

1 核種崩壊とその同定

γ 線は原子核内部から出る光（電磁波）で、核種の崩壊に伴って、高くなったエネルギー状態が低くなる時に発生します。この時出る光の色は核種によって決まっていますので、出た光の色を調べれば核種がわかります。これが核種の同定原理です。簡単ですね。

2 γ 線スペクトルと検出器

光の色をエネルギーで分類したものをスペクトル (spectrum) と呼びます。太陽の光をプリズムで分光した時に現れる、虹色の帯もスペクトルの一種です（青側がエネルギーが高く、赤側が低い）。核種ごとに出る γ 線も電磁波の一種ですからスペクトルで表す事ができます。しかし、太陽光と違って γ 線は物凄い高エネルギーの電磁波で、人間の目には見えません。見えませんから色はわかりません。そこで、 γ 線の色を識別するのに良く使われる道具がシンチレータや半導体検出器です。測定所の AT1320A は Cs を添加した NaI を使ったシンチレータ方式で、Ge に比べ、安くて取り扱いが簡単です。しかし、スペクトルの分光能力、すなわち分解能が悲しいかな貧弱です。安かろう悪かろう、ですね。

3 NaI シンチレータによる検出

核種ごとの γ 線エネルギー（光の色）は非常に揃っていて、輝線と呼ばれます。これは、鋭い針のようなスペクトルピーク*1を持っています。優れた分解能を持つ Ge 半導体検出器を使うと、簡単に核種を見分けることができます。しかし、NaI シンチレータ検出器の分解能は、Ge 半導体検出器のその約 1/50 しかありません。Ge 半導体では分離可能な 50 種類の異なる色の光が、全部同じ色に見えてしまう情けなさです。例えば、有名な ^{131}I の γ 線は 364.49KeV のエネルギーピークを持っていますが、ちょっと横の 351.93KeV の所に天然放射性核種である ^{214}Pb の γ 線ピークがあります。この程度のエネルギー差（色の違い）は、Ge 半導体検出器なら見分けられますが、NaI シンチレータでは区別が出来ません。同じ現象が、 ^{134}Cs の 604.72KeV と ^{214}Bi の 609.32KeV でも起きます。あら、どうでしょう？

4 間違いが精度を向上させる？ ～ 統計的性質の利用

NaI シンチレータの分解能が低いのは、 γ 線を受けた NaI 蛍光体が、揃った色の鋭い光を出さないからです。「正確な」色も出すのですが、それに混じって「間違っただ」色も出しているわけです。さらに、蛍光体から出た光は極めてかすかなため、光電子増倍管というアンプで増幅しています。この過程でまた「間違い」が起こり、更に分解能を低下させます。

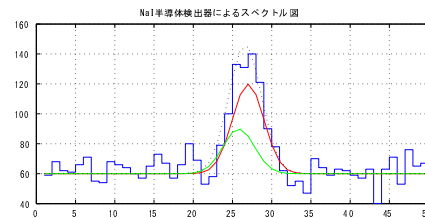
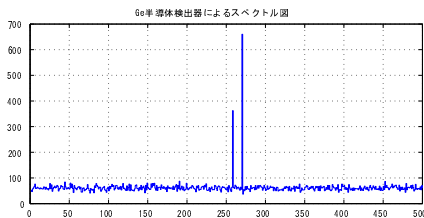
この「間違い」の発生は、シンチレーション現象という物性に基づくもので、消すことは不可能です。「間違い」とは何かメチャクチャなイメージがあります。しかしこの「間違い」の発生頻度は、真の光の色からの離れ具合でだいたい決まっています。実はなかなか律儀なヤツだったんですね。

真の光の色（エネルギー）からのズレの大きさと、数え間違いの光の「数」とに一定の関係があるわけですから、逆に、この一定の関係を前提にして、光の「数」の形状（＝ズレ具合）から、真の光の色（エネルギー）を「推測」することが出来ます。

5 オレピークサーチの動作原理と近接したピークの分離

放射能検出器のスペクトル図は、 γ 線の数を、エネルギー毎に仕分けて数えたものです。AT1320Aのシンチレータ検出器は、盛大に数え間違いを起こすため、おのおのの核種の出す γ 線の周囲に、間違っただけでカウントされた光の数が散らばって観測されます。この間違いカウントは、 γ 線ピークから離れるに従って、だんだんその数が減少していくため、スペクトルの山が徐々に低くなっていきます。このため、でろーんと広がった、鈍いピークを示します。この形状が統計的な確率分布を表しています。AT1320Aでは、おおむねこれを正規分布とみなして*2構いません。オレピークサーチでは、スペクトル図に対し、あらかじめ決め打ちした放射性核種のエネルギーピークを中心とした正規分布曲線でフィッティングを行い、ピークの同定を行なっています。測定器は離散的にしかエネルギーを分解できませんが、正規分布は連続分布なので、測定器のエネルギー区分とは無関係にフィッティングをします。このため測定器の物理的分解能を超えて「推測」することが可能になります。これが近接したピーク分離の原理です。

^{134}Cs と ^{214}Bi を例に解説しましょう。これらの核種も γ 線ピークの周辺に数え間違いによるカウント数が積上げられていて、正規分布型の山ができてはいるはずですが、しかし、この二つの核種はピークが非常に接近して（下左図）、分解能の劣るNaIシンチレータではまるで一つの山のように見えてしまいます。ところが二つの核種はそのピークがずれているため、足し上げた山の形状は、微妙に正規分布とは異なります（下右図）。正規分布を前提にして、このズレ具合を統計的に処理すると、 ^{134}Cs と ^{214}Bi 、どちらがどの程度混ざっているかが推測できます。



*1 真の γ 線エネルギーは輝線ですが、わずかにエネルギー幅（半値幅）を持ちます。その確率分布はCauchy分布となります。

$$f(x) = \frac{1}{\pi} \frac{\eta}{(x - \bar{x})^2 + \eta^2} \quad (1)$$

ここで、 η が半値幅、 x が位置母数でエネルギーになります。 \bar{x} がエネルギーの中央値、 f が γ 線の強さです。Cauchy分布は平均も分散も無いという妙な分布です。

*2 γ 線はCauchy分布ですが、計測器に起因する「間違い」の起こる頻度は、真のエネルギー \bar{x} を平均とする次式の正規分布に従います（Poisson分布は、特定のエネルギー領域で発生する「間違い」発生数の分布）。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{\sigma^2}} \quad (2)$$

σ が分散で、正規分布の広がりを決める母数です。トータル「数え間違い」は、この両者の結合分布となります。正確には次のVoigt分布です。

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{\sigma^2}} \cdot \frac{1}{\pi} \frac{\eta}{(x - \bar{x})^2 + \eta^2} dx \quad (3)$$

これはCauchy分布が積分演算子の中に入っているという凶悪な分布です。とてもじゃないけど僕の手にはおえません。しかし、幸いなことにシンチレータの起こす物性的「間違い」の大きさの前には、Cauchy分布の半値幅はゴミみたいに小さいのです。Cauchy部分は無視してしまっても何の問題もないでしょう。