

放射線計測学

第2回

放射線計測の基礎 および

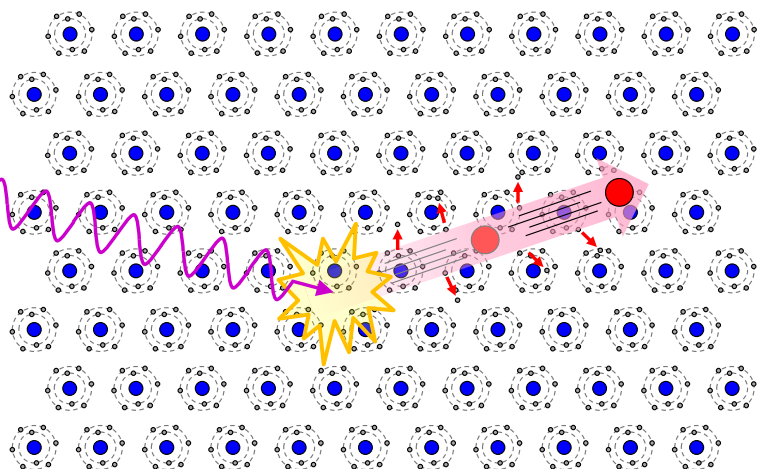
放射線計測における統計

九州大学工学研究院

渡辺 賢一

放射線計測の基礎

放射線計測で得られる情報は？



例えば、間接電離放射線(非荷電粒子)の場合

非荷電粒子  は、

なんらかの相互作用(反応)  を介して、

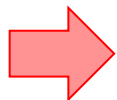
高エネルギー荷電粒子  を生成し、

その荷電粒子が電離&励起  を引き起こす。



放射線検出器から直接得られる情報＝ 電離 or 励起 の量(orしたという事実)

※多くの物質で、平均的に一つの電離 or 励起 を引き起こすために必要なエネルギーはある程度決まっている。(阻止能やLETや電離・励起密度に依存することもあるが)



電離・励起した量 $\propto$ 検出器内に付与されたエネルギー



※放射線そのもののエネルギーではないことに注意！！

一つの放射線粒子
(荷電粒子・非荷電粒子・光子etc)が
引き起こす電離・励起が
それなりの量が存在



個々の放射線の形成
する信号を認識可能



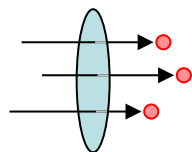
個々の放射線を
数えることができる

放射線計測で取り扱う物理量と単位

エネルギー: E 単位: J(ジュール) = kg m²/s² 物体を1 Nの力で1 m動かすのに必要なエネルギー
放射線計測で良く使う単位

単位: eV(エレクトロンボルト) ⇒ 1個の電子を1 Vで加速して得られるエネルギー
 $E = qV \Rightarrow 1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C} \times 1 \text{ V} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$

フルエンス & フラックス
Fluence & Flux



単位面積を通過する粒子数

フルエンス Φ : 時間積分した量 $\Rightarrow \text{n/cm}^2$
フラックス ϕ : 単位時間当たりの量 $\Rightarrow \text{n/cm}^2/\text{s}$

阻止能 & LET **荷電粒子**が単位距離進む間に失う(物質に与える)エネルギー

阻止能: S

$$S = \frac{dE}{dx} = \left(\frac{dE}{dx} \right)_{col} + \left(\frac{dE}{dx} \right)_{rad}$$

衝突損失
(電離・励起)

放射損失
(制動放射)

質量阻止能

$$\frac{S}{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx}$$

阻止能 $S \propto$ 電子数
電子数 $\propto$ 質量(概ね)
→ S/ρ は物質に寄らず
概ね一定

LET: 線エネルギー付与: L_{Δ}
(Linear Energy Transfer)

$$L_{\Delta} = \frac{dE_{\Delta}}{dx}$$

E_{Δ} : 衝突損失の内
エネルギーが Δ eV 以下の
二次電子によって物質に与える
エネルギー

単位: keV/ μm 等

$$L_{\infty} = S_{col}$$

放射線計測で取り扱う物理量と単位

断面積: σ 各粒子が物質(原子1つ)と相互作用する確率

$$R = \sigma \times N \times \phi$$

反応率
(Reactions/s) 断面積
(cm^2) 原子数
(個) Flux
($\text{n/cm}^2/\text{s}$)

単位: cm^2 (面積の次元)
断面積が大きい方が当たりやすい

1 barn = 10^{-24} cm^2 非常に小さいので

線減弱係数: μ

断面積 σ : 原子1つと相互作用する確率(単位: cm^2)

線減弱係数 μ : 単位厚さあたりに相互作用する確率(単位: m^{-1})

$$-dI = \sigma n I dx = \mu I dx \quad I: \text{粒子数} \quad n: \text{原子数密度}$$

$$\Rightarrow I = I_0 \exp(-\mu x) \quad \text{距離と共に指数関数的に減少}$$

質量減弱係数: μ/ρ 物質の状態(気・液・固体、その密度)に寄らない(データベースではこちらの値)

単位: $(\text{cm}^{-1})/(\text{g/cm}^3) = (\text{g/cm}^2) = \text{cm}^2/\text{g}$ 等 単位面密度あたりに相互作用する確率

W値 & ϵ 値 (単位: eV)

W値: 気体中で一対の電子-イオン対を生成するために必要な平均エネルギー

ϵ 値: 半導体中で一対の電子-正孔対を生成するために必要な平均エネルギー

電離に必要な平均エネルギーが、物質によって概ね決まっているので電離量を測定できれば、物質に付与されたエネルギーを算出できる

※シンチレータの場合:

1 MeVの光子(→電子)が吸収された際の発光量(可視光の光子数): 光子/MeV

放射線計測で取り扱う物理量と単位

吸収線量:D (対象の領域にある)単位質量の物質に吸収されたエネルギー

放射線の種類には
寄らない

$$D = \frac{dE}{dm}$$

単位: J/kg = Gy

古い(CGS系)単位: rad → 100 rad = 1 Gy

吸収線量をベースに各種線量
(等価線量・実効線量 Sv等)
が算出される

カーマ:K Kerma: Kinetic Energy Released in Matter (物質中に付与された運動エネルギー)

間接電離放射線(光子・中性子 等)に対して定義される量

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} \quad \text{(対象の領域にある)単位質量の物質の中で発生した荷電粒子の初期運動エネルギーの総和}$$

※なぜ、Kermaのようなややこしい定義があるのか？

間接電離放射線: (荷電粒子を生成する反応) → (荷電粒子がエネルギー付与) … 2段階でエネルギー付与
→ 荷電粒子のエネルギーが高くなるとエネルギー付与の仕方も複雑に
→ 大まかな効果を見積もるために、

(Kerma) = (反応確率) × (荷電粒子の平均エネルギー) ← すべて吸収されると仮定
→ 領域を無限に大きく設定すれば Kerma = 吸収線量

照射線量:X 単位質量の空気を電離した際に生成される電子 or イオン(片方の極性)の電荷量

(生成された二次電子が完全に止まるまでに電離した電子・イオン対 … 制動放射で出て行く分は除く)

$$X = \frac{dQ}{dm} = \frac{K_{air}(1-g)}{W/e}$$

光子(X線・ガンマ線 等)に対してのみ定義される量

単位: C/kg 等

⇒ X線・ガンマ線の「場」の強度を表す指標
(光子が「空気」を電離する量)

古い単位: R(レントゲン) → 1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg

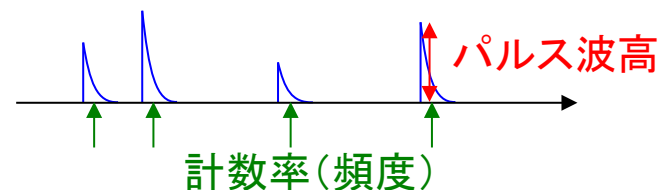
検出器の動作方式

放射線 検出器

逐次読出し
(リアルタイム)

パルスモード

検出器内に生成される信号パルスを、
個別に計測・処理するモード



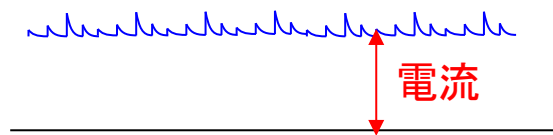
個々のイベントの情報を抽出可能
(パルス波高=エネルギー 等)

高感度の計測が可能

・・・高強度の場の測定には不向き

電流モード

信号を集団的な電流信号として読み出すモード



取得できる情報(平均的な強度 等)は
限られるが、高強度の場の測定も可能

積分型
(線量計)

熱蛍光体、光刺激蛍光体、X線フィルム 等々

パルスモード計測

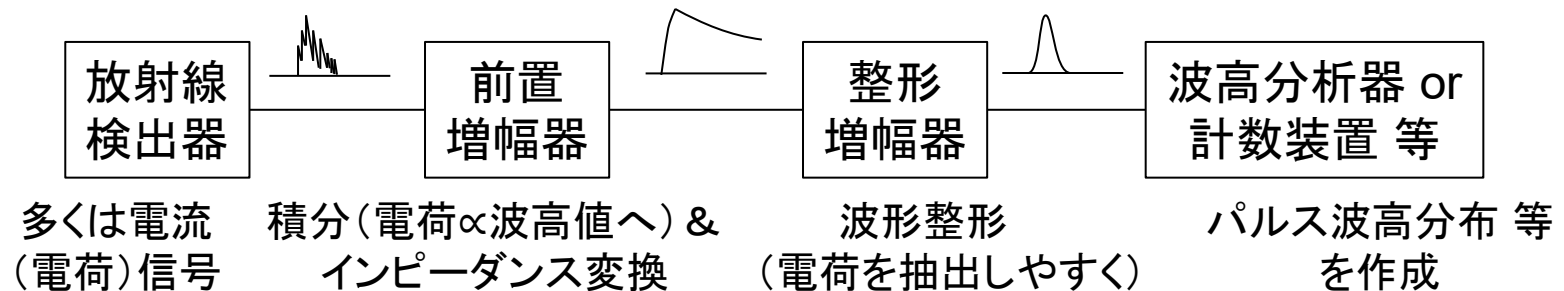
検出器内に生成される信号パルスを、個別に計測・処理するモード

放射線検出器内で生成される信号(通常、微小信号):

- ・電離によってできた電荷
- ・励起され、脱励起する際に放出されるシンチレーション光子
→場合によっては検出器内で増幅(ガス増幅、光電子増倍管)

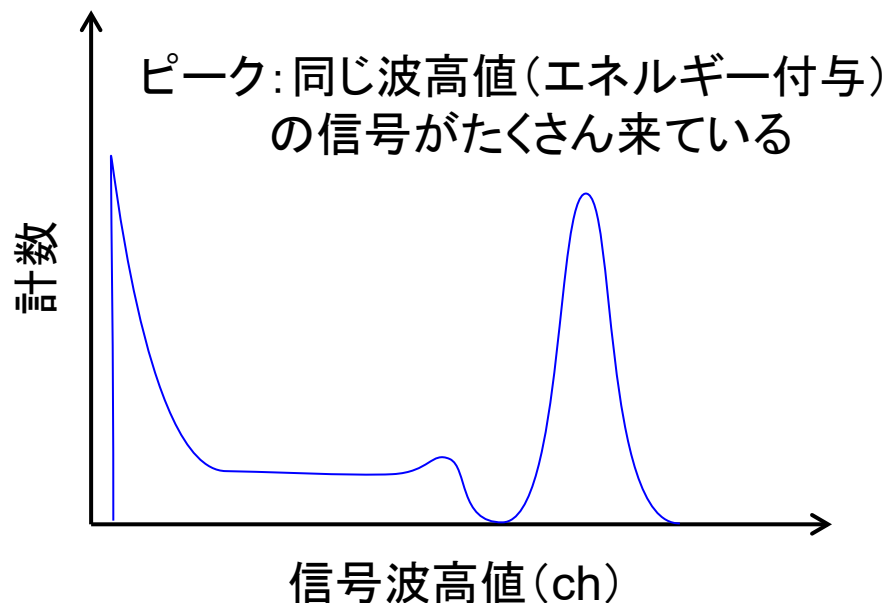
これらの量は検出器内に付与されたエネルギーに比例

典型的なパルスモード計測系



信号波高スペクトル & エネルギー分解能

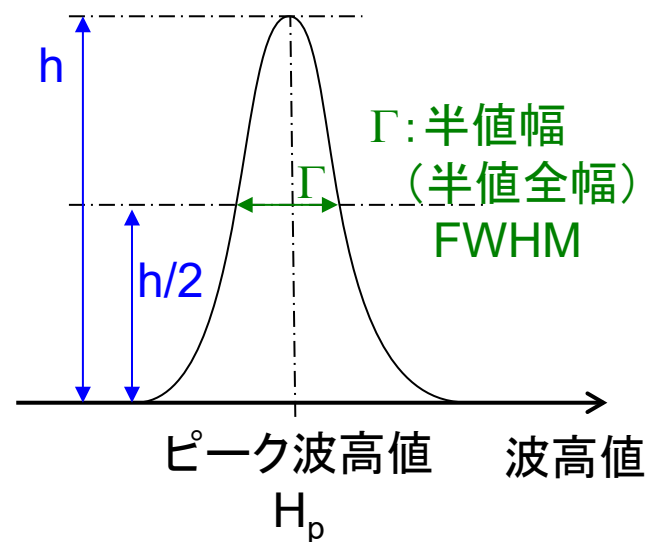
信号波高スペクトル: どの波高の信号がどれだけ来たかを示す頻度分布



ピーク:

例) 半導体検出器中で662 keVの
ガンマ線が光電効果を起こした場合
→662 keVの電子が検出器内に
662 keVのエネルギーを付与
→揃った波高値の信号が多数形成

エネルギー分解能



$$(\text{分解能}) = \frac{\Gamma}{H_p} \times 100(\%)$$

半値幅のピーク波高に対する
相対値

不感時間と数え落とし

パルスモード計測では個々の信号パルスを数えている！

・・・信号が同時に複数来た時には、それらを個別に数えることはできない
→ 一つとして数えられる ⇒ 「数え落とし」

「同時」: どれくらい同時に来たら区別できなくなるか

→ 「不感時間」: 1つ信号が来ると、しばらく次の信号を受け付けない

高計数率時には補正が必要

不感時間のモデル(2種類)

- ・まひ型: 不感時間内にもう一度信号が来ると不感時間は延長
(高頻度で信号が来ると、ずっと不感時間になる可能性あり)
例) GM計数管 等、検出器そのものが原因

$$m = n \exp(-n\tau)$$

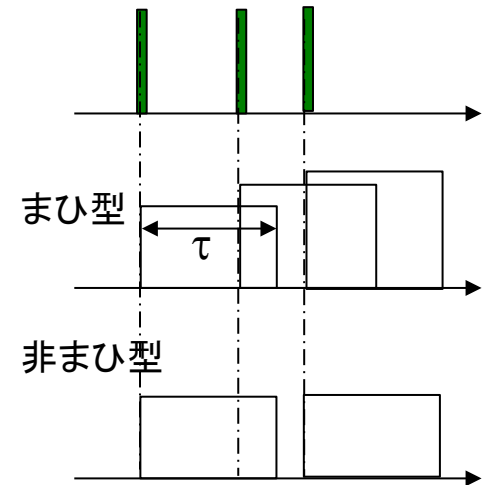
n : 真の計数率
 m : 数え落としをした計数率
 τ : 不感時間

- ・非まひ型: 不感時間内には、全く信号を受け付けないので、
初めの不感時間が終われば復活

例) MCA(マルチチャンネルアナライザ) 等 処理回路が原因

$$n = \frac{m}{1 - m\tau}$$

n : 真の計数率
 m : 数え落としをした計数率
 τ : 不感時間



検出効率

検出器が放射線を検出する効率

・・・いろいろな定義があるので、使うときは注意が必要

絶対検出効率

$$= \frac{(\text{検出された数})}{(\text{線源から放出された放射線数})}$$

放射線源から
放出された放射線が、
どれだけ検出されたか

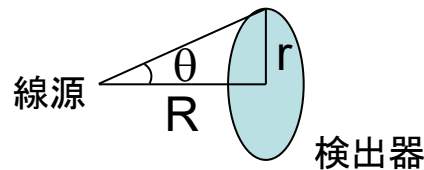
固有検出効率

$$= \frac{(\text{検出された数})}{(\text{検出器に入射した放射線数})}$$

検出器に入射した放射線が、
どれだけ検出されたか

放射線が平行に入射すると見なせれば、、、 $\varepsilon = 1 - \exp(-\mu x)$ μ : 線減弱係数、 x : 検出器厚

$$(\text{絶対検出効率}) = \frac{(\text{線源から見込まれる検出器の立体角}\Omega)}{4\pi} \times (\text{固有検出効率})$$



$$\Omega = 2\pi(1 - \cos \theta) = 2\pi \left(1 - \frac{R}{\sqrt{R^2 + r^2}} \right)$$

相対検出効率

基準となる検出器に対して何%の検出効率となっているか

※基準となる放射線、幾何配置がある

例) HPGe検出器の相対効率

検出器: 3インチ径 × 3インチ長のNaI、放射線: 1.33 MeV(⁶⁰Co)のガンマ線、

幾何配置: 25 cm離れた位置

ピーク検出効率

単に検出するだけでなく、波高スペクトルの

ピークカウントして計数される効率

放射線計測における統計

放射線計測における統計

放射線を計測する際、いろいろな過程において確率的(ランダム)な過程が含まれる

例) 放射性崩壊、放射線と物質の相互作用 etc

→ 放射線計測で得られる情報・・・統計的な変動の影響を受ける

→ 測定で得られた結果の「不確かさ」を評価する必要がある

「不確かさ」と測定の「確からしさ」は表裏一体

・・・極端な話、「不確かさ」の評価されていない測定結果は意味がない

どのような時に統計の知識が役に立つか？

1) 装置の動作チェック

・測定結果は変動するが、統計モデルで予測される範囲か？

2) 統計的不確かさを評価しないといけないが、1回しか測定できず 標準偏差を算出できない時

・・・統計モデルによりある程度評価することが可能

3) 実験計画を立てる際

やみくもに実験を行うのではなく、シミュレーションや基礎実験により
得られる測定値の予測を行う

→ この予測値を元にモデルを用いて統計的不確かさを予測

→ 必要とされる不確かさでデータ取得すべく実験を計画

計測における統計量の定義

測定値の「真値」: 一般的には「知ることのできない神のみぞ知る値」
 → 求めることができるのは、「期待値・推定値」とそれに対する「不確かさ」

※「不確かさ」とよく混同される量⇒「誤差」: 測定された値と真値の差
 何かしらの不具合・間違いがあった時の真値との差・ズレ

如何にして「真値」を推定するか？

→ 複数回測定を行って、**算術平均**や**標準偏差**といった統計量を見積もる

最もよい推定値
算術平均: m

$$m = \frac{\sum_{n=1}^N x_n}{N}$$

この標準偏差は、個々の(1回)測定で
 得られる結果のばらつきの幅「不確かさ」を示す



せっかく複数回測定し、その平均値を
 求めたので、その平均値のばらつきを
 「不確かさ」と使うべき

測定値のばらつき具合を示す指標
分散: V および標準偏差: σ

$$V = \frac{\sum_{n=1}^N (x_n - m)^2}{N-1} \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (x_n - m)^2}{N-1}}$$

※不偏分散を求めるためには
 自由度が1つ減りN-1で割る
 N個のデータで求めた平均 m と使って
 分散を求める時、データの自由度1つ減る

$$\sigma_N = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$$

得られた標準偏差を
 測定回数Nの平方根で割る

$$m_N = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_N}{N} \quad \sigma_N = \sqrt{\left(\frac{\partial m_N}{\partial x_1}\right)^2 \sigma^2 + \left(\frac{\partial m_N}{\partial x_2}\right)^2 \sigma^2 + \dots + \left(\frac{\partial m_N}{\partial x_N}\right)^2 \sigma^2}$$

$$= \sqrt{N \frac{1}{N^2} \sigma^2} = \frac{\sigma}{\sqrt{N}}$$

二項分布

測定値は確率的な過程によりばらつく

二項分布(最も基礎的な確率分布):

1. 各々の試行によりAとBの二つの結果が得られる。
(くじの当たり・はずれ、ある事象が起こるか起こらないか)
2. 各々の試行において、Aの結果が得られる確率 p は常に一定。
3. 各々の試行は、それぞれ独立である。
(ある試行の結果が、次の試行に影響を与えない。)

N回試行を行い、
結果Aがn回得られる確率

$$P(n) = \frac{N!}{(N-n)!n!} p^n (1-p)^{N-n}$$

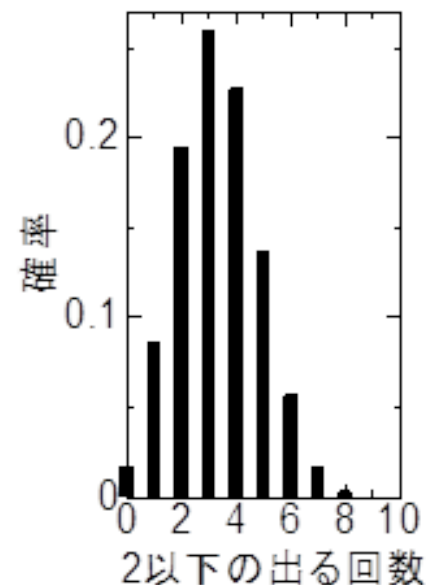
例)サイコロを10回振って2以下の目の出る回数

$$p = 2/6, N = 10$$

2以下の目の出る平均回数:
 $2/6 \times 10 = 3.33$ 回

3回が最多
0回や10回もゼロではない

x	P(x)
0	0.01734
1	0.08671
2	0.19509
3	0.26012
4	0.22761
5	0.13656
6	0.05690
7	0.01626
8	0.00305
9	0.00034
10	0.00002
計	1.00000



二項分布

一般的な性質

N回試行を行い、
結果Aがn回得られる確率

$$P(n) = \frac{N!}{(N-n)!n!} p^n (1-p)^{N-n}$$



規格化条件

$$\sum_{n=0}^N P(n) = 1$$

すべて足すと1となる

平均値:m

$$m = \bar{n} = \sum_{n=0}^N nP(n) = \underline{pN}$$

分散:V

$$V = \overline{(n-m)^2} = \sum_{n=0}^N (n-m)^2 P(n) = \underline{m(1-p)}$$

分散は平均値に比例

標準偏差:σ

$$\sigma = \sqrt{V} = \underline{\sqrt{m(1-p)}}$$

標準偏差は平均値の平方根に比例

ポアソン分布

ポアソン分布(特別な条件下の二項分布):

平均値: $m = pN$ で、 $N \rightarrow \infty$ 、 $p \rightarrow 0$ の極限を取ったもの

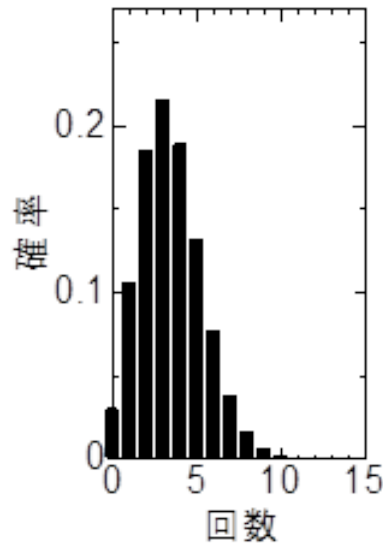
放射線計測で取り扱う事象の多くは、この条件で考えることが可能

結果Aが n 回得られる確率
(平均 m 回の場合)

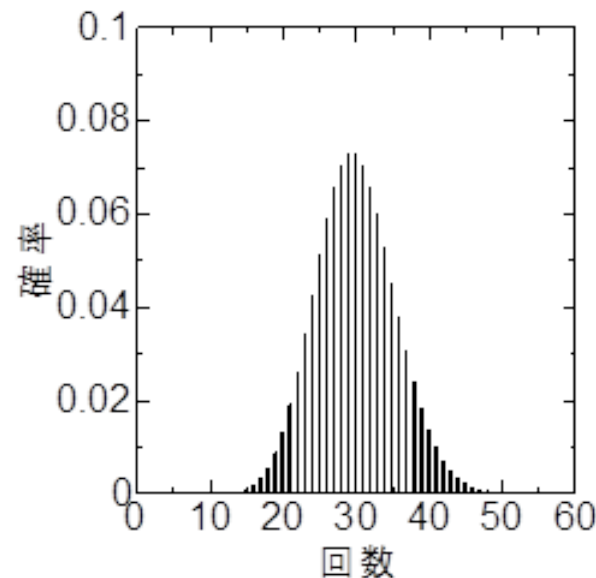
$$P(n) = \frac{m^n}{n!} e^{-m}$$

p や N は具体的に
決まっていなくても良い

例) $m = 3.5$ (左) および $m = 30$ (右) の時のポアソン分布



m が小さいときは非対称な分布



m がある程度大きくなると正規
分布に近づく

ポアソン分布

一般的な性質

結果Aがn回得られる確率
(平均 m 回の場合)

$$P(n) = \frac{m^n}{n!} e^{-m}$$



規格化条件

$$\sum_{n=0}^N P(n) = 1$$

すべて足すと 1 となる

平均値: m

$$m = \bar{n} = \sum_{n=0}^{\infty} n P(n) = \underline{m}$$

当たり前の結果です

分散: V

$$V = \overline{(n - m)^2} = \sum_{n=0}^{\infty} (n - m)^2 P(n) = \underline{m}$$

分散は平均値と等しい

標準偏差: σ

$$\sigma = \underline{\sqrt{V} = \sqrt{m}}$$

標準偏差は平均値の平方根

放射線計数におけるポアソン分布

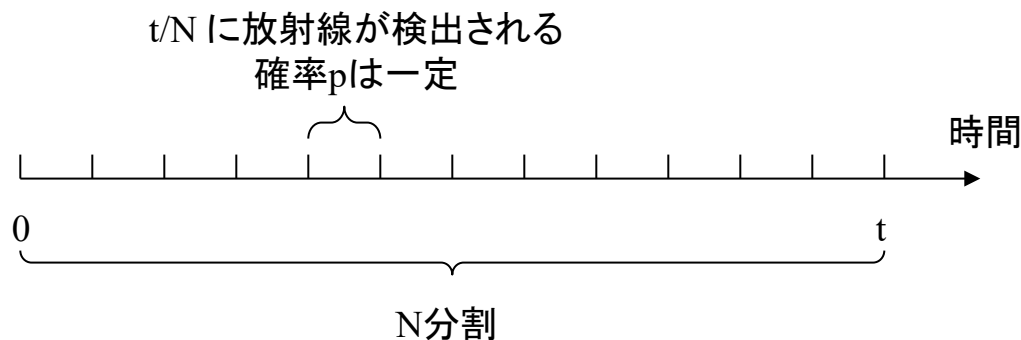
例) 時間 t 秒の間に放射性物質から放出される放射線の数数えることを考える

※ 放射性物質の半減期は計測時間 t 秒に比べ非常に長く、放射性崩壊の起こる確率は一定であるとみなせるとする

計測時間 t 秒を、 N 分割して考える

t/N 秒の間に検出器で放射線を検出する確率 $= p$

(放射性物質が崩壊する確率) $\times$ (検出器の検出効率) $\cdots$ 一定



t/N で2つの放射線を検出しないように $N \rightarrow \infty$ とすると、 $p \rightarrow 0$ $\Rightarrow$ 仮想的に N を大きくしていても検出される数が変わるわけではない
 $m = pN = (\text{一定})$

正に「ポアソン分布」

平均的に m カウント計数されたとすると $\cdots \sigma = \sqrt{V} = \sqrt{m}$

標準偏差は平均カウントの平方根

放射線計数におけるポアソン分布

例) 時間 t 秒の間に放射性物質から放出される放射線の数数えることを考える

平均的に m カウント計数されたとすると $\dots \sigma = \sqrt{V} = \sqrt{m}$ 標準偏差は平均カウントの平方根

通常の測定(例えば質量の測定)では、
複数回の測定を行い右式より標準偏差を
計算する必要がある

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (x_n - m)^2}{N-1}}$$

放射線の計数を行う場合: 1回の計数で(その結果を平均値 m とすれば)、
その標準偏差($\sqrt{m}$)を導き出すことができる

なんか不思議な気もするが...

t 秒間の計測: t/N 秒間の計測を N 回繰り返したと考える (N は非常に大きく、高々1カウント)

各々の測定で1カウント計数される確率は p

→各々の測定で計数される数

(平均は p 、かつ $p \ll 1$) の標準偏差: $\sigma_{t/N}$



$$\sigma_{t/N} = \sqrt{\frac{(1-p)^2 pN + (0-p)^2 (1-p)N}{N}}$$

$$= \sqrt{p(1-p)} \approx \sqrt{p}$$

pN 回 : 1が出る
($1-p$) N 回 : 0が出る

この計数を N 回繰り返して得られ
た平均値 p に対する標準偏差: σ_p



$$\sigma_p = \sqrt{\frac{p}{N}}$$

t 秒間の計数というのは t/N 秒間
の計数を N 回繰り返したもの



t 秒間の計数値の平均: pN 、
その平均値の標準偏差: σ_t



$$\sigma_t = N\sigma_p = \sqrt{pN} = \sqrt{m}$$

正規分布(ガウス分布)

検出される放射線の数や放射線で生成される情報キャリア(電子正孔対やシンチレーション光子)の数の分布は、ポアソン分布あるいは二項分布で表される。

二項分布

$$P(n) = \frac{N!}{(N-n)!n!} p^n (1-p)^{N-n}$$

ポアソン分布

$$P(n) = \frac{m^n}{n!} e^{-m}$$

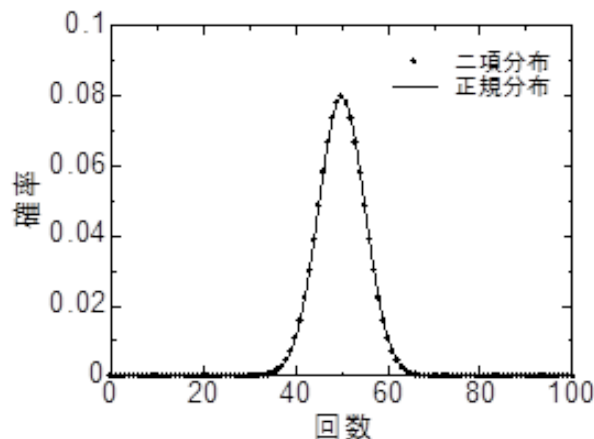
カウント数の階乗を含み、
大きなカウント数の際は適用が困難
・・・加えて整数に対する分布で
実数(計数率等)を扱えない



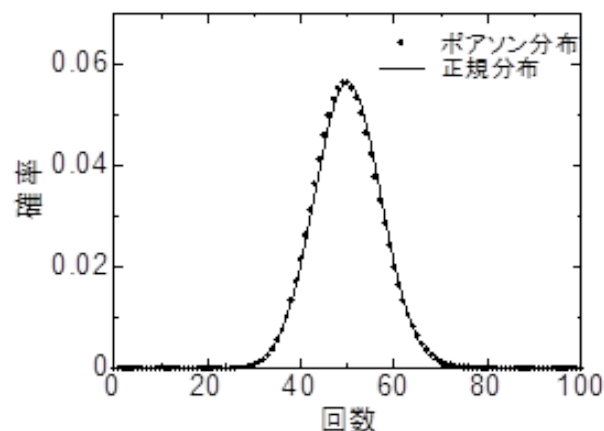
ポアソン分布、二項分布の良い近似となる連続関数分布 → 正規分布(ガウス分布)

正規分布(ガウス分布): $P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right)$ $\left(\begin{array}{l} \text{平均値} : m \\ \text{標準偏差} : \sigma \\ \sum_{x=0}^{\infty} P(x) = 1 \end{array} \right)$

平均が30以上であれば良い近似



$N=100, p=0.5$ の二項分布と
 $m=pN=50, \sigma=\sqrt{m(1-p)}=5$ の正規分布



$m=50$ のポアソン分布と
 $m=50, \sigma=\sqrt{m}=7.07$ の正規分布

正規分布(ガウス分布)

計測の結果が連続関数である正規分布で表現できる

→測定の不確かについて議論する場合に非常に有用

不確かさ: 測定結果の信頼性を示す指標

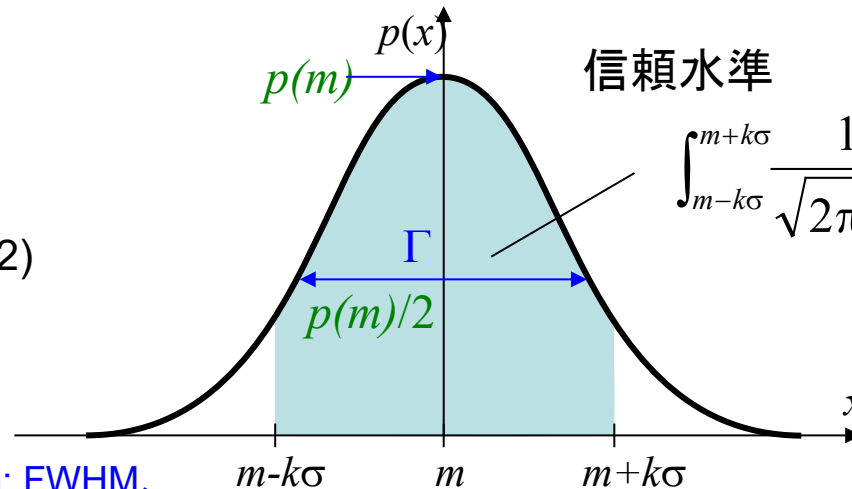
測定値がどれくらいの幅(区間)に、どれくらいの確率(信頼水準)で収まるか

不確かさの表記

$$m \pm k\sigma$$

(k: 包含係数)

例) $123 \pm 22 \text{ Bq}$ ($k=2$)



信頼水準

$$\int_{m-k\sigma}^{m+k\sigma} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right) dx$$

(Full Width at Half Maximum: FWHM、
単に半値幅と呼ぶことも。)

半値全幅 Γ と標準偏差 σ の関係

$$p\left(m \pm \frac{\Gamma}{2}\right) = \frac{p(m)}{2}$$

$$\Gamma = 2\sqrt{2\ln 2}\sigma \approx 2.355\sigma$$

積分区間	その区間に収まる確率
$(m-\sigma) \sim (m+\sigma)$	0.683
$(m-2\sigma) \sim (m+2\sigma)$	0.954
$(m-3\sigma) \sim (m+3\sigma)$	0.997

不確かさの伝搬

多くの場合、いくつかの
測定量を用いて、
何らかの演算を行い
新たな物理量を導出

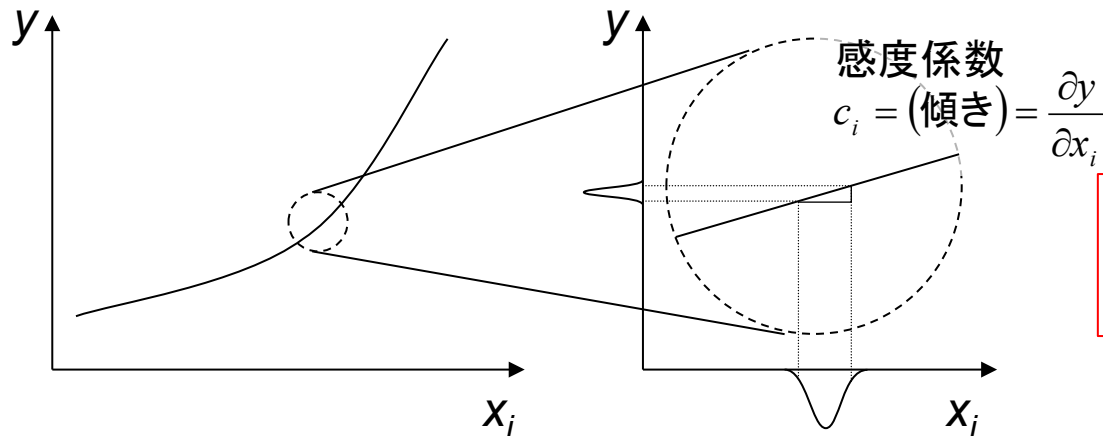


測定量 $x_1, x_2, \dots$ に対して
 $y = f(x_1, x_2, \dots)$ という新たな物理量を導出

物理量 y の不確かさ: σ_y



$$\sigma_y^2 = c_1^2 \sigma_1^2 + c_2^2 \sigma_2^2 + \dots$$



$$\sigma_y^2 = \left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \right)^2 \sigma_1^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \right)^2 \sigma_2^2 + \dots$$

良く使うパターン...

和あるいは差のみで表される物理量

$$y = x_1 \pm x_2 \pm \dots$$

$$\sigma_y = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots}$$

単純な二乗和

積または商で表される物理量

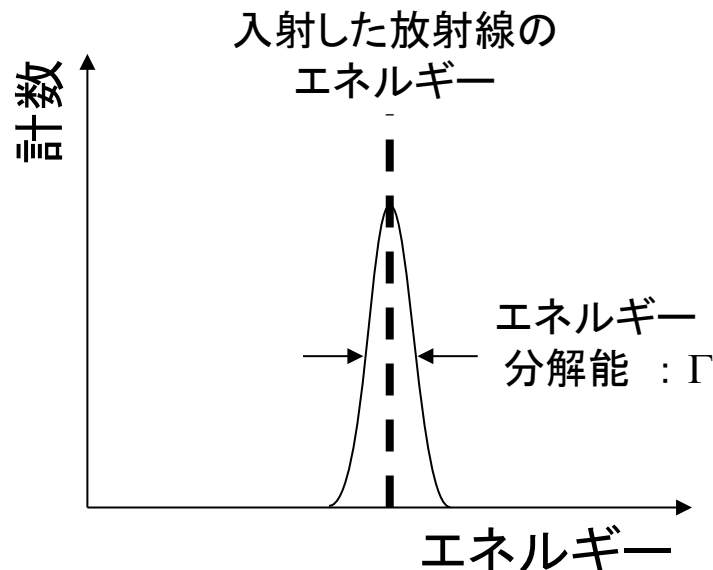
$$y = x_1^{\pm 1} \times x_2^{\pm 1} \times \dots$$

$$\frac{\sigma_y}{y} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_1}{x_1} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{x_2} \right)^2 + \dots}$$

相対不確かさは
各パラメータの
相対不確かさの
二乗和

パルス波高値の分解能

パルス波高スペクトル＝検出器内でのエネルギー付与分布



パルス波高値:

検出器内での生成される情報キャリア数
(電子・イオン対、電子・正孔対、シンチレーション光子)

に対応

一般に情報キャリア数は検出器内に放射線が
付与したエネルギーにおおよそ比例



ピーク幅 = エネルギー分解能
(半値幅 FWHM: Γ)

$$\Gamma = 2.355\sigma$$

エネルギー分解能の要因:

信号処理回路の電子ノイズ、検出器の装置条件の変動、
生成される情報キャリア数の統計的変動 等

$$(\text{エネルギー分解能})^2 = \underbrace{(\text{統計的変動})^2}_{\text{}} + (\text{電子ノイズ})^2 + (\text{条件の変動})^2 + \dots$$

パルス波高値の分解能

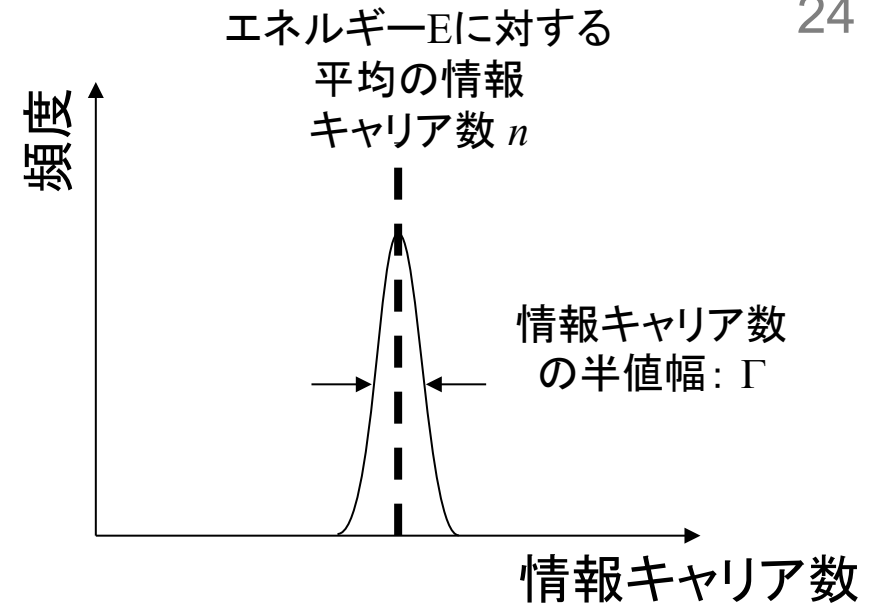
仮に、、、
生成される情報キャリアの数がポアソン分布
に従うとする。

付与されるエネルギー : E
1つ(1対)の情報キャリアを
生成するために必要な平均エネルギー : W

生成される
情報キャリア数 n の平均値: $\bar{n} = \frac{E}{W}$

ポアソン分布に従う場合の
 n の標準偏差:

$$\sigma_n = \sqrt{\bar{n}} = \sqrt{\frac{E}{W}}$$



情報キャリアの数はポアソン分布に従わないときがある・・・

Fano因子: $F = \frac{(\text{実験的に得られる } n \text{ の分散})}{(\text{ポアソン分布で予想される } n \text{ の分散})}$



$$\sigma_n = \sqrt{F \bar{n}} = \sqrt{F \frac{E}{W}}$$

$$\frac{\Gamma}{\bar{n}} = \frac{2.355 \sigma_n}{\bar{n}} = \frac{2.355 \sqrt{F \bar{n}}}{\bar{n}} = 2.355 \sqrt{F \frac{W}{E}}$$

パルス波高値の分解能

おまけ) Fano因子とは？

実際は、複雑な過程を経て電離は起こるので正確な記述ではないが、、

荷電粒子がエネルギー E を失うまでに
検出器内で N 回散乱され、各々の散乱で確率 p で電離が起こるとする

電離により生成される情報キャリア(電子 etc)の数 n の平均値 m : $m = Np = \frac{E}{W}$

情報キャリアの数は二項分布に従う $\rightarrow n$ の標準偏差 σ_n : $\sigma_n = \sqrt{m(1-p)}$

Fano因子は、電離試行イベント内で
情報キャリアが生成される確率 p に
依存

$$F = (1-p)$$



$$= \sqrt{(1-p) \frac{E}{W}} = \sqrt{F \frac{E}{W}}$$

生成確率 p が小さい時 $\Rightarrow F = 1$... シンチレータ 等
生成確率 p が大きい時 $\Rightarrow F < 1$... ガス・半導体検出器 等

ここまで。
お疲れさまでした。