

# 核バーネット効果の観測に成功するまでの経緯

## The circumstances until we succeed in observation of the nuclear Barnett effect

中堂 博之

Hiroyuki Chudo

力学的物質・スピン制御研究グループ

Research Group for Spin Manipulation and Material Design by Combining Spintronics and High-Speed Rotation Technique



電子の持つ磁気的な自由度を用いて従来のエレクトロニクスよりも機能的なデバイス開発をめざすのがスピントロニクスです。我々の研究グループはそこからさらに一步先を見据え、電子の持つスピン角運動量と物体の回転運動の相互作用を利用した、スピนมカトロニクスの開拓を目標にこの中期計画よりスタートしました。

バーネット効果とは、物体の回転運動に磁性体中の電子スピン角運動量が応答し、物体が磁化する現象です(右図) [1]。回転によって物体に有効磁場(バーネット磁場)が働いたと解釈することができ、現在ではスピนมカトロニクスの中心原理とみなされています。2012年10月、我々はこのバーネット磁場を核磁気共鳴(NMR)法で観測することに成功しました。

研究の発端は、量子物性理論グループの家田さんと松尾さんから、バーネット磁場は粒子の質量に比例するので原子核には大きなバーネット磁場が働く、という情報をいただいたことです。NMR法は核が感じる磁場を高精度で測定できますので、試料の回転によってバーネット磁場が生じればNMRの共鳴線はシフトします。しかしながら、NMRの測定手法の一つにmagic angle spinning (MAS)という分解能を向上する手法があり、試料を回転させながらNMR測定することは既に行われていました。そこではいかなる磁場も観測されていませんでした。当初はmagic angleという特殊な角度で磁場に対して回転させているのが問題だろうと推測し、磁場と平行に回転させる装置をつくり測定を行いました。やはりシフトは見えませんでした。理論家と考察したところ、観測する座標系がポイントで、バーネット磁場を磁気共鳴的手法で観測するためには試料と同じ回転座標系で測定しないといけないという結論に至りました。装置全体を数kHzで回せ!と無茶なことをいわれたわけです。到底限られた予算でそのようなことはできませんが、NMR信号の検出部であるコイルを回転させる方法(コイルスピニング法)があることを思い出しました[2]。コイルスピニング法とはごく最近開発されたMAS NMRの感度向上をはかる測定手法です。嘱託研究員の中村さんがどこかの化学系の国際会議でその講演を聞いてきたことを、一緒にタバコを吸っているときに教えてくださいました。コイルスピニング法のコイルを参考にバーネット磁場測定用にコイルを新規開発しましたが、コイ

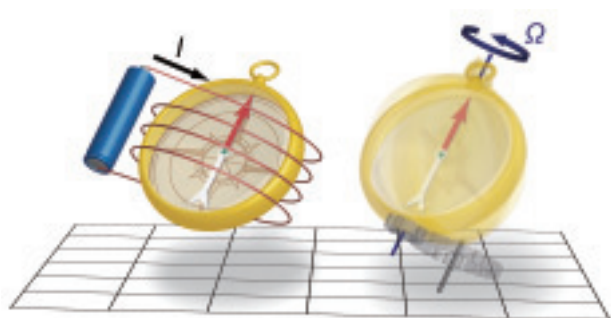
Spintronics is a research field developing more functional devices using electron's magnetic degrees of freedom than the conventional electronics. Our research group started at this mid-term plan for the purpose of exploitation of the spinmechatronics which is advanced concept beyond the spintronics and where an object is rotated by using the electronic spin angular momentum.

The Barnett effect is a phenomenon that the spin angular momentum in a magnetic body responds to rotation, as a result the object is magnetized. S. J. Barnett discovered the phenomenon about 100 years ago [1]. An effective magnetic field (Barnett field) can be interpreted as appearing on the object, and the Barnett field is regarded as the one of the central principles of spinmechatronics now. We succeeded in observing this Barnett field by a nuclear magnetic resonance (NMR) method.

The beginning of this research is that Dr. J. Ieda and Dr. M. Matsuo belonging to the condensed matter theory group told me information that the Barnett field acting on nucleus becomes gigantic since the Barnett field is proportional to rest mass of particles. Since an NMR method can measure a magnetic field acting on nuclei with high precision, if the Barnett field emerges due to the sample rotation, the NMR line will shift. However, NMR measurements during the sample rotation had already been performed, being the magic angle spinning (MAS) which is already established method improving a resolution of NMR. Any magnetic fields have not been observed with MAS NMR experiment. Although we made an instrument and performed an experiment, any additional fields are not observed. We discussed with the theorists and resulted in the conclusion that, in order to observe the Barnett field using the magnetic resonance method, an NMR system and sample must be rotated on the same rotation frame of reference. The theorists said that whole equipment should be rotated by several kHz. We can not do such a thing on our budget.

ルが非対称な構造となり高速で回転させることは簡単ではありませんでした。遠心分離の専門家である小野さんがコイルのバランスを調整して下さり、なんとか高速で回転させることができ、バーネット磁場を観測することに成功しました。

本測定手法をすこし変更すれば、ベリ位相や回転ドップラー効果のようなスピンの回転運動に伴う物理現象も観測可能であることが最近の研究でわかりました。さらに、遠心分離過程における原子の移動をその場観察できる可能性もあります。基礎物理の理論家と実験家、原子力研究の専門家が協力しあえる先端基礎研究センター特有の研究環境のなかで達成できた研究です。



#### バーネット磁場の概念図

通常、磁場は電流によって生じる（左）。バーネット磁場は物体を回転させる事で生じる（右）。方位磁針は生じた磁場の方向に向く。

#### Concept of Barnett field

A magnetic field is conventionally generated by an electric current (left). The Barnett field, on the other hand, is generated by rotation (right). The compass in the figure directs the emergent magnetic field.

Then, I remembered the coil spinning technique that a sample and NMR coil which is a primary detecting element of a NMR signal are rotated at high speed [2]. The coil spinning technique is developed recently and enables a high sensitive MAS NMR. Dr. Nakamura who is a part-time-senior researcher happened to see the technique in the certain international conference on chemistry and taught me the technique while smoking cigarette together with me. Although we referred to the coil spinning technique and developed newly a coil to observe the Barnett field, it was not easy to rotate the coil at high speed because the coil is an asymmetrical structure. Dr. Ono who is a specialist of centrifugal separation adjusted a balance of the coil, and we could rotate the coil at high speed. Then, we succeeded in observing the Barnett field.

With a little change of experimental condition, our latest research reveals that the physical phenomenon accompanying a spin rotation like the Berry's phase or the rotation Doppler effect can also be observed. Furthermore, this technique may allow us to preform in-situ measurements of atomic movements in a centrifugal separation process. This research is achieved in the unique environment of ASRC, where theorists and experimentalists of fundamental physics, and specialists of nuclear engineering collaborate closely.

#### 参考文献 References

- [1] S. J. Barnett, Phys. Rev. **6** 239 (1915).
- [2] D. Sakellariou, G. L. Goff, Nature **447** 694 (2007).



バーネット効果観測の成功を記念して  
力学的物質・スピン制御研究グループの研究者たち  
上段左より 安岡弘志、齊藤英治、春木理恵、岡安悟  
下段左より 針井一哉、中堂博之、小野正雄

Group Members  
Back : H. Yasuoka, E. Saito, R. Haruki, S. Okayasu  
Front : K. Harii, H. Chudou, M. Ono