

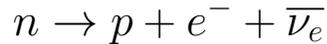
1 原子核 (nucleus) の基本的な性質:

原子核の質量数:

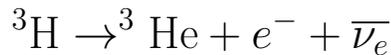
$A = Z + N$ (Z ... 陽子の数、 N ... 中性子の数)

原子核の記号: ${}^A_Z X_N$. 例えば、 ${}^{208}_{82} \text{Pb}_{126}$.

- $A = 1$ は単独の「核子」(nucleon): 陽子 (proton, p)、中性子 (neutron, n)。但し、中性子は不安定で、寿命 15 分で次のようにベータ崩壊する:



- $A=2$ は重陽子 (deuteron, d): p+n の束縛状態。最も簡単な原子核、安定。
- $A=3$: ${}^3\text{He}$ (p+p+n) (helium-3), ${}^3\text{H}$ (p+n+n) (triton). 但し、 ${}^3\text{H}$ は不安定で、寿命 18 年で次のようにベータ崩壊する:



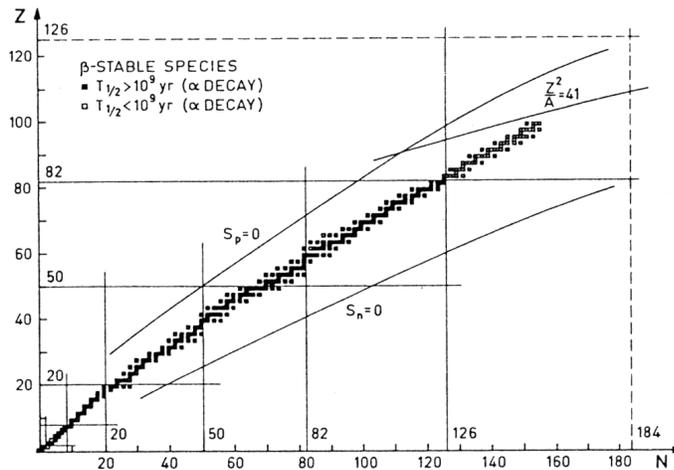
- $A=4$: ${}^4\text{He}$ (p+p+n+n): α 粒子、最も安定な原子核、存在量が多い。
- 質量数 $A = 5$ の安定な原子核はない。
- 質量数 $A = 6, 7$ の安定な原子核は ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$ (lithium). 宇宙の初期の元素合成は ${}^7\text{Li}$ まで進んだ。
理論的な記述: ${}^6\text{Li} \simeq \alpha + d$; ${}^7\text{Li} \simeq \alpha + {}^3\text{H}$.
- 質量数 $A = 8$ の安定な原子核はない。
- $A=12$: 炭素 (carbon) ${}^{12}_6\text{C}_6$. 重い星の中、3つの α 粒子の核融合で合成される。

- $A=16 \sim A=40$: 4の倍数の原子核の存在量が多い。
酸素 (oxygen) ${}^16_8\text{O}_8$; ネオン (neon) ${}^{20}_{10}\text{Ne}_{10}$; マグネシウム (magnesium) ${}^{24}_{12}\text{Mg}_{12}$; シリコン (silicon) ${}^{28}_{14}\text{Si}_{14}$; サルファ (sulfur) ${}^{32}_{16}\text{S}_{16}$; アルゴン (argon) ${}^{36}_{18}\text{Ar}_{18}$; カルシウム (calcium) ${}^{40}_{20}\text{Ca}_{20}$.
 ${}^{40}_{20}\text{Ca}_{20}$ は $N = Z$ の最も重い安定な原子核。($A > 40$ の安定な原子核では $N > Z$.)
- $A=56$: 鉄 (iron) ${}^{56}_{26}\text{Fe}_{30}$. α 粒子次に安定な原子核。重い星の中の核融合は鉄まで進んでいる。(鉄より重い原子核が主に中性子捕獲プロセス (slow process = s - process) もしくは超新星爆発プロセス (rapid process = r- process) で合成される。)
- $A=208$: 鉛 (lead) ${}^{208}_{82}\text{Pb}_{126}$. 最も重い安定な原子核。(それより重い原子核は α 崩壊をする。)
- $A=209$: ビスマス (Bismuth) ${}^{209}_{83}\text{Bi}_{126}$. 重い星の中の中性子捕獲プロセスは ${}^{209}\text{Bi}$ まで進んでいる。(それ以上に重い原子核は超新星爆発で合成される。)
- $A=238$: ウラニウム ${}^{238}_{92}\text{U}_{146}$. 寿命 6×10^9 年でアルファ崩壊する。「ウラニウム崩壊系列」は安定な ${}^{206}_{82}\text{Pb}_{124}$ まで続く。
- 実験室で合成された最も重い原子核: $Z=118$, $A=294$ (Oganesson) ${}^{294}_{118}\text{Og}_{176}$. 半減期は約 0.7 ms.

安定な原子核の特徴：

- 軽い原子核 (^{40}Ca まで) : $N \simeq Z$ (「対称エネルギー」のため。)
- 重い原子核 : $N > Z$ (「クーロンエネルギー」のため。)

次の図は、核図表 (N-Z 平面) で「安定な原子核の谷」 (valley of stable nuclei) を示している：



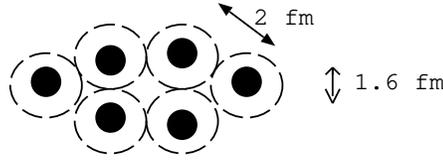
原子核の大きさ：

電子・原子核散乱の実験データから原子核内の電荷分布が測定された。その電荷分布の広がり「原子核の半径」 R で定義する。解析の結果は、質量数 A の原子核の半径は

$$R = r_0 A^{1/3} \quad (r_0 = 1.1 \text{ fm}) \quad (1.1)$$

但し、1 fm (1 femtometer) = 10^{-15} m は原子核物理で便利な単位。従って、原子核の体積は A に比例する：

$$V = \frac{4\pi}{3} r_0^3 A \equiv vA$$
$$v \equiv \frac{4\pi}{3} r_0^3 = \text{volume/nucleon} \quad (1.2)$$



⇒ 原子核内の核子間の距離 $\simeq 2r_0 \simeq 2\text{fm}$. 核子自信の半径は 0.8 fm 程度であるので、原子核内の「空白」はあまりない。

原子核内の核子の「個数密度」は A に依存しない定数である：

$$\rho_A = \frac{A}{V} = \frac{1}{v} = 0.17 \text{ nucleons/fm}^3 \quad (1.3)$$

核子の質量 $M_N = 1.7 \times 10^{-24}\text{ g}$ を使って、「質量密度」に換算できる：

$$\rho = 0.17 \times 10^{39} \times 1.7 \times 10^{-24} \simeq 3 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$$

原子核内の密度は非常に大きい！（中性星内部の密度もその程度である。）

以上のことから、核力 (核子間の力) について何が分かる？

- 距離 $r \simeq 2\text{fm}$ のとき：引力
- $r \rightarrow \infty$ のときに、核力はゼロ。その理由：核子を原子核から叩き出すことができるから。
- r は小さいとき：核力は 斥力 に変わる。その理由：もし斥力がない場合は、核子は皆互いの引力の到達距離内に集中する。(何故ならば、そのときに原子核のエネルギーは最低になる。) 従って、その場合は原子核の半径は核力の到達距離の程度で、質量数 A に依存しない。密度は A とともに増加する。それは以上の原子核の性質と大きく矛盾するので、核力は短距離で斥力 に変わる。

原子核の質量

原子核物理で、粒子の質量 (M) よりも、質量エネルギー (静止エネルギー) $M c^2$ を使い、MeV の単位で表す。但し

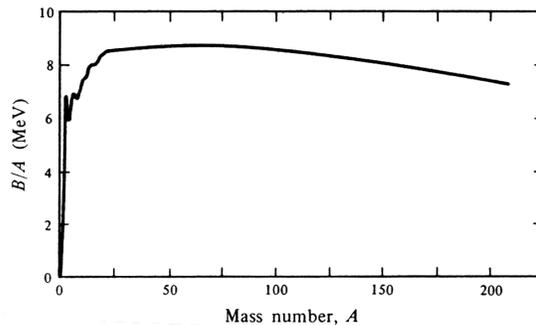
$$1 \text{ MeV} = 1.6 \times 10^{-13} \text{ J}$$

例えば陽子: $M_p c^2 = 938.3 \text{ MeV}$; 中性子: $M_n c^2 = 939.6 \text{ MeV}$; 電子: $M_e c^2 = 0.51 \text{ MeV}$.

原子核の質量エネルギー:

$$M_A(Z, N)c^2 = ZM_p c^2 + NM_n c^2 - B_A(Z, N)$$

ただし、 $B_A > 0$ は原子核の「束縛エネルギー」である。即ち、原子核の質量はバラバラな陽子、中性子の質量の和よりも小さいである。原子核の束縛エネルギーは核子間の強い力 (核力) および核子の運動エネルギーから生じる。次の図は核子当たりの束縛エネルギー (B_A/A) の観測データを示している:



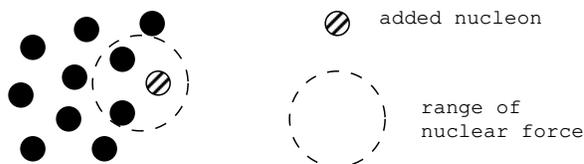
$A > 20$ の場合は、核子当たりの束縛エネルギーはほぼ一定で、 $B_A/A \simeq 8 \text{ MeV}$.

以上のことから核力について何が分かる?

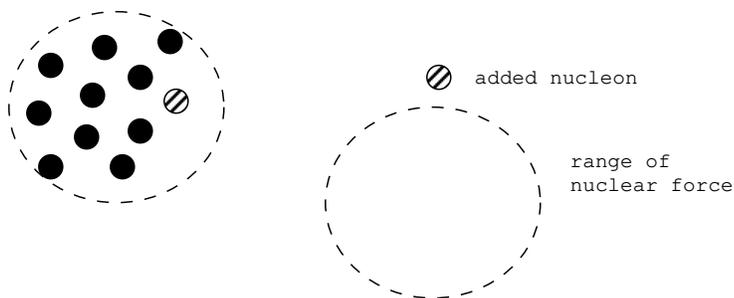
核力は 短距離 の力である。即ち、核力の到達距離は原子核の大きさと比べて小さい。

それを理解するために、原子核 (質量数 A) に核子 1 個を付け加えて、質量数 $A + 1$ の原子核を形成することについて考えよう：

- 力が短距離の場合：付け加えた核子は隣の核子のみと相互作用する \Rightarrow 束縛エネルギーは一定の値 (A に依存しない値) で増加する。従って、全束縛エネルギーは A に比例し、以上の結果 $B_A \simeq 8 \text{ MeV} \times A$ に矛盾しない。従って、次の図は正しいシナリオを表している：



- 長距離の場合：付け加えた核子は全ての A 個の核子と相互作用する \Rightarrow 全束縛エネルギーは $B_A \propto$ 核子の pair の数 $\propto A(A - 1)$. それは経験則 $B_A \simeq 8 \text{ MeV} \times A$ と大きく矛盾する。従って、次の図は間違ったシナリオを示している：



核力の強さについて:

原子核の中の核子は、大きさ $\Delta r = r_0 \simeq 1.1 \text{ fm}$ のスペースに束縛されていると考える。 \Rightarrow 不確定性原理から、核子の平均の運動量の大きさは評価できる：

$$\Delta r \cdot \Delta p > \hbar \quad (\text{Heisenberg's uncertainty principle})$$

ここは、 Δr は位置についての不確定性で、即ち核子がかもっているスペースである。 Δp は運動量についての不確定性で、原子核内

の平均の運動量はゼロなので、 $\Delta p = \frac{\hbar}{\Delta r}$ は核子の最小限の運動量となる。原子核の基底状態ではエネルギーは最小となるので、運動エネルギーも最小となる。この最小の運動エネルギーを次のように評価できる：

$$p_{\min} \cdot c = \frac{\hbar \cdot c}{\Delta r} = \frac{197 \text{ MeV} \cdot \text{fm}}{1.1 \text{ fm}} = 179 \text{ MeV}$$

$$K = \frac{p_{\min}^2}{2M_N} = \frac{p_{\min}^2 c^2}{2M_N c^2} = \frac{(179)^2}{2 \times 940} = 17 \text{ MeV}$$

ただし、ここでは $\hbar c = 197 \text{ MeV fm}$, $M_N c^2 = 940 \text{ MeV}$ は核子 (nucleon) の静止エネルギーを使った。

従って、原子核中の核子 1 個の平均の運動エネルギーは $\simeq 20 \text{ MeV}$ である。原子核の中の pair の相互作用エネルギー（ポテンシャルエネルギー）は、核力から生じ、その平均の値いを $V < 0$ とする。従って、核子 1 個の平均のポテンシャルエネルギーは $\frac{V}{2}$ で、原子核の全エネルギー（核子の静止エネルギーを除く）は

$$AT + \frac{A}{2}V$$

となる。束縛エネルギーの定義を使うと、

$$-B_A = AT + \frac{A}{2}V$$

$$V = -2 \left(T + \frac{B_A}{A} \right) = -2(17 + 8) = -50 \text{ MeV}$$

核子間の相互作用エネルギーは -50 MeV 程度である。

以上のことから、「核力」（核子間の相互作用エネルギー）は、核子間の距離の関数として次の図のようになる。短距離 ($r < 0.5 \text{ fm}$)

ではポテンシャルエネルギーは有界 (soft core) が無限 (hard core) かどうかはまだ分かっていない。長距離 ($r > 2 \text{ fm}$) での核力は湯川理論の π 中間子交換 (pion exchange) で説明できる。中間距離 ($r \simeq 1.5 \text{ fm}$) の引力は σ 中間子交換 (scalar meson exchange) で説明できる。

