

# 原子核の結合エネルギー

平成 14 年 2 月 5 日

## 概要

普段、我々が生活している中では、原子核物理学なんてものは、なかなか、どこか、ほとんど、いや、全く意識されていないに等しい。また、このテキストでもって意識してもらおうなんて毛頭思ってもいない。結局、多くの人は、素粒子物理学、特に超ひも理論や宇宙論に興味を覚えるだろう。そうなると、このテキストに意味があるのかどうかも疑いたくなる。しかし、敢えて、原子核物理学の話をしよと思う。原子核物理学が宇宙の現象の説明の一旦を担っていることだし。

## 1 Introduction

原子核は、陽子、中性子 (総称して核子) の数が、数個から数百個という数からなる物体である。したがって、原子核物理学という学問は、少数粒子系の物理学や、また一方で、多粒子系の物理学の手法が用いられるような非常に広い領域にわたり、また、様々な手法を用いて研究がなされている分野である。最近では、ハドロン物理学と呼ばれる核子の構造や反応を調べる研究も原子核物理学の範疇に入ってきている。なぜならば、量子色力学と呼ばれるクォーク、グルーオンについての理論は、核子の内部構造が多体系であることを教えてくれた。すなわち、原子核物理学の手法を用いることによって、原子核よりもさらに小さな核子の内部についても研究することができるようになったというわけである。

原子核物理学は、素粒子物理学のように華がなく、物性物理学のように実用性にも乏しく思える。しかし、その中間領域である原子核物理学はまだまだ謎が多く、それらの解明は長期的視野に立てば、先の二つの学問領域に影響を及ぼす可能性がある (しかし、これまでのところは、むしろ知識を輸入している方が圧倒的に多い)。また、物理学全体を見ても、原子核物理学の研究は、一貫した物理法則、物理理論の構築、検証に欠かすことのできない領域でもある。そういった意味で、原子核物理学という華もなく、実用性にも乏しい研究分野と言えども、物理学全体の発展から見れば、欠かすことのできない研究分野なのである。

このテキストでは、まず、原子核物理学の歴史を簡単に概観する。次に、原子核についての実験などから発見された独特な性質、密度の飽和性、結合工

エネルギーの飽和性について簡単に紹介する。その後、核子(陽子、中性子の総称)が数個から数百個からなるような原子核の性質を、半経験的にはあるが、よく記述している原子核の結合エネルギーの公式、ワイツゼッカー・ベータの質量公式について、それらの意味を含めて説明する。そして、結合エネルギーの様子から、原子核の分裂や融合が説明できることを紹介し、できることならば、その後の理論展開についても述べていきたいと思う。

## 2 原子核物理学の歴史

1911年、ラザフォードが、金箔に  $\alpha$ 線を照射し、 $\alpha$ 線がどのように散乱されるかを調べる実験を行った。その結果、クーロン斥力によって非常に大きく散乱される  $\alpha$ 線が確認された。すなわち、半径が  $10^{-10}\text{m}$  という大きさの原子の内部で、 $10^{-15}\text{m}$  という非常に小さな領域に正の電荷が集まっているということが確認された。これにより、原子の  $10^{-5}$  倍の大きさの原子核の存在が発見された。なお、それ以前には、1904年にトムソンによって提唱されたトムソン模型と呼ばれる模型が、電磁気学的な理由から、支持されていた。これは、半径  $10^{-10}\text{m}$  の原子の内部に、正電荷と電子が一樣に分布しているというもので、この模型に基づいて  $\alpha$ 線による散乱実験を行えば、クーロン斥力が分散されるため、ラザフォードの実験のように強いクーロン斥力を受けて大きく散乱されるようなことはなく、比較的前方に散乱されるはずであった。また、特筆すべきことに、1903年には長岡半太郎によって、原子の土星型模型(内部に原子核が存在するというラザフォードの原子模型に近い)が提唱されていたことを述べておく。

1913年、ラザフォードの原子模型では、電磁気学的に計算すると、電子が原子核の周りをまわる際に電磁波を放射してエネルギーを失い、 $10^{-11}$ 秒という非常に短い時間で、電子が原子核に落ちてしまうという問題があったが、ニールス・ボーアによって原子模型に量子論を導入し、原子核に束縛されている電子が飛び飛びのエネルギー順位しか取ることができず、電子が原子核に落ち込むことはないという模型を考案した。これにより、原子の飛び飛びのエネルギー順位の説明にも成功した。

1932年、 $\alpha$ 粒子をベリリウム原子核と反応させるという実験をチャドウィックが行い、陽子と同じ質量で、電氣的に中性な粒子が存在することを発見した。すなわち、中性子の存在が発見された。

また、同じ年にハイゼンベルグによって、アイソスピンと呼ばれる物理量を、陽子と中性子の間で交換することで、陽子が中性子になり、また、その逆の現象が生じるという模型を考案。これにより、陽子と中性子は核子と呼ばれる粒子の異なった顔の表われとして理解されるようになった。

1935年、正の電荷をもつ陽子が、強くクーロン斥力が働くような  $10^{-15}\text{m}$  という非常に小さな領域に押し込められているという事実を説明するために、

中間子と呼ばれる粒子を核子間で交換するということにより、核力という強い引力で核子が結び付けられているという中間子論を考案。1947年にパウエルによって中間子の存在が確認された。

### 3 原子核の性質

#### 3.1 核の密度の飽和性

核子の散乱実験を解析すると、原子核の密度が、原子核の質量数に関わらず、どのような原子核でもほとんど一定であることが明らかになった。ここで、金の原子核  $^{197}\text{Au}$  の密度と核半径の関係を表すグラフを示す。

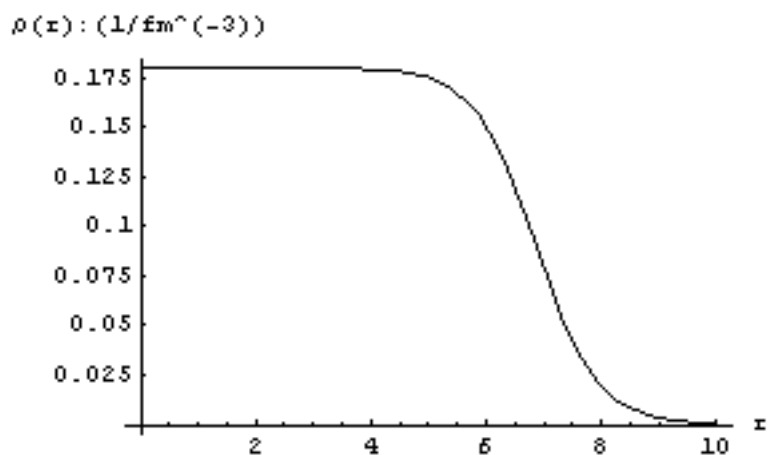


図 1:  $^{197}\text{Au}$  における核密度と核半径の関係

この図を見て分かるように、核半径が小さい領域では、核の密度はほぼ、 $0.18 \text{ nucleons} \cdot \text{fm}^{-3}$  程度で一定である。核の中心からの距離が 4fm あたりから減少し始めて、10fm あたりではもう核の密度は 0 になって、この外では核力が及んでいないことを示している。これは核子間に引力として働く核力の到達距離が有限の距離でしか作用しないことに関係している。このグラフは、実験値と非常に良く合う形の密度分布関数

$$\rho(r) = \rho(0) \left[ 1 + \exp\left(\frac{r-R}{a}\right) \right]^{-1} \quad (1)$$

において、 $\rho(0) = 0.18 \text{ nucleons} \cdot \text{fm}^{-3}$ 、 $R = 6.38 \text{ fm}$ 、核の表面のぼやけのパラメーター  $a$  を  $a = 0.53 \text{ fm}$  として代入したものである。なお、この結果は実験結果と非常によく合っていることを補足しておく。様々な質量数  $A$  の原

子核に対して調べた結果、原子核の半径  $R$  は

$$R = r_0 A^{1/3}, r_0 = 1.1 \sim 1.3 \text{fm} \quad (2)$$

とあらわすことができ、また、核表面のぼやけは質量数  $A$  によらず、おおよそ  $a = 0.6 \text{fm}$  程度であることが分かった。これは原子核の面白い特徴である。このことは質量数  $A$  の増加とともに核半径が増加して、核密度はほとんど変化しないことを表現している。すなわち原子核の核密度の飽和性が非常によく再現された。

### 3.2 結合エネルギーの飽和性

次に話すこともまた、実験から明らかになってきたことなのであるが、質量数の大きい領域では、原子核の 1 核子当たりの結合エネルギーがおおよそ  $8 \text{MeV}$  程度という、”おおまかに”一定の値を持つという事実である。

質量数と結合エネルギーについてのグラフをプロットすると、質量数がおおよそ 60 以下の領域では、質量数の増加とともに、結合エネルギーは増加し、それ以上の領域では、質量数の増加とともに減少していく。結合エネルギーの質量数との関係のグラフは、 $^{56}\text{Fe}$  あたりを頂点とした山のようなグラフになる。

次の章において、ワイツゼッカー・ベエテの質量公式と、結合エネルギーについて述べるが、この公式は、先に述べた事実をよく表現している。次の章では、質量公式の意味を説明するとともに、そのグラフからわかる事実についてもう少しだけ掘り下げて触れていきたいと思う。

## 4 結合エネルギーと質量公式

原子番号 (陽子数) を  $Z$ 、質量数を  $A$  として原子核の (基底状態の) 質量を  $M(A, Z)$  と表し、さらに、陽子の質量を  $M_p$ 、中性子の質量を  $M_n$  とすると、 $A$  と  $Z$  で指定される原子核の全結合エネルギー  $B(A, Z)$  は

$$B(A, Z) = ZM_p c^2 + (A - Z)M_n c^2 - M(A, Z)c^2 \quad (3)$$

で表される。この全結合エネルギーというのは、原子核をばらばらな核子に分解するのに必要な最小エネルギー、もしくは、原子核をつくるために核子が互いに力を及ぼし合って結合するときに放出されるエネルギーである。もっと簡単に言ってしまうと、原子核の結びつきの強さを表すものと考えればよいだろう。また、この式において、 $B = \Delta M c^2$  とすれば、 $\Delta M$  は、原子核内における相互作用によって生じた質量欠損を表す。

ここで現れた  $M(A, Z)$  は、0 次近似としては、 $ZM_p + (A - Z)M_n$  と等しいのであるが、実際には、核内の種々の相互作用により、補正されなければ

ならない。それらを取り入れた原子核の質量の表式は、

$$M(A, Z)c^2 = ZM_p c^2 + (A - Z)M_n c^2 - a_{vol}A + a_{surf}A^{\frac{2}{3}} + a_{coulomb}\frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}} + a_{sym}\frac{(A/2 - Z)^2}{A} + \delta(A, Z) \quad (4)$$

と表すことができる。

#### 4.1 質量エネルギーの表式における各項の意味

それでは、各項の意味について説明していこうと思う。

第1項と第2項は、明かなように、それぞれ陽子と中性子の質量エネルギーの総和である。

第3項は、体積エネルギーと呼ばれ、前章で述べた、1核子当たりの結合エネルギー ( $B/A$ ) がおよそ 8MeV で一定であることから導入されたものである (確かに、もし  $B/A$  が一定であるとすれば、 $B$  が  $A$  に比例することは明らかであろう。したがって、体積エネルギーは核内部の核子数  $A$  に比例するとして表現される)。これは、核子とその周囲を取り巻く核子と相互作用するときの結合エネルギーと考えることができる。

第4項は、表面エネルギーと呼ばれるものである。前章で見たように、原子核は有限の大きさをもっている。このことは、表面付近に存在する核子は、核の中心側からは相互作用を受けるが、核の外側からは作用を受けないということの意味する。すなわち、核内部の核子よりも結合エネルギーは小さくなるわけである。体積エネルギー (第3項) は、核の中心付近に存在する核子 (全方向から相互作用を受ける) の結合エネルギーということもできるが、このエネルギーには、当然、先に述べた表面付近の核子についての結合エネルギーの情報は何も含んでいないので、結合エネルギーの補正としては、補正のしすぎである。したがって、体積エネルギーから、表面付近の核子の結合エネルギーの分のさらなる補正を与えなければならない。その補正を与えるのが、この第4項である。この表面エネルギーは核表面にある核子数、すなわち、核表面積に比例する。前章の (2) 式で見たように、核半径が  $A^{\frac{1}{3}}$  に比例することから、原子核の表面積は、

$$4\pi R^2 = 4\pi r_0^2 A^{\frac{2}{3}} \quad (5)$$

で、 $A^{\frac{2}{3}}$  に比例する。したがって、表面エネルギーは質量数の  $\frac{2}{3}$  乗に比例することが分かる。

第5項については、陽子数が  $Z$  なので、 $Z^2$  に比例していることから分かるように、クーロンエネルギーの項である。また、 $A^{\frac{1}{3}}$  に反比例しているのは、原子核の密度の飽和性と、核半径が  $A^{\frac{1}{3}}$  に比例することから推測できる。もう少し具体的に説明すると、密度の飽和性という性質が存在し、原子核の内部での核子の密度がほぼ一定であることが分かることは先に話した。すな

わち、核子は、原子核の種類によらず、ほぼ等間隔に分布していると考えてよい。したがって、その核子間の平均的な距離は、原子核の半径の定数倍（当然この値は、1より小さい）と見積もることは、妥当である。また、陽子の分布も核子と同じように分布していることは昔から確認されている。よって、陽子間の平均距離も同じようにして見積もることができる。こうしてクーロンエネルギーの表式が第5項のように書けることが分かる。

次に、第6項についてであるが、これは、対称エネルギーと呼ばれている。すなわち、原子核内の陽子数と中性子数を同じにしようとする働きを表したものである。この項の関数形はフェルミ気体模型と呼ばれる模型から、パウリの排他原理を考慮することで得られるということだけ述べておくことにする。

第7項のエネルギー補正項は、陽子数、中性子数が奇数であるか、偶数であるかによって決まる原子核の安定性を表している補正項で、原子核内における超伝導効果すなわち、核子が対（物性物理学で言う Cooper 対）を作る（対相互作用）ことでエネルギー的に安定な状態を作るという事実に基づいて導入されたものである。これは、

$$\delta(A, Z) = \begin{cases} -\Delta(A) & A = \text{偶}, Z = \text{偶}, \text{もっとも安定} \\ +\Delta(A) & A = \text{偶}, Z = \text{奇}, \text{もっとも不安定} \\ 0 & A = \text{奇}, Z = \text{奇または偶}, \text{上の中間} \end{cases} \quad (6)$$

として、質量数  $A$  の関数として表す。

#### 4.2 4個の定数、 $a_{vol}, a_{surf}, a_{coulomb}, a_{sym}$ と、 $\delta(A, Z)$ の決定

ここで、具体的に陽子の質量エネルギー  $M_p c^2 = 938.256 \text{MeV}$ 、中性子の質量エネルギー  $M_n c^2 = 939.550 \text{MeV}$  という数値を代入すると、

$$M(A, Z)c^2 = 938.256A - 1.294Z - a_{vol}A + a_{surf}A^{\frac{2}{3}} + a_{coulomb}\frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}} + a_{sym}\frac{(A/2 - Z)^2}{A} + \delta(A, Z) \quad (7)$$

となる。今、4個の定数、 $a_{vol}, a_{surf}, a_{coulomb}, a_{sym}$  と、 $\delta(A, Z)$  が定まっていなくても、 $a_{coulomb}$  の項は、核半径  $R = r_0 A^{\frac{1}{3}}$  の球内に陽子が一様に分布しているとすると、厳密に計算することができて、 $\frac{3}{5}\frac{Z^2 e^2}{R}$  と表すことができ、 $r_0 = 1.25 \text{fm}$  として、これに具体的な数値を当てはめれば、 $0.6986\frac{Z^2}{A^{1/3}} \text{MeV}$  と求めることができる。

これで、定数は3個になったわけであるが、この定数を決定する方法として、実験による質量  $M$  の実測値によく合うように決めていくことになる。

まずは、 $\beta$ 崩壊について安定であるような原子核（ $\beta$ 安定核という）の質量数  $A$  と陽子数  $Z$  の関係を調べることにする。 $A$  を固定して、 $Z$  を変化させたときに  $M$  が極小になるような  $Z$  の値が、質量が同じ原子核（同重核）におい

て  $\beta$  安定な  $Z$  を表す。すなわち、 $M$  を  $A = \text{一定}$  として  $Z$  について微分し、それが 0 になるとすれば、 $M$  が極小であるというわけである。したがって、

$$\left( \frac{\partial M(A, Z)c^2}{\partial Z} \right)_{A=\text{const}} = -1.294 + 0.6986 \frac{2Z}{A^{\frac{1}{3}}} - 2a_{\text{sym}} \frac{(A/2 - Z)}{A} = 0 \quad (8)$$

という式を得る。この式が、 $\beta$  安定核の  $A$  と  $Z$  の関係を最もよく表すように実測値から  $a_{\text{sym}}$  の値を決めると、

$$a_{\text{sym}} = 93.15 \text{MeV} \quad (9)$$

と数値を与えることができる。すると、

$$Z_{\beta} = \frac{A}{2.00 + 0.015A^{\frac{2}{3}}} \quad (10)$$

という関係式が得られる。この関数は、 $\beta$  崩壊に対して安定な原子核の  $A$  についての曲線を描いており、 $\beta$  安定曲線と呼ばれる。これをグラフ化したのが次のグラフである。

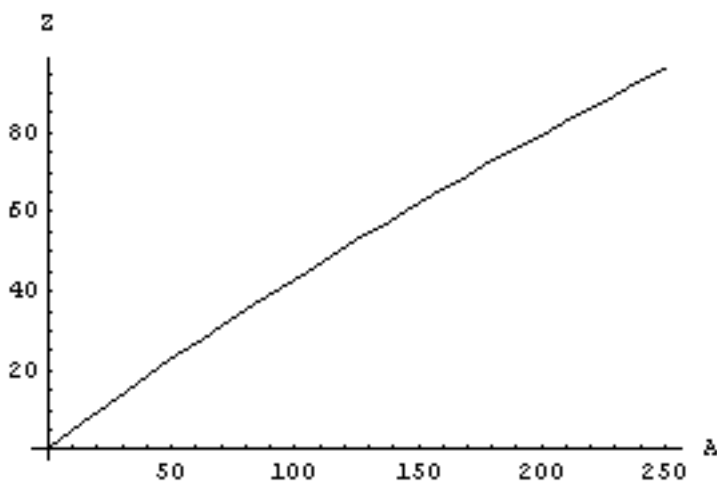


図 2:  $\beta$  安定曲線

このグラフから分かることは、質量数が小さい領域では、 $Z = \frac{A}{2}$ 、すなわち、陽子数と中性子数が等しい関係にあるが、質量数が増えていくに従って、中性子数の方が大きくなっていくことが分かる。この意味を考える。質量数が大きくなっていくと、陽子数も増加していくが、このことは、陽子間のクーロン斥力も大きくなっていくことを意味する。すなわち、この斥力によって、原子核はエネルギー的に不安定な状態になるわけである。すると、同じ質量数である同重核では、陽子よりクーロン力の働かない中性子が多い方が、エネルギー的には安定することになるというわけである。

(10) 式を (9) 式に代入することにより、質量エネルギーの表式は  $A$  だけの関数として表すことができる。そして、 $\delta(A) = 0$  である質量数  $A$  が奇数で、 $\beta$  安定核の場合において、この質量を最もよく再現するように実測値から、 $a_{vol}, a_{surf}$  を決めると、

$$a_{vol} = 15.56\text{MeV}, a_{surf} = 17.23\text{MeV} \quad (11)$$

という数値になる。

また、 $\delta(A, Z)$  は、 $A =$  偶数の核の質量と、 $\beta$  崩壊のエネルギーの測定値を再現するようにして決定することができ、

$$\delta(A, Z) = \begin{cases} -33.53A^{-\frac{3}{4}}\text{MeV} & A = \text{偶}, Z = \text{偶} \\ +33.53A^{-\frac{3}{4}}\text{MeV} & A = \text{偶}, Z = \text{奇} \end{cases} \quad (12)$$

と得られる。

### 4.3 ワイツゼッカー・ベータの半経験的質量公式

こうして、4 個の定数と  $\delta(A, Z)$  を決定することができたので、これを (9) 式に代入すると、

$$M(A, Z)c^2 = 922.691A - 1.294Z + 17.23A^{\frac{2}{3}} + 0.6986\frac{Z^2}{A^{\frac{1}{3}}} + 93.15\frac{(A/2 - Z)^2}{A} + \delta(A, Z) \quad (13)$$

となる。この式はワイツゼッカー・ベータの半経験的質量公式と呼ばれている。この式は軽い核 (質量数  $A$  が小さい核) を除いて、 $\beta$  安定曲線付近の原子核の質量を非常によく再現する。

ワイツゼッカー・ベータの半経験的質量公式において質量エネルギー  $M$  を質量数  $A$  で割ることにより、1 核子あたりの質量エネルギーを求めたグラフと、この式を (3) 式に代入して求めた 1 核子あたりの結合エネルギーのグラフを以下に示す。なお、このグラフを求める際に、 $\beta$  安定曲線の関係式を用い、対相互作用による効果の項  $\delta(A, Z)$  を無視した。

このようにして、半経験的質量公式とそのグラフを得た。このグラフが、実験による測定値と非常によく合うのは定数の決定に実験値を用いていることから明らかである。しかし、重要なのは、質量公式の中に体積エネルギー、表面エネルギー、クーロンエネルギー、対称エネルギー、対相互作用エネルギーの概念を導入したところにある。これらのエネルギーの項は、たくましい想像力によって導入されたものである。これらの項を導入することで、原子核において核子がどのように相互作用しているかを理解することを助けている。あとの課題は、それぞれのエネルギーの定数を、実験値からではなく、理論的に導出できるかどうかである。ワイツゼッカー・ベータの半経験的質量



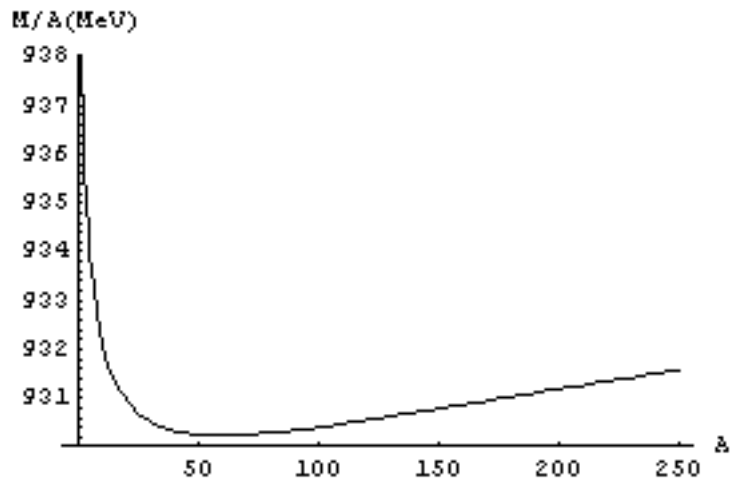


図 3: ワイツゼッカー・ベータの半経験的質量公式による 1 核子あたりの質量エネルギー

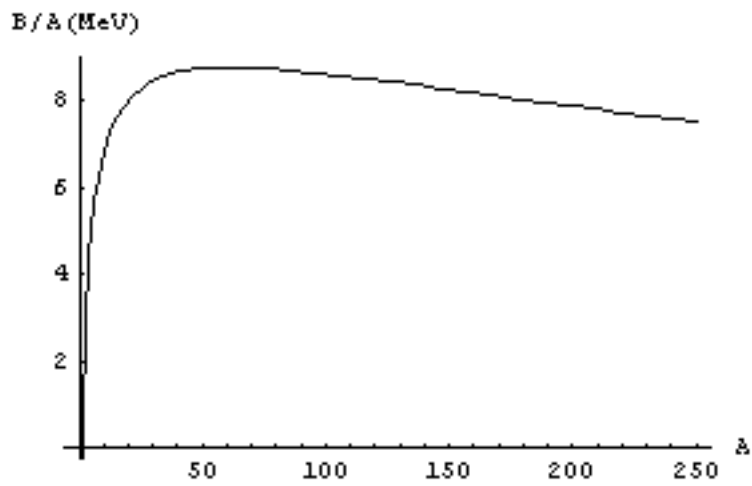


図 4: 1 核子あたりの結合エネルギー

公式は、実験値から定数を決定しているという意味で、“半経験的”なのである。半経験的であることを越えて、理論的にエネルギー項の定数を導出することを試みるために、過去、様々な原子核の模型が考え出されてきた。これらの模型の話については、ここでは詳しくは述べないが、概略だけ述べよう。

まず原子核を球体としてでなく立方体と考え、その中では、自由粒子として振舞っているとするフェルミ気体模型が考案され、境界を持った有限体積(原子核)内の核子の振舞いを説明しようとした。この模型は比較的良好に体積エネルギーや表面エネルギーを再現し、対称エネルギーについてはその半分の量を説明することに成功した。実際には、原子核の内部の核子は、他の核子から複雑な相互作用を受けるのであるが、よく調べてみると、複雑な相互作用の中においても核子は原子核内で自由に独立な軌道を描くと見てよいことが明らかになった(独立粒子模型)。さらに進んで、2つの核子間の相互作用は考慮されるが、その他の核子からの相互作用は考慮しないというような近似法(もちろんパウリの排他原理は考慮されたものである)により、複雑な相互作用を2体核子間のポテンシャルに単純化して見ることができるとも明らかになった(独立粒子対模型)。こうして原子核の模型は精密化され、質量公式をよく説明できるようになった。また、原子核内の核子が完全に自由に振舞っているのではなく、核密度分布関数(1)式からの類推により核半径を $R$ 、核表面のぼやけを $a$ として、ウッズ・サクソンポテンシャル

$$V(r) = \frac{-V_0}{1 + \exp\left(\frac{r-R}{a}\right)} \quad (14)$$

という1体ポテンシャルの中で運動していると考え、さらにスピン軌道相互作用と呼ばれる相互作用

$$V_{so} = v(r)\mathbf{l} \cdot \mathbf{s} \quad (15)$$

を導入し、そのシュレーディンガー方程式を解くことによって、陽子数もしくは中性子数が2, 8, 20, 28, 50, 82, 126であるときに原子核が安定になるという原子核の閉殻構造を説明することに成功した。この模型は殻模型と呼ばれ、原子核構造を理解する上での基礎を築き上げている。このようにして模型の発展とともに原子核の結合エネルギーが定量的にも精密に理解できるようになった。

さて、次章では原子核の結合エネルギーの性質から分かる事柄を少々説明することにする。

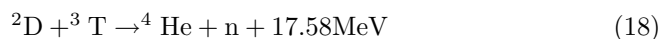
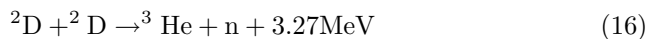
## 5 核分裂と核融合

ここでは、図4のグラフを主に見ていこう。この1核子あたりの結合エネルギーというのは、先にも述べたが、核子の結びつきの強さを表すものである。このグラフから分かるように、この結合エネルギーの極大は質量数が50

～ 60 の間あたりにある。およそ  $^{56}\text{Fe}$  あたりが最も核子の結びつきが強いと言ってもよい。核子の結合エネルギーが大きいほど、原子核から核子を引きはがすのに大量のエネルギーを必要とする。すなわち、安定な状態になる。したがって、質量数  $A \sim 60$  より大きい領域では、重い原子核から、中くらいの原子核へ転換されるような反応があれば、核子の結合エネルギーの差の分だけ原子核はエネルギーを放出する。この現象は、核分裂に他ならない。また、一方で、質量数  $A \sim 60$  より小さい領域では、軽い原子核から中くらいの原子核へ転換されるような反応があれば、これによってもまた、原子核はエネルギーを放出する。こちらは核融合に他ならない。

これらの反応のメカニズムについては触れないことにするが、結合エネルギーのグラフから分かる興味深い事実を述べておこう。図 4 は質量公式から描いたグラフである。質量数が  $A \approx 240$  程度のところでは核子 1 個当りの結合エネルギーは  $B/A \approx 7.6\text{MeV}$  くらいであり、 $A \approx 120$  あたりでは、 $B/A \approx 8.5\text{MeV}$  である。したがって、質量数  $A \approx 240$  の原子核が半分に分裂して 2 つの質量数  $A \approx 120$  の原子核になったとすると、この核分裂で放出されるエネルギーは  $240(8.5 - 7.6) \approx 210\text{MeV}$  くらいである。このうち多くは 2 つの分裂した原子核の運動エネルギーになるはずで、これを利用すれば、莫大なエネルギーを得ることができる。実際、 $^{235}\text{U}$  (ウラン 235) が 1MeV 以下の遅い中性子によって  $A \sim 96$  と  $A \sim 140$  のような 2 種類の核に分裂したとき、この核分裂の全エネルギーはおよそ 202MeV である。これは、先に示した概算によく一致する。このうち約 165MeV が分裂した核の運動エネルギーへと変換される。なお、この分裂の際に中性子がいくつか放出されることが確認され、この中性子を更なるウランの核分裂に利用することで連鎖核反応の可能性が示された。これは原発などの核分裂エネルギーの応用において非常に重要である。

一方、質量数が小さい領域では原子核の閉殻構造の存在などもあり、質量公式はあまり当てにならない。したがって、核分裂について行ったようなエネルギーの概算はあまり意味を持たない。しかしながら、核分裂の領域における結合エネルギーのグラフの傾きと核分裂の領域でのそれを比べると、明らかに核融合の領域の傾きのほうが急であることから分かるように、核融合が核分裂に比べて多くのエネルギーを得ることができる可能性があることを示している。実際の核融合反応としては



のような反応が存在し、確かに核融合によってエネルギーを獲得することができる。特に (18) の反応は核子 1 つ当りに放出されるエネルギーは先のウランの核分裂に比べ 3 倍以上である。核融合反応において重要なことは、核分

裂では、分裂の際に生じた原子核は一般的に中性子過剰であり、放射性の物質であるため、安全性という面では問題があるが、それに比べ、核融合反応ではそのような放射性物質の問題はほとんど解決されるということである。しかし、問題がないわけではない。これらの反応を持続的に生じさせるためには非常に高温な状態を作らなくてはならない。このような状態をいかに効率よく作るかという問題があり、コストという面で問題が残っている。

## 参考文献

- [1] 八木浩輔, 原子核物理学, 朝倉書店, 1971.
- [2] 市村宗武・坂田文彦・松柳研一, 岩波講座 現代の物理学 9「原子核の理論」, 岩波書店, 1997
- [3] 砂川重信, 電磁気学, 岩波書店, 1977.
- [4] deShalit and Feshbach *Theoretical Nuclear Physics Volume 1 Nuclear Structure*, Wiley & Sons, 1974