

# 物質を構成する原子核

筑波大学  
計算科学研究センター  
教授  
中務 孝



## ●著者略歴●

1994年、博士（理学）[京都大学]取得。  
その後、大阪大学核物理研究センター、  
カナダ・チョークリバー研究所、  
英国・マンチェスター工科大学、  
理化学研究所での研究員、東北大学（助教）、  
筑波大学（講師）、理化学研究所（准主任研究員）を経て  
現職。

## はじめに

今回「かく」というテーマの特集の中で「原子核」の話をしていただくことになりました。私は原子核物理学の研究を大学院時代から既に四半世紀に渡って続けてきていますが、原子核は未だに謎に包まれた研究対象です。我々が莫大な時間と労力をかけても、自然はほんの一部しかその姿を見せてくれません。しかしそこから、人類は科学を構築し、技術を発展させてきました。今回私がお話する原子核の話は、人類がこれまでに手にしたそのような限られた知識の一部ですが、少しでも興味を持っていただければ幸いです。

## 原子核の発見

物質は多数の原子から構成され、その原子は、中心に原子核、その周りを電子が回っているということは読者の多くがご存知だと思います。もともと原子の語源は古代ギリシャのアトモスから来ていて、哲学者のデモクリトスが命名した「これ以上分割できない」最小単位という意味でした。

図1はアメリカ原子力委員会（現在の原子力規制委員会の前身）のロゴですが、原子の構造を模式的に表していて、原子核と電子の軌道を表しています。

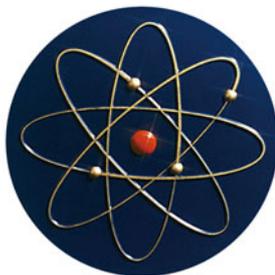


図1 原子模型。中心の赤い玉が原子核。

原子は原子核と電子に「分割できる」のです。しかし、図1の原子と原子核の相対的な大きさは正しくありません。原子がこの程度の大きさでは、まだまだ中心の原子核は小さすぎて見えません。

原子はオングストローム（Å）という単位の大きさを持ちます。1Å = 10<sup>-10</sup>mで、電子顕微鏡を使うと何とか“見る”ことができる大きさです。原子核はこれよりもはるかに小さく、その大きさはフェムとメートル（fm）というスケールで、1 fm = 10<sup>-15</sup>mです。これらの数字は“だいたい”の大きさを表していると思ってください。物理学の研究者は、数倍から場合によっては十倍程度の違いは気にせず平気で話をするのでご容赦ください。イメージで言うと、半径1kmの巨大な球を原子だとすると、原子核はピンポン玉くらいになります。“ピンポン玉くらい”とは、パチンコ玉から野球のボールくらいまでを含んでいると思ってください。

およそ100年前に原子核はラザフォードによって発見されました。電子顕微鏡でも見えないこんな小さな物体をどうやって見つけたのでしょうか。まずこの話から始めたいと思います。当時、フランスのベクレルやキュリー夫妻によって、放射線を出す原子があることが知られていました。この放射線の一つであるアルファ線を使って金の薄膜にぶつけるという実験がイギリスのマンチェスターで行われました。アルファ線とは、放射性の原子から放射されるヘリウムの原子核です。実験は、ラザフォードの助手であったガイガーと学生のマースデンが行い、彼らは、金膜に衝突して後方に跳ね返されたアルファ線を観測しました。この結果を聞いたラザフォードは驚愕します。なぜこれが

びっくりすることだったのかを説明するには、紙面が足りないので省略しますが、当時ヨーロッパで信じられていたトムソンの原子模型ではあり得ないことでした。ラザフォードは後にこの時の驚きを、「ちり紙に向かって大砲を打って大砲の弾が跳ね返ったようなもの」と表現しています。

ラザフォードはこの結果の意味について数年にかけて考察を重ね、一つの結論に至ります。実験結果を矛盾なく説明するためには、原子よりもはるかに小さい点のような領域に、電子の負の電荷を打ち消すだけの正の電荷があり、そこに原子のほぼ全ての質量が集中している「核」が必要だということです。人類が原子核を“発見”した瞬間です。こんなことを「発見」と呼んでよいのか、と思われる読者もいるでしょう。実は、科学の重大な発見の多くは、このような“傍証”の積み重ねなのです。その中の初期の最も重要な業績に「発見」の荣誉が与えられます。ラザフォードの後に続く研究者の努力が無ければ、真の意味での「原子核の発見」は無かったでしょう。

ラザフォードの言ったとおり、原子の重さ（質量）のほとんどすべては、この小さな原子核にあります。私たちの周りの物質はすべて原子からできているので、この世の中の物質の重さは、すべて原子核の重さだと言って構いません。電子は原子核に比べるとはるかに軽いので、物質の重さの99.9%以上が原子核の重さなのです。

私は2年半の研究生活をマンチェスターで過ごしました。1年中天気が悪く、細かい雨がいつも降っているという印象ですが、そんな街で、18世紀に産業革命が起こり、19世紀初頭にドルトンが原子説を提唱、そして20世紀にラザフォードがその原子の中心

に原子核を発見しました。大学の建物に掲げられた円形パネルにラザフォードの業績が刻まれていました（図2）。彼の業績の偉大さから考えると小さなパネルですが、「初めて原子を分割した」（First to split the atom）とあります。

## 量子力学の発見

原子核の発見は、物理学に大変革をもたらしました。それが量子力学の“発見”です。それまで自然界に隠されていた新しい法則（理論）を発見したのです。量子力学は大変不思議な理論ですが、その正しさは疑いようがありません。この理論に合わない実験結果が得られれば間違いなくノーベル賞ですから、研究者は血眼で間違い探しをやりましたが、ほころびすら見つけることができませんでした。ディーゼル車の排ガス検査では、最近、某国でショッキングな事件がありましたが、量子力学がパスした検査は全くレベルの違うものです。

原子を構成する電子と原子核はそれぞれ負と正の電荷持っているので、お互いに電気的な力で引き合っています。量子力学が無ければ、電子はやがて小さな原子核の中に吸い込まれてしまうはずですが、ところが原子は原子核の1万倍以上（体積はこの3乗）の大きさを持っていて、決して潰れることはありません。なぜでしょうか。

量子力学の基本法則は様々な形に表現できますが、その一つはハイゼンベルグが定式化した不確定性原理と呼ばれるものです。かいつまんでその意味を説明すると、粒子（この場合は電子）の位置を正確に知れば知る程、その粒子の速度（正確には運動量）は分からなくなるということです。これはミクロの世界の法則であって、我々の通常感覚とは相容れません。

例えば、我々は自動車をあるスペースに駐車することができます。位置と速度を同時に決めているわけです。ところがミクロな世界では、粒子を小さな空間の中に閉じ込めると、その粒子はじっとしていられずに動き回ります。箱の大きさを小さくすると、粒子の速度はさらに大きくなります。図1をもう一度見てください。原子とは、この図のように、原子核が電気的引力によって、その周りに電子を閉じ込めたものと見ることができるので、閉じ込める領域をあまり小さくしすぎると、電子が激しく動き回り、エネルギーが大きくなってしまいます。1Åという大きさが、原子にとって“ちょうどいい”大きさであって、これ以上原子を小さくするとエネルギー的に損なのです。



図2 英国・マンチェスター大学の建物に掲げられたラザフォードの業績を記したパネル。

このように、我々の常識が通用しないのが、ミクロな世界です。ニュートンが17世紀に万有引力を発見し、全く同じ運動方程式が、地球上の物体の運動と宇宙の天体の運動を記述できることを知りました。その後長い間、この力学（古典力学）は万能だと信じられていましたが、20世紀になって、古典力学が通用しない世界があることを知ったのです。もしかすると、やがて人類は量子力学が通用しない世界を発見するかもしれません。

### 陽子と中性子、核力の発見

原子核の研究が進み、やがて原子核は、陽子と中性子と呼ばれる2種類の粒子が結合してできていることが分かってきます。陽子は電子とは逆の正の電荷をもち、中性子は名前の通り電荷を持たない中性の粒子です。そうすると電気的には力が働かないはずですが。

では陽子と中性子を結合させている力は何でしょう。この未知の力の謎を解明したのが、日本人初のノーベル賞受賞者である湯川秀樹です。この原子核を形作る力を「核力」と呼びますが、湯川が核力の謎を解く際にも、量子力学の不確定性原理が重要な役割を果たしました。原子核は原子よりもはるかに小さいので、先ほどの不確定性原理から、その中に陽子と中性子を閉じ込めると、その運動エネルギーは巨大なものになります。それに打ち勝つだけの強力な引力が陽子や中性子の間に働いていないと原子核はあっという間にバラバラになってしまいます。これで力の“強さ”が分かります。また、原子核の大きさから、力の“到達距離”が分かります。湯川はさらに、この力の到達距離から、これを媒介する未知の粒子の性質を予言し、これが後にパイオンと呼ばれる粒子として発見されることになりました。湯川の研究はその後、粒子の交換で力が生まれるとする物理学の“常識”となって、現在に引き継がれています。

### 星の燃料

原子核は、陽子と中性子を原子よりもはるかに小さな“箱”に閉じ込めたようなものですから、原子中の電子と同様、陽子と中性子は止まっていることはできません。不確定性原理を使えば、陽子・中性が原子核内部でもつ運動エネルギーは、原子の中の電子のエネルギーのおよそ100万倍という大きなものになることが分かります。この巨大なエネルギーを取り出して燃料として使っているのが、夜空に輝く星々です。そのエネルギーの大きさは、人類の想像を絶する大きさです。太陽は、地球上の生物が生きて行くために必

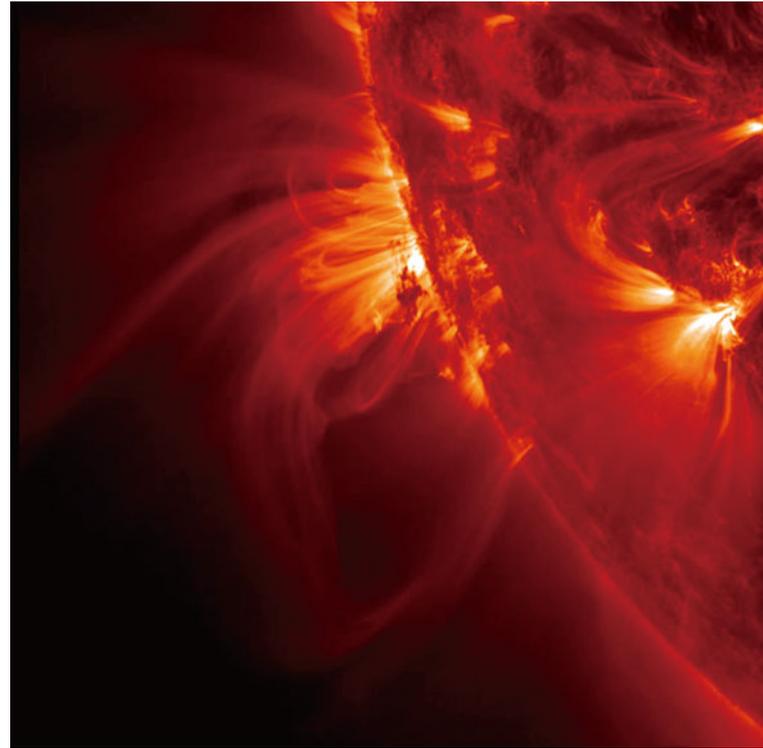


図3 太陽表面の活動。  
NASA/Solar Dynamics Observatory より。

要なエネルギーをすべて供給し、台風や竜巻などを引き起こしますが、太陽から地球に降り注いでいる熱や光は、太陽が出しているエネルギーのほんの一部です。太陽の表面では紅炎が立ち上がり、とてつもないエネルギーが放出されていることは、読者の皆さんもご存知のことでしょう（図3）。

太陽の組成はほとんどが水素で、中心部には高圧・高温の水素が大量にあると考えられています。水素の原子核は1個の陽子ですが、これを4つ集めて結合させると、ヘリウムの原子核を作ることができます。この反応でエネルギーを取り出しているのが、pp連鎖反応と呼ばれる太陽の燃焼過程です。このpp連鎖反応は、3つの段階があります。ところがその第一段階の反応である2つの陽子から重陽子（陽子と中性子が結合した重水素の原子核）を作る反応はとてつもなく起こりにくい反応で、この反応が進まないために太陽は水素をゆっくり燃やしているのです。量子力学を使って反応率を計算し、太陽が燃え尽きるまでの寿命は約100億年と見積もられています。太陽が誕生してからまだ50億年程度なので、太陽が燃え尽きてしまうという心配は、“しばらく”は大丈夫そうです。

重水素を生成する核融合反応が律速となって太陽がゆっくりと50億年にわたって輝き続けてくれたおかげで、地球上で生物が進化する時間が与えられ、運良く人類が誕生することができました。人類は、地球上

でこの核融合を用いたエネルギー生成に挑戦していますが、そこでは重水素を燃料にしています。重水素を作る太陽のマネは、まだまだできないのです。

## 元素組成

太陽はヘリウムよりも重い原子核をほとんど作ることはできませんが、宇宙には太陽よりもはるかに大きな巨星が存在し、そこではより重い原子核が作られていると考えられています。また、その巨星が燃え尽きたときに起こるとされる大爆発（超新星）などの爆発現象においても重い原子核が作られている可能性があります。こうして、物質や生物を構成する元素は、星の中や星の爆発の際に起こる核反応で作られています。星はまさに、ヨーロッパで中世から研究されていた「錬金術」を実現し、我々に必要な様々な元素を供給しているのです。

高校の化学の教科書に載っていた元素の周期表を思い出してみてください。元素の数は限られていて、自然界には100種類もありません。原子番号の大きな重い元素の原子核はみな不安定で壊れてしまうのです。実はこれは重要な性質です。もし地球上にとつともなく重い元素があったら、その強い重力のために人類は生活できなくなってしまうでしょう。1円玉程の大きさの原子核がもし存在したら、100万トンというようなとつともない重さになるのです。

地球を含む太陽系にどの元素がどれくらいあるかは、かなり詳しく調べられています。多い順に、水素、ヘリウム、酸素、炭素、窒素、ネオンといった順番です。ヘリウムとネオンは希ガスで分子を作らないので、それ以外で大量に存在している水素、酸素、炭素、窒素などを使って、地球上の生物の体は出来ていることが分かります。我々の体が有機物から出来ている理由は、簡単に言ってしまうと、これらの元素が沢山あるから、と言えるでしょう。ではなぜ、これらの元素は大量に存在するのでしょうか。レアメタルが、鉄や鉛よりはるかに貴重で高価なのはなぜでしょう。このような素朴な疑問に答えるためには、原子核の構造・反応の性質を理解することが必要です。長年の研究を通して、我々はその答えに近づいてはいますが、まだその謎は完全には解けていません。

## ゴミを資源に変える可能性

星が錬金術を実現しているのなら、人類もやがて実現できるのではないのでしょうか。そう考えるのは当然です。事実、原子核を別の原子核に変換するいわゆる核変換は、原子核を発見したラザフォード自身が

1919年に実現しています。窒素にアルファ線を当てて、酸素に変換することに成功したのです。しかし、有用な元素でもわずかな量では実際には役に立ちません。また、特定の核反応だけを選択的に起こさせるという技術も必要になります。量、反応の制御、生産コスト等、まだまだ“実用的”な段階に向けた課題は山積みです。

また、原子力発電の使用済み燃料には様々な元素が入っています。日本の原子力発電のほとんどはウランの核分裂を用いていますが、発電中に、その分裂片である「核分裂生成物」や、燃料のウランが分裂せずに別の元素に変換された「マイナーアクチノイド」と呼ばれる元素を大量に生産しています。しかしながら、これらは放射線を放出するやっかいものでもあります。「核のゴミ」とも呼ばれる高レベル放射性廃棄物の中には、核分裂や核変換により新たに生成された大量の元素があるのです。例えばパラジウムは自動車の排ガス浄化触媒として利用される貴重な元素ですが、その同位体の一つ<sup>107</sup>Pdがゴミには大量に含まれています。<sup>107</sup>Pdは非常に長い期間放射線を出すやっかい物であって、そのままでは使い物になりません。しかし、うまく中性子を一つ剥ぎ取れば、安定な（放射線を出さない）<sup>106</sup>Pdとなります。この核変換を大量に効率よく行うことができれば、ゴミを資源に変えることができるのです。パラジウム以外にも多くの元素が高レベル放射性廃棄物には含まれていて、これらを分離・変換するために必要な基礎データの収集と技術開発を目的としたプロジェクト\*が2014年からスタートしました。これは、基礎物理と応用工学の研究者が集結して開発を進める新しい取り組みです。

## おわりに

20世紀、人類は原子核を発見し、量子力学を構築し、放射線や核エネルギーの利用まで一気に突っ走りました。放射線が人類にもたらした恩恵は計り知れず、レントゲンのない社会など、もはや想像すらできないでしょう。一方で、東日本大震災と福島第一原子力発電所の事故は、科学技術への過信の危うさ、不断の努力が常に必要であることを改めて思い知らされる出来事でした。我々の自然に関する知識は、全体のほんの一部であるという自然科学の研究者には当たり前のことをもう一度肝に銘じて、謙虚な姿勢で研究を続けて行きたいと考えています。

## [参考サイト]

\* <http://www.jst.go.jp/impact/program08.html>