

PRESS RELEASE

2019年1月24日

 理化学研究所
 高エネルギー加速器研究機構
 日本原子力研究開発機構
 大阪大学
 東北大学

 Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
 The Stefan Meyer Institute
 J-PARC センター

K⁻中間子と二つの陽子からなる原子核の発見 —クォークと反クォークが共存する“奇妙な”結合状態—

理化学研究所（理研）開拓研究本部岩崎中間子科学研究室の岩崎雅彦主任研究員らの国際共同研究グループ※は、大強度陽子加速器施設「J-PARC」^[1]にて、クォーク^[2]と反クォーク^[2]が共存する「中間子束縛原子核」の生成実験に世界で初めて成功しました。

本研究成果は、量子色力学^[3]における核子の質量の起源や、中性子星^[4]の中心部にできる超高密度核物質の解明などの基本的理解に貢献すると期待できます。

原子核内に陽子と中性子をつなぎ止める“糊”の役目をする中間子^[5]は、原子核から真空中に取り出すこともでき、固有の質量と寿命を持った「実粒子」として振る舞います。しかし、実粒子として振る舞う中間子が、陽子や中性子とともに原子核を作ることができるかは分かっていませんでした。

今回、国際共同研究グループはJ-PARCにおいて、K⁻中間子^[5]ビームをヘリウム3原子核標的に照射する実験を行い、K⁻中間子と二つの陽子（p）が結合した中間子束縛原子核 “K⁻pp” を作ることに成功しました。この状態の束縛エネルギー^[6]は50メガ電子ボルト（MeV、Mは100万）であり、これは通常の原子核の束縛エネルギーの約10倍にも達し、かつK⁻中間子自身の質量エネルギーの10%に達することが分かりました。ここから、この結合状態はコンパクトな高密度状態であると予想され、極めて特異的な高密度核物質が自発的に形成されたと考えられます。

本研究は、欧州の科学雑誌『*Physics Letters B*』掲載に先立ち、オンライン版（1月2日付け）に掲載されました。

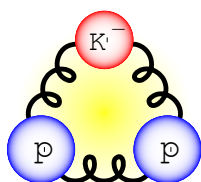


図 K⁻中間子（K⁻）と二つの陽子（p）からなる“奇妙な”結合状態の模式図

※国際共同研究グループ

理化学研究所 開拓研究本部 岩崎中間子科学研究室
主任研究員 岩崎 雅彦 (いwasaki masahiko)
高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設
助教 佐藤 将春 (sato masaharu)
日本原子力研究開発機構 先端基礎研究センター ハドロン原子核物理研究グループ
卓越研究員 橋本 直 (hashimoto tadao)
大阪大学 核物理研究センター
教授 野海 博之 (のうみ ひろゆき)
(兼 高エネルギー加速器研究機構 特別教授)
東北大学 電子光物理学研究センター
教授 大西 宏明 (おおにし ひろあき)
INFN 原子核物理学研究所
教授 カタリーナ・クルシアーヌ (Catalina Curceanu)
SMI 中間エネルギー物理学研究所
教授 エバハルト・ウィドマン (Eberhard Widmann)

本研究は、J-PARC E15 国際共同研究グループ（理化学研究所、高エネルギー加速器研究機構、日本原子力研究開発機構、大阪大学、東北大学、Istituto Nazionale di Fisica Nucleare、The Stefan Meyer Institute などからなる国際共同研究グループ）から 75 名の研究者が参加し行われました。

※研究支援

本研究は、文部科学省 科学研究費補助金特定領域研究「ストレンジネスで探るクォーク多体系（領域代表者：永江 知文）」を始めとする多くの科学研究費補助金による支援を受け、同時にイタリア外務省(MAECI) の StrangeMatter プロジェクト(代表者：CURCEANU, Catalina)の支援を受けて行われました。

1. 背景

原子核は、「核子」と呼ばれる陽子と中性子から構成されます。湯川秀樹博士は、原子核内に核子をつなぎ止める“糊”の役目をするものとして、「中間子」の存在を予言しました。糊として核内を満たす中間子は、力の場を形成することで、核子を結合させ原子核を作ります。中間子は、量子力学の不確定性原理^[7]に従って、現れては消える「仮想粒子」として振る舞う一方、真空中に取り出すと、固有の質量と寿命を持った「実粒子」としても振る舞います。このことから、中間子が実粒子として核子とともに原子核を構成する固有の質量エネルギーを持った量子状態は存在するののかという疑問が生まれます。

強い相互作用^[8]をする粒子群は「ハドロン」と呼ばれ、クォークと反クォークの対でできた中間子と、三つのクォークでできた「バリオン^[9]」とに分けられます。核子は、バリオンの中で最も軽く安定であることから、原子核を形成する構

成要素となります。もし、反クォークを持つ中間子が、クォークでできた核子に密に取り囲まれた環境下（原子核中）で実粒子的な性質を保った束縛状態（結合状態）を作るなら、反クォークとクォークが共存する全く新しい原子核が形成されたことになり、「原子核は核子だけでなく中間子も構成要素となり得る多様性を持った系である」というパラダイムシフトをもたらします。

この「中間子束縛原子核」があれば、真空中と原子核媒質中で中間子の性質（質量、寿命、半径など）がどう変化するか、あるいは逆に中間子の存在が原子核媒質の密度などにどう影響するかを調べることができます。具体的には、「宇宙創成（ビッグバン）後にヒッグス凝縮^[10]が起こって素粒子が質量を獲得した後、それでも質量がゼロに近いクォークから、ハドロンがいかに質量を獲得したか」や「原子核や中性子星中心部のような超高密度状態で、ハドロンはどこまでクォークを閉じ込めておけるか」といった、宇宙の物質形成進化の根源に関わる未解決問題を解く糸口となります。

もっとも、中間子束縛原子核は、どのような中間子と核子の組み合わせによっても作れるわけではありません。例えば、アップクォークと反ダウンクォークからなる π 中間子と核子の間には斥力が働くため、 π 中間子と核子では原子核を作れません。一方、ストレンジクォークを持つ K 中間子^[5]と核子間には強い引力が働くため、原子核を作れる可能性があります。そして、ストレンジクォークを持つバリオンの中で最も軽い「ラムダ (Λ) 粒子」の一つの励起状態は、 K^- 中間子と陽子 (p) の原子核束縛状態である可能性がこれまで指摘されてきました。そこで、国際共同研究グループは、 K^- 中間子と二つの陽子が結合した“ K^-pp ”中間子束縛原子核を作り出す実験を試みました。

2. 研究手法と成果

“ K^-pp ”中間子束縛原子核状態 (X_{K^-pp}) を作るためには、 $K^- + “pp” \rightarrow X_{K^-pp}$ という反応が最も単純です。ところが、 X_{K^-pp} の質量エネルギーが K^- 中間子と陽子 2 個の質量エネルギーの和よりも、束縛エネルギーの分だけ小さくなるため、反応の前と後でのエネルギー保存則を満たすことができません。

そこで、国際共同研究グループは、大強度陽子加速器施設 J-PARC（茨城県東海村）にあるハドロン実験ホールにて、 K^- 中間子ビームを陽子 2 個と中性子 (n) 1 個からなるヘリウム 3 (^3He) 原子核の標的に照射する実験を行いました（図 1）。

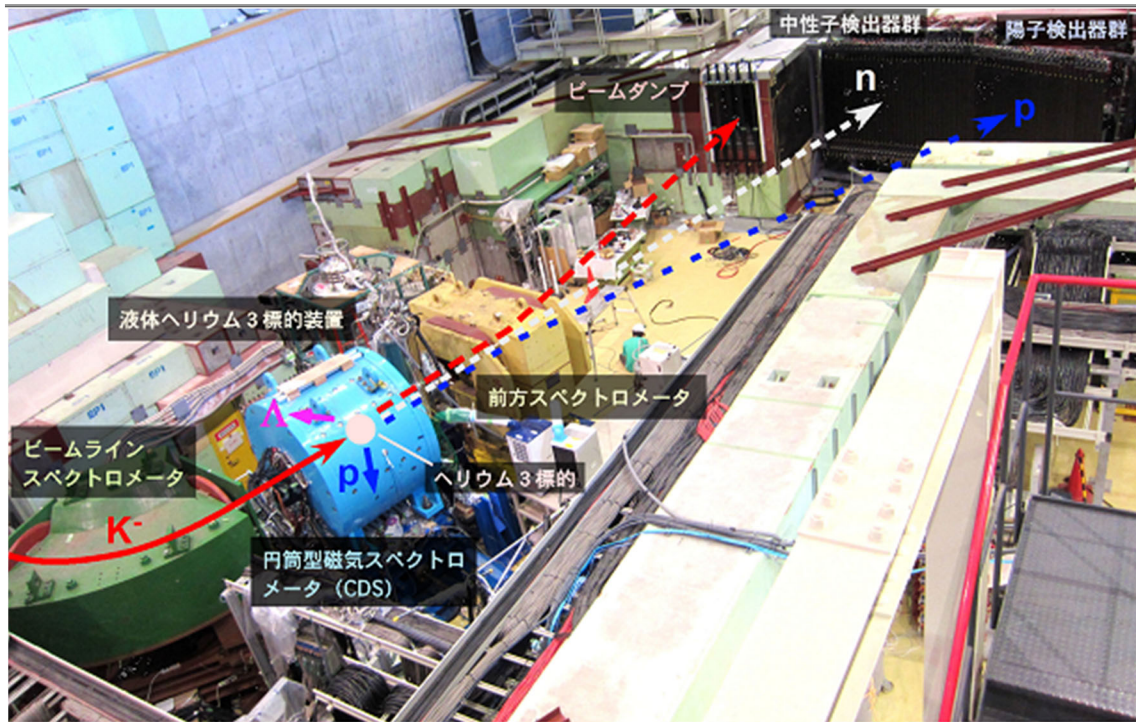


図1 J-PARC ハドロン実験ホールに設置された実験装置

K^- 中間子（赤矢印）はヘリウム-3 原子核標的に入射され、前方に放出された中性子（白破線矢印）は中性子カウンターへ、陽子などの正電荷を持った粒子（青色破線矢印）は陽子カウンターへ向かう。反応を起こさなかった負電荷の K^- 中間子（赤破線矢印）は取り除かれる。本研究では、水色の磁気スペクトロメータ（CDS）を用いて粒子群（ Λ と p ）を解析し、反応で“ K^-pp ”中間子束縛原子核状態と中性子が作られたことを同定した。

この実験では、 $K^- + {}^3\text{He} \rightarrow X_{K^-pp} + n$ という反応により、前方に中性子が蹴り出されます。図 2 に示すように、この反応は不確定性原理が許す時間内に起こる二段階反応として理解できます。まず、 K^- 中間子が ${}^3\text{He}$ 中の中性子を弾性的に前方に蹴り出す一方で、 K^- 中間子は中性子よりも軽いため後方に反跳（ q ）を受け、エネルギーを大きく失います。この反跳を受けた K^- 中間子は、反応に関与しなかった残りの陽子 2 個と直ちに結合します。不確定性原理により、反跳を受けた K^- 中間子のエネルギーが X_{K^-pp} の束縛エネルギーと等しい分だけ小さくなったときに X_{K^-pp} が生成されます。また、余分なエネルギーは、第一段階で前方に蹴り出されつつある中性子が受けて持ち出すので、反応全体でエネルギーおよび運動量保存則が満たされます。

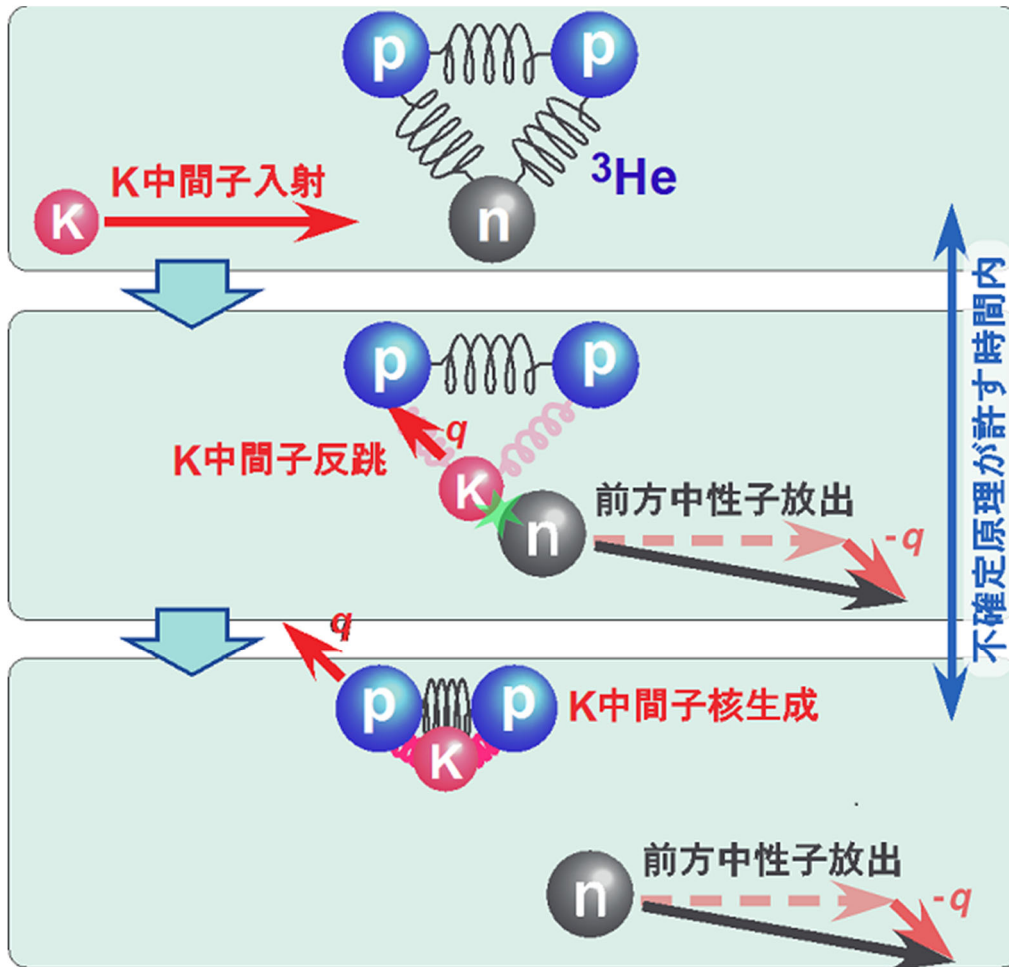


図 2 K^- 中間子とヘリウム 3 (^3He) の反応の模式図

K^- 中間子 (赤丸の K) が ^3He に入射されると (上段)、 ^3He 中の中性子 (n) を弾性的に前方に蹴り出す一方で、 K^- 中間子は n よりも軽いため後方に反跳 (q) を受け、エネルギーを大きく失う (中段)。この反跳を受けた K^- 中間子は、残りの陽子 (p) 2 個と直ちに結合する (下段)。不確定性原理により、反跳を受けた K^- 中間子のエネルギーが、 X_{K-pp} の束縛エネルギーと等しい分だけ小さくなったときに X_{K-pp} が生成される。

ただし、生成した X_{K-pp} はすぐに崩壊してしまうため、実験では X_{K-pp} が Λ 粒子と陽子に崩壊する事象 ($X_{K-pp} \rightarrow \Lambda + p$) を観測し、観測していない残りの粒子が中性子だったことを、エネルギーおよび運動量保存則で確認しました。 X_{K-pp} からの崩壊 Λp を計測して、元の X_{K-pp} の質量を再構成した不変質量スペクトルを図 3 に示します。スペクトルは、ばらばらの状態の K^- 中間子と二つの陽子の質量の和 (質量閾値) よりも明らかに低い質量値に、ピーク構造を持っています。このような構造は、束縛エネルギーの分だけ質量閾値よりも質量エネルギーが小さい状態、すなわち X_{K-pp} が存在することを示しています。

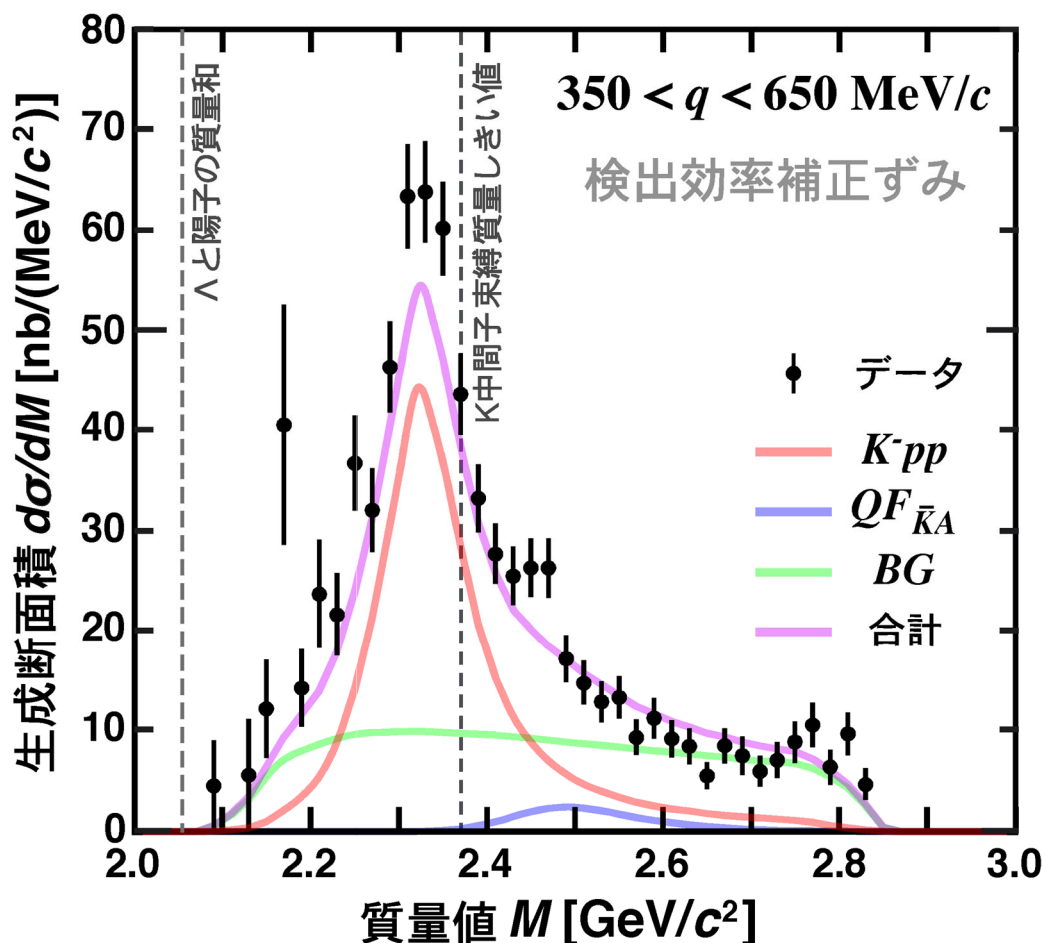


図3 Λ粒子と陽子の不変質量スペクトル

S/N比の高い反跳運動量(q)350~650 MeV/ c の領域のデータに関して検出効率補正した質量スペクトル。曲線は反応成分分解で、赤線が“ K^-pp ”束縛状態の生成を示す。スペクトルのピークは、縦の破線で示されたばらばらの状態の K^- 中間子と二つの陽子の質量の和(質量閾値)よりも低い位置にある。これは K^- 中間子と二つの陽子の結合状態が存在することを意味している。

さらに、中間子原子核束縛状態 X_{K^-pp} は、通常の原子核の束縛エネルギー(数メガ電子ボルト [MeV、 M は100万])よりも約10倍大きい50MeVという束縛エネルギーを持つことが分かりました。これは、構成要素である K^- 中間子の質量の10%にあたる巨大な束縛エネルギーです。これらの結果から、極めて特異的な高密度核物質が自発的に形成されたと考えられるだけでなく、実際に空間的に極めて小さいことを示唆する実験データが得られました。

3. 今後の期待

K^- 中間子と原子核が束縛状態を作ること自体はさまざまな理論研究から予想されていましたが、予想される束縛エネルギーは理論の枠組みの違いによって

さまざまでした。今回、 K^- 中間子が原子核内でも中間子の実粒子としての特性を失わずに存在し、陽子二つと非常に深い束縛状態を作ることや、その束縛エネルギーが非常に大きいことが分かりました。さらに、その束縛エネルギーのせいで空間サイズが小さいことも示唆されたことから、量子色力学における物質密度とハドロンの質量の関係についても理論的研究の発展が期待されます。

原子核内の核子は、量子色力学でいう「色」を持ったクォークが三つ組み合わさって閉じ込められることで「無色」になった状態ですが、どこまで核子を近づけると互いの色が見えてくるのか分かっていません。また、最近の観測で太陽質量の2倍もある中性子星が見つっていますが、その巨大な質量にもかかわらず、なぜ中心部が崩壊せずに外殻物質を支えられるのかについてもよく分かっていません。このような、宇宙における自然法則の謎に迫るためにも、中間子束縛原子核の研究の進展は不可欠です。そのために、国際共同研究グループはJ-PARCでのハドロン実験を通して、より大きな原子核との束縛状態や、複数の K^- 中間子の束縛状態の探査検証実験を通して、その謎に挑んでいきたいと考えています。

4. 論文情報

<タイトル>

“ K^-pp ”, a \bar{K} -Meson Nuclear Bound State, Observed in ${}^3\text{He}(K^-, \Lambda p)n$ Reactions

<著者名>

S. Ajimura, H. Asano, G. Beer, C. Berucci, H. Bhang, M. Bragadireanu, P. Buehler, L. Busso, M. Cargnelli, S. Choi, C. Curceanu, S. Enomoto, H. Fujioka, Y. Fujiwara, T. Fukuda, C. Guaraldo, T. Hashimoto, R. S. Hayano, T. Hiraiwa, M. Iio, M. Iliescu, K. Inoue, Y. Ishiguro, T. Ishikawa, S. Ishimoto, K. Itahashi, M. Iwasaki, K. Kanno, K. Kato, Y. Kato, S. Kawasaki, P. Kienle, H. Kou, Y. Ma, J. Marton, Y. Matsuda, Y. Mizoi, O. Morra, T. Nagae, H. Noumi, H. Ohnishi, S. Okada, H. Outa, K. Piscicchia, Y. Sada, A. Sakaguchi, F. Sakuma, M. Sato, A. Scordo, M. Sekimoto, H. Shi, K. Shirotori, D. Sirghi, F. Sirghi, K. Suzuki, S. Suzuki, T. Suzuki, K. Tanida, H. Tatsuno, M. Tokuda, D. Tomono, A. Toyoda, K. Tsukada, O. Vazquez Doce, E. Widmann, T. Yamaga, T. Yamazaki, K. Zhang, and J. Zmeskal (75 authors)

<雑誌>

Physics Letters B

<DOI>

10.1016/j.physletb.2018.12.058

5. 補足説明

[1] 大強度陽子加速器施設「J-PARC」

高エネルギー加速器研究機構と日本原子力研究開発機構が共同で茨城県東海村に建設し運営している、大強度陽子加速器と利用施設群の総称。加速した陽子を原子核標的に衝突させることにより発生する中性子、ミュオン、中間子、ニュートリノなどの二次粒子を用いて、物質・生命科学、原子核・素粒子物理学などの最先端学術研究及び産業利用が行われている。J-PARCはJapan Proton Accelerator Research Complexの略。

[2] クォーク、反クォーク

クォークは原子核を構成する素粒子で、質量の異なる6種類がある。軽い方から、それぞれアップ、ダウン、ストレンジ、チャーム、ボトム、トップと名付けられている。反クォークとは、クォークの反粒子である。なお、粒子と反粒子は、電荷などプラス・マイナスの符号を持つことが許される量子数は符号が反対で、質量や寿命などの性質は同じである。同種の粒子・反粒子は、対消滅を起こす。

[3] 量子色力学

クォークとグルーオンとが従う物理法則であり、素粒子の標準理論の一部。量子色力学によれば、全てのクォークは青・赤・緑と名付けられた3つの独立な状態があり、グルーオンはそれぞれのクォークのもつ色を交換する働きを持ち、この色の交換によってグルーオンはクォークとクォークを結び付ける。量子色力学において、クォークの複合粒子は、それぞれのクォークの3種類の「色」の様々な組み合わせ方のうち1つの量子状態「無色」だけが実現されると考えられている。このことから、光の3原色にならって量子色力学と呼ばれている。「無色」しか許されないのので、クォークは単体で存在できず、常に数個のクォークが集まって、バリオンや中間子などの「無色」の複合粒子を作ると考えられている。

[4] 中性子星

超新星爆発によって生まれる、中性子を主成分とする超高密度の星で、星の最終形態の一つ。半径は約10km強、質量は太陽の1~2倍で、密度は1cm³あたり10億トンに達する。宇宙空間に浮かぶ“巨大な原子核”とも呼ばれる。

[5] 中間子、K中間子、K⁻中間子

クォークと反クォークが、強い相互作用で結びついた状態が「中間子」である。4種類ある「K中間子」のうち「K⁻中間子」は、ストレンジクォークと反アップクォークで構成される。

[6] 束縛エネルギー

結合エネルギーともいう。例えば電子と原子核、原子核中の粒子（核子）同士、もしくは月と地球のように、互いに引き合う二つの物体において、お互いがどの程度強く結びついているかを表すエネルギー量。全体として結合エネルギー分だけ結合した系の質量は小さくなる。

[7] 不確定性原理

粒子は、その位置と運動量の両方を同時に正確に計測することができないという、量子力学の根幹をなす有名な原理。粒子そのものが持つ物理的性質による原理であり、計測手法に関わらず成り立つと理解されている。1927年にハイゼンベルグによって提唱された。

[8] 強い相互作用

クォークの間に働く相互作用で、自然界の四つの力（強い相互作用、電磁相互作用、弱い相互作用、重力相互作用）の中で最も強い。

[9] バリオン

3個のクォークが結合してできる粒子。陽子や中性子のほかに、ラムダ (Λ) 粒子やデルタ (Δ) 粒子、オメガ (Ω) 粒子などがある。

[10] ヒッグス凝縮

ヒッグスが提唱した理論によれば、ビッグバン後の宇宙が冷却する過程で、ヒッグス粒子が自発的に真空中に満ちた。これをヒッグス凝縮と呼ぶ。ヒッグス凝縮を仮定することで、素粒子に質量が存在する理由を、素粒子の標準理論の中で自然に説明することができる。ヒッグス粒子は2012年に実際に観測され、ヒッグスは同様の機構を提唱したアンブレアとともに2013年にノーベル物理学賞を受賞した。

6. 発表者・機関窓口

<発表者> ※研究内容については発表者にお問い合わせ下さい
理化学研究所 開拓研究本部 岩崎中間子科学研究室
主任研究員 岩崎 雅彦 (いわさき まさひこ)

TEL : 048-467-9352 FAX : 048-462-4648
E-mail : masa[at]riken.jp



岩崎 雅彦

<機関窓口>

理化学研究所 広報室 報道担当
TEL : 048-467-9272 FAX : 048-462-4715
E-mail : ex-press[at]riken.jp

高エネルギー加速器研究機構 社会連携部広報室
TEL : 029-879-6047 FAX : 029-879-6049
E-mail : press[at]kek.jp

日本原子力研究開発機構 広報部
報道課長 小野 徳久
TEL : 03-3592-2346 FAX : 03-5157-1950
E-mail : ono.norihisa[at]jaea.go.jp

大阪大学核物理研究センター庶務係
TEL : 06-6879-8903 FAX : 06-6879-8899
E-mail : kakubuturi-syomu[at]office.osaka-u.ac.jp

東北大学大学院 理学研究科 広報・アウトリーチ支援室
TEL : 022-795-5572、6708 FAX : 022-795-5831
E-mail : sci-pr[at]mail.sci.tohoku.ac.jp

J-PARC センター広報セクション
リーダー 阿部 美奈子 (あべ みなこ)
TEL : 029-284-4578
E-mail : abe.minako[at]jaea.go.jp

※上記の[at]は@に置き換えてください。
