

平成 21 年 5 月 18 日現在

研究種目：基盤研究 (C)
 研究期間：2005～2008
 課題番号：17540247
 研究課題名 (和文) 原子核の相対論的模型
 研究課題名 (英文) RELATIVISTIC NUCLEAR MODELS
 研究代表者
 鈴木 敏男 (SUZUKI TOSHIO)
 福井大学・大学院工学研究科・教授
 研究者番号：80115865

研究成果の概要：原子核の相対論的応答関数において反核子の自由度を考慮する際、原子核密度に依存し発散しない項だけを考慮するという従来の計算は、本来引力の効果を斥力に変えてしまうという非物理的な結果を与えてしまうことを解析的に示した。その結果として、広く行われている Ring たちの手法による計算は、多くのパラメータを導入し実験値を再現しているが、それらの物理的意味を、再考しなければならないことを示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	1,300,000	0	1,300,000
2006年度	600,000	0	600,000
2007年度	600,000	180,000	780,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
総計	3,400,000	450,000	3,850,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：理論核物理、相対論的模型、反核子、和側、巨大共鳴

1. 研究開始当初の背景

原子核構造の理解は、未だ現象論的な段階にある。その中で、原子核を良く記述する代表的な模型に二つあり、一つは、従来の非相対論的模型であり、もう一つは、最近急速に研究が進んでいる場の理論に基づいた相対論的模型である。前者は、原子核を、非相対論的な核力で相互作用する核子 (中性子、陽子) から成る多体系であるとするのに対し、後者は、核力の源となる種々の中間子と Dirac 粒子からなる相対論的多体系とする。ところが、両者とも原子核構造・原子核反応を非常に良く説明するにも拘わらず、二つの模型の原子

核の物理的な理解には基本的な違いがある。

相対論的模型では、相対論的効果が本質的なはたらきをし、その非相対論的な極限で、従来の非相対論的模型に帰着しない。例えば、相対論的模型において、原子核の結合エネルギーに対する相対論的効果は、再現すべき結合エネルギーと同じオーダーで、無視できるものではない。その結果、相対論的模型の原子核描像は、非相対論的模型と大きく異なり、どちらが現実的な模型なのかは不明な状況にある。

一方、現在の相対論的模型には、まだ基本的な問題がある。それは、取扱が困難な反粒

子（反核子）の自由度の大部分を無視していることである。現象論的模型とは言え、反核子は非相対論との本質的な違いであり、その自由度を無視して良いという理由はない。或いは、無視して良い理由を明らかにしなければ、これまでの非相対論的模型による計算結果と相対論的模型の計算結果を単純に比較することはできない。反核子の自由度が、相対論的模型における相対論的効果の重要性に何らかの影響を与える可能性がある。

相対論的模型は、相対論的効果を無視できない高密度中性子星や高エネルギー現象を、原子核と統一的に理解するために、1972年、Waleckaを中心とするスタンフォード大学のグループによって提唱された。以来、その模型は、原子核の多くの現象を再現するように改良され、今では原子核構造・反応を非常によく説明する模型となった。

特に、原子核の基底状態や集団運動状態をよく説明する模型としては顕著なものがある。その中で、相対論的模型による集団運動の記述は、我々のグループによって、1987年、世界で最初に行われ、反核子の自由度を無視した模型では、実験値の説明が困難であることが示された。その困難を解決するために、その後、多くの試みが成されたが、我々は、原子核の相対論的応答関数の計算において、反核子の自由度の一部（原子核の密度に依存する発散しない項）を考慮することの必要性を、一つの模型により解析的に示した。それを受け、数値的により詳細な計算を行い、実験値をほぼ再現する模型を構築したのが、現在、相対論的模型研究の第一人者であるドイツの Ring とフランスの Van Giai のグループである。

その後、彼らの手法に従い、実験値を再現するため、中間子の種類やパラメータを増やした模型の改良が精力的に行われ、最近は多様な実験値を非常に良く再現する模型となった。そして、同時に、当初の目的であった高エネルギー現象や中性子星の研究、それに関わるニュートリノ散乱の計算などにも広く使われている。

このような状況の中で、原子核研究が現在の現象論的な段階から脱却するためには、相対論的模型と従来からよく使われてきた非相対論的模型の関係を明確にすべき段階にある。お互いに関係の明らかでない異なる模型で、指針を持たずにパラメータを変え、原子核を記述する試みを再考すべき時期である。

2. 研究の目的

我々は、相対論的模型と非相対論的模型の関係を調べるために、まず、相対論的模型で

曖昧にされてきた反核子の役割を明確にすることを目的とした。このことにより、相対論的模型の模型としての完成度を高め、非相対論的模型との関係を、相対論的模型の不確定な要因を持つことなく調べる事が可能となる。

3. 研究の方法

原子核模型は現象論的に構築されているために、基本的な問題を探る上で大きな困難がある。例え、その模型の本質が無視されていても、適当なパラメータを導入すれば、原子核現象を説明することが可能である場合があるから、どこに物理的に適当でないことが内包されているのか、或いは、どのような物理がパラメータの中に含まれているのか不明となる。そこで我々は、そのような状況を避けるため、パラメータによらない和則を探し出し、相対論的模型における反核子の役割を陽に示す方法をとることにした。また、近似の必要な計算でも、可能な限り数値計算を避け、解析的な表式を求め、一般的な模型の構造が明らかになるような理論展開を探ることとした。

4. 研究成果

(1) 和則

和則は、パラメータや、模型を設定した後の多体問題を解く近似に依らない。そのために、原子核物理学分野だけでなく、広く他の分野でも模型の検証に大きな役割を果たしている。原子核の非相対論的模型でも多くの和側が知られ、原子核の光吸収断面積や電子散乱に対する核子以外の自由度の研究、或いは核構造の研究にも活用されてきた。

一方、相対論的模型では、我々がこの問題を取り上げるまで、全く議論されてこなかった。相対論的模型で和則を議論するには、克服しなければならない基本的な問題があったからである。

我々は、ベータプラス遷移強度とベータマイナス遷移強度の差に対する Gamow-Teller 和則の議論では、相対論的模型の色々な困難を解決することができることを示した。その結果、以下のことが証明された。

- ① 遷移強度の差の和則値は、非相対論的模型でも相対論的模型でも同じ値であり、原子核を構成する中性子と陽子の数の差で与えられること。
- ② しかしながら、相対論的模型が和則を満たすためには、反核子の自由度の寄与が必須であること。
- ③ 反核子の励起によるベータプラス遷移強度とベータマイナス遷移強度は、それぞれが無限大で発散すること。

- ④ 遷移強度の差に対する和則値は、無限大同士がほぼ打ち消し合った結果であること。
- ⑤ 無限大同士が打ち消しあって残る和則値に対する反核子の寄与は、原子核の中の核子の Fermi 速度の2乗に比例し、安定な原子核では和則値の約 10%を担っていること。

これらの結果から、ベータプラス遷移、或いはベータマイナス遷移をそれぞれ独立に議論する応答関数の計算では、発散項の取扱を適切にすることは避けられないことが明らかになった。

(2) 相対論的応答関数

そこで我々は、原子核の相対論的な応答関数を解析的に計算することを試み、反核子による発散項の重要性を解析的に示すことに成功し、これまで世界中で行われてきた多くの反核子の自由度を無視した相対論的模型による計算は非物理的であることを示した。

これらの仕事の結果については、Mod. Phys. Lett. の編集長から招待を受け、我々のこれまでの相対論的模型に関する一連の仕事のレビューとしてまとめられた(下記の論文リスト②)。

相対論的な応答関数を解析的に求め、その論文で示したことは、以下の通りである。

- ① 相対論的応答関数において、反核子の自由度を考慮しなければ、当然ながら和則を破ること。
- ② 発散しない項だけを考慮する計算は、本来引力の効果を、斥力に変えてしまうという非物理的な結果を与えてしまうこと。
- ③ さらに、発散しない項だけを考慮する計算は、核子-反核子励起状態に対して、負の励起強度を与えるという非物理的な結果を生むこと。
- ④ その例は、これまで世界的に使われてきた発散しない反核子の寄与のみを考慮するという Ring たちの手法による計算結果に見られること。

これらの事実をこれまでの多くの数値計算において気が付かなかったのは、パラメータを導入することにより実験値を再現することのみに専念してきたためである。

(3) 今後の課題

今後の課題は、以下の通りである。

- ① 発散項を繰り込む手法を構築し、その本質的な役割を示すこと。
- ② その上で、これまで反核子を無視して行

われてきた計算を再計算すること。

- ③ その結果を、従来の非相対論的な模型による計算と比較し、何れが現実的な現象論的模型かを調べること。

最後に、今回の研究成果が、非相対論的模型において、実験的にも理論的にも長い間議論されてきた Gamow-Teller 和則値のクエンチング問題にも、深く関わることになったことについて述べる。

非相対論的模型における Gamow-Teller 和則値そのものは古く(1960年代)から知られていたが、それを実験的に確かめることは難しい問題で、1970年代以来長い間条件付きの実験値が示されてきた。ところが、それらの多くは、和則値の 60%程度しか観測できないというもので、何故、残りの約 40%が観測できないか、その理由を考えるのがクエンチング問題である。

一つの説明は、原子核に、中性子、陽子以外の新しい自由度、デルタ粒子を導入することによるものであった。ベータマイナス状態(陽子-中性子空孔状態)にデルタ-核子空孔状態を結合させ、ベータマイナス遷移強度の一部をデルタ-核子空孔状態に吸収させるものである。

この考えは二つの意味で魅力的であった。一つは、デルタ粒子という新しい自由度が原子核の説明に必要なこと、二つ目は、ベータマイナス状態(陽子-中性子空孔状態)とデルタ-核子空孔状態を結合させる相互作用は、宇宙論で中性子星の構造を研究する上で、重要なパラメータであったことである。即ち、その値は、中性子星の中で、どのような核子密度のときにパイオン凝縮が顕在化するかを定めるものであった。

実験の精度を高める試みが長い間行われたが、2005年に東京大学のグループが、和則値のクエンチングは 40%ではなく、8%程度であることを示すに至った。この事実は、理論的に新たな問題を引き起こした。

クエンチングが 8%程度と弱いことは、ベータマイナス状態(陽子-中性子空孔状態)とデルタ-核子空孔状態を結合させる相互作用が弱いことを意味する。このことは、安定な原子核の核子密度の 2~3 倍の密度で、パイオン凝縮が起こることを意味した。

さらに、相対論的模型が示す 10%程度のクエンチングが相対論的效果として存在するならば、ベータマイナス状態(陽子-中性子空孔状態)とデルタ-核子空孔状態の結合はますます弱く、パイオン凝縮は非常に起き易いことになり、中性子星等の高密度核物質の研究に大きな影響を及ぼすことになる。

これまで、実験の解析は従来の非相対論的模型で行われている。クエンチング問題に決着を付け、中性子構造の理解を深めるために

は、今後、応答関数の計算と実験の解析の両方を、相対論的模型により統一に行うことが必要である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

- ① H. Kurasawa and T. Suzuki, Role of Anti-nucleon Degrees of Freedom in Relativistic Nuclear Models, Int. J. Modern Physics, E15(8) 1925-1931, 2006, 査読有
- ② H. Kurasawa and T. Suzuki, Gamow-Teller Sum Rule in Relativistic Nuclear Models, Modern Phys. Lett. A21(12) 935-946, 2006, 編集長からの招待論文
- ③ H. Kurasawa and T. Suzuki, Sum Rules in Relativistic Nuclear Models, BgNS Transactions, 114, 805-812, 2005, 査読有
- ④ H. Kurasawa, T. Suzuki and P. F. Bortignon, Sum Rules of the Multiple Giant Resonance States, Prog. Theor. Phys., 114, 805-812, 2005, 査読有
- ⑤ T. Maruyama, H. Kurasawa and T. Suzuki, Role of the Landau-Migdal Parameters with the Pseudovector and the Tensor Coupling in Relativistic Nuclear Models, Prog. Theor. Phys., 113, 355-367, 2005, 査読有
- ⑥ H. Kurasawa and T. Suzuki, Relativistic Corrections to Gamow-Teller Strengths and Sum Rules, Journal of Phys. Conference Series, 20, 203-204, 2005, 査読有

[学会発表] (計4件)

- ① T. Suzuki, Roles of Anti-nucleon Degrees of Freedom in Relativistic Nuclear Models, Int. Conf. on Frontiers of Nuclear Structure, June 12, 2006, Shanghai
- ② T. Suzuki, Sum Rules in Relativistic Nuclear Models-Roles of Anti-nucleon Degrees of Freedom-, XVI Int. School on Nuclear Physics, Neutron Physics and Nuclear Energy, Sep. 19, 2005, Varna, Bulgaria

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 敏男 (SUZUKI TOSHIO)
福井大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：80115865

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者