

原子核の世界

東北大学大学院理学研究科教授 滝川 昇

1. はじめに

魔法数, 超重核, 量子トンネル効果(核融合反応), 元素の誕生等をキーワードとし, 研究の動向に注目しながら, 原子核の世界の一端を紹介してみたい。

2. 原子核の種類

どのような原子核が存在するかから話を始めよう。図1は, 横軸に中性子数, 縦軸に陽子数をとった2次元平面上に原子核を並べたもので, 黒い印は, 寿命が宇宙の年齢より遙かに長い言わば安定な原子核256種と, ウランなど宇宙の年齢と同程度の長い寿命をもつ放射性的原子核12種を示す。それらはほぼ対角線に沿って分布する。これは, 中性子と陽子の間に働く引力の方が, 陽子間や中性子間に働く引力より強いという核力の特性¹⁾とフェルミ粒子が従うパウリの排他律の為である。

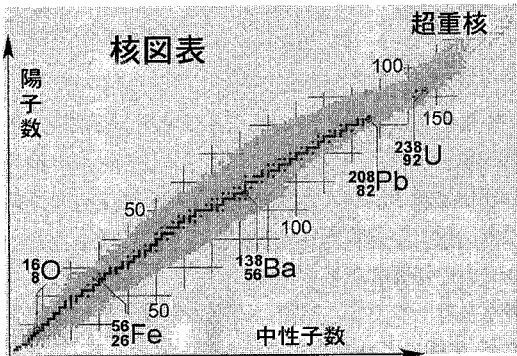


図1 これまでに存在が確認された原子核

上に述べた理由で, 陽子数と中性子数が極端に違う原子核は存在しない。しかし, 100万分の1秒程度以上の寿命をもつ原子核を含めると, 理論的には約7000種の原子核が存在すると予測され, 現在, それらの不安定な原子核に関する研究(不安定核の物理)が, 活発に展開されている。図1には, 実験的に既に確認された約3000種の原子核を記した。

3. 魔法数と殻構造—原子との類似性と相違

2, 8, 20, 28, 50, 82, 126という数は, 魔法数と呼ばれている。陽子数や中性子数が魔法数の原子核は, 核子の結合エネルギーが大きい, 存在量が多

い, 形が球形であるなど際立った特色を示す。魔法数は元素の誕生に関しても重要な役割を演じる。

魔法数の存在は, 原子核を平均的な力の場の中を独立に運動する陽子および中性子の多体系と考える(殻模型)ことによって理解できる。元素の周期表に現れる魔法数(不活性元素の原子番号: 2, 10, 18...)が, 原子中の電子が原子核の作るクーロン場の中をパウリ原理を満たしながら独立に運動していると考えられることによって理解できることと似ている。

2番目の魔法数が10ではなく8であることによって, 酸素が沢山存在し, それによって生命体の呼吸が支えられている。また, 以前に核力の特性について述べたが, もし2つの陽子からなる安定な原子核が存在するほど核力が強かったら, 太陽はもっとずっと早く燃え尽きるはずである。自然は, まさに絶妙なバランスの上に成り立っているとさえ言えよう。

4. 極限に挑む—超重核

原子番号の大きな原子核は, ほぼ同じ2つの分裂片に分かれることによって崩壊する(自発核分裂)²⁾。原子核は一様に帯電した液滴のように振る舞うが(液滴模型), 原子番号が大きくなると, 分裂によるクーロンエネルギーの低下が, 表面エネルギーの増加を凌ぐからである。ただし, ウラン程度の原子番号の原子核の場合には, 分裂に至る道筋に高いポテンシャル障壁が現れ, ある程度の時間準安定状態として存在することになる。

原子番号が100を越すと, 原子核を一様に帯電した古典的液滴と考えて評価した核分裂に対する障壁は消滅し, 原子核は瞬時にして分裂し, そのような原子核は存在しないことになる。

しかし, 原子核は, 量子力学に従うフェルミ粒子の多体系であり, 核分裂に対する安定性を議論するときには, クーロンエネルギーと表面エネルギーの変化と同時に量子効果を考慮しなければならない(量子流体)³⁾。理論的には, 原子番号が114で中性子数が184の近辺に, 量子効果(殻効果)によって安定化された原子核が存在することが予言され, それら超重元素探索の研究が精力的に展開されている。実験的には重い原子核同士の核融合反応で超重元素

の合成が試みられているが、現在までに、実験的に合成が確認された最大の原子番号は、112である⁴⁾。

5. 核反応

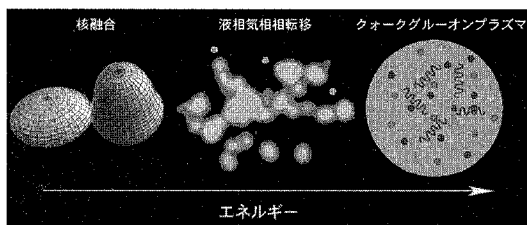


図2 衝突エネルギーによる核反応の変化

原子核の構造や励起運動の研究と共に核反応の研究も、重要な研究課題である。図2は、2つの重い原子核が衝突したときに起こる典型的な現象を、3つのエネルギー領域に対してイメージ化したものである。左側の図は、衝突のエネルギーが低いときは核融合反応や、弾性散乱、非弾性散乱が起こることを示している。衝突核間のクーロン斥力によるポテンシャル障壁より衝突のエネルギーが低くなると、核融合反応は量子力学系に特有のトンネル効果で起こり、その確率は衝突する原子核の形や励起運動に強く影響される。重イオン散乱では、虹やブロッケン現象と似た現象が起きる。空にかかる気象虹等との対比が興味深い。ある程度エネルギーが高い衝突では高温高密度状態ができ、膨張後、真中の図に描いたように多数の核子や原子核が生成される(核破砕反応)。核破砕反応は、超新星爆発の研究などに必要な状態方程式の決定や、有限量子多体系における液相気相相転移を解明する観点からも注目されている。超高エネルギーの衝突ではクォークとグルーオンのプラズマ状態(QGP)が生成されると予想されている。

6. まとめにかえて

紙数の制限で触れられなかったが、原子核の集団運動(表面振動、変形した原子核の回転運動、超変形状態⁵⁾、高速回転運動、スピン励起、陽子群と中性子群が逆に動く集団振動、不安定核に固有の励起運動等々)、元素誕生の解明⁶⁾、中性子星の問題、ニュートリノ核物理学など多くの研究が活発に展開されている。また、物質内核反応の研究も始まり、物質内では核反応率が異常に大きくなることや不安定核の寿命が変わることなど、様々な謎を提起している。「かわりものの原子」(反陽子原子、 π 中間子原子、K-中間子原子など)の研究も興味深い最近の

研究である。

本稿では、核子多体系としての観点から、原子核の世界の幾つかを紹介した。しかし、今日、陽子や中性子は、より基本的な粒子であるクォークからできた複合粒子である事が知られている。そのような観点から、量子色力学(QCD)に立脚した様々な研究が行われ、原子核・ハドロン物理学の1つの大きな流れを形成していることに言及しておきたい。

QCDに立脚した研究は、高エネルギー散乱や、超高温・超高密度現象の解明には不可欠である。

最後に、ストレンジネスをもつバリオン(Λ 粒子や Σ 粒子など)を含むハイパー核の研究が進展し、J-PARC計画⁷⁾の中心課題の1つとして更に飛躍的發展が期待されていることを付け加えたい。この観点からすると、図1は、ストレンジネスが0の平面であり、ストレンジネスが-1や-2の平面(ハイパー核図表)を積み重ねた拡張が行われている。

〈脚注〉

- 1) 同じ理由で、2つの核子からなる系で、重陽子だけが安定に存在し、2個の陽子や2個の中性子からなる原子核は存在しない。また、2個の陽子の衝突による核反応は、 $p+p \rightarrow d+e^++\nu_e$ のように、弱い相互作用を通して起こることになる。太陽中の水素燃焼反応がゆっくり進行するのは、反応がトンネル効果によって起こることと、2陽子核が存在しないためである。
- 2) 質量数の大きな原子核の寿命は、大抵の場合、実際には、 α 崩壊によって決まる。自発核分裂も α 崩壊もトンネル効果によって起こるが、後者のほうが、分裂の妨げとなるポテンシャルの障壁が小さいためである。
- 3) 通常の液滴が球形であるのに対し、多くの原子核は量子効果のために変形している。例えば、 ^{222}Rn は、長軸が短軸より約30%ほど長いラグビーボールのような形をしている。一方、 ^{28}O や ^{228}Pb のように陽子数も中性子数も魔法数である原子核(double magic核と呼ばれる)は球形である。
- 4) 本原稿執筆中(2004年9月)に、原子番号113の元素が理化学研究所の加速器実験で合成されたとの発表があり、話題を呼んでいる。
- 5) 長軸の長さが短軸の長さの2倍程度に変形した状態で、DyやHgなど多くの原子核の励起状態が発見されている。
- 6) 中性子過剰な不安定原子核を経由したr-process(rはrapidの意)による重元素の生成や、超新星爆発の役割など、様々な最新の研究成果が理化学研究所が作成したビデオ「元素誕生の謎にせまる」(望月優子他監修)に紹介されている。
- 7) Japan Proton Accelerator Research Complexの略。東海村に建設中の3GeVと50GeVの大強度陽子加速器をもつ研究機構。2008年末実験開始予定。