

学 位 論 文 題 名

Structure of ${}^3_{\Sigma}\text{H}$ -hypernucleus(${}^3_{\Sigma}\text{H}$ -ハイパー核の構造)

学 位 論 文 内 容 の 要 旨

最近の原子核研究分野において、ストレンジネスを持ったハドロンを含む原子核の研究に多くの興味向けられている。すなわち、通常の原子核についての理解に基づいて Λ -ハイパー核、 Σ -ハイパー核、さらに最近では二重 Λ や三-ハイパー核についての研究が開始されて来た。これらのハイパー核は自然界では弱崩壊により壊れてしまうが、最近の実験の進展によりハイパー核の人工的な生成が可能になり、それらの性質が調べられるようになった。

ここでは、ストレンジネス $S = -1$ を持つハイペロン (Λ, Σ) の中で、アイソスピン 3 重項状態に属する Σ -ハイペロンを含む Σ -ハイパー核に注目する。 Σ -ハイペロンと核子 (N) の間のポテンシャルは、 ΣN 散乱の実験データが少ないために実験データだけから決めることができない。特に、ポテンシャルのスピンの依存性についてはスピンの観測量についての実験が無いのでわかっていない。こうした実験の状況から、ポテンシャルを決めるためには理論的なモデルを導入する必要がある。Nijmegen や Bonn グループは豊富な NN の散乱データを利用し、結合定数に対して $SU(3)$, または $SU(6)$ 対称性を仮定してハイペロン-核子間ポテンシャルを導いた。これらのグループは、定性的な特徴として強いスピン・アイソスピン依存性を持つ Σ -N 間ポテンシャルを提案した。

この Σ -N 間ポテンシャルの強いスピン・アイソスピン依存性により、 Σ -ハイパー核内での Σ -ハイペロンと残りの核との間ポテンシャルが、 Σ -ハイパー核のスピン・アイソスピン状態に依存する場合がある。Harada らはこの Σ -核間ポテンシャルのスピン・アイソスピン依存性の例が ΣNNN 系において、 ${}^4\text{He}$ (静止 K^+, π^\pm) 反応における π^+ と π^- のエネルギースペクトラムの形の違いとして見られることを指摘した。また実験との比較において、Nijmegen モデル D ポテンシャルに基づいた SAP ポテンシャルを用いて求められた π スペクトラムは、実験結果と定性的な一致を示している。この理論と実験との定性的な一致は、 Σ -N 間ポテンシャルが強いスピン・アイソスピン依存性を持つことと解析に用いられた Σ -N 間ポテンシャルの信頼性を意味している。

本研究は、 Σ -N 間ポテンシャルの強いスピン・アイソスピン依存性に基づいて、他の Σ -ハイパー核における Σ -核間ポテンシャルのスピン・アイソスピン依存性を理解することを目的とする。上で述べた ΣNNN の 4 体系以外の Σ ハイパー核として、 ΣNN 系はポテンシャル以外にモデルを導入する必要がないので不定性が少ないという利点を持っている。また、最も基本的な系として ΣNN 系を理解することは、軽い Σ -ハイパー核を統一的に理解する上で極めて重要であると考えられる。

ΣNN 系についてはこれまで以下の研究がなされている。Garcilazo は $\Sigma^- NN$ 系において束縛状態がないことを示している。また、Stadler と Gibson は Bonn グループが提案した ΣN ポテンシャルを用いてこのことを議論している。Afnan と Gibson はアイソスピン $T = 0$ 、スピン $S = 1/2$ の状態が最も引力的であるとの考えに基づいて、 Λd 散乱によってその状態を観測することの可能性について調べた。Dover と Gal は $\Sigma N \rightarrow \Lambda N$ 転換過程におけるスピン・アイソスピンの選択則を考慮して、 $(T = 1, S = 1/2)$ の ΣNN 系の状態のうちで特に核子対のアイソスピン $T_{NN} = 0$ 、スピン $S_{NN} = 1$ の状態が、寿命が長く最も束縛しやすい候補であるという主張を行った。しかしながら、 $(T = 1, S = 1/2)$ の状態には $(T_{NN} = 1, S_{NN} = 0)$ の状態の状態もあり、これらの2つの状態のカップリングによってさらに引力的な状態が生じる可能性がある。このように、 ΣNN 系において最も引力的な状態について統一した見解が無いのが現状である。したがって、この問題を解決するために、 $(T = 1, S = 1/2)$ の状態の2つのチャンネル間のカップリングの効果について調べる必要がある。さらに、 Σ ハイペロンの3つの異なるアイソスピン成分の状態 ($\Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-$) 間の大きな質量差とクーロンポテンシャルによりアイソスピン対称性が破られる可能性がある。したがって、このチャンネルカップリングについて最終的な結論を得るためには、 Σ -ハイペロン間の質量差とクーロン力を考慮しなければならない。

この研究では、 ΣNN 系として ${}^3_2\text{H}$ ハイパー核に注目し、エネルギー、 ΛNN チャンネルへの転換幅や波動関数の広がりなどの物理量を計算し、 ${}^3_2\text{H}$ -ハイパー核の構造に対する Σ -ハイペロン間の質量差とクーロン力の効果を詳細に調べる。現実的な ΣN ポテンシャルとしては、 ${}^4_2\text{He}(K^-, \pi^\pm)$ 反応の解析で用いられた SAP を用いる。

ΣNN 系を解く方法としては、Kamimura の組替えチャンネルの方法を用いる。 ${}^3_2\text{H}$ ハイパー核は、 $[pn({}^3S_1) \otimes \Sigma^0]$, $[nn({}^1S_0) \otimes \Sigma^+]$, $[pn({}^1S_0) \otimes \Sigma^0]$ および $[pp({}^1S_0) \otimes \Sigma^-]$ のチャンネルによって構成されるので、この4チャンネルの連立方程式を解く。

ΣN 間ポテンシャルとしては、Nijmegen モデル D とモデル F にそれぞれ基づいた SAP-1 と SAP-F を用いた。それぞれの Σ -N 間ポテンシャルに対して、 ${}^3_2\text{H}$ ハイパー核において、 $J^\pi = 1/2^+$ の束縛状態を得た。この状態は計算で取り入れた4つの状態のうち、主に $[pn({}^3S_1) \otimes \Sigma^0]$, $[nn({}^1S_0) \otimes \Sigma^+]$ および $[pp({}^1S_0) \otimes \Sigma^-]$ の3つのチャンネルによって構成される。 $[pn({}^3S_1) \otimes \Sigma^0]$ のチャンネルは他の2つのチャンネルと結合する。 $[pn({}^3S_1) \otimes \Sigma^0]$ と $[nn({}^1S_0) \otimes \Sigma^+]$ のチャンネル間の閾値エネルギーの差は $[pn({}^3S_1) \otimes \Sigma^0]$ と $[pp({}^1S_0) \otimes \Sigma^-]$ のチャンネル間のそれに比べてかなり大きいにもかかわらず、前者のチャンネルの間のカップリングからのエネルギーへの寄与は後者のチャンネル間のカップリングに比べて無視できないほど大きい。実際、前者のカップリングはこの ${}^3_2\text{H}$ の状態のエネルギーや波動関数の広がりを大きく変える。ここで、この3つのチャンネルの間のカップリングが ΣNN 系を束縛させるほど引力的に作用していることが明らかになった。またこの強いカップリングによって、アイソスピンは近似的に非常に良い量子数になっている ($\sim 96\%$) ことが分かった。

以上の結果に基づいて、この研究では、 ΣNN の3体系の研究においてこれまで認識されていなかった $T = 1$ の状態におけるチャンネル間のカップリングの重要性を指摘した。また、この研究結果は軽い Σ -ハイパー核を Σ -核間ポテンシャルのスピン・アイソスピン依存性という立場から統一的に理解できることを示唆している。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 和 田 宏
副 査 教 授 石 川 健 三
副 査 助 教 授 加 藤 幾 芳
副 査 講 師 大 西 明
副 査 助 教 授 岡 部 成 玄 (情報処理教育センター)

学 位 論 文 題 名

Structure of ${}^3_2\text{H}$ -hypernucleus

(${}^3_2\text{H}$ -ハイパー核の構造)

最近の原子核研究分野において、ストレンジネスを持ったハドロンを含む原子核の研究に多くの興味向けられている。すなわち、通常の陽子・中性子(核子)からなる原子核の1つの核子が Λ や Σ 粒子に置き換えられたストレンジネス $S=-1$ を持った Λ -ハイパー核や Σ -ハイパー核、さらに最近では、ストレンジネス $S=-2$ を持った二重 Λ や Ξ -ハイパー核についての研究に関心が寄せられて来ている。これらのハイパー核は自然界では弱崩壊により壊れてしまうが、最近の実験の進展によりハイパー核の人工的な生成が可能になり、それらの性質が調べられるようになったものであり、それによってハドロン多体系についてより統一的な理解が可能となりつつある。

本論文は、ストレンジネス $S=-1$ を持つハイペロン(Λ, Σ)の中で、アイソスピン3重項状態に属する Σ -ハイペロンを含む Σ -ハイパー核を理論的に研究したものである。

Σ -ハイパー核を研究する上で基礎になる Σ -ハイペロンと核子(N)の間の相互作用は実験的に未だ十分に解明されていない。そこで、実験データに加え、クォーク模型等に基づいて幾つかの Σ -N間ポテンシャルが提案されている。Harada等は、 Σ 粒子を含む4体系($A=4$)の研究を通じて、SAP-1およびSAP-Fと呼ばれる Σ -N間ポテンシャルを提案した。本論文の目的は、Harada等が提案した強いスピン・アイソスピン依存性を持つSAP-1およびSAP-Fの Σ -N間ポテンシャルに基づいて、 Σ 粒子を含む3体系($A=3; N\Sigma$)を精確に解いてその構造を解明すること、また、その結果から逆に用いた Σ -N間ポテンシャルの性質を定量的に確立することである。

Σ 粒子を含む3体系($A=3; N\Sigma$)については、束縛状態が存在するかどうか、あるいは束縛状態が存在しない場合でもどのような状態が引力的な状態になり得るか、実験的にも理論的にもまだ統一した理解が得られていない。DoverとGalは $\Sigma N \rightarrow \Lambda N$ 転換過程におけるスピン・アイソスピンの選択則を考慮して、($T=1, S=1/2$)の ΣNN 系の状態のうち特に核子対のアイソスピン $T_{NN}=0$, スピン $S_{NN}=1$ の状態が、最も束縛しやすい候補であると主張した。しかし、($T=1, S=1/2$)の状態には($T_{NN}=1, S_{NN}=0$)の状態の状態もあり、これらの2つの状態の結合によってさらに引力的な状態が生じる可能性がある。したがって、この問題についての理解を得るためには、 $N\Sigma 3$ 体系およびその部分系に全てのスピン・アイソスピン状態を隔に取り込んだ分析が必要であり、とりわけDoverとGalの主張を確かめる為には、($T=1, S=1/2$)の状態の2つのチャンネル間の結合を正確に解かなければならない。その際、 Σ -ハイペロンの3つの異なるアイソスピン成分の状態($\Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-$)間の質量差とクーロンポテンシャルがアイソスピン対称性を破る可能性があり、それらの効果についても正確に取り扱ったチャンネル結合系のSchrödinger equationを解かなければならない。

本論文の著者は、SAP-1とSAP-Fの ΣN ポテンシャルを用いて、 $\Sigma NN 3$ 体系にKamimura等によって開発された組替えチャンネルの方法を適用して、精確に解き上げた。特に、 $\Sigma NN 3$ 体系の状態の中で、最も引力的な

状態として得られる ${}^3_2\text{H}$ ハイパー核の $J^\pi = 1/2^+$ 状態に注目し、そのエネルギー、ANNチャンネルへの転換幅や波動関数の広がりなどの物理量を分析し、 ${}^3_2\text{H}$ -ハイパー核の構造を理論的に解明した。この分析において、 Σ -ハイペロン間の質量差とクーロン力の効果が著者によってはじめて詳細に調べられた。

本研究で得られた特筆される結果は、1) ΣNN 3体系の状態の中で、 ${}^3_2\text{H}$ ハイパー核の $J^\pi = 1/2^+$ 状態が最も引力的であること、2) その状態における引力的構造は、 $[\text{pn}({}^3S_1) \otimes \Sigma^0]$, $[\text{nn}({}^1S_0) \otimes \Sigma^+]$ および $[\text{pp}({}^1S_0) \otimes \Sigma^-]$ 間の結合によって引き起こされること、3) その結合は、各チャンネル間の大きな閾値エネルギーの差にも関わらず、 ${}^3_2\text{H}$ のエネルギーや波動関数の広がりには大きな影響を与えること、4) また、強いチャンネル間の結合によって、系全体のアイソスピンが非常に良い近似的量子数になっている ($\sim 96\%$) ことが示された。

これは要するに、 ΣNN の3体系についてこれまで認識されていなかった $T = 1$ の状態におけるチャンネル間の結合が極めて重要であるという新知見を得たものであり、 ${}^3_2\text{H}$ 系に引力的状態 ($J^\pi = 1/2^+$) が出現するという結論は Σ -ハイパー核の研究分野に対して強いスピン・アイソスピン依存性を持った ΣN 間ポテンシャルの特徴に基づくものでありその貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(理学)の学位を授与される資格があるものと認める。