

平成22年 5月31日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2007～2009

課題番号：19740151

研究課題名 (和文) 重・超重核領域に於ける原子核の崩壊様式と存在限界

研究課題名 (英文) Nuclear decay modes and a limit of existence of nuclei in the heavy and superheavy mass region

研究代表者

小浦 寛之 (KOURA HIROYUKI)

独立行政法人 日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・研究副主幹

研究者番号：50391264

研究成果の概要 (和文)：

大域的原子核質量模型 (KTUY (小浦・橘・宇野・山田) 質量模型) を用いて原子核の主要な崩壊様式である α 崩壊、 β 崩壊、陽子放出、自発核分裂の4崩壊の部分半減期を計算し、全半減期の大域的計算を行った。その結果1ナノ秒以上の全半減期を持つ核種が一万一千核種程度、1ミリ秒以上で八千核種程度、1秒以上のものが四千核種程度という結果となった。同時に、上記の原子核の存在領域は陽子数 $Z=170-180$ 程度、中性子数 $N=330$ 程度までを含む領域であるという結果を得て、核図表上における原子核の有限性を定量的に示すことに成功した。

研究成果の概要 (英文)：

Total half-lives of nuclei in the whole nuclear mass region are obtained from four nuclear decay modes: alpha-decay, beta-decay, proton emission and spontaneous fission, which are estimated from theoretical nuclear ground-state masses of a global nuclear mass model, the KTUY (Koura-Tachibana-Uno-Yamada) mass formula. Number of nuclei with total half-lives of 1 nanosecond or longer is estimated to be approximately eleven thousands, that with half-lives of 1 second or longer is approximately four thousand, and so on. A area of existence of nuclei is also estimated to extend up to 170-180 of proton number and 330 of neutron number. We confirm a finiteness of the area of nuclei with certain lives in the chart of the nuclides.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,400,000	0	1,400,000
2008年度	600,000	180,000	780,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,500,000	330,000	2,830,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：原子核理論 超重核 原子核質量 原子核崩壊 r過程元素合成

科学研究費補助金研究成果報告書

1. 研究開始当初の背景

原子核は陽子と中性子の複合体であり、その組み合わせで核種が定まる。地球に自然に存在する安定核及び長寿命核はおよそ 250 核種であるが、実験的にはこれまで約三千の核種が合成・確認されている。原子核がどこまで存在し得るか、また有限であればどれだけの核種数が存在しうるのかというのは、原子核物理研究にとって基本的かつ重要なテーマであるといえるが、これまで国内外とも十分な研究はなされていなかった。本研究課題は原子核の崩壊様式の大域的計算を行うことによりこの問題に取り組み、その性質を明らかにすることを目的とした。

原子核の存在領域を考察する場合、中性子過剰側及び軽い陽子過剰核側はその定義がかなり明確といえる。つまり、中性子（陽子）過剰核側で中性子（陽子）分離エネルギーが負となれば、強い相互作用により容易に（例えば 10^{-22} 秒程度で）崩壊するからである。この限界線を中性子（陽子）ドリップ線という。また、主要な崩壊様式としては β 崩壊のみを考えればほぼ十分であり、理論的扱いにおいても比較的容易である。

一方、重・超重核領域の中性子不足側では、原子核のクーロンポテンシャルのため、荷電粒子（陽子、 α 粒子、核分裂片核種など）の分離エネルギーが負であっても、トンネル効果のため“比較的”長い寿命をもつ核種として存在し、いくつかの崩壊様式が混在しうる。理論研究においてはこれらを統一的に扱う必要がある。

さて、既知核の陽子・中性子 2 重閉殻核種で最重のものは ^{208}Pb （陽子数 $Z=82$ 、中性子数 $N=126$ ）であるが、それより質量数の大きい 2 重閉殻核種として $Z=114$ 、 $N=184$ の核種の存在が 1960 年代辺りから殻模型計算や平均場

近似計算などを用いた理論的立場から提唱されてきた。このような核種は比較的長寿命で存在しうるということが予想され、理論・実験の両面からこの方面の研究が精力的になされてきた。現在世界中でこの核種の実験的合成に向けてしのぎを削っている状況であり、日本でも一昨年に理化学研究所で原子番号 113 番の新元素（中性子数 $N=165$ ）が合成されたと発表されるなど²⁾、進展が著しい。

他方、 $Z=114$ 、 $N=184$ より中性子側過剰側に大きく越えた領域における核構造・核崩壊に関しては、定量的にはほとんど研究の対象にされていなかったというのが現状である。原子番号（陽子数）および中性子数の上限について、その物理的意味も含め、定量的にはほとんどわかっていない。一般の原子核の教科書では存在予想核種数として、六-七千核種程度という記述がしばしば見られるが、これらはこの領域の原子核が極めて短寿命であると推定したか、または計算を行わず無視したかのいずれかと推察される。

実際、こういった領域を理論的に扱う場合、局所的な核種領域を対象とするような理論計算では難しく、広い核種領域に対して適用可能な計算が不可欠である。現在においては大域的原子核質量模型（いわゆる原子核質量公式と呼ばれるもの）はこのような探求を可能にする模型の一つである。

申請者は最近、巨視的-微視的模型の一種である KTUY 質量模型を作成した³⁾。これは最近の他の質量計算に比べて質量値及び付随して得られる中性子分離エネルギーの予測精度がよく、また極めて広い核種領域に適用可能である。さらに、この KTUY 模型を用いて、 $Z=114$ 、 $N=184$ を大きく含む超重核種領域の崩壊様式について議論を行った¹⁾。そこでは $N=228$ 付近の閉殻構造を予想し、 $Z=114$ 、 $N=184$

の超重核領域を越えて続く、“長寿命”核領域の存在の可能性を指摘し、その限界領域は自発核分裂半減期によって支配されていることを指摘し、この領域における微視的構造と崩壊様式についての新たな知見を示した(図1)。しかしこの時点では、原子核質量の理論計算において、用意すべき原子核の単一粒子基底が不足しており、それ以上質量数が大きい核種領域の原子核質量を計算することができず、存在領域に関する理論的結論までに至らなかった。

また上記の手法を用いて試みた核分裂半減期計算についても、この時点で扱えたのは原子核の基底状態小変形に限られていたので核分裂切断形状までの計算は行うことができず、近似的外挿を用いた計算により結果を得ていたのが現状であり、手法の拡張を行う必要があった。

2. 研究の目的

本研究課題において、理論計算上の問題点となっていた原子核球形基底状態を拡張し、広範囲にわたる核種領域に対する質量計算および崩壊半減期計算を行い、以下の点を明らかにする目的で研究を進める。

「崩壊様式の解明」 KTUY 質量公式を基に、原子核の崩壊様式のうち主要と考えられる α 崩壊、 β 崩壊(電子捕獲を含む)、陽子放出、自発核分裂の部分半減期を核種ごとに計算する。他の崩壊様式で有意な崩壊がある場合は可能な限り考慮する。その結果は図表化し、どの核種領域でどの崩壊様式が主要であるか、特に $N=228$ 付近を大きく越えた領域での崩壊様式を明らかにする。

「存在領域の解明」 上記を用い、原子核が比較的長い寿命を持って存在しうる核種領域を求める。“比較的”とは例えば1ナノ秒以上とするなど、下限を定めて解析する。核

種数については従来典型的に言われている理論予想核種数六-七千核種より遥かに多いと予想される。

「閉殻構造の解明」 原子核の閉殻構造の周期性を明らかにする。現時点では中性子数 $N=184$, $N=228$ までの閉殻構造は確認しており、それ以上の領域での周期性の存在の有無を本課題で調べる。

また、本研究の成果は星の超新星爆発における r 過程元素合成における原子核基礎データとしての利用も想定している。 r 過程中の超重核の中性子過剰領域における中性子誘発核分裂および r 過程終了後に続く β 崩壊においても β 崩壊遅発核分裂の影響についても調べる。

参考文献

- 1)小浦寛之, 橘孝博、日本物理学会誌 60 (2005), p. 717-724.
- 2)K. Morita, et al. (計 20 名, 10 番目), J. Phys. Soc. Jpn. 73 (2004) p. 2593-2596.
- 3)H. Koura, T. Tachibana, M. Uno and M. Yamada, Prog. Theor. Phys. 113 (2005), p. 305-325.

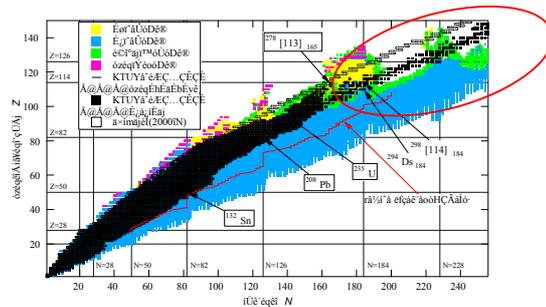


図1：各原子核の優勢な崩壊様式の理論予測ある原子核において複数起こりうる原子核崩壊のうち、一番部分半減期の短いものがその原子核の優勢な崩壊様式である。 α 崩壊、 β 崩壊、陽子放出、自発核分裂の理論部分半減期を計算し、全半減期が1ナノ秒以上と予測された核種についてのみ描いた。赤丸が本研究で主に対象とする領域。

3. 研究の方法

KTUY 質量模型ではまず球形原子核の基底を計算し、つぎに任意の原子核（一般に変形している）について球形基底の原子核形状に対応する配位混合計算を行うことにより原子核質量を与える。具体的にはまず大域的核種領域に適用可能な球形単一粒子ポテンシャル¹⁾を用意し、得られる球形単一粒子準位を用い、BCS 型対相関を取り入れて球形基底計算の元となる球形殻エネルギーを作成する。基底として用意する原子核の陽子数・中性子数をこれまでの $Z=270, N=400$ （実際の核種数というよりも、配位混合計算に必要な粒子数に対応するもの）までとしていたが、これをそれぞれ $Z=540, N=800$ 程度までに領域を拡張した。計算領域は従来の 4 倍程度、計算すべき状態数はさらに数倍に拡大されたことになる。陽子・中性子それぞれの単一粒子準位を用意し、これに BCS 型対相関を考慮し、変形計算の基底となる球形殻エネルギーを用意した。そして各核種ごとに球形基底の変形による配位混合を行った。このようにして各原子核の殻エネルギー及び質量を計算可能な核種領域に対して計算を行った。そして得られた原子核質量を用い、各崩壊様式を計算した。 α 崩壊及び陽子放出の部分半減期計算については既に申請者が開発した方式を用い、計算に必要な崩壊 Q 値及び原子核の spin・パリティは質量計算から得られたものを用いた。 β 崩壊については β 崩壊の大局的理論を用いて計算した。同じく Q 値は質量計算から求めた。

自発核分裂については原子核の形状に対するポテンシャルエネルギー面 (PES) を求めて部分半減期を計算する。PES は球形基底の配位計算の過程において得られるが、その計算の際に必要な巨視的液動的計算部分のクーロン積分部分をこれまでの変形度の多項式展

開の処理から数値積分を用いた方法に変更した。このようにして得られた PES を用い、1 次元 WKB 近似を用いた透過確率計算を行い、部分半減期を計算した。そしてこれらを用いて原子核の全半減期を求めた。全半減期を 1 ナノ秒以上、1 マイクロ秒以上、など下限を設定して条件に含まれる核種数を勘定した。

参考文献

1) H. Koura and M. Yamada, Nucl. Phys. A 671, (2000) p. 96-118

4. 研究成果

基底として用意した陽子数 $Z=540$, 中性子 $N=800$ の球形殻エネルギーを用い、最終的に陽子数 $Z=175$, 中性子数 $N=380$ の核種領域における約 2 万 2 千核種（最終的な存在核種数ではない）について、球形単一粒子準位、ポテンシャルエネルギー面 (PES)、殻エネルギー、基底状態変形度及び原子核質量を計算した。

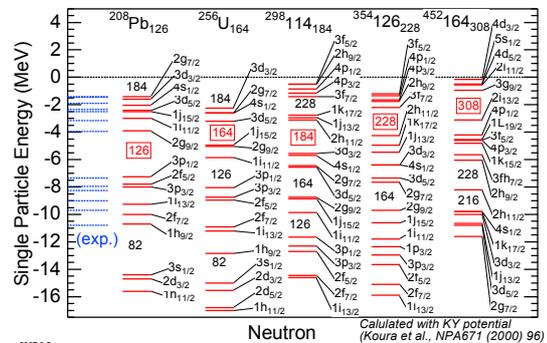


図 2：中性子単一粒子準位（2 重閉殻核種）

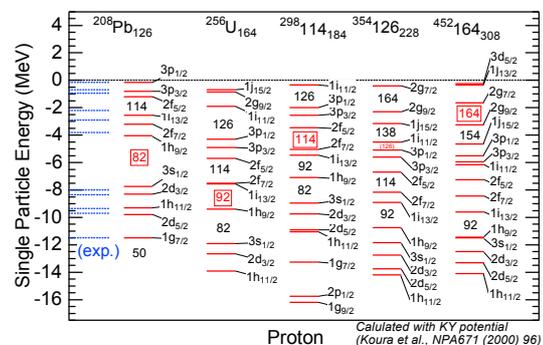


図 3：陽子単一粒子準位（2 重閉殻核種）

閉殻構造に関する結果として、2重閉殻で球形となった超重核種に対する単一粒子準位を図2（中性子）及び図3（陽子）で示す。中性子数 $N=228$ を超えて、 $N=308$ に比較的顕著な閉殻構造が生じ、閉殻周期性はこの程度の中性子数では崩れず、よく保たれていることがわかった。一方陽子数 $Z=126$ を超えた場合は $Z=164$ が次の閉殻であるが、その閉殻性は比較的小さく、周期性も弱いという理論計算結果を得た。陽子単一粒子状態に対してはクーロンポテンシャルが有意に効いてくるため、単一粒子ポテンシャルとしては底上げがされ、中性子単一粒子状態とは異なる様相を示す結果となった。この性質は後述する存在領域の領域の様子に影響を与える。

次に、 α 崩壊、 β 崩壊、陽子放出、自発核分裂の4崩壊の部分半減期を各核種について計算した。そしてこれらの部分半減期を用いて原子核の全半減期（部分半減期の逆数の和の逆数となる）を計算した。その結果を図4に示す。

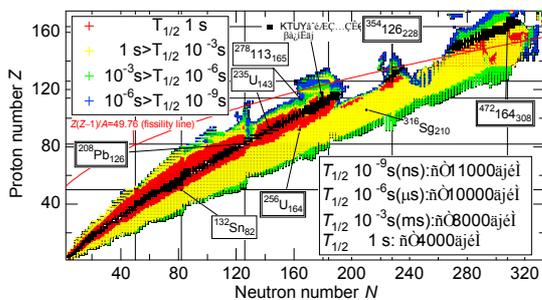


図4：4崩壊部分半減期より求めた全半減期。1ナノ秒 (10^{-9} 秒) 以上の核種を載せた。

図において中性子過剰側は1中性子及び2中性子分離エネルギーが正の核種までを存在の範囲として与えた（中性子ドリップ線。図の右下側）。これより中性子過剰側は強い相互作用により極短時間（典型的には 10^{-21} 秒程度）で崩壊する。中性子欠損側、つまり

図の左上側の境界は1ナノ秒 (10^{-9} 秒) の等半減期線となっている。図はいくつかの半減期の範囲で色分けをされており、半減期ごとの存在核種数がわかる。これによると1ナノ秒以上の全半減期を持つ核種が一万一千核種程度、1マイクロ秒以上の核種が一万核種程度、1ミリ秒以上で八千核種程度、1秒以上のものが約四千核種程度という結果となった。また、原子核の存在領域は1ナノ秒以上の核種に対しては陽子数 $Z=170-180$ 程度、中性子数 $N=330$ 程度までを含む領域であるという結果を得た。なお、図中の赤線は微視的構造を考慮しない場合の核分裂限界線である。この線は中性子ドリップ線と概ね $Z \approx 160$ 、 $N \approx 330$ 付近で交差している。今回の成果は、このような巨視的な考察とも矛盾せず、かつ微視的効果を取り入れた極めて具体的な結果となった。

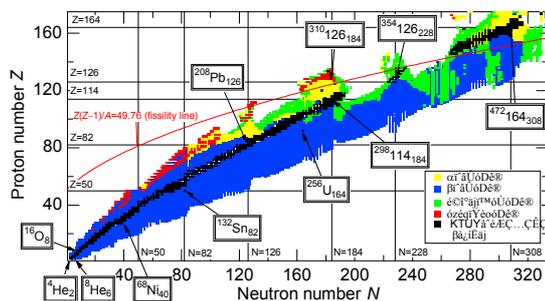


図5：各原子核の優勢な崩壊様式の理論予測（図1参照）

図4と同領域における各原子核の優勢な崩壊様式を図5に示す。中性子欠損側の核種領域の境界は $N=126$ を概ね超えた領域では自発核分裂（図中緑）の短寿命性が与えていることがわかった。また、いわゆる超重核の安定性の島とされる $Z=114$ （または 126 ）、 $N=184$ 付近が島状になっているのに対して、 $N=228$ 付近は図の縦に伸びた半島状となった。これは前述の陽子単一粒子準位の閉殻性が中性子のそれに比べてかなり弱いことを反映して

いる。N=308 付近も同様で、陽子数閉殻の性質はあまり顕著でなく、中性子数閉殻の強さのおかげで大きな島状の領域を形成していることが分かる。

以上、通常議論される超重核領域を遥かに超えた領域における、崩壊様式と全半減期の「核図表」を作成し、原子核の有意な寿命で存在しうる領域の有限性についての結論を得た。結果は数値データ化してあるのこれを核データに用いることが可能である。例えば r 過程元素合成における中性子過剰領域での β 崩壊半減期、中性子捕獲遅延核分裂または β 崩壊遅発核分裂の可能性を挙げておく。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

①Global Properties of Nuclear Decay Modes
H. Koura, T. Tachibana and S. Chiba, Global JAEA-Conf 査読無 2009-004 (2009) p. 135-140

② Single-particle levels of spherical nuclei in the superheavy nuclear mass region

H. Koura

JAEA-Review 査読無 2009-036 (2009) p. 81-82

[学会発表] (計 7 件)

①重・超重核領域に於ける原子核の崩壊様式と存在限界

小浦寛之

日本物理学会第 65 回年次大会、(2010 年 3 月、岡山大学)

②Decay modes and a limit of existence of nuclei in the superheavy mass region

H. Koura

4th Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry '09 (APSORC09), 29 Nov.-5 Dec., 2009, Napa, CA, U.S.A.

③重・超重核領域に於ける球形単一粒子準位の系統的予測

小浦寛之

日本物理学会 2008 年秋季大会、(2010 年 9 月 20-23 日、山形大学)

④Global Properties of nuclear mass and decay modes

H. Koura, T. Tachibana and S. Chiba

The fifth International Conference on Exotic Nuclei and Atomic Masses (ENAM' 08), 7-13 Sep., 2008, Ryn, Poland

⑤ Phenomenological mass formulas and local fits

H. Koura

Mass Olympics, 26-30 May, 2008, Trento, Italy

⑥R-process element abundance considering nuclear fission in the region of superheavy neutron-rich nuclei

H. Koura

3rd Japanese-German EFES (JSPS)-DFG/GSI workshop on Nuclear Structure and Astrophysics, 30 Sep., 2007, Chiemsee, Germany

⑦Systematical study of nuclear fission in the region of superheavy and neutron-rich nuclei

H. Koura

International Conference on the Chemistry and Physics of the Transactinide Elements (TAN07), 24 Sep., 2007, Davos, Switzerland

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小浦 寛之 (KOURA HIROYUKI)

独立行政法人 日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・研究副主幹
研究者番号：50391264

(2) 研究分担者

無し ()

研究者番号：

(3) 連携研究者

無し ()

研究者番号：