日本中性子科学会第15回技術賞を受賞して

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、

中性子科学研究施設 益田 隆嗣

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10meV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。 $E_i = 150$ meV 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 NdFe3(BO3)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、(00*l*), *l* = 1, 2, 3, …)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).

.....