

物理学で扱える天体～中性子星～

千葉隆司（物理学専攻 M1）

はじめに

初めまして、千葉隆司です。最近 Twitter で月報書く書く詐欺を繰り返していた人です。次に月報が出る頃には 2023 年になってしまうことに気づいたので、いい加減観念して筆を執ります。

さて、今回扱う話題は「中性子星」です。ほとんどの人が一度は耳にしたことがあるくらい名の知れた天体ですが、1967 年の観測的発見から半世紀以上経過した現在でも、天文学者・物理学者の頭を悩ませ続けている面白い研究対象でもあります。このコラムを通して、中性子星の奥深さの一端でも感じていただければと思います。

中性子星はもちろん天文学で扱うことのできる天体で、東北大学では天文学専攻の檜山和己助教が「高エネルギー天体・コンパクト天体」という視点から研究されています。同専攻の田中雅臣准教授は中性子星合体の研究に関わっています。この研究はこれまでの観測手法と重力波天文学を組み合わせた「マルチメッセンジャー天文学」の最前線を開拓する研究でもあります。

天文学の視点からの研究も興味深いですが、中性子星の研究は、天文学だけでなく、物理学サイドからも積極的に行われています。東北大学の原子核物理研究室（実験）の方々は陽子や中性子など「核子」の間にはたらく「核力」を調べることで、中性子星の性質を明らかにしようとしています。また、原子核理論研究室の古城徹准教授は素粒子の理論である「量子色力学」、富樫甫助教は核力の理論を元に中性子星を理解しようとしています。

一見天文学がカバーする対象に思える中性子星ですが、さまざまな分野を横断する最先端の研究がその謎に迫ろうとしている、非常に面白い対象です。それだけではなく、中性子星にまつわる物理学は、大学の学部学生が 4 年間で学ぶさまざまなエッセンスが詰まっています。このコラムでは、最先端の研究を述べるのではなく、4 年間で学ぶ物理学が中性子星の理解に使えることをお見せしたいと思います。

中性子星が生まれる瞬間 — 素粒子・核物理 —

中性子星は恒星の「最終形態」として実現します。太陽を含めた恒星は全て、核融合反応でエネルギーを生成しています。



ここでは水素原子核 4 つからヘリウム 4 原子核 1 つができる反応を示しました。この式からわかるように、核融合では軽い原子核を融合させ、重い原子核を生成しています。

この過程は発熱反応なのである程度の温度・密度があれば実現するのですが、実は ${}^{26}\text{Fe}$ ができてしまうとこの反応は必ず終わってしまいます。これは鉄原子核が「一番安定」な原子核だからです。

一度核反応が終わってしまうと、それまでにあった星の内部から外部へのエネルギー移動がなくなり、重力に対抗していた星を支える力が失われます。そのため、恒星は急速に収縮を始めることとなります。太陽質量の 10 倍以下の重さを持つ恒星はそもそも温度が足りず ${}^{26}\text{Fe}$ ができる前に核融合が終わり、比較的ゆっくりと「白色矮星」に変わります。一方でそれよりも重い質量を持つ恒星は、核融合の終末に ${}^{26}\text{Fe}$ を作り、自身の重さで急激に「重力崩壊」を起こします。その勢いによって鉄原子核に含まれる陽子が、漂っている電子を「捕獲」をして中性子に変わる反応が

起こります。



基本的に陽子と電子は同数ありますから、それらが全て電子捕獲反応を起こすと、残るのは中性子だけになります。このようにして作られたのが中性子星です。

パルサーとしての中性子星 — 古典力学 —

中性子は基本的に温度が非常に低く、光をほとんど発していません。しかし天体の一部領域から強いエネルギー（ジェット）が放出されることがあります。これが観測されたのは1967年のことです。大学院生だったS.J.Bellと指導教官A.Hewishは1.337秒ごとに強い信号が観測されることに気づきました。彼らは高速で回転する天体（パルサー）が、回転軸とは異なる方向に強い電磁波を放出していると考えたのですが、中性子星の半径は10km程度です。そのような天体が1秒余りで自転している状況を想像してみてください。そのような回転で崩壊しない天体は遠心力と釣り合うだけの強い重力で束縛されている必要があります。

このことを確認するために、半径 R の密度 ρ （一定）な天体が周期 $T = 1.3\text{s}$ で回転する際の条件を考えてみます。この計算は高校物理学の範囲でできるはずですが。

天体表面にはたらく遠心力は

$$F_{\text{遠心力}} = \rho R \omega^2, \omega = \frac{2\pi}{T} \quad (5)$$

であり、重力は

$$F_{\text{重力}} = G \frac{M\rho}{R^2}, M = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho \quad (6)$$

となります。ただし天体表面が天体自体から受ける重力は、天体の質量が中心に集中していると近似して計算しました。これら2つの力が釣り合うので、

$$\rho R \frac{4\pi^2}{T^2} = G \frac{1}{R^2} \frac{4}{3}\pi R^3 \rho^2 \quad (7)$$

$$\therefore \rho = \frac{3\pi}{G} \frac{1}{T^2} = \frac{3 \times 3.14}{6.67 \times 10^{-11} [\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}]} \frac{1}{(1.3[\text{s}])^2} \simeq 0.84 \times 10^{11} [\text{kg}/\text{m}^3] \quad (8)$$

となります。 1m^3 は 10^6cm^3 なので、 $\rho \simeq 0.84 \times 10^5 [\text{kg}/\text{cm}^3]$ でしょうか。かなり密度が高いことがわかります（Randall Munroeの本“*What If?*”によると、角砂糖サイズの中性子星に触れてしまうと、重力が強すぎて「指を離せない」事態に陥るそうです）。HewishとBellらはこのような強い重力で束縛される天体は中性子星しかないと考えました。

実際の原子核の密度は原子数によらずおよそ $2.5 \times 10^{14} \text{g}/\text{cm}^3 = 2.5 \times 10^{17} \text{kg}/\text{m}^3$ なので、上で求めた中性子星の密度はかなり低いことがわかります。実際の中性子星の密度は原子核密度のおよそ1.5倍です。

自由フェルミ気体としての中性子星 — 量子力学と統計力学、相対論 —

先ほどは重力と遠心力の釣り合いを考えましたが、全ての中性子星が高速で回転しているわけではありません。ではどのような力が重力と釣り合っているのでしょうか。

その答えは量子力学の知識から見出すことができます。中性子星を構成する中性子は「フェルミ粒子」です。つまり「同じ粒子は同じ状態をとることはできない」という「パウリの排他原理」に従っています。すなわち、フェルミ粒子である中性子を圧縮すると、パウリの排他原理によって反発力が生じるのです。これが重力に対抗する力になります。

少し計算をしてみましょう（統計力学を知らない方は少し難しく感じるかもしれません）。中性子星は基本的にゼロ温度状態にあり熱励起がなく、状態は最もエネルギーの低い状態から順に占有されていきます。中性子が持つ最大

の運動量（フェルミ運動量）を p_f と書くと、粒子数は座標空間・運動量空間における体積の積（位相空間の体積）で与えられます。

$$N = \frac{2}{(2\pi\hbar)^3} V \int_0^{p_f} 4\pi p^2 dp. \quad (9)$$

なお、 $(2\pi\hbar)^3$ は 1 つの状態が位相空間にシめる体積であり、これで割ることで状態の数を得ることができます。また、中性子が持つ「スピン自由度」を考慮して 2 がかかっています。

さらに、相対論ではエネルギーが $E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$ とかけるのですが、超相対論的（速度が十分早く、静止質量のエネルギーが無視できる）近似では $E = pc$ であることから、系のエネルギーは

$$E = \frac{2}{(2\pi\hbar)^3} V \int_0^{p_f} 4\pi p^2 dp pc \quad (10)$$

で与えられます。この 2 式からフェルミ運動量 p_f を消去するとエネルギーが空間体積 V と中性子数 N を使って

$$E = \frac{\hbar c}{3} \left(\frac{9\pi}{8}\right)^{2/3} \left(\frac{N}{V}\right)^{4/3} \quad (11)$$

と書けることがわかります。

さらに熱力学第一法則 $\Delta E = T\Delta S - P\Delta V$ から圧力は $P = -dE/dV$ と表されます。この圧力が重力による圧力

$$\frac{dP_G(r)}{dr} = -\frac{1}{r^2} GM(r)\rho(r) \Leftrightarrow P_G(r) = \frac{1}{2} \left(\frac{4\pi}{3}\right)^{1/3} GM(r)^{2/3} \rho^{4/3} \quad (12)$$

と釣り合う条件が、中性子星が自分の重力を支えることのできる条件になります。

ちなみにこの議論は重力エネルギーとパウリの排他原理によるエネルギーの和を最小にする、という枠組みでも議論することができます。そのように議論すると、中性子星のエネルギーが最小値を持つ半径 R が $R \neq 0$ となるために、中性子星の質量に上限が課されることがわかります。その値は太陽質量のおよそ 1.73 倍です。

このような計算は、中性子星が発見される前の 1930 年前後にレフ・ランダウとチャンドラセカールが独立に行っており、中性子星を初めて理論的に予言したと言われていました。またチャンドラセカールは高密度天体に存在する質量上限に「チャンドラセカール質量限界」として名を残しています。

今、研究者がしていること

1960 年代の中性子星発見から半世紀、中性子星の「質量上限」については原子核の理論を元にした議論が継続的になされてきました。そこでは質量上限が「太陽質量の 1.5 倍程度」という結論に至り、天文・物理の両領域に広く浸透していました。

しかし 2010 年に太陽質量の 2 倍の中性子星が発見されました。この発見は中性子星の常識を打ち破るものであり、それまでの研究に大きな示唆と危機を与えました。以来 10 年余り、理論・実験の両方がより良い中性子星の理解のために研究を続けています。詳しく知りたい方は以下の参考文献を読んだり、教員に話を聞いてみてください。

参考文献

- 「天体核物理と高密度 QCD 物性の新展開」（日本物理学会誌 Vol. 1, No. 1, 2021）
古城徹准教授が非専門家向けに書いた解説。天体物理学サイドの研究（重力波天文学など）についても言及しており、個人的におすすめ。これを読んでおけばある程度人に喋れるようになる。クォークの理論（QCD）についてはたくさん書いてあるが、核力の話は少なめ。
- 原子核物理研究室のウェブサイト (<http://lambda.phys.tohoku.ac.jp>)
毎年学部 3 年生向けに行われている研究室説明会の、ストレンジネス核物理グループの研究室紹介スライドが

おすすめ。ストレンジクォークの入った原子核をメインに扱っている研究グループだが、中性子星研究とのリンク（ハイペロン・パズルなど）についても比較的詳しく書いてある。田村裕和教授はこの実験分野の大御所だが、中性子星についてもかなり詳しく、色々と話してくれる。

- 「日本の核物理の将来レポート（2021年版）」

中性子星だけではなく、核物理学の実験・理論両方の現状・将来についてまとめたもの。中性子星についての直接的な言及はほとんどなかった気がするが、周辺領域についての情報が詳しく載っている。学部3・4年生ぐらいで読むのがちょうど良いと思う。