

氏名・(本籍)	まる やま とも ゆき 丸 山 智 幸
学位の種類	理 学 博 士
学位記番号	理博第 1058 号
学位授与年月日	昭和 63 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 1 項該当
研究科専攻	東北大学大学院理学研究科 (博士課程) 原子核理学専攻
学位論文題目	相対論的アプローチによる準弾性電子散乱と巨大共鳴の研究
論文審査委員	(主査) 教 授 笹 川 辰 弥 教 授 武 田 暁 教 授 石 松 敏 之

論 文 目 次

第 1 章 序 論

第 2 章 $\sigma-\omega$ 模型の概要

第 1 節 理論的枠組み

§ 1 ラグランジアン

§ 2 グリーン関数

第 2 節 相対論的ハートリー (RH) 近似

§ 1 グリーン関数法

§ 2 変分法

§ 3 核物質

§ 4 有限核での RH 近似

第 3 章 $\sigma-\omega$ 模型による準弾性電子線散乱

第 1 節 準弾性電子線散乱の概要

- § 1 電子線散乱の断面積
- § 2 準弾性電子線散乱
- 第 2 節 $\sigma-\omega$ 模型による応答関数
 - § 1 応答関数
 - § 2 計算結果
 - § 3 議 論
- 第 4 章 $\sigma-\omega$ 模型による巨大共鳴の研究
 - 第 1 節 導 入
 - 第 2 節 模型の概要
 - § 1 巨視的な準古典近似
 - § 2 質量パラメーター
 - 第 3 節 スケーリング法による記述
 - § 1 核物質での計算
 - § 2 単極子共鳴
 - § 3 双極子共鳴
 - § 4 議 論
 - 第 4 節 安定性の問題
 - § 1 不安定性の例
 - § 2 議 論
 - 第 5 節 相対論的束縛条件付きハートリー (RCH) 法による記述
 - § 1 RCH 法の概要
 - § 2 計算結果
 - § 3 議 論
 - 第 6 節 まとめと議論
- 謝 辞
- 参照論文
- 図と表

論文内容要旨

$\sigma-\omega$ 模型は J.D. Walecks が提唱して以来、核物質の飽和性、核子-原子核散乱、原子核内の荷電分布等に大きな成功をおさめてきた。しかし、これらの成功は結局のところ原子核の基底状態を対照とした問題についてであり、励起状態を扱うような問題に対してあまりなされておらず、そのほとんどが核物質での議論である。有限核の励起状態を扱った議論はほとんどされておらず、行われていても核物質での理論をもとにした局所密度近似によるものである。

そこで今回の博士論文に於いては、相対論的ハートリー (RH) 近似をもとにして、 $\sigma-\omega$ 模型を有限核に応用し比較的高い励起エネルギーを持つ励起状態について議論を加えることにする。

具体的には、

- (1) 準弾性電子線散乱
- (2) アイソスカラーの単語極子巨大共鳴

の問題について議論を行った。

- (1) これは、電子線散乱実験に於て比較的移行運動量の高い領域で起きるもので、電子は原子核全体ではなく、原子核を構成する個々の核子と弾性散乱し、そして、電子と相互作用した核子は原子核の外へ散乱されると考えられるものである。

近年の Sacley と MIT で行われた実験によって、縦成分横成分二つの応答関数が分離して観測されるようになった。しかし、この二つの応答関数の実験値を同時に理論値と一致させることができないので、現在問題となっているものである。この問題点としては二つの側面がある。一つの問題は応答関数の最も大きくなるピーク付近で、理論的に求めた縦成分応答関数が実験値に比べて大きすぎる。第二に応答関数を移行エネルギーで積分した 0 次の和則が、理論的に求めたものと、実験値を比べると、やはり理論値の方が大きすぎることである。

最近、Do Dang&Giai が $\sigma-\omega$ 模型で説明できるのではないかという示唆を行った。そこで、それを確かめる意味で $\sigma-\omega$ 模型による応答関数の計算を行った。非相対論的理論と相対論的理論での違いは既に修士論文で議論しているので、この論文では、RH 近似を行い、さらに核子の形状因子についてもより正確なものを用いて計算を行った。その結果、移行運動量 400 MeV 程度のところでは実験との一致がよい。しかし、それよりも低い移行運動領域に於いては、他の模型と同様に横成分は実験と合うものの、縦成分で理論値が大きすぎるし、高い移行運動量領域では横成分が小さくなりすぎてしまう。

また、0 次の和則は、横成分は比較的実験に合うものの、縦成分においては全体的に大きくなりすぎてしまう傾向にある。

- (2) 核物質での非圧縮率が 540 MeV という非常に大きな値をとることが、 $\sigma-\omega$ 模型の問題点として上げられてきた。このことから、この非圧縮率と深い関係にあり実際に実験で観測され

る物理量である，単極子振動の共鳴エネルギーが大きくなりすぎる事が予想される。核物質では単極子共鳴については Nishizaki 等がフェルミ流体におけるランダウ理論を基にして計算を行っているが，それによると共鳴エネルギーは $160 A^{-1}$ と実験値と比べて倍近い値になってしまう。

そこで，我々は有限核で計算を行い，有限性の効果によってどの程度共鳴エネルギーが変化するかを見た。実際の計算は相対論的ハートリーを基にして，巨視的な描像に立って計算を行った。

この巨視的描像に依る方法とは，時間に依存する変形パラメータ λ を導入し，原子核全体の振動のこと λ とその時間微分で記述する。その運動に合わせて内部の核子の波動関数は断熱的に変化し，やはり λ とその時間微分で決定される。

さて，相対論においても非相対論のとき同様，RH 近似を基にして，原子核の全エネルギーを核子の波動関数の汎関数として書くことができる。そこで，先ほど断熱近似で求めた核子の波動関数を，その汎関数の中に代入する。

すると全エネルギーは， λ が十分小さいとして，次のように書かれる。

$$E - E_{RH} = \frac{1}{2} B \dot{\lambda}^2 + \frac{1}{2} C \lambda^2$$

ここで C は復元力と呼ばれ， B は質量パラメータと呼ばれる。この λ を量子化することによって励起エネルギー ω を求めることができる。それは，

$$\omega = \sqrt{C/B}$$

となる。

本論文で行ったことをまとめると

- ① 相対論的流体力学を用いて，原子核の振動に依って生じる核子流が連続の方程式を満足するように，原子核内の各座標での速度場を決定し，原子核全体の運動が流体的性質を再現するようにして， B を決定する一般的模型を作った。
- ② 巨視的模型の一つであるスケーリング法を基にして，この $\sigma - \omega$ 模型を巨視的に扱うときには，不安定性の生じることを示し，その原因について議論した。それによると，波動関数の変化がスカラー型の外力によって起こる場合，負エネルギーの混ざりが多くなることが原因であった。そのため，断熱近似であっても波動関数の変化のさせ方には，何等かの制限が必要であることが示唆された。
- ③ ②で生じた問題を回避するため，完全な解決策でないが，相対論的束縛状態付きハートリー (RCH) 法で計算を行った。

単極子共鳴は $\langle r^2 \rangle \equiv R^2$ の変化するモードと考えられる。そこで， R^2 を固定したときのエネルギーが極小 (極大) 値をとるとして原子核の内部を記述することにする。具体的には，未定常数 κ を導入してハミルトニアンに $-\kappa r^2$ を加えたものに対して変分を実行するわけで

ある。

$$\frac{\delta}{\delta\Psi_n} \langle \Phi(R^2) | \{H - \kappa r^2\} | \Phi(R^2) \rangle = 0$$

すると、RCH方程式が与えられ、その方程式によって解かれた波動関数を用いて、Rの変動に対する原子核の全エネルギーの変化を見る事ができる。先に導入した λ

$$\lambda = \frac{R - R_0}{R_0} \quad (R_0 \equiv \sqrt{\langle r^2 \rangle_{RH}})$$

と定義して、この λ を時間依存の変数と考える。質量パラメーターは①で求めた方法に基づいて決定した。

実際に、 $A=12, 16, 40, 80, 100, 164, 208$ について計算を行った。全ての原子核は陽子と中性子の数が同じであるとした。

その結果、

I 非圧縮率の値が

$$K_{RH} \simeq 320 \sim 340 \text{ MeV}$$

と核物質に比べてかなり小さくなる事が解った。

II 質量パラメーターの値が、非相対論で用いられる

$$B_{nr} = AM \langle r^2 \rangle$$

という値よりも10%程度小さくなった。

III 有限な大きさの原子核に於いて、単極子共鳴エネルギーは質量数Aの大きい極限で、

$$\omega_{RH} \simeq 125 \sim 130 A^{-1/3} \text{ MeV}$$

となり、この模型に於いても一般に知られている共鳴エネルギーのA依存性が再現できることがわかった。

実験値の $80A^{-1/3}$ に比べればまだ大きすぎるものの、同じパラメーターを用いて核物質で求めた値 $167A^{-1/3}$ よりは実験に近い方へ改善する事ができた。

論文審査の結果の要旨

原子核に対する相対論的理論の一つである $\sigma-\omega$ 模型は核子-核散乱, 核物質の飽和性, 原子核の荷電分布等原子核の基底状態に関する物理量の解析に適用されて成功をおさめたが, これらの理論は, 原子核を核物質と見做して取扱ったものであり, 有限核として計算したものではなかった。

本論文では, $\sigma-\omega$ 模型に基づく方程式を有限核に対して解く方法として, 相対論的ハートリー法を適用し, (1)準弾性電子散乱に於ける縦横両成分の応答関数, (2)アイソスカラーの単極子巨大共鳴の振動数の原子核質量に対する依存性, (3)原子核の非圧縮率について議論した。

準弾性電子散乱の上記二つの応答関数に対する理論値を同時に実験値と一致させることは出来ないとされて来たが, Do-Dang と Giai が, $\sigma-\omega$ 模型を用いると良い結果が得られる事を示した。しかし, 丸山智幸は, 限られた移行運動量領域以外では Do-Dang-Giai の理論は成功しないことを確かめ, 修士論文とした。今回, 丸山は相対論的ハートリー近似で計算を行なった結果, 移行運動量が400MeV 程度の領域では実験結果とよく一致する理論値が得られるが, それよりも低い移行運動量領域では, 横成分は実験と一致するが, 縦成分に対しては理論値が大きすぎ, 高い移行運動量領域では, 横成分は小さくなりすぎる, またクーロン和則に対する計算値は大き過ぎる傾向があることを示した。

単極子巨大共鳴は $\langle r^2 \rangle$ の変化するモードであると考えられる。 $\langle r^2 \rangle$ の変化に対するエネルギーの変化を求める為に, 未定常数 λ を導入して $-\lambda r^2$ を加えた後, 変分法を適用して束縛条件つき相対論的ハートリー方程式を作り, その方程式を解いた。得られた波動関数を用いて振動の復元力及び質量パラメータを, 原子核の質量数 $A=12, 16, 40, 80, 100, 164, 208$ について計算した。その結果, 有限核の単極子共鳴エネルギーは, A が大きい場合およそ $125\sim 130A^{-1/3}$ (MeV) であることがわかった。実験値 $80A^{-1/3}$ と較べれば大きい, 従来の核物質に対する計算値 $167A^{-1/3}$ よりは実験に近い値が得られたことになる。

非圧縮率に対しては $320\sim 340$ MeV という値が得られたが, 核物質模型から得られる 540 MeV という値よりも実験値に近い値が得られた。

本論文は, 丸山智幸が自立して研究活動を行なうに必要な高度の研究能力と学識を有することを示しており, よって丸山智幸提出の論文は理学博士の学位論文として合格と認める。