

4.3 放射線の測定

放射線：電離作用を持つ高エネルギーの電磁波や粒子線。ただし、核反応を起こす中性子線については、低エネルギーでも放射線に分類する。

| 放射線の種類 | 質量 | 電荷 | 透過力 | 遮蔽 | 荷重係数 |
|--------|-------------|--------|-----|---------------|------|
| α線 | $\sim 4m_p$ | +2e | 低 | 紙、空気数cm | 20 |
| 中性子線 | $\sim m_p$ | 0 | 高 | 水、コンクリート | 5-20 |
| β線 | m_e | -e, +e | 中 | アルミ板 | 1 |
| X線、γ線 | 0 | 0 | 高 | 鉛ブロック、コンクリート壁 | 1 |

放射線の単位 グレイ(Gy) 1 Gy = 1J/kgのエネルギー吸収線量
シーベルト(Sv) 吸収線量に放射線の種類ごとの荷重係数を乗ずる

放射能：放射線を出す能力

放射能の単位 ベクレル(Bq) 1秒間に崩壊する原子核の数

放射線研究の歴史

1895年 レントゲン (Wilhelm Conrad Röntgen) によるX線の発見。
透過力の高い放射線。
高電圧で加速された電子が電極に衝突することによる制動放射

1896年 ベクレル (Antoine Henri Becquerel) によるウラン鉱石からの放射線の発見。(写真乾板の感光)

キュリー夫妻 (Pierre Curie, Maria Skłodowska-Curie) による放射性元素、放射能の研究

1903年 ラザフォード (Ernest Rutherford) によるα線とβ線の発見。

1932年 チャドウィック (James Chadwick) による中性子線の発見。

1934年 ジョリオ・キュリー夫妻 (Irène Joliot-Curie, Jean Frédéric Joliot-Curie) による放射性同位元素の研究。

放射線の電離作用を利用する検出方法

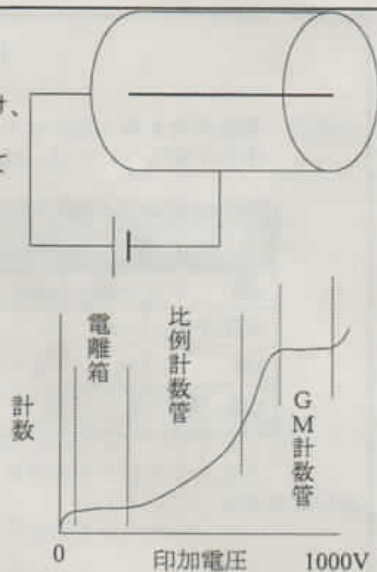
不活性ガスを封入した管の中心部に陰極を取り付け、高電圧を印加する。雲母（マイカ）などの窓から入ってきた放射線によって不活性ガスが電離されて陰極と陽極の間にパルス電流が流れる。
 α 線および β 線の検出に適している。
 γ 線の検出効率が悪い。
 印加する電圧によって以下の3タイプに分類

低印加電圧 電離箱
 低電圧で簡単に検出できる。

中印加電圧 比例計数管
 発生した電荷に比例した信号が得られるので、放射線のエネルギーを計測することが可能。

高印加電圧 GM計数管 (Geiger-Müller counter)
 非常にゲインが高く大きな信号を得られるが、放射線のエネルギーと比例関係にはならない。

管の内側をホウ素でコーティングするか、 BF_3 もしくは ^3He ガスを充填すれば、中性子線に反応する。中性子はB原子核と反応して α 線を、 ^3He 原子核と反応して電子を生成するためである。



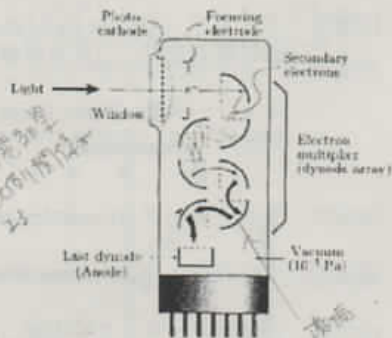
マイカ窓
 透過率が高い
 放射線が透過
 電離作用
 電圧が高くなる
 ゲインが高くなる
 検出効率が高くなる

シンチレーションを利用する検出方法

光電子増倍管：

光電面に光が当たると真空中に光電子が放出される（外部光電効果）。その光電子は集束電極によって電子増倍部に導かれて、2次電子放出によって増倍され、光電子を 10^6 程度に増倍してパルス信号を出力する。ノイズが少なく高感度、高速応答で、微弱光の測定に最適である。

高エネルギーの荷電粒子や γ 線が物質に衝突すると、そのエネルギーは物質中の電子に伝わり、さらに励起された電子がフラッシュ的に光を放出する。これをシンチレーションと呼ぶ。NaIなどの透明な物質からのシンチレーションを光電子増倍管で検出することができる。光電子増倍管の出力パルスを波高分析することによって、入射した荷電粒子やガンマ線のエネルギー分布を計測することができる。



光電子増倍管
 高感度
 高速応答

マルチチャンネルアナライザー：

シンチレーション光の強さは入射する放射線のエネルギーに比例するため、光電子増倍管の出力信号の波高は放射線のエネルギーに比例する。多チャンネルで波高分析を行うことによって効率的にエネルギースペクトルを計測する。

半導体を利用する検出方法

フォトダイオード (photodiode) :

半導体内部での光電効果 (内部光電効果) を利用するもので、X線から赤外の広い領域で用いられる。半導体中で光励起された電子あるいは正孔による電気伝導度の変化を検出する光導電型と、電子と正孔が分離することによって生じる電位差 (光起電力) を検出する光起電力型がある。最も典型的な光起電力型の検出器はフォトダイオードであり、ショットキー接合やPN接合の両側に電荷分離によって生じる電位差を検出する。

(a) ショットキー接合 (b) PN接合

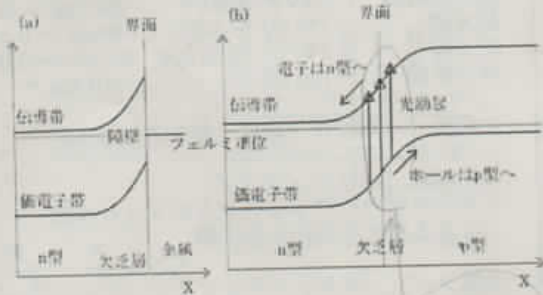
PINダイオード:

p型層とn型層の間に不純物を混ぜない真性層を設けて、空乏層を大きくすると、入射光子の吸収効率が良くなる。



アバランシェ・ダイオード:

空乏層の一部にPN接合による強力な電界を作り、吸収光子によって作られた一次キャリアがこの電界によって加速され、さらに他の電子を価電子帯から伝導帯へ励起する光電子増倍効果を持つ。



フォトダイオード
等価回路
外部回路の電圧
等価回路

異相電荷の
分離
検出

PET (Positron emission tomography) ポジトロン断層法:

PETとは、陽電子を放出する放射性トレーサーをガス吸入等によって血管内に投与して、陽電子が生体内の電子との対消滅によって生成するガンマ線を環状に並べたシンチレーション計測器で検出して断層画像を構築する技術である。代謝の活発な部位に集るグルコースに放射性トレーサーを付加することで、脳の代謝レベルを観察する手法として活躍してきた。また、脳血流量の計測にも利用される。近年、腫瘍組織におけるグルコース代謝レベルの上昇を検出することにより癌の診断に利用されるようになった。

グルコース代謝量: トレーサーとして¹⁸F-fluorodeoxy glucose (FDG) を主に用いる。
脳血流量: トレーサーとして、¹⁵O₂やH₂¹⁵O を主に用いる。

これらの同位体の半減期は数分から数時間程度であり、利用にあわせて専用のサイクロトロンで製造する。十数MeVまでH₂⁺イオンをサイクロトロン加速して、¹⁴Nへの重陽子の照射で¹⁵O(d,n)¹⁴N過程によって¹⁵Oを製造、¹⁸Oへの陽子照射で¹⁸F(p,n)¹⁸O過程によって、またはNeへの重陽子照射で¹⁸F(d,α)²⁰Ne過程によって¹⁸Fを製造する。

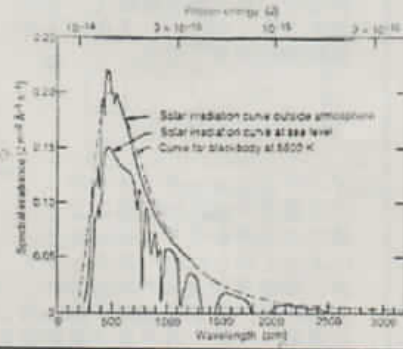
4.4 光の測定

| | | | |
|--------|-----------------|------------------|-------------------|
| 電波 | | 100 km ~ 0.1 mm | 3 kHz ~ 3 THz |
| マイクロ波 | | 10 cm ~ 1 cm | 3 GHz ~ 30 GHz |
| ミリ波 | | 1 cm ~ 1 mm | 30 GHz ~ 300 GHz |
| テラヘルツ波 | | 1 mm ~ 0.1 mm | 300 GHz ~ 3 THz |
| 遠赤外線 | | 1 mm ~ 4 μm | 300 GHz ~ 100 THz |
| (近)赤外線 | 0.3 eV ~ 1.7 eV | 4 μm ~ 700 nm | |
| 可視光 | 1.7 eV ~ 3.2 eV | 700 nm ~ 380 nm | |
| (近)紫外線 | 3.2 eV ~ 6 eV | 380 nm ~ 200 nm | |
| 真空紫外線 | 6 eV ~ 120 eV | 200 nm ~ 10 nm | |
| 軟X線 | 120 eV ~ 2 keV | 10 nm ~ 0.6 nm | |
| 硬X線 | 2 keV ~ 100 keV | 0.6 nm ~ 0.01 nm | |
| ガンマ線 | 100 keV ~ | 0.01 nm ~ | |

太陽光：エネルギー密度 最大約1kW/m²

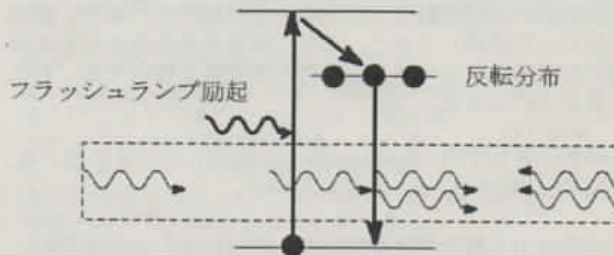
白熱電球、ハロゲンランプ：
ガラス球内のフィラメントのジュール熱による発光を利用した光源

水銀ランプ、キセノンランプ：
ガラス管内の水銀蒸気やキセノンのアーク放電による発光を利用する。
蛍光灯は水銀が発生する波長253.7 nmの紫外線を蛍光体で可視光線に変換する。



3 準位系によるレーザー発振

最初のレーザー発振：T. H. Maiman, Nature 187, 493-494 (1960).
人工ルビー-Cr:Al₂O₃の配位子場遷移を利用
フラッシュランプ励起によるパルス出力のみ可能



光共振器：

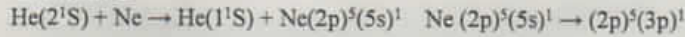
レーザー物質の入っている光共振器は、その両端が2枚の平行な鏡になっており、この2枚の鏡で光子を反射させてレーザー物質中を往復させることによって、誘導放出する光子の数を増やしている。2枚の鏡の距離は、光が定常波を作る距離に設定されている。

4 準位系によるレーザー発振

連続的な出力が可能

He-Neレーザー：632.82 nm

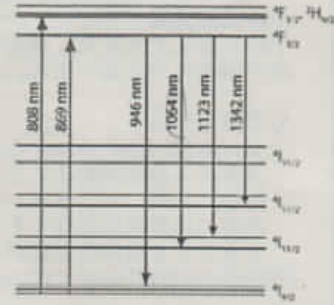
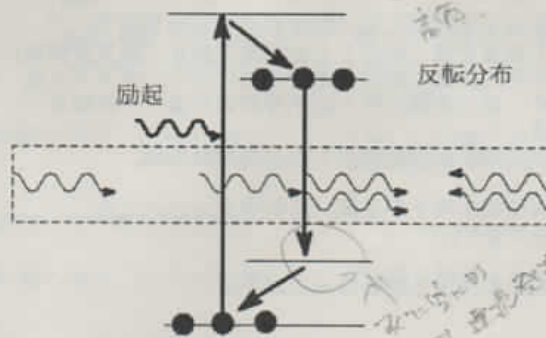
電子線励起



Nd:YAGレーザー：1064 nm

クリプトンフラッシュランプあるいは

ダイオードレーザーによる励起

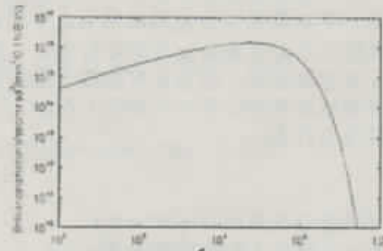


放射光 (シンクロトロン放射)

光速の近くまで加速された荷電粒子が磁場を横切る時、相対論的效果によって軌道の接線方向に連続スペクトルを持つ放射光出す。放射光施設 (Synchrotron Radiation Facility) は、赤外線から硬X線をカバーする光源として利用される。

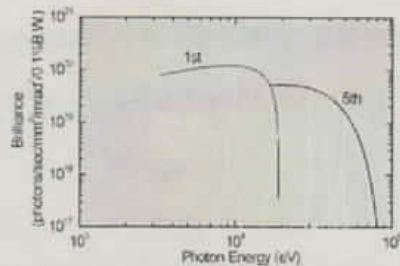
偏向磁石：

磁場によって荷電粒子の軌道を曲げる働きを持つ。SPring-8の偏向磁石は磁場0.679T、軌道半径39.3m、臨界エネルギー28.9keVという磁場特性を持つ。



アンジュレーター：

N極とS極の磁石を交互に並べて周期的な磁場を作り出し、電子を蛇行運動させることによって各周期から光が放出され、強度が増大する。また、磁場強度を変化させる (一般的にはギャップと呼ばれる上下磁石列の間隙を変化させる) ことにより、放射光のエネルギーを変化させることができる。



光の計測 分光器

バンドパスフィルター：
特定の波長の光を選択的に透過させる光学フィルター。

レーザーなど光源の波長にあわせたフィルターを用いると迷光を除去できる。

干渉型分光器：
干渉を起こす光路長に設定することによって、特定の波長を取り出す。
赤外領域の分光器の主流。

分散型分光器：
プリズムや回折格子などの分散素子を利用して、特定の波長を取り出す。
プリズムは回折格子に比べ分散度を高くすることが困難であり、波長分解能に劣る。また、回折格子が幾何学的計算で波長を示せるのに対し、プリズムは素材の屈折率に依存するため、波長の読み取りに不等間隔目盛りや特殊なカムなどを用いる必要がある。
可視および紫外領域では、反射型回折格子を使用した分光器が主流。

真空紫外、軟X線領域でも反射型回折格子が主流。反射率が小さいため、斜入射の条件で使用される場合が多い。

硬X線領域では、ブラッグ反射を利用する結晶分光器が主流。

干渉型分光器

フーリエ変換型分光器は、光の干渉波形を空間あるいは時間の関数として観測し、それをフーリエ変換することによってスペクトルを得る。

フーリエ変換型分光器に最もよく用いられる干渉計は、Michelson干渉計である。光源からの光をレンズで平行光とした後、ビームスプリッターにより2分して、一方を固定鏡、他方を可動鏡で反射させた後、再び重ね合わせて検出器に導く。可動鏡を光軸にそって掃引しながら、検出器上の光の強度を記録すると干渉波形が得られる。

可動鏡の位置はレーザー光によって精度よく校正できる。

赤外領域で有利。

