

現代物理学基礎特論

1日目:原子核物理学と私たち

講義1:核力と原子核構造の不思議

講義2:魔法数の生成、消滅

講義3:宇宙におけるファインチューニング

原子核現象と人間との係わり合い

電力の30－40%は原子力発電(＝核分裂エネルギー発電！)

世界には核兵器保有国；米国、ロシア、英国、フランス、中国、インド、パキスタン、北朝鮮、(イスラエル)、...

総爆発力は通常爆弾に換算して、人間一人当たり、2－3トン相当！！

地球内部の主要な熱源としての地殻中の放射性同位元素の崩壊熱

→地球磁場の原因の可能性(磁場ができるためには電磁流体の存在とその運動のエネルギー源が必要)

体内の放射性同位元素

太陽のエネルギー源は何か？

太陽の年齢は約45億歳、今後約50億年もエネルギーを放出する理由は何か？

原爆消えぬ心の傷

(山田菜の花)



長崎での救援活動を振り返る坂本由己雄さん―宗像市の自宅

45年8月9日、佐賀市の旧
制佐賀高1年だった坂本さん
は、動員先の長崎県川棚町
の川棚海軍工廠で働いてい
た。午前11時2分。工場へ鋭
い光が差し込み、坂本さんた
ちは驚いて外へ飛び出した。
大村湾を挟んで約30kmの長
崎市上空に、キノコ雲があっ
た。「火薬が爆発したんかあ
な」。仲間とろわさし合っ
た。

翌夕、「佐高救援隊」として140人の同級生と船で対岸へ渡り、長崎市へ向かう。道の両端に遺体が積み重なり、電柱が立ったまま燃えていた。長崎から逃げてくる人たちは大けがを負っていた。

理系の坂本さんには、質量

少年の名忘れ 遺族探せず

をエネルギーに変えるところから、
いい兵器になるという知識があった。
当時は原爆だとはわからなかった。
然ながら、周囲の惨状に接して、
「米国にはこんな兵器を作れる
学者がいるのか」と国力の差を感じた。

11日朝、乾パン²2枚の朝食を済ませると、三菱重工長崎兵器製作所で遺体の収容作業にあたった。4人1組で架梁に乗せた。焼けただれた体をつかむと、皮膚がずるりとむける。坂本さんは灯火管制用の黒い布をかぶせて収容した。これだと遺体の顔も見ないで済んだ。

少年もその一人だ。工場の
中で両手に丁真を持ち、うつ
ぶせに倒れていた。外傷はな
かった。背は150センチほど。
担架に乗せようとするとき榮
養失調でやせこけた体は軽
かった。胸には名前と「佐
賀県立商3年」が書かれた
名札が縫いつけられていた。
同郷の少年の死に胸が痛み、
必死に名前を覚えた。形見代
わりに、少年の最期を彼の家
族へ話してあげるためだっ
た。

終え 13
てし
取り
害調
日に
静ま
を浮
わつ
放送
戦
あの
たこ
なり
柄な
年の
の記
少年
だ。
く
な
よう
妻や
さな
毎
典の
で手
同じ
入
ドは
忘れ
消え

地球の熱収支における放射性崩壊熱の役割

表1 地球の熱エネルギー収支

	受熱量・放熱量 (単位 10^{20} ジュール・年 ⁻¹)	45億年の合計 (単位 10^{20} ジュール)
[地球外部との熱収支]		
・地球が受け取る熱量 太陽からの放射(太陽定数)	54,000	
・地球が放射する熱量 大気や雲などによる反射(アルベド=0.34) 6000K放射	16,000	
大気や地球表面からの放射 300K放射	38,000	
[地球内部からの熱流量]		
・発熱量 天然放射性核種の壊変エネルギー	~10	~45
地球形成時の微惑星集積による運動(重力)エネルギー	9.5	10
金属殻(コア)形成の重力エネルギー ⁽¹⁾		≤20
・流出量 火山活動など	0.3	0.14
温泉・地熱など	0.02	0.009
地震波動など	~0.005	0.003
地殻熱流量として ⁽¹⁾	9.5	(5~30)

(1) 入山(1973)による推定

表2 天然に存在する放射性核種

●放射壊変系列に属さない主な天然放射性核種

原子記号	存在比%	半減期	壊変形式	エネルギー(MeV)
⁴⁰ K(カリウム)	0.0117	1.28×10^9 年	β ⁻	1.33

成ては、このよ
程度放射能が冷
た状態の微惑星
微惑星の生成時
地球の年齢は、
一方、ウラン2
5 (U 235)、
2、カリウム40
45億年、7億年、
地球生成時と45
能レベルを比べ、
列(放射壊変系列
とんど変わらず、

生命誕生当時の 自然放射線レベル[†]

新しく行われた解析 (Andrew Karam, 1-716-275-1473, Andrew_Karam@URMC.Rochester.edu) により、今日の地球上の自然放射線レベルは、生命が初めて現れたときと比べてずっと低いことが明らかになった。そして、あらゆる生命体——原始的な生命が最初に発達させたものと、非常によく似た突然変異修復メカニズムを備えている生命体——は現在よりもずっと大きなバックグラウンド放射線に対処するために、そのメカニズムをかつて身につけたのだということを示唆している。現在、人間は自然放射線源から年間360mrem (ミリレム) の放射線量を、そして人工的な放射線源から典型的に約63mremの放射線量を受けている。おそらく意外に思われるだろうが、自然放射線の主要な源はわれわれの体内にある——細胞間でやり取りされる信号の発生など、さまざまなことに必須の栄養素、カリウムという形で存在している。自然のカリウム源には必ず、放射性のカリウム ^{40}K がいくらか含まれている。しかし、生命が初めて誕生したのがおよそ40億年前—— ^{40}K の半減期のおよそ3倍前——ということは、今日カリウムから受ける放射線量は、40億年前のおよそ8分

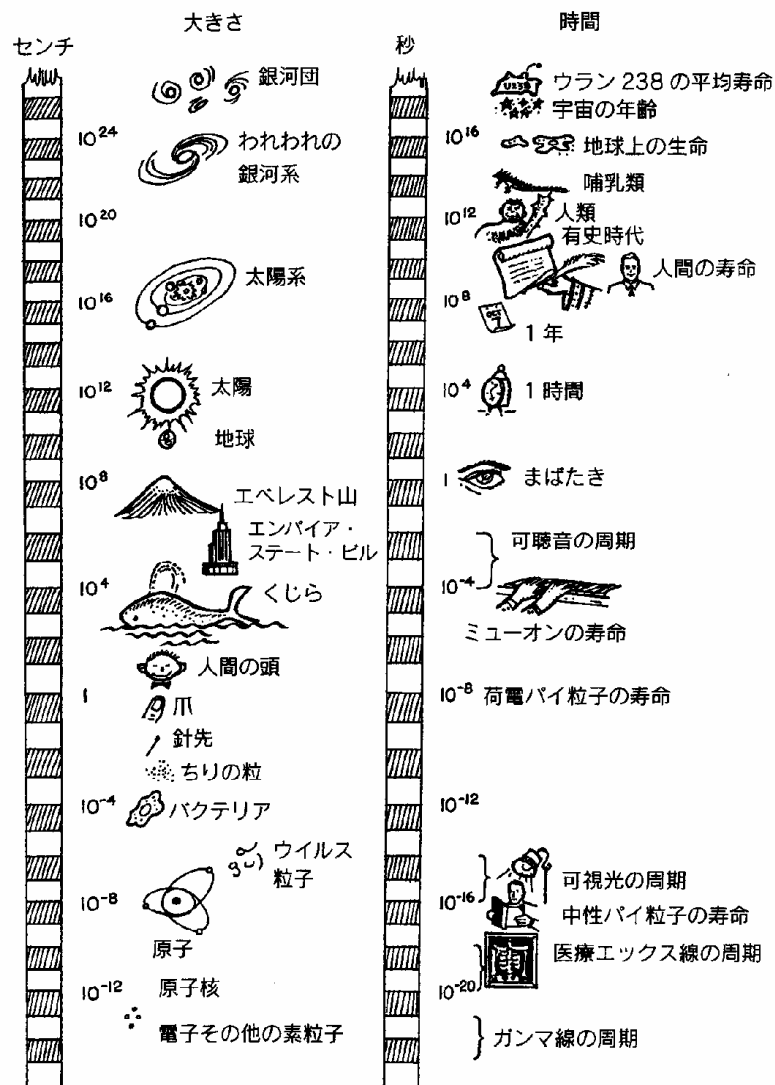


図 I-1 宇宙における空間と時間の物差し

電子の電荷質量比

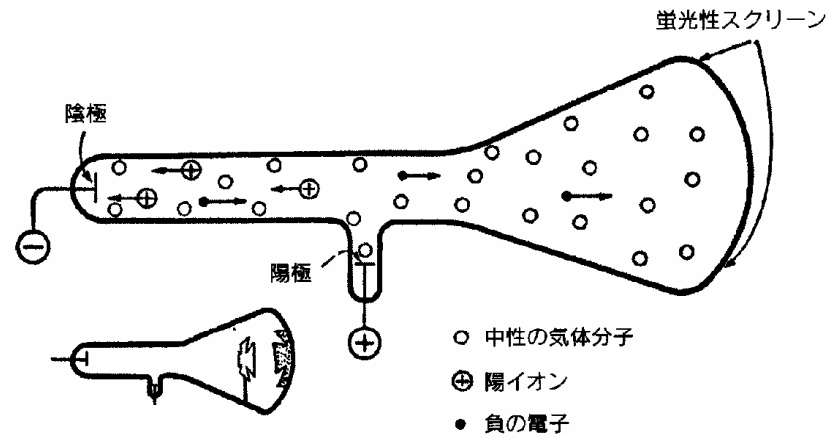


図 2-2 希薄な気体中を通過する電流

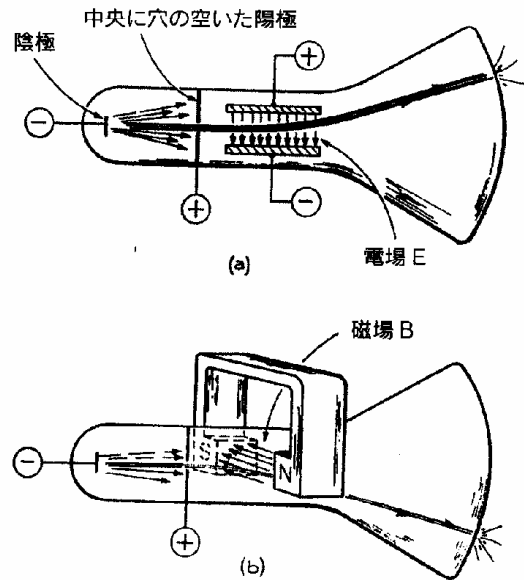


図 2-3 電子の速度と質量を測定する J. J. トムソンの方法。(a) 電子ビームの電場による曲がり、(b) 磁場による曲がり。

電子の電荷と質量

トムソンのこの仕事は、アメリカの著名な物理学者ロバート・ミリカの研究への足がかりとなった。ミリカンは、図 2-4 に描かれたような

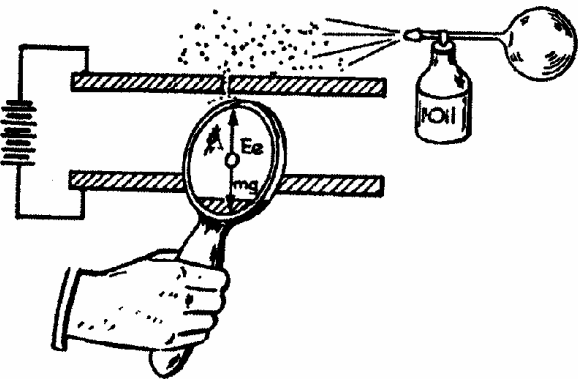


図 2-4 電荷を測るミリカンの実験装置の概略図

陽極線と同位体

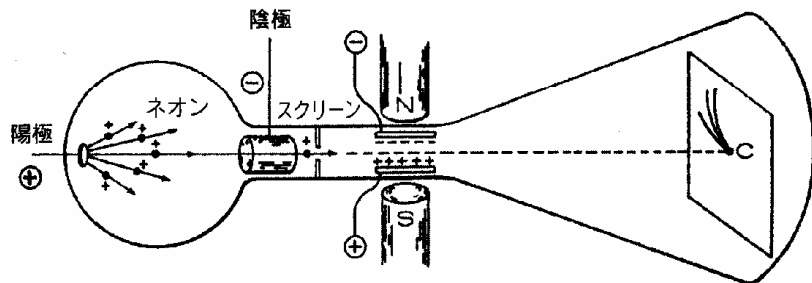


図2-5 同位体の発見につながった実験装置。ネオンの陽イオンはスクリーンのスリットを通過したのち電場によって加速され、細いビームになる。ビームは電場と磁場によって曲げられ、管内のはるか右端にある蛍光スクリーン上に届く。もしすべてのネオンイオンが速度は違っても同じ質量をもっていれば、スクリーン上には放物線が1本だけ描かれるだろう。しかし実際には、質量20、21、22にそれぞれ対応する3本の放物線があった。

ラザフォードの原子モデル

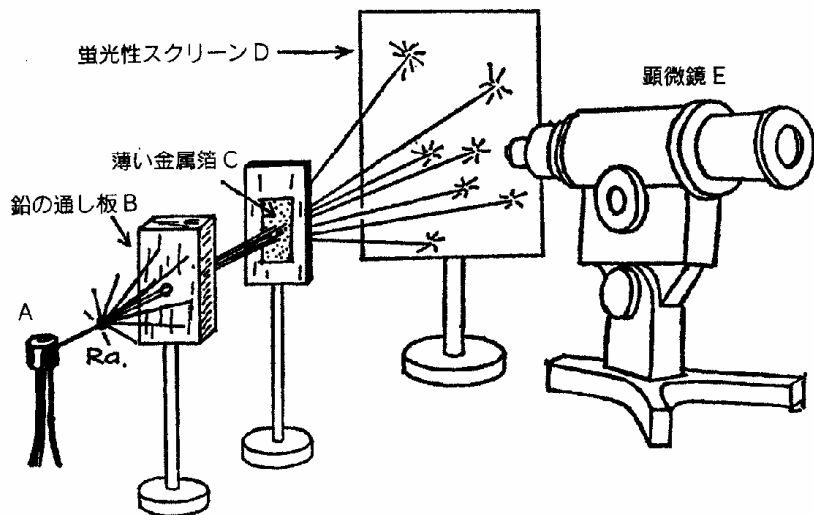


図2-7 ラザフォードが「原子衝突」の実験で用いた装置

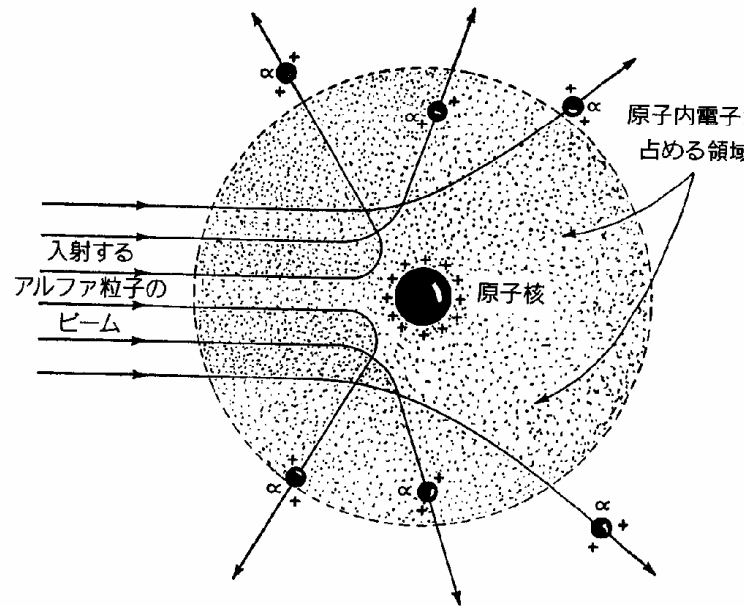


図2-9 アルファ粒子の軌道は原子核の正電荷によって曲げられる。

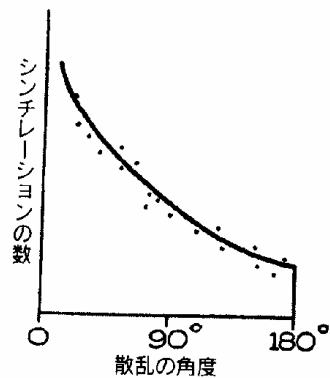
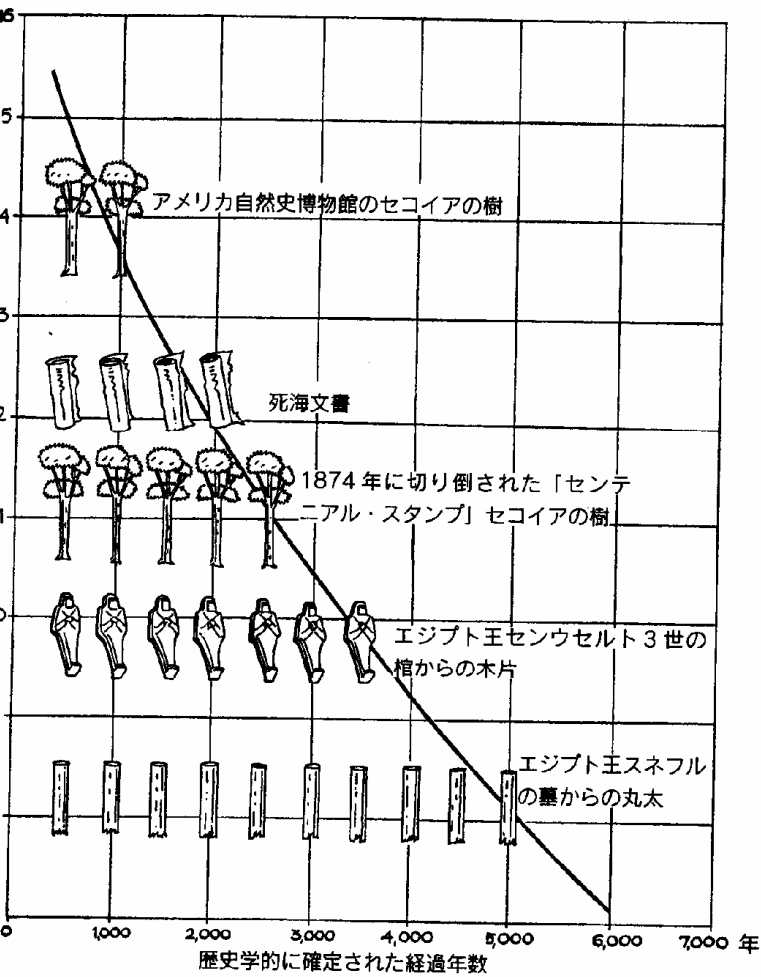


図2-8 アルミニウム中のアルファ粒子の散乱についてのグラフ。散乱されるアルファ粒子の数が散乱の角度に依存していることがわかる。

放射性崩壊の法則とその応用例



リビー博士によって測定された、さまざまな古い物体の炭素14による放射能年齢の関数として表した曲線。図形ひとつが500年を表す。

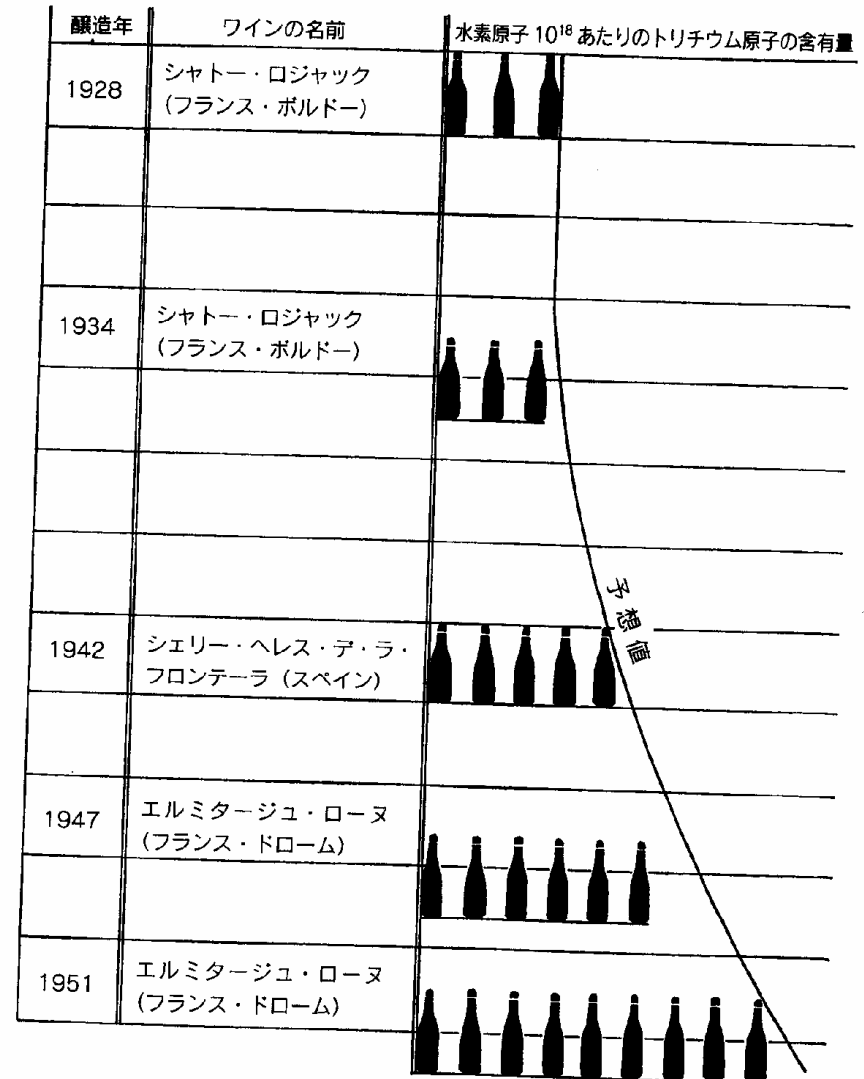


図6-4 いろいろなワインに対する放射能とその年齢の関数。計算結果と予測とが一致している。

講義1：核力と原子核構造の不思議

ビッグバン宇宙

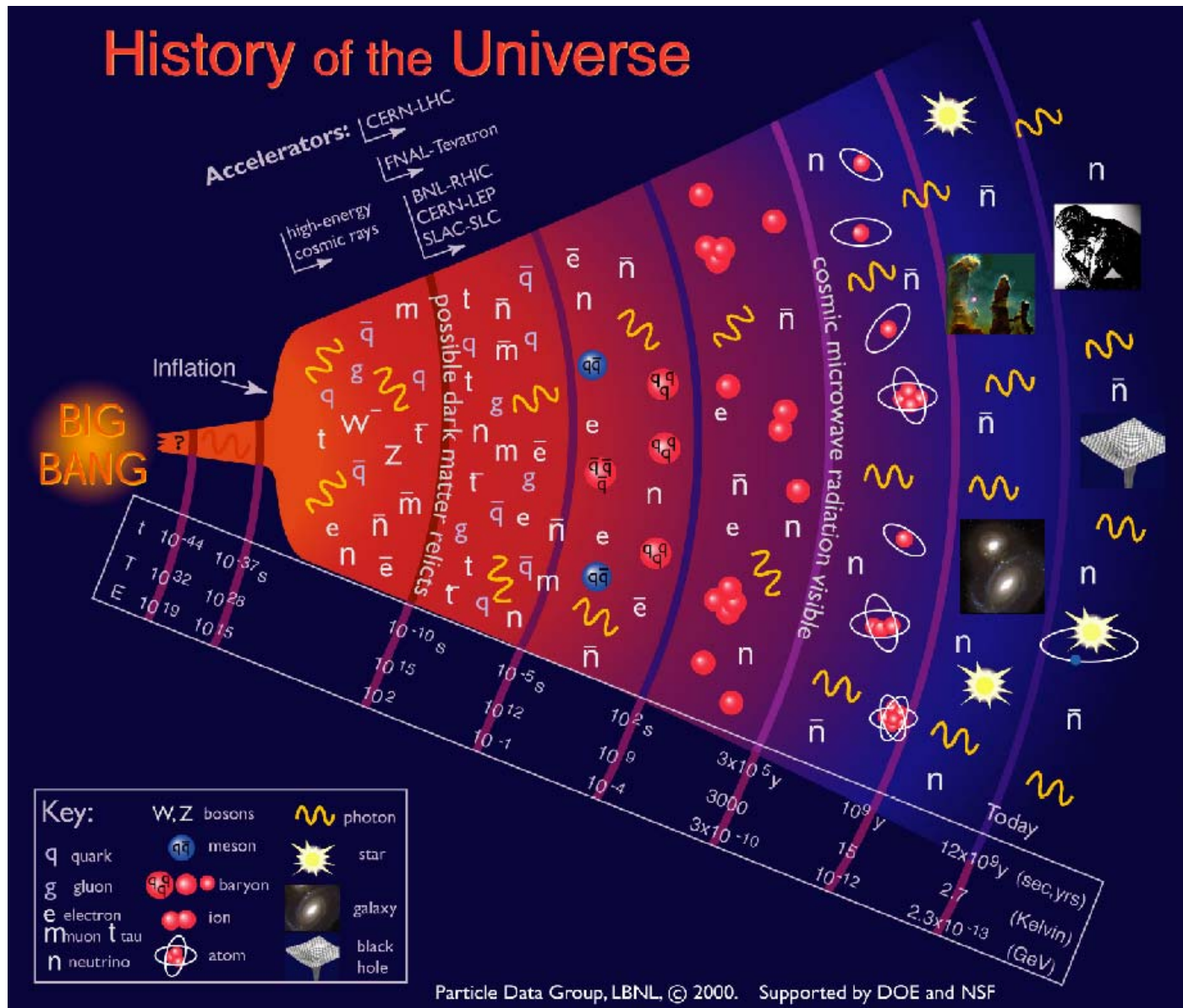
基本的相互作用の分化

湯川理論から現在も続く核力研究

独立粒子的運動、振動、回転、核分裂

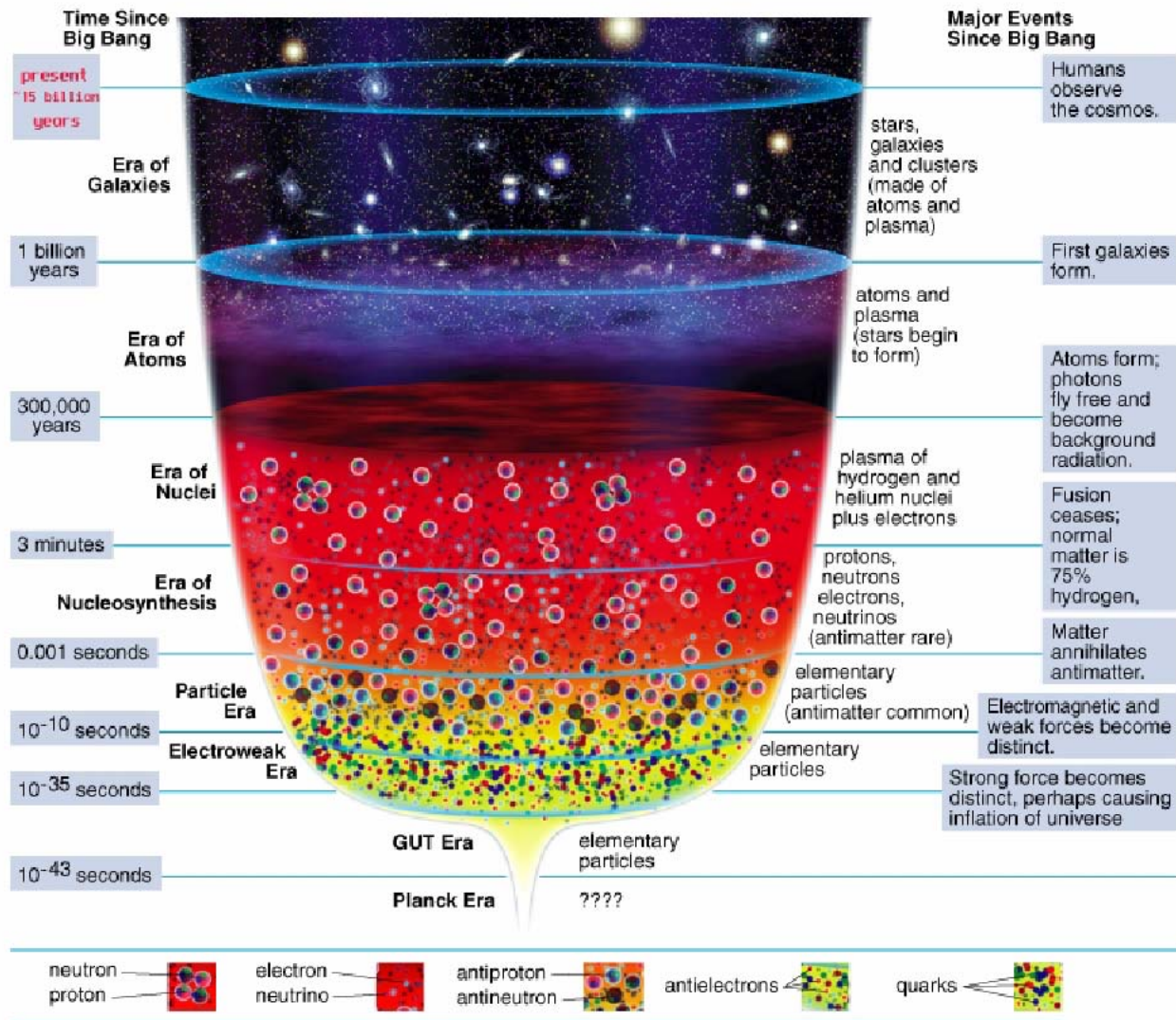
原子炉、核兵器

宇宙の歴史(進化)



宇宙の進化

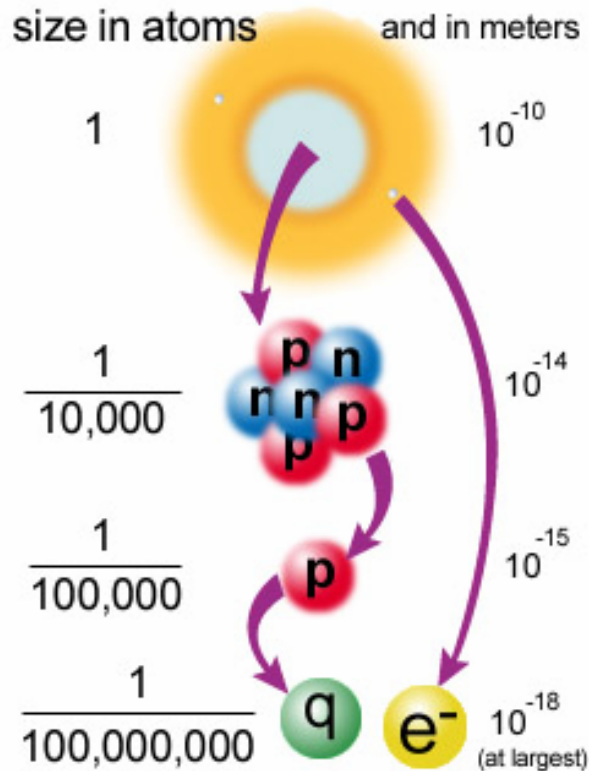
時間の
進行



© Addison-Wesley Longman

空間サイズ

原子と原子核の大きさ



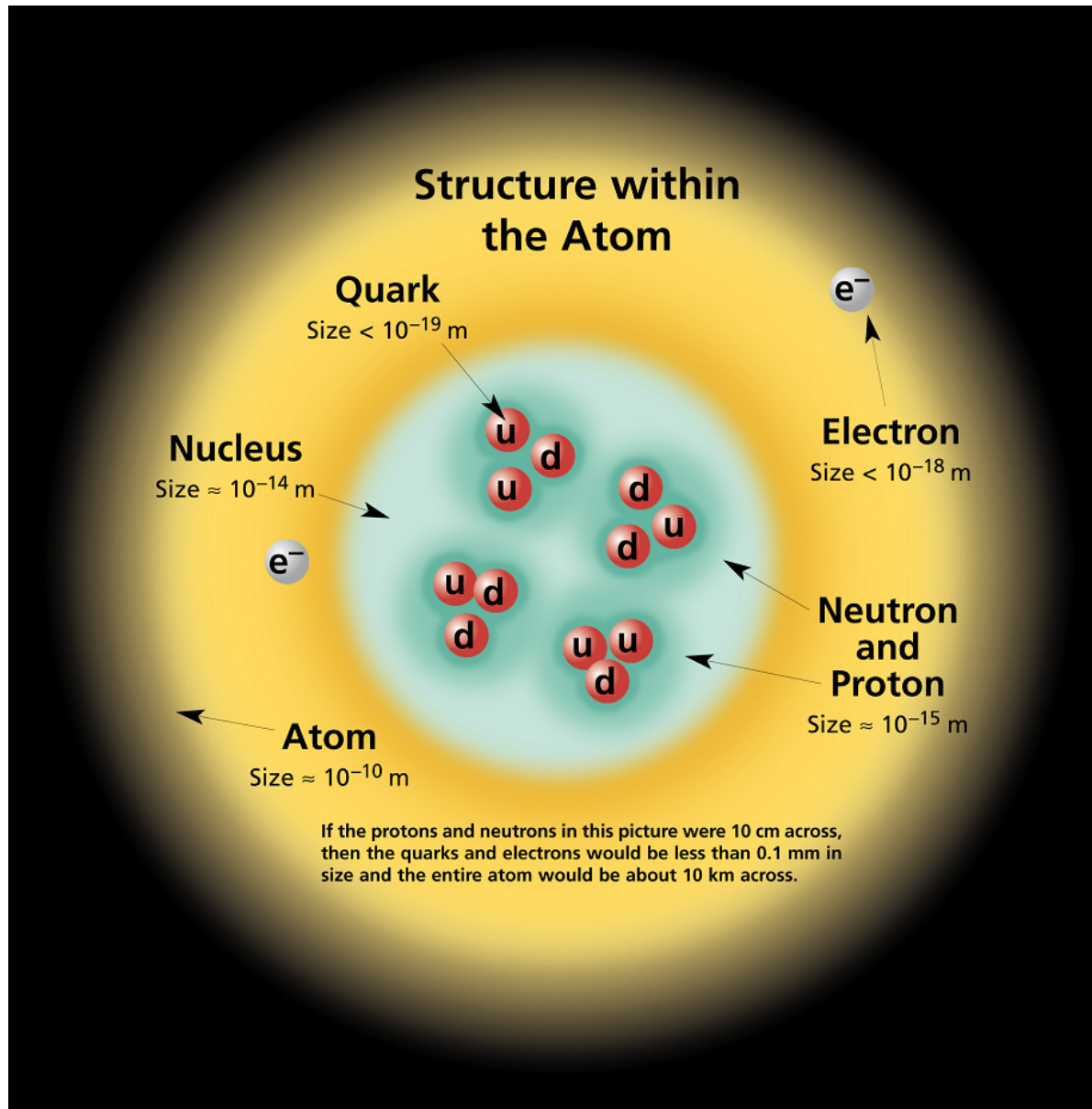
われわれの宇宙には数千億個の銀河が含まれており、1つの銀河には数千億個の恒星が含まれている。

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 ($10^{10} - 10^{12}$ 個) の原子を含む

小宇宙としての人体

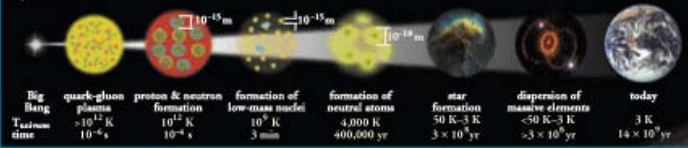
原子の中の小宇宙としての原子核



Nuclear Science

Expansion of the Universe

After the Big Bang, the universe expanded and cooled. At about 10^{-35} second, the universe consisted of a soup of quarks, gluons, electrons, and neutrinos. When the temperature of the Universe, $T_{universe}$, cooled to about 10^9 K, this soup coalesced into protons, neutrons, and electrons. As time progressed, some of the protons and neutrons formed deuterium, helium, and lithium nuclei. Still later, electrons combined with protons and these low-mass nuclei to form neutral atoms. Due to gravity, clouds of atoms contracted into stars, where hydrogen and helium fused into more massive chemical elements. Exploding stars (supernovae) form the most massive elements and disperse them into space. Our earth was formed from supernova debris.

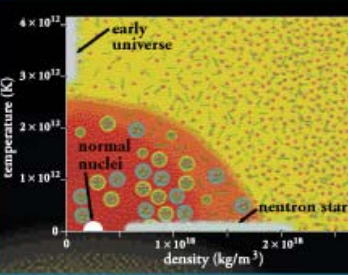


Nuclear Science is the study of the structure, properties, and interactions of the atomic nuclei. Nuclear scientists calculate and measure the masses, shapes, sizes, and decays of nuclei at rest and in collisions. They ask questions, such as *Why do nucleons stay in the nucleus?* What combinations of protons and neutrons are possible? What happens when nuclei are compressed or rapidly rotated? What is the origin of the nuclei found on Earth?

Legend

- electron (e^-)
- proton
- neutron
- quark
- positron (e^+)
- neutrino (ν)
- antineutrino ($\bar{\nu}$)
- gluon field
- gluon
- photon (γ)

Mass number 14
Atomic number 6
Neutron number 8
Nucleon number = $A - Z$



Phases of Nuclear Matter

Nuclear matter can exist in several phases. When collisions excite nuclei, individual protons and neutrons may evaporate from the nuclear field. At sufficiently high temperature or density, a gas of nucleons (red background) forms. At even more extreme conditions, individual nucleons may cease to have meaningful identities, merging into the quark-gluon plasma (yellow background). Current data provide hints that physicists have glimpsed the quark-gluon plasma.

Unstable Nuclei

Stable nuclei form a narrow white band on the Chart of the Nuclides. Scientists produce unstable nuclei far from this band and study their decays, thereby learning about the extremes of nuclear conditions. In its present form, this chart contains about 2500 different nuclides. Nuclear theory predicts that there are at least 4000 more to be discovered with $Z \leq 112$.



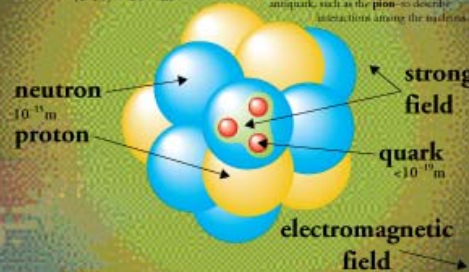
Radioactivity



Radioactive decay transforms a nucleus by emitting different particles. In alpha decay, the nucleus releases a ^4_2He nucleus—an alpha particle. In beta decay, the nucleus either emits an electron and antineutrino (for a positron and neutrino) or captures an atomic electron and emits a neutrino. A positron is the name for the antiparticle of the electron. Antimatter is composed of antiparticles. Both alpha and beta decays change the original nucleus into a nucleus of a different chemical element. In gamma decay, the nucleus lowers its internal energy by emitting a photon—a gamma ray. This decay does not modify the chemical properties of the atom.

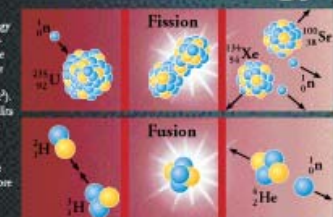
The Nucleus

(1–10) $\times 10^{-14}$ m



In an atom, electrons orbit around the nucleus at distances typically up to 10,000 times the nuclear diameter. If the electron cloud were shrunk to scale, the atom would cover a small room.

Nuclear Energy



In the early stages of stellar evolution of our sun and other stars, hydrogen fuses to form helium, releasing energy in the form of photons (light) and neutrinos. During the later stage of stellar evolution, more massive nuclei build up to and beyond uranium are synthesized by fusion. By measuring the number of neutrinos that come from the Sun, scientists recently have demonstrated that neutrinos must have a mass greater than zero.

Chart of the Nuclides

The Chart of the Nuclides presents in graphic form all known nuclei with atomic number, Z , and neutron number, N . Each nuclide is represented by a box colored according to its predominant decay mode. Magic numbers (N or $Z = 2, 8, 20, 28, 50, 82$ and 126) are indicated by a rectangle on the chart. They correspond to major closed shells and show regions of greater nuclear binding energy.



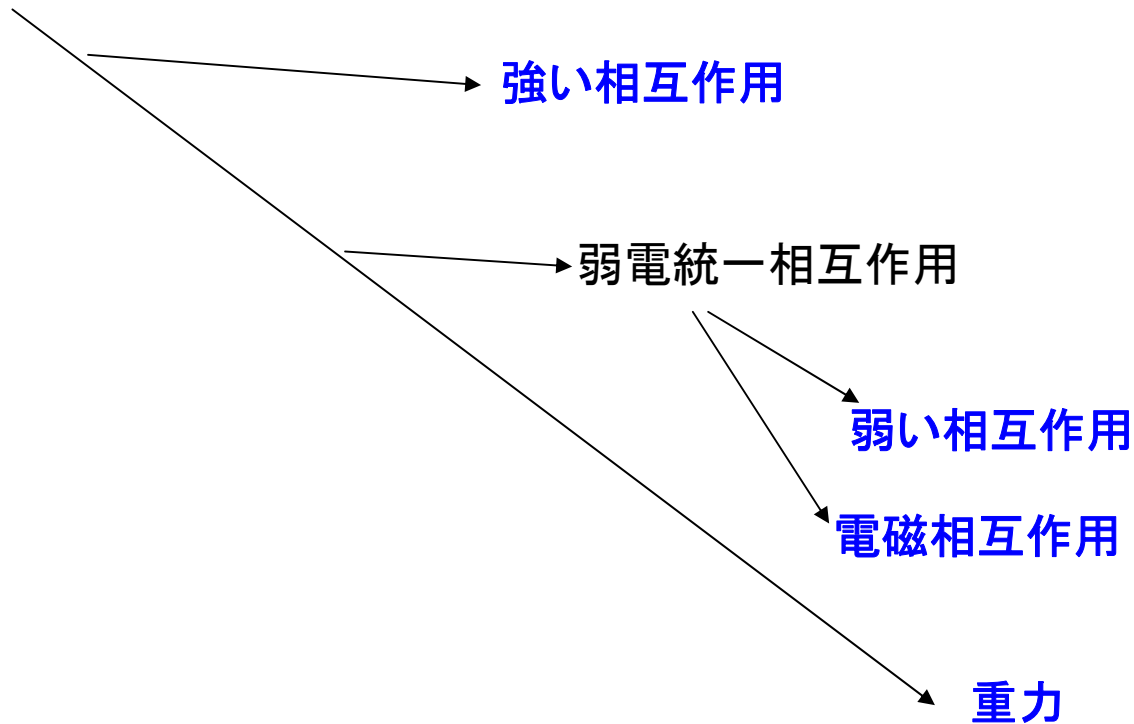
www.CPEPweb.org

Applications



ビッグバン宇宙から**基本的**相互作用の分化

大統一相互作用



力→相互作用→基本的相互作用と複合的相互作用

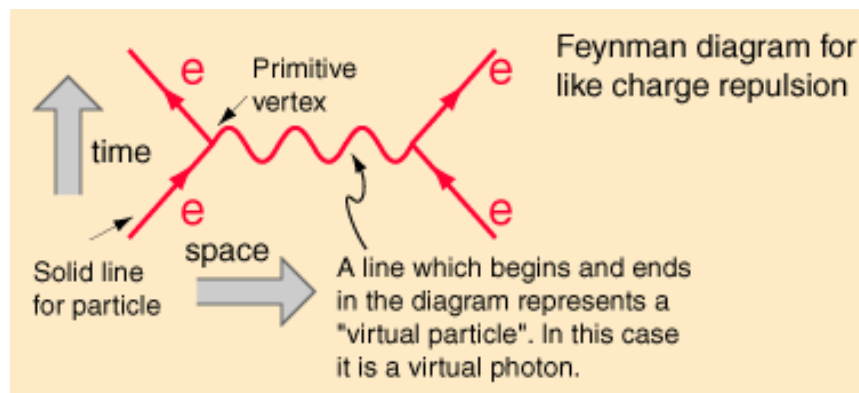
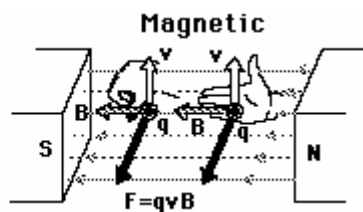
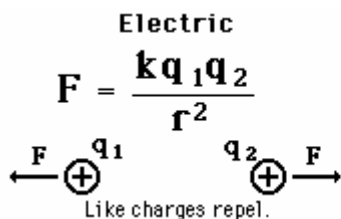
複合的相互作用は基本的相互作用の集積効果として生じる

基本的相互作用と交換力の概念 (場の量子論)

- (1) ある粒子を2つの粒子間に交換することにより相互作用が生じる
- (2) 相互作用の到達距離は交換される粒子の質量の逆数に比例

電気力の場合:

交換される粒子は光子 (photon)



重力

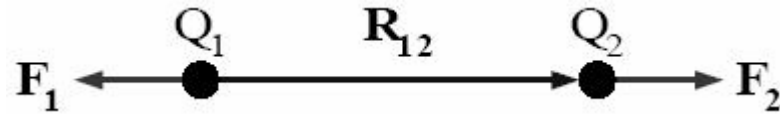
$$F_{\text{gravity}} = \frac{G m_1 m_2}{r^2} \quad \text{where} \quad G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 / \text{kg}^2$$

交換される粒子：重力子(graviton)の質量はゼロ、まだ発見されていない

電氣力

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{|\mathbf{r}|^3} \mathbf{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{|\mathbf{r}|^2} \hat{\mathbf{r}}$$

where



$\mathbf{F}$ is the electrostatic force vector,

q_1 is the charge on which the force acts,

q_2 is the acting charge,

$\mathbf{r} = \mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2$ is the distance vector between the two charges,

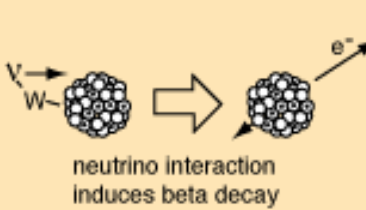
$\mathbf{r}_1$ is position vector of q_1 ,

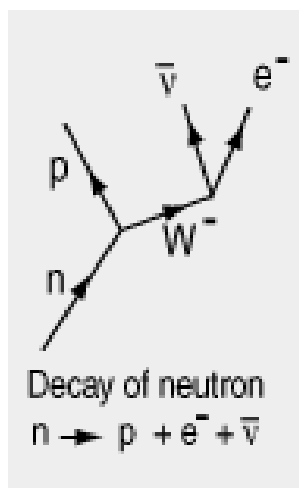
$\mathbf{r}_2$ is position vector of q_2 , and

$\hat{\mathbf{r}}$ is a unit vector pointing in the direction of $\mathbf{r}$.

電氣力 + 磁氣力 $\Rightarrow$ 電磁力

弱い相互作用

<i>Weak</i>	 neutrino interaction induces beta decay	Strength 10^{-6}	Range (m) 10^{-18} (0.1% of the diameter of a proton)	Particle Intermediate vector bosons W^+ , W^- , Z_0 , mass > 80 GeV spin = 1
-------------	--	-----------------------	---	--



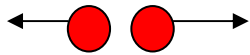
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hph.html>

左右非対称性(Chirality)の起源の1つ？

自由空間における核力、2核子系の不思議(1)

● 陽子
● 中性子

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) 電氣的反発力が働く

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

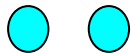
4) 同種の粒子は固有スピンの向きは反対になる(基底状態では)

↑ ↓ ($S=0$) 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

自由空間における核力、2核子系の不思議(2)

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。

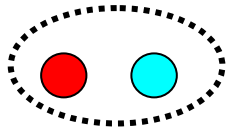
$S=0$ では核力のテンソル成分はゼロ

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。

自由空間における核力、2核子系の不思議(3)

陽子・中性子系(重陽子)のみが安定！



理由

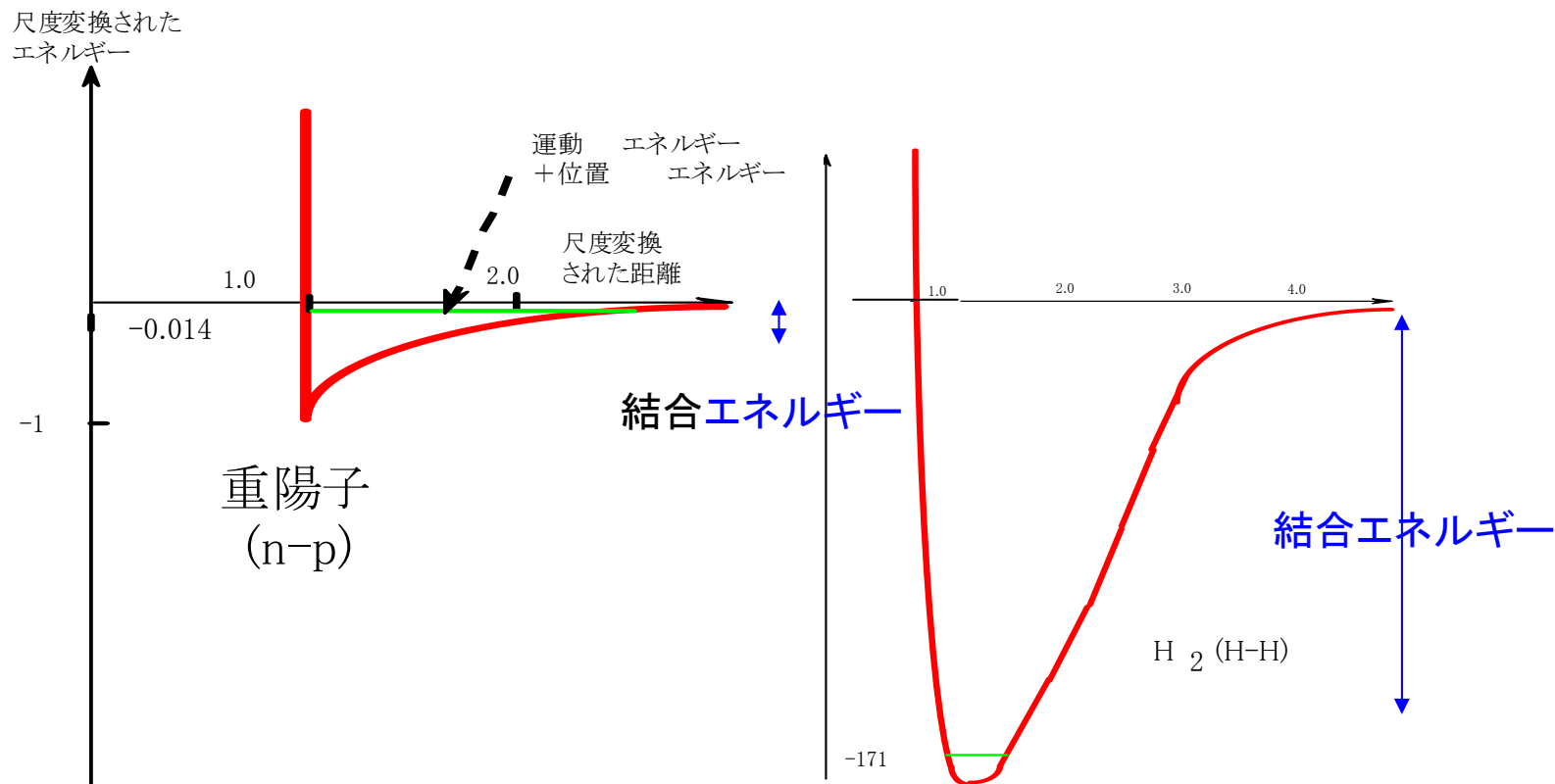
- 1) 核力(の引力部分)は短距離でしか作用しない
- 2) 2粒子が狭いところに閉じ込められると(不確定性関係により)運動エネルギーが大きくなり、結果的に束縛エネルギーが減少
- 3) 異種の粒子は固有スピンの向きは同じ向きも可能
↑ ↑ ($S=1$) パウリの排他原理は働かないため。

$S=1$ 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。

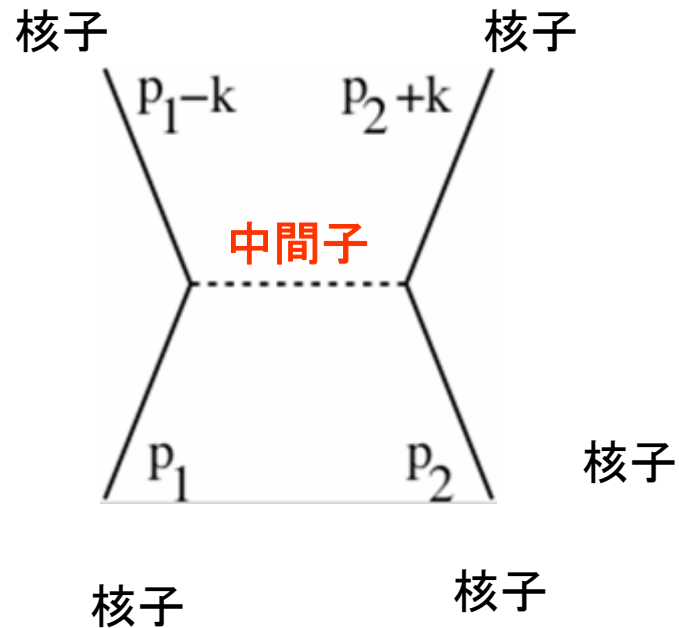
核力は強いが結合力は弱い原子核

-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。

核力と湯川ポテンシャル



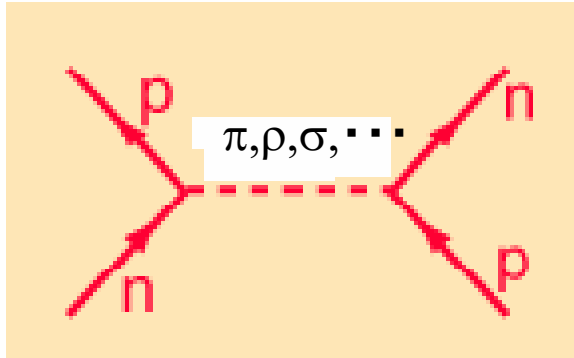
Yukawa potential

$$V(r) = -g^2 \frac{e^{-mr}}{r}$$

類似；

誘電体内の電気力のポテンシャルとしての
遮蔽されたクーロン・ポテンシャル

中間子交換力としての核力



質量(到達距離)の異なる中間子の交換

$\pi, \rho, \sigma, \dots$

中心力成分

短距離に強い斥力、

中間距離に強い引力、

遠距離は π 中間子1個の交換による

非中心力(テンソル力)

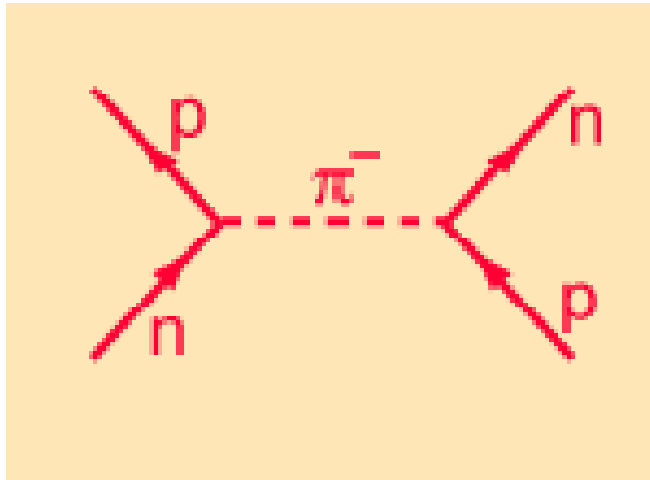
2つの微小磁石間の力や、

分子間のファンデアワールス力に類似

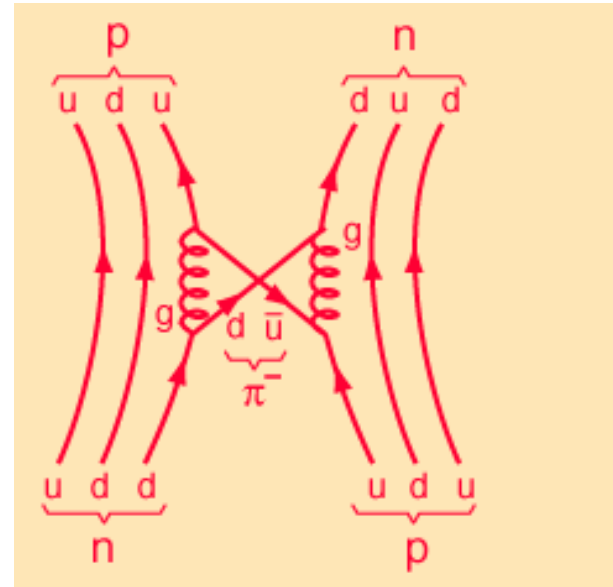
量子状態(スピンなど)への依存性

核力の二つの見方

核子(p,n)・中間子(π)による見方



クォーク(q)・グルオン(g)による見方



Yukawa potential

$$V(r) = -g^2 \frac{e^{-mr}}{r}$$

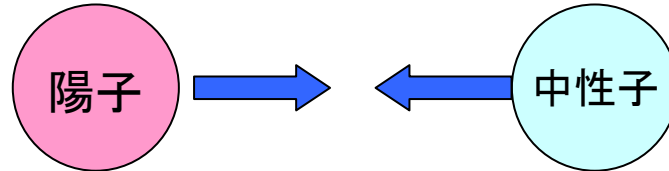
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hph.html>

類似；

誘電体内の電気力のポテンシャルとしての
遮蔽されたクーロン・ポテンシャル

湯川「中間子論」を素粒子から説明

湯川秀樹博士の中間子論による核力の説明(1935年)

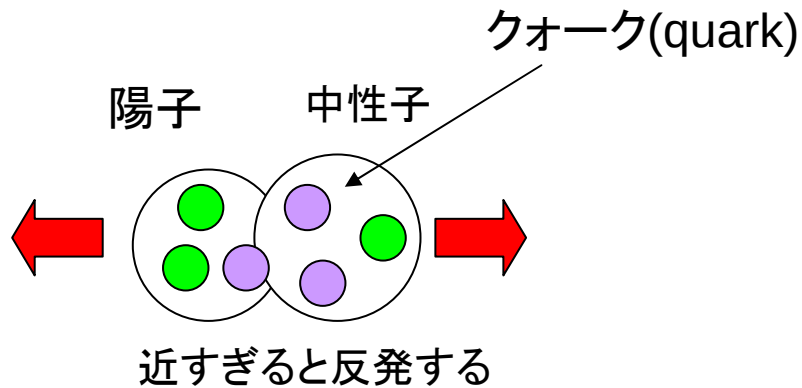


当時は未知の中間子の存在を
予言して説明し、1949年に
発見された！

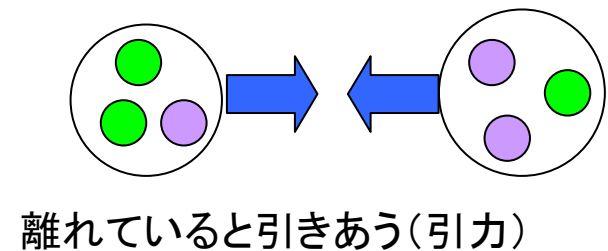
2つの粒子が離れていると引きあう(引力)

今回の成果(2006-7年)

中性子



陽子



クォークの振る舞いを、QCD(量子色力学)にもとづいて計算したところ、引力と反発力がそれぞれ実験結果と一致した！（世界最高水準のスパコンで4ヶ月連続計算）

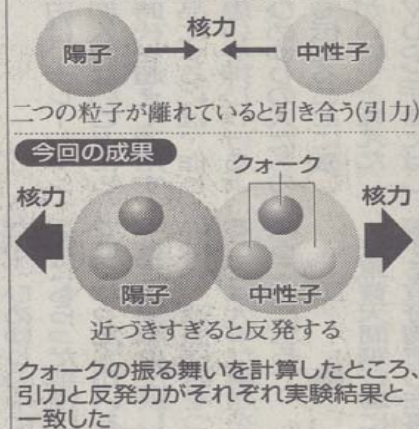
N.Ishii, A. Aoki, T.Hatsuda, Phys.Rev. Lett.2007、June

湯川「中間子論」素粒子から説明

原子核を構成する陽子や中性子の間に働く「核力」と呼ばれる力を、スーパーコンピュータによる大規模計算で、素粒子（クォーク）のレベルから説明することに筑波大などのチームが成功した。49年に日本人初のノーベル賞を受けた湯川秀樹博士の生誕100年に、博士が提唱した中間子理論を、より根源的に証明したことになる。

筑波大などのチーム

クォークによる核力の説明
「湯川秀樹博士の中間子論」



スパコンで計算、連続4カ月

陽子、中性子の間に働く核力は、両者が離れていると引き合い、近づきすぎると非常に強く反発するように働くことが実験で確かめられている。湯川博士は、のりのような働きをする中間子という粒子を仮定すると、核力のうちの引力が説明できることを示した。

現在の物理理論によると、陽子や中性子は3個ずつのクォーク

クからできている。核力はクォークの振る舞いから生まれるとわかってきたが、クォークの振る舞いを表す法則（量子色力学）を基に核力を説明するには膨大な計算が必要で、これまでできていなかった。

筑波大の石井理修研究員、東京大の初田哲男教授らのチームは計算法を工夫、陽子と中性子の計6個のクォークの間に働く

力を計算させた。結果、引力、反発力ともに実験と一致する結果が得られた。高エネルギー加速器研究機構（茨城県つくば市）の世界最高水準のスパコンで4カ月間も連続計算させた。

核力の全容を説明する道筋をつけた成果に、初田さんは「この核力の反発力のおかげで我々の世界が決してつぶれないことわかった」。成果は29日付の米物理学誌フィジカル・レビュー・レターズに掲載される。

この核力の反発力のおかげで、
われわれの世界が決してつぶれないこと
もわかった！

20世紀前半の原子核研究

放射線の実体の解明

放射性崩壊の機構の理解

核力とそれを媒介する中間子の予言

恒星のエネルギー源の理解

核分裂現象の発見

核分裂の機構の定性的理解

核分裂連鎖反応の発見と実現

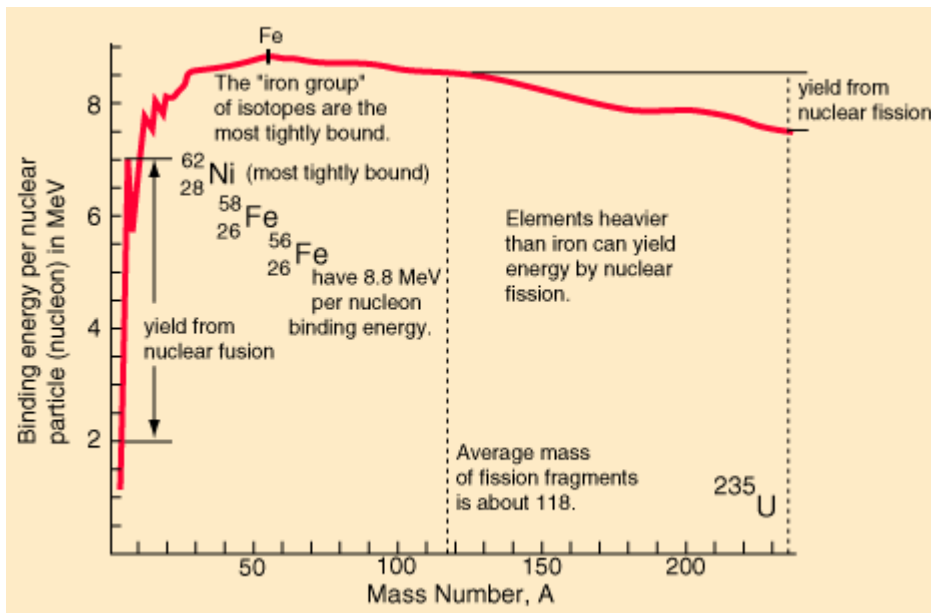
原爆の開発、実験、投下

核兵器体系の集積

原子核の結合エネルギーの実験値

重陽子の場合、最小値〔最も安定度が低い〕

鉄(Fe)のあたりが最大: 最も安定



質量数あたり結合エネルギー
の平均値＝約 8 MeV

陽子数、中性子数が

2,8,20,28,50,82などに

局所的なピーク値がある

軽い核が融合するとエネルギーが発生

重い核が分裂するとエネルギーが発生

原子核の結合エネルギー(質量)の経験公式

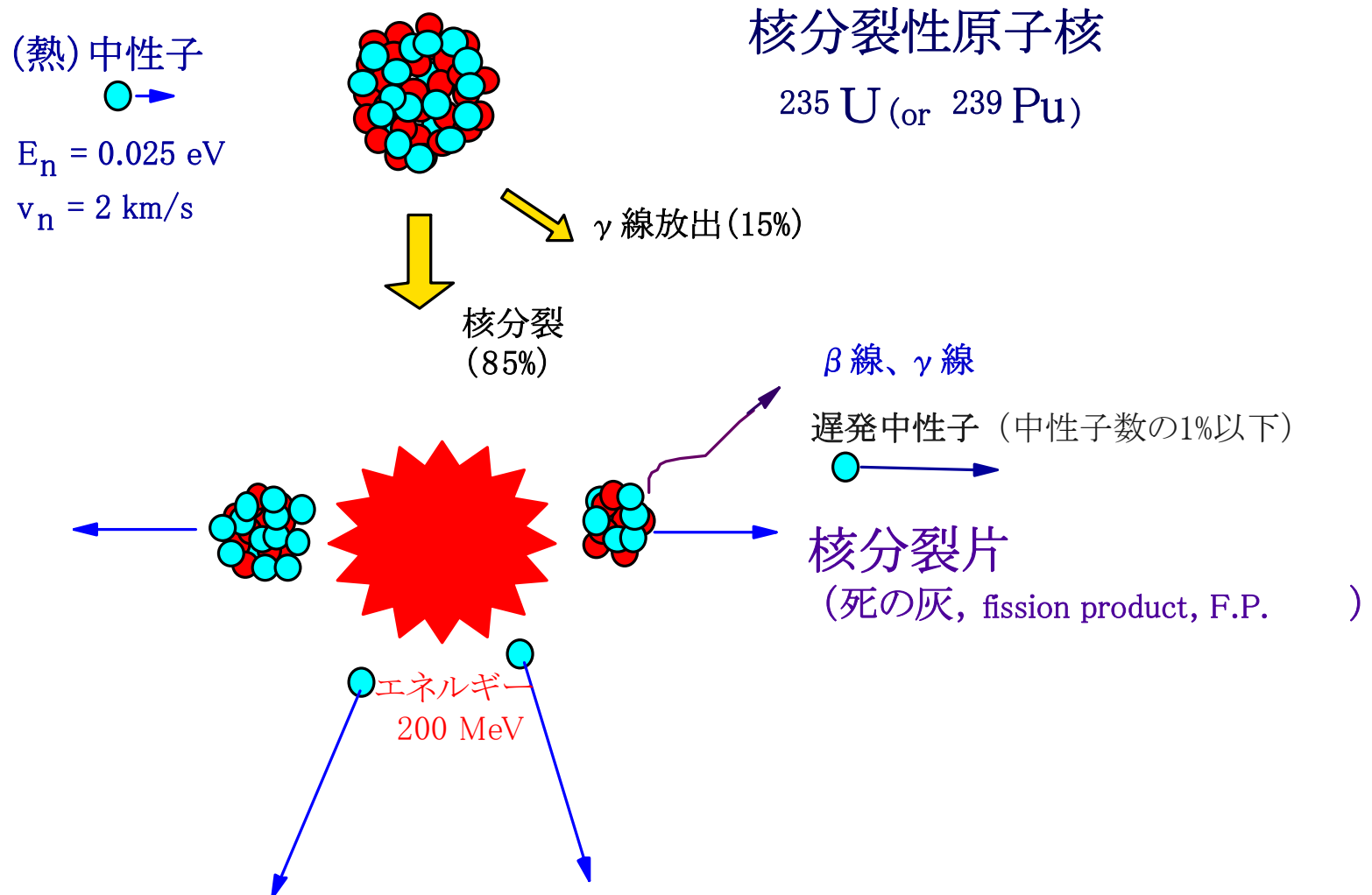
Bethe-Weizaecker 公式

$$E_b^{even-odd} \approx \underbrace{(15.75 \text{ MeV})A}_{\text{Volume term}} - \underbrace{(17.8 \text{ MeV})A^{2/3}}_{\text{Surface term}} - \underbrace{\frac{(0.711 \text{ MeV})Z^2}{A^{1/3}}}_{\text{Coulomb term}} - \underbrace{\frac{(23.7 \text{ MeV})(A-2Z)^2}{A}}_{\text{Pauli term}}$$

+ 偶数奇数補正項

⇒ 1959年(核子対が角運動量ゼロに組んだ)超伝導状態

原子核分裂 nuclear fission



高速中性子(即発中性子) (平均)2.5個



核分裂していない原子核に吸収されると、
次の核分裂を起こすことができる！

→連鎖反応の可能性

$$E_n(\text{平均}) = 2\text{MeV}$$

$$= 2,000,000 \text{ eV} \quad v_n(\text{平均}) = 19,500 \text{ km/s}$$

核分裂片 (F.P., Fission Product)

1) 真っ2つに分裂するのはほとんどなく、
質量数(陽子数)で、

軽い分裂片で90(38)前後、

重い分裂片で140(54)前後の組み合わせが多い。

←魔法数20,28,50,82を持つ原子核がしやすい

2) 一般に、放射性で、ガンマ線、ベータ線または中性子(遅発中性子)を放出する。

3) 超重荷電粒子としての核分裂片:

分裂前の原子が持っていた電子は適当な分かれ方をするが、
取り残されるものも多い。

それぞれの核分裂片は約+20単位の電気量を持っている。

→ 励起作用, 電離作用が非常に大きい。

$$E_{\text{FP1}} = \text{約}97\text{MeV}, E_{\text{FP2}} = \text{約}65\text{MeV}$$

$$v_{\text{FP}} = \text{約}c/3 = 100,000 \text{ km/s}$$

空気中の飛程は約2cm程度である。

核分裂反応のエネルギーは化学反応のエネルギー の約200万倍！（要素的過程における比較）

1電子ボルト(eV)

=1ボルトの電圧で電子を加速するとき電子のもつエネルギー

= 1.6×10^{-19} joule

化学反応におけるエネルギーは数eV

例: $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + Q$;

$Q = 2.9 \text{ eV / 分子}$

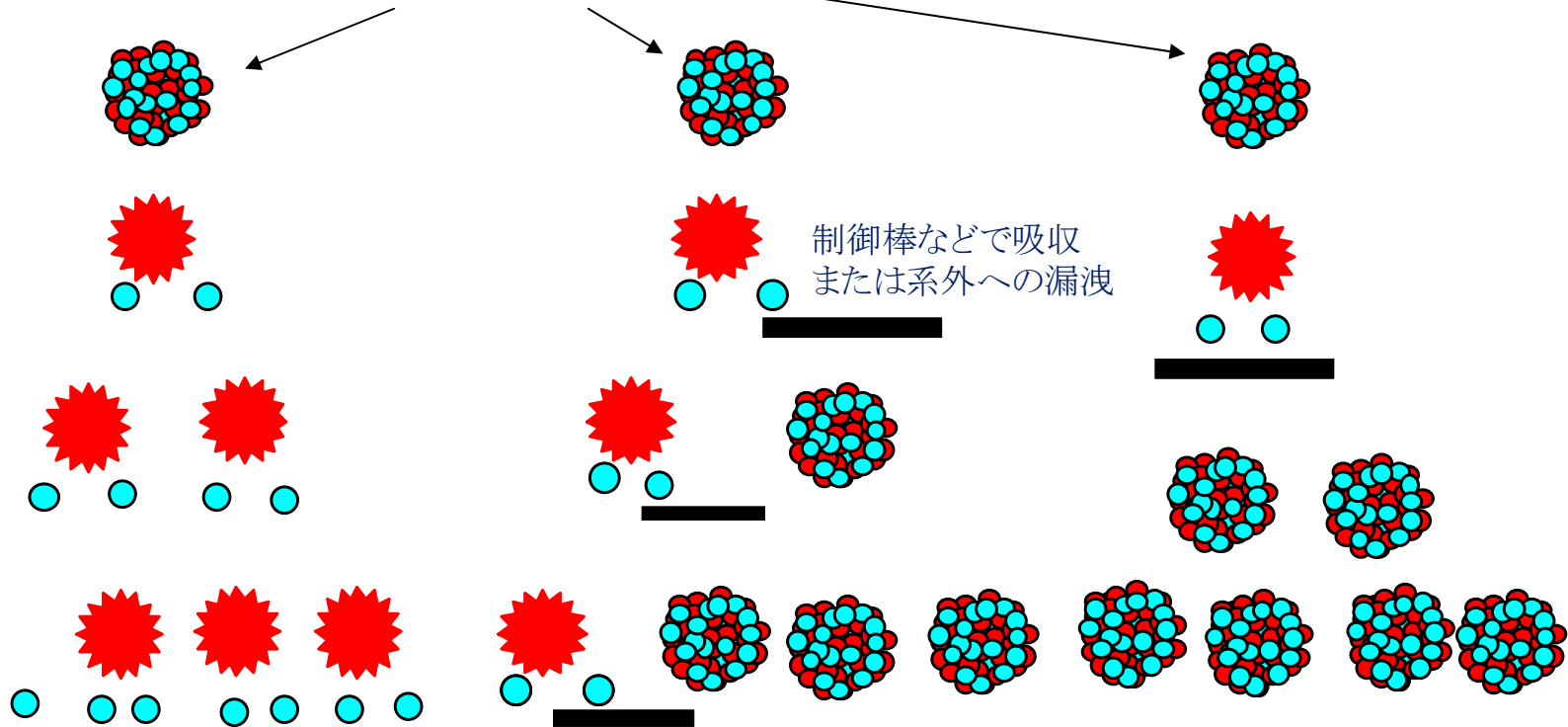
原子炉における減速の必要性

熱中性子に対しての方がより核分裂しやすい
熱中性子の方が制御できる時間的余裕が大きい。

—高速中性子に比べて—

核分裂連鎖反応と臨界条件

分裂していない原子核(U235 / Pu239)



● 即発中性子

臨界条件

臨界超過

発生する中性子数 $>$

臨界

発生する中性子数 $=$ 材料等への吸収される、または
系外への漏洩する中性子数

臨界未満

発生する中性子数 $<$

一口に、連鎖反応といっても

出力を定常的に維持する連鎖反応の条件と爆発的連鎖反応を開始し、想定された威力発揮までの過程を完了する条件とはお互いにかかなり異なる！

俗説：原子炉は制御された核分裂、原爆は制御されない核分裂



正しくは、どちらも制御が必要あり、しかし、異質の制御である

定常的出力を出す連鎖反応（原子炉）：

発生する中性子数の1%以下の遅発中性子数の制御がポイント

爆発的連鎖反応（核爆発装置）：

広島型原爆（ウラン235使用、砲身型）；臨界量以下の核分裂物質を急速に合体

長崎型原爆（爆縮型）：高精度の構造、

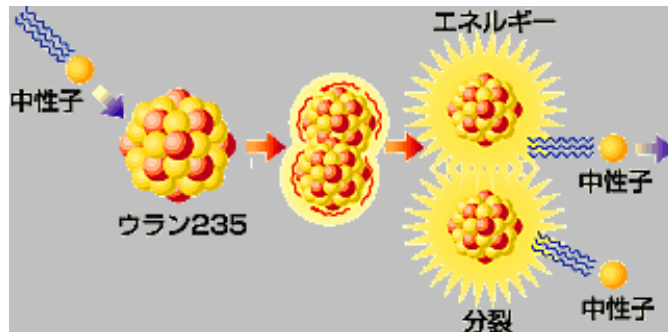
超短時間（1000万分の1秒以下）の高精度の制御が必要

原子炉の原理と構造

- ・ 原子炉とは何か？
- ・ 原子炉の構成要素
 - ・ 原子炉の種類
- ・ 原子力発電と火力発電との比較

原子炉とは何か？

核分裂連鎖反応を出力を定常に維持するように制御しながら原子核エネルギーを取り出す装置が原子炉(nuclear reactor)である。

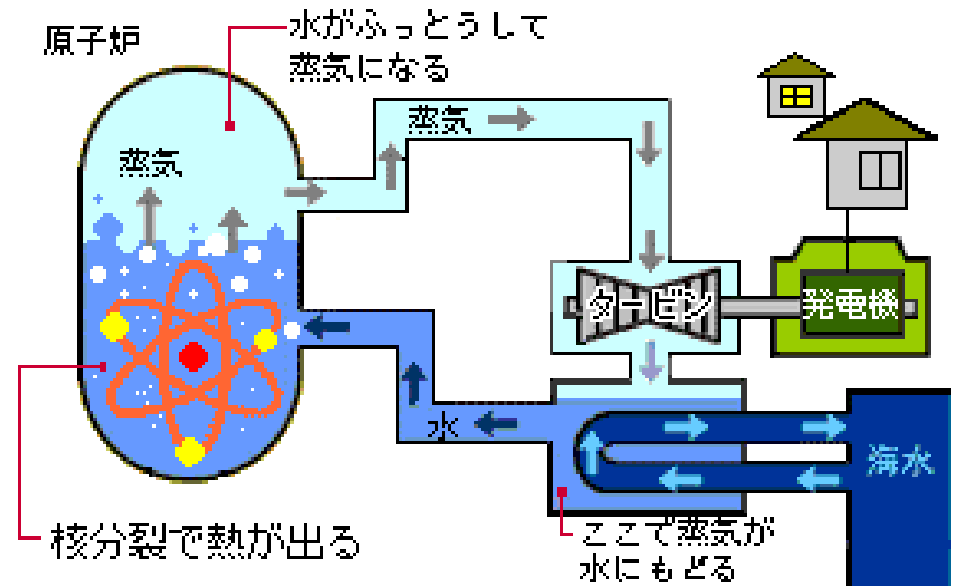


(2)原子炉の副産物: 低濃縮ウラン燃料の97%をしめるウラン238から中性子プルトニウム239 (239Pu) が生成される。

これは核燃料と核弾頭の原料になりうる。

→高速増殖炉のアイデア

→核兵器の拡散問題



原子炉の構成要素

核燃料または原子燃料(nuclear fuel):

低濃縮ウラン[U238(97%)+U235(3%)]

天然ウラン[U238(99.3%)+U235(0.7%)]

減速材(modulator):

水(軽水, H_2O) → 軽水炉(軽水型熱中性子炉)

重水(D_2O) → 重水炉(重水型熱中性子炉): Candu炉

金属ナトリウム → 高速増殖炉

冷却材または熱伝達媒体(coolant):

水(軽水) → 軽水炉

金属ナトリウム → 高速増殖炉

制御棒(regulator):

カドミウム, ボロンなど

遮蔽材(shielding): コンクリート、鉛、鉄など

原子力発電と火力発電との比較

(1) 蒸気を発生させる仕組みの違い

原子力発電: **原子核エネルギー(原子力)**で蒸気を発生させ、蒸気の力で発電タービンを回して発電する。

火力発電: 石油または石炭など**化学エネルギー**によって蒸気を発生させ発電タービンを回して発電する。

(2) 稼働中の火力発電ではCO₂などが発生する、

稼働中の原子力発電ではCO₂などは発生しないが、放射能をもつ核分裂生成物が生成される。

(石炭の中にもごく微量の放射性物質が含まれる。核燃料の加工生成工程においてもCO₂は発生する。)

(3) 熱効率(熱から電気への変換効率)の違い

原子力発電: 熱効率33%程度

最新型火力発電: 熱効率約50%、

原子炉の種類

熱中性子炉; 熱中性子による核分裂連鎖反応を利用

低濃縮ウラン軽水型炉

加圧水型原子炉(PWR)

沸騰水型原子炉(BWR)

新型転換炉(原型炉「ふげん」

→実証炉は開発中止)

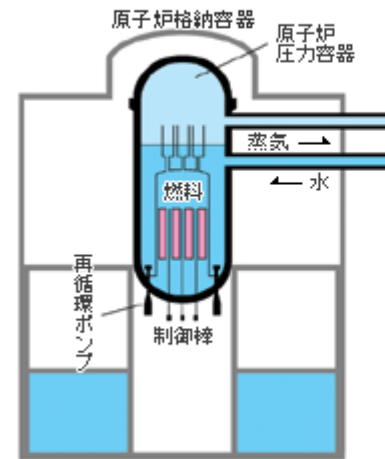
高速中性子炉; 高速中性子による核分裂連鎖反応を利用

→高速増殖炉: 実験炉「常陽」

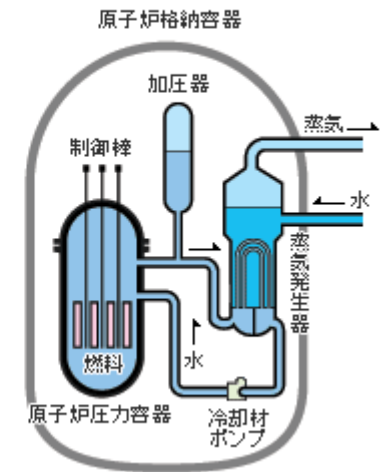
→原型炉「もんじゅ」

パイプに穴があき、液体金属ナトリウムが漏れてしまったという事故を起こしている(1995年12月)。

沸騰水型軽水炉(BWR)



加圧水型軽水炉(PWR)



原子炉の構造

原子炉の炉心

燃料棒:

ウラン235を3%程度まで濃縮した錠剤状の酸化ウランを、直径1cm、長さ4mのジルコニウムのさやに詰めたものが燃料棒

燃料棒集合体: 燃料棒を数十から数百集めたもの

制御棒: 中性子を吸収し核分裂を調節する

炉心は冷却水で満たされ、その冷却水は、炉心が加熱しないように毎秒3mという速さで循環している。さらに冷却水は、中性子の減速、放射能の遮蔽という重要な役割も果たしている。

燃料棒と燃料被覆材の過酷な環境

核反応中は燃料被覆材(ジルコニウム)のさやの中心部は2000°Cにもなる。ジルコニウムの融点は1900°Cだが、1000°Cを越えると水蒸気との反応が始まるので、さやの表面は300°Cに抑えている。つまり、わずか5mmで1700°Cの温度勾配をつくらなくてはならない。そのために冷却水を毎秒3mで循環させている

格納容器: 炉心を分厚い鉄でできたに納める。

原子炉建屋: 全体が分厚いコンクリートでできた建物

核燃料

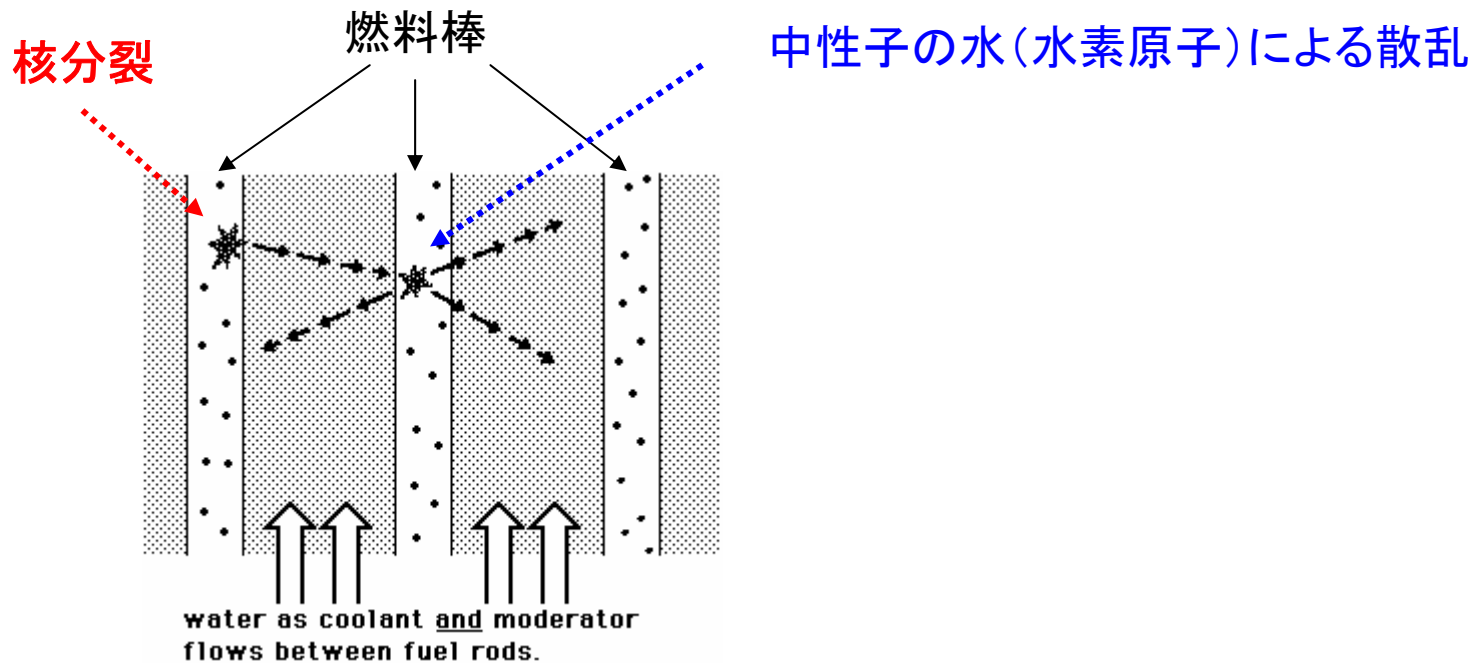
- 天然ウラン[U238(99.3%) + U235(0.7%)]
- 低濃縮ウラン[U238(97%) + U235(3%)]
- 高濃縮ウラン

プルトニウム

ウランとプルトニウムの混合(MOX燃料, Mixed Oxide)

原子炉のどこでエネルギーが 発生するのか

水の役割は冷却材(熱伝達媒体)と減速材



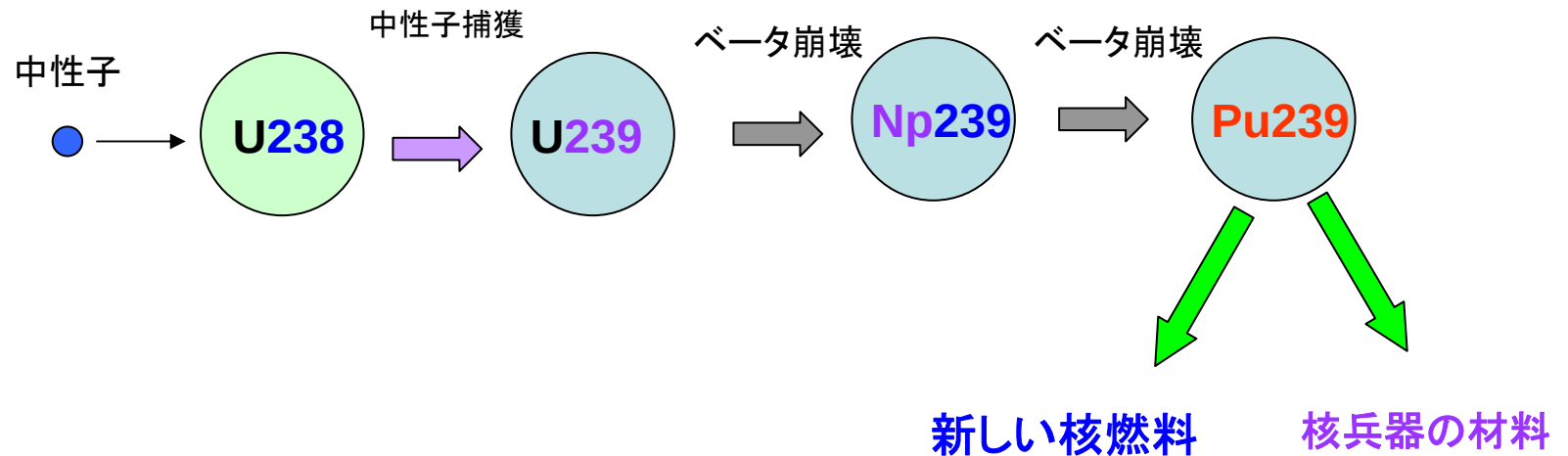
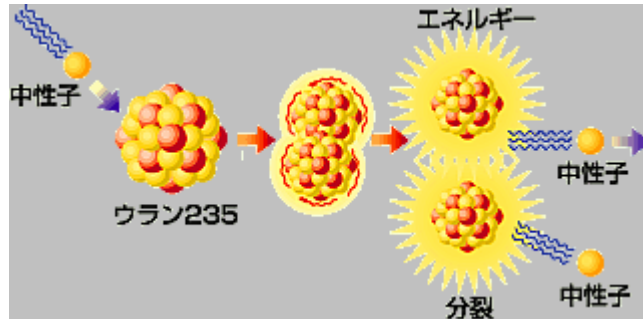
水(軽水)

制御棒

- 核分裂反応を制御する(抑止する)ための装置
- 中性子の吸収反応が容易に起こる材料
- ホウ素(ボロン、B)、カドミウム(Cd)、キセノン(ゼノン、Xe)、ハフニウム(Hf)などの元素、またはこれらを含む物質。
- ただし、ウランなどの核燃料物質も中性子を吸収して、核分裂反応を起こして、さらに(高速の)中性子を放出するが、その目的が異なるので中性子吸収材とは呼ばない。

原子炉におけるプルトニウムの生成

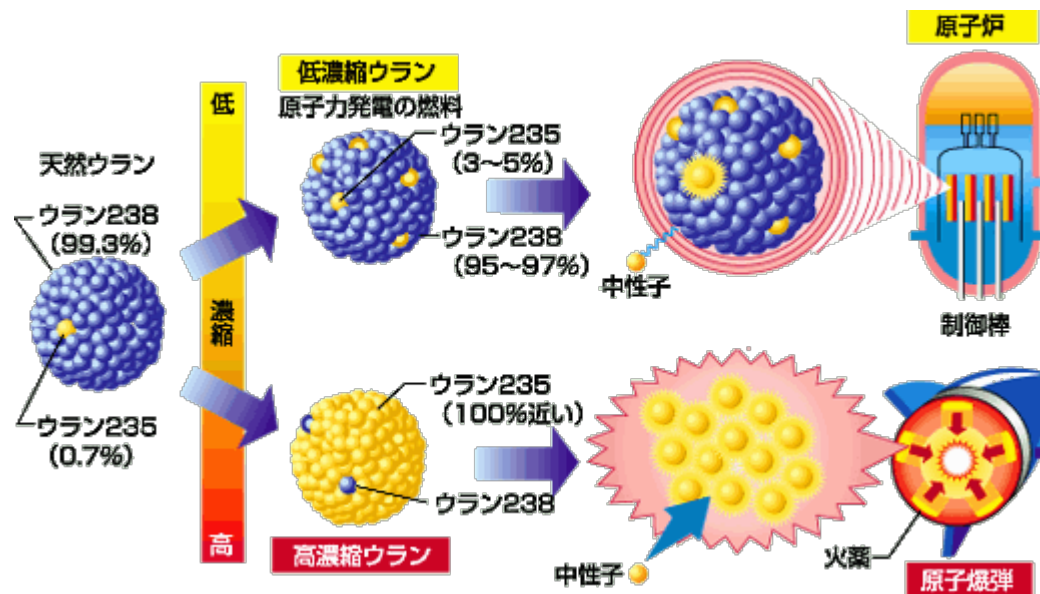
- 低濃縮ウラン[U238(97%) + U235(3%)]



原子力発電と原爆(核分裂兵器)の違いと関連(1)

原子力発電: 低濃縮ウランを熱中性子により、一定出力を維持するように核分裂連鎖反応を制御

原爆(核分裂兵器): 高濃縮ウランを高速中性子により、極短時間にエネルギーを放出するように核分裂連鎖反応を制御



原子力DICTIONARYより

原子力発電と原爆(核分裂兵器)の違いと関連(2)

原子炉でプルトニウムが生成される  核兵器の材料
生成・抽出

原子炉級プルトニウムは爆弾にならないか？

「原子炉級プルトニウムにより爆弾をつくることは困難」

(九電「プルサーマル」パンフレット)



100トン程度(TNT火薬換算)の爆発威力の可能性あり(アメリカ)



約150分の1

広島原爆の爆発威力: 約15キロトン (=15000トン(TNT火薬換算))

核燃料サイクル(1)

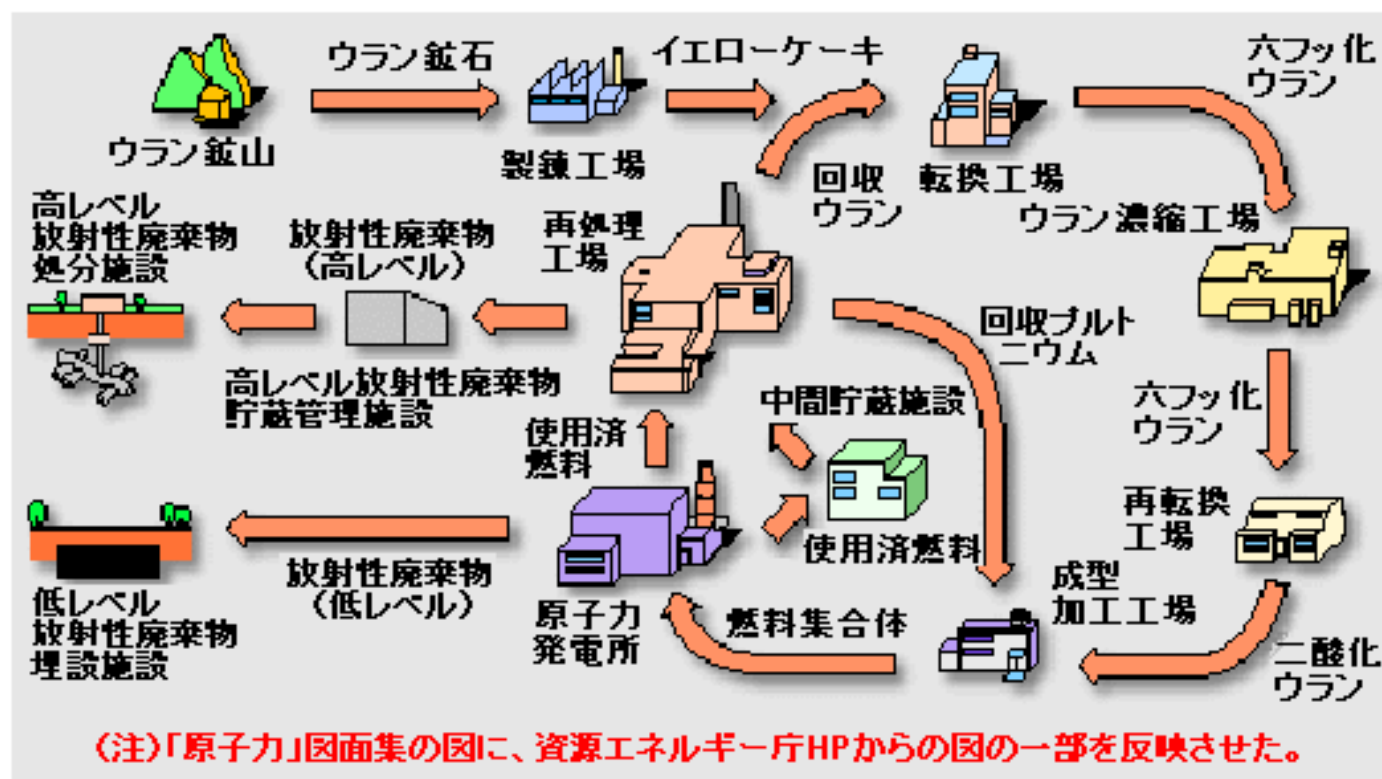
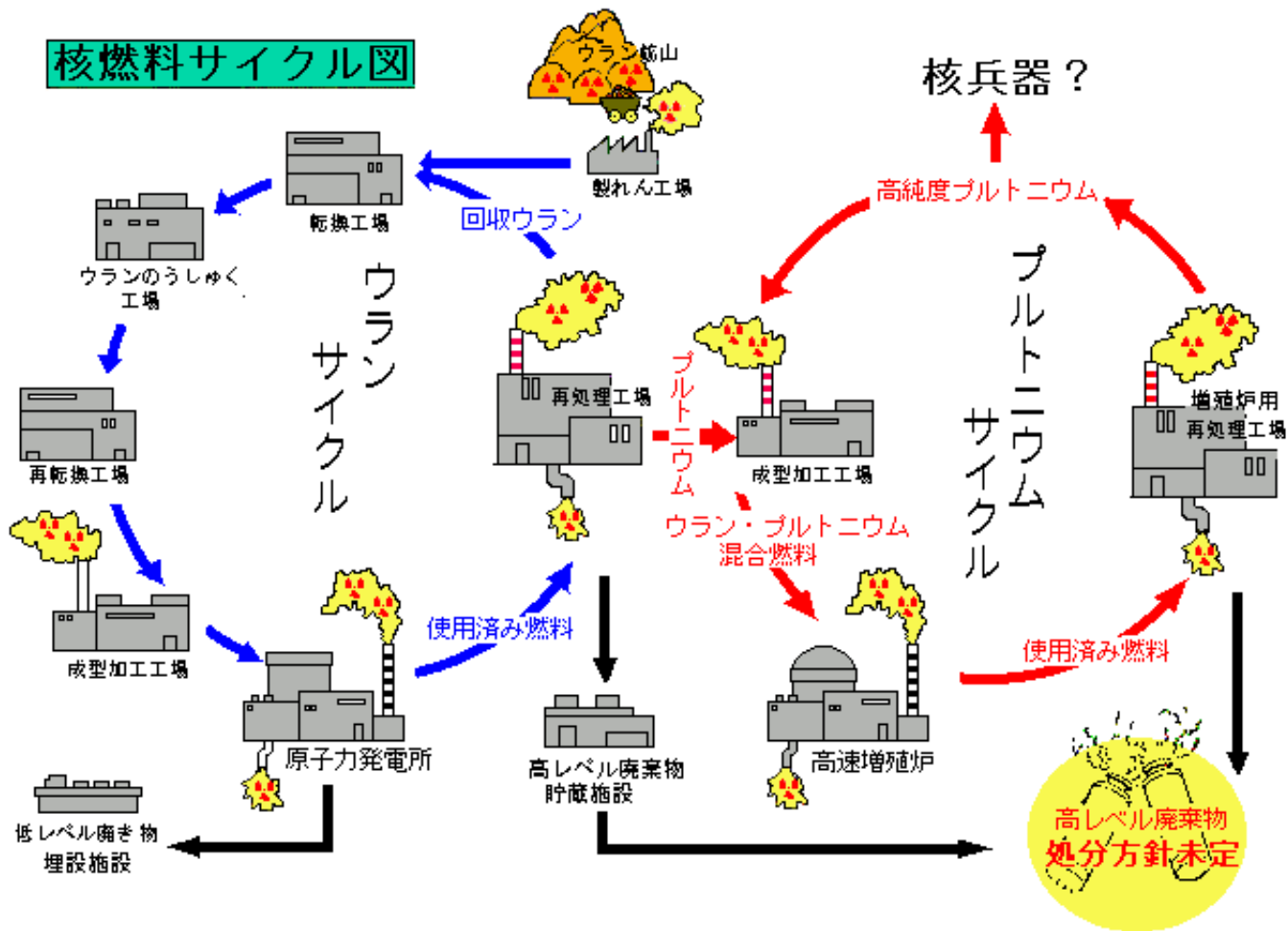


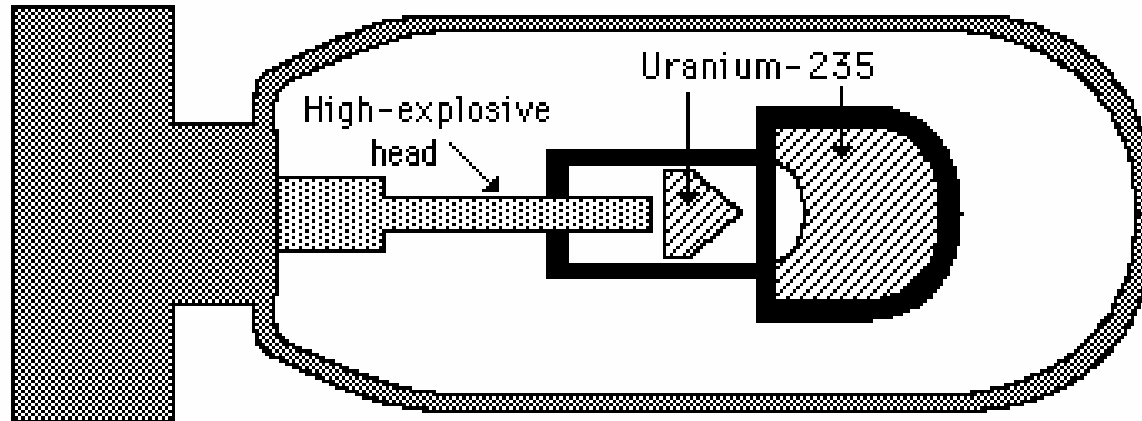
図1 核燃料リサイクル概念図

[出典]電気事業連合会:「原子力」図面集-2000年版-(2000年10月) p.139
および資源エネルギー庁HP(<http://www.enecho.go.jp/index02.html>)

核燃料サイクル(2)



広島型原爆(ウラン235、砲身型)



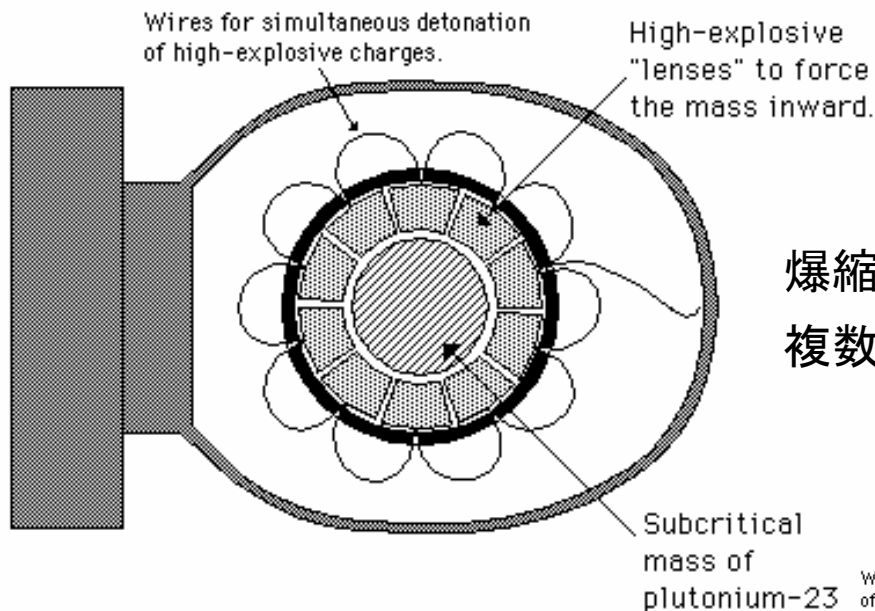
高濃縮ウラン235の約60kg、

その約1.5%のみが核分裂。

爆発威力は約15キロトン＝15,000トン爆薬相当

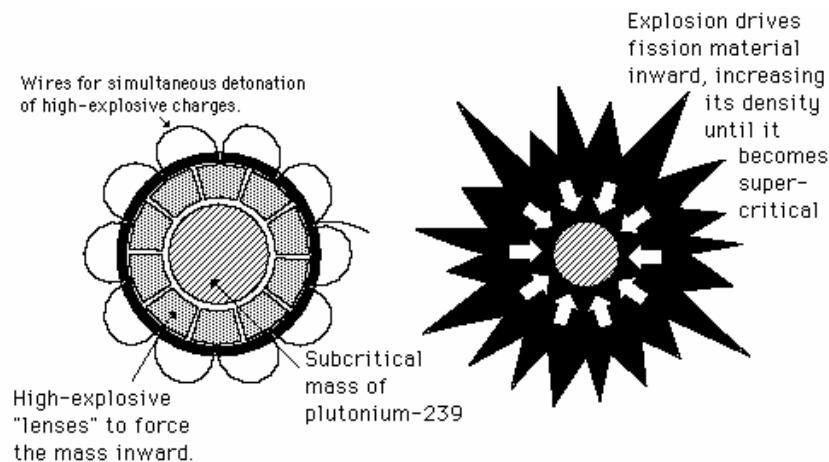
1キロトン＝核分裂性物質57gが核分裂により発生するエネルギー
＝ 1.45×10^{23} 個の原子核の核分裂により発生するエネルギー
＝ 4.18×10^{12} J = 2.6×10^{25} MeV

長崎型原爆(プルトニウム239、爆縮型)



爆縮レンズと呼ばれる、爆発速度の異なる複数種類の爆薬を数十個の分けておく

1千万分の1秒以下の時間精度で
同時に点火し、
Puを急速かつ球対称に圧縮させる



プルトニウム239の約8kg、その約15%のみが核分裂。
爆発威力は約20キロトン=20,000トン爆薬相当

Q. なぜプルトニウム原爆は爆縮型なのか？

A. Puの同位体としては、Pu239以外に、Pu240,241などが含まれている。

その中で、**Pu240**はかなり大きな確率で、中性子の入射がなくても、核分裂を起こす。(自発核分裂)。

Pu240の自発核分裂のために、想定時間以前に、核分裂連鎖反応が始まり、そのエネルギーで、まだ核分裂していない塊が膨張、破裂してしまうという不発爆弾になる可能性が高い。

事前爆発 (Pre-detonation)

自発核分裂はトンネル効果の一種である。

→事前爆発を避けるためには、高性能の爆薬を特殊な配置でおき、1000万分の1秒以下の精度で同時に点火しなければならない！

爆縮型原爆の研究開発の余話

1) 爆縮のアイデアを考案したのはNeddermeyerで1949年、指導教授のAndersonと湯川博士が1930年代に予言した π 中間子を発見した。

2) 爆縮型原爆の爆発効率の理論式
(第2次世界大戦時の米国原爆開発(マンハッタン計画))

Serber (→後に核力の研究)

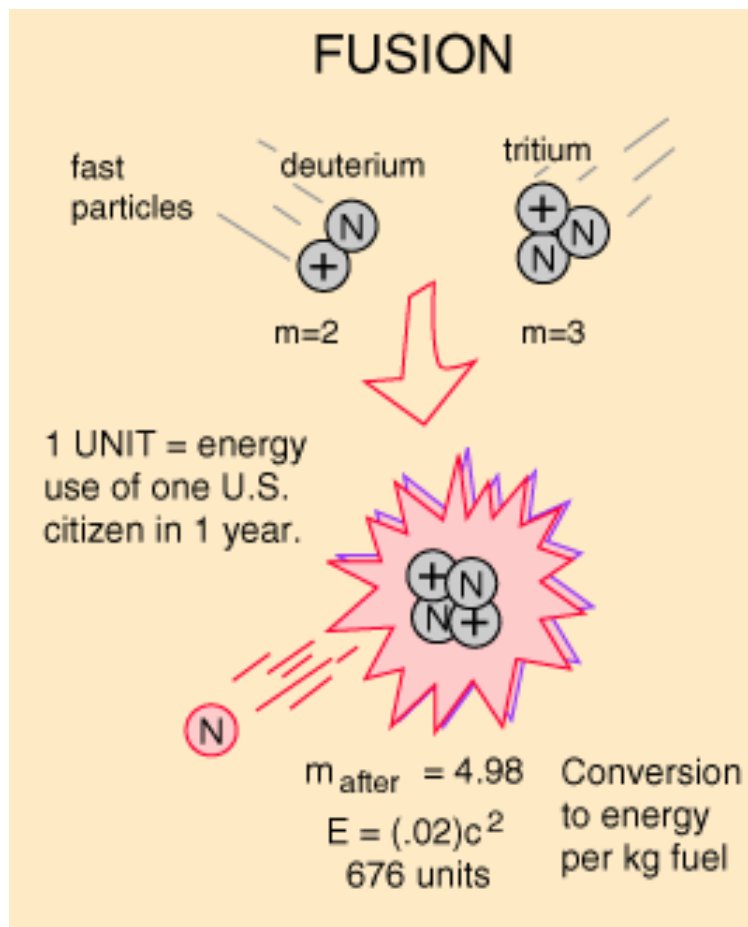
Bethe-Feynman(→後にノーベル物理学賞受賞)

3) 恒星の世代の最終段階における超新星爆発時に、
爆縮と類似の機構が必要らしい。
(→核兵器開発に使用された数値計算プログラムの活用??)

4) 爆縮型原爆は小型化、効率化が可能であるため、
その後の核兵器の多くに採用されている。

5) 2006.10の北朝鮮による核爆発; 部分的成功・部分的失敗
その原因は爆縮機構の不十分性の可能性大(低威力を目指した!)

核融合反応

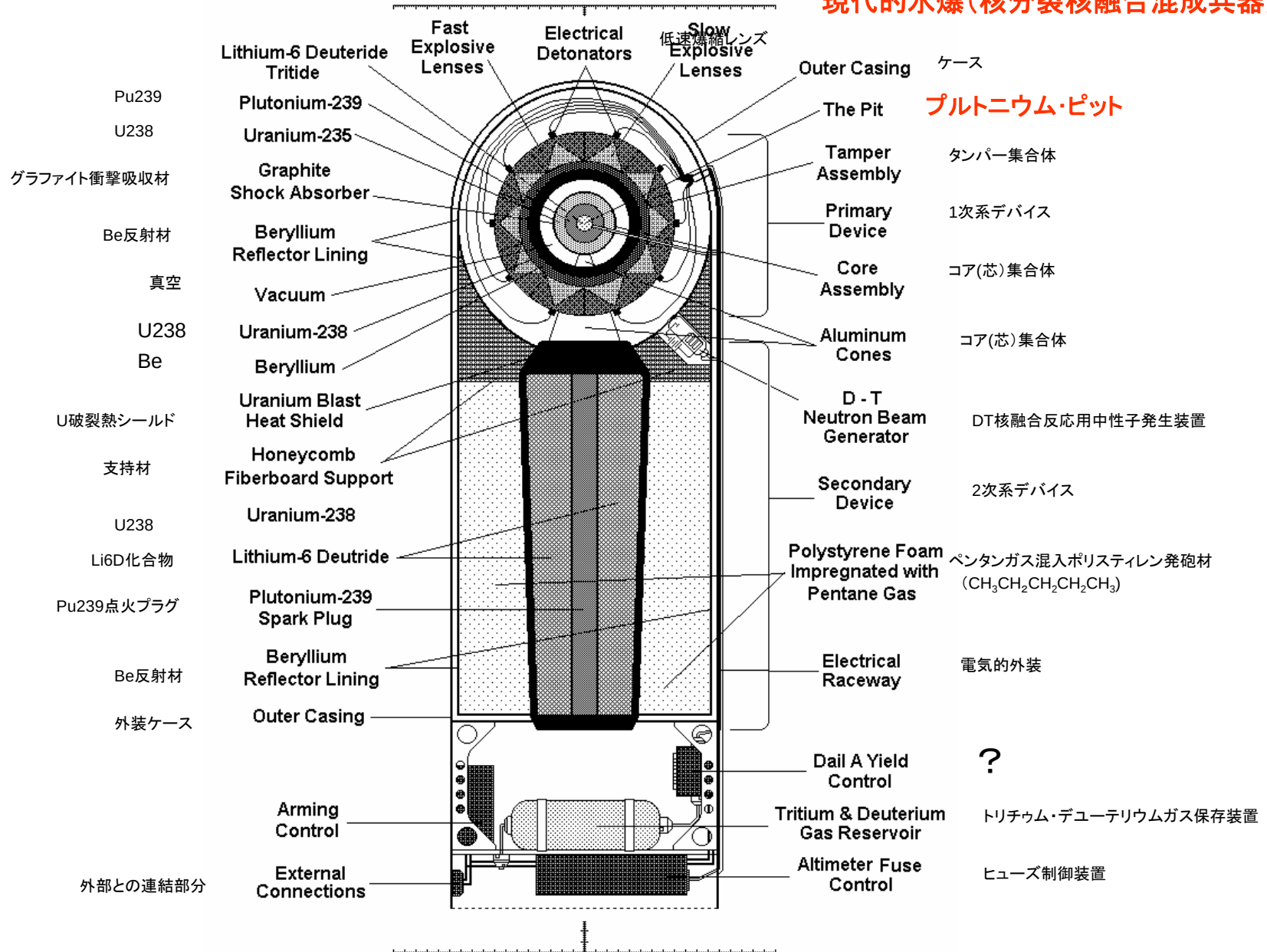


太陽は毎秒、約300万トンの質量をエネルギーに転換させて、過去50億年、輝き続けている。

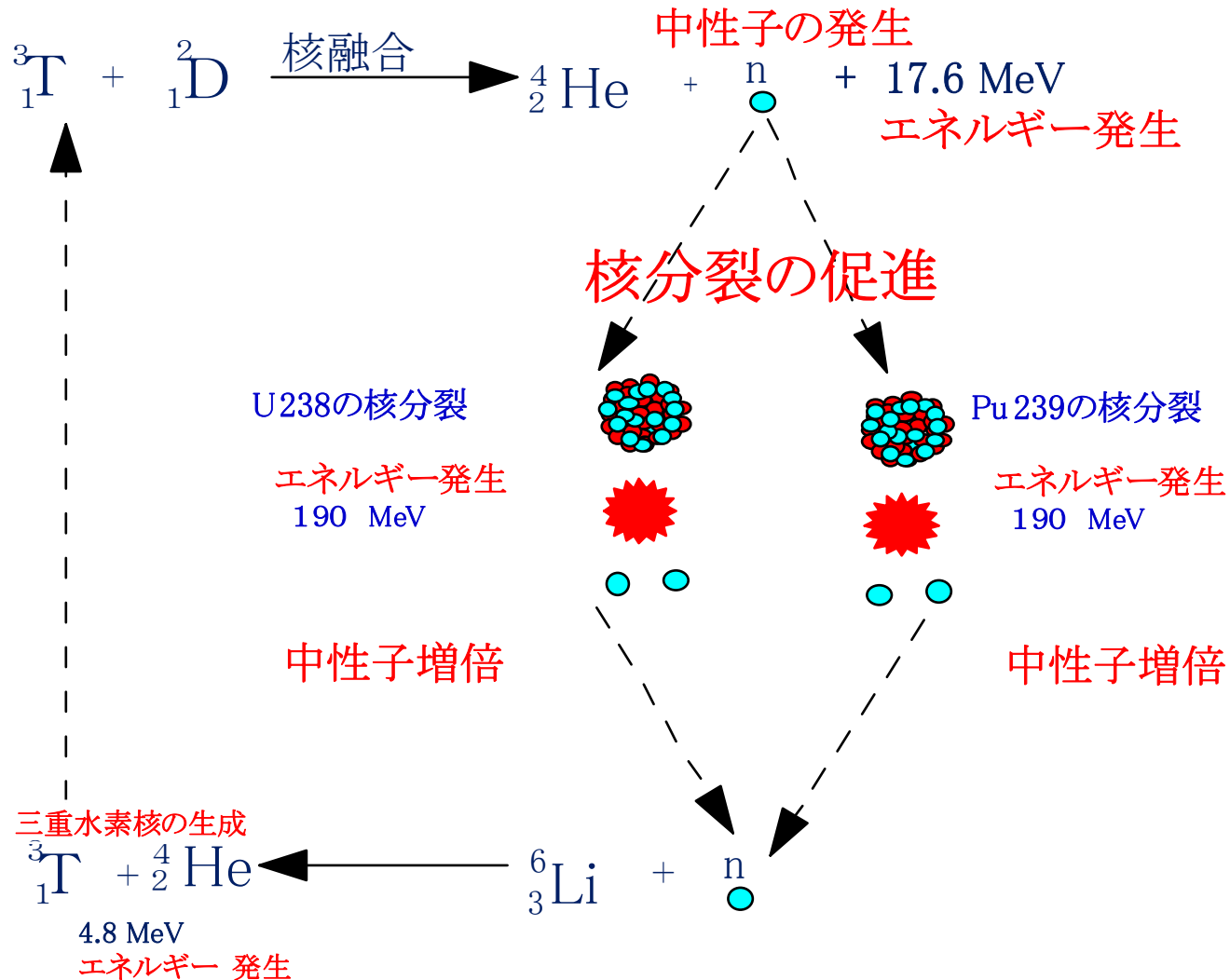
MILNET: Richard K. Brown's Bomb Drawings

高速爆縮レンズ 電子的点火装置

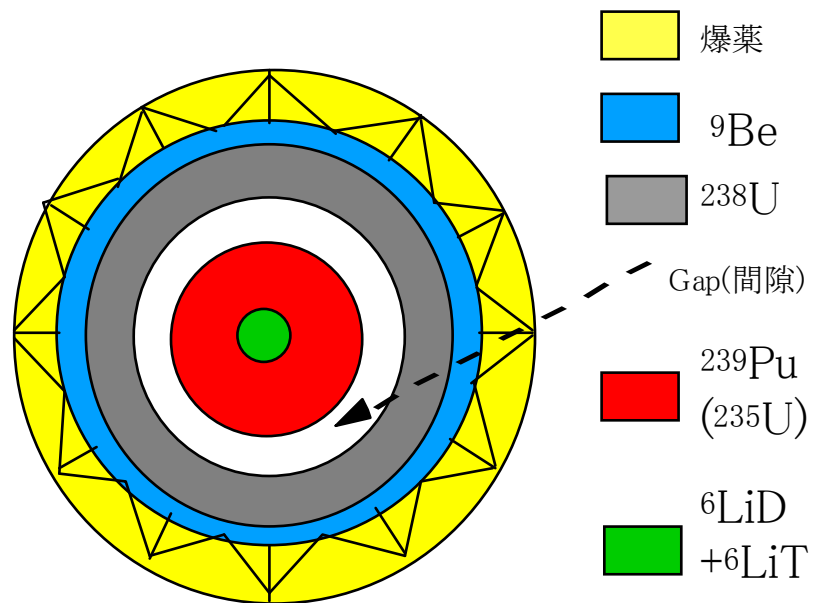
現代的水爆(核分裂核融合混成兵器)



ブースター原理(核融合物質の添加による核分裂の促進)



核融合核分裂混成兵器(水爆)の1次系 プルトニウムピット



2005年、米国政府は、毎年10個程度ずつ、20年間に架けて増産することを決定

講義2: 魔法数の生成、消滅

魔法数の生成、消滅, 新魔法数の生成
— 殻構造の進化と平均場・多体相関 —

復習; 水素原子、周期律表

パウリ原理

多電子原子のスペクトル

分子のスペクトル

水素原子〔電子〕におけるスピン軌道結合力の起源

原子核物理学における最近のトピックス

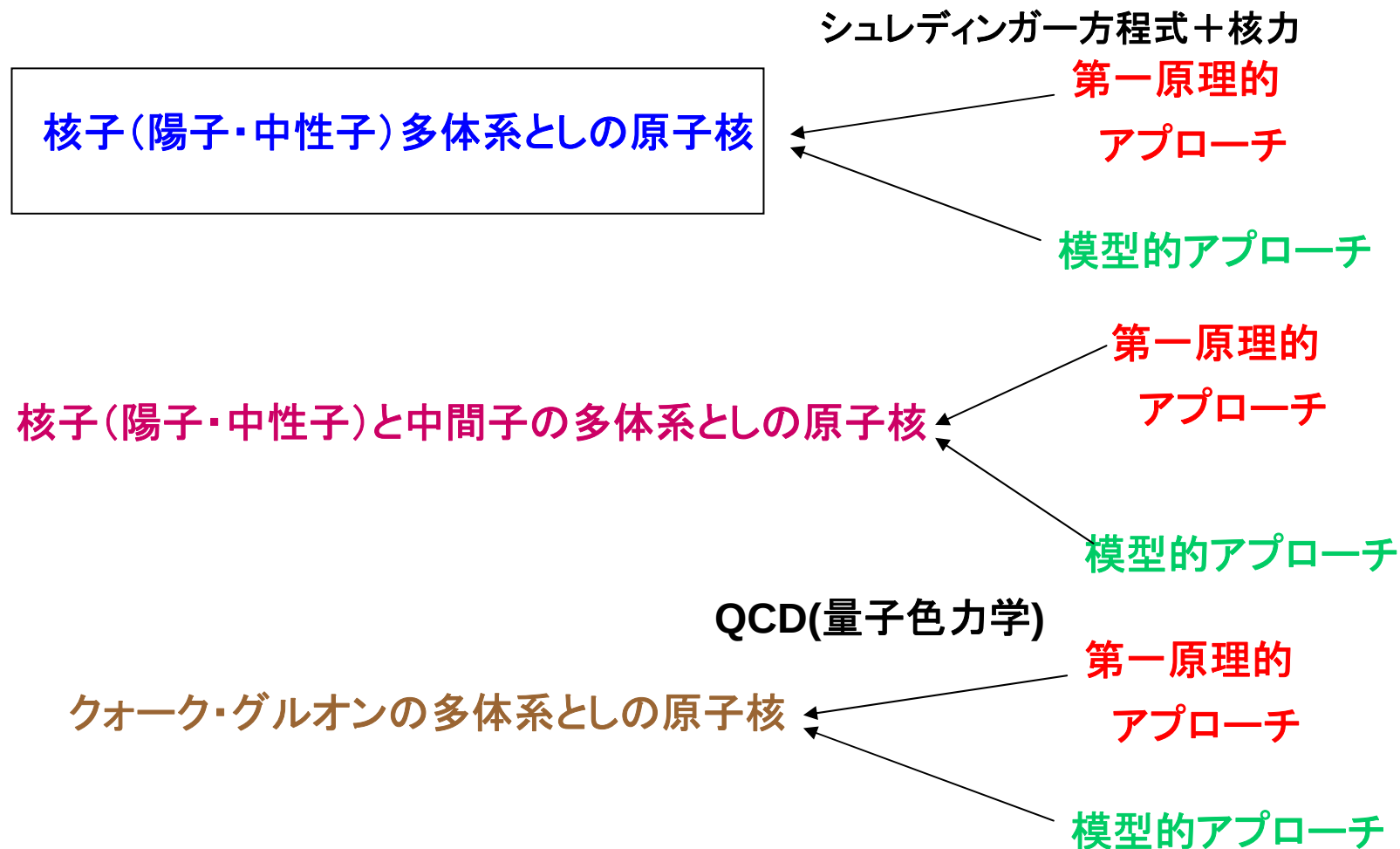
宇宙初期の状態としてのクォーク・グルオン・プラズマ
不思議さの自由度をもつ超核(ハイパー核)
中間子が束縛した原子核(中間子原子核)
→ 中性子過剰の不安定核

原子核における殻構造の進化

新魔法数とその出現の仕組みを理論的に調べる
(核力から出発して)

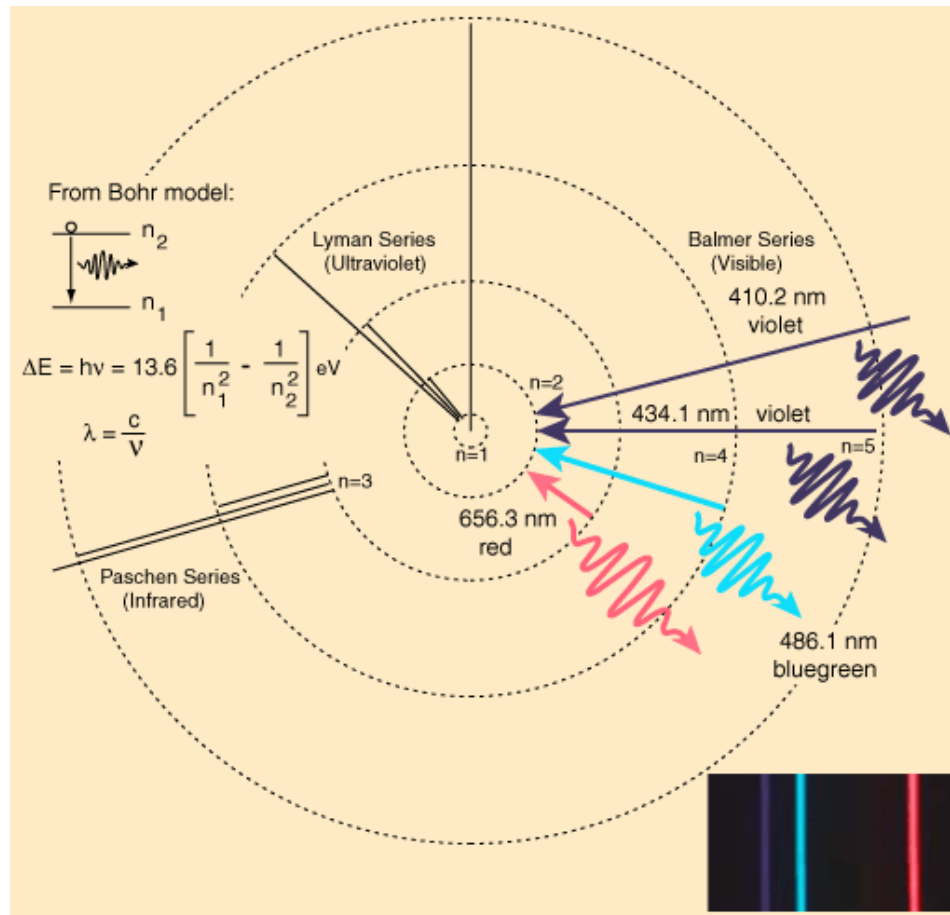
天体物理学的な興味による研究動機:
→ 元素形成機構におけるr過程(rapid process)に対するモデル構築にも有用

研究対象の階層性と種々のアプローチ



水素原子の励起構造(1)

陽子(原子原子核)から働くクーロン引力の下の束縛状態

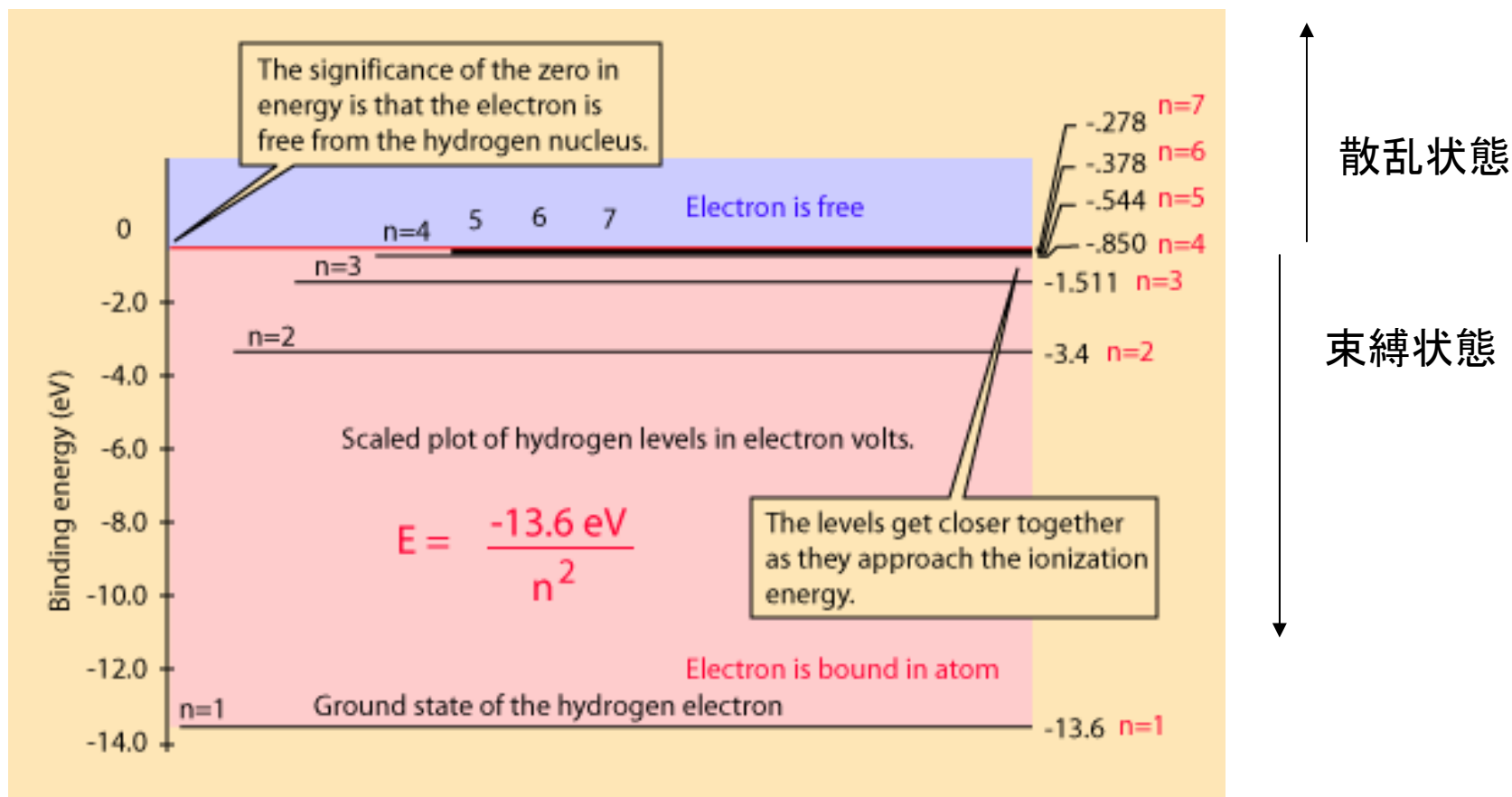


量子数の組で決まる量子状態

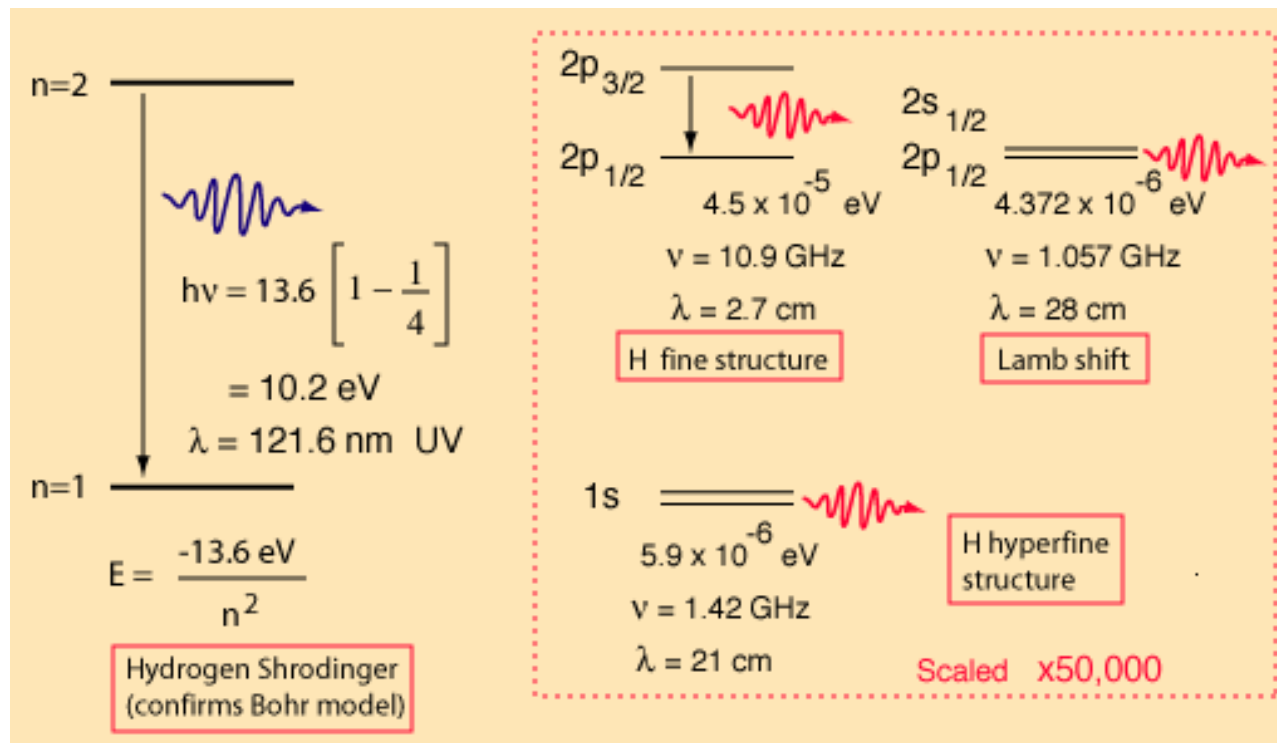
離散的なエネルギー準位

量子状態間の遷移の際には
光の放出または吸収が起こる

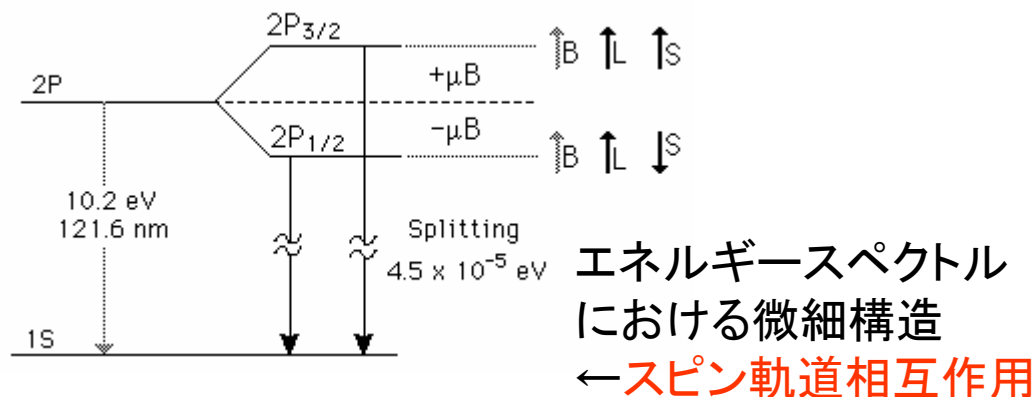
水素原子の励起構造(2)



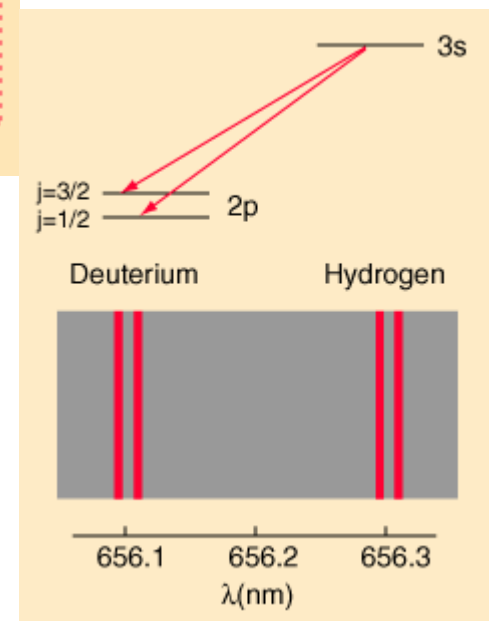
水素原子の励起構造(3)



エネルギースペクトル
における超微細構造
← 相対論的效果



<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hph.html>



元素周期表と電子配置の殻構造

- ・ メンデレーエフによる周期律の発見と未知元素の予言
-元素の物理的、化学的性質の規則性-
- ・ 水素原子スペクトルの規則性の発見(分光学)
- ・ ラザフォードによる(原子の芯としての)原子核の発見
- ・ ボーアの水素原子模型ー前期量子論ー

ハイゼンベルクの行列力学1925、シュレディンガーの波動力学1925、
ディラックの変換理論1926

⇒量子力学の建設

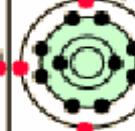
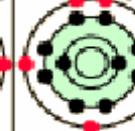
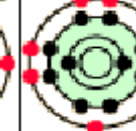
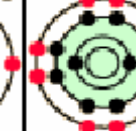
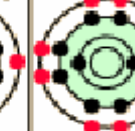
原子の軌道電子の殻構造⇒原子の化学的性質を決める
力の中心としての原子核と電子間のクーロン引力による
量子力学的束縛状態;離散的なエネルギー準位構造

元素の周期律表

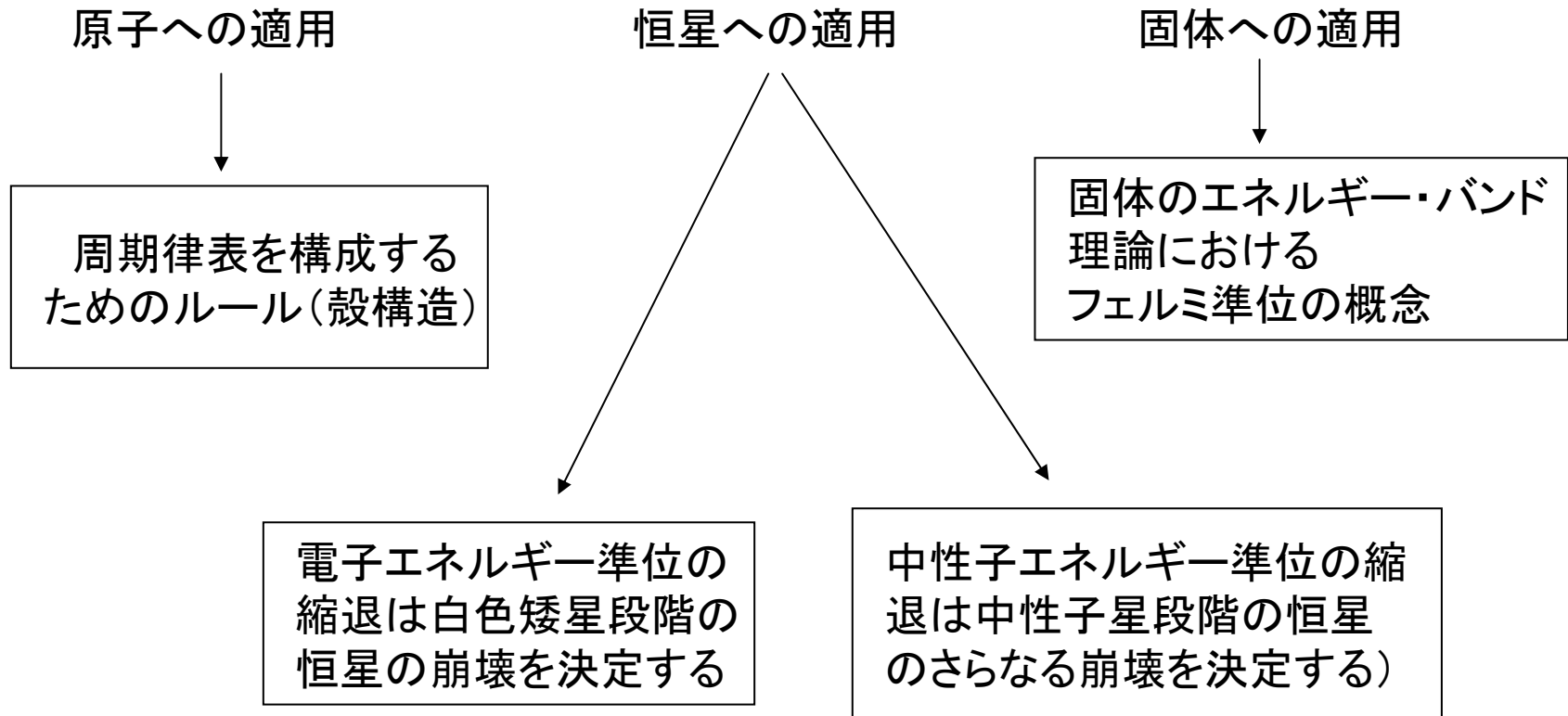
Periodic Table of the Elements

I	II											III	IV	V	VI	VII	0																																				
H ¹																		He ²																																			
Li ³	Be ⁴	Transition Metals										B ⁵	C ⁶	N ⁷	O ⁸	F ⁹	Ne ¹⁰																																				
Na ¹¹	Mg ¹²	IIIB	IVB	VB	VIB	VII B	VIII B			IB	IIB	Al ¹³	Si ¹⁴	P ¹⁵	S ¹⁶	Cl ¹⁷	Ar ¹⁸																																				
K ¹⁹	Ca ²⁰	Sc ²¹	Ti ²²	V ²³	Cr ²⁴	Mn ²⁵	Fe ²⁶	Co ²⁷	Ni ²⁸	Cu ²⁹	Zn ³⁰	Ga ³¹	Ge ³²	As ³³	Se ³⁴	Br ³⁵	Kr ³⁶																																				
Rb ³⁷	Sr ³⁸	Y ³⁹	Zr ⁴⁰	Nb ⁴¹	Mo ⁴²	Tc ⁴³	Ru ⁴⁴	Rh ⁴⁵	Pd ⁴⁶	Ag ⁴⁷	Cd ⁴⁸	In ⁴⁹	Sn ⁵⁰	Sb ⁵¹	Te ⁵²	I ⁵³	Xe ⁵⁴																																				
Cs ⁵⁵	Ba ⁵⁶	57-71		Hf ⁷²	Ta ⁷³	W ⁷⁴	Re ⁷⁵	Os ⁷⁶	Ir ⁷⁷	Pt ⁷⁸	Au ⁷⁹	Hg ⁸⁰	Tl ⁸¹	Pb ⁸²	Bi ⁸³	Po ⁸⁴	At ⁸⁵	Rn ⁸⁶																																			
Fr ⁸⁷	Ra ⁸⁸	89-103		Rf ¹⁰⁴	Ha ¹⁰⁵																																																
Lanthanides		<table><tr><td>57</td><td>58</td><td>59</td><td>60</td><td>61</td><td>62</td><td>63</td><td>64</td><td>65</td><td>66</td><td>67</td><td>68</td><td>69</td><td>70</td><td>71</td></tr><tr><td>La</td><td>Ce</td><td>Pr</td><td>Nd</td><td>Pm</td><td>Sm</td><td>Eu</td><td>Gd</td><td>Tb</td><td>Dy</td><td>Ho</td><td>Er</td><td>Tm</td><td>Yb</td><td>Lu</td></tr></table>																57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu						
57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71																																							
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu																																							
Actinides		<table><tr><td>89</td><td>90</td><td>91</td><td>92</td><td>93</td><td>94</td><td>95</td><td>96</td><td>97</td><td>98</td><td>99</td><td>100</td><td>101</td><td>102</td><td>103</td></tr><tr><td>Ac</td><td>Th</td><td>Pa</td><td>U</td><td>Np</td><td>Pu</td><td>Am</td><td>Cm</td><td>Bk</td><td>Cf</td><td>Es</td><td>Fm</td><td>Md</td><td>No</td><td>Lr</td></tr></table>																89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr						
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103																																							
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr																																							
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			
		<table><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr></table>																																																			

電子配置の例

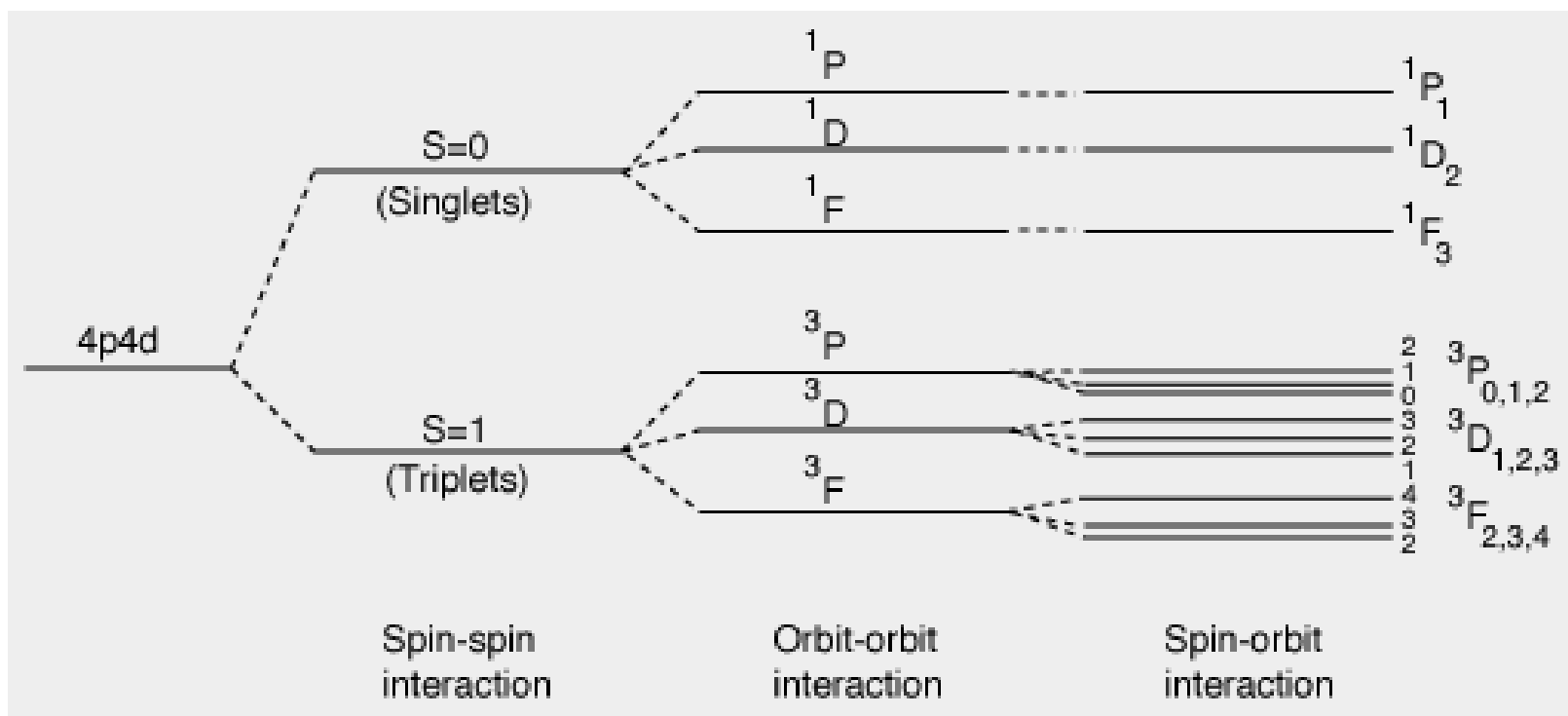
	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8A
n	H 1							He 2
1								
2	Li 3 	Be 4 	B 5 	C 6 	N 7 	O 8 	F 9 	Ne 10 
3	Na 11 	Mg 12 	Al 13 	Si 14 	P 15 	S 16 	Cl 17 	Ar 18 

2個以上のフェルミ粒子は 同じ量子状態には占有できない: パウリの排他原理



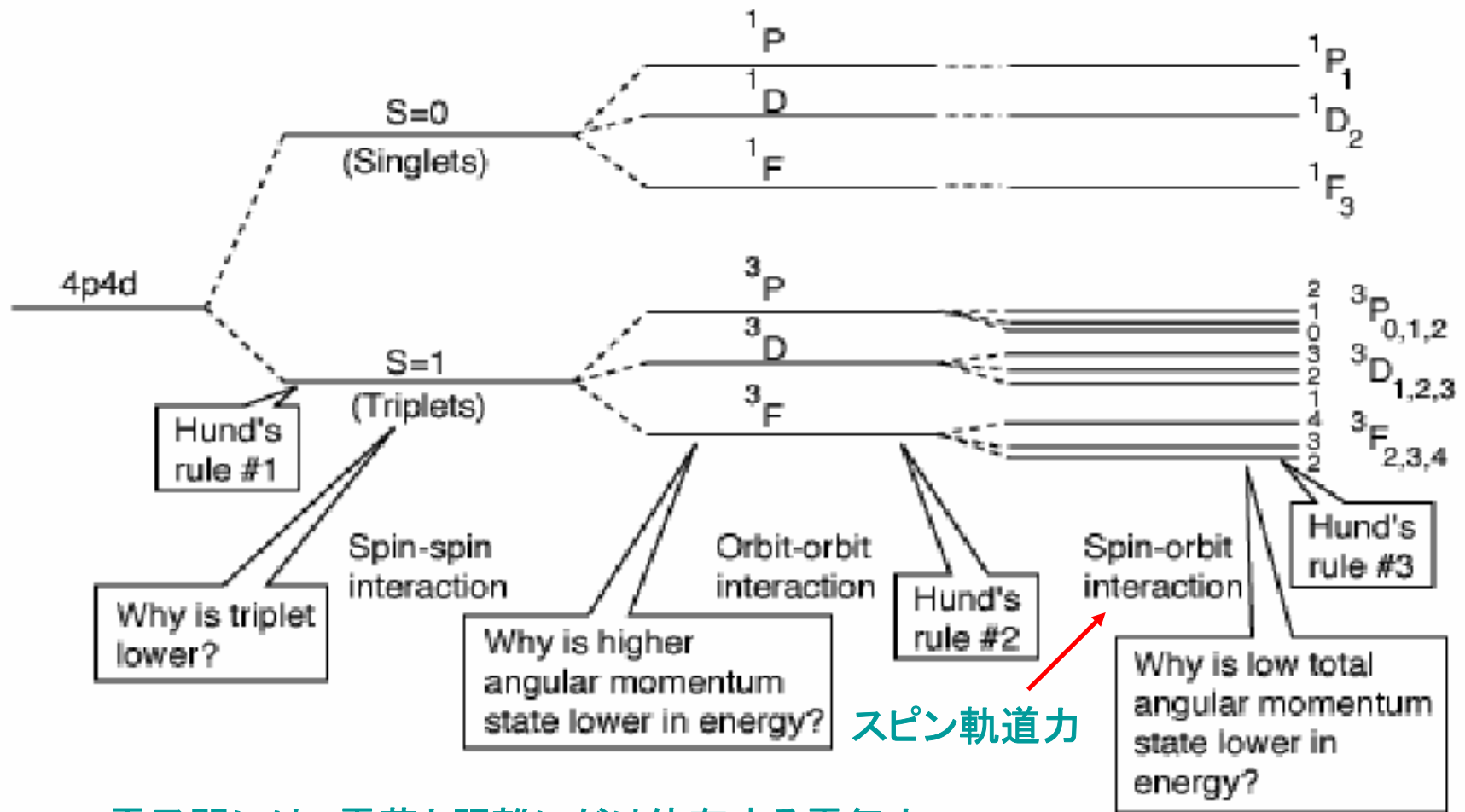
フェルミ粒子—電子、陽子、中性子—

多電子原子(1) 励起スペクトル



原子の形状(=電荷分布)は球形

多電子原子(2)励起スペクトルと パウリ原理、電子相関



Q. 電子間には、電荷と距離にだけ依存する電気力が働くのに、なぜスピン・スピン相互作用が生じるのか？

原子におけるスピン・軌道相互作用 -その起源と実例-

電子に対する相対論的な効果により、
軌道角運動量とスピン角運動量の間には相互作用が働く

外部磁場の下でのゼーマン効果

→ 原子における電エネルギー・スペクトルの微細構造

→ 半導体における価電子帯のエネルギー分岐

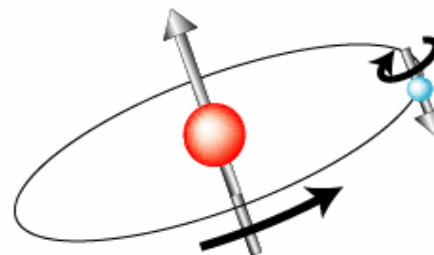
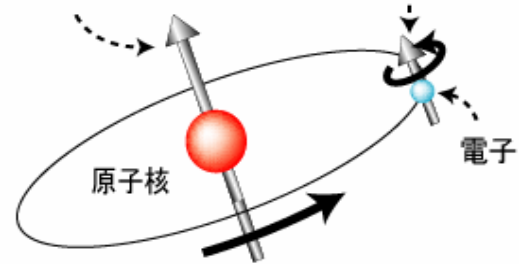
→ 2次元電子正孔系におけるスピン軌道結合効果

$$H_{so} = f(r) \underline{\vec{l} \cdot \vec{s}}$$

$$f(r) \equiv \frac{1}{2m^2c^2} \frac{1}{r} \frac{dV(r)}{dr}$$

軌道角運動量

スピン角運動量



高エネルギー側への
エネルギー分岐

低エネルギー側への
エネルギー分岐



電子のスピン軌道相互作用項の導出

原子核が軌道電子のいる場所につくる電場

$$\vec{E} = \frac{Ze}{4\pi\epsilon_0} \frac{\vec{r}}{r^3}$$

速度 $\vec{v}$ で運動する電子が'感じる'有効磁束密度

$$\begin{aligned} \vec{B} &= -\frac{1}{c^2} \vec{v} \times \vec{E} = \frac{Ze}{4\pi\epsilon_0} \frac{\vec{r} \times \vec{v}}{c^2 r^3} \\ &= \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right) \frac{1}{c^2} \frac{Ze}{mr^3} \vec{\ell} \quad (\vec{\ell} \equiv \vec{r} \times m\vec{v}) \end{aligned}$$

磁束密度の中の磁気モーメントベクトルに働くポテンシャル(相互作用)

$$H_{so} = -\vec{\mu}_s \cdot \vec{B} = \frac{e}{m} \vec{s} \cdot \vec{B} \quad \left(\vec{\mu}_s = \frac{-e}{m} \vec{s} \right) \quad \text{一般のポテンシャルに対して}$$

$$= \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right) \frac{Ze^2}{mc^3} \frac{1}{r^3} \vec{\ell} \cdot \vec{s}$$

$$H_{so} = \frac{1}{m^2 c^2} \frac{1}{r} \frac{\partial V(r)}{\partial r} \vec{\ell} \cdot \vec{s} \quad ; V(r) = - \left(\frac{Ze}{4\pi\epsilon_0} \right) \frac{1}{r}$$

$$H_{so} = \frac{1}{2m^2 c^2} \frac{1}{r} \frac{\partial V(r)}{\partial r} \vec{\ell} \cdot \vec{s}$$

← 相対論的効果: Thomas factor (1/2)

参考：運動系における‘有効電場’、‘有効’磁場

「静止」系(S系)における電場、磁場 $\vec{E} = (E_x, E_y, E_z), \vec{B} = (B_x, B_y, B_z)$

S系に対して、x軸方向に速度vで運動する系(S'系)における電場、磁場

$$\vec{E}' = (E_{x'}, E_{y'}, E_{z'}), \vec{B}' = (B_{x'}, B_{y'}, B_{z'});$$

$$E_{x'} = E_x, E_{y'} = \gamma[E_y - \beta(cB_z)], E_{z'} = \gamma[E_z + \beta(cB_y)],$$

$$B_{x'} = B_x, (cB_{y'}) = \gamma[(cB_y) + \beta E_z], (cB_{z'}) = \gamma[(cB_z) - \beta E_y],$$

$$\beta \equiv v/c, \gamma \equiv 1/\sqrt{1-\beta^2}$$

| β | が十分小さいとき

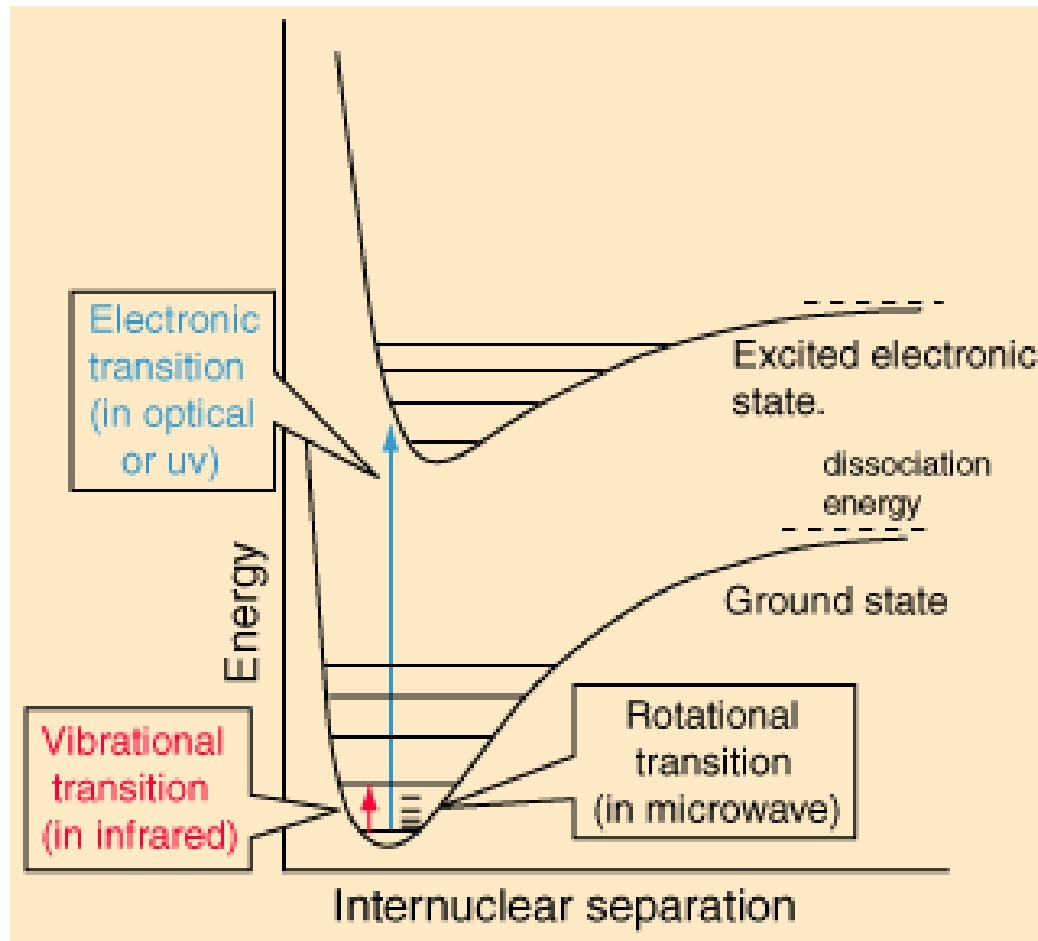
$$E_{y'} \cong E_y - \beta(cB_z), E_{z'} \cong E_z + \beta(cB_y),$$

$$cB_{y'} \cong (cB_y) + \beta E_z, (cB_{z'}) \cong (cB_z) - \beta E_y,$$

$$\rightarrow \vec{E}' \cong \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}, \quad \vec{B}' \cong \vec{B} - \frac{\vec{v} \times \vec{E}}{c^2}$$

分子の励起様式(1)全体

ポテンシャル



電子的励起

2つの電子的励起の間に

振動的励起: 原子間の間隔の
周期的変動

2つの振動的励起の間に

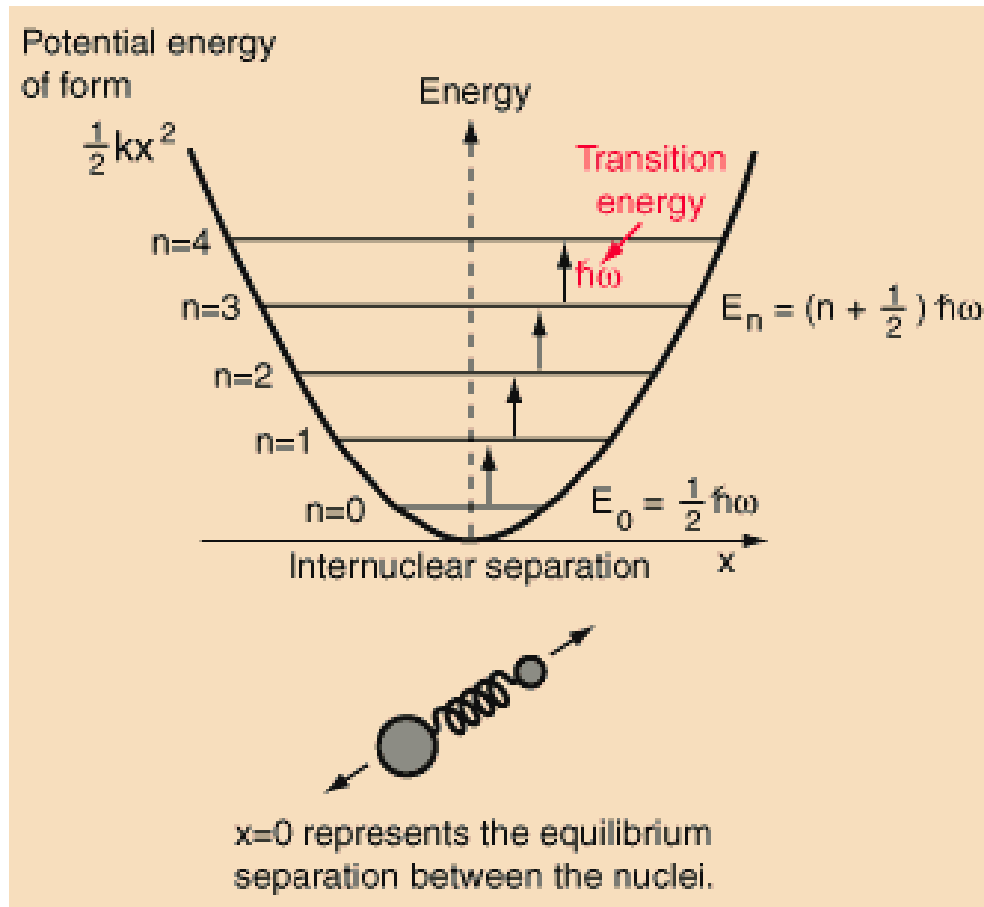
分子全体の回轉的励起

原子間距離

分子の形状(=電荷分布)は変形

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hph.html>

分子の励起様式(2) 振動的励起



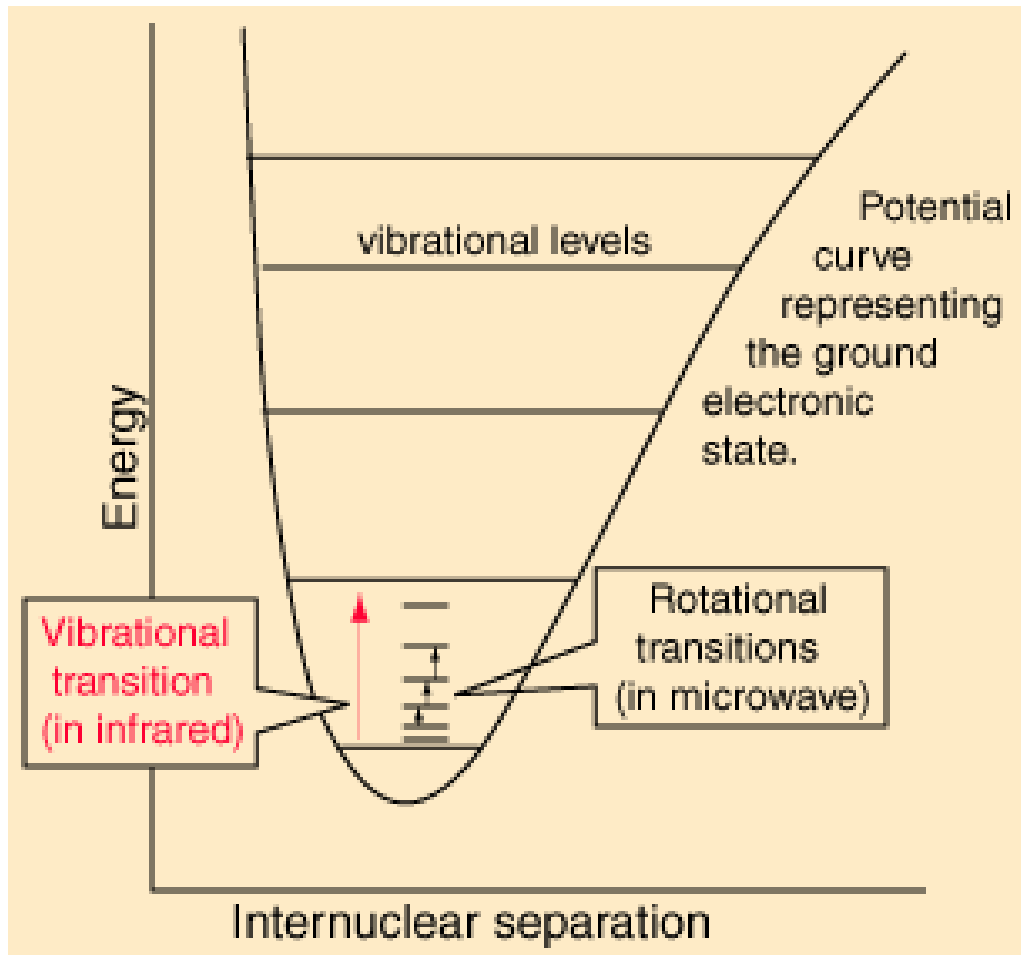
原子間距離

Q.量子力学的な振動の基本的な特徴は何か

Ans.

- (1) 等間隔の励起エネルギー
- (2) 最低エネルギーはゼロではない。
零点エネルギーと零点振動

分子の励起様式(3)回転的励起



Q.量子力学的な回転の特徴は何か

A.

回転の運動エネルギー(古典力学)

$$E_L = \frac{1}{2} I \omega^2 = \frac{1}{2I} L^2 \quad (I: \text{慣性モーメント}, L: \text{角運動量メント})$$

角運動量演算子の量子化

$$\hat{L} \Rightarrow \ell \hbar (\ell = 0, 2, 4, \dots)$$

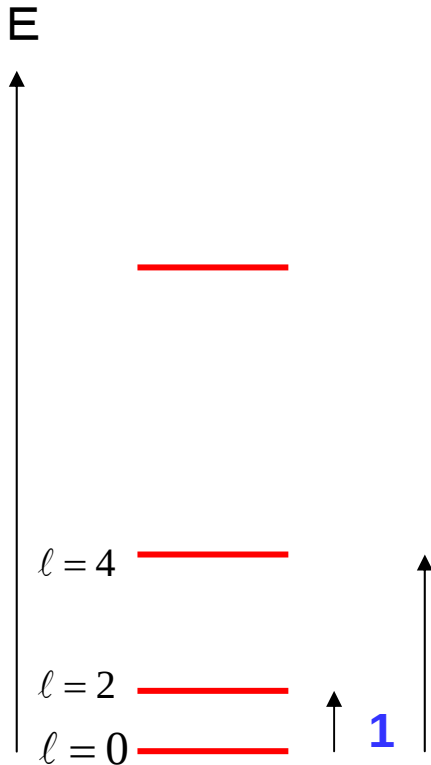
← 波動関数の対称性から偶数のみ可能

角運動量2乗演算子の固有値

$$\hat{L}^2 \Rightarrow \ell(\ell+1)\hbar^2 \quad (\ell=0, 2, 4, \dots)$$

回転の励起エネルギー(量子力学)

$$E_\ell = \frac{1}{2I} \hbar^2 \ell(\ell+1)$$



1950—60年代の原子核研究

強結合系の典型とされていた原子核に
独立粒子的運動(励起構造)の証拠の発見

中間子の発見(測定)⇒湯川秀樹博士、ノーベル賞受賞

核力の3領域理論(日本における核力研究グループ)

スピン軌道結合力の導入による魔法数の
実体的(現象論的)説明

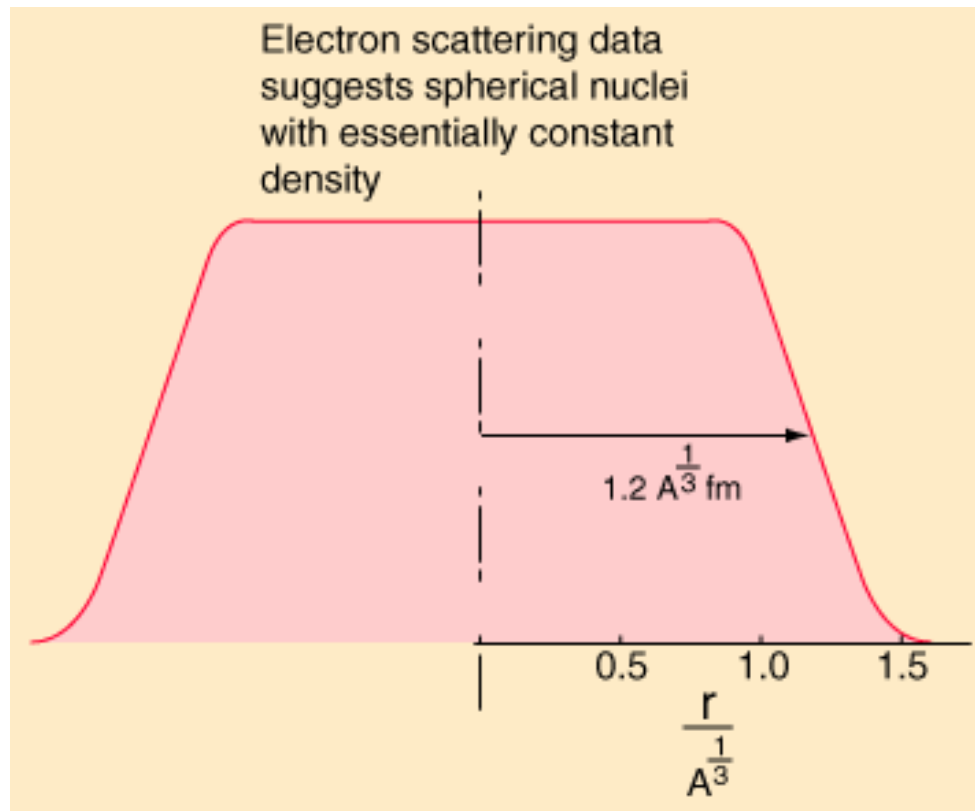
回転的励起、振動的励起の発見と量子力学的理解

分子的励起構造[クラスター構造]の発見
独立粒子描像の成立の根拠の解明
(Breuckner理論)

→電子ガス理論、磁性体理論への応用、

原子核の大きさ、密度

$$r = r_0 A^{1/3} \text{ where } r_0 = 1.2 \times 10^{-15} \text{ m} = 1.2 \text{ fm}$$



核力から出発した原子核動力学の理解

—原子核多体問題の究極の目標—

- 運動エネルギー＋核子間相互作用（2体力＋3体力）

⇒ どのようにして自己束縛系が成立するか

核力の特異性と複雑さ：短距離斥力、テンソル力、多体力成分

〔←核子中間子系からの中間子自由度の消去、核子の複合粒子性、相対論的效果〕
パウリ原理、
同じ質量の2種類のフェルミ多体系
クーロン力効果

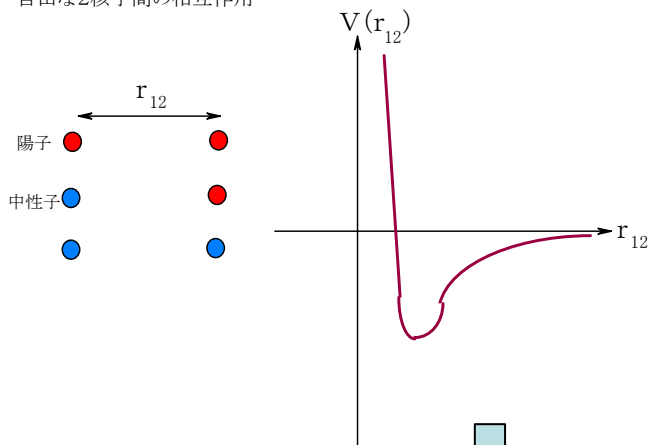
- → 自己無撞着平均場＋多体相関；
（有効一粒子エネルギー）＋（有効相互作用）
有効一粒子エネルギー ← 一粒子運動エネルギー＋一粒子ポテンシャル

（各種の）平均場と（それぞれの）多体相関の相互規定性

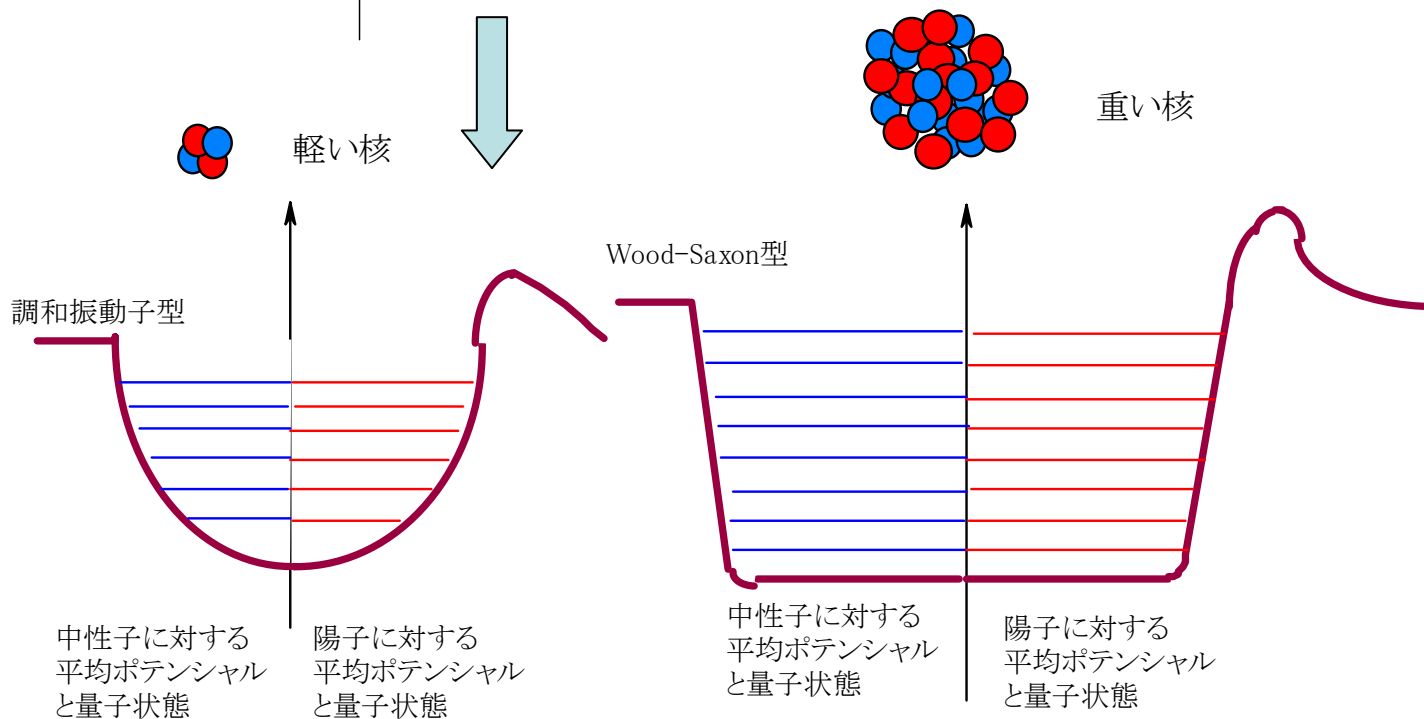
有限量子多体系における平均場の概念の有効性と限界
物理量の基底状態期待値＞量子揺らぎ、＞＞ではない！
複数の平均場間の相互移行—「相転移」—
⇒多体相関の複合構造、平均場の複合構造の理解
大次元対角化による非摂動的計算

核内有効相互作用の不思議

自由な2核子間の相互作用



原子核内核子の平均場(一体ポテンシャル)



原子核の励起様式、形状は陽子数、中性子数、励起エネルギーの高低に大きく依存して多種多彩である

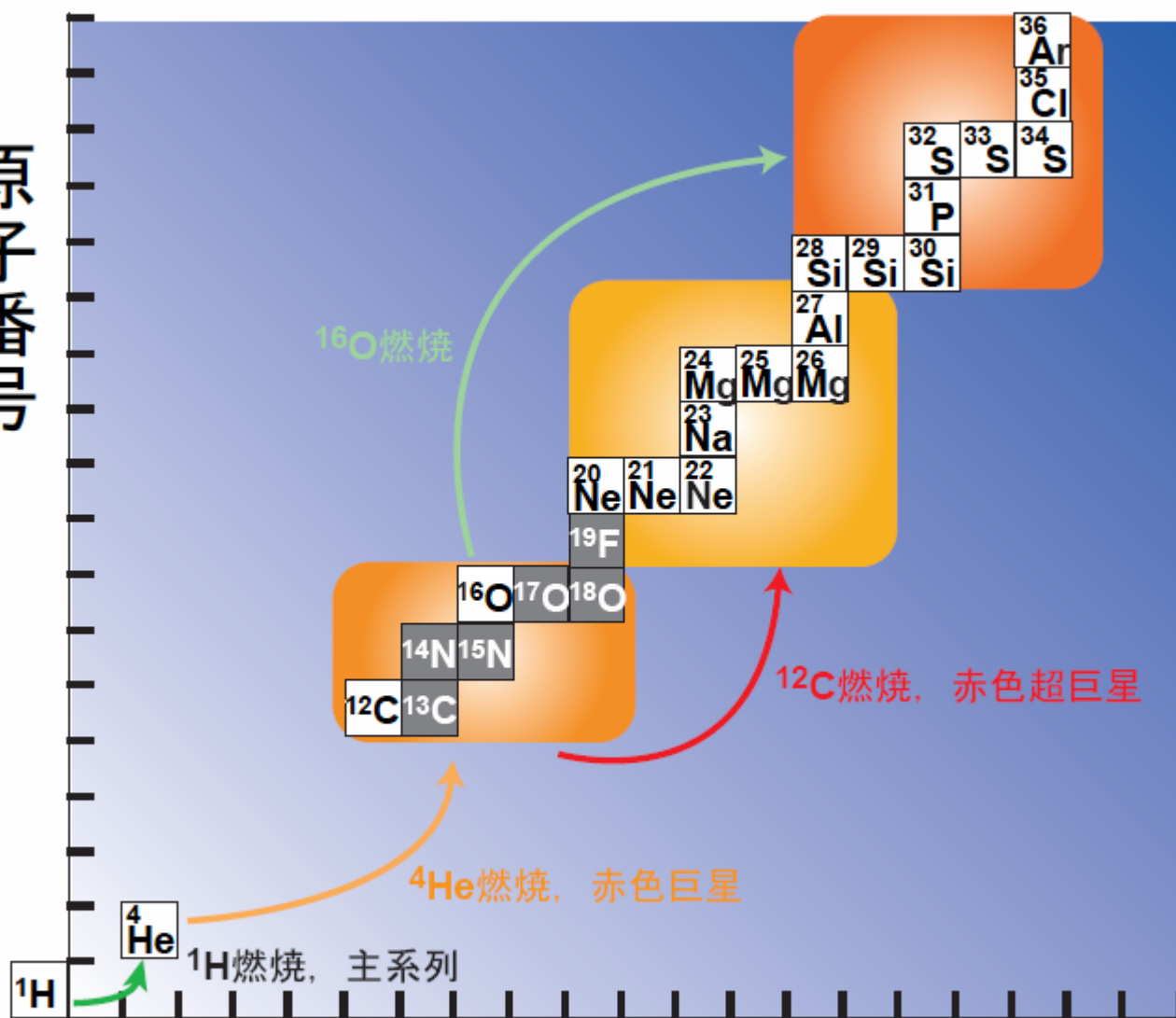
有限量子多体系としての原子核

1. 軽い核の結合エネルギー〔安定度〕は質量数により大きくことなる。
 $BE(^2_1\text{H}) = 2.2 \text{ MeV}$, $BE(^4_2\text{He}) = 28.4 \text{ MeV}$
 ^5_2He の束縛状態は存在しない。
2. 同じ陽子数 Z をもつ原子核でも、中性子数により、励起スペクトル(形状)は大きく異なる。
振動スペクトル(球形)から回転スペクトル(変形)への構造変化
(「相転移」)
3. 熱中性子吸収により $^{235}\text{U}(Z=92)$ は核分裂するが、 ^{238}U は分裂しない。
4. 熱中性子吸収により $^{239}\text{Pu}(Z=94)$ は核分裂するが、 ^{240}Pu は熱中性子を吸収しなくても、自発核分裂する。

□ 直接できる核種

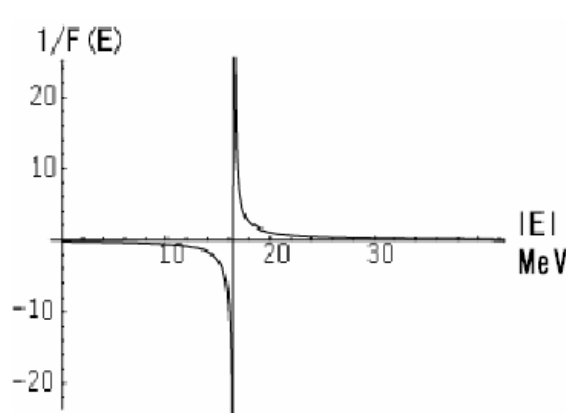
■ 間接的にできる核種

原子番号

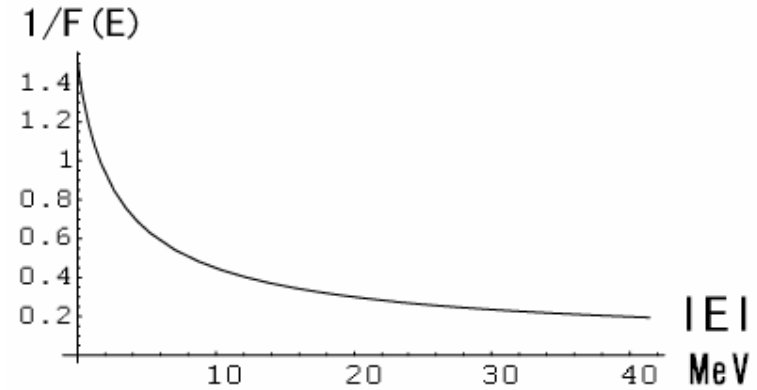


中性子数

質量数 $A=5$ の場合



$\ell=0$

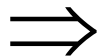


$\ell=1$

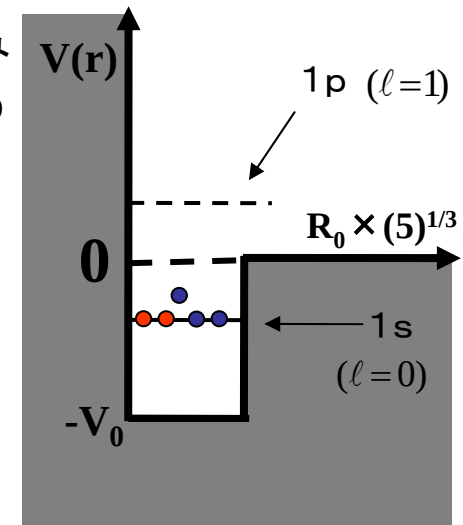
質量数 $A=5$ のときに現れるエネルギー準位は $1s(\ell=0)$ のみである。さらにフェルミガス模型を適用しているので、ひとつの準位を占めることの出来る粒子は2個までである。

よって、陽子と中性子を合わせて4個しか占有できない

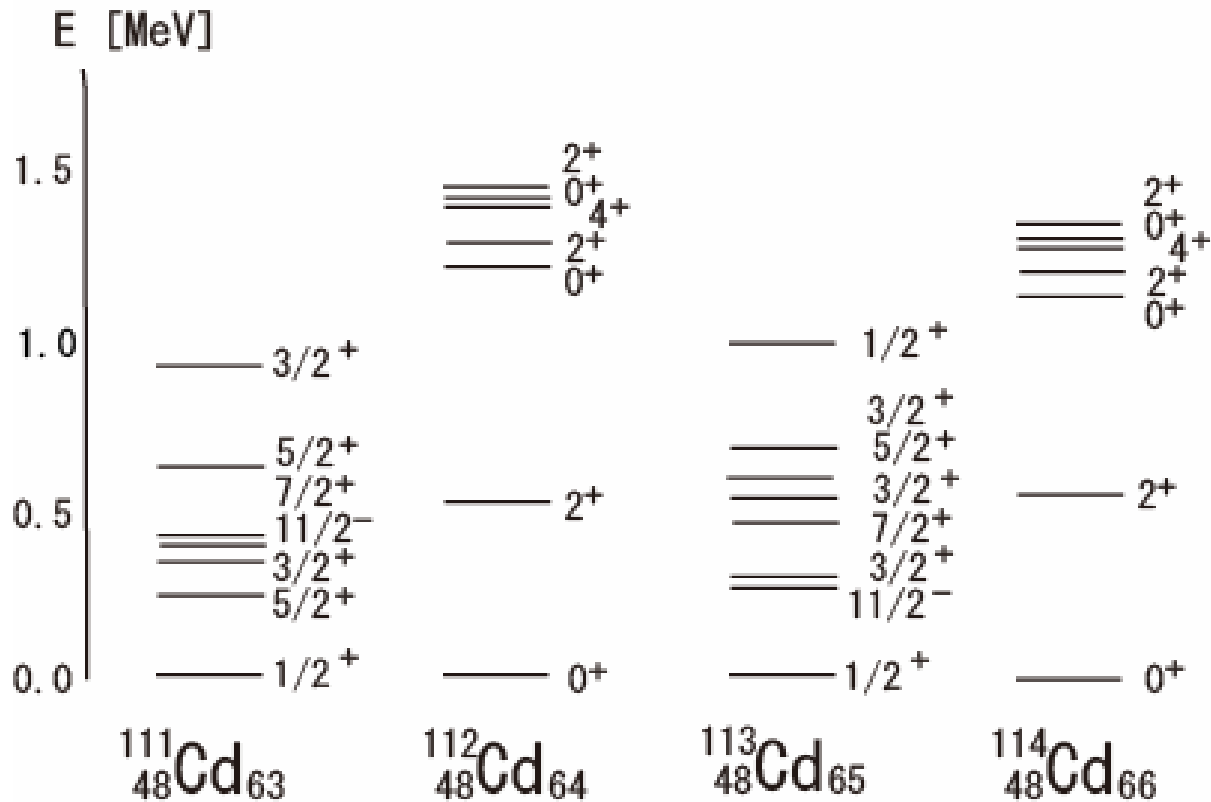
5個目の粒子の入る $1p(\ell=1)$ 軌道が現れない



質量数5の原子核が自然界に存在しない理由



Cd 核の励起エネルギースペクトル の中性子数依存性

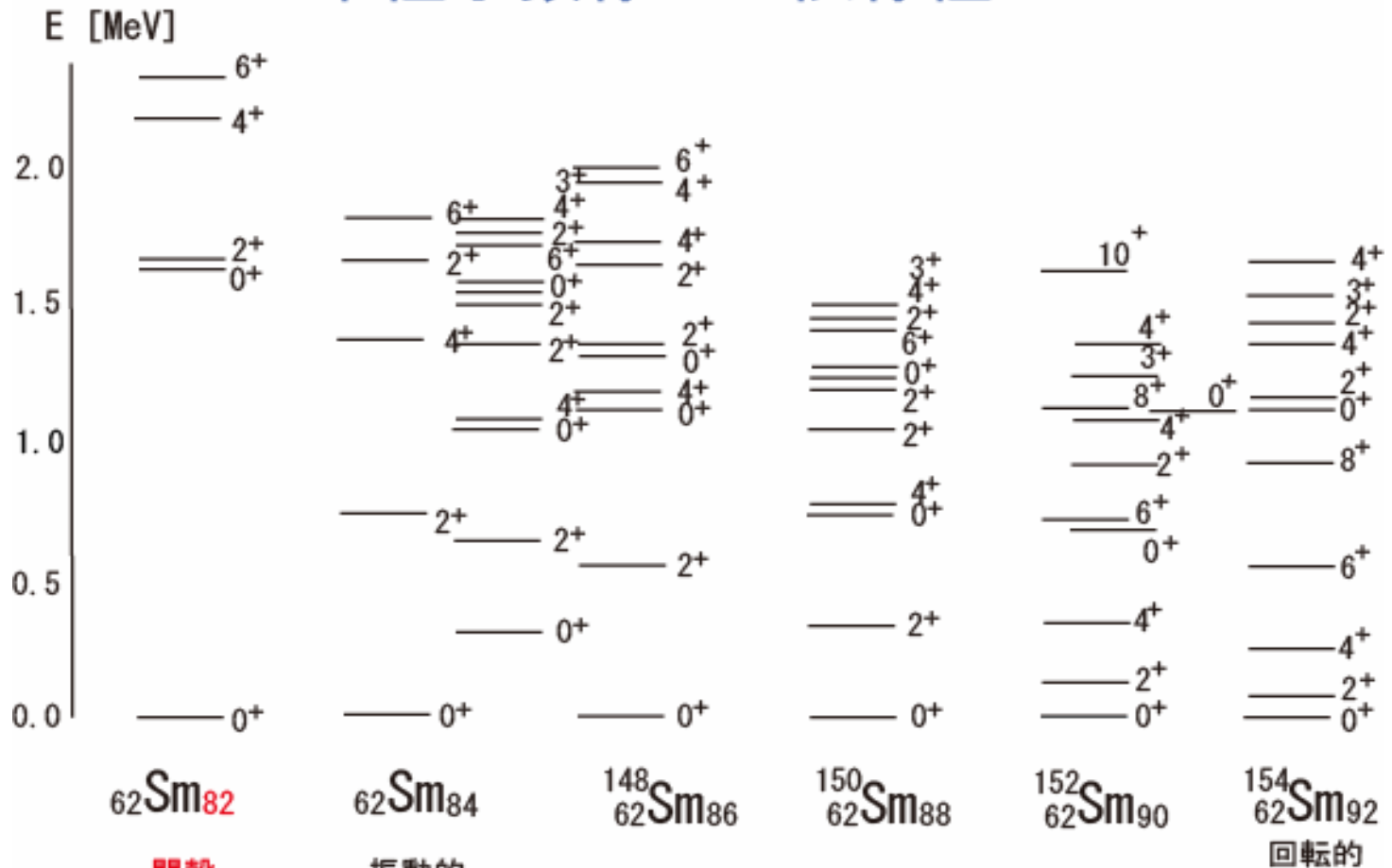


わずか1個の中性子が追加されただけで、大きな変化

Q. 偶数核と奇数核で全スピン(角運動量)が整数と半整数になるのはなぜか

Sm 核の励起エネルギースペクトル

中性子数存への依存性



球形

軸対称変形

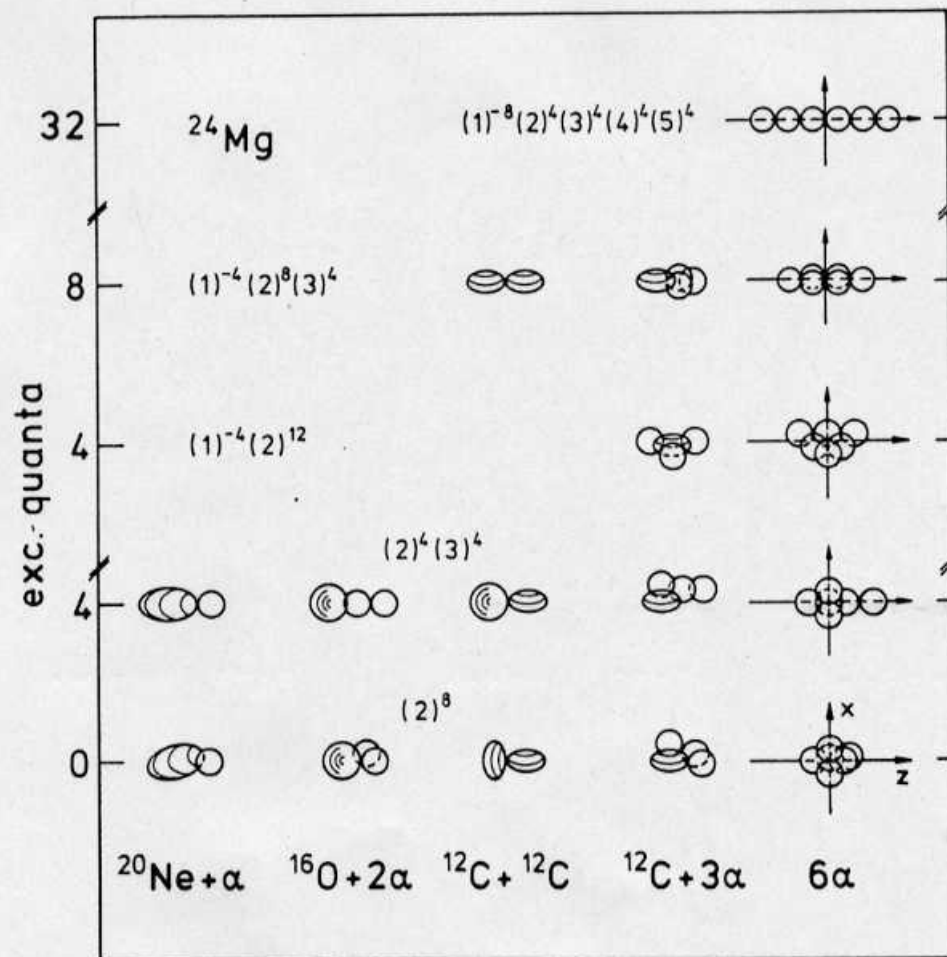
原子は球形、分子は変形

原子核の振動(励起)

低励起エネルギーにおける振動的運動；
表面振動。超伝導状態の効果
量子論的性格が強い

高励起エネルギーにおける振動的運動：
巨大共鳴状態
古典的振動に類似。

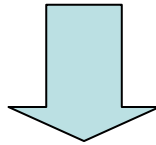
クラスタ的励起(原子核分子)



分子が原子からなるように、
原子核もクラスターと呼ばれる
塊の組合せと考えることができます。
つまり、陽子と中性子からなる塊が
でき、さらにその塊が結合してできる
原子核が存在します。こうした塊(主
に He4 の原子核)を考えることによっ
て、より多くの原子核を統一的に理
解できる

没個性の粒子からなぜ多彩な個性が生まれるか？ メゾスコピック系(有限量子多体系)の不思議

すべての電子は同じ性質をもつ
すべての陽子は同じ性質を持つ
しかし、



原子は100種類以上も存在しているが、その多様性は原子核における正電荷の数と**電子の個数**が異なるということだけから生じている。

閉じ込めポテンシャルの形状と

そこに人工的に閉じ込められる**電子の個数**により性質の違いが現れる。

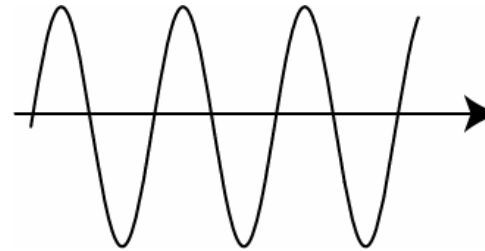
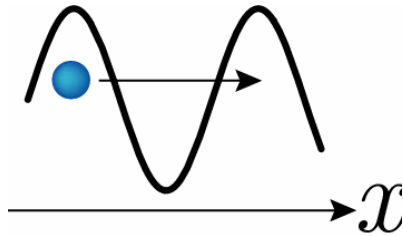
2個以上の電子の場合、

電子相関が重要になってくる。

1体系から多体系へ

1)自由粒子:平面波

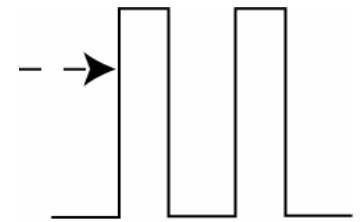
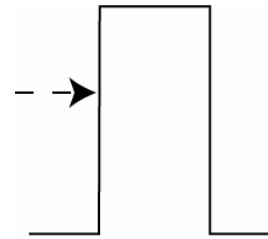
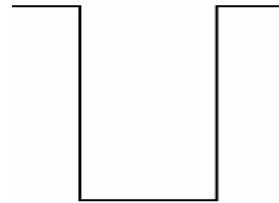
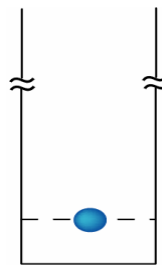
$$\psi(x) \propto e^{ikx} \rightarrow \Psi(x, t) \propto e^{i(kx - \omega t)}$$



$$\hbar\omega = E$$

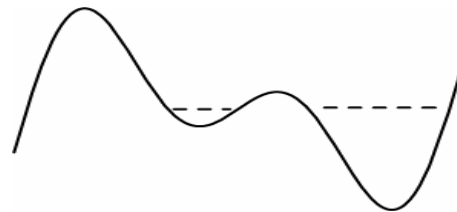
2)外場の中の1粒子

矩形ポテンシャル



解析解

非矩形ポテンシャル

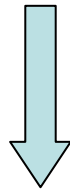
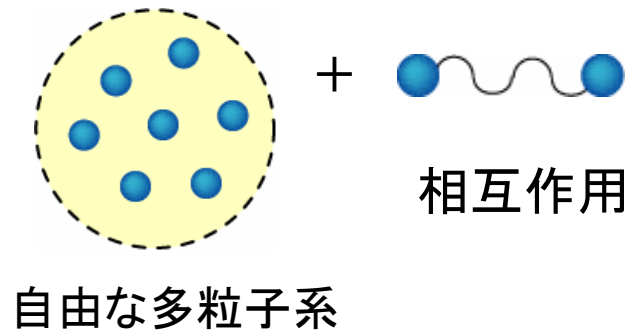


WKB近似
数値解法

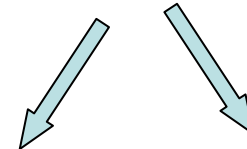
3)相互作用しない多粒子系

個別粒子の性質の総和、量子統計性(パウリ原理)

4)相互作用する多粒子系(孤立多粒子系)では ある粒子は他の粒子がつくる平均場の中を運動



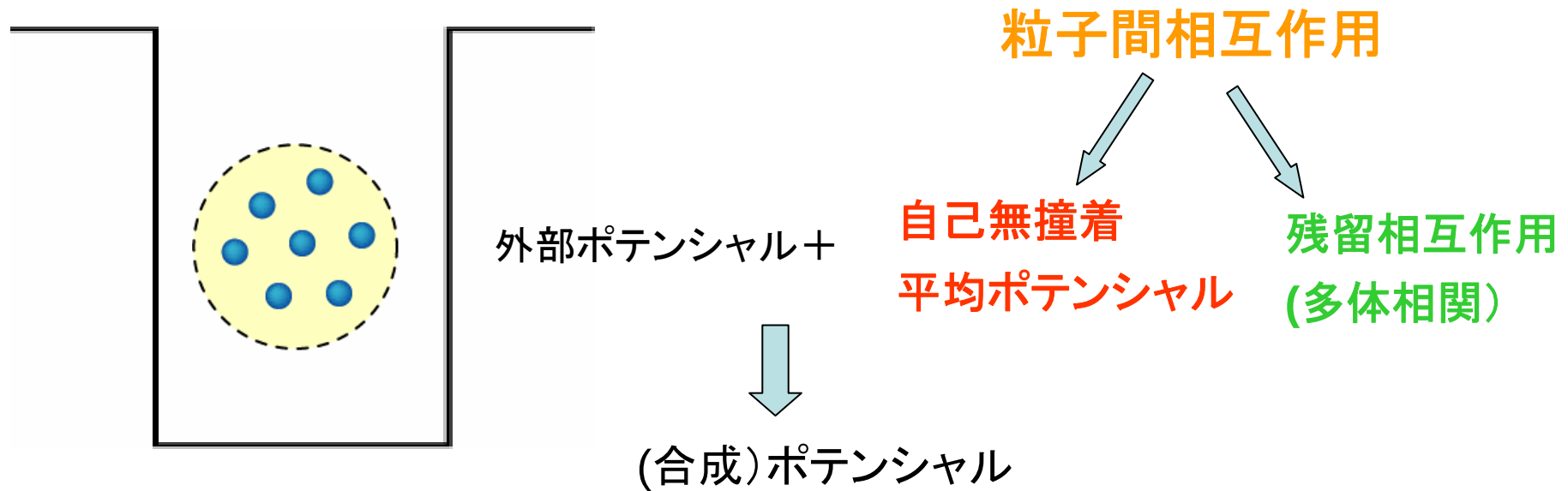
粒子間相互作用



自己無撞着
平均ポテンシャル

残留相互作用
(多体相関)

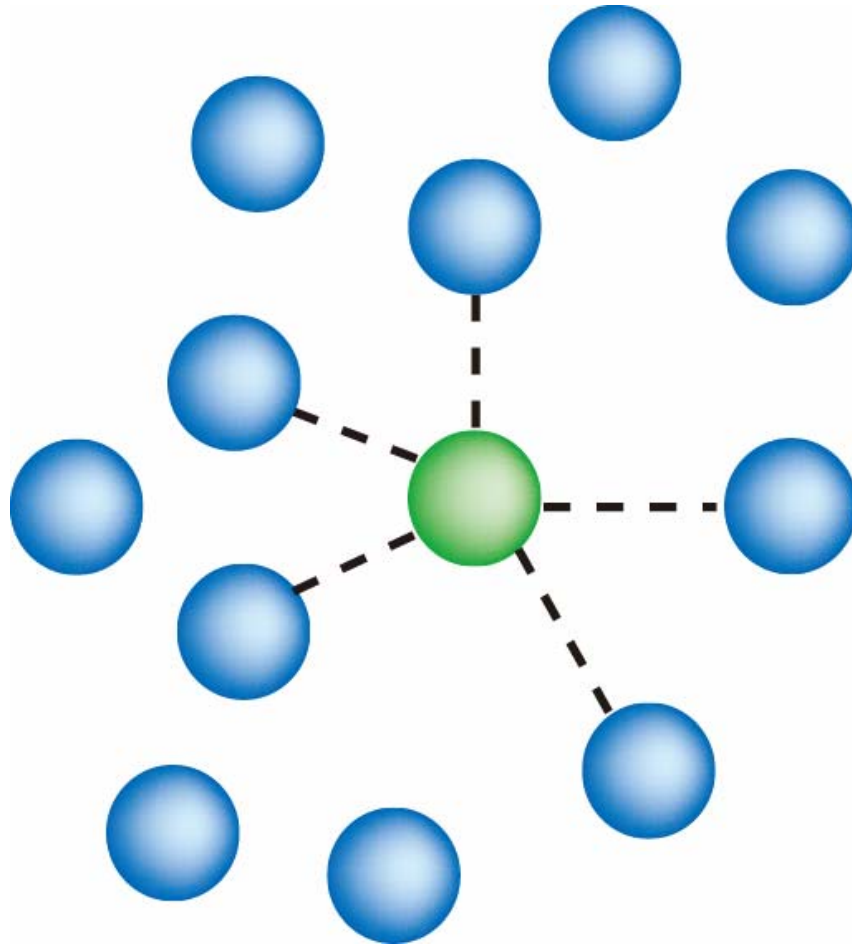
5) 外場の中の相互作用する粒子系



類似の現象(しくみ)

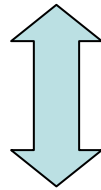
静電場 + 外部電場 $\longrightarrow$ 合成電場

平均場のイメージ



多体相関のイメージ

相互作用を考慮した場合の、
構成要素間の**連動した運動**

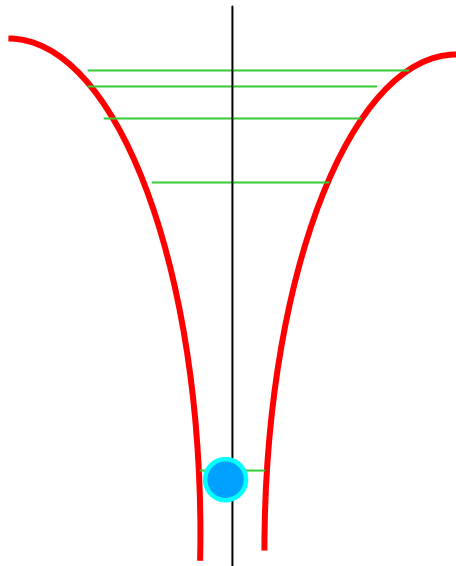


平均場(1体運動)

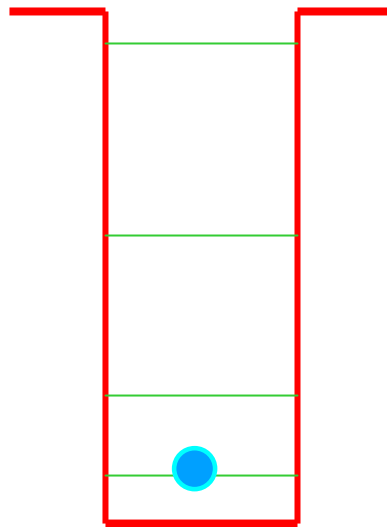
相互作用を考慮した場合の、
構成要素間の**独立した運動**

閉じ込めポテンシャルと エネルギー準位の殻構造

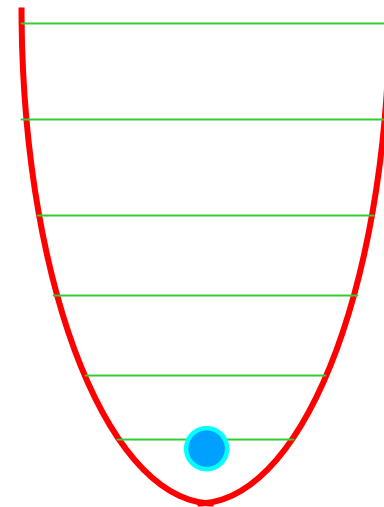
電子のエネルギー準位 ↑



自然原子
のクーロン
ポテンシャル

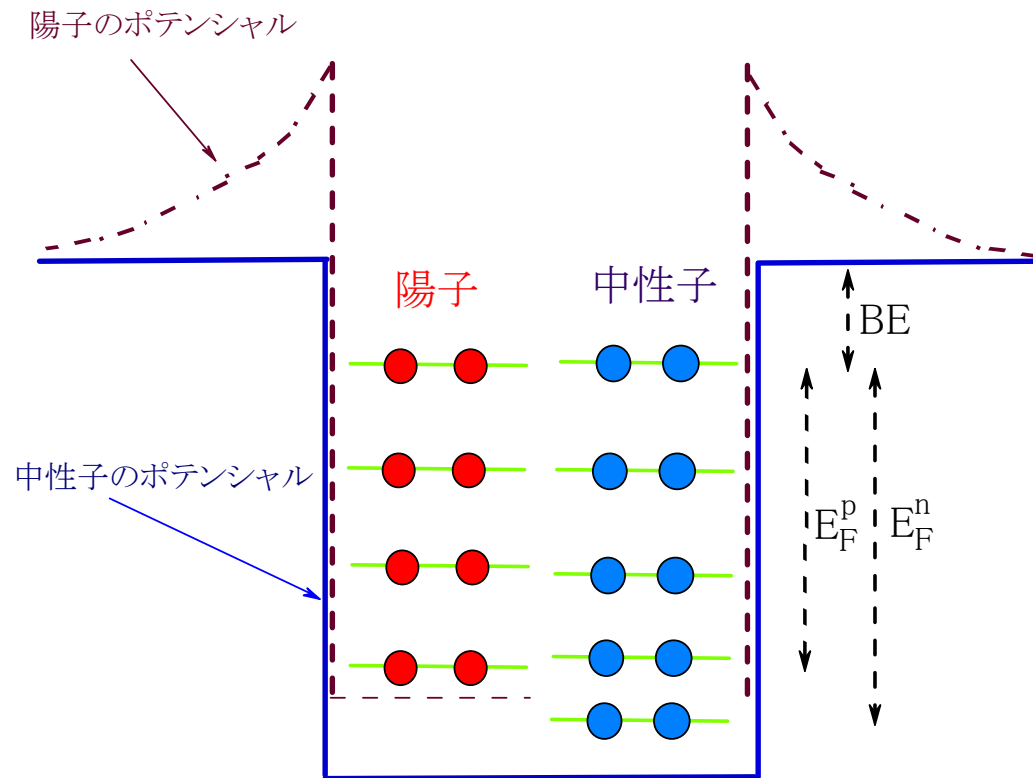


超微粒子型の
量子ドットの
井戸型
ポテンシャル



電極で閉じ込めた
量子ドットの
調和振動子型
ポテンシャル

原子核内核子の平均ポテンシャルと フェルミ気体模型による陽子と中性子の量子状態

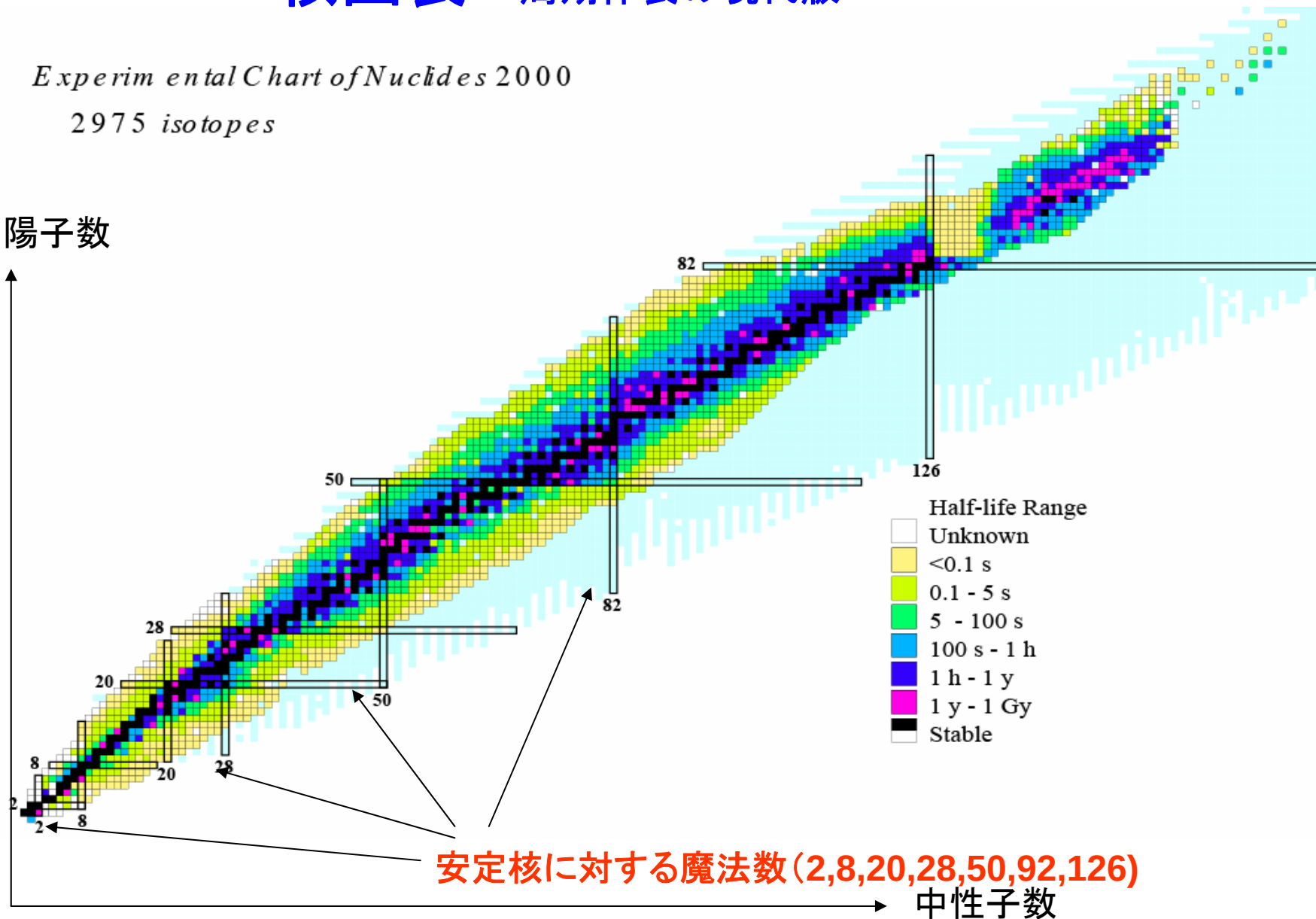


核図表 -周期律表の現代版-

Experimental Chart of Nuclides 2000

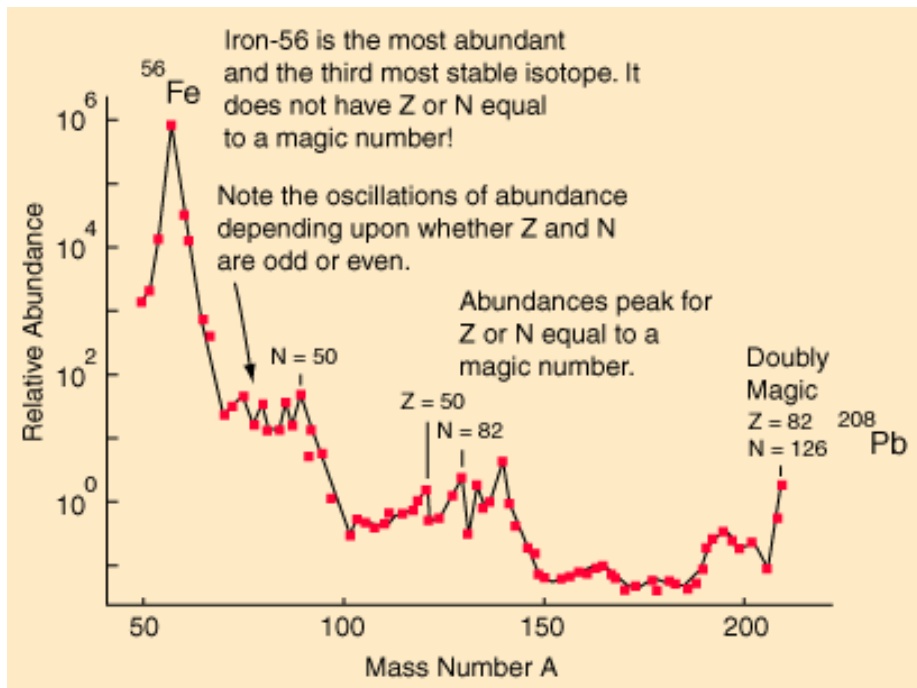
2975 isotopes

陽子数

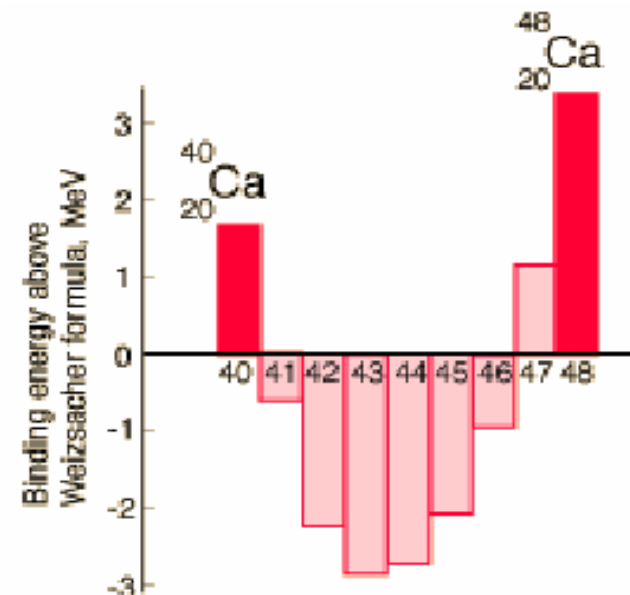


魔法数の証拠 ＝原子核における核子の殻構造の証拠

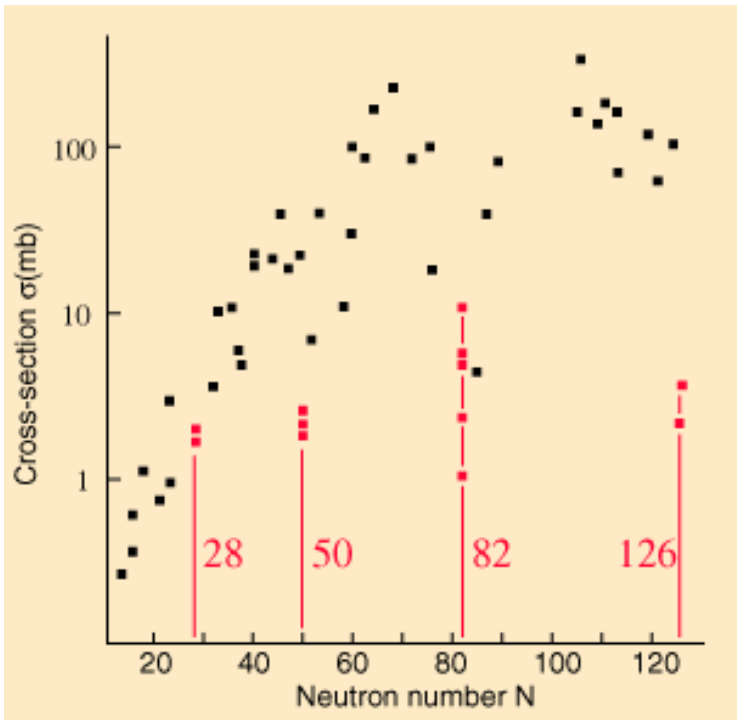
魔法数をもつ核の存在比は周囲に比べて大きい



Ca同位元素中の結合エネルギー
は $N=20,28$ の場合が大きい



魔法数の証拠： 魔法数を持つ核の中性子吸収の割合は 周囲の核に比べて小さい



ジルコニウムの同位体でもっとも豊富に存在するものは
50個の中性子をもつ ^{90}Zr である。

ジルコニウム合金 は核燃料の被覆材として
使用されている。

(J.R.ラマーシュ「原子核工学入門(上)」、
ピアソン・エデュケーション社、p.33)

核分裂生成物の質量分布における魔法数効果

- 核分裂の過程で原子核が分裂してできた核種を核分裂生成物 (fission product) という。核分裂片ともいう。
- 通常は二等分になることはなく、
- 一方が重く(質量数140程度)、一方は軽い(95程度)核になる。これは、分裂するときに**魔法数(マジックナンバー)**に近い安定な原子核になろうとするためだと解釈されている。
- 核分裂生成物がどの核種になるかはある確率で決まる。この確率を収率 (yield) という。核分裂する核種によって異なる収率分布をもっているので、核分裂生成物を分析すれば核反応を起こした核種が判る。

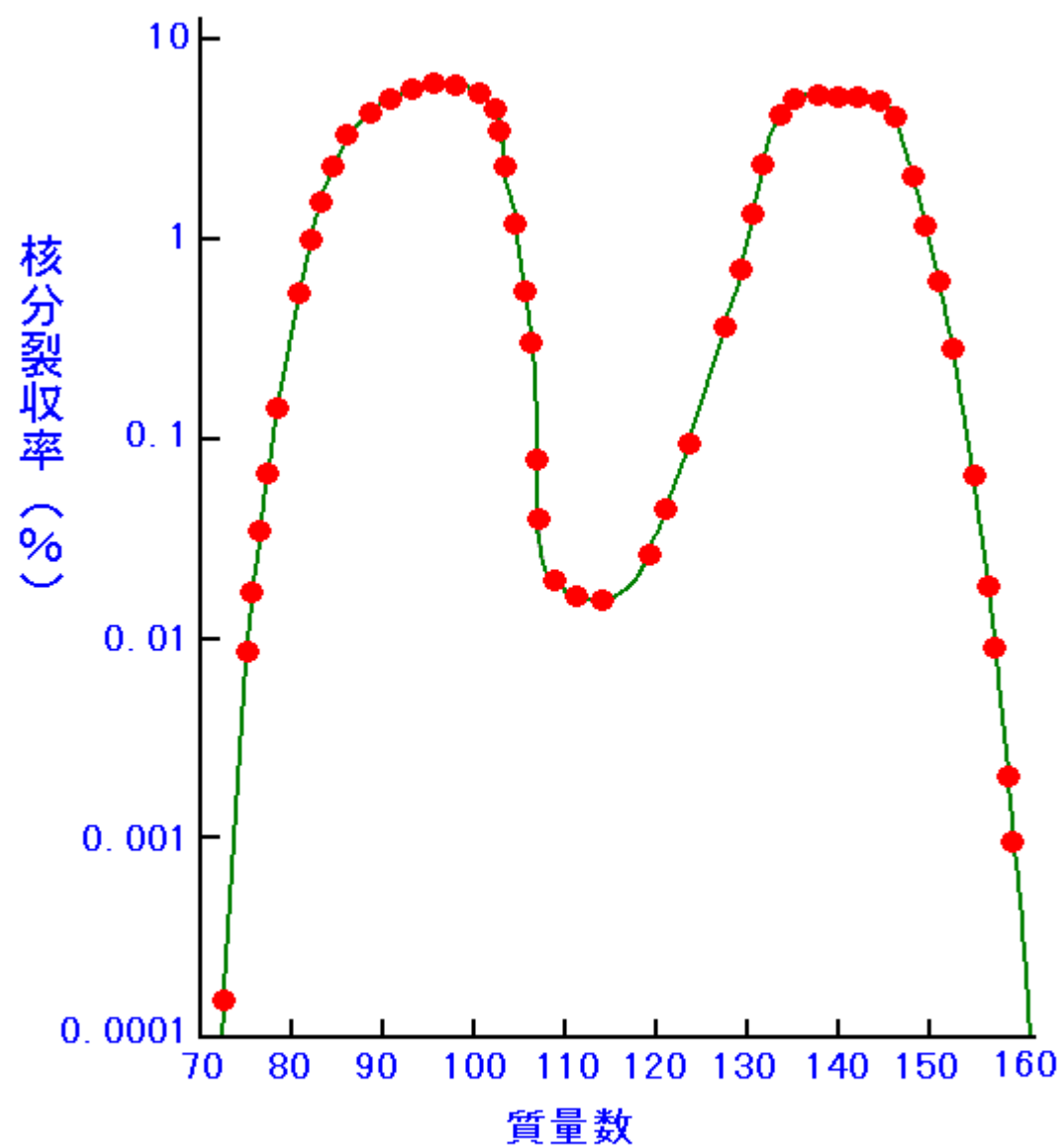
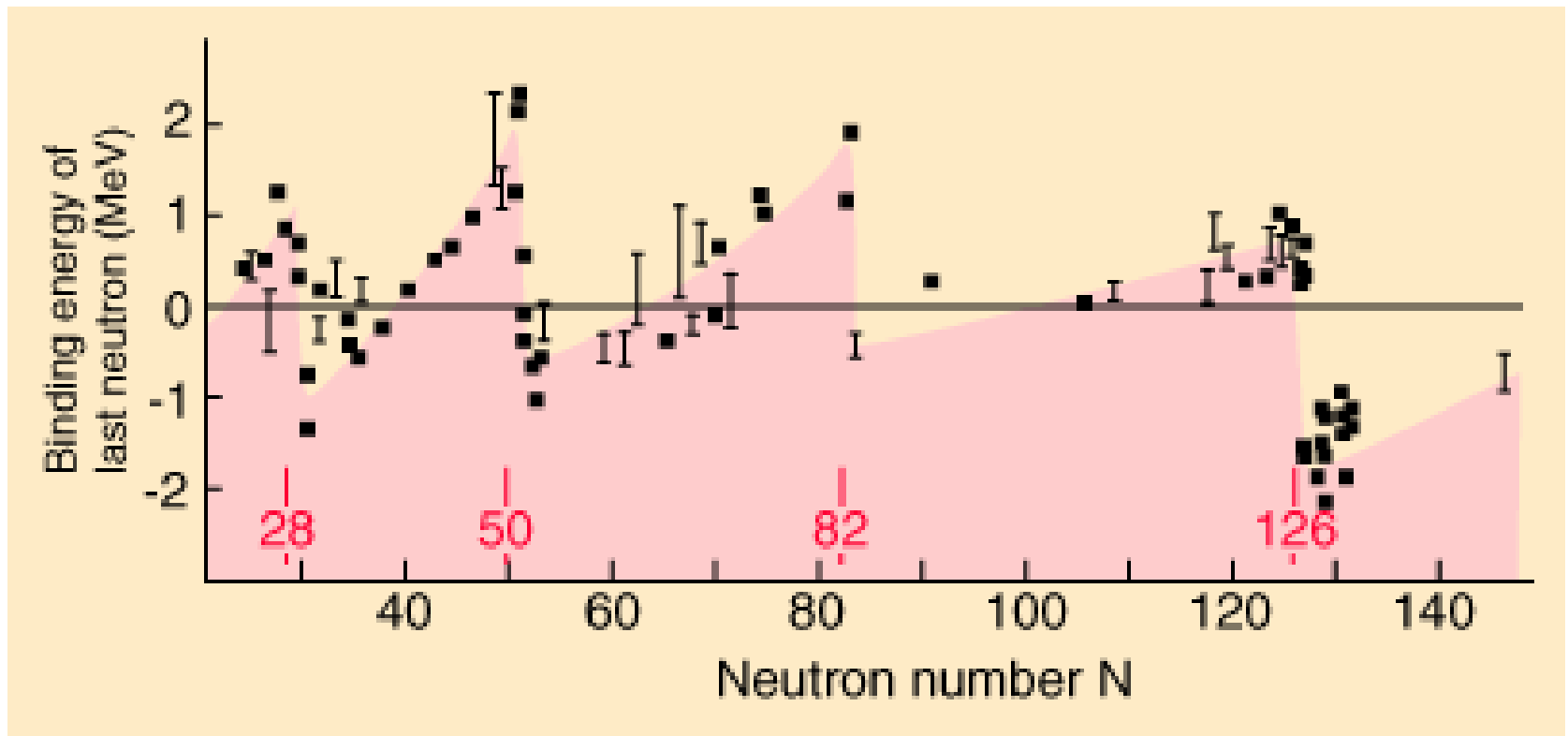


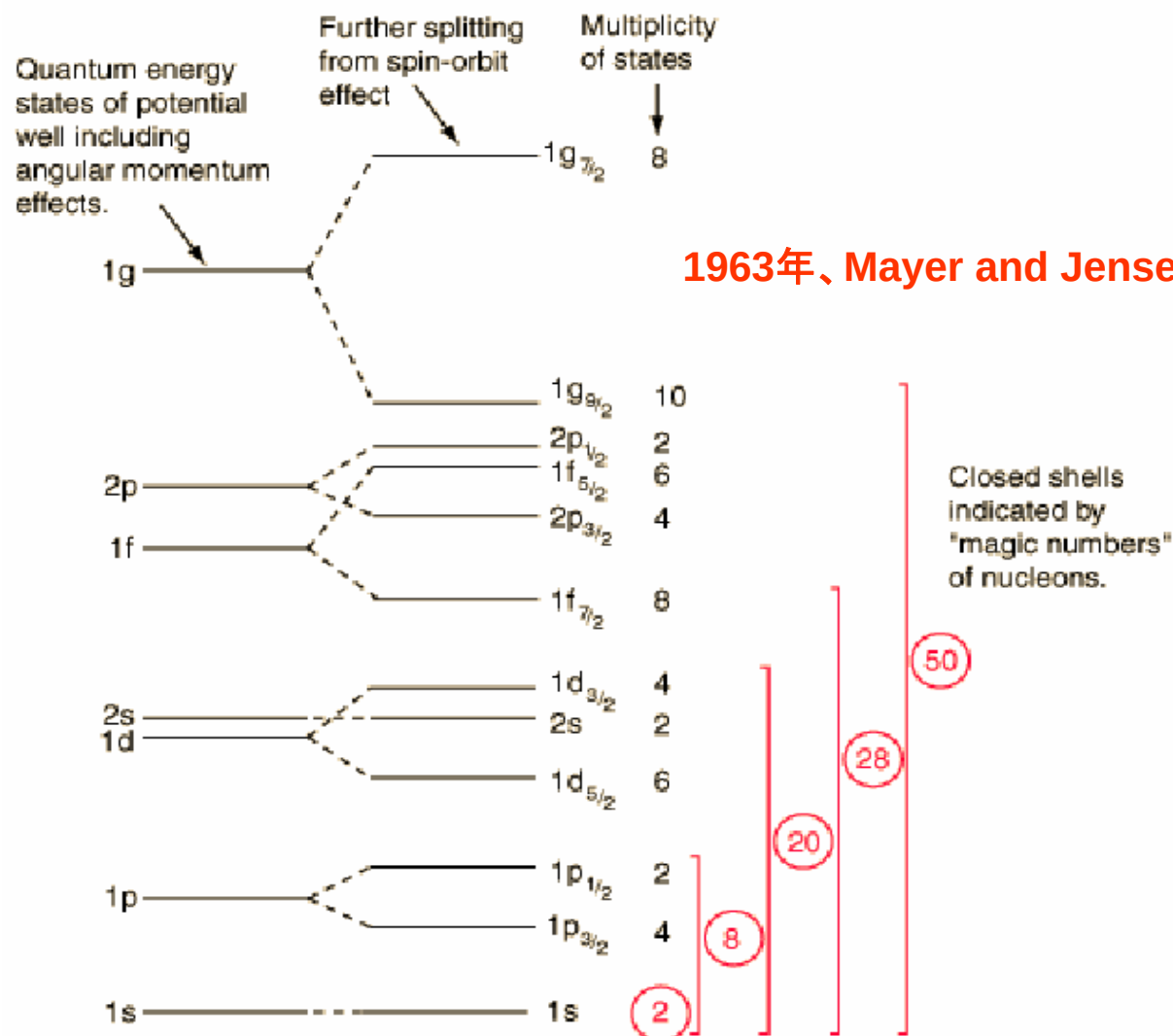
図1 U-235の核分裂生成物収率曲線

魔法数の証拠:

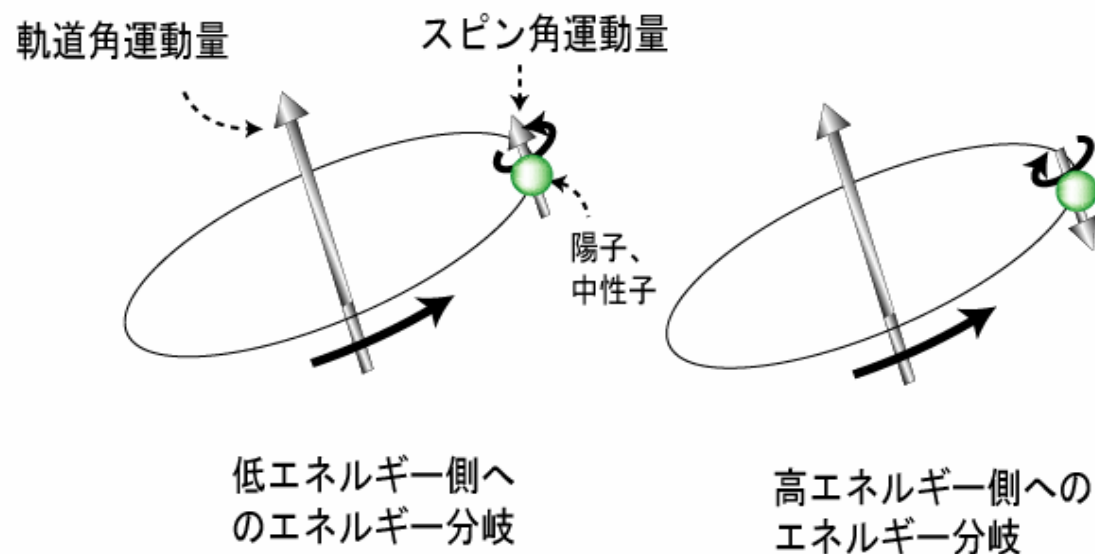
魔法数の場合、中性子の分離エネルギーが大きい



スピン軌道結合力の導入による魔法数の理解



原子核の一粒子エネルギースペクトル におけるスピン軌道相互作用



Q. 原子核は民主的な系で、力の中心はなく、核力は強い短距離領域の斥力と中間距離領域の引力を持っているのに、どうして平均場ができるのだろうか

A(1) パウリ原理により核内の核子の運動に強い制限が加わり、多核子系内における核力の効果が弱められる。

まず、散乱による遷移する最終状態は他の核子によりすでに占有された状態があるので、単純な殻模型をやぶることのできる2体散乱過程のほとんどが、パウリ原理により禁止される。

次に、高エネルギーの仮想的な励起のみが物理的に許される。しかし、エネルギーと時間の間の不確定性関係(正確には量子状態のエネルギー幅と平均寿命の積についての制限条件)のため、これらの励起は短時間しか継続できない、そして短距離に限定される。

(2) 核力の硬い芯の大きさ c (短距離における強い斥力の到達範囲)は原子核の飽和性を成り立たせるほどには大きい、原子核内2核子の基本方程式(ベーテ・ゴールドストーン方程式)により得られる波動関数は2核子の相対距離が平均的粒子間隔 d 程度がそれ以上においては自由粒子の解(平面波)に復元してしまうほど小さい。

3) 核力の引力部分のポテンシャルは弱い。

すなわち、核力の成分のひとつであるザーバー力 (Serber force) は奇パリティ状態でははたらかないのでP状態 ($\ell = 1$) では引力はなく、D波以上の部分波は遠心力ポテンシャルのために引力効果は弱まる。

以上の正味の結果は、

原子核の全般的な波動関数はひとつのポテンシャル井戸の中を相互作用しない波動関数のそれと非常によく似たものになる。

この記述には、任意の二粒子が非常に接近し、パウリ原理が強い二体相関を誘起する可能性を許すような場合に少しだけ取りこぼしがある。

以上のような事情は、量子多体問題における、関連する粒子相関についての級数展開の第一項としての平均場近似、高次項としての多体相関として、核子の有限多体系としての原子核と他のフェルミ多体系が共通性と相違点をもつことを意味している。

スピン軌道結合力の微視的原因は何か

スピン軌道結合力ー陽子中性子と電子の場合の違いー

- 1) 電子の場合; 典型的な一粒子エネルギー間隔に比べて100分の1以下の大きさである。しかし、陽子、中性子の場合; 典型的な一粒子エネルギー間隔とほぼ大きさである。
- 2) 電子の場合には、スピン軌道結合組状態のうち、軌道角運動量とスピンの逆向きに結合した状態が下がる。しかし、陽子、中性子の場合、軌道角運動量とスピンが同じ向きに結合した状態が下がる

非相対論、2体力という理論的枠組みでは、長い間理解できないとされていた。(1980年代半まで)

可能な原因; 多体理論の不備? 相対論的效果? 3体力の必要性など核力の不備?

平均場＋多体相関の効果
であるという解釈

相対論的平均場の効果
であるという解釈

3体力で説明できるかもしれないという推測

魔法数は神秘的な数ではない！

成立する機構の存在

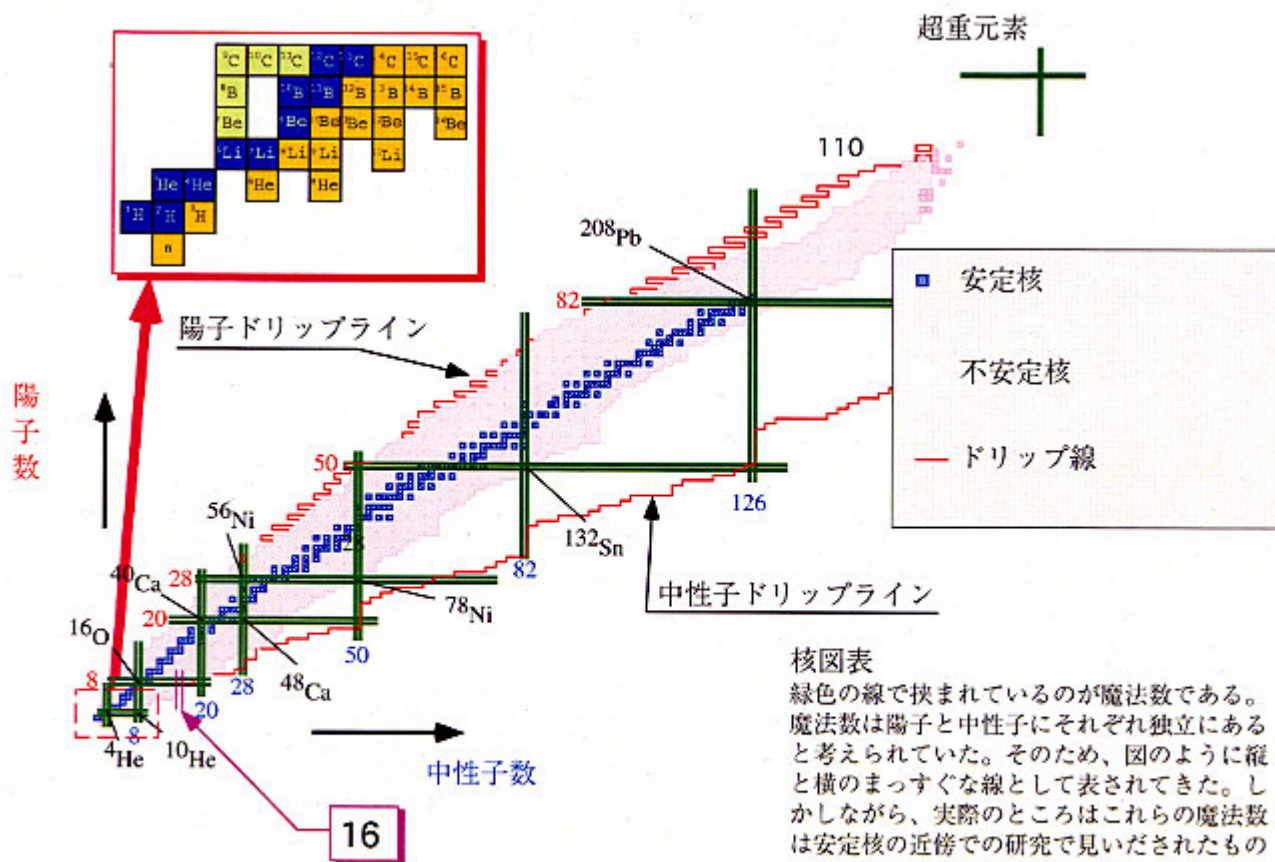
有効性と限界

魔法数の消失、新魔法数の成立；

殻構造の進化とその背景としての
平均場と多体相関は相互に影響しあう

原子核殻模軌道の「欠損」と短距離相関

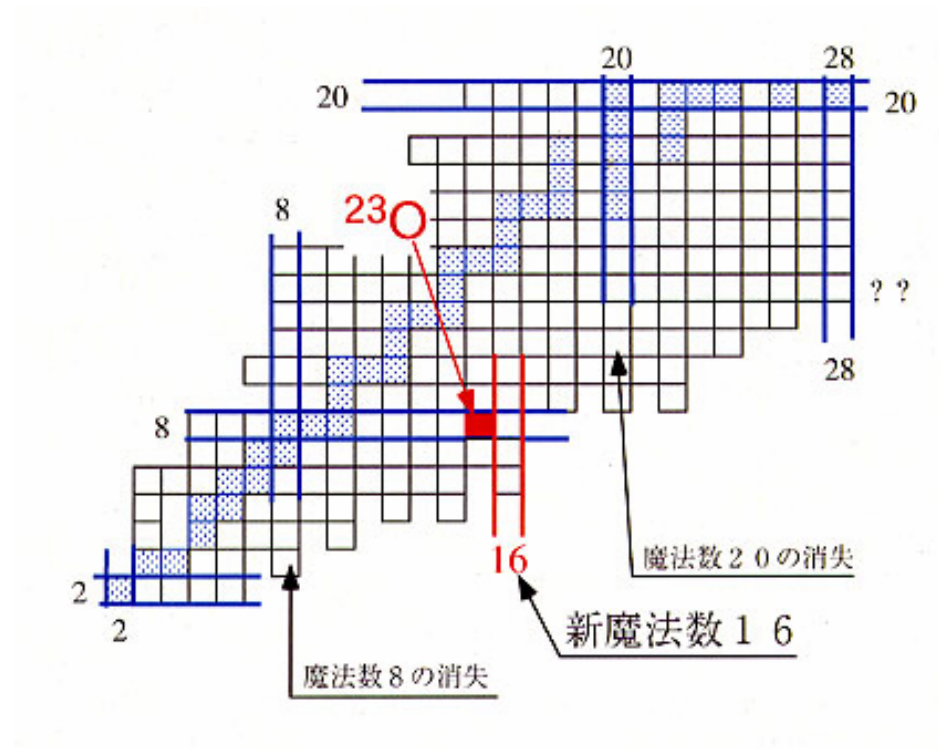
陽子数・中性子数変化に伴う殻構造の進化



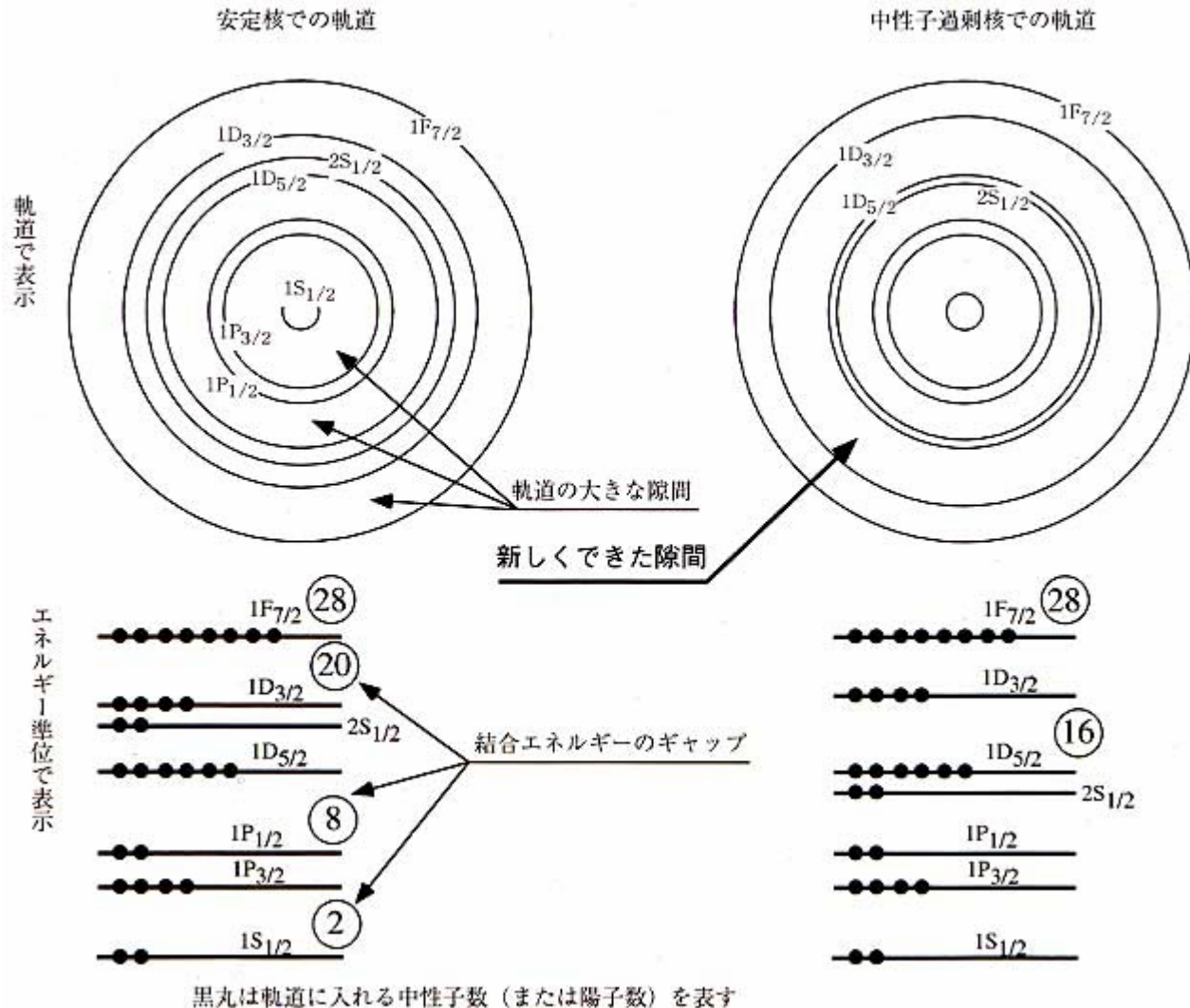
核図表

緑色の線で挟まれているのが魔法数である。魔法数は陽子と中性子にそれぞれ独立にあると考えられていた。そのため、図のように縦と横のまっすぐな線として表されてきた。しかしながら、実際のところはこれらの魔法数は安定核の近傍での研究で見いだされたものであり、RIビームでの研究が始まるまでは安定核から離れたところでの魔法数は想像以上のものではなかった。このたびの研究で安定核から離れたところに新しい魔法数があることが発見された。

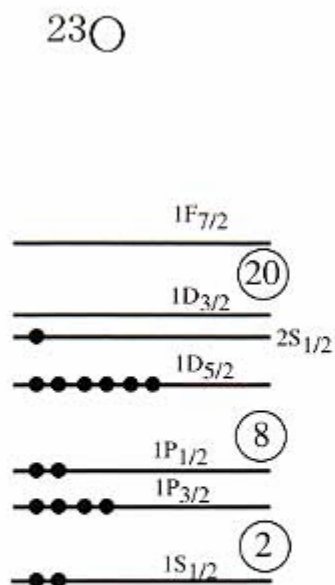
魔法数の消滅と新魔法数



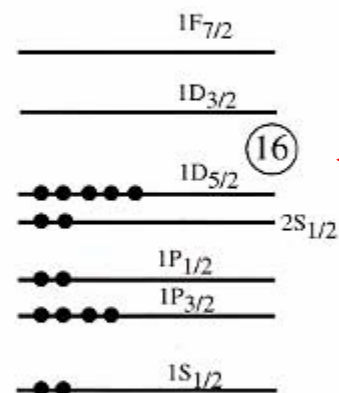
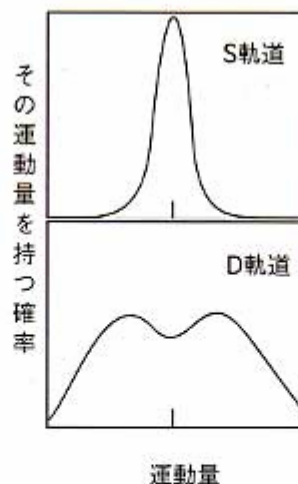
一粒子軌道エネルギーの間隙 —安定核と中性子過剰核—



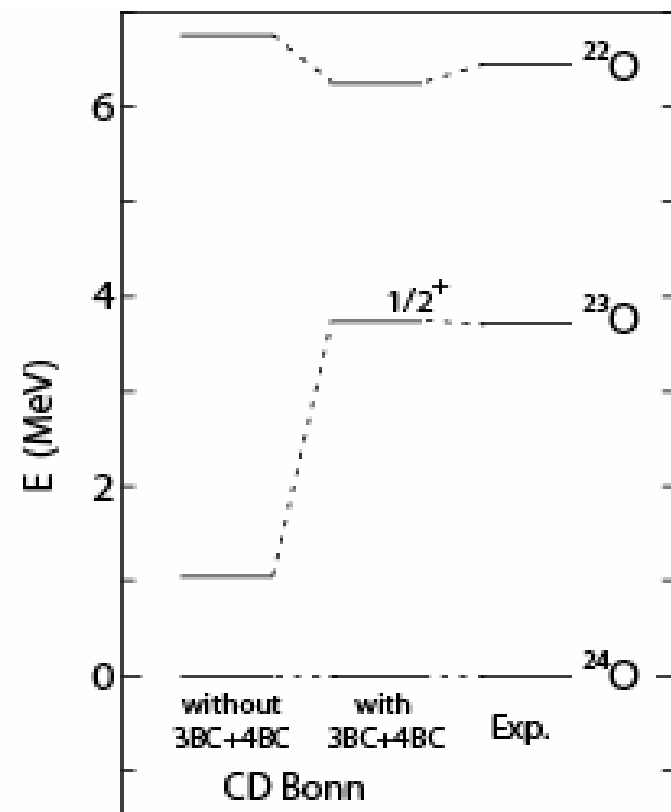
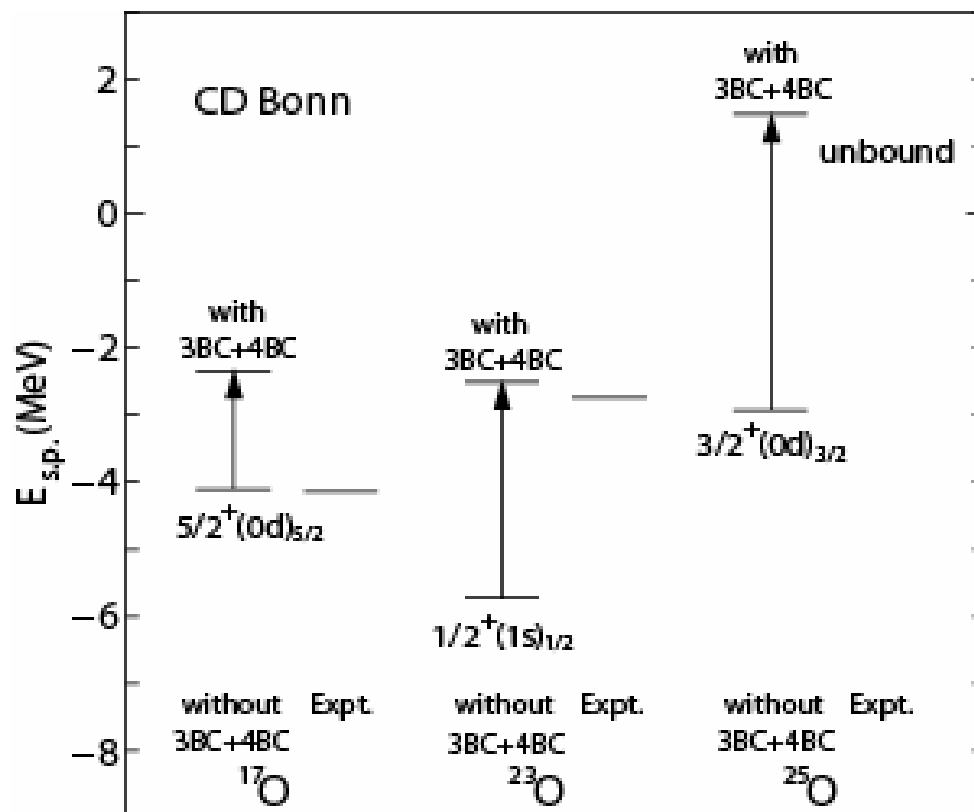
$^{23}_{8}\text{O}_{15}$ 核における一粒子軌道エネルギー(実験)



通常の軌道の順序と中性子の占有の様子
 $1D_{5/2}$ までが完全に占有され、最後の一つが $2S_{1/2}$ 軌道にある。



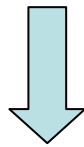
実験により確かめられた軌道の順序



Fujii, Okamoto and Suzuki 2004

拡大する有限量子多体系の領域

- 粒子(素粒子)単体と無限多体系としてのマクロ(巨視的)物質の間に位置する膨大の“中間領域”としての有限量子多体系の世界は相当以前が研究されてきましたが、近年も新しい展開が見られます。
- 原子: 電子のつくる有限量子多体系
- 原子核: 陽子、中性子のつくる有限量子多体系
- 分子: 原子のつくる有限量子多体系



拡大

- 人工原子(量子ドット)
- : 量子ポテンシャル内に閉じ込められた有限個の電子多体系
- 人工分子: 人工原子の有限量子多体系
- 金属原子クラスター: 原子のつくる有限量子多体系:
- 極低温原子気体(B.E.C.): 原子のつくる有限量子多体系

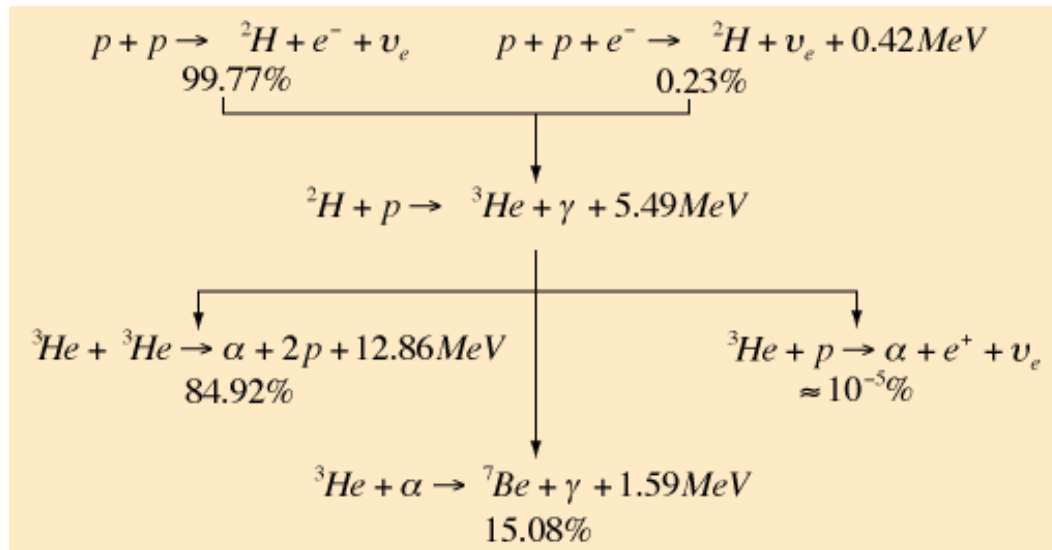
ポテンシャルに閉じこめた極低温の原子気体において、1995年にボーズ・アインシュタイン凝縮(BEC)が観測されて以来、有限量子多体系としての極低温原子気体についての実験的、理論的な研究が盛んになっている。

講義3: 宇宙におけるファインチューニング (subtle fine tuning in universe)

- 3.1) もしも太陽が「CNOサイクル」によってエネルギーを放出していたら人間は存在したか？
- 3.2) 原子と原子核の魔法数が一致していない幸運
- 3.3) 原子核を形づくる力である「核力」の微妙なさじ加減
- 3.4) もしもRプロセス (rapid process) でウランが生成されなかったら？
- 3.5) 星の内部で炭素12が合成された幸運

3.1) もしも太陽が「CNOサイクル」によってエネルギーを放出していたら人間は存在したか？

太陽くらいの質量をもつ恒星のエネルギー源は陽子間核融合（PPサイクル）である。



2種の核融合反応では重陽子が生成される。
重陽子は結合エネルギーが小さく、ひろがり、安定度は低い。



<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hph.html>

太陽は効率の悪い核融合炉である

もしも太陽が質量が大きく、「CNOサイクル」によってエネルギーを放出していたら核融合の継続期間は短く(1億年以下)、地球に生命が誕生する30億年と太陽はもたず、人間は誕生できなかった！！

もしも太陽がPP連鎖反応ではなくCNOサイクルによりエネルギーを放出していたら
太陽より重い星ではCNOサイクル反応が優勢で、
以下の星ではpp連鎖反応が優勢

CNOサイクルが優勢であると、星の寿命はぐんと短くなる。
太陽質量の2倍で10億年、5倍の星では1億年

太陽系成立後46億年、地球では生命誕生後、36億年経過

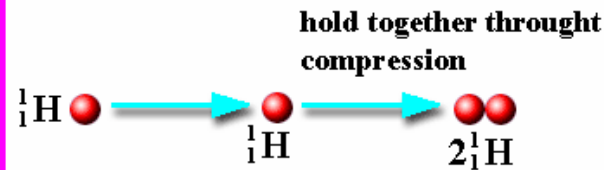
⇒太陽の2倍以上の星のまわりの惑星では、地球型の生命が進化する 時間も、
人類のような知性体が誕生する時間はない！

太陽が10億－100億年の寿命を持つ秘密：

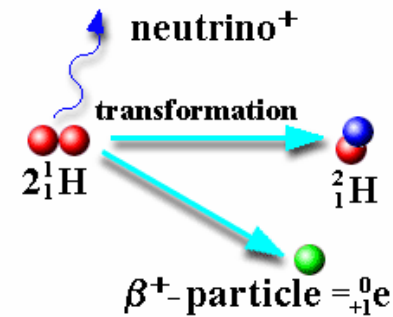
pp連鎖反応の最初の過程：陽子2個から重水素核を合成する反応において、
陽子1個が中性子に転換する β 崩壊(＝質量が重くなる反応！) が起きているため。
←(量子力学の)不確定性関係と弱い相互作用があるために可能になっている！

proton proton cycle (in the burning zone of the sun)

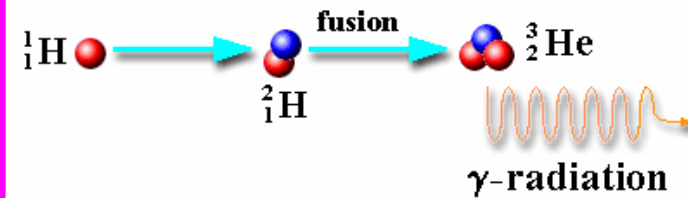
1. step



2. step

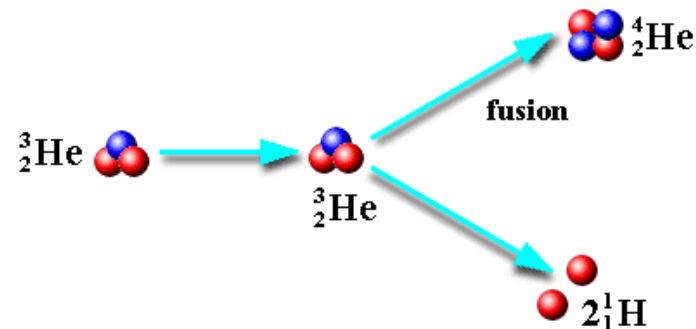


3. step



● proton
● neutron
● electron

4. step



弱い相互作用の低効率という偶然

陽子＋陽子⇒(弱い相互作用経由)陽子＋中性子⇒重陽子

反応率は重陽子・重陽子反応に比べて、 10^{18} 分の1という低効率

←→ 水爆の中の反応: $d+d\rightarrow 3\text{He}+n$

(2陽子の束縛系(=He2核)は存在しない！)

もし、核力が数%強かったら、

$p+p\rightarrow 2\text{He}+\gamma$, $2\text{He}\rightarrow$ 重陽子＋陽電子＋ニュートリノ

このとき弱い相互作用の低い効率という障壁は存在しない
→水素原子は短い時間に燃え尽きてしまう！

→太陽は太く、短く生きて、地球は灼熱地獄、

生命も誕生できる時間や、

人類など知性体の進化までの時間はなかった！

3.2) 原子と原子核の魔法数が一致していない幸運

原子の魔法数: 電子数 = 2, 10, 18, 36, 54, 86

⇒ヘリウム、ネオンなど化学的に安定な単体の不活性ガス元素

原子核の魔法数: 陽子または中性子数 = 2, 8, 20, 28, 50など
魔法数に相当する原子核は安定なために、他の原子核に比べて宇宙に多く存在する。 陽子数8の酸素、20のカルシウムなど

原子と原子核の魔法数の微妙なずれが生命誕生に大きな意味をもっている。

←もし、原子と原子核の魔法数が一致していれば、
太陽系に大量に存在する元素は不活性になり、
化学反応によって種々の複雑な物質をつくり、
生命にいたるという経過をとらなかったはず

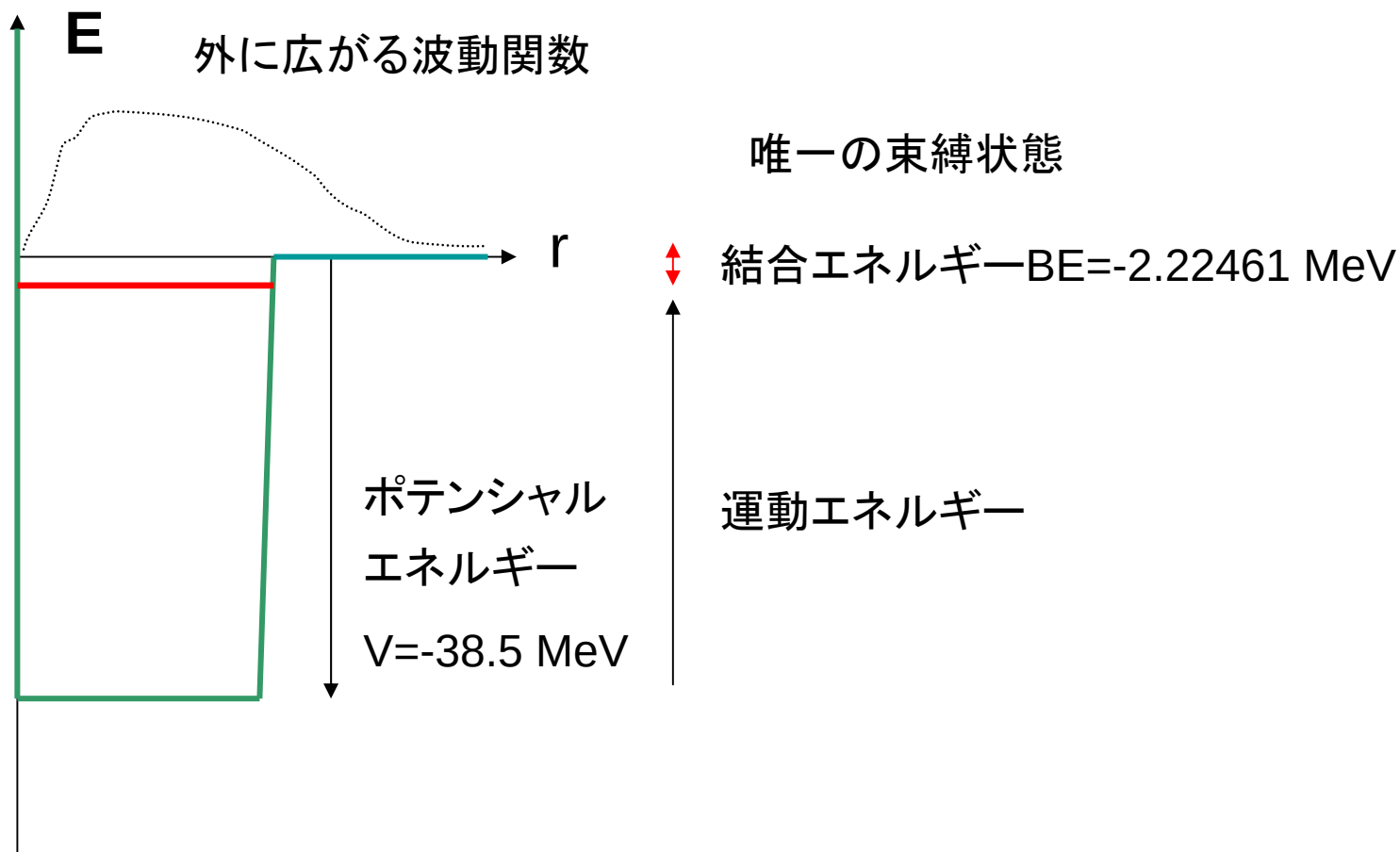
→電磁気力と核力の大きさがこの宇宙で定まっている様(比)であるための偶然である。

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。**

3.3) 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



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。
- 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る。

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！

電子の質量とその周辺の微妙さ

原子の安定性の根拠

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1840分の1

原子核のまわりの（基底状態における）平均半径は
電子の質量に反比例している。

→電子がミュー粒子程度（約200倍）重いとすると、
原子の大きさは200分の1になる

⇒原子核による電子捕獲過程が速くなり、
原子の寿命が短くなり、

2) 中性子、陽子の質量差（エネルギー差）

3) $p + e \rightarrow n + \nu$ + 反応は禁止されている。（電子質量への制約）

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。
(←Fe56核がもっとも安定な原子核)

Fe以上の重い原子核は星の末期としての超新星爆発の際に生成され(= Rapid process)、宇宙空間に飛散する。

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。

ウラン235の核分裂連鎖反応により日本国内の電力の30%以上はつくられている。(賛否は別として)

⇒もし、自然がウラン235、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。

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

3.5) 星の内部でC12が合成された幸運

2個のHe4核の共鳴状態が存在する偶然

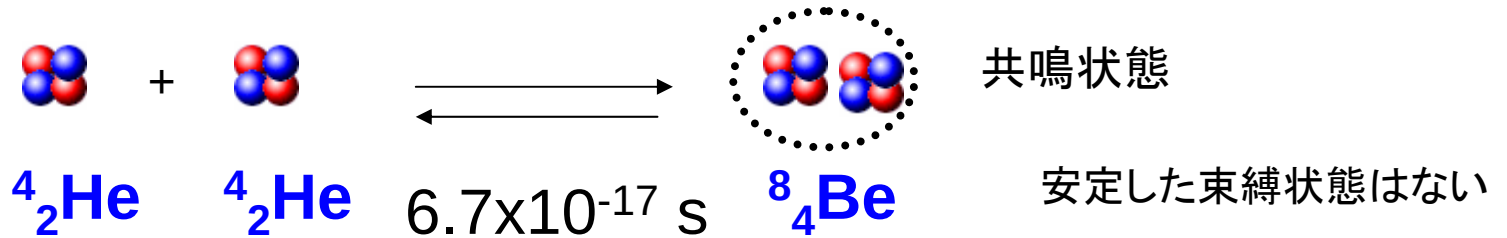
+

C12核に特殊な励起状態(共鳴状態)が存在する偶然

+

O16核の励起エネルギーが(C12+He4)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

2個の ${}^4_2\text{He}$ 核の共鳴状態が存在する偶然



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

はかなくもろいBe8だが
 共鳴状態により
 遭遇する確率が
 1万倍長くなる！



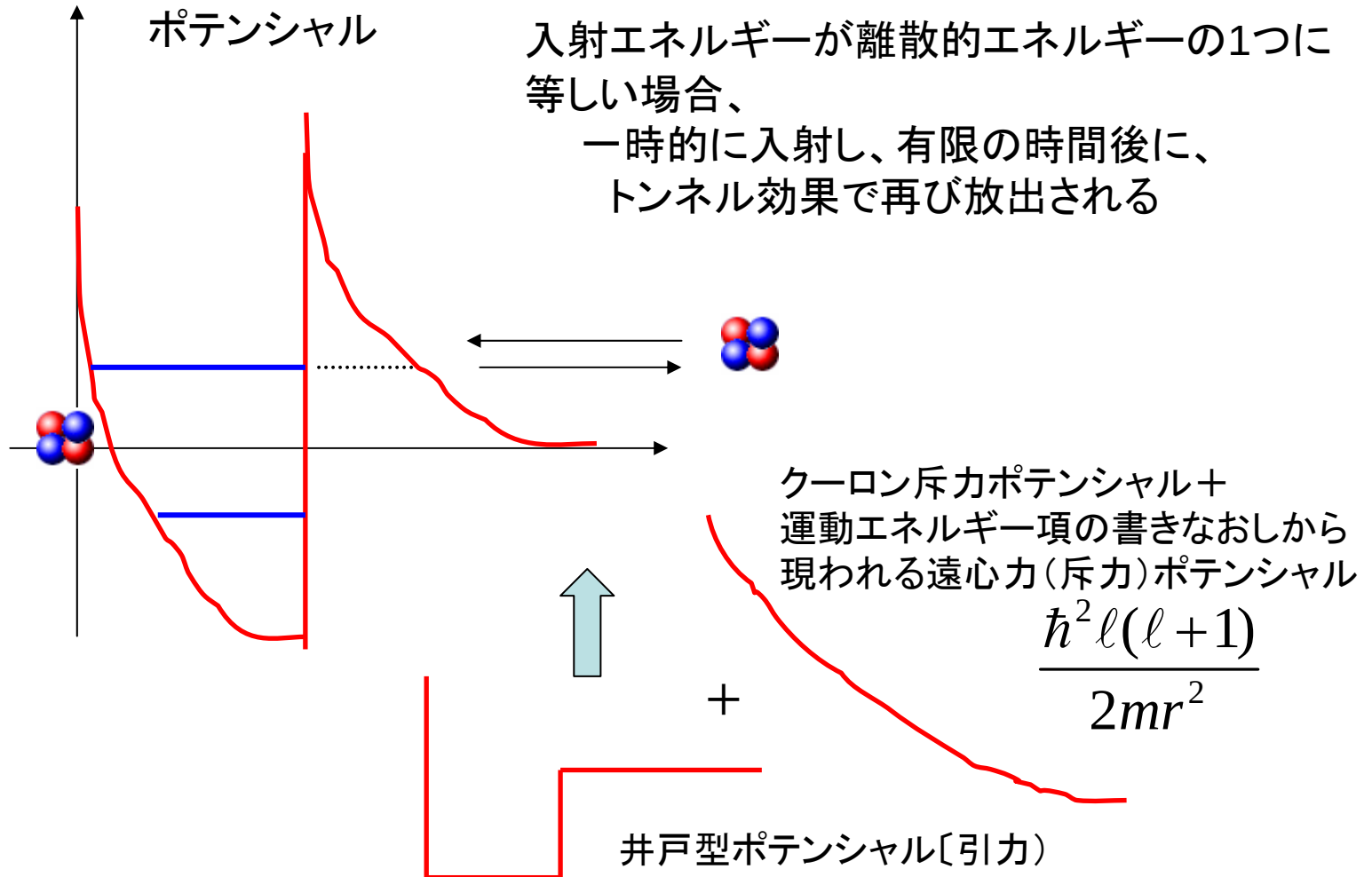
$$E = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mc^2 \left(\frac{v}{c} \right)^2 \rightarrow v = c \sqrt{\frac{2E}{mc^2}}$$

2R 通過する時間t

$$t = \frac{2R}{v} = \frac{2R}{c} \sqrt{\frac{mc^2}{2E}} \quad R = 2 \text{ fm} = 2 \times 10^{-15} \text{ m}, E = 0.1 \text{ MeV} = 100,000 \text{ eV}$$

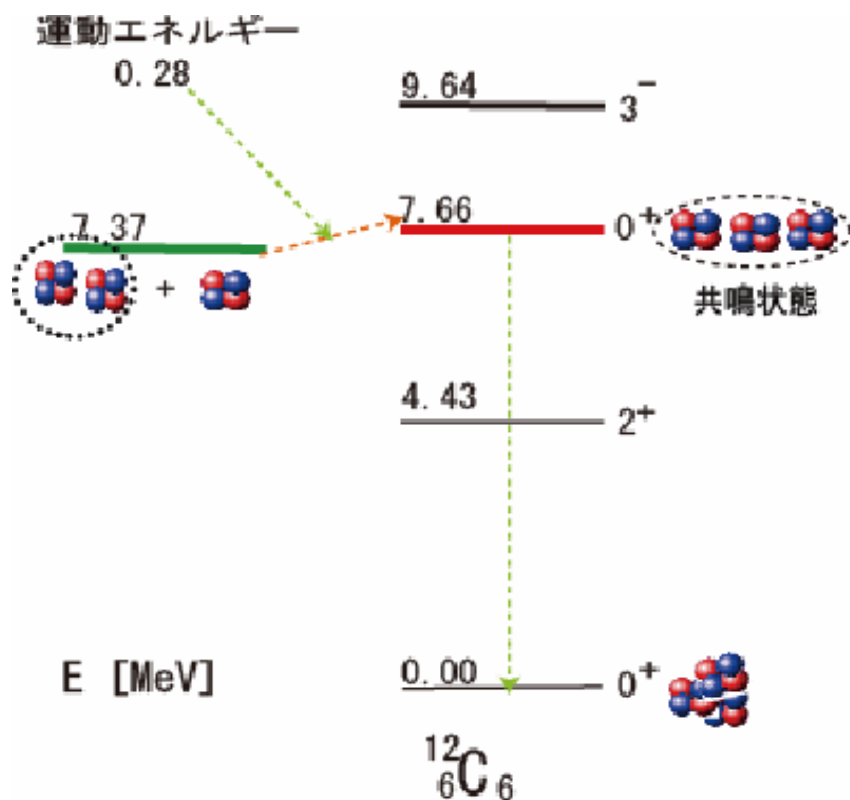
$$\rightarrow t = \frac{2 \times 10^{-15} \text{ m}}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} \sqrt{\frac{4 \times 940 \text{ MeV}}{2 \times 0.1 \text{ MeV}}} = 0.9 \times 10^{-21} \text{ s}$$

共鳴状態—量子力学における—



^{12}C 核に特殊な励起状態が存在する偶然

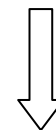
アルファクラスター状態(原子核分子)



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

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

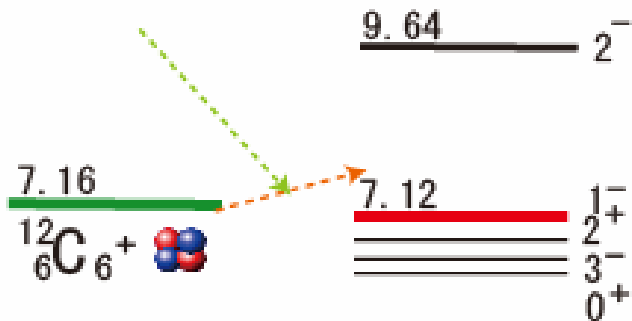
星内部の高温

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

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

^{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

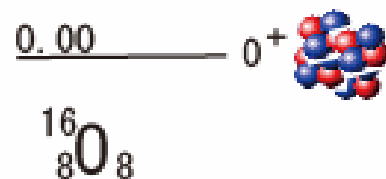
運動エネルギー



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]



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作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生し、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。

講義3の参考文献

- 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) マーカス・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)
- 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