

原子核の魔法数と殻模型

中村研究室 津江 透仁

物質を構成する原子の中心には原子核が存在し、それは核子と呼ばれる陽子と中性子からなる。原子中の電子が特定の軌道および殻を持ち、安定となる数(希ガス)が決まっているのと同様に、陽子・中性子にも特定の「軌道」が存在し、それによる「殻」を埋めることで極めて高い安定性を示す。その数のことを「魔法数」と呼び、2,8,20,28,50,82,126が確認されている。本発表では、なぜこれらの数において原子核が安定するのかを「殻模型」を用いて概説し、それらが宇宙における元素存在比への影響について論じる。

まず原子核を液滴とみなす「液滴模型」での結合エネルギーを表す以下のWeizsäckerの半経験的質量公式では[1]、同位体間の結合エネルギーの傾向(対称エネルギーやペアリング項など)が記述される。

$$E = -a_1 A + a_2 A^{2/3} + a_3 Z^2 A^{-1/3} + a_4 (A - 2Z)^2 A^{-1} + \lambda a_5 A^{-1/2}$$

$a_1 \sim a_5$ は現象論的なパラメータであり、原子核の液滴としての半径が $A^{1/3}$ に比例している。しかし、このままでは陽子・中性子が魔法数となる原子核が安定となることは説明できない。

ここで、魔法数の具体的な値を理論的に導出するための第一歩として球対称な3次元調和振動子ポテンシャルや井戸型ポテンシャルでのエネルギー準位を考える。現実的な原子核ポテンシャルは、これら2つの

中間的な形をしていると電荷分布などから予想される。調和振動子ポテンシャルは、 $V(r) = -V_0 + \frac{1}{2}m\omega^2 r^2$ で与えられ、井戸型ポテンシャルは $r = R$ に障壁を持つものである。それらのポテンシャルによるエネルギー準位を図1に示す。図中では各準位の縮重度は()に、ある準位までに含まれる全準位数は[]に示してある。

これら2つのポテンシャルにより、エネルギーギャップのある魔法数2,8,20までは記述可能だが、それ以上の数を説明するには不十分である。この問題を解決するには「スピン・軌道相互作用」を導入する必要がある。これは、核子のスピンと軌道運動が相互作用してエネルギー準位が分裂する効果であり、 $H_{so} = -\alpha(r)\mathbf{l} \cdot \mathbf{s}$ で記述され、 $\alpha(r)$ は陽子・中性子のそれぞれ別の値を持つ[2]。このとき、全角運動量 j が保存量となり、エネルギー準位が $j = l + \frac{1}{2}$ と $j = l - \frac{1}{2}$ に分裂して、大きなエネルギーギャップが形成されることで残りの魔法数が説明される。スピン・軌道相互作用を取り入れたときのエネルギー準位の分裂を図2に示す。

魔法数の存在は、現在の宇宙における元素の存在比にも深く関与している[3]。魔法数を持つ原子核はその安定性ゆえに崩壊しにくく、宇宙空間に大量に蓄積される傾向がある。さらに鉄より重い元素の合成では魔法数の存在が大きく影響する。以上より、魔法数は殻構造とスピン軌道相互作用に起因する量子力学的効果であると同時に、宇宙の元素組成にも影響する重要な概念である。

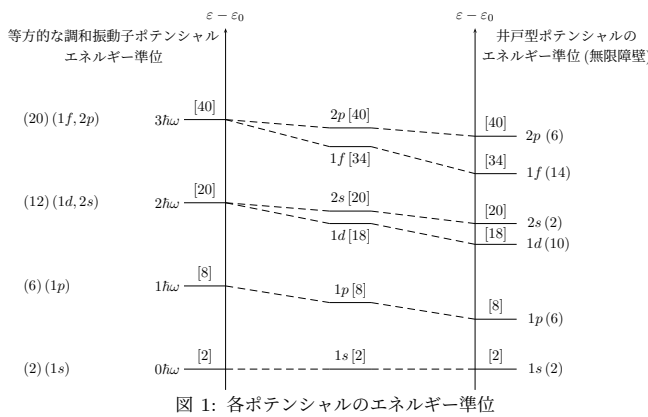


図1: 各ポテンシャルのエネルギー準位

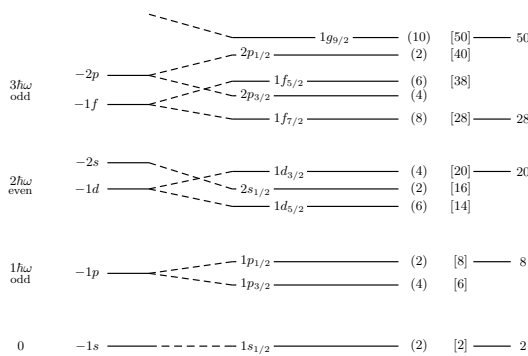


図2: スピン軌道相互作用によるエネルギー準位分裂

[1] Alexander L. Fetter and John Dirk Walecka, *Quantum Theory of Many-Particle Systems*, McGraw-Hill, New York (1971)
 [2] M. G. Mayer and J. H. D. Jensen, *Elementary Theory of Nuclear Shell Structure*, John Wiley and Sons, Inc., New York (1995)
 [3] 谷畑勇夫, 宇宙核物理学入門, 講談社 5, 253 (2002)