

氏 名	やす ひら まさ とみ 安 平 正 臣
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 2296 号
学位授与の日付	平 成 13 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研究科・専攻	理 学 研 究 科 物 理 学 ・ 宇 宙 物 理 学 専 攻
学位論文題目	K 中間子凝縮相の発現に伴う原始中性子星の遅延崩壊

論文調査委員 (主 査) 教 授 堀 内 昶 教 授 九 後 太 一 教 授 國 広 悌 二

論 文 内 容 の 要 旨

超新星爆発後に誕生した原始中性子星においては、高温でニュートリノを捕捉した状態の核物質が存在する。その後ニュートリノを放出し冷えていき、低温の中性子星に進化する。この過程で核物質の状態方程式が変化し、もはや重力に抗し得なくなった時重力崩壊を引き起こしてブラックホールになる現象が、遅延崩壊と呼ばれる現象である。

申請論文は核物質中で起こると考えられている相転移の一つである K 中間子凝縮を取り上げ、この相転移が原始中性子星内部で発生しうのかどうか、また発生したとすれば遅延崩壊が可能になるのかどうかを議論したものである。核物質中での Bose-Einstein 凝縮である K 中間子凝縮の問題は温度 0 の状況でよく調べられており、ストレンジネスの自発的発生、カイラル対称性の回復、クォーク物質への変化など理論的にも興味深い内容を含んでいる。

申請論文ではまず微視的な立場から有限温度、ニュートリノを捕捉下での K 中間子凝縮相の状態方程式が導出される。カイラル対称性を基礎にした非線形ラグランジアンを用い、虚時間形式の経路積分の方法で熱力学ポテンシャル、状態方程式を導出し、まず相図によって相転移に対する温度効果、ニュートリノ捕捉の効果を明らかにした。その結果、温度効果、ニュートリノ捕捉の効果共に相転移をさまたげ、その効果の大きさはほぼ同程度であることがわかった。温度効果は熱ゆらぎにより秩序が乱されることによるもので一般的な効果だが、ニュートリノ捕捉の効果は核物質内での K 中間子発現の機構と関係しており、電子が K 中間子とニュートリノに変化する反応確率がニュートリノの存在によって抑圧されるせいであり、低温でもすでに大きく寄与することが特徴である。その後この結果を用いて一般相対論に基づくコンパクト星の構造決定方程式 (TOV 方程式) を数値的に解くことにより K 中間子凝縮を含む原始中性子星の特徴を明らかにした。このとき原始中性子星の中心密度は非常に高くなり、その最大質量は温度効果よりもニュートリノ捕捉の効果のほうに顕著に依存することがわかった。とくに十分多くのニュートリノが捕捉されている場合には、 K 中間子凝縮がほとんど妨げられ、内部は通常相で占められている構造を持つことがわかった。

次に原始中性子星の熱的進化を考えて遅延崩壊がおこる可能性を議論した。今アクリーションが小さい場合の進化の過程ではバリオン数が一定に保たれるので、この条件の下で原始中性子星の重力的安定性がどのように変化するかを、原始中性子星の持ちうる最大質量を計算することによって調べた。その結果、熱的進化初期のニュートリノ開放時期で K 中間子凝縮が起こることにより状態方程式が軟化し、原始中性子星は重力的に不安定になり、ブラックホールに崩壊する可能性があることが示された。他の仕事ではニュートリノ開放後の冷却時期での遅延崩壊が強調されているが、申請論文ではむしろニュートリノ開放時期での遅延崩壊を示し、これはカイラル対称性に基づく議論の特徴であることが強調されている。また K 中間子凝縮を考えない通常物質からなる原始中性子星ではどの時期においても遅延崩壊は起こらないことを確認している。

同時にニュートリノ開放後の冷却過程での原始中性子星の性質を調べることで低温の中性子星の最大質量は初めから温度 0 とした状態方程式を用いて得られる値よりも小さくなることを注意した。

論文審査の結果の要旨

申請論文のテーマである原始中性子星の遅延崩壊は天体物理と核物理の境界領域の問題の一つとして近年国際的にも興味を持たれ研究されている重要な課題である。観測的にも例えば超新星 1987A の問題と関連している。また将来の超新星爆発時のニュートリノ観測においてはそのスペクトルなど詳細な情報が得られると考えられており、遅延崩壊が直接観測できる可能性がある。

遅延崩壊を引き起こす原因としては核物質中での相転移が考えられるが、その中でも K 中間子凝縮は有力な候補の一つである。温度がほぼ零と考えてよい中性子星内部の核物質での K 中間子凝縮の研究は多く存在し、カイラル対称性の変化、状態方程式の軟化、固有の冷却機構など理論面、現象との関連においてさまざまな側面が研究されてきた。 K 中間子凝縮を伴う原始中性子星の遅延崩壊に関してはいくつかの研究が存在するが、これまでになされた研究では有限温度、ニュートリノ捕捉下での K 中間子凝縮相の取り扱いにいろいろ不十分な点があった。その一つは、温度 0 での K 中間子凝縮の議論ではカイラル対称性の役割が強調されてきたが、それに比べて有限温度の場合の議論が非常に簡単化されてきたことがある。これは、凝縮相の熱的ゆらぎの取り扱いの困難が原因である。実際カイラル対称性に基づくモデルでは内在する場の非線形性のために熱的ゆらぎを取り扱える理論は存在しなかった。このため初期には温度 0 として得られた状態方程式をそのまま採用するという事まで行われた。他の一つは、この課題では状態方程式の変化とニュートリノ反応率の変化の整合的取り扱いが重要になるが、 K 中間子凝縮による遅延崩壊の議論ではこれまでは考慮されていない。しかし、カイラル対称性を基礎に置いた理論では自然に考慮されることが考えられる。

申請論文においてはこの問題に対してカイラル対称性を活用することによって、虚時間形式の経路積分をうまく実行し、非線形 Lagrangian に対する熱的ゆらぎをうまく考慮することに初めて成功している。その結果、凝縮相での対称性の変化、Goldstone ボソンの役割を明らかにした。またこの方法により、本質的にカイラル対称性を破る項が K 中間子と核子とのダイナミクスを規定していることが明白な形で示され、さらに進んだ取り扱いも可能にする見通しのよい定式化になっている。申請論文ではこの定式化を応用することによって、妥当と思われる近似を用いて実際に高温、ニュートリノ捕捉下での K 中間子凝縮の相図および状態方程式を得た。とくにこの状態方程式の導出は例えば原始中性子星の進化の動的シミュレーションの際の基礎データとなりうる重要な成果である。

この結果を基に申請論文は、実際に原始中性子星の熱的進化過程の各ステップごとに最大質量を計算することにより星の安定性を調べ遅延崩壊の可能性を分析している。原始中性子星の遅延崩壊の可能性に関しては、既にいくつかの研究が存在するが、既述したように K 中間子凝縮に対してはその理論的取り扱いが不十分ではあるが、それらの研究から得られた結果では、ニュートリノ開放後の冷却時期での遅延崩壊が強調されている。熱的効果の減少によって K 中間子凝縮がおこると言うものである。これに対し申請論文ではむしろニュートリノ開放時期で K 中間子凝縮が内部に発生し、その結果遅延崩壊を起こすというものであり、ニュートリノ捕捉の重要性を示した。この結果は遅延崩壊の機構に新しい知見を付け加えると共に、カイラル対称性に基づくモデルの特徴である K 中間子の非線形性が顕著な形で現れたものとして興味深いものであり、放出されるニュートリノスペクトルの時間的変化など動的なシミュレーションでの詳細な研究が期待される。

以上に述べた申請論文の研究の重要な成果により、申請論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認めた。なお申請論文とそれに関連した口頭試問を行った結果合格と認めた。