

総合科目E物質・生命一般

「原子力エネルギーと放射線」

2014年10月6日

原子核と放射線の基礎

工学部システム創成学科B

石川顕一

ウェブ <http://ishiken.free.fr>

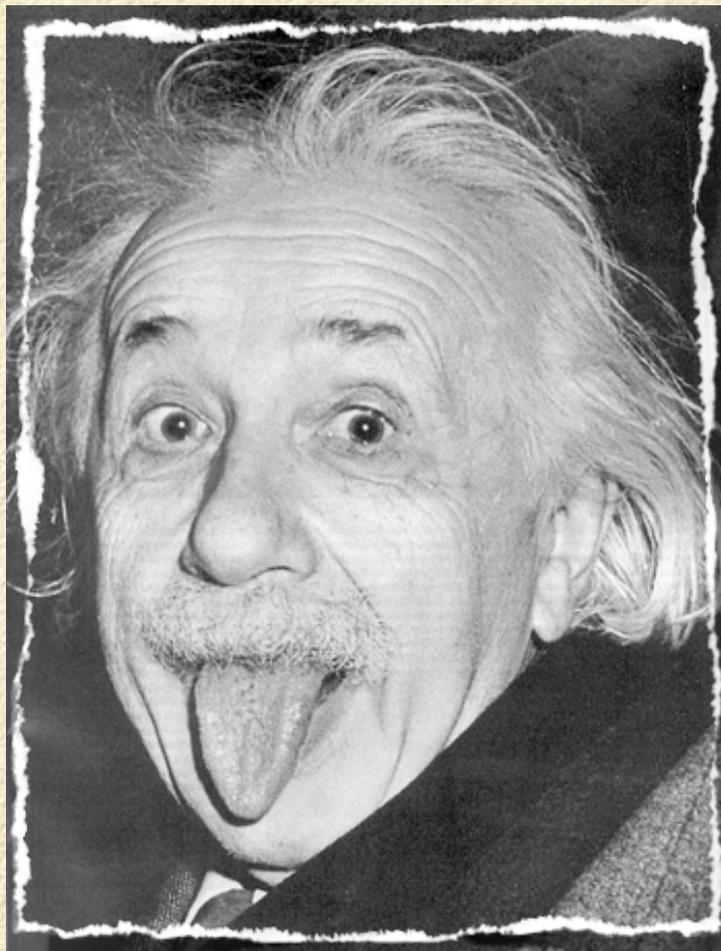
メール ishiken@n.t.u-tokyo.ac.jp

講義資料はウェブにアップする予定です。

本日のメニュー

- 原子力エネルギーとは
- 放射線と物質の相互作用
の基礎

すべてはこの人の理論から



世界一有名な方程式

エネルギー

質量

$$E = mc^2$$

光速度 3×10^8 m/s

1グラムの物質を完全に消滅させたらエネルギーは何カロリー？

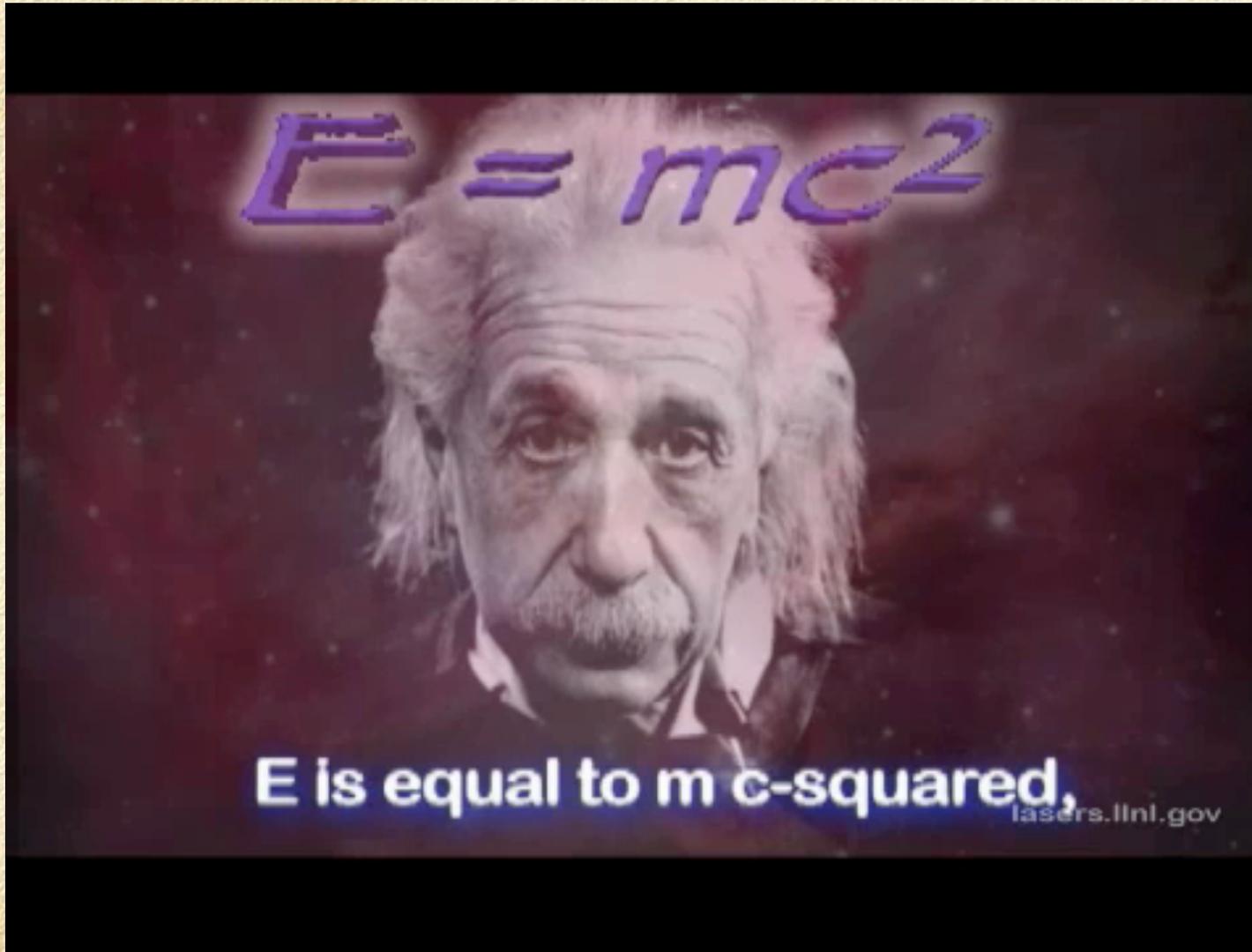
1グラムの水を1度温める→1カロリー

東京都の1日あたりの消費電力→77兆カロリー

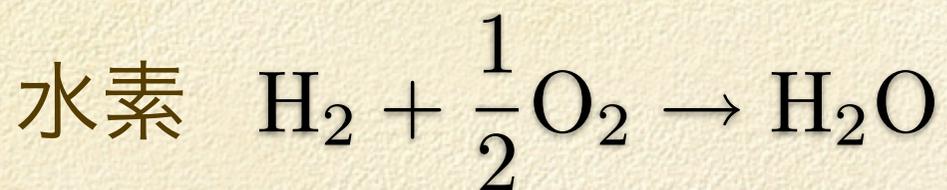
21兆カロリー

(東京都 6 時間半分)

質量のエネルギーは莫大！



化学反応(燃焼)には質量保存の法則がある

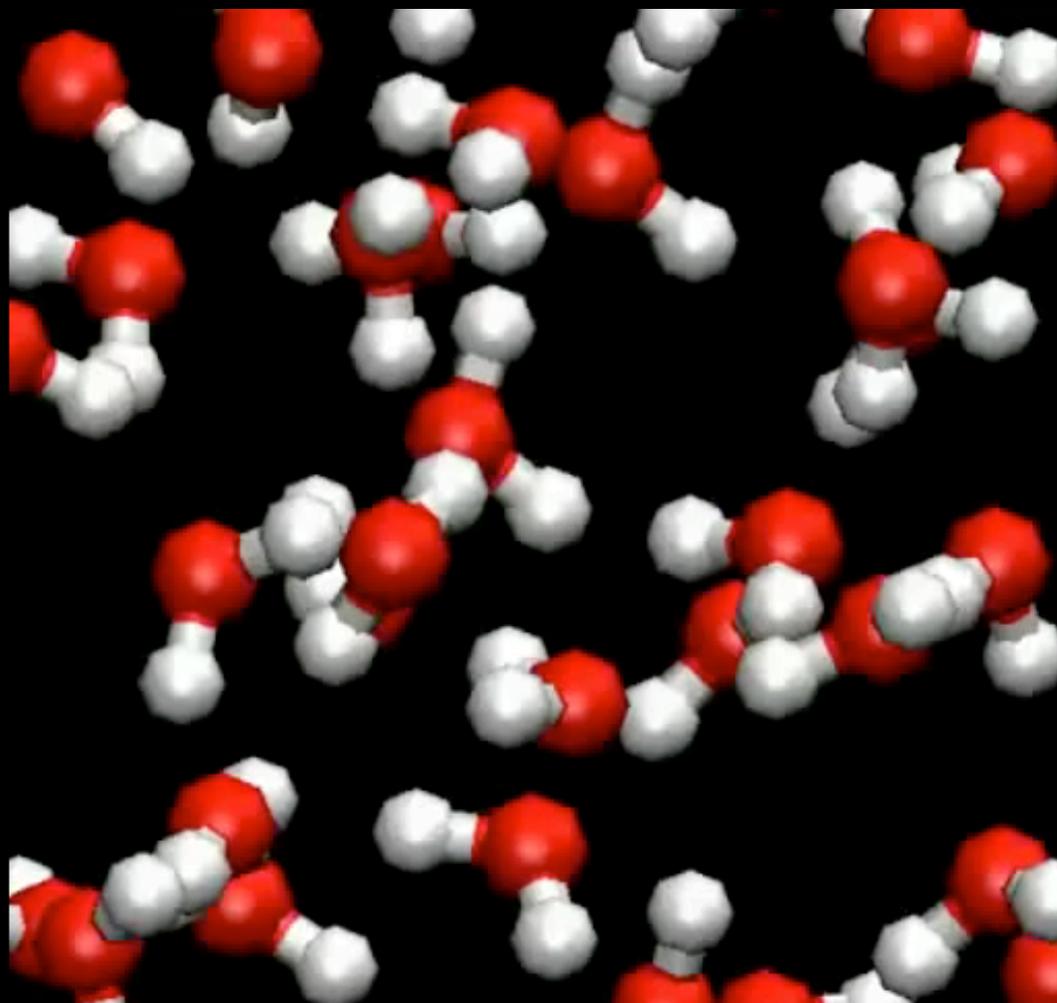


ラボアジエ 1774年



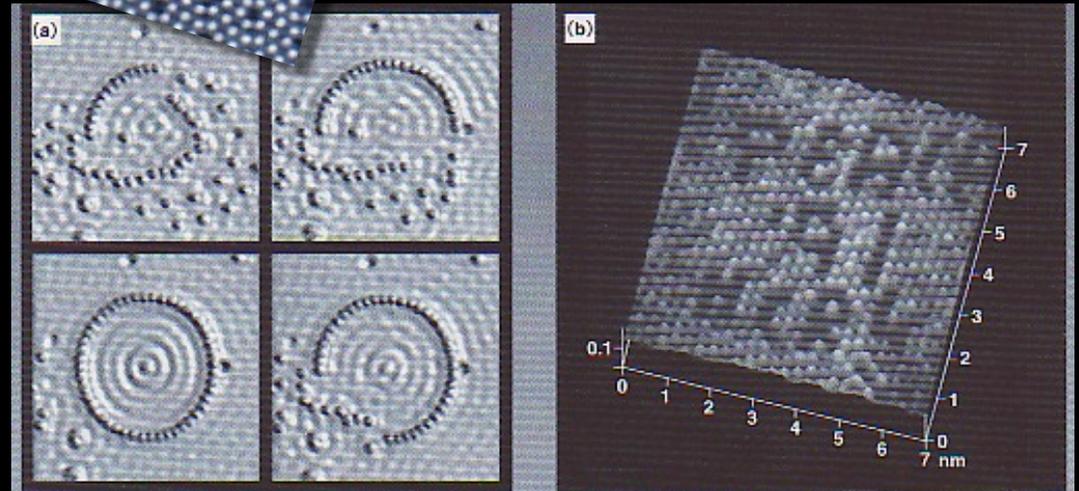
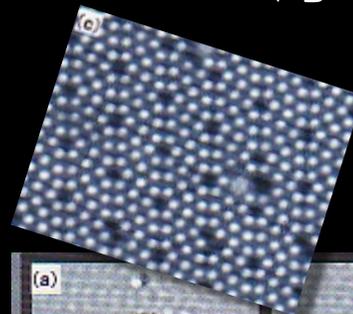
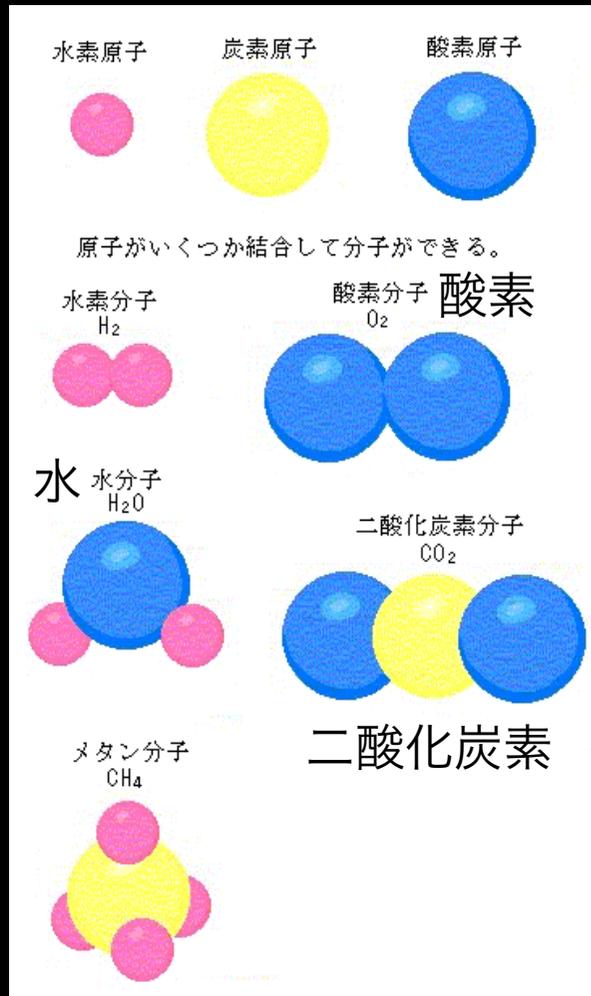
- 化学反応の前後では質量が変化しない

物質は分子からできている



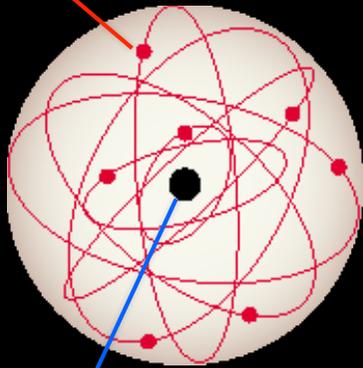
分子は原子からできている

原子は本当にある
原子は見える

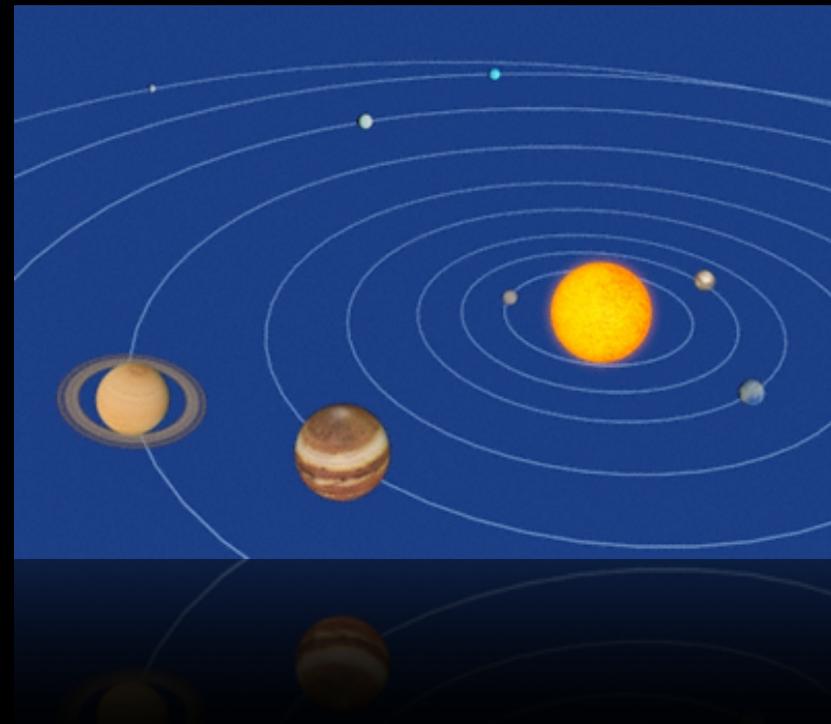


原子の中では、電子が原子核 のまわりを回っている

電子（マイナスの電荷）

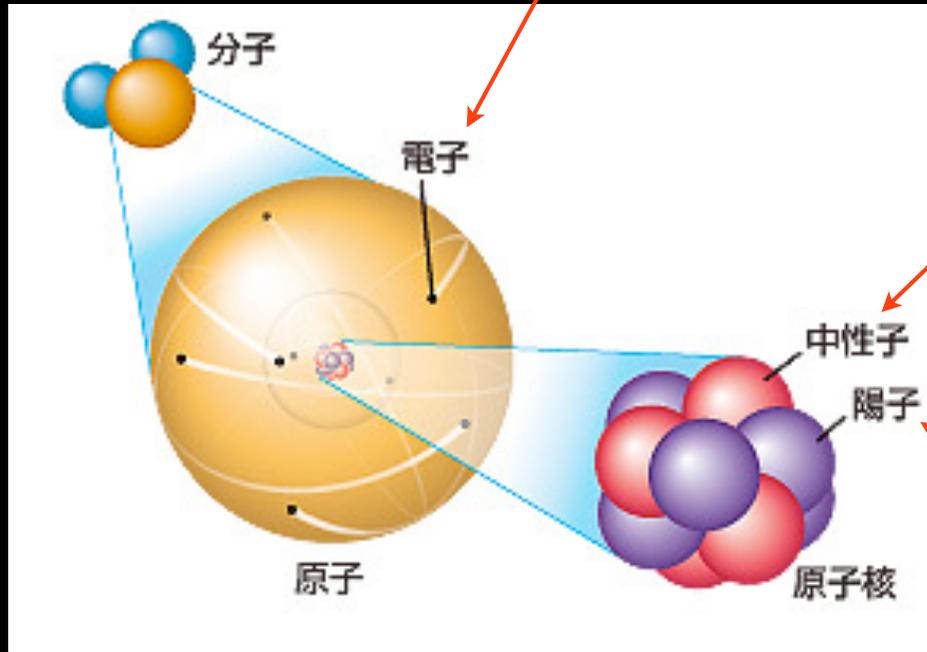


原子核（プラスの電荷）



原子核は陽子と中性子からできている

マイナスに帯電 -1.6×10^{-19} クーロン 質量 9.109×10^{-31} kg



電氣的に中性

質量 $1.674927351 \times 10^{-27}$ kg

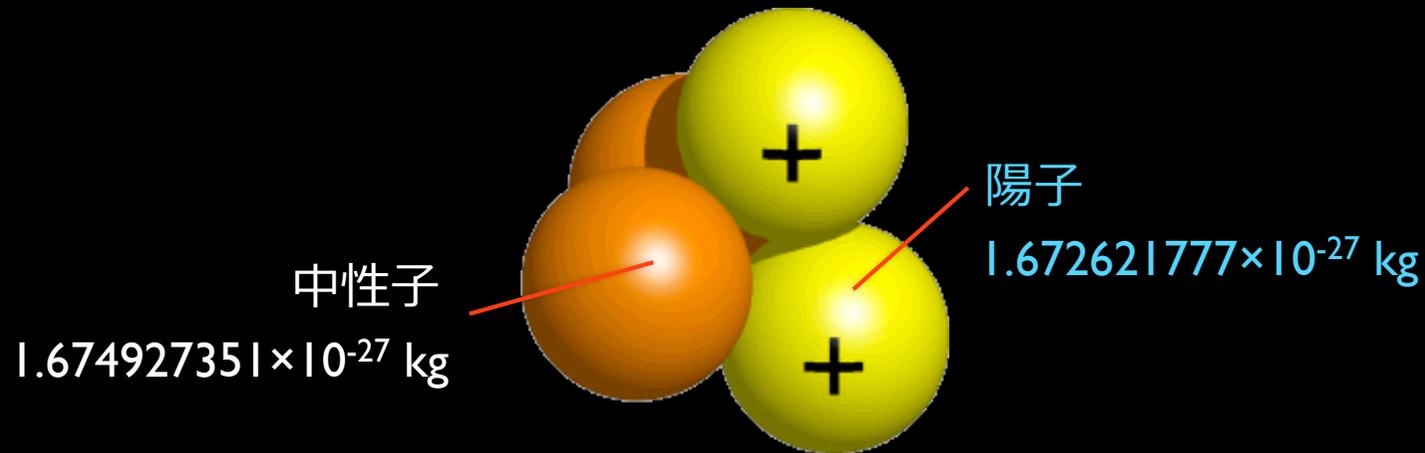
1840倍

1.0014倍

水素の原子核
プラスに帯電
 1.6×10^{-19} クーロン

質量 $1.672621777 \times 10^{-27}$ kg

ヘリウムの原子核の質量は？



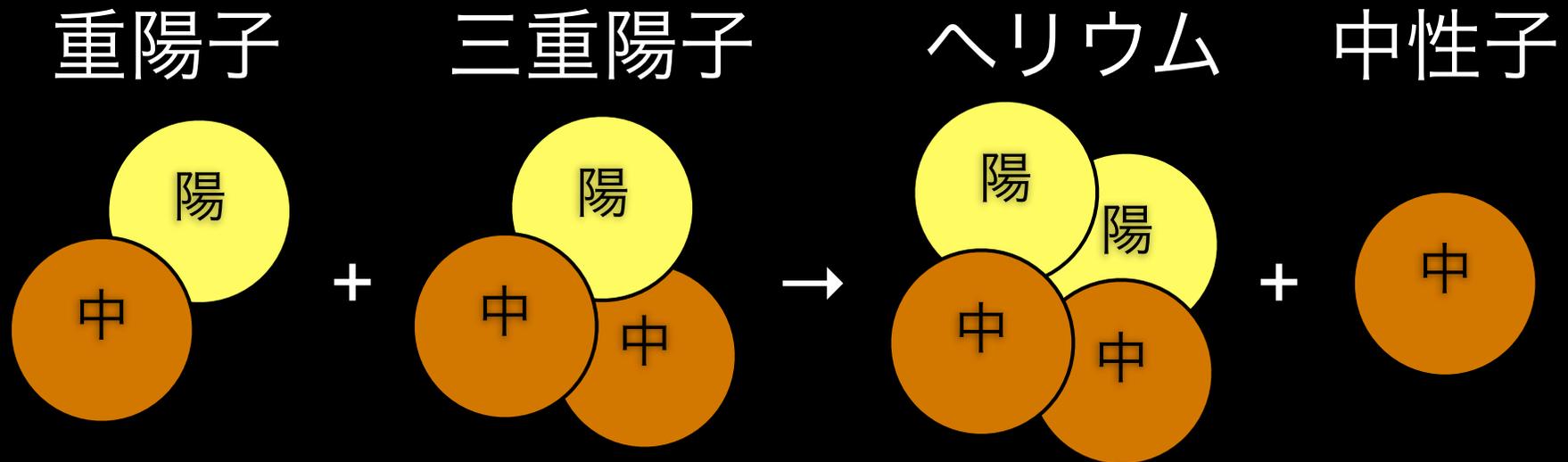
$$1.672621777 \times 10^{-27} \times 2 + 1.674927351 \times 10^{-27} \times 2 = 6.695098256 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

実際は... $6.64465675 \times 10^{-27} \text{ kg}$

0.75%軽い!

原子核の質量 \neq 構成している陽子・
中性子の質量の総和

原子核同士が反応するとき

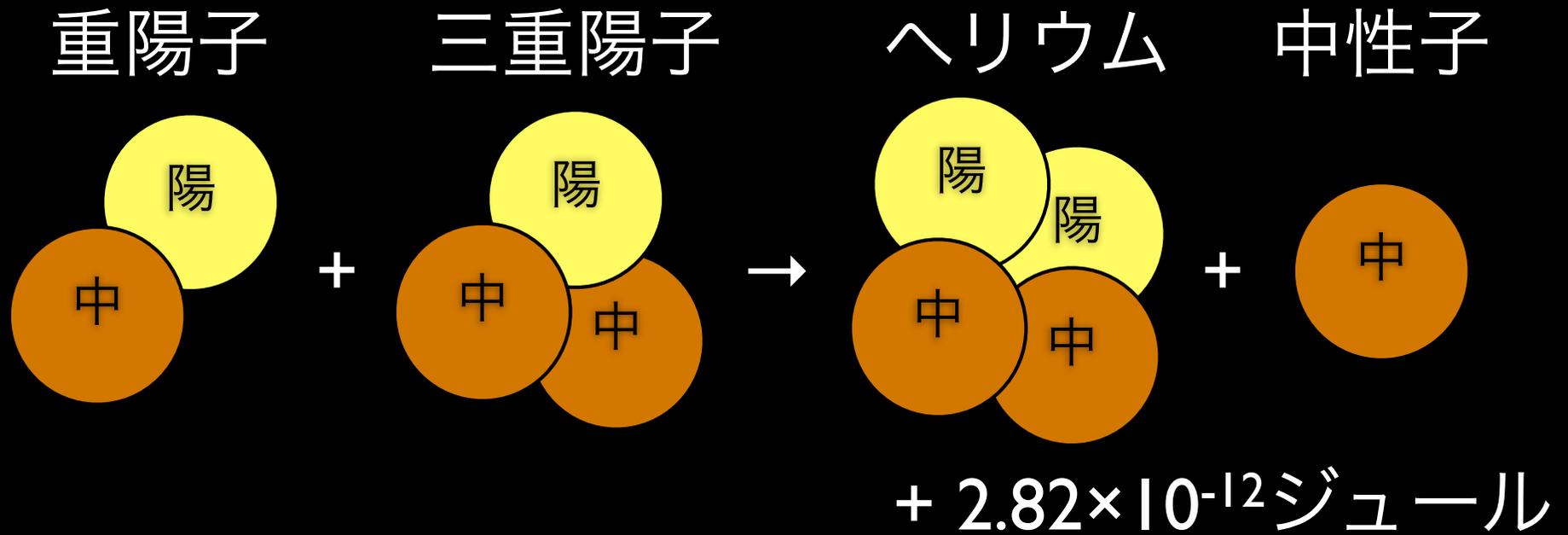


質量保存の法則が成り立たない 3.14×10^{-29} kg 軽い

$$E = mc^2 \rightarrow 3.14 \times 10^{-29} \times (3 \times 10^8)^2 = 2.82 \times 10^{-12} \text{ジュール}$$

のエネルギーが発生

核融合反応



- 太陽や恒星のエネルギー源
- ただし、原子力発電所のエネルギー源ではない

※太陽で起こっている核融合反応は上記の反応ではないので注意

原子力発電所が
使っているのは

核分裂反応

ウランの核分裂反応の例



| | | | | | |
|-----|-----|---|-----|----|---|
| 陽子 | 92 | 0 | 56 | 36 | 0 |
| 中性子 | 143 | 1 | 88 | 53 | 3 |
| 合計 | 235 | 1 | 144 | 89 | 3 |

原子力発電所が
使っているのは

核分裂反応

ウランの核分裂反応の例



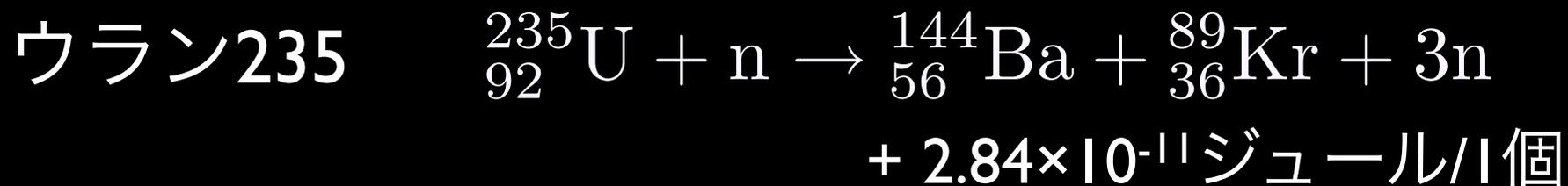
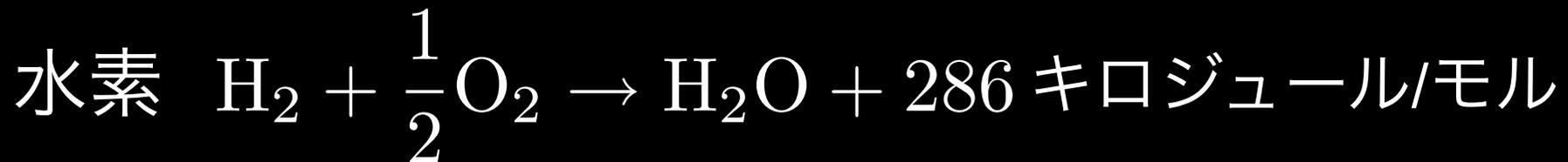
質量保存の法則が成り立たない

3.16×10^{-28} kg 軽い

→ 2.84×10^{-11} ジュールの
エネルギーが発生

質量をエネルギーに
変換するのが原子力

普通の燃焼（化学反応）と比べてみよう



➡ $(2.84 \times 10^{-11}) \times (6.02 \times 10^{23}) = 1.71 \times 10^{13}$ ジュール/モル
= 17100000000 キロジュール/モル

核分裂反応は**百万倍以上**効率がいい！

原子力（核分裂）は
火力（燃焼）よりケ
タちがいに高効率

ウラン1グラム=石油2トン（ドラム缶10本）

- 質量のエネルギーは莫大
- 質量をエネルギーに変換するのが原子力
- 原子力はウランとプルトニウムの核分裂反応を利用
- 核分裂反応によるエネルギー生成は化学反応よりケタちがいに高効率

※ 厳密には化学反応においても反応エネルギーに対応した質量変化があるが、歴史的には原子核反応においてはじめて質量変化が観測された。

核分裂反応の発見

- 1938年に、オットー・ハーンとフリッツ・シュトラスマンが、ウラン(U)に中性子を当てる実験をしたところ、バリウム(Ba)ができていることを見つけたが、一体何が起こっているのか理解できなかった。
- リーゼ・マイトナーとオットー・フリッシュが、ウランがバリウムとクリプトンに割れたことに気づき、**核分裂**と名付けた。

ノーベル化学賞
(1944)

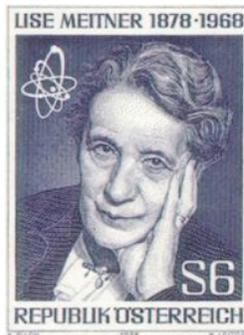
ハーン



シュトラスマン



マイトナー

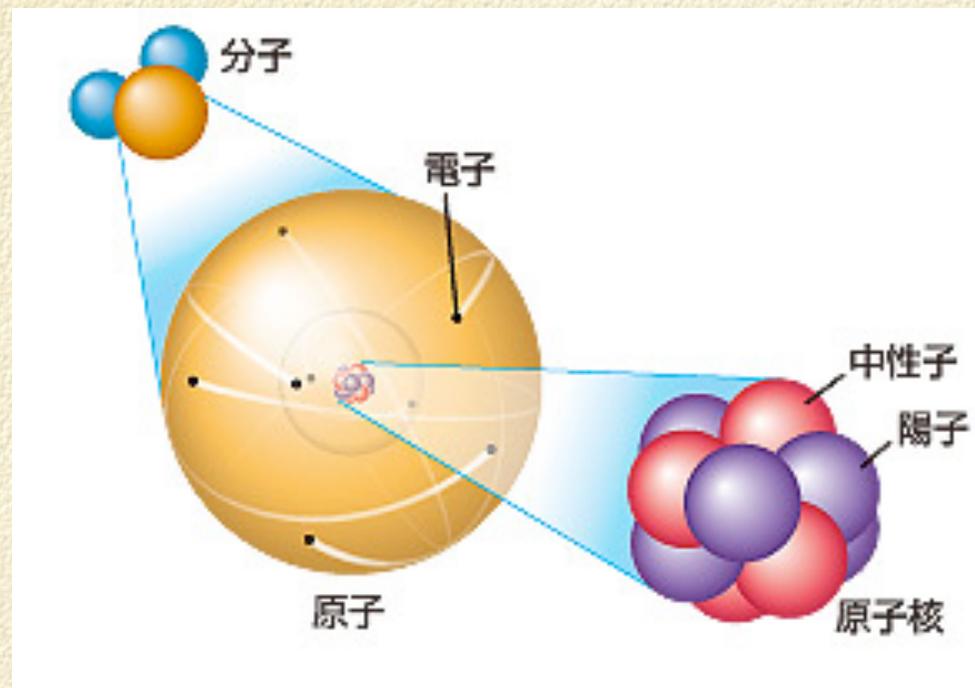
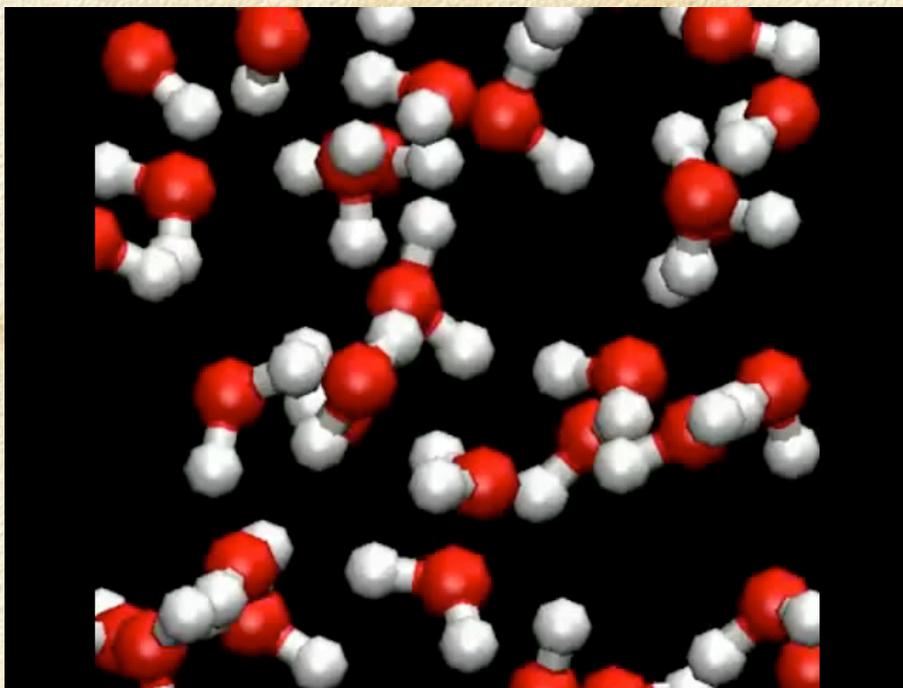


フリッシュ



FRISCH





原子核の中には、放射線を出す
ものがある

「放射線」と「放射能」を区別しよう

放射線（電離放射線）とは

原子核から出てくる電離（イオン化）を起こすことのできる粒子

荷電粒子

Ra, U, Pu  アルファ線：ヘリウムの原子核（正電荷）

^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{131}I  ベータ線：高速の電子（負電荷）

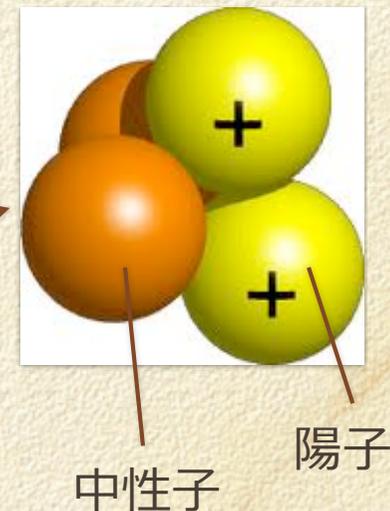
非荷電粒子

^{137}Cs ($^{137\text{m}}\text{Ba}$)
 ^{131}I ($^{131\text{m}}\text{Xe}$)  ガンマ線：きわめて波長の短い電磁波（光）

放射能

原子核が自発的に放射性壊変して、アルファ線、ベータ線、ガンマ線を放出する性質（放射線を出す能力）

光と蛍光灯の違いに似ている



ガンマ線と物質の相互作用

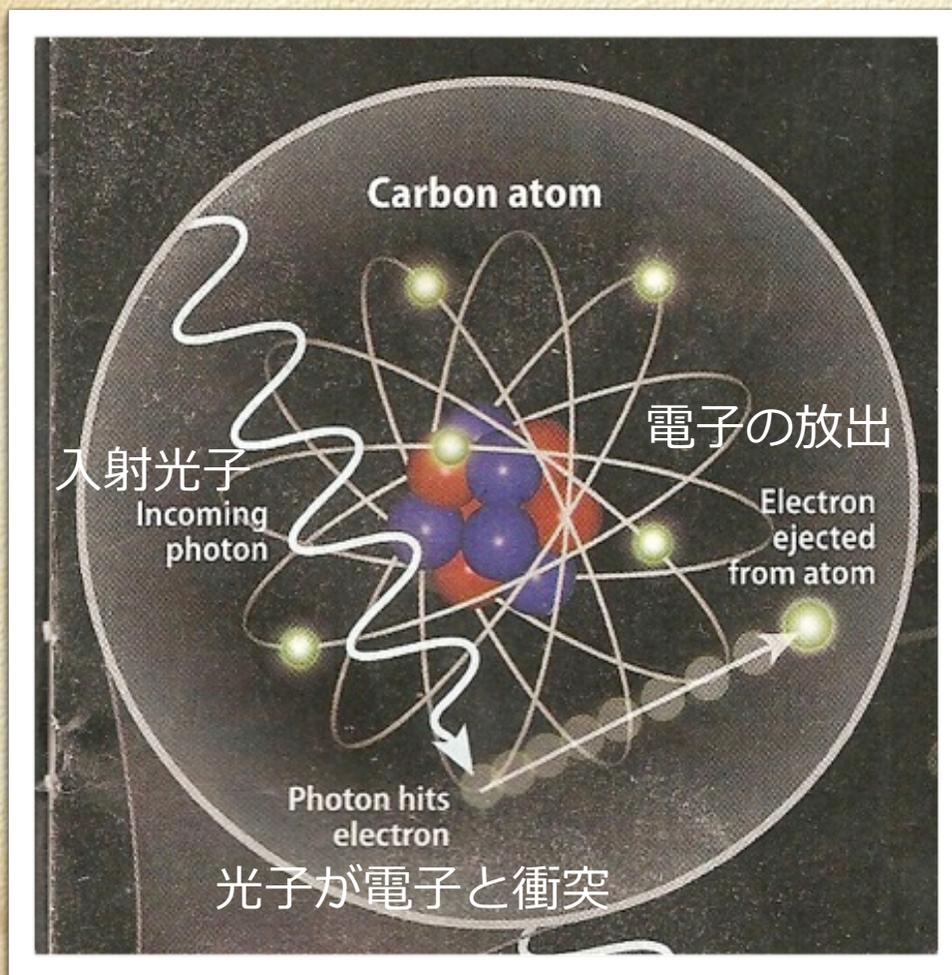
励起した原子から光（光子）が出てくるように、励起した原子核からガンマ線（これも光子）が出てくる。

ガンマ線が原子と衝突すると何が起こるか

- 光電効果
- コンプトン効果
- 電子対生成

光電効果

光子はエネルギーをすべて軌道電子に与え、たたき出す。



2次電子の運動エネルギー
ガンマ線光子のエネルギー
軌道電子の束縛エネルギー

$$E_e = E_\gamma - I$$

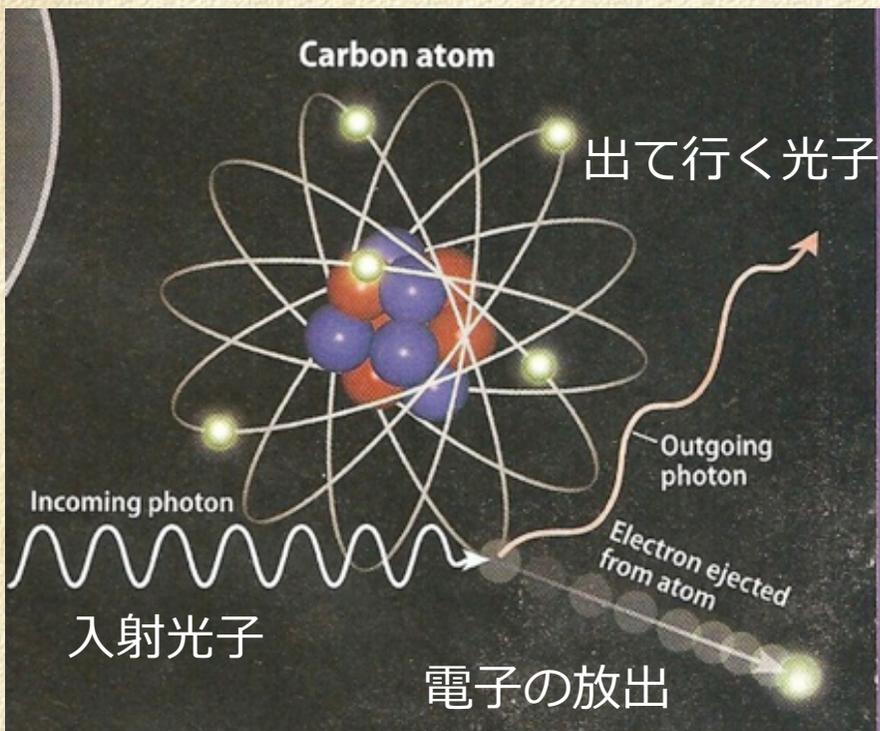
放出される電子（2次電子）も放射線 → ベータ線のようにふるまう

<http://www.spec2000.net/06-atomicphysics.htm>

コンプトン効果

光子は、エネルギーの一部だけを軌道電子に与える。

アーサー・コンプトンが1923年に発見（1927年ノーベル物理学賞）



<http://www.spec2000.net/06-atomicphysics.htm>



$$E_e + E'_\gamma = E_\gamma - I$$

2次電子の運動エネルギー

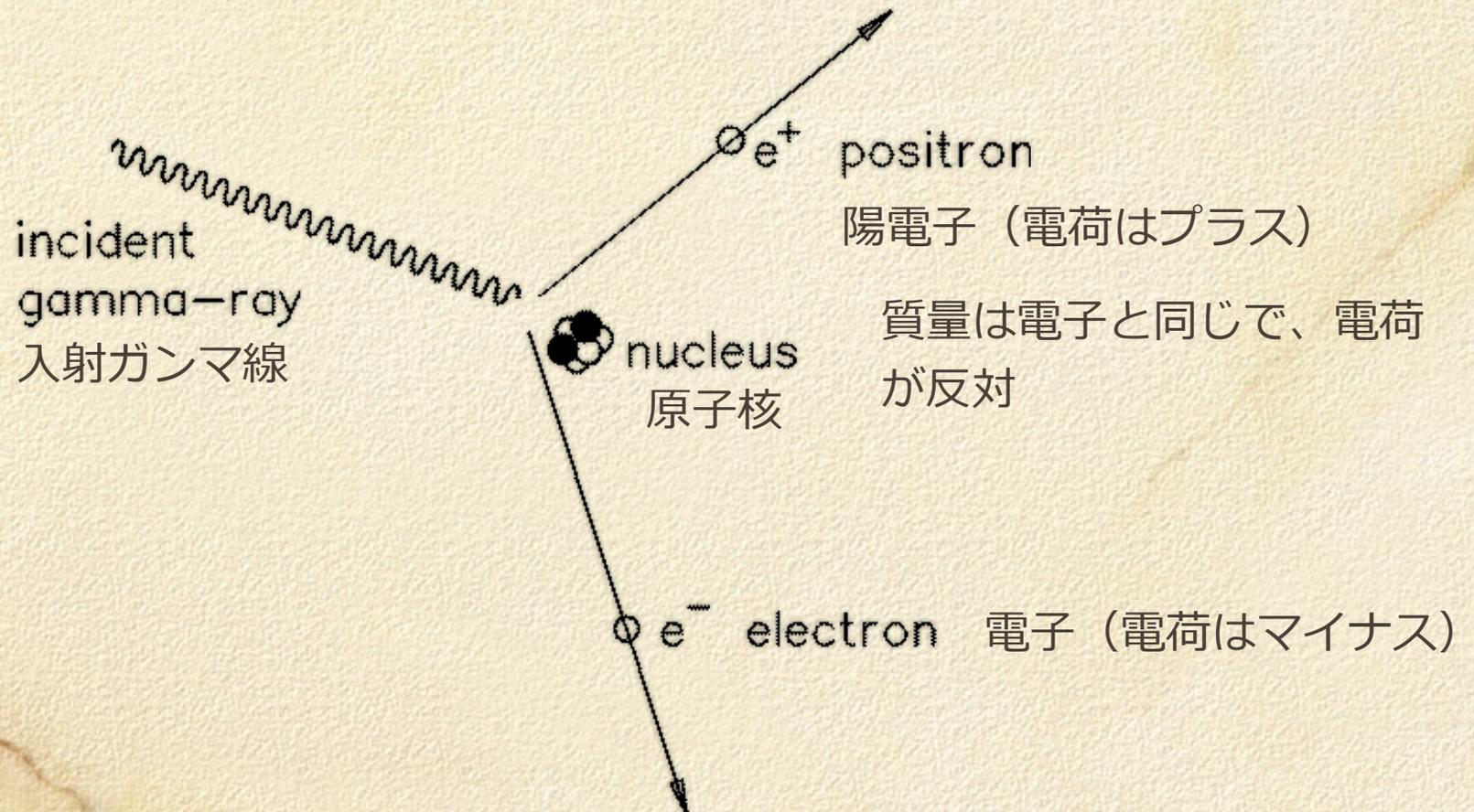
出て行く光子のエネルギー

入射ガンマ線光子のエネルギー

軌道電子の束縛エネルギー

電子対生成

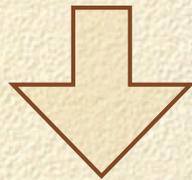
高エネルギーのガンマ線が原子核の近くを通るとき、光子は消滅して、**真空から電子と陽電子（電子の反粒子）の対が生まれる**ことがある。



陽電子はガンの診断に利用されている！

陽電子断層法 (PET)

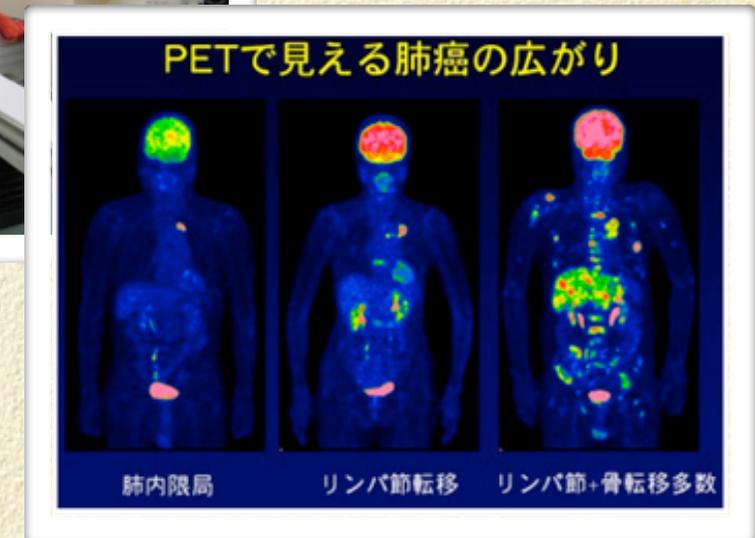
陽電子を放出する（反ベータ壊変）放射性同位元素（酸素15, 窒素13, 炭素11, フッ素18）をがん細胞に集積させる。



陽電子が回りの原子の電子と衝突して対消滅する時に
出るガンマ線を検出



ウィキペディアより

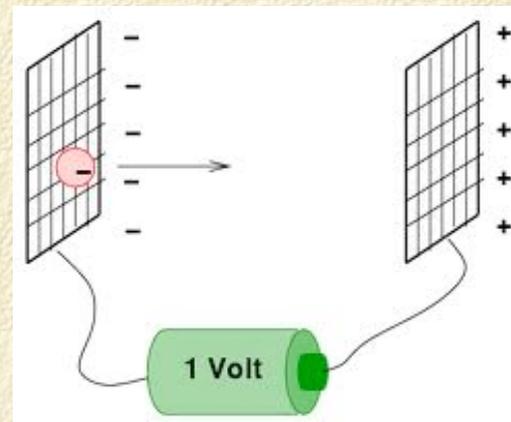


http://www.skypaktours.co.jp/product_categories/cancer/products/1/7

初期の小さいガン（1cm前後）を発見できるのが特徴

放射線のエネルギーの単位

1 ボルトの電圧で電子を加速したときに、電子が得る運動エネルギーを1電子ボルトと呼ぶ。



電子の電荷 (素電荷) = 1.602×10^{-19} クーロン

➔ 1 eV (電子ボルト) = 1.602×10^{-19} ジュール

1 keV = 1,000 eV 1 MeV = 1,000,000 eV

例：放射性セシウム(^{137}Cs)からのガンマ線光子のエネルギーは
 $662 \text{ keV} = 1.06 \times 10^{-13}$ ジュール = 2.53×10^{-14} ジュール

微小なエネルギーが影響をおよぼすのは、電離 (イオン化) ができるから

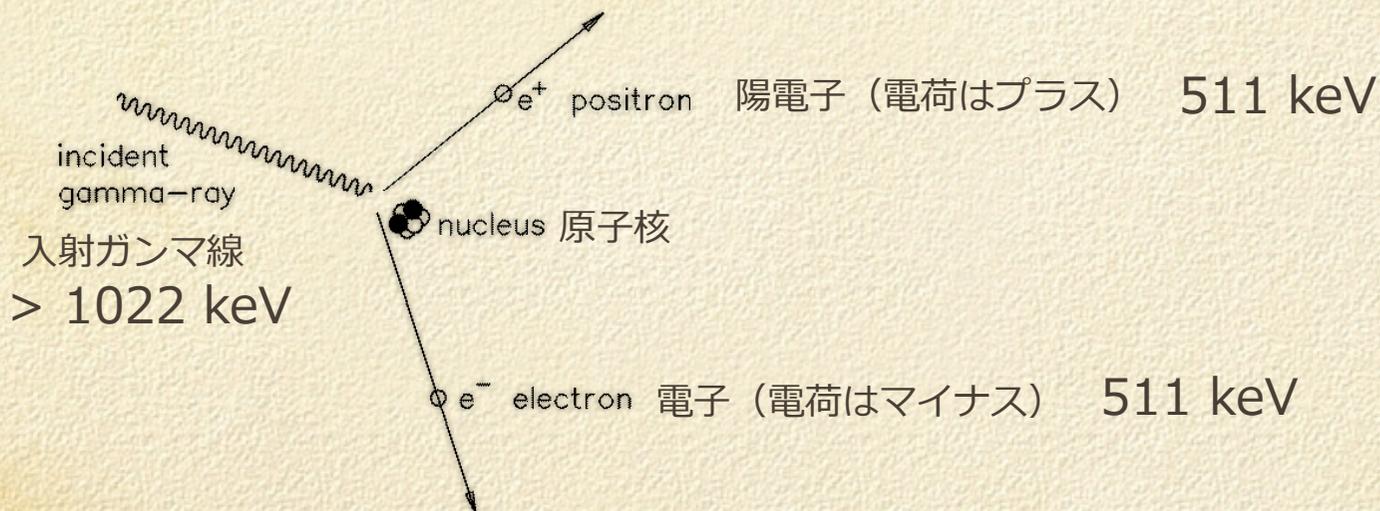
電子の質量のエネルギー

質量はエネルギーの一形態（特殊相対性理論）

$$E = mc^2 = 511 \text{ keV}$$

電子の質量 $m = 9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$

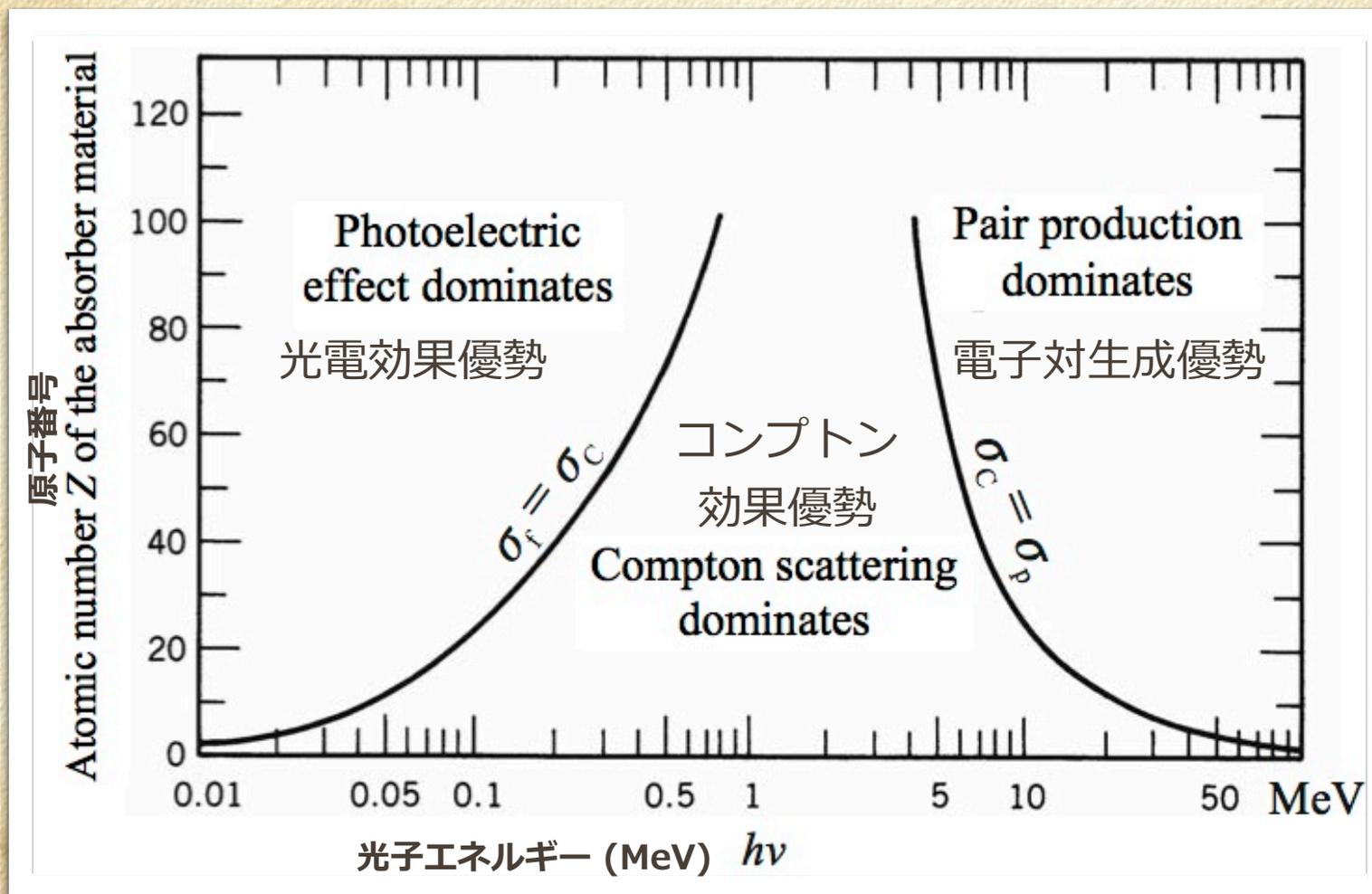
光の速度 $c = 299,792,458 \text{ m/s}$



電子対生成が起こるには、1022 keV = 1.022 MeV 以上のガンマ線が必要

例：コバルト60 (1.33 MeV, 1.17 MeV)

原子番号やガンマ線光子のエネルギーによって、起こる反応は異なる。



ガンマ線光子の減衰

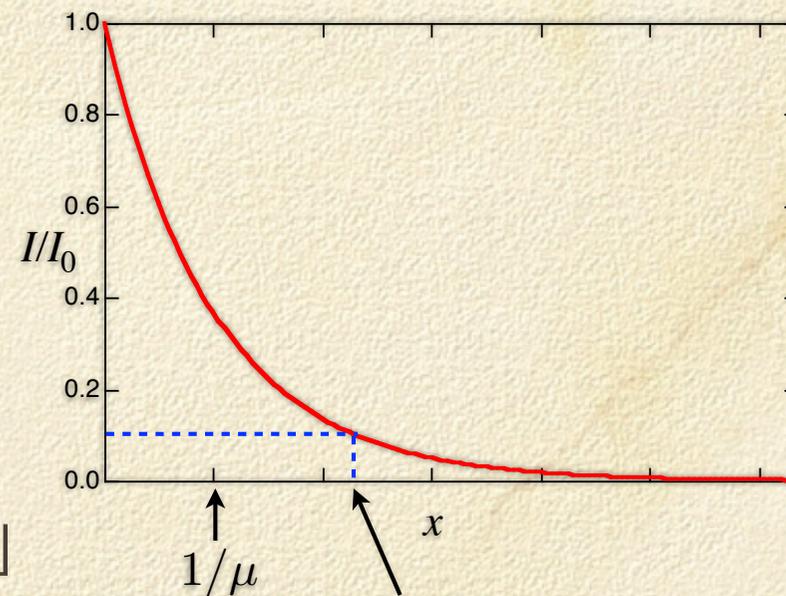
遮蔽（しゃへい）物が厚くなるにつれ、
指数関数的に減衰

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

強度 減弱係数 物質の厚さ

物質とその密度、ガンマ線のエネルギーによる。

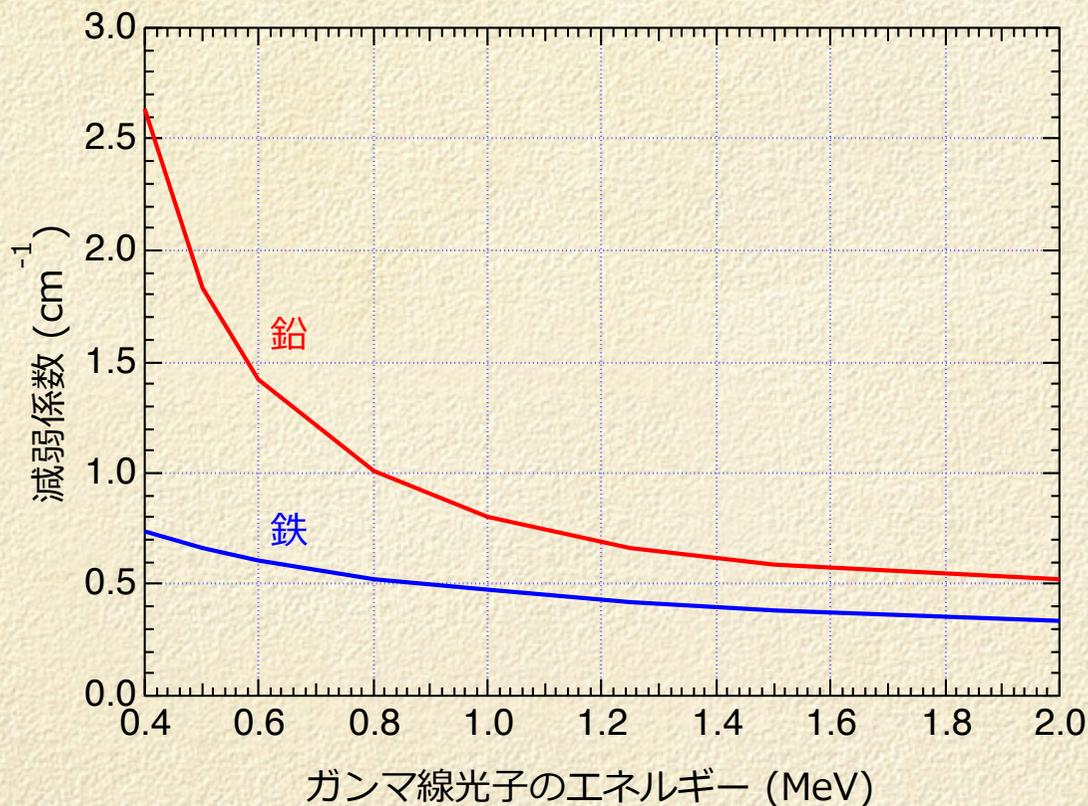
「起こる反応の数は、光子の数に比例」



1/10に減る距離
(1/10価層)

$$x_{1/10} = \frac{\ln 10}{\mu} = \frac{2.30}{\mu}$$

原子番号が大きいほどガンマ線の遮蔽効果が大きい (鉛がよく利用される)



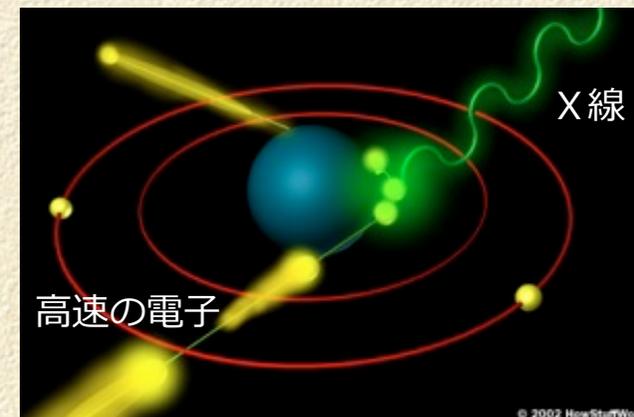
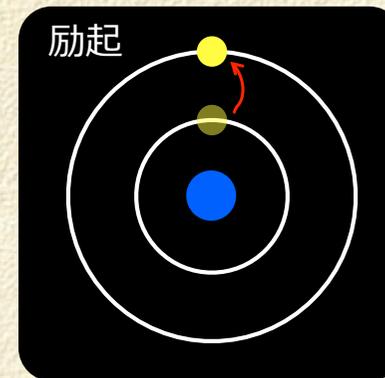
例：放射性セシウム(¹³⁷Cs)からのガンマ線光子のエネルギーは662 keV

鉛の減弱係数=約1.3 cm⁻¹ ⇒ 1/10価層 = 約1.8 cm
1/100 価層 = 約3.6 cm

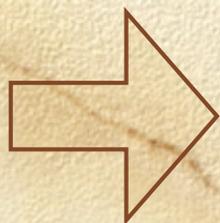
ベータ線（高速の電子）と物質の相互作用

電荷を持った放射線は、クーロン力によって物質中の電子をはね飛ばしながら進む。

- クーロン力によって原子を励起または電離する。
- 原子核の強いクーロン場によって急に曲げられて減速され、X線を放出する（制動放射）。



制動放射



徐々にエネルギーを失って止まる

<http://www.physics.hku.hk/~phys0607/lectures/chap06.html>

制動放射はエックス線源として応用されている

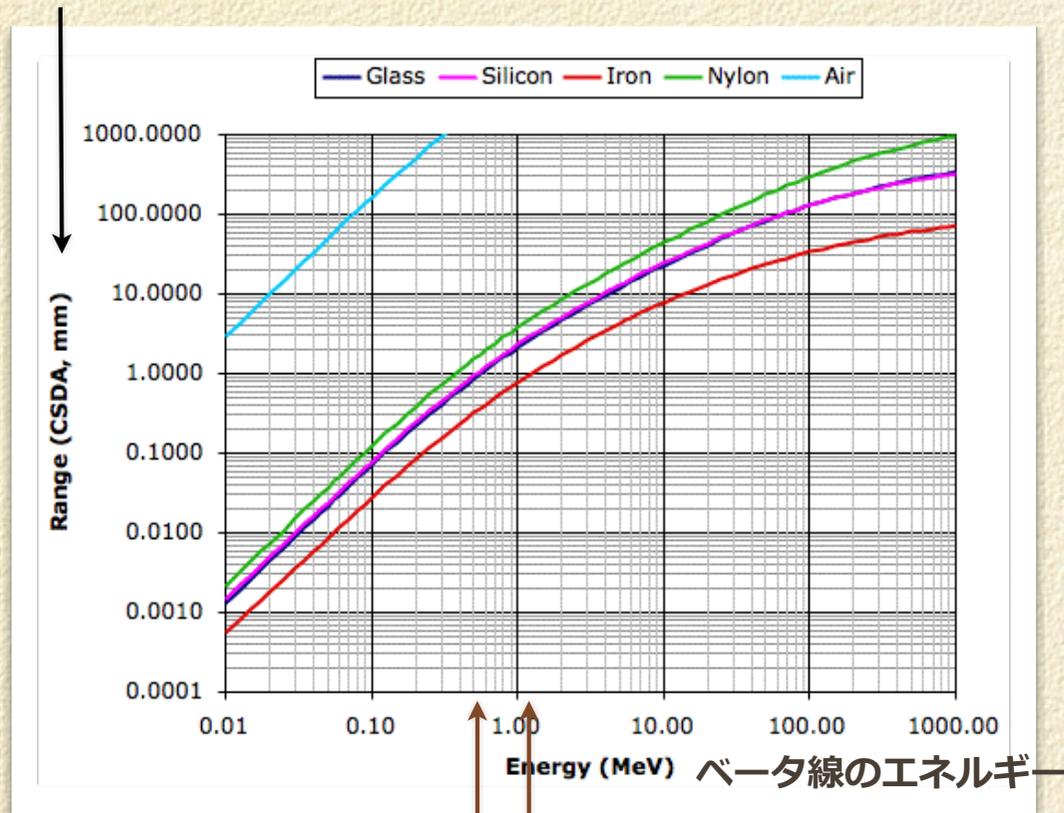
放射光施設 SPring-8 (兵庫県)



<http://www.spring8.or.jp>

ベータ線はどれぐらいの距離を進むか

飛程：荷電粒子が止まるまでに物質中を進む距離



放射性セシウム137からのベータ線

ベータ線は厚さ数ミリのガラスや金属板、水で止まる

重荷電粒子と物質の相互作用

**止まる直前に
最大の電離**

重荷電粒子（アルファ線、陽子線、イオンビームなど）

- クーロン力によって原子を電離または励起することによって減速する。
- 質量が大きくほとんど直進するので、制動放射は無視できる。

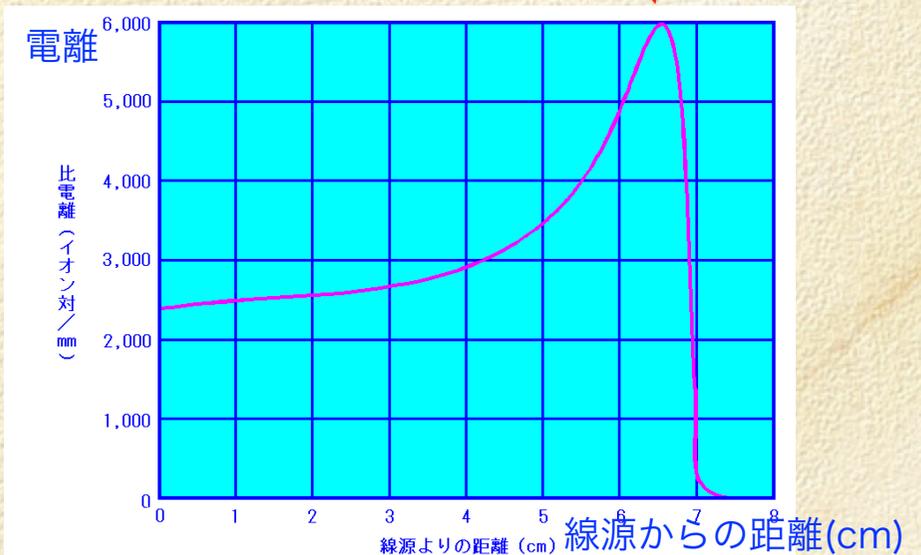


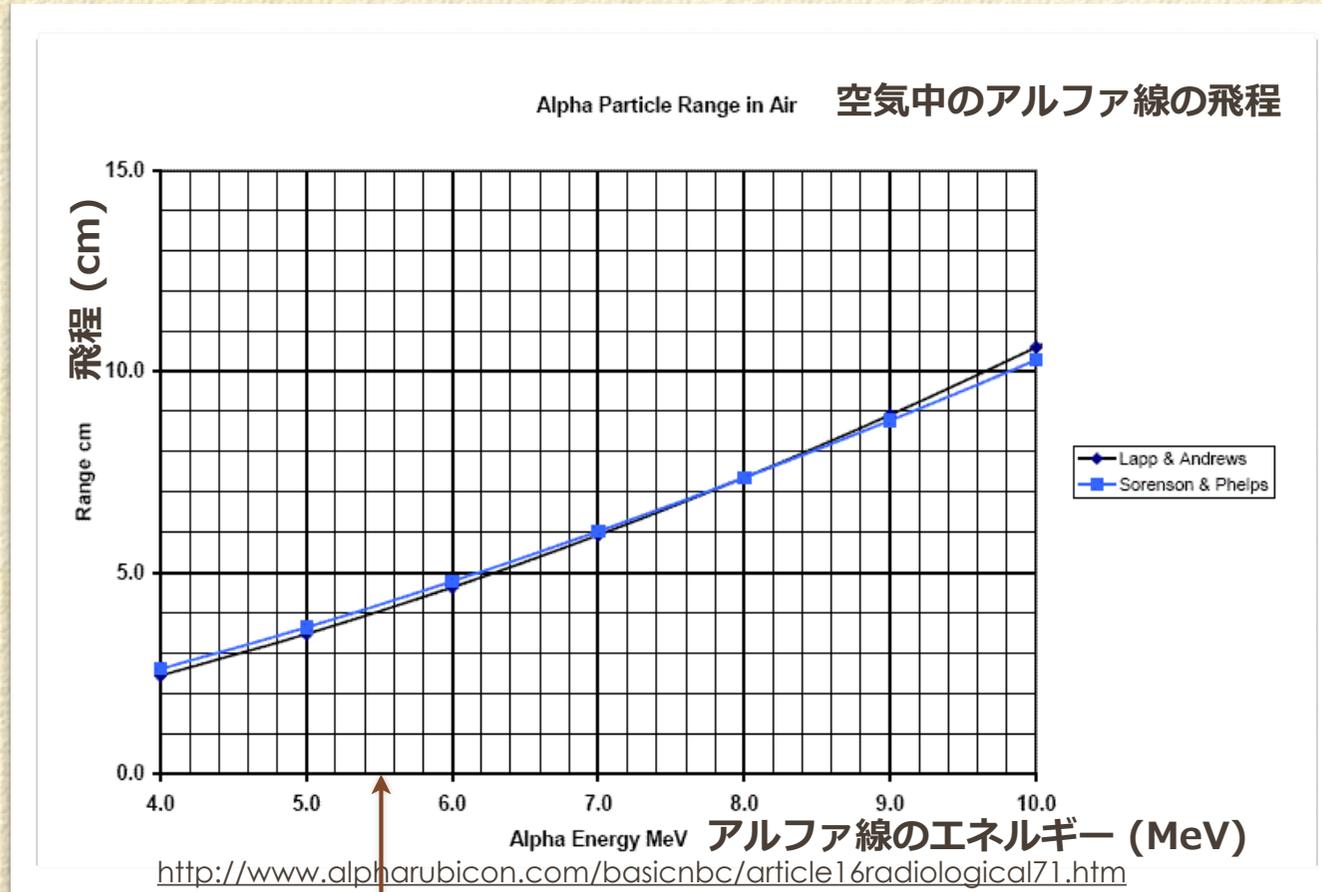
図4 RaC' からの α 線によるBragg曲線 (空气中)

【出典】江藤秀雄ほか：放射線の防護、丸善（1982年12月）、p58

ブラッグ曲線

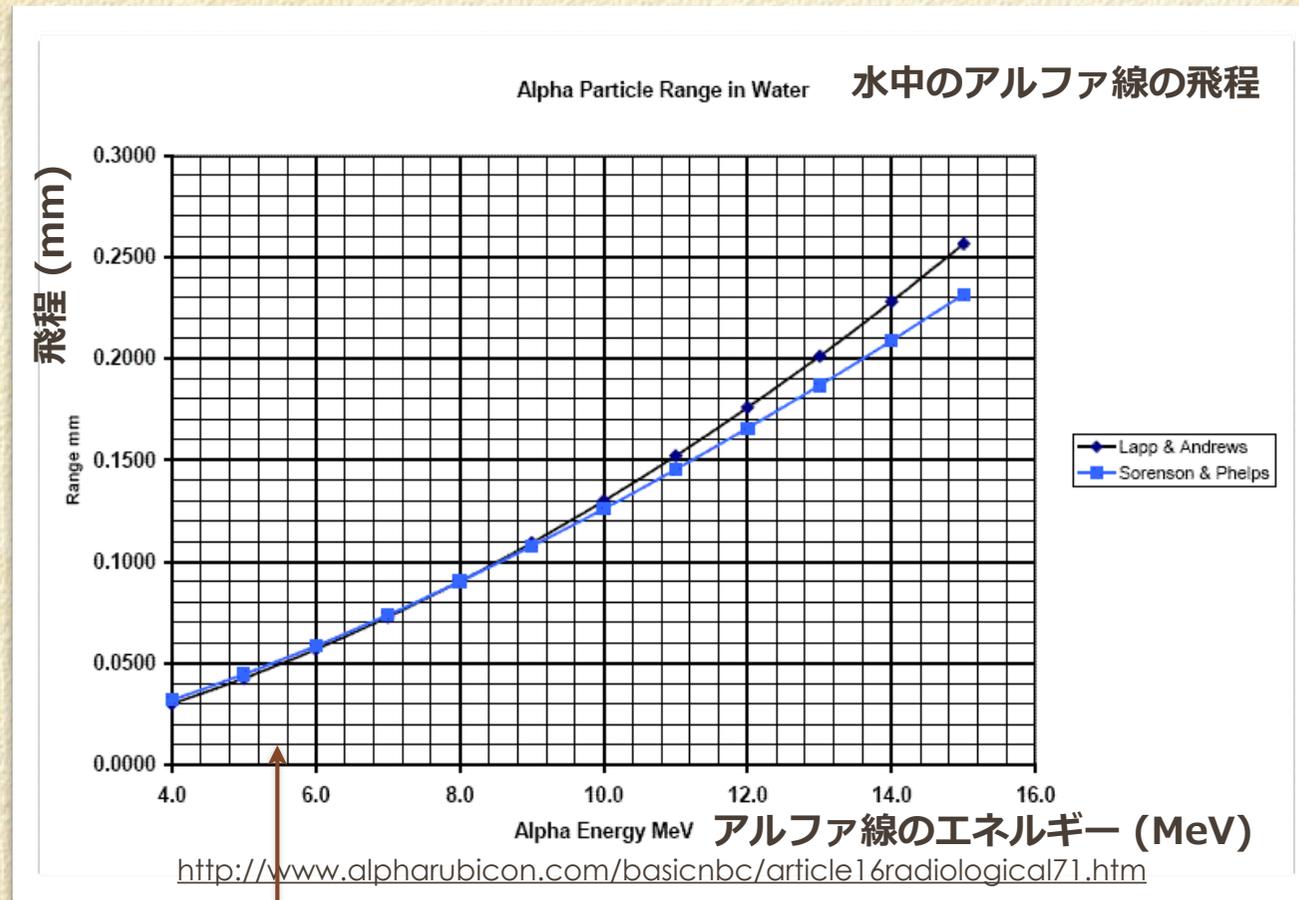
アルファ線は空气中でさえ数センチで止まる。

アルファ線は空気中でさえ数センチで止まる。



アメリシウム241からのアルファ線 (海外では火災報知器に使われている)

アルファ線は水中を1ミリも進めない



アメリカシウム241からのアルファ線（海外では火災報知器に使われている）

アルファ線は紙一枚で止まる

放射線の種類と透過力

放射線は、いろいろな物質で
さえぎることができる。

