

PRESS RELEASE (2024/1/22)

原子核が特異な量子ガス状態になることを予言

～アルファクラスターによるボーズ・アインシュタイン凝縮現象の解明に向けて～

ポイント

- ・ ネオン(^{20}Ne)原子核に、5つのアルファクラスターから構成されるガス状のボーズ・アインシュタイン凝縮状態が存在することを理論的に予言
- ・ ネオン(^{20}Ne)原子核で観測されている特異なアルファ崩壊様式を持つ状態を理論的に再現
- ・ 中性子星表面のような、原子核物質の低密度領域での状態方程式の理解の進展に期待

【概要】

関東学院大学 理工学部 船木 靖郎 准教授（理化学研究所 仁科加速器科学研究センター 客員研究員）、山田 泰一 教授（同）、中国・復旦大学の Bo Zhou 教授、Yu-Gang Ma 教授、大阪大学 核物理研究センターの堀内 昶 招へい教授、東崎 昭弘 共同研究員、ドイツ・ロストック大学の Gerd Röpke 教授、フランス・オルセー原子核研究所の Peter Schuck 教授の国際共同研究グループは、原子核が特異な量子ガス状態になることを理論的に予言しました。本研究成果は、原子核の存在形態に対する本質的理解を深めるだけでなく、超新星爆発後に生まれる中性子星の性質を理解するためにも重要な貢献をすることが期待されます。

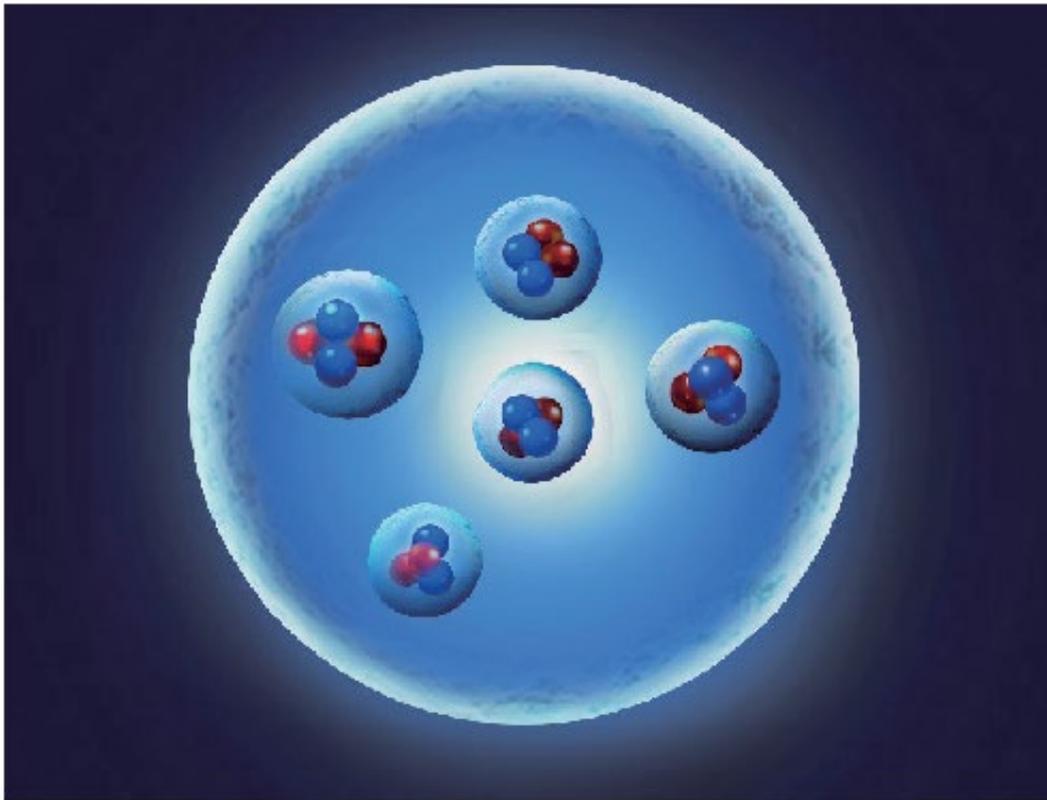


図1 ^{20}Ne 原子核で5つのアルファクラスターがガスのように運動している様子

今回、国際共同研究グループは、ネオン(^{20}Ne)原子核を安定な基底状態から励起させると、5つのアルファ粒子(^4He 原子核)からなる量子ガス状態になることを理論的に予言しました(図1参照)。これは、東崎-堀内-シュック(Schuck)-レプケ(Röpke)(THSR)模型^[1]と呼ばれる最先端のアルファクラスター模型^[2]を用いて数値シミュレーションを行った結果です。特にこの量子ガス状態は、アルファ凝縮状態^[3]と呼ばれる、アルファクラスターが最低エネルギー軌道を占有してボーズ・アインシュタイン凝縮^[4]した状態となっていることが突き止められました。

本研究は、科学雑誌「*Nature Communications*」オンライン版(12月11日付:日本時間12月12日)に掲載されました。

【背景】

原子核は核子(陽子と中性子)から構成され、最もエネルギーの低い基底状態では、それらが独立に運動し殻模型構造^[5]を持つことが良く知られています。しかしながら基底状態にエネルギーを加えることで現れる励起状態では、しばしば原子核はその構造を大きく変えることも分かってきました。特に軽い原子核の励起状態においては、陽子2個中性子2個から成るヘリウム4原子核(^4He : アルファ粒子)を単位としたアルファクラスター構造が現れます。これは陽子や中性子が独立に運動するとして結果生じる殻模型構造とは大きく異なるものです。典型例は、ホイル状態^[6]と呼ばれる炭素(^{12}C)原子核の励起状態で、 ^{12}C 原子核の元素合成にとって決定的に重要な役割を果たすことで知られている状態です。またこの状態は、3つのアルファクラスターに分解した共鳴状態であるだけでなく、それらがガスのように緩く束縛しており、かつ最低エネルギー軌道にボーズ・アインシュタイン凝縮した特殊な状態であることも示され

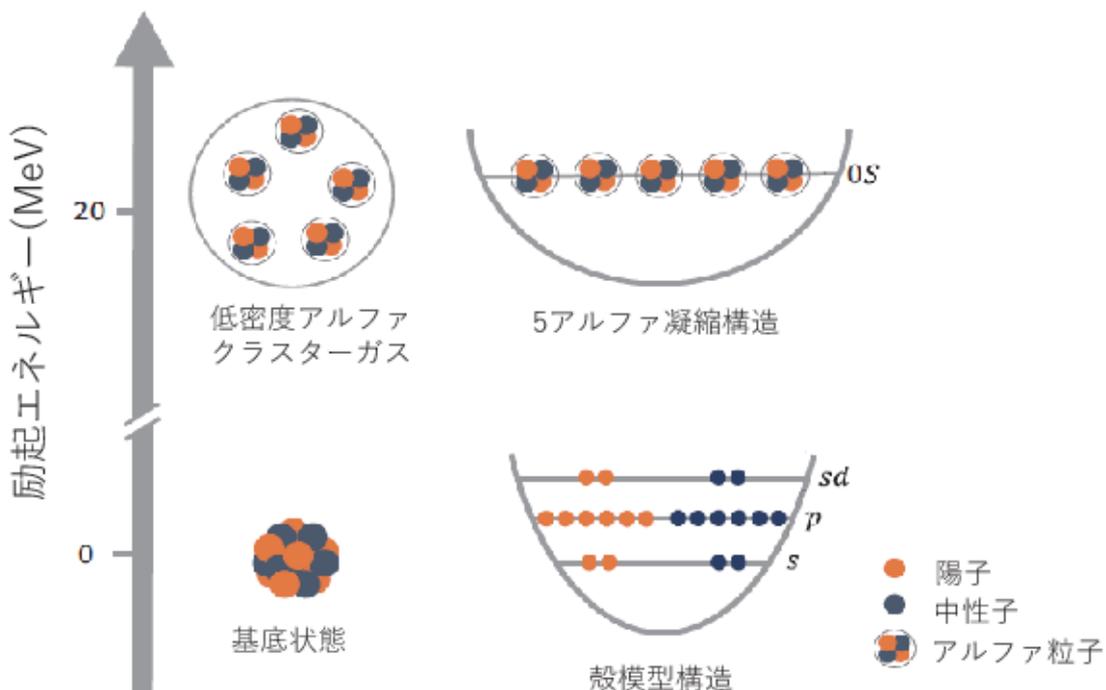


図2 ^{20}Ne 原子核において5アルファ凝縮状態が励起状態に現れる様子を示している。基底状態では核子による殻模型構造が実現しており、エネルギーの高い励起状態では密度の低い5アルファクラスター構造が現れている。

てきました。

近年ではそのような特殊な構造状態は、ホイル状態に限らず酸素(^{16}O)原子核の励起状態にも現れることが理論的に示唆されてきました。 ^{16}O 原子核では、4つのアルファクラスターに分解されて実現するボーズ・アインシュタイン凝縮なので、4アルファ凝縮状態と呼ばれます。これは、基底状態から数えて6番目にエネルギーの高い準位として観測されている、励起エネルギー15.1 MeV (1 MeV は 100 万電子ボルト)、スピン 0 で正パリティ^[7]を持つ状態(0_6^+ 状態)に対応する可能性が高いことが分かっています(文献 1)。

しかしながら過去 15 年ほど、 ^{16}O 原子核より重い原子核領域でより一般的にアルファ凝縮状態が存在するかどうかの確定的な実験的、理論的証拠は無く、未知の領域でした(図 2 参照)。ところがごく最近、大阪大学大学院理学研究科の足立智特任研究員、川畑貴裕教授らの実験研究グループが、 ^{20}Ne 原子核の 23 MeV 付近の高励起エネルギー領域に、特殊なアルファ崩壊過程を示す状態群を観測しました(文献 2, 3)。これは、アルファクラスターを一つ放出した残留核が ^{16}O の 4 アルファ凝縮状態の候補である 0_6^+ 状態になっている、というもので、5 アルファ凝縮状態の最有力候補となるものです。そして理論的にも、この実験で観測された量子準位を再現し、その構造を明らかにすることが、アルファ凝縮構造が原子核物質に一般的に存在するか否かを探るうえで必要不可欠で、解決すべき非常に重要な課題となっていました。

【研究手法と成果】

最新のアルファクラスターモデルである東崎-堀内-シュック-レプケ(THSR)モデルを ^{20}Ne 原子核に適用し

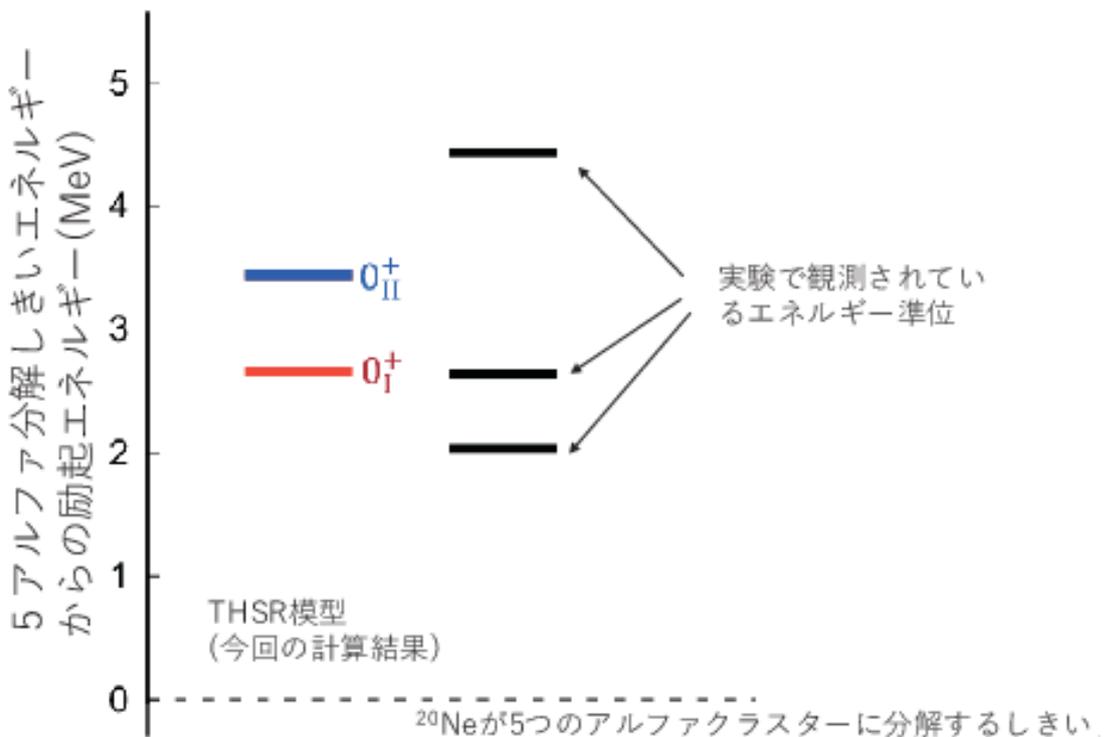


図3 エネルギー準位の計算結果と実験データとの比較。実験で観測されている下側2つの状態が、それぞれ計算結果である 0_1^+ 状態、 0_{11}^+ 状態に対応している。

数値シミュレーションを行いました。これは核子 20 体系の問題をアルファクラスターの自由度を考慮しつつ量子力学的に解くもので、 ^{20}Ne の様々な量子準位のエネルギーや波動関数を与える方法です。

図 3 に、数値シミュレーションの結果得られたエネルギー準位を実験データと比較したものを示しました。励起エネルギー 19.5 MeV で ^{20}Ne は 5 つのアルファクラスターに分解しますが、そのしきいエネルギーを基準(0 とする)として示してあります。実験で観測されている下側の 2 つの準位に対応する状態として、スピン 0、正パリティの、 0_1^+ 、 0_{II}^+ と示した 2 つの状態が得られました。

また、得られた量子状態の波動関数を解析した結果、これらの状態(0_1^+ 、 0_{II}^+)は、 ^{16}O 原子核の 4 アルファ凝縮状態(0_6^+ 状態)にアルファクラスターがくっ付いた構成成分を極めて大きく持っていることが分かりました(図 4 の赤色のバー)。これらが 5 アルファ凝縮状態となっている強い証拠となります。図 3 では、 0_1^+ 状態、 0_{II}^+ 状態の他に、基底状態に対しても同様の計算を行った結果を示していますが、 0_1^+ 状態、 0_{II}^+ 状態とは全く異なった分布を持っていることが分かります。また、 0_{II}^+ 状態は、5 アルファ凝縮構造から、1 つのアルファクラスターがエネルギーのより高い軌道に遷移した状態となっていることが示されました。

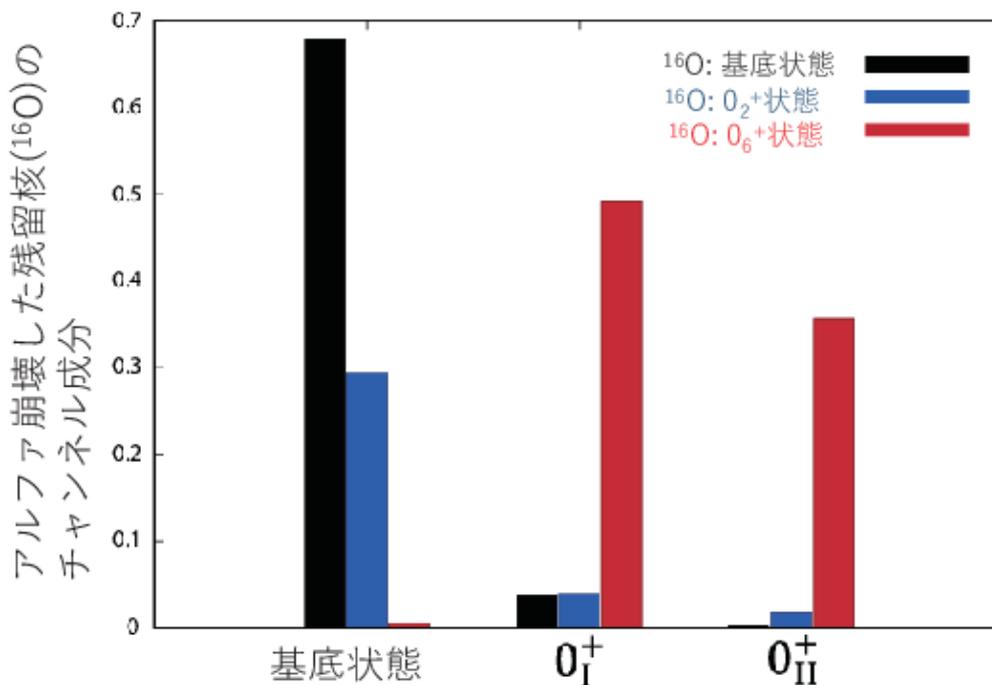


図4 基底状態、 0_1^+ 状態、 0_{II}^+ 状態のそれぞれについて、アルファクラスターと ^{16}O 残留核とに分解したときの ^{16}O 原子核部分のチャンネル成分。基底状態の分布と異なり、 0_1^+ 状態、 0_{II}^+ 状態では、4アルファ凝縮状態である ^{16}O 原子核の 0_6^+ 状態の成分が支配的となっている。

更に、アルファクラスターを 1 つ放出して ^{16}O 原子核へと崩壊する際の崩壊チャンネルについても調べました。実験では、 ^{16}O 原子核の 4 アルファ凝縮状態(0_6^+)への崩壊過程がメインチャンネルとなることが観測されていますが、理論計算によっても見事に再現されました。これにより、観測されていた不思議な崩壊過程を持つ状態が、理論模型の示すような、5 つのアルファクラスターがガスのように配位し、アルファ凝縮した構造を持った状態である強い証拠が得られました。

【今後の期待】

^{12}C 原子核、 ^{16}O 原子核でその存在が議論されてきたアルファ凝縮状態ですが、今回 ^{20}Ne においてもその存在を示す強い理論的証拠が示されました。これは原子核においてアルファ凝縮状態が普遍的に存在することを強く示唆しており、原子核物質の存在形態に対する認識を大いに深めるものです。また、中性子星表面のような原子核物質における低密度領域の状態方程式に対する知見の深化にも大いに貢献するものと考えられます。

【参考文献】

1. Y. Funaki, et al., α -particle condensation in ^{16}O studied with a full four-body orthogonality condition model calculation, Phys. Rev. Lett. **101**, 082502(2008).
2. S. Adachi et al., Candidates for the 5-alpha condensed state in ^{20}Ne , Phys. Lett. B **819**, 136411(2021)
3. [ネオン 20 原子核の新しい存在形態の発見 - リソウ \(osaka-u.ac.jp\)](https://www.osaka-u.ac.jp/~nucleon/2021/05/20210511.html)

【用語解説】

[1] 東崎-堀内-シュック(Schuck)-レプケ(Röpke)(THSR)模型

アルファクラスター模型の中でも最先端の理論模型。原子核の密度が大きいときには核子による殻模型構造が現れ、密度の小さいときにはアルファクラスターが析出し、かつアルファクラスターによるアルファ凝縮構造が現れるとした模型。

[2] アルファクラスター模型

原子核の中でアルファ粒子を単位として生じる構造をアルファクラスター構造と呼び、そのような構造が現れると仮定した理論模型。ホイル状態等で実現されているアルファクラスター構造を説明するために必要不可欠な模型。

[3] アルファ凝縮状態

原子核物質中で、ボーズ粒子であるアルファクラスターがボーズ・アインシュタイン凝縮を起こした状態。

[4] ボーズ・アインシュタイン凝縮

低温領域で整数のスピンを持つ粒子(ボーズ粒子)が最低エネルギー軌道を占有する現象。1995年、冷却原子気体で初めて実験的に観測された。超伝導状態、液体ヘリウムの超流動状態のメカニズムもボーズ・アインシュタイン凝縮状態の一種である。

[5] 殻模型構造

各々の核子が独立に運動し、低いエネルギー軌道から順々に殻状に核子が占有した構造。通常、多くの原子核の基底状態で実現されていると考えられている。

[6] ホイル状態

1954年にフレッド・ホイル博士が、炭素の元素合成過程を説明するために理論的に存在を予言したことで有名なエネルギー準位。 ^{12}C 原子核の励起エネルギー7.7 MeVを持つ励起状態で、後に実験で実際に観測された。

[7] スピン 0、正パリティ

量子力学に従うミクロな粒子において、回転の勢いである角運動量をスピンと呼ぶ。量子力学では、連続的な値では無く飛び飛びの値(整数値か半整数値)のみを取る。また、空間反転の変換をした時の波動関数の対称性をパリティ対称性と呼び、正(+)パリティか負(-)パリティのどちらかを取る。原子核で観測されるエネルギー準位は全て特定のスピン・パリティの値を持っている。

【研究支援】

共同研究者の Bo Zhou 教授、Yu-Gang Ma 教授は、National Natural Science Foundation of China under contract Nos. 12175042, 11890710, 11890714, 12047514, and 12147101, Guangdong Major Project of Basic and Applied Basic Research No. 2020B0301030008, China National Key R&D Program No. 2022YFA1602402, 111 Project, Shanghai “Science and Technology Innovation Action Plan” Project No. 21ZR1409500, 大阪大学核物理研究センター(RCNP) Collaboration Research Network (COREnet)、船木 靖郎 准教授は、科学研究費助成事業 JP21H00127 の補助を受け、本研究を実施した。

【原論文情報】

- Bo Zhou, Yasuro Funaki, Hisashi Horiuchi, Yu-Gang Ma, Gerd Röpke, Peter Schuck, Akihiro Tohsaki, and Taiichi Yamada, “The 5α condensate state in ^{20}Ne ”, Nature Communications, 10.1038/s41467-023-43816-9 (<https://doi.org/10.1038/s41467-023-43816-9>)

【問い合わせ先】

(研究に関すること)

船木 靖郎 (ふなき やすろう)
関東学院大学理工学部 准教授
E-mail: yasuro@kanto-gakuin.ac.jp
Tel: 045-374-6545

(取材・報道に関すること)

関東学院大学 広報課 (〒236-8501 横浜市金沢区六浦東 1-50-1)
E-mail: kouhou@kanto-gakuin.ac.jp
Tel: 045-786-7049 Fax: 045-786-7862

大阪大学 核物理研究センター 庶務係 (〒567-0047 茨木市美穂ヶ丘 10-1)
E-mail: kakubuturi-syomu@office.osaka-u.ac.jp
Tel: 06-6879-8902 Fax: 06-6879-8899