

粒子検出器(2)

河野能知

2015.02~03

資料:

<http://hpx.phys.ocha.ac.jp/wiki/Lec2015ParticleDetectors>

内容

1. 素粒子実験と粒子検出器
2. 粒子と物質との相互作用
3. 検出器の基礎
 1. シンチレーター、PMT、ガス比例計数管、半導体検出器
 2. 偶発事象と同時計測
 3. 統計について
4. 飛跡検出器
 1. MWPC、シリコンMicro-strip, pixel検出器、TPC
5. カロリメーター(エネルギーの測定)
 1. サンプリング型カロリメーター
 2. エネルギー分解能
6. 素粒子実験で用いられる測定器システム

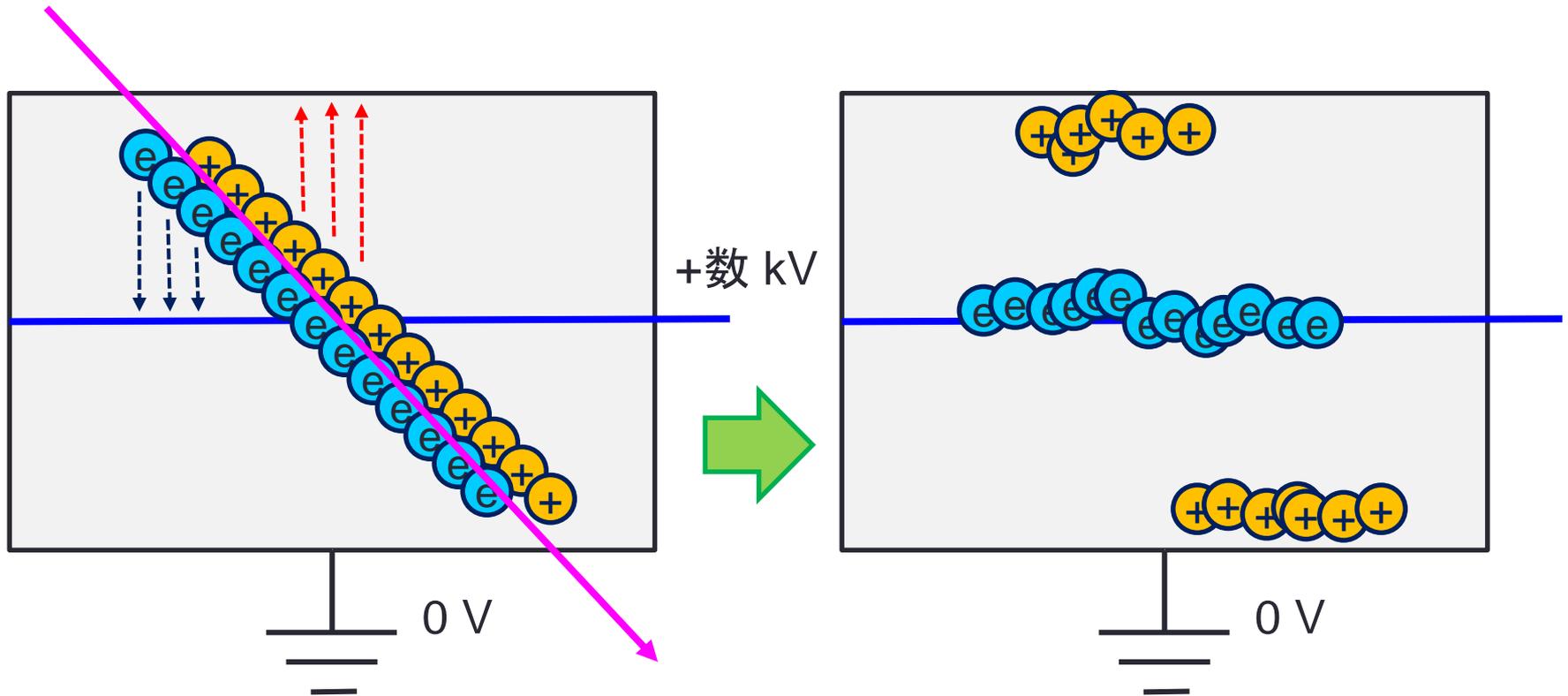
前回のまとめ

- 検出器の動作原理を理解する
 - 粒子と物質との相互作用を考える。素過程は何か
 - 信号の増幅方法
 - 信号の記録、読み出し方法
- 粒子と物質との相互作用
 - 物質を構成しているのは、種々の原子核と電子である
 - 荷電粒子、電子、光子、ハドロンによって振る舞いが異なる
 - 荷電粒子のエネルギー損失は主に電子との散乱による
 - 粒子の進行方向のずれは原子核との散乱による効果が多い
- いろいろな概念
 - イオン化、断面積、エネルギー損失、Landau分布、Bethe-Blochの式、電磁シャワー、放射長

今回の内容

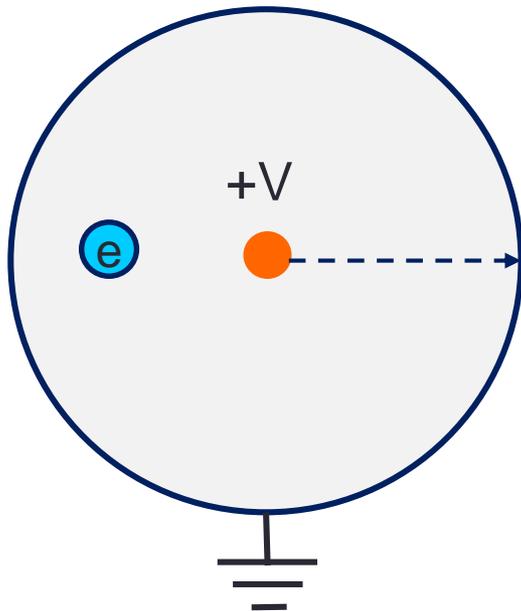
- 検出器の例
 - ガス比例計数管(イオン化)
 - シンチレーター(蛍光)、PMT(光センサー)
 - 半導体検出器(電子・正孔対生成)
- 粒子の信号とノイズの見分け方
 - 確率・統計の考え方に慣れる
 - 偶発的事象の頻度
 - 同時計測

ガス比例計数管



- 密閉した容器の内部にガスを充填しておく
- 荷電粒子が入射すると気体分子をイオン化する(電子+陽イオン)
- 中心に正の高電圧をかけたワイヤーを設置して電子を集める

電子・イオンのドリフト



左図の状況を考える

- $\vec{E} = \frac{\sigma}{2\pi\epsilon_0 r} \cdot \frac{\vec{r}}{r}$ ($\sim 1/r$)
- σ : アノード上の単位長さ当たりの電荷密度
- アノード・ワイヤーの近くで急激に電場が強くなる
- 電子・イオンはそれぞれアノード・カソードに引き寄せられる
 - 移動は周囲の分子と衝突を繰り返しながら進む
 - ドリフト速度は $\vec{v}_{e,i} = \mu_{e,i} \vec{E}$ ($\mu_{e,i}$: 移動度)
 - 移動度は、ガスの種類によって変わる
 - イオン化には希ガスが良く用いられる
 - 有機分子を混ぜて増幅作用を調節する
- 電極まで辿りつくと、
 - 電子は電極に吸い込まれて電流として流れる
 - イオンは負電極の周りに集まって、電場を弱める働きをする

分子のイオン化エネルギー

Table 33.5: Properties of noble and molecular gases at normal temperature and pressure (NTP: 20° C, one atm). E_X , E_I : first excitation, ionization energy; W_I : average energy per ion pair; $dE/dx|_{\min}$, N_P , N_T : differential energy loss, primary and total number of electron-ion pairs per cm, for unit charge minimum ionizing particles.

Gas	Density, mg cm^{-3}	E_x eV	E_I eV	W_I eV	$dE/dx _{\min}$ keV cm^{-1}	N_P cm^{-1}	N_T cm^{-1}
He	0.179	19.8	24.6	41.3	0.32	3.5	8
Ne	0.839	16.7	21.6	37	1.45	13	40
Ar	1.66	11.6	15.7	26	2.53	25	97
Xe	5.495	8.4	12.1	22	6.87	41	312
CH ₄	0.667	8.8	12.6	30	1.61	28	54
C ₂ H ₆	1.26	8.2	11.5	26	2.91	48	112
iC ₄ H ₁₀	2.49	6.5	10.6	26	5.67	90	220
CO ₂	1.84	7.0	13.8	34	3.35	35	100
CF ₄	3.78	10.0	16.0	54	6.38	63	120

電子のドリフト速度

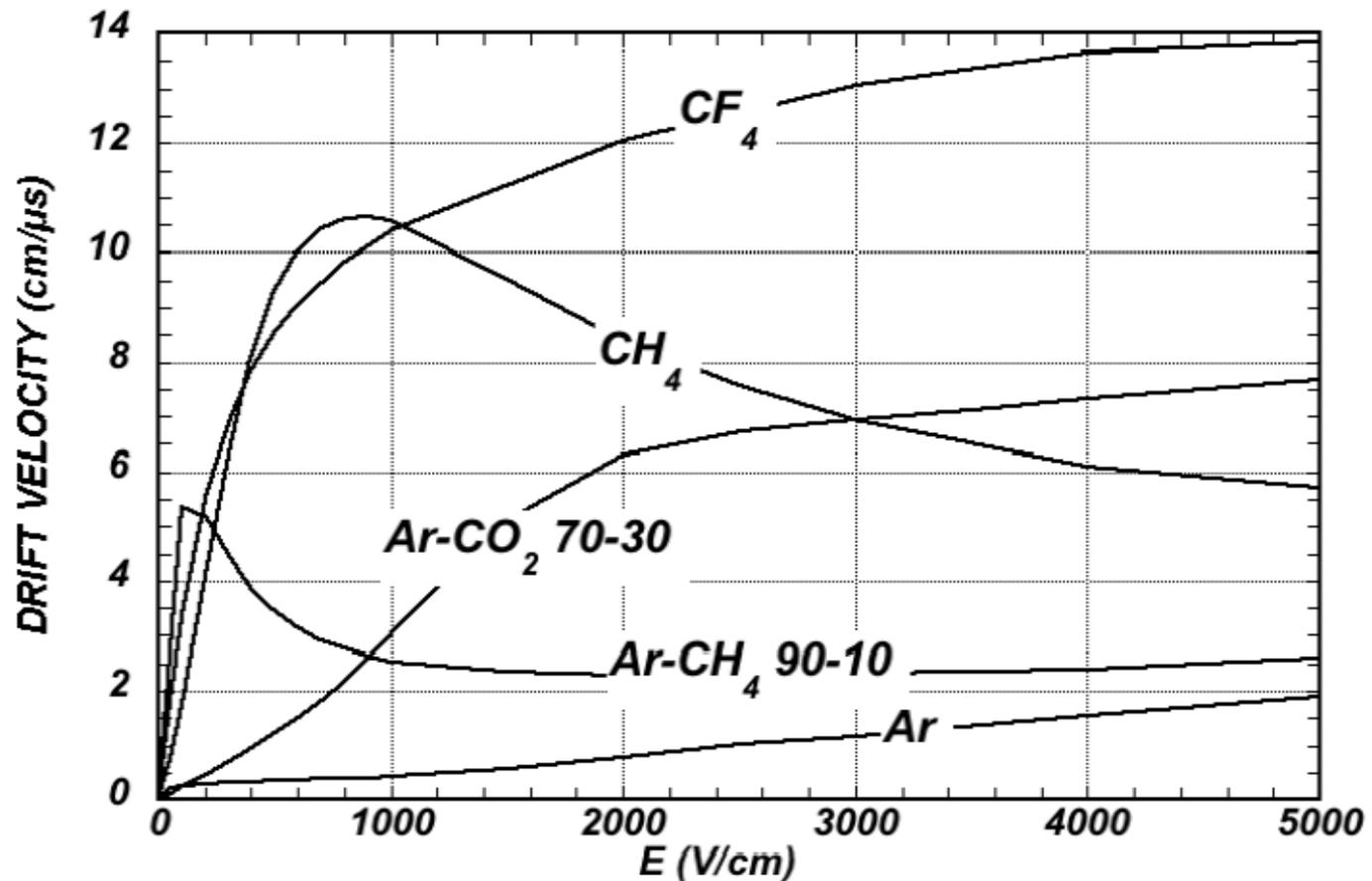


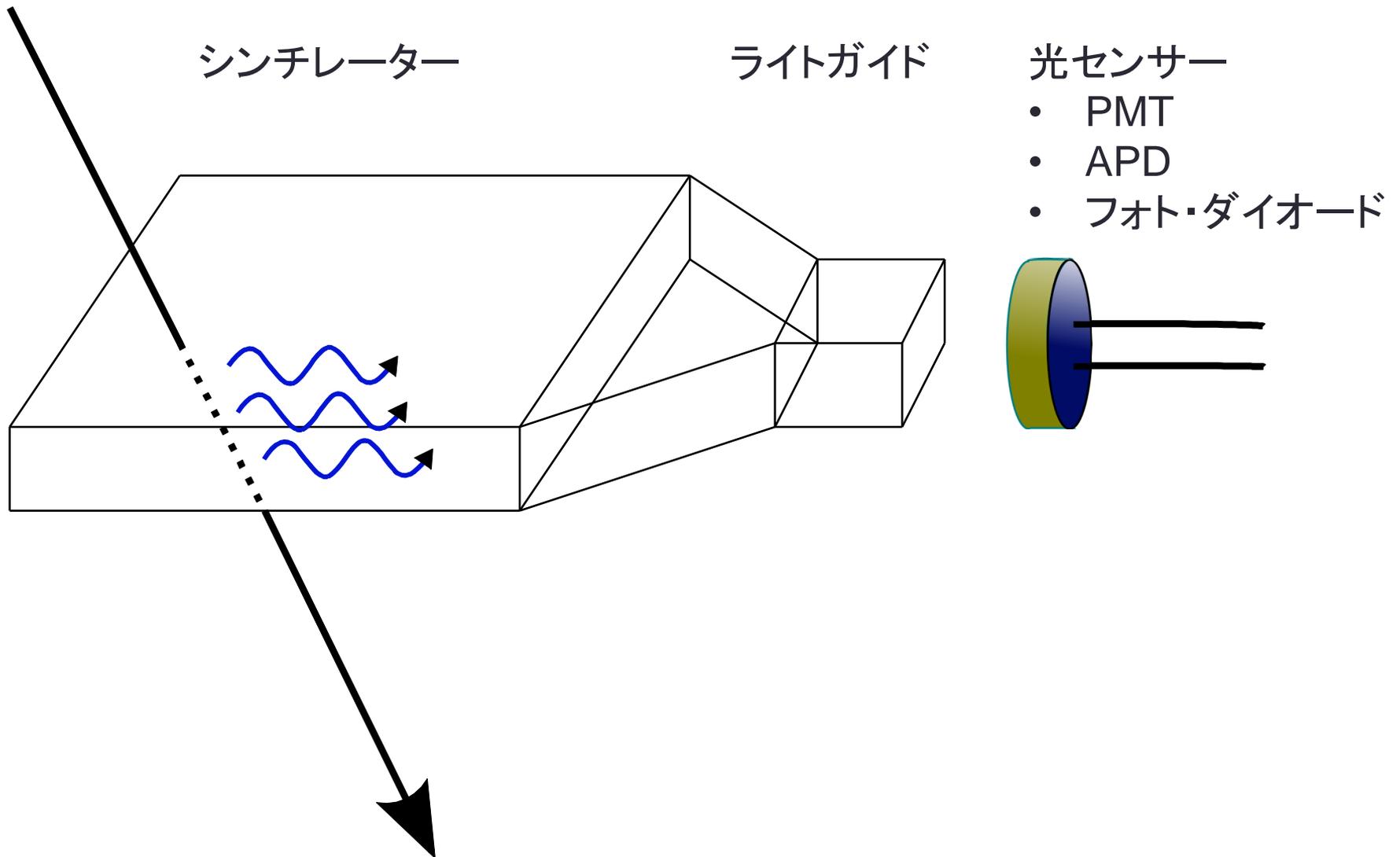
Figure 33.4: Computed electron drift velocity as a function of electric field in several gases at NTP and $B = 0$ [65].

気体の混合比によるドリフト速度

分解能について

- ガス検出器(他の検出器でも同様)で、測定される量は粒子のエネルギー損失に比例する量である
 - 粒子がエネルギーを全て失うのに十分な厚さがあれば、
エネルギー損失=粒子のエネルギー
となるので、エネルギー測定が可能になる
- エネルギー損失(dE/dx)の測定
 - 分子のイオン化(生成される電子・イオン対 N)
 - 電場により電子とイオンをそれぞれ電極に集める
 - その過程で、2次的な衝突、イオン化により電荷量を増幅する(増幅度 A)
 - 観測される電荷量は $Q = eNA$ (実際にはさらに検出効率が掛かる)
- Q の分解能(δQ)
 - 同じ状況で測定を繰り返したとき、どのような結果が得られるか
 - イオン化の過程は量子力学に従い、確率的に起こる($N \pm \delta N$)
 - 増幅度にも誤差があり得る($A \pm \delta A$)
 - δN 、 δA はそれぞれどれくらいか。 δA は難しいが、 $\delta N = \sqrt{N}$
 - 分解能を良くするには N を増やす必要がある
 - イオン化に必要なエネルギーが低いほど有利である

シンチレーターと光検出器

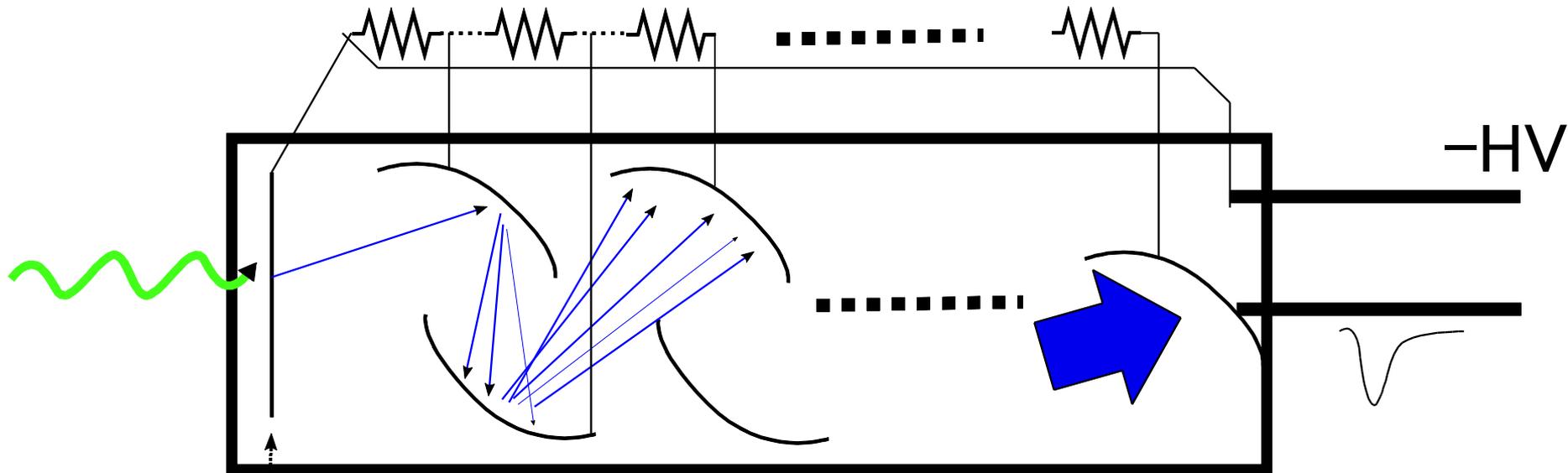


様々な無機シンチレータ

Table 33.4: Properties of several inorganic crystal scintillators. Most of the notation is defined in Sec. 6 of this *Review*.

Parameter:	ρ	MP	X_0^*	R_M^*	dE^*/dx	λ_I^*	τ_{decay}	λ_{max}	n^{\ddagger}	Relative output [†]	Hygroscopic?	$d(\text{LY})/d\text{C}^{\ddagger}$
Units:	g/cm^3	$^{\circ}\text{C}$	cm	cm	MeV/cm	cm	ns	nm				$\%/^{\circ}\text{C}^{\ddagger}$
NaI(Tl)	3.67	651	2.59	4.13	4.8	42.9	245	410	1.85	100	yes	-0.2
BGO	7.13	1050	1.12	2.23	9.0	22.8	300	480	2.15	21	no	-0.9
BaF ₂	4.89	1280	2.03	3.10	6.5	30.7	650 ^s 0.9 ^f	300 ^s 220 ^f	1.50	36 ^s 4.1 ^f	no	-1.9 ^s 0.1 ^f
CsI(Tl)	4.51	621	1.86	3.57	5.6	39.3	1220	550	1.79	165	slight	0.4
CsI(pure)	4.51	621	1.86	3.57	5.6	39.3	30 ^s 6 ^f	420 ^s 310 ^f	1.95	3.6 ^s 1.1 ^f	slight	-1.4
PbWO ₄	8.3	1123	0.89	2.00	10.1	20.7	30 ^s 10 ^f	425 ^s 420 ^f	2.20	0.3 ^s 0.077 ^f	no	-2.5
LSO(Ce)	7.40	2050	1.14	2.07	9.6	20.9	40	402	1.82	85	no	-0.2
LaBr ₃ (Ce)	5.29	788	1.88	2.85	6.9	30.4	20	356	1.9	130	yes	0.2

光電子増倍管

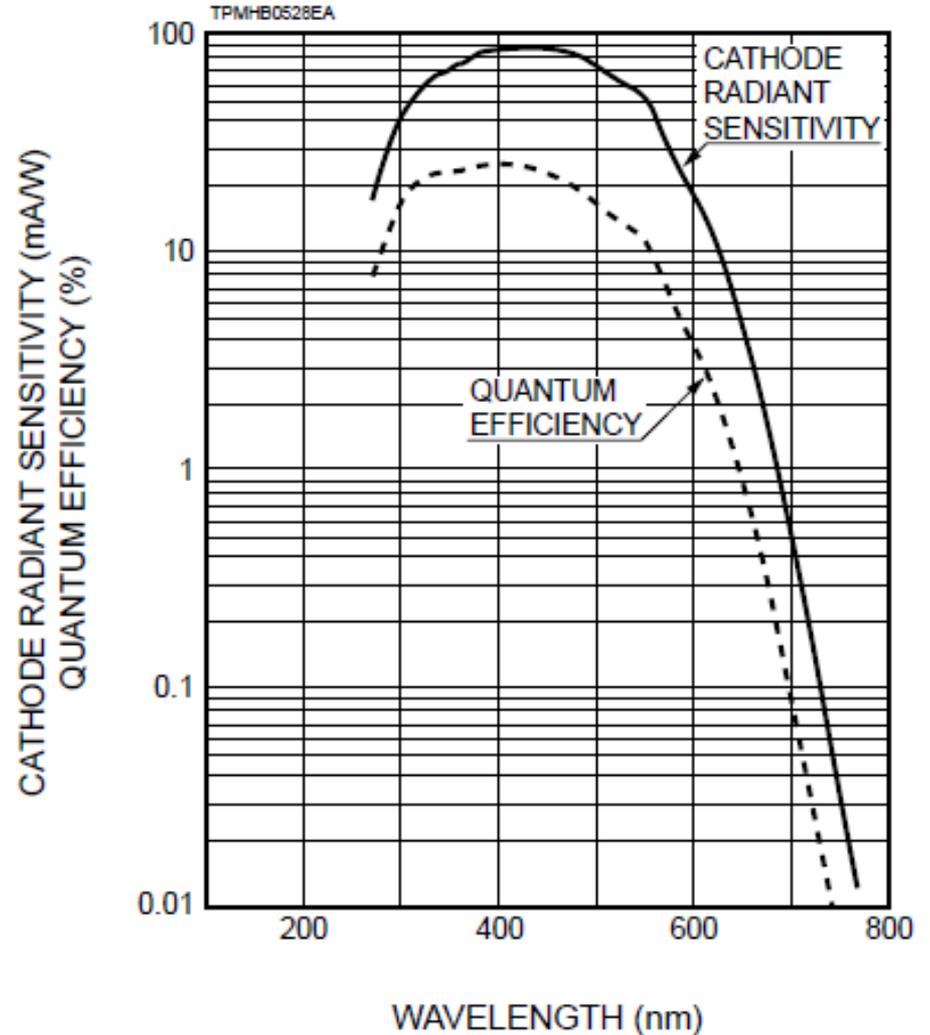


光電効果
(量子効率 $\sim 20\%$)

- 光電効果により光子を電子に変換
- 電子を電場で加速して、電極にぶつけて2次的な電子を生成して、それらをさらに増幅する(A)
 - ゲインのばらつきには初段の増幅が重要
- 光子一個に感度がある
 - $I = \frac{eA}{\Delta T} \sim 1.6 \times 10^{-19} \times 10^7 / 10^{-9} = 1.6 \text{ mA}$

PMTの仕様書より

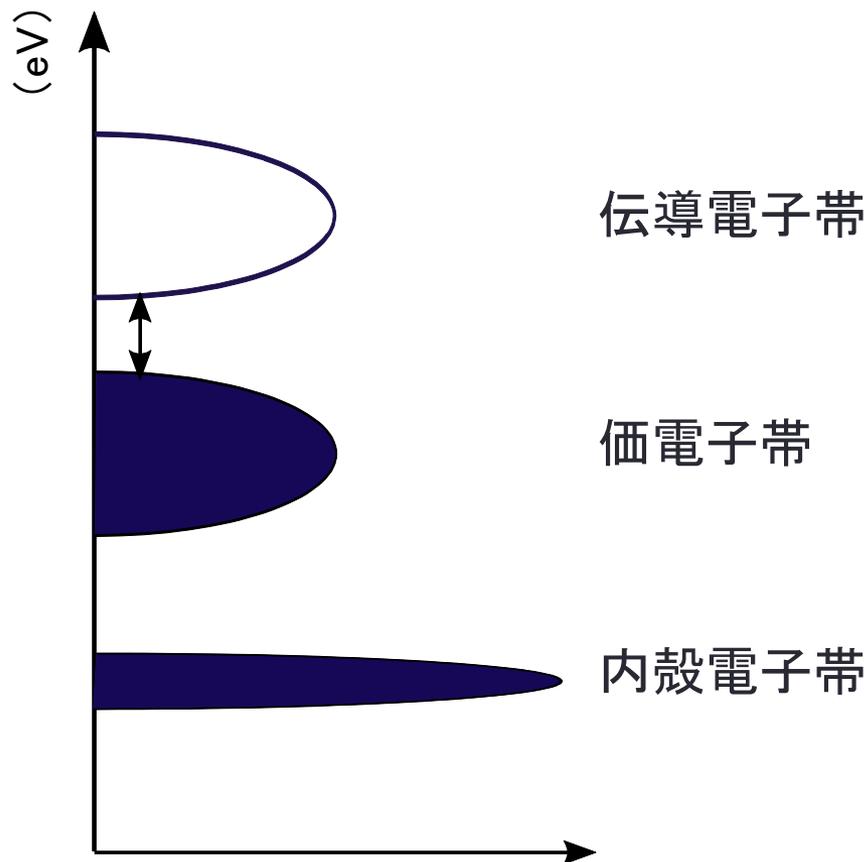
量子効率の波長依存性



半導体検出器

- 電子・正孔対の生成により信号を得る
 - 必要なエネルギーが約3.5 eVと分子のイオン化等に比べて一桁小さい
 - → より多くの電子を生成可能であり統計誤差を抑えられる
- 物質量を抑えられる
 - 厚さ300 μm くらいのシリコンで電子・正孔対を約30,000個生成可能
- 電荷を収集する際、ドリフト距離が短くて済むので**応答が早い**
- 半導体の微細加工技術により、検出器の**微細化が可能**

結晶中の電子状態



基本的な考え方

- Linear Combination of Atomic Orbital (LCAO)
- 固体中の電子の波動関数

$$\Psi = \sum_{n,i} \phi_{n,i}$$

- $\phi_{n,i}$: 原子 n の周りの電子の波動関数の i 番目の固有状態
- 孤立した原子の波動関数の重ね合わせで書ける

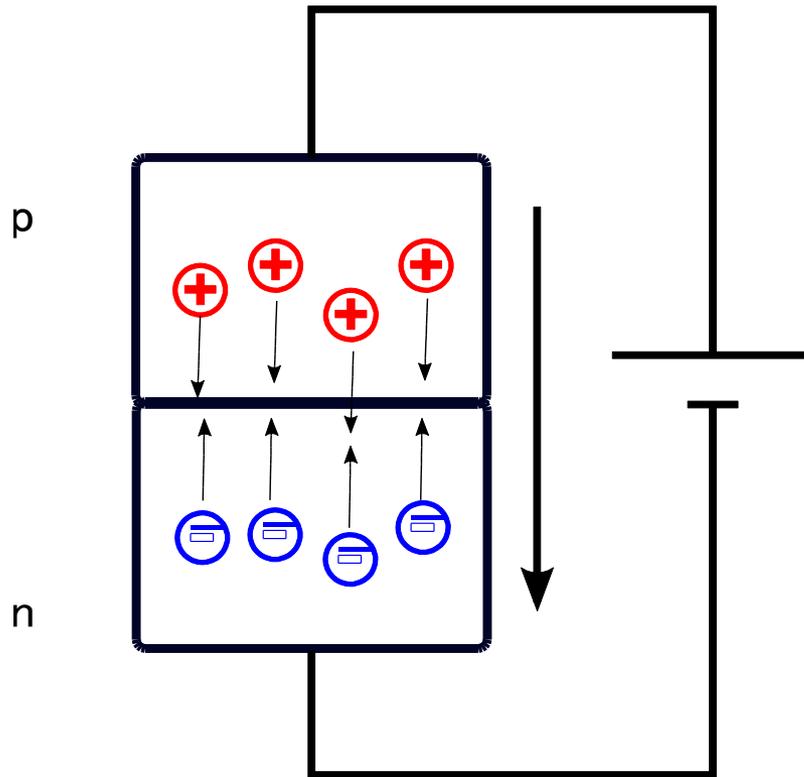
ブロッホの定理

- 周期的なポテンシャル中の波動関数は

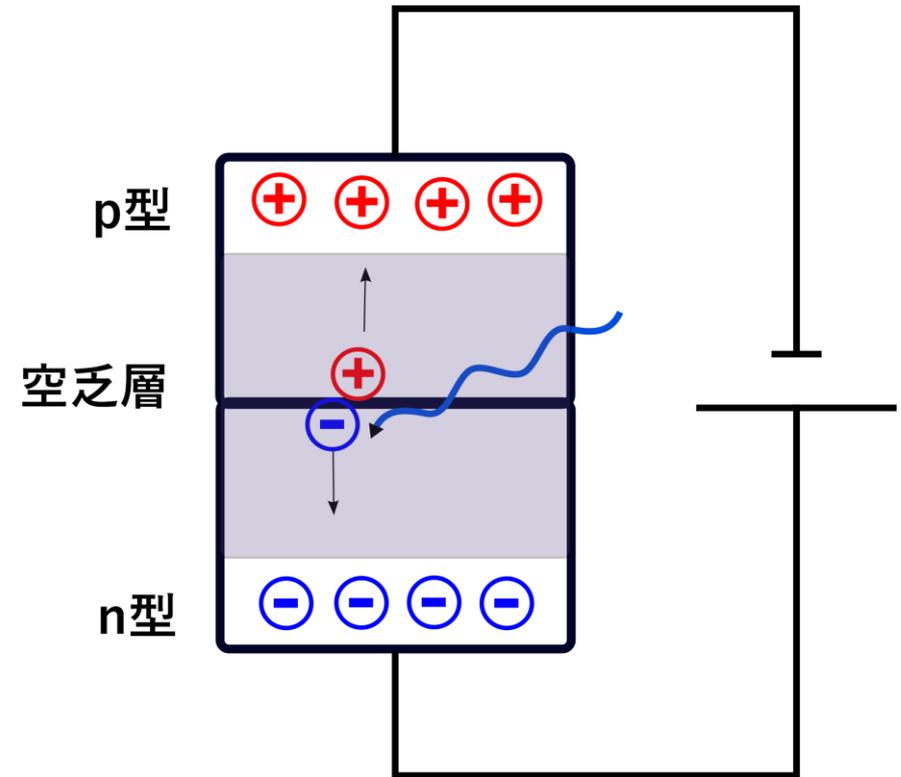
$$\Psi_{\vec{k}}(\vec{r}) = u_{\vec{k}}(\vec{r}) e^{i\vec{k} \cdot \vec{r}}$$

と書け、 $u_{\vec{k}}(\vec{r})$ は周期的な関数である

pn接合

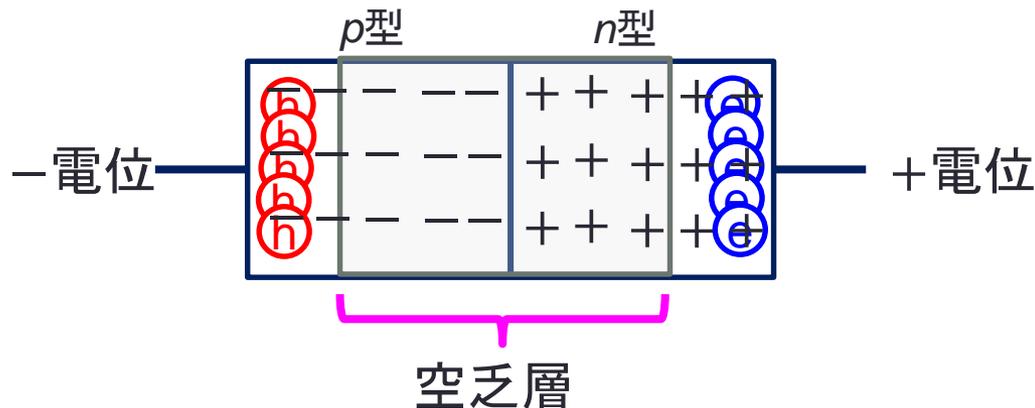


- 普通に電流が流れる



- 電流は流れない
- 電子も正孔も無い領域(空乏層)が生じる
- 空乏層の厚さは電圧に比例する

空乏層と逆バイアス



Si結晶： 4族元素

p型半導体： Si結晶に3族元素を不純物として混ぜたもの

n型半導体： Si結晶に5族元素を不純物として混ぜたもの

- 外部か電位差を与えない場合でも、pn接合付近では拡散により、電子と正孔が結合して消滅する
 - 空乏層を形成
- 空乏層からは電子やホール居なくなったため、原子の電荷だけが残る
 - 空間電荷
- 逆バイアスを掛けることでさらに空乏層を厚くでき、電場を強くできる

- 空乏層の厚さ： $d = \sqrt{\frac{2\varepsilon(V+V_0)}{Ne}}$
- 空乏層内で電子・正孔対が励起されると強い電場でそれぞれが電極に引き寄せられる
- 空乏層内や電流の担い手がないため、実質的に絶縁体である
- センサーとして感度を持つのは空乏層内の領域のみ