中性子星は三体力が際立った「巨大な原子核」か

飯田 圭 鷹野正利 田島裕之 いいだ けい 高知大学 たかの まさとし 早稲田大学 たじま ひろゆき

「巨大な原子核」に似た天体の存在が予言されたのは中性子発見より前のことだった。一方、中性子発見以降、超新星爆発のあとに残るコンパクトな天体、すなわち中性子星がパルサーとして発見され、さらには、中性子星同士の合体までもが重力波により観測されるようになってきた。では翻って中性子星は「巨大な原子核」とみなせるのだろうか。その鍵を握るのは、核子(中性子や陽子)間の三体力、さらには核子を構成するクォーク間に働く三体力であることをみる。

1 中性子星とは

質量数が10⁵⁷にも達する「巨大な原子核」をイメージすることからはじめよう。この質量数は太陽が含む核子(中性子や陽子)の数と同程度である。通常の原子核は密度一定の液滴のようなものであり、質量数はほぼ体積に比例するが、質量数が10⁵⁷にも達すると、重力の影響で密度や圧力は中心から外に向かって減少するように分布するはずだ。また、通常の原子なら原子核の周囲に電子は長さにして原子核の1万倍程度のスケールでほやっと分布するが、「巨大な原子核」の場合、クーロン力の影響で陽子とほぼ同数の電子が陽子とほぼ同じ密度で分布することが想定されるのである。

以上のことは 1932 年に中性子の存在が確認される前からある程度見当はついていたであろう。 実際ランダウが「巨大な原子核」について論じた のは中性子発見より少しばかり前の話である。一 方、中性子の存在が明らかになり、中性子が陽子 より若干重いことから真空中では不安定であるこ とがわかってきた。ところが、共存しているはず の電子が核子との間に働く弱い力による化学平衡 条件の下、陽子を中性子化するように働くため、 星を構成する核子の大方は中性子となってしまう のである。しかも、中性子は電子と同様、低温で フェルミ縮退と呼ばれる重要な性質を示す。この 性質は、平衡下でも中性子に激しい運動を誘起し、 結果として圧力(縮退圧)をもたらす。このような 機構で支えられた天体は中性子星と呼ばれる。す ると、理論的に星のサイズを検討することができ る。半径10kmがその典型的な値であり、星の 平均密度は原子核の密度を超える。なお、同程度 の質量をもつ天体で電子の縮退圧で支えられたも のは、白色矮星として数多く存在しており、その 半径は地球と同程度である。

パルサー(自転に伴い規則正しい電波パルスを発する天体)の発見(1967年)を通して中性子星が観測されるようになると、質量や半径はどの程度かという問題が関心事となる。質量に関しては、アインシュタインの一般相対性理論のおかげで、太陽を除く恒星のうち最高の精度で決定された例1がある。これは、二つの中性子星が互いに公転運動するいわゆる近接連星系であり、そのうちの一つがパルサーとして観測されていた。電波パルスの到着時間を解析した結果、公転の楕円軌道に一般相対性理

論でのみ説明可能な特徴が見いだされ、二つの星の質量がともに太陽質量の1.4倍程度と決められたのである。加えて、公転周期が変化する様子から、重力波の発生が公転軌道を縮小させていると結論された。一般相対性理論が予言する重力波の間接的な証拠が得られたのである。近年、同様の系から重力波が直接検出され²、質量・半径の同時測定を可能にした。この衝撃の大きさについては改めて次節で述べたい。

一方、半径に関してはコンパクトな天体である ことが測定を困難にする。半径を実際の値の半分 と見積もったとしよう。天体観測において、これ は決して悪い見積もりではないように思えるが、 体積にすると実際の値の1/8倍、平均の密度は8 倍にもなる。このずれは中性子星内部の物質状態 を推定する上では致命的である。例えば、太陽半 径を観測で決めようと思えば太陽までの距離を測 り、見た目の大きさから判断すればよいわけだが、 かりに見た目の大きさがはっきりしない場合でも. 太陽光の強さと色から半径を決めることができる のである。この手法を中性子星に適用する場合. 中性子星表面の温度が一般に太陽より高温である ため、光学望遠鏡よりもX線望遠鏡による観測 が適している。実際には限定的とはいえ、中性子 星までの距離が精度よくわかっている場合に、X 線の観測で半径が推定されてきた。結果は 10 km と矛盾しないが、5km なのか20km なのか判別 するのも容易ではない。

半径の問題はともかくとして、パルサーがもたらした知見は計り知れない。例えば、若いパルサーでは電波パルスの周期が急に短くなる現象(グリッチ)が知られているが、これは、星内部の中性子物質が、低温下での液体へリウムと似た超流動性(摩擦のない流れ)を示すためと考えられている。また、X線でもパルサーとして見える場合があるが、その一部(マグネターと呼ばれる)は10¹⁴ Gを超える強磁場を表面において有しており、ごくまれに太陽のフレアをはるかにしのぐ規模の巨大なフレア現象が観測されてきた。このような強磁場下におかれた原子の構造は真空中とは全く異なるものと考

えられる上、巨大なフレア後に星全体が震動する様子から、核子からなる物質が、原子核からなる固体、さらには高分子系と似た液晶構造をもつことが予想されている。よって、中性子星は、地上の実験で実証できる範囲をはるかに超えた「超高圧かつ超強磁場の実験室」とみなすことができるのである。。

この節の最後に、パルサーがもたらした重要な 知見、すなわち中性子星の最大質量にふれよう。 中性子星の質量が正確に決まった前述の例は二つ の中性子星の近接連星系であったが、21世紀に 入り. 白色矮星とミリ秒の自転周期を示す電波パ ルサー(PSR J1614-2230)の近接連星系が注目を集め た4。白色矮星は太陽の成れの果ての姿であり、 白色矮星と連星系を組んでいる中性子星も年老い ていると考えるのが自然である。それにもかかわ らず、ミリ秒周期という極めて短い周期で自転す るのは驚きだが、進化の過程で相手の天体から回 転運動のいきおい(角運動量)をもらってきたと考え れば合点がいく。角運動量だけでなく同時に質量 ももらいうけた結果、中性子星はどんどん重たく なっているはずである。パルス周期の到着時間の 観測が実際にそうであることを実証した。パルス の到着時間は白色矮星のそばをパルスが通過した 場合に変調(シャピロ遅延)を受ける。これも一般相 対性理論の効果であり、長期にわたりパルスの到 着時間を観測した結果、中性子星の質量が太陽質 量のほぼ2倍であることがわかった。この値は 質量の観測値のなかで最大級であり、理論屋泣か せでもある。実際理論的には、中性子星には最大 の質量があり、 それを超えると星が不安定となり ブラックホールになると考えられている。最大質 量は、星を構成する高密度物質の状態方程式が硬 ければ(圧力を変えても密度が変わりにくい場合は硬い)増す。 密度が高くなれば、核子間の三体力により状態方 程式が硬くなる一方、核子より重い重核子(ハイペ ロン), さらには核子・重核子の構成粒子であるク ォークなどが出現するようになると、中性子の縮 退圧が弱まって状態方程式は軟らかくなり、2倍 の太陽質量を支えられるか微妙となる(図1左)。

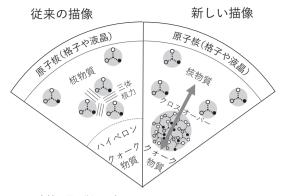


図 1-中性子星の断面予想図

左は従来の描像。右は新しい描像。左では核子間の三体斥力,右では核子内の三体引力がもたらす核物質からクォーク物質へのゆったりとした移り変わりが特徴である。小さい丸はクォークを表す。

従来からあるこの問題は3節のテーマである三 体力と直結するのである。

2

重力波がもたらした奇跡

2017年8月に観測された重力波(GW170817)は 衝撃的であった²。2015年以降. ブラックホール 合体起源の重力波検出に実績のあった米国の LIGO のみならず、稼働したばかりだった欧州の 重力波検出器 Virgo が重力波の信号をとらえたの である。重力波の解析から、中性子星同士の合体 であることがわかり、これが中性子星合体の初め ての観測例となった。公転周期の変化、潮汐力に よる星変形の効果に着目することにより、 合体す る前の中性子星の質量・半径の両方が同時に推定 された。さらには、一般相対性理論に静水圧平衡 (重力と圧力がつりあって星内部が静止した状態)の条件を適 用することにより、中性子星内部物質の状態方程 式が、原子核の数倍の密度で音速(文字通り音の速さ) がピークをもつようなものと定まったのである。 物質の相状態がどのようなものかは依然不明だが, 核子からなる物質(核物質)が密度とともに硬くな り、クォークからなる物質(クォーク物質)に徐々に 変わっていくと考えるのが自然な解釈である(図1 右)5。すると中性子星が「巨大な原子核」との見 方はいささかいきすぎとなるが、それは三体力が 際立ったせいと見られないだろうか。これが次節

で扱う問いである。

なお、合体後の天体は直ちにブラックホールに 潰れたわけではなく短時間残存し、多波長での電 磁波観測により豊富なデータをもたらした。特に ブラックホールへの変遷を示唆するガンマ線バー ストの観測、重元素の合成を示唆する赤外線の観 測は特筆に値する。

すべき 中性子星における三体力の 深遠な役割

図1に描かれた中性子星断面予想図の理解には,三体力が鍵となる。以下,核子間の三体力,核子内の三体力の順にその効果を解説する。

核子間の三体力

中性子星内部にある核物質の性質を知るには. 一様核物質(陽子の電荷を無視した仮想的な物質)の一核 子当たりのエネルギー E/A の密度依存性を調べ ることが有益である。1節で紹介したように原子 核内部の密度はほぼ一定であるが、その密度は飽 和密度(n₀)と呼ばれ、およそ 0.16 fm⁻³ である(1 fm=10⁻¹⁵ m)。この性質は、一様核物質の一核子当 たりのエネルギーE/Aが密度 n_0 で最小になる、 という特徴によって理解される。よって一様核物 質を、核子が核力で相互作用する多体系ととらえ、 さまざまな密度でそのエネルギー E/A を理論計 算することで、もし密度 noで E/A が最小になれ ば、原子核の密度の飽和性が理論的に説明できた ことになる。しかし二体の核力だけを用いた場合 の理論計算により得られた E/A は、その最小値 が no よりもかなり高密度側にずれてしまう。こ のずれの原因が、三体核力であると考えられてい る。つまり三体核力を適切に取り入れなければ. 原子核の基本的性質である密度の飽和性が説明で きない6。

特に三体核力は、高密度では斥力的に(E/Aを上昇させるように)、一方で低密度では引力的に(E/Aを下降させるように)働くと考えられている(図2)。このことは、軽い原子核に対する第一原理計算結果とも矛盾しない。例えば三つの核子からなる原子核

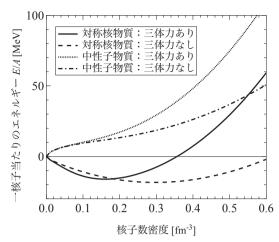


図 2――様核物質の一核子当たりのエネルギーの計算例。(文 献9の著者富樫甫氏(東北大学)提供のデータをもとに作成)

(³Hゃ³He)に対して、二体核力だけを用いてエネル ギーを計算すると、その値は実験値よりも有意に 高くなってしまう。同様な傾向は ⁴He や ¹²C など のより重い原子核にも見られるで、つまり少なく とも. これらの比較的軽い原子核の実験値を説明 するには、三体核力の引力的な効果が不可欠であ る。しかし、三体核力を実験的に決定することは 難しく. よって三体核力を含んだ一様核物質エネ ルギーの理論計算も不定性をもってしまう。

上記で密度の飽和性に関連して議論した一様核 物質は、陽子と中性子の個数が等しい、いわゆる 対称核物質である。それは、地球上に安定に存在 する原子核において、陽子数と中性子数がほぼ同 数だからである。一方で中性子星内部の核物質は 中性子が過剰であり、その性質は対称核物質とは 大きく異なる(例として、中性子のみからなる中性子物質の E/Aを図2に示す)。特に核力は、それが働く核子が 陽子か中性子かによって、その特徴が変化する。 三体核力も同様な性質をもつと考えられ、よって 地球上に安定に存在する原子核内部での三体核力 と、中性子が過剰な三体核力とでは、その性質が 異なると予想される。その違いを実験的に調べる ことは、容易なことではない。だが近年の核子散 乱実験の進歩により、徐々に三体核力の性質が解 明されつつある。

では中性子星の構造に、三体核力は影響するの

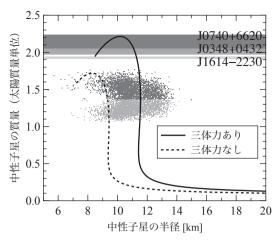


図 3-中性子星の半径と質量の関係の例

図2の状態方程式から計算された。点は、重力波GW170817 から推定された合体前の二つの中性子星の質量・半径値を示す。 また、重い三つの中性子星(J0740+6620, J0348+0432, J1614-2230)の質量も、帯で示されている。(文献 10 の著者富樫甫氏 提供のデータをもとに作成)

だろうか。中性子星内部物質が核子からなる核物 質だと仮定すると、三体核力としての大きな斥力 効果がなければ、明らかに、すでに発見されてい る重い中性子星の存在が説明できない(図3)。す なわち中性子星は、三体核力で支えられていると 言ってよい。しかし前述のように中性子過剰物質 における三体核力の詳細は未知であるため、中性 子星構造の理論計算にも大きな不定性が残ってい る。これが図1左の理解が困難な所以である。 さらに核物質にハイペロンが混入したり. 核物質 の一部または全体が急激にクォーク物質に転移し たりすれば一般に状態方程式は軟らかくなり、重 い中性子星の存在のみならず、中性子星合体の示 唆する音速のピークの説明も困難となる。

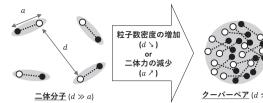
核子内の三体力

三体力は、二つの粒子のみでは働かず三つの粒 子が集まったときに初めて働く奇妙な力であるた め、直感的にイメージすることが難しい。二体力 と三体力を切り分けて考えるという観点から.人 工系を用いた量子シミュレーションによってこの 難題に取り組む研究が近年行われている。本項で は、こうした学際的な観点から三体力によって中 コラム

そもそも二体力が重要となるのはいつ?

三体力を考える前に、まず二体力の効果が顕著に現れるのはどういった状況かを考えてみよう。二体力が重要な役割をする典型例は、二つの粒子が二体引力によりくっついて分子を形成するときである。また、分子が形成されるほど引力が強くなくとも、量子効果に手助けされて広がった「分子のような状態」が形成されることがある。これが超伝導現象の説明において決定的な役割を果たすクーパーペアの形成である"。詳細は割愛するが、電子やクォーク、中性子などが低温で示すフェルミ縮退状態はクーパーペアの形成に対して不安定であるため、二つが強くくっつくほど引力が強くなくともクーパーペアがどんどん形成される。このペアはただの分子とは異なり、空間的に広がっているが故に互いに重なり合いペアを組み換え続ける。

冷却原子気体と呼ばれる人工量子系では、二体力の強さを人為的にコントロールできるため、二体力を変化させることで強く束縛された分子状態からクーパーペア状態へ連続的に変化する様子が実験的に観測されている¹²。この現象はボース-アインシュタイン凝縮(BEC)状態からバーディーン-クーパー-シュリーファー(BCS)状態へのクロスオーバーと呼ばれている。BEC 状態は二つの粒子が強く引き合って形成した分子が凝縮した状態に、BCS 状態は量子効果(フェルミ縮退)の助けを借りてクーパーペ



d: 平均粒子間距離 a: 分子の大きさ

図 4-気体中の引力的な二体力による二体分子形成とクーパーペアの模式図

二体分子の気体は二体力が強く分子の大きさaが平均粒子間距離dに比べ小さいときに実現されるのに対し、分子サイズaが平均粒子間距離dと同程度もしくは大きいような状況ではクーパーペアが多数形成された BCS 状態となる。二つの状態の移り変わりは BEC-BCS クロスオーバーとして冷却原子気体や超伝導体で実際に観測されている $^{12.13}$ 。

アを作っている状態にそれぞれ対応する。

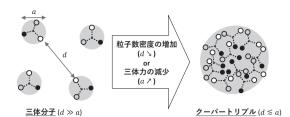
このとき、二体力の強さが「何に比べて強いか」を認識しておく必要がある。図4に示すように、二体力が強ければ分子のサイズはより小さくなるが、平均粒子間距離よりもサイズが大きければ分子というよりは内部構造が顕わなクーパーペアに近い状況となる。平均粒子間距離はおおよそ粒子数密度で決まるため、粒子数密度を変化させることでも二体分子からクーパーペアへのクロスオーバーを実現させることができる。二体力を変化させるという「離れ業」をせずとも、ある種の超伝導体では、伝導電子密度の変化により BEC-BCS クロスオーバーが実現されるのはこのためである¹³。

性子星や極限物質において現れうるクーパートリ プルと呼ばれる量子状態について紹介する。

コラム中の二体力の状況を踏まえ、三体力の効果が顕著に現れるのがどういった場合かを考えてみると、三つの粒子がくっついて三体分子を形成しているときであると推測できる。実際に、原子核物理において三体力は三体束縛状態の性質を説明する上で重要となる(前項)。さらに、核子そのものもクォークが三つくっついた状態である。クォークには三原色と対応づけて「カラー」と呼ばれる自由度が存在し、赤青緑が合わさって白色になるように三体力が引力的に働く¹⁴。では、三体

分子のサイズに比べて平均粒子間距離が短くなるような状況ではどうなるだろうか。例えば中性子星の内部のような高密度状態では、クォークの数が多すぎてクォーク間の平均距離が中性子のサイズよりも短くなる。

このような環境下では、図5に示すように、クーパーペアの三体版であるクーパートリプル¹⁵が実現しうることが理論的に明らかになりつつある。しかもこのクーパートリプルは、二体力のみでも現れるが三体力があるとより安定に存在しやすい¹⁶。クーパーペアと同様、分子サイズに比べ平均粒子間距離が小さく、空間的に互いに重なり



d: 平均粒子間距離 a: 分子の大きさ

図 5-気体中の引力的な三体力による三体分子形成とクーパートリプルの模式図

図4の二体分子の場合と同様に、三体力が強く分子の大きさaが平均粒子間距離dに比べ小さいときは三体分子の気体が実現されるのに対し、分子サイズaが平均粒子間距離dと同程度もしくは大きいような状況ではクーパートリブルが多数形成された状態となる。冷却原子気体分野でクーパートリブルの存在が理論的に考案されているが、実験ではまだ観測に至っていない。一方、中性子星内部のハドロン-クォーククロスオーバーと類似性があり、将来の天体観測からこうした多体状態が確認される可能性もある。

合うことになるため、超伝導体と似た量子状態に なることも考えられる17。さらに、粒子数密度の 変化による BEC-BCS クロスオーバー. つまり. 二体分子からクーパーペアへのクロスオーバーが 起こりうるなら、粒子数密度の変化による三体分 子からクーパートリプルへのクロスオーバーも起 こりえよう。中性子星においても類似した描像 (図1右)が、ハドロン-クォーククロスオーバー(核 物質とクォーク物質がどっちつかずな状態)という文脈で活 発に議論されてきた5。特に、その特徴としてク ロスオーバーに対応する密度領域で音速が極大と なることが期待され注目を集めている。しかし. 水の気液相転移のような非連続的な相転移ではこ のような現象は説明できず、その微視的メカニズ ムは未解明のままであった。一方、三体分子から クーパートリプルへのクロスオーバーにおいても 数値シミュレーション結果から音速の極大が現れ うることが示唆されており¹⁶. ハドロン-クォー ククロスオーバーのシナリオと整合する。

重力波や X 線観測から提供される中性子星の質量・半径のデータが増えれば内部物質の状態方程式がさらに絞られる可能性は高いが、組成や相状態についての決定的な証拠を摑むのは難しい。他方、量子色力学(クォークに関する基礎理論)にもとづく正確な高密度状態の記述は困難を極める。そこ

で、冷却原子気体による量子シミュレーションの 出番である。二体力を制御できるため、二体力を なくすこともできる。さらに、三体力を人為的に 制御する方法も理論的に考案されている¹⁸。三体 状態が形成されたときの気体の安定性や二体力が 共存する場合の二体分子/クーパーペア形成との 競合など課題も多く残されているが、近い将来、 実験技術の進歩に伴い、この難題が学際的なアプローチにより解決される日が来るかもしれない。

猫文

- 1—J. H. Taylor & J. M. Weisberg: Astrophys. J., **345**, 434(1989)
- 2—B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration): Phys. Rev. Lett. **119**, 161101(2017)
- 3-飯田圭: 『宇宙物理学ハンドブック』 所収. 高原文郎・他編集, 朝倉書店(2020)pp. 389-394
- 4-P. B. Demorest et al.: Nature, 467, 1081 (2010)
- 5—古城徹: 日本物理学会誌, **77**, 74 (2022)
- 6─住吉光介:『基本法則から読み解く物理学最前線 21 原子核か
- ら読み解く超新星爆発の世界』共立出版(2018)pp. 37-41
- 7—J. Carlson et al.: Rev. Mod. Phys., 87, 1067(2015)
- 8—A. Watanabe et al.: Phys. Rev. C, 103, 044001 (2021)
- 9-H. Togashi et al.: Nucl. Phys. A, 961, 78(2017)
- 10—H. Togashi: JPS Conf. Proc., **31**, 011022(2020)
- 11—J. Bardeen et al.: Phys. Rev., **108**, 1175(1957)
- 12—C. A. Regal et al.: Phys. Rev. Lett., 92, 040403(2004)
- 13-Y. Nakagawa et al.: Science, 372, 190(2021)
- 14—S. Capstick & N. Isgur: Phys. Rev. D, **34**, 2809 (1986) 15—P. Niemann & H.-W. Hammer: Phys. Rev. A, **86**, 013628
- 16—H. Tajima et al.: Phys. Rev. Research, **4**, L012021(2022)
- 17—S. Akagami et al.: Phys. Rev. A, **104**, L041302(2021)
- 18-A. J. Daley & J. Simon: Phys. Rev. A, 89, 053619(2014)

飯田 圭 いいだ けい

高知大学教育研究部自然科学系理工学部門教授。高密度物質の 理論研究を30年継続中。著書に『宇宙物理学ハンドブック』 (朝倉書店,共著)。現在,量子力学(学部生向け)の教科書を執 筆中。

鷹野正利 たかの まさとし

早稲田大学理工学術院教授。主に変分法による核物質状態方程 式の理論的研究と, その天体物理学への応用の研究に従事。

田島裕之 たじま ひろゆき

東京大学大学院理学系研究科助教。量子多体物理学(超伝導体, 冷却原子気体,核物質など)の理論研究に従事。