

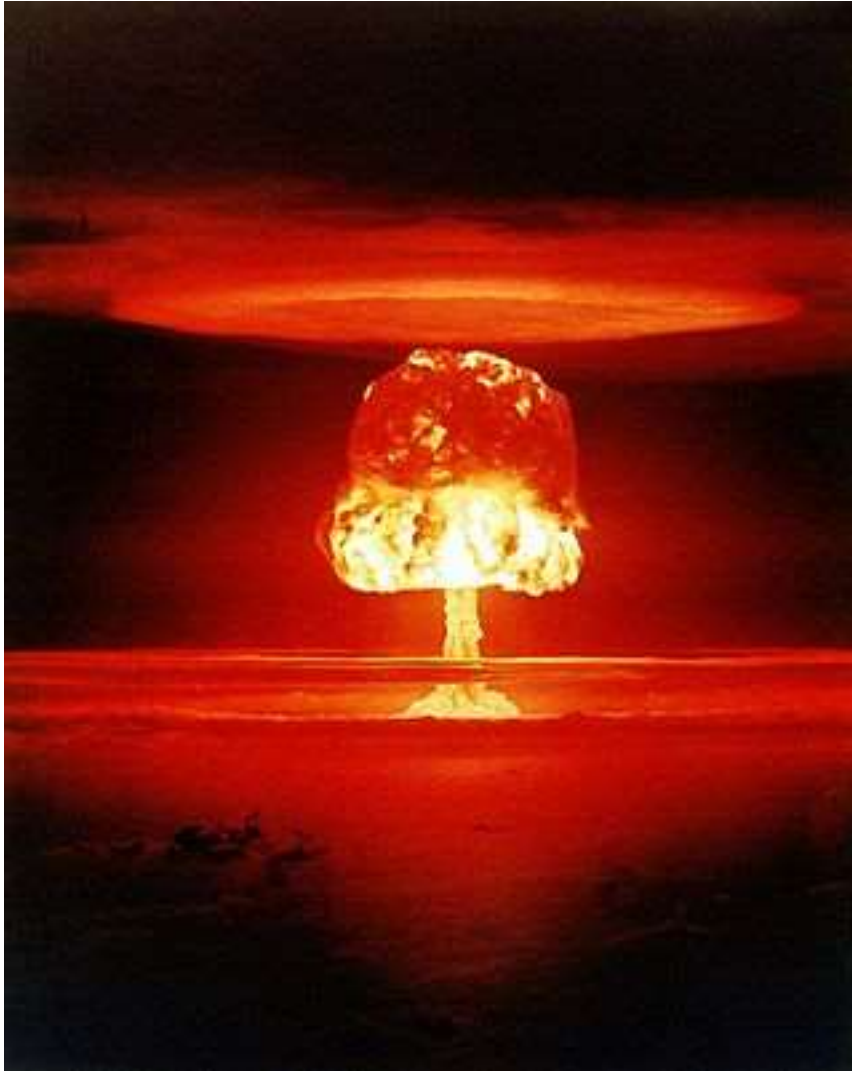
2024/6/15

「放射線の物理」

物理的な側面から
放射線を見てみる。



X線を用いた
レントゲン写真



Wikipedia

キャッスル作戦@ビキニ環礁

ロメオ実験のキノコ雲



放射線とは？

α 線：エネルギーの高いヘリウムの原子核

β 線：エネルギーの高い電子

γ 線：エネルギーの高い電磁波

放射線とは？

α 線：高速のヘリウムの原子核

β 線：高速の電子

γ 線：波長の短い電磁波



どれくらい速いか？

α 線＝ヘリウム原子核

- α 線：ヘリウム原子核

$$1.5 \times 10^7 \text{ m/s}$$

光速の5%

(大阪からエクアドルまで1秒)

- ヘリウムガスの分子運動

室温： $1.3 \times 10^3 \text{ m/s}$

(豊中キャンパスから蛍池駅まで1秒)

- 分子運動が $\sim \text{MeV}$ になるためには

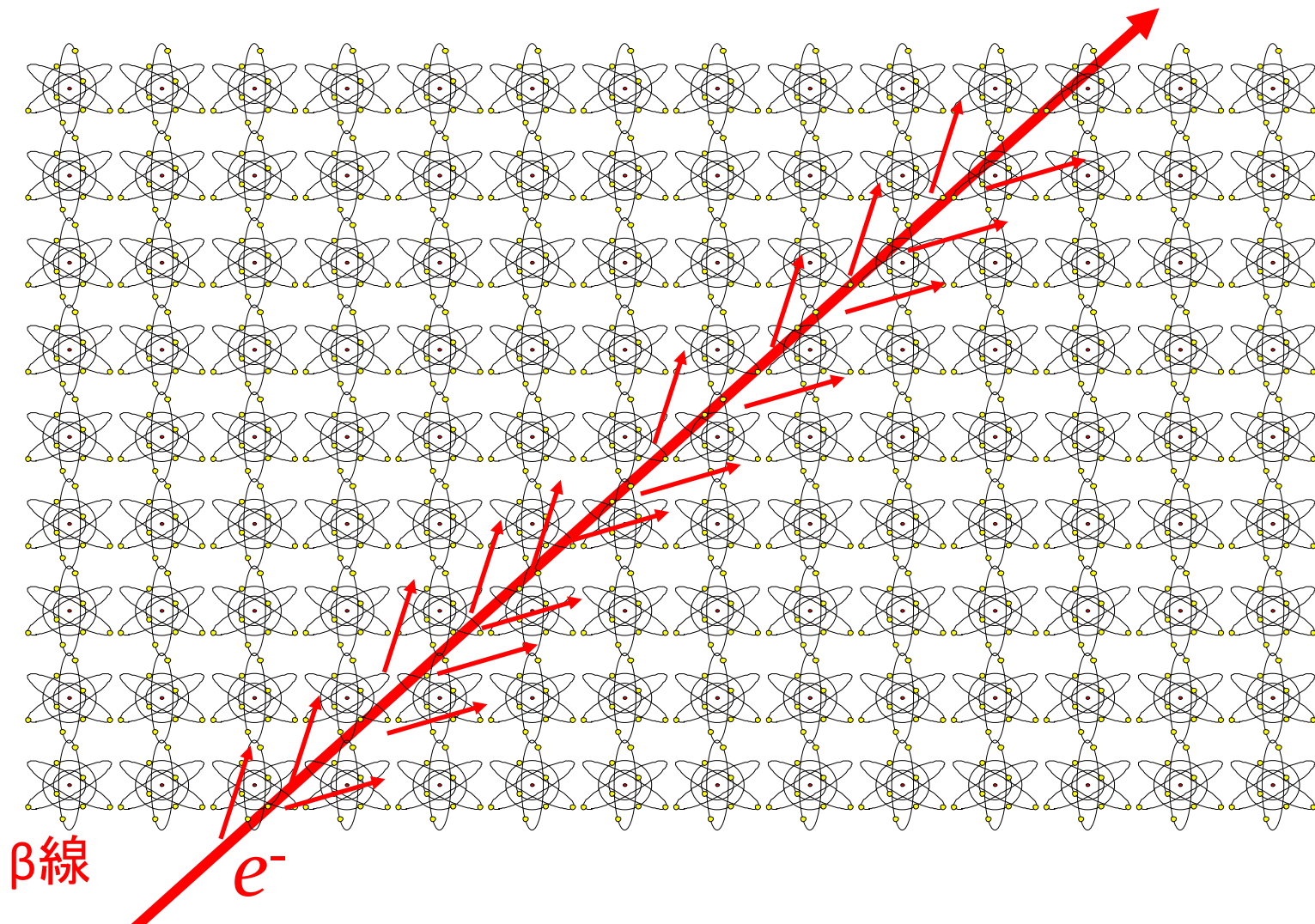
温度 $\sim 10^{10}$ 度 (太陽表面 $\sim 6 \times 10^3$ 度)



放射線の電離作用

放射線が物質に入射するとどうなるか？

物質を構成する原子の電子をはじき飛ばす：イオン化



放射線の電離作用

放射線が物質に入射するとどうなるか？

物質を構成する原子の電子をはじき飛ばす：イオン化

物質の化学形態や結晶構造を壊す

放射線損傷

生物への影響

☺ ガンを殺す

☹ 生物への影響

自分自身はエネルギーを落とす。

最終的には停止する。

物質に強く影響を与えるもの程すぐに止まる。

α 線は紙一枚でとまるが物質（例えば細胞）に与える影響は強い。

→ α 線放出核を含む薬によるガン治療

α 線や β 線や γ 線などの放射線は
どのように作られるのか？

化学反応ではできない。

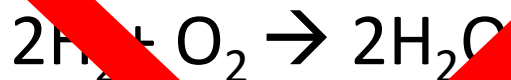
→ 原子核反応



原子核反応のエネルギー って言われても...

水素の「燃焼」

水素と酸素の化学反応？

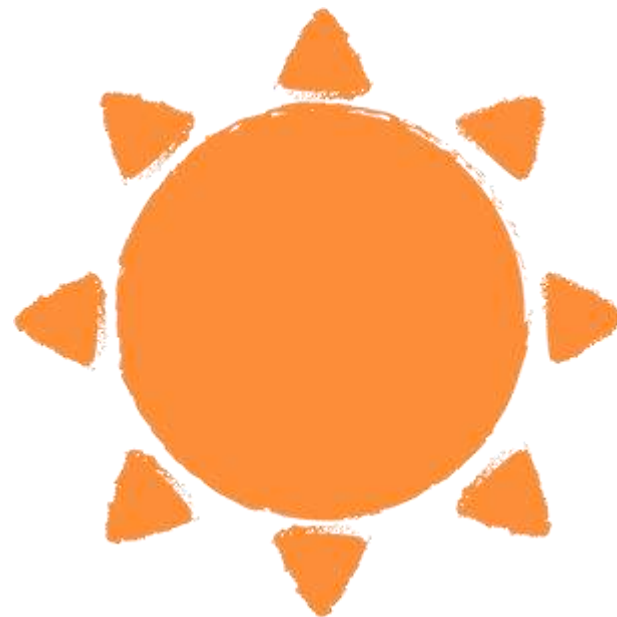


それでは燃焼することがある

→ あつちという間に（3000-5000年）
燃え尽きる。

<http://kenbunden.net/totsuka/02/01.html>

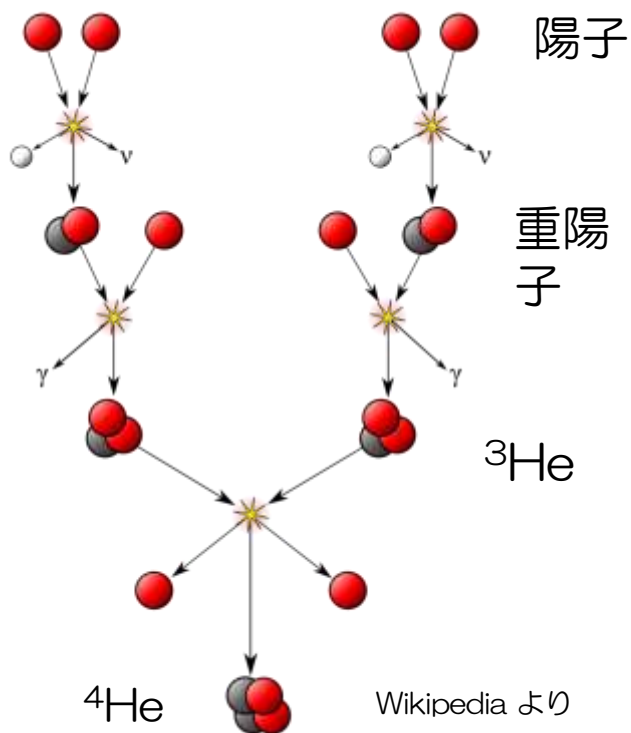
参考：地球の年齢は約45億年



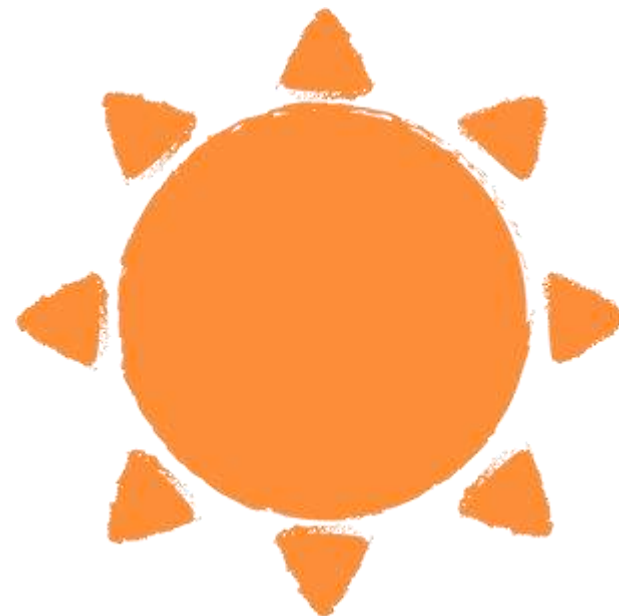
太陽のエネルギー源

水素の「燃焼」

「燃焼」＝核融合



Wikipedia より



素粒子・原子核・放射線の世界で
使われるエネルギーの単位

電子ボルト eV

$$1 \text{ keV} = 1,000 \text{ eV}$$

$$1 \text{ MeV} = 1,000 \text{ keV} = 1,000,000 \text{ eV}$$

$$1 \text{ GeV} = 1,000 \text{ MeV} = 1,000,000 \text{ keV} = 1,000,000,000 \text{ eV}$$

電子ボルト eV : エネルギーの単位

1 電子ボルト

電荷が e の粒子が1Vの電圧で

加速された際に得られるエネルギー

$$\begin{aligned} 1 \text{ 電子ボルト} &= 1.6 \times 10^{-19} \text{ ジュール} \\ &= 3.8 \times 10^{-20} \text{ カロリー} \end{aligned}$$

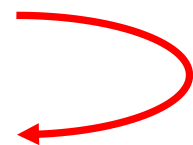
定義やジュールとの関係は覚えなくて結構です。

電子ボルトの世界で数字の感覚（桁）を身につけてください。

化学反応は 電子ボルト

核反応は メガ電子ボルト

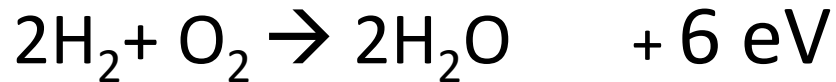
百万倍



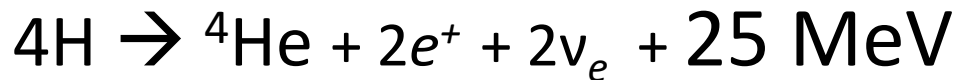
太陽の“燃焼” -- 核反応

太陽は水素を燃料として「燃えて」いる。

普通の「燃焼」



太陽中の「燃焼」

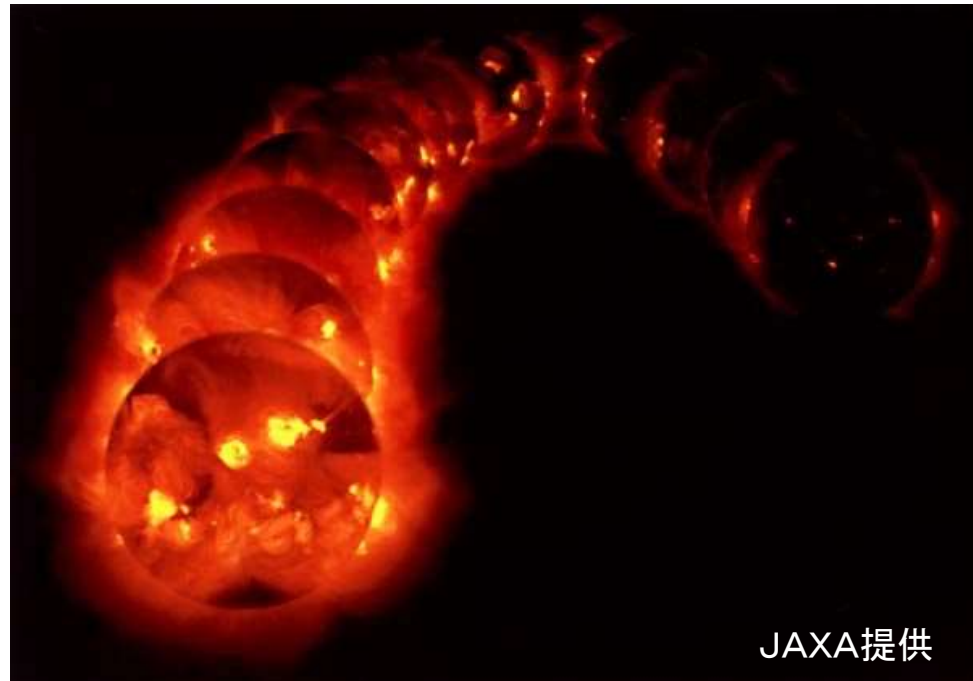


[eV]

電子ボルト

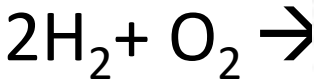
エレクトロンボルト

エネルギーの単位



太陽の “燃焼” -- 核反応

太陽は水素を燃焼
普通の「燃焼」



太陽中の「燃焼」



[eV]

電子ボルト
エレクトロンボルト

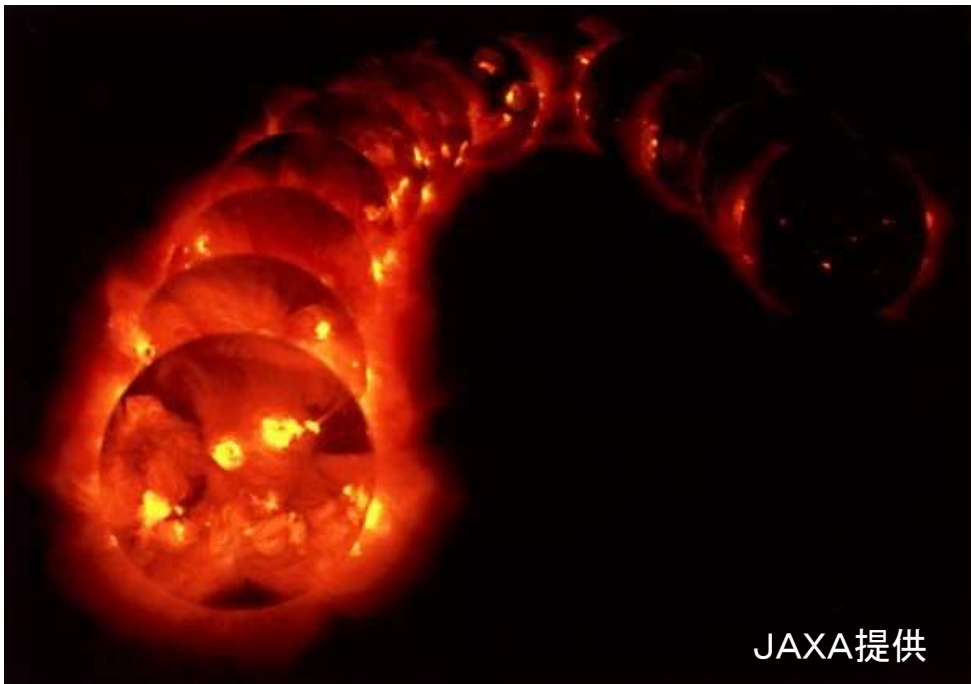
エネルギーの

燃えて」いる。

6 eV

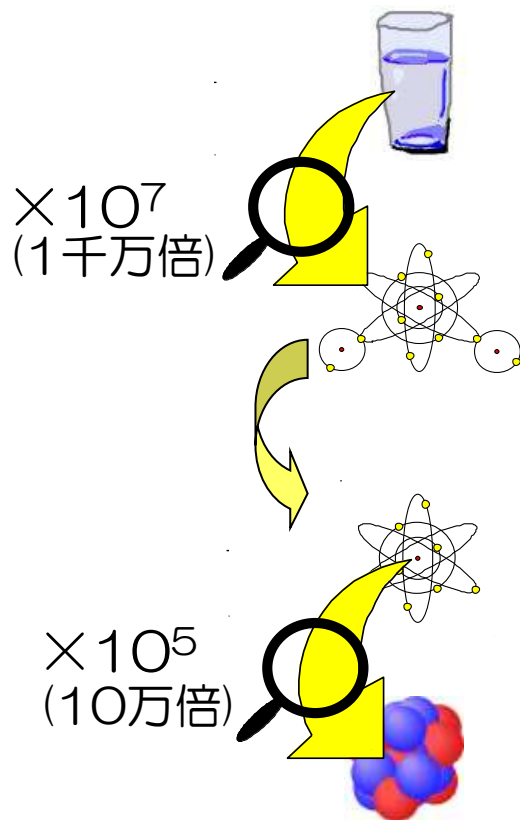
25 MeV

「太陽エネルギーの持続性……もし、成分元素の内部エネルギーが利用されていると考えるならば、すなわち、太陽内部で原子核変換過程が進行していると仮定するならば、もはや、どのような基本的困難もなくなってしまふ」



放射線と物理

物質の構成要素



物質

~ 10⁻¹ m

分子

10⁻¹⁰ ~ 10⁻⁸ m

原子

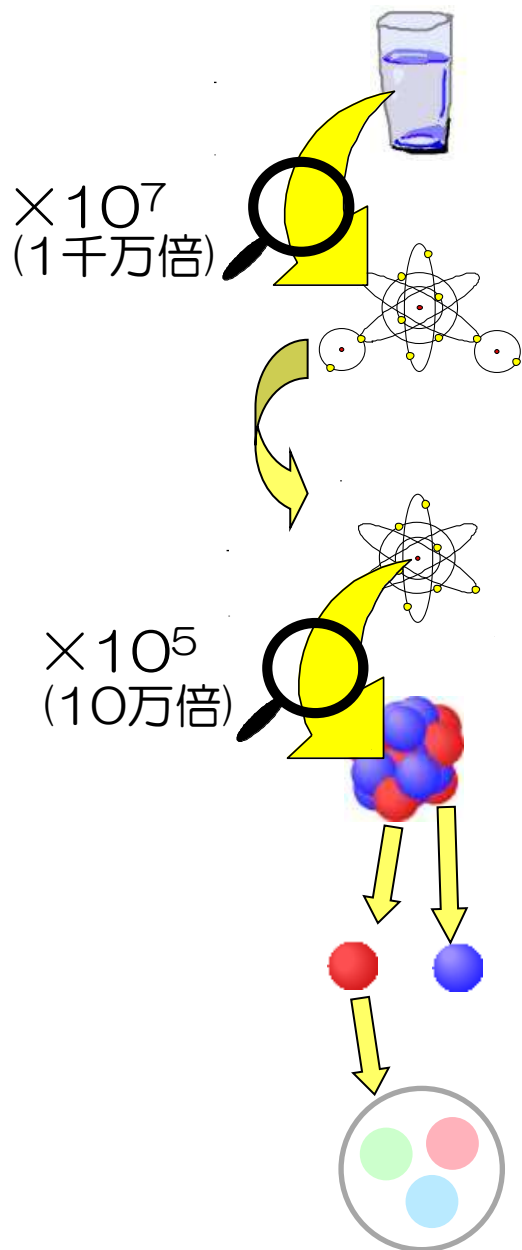
~ 10⁻¹⁰ m = 1 Å

原子核

~ 10⁻¹⁴ m

(+ 電子)

物質の構成要素



物質

~ 10⁻¹ m

分子

10⁻¹⁰ ~ 10⁻⁸ m

原子

~ 10⁻¹⁰ m = 1 Å

原子核

~ 10⁻¹⁴ m

(+ 電子)

陽子、中性子

~ 10⁻¹⁵ m = 1 fm

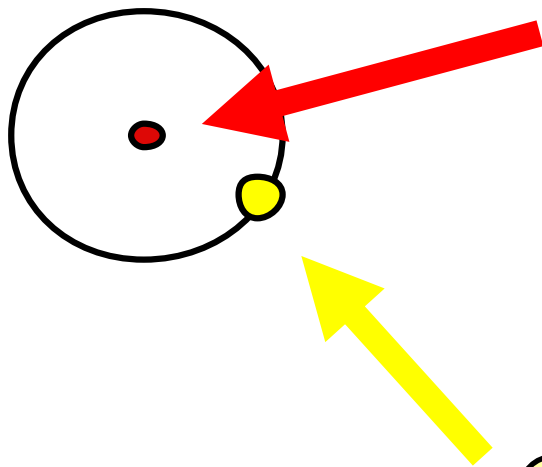
フェムトメートル

クォーク

0 ??

原子と化学反応

最も簡単な原子
「水素」
原子番号=1



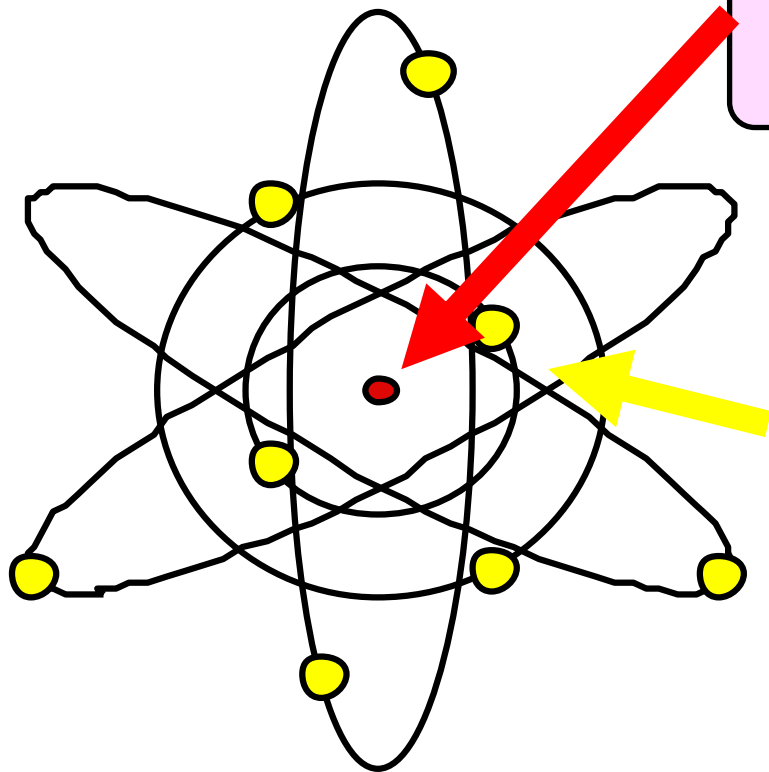
原子核
原子の10万分の1の大きさ
正の電荷「+1」
(水素の場合1単位)

1つの電子
大きさはゼロ
負の電荷「-1」

原子と化学反応

酸素原子
原子番号=8

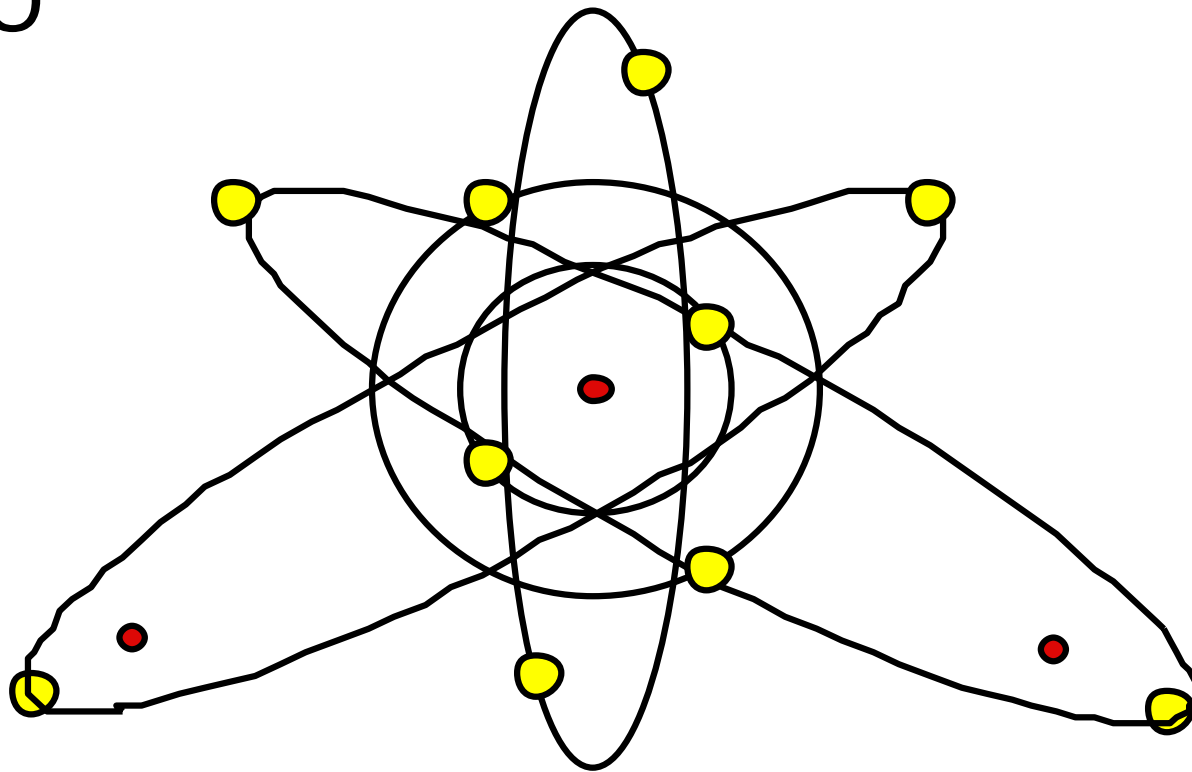
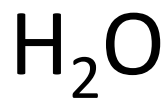
原子核
原子の10万分の1の大きさ
正の電荷「+8」
(酸素の場合8単位)



のまわりを

8つの電子
大きさはゼロ
負の電荷「-8」

酸素と水素2つが出会うと
「水分子」



原子と化学反応

酸素と水素2つが出会うと

「水分子」
 H_2O

元素の種類を決めているのは原子核！

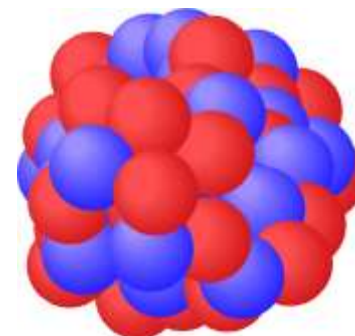
化学反応は原子の組み合わせを変えるだけ。
元の分子に含まれている原子の組み合わせ
以外のものは作れない。

cf. 錬金術

原子核自体を変化させる反応： 原子核反応
原子核崩壊

「原子核」

- 陽子と中性子でできている。
 - 陽子 : 電荷 $=+1$
 - 中性子 : 電荷 $=0$
 } 重さはほぼ同じ



陽子数	Z (= 原子番号)
中性子数	N
質量数	$A=Z+N$

原子核の表記法

 A_Z

例: ${}^{12}\text{C}$

炭素-12

陽子数 = 6

中性子数 = 6

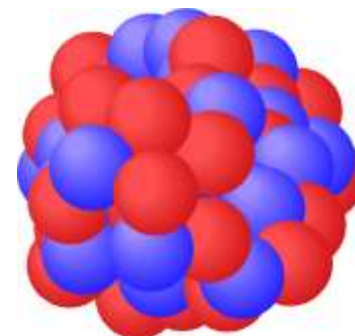
質量数 = $6+6 = 12$

「原子核」

- 陽子と中性子でできている。

● 陽子 : 電荷=+1

● 中性子 : 電荷=0



陽子数 Z (= 原子番号)

中性子数 N

質量数 $A=Z+N$

原子核の表記法

A_Z

例: ${}^{13}_6\text{C}$

炭素-13

陽子数 = 6

中性子数 = 7

質量数 = $6+7 = 13$

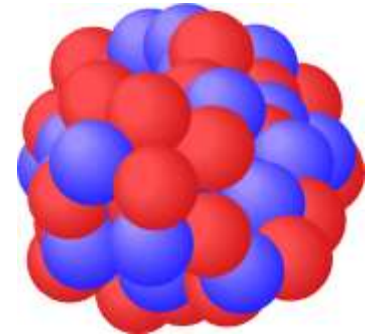
陽子数が同じで
中性子数が違う原子核
= 同位体
化学的な性質は同じ

「原子核」

- 陽子と中性子でできている。

● 陽子 : 電荷=+1

● 中性子 : 電荷=0



陽子数 Z (= 原子番号)

中性子数 N

質量数 $A=Z+N$

原子核の表記法

A_Z

例: ${}^{133}_{55}\text{Cs}$

セシウム-133

陽子数 = 原子番号=55

中性子数 = 78

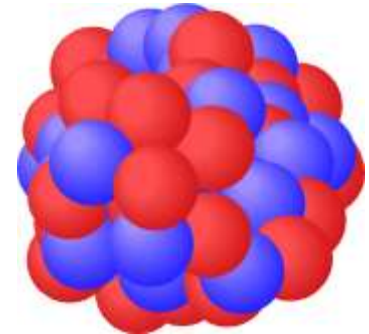
質量数 = $55+78 = 133$

「原子核」

- 陽子と中性子でできている。

● 陽子 : 電荷=+1

● 中性子 : 電荷=0



陽子数 Z (= 原子番号)

中性子数 N

質量数 $A=Z+N$

原子核の表記法

A_Z

例: ${}^{137}\text{Cs}$

セシウム-137

陽子数 = 原子番号=55

中性子数 = 82

質量数 = $55+82 = 137$

ベータ崩壊

陽子数と中性子数には安定な組み合わせがある。

地球上の原子核はこの組み合わせをもつ。

それよりも

中性子が多いと不安定

中性子が
陽子に変わる。

ベータマイナス崩壊

陽子が多くても不安定

陽子が
中性子に変わる。

ベータプラス崩壊

ベータマイナス崩壊

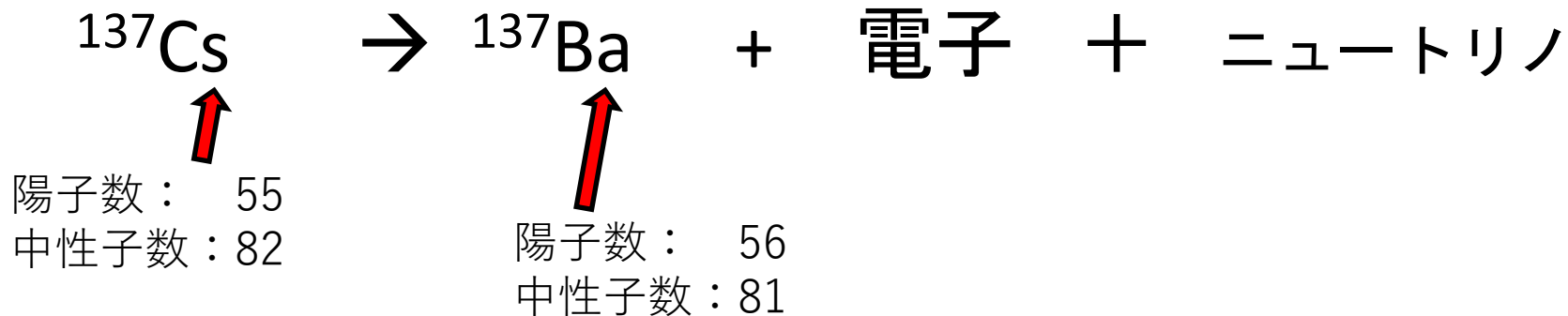
中性子 $\rightarrow$ 陽子 + 電子 + ニュートリノ

電荷 0 $\rightarrow$ (+1) + (-1) + (0)

ベータ崩壊

中性子 $\rightarrow$ 陽子 + 電子 + ニュートリノ

原子核中で起こると



ベータ崩壊

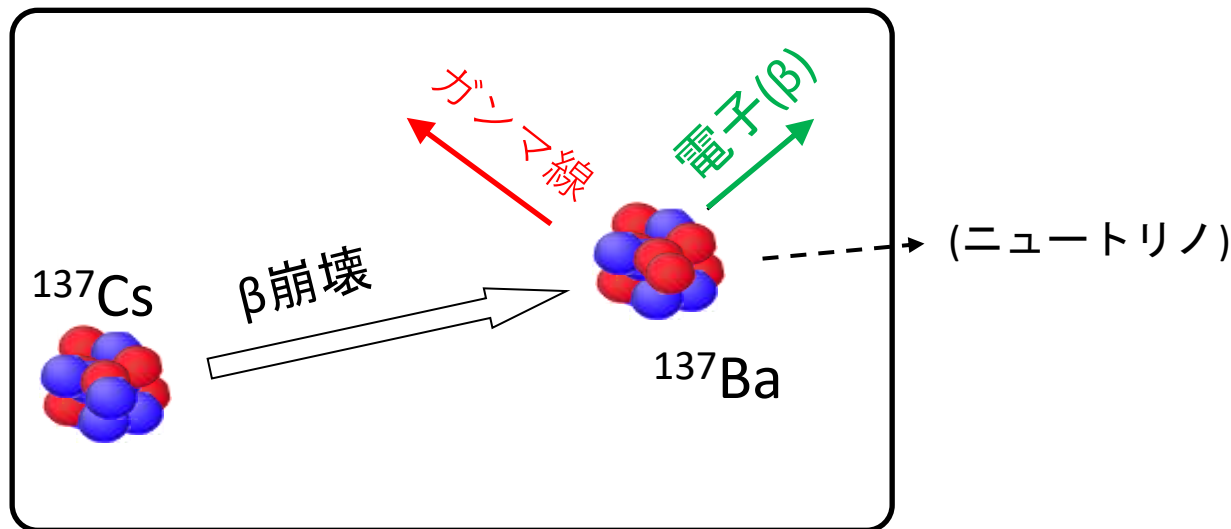
中性子 $\rightarrow$ 陽子 + 電子 + ニュートリノ

原子核中で起こると

$^{137}\text{Cs} \rightarrow ^{137}\text{Ba} + \text{電子} + \text{ニュートリノ}$

ベータ線

+ 1.2 MeV



重い原子（核）

元素の周期表 The Periodic Table

周期\族	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H 水素 Hydrogen 1.00798																	2 He ヘリウム Helium 4.0026
2	3 Li リチウム Lithium 6.968	4 Be ベリリウム Beryllium 9.01218											5 B 硼(ホウ)素 Boron 10.814	6 C 炭素 Carbon 12.0106	7 N 窒素 Nitrogen 14.0069	8 O 酸素 Oxygen 15.9994	9 F 弗(フッ)素 Fluorine 18.9984	10 Ne ネオン Neon 20.1797
3	11 Na ナトリウム Sodium 22.9898	12 Mg マグネシウム Magnesium 24.306											13 Al アルミニウム Aluminum 26.9815	14 Si 珪(ケイ)素 Silicon 28.085	15 P 燐(リン)素 Phosphorus 30.9738	16 S 硫黄 Sulfur 32.068	17 Cl 塩素 Chlorine 35.452	18 Ar アルゴン Argon 39.948
4	19 K カリウム Potassium 39.0983	20 Ca カルシウム Calcium 40.078	21 Sc スカンジウム Scandium 44.9559	22 Ti チタン Titanium 47.867	23 V バナジウム Vanadium 50.9415	24 Cr クロム Chromium 51.9961	25 Mn マンガン Manganese 54.938	26 Fe 鉄 Iron 55.845	27 Co コバルト Cobalt 58.9332	28 Ni ニッケル Nickel 58.6934	29 Cu 銅 Copper 63.546	30 Zn 亜鉛 Zinc 65.38	31 Ga ガリウム Gallium 69.723	32 Ge ゲルマニウム Germanium 72.630	33 As 砒(アセ)素 Arsenic 74.9216	34 Se セレン Selenium 78.971	35 Br 臭素 Bromine 79.904	36 Kr クリプトン Krypton 83.798
5	37 Rb ルビジウム Rubidium 85.4678	38 Sr ストロンチウム Strontium 87.62	39 Y イットリウム Yttrium 88.9058	40 Zr ジルコニウム Zirconium 91.224	41 Nb ニオブ Niobium 92.9064	42 Mo モリブデン Molybdenum 95.95	43 Tc テクネチウム Technetium [99]	44 Ru ルテチウム Ruthenium 101.07	45 Rh ロジウム Rhodium 102.906	46 Pd パラジウム Palladium 106.42	47 Ag 銀 Silver 107.868	48 Cd カドミウム Cadmium 112.414	49 In インジウム Indium 114.818	50 Sn 錫(スズ)素 Tin 118.710	51 Sb アンチモン Antimony 121.760	52 Te テルル Tellurium 127.60	53 I 碘(ヨウ)素 Iodine 126.904	54 Xe キセノン Xenon 131.293
6	55 Cs セシウム Cesium 132.905	56 Ba バリウム Barium 137.327	※1	72 Hf ハフニウム Hafnium 178.49	73 Ta タンタル Tantalum 180.948	74 W タングステン Tungsten 183.84	75 Re レニウム Rhenium 186.207	76 Os オスミウム Osmium 190.23	77 Ir イリジウム Iridium 192.217	78 Pt 白金(プラチナ) Platinum 195.084	79 Au 金 Gold 196.967	80 Hg 水銀 Mercury 200.592	81 Tl タリウム Thallium 204.384	82 Pb 鉛 Lead 207.2	83 Bi ビスマス Bismuth 208.980	84 Po ポロニウム Polonium [210]	85 At アスタチン Astatine [210]	86 Rn ラドン Radon [222]
7	87 Fr フランシウム Francium [223]	88 Ra ラジウム Radium [226]	※2	104 Rf ラザホージウム Rutherfordium [267]	105 Db ドブニウム Dubnium [268]	106 Sg シーボーギウム Seaborgium [271]	107 Bh ボーリウム Bohrium [272]	108 Hs ハッシウム Hassium [277]	109 Mt マイタケリウム Meitnerium [276]	110 Ds ダームスタチウム Darmstadtium [281]	111 Rg レントゲニウム Roentgenium [280]	112 Cn コペルニシウム Copernicium [285]	113 Nh ニホニウム Nihonium [278]	114 Fl フレロビウム Flerovium [289]	115 Mc モスコビウム Moscovium [289]	116 Lv リバモリウム Livermorium [293]	117 Ts タネシン Tennessine [293]	118 Og オガネソン Oganesson [294]

※1 ランタノイド系	57 La ランタン Lanthanum 138.905	58 Ce セリウム Cerium 140.116	59 Pr プラセオジム Praseodymium 140.908	60 Nd ネオジム Neodymium 144.242	61 Pm プロメチウム Promethium [145]	62 Sm サマリウム Samarium 150.36	63 Eu ユウロビウム Europium 151.964	64 Gd ガドリニウム Gadolinium 157.25	65 Tb テルビウム Terbium 158.925	66 Dy ジスプロシウム Dysprosium 162.500	67 Ho ホルミウム Holmium 164.930	68 Er エルビウム Erbium 167.259	69 Tm ツリウム Thulium 168.934	70 Yb イットリビウム Ytterbium 173.045	71 Lu ルテチウム Lutetium 174.967
※2 アクチノイド系	89 Ac アクチニウム Actinium [227]	90 Th トリウム Thorium 232.038	91 Pa プロトアクチニウム Protactinium 231.036	92 U ウラン Uranium 238.029	93 Np ネプツニウム Neptunium [237]	94 Pu プルトニウム Plutonium [239]	95 Am アメリシウム Americium [243]	96 Cm キュリウム Curium [247]	97 Bk バーケリウム Berkelium [247]	98 Cf カリホルニウム Californium [252]	99 Es アインスไตニウム Einsteinium [252]	100 Fm フェルミウム Fermium [257]	101 Md メンデレビウム Mendelevium [258]	102 No ノーベリウム Nobelium [259]	103 Lr ローレンシウム Lawrencium [262]

表の見方

セル内の表記

原子番号 元素記号
元素名(日本語)
元素名(英語)
原子量

セルの色



の元素は、単体の物質が金属的性質(光沢がある、電気や熱をよく通す、陽イオンになりやすい、など)を持つ。
の元素は、単体の物質が非金属的性質を持つ。
の元素は、単体の物質がその中間の(半導体的、半金属的)性質を持つ、ことを示す。

【元素記号の色】

赤字は、単体の物質が常温・常圧(25℃、1気圧)で**気体**。
青字は、単体の物質が常温・常圧で**液体**。
黒字は、単体の物質が常温・常圧で**固体**である、ことを示す。

参考文献

国立天文台編「理科年表 2018年版」、丸善
...他

※ 原子量が範囲で示される元素の原子量は、簡単のため、範囲の中間値を記した。

※ 安定同位体がなく、天然で特定の同位体組成を示さない元素については、その元素の放射性同位体の質量数の一例を [] 内に記した。

重い原子（核）

重たくなると陽子が多すぎて

電氣的な斥力に負けて「割れて」しまう。

- ヘリウム原子核（ α 粒子）の放出
- 原子核の分裂



アルファ崩壊

ヘリウム原子核（ α 粒子）を放出する

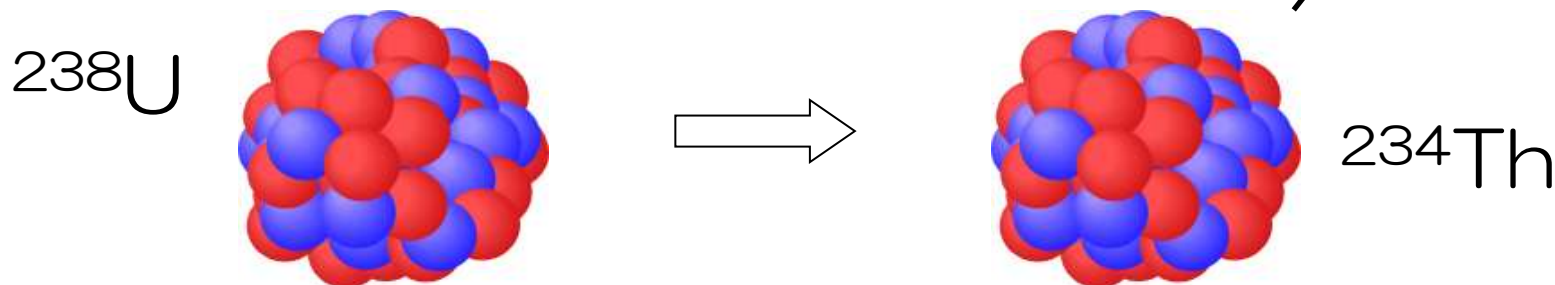
陽子数が2減り

中性子数が2減る

質量数が4減る



$$Z = \quad 92 \quad \quad 90 \quad \quad 2$$



ヘリウム

ビッグバンの直後に水素とヘリウムとごく少量のリチウムが創られました。

今でも宇宙全体に存在する元素のうち

約7割が水素

約3割がヘリウム

実際ヘリウムが始めて発見されたのは太陽のスペクトル

地球上にヘリウムはそんなに無い。

なぜ？

アルファ崩壊

ヘリウム原子核（ α 粒子）を放出する

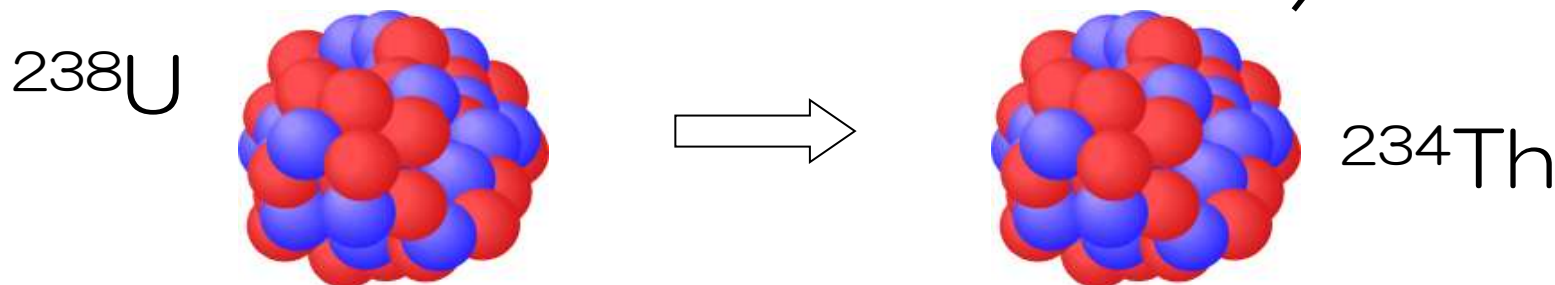
原子数が2減り

中性子数が2減る

質量数が4減る



$$Z = \quad 92 \quad \quad 90 \quad \quad 2$$



さらに重い原子核

非常に重い原子核

勝手に核分裂

：自発核分裂

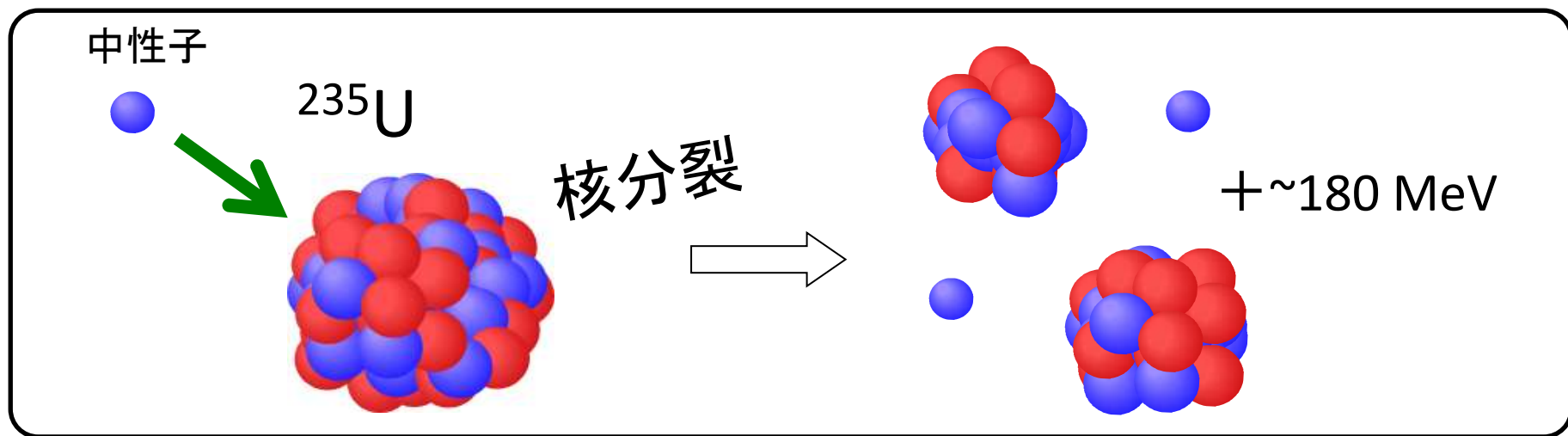
その少し手前（～ウラン）は核分裂ギリギリ

きっかけがあると核分裂

：中性子誘導核分裂



核分裂



陽子数 : 92

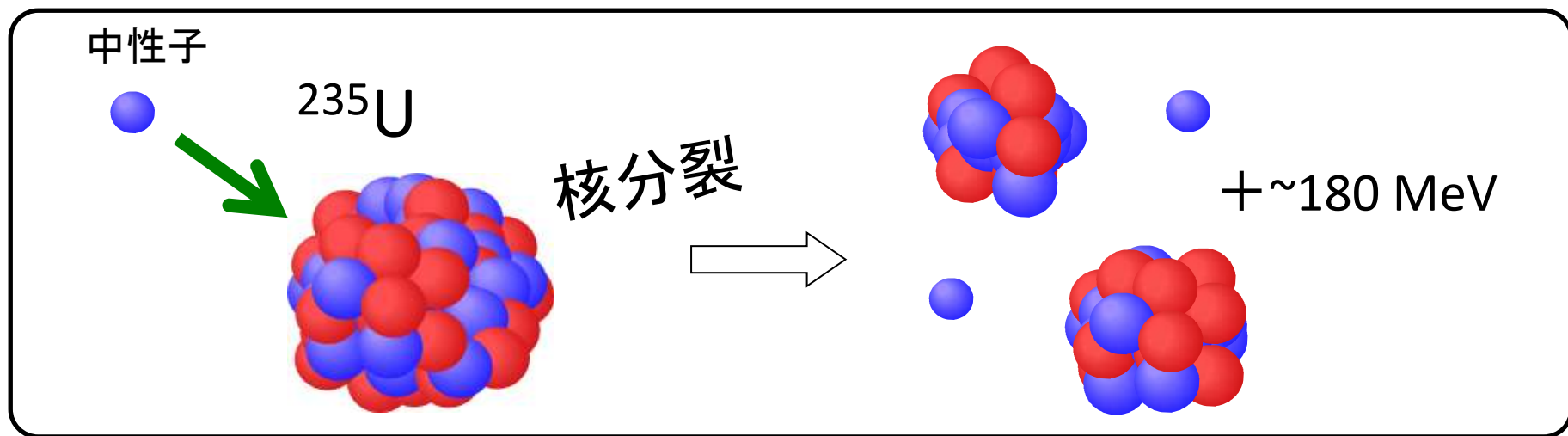
中性子数 : 143



陽子数 : 46

中性子数 : 71

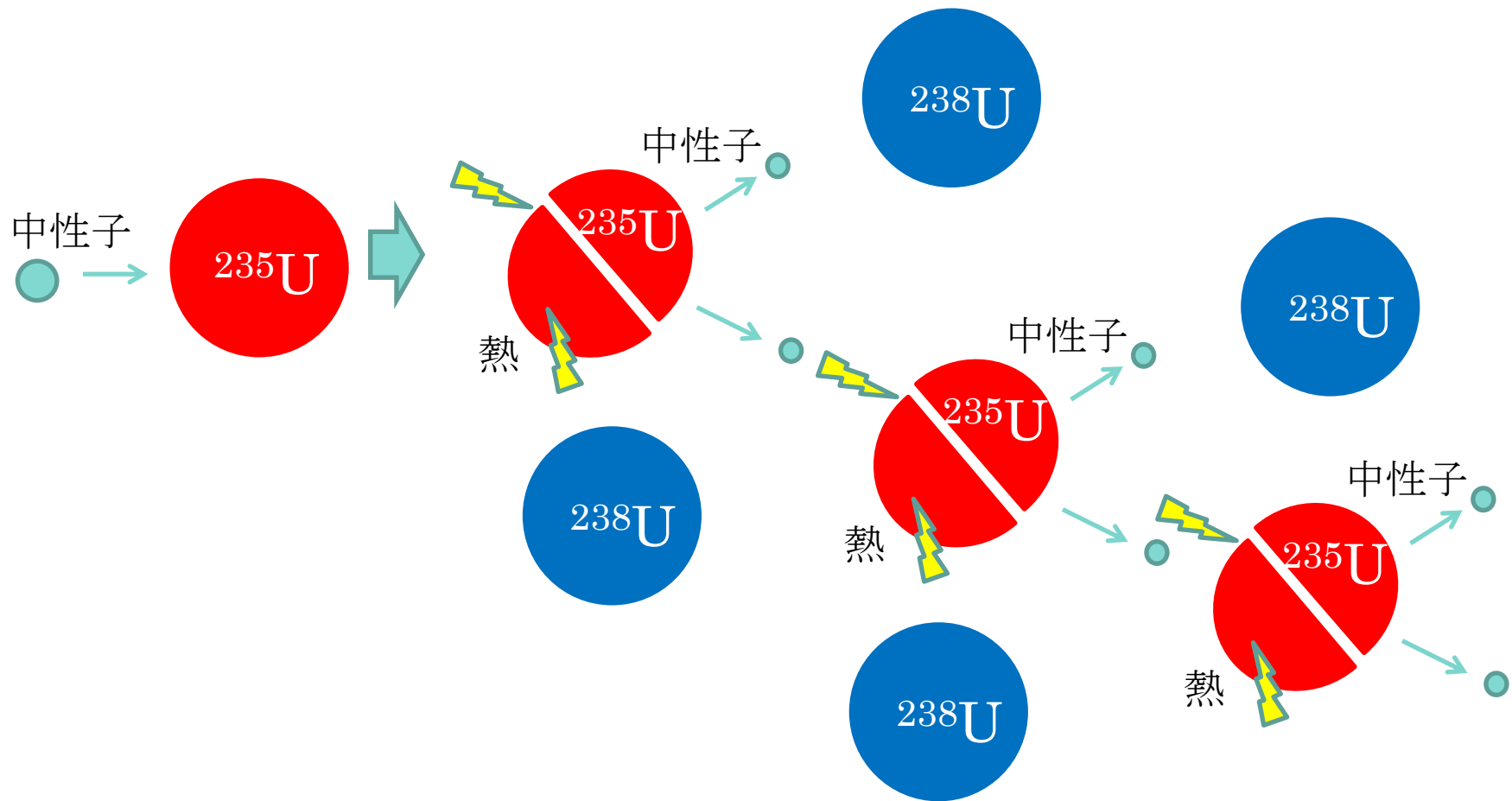
核分裂



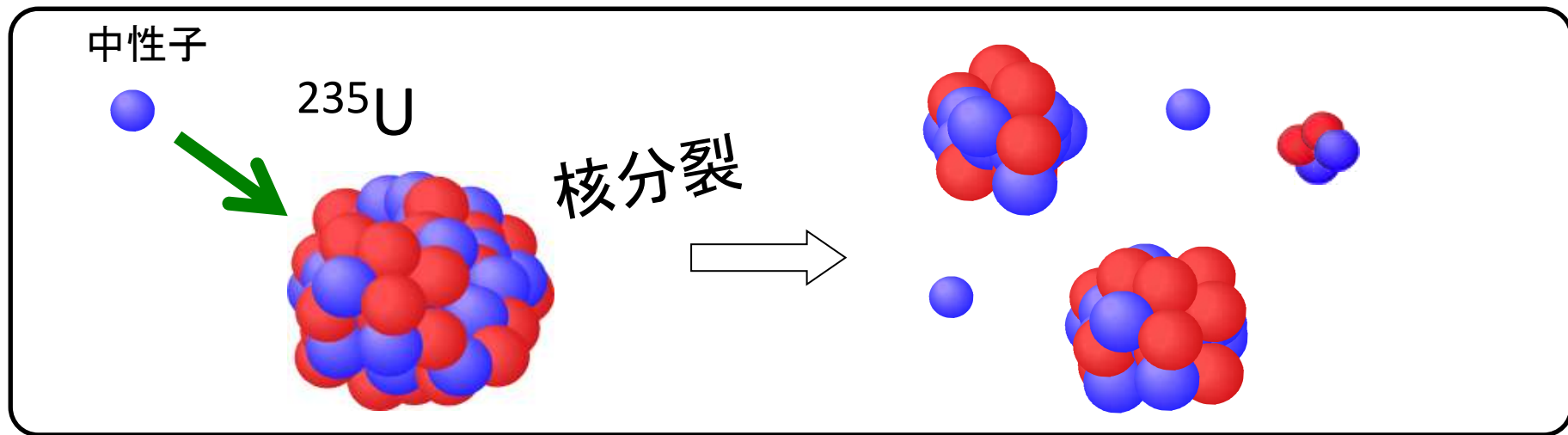
実際は

一方が少し重く	(質量数 ~ 135)	← ^{137}Cs
もう一方が少し軽い	(質量数 ~ 95)	← ^{90}Sr

原子炉内での臨界とは？



核分裂



三体核分裂

非常に小さい分岐比 ($\sim 0.3\%$) で3つの原子核に分裂する。

α 粒子、トリトン (3重水素原子核)

原子核の崩壊と放射線

- アルファ崩壊

アルファ粒子（= ${}^4\text{He}$ 原子核）を放出

- ベータ崩壊

ベータ粒子（＝電子）を放出

- **ガンマ崩壊**

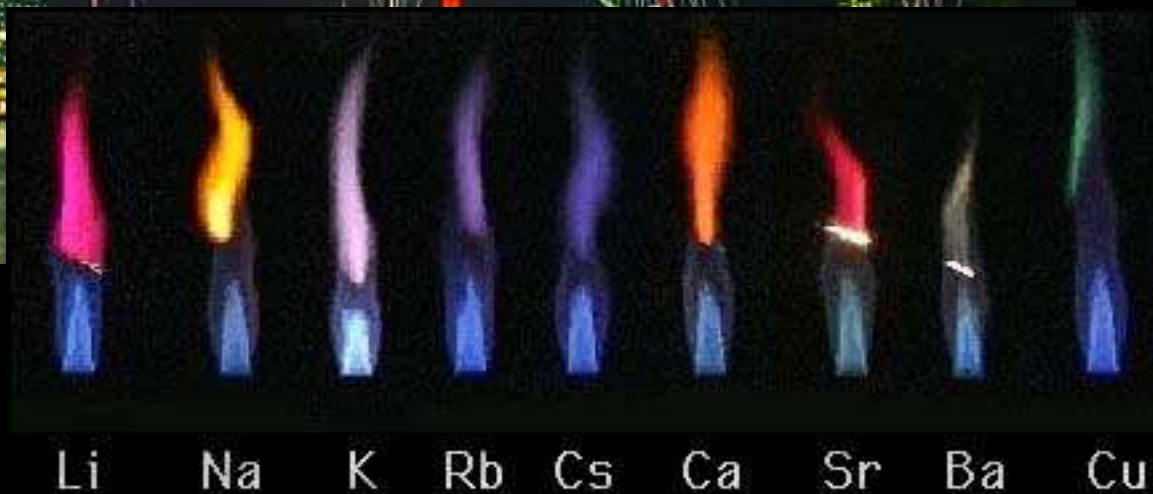
ガンマ線（＝波長の短い光）を放出

- 核分裂

$A \sim 140$ と $A \sim 95$ の原子核に転換

ガンマ崩壊

- 一般にものを刺激すると
エネルギーの高い状態（励起状態）になる。
- 励起状態が元の状態に戻るときに余った
エネルギーを光として放出することが多い。
- 化学における炎色反応、花火
元素ごとに**特有の色**



ガンマ崩壊

- 一般にものを刺激すると
エネルギーの高い状態（励起状態）になる。
- 励起状態が元の状態に戻るときに余った
エネルギーを光として放出することが多い。
- 化学における炎色反応、花火
元素ごとに特有の色

ガンマ崩壊

- 一般にものを刺激すると
エネルギーの高い状態（励起状態）になる。
- 励起状態が元の状態に戻るときに余った
エネルギーを光として放出することが多い。
- 化学における炎色反応、花火 $\sim 1 \text{ eV}$
元素ごとに特有の色
- 原子核でも同じことが起きる。
ただし「光」のエネルギーは高い（波長が短い）
原子核ごとに特有の「色」 $\sim 1 \text{ MeV}$

ガンマ崩壊

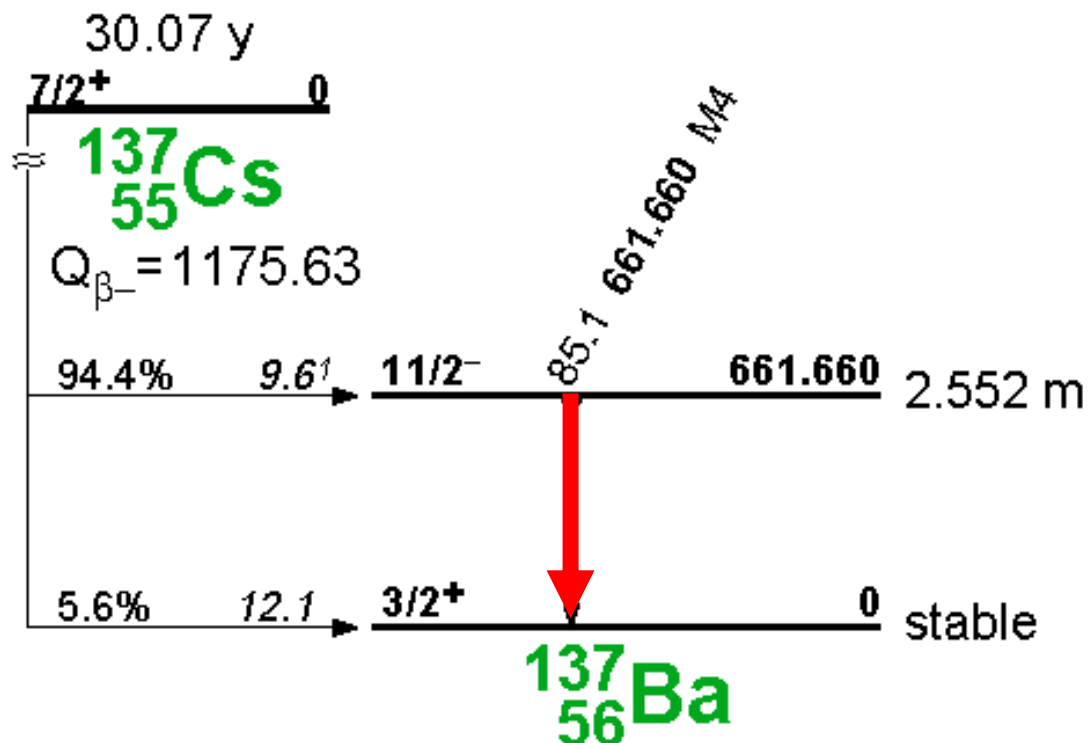
- 一般にものを刺激すると
エネルギーの高い状態（励起状態）になる。
核種は変わらない
- 励起状態が元の状態に戻るときに余った
エネルギーを光として放出することが多い。
- 化学における炎色反応、花火 $\sim 1 \text{ eV}$
元素ごとに特有の色
- 原子核でも同じことが起きる。
ただし「光」のエネルギーは高い（波長が短い）
原子核ごとに特有の「色」 $\sim 1 \text{ MeV}$

^{137}Cs の崩壊

半減期 : 30年
 γ 線エネルギー : 662 keV

^{137}Cs のベータ崩壊には
 ガンマ崩壊が伴う

^{137}Cs の同定に使える

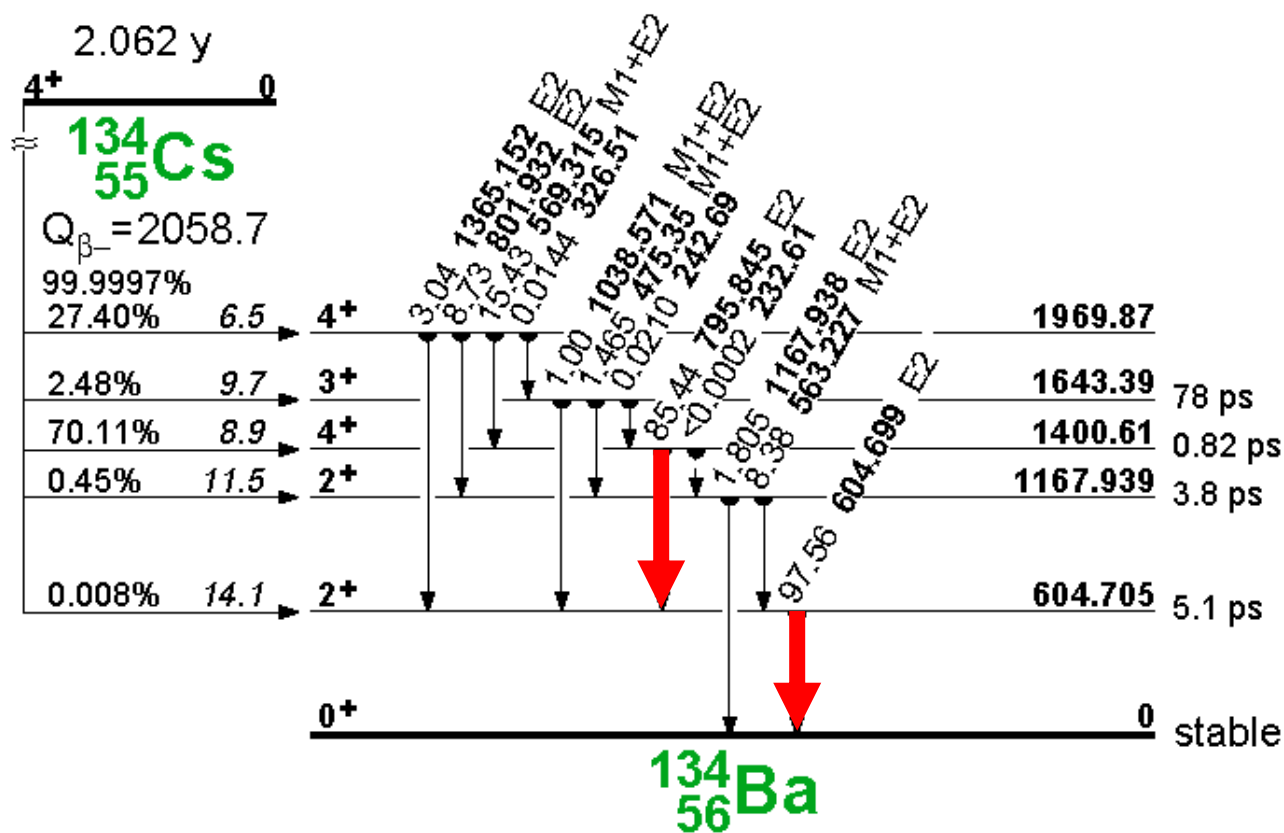


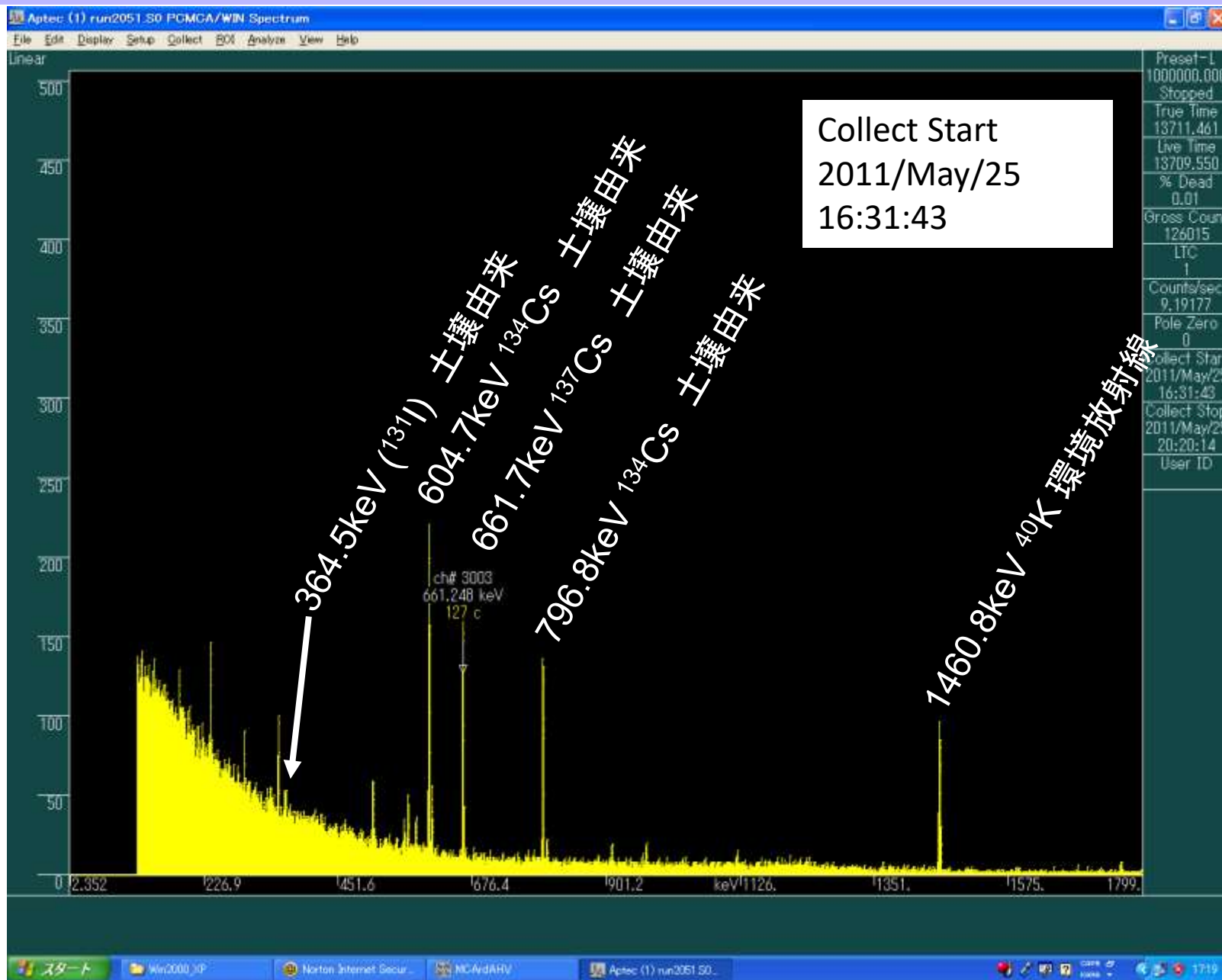
^{134}Cs の崩壊

半減期： 2.1年

γ 線エネルギー： 604 keV

796 keV





^{90}Sr の崩壊

半減期 : 29年

^{90}Sr のベータ崩壊には
ガンマ崩壊が伴わない