

1. 目的

- ・ 19 素子 Ge-SSD を高計数率条件下で使用する場合の数え落とし補正の手順を解説する。

- ・ 参考文献: KEK PF 野村氏による検出器関係ページ

(<http://pfwww.kek.jp/nomura/pfxafs/detect.html>)

K.Zhang et al., Jpn. J. Appl. Phys. Suppl. 32-2, 147-149(1993).

2. 数え落とし補正の必要性

(1) 数え落としの起源

各 SSD 素子に接続されたプリアンプは、SSD 素子に入射したフォトンエネルギーに比例した波高を持ったパルスを出力する。プリアンプに接続された Spectroscopy AMP(以下、アンプの略)は、プリアンプからの出力パルス信号に対し、設定された Gain と Shaping time により、波形整形を行い、フォトンエネルギーに比例した電圧を持ったパルス波高を出力する。このパルス波高を後段の MCA や SCA で計測する。プリアンプ及びアンプでの信号処理過程において、信号処理時間よりも短い間隔で複数の入力信号があると数え落としが生ずる。別の言い方をするとプリアンプ、アンプには dead time があるといえる。数え落とされたフォトンが高計数率の場合、主にパイルアップとしてスペクトル上に現れる。

(2) XAFS スペクトルへの影響

数え落としは計数率が高くなるほど比率が大きくなるため、XAFS スペクトルにおいては、エッジジャンプ量が実際よりも小さくなり、また XAFS 振動も小さくなってしまう。

(3) 数え落とし補正が必要となるフォトン数の下限の目安

アンプの Shaping time 及び Gain に依存する。高計数率の測定 (Shaping time を $1\ \mu\text{sec}$ 以下に設定) の場合、各 SSD 1 素子に入射する全フォトン数 (SCA の window 内で計測されるフォトン数ではない) に対して、 $10^4\ \text{cps}$ 程度以上では数え落としの補正が必要である。

(4) 数え落とし補正が妥当なフォトン数の上限の目安

これもアンプの Shaping time 及び Gain に依存するが、下記で示す補正式が妥当な領域は、数え落とし率が 20%程度までが安全と思われる。各 SSD 1 素子に入射する全フォトン数で $10^5\ \text{cps}$ 程度である。

(5) SSD 計測で高計数率が必要な理由

上記のように、数え落とし補正を行うことにより、計数率を 10^4 cps から 10^5 cps まで高めることが可能となる。XAFS 測定では理想的には 4×10^6 counts が必要とされている。これは 19 素子 SSD を使用すると 10^5 cps \times 19 素子 \times 2 sec で実現される。しかしながら、SSD で測定することが必要な試料は、極希薄系あるいは極薄膜系の試料であり、目的元素以外の元素からの蛍光、Thomson 散乱、Compton 散乱等が background として SSD に入射し余分に計数率を増加させてしまうため、目的元素の蛍光分は非常に少なくなってしまうケースが殆どである。従って、できるだけ高い計数率で測定することが必須となる。

3. 数え落としを記述する一般式

(1) paralyzable model

dead time 中に生じた event により dead time が更に伸びるとするモデル

$$n_{\text{obs}} = a n_{\text{true}} \exp(-n_{\text{true}})$$

ここで、

n_{true} : 検出器に入射するフォトン数

n_{obs} : 検出器で計測されるフォトン数

a : dead time

a : フォトン数と検出器の出力を関係づける定数

(2) non-paralyzable model

dead time 中に生じた event は dead time に影響を与えないとするモデル

$$n_{\text{obs}} = a n_{\text{true}} / (1 + n_{\text{true}})$$

(3) 中間モデル

上記 2 つのモデルの $n_{\text{true}} \ll 1$ の場合の近似モデル

$$n_{\text{obs}} = a n_{\text{true}} (1 - n_{\text{true}}) \quad \dots \text{eq(A)}$$

4. SSD 実験での数え落とし補正式

・ SSD の数え落とし補正では、中間モデル eq(A) が妥当であることが示されているので、ここでも採用する。

(1) プリアンプの数え落としの dead time を求める式

プリアンプで計測されたフォトン数はアンプで計数され、Canberra アンプでは ICR (Input Count Rate) OUT、Ortec アンプでは CRM (Count Rate Monitor) OUT からモニターできる。以下の記述では、Canberra アンプを用いたと仮定して、ICR と表記する。Ortec アンプを用いた場合 ICR CRM と読み替えること。

n_{10} : 試料上流で 10 イオンチェンバーで測定したフォトン数 (/毎秒)

$n_{ICRtrue}$: 各 SSD 素子への真の入射光子数 (/ 毎秒)

a_{ICR} : 測定機器の配置、検出効率に依存した比例定数

とすると、

$$n_{ICRtrue} = a_{ICR} n_{I0}$$

と書ける。従って、

n_{ICRobs} : 各 SSD 素子のプリアンプで(数え落としされた後)計測される入射光子数 (/ 毎秒)

ICR : プリアンプの dead time

とすると、eq(A)を用いて、

$$\begin{aligned} n_{ICRobs} &\sim n_{ICRtrue} (1 - n_{ICRtrue} ICR) \\ &= a_{ICR} n_{I0} (1 - a_{ICR} n_{I0} ICR) \end{aligned} \quad \dots eq(1)$$

となる。ICR vs I_0 を測定すれば、eq(1)を用いたフィッティングにより、 ICR が求められる。

(2) アンプの数え落としの dead time を求める式

アンプへの入力信号数は ICR の出力 (n_{ICRobs}) から計数される。出力信号数は後段の SCA の window を測定の目的に合わせて設定した状態で、後段に接続したカウンターにより計数される。

n_{SCAobs} : SCA の window で制限された光子数 (/ 毎秒)

a_{SCA} : SCA の window による制限の効果を表す比例定数

AMP : アンプの dead time

とすると、

$$n_{SCAobs} \sim a_{SCA} n_{ICRobs} (1 - n_{ICRobs} AMP) \quad \dots eq(2)$$

と書ける。SCA 出力(カウント数) vs ICR を測定すれば、eq(2)を用いたフィッティングにより、 AMP を求められる。

(3) 数え落とし補正した SCA 出力の求め方

$n_{SCAtrue}$: プリアンプとアンプに数え落としがない場合の SCA の window で制限された光子数 (/ 毎秒)

とすると、

$$n_{SCAtrue} = a_{SCA} n_{ICRtrue}$$

と書ける。ここで、eq(1)より

$$n_{ICRtrue} \sim \{1 - [1 - 4n_{ICRobs} ICR]^{1/2}\} / 2 ICR$$

また、eq(2)より、

$$a_{SCA} \sim n_{SCAobs} [n_{ICRobs} (1 - n_{ICRobs} AMP)]^{-1}$$

であるので、結局

$$\begin{aligned} n_{SCAtrue} &\sim n_{SCAobs} [n_{ICRobs} (1 - n_{ICRobs} AMP)]^{-1} \{1 - [1 - 4n_{ICRobs} ICR]^{1/2}\} / 2 ICR \\ &\sim n_{SCAobs} [1 - n_{ICRobs} (AMP + ICR)]^{-1} \end{aligned} \quad \dots eq(3)$$

となる。以上より、eq(1)と eq(2)により ICR 及び AMP を求め、実験で測定された n_{SCAobs} と n_{ICRobs} を

eq(3)に代入すれば、補正された SCA の出力値 $n_{SCAtrue}$ が求められる。

5. プリアンプとアンプの dead time を求める実験手順

(1) 実験目的の元素からなる標準試料(フォイル等)からの蛍光を SSD で検出できるよう、機器を設置する。

(2) 試料への入射光子数とする光子数を数種類変えながら、下記の3つの量を測定する。

n_{I0} : I0 イオンチェンバーで計測される光子数

n_{ICRobs} : 各 SSD 素子の ICR カウント数

n_{SCAobs} : SCA で制限された window 内の各 SSD 素子のカウント数

試料への入射光子数の調整は、適当な absorber (Al または Cu) を I0 イオンチェンバーの上流にセットして行う。absorber の厚さは、absorber なしの入射光強度を 1 として 1/2、1/4、1/10、1/20、1/50、1/100 程度になるよう計算により求めること。absorber なしの入射強度は ICM 出力が 10^5 cps 程度になるよう調整すること。スリットや分光器の detuning で光子数を調整すると正確な結果が得られない(試料位置でのビームプロファイルが変化するため)。

(3) absorber の切替は専用の回転ステージを用い、実験ハッチ外から制御できる。制御プログラムにより、absorber 用回転ステージを制御しながら、 n_{I0} と全 SSD 素子の n_{ICRobs} と n_{SCAobs} が一度に計測可能である。(制御ソフトのマニュアルは準備中)

(4) Excell のファイルを用い、 ICR 及び AMP を求める。(マニュアルは準備中)

6. 実験例

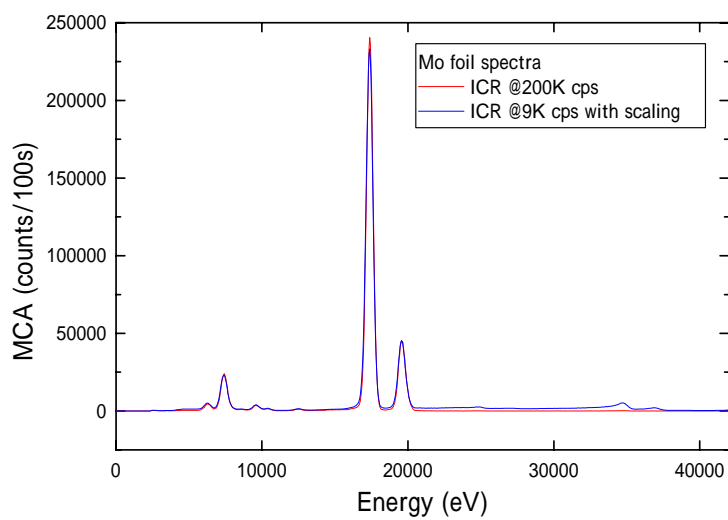
(1) 実験条件

- ・ 蓄積リング: 24/29 fill、80 ~ 90 mA
- ・ Monochro: Si(511)、 $B=15.99270$ deg ($E \sim 21.5$ keV)
- ・ Mirror: 2.5 mrad、第 2 ミラー集光
- ・ 配置: 入射光に対し水平面内 45° に試料を設置、 90° 方向に SSD を設置
- ・ 試料: 実験(1) Mo フォイル
- ・ 試料: 実験(2) K_2MoO_4 ペレット
- ・ SSD: 単素子 Canberra Ge detector GL0055P
 - ・ Active area: 50 mm^2 、Thickness: 5 mm
 - ・ Pulsed Optical Reset Preamp: 2008
 - ・ PUR Inhibit signal: 接続しない(接続すると、ICR が動作しないため)
- ・ Amp: Canberra Fast Spectroscopy Amp 2024
 - ・ Fine Gain: 0.5
 - ・ Coarse Gain: 1K
 - ・ Polarity: +
 - ・ P/Z: OR preamp なので、Manual に従って、CCW いっぱいに戻す。

- Shaping time: 0.25 μ sec
- Restorer: Auto, SYM
- PUR: UNI, ON
- Disc: beam を off にし、ICR の background が数 cps になるように調整する。
- Gain を変えると再調整が必要。
- HV: Ortec 660
 - Nagtive -500 V
- SCA: Ortec
 - LLD: 0.30 ~ 0.50 (可能であれば低パルス波高の background が数 cps になるように調整する。)
 - ULD: 9.50
- Counter: Ortec 974

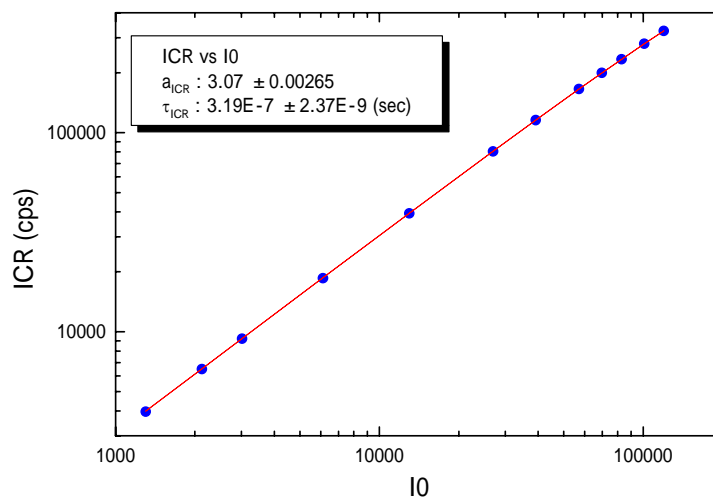
7. 実験結果(1) - プリアンプ、アンプの dead time の決定

(1) Mo フォイルのスペクトル



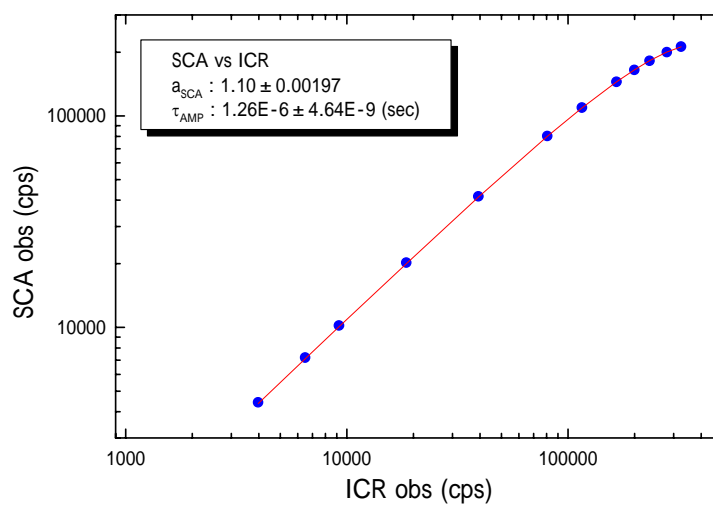
(2) プリアンプの dead time の決定 (ICR vs I0)

eq(1)の fitting により、 $\tau_{ICR}=0.32 \mu\text{sec}$ と求められた。



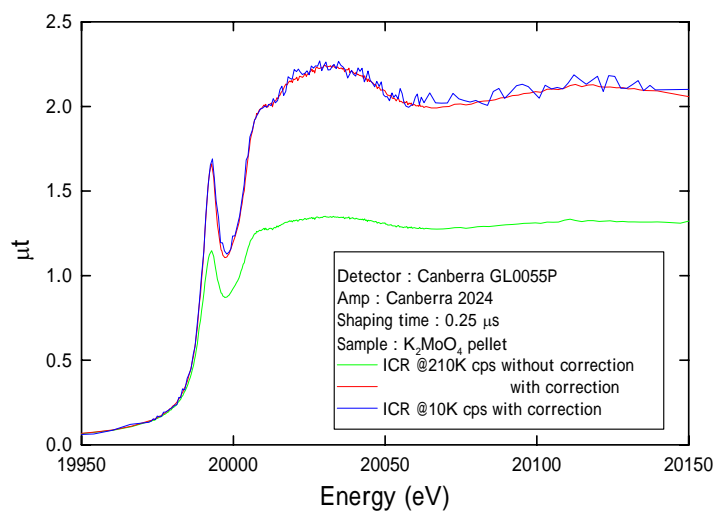
(3) アンプの dead time の決定 (SCA カウント数 vs ICR)

eq(2)の fitting により、 $\tau_{AMP}=1.26 \mu\text{sec}$ と求められた。



8. 実験結果(2) - XAFS スペクトルの補正

・eq(3)を用いて、数え落とし補正を行った K_2MoO_4 ペレットのスペクトルを示す。



・ ICR の計数率が 210K cps の場合、プリアンプとアンプの数え落としの合計は、30%程度に達するが、数え落とし補正を行うことにより、スペクトルが適正に再現されていることが分かる。

・ 注意:

エネルギー補正は行っていない。

試料が高濃度であるため、スペクトルには自己吸収等の影響がある。