

バンデグラフ加速器 ~物質の構造と起源~

大阪大学 松多健策、福田光順、三原基嗣

16世紀ごろ、**錬金術師**は、鉛などの平凡な金属から金を作ろうとしました。錬金術の研究は化学をたいへん発展させましたが、元素を別の元素に変換することはついにはできませんでした。原子の外縁部にある電子を組み替える化学反応では元素を変えることはできないのです。しかし、原子の中心にある原子核に届くほど高いエネルギーを持つ粒子を衝突させれば、元素を変えることができるのです。このような高速の粒子を作り出す装置は**加速器**と呼ばれ、これを用いることで、今日、原子内部を調べられるばかりか、**元素の人工変換**すらもできるのです。

加速器にはいろいろな種類がありますが、基本的にどれも電気力を使ってイオンを加速し、高エネルギー粒子を作っています。その一つが科学館4階に展示されている戦前大阪大学で作られた図1の**コッククロフト・ウォルトン加速器**であり、また2016年まで大阪大学で使われ、昨年展示に加わった米国HVEC社製**バンデグラフ加速器**です。ここでは、バンデグラフ加速器の仕組みなどを紹介します。

1. 物質の構造

古代ギリシャのデモクリトスは、物質は粒子からできていると考え、物質の最小単位を、これ以上分割できないものという意味で**アトム(原子)**と名付けました。例えば18gの水の中には、水の性質を持つ最小単位である水分子が、1兆個のそのまた1兆倍ほど(詳しくはアボガドロ数 $=6 \times 10^{23}$ 個)あります。今日では、水分子は、酸素原子(O)の周りに水素原子

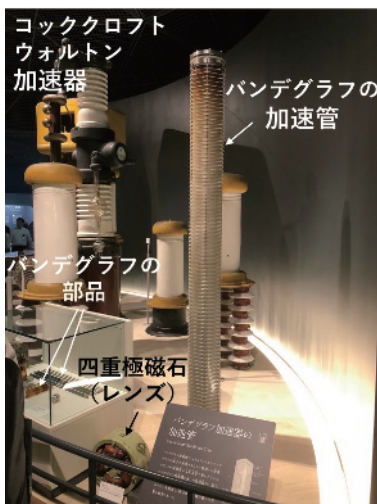


図1. バンデグラフの加速管、後の装置はコッククロフト ウォルトン加速器

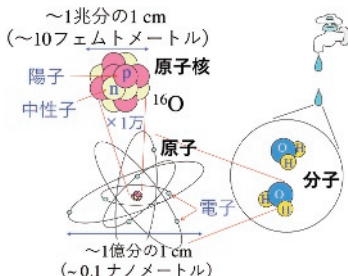


図2. 物質の構造

(H)2個が105度の2方向に結合してできていることが分かっています。19世紀末になり、**電子**が発見されると、原子は**電子**や**原子核**といった電気を帯びた粒子からできていることがわかりました(図2)。

原子の構造は、長岡半太郎のモデルのように中心に**正の電気を持つ重い原子核**があり、その周りを**負の電気を持つ軽い電子**が原子核に引かれながら飛

び回っています。このモデルは、1911年、図3の様なラザフォードの実験で確かめられましたが、長岡の土星モデルとは少し違い、原子核は原子の大きさの約1万分の一程度しかないことがわかりました。あたかも太陽の周りを小さな惑星が周回する太陽系さながらの構造です。1932年、原子核は正の電荷を持つ**陽子**と電荷を持たない**中性子**からできていることがわかりました。陽子の数(原子番号)で元素が決まり、ほぼ同数の中性子と共に互いに核力で結合しています。同じ元素で中性子数だけ異なるものを**同位元素**と呼びます。

ラザフォードの実験

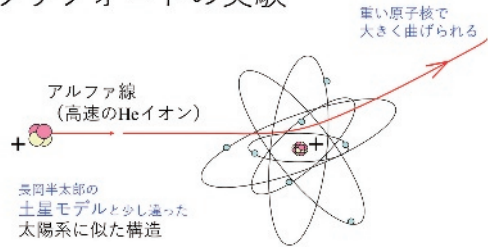


図3. 原子の構造とその調べ方

2. バンデグラフ加速器の仕組み

それでは原子の構造を調べたり、原子核の中の構造まで調べるにはどうしたらいいのでしょうか？それには化学反応や化学反応を用いた電池で得られる電気エネルギーでは足りず、**高エネルギーの粒子**が必要です。元々化学反応は原子の外縁にいる電子が組み換わって起きる現象です。この時に得られる化学エネルギーでは、**電子を組み換えることしかできません**。しかし、電池よりもずっと

高い電圧を発生させ、電気を帯びた粒子を電気エネルギーで加速すれば、**高エネルギー粒子**が得られ、**電氣的反発力**に打ち勝って原子核の内部にまでも届けることができます。そのために発明された高電圧装置が、**コッククロフト・ウォルトン装置**や**バンデグラフ起電機**(図4は小型の装置)です。



図4. 小型バンデグラフでの高電圧の発生実験

コッククロフト・ウォルトン装置は交流をトランスで高電圧に変換して、直流に変換し、コンデンサを積み上げて高電圧にします。歴史上、この装置が最初に元素の人工変換に成功しましたが、バンデグラフはさらに高い電圧を得ることができます。

バンデグラフ加速器では、加速に使われる高電圧は、図5の様に**絶縁ゴムベルト**で電気を運んで得られます。大阪大学のバンデグラフは縦型で、下部で電気をベルトに載せて運び、上部の**ターミナルシエル**と呼ばれる高電圧部分にこの電気を貯めて、およそ**500万ボルト**の高電圧が得られます。内部を真空にした**加速管**に高電圧をかけ、電気を帯びた正イオンを電気力で加速し、高いエネルギーにします。この大阪大学理学部にあった米国HVEC社製バンデグラフの加速管が科学館4階に展示されています(図1)。この加速管は、絶縁ガラスの円筒を両端から穴あきの金属電極で挟んだ構造が、およそ100段重ねられ、それぞれの電極に均等に約5万ボルトの電圧がかけられます(**高耐圧抵抗**で分割)。高電圧による放電を避けるため、バンデグラフは20気圧の絶縁ガス(N₂, SF₆, CO₂の混合気体)の入ったタンク内で運転されます。

粒子の種(イオン)は加速管上部にある**イオン源**で作ります。イオンを作るには、**プラズマ**と呼ばれる状態を作ります。高温の気体分子が衝突すると、**電離**して正イオンと電子が混合したプラズマになります。ロウソクの炎もその例です。これを作り出すには、例えば、薄い気体中で放電を起こします。それにより、気体分子が電離イオンになります。こうして作られたプラズマに電圧をかけてイオンを引き出し、イオン源から**加速管**に導きます。H(水素)、²H(重水素)、³He(ヘリウム-3)、⁴He(ヘリウム-4)などを加速することができます。

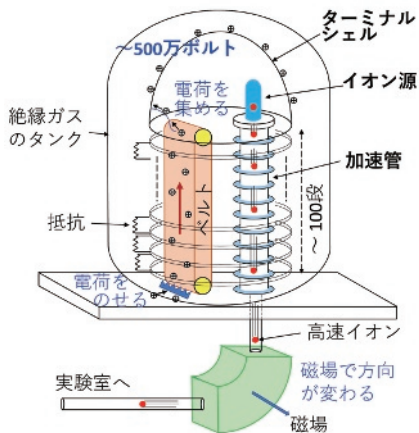


図5. バンデグラフ加速器の仕組み

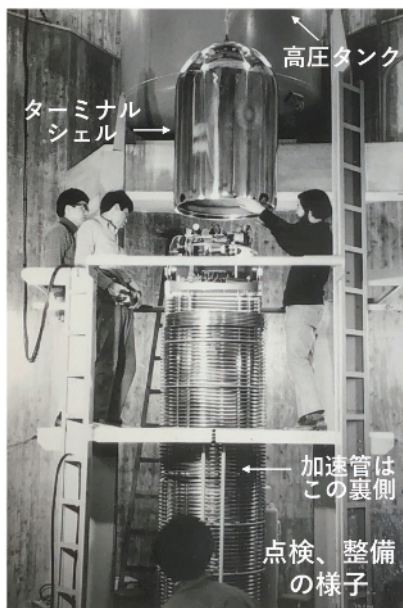


図6. バンデグラフ内部

3. 元素の人工変換とニホニウム

冒頭に出てきた**錬金術**との関係を少しお話しします。加速器で作られた高速の正イオンは原子核との反発に打ち勝って原子核の中に入り、原子核反応を起こします。例えばバンデグラフ加速器からの ^2H (重水素)が ^{16}O (酸素)に衝突すると、中性子を放出して ^{17}F (フッ素-17)に変わります(図7)。 ^{17}F は天然の ^{19}F の**同位元素**(陽子数は同じで中性子数が異なる元素、左肩の数字は合計数)ですが、1分でベータ線を出して ^{17}O (酸素-17)に壊れます。

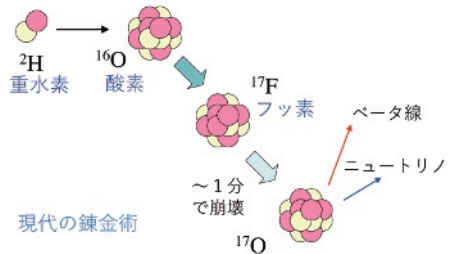


図7. 元素の人工変換

もっと高いエネルギーの加速器を用いれば、鉛から金を作ることもできますが、アボガド数(6×10^{23})には遠く届かず、お金儲けにはなりません。また、天然にない新元素も作れます。森田浩介らのグループは、理化学研究所の加速器で、亜鉛(Zn)の原子核をビスマス(Bi)に衝突させて113番元素(原子番号113)を合成し、2016年**ニホニウム(Nh)**と名付けました。原子番号92ウラニウム(U)より重い**超ウラン元素**は、例外を除き天然には存在せず、すべて人工的に作られたものです。

一方で、天然に存在する元素は、宇宙の初め、**ビッグバン**で合成された軽い元素や、その後、恒星の中で合成されたものです。図8の様に、恒星の中では、高温高密度の環境下で、水素がゆっくりと核融合しヘリウムが作られます。そして、太陽質量の10倍程度もあるような巨大な恒星内においては核融合反応が鉄原子核の合成まで進み、その後、潰れて**超新星爆発**を起こして、急激に重い元素が合成され、爆発により宇宙にばら撒かれます。太陽程度の大きさの恒星の寿命は百億年ほどありますが、太陽質量の10倍もあるような巨大な恒星では、一千万年程度の寿命で急速に核融合反応が進みます。

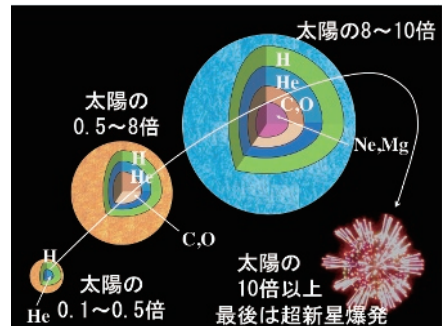


図8. 恒星内での元素合成

4. 原子核の構造の研究

加速器を用いて生成した高エネルギーの荷電粒子をぶつけて**原子核反応**を起こしたり、放射線を出す同位元素を生成し、ベータ線など放出される放射線を観測してその原子核の構造を調べることができます。**放射性同位元素**は短時間で崩壊し

安定な原子核に変わるので、天然にはありませんが、宇宙での元素合成では重要な役割を果たしました。

図9の様に、原子核は、球形のものばかりではなく、むしろ、レモンの様に長く伸びたり、みかんの様に平たく**変形**している場合が多く見られます。形を調べることで、構造がわかります。原子核は電荷を持っているので、変形した核では、電気的な偏りができます(**電気四重極モーメント**といいます)。また、原子核内を運動する陽子や中性子は、回転の勢い(**角運動量**)があり、その運動が作る電流により小さな磁石(**磁気モーメント**)になります。これを調べれば、核内での陽子や中性子の運動の様子もわかってきます。

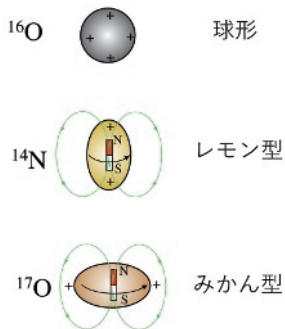


図9. 原子核の形

これら磁気モーメントなどは図10の様に外部の磁場から力を受けて、コマのように首振り運動をします(**歳差運動**)。余談ですが、地球も赤道が少し膨らんでいるため月などから偏った力を受けて2万6千年周期で首振り運動し、地軸の方向は北極星からずれてゆきます。原子核はずっと小さいので、1マイクロ秒以下の周期です。この歳差運動の周期を**核磁気共鳴法**で測定すれば磁気モーメントや電気四重極モーメントが極めて精度良くわかります。水素の核磁気共鳴を応用した**MRI**は、医療ではなくてはならない技術です。

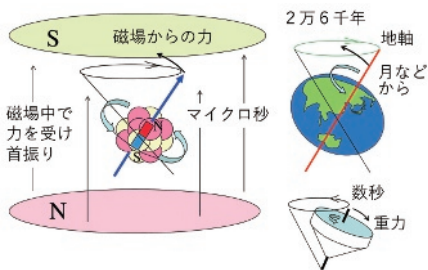


図10. 核磁気共鳴

5. 物質科学の研究と微量元素分析

磁気モーメントは、例えるなら小さな方位磁石のように、その場所の磁場を知らせてくれます。**放射性同位元素**を結晶内に埋め込み、放射性同位元素からのベータ線の方向を見ながら核磁気共鳴を行うと、**共鳴周波数**から結晶内部の磁場が精密にわかります。こうして物質内部の磁場や電場を調べられます。また、埋め込んだ元素の結晶中での動きもわかります。図11のように、ICなど電子部品の材料となるケイ素(シリコン:Si)などの半導体中

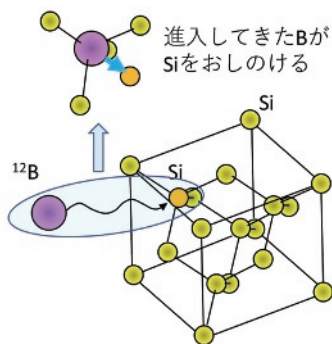


図11. Si中のB

の重要な微量成分、**ホウ素(B)**の振る舞いを放射線の ^{12}B で調べています。

銅(Cu)やアルミ(Al)の単結晶中でホウ素(B)や窒素(N)などがどの**結晶内位置**を占めるのかといった研究も行いました。

図12は、特性엑스線による微量元素分析の例です。ヒ素(As)などの含有率から、作物の産地を特定しました。

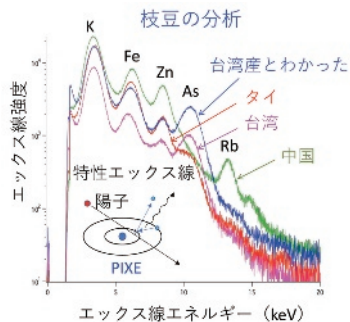


図12. 枝豆の微量元素分析

6. 自然界の力の性質、対称性の研究

自然界で、粒子間に働く力は4つあります。原子中の電子の組み換えで起こる化学反応は**電磁気力**で起きます。モーターに限らず、エンジンや筋肉による力、摩擦など、普段目にする現象はたいてい電磁気力によるものです。**重力**は極めて弱いけれど、地球は極めて重いのでその重力は実感できます。あと2つは**強い力**と**弱い力**ですが、**原子核のごく近くでしか働きません**。

さて、例えば、時間の進む向きを反転してもニュートンの運動方程式は同じです。鏡で空間座標を反転しても同じです。ところが、弱い力で起きる**ベータ崩壊では空間反転するとベータ線の放出方向は同じになりません**。弱い力では、他の力とは違って、空間反転に対して対称ではないのです。

さて、陽子と中性子の入れ替えではどうでしょう？例えば ^{12}B の陽子と中性子を入れ替えると ^{12}N になります。これらが同じ構造を持つことは磁気モーメントでも確かめられています。上記の特殊な性質を持つ弱い力でも同じになるのでしょうか？大阪大学バンデグラフの精密実験で、陽子と中性子を入れ替えた ^8B と ^8Li の対、 ^{12}B と ^{12}N の対のベータ崩壊でも角運動量とベータ線の方向との関係は同じになり対称であることがはっきりしました。

バンデグラフは、50年間幅広い分野の実験研究に利用されてきましたが、2016年その役目を終え、その加速管などの部品が2024年科学館に展示されました。

著者紹介 松多健策(まつた けんさく)、福田光順(ふくだ みつのり)、三原基嗣(みはら もとつぐ)



阪大物理の退職准教授。併任教授、助教の3名。ここで紹介したバンデグラフ(~2016年)のほか、理研の超伝導リングサイクロトロン、量子医科学研究所のシンクロトロン、イギリスやカナダ等の加速器を使って、原子核の構造や物質科学の幅広い実験研究を行っています。