

核図表

Chart of Nuclides

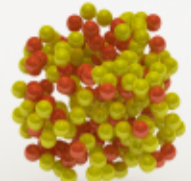
監修：理化学研究所 仁科加速器科学センター

核図表には物質創成の歴史が刻まれている

私たちの体を含め、目に見える宇宙を構成する物質は100種類定らずの元素からできています。その元素の本体は陽子と中性子からなる原子核です。陽子と中性子の微妙なバランスからなる原子核の成り立ちを調べることは、物質の起源を調べることで、ここに示す核図表^{※1}は全ての原子核を示した地図であり、そこには元素合成と宇宙の歴史も刻まれています。原子核は果たしてどのように生まれたのか、またどのようなものなのか、核図表と一緒に見てみましょう。

12 原子核=陽子+中性子

中性子 陽子



ヘリウム4 ウラン235

●×2 ●×92
●×2 ●×143

原子核は陽子と中性子で構成されています。例えばヘリウム4は2つの陽子と2つの中性子からなり、ウラン235は92個の陽子と143個の中性子からなっています。それぞれの原子核の安定性は陽子と中性子の数で定められ、そのバランスが崩れている原子核は不安定で別の原子核に変化します。

3 原子核の崩壊—不安定核は崩壊し別の原子核になる

原子核はとても固く簡単に壊れません。しかし不安定核はより安定な原子核へと自らを変化させます。その現象を「崩壊」と呼びます。主な崩壊のしかたはアルファ、ベータ、ガンマの3種類と自発核分裂です。すべての不安定核は崩壊を繰り返し、最終的に安定核へと落ち着きます。

| 崩壊の種類 | 崩壊の過程 | 崩壊の結果 |
|--------------|--------------|------------------------|
| アルファ崩壊 | ウラン238放射性同位体 | ヘリウム4とトリウム234放射性同位体 |
| ベータ崩壊 | ヘリウム6放射性同位体 | リチウム6安定同位体 |
| ベータ崩壊-電子捕獲 | 反ニュートリノ | 陽子→中性子 |
| ベータ崩壊-ニュートリノ | ニュートリノ | 中性子→陽子 |
| 電子捕獲 | 陽子+電子 | 中性子 |
| ガンマ崩壊 | ガンマ線 | 励起した原子核が安定状態になる時にγ線を放出 |
| 自発核分裂 | | 重い原子核が2つの原子核に分裂 |

45 球形だけじゃない—色々な原子核

原子核の形は球形で固く結合していますが、実はそうとは限りません。(左図参照)。魔法数近傍の原子核は球形ですが、それを外れた領域には多様な形の原子核が存在することがわかっています。バナナ型やミカン型など様々です。特に左図に示した原子核は特徴的です。中性子スキンは過剰な中性子が原子核の外にしみ出して中性子だけの皮を作っています。中性子ハローはしみ出した中性子が大きく広がっています。

中性子スキン 中性子ハロー

原子核のカタチ

- ミカン型
- レモン型
- バナナ型
- 洋な型

核図表の見かた

縦軸は陽子数(Z)で、下から上に向かって増えていきます。陽子数は原子番号と同じなので、縦軸は周期表の順番に並んだ元素の種類でもあります。横軸は中性子数(N)で、左から右に向かって増えていきます。したがって横一列に並ぶのは、同じ元素でそれぞれ中性子数が違う同位元素^{※2}です。青い所は安定核^{※3}といい、天然に存在する原子核です。オレンジ色の所はこれまでに発見・合成された原子核です。白色と灰色の所は理論的に存在が予想される未発見の原子核です。

原子核の表記方法

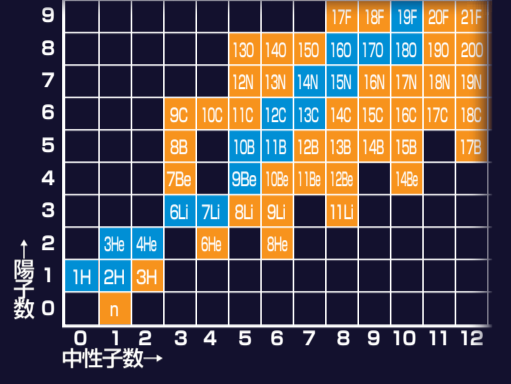
陽子+中性子数 元素記号 陽子数

例えばヘリウム4では ${}^4_2\text{He}$

例えば炭素13では ${}^{13}_6\text{C}$

と表す。(※右の核図表では陽子数は省略)

核図表上での個々の表記



原子核は今も発見され続けている

194

原子核は理論上 7000 種類以上あると予想されていますが、これまで発見された原子核は約 3000 種類です。このうち 194 種類は理論で発見されました(2022年現在)。現在も各国で原子核の研究が進められているので、これからも多くの原子核が発見され、物質創成の謎^{※4}の解明への大事なステップとなることでしょう。

6 魔法数

原子には電子軌道が層状にあり、これを殻構造と呼びます。電子は内側から順に殻を埋めます。第1殻(殻)は電子が2個、第2殻は8個、第3殻も8個入ります。魔法数とは電子が2, 8, 20, 28, 50, 82, 126が70年程前から知られています。1949年にマリア・ゲッパート=メイヤーとヨハネス・ハンス・イェンゼンが魔法数を理論的に説明し、1963年にノーベル物理学賞を受賞しました。

7 「異常変形の島」と新たな魔法数—魔法数の消失と出現

陽子と中性子の魔法数はそれぞれ独立です。そこで中性子数が魔法数でも陽子数が魔法数からかけ離れた原子核はその安定性が失われる。つまり魔法数が消失する場合もあることが近年分りました。たとえばマグネシウム32は陽子数がZ=12、中性子数がN=20のアノバランス(中性子過剰)な原子核です。中性子数N=20は通常では魔法数ですが、この原子核は変形して魔法数が消失しています。その近傍には異常変形した原子核ばかりの領域があり、これを「異常変形の島(逆転の島)」と呼んでいます。このような魔法数の消失がある一方で、中性子過剰な原子核に新たな魔法数として2000年に中性子数N=16が、その後さらにN=6, 32, 34が見つかりました。理論的にはまだほかにも魔法数の出現と消失の可能性があり、今後の研究が待ち望まれます。

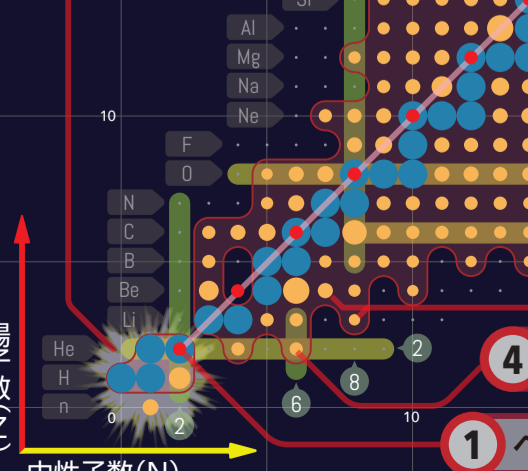
13 ビッグバン

138億年前のビッグバンで我々の宇宙は生まれました。とてつもない温度と圧力の宇宙が急激に膨張し冷えます。3分後に陽子・中性子が結合して重水素やヘリウムが作られ始めますが(ビッグバン元素合成)、20分には温度が下がり過ぎて合成終了。宇宙は水素とヘリウムだけでほとんど3億年過ごし、やっと生まれる恒星が元素合成を引き継ぎます。

14 恒星内の核融合

恒星内では水素とヘリウムが核融合してヘリウムと炭素が生成されます。この過程でエネルギーが放出され、恒星の膨張を防ぎます。最終的に恒星の中心部では鉄が生成され、恒星は崩壊して超新星爆発を起こします。

13 ビッグバン



14 恒星内の核融合



※1 [核図表] 原子核をその陽子数と中性子数で並べたのが核図表で、この図のように縦軸は陽子数、横軸は中性子数をとるのが一般的です。それに対して周期表は原子核の陽子数だけを示しています。

※2 [同位元素] 同位体ともいいます。同じ元素には放射性崩壊を起こす「放射性同位元素(PN)」と、崩壊しない「安定同位元素」があります。

※3 [安定核] 崩壊しない原子核のことを安定核といいます。ただしこの表では、半減期が地球の年齢程度のため理論的に推定される安定核として扱っています。

※4 [物質創成の謎] 約100種類ある元素が物質の源です。ほとんどは宇宙に星が生まれた後に作られたのですが、どのように作られたのかまだ完全には分かっていません。特にウランなどの重い元素のくられ方はまだ謎だらけなのです。

※5 [超新星爆発] 超新星爆発は、恒星が燃え尽きたときに起こる爆発現象です。この爆発によって、恒星の中心部で生成された重い元素が宇宙空間にばらまかれます。

※6 [RIBF] 理化学研究所の重粒子加速器施設で、陽子と中性子から原子核を生成する装置です。

※7 [BigRIPS] RIBFの加速器施設で、陽子と中性子から原子核を生成する装置です。

※8 [安定核] 崩壊しない原子核のことを安定核といいます。ただしこの表では、半減期が地球の年齢程度のため理論的に推定される安定核として扱っています。

※9 [半減期] 放射性同位体が放射線崩壊を起こし、そのうち半分の核種に変化するまでの時間です。

※10 [元素創成] 陽子数と中性子数がアンバランスで、原子核としてできても崩壊して安定核にはなりません。

※11 [ポテンシャルエネルギー] 粒子系の安定性を示す量で、低いほど系は安定です。陽子と中性子には強い力(核力)が働くので、結合して原子核になる方が(1)よりポテンシャルエネルギーが低い安定な状態です。

※12 [ハイゼンベルクの谷] 右の図は核図表を立体的に示したものです。それぞれの原子核の場所の高低は核子の結合エネルギーで、その高低が谷の深さ(低い方が強く結合している)を示しています。この図全体の形が山の間の谷筋のように見えることから、これを「ハイゼンベルクの谷」と呼びます。青色で示す安定核が谷底に見えます。谷の両側の原子核はβ崩壊を繰り返して斜面を下り、谷底の安定核に到達します(水色の矢印)。その際、高低差に相当するエネルギーが放出されます。下のグラフは谷底の安定核を横から見た図で、鉄の原子核が最もエネルギーが低く、それより軽くても重くても高くなります。さて、地球上で採掘できる最も重い元素のウランは、下のグラフでは右側の高い位置にありますから、核分裂して2個の原子核になると、その高低差分のエネルギーで発電できます。一方、太陽の中心では核融合反応で水素4個からヘリウムがつかられ、その際のエネルギー差で太陽は光り輝いています。