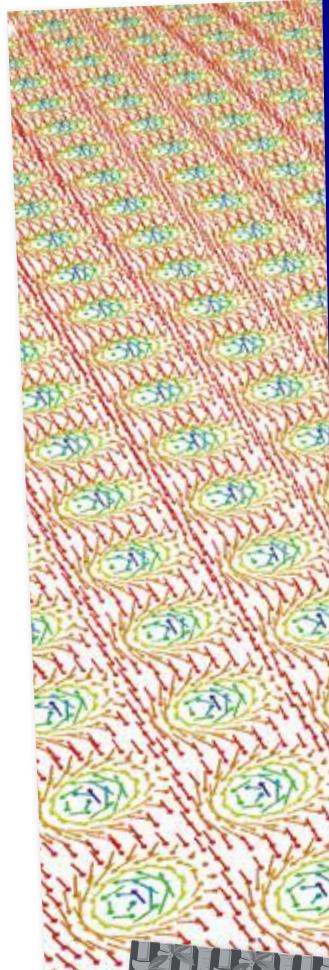


2018.6 No.24

「磁気スキルミオン」を放射光で見る



放射光でとらえた磁気スキルミオン
提供：物質・材料研究機構 山崎 裕一



放射光は、エネルギーの高い電磁波（真空紫外線～X線）です。KEKではフォトンファクターで作られます。



クマさんの鍵穴

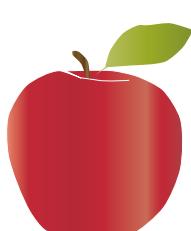


詳しくは2ページへ

突然ですが、
クイズ です。

リンゴを赤い四角形から
出すにはどうしたらいい
でしょうか？

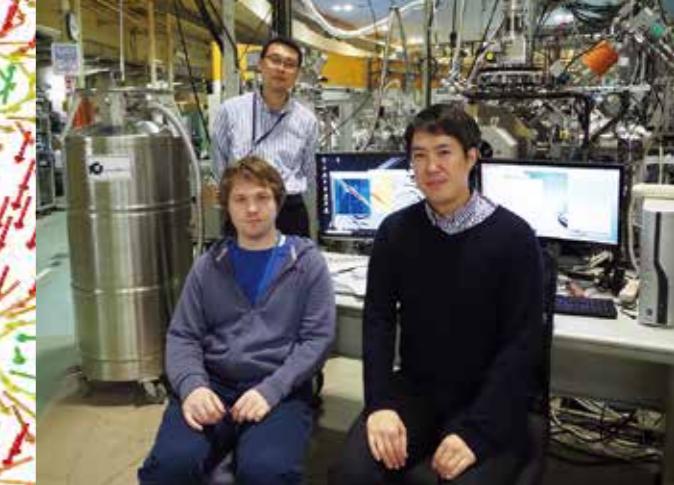
答えは6ページ



「磁気スキルミオン」を放射光で見る

物質・材料研究機構（NIMS）山崎 裕一 主任研究員と物構研の中尾 裕則 准教授、理化学研究所（理研）の Victor Uklev 特別研究員らが中心となって、東京大学 工学系研究科や 理研 創発物性科学研究センターなどと共同で進めている研究をご紹介します。

この研究が始まったのは 7 年前。物構研からは、他に本田 孝志 助教や 村上 洋一 教授が参加しています。山崎氏は 2014 年までフォトンファクトリー（PF）のスタッフでした。



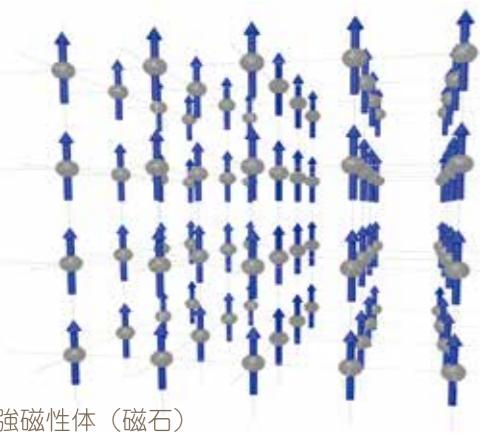
PF BL-16A にて
左奥から中尾氏、Ukleev 氏、山崎氏



磁気モーメントと磁性体

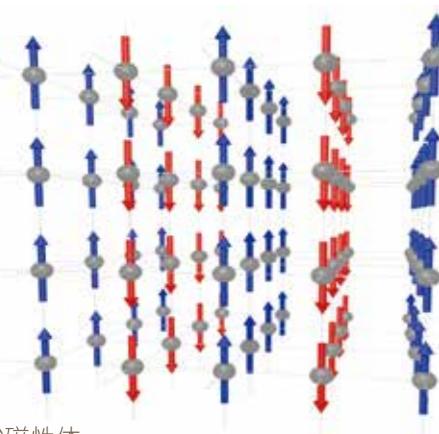
物質が磁力を持つか持たないかは、原子が持つ磁場の源「磁気モーメント」が、打ち消しあうかどうかで決まります。磁気モーメントが同じ方向に揃うか、逆方向に向いて打ち消しあうかは、隣り合った原子間の相互作用によります。

例えば、磁石では、それぞれの磁気モーメントが同じ方向に揃っています。これを強磁性体と呼びます。



強磁性体（磁石）

一方で、磁力を持たないものは、隣り合った原子同士の磁気モーメントが互い違いに向いていて、全体では磁力を打ち消しあっています。これを反強磁性体と呼びます。



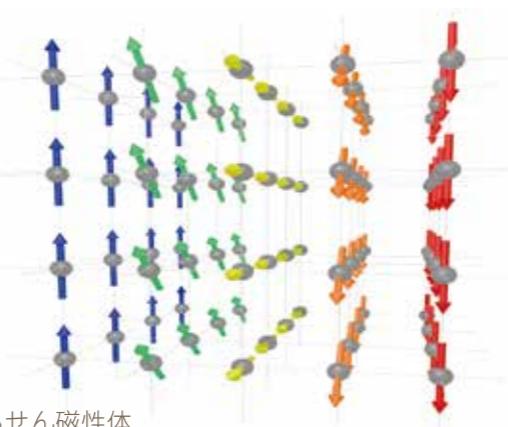
反強磁性体

磁性体	強磁性	コバルト・鉄など（磁石）
	反強磁性	酸化マンガンなど
	常磁性	アルミニウム・タンゲステンなど
	反磁性	銅・プラスチック・超伝導物質など

カイラリティ * を持つ結晶では、空間のある 1 点で反転させようとしても重ね合わせることができない（空間反転対称の破れ）ことにより、磁気モーメントの方向をねじろうとする作用が働くことがあります。これを「ジャロシンスキー・守谷相互作用」と呼びます。

* カイラリティ（キラリティ）：ある立体構造とその鏡像が、空間上の回転によって重ね合わせることができない（左手と右手の関係という意味で「対掌性」ともいう）。カイラリティを持つ結晶構造のことを「カイラル（キラル）な結晶構造」と呼ぶ。

強磁性になろうとする相互作用と競合すると、磁気モーメントが回転した「らせん磁性体」になることもあります。

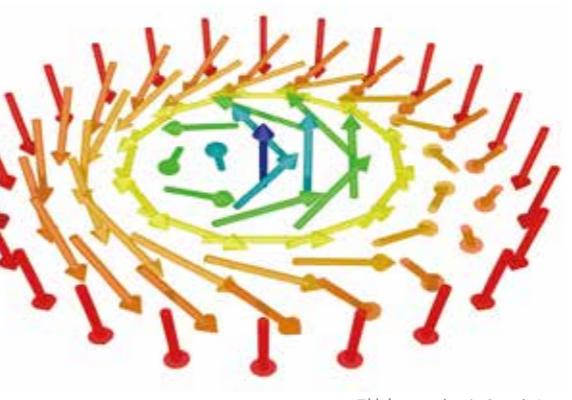


らせん磁性体に磁場を加えると磁気モーメントが円錐状に回転する「コニカル磁性体」になり、さらに強い磁場を加えると磁気モーメントが同じ方向に揃った強磁性体になります。



磁気スキルミオン

しかし、らせん磁性体をある温度に冷やして、磁場を加えると磁気モーメントが渦を巻いたような特殊な磁気構造が現れることがあります。



磁気スキルミオン

このような磁気構造体は磁気スキルミオンと呼ばれています。物質によって大きさは異なりますが、直径が数十から数百 nm になります。磁気モーメントを一点に集めると球を覆うように配置できるため、ヘッジホッグ（はりねずみ）構造とも呼ばれています。



ヘッジホッグ構造

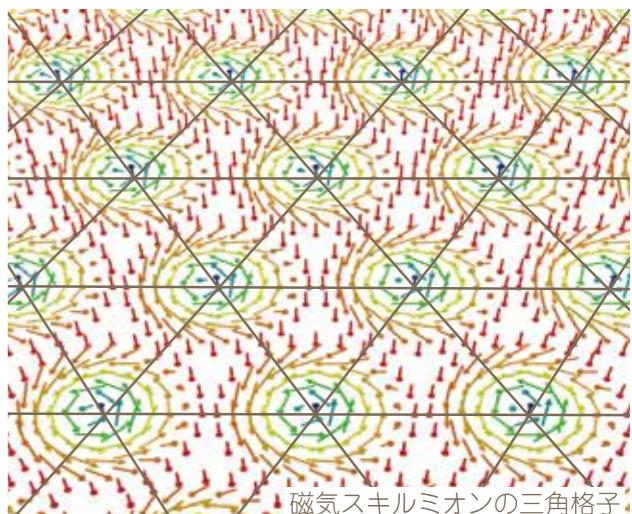


磁気スキルミオンへの期待

2009 年、ドイツの研究グループが中性子小角散乱 * によって磁気スキルミオンを初めて観測しました。カイラルな結晶構造を持つマンガニケイ化物（MnSi）において、ある温度と磁場の

* 中性子小角散乱：中性子線を試料に当て、入射に対しあおむね 5°以下の角度で散乱する中性子線を検出して情報を得る分析手法。

条件下で六角形の磁気散乱を観測し、磁気スキルミオンの三角格子 * を形成している可能性を報告したのです。



* 三角格子…周期的に並んだ仕切りが作る图形が三角形の格子。基盤の目は四角格子。

翌 2010 年には、日本の研究グループ（理研・NIMS・日本電子）がローレンツ電子顕微鏡法 * によって磁気スキルミオン格子を直接的に観測することに成功しました。

* ローレンツ電子顕微鏡法：透過型電子顕微鏡（TEM）を用い、試料の内部磁化と入射電子線の相互作用により生じるローレンツ力を使って、強磁性体の自発磁化を観察する手法。

磁気スキルミオンは、磁気構造の特徴から安定な構造であることが知られていて、結晶に電流を流すと、磁気スキルミオンが壊れずに結晶内を流れることが実験的に報告されています。電場や電流によって制御でき、その有無によって 1 と 0 を表現することができるので、磁気スキルミオンを情報媒体とする次世代のエレクトロニクスデバイスへの応用が期待されています。



ゼロからの装置開発

デバイス応用への道筋をつけるためには、電流や電場を加えたときの磁気スキルミオンの挙動を、高い空間分解能でしかも時間分解能よく観測しなければなりません。実際にデバイスが動いている状態での観測が重要となるので、デバイスに使われる微小な試料でも磁気スキルミオンを観測できる測定手法が必要となります。

研究グループは、放射光のパルス性や高輝度などの特性を活用することでそのような測定ができると考え、2011年にフォトンファクトリー(PF)BL-16Aにおいて、磁気スキルミオン観測のための透過型共鳴軟X線小角散乱装置*の開発に着手しました。2004年にはドイツの研究グループが類似の手法を使った薄膜の磁気構造の観測を報告していましたが、磁気スキルミオンは、さらに「温度変化」させ、「磁場」をかけられる装置でなければ測定できません。世界初への挑戦でした。



薄膜試料をどう切り出すか

透過型共鳴軟X線散乱の測定には、軟X線が透過できる数百nm程度の非常に薄い試料を使います。

磁気スキルミオンは、バルク試料から切り出した薄片でなければ発現しないので、試料調製法も合わせて開発する必要がありました。イオンミリング法*によって薄片化する方法や、集束イオンビーム装置(FIB)*による試料調製など様々な手法で、薄い試料を作っては測定することを繰り返しました。非常に薄い試料なので壊れやすく、試料を準備するときの取り扱いにも細心の注意を払いつつ作業を続けました。

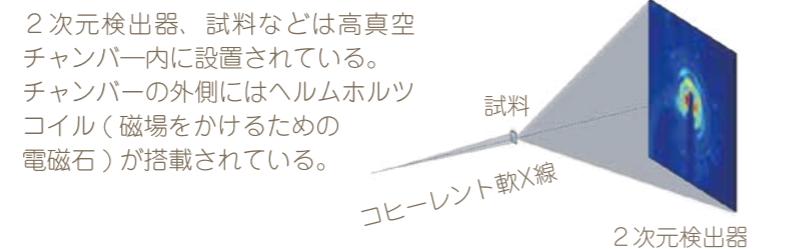
試行錯誤の末、金の薄片にピンホールを加工し、その上にFIBで薄片化した試料を固定する方法が良いということがわかり、測定可能な試料を作製することができました。震災の影響もありましたが、装置の開発を始めてから測定できるまでに4年近くの歳月を要しました。

*イオンミリング法：アルゴンイオンビームを試料に照射し、表面を削ることで試料を薄片化する方法。

*集束イオンビーム装置(FIB)：細く絞ったガリウムなどのイオンビームを試料表面で走査し、観察しながら加工する装置。電子顕微鏡の試料作製に用いられる。



* 透過型共鳴軟X線小角散乱装置(PF BL-16A)：
薄片化した試料に軟X線を照射し、
透過し散乱された軟X線を
2次元検出器で計測する。

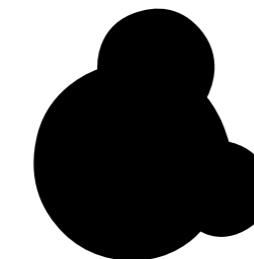


いよいよ観測へ…と、その前に

この実験では、軟X線を切り出すためにクマの形をした数マイクロメートル程度のピンホールを準備し、その上に試料を固定しました。

BL-16Aで発生する軟X線は数百μm角に集光されていますが、全体的に見ると軟X線の波面は揃っていません。ところが、直径5μm以下のピンホールを挟むと、コヒーレントな*軟X線を取り出すことができます。

試料にはクマ型に切り出された軟X線が照射されます。



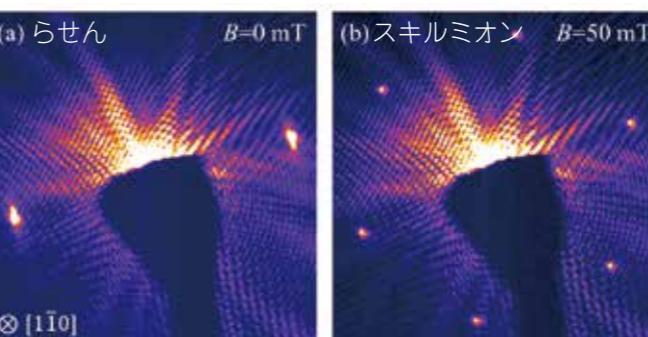
ピンホールのクマの形
(耳のサイズが左右で
異なることに着目!)

*コヒーレントな軟X線の性質を表す言葉で、位相や振幅、波面が揃っていない、互いに干渉しあうことができる様子。



鉄 - ゲルマニウム(FeGe)を測定

装置にカイラルな結晶構造を持つ磁性体FeGeを入れ、透過型共鳴軟X線小角散乱による磁気スキルミオンの観測を試みました。下図は透過型の磁気回折像です。



FeのL3吸収端(707 eV)で観測した回折像
(a) 磁場なし→輝点2つ (b) 磁場あり→輝点6つ
中心付近に見えるのは放射光の直射を遮るために
ストッパーの影

(a) 磁場がないときはらせん磁性体に由来する2つの磁気散乱が観測されていて、(b) 磁場をかけると磁気スキルミオンの三角格子を反映した6つの磁気散乱が観測されていることが分かります。放射光で磁気スキルミオンが見えました！

クマさんが鍵

コヒーレントな軟X線を使うと観測された回折図形から解析によって実空間像を再構成することができます。この解析手法は「位相回復アルゴリズム」と呼ばれるもので、拘束条件を課しながらフーリエ変換*と逆フーリエ変換を繰り返します。フーリエ変換したあとの拘束条件は実験で観測した回折図形を、逆フーリエ変換したあとの拘束条件は試料の前においたピンホール形状の情報を用います。このピンホールの形状を、単純な円ではなく面内で対称でない形になると解析精度が向上することが分かっています。これが非対称クマ型が採用された理由です。

*フーリエ変換：周波数の関数と、位置や時間の関数間の変換手法。

ここでは、磁気散乱の情報を、位置の関数（実空間像）から周波数の関数（回折図形）へと変換している。

研究について詳しくは

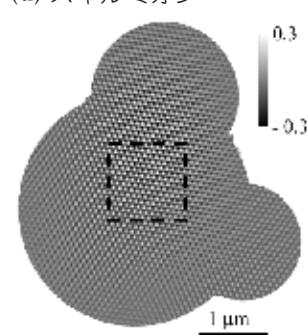
PHOTON FACTORY NEWS Vol.36 No.1 May 2018
「共鳴軟X線小角散乱による磁気スキルミオンの観測」
http://pfwww.kek.jp/publications/pfnews/36_1/saikin1.pdf

計測によって得られた回折図形から再構成した磁気構造の実空間像が下の図です。白と黒はそれぞれ磁気モーメントが紙面に対して手前に向いているか、奥に向いているかを表しています。(c)にみられる縞々の模様がらせん磁性体の状態を示し、(d)の白の粒々が磁気スキルミオンに対応しています。この測定では、70 nm の磁気スキルミオンを数十 nm の空間分解能で観測することができました。

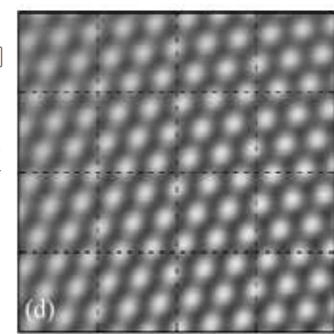
(c) らせん



(d) スキルミオン



解析後の実空間像
右は(d)の部分拡大図



今後は、放射光の短パルス特性を生かしたイメージングにより、電流や電場などを加えて磁気スキルミオンが動いている様子を観測することが目標です。

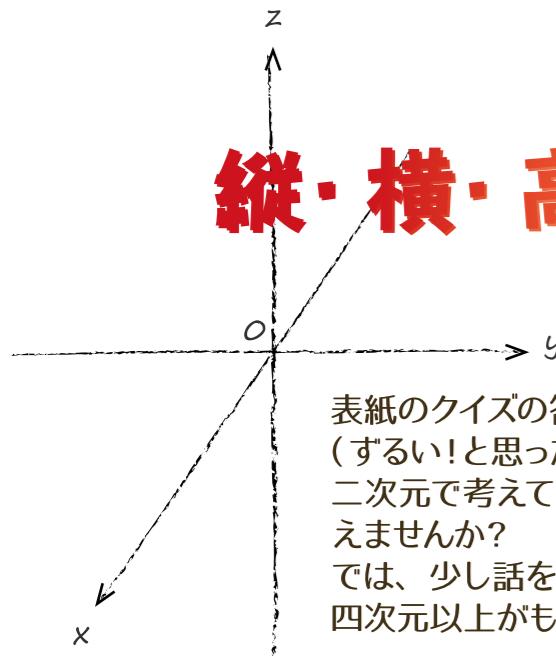
(執筆：山崎 裕一・深堀 協子)

論文情報：“Coherent Resonant Soft X-ray Scattering Study of Magnetic Textures in FeGe; カイラル磁性体FeGeにおけるコヒーレント共鳴軟X線回折イメージング”
Quantum Beam Science, 2 (2018) 3. Victor Ukleev, Yuichi Yamasaki, Daisuke Morikawa, Naoya Kanazawa, Yoshihiro Okamura, Hironori Nakao, Yoshinori Tokura and Taka-hisa Arima

PF BL-16Aにて



空間はほんとうに 縦・横・高さの三次元だけで できている？



表紙のクイズの答えは、「りんごを切り抜いて出す」でした。
(するい!と思った方、ごめんなさい)
二次元で考えて無理なことも、三次元では可能になると思
えませんか?
では、少し話を広げて、三次元では不思議に思えることも
四次元以上がもしあれば解決するかもしれません…

理論物理学者は考えた

1998年、ある理論物理学者が三次元を超える
次元（余剰次元）が存在する可能性を唱え始めた。
「近距離間に働く重力は、余剰次元の中に押し込
められている」という。

2つの物体の間に働く力には、万有引力や電磁
気的な力の他に、原子核をつなぎとめる力（核
力・強い力）、原子核を崩壊させる力（弱い力）の、
4種類が存在していることが知られている。しかし、
これらの力はその大きさが桁違いで、万有引
力だけがあまりに弱い。その不自然さを解決する
ための理論だった。

空間が三次元かどうか確かめるには

三次元を超える空間が存在すると仮定しよう。
余剰次元で何かが三次元にある物体を押していく
ても、三次元にいる私たちには感知できない。しかし、
押された物体が三次元上で動けば、それを観
測することはできる。

空間が三次元かどうか確かめるには、物体に加
えられる力と物体の動きを正確に調べればいい。
物体は力を加えられると動くので、もし余剰次元
から物体に力が加えられれば、三次元の力では説
明できない動きをするはずだ。

例えば、星の動きはニュートンの万有引力の法
則により三次元内の計算で説明できる。つまり、
宇宙のスケールでは四次元の力は働いていないよ
うだということが分かる。

では、逆に小さいスケールの空間ではどうか。

ニュートンの万有引力と逆二乗則

2 物体間に働く力 F

$$F = G \frac{mM}{r^2}$$

(G: 万有引力定数)

余剰次元の探索

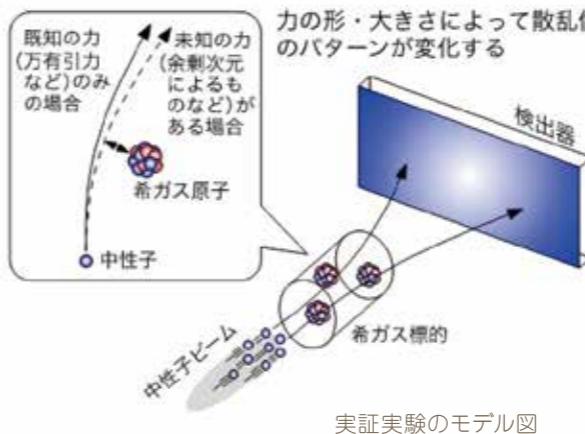
物構研の三島 賢二 特別准教授は、名古屋大学・
大阪大学・インディアナ大学とともに、九州大学
の吉岡 瑞樹 准教授を中心とする余剰次元の探索
に挑む共同研究に参加している。

余剰次元が存在するとすると、重力として、
ニュートンの万有引力で考えられている逆二乗則
に、湯川型*相互作用の項が加わる。 α と λ を未
知の定数として、距離 r 離れた質量 m と質量 M
の2物体間に働くポテンシャルエネルギー $V(r)$
はこう書ける。

$$V(r) = -G \frac{mM}{r} (1 + \alpha e^{-r/\lambda})$$

↑ ニュートン ↓ 湯川

*湯川型：湯川秀樹が核力の説明のために導入した式の形。

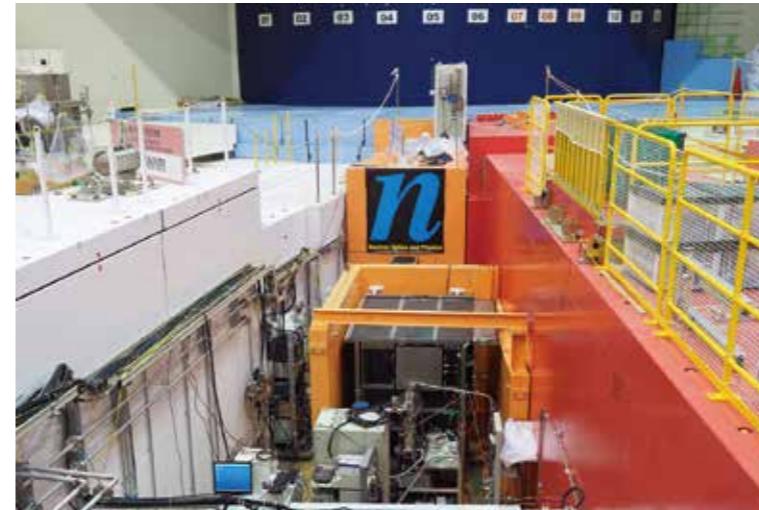


物質・生命科学実験施設（MLF）での 実証実験

2物体間の運動を考察することによる余剰次元の実験的探索は、現在様々な研究グループによって進められている。例えば、韓国的研究グループは、研究用原子炉 HANARO を使って中性子による実証実験を行っている。

J-PARC MLF の BL05 中性子光学基礎物理実験装置でも、同様の実証実験が行われた。実証実験の方法は、容器に閉じ込めた希ガス原子に中性子をぶつけるというものだ。

パルス状に打ち込まれる中性子の 99% 以上は直進してビームストッパーに捕獲されるが、残りの中性子は希ガス原子によって散乱されて進路を曲げ、検出器に到達する。個々の中性子や希ガス原子を追いかけて計算するのではなく、計測したデータから統計的に中性子の受ける力と動きを算出する。検出器に到達した中性子の飛行時間と位置情報のほか、そのときのガス容器の温度と圧力、陽子ビームの出力値を記録し、解析とデータの正規化に用いた。ガス容器が真空のとき、高純度の希ガスが入っているときに、繰り返し精密に測定し、理論値とのずれを計算した。



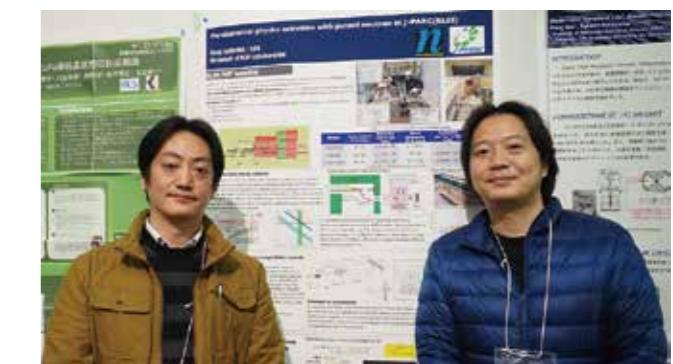
装置を上から見下ろしたようす（白い矢印は中性子の通り道）
中性子は左から右に向かい、希ガスの入った容器（グレー部分）を通過して真空チャンバー（黒い部分）を通り、検出器に到達する。

気になる結果は？

今回は、中性子と希ガス原子の距離が 0.1 ~ 1 nm の場合の実証実験となった。三次元で考えられるあらゆる力を考慮したシミュレーションと精密な実験が行われ、未知の力の探索感度を従来の同様の実験に比べて 1 行向上させることに成功した。その結果、実験値とニュートンの万有引力による計算値は一致し、未知の湯川型相互作用は観測されなかった。

研究グループは今後も、余剰次元の探索領域をより広げて測定を続ける予定だ。

（執筆：深堀 協子）



物構研の三島 賢二 特別准教授と 九州大学の吉岡 瑞樹 准教授

プレスリリース：2018.3.19 九州大・KEK・J-PARC・名古屋大・大阪大「パルス中性子ビームにより原子サイズでの未知の力を検証 — 空間が縦・横・高さの 3 次元だけでできているのかを探る大きな一步 —」

論文情報：“Search for deviations from the inverse square law of gravity at nm range using a pulsed neutron beam”
Physical Review D, 97, 062002 (2018). Christopher C. Haddock, Noriko Oi, Katsuya Hirota, Takashi Ino, Masaaki Kitaguchi, Satoru Matsumoto, Kenji Mishima, Tatsushi Shima, Hirohiko M. Shimizu, W. Michael Snow, and Tamaki Yoshioka

J-PARC MLF BL05 中性子光学基礎物理実験装置 NOP
オレンジ色の実験ハッチ内に、中性子のビームプランチが
3 本設けられている。今回使用したのは左端。

イベントのお知らせ

KEK 公開講座

「J-PARC の中性子で観る

エネルギー関連材料」

米村 雅雄 特別准教授

池田 一貴 特別准教授

6/30 (土) 13:30 ~

つくばキャンパスにて

KEK 一般公開

9/2 (日)

9:00 ~ 16:30

つくばキャンパスにて

PF 今年のテーマは「はかる」

物構研の新体制について

物構研は平成 30 年 4 月より下記の体制となりました。

今後ともよろしくお願ひいたします。

所長 小杉 信博

副所長 瀬戸 秀紀・足立 伸一

研究主幹

放射光科学第一研究系 雨宮 健太

放射光科学第二研究系 千田 俊哉

中性子科学研究系 大友 季哉

ミュオノン科学研究系 三宅 康博

研究センター長

構造生物学研究センター 千田 俊哉

構造物性研究センター 門野 良典



三宅 門野 瀬戸 小杉 足立 雨宮 大友 千田

フォトンファクトリー 産業利用促進運転（試行運転）のお知らせ



PF では、産業利用の促進を目的として、施設の利用料収入を用いた放射光加速器運転を検討しています。対象となる期間において民間企業による有償の施設利用を優先して受け入れる制度で、2018 年 5 ~ 7 月に制度立上げのための試行運転を実施しています。

詳細は、放射光科学研究施設の web ページ「産業利用促進運転について」をご覧ください。

<https://www2.kek.jp/imss/pf/approach/industry/promotion.html>