

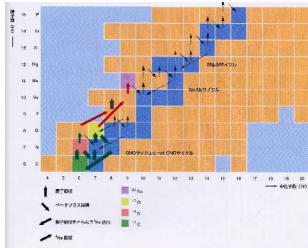
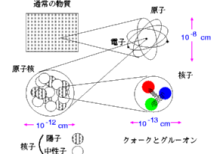
原子核物理学の今と未来

<<http://nucl.sci.hokudai.ac.jp/index-e.html>>

みなさんご存知のとおり、私達の体は原子・分子からできています。この原子や分子は電子と原子核からなっています。原子核の大きさは1cmの1000万分の1のさらに1000万分の1です。こう言われてもピンとこないかも知れませんが、原子核をピンポン球の大きさとすると、電子ははるか1km先をまわっており、私達の身長は太陽系と同じくらいになります。

さて、原子核は自然界に天然に約300種存在します。しかし、今日では実験技術の発展により、約3000種の原子核の存在が明らかになっています。この原子核の存在領域の拡大を通じて、私達は原子核の非常に多様な姿を見ることができるようになりました。新しく発見された原子核や原子核反応の途中である状態の研究を通じて、これまでの原子核の基本的性質についても、新しい理解がもたらされています。

このような新たな知識が、やがて核廃棄物の処理や放射線治療、さらには全く新しい技術の開発に役立つ事を我々は期待しています。



1. 原子核はどのようにできたか？ — 天体核物理学

人類には非常に多くの元素が必要ですが、炭素や酸素はもちろんですが、例えば亜鉛が足りないとう味覚障害になるなど、周期表のほとんどの元素が体の中で、あるいは社会の中でなんらかの役割を果たしています。これらの元素はどこで作られたのでしょうか？ 水素原子核(陽子)やHe原子核(α粒子)は、宇宙創生の現象としてよく知られているビッグバンの際に創られ、宇宙空間に大量に撒き散らされたことが知られています。しかしリチウムより重い原子核は星のなかで原子核反応を通じて作られ、何らかの形で星間ガスとして放出されました。そう、我々は「星の子」なのです。

鉄までの様々な原子核は、星を輝かせている水素やヘリウム核融合反応によって創られてきました。左上图は、軽い原子核からどのようなプロセスを経て重い原子核が生成されるかを示したものです。鉄よりも重い原子核の多くは超新星爆発時に作られると考えられています。超新星爆発では原子核が莫大な量の中性子にさらされ、これらの中性子をどんどん吸収していった原子核がのちに不安定な原子核に変換し、現在の重い元素を作っているのです。(r過程, 左中国)

他にも多くの天体現象が原子核の反応に関与しています。例えば、温度などの条件が星によって違うので、原子核の組成(存在比)は星によって異なります。また古い星では初期宇宙の頃の状況がある程度反映した元素組成をもっていると考えられます。このように、それぞれの星での元素組成は宇宙の歴史の様々な過程を反映しており、「宇宙の履歴書」といえるでしょう。こうした元素生成について、原子核の構造と反応、そして星の構造から理解できるかどうかは大きな課題であり、活発な研究分野を作っています。

特に、元素生成過程は現在原子核物理学の主要テーマの一つになっています。

2. 人工的な原子核 — 中性子過剰核

さて、上で述べた元素生成の多くの過程では地上に存在しないような不安定な原子核が関係しています。左中国の核図表(横軸は中性子数、縦軸は陽子数)の中で、安定な原子核は中央の「線」ではなく、原子核のほとんど全ては「不安定核」といえます。

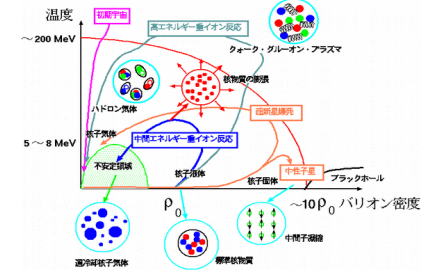
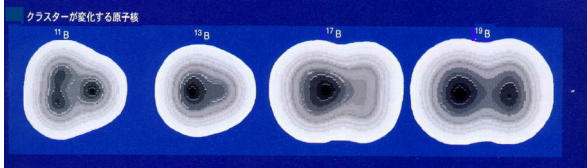
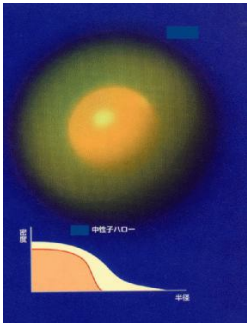
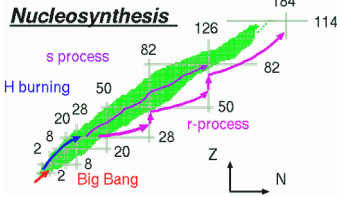
これらの不安定な原子核はこれまで研究の対象に出来なかったのですが、1980年代からの加速器・観測技術の進歩により、中性子が陽子よりもたくさん存在する原子核(中性子過剰核)やその逆の陽子過剰核を人工的に多く作り、その性質を調べられるようになりました。こうしてつくられた原子核は天然に存在する原子核とはかなり違った性質を示します。天然の軽い原子核はほぼ同じ数の陽子と中性子からなっており、陽子と中性子の分布はほぼ同じです。しかし中性子過剰核では中性子を多くするまで中性子が原子核からはみ出し、原子核のまわりを雲のようにまわります。左下图は、中性子過剰核を構成する外殻中性子が、通常考えられる以上に核表面から外側に浸み出る現象である中性子ハローについての模式図を示したものです。

さて、現在の所このような中性子過剰核の実験的な研究は「軽い中性子過剰核」と「重いけれども安定核に近い少し中性子過剰核」に限られています。すなわち、r過程が進むような「重くて大変中性子過剰な核」の研究は、実験の制約もあり、進んでいるとはいえません。しかしながら、21世紀の初頭にはこれらの不安定核を1000個見つけられる加速器が日本国内で稼働します。現在地上に存在する全ての元素の生成過程が実験室での実験により明らかになる日も近いかも知れません。

3. 原子核の集合 — クラスタ理論

不安定な原子核で安定な核と性質が異なっているのは中性子の広がった分布(ハロー構造)のみではありません。最近大きな話題となっているのが、「魔法数」の変化です。魔法数というのは、陽子、あるいは中性子がその数になったとき結合系がまわりに比べて特に安定になる数のことで、原子核では2, 8, 20, 28, 50, 82, 126の7つであると長く信じられてきました(左中国の線)。これは、例えば原子核では、ヘリウム(He)、ネオン(Ne)、アルゴン(Ar)、クリプトン(Kr)といった化学反応を起こさずに安定な希ガスの原子番号が「電子の魔法数」(2, 10, 18...)になっていることに対応します。これらの電子の魔法数が変わってしまうと大変ですね。教科書に載っている周期表を全て書き換えなければなりません。そうした書き換えが現在原子核物理学では進行しているのです。

さて、このような「魔法数」の変化を説明する可能性のある最も簡単な考え方は、原子核の変形です。軽い核では、ヘリウム4原子核(4He, α粒子)が陽子数2、中性子数2であり、ともに魔法数であることから極めて安定な性質のため、このα粒子が集まった変形した構造(クラスタ構造)があらわに現れます。このようなクラスタ構造は主として励起状態に現われ、また安定核近傍で詳しく調べられてきました。ところがこうしたクラスタ構造が中性子の海の中に現われ、かつ基底状態に現われれば確かに不安定な陽子数と中性子数の組合せは変化するのであります。例えば右中国でポロニウム原子核で中性子を増やしていくと、クラスタの構造がどのように変化するかを示しています。現時点では魔法数の変化の原因として、ここで述べたような変形の他に、対相互作用の変化、スピン軌道力の影響、密度の広がりによる位相の逆転など様々なアイデアが提出されています。教科書が書き変わる日は確かですが、「しばしば変わらない教科書」ができるのはもう少し先になりそうです。

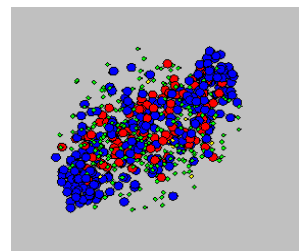


4. 爆発的な元素合成の環境を地上で実現しよう --- 高エネルギー重イオン反応

さて、宇宙の歴史の中で起こった非常に爆発的な元素合成過程はビッグバンと超新星爆発です。これらについて人類の手で、地上で起こすことは出来ないのでしょうか？ 確かにビッグバンや超新星爆発を実際に地上で起こすと大変なことになりますが、それに近い状況を生み出すことは可能です。

ビッグバンでは密度は通常の原子核に比べてずっと小さいのですが、原子核が壊れ(存在出来ず)、さらに陽子や中性子さえもそのままではいらなくなり、3つのバラバラのクォークに壊れちゃうくらい高い温度でした。一方超新星爆発では、通常の原子核の密度よりもずっと高い密度に達し、それが急激に膨張して重い元素を作りました(右中国参照)。ですからこうした状況を地上で再現するには原子核を非常に高い温度まで熱する、あるいは非常に高い密度まで圧縮して「つぶす」ことが必要です。これに最も有効な方法は高いエネルギーで原子核同士を衝突させることです。右中国は2つの金の原子核を高いエネルギー(質量エネルギーの10倍程度)で衝突させた様子を示シミュレーションしたものです。もともと核子(青い丸)のみだった原子核をぶつくと様々な励起状態(赤い丸)がつくれ、それが崩壊してハイなどの中間子(緑)を作っていきます。

20世紀最後の年には、上の図の26倍ものエネルギーでの原子核衝突実験が開始され、日本人の実験家も多く参加しています。このエネルギーでは核子さえもそのままではいらなくなり、クォークがバラバラになるほど高い温度になっていると考えられています。つまり、「ミニビッグバン」を人類の手で作れたと考えられるのです。実際、今年(2003年)の6月には、「ジェット抑制」(クォークが走った軌跡が通常と大きく異なる)が観測されたことから、ミニビッグバンが生成されたと考えられる、というプレスリリースが行われました。最終的な確認には、もう少し時間がかると思いますが、人類はビッグバンの扉にますます近づいています。



5. 星の終末(中性子星)の中を覗いてみると... --- ハイパー核

大きな恒星の内部で核融合反応が起こると星の中心部に重い原子核がたまっていきます。これがある程度以上進むと、巨大となった重力により星がつぶれていきます。そのリバウンドにより起こるのが超新星爆発であり、その中心に残る星の残骸が中性子星、あるいはブラック・ホールです。原子核の定義を「核子が集まって束縛した系」とするならば、中性子星はまさに巨大な原子核であり、原子核物理学者にとっては興味深い研究対象です。

この中性子星の中では非常に密度が大きくなっており、ビッグバン(高温、低密度と逆の極限状況(低温、高密度)の状況が実現しています。そしてこうした高密度物質では、再び核子は核子のまわりをまわらなくなっていると考えられるのです。これは、核子はフェルミ粒子であるためパウリ原理が働いて「同じ量子状態をとることができず、非常に大きな密度では他の種類の粒子に変化したほうがエネルギー的に有利になるからです。

核子の変化する先の代表的なものには「ハイペロン」とよばれる核子です。核子がクォークで見ればu(アップ)クォークとd(ダウン)クォークからできていますが、ハイペロンはs(ストレンジ、奇妙な)クォークを含んでいます。このため核子とは異なる粒子として振舞い、核子との間にパウリ原理が働かなくなるのです。右下图には、中性子星の内部でどのような粒子が現われるか、またどのような構造になっているかの理論的な予想が示されています。現時点で、外側の3層については多分確からしく考えられています。しかしながら中性子星の一番内側がどのような構造になっているのか、全く決着はついていません。これについても、中性子星内部で現われ得る核子の海の中のハイペロンの性質を再び「人類の手で、実験室で」調べるため、ハイペロンを原子核内に束縛された「ハイパー核」の研究が盛んに行なわれています。

6. さらに微小な世界へ --- クォーク多体系

原子核をつくる陽子や中性子や、それらをつなぐ力を担う中間子は、これよりも小さなクォークからできていると考えられており、物質を細かくいった場合にこれより小さなもの(最小単位)と信じています。現在、原子核を陽子や中性子の集合体とみなすのと同様に、核子や中間子をクォークとクォークを結び付けているグルーオンの集合体とみなして、この階層から性質を明らかにしようとする試みも、原子核物理学の大きな課題として研究が行なわれています。