

日本物理学会が発行している Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ) の 2008 年 8 月号に掲載された論文の中から JPSJ 編集委員会が選んだ “Papers of Editors’ Choice” (JPSJ 注目論文) を以下に紹介する。

この紹介記事は国内の新聞社の科学部、科学雑誌の編集部で電子メールで送っている「紹介文」をこの欄のために少し書き直したものである。専門外の読者を想定し、「何が問題で、何が明らかになったのか」を中心にした読み物であるので、参考文献などを省いている。詳しく知りたいと思う読者は、末尾に挙げる論文掲載誌と電子版の URL を参考にして、是非掲載論文を見て頂きたい。

物理学は自然界の様々な問題の解明に寄与できる学問である。JPSJ 編集委員会では物理学のあらゆる分野の興味ある、優れた論文を「注目論文」としてこの欄で紹介したいと思っている。物理学会会員からの JPSJ への自信作の投稿をお待ちしている。

### ウランビームの飛行核分裂による新同位元素 $^{125}\text{Pd}$ , $^{126}\text{Pd}$ の生成と発見—理研次世代型 RI ビームファクトリーからの初成果—

自然界には、水素からウランにいたる 83 種類の元素、同位元素で数えると約 270 種類が存在し、これらは核図表において安定線を形成する。安定線から外れた領域には、10,000 種にもおよぶ短寿命の放射性同位元素 (RI: radioisotope) があると言われ、それらの原子核は不安定核と呼ばれる。現在までに実験的に存在が確認されている RI は、このうち約 3,000 種にすぎない。安定線近辺の原子核の研究は進んでいるが、安定線から離れた不安定核の研究はまだまだこれからの課題と言える。不安定核の領域では、原子核の基本的性質である魔法の数や変形などについて既存のモデルでは説明できない性質を呈したり、また、宇宙における元素合成は不安定核を経由して起こるため、不安定核の性質は元素誕生の解明に密接に関係する。これら天然に存在しない多様な RI を人工的に生成し、観察・研究することは、原子核の根本的性質の究明や元素の起源を探る上で欠かせない。

昨年、独立行政法人理化学研究所の仁科加速器研究センターは、上記 RI を人工的に生成し不安定核の研究を推進すべく、RI ビームファクトリー (RIBF と略す) と呼ばれる次世代型大強度 RI ビーム施設を完成させた。RIBF において RI 生成を受け持つのは、BigRIPS と呼ばれる超伝導 RI ビーム生成装置である。この RIBF の初成果として、BigRIPS の開発と建設を担当してきた久保敏幸氏の率いるグループが中心になり、BigRIPS を用いて行ったウラン ( $^{238}\text{U}$ ) ビームの飛行核分裂による新同位元素探索実験において、二つの新同位元素  $^{125}\text{Pd}$ ,  $^{126}\text{Pd}$  (元素名パラジウム、原子番号 46、質量数 125 と 126) が発見された。

ウランビームの飛行核分裂は、1990 年代に見つかったまだ新しい生成反応で、中性子過剰の中重核領域の RI 生成に非常に大きい生成断面積を持つ。一方、その運動学的性質のため、RI ビームは角度と速度について大きな広が

りを持って生成される。BigRIPS には、この飛行核分裂の効率の良い利用を強く意識し、高収集率を達成すべく大口径 (大アクセプタンス) の設計がなされている。RIBF の加速器が目標性能に達する近い将来には、約 4,000 種類の不安定核が研究可能になる予定である。BigRIPS のもう一つの重要な特長は、RI の収集・分離を行う第 1 ステージと RI の識別・同定を行う第 2 ステージの連続する二つのステージから構成され、その第 2 ステージが高い RI 識別能力を持つよう設計されていることである。

本実験は、RIBF のサイクロトロンが供給する、核子あたり 3.45 億電子ボルト (光速の 70%) の  $^{238}\text{U}$  ビームを用いて行われた。飛行核分裂反応によってベリリウム標的から生成された多様な RI は、BigRIPS 第 2 ステージにおける飛行時間 (TOF) 測定、磁気剛性 ( $B\rho$ ) 測定、エネルギー損出 ( $\Delta E$ ) 測定をもとに、その原子番号 ( $Z$ ) および質量数と荷電数の比 ( $A/Q$ ) を導出することにより識別された。図 1 は、そうして得られた二次元の RI 識別図である。図 2 は、図 1 から  $Z=46$  のパラジウム (Pd) 同位元素の事象のみを選び

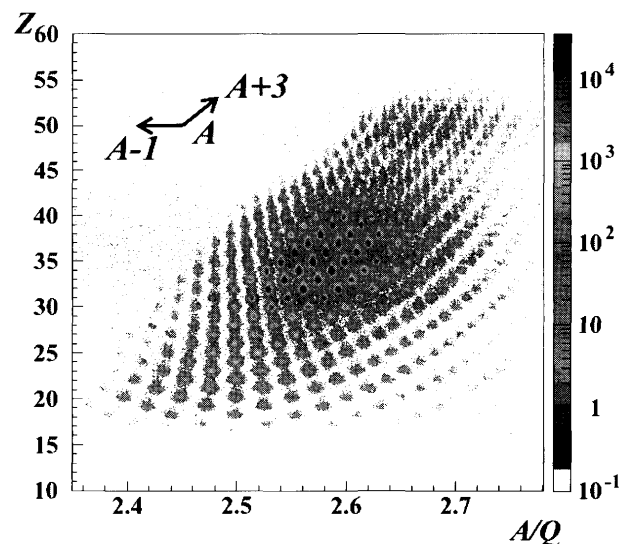


図 1 RI の識別図。縦軸は原子番号 ( $Z$ )、横軸は質量数と荷電数の比 ( $A/Q$ )。

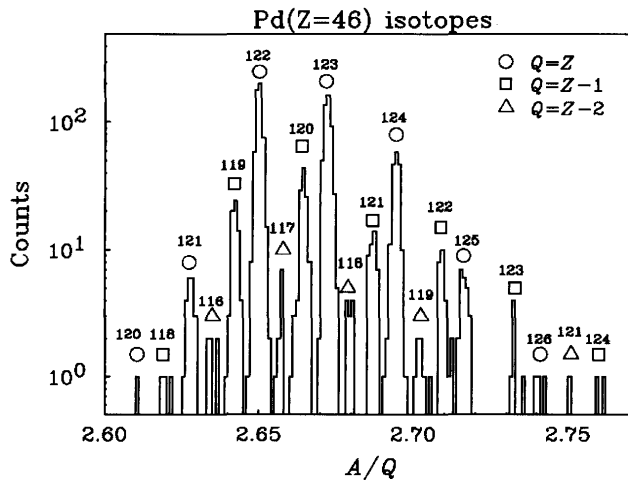


図2 パラジウム ( $Z=46$ ) の  $A/Q$  スペクトル. 各ピークは質量数と荷電数でラベルされている.

出し作成された  $A/Q$  の一次元スペクトルで, そこには新同位元素  $^{125}\text{Pd}$ ,  $^{126}\text{Pd}$  の発見がはっきりと確認できる. これらは安定線から遠く離れ, 最も重いパラジウムの安定同位元素  $^{110}\text{Pd}$  に比べ, それぞれ中性子数が 15, 16 も多い. さらに,  $^{126}\text{Pd}$  について言えば,  $N=82$  の中性子魔法数まであと 2 つのところに来ており, 中性子過剰領域における魔法数消失の研究における進展が期待される. また, 図 1, 2 からは BigRIPS の優れた RI 識別能力もうかがえる.

本実験では, RIBF 稼動開始直後のコミッションング実験であったためウランビームの強度も低く, また測定時間も 1 日と短いという条件にもかかわらず, 不安定核の既知限界に到達するばかりでなく, 新同位元素の発見に至った. この成果は, 次世代型 RI ビーム生成施設の計画通りの順調な発進を象徴するのみならず, 新しい領域の不安定核の物理が, RIBF の加速器と BigRIPS の卓越した能力によって, 大きく開くことを強く予見させるものであり, これからの研究の展開が大いに期待される.

論文掲載誌: J. Phys. Soc. Jpn. 77 (2008) No. 8, p. 083201.

電子版: <http://jpsj.ipap.jp/link?JPSJ/77/083201/>

〈情報提供: 久保敏幸 (理化学研究所)〉

なお, 本注目論文に関連して, 理論的に存在が予想される約 10,000 種におよぶ (不安定) 原子核についての酒井英行氏による解説 “Nuclear Chart” が, JPSJ ホームページ上の News and Comments 欄に掲載されている ([http://www.ipap.jp/jpsj/news/jpsj-nc\\_37.htm](http://www.ipap.jp/jpsj/news/jpsj-nc_37.htm)). どなたでもアクセスできるので, ご参照いただきたい.

### 新型超伝導の転移温度が最も高くなる最適な結晶構造が明らかに

今年 2 月に新型超伝導体  $\text{LaFeAs}(\text{O}_{1-x}\text{F}_x)$  が発見されたのを端緒に, 3 月には 50 K を

超える温度で超伝導を示す類似化合物が発見され, 銅酸化物高温超伝導体の発見以来 23 年ぶりとなる超伝導フィーバーが沸き起きている. 新型超伝導体の構成元素はいずれも他の元素と置換することができ, 組み合わせを変えることによって極めて多くの類似物質を合成することが可能である. 例えば, 4 月には産総研の研究グループによってフッ素無しの  $\text{NdFeAsO}_{1-y}$  が  $T_c=54\text{ K}$  で超伝導を示すことが発見された. 銅酸化物高温超伝導体の超伝導転移温度 ( $T_c$ ) が頭打ちになっている今, 新型超伝導体にかかる期待はますます高まっている.

このように新型超伝導体の化合物はバラエティーに富んでおり,  $T_c$  もまちまちである. そこで, どのような場合に  $T_c$  が最も高くなるのかを明らかにすべく, 産業技術総合研究所の李哲虎氏らの研究グループは, 東北大学, ケルン大学 (独), 及びラウエランジュバン研究所 (仏) との国際共同研究で  $\text{LnFeAsO}_{1-y}$  ( $\text{Ln}=\text{La}, \text{Nd}$ ) の結晶構造解析を行なった. その結果, 最も高い超伝導転移温度を実現する最適な結晶構造が明らかとなった.

本研究で調べられた  $\text{LnFeAsO}_{1-y}$  は  $\text{LnO}$  層と  $\text{FeAs}$  層が交互に積み重なった結晶構造を持つ (図 3).  $\text{LnO}$  層は絶縁性,  $\text{FeAs}$  層は導電性であり, 超伝導電流は導電性の  $\text{FeAs}$  層を流れると考えられている. したがって,  $\text{FeAs}$  層の結晶構造が超伝導の転移温度を決める重要な鍵を握っている可能性が高い. そこで, 本研究では中性子回折によって  $\text{FeAs}$  層の構造を詳しく調べた.  $\text{FeAs}$  層は, 4 つの頂点をなす  $\text{As}$  原子とその中心に位置する  $\text{Fe}$  原子とからなる四面体で構成されている. 図 4 はこの  $\text{FeAs}_4$  四面体の形状を特徴づける角度 ( $\alpha$ ) (図 3) と  $T_c$  との相関関係を表している.  $\alpha=109.47^\circ$  のとき,  $\text{FeAs}_4$  四面体は正四面体となる. 図 4 から  $\text{FeAs}_4$  が正四面体のとき,  $T_c$  が最も高くなることが明確に読み取れる.

本研究の発見は超伝導の転移温度が最も高くなる結晶構造を明らかにしたもので, より高い転移温度を持つ超伝導

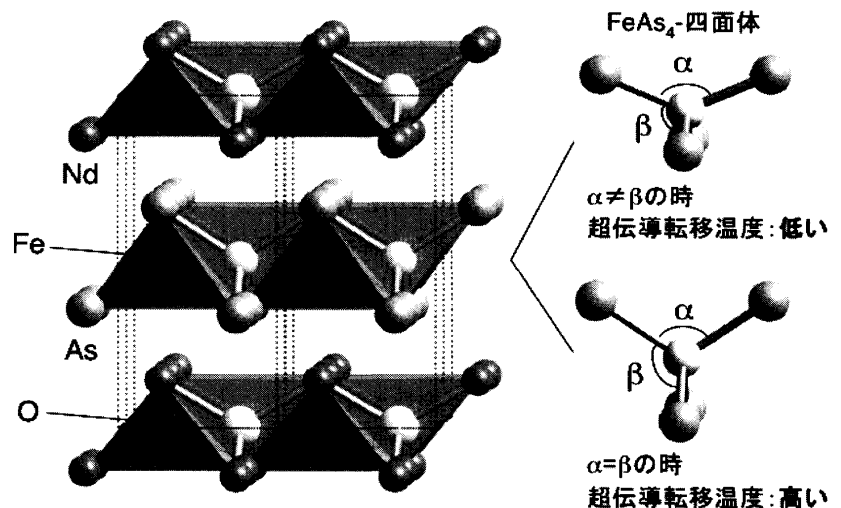


図3  $\text{NdFeAsO}_{1-y}$  の結晶構造と  $\text{FeAs}_4$  四面体.  $\alpha=\beta=109.47^\circ$  のとき,  $\text{FeAs}_4$  四面体は正四面体となり, このとき, 超伝導転移温度は最も高くなる.

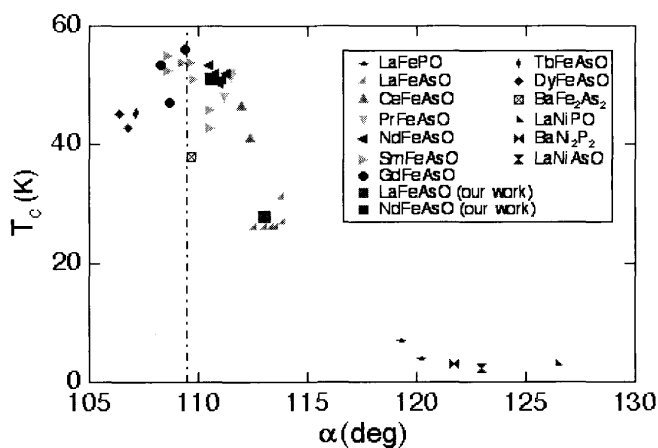


図4 FeAs<sub>4</sub>四面体の形状を特徴づける角度 $\alpha$  (図3参照)と超伝導転移温度 $T_c$ との相関関係. 本研究で測定したデータと共に, 他の研究グループの測定結果も併せて載せてある.

体を開発するための新しい指針として多くの研究者の注目を集めている. 今後, 同様の結晶構造をもつ物質を, 構成元素を変えて合成することにより, より高い超伝導転移温度を持つ超伝導体が開発されるものと大いに期待される. 論文掲載誌: *J. Phys. Soc. Jpn.* 77 (2008) No. 8, p. 083704. 電子版: <http://jpsj.ipap.jp/link?JPSJ/77/083704>

〈情報提供: 李 哲虎 (産業技術総合研究所)〉

## 酸素分子からなる磁性体の設計とその中性子散乱実験

酸素分子は大気中で2番目に多く含まれる構成要素であり, 地球上の生物にとって不可欠な存在である. 物理化学的性質としては, 単純な2原子分子でありながら, 最外殻の $\pi$ 軌道を占有する二つの電子により, 大きさが $S=1$ のスピンの(磁性)を有している点が興味深い. しかし, 磁性体研究は古くより金属化合物が主役を担っており, 酸素分子からなる磁性体の設計の試みは数少ない. その中で, 近年の化学分野では, 細孔性金属錯体に酸素を規則正しく物理吸着させることにより, 酸素分子による磁性体実現の可能性が示唆されてきた. 最近, 横浜市大の益田隆嗣氏のグループが, 東京大学, 京都大学の研究者と共同で, 細孔性ホスト金属錯体に吸着した酸素分子の磁気励起を中性子散乱実験で観測することに成功した. 散乱強度の解析から, 低温では隣接する2個の酸素分子スピンの大きさがゼロという意味で‘非磁性状態’ともよばれる量子的磁性状態の一つ)となつてゐることを明らかにし,

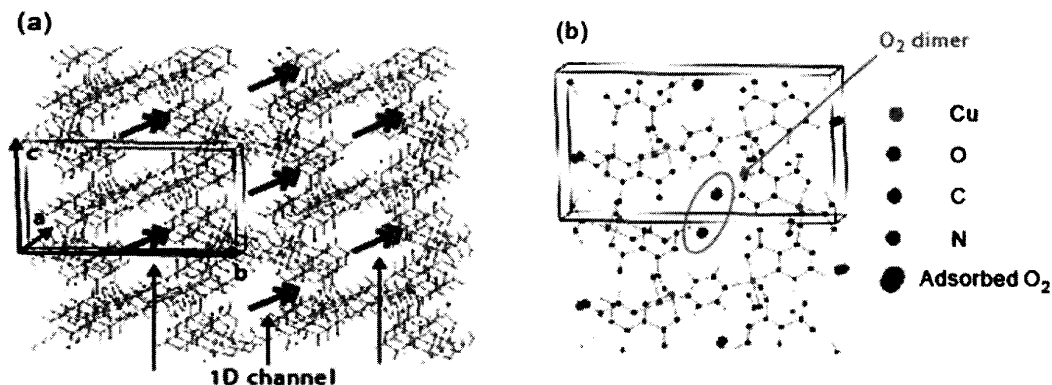


図5 (a) CPL-1( $C_{16}H_{12}Cu_2N_6O_{10}$ )の結晶構造. 気体分子を吸着する一次元チャンネルが結晶の $a$ 軸方向に存在している. (b)  $O_2$ 分子の吸着の様子.

さらに, 温度を上昇させるとその量子状態が変わる“柔らかい磁性体”である可能性を指摘した.

本研究で用いられた, 酸素分子磁性体のフレームとなる物質は細孔性金属錯体の一種CPL-1である. 図5(a)に示されるように, 断面積が $4.0 \times 6.0 \text{ \AA}^2$ 程度の一次元チャンネルが存在しており, フレーム物質からのポテンシャルと酸素分子間のvan der Waals結合で決まる酸素分子の結晶構造は, 図5(b)に示されるように, チャンネル方向に梯子状に並んだ構造となる. その磁性を解明するため, 日本原子力研究機構に設置の東京大学物性研究所の分光器PONTAを用いて中性子非弾性散乱実験を行った. まず,  $T=2 \text{ K}$ の低温で,  $\hbar\omega=7.8 \text{ meV}$ において, 散乱中性子の波数( $Q$ )に依存しないエネルギーの吸収スペクトルが観測された. 次に,  $\hbar\omega=7.8 \text{ meV}$ における, 散乱強度の $Q$ -依存性を測定したところ(図6),  $Q=1.3 \text{ \AA}^{-1}$ 近傍に極大を持ち,  $Q$ の増大とともに減少していく様子が観測され, 実験結果(○, ●印)は,  $S=1$ スピン二量体の理論曲線(実線)できれいに再現されている. これらの結果から, この酸素分子磁性体では, チャンネル方向の隣接する酸素分子スピン対が, 分子軌道の重なりを通じた磁気相互作用によって, 低温で, 上記の二量体( $O_2$  dimer)を形成しているものと結論された.

低温での中性子散乱の実験結果がスピン二量体モデルで見事に説明される一方, 温度を上昇させていくと, 散乱強度の温度依存性は同モデルの理論予測から有意なずれを示すことが観測された. これまでの酸素分子二量体のvan der Waalsポテンシャルの計算によると, 合成スピンの大きさ $S$ が $S=0$ の一重項状態(基底状態)と $S=1$ の三重項状態(第一励起状態)では, 酸素分子軸が互いに平行な配置が安定であるが,  $S=2$ の五重項状態(第二励起状態)では, 分子軸が互いに直交した配置が安定となることが報告されている. このように, 酸素分子対のスピン状態が分子軌道の占有の仕方によって決まる電荷分布状態と微妙に絡んでゐることを踏まえると, 結晶構造とスピン二量体の磁性状態との協力的現象として, 上記のずれを, ある程度説明することができた. つまり, CPL-1において実現されている

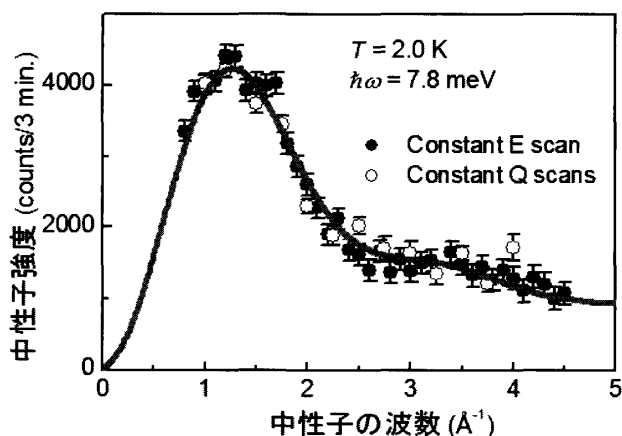


図6 吸着酸素の磁気励起。散乱中性子強度の波数依存性(○, ●印)が、 $S=1$  スピン二量体モデル(実線)で再現されている。

酸素分子磁性体は、温度・磁場などでその磁性状態が容易に変化する“柔らかい磁性体”である可能性が指摘された。

本研究によって、細孔性金属錯体に吸着した酸素分子は、エキゾチックな磁性体を実現していることが明らかになっ

た。酸素分子磁性体は、その主な凝集力である van der Waals 結合がイオン結合や金属結合などと比べるとはるかに柔らかいため、温度や圧力により様々な磁気状態、さらには、巨視的磁気秩序相が存在し得ると考えられる。柔らかいフレームワークをベースとした酸素分子磁性体の設計、実現が今後さらに進むものと期待される。

論文掲載誌: J. Phys. Soc. Jpn. 77 (2008) No. 8, p. 083703.

電子版: <http://jpsj.ipap.jp/link?JPSJ/77/083703>

〈情報提供: 益田隆嗣(横浜市立大学)〉

なお、本注目論文に関連して、1次元酸素分子磁性体についての壽榮松宏仁氏による解説“One-Dimensional Molecular Oxygen Magnet—A New Type of Low-Dimensional Molecular Crystal—”が、JPSJ ホームページ上の News and Comments 欄に掲載されている ([http://www.ipap.jp/jpsj/news/jpsj-nc\\_38.htm](http://www.ipap.jp/jpsj/news/jpsj-nc_38.htm))。どなたでもアクセスできるので、ご参照いただきたい。

(2008年9月24日原稿受付)