

放射線検出器

-シンチレーション検出器を中心に-

2020年5月13日

高橋 正二

放射線検出器の使用目的・方法

1. 放射線を測定する

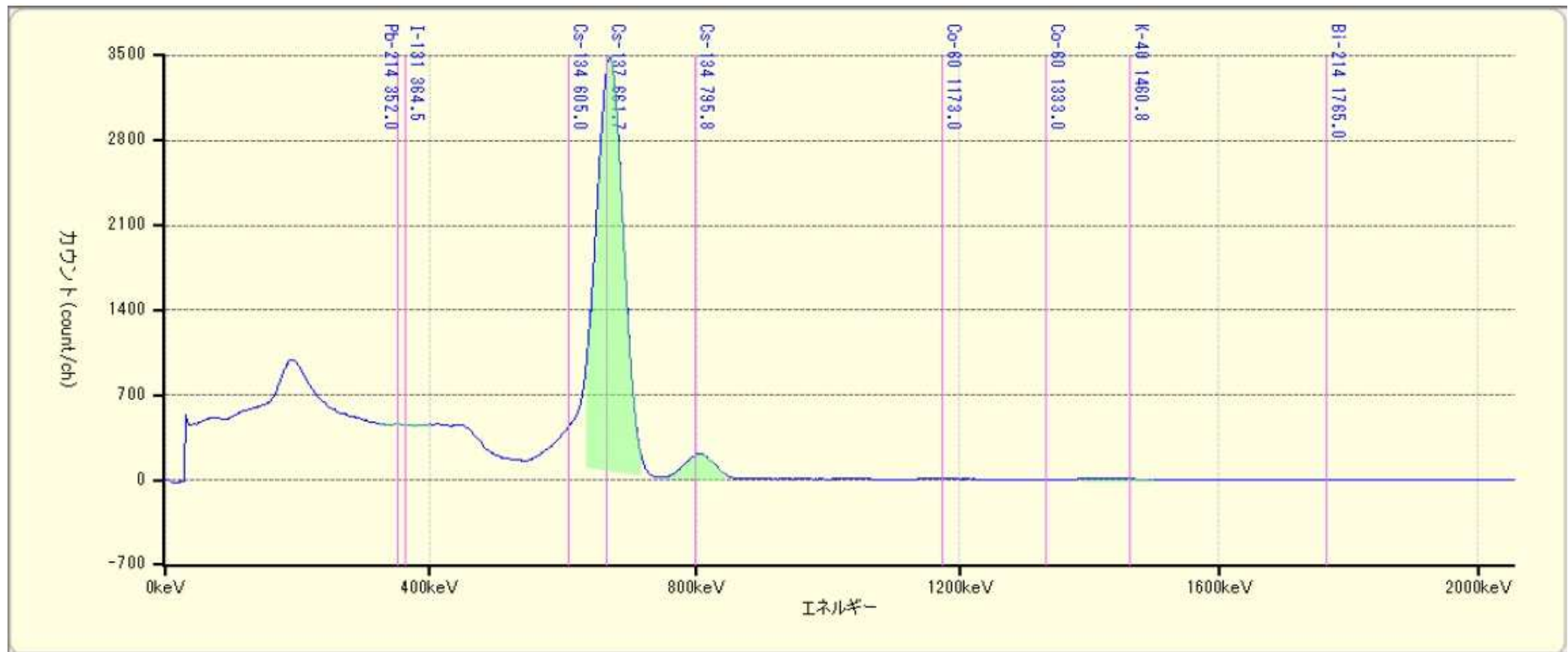
- ・放射線の量を測定する 空間線量率、個人被ばく線量
- ・放射線の数进行測定する GMカウンター
- ・放射線の種類、特性进行測定する EMF211 (NaIスペクトロメータ)

2. 放射能(の量)进行測定する

- ・線源から放出されるすべての放射線を数える
- ・線源と検出器の位置关系を決めて、検出器に入射する放射線を数える

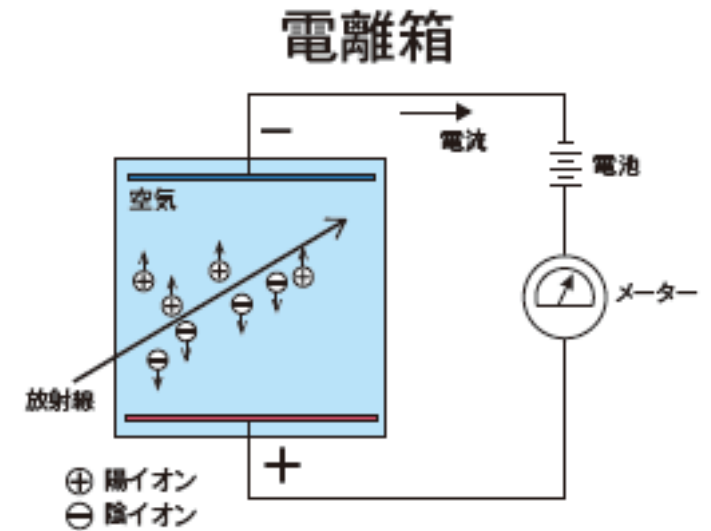
エネルギースペクトル

この図の意味をこの章で説明



放射線検出器の原理

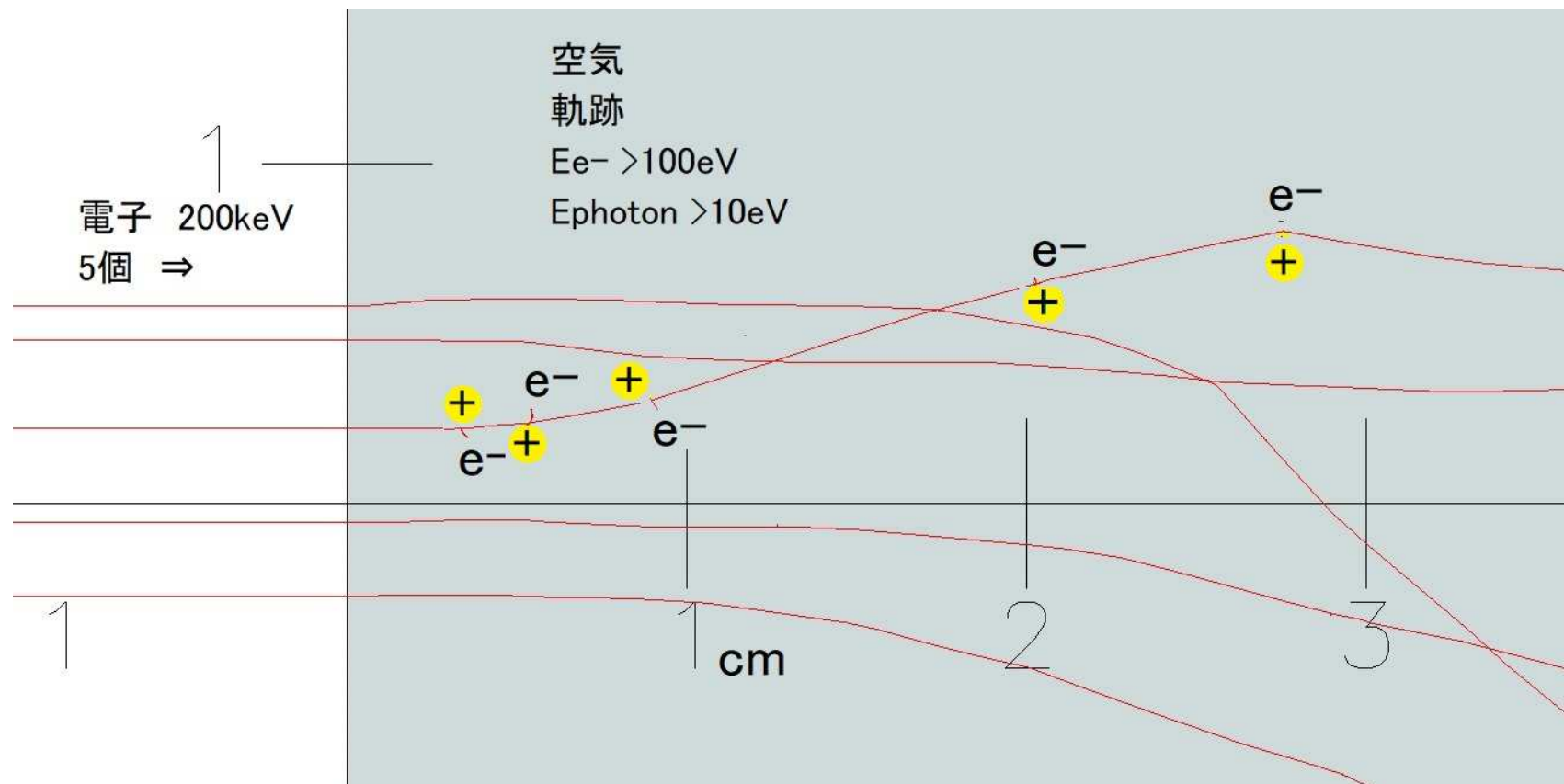
- すべての放射線検出器は電離作用を利用
- 電離作用により発生した電子の動作を電気信号に変える
- 電離作用は物質の化学反応レベルのエネルギーのやり取り(数 $10\text{eV} \sim 1\text{eV}$)
 - 気体の最外殻電子の剥ぎ取り
 - 結晶内のレベル間の電子励起
- 通常は1個の放射線入射に対して多数の電離が連鎖的に発生



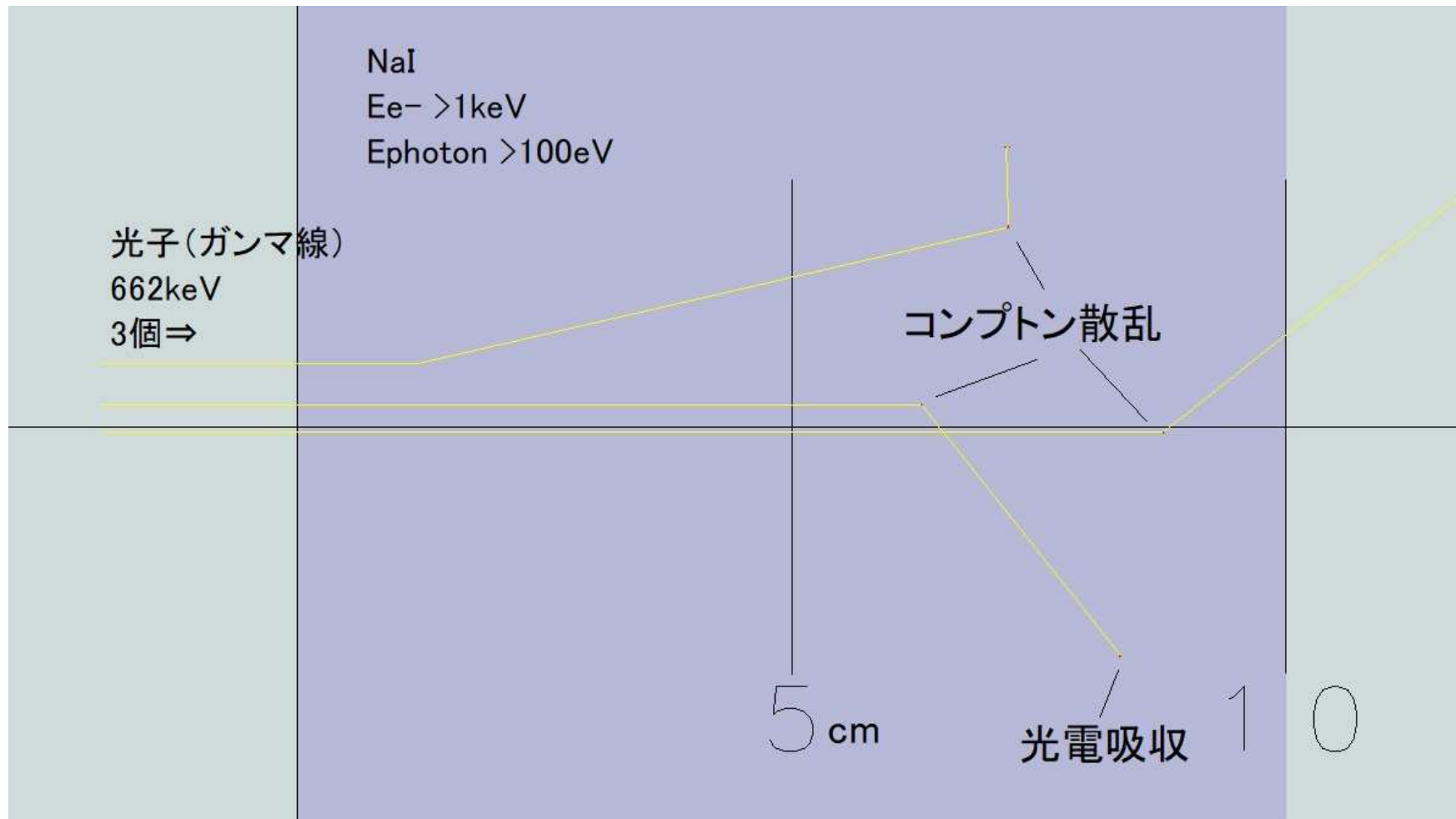
日本原子力研究所「原子力
基礎用語集(1997年)」

↑
よく使われる図である
が、実はあまり適切で
はない

電子線の空気への入射



ガンマ線のNaIへの入射



放射線検知

反応物質	放射線による反応	処理
ガス	電離作用による電子とイオン対の発生	・電離電流の測定 ・検知イベントのカウント
固体 (半導体、シンチレータ)	電子の電離・励起 ⇒ 1. 電流の発生 2. 蛍光(シンチレーション)の発生	・電離電流の測定 ・検知イベントのカウント ・入射粒子のエネルギー測定

電離電流

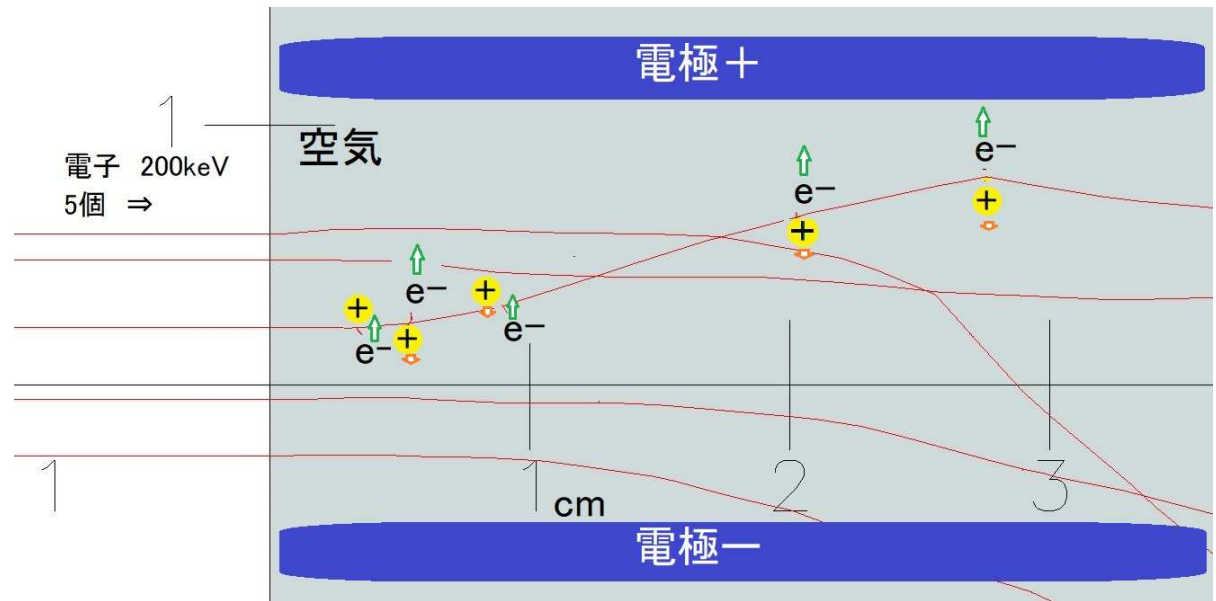
- 電離により発生した電子、イオンを検知する。測定方法は2種類。

1. (電離電流)

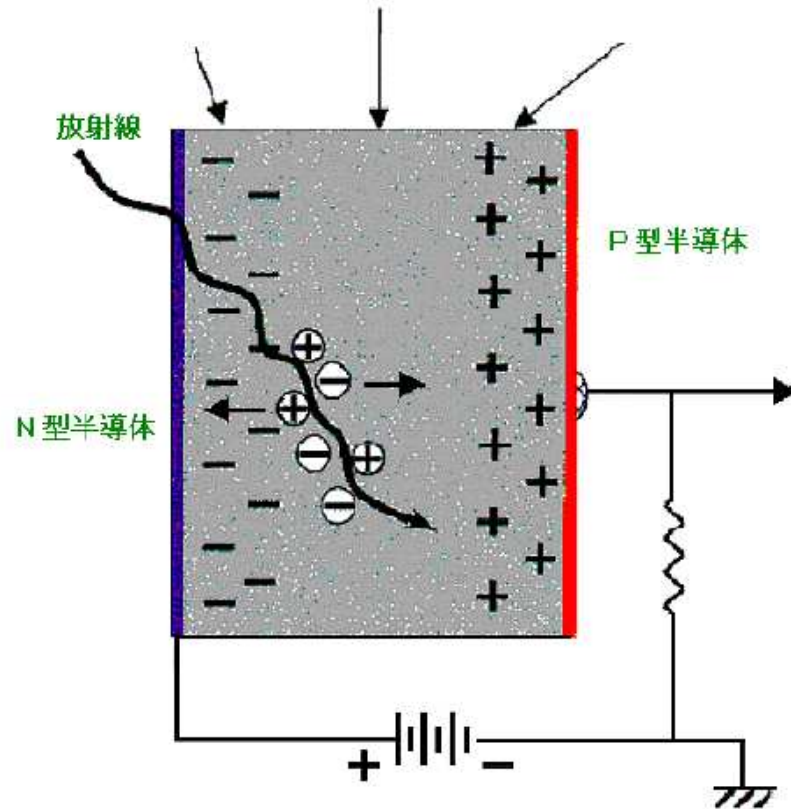
流れた電流を測定する。電流は放射線が物質中で失ったエネルギー(吸収線量)に比例する。

2. (カウント)

流れた電流パルスのカウントする



固体電離箱(半導体検出器)



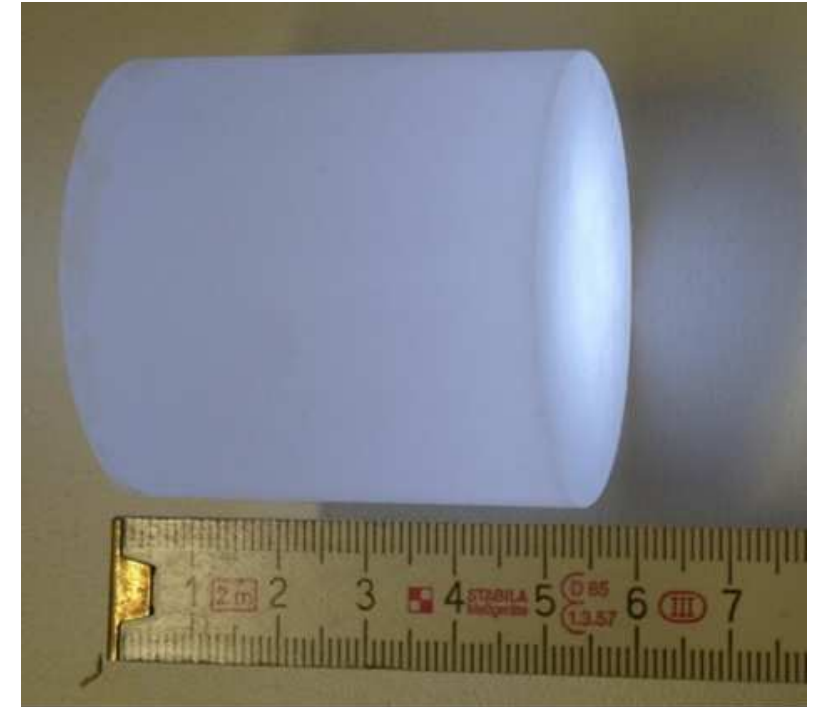
半導体検出器 (P-N結合) の動作原理

[出典] 江藤ほか：放射線の防護、丸善、p86 (1978年)

- ・ガスに比べて密度が大きい (1000倍以上)
- ・励起に必要なエネルギーがガスの1/10程度
- ・ガンマ線に対して検出感度を上げることが出来る
- ・沢山の電子が発生することからエネルギー分解能が良い

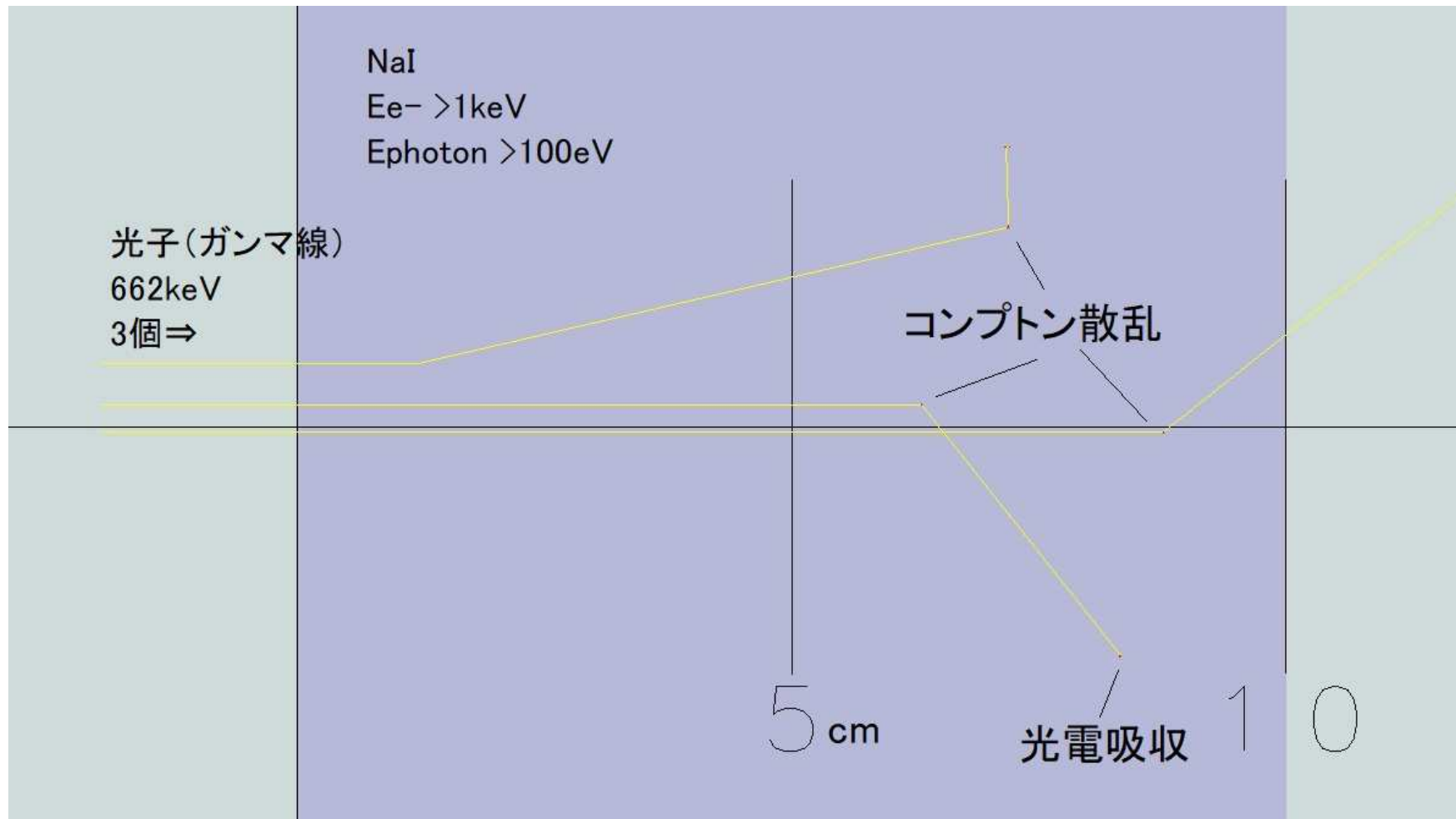
シンチレーション(蛍光)

- 電離(励起)による電子、正孔(抜け跡)が再結合するときの光を検知する
- 蛍の光、蛍光灯、LED、シンチレータ
- 発光量は放射線がシンチレータ内で消費したエネルギーに比例する
(注意)
入射した放射線のエネルギーそのものではないことに注意



CsI(Tl)結晶 Wikipedia シンチレータ

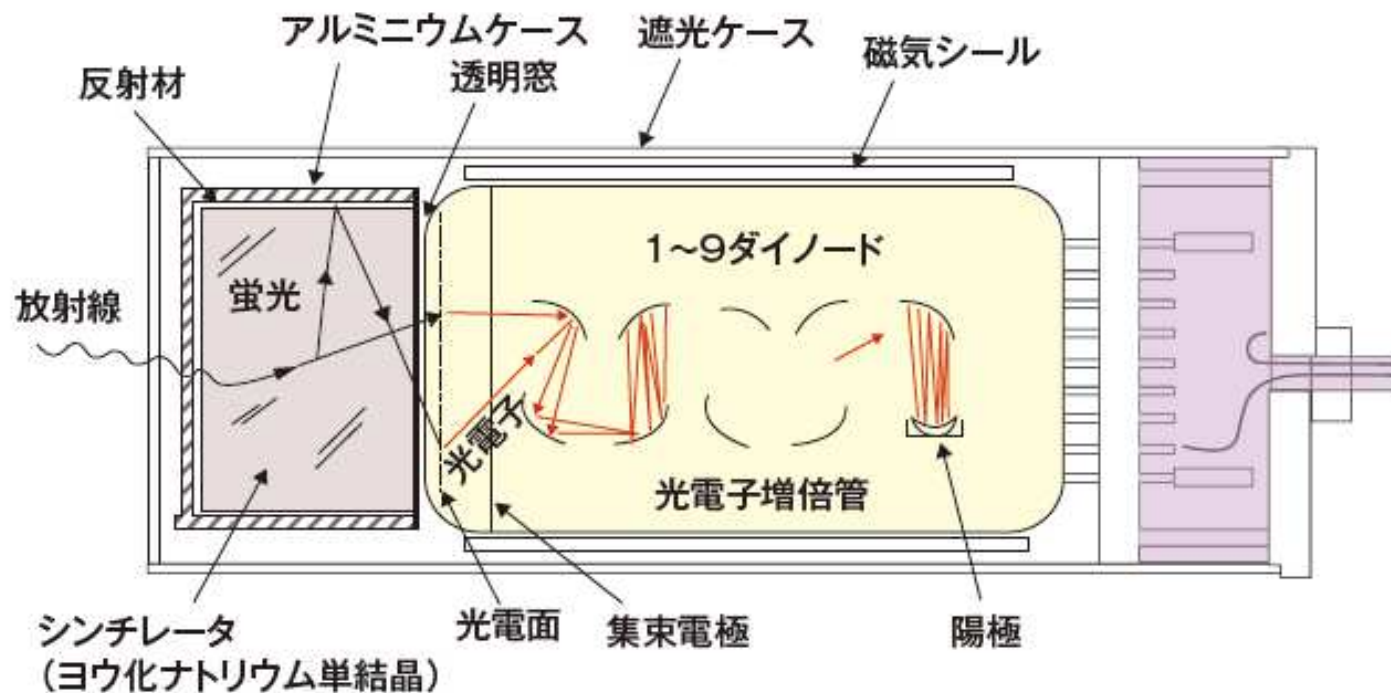
ガンマ線のNaIへの入射

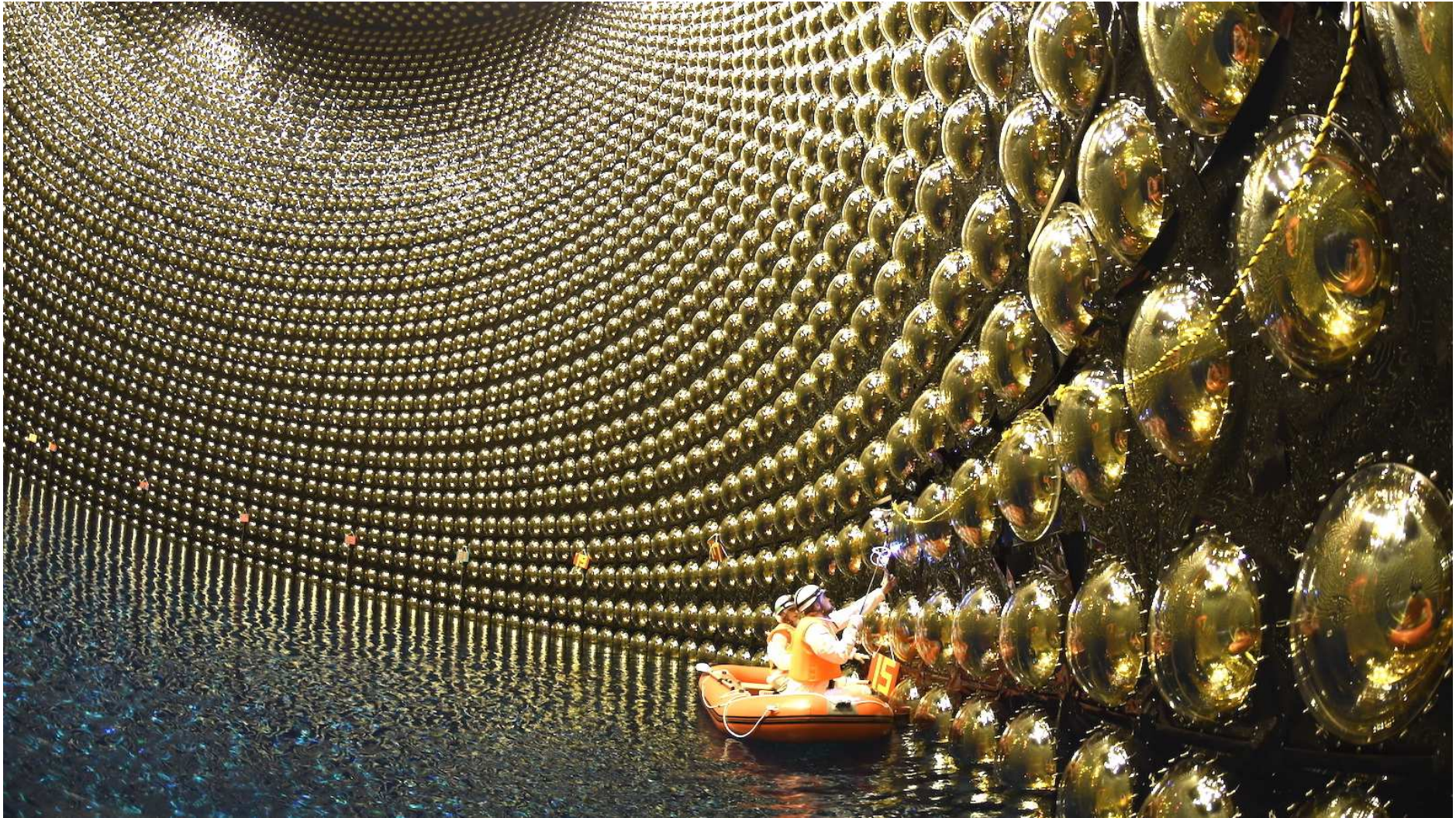


光から電気信号への変換

光電子増倍管 (フォトマルチプライヤー、PMT)

- ・増幅率が非常に大きい 100万倍程度
- ・衝撃に弱い



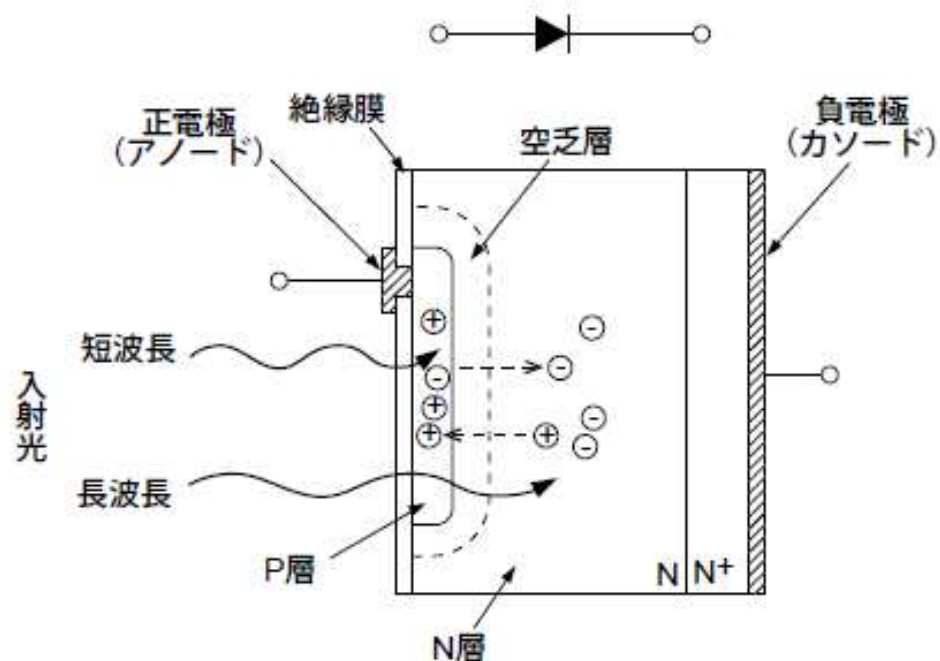


スーパーカミオカンデ

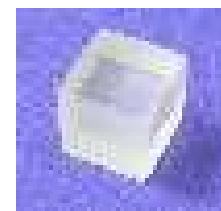
フォトダイオード

光を検知：光が当たると電流が流れる
光検出器（太陽電池も同じ原理）、
PINフォトダイオード

図1-1 フォトダイオード断面図



浜松ホトニクス



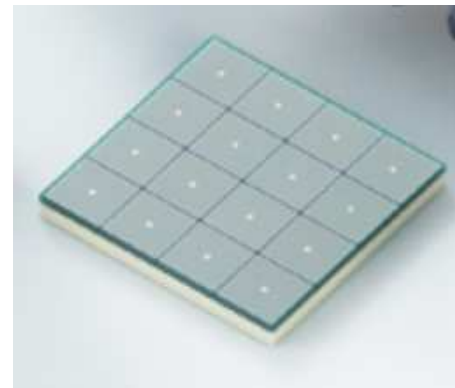
CsI(Tl)シンチレータ
5x5x5mm @2,500円



フォトダイオード、受光面5x5mm
@300円くらい(秋月電子)

半導体光増幅素子 (SiPM、MPPC)

- ・真空管式の光電子倍增管は反応速度が速く、安定に動作するが体積が大きいのと衝撃に弱いという課題がある
- ・半導体を使った高増幅率の素子が開発された



浜木ト、MPPC



kurama2

測定器

発生現象	用途	製品例
電離電流 (ガス、固体) 線量(μSv)または線 量率($\mu\text{Sv/h}$)に変換	・電離箱型線量計 ・半導体式個人線量計 (PINダイオード)	 Dシャトル
入射粒子の計数率 (cpm) ⇒ ・cpmのまま表示 ・線量率($\mu\text{Sv/h}$)に 変換	・GMサーベメータ ・シンチレーションサーベメータ ・シンチレーション線量計 (CsI+フォトダイオード型)	
入射粒子のエネル ギー度数分布 (スペクトル)	・シンチレーションスペクトロメー タ ・Ge半導体スペクトロメータ	EMF211  ゲルマニウム半導体検出器

線量計の校正

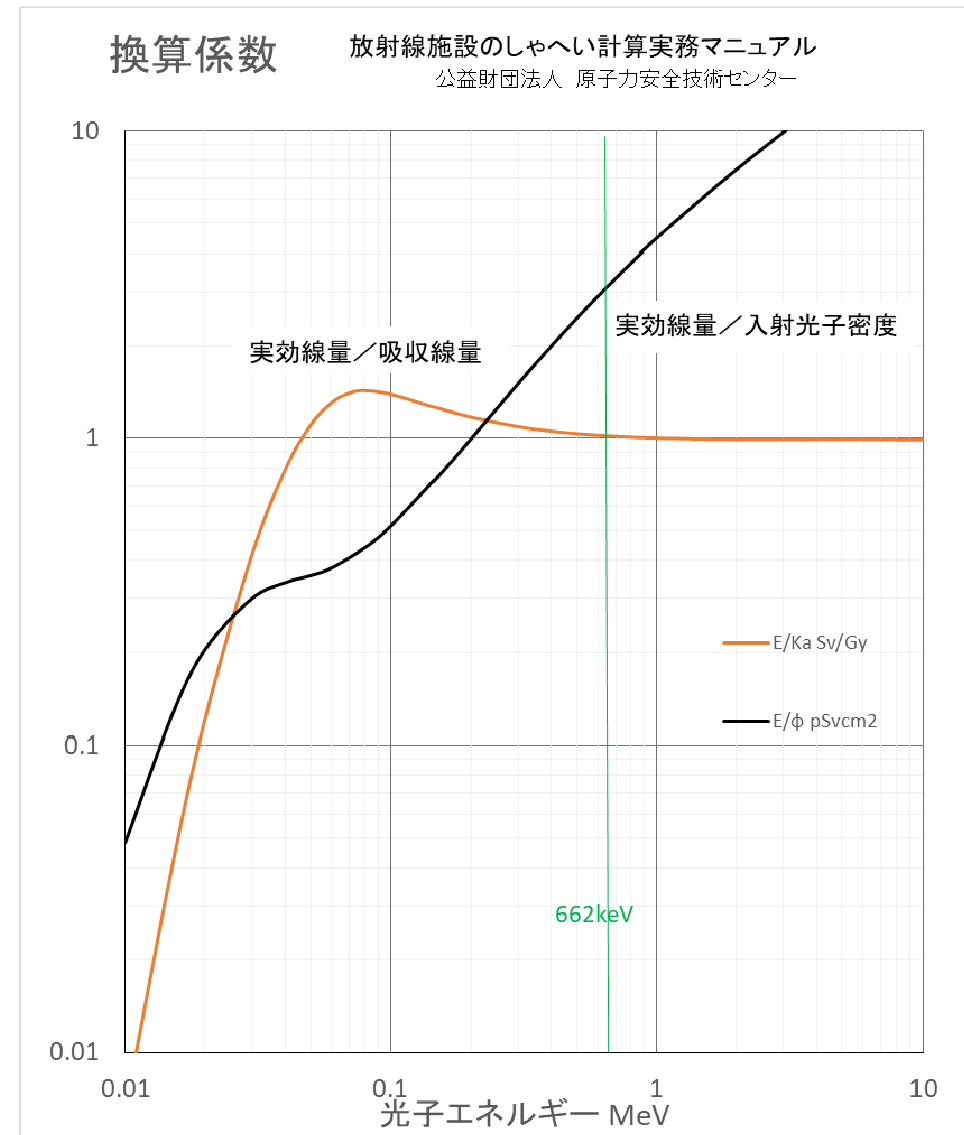
- ・線量計は計量法校正事業者登録制度(JCSS)登録事業者による校正が必要
- ・校正に使用する線源はCs-137



株式会社 日本遮蔽技研 HP 校正施設

線量計のエネルギー補償

- エネルギー依存性
同じ個数のガンマ線が入射したとき実効線量はエネルギー依存性がある。100keVと660keVでは6倍程度の違いがある。
- 線量計はCs-137の662keV、 γ 線で校正される。福島県の現場で測定するときは「エネルギー補償」型を使う必要がある。
- 吸収線量と実効線量は50keV以上の広い領域で比率は1に近い。電離箱(ガス、固体とも)線量計はもともとエネルギー依存性が小さい。更に補償しているものもある。



エネルギー補償

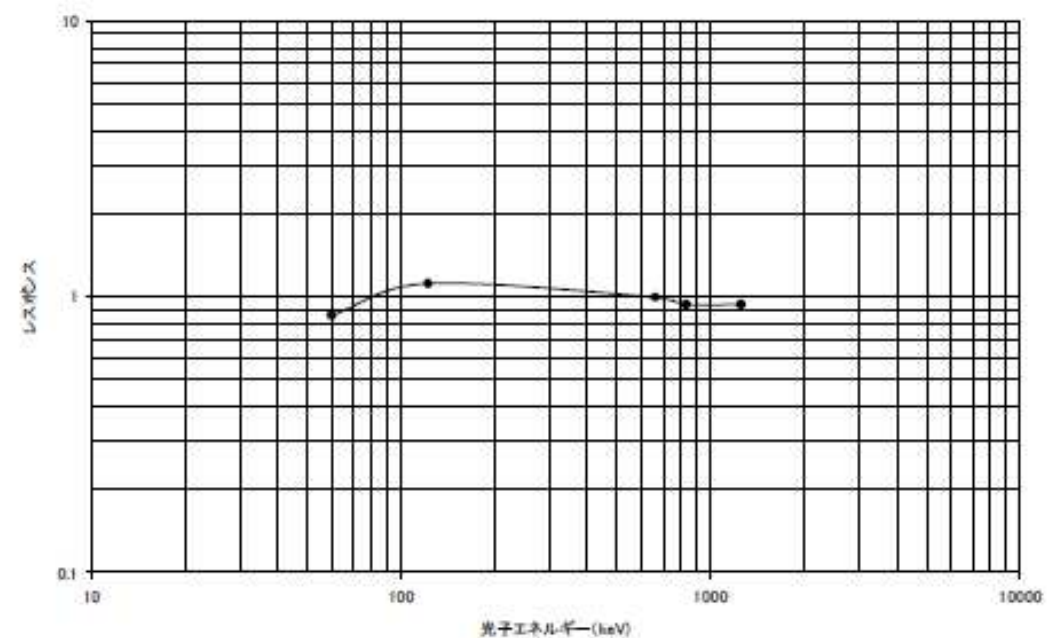
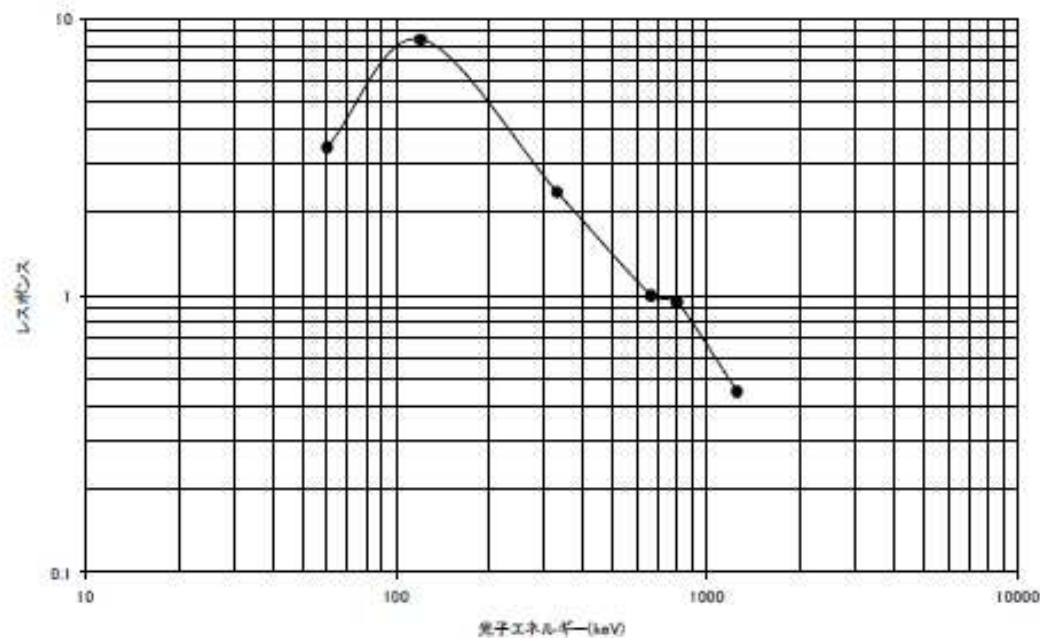


図 5-10

NaI(Tl)シンチレーションサーベイメータ(日立アロカメディカル製)に関するエネルギー補償
有無でのエネルギー特性差異(左がエネルギー補正無し、右がエネルギー補正有り)

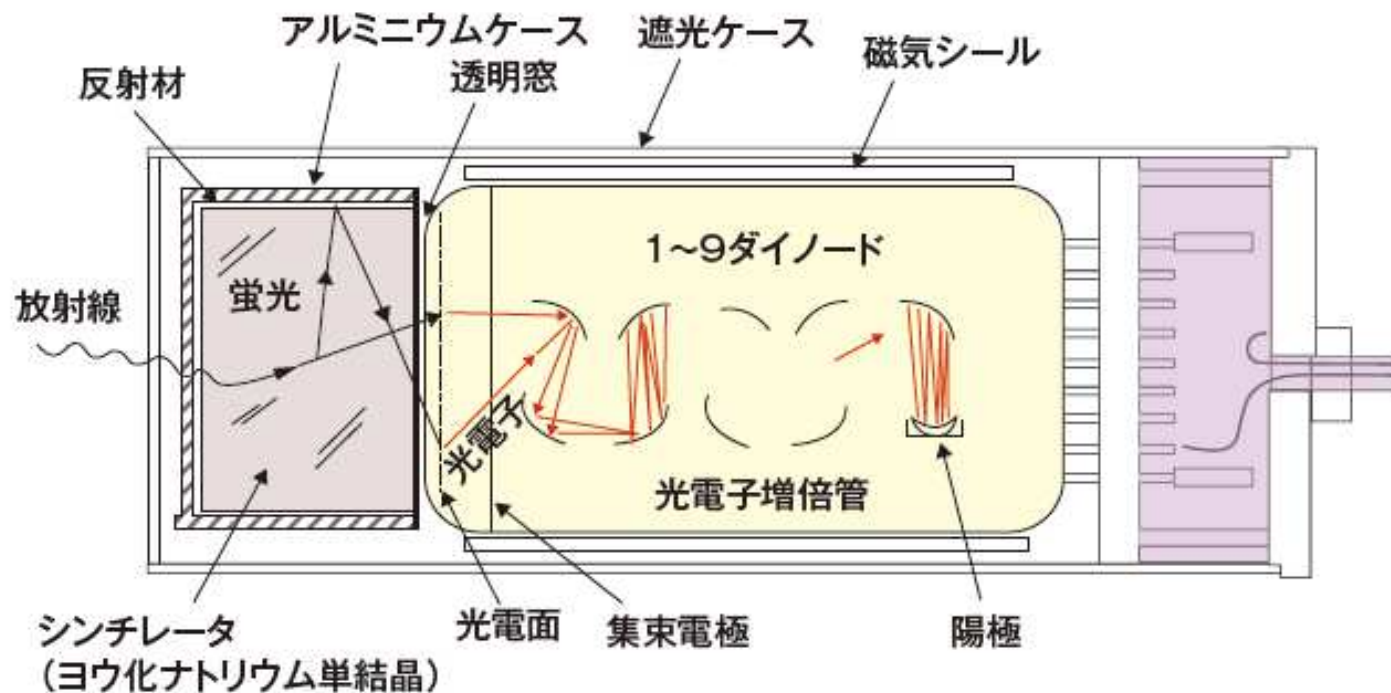
NaIシンチレーションスペクトロメータ (EMF211)



光から電気信号への変換

光電子増倍管 (フォトマルチプライヤー、PMT)

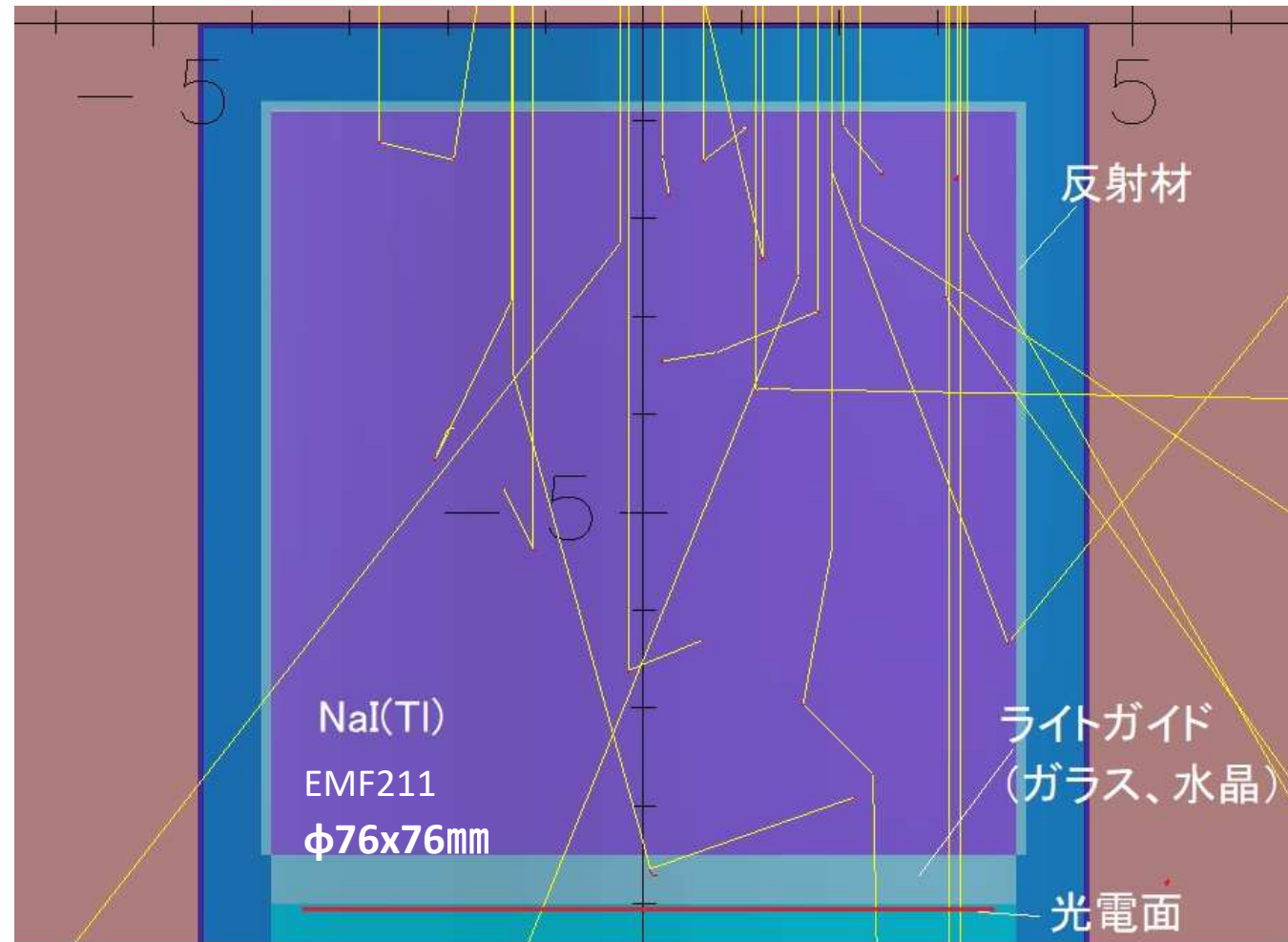
- ・増幅率が非常に大きい 100万倍程度
- ・衝撃に弱い



ガンマ線の散乱、吸収

662keVガンマ線20個

- 662keVのガンマ線がNaI結晶に入射したとき多くはコンプトン散乱
- 散乱後のガンマ線がNaI外へ飛び出てしまう場合が多い
- 結晶が大きいとガンマ線がNaI内で全エネルギーを放出する数が増える



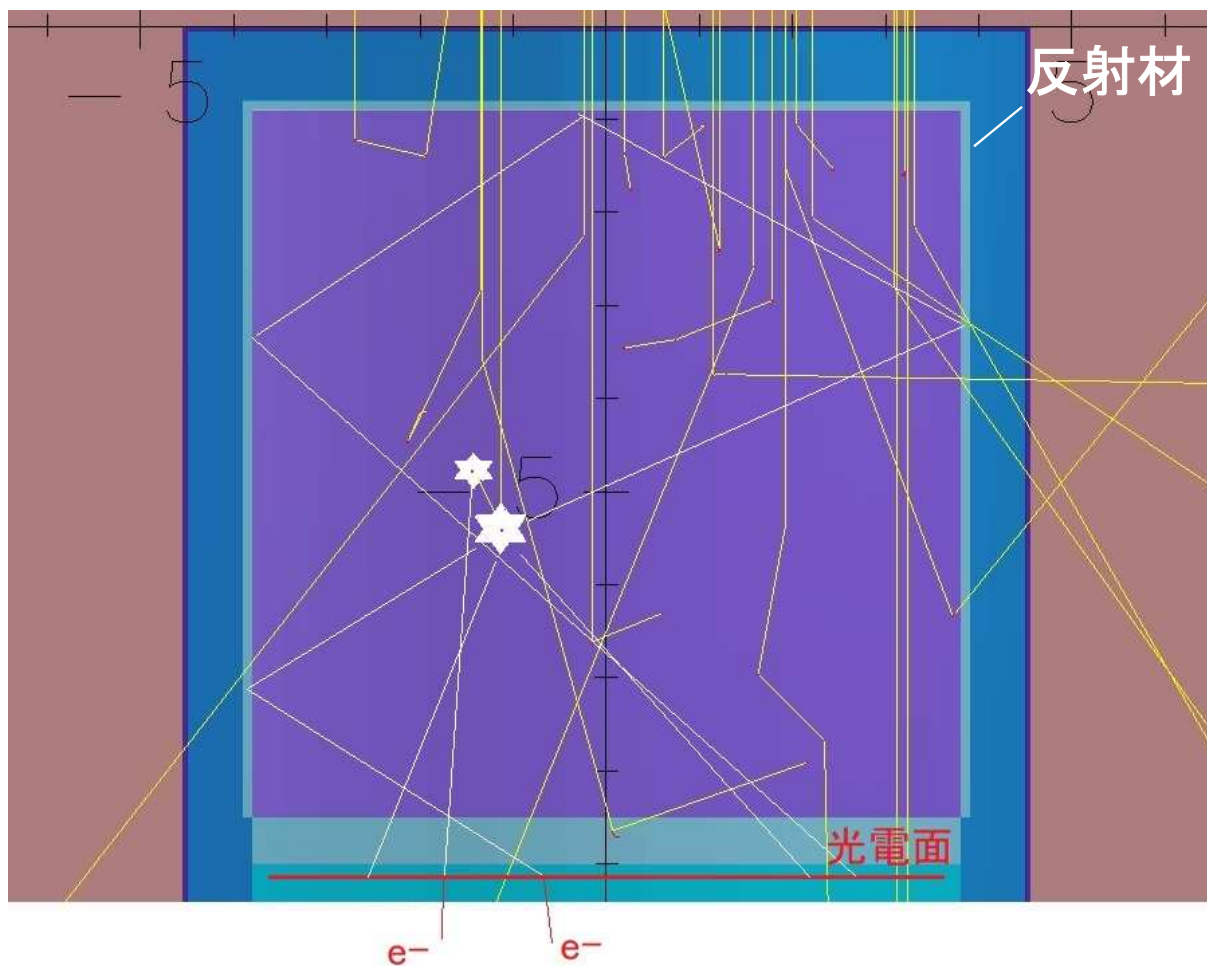
発光

- ・散乱された電子がシンチレーションを起こす
- ・発生した光は反射材で反射され多くが光電子増倍管の光電面に到達し、光電子を発生させる



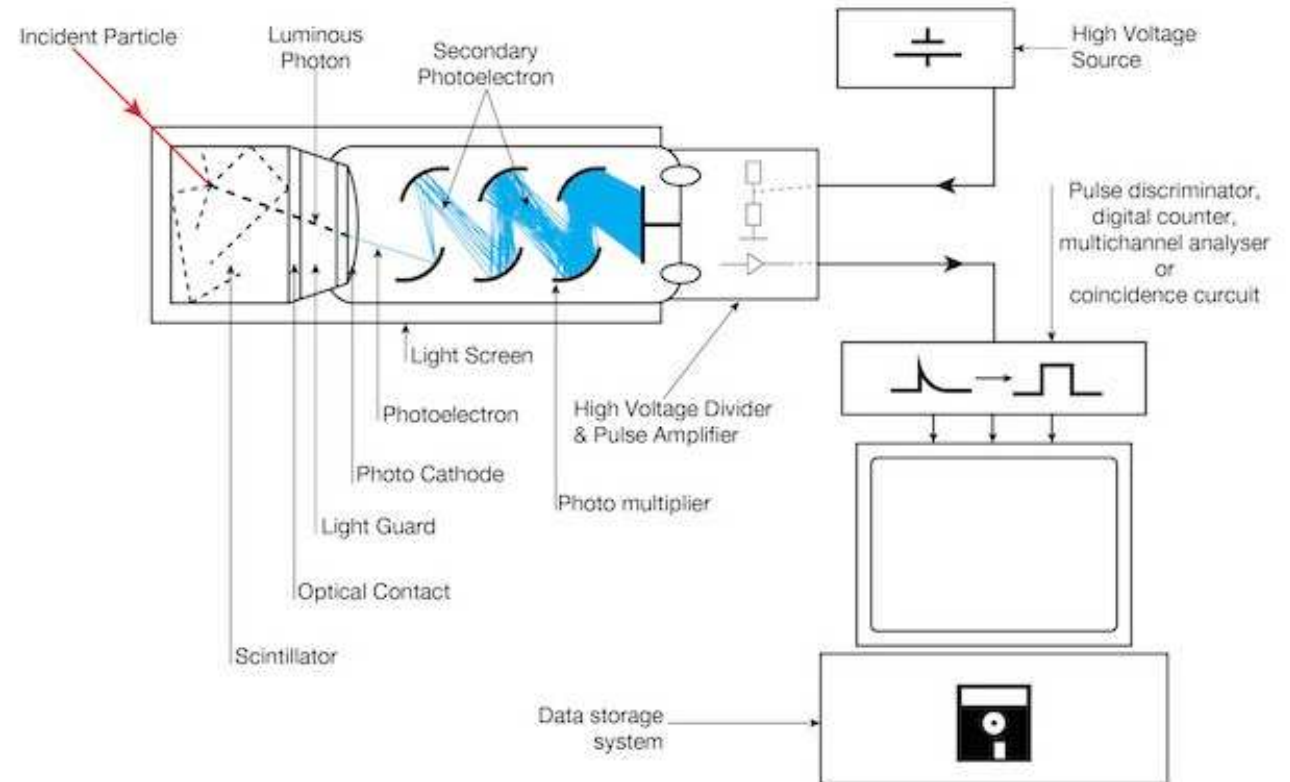
NaI(Tl)シンチレータ

 Leading Edge Algorithms Co., Ltd.



電気信号処理

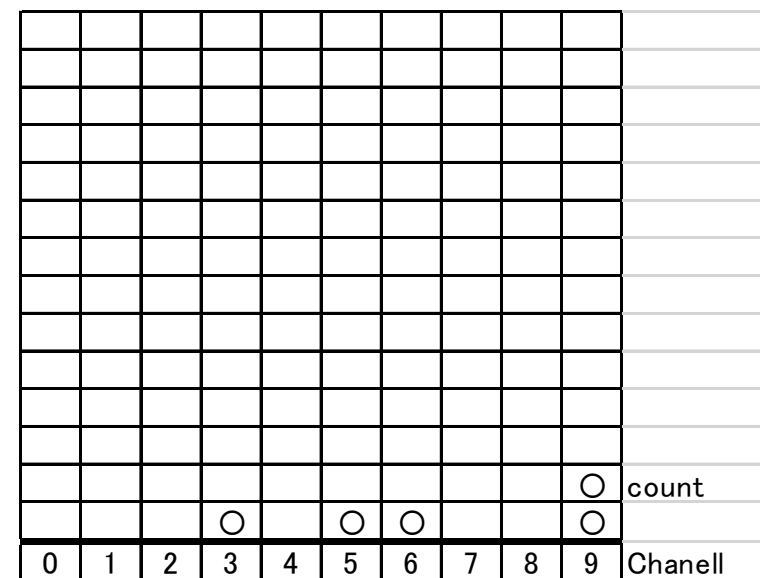
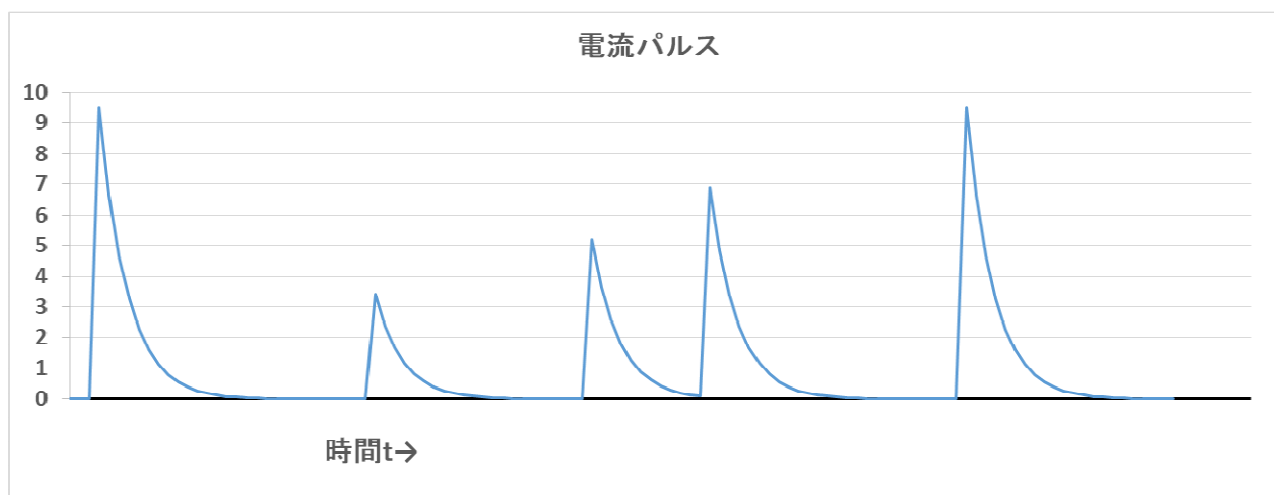
- ・発光量は電子のエネルギーに比例する
- ・光は光電子増倍管の光電面で電子に変換され、電氣的に増幅される。
- ・その結果短い電流パルスが取り出される(μsec 単位)
- ・パルスの高さは電子のエネルギーに比例する
- ・多数のパルスの高さの度数分布を作る(スペクトルと呼ぶ)



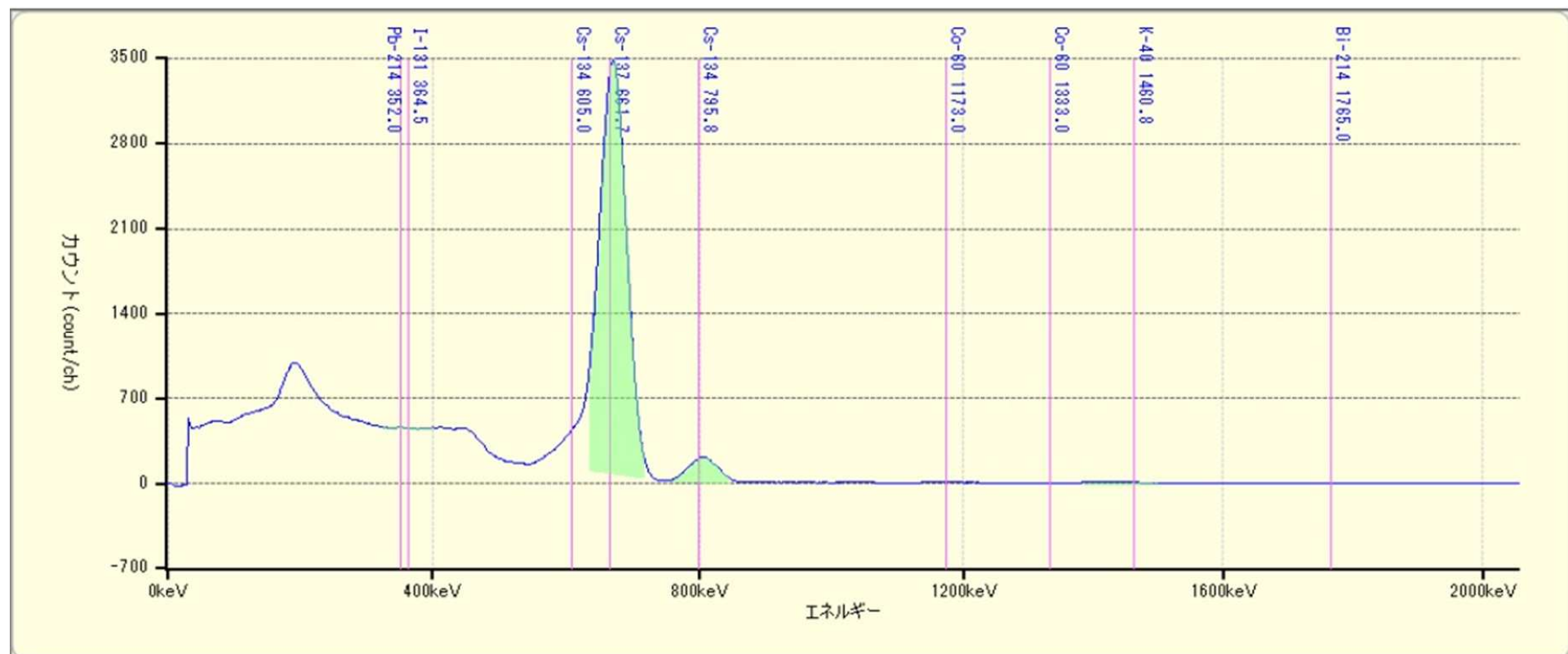
放射線ホライズン シンチレーション検出器

波高分析器

- ・放射線が入射した時に発生する電流パルスの高さを1個ずつ調べる
- ・一定の大きさごとに区分して割り振る。区分の数をチャンネルという。(EMF211は1,000Ch)
- ・出来上がった度数分布グラフをエネルギースペクトルと呼ぶ



EMF211で取ったスペクトル

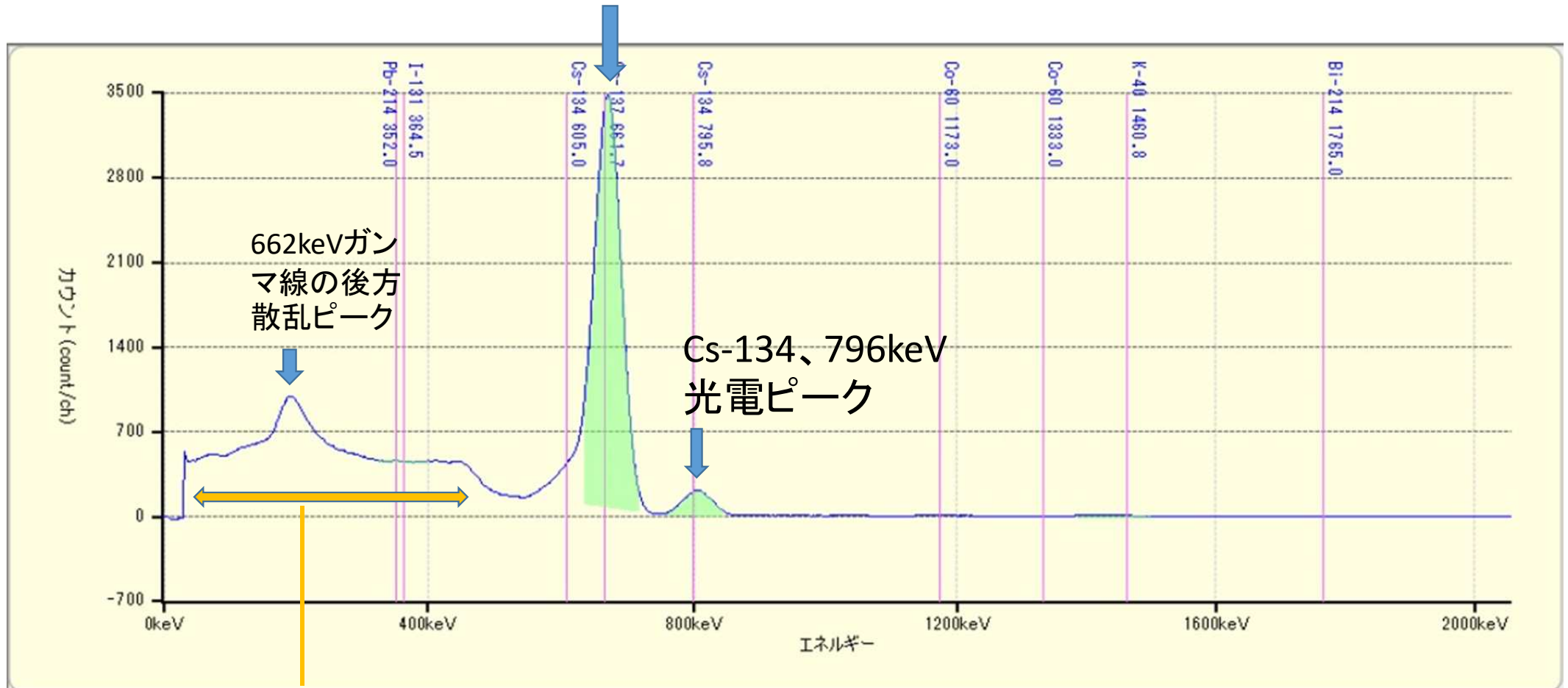


スペクトルを見るときにの注意点

- エネルギースペクトルは入射光子のエネルギー分布そのものではない
- 単一エネルギーのガンマ線入射時にも光電ピークの他にコンプトン散乱の分布が発生。
見えているのは跳ね飛ばされた電子のエネルギー分布
- コンプトン散乱しても結晶内で光子が止まれば(全エネルギーを結晶内で放出すれば)
全体としては光電ピークと同じエネルギーとなる

ピークの説明

Cs-137、662keV光電ピーク
(全エネルギーピーク)



662keVのNaI内でのコ
ンプトン散乱分布

放射能測定器の校正

- 検出器の測定計数率から線源の放射能を求めるには、変換係数が必要である

$$\text{線源の放射能 (Bq)} = \text{変換係数} \times \text{測定計数率 (cps)}$$

- ・ 変換係数を求める方法
 - 1) 標準線源を使う方法
 - 2) 検出効率から求める方法

標準線源を使って変換係数を求める

- 試料測定用の容器に濃度が既知の試料(標準試料)を入れて計数率を測定し変換係数を求める(校正をするという)

$$\text{試料の放射能濃度(Bq/kg)} = \frac{\text{標準試料の放射能濃度(Bq/kg)}}{\text{標準試料の計数率(cps)}} \times \text{試料の計数率(cps)}$$

- 条件
 - ① 標準試料はトレーサビリティが取れているもの
 - ② 試料の形態は完全に同じであること
容器、試料の体積、密度、組成
350mLプラ容器の場合であれば、水、330mL、330g
軽い草葉とか100mLにすると正しい値が得られない
 - ③ 校正時と同じ位置に置く



検出効率

- 計数率(cps) = 検出効率 × 放出比 × 放射能(Bq)

放出比: 1Bqの放射能から出るガンマ線の放出割合
Cs-137の662keV 85%とか

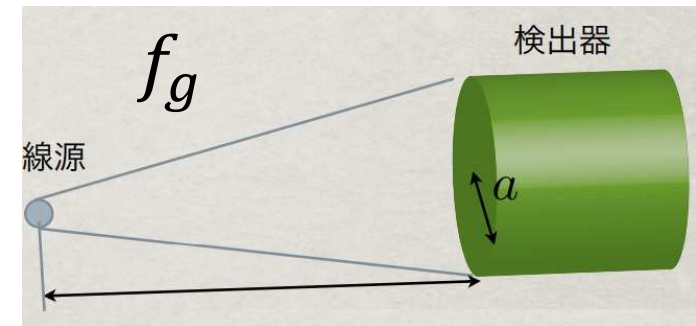
- 検出効率 = $f_{det} f_g f_s f_{abs}$

f_{det} : 検出器の入射光子に対する光電ピーク検出効率

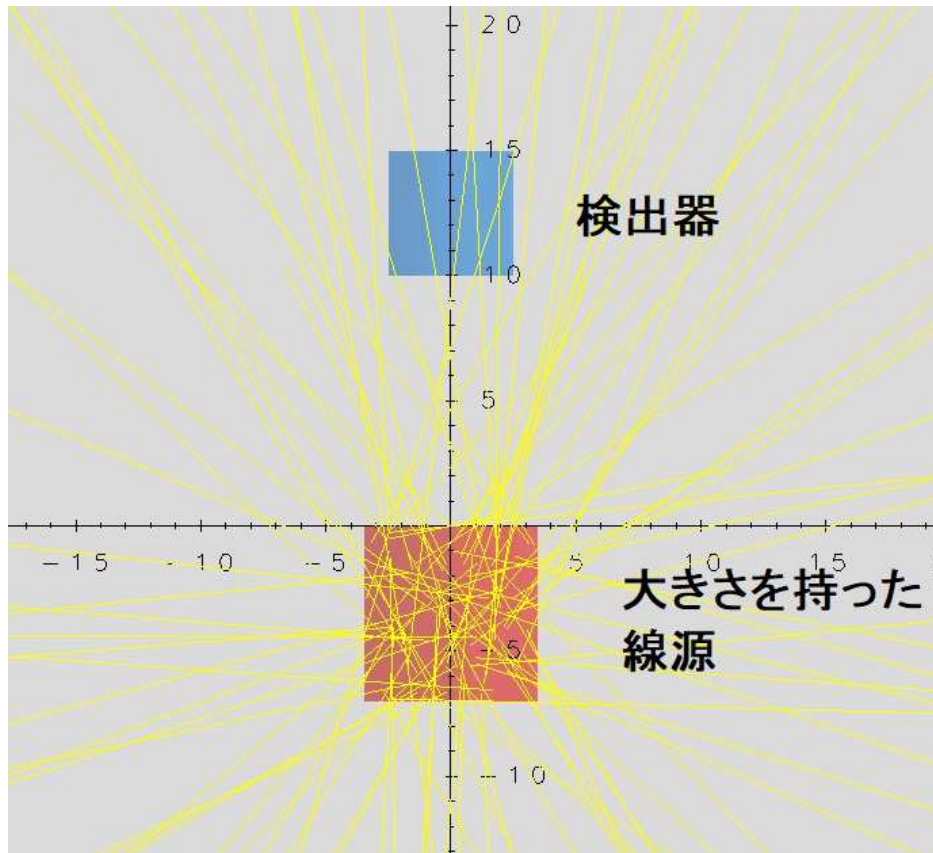
f_g : 幾何学的係数(相対的な位置関係による係数)

f_{sh} : 遮蔽効果(途中にある物質による遮蔽効果)

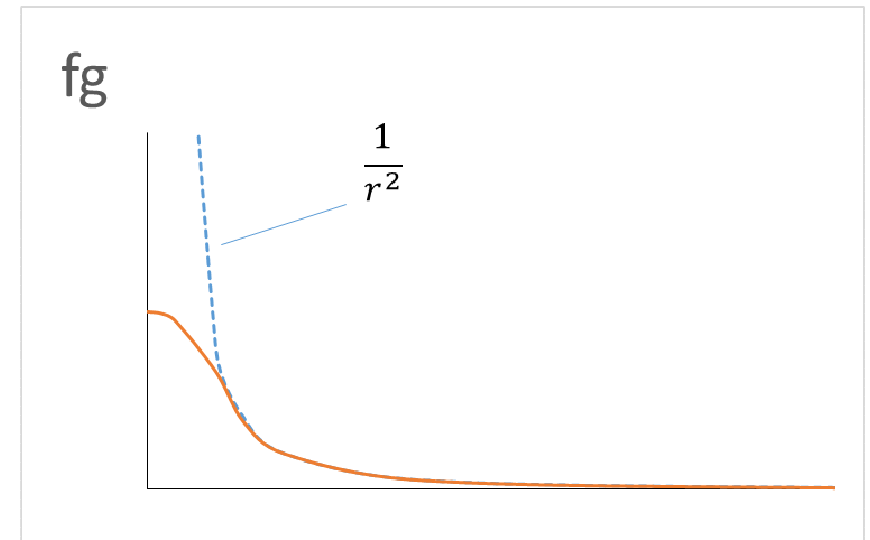
f_{abs} : 線源の自己吸収係数



幾何学的係数

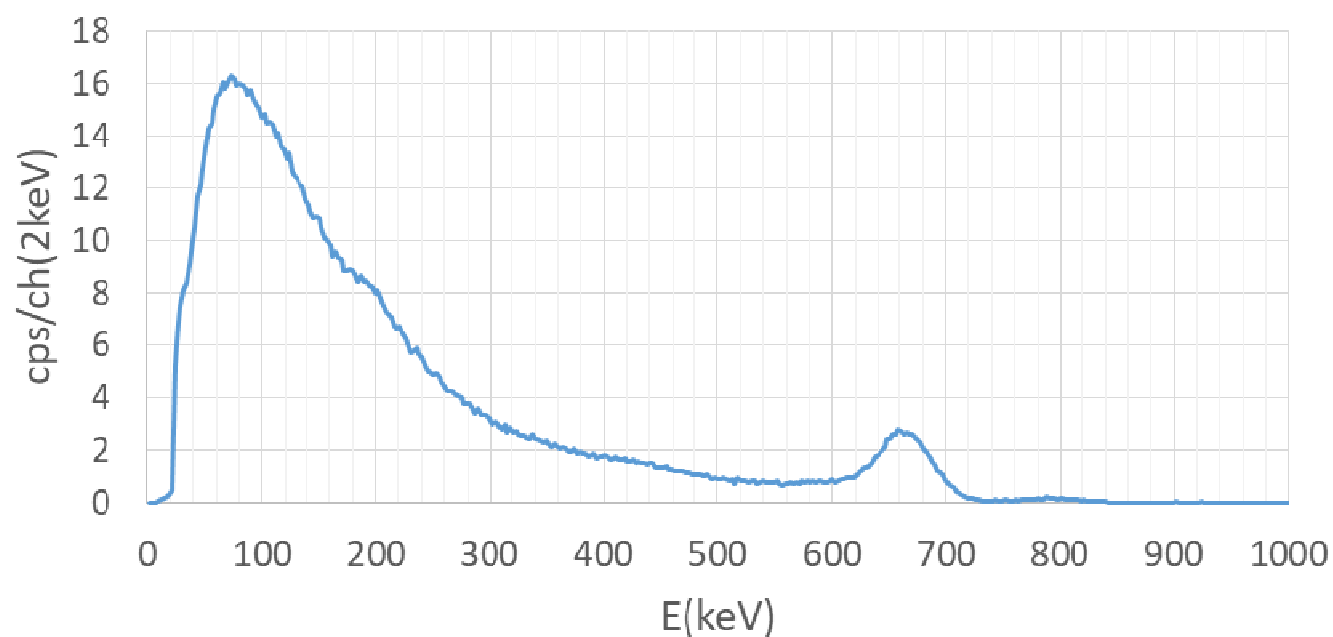


- ・幾何学的係数(fg)は距離が離れると $1/r^2$ のラインに乗るが、距離が小さくなると一定値に近づく。変化の式は検出器、線源双方の大きさに関する複雑な式になる
- ・最近ではモンテカルロシミュレーションにより求める



環境放射線の測定

山田牧場 kurama2 2019/12/08 10:20:00 11:00:00



- ・2019年12月屋外でシンチレーションスペクトロメータで計測した例
- ・Cs-137による662keVの光電ピークが見えている
- ・470keV以下にコンプトン分布があるはずだが、それ以上に低エネルギー側に向かって計数が上がっている。
- ・これは662keVの散乱線(多重)が空間中を多数飛び交っていることを示している

補足

測定する放射線の種類(現時点で対象となるもの)

- 高速の電子: ベータ線、光電効果でたたき出された電子、コンプトン散乱電子

物質中で止まりやすい

200keVの電子(Cs-137のベータ線平均エネルギー)の飛程 水で 約 mm

630keVの電子(Ba-137mのキックアウト(内部転換)電子) 水で 約 2mm

空気なら約 m

- ガンマ線(光子)

Cs-137のガンマ線 662keV

コンプトン散乱(1～複数回)した後のガンマ線 10keV～662keV

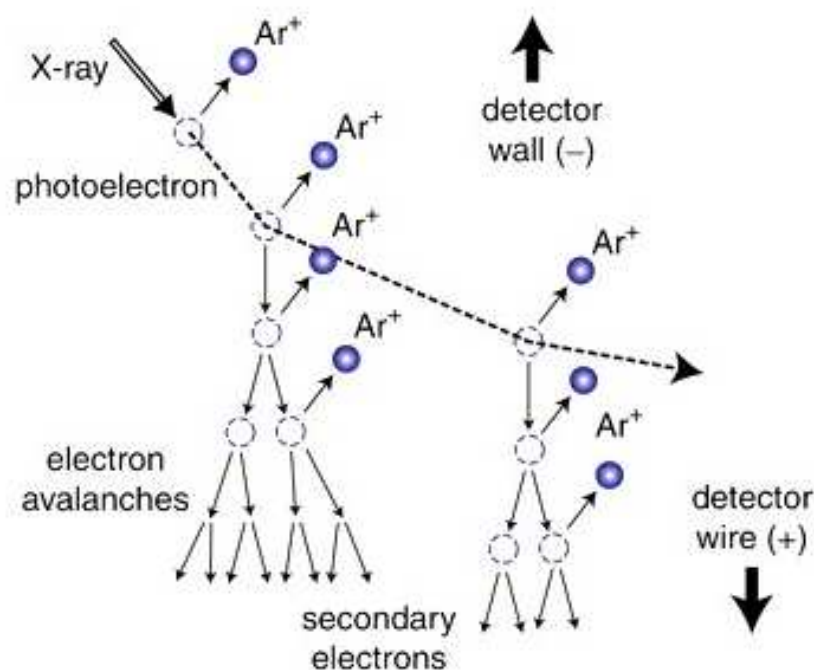
特性X線 10keV～80keV

ガス(電離)検出器

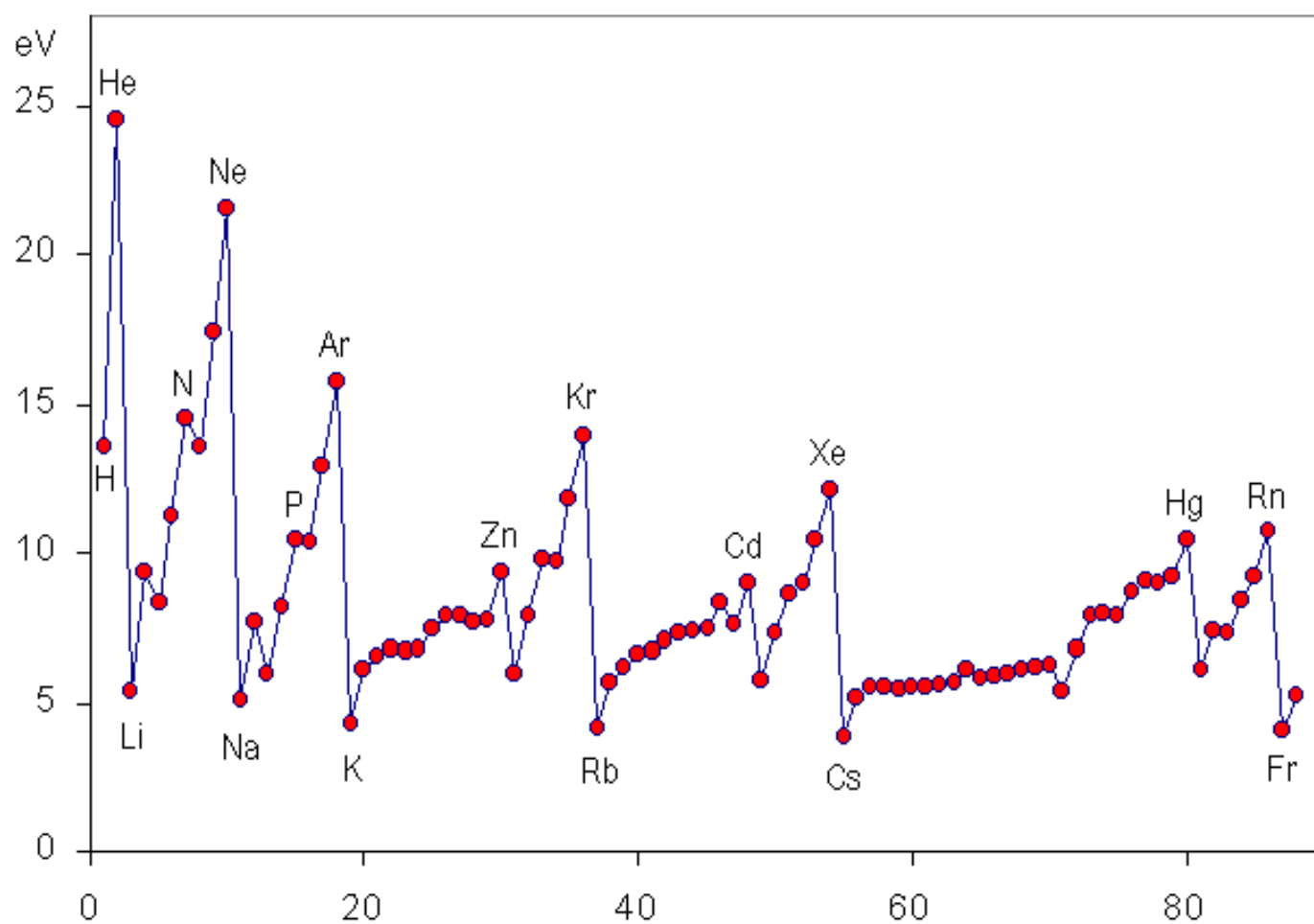
電流がごく僅かなので増幅が必要

- ガス増幅(電子雪崩)による自己増殖

電離箱、GM検出器



イオン化エネルギー

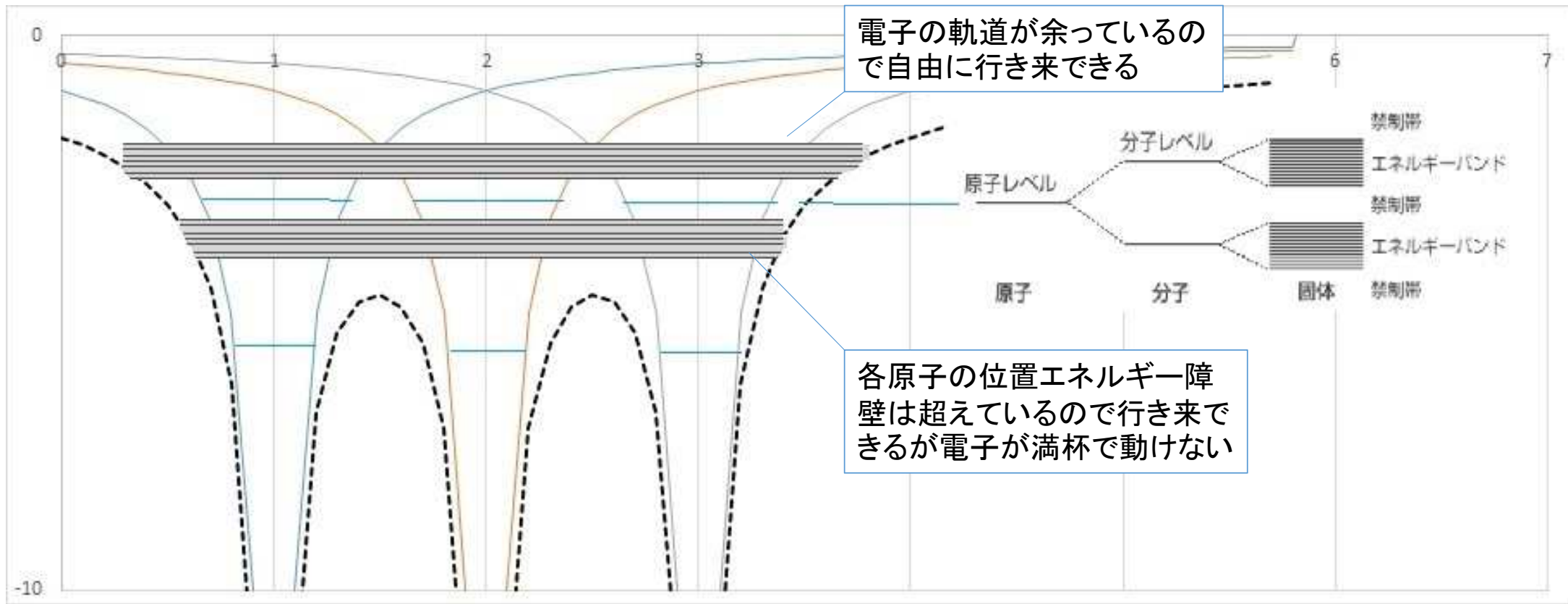


周期律:

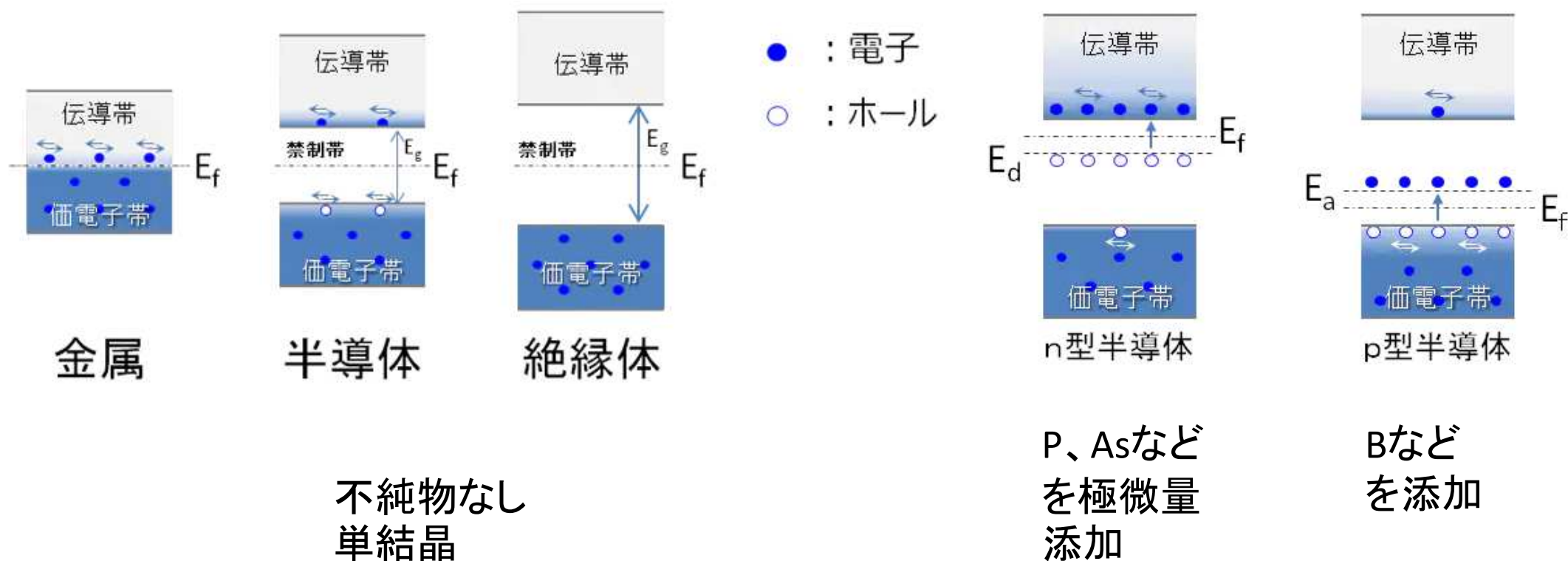
1																	18
H	2											13	14	15	16	17	He
3	4											5	6	7	8	9	10
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
11	12	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
55	56	*1	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
87	88	*2	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118
Fr	Ra		Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Nh	Fl	Mc	Lv	Ts	Og

*1 ランタノイド:	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
*2 アクチノイド:	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

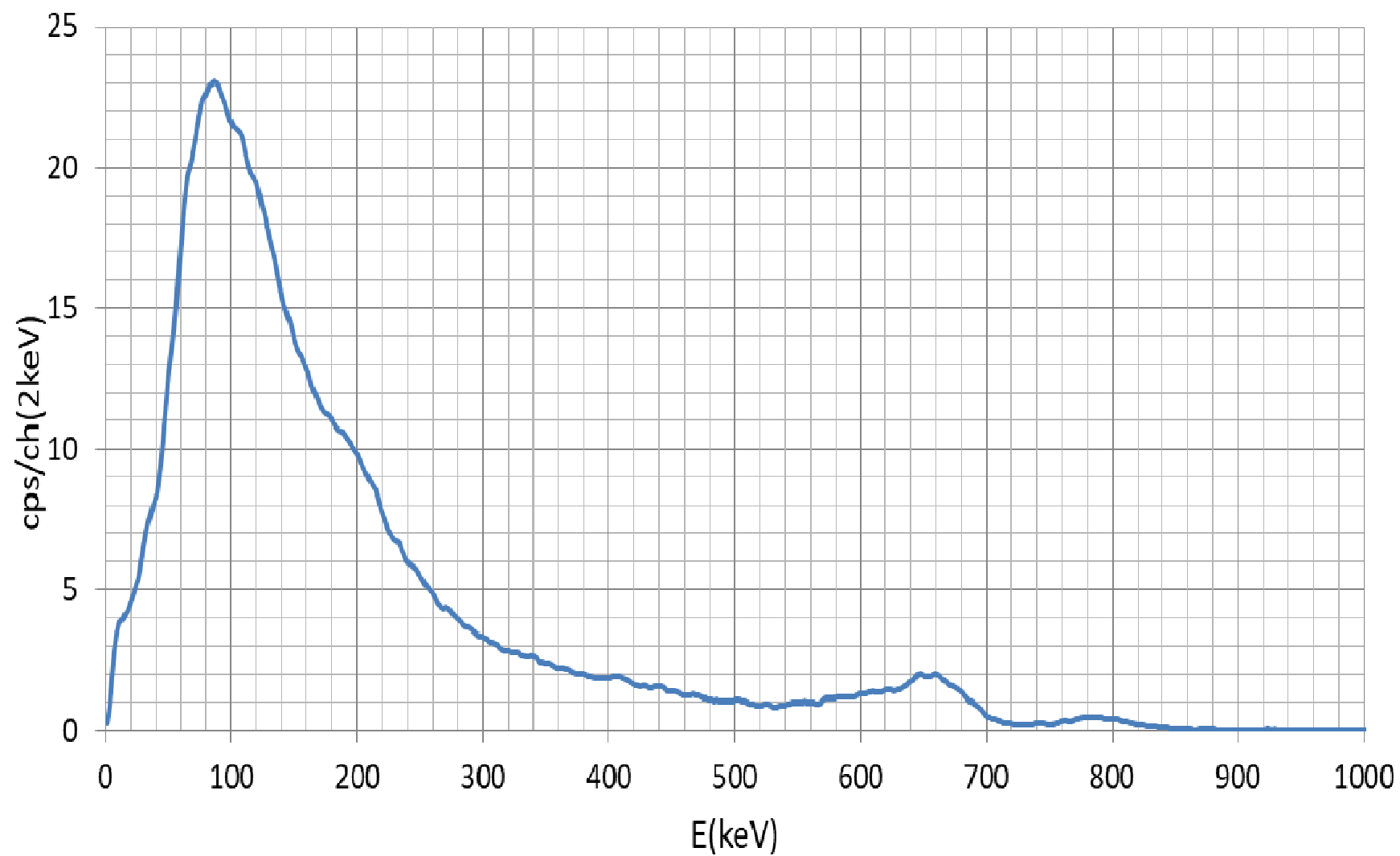
結晶中のポテンシャル



半導体



2" 飯館 実験小屋外北 05/10/2015 10:56:47 55 cm



カミオカンデ ウィキペディア (Wikipedia)

カミオカンデは、大統一理論の予言する陽子崩壊を実証するため1983年に完成した。

カミオカンデは3000トンの超純水を蓄えたタンクと、その壁面に設置した1000本の光電子増倍管からなる。ここで使用された光電子増倍管は研究グループと浜松ホトニクスが新規に共同開発した口径20インチのものである(一般に広く使われるのは口径2インチ型)。ガラスバルブには耐水性が高いHARIOの耐熱ガラス「ハリオ32」が使用された[1]。

カミオカンデが地下に設けられたのは、陽子崩壊時に放出されるニュートリノ以外の粒子の影響を避けるためである。ニュートリノはものを貫通する能力が高く、他の物質と反応することなく簡単に地球を抜けていってしまう。しかし、まれに他の物質と衝突することがある。カミオカンデは、このまれに起こる衝突を検出することで間接的に陽子崩壊を実証することを目的とした。

カミオカンデはニュートリノの衝突を検出するため、超純水をつかう。カミオカンデの内部には超純水がためられており、ニュートリノが水の中の電子に衝突したあとに、高速で移動する電子より放出されるチェレンコフ光は青白く発光し、壁面に備え付けられた光電子増倍管で検出する。チェレンコフ光を検出した光電子増倍管がわかると、計算によりどの方角からきたニュートリノによる反応かがわかる仕組みになっている。

1987年2月23日、カミオカンデはこの仕組みによって、大マゼラン星雲でおきた超新星爆発 (SN 1987A) で生じたニュートリノを偶発的に世界で初めて検出した[2]。この功績により、2002年小柴昌俊東大特別栄誉教授は、ノーベル物理学賞を受賞した。

その後も太陽ニュートリノやニュートリノ振動の検出、レプトンフレーバーの保存の破れの研究に活用された。

