



子過剰核では、普通の原子核のように陽子と中性子が均等に混ざり合っているのではなく、図4左のように、余った中性子が月のカサのように(中性子ハローという)、あるいは饅頭の皮のように(中性子スキンという)、核の外側を取り巻いていることが分かりました。この中性子だけの部分の性質を調べると中性子物質の性質がわかります。

例えば、このような原子核が縮んだり広がったりして密度変化する振動を起こさせることができれば、中性子物質の状態方程式(どれだけ密度が変化すると、どれだけエネルギーや圧力が増えるか)がわかります。また、中性子星の表面から少し中に入ったところでは、中性子物質が重力で圧縮されて密度が高くなっているはずですが、そこを調べるには、中性子過剰核を別の核に衝突させて一瞬だけ密度を高くて、その性質を測ります。このような中性子過剰核を使ったさまざま

中性子過剰核

理研RIビームファクトリー
超伝導リングサイクロトロン



な研究が理研のRIビームファクトリーという世界最大の超伝導サイクロトロン加速器(図4右)を擁する施設で進められています。

逆に中性子星の表面のあたりでは中性子物質は希薄なガスのようになっています。そこを調べるには、レーザーを使って超低温に冷却したリチウムなどの気体原子を使います。原子と中性子はまったく別物ですが、低温で希薄なガスになると熱力学的な性質が似てくるためです。

図4 中性子ハローや中性子スキンをもつ中性子過剰核の模式図と、その研究に用いられる理研RIビームファクトリー(写真は超伝導リングサイクロトロン)。(提供:理化学研究所)

4. 中性子星の中のもっと奇妙な物質

ところで、図3のように、中性子星内部のさらに密度が大きいところには、もっと奇妙な物質があると言われていています。陽子・中性子には、仲間の粒子がいます。陽子はu,u,d、中性子はu,d,dクォークでできていますが、ストレンジクォーク(s)が入った Λ (ラムダ)粒子(u,d,s)や Ξ (グザイ)粒子(u,s,s)のような「ハイペロン」といわれる粒子(図5左上)です。これらは加速器で作れますが、100ピコ秒くらいで壊れて陽子や中性子に変化します。このハイペロン粒子が、中性子星中心部の密度が高いところで自然に発生し、壊れずに安定に存在していると言われていています。高密度になると Λ 粒子が発生し、もっと高密度の中心部では Ξ 粒子も発生して、陽子、中性子、 Λ 、 Ξ が混ざった「ストレンジ核物質」ができていているというのです。

しかし、それが本当かどうか、さらにこの物質がどんな性質を持つかを知るには、 Λ 、 Ξ ハイペロンと陽子・中性子との間にはたらく力や、ハイペロン同士の力を

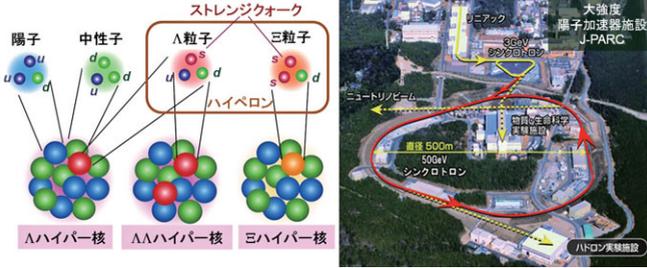


図5 左:ストレンジ(s)クォークをもつハイペロン(ΛやΣ粒子)を原子核に入れたハイパー核。右:その研究に用いられる茨城県東海の大強度陽子加速器施設J-PARC (提供:日本原子力研究開発機構)。

知らなければなりません。私達は、原子核の中で陽子や中性子の間にはたらく「核力」の性質をよく知っています。最初に核力を理論的に解明した湯川秀樹先生は、その業績で日本人最初のノーベル賞を受けました。しかしハイペロンの核力はまだわかっていません。これを調べるには、加速器で作ったハイペロンを原子核に埋め込んだ「ハイパー核」といわれる特殊な原子核(図5左)を作り、その性質を研究します。日本はハイパー核研究で世界を圧倒的にリードしており、主に日本人の研究によって、Λを1個含んだΛハイパー核は39種類、Λを2個含んだΛΛハイパー核は3種類がこれまでに実験で作られ、Λ粒子が核内でどんな力を受けるのかも分かってきました。しかしΣ粒子や別のハイペロンであるΣ粒子については、どんな力を受けるのかまだわかりません。私達はこうした問題に答えるため、世界最高のビーム強度をもつ陽子加速器J-PARC(図5右)を使ってハイパー核の実験を進めています。このような物質は、中性子物質と同様に「原子からできていない」ばかりか、今の宇宙には存在しないと思われていたストレンジ(s)クォークを含んだ文字通り“奇妙な”物質です。こんな物質が宇宙に本当にあるなら驚きです。

5. 地上実験と天文観測から中性子星に迫る

こうして、地上の実験室で中性子過剰核やハイパー核などの特殊な原子核や、冷却原子ガスを作って調べた結果をもとに、中性子星の中の物質の性質を理論的に予想し、中性子星を計算機の中に作ることができます。これが本当に正しいかどうかは、計算で求められた中性子星の質量・半径・冷却速度などが、天文観測のデータと一致するかどうかを調べればわかります。中性子星からのX線を精度よく測ると、中性子星表面の重力の強さがわかり、そこから中性子星の半径が決定で



図6 中性子星観測に威力を発揮する日本のX線天文衛星ASTRO-H (2015年打ち上げ予定)。(提供:宇宙航空研究開発機構)



きます。これには世界でまだ誰も成功していませんが、2015年に打ち上げられる日本のX線天文衛星ASTRO-H(図6)では、高性能の新型検出器でX線を測定して、初めて半径を正確に決定できると期待されています。

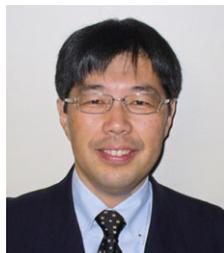
中性子星の質量は以前から多数の測定例があり、太陽の1.5倍かそれ以下とされてきましたが、最近太陽質量の2倍の中性子星が見つかり大問題となっています。現在の原子核物理の知識で中性子星を計算すると、そんなに重い星は密度が上がりすぎて中性子星ではなくブラックホールになってしまうからです。超高密度の物質の中で私達の知らないことが起こって、ブラックホールになるのを妨げているのかも知れません。

図3のように、ストレンジ核物質よりももっと不思議なクォーク物質に変化することで、ブラックホールになるのを妨げていると指摘する理論家もいます。陽子・中性子もハイペロンも、クォーク3個が固く結びついて閉じ込められた塊という意味では、同じ仲間(ハドロン)です。しかし、極めて高密度になると、クォークがばらばらになって全体が3種類のクォークからなるスープのようになると理論的に予測されています。これは、氷の粒が融けて水になるのと同様の相転移です。最近アメリカの加速器で、宇宙誕生時のビッグバンの直後の物質を再現する実験を行ったところ、クォークがばらばらになった熱いスープ状態(クォーク・グルーオン・プラズマ)が現れ、宇宙初期には物質が今とはまったく異なるものだったことが実証されました。しかし、今の冷えた宇宙のどこかに、冷たいクォークのスープが存在しているとしたら、これは科学の常識を根本から覆す画期的なことです。

6. おわりに

このように、宇宙にはまだ人類がまったく知らない形態の物質があります。物質は原子でできているというのが19世紀の物質観でした。陽子・中性子・電子(素粒子で言うとu,dクォークと電子)でできているというのが20世紀の物質観でした。21世紀には、中性子星の研究から、物質には原子からできていないものもある、物質はu,d,sクォークと電子の4種類の素粒子でできている、ということが常識になるのかも知れません。

著者紹介:田村 裕和(たむら ひろかず)



東北大学大学院理学研究科物理学専攻教授。栃木県足利市生まれ。1988年東京大学大学院理学系研究科修了(理学博士)。東京大学理学部助手、東北大学理学研究科助教授を経て2004年より現職。専門は実験核物理。ハイパー核ガンマ線分光学を開拓し、2009年仁科記念賞受賞。文科省の科研費新学術領域研究「実験と観測で解き明かす中性子星の核物質」代表。