

スパコンで予言する魅惑の新粒子「チャームダイオメガ」

クォーク 6 個状態の謎の解明に新たな 1 ページが加わる

理化学研究所（理研）数理創造プログラムの杉浦拓也特別研究員、初田哲男プログラムディレクター、仁科加速器科学研究センター量子ハドロン物理学研究室のトン・ファイ研修生（研究当時）、リユー・ヤン研修生、土井琢身専任研究員、京都大学基礎物理学研究所の青木慎也教授の共同研究グループは、チャームクォーク^[1]6 個からなる新粒子「チャームダイオメガ ($\Omega_{ccc}\Omega_{ccc}$)」の存在を理論的に予言しました。

本研究成果は、素粒子クォークがどのように組み合わせられて原子核ができるのかという、原子核物理学の重要な問題の解明に貢献するものと期待できます。

物質を構成する素粒子クォークには、アップ、ダウン、ストレンジ、チャーム、ボトム、トップの 6 種類あることが知られています。陽子や中性子、その他複数のクォークからなる複合体のことを総称して「ハドロン^[2]」といい、チャームクォーク 3 個からなるハドロンは「チャームオメガ (Ω_{ccc})」と呼ばれます。

今回、共同研究グループは、時間依存型 HAL QCD 法^[3]と呼ばれる数理手法とスーパーコンピュータ「京」^[4]、「HOKUSAI」^[4]を用いた大規模数値計算を組み合わせることで、2 個のチャームオメガ (Ω_{ccc}) 粒子間に働く力を計算し、新粒子チャームダイオメガ ($\Omega_{ccc}\Omega_{ccc}$) の存在を理論的に予言しました。

本研究は、科学雑誌『*Physical Review Letters*』の掲載に先立ち、オンライン版（8 月 11 日付）に掲載されました。



チャームダイオメガのイメージ図

研究支援

本研究は、日本学術振興会（JSPS）科学研究費補助金基盤研究（S）「クォークから中性子星へ：QCD の挑戦（研究代表者：初田哲男）」、同新学術領域研究（研究領域提案型）「第一原理計算から明らかにする階層構造の発現機構（研究代表者：肥山詠美子）」、MOST-RIKEN Joint Project “Ab initio investigation in nuclear physics”、文部科学省「富岳」成果創出加速プログラム「シミュレーションで探る基礎科学：素粒子の基本法則から元素の生成まで（課題責任者：橋本省二）」、同ポスト「京」重点課題9「宇宙の基本法則と進化の解明（統括責任者：青木慎也）」、計算基礎科学連携拠点（JICFuS）による支援を受けて行われました。

1. 背景

原子核は核子（陽子と中性子）が集まってできており、さらに核子はクォーク3個が集まってできています。このようなクォークの複合体のことを総称して「ハドロン」と呼びます。核子が質量の小さいアップクォーク、ダウルクォークの合計3個からできているハドロンであるのに対し、「チャームオメガ (Ω_{ccc})」粒子はチャームクォークという質量の大きいクォーク3個からなるハドロンです（図1）。

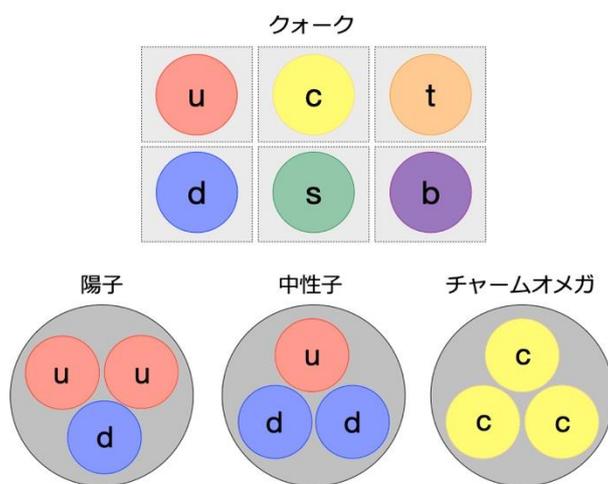


図1 クォークとハドロンのイメージ図

クォークは物質の基本構成要素である素粒子で、アップ (u)、ダウン (d)、ストレンジ (s)、チャーム (c)、ボトム (b)、トップ (t) の6種類が存在する。原子核を構成する陽子はアップクォーク2個とダウルクォーク1個、中性子はアップクォーク1個とダウルクォーク2個からできている。チャームオメガ (Ω_{ccc}) は質量の大きいチャームクォーク3個からできている。

「身の回りの物質はどのようなメカニズムで作られるのか」という物理学の根源的問題に答えるためには、ハドロン間に働く力の解明が不可欠です。そのうち、核子間の力については、1935年に発表された湯川秀樹博士の理論に始まる長い歴史を経て、比較的よく理解されています。一方で、チャームクォークを含むハドロン（チャームハドロン）間の力については未解明の部分が多く残されて

います。近年、従来の理論では説明できない新奇なチャームハドロンの存在が、高エネルギー加速器研究機構の KEKB、中国科学院高能物理研究所の BES III、欧州原子核研究機構の LHC といった加速器実験によって報告されており、チャームハドロン間力の解明は原子核物理における重要課題となっています。

Ω_{ccc} 粒子はチャームクォークだけからできているハドロンであり、最も単純なチャームハドロンといえます。2 個の Ω_{ccc} 粒子の間に働く力を解明することは、チャームハドロン間力の系統的研究の出発点として重要です。特に、2 個の Ω_{ccc} 粒子による結合状態が存在するのかどうかは、理論的・実験的に興味深い問題です。

Ω_{ccc} 粒子間の力は、クォークの運動を決める基礎理論である量子色力学(QCD)^[5]から決める必要があります。しかし、QCD の基本方程式を紙と鉛筆だけで解くことは、理論物理学の最先端手法をもってしても困難です。この問題は格子量子色力学(格子 QCD)^[6]と呼ばれる手法によって解決され、大規模数値シミュレーションによる QCD の直接計算が可能になりました。2007 年には、石井理修、青木慎也、初田哲男によって、格子 QCD を用いてハドロン間力を直接決定する方法が提案されました^{注 1)}。しかし、現実世界のシミュレーション^[7]は、当時の計算機性能や計算手法では困難でした。

注 1) N. Ishii, S. Aoki and T. Hatsuda, “Nuclear Force from Lattice QCD” *Physical Review Letters*, vol. 99, p.022001, 2007.

2. 研究手法と成果

今回、共同研究グループは、2 個の Ω_{ccc} 粒子の間に働くハドロン間力を計算することで、チャームクォーク 6 個からなる新粒子「チャームダイオメガ ($\Omega_{ccc}\Omega_{ccc}$)」の存在を理論的に予言しました。

ハドロン間力の計算は、時間依存型 HAL QCD 法と呼ばれる手法を用いて行いました。これにより、数値計算誤差が従来の方法に比べて指数関数的に改善されました。さらに、さまざまなクォークの運動を高速で計算するために、統一縮約法^[8]というアルゴリズムを利用することで、計算量を大きく削減しました。これらの理論的手法に加え、理研のスーパーコンピュータ「京」と「HOKUSAI」を用いた大規模計算によって、現実世界のシミュレーションを実行することが可能になりました。

シミュレーションの結果、2 個の Ω_{ccc} 粒子間には、互いの距離が遠いときには引き合う力が働く一方、距離が 10^{-14} cm 程度まで近づくと反発し合うことが分かりました(図 2)。さらに、この引き合う力のおかげで、 Ω_{ccc} 粒子 2 個からなる結合状態が存在することが示されました。

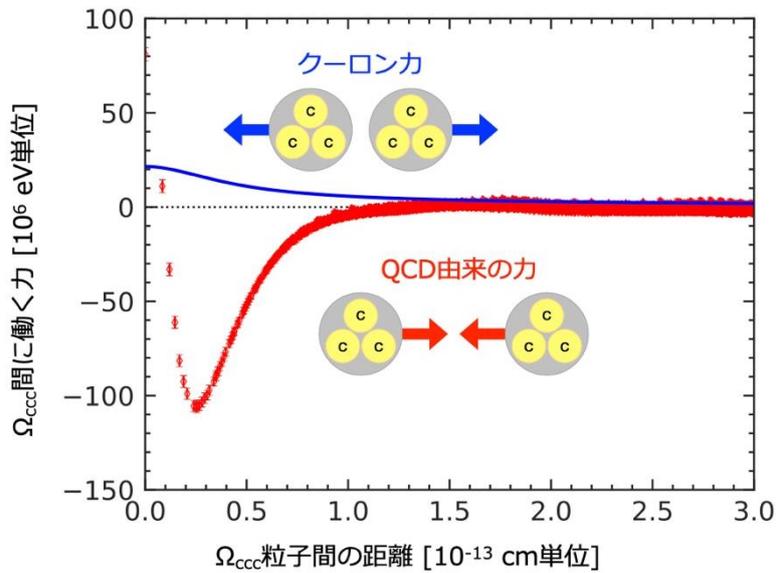


図2 スパコンを用いて得られたチャームオメガ (Ω_{ccc}) 粒子間に働く力

クォークの運動を記述する量子色力学 (QCD) をスパコンによって解くことで、2 個の Ω_{ccc} 粒子間に働く力を明らかにした (赤色の線)。 Ω_{ccc} 粒子間の距離が非常に短い場合 (約 10^{-14} cm 以下) では弱い反発力が働くが、それより遠くでは引力が働くことが分かった。また、 Ω_{ccc} 粒子は正の電荷を持つため、 Ω_{ccc} 粒子間にはクーロン反発力も働く (青色の線)。

Ω_{ccc} 粒子は正の電荷を持っているため、クーロンの法則により二つの Ω_{ccc} 粒子は反発し合います。チャームダイオメガが現実世界に存在するのかを調べるために、この反発力も考慮した計算を行ったところ、QCD による引力とクーロン反発力がほぼぴったり打ち消し合い、 $\Omega_{ccc} \Omega_{ccc}$ 粒子は「ユニタリー極限^[9]近傍」という非常に結合が壊れやすい特殊な状態になっていることが分かりました。

クォーク 6 個からなるユニタリー極限近傍の状態としては、これまで核子 2 個からなる状態、すなわち重陽子 (陽子と中性子) とダイニュートロン (中性子 2 個) だけが実験的に知られています。本研究グループは、2018 年にストレンジクォーク 6 個からなるダイオメガ ($\Omega \Omega$)^[10]、2019 年には核子オメガ ($N \Omega$)^[10] の存在を理論的に予言していましたが^{注 2-3)}、本研究によるチャームダイオメガ ($\Omega_{ccc} \Omega_{ccc}$) の予言はそこに新たな 1 ページを加えるものであり、この世には従来想像されてこなかった多様なユニタリー極限状態が存在することが明らかになりました (図 3)。

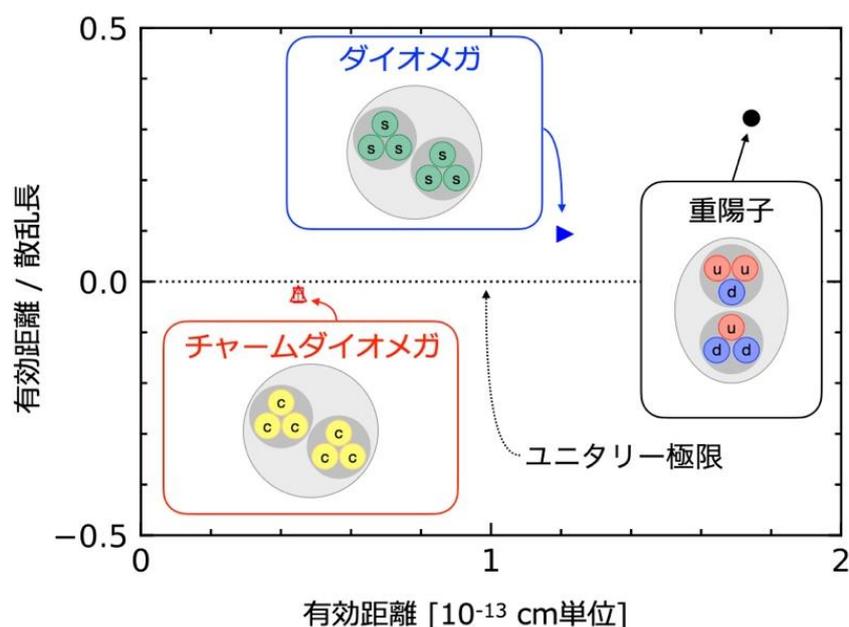


図3 ユニタリー極限近傍の6クォーク状態の特徴を表す図

いくつかの6クォーク状態について、相互作用が働く典型的な距離である有効距離と、結合の強さを表す指標である（有効距離/散乱長）の関係を表した。縦軸の値が0に近いほどユニタリー極限近傍であることを意味する。今回発見されたチャームダイオメガは、重陽子（陽子と中性子の結合状態）や2018年に予言されたダイオメガと比べても、最もユニタリー極限に近い場所にあることが分かった。

注2) 2018年5月24日プレスリリース「新粒子「ダイオメガ」」
https://www.riken.jp/press/2018/20180524_1/index.html

注3) Takumi Iritani *et al.*, "N Ω dibaryon from lattice QCD near the physical point" *Physics Letters B*, vol. 792, 284–289, 2019.

3. 今後の期待

今回の研究により、チャームクォーク6個からなる新粒子「チャームダイオメガ」が存在する可能性が明らかになりました。また本成果は、いまだに解明されていない部分が多い、重いクォークを含むハドロン間力の解明の第一歩となるものです。

今後、スーパーコンピュータ「富岳」^[11]を用いることで、チャームクォークを含むさまざまなハドロン間力の研究や、さらに重いボトムクォークを含む新粒子の探索などを進めていく予定です。これにより、クォークはどのように組み合わせたり、この世にはどのような物質が存在し得るのかという謎に対し、素粒子理論に基づく根源的な解明が進むものと期待できます。

4. 論文情報

<タイトル>

Dibaryon with highest charm number near unitarity from lattice QCD

<著者名>

Yan Lyu, Hui Tong, Takuya Sugiura, Sinya Aoki, Takumi Doi, Tetsuo Hatsuda, Jie Meng, and Takaya Miyamoto

<雑誌>

Physical Review Letters

<DOI>

10.1103/PhysRevLett.127.072003

5. 補足説明

[1] チャームクォーク

クォークは物質を構成する最も基本的な素粒子で、(質量の軽い順に)アップ、ダウン、ストレンジ、チャーム、ボトム、トップの6種類がある。このうちチャームクォークは、核子の約1.4倍の質量を持ち、素粒子理論におけるその役割から、魅惑的な(チャーム)クォークと名付けられた。

[2] ハドロン

複数のクォークが結合してできる粒子を総称してハドロンと呼ぶ。陽子や中性子のほかに、ラムダ(Λ)粒子、デルタ(Δ)粒子、オメガ(Ω)粒子などがある。本研究で取り扱ったチャームオメガ(Ω_{ccc})は、チャームクォーク3個からなる。チャームオメガは寿命が短くすぐに崩壊してしまうため、通常の物質中には存在しないが、数値計算ではその存在が予言されており、高エネルギー加速器で作り出せると考えられている。

[3] 時間依存型 HAL QCD 法

HAL QCD 法は、格子量子色力学を用いることにより、ハドロンの間に働く力を量子色力学(QCD)から直接計算する理論手法。2007年に石井理修(現大阪大学核物理研究センター准教授)、青木慎也(現京都大学基礎物理学研究所所長)、初田哲男(現理研数理創造プログラムプログラムディレクター)により提唱された。その後、これら3人を含む、理研、京都大学、大阪大学、九州大学、日本大学、高エネルギー加速器研究機構の研究者からなる共同研究グループ HAL QCD Collaboration によって、さらなる発展研究が行われている。時間依存型 HAL QCD 法は、2012年に提案された改良版の手法で、複数のエネルギー固有状態を含んだ状態からハドロン間力を取り出すことが可能になり、数値計算誤差を抑えられる。

[4] スーパーコンピュータ「京」、 「HOKUSAI」

「京」は、文部科学省が推進する「革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラ(HPCI)の構築」プログラムの中核システムとして、理研と富士通が共同で開発を行い、2012年に共用を開始した計算速度10ペタフロップス級のスーパーコンピュータ。2019年8月に運用終了。「HOKUSAI」は、幅広い分野の研究開発活動をカバーする目的で理研が運用するスーパーコンピュータで、計算速度2.6ペタフロップス。

[5] 量子色力学 (QCD)

原子核を構成するクォークとその間に働く強い相互作用を媒介するグルーオンが従う物理法則であり、素粒子の標準理論の一部である。量子色力学によれば、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、ハドロンと呼ばれる複合粒子を作ると考えられている。QCD は quantum chromodynamics の略。

[6] 格子量子色力学 (格子 QCD)

量子色力学を、時間と空間を 4 次元の格子状グリッドで置き換えて定式化する理論。ケネス・ウィルソン博士 (1982 年ノーベル物理学賞受賞) によって提唱された。モンテカルロ法などを使った大規模数値シミュレーションに適しており、量子色力学を近似なく計算できる。

[7] 現実世界のシミュレーション

量子色力学に基づくシミュレーションは、パイ中間子の質量で特徴付けられ、その質量が大きいほど容易に計算ができる。現実世界でのパイ中間子の質量は、約 140MeV (M は 100 万、eV は電子ボルト、1MeV は約 1.8×10^{-30} kg) である。しかし、これまでの研究ではスーパーコンピュータの性能の限界から、その質量が数倍以上大きい、現実から離れた状況での計算しかできなかった。一方、今回のスーパーコンピュータ「京」、「HOKUSAI」を用いたシミュレーションでは、パイ中間子の質量を 146MeV で計算することが可能となり、ほぼ現実世界と対応する計算を実現した。

[8] 統一縮約法

従来の計算手法では、クォークの個数が増えるにつれ、その運動の絡み合い (縮約) に関する計算量が急速に増大するという問題があった。土井琢身 (現理化学研究所専任研究員) らが開発した統一縮約法では、複数の縮約計算を統一的に扱うことで、指数関数的な高速化を達成した。

[9] ユニタリー極限

二つの粒子の間の低エネルギーの散乱は、散乱長というパラメータで特徴付けられる。散乱長が発散する状況をユニタリー極限と呼ぶ。このとき、系の状態が物質の詳細な性質に依存しない普遍的な振る舞いを示すことが知られている。原子分子物理学、原子核物理学、ハドロン物理学などにおけるさまざまな量子系で存在が示唆されている。

[10] ダイオメガ ($\Omega\Omega$)、核子オメガ ($N\Omega$)

ダイオメガは、2018 年、HAL QCD 共同研究グループによる格子 QCD 計算で预言された、ストレンジクォーク 6 個からなる新粒子。ストレンジクォーク 3 個からなるハドロン、オメガ (Ω) 粒子が 2 個結合した状態である。本研究で预言したチャームダイオメガ ($\Omega_{ccc}\Omega_{ccc}$) とは兄弟のような関係にある。核子オメガは、陽子または中性子 (核子) とオメガ粒子が結合した状態で、同グループの 2019 年の研究により存在が预言された。

[11] スーパーコンピュータ「富岳」

スーパーコンピュータ「京」の後継機。2020年代に、社会的・科学的課題の解決で日本の成長に貢献し、世界をリードする成果を生み出すことを目的とし、電力性能、計算性能、ユーザーの利便性・使い勝手の良さ、画期的な成果創出、ビッグデータやAIの加速機能の総合力において世界最高レベルのスーパーコンピュータとして2021年3月に共用開始。

6. 発表者

<発表者> ※研究内容については発表者にお問い合わせください。

理化学研究所

数理創造プログラム

特別研究員 杉浦 拓也 (すぎうら たくや)

プログラムディレクター 初田 哲男 (はつだ てつお)

仁科加速器科学研究センター 量子ハドロン物理学研究室

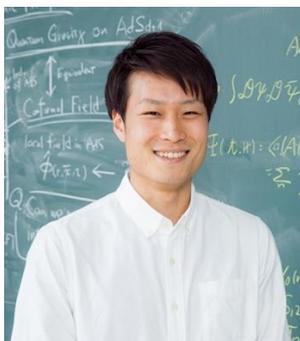
研修生 (研究当時) トン・ファイ (Tong Hui)

研修生 リュー・ヤン (Lyu Yan)

専任研究員 土井 琢身 (どい たくみ)

京都大学 基礎物理学研究所

教授 青木 慎也 (あおき しんや)



杉浦 拓也