

論文内容の要旨

論文題目 : Shell-model description of light unstable nuclei (軽い不安定核の殻模型による記述)

氏名 : 藤本 林太郎

近年の実験により、従来より知られていた原子核における魔法数は中性子過剰核で変化することが示唆されている。この研究では、この現象を核子 - 核子相互作用の立場から説明し、そこから明らかとなる核力の性質を殻模型のハミルトニアンに反映させることで、 p 殻、 psd 殻での原子核について、安定核、不安定核を同時に含め、系統的に記述することを目指す。

$N = 20$ の魔法数が Mg の付近で壊れ、その付近では原子核が変形していることは 10 年以上前から知られていた。RI ビームを用いたここ最近の不安定核の実験により、軽い原子核ではドリップライン近くまで様々な物理量の解析が進んでいる。そうした中で $N = 16$ の魔法数が中性子過剰な領域で現われることが見出された。 sd 殻において考えると、 $N = 20$ から $N = 16$ への魔法数の変化は、ドリップライン近くでは $0d_{3/2}$ 軌道が安定な原子核での位置に比べて非常に高いところに存在していることが原因と考えられる。そこで不安定核領域の原子核においても有用な殻模型のハミルトニアンを用いて有効一粒子軌道を書いてみると、確かにそのようになる。つまり $0d_{5/2}$ にいる陽子数が減るにつれて $0d_{3/2}$ 軌道はあがっていく。何がその原因になっているのかを調べると、それは $0d_{5/2}$ 軌道にいる陽子と、 $0d_{3/2}$ 軌道にいる中性子との間に働く強い引力が原因であった。この $j_{>} = l + 1/2$ 軌道と $j_{<} = l - 1/2$ 軌道の間に働く力が強いことは G -matrix による計算を見ても同じ傾向にある。 sd 殻以外の他の殻においても同様である。これは陽子と中性子を交換する力に対応しており、式で表すと

$$V_{\tau\sigma}(r) = (\tau_1 \cdot \tau_2)(\sigma_1 \cdot \sigma_2)f_{\tau\sigma}(r)$$

と表される。 (τ, σ) はそれぞれアイソスピン、スピンのオペレータ この起源は Boson の交換ポテンシャルと考えることができ、強い引力を持つことも自然に理解できる。この力が魔法数の変化に大きな影響を及ぼしている、重要な力である (図 1)。

p 殻においては、Cohen-Kurath による相互作用が殻模型計算において長く使われ、実験値をよい精度で再現してきた。このハミルトニアンは主に安定核領域の実験値に合わせるために行列要素、一粒子エネルギー

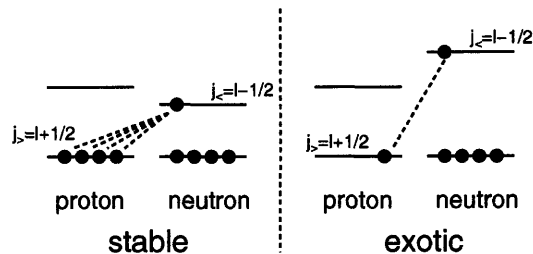


図 1: 安定核 (左) においては j_p 軌道にいる十分な数の陽子が中性子の j_n を引き戻す。不安定核 (右) ではそれまで存在した強い引力がなくなるため、中性子の軌道は相対的に上がり、そこに新しいギャップができる。

ギーをすべてパラメータとして決定したものである。ここで先程の $V_{\tau\sigma}$ に対応した要素を見てみると、あまり大きくないことが分かる。G-matrix との比較でも、同じ結論になる。つまり、Cohen-Kurath においては、この $V_{\tau\sigma}$ の効果が十分に取り入れられていないと考えられる。なぜならその効果は不安定核で強く現われるが、このハミルトニアンは安定核のみのデータで作られていたからである。そこで我々はこの部分を強くすることで、不安定核も含めた p 殻の原子核の記述を目指す。これと同時に、Cohen-Kurath ではほとんど縮退していた一粒子エネルギーの間隔を 4MeV 程度に広げる。この二つの効果が安定核ではキャンセルし、この修正により、安定核、不安定核両方での記述が同時に可能となる。

今述べた方向で従来のハミルトニアンを変更し、 p 殻の原子核について、エネルギー、Gamow-Teller(GT) 遷移、磁気モーメントを計算した結果、既存の相互作用での結果よりも実験値とよく一致することが確認できた (図 2)。Gamow-Teller 遷移や磁気モーメントは同じ軌道角運動量を持つ軌道の組の間の相互作用の強さにより、その値に影響を受ける。 $V_{\tau\sigma}$ はまさしくこれに相当する。つまり、GT 遷移や磁気モーメントを実験と比べることで、計算により求めた波動関数が妥当であるかを判断できる。この観点から、我々の施した $V_{\tau\sigma}$ に関する変更は正しい方向、かつ妥当な変化量であったと結論付けられる。

続いて、 sd 殻に核子がいる場合について計算を拡張する。炭素原子については、ドリップラインである ^{22}C の手前まで、いくつかの基底状態のスピンの程度分かっている。まず、この同位体では $1s_{1/2}$ 軌道が重要な役割を果たしていることに注意する必要がある。これは中性子が $0d_{5/2}$ 軌道からつまっていき酸素の同位体とは大きく異なる点である。なぜ $1s_{1/2}$ の方が下にいるのかについては、 p 殻と sd 殻の間に働く相互作用が関係しており、 $0p_{1/2}$ に陽子があるかどうか大きく影響している。炭素同位体のその $1s_{1/2}$ はまた、その束縛が弱いことも大きな特徴である。one neutron separation energy (S_n) は ^{15}C において、1.2MeV であり、同じ中性子数の酸素などと比べてもかなり小さい。このゆるい束縛状態は炭素同位体において常に保たれているであろうことは、 ^{17}C 、 ^{19}C のやはり小さい S_n からみても理解できる。

その広がっているであろう $1s_{1/2}$ 軌道の効果を相互作用に取り入れた計算を行った。どのくらい変更するかは、すべての同位体の基底状態を同時にさせるようにする程度に決める。知られているすべての基底状態のスピンの、パリティを再現することができた。既存のハミルトニアンと比べてみても最もよい結果を出している。また、いくつか観測されている γ 線の情報とも矛盾しないことがわかった (図 3)。

最後に、核子間の相互作用に起因して殻構造が大きく変化することを見てきたが、始めに述べたように、 $0d_{3/2}$ の軌道は酸素のドリップライン近くではかなり押し上げられている。ドリップライン近くの核はもともと束縛の強い状態ではないのでその押し上げられた状態がすぐに非束縛状態になってしまう可能性がある。そこで最後に酸素の同位体において、非束縛になったときの連続状態からの寄与を計算して、殻模型計算との違いを見積もっておくことは重要であろう。我々は、 ^{24}O の 2^+ 励起状態と ^{25}O の基底状態について連続状態からの効果も取り入れた計算を行い、殻模型と比べてどの程度変化するかを計算した。その結果、 ^{24}O の 2^+ 状態では殻模型の計算から 0.8MeV 程低い位置に中性子放出のピークが出た。 ^{25}O の場合は 0.3MeV 程度だけ下がる。これは二体相互作用に起因している。

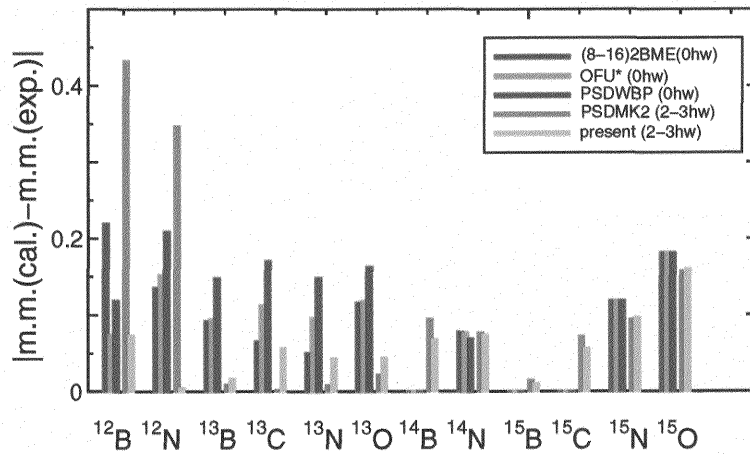
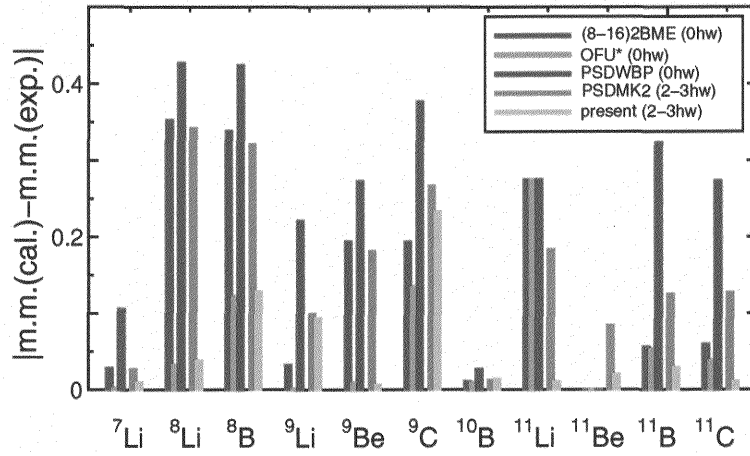


図 2: 各原子核での磁気モーメントの実験との誤差。「present」が我々の計算。その他の相互作用を用いた場合と比較してある。「(8-16)2BME」は Cohen-Kurath を表す。

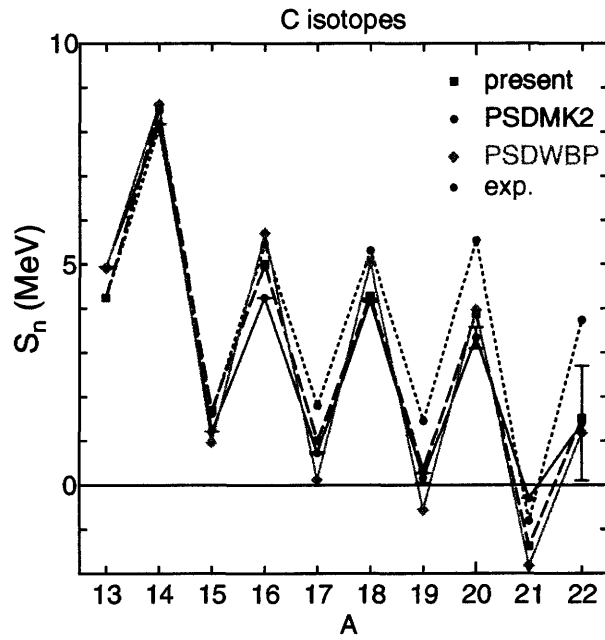


図 3: 炭素同位体の S_n 。実験値と、他の相互作用の結果とが比べてある。「present」がもっともよい値を出している。(図 2 の「present」とは違うものであるが、 p -shell 部分はほぼ同じである。)

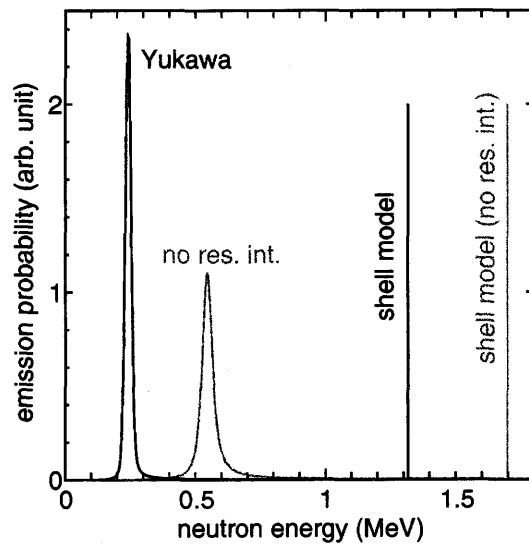


図 4: ^{24}O の 2^+ 状態から放出される中性子のエネルギー分布。殻模型による結果 (shell model) から「Yukawa」で表されるところまで下がってきている。「no res. int.」は二体相互作用がない場合を表す。