdülettel és \mathbf{m} mágneses momentummal. A müon mágneses momentuma is arányos a sajátperdületével (spinjével): $\mathbf{m} = \gamma_\mu \mathbf{S}$, az arányossági tényező azonban $\gamma_\mu = 8,48 \cdot 10^8$ Hz/T, a müon ún. giromágneses faktora. (A müon esetében γ_μ nem számolható olyan egyszerűen, mint az 1. feladatban.)

Határozzuk meg a müon mágneses momentumának kezdeti ($t = 0$) iránya és a mágneses momentum t . időpillanatbeli iránya által bezárt $\alpha(t)$ szöget! A lokális mágneses tér az intersticiális helyen $\mathbf{B} = (0, 0, B_0)$, a müon kezdeti mágneses momentuma pedig $m(t = 0) = m_0(\sin \varphi, 0, \cos \varphi)$. A választ γ_μ , B_0 , m_0 és φ

segítségével adjuk meg!

4. Az intersticiális helyen lévő müion a kristályba juttatása után előbb-utóbb pozitronra (e^+), elektron-neutrínóra (ν_e) és müion-antineutrínóra ($\bar{\nu}_\mu$) bomlik:

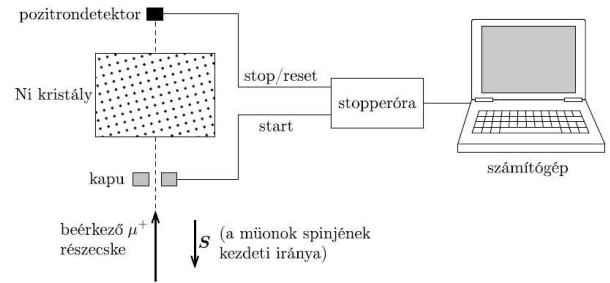


A pozitron kibocsátási irányának valószínűségeloszlása nem gömbszimmetrikus: legnagyobb eséllyel a müion pillanatnyi spinjével megegyező irányban repül ki a pozitron, míg a legkisebb valószínűsége a spin irányával ellentétes irányban történő kibocsátásnak van. Annak a valószínűsége, hogy a pozitron kibocsátási iránya a müion spinjével ϑ szöget bezáró irányban elhelyezkedő, kicsiny $d\Omega$ térszögbe essen

$$P(\vartheta, d\Omega) = w \left(1 + \frac{1}{3} \cos \vartheta \right) d\Omega,$$

ahol w egy dimenziótlan paraméter. Határozzuk meg w értékét!

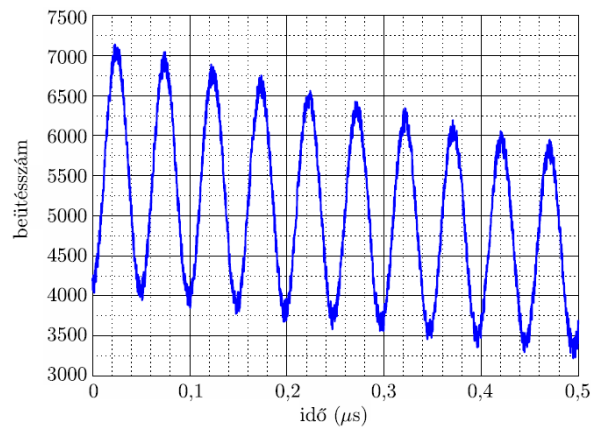
5. A 2. ábrán egy valódi müionspinrotáció-kísérlet vázlatos rajza látható. Amikor a rögzített irányból beérkező müion áthalad a kapun, a stopperóra elindul, a müion pedig beépül a kristályrács egy intersticiális helyére. Egy idő után a beépült müion elbomlik, a keletkező pozitron pedig kicsiny (de nem zérus) eséllyel eltalálja az ábrán látható detektort. Ekkor a stopperóra megáll és lenullázódik, a mért időtartam eltárolódik a számítógépen, és egy újabb müiont lőnek be a kristályba. (Azokat az eseményeket, amelyekben a müion mégsem épül be a kristályrácsba vagy a keletkező pozitron nem találja el a detektort, egy – az ábrán nem jelölt – speciális áramkör segítségével automatikusan kiszűrik.)



2. ábra. A mérési elrendezés vázlata.

A beérkező müionok (az előállítási módjukból adódóan) tökéletesen polarizáltak, azaz spinjük minden esetben ellentétes irányú a belövés irányával. Ez azt jelenti, hogy a kristályrácsba történő beépülés (vagyis a stopper indulásának) pillanatában a müionok spinje mindig ugyanolyan irányú.

Több millió müion belövése után a számítógép összegyűjti a beérkezett időtartamokat, és hisztogramot készít belőlük (3. ábra). A hisztogram úgy készül, hogy a $t = 0$ és a leghosszabb mért időtartam közötti időablakot kicsiny, egyenlő (mondjuk 1 ns) hosszúságú intervallumokra osztjuk, majd megszámoljuk, hogy hány darab müion bomlott el a betáplálást követően az adott (például a 100 ns és 101 ns közötti) időintervallumban. A hisztogram tehát a kísérleti berendezés által mért elbomlási időtartamok előfordulási gyakoriságát mutatja.



3. ábra. A mérési adatokból nyert hisztogram.

A 3. ábrán látható hisztogram segítségével határozzuk meg a nikkal kristály intersticiális helyein észlelhető B_0 lokális mágneses indukció nagyságát tesla egységekben!

6. A 3. ábra segítségével határozzuk meg a müionok T_μ felezési idejét!

7. A mérési adatok alapján adjunk becslést a lokális mágneses tér iránya és a beérkező müionok spinjének iránya közötti φ szög nagyságára! Lehet-e ez kétféle érték?