

論文内容要旨

第1章 序 論

^{59}Co , ^{58}Fe 核は、中性子数が $N=32$ で、陽子数がそれぞれ $Z=27$, 26 であるから、陽子数が魔法数 $Z=28$ である同中性子核 ^{60}Ni を芯 (core) と考えると、これらの原子核はこの芯に陽子1空孔、2空孔がついた核と見ることができる。そこで今、 ^{60}Ni 核が振動核であるとすれば、これらの原子核の低励起エネルギー領域には、陽子1空孔、2空孔と芯核の表面振動 (4重極表面振動) との結合に起因する状態が現われると期待できる。従って、このような描像が成り立つ ^{59}Co , ^{58}Fe 核に対しては、所謂、「粒子-振動結合模型 (particle-vibration coupling model)」が適用可能となる。

この模型は、これまでに陽子数あるいは中性子数が魔法数に近い広い質量数領域の原子核に数多く適用されてき、その有効性が明らかにされているが、ここで注目しておきたいことは、この模型が振動領域における、所謂、準回転バンド (quasi-rotational band) の存在を予言できる点である。実際、 ^{58}Fe 核においては、準回転バンド (基底状態バンドと準 γ バンド) の存在が実験的に明らかにされており、 ^{58}Fe 核にこの模型を適用してみる興味は大きい。

このように、 ^{59}Co , ^{58}Fe 核に粒子-振動結合模型を適用した場合、模型の妥当性の検証材料としては、それぞれの核の諸特性、例えば電磁遷移強度や電磁モーメント等についての実験データが挙げられるが、 ^{59}Co を標的核とした一陽子ピック・アップ反応から得られる核分光学的情報も有力な検証材料となる。即ち、 ^{59}Co , ^{58}Fe 核に対して上述の描像が成り立つならば、この反応の遷移強度には粒子と振動の相関による効果が直接反映されるからである。しかしながら、これまでのところ、この反応についての精度の良い実験データは皆無である。

従って、本論文の研究目的は、(1) ^{59}Co , ^{58}Fe 核に粒子-振動結合模型を適用し、その妥当性を調べること、(2) この妥当性の検証材料の一つとして、一陽子ピック・アップ反応 $^{59}\text{Co}(d, ^3\text{He})^{58}\text{Fe}$ の遷移強度即ちスペクトロスコピック因子 (以下 S 因子と略す) を実験的に明らかにすることである。更に、(1) の目的に関連して、(3) 芯核の表面振動における非調和性 (anharmonicity) を考慮した場合の効果 (非調和効果) を調べること、そして、(4) 粒子-振動結合模型と殻模型との相関関係を調べることも本論文の研究目的とする。(4) については、最近、この領域の殻模型計算が精力的に行なわれており、その結果との比較を行なうことである。

第2章 理論 (粒子-振動結合模型)

粒子-振動結合模型について概説し、その理論形式を明らかにした。

第3章 測定装置と実験方法

$^{59}\text{Co}(d, ^3\text{He})^{58}\text{Fe}$ 反応の実験は、核研SFサイクロトロンからの33.3 MeVの重陽子ビームを用いて行なった。反応生成粒子の運動量分析には、核研QDDスペクトロメーターを用い、このスペクトロメーターの集束面での粒子の位置検出には position-sensitive proportional counterを用いた。粒子弁別は、位置検出器の後方に設置された、2連の ΔE 検出器によって行なった。1個の ΔE 検出器から得られるエネルギー損失スペクトルだけでは、入射粒子の質量差による弁別しかできず、質量が同じである ^3He とtritonは分離できない。そこで、前後に連なった2個の ΔE 検出器の間に、tritonを吸収し、 ^3He を通過させる適当な厚さのAlの吸収体を挿入し、両検出器からのエネルギー損失信号の同時計数をとることにより、 ^3He とtritonの分離を可能にした。 ^{59}Co ターゲットには、真空蒸着法によって作製した、 $0.2\text{mg}/\text{cm}^2$ の厚さのself-supporting metallic foilを用いた。

$^{59}\text{Co}(d, ^3\text{He})^{58}\text{Fe}$ 反応において放出される ^3He 粒子の運動量スペクトルを、 $\theta_L = 7.5^\circ \sim 45^\circ$ の角度領域で、 2.5° 及至 3° 間隔で測定した。また、 $(d, ^3\text{He})$ 反応の反応断面積の絶対値を決定する必要から、 $^{59}\text{Co}-d$ 弾性散乱の測定も行なった。

第4章 実験結果と解析

$^{59}\text{Co}(d, ^3\text{He})^{58}\text{Fe}$ 反応の測定結果を解析することにより、残留核 ^{58}Fe における、励起エネルギーが $E_x = 0 \sim 6\text{MeV}$ の範囲の24本の状態に対する反応断面積の角度分布を求めた。得られた角度分布にDWBA(歪曲波ボルン近似)解析を施すことにより、上記24本の状態に対する、反応の移行角運動量 l 及びS因子 C^2S を決定した。

第5章 理論と実験の比較及び考察

§1 実験結果の考察

$^{59}\text{Co}(d, ^3\text{He})^{58}\text{Fe}$ 反応の実験結果について、他の実験結果との比較を含めて若干の考察を加えた。

反応の遷移強度(S因子)の励起エネルギーに関する分布に注目した結果、この分布に大きな分散が認められ、このことから粒子と振動の結合による芯励起(core excitation)の効果が、反応の遷移強度に強く反映されていることが示唆された。また、核の基底状態の配位を決定する上で重要な目安となるS因子の総和則(sum rule)について調べた結果、 ^{59}Co の基底状態の陽子系の配位が主たる成分として $(\pi f \frac{7}{2}^{-1})$ であることが明らかになった。以上のことから、 ^{59}Co 、 ^{58}Fe 核が $f \frac{7}{2}$ 陽子1空孔、2空孔と芯の表面振動との結合により描写されるという仮定の傍証を得た。

§ 2 理論と実験の比較

$^{59}\text{Co}(d, ^3\text{He})^{58}\text{Fe}$ 反応の S 因子の実験結果及び、これまでに実験的に明らかにされている ^{59}Co , ^{58}Fe 核の諸特性が、粒子一振動結合模型によりどの程度説明できるかを見た。模型計算では、 $f \frac{7}{2}$ 陽子 1 空孔、2 空孔と 4 重極表面振動との結合を仮定し、表面振動については 3 フォノン状態までを考慮した。

準位エネルギー、電磁遷移強度、電磁モーメント及び S 因子について、模型による理論値と実験値との比較をした結果、準位エネルギーを除けば両者は比較的良く一致していることが確かめられた。特に、 $^{59}\text{Co}(d, ^3\text{He})^{58}\text{Fe}$ 反の S 因子については、図 1 に示すように、個々の準位の S 因子、遷移強度の分布共に、実験結果を良く説明できた。また、 ^{58}Fe 核における準回転バンド構造も模型により再現できた。(図 2)

§ 3 非調和効果

これまでの多くの粒子一振動結合模型の計算においては、芯の振動に対して調和振動を仮定していた。しかしながら、実際の原子核を見るならば、この仮定は必ずしも妥当であるとは言えない。特に、 $f p$ 殻領域の振動核においては、所謂、非調和性の存在が無視できないと考えられる。そこで、準位エネルギーについて理論と実験の満足できる一致が得られなかった原因は、調和振動を仮定していたことにあるという観点から、 ^{60}Ni 芯核の表面振動の非調和性を考慮した模型計算を試み、その効果を調べた。

その結果、準位エネルギーの模型計算値において改善が見られたばかりでなく、 $^{59}\text{Co}(d, ^3\text{He})^{58}\text{Fe}$ 反応の S 因子を含め、その他の諸量についても調和振動を仮定した場合より良い結果を得た。このことから、同じ粒子一振動結合模型で描写可能である ^{57}Co , ^{56}Fe 核においても非調和効果が重要であると予想され、この場合の芯核である ^{58}Ni 核の表面振動の非調和効果についても調べた。その結果、これらの原子核に対しても、 ^{59}Co , ^{58}Fe 核の場合以上に、芯核の表面振動の非調和性が重要な役割を担うことが明らかになった。特に、これらの核の低励起状態に対しては、 ^{58}Ni 核の 1 フォノン、 2^+ 状態と目される 2_1^+ 状態が実際には大きな電気 4 重極モーメントを持っているということが重要な役割を果たすことが示された。

§ 4 粒子一振動結合模型と殻模型

粒子一振動結合模型による計算結果を、これまでに行なわれている殻模型計算の結果と比較した結果、上述の Co , Fe 同位体核全てにおいて、両者の際立った類似性が認められた。そこで、この類似性についての考察を加えた。

Ogawa は、 $f p$ 殻領域核における陽子・中性子相互作用 ($p-n$ interaction) に注目し、この相互作用が本質的に単極力 (monopole force) と $Q \cdot Q$ 相互作用 (quadrupole force) から成ることを明らかにし、その中の $Q \cdot Q$ 相互作用が原子核の集団運動の諸様相を決定する上で重要であると指摘している。粒子一振動結合模型においては、模型ハ

ミルトニアンの中の粒子一振動結合項が、4重極表面振動を仮定する限り本質的に $Q \cdot Q$ 相互作用として働く。従って、上述の類似性の原因は、殻模型における $p-n$ 相互作用の中の $Q \cdot Q$ 成分と粒子一振動結合模型における粒子一振動結合ハミルトニアンが同等な役割を担っていることにあるということが分った。

Ogawaは更に、上述の $p-n$ 相互作用の性質に基づいて中性子系の固有状態の中から4重極演算子で強く結びついている状態のみを選択することにより、殻模型空間の切断(truncation)を試みた。そして、こうした模型空間の切断を施した殻模型計算が、切断なしの殻模型計算と類似した結果を与えるということを見出ししている。ここで、4重極演算子と強く結びついている殻模型における中性子系の固有状態は、粒子一振動結合模型における芯核の4重極フォノン状態に対応するものであり、それ故、上述の模型空間の切断を施した殻模型こそ粒子一振動結合模型に対応するものであると言える。そこで、実際に、 ^{56}Fe 、 ^{55}Mn 核(^{55}Mn 核は陽子3空孔と振動との結合によって描写される)について両者の比較を行なったところ、両者は非常に類似した結果を与えることが確かめられた。このことから、粒子一振動結合模型と殻模型との類似性がより明らかになった。

第6章 まとめ

^{59}Co 、 ^{58}Fe 核がそれぞれ陽子1空孔、陽子2空孔と芯核 ^{60}Ni の表面振動との結合によって描写できるという仮定の下に、これらの原子核に対して粒子一振動結合模型を適用し、本研究で実験的に明らかにした $^{59}\text{Co}(d, ^3\text{He})^{58}\text{Fe}$ 反応のS因子と共に、それぞれの核の諸性質の説明を試みた。その結果、全体的には満足できる結果が得られたが、実験値との更により一致を得るには、芯核の表面積振動の非調和性を考慮する必要があることが明らかになった。また、粒子一振動結合模型と殻模型との間に際立った類似性があることが認められたが、これは、粒子一振動結合模型における粒子一振動結合ハミルトニアンが、殻模型における $p-n$ 相互作用の中の $Q \cdot Q$ 成分と同等な役割を担っていることに原因するということが明らかになった。

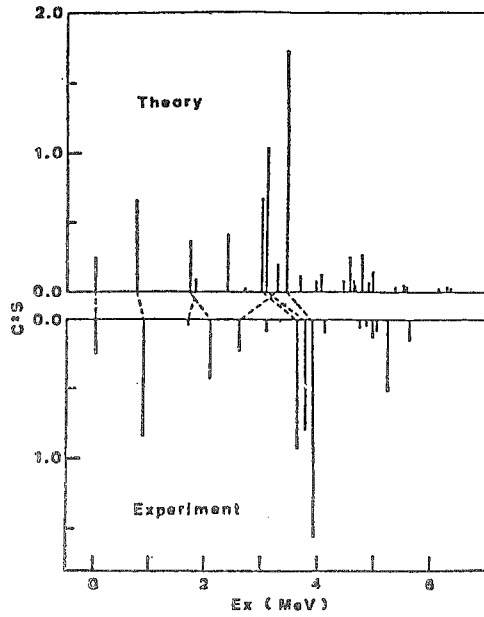


図1 反応遷移強度の分布。点線は対応する単位間を結んでいる。

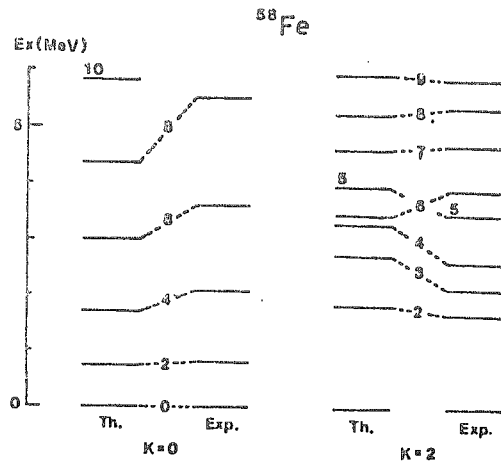


図2 ^{58}Fe 核のバンド構造。K=0は基底状態バンド、K=2は準 γ バンド。

論文審査の結果の要旨

本論文は、原子核 ^{59}Co と ^{58}Fe を ^{60}Ni 核にそれぞれ1個と2個の陽子空孔が結合した構造をもつものと考え、 ^{59}Co と ^{58}Fe の低い準位の諸性質(準位エネルギー、スピン、パリティ、電磁転移強度、 $^{59}\text{Co}(d, ^3\text{He})^{58}\text{Fe}$ 反応の分光学的因子、等)を所謂「粒子-振動結合模型」によって統一的に説明することを試みたものである。

$^{59}\text{Co}(d, ^3\text{He})^{58}\text{Fe}$ 反応の分光学的因子は粒子-振動結合模型の妥当性の検証のための重要な決め手の一つであるが、公表されたデータが存在しないため、著者は33 MeVの重陽子によるこの反応の実験を遂行して、6 MeV附近までの励起エネルギー範囲の24の準位に対して、移行角運動量と分光学的因子を決定した。その他の ^{59}Co 、 ^{58}Fe 核の準位の性質は既に知られている実験結果を利用している。

粒子-振動結合模型の計算を行い、その結果を実験結果と比較してみたところ、準位エネルギーの再現性はやや不十分であったが、その他の性質については、この模型は全体として実験結果を説明することができ、特に分光学的因子については計算結果と実験結果の一致は良好であった。

著者は、 ^{60}Ni 核の表面振動を調和振動と考える単純な粒子-振動結合模型から一歩進んで、 ^{60}Ni の振動準位についての実験結果から現象論的に非調和振動効果を取り入れた上で、粒子-振動結合模型の計算を実行し、計算結果が実験結果をより良く再現することを示した。

更に著者はCoとFeの同位体核に対する殻模型計算の結果が粒子-振動模型の結果と類似していることに注意し、その原因を追究した結果、殻模型における陽子-中性子相互作用と、粒子-振動結合模型における粒子-振動相互作用の類似性が原因となっていることを発見し、両模型の間の関連を明らかにした。

以上のように本論文は著者が自立して研究活動を行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いる。よって庭野道夫提出の論文は理学博士の学位論文として合格と認める。