

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】

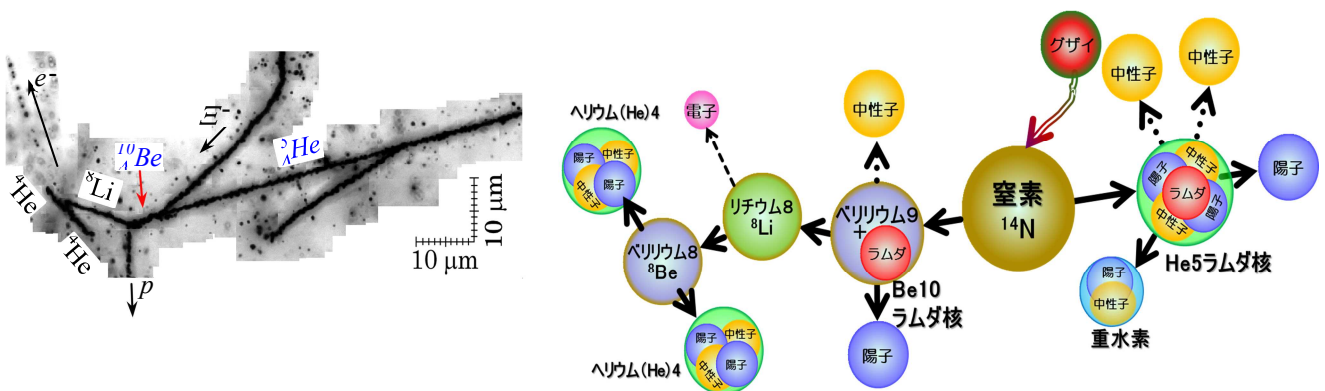
二重ラムダ核の探索作業は引き続き継続中で、今後 1 年程度の間過去の実験の 10 倍近い数の二重ラムダ核の検出後には、さらに 10 倍 = 過去の実験の 100 倍の数を見込んでいます。

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。



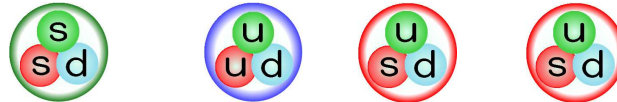
【用語解説】

*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。