



Title	Stability of strange matter with chiral symmetry breaking
Author(s)	安井, 繁宏
Citation	大阪大学, 2004, 博士論文
Version Type	
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/45612">https://hdl.handle.net/11094/45612</a>
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 <a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">〈a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed"〉</a> 大阪大学の博士論文について <a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">〈/a〉</a> をご参照ください。

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

氏名	安井 繁 宏
博士の専攻分野の名称	博士(理学)
学位記番号	第 19018 号
学位授与年月日	平成 16 年 9 月 30 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当 理学研究科物理学専攻
学位論文名	Stability of strange matter with chiral symmetry breaking (カイラル対称性の破れを伴ったストレンジ物質の安定性)
論文審査委員	(主査) 教授 土岐 博 (副査) 教授 東島 清 教授 岸本 忠史 助教授 板橋 隆久 助教授 保坂 淳

### 論文内容の要旨

QCD の物理の研究対象はバリオンやメソンなどのハドロン粒子だけではなく、クォークグルーオンプラズマ等のクォーク物質にまで広がっている。宇宙初期、重イオン衝突実験やコンパクト天体など、高温・高密度の状況においてクォーク物質が実現されると期待されている。u、dクォークのみならずsクォークも含むストレンジ物質は、原子核よりも安定である可能性が指摘され、宇宙の暗黒物質の候補として議論されてきた。しかし、従来のストレンジ物質に関する理論研究はカイラル対称性の自発的破れに関連するクォークの非摂動ダイナミクスが考慮されていなかった。

申請者はカイラル対称性の自発的破れを考慮して、ストレンジ物質の安定性を議論した。このとき、sクォークによる自由度の増加に伴うエネルギーの減少と大きなダイナミカル質量の競合が一つの焦点となる。

クォークの有効理論として南部-Jona-Lasinio (NJL) モデルを用いた。平均場近似により、有限密度におけるカイラル対称性の自発的破れの議論を行い、また、状態方程式よりクォーク物質の安定性を議論した。この結果、有限密度におけるカイラル対称性の回復によって減少するダイナミカル質量と増加する運動エネルギーの釣り合いによって、クォーク物質は安定に存在することが示された。ただし、sクォークはu、dクォークに比べて大きなダイナミカル質量を持つので、ストレンジ物質はudクォーク物質に比べて不安定であることが示された。これは、ストレンジ物質が安定であるという従来の議論とは大きく異なる。

次に、自然界においてクォーク物質やストレンジ物質が存在する可能性を探るために、有限なバリオン数のストレンジ物質であるストレンジレット、及びストレンジ物質を含むコンパクト天体であるストレンジ星について、カイラル対称性の破れの観点から議論した。

ストレンジレットの議論において、カイラル対称性の破れを考慮するため NJL モデルを用い、またストレンジレットにクォークが閉じこめられているという条件を考慮するため、ストレンジレット表面において境界条件を課した。その結果、バリオン数が数百~千以下のストレンジレット中のsクォークのダイナミカル質量が小さくなり、そのようなストレンジレットが安定に存在することが示された。また、観測量として、 $0.05 [e \text{ GeV}^{-1}]$  程度の小さな電荷質量比を得た。これは宇宙線において観測されたいくつかの報告と整合性がある。

ストレンジ星の議論において、NJL モデルより得られた状態方程式をもとに、一般相対論的な重力場の方程式である Tolman-Oppenheimer-Volkov 方程式を解いて、ストレンジ星の質量や半径を求めた。その結果、ストレンジ物質はクォーク星の中心部にのみ存在することが示された。また、ストレンジ星の最大質量  $1.3-1.4 M_{\text{sun}}$ 、8 km 以下の半径を得た。これらの値は、クォーク星の候補のコンパクト天体の観測値として報告されている値と矛盾しないことがわかった。

## 論文審査の結果の要旨

現在我々が観測するハドロン物質は、クォーク・反クォーク対からなるメソンとクォーク 3 個からなるバリオンを構成要素にして、殆ど全ての場合それらの多体系として存在している。一方、量子色力学 (QCD) によれば、ハドロンとしていくつもの数からなるクォーク多体系の存在が予想されている。昨年発見されたペンタクォーク粒子はその最初の例であるが、さらなるクォーク多体系としてクォークナゲットやクォーク星等が考えられている。ハドロン物質の存在形態から QCD の非摂動ダイナミックスの機構を明らかにする上で、また、宇宙の暗黒物質の一つの候補として、クォーク物質の研究は重要である。特にストレンジクォークを含むストレンジレットは、1984 年以來 Witten を初めとする多くの研究者の興味を集めてきた。

安井君は今回の博士論文で、少数系のストレンジレットから巨視系のストレンジ星を対象に、ストレンジ物質の安定性に関する一貫した研究を行った。南部-Jona-Lasinio (NJL) 模型を採用し、物質中におけるカイラル対称性の自発的な破れと回復のダイナミックスを考慮した議論を展開した。従来の研究は、多くの場合 MIT bag 模型を用いた簡単な解析に基づいていたが、そこではカイラル対称性の問題は考慮されていなかった。カイラル対称性はハドロンの性質を知る上で極めて重要なことから、この研究の重要性を認めることができる。

ストレンジレットの研究では、有限サイズの効果を境界条件として取り込み、NJL 模型から導かれる状態方程式を self-consistent に解いた。有限系におけるこのような計算は安井君が初めて行ったものである。その結果、カイラル対称性の自発的な破れの効果によって、s クォークの構成質量が ud クォークの質量より大きくなること、従ってストレンジレットは ud クォークナゲットに比べ重くなることを示すことができた。しかし、このストレンジレットは、多くのフレーバー数変化を伴う弱崩壊確率が実質的にゼロであることから、一端形成されれば安定に存在しうることを示した。さらにストレンジレットの電荷/質量比を求め、質量数が数百の近傍では 0.05 程度であること、これは、宇宙線の観測で見られているいくつかの報告例と矛盾しないことを示した。

クォーク星の研究では、同じ NJL 模型の状態方程式を Tolman-Oppenheimer-Volkov 方程式に適用し、星の質量、密度分布、半径等の量を計算した。その結果、クォーク星は太陽と同程度の質量をもち、その半径が数キロ程度、中心密度は核密度の 10 倍程度であることがわかり、Chandra による 2002 年の観測と矛盾しないことがわかった。しかし、ストレンジクォークは星のクォーク数のうち 10% 以下にとどまることを示した。

本研究で安井君はストレンジ物質というクォーク多体系を、少数系からマクロな系に至るまで一貫して同じ状態方程式を用いて考察した。その際、カイラル対称性の自発的な破れの効果と、有限系における境界の効果を検討した。その結果、ストレンジレットからストレンジ星に至るまでの安定性とその性質を議論することが出来た。カイラル対称性の自発的な破れの重要性が明らかになり、従来の簡単なバッグ模型による考察は見直される必要があるだろう。

ストレンジ物質を軽いものから重いものまで NJL 模型というハドロン物理の現実的な有効模型によって記述し、それが安定に存在できることを理論的に示した点は重要である。NJL 模型に含まれるパラメータは 2 つしかなく、それらはパイ中間子の性質によって完全に決定されるので、今回の理論計算は実質上パラメータのないものになっている点も重要である。現在までにクォーク物質が存在する確固とした証拠はないものの、その存在と安定性を信頼できるハドロンの模型によって議論しきった点は、今後ハドロン物質の新しい存在形態を追及する上で、重要な指針を与えてくれると期待できる。このような研究の成果は高く評価することが出来る。

以上のことから、博士 (理学) の学位論文として十分価値のあるものと認める。