

# 磁気八極子の観測に成功

平成 22 年 1 月 18 日

松村 武\*

物質が磁化した状態をミクロスコピックに記述しようとするとき、磁気双極子だけでは不十分で、磁気八極子まで必要な場合がある。その観測は難しいが、共鳴 X 線回折が極めて有効であることがわかった。

物質に外部から磁場をかけると、普通はかけた磁場の方向に磁化が発生する。この現象をミクロスコピックに記述すると、次のようになる。物質中には磁性の源になる原子があり、その 1 個 1 個が、電子のスピンと軌道運動によって、磁気双極子と呼ばれるミクロな磁石を形成している。1 対の N 極と S 極、計 2 個の磁極で表されるので双極子なのである。図に描くときは S 極から N 極へ向かう 1 本の矢印で表す。無磁場ではこれらは無秩序にバラバラな方向を向いていて、物質全体としては N 極も S 極も発生していない。ここに外部から磁場をかけると、温度による乱れはあるものの、各原子の N 極が磁場の方向を向いて揃うので、物質全体としても N 極 S 極が発生する。これが物質が磁化した状態である (図 1-b)。

ところが、CeB<sub>6</sub> (セリウム六ホウ化物、図 1-a) という物質に磁場をかけると、普通の大極子的な磁化だけでなく、図 1-d のような、非常に奇妙な内部構造をした磁化状態が現れることが予言されていた [1]。この状態は各原子が N 極 4 個、S 極 4 個、計 8 個の磁極で表されており、磁気八極子と呼ばれる状態である。N 極が上にも下にも、また右にも左にも、出てくるので、全体の磁化には寄与しない。しかし、無秩序なのではなく、周期的に揃った秩序構造が保たれていおり、磁気八極子間の相互作用がマクロな物性を支配しているという、実に特異な状態である。

なぜこのような奇妙な磁化状態が現れるのだろうか。実は、その背後には、CeB<sub>6</sub> が絶対温度 3.3 ケルビン以下で電気四極子秩序と呼ばれる秩序状態に相転移しているという事実がある (図 1-c)。電気四極子とは、電荷分布が球対称からずれた状態のことで、古典的には電荷分布の薄いところに正電荷 2 個、濃いところに負電荷 2 個を置くことで表されるので四極子と呼ぶのである。この状態で図 1 のように上向きに磁場をかけると、単純な考えでは、電荷分布があるところだけで上向きの磁化が生じるので、磁気双極子密度が等方的ではなくなり、薄いところは実効的に下向きの磁化が生じることになる。単純にはこれが磁気八極子だと考えることもできようが、物質中の電子状態は量子力学で記述されるものであり、磁気八極子を量子力学的に正しく記述すると実に奇妙な状態である。 $x, y, z$  方向を向いた磁気双極子をそれぞれ  $J_x, J_y, J_z$  と表すとき、図 1-d の磁気八極子は  $(J_x J_y J_z + J_y J_z J_x + J_z J_x J_y - J_x J_z J_y - J_z J_y J_x - J_y J_x J_z)$  と書き表されるのである。特定の向きというものが無い等方的な状態であることが読み取れる。

\*広島大学大学院先端物質科学研究科量子物質科学専攻  
E-mail: tmatsu@hiroshima-u.ac.jp

この  $\text{CeB}_6$  の磁気八極子とその背後にある電気四極子秩序を実験的に観測するため、我々は共鳴 X 線回折という手法を用いた。X 線回折は物質の結晶構造を調べるために使われる一般的な手法であり、多くの大学や研究所の実験室に装置が備えられているが、共鳴 X 線回折は通常の X 線回折とは原理が異なっている。試料に照射する X 線のエネルギー ( $E = h\nu = hc/\lambda$ ,  $h$  はプランク定数,  $c$  は光速,  $\lambda$  は X 線の波長) を特定の内殻と最外殻電子軌道のエネルギー準位差に一致させることで内殻電子を励起し、励起された電子がもとの内殻に戻るときに出す X 線光子による回折現象を調べるのである (図 2 上)。秩序の周期を  $d$  とするとき、ブラッグの公式  $\lambda = 2d \sin \theta$  で決まる方向に共鳴回折ピークが現れ、それを詳しく調べると、電気四極子や磁気八極子発生の源となっている特定の電子軌道の情報だけを選択的に引き出すことができるのである [2]。

実験にはエネルギー可変で、かつ高強度な X 線ビームが必要なので、共鳴 X 線回折は大型の放射光施設でなければできない。今回の実験はつくば市にある高エネルギー加速器研究機構の放射光科学研究施設のビームライン 3A で行われた。図 2 下がその結果である。入射する X 線のエネルギーを変化させながら回折ピークの強度を測定すると、ちょうどエネルギーがセリウムの内殻 2p 準位と非占有軌道である 4f 準位や 5d 準位間のエネルギー差、約 5.72 キロ電子ボルトに一致するあたりで強度が増大する。低エネルギー側のピークが 2p-4f 準位間の共鳴、高エネルギー側が 2p-5d 準位間の共鳴ピークである。我々は今回の実験中、外部磁場の向きを反転させると、2p-4f 間の共鳴ピーク強度が変化することに気がついた。磁場反転で実験結果が変わることはとても不思議であったが、データだけはとって、理由は後でじっくり考えることにした。

この実験結果を理解する鍵は 2p-4f 共鳴と 2p-5d 共鳴の間の干渉効果にある。2p-5d 共鳴のほうは四極子秩序を反映した信号であるのに対し、2p-4f 共鳴のほうは主に磁気八極子を反映している。ここで、電荷分布は磁場反転でも変わらないのに対し、磁気八極子は N 極と S 極が入れ替わるのでその符号が逆転する。そのため両者の干渉の仕方がプラス磁場のときとマイナス磁場のときで異なってきて、強度に違いが出てくるのである。この違いから磁気八極子が磁場で誘起される様子を高精度に観測することができた [3]。双極子、四極子、八極子といったミクロな電子状態は多極子モーメントと呼ばれ、現在日本を中心に盛んに研究されている。今回見出した磁場を反転させる手法は他の物質における多極子の観測にも有効に適用されるであろうと考えている。

## 参考文献

- [1] O. Sakai, R. Shiina, H. Shiba and P. Thalmeier: J. Phys. Soc. Jpn. **66**, 3005 (1997).
- [2] 村上洋一, パリティ Vol. 16, No. 6, (2001).
- [3] T. Matsumura, T. Yonemura, K. Kunimori, M. Sera and F. Iga: Phys. Rev. Lett. **103**, 017203 (2009).

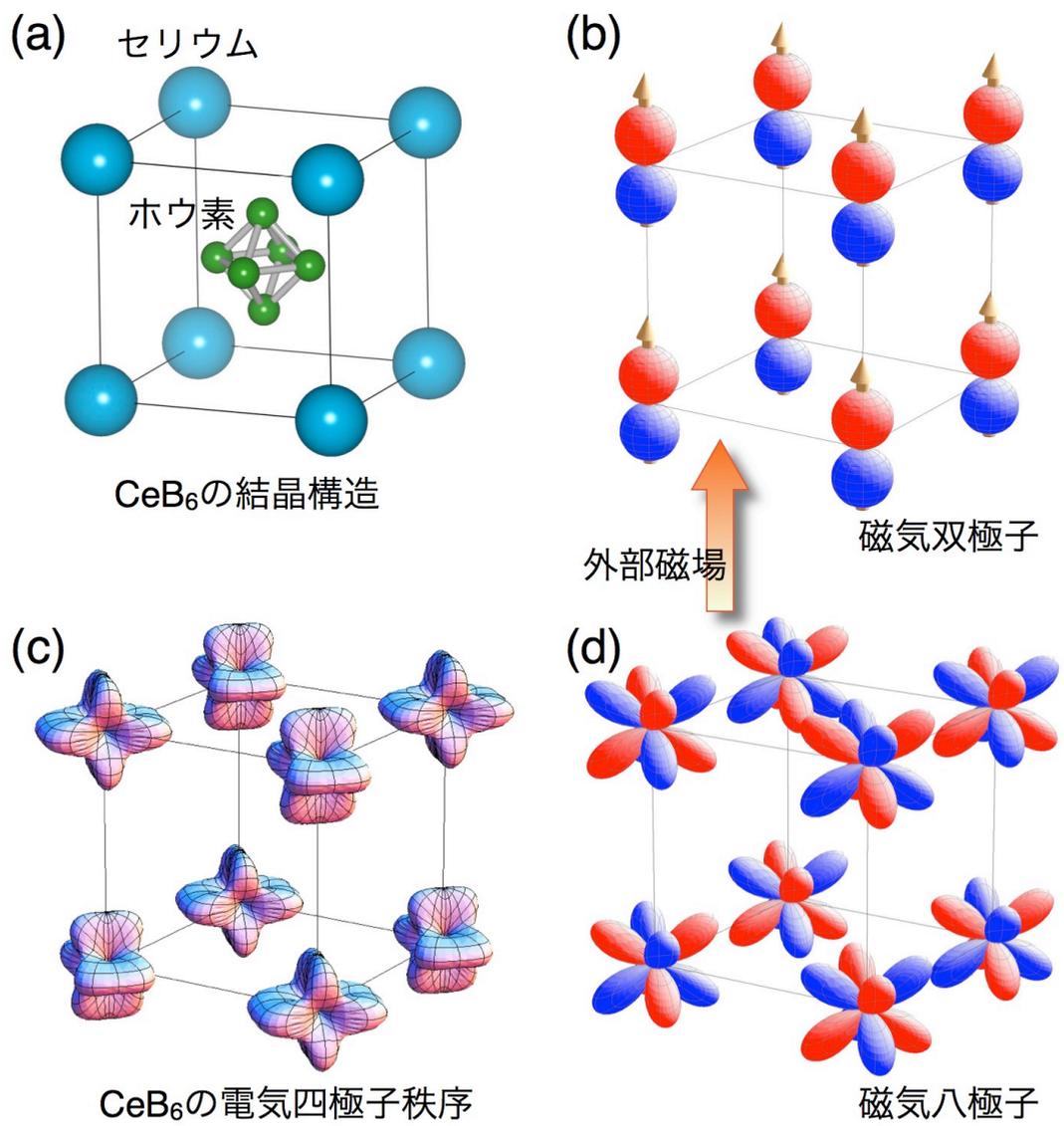


図 1: (a) CeB<sub>6</sub> (セリウム六ホウ化物) の結晶構造. (b) 外部磁場で磁気双極子が誘起される様子. (c) 電気四極子秩序状態. (d) 外部磁場で磁気八極子が誘起される様子.

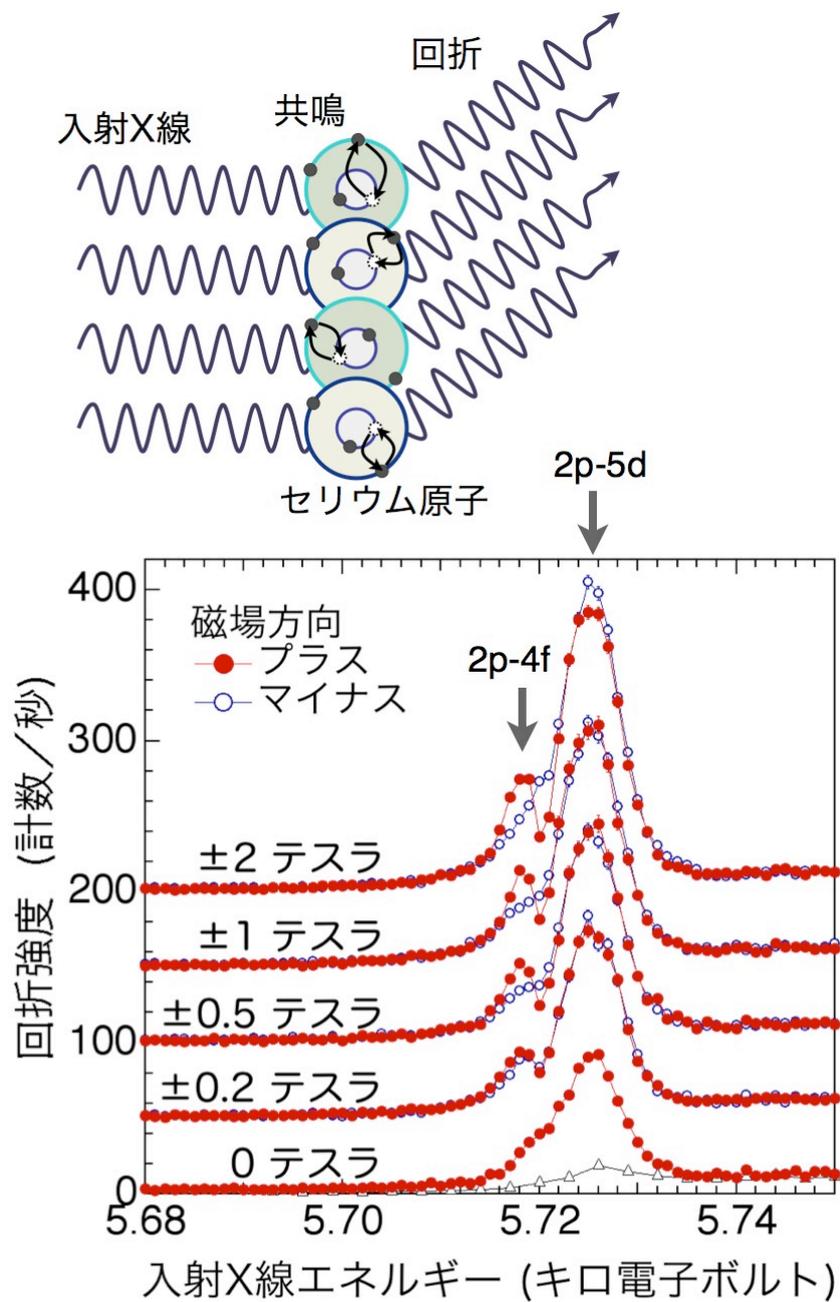


図 2: 共鳴 X 線回折の模式図 (上) と  $\text{CeB}_6$  での実験結果 (下)。磁場方向を反転させると、共鳴スペクトルが変化する。