

# 超重核の安定性について

( $105 \leq Z \leq 120$ )

佐 藤 均

On the stability degree for super heavy nuclides/elements

Hitoshi Satoh

## はじめに

原子核及びそのモデルの問題は古くからあり且今だに新しいテーマをしばしば与えてくれる。今回は特に超重核の性質をとり上げよう。1971年に地上の物質に $^{244}\text{Pu}$ が微量ながら見出された事は少からず驚きであり人々に事によったら更に質量の大きな核種が見出されるのではないかとの期待をいだかせた。他方原子核の色々なモデルの内 $\alpha$ -粒子モデルが一番古くから存在したが長い間、軽核にしか妥当しないと考えられ、独立モデルや集団モデル液滴モデルに圧倒されて来たがそれは軽核以外では軌道スピニ力 ( $l \cdot s$  interaction) が強い為 $\alpha$ クラスターが出来にくいと考えられたのだが80年代中ばで例えば $^{48}\text{Ti}$ にも $\alpha$ -粒子モデルがはっきりあてはめることが実証されたがこれは $\alpha$ 粒子の乗り移り反応 $^{40}\text{Ca} (^6\text{Li}, d) ^{48}\text{Ti}$   $E = 50\text{MeV}$ , で生じる $d$ のエネルギー測定の結果<sup>10)</sup>かような結論が導かれた。 $\text{Ti}$ は $\text{Ca}$ と $\alpha$ の複合粒子つまり $\alpha$ 粒子モデルがよみがえったことになる。 $\alpha$ 粒子モデルの未来はこれにより明るいものとなった。今回超重元素と称するものは $Z$ が106から120程度のいわゆる Segré chart これを海図に例えるならば北東にのびる半島から更に少し離れた島に相当する領域である。すなわち超ウラン元素の自発分裂と $\alpha$ 崩壊に関する半減期の系統的理解を得ることを目標としており、元素番号が大きくなる程半減期 $\tau_{1/2}$ は短くなりそれと同時に自発核分裂の傾向がより著しくなることが多くの data から判明した。10年程前に $Z = 106$ 迄が米ソで合成され前者はバークレイグループによるもので $A = 263$ で半減期は0.9秒、後者はDubnaグループで $A = 259$ , 半減期はわずか7.5ミリ秒であった。ごく最近ドイツのDarmstadtで $Z = 109$ 迄が重イオン加速器でつくられたときいている。未発見の超重核にも色々な性質の予知予言がわずかながら出来ることは大変に興味深いであろう。

### ◇核分裂バリヤの量子力学的計算

一粒子ポテンシャルに関する知識によってどの様にして超重核の分裂バリヤの値を計算するかより詳しい記述といった事が次に問題となろう。そこでは明らかに第一段階として、原子核の形状の関数としての超重核の一粒子エネルギーを調べなくてはならない。ぜひ考慮に入れるべきこれら変形座標は第一に次の通りである。一つは伸長であり図中にしばしば $\epsilon$ 又は $\epsilon_2$ なる記号で表示される。元来は座標 $\epsilon$ はスフェロイドに対し定義されるもので第一近似では短軸に対し長軸の余剰分を意味するものである。更にもう一つ“くびれのパラメーター”が必要になりそれは例えば16重極(変形)を示す $P_4$ 変形の度合を測るもので図には $\epsilon_4$ と表記される。それとともに又我々はエネルギー鞍点の近くで鏡映非対称性との関連で安定度を調べなくてはならないがこれは質量分布の非対称とも呼べるものである。これに対する一つの尺度は8重変形であり従って図では $\epsilon_3$ なる記号が用いられる。

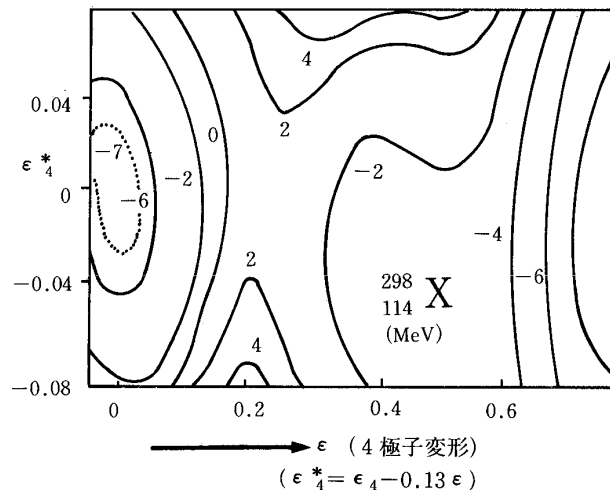
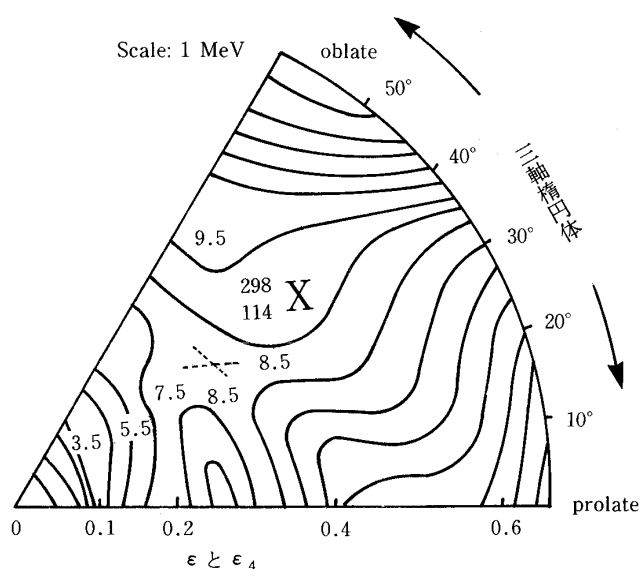


図 I

更に軸非対称性も存在し通常は角度 $\gamma$ によって表わされ、そこで $\gamma = 0^\circ$ は軸対称的な prolate 形を又 $\gamma = 60^\circ$ は軸対称的 oblate 形を意味しその中間の $\gamma$ 値は3軸楕円体をあらわしている。(prolate 形はよく葉巻タバコ型、又 oblate 形は円盤状に例えられる。)以前からアクチノイド核の例として $^{236}_{92}\text{U}$ に対する全エネルギーの一つの変形領域が図示されてきたのであるがそこでx軸は $\epsilon$ と $\epsilon_4$ の一つの線形結合を含み(くびれと同時に伸長)、一方y軸は単に鏡映非対称の度合をあらわす。後者の自由度は確かな根拠によりはじめの分裂フラグメント間の質量分布の非対称性に関係づけることができる。次いで従来からマジックナンバーを含むことで理論家の関心の的であった所の核種 $^{298}_{114}\text{X}$ に対するトータルエネルギーの理論計算を考えることにしよう。第I図には伸長と中央くびれの観点から $^{298}_{114}\text{X}$ の為の理論的に算出された全エネ

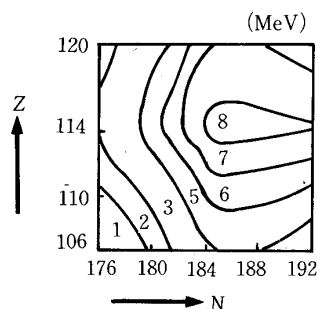
ルギーを示してある。これはポテンシャル一面をあらわす。更に角度 $\gamma$ としての軸非対称座標を含めると第II図の結果を与える。かくして理論計算により得られた結果は核種 $^{298}114$ に対しては8 MeVより少し高く $^{294}110$ に対しては約2 MeV低くつまり6 MeVが夫々フィッションのバリヤとなる。従ってこれら超重核のバリヤの高さは例えばラウンUのバリヤの高さとかなり似たものとなる。(ついでに元素110はエカ白金とでも称されグループ番号がVIIIで電子配列が $7s^2 6d^8$ , 酸化段階が+6, 4, で比重が27.4ときわめて大で, 一方元素114はエカ鉛に相当し周期律の族番号がIVB族, 電子配列が $7s^2 7p^2$ , 酸化数は+2, で比重が15.1であることが予言されておりこれはおどろくべき事である。勿論これらの超重元素の芯は $Rn+5f^{14}$ の稀ガスである。)又別の研究者は他のより良いポテンシャル及び他の原子核形状パラメーター(これはさほど完全ではないと思われる)にもとづいて数MeV程より高めのバリアー値を報告している。これらの理論値は今度はBrueckner-Hartree-Fock法に基づくバリアー値と比べてみるとそれは1~2 MeV程低くなりおよそ5~6 MeVであることを示す。今や我々は一つの或る原子核形状に対する一粒子ポテンシャルの波動軌道関数(オービタル)および同じ原子核形状に対する全エネルギーの算定の間に関連性を調べるのが問題になる。すべに述べた様にこれら一粒子エネルギー準位は原子核形状の関数として計算されなくてはならない。しかる後いわゆるshellエネルギーをStrutinsky法に依り計算するがこれは単的にいえば一粒子エネルギーの総和を, 均一にならした準位密度に対し, 対応する一粒子エネルギーの積分と比較することからスタートする。この様にしていわゆるポテンシャルエネルギー, 面の図を得ることができる。Ekaラドンたる元素118は液体と予想される。



図II

### ◇元素115と重力波発生の可能性と謎

現時点でいかなる加速器を用いても元素（核種）115はとてつくれそうにない。出来たとしても瞬時に崩壊するであろう。今核種 $^{310}115$ を考えることにしよう。これは周期律表ではVB族にすなわち「Eka ビスマス」とでも称されるもので電子配置は $7s^27p^3$ と考えられ原子価つまり酸化数は+3, 1, 更に比重は14.7と予言されている。かなり重い元素108（すなわちEka オスミニウム）の比重の半分でしかない。



図Ⅲ

核種 $^{310}115$ は極度な変形核であろう。そして prolate 形と oblate 形の間を周期的に変動すると考えても良いだろう。その結果加速度運動をする質量からは必ず重力波が放射されることが相対性理論から予言されるのでその物質からも恐らく重力放射が生じると思われる。元素115は存在するとしても太陽系からきわめて遠い星にしかないであろう\*。すでに元素114は $\gamma$ 振動を通して prolate ( $\gamma = 0^\circ$ ) と oblate 形 ( $\gamma = 60^\circ$ ) の間の振動の可能性が示されたので115からその可能性はより完全な筈だと考えたからである。(特に\*重力放射)

### ◇超重核の分裂半減期の算定

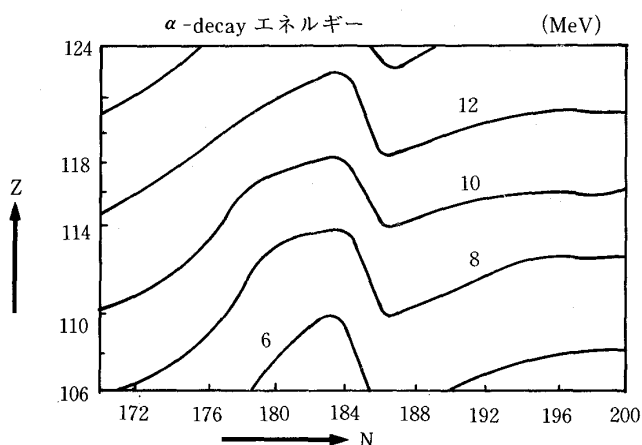
$Z = 90 \sim 103$ すなわちアクチノイド領域でのバリアーの高さに関しては実測値と理論値の一致は大体満足の行くものと思われる。他方核分裂の半減期  $\tau_{1/2}$  は一般的にバリアー侵入に対する量子力学の式により算定できる。かくして我々は一次元のケースに対し次の式にて  $\tau_{1/2}$  を求められるが実際には容易でない。

$$\tau_{1/2} = \exp \left( \int_{\epsilon_1}^{\epsilon_2} 2 \sqrt{\frac{2M(\epsilon)}{\hbar}} (V(\epsilon) - E) d\epsilon \right) \times 10^{-28} \text{年}$$

及び (単位時間当りの確率) = (衝突数)  $\times$  (透過係数)

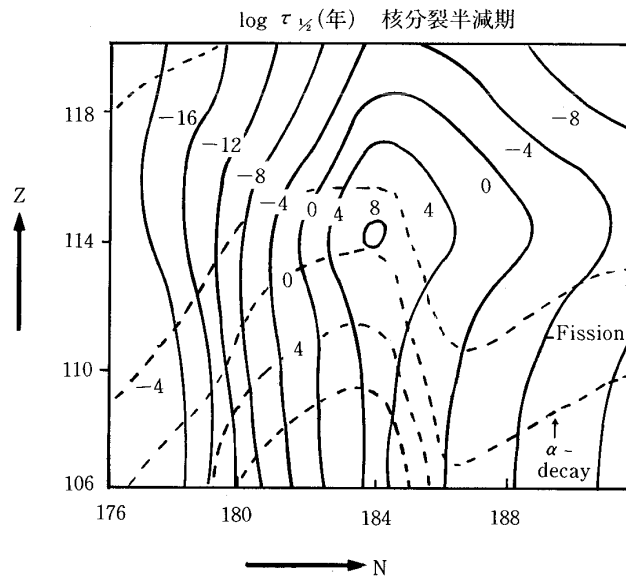
ここで  $E$  は基底状態のエネルギーを、 $\epsilon$  は一般的な一次元変形座標 (これは多次元変形のエネルギー面  $V(\epsilon)$  による一つの断面であるが)、そして  $\epsilon_1$  と  $\epsilon_2$  は  $E = V(\epsilon)$  である様なバリアーの透過 (侵入) 経路での点をあらわす。所が現実問題は透過座標  $\epsilon$  に対応する質量  $M$  を計算する所にある。これはたとえ実験的 data を基礎に規格化される或る水力学的に計算された

質量によりなされた試みがあるとしても尚恐らく量子力学的に計算するのが最良であろう。第IV図にはアクチノイド領域での半減期を量子力学的に算出した透過（バリヤー）質量の助けによって求めた結果が示される。同領域からの経験を利用して多数の研究者は  $Z=114$ ,  $N=184$  あたりの超重核の分裂半減期を出すのに利用して来た。これ等トータルの半減期は核分裂,  $\alpha$  崩壊,  $\beta$  崩壊のいずれにも依存する。 $\alpha$  崩壊は核分裂同様にバリヤー侵入プロセスでありそのバリヤーは本質的には原子核周辺のクーロン場により決まり, 更にその質量はここでは近似的に  $\alpha$  粒子の質量である。一個の半実験式により  $\alpha$  崩壊の寿命のすぐれた表式が得られ, そこでは荷電, 質量, 有用なエネルギーこれは理論的に算出された質量差にもとづくものだがこれらが図IVに含まれている。この式は古い Geiger-Nuttal 関係式の改良された変種である。かようにしてここでは Strutinsky 法による諸計算は基底状態の質量に対して用いられるのであり  $\alpha$  崩壊のバリヤー計算の為ではない。その領域での算定された質量からは  $\beta$  崩壊の状況を取り上げることはつまらないことであろう。第V図には利用した一粒子モデルでの一粒子状態の助けにより行われた Strutinsky 法による計算をベースにしたこれらのプロセスの半減期の全体的イメージが画いてある。第VI図は別のタイプの一粒子ポテンシャルに基づいた同様な結果を与えている。特殊なパラメーター化の為にこの図のバリヤーは系統的に  $2 \sim 3$  MeV も高くなっている。そのダイアグラムには  $\beta$ -安定核もマークしてある。様々な研究グループの計算値の一致は大体良好である。Ray Nix と共同研究者は核種  $^{294}110$  が最も寿命の長いアイソトープで  $10^9$  年のトータル半減期を有すると予言している。Nilsson 等は1968年からプリミティブな計算ながら  $^{294}110$  に対し  $10^8$  年を与えたが他方 Randrup 等は一連の補正の後に  $10^5$  年を与えている。更に新しい発展としてフランスの Orsay-グループが Brueckner-Hartree-Fock 法にもとづいた結果を発表したが  $^{294}110$  に対し  $\alpha$ -崩壊の半減期をわずか50時間としておりこれは著し

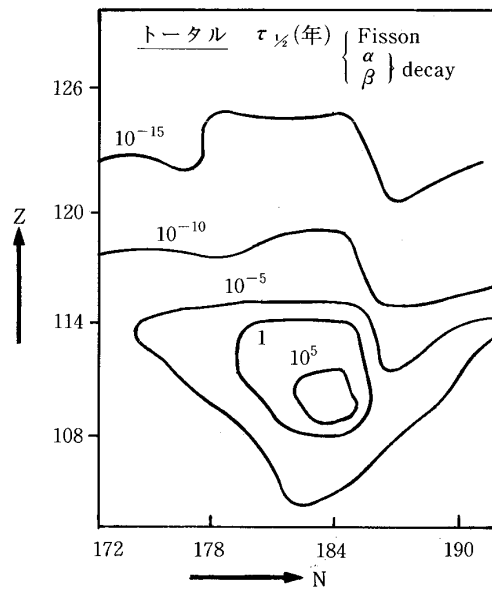


図IV

い減少である。



図V

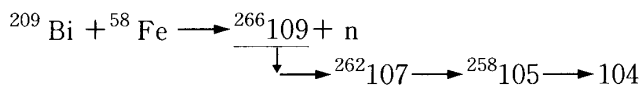


図IV

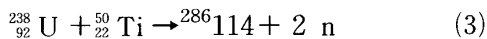
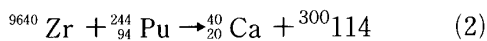
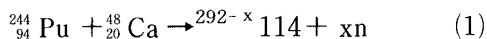
◇半減期の評価 この領域の最も長寿の核種に対し色々な理論的方法は、かようにして半減期として $10^9 \sim 10^{-2}$ 年の値を与える。残念ながらこれら予言値のばらつきは小さくない。核分裂に対するこれに対応する最大のバリアの高さは13 MeV と 6 MeV の間を変動する。

かくして shell-効果は本質的にしゃへのケースでは半分になる。しかし次の重要な点に関する著しい一致は問題にし得る。第一は、マジック数  $Z=114$ ,  $N=184$  と結びついた大きな

shell 効果が存在する。第二にこの shell 効果の為マジック数を含む安定な核種がそのすぐ前後の隣の核種にくらべ桁ちがいの大きな半減期を有させ、割に最近人工的につくられた  $Z=104 \sim 107$ あたりの核種よりも相当大きな半減期となる。1970年代初期に  $10^8 \sim 10^9$ 年といったオーダーの半減期が算定により得られたがこの事は当然地上の物質中に超重元素を探索せしめる動機をもたらした。半減期の理論値が下るにつれて益々重イオン衝突加速器により合成できるのではないかの期待がつよまった。一番新しい所では西独の Darmstadt での線形加速器で元素番号109迄創れることが判ったが核種 $^{266}109$ はわずか5 m秒で $\alpha$ 崩かいをし107元素に崩壊し更にこれは22m秒で $\alpha$ 崩かいをし105元素、そして104元素へと進むことが示された。



これにくらべて元素114の作成はその反応断面積の小ささの為すぐ fission を起し仲々つくれそうにもない。次にこの反応が理論的には考えられるであろう。



それでも元素113, 115の合成に比べればまだはるかに容易であるに違いない。上の(3)式では $^{300}114$ から沸騰によりその後いくつかの中性子が、高い励起エネルギーの為に抜け出す\*。

ここではプロトンリッチなフラグメント $^{40}_{20}\text{Ca}$ はこの重い核 $^{300}114$ における中性子/陽子の比を改善するであろう。このCaのフラグメントは又過剰なエネルギーの一部分を持ちさるとも考えられる。(\*蒸発)

最後に超重元素が重イオン加速器でZがいくつ迄現実的に合成出来るかといった問題は単に原子核の問題にとどまらず、実は我々の時空の平坦性の程度とも密接に関係つまり時空の基本的な性質こそ元素番号Zの範囲を制約すると考えるべきであろう。そういう観点から例えば odd-odd 核たる $^{310}115$ 等とはとても人工的に造れそうにはないと思われる\*。元素115はいわばきわめてマイクロな天体の一種として可能性の範囲でのみ存在しよう。  $Z > 173$ での真空崩壊 ( $e^-$ ,  $e^+$  形成) も理論的には興味深いが今回は割あいた。

## 文 献

- 1) 物理学的大辞典 (丸善)
- 2) Scientific American '79 Vol4 No.3  
宇宙の年齢 D・N・シュラム
- 3) Super tunga grundämnen, S. G. Nilsson & S. E. Larsson. 9-Kosmos '76
- 4) 原子核のモデルの多様性 佐藤 均  
本学紀要第24号
- 5) Kvantfysik (量子物理学)  
Almgvist & Wiksel 出版

- 6) Scientific American '73 Vol3, No.1  
異粒子原子と原子核の構造 C・E・ウィーガン
  - 7) Hur ser atomens Kärna ut? S. G. Nilsson  
Kosmos 1968 (Svenska Fysikersamfundet)
  - 8) G. T Seaborg, Physica Scripta 10A (1974) 5.
  - 9) J. R Nix, Ann Rev Nucl Sci. 22 (1972) 65.
  - 10) 原子核の $\alpha$ 粒子モデル 大久保茂男 Parity 04. 1990.
- \* この重力エネルギーを動力に転換するアイデアは勿論現時点では全くナンセンスといわない迄も技術的に時期早尚であることは明白である。