

2008年3月 八戸工業高等専門学校

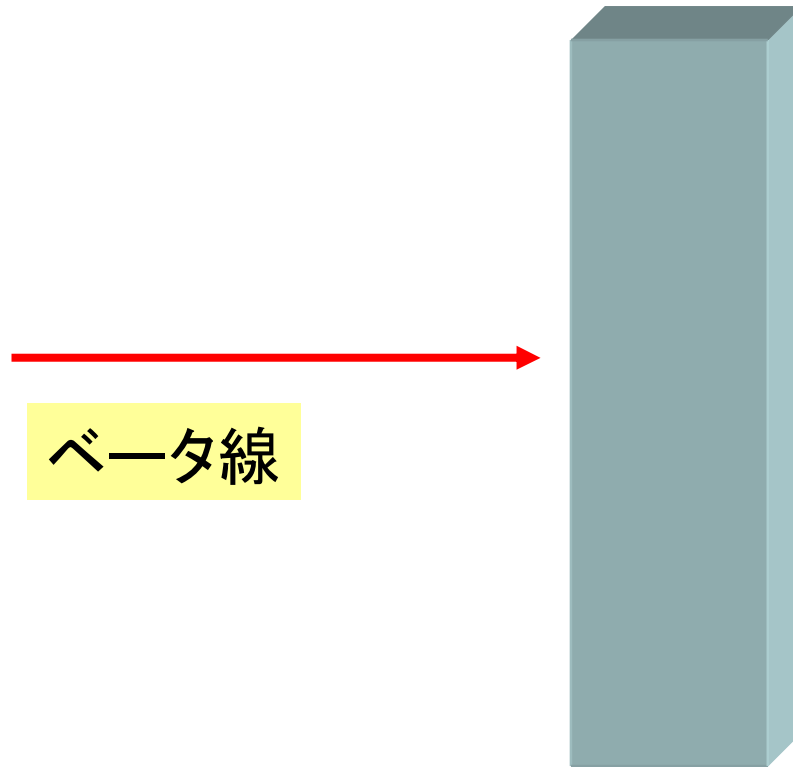
# 放射線拳動シミュレーション

高エネルギー加速研究機構

放射線科学センター

波戸芳仁

# 例1 ベータ線を物質に打ち込む



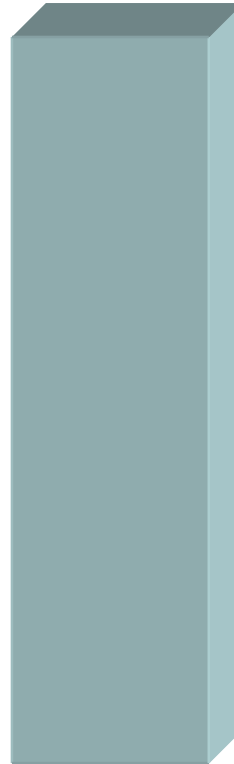
- ベータ線は物質で止まってしまうか？ 通り抜けるか？
- 物質の内部でどのような反応が起こるか？

# 条件設定



放射線源  
 $^{90}\text{Sr}$ - $^{90}\text{Y}$

ベータ線  
最大エネルギー  
 $2.3 \text{ MeV}^*$

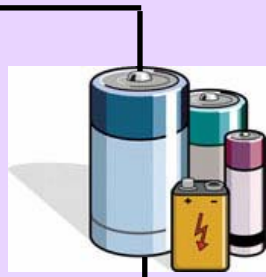


物質 アルミニウム

- ベータ線は物質で止まってしまうか？ 通り抜けるか？
- 物質の内部でどのような反応が起こるか？

→ 放射線挙動の計算機シミュレーション

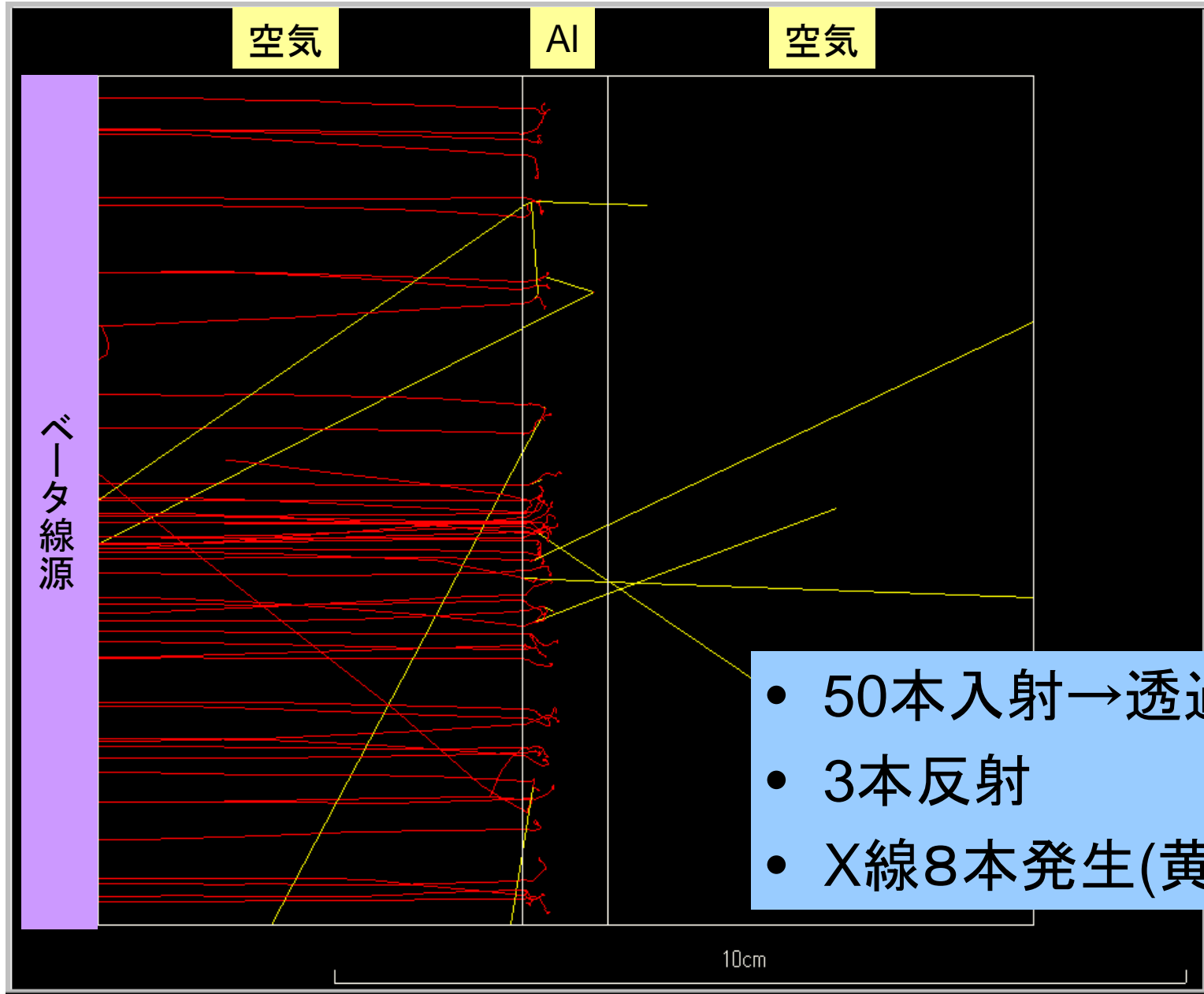
1.5 eV



\*電子ボルト:

エネルギーの単位  
電位差1 Vで加速され  
た電子のエネルギー  
 $\text{MeV} = 10^6 \text{ eV}$

# 2.3 MeV ベータ線 → Al 1cm



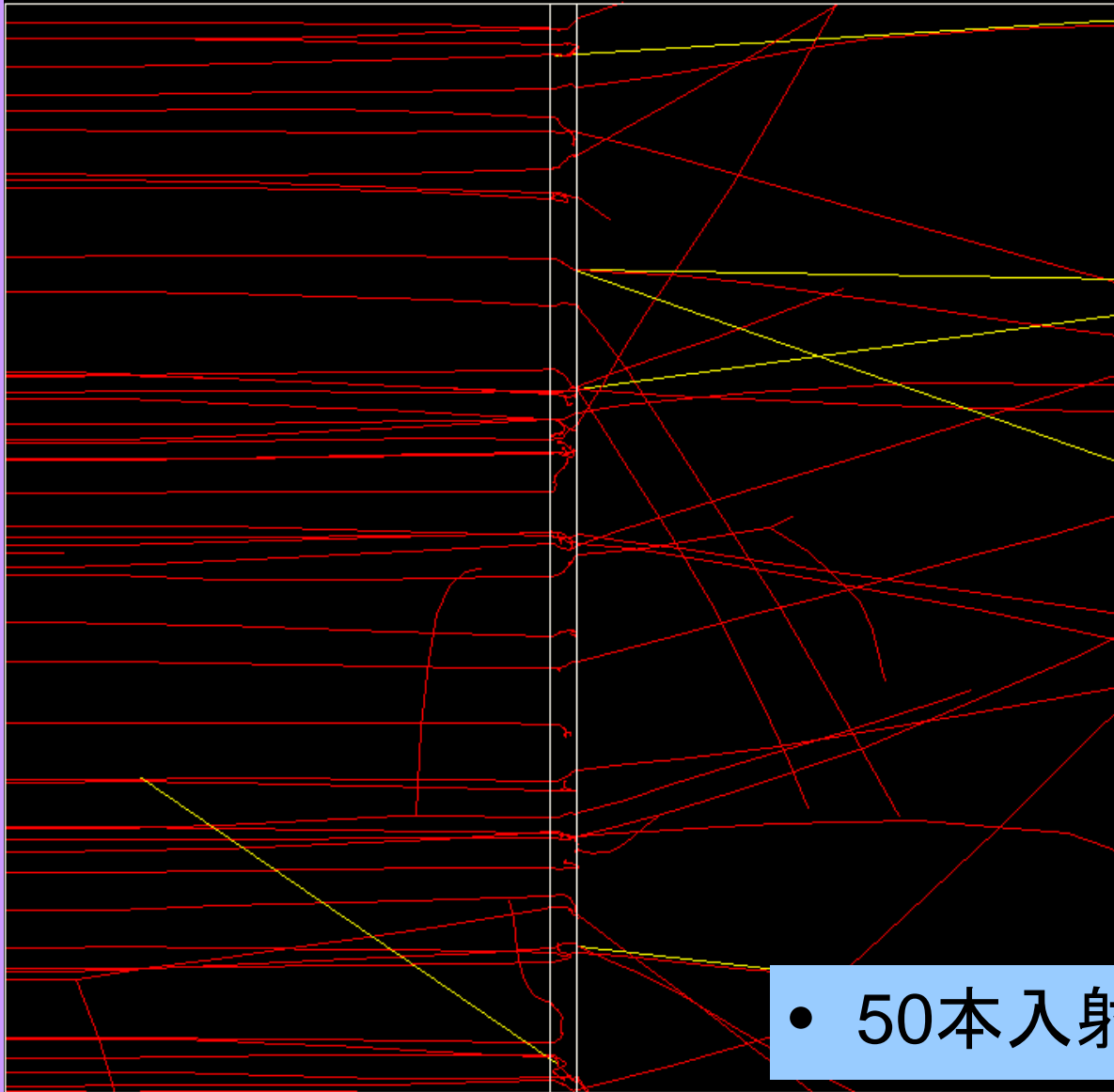
# 2.3 MeV ベータ線 → Al 0.25cm

空気

Al

空気

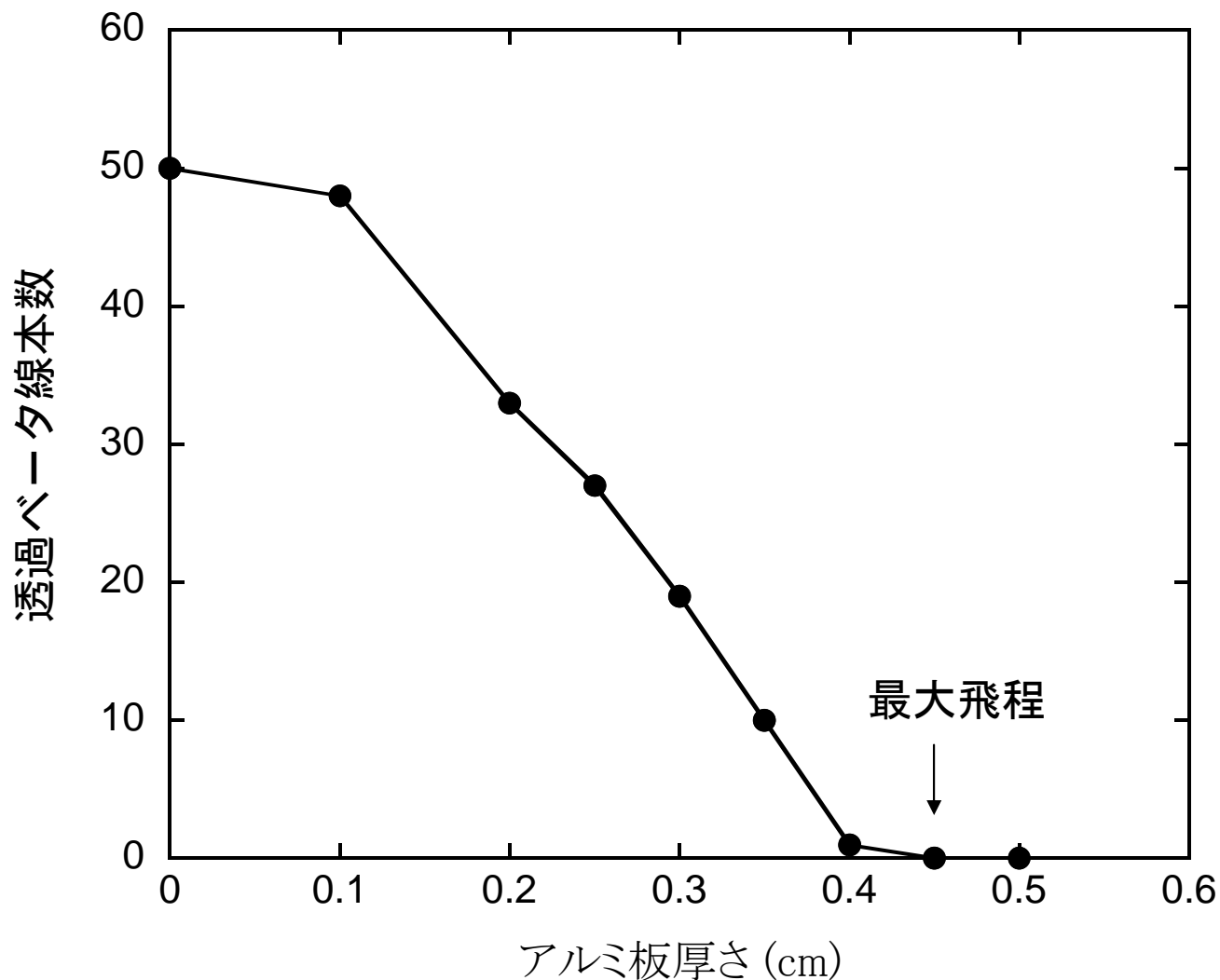
ベータ線源



- 50本入射 → 27本透過

10cm

# アルミ板厚さによる透過ベータ線本数の変化



# シミュレーションコード: EGS

- $10^3\text{eV}$ から $10^{12}\text{eV}$ の電子(ベータ線)、光子(ガンマ線、エックス線)と物質との相互作用の計算
- EGS5: 2006年公開、著者: 平山、波戸、Bielajew, Wilderman, Nelson
- 対話型実行プログラム+飛跡表示プログラム
  - EGSを利用
  - <http://rcwww.kek.jp/research/shield/education.html>からダウンロード可能

# ベータ線と物質との相互作用

- ベータ線にとって、物質はどのように見えるか？
- ベータ線にとっては、物質は原子核と電子。
- 原子、原子核、放射性物質とは？

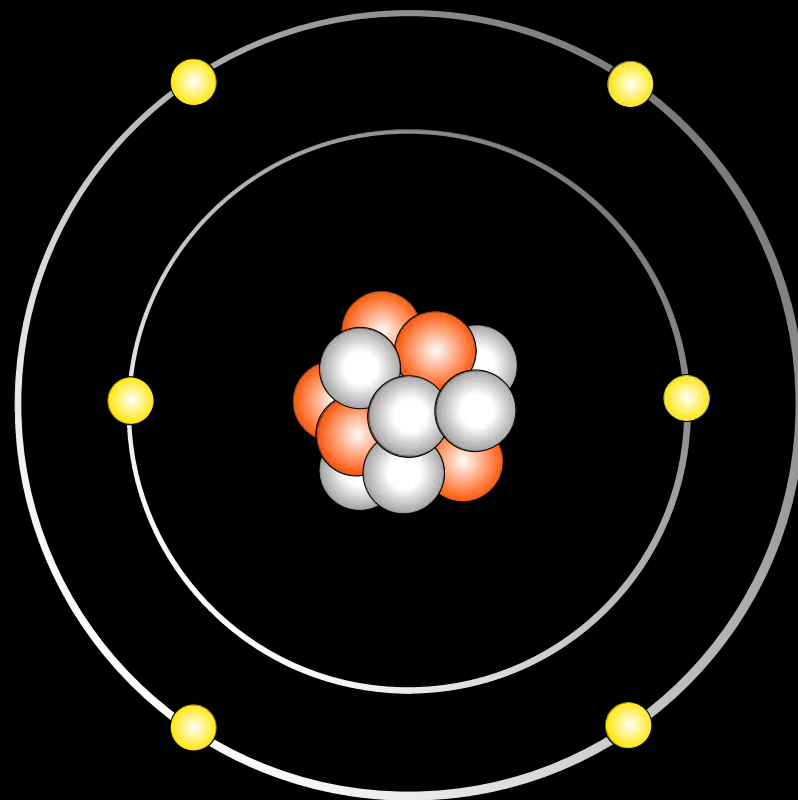




私たちの体をふくめ、自然界のすべてのものが原子からできています。



例えばこの花をかたち作っている主要な元素として**炭素**があります。



陽子



中性子



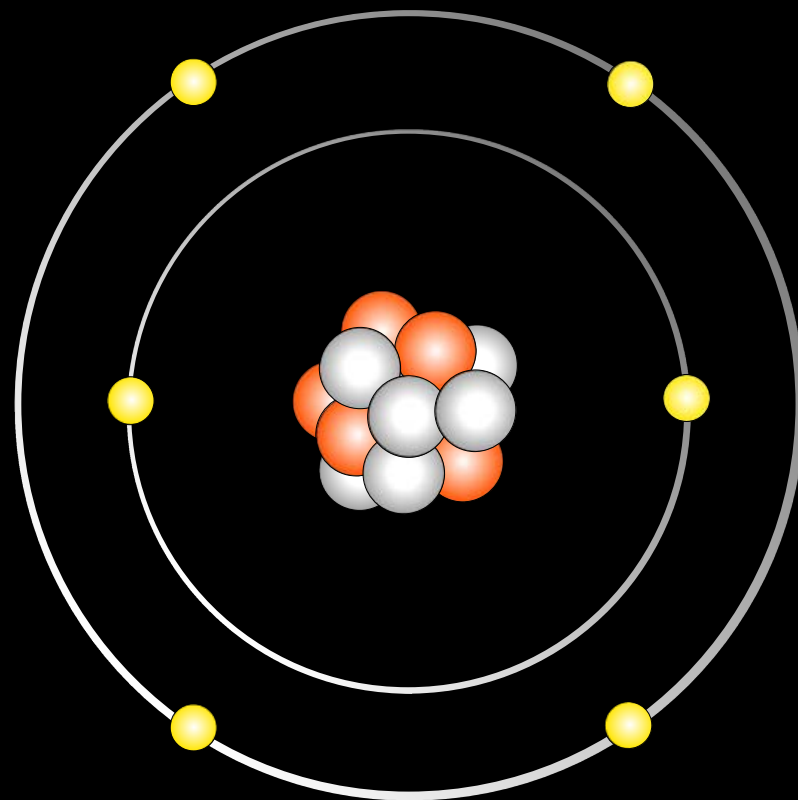
電子

## 炭素原子

原子番号 = 陽子の数

質量数 = 陽子の数 + 中性子の数





陽子



中性子



電子

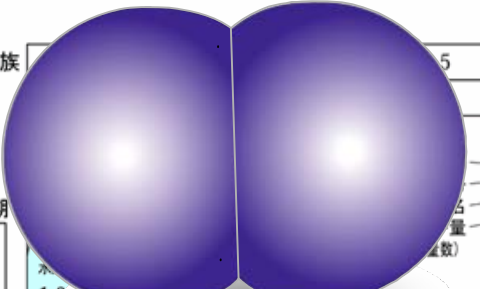
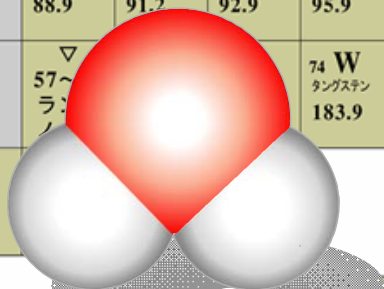
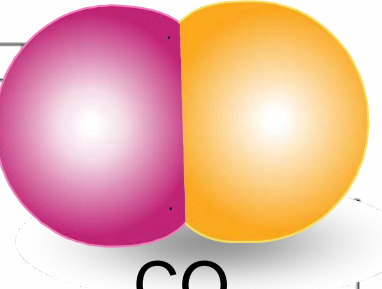
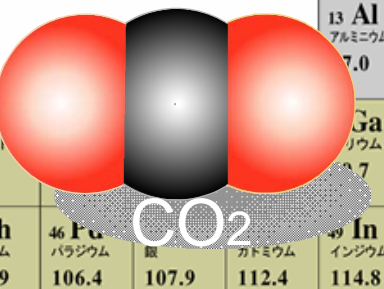
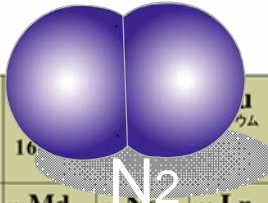
## 炭素原子

原子番号 = 陽子の数

質量数 = 陽子の数 + 中性子の数



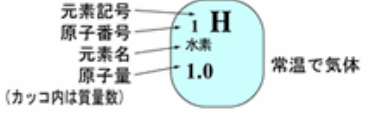
# 元素の周期表（長周期型）

族	遷移元素										典型元素																																						
周期	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18																															
1																																																	
2	3 Li リチウム 6.9	4 Be ベリリウム 9.0											5 B ホウ素 10.8	6 C 炭素 12.0	7 N 窒素 14.0	8 O 酸素 16.0	9 F フッ素 19.0	10 Ne ネオン 20.2																															
3	11 Na ナトリウム 23.0	12 Mg マグネシウム 24.3											13 Al アルミニウム 27.0	14 Si ケイ素 28.1	15 P リン 31.0	16 S 硫黄 32.1	17 Cl 塩素 35.5	18 Ar アルゴン 39.9																															
4	19 K カリウム 39.1	20 Ca カルシウム 40.1	21 Sc スカンジウム 45.0	22 Ti チタン 47.9	23 V バナジウム 50.9	24 Cr クロム 52.0	25 Mn マンガン 54.9	26 Fe 鉄 55.8	27 Co コバルト 58.9	28 Ni ニッケル 58.7	29 Cu 銅 63.5	30 Zn 亜鉛 65.4	31 Ga ガリウム 69.7	32 Ge ゲルマニウム 72.6	33 As ヒ素 74.9	34 Se セレン 79.0	35 Br 臭素 79.9	36 Kr クリプトン 83.8																															
5	37 Rb ルビジウム 85.5	38 Sr ストロンチウム 87.6	39 Y イットリウム 88.9	40 Zr ジルコニウム 91.2	41 Nb ニオブ 92.9	42 Mo モリブデン 95.9	43 Tc テクネチウム (99)	44 Ru ルテチウム 101.1	45 Rh ロジウム 102.9	46 Pd パラジウム 106.4	47 Ag 銀 107.9	48 Cd カドミウム 112.4	49 In インジウム 114.8	50 Sn スズ 118.7	51 Sb アンチモン 121.8	52 Te テルル 127.6	53 I ヨウ素 126.9	54 Xe キセノン 131.3																															
6	55 Cs セシウム 132.9	56 Ba バリウム 137.3	57-71 ランタノイド	72 W タングステン 183.9	73 Re レニウム 186.2	74 Os オスマニウム 190.2	75 Ir イリジウム 192.2	76 Pt 白金 195.1	77 Au 金 197.0	78 Hg 水銀 200.6	81 Tl タリウム 204.4	82 Pb 鉛 207.2	83 Bi ビスマス 209.0	84 Po ポロニウム (210)	85 At アスタチン (210)	86 Rn ラドン (222)																																	
7	87 Fr フランシウム (223)	88 Ra ラジウム (226)	▼ランタノイド			60 Nb ネオジム 138.9	61 Pm プロメチウム 140.1	62 Sm サマリウム 140.9	63 Eu ユウロピウム 144.2	64 Gd ガドリニウム (145)	65 Tb テルビウム 150.4	66 Dy ジスプロシウム 152.0	67 Ho ホロミウム 157.3	68 Er エルビウム 158.9	69 Yb イットリウム 162.5	70 Lu ルテチウム 164.9	71 Yt イットリウム 167.3	72 Hf ハフニウム 168.9	73 Ta タンタルウム 180.9	74 W タングステン 183.9	75 Re レニウム 186.2	76 Os オスマニウム 190.2	77 Ir イリジウム 192.2	78 Pt 白金 195.1	79 Au 金 197.0	80 Hg 水銀 200.6	81 Tl タリウム 204.4	82 Pb 鉛 207.2	83 Bi ビスマス 209.0	84 Po ポロニウム (210)	85 At アスタチン (210)	86 Rn ラドン (222)	87 Fr フランシウム (223)	88 Ra ラジウム (226)	89 Ac アクチニウム (227)	90 Th トリウム 232.0	91 Pa プロトアクチニウム 231.0	92 U ウラン 238.0	93 Np ネプツニウム (237)	94 Pu プルトニウム (239)	95 Am アメリシウム (243)	96 Cm キュリウム (247)	97 Bk バークリウム (247)	98 Cf カリホルニウム (252)	99 Es アインスタイニウム (252)	100 Fm フェルミウム (257)	101 Md メンデルレービウム (256)	102 No ノーベリウム (259)	103 Lr ローレンシウム (260)
			▼アクチノイド																																														
																																																	
																																																	
																																																	



# 元素の周期表（長周期型）

族	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	族
	典型元素		遷移元素										典型元素						
	アルカリ金属 (Hは除く)	アルカリ土類金属 (Be, Mgは除く)											ハロゲン		希ガス				
周期																			周期
1	1 H 水素 1.0																	2 He ヘリウム 4.0	
2	3 Li リチウム 6.9	4 Be ベリリウム 9.0											5 B ホウ素 10.8	6 C 炭素 12.0	7 N 窒素 14.0	8 O 酸素 16.0	9 F フッ素 19.0	10 Ne ネオン 20.2	
3	11 Na ナトリウム 23.0	12 Mg マグネシウム 24.3											13 Al アルミニウム 27.0	14 Si ケイ素 28.1	15 P リン 31.0	16 S 硫黄 32.1	17 Cl 塩素 35.5	18 Ar アルゴン 39.9	
4	19 K カリウム 39.1	20 Ca カルシウム 40.1	21 Sc スカンジウム 45.0	22 Ti チタン 47.9	23 V バナジウム 50.9	24 Cr クロム 52.0	25 Mn マンガン 54.9	26 Fe 鉄 55.8	27 Co コバルト 58.9	28 Ni ニッケル 58.7	29 Cu 銅 63.5	30 Zn 亜鉛 65.4	31 Ga ガリウム 69.7	32 Ge ゲルマニウム 72.6	33 As ヒ素 74.9	34 Se セレン 79.0	35 Br 臭素 79.9	36 Kr クリプトン 83.8	
5	37 Rb ルビジウム 85.5	38 Sr ストロンチウム 87.6	39 Y イットリウム 88.9	40 Zr ジルコニウム 91.2	41 Nb ニオブ 92.9	42 Mo モリブデン 95.9	43 Tc テクネチウム (99)	44 Ru ルテチウム 101.1	45 Rh ロジウム 102.9	46 Pd パラジウム 106.4	47 Ag 銀 107.9	48 Cd カドミウム 112.4	49 In インジウム 114.8	50 Sn スズ 118.7	51 Sb アンチモン 121.8	52 Te テルル 127.6	53 I ヨウ素 126.9	54 Xe キセノン 131.3	
6	55 Cs セシウム 132.9	56 Ba バリウム 137.3	▼ 57~71 ランタノイド	72 Hf ハフニウム 178.5	73 Ta タンタル 180.9	74 W タングステン 183.9	75 Re レニウム 186.2	76 Os オスミウム 190.2	77 Ir イリジウム 192.2	78 Pt 白金 195.1	79 Au 金 197.0	80 Hg 水銀 200.6	81 Tl タリウム 204.4	82 Pb 鉛 207.2	83 Bi ビスマス 209.0	84 Po ポロニウム (210)	85 At アスタチン (210)	86 Rn ラドン (222)	
7	87 Fr フランシウム (223)	88 Ra ラジウム (226)	▼ 89~103 アクチノイド																



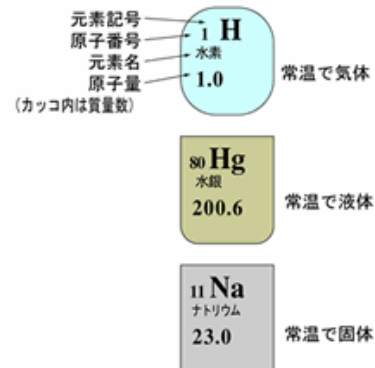
- は非金属元素
- は軽金属 (密度4g/cm<sup>3</sup>未満)
- は重金属 (密度4g/cm<sup>3</sup>以上)

▼ランタノイド	57 La ランタン 138.9	58 Ce セリウム 140.1	59 Pr プラセオジム 140.9	60 Nb ネオジム 144.2	61 Pm プロメチウム (145)	62 Sm サマリウム 150.4	63 Eu ユウロピウム 152.0	64 Gd ガドリニウム 157.3	65 Tb テルビウム 158.9	66 Dy ジスプロシウム 162.5	67 Ho ホロミウム 164.9	68 Er エルビウム 167.3	69 Tm ツリウム 168.9	70 Yb イットルビウム 173.0	71 Lu ルテチウム 175.0
▼アクチノイド	89 Ac アクチニウム (227)	90 Th トリウム 232.0	91 Pa プロトアクチニウム 231.0	92 U ウラン 238.0	93 Np ネプツニウム (237)	94 Pu プルトニウム (239)	95 Am アメリシウム (243)	96 Cm キュリウム (247)	97 Bk バークリウム (247)	98 Cf カリホルニウム (252)	99 Es アインスタイニウム (252)	100 Fm フェルミウム (257)	101 Md メンデルビウム (256)	102 No ノーベリウム (259)	103 Lr ローレンシウム (260)



# 元素の周期表（長周期型）

族	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	族
	典型元素		遷移元素										典型元素						
	アルカリ金属 (Hは除く)	アルカリ土類金属 (Be, Mgは除く)											ハロゲン		希ガス				
1	1 H 水素 1.0																		2 He ヘリウム 4.0
2	3 Li リチウム 6.9	4 Be ベリリウム 9.0											5 B ホウ素 10.8	6 C 炭素 12.0	7 N 窒素 14.0	8 O 酸素 16.0	9 F フッ素 19.0	10 Ne ネオン 20.2	
3	11 Na ナトリウム 23.0	12 Mg マグネシウム 24.3											13 Al アルミニウム 27.0	14 Si ケイ素 28.1	15 P リン 31.0	16 S 硫黄 32.1	17 Cl 塩素 35.5	18 Ar アルゴン 39.9	
4	19 K カリウム 39.1	20 Ca カルシウム 40.1	21 Sc スカンジウム 45.0	22 Ti チタン 47.9	23 V バナジウム 50.9	24 Cr クロム 52.0	25 Mn マンガン 54.9	26 Fe 鉄 55.8	27 Co コバルト 58.9	28 Ni ニッケル 58.7	29 Cu 銅 63.5	30 Zn 亜鉛 65.4	31 Ga ガリウム 69.7	32 Ge ゲルマニウム 72.6	33 As ヒ素 74.9	34 Se セレン 79.0	35 Br 臭素 79.9	36 Kr クリプトン 83.8	
5	37 Rb ルビジウム 85.5	38 Sr ストロンチウム 87.6	39 Y イットリウム 88.9	40 Zr ジルコニウム 91.2	41 Nb ニオブ 92.9	42 Mo モリブデン 95.9	43 Tc テクネチウム (99)	44 Ru ルテニウム 101.1	45 Rh ロジウム 102.9	46 Pd パラジウム 106.4	47 Ag 銀 107.9	48 Cd カドミウム 112.4	49 In インジウム 114.8	50 Sn スズ 118.7	51 Sb アンチモン 121.8	52 Te テルル 127.6	53 I ヨウ素 126.9	54 Xe キセノン 131.3	
6	55 Cs セシウム 132.9	56 Ba バリウム 137.3	△ 57~71 ランタノイド	72 Hf ハフニウム 178.5	73 Ta タンタル 180.9	74 W タングステン 183.9	75 Re レニウム 186.2	76 Os オスミウム 190.2	77 Ir イリジウム 192.2	78 Pt 白金 195.1	79 Au 金 197.0	80 Hg 水銀 200.6	81 Tl タリウム 204.4	82 Pb 鉛 207.2	83 Bi ビスマス 209.0	84 Po ポロニウム (210)	85 At アスタチン (210)	86 Rn ラドン (222)	
7	87 Fr フランシウム (223)	88 Ra ラジウム (226)	▽ 89~103 アクチノイド																



- は非金属元素
- は軽金属 (密度4g/cm<sup>3</sup>未満)
- は重金属 (密度4g/cm<sup>3</sup>以上)

▽ランタノイド

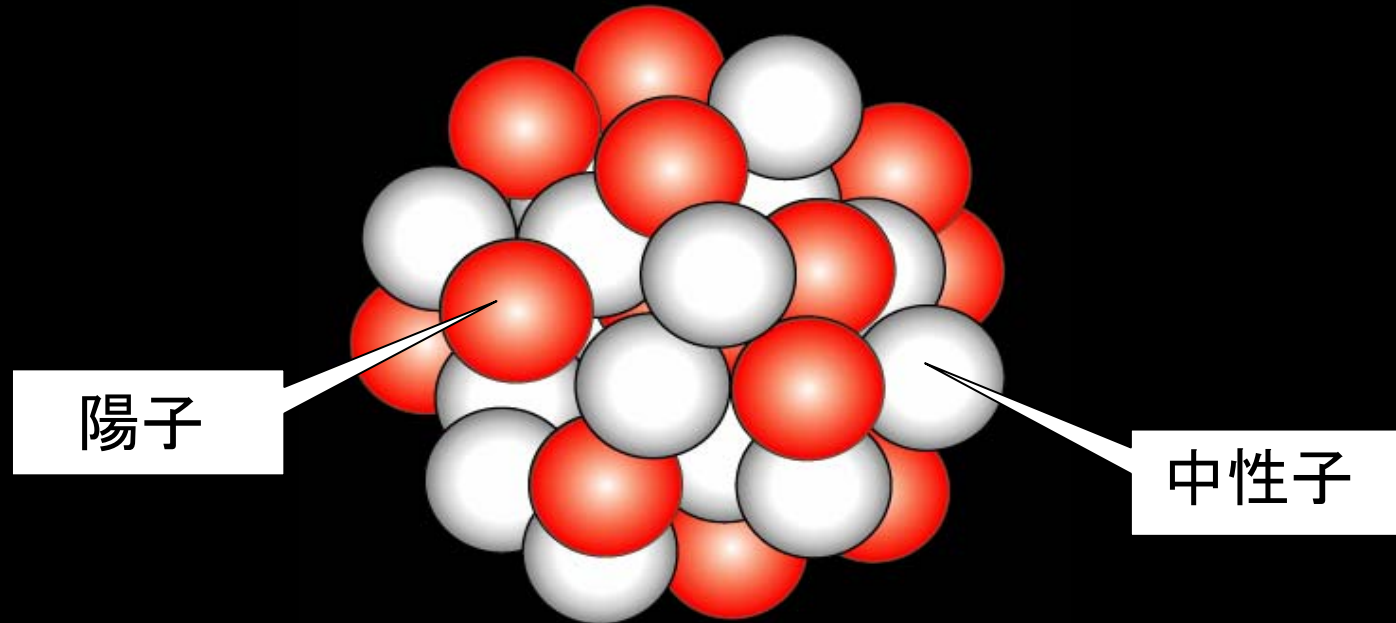
57 La ランタン 138.9	58 Ce セリウム 140.1	59 Pr プラセオジム 140.9	60 Nb ネオジム 144.2	61 Pm プロメチウム (145)	62 Sm サマリウム 150.4	63 Eu ユウロピウム 152.0	64 Gd ガドリニウム 157.3	65 Tb テルビウム 158.9	66 Dy ジスプロシウム 162.5	67 Ho ホロミウム 164.9	68 Er エルビウム 167.3	69 Tm ツリウム 168.9	70 Yb イットルビウム 173.0	71 Lu ルテチウム 175.0
------------------------	------------------------	--------------------------	------------------------	--------------------------	-------------------------	--------------------------	--------------------------	-------------------------	---------------------------	-------------------------	-------------------------	------------------------	---------------------------	-------------------------

▼アクチノイド

89 Ac アクチニウム (227)	90 Th トリウム 232.0	91 Pa プロトアクチニウム 231.0	92 U ウラン 238.0	93 Np ネプツニウム (237)	94 Pu プルトニウム (239)	95 Am アメリシウム (243)	96 Cm キュリウム (247)	97 Bk バークリウム (247)	98 Cf カリホルニウム (252)	99 Es アインスタイニウム (252)	100 Fm フェルミウム (257)	101 Md メンデルビウム (256)	102 No ノーベリウム (259)	103 Lr ローレンシウム (260)
--------------------------	------------------------	-----------------------------	----------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	-------------------------	--------------------------	---------------------------	-----------------------------	---------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------



$^{40}\text{K}$  (カリウム — 40)

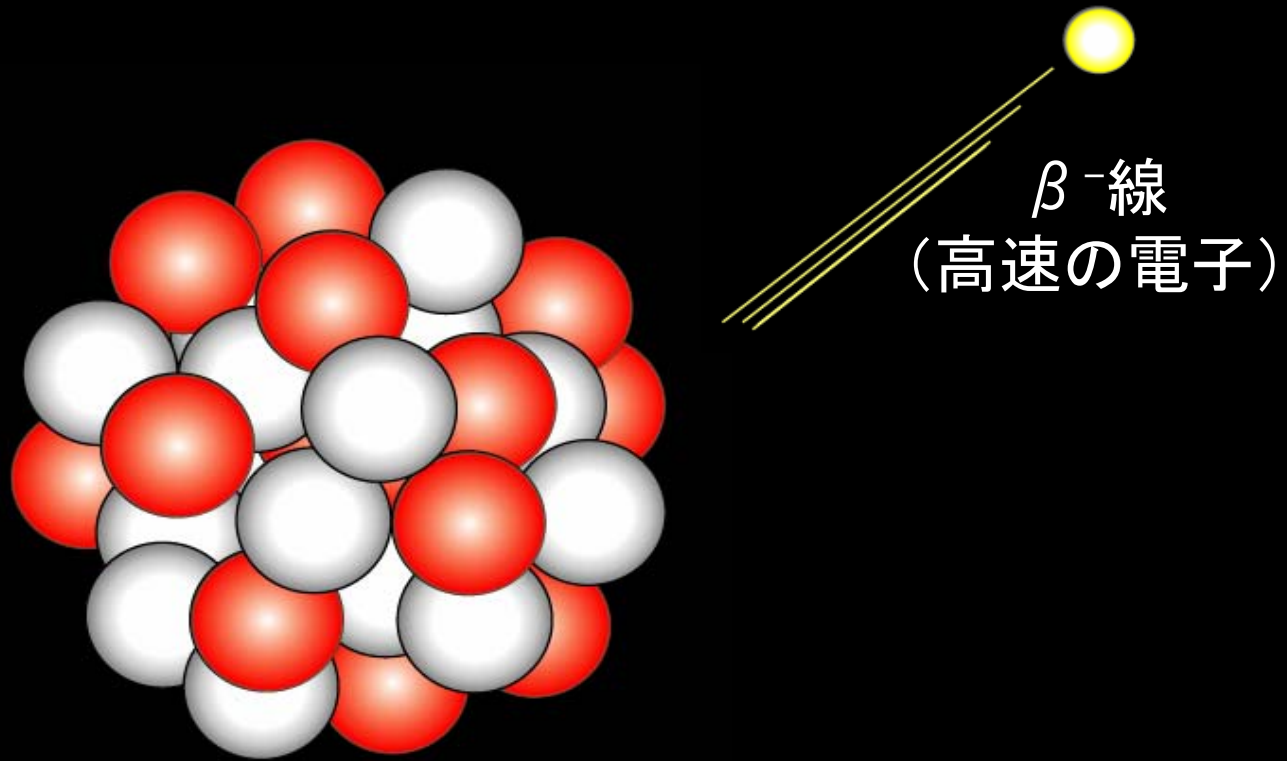


不安定な原子核





$^{40}\text{Ar}$  (アルゴン — 40)



安定な原子核

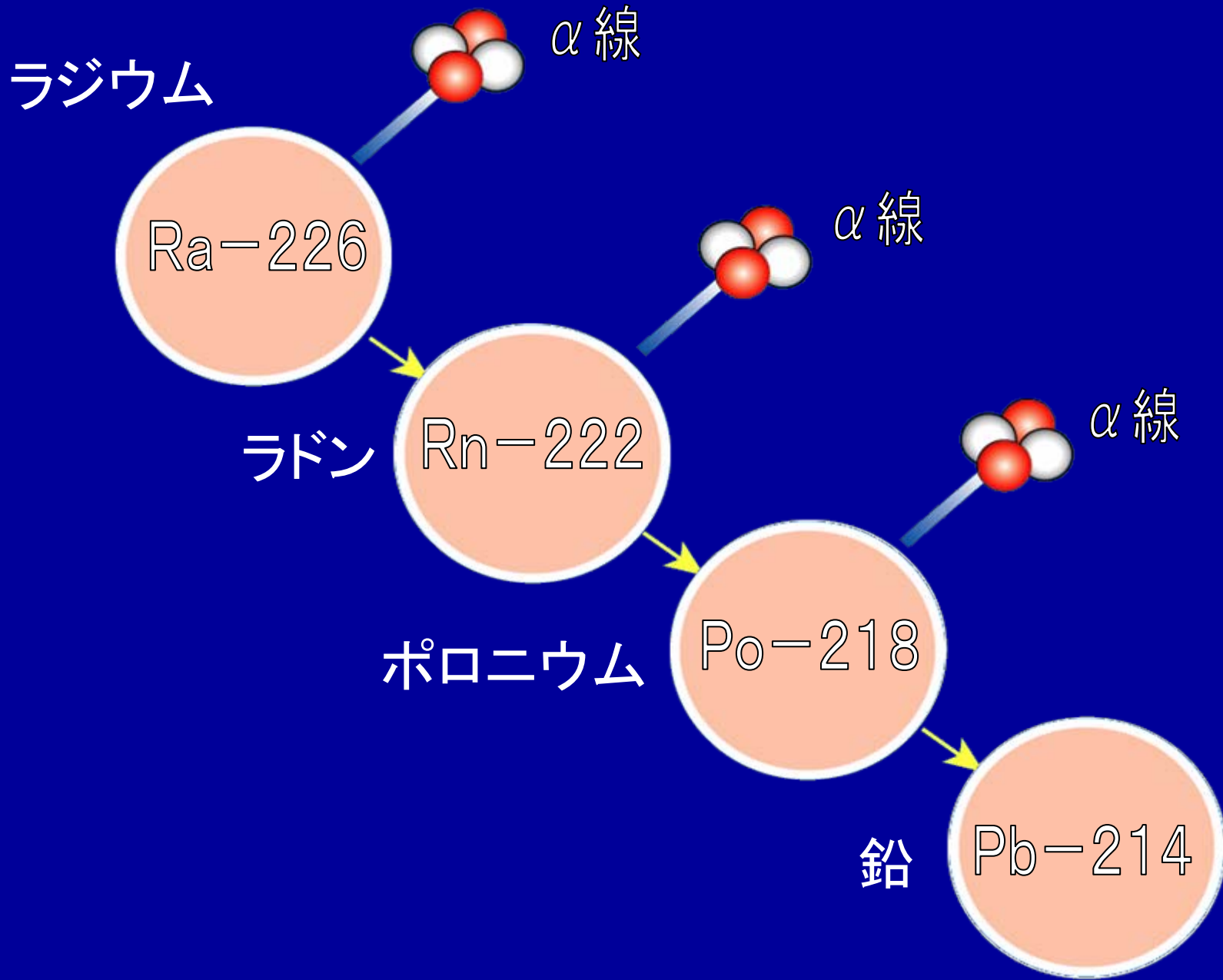


同位元素  
(アイソトープ)

放射性同位元素  
(ラジオアイソトープ: RI)

安定同位元素  
(ステーブルアイソトープ)





ラジウム  $\alpha$ 線

Ra-226

このように、不安定な原子核が放射線を出していくことを

「崩壊」あるいは「変換」といいます。カリウム40やラジウム226の

ような物質は放射線を出す能力を持っているという意味で、

「放射能をもつ物質」、「放射性物質」と呼ばれています。

ポロニウム

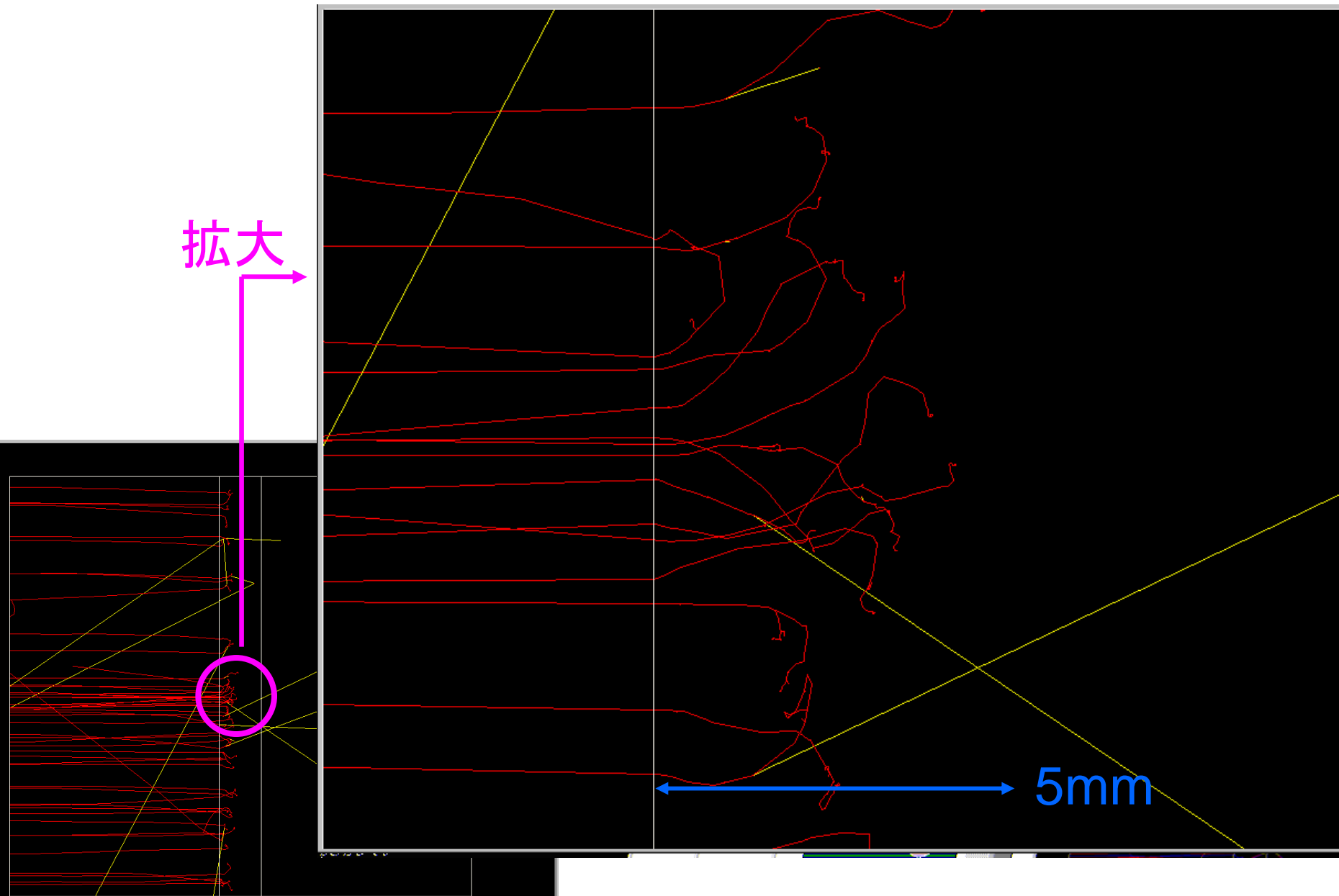
Po-218

鉛

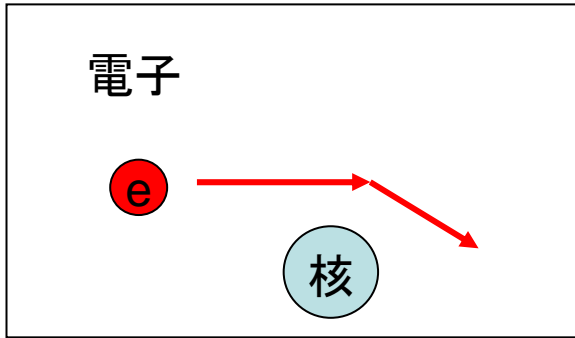
Pb-214



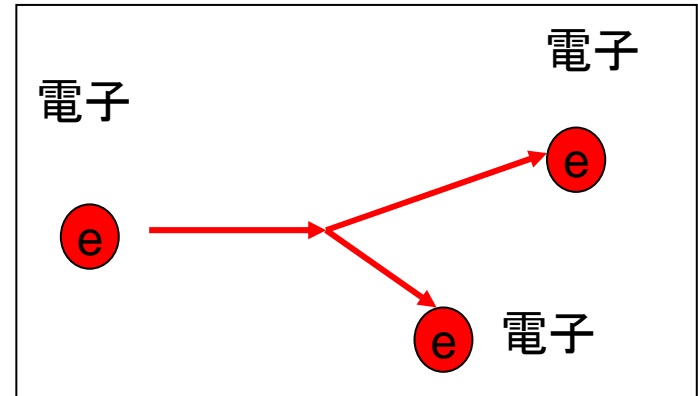
# ベータ線と物質の相互作用



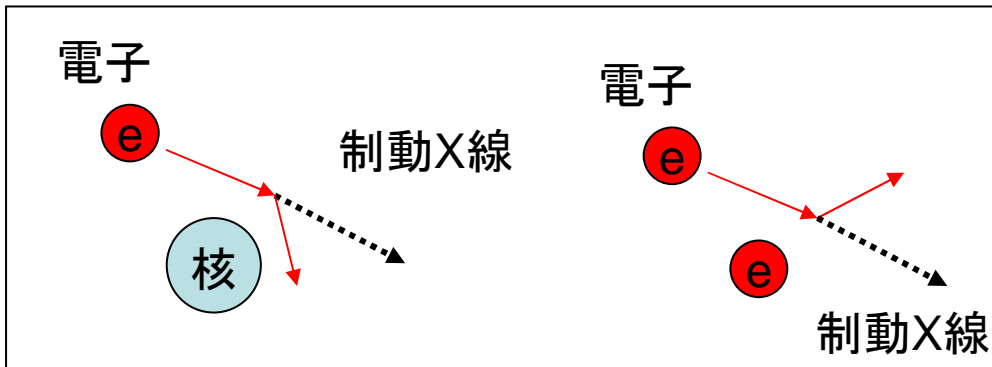
# ベータ線と原子核、電子との相互作用



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。

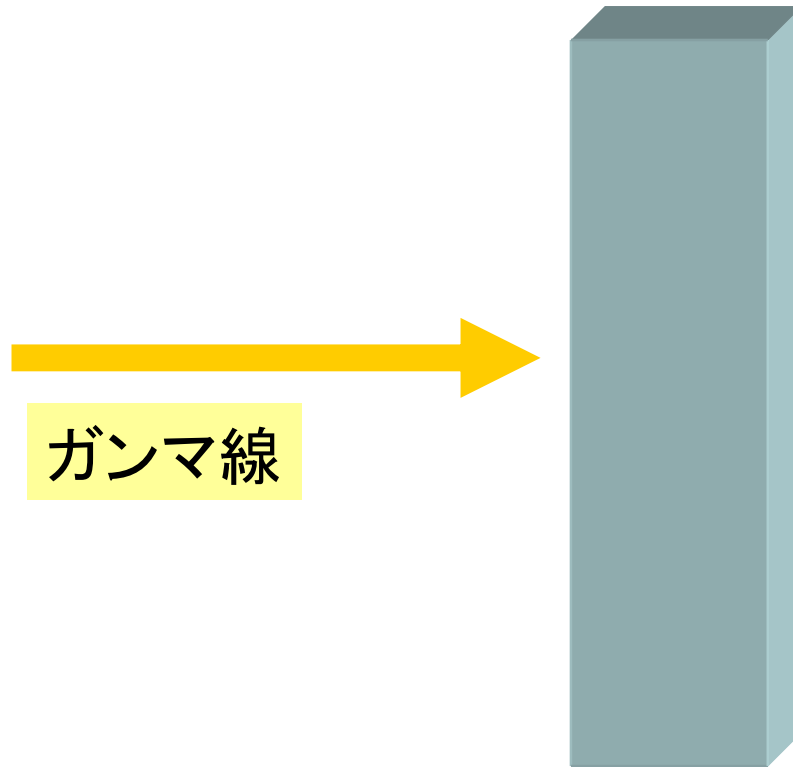


2. 電子と電子の非弾性散乱  
エネルギーを失う。



3. 制動X線の発生

## 例2 ガンマ線を物質に打ち込む



- ガンマ線は物質で止まってしまいか？ 通り抜けるか？
- 物質の内部でどのような反応が起こるか？

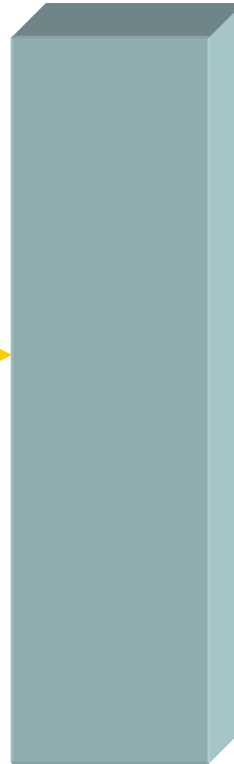
# 条件設定



放射線源  
 $^{60}\text{Co}$



ガンマ線  
平均エネルギー  
 $1.25 \text{ MeV}^*$

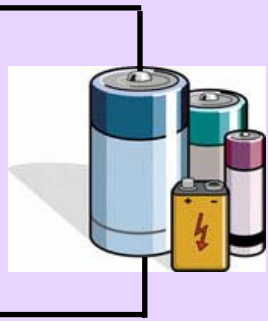


物質 アルミニウム

- ガンマ線は物質で止まってしまうか？ 通り抜けるか？
- 物質の内部でどのような反応が起こるか？

→ 放射線挙動の計算機シミュレーション

1.5 eV

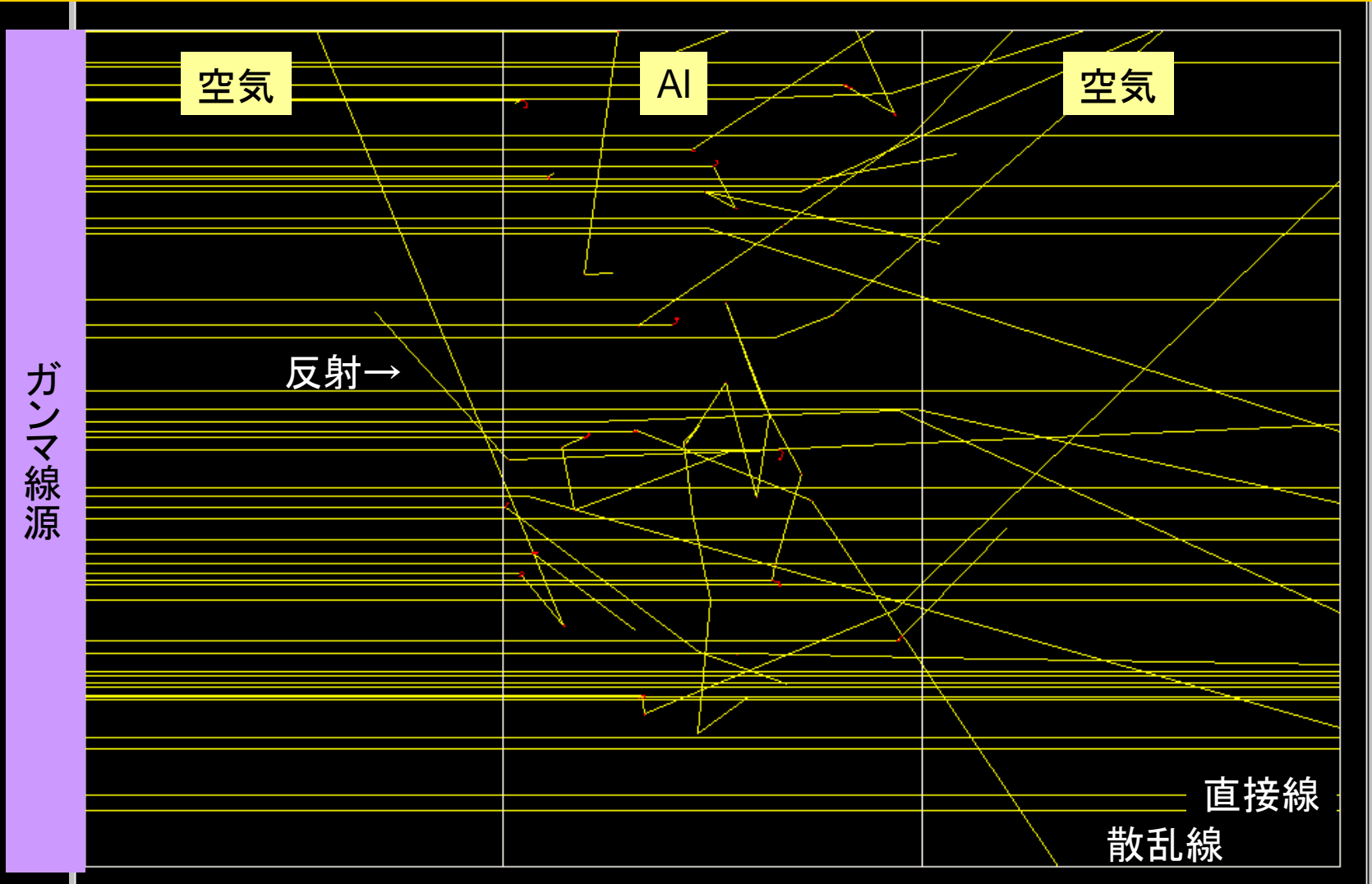


\*電子ボルト:

エネルギーの単位  
電位差1 Vで加速され  
た電子のエネルギー  
 $\text{MeV} = 10^6 \text{ eV}$



# 1.25 MeV ガンマ線 → Al 5cm



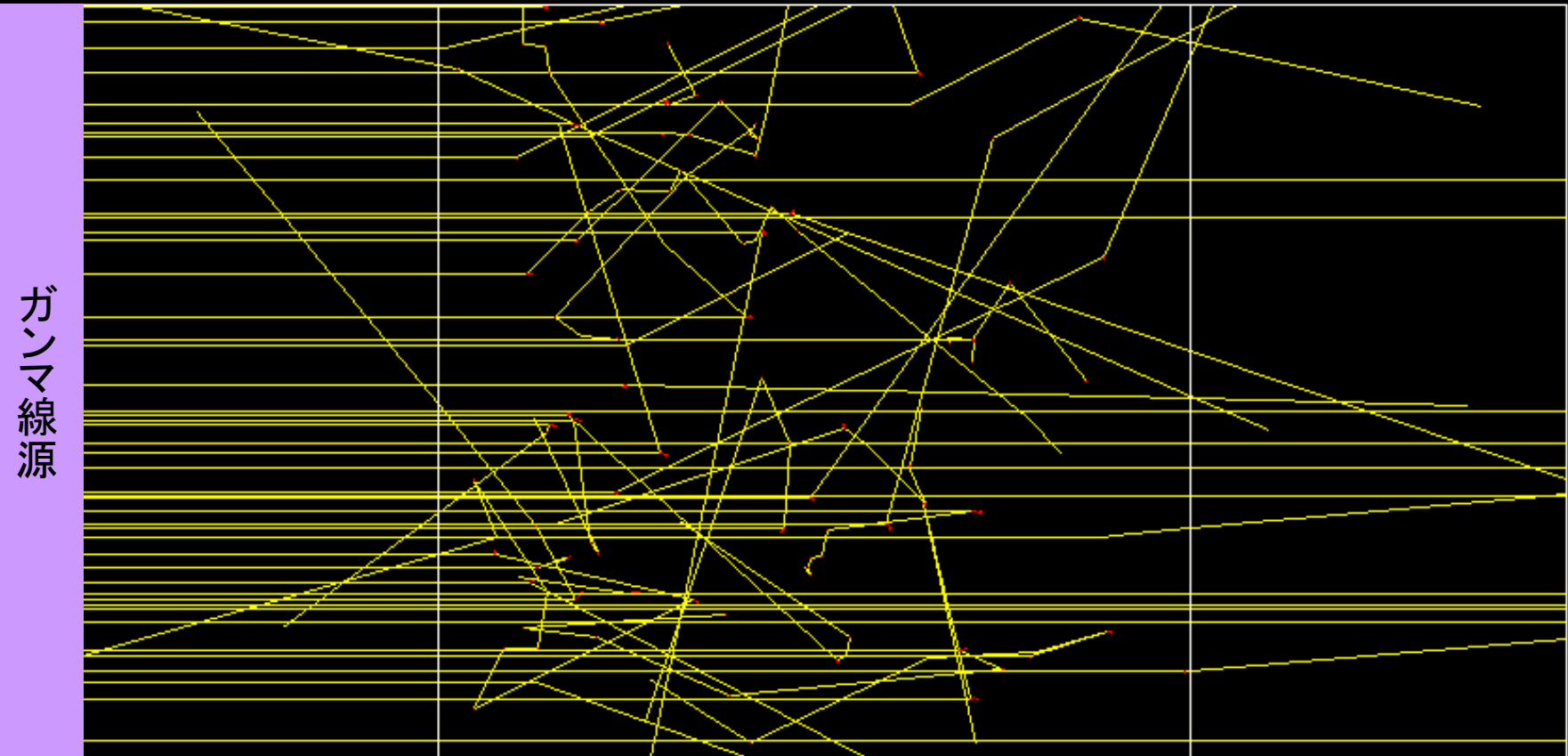
- 50本入射
- 透過: 直接線24、散乱線13; 反射2

# 1.25 MeV ガンマ線 → Al 10cm

空気

Al

空気



透過：直接線11、散乱線8；反射4

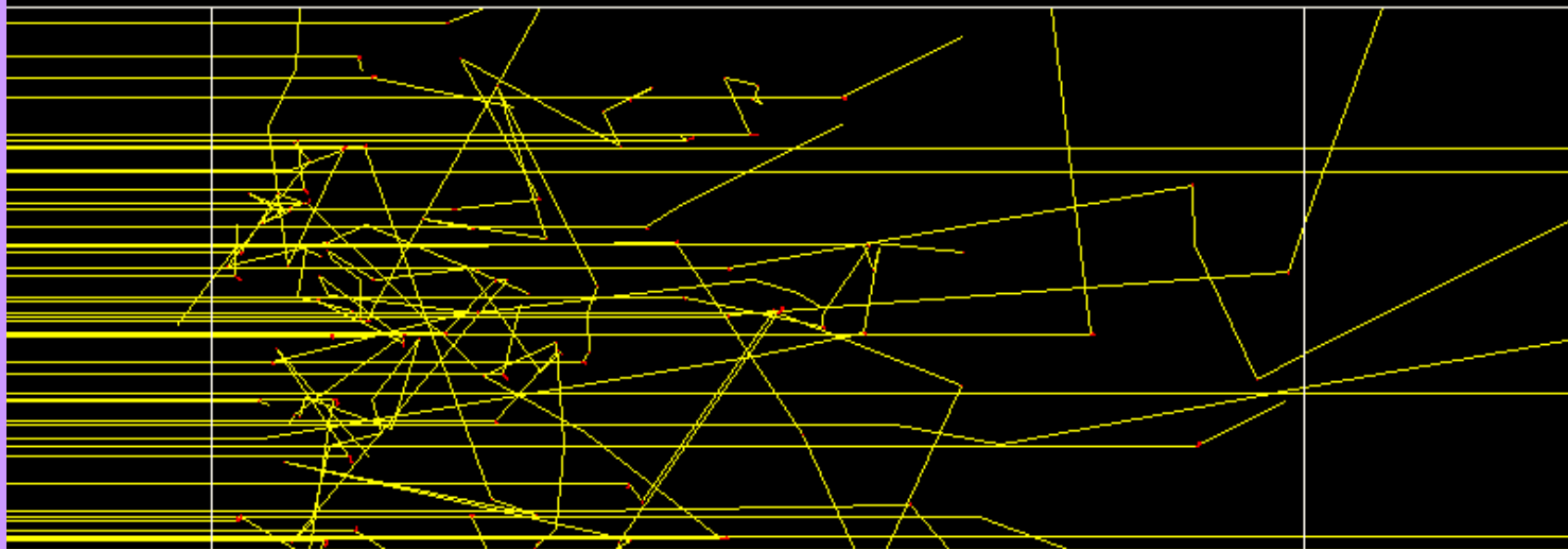
# 1.25 MeV ガンマ線 → Al 20cm

空気

Al

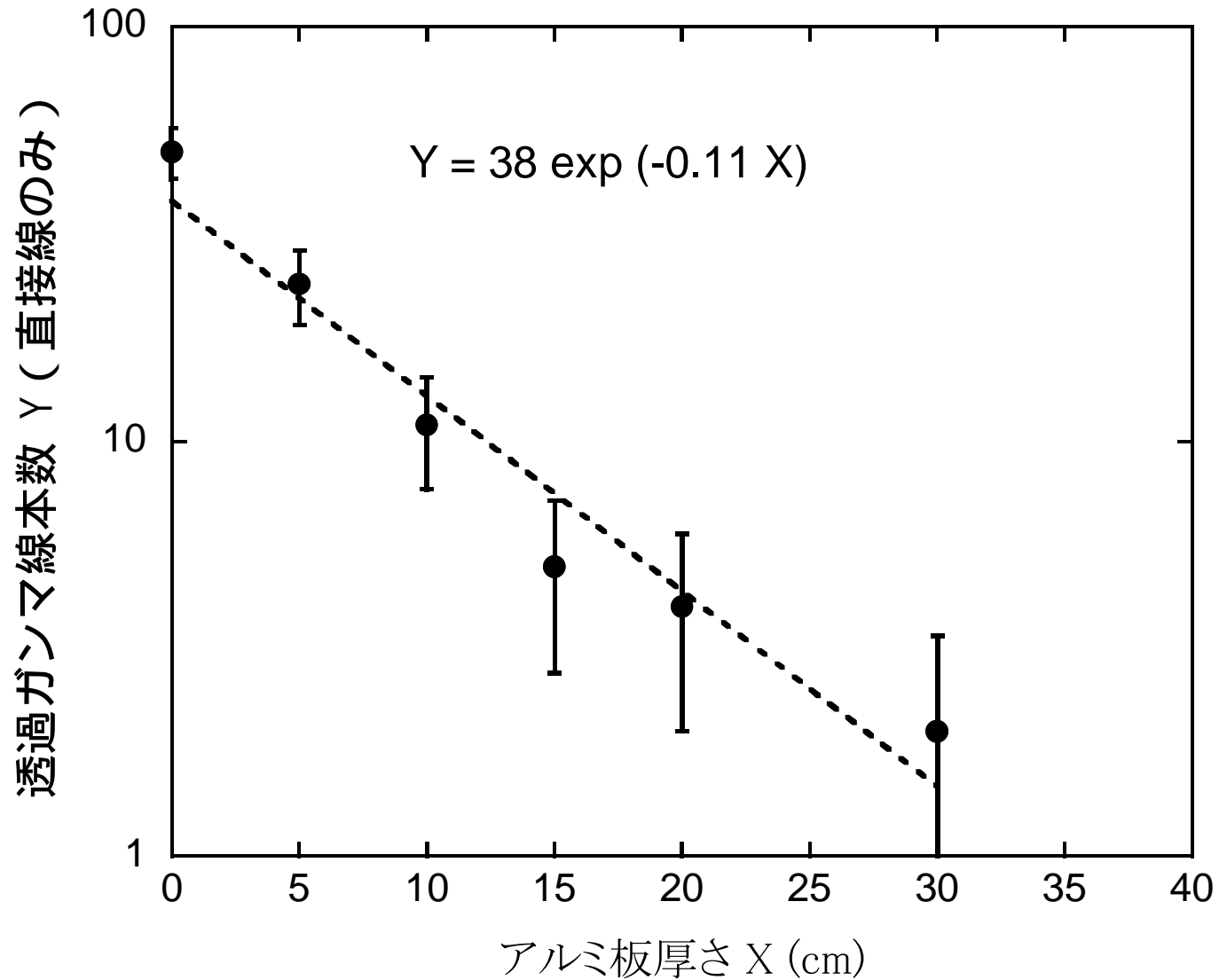
空気

ガンマ線源



透過: 直接線4、散乱線3; 反射1

# アルミ板厚さによる透過ガンマ線本数の変化



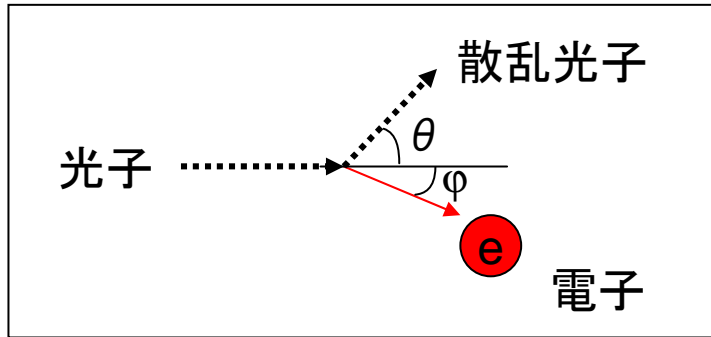
# ガンマ線と物質との相互作用

ガンマ線にとって、物質はどのように見えるか？

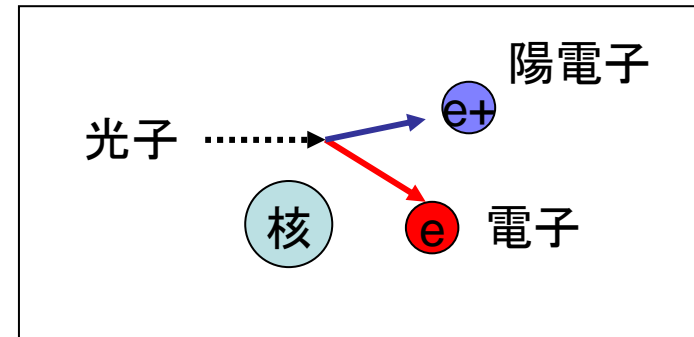
→最も多いのは、自由電子。

→次に、原子核または原子。

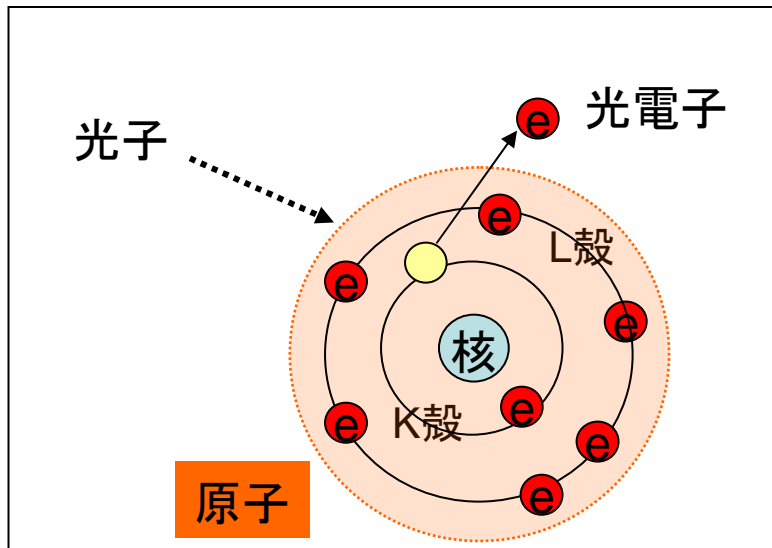
# ガンマ線と電子・原子核・原子との反応



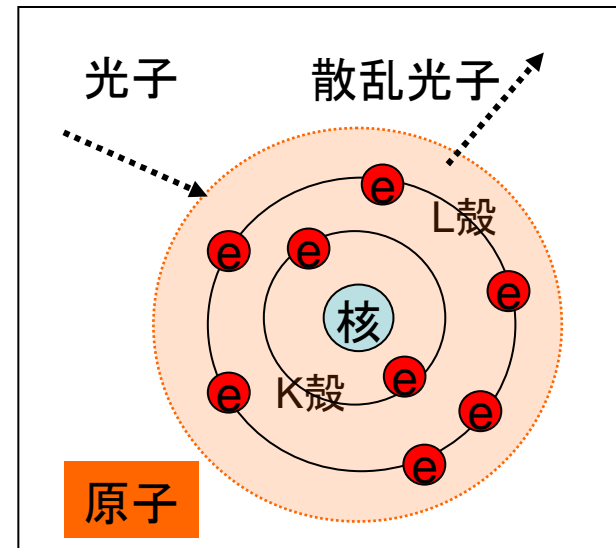
コンプトン散乱



電子対生成

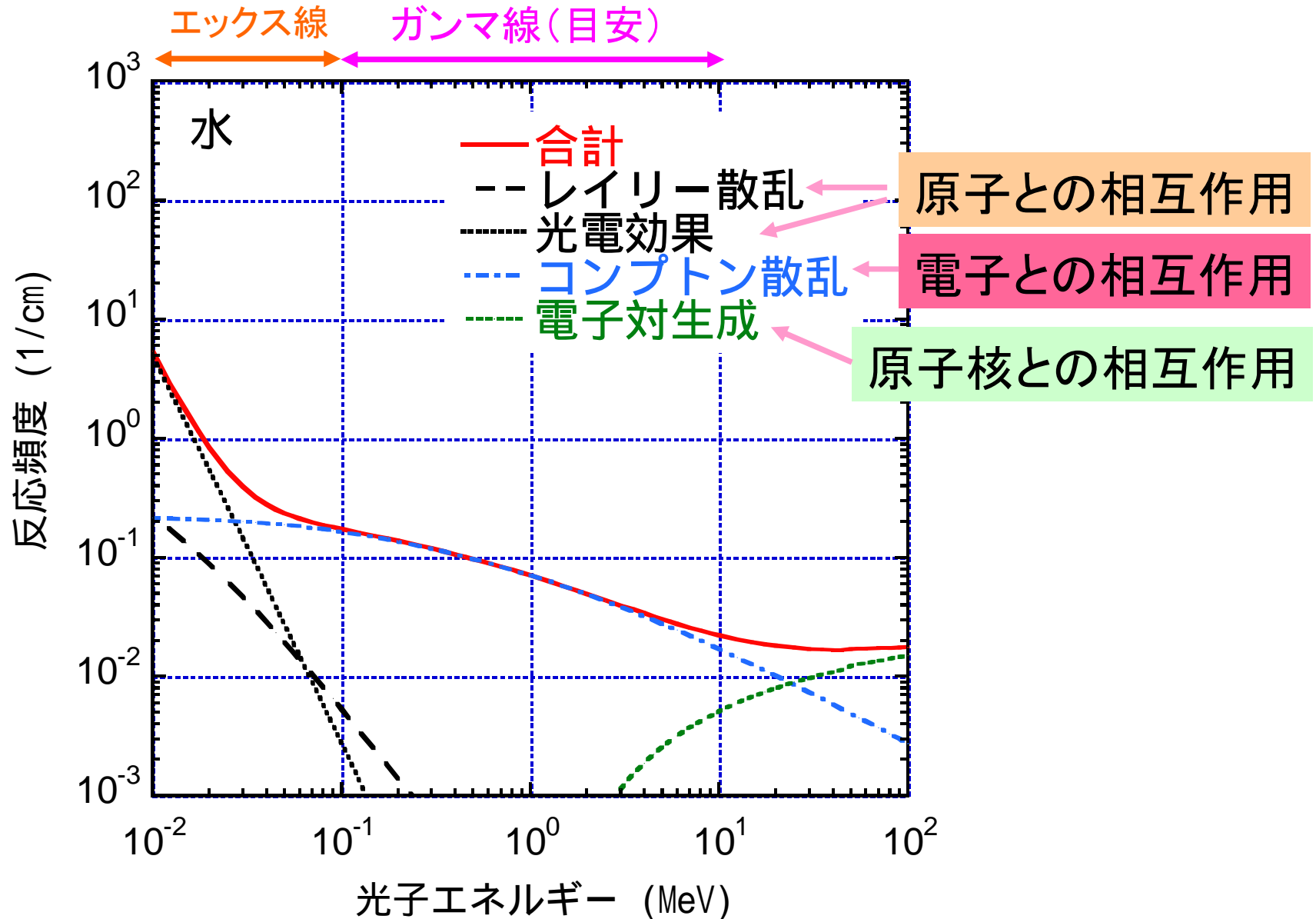


光電効果

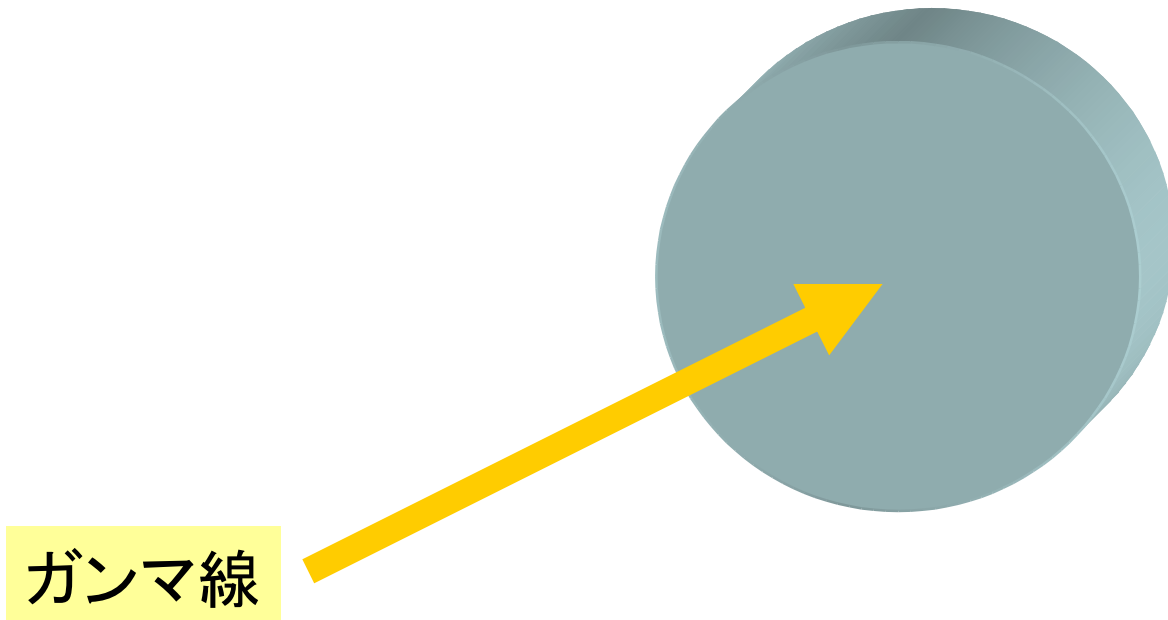


レイリー散乱

# ガンマ線と物質の反応頻度



# 例3 ガンマ線を放射線検出器で測定する



- 検出器内部でどのような反応が起こるか？
- 検出器からどのような信号が出るか？

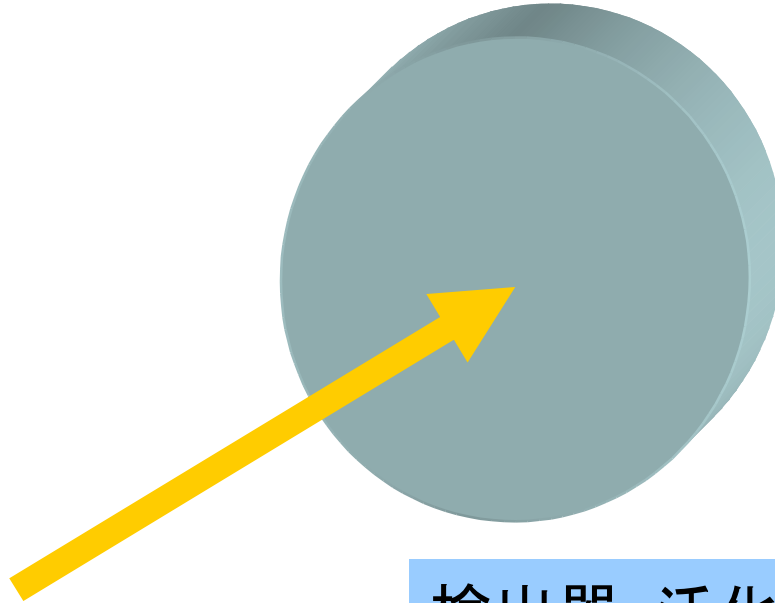


# 条件設定



放射線源  
 $^{137}\text{Cs}$

ガンマ線  
エネルギー  
662 keV



検出器: 沃化ナトリウム  
直径 3インチ、厚さ 3インチ

# 沃化ナトリウム内での相互作用①

空気

沃化ナトリウム

空気

吸収エネルギー: 0.232 MeV

ガンマ線源

入射エネルギー:  
0.662 MeV

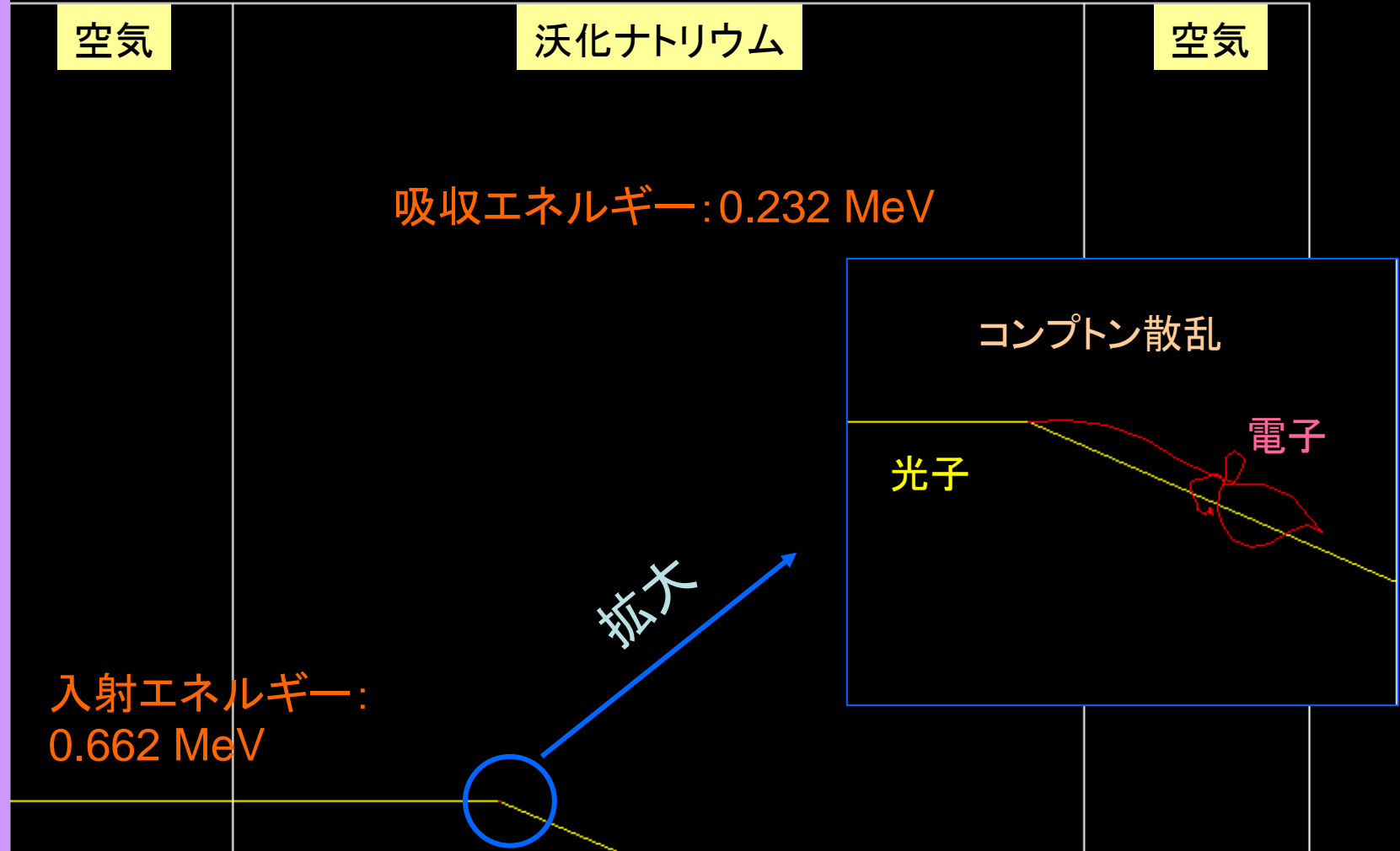
コンプトン散乱

光子

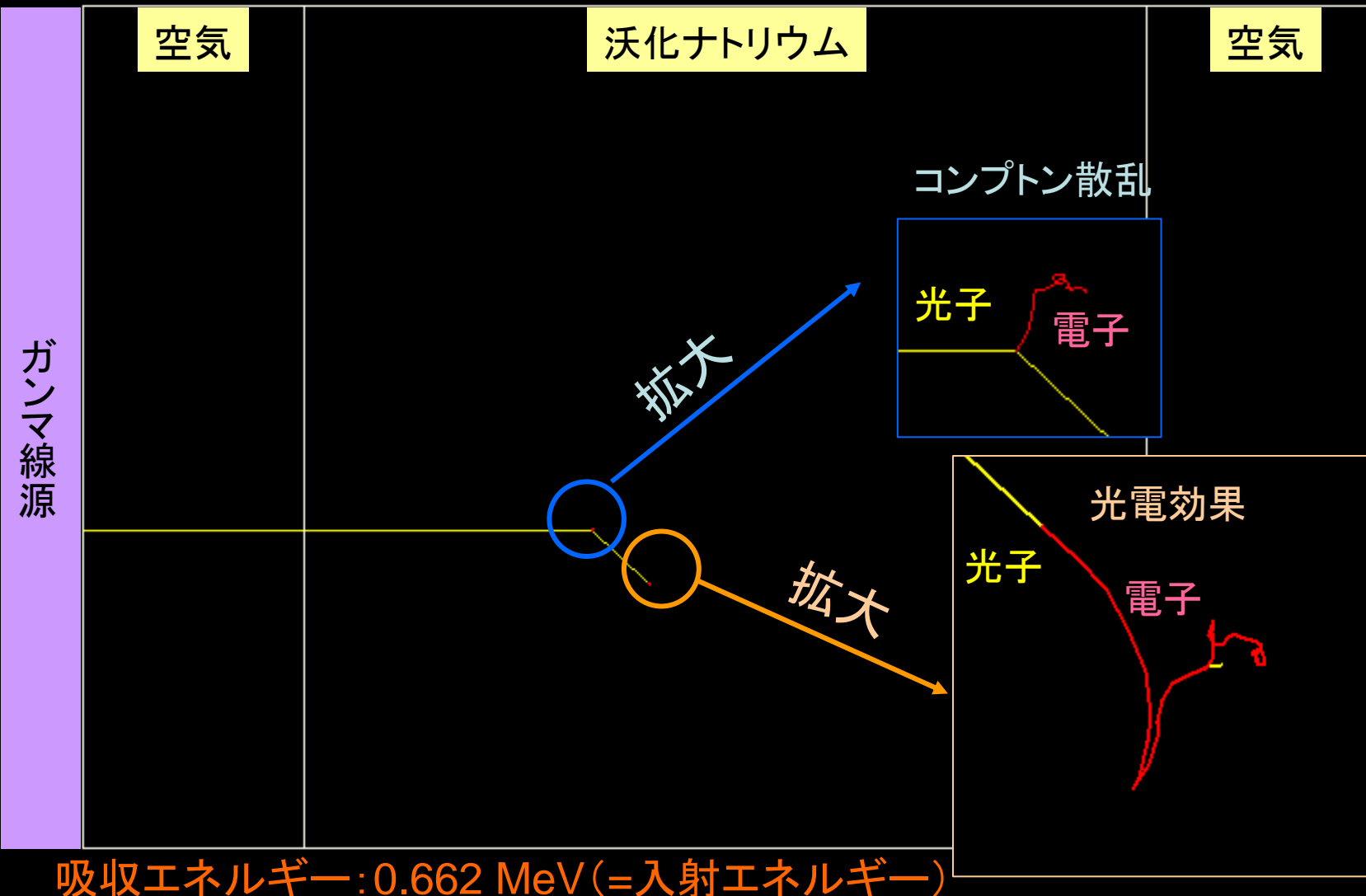
電子

拡大

エネルギー: 0.430 MeV



# 沃化ナトリウム内での相互作用②



# 沃化ナトリウム内での相互作用③

空気

沃化ナトリウム

空気

入射エネルギー：  
0.662 MeV

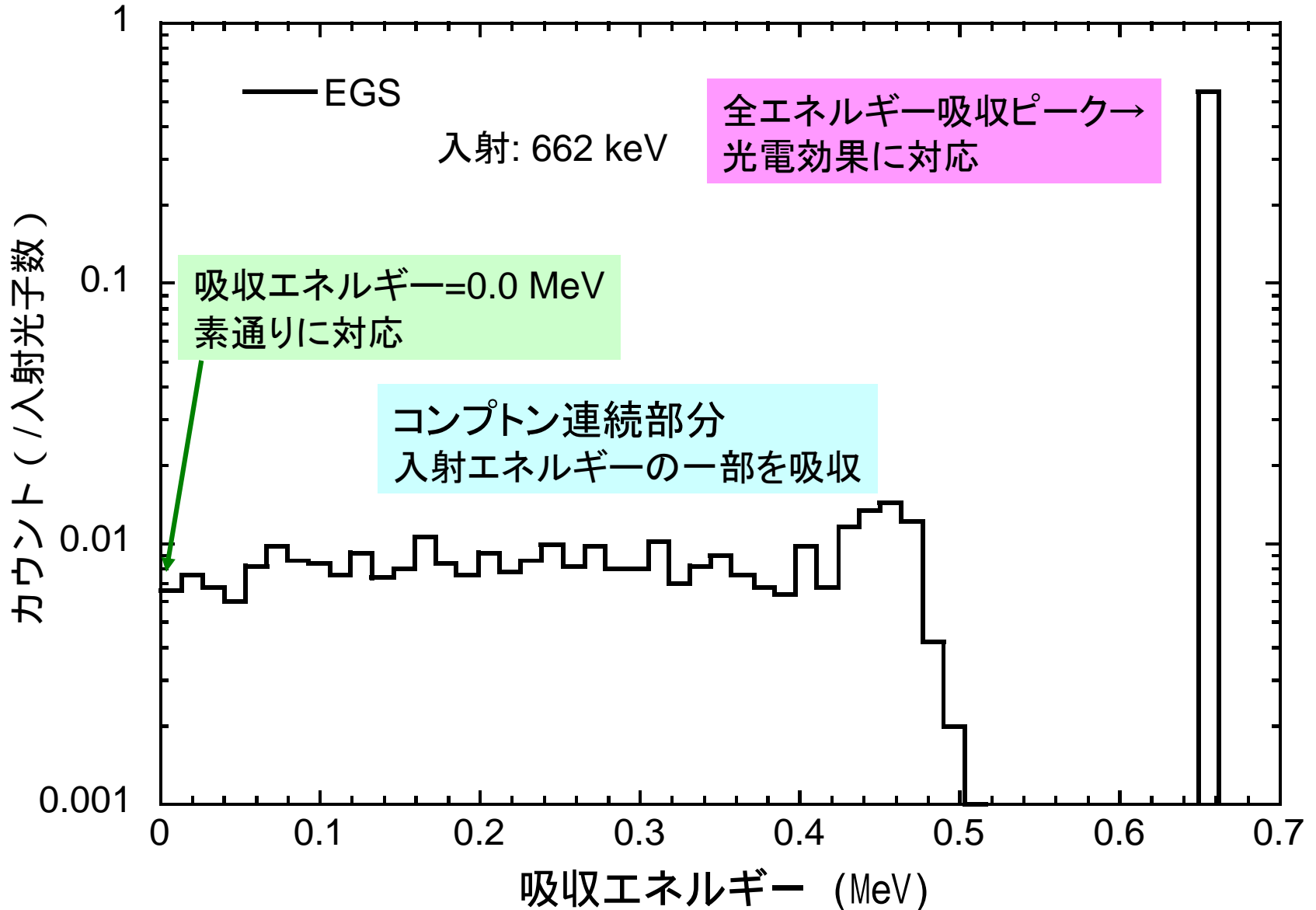
エネルギー：  
0.662 MeV

吸収エネルギー：0.0 MeV

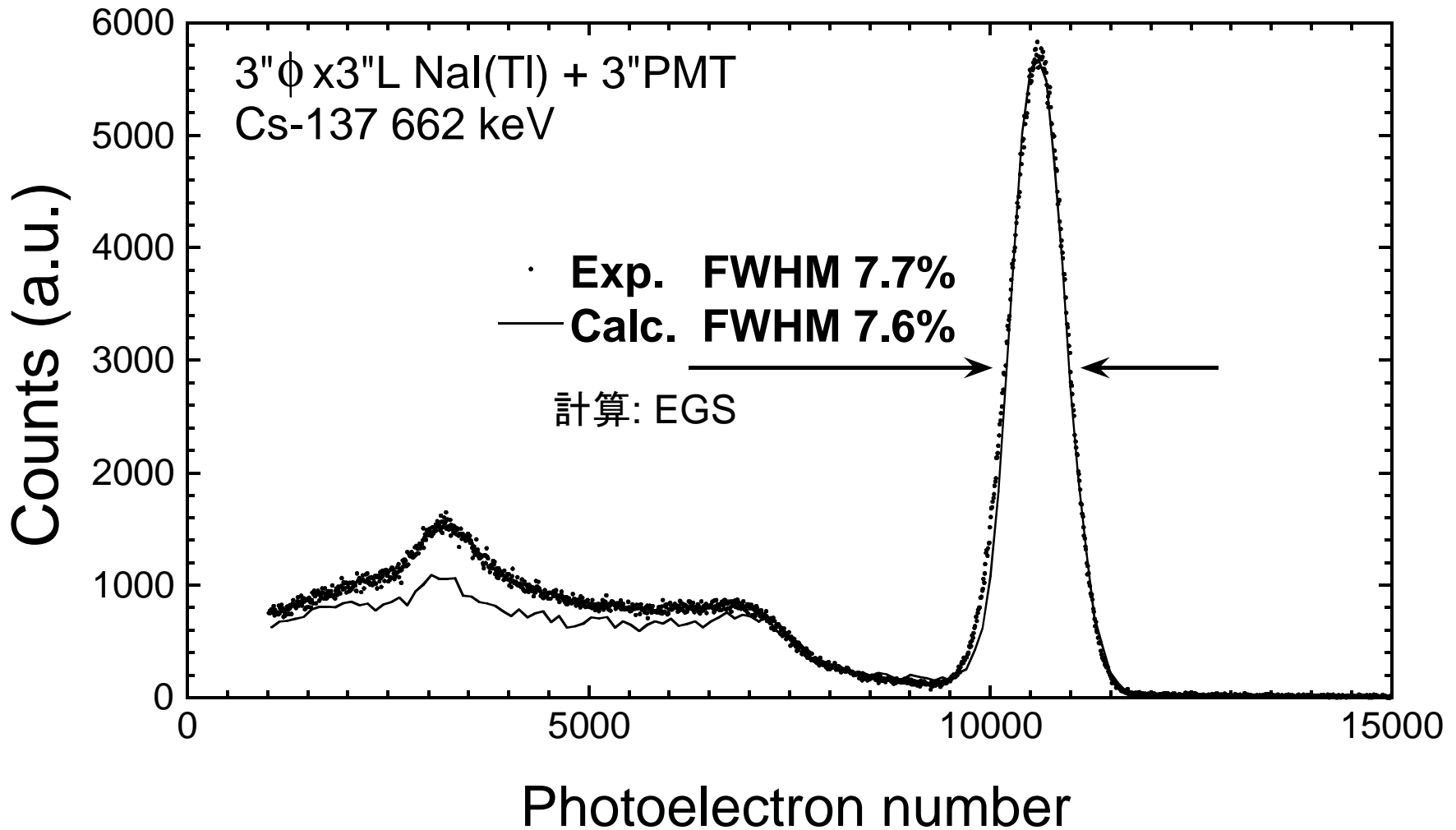
ガンマ線源

# 沃化ナトリウム検出器の応答関数

=単一エネルギー入力に対する吸収エネルギーの度数分布



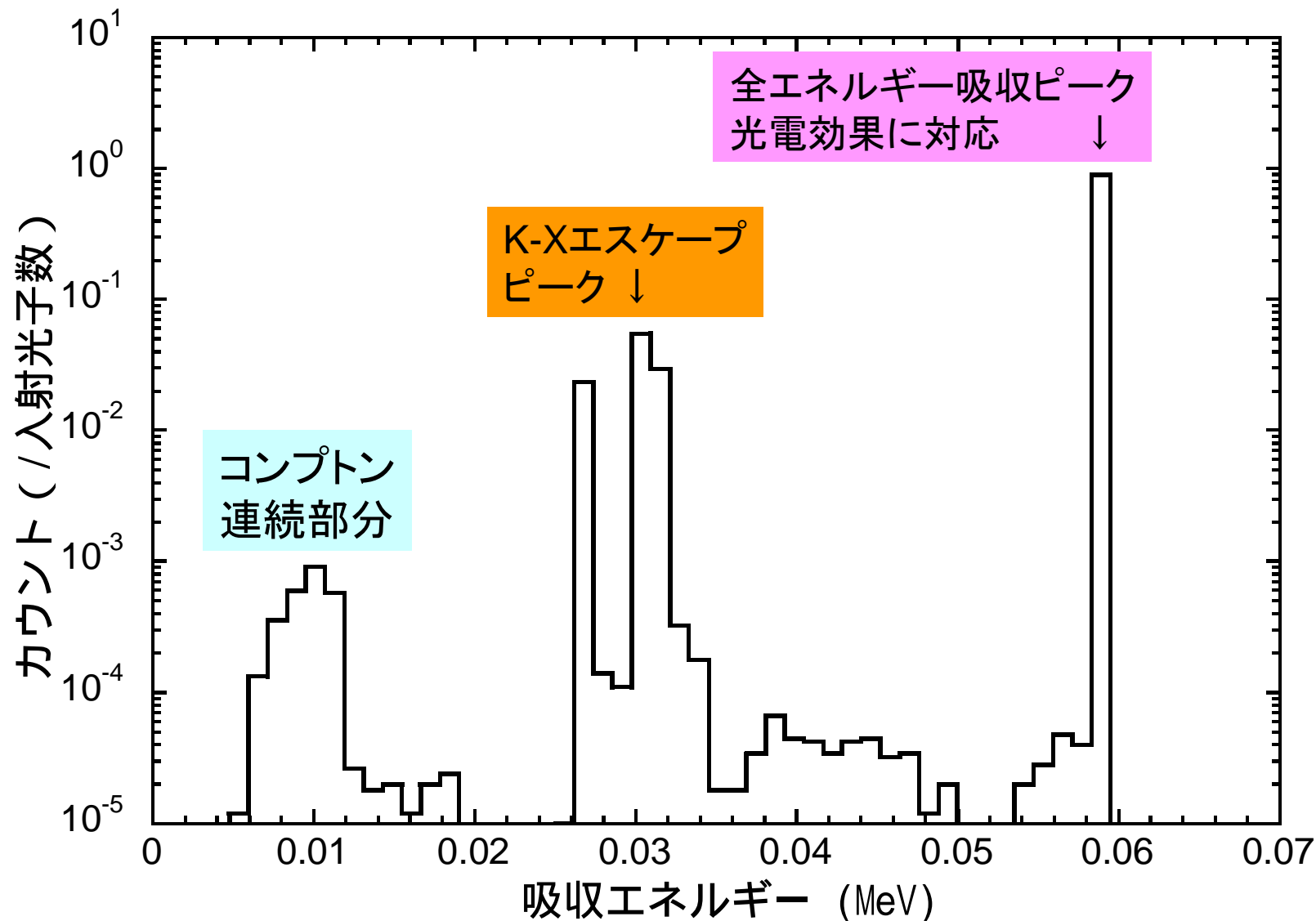
# 沃化ナトリウムのCs-137に対する出力: 測定とシミュレーションとの比較



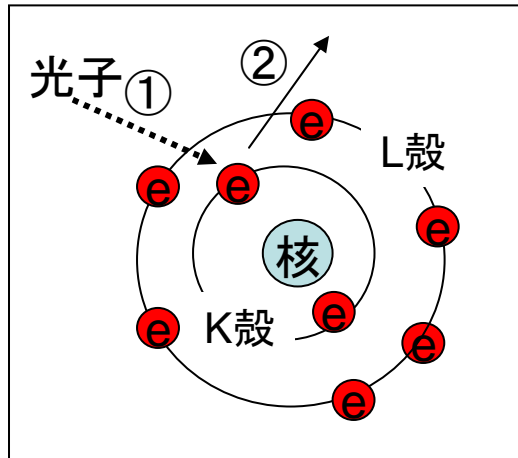
- 出典 Tawara et al, KEK Proc 2000-20 (2000).

# 沃化ナトリウム検出器の応答関数②

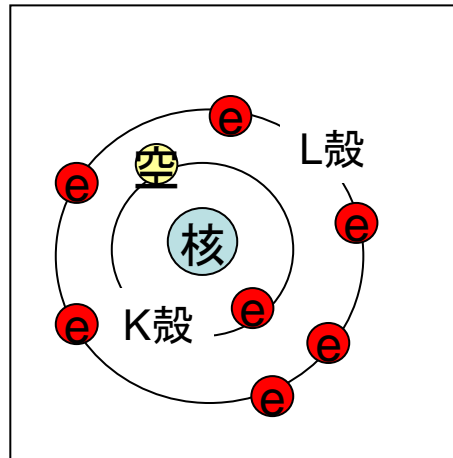
入射： $^{241}\text{Am}$ からの59.5 keVガンマ線



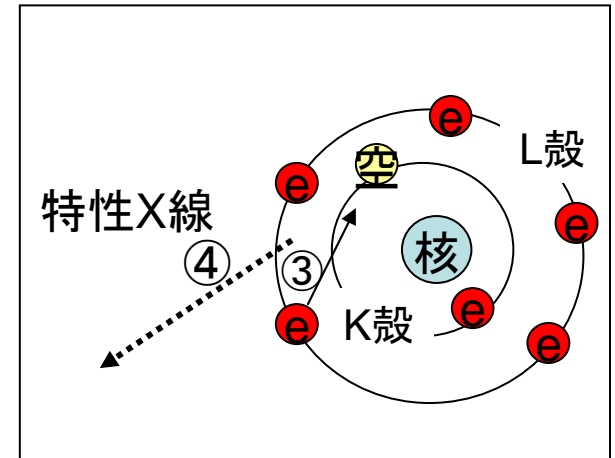
# 特性X線の発生とエスケープ



光子の入射と電離



原子励起状態  
(K殻に空孔がある)



特性X線の発生

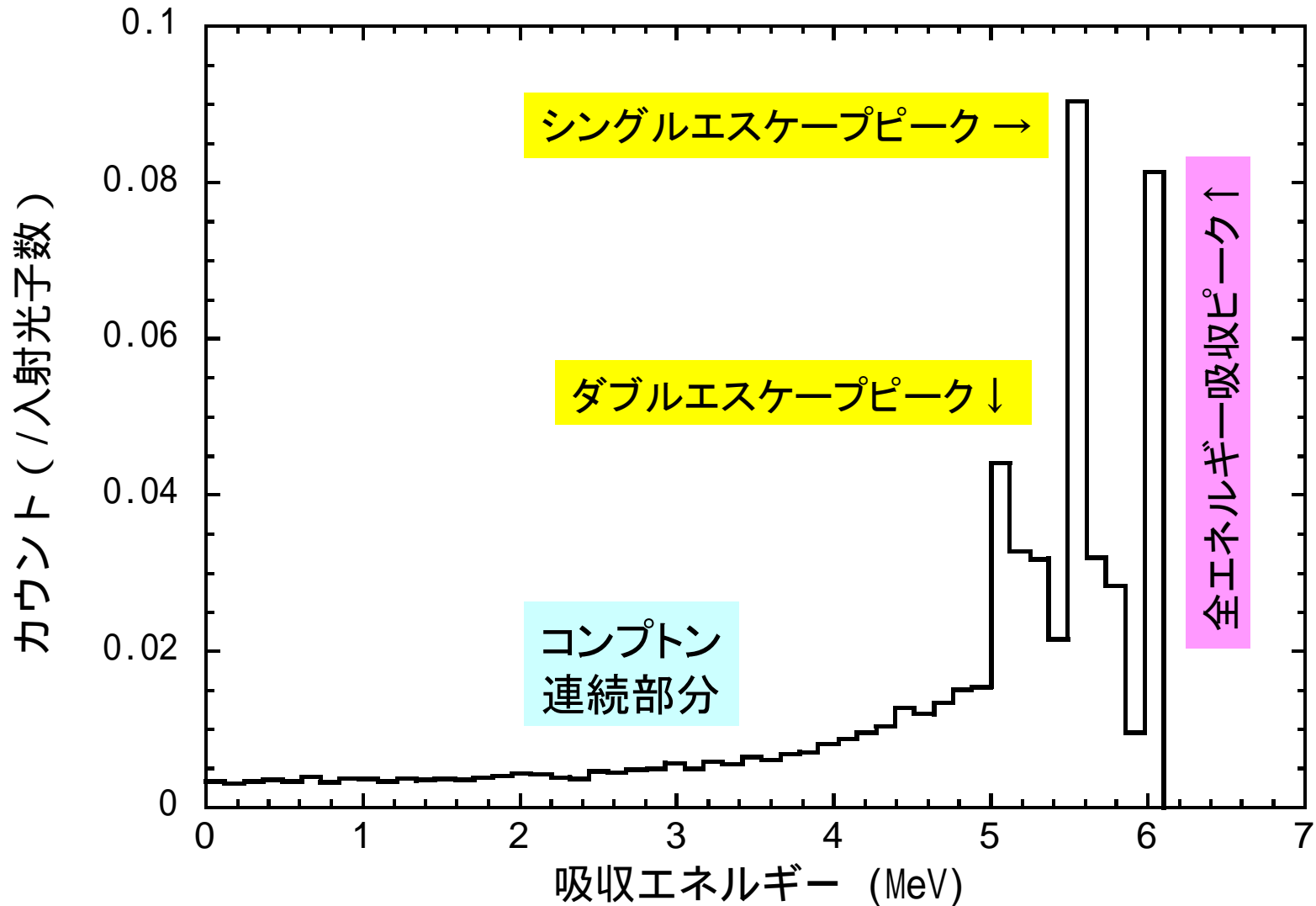
$$\begin{aligned}\text{特性X線のエネルギー} &= \text{K殻束縛エネルギー} - \text{L殻束縛エネルギー} \\ &= 33.2 \text{ keV} - 4.6 \text{ keV} \\ &= 28.6 \text{ keV}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{K-X エスケープピークエネルギー} &= 59.6 \text{ keV} - 28.6 \text{ keV} \\ &= 31.0 \text{ keV}\end{aligned}$$

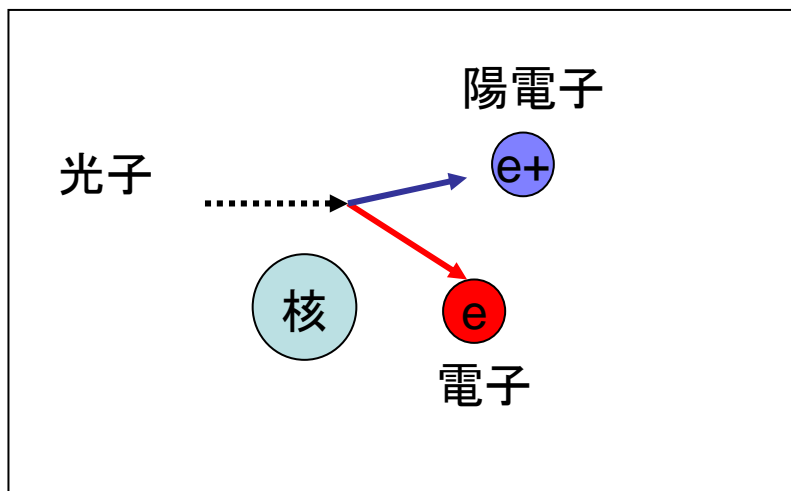


# 沃化ナトリウム検出器の応答関数③

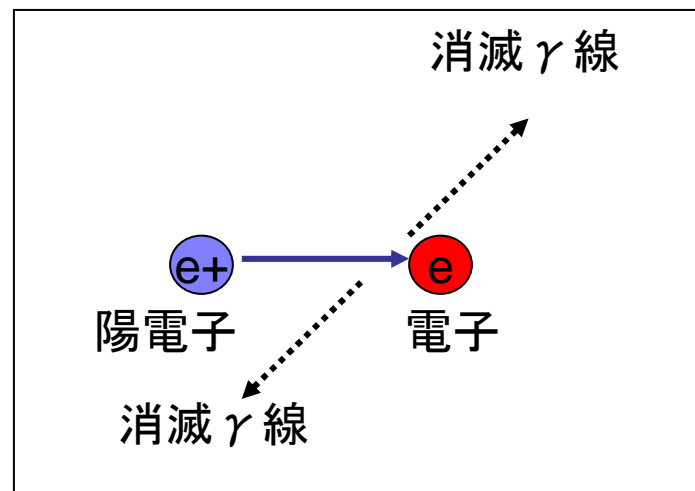
入射： $^{16}\text{N}$ からの6.1 MeVガンマ線



# 消滅ガンマ線の発生とエスケープ



電子対生成での  
陽電子の発生



陽電子の消滅と  
消滅ガンマ線の発生

消滅ガンマ線のエネルギー = 0.511 MeV

シングルエスケープピークエネルギー = 6.1 MeV - 0.511 keV  
= 5.6 MeV

ダブルエスケープピークエネルギー = 6.1 MeV - 0.511 MeV x 2  
= 5.1 MeV