日本中性子科学会第 15 回技術賞を受賞して

中性子科学研究施設 益田 隆嗣

2017 年 12 月 2-3 日に福岡大学で開催された日本中性子科学会第 17 回年会において、中性子科学研究施設の皆様および高エネルギー加速器研究機構の皆様と共同で、第 15 回中性子科学会技術賞を受賞する栄誉に恵まれました[1]。受賞テーマは、「高分解能チョッパー分光器 HRC の建設と中性子ブリルアン散乱法の実装」でした。高分解能チョッパー分光器(High Resolution Chopper Spectrometer, HRC)は、東京大学と高エネルギー加速器研究機構が共同で J-PARC MLF に建設し、2010 年 5 月にビーム実験が開始されました。meV から eV にわたる広いエネルギー領域の中性子を高分解能で利用し、物質のダイナミクスを幅広い波数-エネルギー空間で効率的に測定を行い、詳細な研究を行うことが可能となっています。

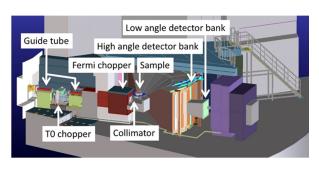


図1: HRC 分光器の概念図

HRC 分光器では、試料位置を中心とした半径約 4m 中心角 90 度の弧上に、直径 3/4 インチ高さ約 3m の細長い位置敏感型検出器が設置されています[2]。これにより、3 次元波数 q 空間において検出器がカバーする 2 次元面上での測定を一度に行います。図 2(a)に紺色の領域が示されていますが、これは、試料を回転させることにより、弧状の検出器が 2 次元逆格子空間を掃引した様子を示しています。(0, -1.5)に赤いスポットがありますが、これは磁気ブラッグピークです。このように、チョッパー分光器では q 空間を効率的に測定することができますが、それだけではありません。熱中性子 25.3 meV の中性子の速度は秒速 2.2 km 程度であるため、ミリ秒の飛行時間と飛行距離を測定することにより、中性子の速さ、すなわちエネルギーを決めることができます。飛行距離は、試料位置から検出器までの距離で固定されているので、

実験では飛行時間を記録することでエネルギーが決定さ れます。したがって、エネルギー方向にも幅広い領域を 測定することになります。図 2(b)-2(d)は各々1 meV、2 meV、3 meV の励起スペクトルを表していますが、これ らは図 2(a)と同時に測定されたデータです。(0, -1.5)か らスピン波が立ち上がっている様子が分かります。さら に、測定データの切り口を、波数-エネルギーにすると、 図 2(e)、2(f)のような分散関係が得られます。このように して、波数-エネルギーの 4 次元空間で定義される動的 相関関数を効率的に測定することができます。図2では、 マルチフェロイック物質 NdFe3(BO3)4のスピン・モデル を決定することにより、磁気異方性の起源が Nd イオン の結晶場であることが明らかとなりました[3]。この実験 では、試料の入射中性子エネルギー(Ei)を 10 meV として おり、0.4 meV 程度の高いエネルギー分解能で実験を行 うことができたため、磁気Γ点での異方性ギャップの大 きさを見積もることもできました。

効率的な測定が可能となった一方で、収集されるデータ量は膨大になりました。これらのデータを解析するためのソフトウェア開発に、中性子施設は大きな貢献をしました。また、測定q空間を広げるための検出器増設にも貢献をしました。

 E_i を大きくすれば、より高いエネルギーの励起を観測することもできます。図3は、ブリージングパイロクロア物質 $Ba_3Yb_2Zn_5O_{11}$ の中性子スペクトルです。 E_i =150meV で実験を行ったので、固有エネルギーが 68 meV, 55 meV, 38 meV の結晶場励起を観測することができました[4]。これにより、Yb イオンの基底波動関数を決定することができました。原子炉中性子では 70meV 以上の中性子を作るにはホットソースとよばれる特殊な装置が必要となるため、これまであまり実験されてきませんでした。J-PARC が稼働してから、結晶場の中性子実験が国内で簡単にできるようになりました。

HRCの特徴の一つは、0.6 度の低角まで散乱実験が可能であることです。これによりたとえば、粉末強磁性試料の Γ 点近傍のスペクトルが測定可能となり、中性子研究の幅が大きく広がりました[5]。

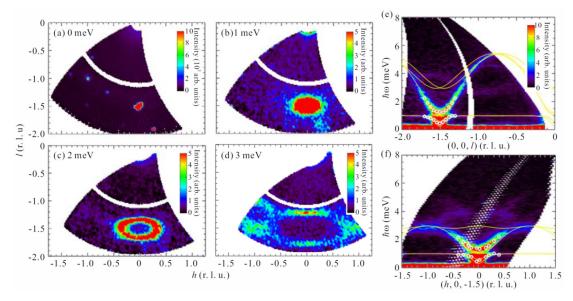


図 2:マルチフェロイック物質 $NdFe_3(BO_3)_4$ の中性子非弾性スペクトル[3]。

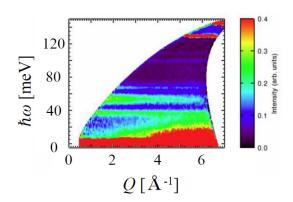


図 3: Ba₃Yb₂Zn₅O₁₁の結晶場励起スペクトル[4]。

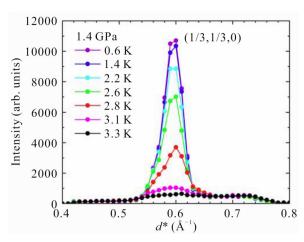


図4: CsFeCl₃の圧力誘起秩序相における磁気ピーク。

HRC 分光器は非弾性散乱実験用に設計されていますが、弾性散乱実験、すなわち中性子回折実験もできます。 特に、白色中性子によるラウエ法を用いると、飛行時間 分解により、等価なミラー指数のブラッグピーク (たとえば、(00D), $l=1,2,3,\cdots$)を時間分解することができます。これは、速度の速い X 線では困難です。図 4 は、クランプ式圧力セルに封入した結晶の高圧下での磁気ピークの温度依存性を示しています [6]。セルの材質は CuBe 合金で、肉厚は 6 mm となっていますが、透過力の強い中性子を用いると、ピークプロファイルがきれいに測定されます。

このように、J-PARC に建設された HRC 分光器を用いることにより、幅広い波数-エネルギー空間の動的相関関数の測定を効率的に収集できるようになりました。必要に応じて回折実験による秩序変数測定も可能です。現在では数多くの共同利用ユーザーがこの分光器を使って研究を行っています。中性子施設では、引き続きソフトウェア開発を継続すると同時に、検出器増設、試料環境機器の充実に尽力しています。今後とも皆様のご支援をどうぞよろしくお願いします。

謝辞

本稿に記載した実験データの多くは、林田翔平博士(元 益田研大学院生、現在ETH博士研究員)との共同研究によ るものです。ここに感謝の意を表します。

[1] 本技術賞は、伊藤晋一氏(KEK)、横尾哲也氏(KEK)、 吉澤英樹氏(元中性子施設)、遠藤康夫氏(元東北大学)、 川名大地氏(中性子施設)、杉浦良介氏(中性子施設)、 浅見俊夫氏(中性子施設)、左右田稔氏(理研)、井深壮 史氏(元 KEK)、羽合孝文氏(KEK)との共同受賞です。

- [2] 弧の中心角は、現在の HRC では 90 度となっておりますが、予算に応じて、最大 120 度まで広げることが可能となっております。皆様のご支援をよろしくお願いします。
- [3] S. Hayashida, M. Soda, S. Itoh, T. Yokoo, K. Ohgushi, D. Kawana, H. M. Ronnow, and T. Masuda, Phys. Rev. B 92, 054402 (2015).
- [4] T. Haku, M. Soda, M. Sera, K. Kimura, S. Itoh, T. Yokoo, T. Masuda, J. Phys. Soc. Jpn. 85, 034721 (2016).
- [5] S. Itoh, Y. Endoh, T. Yokoo, S. Ibuka, J-G. Park, Y. Kaneko, K. S. Takahashi, Y. Tokura and N. Nagaosa, Nature Communications 7, 11788 (2016).
- [6] S. Hayashida, O. Zaharko, N. Kurita, H. Tanaka, M. Hagihala, M. Soda, S. Itoh, Y. Uwatoko, and T. Masuda, Phys. Rev. B 97, 140405 (2018).