

# 若手研究者の研究計画「極限天体の物理学」研究チーム 高密度物質中の相転移現象——強結合領域の多体問題研究

COE研究員採択予定者（現・理化学研究所基礎科学特別研究員） 飯田 圭

中性子星内部の平均密度は $1\text{cm}^3$ 当たり10億トンにもなります。私は、中性子星内部のような高密度状態における物質の振る舞い、特に相転移現象を研究してきました。私の研究のキーワードは、粒子同士が強く結び付いた状態「強結合」です。ここでは、私がどのような研究アプローチをとってきたか、およびいくつかの具体的なトピックスを紹介します。

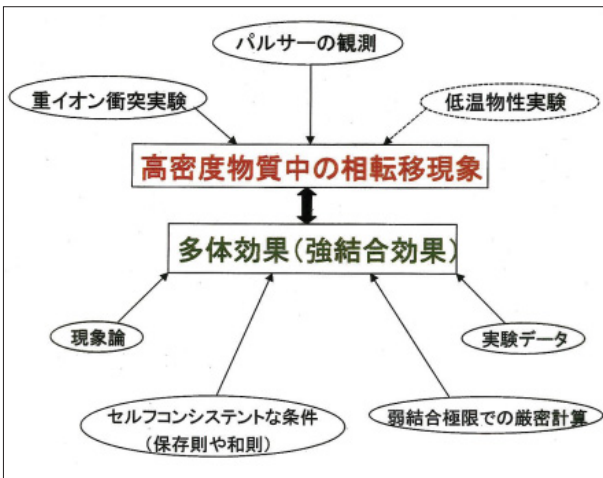


図1：研究のアプローチ

## 高密度物質中の相転移とは

相転移とは、例えば水（液相）が氷（固相）へと変わることで、物質の状態ががらりと変化することです。高密度物質中ではさまざまな相転移現象が見られます。私は相転移現象の中でも、クォーク物質中で起きる超流動転移や、核物質中の組成や形状の変化を、最近のテーマとしています。一方で電子液体の強磁性転移といった物性物理の基本問題にも携わってきました。

近年、重イオンの衝突実験によって、不安定核の構造や、核物質中における液相・気相転移、クォークやグルーオンが自由に飛び回るクォーク・グルーオン・プラズマ相への転移について徐々に明らかにされつつあります。また、電波パルサーやX線連星系の観測によって、中性子星の内部構造や進化のことも分かってきました。これらが、私が高密度物質中の相転移現象の研究に携わるようになった直接の動機です。一方で、超流動や量子核生成などの低温の物性実験にも強く影響を受けています（図1）。

一般に、高密度物質中の相転移現象はたくさんの粒子がからみあう「相関」によって引き起こされるため、厳密な計算によってその振る舞いを明らかにすることは困難です。したがって、個々の対象・問題に適切な

## 3次元強結合縮退フェルミ多体系における相転移現象

温度：縮退領域 ( $k_B T \ll E_F$ )  
 密度：強結合領域 ( $E_F \ll U_{int}$ )  
 非相対論的領域 ( $mc^2 \gg E_F$ ) vs. 相対論的領域 ( $mc^2 \ll E_F$ )

|            | 高密度物質                               |                                    | 量子凝縮系  |   |
|------------|-------------------------------------|------------------------------------|--|---|
|            | 核物質                                 | クォーク物質                             | 電子液体   | 液体 $^3\text{He}$                          |
| 密度         | $\sim 10^{11-15} \text{ g cm}^{-3}$ | $> \sim 10^{15} \text{ g cm}^{-3}$ | $< \sim 10^{24} \text{ cm}^{-3}$             | $\sim 0.1 \text{ g cm}^{-3}$              |
| 温度         | $< \sim 10 \text{ MeV}$             | $< \sim 100 \text{ MeV}$           | $< \sim 100 \text{ K}$                       | $< \sim 1 \text{ K}$                      |
| relativity | mild                                | extreme                            | none   | none                                      |
| 主な相転移      | 液相気相転移<br>核組成・形状変化                  | カラー超伝導転移<br>閉じ込め転移                 | 強磁性転移<br>固化転移                                | $^3\text{He}$ - $^4\text{He}$ 混合液<br>の相分離 |
| 経験的知見      | 中性子星・重力崩壊<br>原子核・重イオン衝突             | 中性子(クォーク)星？<br>重イオン衝突・K束縛核？        | $\text{Ca}_{1-x}\text{La}_x\text{B}_6$<br>金属 | 低温実験                                      |

図2：研究テーマ

アプローチをとることが重要です。例えば、超流動現象を記述するギンツブルグ・ランダウ理論や、原子核を記述する液滴モデルのような現象論を使ったり、微視的な近似理論が満足すべき保存則や和則といったセルフコンシステントな条件を導くといったアプローチが重要になってきます。あるいは、境界条件をおさえるのに役立つ弱結合極限における厳密計算や計算機実験を含む実験データを活用することで、高密度物質中のたくさんの粒子が引き起こす「多体効果」の解明を進めてきました。

私が対象としているのは、粒子同士が強く結合した、3次元縮退フェルミ多体系です。縮退フェルミ多体系は、高密度物質中や量子凝縮系において発現していると期待されています。具体的には、高密度物質である核物質とクォーク物質、量子凝縮系である電子液体と液体ヘリウム3における相転移現象を研究しています(図2)。

研究対象となる密度や温度領域は、それぞれの系によってかなり違います。質量とフェルミエネルギーの大小関係からうかがい知ることができる相対論の効果も、系によってさまざまです。例えば、質量が小さいアップクォークやダウンクォークからなるクォーク物質では、相対論的效果がとて強くなります。その相対論的效果が、超流動転移に影響を与えたりするのです。粒子間の相互作用の性質によって、問題となる相転移もさまざまです。

図2に示した相転移現象はいずれも、実験や観測ができる可能性のあるものです。といっても、極低温や重イオン衝突など極端な条件設定が施された実験や、中性子星のような超高密度天体の観測が必要になってきます。

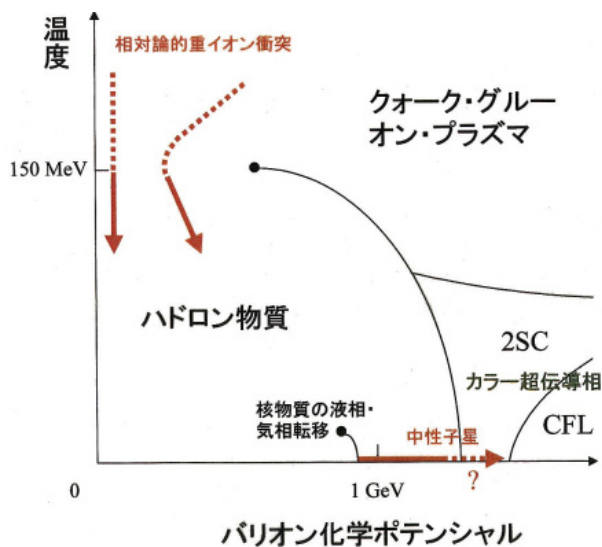


図3：高密度物質の相図

## 高密度物質の状態方程式を探る

個々の相転移現象を見てみましょう。まずは、高密度物質である核物質とクォーク物質についてです。原子核を作る陽子と中性子は、基本的にはクォークが3つ集まってできています。陽子や中性子など、クォークからなる粒子を「ハドロン」と呼びます。ハドロンの集まってできている物質が「核物質」です。自然界に存在する普通の原子核の密度はほぼ一定で、「標準原子核密度」といいます。核物質の密度をどんどん高くしていくと、ハドロン同士がくっついて、物質全体がクォークで埋めつくされた状態になると考えられています。それが「クォーク物質」です。

核物質とクォーク物質の相図の概容を見てみましょう(図3)。ハドロン同士、クォーク同士の相互作用がとて強いため、理論的に相図を明らかにすることは非常に困難です。例えば、クォーク間に働く力を記述する量子色力学(QCD)の計算機実験や重イオン衝突実験、パルサーの観測などによって、ある程度の知見は得られるかもしれませんが、より高密度領域になるほど知見は限られてきます。

しかし最近になってドイツのGSI(国立重イオン科学研究所)において新しい重イオン衝突実験が計画され、日本でもKEK(高エネルギー加速器研究機構)においてハドロンの一種であるK中間子が束縛されたエキゾチックな原子核を探るための実験が計画されています。このような実験により、高密度領域の知見が得られると期待されています。

高密度物質の相図を理解するには、温度・圧力・体積などの関係を記述する状態方程式を知ることが必要です。しかし、標準原子核密度近傍の核物質においてすら、正しい状態方程式を導くのに十分な知見が得られているわけではありません。図4は、核物質のさまざまな状態方程式の振る舞いを示しています。縦軸は核物質のエネルギー、横軸は密度です。中性子と陽子の数が同じもの( $\alpha=0$ )から、中性子の数が次第に増えていき( $\alpha=0.3$ ,  $\alpha=0.5$ ,  $\alpha=0.8$ )、中性子だけからなる核物質( $\alpha=1$ )までのエネルギーを実線で示しています。点線は、エネルギーの最小点(飽和点)をつないだ、飽和曲線です。この飽和曲線の傾きと、飽和点近傍の曲率を決める核物質の圧縮率が、それぞれのパネルにおいて異なる値になっています。

ここで問題なのは、どの状態方程式から原子核の巨視的なモデルを作って安定核の質量や大きさを計算しても、実験データを同様によく再現してしまうことです。これでは、どれが正しい状態方程式か分かりません。今後は、既存の実験データのみならず、将来の実験で測定される不安定核、特に陽子より中性子の数の

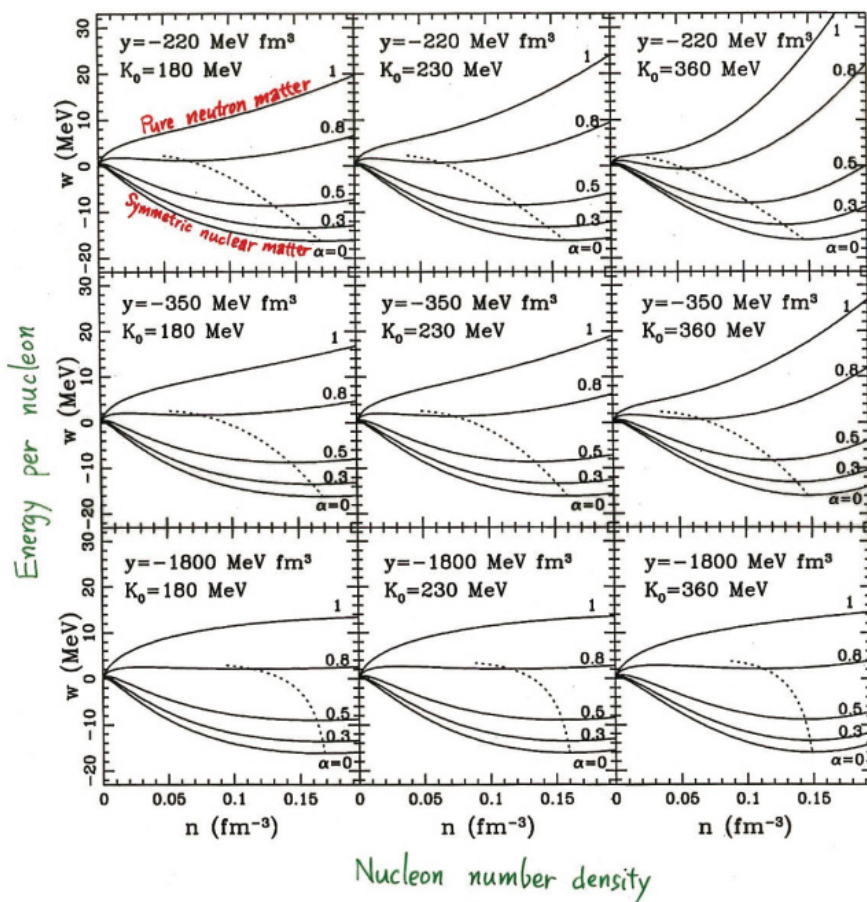


図4：核物質のさまざまな状態方程式 EOS of nuclear matter at T=0  
Oyamatsu & Iida, Prog. Theor. Phys. 109 (2003) 631

ほうが極端に多い、重たい不安定核のデータを用いて、これらの実験データをよりよく記述できる、正しい状態方程式を絞り込んでいきたいと考えています。

### 中性子星の内部はどうなっているのか

核物質の状態方程式が分かると、中性子星内部のこともよく分かるはずですが、そこで中性子星の内部を予想してみましょう（図5）。中性子星の外側から内側に行くにつれて、密度が急激に高くなっていきます。それに伴って物性も変わっていくのです。一番外側では、電子とイオンがばらばらになったプラズマが主役を演じます。内側に入っていくとイオンにおいて完全に電離が進み高密度の電子のガスができます。その中で原子核がクーロン力で格子を作ります。

さらに内側について密度が上がると、電子の化学ポテンシャルが中性子と陽子の静止質量差くらいになると、原子核の中で中性子の数が陽子より非常に多くなる「中性子過剰化」が起こります。中性子過剰化がどんどん進んでいって、あるところで原子核のポテンシャルから中性子がこぼれ落ちてしまう状況になります。さらに密度が上がっていき、系全体が普通の原子核の密度（標準原子核密度）くらいになると、原子

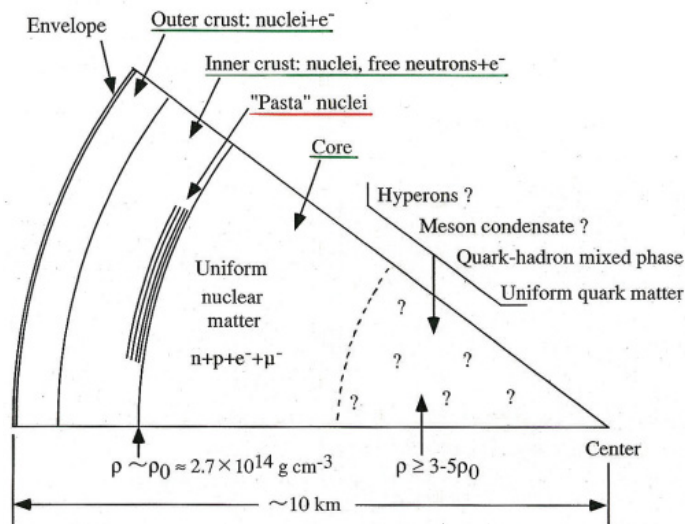


図5：中性子星の断面予想図

核同士がくっつき合うようにして一様化してしまいます。その一様化した核物質が、中性子星の構造を主に担っていると考えられています。

### 中性子星の中で原子核がスパゲッティ状になる？

大変面白いことに、一様化の過程で原子核が変形す

る可能性が指摘されています（図6）。例えば、棒状や板状の原子核ができるということです。その形がスパゲッティやラザニアに似ていることから、「パスタ原子核」と呼ぶ人もいます。なぜパスタ原子核ができるのでしょうか。原子核同士がひしめき合う状況では、球状のままではより、棒状になったほうが全表面積を減らすことができ、エネルギー的に“得”になるからです。しかし表面積が減ればどんな形でもよいわけではなく、クーロン力も働くためにパスタの形になると予想されるのです。パスタ原子核が存在する密度領域を正確に知るためには、核物質に陽子がどれだけ含まれるかなどの性質が分からないといけません。中性子が極端に過剰な不安定核の性質を説明できる状態方程式が得られると、パスタ原子核が存在する領域の密度も推定することができます。

### 中性子星の中心部は カラー超伝導状態か？

中性子星の内部をさらに進んでいきましょう。さらに密度が上がっていき、星の中心領域にさしかかります。実は、そこで何が起きているのか、いまだによく分かっていません。1つの可能性として、クォーク物質があるのではないかと、かなり古くから指摘されていました。最近になって、クォーク物質において「カラー超伝導状態」が発現しているのではないかとはいわれはじめました。電磁気力はプラスとマイナスの2

種類の電荷が引き合って中和しますが、クォーク同士に働く強い相互作用では3種類の荷が引き合って中和します。それぞれの荷は光の3原色である赤、青、緑にたとえられ、「カラー電荷（色荷）」と呼ばれます。ふつうの超伝導は、電気抵抗がなくなる現象ですが、カラー超伝導は、抵抗なく色荷が流れる現象です。

カラー超伝導状態が示す主な現象は、2つあります。1つ目が「超流動性」です。カラー超伝導状態ではフェルミ面近傍においてクォークとクォークがクーパー対を作り、それらが1つのエネルギー状態に落ち着く結果、系全体にわたり位相がそろった状態になります。これを「凝縮」といいます。普通の流体は、各粒子がばらばらに運動するので粘性を持ちます。ところが、カラー超伝導状態では、粒子が勝手に動けず、粘性がなくなる流体成分が存在します。その結果、いったん流れを作ると永久に流動を続ける、超流動性を示すこととなります。

カラー超伝導状態が示すもう1つの現象は「カラーのマイスナー効果」です。色荷に伴いカラー磁場が発生します。カラー磁場には8つの種類があるのですが、外部からカラー磁場をクォーク物質にかけた場合、少なくとも1種類のカラー磁場を排斥する性質が、カラーのマイスナー効果です。ただし、このような実験をハドロンからなる現実の世界で行うことはできません。あくまでも思考実験です。

通常の超流動系と比較してみましょう（図7）。非常

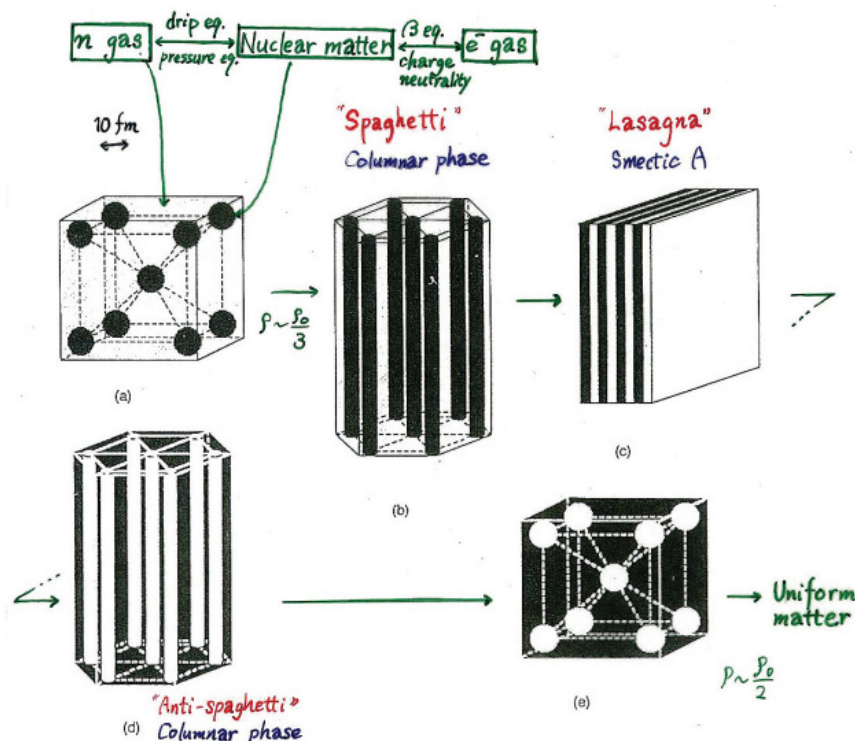


図6：パスタ原子核  
Oyamatsu, Nucl. Phys. A561 (1993) 431

に密度の高いカラー超伝導体に特徴的な点は、クォーク同士が対になるように働くペアリング相互作用が「長距離力」であることです。これは、クォーク物質が相対論的なプラズマ状態にあることに起因しています。そこでは色荷によるクーロン相互作用のみならず、カラー磁場による相互作用も効いてきます。真空中ではともに長距離力です。プラズマ中ではクーロン相互作用はデバイ遮蔽によって短距離力となりますが、磁場の相互作用は、デバイ遮蔽が効かないため、長距離力としてペアリング相互作用を支配します。

カラー超伝導体のもう一つの面白い特徴は、いろいろなペアリングのパターンが可能となることです。これは、クォークが「カラー」や「フレーバー」と呼ばれるいろいろな性質を帯びていて、各性質においてさまざまな状態をとり得る内部自由度を持っているからです。この状況は、クーパー対がさまざまなスピン、軌道状態を取り得るヘリウム3の超流動体と酷似しています。

カラー超伝導体の磁場への応答も興味深い点です。クォークはカラー荷のみならず、電荷も帯びています。電磁気力の磁場を排斥する通常のマイスナー効果も起こります。電磁気力の磁場とカラー磁場が混じり合う結果、マイスナー効果が部分的にしか起こらない場合が生じます。このような面白い特徴を備えているのが、カラー超伝導体なのです。

### 電子液体の性質

次に密度を思い切り下げて、電子系の話をしたしたいと思います。電子同士が強く相互作用している電子液体における磁気転移と固化転移に関する相図を見てみましょう(図8)。縦軸が温度、横軸が密度です。電子の密度が高い状態では、フェルミエネルギーに比べてクーロン力による相互作用エネルギーは非常に小さくなります。しかし密度が下がると、マイナスの電荷が斥け合う「クーロン斥力」の効果が強くなります。すると、スピンの向きをそろえたほうが、エネルギー的に安定になる可能性がでてきます。さらに密度が下がるとクーロン斥力が非常に強くなって、各電子は格子点に局在したほうが、エネルギー的に安定になります。いわゆる、「ウイグナー結晶」の状態になります。

通常、アルカリ金属の伝導電子系の密度は高く、図8の右外側の領域になります。ところが、最近話題になっている6ホウ化カルシウムにランタンをドーブ(添加)した物質(Ca<sub>1-x</sub>La<sub>x</sub>B<sub>6</sub>)では、通常の金属よりも密度が低い伝導電子系ができていといわれています。面白いことに、この物質は磁石のように磁気を持つ「強磁性体」となることが観測されています。しか

| ペアリング相互作用の性質          |           |     |       |
|-----------------------|-----------|-----|-------|
|                       | 主な起源      | レンジ | 弱結合理論 |
| 高密度カラー超伝導体            | 1グルーオン交換  | 長距離 | ○     |
| 低密度カラー超伝導体—2フレーバーの場合— | インスタントン   | 短距離 | △     |
| 超流動 <sup>3</sup> He   | スピンゆらぎの交換 | 短距離 | ×     |
| 通常の超伝導体               | フォノンの交換   | 短距離 | ○     |
| 原子核内の中性子超流体と陽子超流体     | 中心力       | 短距離 | △     |

|               | 内部自由度 (カラー-フレーバー) | 磁場と回転への応答特性     | 磁場への応答     | 回転への応答 |
|---------------|-------------------|-----------------|------------|--------|
| カラー超伝導体—CPL相— | 部分的マイスナー遮蔽        | 渦糸も生成(II型の場合のみ) | 超流動渦糸格子の生成 |        |
| カラー超伝導体—QSC相— | 部分的マイスナー遮蔽        | 渦糸生成はII型の場合のみ   | ロンドン磁場の生成  |        |
| 液体 He II      | マイスナー遮蔽なし         | 渦糸なし            | 超流動渦糸格子の生成 |        |
| 通常の超伝導体       | マイスナー遮蔽           | 渦糸生成はII型の場合のみ   | ロンドン磁場の生成  |        |

図7: 超流動系の比較 (「日本物理学会誌」57 (2002) 883)

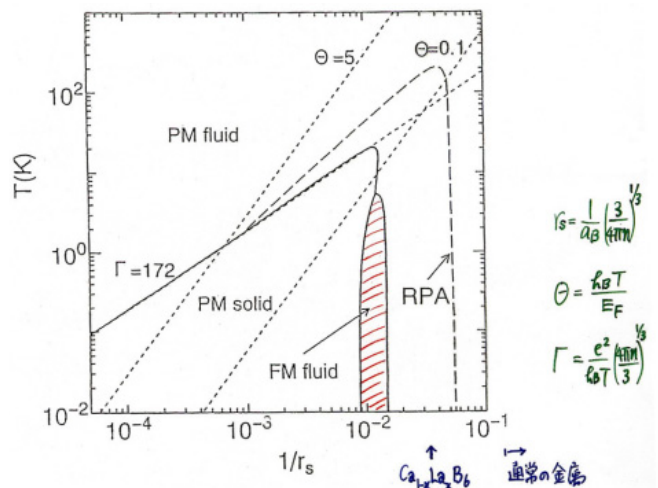


図8: 電子液体の相図  
境界線は量子限界と古典限界のモンテカルロ計算を再現するように、なおかつ、圧縮率に関する和則を満たすように作られた近似理論による計算結果。  
Iida & Ichimaru, Phys. Rev. B52 (1995) 7278

も強磁性が現れる温度は数百Kにまで及びます。これは、もうフェルミ温度と同じくらいです。この高温強磁性の起源は、電子液体の性質で解釈できる、というのが従来の見方でしたが、系に混入した鉄の不純物がこの高温強磁性の原因であるという解釈が有力のようです。

### 量子核生成現象

最後に紹介したいトピックは「量子核生成」です。これは、一次相転移のダイナミクスに関係した問題です。ある相が完全に安定でいられなくても、準安定相として存在できる状況があります。0°C以下でも凍らずに液体状態にある水などの過冷却状態や、水蒸気の過飽和状態がその例です。

核物質からクォーク物質への相転移の場合には、圧

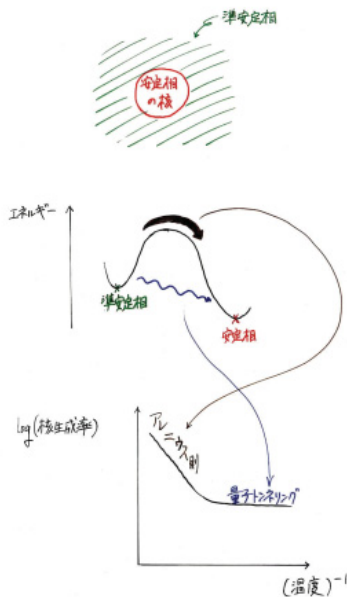


図9：量子核生成

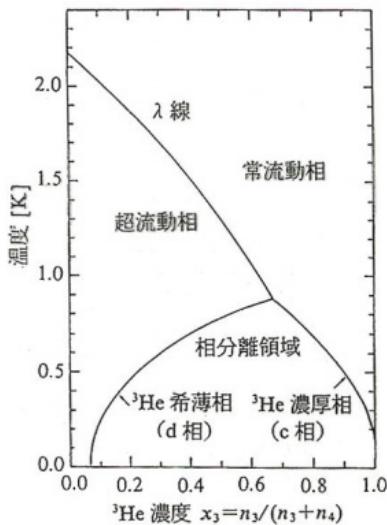


図10：ヘリウム3、ヘリウム4混合液の飽和蒸気圧下での平衡状態相図

佐藤 (武) ・高木 「日本物理学会誌」 Vol. 50, No. 30, 1995

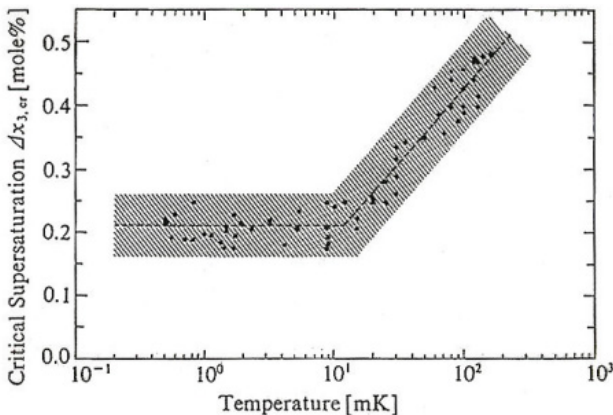


図11：臨界飽和度  $\Delta\chi_{3,cr}$  の温度依存性  
ハッチングと点線はeye-guideである。

佐藤 (武) ・高木 「日本物理学会誌」 Vol. 50, No. 30, 1995

力がかかりすぎて準安定相となった核物質の中で、クォーク物質という安定相の“核”が生ずるところから一次相転移がスタートすると考えられています(図9)。一次相転移が完了するためには、この核が準安定相と安定相の間にあるエネルギー障壁をクリアーして成長しなければいけません。成長する核の生成率は、高温側ではエネルギー障壁を熱的に乗り越えることによってクリアーするため、「アレニウス則」に従います。アレニウス則とは、温度が高くなると指数関数的に反応率が增大するという化学反応の規則です。一方、低温側では、量子トンネリング(トンネル効果)が起きます。ここでのトンネル効果とは、量子の世界においてある確率で粒子がエネルギー障壁を通り抜ける現象が、巨視的な世界において現れたものです。したがって温度によらない核生成率が得られるのです。これが、量子核生成現象です。

量子核生成の実例としては、ヘリウム3とヘリウム4の混合液の相分離現象があります(図10)。横軸がヘリウム3の濃度です。ヘリウム3の濃度を低い状態からどんどん高くしていくと、いずれはヘリウム3希薄相と濃厚相の相分離領域に入りますが、実際には相分離を起ささない。ある臨界的な過飽和度に至ったところで、ようやく相分離がスタートします。臨界過飽和度の測定値を縦軸に、温度を横軸にとったものが図11です。低温側では、臨界過飽和度が温度によらない状況が示されています。これは、量子核生成現象として理解されています。もう一つ面白いのは、高温側です。もしアレニウス則に従うのなら、グラフは下向きになると考えられるのですが、むしろ上向きです。これには、エネルギーや物質が拡散していく「散逸過程」がかかっているのではないかとされています。この問題も、いまのところ決着が付いていません。

いろいろなトピックスを紹介してきましたが、未解決の問題が多く残されています。特にクォーク物質に関しては、分からないことだらけです。クォーク物質の研究で重要なことは、クォーク物質が実際に存在するとしたらどういう状況なのかを想定することだと思います。すると、強結合あるいは有限系、という難題が立ち上がるはずで、とっつきにくいテーマかもしれませんが、これらの諸問題に関心のある方、特に若い方、ぜひ声をかけていただければと思います。