

光子ビームで反Kメソンを含む原子核の観測に初成功

—中性子星の謎などに迫る新たな観測—

キーワード： 反Kメソン原子核、高密度核物質、レーザー電子光、SDGs

【研究成果のポイント】

- ◆ 「反Kメソン」と呼ばれる特殊な粒子が「糊」となって陽子や中性子を強く結びつけた原子核を、光子ビームを使った実験で初めて観測した
- ◆ 反Kメソン原子核の運動量分布を参照することでほかの現象との判別が可能になった
- ◆ 高密度核物質や中性子星の内部構造といった物質の起源に迫る理解の進展に期待

❖ 概要

大阪大学核物理研究センターの小早川亮特任研究員、石川貴嗣教授、京都産業大学理学部の新山雅之教授、東北大学先端量子ビーム科学研究センターの大西宏明教授、韓国・高麗大学校の Jung Keun Ahn 教授、岐阜大学教育学部の住濱水季教授、中国近代物理研究所の村松憲仁教授、理化学研究所仁科加速器科学研究センターの Yue Ma 専任研究員、京都大学理学研究科の富田夏希准教授、台湾中央研究院の Wen-Chen Chang 教授、カナダ・サスカチュワン大学の Chary Rangacharyulu 教授らの国際共同研究グループ「LEPS2/Solenoid コラボレーション」は、図1のような通常とは異なる「糊」が陽子と中性子を結びつけた原子核を、光子ビームを使った実験において、世界で初めて観測することに成功しました。具体的には反Kメソン^{*1}と呼ばれる粒子が陽子や中性子を強く結びつけた状態です。

実験は、兵庫県にある大型放射光施設 SPring-8^{*2}のレーザー電子光^{*3}実験施設 LEPS2 における大型ソレノイド分光装置を使った初めての成果です。LEPS2 は大阪大学核物理研究センターと東北大学先端量子ビーム科学研究センターが共同で運用しています。

身の回りの物質を構成する原子の中心には陽子と中性子からなる原子核があります。湯川秀樹博士により π メソン^{*4} (π 中間子) という粒子が、陽子や中性子を糊のように結びつけていることがわかりました。陽子や中性子、そして π メソンは、物質の最小構成要素である素粒子のクォークの中で u クォークと d クォーク、およびこれらの反クォークでできています。クォークには他にも種類があり、クォークが集まってできる粒子をハドロンと呼んでいます。ハドロンには 3 つのクォークからなるバリオン、クォークと反クォークからなるメソンの 2 種類があります。しかし非常に密度の高い中性子星の内部などでは、陽子や中性子がもたない s クォークを含む特殊な原子核 (ハイパー核) が存在すると考えられておりますが、s クォークを含む反Kメソンが糊として働くような原子核 (反Kメソン原子核) が存在するかは謎でした。

今回、LEPS2/Solenoid コラボレーションでは、光子ビームを使って重陽子から反Kメソン原子核を

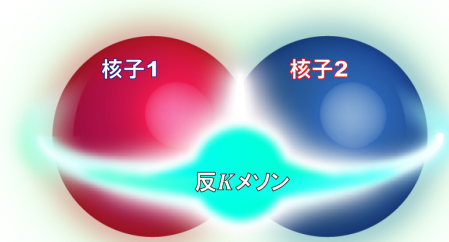


図1

反Kメソンが入り込み、糊のように陽子や中性子（合わせて核子）を強く結びつける原子核。

生成・観測することに成功しました。s クォークを含まない光子・重陽子衝突からの生成に初めて成功したことにより、反 K メソンが原子核を作り上げる糊としてしっかり働いていることが明らかにされました。これまで茨城県那珂郡東海村の大強度陽子加速器施設(J-PARC)における反 K メソンビームの実験で候補となる存在が見つっていますが、全く異なる反応(ビーム)で同じ状態が見つかった、すなわち反 K メソン原子核状態が存在する可能性が高まった、ということを意味します。また生成された反 K メソン原子核の運動量分布から、通常の原子核である重陽子に比べ、二つの核子がより引き寄せられた状態である可能性が強く示唆されました。このことは、未だよくわかっていない高密度の核物質^{※5}や中性子星^{※6}の内部構造を理解するために極めて重要な情報をもたらし、進展が期待されます。

本研究成果は、国際的な物理専門誌「Physics Letters B」に、7月9日(木)に公開されました。

【石川貴嗣教授のコメント】

本研究成果を学術論文としてまとめた小早川亮特任研究員は、2015年からLEPS2実験施設の大型ソレノイド分光装置における検出器開発・建設の中核を担ってきました。特に主要検出器である三次元飛跡検出器 TPC の立ち上げ・運用では数々の技術的課題を粘り強く克服し、長年にわたる挑戦の積み重ねが、今回の反 K メソン原子核の光子ビームでの世界初観測という画期的な成果へと結実しました。

❖ 研究の背景

私たちの身の回りには、すべて原子でできています。その原子の中心には「原子核」があり、原子核は陽子と中性子からできています。この陽子や中性子は、さらに「クォーク」という、これ以上分けられない一番小さな粒からできています。クォークが集まってできる粒子を「ハドロン」と呼びます。ハドロンには2種類あり、クォーク3つでできる「バリオン」(陽子や中性子はこの仲間)と、クォークと反クォークでできる「メソン」です。こうしてクォークからハドロンができることが、物質が作られていく最初のステップです。実は、私たちの身の回りには物質の質量の98~99%は、このステップで生まれています。

普通の原子核では、陽子や中性子は π メソンをキャッチボールのようにやり取りすることで、互いに引き合っています。このやり取りが、原子核をまとめる「糊」のような役割を果たしています。陽子や中性子、 π メソンはuクォーク、dクォーク、およびこれらの反クォークからできているため、原子核の中で π メソンは露わに現れません。これとは別に、sクォークを含む反 K メソンという特殊な粒子も、陽子や中性子を強く引きつけることが分かっていました。sクォークは一般的な物質の中には含まれませんが、宇宙線の中にはsクォークを含む粒子が観測されることがあり、中性子星のような非常に密度が高い物質の中にもあると考えられています。またsクォークを含む粒子を人工的につくることもできます。

反 K メソンは、 π メソンのようにやり取りされるのではなく、原子核の中に実際の粒子として入り込み、周りの陽子や中性子を直接引きつけると考えられています。つまり、原子核の中に反 K メソンそのものがとどまることで、ずっとコンパクトな原子核ができる、と考えられます。そのため、「反 K メソンを原子核内に抱え込んだ、通常よりずっと小さくまとまった原子核があるのではないかと」長年考えられてきましたが、実験結果の解釈がはっきりせず、本当にあるのかは分かっていませんでした。

そんな中、J-PARCのE15実験で、反 K メソンをビームとして原子核に照射する実験が行われ、反 K メソンを含む原子核の候補が報告されました。この新種の原子核の存在や性質を明らかにするため、他のビーム、とくにsクォークを含まないビームを用いた実験での確認が待たれていました。

❖ 研究の内容

LEPS2/Solenoid コラボレーションでは、光子・重陽子衝突実験で、反 K メソンを含む原子核を生成・観測することに世界で初めて成功しました。

この実験では、紫外線レーザーを大型放射光施設 SPring-8 の電子蓄積リングに入射し、レーザーと 8 GeV の高エネルギー電子のコンプトン散乱で得られる 1.3~2.4 GeV の高エネルギーガンマ線を光子ビームとして使用しています。このような光子ビームをレーザー電子光と呼んでいます。レーザー電子光は蓄積リング棟とは別の LEPS2 実験棟まで導き、このレーザー電子光を液体重水素標的^{※7}に照射しました。光子・重陽子衝突では様々な反応が起こりますが、本実験では、図 2 の磁気スペクトロメータ Solenoid を使って、主に荷電粒子の運動量とエネルギーを測定することで反応を同定しています。反 K メソン原子核の観測では、中性 K メソン、 Λ バリオン^{※8}、陽子の三つのハドロンを同時に生成する反応を調べました。

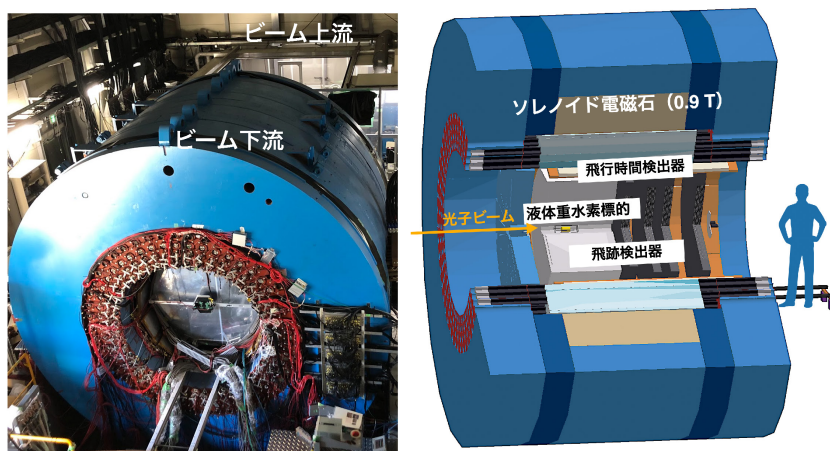


図 2

大型ソレノイド分光装置 Solenoid。ソレノイド電磁石の中心に、液体重水素標的を配置し、荷電粒子に対して飛跡検出器と飛行時間検出器を使って、どのような粒子がどのような運動量とエネルギーを持って放出されたかを測定します。模式図では、大きさを表すため人を書き込んでいます。

反 K メソン原子核は、崩壊して Λ バリオンと陽子になると期待されます。そこで、 Λ バリオンと陽子の不変質量^{※9}を調べることで、反 K メソン原子核の生成を調べました。 Λ バリオンと陽子の不変質量を示した図 3 では、 Λ バリオンと陽子が最終的に生成されていても、反 K メソン原子核が形成されていない背景事象がたくさん存在します。 Λ バリオンと陽子をもつ運動量分布を参照することで反 K メソン原子核が確かに存在することを確認しました。s クォークを含まない光子・重陽子衝突での生成に初めて成功したことにより、反 K メソンが原子核を作り上げる糊として機能していることがわかりました。

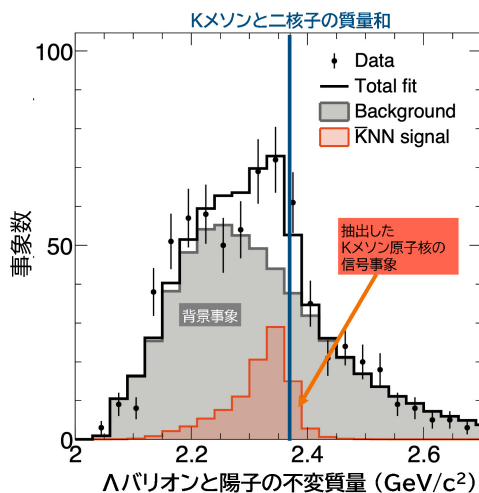


図 3

Λ バリオンと陽子の不変質量分布。反 K メソンを糊とする原子核が崩壊して Λ バリオンと陽子が発生した信号事象とこれらが独立に生成された背景事象は、 Λ バリオンと陽子をもつ運動量を使って弁別しました。

❖ 本研究成果が社会に与える影響（本研究成果の意義）

本研究成果と J-PARC の E15 実験での成果を合わせて、反 K メソンを糊とする原子核の存在が確実なものとなりました。また反 K メソン原子核の運動量分布から、通常の原子核である重陽子よりも、はるかに二つの核子が引き寄せられた状態であることがわかりました。そのため未だよく理解されていない高密度である核物質や中性子星の内部構造に対して極めて重要な情報をもたらします。

❖ 特記事項

本研究成果は、国際的な物理専門誌「Physics Letters B」に、7 月 9 日に公開されました。

タイトル：“Evidence for a $\bar{K}NN$ quasi-bound state in the $\gamma d \rightarrow K^0 \Lambda p$ reaction”

著者名： R. Kobayakawa, J.K. Ahn, S. Ajimura, W.-C. Chang, M.-L. Chu, S. Daté, T. Gogami, T.A. Hashimoto, T. Hotta, T. Ishikawa, H. Katsuragawa, H. Kohri, Y. Ma, M. Miyabe, K. Mizutani, N. Muramatsu, T. Nakano, T. H. Nam, M. Niyama, Y. Nozawa, Y. Ohashi, H. Ohkuma, H. Ohnishi, T. Ohta, C. Rangacharyulu, S.Y. Ryu, Y. Sada, H. Shimizu, M. Sumihama, S. Suzuki, S. Tanaka, A.O. Tokiyasu, N. Tomida, K. Watanabe, T. Yorita, C. Yoshida, and M. Yosoi (LEPS2/Solenoid Collaboration)

D O I : <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2026.140719>

本研究は、日本学術振興会科学研究費助成事業(15H00839, 16K13806, 17H02892, 18H05402, 20H01933, 21H00114, 21H01110, 21H01115, 21H04986, 22H00124, 433 23H01201, 24H00232)、韓国研究財団（NRF）の助成事業（2020R1A3B2079993）、台湾（中華民国）国家科学及技術委員会の助成事業の助成を受けて推進しました。

❖ 用語説明

※1 反 K メソン

反 K(ケイ)中間子とも呼ばれる。反 u クォークまたは反 d クォーク、および s クォークからなるメソン。核子との間に非常に強い引力が働くことが知られており、核子同士を強く束縛する「糊」として働く可能性がある。

※2 SPring-8

兵庫県播磨科学公園都市にある世界最高性能の大型放射光施設。8 GeV まで加速した電子から放射光（X 線）を発生させ、物質・生命・材料科学など幅広い研究に利用されている。本研究では、LEPS2 ビームラインでレーザー電子光を用いたハドロン生成実験を行った。

※3 レーザー電子光

高エネルギー電子にレーザー光を正面衝突させて発生させる高エネルギーガンマ線。散乱後の電子の運動量を測定することで、それぞれのガンマ線のエネルギーを高い精度で決定（標識化）できる。

※4 π メソン

π (パイ)中間子とも呼ばれる。u クォークまたは d クォーク、および反 u クォークまたは反 d ク

オークからなるメソンの総称。陽子や中性子(核子)の間に働く力を伝え、原子核を形作る「糊」のような役割を果たす。

※5 核物質

陽子や中性子(核子)が隙間なく集まった高密度の物質。通常の原子核も小さな核物質と考えることができる。反 K メソンが核子同士を強く束縛すると、通常の原子核よりさらに高密度な核物質が実現する可能性があり、その研究は中性子星内部の超高密度物質の理解にもつながると期待されている。

※6 中性子星

太陽の約 8 倍以上の質量をもつ恒星が一生の最後に超新星爆発を起こした後に残る超高密度の天体。太陽の約 1~2 倍の質量が直径約 20 km の球に詰め込まれている。内部には原子核を超える高密度の物質が存在すると考えられており、反 K メソンと核子の相互作用を理解することは、そのような極限環境の物質の性質を解明する手掛かりになる。

※7 液体重水素標的

重水素(陽子 1 個と中性子 1 個からなる重陽子原子核と電子からなる原子または分子)を約 20 K (約 -253 °C) まで冷却して液体にした標的。気体のままより約 1000 倍高い密度となるため、多くの反応を効率よく測定できる。

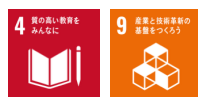
※8 Λ バリオン

u クォーク、d クォーク、s クォークからなる電氣的に中性なバリオン。ごく短時間で負電荷の π メソンと正電荷の陽子に崩壊するため、これらの粒子の運動量とエネルギーを測定することで、もとの Λ (ラムダ)バリオンの性質を調べることができる。

※9 不変質量

複数の粒子を一つの粒子としてみなしたときの質量。観測する人の運動状態によらず一定であることから、「不変質量」と呼ばれる。新しい粒子や束縛状態を探す際の重要な指標となる。

❖ SDGs 目標



❖ 参考 URL

レーザー電子光実験グループ URL <https://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/Divisions/np1-b/>