FIATAL MŰSZAKIAK TUDOMÁNYOS ÜLÉSSZAKA

Kolozsvár, 2001. március 23-24.

NEUTRONNYALÁBOK MÁGNESES ALAKÍTÁSA

Fűzi János

Summary - The movement of neutrons in inhomogeneous magnetic field is studied, envisaging magnetic focusing of thermal neutron beams. The field of a sextupole electromagnet is computed and the shape of its poles optimized to obtain highest focusing effect.

1. Neutronok mozgása mágneses térben

A neutronok állandó nagyságú L impulzusnyomatékkal és s mágneses momentummal (spin) rendelkeznek. A két vektormennyiség között fennáll az

$$s = \gamma L, \quad (1)$$

összefüggés, ahol γ a neutron giromágneses viszonya. A termikus (viszonylag kis energiájú) neutronok mozgása inhomogén mágneses térben a klasszikus mágneses momentum mozgásegyenleteinek megfelelően történik [1]. A neutronra ható erő és forgatónyomaték kifejezései:

$$F = (s \cdot \nabla) B; \quad T = s \times B \quad (2)$$

és a mozgásegyenletek:

$$F = m \frac{d^2 r}{dt^2}; \quad T = \frac{dL}{dt} = w \times L, \quad (3)$$

ahol w a Larmor precesszió szögsebessége. A (2) egyenletnek megfelelően inhomogén mágneses térre van szükség a neutron röppályájának (a neutronnyaláb alakjának) módosításához. Egy nagyon hosszú, ideális $2n$ pólusú mágnes által létrehozott mágneses skalárpotenciál kifejezése hengerkoordinátákban:

$$\Psi = Cr^n \cos n\varphi, \quad (4)$$

amely a

$$B = \mu_0 C n r^{n-1} (-\cos n\varphi e_r + \sin n\varphi e_\varphi) \quad (5)$$

mágneses fluxussűrűségnek felel meg. A neutronra ható erő:

$$F = s_r \frac{\partial B}{\partial r} + s_\varphi \frac{1}{r} \frac{\partial B}{\partial \varphi} \quad (6)$$

Igazolható, hogy a hatpólusú mágnesek ($n = 3$) gyűjtőlencseként hatnak a termikus neutronnyalábokra, így sikerrel alkalmazhatók ezek fókuszolására [2]. Amennyiben a spinvektor a röppálya minden pontjában párhuzamos az indukcióval (ez a feltétel önműködően megvalósul, ha a neutron által érzékelt térerősségváltozás jóval lassúbb, mint a Larmor szögsebesség - adiabatikus feltétel), fennáll:

$$\mathbf{F} = \nabla(\mathbf{s} \cdot \mathbf{B}) = \pm s \nabla |\mathbf{B}| \quad (7)$$

Ez az összefüggés akkor alkalmazható az erőszámításban, ha a hatpólusú mágnes végén a szórt tér megvalósítja a neutronok polarizációját, tehát a neutronok spinjei a mágneses tér erővonalalaival párhuzamosan rendeződnek. Ideális hatpólustér esetén a neutronra ható erő nagysága a sugárral arányos és a sugárral párhuzamos. Az indukcióvektor irányába mutató mágneses momentumokra kifelé, az indukcióvektorral ellentétes irányítású momentumokra a középpont felé mutató erő hat.

2. A hatpólusú elektromágnes

Néhány sikeres próbálkozás történt hatpólusú mágnesek állandómágnes darabokból való összeállítására [3, 4]. Az elektromágnesek nagyobbak és nehezebbek, de előnyük, hogy neutronoptikai jellemzőik módosíthatók. Egy ilyen elektromágnes keresztmetszete látható az 1. ábrán.

1. ábra. Hatpólusú elektromágnes.

A cél minél erősebb és az ideális hatpólust minél jobban megközelítő mágneses tér elérése. A pólusok alakját meghatározó paraméterek értelmezése a 2. ábrán látható. Az optimalizálás változói: a , b , α és a d_1/d_2 arány. Adott korlátok: a (a neutronnyaláb sugara), $b < a/\sqrt{3}$ és $\alpha < 30^\circ$.

2. ábra. A pólusok alakjának meghatározása.

3. A mágneses tér számítása

Mivel a fellépő erők gyengék, az elektromágnesek meglehetősen hosszúak kell legyenek (méter nagyságrendűek), így a feladat két dimenzióban megoldható. A szimmetria miatt a keresztmetszet tizen-

ketted részét vizsgáljuk, megfelelő határfeltételek mellett (a mágneses fluxussűrűség merőleges a tekercsek szimmetriasíkjára és párhuzamos a pólusok szimmetriasíkjával).

A

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\mu} \nabla A \right) = -J \tag{8}$$

parciális differenciálegyenletet oldjuk meg [5], ahol J a mágneses vektorpotenciálnak a keresztmetszet síkjára merőleges (egyetlen) összetevője, J pedig a tekercsek ekvivalens (üreges huzalt alkalmaznak, amelyben hűtőfolyadék kering) áramsűrűsége. A vasmag anyagának (lágvas) nemlineáris mágneses permeabilitását a:

$$\mu = \frac{kB}{\tan \frac{\pi}{2} \frac{B/\mu_0 - H}{M_s}} \tag{8}$$

összefüggés írja le, ahol $A = 0.1 \text{ m/A}$ és a szaturációs mágneses polarizáció $\mu_0 M_s = 1.89 \text{ T}$.

A végeselemmódszerrel kapott eredmények $a = 7 \text{ mm}$ $b = 3.5 \text{ mm}$, $d_1/d_2 = 1$ és $J = 2.5 \text{ A/mm}^2$ esetén a 3-5. ábrákon láthatók. Az indukció legnagyobb értéke $r = 7 \text{ mm}$ -nél 0.55 T , ami megegyezik a [4]-ben beszámolt értékkel állandómágneses megoldásra, de a [3]-ban megadott értéknek kevesebb mint fele. Az indukció szintvonalai a nyalábtartományban megközelítőleg kör alakúak, ami azt bizonyítja, hogy a téreloszlás hatpólusú.

3. ábra. Mágneses vektorpotenciál szintvonalai.

4. ábra. A mágneses indukció nagyságának szintvonalai (szintköz: 0.0925 T).

5. ábra. A mágneses indukció nagyságának szintvonalai (szintköz: 0.037 T).

4. Következtetések

A neutronnyalábok fókuszolására elektromágnesek építhetők. Bár elég nagy számítási erőfeszítést igényel, a pólusok alakjának optimalizálásával a neutronoptikai jellemzők lényeges javítása érhető el. A kapott indukciósintek és téreloszlások ígéretesek a mágneses neutronlencsék építése tekintetében. Az állandómágneseknél kisebb fluxussűrűség hatása ellensúlyozható az aktív hossz megnövelésével míg a fókusz távolság állítható volta fontos előny különböző hullámhosszú (sebességű) neutronok használatánál.

Irodalomjegyzék

1. F. Mezei, "Neutron Spin Echo: A New Concept in Polarized Thermal Neutron Techniques," *Z.Physik*, vol. 255, pp. 146-160, 1972.
2. P.S. Faragó, "Electromagnetic Focusing and Polarization of Neutron Beams," *Nuclear Instruments and Methods*, vol. 30, pp. 271-273, 1964.
3. P. Schiemenz, A. Ross, G. Graw, "High Field Permanent Sextupole Magnets for Stern Gerlach Separation in Atomic Beam Sources," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, vol. A305, pp.15-18, 1991.
4. T. Oku, H.M. Shimizu, "Neutron Lens and Prism," *Physica B*, vol. 283, pp. 314-317, 200.
5. K.J. Binns, P.J. Lawrenson, C.W. Trowbridge, *The Analytical and Numerical Solution of Electric and Magnetic Fields*. Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore: John Wiley & Sons, 1992.

Dr. Fűzi János, egyetemi docens

Transilvania Egyetem, Villamosmérnöki Kar, Politehnicii 1-3, 2200 Brassó, Románia

Tel. & Fax: +40 68 143116; E_mail: fuzi@leda.unitbv.ro

tudományos főmunkatárs

MTA - Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet, Neutronspektroszkópai Osztály

H-1525 Budapest, Magyarország; Fax: +36 1 392 2501; E_mail: fuzi@szfki.hu

Bolyai János ösztöndíjas (BO/00920/98 - Magyar Tudományos Akadémia)

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Elméleti Villamosságtan Tanszék,

H-1521 Budapest, Magyarország; Fax: +36 1 463 3189; E_mail: fuzi@evtsz.bme.hu