

新刊書籍 発売！ 2012年10月10日 刊行

「放射線を科学的に理解する — 基礎からわかる東大教養の講義」

鳥居寛之・小豆川勝見・渡辺雄一郎 著
中川恵一 執筆協力

丸善出版 本体 2500円＋税

- 1章 放射線とは？《放射線入門》
- 2章 放射線の性質《放射線物理学 I》
- 3章 原子力発電で生み出される放射性物質《原子核物理学・原子力工学》
- 4章 放射線量の評価《放射線物理学 II》
- 5章 放射線の測り方《放射線計測学》
- 6章 環境中での放射性物質《環境放射化学》
- 7章 放射線の細胞への影響《放射線生物学》
- 8章 放射線の人体への影響《放射線医学》
- 9章 放射性物質と農業《植物栄養学・土壤肥料学》
- 10章 放射線の防護と安全《放射線防護学》
- 11章 役に立つ放射線《放射線の利用・加速器科学》
- Q&A

放射線を理解するには、物理学・化学・生物学・医学・工学など、多くの分野の知識が必要です。しかしこれらすべてを網羅することは難しく、系統立てて学べる機会は非常に少ないのが実情です。

本書は、東京大学教養学部で行われた講義をもとにし、放射線について多角的に学べるよう配慮しています。日常生活や原発事故にかかわる具体的な例を引きながらやさしくていねいに解説しましたので、高校生や一般の方にも広く読んでいただきたいと願っています。

<http://radphys4.c.u-tokyo.ac.jp/~torii/lecture/radiolect-kn.html>

放射線

鳥居 寛之
小豆川勝見
渡辺雄一郎 著
中川 恵一
執筆協力

科学的に
理解する

基礎からわかる東大教養の講義

丸善出版

2012年度冬学期 主題科目テーマ講義

放射線

を

科学的に

理解する

金曜 5 限

@ 21 KOMCEE

K402教室

2013 / 1 / 25 (金)



γ 線



中性子線



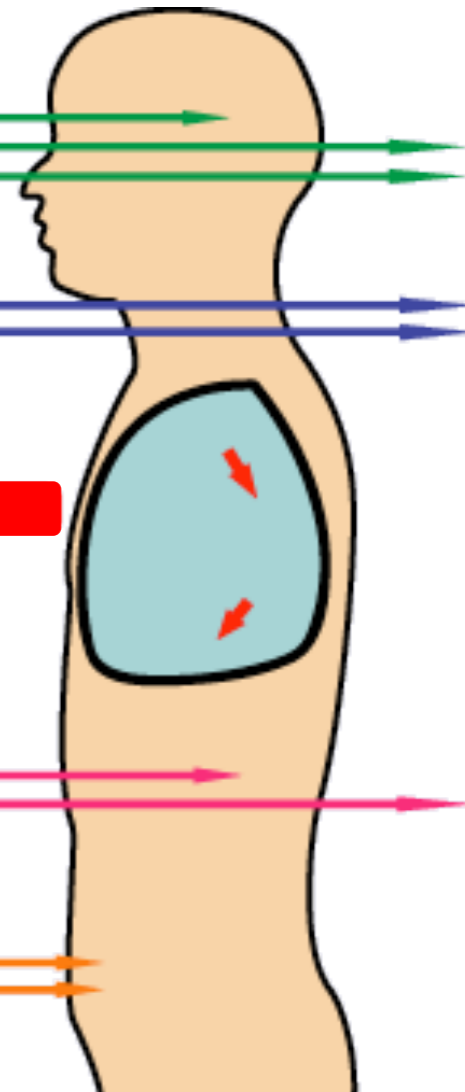
α 線



X線



β 線



第13回

放射線防護学・加速器科学

線量評価・人工の放射線

鳥居 寛之

東京大学 教養学部 / 大学院総合文化研究科

放射線を科学的に理解する

- 10/12 放射線入門 【鳥居】
- 10/19 放射線物理学 【鳥居】
- 10/26 放射線計測学 【小豆川】
- 11/ 2 環境放射化学 【小豆川】
- 11/ 9 放射線生物学 【渡邊】
- 11/16 放射線医療 【作美】
- 11/20 原子核物理学 【鳥居】
- 11/30 環境システム工学 【森口】
- 12/ 7 科学技術社会論 【藤垣】
- 12/14 環境放射化学 【小豆川】
- 12/21 植物栄養・肥料学 【藤原】
- 1/11 放射線の利用 【渡邊】
- 1/25 放射線防護学・加速器科学 【鳥居】

担当教員

ゲスト講師

鳥居 寛之

小豆川 勝見

渡邊 雄一郎

《教養学部》

作美 明

森口 祐一

藤原 徹

藤垣 裕子

《医学部附属病院放射線科》

《工学系都市工学》

《農学部応用生命化学》

《教養学部広域システム》

準教科書

- 1章 放射線とは？《放射線入門》
 - 2章 放射線の性質《放射線物理学Ⅰ》
 - 3章 原子力発電で生み出される放射性物質
《原子核物理学・原子力工学》
 - 4章 放射線量の評価《放射線物理学Ⅱ》
 - 5章 放射線の測り方《放射線計測学》
 - 6章 環境中での放射性物質《環境放射化学》
 - 7章 放射線の細胞への影響《放射線生物学》
 - 8章 放射線の人体への影響《放射線医学》
 - 9章 放射性物質と農業
《植物栄養学・土壌肥料学》
 - 10章 放射線の防護と安全《放射線防護学》
 - 11章 役に立つ放射線
《放射線の利用・加速器科学》
- Q&A

新刊書籍

「放射線を科学的に理解する

— 基礎からわかる東大教養の講義 —

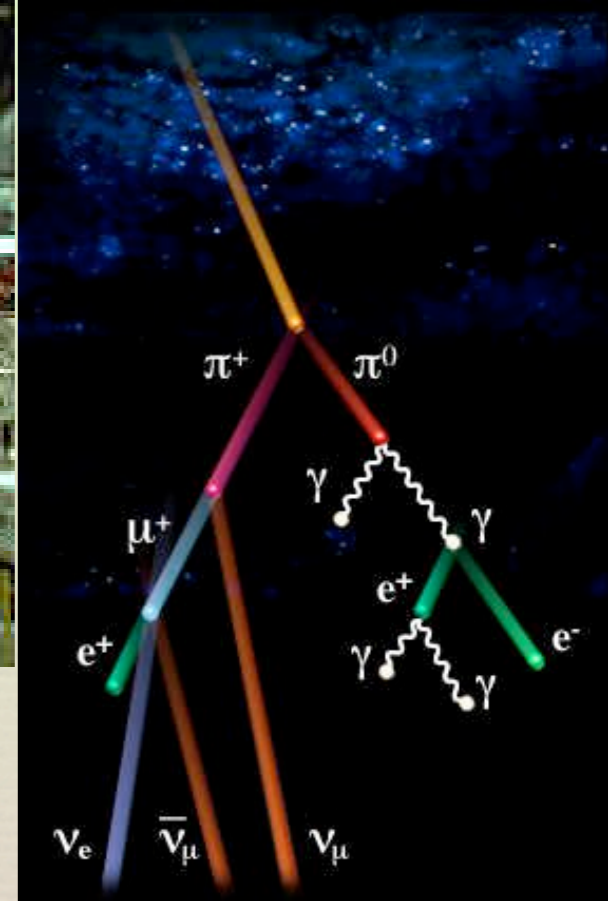
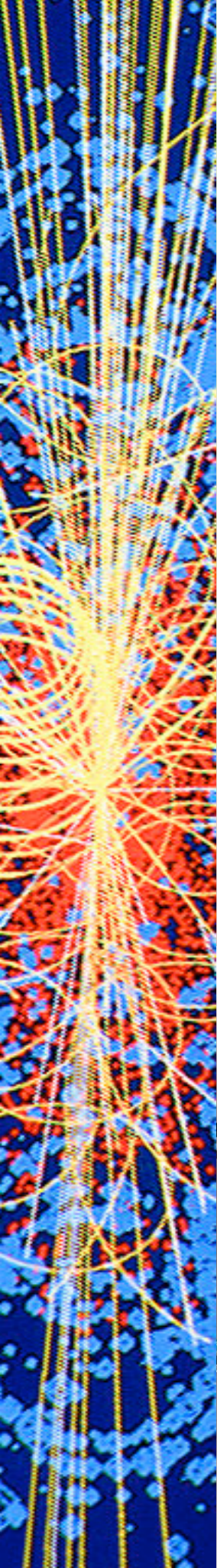
鳥居寛之・小豆川勝見・渡辺雄一郎 著

中川恵一 執筆協力

丸善出版

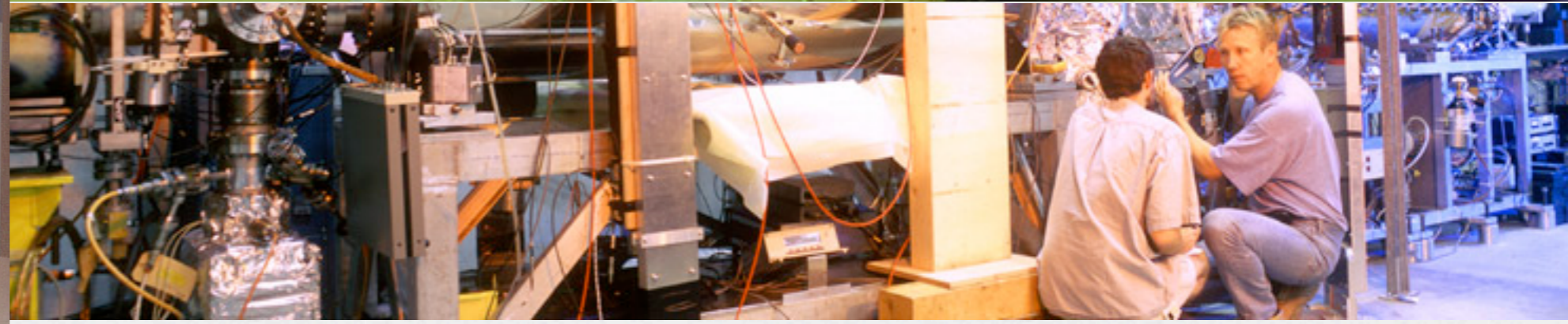
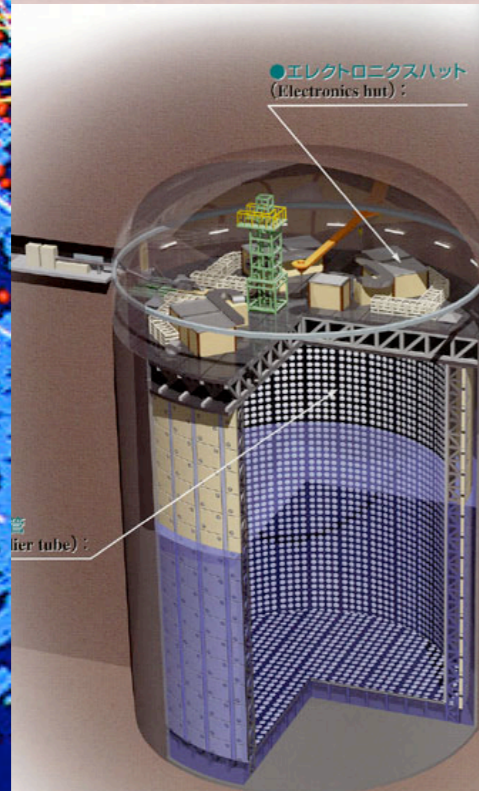
本体 2500円＋税

ご購入は**生協書籍部**で



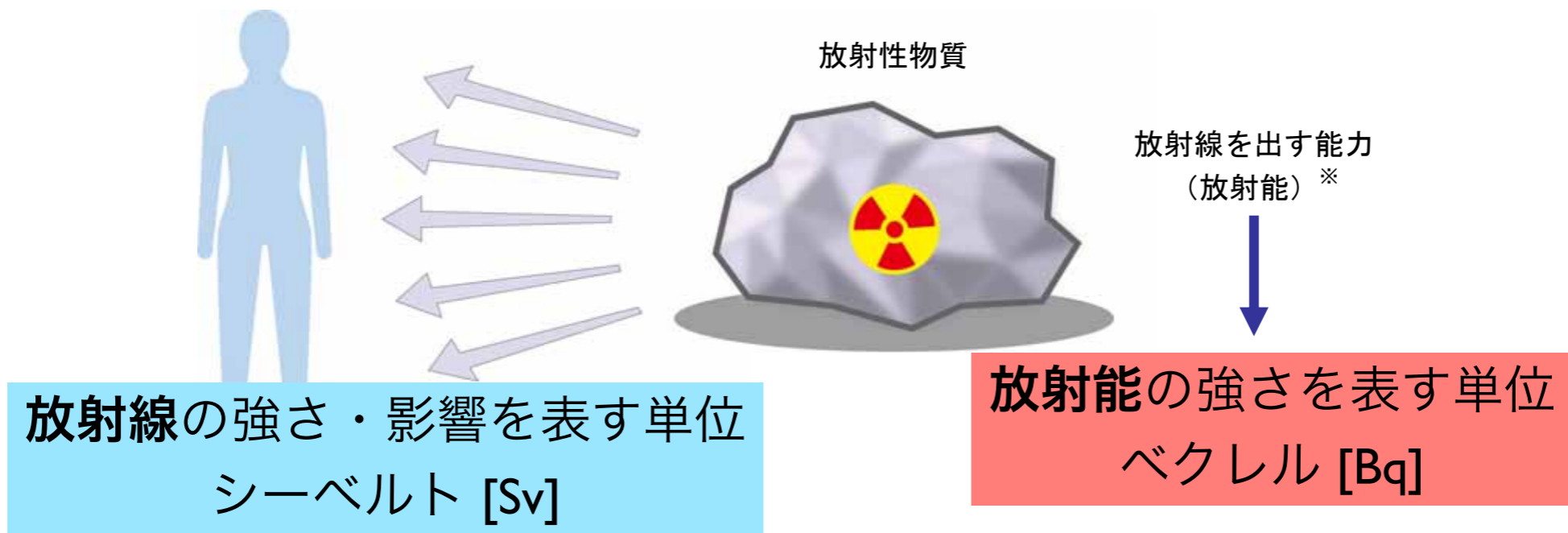
第13回 (1/25)

- 線量評価と放射線防護
- 加速器科学・高エネルギー物理学



放射線防護学

線量計算



放射線量の単位

グレイ

吸収線量 $D [J / kg] = [Gy]$

等価線量 $H_T [J / kg] = [Sv]$ シーベルト

実効線量 $E [J / kg] = [Sv]$ シーベルト

放射能の単位

放射能の強さ $[Bq]$
ベクレル

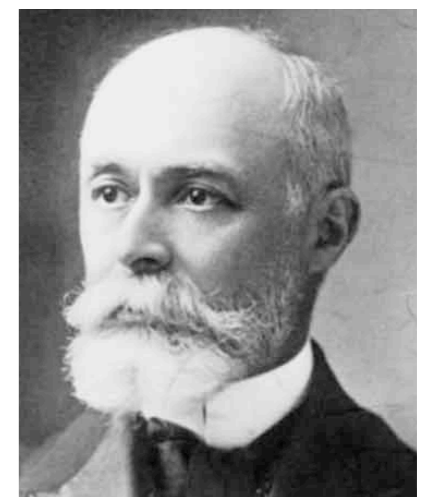
Gray



Sievert



Becquerel



放射線量の単位

放射場には

多様なエネルギーの

多種放射線（光子、粒子線）が

様々な方向を向いて飛び交い、

それぞれの強度で存在している。

これをひとつの物理量で表すのは

一筋縄ではいかない。

様々な放射線量の単位が存在する。

放射線量の単位



Röntgen



Gray

放射計測量 radiometric quantity

粒子フルエンス fluence Φ [cm^{-2}]

エネルギーフルエンス energy fluence Ψ [MeV cm^{-2}]

線量計測量 dosimetric quantity : エネルギー変換

カーマ kerma (Kinetic Energy Released in MAterial / MAtter) 非荷電粒子線 K [J / kg] = [Gy]

シーマ cema (Charged particle Energy imparted to MAtter) 荷電粒子線 C [J / kg] = [Gy]

照射線量 光子 (x線・γ線) X [C/kg], [R] | R $\approx 2.58 \times 10^{-4}$ C/kg

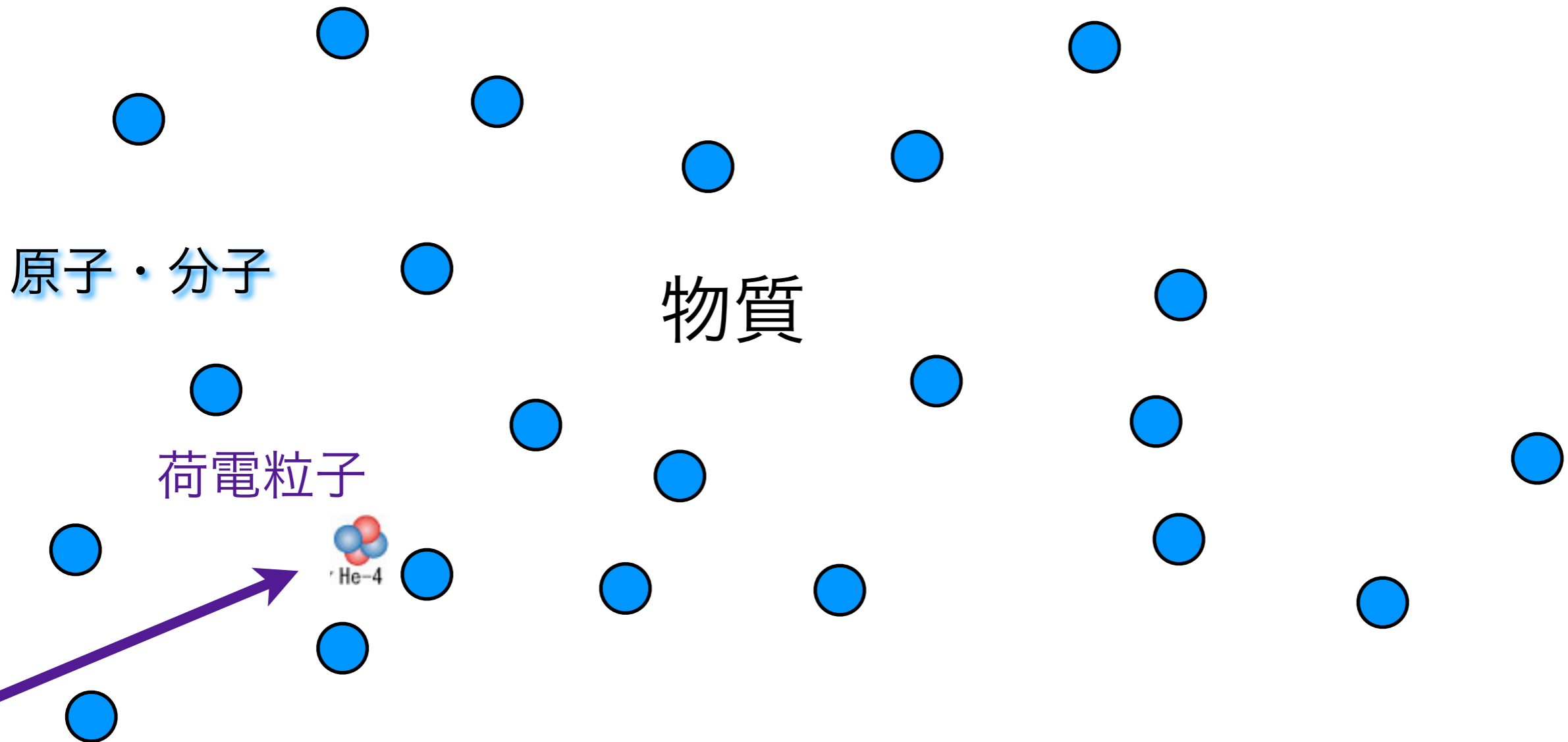
線量計測量 dosimetric quantity : エネルギー付与

吸収線量 D [J / kg] = [Gy], [erg / g] = [ram] | Gy = 100 ram

荷電粒子のエネルギー損失過程

荷電粒子：
クーロン力

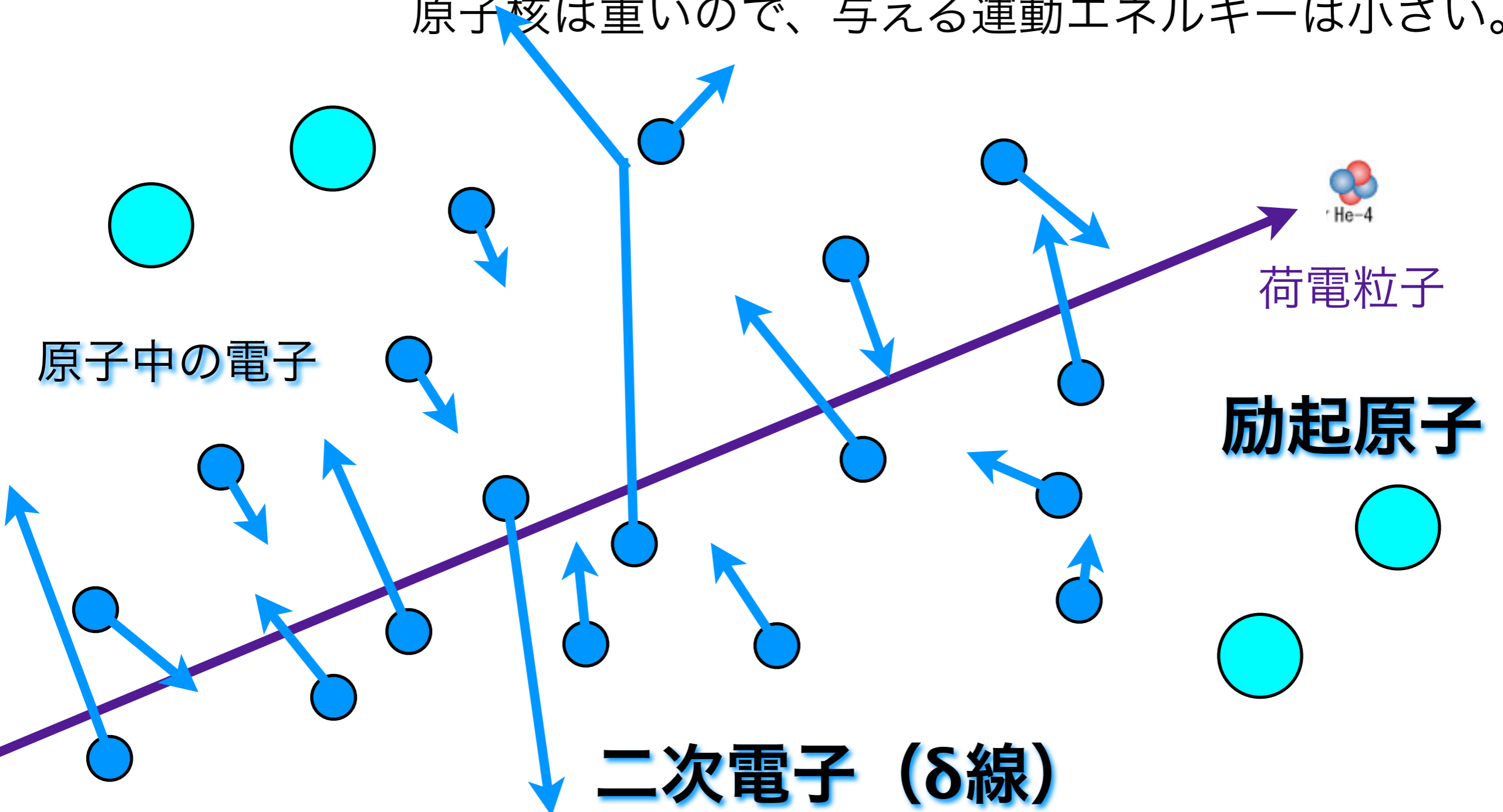
物質中の原子を電離・励起して電子に運動エネルギーを受け渡し、その分だけ減速される（電子衝突阻止能）。
原子核は重いので、与える運動エネルギーは小さい。



荷電粒子のエネルギー損失過程

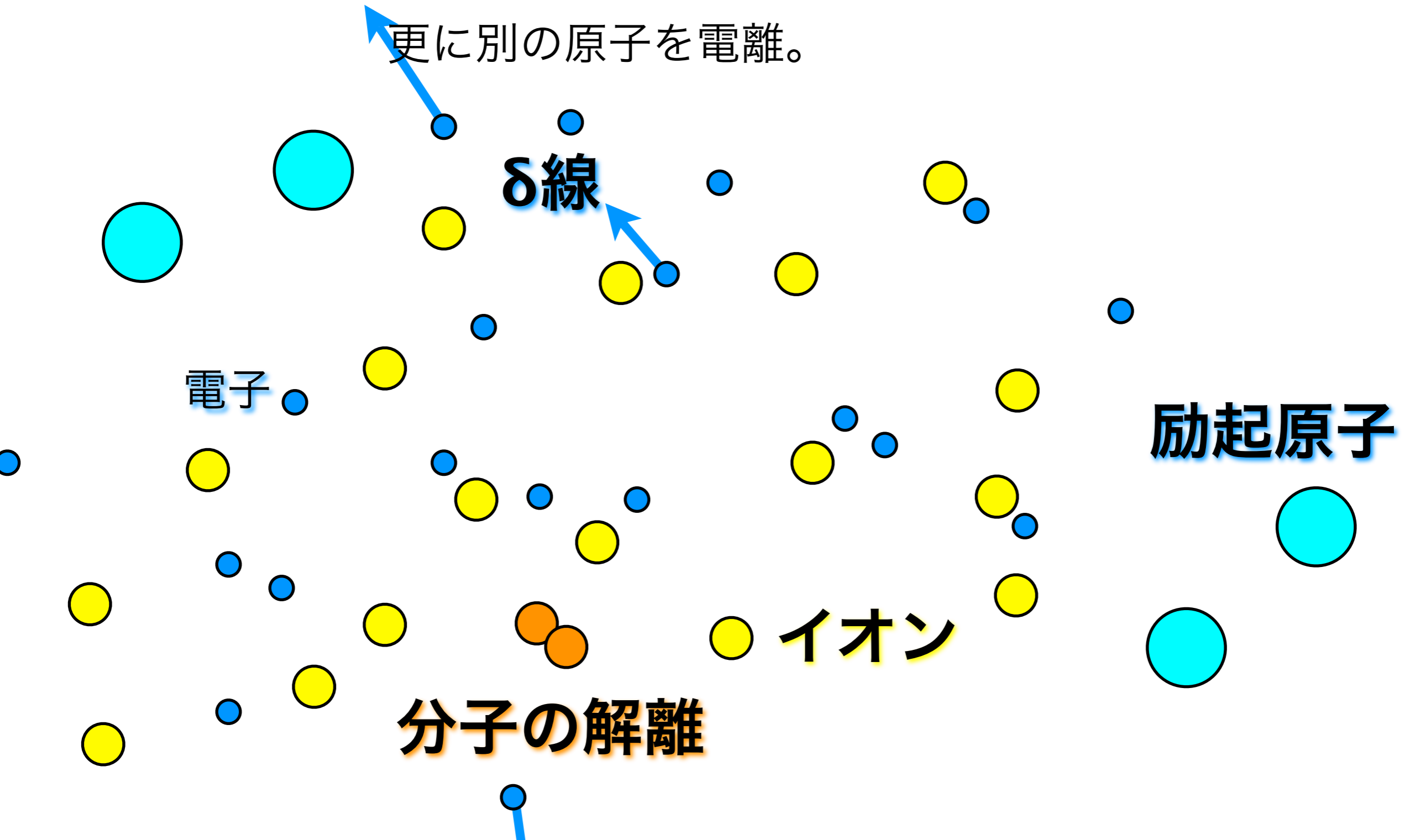
荷電粒子：
クーロン力

物質中の原子を電離・励起して電子に運動エネルギーを受け渡し、その分だけ減速される（電子衝突阻止能）。
原子核は重いので、与える運動エネルギーは小さい。



荷電粒子通過後の軌跡近傍の様子

物質中の原子は電離・励起されてイオンや励起原子を生じ、運動エネルギーを受け取った電子は二次電子として更に別の原子を電離。



荷電粒子通過後の軌跡近傍の様子

物質中の原子は電離・励起されてイオンや励起原子を生じ、運動エネルギーを受け取った電子は二次電子として更に別の原子を電離。再結合・脱励起によりX線が発生。

励起原子

電子

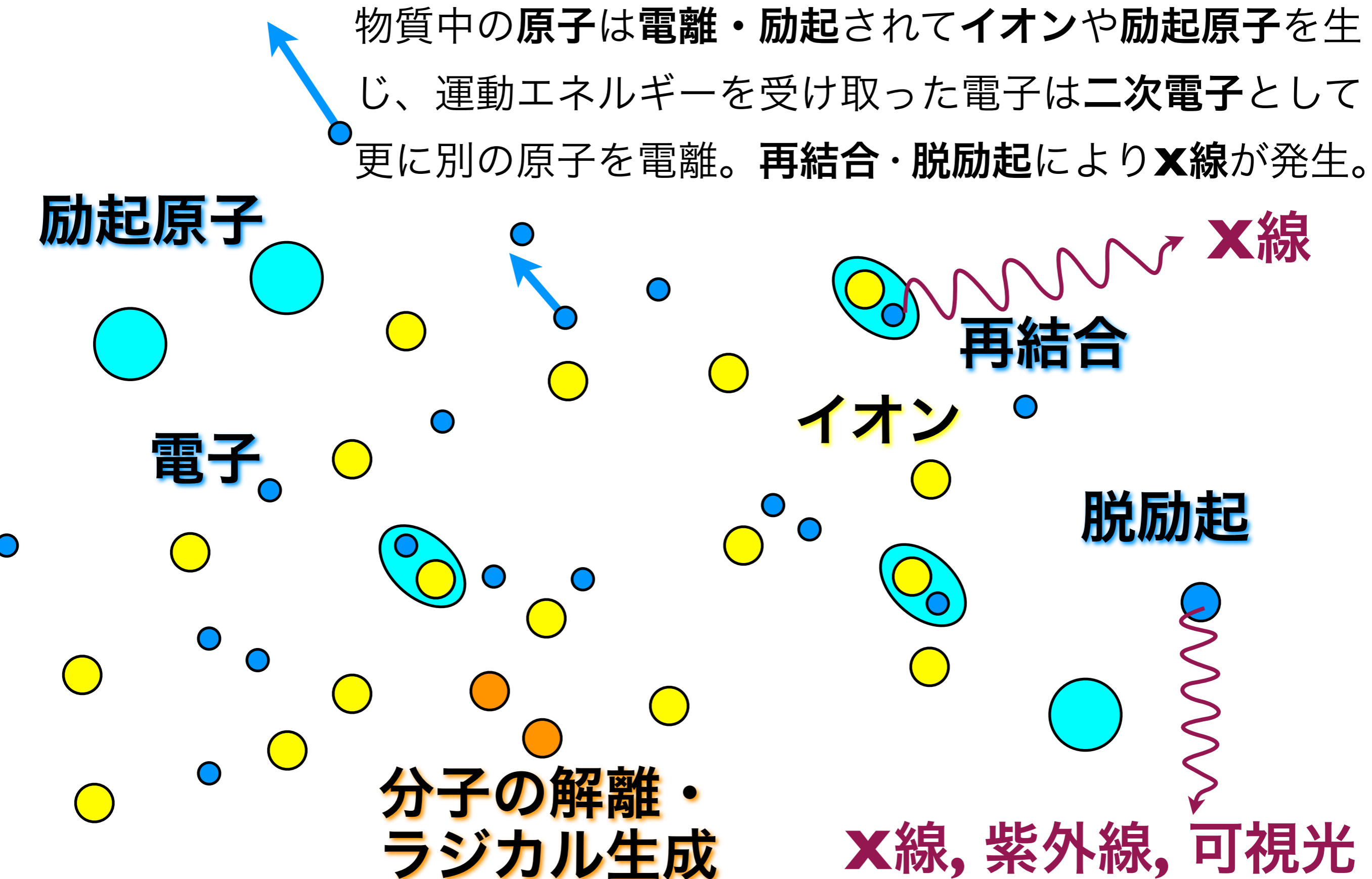
イオン

再結合

脱励起

分子の解離・ラジカル生成

X線, 紫外線, 可視光



放射線量の単位

線量計測量 **dosimetric quantity** : エネルギー付与

吸収線量 absorbed dose $D [J / kg] = [Gy]$ Gray
[erg / g] = [ram] | Gy = 100 ram

放射線防護のための線量 **protection quantity**

等価線量 equivalent dose $H_T [J / kg] = [Sv]$ Sievert

実効線量 effective dose $E [J / kg] = [Sv]$

[erg / g] = [rem] | Sv = 100 rem

係数

生物学的効果比 RBE (Relative Biological Effectiveness) 放射線生物学の観測量

線質係数 Q 放射線防護のための取り決め

放射線加重係数 w_R 放射線防護のための取り決め



放射線量の単位

- 物質が吸収したエネルギー（単位質量あたり）

吸収線量 $D [J / kg] = [Gy]$ グレイ

Gray

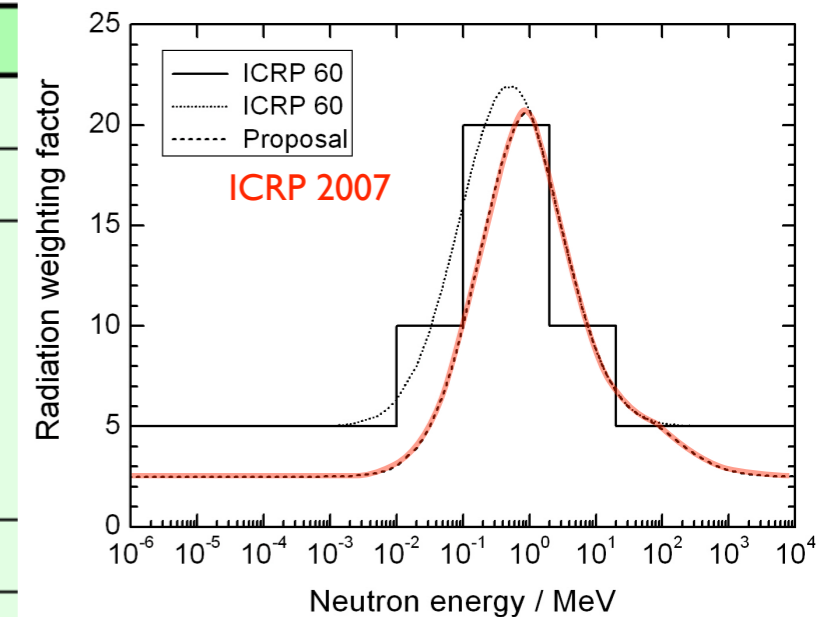


- 放射線の種類による生物学的影響の違いを考慮

等価線量 $H_T [J / kg] = [Sv]$ シーベルト

放射線加重係数

放射線の種類・エネルギーの範囲	放射線加重係数: W_R	
光子(X線・γ線); 全てのエネルギー	1	1
電子(β線)およびミュー粒子; 全てのエネルギー	1	1
中性子; 10keV 以下	5	右図を参照
10keV~100keV	10	
100keV~2MeV	20	
2MeV~20 MeV	10	
20MeV以上	5	
反跳陽子以外の陽子; エネルギー 2MeV 以上	5	2 (正負パイオンも)
アルファ粒子(α線)	20	20
核分裂片	20	20
重原子核	20	20



[出典] 日本アイソトープ協会:ICRP Pub 60、国際放射線防護委員会の1990年勧告、丸善、p7(1991)

赤字 ICRP 2007

- 全身被曝での影響に換算（臓器ごとに加重係数をかけて合算）

実効線量 $E [J / kg] = [Sv]$ シーベルト

Sievert



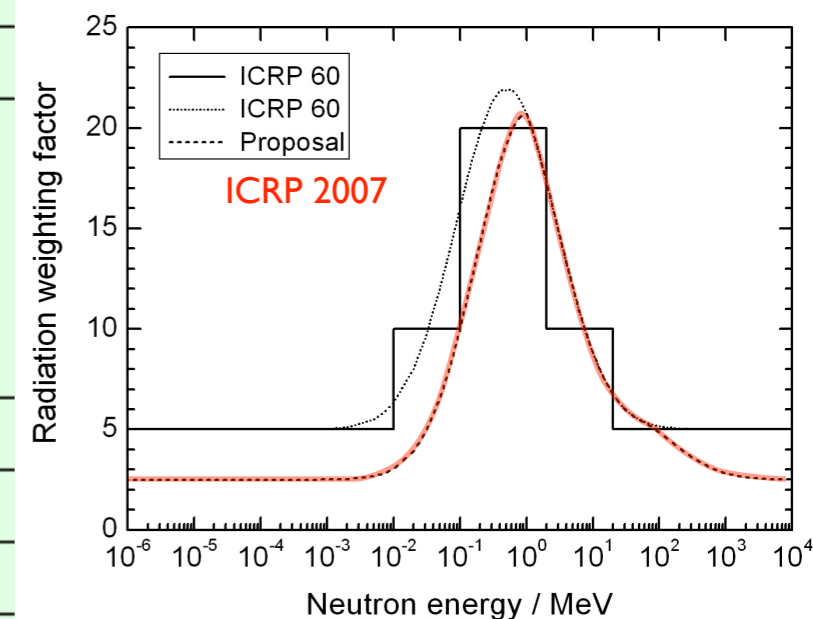
等価線量 equivalent dose H_T [J / kg] = [Sv]

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$$

等価線量 [Sv] R 放射線加重係数 平均吸収線量 [Gy]

放射線加重係数

放射線の種類・エネルギーの範囲	放射線加重係数: w_R	
光子(X線・γ線); 全てのエネルギー	1	1
電子(β線)およびミュー粒子; 全てのエネルギー	1	1
中性子; 10keV 以下	5	see graph
10keV~100keV	10	
100keV~2MeV	20	
2MeV~20 MeV	10	
20MeV以上	5	
反跳陽子以外の陽子: エネルギー 2MeV 以上	5	2 (正負パイオンも)
アルファ粒子(α線)	20	20
核分裂片	20	20
重原子核	20	20

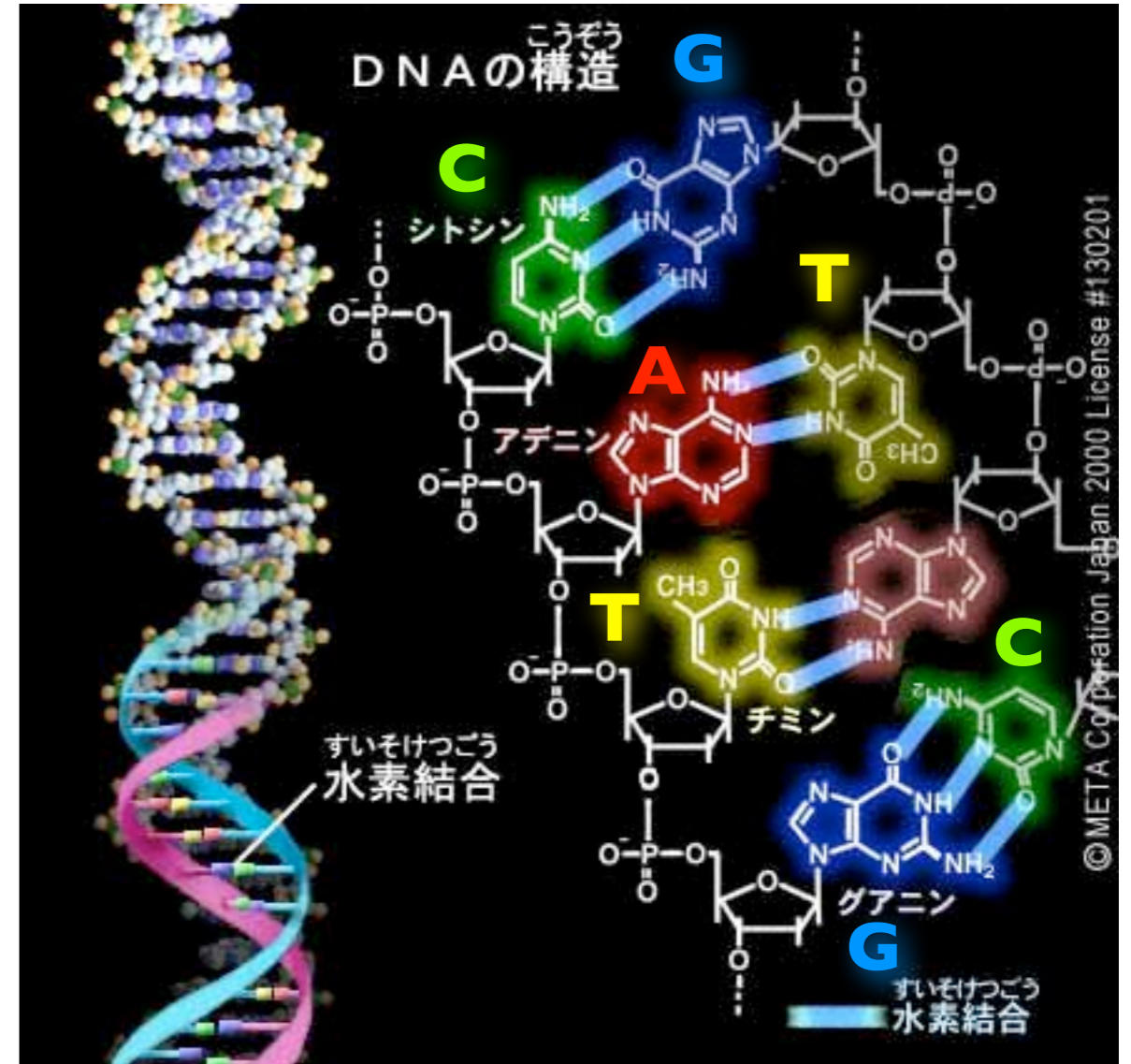
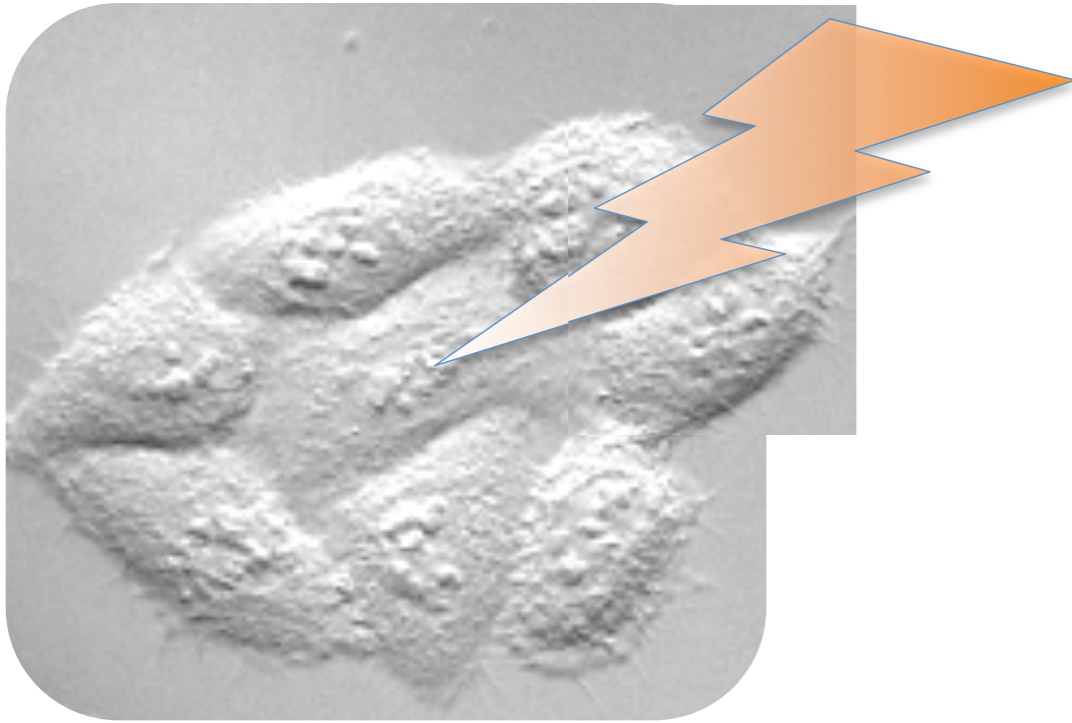


[出典] 日本アイソトープ協会:ICRP Pub 60、国際放射線防護委員会の1990年勧告、丸善、p7(1991)

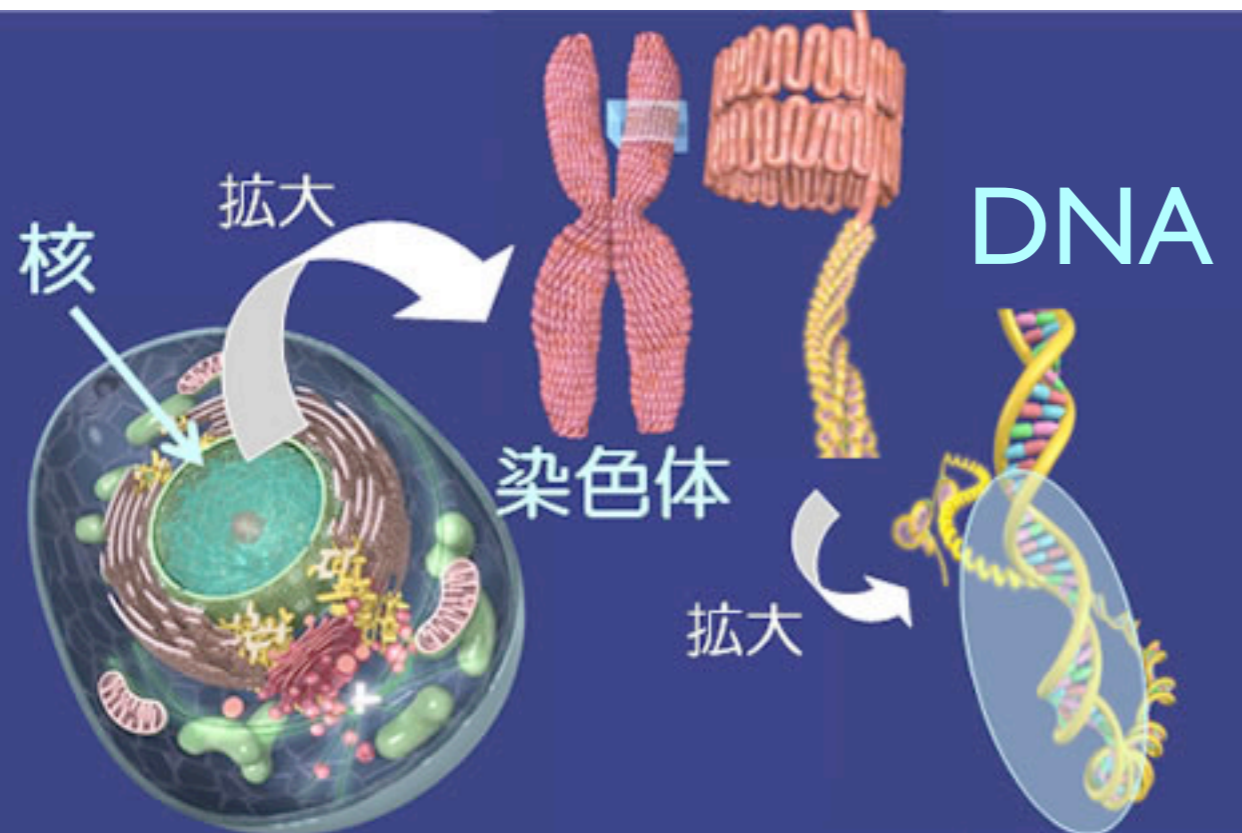
赤字 ICRP 2007

細胞の核に放射線が照射

DNA



出典：IPA「教育用画像素材集サイト」 <http://www2.edu.ipa.go.jp/gz/>

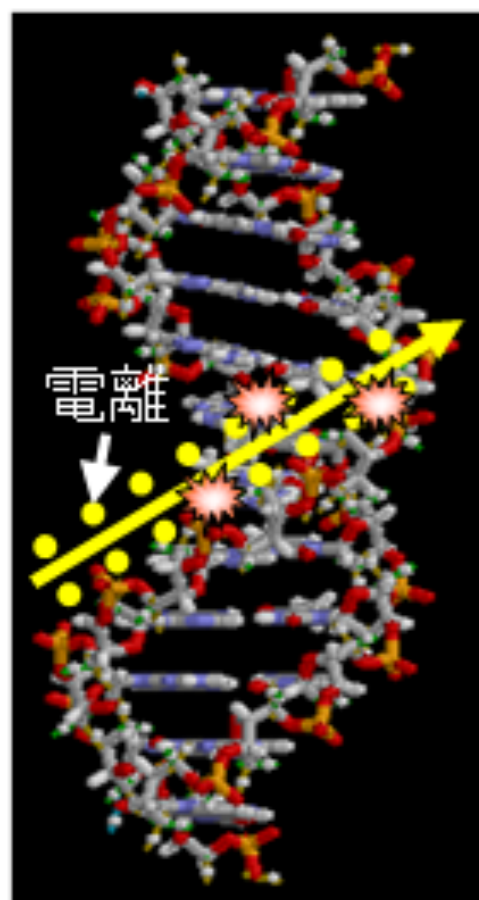


細胞(60兆個)

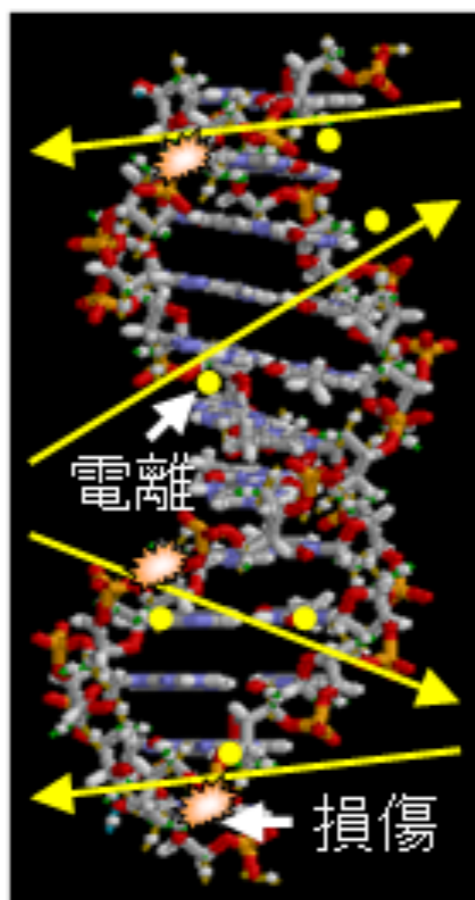
一部が遺伝子

図1 核、染色体、遺伝子

放射線による DNA 損傷



重イオン



電子

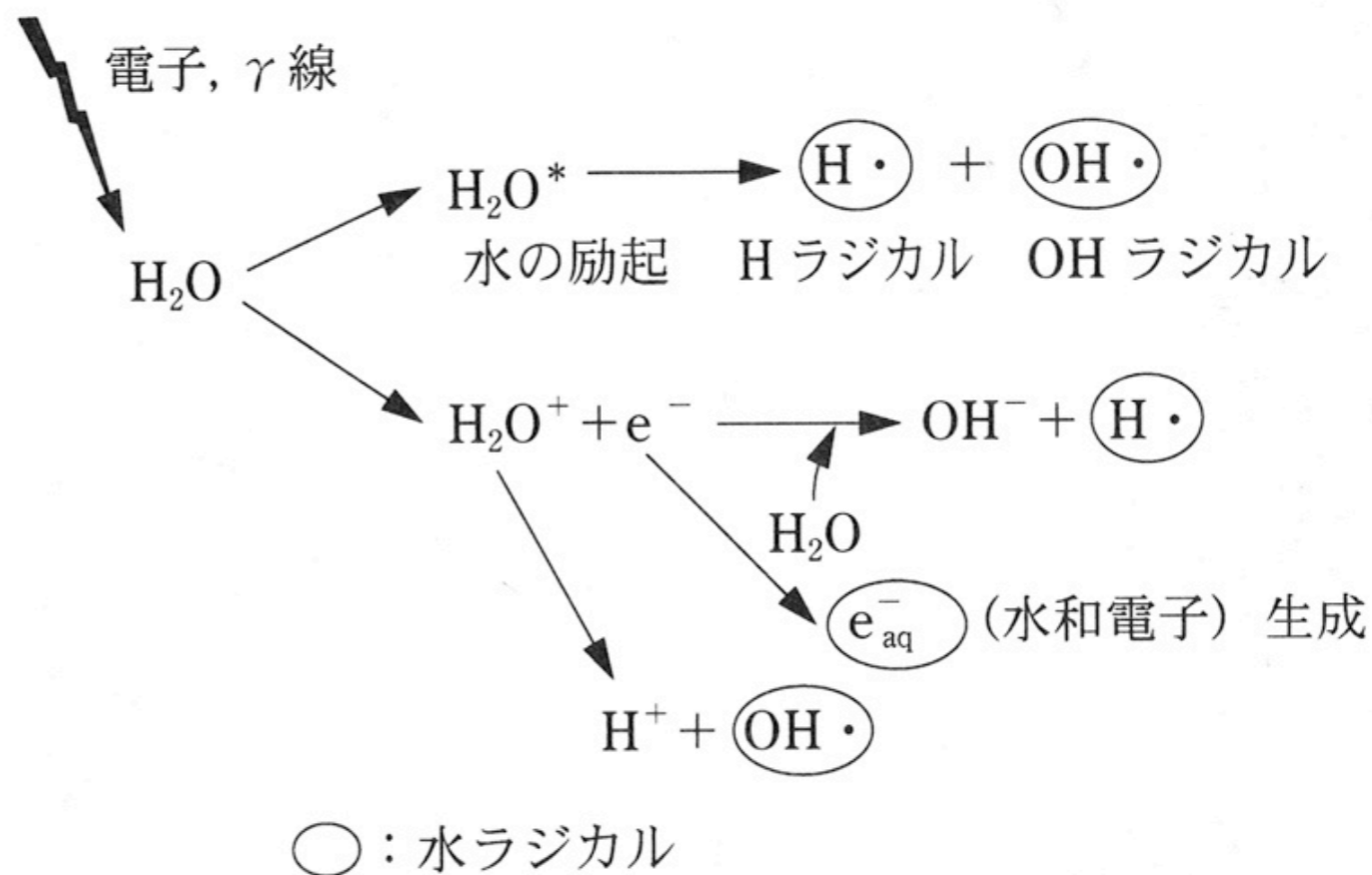


図 6・5 電離放射線による水分子の電離と励起の概略

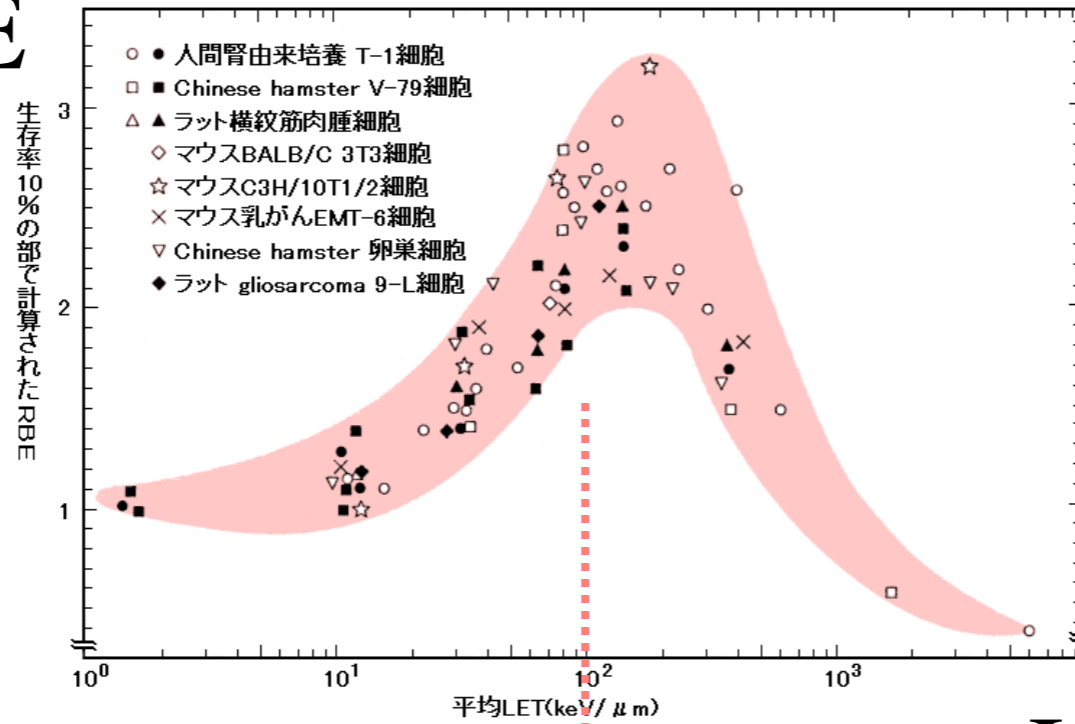
LET：線エネルギー付与

放射線の直接作用：荷電粒子が直接 DNA 分子を叩く **高 LET 放射線**
 α 線

と間接作用：水の電離で生じるラジカルが DNA 分子に作用

低 LET 放射線
 β 線, γ 線

RBE



生物学的効果比 RBE

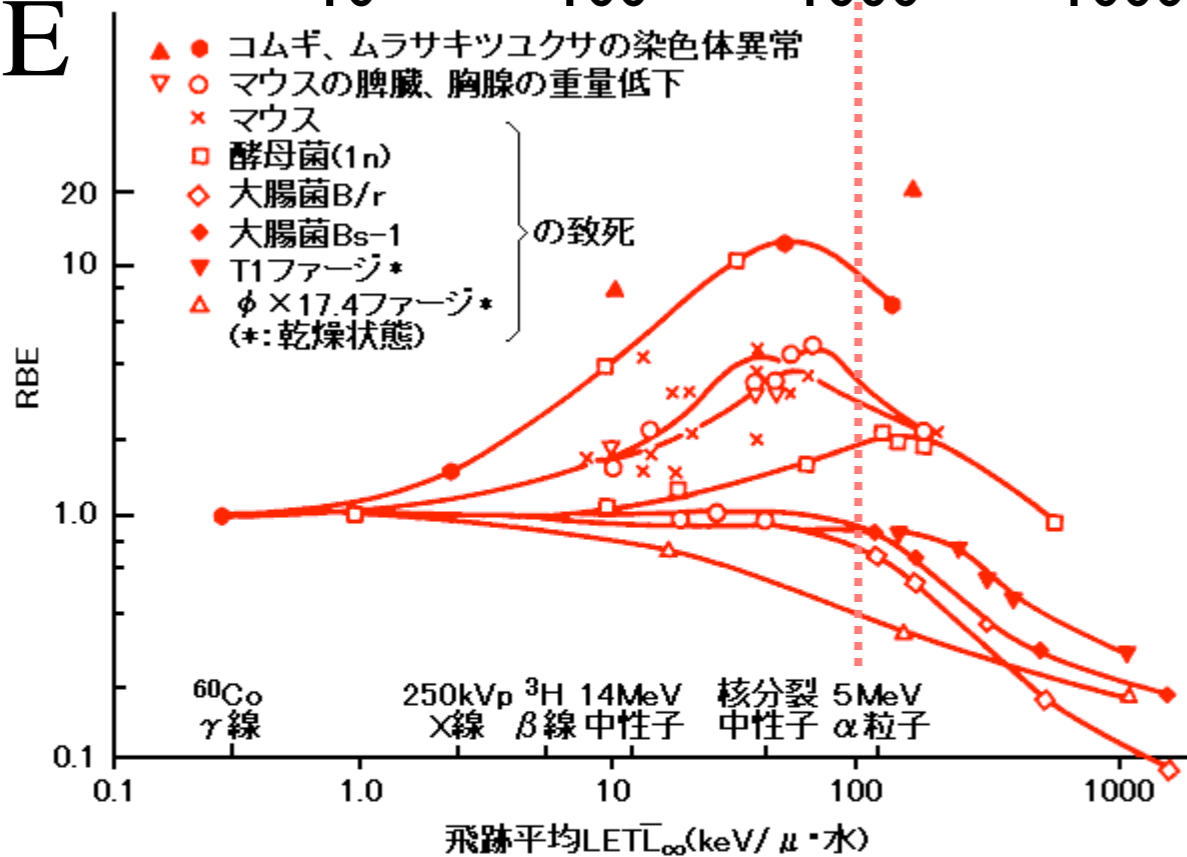
(Relative Biological Effectiveness)

黒印はピーク幅を広げたときのピークとプラトー部のRBE、白印はピーク幅を広げず、
本来ピーンが持つdeath-dose curveのピークとプラトー部のRBEである

LET (線エネルギー付与) keV/μm

放射線の軌跡上の単位長さ当たり
物質に与えられるエネルギー

RBE



LET

様々な生物反応(マウスの臓器の重量低下や致死、高等植物の染色体異常等)において、
いずれも約80keV/μm付近のLET値をもつ放射線が最大のRBE値を示す。

図2 体細胞的効果に対する各種放射線のRBEとLETの関係

[出典]近藤 宗平:分子放射線生物学、東京大学出版会(1972年)、p.174

実効線量 effective dose $E [J / kg] = [Sv]$

$$E = \sum_T w_T \times H_T = \sum_T w_T \times \left(\sum_R w_R \times D_{T,R} \right)$$

組織 T の組織加重係数

組織 T における
等価線量 [Sv]

組織 T における
平均吸収線量 [Gy]

器官・組織	組織加重係数: w_T	
生殖腺	0.20	0.08
骨髄(赤色)	0.12	0.12
結腸	0.12	0.12
肺	0.12	0.12
胃	0.12	0.12
膀胱	0.05	0.04
乳房	0.05	0.12
肝臓	0.05	0.04
食道	0.05	0.04
甲状腺	0.05	0.04
皮膚	0.01	0.01
骨表面	0.01	0.01
脳		0.01
唾液腺		0.01
残りの器官・組織 ^{※2}	0.05	0.12
合計(全身)	1.00	1.00

左欄黒字 ICRP 1990

右欄赤字 ICRP 2007

内部被曝の計算例

(^{131}I による甲状腺預託線量)

放射線防護のための線量 protection quantity

預託線量 committed dose (内部被曝) [Sv]

預託等価線量

預託実効線量

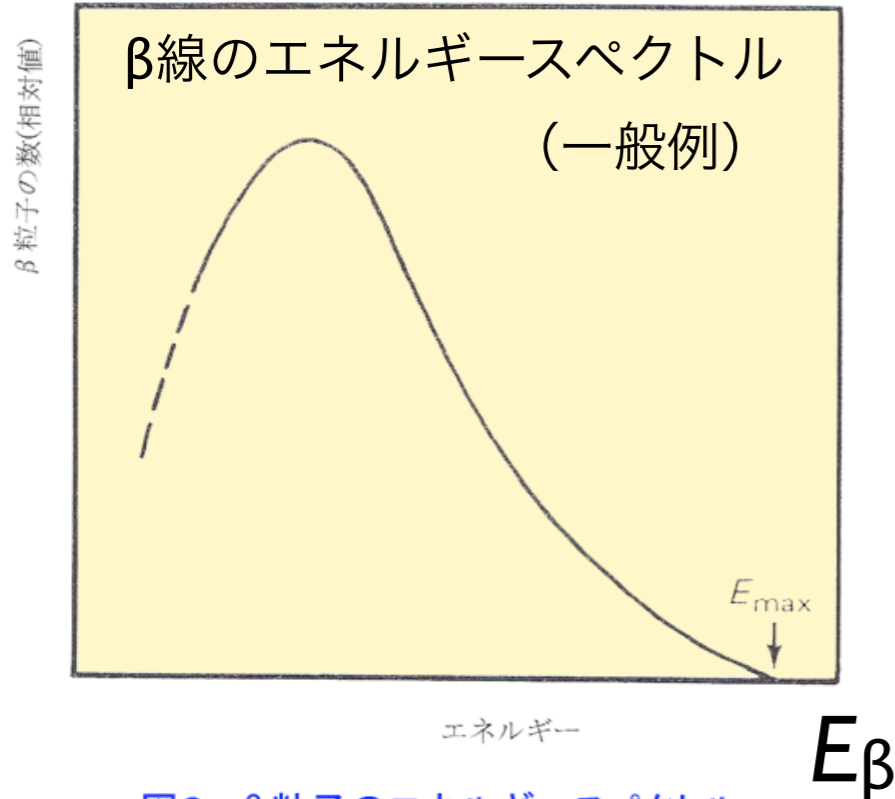
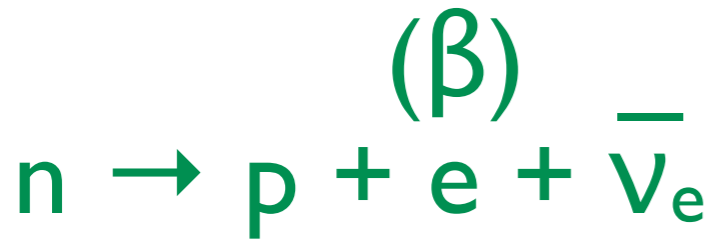
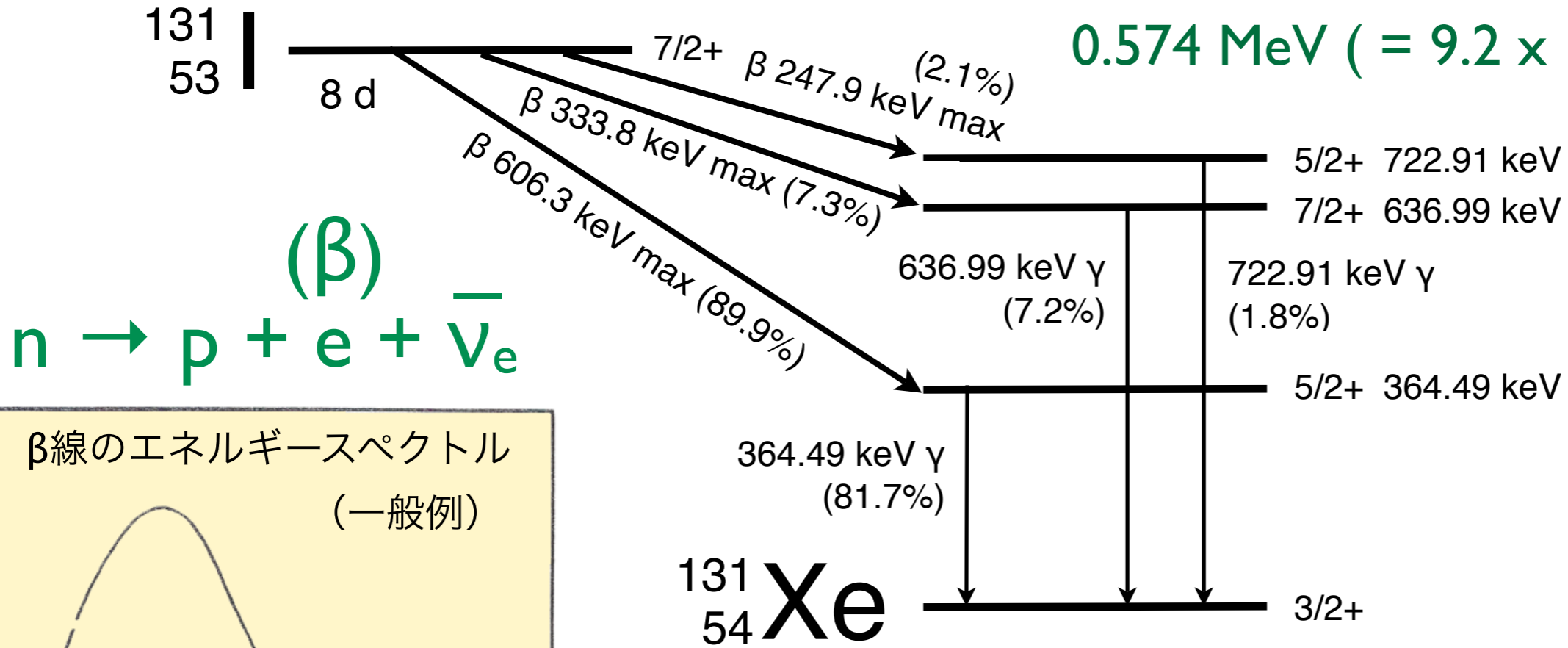
体内摂取した放射性物質から出るすべての放射線を、摂取した時点で被曝したと見なして計算をする。Bq から Sv への換算には、物理学的半減期のみならず排泄機能による生物学的半減期も考慮のうえ、50年間分の積分をする。

実効線量係数 (成人)

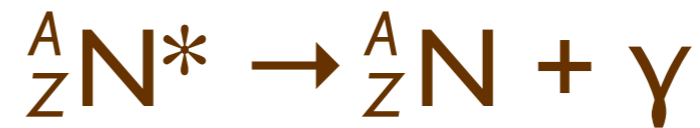
核種	半減期	経口摂取 (Sv/Bq)	吸入摂取 (Sv/Bq)
C-14	5730年	5.8×10^{-10}	5.8×10^{-9}
P-32	14.3日	2.4×10^{-9}	3.4×10^{-9}
K-40	12.8億年	6.2×10^{-9}	2.1×10^{-9}
I-131	8.04日	2.2×10^{-8}	7.4×10^{-9}
Sr-90	29.1年	2.8×10^{-8}	1.6×10^{-7}
Cs-137	30.0年	1.3×10^{-8}	3.9×10^{-8}

経口摂取	乳児 (3ヶ月)	幼児 (1歳)	子供 (2-7歳)	成人
I-131	1.8×10^{-7}	1.8×10^{-7}	1.0×10^{-7}	2.2×10^{-8}

β線の最大エネルギーの平均値
 0.574 MeV (= 9.2 x 10⁻¹⁴ J)



γ線：原子核の脱励起

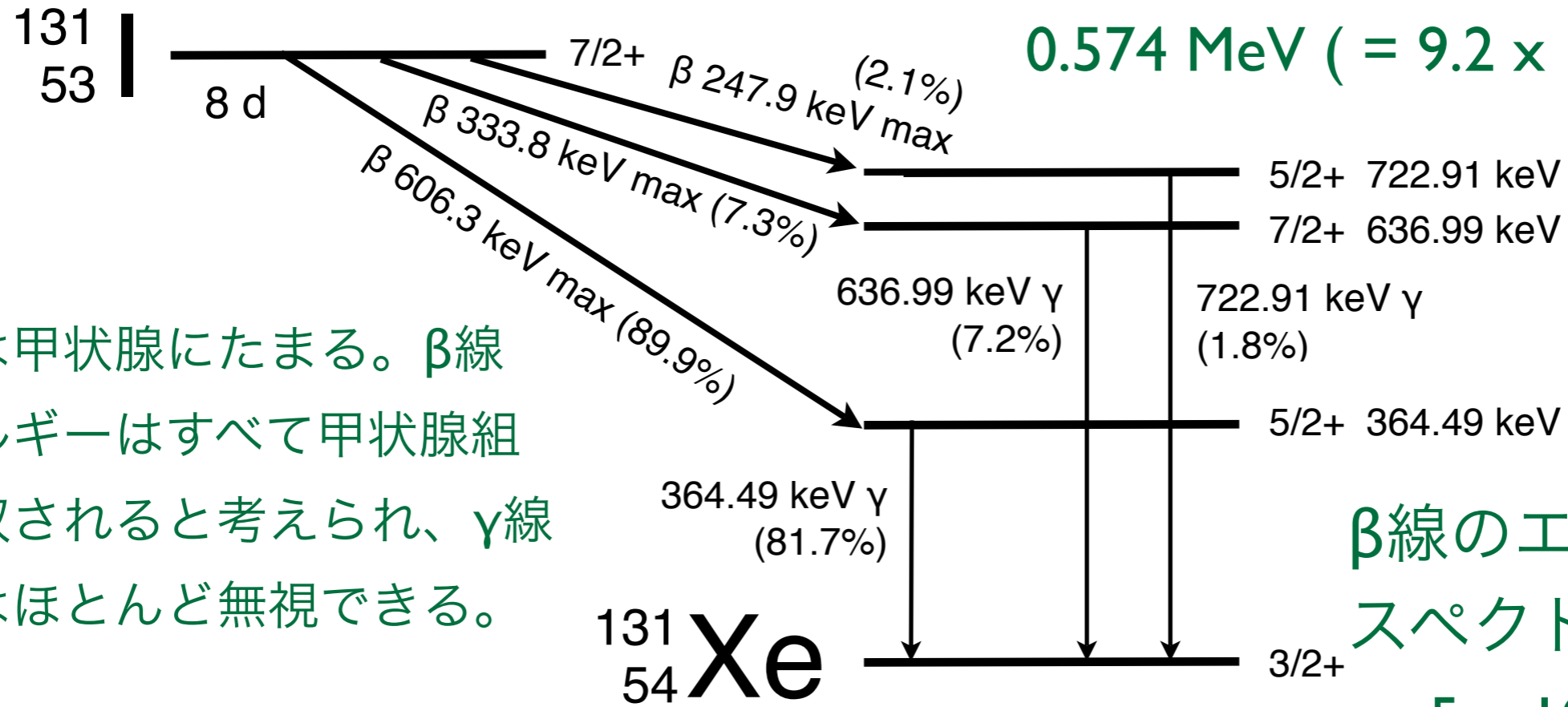


γ線 (定まったエネルギー)

図2 β粒子のエネルギースペクトル
 [出典]石川友清(編):初級放射線、通商産業研究社、p.37

β線 (連続スペクトル)
 エネルギーの平均値 ~ 0.3 MeV

β線の最大エネルギーの平均値
0.574 MeV (= 9.2×10^{-14} J)



β線のエネルギー
スペクトルの平均値
~ 5×10^{-14} J

ヨウ素は甲状腺にたまる。β線のエネルギーはすべて甲状腺組織に吸収されると考えられ、γ線の効果はほとんど無視できる。

1 Bq あたり $8.04 \text{ d} \times 86400 \text{ s/d} / \ln 2 = 1,000,000 \text{ decays}$

$5 \times 10^{-14} \text{ J} \times 1,000,000 / \text{Bq} = 5 \times 10^{-8} \text{ J/Bq}$ γ線はほとんど無視できる。

成人の場合

成人の場合

これのうち 20% が甲状腺に取り込まれる (残りは排泄) と見積もると、20 g の甲状腺の

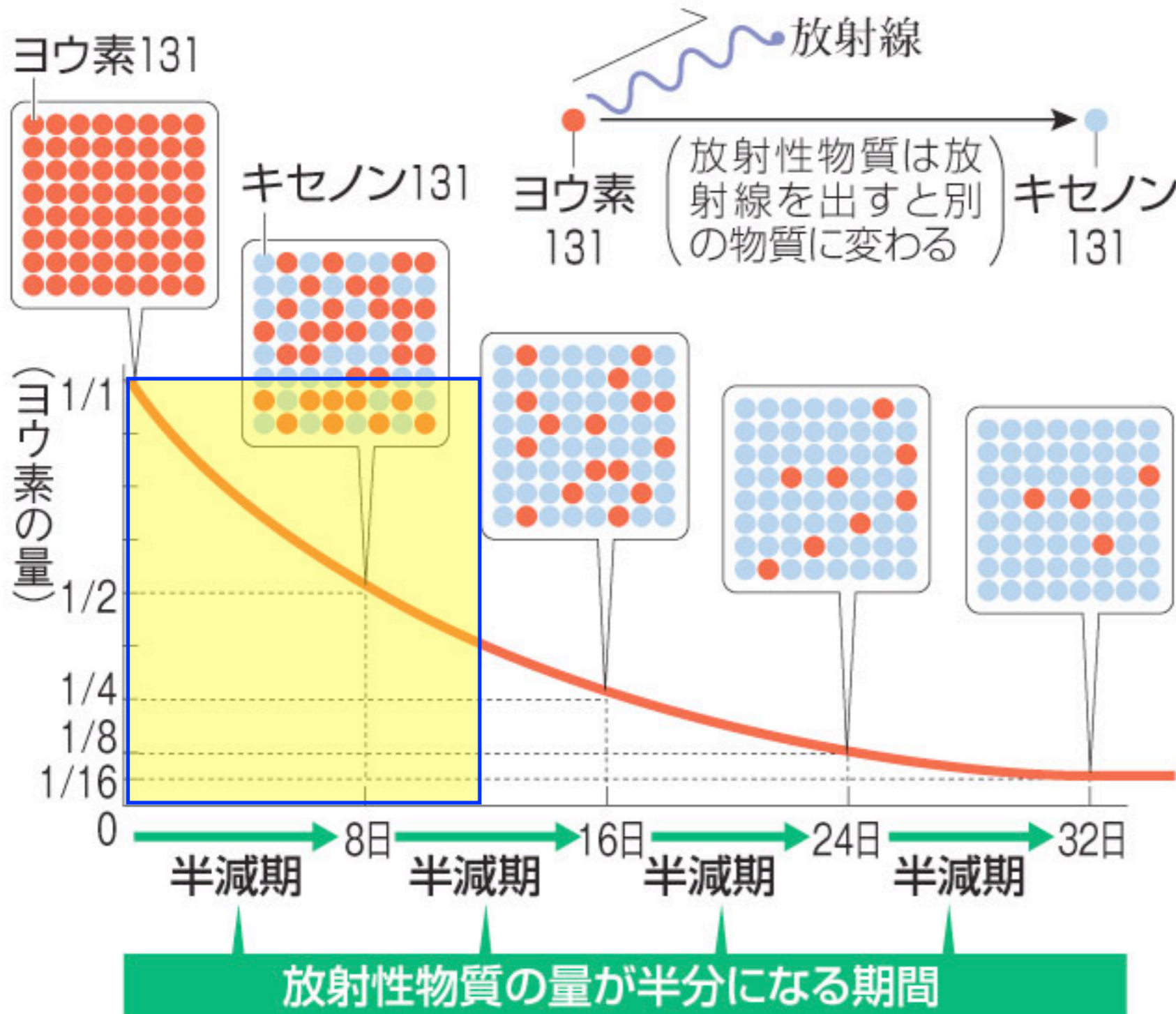
吸収線量 = 等価線量は $5 \times 10^{-8} \text{ J/Bq} \times 0.2 / 0.02 \text{ kg} = 0.5 \mu\text{Sv/Bq}$

甲状腺は組織加重係数が 0.04 なので、全身被曝量としての実効線量は

$0.5 \times 0.04 = 0.020 \mu\text{Sv/Bq}$ 。表の値 $2.2 \times 10^{-8} \text{ Sv/Bq}$ とほぼ一致。

(ヨウ素換算63万テラベクレル, <http://bit.ly/fRxmkt> これを放射性ヨウ素131の質量に焼き直すと, およそ1) 100トン 2) 100 キログラム 3) 100 グラム 4) 100ミリグラム, ?)

放射性物質の半減期のしくみ(ヨウ素131の例)



注：ヨウ素等価換算は、環境や人への影響を勘案して係数を決めている。ヨウ素以外の核種の質量を計算するには適していない。ヨウ素131については、15万テラベクレルの放出と言われているので、その質量は上の問いに対する計算値の4分の1となる。また、半減期の長いセシウム137などでは、同じベクレル数でも、モル数も質量もヨウ素に比べてずっと大きくなる。

外部被曝の計算例

(^{137}Cs による空間線量率)

コンプトン散乱

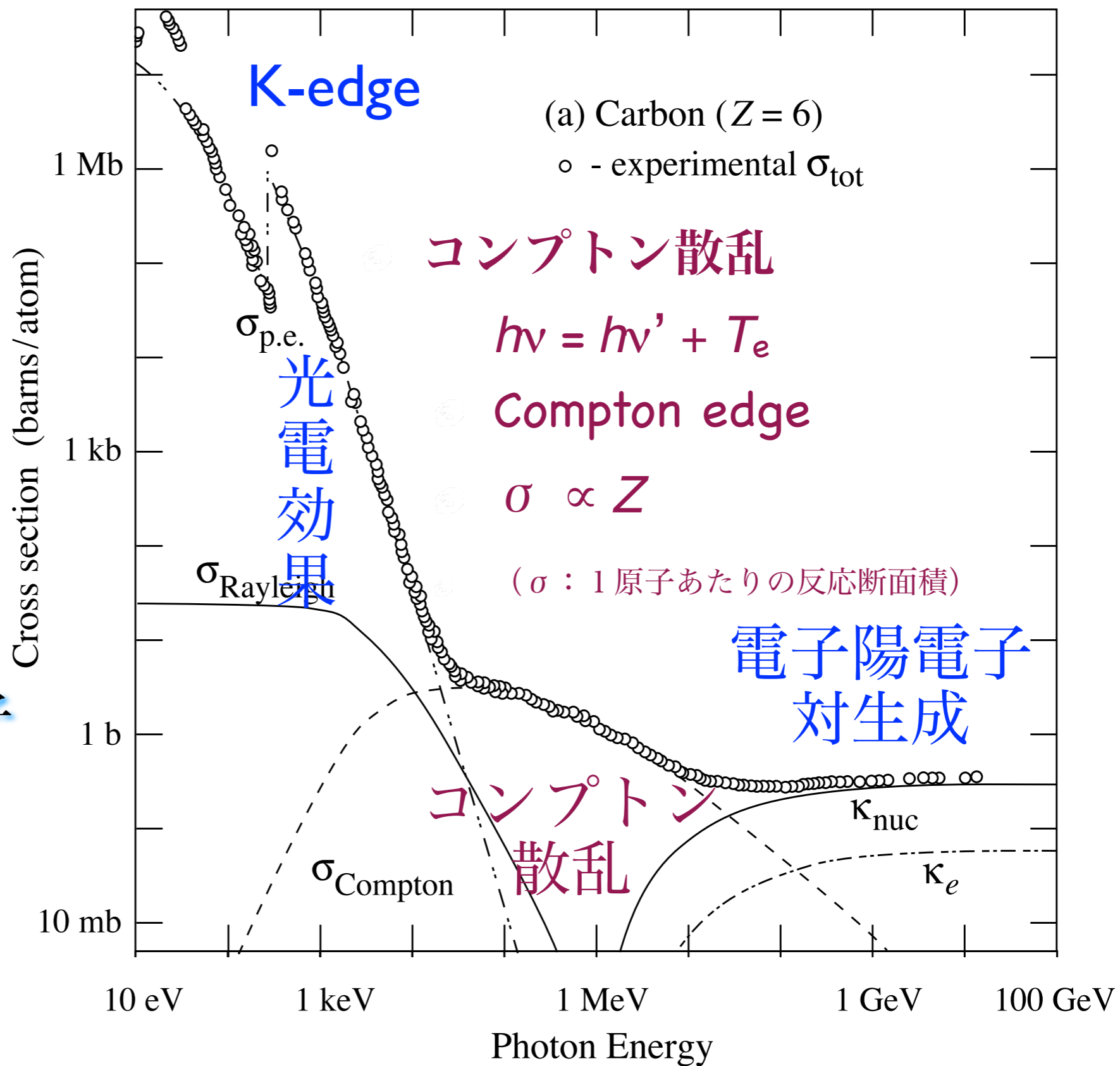
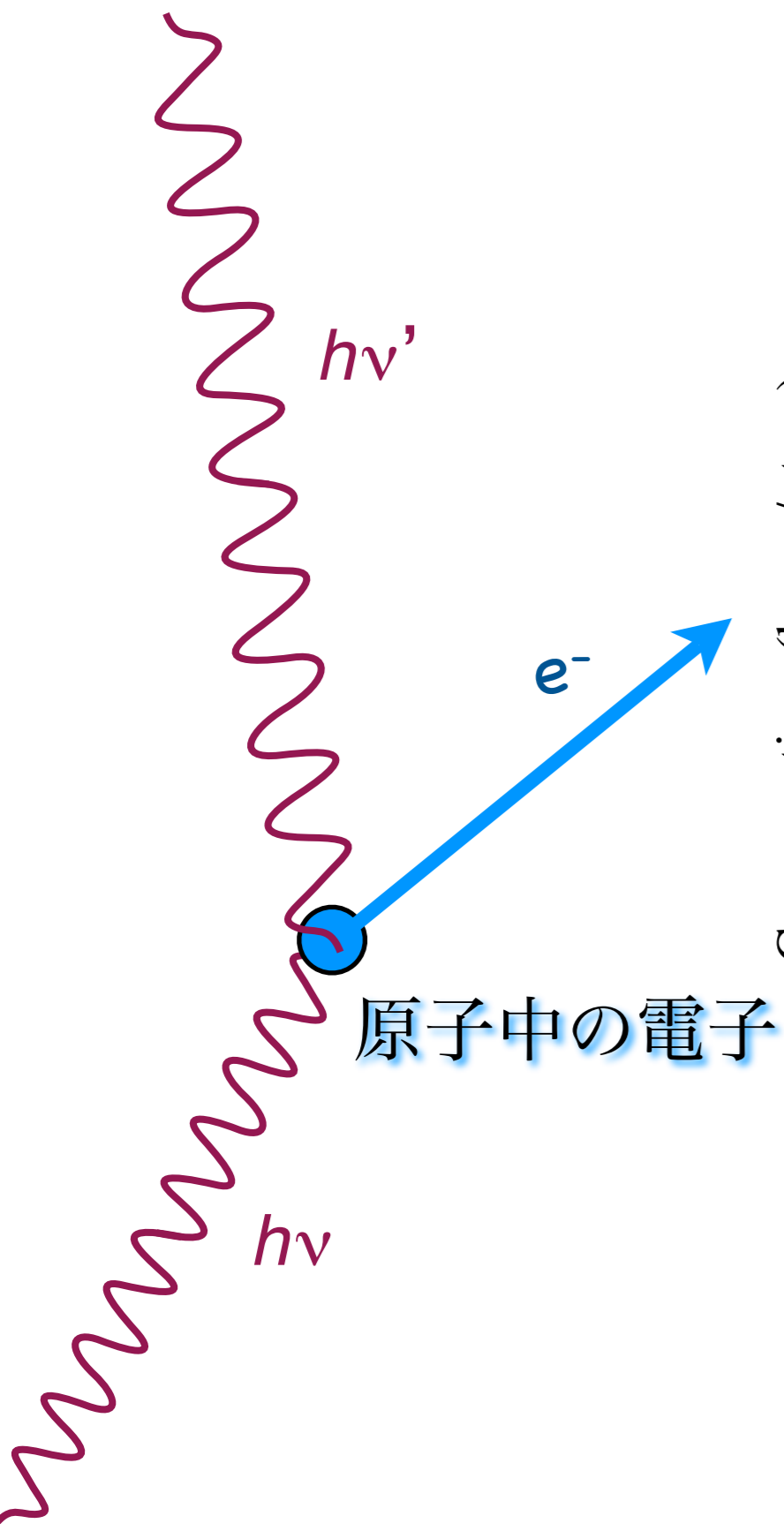
紫外線

X線

線

γ線

線

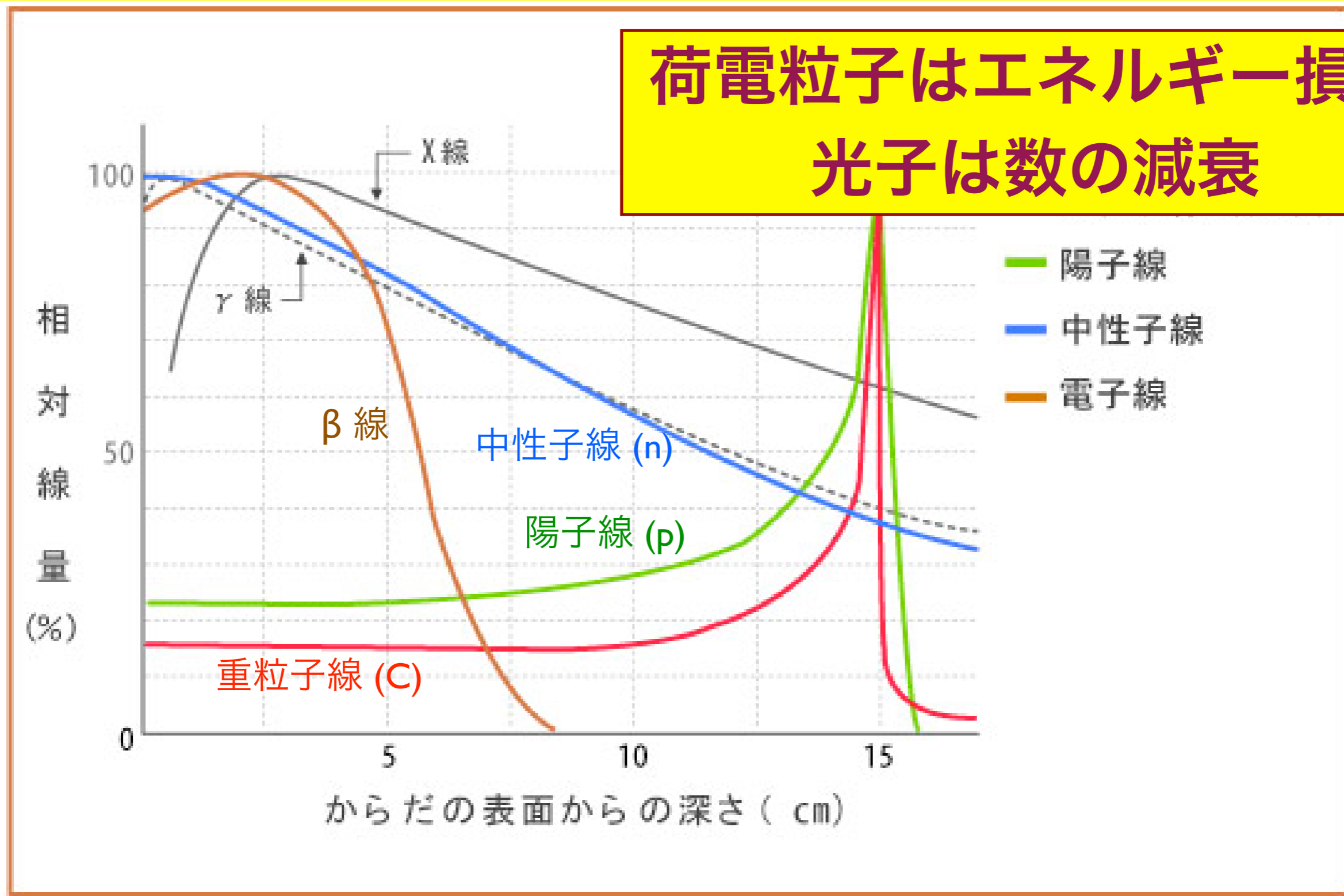


陽子(p)、 α 、重粒子線は飛程が揃っている。

電子(β)は散乱されやすく、飛程を直線距離(物質厚)で測るとばらつきが大きい。

中性子(n)、光子(X, γ) は反応が確率的に起こるため、指数関数的減衰をする。

**荷電粒子はエネルギー損失
光子は数の減衰**



光子 (γ 線) の物質中での減衰と吸収

光子数の減衰

光電効果・コンプトン散乱などは確率的に起こる

$$\frac{d\dot{\Phi}(x)}{dx} = -\mu \dot{\Phi}(x)$$

$$\dot{\Phi}(x) = \dot{\Phi}(0) e^{-\mu x}$$

$$\dot{\Phi}(L) = \dot{\Phi}(0) / 2$$

$$L = \ln 2 / \mu$$

$\ln x$ は自然対数
 $\log_e x$ のこと。

$\dot{\Phi}$: 粒子フルエンス率

for γ ($h\nu = 0.66$ MeV) from ^{137}Cs

x : 距離, L : 半減距離

$$L_{\text{air}} = 69.2 \text{ m}$$

μ : 線減衰定数

$$\mu_{\text{air}} = 0.0100 \text{ m}^{-1}$$

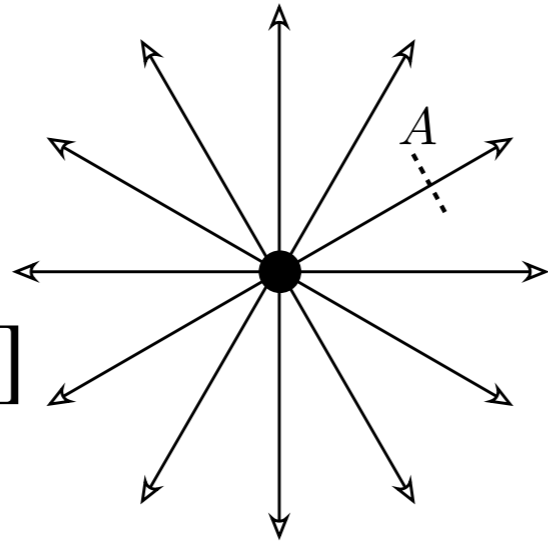
μ/ρ : 質量減衰係数 $\mu_{\text{en}}/\rho < \mu/\rho$ $(\mu/\rho)_{\text{air}} = 0.077 \text{ (g/cm}^2\text{)}^{-1}$

μ_{en}/ρ : 質量エネルギー吸収係数 $(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{water}} = 0.033 \text{ (g/cm}^2\text{)}^{-1}$

\dot{H} : 等価線量率 (γ 線では吸収線量率に等しい)

$$\dot{H} = h\nu (\mu_{\text{en}}/\rho) \dot{\Phi}, \quad h\nu (\mu_{\text{en}}/\rho) = 3.5 \times 10^{-16} \text{ Sv m}^2$$

P : 放射能 [Bq]

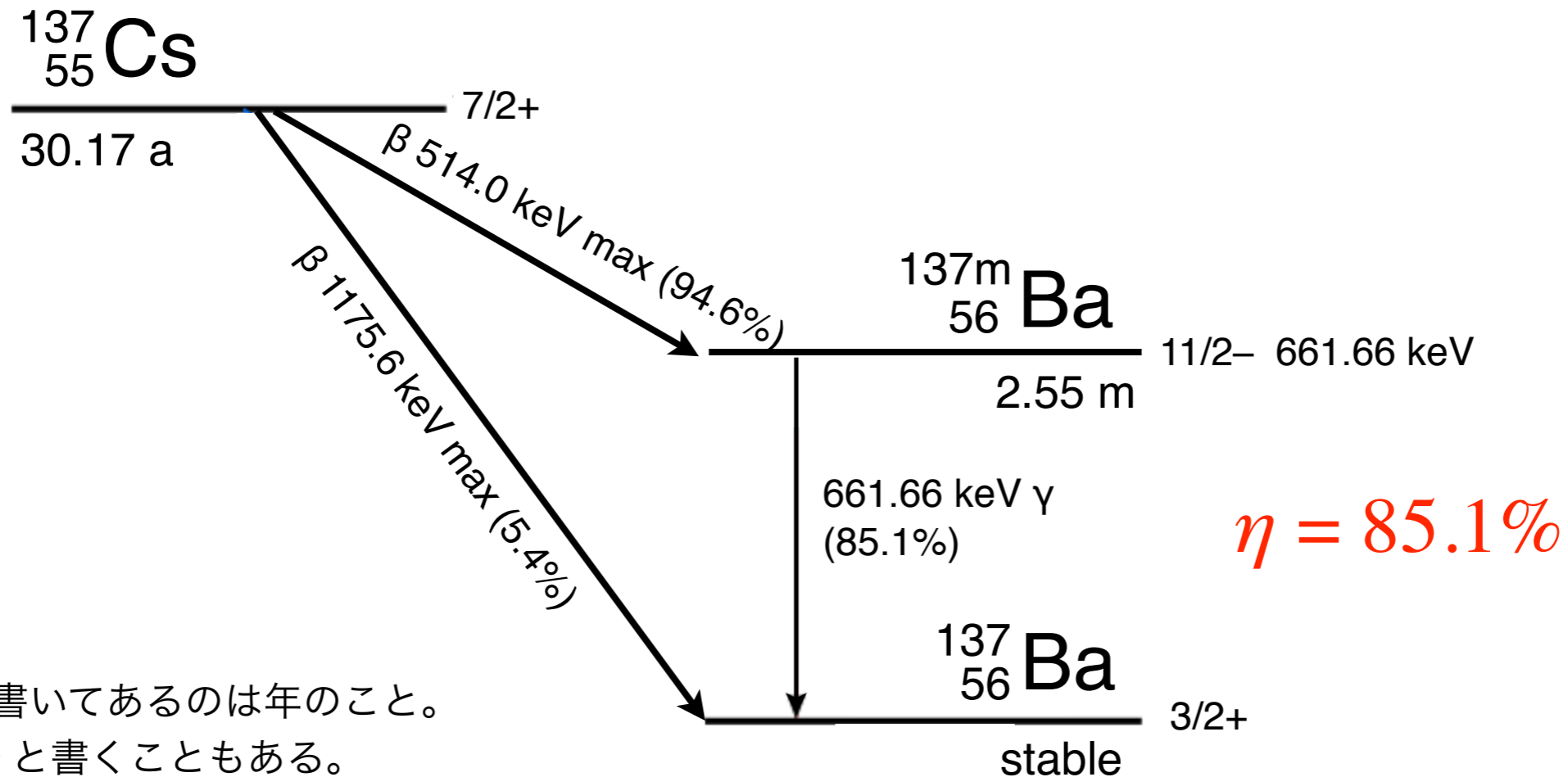


\dot{H} : 等価線量率 [Sv/s]

$$\dot{H} = h\nu (\mu_{\text{en}}/\rho) \dot{\Phi}$$

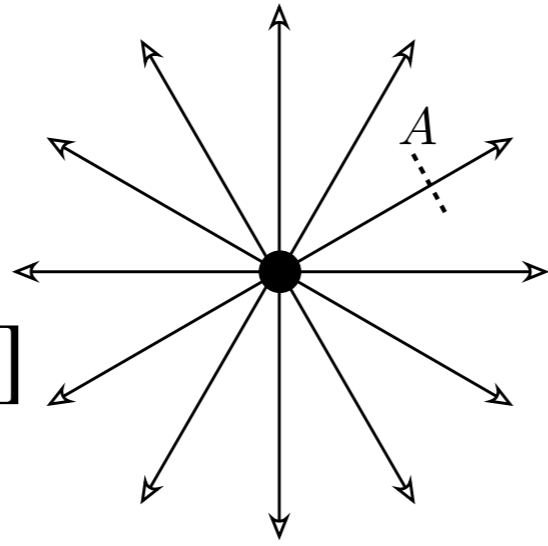
$$\dot{\Phi} = \frac{e^{-\mu_{\text{air}} r} \eta P}{4\pi r^2}$$

図 5: 中央に放射線源があり、全方向に均等にガンマ線を出している。距離 r 離れた場所での微小面 A を通過する流束を考えると、その場所での吸収線量率がわかる。



半減期で a と書いてあるのは年のこと。
y とか yr と書くこともある。

P : 放射能 [Bq]



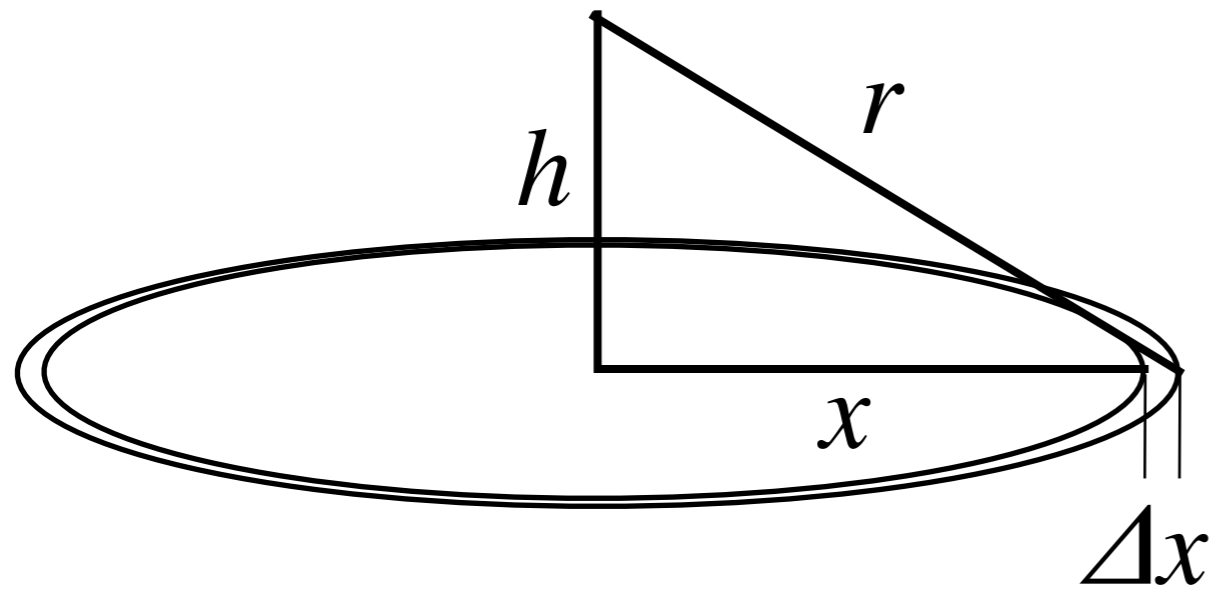
\dot{H} : 等価線量率 [Sv/s]

$$\dot{H} = h\nu (\mu_{\text{en}}/\rho) \dot{\Phi}$$

$$\dot{\Phi} = \frac{e^{-\mu_{\text{air}} r} \eta P}{4\pi r^2}$$

図 5: 中央に放射線源があり、全方向に均等にガンマ線を出している。距離 r 離れた場所での微小面 A を通過する流束を考えると、その場所での吸収線量率がわかる。

散乱された γ 線は消えると仮定して計算している。実際には、コンプトン散乱による低エネルギーの γ 線 (ビルドアップ束) による効果を加味する必要がある (50%くらい増える)。



p : 放射能の平面密度 [Bq/m²]

$$\dot{\Phi} = \int_0^{\infty} \frac{e^{-\mu_{\text{air}} r} \eta p}{4\pi r^2} 2\pi x \, dx$$

$$= \frac{\eta p}{2} \int_h^{\infty} \frac{e^{-\mu_{\text{air}} r}}{r} \, dr$$

$$\dot{\Phi} \approx \frac{\eta p}{2} \int_0^{L_{\text{air}}} \frac{x}{x^2 + h^2} \, dx$$

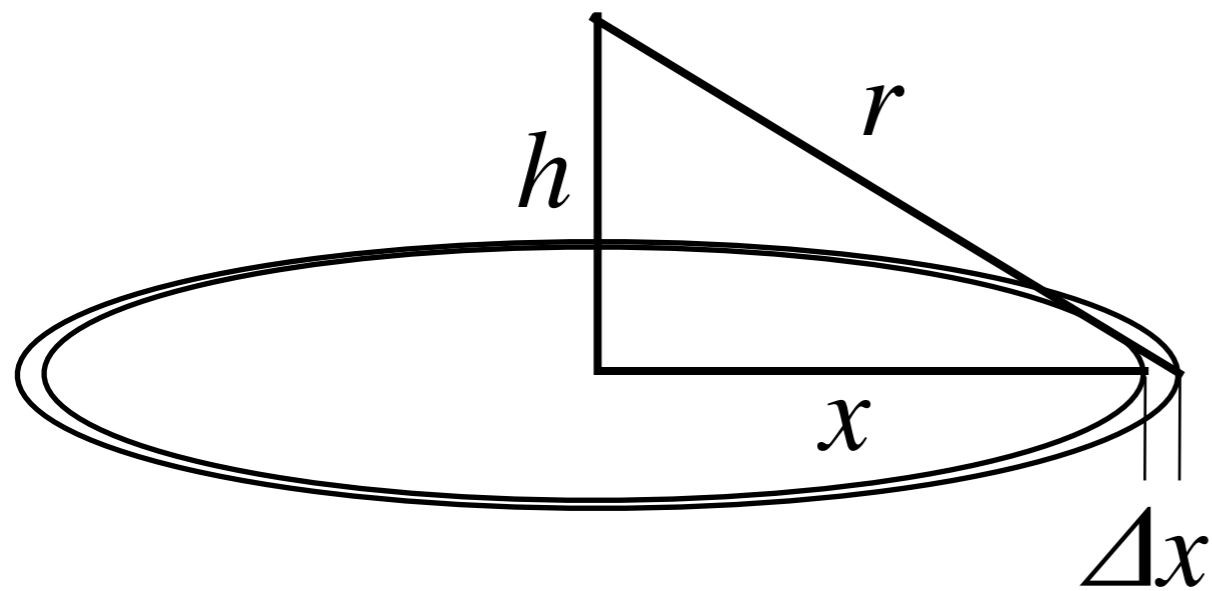
\dot{H} : 等価線量率 [Sv/s]

$$\dot{H}/\dot{\Phi} = h\nu (\mu_{\text{en}}/\rho) = 3.5 \times 10^{-16} \text{ Sv m}^2$$

$$\int_0^{L_{\text{air}}} \frac{x}{x^2 + h^2} dx = \frac{1}{2} \ln(x^2 + h^2) \Big|_{x=0}^{L_{\text{air}}} = \frac{1}{2} \ln[(L_{\text{air}}/h)^2 + 1]$$

$$L_{\text{air}} = 69.2 \text{ m} \quad h = 1 \text{ m}$$

散乱された γ 線は消えると仮定して計算している。実際には、コンプトン散乱による低エネルギーの γ 線 (ビルドアップ束) による効果を加味する必要がある (50%くらい増える)。



p : 放射能の平面密度 [Bq/m²]

$$\begin{aligned} \dot{\Phi} &= \int_0^{\infty} \frac{e^{-\mu_{\text{air}} r} \eta p}{4\pi r^2} 2\pi x dx \\ &= \frac{\eta p}{2} \int_h^{\infty} \frac{e^{-\mu_{\text{air}} r}}{r} dr \end{aligned}$$

$$\eta = 0.851$$

$$\dot{\Phi} \approx \frac{\eta p}{2} \int_0^{L_{\text{air}}} \frac{x}{x^2 + h^2} dx$$

\dot{H} : 等価線量率 [Sv/s]

$$\dot{H}/\dot{\Phi} = h\nu (\mu_{\text{en}}/\rho) = 3.5 \times 10^{-16} \text{ Sv m}^2$$

$$\int_0^{L_{\text{air}}} \frac{x}{x^2 + h^2} dx = \frac{1}{2} \ln (x^2 + h^2) \Big|_{x=0}^{L_{\text{air}}} = \frac{1}{2} \ln [(L_{\text{air}}/h)^2 + 1]$$

$$L_{\text{air}} = 69.2 \text{ m} \quad h = 1 \text{ m}$$

散乱された γ 線は消えると仮定して計算している。実際には、コンプトン散乱による低エネルギーの γ 線 (ビルドアップ束) による効果を加味する必要がある (50%くらい増える)。

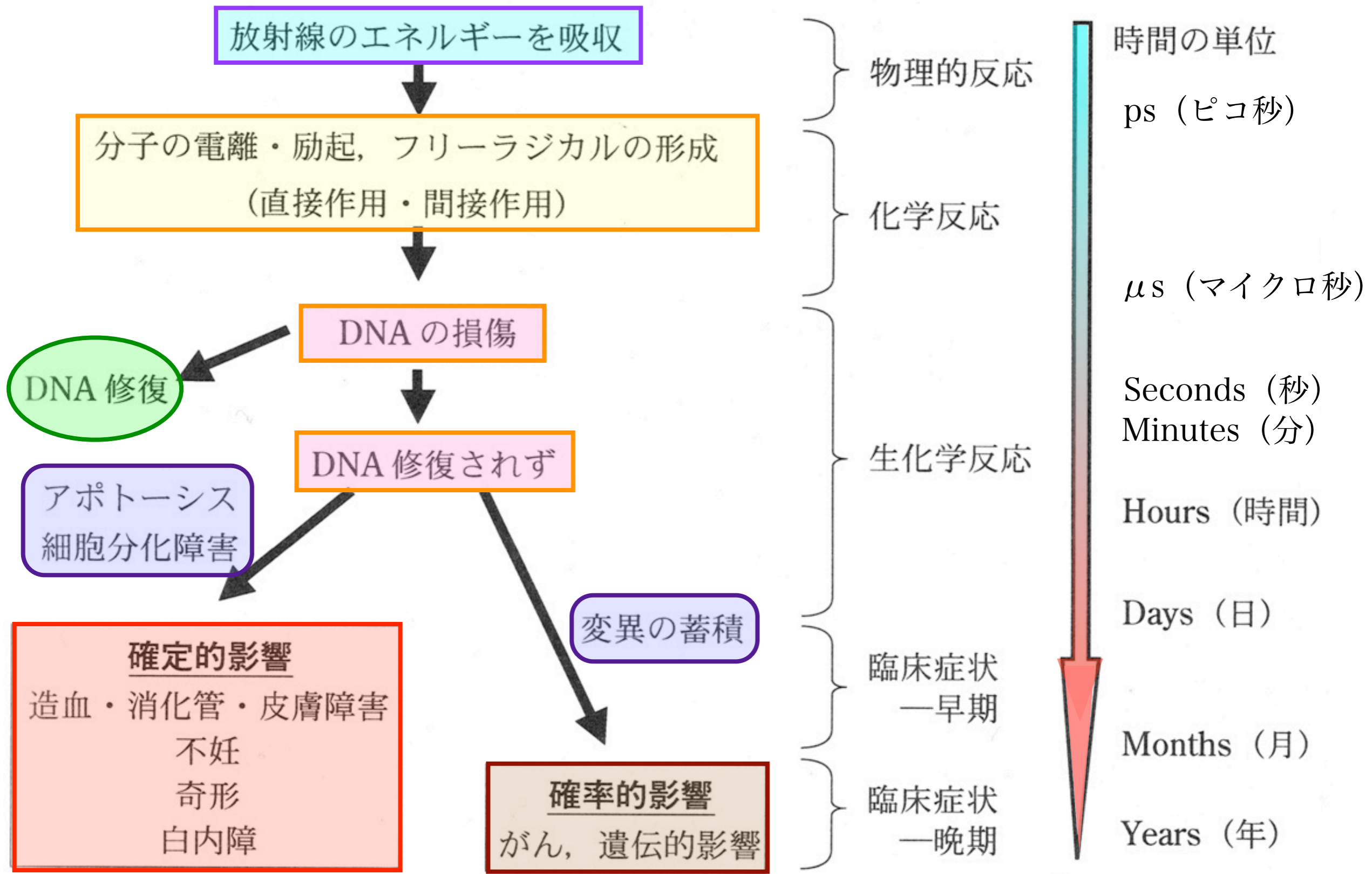
^{137}Cs : 2.1 ($\mu\text{Sv/h}$) / (MBq/m^2) IAEA による値

高さ 1 m でも 50 cm でもさして違くない

遮るものがない平地の場合、半径 10 m だけ除染しても線量は半分も減らない。半径 100 m からの寄与が効く。

放射線の生物学的影響

疫学的調査



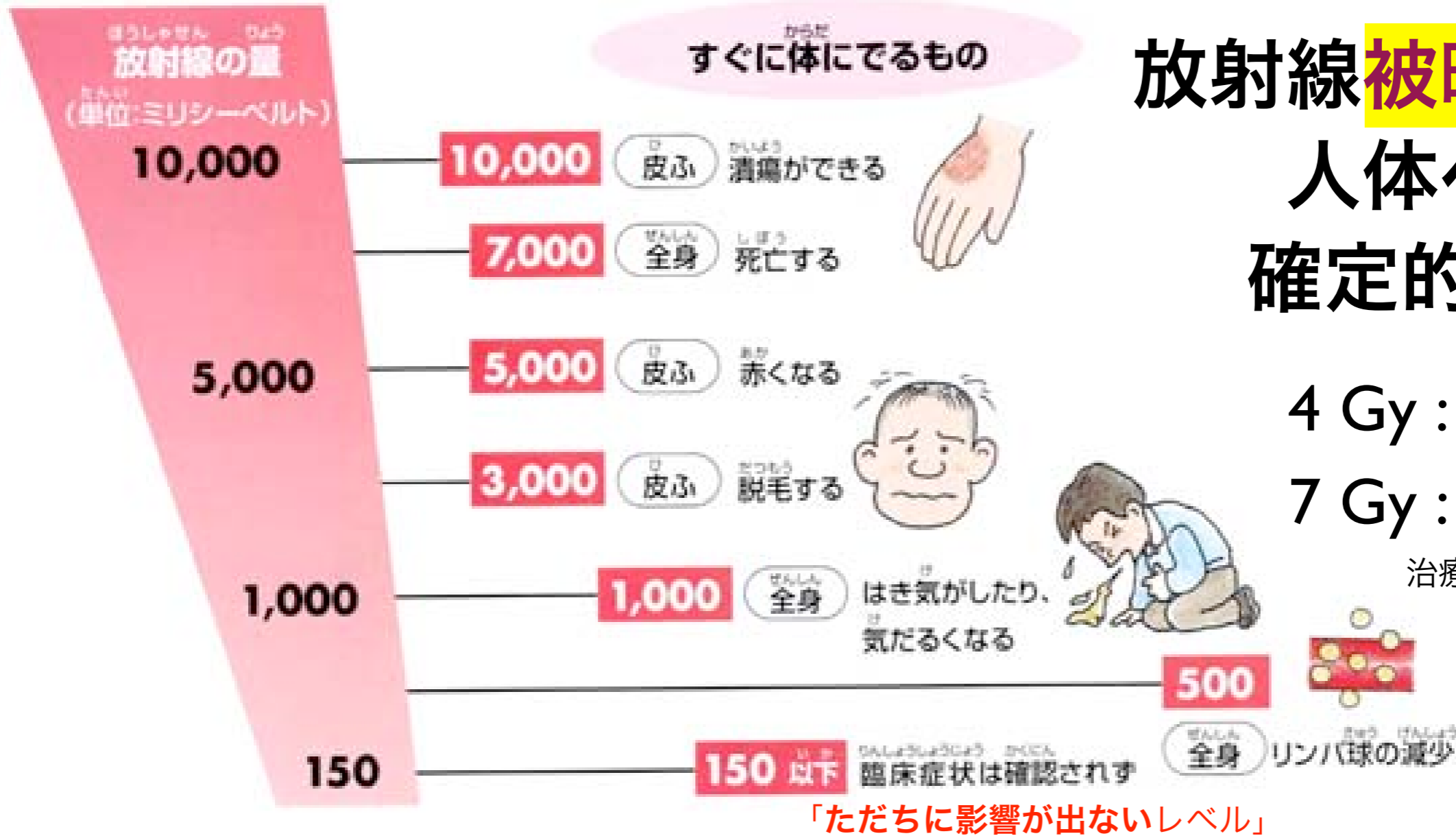
放射線被ばく後に起こる生体反応の経時的変化

放射線被曝による 人体への 確定的影響

4 Gy : 半数死亡
7 Gy : 全員死亡

治療により助かることも。

すぐに体にできるもの



JCO 事故 チェルノブイリの 消防隊員

細胞再生系	造血組織				腸上皮	皮膚	精巣	水晶体
幹細胞 ↓ 幹細胞 芽細胞 ↓ (分裂) 機能細胞 ↓ (老化) 老熟細胞 ↓ (死滅)	幹細胞 ↓ リンパ球 好中球 赤血球 血小板				腺窩 (幹細胞) ↓ 絨毛	基底細胞 (幹細胞) ↓ 角質層	幹細胞 ↓ 精子	上皮 (幹細胞) ↓ 水晶体繊維 赤道部
正常な分化過程	4	4	4	4日	2日	2週間	3-4週間	1/2-3年
正常な成熟過程	1	7-10	7	100日	2日		7-8週間	
照射による変化	免疫能力低力	血液凝固時間延長	食作用低力	酸素輸送低力	絨毛の短縮と喪失、出血、下痢	紅斑、萎縮、潰瘍	一時的または永久不妊	白内障

低線量被曝では**確定的**影響は起きない。

「ただちに**影響が出ないレベル**」

確率的影響(の可能性)が議論の対象となる。

❖ がん

❖ 遺伝的影響の有無

あくまで確率でしか議論できない。

リスクの確率。

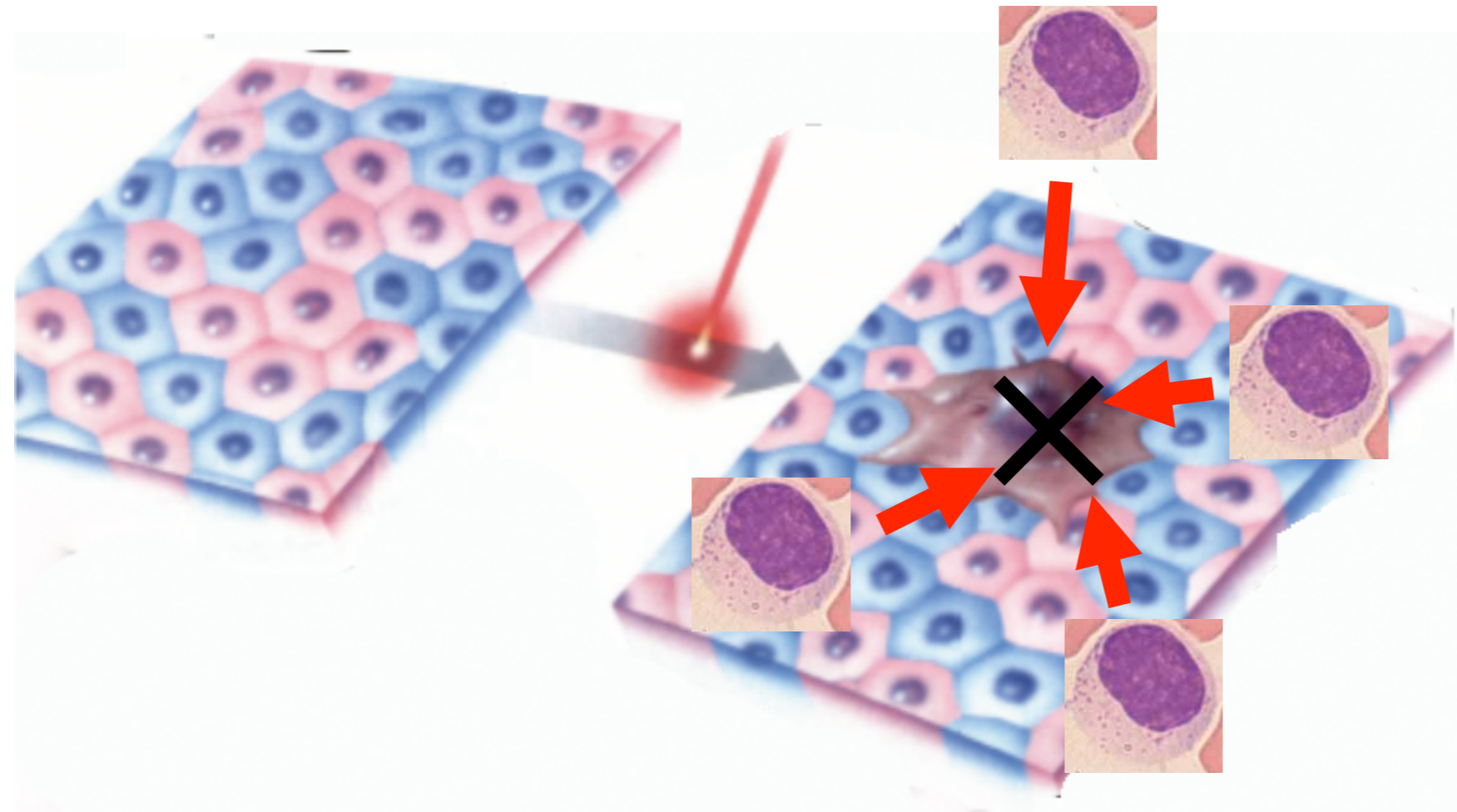
しかしそもそも、放射線を浴びなくても確率はゼロではない。

(日本人の3人に1人はがんで死亡する。)

疫学調査の結果から結論を導きだすのは**統計学的**に困難。

がん、とは？

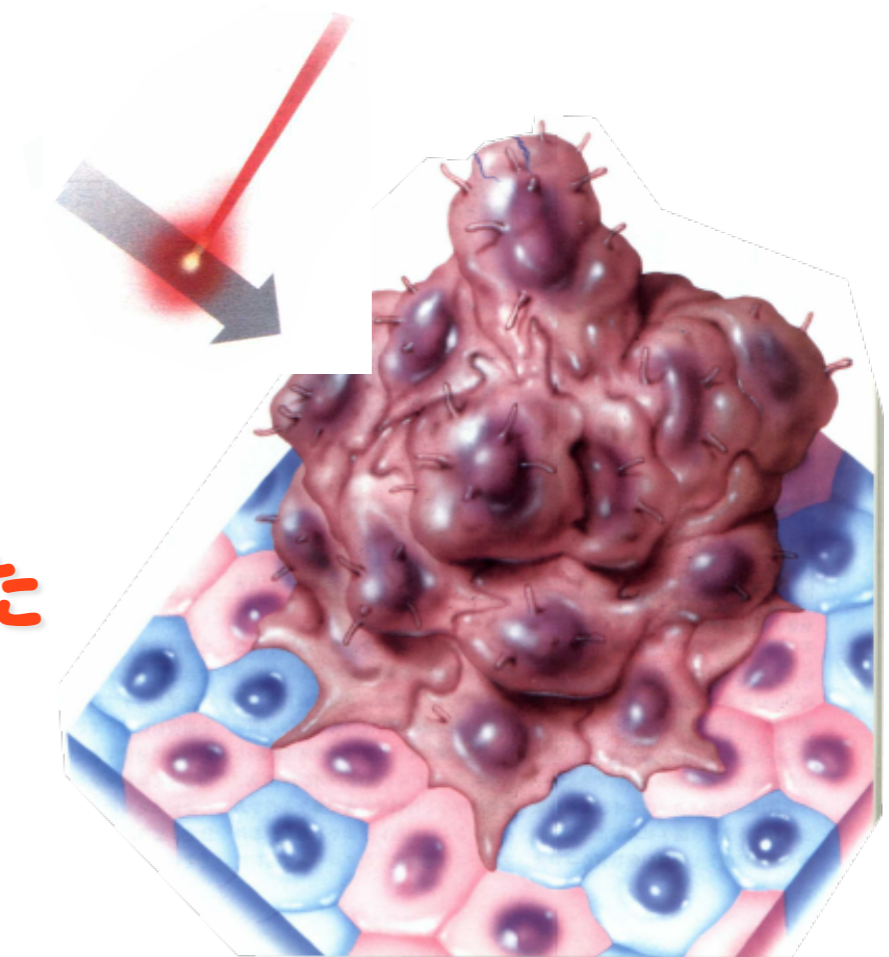
がん細胞は毎日5000個もできている！！



リンパ球が、できたてのがん細胞を殺す

免疫の攻撃をかいくぐった
ものが「がん」

がん、とは一種の「老化」



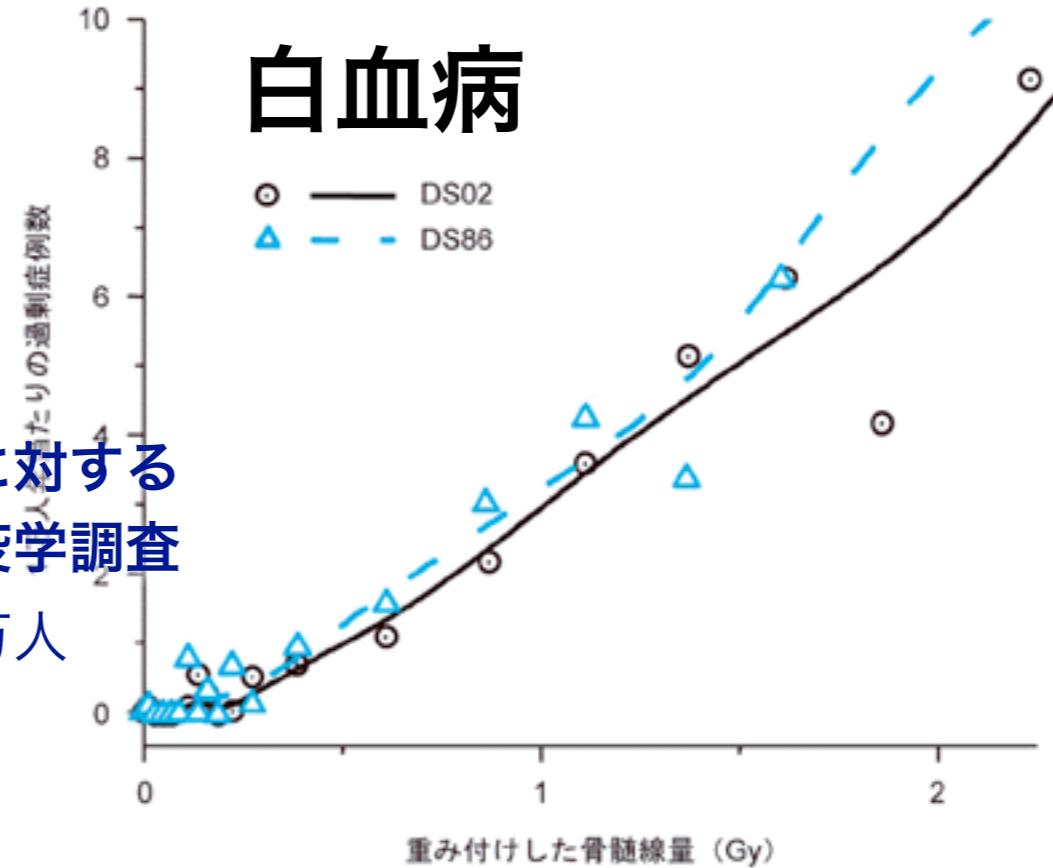
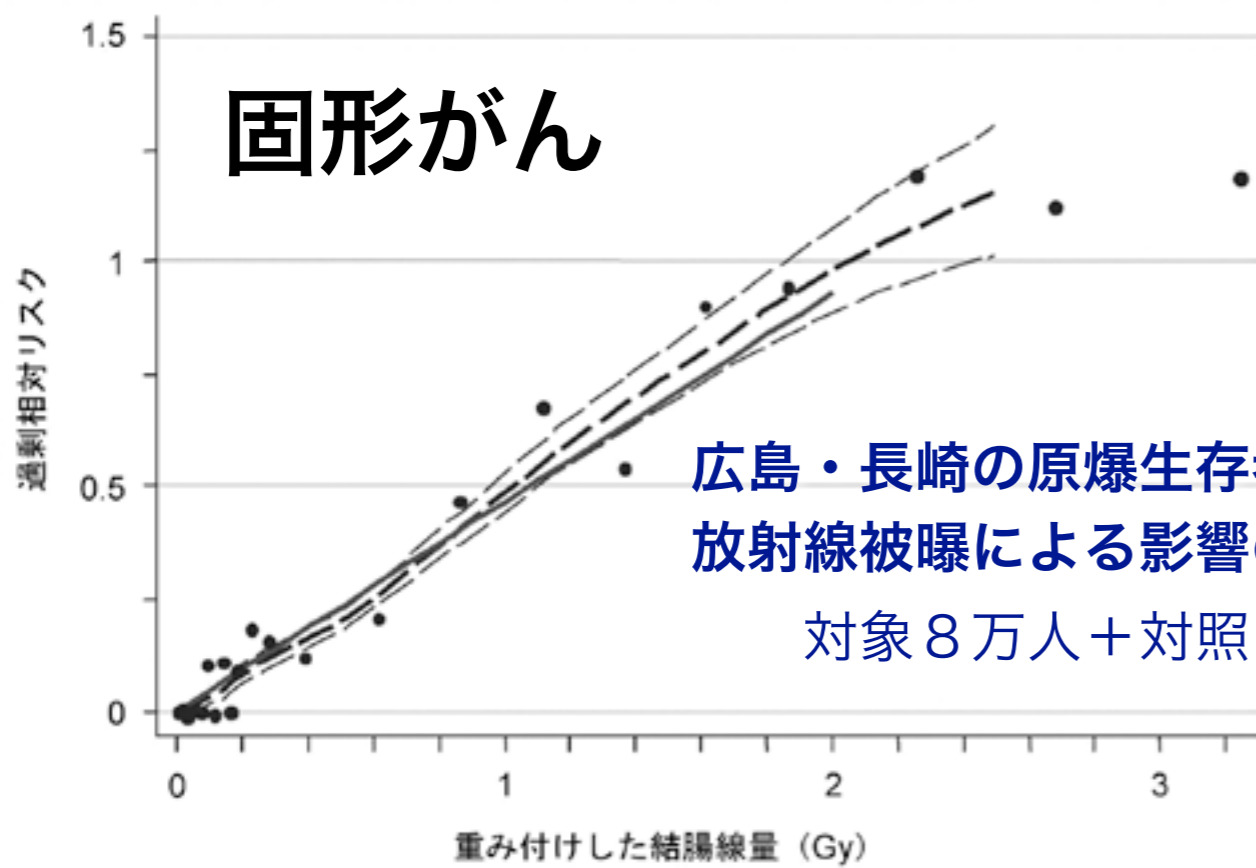


図 LSS (寿命調査) 集団における固形がん発生の過剰相対リスク (線量別) 1958-1998年。太い実線は、被爆時年齢30歳の人が70歳に達した場合に当てはめた、男女平均過剰相対リスク (ERR) の線形線量反応を示す。太い破線は、線量区分別リスクを平滑化したノンパラメトリックな推定値であり、細い破線はこの平滑化推定値の上下1標準誤差を示す。

図. DS02とDS86による白血病のノンパラメトリックな線量反応、1950-2000年。被爆時年齢20-39歳の人の1970年における男女平均リスク。

表. LSS集団における固形がん発生のリスク (線量別)、1958-1998年

重み付けした結腸線量 (Gy)	対象者数	がん		寄与率
		観察数	推定過剰数	
0.005 - 0.1	27,789	4,406	81	1.8%
0.1 - 0.2	5,527	946	75	7.6%
0.2 - 0.5	5,935	1,144	179	15.7%
0.5 - 1.0	3,173	688	206	29.5%
1.0 - 2.0	1,647	460	196	44.2%
>2.0	564	185	111	61.0%
合計	44,635	7,851	848	10.7%

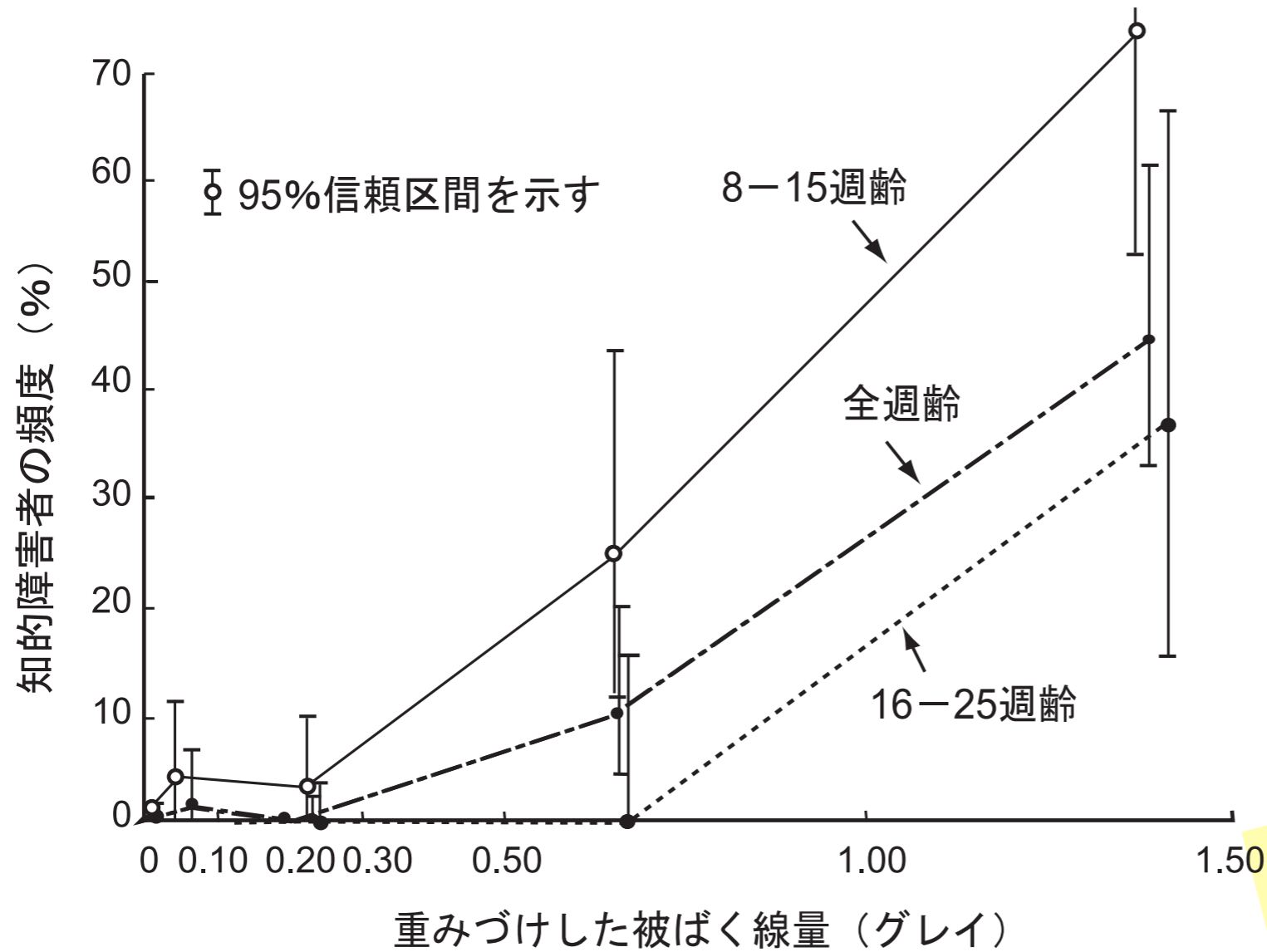
表. LSS集団における白血病による死亡の観察数と推定過剰数、1950-2000年

重み付けした骨髄線量 (Gy)	対象者数	死亡		寄与率
		観察数	推定過剰数	
0.005 - 0.1	30,387	69	4	6%
0.1 - 0.2	5,841	14	5	36%
0.2 - 0.5	6,304	27	10	37%
0.5 - 1.0	3,963	30	19	63%
1.0 - 2.0	1,972	39	28	72%
>2.0	737	25	28	100%
合計	49,204	204	94	46%

(財) 放射線影響研究所 データ

低線量被曝の影響について疫学調査の結果から結論を導きだすのは統計学的に困難。

胎内被爆者における放射線の影響



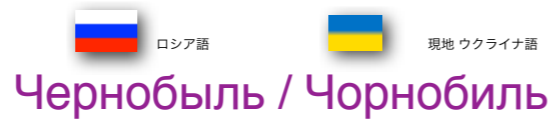
(財)放射線影響研究所 パンフレット「放射線影響研究所のご案内」

チェルノブイリ事故の後、ヨーロッパ全土で不必要な堕胎が数万人以上だったともいわれる。(風評・過度の心配による犠牲)

放射線による遺伝的影響は認められず

これまでのところ原爆被爆者の子供に臨床的または潜在的な影響を生じたという証拠は得られていない。事実これはマウスを用いた実験からの予測と一致しており、遺伝的变化に関する限り、ヒトは放射線に対してマウス以上に高い感受性を示すわけではないことを示唆している。

低線量・低線量率の被曝とガン死亡



チェルノブイリ原発事故

チェルノブイリ原発
黒鉛炉
格納容器なし
1週間燃え続けた

福島第一原発
沸騰水型軽水炉
格納容器あり
水素爆発・汚染水流出

^{131}I (ヨウ素 ^{131}I) total **200京ベクレル !!**

初期消火に当たった原発作業員・消防隊員が
致死・亜致死量の被曝。28人死亡。

事故処理に当たった軍人ら“リクビダートル”
60万人が数百 mSv 被曝

3 km にあるプリピャチ市民は翌日に強制避難
半径 10 km 圏内の避難が1週間遅れた。

(最大で 750 mSv の被曝)

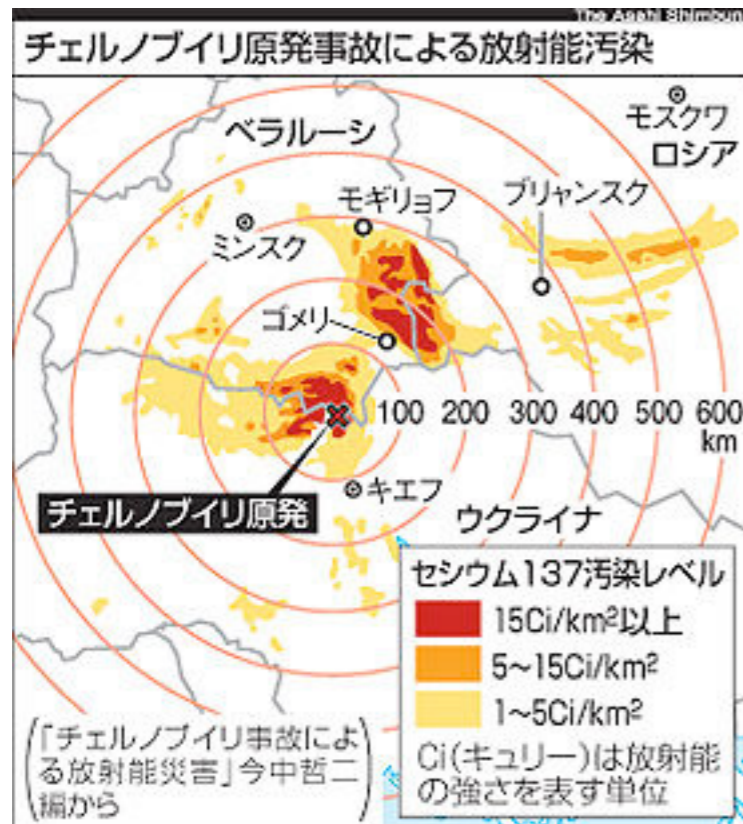
30 km 圏内の牛乳の摂取規制がなされず。

一般住民で確認された健康への影響は
こどもの甲状腺ガンの増加のみ。

毎年 1/300,000人 → 1/10,000人
(患者数 5000人、死亡 15人)

甲状腺平均被曝量 2 Gy !!

と、ずっと大きいストレスによる失調



低線量・低線量率の被曝とガン死亡

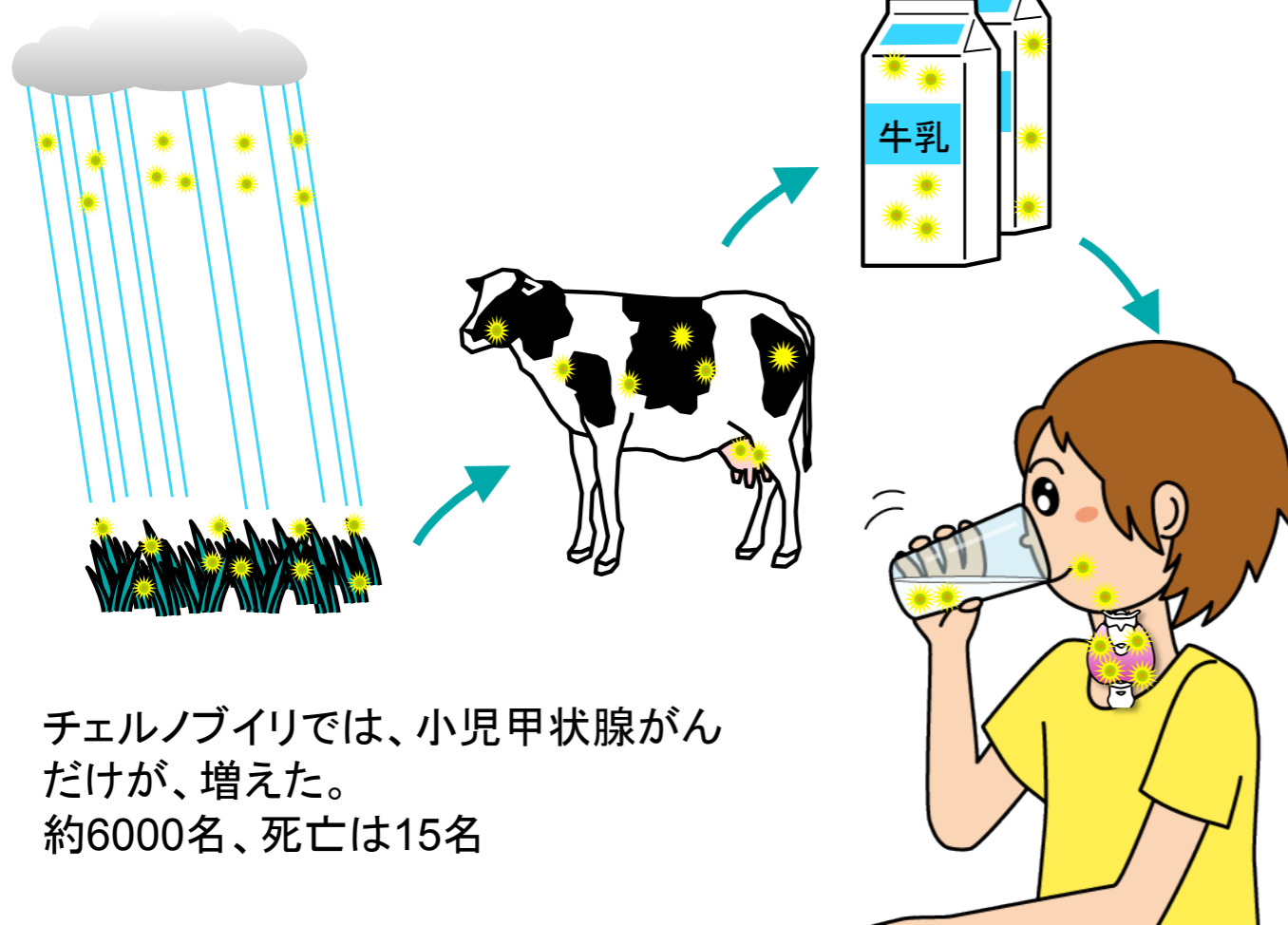


ロシア語
Чернобыль / Чорнобиль



チェルノブイリ原発事故

^{131}I (ヨウ素 ^{131}I) total 200京ベクレル !!



チェルノブイリでは、小児甲状腺がんだけが、増えた。
約6000名、死亡は15名

一般住民で確認された健康への影響は
こどもの甲状腺がんの増加のみ。
(地産地消の牛乳による摂取が問題)

毎年 1/300,000人 → 1/10,000人
(患者数 5000人、死亡 15人)

甲状腺平均被曝量 **2 Gy**

= **2000 mSv !!** (10 Gy 以上の被曝も!)
と、ずっと大きいストレスによる失調

いわき市、飯舘村のこどもの甲状腺被曝調査
最大で **35 mSv** の被曝 (甲状腺等価線量)

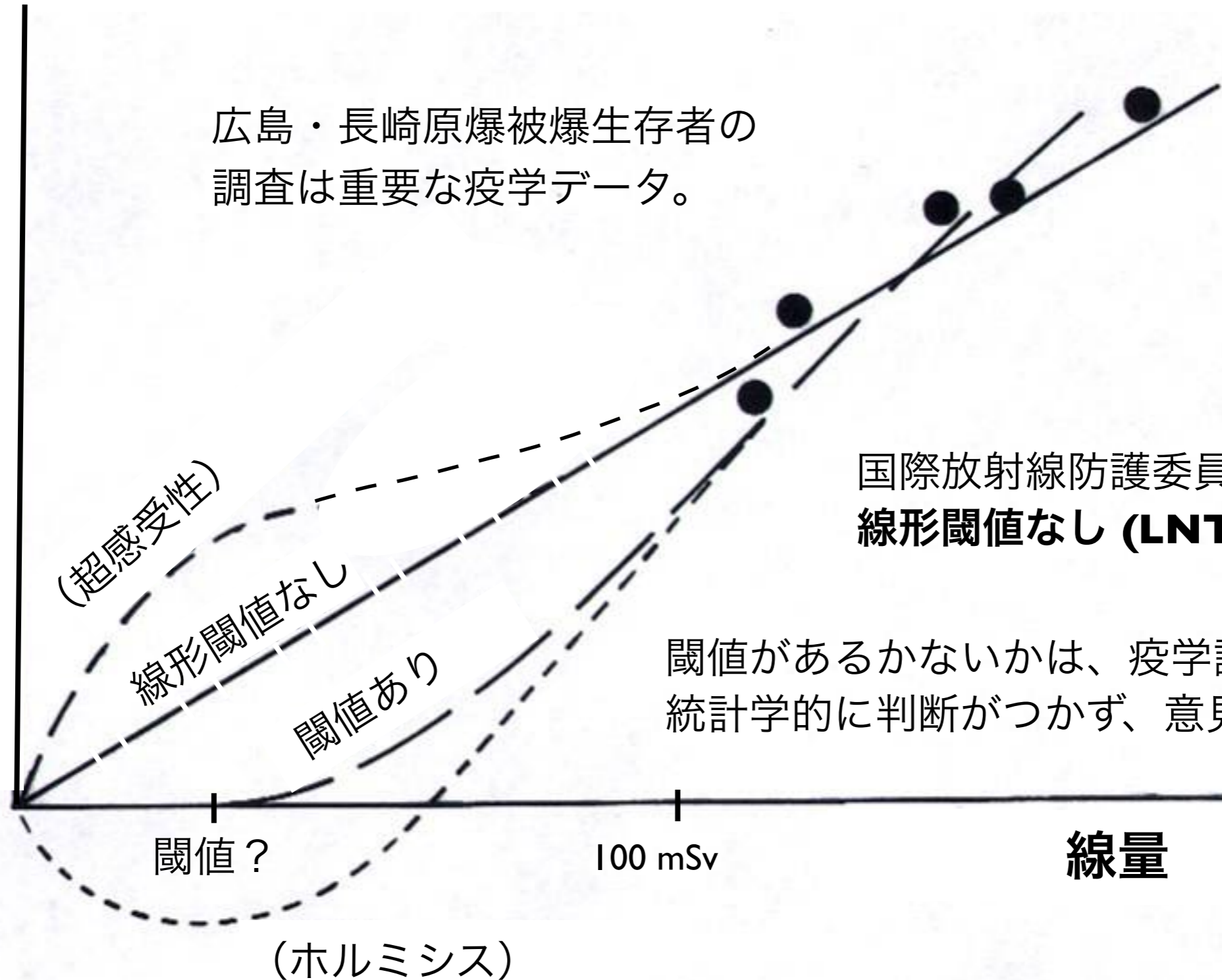
震災・事故による喪失感は共通

放射線のリスク評価と防護

低線量におけるリスク評価

将来のガンの増加リスク

広島・長崎原爆被爆生存者の調査は重要な疫学データ。



国際放射線防護委員会 (ICRP) は線形閾値なし (LNT) 仮説を採用。

閾値があるかないかは、疫学調査から統計学的に判断がつかず、意見が分かれる。

線量

表2 低線量、低線量率放射線被ばくに伴うがん死亡の生涯リスク(ICRP1990)

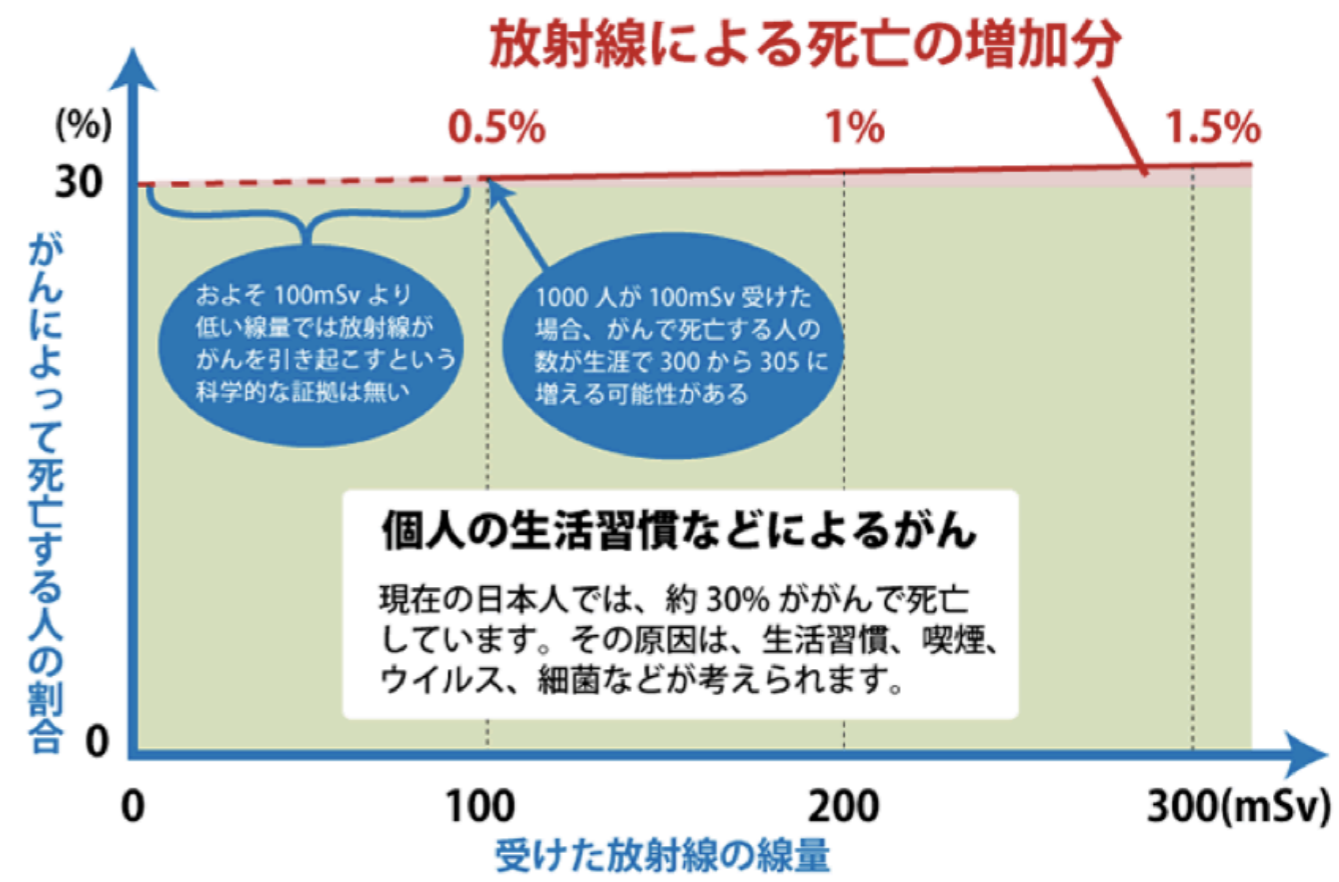
(10,000人当り、全年齢平均、1Sv当り過剰死亡数)

	ICRP 1977年勧告	ICRP 1990年勧告
赤色骨髄	20	50
骨表面	5	5
膀胱		30
乳房	25	20
結腸		85
肝臓		15
肺	20	85
食道		30
卵巣		10
皮膚		2
胃		110
甲状腺	5	8
その他	50	50
合計	125	500

[出典](社)日本アイソトープ協会:国際放射線防護委員会の1990年勧告(1991年11月)、p.157

低線量・低線量率の被曝

放射線によるがん・白血病の増加



国際放射線防護委員会

ICRP 1990 の勧告値

100 mSv の被曝で人口あたり 0.5% の増加 (LNT仮説)

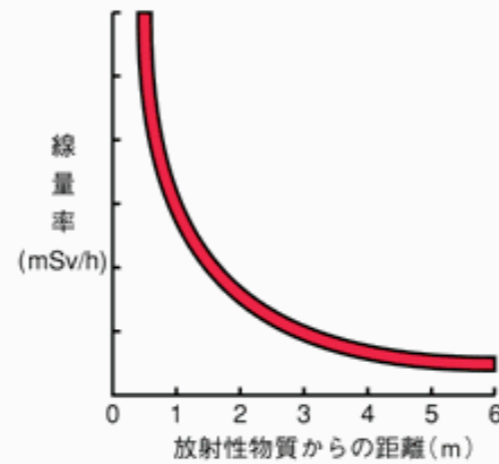
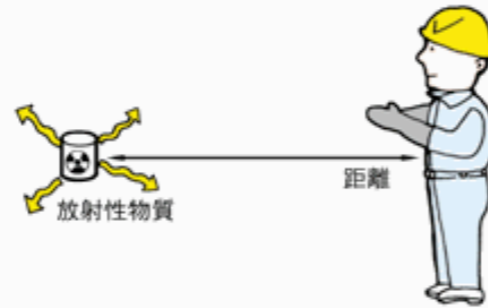
喫煙によるリスクより遥かに小さい。

LNT (線形閾値なし) 仮説はあくまでも放射線あるいは環境化学物質に対する基準の策定に必要な防護の具体的数値を算出するための**仮説**として提出されたもので、メカニズムの面からは必ずしも支持されるわけではない。

放射線防護

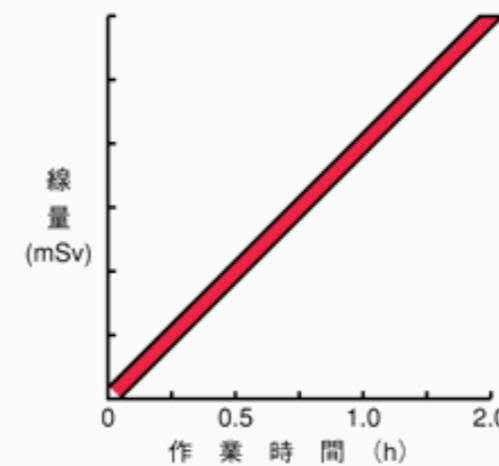
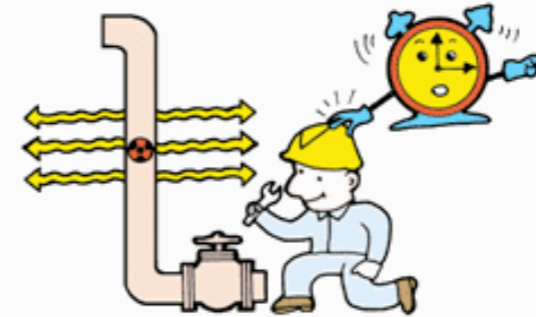
● 距離による防護

$$[\text{線量率}] = [\text{距離}]^2 \text{に反比例}$$



● 時間による防護

$$[\text{線量}] = [\text{作業場所の線量率}] \times [\text{作業時間}]$$



● 遮へいによる防護

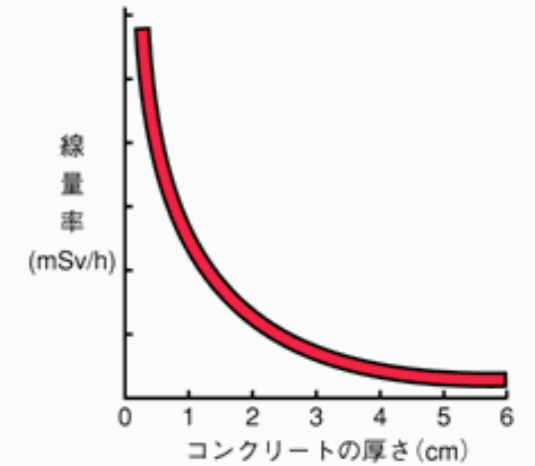
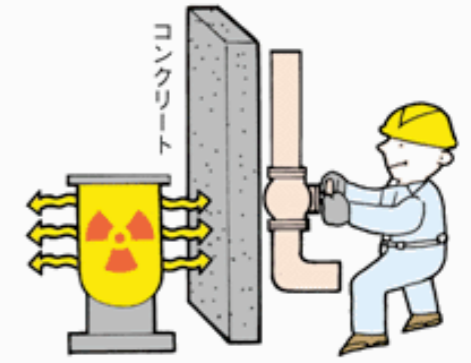


図1 遮へい3原則の図

[出典] 電気事業連合会:「原子力・エネルギー」図面集2003-2004、p.130

防護の最適化：個人線量、被曝人数、潜在的被曝の可能性のすべてを、経済的および社会的要因を考慮に入れたうえで、合理的に達成できる限り低く保つべきである。

(ALARA の原則 = As Low As Reasonably Achievable)

個人被曝の線量限度

線量限度の一覧表（作業者）

職業被曝（作業者 放射線業務従事者）

実効線量	100 mSv / 5年 かつ 50 mSv / 年
女子 妊娠中の女子	5 mSv / 3月 内部被曝について 1 mSv
等価線量	
水晶体	150 mSv / 年
皮膚	500 mSv / 年
妊娠中の女子の 腹部表面	2 mSv / 年

	1990勧告	1977勧告
実効線量	20mSv/年（5年平均）	50mSv/年
水晶体等価線量	150mSv/年	150mSv/年 ²⁾
皮膚等価線量	500mSv/年 ¹⁾	500mSv/年
手・足の等価線量	500mSv/年	500mSv/年 ³⁾
その他の組織	—	500mSv/年

1) 被ばく部位に関係なく、深さ7 mg/cm²、面積1 cm²の皮膚についての平均線量に適用される。

年リスク千分の1 (18歳から65歳までの就業期間の被曝の場合で、65歳までのリスクの最大値)

線量限度の一覧表（一般公衆）

公衆被曝（一般公衆）

実効線量	1 mSv / 年
等価線量	
水晶体	—
皮膚	—

	1990 勧告	1977 勧告
実効線量	1 mSv/年	5 mSv/年 ¹⁾ , 1 mSv/年（生涯の平均）
水晶体等価線量	15 mSv/年	50 mSv/年
皮膚等価線量	50 mSv/年 ³⁾	50 mSv/年
その他の組織	—	50 mSv/年 ²⁾

1) 1985年のパリ声明で主たる限度を1年につき1 mSvとして、補助的な限度を5 mSv/年とした。

2) 1985年のパリ声明で実効線量当量の制限によって不要になった。

年リスク1万分の1 (毎年被曝の場合、65歳までの最大値) **ICRP 勧告**

〔出典〕（1990年ICRP新勧告と1977年ICRP勧告における線量限度値対照表）

〔「ICRP1990年勧告-その要点と考え方-」、草間朋子編、日刊工業新聞社、50ページ〕

国内法令による防護基準

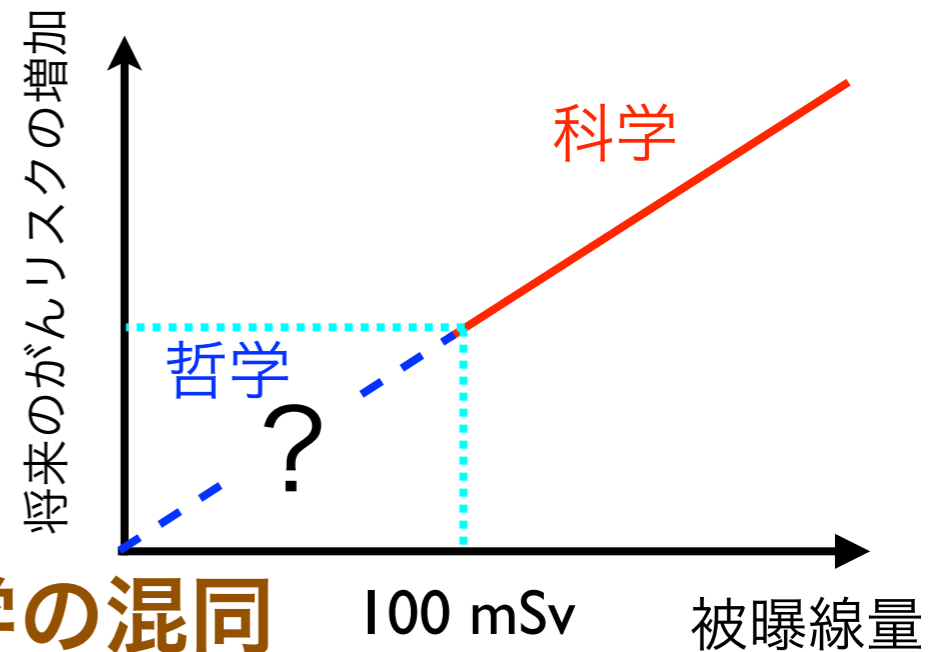
放射線の影響に関して異なった意見があるのはなぜか

がんの原因が医学的に分かっていない

疫学調査の問題点

統計学的有意性

影響の因果関係 スクリーニング効果・別の要因

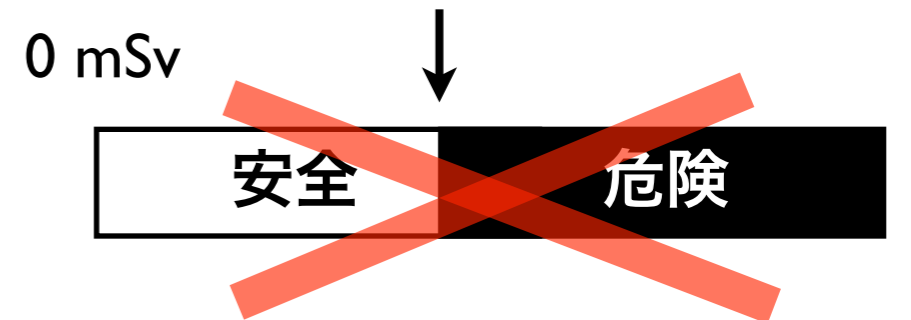


科学的知見と防護学(安全管理学)の哲学の混同

リスクをどこまで許容するか

安全と危険の線引きはできない。

他のリスクとの相対比較



リスクは相対的

基準値

(社会が決める)

放射線のリスク

「絶対安全」は世の中に存在しない。
相対的なリスク評価の目を養うべき。

正しい情報をどうやって判断するか。

根拠のない過信・安心は問題だが、
根拠のない恐れや不安もまた問題。

☞ JCO の事故

☞ パニック、風評、健康被害。

放射線の影響に対して異なった意見があるのはなぜか

福島住民のリスクは？

住み続けるリスク

放射線の影響？

日常サービスの低下／欠如

避難生活でのリスク

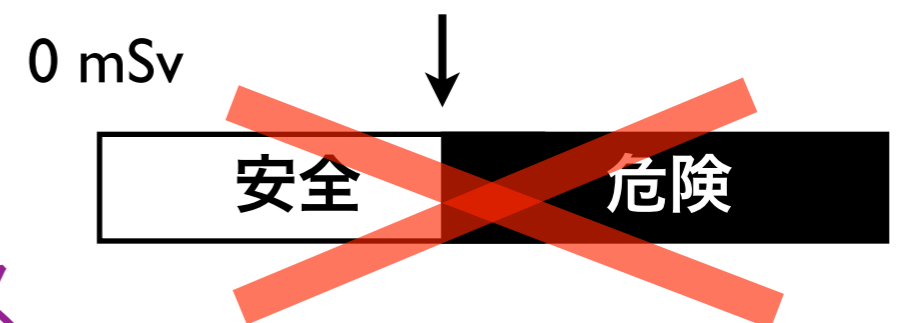
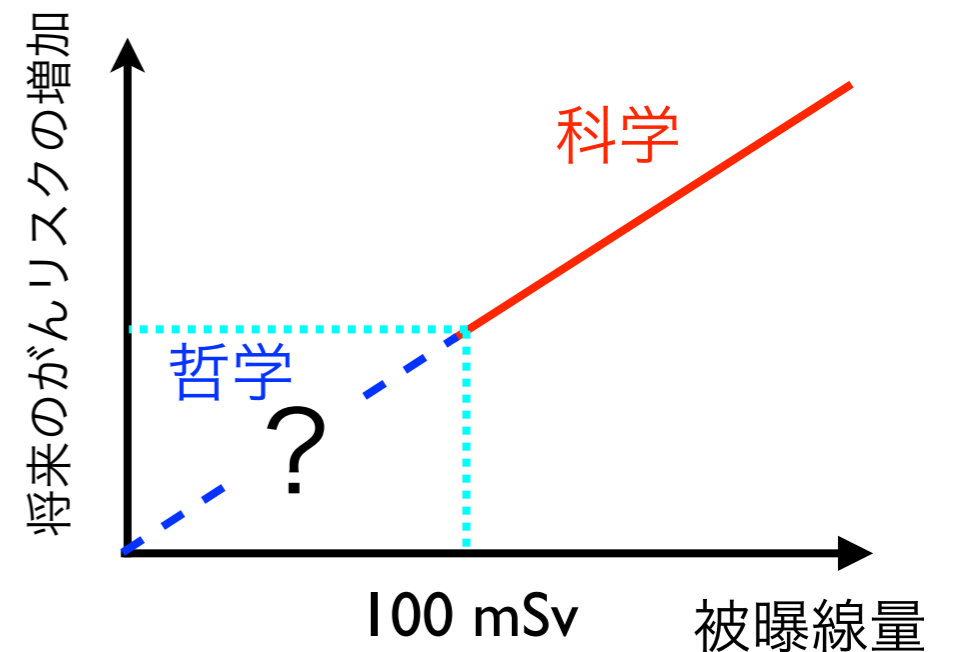
慣れない土地での生活ストレス

生業・収入の損失

年齢、家族構成、職業

リスクのトレードオフは人それぞれに違う。

どう判断すべきか、自分で考えるしかない。



リスクは相対的

基準値
(社会が決める)

放射線のリスク

「ものをこわがらな過ぎたり、こわがり過ぎたり
するのはやさしいが、**正当にこわがる**ことは
なかなかむづかしい**ことだと思われた。**」

寺田 寅彦 (1935年)

被曝を

怖れすぎても、怖れなさすぎても

健康被害が出る。

(東大病院 放射線科 中川恵一先生)

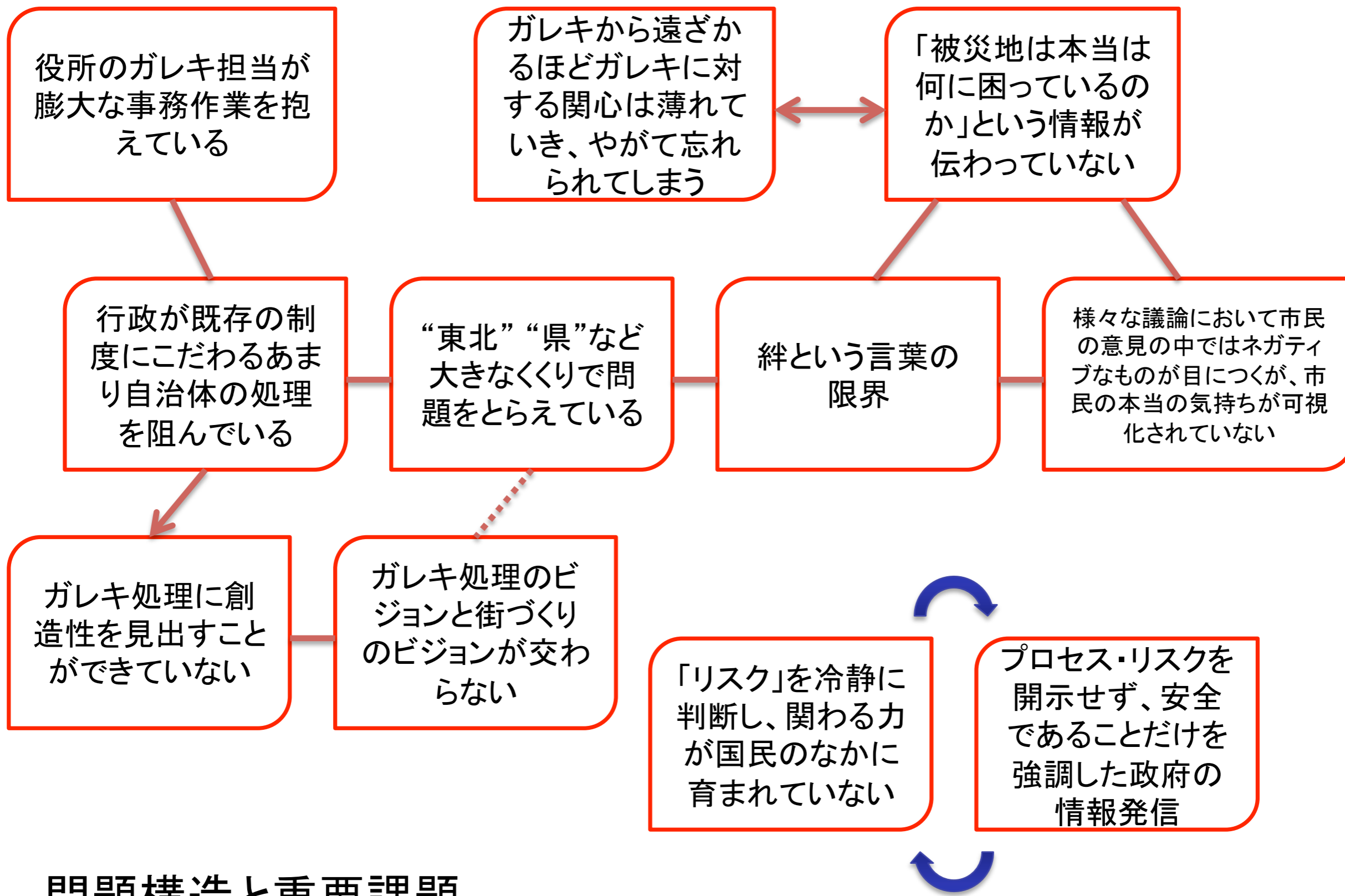
病は気から = 精神失調、免疫力低下などに注意



震災がれき処理問題

東京大学 × 博報堂 × 時事通信社





問題構造と重要課題

高エネルギー物理学

人工の放射線

～ 原子核物理学から素粒子物理学へ ～

■エックス線を発見



1895年、ドイツの物理学者レントゲンは、真空放電の実験中に黒いボール紙で覆われた放電管の電極からボール紙を通り抜け、目に見えないが写真乾板を感光させ、蛍光物質を光らせる性質を持った線を発見しました。この正体の分からないものを「ナゾの」という意味でx(エックス)線と名づけました。



ヴィルヘルム・レントゲン
(1845-1923)

■エックス線を発見

1896年、フランスの物理学者ベクレルは、写真乾板の上に薄い銅の十字架を置き、その上にウラン化合物の結晶を乗せて机の引き出しにしまってしまいました。後で乾板を現像すると、十字架の形がはっきりと写っていました。ウラン原子そのものに光を出す性質があると気づいた彼は、この線をベクレル線(後にアルファ(α)線とベータ(β)線であることが判明)と名づけ、発表しました。



アンリ・ベクレル
(1852-1908)

■放射性元素を発見

ベクレルの研究に刺激を受けたキュリー夫人は、夫のピエールとともにウランの性質を調べました。1898年にはウラン化合物の400倍もの感光作用を持つ新元素・ポロニウムを発見。この名前は、夫人の祖国であるポーランドにちなんでつけられた。彼女は、「放射線」「放射能」の名づけ親でもあります。



マリー・キュリー
(1867-1934)

■放射性元素を発見

イギリスの物理学者ラザフォードは、1903年に放射性物質のラジウムを使った実験で、原子の種類が変わるときに3種類の放射線が出ることを知り、それぞれにアルファ(α)線、ベータ(β)線、ガンマ(γ)線と名づけました。原子は変わらないと信じられていた当時、この発見は大きな波紋を投げかけました。



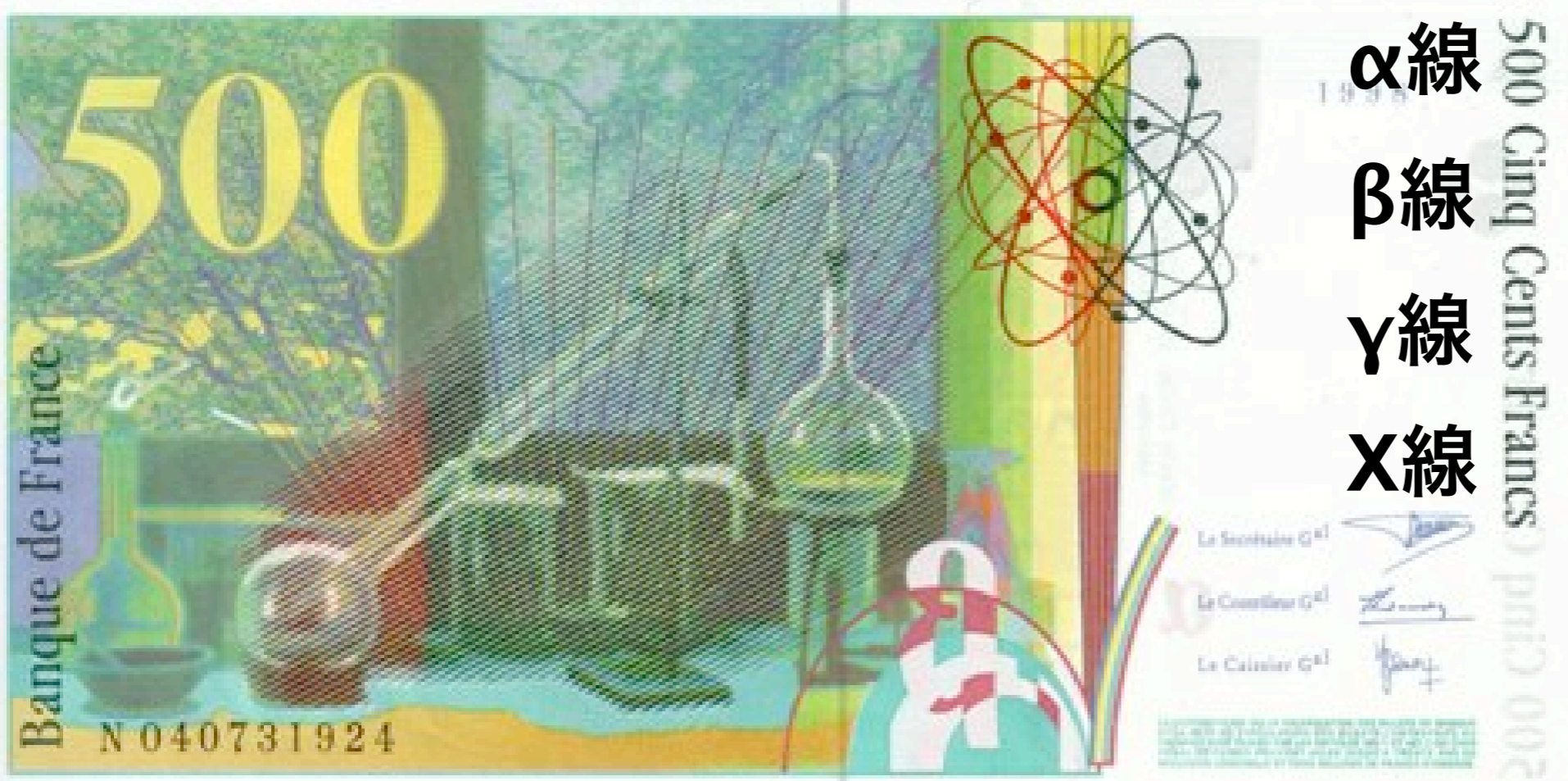
アーネスト・ラザフォード
(1871-1937)



M. Curie & P. Curie



Billet de 500 Francs Français en circulation: 1993–1999



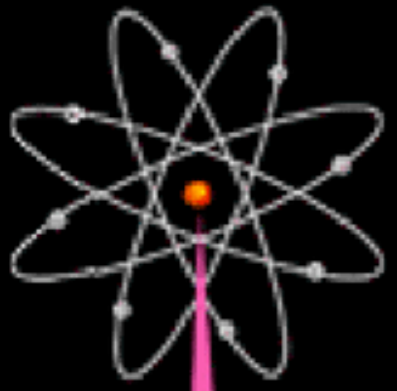
- α 線 ヘリウム原子核
- β 線 高速の電子
- γ 線 光子（電磁波）
- X線 光子（電磁波）



分子
molecule

nm (10^{-9} m) 化学
ナノメートル

eV Chemistry
電子ボルト



原子
atom

∇
Å (10^{-10} m)
オングストローム

原子物理学 Atomic Physics
eV – keV
数電子ボルト～
キロ電子ボルト

錬金術はなぜ失敗したか

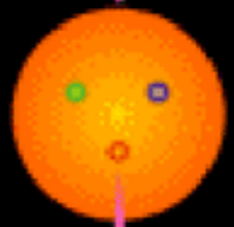


原子核
nucleus

∇
fm (10^{-15} m)
フェムトメートル

原子核物理学 Nuclear Physics

MeV
メガ電子ボルト



陽子
proton



素粒子物理学 Particle Physics



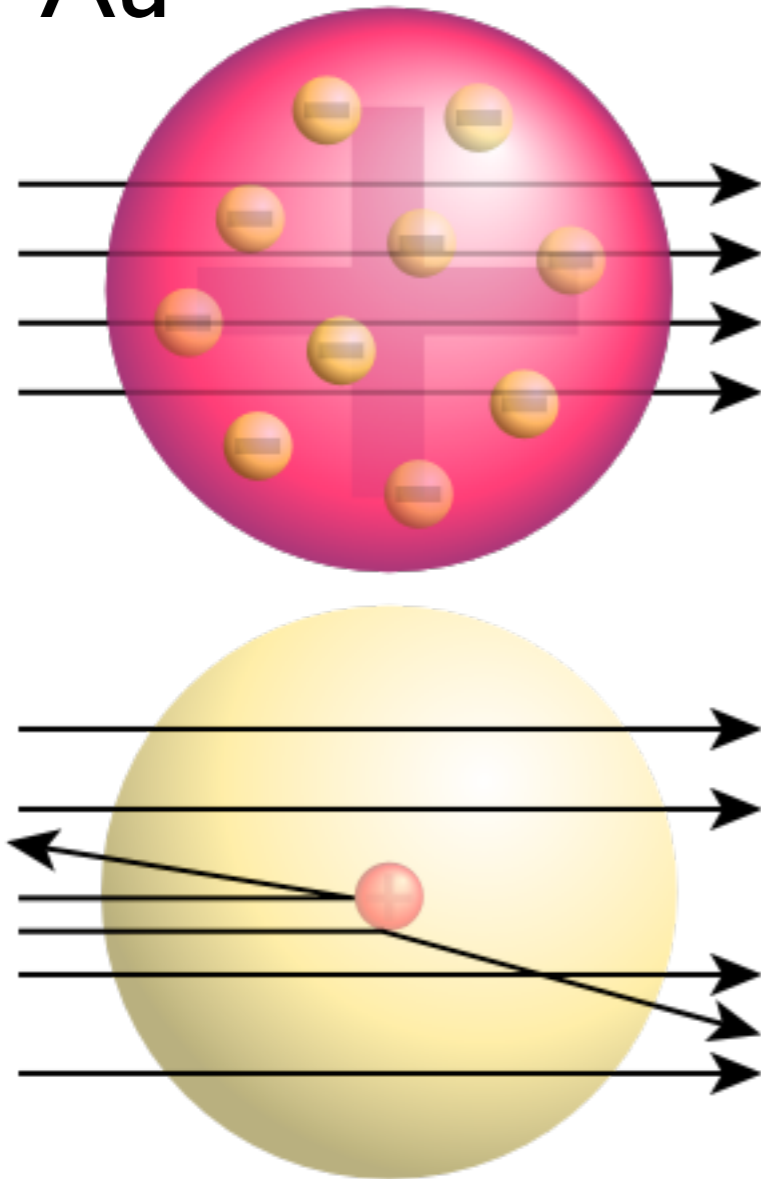
クォーク
quark

am (10^{-18} m)
アトメートル

GeV
ギガ電子ボルト

ラザフォード散乱

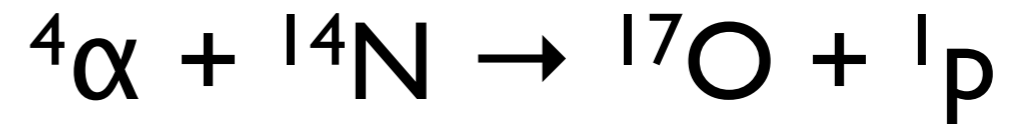
$\alpha + \text{Au}$



ラザフォードの原子模型

初の核変換実験

窒素ガス中において、Poからの α 線の到達距離の実験をしていた。



何らかの粒子が40 cm先の蛍光版を光らせた。
(α 線の到達距離は1気圧空気中で数cm程度)



E. Rutherford

Nuclear Science

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^-)
- positron (e^+)
- neutrino (ν)
- antineutrino ($\bar{\nu}$)
- quark
- gluon field
- gluon
- photon (γ)
- Nucleon: $A = Z + N$

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_{univ} , cooled to about 10^{12} K, this soup condensed into protons, neutrons, and electrons. As time progressed, most 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 condensed into stars, where hydrogen and helium fused into more massive chemical elements. Expanding and impermeable from the most massive elements and dispersed them into space. Our earth was formed from supernova debris.



Phases of Nuclear Matter



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

Alpha Decay: ${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He}$ (alpha particle)

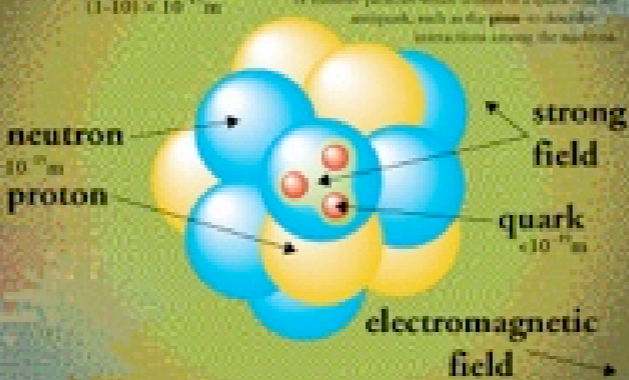
Beta Minus Decay: ${}^{14}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + e^- + \bar{\nu}$ (beta particle)

Beta Plus Decay: ${}^{11}_6\text{C} \rightarrow {}^{11}_5\text{B} + e^+ + \nu$ (beta particle)

Gamma Decay: ${}^{60}_{27}\text{Co} \rightarrow {}^{60}_{27}\text{Co} + \gamma$ (gamma ray)

Radioactive decay transforms a nucleus by emitting different particles. In alpha decay, the nucleus releases a ${}^4_2\text{He}$ nucleus—an alpha particle. In beta decay, the nucleus either emits an electron and antineutrino (for a proton and neutron) or captures an atomic electron and emits a positron and neutrino. A positron is the same for the antiparticle of the electron. Antineutrino is composed of anti-particle. 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



Nuclear reactions release energy when the total mass of the products is less than the sum of the masses of the initial nuclei. The "lost mass" appears as kinetic energy of the products ($E = mc^2$). In fission, a massive nucleus splits into two major fragments that usually emit one or more neutrons. In fusion, low mass nuclei combine plus one or more ejected particles—neutrons, protons, photons, or alpha particles.

Nuclear Energy

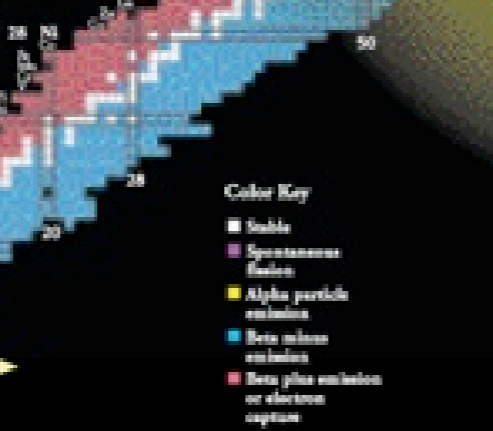
Fission: ${}^{235}_{92}\text{U} + n \rightarrow {}^{141}_{54}\text{Xe} + {}^{92}_{38}\text{Sr} + 2n$

Fusion: ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + n$

In the early stages of nuclear reactions of our sun and other stars, hydrogen fuses to form helium, releasing energy in the form of photons (light) and neutrinos. During the later stages of stellar evolution, more massive nuclei up to and beyond uranium are synthesized by fusion. By measuring the number of reactions that come from the Sun, scientists recently have demonstrated that reactions must have a rate 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 (2 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.



Applications

Radioactive Dating: Recently excavated radioactive isotopes such as ${}^{14}\text{C}$ are used to date objects that were once living, such as wood. For example, from a study of pollen found at the site, scientists determined that the bridge was built nearly 4,000 years ago.

Smoke Detectors: Many smoke detectors use a small amount of the alpha emitter ${}^{241}\text{Am}$ to ionize the air. Smoke entering the detector reduces the current and sets off the alarm.

Nuclear Medicine: Radioactive isotopes such as ${}^{99m}\text{Tc}$, ${}^{131}\text{I}$, and ${}^{18}\text{F}$ are commonly used in the diagnosis and treatment of illness. Nuclear medicine such as ${}^{18}\text{F}$ is used in Positron Emission Tomography (PET) to produce images of brain activity.

Space Exploration: Excess heat and alpha particles in naturally occurring thorium isotopes present in thorium oxide. The heat, nuclear reactions are used to supply power from terrestrial environments to an extraterrestrial.

Nuclear Reactors: Nuclear reactions on the fission of ${}^{235}\text{U}$ or ${}^{239}\text{Pu}$ nuclei to produce atomic power. Reactors will have other nuclear applications generate radioactive waste disposal of the waste is a subject of current research.

Magnetic Resonance Imaging: Magnetic Resonance Imaging (MRI) utilizes one of several reactions involving the magnetic field of a nucleus to study the local chemical environment. The technique accurately maps the density of hydrogen to produce three-dimensional images of the human body.

www.CPEPweb.org

Nuclear Science

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 shapes 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^-)
- positron (e^+)
- neutrino (ν)
- antineutrino ($\bar{\nu}$)
- quark
- gluon field
- photon
- photon (γ)
- Nucleon: $A = Z + N$

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_{univ} , cooled to about 10^{12} K, this soup condensed into protons, neutrons, and electrons. As time progressed, most 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 condensed into stars, where hydrogen and helium fused into more massive chemical elements. Expanding star temperatures from the most massive elements and disperse them into space. Our earth was formed from supernova debris.

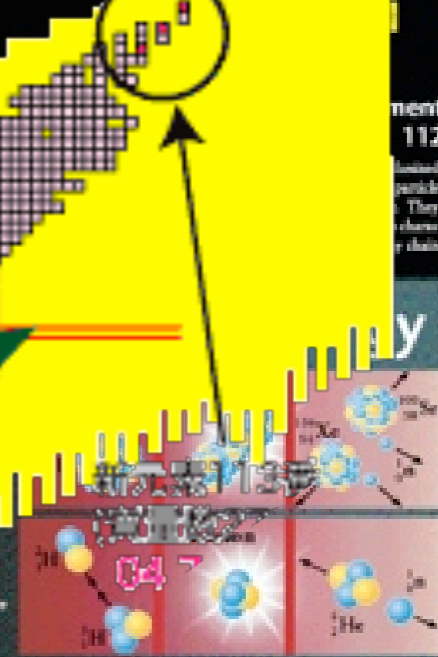


Phases of Nuclear Matter



Unstable Nuclei

Stable nuclei form a narrow white band on the Chart of the Nucleides. Scientists produce unstable nuclei far from this band and study their decays, thereby learning about the structure of nuclear conditions. In its present form, this chart contains about 2500 different nuclei. Nuclear theory predicts that there are about 5000 more.



Radioactivity

Alpha Decay: ${}^{238}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\text{Th} + {}^4_2\text{He}$ (alpha particle)

Beta Minus Decay: ${}^{14}_6\text{C} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + e^- + \bar{\nu}_e$ (beta particle)

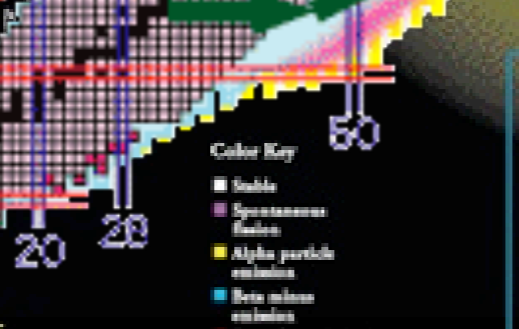
Beta Plus Decay: ${}^{11}_6\text{C} \rightarrow {}^{11}_5\text{B} + e^+ + \nu_e$ (beta particle)

Gamma Decay: ${}^{60}_{27}\text{Co} \rightarrow {}^{60}_{27}\text{Co} + \gamma$ (gamma ray)

Radioactive decay transforms a nucleus by emitting different particles. In alpha decay, the nucleus releases a ${}^4_2\text{He}$ nucleus, an alpha particle. In beta decay, the nucleus either emits an electron and antineutrino for a positron and neutrino, or captures an orbital electron and emits a neutrino. A positron is the same as the antiparticle of the electron. Antineutrino is composed of anti-particle. Both alpha and beta decays change the original nucleus into a nucleus of a different chemical element. In gamma decay, the nucleus liberates internal energy by emitting a photon—a gamma ray. This decay does not modify the chemical properties of the atom.

Chart of the Nucleides

The Chart of the Nucleides presents in graphic form all known nuclei with atomic number, Z, and neutron number, N. Each nucleide is represented by a square according to its predominant decay mode. Magic numbers (2 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.



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

Applications

Radioactive Dating: Recently discovered radioactive isotopes such as ${}^{14}\text{C}$ are used to date objects that were once living, such as wood. For example, from a study of pollen found at the site, scientists determined that Pompeii was built nearly 4,000 years ago.

Space Exploration: Exposure of alpha particles to specially designed detectors placed in Martian soils. The Earth, nuclear reactions are used to supply some form of electrical power for an exploration.

Nuclear Reactors: Nuclear reactions on the fission of ${}^{235}\text{U}$ or ${}^{239}\text{Pu}$ nuclei to produce electric power. Reactors will have other nuclear applications: generate radioactive waste, depend of the way to a subject of current research.

Smoke Detectors: Many smoke detectors use a small amount of the alpha emitter ${}^{241}\text{Am}$ to ionize the air. Smoke entering the detector reduces the current and sets off the alarm.

Nuclear Medicine: Radioactive isotopes such as ${}^{99m}\text{Tc}$, ${}^{131}\text{I}$, and ${}^{18}\text{F}$ are commonly used in the diagnosis and treatment of illness. Nuclear medicine uses a ${}^{99m}\text{Tc}$ is used in Technetium Scintigraphy (Tc-99m) to produce images of bone density.

Magnetic Resonance Imaging: Magnetic Resonance Imaging (MRI) utilizes an external magnetic field to excite protons in the body. The protons then emit signals that are used to produce detailed images of the human body.

www.CPEPweb.org

核種の数

安定核種 約300種

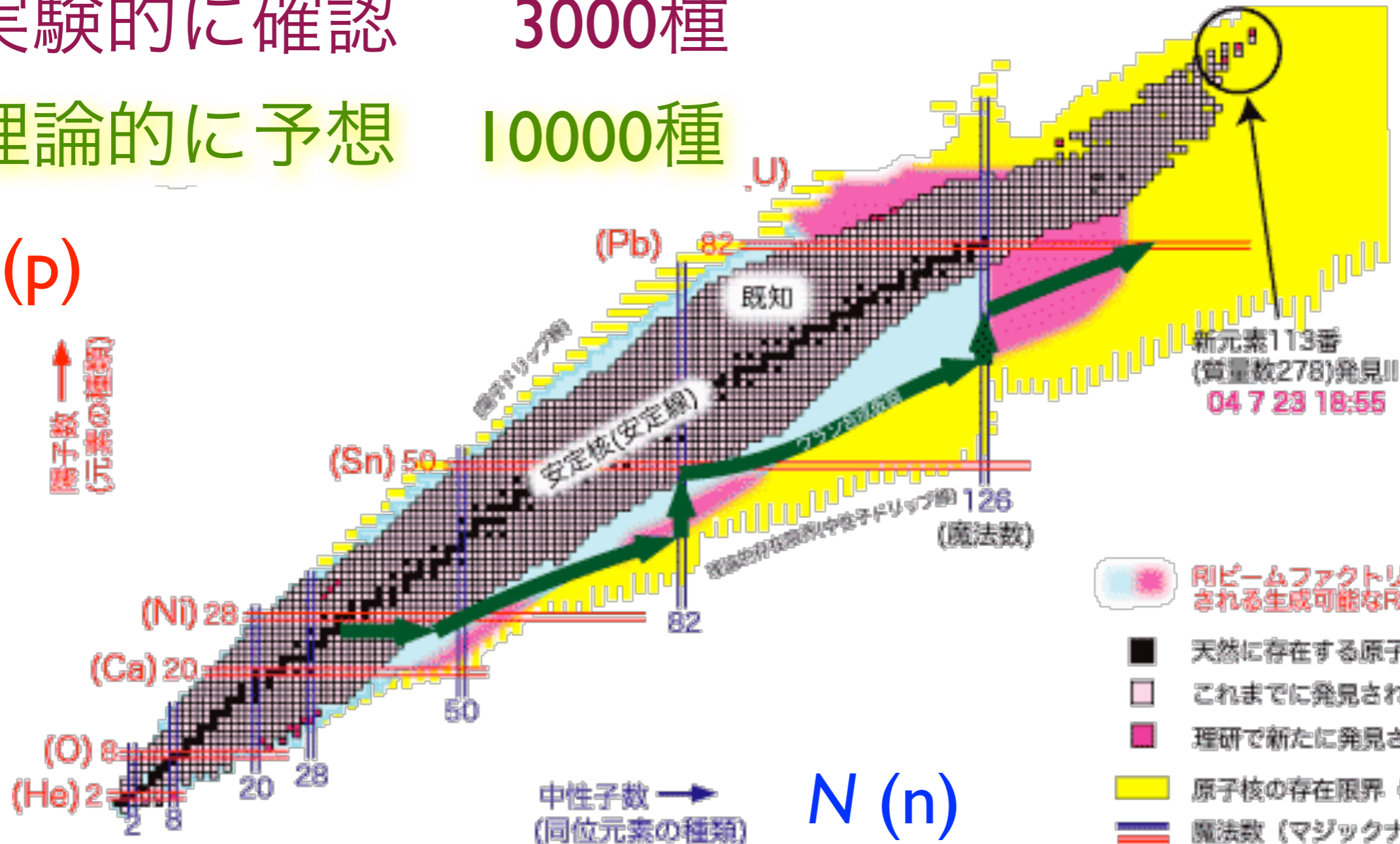
実験的に確認 3000種

理論的に予想 10000種

原子核物理学

Nuclear Physics

Z (p)

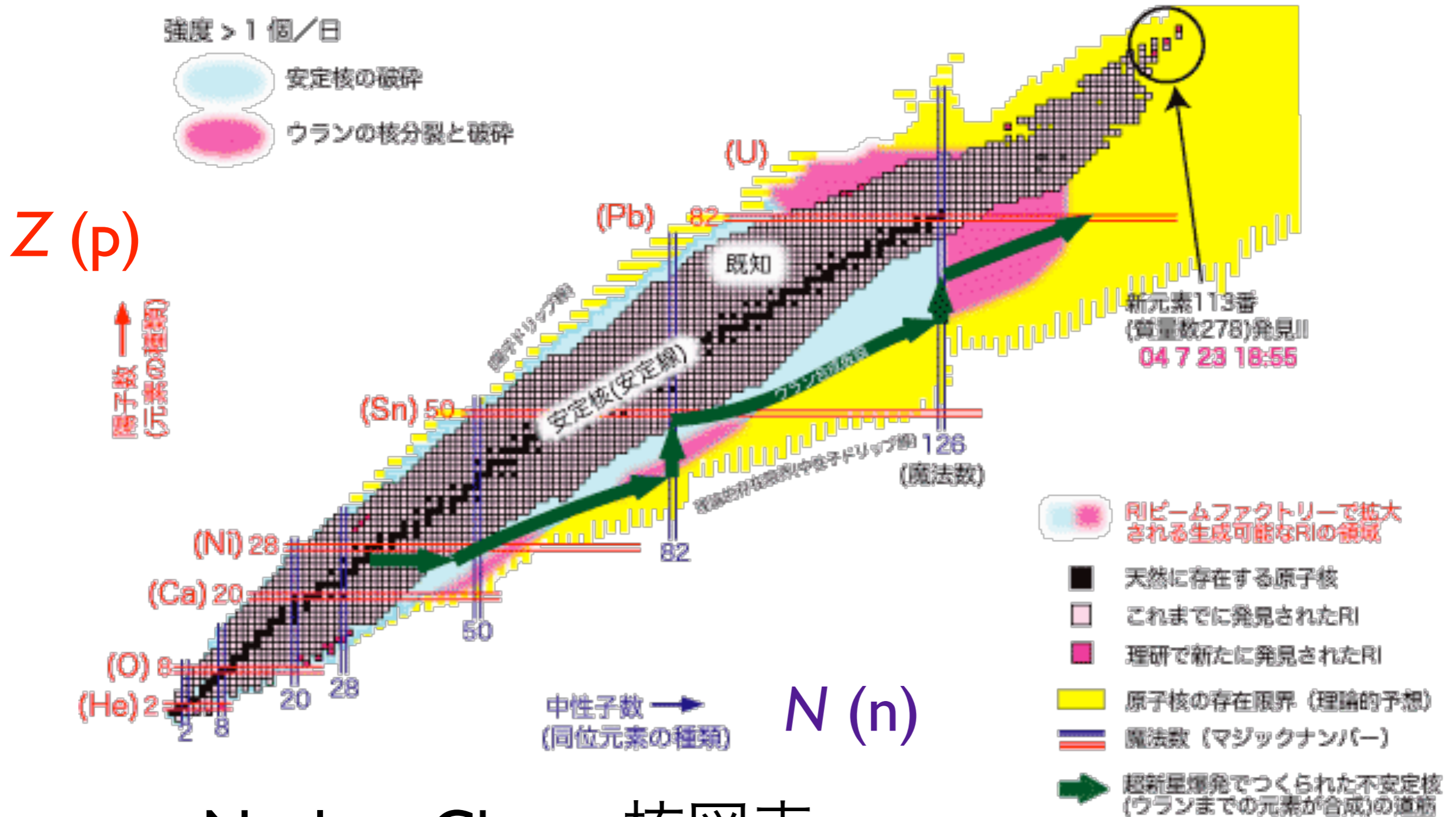


新元素113番
(質量数278)発見!!
04 7 23 18:55

Nuclear Chart 核図表



RIKEN



Nuclear Chart 核図表

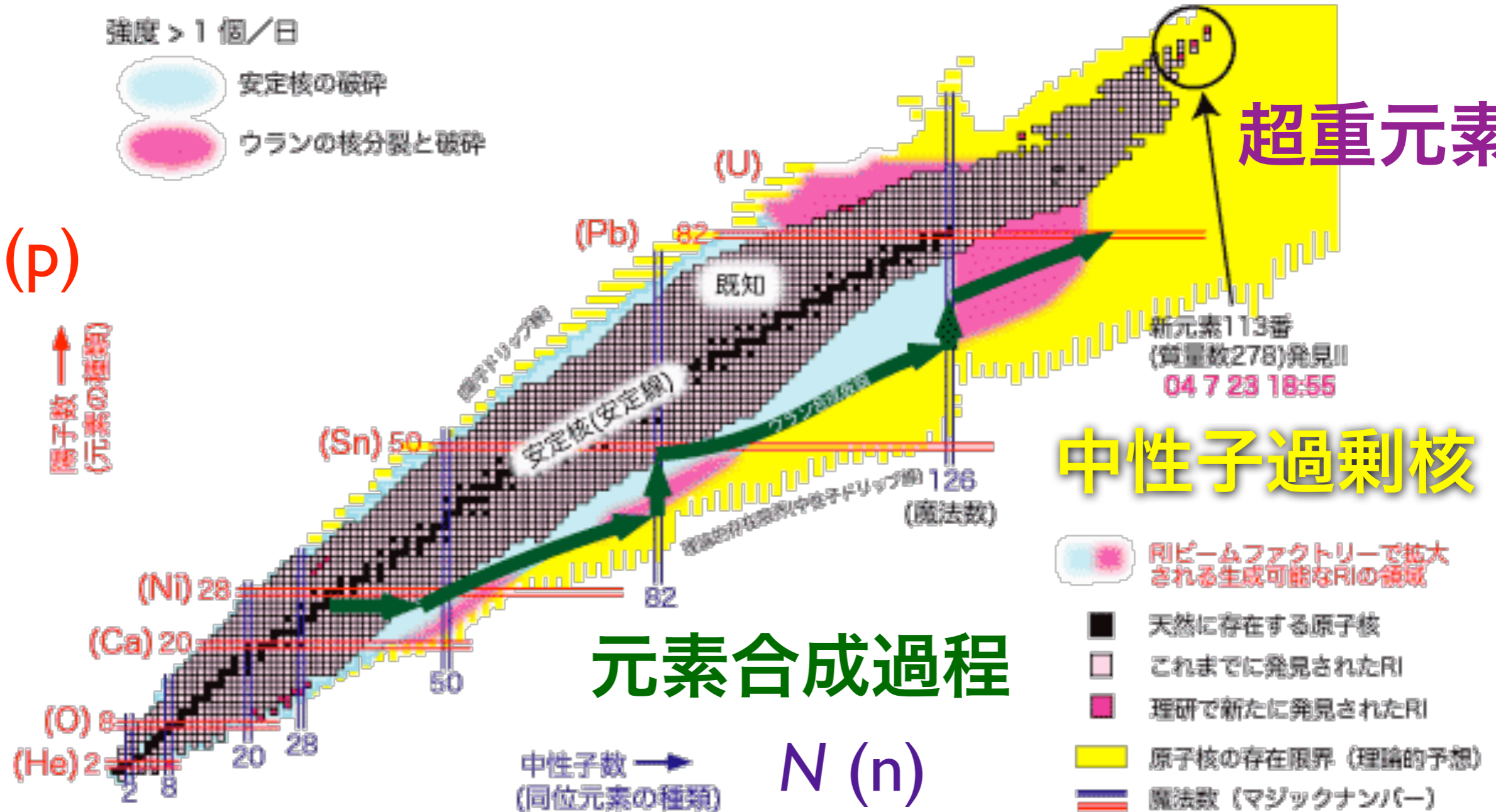


RIKEN

強度 > 1 個/日
 安定核の破砕
 ウランの核分裂と破砕

Z (p)

↑ 原子種 (元素の種類)

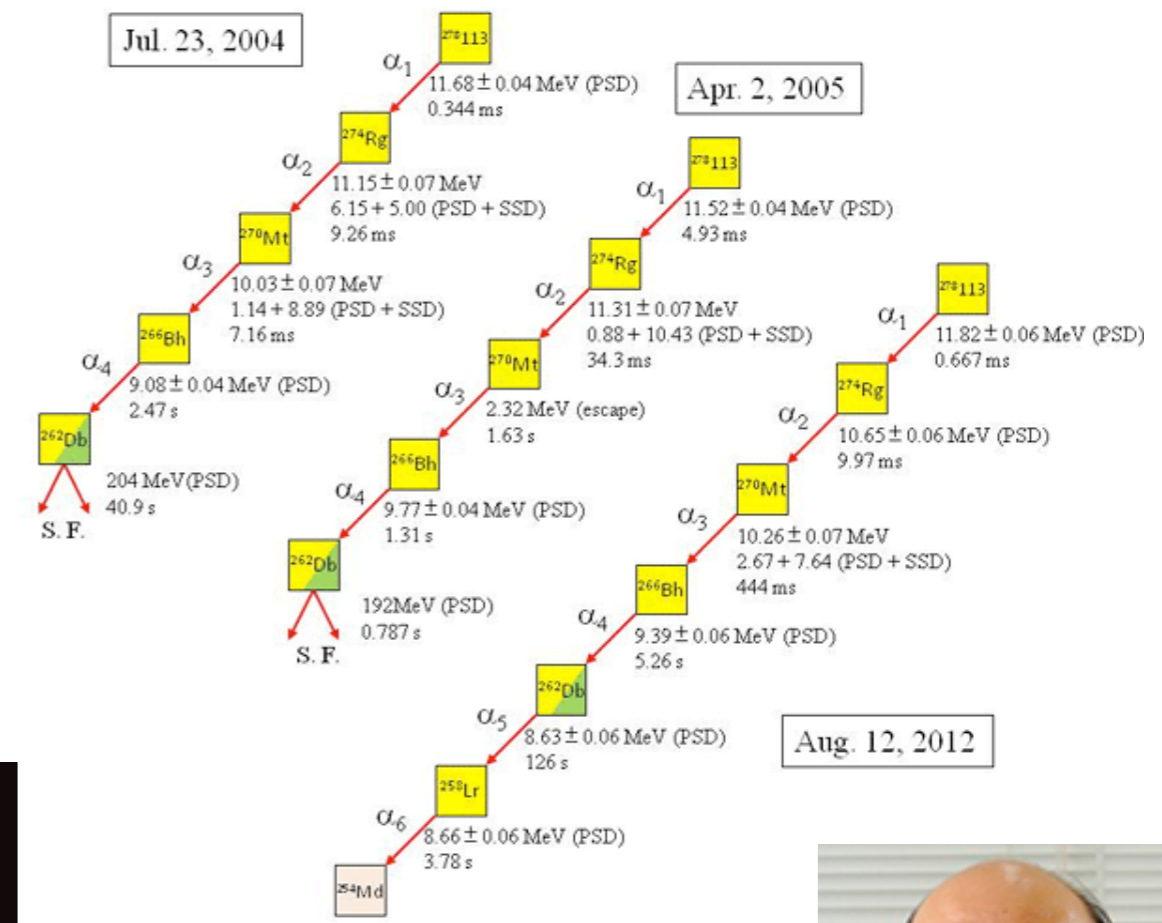
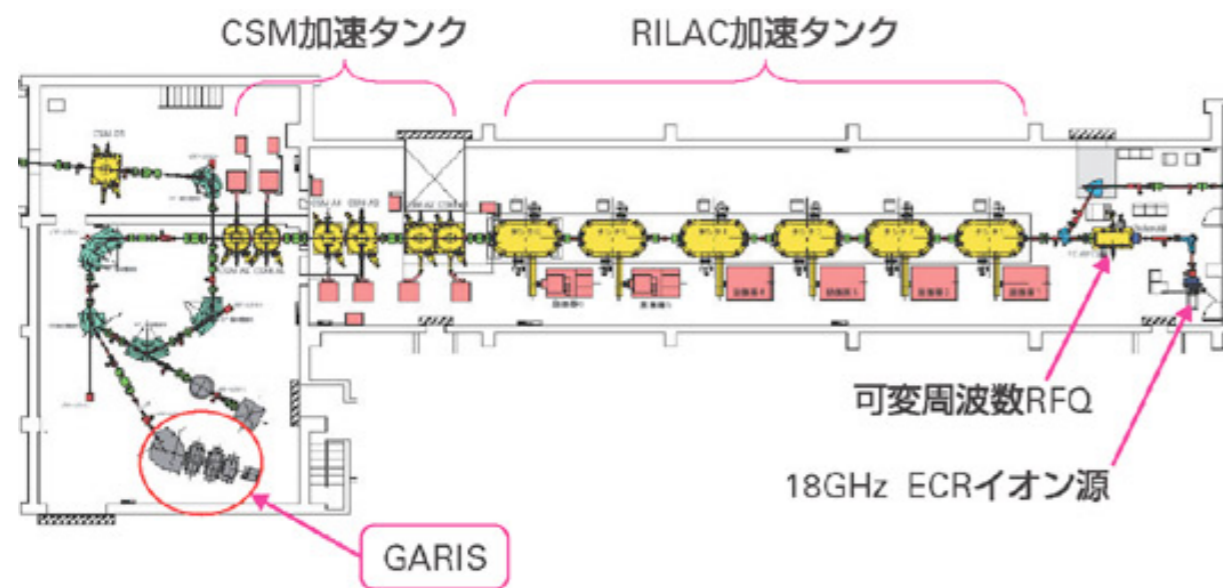


- RIビームファクトリーで拡大される生成可能なRIの領域
- 天然に存在する原子核
- これまでに発見されたRI
- 理研で新たに発見されたRI
- 原子核の存在限界 (理論的予想)
- 魔法数 (マジックナンバー)
- 超新星爆発でつくられた不安定核 (ウランまでの元素が合成)の道筋

Nuclear Chart 核図表

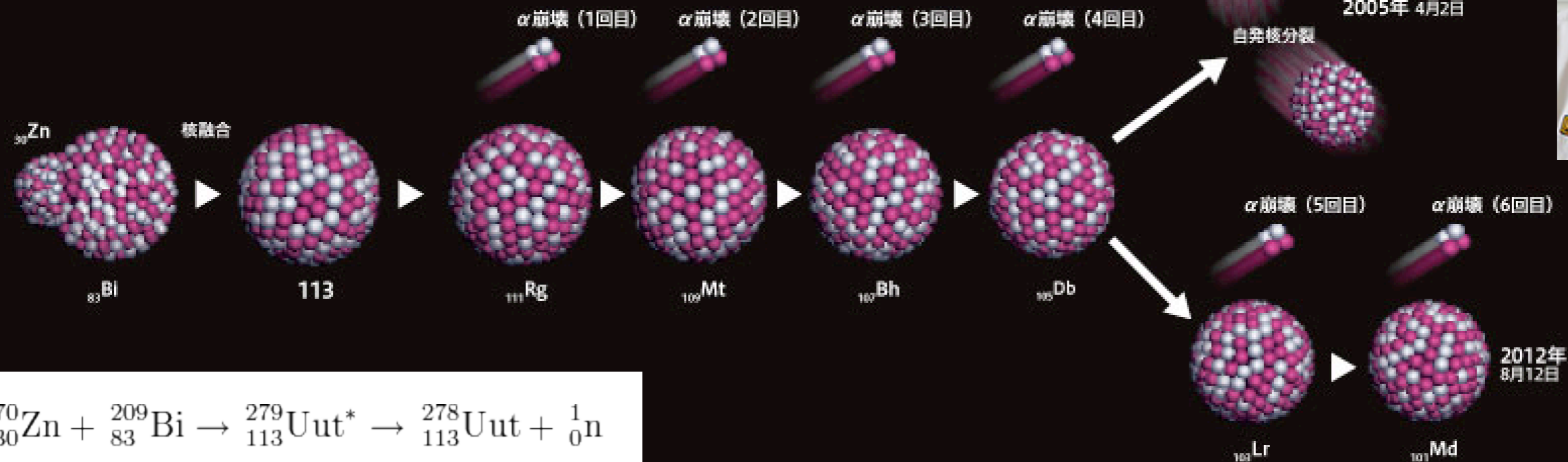
超重元素 $_{113}\text{Uut}$ (ジャポニウム Jp ?) 生成

2004, 05, 12年、理研 森田浩介氏ら



$^{278}_{113}\text{Uut}$ の合成と崩壊の様子

原子番号30の亜鉛 (^{70}Zn) と原子番号83のビスマス (^{209}Bi) が核融合を起こし、原子番号113の $^{279}\text{Uut}^*$ が合成された。2004年と2005年に合成した113番元素 (^{278}Uut) は、4回の α 崩壊を繰り返し、原子番号105のドブニウム (^{262}Db) は自発核分裂を起こして2個の原子核となった。2012年に合成した ^{278}Uut は、 ^{262}Db からさらに2回の α 崩壊を繰り返し、原子番号103のローレンシウム (^{258}Lr)、原子番号101のメンデレビウム (^{254}Md) となった。3個の ^{278}Uut の崩壊の様子から、113番元素の平均寿命は2ミリ秒であることが分かった。



113 Uut (ジャポニウム Jp ??) 生成 2004年 理研 森田浩介氏ら

周期表

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H 1.0079	Atomic Sym Mass																2 He 4.0026
2	3 Li 6.941	4 Be 9.0121	C 固体 Hg 液体 H 気体										5 B 10.811	6 C 12.010	7 N 14.006	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne
3	11 Na 22.989	12 Mg 24.305	Rf Unknown										13 Al 26.981	14 Si 28.085	15 P 30.973	16 S 32.065	17 Cl	18 Ar
4	19 K 39.098	20 Ca 40.078	21 Sc 44.955	22 Ti 47.867	23 V 50.941	24 Cr 51.996	金属					31 Ga 69.723	32 Ge 72.64	33 As 74.921	34 Se 78.96	35 Br	36 Kr	
5	37 Rb 85.467	38 Sr 87.62	39 Y 88.905	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.96	アルカリ金属					49 In 114.81	50 Sn 118.71	51 Sb 121.76	52 Te 127.60	53 I	54 Xe	
6	55 Cs 132.90	56 Ba 137.32	57-71	72 Hf 178.49	73 Ta 180.94	74 W 183.84	75 Re 186.20	アルカリ土類金属					81 Tl 204.38	82 Pb 207.2	83 Bi 208.98	84 Po (208.9)	85 At	86 Rn
7	87 Fr (223)	88 Ra (226)	89-103	104 Rf (261)	105 Db (262)	106 Sg (266)	107 Bh (264)	108 Hs (277)	109 Mt (268)	110 Ds (271)	111 Rg (272)	112 Cn (285)	113 Uut (284)	114 Uuq (289)	115 Uup (288)	116 Uuh (292)	117 Uus (292)	118 Uuo (294)

113 Jp ??
Japonium ??

116 Lv
Livermorium

114 Fl
Flerovium

超重元素
For elements with no stable isotopes, the mass number of the isotope is in parentheses.

周期表 Design and Interface Copyright © 1997 Michael Dayah. <http://www.ptable.com>

57 La 138.90	58 Ce 140.11	59 Pr 140.90	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.36	63 Eu 151.96	64 Gd 157.25	65 Tb 158.92	66 Dy 162.50	67 Ho 164.93	
89 Ac (227)	90 Th 232.03	91 Pa 231.03	92 U 238.02	93 Np (237)	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)

米口の共同研究

ロシア合同原子核研究所の原子核反応研究室創設者 Georgy Flërov
米国 Lawrence-Livermore 国立研究所

放射性元素の命名 (赤字は加速器・緑字は原子炉・青字は水爆で生成したものの)

性質 : $_{43}\text{Tc}$, $_{85}\text{At}$, $_{88}\text{Ra}$, $_{89}\text{Ac}$, $_{91}\text{Pa}$

神話 : $_{61}\text{Pm}$, $_{90}\text{Th}$, $_{92}\text{U}$, $_{93}\text{Np}$, $_{94}\text{Pu}$

発見地や発見者の国名 :

$_{84}\text{Po}$, $_{87}\text{Fr}$, $_{95}\text{Am}$, $_{97}\text{Bk}$, $_{98}\text{Cf}$, $_{105}\text{Db}$, $_{108}\text{Hs}$, $_{110}\text{Ds}$

偉大な科学者名 (発見者でない) : $_{96}\text{Cm}$, $_{99}\text{Es}$, $_{100}\text{Fm}$, $_{101}\text{Md}$,
 $_{102}\text{No}$, $_{103}\text{Lr}$, $_{104}\text{Rf}$, $_{106}\text{Sg}$, $_{107}\text{Bh}$, $_{109}\text{Mt}$, $_{111}\text{Rg}$, $_{112}\text{Cn}$

発見した加速器施設

米国 California大 Berkeley校ほか、シーボーグら :

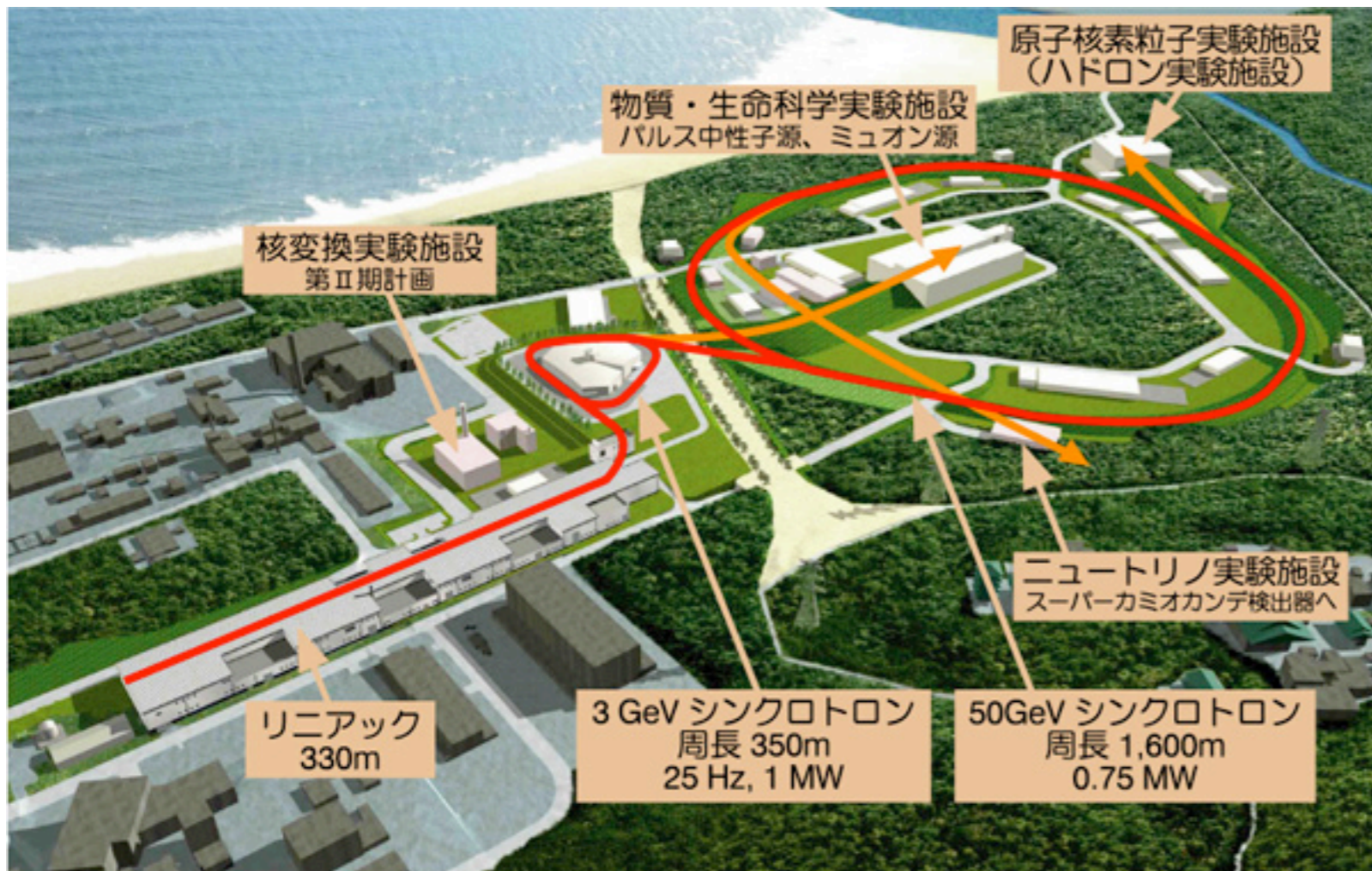
$_{93}\text{Np}$, $_{94}\text{Pu}$, $_{95}\text{Am}$, $_{96}\text{Cm}$, $_{97}\text{Bk}$, $_{98}\text{Cf}$, $_{99}\text{Es}$, $_{100}\text{Fm}$, $_{101}\text{Md}$, $_{102}$, $_{103}\text{Lr}$, $_{104}$, $_{105}$, $_{106}$

ロシア合同原子核研究所 (Дубна = Dubna): $_{102}$, $_{104}$, $_{105}\text{Db}$, $_{106}$, $_{107}$, $_{113}$ – $_{118}$

ドイツ重イオン研究所 GSI (Darmstadt) : $_{107}$, $_{108}\text{Hs}$, $_{109}$, $_{110}\text{Ds}$, $_{111}$, $_{112}$

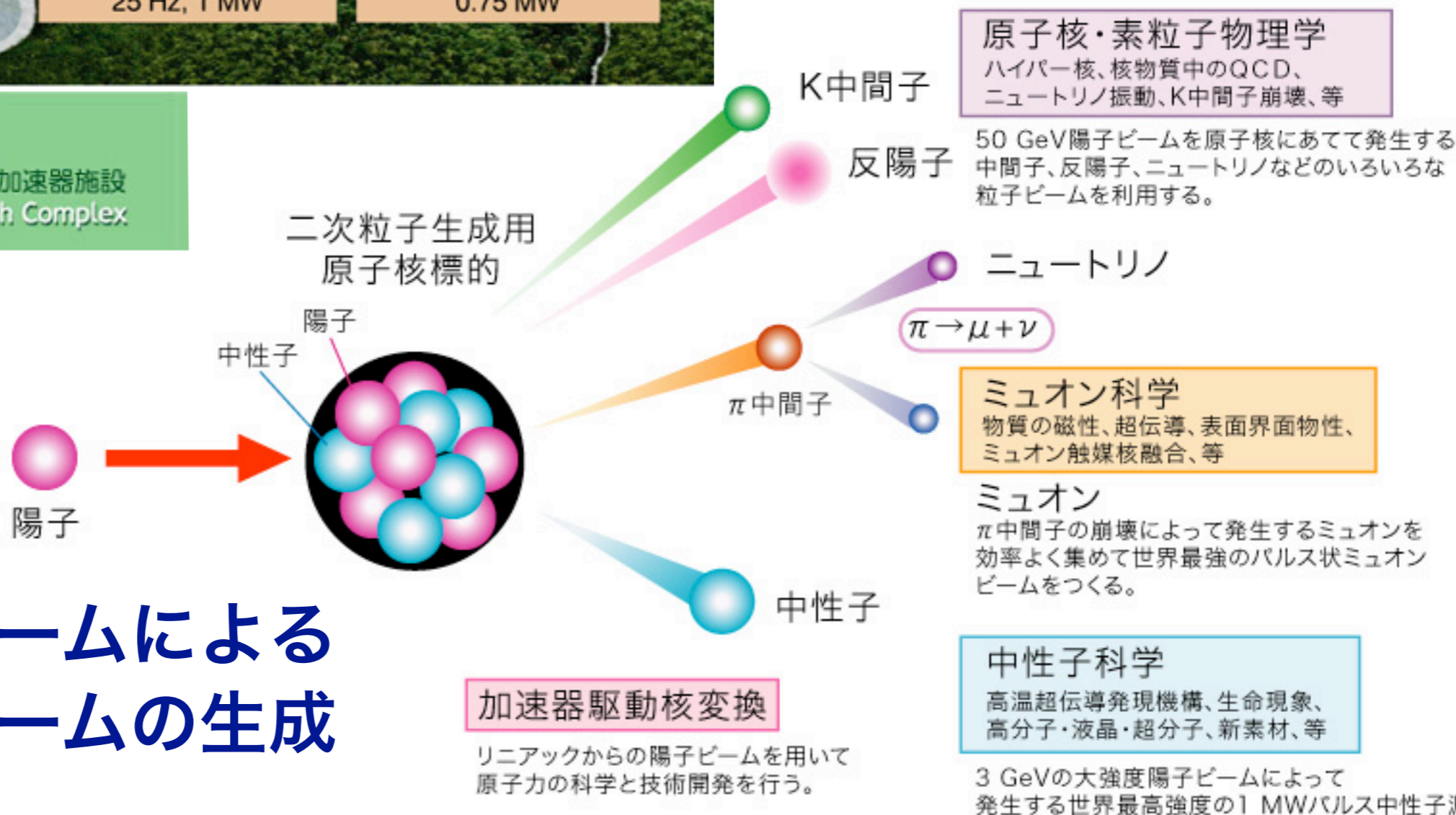
核変換処理は可能か

- **放射性物質の除染**とは、放射性物質を洗い流して移動させること。
- 放射性物質（核種）を減らすことは化学反応ではできないので、**物理学的半減期**を待たなくてはならない。
- **放射性核種を核変換**して非放射性核種に変えることは可能か。
 - 👉 多種多様な核種に対し、うまく非放射性核種に変えるように選択的に反応を起こさせるのは困難。
- 核燃料については、放射性核種を**群分離**し、**原子炉**や**加速器**で**中性子**や**陽子**などを照射して**核分裂**や**核破砕反応**を起こし、安定核種や短寿命核種に変えることを研究中（**分離変換技術**）。
- 環境中の放射性物質を原子炉や加速器施設に運んで**原子核反応**を起こさせるのはまず不可能。（原理的にもコスト的にも）
 - しかも、圧倒的多数の非放射性核種を**放射化**させてしまう。



独立行政法人 日本原子力研究開発機構
Japan Atomic Energy Agency

J-PARC 大強度陽子加速器施設
Japan Proton Accelerator Research Complex



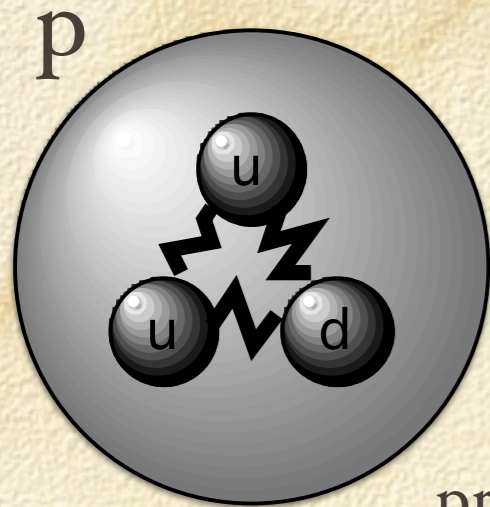
大強度陽子ビームによる 多様な粒子ビームの生成

Hadron

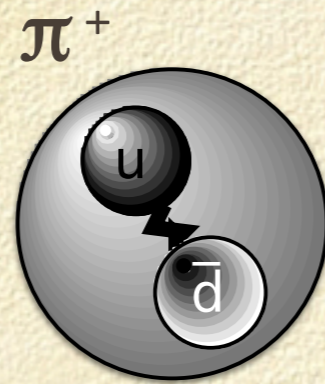
Lepton

Baryon

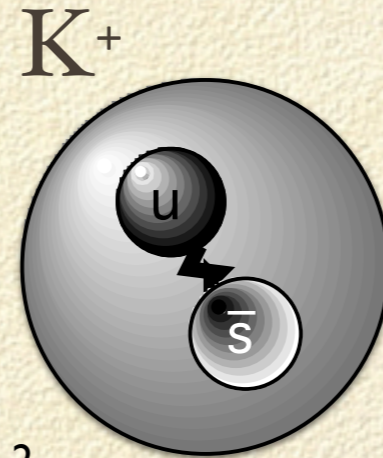
Meson



n
陽子
proton



135
MeV/c²
パイ中間子
pion



K 中間子
kaon



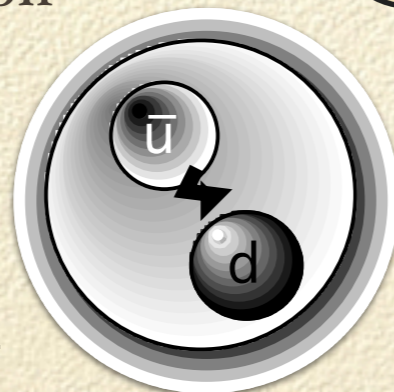
ミュー粒子
muon



陽電子 positron



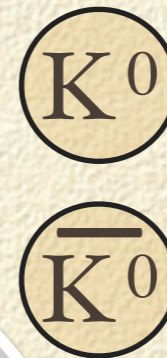
反陽子
antiproton
 \bar{n}
940
MeV/c²



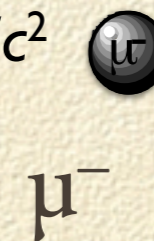
140 MeV/c²



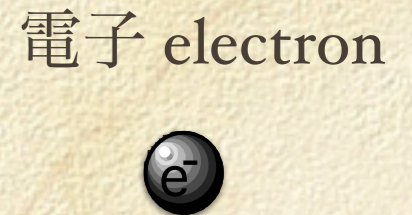
494 MeV/c²



498
MeV/c²



106 MeV/c²



電子 electron

938 MeV/c²

$\tau = \infty$

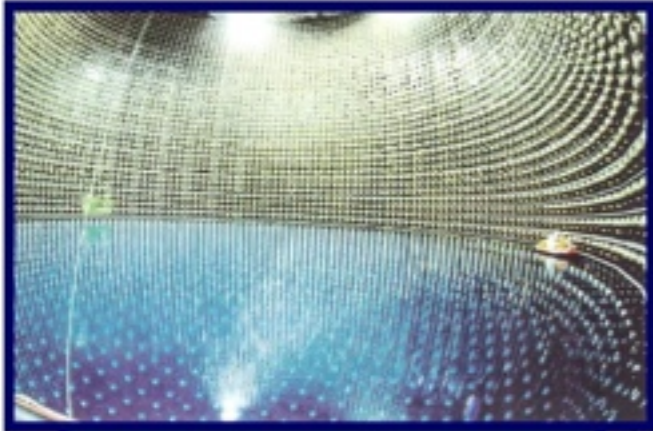
$\tau = 26$ ns

$\tau = 12$ ns

$\tau = 2.2$ μ s

$\tau = \infty$

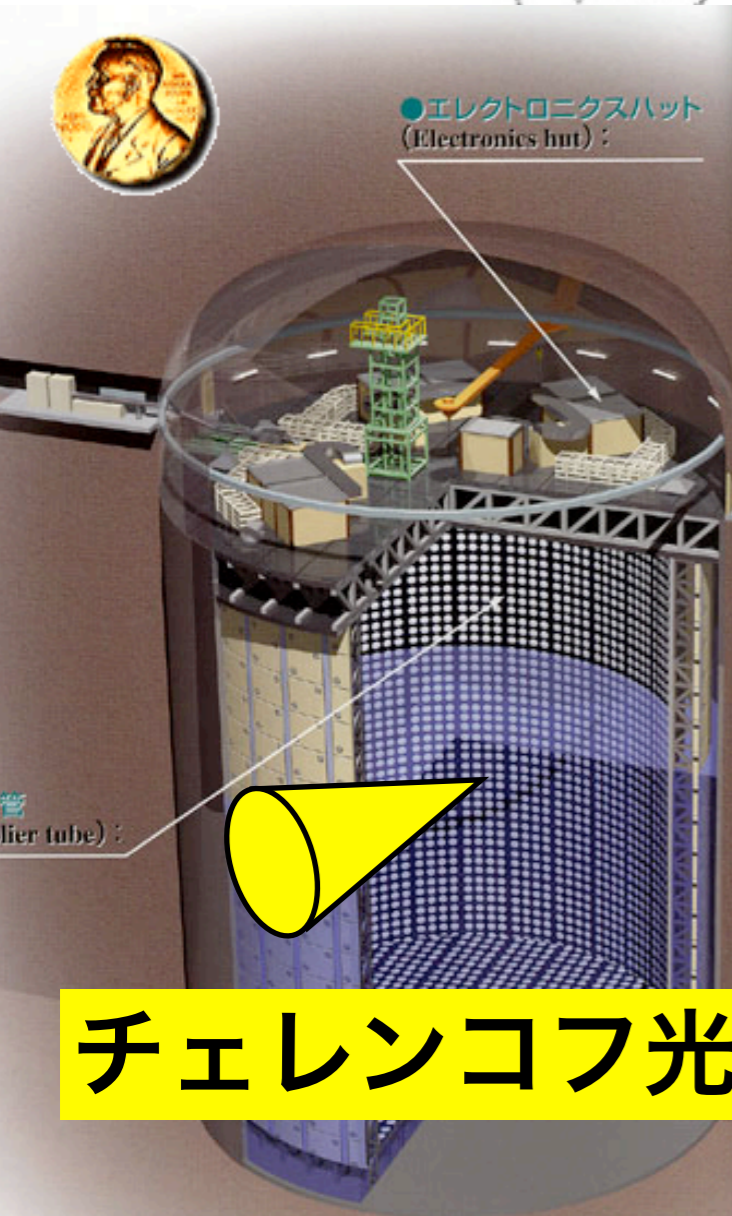
Super-Kamiokande



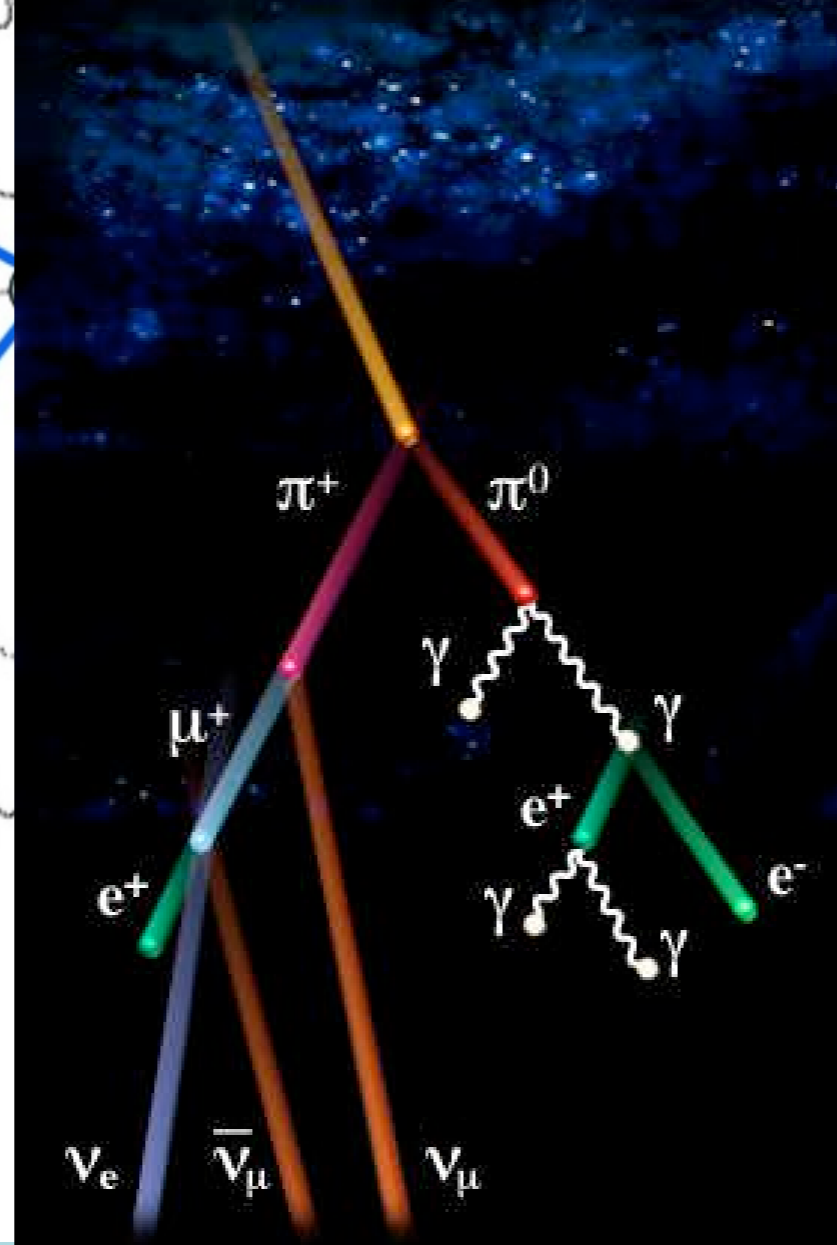
スーパー
カミオカンデ



●エレクトロニクスハット
(Electronics hut):



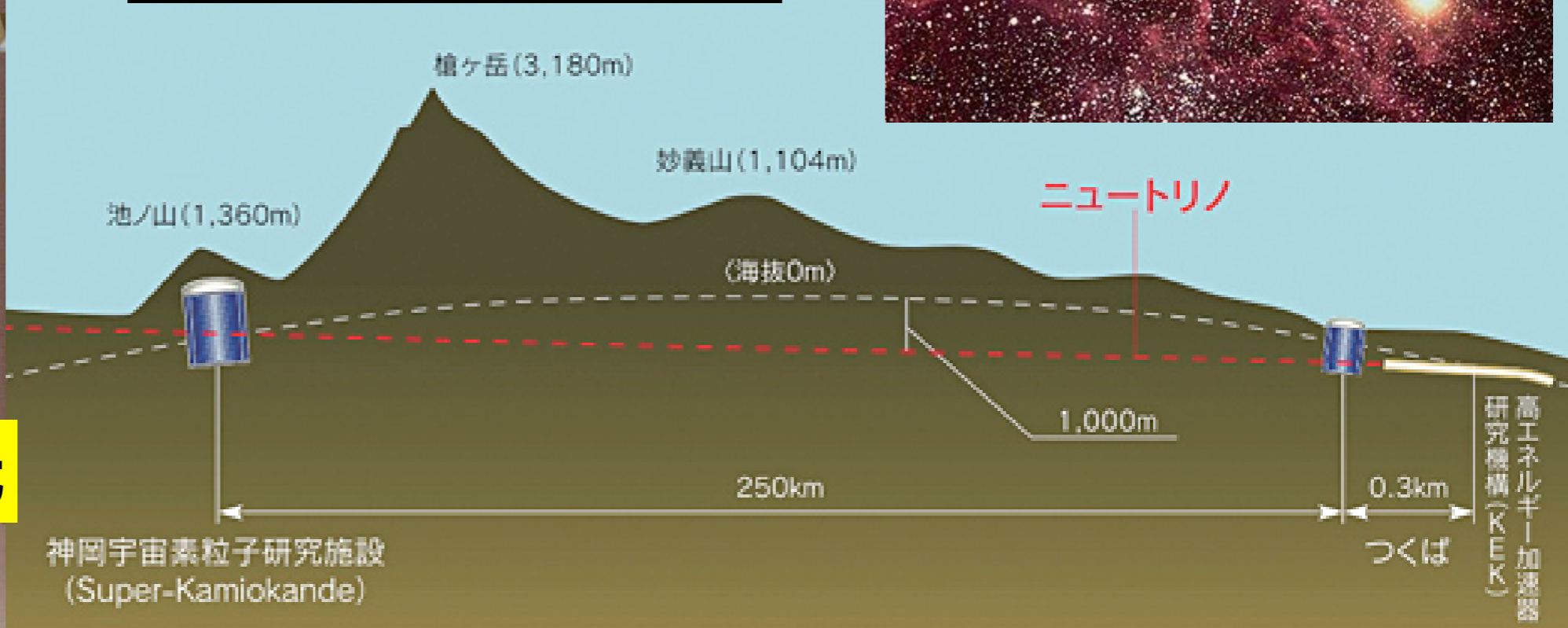
チェレンコフ光



Neutrino beam



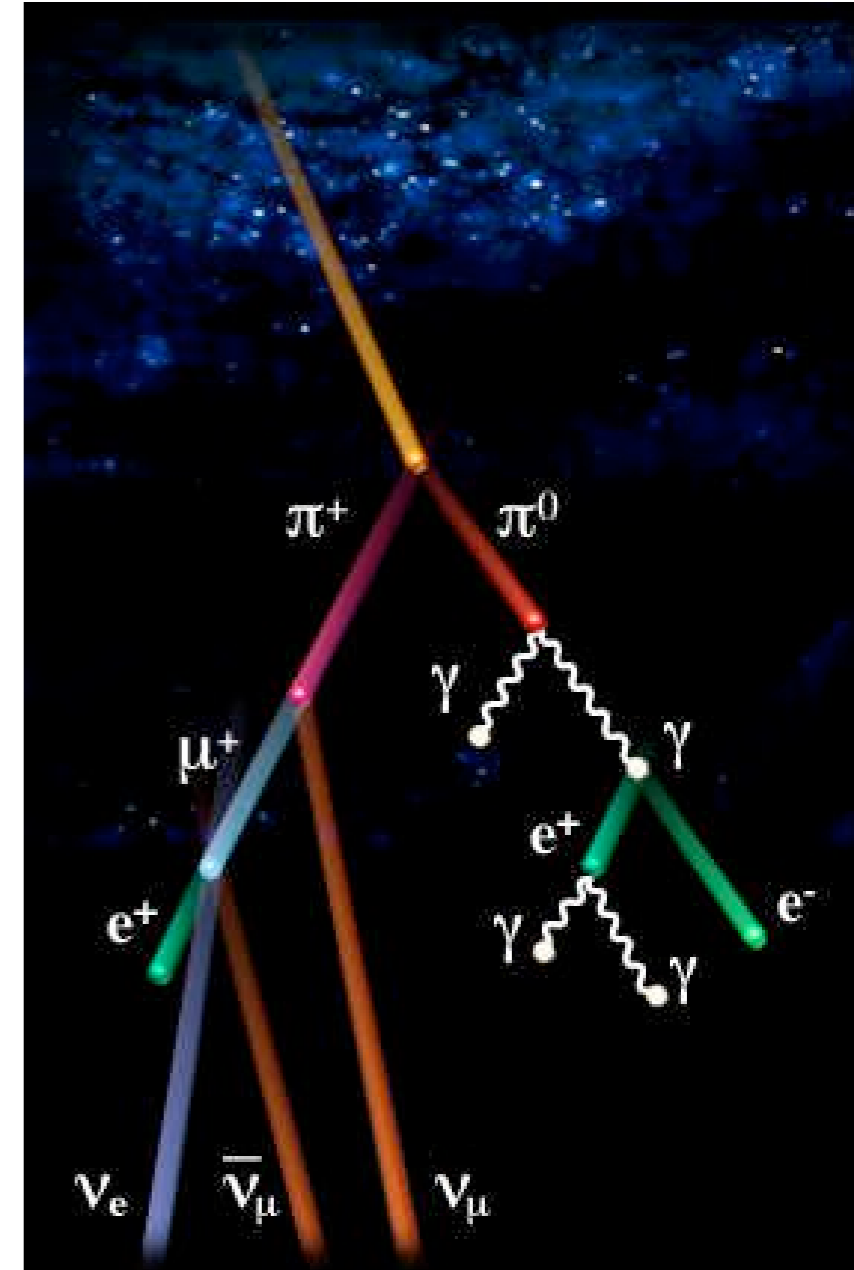
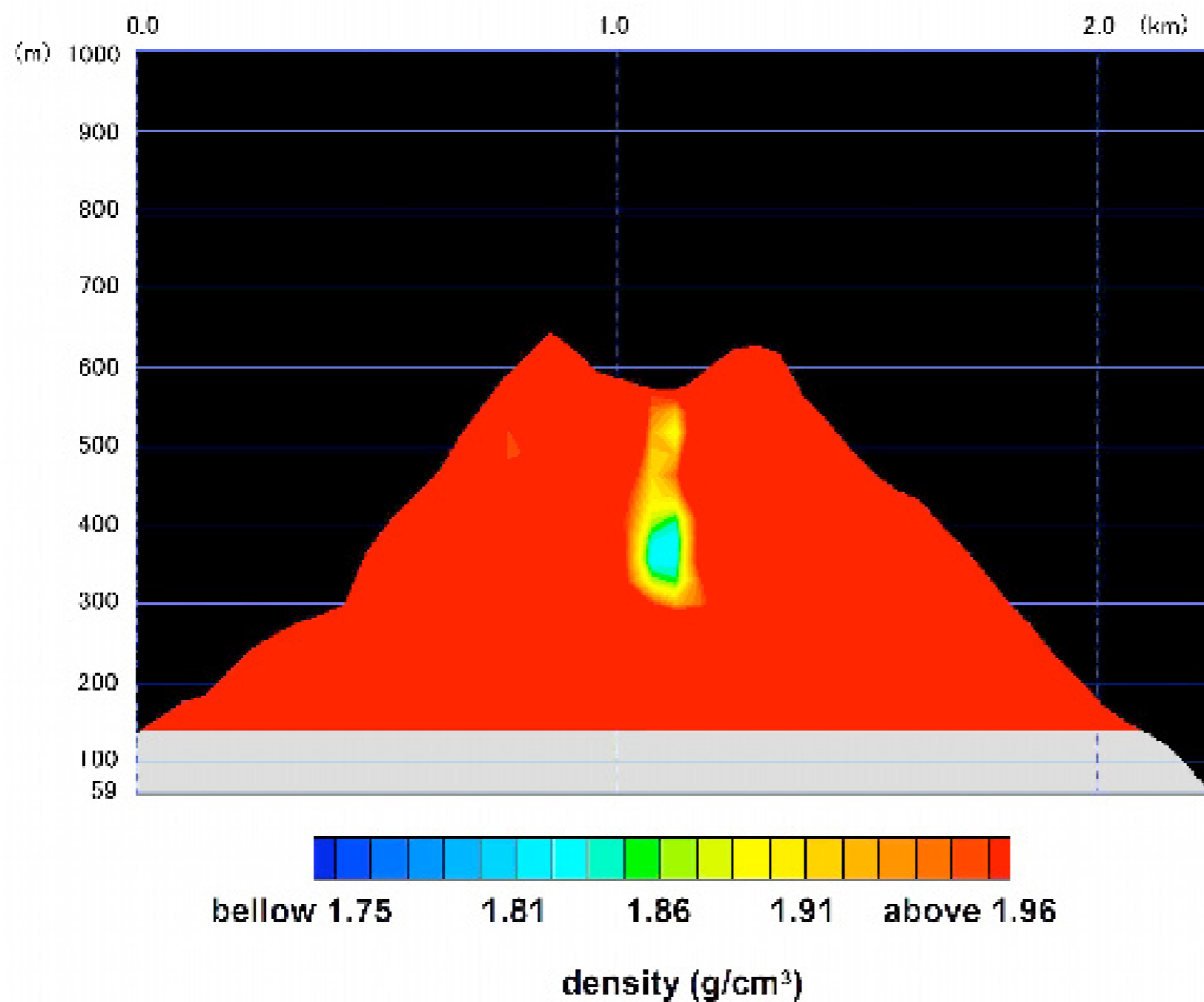
大強度陽子加速器
ニュートリノビーム



神岡宇宙素粒子研究施設
(Super-Kamiokande)

高エネルギー加速器
研究機構(KEK)

宇宙線（ミュオン）で火山を覗く

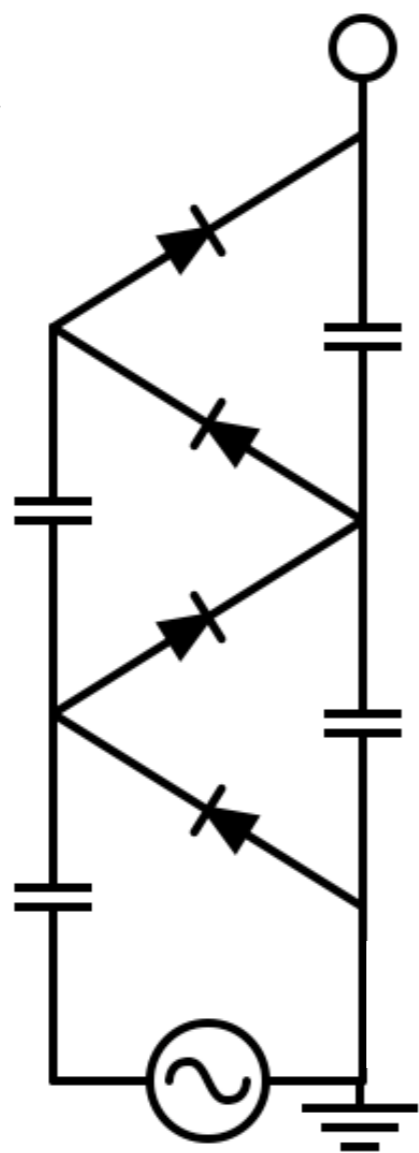


加速器科学

高電圧発生装置

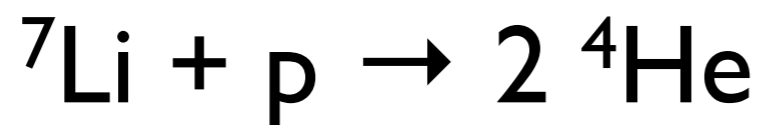
コッククロフト・ワルトン型
Cockcroft-Walton

upto 4 MV



静電加速器

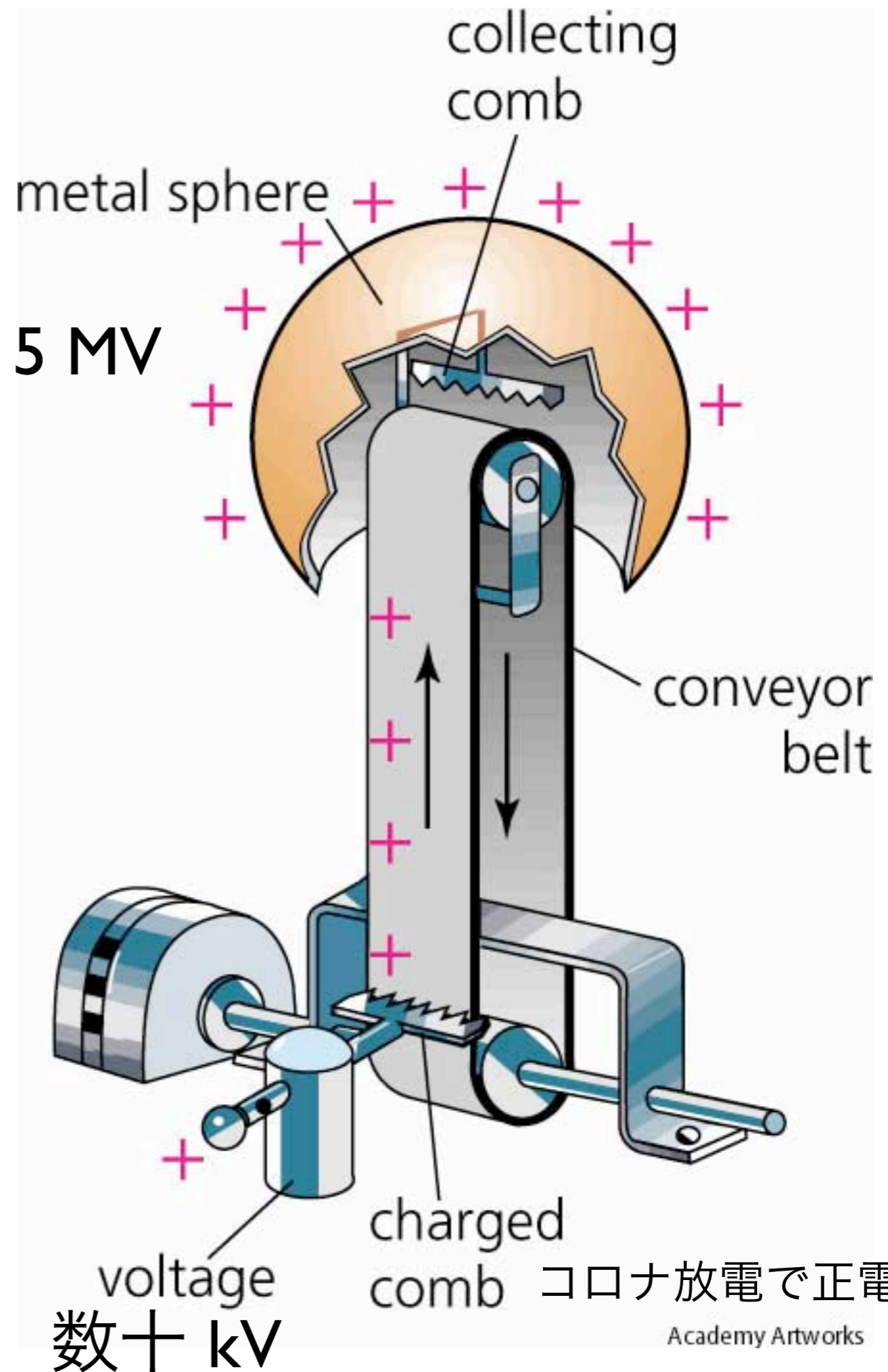
600 keV p



高電圧発生装置

ヴァンデグラフ型
Van de Graaf

upto 5 MV

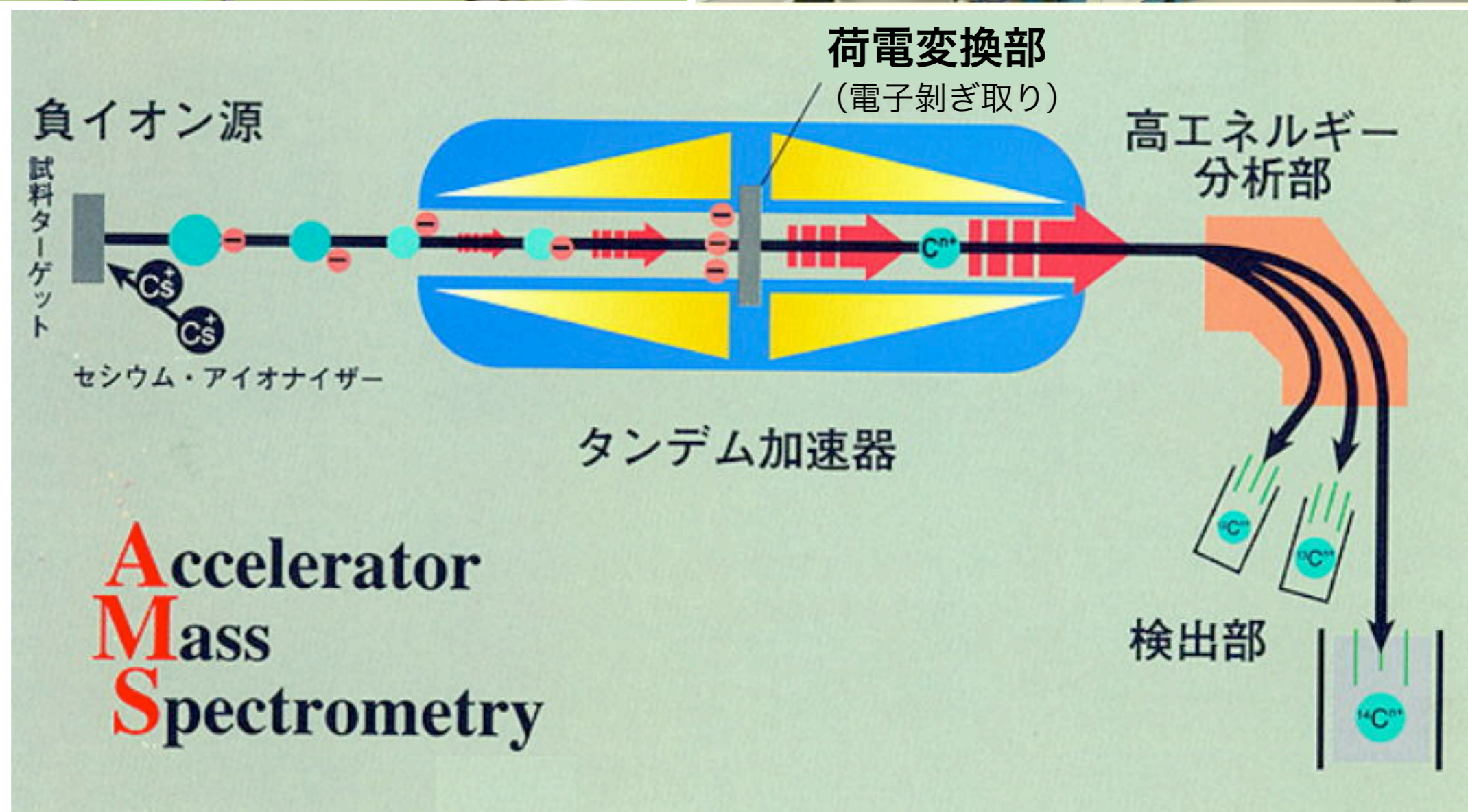


静電加速器 $F = qE$

⇒ タンデム加速器
Tandem accelerator

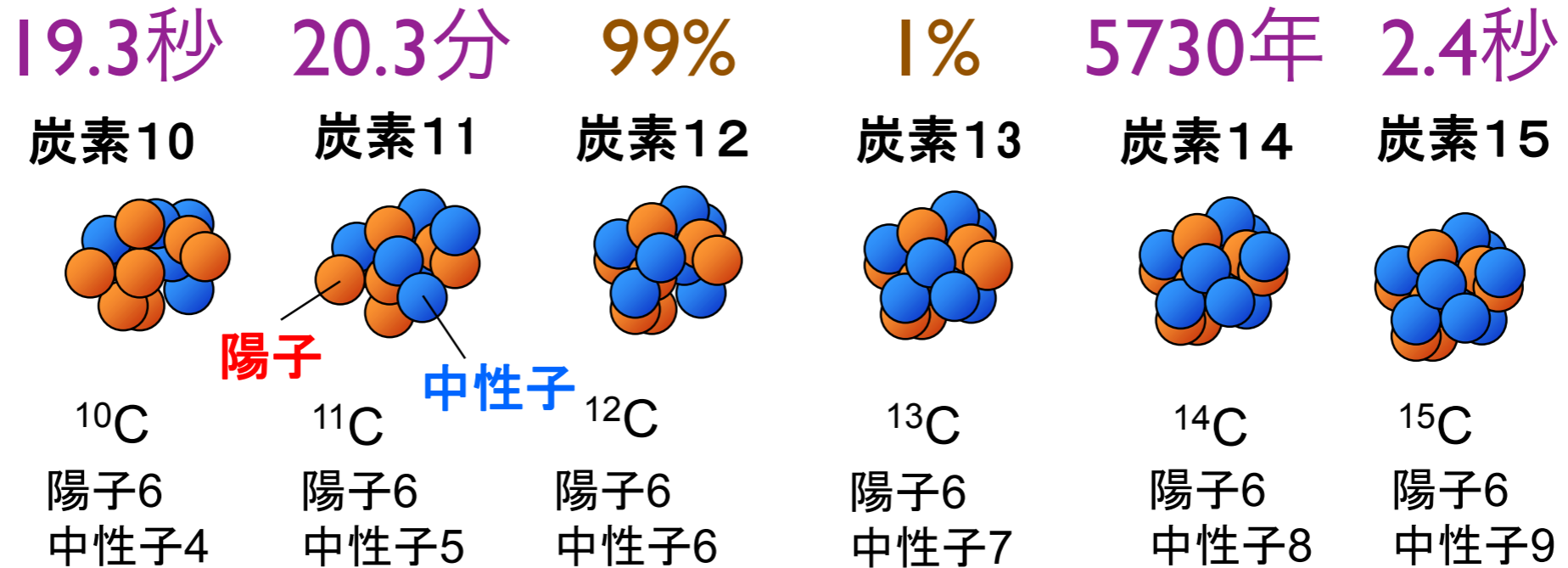
加速器質量分析

AMS (Accelerator Mass Spectrometry)



同位体(原子番号(=陽子数)は同じで中性子数が異なる**原子核**)

同位体間では化学的性質は同じ



陽子過剰になると？

(寿命がある： β^+ 壊変、電子捕獲(EC))

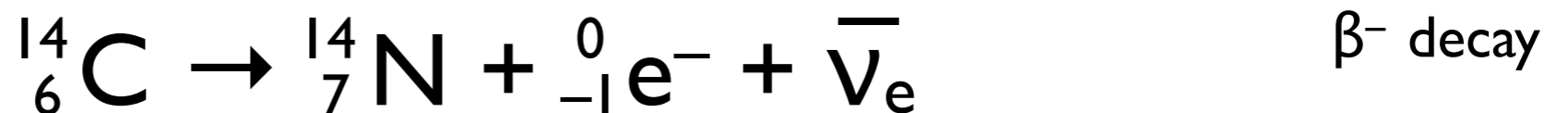
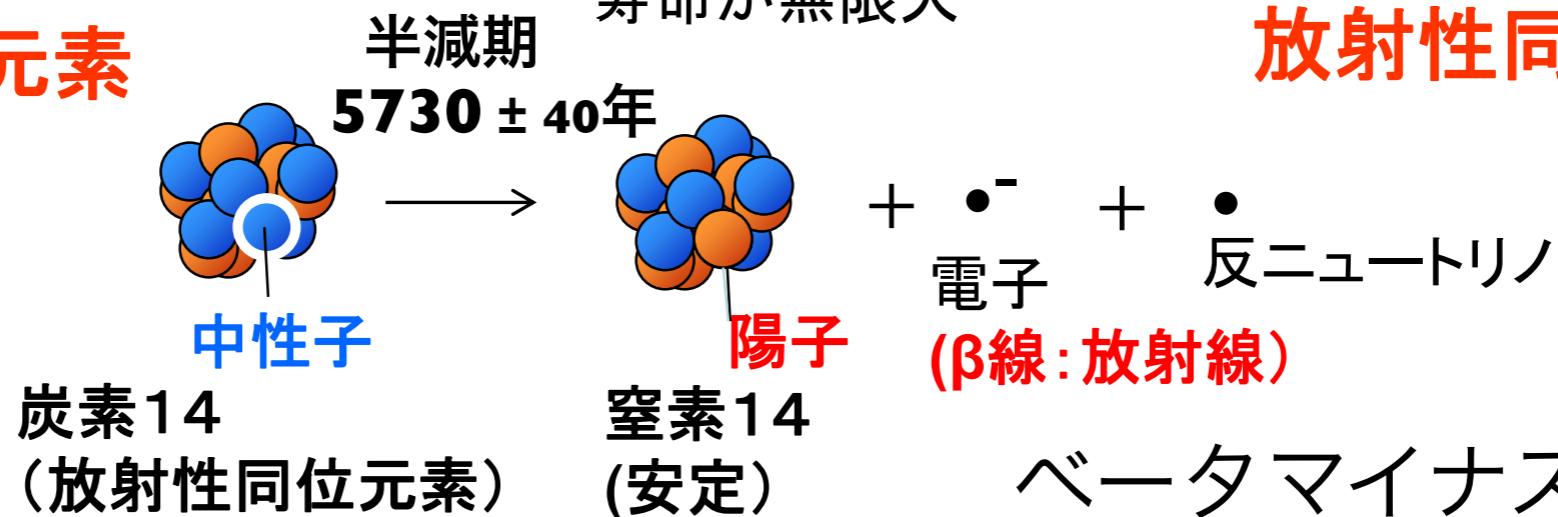
天然に存在=**安定同位体**
寿命が無限大

中性子過剰になると？

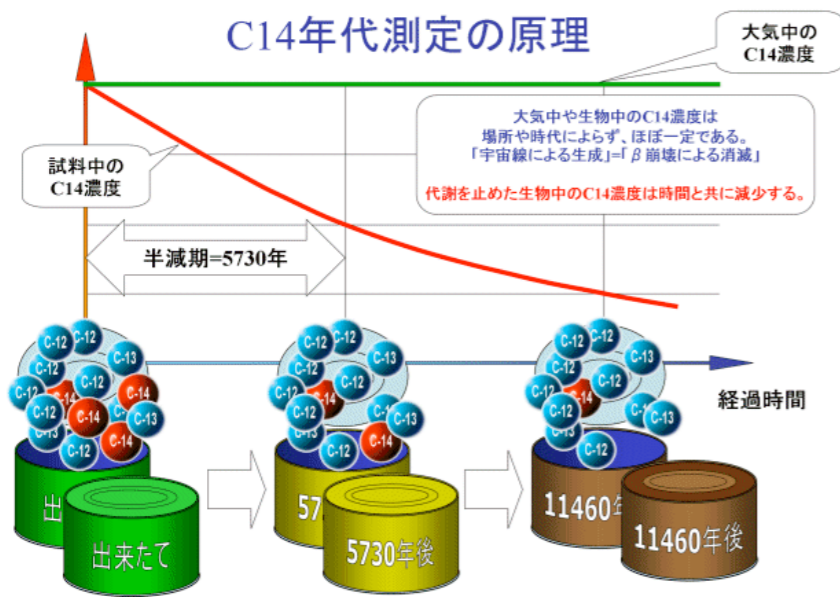
(寿命がある： β^- 壊変)

放射性同位元素

放射性同位元素



放射線年代測定



C14の濃度を測れば「代謝を止めてからの時間」が判る！

測定方法		100年 1000年 1万年 10万年 100万年 1000万年 1億年 10億年	主要対象
放射性同位元素を使う方法	炭素14年代測定法	0 - 50,000	動植物・貝殻・水など
	カリウム・アルゴン法	10,000 - 100,000	鉱物
	ウラン・鉛法	100,000 - 10,000,000	鉱物
	ルビウム・ストロンチウム法	100,000 - 10,000,000	鉱物
	フィッション・トラック法	100 - 100,000	鉱物・天然ガラス
放射線の照射量を測定する方法	熱ルミネッセンス法	100 - 100,000	鉱物・天然ガラス
	光ルミネッセンス法	100 - 100,000	鉱物
	電子スピン共鳴法	100 - 100,000	鉱物・貝殻・サンゴなど
放射線を使わないその他の方法	ラセミ化法	100 - 100,000	貝殻・甲羅・重炭酸塩
	黒曜石水和層法	100 - 100,000	天然ガラス
	考古(古)地磁気法	100 - 100,000	岩石・磁性鉱物
	火山灰層序法	100 - 100,000	火山灰
	年輪年代法	100 - 100,000	樹木
	氷縞粘土法	100 - 100,000	湖底堆積物(粘土)

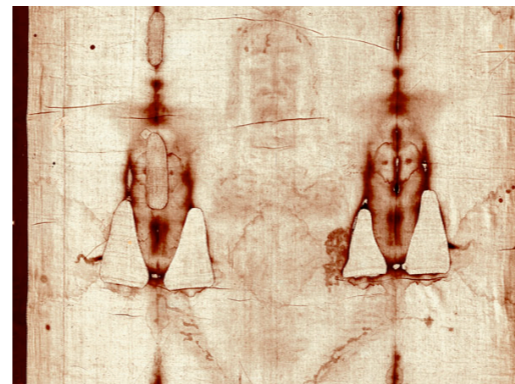
<<図 2-1>> 主な年代測定法による測定可能な年代の範囲

出典:ATOMICA他より作成

- ^{14}C , ^{40}K -Ar, U-Pb, Rb-Sr

- 弥生時代

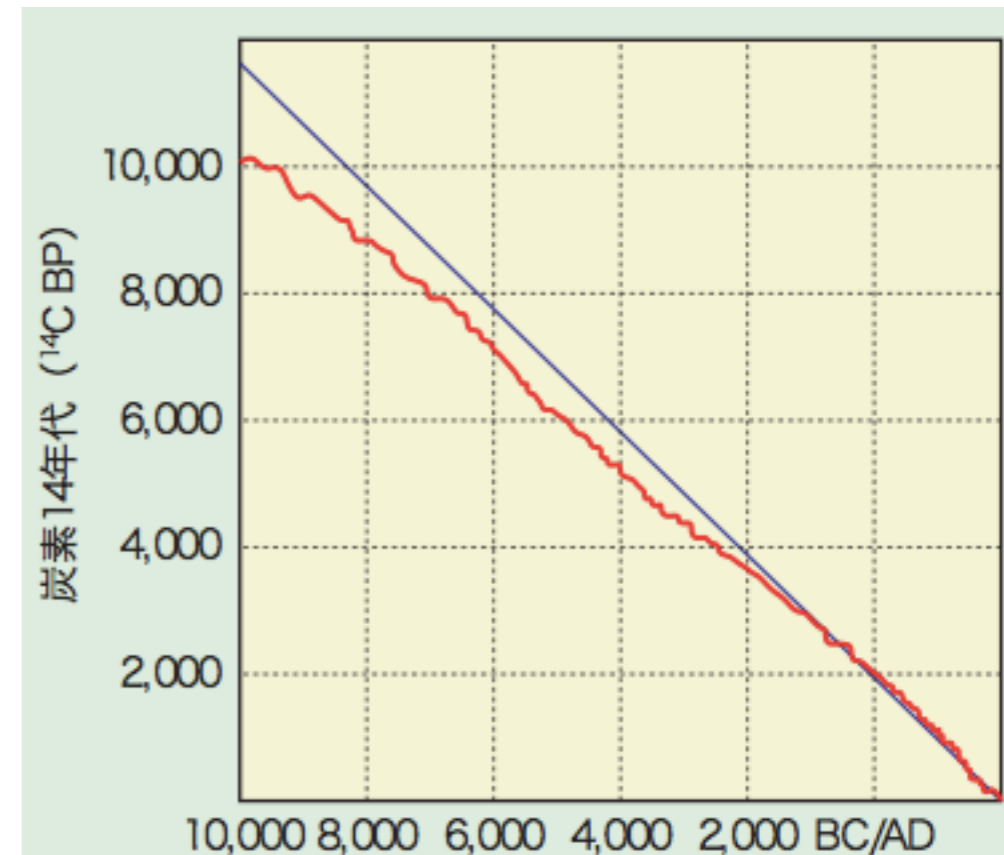
- 聖骸布 (Torino の聖骸布 (1260-1390 A.D., 95% CL))



- 空気中の ^{14}C の比率はほぼ一定

- 微小な変動は年輪中の炭素データで較正

- 地層、火山灰、年輪データと比較



炭素14年代と年輪年代との較正曲線(赤線)(時代が古くなるほど両者がずれることと大気中の炭素14濃度が変動することによる細かな動きが分かる)

出典:国立歴史民俗博物館

リニアック (線形加速器)

Linac (Linear accelerator)

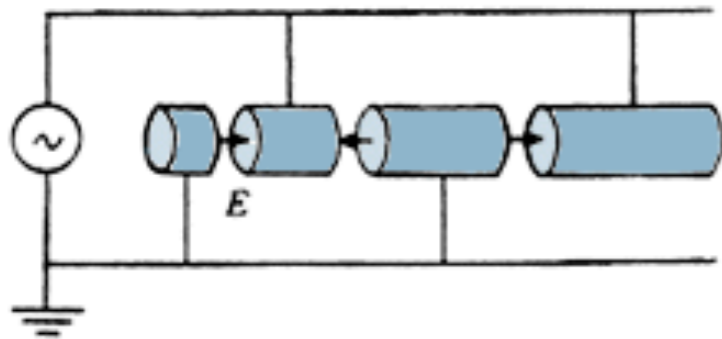


図1 ヴィデレー型リニアック

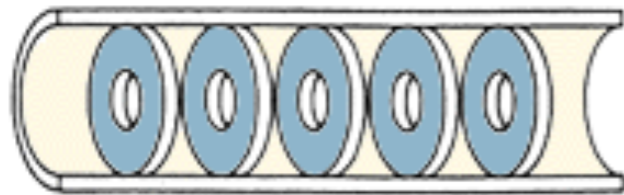


図2 円盤装荷導波管

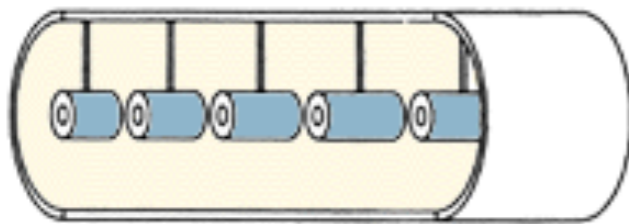
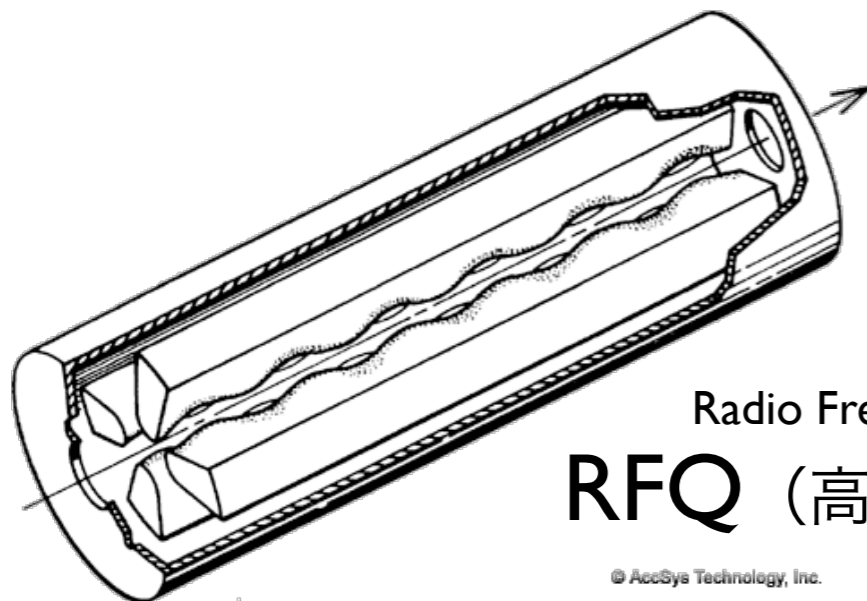
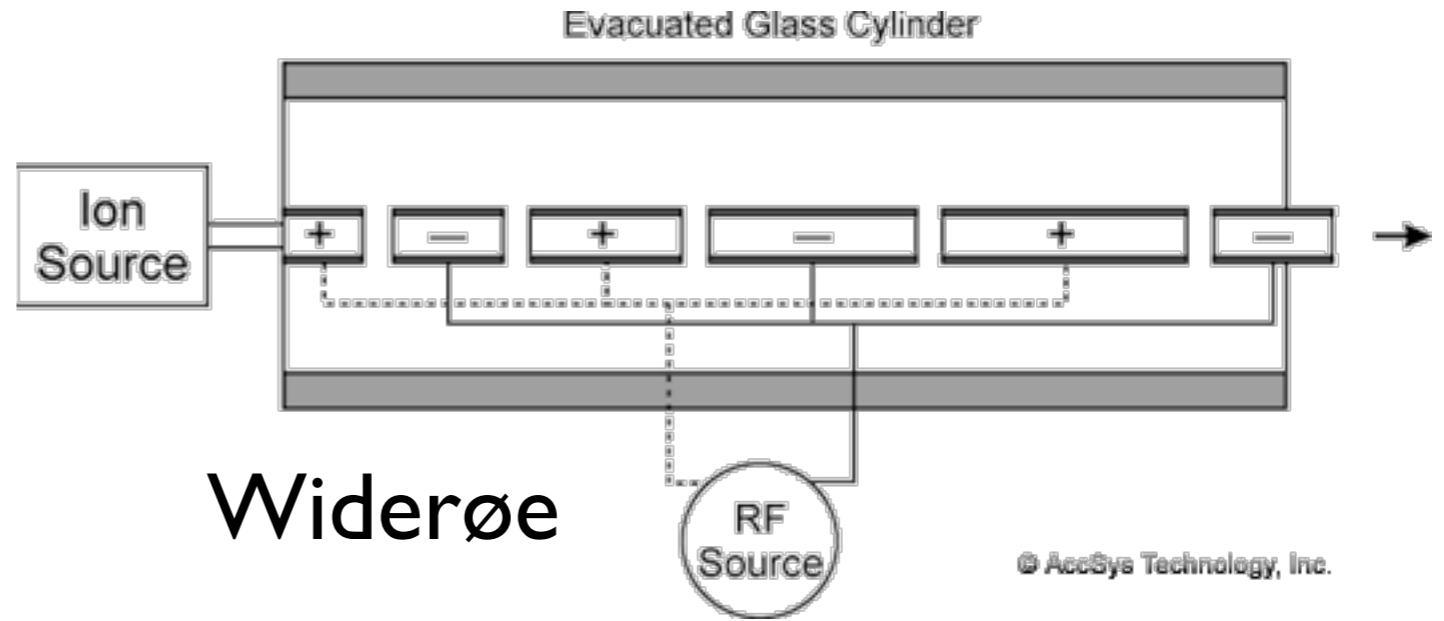


図3 アルバレ型リニアック



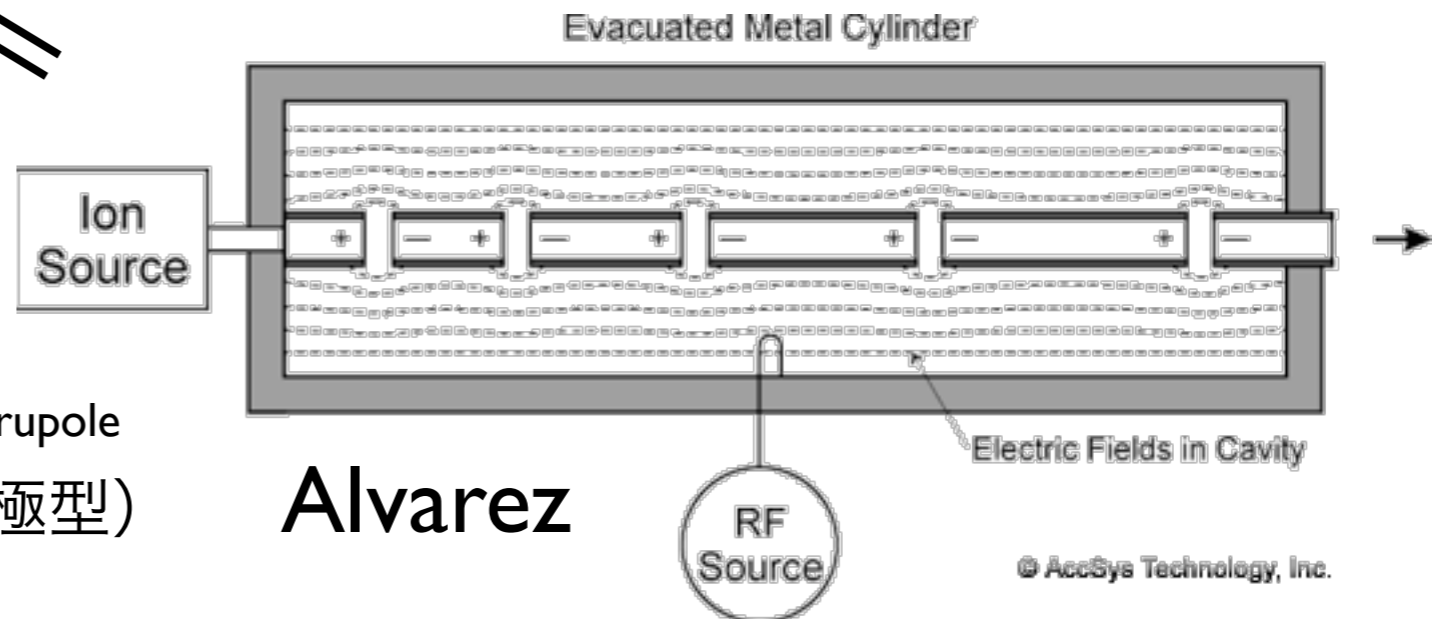
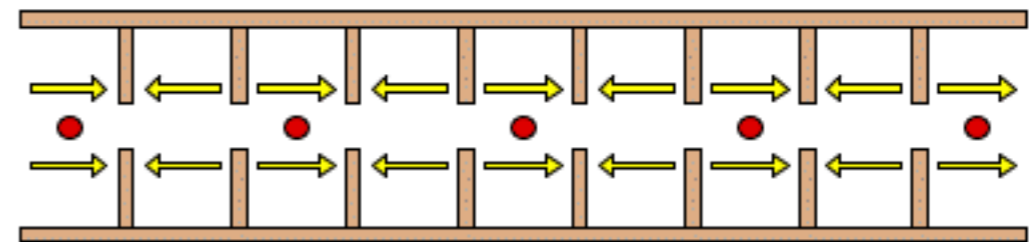
Radio Frequency Quadrupole
RFQ (高周波四重極型)

© AccSys Technology, Inc.



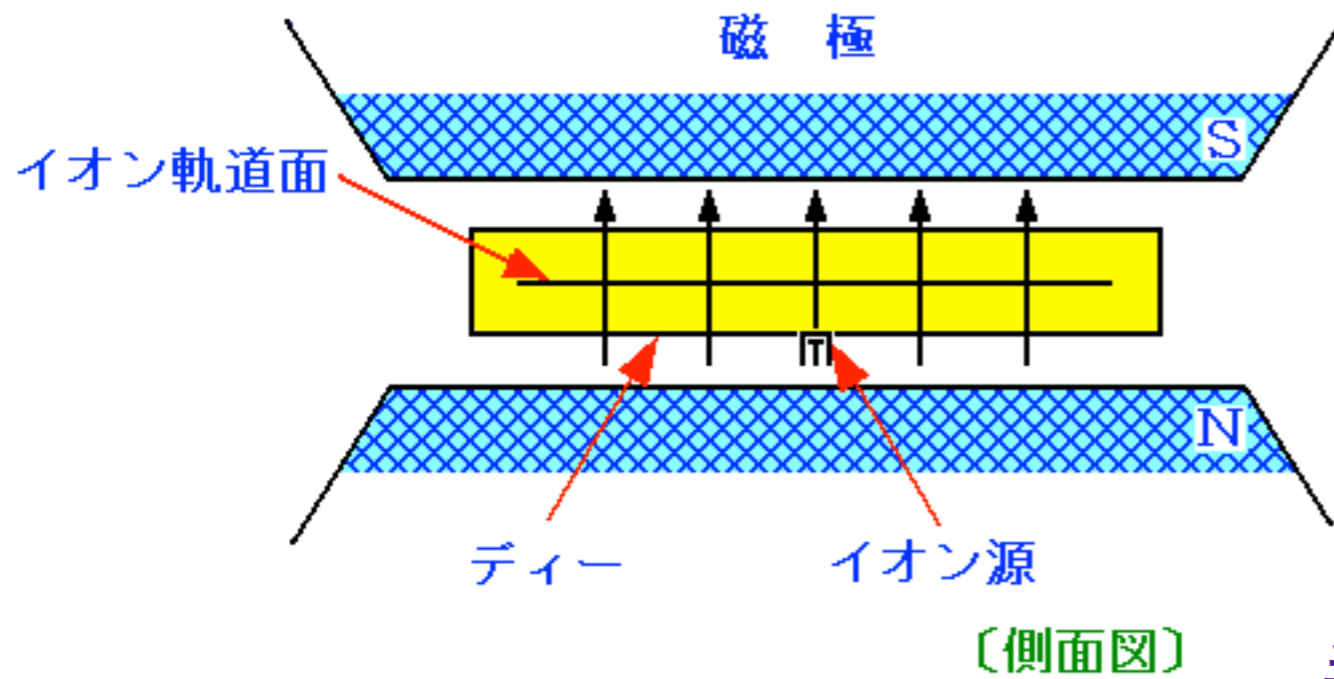
Widerøe

© AccSys Technology, Inc.



Alvarez

© AccSys Technology, Inc.



サイクロトロン

Cyclotron

Lawrence (1929)



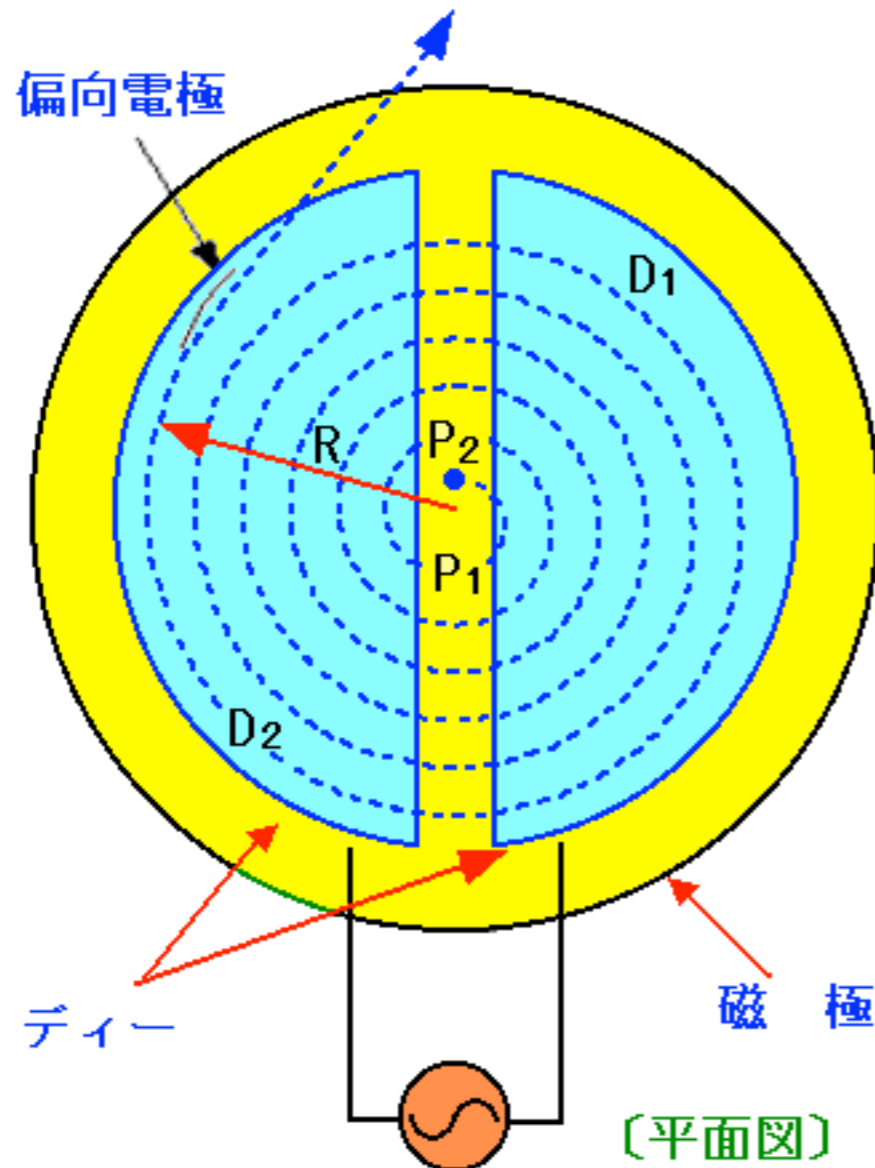
垂直磁場

$$t = \pi m / B q$$

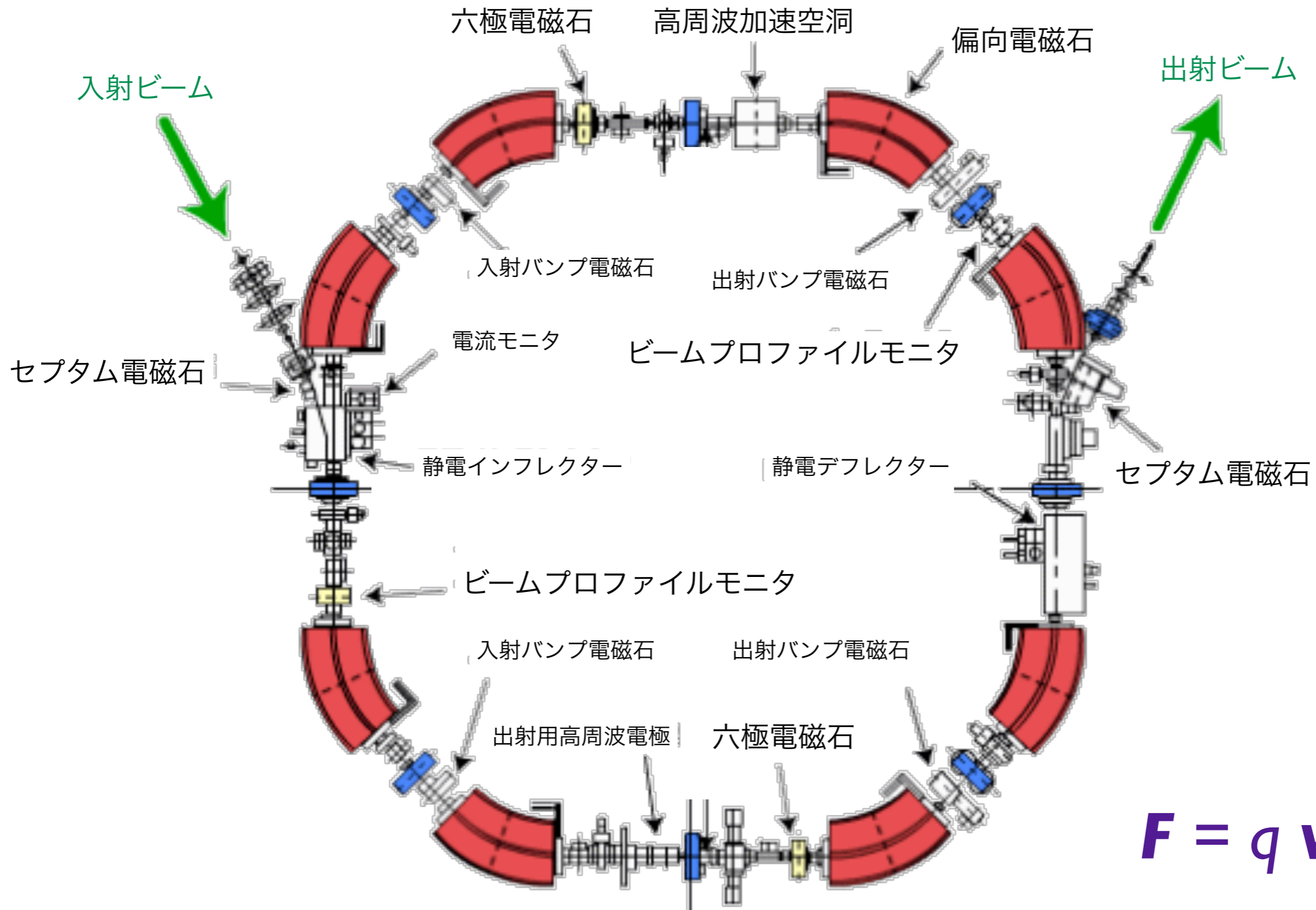
相対論的領域では周期が遅れる

シンクロサイクロトロン
Synchrocyclotron

AVF サイクロトロン
Azimuthally-varying-field
Cyclotron



シンクロトロン Synchrotron

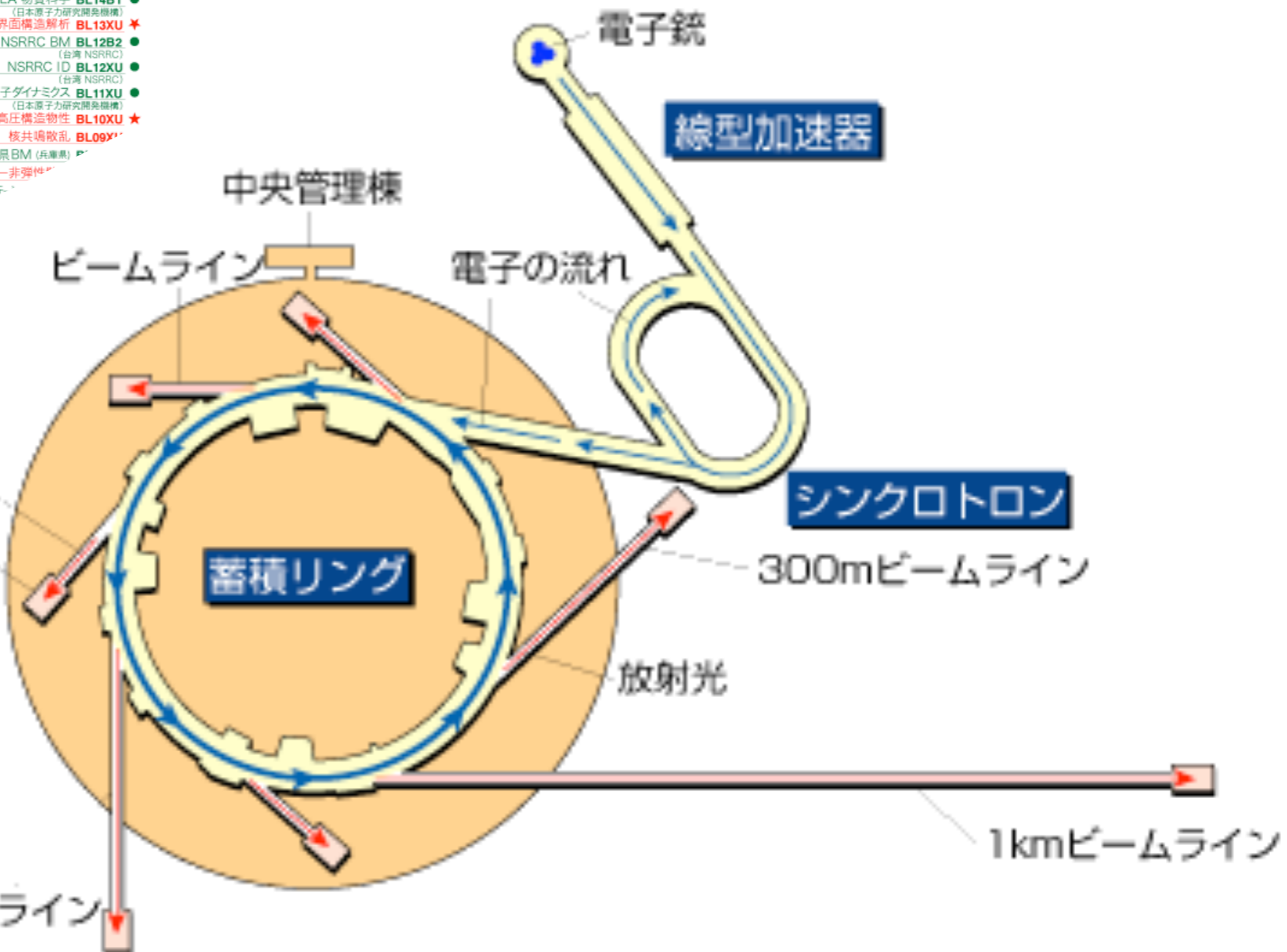
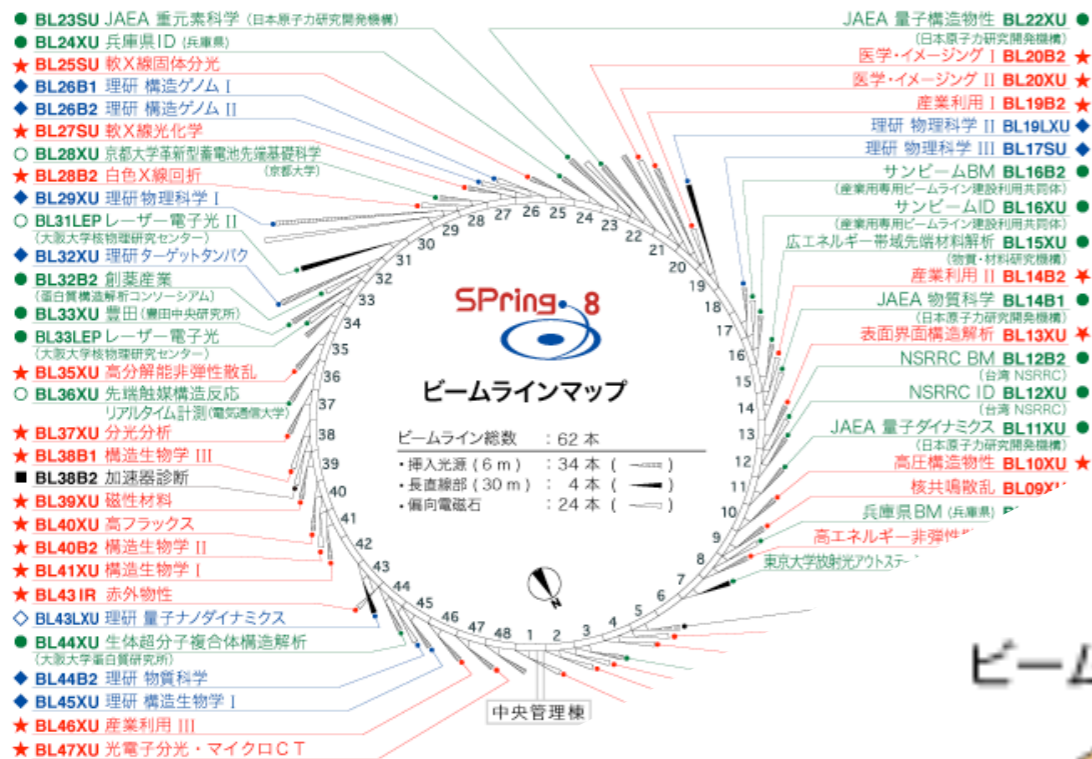


$$F = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

磁場による偏向・収束 (高エネルギー)

SPring-8 (大型放射光施設: 播磨)

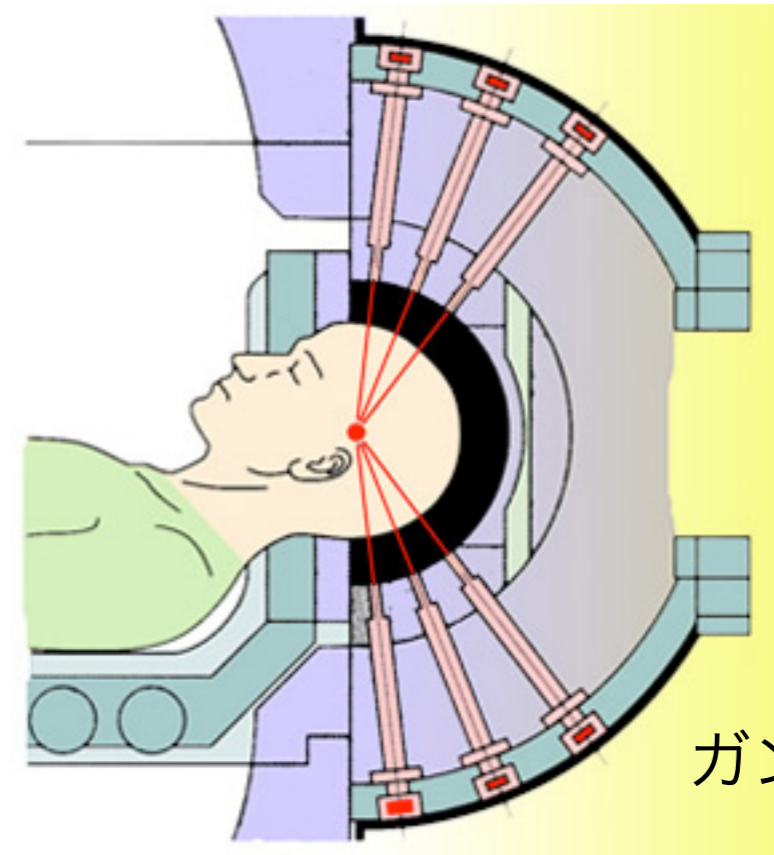
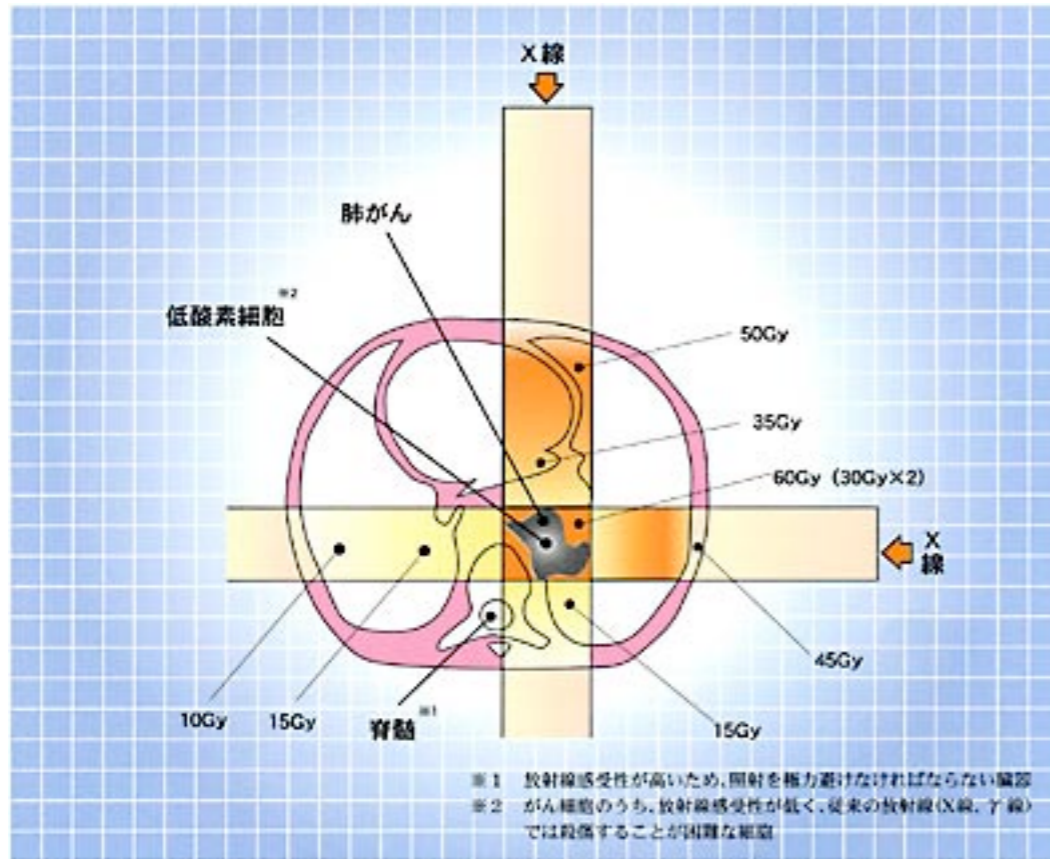
8 GeV 電子ビーム ⇒ 放射光 (X線, γ線)



医療に使われる線形加速器

数 Gy を数十回

X線



^{60}Co

ガンマナイフ

電子線を加速してぶつけ、
制動X線および特性X線を
発生させる。

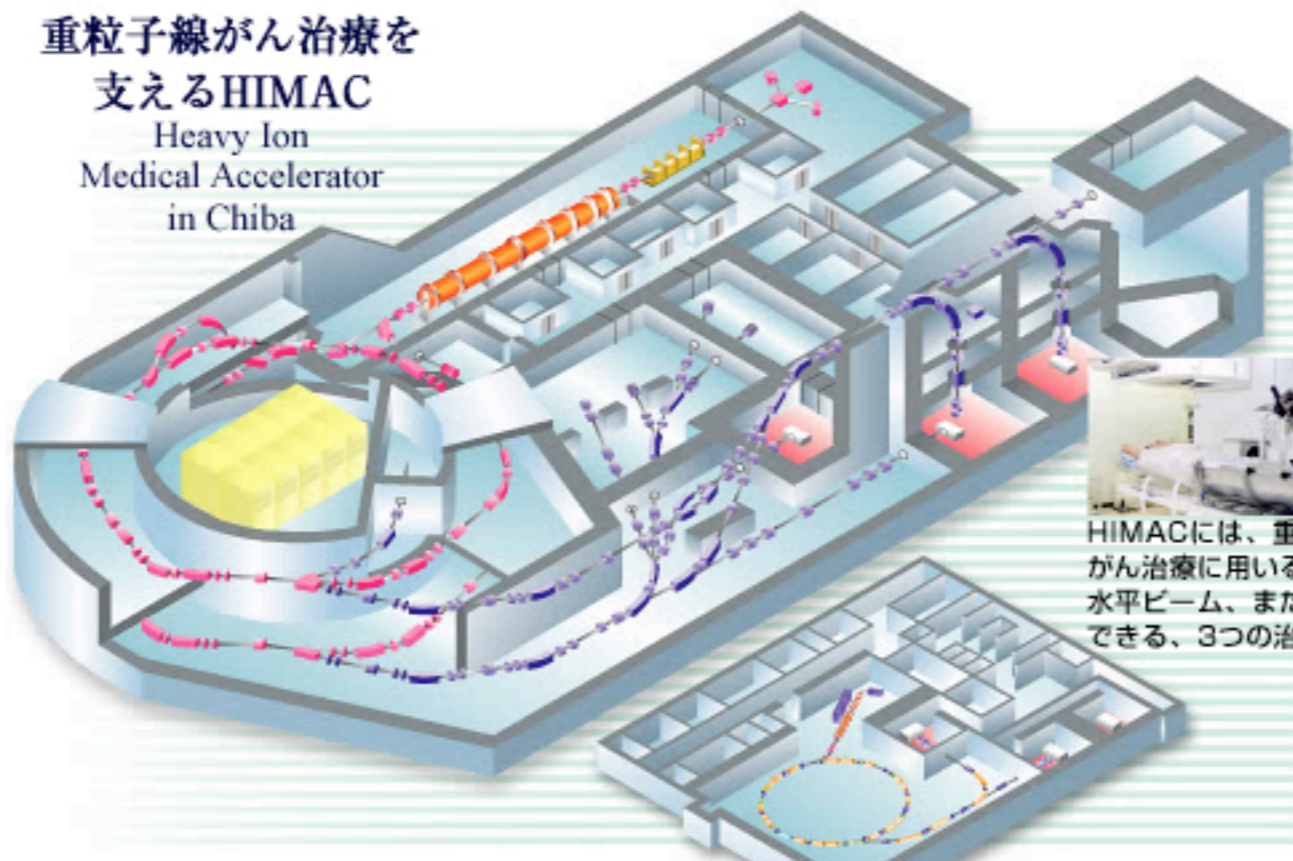
サイバーナイフ



写真提供: (独)放射線医学総合研究所

医療用の重イオン加速器（シンクロトロン）

重粒子線がん治療を
支えるHIMAC
Heavy Ion
Medical Accelerator
in Chiba



HIMACには、重粒子線を効率的にがん治療に用いるため垂直ビーム、水平ビーム、またはその両方を照射できる、3つの治療照射室があります。

■小型重粒子線がん治療装置

放医研における装置小型化開発研究の成果は、2006(平成18)年度から建設が開始される群馬大学の重粒子線がん治療装置に採用されています。放医研は群馬大学に装置を建設するための技術的な支援を行っています。

放射線医学総合研究所（千葉）



写真提供：(独)放射線医学総合研究所



CERN

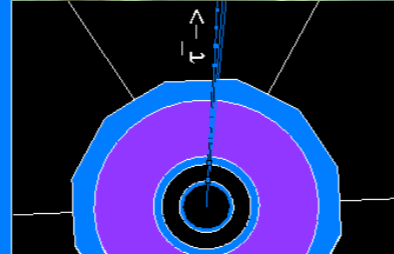
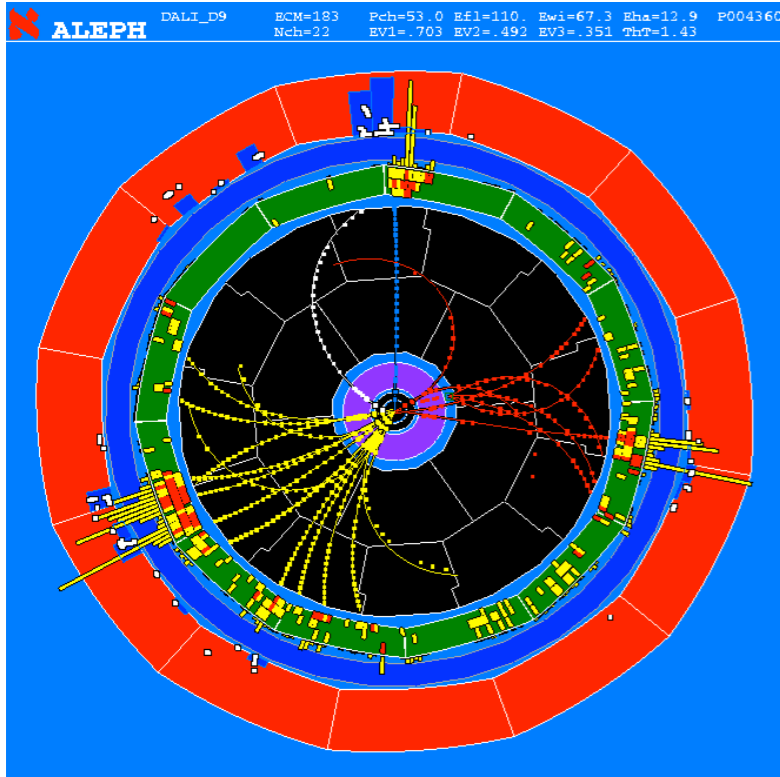
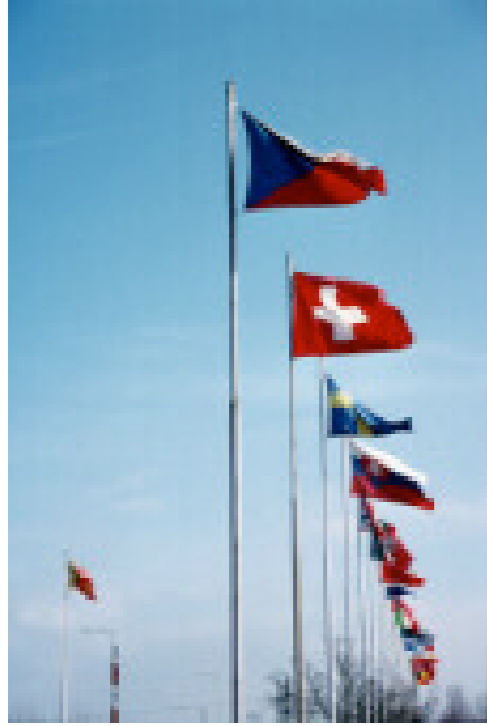
セルン：欧州合同原子核研究機関
European Organization for Nuclear Research
Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire

Questions:

Why accelerators?

Why so large?

Why circular rings?



素粒子物理学

物質粒子

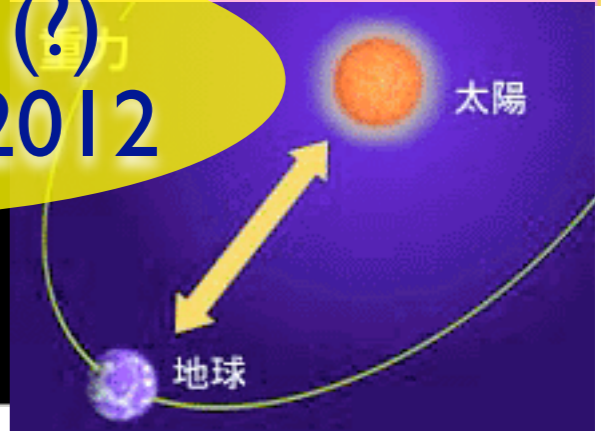
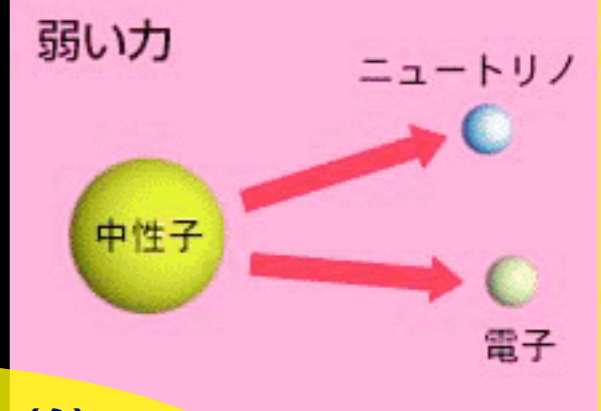
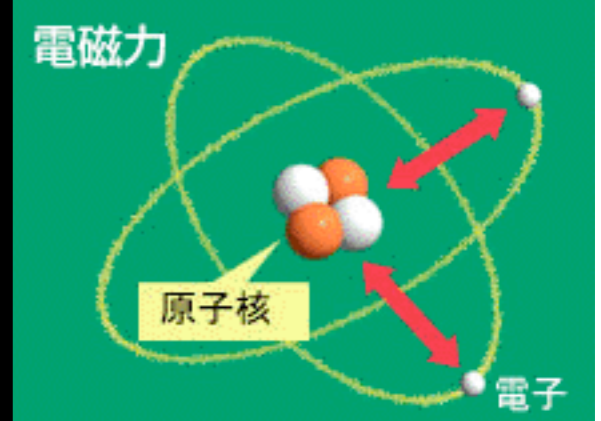
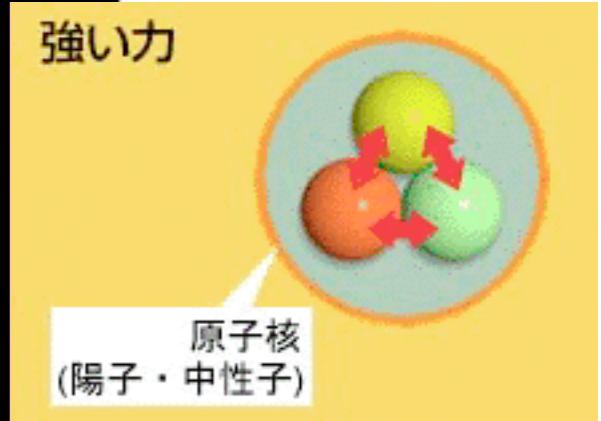
	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	 アップ	 チャーム	 トップ
	 ダウン	 ストレンジ	 ボトム
レプトン	 電子ニュートリノ	 ミューニュートリノ	 タウニュートリノ
	 電子	 ミューオン	 タウ

top quark 発見
at Fermilab in 1995

強い力
グルーオン g

電磁力
光子 γ

弱い力
W ボゾン W^+ W^- Z ボゾン Z



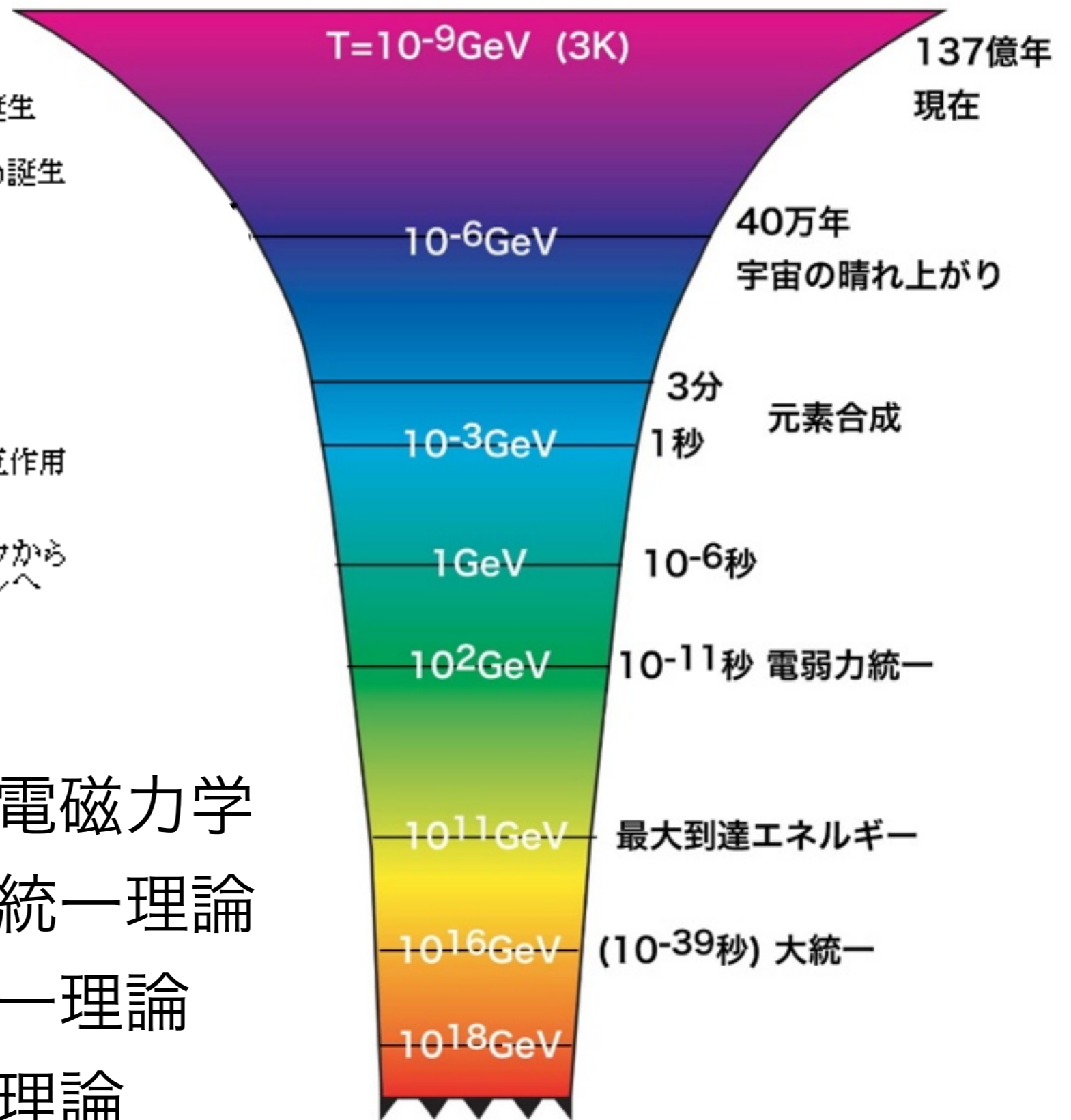
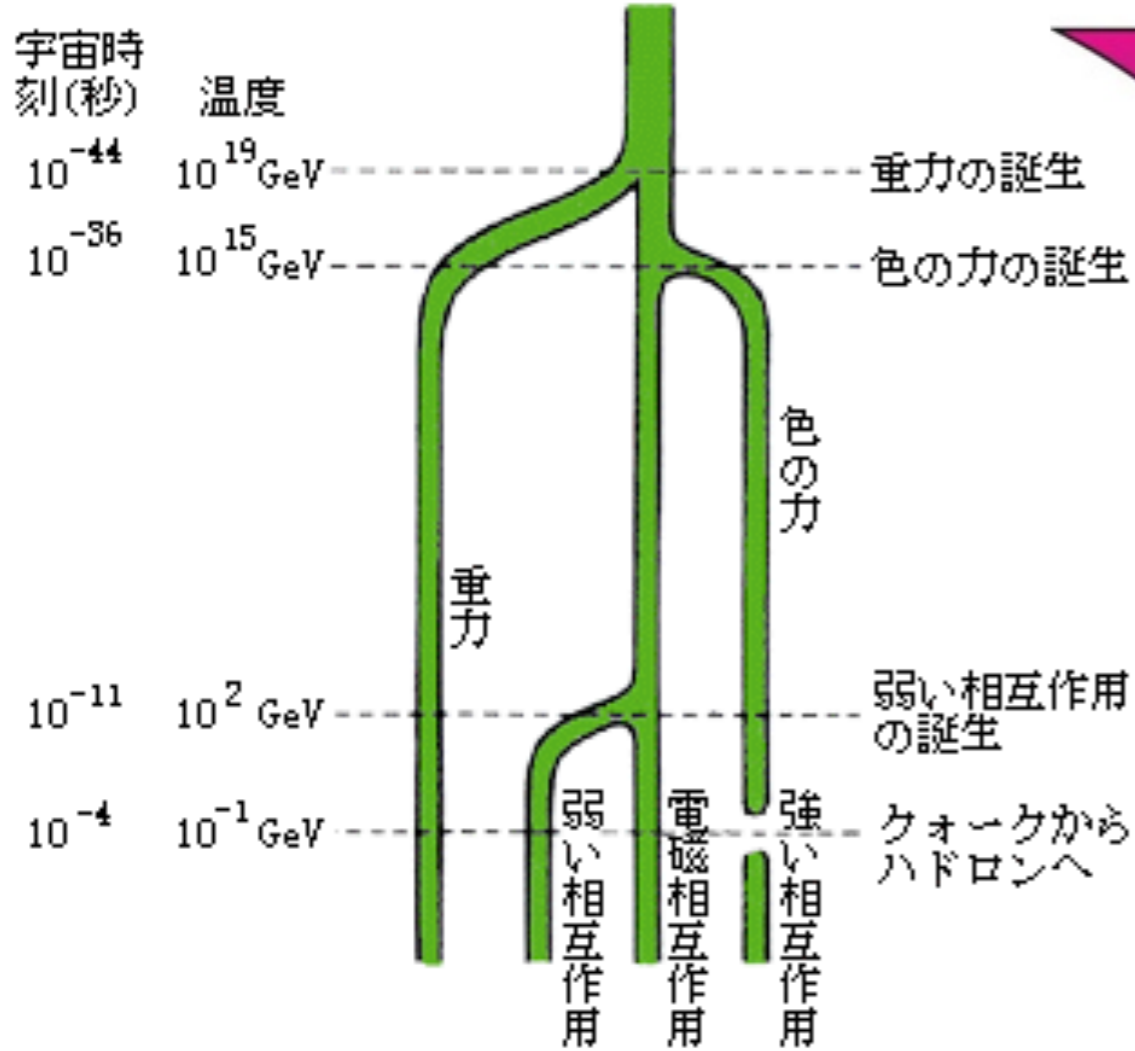
ヒッグス場に伴う粒子
(~~未発見~~)

H
ヒッグス粒子

Higgs 発見 (?)
at CERN in 2012

宇宙と素粒子

相互作用の進化図



標準理論

質量の起源
Higgs 粒子

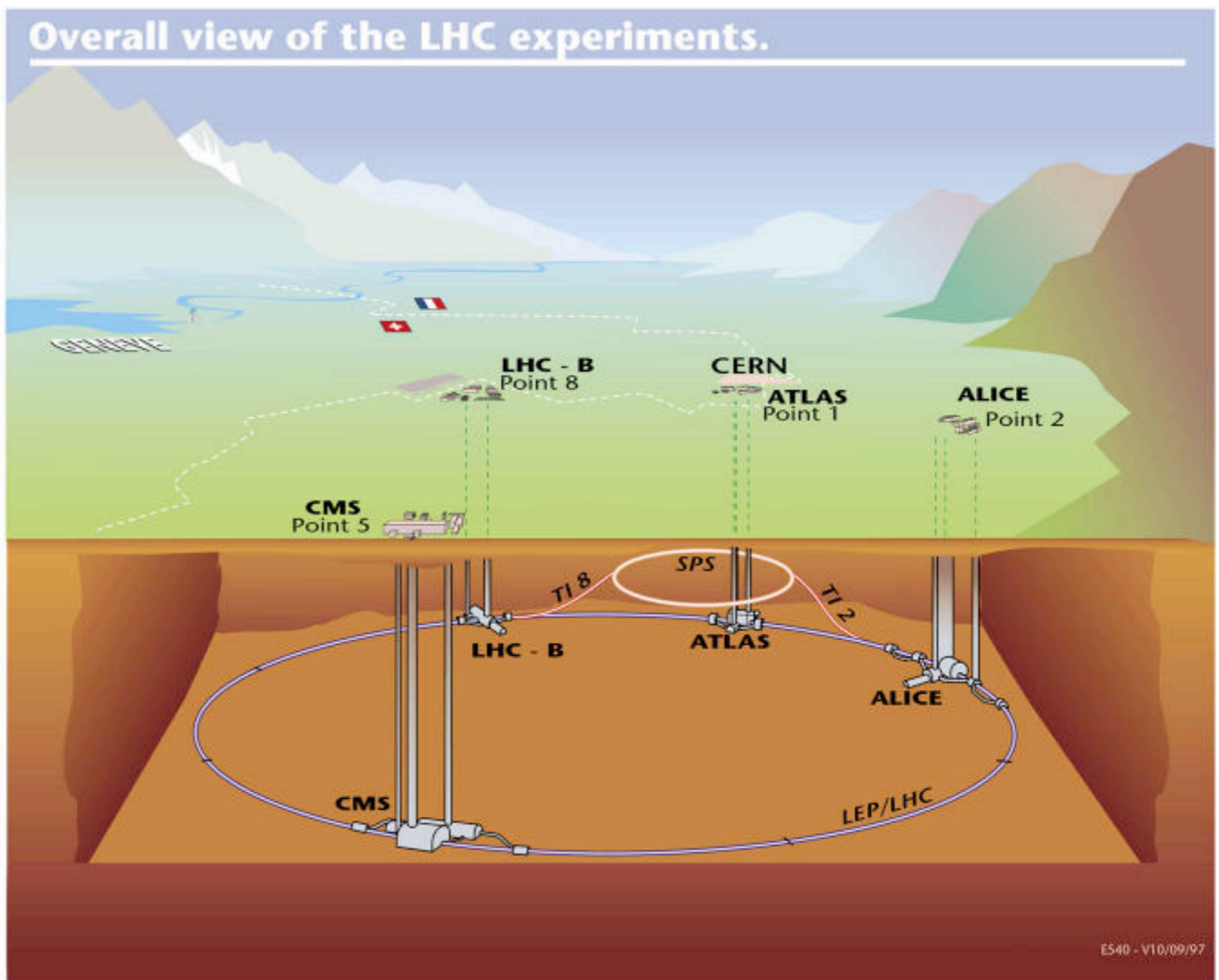
量子電磁力学
電弱統一理論
大統一理論
超弦理論

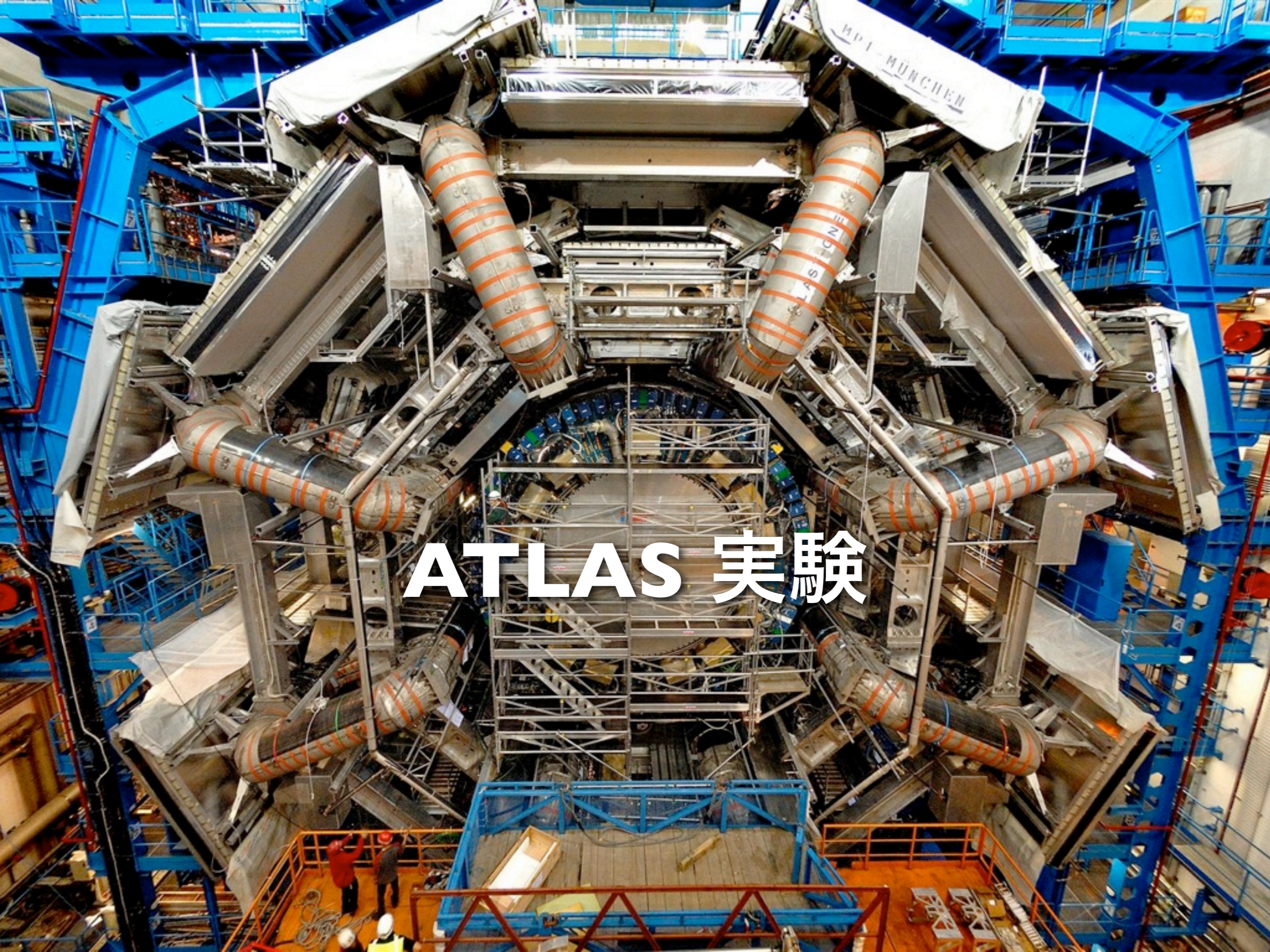


LHC

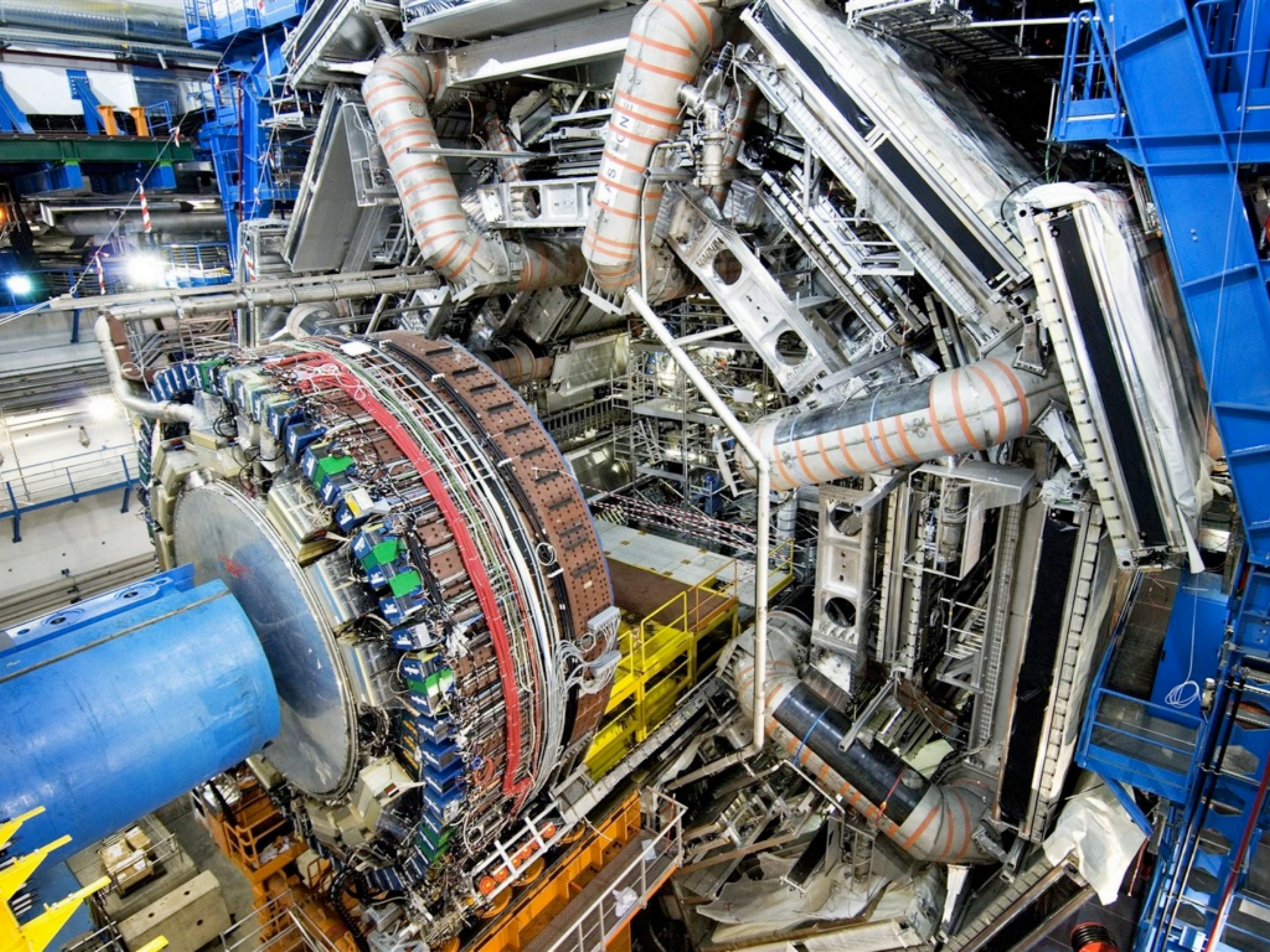
Large Hadron Collider

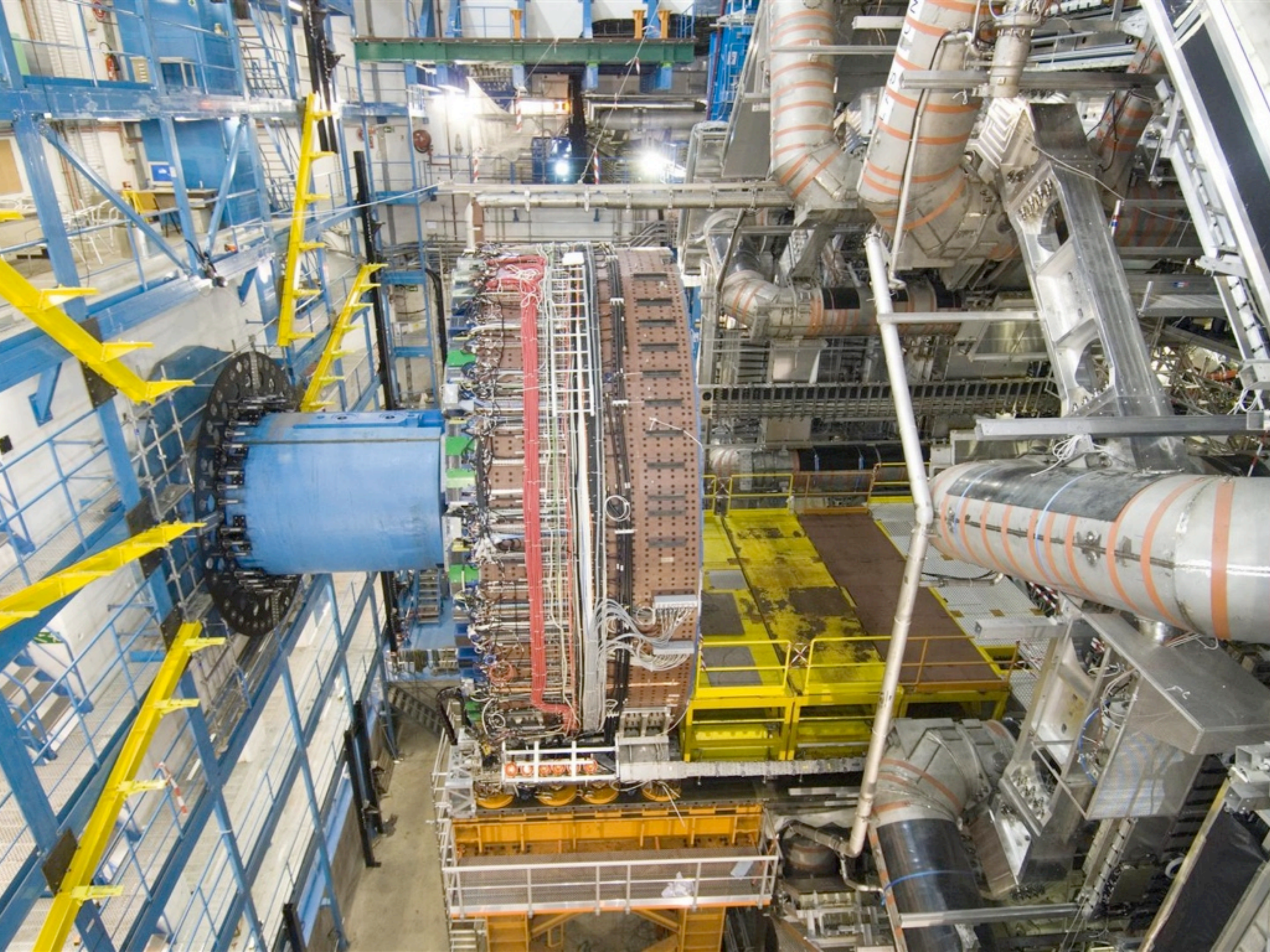
質量の起源 Higgs 粒子





ATLAS 実験







Detector characteristics

Width: 44m
Diameter: 22m
Weight: 7000t

CERN AC - ATLAS V1997

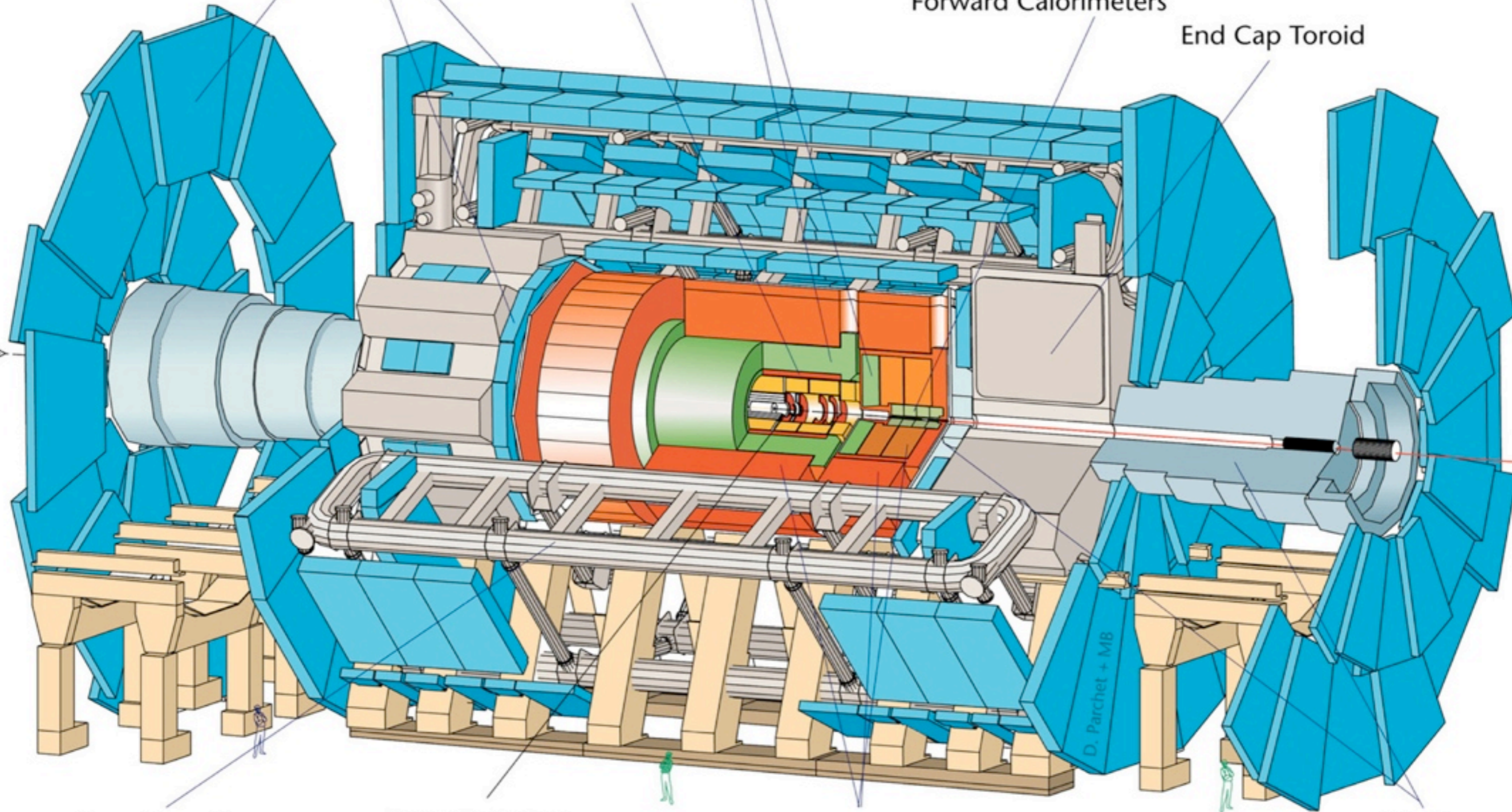
Muon Detectors

Electromagnetic Calorimeters

Solenoid

Forward Calorimeters

End Cap Toroid



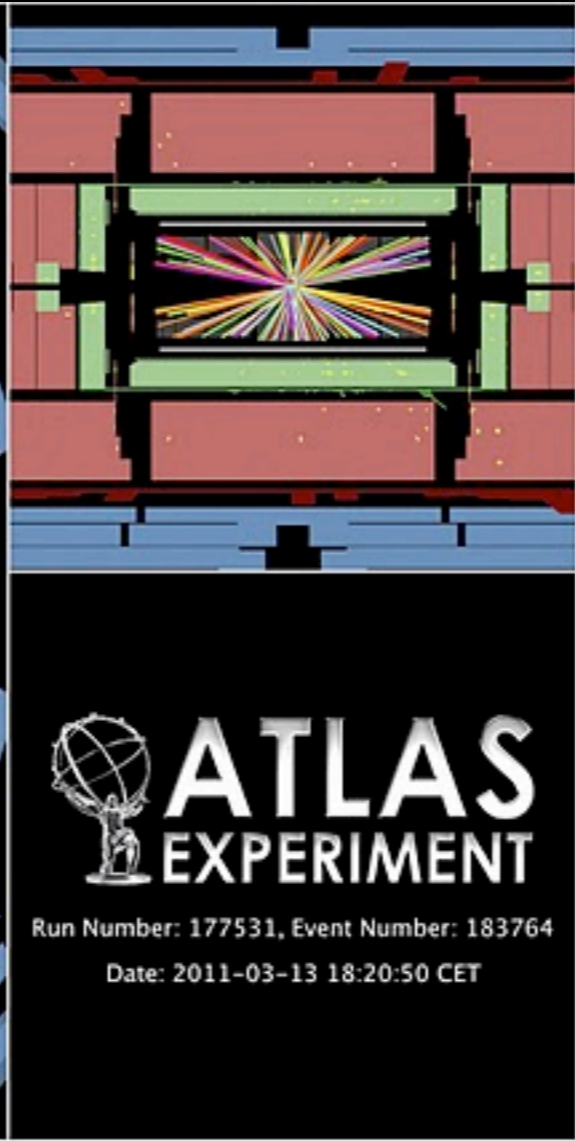
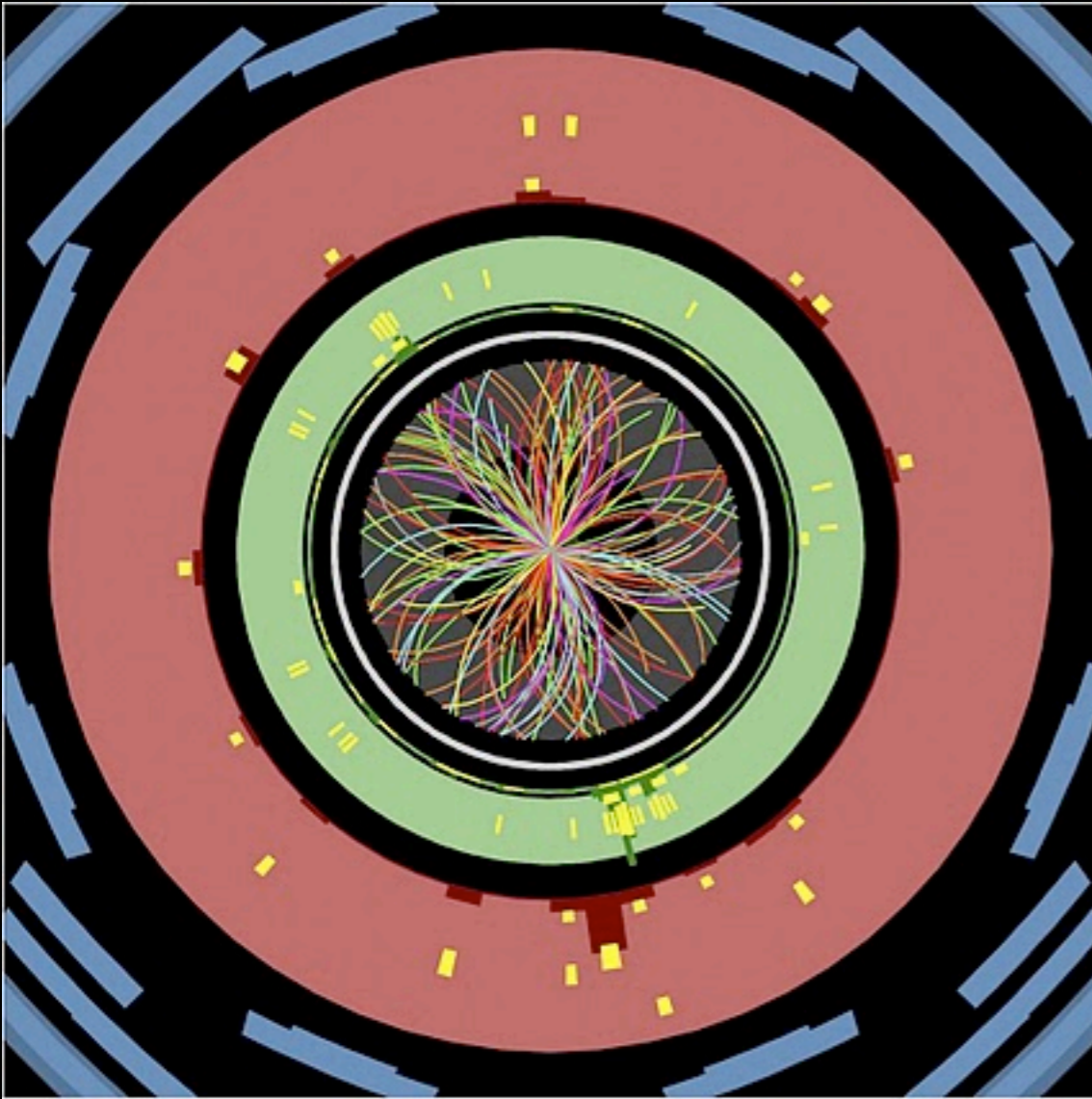
Barrel Toroid

Inner Detector

Hadronic Calorimeters

Shielding

D. Parquet + MB

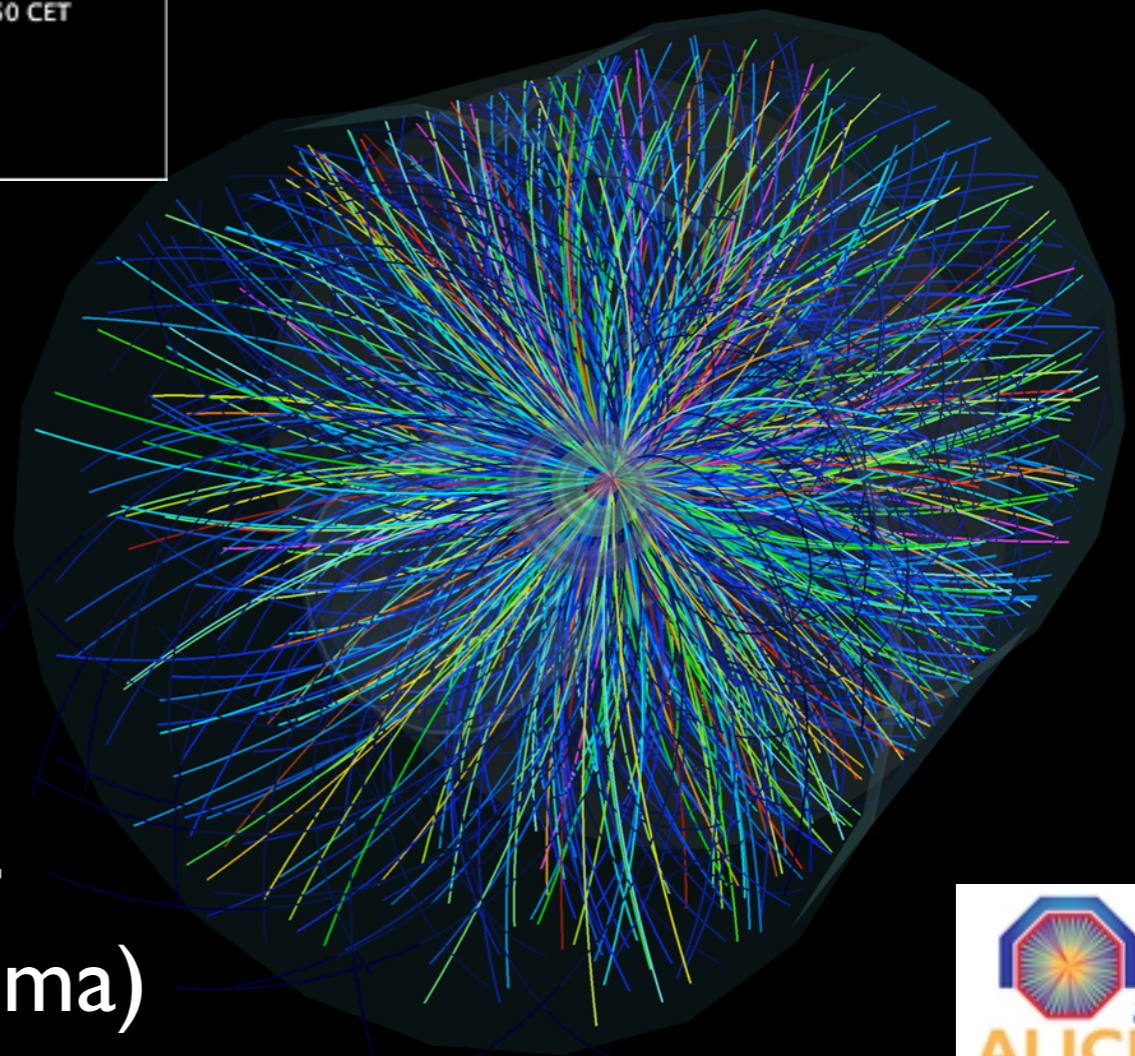


ATLAS
EXPERIMENT
Run Number: 177531, Event Number: 183764
Date: 2011-03-13 18:20:50 CET

$3.5 \text{ TeV} + 3.5 \text{ TeV}$
 $= 7 \text{ TeV}$

目標： $7 \text{ TeV} + 7 \text{ TeV} = 14 \text{ TeV}$

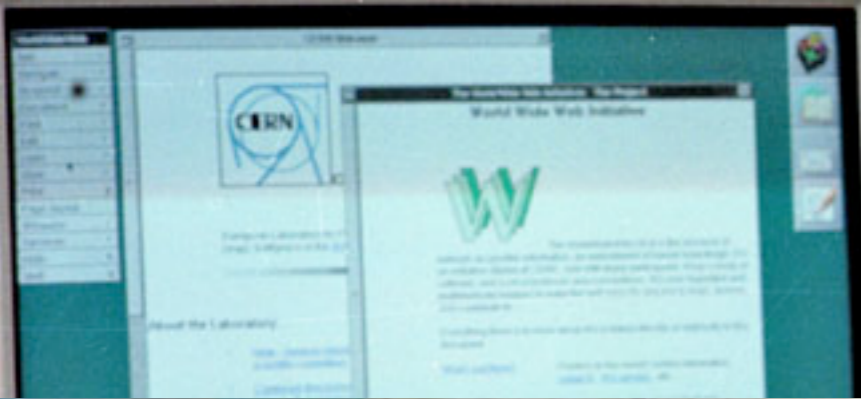
Higgs search



ALICE experiment
QGP (Quark-Gluon Plasma)







Tim Berners-Lee

WorldWideWeb

- Info
- Navigate
- Document
- Edit
- Find
- Links
- Style
- Print...
- Page layout...
- Windows
- Services
- Hide
- Quit

File View

Welcome to the Universe of HyperText

Home

Access to this information is provided as part of the WorldWideWeb project. The WWW project does not take responsibility for the accuracy of information provided by others.

How to proceed <http://info.cern.ch/>

References to other information are represented like this. Double-click on it to jump to related information.

General CERN Information sources

Now choose an area in which you would like to start browsing. The system currently has access to three sources of information. With the indexes, you should use the keyword search option.

CERN Information A general keyword index to the information available on the WWW. Includes CERN's WWW and the computer network (CERN). (This is the same data on CERN's WWW which is also available on CERNVM with the VM FIND.

Telephone Directory A key to the CERN telephone book by location.

News You can access the internet news scheme (See information for new users). News articles are distributed typically CERN-wide or worldwide, and have a finite lifetime.

Other information of general interest at CERN include:

- WWW
- WorldWideWeb Technology Interest Group news.

For more information on this machine, see also the following topics:

- WWW on this WorldWideWeb application

Info

HyperMedia Browser Version 1.0

An exercise in global information availability by Tim Berners-Lee

© 1990,91, CERN. Distribution restricted: ask for terms. BEST VERSION ONLY

Text: Text which is not constrained to be linear.
Media: Information which is not constrained linear... or to be text.

This is the first version of the NextStep WorldWideWeb application with the libWWW library. Bug reports to www-bug@info.cern.ch. Check the list of known bugs in the web too.

This was the original prototype for the World-Wide Web. Many browsers for other platforms now exist. Read the web for details.

You should configure the newsreader code in this application to know where your local news (NNTP) server is. Type in a terminal window



スイス連邦



スイスの言語

フランス

ドイツ
GERMANY

Geographical distribution of the languages of Switzerland (2000)

- German
- French
- Italian
- Romansh
- bilingual areas and cities*

* Areas with changing majorities, traditionally strong minorities of other official languages (over 30%) and officially bilingual communities.

Officially bilingual are the cantons of

- Berne / Bern (German majority)
- Fribourg / Freiburg (French majority)
- Valais / Wallis (French majority)

Officially trilingual is the canton of

- Graubünden / Grigioni / Grischun (German majority)

De facto bilingual are the cantons of

- Jura (French majority)
- Ticino (Italian majority)



Guten Tag !

Grüß Gott !

オーストリア
AUSTRIA

Grüezi !

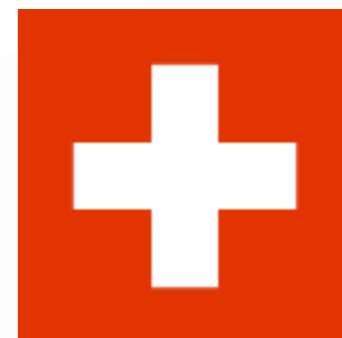
Bonjour !

フランス
FRANCE

Buongiorno.

イタリア
ITALY

Bun di !



『ダヴィンチ・コード』から3年——新たな歴史の謎が暴かれる。

反物質科学

待望の映画化!
『ダヴィンチ・コード』
シリーズ第2弾!

CERN
Antimatter

トム・ハンクス
(ロバート・ラングドン教授)
『ダヴィンチ・コード』監修
天使と悪魔
ANGELS & DEMONS

大ヒット上映中!

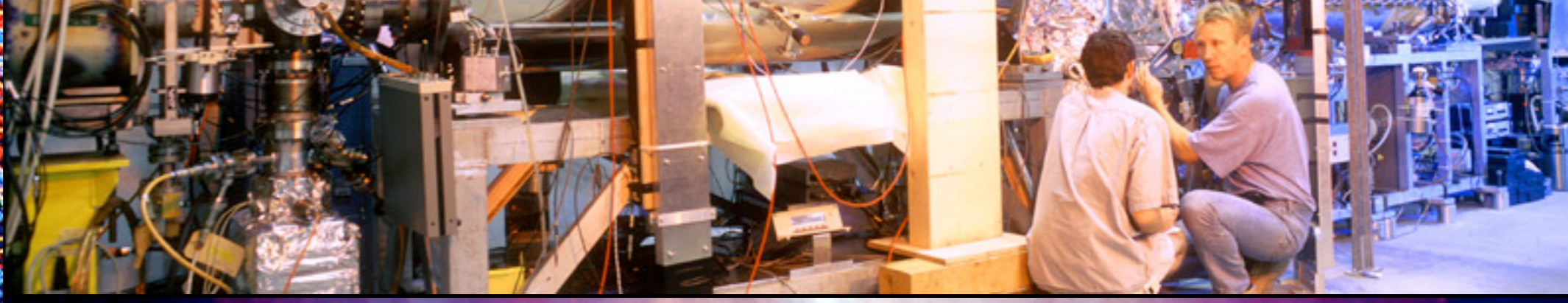
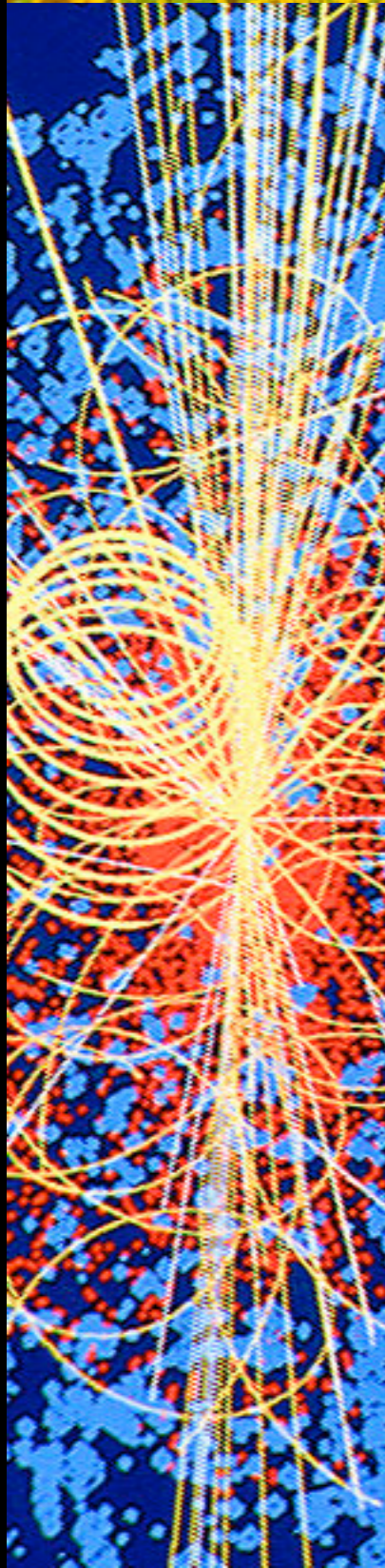
A RON HOWARD FILM
ANGELS & DEMONS
FROM THE AUTHOR OF THE DA VINCI CODE



ヴァチカンを元と闇がほみ込む

『ダヴィンチ・コード』の原作者による
大ベストセラーの完全映画化

2009.5.15(金)

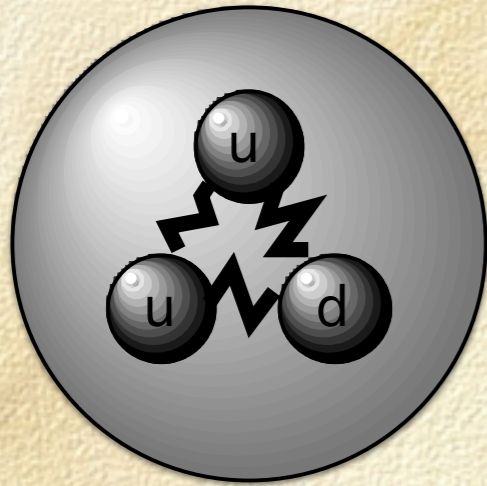


CERN

European Organization for Nuclear Research

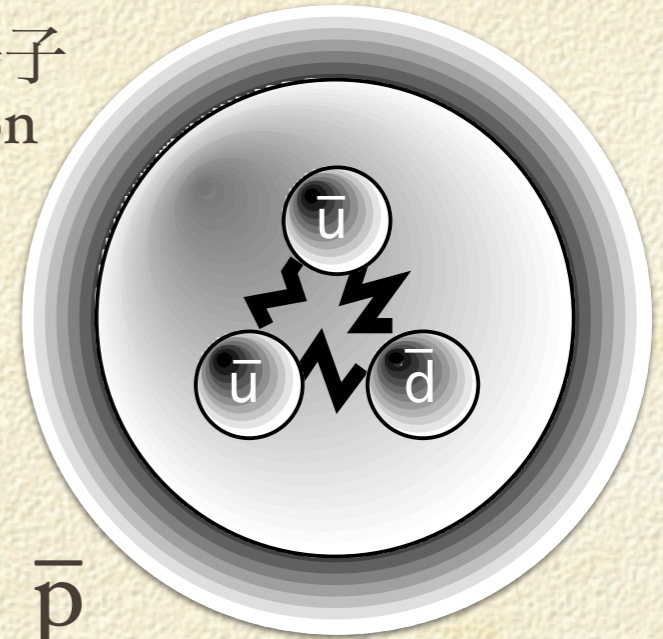
Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire

陽子
proton



p

反陽子
antiproton



p̄

粒子 / 反粒子

Why No Antimatter?

物質 反物質

Matter and antimatter were created in the Big Bang. Why do we now see only matter except for the tiny amounts of antimatter that we make in the lab and observe in cosmic rays?

e^-



電子 electron

e^+



陽電子 positron

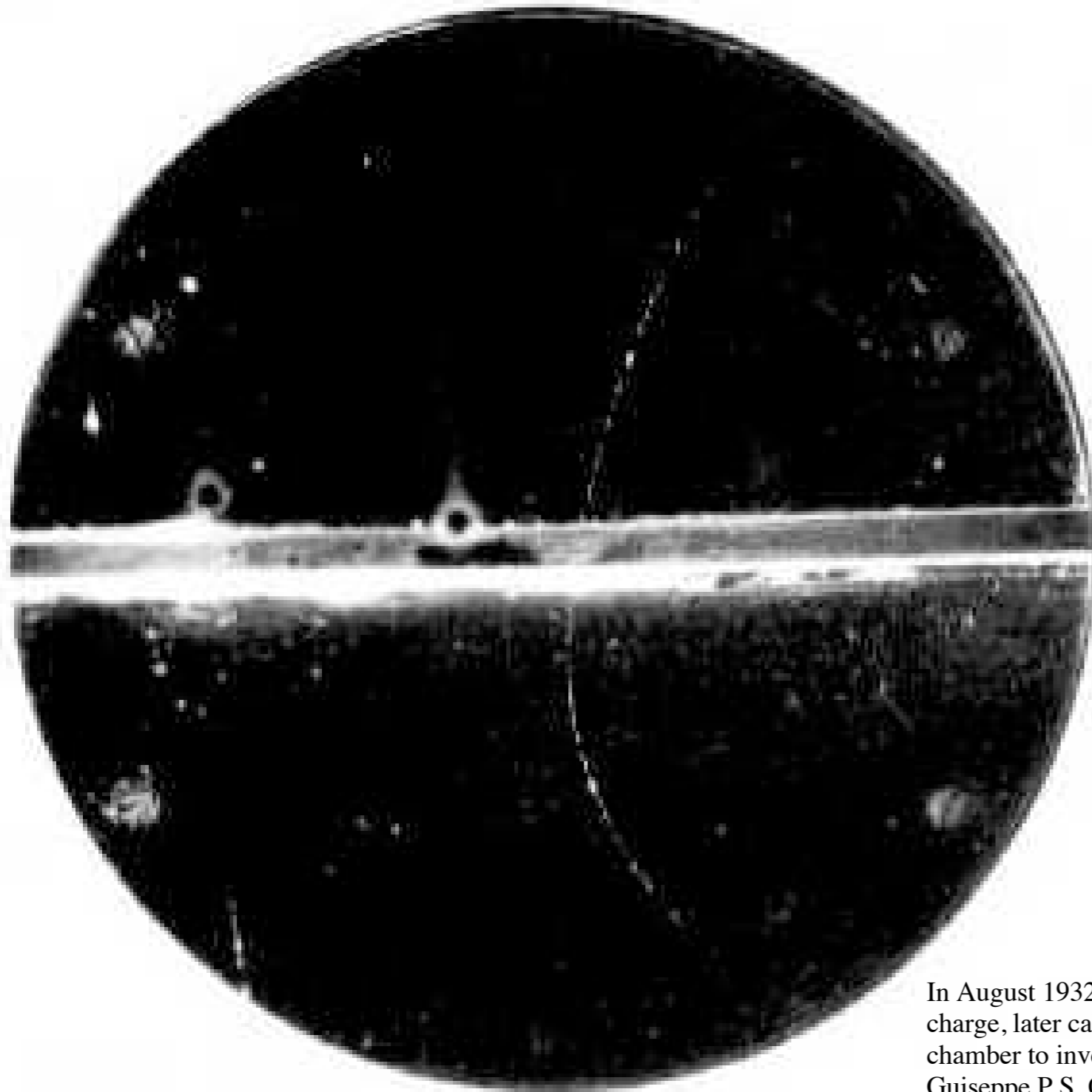
Paul Dirac
(相對論的量子力學)

陽電子の発見



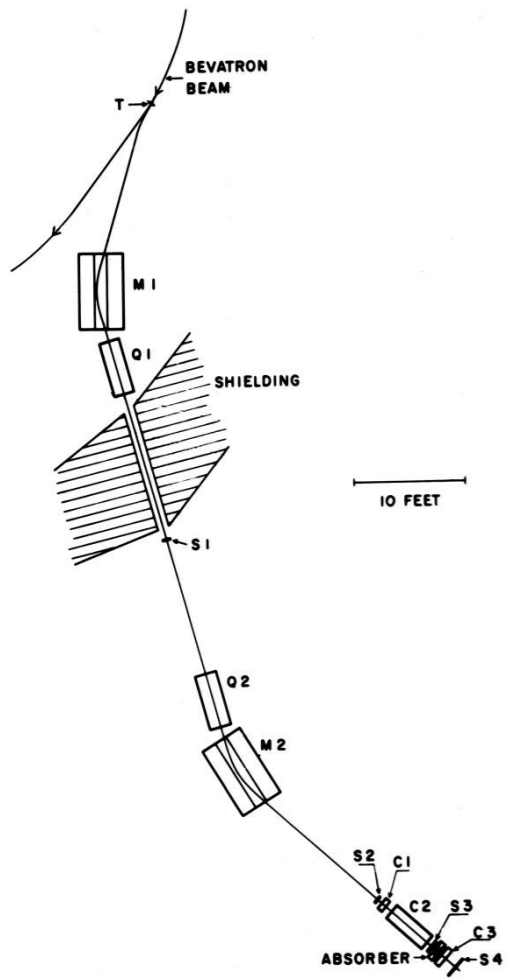
Anderson's first picture of a positron track (Source: C D Anderson)

The positron travelled downwards and lost energy as it passed through a lead plate in the middle of the chamber. Its track is curved because there was a magnetic field in the chamber.

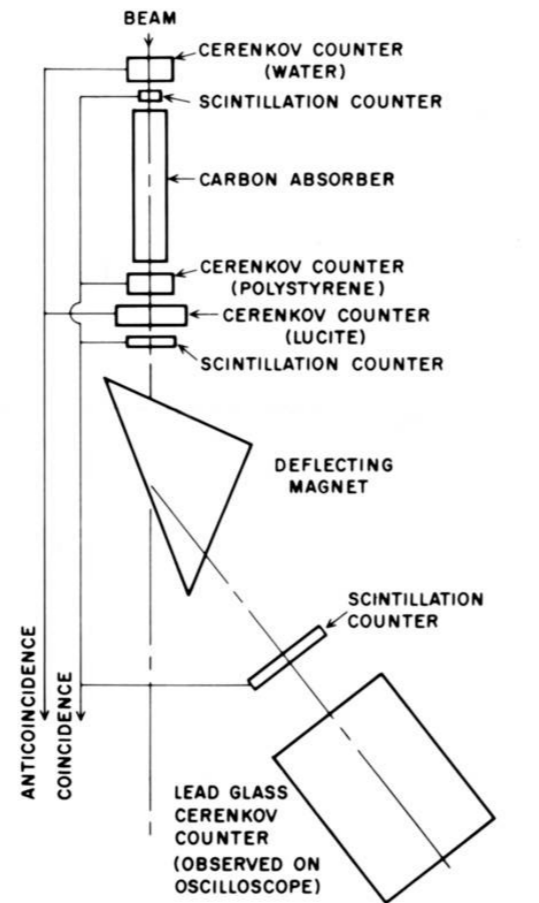


In August 1932, Carl D. Anderson found evidence for an electron with a positive charge, later called the positron. Anderson discovered the positron while using a cloud chamber to investigate cosmic rays. This work was continued by Patrick Blackett and Giuseppe P.S. Occhialini who showed that a positron was produced together with an electron, in line with an earlier theory of Paul Dirac's. According to this theory, a positron was a hole in a sea of ordinary electrons. The positron was the antimatter equivalent to the electron.

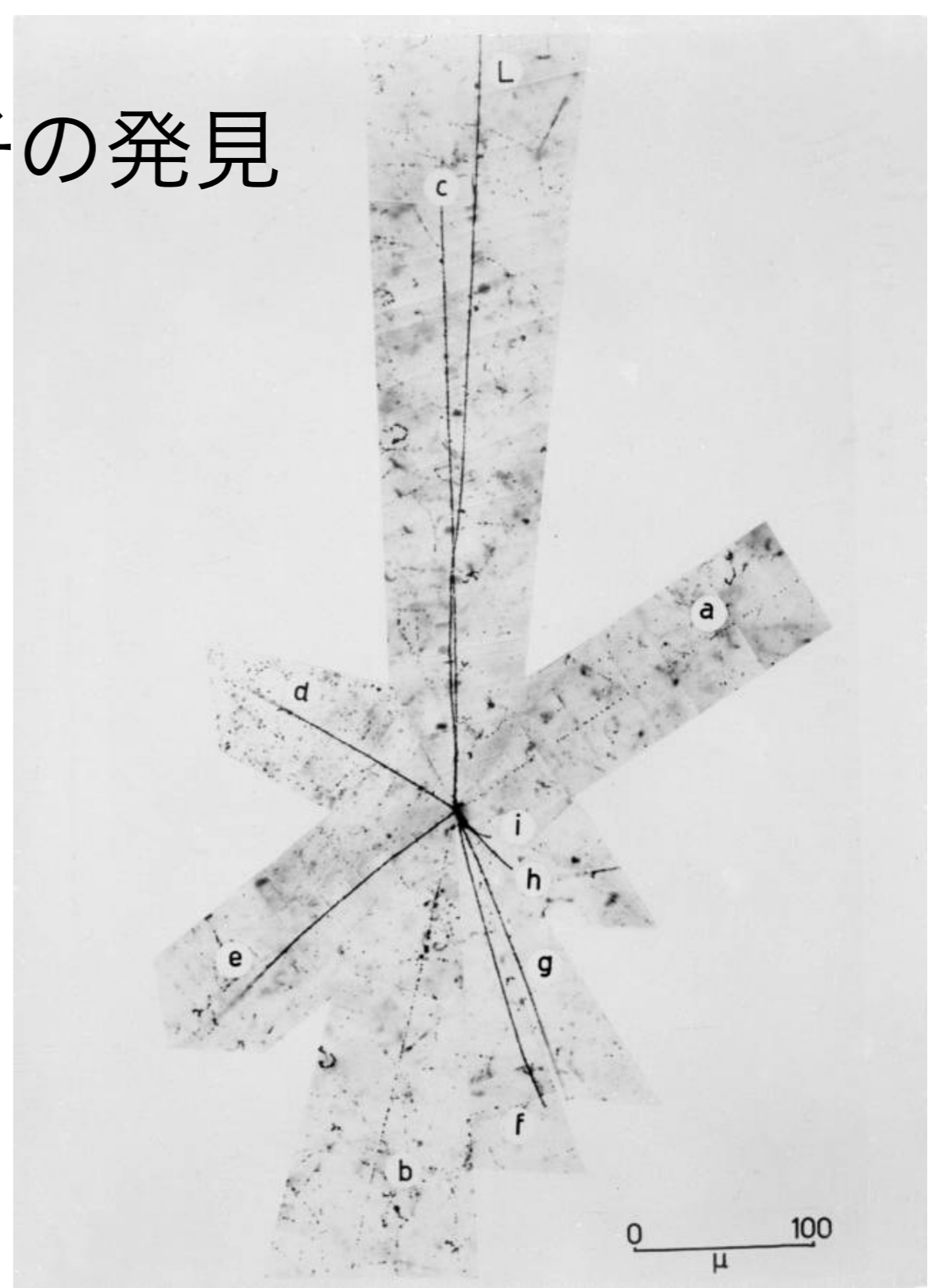
反陽子の発見



XBD 9606-02963



XBD 9606-02964



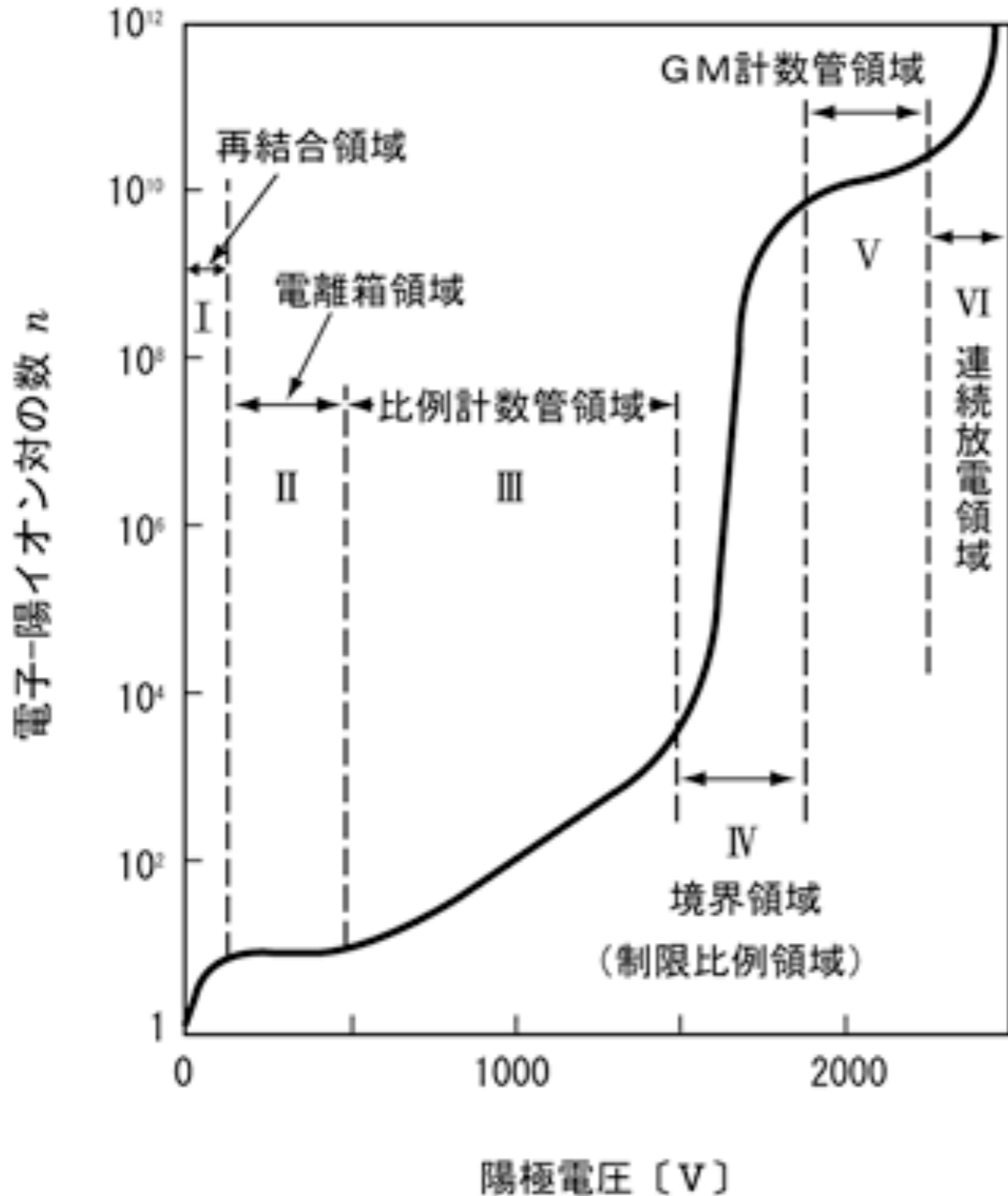
放射線計測学

(高エネルギー物理学実験用)

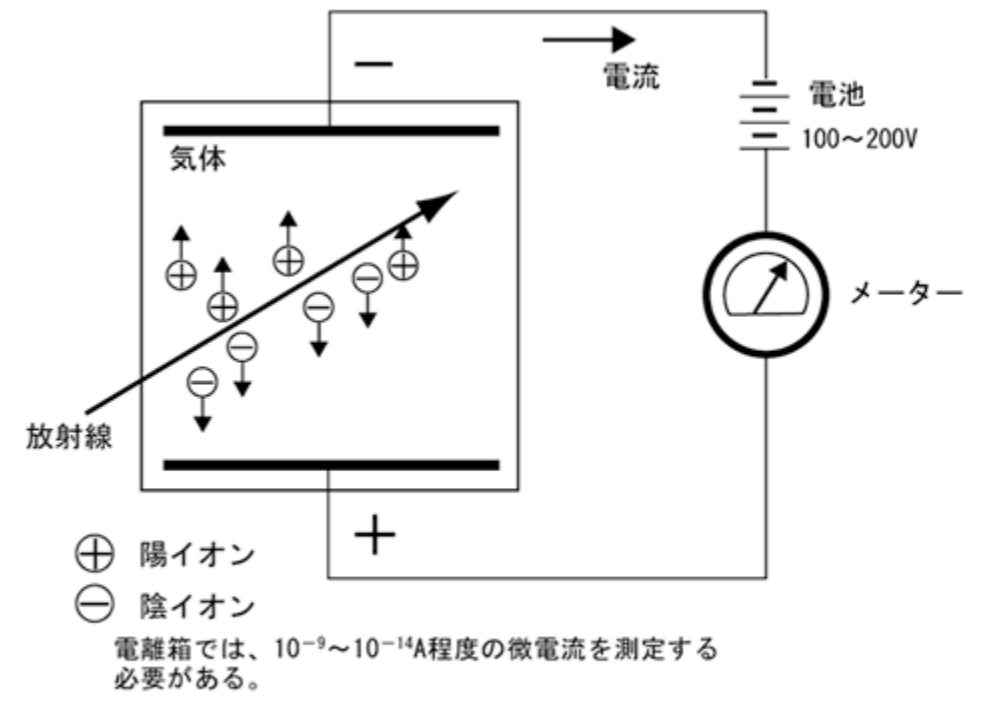
気体の電離を利用する放射線計測

電離箱, 比例計数管, GM管

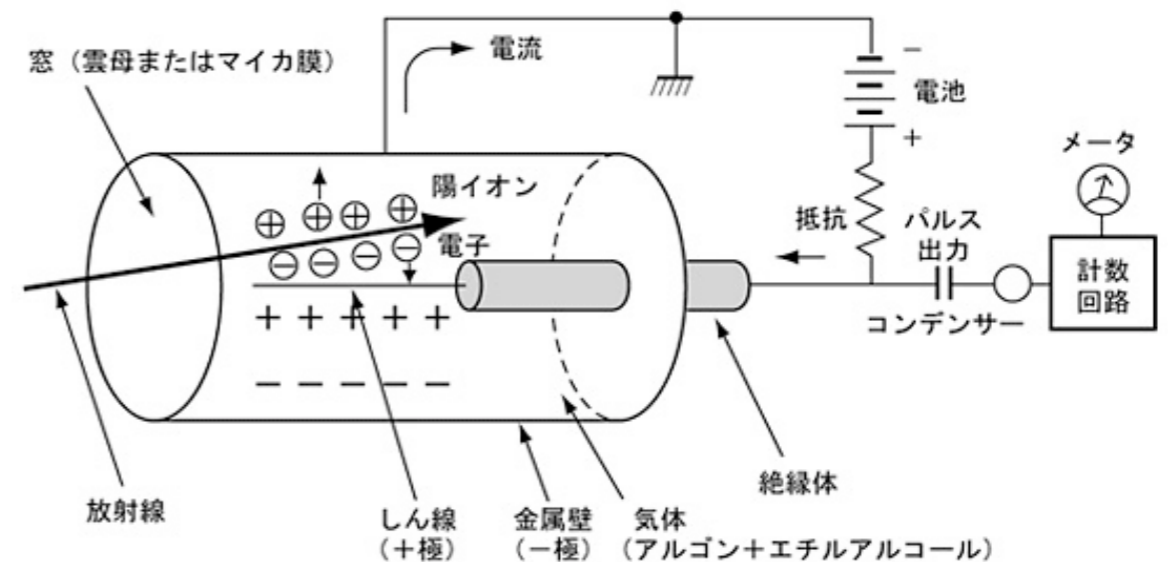
(ガイガー・ミュラー管)



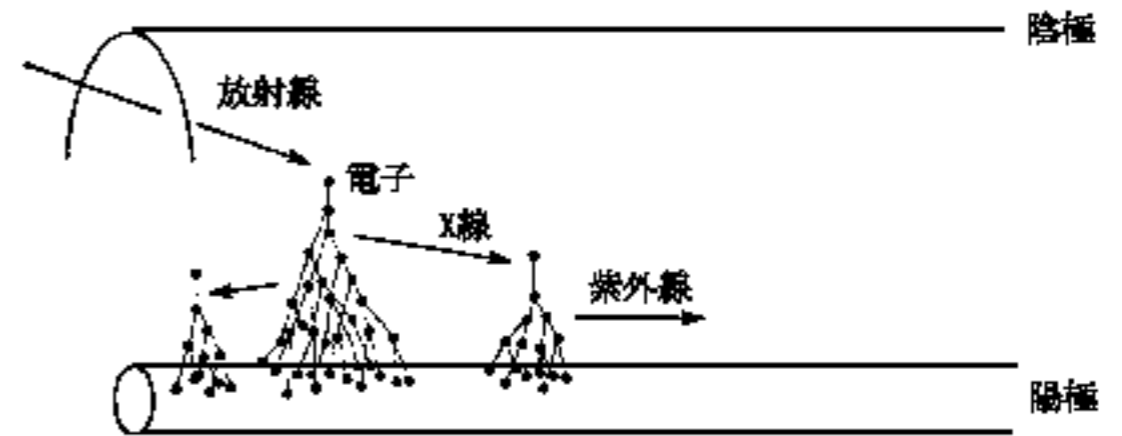
電離箱



GM管

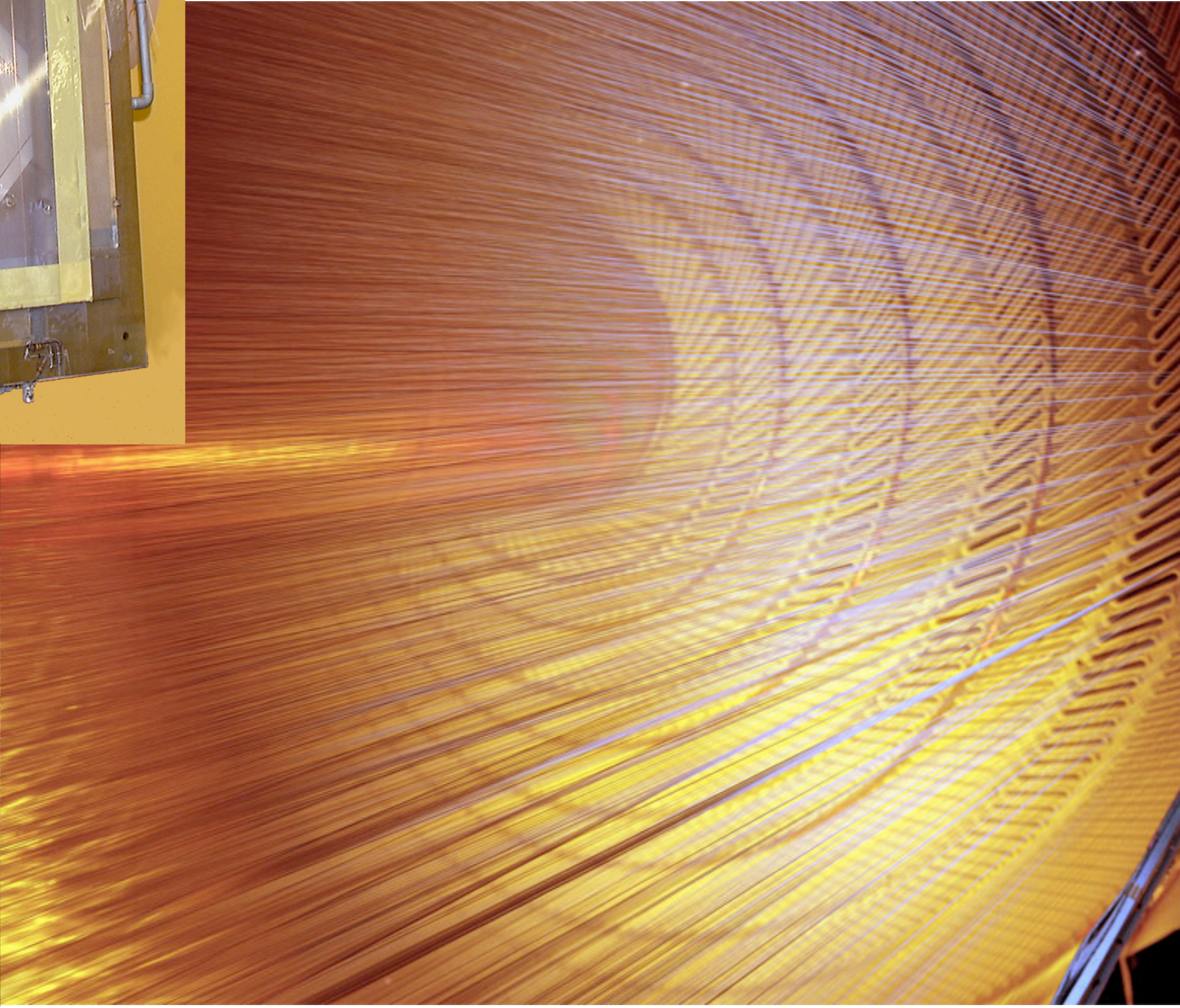
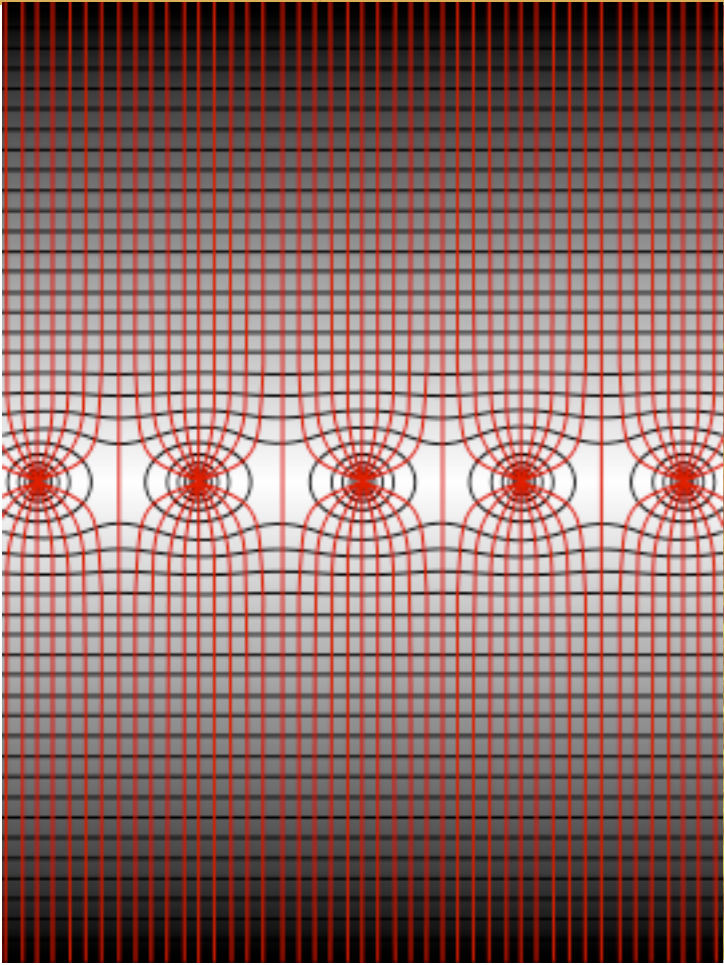
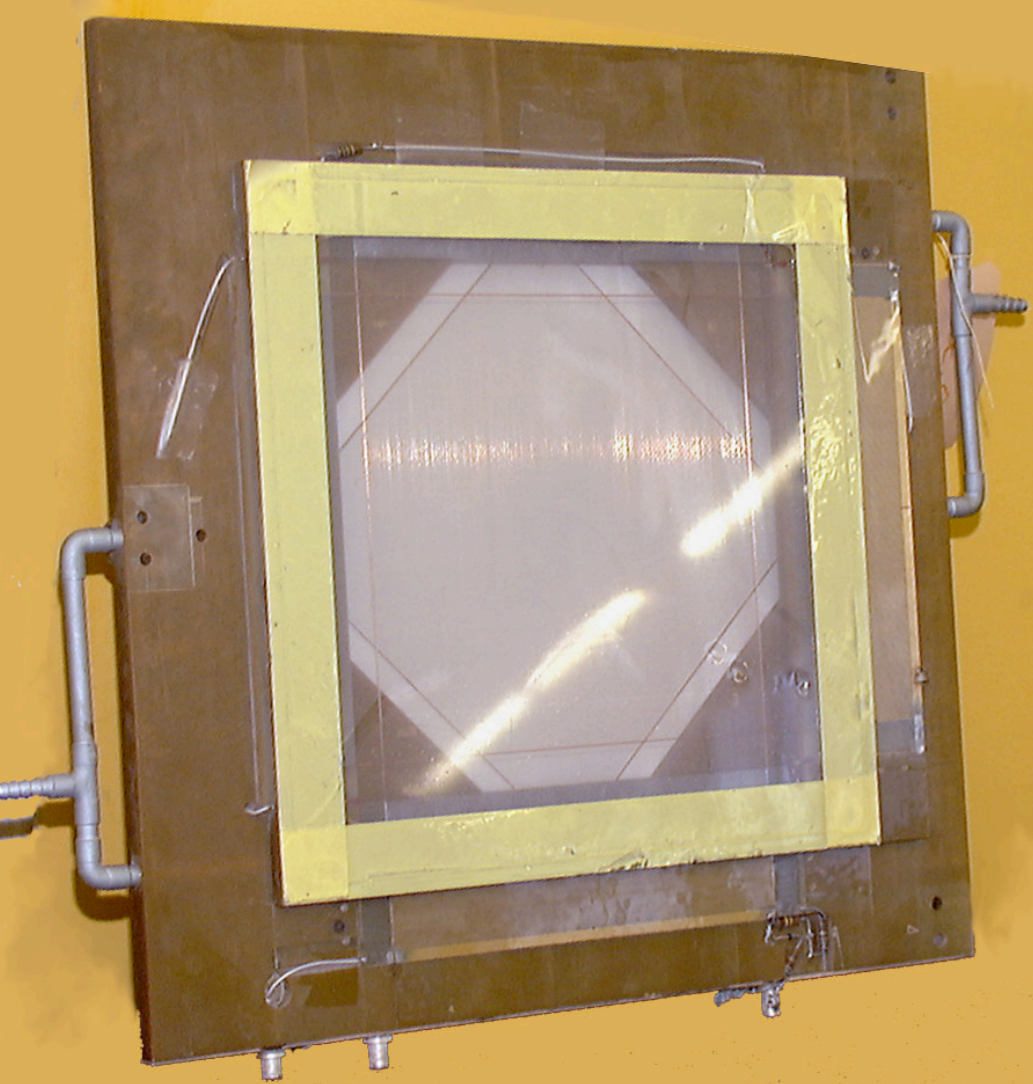


GM管での電子の発生



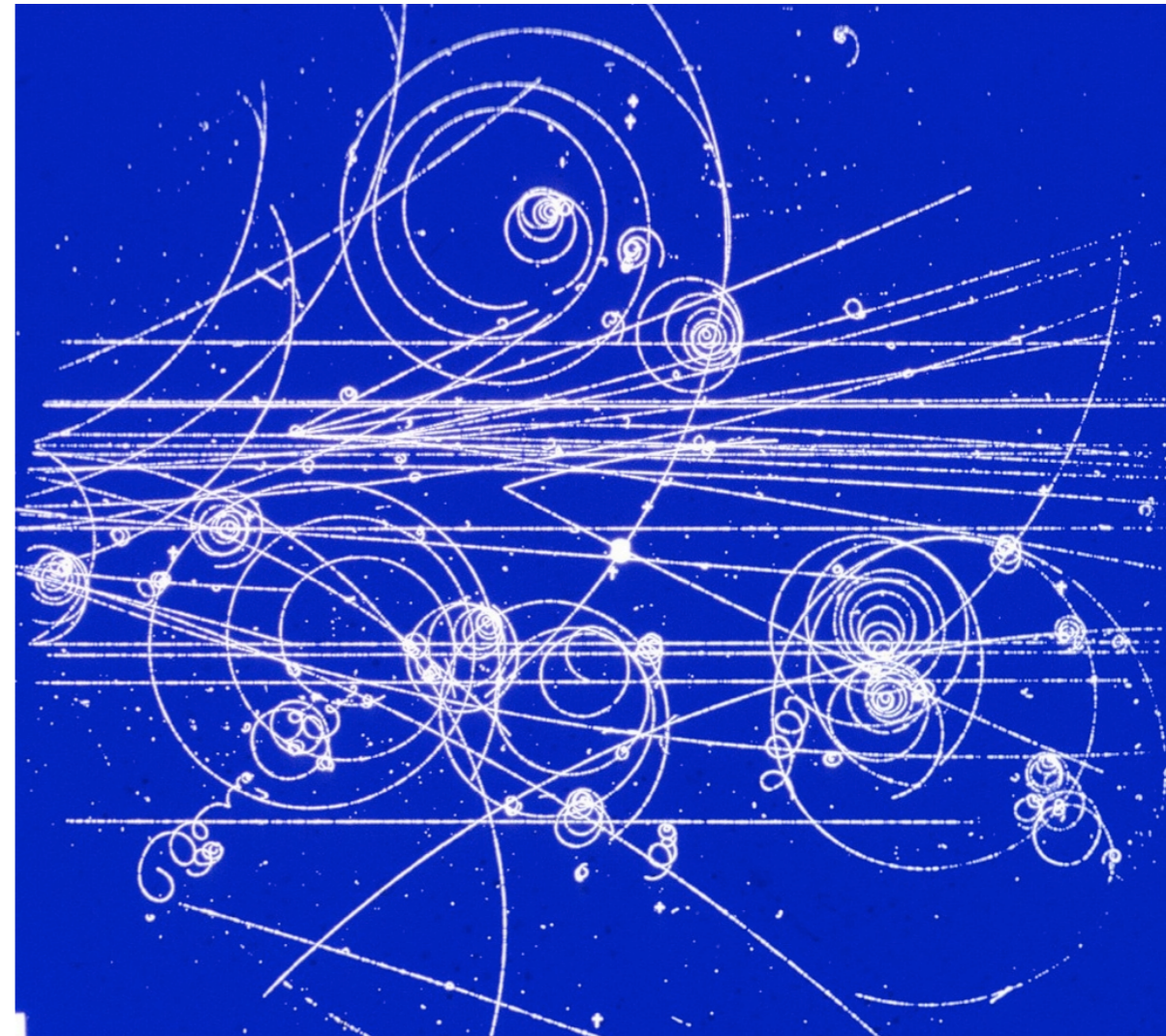
ワイヤーチェンバー MWPC

Multi-wire proportional chamber

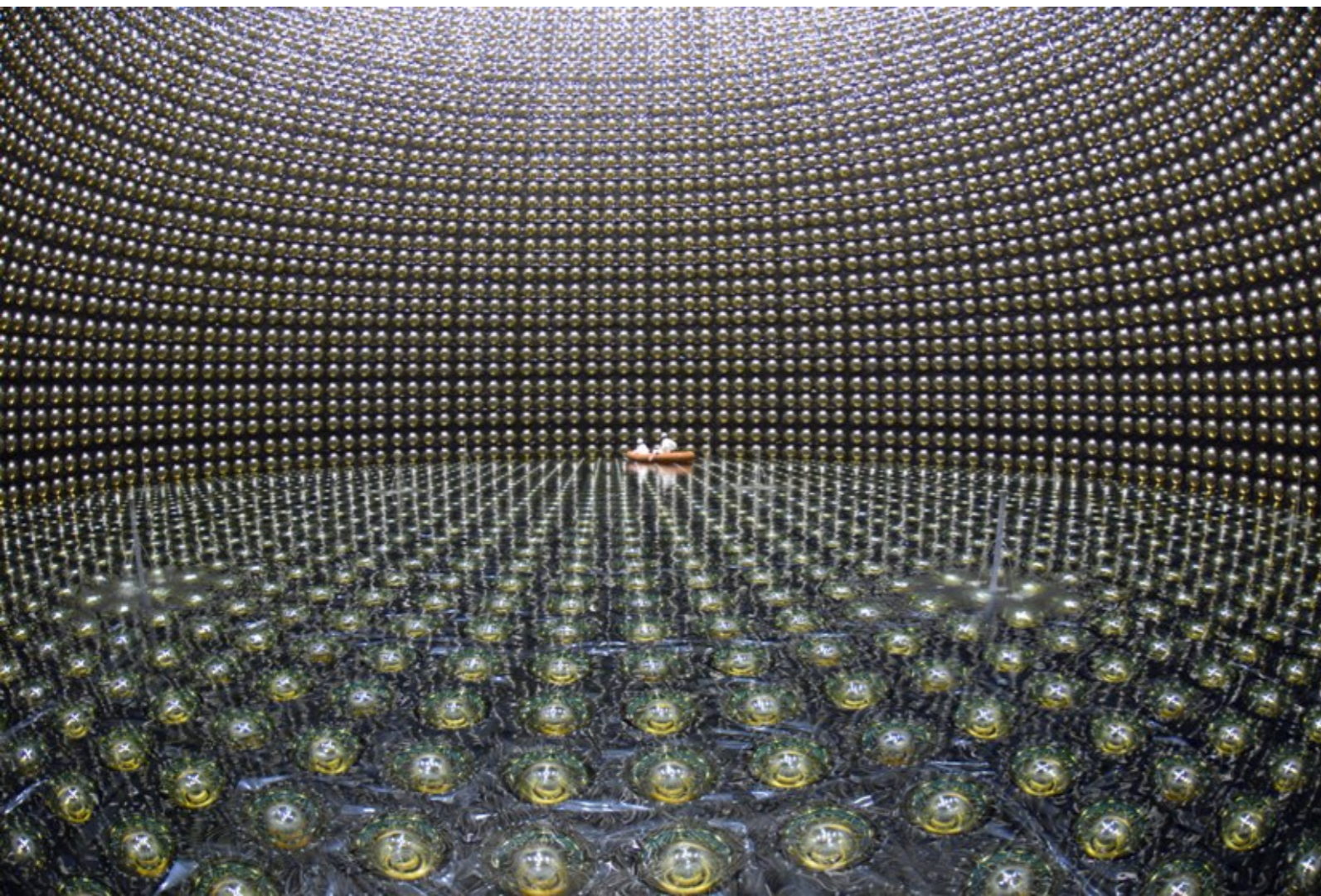
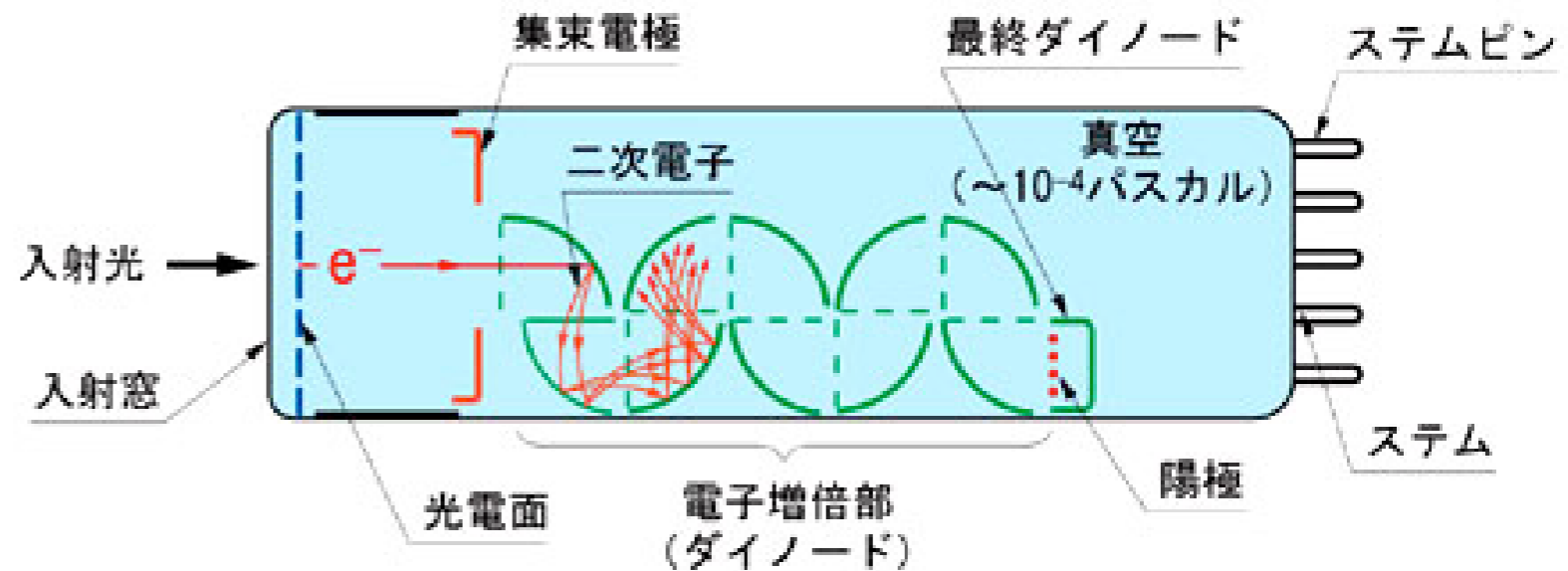


泡箱

Bubble chamber



光電子増倍管 (PMT: Photomultiplier tube)



光 \Rightarrow 光電効果 \Rightarrow 電子増幅
 \Rightarrow 電流

シンチレータとの組み合わせ
Scintillator

放射線 \Rightarrow 分子の励起 \Rightarrow 蛍光
光 \Rightarrow 光電子増倍管

シンチレータ (Scintillators)

プラスチックシンチレータ
およびライトガイド

無機 : NaI (Tl), CsI, ZnS, BaF₂,
BGO, GSO など (γ線、X線)
Bi₄Ge₃O₁₂ Gd₂SiO₅

有機 : プラスチックシンチレータ (電子線)
例 : PPO, POPOP / ポリスチレン (荷電粒子)

: 液体シンチレータ

例 : p-テルフェニル / トルエン



ゲルマニウム検出器 (Ge detector)

半導体検出器 (Semiconductor detectors)



例 : Si(Li) 検出器、Ge 検出器 (高エネルギー分解能) (γ線)

放射線 ⇒ 電離 ⇒ 電子正孔対 ⇒ 電荷測定

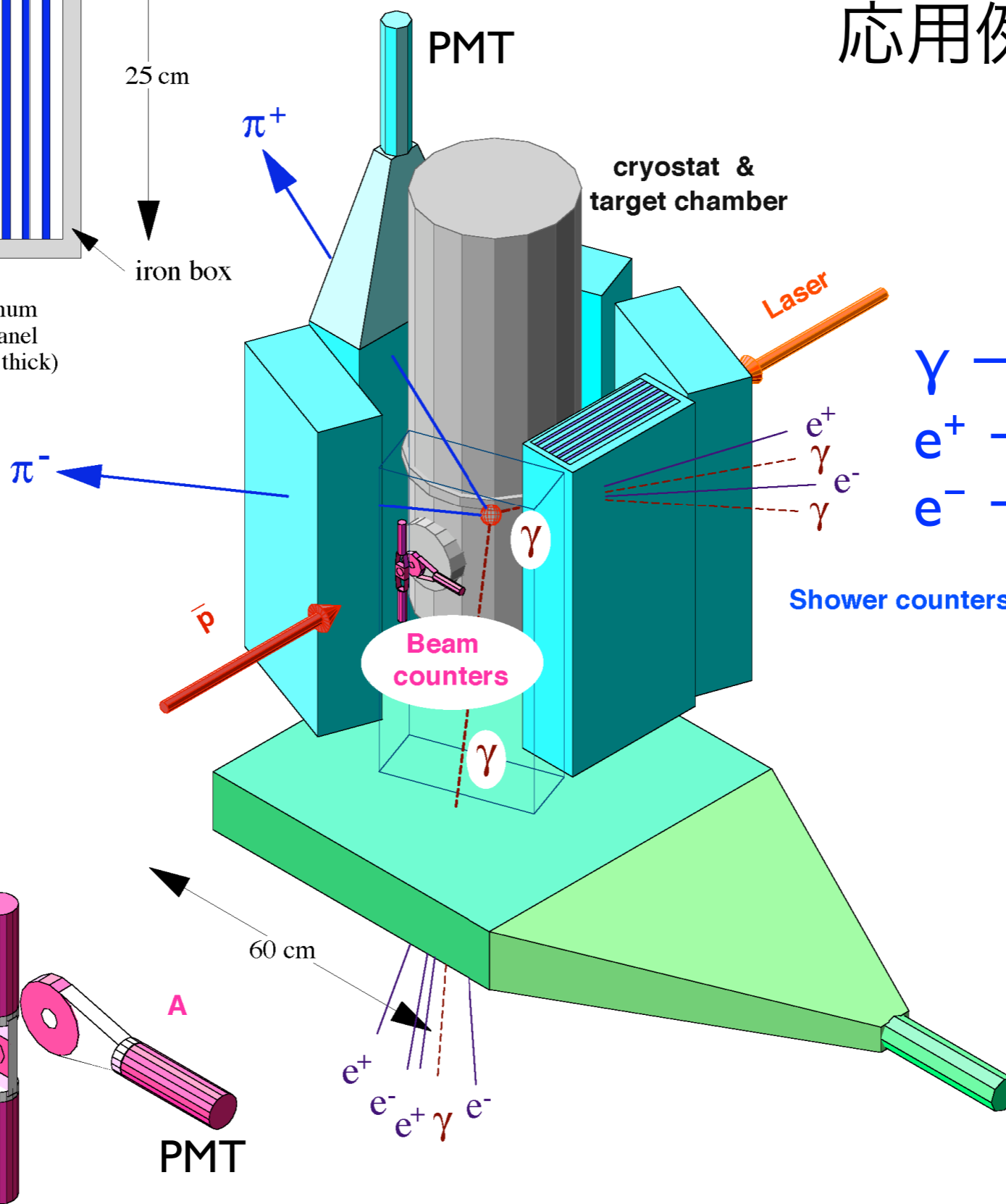
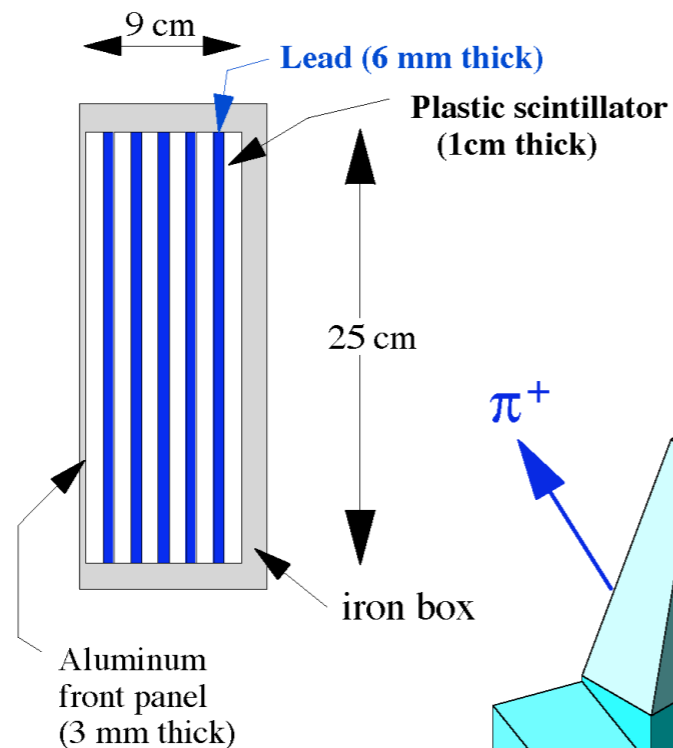
電気パルス : タイミング : 粒子透過時刻

: パルス高 : エネルギー

シンチレーションカウンター

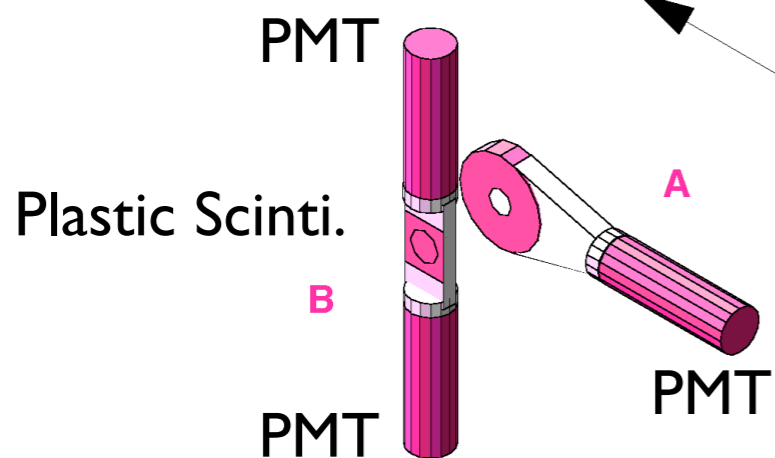
応用例

鉛：Z大
電子対生成
 $\gamma \rightarrow e^+ e^-$



$\gamma \rightarrow e^+ e^-$ (電子対生成)
 $e^+ \rightarrow e^+ \gamma$ (制動放射)
 $e^- \rightarrow e^- \gamma$ (制動放射)

電磁シャワー



線量計 (個人線量計、環境放射線測定)

フリック線量計

熱ルミネッセンス線量計

ガラス線量計



光刺激ルミネッセンス線量計

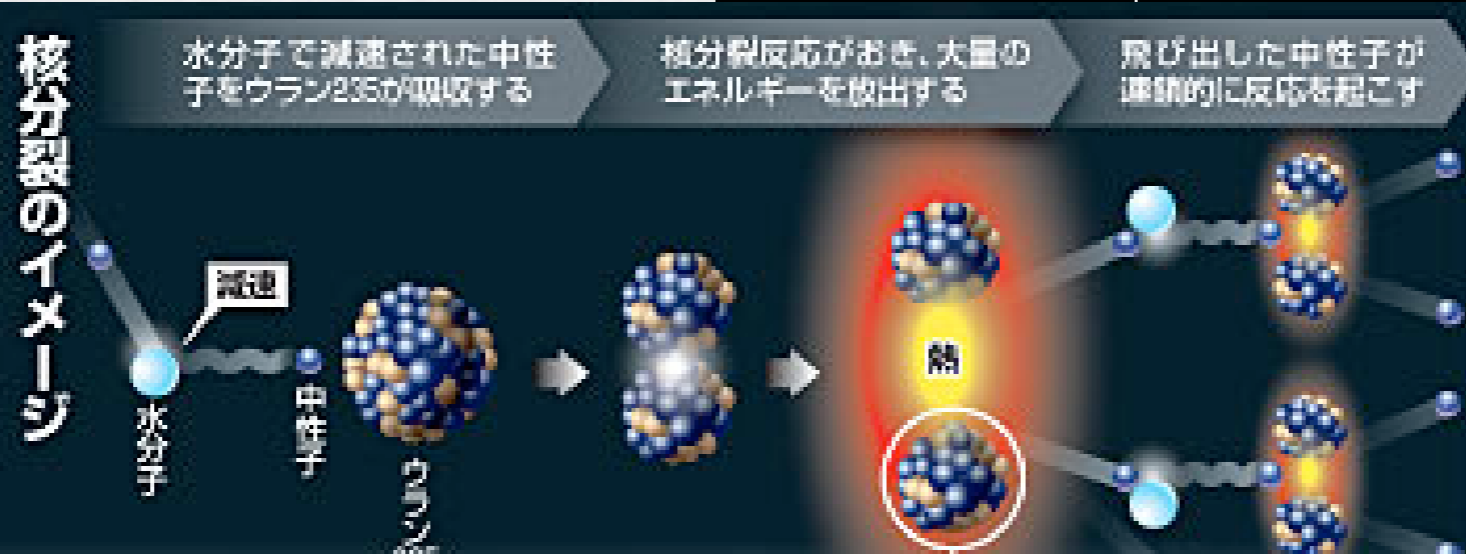
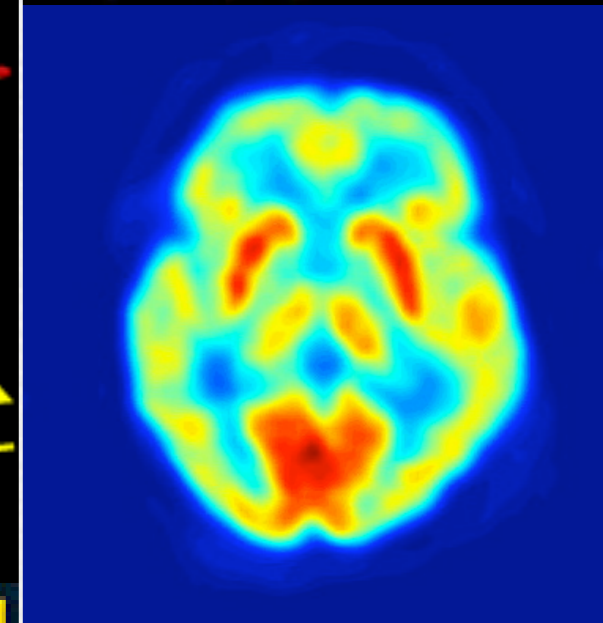
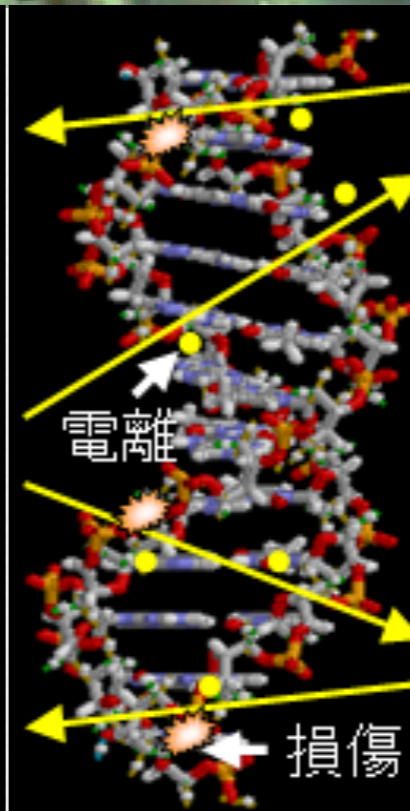
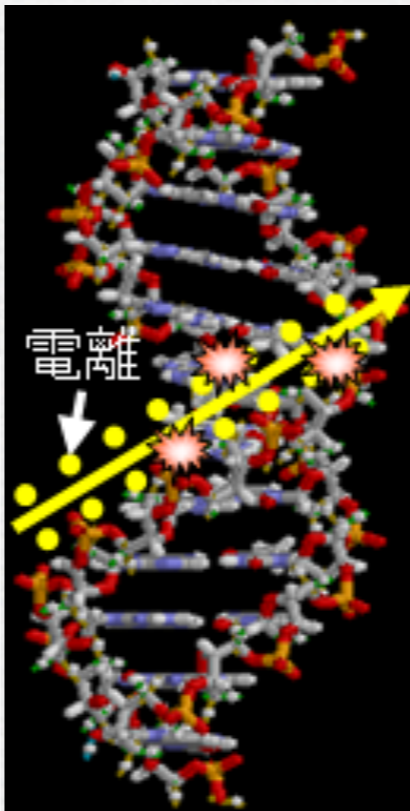
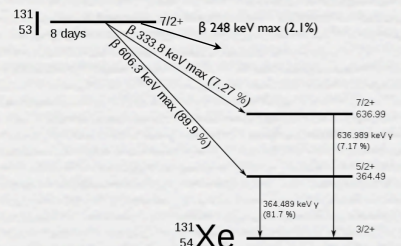
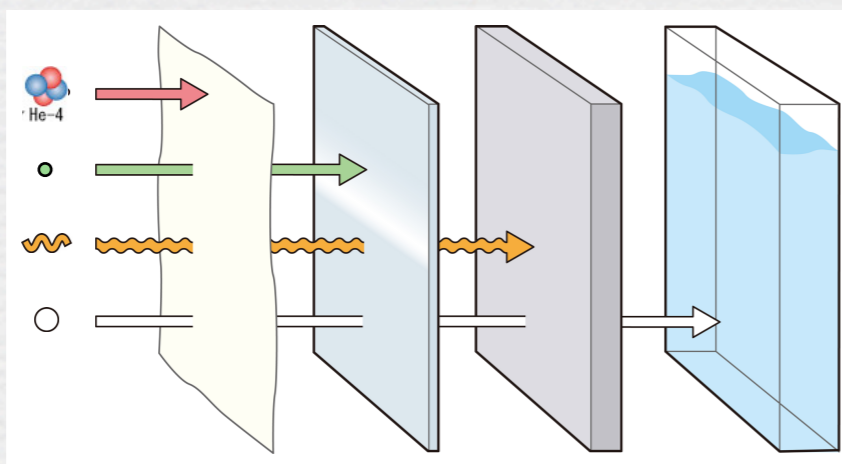
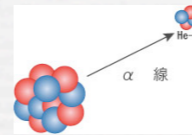
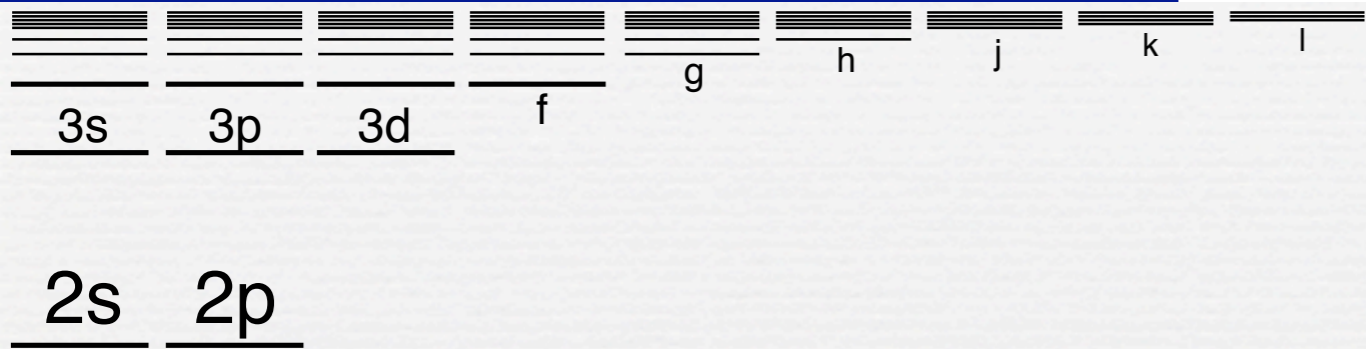
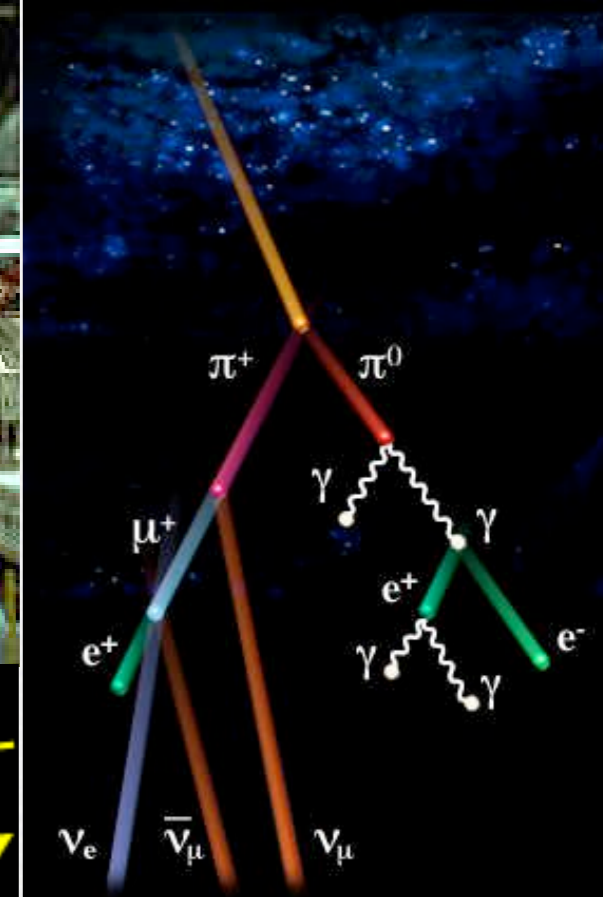
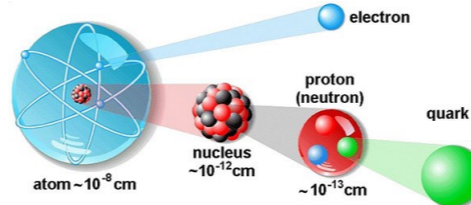
蛍光ガラス線量計 $Ag^+ \rightarrow Ag^0, Ag^{++}$

ポケット線量計：電離箱、半導体検出器

フィルムバッジ：銀塩写真フィルム $AgBr$



放射線



放射線を科学的に理解する

- 10/12 放射線入門 【鳥居】
- 10/19 放射線物理学 【鳥居】
- 10/26 放射線計測学 【小豆川】
- 11/ 2 環境放射化学 【小豆川】
- 11/ 9 放射線生物学 【渡邊】
- 11/16 放射線医療 【作美】
- 11/20 原子核物理学 【鳥居】
- 11/30 環境システム工学 【森口】
- 12/ 7 科学技術社会論 【藤垣】
- 12/14 環境放射化学 【小豆川】
- 12/21 植物栄養・肥料学 【藤原】
- 1/11 放射線の利用 【渡邊】
- 1/25 放射線防護学・加速器科学 【鳥居】

担当教員

ゲスト講師

鳥居 寛之

小豆川 勝見

渡邊 雄一郎

《教養学部》

作美 明

森口 祐一

藤原 徹

藤垣 裕子

《医学部附属病院放射線科》

《工学系都市工学》

《農学部応用生命化学》

《教養学部広域システム》

講義スライド

<http://radphys4.c.u-tokyo.ac.jp/~torii/lecture/>

東大教養 放射線 テーマ講義



検索

連絡先

torii-radio@radphys4.c.u-tokyo.ac.jp

担当教員：鳥居 寛之

Fine

完

Fine.

Grazie per vostra attenzione.

Merci pour votre attention.

Thank you for your attention.

Спасибо за внимание.

경청해 주셔서 감사합니다.

ご清聴ありがとうございました。

鳥居 寛之

Hiroyuki A. TORII