

放射能測定のための 放射線物理入門

1. 放射線と物質の相互作用

2020. 4. 21

高橋 正二

原子の構造

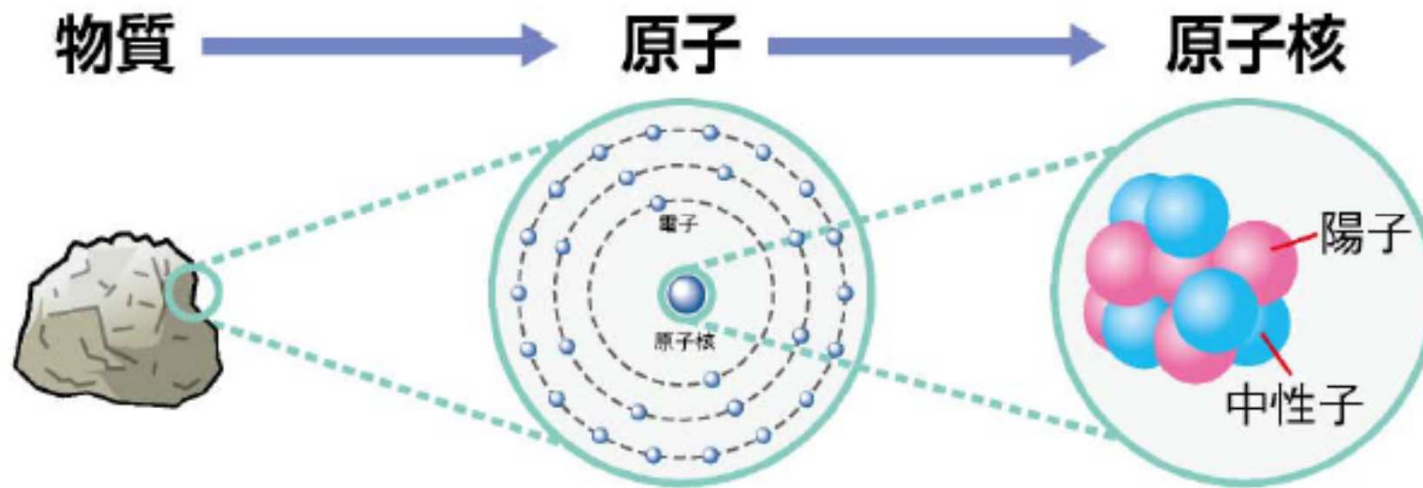
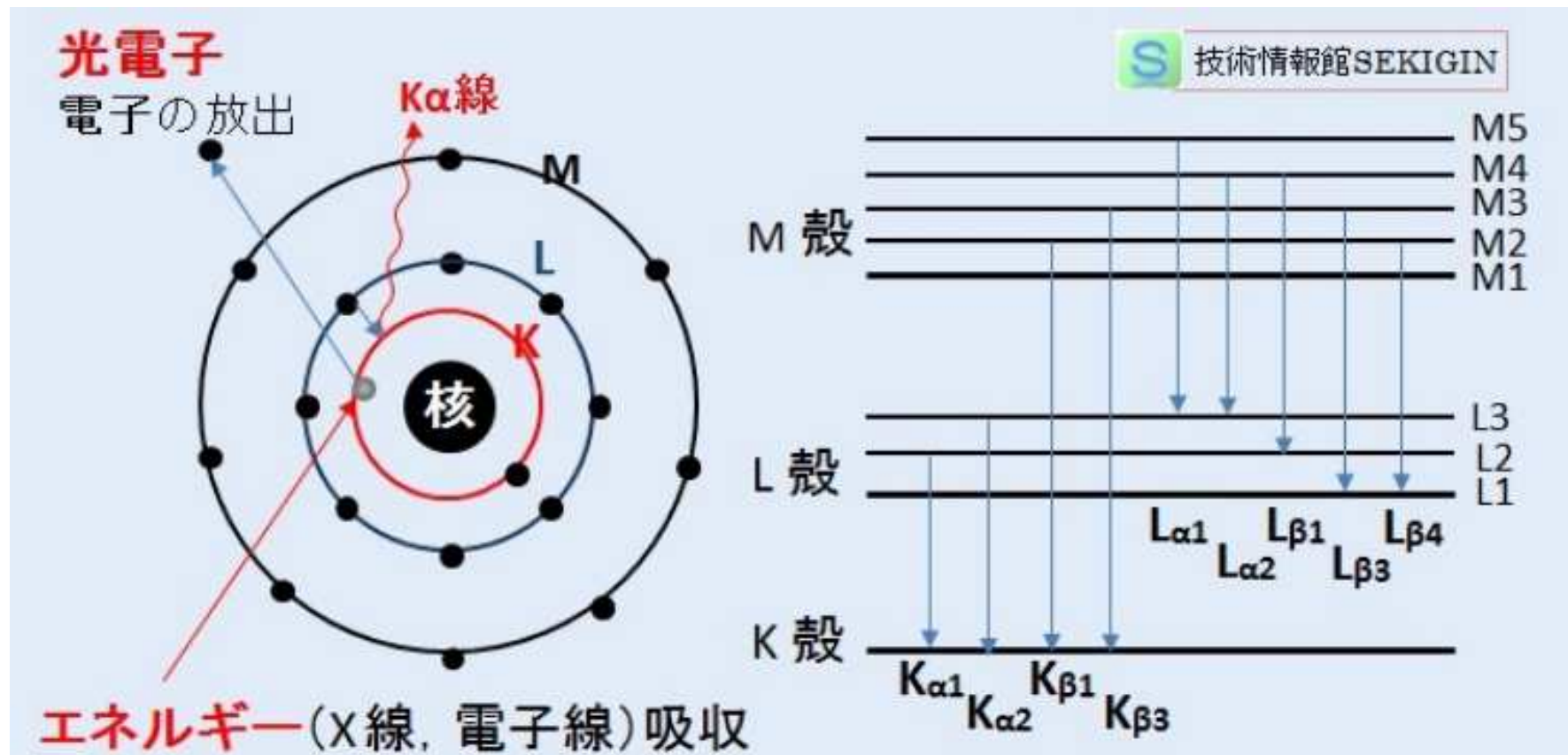


図 1-1 原子の構造

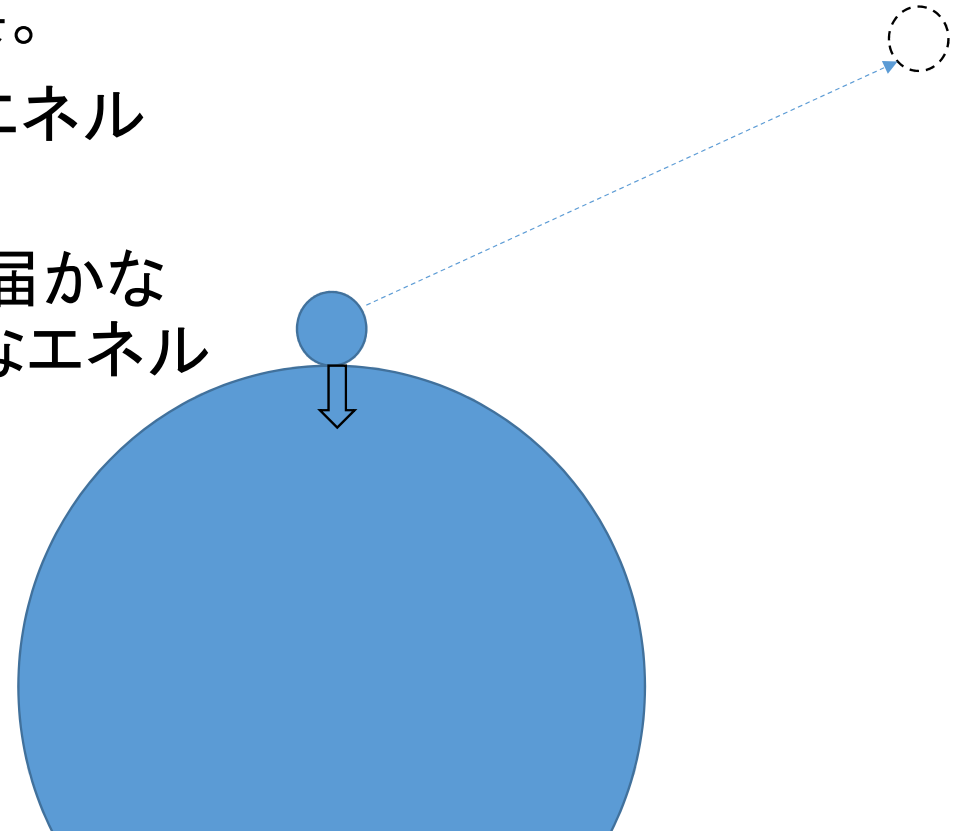
文部科学省発行“知っておきたい放射線のこと”（放射線副読本）より引用

電子、光子と物質との相互作用



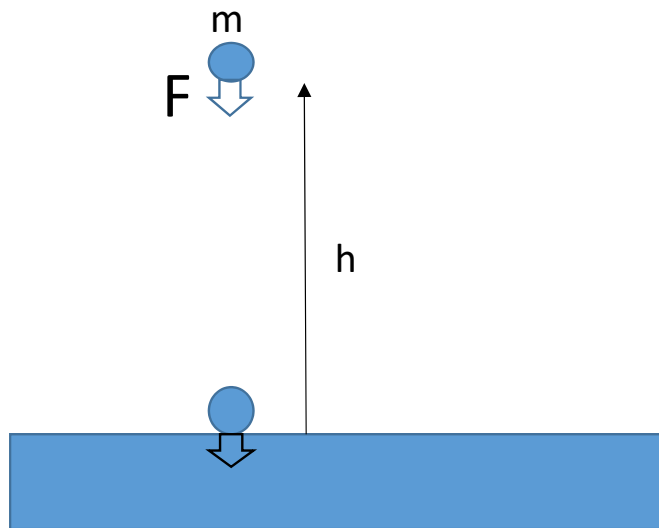
「エネルギー」

- 引力が働いて固定されてているものを引き離して遠ざけるには仕事(W)が必要。
- 摩擦のない系で受け取った仕事をエネルギーと呼ぶ。
- 引力で束縛状態にある物体を力が届かないほど遠方まで引き離すのに必要なエネルギーを束縛エネルギーと呼ぶ。



位置エネルギー(ポテンシャルエネルギー)

- 重力場 低い高さでは物体にかかる重力は(ほぼ)一定

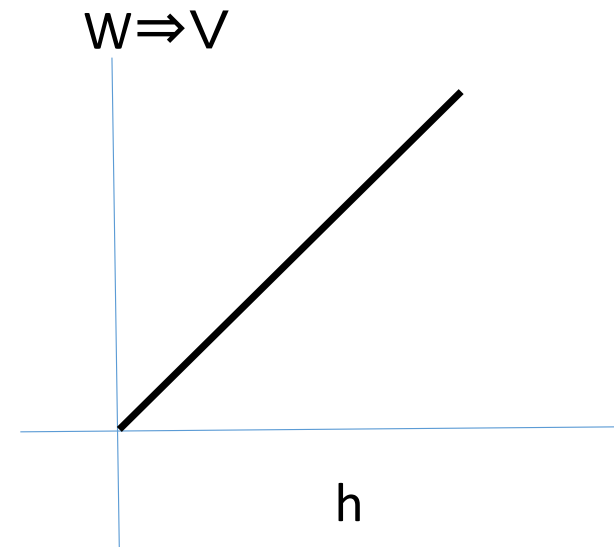


$$F=mg$$

高さ h まで持ち上げる
のに必要な仕事

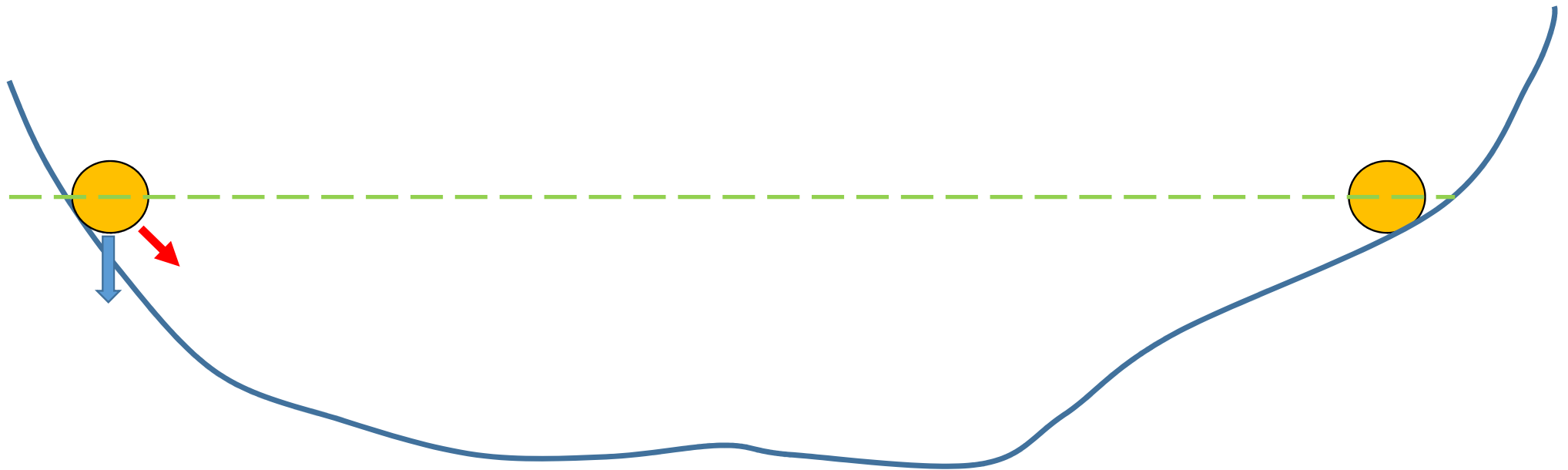
$$W=Fh=mgh$$

与えた仕事が途中で
ロスしていないとき、
蓄えられた仕事を位
置エネルギー(V)と
呼ぶ

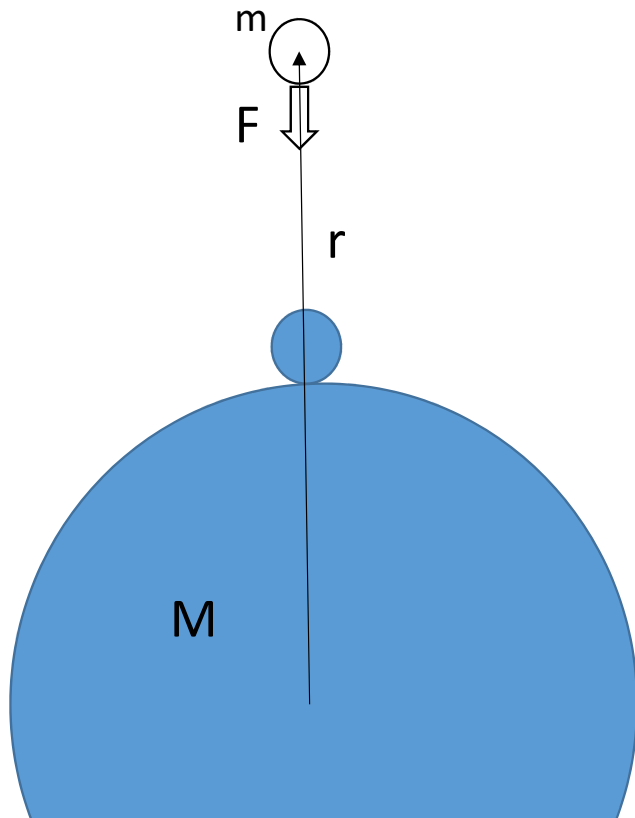


重力による位置エネルギー

- 坂の途中にある球は手を離すと、ちょうど同じ高さまで登って止まる
(ころがり摩擦がないとして)

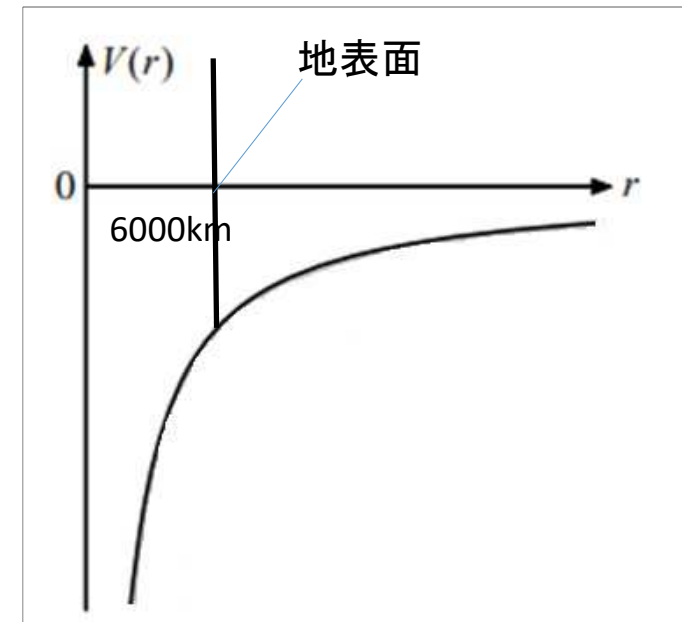


地表からはるか遠くまで離れるとき



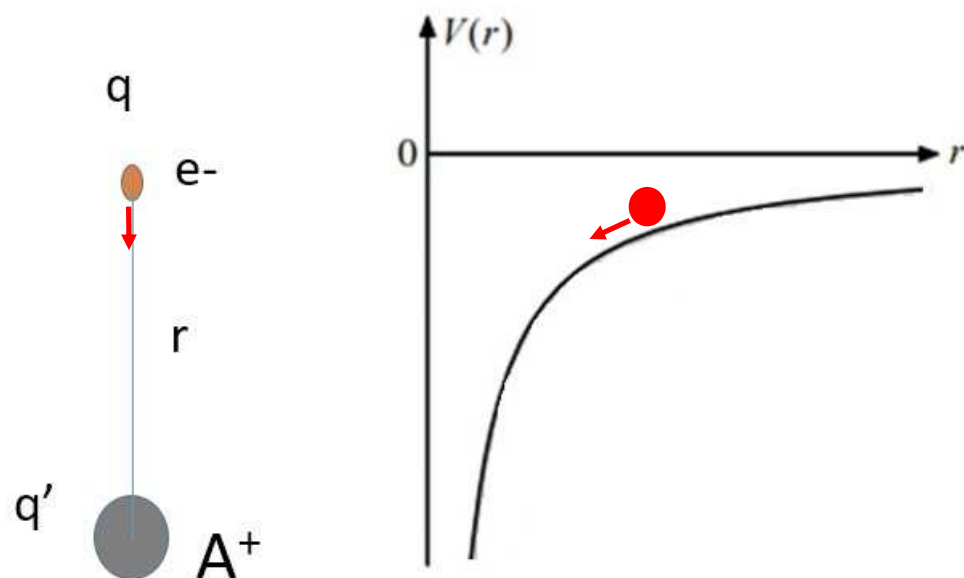
$$F = G \frac{Mm}{r^2}$$

$$V = -\frac{GMm}{r}$$

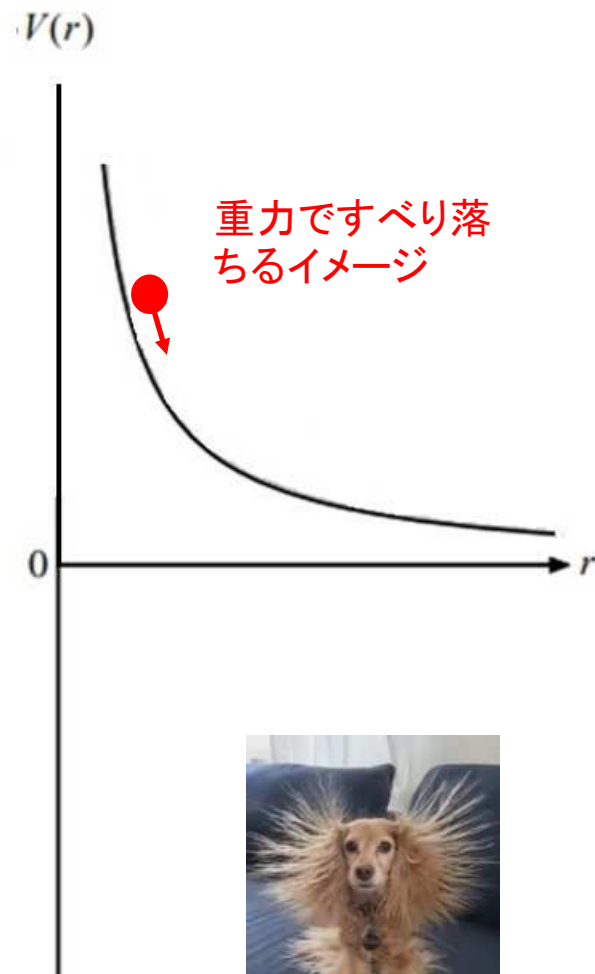
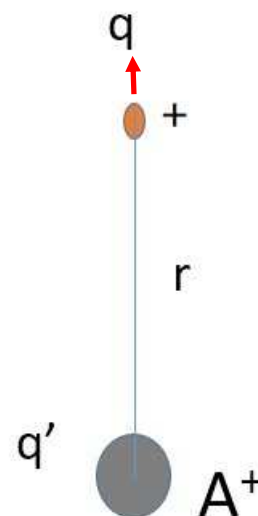


電氣的な引力

- $F = k \frac{qq'}{r^2}$

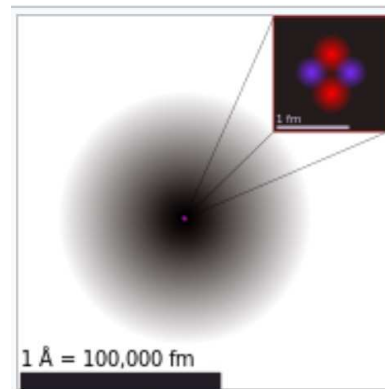
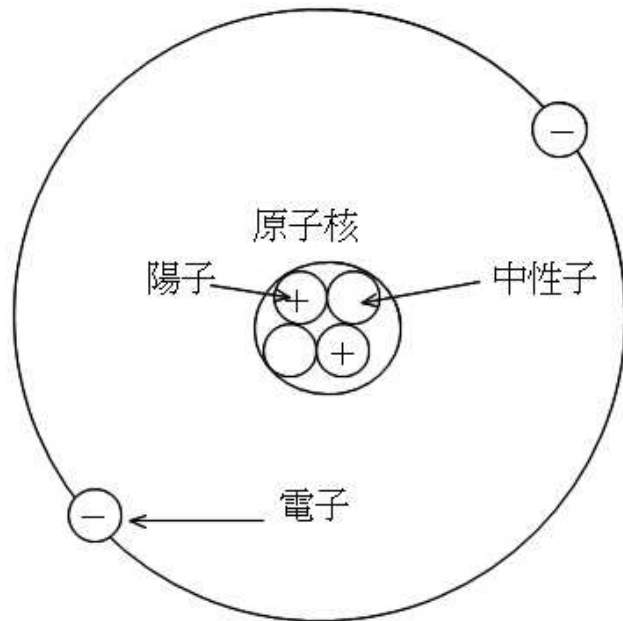


⊕ と ⊕
斥力(反発力)

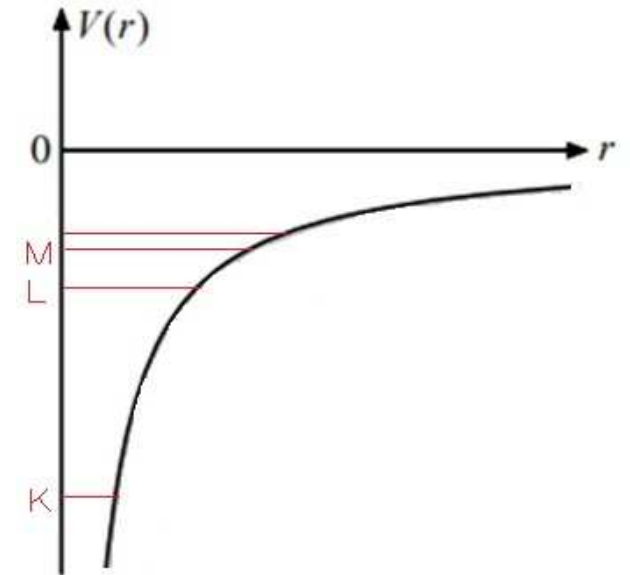


原子の構造

- ・原子の中心には+電荷をもつ陽子と電氣的に中性な中性子からなる原子核がある
- ・原子核の周りには-電荷をもつ電子が電氣的な引力で束縛されている
- ・電子は量子力学的効果により原子核に密着できず離散的なエネルギー値(エネルギー準位)に留まる
- ・一つのエネルギー準位に入れる電子の数は限りがある

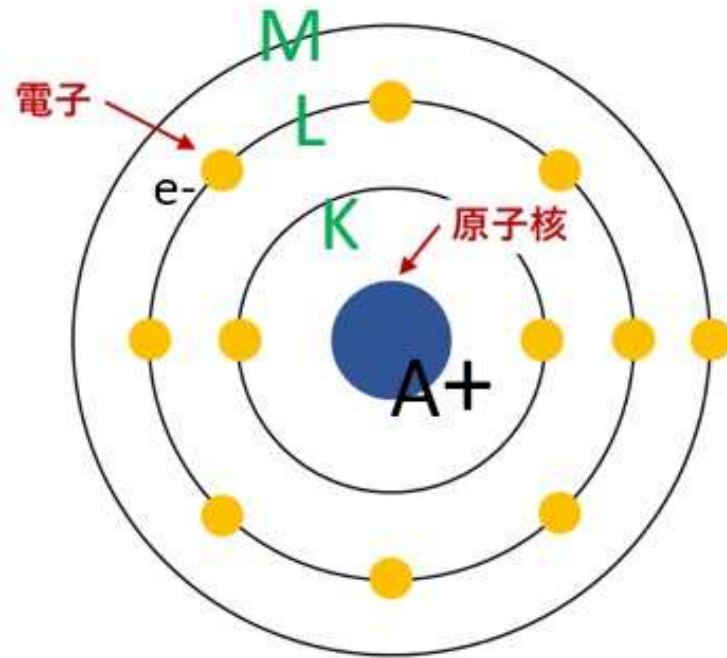


ウィキペディア「原子」



殻模型 (shell model)

- ・それぞれの殻に入りうる電子の数は決まっている。
- ・殻と殻との間には大きなエネルギー差がある。そのため殻に最大数まで入った原子は化学的には安定である 希ガス



殻	最大電子数	累算 (原子番号)	元素
K	2	2	He
L	8	10	Ne
M	18	28	Ar
N	32	60	Kr
:			

電子の束縛エネルギー

「放射線データブック」村上悠紀雄他、地人書館1982年

原子の電子結合エネルギー(eV)													
原子番号 (A)	元素	K	L1	L2	L3	M1	M2	M3	M4	M5	N1	N2	...
1	H	13.6											
2	He	24.6											
8	O	532.0	23.7	7.1									
13	Al	1,559.6	117.7	73.1									
26	Fe	7,112.0	846.1	721.1	708.1	92.9	54.0	3.6					
29	Cu	8,978.9	1,096.6	951	931.1	119.8	73.6	1.6					
55	Cs	35,984.6	5,714.3	5,359.4	5,011.9	1,217.1	1,065.0	997.6	739.5	725.5	230.8	172.3	...
56	Ba	37,440.6	5,988.8	5,623.6	5,247.0	1,292.8	1,136.7	1,062.2	796.1	780.7	253.0	191.8	...
82	Pb	88,004.5	15,860.8	15,200.0	13,035.2	3,850.7	3,554.2	3,066.4	2,585.6	2,484.0	893.6	763.9	...

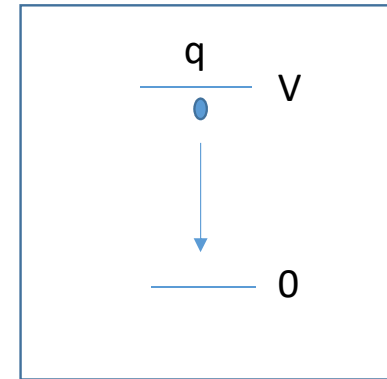
- ・原子番号の増加とともに各軌道の深さ(束縛エネルギー)は急激に深くなる
- ・通常の化学反応は最外殻電子のやり取り 数eV以下の反応
- ・放射線と物質との相互作用は、keV単位の反応
- ・原子核内の反応(放射性物質の壊変、核分裂など)は、MeV単位

荷電粒子の運動エネルギー

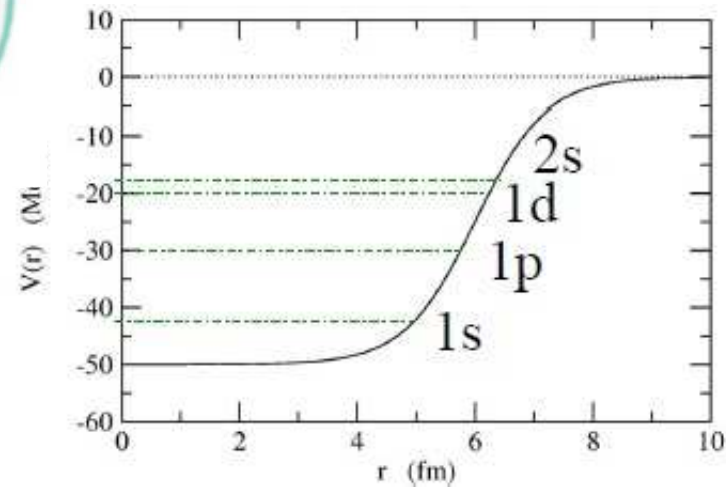
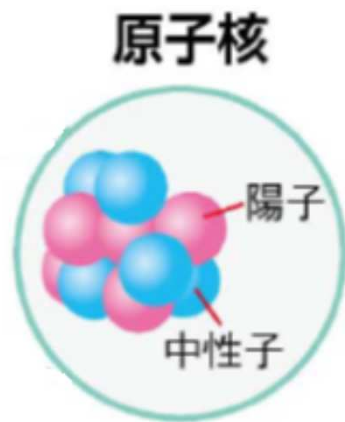
- 電荷 q (C クーロン)の荷電粒子が電圧 V (V)の電圧により加速されるとき得られる運動エネルギー E (J ジュール)は、

$$E=qV$$

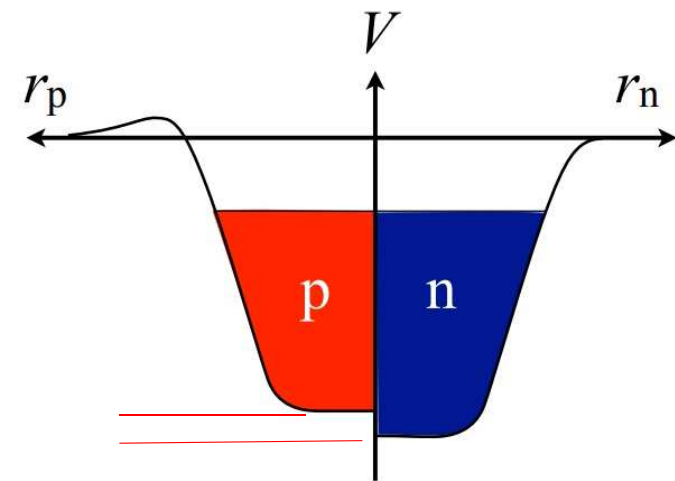
- 核物理では電子電荷 e (1.6×10^{-19} C)が電荷単位としてよく用いられる
 - $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}$ ジュール
 - $1\text{keV} = 10^3\text{eV}$
 - $1\text{MeV} = 10^6\text{eV}$
- 100keVの運動エネルギーをもつ電子が10個当たったときのエネルギーは、()keV？
()ジュール(J)？



原子核の構造



原子核のポテンシャル

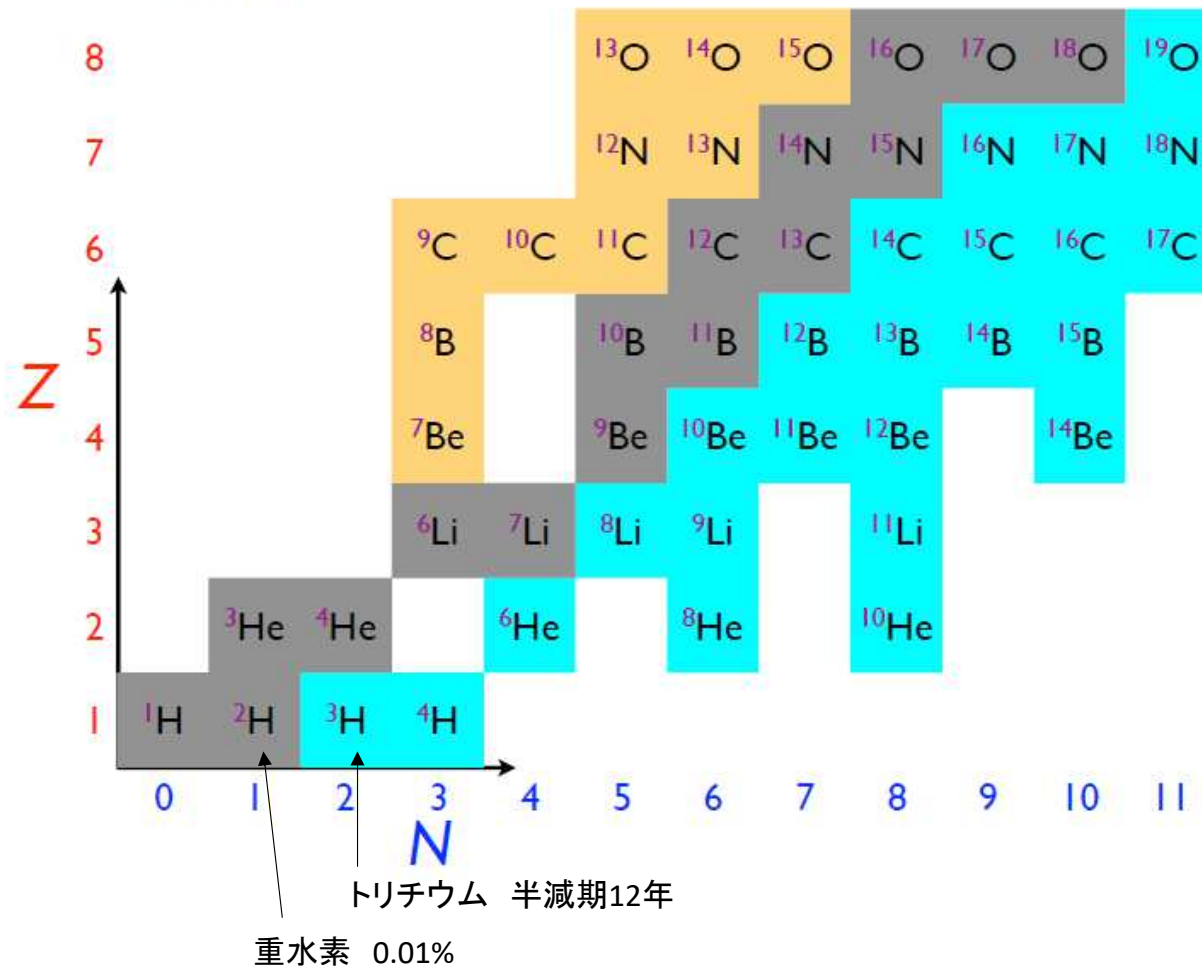
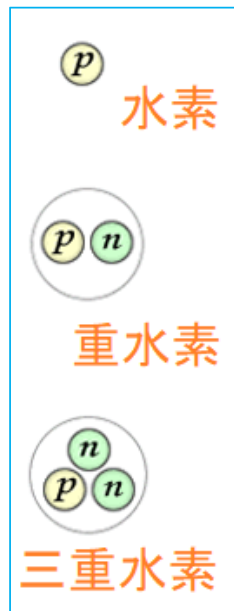


電氣的反発力による位置エネルギーのかさ上げ

アイソトープ(同位元素)

原子番号(Z)が同じで中性子の数(N)が
違う核種

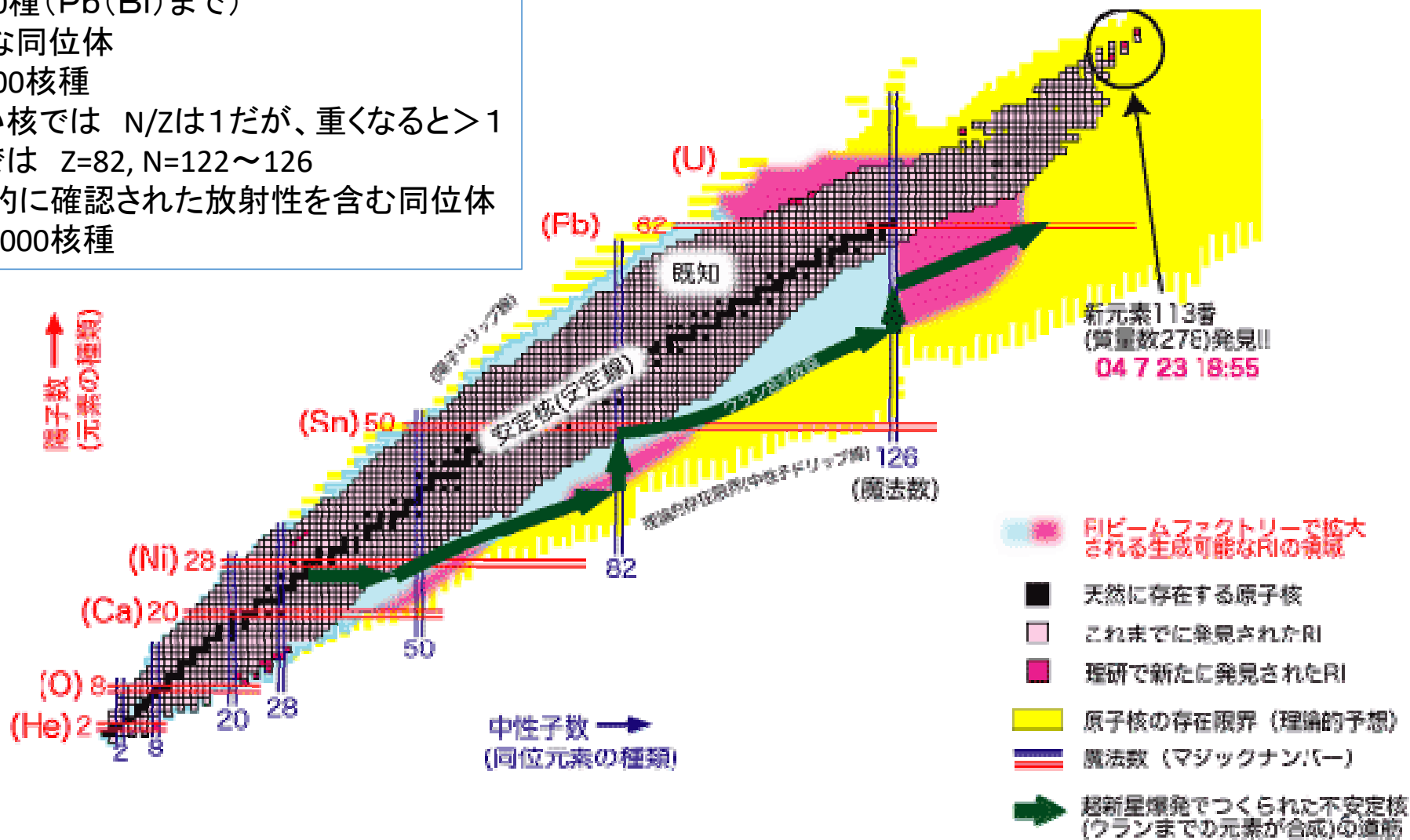
核図表



鳥居 寛之「原子核物理学」

核図表

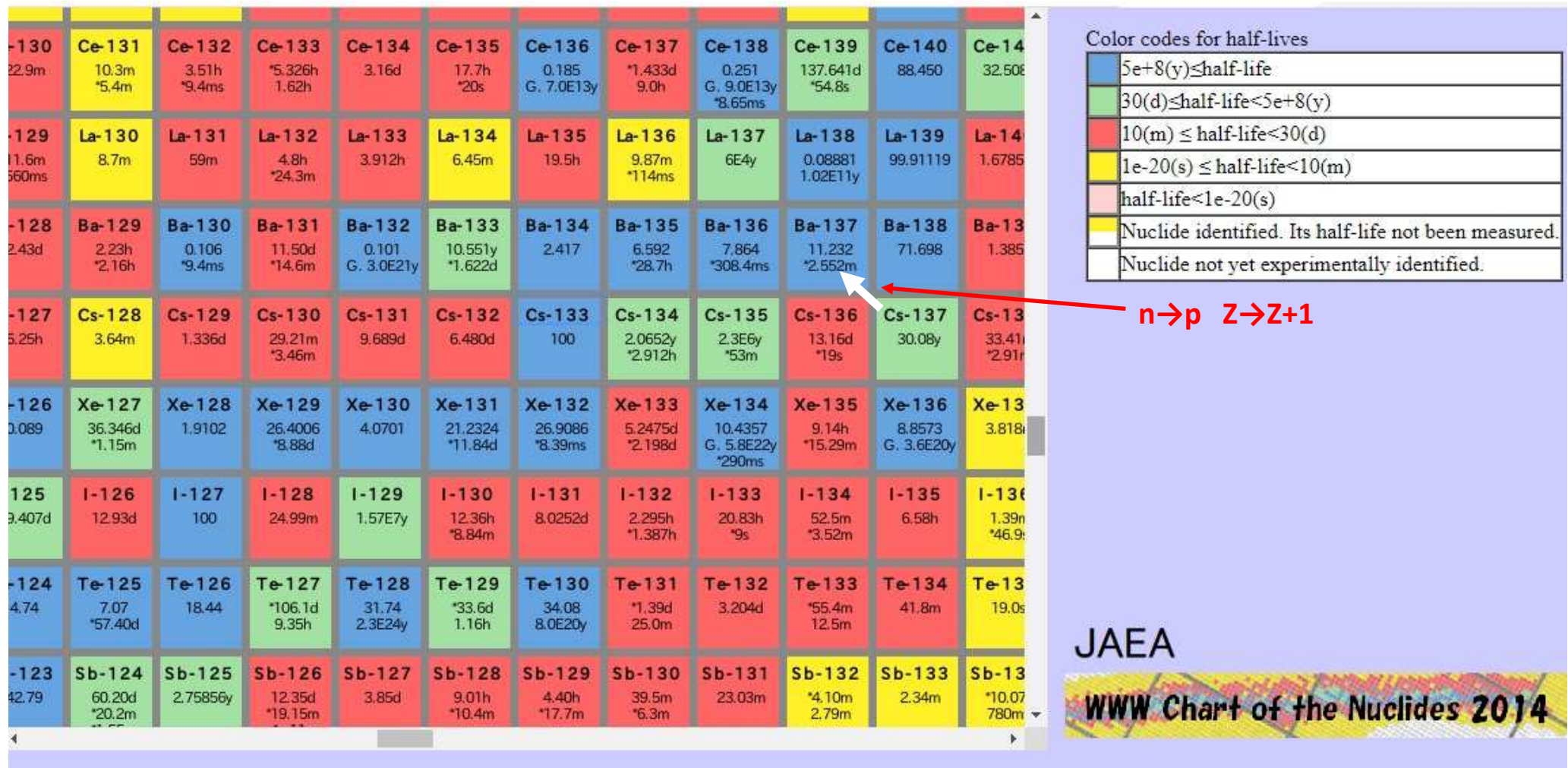
安定な元素
 約80種(Pb(Bi)まで)
 安定な同位体
 約300核種
 軽い核では N/Z は1だが、重くなると >1
 Pbでは $Z=82$, $N=122\sim126$
 実験的に確認された放射性を含む同位体
 約3,000核種



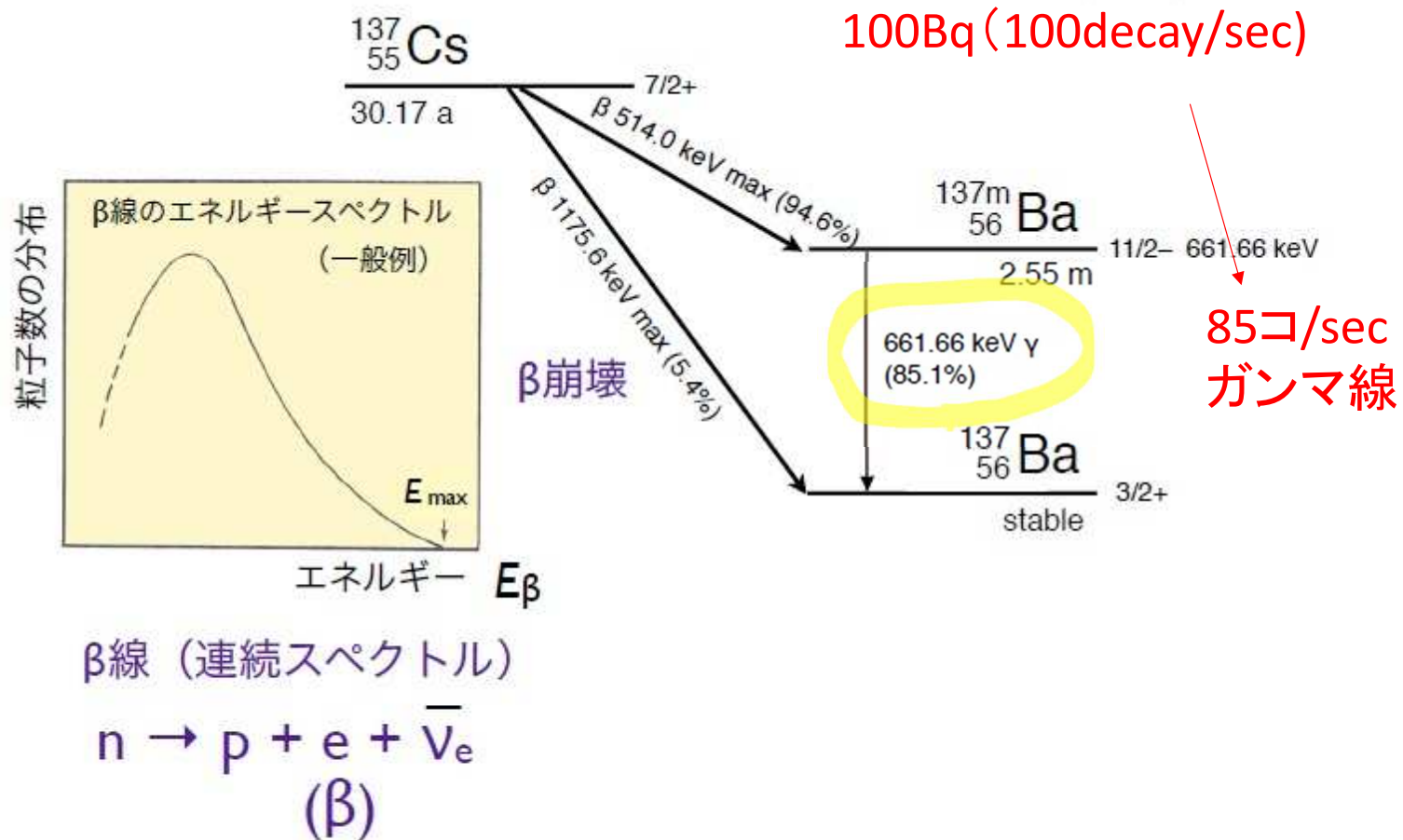
理化学研究所仁科加速器科学研究センター

Cs-137

- ・セシウムの安定同位体はCs-133
- ・Cs-137は中性子が過剰 中性子⇒陽子

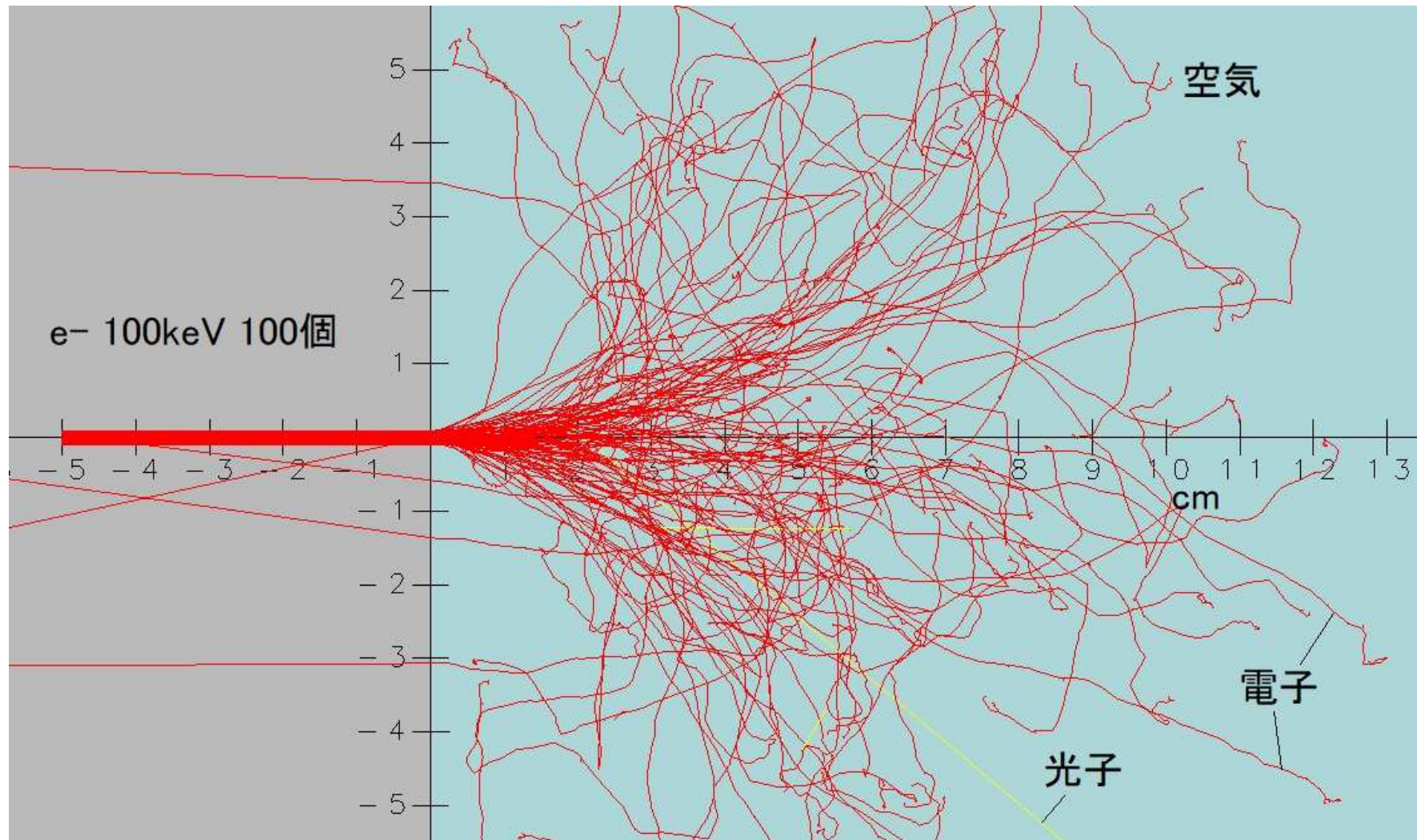


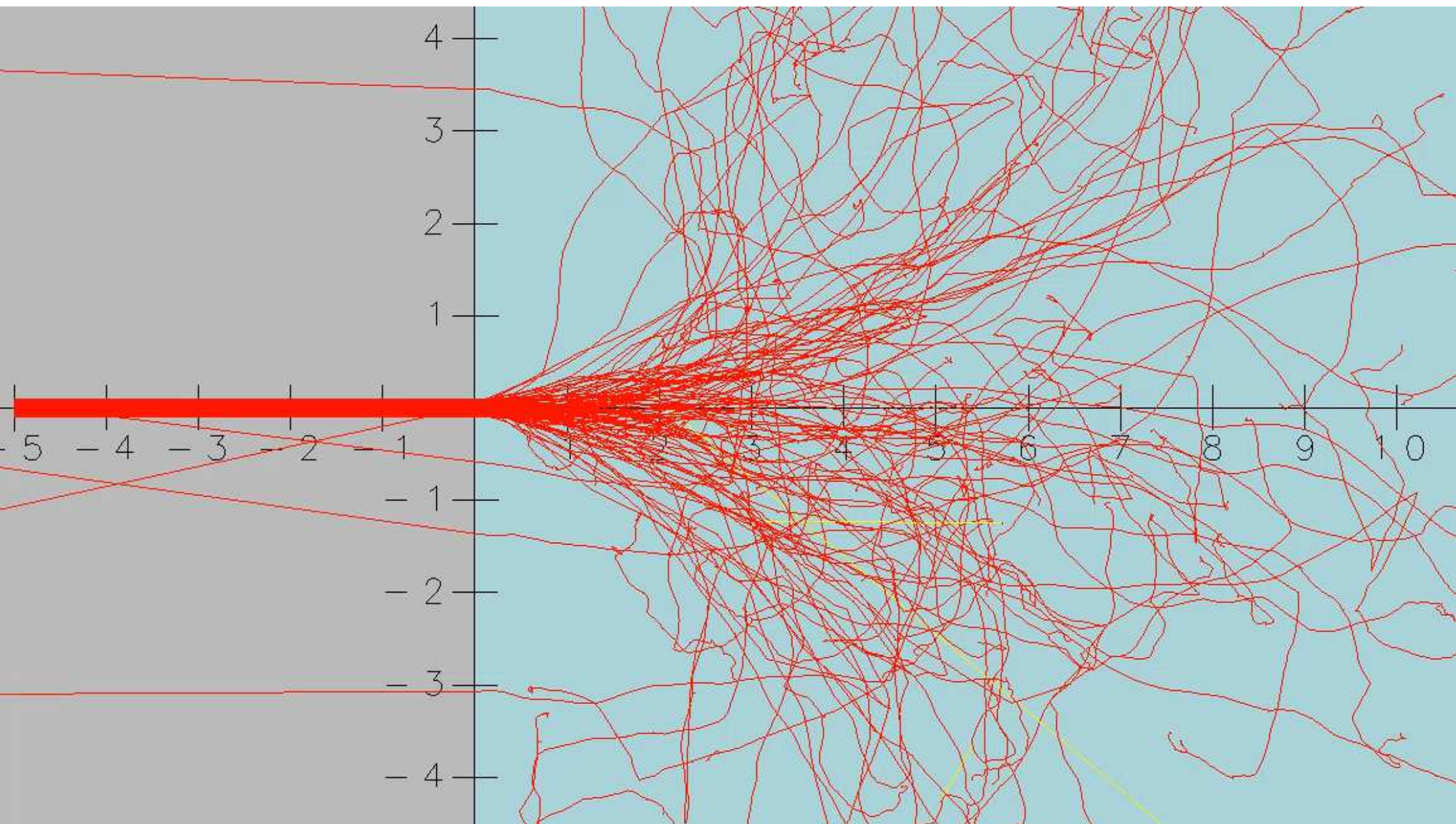
Cs-137の崩壊図式



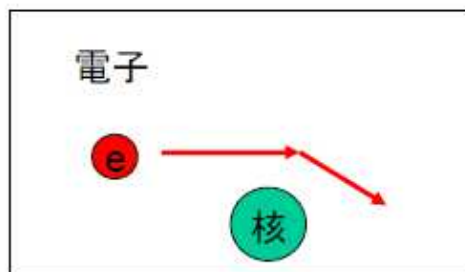
1) 電子と物質との相互作用

電子が空気を通過したとき何が起こっているか？

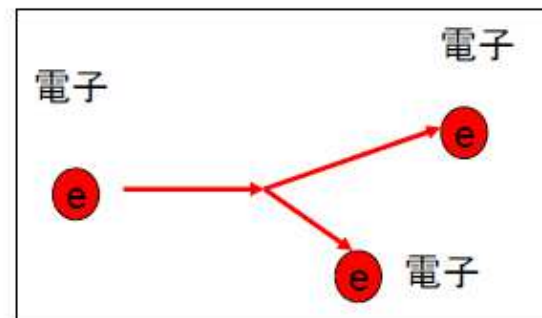




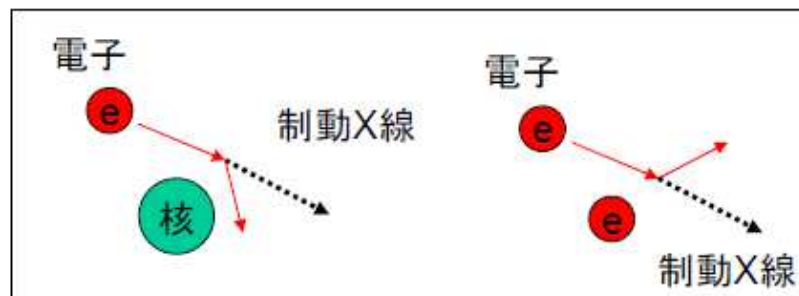
電子と原子核、電子との相互作用



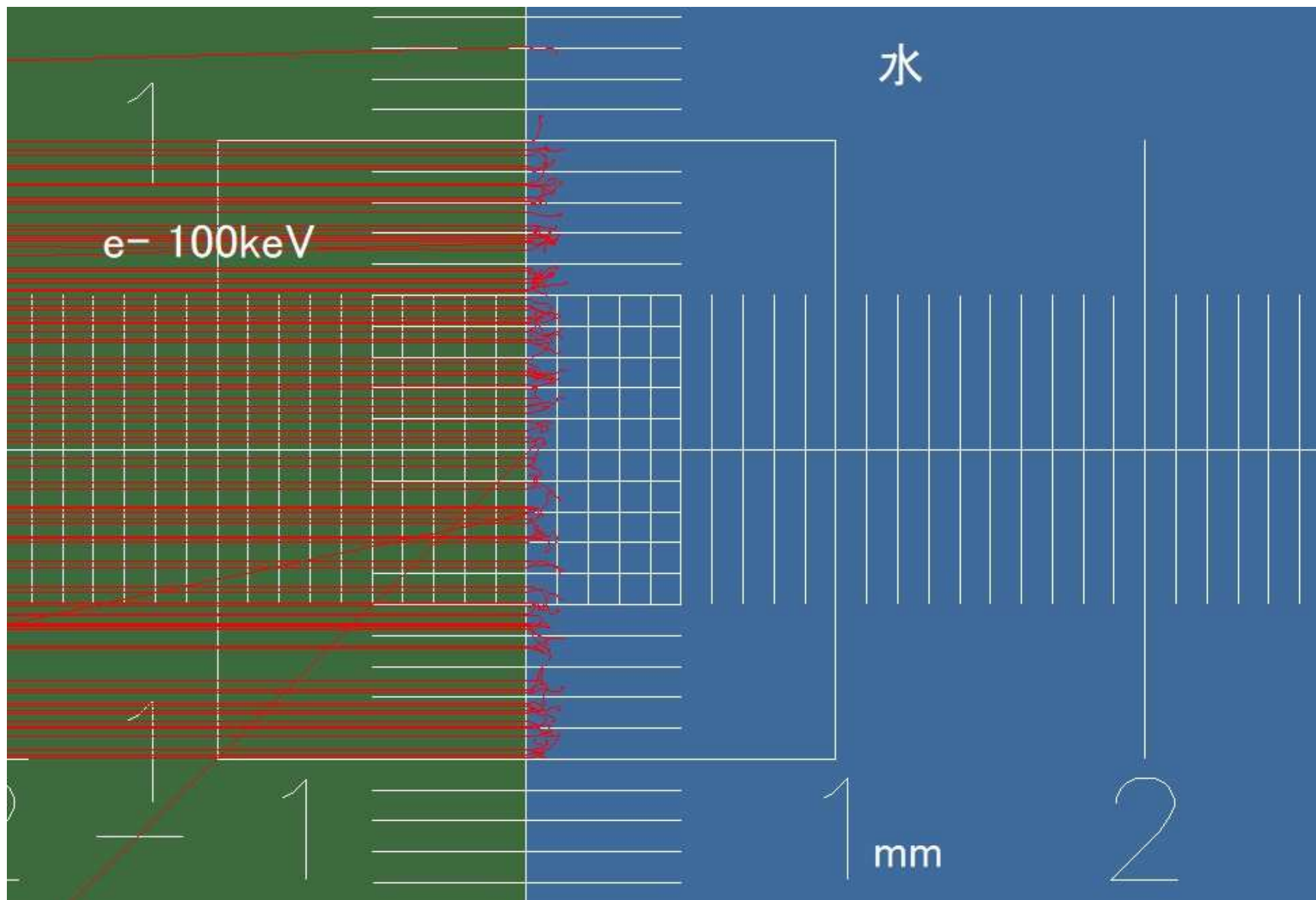
1. 原子核による電子の散乱
(ラザフォード散乱): 方向を大きく変える。

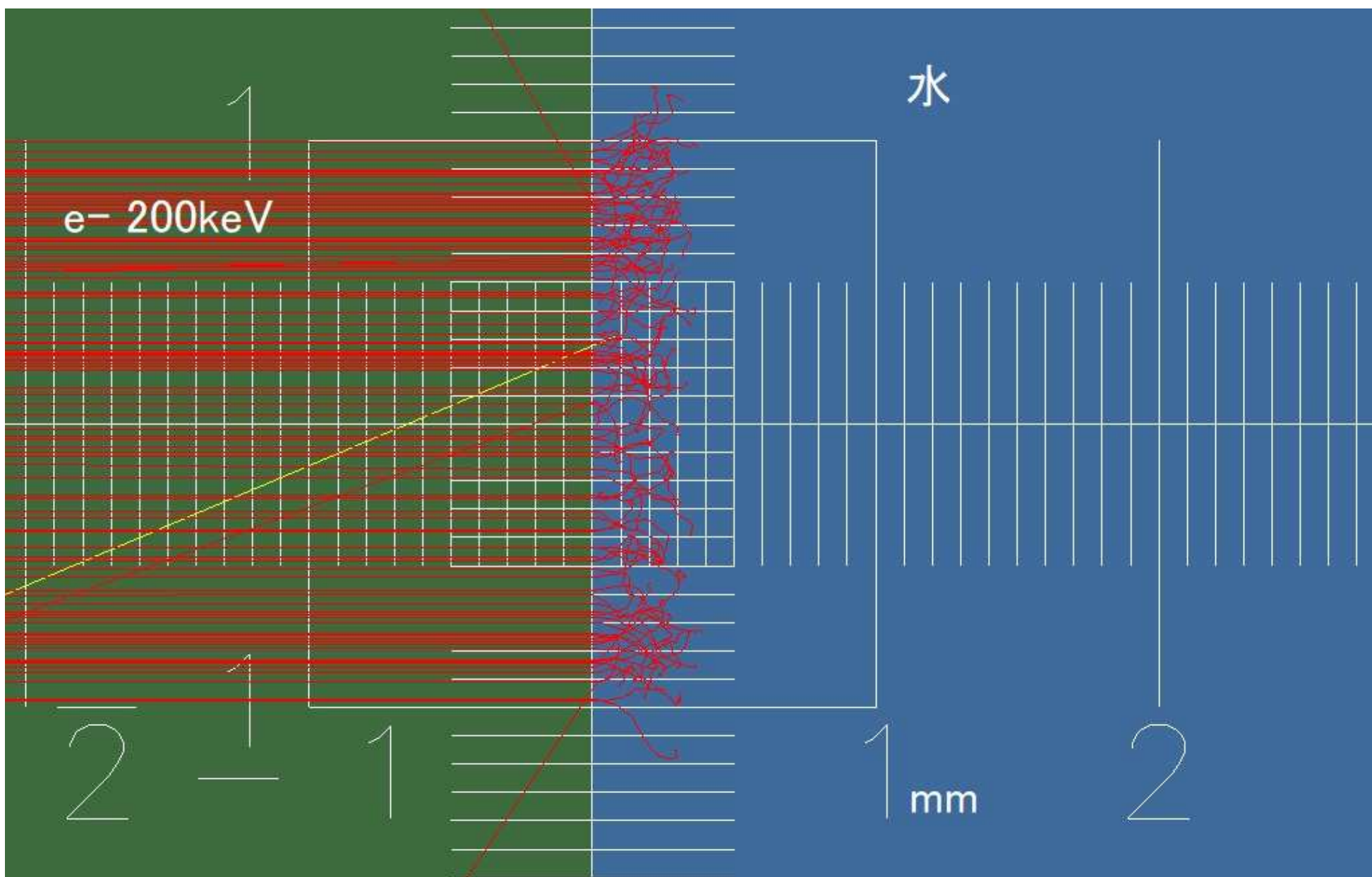


2. 電子と電子の非弾性散乱
エネルギーを失う。



3. 制動X線の発生





電子の飛程

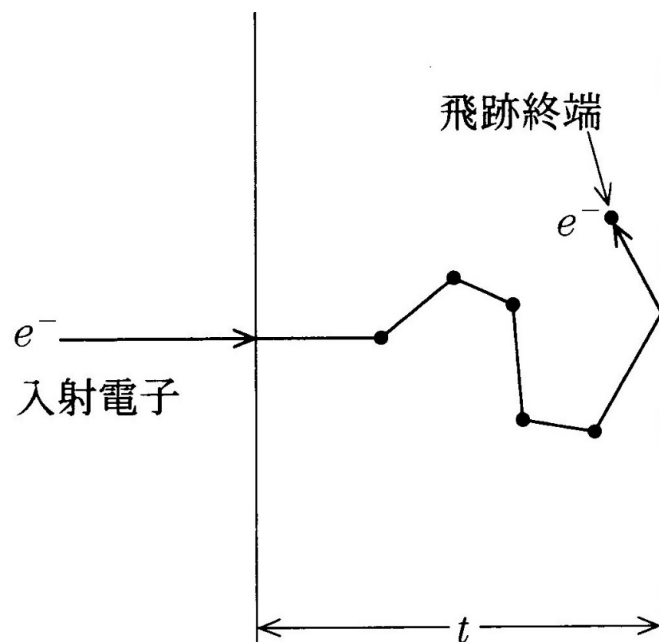
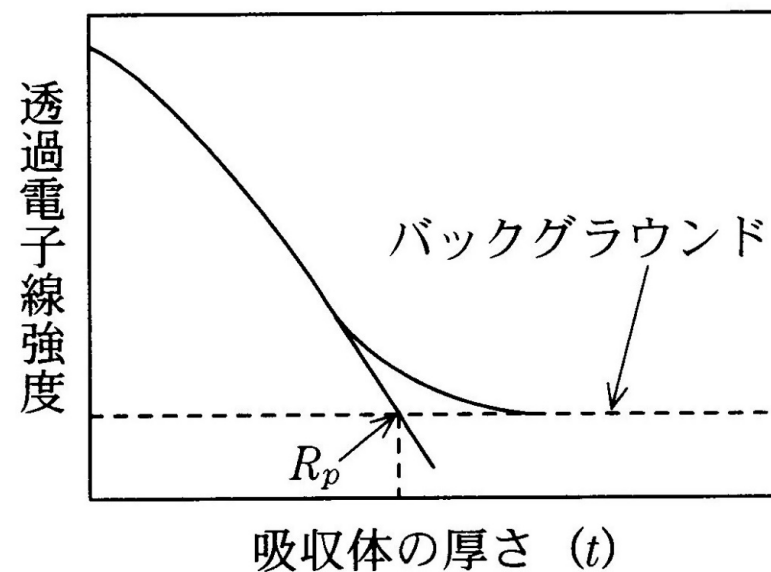


図 6・6 電子の飛程

電子では軌跡はジグザグとなり、到達する深さは真の飛程より短い。電子では到達深さを実用飛程として用いる。



電子の水での(実用)飛程

電子のエネルギー	飛程(水)
100keV	mm
200keV	mm

100keV電子の空気中の飛程 cm

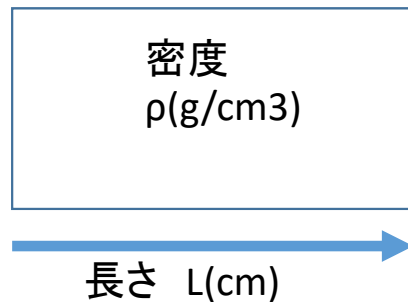
空気中の飛程と水中の飛程の比率は？

水の密度と空気の密度

- 水 1g/cm^3
 - 空気 1g/L （本当は $29\text{g}/22.4\text{L}$ ）
 - 空気の密度は水の $1/1,000$
-
- 飛程は密度に逆比例

重さ厚み(面密度)

- 重さ厚み: 層の厚みに密度を掛けたもの
単位 $\text{cm} \times \text{g/cm}^3 = \text{g/cm}^2$



厚み2cmの層の重さ厚みは？

物質	重さ厚み(g/cm^2)
水	
空気	
アルミ (密度 2.7g/cm^3)	

100keV電子の飛程
(重さ厚み)

水	g/cm^2
空気	g/cm^2

電子と物質との相互作用

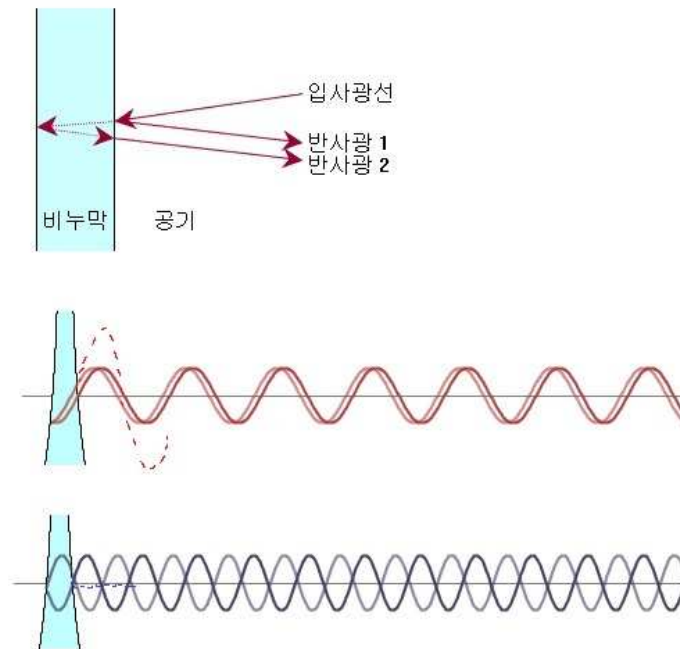
- エネルギーの高い電子は物質中の電子と粒子粒子玉突き衝突を起こして、方向を変えエネルギーの一部を相手の電子に与える。
- 相手の電子が深い軌道(エネルギー準位)から跳ね飛ばされた場合、空いた穴に上の軌道から電子が落ちてきたときに特性X線が発生する
- 入射電子は何度も衝突を繰り返しジグザク軌跡を描いて、徐々にエネルギーを失い最終的に物質中の電子に紛れてしまう
- 電子の飛程の重さ厚みはほとんど物質によらない
(他の物質、エネルギーでも確認されている)

2) 光子と物質の相互作用

光とは

- 光は波である(波動性)

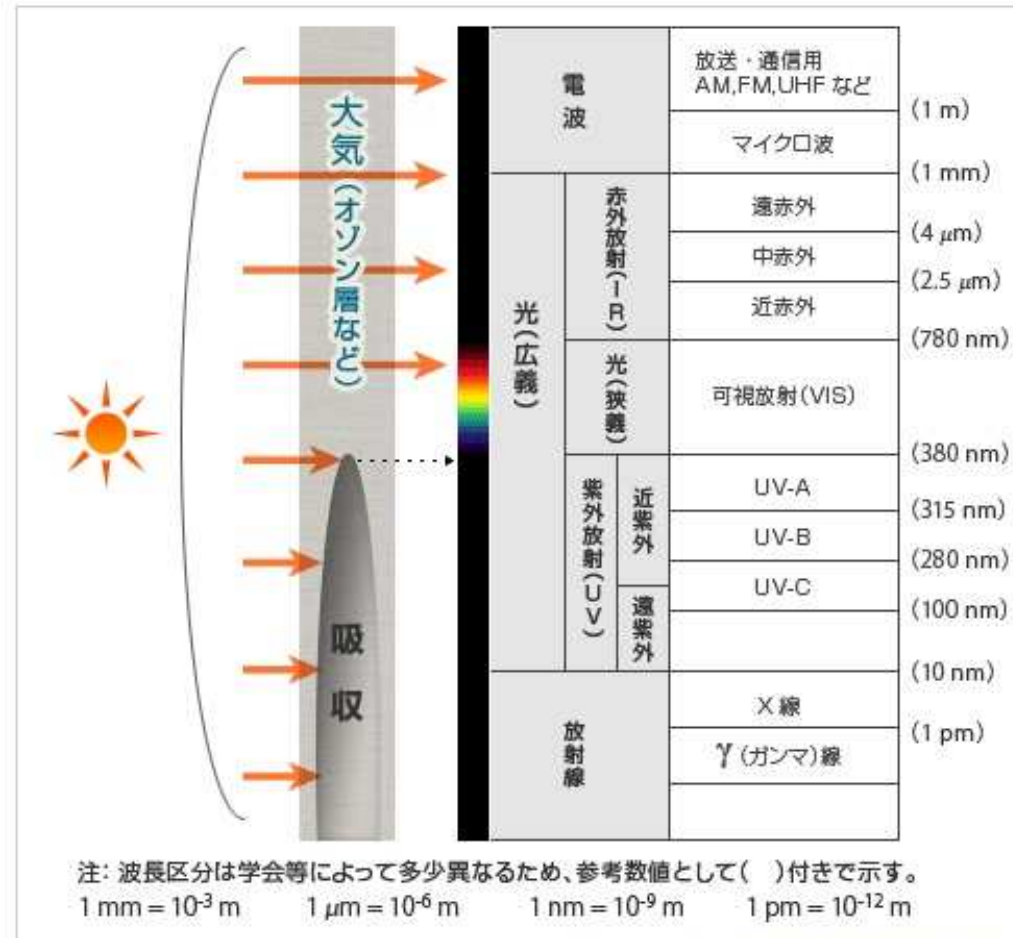
- 干渉現象 java実験室より引用 https://javalab.org/ja/thin_film_interference_ja/



光、電磁波

色	波長	エネルギー
紫	380-450 nm	2.755-3.26 eV
青	450-495 nm	2.50-2.755 eV
緑	495-570 nm	2.175-2.50 eV
黄色	570-590 nm	2.10-2.175 eV
橙色	590-620 nm	1.99-2.10 eV
赤	620-750 nm	1.65-1.99 eV

ウィキペディア 可視光線



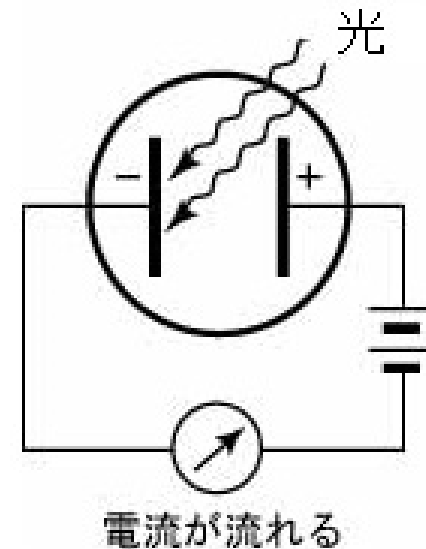
シーシーエス株式会社

光は粒子かもしれない？

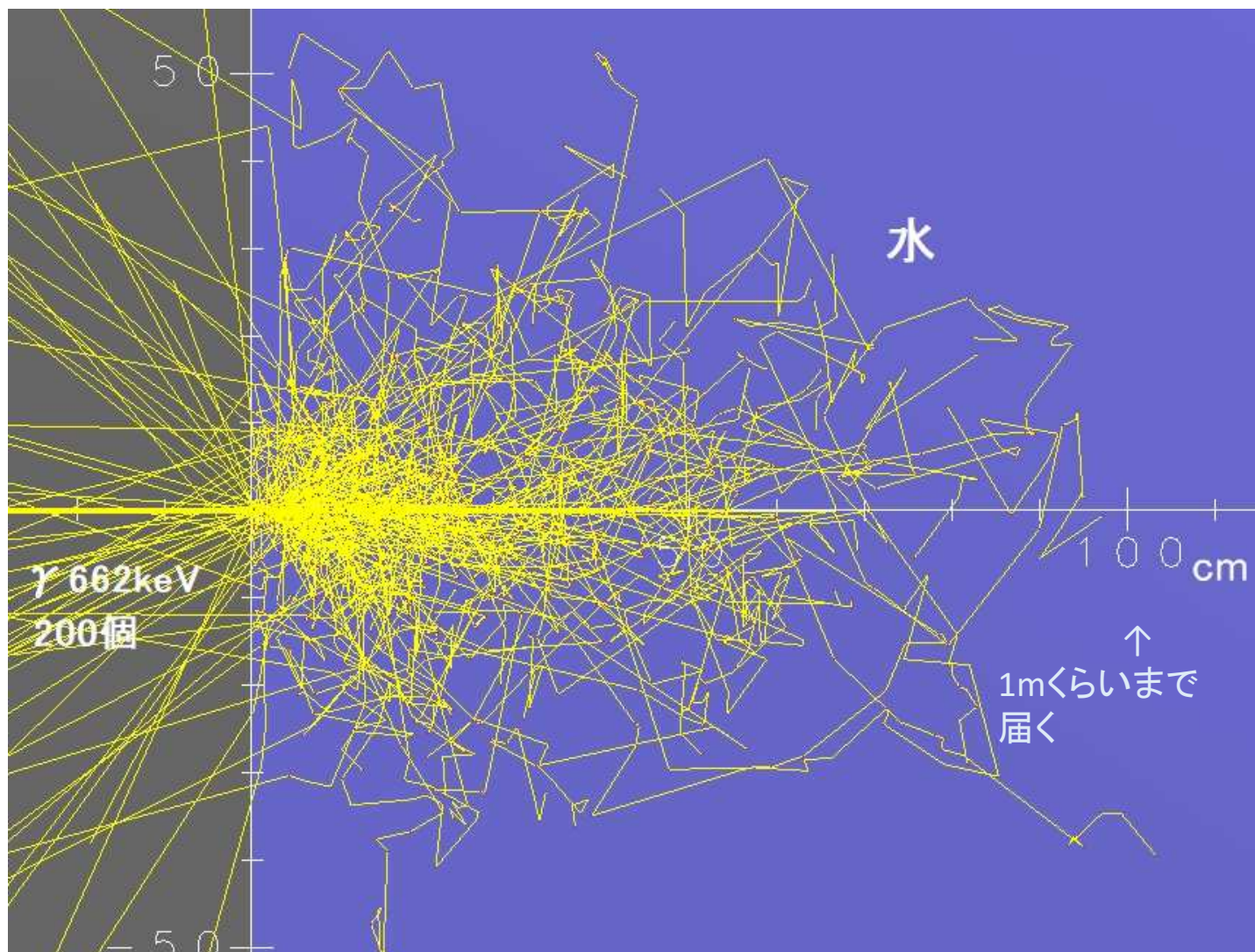
- 光電子現象
電極に光をあてると電気が流れる現象（電子が放出される）

光の周波数が小さいと光の量を上げても光電子現象が発生しない

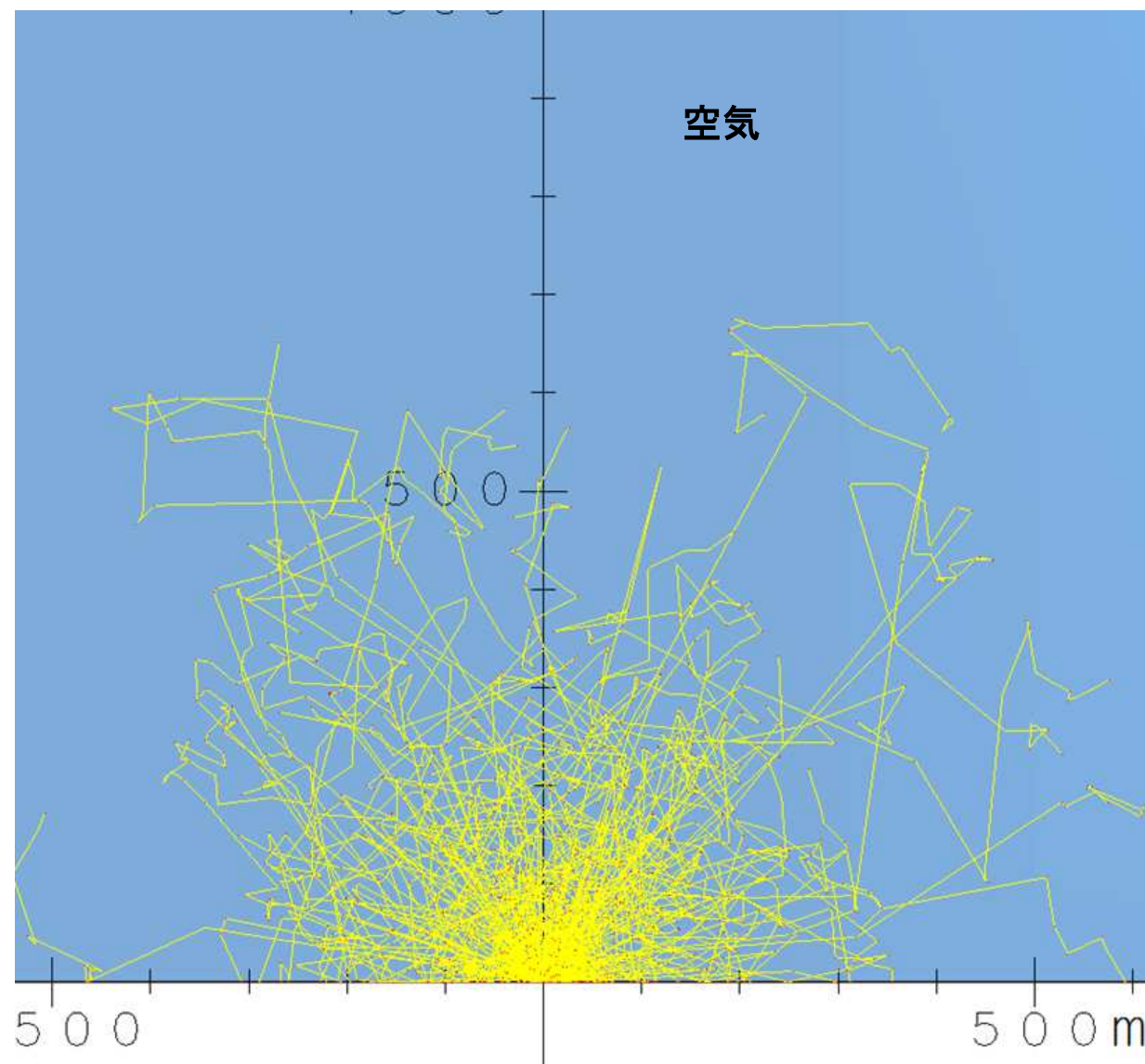
光は1個1個が独立していて、周波数に比例したエネルギーをもつ粒子の性質を持つのではないか？（アインシュタイン）



662keVのガンマ線が水に入射



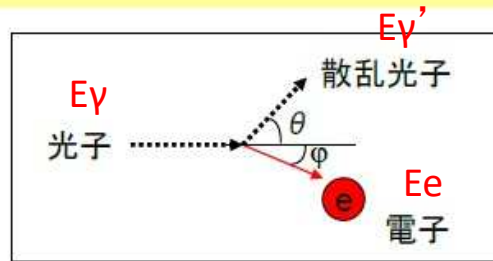
662keVガンマ線
等方放出



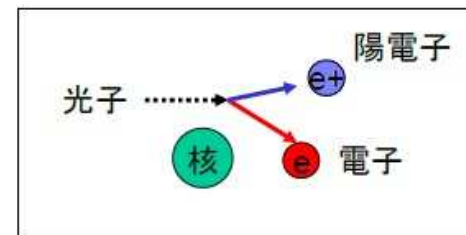
光子と物質の相互作用

ガンマ線と電子・原子核・原子との反応

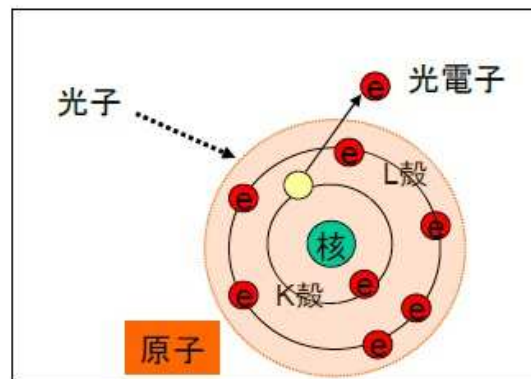
$E_\gamma 660\text{keV}$ のとき、
 $\theta = 180^\circ$ (後方散乱)
 $E_{\gamma'} \sim 180\text{keV}$
 $E_e \sim 480\text{keV (max)}$
 $\theta \doteq 0^\circ$ (かすり)
 $E_{\gamma'} \sim E_\gamma$
 $E_e \sim 0$



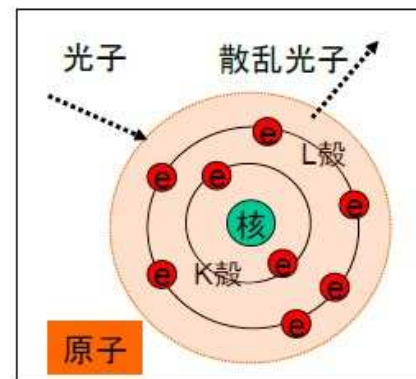
コンプトン散乱



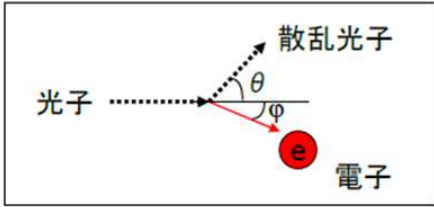
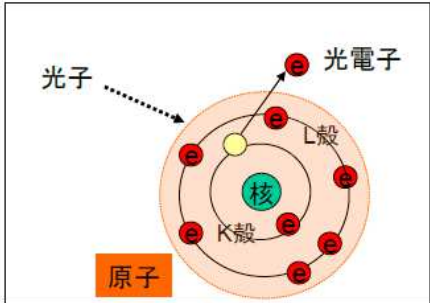
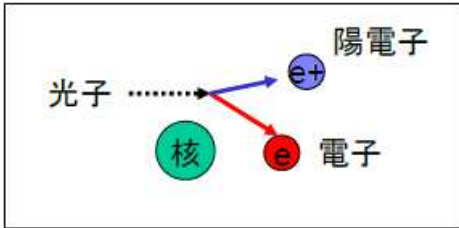
電子対生成



光電効果

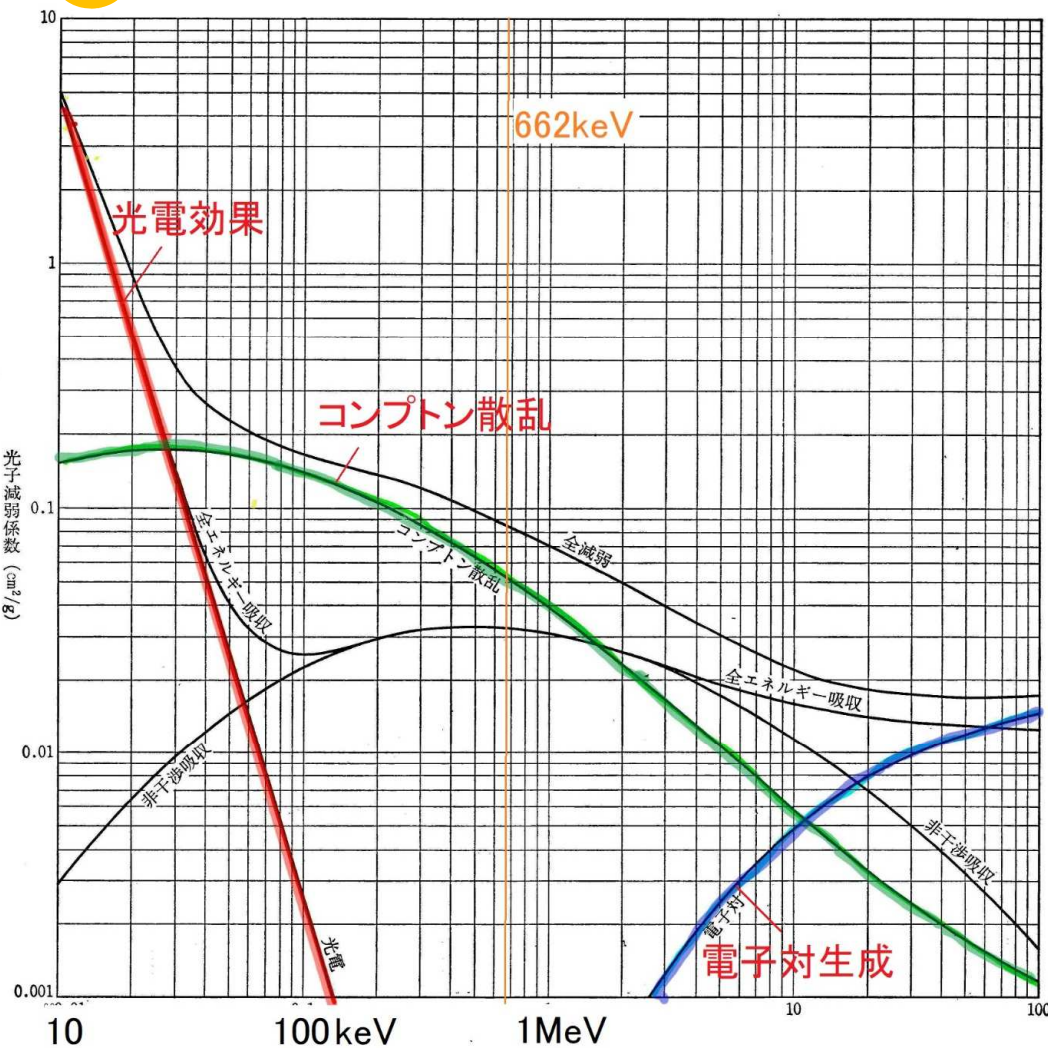


レイリー散乱

コンプトン散乱	 コンプトン散乱	・粒子(光子)と粒子(電子)との玉突き散乱。エネルギーを光子と電子で分け合う ・電子と電子の散乱に似ている ・反応確率は電子の密度に比例する⇒物質の種類(元素)にはあまりよらず密度だけでほぼ決まる ・1MeV以下の広い範囲で主となる反応
光電効果	 光電効果	・光子は全エネルギーを軌道電子に与えて消滅 ・軌道電子の束縛エネルギー付近のエネルギーで大きな反応確率を持つ⇒元素依存性が高い ・電子が飛び出した穴に上の軌道にいる電子が落ちてきたときに、光子(特性X線)を放出する
電子対生成	 電子対生成	・光子のエネルギーが1MeVを超えると、電子(0.511MeV)と反電子(陽電子)を生成する ・数MeVから10MeV以上で主となる ・発生した陽電子は物質中で他の電子と結合して2本のガンマ線(0.511MeV)となる

重さ厚み(面密度)あたりの光子減弱確率(係数)(g/cm^2)

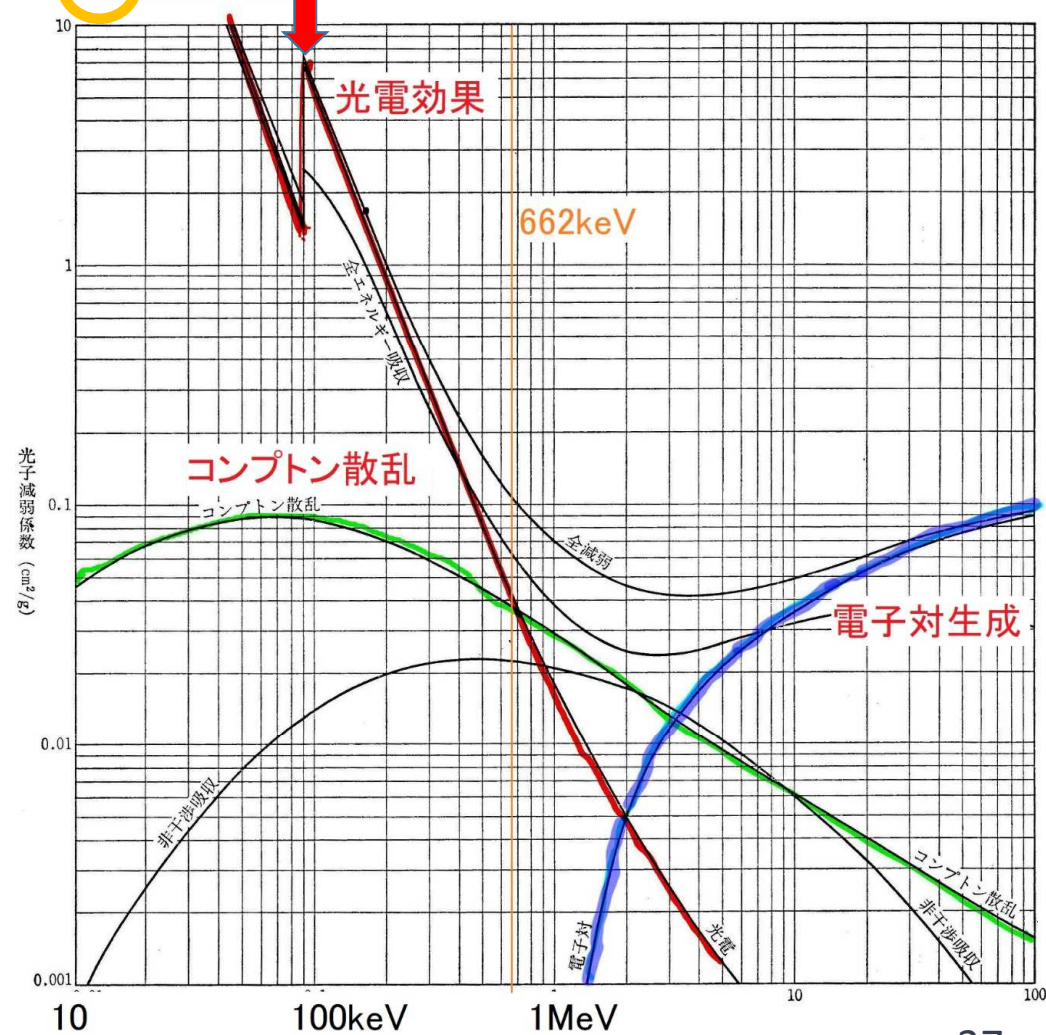
水の光子減弱係数



【1.8】 水の光子減弱係数

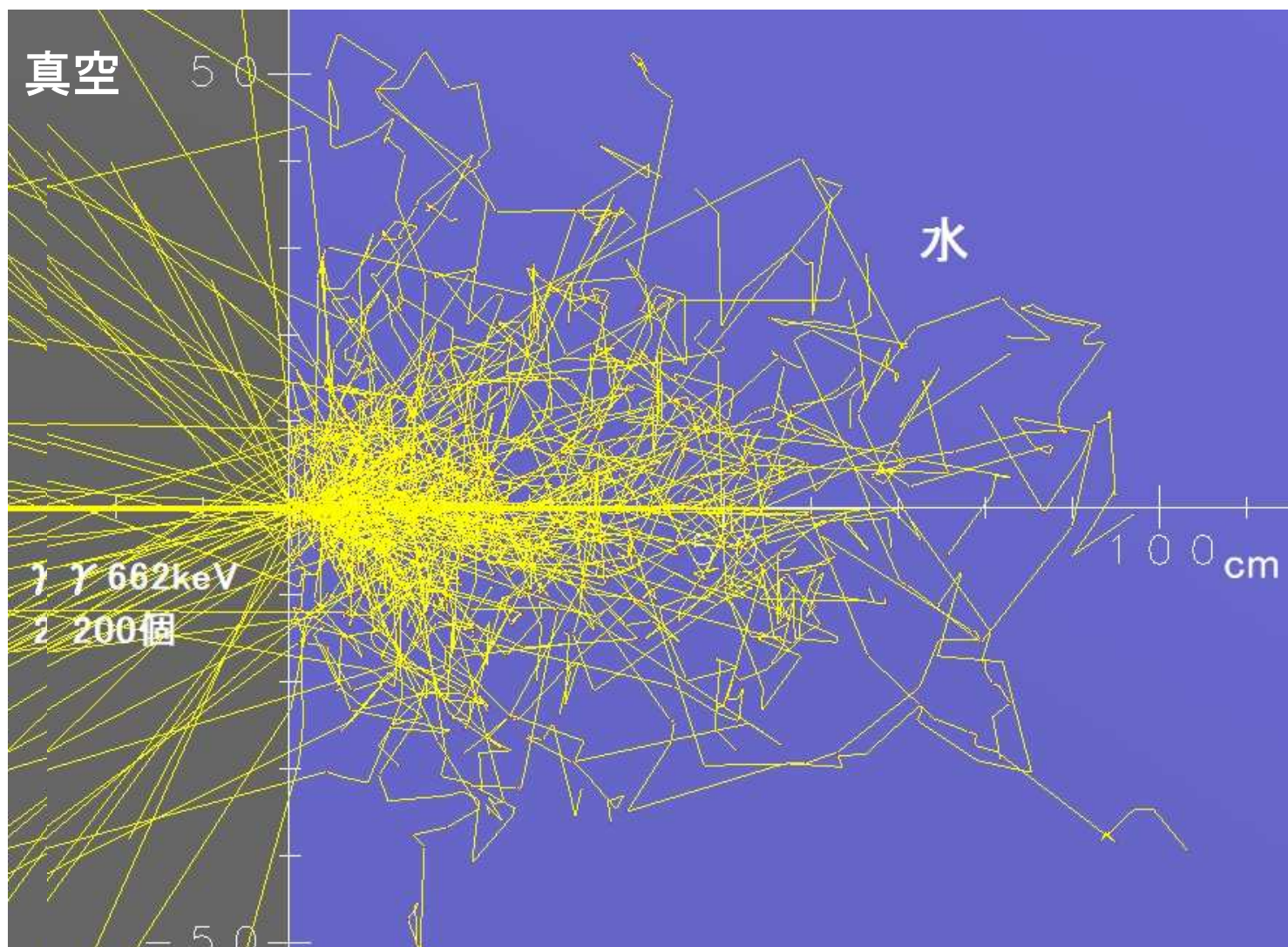
鉛の光子減弱

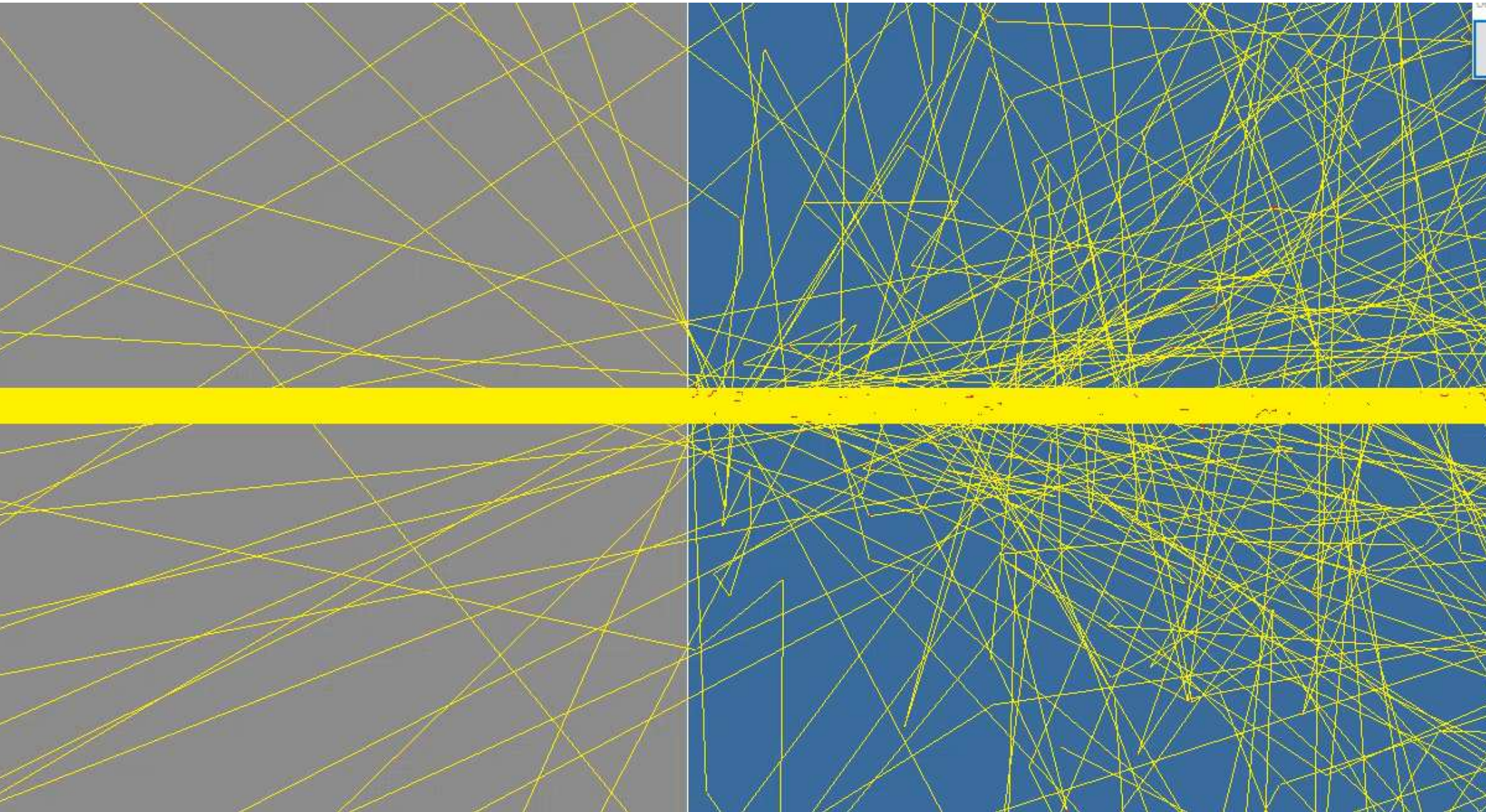
鉛のK吸収端(K軌道の束縛エネルギー)



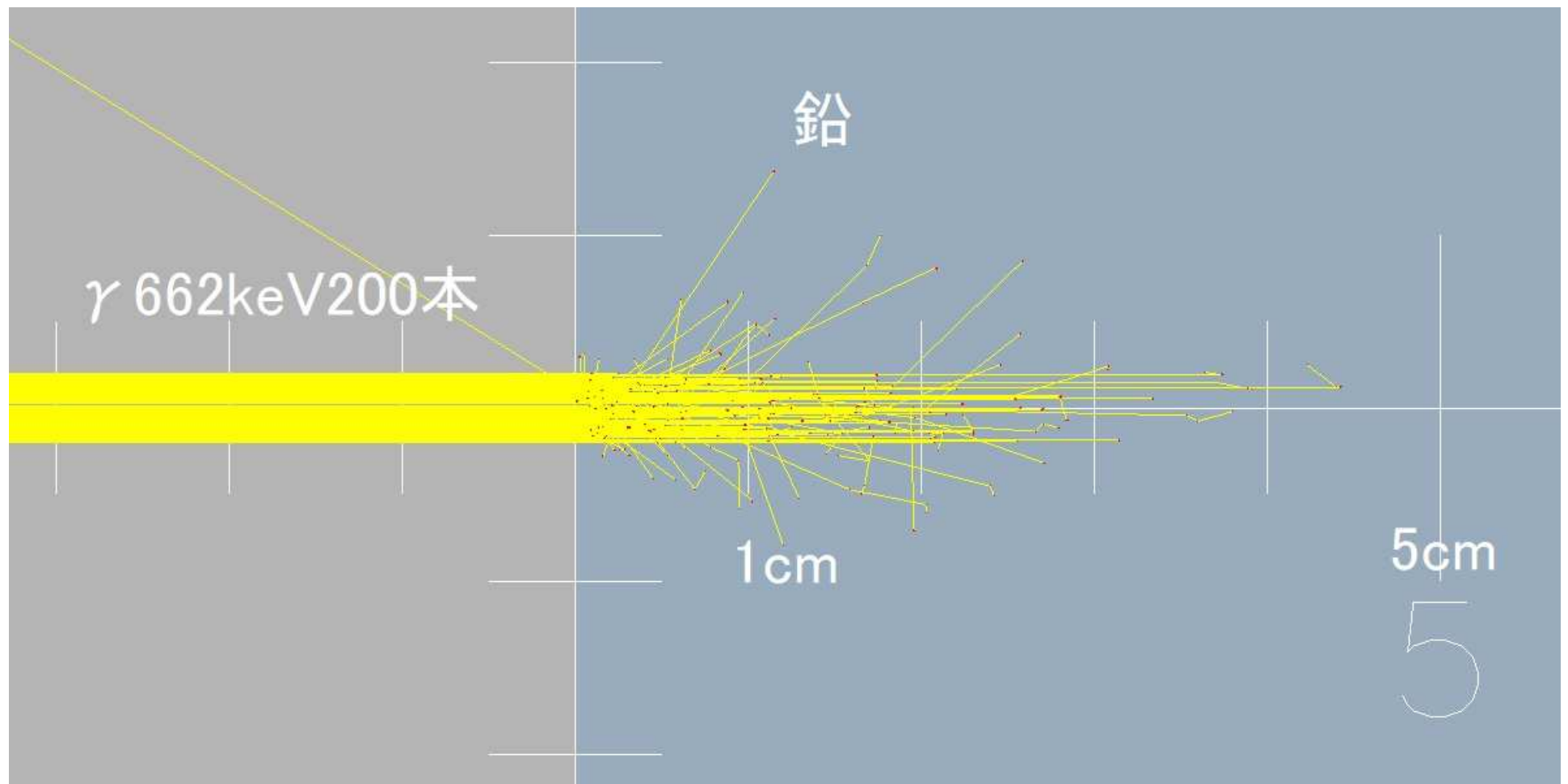
【1.5】 鉛の光子減弱係数

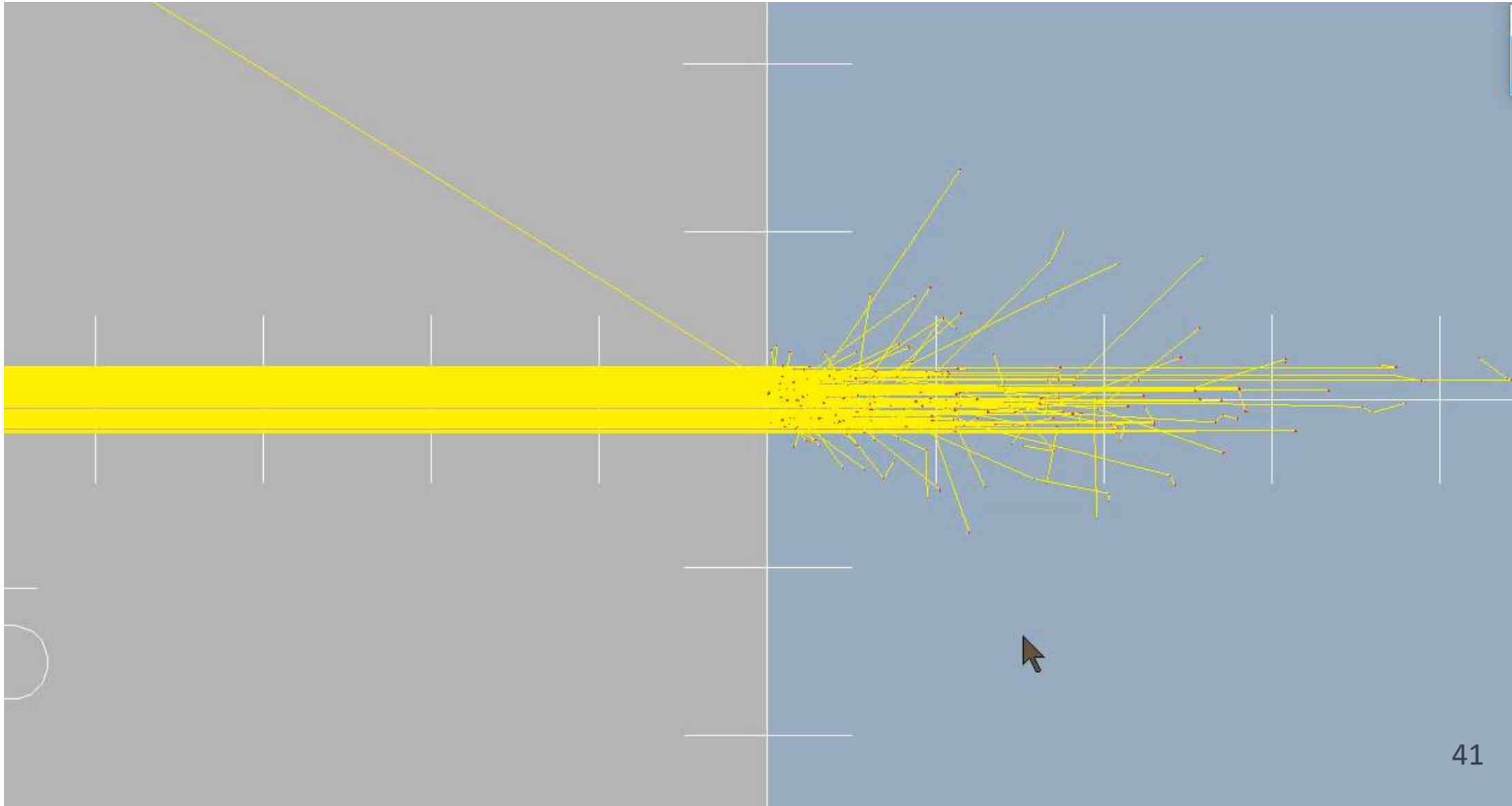
662keVのガンマ線が水に入射



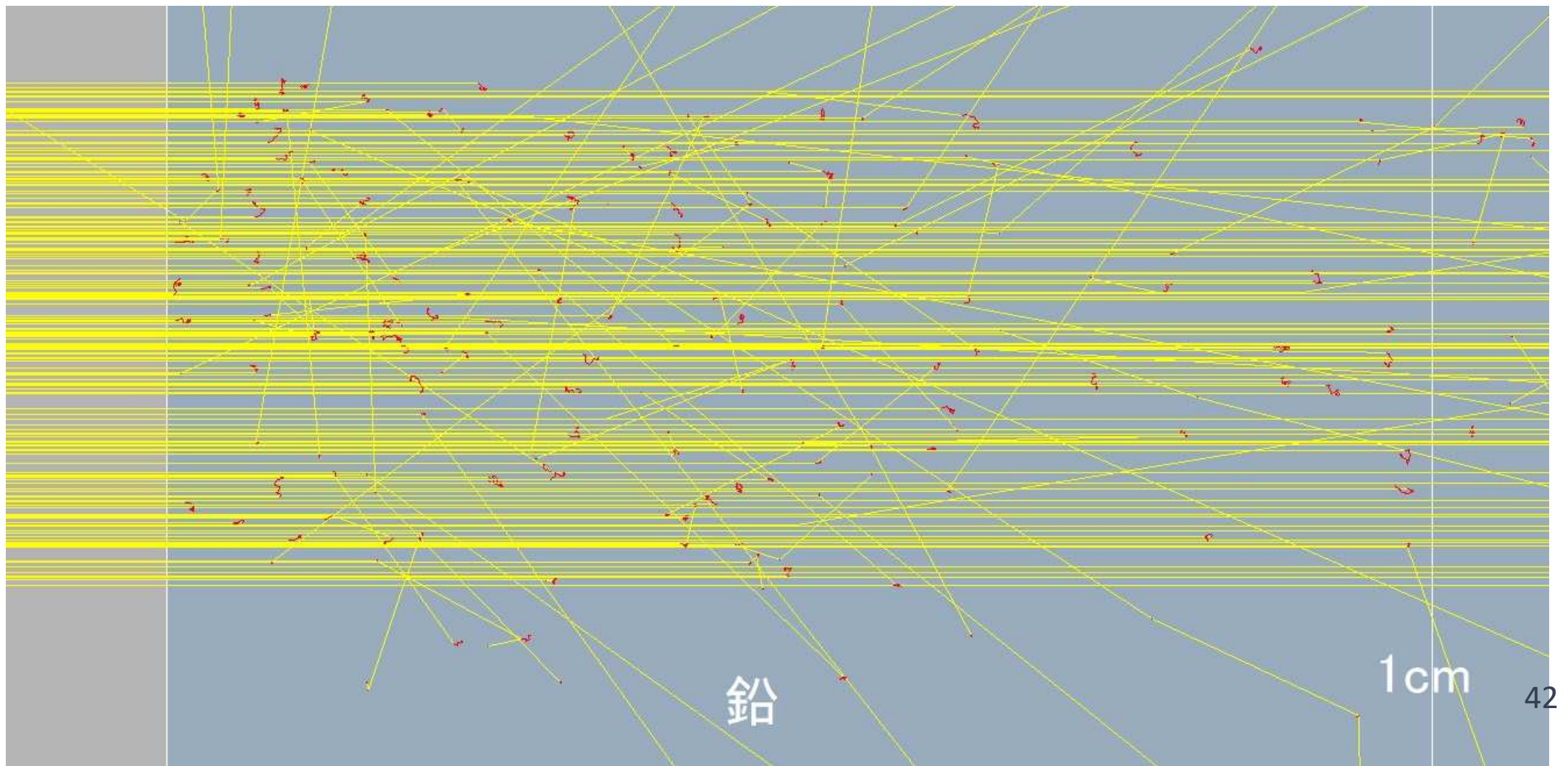


鉛に662keVのガンマ線が入射

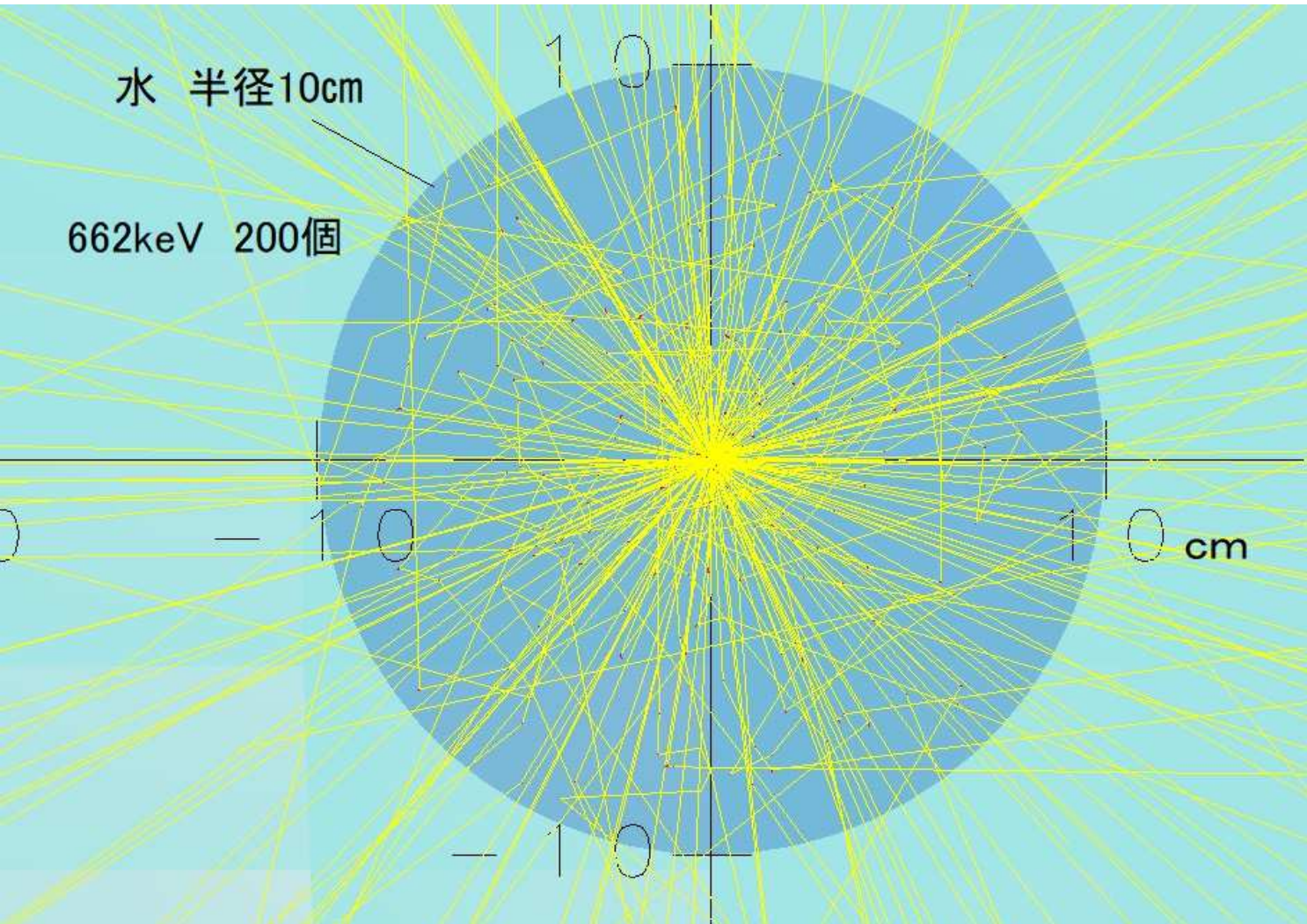




拡大



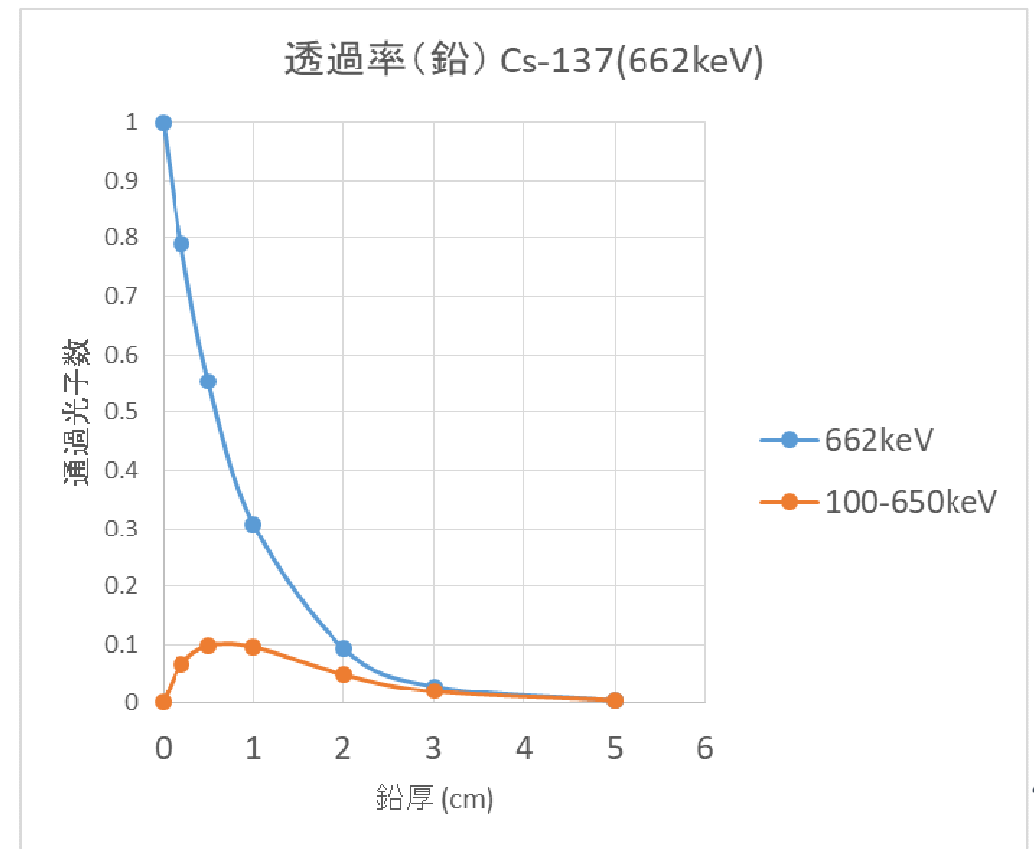
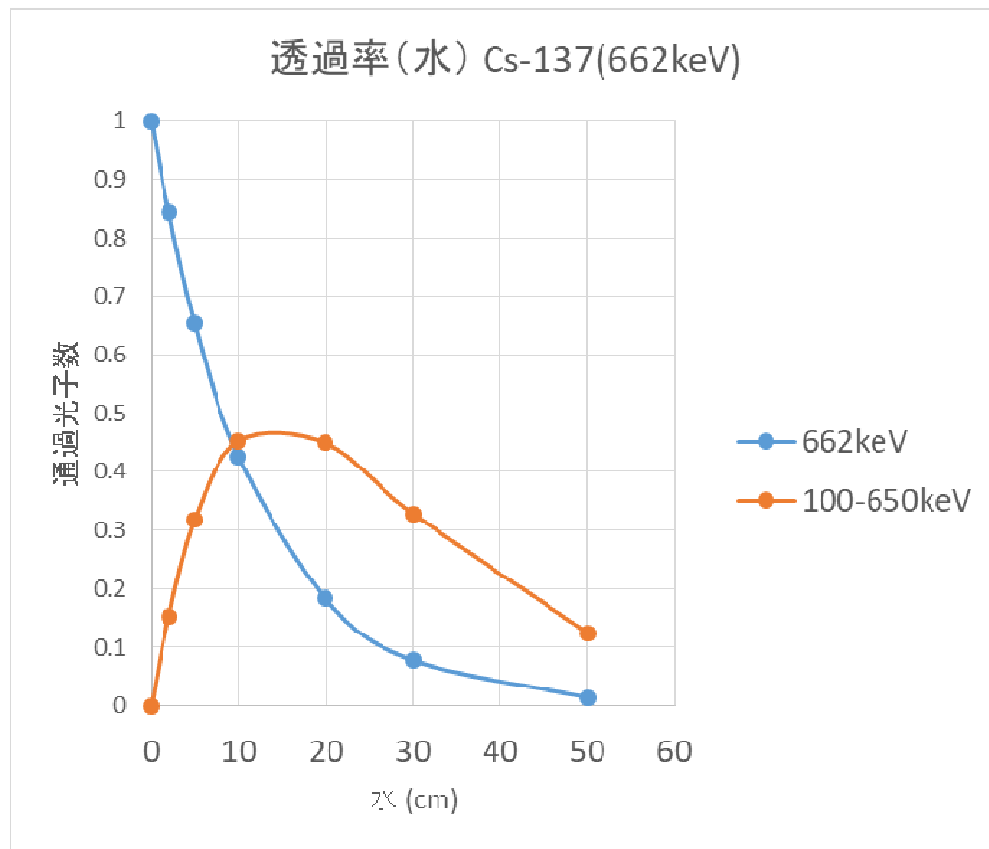
ガンマ線の物質透過率



- ・半径10cmの水球の中心に662keVの線源を置いた
- ・放射されたガンマ線のうち半分くらいはそのまま外へ通過
- ・半分くらいは水の中で衝突して方向が変わり同時にエネルギーの一部を電子へ与える

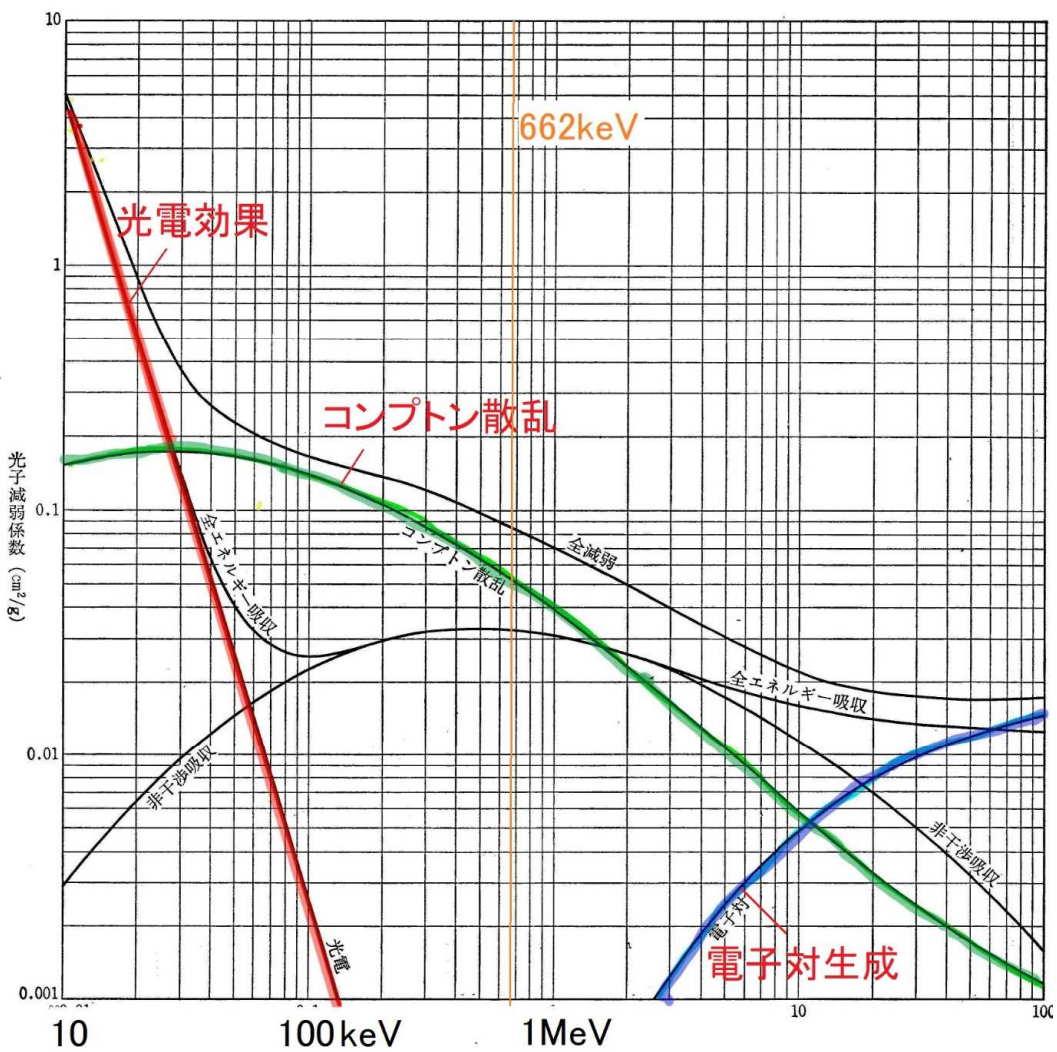
662keVガンマ線の物質透過

- ・662keVガンマ線が水10cmと鉛1cmに入射したとき、そのまま反応せずに通過する確率は0.4～0.3とほぼ同じ
- ・水の場合、散乱線(100～650keV)が透過する率は0.5近くある。そのまま透過するものと合わせると90%近くが外に漏れる
- ・鉛では散乱線の透過は0.1程度
- ・鉛での光子の消失は()による吸収の効果



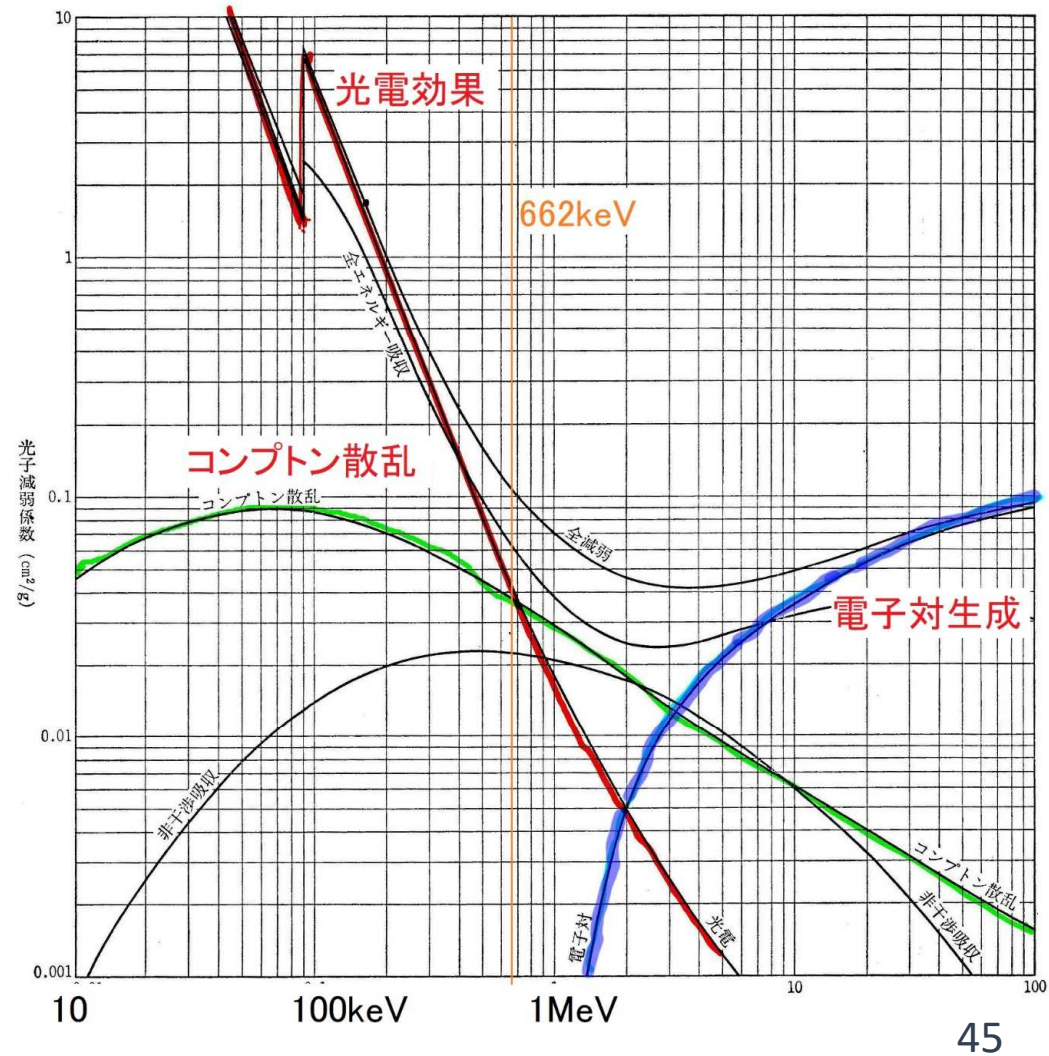
重さ厚み(面密度)あたりの光子減弱確率(係数)(g/cm^2)

水の光子減弱係数



【1.8】 水の光子減弱係数

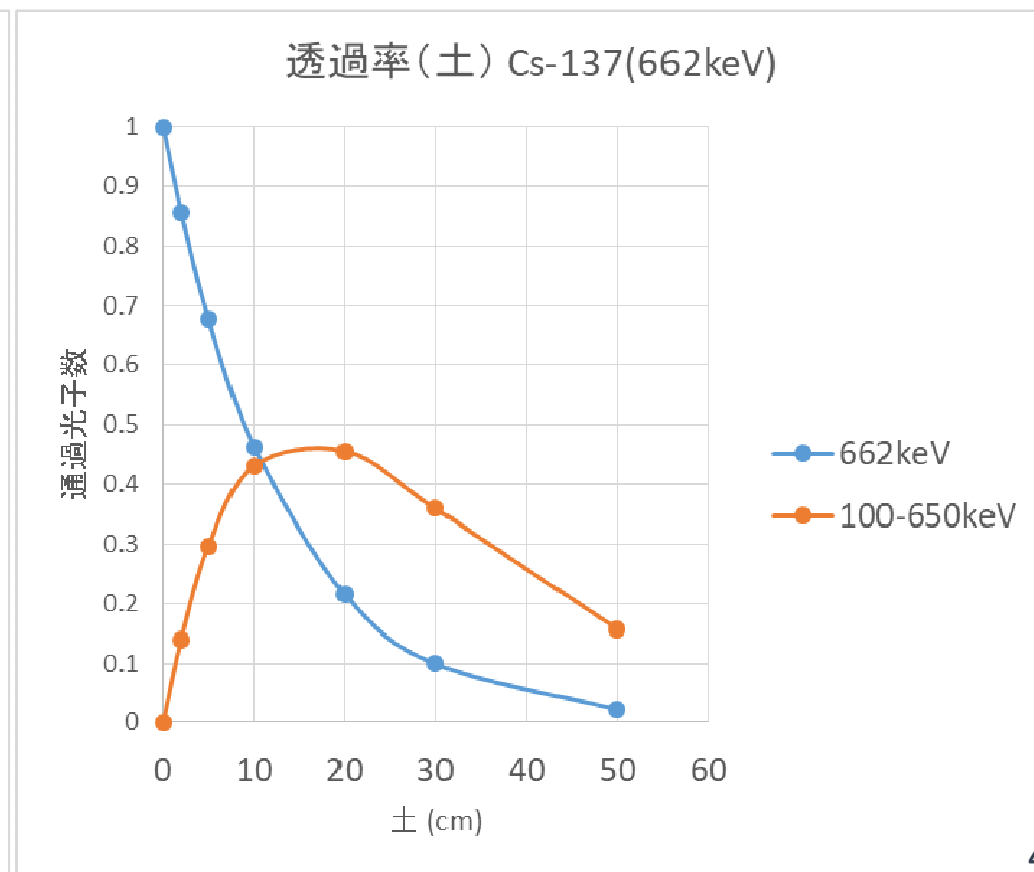
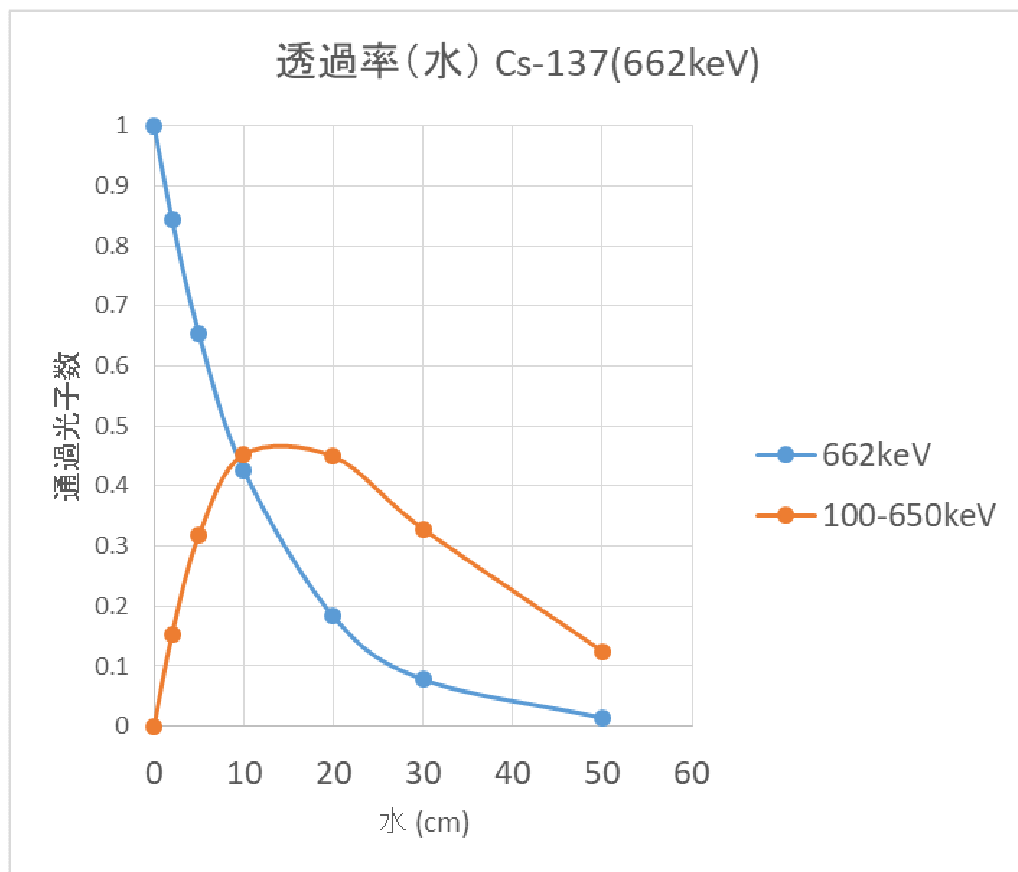
鉛の光子減弱係数



【1.5】 鉛の光子減弱係数

水と土(密度1g/cm³)

- ・密度1g/cm³の土と水の透過率を比較すると、ほとんど変わらない
- ・なぜか？



物質の組成

・私たちの身の回りの自然物はほとんどは酸素が主とした軽い元素で出来ている

物質	分子	H	C	N	O	Al	Si	Fe	Pb
	原子番号	1	6	7	8	13	14	26	82
	束縛エネルギー(keV)	0.013	0.28	0.40	0.53	1.56	1.84	7.1	88.0
		重量%							
水	H ₂ O	11			89				
空気	N ₂ ,O ₂ ,Ar,,			76	23				
木材	H _n C _m O _p	7	43		51				
石、土	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ ,CaO, Na ₂ O、				53	13	29	1	
鉄	Fe							100	
鉛	Pb								100

(信楽土)

光子と物質との相互作用

- 1MeV以下のガンマ線では電子にあたってその方向を変えエネルギーの一部を電子に与えるコンプトン散乱がメイン
- 光子のエネルギーが原子の束縛エネルギーの10倍程度以下になると光電効果が効いてきて光子の吸収が起こる
- エネルギーの高い光子からみると、軽い元素はその種類や化学結合状態の違いはほとんど気にならない。密度だけが気になる。(極論ですが)

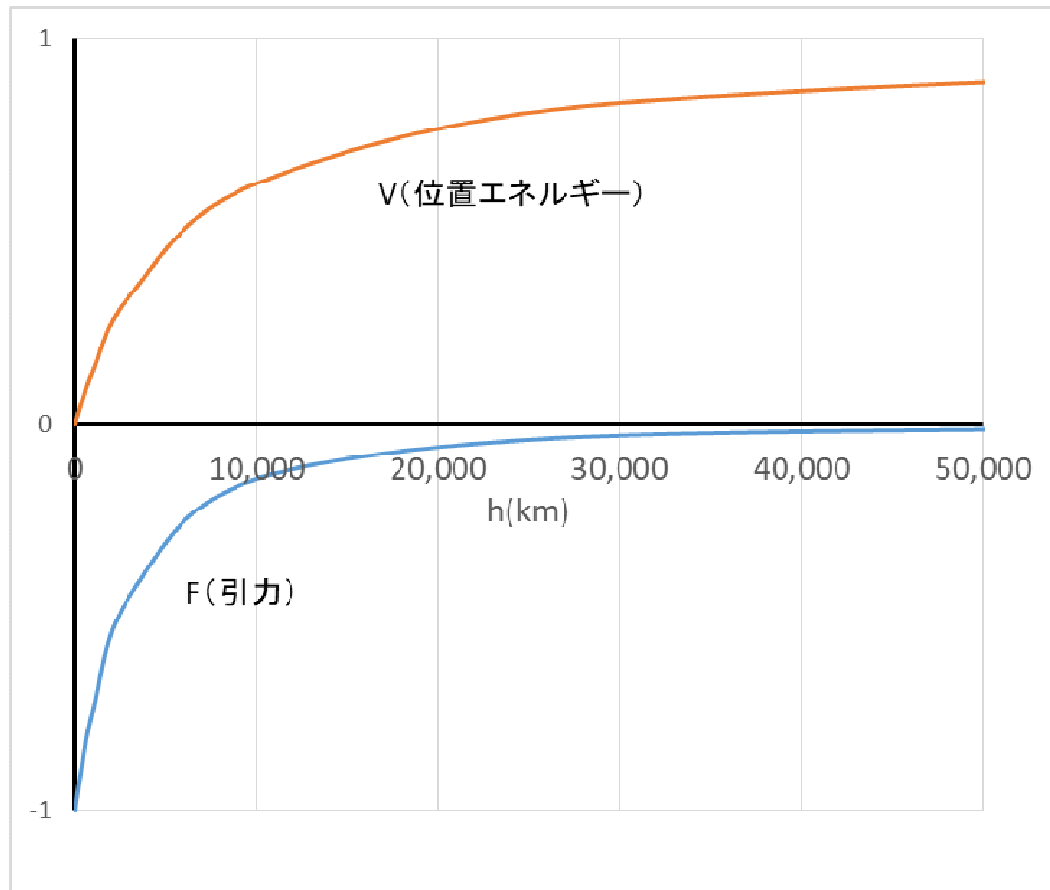
<「放射線と物質の相互作用」 終わり>

補足

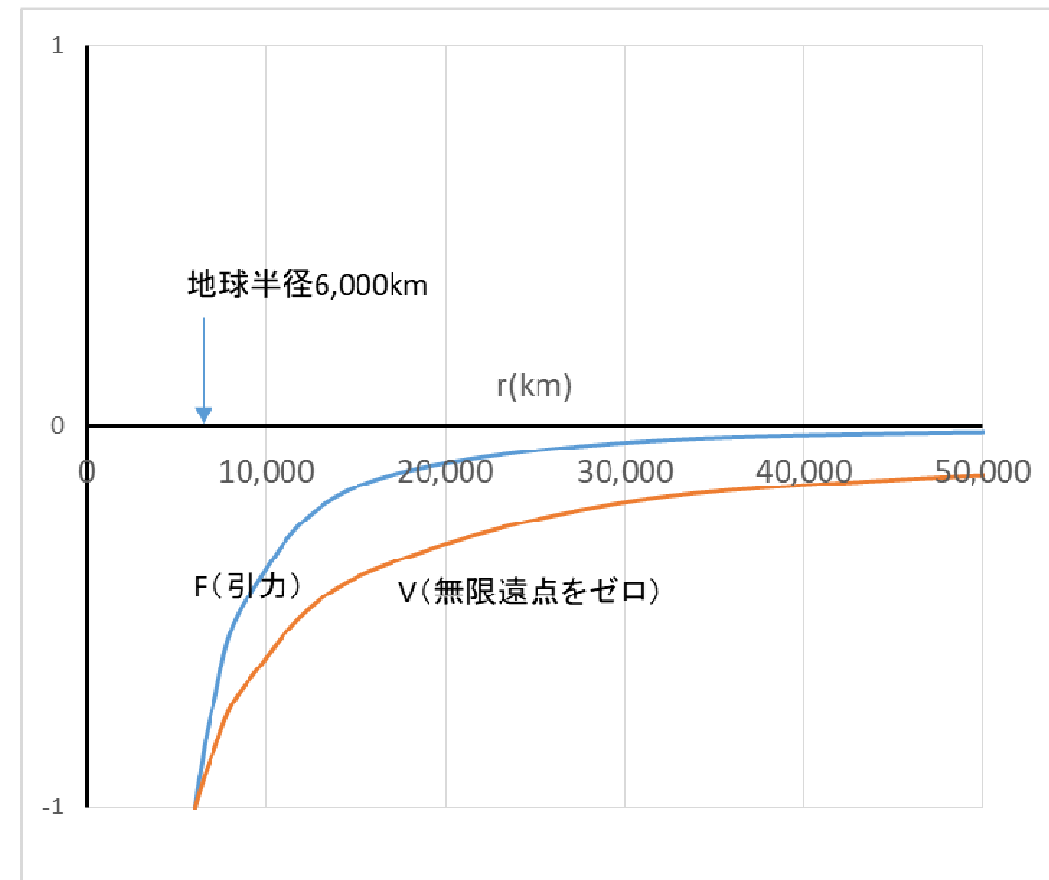
- 対数グラフとは？

<https://controlabo.com/logplot/>

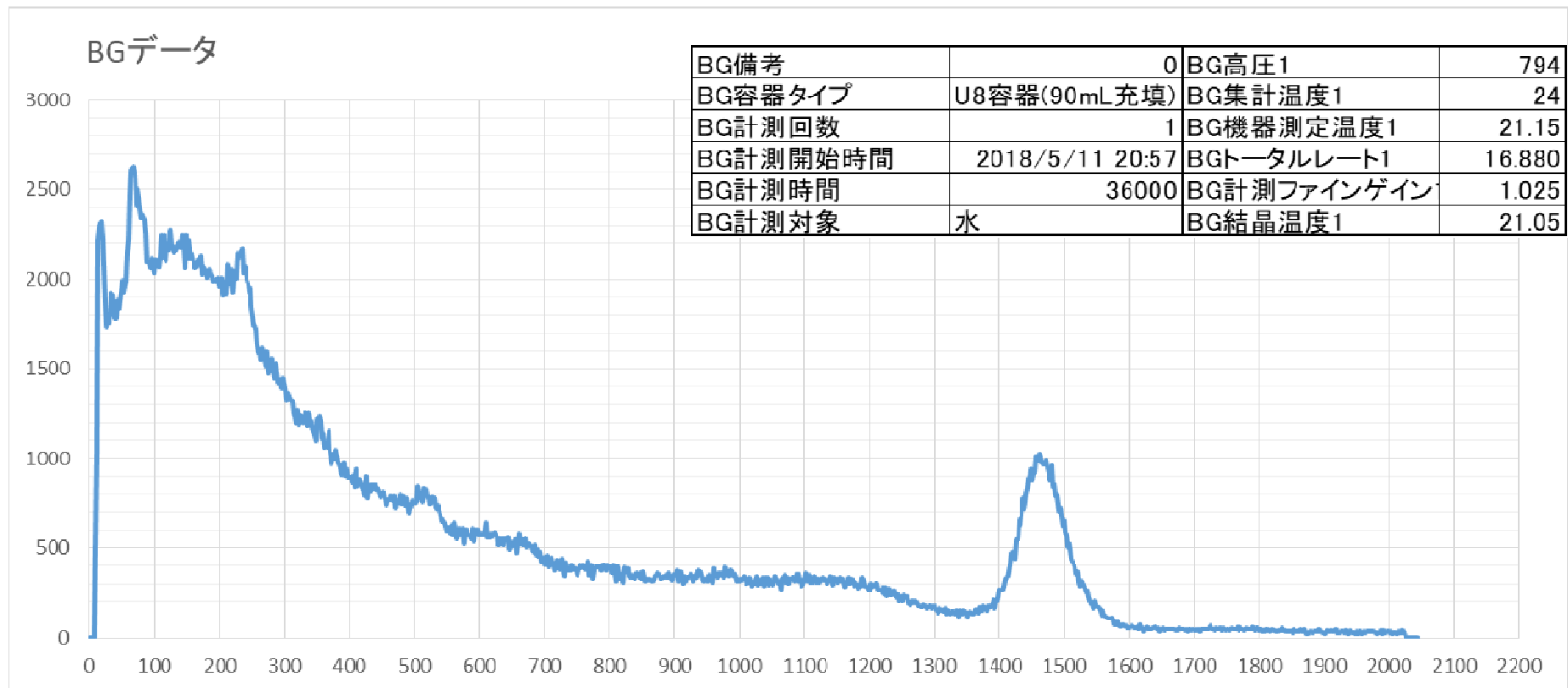
引力と位置エネルギー



地球中心から見ると



EMF211 BGスペクトル



Pb X-ray

Element: Pb, Z= 82

Edge energy, radiation ratio and jump for Pb (Z= 82)

	L_3 $2p_{3/2}$	L_2 $2p_{1/2}$	L_1 $2s_{1/2}$	K $1s_{1/2}$
Edge [keV]	13.035	15.200	15.861	88.005
Fluor Yield (xraylib)	0.360	0.373	0.112	0.967
Fluor Yield (Krause)	0.360	0.373	0.112	0.967
Jump Factor	2.506	1.400	1.156	4.731

XRF line energies and fractional radiative rate for Pb (Z= 82)

	KL_3 $K\alpha_1$	KL_2 $K\alpha_2$	KM_3 $K\beta_1$	KM_2 $K\beta_3$
Line energy [keV]	74.970	72.805	84.939	84.450
Radiative rate	0.489	0.291	0.110	0.056

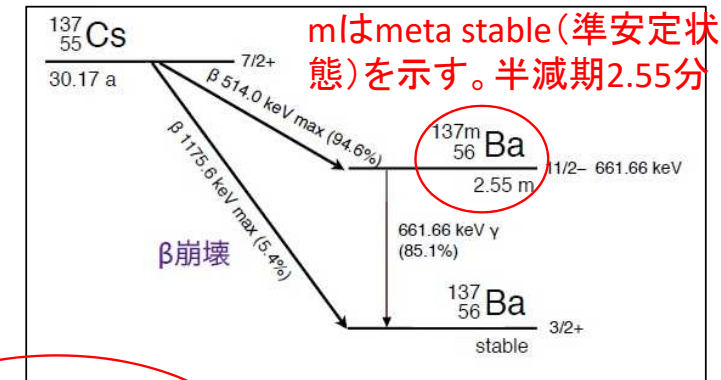
	L_1M_3 $L\beta_3$	L_2M_4 $L\beta_1$	L_2N_4 $L\gamma_1$	L_3M_5 $L\alpha_1$	L_3M_1 Ll
Line energy [keV]	12.793	12.614	14.765	10.552	9.185
Radiative rate	0.366	0.780	0.167	0.691	0.041

European Synchrotron Radiation Facility and University of Sassari

http://ftp.esrf.fr/pub/scisoft/xraylib/xraylib_tables_v2.3.pdf

放射性同位元素の表(放射線データ)

1MBqの線源から1mの場所
の空間線量率($\mu\text{Sv/h}$)

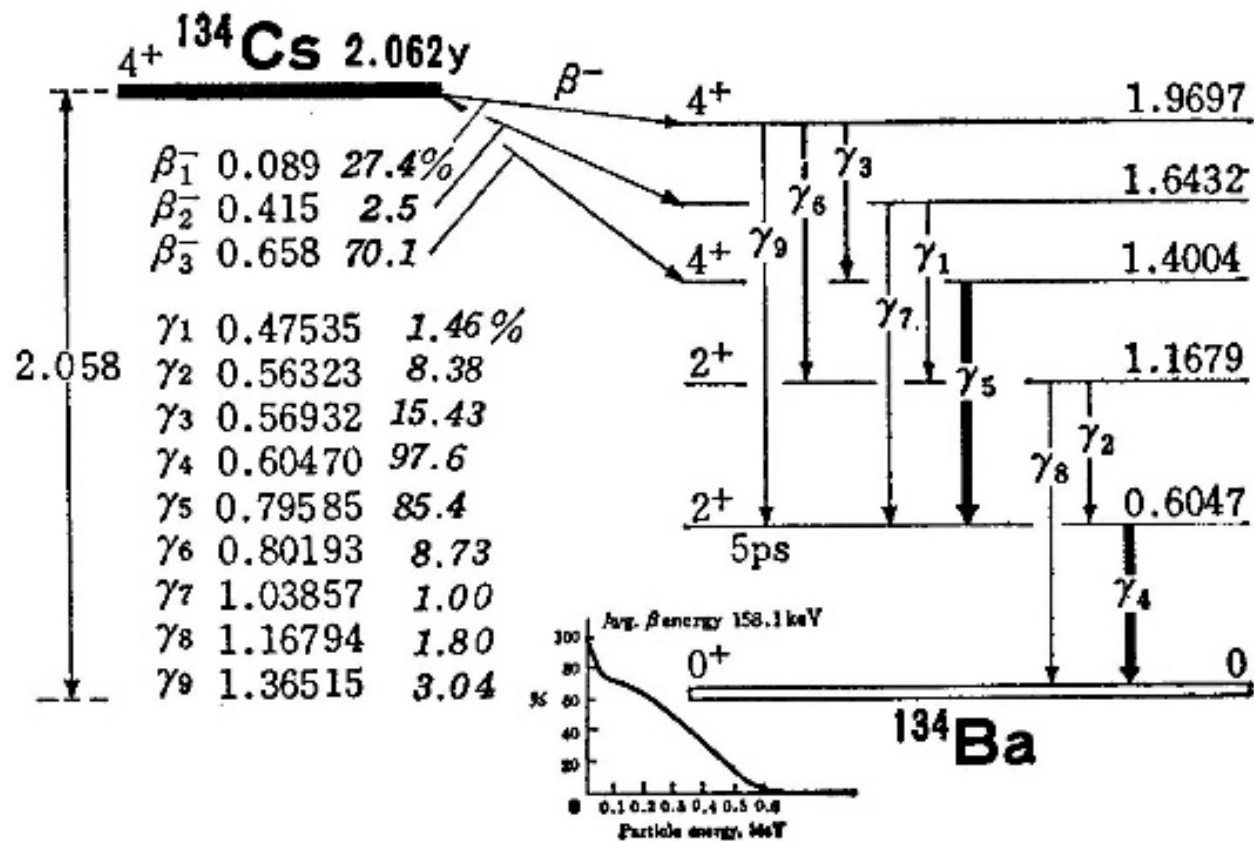


核 種	半減期	壊変形式	おもな β 線(または α 線)のエネルギー(MeV)と放出割合	おもな光子のエネルギー(MeV)と放出割合	内部転換電子の放出割合[%]	$\mu\text{Sv m}^2/\text{h MBq}$ 実効線量率定数 (空気衝突カーマ率定数) 1cm線量当量率定数		おもな生成反応
						10keV以上	30keV以上	
^{134}Cs	2.0648y	β^-	0.0886- 27.3% 0.415- 2.5% 0.658- 70.2% 他	0.563- 8.4% 0.569- 15.4% 0.605- 97.6% 0.796- 85.5% 0.802- 8.7% 1.365- 3.0% 他 0.0321- 0.69% Ba- K_α 0.0365- 0.16% Ba- K_β	0.061 0.15 0.58 0.26 0.026	0.211 (0.208) 0.249	同左	$^{133}\text{Cs}(n, \gamma)^{134}\text{Cs}$
^{137}Cs	30.1671y 娘 * $^{137\text{m}}\text{Ba}$	β^-	0.514- 94.4% 1.176- 5.6%	0.662- 85.1% $^{137\text{m}}\text{Ba}$ 0.0321- 5.8% Ba- K_α 0.0365- 1.3% Ba- K_β	9.7	*0.0779 *(0.0771) *0.0927	同左	$\text{U}(n, f)^{137}\text{Cs}$



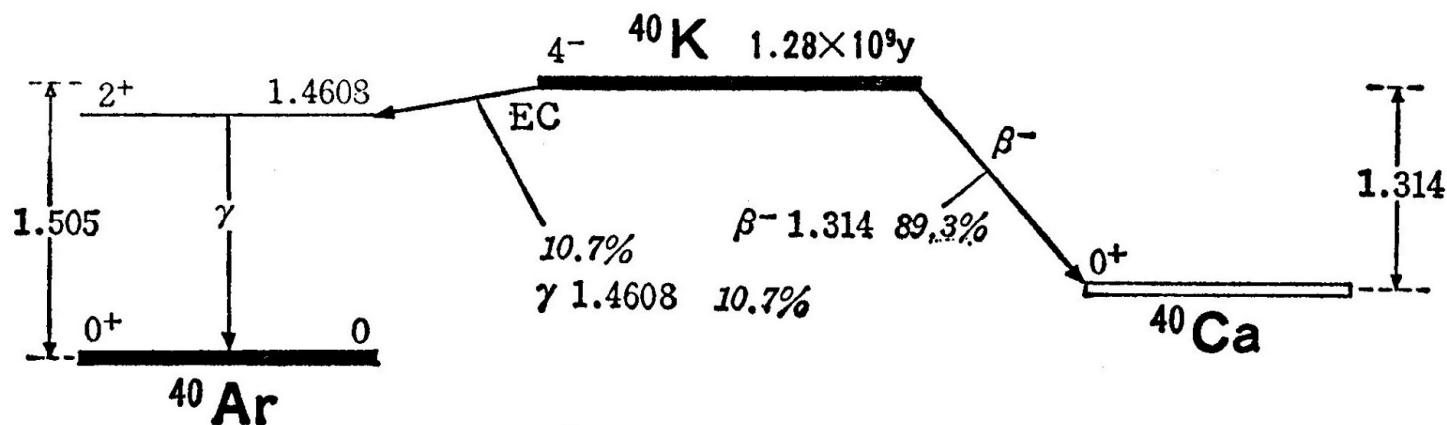
日本アイソトープ協会、アイソトープ手帳 11版(2011年)

Cs-134崩壊図



核 種	半減期	壊変形式	おもなβ線(またはα線)のエネルギー(MeV)と放出割合	おもな光子のエネルギー(MeV)と放出割合	内部転換電子の放出割合[%]	実効線量率定数 ($\mu\text{Sv m}^2/\text{h MBq}$) 1cm線量率定数		おもな生成反応
						10keV以上	30keV以上	
^{40}K	$1.251 \times 10^9 \text{ y}$	β^- EC	1.311- 89.1% 他 10.8%	1.461- 10.7%		0.0184 (0.0185) 0.0212	} 同左	天然存在度 0.0117%

日本アイソトープ協会、アイソトープ手帳 11版(2011年)



半減期

- 半減期30年
30年毎に半分
60年で1/4、90年で1/8

15年では $\frac{1}{\sqrt{2}}$ $\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 = \frac{1}{2}$

10年では $\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{10}{30}} = 0.793$

- 一般式 半減期を $T_{1/2}$ とすると、 t 後の値は、 $0.5^{\frac{t}{T_{1/2}}}$

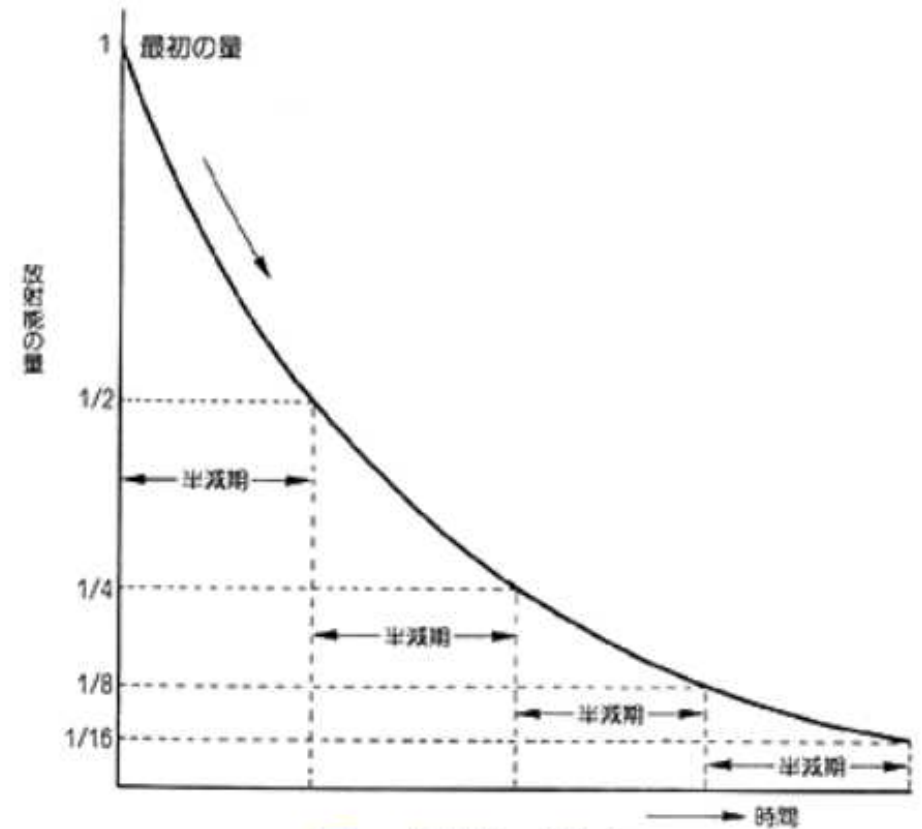


図1 放射能の減り方