(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号
特許第4352122号
(P4352122)
(45)発行日　平成21年10月28日(2009.10.28)　(24)登録日　平成21年8月7日(2009.8.7)

(51)Int.Cl.　F I
G01T 1/161 (2006.01)　G01T 1/161 E

請求項の数 7　(全 15 頁)

(21)出願番号　特願2003-124173(P2003-124173)
(22)出願日　平成15年4月28日(2003.4.28)
(65)公開番号　特開2004-325405(P2004-325405A)
(43)公開日　平成16年11月18日(2004.11.18)
審査請求日　平成17年7月14日(2005.7.14)

特許法第３０条第１項適用　平成１４年１０月２９日理化学研究所及び山梨県環境科学研究所が共催する「BITREL2002 International Symposium on Bio-Trace Elements 2002 -Joint Symposium of RIKEN and Yamanashi Institute of Environmental Sciences-」において文書をもって発表

(73)特許権者　301032942
独立行政法人放射線医学総合研究所
千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目９番１号
(74)代理人　100105371
弁理士　加古　進
(72)発明者　平澤　雅彦
千葉市稲毛区穴川４丁目９番１号
独立行政法人　放射線医学総合研究所内
(72)発明者　富谷　武浩
千葉市稲毛区穴川４丁目９番１号
独立行政法人　放射線医学総合研究所内

審査官　原　俊文

最終頁に続く

(54)【発明の名称】散乱角不確定性補正コンプトンカメラ

(57)【特許請求の範囲】

【請求項１】

ガンマ線源の放射能密度分布を測定するコンプトンカメラであって、

前面検出器及び後面検出器と、該検出器からの出力に基づき計算しガンマ線源の放射能密度分布を再構成する演算手段を有し、

該演算手段は、ガンマ線の測定コンプトン散乱角の不確定性を積分核に組み込んだ積分方程式の解を用い、補正された方向線上ガンマ線源積算放射能密度分布を得ることにより、解像度の良いガンマ線源放射能密度分布を再構成することを特徴とするコンプトンカメラ。

【請求項２】

請求項１に記載のコンプトンカメラにおいて、

前記演算手段は、次に示す関数k_{Br}を組み込んだ積分方程式の解を用いることを特徴とするコンプトンカメラ。

【数１】

$$k_{Br}(\boldsymbol{s},\boldsymbol{t},\varpi) \equiv \frac{1}{2\pi} Br(\boldsymbol{s},\boldsymbol{t},\varpi)$$

$$Br(\boldsymbol{s},\boldsymbol{t},\varpi) \equiv \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma \sin\varpi'} \exp\left\{-\frac{(\varpi'-\varpi)^2}{2\sigma^2}\right\}$$

$$\varpi' \equiv \arccos\langle \boldsymbol{s},\boldsymbol{t}\rangle \qquad (0 \le \varpi' \le \pi)$$

$$\sigma \equiv \frac{\Delta\varpi}{2\sqrt{2\ln 2}}$$

ここで、ベクトルｓは前面検出器へのガンマ線の入射方向単位ベクトル、ベクトルｔは前面検出器からのガンマ線のコンプトン散乱方向単位ベクトル、ωは測定コンプトン散乱角、Δωは測定コンプトン散乱角の不確定度（半値幅）である。

【請求項３】

請求項２に記載のコンプトンカメラにおいて、

前記演算手段の前記関数k_{Br}中の関数Brの近似関数として、次に示す関数を用いることを特徴とするコンプトンカメラ。

【数２】

$$Br(\boldsymbol{s},\boldsymbol{t},\varpi) \equiv \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma \sin\varpi} \exp\left\{-\frac{(\cos\varpi'-\cos\varpi)^2}{2(\sigma\sin\varpi)^2}\right\}$$

【請求項４】

請求項２又は３に記載のコンプトンカメラにおいて、

前記演算手段の前記測定コンプトン散乱角不確定性を積分核に組み込んだ積分方程式は、次に示すものであることを特徴とするコンプトンカメラ。

【数３】

$$g_1(\boldsymbol{t}) = \int_V d\boldsymbol{s} \int_S d\boldsymbol{u}\, k_{Brd}(\boldsymbol{s},\boldsymbol{t};\arccos\langle \boldsymbol{s},\boldsymbol{u}\rangle)\, h(\langle \boldsymbol{s},\boldsymbol{u}\rangle) f(\boldsymbol{s})$$

ここで、g_1（ｔ）は方向tでの後面検出器へのガンマ線コンプトン散乱計数値、Ｖは後面検出器面領域、Ｓは前面検出器を中心とする単位球面、ｈはクライン・仁科の公式，ベクトルｕはクライン・仁科の公式に前記測定コンプトン散乱角不確定性を畳み込むための助変数としての方向単位ベクトル、ｆ（ｓ）は方向ｓでのガンマ線源の方向線上積算放射能密度である。また、関数k_{Brd}中のΔωは、束縛運動電子によるドップラー効果に起因する測定コンプトン散乱角不確定度（半値幅）である。

【請求項５】

請求項２又は３に記載のコンプトンカメラにおいて、

前記演算手段の前記測定コンプトン散乱角不確定性を積分核に組み込んだ積分方程式は、次に示すものであることを特徴とするコンプトンカメラ。

【数４】

$$g_2(\boldsymbol{t},\varpi)=\int_V d\boldsymbol{s}\int_S d\boldsymbol{u}\,k_{Brd}(\boldsymbol{s},\boldsymbol{t};\arccos\langle\boldsymbol{s},\boldsymbol{u}\rangle)\,h(\langle\boldsymbol{s},\boldsymbol{u}\rangle)\,k_{Bre}(\boldsymbol{s},\boldsymbol{u};\varpi)\,f(\boldsymbol{s})$$

又は

【数５】

$$g_2(\boldsymbol{t},\varpi)=\int_V d\boldsymbol{s}\;k_{Brt}(\boldsymbol{s},\boldsymbol{t};\varpi)\,h(\cos\varpi)\,f(\boldsymbol{s})$$

ここで、g_2（ｔ，ω）は方向ｔと測定コンプトン散乱角ωでの後面検出器へのガンマ線コンプトン散乱計数値、Ｖは後面検出器面領域、Ｓは前面検出器を中心とする単位球面、ｈはクライン・仁科の公式、ベクトルｕはクライン・仁科の公式に前記測定コンプトン散乱角不確定性を畳み込むための助変数としての方向単位ベクトル、ｆ（ｓ）は方向ｓでのガンマ線源の方向線上積算放射能密度である。また、関数k_{Brd}中のΔωは、束縛運動電子によるドップラー効果に起因する測定コンプトン散乱角不確定度（半値幅）であり、関数k_{Bre}中のΔωは、前面検出器の有限であるエネルギー分解能に起因する測定コンプトン散乱角不確定度（半値幅）であり、関数k_{Brt}中のΔωは、両半値幅の２乗和の平方根である。

【請求項６】

請求項４に記載のコンプトンカメラにおいて、

前記演算手段の前記測定コンプトン散乱角不確定性を積分核に組み込んだ積分方程式の解は、次に示す式であることを特徴とするコンプトンカメラ。

【数６】

$$h_d(\langle\boldsymbol{s},\boldsymbol{t}\rangle)\equiv\int_{-1}^{1}d\cos\varpi\,2\pi\,k_{Brd}(\boldsymbol{s},\boldsymbol{t};\varpi)\,h(\cos\varpi)$$

$$a_{ij}\equiv\int_V d\boldsymbol{t}\int_V d\boldsymbol{s}\,\varphi_i^*(\boldsymbol{t})\,h_d(\langle\boldsymbol{s},\boldsymbol{t}\rangle)\,\varphi_j(\boldsymbol{s})$$

$$c_i\equiv\int_V d\boldsymbol{t}\,g_1(\boldsymbol{t})\,\varphi_i^*(\boldsymbol{t})$$

$$f(\boldsymbol{s})=\left[(c_1,\cdots,c_m)\begin{pmatrix}a_{11}&\cdots&a_{m1}\\\vdots&\ddots&\vdots\\a_{1m}&\cdots&a_{mm}\end{pmatrix}^{-1}\begin{pmatrix}\varphi_1(\boldsymbol{s})\\\vdots\\\varphi_m(\boldsymbol{s})\end{pmatrix}\right]$$

ここで、φ_iは、Ｖの前面検出器中心単位球面上への投影面を定義域とする任意の完全正規複素直交関数系である。

【請求項７】

請求項５に記載のコンプトンカメラにおいて、

前記演算手段の前記測定コンプトン散乱角不確定性を積分核に組み込んだ積分方程式の解は、次に示す式であることを特徴とするコンプトンカメラ。

【数７】

$$\alpha_n(\cos\varpi) \equiv \int_{-1}^{1} d\cos\varpi' \, 2\pi k_{Brt}(\boldsymbol{s},\boldsymbol{t};\varpi) P_n(\cos\varpi')$$

$$H_{Brn} \equiv \int_{\cos\omega_2}^{\cos\omega_1} d\cos\varpi \, h(\cos\varpi) \, \alpha_n(\cos\varpi)^2$$

$$k_{Br}^{-1}(\boldsymbol{t},\boldsymbol{s};\varpi) \equiv \sum_{n=0}^{m} \frac{2n+1}{4\pi} \frac{P_n(\langle \boldsymbol{t},\boldsymbol{s} \rangle)}{H_{Brn}} \alpha_n(\cos\varpi)$$

$$f(\boldsymbol{s}) = \int_{\cos\omega_2}^{\cos\omega_1} d\cos\varpi \int_S d\boldsymbol{t} \, k_{Br}^{-1}(\boldsymbol{t},\boldsymbol{s},\varpi) \, g_2(\boldsymbol{t},\varpi)$$

ここで、Ｐｎはｎ次のルジャンドル関数、ω_1とω_2は０からπの実数（$\omega_1 < \omega_2$）である。

【発明の詳細な説明】

【０００１】

【発明の属する技術分野】

本発明は、コンプトンカメラやコンプトンテレスコープ（以下まとめて、コンプトンカメラという）に関し、特にコンプトンカメラにおける測定コンプトン散乱角の不確定性の補正に関する。

【０００２】

【技術的背景】

コンプトンカメラは、典型的には、図１に示すようにガンマ線のコンプトン散乱・光電吸収位置とそこでのガンマ線のエネルギー損失量が測定できる２枚の検出器１１０、１２０よりなる。ガンマ線が前面の検出器１１０でコンプトン散乱された後、後面の検出器１２０で光電吸収される過程を利用し、その前面検出器での損失エネルギーE_1からコンプトン公式（式（１）参照）によりコンプトン散乱角ωを求め、ガンマ線源１５０の位置を散乱点ａと吸収点ｂを結ぶ直線を軸とする頂角２ωの円錐面内に限定する。これが、電子的コリメーションとよばれるコンプトンカメラの基本原理である（必要であれば、本出願発明者の特許文献１や非特許文献１，２参照のこと）。

【数８】

$$\cos(\varpi) = 1 + m_e C^2 \left[\frac{1}{E_0} - \frac{1}{E_0 - E_1} \right] \qquad \cdots(1)$$

ここで、m_eとＣは、それぞれ、電子の静止質量と光の速さであり、E_0はガンマ線源からの入射ガンマ線のエネルギーである。図１に示す円錐面が３つ測定されれば、３つの円錐面がいずれもガンマ線源位置を含み、３つの円錐面の交点が、ガンマ線源１５０の３次元位置を与えてくれる。

【０００３】

さて、L.C.Parraは、複素球面調和関数による級数展開を用い、２種のコンプトンカメラでの積分方程式の解としてのガンマ線源放射能密度分布再構成手法を提示した（非特許文献１参照）。そこでは、級数展開により方向線逆投影値（ガンマ線源の方向線上積算放射能密度）分布が導出される。さらには、複素球面調和関数は、その加法定理を用いて、ルジャンドル関数に全て落とされている。しかし、この手法は、前面検出器から全方向への散乱投影値（コンプトン散乱ガンマ線計数値）の分布を測定値として必要とするため、後面検出器としては、前面検出器をそっくり覆う物が必要となってしまう。

L.C.Parraの第１手法は、コンプトン散乱角の測定値を必要としない形式になっている。その積分方程式の一般形は以下の通りである。

【数９】

$$g_1(\boldsymbol{t}) = \int_V d\boldsymbol{s}\, h(\langle \boldsymbol{s}, \boldsymbol{t} \rangle)\, f(\boldsymbol{s}) \qquad \cdots(2)$$

ここで、ベクトルｓは前面検出器へのガンマ線の入射方向単位ベクトル、ベクトルｔは前面検出器からのガンマ線のコンプトン散乱方向単位ベクトルであり、Ｖは後面検出器面領域である。ｈ、g_1（ｔ）、ｆ（ｓ）は、それぞれ、クライン・仁科の公式、方向ｔへの散乱投影値、方向ｓでの方向線逆投影値を示す。また、$\int_V$ ｄｓはＶの前面検出器中心単位球面上への投影面の上での面積分を示し、＜ｓ，ｔ＞は、ベクトルｓとベクトルｔの内積を示す。

【０００４】

この積分方程式の解は、本願発明者たちにより、任意の完全正規複素直交関数系による級数展開の形式に、複素関数空間論（無限次元複素ヒルベルト空間論）の枠組みの中で、以下のように一般化されている。

【数１０】

$$a_{ij} \equiv \int_V d\boldsymbol{t} \int_V d\boldsymbol{s}\, \varphi_i^*(\boldsymbol{t})\, h(\langle \boldsymbol{s}, \boldsymbol{t} \rangle)\, \varphi_j(\boldsymbol{s}) \qquad \cdots(3)$$

$$c_i \equiv \int_V d\boldsymbol{t}\, g_1(\boldsymbol{t})\, \varphi_i^*(\boldsymbol{t}) \qquad \cdots(4)$$

$$f(\boldsymbol{s}) = \left[(c_1, \cdots, c_m) \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{m1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{1m} & \cdots & a_{mm} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \varphi_1(\boldsymbol{s}) \\ \vdots \\ \varphi_m(\boldsymbol{s}) \end{pmatrix} \right] \qquad \cdots(5)$$

ここで、ϕ_i（ｉは正の整数）はＶの前面検出器中心単位球面上への投影面を定義域とする任意の完全正規複素直交関数系である。また、$\int_V$ ｄｓ又は$\int_V$ ｄｔはＶの前面検出器中心単位球面上への投影面の上での面積分を示す。

適当な完全正規複素直交関数系が与えられれば、方向線逆投影値分布ｆを前面検出器からＶへの限定された方向範囲内への散乱投影値分布g_1から導出することが可能となり、後面検出器は前面検出器を覆う必要が無くなる。これらに関しては、本願発明者たちによる出願（前述の特許文献１）を参照されたい。

【０００５】

また、本願発明者たちは、L.C.Parraの第２手法を改良した新手法をも提示した（非特許文献２参照）。そこでは、δ関数の級数展開が利用され、ω_1からω_2の限定されたコンプトン散乱角ωでの散乱投影値分布g_2のみから方向線逆投影値分布ｆを導出することが可能であり、後面検出器は前面検出器を覆う必要が無くなる。解くべき積分方程式の一般形は以下の通りである。

【数１１】

$$g_2(\boldsymbol{t}, \varpi) = \int_V d\boldsymbol{s}\, k(\boldsymbol{s}, \boldsymbol{t}; \varpi)\, h(\cos \varpi)\, f(\boldsymbol{s}) \qquad \cdots(6)$$

ここで、関数ｋ（ｓ，ｔ，ω）は、
【数１２】

$$k(\boldsymbol{s},\boldsymbol{t};\varpi) \equiv \frac{1}{2\pi}\delta(\langle \boldsymbol{s},\boldsymbol{t}\rangle - \cos\varpi) \qquad \cdots(7)$$

である。
【０００６】
本願発明者たちによる、積分方程式（６）の解は、以下のようになる（非特許文献２参照）。
【数１３】

$$H_n \equiv \int_{\cos\omega_2}^{\cos\omega_1} d\cos\varpi\, h(\cos\varpi)\, P_n(\cos\varpi)^2 \qquad \cdots(8)$$

$$k^{-1}(\boldsymbol{t},\boldsymbol{s};\varpi) \equiv \sum_{n=0}^{m} \frac{2n+1}{4\pi}\frac{P_n(\langle \boldsymbol{t},\boldsymbol{s}\rangle)}{H_n} P_n(\cos\varpi) \qquad \cdots(9)$$

$$f(\boldsymbol{s}) = \int_{\cos\omega_2}^{\cos\omega_1} d\cos\varpi \int_S d\boldsymbol{t}\, k^{-1}(\boldsymbol{t},\boldsymbol{s};\varpi)\, g_2(\boldsymbol{t},\varpi) \qquad \cdots(10)$$

ここで、ω_1とω_2は０からπの実数（$\omega_1 < \omega_2$）、P_nとg_2（ｔ，ω）は、それぞれ、ｎ次のルジャンドル関数とコンプトン散乱角ωでの方向ｔへの散乱投影値を表す。さらに、＜ｔ，ｓ＞と$\int_S$ｄｔは、それぞれ、ベクトルｔとベクトルｓの内積、および、前面検出器を中心とする単位球面Ｓ上での面積分を示す。
【０００７】
しかし、これらの方向線逆投影値分布再構成手法におけるコンプトン散乱角ωでの損失エネルギーE_1は、実測定段階で前面検出器の有限のエネルギー分解能によるΔE_{1e}（半値幅）の不確定度を持っている。さらには、このエネルギー分解能によるものとは独立に、コンプトン散乱角ωでの損失エネルギーE_1は、コンプトン散乱が原子内の有限の運動量を持つ束縛電子によるものであるために、束縛運動電子によるドップラー効果での不確定度ΔE_{1d}（半値幅）をも持つ。
総エネルギー不確定度ΔE_1（半値幅）は、以下の式で表すことができる。
【数１４】

$$\Delta E_1 = \sqrt{\Delta E_{1e}^2 + \Delta E_{1d}^2} \qquad \cdots(11)$$

これらのガンマ線損失エネルギー不確定度は、それぞれ近似公式（式（１２）参照）を用いることにより、前面検出器での測定損失エネルギーE_1に対応する測定コンプトン散乱角ωの不確定度Δω（半値幅）に変換することができる。
【数１５】

$$\Delta\varpi = \frac{\left(1+\alpha\left(1-\cos\varpi\right)\right)^2}{E_0\alpha\sin\varpi}\Delta E_1 \qquad \cdots(12)$$

ここで、α＝　E_0／$m_e C^2$である。

【０００８】

本願発明者たちは、マルチトレーサー用のＧｅ両面クロスストリップ検出器を用いたコンプトンカメラの共同開発を進めている。そのＧｅ両面クロスストリップ検出器の推定エネルギー分解能を元に計算した測定コンプトン散乱角総不確定度（半値幅）を、図２に３つの入射エネルギー（１４１ｋｅＶ，３６４ｋｅＶ，５１１ｋｅＶ）のガンマ線に対して示す。図２から分かるように、低エネルギーガンマ線ほど不確定度は大きく、また、特に小測定コンプトン散乱角で不確定度が顕著になり、１４１ｋｅＶのガンマ線では、測定コンプトン散乱角１０度から３０度で、約９．０度から４．６度もの不確定度（半値幅）となってくる。

【特許文献１】

特開２００２－３５７６６１号公報

【非特許文献１】

Parra L.C.; Reconstruction of cone-beam projections from Compton scattered data, IEEE Trans. Nucl. Sci., 47 : 1543-1550, 2000.

【非特許文献２】

Tomitani T and Hirasawa M : Image reconstruction from limited angle Compton camera data, Phys. Med. Biol., 47 : 2129-2145, 2002.

【０００９】

【発明が解決しようとする課題】

本願発明の目的は、コンプトンテレスコープを含むコンプトンカメラにおいて、測定コンプトン散乱角に対する不確定性を補正し、得られるガンマ線源放射能密度分布の解像度を改善することである。

【課題を解決するための手段】

上述の目的を達成するために、本願発明は、ガンマ線源の放射能密度分布を測定するコンプトンカメラであって、前面検出器及び後面検出器と、該検出器からの出力に基づき計算しガンマ線源の放射能密度分布を再構成する演算手段を有し、該演算手段は、ガンマ線の測定コンプトン散乱角の不確定性を積分核に組み込んだ積分方程式の解を用い、補正された方向線上ガンマ線源積算放射能密度分布を得ることにより、解像度の良いガンマ線源放射能密度分布を再構成することを特徴とする。

前記演算手段は、次に示す関数k_{B_r}を組み込んだ積分方程式の解を用いることが望ましい。

【数１６】

$$k_{Br}(\boldsymbol{s},\boldsymbol{t},\varpi) \equiv \frac{1}{2\pi} Br(\boldsymbol{s},\boldsymbol{t},\varpi)$$

$$Br(\boldsymbol{s},\boldsymbol{t},\varpi) \equiv \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma \sin\varpi'} \exp\left\{-\frac{(\varpi'-\varpi)^2}{2\sigma^2}\right\}$$

$$\varpi' \equiv \arccos\langle \boldsymbol{s},\boldsymbol{t}\rangle \qquad (0 \le \varpi' \le \pi)$$

$$\sigma \equiv \frac{\Delta\varpi}{2\sqrt{2\ln 2}}$$

ここで、ベクトルｓは前面検出器へのガンマ線の入射方向単位ベクトル、ベクトルｔは前面検出器からのガンマ線のコンプトン散乱方向単位ベクトル、ωは測定コンプトン散乱角、Δωは測定コンプトン散乱角不確定度（半値幅）である。

前記演算手段の前記関数k_{Br}中の関数Brの近似関数として、次に示す関数を使用することにより、前記演算手段での数値計算が容易となる。

【数１７】

$$Br(\boldsymbol{s},\boldsymbol{t},\varpi) \equiv \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma \sin\varpi} \exp\left\{-\frac{(\cos\varpi'-\cos\varpi)^2}{2(\sigma\sin\varpi)^2}\right\}$$

前記演算手段の前記測定コンプトン散乱角不確定性を積分核に組み込んだ積分方程式は、次に示すものでもよい。

【数１８】

$$g_1(\boldsymbol{t}) = \int_V d\boldsymbol{s} \int_S d\boldsymbol{u}\, k_{Brd}(\boldsymbol{s},\boldsymbol{t};\arccos\langle \boldsymbol{s},\boldsymbol{u}\rangle)\, h(\langle \boldsymbol{s},\boldsymbol{u}\rangle) f(\boldsymbol{s})$$

ここで、g_1（ｔ）は方向ｔでの後面検出器へのガンマ線コンプトン散乱計数値、Ｖは後面検出器面領域、Ｓは前面検出器を中心とする単位球面、ｈはクライン・仁科の公式、ベクトルｕはクライン・仁科の公式に前記測定コンプトン散乱角不確定性を畳み込むための助変数としての方向単位ベクトル、ｆ（ｓ）は方向ｓでのガンマ線源の方向線上積算放射能密度である。また、関数k_{Brd}中のΔωは、束縛運動電子によるドップラー効果に起因する測定コンプトン散乱角不確定度（半値幅）である。

上述の積分方程式の解としては、次に示す式を用いるとよい。

【数１９】

$$h_d(\langle \boldsymbol{s},\boldsymbol{t}\rangle) \equiv \int_{-1}^{1} d\cos\varpi\, 2\pi k_{Brd}(\boldsymbol{s},\boldsymbol{t};\varpi)\, h(\cos\varpi)$$

$$a_{ij} \equiv \int_V d\boldsymbol{t} \int_V d\boldsymbol{s}\, \varphi_i^*(\boldsymbol{t})\, h_d(\langle \boldsymbol{s},\boldsymbol{t}\rangle)\, \varphi_j(\boldsymbol{s})$$

$$c_i \equiv \int_V d\boldsymbol{t}\, g_1(\boldsymbol{t})\, \varphi_i^*(\boldsymbol{t})$$

$$f(\boldsymbol{s}) = \left[(c_1,\cdots,c_m) \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{m1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{1m} & \cdots & a_{mm} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \varphi_1(\boldsymbol{s}) \\ \vdots \\ \varphi_m(\boldsymbol{s}) \end{pmatrix} \right]$$

ここで、φ_i（iは正の整数）は、Vの前面検出器中心単位球面上への投影面を定義域とする任意の完全正規複素直交関数系である。

また、前記演算手段の前記測定コンプトン散乱角不確定性を積分核に組み込んだ積分方程式は、次に示すものでもよい。

【数２０】

$$g_2(\boldsymbol{t},\varpi) = \int_V d\boldsymbol{s} \int_S d\boldsymbol{u}\, k_{Brd}(\boldsymbol{s},\boldsymbol{t};\arccos\langle \boldsymbol{s},\boldsymbol{u}\rangle)\, h(\langle \boldsymbol{s},\boldsymbol{u}\rangle)\, k_{Bre}(\boldsymbol{s},\boldsymbol{u};\varpi)\, f(\boldsymbol{s})$$

又は

【数２１】

$$g_2(\boldsymbol{t},\varpi) = \int_V d\boldsymbol{s}\, k_{Brt}(\boldsymbol{s},\boldsymbol{t};\varpi)\, h(\cos\varpi)\, f(\boldsymbol{s})$$

ここで、g_2（ｔ，ω）は方向ｔと測定コンプトン散乱角ωでの後面検出器へのガンマ線コンプトン散乱計数値、Ｖは後面検出器面領域、Ｓは前面検出器を中心とする単位球面、ｈはクライン・仁科の公式、ベクトルｕはクライン・仁科の公式に前記測定コンプトン散乱角不確定性を畳み込むための助変数としての方向単位ベクトル、ｆ（ｓ）は方向ｓでのガンマ線源の方向線上積分放射能密度である。また、関数k_{Brd}中のΔωは、束縛運動電子によるドップラー効果に起因する測定コンプトン散乱角不確定度（半値幅）であり、関数k_{Bre}中のΔωは、前面検出器の有限であるエネルギー分解能に起因する測定コンプトン散乱角不確定度（半値幅）であり、関数k_{Brt}中のΔωは、両半値幅の２乗和の平方根である。

上述の積分方程式の解は、次に示す式を用いるとよい。

【数２２】

$$\alpha_n(\cos\varpi) \equiv \int_{-1}^{1} d\cos\varpi' \, 2\pi k_{Brt}(\boldsymbol{s},\boldsymbol{t};\varpi) P_n(\cos\varpi')$$

$$H_{Brn} \equiv \int_{\cos\omega_2}^{\cos\omega_1} d\cos\varpi \, h(\cos\varpi) \, \alpha_n(\cos\varpi)^2$$

$$k_{Br}^{-1}(\boldsymbol{t},\boldsymbol{s};\varpi) \equiv \sum_{n=0}^{m} \frac{2n+1}{4\pi} \frac{P_n(\langle \boldsymbol{t},\boldsymbol{s} \rangle)}{H_{Brn}} \alpha_n(\cos\varpi)$$

$$f(\boldsymbol{s}) = \int_{\cos\omega_2}^{\cos\omega_1} d\cos\varpi \int_S d\boldsymbol{t} \, k_{Br}^{-1}(\boldsymbol{t},\boldsymbol{s},\varpi) \, g_2(\boldsymbol{t},\varpi)$$

ここで、Ｐｎはｎ次のルジャンドル関数、ω_1とω_2は０からπの実数（$\omega_1 < \omega_2$）である。

【００１０】

【発明の実施の形態】

以下、本願発明の実施の形態を、詳しく説明する。

本願発明の補正の手法を用いることにより、図１に示したコンプトンカメラ（コンプトンテレスコープを含む）において、測定コンプトン散乱角に対する不確定性を補正して、より解像度の良いガンマ線源放射能密度分布を得ることができる。以下に、本願発明者たちが提案しているガンマ線源放射能密度分布再構成手法に対して、この補正を適用した例も示している。これは、図１の２つの検出器からの出力に基づき、コンピューターにより計算してガンマ線源放射能密度分布を再構成することで、実現することができる。

コンプトンカメラ用ガンマ線源放射能密度分布再構成手法に対する測定コンプトン散乱角不確定性補正では、次に示す関数k_{Br}を積分方程式の積分核に組み込み、組み込んだ積分方程式の解をコンピューターにより計算することにより、実現できる。なお、コンピューターにより、積分方程式の解を計算することは、既存のコンプトンカメラで用いられている手法でよい。

【数２３】

$$k_{Br}(\boldsymbol{s},\boldsymbol{t};\varpi) \equiv \frac{1}{2\pi} Br(\boldsymbol{s},\boldsymbol{t};\varpi) \qquad \cdots(13)$$

$$Br(\boldsymbol{s},\boldsymbol{t};\varpi) \equiv \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma\sin\varpi'} \exp\left\{-\frac{(\varpi'-\varpi)^2}{2\sigma^2}\right\} \qquad \cdots(14)$$

$$\varpi' \equiv \arccos\langle \boldsymbol{s},\boldsymbol{t} \rangle \qquad (0 \le \varpi' \le \pi) \qquad \cdots(15)$$

$$\sigma \equiv \frac{\Delta\varpi}{2\sqrt{2\ln 2}} \qquad \cdots(16)$$

ここで、各記号は前と同様であり、ベクトルｓは前面検出器へのガンマ線の入射方向単位ベクトル、ベクトルｔは前面検出器からのガンマ線のコンプトン散乱方向単位ベクトル、ωは測定コンプトン散乱角、Δωは測定コンプトン散乱角不確定度（半値幅）である。

上述の関数（１４）は、以下の近似関数を用いてもよい。

【数２４】

$$Br(\boldsymbol{s},\boldsymbol{t},\varpi) \equiv \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma\sin\varpi}\exp\left\{-\frac{(\cos\varpi'-\cos\varpi)^2}{2(\sigma\sin\varpi)^2}\right\} \qquad \cdots(17)$$

【００１１】

上述の第１手法では、コンプトン散乱角の測定値を必要としないものであるため、束縛運動電子によるドップラー効果に起因する測定コンプトン散乱角不確定性のみが補正されればよい。

上述の積分方程式（２）は、式（７）の関数ｋを用いて、以下のように表現することができる。ここで、ベクトルｕは、クライン・仁科の公式に測定コンプトン散乱角不確定性を畳み込むための助変数としての方向単位ベクトルである。

【数２５】

$$g_1(\boldsymbol{t}) = \int_V d\boldsymbol{s}\int_S d\boldsymbol{u}\, k(\boldsymbol{s},\boldsymbol{t};\arccos\langle\boldsymbol{s},\boldsymbol{u}\rangle)\, h(\langle\boldsymbol{s},\boldsymbol{u}\rangle)\, f(\boldsymbol{s}) \qquad \cdots(18)$$

この積分方程式（１８）中の関数kの替わりに、上述の補正のための関数ｋ$_{Br}$（１３）を組み込むと、以下のようになる。

【数２６】

$$g_1(\boldsymbol{t}) = \int_V d\boldsymbol{s}\int_S d\boldsymbol{u}\, k_{Brd}(\boldsymbol{s},\boldsymbol{t};\arccos\langle\boldsymbol{s},\boldsymbol{u}\rangle)\, h(\langle\boldsymbol{s},\boldsymbol{u}\rangle)\, f(\boldsymbol{s}) \qquad \cdots(19)$$

この手法の場合、コンプトン散乱角の測定値を必要としないので、ｋ$_{Brd}$中のΔωは、束縛運動電子によるドップラー効果に起因する測定コンプトン散乱角不確定度（半値幅）を示す。

上積分方程式（１９）の解は以下の式のようになり、これで計算するとよい。

【数２７】

$$h_d(\langle\boldsymbol{s},\boldsymbol{t}\rangle) \equiv \int_{-1}^{1} d\cos\varpi\, 2\pi k_{Brd}(\boldsymbol{s},\boldsymbol{t};\varpi)\, h(\cos\varpi) \qquad \cdots(20)$$

$$a_{ij} \equiv \int_V d\boldsymbol{t}\int_V d\boldsymbol{s}\, \varphi_i^*(\boldsymbol{t})\, h_d(\langle\boldsymbol{s},\boldsymbol{t}\rangle)\, \varphi_j(\boldsymbol{s}) \qquad \cdots(21)$$

$$c_i \equiv \int_V d\boldsymbol{t}\, g_1(\boldsymbol{t})\, \varphi_i^*(\boldsymbol{t}) \qquad \cdots(22)$$

$$f(\boldsymbol{s}) = \left[(c_1,\cdots,c_m)\begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{m1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{1m} & \cdots & a_{mm} \end{pmatrix}^{-1}\begin{pmatrix} \varphi_1(\boldsymbol{s}) \\ \vdots \\ \varphi_m(\boldsymbol{s}) \end{pmatrix}\right] \qquad \cdots(23)$$

【００１２】

また、上述の第２手法の積分方程式（６）は、次のように表現できる。ここで、ベクトルｕは、クライン・仁科の公式に測定コンプトン散乱角不確定性を畳み込むための助変数としての方向単位ベクトルである。

【数２８】

$$g_2(\boldsymbol{t},\varpi)=\int_V d\boldsymbol{s}\int_S d\boldsymbol{u}\,k(\boldsymbol{s},\boldsymbol{t},\arccos\langle\boldsymbol{s},\boldsymbol{u}\rangle)\,h(\langle\boldsymbol{s},\boldsymbol{u}\rangle)\,k(\boldsymbol{s},\boldsymbol{u},\varpi)\,f(\boldsymbol{s}) \qquad \cdots(24)$$

この積分方程式（２４）に補正を行う関数ｋ$_{Brd}$（束縛運動電子によるドップラー効果に起因する不確定を補正），ｋ$_{Bre}$（前面検出器の有限のエネルギー分解能に起因する不確定を補正）を関数kの替わりに組み込んだ積分方程式は、以下のようになる。

【数２９】

$$g_2(\boldsymbol{t},\varpi)=\int_V d\boldsymbol{s}\int_S d\boldsymbol{u}\,k_{Brd}(\boldsymbol{s},\boldsymbol{t},\arccos\langle\boldsymbol{s},\boldsymbol{u}\rangle)\,h(\langle\boldsymbol{s},\boldsymbol{u}\rangle)\,k_{Bre}(\boldsymbol{s},\boldsymbol{u},\varpi)\,f(\boldsymbol{s}) \qquad \cdots(25)$$

なお、ｋ$_{Bre}$中のΔωは、前面検出器の有限のエネルギー分解能に起因する測定コンプトン散乱角不確定度（半値幅）を示す。

上述の積分方程式（２５）は、以下のように近似表現できる。

【数３０】

$$g_2(\boldsymbol{t},\varpi)=\int_V d\boldsymbol{s}\;k_{Brt}(\boldsymbol{s},\boldsymbol{t};\varpi)\,h(\cos\varpi)\,f(\boldsymbol{s}) \qquad \cdots(26)$$

ここで、ｋ$_{Brt}$におけるΔωは、関数ｋ$_{Brd}$におけるΔωと関数ｋ$_{Brd}$におけるΔωの二乗和の平方根である。

この積分方程式（２６）の解は、以下の式のようになり、これで計算するとよい。

【数３１】

$$\alpha_n(\cos\varpi)\equiv\int_{-1}^{1}d\cos\varpi'\,2\pi k_{Brt}(\boldsymbol{s},\boldsymbol{t};\varpi)\,P_n(\cos\varpi') \qquad \cdots(27)$$

$$H_{Brn}\equiv\int_{\cos\omega_2}^{\cos\omega_1}d\cos\varpi\;h(\cos\varpi)\;\alpha_n(\cos\varpi)^2 \qquad \cdots(28)$$

$$k_{Br}^{-1}(\boldsymbol{t},\boldsymbol{s};\varpi)\equiv\sum_{n=0}^{m}\frac{2n+1}{4\pi}\frac{P_n(\langle\boldsymbol{t},\boldsymbol{s}\rangle)}{H_{Brn}}\alpha_n(\cos\varpi) \qquad \cdots(29)$$

$$f(\boldsymbol{s})=\int_{\cos\omega_2}^{\cos\omega_1}d\cos\varpi\int_S d\boldsymbol{t}\;k_{Br}^{-1}(\boldsymbol{t},\boldsymbol{s},\varpi)\;g(\boldsymbol{t},\varpi) \qquad \cdots(30)$$

なお、上述の解（２７）～（３０）の導出に関しては、必要が有れば、本願発明者たちが発表した、Hirasawa M and Tomitani T : An analytical image reconstruction algorithm to compensate for scattering angle broadening in Compton cameras, Phys. Med. Biol., 48 : 1009-1026, 2003. を参照されたい。

なお、関数ｇ$_1$とｇ$_2$との間には、常に以下の関係がある。

【数３２】

$$g_1(\boldsymbol{t})=2\pi\int_{-1}^{1}d\cos\varpi\;g_2(\boldsymbol{t},\varpi)$$

【００１３】

さて、上述の第２のガンマ線源放射能密度分布再構成手法の式（２７）～（３０）により、補正した場合の効果について、図３～図７を用いて説明する。図３～図７において、

図の中心に垂直な軸がコンプトンカメラの前後面検出器の中心軸に一致している。また、中心軸の方向は、天頂角９０度、方位角１８０度にあわせてあり、図中の横軸と縦軸は、それぞれ、９０度を中心とした天頂角と１８０度を中心とした方位角に対応している。

図３，図４は、同じ放射能を有し隣あって位置している、２点から成る１４１ｋｅＶのガンマ線源分布に対して、補正がある場合とない場合とで、放射能密度分布を再構成計算した例を示している。２点は、球面座標で（８５，１８０）度と（９５，１８０）度の方向に前面検出器から同じ距離に位置している。これらの図は、２点のガンマ線源に対して再構成計算された方向線逆投影値の方向分布を示している。図３は補正なしで、図４は補正ありで計算された再構成分布である。図３，図４から、測定コンプトン散乱角の不確定性による点ガンマ線源に対する分布の広がりが、半値幅６．０度から半値幅３．２度へと、補正関数を用いることにより補正され広がりが小さくなっており、分布の解像度が改善されていることがわかる。

【００１４】

図５～図７は、トレーサーによる核医学診断や生物機能研究への適用を評価するために、方向線逆投影値分布を再構成計算した例を示している。図５に示すような、天頂角±３０度×方位角±３０度に渡るガンマ線源放射能密度分布からの１４１ｋｅＶのガンマ線に対して、方向線逆投影値分布の再構成計算を試みた。図５での円又は楕円の領域において、隣接する領域間でのガンマ線放射能密度差は、約１０％となっている。また、上部と下部のガンマ線放射能密度約±１０％差の凹凸円領域は、左から、２，４，６度の直径である。

測定コンプトン散乱角不確定性の補正を組み込む前の分布再構成手法により計算された方向線逆投影値分布を図６に示す。約１０％のガンマ線放射能密度差の識別が困難となっていることがわかる。

測定コンプトン散乱角不確定性の補正を組み込んだ後の分布再構成手法により計算された方向線逆投影値分布を図７に示す。上部と下部の２度の直径の円領域部分を除けば、ほぼ元の図５の分布を再現しており、分布の解像度が改善されていることがわかる。

なお、上での分布再構成手法の適用計算においては、いずれにおいても、１０度から３０度までの測定コンプトン散乱角での散乱投影値分布を用い、有限級数和ではＨａｍｍｉｎｇ窓が適用されている。また、式（９）、（２９）での和の次数は、補正組み込み後の式（２９）では９０次までが、補正組み込み前の式（９）では１３５次までが使用されている。さらにまた、データサンプリング間隔は１度である。

【００１５】

【発明の効果】

以上、説明したように本願発明を用いることにより、コンプトンカメラによるガンマ線源の放射能密度分布測定（分布測定値を基に３次元分布像を得る場合を含む）において、測定コンプトン散乱角の不確定性を補正することで、より解像度の良い分布を得ることができる。

【図面の簡単な説明】

【図１】コンプトンカメラの基本構成を説明する図である。

【図２】Ｇｅ両面クロスストリップ検出器に対する散乱角の総不確定度を示す図である。

【図３】点線源分布に対する補正無しでの再構成方向線逆投影値分布を示す図である。

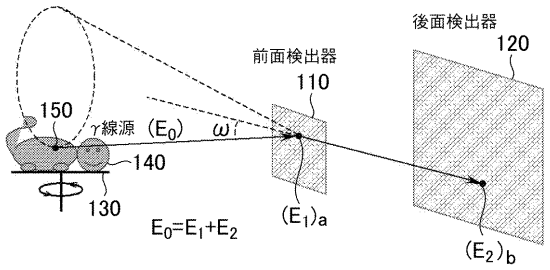
【図４】点線源分布に対する補正有りでの再構成方向線逆投影値分布を示す図である。

【図５】連続線源分布測定対象の放射能密度分布を示す図である。

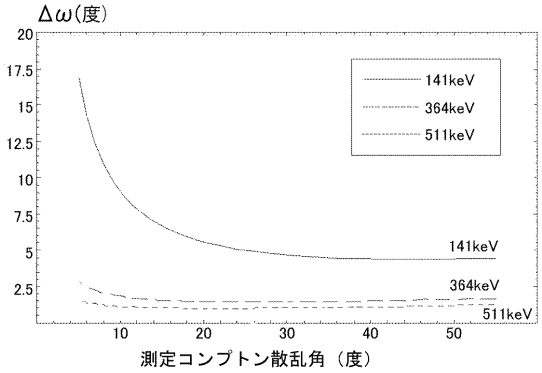
【図６】連続線源分布に対する補正無しでの再構成方向線逆投影値分布を示す図である。

【図７】連続線源分布に対する補正有りでの再構成方向線逆投影値分布を示す図である。

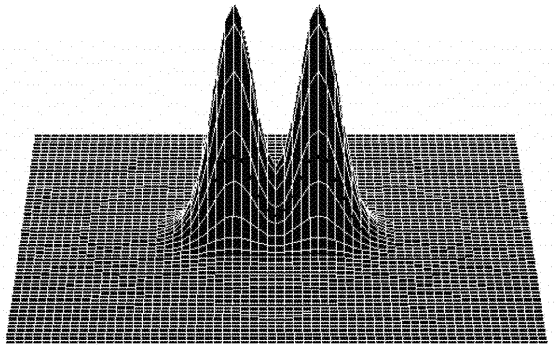
【図１】



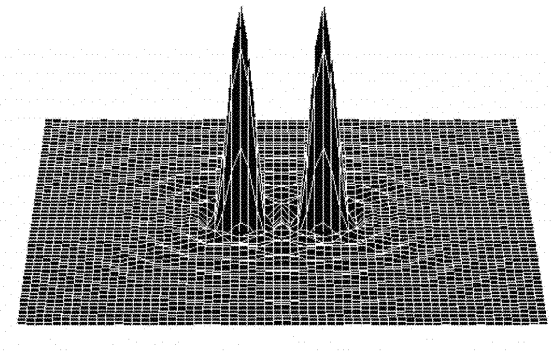
【図２】



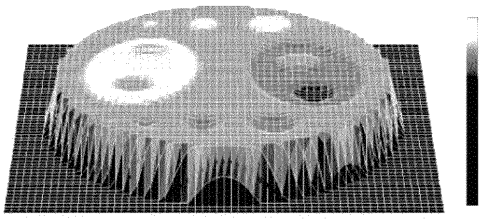
【図３】



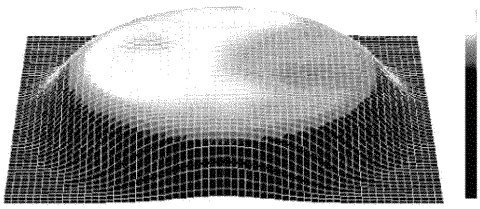
【図４】



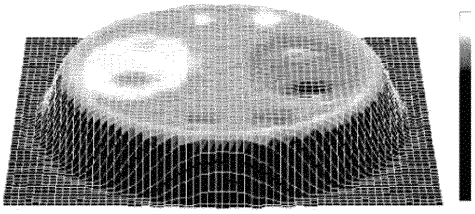
【図５】



【図６】



【図７】



フロントページの続き

特許法第３０条第１項適用　Ｐｈｙｓｉｃｓ　ｉｎ　Ｍｅｄｉｃｉｎｅ　ａｎｄ　Ｂｉｏｌｏｇｙ，　Ｖｏｌ．４８，　Ｎｏ．８（平成１５年4月1日）の第１００９－１０２６頁に発表

(56)参考文献　特開平０６－２０１８３２（ＪＰ，Ａ）
特開平０９－１０１３７１（ＪＰ，Ａ）

(58)調査した分野(Int.Cl.，ＤＢ名)
G01T　1/00-7/12
JSTPlus(JDreamII)
JMEDPlus(JDreamII)