

「何ができる?どこがすごい?」~各装置の紹介~

# 高分解能チョッパー分光器 (High Resolution Chopper Spectrometer) HRC<sup>†</sup> 伊藤晋一<sup>\*</sup>横尾哲也<sup>\*</sup>

## 1. **HRC** で何ができる?

小特集

本装置<sup>(1)</sup>は、1 meV~2 eV 程度の単色中性子を実験試料 に入射し、散乱角1°~120°程度に配置された検出器を用い て、飛行時間法により、マグノンやフォノン等の干渉性非弾 性散乱を測定するための装置である. 従来この種の装置での エネルギー分解能(ΔE)は入射中性子エネルギーE<sub>i</sub>に対して 3%程度(= $\Delta E/E_i$ )であったが、本装置では単色化デバイス であるフェルミチョッパーを高性能化し ΔE/E<sub>i</sub>=1%の実現 を目指している.本装置では、当面これまで KENS のチョ ッパー分光器 INC で用いられてきた検出器を用いて検出器 系を構成するため、散乱角が10数°程度以下の領域にのみ検 出器が配置される(HRC 基幹部). HRC 基幹部では、比較的 高いエネルギーの中性子を高分解能で用いることにより、従 来の中性子非弾性散乱実験では困難だった実験が可能にな る. 非弾性散乱断面積は弾性散乱に比べて極めて小さいため に、十分な統計精度のデータを得るためには、多量の試料を 必要とし、測定時間も必要である.多量の試料を用いること ができるようにするために最大 50 mm × 50 mm のビーム断 面積が試料位置で利用可能である. 試料サイズに応じてスリ ットを用いて試料位置でのビームサイズを制御することがで きる. 試料環境については, KENS で用いられてきた資産 を用いているために、現状では単結晶試料の測定のために、 一軸ゴニオに冷凍機が搭載されたものが利用可能であり、5 ~300 K の温度範囲で無磁場中の実験が可能である. 試料環 境については今後順次整備していく.

# 2. HRC はどこがすごい?

HRC 基幹部を用いて、0.1 eV 程度から 1 eV 程度のエネ ルギーの中性子を入射して、エネルギー分解能  $\Delta E/E_i = 1\%$ を実現させることによって、従来の中性子非弾性散乱実験で





は困難だった以下に述べる3種類の中性子非弾性散乱実験 方法による研究が実現可能となる(図1).

# (1) 100 meV 程度以下のエネルギー運動量空間における 高分解能実験

図2はISISのチョッパー分光器 MARI を用いて測定した 一次元反強磁性体 CsVCl<sub>3</sub>(単結晶)の磁気励起の動的構造因 子S(q,ω)である<sup>(2)</sup>.磁気励起の分散関係は量子効果も考慮 するとE(q)=4SRJ|sin aq|(Sは磁性原子のスピン量子数, qは一次元波数,aは格子定数)と表わされ,分散関係の測 定から交換相互作用定数Jと量子再規格化因子Rの積が決

<sup>\*</sup> 高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所(〒305-0801 つくば市大穂 1-1) High Resolution Chopper Spectrometer HRC; Shinichi Itoh, Tetsuya Yokoo (High Energy Accelerator Research Organization, Tsukuba) Keywords: *inelastic neutron scattering, chopper spectrometer, high resolution spectroscopy, eV neutrons, spin dynamics* 

 <sup>\*</sup> 略称は今後,変更の可能性有り.
 2009年4月11日受理





定できる.この実験の目的は R の値を決定し量子効果について議論するものであるが、そのためには J の値を決定しなければならない.S(q, $\omega$ )のエネルギー積分は静的相関関数 S(q)を与え、S(q)の温度変化から J の値が決まるので、図2に示される S(q, $\omega$ )のデータを温度数点で測定することによりこの目的を果たすことが原理的には可能である.しかし、この実験では E<sub>i</sub> = 123 meV 及び  $\Delta E/E_i$  = 3%で q 分解能は  $\Delta q$  = 1 nm<sup>-1</sup>であり、S(q)から J を決定するためには q 分解能が不十分であった.そのため、q 分解能の高い別の装置で S(q)を測定する必要があった<sup>(3)</sup>.q 分解能はエネルギー分解能にほぼ比例するので、もし  $\Delta E/E_i$  = 1%が実現していれば、図2に示される測定だけで結論を得ることができていたはずである.このように、分散関係と S(q, $\omega$ )の詳細を同時に決定しようとする研究には高分解能が不可欠であり、HRC 基幹部ではこういった研究が可能となる.

#### (2) 第1ブリルアンゾーンへのアクセス

スピン波を測定して交換相互作用等の相互作用パラメータ ーを決定することは中性子非弾性散乱実験での典型的な研究 方法であり、単結晶試料を用いれば容易に実現するものであ る(図3上).しかし、多結晶試料でスピン波が測定できるよ うになれば、研究の初期段階で多結晶試料しか得られないよ うな場合にも相互作用パラメーターの決定が可能になり、多 くの強磁性物質のスピン波観測へと研究範囲が画期的に広が る.(000)から伝播する強磁性スピン波は粉末平均により運 動量遷移が大きくなると急激に散乱強度が減少する(図3 下).散乱角が1°程度でサブ eVの中性子を高分解能で用い ると、運動量遷移が2nm<sup>-1</sup>程度かつ遷移エネルギーが数 meV~数10 meV の第1ブリルアンゾーンにアクセスする



図3 強磁性スピン波測定の概念図.上:単結晶試料の 場合,下:粉末試料の場合.

ことが可能になり、(000)から伝播する強磁性スピン波が検 出可能となる.金属強磁性体,磁性半導体等におけるスピン ダイナミクスの研究が期待される.

## (3) eV 領域中性子分光の可能性

多くの反強磁性物質のスピン波の観測では  $q = 10 \text{ nm}^{-1}$ 程 度の逆超格子点のまわりで磁気励起の分散関係を決定する が,分散関係の決定には少なくても  $\Delta q = 1 \text{ nm}^{-1}$ 程度の q分解能が必要である.図1での測定では  $E_i = 123 \text{ meV}, \Delta E/E_i = 3% で <math>\Delta q = 1 \text{ nm}^{-1}$ であった. q分解能はエネルギー分 解能にほぼ比例するので, $E_i = 1 \text{ eV}$ 程度の中性子を用いて 分散関係を測定する実験の場合, $\Delta q = 1 \text{ nm}^{-1}$ を実現するた めには  $\Delta E/E_i = 1\%$ が必要である. HRC 基幹部では eV級中 性子に対しても高分解能を実現して高エネルギー磁気励起の

	KENS INC	J-PARC HRC
測定対象 測定領域	非弹性散乱 3 < Q < 300 nm <sup>-1</sup> 1 < E < 500 meV	非弾性散乱(図 1 参照) 0.2 < Q < 400 nm <sup>-1</sup> 0.01 < E < 2000 meV
分解能	$\Delta E/Ei = 5-9\%$	$\Delta E/Ei = 1-5\%$
入射中性子エネルギーお よびビーム出力	Ei = 20–500 meV 3 kW	Ei = 1-2000 meV 1 MW
得られる情報	スピンダイナミクス、格子振動、水素系の振動モード	同左
対象研究分野	強相関電子系,無機材料,金属材料,有機材料	同左
試料サイズ	最大 50 mm×50 mm	同左
特殊環境	低温・高温	低温・高温・磁場等を順次整備
測定時間	数日程度	数時間程度(1 MW 時)
装置特徴	広い(Q,E)を中分解能でカバー	広い(Q, E)を高分解能でカバー(図1参照)
装置運用状況	運転終了	調整試験中
J-PARC 関連装置(チョ ッパー分光器)		アマテラス(Cold Neutron Chopper Spectrometer),四季分光器(4d SpacE AccesS neutrON Spectrometer)

表1 HRC で何ができる? どこがすごい?

分散関係を決定することが可能になる.また,検出器をより 高角に配置することにより,水素系の振動モードの高分解能 測定が可能となる.さらに,eV領域の中性子が利用可能に なると,中性子非弾性散乱による電子励起の観測が期待され るが<sup>(4)</sup>, J-PARCが目標出力である1MWを達成すれば HRC 基幹部で電子励起の検出の可能性が現実化する.

J-PARCでは、HRC、アマテラス(Cold Neutron Chopper Spectrometer)<sup>(5)</sup>,四季分光器(4SEASONS: 4d Space Access neutrON Spectrometer)<sup>(6)</sup>の3台のチョッパー分光器が 建設されている。HRCはmeVからeVまでのエネルギー領 域を高分解能で、アマテラスは20meV以下の低エネルギー 領域を高分解能で、四季分光器は高温超伝導研究に特化して 設計されたもので300meV以下のエネルギー領域を中程度 の分解能で大強度で、それぞれカバーするものである。また、 J-PARCには、チョッパー分光器より低いエネルギー領域 をカバーする生物ダイナミクス解析装置(DNA)及び中性子 共鳴スピンエコー分光器群(VIN ROSE: Village of Neutron Resonance Spin Echo Spectrometers)の設置が計画されてい る。参考までに、KENSに設置されていた INC 分光器<sup>(7)</sup>と の性能比較を**表1**に記す。

## 3. HRC を活用するために

本装置では2008年度に遮蔽体が完成し,KENSで用いて

いた INC 分光器を移設して調整試験を開始した. INC が KENS に設置されていたときに比べて,分解能関数が対称 で,フェルミチョッパーで分解能がよく制御できることが明 らかになっている.本格的真空槽が2009年度に設置が完了 する予定であり,これによって HRC 基幹部が完成する.高 度化についても一部予算化されていて,2009年度中に一部 の高角部の検出器が増設される計画である.HRC 基幹部で 展開されるサイエンスを議論するために2008年度に研究会 を開催してきた.今後も適宜研究会開催の予定である(研究 会情報アクセス先:http://neutron-www.kek.jp/).

## 文 献

- S. Itoh *et al.*: J. Neutron Research, **13**(2005), 59; ICANS-XVII (LA-UR-06-3904, Los Alamos National Laboratory), (2006), 1019; ICANS-XVIII (Institute of High Energy Physic, Chinese Academy of Science), (2007), 362: HRCの設計性能.
- (2) S. Itoh *et al.*, Phys. Rev. Lett., **74**(1995), 2375: CsVCl<sub>3</sub>の分散 関係.
- (3) S. Itoh *et al.*: J. Phys. Soc. Jpn., **73**(2004), 269: スピン量子数 に依存する一次元反強磁性体の量子効果.
- (4) N. Tomita and K. Nasu: Phys. Rev. B, 61 (2000), 2488: 中性子 非弾性散乱で期待される電子励起.
- (5) K. Nakajima *et al.*: J. Neutron Research, 15(2007), 13: アマテ ラスの設計性能.
- (6) R. Kajimoto *et al.*: J. Neutron Research, 15(2007), 5:四季分 光器の設計性能.
- (7) S. Itoh *et al.*: ICANS-XV (KEK Proceedings 2000-22),
  (2001), 425: INC 分光器の性能.