

# 新粒子探索のための量子センサー

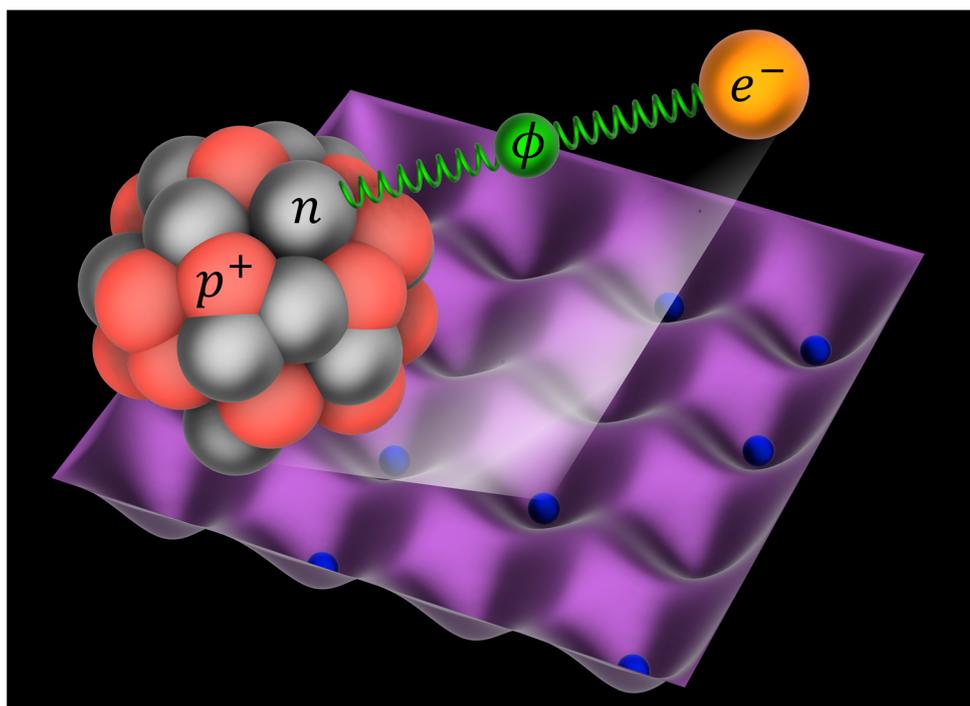
## —原子スペクトルの精密分光から基礎物理法則に迫る—

### 概要

現在の素粒子物理学では標準模型<sup>\*1</sup>と呼ばれる枠組みが成功を収めていますが、様々な未解決問題を抱えており、これを超える新物理が存在します。最近、キング関係式<sup>\*2</sup>と呼ばれる同位体シフト（同位体間でわずかに異なる電子遷移の共鳴周波数差）間に成り立つ関係式の線形性を検証することで、電子・中性子間の相互作用を媒介する新粒子を探索する方法が提案されました。これをきっかけに、同位体シフト精密測定が世界中で盛んに行われています。

京都大学大学院理学研究科 小野滉貴 特定助教、高野哲至 日亜化学工業株式会社（研究当時、現：同特定准教授）、高須洋介 同准教授、高橋義朗 同教授、田中実 大阪大学 助教、山本康裕 National Center for Theoretical Sciences（台湾） 博士研究員らの国際共同研究グループは、イッテルビウム原子の狭線幅光学遷移（時計遷移、波長 578 nm）の同位体シフトを数 Hz の精度で測定しました。そして、一般化キング関係式<sup>\*3</sup>の線形性を世界で初めて検証し、新粒子が存在する場合に考えられる中性子・電子との結合の強さの上限を決定することに成功しました。

本成果は、2022 年 5 月 10 日（現地時刻）に米国の国際学術誌「Physical Review X」にオンライン掲載されました。



本研究の概念図。原子は陽子( $p^+$ )、電子( $e^-$ )、中性子( $n$ )で構成されている。電子・中性子間に相互作用を媒介する新粒子( $\phi$ )が存在するならば、原子スペクトルはその影響によって違いが生じると期待される。本研究では光格子と呼ばれる光の器に原子を閉じ込めて同位体シフトの精密測定を行った。

## 1. 背景

あらゆる物理現象を統一的に理解することは多くの物理学者のロマンであり、究極の目標といっても過言ではないでしょう。素粒子物理学の実験結果のほとんどは標準模型と呼ばれる理論で説明することができ、特に 2012 年に標準模型が予言するヒッグス粒子の発見は大きなニュースになりました。しかし、標準模型では説明できない未解決問題（暗黒物質の正体など）が存在するため、標準模型の次、つまり新物理を目指す研究が精力的に行われています。伝統的に、素粒子物理学実験では高エネルギー加速器をはじめとした大型の実験装置を用いて新物理を探索します。一方、それとは相補的な形で、冷却原子、分子、またはイオンの精密測定によって新物理に迫る研究も盛んに行われており、特に最近、同位体シフトの精密測定で電子・中性子間の力を媒介する新粒子を探索する方法に注目が集まっています。

## 2. 研究手法・成果

今回の成果に至った重要なポイントは、標準模型の範囲内で高い精度で成立することが知られている同位体シフト間の線形関係を実験的に検証し、確認された非線形性から新粒子の存在する場合に考えられる中性子・電子との結合の強さの上限を決定した点にあります。

### <同位体シフトについて>

研究手法について説明する前に同位体シフトの考え方について説明します。質量数 $A$ の原子（イオン）について、電子遷移 $\alpha$ の共鳴周波数を $\nu_\alpha^A$ とします。質量数 $A$ 、 $A'$ の同位体間の共鳴周波数差 $\nu_\alpha^{A'A} = \nu_\alpha^{A'} - \nu_\alpha^A$ を同位体シフトと言います。同位体シフトは同位体間の 1) 質量（原子核の運動エネルギー）の違い、2) 原子核の電荷分布の違いに由来します。1) 2) による周波数シフトをそれぞれマスシフト、フィールドシフトと呼び、同位体シフトはマスシフトとフィールドシフトの和で表されます。つまり、質量 $m^A$ の逆数の差を $\delta\mu^{A'A} = 1/m^{A'} - 1/m^A$ 、原子核電荷半径の 2 乗平均 $\langle r^2 \rangle^A$ の差を $\delta\langle r^2 \rangle^{A'A} = \langle r^2 \rangle^{A'} - \langle r^2 \rangle^A$ と表すと、同位体シフトは式 (1) のように表されます。

$$\nu_\alpha^{A'A} = K_\alpha \delta\mu^{A'A} + F_\alpha \delta\langle r^2 \rangle^{A'A} \quad (1)$$

$K_\alpha$  と  $F_\alpha$  は遷移に依存した係数です。もし新粒子が存在すれば、式 (1) に新粒子の項を追加する必要があります。素朴に考えれば、同位体シフトの測定結果とマスシフトおよびフィールドシフトの数値計算を比較すれば新粒子の寄与が分かりそうですが、それには多体電子系の計算および原子核構造の情報が必要になり、非常に困難です。

そこで、2 つ以上の遷移に関する同位体シフト間に成り立つ関係式に着目します。まず新粒子が存在しない場合を考えます。式 (1) と同様に遷移 $\beta$ についての同位体シフト $\nu_\beta^{A'A} = K_\beta \delta\mu^{A'A} + F_\beta \delta\langle r^2 \rangle^{A'A}$ を考え、これらの式を組み合わせると 2 つの遷移の同位体シフト間の関係式

$$\overline{\nu_\beta^{A'A}} = F_{\beta\alpha} \overline{\nu_\alpha^{A'A}} + K_{\beta\alpha} \quad (2)$$

が得られます ( $F_{\beta\alpha} = F_\beta/F_\alpha$ 、 $K_{\beta\alpha} = K_\beta - F_{\beta\alpha}K_\alpha$ )。ここで見通しをよくするために修正同位体シフトと呼ばれる量 $\overline{\nu_\alpha^{A'A}} = \nu_{\alpha(\beta)}/\delta\mu^{A'A}$ を導入しました。式 (2) はキング関係式と呼ばれ、遷移 $\alpha$ の同位体シフトと遷移 $\beta$ の同位体シフトを 2 次元平面にプロットすると同一直線上に乗ることを意味しています。例えば、同位体 $\{A_1, A_2, A_3, A_4\}$ の中から同位体ペア $A_1A_2$ 、 $A_1A_3$ 、 $A_1A_4$ を選び、 $x$ 軸が遷移 $\alpha$ 、 $y$ 軸が遷移 $\beta$ に対応した平面に同位体シフトをプロットすると 3 点は直線 $y = ax + b$ に乗ることが期待されます。ここでもし新粒子が存在すれば、式 (1) には第 3 項目として同位体ペア依存の項が加わるので、式 (2) の線形性は破られます。したがって、キング関係式の線形性の破れを精度よく検証することで新粒子を探索することができます。この方法の良い所は式 (2) を得る際に高い精度で判っていない原子核のパラメータ $\delta\langle r^2 \rangle^{A'A}$ が消去されている点で、

これにより線形性を高い精度で検証することができます（一方、質量は  $10^{-10}$  の精度で測定されており、現状ではその不確かさは問題になりません）。

線形性の破れを観測して直ちに「新粒子はあります！」と主張することは早計です。非線形性の起源は標準模型の範囲内でも存在し、特に本研究で使用するイッテルビウム (Yb) 原子では  $\langle r^2 \rangle^A$  や  $\langle r^4 \rangle^A$  といった原子核電荷分布に依存した高次のフィールドシフトが非線形性の起源になることが理論的に指摘されています。しかし、これらの高次項は（式（2）を得る際に  $\delta \langle r^2 \rangle^A$  を消去したように）組み合わせる遷移の数を増やすことで消去することが可能です。例えば3つ遷移 ( $\alpha, \beta, \gamma$ ) の場合だと、 $(\overline{v_\alpha^A}, \overline{v_\beta^A}, \overline{v_\gamma^A})$  に関する関係式を得る際に高次項を1つ消去することができます。得られた関係式は一般化キング関係式と呼ばれ、余剰な高次項が存在しない場合は3次元空間にプロットされた点は同一平面上に乗ります。

### <同位体シフトの測定>

本研究では中性 Yb 原子の4つの偶核安定同位体ペア  $^{*4}(A, A') = (168, 170)$ 、 $(170, 174)$ 、 $(172, 174)$ 、 $(174, 176)$  に対して、 $6s^2 \ ^1S_0 - 6s6p \ ^3P_0$  遷移（波長 578 nm）の同位体シフトを測定しました。この遷移は自然幅が 10 mHz 程度と非常に狭く精密測定に適しており、光格子時計<sup>\*5</sup> に用いられていることから時計遷移と呼ばれています。本研究では、数百ナノケルビンまで冷却した原子を3次元魔法波長光格子トラップ<sup>\*6</sup> 中に捕獲し、ドップラーシフト<sup>\*7</sup> および光格子による共鳴周波数の変化を抑制しました。また、光会合と呼ばれる方法で光格子サイト内を多重占有する原子を除去することにより、原子間衝突による共鳴周波数のシフトを抑制しました。共鳴周波数は、励起スペクトルの両肩で励起率を比較し両肩の励起率が同じになるようにレーザー周波数を制御する方法で測定しました。これは光格子時計の動作原理と同じです。その結果、不確かさ数 Hz（相対不確かさ  $10^{-9}$ ）で時計遷移の同位体シフト測定に成功しました。偶核同位体ペアに加えて、絶対周波数が測定されている  $(171, 174)$  についても測定を行い、先行研究と不確かさの範囲で一致することを確認しました。

### <一般化キング関係式の線形性検証>

本研究で測定された  $6s^2 \ ^1S_0 - 6s6p \ ^3P_0$  遷移と、マサチューセッツ工科大学 (MIT) のグループで測定された  $Yb^+$  の2つの遷移  $6s \ ^2S_{1/2} - 5d \ ^2D_{5/2}$ （波長 411 nm）、 $6s \ ^2S_{1/2} - 5d \ ^2D_{3/2}$ （波長 436 nm）を組み合わせ、3次元の一般化キングプロットを解析しました。図1に示すようにプロットされた4点は同一平面上に乗っているように見えますが、100万倍拡大してみると測定精度を超えて平面からずれていることが分かります。この結果は少なくとも2種類以上の非線形性の起源がこれらのデータに寄与していることを意味します。

この内の1つが新粒子の影響だとすると他の実験結果との間に矛盾が生じるため、確認された2つの起源を標準模型の範囲内の高次項であると仮定し、追加で新粒子の寄与がある場合にどの程度平面からの「ずれ」が増大するかを調べることで、新粒子の結合定数の上限値を決定しました。つまり本研究は、「ある値（上限値）より強い結合定数を持つ新粒子は存在しない」ということを示し、別の言い方をすれば、仮に新粒子が存在した場合に取りうる結合定数の範囲に制限を与えたことになります。今後精度の高い同位体シフト測定を行うことで、より結合定数の小さい新粒子の存在可能性に迫ることができると期待されます。

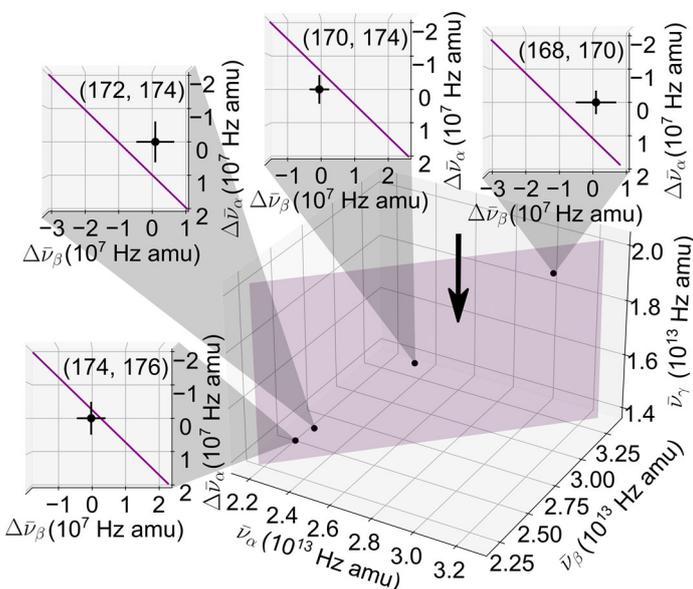


図1 3次元一般化キングプロット。 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ はそれぞれ  $^2S_{1/2} - ^2D_{5/2}$  遷移、 $^2S_{1/2} - ^2D_{3/2}$  遷移、 $^1S_0 - ^3P_0$  遷移、に対応する。挿入図は矢印の方向から見た図で、100万倍拡大されている。単位 amu は原子質量単位を表す。

### 3. 波及効果、今後の予定

本研究で得られた新粒子の結合定数の範囲の制限は既存の実験結果（電子の異常磁気能率測定と中性子散乱実験）から得られる制限より弱かった（つまり、今回決定した結合定数の上限値は、既存の実験で得られているものより大きい）のですが、ごく最近 MIT のグループで測定された新たな遷移を組み合わせると既存の制限に匹敵することがわかりました。本研究を含む一連の同位体シフトの精密測定はここ 1~2 年の結果であり、驚異的な速さで進展しています。今後は中性 Yb 原子の他の狭線幅遷移の同位体シフトを測定してより厳しい制限を与えたいと考えています。

### 4. 研究プロジェクトについて

本研究は、JSPS 科学研究費育成事業 (JP17H06138、JP18H05228、JP18H05405、JP18K03621、JP19J11413、JP21H01014)、JST 戦略的創造研究推進事業 CREST (JPMJCR1673)、文部科学省 光・量子飛躍フラッグシッププログラム Q-LEAP (JPMXS0118069021)、内閣府 革新的研究開発推進プログラム (ImPACT)、National Science Centre (Poland) (2017/26/D/ST2/00490)、台湾科技部、國家理論科學研究中心の助成を受けて行われました。

#### <用語解説>

※1 **標準模型**：素粒子物理学におけるモデルの一つで、強い相互作用、弱い相互作用、電磁相互作用と呼ばれる 3 つの基本的な相互作用を記述する。多くの素粒子物理学の実験結果を説明することができる。

※2 **キング関係式**：複数の同位体ペアについて、2 種類の光学遷移に関する同位体シフトの 2 次元空間プロットは、標準模型の範囲内では高い精度で線形であることを示した関係式（詳細は本文参照）。1963 年に W. H. King によって発見された。

※3 **一般化キング関係式**：2 次元のキング関係式から一般化し、3 種類以上の光学遷移に対する高次元空間プロットに関する線形関係式（詳細は本文参照）。

※4 **偶核安定同位体ペア**：Yb 原子（原子番号：70）には 7 種類の安定同位体が存在し、中性子の数が偶数の同位体が 5 種類（偶核：168、170、172、174、176）、奇数の同位体が 2 種類（奇核：171、173）存在する。本研究では標準模型の範囲内の効果が大きい奇核安定同位体は対象外とした。

※5 **光格子時計**：魔法波長光格子トラップ（注 6）に捕獲された原子に光を当て、吸収された光の振動数（共鳴周波数）を精密に測定して 1 秒の長さを決める時計。次世代の「秒の定義」の最有力候補である。

※6 **魔法波長光格子トラップ**：魔法波長とは時計遷移に関する 2 状態の光格子深さが等しい特殊な波長のことで、光格子トラップによる共鳴周波数の変化を抑制する。光格子トラップは対向するレーザー光の干渉によって形成される周期的なポテンシャルであり、ドップラー効果（注 7）と反跳の影響を受けない分光が可能となる。

※7 **ドップラーシフト**：ドップラー効果による共鳴周波数の変化。救急車が近づいてくるときに高く音が聞こえるのと同じように、光の進行方向と逆方向に原子が速度を持つとき共鳴周波数は高周波数側にシフトする（また逆も然り）。

#### <研究者のコメント>

同位体シフトの精密測定という原子物理学色の濃い研究が素粒子物理学と接点を持ち、学際的な研究に発展したことに大きな意義を感じています。また昨今、量子技術という言葉を目にする機会が増えましたが、本

研究は量子技術を活用した「新粒子探索のための量子センサー」の研究開発とってよいでしょう。本記事を読んで量子技術を活用した基礎研究にも興味を持っていただけると幸いです。(小野滉貴)

<論文タイトルと著者>

タイトル：Observation of Nonlinearity of Generalized King Plot in the Search for New Boson (新ボソン探索における一般化キングプロットの非線形の観測)

著者：Koki Ono, Yugo Saito, Taiki Ishiyama, Toshiya Higomoto, Tetsushi Takano, Yosuke Takasu, Yasuhiro Yamamoto, Minoru Tanaka, and Yoshiro Takahashi

掲載誌：Physical Review X DOI：10.1103/PhysRevX.12.021033