

小さな原子の磁気をもっと小さな原子核の磁気と比べて測定する

強い磁石の開発に役立つ簡便で正確な「原子の磁気」の新測定法の開発

発表のポイント

- 磁気の強さの測定には中性子散乱が用いられます。従来は結晶構造や磁気構造を詳細に決める必要があったため、測定データが膨大で解析も複雑なため手間がかかっていました。実験および解析上の問題からうまくいかないこともあり、簡便かつ正確に決める手法が求められていました。
- 磁性元素をその原子核の磁気によって特定し、原子の持つ小さな磁気を、さらに小さな原子核の磁気と比較して測定する手法を編み出しました。複雑な結晶構造や磁気構造の情報が不要で一つの測定点だけで測定できます。
- この手法を様々な磁性元素に適用し、複雑な磁気構造の解明や磁氣的性質の起源を理解し、高性能モーターなどに使う強力な磁石の開発に役立てます。

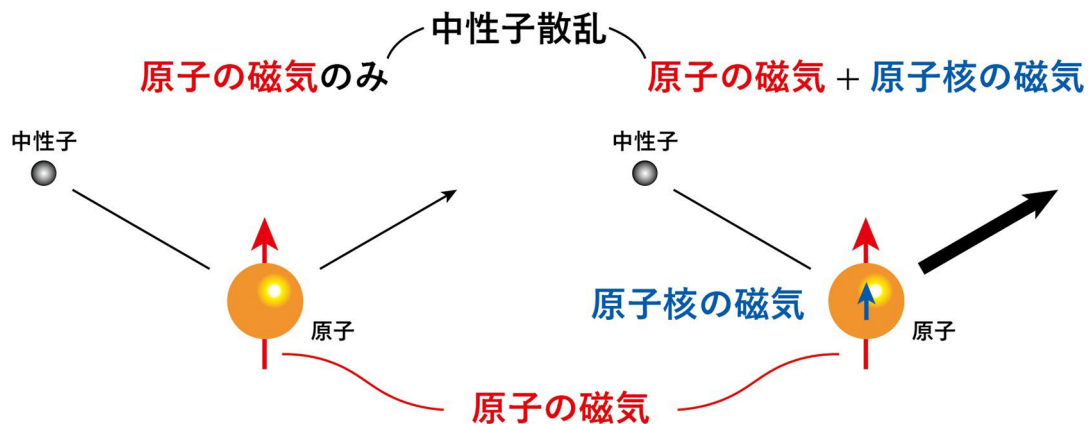


図1

小さな**原子の磁気**と、もっと小さな**原子核の磁気**を比較することで、**原子の磁気**の強さが分かる

【概要】

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構(理事長:小口正範、以下「原子力機構」という。)物質科学研究センター強相関材料物性研究グループの目時研究主幹らは、磁性体の磁力の源である磁性元素をその原子核の磁気によって特定し、原子の持つ小さな磁気の強さを、さらに小さな原子核の磁気と比較して簡便かつ正確に測定する新たな手法を開発しました。

従来の磁気強度の測定手法では、[結晶構造^{\(1\)}](#)や[磁気構造^{\(2\)}](#)の全体像を詳細に決める必要があったため、数百点に及ぶ膨大なデータを測定しなければならず、しかも複雑な解析が必要で手間がかかっていました。実験および解析上の問題からうまくいかないこともあり、簡便かつ正確に測定する手法が求められていました。

本研究において、磁性元素の磁気の発生に伴って原子核に磁気が生じることを実験的に確認しました。また、原子核の磁気の存在により磁性元素を特定し、その小さな原子の磁気を、より小さな原子核の磁気と比較して測定する手法を開発しました。磁性元素を特定するために一つの測定点を使って容易かつ正確に磁気の大きさを決められます。結晶構造や磁気構造の情報を用いないために膨大な測定データや複雑な解析は不要です。異なる種類の磁性元素が含まれる複雑な磁性体も、それぞれを特定して磁気の大きさを測定できます。

磁気の強さは磁性体の重要な性質です。この手法を種々の磁性元素に適用し、磁氣的性質の起源や複雑な磁気構造を理解して、有用な機能を持つ新物質の開発、強力な磁石に用いられる磁性体の開発などに役立てます。

本研究成果は、2022年5月15日発行の日本物理学会欧文誌「Journal of the Physical Society of Japan」(5月号)に掲載されます。

【これまでの背景・経緯】

磁性元素の磁気の強さは磁性体の性質や機能を知る上で重要で、磁性体に入射した中性子の反射強度を測定する中性子散乱実験⁽³⁾により調べられてきました。通常は(1)様々な方向の散乱強度を正確に測定し、(2)数百点の実験データに補正を加え、(3)結晶の対称性や化学組成などを考慮して得られた構造モデルによる計算と比較を繰り返して(4)結晶構造と磁気構造を決定します(図2左)。こうして正しい構造を明らかにして初めて、磁気の大きさを決めることができます。このように面倒な理由は、複雑な結晶構造全体からの散乱強度と、原子の磁気配列(磁気構造)に伴う散乱強度を比較して、磁気の強さを決定するためです。従って、結晶構造や磁気構造が不明であったり、実験上の問題から必要な散乱強度の一部が正しく測定できない場合や、実験データの補正が正確ではないときには、磁性材料の最も基本的な特徴である磁気の強さを決めることができませんでした。そのため、磁性元素のみに着目して測定する手法が求められていました。

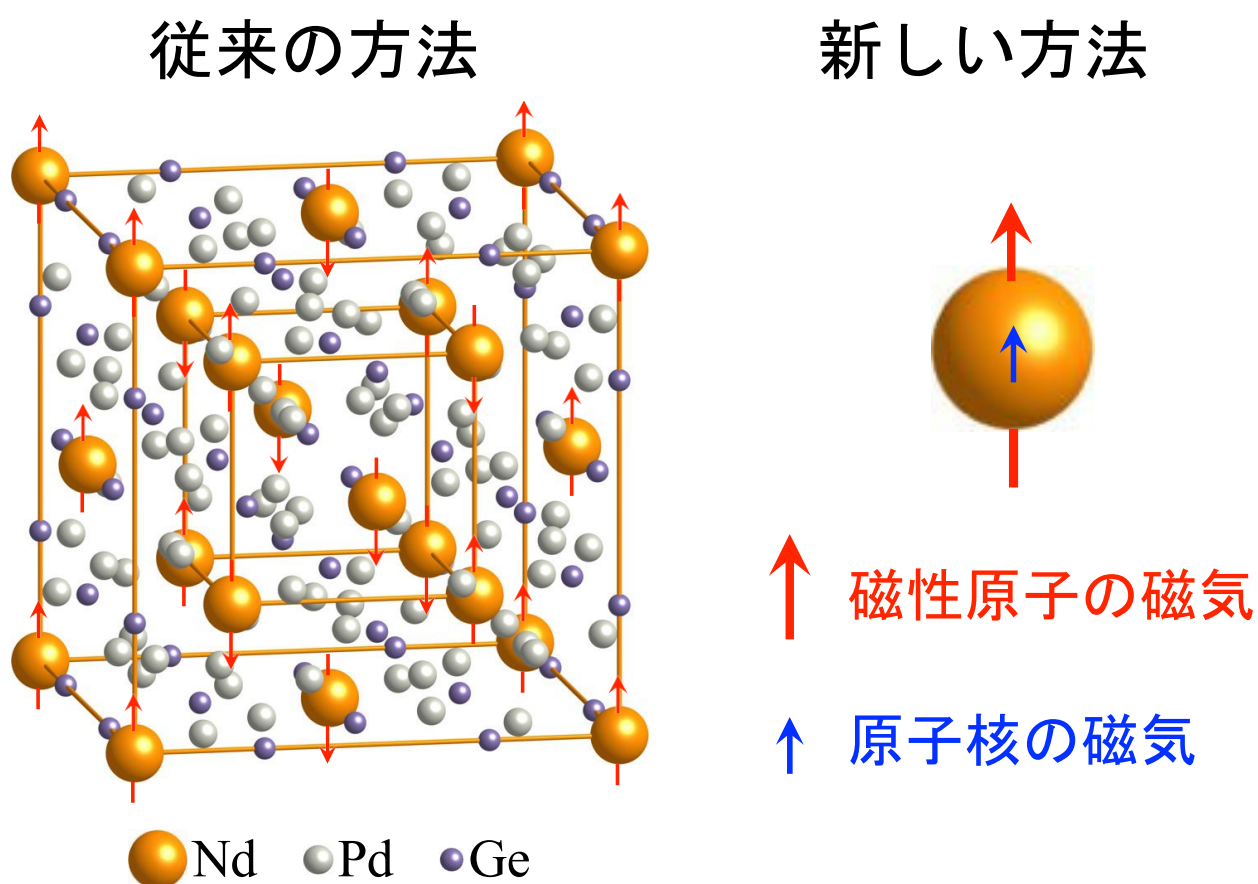


図2 磁性原子の磁気の強さを決める従来の方法(左)と新しい方法(右)の測定対象

【今回の成果】

今回実証した方法は磁性元素のみに着目し、その磁性元素の中心に存在する、原子よりさらに小さな原子核の磁気と原子の磁気を比較します。これが今までの方法と全く異なる新しい点です（図2右）。この原理を使えば、1つの磁気散乱ピーク強度の温度変化を測定するだけで原子の持つ磁気の大きさを決定できます。

$\text{Nd}_3\text{Pd}_{20}\text{Ge}_6$ （ネオジウムパラジウムゲルマニウム化合物）の磁気散乱強度の温度変化を、[研究用原子炉 JRR-3^{\(4\)}](#) の中性子を用いて測定した結果を図3に示します。（1）転移温度 $T_N=1.8\text{K}$ （下向きの黒矢印）以下で中性子の強度が増大しています。これは希土類元素であるネオジウム原子（橙色の球）に磁気（赤太矢印）が発生していることを示しています。（2）さらに約 0.3K 以下で急激に中性子の強度が増大します。これはネオジウム原子の原子核に磁気（青矢印）が発生したためです。（3）原子の磁気による散乱強度（左向きの赤矢印）と原子と核の両方の寄与を含む散乱強度（左向きの黒矢印）の比を求めると、原子と核の磁気の強さが比較できます。（4）核の磁気の強さは正確にわかっているため、その値を使えば原子の磁気の強さは簡単に求めることができます。このようにして、この物質のネオジウム原子の磁気の強さを決めることができました。

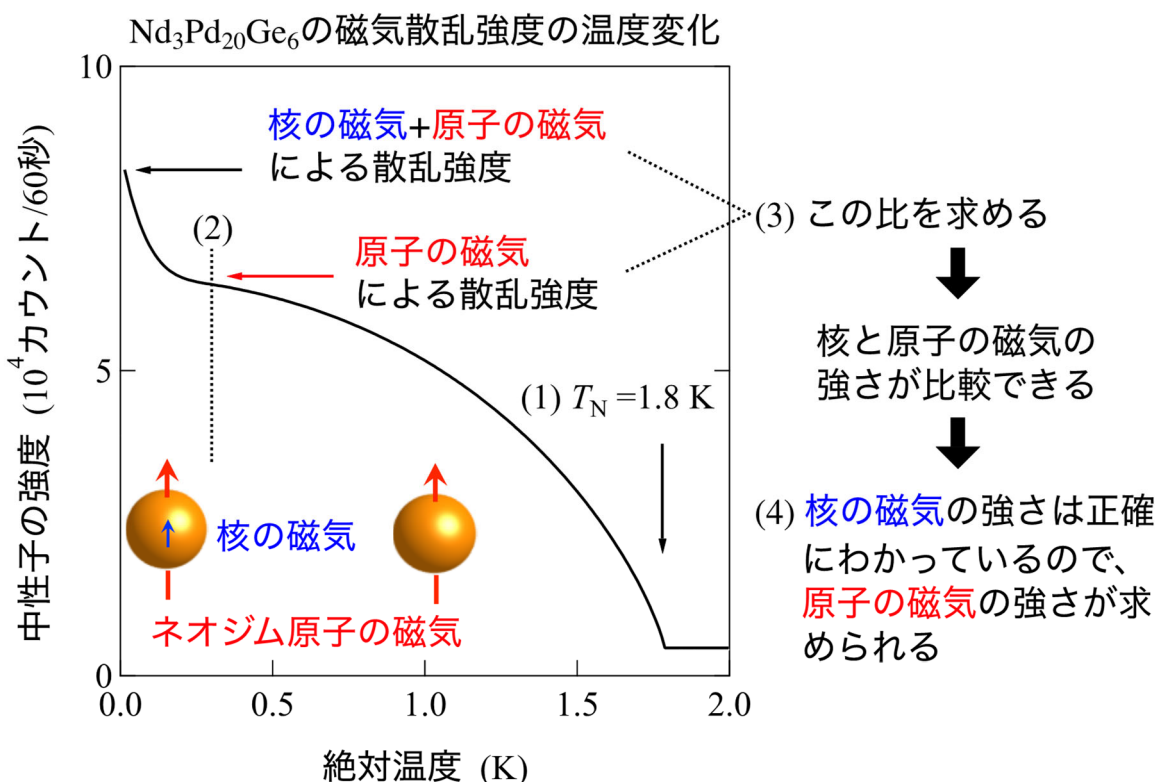


図3 核磁気と原子の磁気の比較から原子の磁気の強さ(磁気モーメントの大きさ)を決める方法

今回実証した方法では、原子核の磁気を用いて磁性元素のみに着目するため、1つの磁気散乱ピークを測定するだけで十分です。通常必要な数百に及ぶ散乱ピークの強度測定やその補正を行う必要はなく、データ解析によって得られる磁気構造や結晶構造の情報も必要ありません。

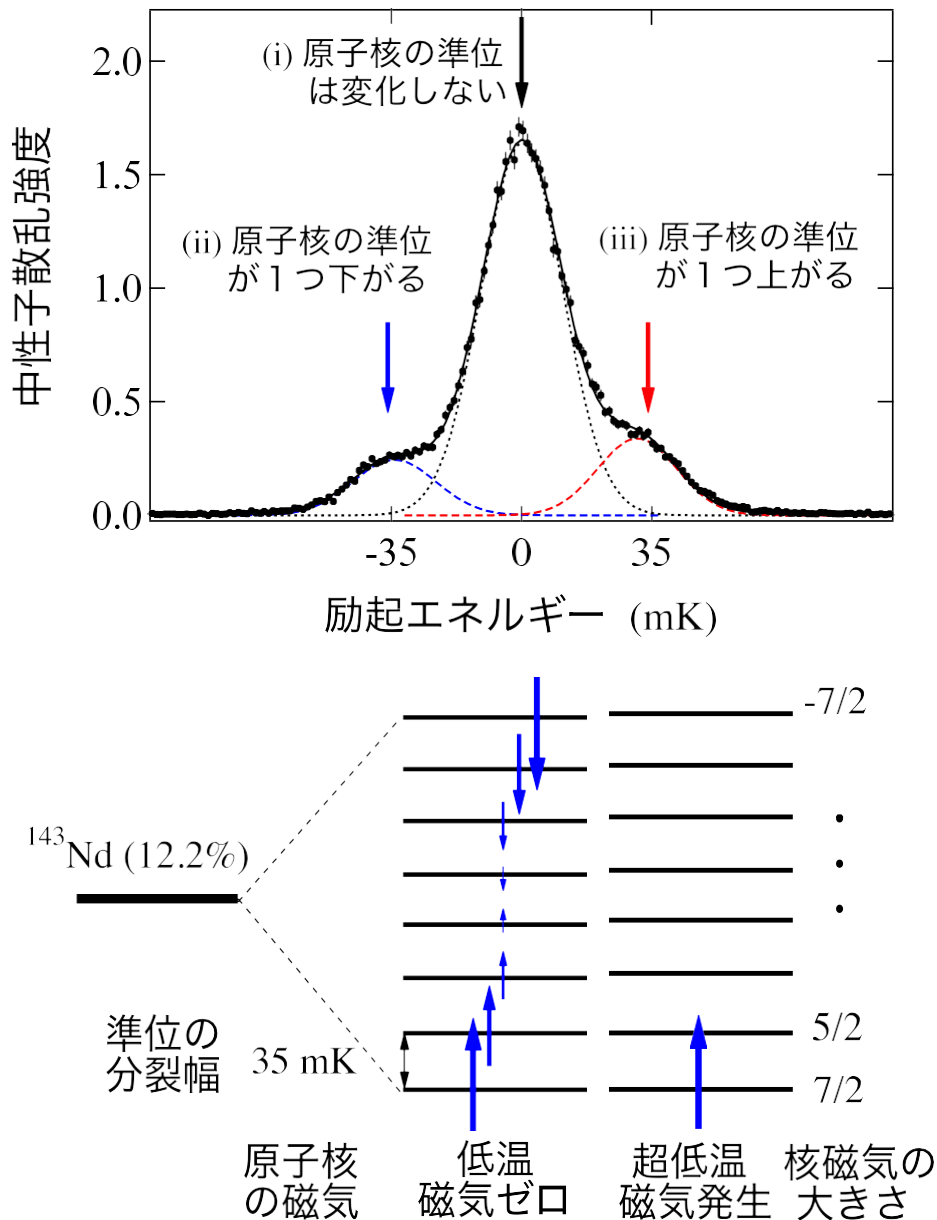


図4 核準位間の励起スペクトル(上)と8つに分裂した ^{143}Nd の核準位(下)

実際に原子核が磁気を帯びていることは、J-PARC 物質生命科学実験施設⁽⁵⁾に設置された逆転配置型超高分解能中性子分光器 DNA により、核準位の分裂幅を測定して確認しました。

ネオジウム元素には質量数の異なる複数の同位体が存在しますが、それらの中で天然の存在比 12.2%の ^{143}Nd は最大値 7/2 の磁気(核スピン)を持っています。ネオジウム原子が磁気を帯びると、その磁場を感じてネオジウム原子核も磁気を発生した方が安定になります。従って図4下のように、原子核の状態がその磁気の大きさ(-7/2~7/2)の違いによってエネルギーが等間隔の8つの状態に分裂します。磁気が最大である 7/2 の状態が最も安定で最低エネルギーの準位となり、その反対向きの-7/2 の磁気を持つ場合は最も不安定で、最高エネルギーの準位になります。(量子力学が支配的なので、磁気の大きさやエネルギー準位は連続的な値ではなくなります。)

このようにネオジム原子核のエネルギー状態が分裂しているときに、磁気をもつ中性子がネオジム原子核に衝突すると、(i) 中性子とネオジム原子核の磁気がともに変化しない(図4上の黒矢印)、中性子とネオジム原子核が磁気のやり取りをして、(ii) ネオジム原子核の磁気が準位 1 つ分だけ増加(図4上の青矢印)、または(iii)減少(図4上の赤矢印)する3つの過程が生じます。原子核の構成要素でもある中性子は、ちょうどこの準位1つ分に相当する磁気を持っているからです。ネオジム原子核のエネルギーは、(i)では変化しませんが、(ii)及び(iii)では準位ひとつ分だけ増減し、同じだけ中性子のエネルギーは減少または増加します。従って、中性子のエネルギー スペクトルを測定することによって、ネオジム原子核の準位の分裂幅を測定することができます。

測定した結果から、分裂幅のエネルギーは非常に小さく、 $3\mu\text{eV}$ (マイクロエレクトロンボルト)、これを温度に換算すると約 35mK であることがわかりました。従って 35mK よりも十分に温度を下げれば、最低エネルギーの準位のみが占拠され、その結果、核に磁気が発生します。中性子散乱強度が大きく増加した超低温の 14mK では核の持つ 96%の磁気が発生します。これが図3において超低温で中性子散乱強度が急激に増加した理由です。またこの原理を使うことによって、磁性体の中で磁気を担う磁性元素を特定することが可能です。

【今後の展望】

今回実証した方法は原子核に依存するため、原理的には様々な磁性元素について適用可能で、実際に実験によりその可能性を調べることができる大変興味深い研究です。この方法により磁気を帯びた磁性体の中の磁性元素を特定できます。さらにこの方法を応用すれば、磁性元素が複数存在する物質の磁気を元素毎に特定し、磁気の大きさをそれぞれ決めることが可能になります。そして通常は解析が困難な、複雑な磁気構造や結晶構造の解明に役立てることが出来ます。また、磁気の強さは磁性体の重要な性質であり、その発現機構の理解は非常に重要です。このような研究を通じて、強力な磁石を発生する磁性体の開発などに役立てることが出来ます。

【論文情報】

論文タイトル: Hyperfine Splitting and Nuclear Spin Polarization in NdPd_5Al_2 and $\text{Nd}_3\text{Pd}_{20}\text{Ge}_6$

著者(★責任著者): Naoto Metoki^{1,2★}, Kaoru Shibata³, Masato Matsuura⁴, Hideaki Kitazawa⁵, Hiroyuki S. Suzuki⁵, Hiroki Yamauchi¹, Masato Hagihara¹, Matthias D. Frontzek⁶, Masaaki Matsuda⁶

所属

1. 日本原子力研究開発機構 物質科学研究センター
2. 茨城大学大学院量子線科学専攻
3. J-PARC センター物質生命科学研究ディビジョン
4. 総合科学研究機構
5. 物質・材料研究機構
6. 米国オークリッジ国立研究所

掲載誌: Journal of the Physical Society of Japan doi:

10.7566/JPSJ.91.054710

URL: <https://journals.jps.jp/doi/10.7566/JPSJ.91.054710>

各研究機関の役割は以下の通りです。

原子力機構: 発案及び研究統括、中性子散乱実験、解析、論文執筆

茨城大学: 発案及び研究統括、中性子散乱実験、解析、論文執筆

J-PARC センター: 中性子散乱実験

総合科学研究機構: 中性子散乱実験の支援

物質・材料研究機構: 試料作製

国立オークリッジ研究所: 中性子散乱実験

【本件に関する問合せ先】

(研究内容について)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 物質科学研究センター
強相関材料物性研究グループ研究主幹 目時 直人
TEL: 029-284-3872、Mail: metoki.naoto@jaea.go.jp

(報道担当)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 広報部
報道課長 児玉 猛
TEL: 029-282-0749、Mail: kodama.takeshi@jaea.go.jp

茨城大学
茨城大学広報室
山崎一希
TEL 029-228-8008 FAX 029-228-8019

J-PARC センター
J-PARC センター・広報セクション
TEL: 029-284-4578、Fax: 029-284-4571、Mail: pr-section@j-parc.jp

総合科学研究機構
総合科学研究機構 中性子科学センター
利用推進部 広報担当
TEL 029-219-5300 FAX 029-219-5311

【用語の説明】

1. 結晶構造

物質は様々な種類の数多くの元素が周期的に配置した構造をもち、その構造のことを結晶構造と呼ぶ。

2. 磁気構造

物質の中に含まれる磁性元素は磁石の性質を持ち、その磁石の位置と方向や向きが結晶の中でどのようにになっているかを磁気構造と呼ぶ。磁気構造を決定するためには中性子散乱が唯一の方法である。

3. 中性子散乱実験

中性子は原子核の中に存在し、陽子とほぼ同じ質量を持つが電荷を持たない粒子である。中性子を物質に衝突させると、物質中の元素に存在する原子核と衝突して散乱し、その散乱強度が原子核によって異なるために、物質の結晶構造を決めることができる。また、中性子はミクロな磁石の性質を有するために、物質が磁気を帯びている場合にも散乱され、磁気構造を決めることができる。

4. 研究用原子炉 JRR-3

日本原子力研究開発機構が所有し、原子力科学研究所に設置した出力 20MW の研究用原子炉。炉心から強力な中性子ビームを発生させ、物質研究や産業利用、RI 生産などに利用される。震災後停止していたが、原子力規制委員会の新規制基準をクリアし、耐震工事後の 2021 年 2 月に運転再開、同年 5 月に供用運転を再開した。

5. J-PARC 物質生命科学実験施設

茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設(J-PARC)内に設置された、物質や生命科学の研究に用いられる実験施設。大強度の陽子ビームを水銀のターゲットに照射してパルス状の非常に強力な中性子ビームを発生させ、中性子散乱実験を行っている。