

原子核の不思議さ

目次

§ 1 原子核の発見

§ 2 原子核は何からできているか

§ 2.1 中性子の不思議

§ 2.2 陽子の不思議

§ 2.3 中性子の質量が陽子よりもわずかに重いという偶然

§ 2.4 電子の質量とその周辺の微妙さ

§ 3 原子核内で働く力

§ 4 核図表

§ 5 宇宙における原子核にまつわる微妙なしくみ

§ 5.1. 核力の微妙なさじ加減

§ 5.2 もしもRプロセスでウランが生成されなかったら？

§ 5.3 生命の源としての元素

§ 5.4 星の内部でC-12核が合成された幸運

§ 5.5 2個の ${}^4_2\text{He}$ 核の共鳴状態が存在する偶然

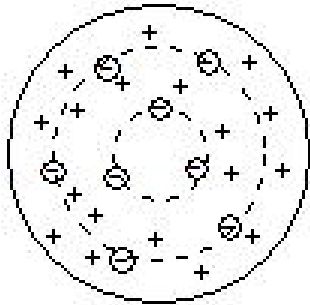
§ 5.6 ${}^{12}\text{C}$ 核に特殊な励起状態が存在する偶然

§ 5.7 ${}^{16}\text{O}$ 核の励起エネルギーが(${}^{12}\text{C} + {}^4\text{He}$)系のエネルギーよりほんの少し低いという偶然

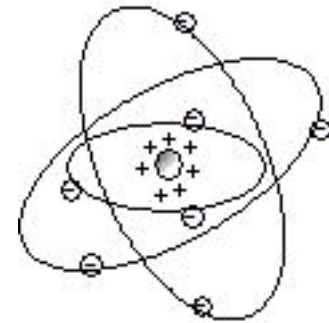
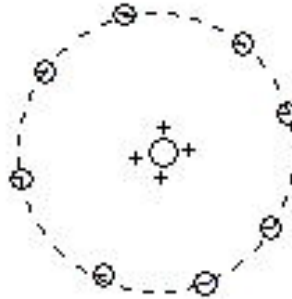
§ 5.8 なぜこれらの微妙な偶然が重なったのか？

§ 1. 原子核の発見

トムソンの原子モデル

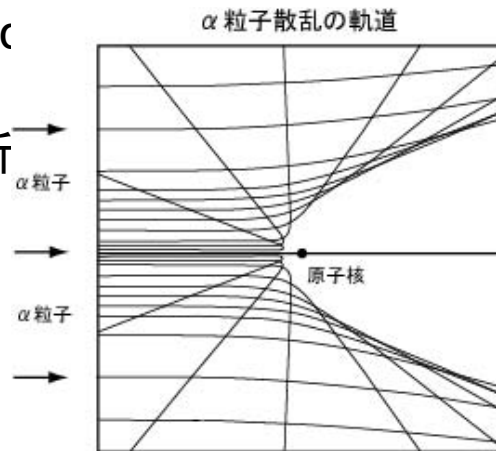


長岡半太郎の原子モデル



ガイガー・マースデンの

ラザフォードによる分析

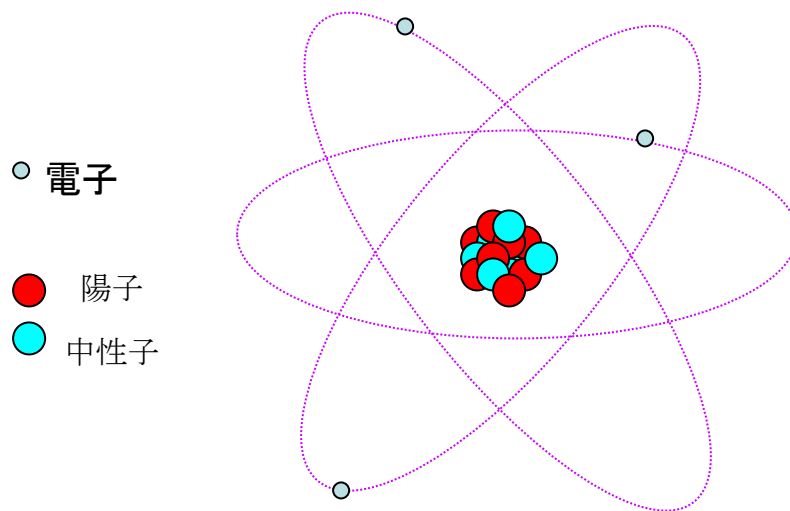


原子の「大きさ」= 10^{-10}m
⇔ 原子核の「大きさ」= 10^{-14}m

(原子核から見ると)原子は「大きい」、原子はかさばっている！

原子と原子核のイメージの虚実

過度に単純化された図



「電子が惑星のように、原子の周りをめぐっているというイメージは、意識からも、できれば無意識からも追いついてもらいたい。完全に間違っているからだ。それはサイエンスフィクションといってもよく、すでに息の根を止められ、退けられた原子模型である。なぜ間違いかという、電子はよく知られた意味での粒子とは違って、波のような性質も持っているからである。」

P.アトキンス「ガリレオの指」(早川書房、2004年)、6章 原子、特にp. 180.

原子核を構成している陽子、中性子は相互に接触しながら静止しているのではない！

原子核のイメージ

1. 原子を直径「1m」のボールとすれば、原子核は「0.1mm」の芥子粒程度の「大きさ」

原子の「大きさ」= 10^{-10}m ⇔ 原子核の「大きさ」= 10^{-14}m

2. 原子の質量の99.9%が原子核に集中している。

電子質量 = $0.9 \times 10^{-30}\text{kg}$ ⇔ 陽子・中性子の質量 = $1840 \times$ 電子質量

3. 原子核には正電荷が集中し、電子の負電荷を相殺している、

4. 原子核は超超高密度である。

原子核の密度は1立方センチ当たり、数十億トン

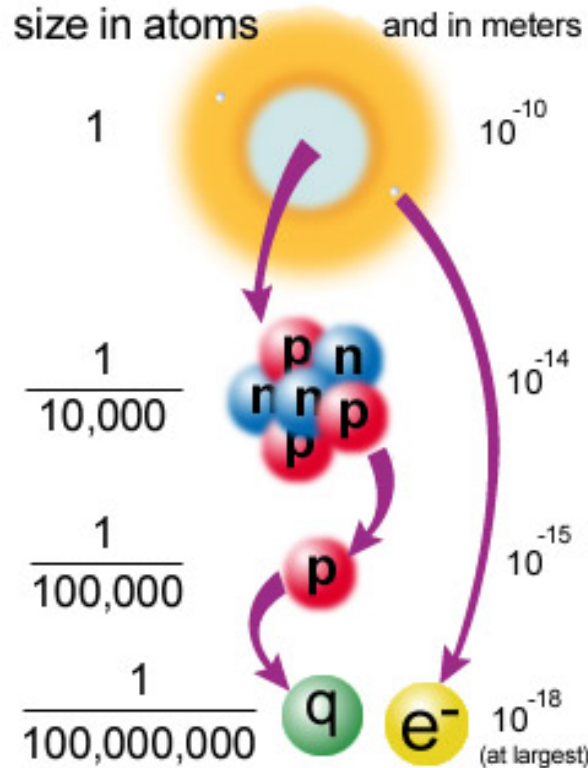
→核爆発: 超高密度の原子核のエネルギーの解放

→超高密度の原子核の崩壊(壊変)があると、放射能。

5. 原子の安定性の根拠は原子核の安定性にある。

原子核が不安定(放射性)であれば、原子は不安定

原子と原子核の大きさ



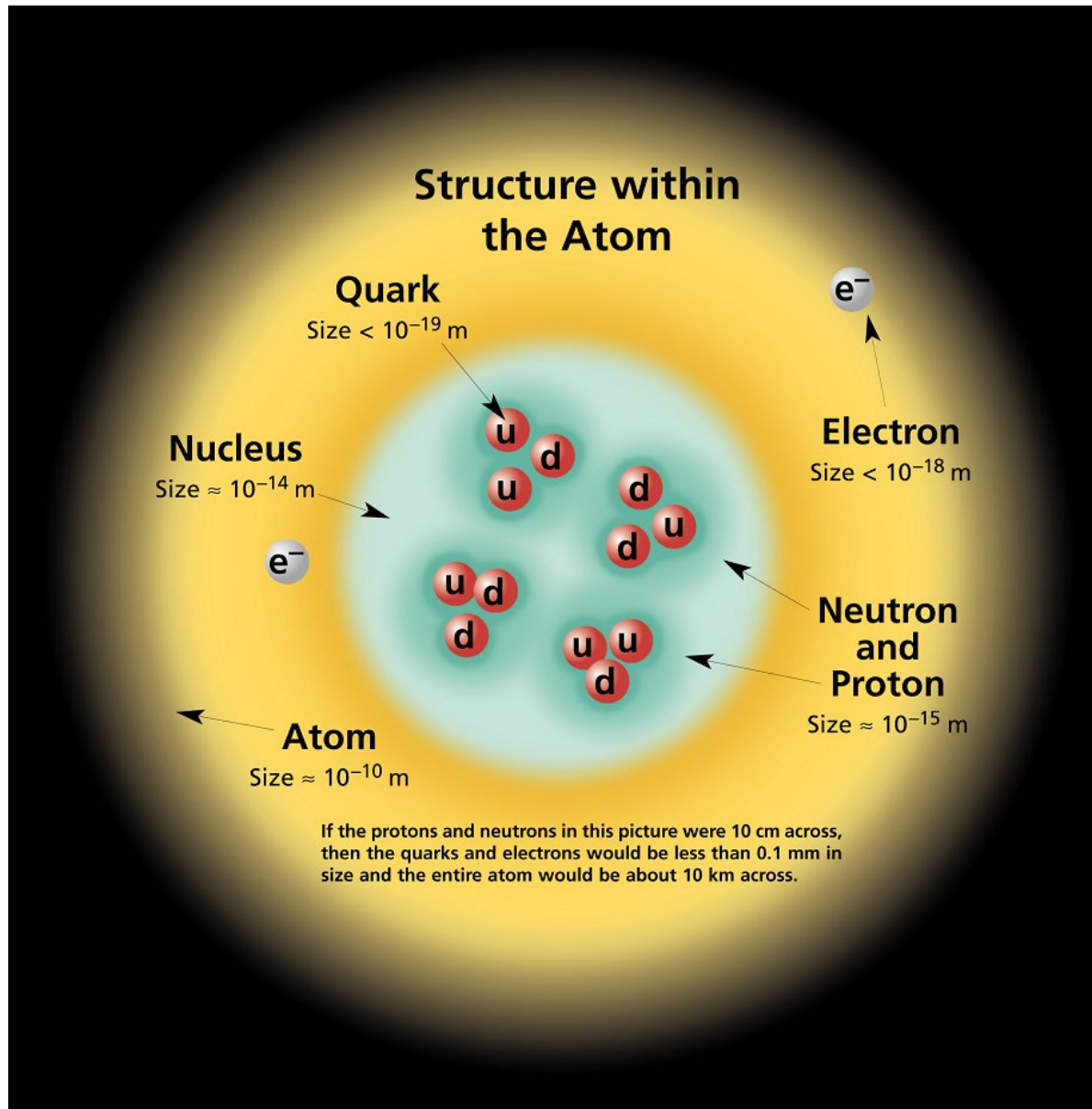
われわれの宇宙には数千億個の銀河が含まれており、1つの銀河には数千億個の恒星が含まれている。

驚くのはまだ早い！

ヒトの全細胞数は約60兆個 (6×10^{13} 個)、
1個の細胞は約100億から1兆個 ($10^{10} \sim 10^{12}$ 個)の
原子が含まれる。

小宇宙としての人体

原子の中の小宇宙としての原子核



§ 2. 原子核は何からできているか

§ 2.1 中性子の不思議

原子核外の中性子(=自由な中性子);

ベータ崩壊して陽子と電子ニュートリノに壊変

半減期は約12分

原子核内の中性子(=束縛された中性子);

1)陽子数に比べて, 中性子数が「十分に多い」場合

中性子はベータ崩壊して陽子と電子ニュートリノに壊変

電子は核内に留まることはできず, 核外に放出される.

ニュートリノは核子(陽子, 中性子の総称)とほとんど相互作用

しないので, 核外に放出される.

2)陽子数に比べて, 中性子数が「十分に少ない」場合

中性子はそのままで, 陽子が中性子と陽電子とニュートリノに壊変する

§ 2.2 陽子の不思議

原子核外の陽子(=自由な陽子);

極めて安定で、壊変するとしてもその平均寿命は極めて長い!

→陽子崩壊の測定を目的に製作・設置されたのがカミオカンデであり、1987年に偶然、地球を貫通するニュートリノを観測した。
(→小柴博士のノーベル物理学賞)

原子核内の陽子(=束縛された陽子)

1) 中性子に比べて、陽子数が「十分に多い」場合:

陽子は逆ベータ崩壊して、中性子、陽電子とニュートリノに壊変

陽電子は核内に留まることはできず、核外に放出される。

ニュートリノは核子(陽子, 中性子の総称)とほとんど相互作用しないので、核外に放出される。

2) 中性子数に比べて、陽子数が「十分に少ない」場合:

陽子はそのままで、中性子が陽子、電子とニュートリノに壊変する。

§ 2.3 中性子の質量が陽子よりも わずかに重いという偶然

- ベータ崩壊により、自由な中性子は陽子に転換される。
- 自由な陽子は周囲の自由電子を取り込み水素原子になる。
- もし、中性子が陽子よりも質量が小さければ、
陽子は生成されにくくなり、
水素原子は生成されず、水分子も水素結合もできなかったはず！

§ 2.4 電子の質量とその周辺の微妙さ

電子の本質的重要性:

生物の営みは化学反応に依存している。
化学反応は電子の交換や「共有」過程であるので、
電子は生命の根源を担う物質粒子である。

電子の特徴:

- 1) 質量は極端に小さいこと: 陽子、中性子の約1840分の1
(電子の質量) \simeq (中性子の質量) $-$ (陽子の質量)
- 2) 電子の「大きさ」は、陽子、中性子に比べて無視できるほど小さい

§ 3. 原子核内で働く力

1) 核力(nuclear force) 「主役」

- ・核子間に働く力で、近距離で強い斥力、中間的距離でかなり強い引力であり、
- ・原子核の大きさ程度より長い距離ではゼロになる短距離力である。
- ・電荷の有無には基本的には依存しない(荷電独立性、荷電不変性)。
- ・粒子間の相対距離だけできまる中心力成分だけではなく、
- ・非中心力成分(テンソル力成分)もあるので、
2粒子の(量子力学的な)状態にも依存する。
- ・陽子と中性子を入れ替える交換力的性質もある。

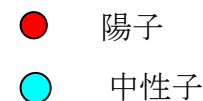
2) 電気力(electric force) 「脇役」だが、重い核では「準主役」

- ・無限遠方にも到達する長距離力で、粒子間の相対距離だけできまる中心力。
- ・原子核内の構成粒子では、陽子間のみ働く斥力である。
- ・軽い核においては重要ではなく、核力に比べて脇役的な役割を果すにすぎない。
- ・しかし、U, Puなどのような重い核における核分裂については、核力とともに主要な役割を果す。

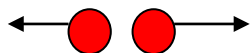
3) 弱い力(weak interaction) 「脇役」

短距離で働くがかなり弱い。ベータ崩壊を支配する力である。

§ 3.1 自由空間における核力、2核子系の不思議



2陽子系は不安定 ${}^2_2\text{He}$ は存在しない



理由: 1) 核力(の引力部分)は短距離でしか作用しない

2) 電気的反発力が働く

3) 2粒子が狭いところに閉じ込められると(不確定性関係により)
運動エネルギーが大きくなり、結果的に束縛エネルギーが減少

4) 同種の粒子は固有スピンの向きは反対になる(基底状態では)

$\uparrow\downarrow$ ($S=0$) パウリの排他原理のため。

$S=0$ では核力のテンソル力成分はゼロ

2中性子系も不安定！ ● ●

理由: 1) 核力(の引力部分)は短距離でしか作用しない

2) 2粒子が狭いところに閉じ込められると(不確定性関係により)運動エネルギーが大きくなり、結果的に束縛エネルギーが減少

3) 同種の粒子は固有スピンの向きは反対になる(基底状態では)

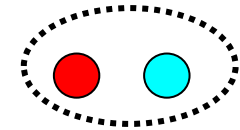
$\uparrow\downarrow$ ($S=0$) パウリの排他原理のため。

$S=0$ では核力のテンソル成分はゼロ

Q. 3中性子系、4中性子系の束縛状態は存在するか？

C. 実験的にも、理論的にも可能性が探索されているが、
現在では否定的である。

陽子・中性子系(重陽子)のみが安定！



理由

- 1) 核力(の引力部分)は短距離でしか作用しない
- 2) 2粒子が狭いところに閉じ込められると(不確定性関係により) 運動エネルギーが大きくなり、結果的に束縛エネルギーが減少
- 3) 異種の粒子は固有スピンの向きは同じ向きも可能

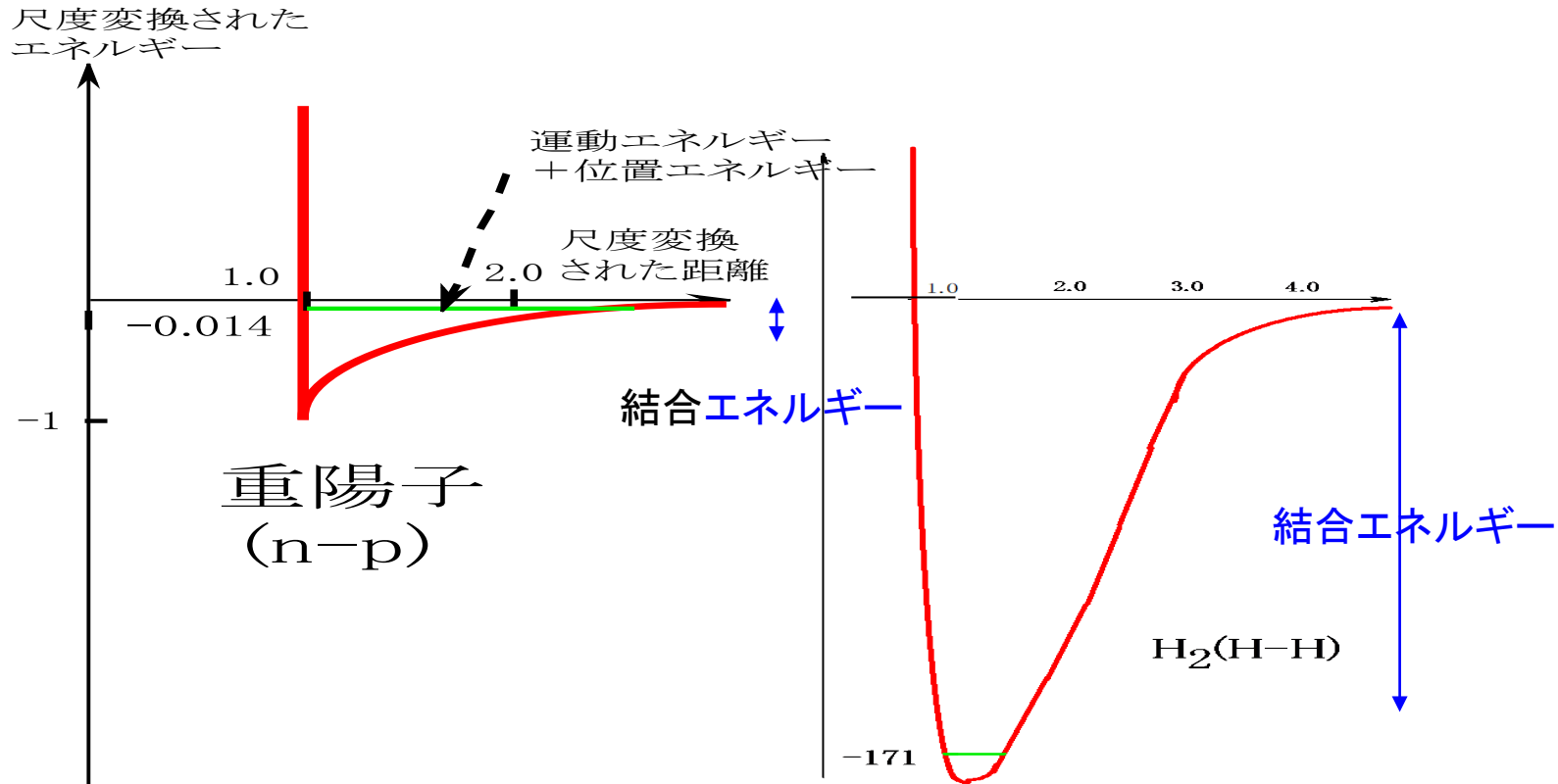
↑ (S=1) パウリの排他原理は働かないため。

S=1では核力のテンソル成分が存在する！

重陽子に電子が束縛された重水素は自然界に比較的少量しか存在せず、水分子7000個のうち1個程度の重水素の原子が含まれているに過ぎない。重水素の原子が含まれている水分子がからなる水は**重水**と呼ばれている。原子炉では、普通の水のことを**軽水**と呼ぶ。

核力は強いが、結合力は弱い原子核

尺度変換された長さエネルギーで比較した結合力-

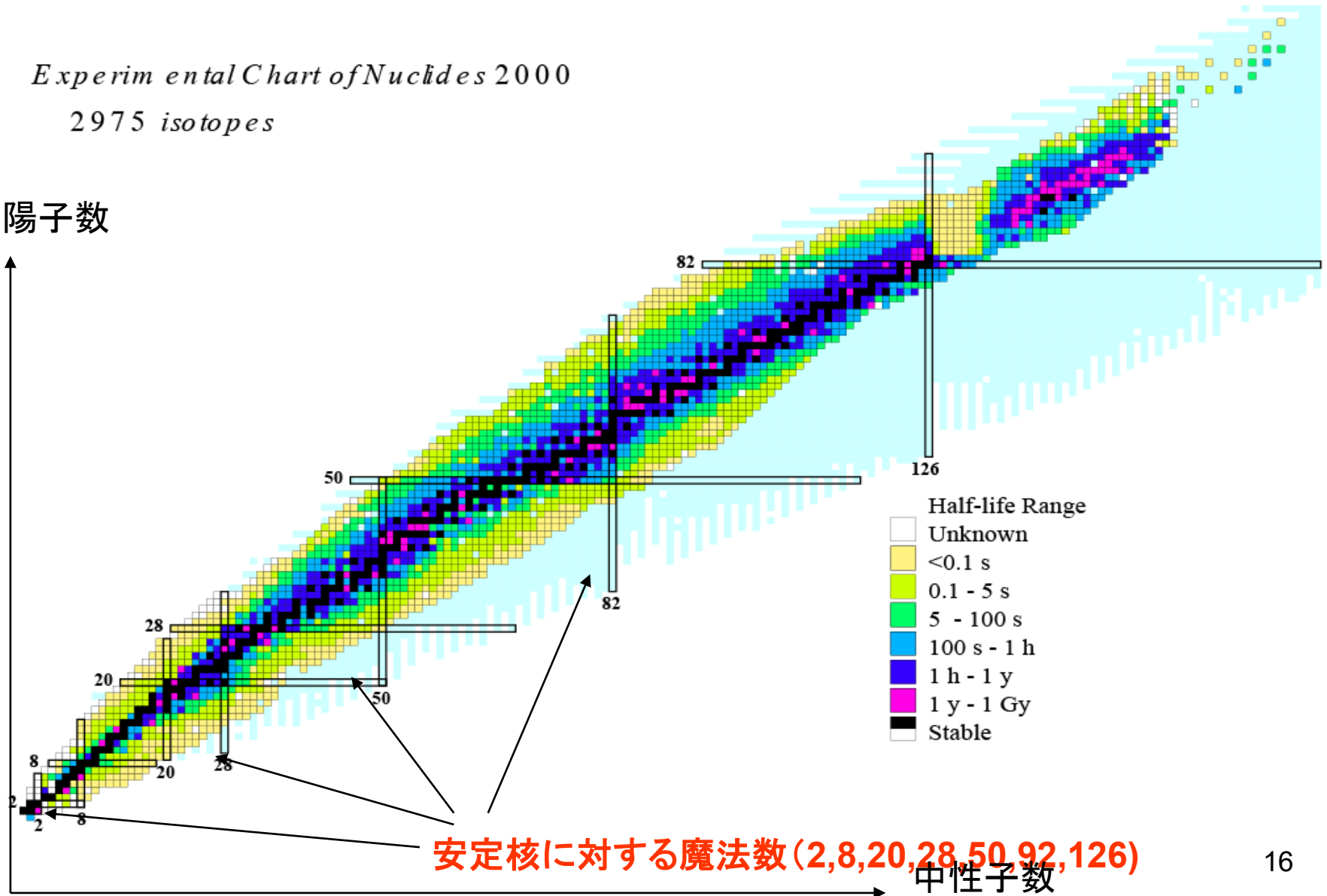


質量 M の同種の2粒子系について、ポテンシャルがゼロとなる相対距離 r_c を用いて、横軸は $x=r/r_c$ 、縦軸は $K_0=\hbar^2/M r_c^2$ を単位とした換算ポテンシャル V/K_0 を示す。

§ 4. 核図表 -周期律表の現代版-

Experimental Chart of Nuclides 2000
2975 isotopes

陽子数



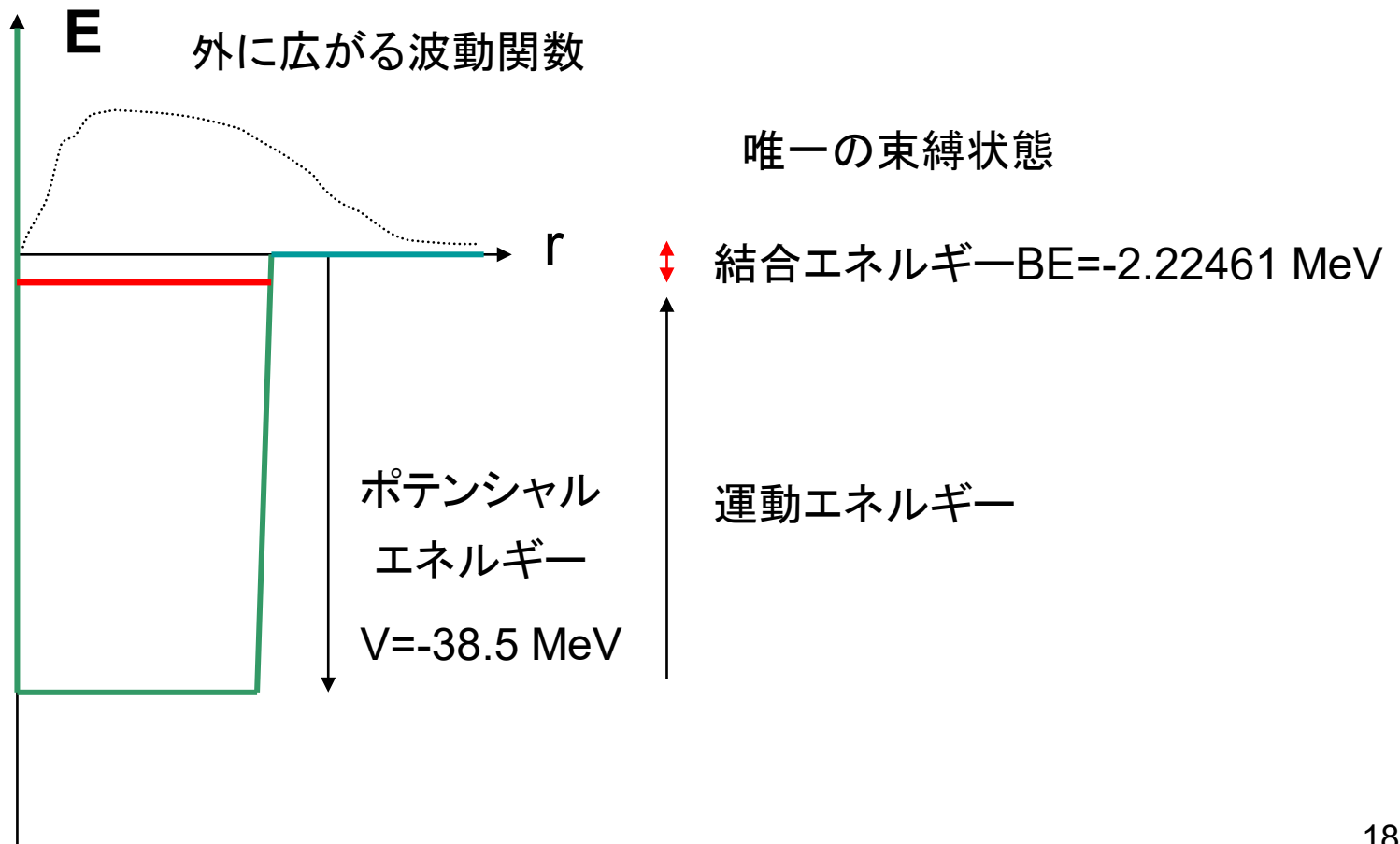
§ 5. 宇宙における原子核にまつわる微妙なしくみ

§ 5.1. 核力の微妙なさじ加減

- **核力が5%弱かったら**、重水素核は安定に存在できない
⇒pp連鎖反応は存在しないことになる
- **核力が数%強かったら**、陽子2個が結合した“ダイプロトン“が安定になる
⇒ビッグバンでは陽子は残存しない。
- ⇒水素がなければ、その後の多様な元素合成は進まないし、水もできない。
- ⇒核力がほんの少し強くても弱くても、地球に存在する形態の生命は 誕生できなかった。

原子核を形づくる力である「核力」の微妙な匙加減

重水素核の束縛状態の微妙さ



§ 5.2 もしもRプロセス (rapid process) で ウランが生成されなかったら？

Fe以上の重い原子核は通常の状態の恒星内部では生成されない。
(←Fe-56 核がもっとも安定な原子核)

「星の進化の最終段階である、超新星爆発により鉄より重い原子核が合成され、宇宙空間にばら撒かれる！」と従来言われてきたが、

2017年8月、宇宙の彼方で起きた連星中性子星の合体により生じた重力波の観測により、「鉄より重い原子核が合成される主な仕組みは、超新星爆発ではなく、連星中性子星の合体による」ということが分かった(「日経サイエンス」2018年1月号. <http://www.nikkei-science.com/page/magazine/201801.html>)

1886年、ベクレルがウラン鉱からの放射能を発見したことが契機として、ラザフォードによる原子核の発見、原子の構造、量子力学への発展をもたらし、今日の科学・技術の礎となった。

⇒もし、自然がU-235、U-238を生成しなかったら、
人類はまだ原子核の存在に気づいていなかったかもしれない。

§ 5.3 生命の源としての元素

原子分子の化学的性質を決めるのは原子番号、

原子番号 = 中性原子の電子数 = 原子核の陽子数

原子分子の安定性の根拠としての**原子核の安定性**

素材としての炭素原子C

炭素原子C = **炭素12原子核** + 電子6個

呼吸に必要な酸素分子

酸素原子O = **酸素16原子核** + 電子8個

§ 5.4 星の内部でC-12核が合成された幸運

2個のHe-4核の共鳴状態が存在する偶然

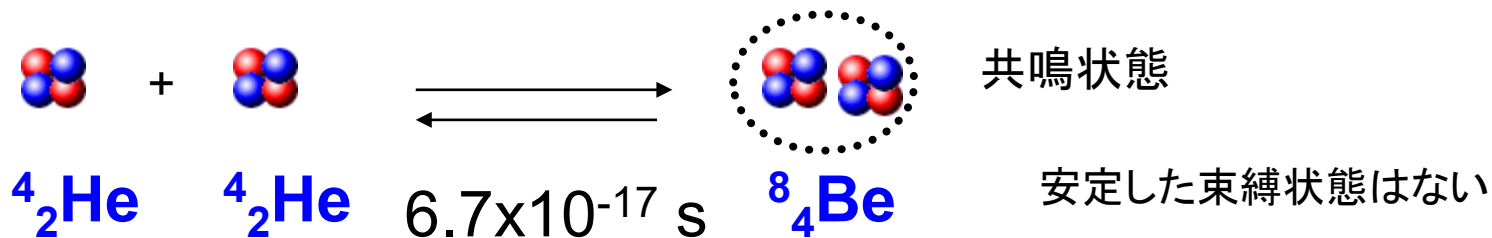
+

C-12核に特殊な励起状態(共鳴状態)が存在する偶然

+

O-16核の励起エネルギーが(C-12+He-4)系のエネルギーよりほんの少し低い(共鳴状態が存在しない)という偶然

§ 5.5 2個の ${}^4_2\text{He}$ 核の共鳴状態が存在する偶然



はかなくもろいBe-8だが
 共鳴状態により
 遭遇する確率が
 1万倍長くなる！

Be8の共鳴状態が存在しない場合
 の2つのHe4が遭遇する時間

$$E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mc^2 \left(\frac{v}{c}\right)^2 \rightarrow v = c\sqrt{\frac{2E}{mc^2}}$$

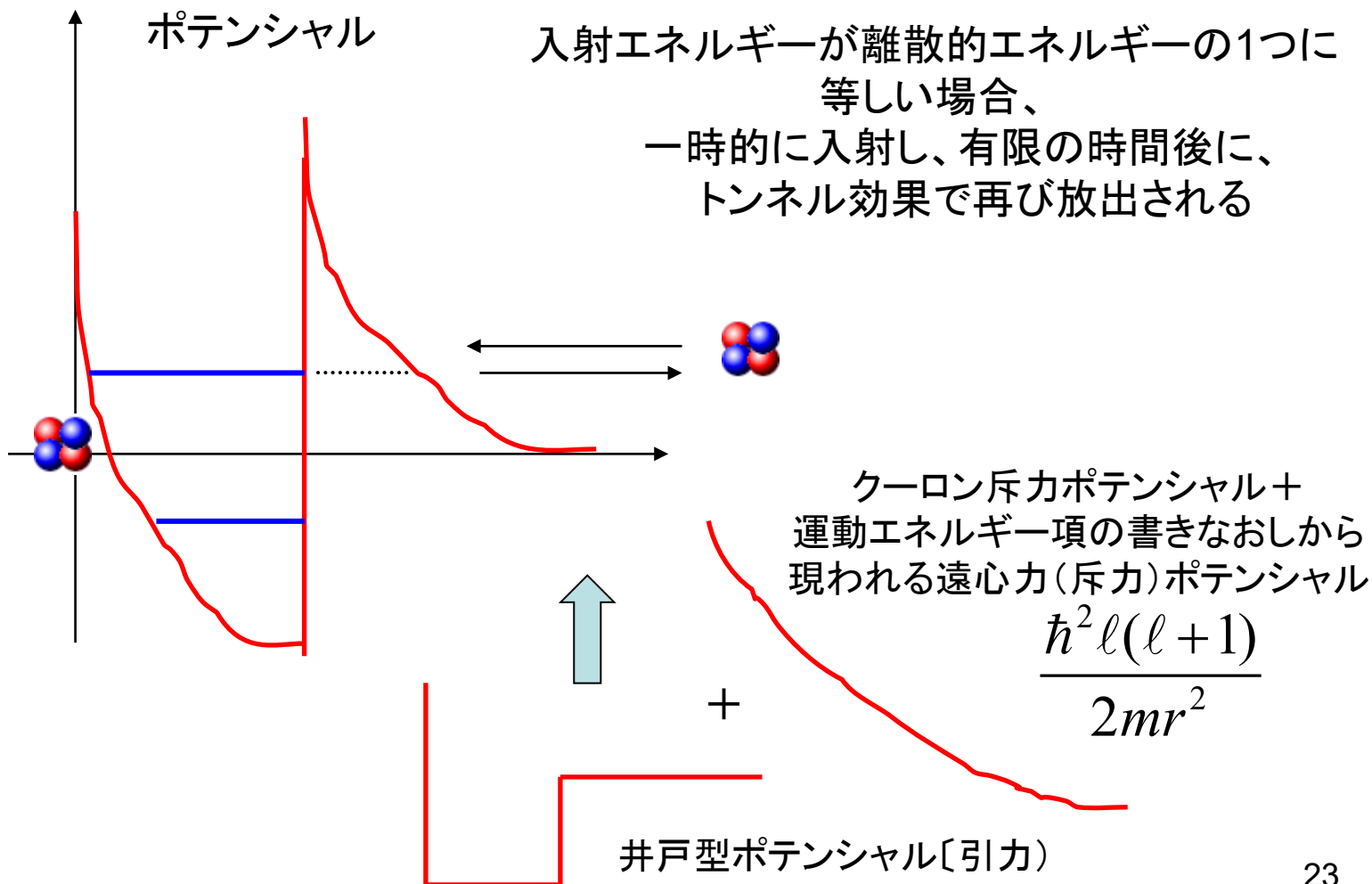
$2R$ 通過する時間 t

$$t = \frac{2R}{v} = \frac{2R}{c} \sqrt{\frac{mc^2}{2E}}$$

$R = 2 \text{ fm} = 2 \times 10^{-15} \text{ m}, E = 0.1 \text{ MeV} = 100,000 \text{ eV}$

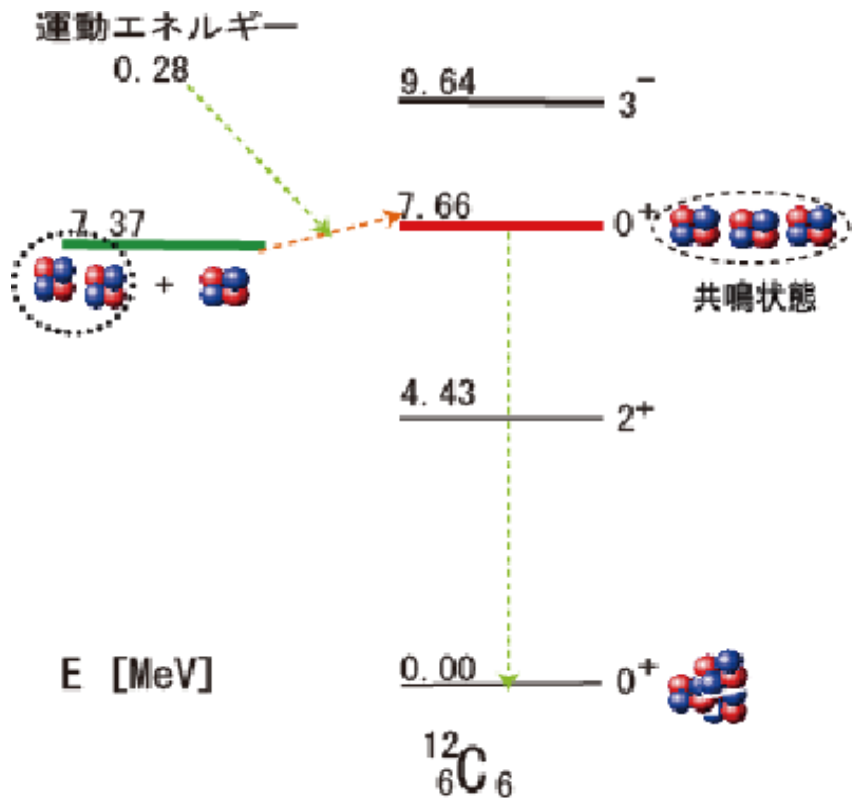
$$\rightarrow t = \frac{2 \times 10^{-15} \text{ m}}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} \sqrt{\frac{4 \times 940 \text{ MeV}}{2 \times 0.1 \text{ MeV}}} = 0.9 \times 10^{-21} \text{ s}$$

共鳴状態—量子力学における—



§ 5.6 ^{12}C 核に特殊な励起状態が存在する偶然

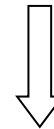
アルファクラスター状態(原子核分子)



重力により恒星内部が高温になる



運動エネルギー増加



^{12}C の共鳴状態に移ることができる

3個目の ^4He が衝突する確率は、 ^{12}C の共鳴状態がない場合に比べて、約100万倍高い

1952 Salpeter suggested

核力、電磁力と重力の絶妙なチューニング

マクロな系の中の粒子の平均の運動エネルギー

分子運動論におけるエネルギー等分配則

$$\frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle = \frac{3}{2} k_B T$$

ボルツマン定数

$$\begin{aligned} k_B &= 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/deg} \\ &= 0.863 \times 10^{-4} \text{ eV/deg} \\ &= 0.863 \times 10^{-10} \text{ MeV/deg} \end{aligned}$$

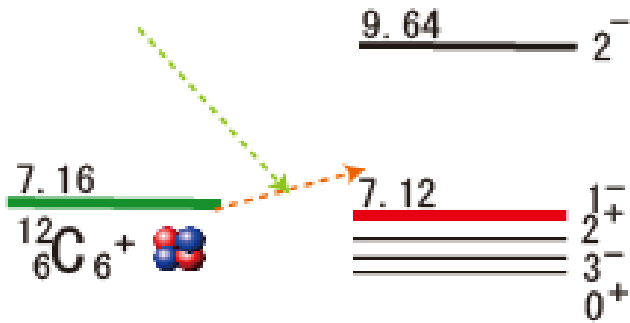
星内部の高温

$$T = 10^8 \text{ deg (1億度)} \rightarrow \frac{3}{2} k_B T = 0.012 \text{ MeV}$$

分子運動論における速度分布則より、
平均運動エネルギーよりも高いエネルギーをもつ粒子も存在する

§ 5.7 ^{16}O 核の励起エネルギーが($^{12}\text{C} + ^4\text{He}$)系のエネルギーよりほんの少し低いという偶然

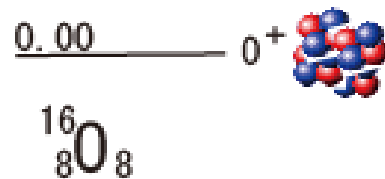
運動エネルギー



恒星の中で、粒子の運動エネルギーをマイナスにはできない

もし、 ^{16}O 核に共鳴状態があれば、 ^{12}C 核はほとんど ^{16}O 核に転化してしまうことになる！

E [MeV]



§ 5.8 なぜこれらの微妙な偶然が重なったのか？

- 微妙な調節をする存在（設計者、神）がある？
- 人間という知性体が誕生、進化するように宇宙はある？
（人間原理という考え方）
- 単純に偶然である？

宇宙と星と私たち(現代科学の観点)

- 私たちが吸う息には、
星の内部奥深くの灼熱の炉でつくりだされた原子
が含まれている。
- 摘む花のひとつひとつには、
太陽の十億倍も明るい閃光を発し、星が爆発したとき
に宇宙に放り出された原子
が含まれている。
- 読む本の一冊一冊には、
星から星へと吹く風に運ばれ、想像を絶する空間と時間
の隔たりを乗り越えて地球にやってきた
原子が含まれている。

マーカス・チャウン「僕らは星のかけら」(無名社、2001年、ソフトバンク文庫、2005年)より

参考文献

- 1) 池内 了「宇宙と自然界の成り立ちを探る」サイエンス社
- 2) マークス・チャウン「僕らは星のかけら一原子をつくった魔法の炉を探して」
無名社、2001年、ソフトバンク文庫、2005年
- 3) P. C. W. ディビス「魔法の数1040」地人書館
- 4) 谷畑勇夫「宇宙核物理学入門」講談社ブルーバックス
- 5) ビデオテープ「元素の起源を探る」（理研編）における望月洋子氏の解説
- 6) F. J. Dyson, Energy in the universe, in Scientific
American, Vol. 225, (1971), 50
- 7) M. Livio, D. Hollowel, A. Weiss, and J. W. Truran, Nature,
vol. 340, (1989), 281
The anthropic significance of the existence of an excited state of ^{12}C