

## Press Release(R3/3/2)

# 稀少な超原子核「グザイ核」の質量を初めて決定 原子核の成り立ちや中性子星の構造を理解する新たな知見

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26大学・研究機関の総勢97名の研究者・大学院生からなる国際研究チームは、茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設(J-PARC)を利用した国際共同実験(J-PARC E07 実験)で、グザイマイナス<sup>1)</sup>と呼ばれるストレンジクォーク<sup>1)</sup>を2つ持つ粒子を含む超原子核である「グザイ核」を新たに観測しました(図1)。この事象は岐阜県にある伊吹山にちなんで「伊吹事象(IBUKI event)」と命名され、詳細解析によってグザイマイナス粒子が窒素14原子核に束縛した状態とわかりました。これまでグザイ核の質量は、グザイ核が崩壊してできる娘核の状態に複数の解釈があったために決定できていませんでした。今回発見された事象では、解釈の曖昧さなく、その質量を初めて高精度で決定しました。グザイ核の質量から、グザイマイナス粒子と原子核、さらにはその構成要素である陽子や中性子との間に働く力の大きさを知ることができます。また、グザイマイナス粒子などのストレンジクォークを持つ粒子(ハイペロン<sup>1)</sup>)は、この宇宙で最も密度の高い天体である中性子星内に出現すると考えられており、その力の大きさは中性子星内でどのハイペロンがどのような密度で出現してくるか、ひいては半径や内部の圧力といった構造の理解につながります。したがって、グザイマイナス粒子に働く力を精密に決定した本研究は、物質を構成する素粒子「クォーク」から物質が形成される仕組みの理解に繋がる成果になるとともに、巨大な原子核と言われる中性子星の内部構造の解明に一步迫る成果です。

本研究成果は、日本時間2021年2月12日(金)にPhysical Review Letters (PRL) 誌のオンライン版で発表されました。論文は、Editors' Suggestion(注目論文)に選ばれ、解説記事としてPhysics Synopsis(梗概)(<https://physics.aps.org/articles/v14/s15>)でも紹介され、顕微鏡画像写真(図1左)は、同日発行のPRL誌126巻6号の表紙を飾りました。

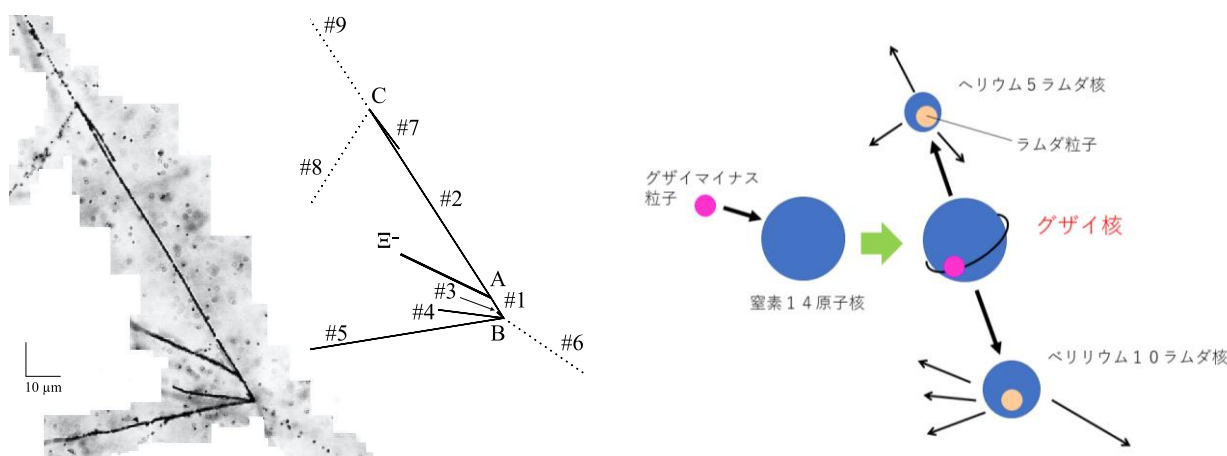


図1. 写真乾板中で観測された新たなグザイ核事象(伊吹イベント)の顕微鏡画像とそのイメージ図  
グザイマイナス( $\Xi^-$ )粒子がA点で窒素14原子核に吸収されグザイ核を形成し、ベリリウム10ラムダ核(#1)とヘリウム5ラムダ核(#2)に崩壊しました。ベリリウム10ラムダ核は、B点でいくつかの原子核(#3から#6)といくつかの中性子(電荷を持っていないので飛跡は残らない)に崩壊し、ヘリウム5ラムダ核はC点でヘリウム4原子核(#7)、パイマイナス粒子(#8)と陽子(#9)に崩壊しました。

## 【発表のポイント】

- J-PARC で実施した過去最大規模のグザイ核探索実験によりグザイ核の観測に成功した。
- グザイ核の存在は、我々の先の実験で初めて確認したものの、その質量を単一に決めるには至らなかったが、今回観測したグザイ核ではその質量を一意にかつ世界最高精度で決定することができた。
- グザイ核の質量から、グザイマイナス粒子と原子核や陽子・中性子との間に働く力の大きさがわかり、これは原子核がクォークからどのように成り立つのかを紐解くとともに、この宇宙で最高密度の中性子星の内部構造の理解を促す地上の実験で得た重要な知見である。

## 【研究成果】

研究チームは、J-PARC ハドロン実験施設で行った実験（J-PARC E07 実験）で、グザイマイナス粒子を含んだグザイ核を新たに観測しました。この実験では、加速器ビームで作られた大量のグザイマイナス粒子を写真乾板に照射しました。詳細な解析により、ある写真乾板に記録された飛跡がグザイマイナス粒子と窒素 14 原子核とが束縛した状態の痕跡とわかりました。グザイマイナス粒子はストレンジクォーク<sup>1)</sup>を2つ含む地球上に自然に存在しない粒子であり、原子核との間に働く力の大きさは精度良く分かっていませんでした。本研究では観測したグザイ核の質量から、グザイマイナス粒子と窒素 14 原子核との間に働く力(束縛エネルギー)を  $1.27 \pm 0.21$  MeV という世界最高精度で決定しました。グザイマイナス粒子はマイナスの電荷を持つ電子と同じようにプラスの電荷を持つ原子核とクーロン力で束縛状態を作りますが、働く力がクーロン力のみであれば束縛エネルギーは 0.39 MeV と計算されます。今回観測した事象は、クーロン力に加えて、原子核と「強い相互作用<sup>2)</sup>」による引力によってさらに強く束縛したグザイ核状態を形成した後に崩壊したもので、今回の結果から強い相互作用による引力の大きさがわかります。なお、この崩壊は、グザイマイナス粒子が原子核中の陽子と反応して2つのラムダ粒子<sup>1)</sup>へ変換する反応で起きますが、この変換反応が強いとグザイマイナス粒子が原子核内に入ってグザイ核状態を形成する前に壊れてしまうため、変換反応の強さは弱いということも示唆されます。グザイマイナス粒子と原子核の間に働く力、またそのもととなるグザイ粒子<sup>1)</sup>と陽子・中性子との間に働く力や変換を引き起こす強い相互作用は、原子核の成り立ちや天体サイズの原子核ともいえる中性子星の内部の状態を理解する上で重要であり、本研究で強い相互作用の新たな知見が得られました。

## 【背景】

グザイ核とは、通常原子核にグザイ粒子が加わった原子核を指します。グザイ粒子は、通常原子核を構成する陽子や中性子と同じようにクォーク3つから構成される粒子で、ストレンジクォークを2つ含み、100 億分の 1 秒程度の時間で崩壊するという性質を持っています。通常原子核には含まれないストレンジクォークを含む原子核（超原子核）を研究することは、原子核形成のメカニズムの深い理解に繋がります。また超原子核、特にグザイ核の研究は、天体サイズの巨大な原子核と言われる中性子星の理解にも重要です。中性子星は恒星が超新星爆発を起こした後に形成される超高密度天体で、その合体事象は重力波源や宇宙の重元素の供給源として近年注目を集めています。中性子星の質量の上限値、半径、内部の密度や圧力といった性質を理解するには、中性子星の内部においてどのような条件下でどのような粒子が発生するかを考える必要があります。グザイ粒子も中性子星内に発生しうる粒子の一つで、その発生条件は陽子や中性子との間に働く力の強さに依存することから、その大きさを地上実験によって決めることが必要で、グザイ核の実験データの充実は長い間望まれていました。

グザイ粒子と原子核の間に働く（強い相互作用による）力はそれまでの実験から引力であることが示唆されていましたが、仲澤和馬シニア教授のグループは 2015 年、KEK 12GeV 陽子シンクロトロンでの実験（E373）で世界初となるグザイ核事象（木曾イベント）を報告し、グザイ粒子と原子核との間の強い相互作用は引力であることを明らかにしました。しかし木曾イベントでは、グザイ核が崩壊した際の娘核が基底状態だったのか励起状態だったのか確定できませんでした。そのため質量を一意に決められず、グザイ粒子と原子核に働く力の大きさを精度良く決定できませんでした。グザイ核事象は非常に稀な事象で、質量を一意に決め、さらにグザイ粒子に働く強い相互作用の詳細を知るには、より多くのグザイ核を観測する必要がありました。そこで研究チームは、大強度ビームが得られる J-PARC において、新たな技術開発により従来の 10 倍の事象観測を目指した実験を計画、実行しました。

## 【研究の経緯】

研究チームは、J-PARCのハドロン実験施設で、従来の10倍の事象観測を目指した国際共同実験(J-PARC E07)を2016-17年に実施しました。J-PARC加速器ビームで作られる大強度・高純度の負電荷のK中間子(K<sup>-</sup>)<sup>1)</sup>のビームを用いてグザイマイナス粒子を大量に生成し、これを総計1500枚の特殊な写真乾板に入射させてグザイ核事象を記録しました。その後写真乾板を現像し、独自に開発した光学顕微鏡システムでグザイ核事象を探索しました。探索をより効率よく行うため、グザイマイナス粒子の生成反応を写真乾板の前後に設置された検出器群によって同定し、さらにグザイマイナス粒子の写真乾板への入射位置の測定データを用いて写真乾板内を探索しました。探索の結果、グザイマイナス粒子が写真乾板中の原子核に吸収され、2つのラムダ核に分裂する事象を観測しました。解析の結果、この事象は写真乾板中の窒素14原子核に吸収され、2つのラムダ核(ベリリウム10ラムダ核とヘリウム5ラムダ核)に崩壊した事象であること、その束縛エネルギーは $1.27 \pm 0.21$  MeVであると一意に決定できました。

この事象は、顕微鏡を用いた探索を主導している岐阜大学の位置する岐阜県・伊吹山にちなみ「伊吹イベント」と命名されました。これまでグザイ核事象は数例しか観測例が無く、新たに発見された場合、発見に貢献した研究機関や発見者に縁のある地名にちなんで命名することが研究チームの慣例となっています。

## 【今後の展開】

グザイマイナス粒子に働く力を精密に測定した本研究は、物質を構成する素粒子クォークから物質が形成される仕組みの理解に繋がる成果になるとともに、巨大な原子核と言われる中性子星の内部構造の解明に一歩迫る成果になります。

研究グループは、全面探査法と呼ばれる新たなグザイ核の探索法を開発しています。これにより現状の検出器群で同定できないグザイマイナス粒子によって生成されるグザイ核の観測が可能になり、この手法によるグザイ核事象の観測数は現在のさらに10倍(過去実験の100倍)と見積もられます。多くのグザイ核事象の観測により、様々な種類とエネルギー状態にあるグザイ核を系統的に測定し、グザイ粒子の強い相互作用の詳細が明らかになります。

## 【論文情報】

雑誌名： Physical Review Letters

タイトル： Observation of Coulomb-Assisted Nuclear Bound State of  $\Xi^- - {}^{14}\text{N}$  System

著者： S. H. Hayakawa et al.

DOI番号： 10.1103/PhysRevLett.126.062501

論文公開URL： <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.126.062501>

## 【国際研究チーム】

本研究は岐阜大学(教育学部、工学研究科)、日本原子力研究開発機構、東北大学、高エネルギー加速器研究機構(素粒子原子核研究所、加速器研究施設)、大阪大学(理学研究科、核物理研究センター)、京都大学、理化学研究所(高エネルギー原子核研究室、中間子科学研究室、光量子工学研究センター)、名古屋大学、韓国・ソウル国立大学、韓国・標準科学研究所、韓国・高麗大学、韓国・慶尚国立大学、アメリカ・ニューメキシコ大学、アメリカ・オハイオ大学、ドイツ・ヘルムホルツ研究所マインツ、ドイツ・ヨハネス・グーテンベルク大学マインツ、中国・合肥物質科学研究院、中国・高エネルギー物理研究所、中国・山西師範大学(現代物理学研究所)、ミャンマー・ラシオ大学、ミャンマー・ヤンゴン大学が参加する国際共同研究グループにより行われました。これらの機関は実験遂行に向けた検出器開発や実験の実施に貢献しました。岐阜大学は、写真乾板を用い光学顕微鏡を用いた写真乾板内の物理事象探索、特に伊吹イベントの発見に貢献しました。日本原子力研究開発機構は検出器群をもちいたグザイマイナス粒子の同定と、写真乾板画像の詳細解析によるグザイ核生成反応の観測と質量の測定に貢献しました。

## 【用語解説】

### 1) ストレンジクォーク、ラムダ粒子、グザイ粒子、ハイペロン、K 中間子

クォーク 3 つからなる陽子・中性子のような粒子（バリオンと呼びます）は、陽子や中性子の他にもいくつか存在することが分かっています。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) といった粒子などがあります。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。このようにストレンジクォークを含む、ラムダ粒子やグザイ粒子などのことを総称してハイペロンと呼びます。

ラムダ粒子やグザイ粒子などハイペロンが入った原子核を超原子核といい、ラムダ粒子が入ったラムダ核やグザイ粒子の入ったグザイ核などがあります。

また、クォークと反クォークからなる中間子と呼ばれる粒子も存在します。s を一つ持つ負電荷の K 中間子 ( $K^-$ ) は ( $\bar{u}s$ ) で、 $\bar{u}$ 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、正電荷の K 中間子 ( $K^+$ ) とともに次のように生成されます。



グザイマイナス粒子は、陽子と反応して、2つのラムダ粒子に変換します。この変換反応によりグザイ核は崩壊します。この時、2つのラムダ粒子がたまたま束縛し2つのラムダ核になったものが今回観測した事象です。



### 2) 強い相互作用

「強い力」ともいい、自然界に存在する4つの相互作用（力）の一つ（他の3つは、弱い相互作用、電磁相互作用、重力相互作用）。クォーク間に働いて核子（陽子や中性子）を形作ったり、核子間に働いて原子核を形作ったりします。この力の性質の理解を深めることは現代物理学の重要課題の1つであり、それには、地球上に自然には存在しないストレンジクォークを含む粒子同士や、それらと原子核や核子との間に働く力を調べる事が重要なカギとなります。そこで、加速器を用いてストレンジクォークを含む「超原子核」をつくり、強い力の研究が行われています。