

# 中性子星の物性

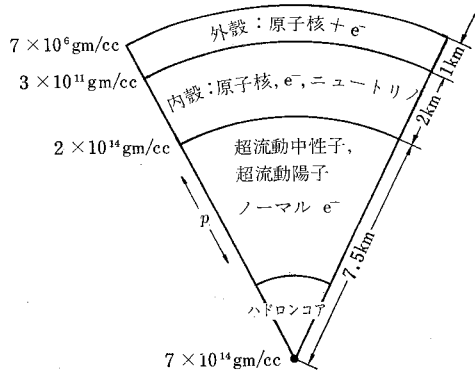
伊藤直紀\*

## 1. はじめに

天体物理学はいろいろの側面を持っており、それを研究する研究者の態度にも多様性があるのは、しごく当り前のことであろう。パルサーの発見に刺激されて、多くの原子核物理屋、物性物理屋、プラズマ物理屋が、この天体を精力的に研究するようになったのも十分の理由がある。本稿では、物性物理の側面から中性子星をながめ、中性子星がいかに物性物理的に興味ある天体であるかを読者と共に考え直してみたい。このようなわけで、本稿は純粋の天文畑の読者には少々なじみにくいものになるかも知れないが、そのことはあらかじめおことわりしておかなければならない。それらの読者が、本稿によって、新たな側面から天体物理をながめる可能性があることを知っていただければ、筆者として望外のしあわせである。また本稿では、筆者が特に興味をもっている中性子星の内部に話を限ることを、はじめにおことわりしておく。

パルサーの磁気圏や輻射機構に興味をお持ちの読者は、たとえば本誌第64巻(1971年)第8号の、一丸助教授の解説を参考にさせていただきたい。

ここに、中性子星の断面図(Pines教授による)をかかげて読者に中性子星の構造のあらましを知っていただく助けにしたい、内容のくわしい説明については、以下



第1図 中程度の質量の中性子星の断面図

\* Department of Physics, University of Illinois, Urbana, Ill. 61801 U.S.A.

(1973年9月以降: Cavendish Laboratory, Free School Lane, Cambridge, CB 23 RQ England)

Naoki Itoh: Solid State and Many-Body Physics of Neutron Stars

を読んでいただきたい。

## 2. 量子流体としての中性子星物質

まず「量子流体」ということばの説明からはじめよう。これは文字通り、量子力学的効果が大きくきいている流体を意味する。我々は、液体ヘリウム、金属中の電子、それに原子核が量子流体であることを知っている。ヘリウムには質量数が3の $^3\text{He}$  質量数が4の $^4\text{He}$ の2種類の安定な同位元素があり、液体 $^3\text{He}$ と液体 $^4\text{He}$ は低温で全く異なったふるまいをする。

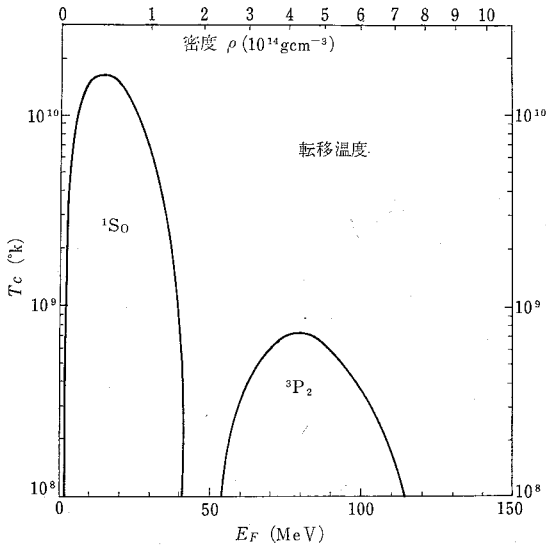
それでは、この宇宙の中に量子流体としては上にあげたもの以外に例がないのであろうか。答は「大あり」で、中性子星の内部では我々が地球上で経験したことのない形態の量子流体が存在するのである。第1図で見ていただくと、中性子星に内殻と呼ばれる領域があることがわかる。ここでは裸の原子核が結晶格子をくんでおり、その中を電子と中性子が自由に運動している。これは我々の知っている金属に似ているが、電子だけでなく、自由な中性子が結晶中を運動している点が、地上の金属と本質的に異なる。

さらに内部に入って行こう。密度が $2 \times 10^{14} \text{ gm/cc}$ のあたりで、ついに原子核は融けてしまい、中性子液体、陽子液体、電子液体の均一な混合相が実現する。中性子液体、陽子液体の混合相は原子核のモデルとして我々に、すでになじみ深い中性子星物質においては、陽子の中性子に対する存在比が極端に小さいこと(数%),電子液体が核子液体と共存することが、通常の原子核とは本質的に異なる点である。

これらの核子液体は、核子間の引力の相互作用により、超流動状態にあると考えられている。第2図に純粋の中性子液体の超流動転移温度を密度の関数として示す。(高塚氏の計算による。)

$E_F$ は中性子のフェルミ・エネルギーである。低密度側の曲線は $^1S_0$ 部分波の引力による超流動転移温度、高密度側のは $^3P_2$ 部分波の引力によるものである。パルサーの内部の温度は $10^9 \text{ K}$ より低いと考えられているので、パルサー内部の中性子液体は超流動状態にあると考えられる。また同じ理由で、陽子液体も超流動状態にあると考えられる。陽子は電荷をもっているので、陽子超流体はとりも直さず超伝導体であるといえる。

地上の実験室で我々が超流体として知っているものに



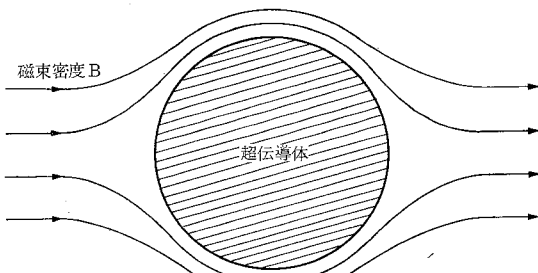
第2図 中性子液体の超流動転移温度

は、液体  ${}^4\text{He}$ 、超伝導体中の電子液体がある。また、原子核の性質のうちいくつかは、核子液体が超流体であるとするにより、うまく説明される。さらに、ごく最近、液体  ${}^3\text{He}$  が極低温で超流体になることを支持する実験が、いくつか報告されている。

3. 陽子超流体の Meissner 効果の可能性

それでは中性子星内部で核子液体が超流体になると、どのような現象が起ることが期待されるであろうか。まず第一に思い浮ぶのは、陽子超流体による Meissner 効果である。Meissner 効果とは実験室の超伝導体でよく知られているように、ある臨界磁場  $H_{c1}$  以下の外部磁場中におかれた超伝導体内部には外部磁場を打消す電流が流れ、このために表面領域を除いて磁束密度が超伝導体内部でゼロになる現象である。第3図にその概略を示そう。

臨界磁場  $H_{c1}$  を典型的な中性子星の場合について計算してみると  $10^{15}$  ガウス程度の値が得られる。したがって、単純に考えると、 $10^{15}$  ガウス以下の外部磁場に対しては、陽子超流体は Meissner 効果を示すように思わ



第3図 Meissner 効果

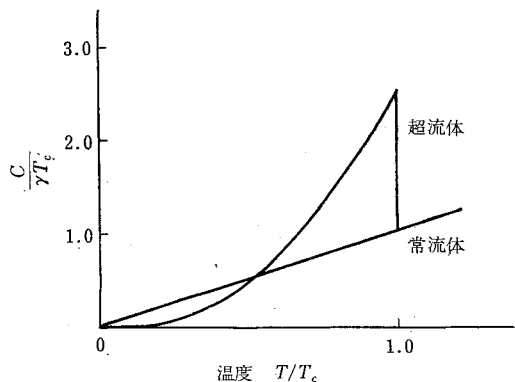
れるが、実は一つ見落していた重要な点がある。それはタイム・スケールの問題であって、超伝導体が磁束を外部に放り出すには、有限のタイム・スケールを必要とする。このタイム・スケールは超伝導体のサイズ  $R$  と常伝導相での電気伝導率  $\sigma$  の関数であるが、陽子超流体の場合には  $R, \sigma$  とともに非常に大きいので、タイム・スケールは  $10^{13}$  年の程度になる。(  $\sigma$  はこの場合、電子による単伝導相での電気伝導率で、電子・陽子ともに強く縮退しているために、非常に大きな値になる。)  $10^{13}$  年というタイム・スケールは宇宙の年齢  $10^{10}$  年よりも長く、もちろんパルサーの年齢とは比較にならないくらい長い。したがって実際のパルサーの内部では陽子超流体中に磁束が侵入しており、Meissner 効果は実現していないと考えられる。言いかえれば、陽子超流体は磁束の存在する準安定状態にあり、安定状態である Meissner 状態への転移時間は考えている時間に比べて問題にならない程度に長いのである。このようなわけで残念ながら、陽子超流体が中性子星の磁場に対して演ずる役割は、さほど劇的ではないことが明らかになった。

4. 核子超流体の熱的性質

物質の熱的性質は物性物理の一つの大きな研究分野であるが、中性子星の熱的性質も、天体物理の観点から大いに興味がある。核子の超流動性が中性子星の熱的性質にどのような影響を及ぼすかをここで考えてみよう。

1972年度のノーベル物理学賞は Bardeen, Cooper, Schrieffer 3博士の超伝導の研究に対して与えられたが、我々は核子超流体の比熱をこの BCS モデルによって調べて見よう。結果は第4図に示されているように、超流体の比熱は常流体のそれとたいへん異なったふるまいを示す。常流体の比熱は温度の一次関数になっているが、超流体の比熱は低温で指数関数的に小さくなる。この比熱の減少は中性子星の冷却を大いに早めることになる。

比熱と並んで物質の熱伝導率もたいへん重要な物理量



第4図 超流体および常流体の地熱

である。次に核子の超流動性が熱伝導率をどのように変えるかを考えてみよう。もし中性子液体・陽子液体とともに常流体であるとすると、中性子星物質中の熱流は、電子と中性子がほぼ同程度に運ぶことが、計算の結果導かれる。この際、電子は主に陽子によって、中性子は主に他の中性子によって散乱される。ところが、核子が超流体になると中性子の熱伝導への寄与は非常に小さくなる。また電子陽子散乱の頻度は小さくなり、電子・電子散乱が中性子星物質の熱伝導を支配することになる。これは電子が常流体として留まっていることによるのである。この結果、核子が超流体になると、熱伝導率は常流体の場合に比べて100倍程度よくなる。この100倍という値は、電子・電子散乱と、電子・陽子散乱の有効性の比から来ている。

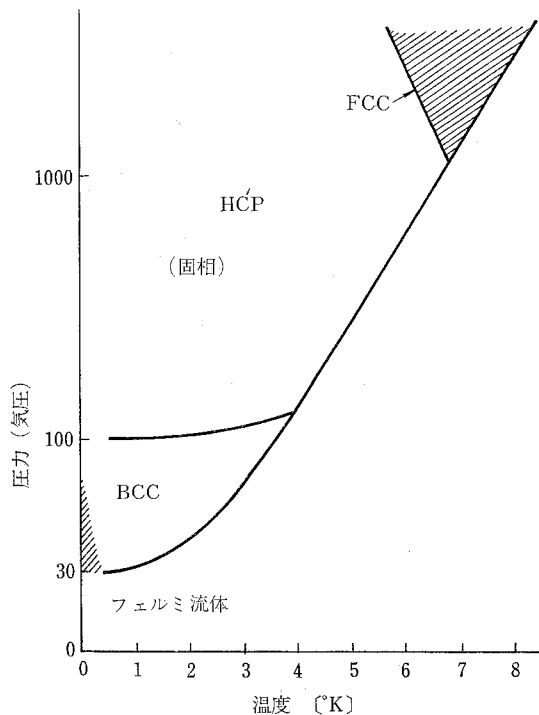
とまれ、中性子星の内部では、中性子液体・陽子液体・電子液体の3種の量子液体が共存していて、たいへん興味深いふるまいをする。原子核ももちろん中性子液体と陽子液体の混合相であるが、これ以外に、我々は地上の実験室において、液体 $^4\text{He}$ と液体 $^3\text{He}$ の混合量子液体の状態を実現している。中性子星内部の量子液体はこの意味で、我々の知っている第3の混合量子液体であり、(実際の原子核は液体というより液滴と呼ぶのが適当であろうが)各量子液体間の相互作用を研究するのは、物性物理的にもまことに興味深い。

## 5. 未解決の諸問題

今まで、我々は主に中性子液体、陽子液体、電子液体の共存する領域を考えてきたが、さらに高密度の領域ではどんなことが起っているであろうか。この領域は第1図でのHadronic Coreに相当する領域である。この領域での物理を定量的に論ずるのは、現在の段階ではたいへんむずかしいが、物性物理的にたいへん興味深い問題を二つ紹介しよう。

一つは中性子液体が高密度領域で固化する可能性についてである。この可能性は最初にP.W. Andersonたちによって指摘された。彼らは低温での $^3\text{He}$ が、低圧のもとでは液体としてとどまっているが、30気圧程度の圧力をかけると固化することに注目し、これからの類推で超高压下の中性子星内部では、中性子液体が固化するのではないかと考えた。第5図に $^3\text{He}$ の相図を掲げよう。BCC, HCP, FCCは結晶構造の名前である。

ただし、 $^3\text{He}$ の原子間のポテンシャルと中性子間の核力ポテンシャルの形はよく似ているが、異なっている点も多々あり、Andersonたちの類推が正しいかどうかは、大いに検討を要する。現在、もっともらしい核力のポテンシャルを用いて、多くの人々により計算がなされているが、完全な一致はまだ得られておらず、中性子液体の



第5図  $^3\text{He}$ の相図

固化の問題は未解決と言ってよいであろう。中性子星が固体の中性子コアをもつか、液体のコアをもつかでは、中性子星の弾性的ふるまいが大いに異なり、Pinesたちの星震(中性子星の地震)理論に大きな影響を与えることになる。ちなみに、Pinesたちの理論では、重い中性子星は、固体の中性子コアをもっている方が、パルサーの観測を説明しやすいことになっている。

もう一つの問題は、高密度領域で $\pi$ -中間子が存在するかどうかの問題である。 $\pi$ -中間子はボーズ粒子であるので、もしこれが中性子星内部で存在することが証明されれば、我々は地上の液体以外にもう一つのボーズ液体が実際、我々の宇宙に存在することを知ったことになり、たいへん興味深い。 $\pi$ -中間子が、中性子星内部で存在するとすれば、それは $\pi$ -中間子と中性子との間の $P$ -波の引力によると考えられているが、 $\pi$ -中間子凝縮を証明する満足すべき理論計算はまだなされていない。

以上見て来たように、中性子星は物性物理的にもたいへん興味深い対象である。とくに中性子星内部の話は観測との対応をつけることがむずかしいが、観測の充実と理論の発展により、定量的に理論のテストをできる日が来ることを読者と共に待ち望みたい。Pinesたちの理論もまだまだ荒っぽい理論であるが、積極的に理論と観測を結びつけるようとする意図を大いに評価し、この方向で理論と観測の緊密な関係が深まることを期待して、この稿を閉じることにしよう。