

新種の超原子核(二重ラムダ核)を発見 —中性子星の内部構造の謎に迫る—「美濃イベント」と命名

岐阜大学教育学部・工学研究科 仲澤和馬シニア教授のグループをはじめとする日・韓・米・中・独・ミャンマーの6カ国 24 大学・研究機関の総勢 103 名の研究者・大学院生からなる研究チームは、大強度陽子加速器施設(以下、J-PARC)を利用した国際共同実験 (J-PARC E07 実験)で、ベリリウム(Be)原子核を芯とする新種の二重ラムダ核を発見し、「美濃イベント(MINO event)図 1」と命名しました。二重ラムダ核とは、通常は、陽子と中性子でできている原子核に、ストレンジクォーク*1 を含む「ラムダ粒子*1」が二つ入った超原子核です。現代物理学の大きなテーマは、物質を構成する素粒子「クォーク」に働く力の性質と仕組みの解明であり、その中で課題の一つが二重ラムダ核の研究*2 で、二つのラムダ粒子が入ったことによる超原子核の質量変化の測定により、ラムダ粒子間に働く力の大きさを定量的に知ることです。この種の超原子核の発見は二例目で、最初のもの(「長良イベント」・図 2)もこのグループが発見していました。ヘリウム4 (He4) を芯とする二重ラムダ核(陽子2個、中性子2個、ラムダ粒子2個からなる)である長良イベントの発見により、ラムダ粒子間に働く力が引力であることが分かりましたが、今回の発見でもラムダ粒子間に働く力が引力であることが確認されました。二重ラムダ核検出をねらった E07 実験は、J-PARC を用いることにより、過去の実験の 100 倍のデータを取りためることができました。今回発表する成果は、その解析による成果の第一弾です。今回の解析の成功は、今後、取りためたデータを解析すれば、芯となる原子核が異なる様々な二重ラムダ核が発見でき、それらの質量変化の測定から、ラムダ粒子間に働く力の知見が確実に増えることを意味するものです。それは、はるか宇宙の中性子星*3 の内部構造の解明につながります。今後の解析にご期待ください。本研究成果は、日本時間 2019 年 2 月 22 日出版の日本物理学会が刊行するオンラインオープンアクセス国際月刊誌『Progress of Theoretical and Experimental Physics』に掲載されました。

図 1. 美濃イベントにおける写真乾板中の粒子の飛跡 … グザイマイナス(Ξ^-)粒子*1 が酸素 16 原子核に吸収され Be の二重ラムダ核が生成されました。ヘリウム5 (He5) ラムダ核への崩壊の様子も示してあります。

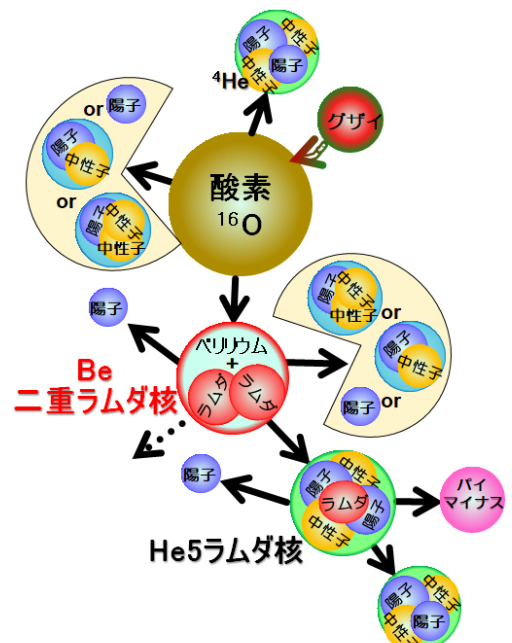
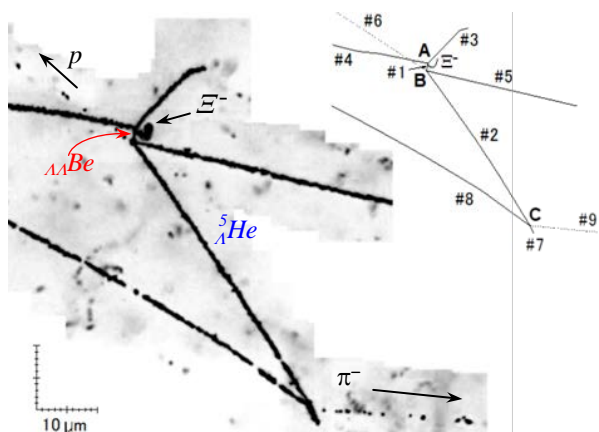
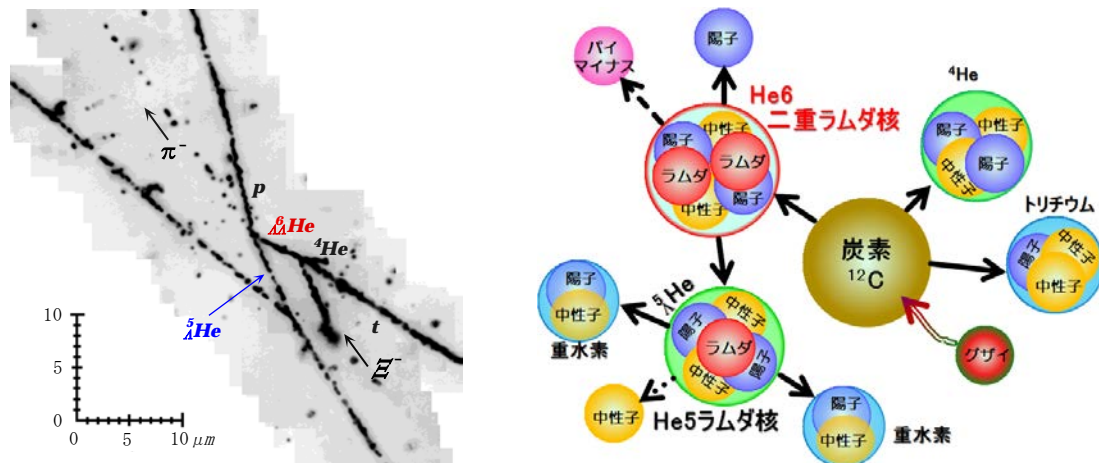


図 2. 長良イベントにおける写真乾板中の粒子の飛跡 (2001 年に仲澤シニア教授のグループが発見) … グザイ粒子が炭素 12 原子核に吸収されヘリウム 6 (He6) 二重ラムダ核が生成され、He5 ラムダ核に崩壊しました。



【研究成果のポイント】

- ・ストレンジクォークを持つ、100 億分の 1 秒という短寿命のラムダ粒子二つを含んだ新しい超原子核(二重ラムダ核)の生成・崩壊を発見した。
- ・発見した二重ラムダ核(「美濃イベント(MINO event)」)と命名、図 1) は Be 原子核を芯とするものであり、我々が 2001 年に発見した He4 原子核を芯とする「長良イベント」(図 2) とは異なる全く新しいものである。
- ・美濃イベントの発見は芯の相違に伴う二重ラムダ核の質量変化の違いから、ラムダ粒子間に働く力の詳細を調べる第 1 歩である。
- ・今後さらにたくさんの二重ラムダ核の発見が期待され、力の詳細が明らかになれば、膨大な数のラムダ粒子が存在する可能性のある中性子星(超巨大な原子核)の構造解明に結びつくものと期待される。
- ・これは、はるか宇宙の中性子星の構造解明に、加速器を使った地上実験で迫るものである。

【背景】

我々の身の回りにある物質は、原子、原子核、ハドロン、クォークという階層構造からなっていると考えられており、現代物理学の大きなテーマは、これらの粒子間に働く力の性質とその仕組みを明らかにすることです。こうした中で重要な課題とされてきたのが、ラムダ粒子が二つ入った様々な種類の二重ラムダ核を生成し、ラムダ粒子間に働く力をその質量変化として測定することです。ラムダ粒子はストレンジクォークという 3 番目に軽いクォークを含んだ、100 億分の 1 秒という短寿命の粒子です。ラムダ粒子間に働く力は、理論的にも極めて重要な研究対象でありながら、その短寿命さゆえの実験的困難さから、2001 年の長良イベントまで実験データはほとんどありませんでした。

一方で二重ラムダ核の研究は、超新星爆発後に形成される天体、「中性子星」の研究とも密接に関連があります。中性子星の中心部は、強力な重力により原子核の数倍に相当する超高密度になっていると考えられています。このような極限的な環境では、ラムダ粒子が自発的に発生して存在する状態がエネルギー的に安定であるかもしれないと考えられています。つまり中性子星は天体規模の超巨大な原子核で、二重ラムダ核は地上の小さな中性子星と言えます。ラムダ粒子同士に働く力の詳細が分かれば、中性子星内でどのような密度条件でラムダ粒子が発生するのか、それによって中性子星内部の圧力がどのように変化し、どのような質量やサイズの中性子星が形成されるのかという謎に手がかりが与えられると期待されています。

【概要】

2016-17年にJ-PARCハドロン実験施設で行った加速器実験（E07）の解析において、Be原子核を芯とした新種の二重ラムダ核（陽子4個、中性子4～6個、ラムダ粒子2個からなる：図3）を発見し、二つのラムダ粒子を注入することによる質量変化を定量的に求めました。この事象を岐阜県南部の美濃豊かな土地柄にちなんで「美濃イベント」と命名しました。



図3. Be11 二重ラムダ核の場合は、陽子4個、中性子5個、ラムダ粒子2個

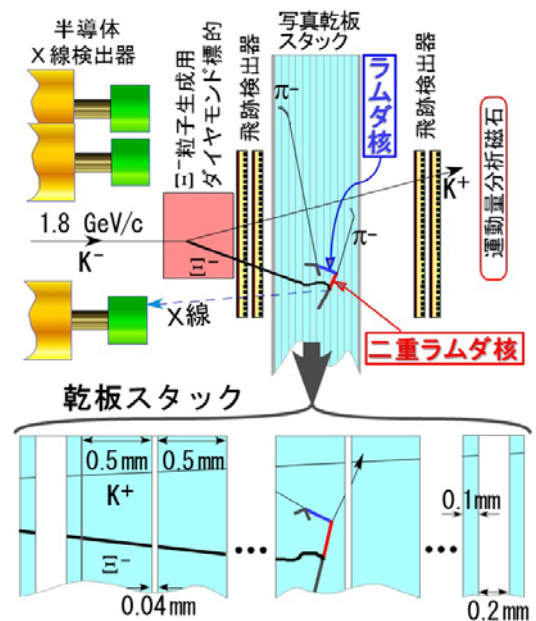
E07 実験では、J-PARCハドロン実験施設で高純度な1130億個のK⁻中間子のビームをダイヤモンド標的(3[縦]×5[横]×3[厚]cm³)に当て、そこで作られるストレンジクォークを二つ持つグザイマイナス粒子を1500枚の特殊な写真乾板に照射しました。この実験の目的は、グザイマイナス粒子が乾板中の原子核に吸収されてできる二重ラムダ核の生成・崩壊の様式を光学顕微鏡を用いて検出・観察し、種々の二重ラムダ核の質量を測定し、ラムダ粒子同士の間働く力を測定することです。実験の原理を図4に示します。

二重ラムダ核の確固たる検出・測定例は、その技術的困難さから、2001年の1例（長良イベント、図2）しかありませんでした。この事象は、He4原子核を芯とする最も基礎的な構造で、He4原子核とラムダ粒子の間働く力のうちスピンなどによる効果は打ち消しあって無視できます。一方これとは別種の、新種の二重ラムダ核である美濃イベントでは、芯となるBe原子核の影響によって二つのラムダ粒子の混入による質量変化が長良イベントとは異なることが分かりました。長良イベントが質量変化の「物差し」の「原点」であるとすると、美濃イベントは物差し上の各種の二重ラムダ核へ理解を広げる初の発見といえます。

今後、他の種類の超原子核の発見を進めて「物差し」の目盛りを増やし、理論的研究の進展を促し、天体規模の巨大原子核＝中性子星の内部構造の解明に結びつくものと期待されます。

図4. E07 実験の概要

J-PARCハドロン実験施設では、メインリングから30 GeVの陽子ビームを導いて金の2次粒子生成標的に照射し、1.8 GeV/cの高純度なK⁻中間子を2次ビームラインであるK1.8ビームラインに送り出します。その下流に右図のような写真乾板スタックを置きます。



前段に置いたダイヤモンドの塊の中で、K⁺中間子の発生によりグザイマイナス（図中のΣ⁻）粒子の生成を捉えます。このK⁺中間子の発生は、後段の高位置精度の飛跡検出器と運動量分析磁石で確認されます。生成されたグザイマイナス粒子は、前段の飛跡検出器で、位置と角度が精度よく測定され、最もダイヤモンドに近い乾板での位置と角度が予測されます。

この飛跡検出器と乾板とは100分の1ミリメートルの精度で位置合わせができ、グザイマイナス粒子を全自動で検出し、この、グザイマイナス粒子が停止するまで自動で追跡します。粒子が停止したと判断されると、その近辺の顕微鏡画像を撮影し、それを人が目視で確認します。すると確かにマイナス荷電の粒子の停止事象が約20%あり、その中に二重ラムダ核の候補となる3つ以上の分岐点を持つ事象が捉えられます。

【研究成果】

検出開始後の2ヶ月を経た2018年7月17日、岐阜大学教育学部4年生が二重ラムダ核特有の生成・崩壊を示す事象を検出しました。その後、大学院生（日本原子力研究開発機構（以下、JAEA）先端基礎研究センター研究開発アシスタント、京都大学・理学研究科）を中心に、あらゆる可能性について運動量やエネルギーの保存則が成り立つかどうかを評価したところ、この事象はグザイマイナス粒子が乾板中の酸素原

子核に吸収され、電荷が4のBe原子核を芯に持つ二重ラムダ核(Be10二重ラムダ核、Be11二重ラムダ核またはBe12二重ラムダ核のいずれか)が生成したものであることが分かりました。さらに、この二重ラムダ核の質量変化を計測したところ、ラムダ粒子間に働く引力を定量的に求めることができました。Be10二重ラムダ核、Be11二重ラムダ核またはBe12二重ラムダ核の3種類の解釈について、それぞれの妥当性を評価すべく運動学にもとづいて統計的に解析したところ、Be11二重ラムダ核であることが尤もらしいことが分かりました。

この事象は、芯となる原子核の違いによってラムダ粒子の結合エネルギーに変化が起こったという初めての観測例で、多様な二重ラムダ核の理解を広げる初の発見といえます。この事象を岐阜県南部の実り豊かな土地柄にちなんで「美濃イベント」と名付けました。美濃イベントにみられる二重ラムダ核の生成・崩壊のようすを図1に示しました。

【研究の経緯】

二重ラムダ核を百例規模で検出する実験の計画は2000年ごろから始まりました。高エネルギー加速器研究機構(以下、KEK)の2.5倍の高純度なK中間子ビームが期待できる米国BNL(Brookhaven National Laboratory)の加速器AGS(Alternating Gradient Synchrotron)に実験計画を提出し、これが2001年9月に採択されました(AGS E964実験)。しかしBNLの諸事情により、すべてのAGS実験が停止されE964実験も実施できませんでした。そこで建設開始が目前となったJ-PARCに実験計画を提出し、2007年1月に本実験がE07実験として採択されました。

ビーム照射に向けて、過去の3倍近く(2.1トン)の写真乳剤を使い、1500枚の大型写真乾板を大学院生らが手作業で半年かけて製作しました。また顕微鏡システムや解析プログラムを構築し、1500枚の大型写真乾板を数か月で現像するシステムの最適化を達成しました。

J-PARCは東日本大震災などのアクシデントに見舞われ、E07実験のビーム照射開始は当初の計画から遅延しましたが、製造した乾板をビーム照射に使うまで待機の3年間は、東大宇宙線研・神岡施設の地下空間に保管させていただき宇宙線による乾板の透明度の悪化を低減させることに成功しました。

E07実験のビーム照射は、採択から約10年後、2016年6月と、2017年4~6月に実施されました。J-PARCハドロン実験施設でKEKのおおよそ4倍の高純度なK中間子のビームを利用でき、グザイマイナ粒子を写真乾板に照射しました。反応を記録した1500枚の写真乾板の現像は、ビーム照射後、大学院生らが手作業で7ヶ月間かけて完了しました。現像終了後の顕微鏡システムの最適化が終了した2018年5月から、岐阜大学とJAEAで本格的に二重ラムダ核探索を開始しました。同12月末時点で、美濃イベントを含む、過去の実験の2倍の二重ラムダ核の検出に成功しています。

【今後の展開】

二重ラムダ核の探索作業は引き続き継続中で、今後1年程度の間は過去の実験の10倍近い数の二重ラムダ核の検出を見込んでいます。この中から一意に核種が同定できる事象、さらにHe4やBe以外の原子核を芯とするさらに新種の二重ラムダ核の検出を期待しています。数多くの二重ラムダ核の検出により、原子核内ひいては中性子星内部で、グザイ粒子+核子と二つのラムダ粒子とが同時に存在するような混合状態の形成の有無(グザイ粒子と核子の質量の和とラムダ粒子2個分の質量との差は、高々1%程度しかないので、両方の状態が混じりやすくなります)などが明らかになるかもしれません。これらの実験データによって、理論的研究の進展を促し、中性子星内のラムダ粒子の存否をはじめとする内部構造の理解につながると期待されます。

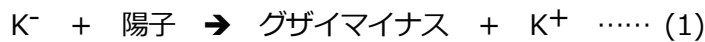
また、二重ラムダ核を大量に検出するための新たな探索手法(全面探査法)を開発しています。図4で解説したように従来の方法では、グザイマイナ粒子の生成事象を電気的な信号を処理する複数の検出器で検出し、その情報を手掛かりにグザイマイナ粒子を乾板中で追跡して二重ラムダ核を探索していました。しかしこの方法は、電気的な検出器の有効な検出領域や事象再構成能力や、また【用語解説】の(2)式で示すような、今回の検出器では検出できない中性K⁰中間子を伴うグザイ粒子生成が検出できないことにより、乾板中に記録されている全ての二重ラムダ核事象の1割程度しか検出していないと考えられます。したがって乾板全面を顕微鏡で網羅的にスキャンして、二重ラムダ核の生成・崩壊に特有の分岐点を3つ以上持つ

事象を画像認識技術によって探索すれば、さらに 10 倍すなわち過去の実験の 100 倍に相当する約千例の二重ラムダ核を検出できるようになります。そのような全面探索システム (Vertex Picker [VP]と命名) の開発を押し進めており、実用化も間近です。

【用語解説】

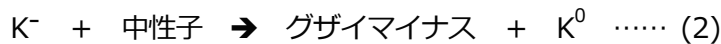
*1 ストレンジクォーク、ラムダ粒子、グザイ粒子、K⁻中間子

通常の原子核を構成する陽子および中性子は、アップ (u)、ダウン (d) の 2 種類のクォークでできている。陽子は (uud)、中性子は (udd) です。第 3 のクォーク ストレンジ (s) も考えると、ラムダ粒子 (uds)、グザイマイナス粒子 (dss)、グザイゼロ粒子 (uss) といった粒子などもあります。グザイと名の付く粒子には、ストレンジクォークが二つ含まれます。s を一つ持つ中間子 K⁻は (ūs) で、ū は u の反クォークです。本実験で用いるグザイマイナス粒子は、K⁻ビームがダイヤモンド標的中の陽子と反応することで、K⁺ (ūs) 中間子とともに次のように生成されます。



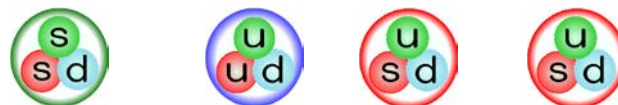
クォークと反クォークは 1 対ですので、反応の前後の u、d、s の個数は、それぞれ 1 個ずつで変わっていません。

また、本研究の手法では検出できませんが、K⁻ビームがダイヤモンド標的中の中性子と反応し、中性 K⁰ 中間子を伴うグザイマイナスも生成することができます。



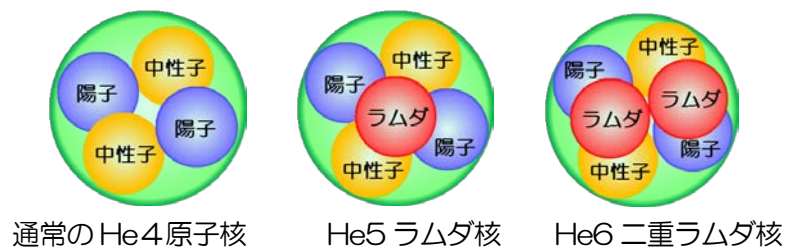
*2 ラムダ粒子を二つ含む超原子核 (二重ラムダ核) の研究

上述の*1 で作られたグザイマイナス粒子は電荷をもつため、図 4 で示す乾板を構成する原子を電離しながら、次第にエネルギーを失い進んだ後に静止します。すると電子に代わって原子核を周回するグザイ原子になり、ゆくゆくは原子核の陽子と反応し、次のように二つのラムダ粒子に変化します。



ここでも u、d、s の個数は反応の前後で変わっていません。この二つのラムダ粒子を核内に持つ原子核が二重ラムダ核です。右に He4 の通常原子核、ラムダ粒子を一つ含むラムダ核、二つ含む二重ラムダ核を図示します。

通常の He4 原子核は、陽子 2 個、中性子 2 個でできています。これにラムダ粒子 1 個を加えると、He5 ラムダ核になります。さらにラムダ粒子を加え、陽子 2 個、中性子 2 個、ラムダ粒子 2 個でできた二重ラムダ核が He6 二重ラムダ核です。



陽子と中性子でできた重水素では、右図のように陽子と中性子の質量の和より 2.2 MeV (陽子や中性子の質量の持つエネルギーの約 0.2%) 軽くなります。これは双方の間にはたらく力が引力であることを意味します。He6 二重ラムダ核の長良イベントでは、その質量が He4 と二つのラムダ粒子の質量和

より、6.91 MeV 軽くなりました。その質量減が、He4 と1個のラムダ粒子でできたHe5 ラムダ核の質量減の2倍より大きいことで、ラムダ粒子間に引力がはたらくと結論付けました。He4 だけではなく他の原子核も二重ラムダ核の芯となれるのか、その際にどのように質量変化が起こるのか、数多くの二重ラムダ核を検出してこそ、ラムダ粒子間に働く力を詳細に調べることができます。

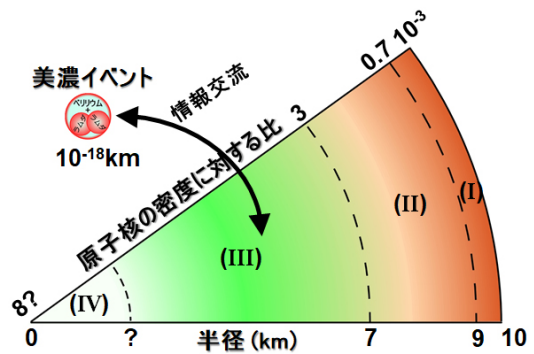
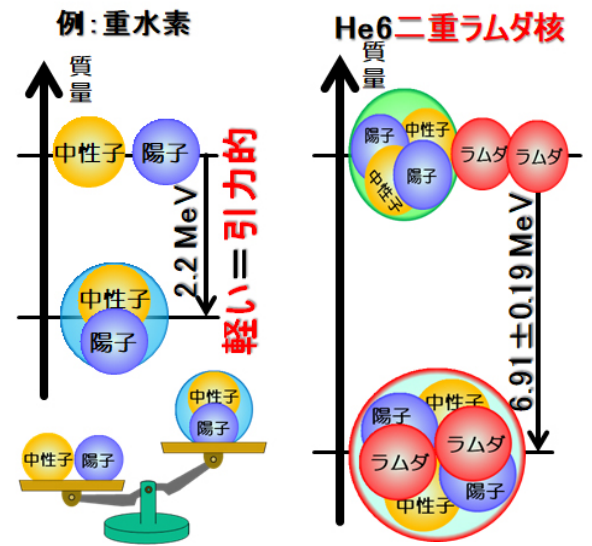
*3 膨大な数のラムダ粒子が存在する可能性のある中性子星(超巨大な原子核)

仲澤和馬、高塚龍之「超巨大ハイパー核としての中性子星 -混在ハイペロンの謎-」

丸善出版、「パリティ」Vol.31 No.04 (2016) pp.12-18

中性子星は、半径が約 10km で質量が太陽の 1.4~2 倍、その内部はスプーン 1 杯で 10 億トンといわれる通常の原子核の数倍にもなる超高密度な星です。その中身は、右図の 4 つの領域に分けて次のように考えられています。

- (I) 通常の原子核、電子ガス、中性子超流体
- (II) 中性子や陽子の超流体、電子やミュオンガス
- (III) 中性子・陽子に加えてラムダやグザイ粒子が混在
- (IV) クォーク物質



【論文情報】

雑誌名 : Progress of Theoretical and Experimental Physics

タイトル : Observation of a Be double-Lambda hypernucleus in the J-PARC E07 experiment

著者 : H. Ekawa^{1,2}, K. Agari³, J. K. Ahn⁴, T. Akaishi⁵, Y. Akazawa³, S. Ashikaga^{1,2}, B. Bassalleck⁶, S. Bleser⁷, Y. Endo⁸, Y. Fujikawa¹, N. Fujioka⁹, M. Fujita⁹, R. Goto⁸, Y. Han¹⁰, S. Hasegawa², T. Hashimoto², S. H. Hayakawa^{2,5}, T. Hayakawa⁵, E. Hayata¹, K. Hicks¹¹, E. Hirose³, M. Hirose¹, R. Honda⁹, K. Hoshino⁸, S. Hoshino⁵, K. Hosomi², S. H. Hwang¹², Y. Ichikawa², M. Ichikawa^{1,13}, M. Ieiri³, K. Imai², K. Inaba¹, Y. Ishikawa⁹, A. Iskendir⁵, H. Ito⁸, K. Ito¹⁴, W. S. Jung⁴, S. Kanatsuki¹, H. Kanauchi⁹, A. Kasagi⁸, T. Kawai¹⁵, M. H. Kim⁴, S. H. Kim⁴, S. Kinbara^{2,9}, R. Kiuchi¹⁶, H. Kobayashi⁸, K. Kobayashi⁵, T. Koike⁹, A. Koshikawa¹, J. Y. Lee¹⁷, J. W. Lee⁴, T. Ma¹⁸, S. Y. Matsumoto^{1,13}, M. Minakawa³, K. Miwa⁹, A. T. Moe¹⁹, T. J. Moon¹⁷, M. Moritsu³, Y. Nagase⁸, Y. Nakada⁵, M. Nakagawa⁵, D. Nakashima⁸, K. Nakazawa⁸, T. Nanamura^{1,2}, M. Naruki^{1,2}, A. N. L. Nyaw⁸, Y. Ogura⁹, M. Ohashi⁸, K. Oue⁵, S. Ozawa⁹, J. Pochodzalla^{8,20}, S. Y. Ryu²¹, H. Sako², Y. Sasaki⁹, S. Sato², Y. Sato³, F. Schupp⁸, K. Shirotori²¹, M. M. Soe²², M. K. Soe⁸, J. Y. Sohn²³, H. Sugimura²⁴, K. N. Suzuki^{1,2}, H. Takahashi³, T. Takahashi³, Y. Takahashi¹, T. Takeda¹, H. Tamura^{2,9}, K. Tanida², A. M. M. Theint⁸, K. T. Tint⁸, Y. Toyama⁹, M. Ukai³, E. Umezaki¹, T. Watabe¹⁴, K. Watanabe¹, T. O. Yamamoto², S. B. Yang⁴, C. S. Yoon²³, J. Yoshida², M. Yoshimoto⁸, D. Zhang¹⁸, and Z. Zhang¹⁸

¹ Department of Physics, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan

² Advanced Science Research Center, Japan Atomic Energy Agency, Tokai 319-1195, Japan

³ Institute of Particle and Nuclear Study (IPNS), High Energy Accelerator Research Organization

(KEK), Tsukuba 305-0801, Japan

⁴ Department of Physics, Korea University, Seoul 02841, Korea

⁵ Department of Physics, Osaka University, Toyonaka 560-0043, Japan

⁶ Department of Physics and Astronomy, University of New Mexico, Albuquerque, New Mexico 87131, USA

⁷ Helmholtz Institute Mainz, 55099 Mainz, Germany

⁸ Physics Department, Gifu University, Gifu 501-1193, Japan

⁹ Department of Physics, Tohoku University, Sendai 980-8578, Japan

¹⁰ Institute of Nuclear Energy Safety Technology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

¹¹ Department of Physics & Astronomy, Ohio University, Athens, Ohio 45701, USA

¹² Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 34113, Korea

¹³ RIKEN Cluster for Pioneering Research, Wako 351-0198, Japan

¹⁴ Department of Physics, Nagoya University, Nagoya 464-8601, Japan

¹⁵ RIKEN Nishina Center, Wako 351-0198, Japan

¹⁶ Institute of High Energy Physics, Beijing 100049, China

¹⁷ Department of Physics, Seoul National University, Seoul 08826, Korea

¹⁸ Shanxi Normal University, Linfen 041004, China

¹⁹ Department of Physics, Lashio University, Buda Lane, Lashio 06301, Myanmar

²⁰ Institut für Kernphysik, Johannes Gutenberg-Universität, 55099 Mainz, Germany

²¹ Research Center for Nuclear Physics, Osaka University, Osaka 567-0047, Japan.

²² Department of Physics, University of Yangon 11041, Myanmar

²³ Research Institute of Natural Science, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea

²⁴ Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba 305-0801, Japan

論文公開URL : <http://doi.org/10.1093/ptep/pty149>

【研究支援】

本研究は以下の助成金の支援のもとに進めてまいりました。

1. 平成14年-16年 (2002-2004) 基盤研究 (B) 課題番号 14340069 研究代表者: 仲澤和馬 (岐阜大学)
課題名『重ストレンジネス核によるハイペロン-ハイペロン相互作用の実験研究』
2. 平成15年-19年 (2003-2007) 特別推進研究 課題番号 15001001 研究代表者: 今井憲一 (京都大学)
課題名『ダブルハイパー核の研究』
3. 平成19年-20年 (2007-2008) 公益財団法人 遠藤齊治朗記念科学技術振興財団 研究代表者: 仲澤和馬
課題名『超厚型両面塗布写真乾板のための極薄フィルム高速表面処理技術の研究開発』
4. 平成20年 (2008) 三菱マテリアル(株)岐阜製作所 岐阜大学における研究等助成 受領者: 仲澤和馬
5. 平成21年 (2009) 国立大学法人 岐阜大学 活性化経費 (大型科研費取得支援) 受領者: 仲澤和馬
課題名『ダブルハイパー核分光学の開拓』
6. 平成23年-27年 (2011-2015) 基盤研究 (S) 課題番号 23224006 研究代表者: 仲澤和馬
課題名『エマルションによる大統計ダブルハイパー核生成実験』
7. 平成24年-28年 (2012-2016) 新学術領域「実験と観測で解き明かす中性子星の核物質」・計画研究
A01 課題番号: 24105002 研究代表者: 高橋俊行 (KEK)
課題名『多重ストレンジネスのバリオン間相互作用』
8. 平成28年-31年 (2016-2019) 基盤研究 (A) 課題番号 16H02180 研究代表者: 仲澤和馬
課題名『ダブルラムダ、グザイハイパー核による二重ストレンジネス相互作用の実験的研究』

【問い合わせ先】

<研究に関すること>

- ・岐阜大学教育学部・大学院工学研究科 シニア教授 仲澤 和馬
電話：058-293-2246 E-mail：nakazawa@gifu-u.ac.jp
- ・日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター 博士研究員 吉田 純也
電話：029-282-6487 E-mail：jyoshida@post.j-parc.jp

<各機関報道担当>

- ・岐阜大学総合企画部総務課広報係 佐藤 孝英／伊藤 智衣
電話：058-293-3377 E-mail：kohositu@gifu-u.ac.jp
- ・J-PARC センター 広報セクション リーダー 阿部 美奈子
電話：029-284-4578 E-mail：abe.minako@jaea.go.jp
- ・大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 広報室長 引野 肇
電話：029-879-6047 E-mail：press@kek.jp
- ・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 小野 徳久
電話：03-3592-2346 E-mail：ono.norihisa@jaea.go.jp
- ・大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所
広報コーディネーター 多田 裕子
電話：029-864-5335 E-mail：htada@post.kek.jp

【注意事項】

- ・本プレスリリースには別紙を用意しております。上記岐阜大学の報道担当にお問い合わせください。
- ・本プレスリリースは文部科学記者会、科学記者会および各社科学担当等に送信しております。

別紙

プレスリリース

「新種の超原子核(二重ラムダ核)を発見」

補足資料

【研究成果】

今回発見した美濃イベントは、グザイマイナス粒子が乾板中の酸素原子核に吸収され、電荷が4のベリリウム (Be) 原子核を芯に持つ二重ラムダ核 (Be10 二重ラムダ核、Be11 二重ラムダ核または Be12 二重ラムダ核のいずれか) が生成したものです。各場合の質量欠損は、芯となる Be 原子核 (Be8、Be9 あるいは Be10) と二つのラムダ粒子の質量の和に比して、それぞれ 15.05 ± 0.11 MeV (このエネルギーを ΔM_{10} とします)*1、 19.07 ± 0.11 MeV (ΔM_{11} とします) あるいは 13.68 ± 0.11 MeV (ΔM_{12} とします) となりました。一方、過去に検出・測定された長良イベントにおいては、質量欠損が $\Delta M = 6.91 \pm 0.16$ MeV でした。

ΔM はラムダ粒子 2 個分の結合エネルギーに相当します。もしラムダ粒子間に力が働かなければ、 ΔM はラムダ粒子 1 個の結合エネルギー、すなわちラムダ粒子が 1 つ入った Be9 ラムダ核、Be10 ラムダ核あるいは Be11 ラムダ核における、1 個のラムダ粒子の結合エネルギー (6.71MeV、8.60MeV あるいは 8.2MeV[推定値]) の単純な 2 倍になるはずですが、しかし ΔM_{10} および ΔM_{11} の場合の 2 倍からのずれは、それぞれ 1.68MeV ($15.05 - 2 \times 6.71$) および 1.87MeV だけ大きく ($19.07 - 2 \times 8.60$) なり、結合エネルギーと同様に正であるため、ラムダ粒子間にはたらく力が引力であることが改めて確認されました。この相互作用エネルギーの測定誤差は、それぞれ 0.14 MeV および 0.37 MeV で、これは長良イベントである He 6 二重ラムダ核の 0.67 ± 0.17 MeV とは有意に離れています。Be12 二重ラムダ核の場合には、励起状態の Be10 が芯であるとすると相互作用エネルギーが正となり、やはり引力であることが分かりました。さらにこれら 3 種類の解釈について、それぞれの妥当性を評価すべく運動学にもとづいて統計的に解析したところ、Be10 二重ラムダ核、Be11 二重ラムダ核または Be12 二重ラムダ核のうち、Be11 二重ラムダ核であることが尤もらしいことが分かりました。

この事象は、芯となる原子核の違いによってラムダ粒子の結合エネルギーに変化が起こったという初めての観測例で、多様な二重ラムダ核の理解を広げる初の発見といえます。

【実験の背景】

二重ラムダ核の研究は、日本の研究グループの持つ写真乾板を用いた実験技術により開拓されてきました。最初の二重ラムダ核は M. Danysz ら (ヨーロッパの実験グループ) により 1963 年に報告されましたが、それから約 30 年経った 1991 年に、E176 (KEK- PS (Proton Synchrotron)) 実験でようやくその存在の確固たる証拠が得られました。続いて E373 実験では 7 例の二重ラムダ核事象を検出し、2001 年にはここで得られた「長良イベント」が、ヘリウム 4 (He4) 原子核を芯とする最も基礎的な二重ラムダ核であること、さらにラムダ粒子同士にはたらく力が引力的であることを世界で初めて定量的に明らかにしました。

ラムダ粒子同士に働く力を詳細に議論するうえで、様々な種類の二重ラムダ核を検出しそれらの質量変化を測定することが不可欠です。核内の粒子に働く力およびその結果としての結合エネルギーは、原子核の構造やスピンなどに依存すると考えられています。長良イベントの芯核であるヘリウム 4 (He4) 原子核のスピンは 0 「ゼロ」です。そこで、長良イベントの発見以降、この事象とは異なる別種の二重ラムダ核の独立な実験データが望まれていました。

過去の 10 倍にあたる約百例の二重ラムダ核を検出し、新種の二重ラムダ核を発見すべく、J-PARC E07 実験が計画されました。この実験を実現するために、以下の 3 つが重要な要素でした。

まず 1 つ目は、J-PARC ハドロン実験施設で供給される高純度の K 中間子ビームです。J-PARC ハドロン実験施設では、2 段のビーム粒子の質量分離装置を備えたことにより、KEK-PS の 4 倍近くの K 中間子の純度が達成されました。実験中、写真乾板は、グザイマイナス粒子を生成せずに素通りしていく大量のビーム粒子飛跡までも記録してしまいます。このビーム飛跡の本数密度が高くなりすぎると顕微鏡観察に支障をきたし、つまり照射できる総ビーム粒子数は限られるので、ビーム中に含まれる K 中間子の割合を極力増

やすことが重要でした。

2つ目は、過去の実験より多量の乾板を用意し、現像できる体制を作ることでした。まず岐阜大学の教育学部敷地内に新築された実験施設、「ダブルハイパー核実験棟」を岐阜大学より提供されました。この実験棟で我々は、実験に必要な約 1500 枚の大型写真乾板(350[縦]×345[横]×1[厚み]mm³)を製造、現像するための技術開発を行いました。

さらに3つ目は、過去の 10 倍量を相手にする二重ラムダ核の探索と解析技術の開発です。我々は、グザイマイナス粒子が写真乾板に入射した場所とその角度を確実に検出する手法や、顕微鏡下で乾板中のグザイマイナス粒子を画像認識で自律的に追跡するシステムを開発しました。また、検出した事象の核種を同定するための、顕微鏡画像解析プログラムや核種識別のプログラムを開発して E07 実験に臨みました。

【今後の展開】

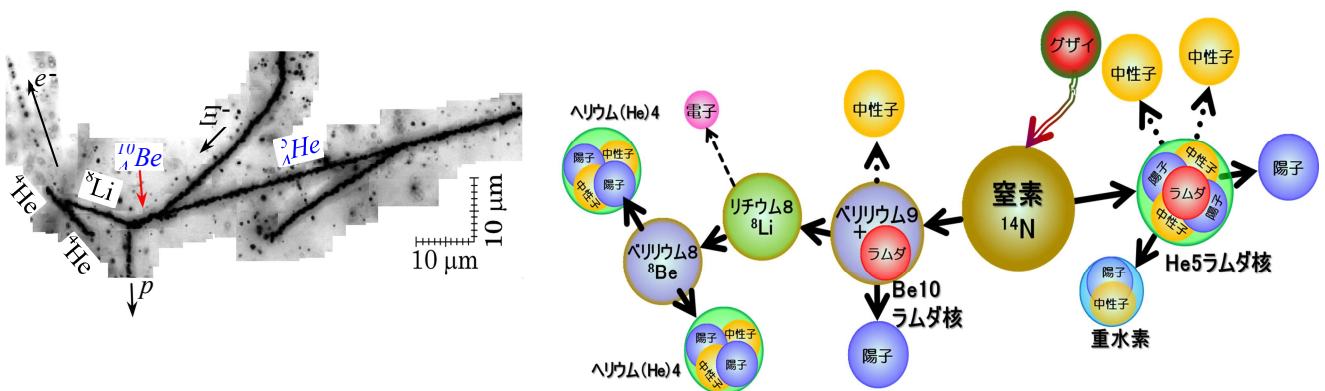
二重ラムダ核の探索作業は引き続き継続中で、今後 1 年程度の間過去の実験の 10 倍近い数の二重ラムダ核の検出後には、さらに 10 倍 = 過去の実験の 100 倍の数を見込んでいます。

E07 実験によってグザイ核*2の研究も大きく進展する見込みです。木曾イベント (図 1) は、下記に述べる全面探査法で過去にビーム照射した写真乾板を探査し、岐阜大学で発見された、グザイマイナス粒子が陽子や中性子と同様に核力 (強い相互作用) で窒素 14(N14)原子核と結合したことが初めて明らかになったグザイ核事象です。この事象の発見により、グザイ粒子に働く核力が引力であることが判りました。

こうして二重ラムダ核とグザイ核の大量検出により、核内ひいては中性子星内部で、グザイ粒子+核子と二つのラムダ粒子とが同時に存在するような混合状態の形成の有無(グザイ粒子と核子の質量の和とラムダ粒子 2 個分の質量との差は、高々 1%程度しかないため、両方の状態が混じりやすくなります) などが明らかになるかもしれません。

二重ラムダ核やグザイ核を過去の実験の 100 倍も検出するための新たな探索手法 = 全面探査システム (Vertex Picker [VP]と命名) の開発を推し進めています。このシステムは、開発段階で約 800 万枚の顕微鏡画像から「木曾イベント」が検出されたことにより、その有効性が示されています。

図 1. 木曾イベントにおける写真乾板中の粒子の飛跡 … グザイマイナス粒子が N14 原子核の内部で吸収され、He5 ラムダ核と Be10 ラムダ核に分裂しました。グザイマイナス粒子と N14 原子核が核力で結びついたグザイ核ができたと考えられます。



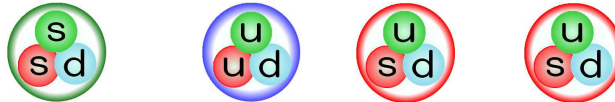
【用語解説】

*1 MeV、 ΔM_{10}

質量とエネルギーの等価性による質量の持つエネルギーを MeV (メガ・エレクトロンボルト) で表しています。1 MeV はおよそ電子 2 個分の質量に対応します。質量欠損 ΔM の右下につく数値は、Be10 二重ラムダ核などの質量数 (ここでは 10) を表します。

*2 グザイ核

グザイマイナス粒子が乾板を構成する原子を電離しながら進み、次第にエネルギーを失い静止すると、グザイ原子になり、ゆくゆくは原子核の陽子と反応し、次のように二つのラムダ粒子に変化することは、プレスリリースで述べました。



グザイマイナス粒子が、原子核内部で吸収され、反応 (3) によって 2 つのラムダ粒子に変換する前に、陽子や中性子と同様に原子核の構成要素となり、核力 (強い相互作用) によって結合した状態を作るともありません。そのような原子核をグザイ核 (これも超原子核の一種です) と呼びます。グザイ核が存在するには、グザイ粒子に働く核力が引力でなければなりません。その存在の有無は長い間不明でしたが、木曾イベントの発見によって、グザイ核が存在し、グザイ粒子に働く力が引力であることがわかりました。