

放射線取り扱い(物理)

放射線の基礎

ISBN978-4-905025-01-6

大学等放射線施設協議会

113-0032 東京都文京区弥生2-11-16
東京大学アイソトープ総合センター内
電話: 03-5841-3058 Fax: 03-5841-3050
E-mail: kyogikai@ric.u-tokyo.ac.jp

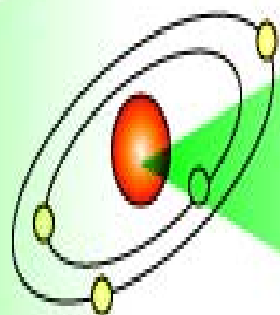
放射線に使用される単位

量	単位	説明	定義
照射線量	クーロン/kg (C/kg)	X線やγ線によって電離された空気中の電荷量	1R (レントゲン) = 2.58×10^{-4} C/kg
吸収線量, D	グレイ (Gy)	放射線の照射により単位質量の物質が吸収するエネルギー量	1Gy=1J/kg (=100rad)
等価線量, H_T	シーベルト (Sv)	組織や臓器における被ばく量 放射線の種類(R)ごとに重みづけ(w_R)をした 吸収線量($D_{T,R}$)の和として求められる	$H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$
実効線量, E	シーベルト (Sv)	全身の被ばく量 各組織や臓器(T)ごとに重みづけ(w_T)をした 等価線量(H_T)の和として求められる	$E = \sum_T w_T H_T$
放射能	ベクレル (Bq)	放射性物質が単位時間に核変換(崩壊)する数	1Bq=1 decay/sec (1Ci= 3.7×10^{10} Bq)
放射線のエネルギー	電子ボルト (eV)	1 Vの電位差で加速された電子が得るエネルギー量.	1eV= 1.6×10^{-19} J

物質の微細構造



物質



原子

(電子, 原子核)

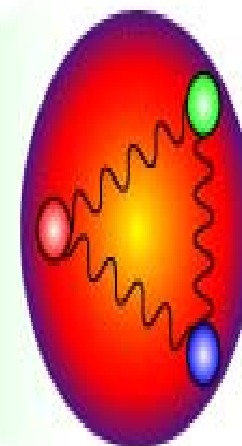
10^{-10}m



原子核

(陽子, 中性子)

10^{-15}m



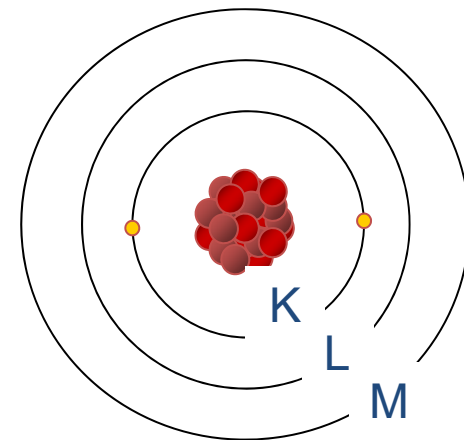
核子

(クォーク)

10^{-16}m

原子の構造

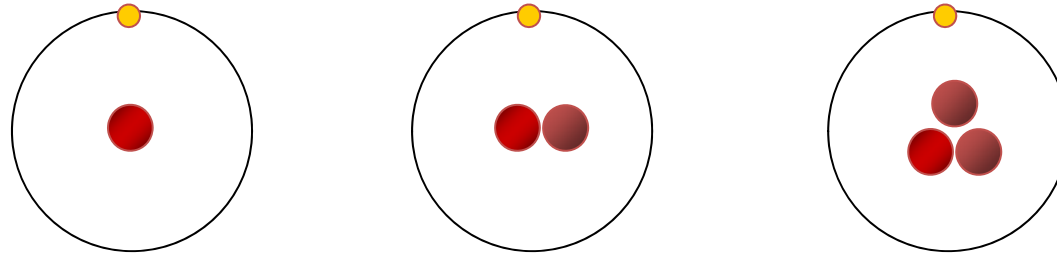
粒子	直径 (m)	電荷
原子	1×10^{-10}	
原子核	1×10^{-15}	正
電子		負
陽子	1×10^{-16}	正
中性子	1×10^{-16}	中性



放射性同位元素の表記法

原子量 32 P 元素記号
原子番号 15 17 中性子数

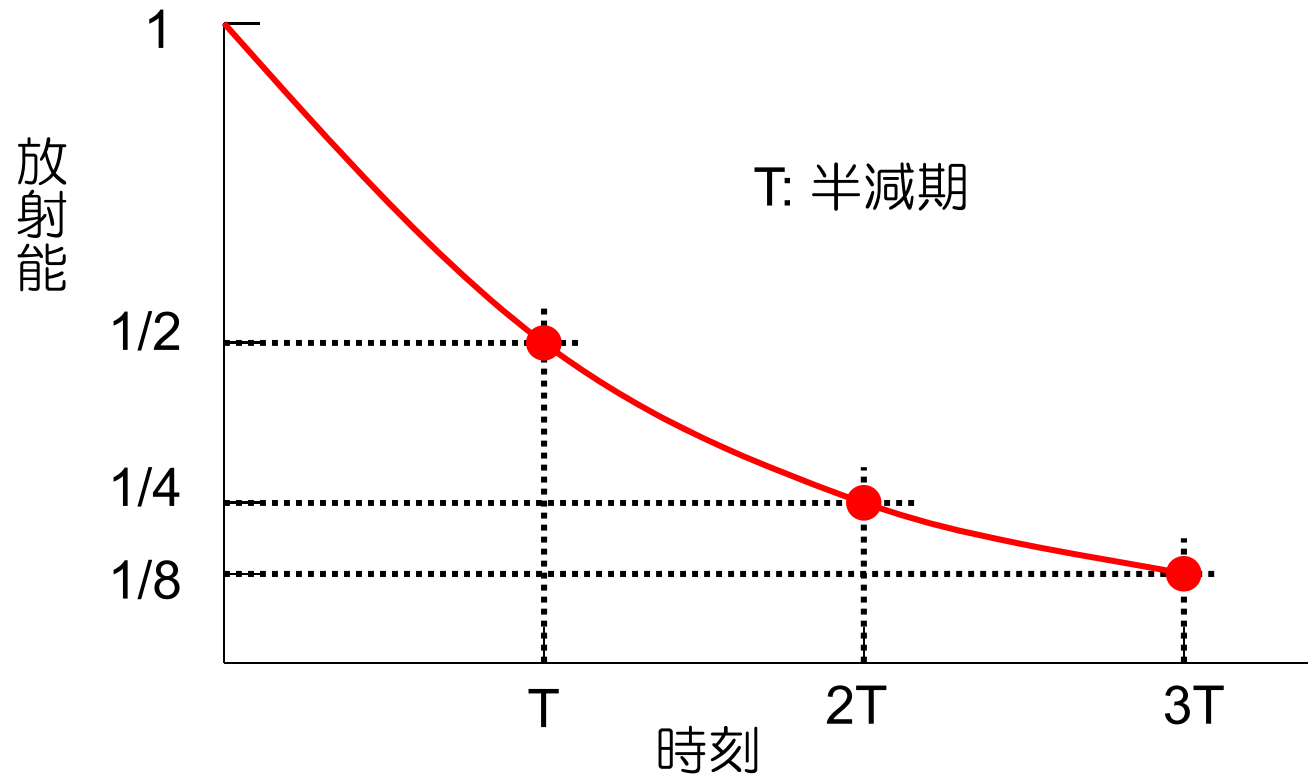
水素の同位体



	水素	重水素	三重水素
陽子数	1	1	1
中性子数	0	1	2
自然界の存在比[%]	99.9885	0.0115	なし
放射能	なし	なし	あり

放射性崩壊

放射性崩壊とは、不安定な核種の原子核が荷電粒子や光子を自発的に放出して別の核種に変化すること。
それぞれの崩壊過程は、固有の半減期を持つ。



放射能 (A)

与えられた物質中で、単位時間におこる原子核崩壊の数

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N \equiv A$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{0.693}{T_{1/2}}$$

$$A(t) = \lambda N(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = \lambda N_0 e^{-0.693 t / T_{1/2}} = A_0 e^{-0.693 t / T_{1/2}}$$

以下のようにも表される

$$A(t) = \lambda N(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = \lambda N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}} = A_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T_{1/2}}}$$

N	: 原子核数
t	: 時刻
λ	: 崩壊定数
N_0	: 時刻 $t=0$ における原子核数
A_0	: 時刻 $t=0$ における放射能
$T_{1/2}$: 半減期

例: P-32(リン)の崩壊

$T_{1/2}$: 14.3 日
A_0	: 1 MBq
t	: 7 日

$$A = A_0 e^{-0.693 t / T_{1/2}} = 1 \times e^{-0.693 \times 7 / 14.3} = 1 \times e^{-0.339} = \mathbf{0.712}$$

$$A = A_0 \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{T_{1/2}}} = 1 \times \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{7}{14.3}} = \mathbf{0.712}$$

主要な放射線

荷電粒子	α -ray (ヘリウム原子核)	放射核から生成
	β^- -ray (電子)	
	β^+ -ray (陽電子)	
	陽子	粒子加速器により生成
	重陽子	
	電子線	
	重イオン	
中性粒子	中性子	原子炉、粒子加速器、放射核から生成
電磁波	X-線 - 特性 X-線 - 制動放射	原子（核外）から生成
	γ -線	原子核から生成

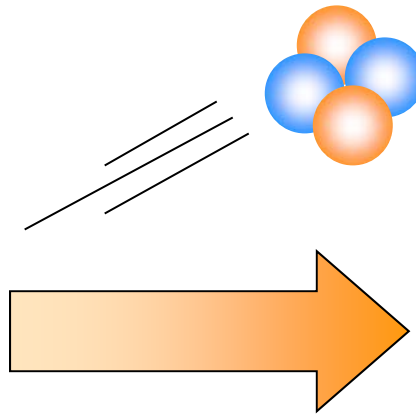
主な放射性原子核崩壊

不安定な原子核から、より安定な原子核に崩壊する

α -崩壊	ヘリウム原子核(α -線)を放出
β^- -崩壊	電子(β^- -線)を放出
β^+ -崩壊	陽電子(β^+ -線)を放出
電子捕獲	軌道電子が原子核によって捕獲される
その他の崩壊	電磁波(γ -線)の放出
	内部転換された電子の放出 (内部転換)
	電子-陽電子対の放出 (内部対生成)

α -崩壊 (α -線)

ラジウム-226
陽子 88
中性子 138

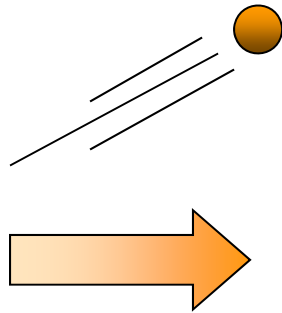


α -粒子
= ヘリウム原子核
= α -線

ラドン-222
陽子 86
中性子 136

β^- 崩壊 (β^- 線)

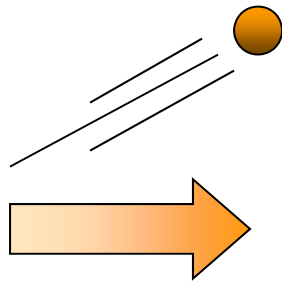
三重水素
陽子 1
中性子 2



電子
= β^- 粒子
= β^- 線

ヘリウム-3
陽子 2
中性子 1

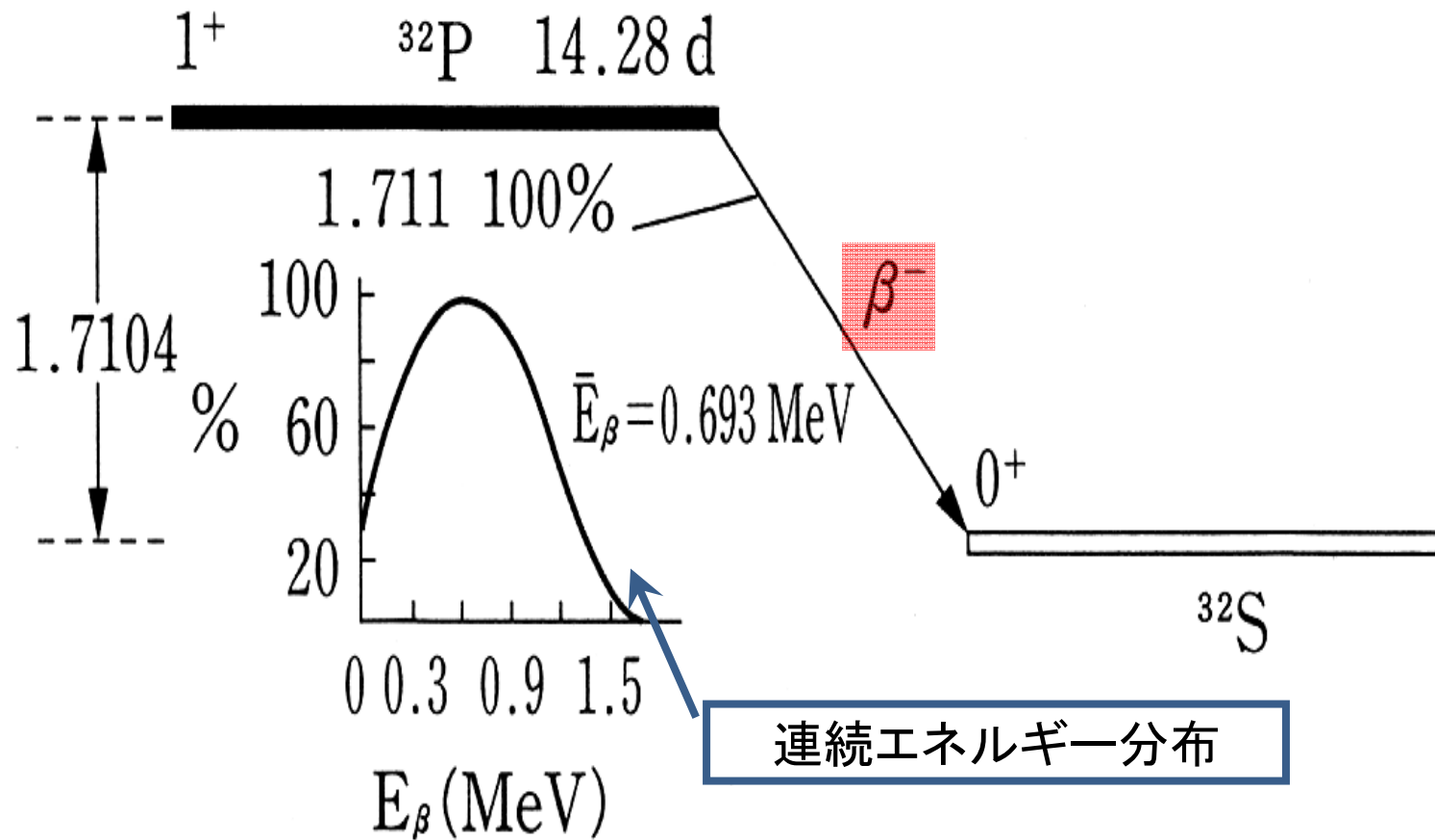
リン-32
陽子 15
中性子 17



電子

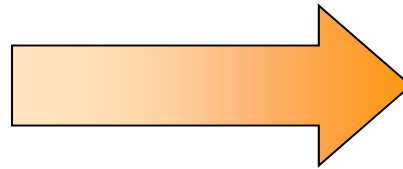
硫黄-32
陽子 16
中性子 16

^{32}P の崩壊様式



β^+ -崩壊

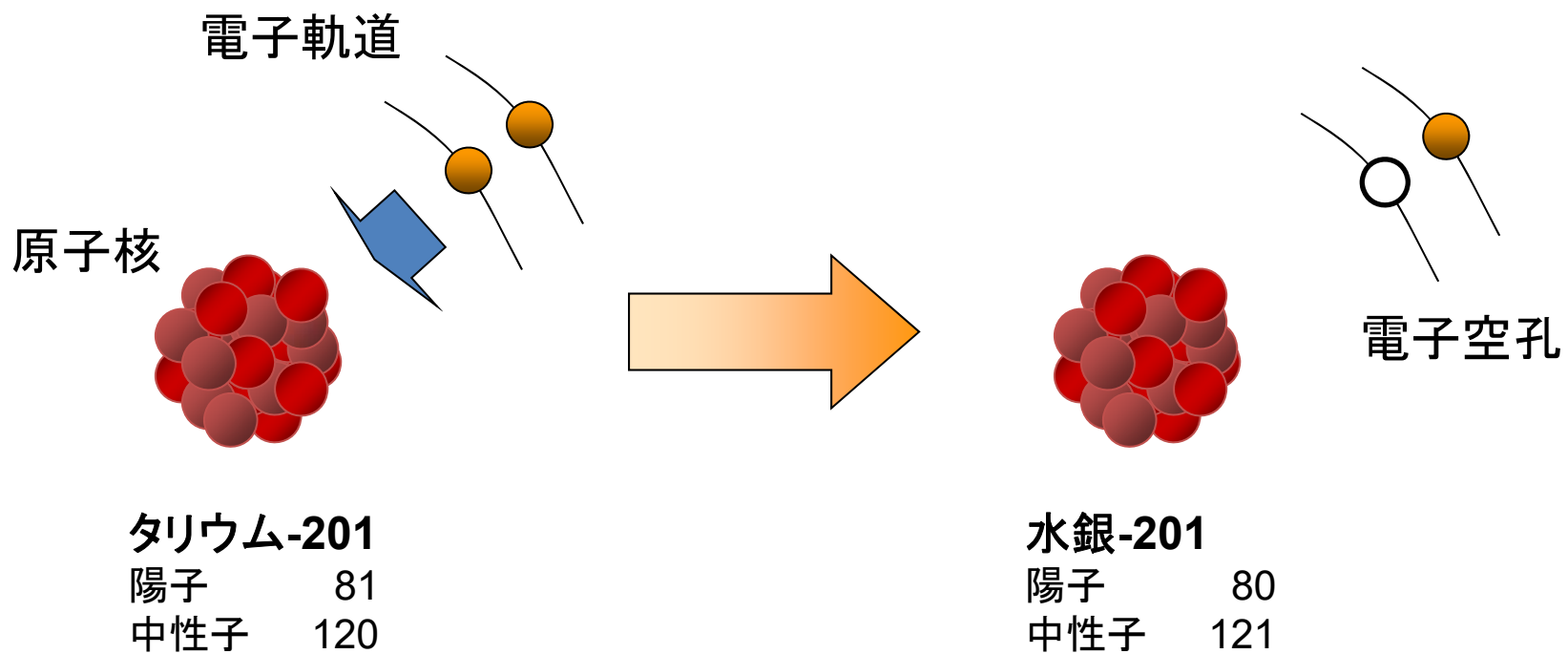
炭素-11
陽子 6
中性子 5



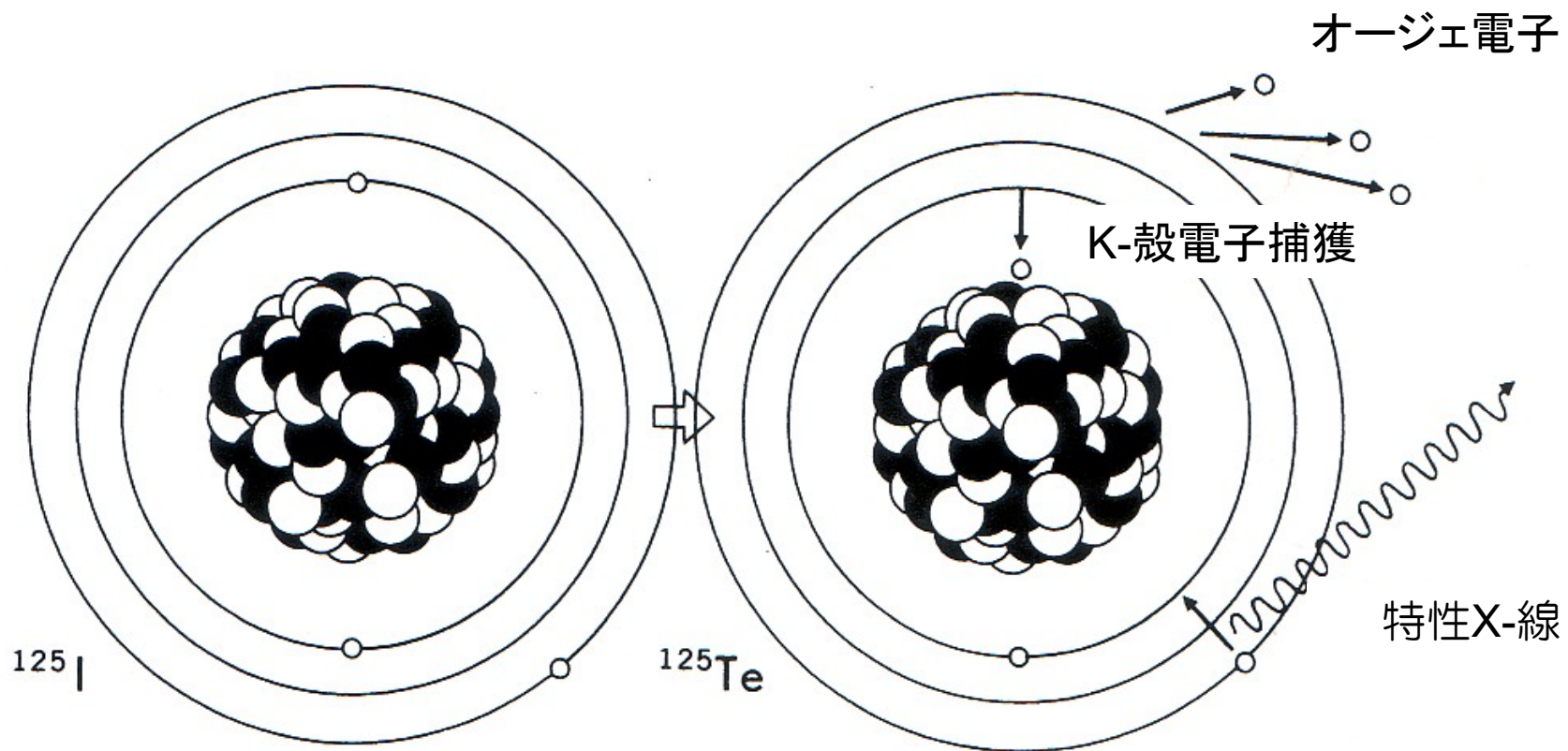
陽電子
= β^+ 粒子
= β^+ -線

ホウ素-11
陽子 5
中性子 6

電子捕獲



電子捕獲によるオージェ電子とX線の放出



不安定原子核からのエネルギー散逸過程 (その他)

ガンマ崩壊 (γ -線)

原子核からの高エネルギー・短波長の電磁波放出。α-崩壊、β-崩壊、核分裂反応は、一般的に γ -線の放出を伴う。

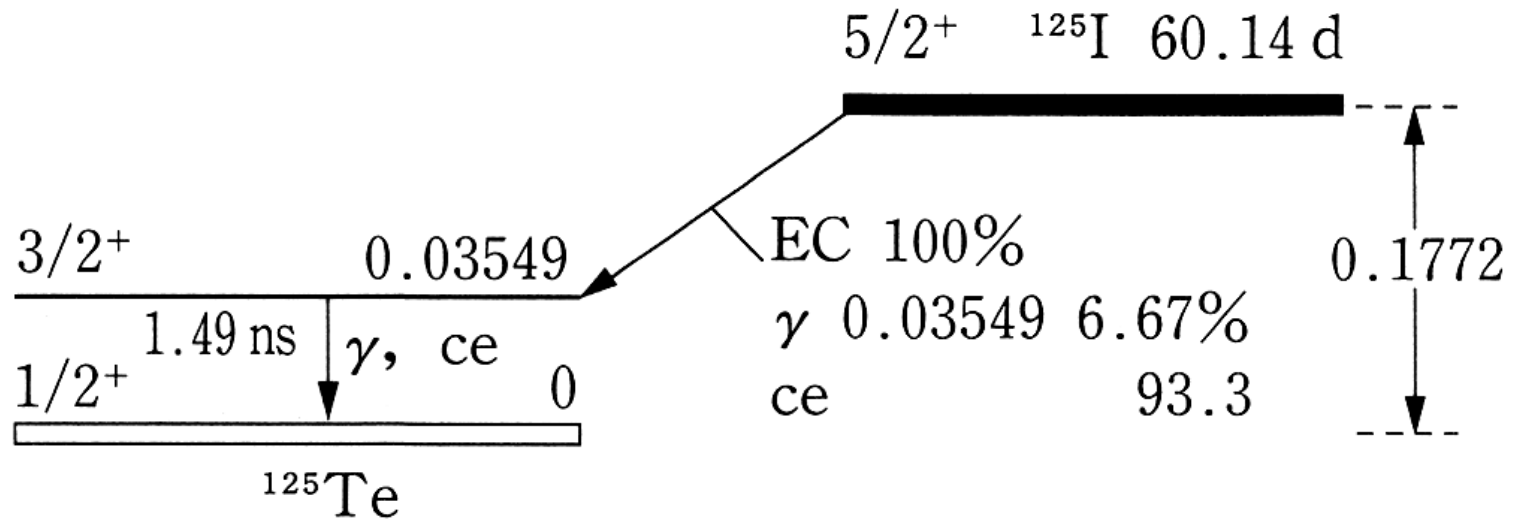
内部転換 (internal conversion)

励起原子核が軌道電子の1つに直接エネルギーを与え、電子が原子から放出される(転換電子 = conversion electron)過程。ガンマ崩壊を伴う。

内部対生成

励起原子核のエネルギーで電子-陽電子が対生成される。この過程が起きるには、不安定原子核と安定原子核のエネルギー差が電子と陽電子の質量エネルギーの和(1,020,000 電子ボルト)以上である必要がある。

^{125}I の崩壊様式



電磁放射

ガンマ線 (γ -線)

原子核反応に伴う**励起された原子核から放射される**単一エネルギーの電磁放射。多くの場合、 α 崩壊、 β 崩壊に伴って放出される。

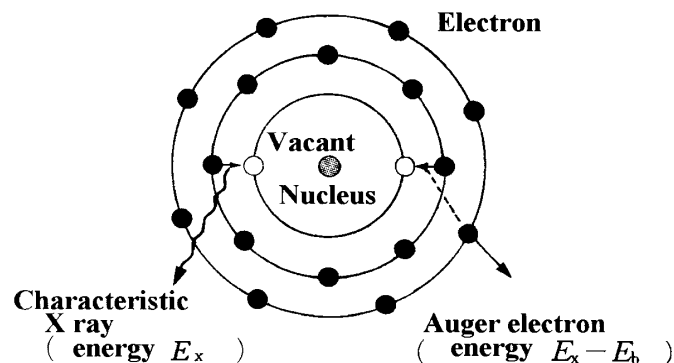
ガンマ線の放出は、原子核が励起状態から低エネルギーの安定した状態に遷移する時に減少するエネルギーによって起こる。

X-線

原子核外で生成される電磁放射。2種類の放出過程が存在する。

- 特性X-線
- 制動放射

特性 X-線



エネルギーを持った電子と原子の衝突によって内殻電子がはじきだされ、外殻電子が、その内殻の空準位に落ち込む。

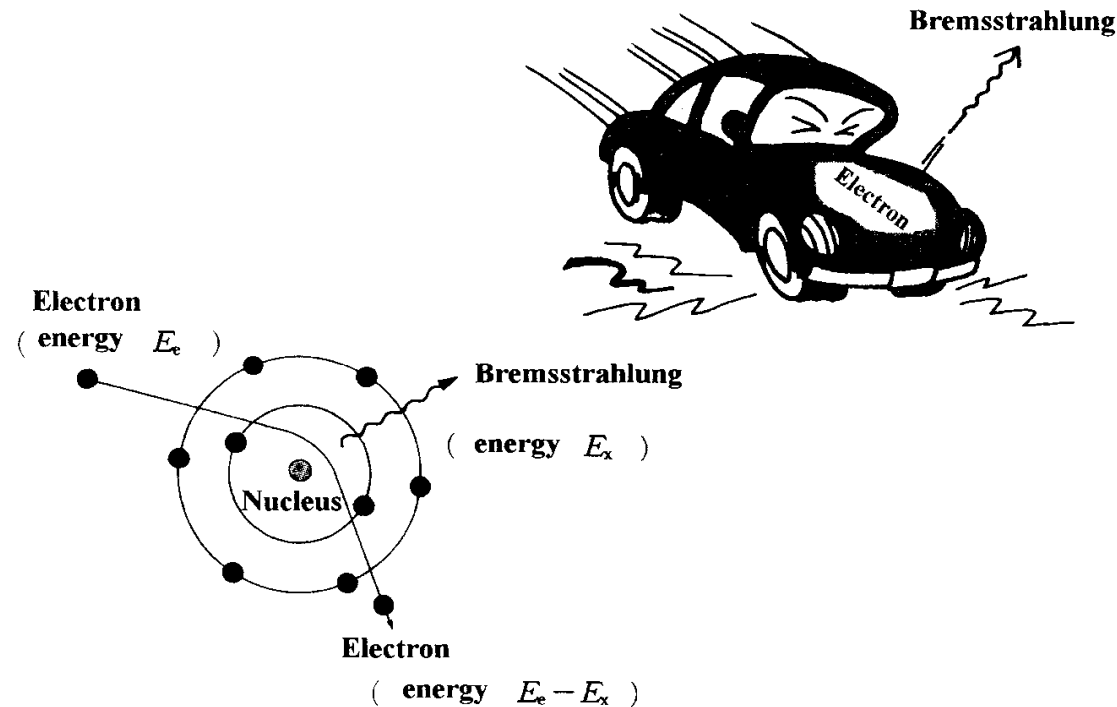
この過程で、外殻と内殻のエネルギー準位差に相当する光子が1個放出される(特性X線)。このエネルギー準位差(E_x)がX線の波長を決める。

一方で、軌道電子が励起エネルギーを与えられると原子からはじき出される。この電子をオージェ電子と呼ぶ。

オージェ電子のエネルギーは、 $E_x - E_b$ で与えられる。ここで E_b は結合エネルギー(電子を原子の束縛から離すのに必要なエネルギー)である。

制動放射

(ドイツ語: Bremsstrahlung)

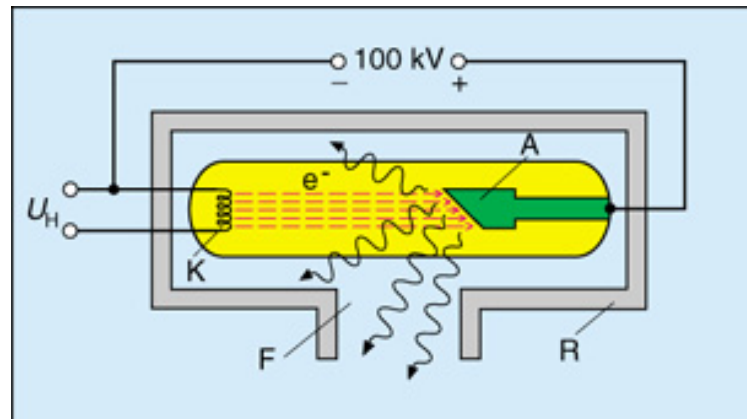


制動放射は、電子(エネルギー E_e)が原子核付近の電場によって急激に減速された時に放出される。

放出される光子のエネルギー(E_x)は、入射電子のエネルギーと電場の強さに依存する。この電場は、原子番号の大きい原子で大きくなる。

X-線の生成

X-線は、電子や重い荷電粒子を減速することで生成される。(特性X-線, 制動放射). X線管の中では、電子を高電圧によって加速して、金属電極に衝突させる。

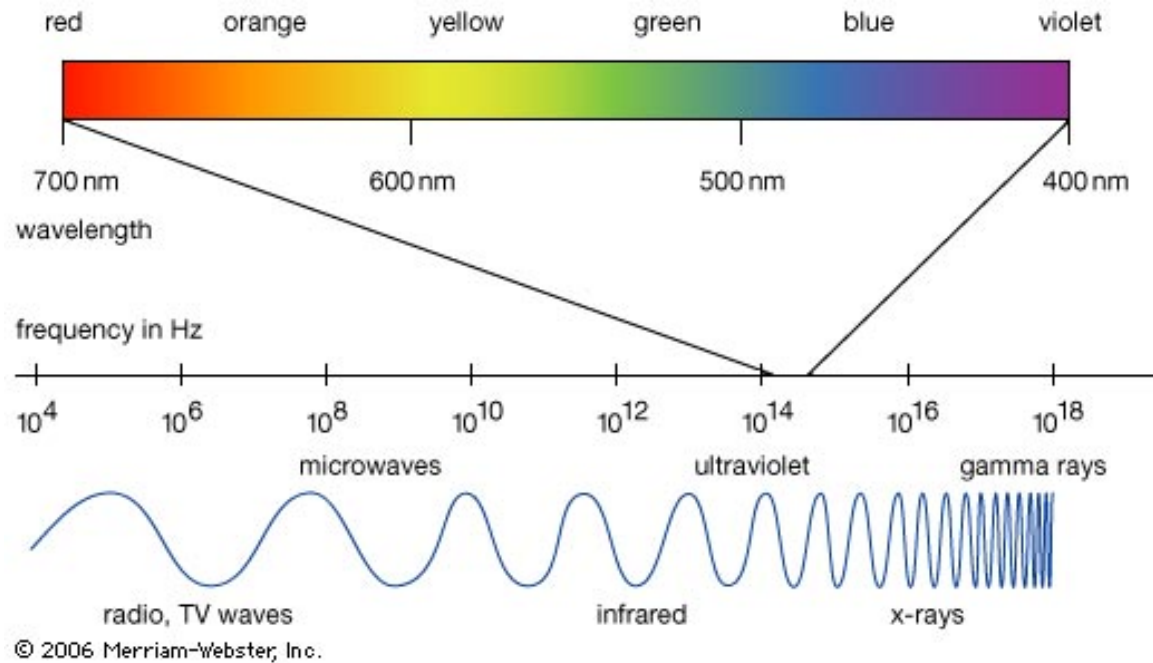


X線管の構造(UH: ヒーター電圧, K: カソード, A: アノード, e: カソードからアノードに加速される電子, R: X-線シールド, F: X-線透過窓)

<http://www.euronuclear.org/info/encyclopedia/x/x-radiation.htm>

大学等放射線施設協議会

電磁波の波長スペクトル



"Electromagnetic wave spectrum." Online . Britannica Student Encyclopedia. 6 Apr. 2009

放射能、放射線、放射性同位元素

放射能

不安定な原子核の自発的崩壊。放射線の放出を伴う。

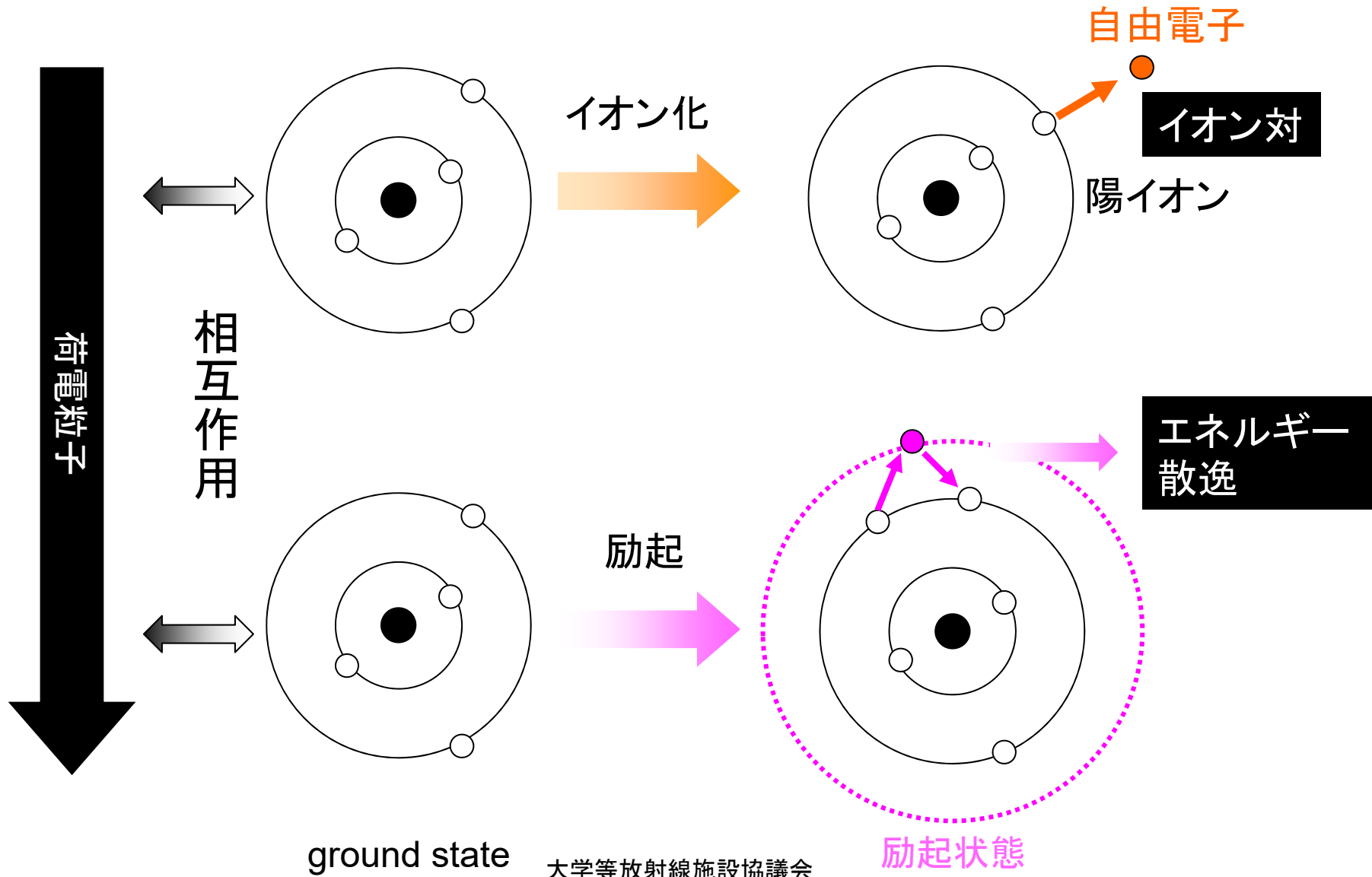
放射性同位元素

放射能を持つ同位体。放射性核種とも



コーヒーの香りは放射線。コーヒーは放射能を持つ放射性同位元素に対応する。

イオン化と励起



物質と放射線の相互作用

α -線

- α 粒子が通過した付近の原子から外殻軌道電子をクーロン力で引き付ける。
 - 結果、電子が元の原子から引き剥がされてイオンを生成する(イオン化)。
- α 粒子は2価の正電荷を持ち、質量が大きいため、低速。
 - 空気中で直線距離4cm程度の飛行でエネルギーを失う。

物質と放射線の相互作用

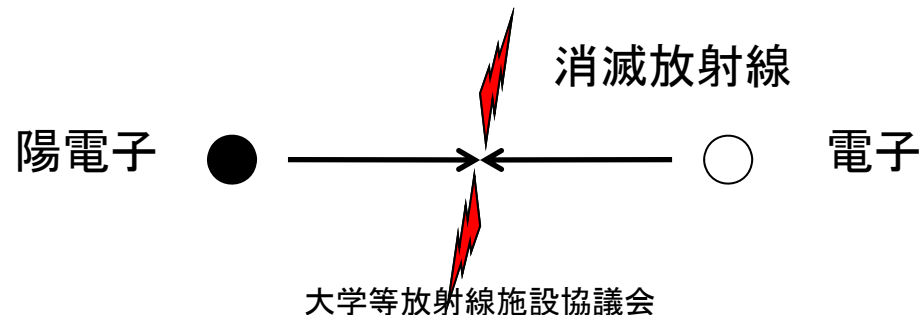
β^- 粒子 (電子)

- 負電荷の β^- 粒子が負電荷の軌道電子と相互作用する。
 - 軌道電子を励起するか、弾き飛ばす(電子イオン対の生成)。この過程を β 粒子がエネルギーを失い、原子核に捕獲されるまで続ける。
- 質量軽、高速、1価の負電荷
 - このため、イオン化作用によって止められるまで、 α 粒子より遠くまで飛行できる。空気中での飛程は790cmに達する。
 - 物質との相互作用のたびに散乱され、大きく方向が変わる。

物質と放射線の相互作用

β^+ -粒子 (陽電子)

- 正電荷の β^+ 粒子が負電荷の軌道電子と相互作用する。
 - β^- 粒子と同様に、物質の励起やイオン化を通じて自身の運動エネルギーを失う。
- 加えて、陽電子は電子と結合すると対消滅を起こす。
 - エネルギー 0.511 MeV のガンマ線2本が正反対の方向に放出される。これは、消滅放射線と呼ばれる。

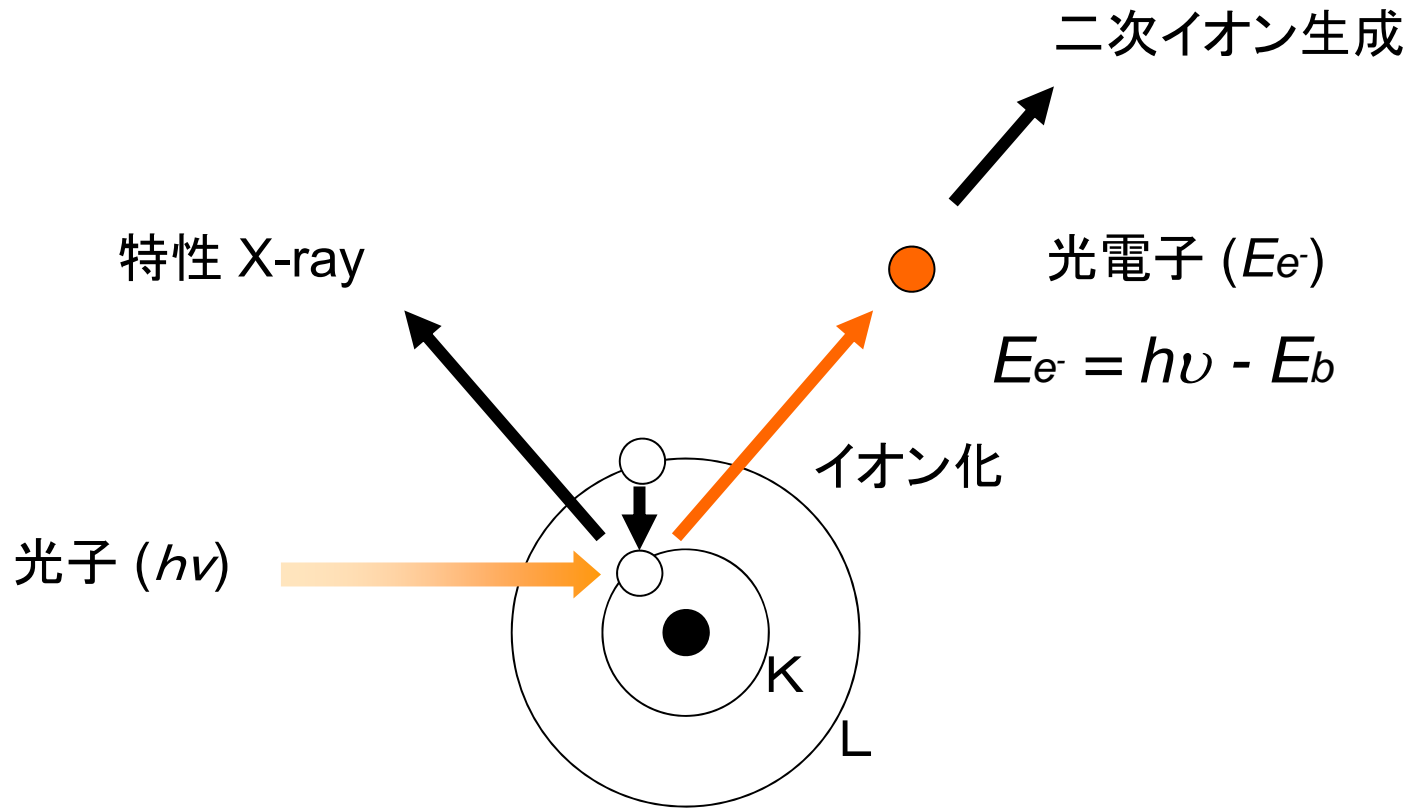


物質と放射線の相互作用

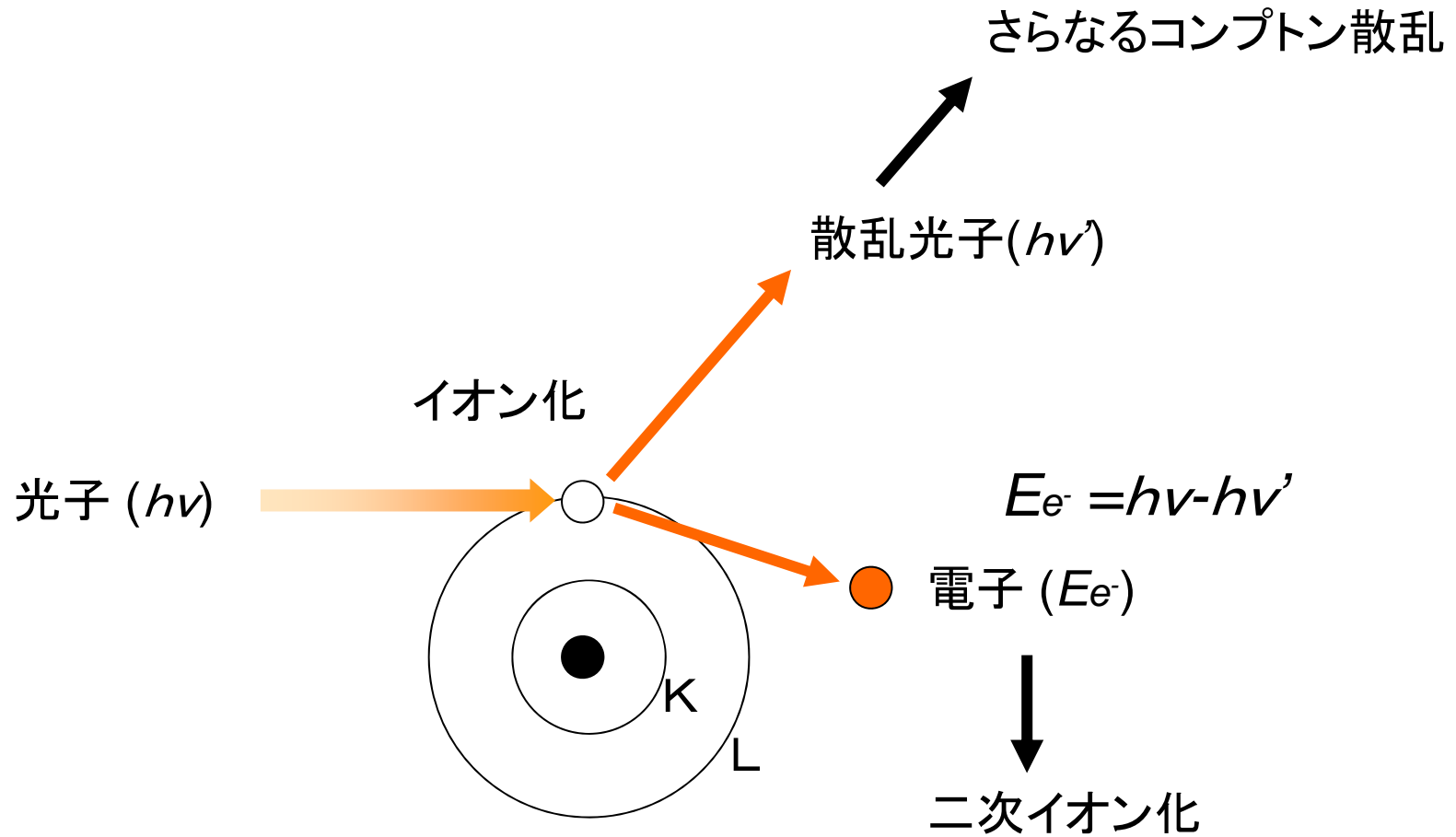
電磁波

- **光電効果**
 - 光子が全てのエネルギーを軌道電子に与えて、自身は消滅する。
 - 光子のエネルギーが電子の束縛エネルギーより大きければ、電子は原子から飛び出す。
- **コンプトン散乱**
 - 光子がエネルギーの一部のみを軌道電子に与え、自身はエネルギーと方向を変えて飛行を続ける。
- **対生成**
 - 原子核の領域を通過する光子が電子と陽電子を対生成する。

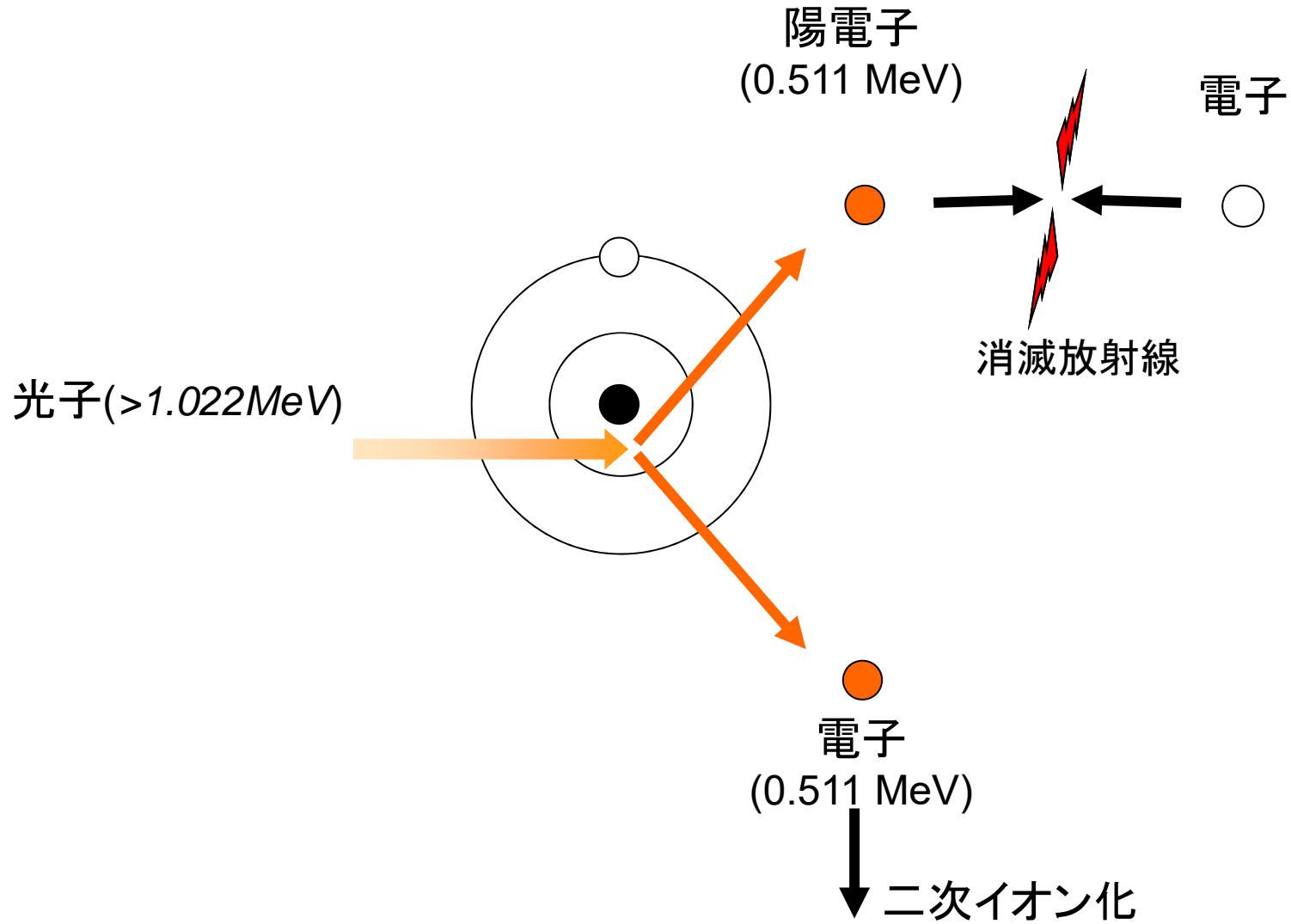
光電効果



コンプトン散乱

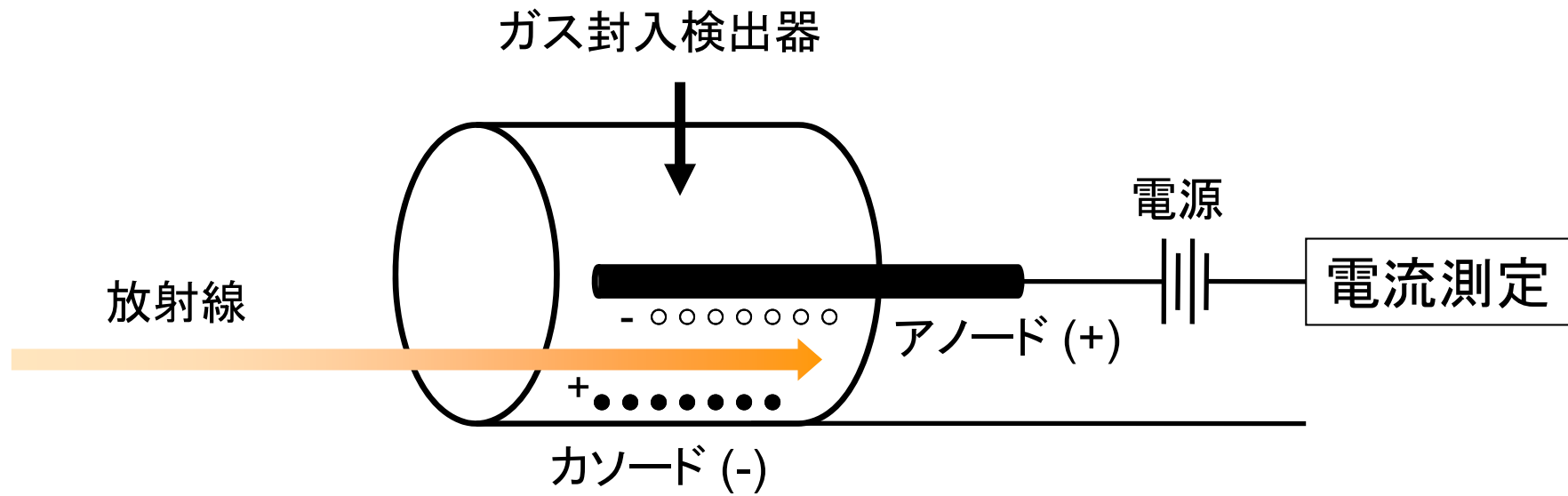


電子・陽電子対生成

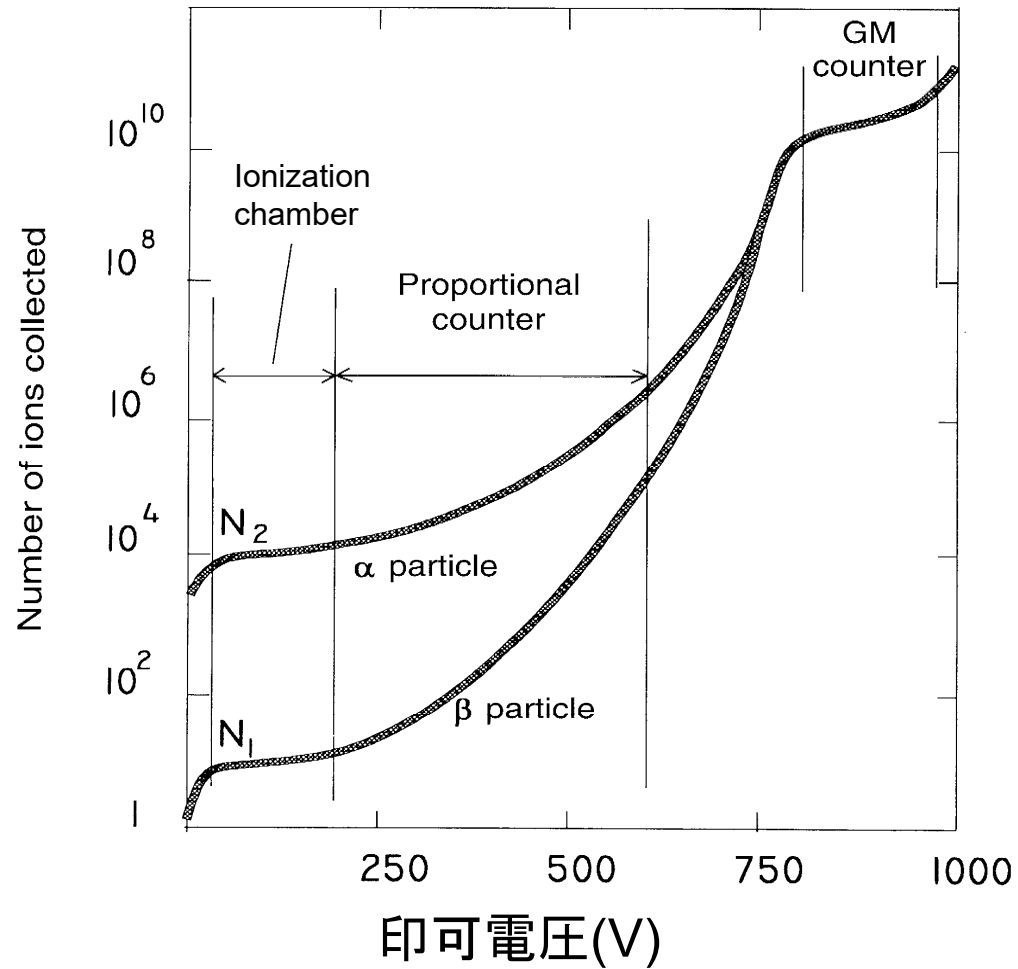


- # 放射線検出器
- **ガス検出器**
 - 電離箱
 - 比例計数管
 - ガイガーミュラー (GM) 管
 - **シンチレーション検出器**
 - 無機結晶シンチレーター
 - 液体シンチレーター
 - **半導体検出器**
 - シリコン (Si(Li)) 検出器
 - ゲルマニウム (Ge(Li)) 検出器
 - **その他の発光を利用した検出器**
 - 熱ルミネッセンス (TLD) 線量計
 - ラジオフォトルミネッセンス (RPL) 線量計
 - 光刺激ルミネッセンス(OSL) 線量計
 - 輝尽性発光検出器(イメージングプレート)

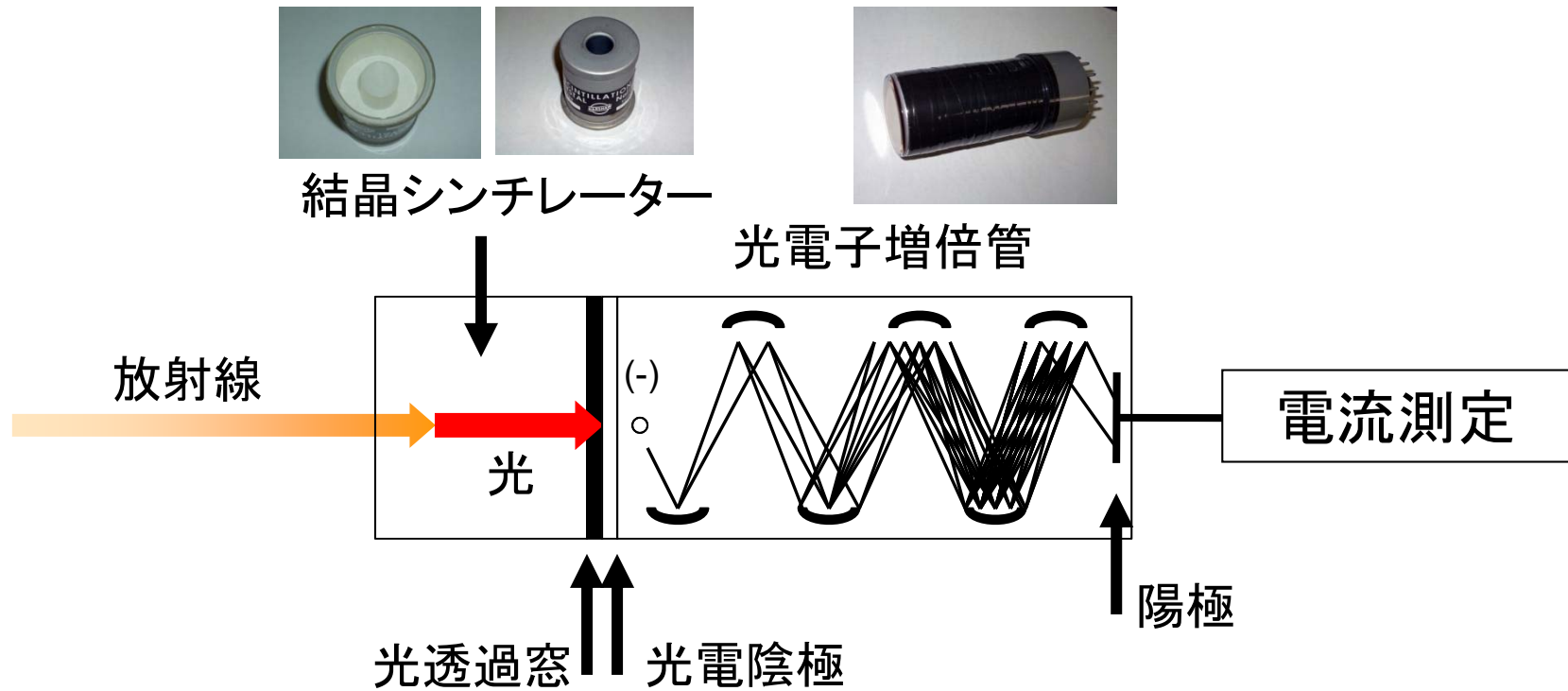
ガス検出器



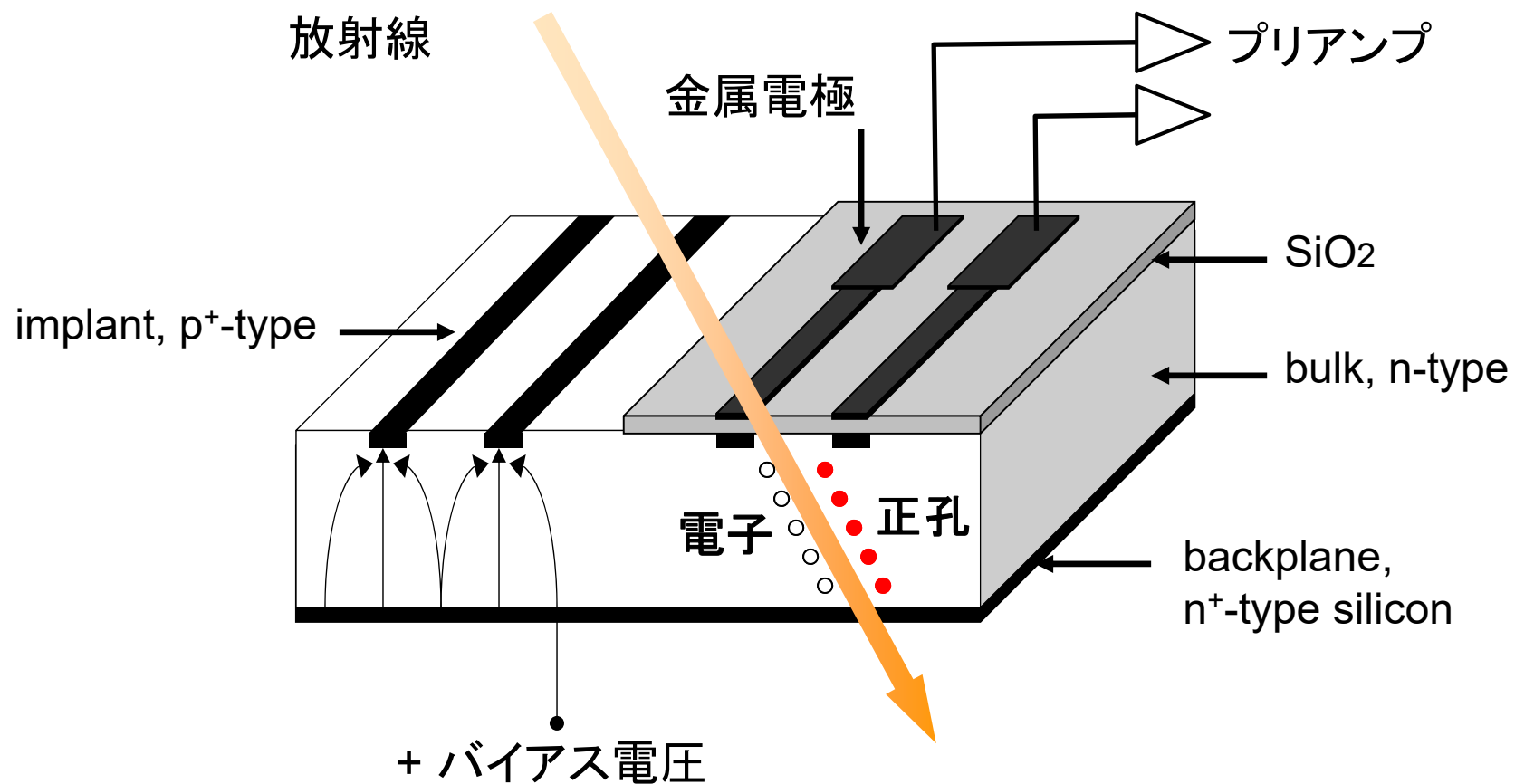
ガス検出器の動作電圧



シンチレーション検出器

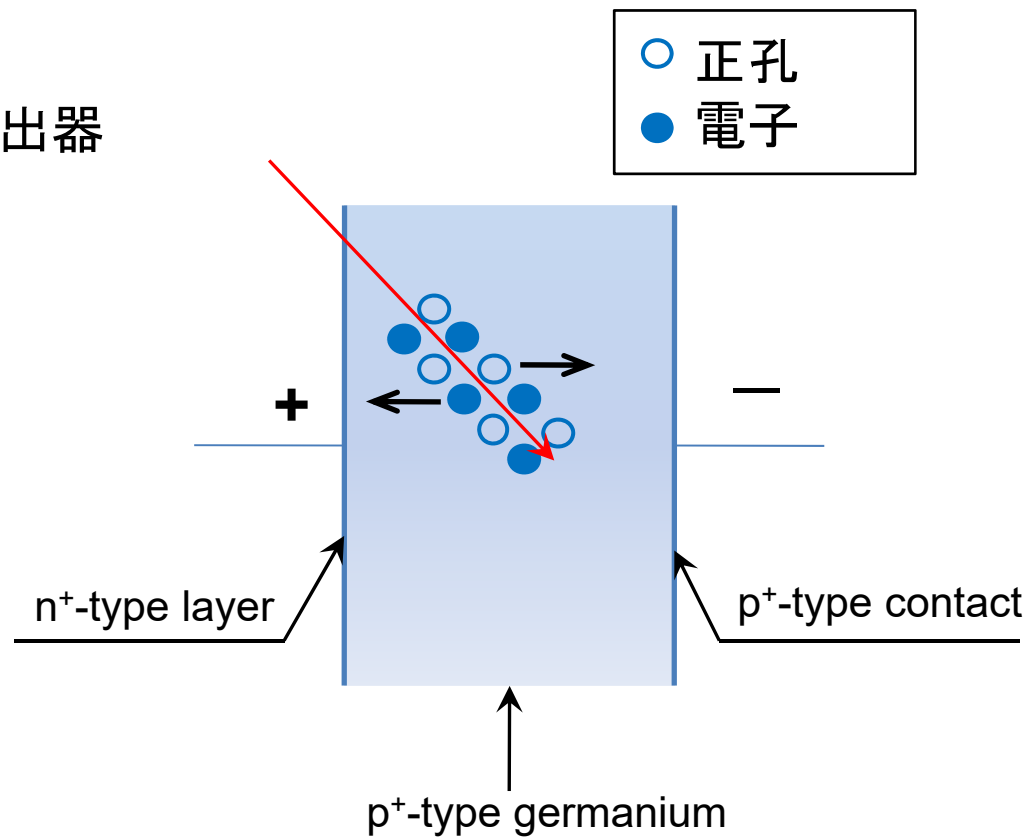
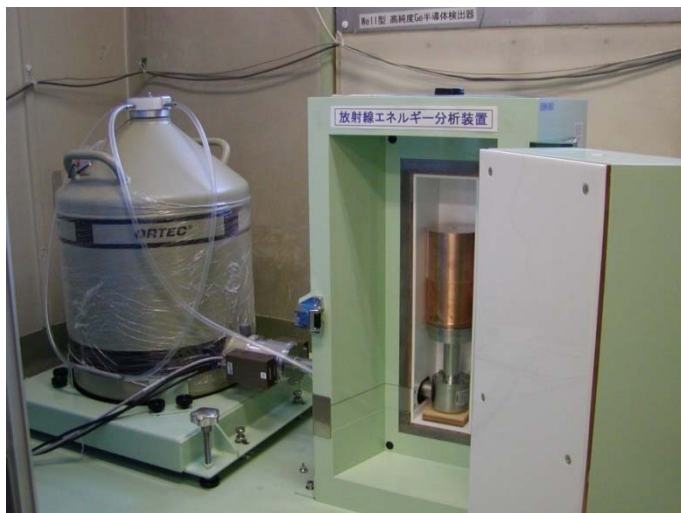


半導体検出器



半導体検出器

HPGe(高純度ゲルマニウム) 検出器



発光を利用した検出器

個人の被ばくモニターに利用される



熱ルミネッセンス
- TLD badge



ラジオフォトルミネッセンス(RPL)
- ガラスバッジ



光刺激ルミネッセンス(OSL)
- LUXEL バッジ