

第8章 シンチレーション検出器の原理

- ある物質中で発生するシンチレーションの光によって電離放射線を検出することは非常に古くから行われてきた放射線測定のひとつ
- シンチレーション過程は各種放射線の検出器とスペクトル測定を行うためのもっとも有用な方法
- 理想的なシンチレーション材料が保有すべき性質
 - (1) 荷電粒子の運動エネルギーを高いシンチレーション効率で検出可能な光に変える
 - (2) 広い範囲にわたり光の収集が付与エネルギーに比例すること（直線的に行われる）
 - (3) 発生した光の波長にたいして透明であること
 - (4) 誘起したルミネセンスの減衰時間が短く、高速の信号パルスを発生すること*ルミネセンス：物質がエネルギーを吸収してその電子軌道がより高いエネルギー準位に励起され、再び励起状態から基底状態に光を放出する現象
 - (5) 光学的性質が良好で、ある程度の大きさのものが作れること
 - (6) シンチレータの光の屈折がガラスの値に近いこと
- 広く用いられている検出器：無機のアルカリハライド結晶、有機の液体、プラスチック（特徴）
 - 無機材料：光出力との直線性に優れている。応答時間が長い（線測定）
 - 有機シンチレータ：応答が速い、光の収集率が悪い（線測定）
- 蛍光：ルミネセンスの減衰時間が短い場合（即発蛍光と遅発蛍光がある）
- 燐光：ルミネセンスの減衰時間が長い

8.1 有機シンチレータ

8.1.1 有機物質中のシンチレーション機構

- 有機物質中の蛍光過程は単一分子間のエネルギー準位間での遷移によって生じる。（分子の種類によってのみ定まる）
- 実用的なシンチレータの大半は 電子構造をもった有機分子に基本をおいている
- 図 8.1 は有機分子のπ電子のエネルギー準位を示している
分子による吸収を上向きの矢印
蛍光過程を下向きの矢印（ S_10 が基底状態に遷移する時でる光が蛍光、T に系間遷移してから基底状態に遷移するとき放出する光が燐光）
- 励起後の時刻 t における即発蛍光の強度は

$$I = I_0 e^{-t/\tau} \quad (1)$$

：図 8.1 の S_0 準位に対する蛍光の減衰時間

- 図 8.2：図 8.1 に示された準位構造を持つ有機シンチレータに対する光吸収および放出のスペクトルであり吸収と放出の重なりがほとんどないことがわかる
- シンチレータのシンチレーション効率は全ての入射エネルギーが可視光に転換される割合で決まる

8.1.2 有機シンチレータの種類

(1) 純粋有機結晶

- 広く用いられてきている純粋なシンチレータはアントラセン、スチルベンのみ

(2) 有機液体シンチレータ

- 有機シンチレータを適当な媒体中に溶解して有用なシンチレータを得ることができる
- 個体構造がないので、強い放射線照射でも損傷を受けにくい

(3) プラスチックシンチレータ

- 有機シンチレータを融かしたあと、これを高分子化して固溶体を作ることができる

(4) 薄膜シンチレータ

- 非常に薄いプラスチックシンチレータの膜を使ったシンチレータ
- 粒子が検出器を通り抜けるさいに失うごく一部のエネルギーに応答する透過型の検出器として用いることができる

(5) 装荷型有機シンチレータ

- 有機シンチレータはその成分がZの低い炭素や酸素なので 粒子や 粒子を検出するのに有用な検出器であるが 線エネルギーにたいしては有用ではない
- そこでガンマ線に対する光電効果の確率を増すために、有機シンチレータに高いZの元素を加えることが試みられてきた

8.1.3 有機シンチレータの応答

(1) 光出力

- シンチレータ中では荷電粒子が失った運動エネルギーのごく一部が蛍光エネルギーに変換される
- 有機シンチレータの荷電粒子に対する応答

$$\frac{dL}{dx} = S \frac{dE}{dx} \quad (2)$$

dL/dx :単位飛程長あたりに放出される蛍光エネルギー

dE/dx :荷電粒子の比エネルギー損失

S :シンチレーション効率

- 消光の確率を計算するため Birks は上の式を次のように書いた

$$\frac{dL}{dx} = \frac{S \frac{dE}{dx}}{1 + kB \frac{dE}{dx}} \quad (3)$$

kB :特定のシンチレータに対する実験データにあうように調整するパラメータ

- 適切な kB の値は次式で決められる

$$kB = \frac{dL}{dE} \Big|_e / \frac{dL}{dx} \Big|_a \quad (4)$$

- 実験データによりよく合致させるために Birks の式を拡張して

$$\frac{dL}{dx} = \frac{S \frac{dE}{dx}}{1 + kB \frac{dE}{dx} + C \left(\frac{dE}{dx}\right)^2} \quad (5)$$

(2) 時間応答

- シンチレーション効率の時間依存性の詳しいモデルでは以下の2つを考慮に入れる
 - 1, 蛍光状態になるのに要する有限な時間
 - 2, 遅発蛍光と燐光に対応する遅いシンチレーションの成分
- 蛍光準位への励起も指数関数的であり、光パルスの波形が次式で与えられるとすると

$$I = I_0(e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2}) \quad (6)$$

τ_1 : 蛍光準位への励起を表す時定数

τ_2 : その減衰を表す時定数

- この場合全体としての光の関係は

$$I/I_0 = f(t) \cdot e^{-t/\tau} \quad (7)$$

(3) パルス波形弁別

- パルス波形弁別：遅い成分に現れる光の割合が励起粒子の種類に依存することを用いて、同じエネルギーを検出器に付与した異種の粒子間の弁別

8.2 無機シンチレータ

8.2.1 活性化物質入り無機結晶中のシンチレーション機構

- 無機物質中のシンチレーション機構は材料の結晶格子で決まるエネルギー状態に依存する
- 遷移過程を介した可視光の放出率をあげるために無機シンチレータには通常少量の不純物（活性化物質）を加える。（図 8.6）

8.2.2 アルカリハライドシンチレータの特性

(1) タリウム活性化ヨウ化ナトリウム (NaI(Tl))

- シンチレータのなかで最高の光収率
- 吸湿性あり
- 脆く機械的衝撃や熱衝撃で破損しやすい

(2) タリウム活性化ヨウ化セシウム (CsI(Tl))

- CsI は NaI に比べて単位当たり長さ当たりの線吸収率がかなり大きい
- CsI(Tl) は各種の励起粒子に対する減衰定数が違う
- 水や高湿度にさらすと劣化

*M2 シリーズで青野さんが発表した SUMIT 用 SD-CCD に用いたシンチレータ

(3) ユーロピウム活性化ヨウ化リチウム (LiI(Eu))

表 8.3 参照

8.2.3 他の応答の遅い各種の無機結晶

(1) ビスマスジャーマネイト (BGO)

- 単位体積当たりの線吸収率が大きい
- NaI(Tl) を使ったものよりも頑丈
- 活性化物質を添加する必要なし

(2) タングステン酸カドミウム (CdWO₄)

- 比較的長い減衰時間のため、このパルスモード利用は計数率が高くないときにだけ限定される

(3) 銀活性化磁化亜鉛 (ZnS(Ag))

- もっとも古い無機シンチレータのひとつ

(4) ユーロピウム活性化フッ化カルシウム (CaF₂(Eu))

- 吸湿性がないので他のシンチレータが使用できないような厳しい条件でも使用できる

8.2.4 低光収率で光速の非活性化シンチレータ

(1) フッ化バリウム (BaF₂)

- 高い原子番号で減衰時間が 1ns 以下という唯一のシンチレータしかし全光収率は NaI(Tl) の 20 % しかなく得られるエネルギー分解能はかなり悪い

(2) 高純度ヨウ化セシウム

- タリウムで活性化したヨウ化セシウムはあらゆる材料の中で最高のシンチレーション収率をもつ

(3) フッ化セリウム (CeF₃)

- 比較的速い減衰時間を持つ

8.2.5 セリウム活性化高速無機シンチレータ

(1) ケイ酸ガドミウム (GSO)

- 相当大きい単結晶が製作でき、原子番号が大きいのが魅力
*すざくの HXD に使われているシンチレータ

(2) YAP

- 線のエネルギー分解能が良い

(3)YAG

- 発光スペクトルが他の多くのシンチレータと異なり長波長側によっている

(4)LSO

- 光収率は NaI(Tl) の 75 % , 減衰時間 47ns 一般的には , 結晶中の乱れや応力を減らす目的で一定時間高温に保つ工程のことなど興味ある値を示すが価格と大きな構

(5)LuAP

- 線に対する線源衰係数はあらゆるシンチレータのなかで最高
- 天然の放射性同位元素 ^{176}Lu をバックグラウンドとして持つ

8.2.6 ガラスシンチレータ

- 光りの相対的出力が低いが、他のシンチレータの使用が無理な条件（例、高温の場合）でも使用できる
- セリウムで活生化されたリチウムを含む石英ガラスが中性子検出器として広く使われている

8.2.7 気体シンチレータ

- ある種の高純度ガス（キセノンやヘリウム）は有用なシンチレーション材料になりえる
- 気体のシンチレーション効率は非常に低い
- しかし遷移は通常 $2\text{--}3\text{ns}$ という短い時間でおこるので気体シンチレータは放射線検出器の中でもっとも速いものとなりえる
- もっとも大きな欠点は低い光収率 (NaI(Tl)) の $1/10$

8.2.8 無機シンチレータの放射線損傷効果

- 全てのシンチレーション材料は高い放射線のもとに長期間晒されると放射線損傷効果を受けることが多い
- しかし数日おけばアニールがおこり部分的には元に戻ることが多い

*アニール：一般的には、結晶中の乱れや応力を減らす目的で一定時間高温に保つ工程のこと