

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6675127号
(P6675127)

(45) 発行日 令和2年4月1日(2020.4.1)

(24) 登録日 令和2年3月12日(2020.3.12)

(51) Int.Cl. F I
GO 1 T 1/20 (2006.01) GO 1 T 1/20 J

請求項の数 8 (全 13 頁)

<p>(21) 出願番号 特願2017-502057 (P2017-502057)</p> <p>(86) (22) 出願日 平成28年2月10日 (2016.2.10)</p> <p>(86) 国際出願番号 PCT/JP2016/054017</p> <p>(87) 国際公開番号 W02016/136480</p> <p>(87) 国際公開日 平成28年9月1日 (2016.9.1)</p> <p>審査請求日 平成31年1月31日 (2019.1.31)</p> <p>(31) 優先権主張番号 特願2015-35788 (P2015-35788)</p> <p>(32) 優先日 平成27年2月25日 (2015.2.25)</p> <p>(33) 優先権主張国・地域又は機関 日本国 (JP)</p>	<p>(73) 特許権者 504173471 国立大学法人北海道大学 北海道札幌市北区北8条西5丁目</p> <p>(74) 代理人 110001210 特許業務法人 Y K I 国際特許事務所</p> <p>(72) 発明者 石川 正純 北海道札幌市北区北8条西5丁目 国立大 学法人北海道大学内</p> <p>(72) 発明者 小川原 亮 北海道札幌市北区北8条西5丁目 国立大 学法人北海道大学内</p> <p>審査官 山口 敦司</p>
---	--

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 LaBr₃シンチレーション検出器及び特定イベント排除方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

LaBr₃シンチレータと、
 前記LaBr₃シンチレータの発光を電気信号に変換する光電変換器と、
 前記光電変換器からの出力を電圧波形信号に変換する波形信号出力器と、
 前記電圧波形信号のピーク値V_p及び全電荷量Q_{total}を検出する検出手段と、
 前記ピーク値V_pと前記全電荷量Q_{total}の比の誤差伝播式関数を算出する算出手段と、

前記誤差伝播式関数を閾値関数として用いることで、線以外のイベントを特定し、該イベントを排除する処理手段と、

を備えることを特徴とするLaBr₃シンチレーション検出器。

【請求項2】

請求項1に記載のLaBr₃シンチレーション検出器において、
 前記波形信号出力器から出力される前記電圧波形信号の高周波成分を除去するローパスフィルタをさらに備えることを特徴とするLaBr₃シンチレーション検出器。

【請求項3】

請求項1に記載のLaBr₃シンチレーション検出器において、
 前記算出手段は、前記検出器で検出される前記ピーク値V_pを、前記全電荷量Q_{total}に対して線形となるように補正して標準偏差を算出することを特徴とするLaBr₃シンチレーション検出器。

【請求項4】

請求項1に記載のLaBr₃シンチレーション検出器において、
前記算出手段は、1.5 MeV以下のエネルギー範囲における誤差伝播式関数を算出することを特徴とするLaBr₃シンチレーション検出器。

【請求項5】

請求項1に記載のLaBr₃シンチレーション検出器において、
前記処理手段は、前記閾値関数として、3の誤差伝播式関数を用いることを特徴とするLaBr₃シンチレーション検出器。

【請求項6】

請求項1に記載のLaBr₃シンチレーション検出器において、
前記ピーク値V_pと前記全電荷量Q_{total}の比は、V_p/Q_{total}であることを特徴とするLaBr₃シンチレーション検出器。

10

【請求項7】

請求項1に記載のLaBr₃シンチレーション検出器において、
前記算出手段は、前記検出器で検出される前記ピーク値V_pを、前記全電荷量Q_{total}に対して線形となるように補正し、補正されたピーク値V_pと前記全電荷量Q_{total}の比であるV_p/Q_{total}の1.5 MeV以下のエネルギー範囲における誤差伝播式関数を算出し、

前記処理手段は、前記閾値関数として、3の誤差伝播式関数を用いることを特徴とするLaBr₃シンチレーション検出器。

20

【請求項8】

LaBr₃シンチレータの特定イベントを排除する方法であって、
前記LaBr₃シンチレータの発光を電圧波形信号に変換して出力するステップと、
前記電圧波形信号のピーク値V_p及び全電荷量Q_{total}を検出するステップと、
前記ピーク値V_pと前記全電荷量Q_{total}の比の標準偏差を算出し、前記シンチレータの発光のうち線以外のイベントを含まない所定値以下のエネルギー範囲における前記標準偏差の誤差伝播式関数を算出するステップと、

前記誤差伝播式関数を閾値関数として用いて前記所定値以上のエネルギー範囲におけるイベントを特定し、該イベントを排除するステップと、
を備えることを特徴とする特定イベント排除方法。

30

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明はLaBr₃シンチレーション検出器、及びその自己放射能による崩壊イベント等の特定イベントの排除に関する。

【背景技術】

【0002】

近年、無機シンチレータの研究開発は日進月歩で進んでおり、性能が飛躍的に向上している。中でも、LaBr₃シンチレータは、時間分解能のみならず、エネルギー分解能に優れており、Cs-137(662 KeV)の線に対して3%以下という特徴を持っている。また、大型の結晶を作成することも可能であり、コンプトン-ピーク比を大きくすることで、高検出効率での測定が期待できる。LaBr₃シンチレータの実効原子番号はやや低い、密度が5.3 g/cm³と大きいため、高エネルギー線の測定に適しており、高純度Ge検出器に代わる検出器として注目されている。

40

【0003】

他方、LaBr₃シンチレータは、自己放射能として¹³⁸Laからの線(1436 keV)と、²²⁷Ac系列の残留放射能(5~6 MeVの線を放出)を有しているため、低アクティビティの線に対する測定では、自己放射能が大きな測定誤差の原因とな

50

っている。特に、 $1.7 \sim 2.4 \text{ MeV}$ に相当する領域に崩壊に伴うスペクトルが存在するため、高エネルギー線領域において、 LaBr_3 シンチレータの特性を十分に生かせない問題があった。

【0004】

図12は、 $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ の自己放射能スペクトラムである。図において、横軸はエネルギー(MeV)であり、縦軸はイベント頻度である。 $1.7 \sim 2.4 \text{ MeV}$ に崩壊に伴うスペクトルが多く存在することが分かる。測定したいイベントが、 $1.5 \sim 2.5 \text{ MeV}$ 以外であれば崩壊のバックグラウンド(BG)は特に問題とならないと考えられるが、環境放射線や核反応は多数分布しており、これらは低係数率である場合が多いため問題となり得る。

10

【0005】

崩壊のバックグラウンド(BG)を単純に引き算してしまえばよいとも考えられるが、低係数率のイベントでは十分な統計を得るには時間を要し、また、一般的に高エネルギーのガンマ線に対する検出効率は低くなるため、計数率も低くなる場合が多い。

【0006】

下記の非特許文献1には、 LaBr_3 シンチレータの発光シグナルが線イベントと線イベントで違いがあることを利用し、部分的な電荷量と全電荷量を比較することで線イベントを除外する方法が記載されている。

【先行技術文献】

【非特許文献】

20

【0007】

【非特許文献1】“Alpha-Gamma discrimination by pulse shape in $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ and $\text{LaCl}_3:\text{Ce}$ ” F.C.L. Crespi et al., Nucl. Instr. Meth. A 602, 2009

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

しかしながら、上記の従来方法では、波形のピーク付近に任意の積分窓を作り、その領域での部分積分電荷を求める必要があり、解析範囲(積分窓)の設定次第で測定結果が変化するという問題がある。

【0009】

また、線イベントと線イベントを識別する閾値も人為的に設定しており、設定次第で識別精度が変化してしまう問題もある。

30

【0010】

本発明の目的は、 LaBr_3 シンチレータにおいて信号のピーク電圧と全電荷量というリアルタイムで実測可能な計測値を用いて崩壊イベント等の特定イベントを同定することで、図13に模式的に示すように、崩壊イベント等の特定イベントを含んで検出されたスペクトラム(a)から、主として線イベントのみのスペクトラム(b)を検出可能な装置を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0011】

本発明は、 LaBr_3 シンチレータと、前記 LaBr_3 シンチレータの発光を電気信号に変換する光電変換器と、前記光電変換器からの出力を電圧波形信号に変換する波形信号出力器と、前記電圧波形信号のピーク値 V_p 及び全電荷量 Q_{total} を検出する検出手段と、前記ピーク値 V_p と前記全電荷量 Q_{total} の比の誤差伝播式関数を算出する算出手段と、前記誤差伝播式関数を閾値関数として用いることで、線以外のイベントを特定し、該イベントを排除する処理手段とを備えることを特徴とする。

40

【0012】

本願発明者等は、 LaBr_3 シンチレータの例えば自己放射能による発光信号の一定数のイベントのデータに対してその電圧信号波形のピーク値 V_p と全電荷量(積分電荷量) Q_{total} の比を解析したところ、崩壊イベントのみが有意に異なる分布を示すこと

50

を見出した。そこで、シンチレータの発光のうち線以外のイベントを含まない所定値以下のエネルギー範囲における V_p と Q_{total} の比の誤差伝播式関数を算出し、これを閾値関数として用いることで、有意に異なる分布を示す崩壊イベント等の特定イベントのデータを同定し、元のデータから特定イベントのデータを排除する。

【0013】

本発明の1つの実施形態では、前記波形信号出力器から出力される前記電圧波形信号の高周波成分を除去するローパスフィルタをさらに備える。

【0014】

本発明の他の実施形態では、前記算出手段は、前記検出器で検出される前記ピーク値 V_p を、前記全電荷量 Q_{total} に対して線形となるように補正して標準偏差を算出する。

10

【0015】

本発明のさらに他の実施形態では、前記算出手段は、1.5 MeV以下の誤差伝播式関数を算出する。

【0016】

本発明のさらに他の実施形態では、前記処理手段は、前記閾値関数として、3の誤差伝播式関数を用いる。

【0017】

本発明のさらに他の実施形態では、前記ピーク値 V_p と前記全電荷量 Q_{total} の比は、 V_p/Q_{total} である。

20

【0018】

また、本発明は、LaBr₃シンチレータの特定イベントを排除する方法であって、前記LaBr₃シンチレータの発光を電圧波形信号に変換して出力するステップと、前記電圧波形信号のピーク値 V_p 及び全電荷量 Q_{total} を検出するステップと、前記ピーク値 V_p と前記全電荷量 Q_{total} の比の標準偏差を算出し、前記シンチレータの発光のうち線以外のイベントを含まない所定値以下のエネルギー範囲における前記標準偏差の誤差伝播式関数を算出するステップと、前記誤差伝播式関数を閾値関数として用いて前記所定値以上のエネルギー範囲におけるイベントを特定し、該イベントを排除するステップとを備えることを特徴とする。

【発明の効果】

30

【0019】

本発明によれば、LaBr₃シンチレータにおいて信号のピーク電圧と全電荷量というリアルタイムで実測可能な計測値を用いて特定イベント（例えば自己放射能の崩壊イベント）を同定し、これを排除することが可能である。従って、本発明によれば、特に1.5 ~ 3 MeVに相当する高エネルギー線領域において、LaBr₃シンチレータの特性を活用した高精度検出が可能である。

【図面の簡単な説明】

【0020】

【図1】実施形態のシンチレーション検出器の構成図である。

【図2】LaBr₃:Ceシンチレータの自己放射能の波形信号図である。

40

【図3】LaBr₃:Ceシンチレータのエネルギースペクトル図である。

【図4】 V_p/Q_{total} のプロット図である。

【図5】 V_p/Q_{total} の標準偏差 $\sigma_{V_p/Q_{total}}$ と誤差伝播式関数を示す図である。

【図6】図4に閾値関数を適用した図である。

【図7】線イベントを排除した結果を示す図である。

【図8】線イベントの誤排除率を示す図である。

【図9】外部線源を用いたBG差し引き法と実施形態の方法のヒストグラム図（その1）である。

【図10】外部線源を用いたBG差し引き法と実施形態の方法のヒストグラム図（その2）

50

)である。

【図11】 線イベントを排除した結果を示す図である。

【図12】 $\text{LaBr}_3 : \text{Ce}$ シンチレータのエネルギースペクトル図(その2)である。

【図13】 線イベント排除の模式図説明図である。

【発明を実施するための形態】

【0021】

以下、図面に基づき本発明の実施形態について説明する。

【0022】

<全体構成>

図1は、本実施形態におけるシンチレーション検出器の構成図である。シンチレーション検出器は、 $\text{LaBr}_3 : \text{Ce}$ シンチレータ10、光電子増倍管12、オシロスコープ14、ハードディスクドライブ16、及びコンピュータ18から構成される。

10

【0023】

$\text{LaBr}_3 : \text{Ce}$ シンチレータ10は、線等の電離放射線を光に変換するシンチレータであり、例えば1.5インチ×1.5インチの円柱型に形成される。 $\text{LaBr}_3 : \text{Ce}$ シンチレータ10は、阻止能、エネルギー分解能、時間分解能に優れたシンチレータであるが、既述したように、含有される放射性核種によって、常にバックグラウンド信号を出力する。

【0024】

光電子増倍管12は、 $\text{LaBr}_3 : \text{Ce}$ シンチレータ10に接続され、 $\text{LaBr}_3 : \text{Ce}$ シンチレータ10の光をその強度に応じた電気信号に変換して出力する。

20

【0025】

オシロスコープ14は、検出された電気信号を時間軸に沿った電圧信号(波形信号)に変換して出力する。

【0026】

ハードディスクドライブ16は、オシロスコープ14とUSBインタフェース等により接続され、オシロスコープ14から出力された波形信号(波形整形等を施さない生(Raw)の波形信号)を記憶する。

【0027】

コンピュータ18は、本実施形態における検出手段、算出手段及び処理手段として機能し、ハードディスクドライブ16に記憶された波形信号を入力し、波形信号を解析して解析結果を出力する。コンピュータ18は、CPU及びプログラムメモリを備え、プログラムメモリには所定の処理プログラムが格納される。コンピュータ18は、プログラムメモリに格納された処理プログラムを読み込んで順次実行することで波形信号を解析する。本実施形態における波形信号の解析は、以下の処理を含む。

30

(a) 波形信号に対するフィルタ処理

(b) 電荷の全積分値 Q_{total} 及び電圧のピーク値 V_p を検出して V_p / Q_{total} を算出する処理

(c) エネルギーに依存する閾値関数の決定処理

(d) 閾値関数を用いた線イベントの排除処理

40

【0028】

なお、図1において、ハードディスクドライブ16とコンピュータ18を一つの波形解析装置で実現してもよく、オシロスコープ14、ハードディスクドライブ16及びコンピュータ18を一つの波形解析装置として実現してもよい。

【0029】

また、コンピュータ18は、線イベントが排除されたデータについてそのイベント数をカウントし、カウント値を放射線の線量に変換して出力する機能を有してもよいが、これについては公知であるためその説明は省略する。

【0030】

次に、上記の処理について順に説明する。

50

【0031】

<フィルタ処理>

図2は、 $LaBr_3 : Ce$ シンチレータ10の自己放射能イベントを含むイベントで測定される波形信号図である。オシロスコープ14で得られる波形であり、外部放射線源は用いられていない。図において、横軸は時間(ns)、縦軸は電圧(V)である。

【0032】

一番上の波形信号は、生データの波形信号であり、

ピーク値 $V_p = -0.113 (V)$

全電荷量(電荷の全積分値) $Q_{total} = 4.219$

が得られる。但し、生データはノイズが大きく、 V_p / Q_{total} を算出したとしてもその精度が低い。

10

【0033】

中央の波形信号は、生データを2nsの時間幅で移動平均処理をした波形信号であり、

$V_p = -0.099 (V)$

全電荷量 $Q_{total} = 4.213$

が得られる。

【0034】

一番下の波形信号は、FFT及びIFFT(逆FFT)で50MHz以上の高周波ノイズを除去するローパスフィルタでノイズ除去した波形信号であり、

$V_p = -0.099 (V)$

全電荷量 $Q_{total} = 4.214$

が得られる。移動平均処理やローパスフィルタ処理、特にローパスフィルタ処理を施して波形整形することで、ピーク値 V_p 及び全電荷量 Q_{total} を高精度に検出し得る。

20

【0035】

なお、これら3つの V_p 及び Q_{total} を比較すると、 V_p については移動平均及びローパスフィルタ処理で同一の値が得られ、生データではこれと異なる値が得られているが、他方で、 Q_{total} については3つのデータでほぼ同一の値が得られている。 Q_{total} は全電荷量であってエネルギーに相当し、このことは3つのデータ間におけるエネルギー分布に大きな変化がないことを示唆している。

【0036】

図3は、図2における一番下の波形信号、すなわちFFTとIFFTのローパスフィルタで高周波ノイズを除去した場合のエネルギースペクトルである。実線は生データのエネルギースペクトルであり、破線はローパスフィルタ処理した場合のエネルギースペクトルである。この図から、ノイズ除去前後でエネルギースペクトルが変化していないことがわかる。このことは、生データに対してローパスフィルタ処理してもデータ欠損が生じないことを意味する。

30

【0037】

< V_p / Q_{total} の算出処理>

図4は、 $LaBr_3 : Ce$ シンチレータ10の自己放射能による発光10万イベント分のデータに対して波形信号(ローパスフィルタ処理済み)のピーク値 V_p と全電荷量 Q_{total} の比 V_p / Q_{total} のプロット結果である。図において、横軸は全電荷量 Q_{total} 及び対応するエネルギー(MeV)であり、縦軸は V_p / Q_{total} である。

40

【0038】

図4の(a.1)から明らかなように、1.5~3MeVのエネルギー範囲において2成分が存在する。線イベントの波形信号のピーク値 V_p は、線イベントの波形信号のピーク値よりも大きいことが知られている(従来技術を参照)。従って、図4の(a.1)における上側の成分が線イベントに対応し、下側の成分が線イベントに対応する。なお、エネルギーの低い部分は、環境放射線核種である ^{208}Tl 2.6MeVによる線イベントと考えられる。

【0039】

50

また、 V_p 及び Q_{total} は、それぞれエネルギーに対して線形の関係にあるため、その比である V_p / Q_{total} は全エネルギー領域において一定となるはずであるところ、そうっておらず、エネルギーが増大するほど低下する傾向にある。これは、ピーク値 V_p が飽和することによるものと考えられる。本願発明者等は、横軸を Q_{total} 、縦軸を V_p としてプロットしたところ、 V_p と Q_{total} の線形性は低エネルギー領域(1.5 MeV以下)において維持され、高エネルギー領域では線形性が維持されず V_p が飽和する傾向にあることを確認している。

そこで、 V_p の飽和を補正するために、 V_p の飽和曲線を

【数1】

$$V_p = \frac{\alpha Q_{total}}{1 + \beta Q_{total}} \quad (\alpha = Const., \beta = Const.)$$

10

と定義する。ここで、 Q_{total} が線形項であり、 $1 + Q_{total}$ が飽和項である。そして、補正された V_p (これを V_{pCorr} とする)は Q_{total} に比例すべき、すなわち $V_{pCorr} = Q_{total}$ になるべきとして、

【数2】

$$V_{pCorr} = \frac{V_p}{1 - (\alpha/\beta)V_p}$$

20

により V_p を補正して V_{pCorr} とする。

図4の(a.2)に、補正された V_p を用いた場合の V_p / Q_{total} のプロット結果を示す。補正された V_p を用いた V_p / Q_{total} は、全エネルギー領域においてほぼ一定となる結果が得られる。なお、上式における係数 α 及び β は実験で定めることができる。

【0040】

図4において、1.5 MeV以下の線イベントは、エネルギーが低いほどバラツキが大きくなっているが、これは、誤差伝播から理論的に導かれる。すなわち、 V_p / Q_{total} の標準偏差 $\sigma_{V_p / Q_{total}}$ (以下、 $\sigma_{V_p / Q_{total}}$ とする)は、

【数3】

$$\sigma_{V_p / Q_{total}} = \sqrt{\left(\frac{1}{Q_{total}} \sigma_{V_p}\right)^2 + \left(\frac{V_p}{Q_{total}^2} \sigma_Q\right)^2}$$

40

である。上記の式は、

【数4】

$$\sigma_{V_p / Q_{total}} = kQ_{total}^{-1} + l \quad (k = const., l = const.)$$

と近似できる。この式から明らかなように、 V_p / Q_{total} の標準偏差 $\sigma_{V_p / Q_{total}}$ は、 Q_{total} が低いほど増大し、すなわちエネルギーが低いほど増大する。

50

【0041】

< 閾値関数の決定処理 >

図4において、線イベントと線イベントを識別するための閾値関数は、 1.5 MeV 以下の純粋な線イベントの標準偏差を用いて決定できる。

【0042】

図5は、補正された V_p を用いた V_p / Q_{total} に関して算出された、2、3と、その誤差伝播式関数を示す。図において、横軸はエネルギーであって 1.4 MeV 以下のエネルギー範囲（つまり線イベントのみのエネルギー範囲）、縦軸は V_p / Q_{total} の標準偏差を示す。この図より、 V_p / Q_{total} のパラッキは、誤差伝播式関数で非常に良く再現されることが分かる。従って、この誤差伝播式関数から閾値関数を決定することで、 1.5 MeV 以上のエネルギー範囲において存在する線イベントを明確に識別できる。

10

【0043】

図6は、図4の(a.2)に示された、補正された V_p を用いた V_p / Q_{total} のプロットに閾値関数を適用した図である。閾値関数は Q_{total} に逆比例し、エネルギー依存性を示す。図には、2、3それぞれの閾値関数を示すが、特に3の閾値関数を用いることで線イベントと線イベントを明確に識別できる。従って、閾値関数を用いて線イベントを排除することが可能である。

【0044】

2、3の閾値関数は、 1.5 MeV 以下における V_p / Q_{total} のデータ群から一義的かつ客観的に決定される点に留意されたい。

20

【0045】

< 線イベントの排除処理 >

図7は、3種類の閾値関数（2、3の閾値関数）を用いて線イベントを排除した結果を示す図である。図において、(a.1)は2の閾値関数、(a.2)は3の閾値関数、(a.3)は3の閾値関数を用いた場合の結果である。これらの図において、横軸はエネルギー（ MeV ）、縦軸はイベント数であり、 1.5 MeV 以上についてはイベント数を10倍に拡大して示している。 1.5 MeV 以上のエネルギー範囲において、実線が線イベントを排除した後のイベント数であり、全ての閾値関数で線のイベントを排除できている。

30

【0046】

図8は、3種類の閾値関数それぞれにおいて、誤った線イベント排除率、すなわち本来であれば排除すべきでない線イベントの排除率を示す図である。図において、横軸はエネルギーであって $0.3 \text{ MeV} \sim 1.5 \text{ MeV}$ 、つまり線イベントのみが生じているエネルギー範囲を示す。2、3と閾値関数が大きくなるほど誤排除率は大幅に低下し、正しく線イベントのみを排除していることが分かる。特に、3の閾値関数を用いた場合には、 1.5 MeV 以下の全領域でほぼ1%以下の誤排除率であり、全体としては0.716%程度の誤排除率が得られる。このことは、言い換えれば、本実施形態において線イベントが全く排除されないことを意味するのではなく、多少は排除され得ることを意味する。

40

【0047】

以上のように、 $\text{LaBr}_3 : \text{Ce}$ シンチレータ10の自己放射能のみを用いて線イベントを識別するための閾値関数を決定できる。また、この閾値関数には数学的根拠があり、人為的に設定するパラメータが含まれていないため、一義的かつ客観的に決定し得るものである。特に、閾値関数をエネルギーの関数として決定することで、線イベントを識別する精度を飛躍的に向上させることが可能となる。さらに、3の閾値関数を用いることで、 1.5 MeV 以下の誤った線イベントの排除率を0.7%程度とし得る。

【0048】

次に、線イベントを正しく排除できるか否かを確認するために、外部線源を用いて測定を行う場合について説明する。

50

【0049】

外部線源として、例えば $Ge/Ga - 68$ (${}^{68}Ga$ 1.883 MeV) を用いる。このとき、環境放射線からの寄与 (${}^{208}Tl$ 2.61 MeV 等) が存在し得るため、1.5 MeV ~ 3 MeV に線イベントと線イベントが混在している。そこで、上記の方法で3 の閾値関数を用いて線イベントを排除した後に、イベント数が予め分かっている線イベント (${}^{68}Ga$ 1.883 MeV) が正しい数だけ残っているか否かを評価する。

【0050】

具体的には、信頼性の高いバックグラウンド (BG) 差し引き法により得られる結果と、本実施形態により得られる結果とを比較し、両者に相違があるか否かを評価する。つまり、外部線源が存在する場合の測定結果から外部線源が存在しない場合の測定結果を差し引いて残った1.883 MeVの線の分布 (バックグラウンドBG差し引き方法) と、外部線源が存在する場合に本実施形態の Vp/Q_{total} 及び閾値関数を用いて残った1.883 MeVの線の分布を比較することにより、本実施形態の方法で正しく線イベントを排除できるかを評価する。

10

【0051】

図9は、外部線源を設置した状態と設置していない状態もエネルギースペクトラムである。(a)において実線は外部線源が存在する場合、破線は外部線源が存在しない場合のエネルギースペクトラムであり、縦軸は規格化されたイベント数である。前者から後者を差し引くことで ${}^{68}Ga$ 1.883 MeV のイベント数を測定できる。

20

【0052】

他方、図9の(b)は、外部線源を設置した状態と本実施形態の方法により線イベントを排除した後のエネルギースペクトラムである。(b)において実線は外部線源が存在する場合、破線は3の閾値関数で線イベントを排除した後のエネルギースペクトラムである。(b)に示すように、3の閾値関数で線イベントを排除しても、1.883 MeVの成分が排除されずに残っている。

【0053】

図10は、バックグラウンド (BG) を差し引いた場合と本実施形態の場合とを比較した図である。横軸はエネルギーであって1.883 MeV 近傍のエネルギー範囲を示す。縦軸は規格化されたイベント数である。(c.1)は外部線源を設定した場合からそうでない場合を差し引いた、BG法による結果、(c.2)は本実施形態の結果であり、(c.3)は両者を照合した結果である。

30

【0054】

それぞれの場合のピークカウント数 (測定値、フィッティング値)、平均エネルギー、半値全幅 (FWHM)、及び相違は以下の通りである。

・ピークカウント数 (測定値)

BG法: 139.6 ± 28.54

実施形態: 138.6 ± 19.22

相違: 0.716%

・ピークカウント数 (フィッティング値)

BG法: 129.9 ± 6.34

実施形態: 127.7 ± 4.46

相違: 1.694%

・平均エネルギー (keV)

BG法: 1885.9 ± 0.7334

実施形態: 1885.5 ± 0.5281

相違: 0.021%

・FWHM (keV)

BG法: 33.1 ± 3.62 (1.755%)

実施形態: 36.2 ± 3.31 (1.920%)

40

50

相違：0.165%

以上の結果より、本実施形態ではBG法と同様の結果をより高精度で得られることが分かる。

【0055】

なお、本実施形態では、波形信号の取得に要するデッドタイムにより、特定のイベントの数え落としがあり得る。例えば、 ^{219}Rn 等からカスケード的に崩壊する短寿命娘核 ^{215}Po の数え落としがあり得る。しかしながら、測定したイベントの排除は確実に実行できるため、この数え落としは精度評価に寄与することはない。

【0056】

また、本実施形態では、上記のように環境放射線核種である ^{208}Tl 2.6 MeVが含まれている可能性があるため、同系列の核種も同様に混在している可能性もある。図11は、統計数をさらに増大させて V_p / Q_{total} 及び3の閾値関数を用いて線イベントを排除した場合の結果を示す図である。非常にイベントの少ない ^{212}Bi 、 ^{214}Bi が同定されている。このことから、本実施形態の方法は、少ないイベント数の線でも顕著に検出できる効果もある。

【0057】

以上説明したように、本実施形態によれば、信号のピーク電圧と全電荷量というリアルタイムで実測可能な計測値を用いて線イベントを同定し、これを排除することで線イベントのみを収集することができる。また、本実施形態では、バックグラウンド(BG)差し引き法と同様の結果をより高精度で得ることができる。また、本実施形態では、測定対象と崩壊バックグラウンドのS/N比に依存せずに測定を行うことができるため、非常に小さい信号の検出にも適している。本実施形態では、自己放射能に含まれる崩壊イベントに特に着目したが、自己放射能に限らず、外部から入射される線や重粒子線に対しても同様に適用し得る。すなわち、本実施形態は、必ずしも自己放射能に限定されず、特定のエネルギー範囲に存在し得る特定イベントの排除に適用し得る。

【0058】

本実施形態では、1イベント毎に数秒かけてデータを保存するのでデッドタイムが大きくなる傾向にあるが、高速で信号波形を取得するFADC(Flash Analog to Digital Converter)用の高速ADCを用いることでデッドタイムの減少を図ることが可能である。

【0059】

本実施形態における処理を実現するための処理プログラムは、FPGA(Field Programmable Gate Array)に実装することで、リアルタイムで線スペクトルのみを抽出することも可能である。

【0060】

本実施形態では、 V_p / Q_{total} を用いて線イベントを同定しているが、その逆数である Q_{total} / V_p を用いてもよいのは言うまでもない。

【符号の説明】

【0061】

10 Labr₃: Ceシンチレータ、12 光電子増倍管、14 オシロスコープ、16 ハードディスク、18 コンピュータ。

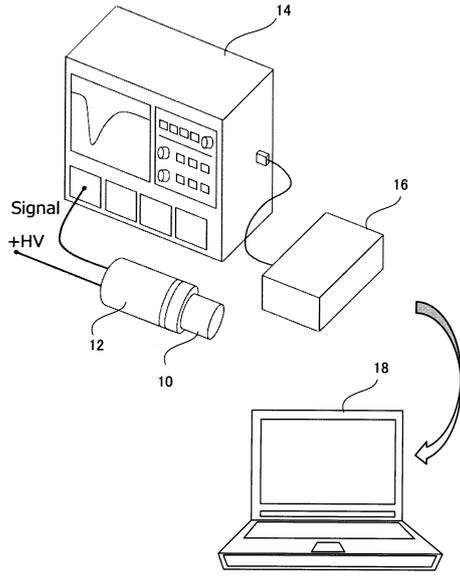
10

20

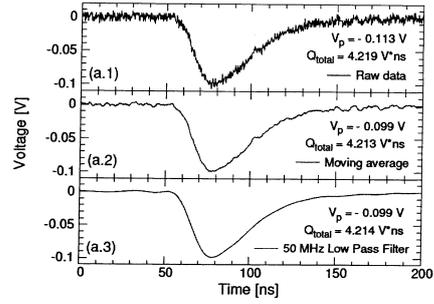
30

40

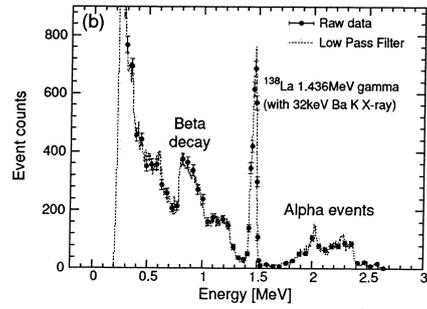
【 図 1 】



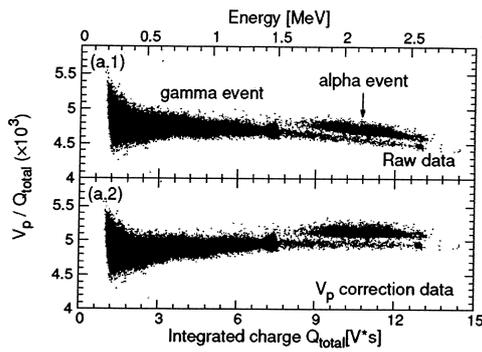
【 図 2 】



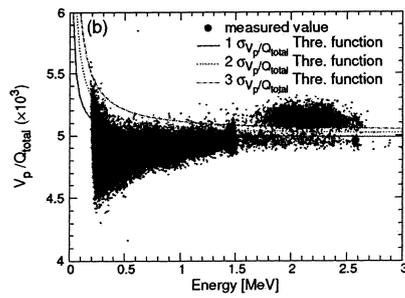
【 図 3 】



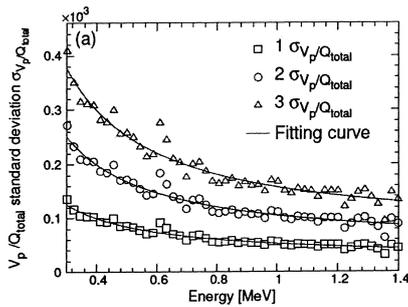
【 図 4 】



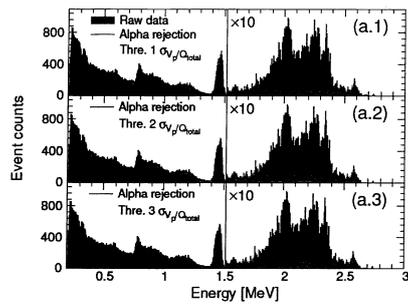
【 図 6 】



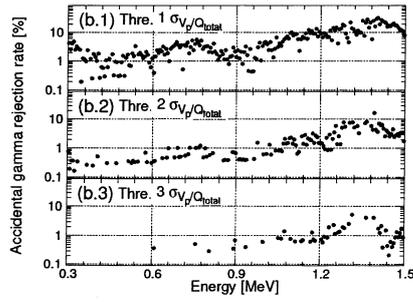
【 図 5 】



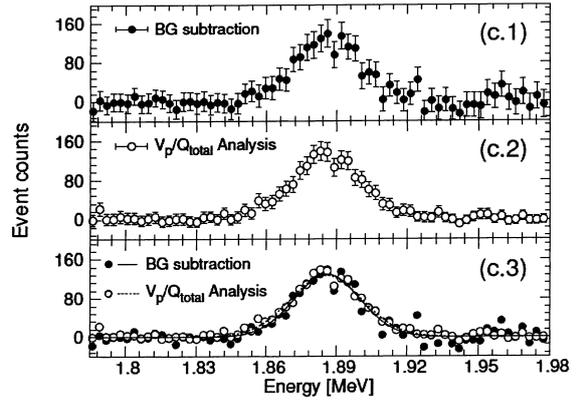
【 図 7 】



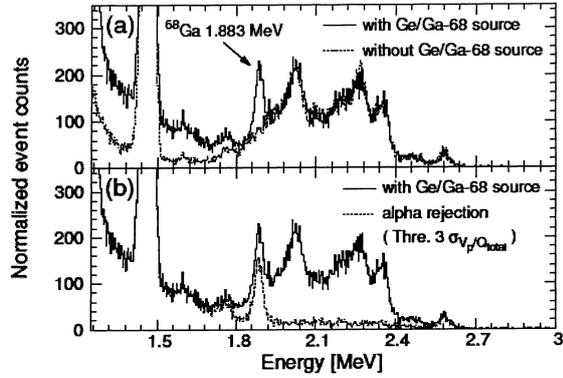
【 図 8 】



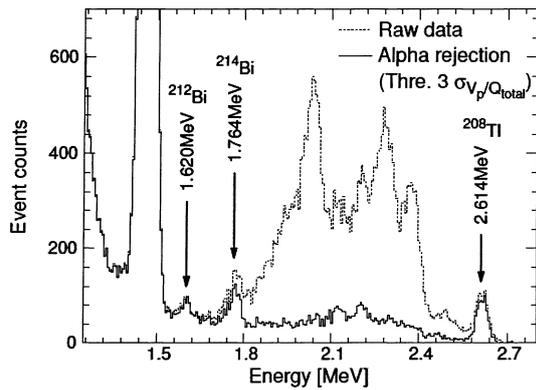
【 図 10 】



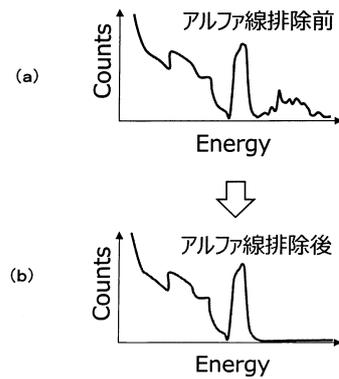
【 図 9 】



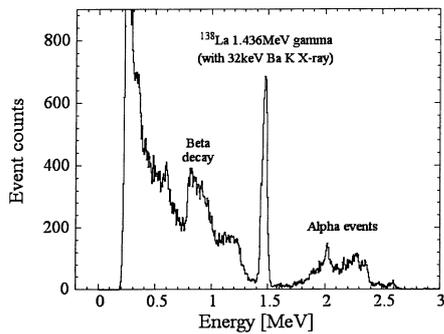
【 図 11 】



【 図 13 】



【 図 12 】



フロントページの続き

(56)参考文献 米国特許第6953937 (US, B2)

英国特許出願公開第2484393 (GB, A)

米国特許出願公開第2014/0027646 (US, A1)

米国特許出願公開第2007/0290136 (US, A1)

米国特許出願公開第2015/0323682 (US, A1)

国際公開第2017/038953 (WO, A1)

CHANDRIKAMOHAN, Pramoth et al., Comparison of Pulse Shape Discrimination Methods for P
hoswich and CsI:TI Detectors, IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, 2007年 4月,
VOL. 54, NO. 2, p. 398-403

CRESPI, F.C.L. et al., Alpha-gamma discrimination by pulse shape in LaBr3:Ce and LaCl3
:Ce, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2009年 4月21日, Vo
l. 602, p. 520-524

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01T 1/20

G01T 1/17

C09K 11/00

C09K 11/85