

Néhány szó a neutronról

Különböző részecskék, úgymint fotonok, neutronok, elektronok és más, töltéssel rendelkező vagy semleges részecskék kinetikus energiája és (vagy) impulzusa a kondenzált közegek atomjaival ütközve megváltozhat. Az impulzus és energiamegmaradási törvények értelmében a szóródott részecske energiájának és impulzusának megváltozása megadja a szóró rendszer kezdeti (a szóródás előtti) állapota és a szóródás utáni állapota közötti energia és impulzus különbségét. A szóródás erősségét jellemző mennyiség – a szórási hatáskeresztmetszet – a szóró közeg adott energia- és impulzusállapotának számosságáról, illetve betöltöttségéről hordoz információt. Ebben a kurzusban a kis energiájú neutronok szóródásának vizsgálatával nyerhető információval foglalkozunk.

Az úgynevezett termikus neutronok hullámhossza összemérhető a kondenzált közegekben tapasztalható atomi távolságokkal, kinetikus energiájuk pedig a kondenzált közegben lévő atomok vagy molekulák mozgási energiájával. Ezért a neutronszórási módszerekről az elmúlt néhány évtized során bebizonyosodott, hogy – költséges voltuk ellenére – nélkülözhetetlenek, mivel révükön egyedülálló bepillantást nyerhetünk a kondenzált közegek atomi, molekuláris és mágneses szerkezetébe, valamint az említett anyagok mikrodinamikai viselkedését leíró törvényszerűségekbe.

A továbbiakban röviden bemutatjuk azokat az érveket, amelyekre a fenti megállapítást alapozzuk, és kifejtjük azokat az alapvető tudnivalókat, amelyek szükségesek a neutronszórásnak mint vizsgálati módszernek a megértéséhez.

Mindenekelőtt ismerkedjünk meg témánk főszereplőjének, a neutronnak néhány alapvető tulajdonságával.

A neutront Chadwick fedezte fel 1932-ben. Felfedezéséért Nobel-díjat kapott 1935-ben. A neutron a hadronok családjába tartozó elemi részecske. A standard elmélet szerint 3 – udd – kvarkból áll.¹

1. A neutron alapvető tulajdonságai

A neutron elektromos töltéssel nem rendelkező, $1/2$ spinű elemi részecske. Tömege $1,67476 \cdot 10^{-24}$ g, ami 939,50 MeV-nyi nyugalmi energiának felel meg. Annak ellenére, hogy a neutron semleges részecske, mégis rendelkezik mágneses momentummal, melynek értéke $-1,91315$ mag-magneton (μ_N). A neutron nem stabil. Szabad állapotban, mintegy kilencszáz másodpercnyi felezési idővel jellemzett béta-bomlással, az alábbi reakció szerint esik szét:



ahol $\bar{\nu}$ az antineutrínót jelöli. A neutronok néhány fundamentális tulajdonságát az alábbi táblázatban foglaljuk össze.

1. táblázat. A neutronok néhány fundamentális jellemzője

Fizikai mennyiség	Mérték
Tömeg	$1,67476 \cdot 10^{-24}$ g
Elektromos töltés	0
Spin	$1/2$
Mágneses dipólus momentum (μ_n)	$-1,91315\mu_N$
Élettartam ($T_{1/2}$)	$882,9 \pm 2,7$ sec

A neutron mozgását a kvantummechanika törvényei határozzák meg. Ezért részecsketulajdonságok mellett hullámtulajdonságokkal is rendelkezik. Ez azt jelenti, többek között, hogy adott energiájú szabadon mozgó neutron megfelelő hullámhosszal is jellemezhetünk. Például, az energia és a hullámhossz közötti összefüggést az alábbi reláció adja meg:

¹ Már amennyiben a kvarkok egyáltalán léteznek. Szabad kvark megfigyeléséről ugyanis nincs tudomásunk. A szerző meg nem alapozott feltételezése, hogy a kvarkok tulajdonképpen az elemi részecskékben jelen lévő kvázirészecskék, amelyek ugyanúgy nem léteznek a részecskéken kívül, mint pl. a fononok léte is csak egy kristályon belül nyer létjogosultságot.

$$E = \frac{2\pi^2\hbar^2}{m_n\lambda^2}. \quad (2)$$

A kinetikus energia mellett az impulzussal arányos

$$\bar{k} = \frac{2\pi}{\lambda} \bar{n} \quad (3)$$

hullámszámvektor is fontos jellemzője a neutronok mozgásának.

Itt \bar{n} a \bar{k} vektor irányába mutató egységvektor. Ehelyütt az energia és az impulzus, valamint a hullámhossz közötti kapcsolat fenti két kifejezése csak ad hoc illusztrálásként szolgál. Alaposabban később fogjuk tárgyalni a most említett összefüggéseket.

Ha az adott energiához tartozó hullámhosszra vagyunk kíváncsiak, akkor azt a

$$\lambda = \frac{2\pi\hbar}{\sqrt{2mE}} \equiv \frac{0,2861}{\sqrt{E}} \quad (4)$$

kifejezéssel írhatjuk le.

A fenti kifejezésben a számszerű együttható akkor érvényes, ha az energiát elektronvoltban, a hullámhosszat pedig angströmben adjuk meg.

2. A termikus neutronok felfedezése

Mielőtt hozzálátnánk a termikus neutronok jelentőségének és hasznának tárgyalásához, szenteljünk néhány szót a termikus neutronok felfedezése történetének. 1934-ben Enrico Fermi, akkor már neves, elismert fizikus, munkatársaival a neutronok által keltett, mesterséges radioaktivitás természetét tanulmányozta. Célul tűzte ki, hogy a periódusos rendszer minden eleméről megállapítsa az indukált radioaktivitás mértékét, valamely törvényszerűség felismerése reményében. A munka a római egyetem viszonylag egyszerű felszereltségű laboratóriumában folyt.² A mérés-összeállítás is módfelett egyszerű volt. Egy ólomládában Ra-Be neutronforrást helyeztek el oly módon, hogy azt

² Figyelemre méltó volt a kis kutatócsoport munkarendje. Reggel 8-tól déli 12-ig és délután 16-tól este 20-ig dolgoztak. A szokatlanul hosszú déli ebédszünet a klimatikus viszonyok miatt alakult ki. A forró déli órákat keserves erőfeszítés,

a besugárzandó mintából készített henger vette körül. Adott idejű besugárzás után Geiger–Müller-számlálóval megmérték a minta aktivitását. 1934 októberében Pontecorvo és Amaldi arra figyeltek fel, hogy ezüstminta esetén az indukált radioaktivitás ismételt mérése során az egyes mérések eredményei lényegesen nagyobb eltérést mutattak, mint ami a statisztikus szórásból várható lett volna. Az ólomládából kiemelt, és deszkaasztalon elhelyezett minta–forrás-együttessel megismételve a besugárzást, ugrásszerű radioaktivitás-növekedést tapasztaltak. Ha pedig kiemelték a forrást a mintából képzett hengerből, és közéjük különböző kémiai anyagot helyeztek el, azt észlelték, hogy minél kisebb atomszámú elemet tartalmaz az elválasztó közeg, annál erősebb az indukált radioaktivitás. A legerősebb aktivitás paraffinból készült választófal esetében volt mérhető. Ez történt délelőtt, és Fermi már az ebédszünetben kimódolt egy munkahipotézist, amely a későbbiekben helytállónak bizonyult.

Nevezetesen, minél inkább összemérhető a neutron és a választófal anyagát alkotó elemek atommagjainak tömege, az energia- és impulzusmegmaradás törvényének következtében annál nagyobb energiát képes a neutron az atommaggal végbemenő ütközés során elveszíteni, más szóval, annál inkább képes a neutron lelassulni. Ha pedig a neutron lassú – vélte Fermi –, akkor az atommagnak, amely mellett a neutron elhalad, több esélye lesz a neutront elnyelni, s ezáltal aktiválódni. Nyilvánvaló, hogy a lassulás mértéke akkor lesz maximális, ha a neutron hidrogénatom magjaival, protonokkal ütközik, mivel a neutron és a proton tömege szinte azonos, így a jól ismert „billiárdgolyó”-effektus miatt nagyobb hidrogéntartalmú közeg effektívebb lassító anyag lesz. Ez utóbbi feltevést Fermi és kollégái a római egyetem udvarában lévő szökőkút medencéjében igazolták. A neutron-

munka közbeni bóbiskolás helyett a hűvös szobában sziesztázva töltötték, majd pihenten folytatták a munkát. Vitathatatlannak tűnik az ilyen munkarend hatékonysága. Gondoljunk csak a nyolc, vagy a szorgalmas kutatók önmagukat hajszoló 12–16 órás görnyedéseire, amikor a számítógép vagy a mérőeszköz mellett nemcsak a hát sajog, de vibrál a szem és lankad a figyelem is. Van, aki bírja, s sokan hiszik, hogy ez az egyedül üdvözítő kutatói hozzáállás. Kérdés, vajon a pihent szellem nem képes-e rövidebb idő alatt megtalálni a helyes utat, mint a testi és idegi fáradtságot jelző impulzusok által zaklatott elme. Ide kívánczik egy tudománytörténeti anekdota, miszerint Rutherford úgy este hat óra tájt körbejárta laboratóriumát, és megpillantva egy lelkes fiatal munkatársát, amint az kísérletében elmélyedve ül helyén, dicséret helyett rosszállóan megjegyezte: és mikor fog gondolkodni kolléga úr? (A lassú neutronok felfedezésének története megtalálható Laura Fermi *Atoms in the Family* című könyvében (The University of Chicago Press 1955).)

forrás vízbe merítve a mintául használt ezüsthengert valóban nagyságrendekkel nagyobb mértékben aktiválta, mint tette ezt ólomládába bezárva. A neutron abszorpciók hatáskeresztmetszetének sebességével fordított arányban való függését – a nevezetes $1/v$ törvényt – számos izotóp esetében a kísérleti magfizika fényesen igazolta. Eltérés az $1/v$ törvénytől általában alacsonyan fekvő rezonancianívó megléte esetében tapasztalható.

Az összes ismert neutronkeltési eljárás során nagyenergiájú (néhány MeV) neutronok keletkeznek. Ezek – mint Fermi megmutatta – hidrogéntartalmú közegbe jutva a (p, n) szórás hatáskeresztmetszet viszonylag nagy értéke, valamint a neutron és proton tömegének igen közeli értéke miatt igen gyorsan (néhány ütközés után) elvesztik a kezdeti nagy kinetikus energiájukat, és lényegében egy $k_B T$ átlagenergiával jellemezhető neutrongázként viselkednek (itt T a lassító közeg – az ún. moderátor – hőmérséklete).

A jelen munkában az úgynevezett termikus neutronokkal végezhető vizsgálatok képezik érdeklődésünk tárgyát. Ezek energiája, durva közelítésben $k_B T$ átlagértékek körüli értékeket vesz fel. $T \cong 300\text{K}$ esetben $E \cong 0,025\text{ eV}$. A kondenzált közegek vizsgálata során alkalmazott neutronok energiája általában az $0 < E < 1\text{ eV}$ tartományba esik, ami megfelel a $\infty > \lambda > 0,3\text{Å}$ hullámhossztartománynak. A vizsgálandó objektum állapotáról a neutron szórás előtti és szórás utáni állapotának összehasonlításából tudunk következtetni. A megfelelő következtetések megejtéséhez viszont szükségünk van a szórás folyamatok mechanizmusának ismeretére.

Mint említettük, hidrogéntartalmú közegben a neutron már néhány ütközés után termalizálódik, azaz úgy viselkedik, mint a közeg hőmérsékletével azonos hőmérsékletű gáz. A termalizációhoz szükséges néhány ütközés a másodperc ezredrészét sem teszi ki, ami a neutron élettartamához mérten elhanyagolhatóan kicsiny idő. A termalizált neutrongáz sebességeloszlása $k_B T$ -vel jellemzett közelítőleg Maxwell-eloszlás lesz. Itt k_B a Boltzmann-állandó.

A kvantummechanika szerint

$$\bar{p} = \hbar \cdot \bar{k} \quad (5)$$

és

$$|\bar{k}| = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (6)$$

ahol λ a de Broglie-hullámhossz.

Mivel

$$E = \frac{p^2}{2 \cdot m} = k_B \cdot T, \quad (7)$$

könnyű kiszámítani, hogy a neutront lassító közeg tipikus hőmérsékletének $\sim 40^\circ\text{C}$ – $\lambda \sim 1,78 \text{ \AA}$ hullámhossz felel meg (ami, mint már említettük, az energiaskálán $E \sim 25 \text{ meV}$ -ot jelent). Ez a hullámhossz összemérhető a kondenzált közegekben lévő atommagok közötti távolsággal, míg az E mennyiség a kondenzált közegben fellépő elemi gerjesztések (pl. fononok, magnonok stb.) energiájával összemérhető nagyságrendbe esik. Mindkét tulajdonság valószínűsíti, hogy elegendően nagy szórási hatáskeresztmetszet esetében a neutron kiváló eszközzé válhat a kondenzált közegek szerkezetének és mikrodinamikájának kutatásához. Ezen bevezetés után lássunk neki célul kitűzött feladatunk elvégzéséhez, azaz a fent vázoltak kvantitatív és megalapozott taglalásához.