

論文の内容の要旨

論文題目 「Quadrupole Collectivity of ^{16}C 」
「 ^{16}C の四重極集団運動性」

氏名 今井 伸明

加速器技術の発展に伴い、自然には安定に存在しない原子核(不安定核)がビームとして生成できるようになり、不安定核の研究が 1980 年後半から盛んに行われている。この結果、安定核の核構造を元に構築された魔法数の様な原子核の基本的な性質が、不安定核では消失していることが分かってきた。

原子核の性質を調べる上で、一般に良く用いられるプローブとして励起エネルギーと励起準位間の転移確率が挙げられる。特に偶偶核の場合、ほとんど例外なく基底、第一励起状態のスピンのパリティがそれぞれ 0^+ 、 2^+ であることから、これらの原子核の第一励起状態の励起エネルギー($E(2^+)$)や、第一励起状態から基底状態への転移確率は系統的な議論に適している。

第一励起状態が束縛状態の場合、脱励起には電磁相互作用のみが関与する。液滴模型を用いると、励起エネルギーを考慮した換算転移確率($B(E2)$)は電荷を持つ陽子物質の四重極集団運動性を反映する変形パラメータ β_c で表現することが出来る。この β_c は原子核全体の集団運動性を示す変形パラメータ β_2 と高々 50% 程度のずれで一致することが系統的に分かっていた。この一致は原子核中では陽子分布と中性子分布の集団運動が、ほぼ等しいことを示している。この性質は現在までに知られている、陽子と中性子数が極端に違う不安定核でも成り立っていた。ところが、不安定核 ^{16}C の β_c 、 β_2 を測定したところ、後者が前者の約 6 倍大きいことが分かった。この変形パラメータの極端な違いは他の原子核には見られなかったことであり、少数量子多体系での新しい集団運動形態を示すものである。

不安定核の $B(E2)$ 測定には、一般に中間エネルギーのクーロン励起法が用いられている。しかし、この方法は ^{16}C の様に陽子数が小さい場合には核力励起が主になり、求めた

B(E2)は核反応模型に大きく依存し、不定性が高い。そこで、核反応模型を用いずに B(E2) を決定するために、私は新しい方法を開発した。この方法では第一励起状態の寿命を直接測定する。励起状態の寿命は遷移確率の逆数であり、B(E2)とは反比例の関係にある。光速の30%程度の速度を持つ ^{16}C を ^9Be 標的に照射し、非弾性散乱により励起状態を生成する。標的下流には鉛障壁を配置する(下図1参照)。またガンマ線検出器を標的上流に輪状に二つ(R1, R2)配置する。脱励起は励起状態の寿命に従って行われる。もし寿命が100psの場合、原子核は高速で移動するので、ガンマ線の放出位置が下流に平均約1cm移動する。R1, R2で検出されるガンマ線が辿る鉛障壁内の距離は、放出位置に対して異なる関数である。ガンマ線は鉛では完全に吸収されないが、その強度は減衰するので、同じ位置から放出されたガンマ線に対してもR1, R2で検出するガンマ線の収量は異なる。この収量の差は放出位置に依存するので、収量差から寿命を求めることができる。

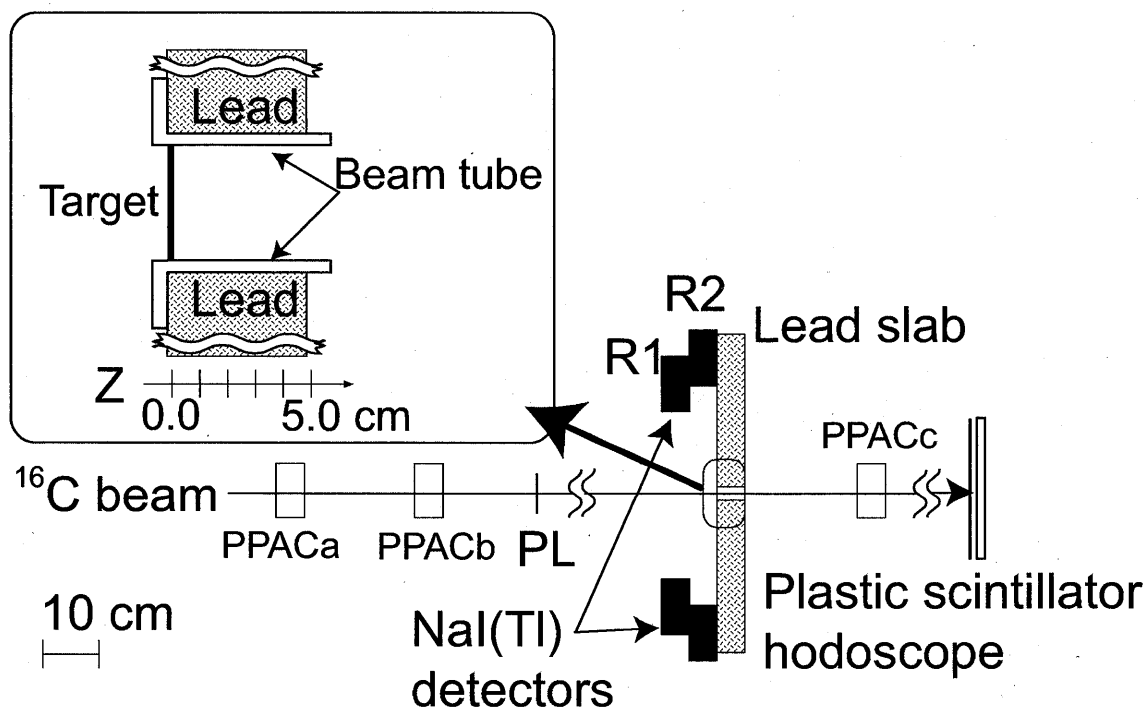


図1 実験のセットアップの概略図

この方法を初めて ^{16}C に適用し、励起状態の寿命を 67 ± 13 (統計誤差) ± 14 (系統誤差)psと決定した。これは変形パラメータに変換すると $\beta_c = 0.14 \pm 0.01 \pm 0.02$ に相当し、第一励起状態の四重極集団運動への陽子の寄与は小さいことが予想できる。

寿命をB(E2)に変換すると $0.71 \pm 0.14 \pm 0.15 \text{ e}^2\text{fm}^4$ となる。中心値をWeisskopf unitと呼ばれる、励起に関与した陽子数に換算すると0.29となった。図2(a)に、質量数が50以下の偶偶核でのB(E2)をWeisskopf unitで表示している。四角は陽子、もしくは中性子数が魔法数を持つ原子核を示し、丸は両方とも魔法数を持たない原子核を示している。図から

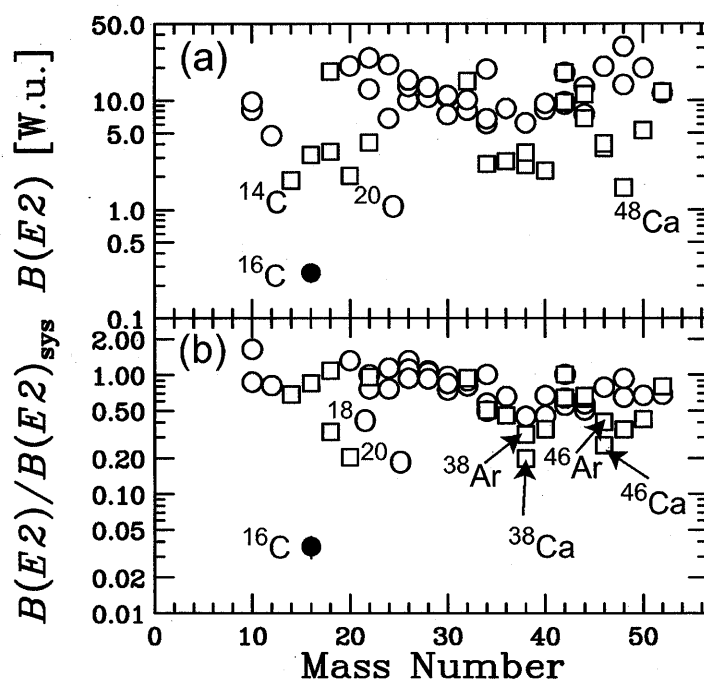


図2 ^{16}C の $B(E2)$ と質量数 50 以下の偶偶核の $B(E2)$ との比較。

魔法数を持つ原子核が小さい $B(E2)$ を持つことが分かる。しかし、 ^{16}C は魔法数を持たないにも関わらず、その $B(E2)$ は魔法数を持つ原子核よりも約一桁小さく、系統性から大きく外れている。この異常性は $B(E2)$ と $E(2^+)$ との関係を見ると更に際立つ。液滴模型では $B(E2)$ は $E(2^+)$ に反比例する。この $E(2^+)$ から予想される $B(E2)$ を $B(E2)_{\text{sys}}$ とし、実測値との比を示したものが図 2(b) である。魔法数を持たない原子核の場合、 $B(E2)_{\text{sys}}$ は 50% 程度のずれで実測値を再現しており、魔法数を持つ場合でも比は高々 0.2 である。ところが ^{16}C の比は 0.036 となり、極端に小さい。これらは ^{16}C 内部の陽子の四重極集団運動性が極めて小さいことを示している。

一方、非弾性散乱は核力によって生じるので、励起断面積は ^{16}C 全体の β_2 を反映する。脱励起ガンマ線の収量を測定することにより、断面積 41^{+2}_{-6} mb と決定した。また、 β_2 は測定した断面積と歪曲波ボルン近似(DWBA)を用いた計算とを比較することにより得られる。DWBA を行うには、入射、出射波を表す光学ポテンシャルが必要である。通常、光学ポテンシャルは弾性散乱の解析から得ることが出来る。しかし、 ^{16}C と ^9Be の弾性散乱は測定されておらず光学ポテンシャルを得ることができなかった。代わりに、 ^{12}C と ^{12}C 、 ^{12}C と ^{16}O の弾性散乱測定結果から導出された二つの光学ポテンシャルを用いて DWBA 計算を行った。これら二つの反応の重心系のエネルギーと換算質量は、本研究で用いた反応のものとはほぼ等しく、導出した β_2 の光学ポテンシャル依存度が小さいと考えられる。最終的に得られた結果は $\beta_2 = 0.87^{+0.02}_{-0.19}$ となり、原子核全体の四重極集団運動性は大きいことを示している。陽子物質の集団運動性が小さいことは $B(E2)$ の値から分かっているのも、大きい β_2 は中性子物質の集団運動性が大きいことを示唆している。

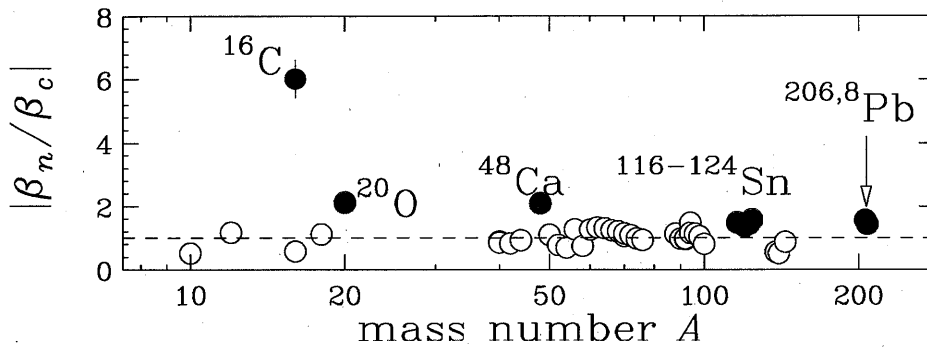


図3 陽子と中性子分布の変形パラメータの比

中性子の四重極集団運動性を示す変形パラメータ(β_n)は、 β_2 と β_c の値と、Bernsteinらが提唱する半経験的な式を用いることで導出できる。その結果、陽子と中性子物質の変形パラメータの比は $|\beta_n/\beta_c|=6.0\pm 0.6\pm 0.8$ となった。図3は陽子、中性子数が魔法数である原子核とその周囲の原子核の $|\beta_n/\beta_c|$ を示している。通常の原子核の場合、点線で示したように $|\beta_n/\beta_c|=1$ になる。つまり陽子と中性子の集団運動性が等しくなる。しかし、 ^{16}C では $|\beta_n/\beta_c|=6$ であり、陽子中性子の四重極運動が非対称であることを示している。

この特異現象を説明する原子核描像の候補として、殻模型と反対称化分子動力学(AMD)を用いた理論計算が挙げられる。殻模型では、陽子数と中性子数の非対称性に起因して、陽子側の $p_{1/2}$ と $p_{3/2}$ 間のエネルギーギャップが大きくなり、また中性子の有効電荷が小さくなる二つの効果が考えられる。これら二つを考慮することで、通常の殻模型計算よりも $B(E2)$ を小さく予想することに成功している。一方、AMDの計算によると、 ^{16}C 内では陽子、中性子物質がそれぞれオブレート、プロレート変形するという興味深い描像が予想されている。また、第一励起状態の回転軸が中性子側によって決まっており、陽子と中性子の回転軸が直交しているために、陽子の変形パラメータが固有値よりも小さくなり、その結果として小さい $B(E2)$ を予想している。ただ、両者とも未だ実験値に比べて $B(E2)$ の値は約2倍大きく、更なる理論研究が望まれる。

また、実験側としても、 ^{16}C 周囲の原子核である $^{15,17}\text{B}$ や、 ^{18}C の第一励起状態の寿命測定及び、非弾性散乱断面積測定を通し、この異常性の領域を明らかにすると共に原因追求を進めて行く予定である。