中性子スピンを利用したビーム制御法・分光法の開発

山崎 大, 海老澤 徹

(日本原子力研究所・中性子利用研究センター)

Neutron Polarization Control for Beam Handling and Spectrometry

Dai Yamazaki, Toru Ebisawa

Neutron Science Research Center, JAERI

ABSTRACT

Neutron spin handling could be used for beam control and spectroscopy. Energy analysis could be performed with Drabkin energy filters, by which inelastic component with a $\Delta\lambda$, a $\Delta\lambda/\lambda$ or a ΔE could be extracted for all incident wavelength. Pulsed spin-flipper and polarization analyzer could be used as a neutron chopper (spin-flip chopper) whose opening time, number of windows and phase are controlled independently. It was demonstrated that S/N ratio can be enhanced up to 1.5×10^5 by installing three spin-flip choppers in sequence.

Keywords: *neutron polarization, spatial neutron spin resonance, pulse shaping, neutron chopper*

はじめに

中性子スピンの制御は主に磁場によるプリセッションを利用して行われる。そしてその磁場はコイルなどにより電氣的に制御することができるので、中性子スピンは精密な制御が可能である。また多様な電気信号に基づく時間的スピン制御など、中性子スピン制御には広い自由度がある。この精密制御を積極的に活用した中性子分光器と言え、3 次元偏極解析を行う CRYOPAD やスピンエコー装置がその代表例であろう。本稿では、J-PARC に代表される大強度パルス中性子源をより活用するために有効な、中性子パルスと同期したスピン制御技術開発の現状を示す。具体的には、Drabkin 型エネルギー・フィルターによるエネルギー解析法を紹介し、スピンスピン・チョッパーの開発について述べる。

Drabkin 型エネルギー・フィルター

Drabkin 型エネルギー・フィルター（以下、Drabkin フィルター）は空間的スピン共鳴反転を利用した中性子の単色化デバイスである。Drabkin フィルターは偏極子・Drabkin フリッパー・スピンスピン・検極子から構成される。Drabkin フリッパー内部でスピン共鳴反転を起こした、ほぼ単色中性子を取り出される。

Drabkin フリッパーは Fig.1 のような構造をしており、カレントシートによる周期的交代磁場とソレノイドによる一様磁場からなる。ここで共鳴

スピンスピン反転により、ほぼ共鳴波長中性子のみがスピンスピン反転を起こし(Fig.2), 最終的に取り出される。取り出される波長（共鳴波長）は Drabkin フリッパー内の合成磁場の強度に反比例し、波長分解能はこの磁場の周期数に反比例する。これらはいずれも電氣的、時間的制御が可能であり、取り出す波長をパルス中性子に同期して変化させることも出来る。Drabkin フィルターを2 段式にするなどして共鳴ピークの周りのサブピークを除去すれば、単色性も一段とよく出来る。これらの特長はパルス中性子へ非常に有効で、Drabkin フィルターは、(1)パルス整形、(2)チョッパー、(3)エネルギー解析などへの適用が期待できる[1-3]。このうち(1)、(2)については波紋の2004 年4 月の号[1]に既に書いてあるので、そちらを参照されたい。ここでは主に(3)のエネルギー解析について述べる。

Fig. 1: Composition of a Drabkin flipper. A zig-zag folded current sheet are placed in the center of a solenoid coil.

Fig. 2: Resonance spin-flip probability as a function of neutron wavelength. Resonance wavelength λ^* and its resolution $\Delta\lambda/\lambda^*$ are both electronically variable.

Drabkin フィルターを使ったエネルギー解析の特長は、設定した ΔE 、 $\Delta\lambda$ または $\Delta\lambda/\lambda_{in}$ で散乱された成分を、波長 λ_{in} に広い幅をもつ入射中性子全てから取り出せる点にある。また、透過型で取り出すことも特長である。普段使われる結晶アナライザーが、設定した散乱波長成分 λ_{sc} のみを反射して取り出すのと対照的といえる。

まず、試料によって弾性散乱($\Delta E, \Delta\lambda=0$)を受けた成分を取り出すことを考えよう。Drabkin フィルターはもちろん試料の後ろに置かれる。このとき、中性子源から試料までの距離を L_1 、試料から Drabkin フィルターまでの距離を L_2 とすれば、弾性散乱成分は L_1 、 L_2 をいずれも同じ速度で走る。よって、時刻 t に Drabkin フィルターに飛び込む弾性成分の波長 $\lambda_{sc}(t)$ は

$$\lambda_{sc}(t) = \frac{ht}{m(L_1 + L_2)}$$

となる(h はプランク定数で m は中性子質量)。したがって、Drabkin フィルターの共鳴波長を $\lambda_{sc}(t)$ と一致するように変化させれば、弾性散乱成分のみを全ての入射波長に対して取り出すことができる (Fig.3 実線)。これは、Drabkin フリップパーのカレントシートとソレノイドコイルに流す電流を時間に反比例して変化させることに相当する。この弾性成分取り出しは、水素系試料からの非干渉性散乱成分を取り除くこと等に有効だと考えられる。冷中性子と水素との非干渉性散乱は、少なからず非弾性的だからである[4]。

非弾性成分を取り出す場合、一番望ましいのは特定のエネルギー変化 ΔE で散乱される成分を全ての入射波長に対して取り出すことであり、Drabkin フィルターを適用する方法は Badurek らが既に提案している[5]。このとき、偏極子とその後ろの Drabkin resonator を、試料からできるだけ近くに置く必要がある。こうして、 L_1 における飛行時間が L_2 における飛行時間に対して十分小さければ、

$$\lambda(t) = \frac{ht}{mL_1} \left(\sqrt{1 - \frac{2\Delta E}{m} \left(\frac{t}{L_1} \right)^2} \right)^{-1}$$

のように、共鳴波長を動かすことで、特定の ΔE による非弾性成分を取り出すことができる (Fig. 3 参照)。この非弾性モードは、実験配置や電気制御の面からの制限が強いが、以下に述べる我々が提案する非弾性モードでは実験配置に対する制約がなく、電気制御もより簡単に行える。それは決まった波長変化量 $\Delta\lambda$ あるいは決まった波長変化比 $\lambda_{sc}/\lambda_{in}$ の非弾性成分を取り出す非弾性モードである[3]。

波長が $\Delta\lambda$ だけ変化する非弾性成分を取り出す場合には L_1 の距離を波長 $\lambda_{in} = \lambda_{sc} - \Delta\lambda$ 、 L_2 の距離を波長 λ_{sc} で走ることから、

$$\lambda_{sc}(t) = \frac{h(t + mL_1\Delta\lambda/h)}{m(L_1 + L_2)}$$

にあわせて Drabkin フィルターの共鳴波長を変化させれば $\Delta\lambda$ の非弾性成分を全ての入射波長に対して取り出すことができる。つまり、Fig. 3 に示したように、弾性散乱の場合に対して時間原点をずらした形で共鳴波長を変化させればよい。

入射波長 λ_{in} に対して特定の比率となる散乱波長 $\lambda_{sc} = \alpha\lambda_{in}$ をもつ成分を取り出すなら、

$$\lambda_{sc}(t) = \frac{ht}{m(L_1/\alpha + L_2)}$$

のように、共鳴波長を動かす。つまり共鳴波長の時間に対する傾きを弾性散乱のときと変えるだけでよい (Fig. 3)。

Fig. 3: Trajectories of resonance wavelength for elastic and three inelastic modes. In these examples, $L_1=15.0$ m and $L_2=1.0$ m except for the “ $\Delta E=1\text{meV}$ ” case where $L_1=15.0$ m and $L_2=0.0$ m.

このようなエネルギー解析の実証を行うために、原研では波長分解能 0.8%相当、8%相当の2種類の Drabkin フィルターを開発して特性試験を行っている[1-2]。Fig. 4 に示すのは 0.8%のフィルターの共鳴波長を固定して単色取り出しを行ったものである。

共鳴ピークの右側にサブピークが大きく現れ、左側のサブピークはほぼ消えたが、これは Drabkin resonator 内部での磁場が中央部でやや強くなっていることによる。Drabkin フィルターでパルス整形を行う場合には左側のサブピークだけが問題

になるので、この磁場分布はむしろ積極的に導入されるべきである。しかし、エネルギー解析の場合には両側のサブピークが問題となるため磁場分布を均一にして、さらに Drabkin フィルターを多段式にするなどしてサブピークを落とす必要がある。これらのフィルターを使った本格的なエネルギー解析ならびにパルス整形の実証実験は現在準備中であり、 ΔE を固定した非弾性モード以外 ($\lambda \propto t$) では電気的実験がほぼ終わっている。また、分解能 8% のフィルターによるチョッパー・モードのテスト実験はすでに行っており、それについては[1]を参照されたい。

Fig. 4: Extraction of monochromatic neutrons by a proto-type Drabkin energy filter.

Drabkin フィルターを用いたエネルギー解析は入射波長全てに対して特定の非弾性成分を取り出せるところに大きな特長があり、それはパルス中性子でこそ実現できるデバイスである。

スピントリッパ・チョッパー

パルス中性子ビーム制御において重要なものにパルス中性子の時間波形の制御がある。これをパルス整形という。J-PARC パルス中性子源の結合型モデレータから得られるパルス中性子ビームは、ピーク強度は大きい、同時にパルスの時間幅(パルス幅)も大きく、そのため波長分解能が甘くなっている。そこで、結合型モデレータの大きなピーク強度を生かしつつパルス幅を狭めようというのがパルス整形である。

ここでは、パルス整形の方法として中性子スピントリッパに基づいた、スピントリッパ・チョッパーを利用した方法について述べる。従来、パルス整形には機械的中性子チョッパー(ディスク・チョッパー、フェルミ・チョッパー)が用いられてきた。しかし、機械的チョッパーには、高速回転体に対する機械工学的制限がある。これに対しスピントリッパ・チョッパーでは、そのパルス特性は磁場発生コイルであるスピントリッパの電気回路的特性によって決定される。そして、スピントリッパ・チョッパーは次のような優れた特徴を持つ。(1)広いビームに対して高い分解能が得られる。(2)開口幅・開口数・位相を大きな自由度で実験毎に選択できる。(3)他の装置との完全な同

期を取ることが可能である。

スピントリッパ・チョッパーは、パルスの中性子スピンを逆転させ、逆転した成分を取り出すことによって中性子ビームをパルス化する。Fig. 5に示すように、スピントリッパ・チョッパーは上流から偏極磁気ミラー、パルス駆動スピントリッパ、偏極解析磁気ミラー構成される。このとき、偏極ミラーによって偏極された中性子ビームに対して、フリッパーを駆動状態からパルスの時間だけ不駆動状態にする。すると、偏極解析ミラーの反射成分として、パルス化された中性子ビームが得られる(Fig. 5(a))。その時間波形は Fig. 5(b) のようになる。ここでは偏極解析ミラーの反射成分を↑偏極でパルス化したが、透過成分を↓偏極でパルス化することも可能である。この場合はフリッパーを基本的に不駆動状態にしておき、パルスの駆動すればよい。

Fig. 5: (a) Configuration of a Spin-flip chopper. Pulsed spin-flipper and polarization analyzer extract pulsed beam. (b) Conceptual profile of the reflected beam from the polarization analyzer.

スピントリッパ・チョッパーの S/N 比はフリッパーが OFF のときと ON のときの中性子強度比 I_{off}/I_{on} で定義する。スピントリッパ・チョッパーについては、1970 年代に RF フリッパーを用いたもの [6]、あるいは Mezei 型フリッパーを用いたもの [7] など、多くの論文が出ている。とくに、数マイクロ秒程度の短いパルスを得るための優れた方法が 80 年代初めに確立されている [8]。しかしながら、従来のスピントリッパ・チョッパーにおける S/N 比はおおよそ 30 程度と低く、機械的チョッパーに取って代わることはできていない。

著者らは、スピントリッパ・チョッパーを多段式にすることにより、S/N 比を $10^3 \sim 10^5$ と大幅に改善し、機械的チョッパーに変わりうる実用的なスピントリッパ・チョッパーの開発に道を開いた [9,10]。JRR-3M の MINE-1 で行われた実証実験の

結果を Fig.6 に示す。この際の中性子の波長は 8 Å以上の白色である。また、スピンフリップ・チョッパーには、断熱型 RF フリッパーをパルス駆動したものを利用した。確かに一段のスピンフリップ・チョッパーでは、S/N 比は 40 程度で、チョッパーとしての実用性は乏しい。しかし、それを 2 段、3 段と直列に並べることで S/N 比を 3×10^3 , 1.5×10^5 まで上げられることが分かった。

Fig.6: Demonstration of spin-flip chopper. Results of beam chopping with (a) a single spin-flip chopper, (b) a double spin-flip chopper and (c) a triple spin-flip chopper are shown.

今後の課題はまず熱中性子領域に適用できるパルス駆動スピンフリップの開発である。また、マイクロ偏極導管を用いると中性子強度を維持して多段式にすることができる[11]。さらに、スピンフリップ・チョッパーを高速パルス駆動して、5μs 以下のパルス幅を実現することも可能である[12]。

おわりに

中性子スピンは電氣的に制御できるので、他のシステムと同期をとった時間的な制御、さまざまな電気信号波形を使った多様な制御が可能である。したがって、特にパルス中性子源への適用で大いにその特徴を発揮し、従来にないビーム制御・分光法を実現することが期待できる。今後 J-PARC のパルス中性子源が動き出し、世界の中性子散乱の中心となることを考えても、中性子スピン制御を利用したビーム制御法・分光法の開発は非常に重要であるといえよう。

参考文献

- [1] 山崎 大, 波紋 vol.14 No.2 (2004) 130.
- [2] D. Yamazaki et al., Nucl. Instr. Meth. A 529 (2004) 204.
- [3] D. Yamazaki et al., J. Neutron Research, in press.
- [4] M. Furusaka, private communication.
- [5] R. Badurek et al., Nucl. Instr. Meth. A 309 (1991) 275.
- [6] H. Rauch, Proc. Panel on Instrumentation for neutron inelastic scattering research, Vienna 1969 (IAEA, Vienna, 1970)
- [7] G. Badurek, G.P. Westphal, Nucl. Instr. Meth. A 128 (1975) 315.
- [8] Y. Ito, S. Takahashi, Nucl. Instr. Meth. A 221 (1984) 490.
- [9] S. Tasaki et al., Physica B 335 (2003) 263.
- [10] K. Soyama et al., Proc. ICANS XVI vol.1 (2003) 371.
- [11] T. Ebisawa et al., J. Neutron Research, in press.
- [12] T. Ebisawa et al., Nucl. Instr. Meth. A 509 (2004) 209.