

目次

第9章X線検出法	349
9.1 気体電離作用利用の検出器	350
9.1.1 電離箱	351
9.1.2 比例検出器	352
(1) 比例計数管 (0次元)	353
(2) 1次元比例検出器	354
(3) 自己消滅ストリーマモード検出器	356
(4) マルチワイヤー比例検出器	356
9.1.3 GM 計数管	357
9.2 シンチレーション光利用の検出器	357
9.2.1 NaI(Tl) シンチレーション検出器	357
9.2.2 プラスチック・シンチレーション検出器	358
9.2.3 YAP (Ce) シンチレーション検出器	358
9.3 半導体検出器	358
9.3.1 リチウムドリフト型シリコン検出器／高純度ゲルマニウム検出器	358
9.3.2 シリコンドリフト検出器	360
9.3.3 シリコンフォトダイオード検出器	361
(1) PIN フォトダイオード検出器	361
(2) アバランシェ・フォトダイオード検出器	362
9.4 写真作用利用の検出器	362
9.4.1 X線フィルム	362
9.4.2 原子核乾板	363
9.5 光輝尽発光利用の画像検出器：イメージングプレート	364
9.6 撮像デバイスを用いた画像検出器	366
9.6.1 撮像管型検出器	366
(1) X線用ビジコン，サチコン撮像管	366
(2) X線 ハープ撮像管	367
9.6.2 CCD 型検出器	367
(1) FOT-CCD 検出器：縮小型光ファイバーの利用	368
(2) X II-CCD 検出器：X 線イメージインテンシファイアーの利用	369
(3) レンズカップル CCD 検出器：可視光レンズの利用	369
9.7 極低温超伝導検出器	370
9.7.1 超伝導転移端センサー利用の検出器	371
9.7.2 超伝導トンネル接合検出器	372

9.8	新しく開発された検出器	372
9.8.1	ピクセル型・スプリット型半導体検出器	372
	(1) マイクロストリップ半導体検出器	372
	(2) ピクセルアレイ検出器	373
	(3) フラットパネル検出器	374
	(4) CMOS 検出器 (CMOS フラットパネル検出器)	374
	(5) SOI ピクセル検出器	375
9.8.2	マイクロパターン・ガス検出器	375
	(1) マイクロストリップ・ガス検出器	375
	(2) マイクロギャップ・ガス検出器	376
	(3) μ -PIC 検出器	376
9.9	パルス計測技術	377
9.9.1	パルス計数回路のシステム	377
9.9.2	パルス型検出器の特性	379
	(1) 検出効率	379
	(2) エネルギー分解能	380
	(3) 不感時間による数え落とし	380
9.9.3	パルス計数の統計的変動	381
	参考文献	383
	索引	385

第9章

X線検出法

X線の検出の仕方はきわめて多岐にわたる¹⁻³⁾。X線の検出のもっとも簡便な方法は蛍光板によるものである。X線がZnS、CdSなどの蛍光体に光電吸収され、それに伴い発光する蛍光作用が利用される。蛍光板は蛍光体を厚紙などに塗布したもので、X線像を可視化して直接見ることができ、透過像の観測や装置の光軸調整などに使われる。これは実験室を暗くするか、装置に黒布をかぶせれば、X線で蛍光板が発光するのが見られる。蛍光体による発光を利用したX線像の可視化と並んで、X線による黒化による可視化があり、このタイプの検出器としてX線フィルムや原子核乾板が挙げられる。最近、X線フィルムに代わる画像検出器の利用が進んでいるが、X線フィルムを用いる回折カメラには、回折現象を理解するのに役立つという教育的な役目もある。

現在、科学計測で用いられる検出器では、一般に検出されたX線光子がリアルタイムで電気信号に変換され、信号処理される。X線検出器を電気信号の計測方式で分類すると、**パルス型**と**積分型**がある。

パルス型では、時々刻々に飛来するX線光子に対応する電気信号（パルス）を1個1個計測する。積分型では、一定時間に飛来するX線光子によって発生した電気信号を積分し、その積分値がX線強度として計測される。X線光子の入射を電気信号に直接変換する検出媒体として、電離作用を利用できるガスや、電子・正孔対の発生を用いる半導体がある。一方、間接変換として、X線光子を蛍光体でいったん光に変換し、さらにフォトダオオードなどを用いてその光を電気信号に変換する方式、あるいはシンチレータによる発光で光電子を誘起し、増倍管で増幅するなどの方式がある。また、検出器を位置分解の機能でも分けられる。位置分解機能のないのが0次元のポイント検出器で、1次元と2次元の検出器は、X線強度の場所的な分布をそれぞれ線状と面状に記録できる**位置分解**（位置敏感ともいう）**検出器**（position sensitive detector）である。それらの主なものをまとめたのが表9.1である。表には、積分型で2次元検出器であるX線フィルムと原子核乾板を入れてある。

パルス型検出器の長所は、感度が高い、ノイズが微弱である、計数率に対する動作範囲であるダイナミックレンジ（検出器が飽和される信号レベルとノイズレベルの比、つまり測定可能なX線量の範囲）が広く、直線性がよい、エネルギー分解能をもつなどである。しかし、不感時間があり、それが高計数率領域で数え落としを生じ、計数率の限界を与える。比例計数管、シンチレーション検出器、半導体検出器などはパルス型に属する。最近、2次元の位置検出機能をもつ高性能のピクセルアレイ検出器、マイクロストリップ・ガス検出器、 μ -PIC 検出器などがパルス型に加わっている。

一方、積分型検出器の長所は、大強度のX線に対しても数え落としの問題がないことである。また、位置検出機能における位置分解能に優れている。しかし、波高弁別の機能をもたないため、検出器自身がつま暗電流や読み出しノイズによって低いX線量に対する感度が低い、また積算量に上限があるのでダイナミックレンジが制限されるなどの難点がある。古くはX線フィルム、そして現在ではイメージングプレートやCCD型検出器がこの積分型に属し、広く用いられてきた。最近では、X線ハープ撮像管、フラットパネル検出器やCMOS検出器も加わっている。

表 9.1 主なX線検出器の機能による分類

計測方式	検出媒体	位置検出機能		
		0次元	1次元	2次元
パルス型	ガス	比例計数管	1次元比例検出器	マルチワイヤー比例検出器 マイクロストリップ・ガス検出器 マイクロギャップ・ガス検出器 μ -PIC 検出器
	シンチレータ	シンチレーション検出器		
	半導体	Si(Li), 高純度 Ge 検出器 シリコンドリフト検出器 PIN フォトダイオード検出器 アバランシェ・フォトダイ オード検出器	マイクロストリップ半導体 検出器	ピクセルアレイ検出器
積分型	写真乳剤			X線フィルム, 原子核乾板
	輝尽性蛍光体			イメージングプレート
	ガス	電離箱 (イオンチェンバー)		
	蛍光体/半導体			X線撮像管検出器 CCD 型検出器 フラットパネル検出器 CMOS 検出器 SOI ピクセル検出器

なお、高速時分割測定に使われるX線ストリークカメラやX線自由電子レーザーで用いられるマルチポート CCD などは第 18 章で触れる。

9.1 気体電離作用利用の検出器

気体封入管を用いた検出器では、X線が入射したときに気体原子・分子から光電効果により放出される光電子やコンプトン効果により生ずる反跳電子などが行なう電離作用が利用される。気体中に 2 つの電極を置き、一定強度のX線を入射すると、電極間に印加する電圧と電離電流との関係は模式的に図 9.1 のようになる。この曲線の変化の特徴から印加電圧の範囲が5つの部分に分けられる。気体中をX線が通過すると、気体原子・分子を電離し、電子とイオンの対が生ずる。気体原子・分子をイオン化して、1組の電子イオン対をつくるのに要する平均エネルギー、すなわち **W 値** は約 30 eV である。電子とイオンはおおの陽極 (anode) と陰極 (cathode) に向かって移動する。印加電圧の低い**再結合領域**では、生じた電子とイオンの一部は再び結合する。電圧が高くなるとともにその再結合の割合が減少し、電流は直線的に増加する。つぎの**電離箱領域**ではX線の通過によってできる 1 次の電子・イオン対が分かれて全部両電極に集められ、電流は一定値になる。さらに印加電圧を大きくした**比例領域**では、1 次電離で生じた電子が強い電場によって加速されて気体原子・分子を電離する。このような電離がねずみ算的に生じて電子が増殖し、いわゆる**ガス増幅**が起こる。この現象は**電子なだれ** (アバランシェ, avalanche) とよばれる。電極に集められる電子数は 1 次の電子・イオン対の数に比例する。つぎの **GM 領域**では、電子なだれが全体に広がって生じ、ガス増幅の割合がさらに大きくなるので、電極に集められる電子数は 1 次の電子・イオン対

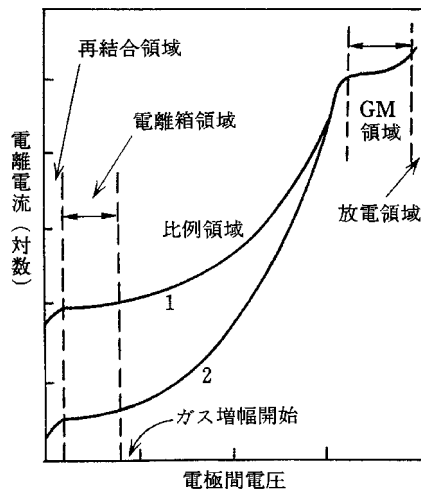


図 9.1 気体計数管における電極間電圧と電離電流の関係 曲線 1 と 2 はX線光子エネルギーが高い場合と低い場合

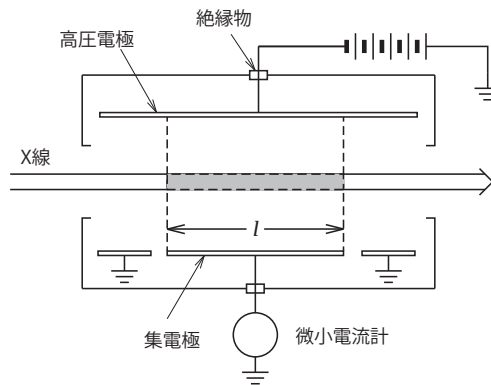


図 9.2 電離箱の構造

の数に無関係に一定になる。印加電圧の増加とともにこの一定の電流値も大きくなる。最後の**放電領域**では連続放電によって大電流が流れる。

9.1.1 電離箱

電離箱 (ionization chamber) はイオン・チェンバーともよばれる。電離作用を利用する検出器のひとつで、図 9.1 の電離箱領域で動作させる。X線が電離箱に入射したときに内部の気体中に生ずる電子・イオン対を平行平板の陽極と陰極の間にかけた電圧によって両極に集め、電離電流を微小電流計によって直接あるいは電流増幅器を通して測定する(図 9.2)。イオンの移動速度は電子のそれに比べてふつう 3 桁以上小さい。よって、すべての電荷を電極に集めるのにミリ秒のオーダーの時間がかかる。気体には自由空気のほか、Ar, N₂, Ar + N₂, Xe, Kr などが 1 気圧のガスフロー型で用いられる。検出効率は非常に低いので、大強度のX線の計測に使用される。放射光X線の入射強度モニターや放射光X線利用の XAFS の測定などに用いられている。

エネルギー E のX線光子 n 個が電離箱に入射したとき、 n は測定される電流 i とつぎの関係がある。

$$n = \frac{W}{Ee} \frac{i}{1 - e^{-\mu l}} \quad (9.1)$$

ここで W は気体の W 値、 e は電子の電荷、 μ は気体の線吸収係数、 l は電極の長さである。いま $l = 5$

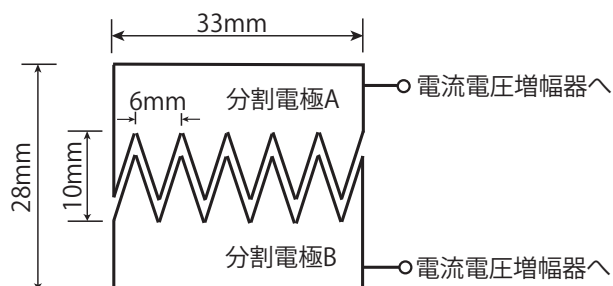


図 9.3 位置分解電離箱 4) バックギャモン型

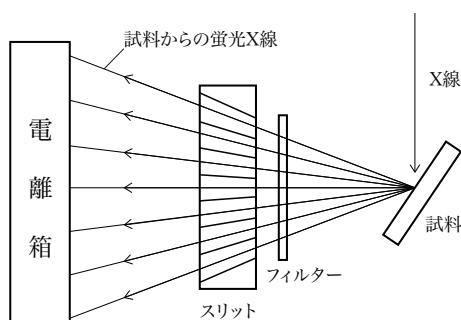


図 9.4 ライトル検出器

cm の空気の電離箱に 8 keV の X 線が入射すると

$$n [\text{photons/sec}] = 4 \times 10^8 i [\text{nA}] \quad (9.2)$$

になる。この場合、電離箱中で吸収される X 線は約 5 % である。1 pA まで測定できる微小電流計を用いれば、 4×10^5 photons/sec 以上の強度の X 線が測定可能である。

(位置分解電離箱)

電離箱に位置分解の機能をもたすことができる^{3,4)}。電離箱の電極の平行平板を 2 枚とも対角線で分割すると (対角線分割型)、両電極の出力 A , B の測定から、 $(A - B)/(A + B)$ の値でビームの中心位置からのずれが分かる。もちろん、 $(A + B)$ の値でビーム強度をモニターできる。さらに両電極をバックギャモン型に分割すれば (図 9.3)、より正確にずれが分かる。

(ライトル検出器)

蛍光 XAFS 用電離箱をライトル (Lytle) 検出器とよぶ⁵⁾。図 9.4 に概念的に示すように、試料への入射 X 線から生ずる蛍光 X 線の発生点を見込むように発散型のソーラスリットを配置して、広い立体角で蛍光 X 線を電離箱によって検出する。また、フィルターも置き、バックグラウンドを低減する。Fe K α 蛍光 X 線の場合には、Fe K β を除去するために Mn フィルターを用いる。

9.1.2 比例検出器

比例検出器 (proportional counter, PC) は 図 9.1 の比例領域で動作させる。

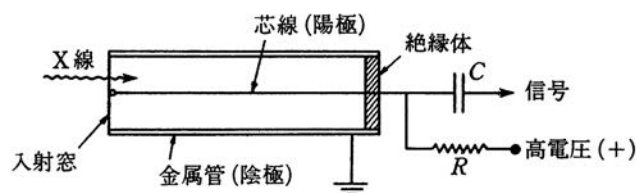


図 9.5 比例計数管の構造

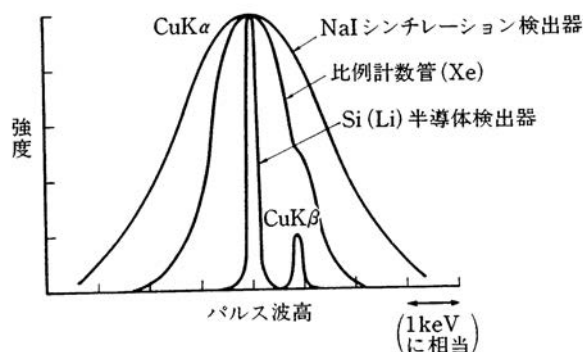


図 9.6 典型的なX線検出器からのパルスの波高分布の比較 CuK線を測定した場合で、計数率はピーク値を一致させてある

(1) 比例計数管（0次元）

0次元の比例検出器である比例計数管は、図 9.5 のように金属円筒（陰極）の中心軸に沿って細いタングステン線（陽極）を張った構造をしている。電極には 1500 ~ 2000 V の電圧が印加される。円筒の端面あるいは側面に窓があり、薄い Be 板や Al 箔が張られている。円筒内部には Ar, Kr, Xe などの希ガスが 1 気圧ぐらいで充填されている。それに少量の CH_4 や CO_2 などの多原子分子ガスやハロゲンガスが後続の電子なだれを防ぐためにクエンチングガス（quenching gas）として入れられている。Ar 90% と CH_4 10% の混合ガスが PR ガスあるいは P-10 ガスとよばれ、よく用いられる。CuK α X線光子（8 keV）は Ar ガス（ $W = 26.4$ eV）中で約 300 個、Xe ガス（ $W = 22.0$ eV）で約 360 個の電子・イオン対を生成する。 W 値はそれぞれのガス固有の値なので、1 次電離によって生ずる電子の数は入射 X 線光子のエネルギーに比例する。それらの電子は陽極芯線のごく近傍（20 ~ 30 μm ）の強い電場からエネルギーを受け、局所的な電子なだれを起こす。この 2 次的な電離によって生ずる電子の数は一定のガス増幅率（ $\sim 10^4$ ）で増えるので、結局、出力パルスの波高は X 線光子のエネルギーに比例する。

エネルギー分解能は 1 次電離で生じた電子イオン対の総数の統計変動、ガス増幅率の変動や芯線の幾何学的条件などで決まる。 $E = 20$ keV に対して $\Delta E = 1 \sim 2$ keV である。図 9.6 のパルス波高分布に他の検出器と比較して示すように、CuK α 線の場合、 $\Delta E/E \sim 20\%$ である。一方、検出効率は、図 9.7 に比較して示すように、X 線に対する気体の阻止能が小さいため、固体検出器の場合より低い。長波長の方で高く（最大で 50 % 以上）、短波長では低くなる傾向がある。充填される希ガスの原子番号が大きいほど阻止能が増大し、短波長での検出効率が高い。Ag や Mo の K α 線に対しては数気圧の Kr ガスが用いられる。0.3 nm よりも長い波長域では計数管の窓による吸収を無視できない。その場合はガスフロー型にする。つまり計数管の窓に Alなどを蒸着して導電性をもたせた厚さ 1 μm ぐらいのポリプロピレン膜などを張る。気密にできないので、気体を絶えず流し、圧力を一定に保つ。なお計数管への X 線入射に際して、芯線の張ってある付近は検出効率が落ちるので注意を要する。先に入射した X 線光子に続く X 線光子が新たに電子なだれを起こしうるまでの時間を不感時間（dead time）といい、約 0.2 μs で、 $10^4 \sim 10^5$ cps（counts per second）の計数率まで数え落としは少ない。ノイズはシンチレーション検出器に比べてかなり少ない。

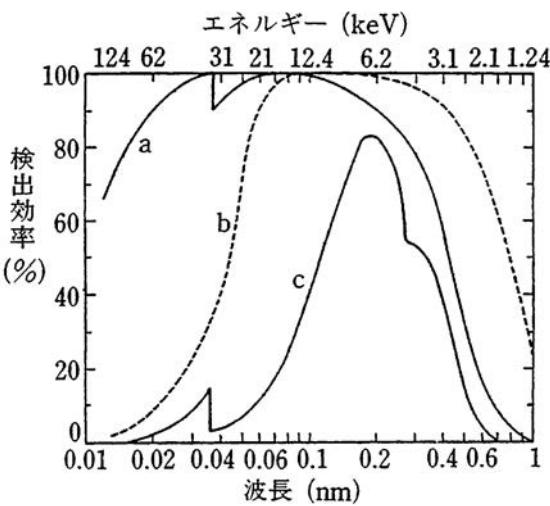


図 9.7 典型的な X 線検出器の検出効率の比較 a: NaI シンチレーション検出器 b: Si(Li) 半導体検出器 c: 比例計数管 (Xe)
検出効率は入射窓の材質と厚さ、検出層の厚さ、充填ガスの種類と気圧などによってかなり変わる。

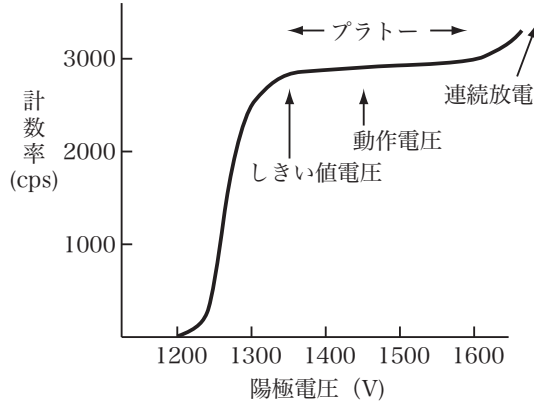


図 9.8 比例計数管のプラトー特性の例

比例計数管では、一定強度の X 線を入射させ、印加電圧を上げてゆくと、計数率がある電圧で急に立ち上がり、その後に計数率がほぼ一定になる領域がある。この領域を**プラトー**（plateau）とよぶ。さらに電圧を上昇させると計数率は急激に増加する（図 9.8）。プラトーでは計数率に対して印加電圧の変動の影響が少ない。使用電圧はプラトーの中心付近あるいは少し低めに選ぶ。計数管としてはプラトーが広く、かつプラトーの傾斜が小さいほどよいが、使用時間が増してくるとプラトーの幅が狭くなり、傾斜も大きくなる。

（2）1 次元比例検出器

位置分解比例検出器は、比例計数管に X 線の入射位置を 1 次元的あるいは 2 次元的に検出する機能をもたせたものである。これは測定時間の大幅な短縮に役立つとともに、時分割測定を容易にし、結晶構造解析、小角散乱、散漫散乱などの実験に利用されている。前述の比例計数管の機能と同様に、入射 X 線によって陽極芯線のごく近傍で局所的な電子なだれが発生し、陽極芯線に負電荷のパルスが生ずる。このときその近くにある陰極の導体上に正の電荷が誘導され、正のパルスが生ずる。その誘導電荷量は電子なだれの生ずる位置を見込む立体角に比例する。この陽極あるいは陰極に生ずるパルス信号を読み出し、位置情報を得る。信号読み出しの方式によって各種の構造の計数管と電子回路がある⁶⁾。

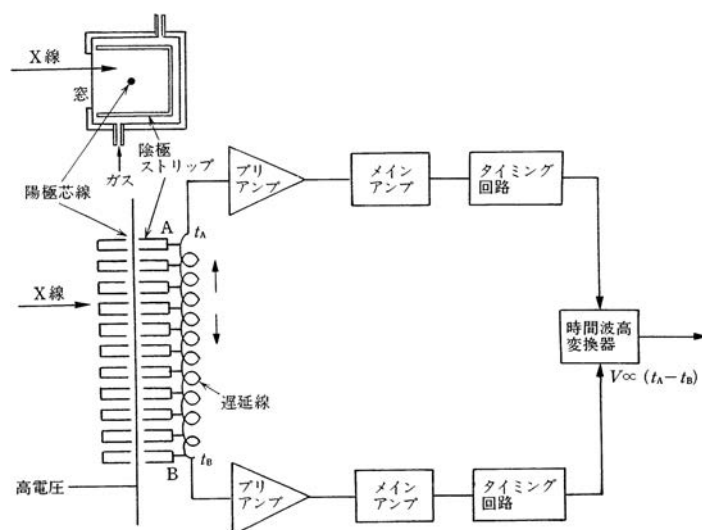


図 9.9 遅延線法の 1 次元位置分解検出器の構造と位置情報の読み出し

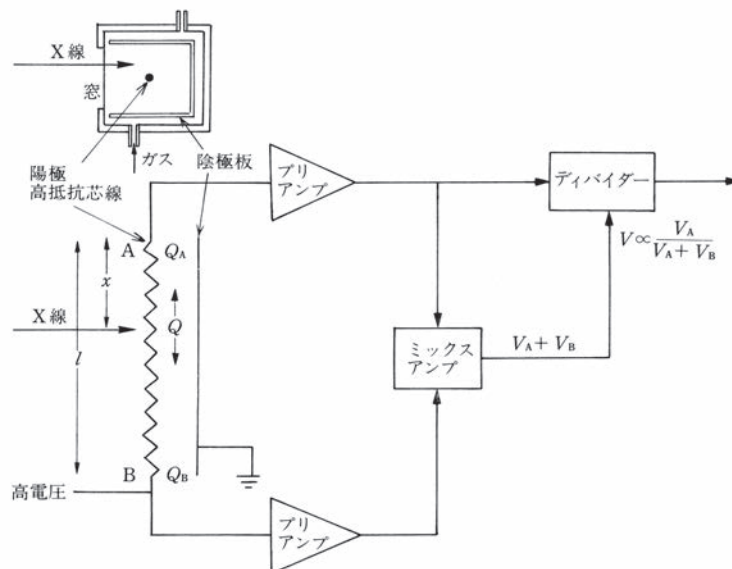
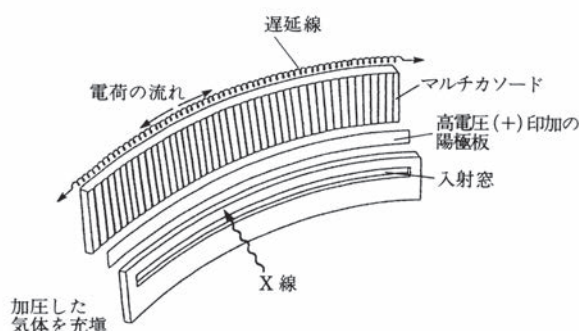


図 9.10 電荷分割法の 1 次元位置分解検出器の構造と位置情報の読み出し

遅延線法の 1 次元比例検出器は、陰極を分割し、遅延線を利用して位置情報を得る。図 9.9 のように陽極線に対向してストリップ状の陰極片が多数、平行に並び、おのおの遅延線の間端子に連結している。ストリップに誘導される電荷は遅延線の両端に向かって伝播し、プリアンプでパルス信号を出力する。両端でのパルス信号の到着時間は伝播距離の差に比例して差がつく。この時間差は時間波高変換器 (time-to-amplitude converter, TAC) によって電圧パルスの波高に変換されたのち、マルチチャンネル波高分析器に入りヒストグラムを与える。結局、 i 番目のストリップの位置を x_i 、誘導電荷を Q_i とすると、入射 X 線の位置は電荷分布の重心 $\sum_i Q_i x_i / \sum_i Q_i$ として求められる。

電荷分割法の 1 次元比例検出器は、陽極あるいは陰極に生じた電荷量を分割して位置情報を得る。1 つは陽極にカーボン被覆の石英線のような高抵抗芯線を用いる方式である。図 9.10 のように陽極芯線にとり込まれる電荷を Q とすれば、芯線の両端 A と B に伝播する電荷は

$$Q_A = Q(l - x)/l, \quad Q_B = Qx/l \quad (9.3)$$

図 9.11 自己消滅ストリーマモード検出器の構造⁷⁾

である。ここで芯線の長さを l ，入射X線の A からの距離を x としている。A と B にあるプリアンプで増幅されて電荷に比例した電圧 V_A と V_B が出力される。さらに演算回路を通して

$$V_A / (V_A + V_B) = (l - x) / l \quad (9.4)$$

からX線の入射位置が得られる。

3 番目は3角カソードを用いる方式である。円筒状の陰極面が斜めにスリットを入れた形で、展開すると2つの3角形になるように分離されている。2つの陰極面に誘起される電荷を Q_A , Q_B とすると、 $(Q_A - Q_B) / (Q_A + Q_B)$ が管の中央からX線の入射点までの距離に比例することから上述と同様に位置情報が求められる。

1 次元比例検出器では、有効長が 5 ～ 10 cm で、位置分解能は 0.1 ～ 0.2 mm のものが、よく用いられる。CuK α 線に対して最高計数率は $\sim 10^4$ cps，検出効率は 40 ～ 80 % である。X 線粉末回折法などには、ローランド円に沿わせた湾曲形状のものが便利である。

(3) 自己消滅ストリーマモード検出器

1 次元の位置分解能をもつ自己消滅ストリーマモード検出器⁷⁾ (self-quenched streamer (SQS) mode detector) は、検出面を湾曲型にするのに適しており、X 線粉末回折法などに利用される。図 9.11 のように円筒形に曲げた金属薄板を陽極に用いる。電離をクエンチする作用の大きい気体を加圧して流し、電極間に比例領域を超える高い電圧を印加すると、X 線の入射により陽極板の強い電場勾配のついたエッジ付近に空間電荷の細長い流れ（ストリーマ）が形成される。それにより遅延線に接続されたストリップ状のマルチカソード上に誘導電荷が生ずる。したがって (2) と同様に遅延線法に基づいてX線の入射位置が決定される。このストリーマモードで動作させることにより、比例計数管に比べて電荷量が 10 倍になるので、S/N 比がよく、高検出効率であり、またストリーマの幅が狭いので高角度分解能である。実際、検出有効角度範囲 120° (角度分解能 0.08°)，円筒曲率半径 25 cm，有効長 6.5 cm のものが用いられている。1 チャンネルあたりの最大計数率は 500 cps で、全チャンネルでは 10^5 cps ぐらいまで計数可能である。充填ガスは CuK α 線に対して Ar(85 %) + C₂H₆(15 %)，MoK α 線に対して Kr(85 %) + C₂H₆(15 %) である。ガス圧力は 6 気圧まで、高電圧は 10 kV までかけられる。

(4) マルチワイヤー比例検出器

多数の近似的に独立した比例計数管が 2 次元的に配列したような機能をもつ検出器として、1968 年からシャルパク (G.Charpak) たちがマルチワイヤー比例検出器 (multiwire proportional counter, MWPC) の開発を進めた⁸⁾。これにはいろいろな電極構造と信号読み出し方式がある⁹⁾。多数の平行な金属線からなる陽極、陰極やグリッドなどがガスを充填した箱の中に配置されている。空間分解能は、point spread

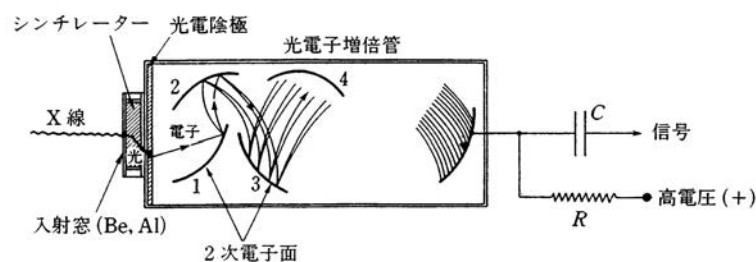


図 9.12 シンチレーション検出器の構造

function (点像が系を通過したときの広がりを表わす関数) の $FWHM$ で 0.6 mm 程度である。

9.1.3 GM 計数管

GM 計数管 (Geiger-Müller (ガイガー・ミュラー) counter) は図 9.1 の GM 領域で動作する。比例計数管 (0 次元) と同じ 2 極管の構造をもつ。Ar などの希ガスで満たされており、それにクエンチングガスが少量加えられていて放電が連続的に起こるのを抑制する働きをしている。円筒の一端の窓を通して入射した X 線光子は、気体を電離する。生じた電子は電場によって非常に大きな加速を受け、芯線の陽極に到達するまでの間に 2 次的な電子・イオン対をなだれ的に生成する。電子なだれは反応で生じた紫外線による光電効果も加わって管全体に広がり、1 次電離でつくられた電子数とは無関係に一定の大きさのパルスになる。したがって GM 計数管は波長に対する選別性をもたない。ガス増幅率が $10^6 \sim 10^8$ と非常に大きいので出力パルスは数 V になり、計数回路は比較的簡単ですむ。

なだれ現象のあと、イオンの空間電荷が円筒の陰極に向かって移動する。この間、つぎに入射する X 線光子によって再びなだれ現象を起こすことはできない。その不感時間は $50 \sim 300 \mu\text{s}$ である。このため入射 X 線が 1000 cps 以上では数え落としが目立つ。比例計数管と同様にプラトー特性をもつ。GM 計数管はサーベイメーターとして使われることが多い。

9.2 シンチレーション光利用の検出器

9.2.1 NaI(Tl) シンチレーション検出器

X 線によって物質が発光するシンチレーション光を用いた**シンチレーション検出器** (scintillation counter, SC) で、発光物質のシンチレーター (scintillator) と光電子増倍管 (photomultiplier tube) からなっている (図 9.12)。シンチレーターには NaI 単結晶がもっともよく使われる。タリウム (Tl) が微量に添加され、発光中心として働く。X 線はシンチレーターに吸収され、シンチレーション光に変換される。その光子数は X 線光子のエネルギーに比例している。つぎに光子は光電子増倍管の光陰極面 (photocathode) で電子に変換され、それに続く多段の 2 次電子面で電子数が増殖され (利得 $10^5 \sim 10^7$)、出力パルスをつくる。光電子増倍管の陽極と陰極の間には $700 \sim 1000 \text{ V}$ の電圧が印加される。電子増殖をすることのできる光電子 1 個をつくるのに、X 線エネルギーのうちふつう数 100 eV を費やす。例えば、 $\text{CuK}\alpha$ X 線光子 (8 keV) は NaI (Tl) 中で平均波長 410 nm (3 eV) の光子を約 270 個つくるが (変換効率約 10 %), 光電子増倍管に入る効率がわるく (約 10 %) そのうち約 25 個だけが有効である。

エネルギー分解能はこの有効な光子数の統計変動と光電子増倍管の利得の変動などで決まる。 $E = 20 \text{ keV}$ に対して $\Delta E = 6 \text{ keV}$ ぐらいである。 $\text{CuK}\alpha$ 線の場合、 $\Delta E/E \sim 40 \%$ である (図 9.6)。検出効率は $0.02 \sim 0.2 \text{ nm}$ の広い波長範囲で高いが、シンチレーター組成元素のヨウ素の吸収端で急激な変化がある (図 9.7)。光電子増倍管の暗電流のため 0.3 nm 近くから長波長でノイズが多くなる。蛍光の減衰時間は

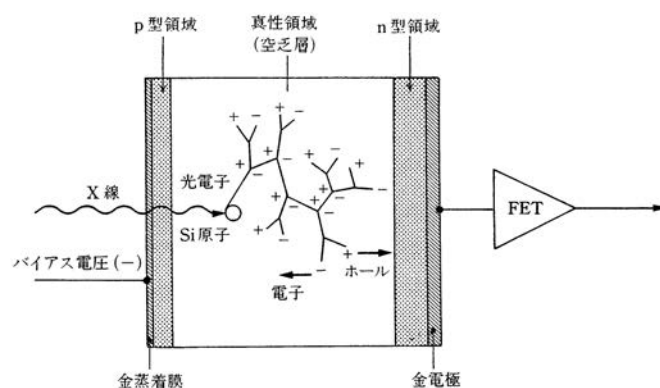


図 9.13 Si(Li) 半導体検出器の構造

約 $0.2 \mu\text{s}$ で、これがほぼ不感時間に相当し、比例計数管の場合と同程度である。

9.2.2 プラスチック・シンチレーション検出器

高速計数用にはプラスチック・シンチレーター（pilot U, NE101 など）や BaF_2 のシンチレーターを高速光電子増倍管と組み合わせて用いる。この場合、エネルギー分解能が低く、ノイズも大きい。シンチレーターの蛍光の減衰時間が 1 ns に近いので、ナノ秒オーダーでの高時間分解測定ができる。シンチレーターからの蛍光を2個の光電子増倍管で受ければ、コインシデンス法によりノイズを減らすことができる。これらの高速シンチレーション検出器は放射光X線の核共鳴散乱における時間スペクトル測定などに用いられている。

9.2.3 YAP (Ce) シンチレーション検出器

YAP とよばれる Y と Al の複合酸化物 YAlO_3 （ペロブスカイト型構造）に Ce をドープした YAP(Ce) シンチレーターは、 NaI(Tl) と比較すると際立った特性をもっている。両者の密度 (g/cm^3) はそれぞれ 5.35 と 3.67 で、YAP(Ce) は高密度である。YAP(Ce) の発光効率は NaI(Tl) の 40 % で、少し落ちる。発光減衰時間は 25 ns と 230 ns で、YAP(Ce) が約 1 桁短い。潮解性がないので、ベリリウム窓は必要ない。このような特性のおかげで、 100 keV 近傍の高エネルギーX線を効率よく検出できる。また、 $10^5 \sim 10^6$ カウント/s の高計数率を少ない数え落としで計数でき（ 84 ns の不感時間が得られている）、時分割測定にも適している。

YAP はさらに高エネルギー対応の2次元検出器として使われている。これは $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ （奥行き）の YAP 素子を $128 \text{ 個} \times 128 \text{ 個}$ 、2次元に配列し（有感領域の面積は $128 \text{ mm} \times 128 \text{ mm}$ ）、それに各々 1 mm 角の波長変換光ファイバーを接続し、さらに光電子増倍管で受ける形がとられている¹⁰⁾。

9.3 半導体検出器

9.3.1 リチウムドリフト型シリコン検出器／高純度ゲルマニウム検出器

半導体検出器（semiconductor detector）は日本では SSD（solid state detector）ともよばれる。その機能は電離箱のそれに類似している。電離箱は前述のように入射X線によって気体中に電子・イオン対を生成させ、その電子とイオンをそれぞれ陽極と陰極に集めて信号とする。それに対して、半導体検出器は図 9.13 のように半導体中に電荷のキャリアの存在しない**空乏層**（depletion region）をもつ。空乏層は絶縁性

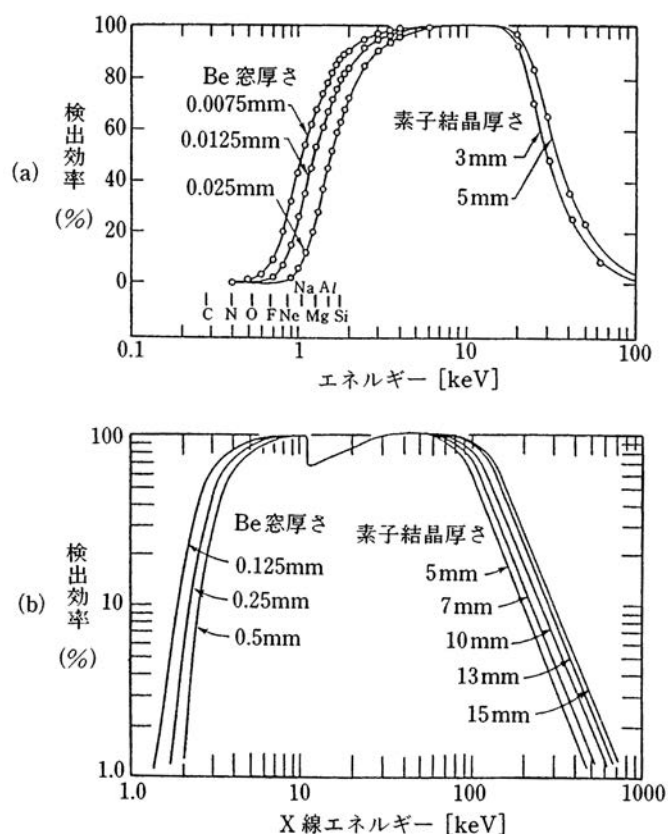


図 9.14 (a) Si(Li) 半導体検出器と (b) Ge(Hp) 半導体検出器の検出効率¹¹⁾ 検出率は、低エネルギー側では Be 窓の厚さに、高エネルギー側では素子結晶の厚さに依存する。

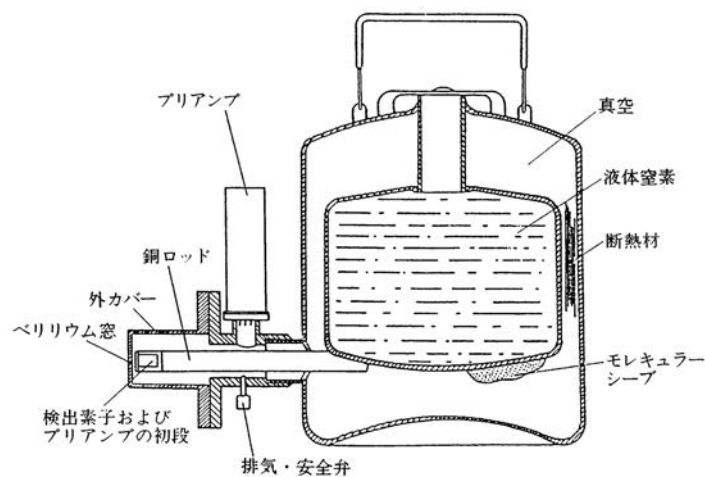


図 9.15 半導体検出器の液体窒素クライオスタットとの組み合わせ¹²⁾

がよく、強い電場をかけることができる。そこに入射した X 線が電子と正孔の対を生成する。その電子と正孔は印加電圧によりそれぞれ陽極と陰極に掃引され、出力電荷パルスを発生する。

半導体検出器の素材として、主として Si と Ge が用いられる。電子の移動速度は正孔のその数倍である。検出器の時間分解能は空乏層の厚さを電荷キャリアが移動する時間で決まるので、数 mm の厚さの場合、100 ns のオーダーである。X 線光子のエネルギーに比例した数の電子・正孔対が生ずるが、1 組の電

子・正孔対をつくるのに要する平均のエネルギー (ε) は Si の場合で 3.76 eV, Ge の場合で 2.96 eV である。 ε は気体の W 値の 1/10 程度で, 生成されるキャリア数が 10 倍ぐらいあるので, 半導体検出器のエネルギー分解能は格段によい。

X線や γ 線の検出には, 空乏層が厚くとれ, 検出効率やエネルギー分解能のよい**リチウムドリフト型シリコン** (Si(Li), Li drift type) **検出器**や**高純度ゲルマニウム** (Ge(Hp), intrinsic type) **検出器**がよく使用される。

Si(Li) 検出器では, 空乏層が 5 mm ぐらいの厚さのものまで作られている (図 9.13)。Li は半導体中で容易に電離する n 型の不純物 (ドナー原子) である。これを p 型 Si の表面から熱拡散させて np 接合をつくる。つぎに温度を上げ, 逆バイアス電圧を加えて Li^+ を p 型層に移動 (ドリフト) させる。その際, p 型不純物と n 型不純物の濃度が等しくなると, Li からの電子がアクセプター原子に捕捉されてしまう。この補償により高抵抗の空乏層が形成される。これはみかけ上**真性** (intrinsic, 略して i) **領域**であり, 全体として n^+-i-p の構造となる。一方, Ge(Hp) 検出器では, Li をドリフトしなくても本来の真性領域が実現している。Eleven nine から twelve nine の高純度 (hyperpure) Ge により作られている。

Si(Li) 検出器と Ge(Hp) 検出器はいずれもエネルギー分解能が ^{13}Fe からの $\text{MnK}\alpha$ 線 (5.90 keV) に対して $\Delta E = 160$ eV ぐらいで, $\Delta E/E \approx 0.03$ である。半導体検出器のエネルギー分解能は, 原子番号が隣りあった元素からの $\text{K}\alpha$ 線を分離するのに十分であり, これを利用して蛍光 X 線による元素分析 (蛍光 X 線分析) ができる。X 線のスペクトルを一度に分析できるので, 結晶分光器を用いて, 結晶を回転しながら分析する場合に比べ, エネルギー分解能は低い, データ収集の効率はよい。図 9.14 に示すように, Si(Li) 検出器では検出効率は 30 keV ぐらいより低エネルギー側でよく, 5 ~ 20 keV では 100 % に近い。軟 X 線に対しては, 検出効率を上げるために検出器の窓に特に薄くしたベリリウム板やダイヤモンドフィルムが用いられ, また窓材なしの場合もある。Ge(Hp) 検出器の場合, 検出効率は高エネルギー X 線や γ 線に対してもよい。なお Ge K 吸収端 (11.01 keV) による鋸歯状の落ち込みがあるので注意を要する。検出器の不感時間はエネルギー分解能のよい条件のもとでは長く, 数 10 μs である。またこの検出器と組み合わせて用いるマルチチャンネル分析器の AD 変換の時間に同程度かかる。したがって計数率は 10^4 cps 以下に抑える必要がある。しかし, エネルギー分解能を落とせば不感時間が短くなり, 計数率を高めることができる。検出器使用時の熱雑音を減らすため, 図 9.15 のように検出素子を液体窒素 (77 K) のクライオスタットからのびた銅ロッドの先端に接触させ, 冷却する。前置増幅器の初段 FET も同時に冷却する。

(1 次元高純度ゲルマニウム検出器)

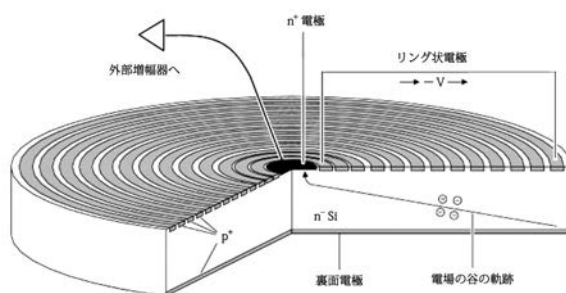
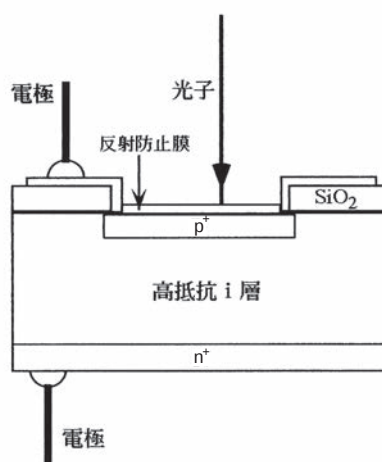
この検出器¹⁴⁾ は, 高純度 Ge 結晶板 (55.5 mm $\times$ 50.5 mm $\times$ 6 mm) 表面に 128 のマイクロストリップ (長さ 5 mm, ピッチ 350 μm) をもっており, 液体窒素で冷却される。各々に独立した回路が付属する。この検出器はコンプトン散乱の測定に用いられている。

(CdTe 半導体検出器)

半導体検出器用の素材として CdTe も用いられる。これは 60 keV ~ 100 keV で検出効率が高く, 室温で使用できる利点をもっており, コンプトン散乱の測定などに使われる。

9.3.2 シリコンドリフト検出器

シリコンドリフト検出器 (silicon drift detector, SDD) は, 1984 年に考案された独特な構造の検出器で, 優れた特性をもつ³⁾。これは図 9.16 に示したような構造をもち, 高純度 n 型シリコンに, 下面の入射部となる広い p 電極と上面の中央に小さな n 電極があり, その n 電極を同心円状に多くの p 型ドリフト電極が取り囲んでいる。素子の両面からバイアスをかけると, 図中の電場の谷の軌跡が示すように, 電場の

図 9.16 シリコンドリフト検出器の素子の断面図¹⁵⁾図 9.17 PIN フォトダイオード検出器の構造¹⁸⁾

谷が中心部の陽極に向かって生成される。入射X線によって発生した電子はその電場に沿ってドリフトされ、アノードに収集される。一方の電極を小さくすることによって静電容量が小さくなるので、低雑音で高速な信号を得ることができ、 10^6 cps 以上の高計数率の測定が可能である。しかもペルチェ素子による冷却 ($\sim -20^\circ\text{C}$) で Si(Li) 検出器のエネルギー分解能に近い値をもつ^{16, 17)}。したがって、卓上型や可搬型のエネルギー分散型蛍光 X 線分析装置などに便利に使われている。

9.3.3 シリコンフォトダイオード検出器

フォトダイオード検出器は主として pn 接合型と pin 型がある。pn 接合型は真空紫外線から軟 X 線の検出器として用いられる。pin 型についてはつぎの (1) と (2) で述べる。

(1) PIN フォトダイオード検出器

PIN フォトダイオード検出器は高抵抗率の真性 (intrinsic) 層が p 層と n 層に挟まれた $p^+ - i - n^+$ 構造をもっている¹⁸⁾(図 9.17)。有感層の厚さが数 $100\ \mu\text{m}$ と薄いため、X線の検出効率はやや低い、時間応答は数 ns と速い。検出器自身に増幅作用がないために信号パルスをノイズパルスからきれいに分離するのはむずかしいが、ゼロバイアスの電流では大強度のX線に対してよい比例関係を示す。したがって放射光のフラックスモニターとして電離箱のように利用できる。この場合、放射光ビームにカプトン膜などを差し込み、そこからの散乱線を測ればよい。また時分割測定において放射光入射のタイミングをとったり、X線光学系のセッティングをする際にも便利である。コンパクトで、廉価なのがよい。

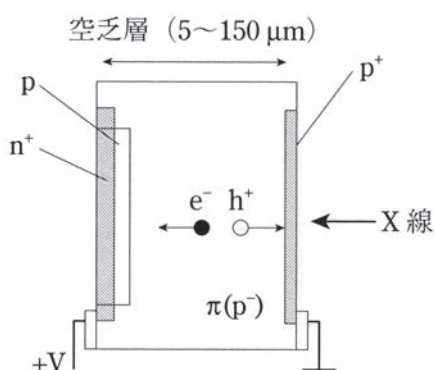


図9.18 アバランシェ・フォトダイオード検出器（リーチスルー型）の構造²⁾ π 層はp型不純物濃度の低い領域を表わす。異常に高濃度の不純物をもつ薄い層を、例えば n^+ 、 p^- などで表わし、電極に使うことがある。

（2）アバランシェ・フォトダイオード検出器

シリコン製のアバランシェ・フォトダイオード（avalanche photo-diode, APD）検出器はナノ秒領域の高速現象の計測に用いられる¹⁹⁻²¹⁾。図9.18で p^+n 間に逆バイアス電圧が印加されると、pn接合層に高い電界が生ずる。印加電圧が増すと、空乏層はp型不純物濃度の低い π 層全域に広がる。X線が空乏層に入射すると電子・正孔対が生成される。その電子がpn接合層に向かって加速され、さらに電子・正孔対をつくり、次々にその数をなだれのように増やす。この増幅作用（増幅率10～100）により、信号パルスを高いS/N比で取り出すことができる。電子が増幅領域を通過する時間はごく短く、パルスの立ち下がり時間は2 ns以下になる。空乏層の厚さが薄い（ $\sim 100 \mu\text{m}$ ）ので、検出効率が低いのが難点である。S2384（浜松ホトニクス）のAPDでは、放射光X線（14.4 keV）による^{22)Fe}核共鳴散乱の時間スペクトルの測定で0.3 nsの高時間分解能が得られている。

9.4 写真作用利用の検出器

9.4.1 X線フィルム

X線フィルムは写真作用、すなわち写真乳剤の黒化作用を利用する。写真乳剤中には臭化銀（AgBr）の結晶粒が含まれている。X線が入射すると臭化銀粒子中で光電効果やコンプトン効果などにより電子が放出される。その電子の電離作用によって現像核がつくられる。現像核のある臭化銀粒子は現像することによって粒子全体が黒化する。

X線フィルムの感度はX線の波長によって大きく変わる。波長が長くなると、吸収が大きくなるので、写真作用も強くなる傾向がある。また乳剤中の臭化銀のAgとBrのK吸収端、0.0486 nmと0.0920 nmの波長に対して感度が不連続となり、長波長側で低く、短波長側で高い鋸歯状的な変化を示す。これらの波長付近のエネルギーをもつ連続X線を用いる場合の強度測定では注意を要する。

使用される工業用X線フィルムにはフジ、コダック社製などがある。フジの場合²³⁾、X線感度の高い順にいくつかを並べると、IX150, IX100, IX80となり、軟X線用にはIXFRがある。IX150の臭化銀結晶の粒子径は数 μm である。一般に臭化銀結晶粒子のサイズが大きくなると、X線感度は高くなるが、解像度は低下する。ふつう回折写真には高感度のフィルムを使うが、精密な測定には高解像度のものを使う。露光時間を短縮するため、乳剤はフィルムベース（厚さ $\sim 0.2 \text{ mm}$ ）の両面に十数 μm の厚さで塗っており、表と裏の区別はない。X線がフィルムに斜めに入射すると、像が表と裏でずれてビーム断面よりも大きく見え、細い線の場合は二重に見えるので注意を要する。

フィルムの特性曲線は、図9.19のように現像銀粒子の光学的な写真濃度（あるいは黒化度） D とX線の

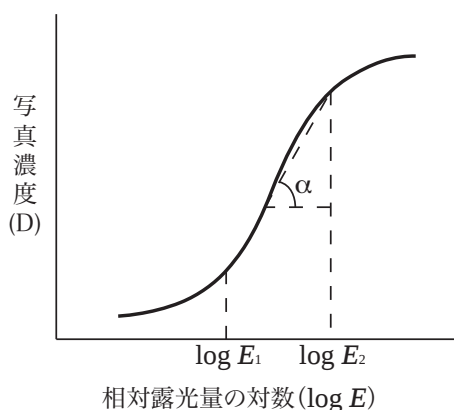


図 9.19 X線フィルムの特性曲線

露光量 E の対数の間で成り立つ関係で示される。 E が増すに従い、 D の傾きはゆるくなり、飽和する傾向をもつ。写真濃度はフォトメーター（デンシトメーター）を用いて測られる。可視光を現像後の黒化したフィルムに入射したとき、入射光の強さを L_0 、透過光の強さを L とすると、写真濃度は

$$D = \log_{10} \frac{L_0}{L} \quad (9.5)$$

で定義される。例えば、写真濃度 1 と 2 は、それぞれ入射光の 10% と 1% が透過できることを意味する。図 9.19 で露光量が E_1 から E_2 まで増すときに、写真濃度はほぼ直線的に増加する。その勾配を α とすれば、

$$\gamma = \tan \alpha \quad (9.6)$$

で表わされる γ は、**フィルムのガンマ**とよばれる。ガンマの大きいフィルムほど、白黒のコントラストがはっきりして、硬調になる。実際の X 線フィルムのダイナミックレンジは 2.5 桁程度、直線域は 1.5 桁程度である。なお、X 線フィルムのノイズレベルは高いので、微弱な X 線強度の測定には適さない。

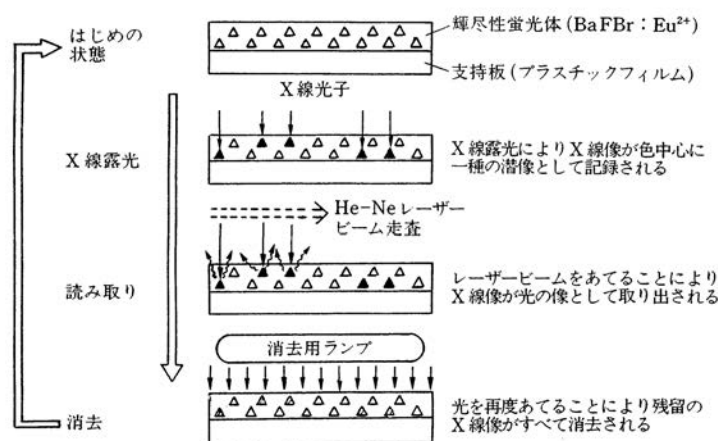
フィルムに強度一定の X 線ビームをあて、露光時間を順次増してゆき、それらの写真濃度を測れば、フィルムの特性曲線が得られる。フィルムを何枚も重ねて X 線に露光すると、各フィルムの露光量の対数が一定値ずつ異なることになり、特性曲線の横軸の対応する点は等間隔で並ぶ。このようにして得られる特性曲線の直線部分を使えば、写真濃度から X 線の露光量が直ちに分かる。さらに露光量は X 線強度と露光時間の積に等しいという相反則（reciprocity law）が成り立つので、X 線強度の相対値を決めることができる。このような方法を**写真測光法**（フォトメトリー）という。

9.4.2 原子核乾板

高エネルギー物理実験で粒子の飛跡の観測に用いられる**原子核乾板**（nuclear plate）は、X 線フィルムに比べて乳剤中の臭化銀結晶の粒子径が小さく、高分解能の X 線像（数 μm 以下）が得られるので、X 線トポグラフィなどに使われる。イルフォード（Ilford）社の原子核乾板 L4 の粒子径は $0.2 \mu\text{m}$ である。乳剤はガラス板あるいはプラスチック板に 25, 50, $100 \mu\text{m}$ などの厚さで塗られているが、ふつう $50 \mu\text{m}$ のものが使われる。微粒子で X 線感度が低いことを乳剤膜の厚さである程度補っているが、膜が厚くなると乾板に X 線を垂直に入れる条件が厳しくなる。

(ガフクロミックフィルム)

放射光 X 線の大線量照射を評価するのに、ガフクロミックフィルム（GAFCHROMIC Film）が用いられる。これは高分子（ジアセチレンの一種）からなり、照射により重合して、無色透明なものが、青に着色す

図 9.20 イメージングプレートによる撮像手順²⁷⁾

る。加速器近傍の機器への放射線損傷対策に役立っている。

9.5 光輝尽発光利用の画像検出器：イメージングプレート

イメージングプレート (imaging plate, IP) は高感度の積分型 2 次元検出器で、光輝尽発光 (photostimulated luminescence) 現象を利用している。1980 年代前半に富士フィルム (株) によって医療画像診断用としてはじめ開発され²⁴⁾、後半に X 線回折・散乱実験の分野に導入されるようになった^{25, 26)}。

光輝尽発光とは、輝尽性蛍光体に X 線のエネルギーが蓄積されたあと、その物質に発光波長より長波長の光を照射すると、蓄積量に比例した蛍光を発するものである。イメージングプレートでは、このメモリー作用をもつ輝尽性蛍光体 (BaFBr:Eu^{2+}) の微結晶が柔軟なプラスチックフィルム上に塗布されている。X 線が輝尽性蛍光体に吸収されると、電子と正孔が生ずる。正孔は Eu^{2+} と結合して Eu^{3+} になる。電子は蛍光体結晶中にある Br 空格子に捕えられて、F センターとよばれる準安定な色中心を形成する。この色中心の半減期は 12 時間以上ある。蛍光体に可視光をあてると色中心が消失する。その際、色中心から放出される電子が Eu^{3+} と再結合して Eu^{2+} の励起状態になり、ここで青色の蛍光 (波長 390 nm, 発光寿命 0.8 μs) が放射される。その強度は X 線強度に比例している。

図 9.20 と図 9.21 に示すように、遮光したイメージングプレートに X 線画像が記録されたあと、X 線潜像の読み取りは、励起用光源である He-Ne レーザー光 (波長 633 nm) の収束ビームで、イメージングプレート上を 2 次元的に走査することにより行なわれる。蛍光強度は光電子増倍管で測定され、その出力は対数アンプで増幅される。さらに AD 変換により数値化されたのちコンピューターで画像が再構成される。読み取りが終わったイメージングプレートは、可視光に十分さらして残っている蓄積エネルギーを放出させ、もとの状態に戻して繰り返し使用する。読み取り装置における 2 次元的な走査は、レーザーの 1 次元的な走査とイメージングプレートをのせたドラムの回転、平板の平行移動、円板の回転などと組み合わせて行なわれる。

イメージングプレートの特徴として以下を挙げることができる。

1) 検出面積は読み取り装置のレーザー走査面積で決まるが、通常 $250 \times 200 \text{ mm}^2$, $400 \times 200 \text{ mm}^2$ などの大面積である。

2) 位置分解能は主として読み取り装置の画素サイズ (最小で $0.1 \times 0.1 \text{ mm}^2$)、すなわちレーザーのスポットサイズで決まるが、蛍光体層の厚さ (最小で 150 μm) と蛍光体層中でのレーザーの広がりも影響し、最小で 0.15 mm ぐらいで、X 線フィルムより劣る。

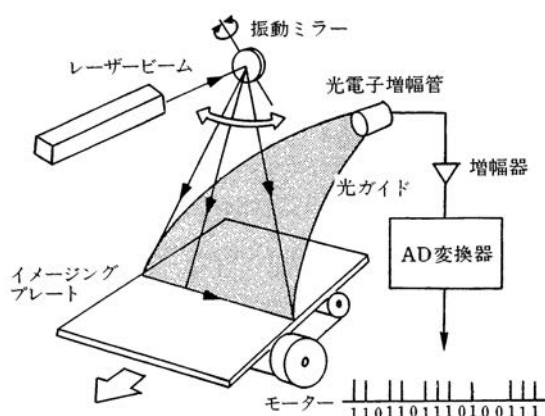


図 9.21 イメージングプレートからのX線像の読み出し（平面スキャナーの場合）²⁸⁾

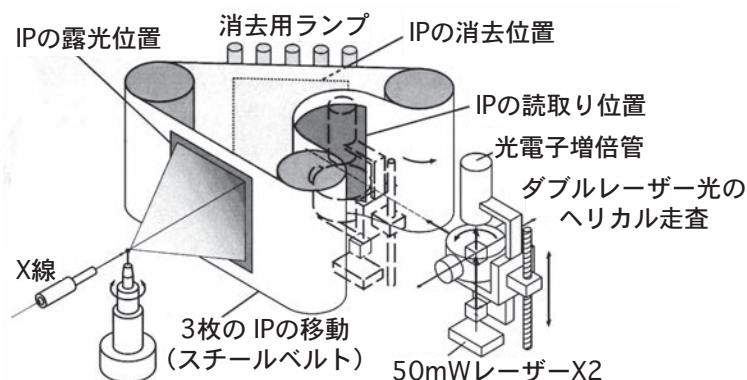


図 9.22 イメージングプレートの高速読み取り機構

3) X線に対する吸収率が高く、検出効率は8～20 keVのX線に対して100 %に近い。

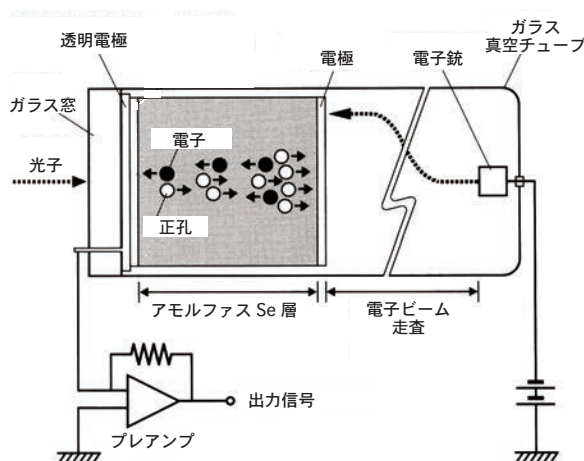
4) バックグラウンドノイズ（かぶり）が低く、微弱なX線強度に対する実効的な感度はX線フィルムの10～60倍である。例えばCuK α 線に対して $0.1 \times 0.1 \text{ mm}^2$ の画素あたりのかぶりは3光子程度（X線フィルムでは1000光子程度）である。

5) 適正露光域が広く、ダイナミックレンジは5桁に及ぶ。そのうち直線的な領域は3.5桁（ $10 \sim 5 \times 10^4$ 光子/画素）である。

上記の優れた性能のために、イメージングプレートはX線小角散乱、結晶構造解析、X線散漫散乱をはじめ多くの実験にX線フィルムの代わりに使われている。

（イメージングプレートの高速読み取り）

X線回折実験、とくにタンパク質結晶の回折図形の迅速な取得のため、複数のIPを順送りして高速に読み取る機構が用いられる。図9.22の読み取り機（リガク製R-AXIS V）では3枚のIPがベルト上に張られており、露光位置にあるIPが露光されている間に、読み取り位置で円筒状にしたIPの読み取りが行われ、同時に消去位置でIPの残像が消去される。読み取りの光学系は共焦点方式で、半導体レーザー光をレンズによりIP上に収束させ、そこで生じた輝尽発光を同じミラーで集光し光電子増倍管に導く。レンズと光導入ミラーが円筒軸のまわりで高速回転しつつ、軸方向に移動することでIPの検出領域が走査される。そこで読み取り用のレーザー光を2系統に分割して、読み取り時間の短縮を図っている。IPの検出面積が $300 \times 300 \text{ mm}^2$ で分解能が $100 \mu\text{m}$ の場合、読み取り時間は30 secであり、ベルトの移動時間などと合

図 9.23 ハープ撮像管の動作原理³⁰⁾

わせて 1 サイクルの最小の時間は 40 sec である。放射光用に検出面積を $400 \times 400 \text{ mm}^2$ に大きくした読み取り機もある。

9.6 撮像デバイスを用いた画像検出器

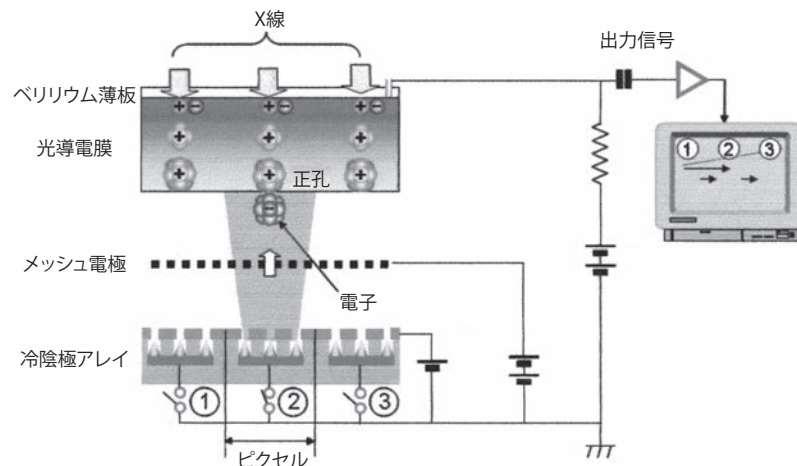
画像検出器には、撮像デバイスとして撮像管を使ったものと固体撮像素子の CCD を使ったものがあり、高解像度や高速撮影をめざして、開発が進められてきた。これは X 線テレビともよばれる積分型の検出器で、物質科学・生命科学に広く役立っている。撮像方式には、いずれの撮像デバイスでも、X 線像が X 線を感じる系に直接導かれる **直接入射型（直接変換型）** と X 線像が蛍光板で可視光像に変換されてから可視光の系に導かれる **間接入射型（間接変換型）** がある。

9.6.1 撮像管型検出器

（1）X 線用ビジコン、サチコン撮像管

ビジコン、プランビジコン、サチコン、トリニコンなどの光学用撮像管が、TV 撮影用として各メーカーによって開発されてきた。これらの撮像管は光導電面をもち、その上にレンズで像が投影される。光を吸収した光導電面は光電子を放出して正の電荷を帯びる。光導電面上を電子ビームで走査することにより、生じた電荷を放電させ、光の強弱に応じた電流が測られる。

X 線撮像管は、これらの光学用撮像管の光導電面を X 線に感度のあるものに改造し、光映像の代わりに X 線の映像信号を得るようにしたものである。初期には、光導電面が PbO 膜からなる **X 線 PbO 撮像管** が X 線用ビジコンの 1 つとして用いられた。その後、サチコン撮像管で前面のガラスをベリリウム薄板に換え、光導電面をアモルファス Se-As 膜に換えた **X 線サチコン撮像管 (SATICON)** が現われた²⁹⁾。空間分解能は X 線 PbO 撮像管で $25 \mu\text{m}$ 程度であるのに対して、X 線サチコン撮像管では $6 \mu\text{m}$ 程度であり、X 線トポグラフで単結晶内の個々の転位が観察された。また微小血管が造影剤を用いて観察されている。撮像管の口径は 25 mm ぐらいである。これらの撮像管に電子の増倍機能はないので、感度は低く、強力ラボ X 線源や放射光光源で使われている。

図 9.24 X線 HARP-FEA 撮像管の構成図³³⁾

(2) X線 ハープ撮像管

NHK 技術研究所がサチコン撮像管を改良し、ハイビジョン用の超高感度のハープ (HARP, High-gain Avalanche Rushing amorphous Photoconductor) 撮像管 (HARPICON) を開発した³¹⁾。図 9.23 の動作原理に示すように、アモルファス Se 光導電膜へ入射した光によって電子と正孔が生じる。そこに高電界を印加すると、アバランシェ現象によって信号電荷が大幅に増倍され、これによって検出効率と空間分解能が向上する^{30, 32)}。

ハープ撮像管の前に、X線が入射する蛍光板とレンズ系を配置すれば、間接入射型の撮影ができる。一方、ハープ撮像管の受光面のガラス板をベリリウム薄板に換えることによって直接入射型の**X線 HARP 撮像管**が作られる。さらに、走査電子ビームの電子源を熱陰極から電界放出の冷陰極アレイ (FEA, Field Emission Array) に換えた**X線 HARP-FEA 撮像管** (ピクセルサイズ $20\ \mu\text{m} \times 20\ \mu\text{m}$, ピクセル数 640×480 , 有効面積 $12.8\ \text{mm} \times 9.6\ \text{mm}$) が作られている。図 9.24 にその撮像管の構成図を示す。X線 HARP 撮像管の場合と同様に、X線によってアモルファス Se 光導電膜 (厚さ $15\ \mu\text{m}$) 中の入射近傍で電子・正孔対が生成する。これらの電子・正孔対は膜に印加された高電界によって加速され、新たな電子・正孔対を次々に生成する。このアバランシェ効果により電荷が増幅されるので、感度が向上する。正孔の移動度が電子のそれより大きいので、正孔に注目すると、膜の終端で正孔の2次元像が蓄積される。その正孔と電子ビームの電子が結合したときに流れる電流が映像信号として得られる^{33, 34)}。このX線 HARP-FEA 撮像管の利用が、X線イメージングやタンパク質結晶の構造解析などの発展に寄与している。

9.6.2 CCD 型検出器

CCD (charge coupled device, 電荷結合素子) **型検出器**は、可視光用の固体撮像素子として開発された。前節 9.6.1 の撮像デバイスを利用した検出器の1つであるが、小型化し、性能が向上して、広く利用されているので、独立の節にまとめた³⁵⁾。

CCD は図 9.25 のように、p 型 Si などの半導体基板表面に薄い絶縁膜 (SiO_2) をつけ、その上に金属電極をのせた MOS (metal oxide semiconductor, 金属酸化膜半導体) 構造をしている。10 V 程度の電圧を印加すると、絶縁膜に接した基板表面近傍に空乏層が形成される。空乏層には電場がかかり、電子に対してポテンシャルの井戸になっている。そこに光子が入射すると、電子・正孔対が生じ、それらは空乏層に一時的に蓄積される。このような電極が基盤目状に配置されている。この電荷が蓄積されるユニットである**ピクセル** (pixel, 画素) は数十 μm の大きさであり、その大きさによって位置分解能が決められる。熱雑音

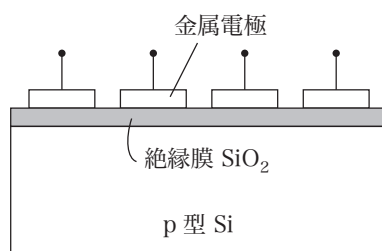
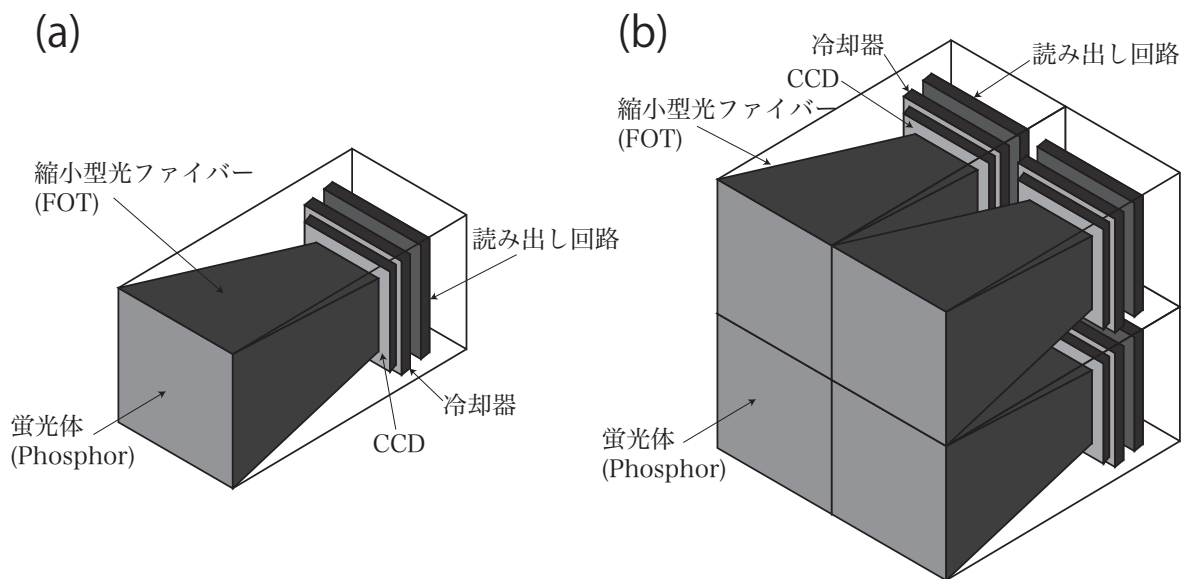


図 9.25 CCD の構造

図 9.26 FOT-CCD 型検出器 (a) とそのアレイ状検出器 (b) ³⁶⁾

を減らすためにペルチェ素子などで -50°C ぐらいに冷却される。また、ガスを冷媒とした冷凍機なども用いられる。

各画素の電極下に集められた電荷群は、各電極に印加する電圧を順次変えることにより、隣り合う画素へバケツリレーのように一方向に転送され、最後に電圧に変換されて1つの出口から時系列信号として読み出される。すべての画素からの信号読み出しに1～10秒の時間がかかり、時間分解能はよくない。読み出しには**フルフレーム転送方式** (full-frame transfer type) と**インターライン転送方式** (interline transfer type) がある。フルフレーム転送方式では全面が受光部で開口率は100%であり、主に科学計測に用いられる。画素は受光とともに転送の役割もあるので、読み出し中は露光できない。インターライン転送方式では受光部と転送部が交互に並んでいるので、開口部の面積は減るが、露光と読み出しを同時に行なうことができ、動画の撮影に適しており、一般のビデオカメラに使われているのはこの方式である。

CCD 型検出器の撮像方式には、X線を蛍光体で可視光に変換してから CCD に入射する間接入射型とX線に感度をもつ CCD に入射する直接入射型がある。X線回折・散乱の測定に使われる**間接入射型**について少し詳しく触れる。X線像は、蛍光体を用いて可視光像に変換され、さらに可視光光学系を経て、CCD に入射し、映像化される。可視光光学系では、X線像が CCD の一辺 20～30 mm のサイズの有感面積へ入るように縮小あるいは拡大する必要がある。それには次のような方法がある。

(1) FOT-CCD 検出器：縮小型光ファイバーの利用

FOT-CCD 検出器は、蛍光体スクリーン、縮小型光ファイバー (fiber-optics taper, FOT) および CCD

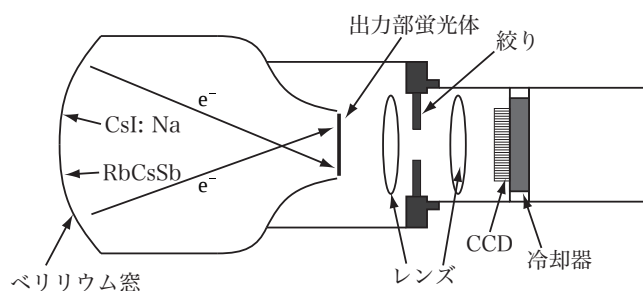


図 9.27 X II-CCD 型検出器 Amemiya03

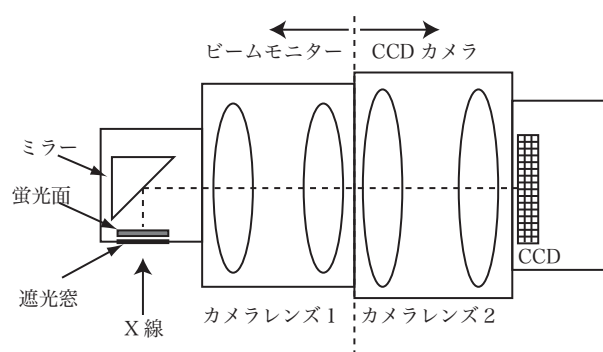


図 9.28 レンズカップル CCD 型検出器 37)

から構成される（図 9.26(a)）。蛍光体（ $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}_2:\text{Tb}$ ）のスクリーンを FOT の大きな端面に密着させ、もう一方の端面を CCD の受光面に密着させる。FOT は束ねた光ファイバーを引き伸ばして作成され、縮小比は光伝達率の低下を考慮して 2～4: 1 に選ばれる。

検出面積を大きくするために、FOT-CCD 検出器をユニットとして例えば 2 個 × 2 個（図 9.26 (b)）、3 個 × 3 個、あるいは 3 個 × 6 個を配列した**アレイ状 CCD 検出器**がつけられている。FOT-CCD 検出器は結晶構造解析に広く利用されてきた。

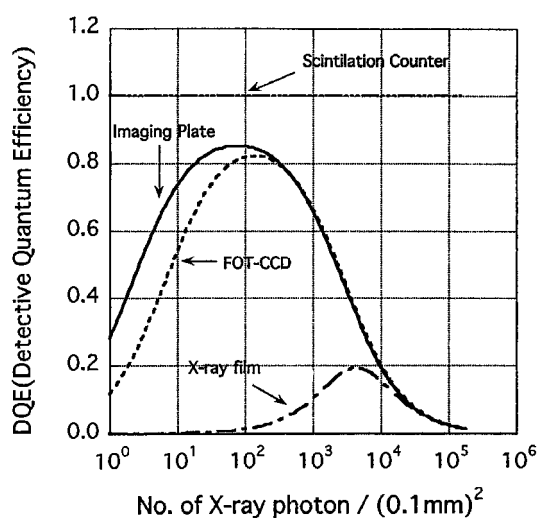
（2）X II-CCD 検出器：X 線イメージンシファイアーの利用

X II-CCD 検出器は、ベリリウム窓をもつ X 線イメージンシファイアー（X-ray image-intensifier, X II）に CCD を組み合わせたものである（図 9.27）。Be 窓に蛍光体膜（CsI: Na）が密着し、その膜上に光陰極面（RbCsSb）が形成されている。これにより X 線が可視光に変換され、つぎに光電子に変換される。光電子は電場によって加速され、出力部の蛍光体膜に入射し、明るさが増倍された可視光像がつけられる。その像は結合レンズを介して CCD に至り、映像化される。X II-CCD 検出器は光増幅機能をもつので感度がきわめて高いが、有感面積が限られ（直径 150 mm または 230 mm）、また入射面が凸面形状で画像の歪みが大きいなどの欠点がある。放射光利用の時分割小角散乱などに使われている。

（3）レンズカップル CCD 検出器：可視光レンズの利用

可視光光学系として上記の FOT や X II の代わりに、図 9.28 のようにレンズ系を用いる**レンズカップル CCD 検出器**がある。可視光像の大きさをレンズ系によって変えることができるので、特に $1\text{ }\mu\text{m}$ ぐらいの高位置分解能の X 線イメージングが可能である。蛍光体として $1\text{ }\mu\text{m}$ ぐらいの分解能では単結晶の LSO ($\text{Lu}_2\text{SiO}_5:\text{TbCe}$)、 $10\text{ }\mu\text{m}$ ぐらいに対しては粉末の P43 ($\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}:\text{Tb}$) が用いられる。

（直接入射型 CCD 検出器）

図 9.29 検出器の検出効率の比較 (計算値)³⁶⁾

直接入射型は $10\ \mu\text{m}$ ぐらいの位置分解能をもつ。しかし、空乏層の薄さのためにX線に対する検出効率は全般に低く、低エネルギーX線領域 ($3\ \text{keV} \sim 10\ \text{keV}$) で用いられる³⁸⁾。

CCD 検出器はふつう積分型であるが、各ピクセルにX線光子が一度に1個しか入らない場合はパルス型で、半導体検出器と同じく、X線エネルギーを測定できる。このような特性を生かして、X線天文学に利用されている。

(CCD 型検出器とイメージングプレート (IP) の棲み分け、ハイブリッド型ピクセル検出器の登場)

これら2種の検出器の利用開始とその後を振り返ってみると、IPは1980年代後半に利用が始まり、5桁に及ぶダイナミックレンジで強弱の反射が1枚のIP上に撮れるなど、X線フィルムの特性を大幅に越えて、構造解析が簡便にできるようになり、急速に広まった。一方、CCD型検出器は1990年代後半に、データの読み出し時間が短いなどで導入が進み、構造解析の分野ではIPと置き換わっていったが、精密な構造解析はIPが受け持つように棲み分けられた^{36, 39)}。さらに最近、**ハイブリッド型ピクセル検出器** (9.8.1(2) 参照) の登場により、利用がCCD型検出器から移りつつある。

参考までに、図9.29に各種検出器の検出効率の比較を示す (計算値)。比較された検出器はイメージングプレート、FOT-CCD型検出器、シンチレーション検出器およびX線フィルムである。これに見られるように、パルス型のSCを除いて、積分型の検出器では検出効率は入射X線量に依存する。また検出効率は低いX線量ではバックグラウンドにより低下し、高いX線量ではゆらぎノイズにより低下する。さらに、図9.30に各種検出器のS/N比の比較を示す (計算値)。積分型の検出器ではS/N比は高いX線量で飽和することが分かる。またあるS/N比のデータを得るのに必要な入射X線量を比較することができる³⁹⁾。

9.7 極低温超伝導検出器

超伝導体の薄膜を用いたX線検出器は、エネルギー分解能を半導体検出器より2桁近く向上できるので、分光結晶を用いる必要がなく、蛍光X線分析などでエネルギー分散分光への利用が始まっている。また、半導体検出器は、表面不感層 (自然酸化膜や電極層) があるために、数keV以下の軽X線領域の蛍光収量XAFSや蛍光X線分析は難しいが、**極低温超伝導検出器**は特にその領域で威力を発揮する。

極低温超伝導検出器には大別して、温度上昇を利用する**熱型**と励起状態を利用する**量子型**がある。それ

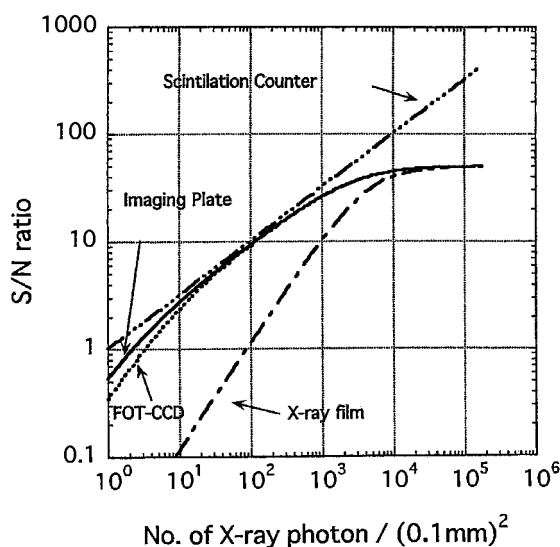
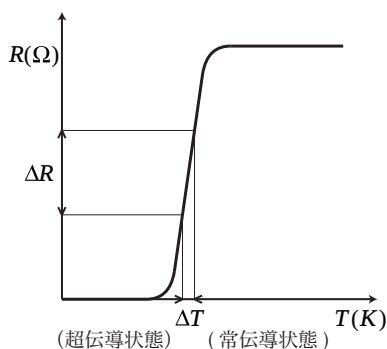
図 9.30 検出器の S / N 比の比較 (計算値)³⁶⁾

図 9.31 超伝導転移温度近傍における抵抗の急峻な変化

それぞれの型にいくつかの方式があるが，ここでは1方式ずつその概略を紹介する。

9.7.1 超伝導転移端センサー利用の検出器

特別な使用目的のために X 線を熱に変換して検出する場合がある。10 keV の X 線光子がすべて熱に変われば 1.6×10^{-15} J, 0.1 keV では 1.6×10^{-17} J の熱量が発生する。この熱型の検出器が**超伝導転移端センサー** (transition edge sensor, TES) をもつマイクロボロメーター (microbolometer) である。あるいは，マイクロカロリメーター (microcalorimeter) ともよばれる。この検出器の原理は赤外線用のものと同じである⁴⁰⁾。この小さなセンサーは，図 9.31 のように，金属の常伝導—超伝導転移点近傍で，ごく僅かな温度変化 ΔT に対して電気抵抗が ΔR だけ急峻に変化することを利用する。検出器を概念的に図 9.32 に示す。X 線光子を吸収体に入射し，そのエネルギーを熱に変換する。吸収体に生ずる温度上昇は，吸収体に接着したセンサーによって電圧パルスとして取り出されるので，X 線光子エネルギーを測ることができる。しかしこの場合，測定可能な温度上昇を得るために，吸収体の熱容量をできるだけ小さくする必要がある。比熱は極低温で T^3 に比例するので，0.1 K ぐらいの極低温ではゼロに近くなる。例えば 1 mm^3 の Si では熱容量は $C \approx 6 \times 10^{-13}$ J/K であり，10 keV の X 線光子のエネルギー E に対して温度変化は $\Delta T = E/C \approx 2.7 \text{ mK}$ になる。実際にエネルギー分散型 X 線分析 (EDS) で，5 eV 前後のエネルギー分解能が得られている。

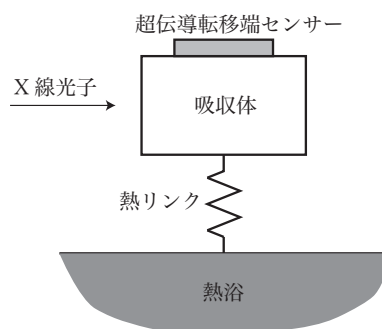


図 9.32 超伝導転移端センサー利用検出器の概念図

9.7.2 超伝導トンネル接合検出器

量子型では、超伝導トンネル接合 (superconducting tunnel junction, STJ) 素子を利用した検出器、**超伝導トンネル接合検出器**があり、例えば Nb/Al/AlO_x/Al/Nb/基板のように、それは2つの超伝導体の電極の間に約 1 nm 厚の AlO_x トンネル障壁をもった構造をしている⁴¹⁾。X線光子が超伝導体に入射し、超伝導状態で形成される電子対 (クーパー対) が破壊され、励起された準粒子 (電子・正孔) が生成される。それが絶縁層をトンネル効果によって通り抜け、もう1つの電極に電流パルスとして取り出される。超伝導状態で準粒子1個を生成するのに必要なエネルギーは数 meV であって、これが半導体検出器での ~ 3 eV のエネルギーギャップに対応するので、エネルギー分解能の向上に結び付く。実際に 10 ~ 15 eV のエネルギー分解能が得られている。軽元素の吸収端である 1 keV 以下の軟 X 線領域において X 線吸収分光の役に立つ。

9.8 新しく開発された検出器

画像検出器としてイメージングプレートと CCD 型検出器が普及し、現在でも広く利用されている。最近、最先端の微細加工技術とマイクロエレクトロニクス技術を駆使した新方式の検出器が登場してきた。

検出媒体が半導体の場合、センサーの形状から分けると、1次元のストリップ型のマイクロストリップ半導体検出器以外はすべて2次元のピクセル型である。ピクセル型はセンサーと読み出し回路の接続方式によって、ハイブリッド型のピクセルアレイ検出器、フラットパネル検出器、CMOS フラットパネル検出器と、モノリシック型の SOI ピクセル検出器がある。一方、検出媒体がガスの場合では、マイクロストリップ・ガス検出器、マイクロギャップ・ガス検出器と μ -PIC 検出器がある。

9.8.1 ピクセル型・スプリット型半導体検出器

(1) マイクロストリップ半導体検出器

最近急速に普及している1次元検出器として**マイクロストリップ半導体検出器**がある⁴²⁾。マイクロストリップ半導体検出器は、1次元であるが構造的にはピクセルアレイ検出器と似ており、高抵抗半導体 Si 基板上に幅 50 ~ 100 μ m、長さ 15 ~ 20 mm 程度のストリップ状電極を加工したもので、普及タイプで 128 チャンネルあるいは 256 チャンネルをもつ。CuK α あるいはその近傍でのエネルギー領域でを使用することを目的に開発されたものは、Si 基板の厚さが 0.3 mm 程度、MoK α あるいはそれ以上の高エネルギー領域での使用に対しては、Si 基板を厚くするか、あるいは CdTe などが使用される。各ストリップは wire bonding (金属細線を用いて電極どうしなどを電氣的に接続) で1単位 64 チャンネルをもつ CMOS 読み

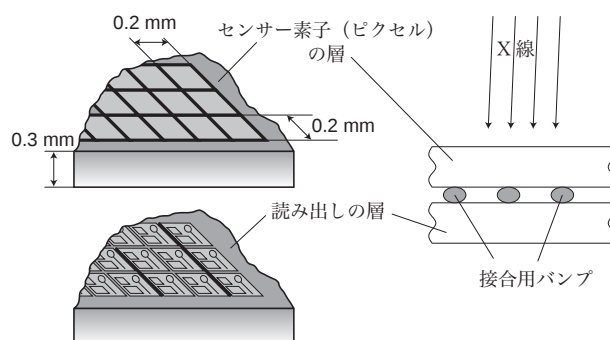


図 9.33 ピクセルアレイ検出器 (PILATUS) のセンサー素子の層と読み出しの層との結合⁴³⁾

出し集積回路 (ROIC, readout integrated circuit) に接続される。ROIC はチャンネルごとに amplifier, shaper, discriminator, counter をもち、ROIC 内でチャンネルごとに独立に信号処理される。各チャンネルは $10^5 \sim 10^6$ 程度のダイナミックレンジをもち、10 % ~ 20 % 程度のエネルギー分解能をもつ。通常、ファン冷却のみで、室温で使用できる。

市販の粉末回折計では、この検出器がシンチレーション検出器に代わって標準装備になろうとしている。粉末回折においては、個々のマイクロストリップと背後の電子回路が受光スリットと0次元検出器に相当し、この検出器を用いて回折強度をスキャンすることにより、例えば128チャンネルをもつ場合、128の回折パターンを一度に測定でき、同じ幅の受光スリットとシンチレーション検出器を組み合わせた場合に比較して、強度を2桁増加、あるいは測定時間を2桁少なくすることができる。また、時分割測定などのために、多数の1次元マイクロストリップ半導体検出器を湾曲状に配置したものもある。

(2) ピクセルアレイ検出器

パウル・シェラー研究所 (Paul Scherrer Institute, PSI) が Swiss Light Source (SLS) のプロジェクトとして開発した検出器である PILATUS (Pixel Apparatus for the SLS, ピラタス) について触れる。前述のマイクロストリップ半導体検出器とはストリップとピクセルの違いはあるが、基本的には同じ構造である。図 9.33 に示すように、心臓部は、pn ダイオードアレイが2次元に配列した高抵抗の Si 基板の層と、検出したX線光子を計測する CMOS 読み出し集積回路 (ROIC) 基板の層からなる。この2層の基板の対応するピクセルと読み出し回路が各々、直径 $15 \mu\text{m}$ ぐらいの In のこぶ (bump) を間に入れて接合される (bump bonding)。

SPRING-8 は PSI との研究協力のもとで、PILATUS の受光面のスケールアップ計画に携わってきた。基本モジュールである PILATUS-100K 検出器は Si 基板に 16 個の ROIC を並べたもので、ピクセルサイズは $172 \times 172 \mu\text{m}^2$ 、受光面積は $83.8 \times 33.5 \text{ mm}^2$ 、ピクセル数は 94,965 ~ 100k、検出効率は 8 keV X線に対して 99 %, 15 keV X線に対して 55 % である。ダイナミックレンジは 6 桁である。放射光施設でよく使われている PILATUS-2M 検出器は基本モジュールを 3(水平)×8(垂直) = 24 台配列したものである。ピクセルサイズは $172 \times 172 \mu\text{m}^2$ 、受光面積は $254 \times 289 \text{ mm}^2$ 、ピクセル数は $1475 \times 1679 = 2.5 \times 10^6$ で、読み出し速度は 3.6 ms と速く、フレームレート (1 秒間に表示できるフレーム (静止画) の数) は 30 fps(frames per second) である^{44, 45)}。PILATUS は大面積のパルス型 2 次元検出器として早い時期に実現され、タンパク質結晶構造解析をはじめ、時分割X線解析、時分割 XAFS, X線小角・極小角散乱などに広く利用されている。

ピクセルアレイ検出器には各種のタイプがあり、ピクセルサイズが $55 \mu\text{m}$, $75 \mu\text{m}$, $130 \mu\text{m}$ などのものが、いくつかのメーカーから販売されている。これらの検出器は上述のように、独立したセンサー部と読み出し集積回路部とを bump bonding によって結合した、いわゆるハイブリッド型であり、高エネルギー

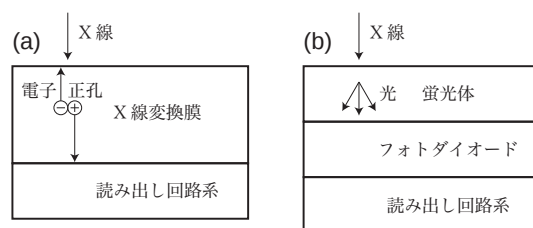


図 9.34 フラットパネル検出器 (a) 直接変換型 (b) 間接変換型

X線に対しては、センサー部だけを Si から、例えばより厚みのある Si、あるいは CdTe などに変えればよいといった利点がある。

(3) フラットパネル検出器

医療分野では画像診断に、X線イメージンシファイアー (XII) に CCD 検出器を組み合わせた装置 (9.6.2(2) 参照) が使用されてきたが、最近では**フラットパネル検出器** (flat panel detector, FPD) も導入されている^{46, 47)}。名前のとおり筐体の厚さは数 cm である。この検出器には図 9.34 のように、直接変換型と間接変換型がある。直接変換型では、入射X線をアモルファス Se 半導体などで電子・正孔対の電荷に変換する。読み出し回路系は、ピクセルごとに、スイッチング素子の働きをする薄膜トランジスター (thin film transistor, TFT) とコンデンサーから構成されている。電荷はコンデンサーに蓄積され、TFT スイッチが ON になると A/D (アナログ/デジタル) 変換されて、デジタル映像信号として読み出される。一方、間接変換型では、X線を蛍光体で光に変換したうえで、フォトダイオードアレイにより電荷に変換する。その後の読み出し回路の動作は直接変換型と同じように行なわれる。この間接変換型は光散乱によって空間分解能が若干低下する。

仕様例として浜松ホトニクス (株) の C-7942-02 を示す。これは間接変換型で、蛍光体に CsI を用いている。ピクセルサイズは $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ 、ピクセル数は $2240(\text{水平}) \times 2344(\text{垂直}) = 5.25 \times 10^6$ 、受光面サイズは $112\text{ mm}(\text{水平}) \times 117.2\text{ mm}(\text{垂直})$ で、フレーム速度は 2 フレーム/s である^{48, 49)}。

フラットパネル検出器は大面積の受光面に高空間分解能の画像を撮影でき、しかもリアルタイムで取得できるので、結晶構造解析をはじめ、多種のイメージングに広く利用されている。またデジタル化が図られているためデータ処理の多様化をもたらし、この検出器が広く普及しつつある。

(4) CMOS 検出器 (CMOS フラットパネル検出器)

固体撮像素子として CCD センサーが広く利用されているが、最近 CMOS センサーも普及しつつある⁵⁰⁾。**CMOS** (Complementary (相補的) Metal Oxide Semiconductor (金属酸化膜半導体)) **検出器**はセンサーが CCD 検出器のセンサーと同じで、光を光電変換して電荷が生ずる。異なるのは電荷を転送する方式である。CCD では電極に順々に電圧をかけて転送回路によってバケツリレーのように電荷を送り、最後に増幅するのに対して、CMOS では個々のピクセルがフォトダイオードと、CMOS トランジスター (MOSFET (電界効果トランジスター) を相補形に配置)) を用いた電荷の読み出しスイッチからなり、ピクセルごとに信号を増幅する。電荷の運搬には自由電子と正孔の両方を用いる。このスイッチを次々に切り換えて、ピクセルごとに直接読み出すので、高速の転送ができる。CMOS 検出器はフラットパネル検出器の発展したものとともいえるので、CMOS フラットパネル検出器ともよばれる。

ふつうタンパク質結晶の構造解析では、結晶を 1° 位の角度幅で振動させ、シャッターを開閉して回折図形を記録するが、ここではシャッターを開けたまま結晶を回転させ、一定の時間間隔で回折図形を高速記録することで、測定時間を短縮させることができる。測定には浜松ホトニクス社の C10158DK が用いられた。

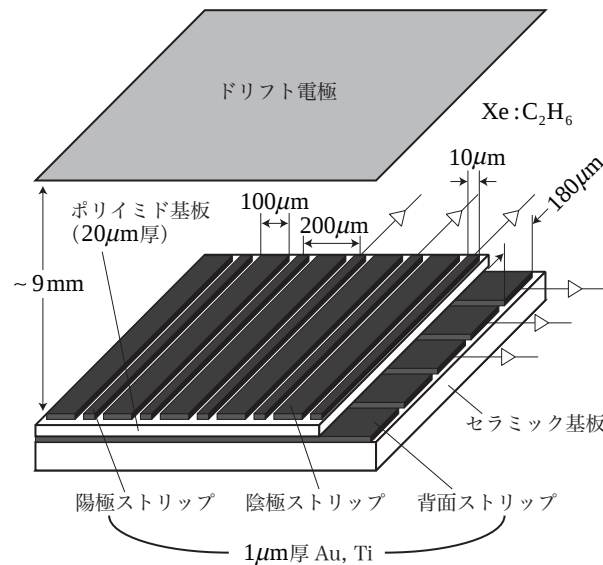


図 9.35 マイクロストリップ・ガス検出器の電極構造⁵²⁾

（５）SOI ピクセル検出器

センサーと読み出し回路の LSI は、それぞれのシリコンの抵抗率が異なるので、一体化していなかったが、これらのシリコンを SiO_2 を介して張り合わせるという SOI (Silicon-On-Insulator, 絶縁膜上シリコン) の技術を用いて一体化させたのが SOI ピクセル検出器である⁵¹⁾。モノリシック型なので、サイズを小さくできる。10 μm 程度の位置分解能が得られるので、イメージングの実験に使える。

また、ピクセルごとに複数のメモリーをもたせれば、数百 ns で変化する現象の高速撮影が可能である。

9.8.2 マイクロパターン・ガス検出器

前述のマルチワイヤー比例検出器 (MWPC) では、静電気力による歪みの影響でワイヤーの間隔を 1 mm 以下にするのが難しかった。この問題を乗り越えるものとして、ワイヤーの代わりに微細加工技術によって基板上に電極構造をつくったガス比例検出器が実現している。これにより高位置分解能と高計数率が得られ、この種の検出器は**マイクロパターン・ガス検出器** (micro pattern gas detector, MPGD) と総称されている。

（１）マイクロストリップ・ガス検出器

マイクロパターン・ガス検出器の先陣を切ったのが、1988 年に考案された⁵³⁾ **マイクロストリップ・ガス検出器** (microstrip gas chamber, MSGC) である^{52, 54)}。この検出器では、基板上のストリップ（細片）を利用している。すなわち、図 9.35 のようにポリイミド基板上に陽極ストリップと陰極ストリップが 200 μm の周期で形成され、その下層の基板に陽極と直交する背面ストリップ電極が形成されている。ドリフト層中で希ガスから電離された電子は、陽極近傍の高電場によって電子なだれ（電子増殖）を生じる。これにより陽極ストリップと背面ストリップに誘導された電荷が 2 次元的に読み出される。

MSGC は陽極と陰極の間隔が狭い微小電極構造をもっているため、空間分解能は MWPC に比べて改善されている。しかし、放電を防ぐために電圧を上げることができず、高い増幅率が得られない。そこでそれを克服するために、図 9.36 のようにガラス製毛细管でできたキャピラリープレート（細管）をドリフト電極と MSGC 基板の間に置き、中間的な電子増殖機能をもたせている。キャピラリープレートの内部に十数 kV/cm 以上の電場をかけると、そこで 100 倍以上の増幅率が得られ、全体で 1000 以上の増幅率となり、

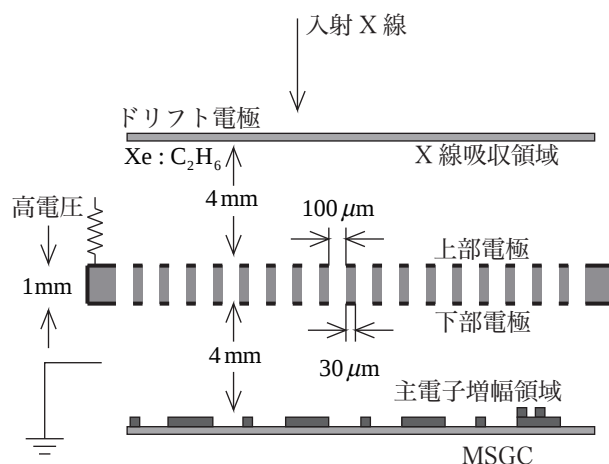


図 9.36 キャピラリープレートを入れたマイクロストリップ・ガス検出器の断面図⁴⁾

実用になる。実際、検出面積 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 、信号線数 1024 で、空間分解能 $< 100\text{ }\mu\text{m}$ (rms)、時間分解能 100 ns が得られており、高輝度のビームや高時間分解の実験に対して利用された。

(2) マイクロギャップ・ガス検出器

マイクロギャップ・ガス検出器 (microgap gas detector) はマルチワイヤー比例検出器を高度化したものの 1 つで、英国のダレスベリー研究所で開発され、RAPID (Refined ADC Per Input Detector) ともよばれる⁵⁵⁾。ここでは SPring-8 に導入された RAPID を紹介する⁵⁶⁾。電極は、陰極として絶縁板上に Cu 製ストリップを 0.8 mm の周期で配列し、陽極としてそれと直角方向に $10\text{ }\mu\text{m}$ ϕ の W 線を 0.8 mm の周期で張った構造がとられている。両極のギャップは 0.5 mm である。このように小さな距離 (マイクロギャップ) にすることで、X 線光子によって生ずる電荷を早く消散させることができる。さらに信号処理に高速の AD 変換器を用いているので、検出器は高速で、 $20\text{ }\mu\text{s}$ の時間分解能をもち、 20 cm 角の検出領域に一樣に X 線が入射すると毎秒 10^7 個の光子を計測できる。広いダイナミックレンジと低いノイズも特長である。特に小角散乱実験や時分割測定に適している。

(3) μ -PIC 検出器

上記の放電の問題を抜本的に解決し、MSGC の性能を凌駕して、入射 X 線の個々の入射位置と時間を記録できる μ -PIC (micro pixel chamber) 検出器が開発された^{13, 57)}。図 9.37 のように、比例計数管を輪切りにしたような円筒形電極をつくり、それらをピクセル状に配列している。厚さ $100\text{ }\mu\text{m}$ のポリイミド基板 (絶縁層) の両面に互いに垂直に陽極と陰極のストリップを配置する。丸い点状の陽極とそれを囲む円形の陰極 (円型の穴を基板に貫通させる) をセットとして 2 次元的に $400\text{ }\mu\text{m}$ 間隔で形成する。このようにすると陽極のまわりの電場は強くでき、高増幅率が得られる。陰極のまわりの電場は弱いので放電しない。ドリフト電極の上から入射した X 線によって気体分子から電子が放出され、ドリフト電極でできた電場で移動し、陽極近傍の高電場でなだれ増幅を起こす。そのときに生じた電子が陽極に到達し、同時に生じたイオンが陰極に到達する。これらの信号によって入射線の位置が決まる。

μ -PIC 検出器の仕様は、受光面積 10 cm 角 $\sim 30\text{ cm}$ 角、計数率 $\sim 10^7\text{ cps}$ 、空間分解能 $\sim 100\text{ }\mu\text{m}$ 、時間分解能 $< 100\text{ ns}$ 、ダイナミックレンジ $> 10^6$ などで、広く利用される。特に広いダイナミックレンジの強度分布が測定できるので、小角散乱の実験に適している。また高時間分解能を生かして、高速の時分割測定ができる。

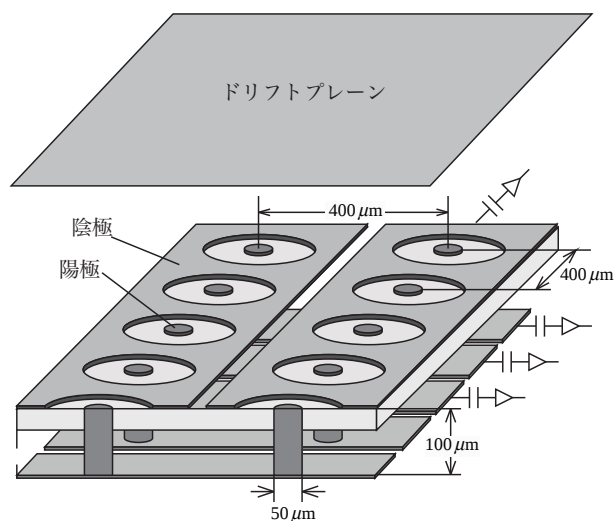
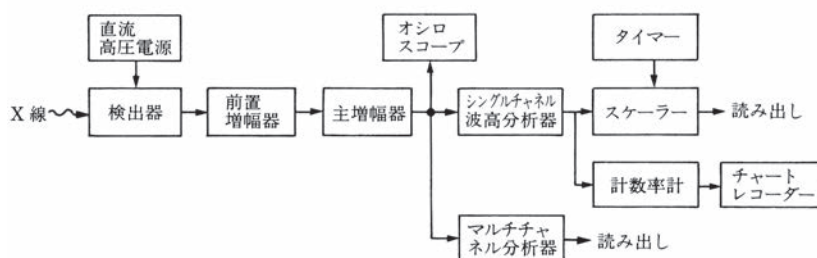
図 9.37 μ -PIC の概念図¹³⁾

図 9.38 パルス計数回路のブロック図

9.9 パルス計測技術

9.9.1 パルス計数回路のシステム

比例計数管やシンチレーション検出器などで用いられる計数回路の基本構成を図 9.38 に示す。検出器から出力される信号が微弱で、検出器のインピーダンスが高いため、検出器のごく近くに高入カインピーダンスの**前置増幅器** (preamplifier) を置き、信号を増幅したのち、低出カインピーダンスで**主増幅器** (main amplifier) へ接続する。これは**比例増幅器** (linear amplifier) ともよばれる。そこでさらに増幅されるとともにパルスの波形整形が行なわれ、X 線光子のエネルギーに比例した 0 ～ 10 V 程度の波高のパルスができる。つぎに**シングルチャネル波高分析器** (single channel pulse height analyzer) あるいは**波高弁別器** (pulse height discriminator) に入る。シングルチャネル波高分析器ではベース電圧 V_B とウィンドウ電圧 V_W が設定される。**微分** (differential) **モード** の場合、パルス波高が下限 (lower level) V_B と上限 (upper level) $V_B + V_W$ の間にあるときだけ選別される。この 2 つの電圧が 1 つのチャンネルをつくる。 V_W を一定にして V_B を順に変えてゆき、そのつどこの後に接続される計数記録部で計数率を測れば、信号パルスの波高分布曲線が得られる。一方、**積分** (integral) **モード** の場合、 V_B だけを効かせて、パルス波高が V_B よりも大きいときに計数される。例えばノイズをカットして信号だけが選別される。この後者の機能だけをもつ回路が波高弁別器である。図 9.39 に微分モードと積分モードの曲線の模式図を示す。明らかに 2 つの曲線は互いに微分と積分の関係にある。この回路の下流側では、例えば計数率計 (ratemeter)

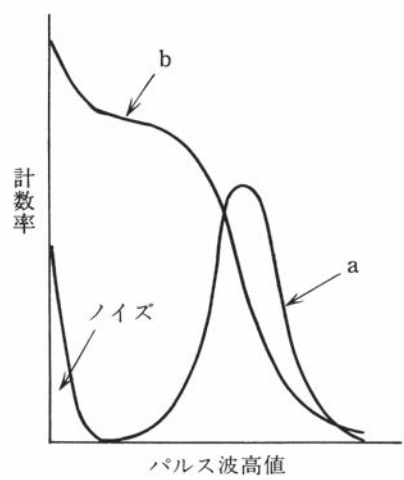


図 9.39 パルス信号の波高分析における微分モード（曲線 a）と積分モード（曲線 b） 曲線 a と b に対する縦軸の目盛りは異なっている。

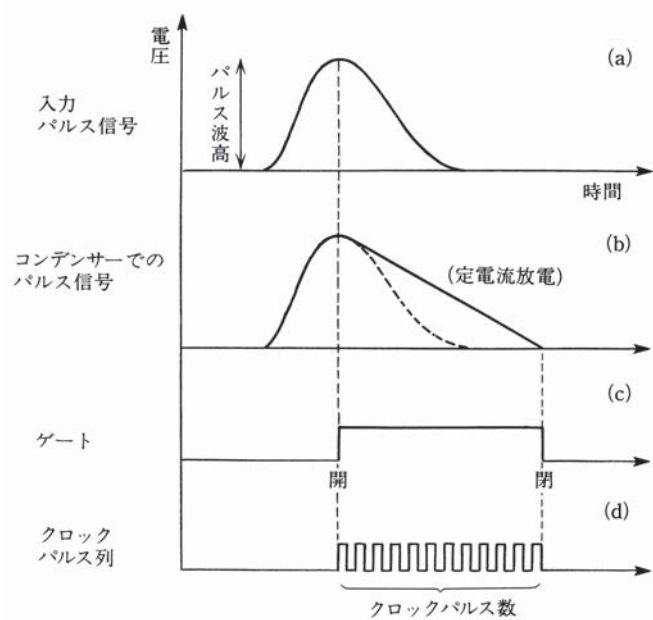


図 9.40 ウィルキンソン方式 AD 変換器の働き

によってパルスが直流電圧に変換されて毎秒あたりの平均計数率がメーターに示され、さらにチャートレコーダー（chart recorder）に記録される。あるいはスケーラー（scaler）とタイマー（timer）の組み合わせでパルスを計数し、プリンター（printer）に書き出される。

パルスの計数の仕方には 2 つの方式がある。1 つは設定した一定時間内に入力したパルス数を計数する**定時計数法**（fixed time mode）で、もう 1 つは一定のパルス数を設定し、その数のパルスが入力されるまでの時間を測る**定数計数法**（fixed count mode）である。このような計数装置と X 線回折・散乱装置はコンピュータ・システムに接続され、機器全体の制御と測定が行なわれる。

検出器が SSD の場合は、X 線光子は X 線エネルギーに比例した大きさの電流パルスになる。これが電圧パルスに変換されたのち、主増幅器で増幅、パルス整形される。つぎに図 9.38 のように**マルチチャンネル分析器**（multi-channel analyzer, MCA）で**マルチチャンネル波高分析**（multi-channel pulse height analysis, PHA）のモードで使われ、X 線強度がエネルギーの関数として、CRT(cathode-ray tube) などに表示され

る。この分析器の主要部は **AD 変換器** (analog-to-digital converter) とメモリ部である。AD 変換器ではアナログ量のパルス波高をデジタルの数に変換する。変換には**ウィルキンソン** (Wilkinson) **方式**がよく用いられる。図 9.40 に示すように入カパルスの波高に対応する電圧でコンデンサーに電荷を蓄え、それを一定電流で放電させる。コンデンサー電圧がゼロになるまでの時間だけゲートを開けてクロック信号発生器からのパルス列を通す。結局、入カパルスの波高はゲートを通したクロックパルス数に比例することになる。そこでパルス列を数えて、その数に対応したチャンネル数を選択する。入カパルスのチャンネルが決まると、必要なチャンネル数分だけあるメモリのうち、いまのチャンネルに対応する番地のメモリの内容に 1 を加えて記憶させる。このような処理の集積により波高分布曲線が得られる。チャンネル数は 256, 1024, 4096 などがある。AD 変換器内で等間隔のパルスの列をつくるクロック振動数は 50 MHz 程度であり、1 チャンネルあたり 0.02 μs の時間がかかる。したがって AD 変換時間は 4096 チャンネルでは 80 μs である。MCA の分解時間は AD 変換時間とメモリ処理時間 (数 μs) の和であるが、ほぼ前者で決まる。

なお、マルチチャンネル分析器は**マルチチャンネル・スケーリング** (multi-channel scaling, MCS) のモードを用いれば、変化する X 線強度の時間分解測定を行なうことができる。この場合、AD 変換器は使わず、メモリ部に入力される。ある時刻から Δt までの間に入力されたパルス数をチャンネル 1 のメモリに蓄え、時刻 Δt から $2\Delta t$ までの間に入力されたパルス数をチャンネル 2 に蓄えるというように時間の経過とともに順々にチャンネルを変えて X 線強度を記録する。この走査過程は 1 回に限らず、周期現象であれば元に戻って何回もくり返して加算することもできる。チャンネルあたりの滞留時間 (dwell time) Δt は実験条件に応じて設定される。

X 線計測の基本回路は**ニム** (NIM, nuclear instrument module の略) 規格のものがよく用いられる。各回路は弁当箱状にモジュール化され、電源を供給するビン (bin) に装着される。信号ケーブルの接続に BNC コネクタが用いられる。また**カマック** (CAMAC, computer aided measurements and control の略) 規格もあり、これはコンピューターや測定器との接続が簡便に行なえるようにデータウェイの接続や制御方式が規格化されている。

9.9.2 パルス型検出器の特性

(1) 検出効率³⁵⁾

パルス型検出器の**検出効率** η は

$$\eta = \frac{\text{記録される光子数}}{\text{検出器に入射する光子数}} \quad (9.7)$$

である。検出器の窓材による吸収を無視すれば、 η は検出部での X 線の吸収率に等しい。

一方、積分型検出器ではより一般化した**検出量子効率** (detective quantum efficiency, DQE)

$$DQE = \frac{(\text{記録される信号})^2 / (\text{記録される信号のゆらぎ})^2}{(\text{検出器に入射する信号})^2 / (\text{検出器に入射する信号のゆらぎ})^2} \quad (9.8)$$

が用いられる。検出器システムに含まれるノイズのために DQE は検出部での X 線の吸収率より低くなる。パルス型検出器で検出器に入射する光子数を N 、記録される光子数を n とすれば、(9.8) は

$$DQE = \frac{n^2 / (\sqrt{n})^2}{N^2 / (\sqrt{N})^2} = \frac{n}{N} \quad (9.9)$$

となり、(9.7) の η と一致する。したがって DQE はパルス型検出器の検出効率と比較するのにも役立つ。

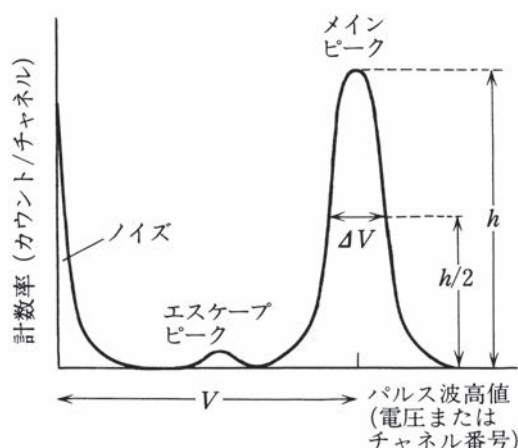


図 9.41 検出器からのパルスの波高分布曲線

(2) エネルギー分解能

エネルギー分解機能をもつ比例計数管，シンチレーション検出器，半導体検出器などでは，入射X線のエネルギーに比例した電圧のパルスが出力される．次々に来るパルスの波高（電圧）の頻度分布（ヒストグラム）をとったものが波高分布曲線で，図 9.41 はその模式図である．メインピークの電圧 V は入射エネルギー E に対応している．ピークの半値幅（*FWHM*, full width at half maximum） ΔV がエネルギー測定 of 広がり ΔE に対応している．検出器のエネルギー分解能は $(\Delta V/V) \times 100\% = (\Delta E/E) \times 100\%$ で定義される．

X線分光実験などで高いエネルギー分解能が必要な場合は，結晶回折を利用した分光が行なわれる．半導体検出器はエネルギー分解能が結晶による分光よりは劣るが，検出器自身で簡便に迅速な測定ができる．比例計数管とシンチレーション検出器のエネルギー分解特性は結晶による分光の際に残る高次光の除去にも役立てられる．

(3) 不感時間による数え落とし

検出器は強いX線を入射させると，数え落としが多くなるとともに，検出器の特性が劣化し，寿命も短くなる．X線が強いと思われるときは，あらかじめ線源の強度を下げるか，アルミニウムや銅などの箔をX線光路に入れて，吸収によって強度を弱めて，検出器へ不必要に強いX線を入射するのを避ける．

1 個のX線光子が検出器に入ってから，つぎのX線光子が入るまでの時間が短かすぎると，計数可能なパルスを生ずることができなくなる．この最小の時間を**不感時間** (dead time) という．さらに計数回路も元の状態に戻る必要がある．ここではそれも含めて不感時間とし (回復時間ともいう)， τ とおく (計数回路の分解時間は，MCA を使うときを除いて，ふつうは無視できる)．このとき，X線光子の**数え落とし** が起こり，計数率がX線強度に比例しなくなる^{1, 2, 22)}．測定された計数率を N ，真の計数率を N_0 とすれば，単位時間内で計数装置の死んでいる時間は $N\tau$ (これは数え落としの割合を示す) であり，この時間の間に $N_0 N\tau$ だけ数え落とされるから $N_0 = N + N_0 N\tau$ となる．したがって，真の計数率は

$$N_0 = \frac{N}{1 - N\tau} \quad \text{あるいは} \quad N = \frac{N_0}{1 + N_0\tau} \quad (9.10)$$

である．比例計数管やシンチレーション検出器は $\tau \approx 0.1 \mu\text{s}$ で小さいので，約 10^5 cps の計数率でも数え落としは 1% 程度である． 10^6 cps で 10% 程度になる．SSD では $\tau \approx 10 \mu\text{s}$ であるから， 10^4 cps の計数率で 10% 程度の数え落としになる．いずれにしても計数値の統計的変動が目立たない範囲で，数え落としの少ないような条件で計数した方がよい．

このように、不感時間を過ぎてからつぎのX線光子を検出できるという応答の仕方は非まひ型といわれる。これに対して不感時間内にX線光子が入射してそれが新たに不感時間をつくるという応答をする場合には、まひ型といわれ、不感時間は長くなる。 N と N_0 の関係は

$$N = N_0 e^{-N_0 \tau} \quad (9.11)$$

で与えられる。実際には (9.10) と (9.11) の中間にあり、真の計数率が低い ($N_0 \ll 1/\tau$) と両者は一致する。

放射光利用では、数え落としにパンチ構造が関係する。実験条件によって数え落としの補正は異なり、正確な計数には厳密な評価が必要である⁵⁸⁾。

9.9.3 パルス計数の統計的変動

一般に放射線計測のような場合は、時間的にランダムに起こる現象が対象であり、その計数値には統計的変動が伴う。いま一定時間内に平均 $\bar{n}$ 個の現象が起こるとする。その時間内に n 個の現象が起こる確率は、つぎに示す**ポアソン分布** (Poisson distribution) によって与えられる。

$$p(n) = \frac{\bar{n}^n}{n!} \exp(-\bar{n}) \quad (9.12)$$

$\bar{n} > 20$ に対してはこの分布は**ガウス分布** (Gaussian distribution)

$$p(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\bar{n}}} \exp\left\{-\frac{(n-\bar{n})^2}{2\bar{n}}\right\} \quad (9.13)$$

で近似される。

一般的なガウス分布は連続変数 x に対して**標準偏差** (standard deviation) を σ 、平均値を m とするときつぎの式が成り立つ。

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (9.14)$$

(9.13) は (9.14) において $\sigma = \sqrt{\bar{n}}$ 、 $m = \bar{n}$ とおいた場合に相当する。図 9.42 に示すようにガウス分布 $p(x)$ では $m - \sigma$ と $m + \sigma$ の間に入る割合は 68.3 % である。 $m - 0.674\sigma$ と $m + 0.674\sigma$ の間に入る割合は 50 %、 $m - 1.96\sigma$ と $m + 1.96\sigma$ の間に入る割合は 95 % である。またガウス分布の**半値 (全) 幅** (full width at half-maximum, *FWHM*) は $2\sqrt{2\ln 2}\sigma = 2.35\sigma$ である。

計数値の測定誤差として標準偏差 σ を用いた場合は**標準誤差** (standard error) とよばれる。なお 0.674σ を用いた場合は**確率誤差** (probable error) とよばれる。

平均 $\bar{n}$ の計数値が得られている場合の標準偏差は $\sigma = \sqrt{\bar{n}}$ (平均値の平方根, rms 値 (root-mean squared value)) で与えられるが、いま 1 回の測定で計数値 n が得られたとき、実際上 n は $\bar{n}$ に近いとして、誤差を $\sqrt{n}$ と見積ることができる。したがって計数値とその誤差は $n \pm \sqrt{n}$ のように表わされ、相対誤差は $\sqrt{n}/n = 1/\sqrt{n}$ である。例えば $N = 10^2, 10^3, 10^4$ のときそれぞれ 10 %, 3 %, 1 % の相対誤差があることになる。測定時間 t を長くして計数値 n を大きくすれば、相対誤差は $\sqrt{t}$ に逆比例して小さくなる。

測定を N 回くり返して、 n_j ($j = 1, 2, \dots, N$) の計数値が得られたときは、平均値とその誤差はそれぞれつぎのように表わされる。

$$\bar{n} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N n_i, \quad \sigma_{\bar{n}} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N n_i} = \sqrt{\frac{\bar{n}}{N}} \quad (9.15)$$

バックグラウンドがあるときの誤差の評価はつぎのようになる。時間 t_G の間に測られる計数値を G 、時間 t_B の間に測られるバックグラウンドの計数値を B とすれば、正味の計数率 (counting rate) とその誤差はそれぞれつぎのように与えられる。

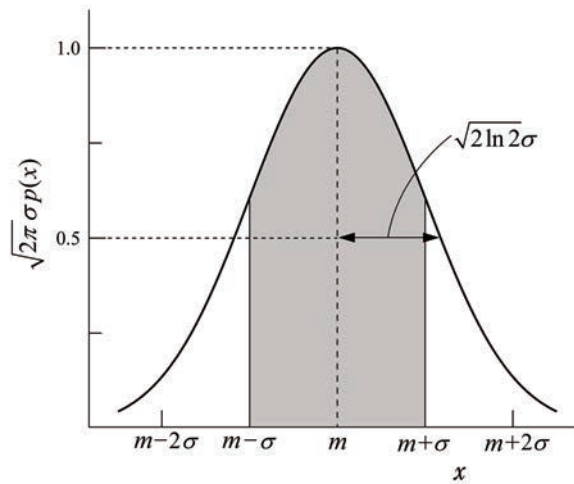


図 9.42 ガウス分布のプロファイル

$$r = \frac{G}{t_G} - \frac{B}{t_B}, \quad \sigma_r = \sqrt{\frac{G}{t_G^2} + \frac{B}{t_B^2}} \quad (9.16)$$

一方、それぞれ N 回ずつ測定し、 G_j と B_j ($j = 1, 2, \dots, N$) の計数値が得られたときは

$$\bar{r} = \frac{1}{N} \left(\frac{\sum_i G_i}{t_G} - \frac{\sum_i B_i}{t_B} \right), \quad \sigma_{\bar{r}} = \frac{1}{N} \sqrt{\frac{\sum_i G_i}{t_G^2} + \frac{\sum_i B_i}{t_B^2}} \quad (9.17)$$

のようになる．バックグラウンドが無視できるとき相対誤差は

$$\sigma_{\bar{r}}/\bar{r} = 1/\sqrt{\sum_i G_i} \quad (9.18)$$

となり、前述の全計数値に対するのと同じ結果を与える．

(スペクトル分布における偽のピーク)

検出器に入射した X 線が有感層の構成元素の吸収端よりも高いエネルギーをもつとき、光電吸収されて蛍光 X 線を生ずるが、その一部が有感層の外に逃げ去る可能性がある．そのとき入射 X 線光子がメインピークに寄与せずに、メインピークから蛍光 X 線のエネルギー分だけ差し引いたところに小さなピークをつくる．これが**エスケープピーク** (escape peak) とよばれる (図 9.41 参照)．半導体検出器の場合、例えば Ge 検出器では入射 X 線のエネルギーが 11 keV 以上であると GeK α 蛍光 X 線に関わるエスケープピークが生ずる．比例計数管の場合も同様である．Kr 比例計数管では MoK α 線に対してエスケープピークの方がメインピークよりも大きくなるので注意を要する．

計数率が高いときには、先行のパルスの持続時間の間につぎのパルスが来て重なり、パルス波高が高くなることがある．この現象を**パイルアップ** (pile up) という．メインピークのエネルギーが M のとき、 $2M$ のエネルギーのところに小さなピークが生ずる．また 2 つのメインピークがあり、それらのエネルギーを M_i と M_j とすると、 $M_i + M_j$ のところにピークを生ずる．このようなピークは**サムピーク** (sum peak) とよばれる．パルス幅が短ければ、このようなピークはできにくい．

参考文献

- 1) Glenn F. Knoll: 「放射線計測ハンドブック」 第3版, 木村逸郎・阪井英次訳, 日刊工業新聞 (2001).
- 2) 岸本俊二, 田中義人編: 「放射光ユーザーのための検出器ガイド」 講談社 (2011).
- 3) E. Gatti and P. Rehak: Nucl. Instrum. Methods A **225** (1984) 608.
- 4) 鈴木昌世, 豊川秀訓: 応用物理 **69** (2000) 380.
- 5) F. W. Lytle, R. B. Gregor, D. R. Sandstrom *et al.*: Nucl. Instrum. and Methods **226** (1984) 542.
- 6) 橋爪弘雄: 日本金属学会会報 **24** (1985) 881.
- 7) 山中高光: 理学電機ジャーナル **21** (1990) 13.
- 8) G. Charpak, R. Bouclier, T. Bressani *et al.*: Nucl. Instrum. and Methods **62** (1968) 235.
- 9) 泉 隆俊, 橋爪弘雄: 日本結晶学会誌 **18** (1976) 102.
- 10) M. Suzuki, H. Toyokawa, M. Mizumaki *et al.*: Nucl. Instrum. and Methods A **467-468** (2001) 1121.
- 11) Catalog 91/92, Oak Ridge Co. Publ. “EG & G ORTEC Detectors & Instruments for Nuclear Spectroscopy”
- 12) A. H. F. Huggleton: Nucl. Instrum. and Methods **101** (1972) 113.
- 13) T. Nagayoshi, H. Kubo, K. Miuchi *et al.*: Nucl. Instrum. and Methods A **513** (2003) 277.
- 14) H. Toyokawa, M. Itoh, M. Mizumaki *et al.*: Nucl. Instrum. and Methods A **467** (2001) 1132.
- 15) P. Lechner, C. Fiorini, R. Hartmann *et al.*: Nucl. Instrum. and Methods A **458** (2001) 281.
- 16) 藤村 一: リガクジャーナル **38**(2) (2007) 6.
- 17) 伊藤真義, 谷田 肇: 放射光 **21** (2008) 221.
- 18) 張小威, 杉山弘, 依田芳卓: 放射光 **14** (2001) 292.
- 19) P. Webb and A.R. Jones: IEEE Trans. Nucl. Sci. NS **21** (1974) 151.
- 20) 岸本俊二: 放射光 **5** (1992) 25.
- 21) 岸本俊二: 放射光 **21** (2008) 320.
- 22) C. S. G. Cousins: J. Appl. Cryst. **27** (1994) 159.
- 23) K. Sato, H. Toyokawa, Y. Kohmura *et al.*: SPIE Proc. **3774** (1999) 114.
- 24) 高橋健治, 宮原諄二: 日本結晶学会誌 **35** (1993) 256.
- 25) 雨宮慶幸, 大隅一政, 竹村謙一他: 固体物理 **29** (1994) 789.
- 26) 山本雅貴: 放射光 **22** (2009) 210.
- 27) M. Sonoda, M. TaKano, J. Miyahara and H. Kato: Radiology **148** (1983) 833.
- 28) 森 信文, 宮原諄二: 日本学術振興会第145委員会B分科会
- 29) 千川純一, 佐藤史郎, 河村達郎他: 日本結晶学会誌 **24** (1982) 295.
- 30) K. Umetani, H. Ueki, K. Ueda *et al.*: J. Synchrotron Rad. **3** (1996) 136.
- 31) 谷岡健吉, 平井忠明: 応用物理 **71** (2002) 1376.
- 32) 梅谷啓二: 放射光 **14** (2001) 280.

- 33) 平野馨一: X線結像光学ニューズレター No.27, 3月(2008) 1.
- 34) T. Miyoshi, N. Igarashi, N. Matsugaki *et al.*: J. Synchrotron Rad. **15**(2008) 281.
- 35) 伊藤和輝, 雨宮慶幸: 放射光 **13** (2000) 372.
- 36) 雨宮慶幸, 伊藤和輝: 日本結晶学会誌 **45** (2003) 163.
- 37) 上杉健太郎, 竹内晃久, 星野真人: 放射光 **22** (2009) 158.
- 38) 常深 博: 応用物理 **69** (2000) 422.
- 39) 大和田謙二, 中尾裕則, 伊藤和輝: PF News **19** (2002) 50.
- 40) 大久保雅隆: 応用物理 **72** (2003) 1057.
- 41) 倉門雅彦, 蓑輪 眞: 日本物理学会誌 **51** (1996) 425.
- 42) マイクロストリップ半導体検出器.
- 43) E.F. Eikenberry: X-ray Detector Development at the SLS, SPring-8 Seminar, 18, 2003
- 44) 豊川秀訓, 兵藤一行: 放射光 **22** (2009) 256.
- 45) 豊川秀訓: SPring-8 利用者情報 **14** (2009) 300.
- 46) 和泉良弘, 寺沼 修, 高橋昌之他: シャープ技報 92 号 (2005) 24.
- 47) 藤田晃年, 阿武秀郎: 東芝レビュー 66 No.7 (2011) 24.
- 48) 浜松ホトニクス(株) カタログ
- 49) N. Yagi, M. Yamamoto, K. Uesugi and K. Inoue: J. Synchrotron Rad. **11** (2004) 347.
- 50) K. Hasegawa, K. Hirata, T. Shimizu *et al.*: J. Appl. Cryst. **42** (2009) 1165.
- 51) 新井康夫, 三好敏喜, 一宮 亮, 小貫良行: 日本物理学会誌 **65** (2010) 691.
- 52) 谷森 達, 越智敦彦, 西 勇, 日本物理学会誌 **55** (2000) 420.
- 53) A. Oed: Nucl. Instrum. Methods A **263** (1988) 351.
- 54) T. Tanimori, A. Ochi, S. Minami and T. Nagae: Nucl. Instrum. Meth. A **381** (1996) 280.
- 55) R. A. Lewis, A. Berry, C. J. Hall *et al.*: Nucl. Instrum. and Methods A **454** (2000) 165.
- 56) 八木直人: 放射光 **19** (2006) 349.
- 57) 豊川秀訓, 兵藤一行: 放射光 **22** (2009) 256.
- 58) T. Ida and Y. Iwata: J. Appl. Cryst. **38** (2005) 426.

索引

記号／数字	
μ-PIC 検出器	376
1次元高純度ゲルマニウム検出器	360
A	
AD 変換器 (analog-to-digital converter)	379
C	
CCD(charge coupled device, 電荷結合素子) 型検出器	367
CdTe 半導体検出器	360
CMOS(Complementary(相補的) Metal Oxide Semiconductor) 検出器	374
CMOS フラットパネル検出器	374
F	
FOT-CCD 検出器	368
G	
GM 計数管 (Geiger-Müller (ガイガー・ミュラー) counter)	357
GM 領域	350
N	
NaI(Tl) シンチレーション検出器	357
P	
PIN フォトダイオード検出器	361
S	
SOI ピクセル検出器	375
X	
X II-CCD 検出器	369
X線 HARP-FEA 撮像管	367
X線 PbO 撮像管	366
X線検出法	349
X線サチコン撮像管 (SATICON)	366
X線テレビ	366
Y	
YAP (Ce) シンチレーション検出器	358
あ	
アバランシェ・フォトダイオード (avalanche photo-diode, APD) 検出器	362
アレイ状 CCD 検出器	369
位置分解検出器 (position sensitive detector)	349
位置分解電離箱	352
イメージングプレート (imaging plate, IP)	364
イメージングプレートの高速読み取り	365
インターライン転送方式 (interline transfer type)	368
ウィルキンソン (Wilkinson) 方式	379
エスケープピーク (escape peak)	382
か	
ガウス分布 (Gaussian distribution)	381
確率誤差 (probable error)	381
ガス増幅	350
数え落とし	380
ガフクロミックフィルム (GAFCHROMIC Film)	363

カマック (CAMAC, computer aided measurements and control の略) 規格	379
間接入射型 (間接変換型)	366
間接入射型 CCD	368
空乏層 (depletion region)	358
原子核乾板 (nuclear plate)	363
高純度ゲルマニウム (Ge(Hp), intrinsic type) 検出器	360
さ	
再結合領域	350
サムピーク (sum peak)	382
自己消滅ストリーマモード検出器	356
写真測光法 (フォトメトリー)	363
写真濃度 (あるいは黒化度)	363
主増幅器 (main amplifier)	377
シリコンドリフト検出器 (silicon drift detector, SDD)	360
シングルチャネル波高分析器 (single channel pulse height analyzer)	377
真性 (intrinsic, 略して i) 領域	360
シンチレーション検出器	357
スペクトル分布における偽のピーク	382
積分型	349
積分 (integral) モード	377
前置増幅器 (preamplifier)	377
た	
遅延線法	355
超伝導転移端センサー (transition edge sensor, TES)	371
超伝導トンネル接合 (superconducting tunnel junction, STJ) 検出器	372
直接入射型 (直接変換型)	366
直接入射型 CCD 検出器	369
定時計数法 (fixed time mode)	378
定数計数法 (fixed count mode)	378
電荷分割法	355
電子なだれ (アバランシェ, avalanche)	350
電離箱 (ionization chamber, イオン・チェンバー)	351
電離箱領域	350
な	
ニム (NIM, nuclear instrument module の略) 規格	379
は	
ハーブ (HARP, High-gain Avalanche Rushing amorphous Photoconductor) 撮像管	367
ハイブリッド型ピクセル検出器	370
パイルアップ (pile up)	382
波高弁別器 (pulse height discriminator)	377
パルス型	349
半値幅 (full width at half-maximum, FWHM)	381
半導体検出器 (semiconductor detector)	358
ピクセル (pixel)	367
微分 (differential) モード	377
標準偏差 (standard deviation)	381
比例検出器 (proportional counter, PC)	352
比例増幅器 (linear amplifier)	377
比例領域	350
フィルムのガンマ	363
不感時間 (dead time)	353, 380
フラットパネル検出器 (flat panel detector,FPD)	374

プラトー (plateau)	354
フルフレーム転送方式 (full-frame transfer type)	368
ポアソン分布 (Poisson distribution)	381
放電領域	351

ま

マイクロギャップ・ガス検出器 (microgap gas detector)	376
マイクロストリップ・ガス検出器 (microstrip gas chamber, MSGC)	375
マイクロパターン・ガス検出器 (micro pattern gas detector, MPGD)	375

マルチチャネル・スケーリング (multi-channel scaling, MCS)	379
マルチチャネル分析器 (multi-channel analyzer, MCA)	378
マルチワイヤー比例検出器 (multiwire proportional counter, MWPC)	356

ら

ライトル (Lytle) 検出器	352
リチウムドリフト型 (Si(Li), Li drift type) シリコン検出器	360
レンズカップル CCD 検出器	369