



宇宙のかなたにある不思議な物質 —中性子星の謎—

東北大学大学院理学研究科 田村 裕四

1. 物質は何からできているか

現在の宇宙に満ちあふれ、地球や生物を形作っている「物質」は何からできているのでしょうか。19世紀に、化学反応や気体の性質の考察から、すべての物質はそれ以上分けられない「原子」から作られているという原子説が生まれましたが、その原子の正体が明らかになったのは20世紀になってからです。図1左のように、正電荷をもつ陽子と電荷のない中性子がある個数ずつ集まった原子核があり、その周りを負電荷をもつ電子が原子核の陽子の数と同数だけ回っている、ということが実験を通じて確かめられました。今では、原子1個1個を特殊な電子顕微鏡で見ることができます。原子核の大きさは原子の1万分の1くらいと非常に小さく、そこに原子の質量の99.98%が集中しているので、原子核は極めて高い密度をもちます。加速器を利用した高エネルギービームの電子顕微鏡のような装置で原子核の形や内部の構造まで見ることができます。

1960年頃までは、物質は陽子・中性子・電子が物質の最小単位である「素粒子」と考えられていました。

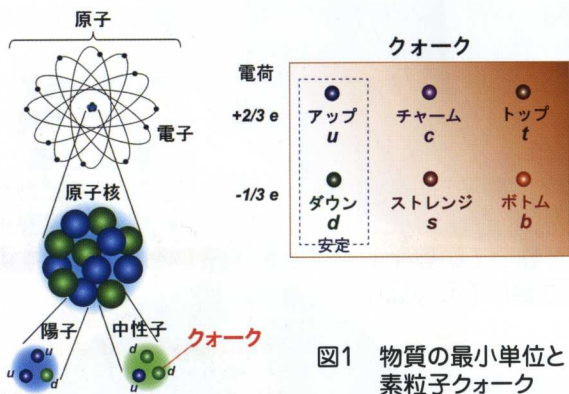


図1 物質の最小単位と素粒子クォーク

の電子ビームを使って陽子・中性子の中を見ると、細かい粒子がうごめいていることがわかりました。こうして、図1のように素粒子クォークが集まって陽子・中性子などの粒子(ハドロンといいます)が出来ていることがわかりました。

それ以降、クォークは何種類あってどんな性質をもつのが、素粒子物理学の最大の問題となりました。ノーベル賞を獲得した小林先生・益川先生は、まだクォークが3種類しか見つかっていなかった頃、クォークのもつ特殊な性質(粒子と反粒子の反応がわずかに異なる)を説明するにはクォークが6種類必要であるという理論を発表しましたが、これが実験で完璧に証明され「標準理論」の柱となり

ました。ところで、図1右のようにアップ(u)・ダウン(d)、チャーム(c)・ストレンジ(s)、トップ(t)・ボトム(b)の3組(世代と呼ばれる)合計6種類のクォークのうち、陽子・中性子の中にあるのは1世代目のuとdだけです。電子も素粒子なので、この世界の物質は、uクォーク・dクォーク・電子の3種類の素粒子だけでできていることになります(ニュートリノという素粒子も宇宙空間をたくさん飛び回っていますが、物質の構成要素とはなれません)。ビッグバンで宇宙ができた直後には、他のクォークも存在していたはずですが、すぐに壊れて安定なu, dクォークに変化したのです。高エネルギーの加速器を使えば他の4つのクォークも作れますが、やはり1ナノ秒以下の短い時間で壊れてu, dクォークになってしまいます。

現在宇宙にある物質はすべて原子でできている、と言ってもいいし、陽子・中性子・電子でできている、あるいは、u, dクォークと電子の3種類の素粒子でできている、と言うこともできます。ところがこの科学の常識が覆ろうとしています。舞台は「中性子星」という不思議な天体です。私達は、この天体の中にどんな物質があるのかを、加速器を使った原子核の実験や、冷却原子ガスの実験、X線天文観測と、原子核やクォークの理論計算やシミュレーションなど、異なる分野の研究を組み合わせることで突き止めようとしています。これからはその最先端の研究についてお話しします。

2. 中性子星とは

中性子星は、1967年に最初に発見されました。1.3秒という短い正確な周期で電波を発する天体(パルサー)が見つかり、宇宙人の仕業ではないかとも言われましたが、これは極めて高速の自転をしている小さな天体が発していることがわかりました。

太陽のような恒星は、内部で核融合反応を起こしてエネルギーを発生させて輝いています。恒星の中心部では、強い重力で物質が圧縮され、水素原子核(陽子)からヘリウム、炭素、酸素と核融合反応で次第に大きな原子核が作られていきます。しかし、鉄の原子核になると、それ以上融合しなくなります。鉄より重い原子核は、核内の陽子同士の電気的反発力が強過ぎて分解(核分裂)しやすくなるためです。中心部が鉄ばかりになると、もはや圧力を保つための熱を核融合で発生できないため、重力で一気に圧縮されます。このとき、電子が鉄の原子核中の陽子と反応して、電子はニュートリノに、陽子は中性子に変わ

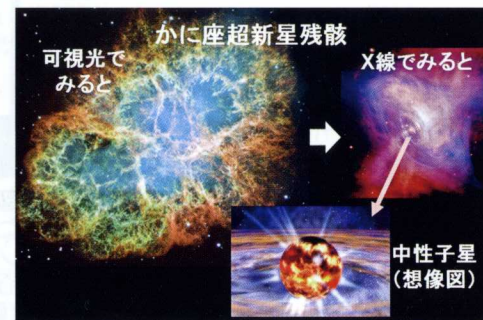


図2 かに座超新星残骸を可視光で見た姿とX線で見た姿。中心にあるX線を放つ中性子星がパルサーとして発見された。(画像は©NASA)



ます。ニュートリノは物質を突き抜けて外へ出てくるので、星の中心には中性子だけが残り、中性子の巨大な塊ができます。これが中性子星です。重力で中心に向かって落ち込んでくる星の外側の物質は、硬い中性子の塊に跳ね返されて外へ吹き飛びます。こうして超新星爆発が起こります。超新星爆発のとき大量に放出されるニュートリノを実際に観測して、このシナリオが本当であることを実証したのが小柴先生です。

図2左は、かに星雲の望遠鏡写真ですが、平安時代に起こった超新星爆発で吹き飛んだガスが今も広がっている様子がわかります。この天体をX線で観測すると、右のような渦巻き構造が見え、その中心に“かにパルサー”と呼ばれる中性子星が見つかっています。このような中性子星は多数観測されていて、半径はわずか10km程度なのに質量は太陽の1~2倍もあり、その密度は東京ドーム2000倍分の土を角砂糖1個の大きさに圧縮したくらいになります。これは原子核の密度の数倍に相当します。中性子星は、いわば宇宙空間に浮かぶ中性の巨大高密度原子核です。これが高速で回転して電波やX線を周期的に発生し、パルサーとして観測されるのです。

3. 原子からできていない物質「中性子物質」

この中性子星の中にあるのはどんな物質でしょうか？電子がニュートリノに変わって逃げたので、原子はありません。地球はおろか太陽系の周辺の物質は、すべて原子からできています(ただし太陽の中は原子核と電子がバラバラになったプラズマ状態です)が、それとはまったく異なる不思議な物質です。中性子星内部の予想図を図3に示します。表面から少し中に入ると、中性子だけがぎっしり集まった物質があるはずですが、この「中性子物質」の性質を調べるにはどうしたらいいのでしょうか？実際に中性子星まで行って調べることはできません。

しかし、大きさは全く違いますが、この中性子物質はある種の原子核と似ています。普通の原子核は、陽子と中性子の個数がだいたい等しいのですが、特に中性子が多い「中性子過剰核」という特殊な原子核を実験室で人工的に作ることができます。例えばリチウムの原子核は、Z(陽子数)=3, N(中性子数)=3の⁶LiとZ=3, N=4の⁷Liだけが地球上に安定に存在していますが、加速器を使うとZ=3, N=8の¹¹Liのような中性子の異常に多い原子核を作れます。こういう核は短時間ですぐ壊れますが、それまでの間に詳しく性質を調べることができます。こうした中性

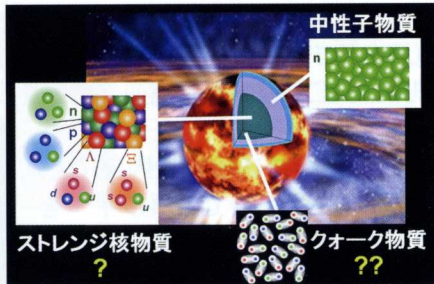


図3 中性子星内部の物質の予想図。外側に中性子物質、内側にsクォークを含むストレンジ核物質の存在が予想され、さらに中心部にクォーク物質があるという説もある。(画像の一部は©NASA)

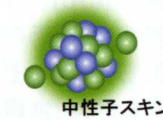
子過剰核では、普通の原子核のように陽子と中性子が均等に混ざり合っているのではなく、図4左のように、余った中性子が月のカサのように(中性子ハローという)、あるいは饅頭の皮のように(中性子スキンという)、核の外側を取り巻いていることがわかりました。この中性子だけの部分の性質を調べると中性子物質の性質がわかります。

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して、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



中性子ハロー



中性子スキン

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

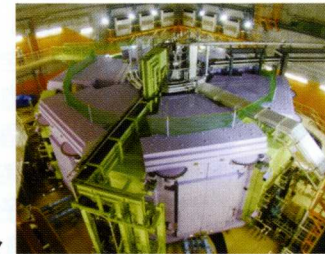


図4 中性子ハローや中性子スキンをもつ中性子過剰核の模式図と、その研究に用いられる理研RIビームファクトリー(写真は超伝導リングサイクロトロン)。(提供:理化学研究所)

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り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。

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クォークからできていますが、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いわれています。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

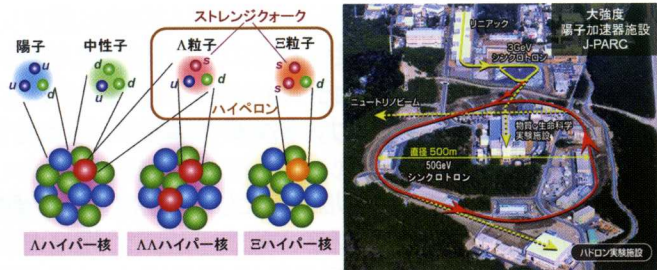


図5 左: ストレンジ(s)クォークをもつハイペロン(ΛやΣ粒子)を原子核に入れたハイパー核。右: その研究に用いられる茨城県東海の大強度陽子加速器施設J-PARC (提供: 日本原子力研究開発機構)。

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。