

フェムトスケールの核分子

伊藤 誠*

Femto-Molecules in a Nucleus

Makoto ITO

1. はじめに

タイトルにあるフェムトスケールとは、フェムトメートル (fm) 程度の大きさ、という意味です。フェムトメートルとは長さの単位で 10^{-15} m を表します。従ってこのトピックスのタイトルは 10^{-15} m 程度の大きさの分子を表すこととなりますが、そうするとこれはおかしな状況を表していることとなります。なぜなら通常の原子の大きさは大体 10^{-10} m 程度ですので、原子が集まってできる分子はそれ以上の大きさを持つはずだからです。実はここで考える“核分子”とは、通常の分子ではなく、原子の約1~10万分の1という、非常に小さいスケールを持つ「原子核」という物理系の中で生じる、分子に類似した状態を意味しています。原子核とは文字通り原子の中心に存在する微小な核のことを指します。原子核は非常に多彩な構造をとる系で、その多様性は他の物理系にはなかなか見られないユニークな特徴です。このトピックスでは原子核の多様性、特に原子核の分子的な構造について触れ、最近の研究について少し紹介したいと思います。解説では数式を殆ど使っていないので、物理系のみならず、高校~大学初年度の物理を習った化学・生物系の方たちにも読んでもらえると幸いです。

2. 物質の階層と原子核

まずは高校の復習からはじめましょう。図1に示すように、物質を細かくしていくと「分子」という、物質の性質をとどめる最小単位の粒子に行き着きます(真ん中)。更に分子は原子という微粒子の集合体

なっているので、物質は細かくしていくと、いずれは原子に辿りつくということが出来ます(一番右の図)。ところがこの原子という微粒子は物質を構成する基本粒子ではなく、まだ分解可能な内部構造を持っています。拡大した原子の内部構造を図2に示します。原子内部の中心には「原子核」と呼ばれる核が存在し、その周囲を「電子」と呼ばれる負の電荷を持つ軽い粒子が取り囲んでいます。原子核は原子よりも1~10万分の1程度の大きさしかありませんが、これは原子を野球場に例えると、その中心に1円玉を置いたのと同じ状況になります。

この様に、原子核は非常に小さい粒子ですが基本粒子ではなく、更に小さい「陽子」、「中性子」という二種類の粒子が複数個集まってできています。陽子と中性子は大きさがほぼ等しく、陽子は正電荷を持ち、中性子は電氣的に中性な性質を持っています。原子核に含まれる陽子の数(これをZとする)によって物質

分子・原子

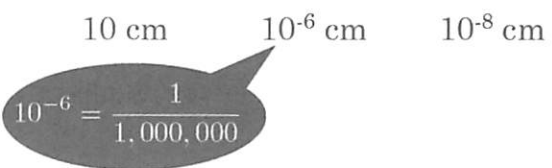
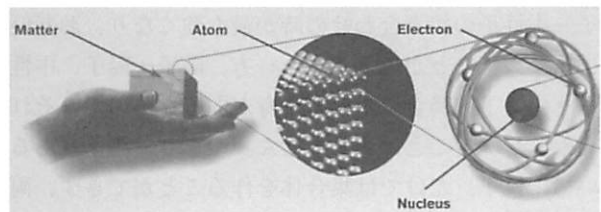


図1 物質の階層を表す図

原稿受付 平成23年 9月13日

*システム理工学部 物理・応用物理学科 准教授

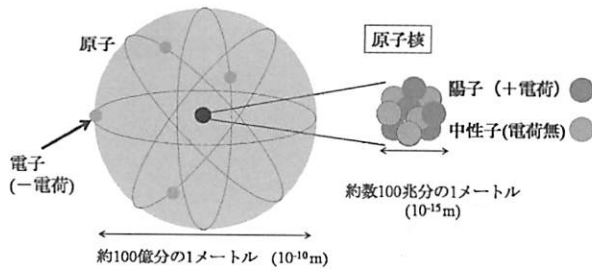


図2 原子の内部構造

の元素記号が決まります。高校で覚えた、水 ($Z=1$)、He ($Z=2$)、Li ($Z=3$)、Be ($Z=4$)、…といった元素記号は原子内の陽子の数を表します。一方、中性子数を N 、両者の合計 $Z+N$ を質量数 A として表し、原子核の種類を元素記号と質量数で表現します。例えば炭素の場合、元素記号は $Z=6$ の C、中性子数 $N=6$ なので、 $A=12$ となり、 ^{12}C と表します。

陽子と中性子をまとめて「核子」と呼ぶことがあります。核子は非常に重く、電子の約2000倍の質量を持っているので、原子の質量の大半は、中心の核に集中していることとなります（物質は実はスカスカな構造を持っているのです）。更に核子はクォーク、グルーオンと呼ばれる更に微小な粒子から構成されていることが分かっています。この様に、物質にはより小さなスケールを構成要素とする階層構造があり、ここでは核子の多体系である原子核に焦点を当てたいと思います。

3. 核力と原子核

先に説明したように、原子核は陽子、中性子といった2種類の核子が複数個集合して出来上がった系です。複数の核子が集まっていることから、基本的に核子の間にはたらく力は引力であると考えられます。

この力は核子の間にはたらく力なので「核力」と呼ばれています¹⁾。核力は面白い性質を持っており、陽子—中性子の組み合わせの 때가最も強くなり、お互いに結びつくことができます。一方、陽子—陽子、中性子—中性子の場合、核力自身が弱くなるので、それらがくっつくことはありません。つまり、陽子（あるいは中性子）だけでは集合体を作ることができず、両者が同数程度 ($N \sim Z$) 集まった場合、強く結びついて安定な原子核を作ります。また陽子の間にはクーロン力の反発がありますが、それに打ち勝って核子が結びついているので、核力はクーロン力等に比べて非常に強い力であることが分かります。

核力は非常に複雑な性質を持つことが知られ、陽子と中性子の組み合わせ以外に、核子間の距離や、核子

の持つ磁気モーメント²⁾ の方向にも強く依存します。ここではその詳細は述べませんが、核力が到達する範囲は短いため、原子核内では核子はほぼ隙間なく密に詰まっています。これはちょうどパチンコ玉がぎっしりと集まった集合体のイメージと同じになります。一方、原子核内では核子は静止しておらず、運動していることが実験で確かめられています。従って原子核は、核子が密に集合し、それらが強い力で結びつきながら運動している系ということになります。

4. 液滴模型

先の説明では、原子核は核力と呼ばれる複雑な強い力で核子どうしが結びつき、運動している系だと説明しました。身の回りの物質からもう少し具体的なイメージを探してみましょう。物質には固体、液体、気体の三態があることは皆さんご存じだと思います。パチンコ玉どうしが密に強く結び付いている、という状況は、固体や液体内の分子に近い状況になります。気体は、分子どうしが遠く離れてしまってほぼ自由に動き回っているので、お互いに強く結びついている、というイメージに合いません。また固体の場合は、分子は強く結びついているのですが、強く結びつきすぎてお互いに殆ど身動きがとれなくなっています。そこで分子どうしが密に存在し、なおかつ運動している液体が、原子核のイメージに一番適合します。

液体の滴を液滴と呼びます。原子核は有限な塊ですから、液滴の性質と多くの類似点があります³⁾。まずはこのトピックで重要になる液滴の性質、エネルギーと密度の飽和性について説明します。飽和性とはどんなに頑張っても物理量が一定の値を超えられない、という性質を意味します（飽和水溶液の飽和と同じ意味です）。密度の飽和性とは、密度を上げようと体積を圧縮しても、ある限界値が存在し、その値以上にはなれない、という状況を示します（例えば水をピストンつきの容器に入れて圧縮しようとしても、ピストンは容易には動きませんね。これは水の密度が飽和していることを表しています）。また大雑把に言うと、物質の持つ単位体積当たりのエネルギーは、物質の密度に関係するはずですから、もし密度に飽和性がある場合、エネルギーにも飽和性が存在することになります。これとよく似た状況が原子核にも起こります。

原子核の密度は内部ではほぼ一定値をとり、表面付近で急激にゼロに近づきます（一例として金原子核の場合を図3に示します）。また、原子核を個々の核子にバラバラするのに必要なエネルギーを結合エネルギー (B) と呼びますが、この結合エネルギーを質量数で割った一核子当たりの結合エネルギー (B/A) に

も飽和性が存在します。水素から始まって、陽子と中性子をくっつけて重い原子核を作っていくと、一核子当たりの結合エネルギーは最初増加してゆくのですが、ある A で最大値をとり、あとはゆるやかに減少してゆきます(図4)。一核子当たりの結合エネルギーは大体8MeV程度で、天然の原子核の場合、B/A は8MeVの約10パーセント程度の範囲におさまります。

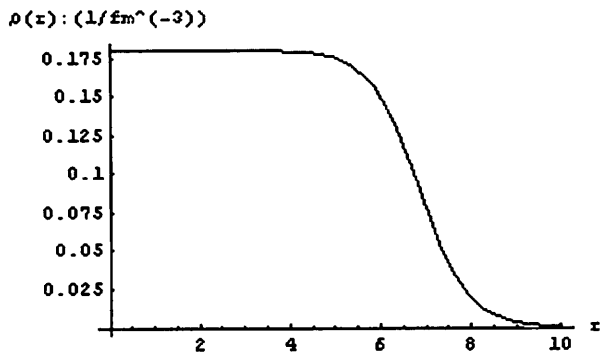


図3 金原子の密度分布。横軸は中心からの距離を表し、縦軸は密度(単位体積あたりの核子数)を表す。横軸の単位は fm。

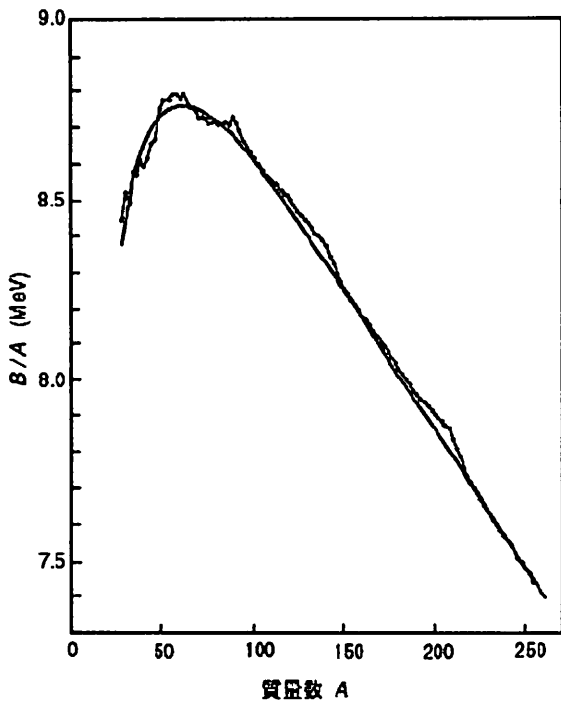


図4 結合エネルギーの質量数依存性。横軸は質量数 A、縦軸は一核子当たりの結合エネルギー (B/A) を表す。振動している直線が実験を表し、滑らかな曲線は液滴模型による計算を表す。

ここで原子核分野でのエネルギーの単位を説明しておきましょう。MeVとは、メガ電子ボルト

と呼ばれるエネルギーの単位で $1\text{MeV}=10^6\text{eV}$ (電子ボルト)、 $1\text{eV}=1.602\times 10^{-19}\text{J}$ の関係式からジュールに換算できます。

これらの事実は、原子核の大まかな振る舞いは、液滴と同じ様に考えてもよい、ということを示しています。液滴との類推に基づいて原子核の性質を記述する理論(模型)を液滴模型と言います^{1,3)}。液滴模型は、原子核の大域的な性質、例えば結合エネルギーを良く再現することが知られています(図4の滑らかな実線)。

5. 魔法数と独立粒子描像

図4を注意深く見てみると、観測線(振動している線)にはところどころ山谷があることに気がきます。山に対応する質量数の原子核は、B/A が大きい、つまり原子核をバラバラに壊すのに沢山のエネルギーが必要になります。言い換えると山の原子核は壊れにくい、ということですから、より硬い、安定な原子核とすることができます。最初に説明した様に、原子核の種類は陽子数 Z と中性子数 N で決まりますが、それらがある特定の値、すなわち

$$2, 8, 20, 28, 50, 126, 184$$

をとる場合、原子核の安定性が非常に良くなります。この数字を魔法数と呼びます^{1,3)}。山に対応する原子核は N または Z、あるいは両方が魔法数になっています。

ここで登場した魔法数という概念は、もともと原子の周期律上で考えられていたものであり、基本的にそれと同じ意味になります。では原子核の話はひとまず忘れて、まず原子の魔法数を簡単におさらいしておきましょう。原子の場合、いわゆる不活性元素(希ガス)と呼ばれる原子は化学的に安定、つまり化学反応しにくいということが知られています。希ガスは電子数(=陽子数 Z)として

$$2(\text{He}), 10(\text{Ne}), 18(\text{Ar}), 36(\text{Kr}), 54(\text{Xe}), 86(\text{Rn})$$

を持つ原子であり、これらの電子数を魔法数と呼びます。

魔法数が出てくる仕組みは、量子力学を習っておかないと理解が難しいのですが、ここではごく簡単に説明しておきます。原子の中心にある原子核は陽子を含むため、正電荷を持っています。一方、電子は負電荷を持つので、電子と原子核の間には引力のクーロン力がはたらき、電子は原子核の周りに束縛されて運動することになります。電子が運動する領域では、当然のことながら電子が見つかる可能性が生じ、この電子が見つかる領域のことを「軌道」と呼びます。要するに、軌道とは電子が運動の際に通る道筋と考えて下さい。

とりあえずは、人工衛星の軌道とほぼ同じ意味と思って差し支えないのですが、電子の軌道は量子力学に支配されるので、確率的で人工衛星の軌道とは異なった性質を持ちます⁴⁾。

電子の軌道、すなわち核の周りでの電子の通り道は量子力学的計算で決まっています、電子はその軌道に入って運動していることとなります。軌道はエネルギーの低いものから高いものに渡って複数存在しており、エネルギーの低い軌道から電子を順番に詰めてゆくことで原子が構成されます。それぞれの軌道が何個まで電子を収容できるかは軌道の種類によりますが、電子をエネルギーが低い軌道から順番に詰めた場合、ある数の時に過不足なく軌道を一杯に埋めることができます。軌道が電子で一杯に埋まった状態が最も安定になるので、この電子数を原子が安定になる魔法の数、つまり魔法数と呼ぶのです。

ここで重要なことは、魔法数は核の周囲の軌道に電子が入り、各電子が核のまわりを自由に運動することにより生じる、という点です。すなわち魔法数の存在は、中心核の周りで電子が独立に運動する描像（独立粒子描像）が成立している、ということの意味しています。では電子の魔法数を思い浮かべながら原子核の魔法数に戻ってみましょう。魔法数が存在するということは、原子核内の核子の運動についても、独立粒子描像が成り立つことを意味します。原子と大きく違う点は、核子はそれぞれが対等で、自分たちで束縛し合っている「自己束縛系」であるという点です。原子内の電子は自分達ではくっつくことができず、原子核という電子を引き付ける“王様”がいて初めて原子内に束縛されることができます。それに対し、原子核は核子という対等な粒子が集まっているので、王様の様な存在はありません。その代わりに核子群が自身で引力の場を作りだし、その中を核子が独立に運動している状況になります^{1, 3)}。

原子と原子核の魔法数のもう一つの違いは、その番号です。つまり魔法数そのものが原子と原子核では異なります。これは粒子を束縛する力の性質によるものですが、魔法数自身が現れる仕組み自身は、原子、原子核ともに独立粒子描像が成り立つということに起因しています。

6. 原子核の励起状態

さて、これまで原子核の性質を駆け足で紹介してきました。色々説明しましたが、まとめると原子核には次の二つの重要な性質があることとなります。①原子核の大雑把な性質は液滴に近い。②核子運動は独立粒子描像で理解され、それに起因して魔法数が現れる。

液滴描像では核子どうしは強く結びついており、一方、独立粒子描像では核子は独立に運動しています。一見するとこれらの性質は互いに両立しにくいのですが、量子力学的な効果により、原子核系ではこれらの相反する性質が両立します。

これまで説明してきた①と②は、普段身の回りにある物質中の原子核に対するものでした。原子核は核子が最大で200~300個程度集まった物理系です。この数はアボガドロ数に比べると非常に少ないので、自身が持っているエネルギーが低い方がより安定になります（もしアボガドロ数程度の多粒子系の安定性を考える場合は、エントロピーの大小も考慮しなければなりません）。従って、身の回りにある物質中の原子核はエネルギーが最低の状態になっており、これを「基底状態」と呼びます。従って、先に説明した①と②の性質は主に基底状態についてのものでした。一方、原子核に何らかの形でエネルギーを与えることができれば、エネルギー的に高い状態をつくることができます。この様にエネルギー的に励起した状態を基底状態に対して「励起状態」と呼びます。

原子核の基底状態の性質は、ごく少数の例外を除いて独立粒子描像で理解されます。従ってその励起状態についても、やはり独立粒子描像が成り立ち、一つ一つの核子の運動が励起することが起こります。励起の仕方は核子一つだけが励起する場合もあれば、複数の核子が一齐に励起することもあり得ます。励起の具体的なイメージですが、核子が早く運動する、つまり運動のスピードが上がる、というイメージでとらえて下さい。普通の質点の回転運動で考えると、回転の角速度または回転半径が増える状況に対応します。特に複数の核子の運動が一齐に励起した状態を「集団運動状態」と呼び、原子核の励起状態の典型例として広く知られています^{1, 3, 5, 6)}。原子核の集団運動の例を図5に示します。核子が一齐に励起することにより、基底状態では球形だった原子核の表面が楕円型やオムズビ型に振動し始めます^{1, 3, 5)}。

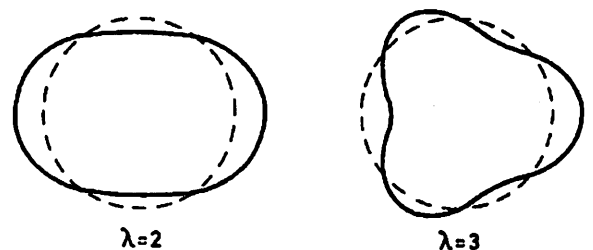


図5 原子核の表面振動を表す模式図。楕円型の振動 ($\lambda = 2$) とおにぎり型の振動 ($\lambda = 3$) を示した。

7. 原子核のクラスター構造

ここからトピックスの本題に入ってきます。独立粒子描像は原子核の基底状態や集団運動状態を記述することに成功を収めました。一方で、独立粒子描像とは正反対の液滴描像が成り立つことを説明しました。ここで液滴の性質についてもう少し詳しく考えてみましょう。二つの水滴を思い浮かべてください。この水滴をゆっくり近づけてゆくと、表面が接した部分がくびれでつながり、そのくびれがあつという間に広がって最後には一つになってしまいます。またその逆も可能で、水滴を引っ張ると簡単に二つの水滴に分かれます。この様に液滴は容易に融合と分離する、つまり離合集散しやすい物理系ですが、この離合集散の性質は先に説明した飽和性に起因します。液滴には密度の飽和性があるので、二つの液滴を融合させてもその全体積はあまり変化せずほぼ一定になります。またエネルギーの飽和性から、融合の前後で液滴が持つ全エネルギーもほとんど変化しないこととなります。つまり、液滴は離合集散に際してエネルギーの出入りをほとんど必要としないのです。

一般に物の状態を変化させるには、仕事やエネルギーを外から与える必要があります。例えば形を変形させるためには、物に力を加えて引っ張ったり押ししたりして仕事を与えます。また化学反応では、たいいてい場合は反応を起こすのに一定の活性化エネルギーが必要となります（もしも活性化エネルギーがないと、例えば酸素と物質の化学反応、燃焼などが簡単に起こってしまって、大変なことになります）。もし状態変化をおこすのに必要なエネルギーが大きいならば、その変化は起こりにくく、また小さければ変化が起こりやすくなります。この事を思い浮かべて液滴を考えると、離合集散に際しては、ほとんどエネルギーを与える必要がない、ということですから、液滴は離合集散しやすい系だということができます。

原子核においても密度とエネルギーの飽和性が近似的に成り立つので、簡単に離合集散しやすい性質が現れます。この状況を図6に示します。原子核の場合、結合エネルギー B/A は核の種類によらず、ほぼ一定値の 8MeV をとるので、分離の前後でのエネルギー差 $E - E_{12} = \Delta E$ は小さく、それを質量数で割った $\Delta E/A$ は $B/A = 8\text{MeV}$ よりも一桁以上小さくなります。従って、わずかなエネルギー変化によって、簡単に複数の塊（サブユニット）に分離します。一つの原子核を複数のサブユニットに分解した場合、構成サブユニットを「クラスター」と呼びます。

一般に原子核の基底状態には独立粒子描像が成立

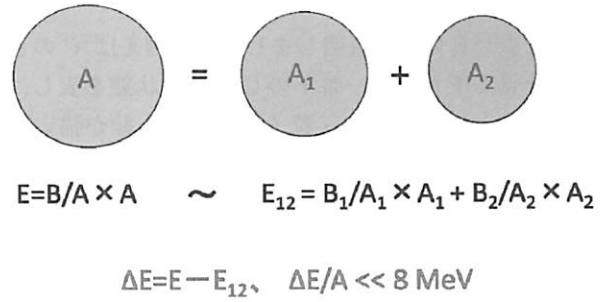


図6 原子核を分解した場合のエネルギー変化。Eは塊の時の全結合エネルギー、 E_{12} は2つに分離した場合の結合エネルギーの総和。分解の前後で一核子当たりの結合エネルギー B/A 、 B_1/A_1 、 B_2/A_2 はほぼ一定であるため、エネルギー変化 ΔE は非常に小さい。

し、またその描像を基盤とする集団運動状態が存在することを説明しました。しかしながら、原子核の性質の全てが独立粒子描像だけで理解できるわけではなく、その描像では説明することが困難な励起状態がいくつも存在します。そのような異常な励起状態は、一つの原子核が複数のクラスターに分離し、それらがフワフワとお互いに弱く結合した構造を持っていると考えられており、「クラスター構造」と呼ばれています^{5,7)}。クラスター構造は、独立粒子描像により得られる原子核の姿とは違った異質な構造です。独立粒子描像では、全核子がバラバラに運動していますが、クラスター構造では、核子がいくつかのサブユニットに分かれ、それらを単位として運動しますから、複数の核子が強く結びついたグループが常に存在していることとなります。これまで日本の研究グループを中心として、様々なクラスター構造が調べられてきました。その結果、主に $N=Z$ の比較的軽い原子核の励起状態には、 α 粒子をサブユニットとする「 α クラスター構造」が多くこの系で発現することが明らかになりました。 α 粒子とは陽子と中性子が2個ずつ集まってできた ^4He 原子核で、非常に大きな結合エネルギーを持ち、硬く不活性な性質を持っています。

α クラスター構造は「閾値則」と呼ばれる経験則に従って現れてきますが、それを簡潔に表したものが図7の「池田図」です^{5,7)}。この図を説明しましょう。ここで示した池田図には、 $^8\text{Be} \sim ^{20}\text{Ne}$ の場合が載せてあり、図の一番下には一塊になった原子核が、また一番上には、一塊の原子核を可能な個数の α 粒子（白小丸）に分けた図が書いてあります。それらの間には、様々な α クラスターに分離した図が描かれており、括弧内の数字は、基底状態の原子核を対応する α クラスターに分離するのに必要なエネルギーを表してい

ます (単位は MeV)。

もう少し具体的に説明しましょう。例えば ^{12}C のところを見て下さい。一番下のCは基底状態を表し、そのすぐ上に、3つの α 粒子に分かれた絵が描いてあります。 ^{12}C を3つの α 粒子に壊すのに必要なエネルギーは図から読み取ると7.27 MeVということになります。この図を基に、閾値則を次の様に言い表すことができます。すなわち、「 α クラスター状態は、もし存在するならば、対応する α クラスターに分離するのに必要なエネルギー (閾エネルギー) の近傍に形成される」。先の ^{12}C の例では、 3α の分離エネルギー7.27MeVのすぐ近くに 3α が緩く結合した状態が現れてきます。この 3α 状態はHoyle (ホイール) 状態と呼ばれ、宇宙で元素が合成されていく過程で、炭素、つまり有機物の合成に重要な役割を果たします。その他にも $^{16}\text{O}=\alpha+^{12}\text{C}$ (7.16MeV) や $^{20}\text{Ne}=\alpha+^{16}\text{O}$ (4.73MeV) 等の α クラスター構造も閾値則に従って現れることが確認されました⁷⁾。閾値近傍では、クラスターどうしが緩く結合した状態が形成されますが、これらが回転や振動といった運動をすることにより、多様なクラスターの励起状態が形成されます。

原子核には独立粒子描像と液滴描像といった、相反する二面性があり、さらにそれらに加えてクラスター構造という異質な構造が現れることを説明しました。この様に、原子核は色々な側面を持っており、励起の状況に応じて様々な側面が顔をだす系です。これは、同じ多粒子の集合体である電子系、すなわち原子・分子とは大きく異なる特徴です。原子・分子内の電子の運動のほとんどは独立粒子描像で説明されます。

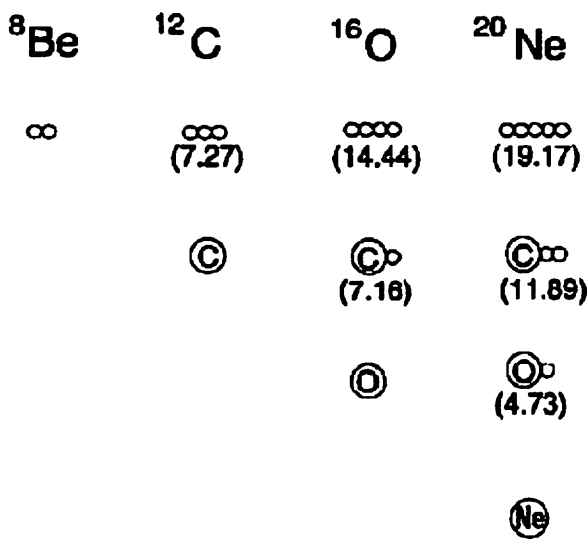


図7 $^8\text{Be} \sim ^{20}\text{Ne}$ に対する池田図。括弧内の数字は、それぞれの原子核を α クラスター (白丸) に分離するのに必要なエネルギーを表す (単位は MeV)。

8. 人工的な元素—中性子過剰核—

では次に原子核の最新の研究内容について紹介したいと思います。天然に存在する原子核はなるべく陽子と中性子が同じ数ずつ結びつきたがる傾向があることを説明しました。この理由をもう一度おさらいすると、陽子—中性子の間にはたらく核力が一番強く、中性子どうし、あるいは陽子どうしの力は弱くなるため、両方が同数程度集まった場合が一番安定になるためです。では、もし天然の原子核に中性子だけをどんどんくっつけていくとどうなるのでしょうか? 最初中性子は原子核に強くくっついていきますが、中性子が増えてくると、原子核にゆるく結びつくようになり、ある限界数を超えると中性子は原子核にくっつかなくなります。これは中性子を増やすことにより、陽子—中性子ペアよりも中性子どうしのペアの数が大きくなっていくためです。また陽子よりも中性子を多数含んだ $N \gg Z$ の原子核は不安定で、時間が経つと中性子は陽子に変化して $N \sim Z$ になろうとします。つまり中性子過剰な原子核、「中性子過剰核」は不安定であり、いずれは過剰な中性子が陽子へ変化し、 $N \sim Z$ の安定な天然原子核に変化してしまいます (中性子の代わりに陽子を増やした陽子過剰核の場合も状況は同じですが、陽子どうしにはクーロン反発力がはたらくので、中性子過剰核よりも作りにくくなります)。この様に、陽子あるいは中性子過剰な核は不安定で、時間が経つと $N \sim Z$ の安定核に変化するので「不安定核」とも呼ばれています^{1, 8)}。

近年の実験技術の進展により、不安定核を実験室で合成することが可能になり、その研究が世界的に進められてきていますが、日本は不安定核研究分野で世界をリードしています。中性子が過剰になった場合、原子核の密度の飽和性が破れたり、また魔法数が変わったりとといった、様々な特異な現象が現れてきます。また中性子過剰核の性質は宇宙空間での元素合成といったマクロスケールな問題とも深く関係しています⁸⁾。

9. フェムトスケールの分子

中性子過剰核に関する話題は非常に多岐にわたるのですが、ここではクラスター構造に関係が深い話題を紹介したいと思います。もう一度池田図を見て下さい。池田図の一番左端の ^8Be には、 α 粒子が二つ並んだ絵が一つ描いてあるだけです。それ以外の原子核では一番下には基底状態にある一塊の原子核が描いてあるので、 ^8Be の絵は少し変わっています。通常、基底状態にある原子核は一塊であり、クラスター構造はその励起状態に現れてきます。ところが ^8Be は例外で、2つ

の α 粒子を接近させてもくっつかず、有限の時間で再び2つに分かれてしまいます。つまり、 ${}^8\text{Be}$ には2 α のクラスター状態しか存在しないのです。

${}^8\text{Be}$ は不安定ですが、これに中性子を一個つけて ${}^9\text{Be}$ という同位体⁹⁾を作ってみると、二つの α 粒子は結びつくことができます。これは水素分子イオンを考えた場合、電子によるボンドの効果と同じに捉えることができます。つまり余分な中性子は電子と同様、2つの α 粒子をつなぐボンドの役割を果たします⁷⁾。

水素分子イオンの結合を考える時、よく用いられるのが分子軌道法です。これは片方の水素イオン（つまり陽子）の周りの軌道（原子軌道）を考え、それらの足し算と引き算でもって二つの陽子全体を回る電子軌道を考える方法です。 ${}^9\text{Be}$ でも中性子の分子軌道を考えることにより多くの性質を説明することができます。つまり ${}^9\text{Be}$ は、 $\alpha + \alpha +$ 中性子という三粒子を基盤にして、水素分子イオンと類似した分子構造を持っていると考えられています（図8）。

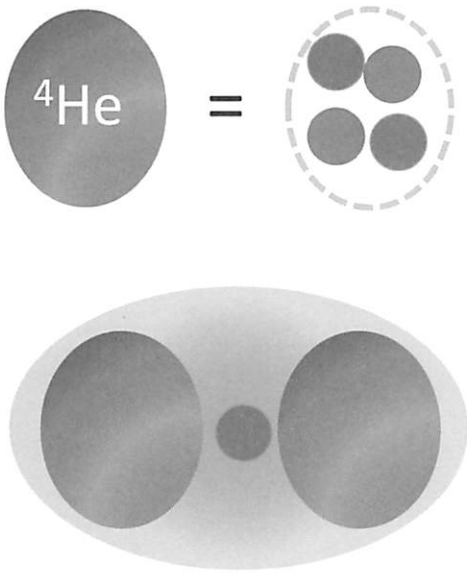


図8 ${}^9\text{Be}$ の分子的構造を示す模式図。二つの α 粒子 (${}^4\text{He}$) を中性子がつないでいる。

分子の場合は、原子核は電子を束縛する王様で、ボンドの電子よりも非常に重い粒子です。そのため、軽い電子が重い原子核の周りを運動することで原子核どうしをつなぐ、という描像が成り立ちますが、 ${}^9\text{Be}$ 原子核の場合、 α 粒子と中性子の質量は4倍程度しか違いません。更に ${}^9\text{Be}$ を9個の核子の集合として考えると、原子核系は完全に民主的で王様と呼べる粒子はもともと存在していないこととなります。それにも拘わらず、fm というごく微小な原子核系で分子に類似した描像が成り立つことは非常に面白い現象です。

${}^9\text{Be}$ は天然に存在する安定な原子核ですが、これに

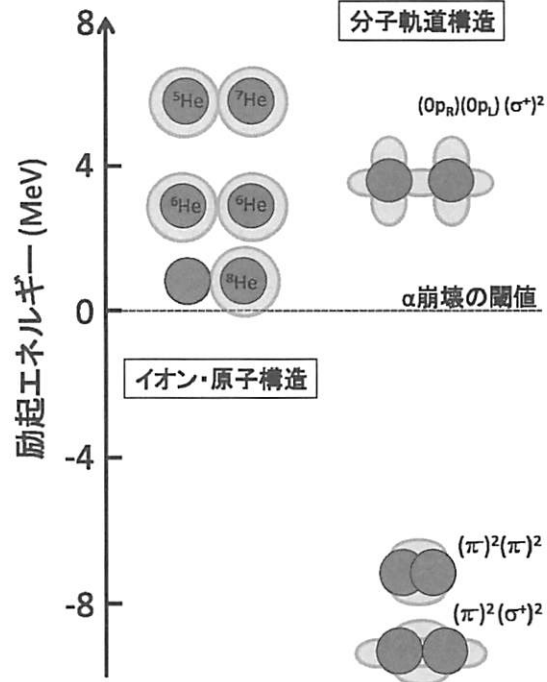


図9 ${}^{12}\text{Be}$ における化学結合様構造。イオン・原子構造（左）と分子軌道構造（右）の二種類に分かれる。 α クラスターの分離エネルギーを縦軸の原点に取っている。

中性子を更にくっつけていき、より重い Be の同位体を合成することも可能です。実験で確認されている同位体は、 ${}^{10,11,12,14}\text{Be}$ で、 ${}^{14}\text{Be}$ に中性子を付与しても束縛しないことが分かっています。これらの同位体の基底状態の性質は、2 α 周りの中性子の分子軌道法により理解することができます。ところが既に説明した様に、ほんの少しのエネルギー増加を与えることにより、原子核はクラスターに分解しやすい性質を持っています。ここが分子系と異なる非常に面白い点で、わずかなエネルギー増加によって、多種多様な化学結合構造が現れてきます。

その典型例である ${}^{12}\text{Be}$ の例を図9に示します¹⁰⁾。この原子核は2 α と4つの中性子からできています。一番下の基底状態 ($(\pi)^2(\sigma)^2$)、下から二番目の励起状態 ($(\pi)^2(\pi)^2$) は2 α 周りの4つの中性子が分子軌道構造をとります。しかしながら、 α 崩壊の閾値近傍では、 $\alpha + {}^8\text{Be}$ に分かれたイオンの構造が現れてきます。更に核子当たり0.08MeV程度という小さなエネルギーを与えていくと、次々に構造変化を起こし、原子的構造に対応する ${}^6\text{He} + {}^6\text{He}$ 、共有結合構造 ($(0p_R)(0p_L)(\sigma)^2$)、そして再びイオンの構造である ${}^5\text{He} + {}^7\text{He}$ へと転移してゆきます。先にも説明したとおり、一核子当たりの結合エネルギーは8MeV程度なので、これよりも二桁程度小さいエネルギー増加で構造

が多様に変化するの¹²Beの非常に面白い性質です。

この様に中性子過剰な系では、クラスターと過剰な中性子の結びつきにより、様々な化学結合に類似した分子構造が現れてきます。これを我々はFemto-Molecule (フェムトモレキュル)と呼んでいます。Be 同位体の基底状態では、分子軌道構造が発現することは以前より知られていました。しかしながらエネルギーが増大した励起状態において、様々な化学結合構造が現れることはごく最近になって分かってきたことです¹⁰⁾。

10. ま と め

このトピックスでは主に原子核の基本的な性質を概観し、それらを基に中性子過剰核のクラスター構造の面白さについて紹介しました。主にBe同位体に焦点を絞りましたが、池田図をみると、 $N=Z$ の安定核の励起状態には色々な α クラスター構造が現れてきます。従って、これに過剰な中性子を付与していくことで、Be 同位体と同様に色々な化学結合構造が形成されることが予想されます。例えば¹²Cが 3α に分離したクラスター状態を考えると、緩く結合した 3α を中性子ボンドがつなぎとめることにより、 α 粒子の直鎖状態や、三角形状態が安定に発現する可能性が指摘されてきています。この様に中性子過剰核では、中性子ボンドを伴った豊かなクラスター構造が生まれる可能性があり、今後の研究は大変興味深いものと思います。

今回は原子核の性質、特にクラスター構造の面白さについて紹介しました。世の中には、多粒子、多自由度からなる物理系には色々な種類がありますが、励起状態がこれほど豊かな様相を呈する系は原子核以外には殆ど存在しません。また原子核の豊かな性質は、応用面ではエネルギー、医療、年代測定、また基礎科学では宇宙物理、特に元素合成などの諸問題とも深く関係しており、その研究対象は非常に多くの学際領域にまたがっています。それらの全てを紹介することはできませんでしたが、このトピックスから原子核という少し奇妙な物理系に興味を持ってもらえれば嬉しく思います。

参考文献

- 1) 中村誠太郎監修、“大学院原子核物理”、講談社サイエンティフィック (1996)。
- 2) 磁気モーメントとは、棒磁石のことです。核子は棒磁石としての性質を持っています。ただしこの棒磁石は量子効果で上向きか下向きの二方向しかとれません。

- 3) 鷲見義雄著、“原子核物理入門”、裳華房 (1997)。
- 4) 例えば、原島鮮著、“初等量子力学”、裳華房 (1972)。
- 5) 高田健次郎、池田清美著、“原子核構造論”、朝倉書店 (2002)。
- 6) 集団運動は液滴模型によっても記述されます。
- 7) K. Ikeda et al., Prog. Theor. Phys. 68 (1980)。
- 8) 谷畑勇夫著、“宇宙核物理入門”、講談社ブルーバックス (2002)。
- 9) 陽子数 (元素記号) が同じで中性子数と質量数が異なる原子核のことを同位体と呼びます。
- 10) M. Ito et al., Phys. Rev. Lett. 100, 182503 (2008); Phys. Rev. Focus, Vol. 22, story 4 (2008) <http://focus.aps.org/story/v22/st4>; RIKEN RESEARCH Vol.3, Issue11 (2008) <http://www.rikenresearch.riken.jp/jpn/research/5457>.