

光の検出



高エネルギー加速器研究機構(KEK)
放射光科学研究施設(PF)

岸本 俊二

概要 — X線を中心に —

1. 放射光実験で光を測る
 - 1-1 何を測るか？
 - 1-2 放射光実験で使われる検出器
2. 検出器の基礎
 - 2-1 光検出のしくみ
 - 2-2 信号から情報を得る
 - 2-3 検出器の性能
3. 検出器の開発
 - 3-1 シリコン・アバランシェダイオード検出器
 - 3-2 放射光における検出器利用の今後

1-2. 放射光実験で使われる検出器

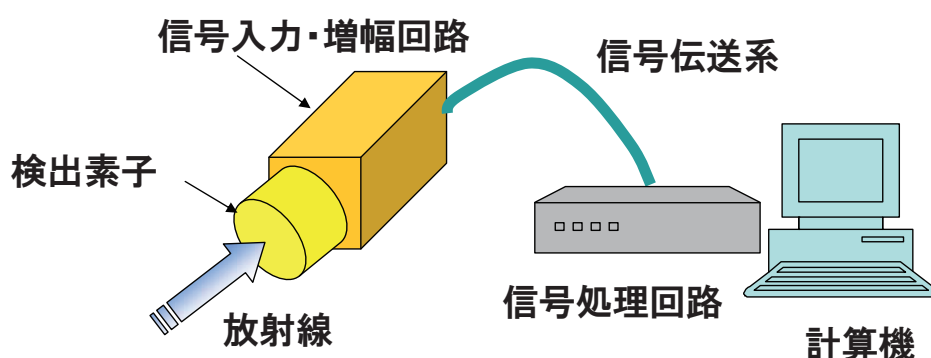
「放射線検出器」によって光(紫外線、X線)や電子、イオンを検出する。

多くの場合、

入射放射線による**電荷の発生**、または**光の放出**を利用して検出する。

電気信号として取り出しデータに変換する。

検出器システムの構成



ガス検出器: 電離箱、比例計数管、GM計数管、
他(MSGC、GEM、...)

半導体検出器: 高純度ゲルマニウム検出器、PINフォトダイオード、
アバランシェフォトダイオード(APD)、CCD、...

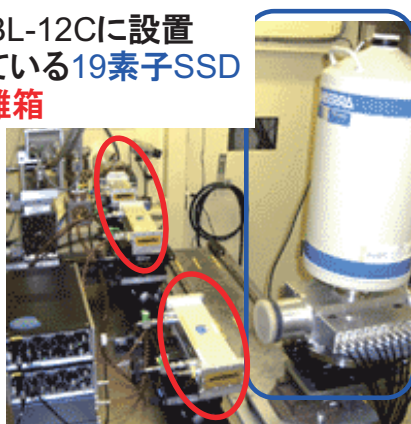
シンチレーション検出器: NaI:TI、YAP:Ce、LaBr₃:Ce、...
イメージングプレート

光電子増倍管(PMT)、マイクロチャンネルプレート(MCP)、...



GM計数管
(サーベイメーター
アロカ TGS-121)

PF BL-12Cに設置
されている19素子SSD
と電離箱

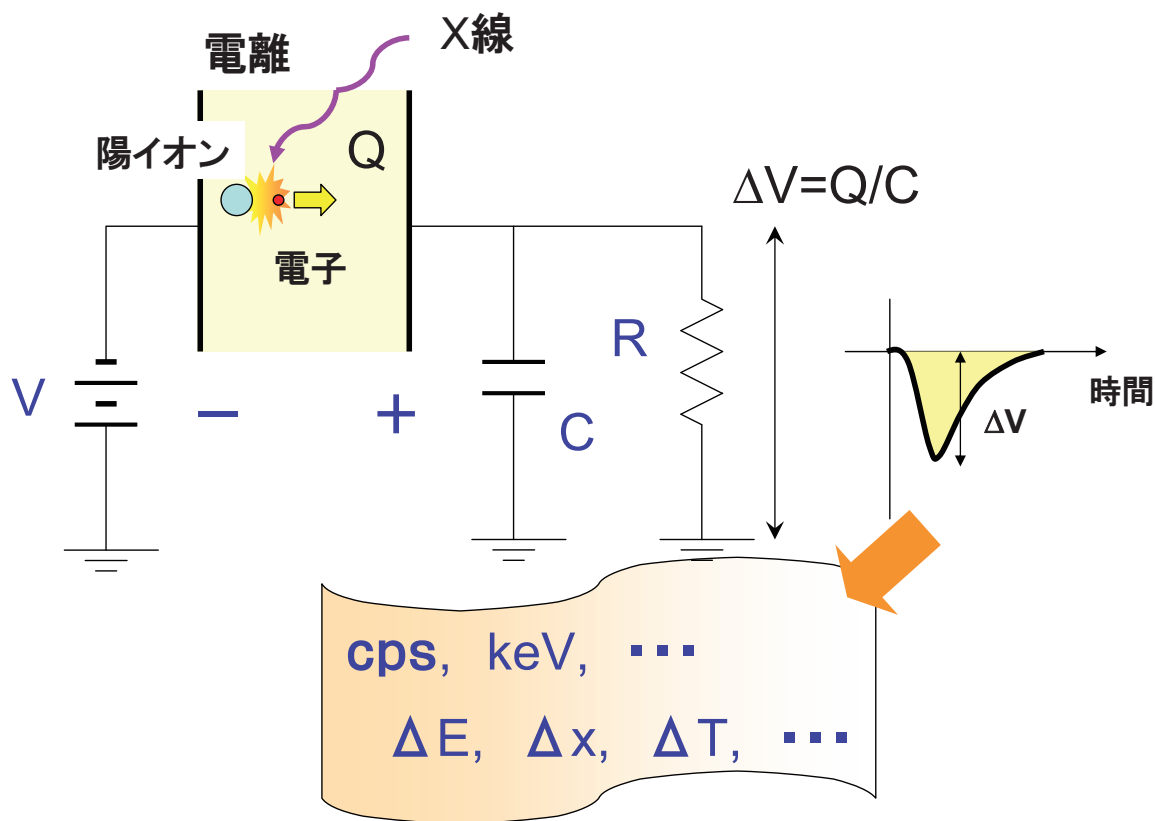


(<http://pfwww.kek.jp/inada/xafsbl/12c/bl12c.html>)



PF BL-17A
実験ハッチ内部

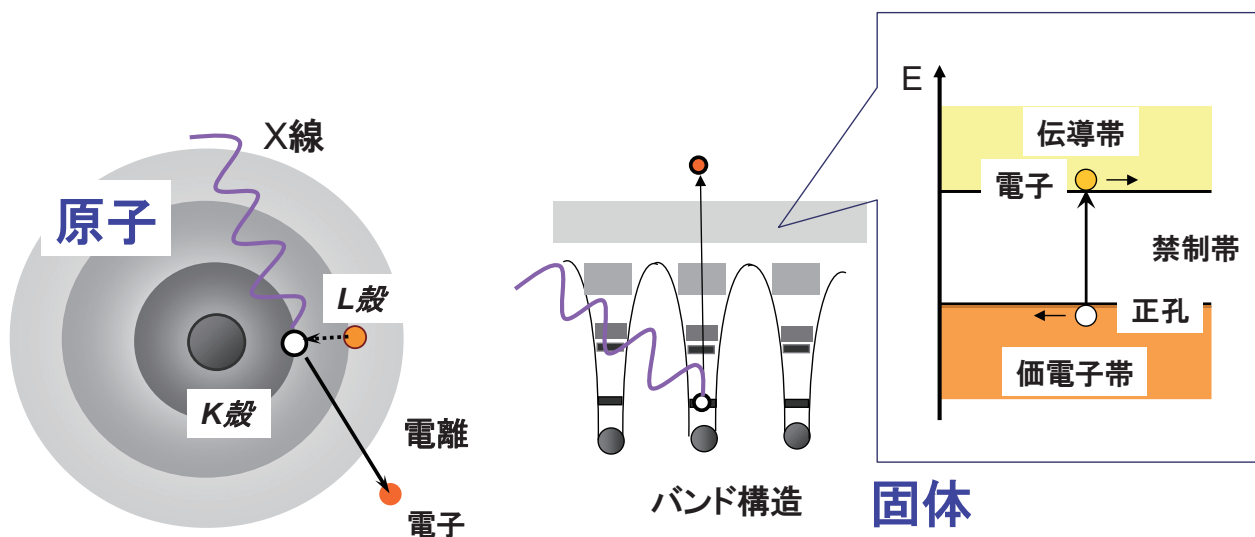
2. 検出器の基礎



2-1. 光検出のしくみ

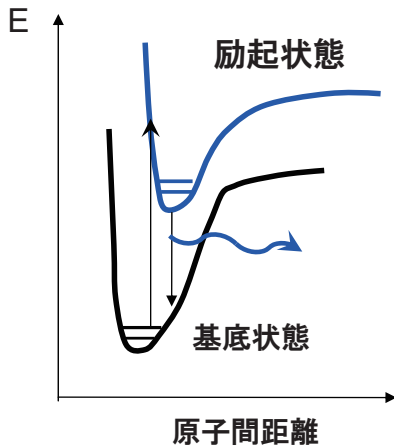
電荷の発生:

気体(液体)中で発生する自由電子を利用。
 固体中で発生する電子-正孔対を利用。固体中の「電離」では電子が価電子帯から伝導帯へ励起される。

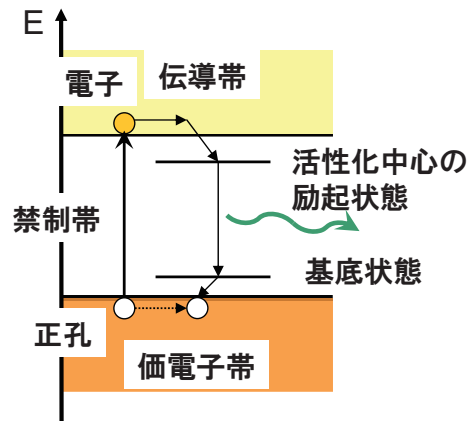


光の放出:

分子や固体中で励起された電子のエネルギー遷移による光の放出を利用。



有機シンチレータ(分子)の発光例



無機シンチレータ(固体)の発光例

光と物質の相互作用

光電効果

エネルギー $E_{h\nu}$ の光が軌道電子(束縛エネルギー: E_b) を放出。運動エネルギーは E_{kin} 。光電吸収係数(断面積、 cm^{-1}) μ_{ph} : 10keVでは銅($Z=29$)の μ_{ph} はシリコン($Z=14$)の25倍。

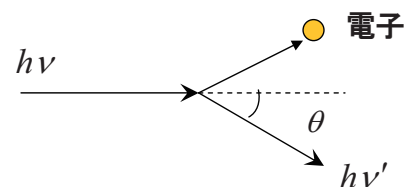
$$E_{kin} = E_{h\nu} - E_b$$

コンプトン散乱

$E_{h\nu}$ 大の光が軌道電子と相互作用、エネルギーを電子に与えて $E_{h\nu'}$ となる。電子のエネルギーは E_e 。コンプトン係数 μ_c : シリコンの場合、 $E_{h\nu} > 50\text{keV}$ で $\mu_c > \mu_{ph}$ (10keVでは μ_{ph} が $\sim 300\mu_c$)。

$$E_{h\nu'} = E_{h\nu} / (1 + (1 - \cos\theta) E_{h\nu} / mc^2)$$

$$E_e = E_{h\nu} - E_{h\nu'} \quad \theta = \pi \text{ のとき、} \quad E_e \text{ が最大。} \quad E_{e \text{ max}} = E_{h\nu} / (1 + (mc^2 / 2E_{h\nu}))$$



その他、

レイリー(Rayleigh)散乱: エネルギーは保存(弾性散乱)。方向が変化。

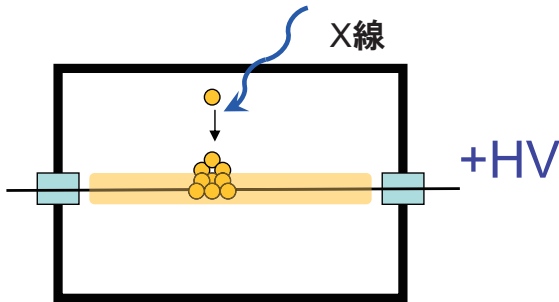
電子対生成: $E_{h\nu} > 1.022\text{MeV}$ のとき、光子が消滅、電子と陽電子が発生。

飛び出した電子はさらに原子と衝突、励起・電離を繰り返してエネルギーを失う。

➡ dE/dx

出力信号として取り出すために、電荷を増幅する。

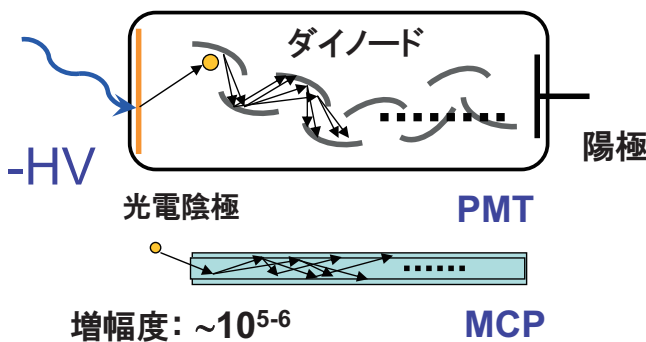
A. ガス中の電子衝突電離： 比例計数管、GM計数管



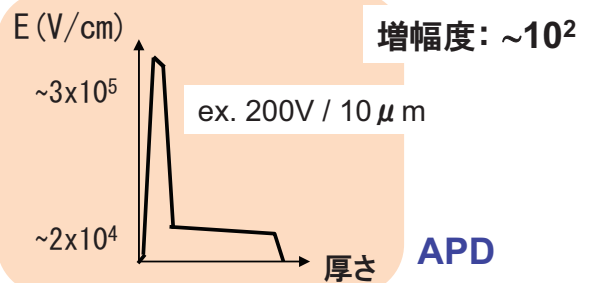
増幅度： 10^4-6

増幅モードが比例領域か、GM領域かの違い。

B. 表面および固体内での増幅： PMT、MCP、APD



高電場を形成、Si内部で衝突電離



2-2. 信号から情報を得る

パルス型

放射線1個あたり1個の
パルスを出力する。

出力信号

積分型・平均値型

ある時間の出力積分値や
平均値を求める。

強度・計数率：

時間あたりのパルス数を調べる。

または、出力電流量や露光時間あたりの電荷量を測る。

エネルギー：

電荷量に比例した波高値を持つ電圧パルスの波高を分析。

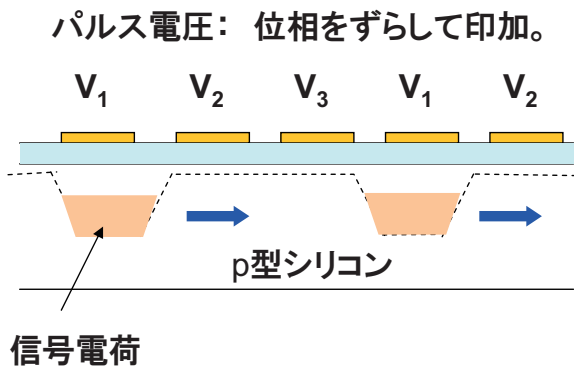
タイミング：

パルス発生タイミング分布。

位置(一次元、二次元):

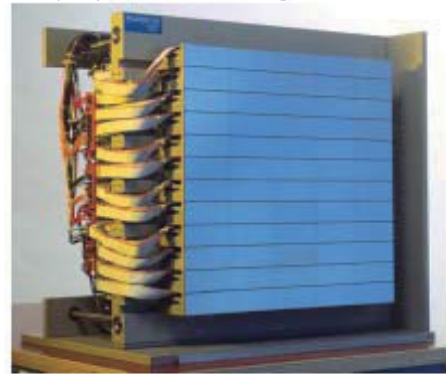
気体や固体検出器に位置読出し回路を工夫して装着。
検出位置を求めるためのいくつかの方式がある。

- A. 電荷分割(抵抗)方式—電極両端で取り出す電荷量の比から位置を求める。
- B. 遅延線方式—電極両端へパルスが伝わる時間差を求める。
- C. X-Yストリップ電極(陽極-陰極)—同時イベントの座標を検出する。
- D. CCD、MOS等、半導体イメージセンサ(蓄積電荷を連続的に読出し可)を利用。
- E. ピクセル方式—Pixel Array Detector, Si-PDタイプなど。



CCD(電荷結合素子)での電荷転送

二次元PADの例



PILATUS-6M @ SLS

(<http://pilatus.web.psi.ch/pilatus.htm>より)

パルス型と積分型・平均値型との比較

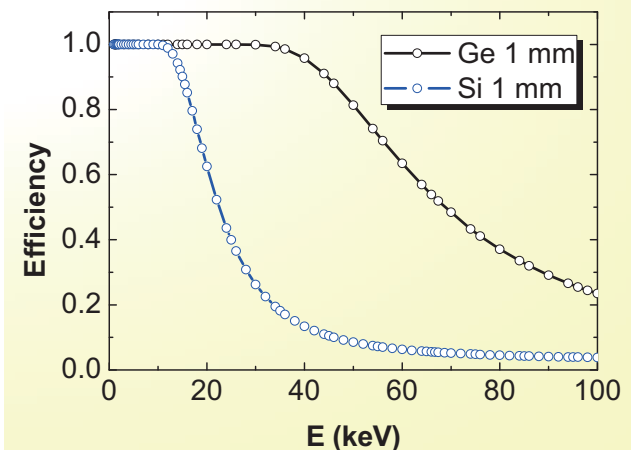
	パルス型	積分型・平均値型
強度	△ 不感時間が問題。 雑音との区別は容易。	○ 不感時間がない。 (「飽和」はある。)
エネルギー	○	△ 複数同時には区別 できない。
タイミング	○	× 測定不可。

2-3. 検出器の性能

(固有)検出効率

検出素子の物性(光や電子との相互作用)に依存。原子番号(1原子あたりの電子の数)、密度(単位体積あたりの電子の数に比例)が重要。立体角も問題になる。

ϵ : 26% (Si 1mm)、
100% (Ge 1mm) @30keV



エネルギー分解能

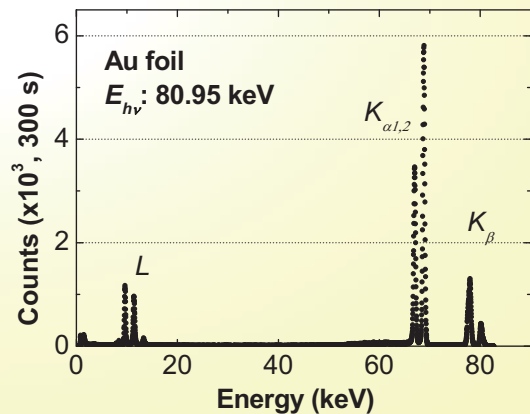
放射線による信号キャリアの数に依存。

ΔE : 100-200eV @ 5.9 keV
(HP-Ge検出器)

$$\Delta E_d = 2.35 \sqrt{F E w}$$

F:ファノ因子(ポアソン統計との比較)~0.1。

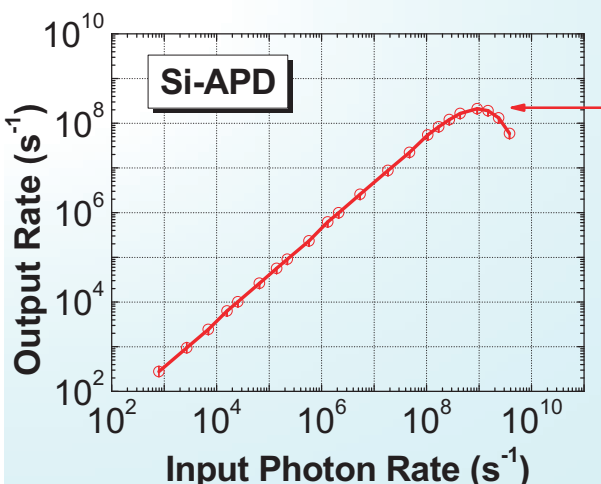
w:e-h対1個生成に必要なエネルギー(2.98eV)



位置分解能

検出素子(ピクセル)の寸法、配置、散乱に依存。
データ処理も重要。

Δx : 100-200 μ m / 20-30cm 2
(CCD検出器)



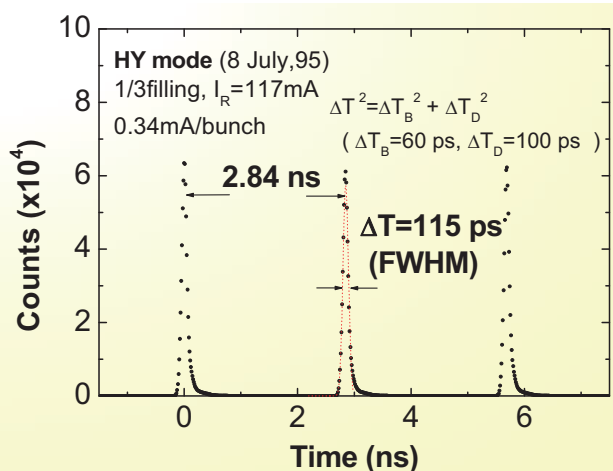
応答速度・時間分解能

信号キャリアの移動速度による。
時間分解能は、応答速度と信号発生場所の分布に依存。

シリコン中の電子のドリフト速度:

max. 1×10^7 cm/s.

ΔT : 0.1-1 ns @ ~10 keV (APD検出器)



3. 検出器の開発

X線吸収で化学反応を観る
時間分解XAFS Dispersive XAFS (DXAFS)

機械的な動きなし
目的エネルギー領域のXAFSスペクトルを一度に測定
単発現象のリアルタイム追跡に適用可能
現在はミリ秒の時間分解 (特殊な検出器を使用して)

(稲田康宏氏(立命館大)作成資料より)

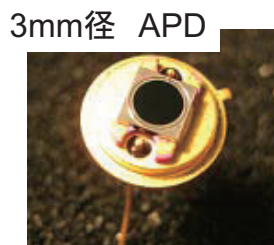
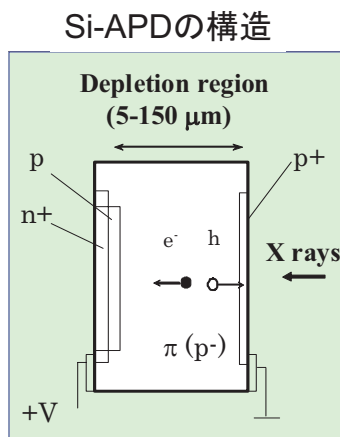
レーザーとX線によるピコ秒時間分解測定 ポンプ・プローブ法

(足立伸一氏(PF)作成資料より。)

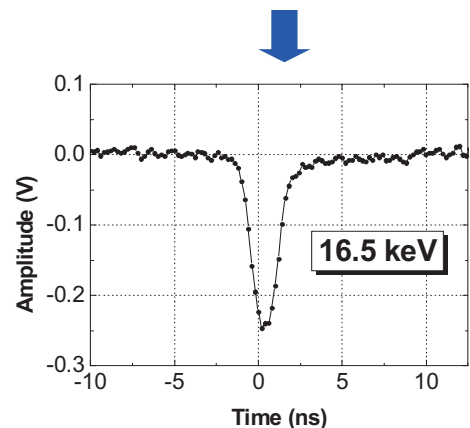
PF-AR NW14A

3-1. シリコン・アバランシェフォトダイオード(Si-APD) X線検出器

10桁に渡る計数率の比例性 (10^{-2} から 10^8 s^{-1})、
ナノ秒以下のタイミングを見分ける。



高周波アンプ(増幅度: 100-400)を使用。
ナノ秒幅パルスを出力。

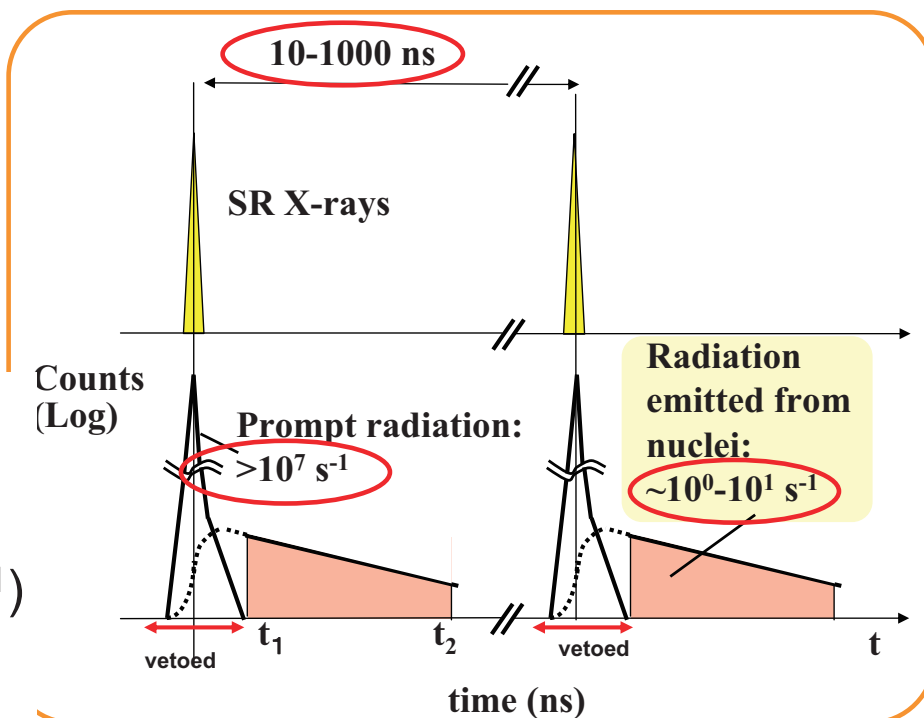


微弱な原子核からの放射線(電子散乱の6-7桁以下)を時間分光法で検出する。

~ 10^{-9} sのスケールで減衰することを利用。



高速応答:
 ns (10^8 s $^{-1}$)
 ダイナミックレンジ:
 10桁(10^{-2} - 10^8 s $^{-1}$)
 時間分解能:
 100 ps-1 ns



3-3. 放射光における検出器利用の今後

「より高速」測定:

二次元デジタル・データの高速収集。
ナノ秒パルス計測。

「より敏感」測定:

雑音、バックグラウンドからの区別: 増幅を利用。
 検出効率を上げる: 素子材料の探索。

「より精密」測定:

エネルギー分解能: 超伝導トンネル接合素子等。
空間分解能: Silicon On Insulator技術(微細電子回路)。
時間分解能: ポンプ・プローブ法(レーザーと組み合わせ)。

➡ 先端的な検出器開発を必要としている。