Drabkin 型中性子エネルギー・フィルターによるパルス整形

山崎 大

(原研・中性子利用研究センター)

Pulse shaping with Drabkin energy filter

Dai Yamazaki

Neutron Science Research Center, JAERI

ABSTRACT

We have been developing Drabkin energy filters for pulse shaping at the J-PARC neutron source. Drabkin energy filter could reduce pulse width without losing wide-bandwidth and also be used as a fast chopper for pulsed neutrons. In this article, simulations on wide-band pulse shaping mode and chopper-mode for J-PARC moderators are presented along with experimental results on our proto-type Drabkin filters.

Keywords: *Pulse shaping, Neutron chopper, Spatial neutron spin resonance, J-PARC*

1. はじめに

J-PARC ではご存知のように大強度のパルス中性子が得られます。パルス中性子実験においては、中性子がモデレータから飛び出す時刻があいまいさなく揃っていれば、試料位置や検出位置までの飛行時間から波長を決めることができます。しかし実際には、モデレータでの減速過程で中性子が様々な経過を経ることなどから、単一波長の中性子だけ見ても、モデレータから飛び出す時刻に数十～数百 μsec の幅が存在します。これはパルス幅とよばれ、パルス中性子実験の分解能を落とす要因となります。逆に言えば、高分解能の実験にはこのパルス幅を狭めること、つまりパルス整形が必要ということです。パルス整形にはこれまでチョッパーが使われていますが、これでは使える波長幅が非常に限られてしまいます。

この稿で述べる Drabkin 型エネルギー・フィルターなら、広い波長幅を損なわずにパルス整形が可能で、そして、広い波長域にわたってパルスを整形すると、結合型モデレータのビームラインで非結合型モデレータ並みの高分解能実験を行えるようになります。また、この Drabkin フィルターはパルス中性子用のチョッパーとして使用することも可能で、さらに狭いパルス幅で単色中性子を切り出すことができると期待されます。本稿では Drabkin 型エネルギー・フィルターの開発とその可能性について解説します[1, 2]。

2. Drabkin 型エネルギー・フィルターとは

Drabkin 型エネルギー・フィルターは、空間的共鳴スピン反転を利用して単色ビームを取り出す

ものです。これは偏極ミラーと Drabkin スピン・フリップパー、偏極解析ミラーから成り立っています。偏極中性子のうち Drabkin フリップパーで特定の波長（共鳴波長）のみをスピン反転させて、それを偏極解析で取り出すという仕組みです。

Drabkin フリップパーの構造は Fig.1 のようなカレントシート系をガイドコイル中に収めたもので、カレントシートから得られる周期的交代磁場とそれに垂直で一様なガイド磁場から構成されます。

Fig.1 Current-sheet for alternating field. Guide field is also generated perpendicular to the alternating field by guide coils.

Fig.2 は Drabkin フリップパーで起こる共鳴スピン反転の確率の例です。中性子が通り抜けるカレントシートの枚数（交代磁場の周期数 $\times 2$ ）を N 、合成した磁場の強度を B とすると、共鳴波長 λ^* と B 、共鳴反転の分解能 $\Delta\lambda/\lambda^*$ と N の間に以下のような反比例の関係があります。

$$\lambda^* \cong 678.2/Bd, \quad \Delta\lambda/\lambda^* \cong 2\sqrt{3}/N$$

つまり、共鳴波長とその分解能はいずれも電気

的に制御可能です。ただし、 d はカレントシートの半周期の間隔で、単位は λ^* (Å), B (G), d (mm) です。共鳴ピーク以外にもサブピークがありますが、これは Drabkin フィルターを 2 つ続けて置いたり (2 段式フィルター)、カレントシートの交代磁場強度に分布を持たせることで抑えることができます。

Fig.2 Typical resonance spin-flip probability by a Drabkin flipper with 200 current sheets.

Fig.3 Extraction of monochromatic neutrons from polarized beam by a Drabkin energy filter with 200 current sheets.

Fig.3 は我々が開発した $N=200$ の Drabkin フィルター (1 段) による単色取り出しの測定結果です。5.15 Å を取り出していますが、ピーク幅は全幅で 2 % ほどで、理論値の 1.73 % をほぼ再現しています。長波長側でサブピークが大きく現れているのは、カレントシートの工作精度がまだ不十分で、各周期の長さにばらつきがあるためと思われる。

3. 全波長パルス整形

共鳴波長は磁場強度で制御できるので、各時刻での主要波長と一致するように共鳴波長を時間変化させれば、各時刻での余分な波長を取り除くことができます。これは、モデレータから出るのが早すぎたり遅すぎたりした成分を取り除くことから、パルス整形に当たります。

簡単な場合として、中性子がモデレータから飛び出す時刻が $t=0$ を中心とした分布をもっているとしましょう。すると、モデレータ表面から L_1

だけ離れた位置に、時刻 t_1 にたどり着く中性子の主要な波長は、 t_1/L_1 に比例します。よって共鳴波長を t に比例させれば、つまり磁場強度を t に反比例して変化させればパルス整形が行えます。

しかし、実際にはモデレータや反射体で中性子が減速するのに時間がかかります。結果として、モデレータから飛び出す時刻はゼロではなく、波長に依存します。J-PARC の減速体系におけるシミュレーションの結果、パルス波形が文献 [3] で関数化して与えられています。これからパルスピークの放出時刻が求められます。結局、パルス整形のためには次のように $1/t$ から振幅と原点をずらした形で磁場強度を変化させればよいことになります。

$$B_{\text{coup}} = \frac{678.2(15.61 + 1000L_1/3.956)}{(t - 16.00)d}$$

$$B_{\text{dec}} = \frac{678.2(6.84 + 1000L_1/3.956)}{(t - 13.03)d}$$

ここで、 B_{coup} , B_{dec} はそれぞれ J-PARC の結合型モデレータ、非結合型モデレータに対応した磁場強度変化を表しています。 L_1 はモデレータから Drabkin フリッパー入り口までの距離です。これによって、3-9 Å の広い波長幅にわたってパルス整形を施すことが可能です。

この式に従って磁場強度を変化させて、J-PARC 結合型モデレータにおけるパルス整形をシミュレートしました。ここでは、Drabkin フィルターを 2 段式にし、共鳴反転のサブピークを抑えるようにしています。2 つのフィルターは前段が $N=200$ 、後段が $N=120$ です。偏極と偏極解析には spin-up 成分の透過率が 93.8 %, down 成分の透過率が 1.2% の偏極ミラーを前段の偏極に 2 枚、前段の偏極解析 (後段の偏極) に 2 枚、後段の偏極解析に 1 枚、あわせて 5 枚を置いています。シミュレーションの結果が Fig.4 です。

Fig.4 Wide-band pulse shaping by a double Drabkin filter. Coupled-moderator pulses of 3.6 Å are shown as examples. Incident beam is not polarized.

これにより、パルス幅は 121 μsec から 51 μsec まで狭められ、パルスピークより遅れてやってくる

成分（テール）は3桁落とせることがわかりました。非結合型モデレータでは、 $3.6\text{\AA}$ の脉冲幅は $44\mu\text{sec}$ なので、もう少しNの大きなDrabkinフィルターを使えば、非結合型と同等以上のパルスが得られることになります。

4. パルス中性子源用チョッパーとして

全波長パルス整形では共鳴波長をパルス中性子の主要波長に合わせて変化させましたが、さらに速く変化させると、パルス幅をずっと小さく狭めることができます。ただし、この場合は共鳴波長とパルスの主要波長とは一点でしか一致しないので、ほぼ単一の波長を狭い時間幅で取り出すことになります。スピン制御を利用したチョッパーは他にも[4]などがあります。

Fig.5は、非結合型モデレータにおいて、共鳴波長をパルス波長の5倍の速さで変化させたときの共鳴ピーク（点線）、パルス波長ピーク（実線）の軌跡です。ここでは $6.4\text{\AA}$ で2つが重なるようにしています。2つの軌跡が重なった部分が、主に取り出されます。点線領域の縦幅が取り出し時間の目安になりますが、これは共鳴波長を速く動かすほど狭くすることができます。これをチョッパー・モードと呼ぶことにします。

Fig.5 Trace of pulse peak (solid) and resonance peak (dotted) where resonance peak is varied as $B \sim 1/5t$.

Fig.5の設定で駆動したとき、取り出し領域にある $6.4\text{\AA}$ のパルスの変化を表したものがFig.6です。白丸が非結合型モデレータからの入射パルス、黒丸がチョッパー・モードでの整形後のパルス、三角は全波長パルス整形モードでの整形後のパルスです。想定しているセットアップはFig.4の全波長パルス整形シミュレーションと同じです。入射パルス幅 $74\mu\text{sec}$ 、全波長パルス整形でのパルス幅 $58\mu\text{sec}$ に対し、チョッパー・モードでは整形後のパルス幅が $21\mu\text{sec}$ です。全波長パルス整形ではこのパルス幅を得るのに $N=500$ 程度のカレントシートが必要であり、短いパルス幅を得るのにチョッパー・モードが有効であることがわかります。

チョッパー・モードでは、共鳴波長を速く動かせばいいのですから、磁場を速く立ち上げて共鳴

Fig.6 Decoupled-moderator pulse of $6.4\text{\AA}$ shaped with a chopper mode (filled circles) and the wide-band pulse shaping mode (triangles). Unpolarized incident pulse is shown as open circles.

波長を小さいほうへ変化させてもチョッパー・モードとして働きます。Fig.8は我々の行った立ち上げ式チョッパー・モードのテストの結果です。 $N=20$ の低分解能Drabkinフィルター（1段）で実験しています。定常的に駆動すると、取り出し時間幅は全幅で 2.2msec 程度でしたが、 2.46msec で磁場を立ち上げるチョッパー・モードでは 0.4msec まで狭められました。ビームタイムの制約のため、これ以上速い立ち上げチョッパー・モードは今回試験できませんでした。より高分解能のDrabkinフィルターを速く立ち上げることで、数十 μsec オーダーの取り出し時間幅は達成できると思われます。また、2段以上にDrabkinフィルターをつなげることで、S/N比も格段に向上すると期待しています。

Fig.7 Extraction of monochromatic neutrons by a chopper-mode where field strength is raised in 2.46msec . The Drabkin filter is of $N=20$. Incident beam is polarized.

5. おわりに

Drabkin型エネルギー・フィルターは、パルス整形の際には広い波長バンド幅を損なうことなく整形を行うことが可能で、整形後のパルス幅も電氣的に制御することができます。また、パルス中性子用チョッパーとして使う際には、開口のタイミング、開口時間、開口数も電氣的に自由に制御

ができます。いずれも従来使われてきた装置にはなかった特性です。また、取り出されなかった中性子は偏極、偏極解析の際にはじかれたからです。これを再利用することが可能です。とくにチョッパー・モードではこれが有効だと思われます。現在では、J-PARC の生物非弾性散乱装置 DYANA での高分解能測定に、Drabkin フィルターの全波長パルス整形かチョッパー・モードが使えないか検討されています。

他にも、Drabkin フィルターにはさまざまな使い道があります。ひとつは、散乱後のビームをこのフィルターに通せばエネルギー解析ができます。全波長パルス整形と同じようにフィルターを駆動すれば、全ての入射波長に対して弾性散乱成分を取り出すことができます。また、振幅や時間をずらして駆動すれば、やはり全ての入射波長に対して、特定の波長変化をした成分を取り出すことも可能です。

原子炉の定常中性子源でも、モノクロメータから取り出される高調波成分(λ_m ではなく $\lambda_m/2$, $\lambda_m/3$, ...)を除去するのにも使えると考えています。これにより、Be フィルターなどでは届かない小さい λ_m に対応できる可能性があります。

現在の開発課題は、Drabkin フリップパーの高分解能化(Nを大きくすること)と、高分解能フィルターでのパルス整形モード、チョッパー・モードの実現です。また、Drabkin フィルターは偏極

と偏極解析の性能に大きく依存するので、短い波長で高い性能を出す偏極子の開発も重要です。

この研究は日本原子力研究所の曾山和彦氏、海老澤徹氏、京都大学の田崎誠司氏との共同研究です。また、実験においては日本原子力研究所の相澤一也氏、武田全康氏、京都大学の丸山龍治氏にお世話になりました。

参考文献

- [1] D. Yamazaki, K. Soyama, T. Ebisawa, S. Tasaki, J. Neutron Research, to be published.
- [2] D. Yamazaki, K. Soyama, T. Ebisawa, S. Tasaki, Nucl. Instr. Meth. A, to be published.
- [3] 田村格ほか, JAERI-Research 2003-008.
- [4] T. Ebisawa, K. Soyama, D. Yamazaki, S. Tasaki, K. Sakai, T. Oku, R. Maruyama, M. Hino, Nucl. Instr. Meth. A, to be published.