



中性子過剰核に魅せられて

中村 隆司 研究室～基礎物理学専攻



中村 隆司 教授

原子の中心に存在する原子核は、陽子と中性子が核力により結びついた、核子の集合体である。その大きさは原子と比べて非常に小さく、半径がおよそ 10^{-15} m程度しかない。通常の原子核構造については我々が知っている通り、すでにほとんどのことが解明されている。しかしその一方で、極端に中性子の数が多い中性子過剰核などの不安定核については、未だその性質が解明されておらず、現在、多くの研究者が解明に取り組んでいる。

本稿では、中村先生が加速器実験を通して行っている、中性子過剰核の研究について紹介する。

中性子過剰核とは

自然界に存在する安定で軽い原子核では、陽子数と中性子数はほぼ同数であり、重い原子核では中性子数のほうが陽子数よりやや多くなっている。ここでいう安定な原子核とは、寿命が少なくとも太陽系の寿命 (10^{10} 年) 程度ある原子核のことであり、無限の寿命があるとみなすことができる。原子核の寿命とは原子核が崩壊を起こし、別の原子核になるまでの時間であり、たいていの場合 β 崩壊が起こるまでの時間を指す。

一方で、陽子数と中性子数が安定核と比べて大きく異なる原子核も存在している。このような原子核を不安定核といい、特に中性子数が過剰なものを中性子過剰核という。不安定核は寿命が短いため観測することは困難であった。しかし、1980年代にラジオアイソトープビーム (RI ビーム) という新しい人工放射線が開発されたことにより、不安定核を効率よく生成できるようになった。光速の40%以上の速さをもった安定核を、標的となる原子核に衝突させると、安定核が砕けて種々の不安定核が生成される。この中から特定の不安定核を電磁力により分離してビームとして利用したものがRIビームである。RIビームの登場

により不安定核の観測が可能になり、不安定核の研究が進んできた。中村先生は不安定核の中でも特に中性子過剰核に興味を持ち、その独特な物理的性質について研究を行っている一人である。

中性子過剰核の中には、安定核とはまったく異なる構造をとるものがあることが知られている。たとえば、現在確認されているものとして「中性子ハロー核」と「中性子スキン」の二つがあげられる (図1)。中性子ハロー核では、過剰な中性子の一部が高密度な原子核部分 (コア核) からはみ出して存在している。その姿がおぼろ月のように見えることから、おぼろ月のかさを意味する halo という英語をとって中性子ハロー核と名付

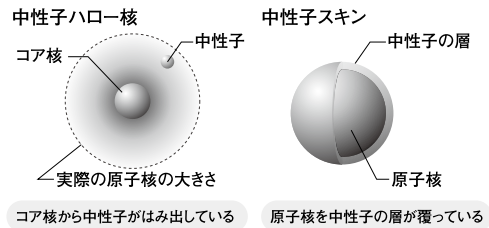


図1 中性子ハロー核と中性子スキン

けられた。中性子スキンでは過剰な多数の中性子が原子核の表面に層をつくっている。その姿が皮で覆われた原子核のように見えるので、皮を意味する skin という英語をとって中性子スキンと名付けられた。これら二つのように通常とは大きく異なる構造をもつ原子核のことを「エキゾチック核」という。

中性子過剰核と安定核との違いは他の性質にも現れる。異なる性質の一例として、たとえば魔法数に変化することがあげられる。魔法数とは、陽子数や中性子数がそれぞれその数になると特に安定となる数のことであり、具体的には2、8、

20、28、50、82、126である。魔法数は原子核の種類によらない普遍的な数とされていたが、中性子過剰核ではこの法則が破られる例が最近見つかっている。法則が破られている例では、ある魔法数が消え、別の新たな魔法数が現れるのである。

しかし、そういった中性子過剰核特有の構造や性質がなぜ現れるのか、またある陽子数の原子核に対していったいどれだけの数の中性子を付けることができるのか、といったことは未だにあまり解明されていない。本稿では中村先生が主に行っている、中性子ハロー核に関する研究と、中性子過剰核による宇宙核物理研究について紹介する。



ハロー構造の謎を探る

中性子過剰な核種の一つに ${}^{11}\text{Li}$ がある。 ${}^{11}\text{Li}$ は陽子数3、中性子数8のリチウム原子核である。リチウムの安定核が中性子数3の ${}^6\text{Li}$ 、中性子数4の ${}^7\text{Li}$ であるから、 ${}^{11}\text{Li}$ の中性子数は安定核に比べて2倍もあり、中性子過剰であることがわかる。また、 ${}^{11}\text{Li}$ の原子核にはこれ以上中性子を付けることはできない。これは、中性子を付け加えようとするエネルギー的にさらに不安定になり、束縛状態を作ることができなくなってしまうためである。束縛状態とは、エネルギーが負で、粒子が互いの相互作用により運動を制限しあっている状態のことをいう。束縛状態を作れなければ、個々の粒子は自由に運動するため原子核のように全体で一つの粒子としてふるまうことができない。ある原子核について束縛状態を作ることができる限界のことを束縛限界という。

束縛限界にある原子核は、奇妙な形をとっていることが1980年代から知られていた。その最初の例が ${}^{11}\text{Li}$ である。 ${}^{11}\text{Li}$ は、 ${}^9\text{Li}$ という核を中心として、その外側を二つの中性子が飛んでいるというハロー構造をとっていたのである。しかし、実際に ${}^{11}\text{Li}$ でハローを作っている中性子がどのように存在しているのかということは明らかにされていなかった。中村先生のグループはそれらの中性子がいったいどのように存在しているのかということを明らかにするために実験を行った。

それまでの研究から、中性子ハロー核の特徴は低いエネルギー領域における励起に反映されることがわかっていた。そのため ${}^{11}\text{Li}$ の構造を知る

ためにはまず原子核に光を当てて励起させる必要がある。しかし、一口に ${}^{11}\text{Li}$ に光を当てるといっても、それは容易に為し得ることはない。 ${}^{11}\text{Li}$ は寿命が短くそのまま観測することはできないので、RIビームとして生成し、実験を行う。この時の ${}^{11}\text{Li}$ の速さは光速のおよそ30%程度である。これだけの速度で飛行している原子核に光そのものを当てることは難しい。

そこで中村先生が用いた手法が、クーロン分解法と呼ばれる手法である。この手法を用いることにより、 ${}^{11}\text{Li}$ ではハローをつくる二つの中性子が空間的に近付いたペアを形成していることを解明した。以下ではその実験の概略について紹介する。

クーロン分解法とは、原子番号の大きな原子核を標的として設置し、そこに中性子過剰核をぶつけることで、重い原子核との間に生じるクーロン力により中性子過剰核を励起させ、分解させる手法である。中性子過剰核では過剰な中性子が弱く結び付いているために簡単に分解させることができる。このとき、対象となる核はクーロン力によって励起されるが、物理学では光の受け渡しによるものとみなすことができる。こうした理由によりこの手法をとることができる。

この実験では標的として鉛を用いる。 ${}^{11}\text{Li}$ が鉛標的にぶつかると、クーロン力により励起され、 ${}^9\text{Li}$ と中性子二つに分解する。これらを検出器で検出し、ベクトル量としての運動量を測ることで ${}^{11}\text{Li}$ の励起エネルギースペクトルを得ることができる。すなわち、どの励起エネルギーで

光を吸収しやすいかがわかる。

${}^9\text{Li}$ は正の電荷をもつため比較的容易に測定できるのだが、中性子は電荷をもたないため測定することが難しい。そこで用いられるのがプラスチックシンチレータと呼ばれる装置であり、これは炭素と水素からできている有機化合物である。水素原子は陽子数1、中性子数0の原子核と電子一つからできているので、事実上陽子が単独で存在しているとみなすことができる。装置に中性子が飛んでくると、中性子が陽子に衝突する。すると陽子は飛ばされる。陽子は電荷をもった粒子なので、飛んでいく際に周囲にある分子中の電子をクーロン力により励起状態にさせる。この励起状態になった電子は、すぐさま基底状態に戻ろうとして、励起エネルギーを光（シンチレーション光）として放出する。シンチレーション光を検出することで中性子を検出したことになる。

実験では、二個の中性子をそれぞれ別の中性子検出器で捉えるために、二層の検出器を設置した。しかし、二個の中性子を観測するのは非常に難しい。たとえば、一層目の検出器で検出された中性子が、散乱されて二層目の検出器でも検出されてしまうことがある。このような事象を取り除かずに行うと正確なデータを得ることができない。これを解決するために中村先生は次のような方法を考案した（図2）。

もしも中性子が一層目で散乱されて、二層目で再び検出されたならば、その中性子は散乱されなかったものに比べて速度が低下しているはずである。この点に着目し、速度が低下しているものを

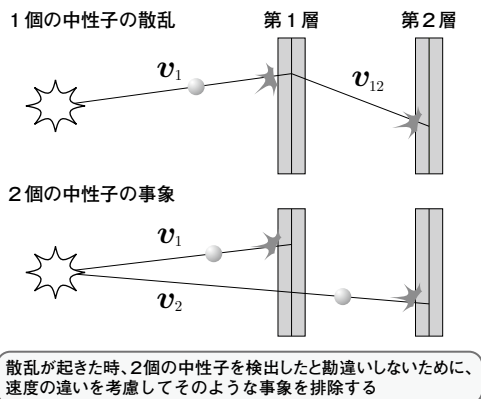


図2 中性子の検出

全て除外して、解析を行うことにしたのである。この際、散乱されていないにもかかわらず、除外される条件を満たす中性子が存在してしまうが、これに関しては補正することができるので問題にはならない。こうして中性子検出の感度と精度を飛躍的に高めることに成功し、次のような結果を得ることができた。

通常の原子核を励起するためには、10～20 MeVと非常に高いエネルギーの光を与えなければならないが、 ${}^{11}\text{Li}$ では1～2 MeVとエネルギーが低い領域でも強い励起が起こっていることが判明した。低いエネルギー領域での励起のことをソフト励起という。実は ${}^{11}\text{Li}$ の励起については中村先生が実験を行う前にも実験が行われていたが、強いソフト励起が起こることは確認されていなかった。それまでの実験では低いエネルギー領域における感度が低く、精度の高い結果が得られていなかったためだ。中村先生の実験では低いエネルギー領域でも高い感度で測定できたので、強いソフト励起が確認できたのである。

原子核を電氣的に励起させるためには、電荷の中心と質量の中心をある程度以上ずらさなければならない。 ${}^{11}\text{Li}$ のハロー構造において二つの中性子が独立して動いていたとすると、たとえばちょうど正反対の位置にあるときには質量と電荷の中心が一致してしまう（図3）。このため、二つの中性子が独立して動いている場合はソフト励起が起こりにくい。一方、二つの中性子が空間的に近付いた状態で動いていたならば、電荷の中心と質量の中心にずれが生じる。最初からずれが生じて

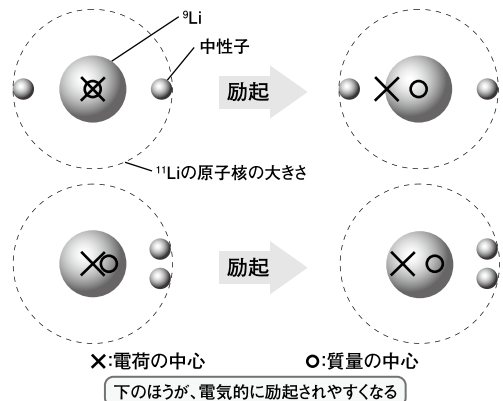


図3 励起に必要なエネルギーの低下

いるので、この場合には低いエネルギーを与えただけでも電氣的に励起させることができる。つまり、今回確認できた強いソフト励起は、二つの中性子が空間的に近付いたペアを形成していると考えられることで説明できる。

二つの中性子がペアになっているものをダイニュートロン (Di-neutron) と呼ぶ。通常、中性子と中性子、陽子と陽子の組み合わせのように、原子核を構成する核子が同種の組み合わせで束縛状態をつくることはない。しかし、原子核中に入ることと同種の核子が疑似的に束縛状態を作り安定化するのではないかという仮説も過去にあった。今回の中村先生の発見により、ダイニュートロンというものが重要な役割を果たすような中性子物質が存在する可能性が出てきたのである。

また、 ^{11}Li 以外にも、別の構造の中性子ハロー核が次々と発見されている。たとえば ^{11}Be も中性子ハロー核の一つである。 ^{11}Be は原子核の中心に ^{10}Be があり、その外側を中性子が一つ飛んでいるため、ワンニュートロンハローと呼ばれている。その他にも、ハロー構造を四つの中性子が形成する、フォーニュートロンハローと呼ばれる原子核もあるのではないかと考えられている。

現在知られている最も重い中性子ハロー核は ^{19}C であるが、中村先生はさらにそれよりも重い

中性子ハロー核を発見するための実験も行っている。2008 年に行った実験では ^{22}C と ^{31}Ne について調べている。実験は ^{11}Li のときと同じく、クーロン分解法を用いて行った。

中性子ハロー核の特徴として、 ^{11}Li のようにソフト励起があげられる。そしてこのソフト励起では、分解反応の断面積が非常に大きくなる。分解反応の断面積とは簡単な言葉で表すと、的の大きさであり、反応率に比例する値である。つまりこの値が大きいほど原子核半径が大きく、また反応率も高いと考えてもよい。通常の原子核では分解断面積は 0.1 バーン (バーン = 10^{-24}cm^2) 以下で小さいのだが、 ^{11}Li などの過去に見つかった中性子ハロー核では 0.5 ~ 1 バーン程度になっていた。つまり、もし分解断面積が 0.5 ~ 1 バーン程度であったなら、その原子核が中性子ハロー核である可能性が高い。この考えに基づいて実験を行ったわけである。

その結果、 ^{19}C と ^{22}C 、 ^{31}Ne で断面積が高く、0.5 ~ 1 バーンの範囲内に入った。 ^{19}C はもともと知られていた中性子ハロー核であるから、前述した考えと合わせて、 ^{22}C と ^{31}Ne の二つも新しい中性子ハロー核であると、先生は結論づけた。

先生の研究で中性子ハロー核についてさらに多くのことが解明されていくことが期待される。



中性子過剰核から、未だ見ぬ領域へ

自然界に存在する元素は、宇宙が生まれたときから存在していたわけではない。現在知られている、天然に存在する元素はウランまでの 92 種だが、これらは恒星の中で起こる原子核反応によって合成されてきた。たとえば、3 個の ^4He が核融合をして ^{12}C となり、 ^{12}C と ^4He がさらに核融合を起こして ^{16}O となる。このように次々と反応を繰り返すことによって元素が合成されていくのだが、その過程では中性子過剰核の反応が重要な役割を果たしている。中村先生は中性子過剰核を介する反応の研究を通して元素合成のメカニズムの解明を目指している。

まずはじめに、現在わかっている元素合成過程の概略について説明する。多くの元素は恒星内部で核融合や核分裂を起こすことによって合成されていくが、実は恒星内部の通常の核融合で合成

することができるのは ^{56}Fe までである。これは、さらに原子番号が大きくなると原子核同士のクーロン反発力が大きくなって安定性が低くなり、核融合が起こりづらくなるためである。そのため ^{56}Fe よりも重い核種は主に中性子捕獲によって生成されると考えられている。中性子は電荷をもたないため原子核とクーロン反発力を生じることがなく、衝突して原子核に吸収されやすい。そして、中性子を吸収していくうちに中性子が過剰となり原子核は不安定になる。過剰な中性子は β 崩壊を起こして原子核内部で陽子になり、その結果一つ原子番号の大きな元素になる。これを繰り返すことで ^{56}Fe よりも重い元素が生成されていく。この過程は超新星爆発の際に急激に起こることから r プロセス (rapid process) と呼ばれている。重元素のおよそ半分がこの r プロセスで生成され

たであろうと考えられている。また、残りの半分の重元素は、太陽の0.8～8倍程度の質量をもつ恒星が進化の最終段階を迎えた際にその内部で生成されただろうと考えられている。こちらは反応がゆっくりと進むためsプロセス(slow process)と呼ばれている。

元素合成のプロセスは概略こそ現在では分かっているが、実際にrプロセスがどこで起こっているのか、その個々の反応がどのようにして起こっていくかは解明されていない。この問題には現在多くの研究者が取り組んでいる最中であり、中村先生もその中の一人である。ここではその研究の一つを紹介する。

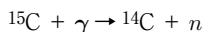
rプロセスにかかわる反応のなかでも特に重要であると考えられているものに、次式で表される ^{14}C の中性子捕獲反応がある。



この反応はrプロセス以外の反応系においても重要な役割を果たしていると考えられている。そこで、この反応の反応率を調べるために中村先生は実験を行った。

この反応を再現するためには ^{14}C を多量に集めてきて、さらにそこに中性子をぶつける必要がある。しかし、 ^{14}C は不安定核であるため多量に集めて標的にすることは難しい。しかも中性子そのものを扱うことも難しいため、この反応を再現することは非常に困難である。

そこで中村先生はこれをより簡単にするために、次式で表される逆反応で実験し、その結果から計算によって正反応の反応率を調べる方法をとった。



これは ^{11}Li のときと同様にクーロン分解法を用いることで実現できる。つまり、 ^{15}C を加速器を用いて生成し、鉛標的にぶつけて分解してやればよい。そして分解によって出てきた ^{14}C と中性子を測定すれば計算に必要な値を得ることができる。RIビームを用いればこの方法は比較的容易にできるので正反応に比べ高い効率でより多くの統計量を得ることができる。

こうして得ることができた結果は、他のチームが行った正反応による実験結果ともほぼ一致していた。そしてその結果から、 ^{14}C の捕獲反応が、どのくらいの温度ではどの程度の反応率で起こるか、ということが計算可能になった。

中村先生の今後の展望としてまず一つに、数多くある反応の中から、上記の ^{14}C の反応のように重要と思われるものを選んで実験をしていこうというものがある。

もう一つの展望として、中性子過剰物質の物性を調べてみようというものがある。超新星や中性子星といったものは特殊な星であり、中性子が大量に固まって存在している。つまり中性子からできた物質というわけだ。あるいは身近にある机や椅子などのものが中性子ばかりからできているという風に考えてもよい。そういった中性子過剰な物質がいったいどのような性質を持っているのかという興味から、どのくらいの圧縮率で圧縮できるのか、などといったことを調べようと中村先生は考えている。中性子過剰物質の物性を調べるために中村先生が考えている方法として、核力による中性子過剰核の励起がある。クーロン力による励起では、どうしても中性子ハローのような表面に一つある中性子に反応しやすくなってしまふ。しかし、今知りたいのはむしろ原子核全体が反応するような場合であるから、クーロン力による励起は適切ではない。それに対して核力による励起であれば原子核全体が反応してくれる。そこで、 α 粒子などの軽い原子核との間に生じる核力を使って励起させようとしている。励起の形にはさまざまなものがあるのだが、一つに原子核全体が膨らんだり縮んだりするようなものがあり、これは核力による励起が該当する。そういった形の励起がどういったエネルギーで起こるかということを見ると、中性子過剰核の圧縮率が分かるはずだと中村先生は考えている。

未だ人類が踏み入っていない領域を開拓していくことで、宇宙の成り立ちや、原子核というものに対する理解が深まっていくだろう。

今回の取材で伺った中性子過剰核の話は大変興味深いものでした。お忙しい中、度重なる取材に

親切に応じてくださった中村先生に厚く御礼申し上げます。(西塚 智也)