

原子核という不思議な量子物質

関東学院大学 理工学部 船木 靖郎

1. はじめに

みなさんは原子核というと何を思い浮かべるでしょうか？残念ながら原子爆弾とか、核兵器等負のイメージを想起される方も多いと思います。あるいは原子力、こちらも最近では社会的にポジティブなイメージをお持ちでない方も多々いることでしょう。これらはすべて、多数の特定の原子核を集めて(濃縮して)、核反応を連鎖的に起こし、そこから莫大なエネルギーを取り出す、というものです。原子核を社会の中でどのように利用するのか、という視点に立つものですが、本稿では、そうではなく、そもそも原子核とはどのような物質で、どのように理解することができるのか、という視点でお話したいと思います。一つ一つの原子核は本当にイメージすることの難しい、不思議な物質なのです。そのような話題を中心に展開し、少しでも原子核の不思議さについてみなさんに実感して頂ければ幸いです。

2. 原子と原子核

私たちの身の回りの物はすべて一つ一つの原子から出来ています。原子核はその原子の中心に存在するものです。その原子核の周りを電子がまわっている(より正確には雲のように広がっている)、というのが原子の姿ということになります。

このような原子の構造、あるいは原子核の存在は、1911年にラザフォードによって明らかにされました。ラザフォードは助手のガイガーと当時学生だったマースデンと、放射線の一種であるアルファ粒子を薄い金箔に照射する実験を行っていました。アルファ粒子のほとんどは金箔をまっすぐ通過することが知られていて、大きな角度に散乱されるものがないことを確認するための実験だったのですが、そのうち20000個に1個は入射方向と逆向きに大きく散乱されることが発見されたのです。ラザフォードは驚いて、「大砲の砲弾を紙切れめがけて発射したら、跳ね返って自分に当たるようなものだ！」と言ったといわれています。原子はスカスカで、アルファ粒子はほとんど原子を素通りするが、たまに中心にある原子核に衝突して大きく散乱される、というわけです。

この原子核の大きさは、原子の大きさに比べ非常に小さいです。原子が 10^{-10}m 程度の大きさであるのに対して、原子核は $10^{-15}\sim 10^{-14}\text{m}$ 程度

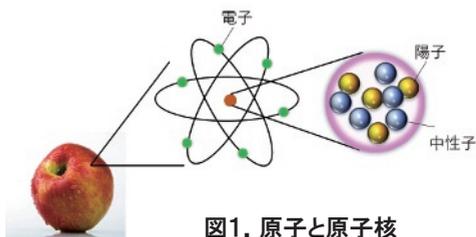


図1. 原子と原子核

の大きさです。これは、原子が東京ドームくらいの大きさだとすると、原子核はそのマウンドに置いたビー玉くらいの大きさに相当します。そのビー玉を除いた広大な領域を複数個の電子が運動している、というのが原子の姿です。図1に原子と原子核の様子を示しましたが、原子の中での原子核の大きさはだいぶ誇張されたものです。

しかしながら、原子の質量のほとんどすべてを担っているのは原子核です。原子核は陽子と中性子を構成要素とするものですが、この陽子や中性子の質量は、電子の質量の2000倍程度も大きいのです。原子から出来ている我々の体は、その体積のほとんどは物質の無い真空になっていて、その質量はほとんど原子核の質量であり、そしてその色や固さといった物性は電子の性質が反映されている、と考えると何とも不思議な気持ちになります。

3. 原子核の性質

さて、原子核ですがその大きさは $10^{-15} \sim 10^{-14} \text{m}$ 程度としました。1fm(フェムトメートル) $=10^{-15} \text{m}$ ですので、原子核の世界をフェムトワールド、と呼んだりします。例えば地球上にありふれている炭素原子核(^{12}C)を例にとりましょう。これはプラスの電気を持った陽子6個と電気的中性の中性子6個からなっています。 ^{12}C の大きさ(半径)は2.4fm程度であることが知られています。陽子や中性子の半径は大体

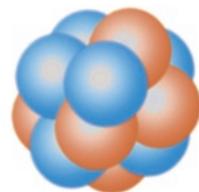


図2. 原子核の姿

1fm弱ですから、大きさの上では、計12個の陽子と中性子がぎゅうぎゅうに詰まった形状が想像されます。図2のようなものですが、高校の物理教科書等で見たことのある方も多いのではないのでしょうか。陽子や中性子はプラス同士の電気的な斥力に打ち勝つ非常に強い核力によって結びついている、と高校の教科書にも説明されています。また核力は非常に短距離力で、核子(陽子と中性子)の間の距離が2fm程度以上になると働かなくなります。このことから、核子が核力で固く結びつくためには、互いに近づいている必要があるのです。

しかしながら、この描像はある意味全く正しいとは言えないことを次に述べます。まず核子は原子核中で静止していることは出来ず、なんと平均して光速の20%程度の速さで飛び回っています。そのような高速でたくさんの核子がぎゅうぎゅうに詰まった領域を飛び回る、というのはにはわかには信じがたいことですが、これは核子がマクロな世界で考えられるニュートン力学ではなく、ミクロの世界の力学法則である、量子力学に従うからです。

量子力学に従うミクロの世界では我々の常識とは全くかけ離れた現象が起こりますが、その中でも「パウリの排他律」は特に不思議で重要です。この原理は、2個以上の核子が「同一の量子状態」を取り得ないことを要求します。この「量子状態」とは、位置や運動量、スピンといった、粒子の持つすべての自由度を含みます。原子核内の

核子は、こういった自由度を、エネルギーの低い方から順に、すべて占有しつくしているため、平均するとかなり大きな運動量を持つことになります。また、原子核内で核子同士がぶつかって散乱しようとしても、散乱後に飛び移れる量子状態が全て占有されているため、散乱は著しく制限されるのです。つまり核子はあたかも幽霊のように、原子核内で互いにすり抜けあってしまう、というわけです。

4. 原子核を記述する模型

原子核を記述する模型は様々なものがあります。原子核は互いに核子が核力(とクーロン力)で強く相互作用することで形成されています。一つの核子は他のすべての核子と相互作用するのですが、核力は強い短距離力です。一つの核子は、核内で他の核子に近づけば強い力を受け、離れるとほぼ0、といったように強い揺らぎのもと運動しているはずなのですが、なぜか不思議なことに、結果として核子は、すべての他の核子との相互作用を平均化したポテンシャル中を運動するとした近似が非常に良く成り立つのです。量子力学ではすべてのエネルギー準位が連続的ではなく、飛び飛びに存在することを要求しますので、核子は同一のポテンシャル中で飛び飛びの準位を占有して埋まっていくことになります。これを原子核の平均場模型と呼び、特に基底状態(安定な一番エネルギーの低い状態)近傍について、原子核全般を非常にうまく記述する模型として知られています。平均場模型は、核子が受ける他のすべての核子からの相互作用による寄与を、同一かつ単一のポテンシャルとして繰り込んだもの、ということができます。このポテンシャル中を核子はあたかも他の核子が存在しないかのように独立に運動する、という独立粒子描像が成り立ちます。図3に平均場近似に立脚した典型的な模型である原子核の殻模型について示してあります。これは原子における電子の殻模型と類似のものですが、この場合の電子が感じる平均ポテンシャルは、原子核によるクーロン電位で近似されるものとして、容易に理解できるものです。原子核の場合はそのような核になるものも無く、核子がみな互いに同等に相互作用しあっているのです、なかなか不思議なものです。

一方で、独立に運動しているはずの核子が、一斉に協調運動をし、原子核全体として変形し、回転運動や振動運動を起こすことも知られています。これは集団運動模型と呼ばれるものですが、ミクロな立場から理解するため、核子の独立運動に基づいた平均場模型を用いた議論が活発になされています。

また、原子核のクラスター構造模型も良く知られた模型です。これは、核子が平均ポテンシャルの中を独立に運動する、という描像とは全

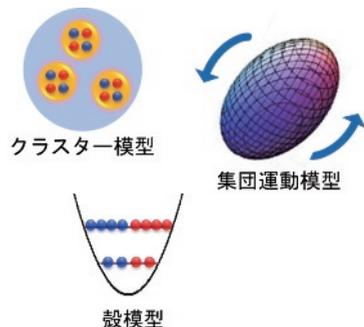


図3. 原子核の様々な模型

く異なるもので、原子核が複数の核子集団でサブユニット(クラスター)を作って全体を形成する、というものです。良く知られたものには、アルファクラスター構造があり、これはヘリウム4原子核(${}^4\text{He}$)がユニットになった構造です。先の ${}^{12}\text{C}$ 原子核では、3つの ${}^4\text{He}$ 核からなる3アルファ構造状態や、 ${}^{16}\text{O}$ 原子核中に現れる ${}^4\text{He}+{}^{12}\text{C}$ クラスター構造等が知られています。

ここで紹介した模型は、一見互いに非常に異なる模型であり、互いに矛盾するものでさえあります。しかしすべて原子核構造を説明することに大きく成功した模型です。これらは原子核の真の姿が明らかになればいずれ淘汰され、一つ、真の模型のみが生き残る、といったものでは無いのです。それぞれの模型が備えた性質はそのすべてが原子核の持つ構造であり正しい描像なのです。ここに量子力学とそれによって記述される原子核の不思議さが現れていると言えると思います。量子力学によれば、全ての量子状態はベクトルと呼ぶべきものです。原子核の一つの量子状態には、複数の模型で記述される構造がベクトルの足し算のように混ざっているという事が出来ません。あるベクトルが異なる(一般には直交しない)複数のベクトルの重ね合わせで表現される、という数学的表現と同等のものとして、物理的状态が複数の相矛盾する構造の成分を同時に含んでいることも、量子力学的には許されるのです。ただ、実はこれらすべての構造を内包するような原子核のスーパー模型が存在し、それが将来発見されるかもしれません。

5. ボーズ・アインシュタイン凝縮

2. で「パウリの排他律」について説明しましたが、実はこれは、粒子のより大きな統計性に含めて議論することができます。量子力学で記述される粒子は全て、スピンという自由度を持っています。これは古典的には自転(回転)する電流による磁気双極子(単純にはN極S極の棒磁石)に対応するものですが、重要なのは、量子力学ではこれらが整数か半整数(のプランク定数倍)の値のみを取ることができる、という点です。そして、半整数のスピン値を持つ粒子をフェルミ粒子、整数のスピン値を持つ粒子をボーズ粒子、と呼びます。核子や電子はスピン $1/2$ を持つのでフェルミ粒子、光子はスピン 1 、アルファ粒子はスピン 0 を持つので共にボーズ粒子です。偶数個のフェルミ粒子からなる系も全体で整数のスピンをもつことになり、ボーズ粒子となります。奇数個のフェルミ粒子の場合はやはりフェルミ粒子です。

多数の粒子が集まったとき、粒子の統計性に著しい制限が付きまします。これは一つ一つの同種粒子を本質的に区別することができない、ということから来ているのですが、要は、フェルミ粒子は「パウリの排他律」に従う、というものです。一方でボーズ粒子は複数の粒子が「同一の量子状態」を取ることができます。ボーズ粒子系の場合、系の温度を下げていくことにより、全ての粒子の熱的かく乱を抑え、より低いエネルギー状態を占有させるようにすると、最終的に大部分のボーズ粒子が同一の最低エ

エネルギー状態を占有するようになります。「パウリの排他律」に従うフェルミ粒子との著しい違いです。これが「ボーズ・アインシュタイン凝縮」と呼ばれる現象で、現在様々な物理系で生じていることが調べられています。

現在日本でも実用化されようとしているリニア中央新幹線や、粒子加速器、磁気共鳴装置等で利用されている「超伝導」現象も、ボーズ・アインシュタイン凝縮現象の一種です。2個の電子が対をなしてボーズ粒子として振る舞うことにより、全てのペア(クーパー対)が同一の運動量状態を占める、というものです。またヘリウムガス(ヘリウム4)の温度を下げていくと、4.2Kで液体ヘリウムに状態変化しますが、さらに温度を下げていくと、2.17Kで超流動ヘリウムに転移します。これもボーズ・アインシュタイン凝縮の一つで、全ての粒子が同一の量子状態を占有することで、あたかも一つの原子のように振る舞うことを示す様々な不思議な現象が実験室で観測されています。

6. クラスター化現象とアルファ凝縮

さて、5. ではボーズ・アインシュタイン凝縮現象について説明しましたが、これは様々な物質階層で共通に見いだされる普遍的な現象です。原子核の世界でも、2核子がペアーを組み、ボーズ粒子のように振る舞って同一の量子準位を占有しています。これはペアリングと呼ばれる2核子相関で、原子核はいわば「超伝導」状態になっていると言えます。

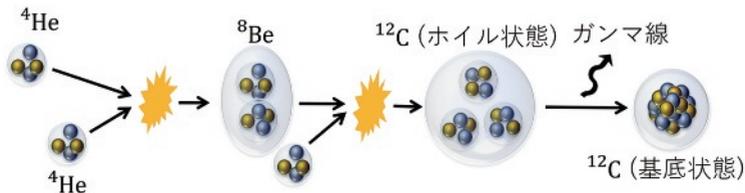


図4. トリプルアルファ反応

最後に、4. で説明したクラスター構造がボーズ・アインシュタイン凝縮現象を引き起こす独特な例を紹介します。 ${}^{12}\text{C}$ 原子核が3つのアルファ粒子からなるクラスター構造を作る、ということを述べましたが、これは ${}^{12}\text{C}$ の基底状態ではなく、より高いエネルギーを持った、ある励起状態に顕著に現れることが分かっています。これはホイル状態と呼ばれる特別な状態で、星の中で ${}^{12}\text{C}$ 核が形成されるために必須の量子状態として知られています。これは3つのアルファ粒子が星の中で偶然くっ付き、ホイル状態を通じて、安定な炭素が出来る、というものです。これはトリプルアルファ反応と呼ばれ、炭素元素が形成される唯一のプロセスです(図4参照)。ただしホイル状態は不安定で、形成されてわずか 10^{-16} 秒後には崩壊してしまいます。このようなほんのわずかの間しか存在しない寿命の短い状態ですが、それが無いと我々生物が生ま

れなかった、というのも何とも不思議なものです。星の中での元素合成の話、不安定な状態から安定な元素が生まれる話は、本誌2019年4月号に谷畑勇夫氏による解説記事がありますので、そちらも参照してみてください。

このホイル状態は、構造の上でも3つのアルファクラスターが深く関連した状態であることは示唆されており、実際多くの理論計算で3つのアルファクラスターが空間局在化した状態であることが示されてきました。これだけでなく、この20年ほどの間に、ボーズ粒子であるアルファ粒子がまさしくボーズ・アインシュタイン凝縮した状態である証拠が積み重なってきました。これは現在ではアルファ凝縮と呼ばれ、原子核中でまずアルファクラスター構造が形成され、これらが互いに緩く束縛したガスのように運動し、最低エネルギー配位に凝縮する、というものです。なにせわずかな時間で崩壊してしまう状態ですので、加速器でいったん形成しても実験的に調べるのは大変です。まだまだ調べていく必要があります。

現在では、このアルファ凝縮状態は、 ^{12}C 核に限らず ^{16}O や ^{20}Ne 原子核で4つ、あるいは5つのアルファクラスターによっても引き起こされることが、理論、実験的に示唆されてきています(図5参照)。また、励起状態に現れるアルファ凝縮状態を出発点として、さらにアルファクラスターが励起した構造状態の存在も予言されており、今後の発展がとても期待されます。

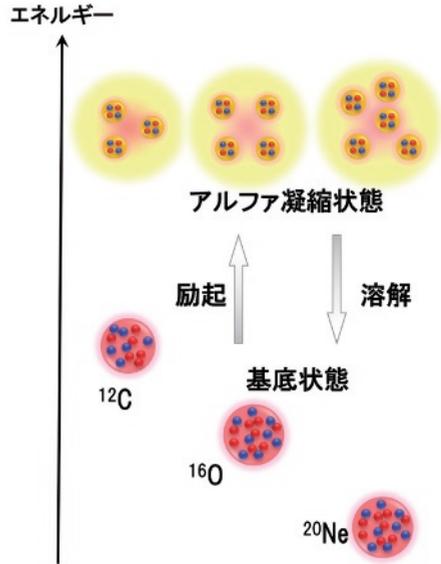


図5. アルファ凝縮状態の出現の様子

著者紹介 船木 靖郎(ふなき やすろう)



2006年京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻で博士(理学)を取得。理化学研究所などでの研究員、中国北京航空航天大学副教授を経て、現在関東学院大学理工学部准教授。原子核構造、反応の理論研究を行っています。