

# 一个用于多重示踪技术的康普顿成像装置

杨永峰<sup>1</sup>, Y. Gono<sup>2</sup>, S. Motomura<sup>2</sup>, S. Enomoto<sup>3</sup>, Y. Yano<sup>3</sup>

(1. 中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 日本九州大学物理系, 福岡 812 8581;

3. 日本理化学研究所回旋加速器中心, 和光 351 0198)

**摘要:**提出了一个由位置灵敏高纯锗探测器组成、用于多重示踪技术的康普顿成像装置。简要介绍了康普顿成像系统的工作原理以及影响其空间分辨率的各种因素。用蒙特卡洛方法模拟了所提出的康普顿成像装置对处于不同位置、发射不同能量  $\gamma$  射线的点源可达到的效率和空间分辨率。用现有的 2 个多单元高纯锗探测器进行了三个点源成像实验, 证明所提出的康普顿成像装置适用于多重示踪技术。

**关键词:**多重示踪技术; 康普顿成像装置; 蒙特卡洛模拟

**中图分类号:** TL814; O615.4   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1000-7512(2001)03~04-0155-06

中高能重离子加速器的使用加速了多重示踪技术的发展。和通常的单一示踪技术相比, 多重示踪技术具有高效率和高可靠性的优点, 被广泛应用于生物学、医学、药学和植物学等领域<sup>[1]</sup>。在多重示踪技术中需要一个探测装置来同时测量多个放射性核素在样品中的位置。由于在多重示踪技术中同时使用多个放射性核素, 这些核素发射的  $\gamma$  射线能量范围为几十 keV 到几 MeV, 所以用于多重示踪技术的成像装置必须具有好的能量分辨率, 以便对不同核素进行鉴别, 还必须同时适用于发射各种能量  $\gamma$  射线的核素。常规使用机械准直器的成像系统只适用于低能单光子, 不能用于多重示踪技术。相反由于多普勒展宽和能量分辨引起的空间分辨率随着  $\gamma$  射线能量的增加而得以改进, 康普顿成像装置适用于高能  $\gamma$  射线。1974年 Todd等<sup>[2]</sup>首次提出了康普顿成像装置的原理, 并提出将该装置应用于医疗成像。此后, 不同研究小组研制了用于医疗成像<sup>[3]</sup>和核工业的康普顿成像装置模型<sup>[4]</sup>, 并进行了一系列成像实验和成像方法研究。近年来, 随着核探测技术, 尤其是位置灵敏硅和锗探测器技术的发展, 越来越多的研究小组开始研制康普顿成像装置<sup>[5,6]</sup>并进行康普顿成像装置的成像方法研究<sup>[7,8]</sup>。但是, 到目前为止康普顿成像装置除了已经成功地用于核天体物理学来测量宇宙中高能  $\gamma$  射线的发射方向外<sup>[9]</sup>, 还没有任何一个装置应用于疾病诊断。本工作提出一个由两个位置灵敏高纯锗探测器组成的康普顿成像装置, 研究本装置用于多重示踪技术的可能性。

## 原理

康普顿成像装置原理示意图示于图 1。康普顿成像装置由 2 个平面高纯锗探测器组成, 每个高纯锗探测器被均匀分割成多个单元, 构成位置和能量皆灵敏的探测器阵列。如果来自样品的  $\gamma$  射线在第一个探测器中发生康普顿散射, 然后被第二个探测器完全吸收, 其在两个探测器中的相互作用位置  $x_1$  和  $x_2$  和能量损失  $E_1$ 、 $E_2$  可直接由两个位置灵敏探测器测量,  $\gamma$  射线的能量  $E_0$  可由  $E_1 + E_2$  得到。由于高纯锗探测器具有好的能量分辨率, 所以不同的放射性核素可由其特征  $\gamma$  射线能量得以鉴别。康普顿散射角  $\theta$  可由康普顿散射公式计算:

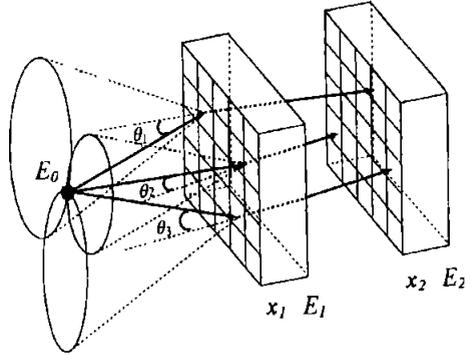


图 康普顿成像装置原理示意图

$$\cos \theta = 1 + \frac{m_e c^2}{E_0} \left( \frac{1}{E_1} - \frac{1}{E_2} \right) \quad (1)$$

(1) 式中  $m_e c^2$  为电子的质量。由于康普顿散射公式没有给出任何方位角的信息, 所以  $\gamma$  射线的发射位置一定处于一个圆锥表面上的某一点, 这个圆锥的顶点为  $x_1$ 、中轴线为  $x_1 x_2$ 、半角为  $\theta$ 。

一个最简单的三维像可通过直接叠加由一系列事件所产生的圆锥得到。像的分辨率依赖于圆锥确定的精度, 从而取决于两个探测器的位置和能量分辨率以及几何位置。确定一个圆锥的误差包括三个方面: 顶点的误差  $\Delta x_1$ 、康普顿散射角的误差  $\Delta \theta$  和中轴线的误差  $\Delta x_2$ 。 $\Delta x_1$  直接取决于第一个探测器的位置分辨率。 $\Delta \theta$  取决于第一个探测器的能量分辨率和由于探测器中电子初始动量分布而引起的多普勒展宽。 $\Delta x_2$  和第一个探测器的能量分辨率  $\Delta E_1$  的依赖关系可由下面公式给出:

$$\Delta \theta = \frac{m_e c^2}{\sin \theta (E_1 - E_2)^2} \Delta E_1 \quad (2)$$

所以由第一个探测器的能量分辨率引起的  $\Delta \theta$  随着  $\gamma$  射线能量的降低和康普顿散射角趋于  $0^\circ$  和  $180^\circ$  而增加。计算由多普勒展宽而引起的  $\Delta \theta$  比较复杂, 文献 [5] 中有详细的描述。由多普勒展宽而引起的  $\Delta \theta$  也随着  $\gamma$  射线能量的降低而增大, 所以康普顿成像装置尤其适用于高能  $\gamma$  射线。 $\Delta x_2$  取决于两个探测器的位置分辨率和间距, 可通过改进探测器的位置分辨率和增加它们的间距而降低。 $\Delta x_1$ 、 $\Delta \theta$  和  $\Delta x_2$  的统计结合给出康普顿成像装置的空间分辨率,  $\Delta x_1$  为从发射点到  $x_1$  的距离。所以, 为了得到好的空间分辨率, 源必须尽可能地靠近康普顿成像装置。

## 蒙特卡洛模拟

使用 GEANT 蒙特卡洛程序<sup>[10]</sup>对康普顿成像装置的探测器系统进行了优化<sup>[11]</sup>。GEANT 为西欧核子中心 (CERN) 研究人员编写的最初用来进行高能物理探测器模拟的一个蒙特卡洛程序, 现在也被广泛应用于核物理、辐射防护和核医学等。本工作根据探测器系统的优化结果提出了一个下述康普顿成像装置。本装置由两个灵敏体积分别为  $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$  和  $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$  的高纯锗探测器阵列组成。由于现在可得到的平面高纯锗探测器的最大面积大约为  $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ , 所以以上 2 个探测器阵列可分别由多个探测器组成。1 cm 大约为第一

个探测器的最佳厚度;第二个探测器厚度选为 2 cm,主要是由于现在可以制做的平面高纯锗探测器的最大厚度为 2 cm,更厚的第二个探测器可得到更高的效率。将每个高纯锗探测器的阳极和阴极分别分割为宽度为 2 mm 的条形,阳极和阴极的分割方向互相垂直,从而得到两个方向的位置分辨。厚度方向的位置分辨可由探测器阳极和阴极信号的时间差得到。实验表明此方法可得到的位置分辨率大约为 2 mm<sup>[12]</sup>。两个探测器阵列平行放置,其间距为 6 cm。

用 GEANT 程序模拟了上述康普顿成像装置的效率和空间分辨率。效率定义为在第一个探测器中发生单次康普顿散射,然后完全被第二个探测器吸收的  $\gamma$ 射线的数目除以从源发射的  $\gamma$ 射线的数目。为了得到空间分辨率,采取了以下简单成像方法:圆锥和成像平面的交线为椭圆,通过直接相加由一系列事件产生的椭圆可以在成像平面上得到一个二维像。一个点源的二维像示于图 2a,通过二维像中心切片而得到的一维位置谱示于图 2b。本工作中将此一维位置谱的半高宽 (FWHM) 定义为康普顿成像装置的空间分辨率。本工作所有计算中第一个探测器的能量分辨率为 2.4 keV (在 1332.5 keV 处),没有考虑多普勒展宽。

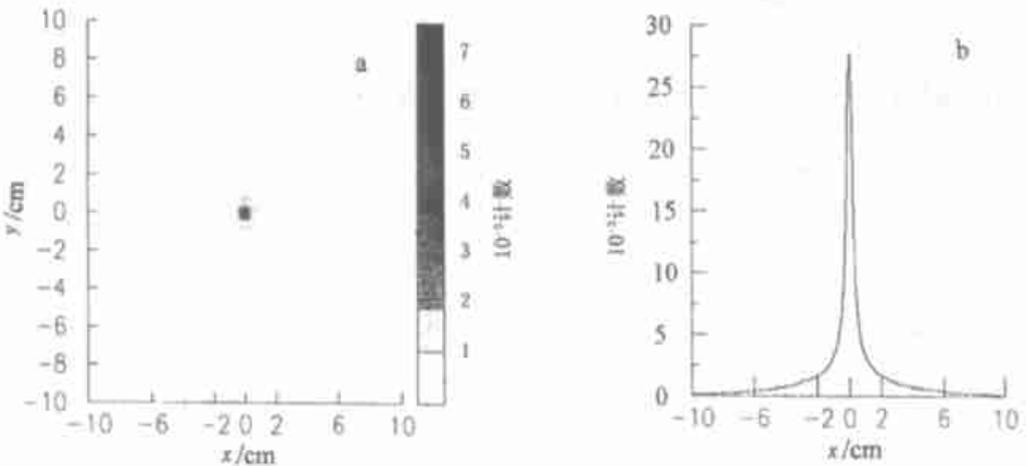


图 ( ) 点源在成像平面上的二维像

图 ( ) 通过二维像中心的一维切片位置谱

和  $y$  分别为成像平面上的  $x$  和  $y$  坐标,图 2 (a) 右纵标尺标出二维像中不同深度对应的每道计数

图 2 给出的像为一个能量为 662 keV、处于康普顿成像装置的中心轴线、距离第一个探测器中心为 6 cm 的点源由上述康普顿成像装置得到的像;对应的效率和空间分辨率分别为 0.41% 和 5 mm,远优于通常采用机械准直器的成像系统使用发射 140 keV  $\gamma$ 射线的  $^{99}\text{Tc}$  时的效率 ( $10^{-4}$ ) 和空间分辨率 (12 mm)。

点源距第一个探测器中心距离的变化对效率和空间分辨率的影响结果示于图 3。点源处于康普顿成像装置的中心轴线,能量为 662 keV。由图 3 可以看出,随着源到康普顿成像装置距离的增大效率减小,空间分辨率变坏。

$\gamma$ 射线能量的变化对效率和空间分辨率的影响结果示于图 4。在低能时由于光电效应截面很大, $\gamma$ 射线很容易被第一个探测器吸收,所以效率随着能量的增加而增加,在 300 keV 时达到最大值,然后随着能量的增加而降低,在 2000 keV 时的效率大约为 300 keV 时的 1/5。空间分辨率随着能量的增加而改善,由于由探测器位置分辨引起的空间分辨率对能量的变化不灵

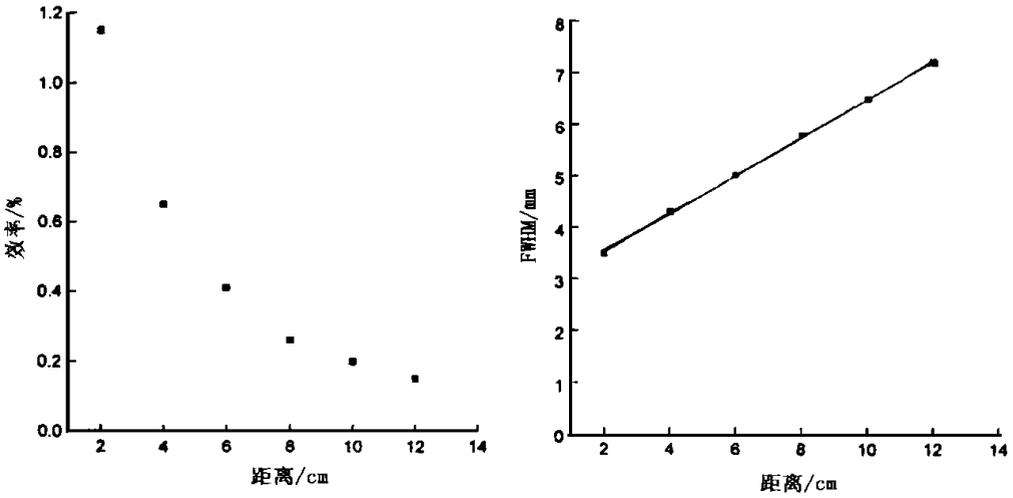


图 2 效率和空间分辨率随着点源距第一个探测器中心距离的变化

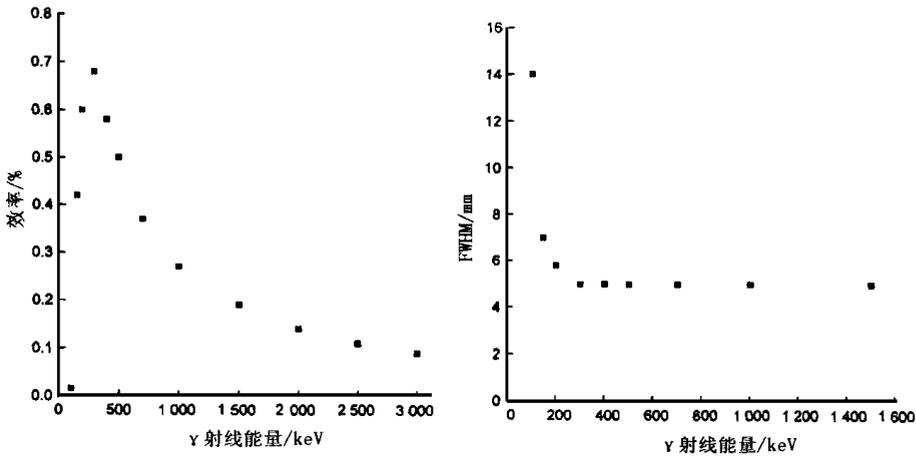


图 3 效率和空间分辨率随着  $\gamma$  射线能量的变化

敏,所以由图 4 可以得到以下结论:和探测器位置分辨的贡献相比,当  $\gamma$  射线能量大于 300 keV 时,第一探测器的能量分辨对空间分辨率贡献可以忽略不计,但随着  $\gamma$  射线能量的降低,第一探测器的能量分辨的贡献越来越大。当  $\gamma$  射线能量大于 200 keV 时,康普顿成像装置的效率和空间分辨率优于使用机械准直器的成像装置,所以康普顿成像装置尤其适用于能量大于 200 keV 的  $\gamma$  射线的成像。

### 实验

使用现有的 2 个多单元平面高纯锗探测器,进行了康普顿成像装置成像的实验研究。实验在日本九州大学物理系完成。两个探测器平行放置,其间距为 6 cm,三个点源  $^{60}\text{Co}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  和  $^{152}\text{Eu}$  放置于一个平行于探测器平面、距离第一个探测器中心 6 cm 的平面上。每个探测器大小为 5 cm × 5 cm × 2 cm,通过阴极分割为 25 个 1 cm × 1 cm × 2 cm 的等大小单元。由于受实验室中现有电子学插件数量的限制,实验中仅使用了第一个探测器中的 7 个单元和第二个探测器中的 9 个单元,采用标准的 NM CAMMAC 电子学系统。实验数据获取时记录了两个探测器的符合数据,但数据分析时为避免多次散射效应的影响,仅采用两个探测器中分别同时只有一个单元有信号的事件来成像。实验测量到的 3 个源的混合能谱示于图 5。由图 5 可以非常清楚地鉴别出不同源的全能峰,通过在 3 个源各自的全能峰上加能量窗,可以得到它们在成像平面上的二维像。扣除每个像的本底后可以得到源的位置,实验测量到的 3 个源的位置示于图 6。实验结果证明了所提出的康普顿成像装置适用于多重示踪技术。

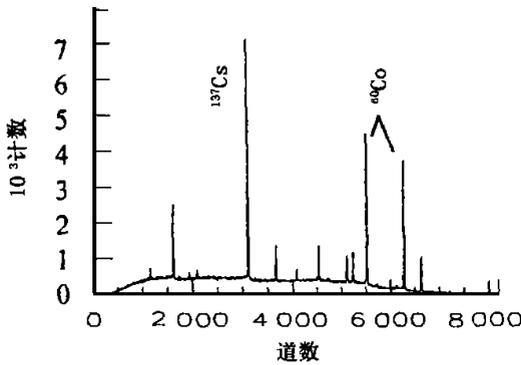


图 5  $^{60}\text{Co}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  和  $^{152}\text{Eu}$  三个点源的混合能谱

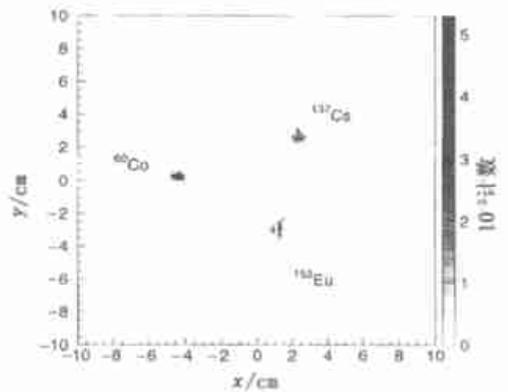


图 6 实验测量到的三个源的位置

$x$  和  $y$  分别为成像平面上的  $x$  和  $y$  坐标,图右标尺标出图中不同深度对应的每道计数

### 小结

本文提出了一个可以同时测量多个核素在样品中位置的康普顿成像装置,简单介绍了其工作原理,并讨论了影响康普顿成像装置空间分辨率的各种因素。使用 GEANT 蒙特卡洛程序对所提出的康普顿成像装置的效率和空间分辨率进行了计算,其效率和空间分辨率远好于常规使用的机械准直器的成像装置,康普顿成像装置尤其适用于发射高能  $\gamma$  射线的核素。使用现有的 2 个多单元高纯锗探测器组成一个康普顿成像装置,进行了成像的实验研究,同时得到了 3 个发射不同能量  $\gamma$  射线的点源的位置,实验结果证明了所提出的康普顿成像系统适用于多重示踪成像。本康普顿成像装置虽然主要为多重示踪研究设计,但它也可以用于医疗成像进行疾病诊断,用于核工业测量核反应堆的泄漏等。

### 参考文献:

[1] Ambe S, Chen SY, Ohkubo Y, et al Preparation of a Radioactive Multitracer Solution From Gold Foil Irradiated by

135 MeV  $^{14}\text{N}$  Ions [J]. Chem Lett (the Chemical Society of Japan), 1991, 149~ 152

[2] Todd RW, Nightingale JM, Everett DB. A Proposed Gamma Camera [J]. Nature, 1974, 251: 132~ 134

[3] Singh M, Brechner RR. Experimental Test object Study of Electronically Collimated SPECT [J]. J Nucl Med, 1990, 31: 178~ 186

[4] Martin JB, Knoll GF, W ehe DK, et al A Ring Compton Camera for Imaging Medium Energy Gamma Rays [J]. IEEE Trans on Nucl Sci 1993, 40 (4): 972~ 978

[5] LeBlanc JW, Clinthorne NH, Hua C, et al C SPRINT: A Prototype Compton Camera System for Low Energy Gamma Ray Imaging [J]. IEEE Trans on Nucl Sci 1998, 45 (3): 943~ 949

[6] Philips BF, Inderhees SE, Kröger RA, et al Performance of a Compton Telescope Using Position Sensitive Germanium Detectors [J]. IEEE Trans on Nucl Sci 1996, 43 (3): 1 472~ 1 475

[7] Sauve AC, HERO AO, Rogers W L, et al 3D Image Reconstruction for a Compton SPECT Camera Mode [J]. IEEE Trans on Nucl Sci 1999, 46 (6): 2 075~ 2 084

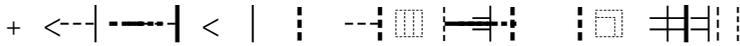
[8] Basko R, Zeng G, Gullberg GT. Application of Spherical Harmonics to Image Reconstruction for a Compton Camera [J]. Phys Med Biol 1998, 43: 887~ 894

[9] Kurfess JD. Compton Scatter Imaging in Astrophysics [J]. IEEE Trans on Nucl Sci 1998, 45 (3): 936~ 942

[10] Brun R, Bruyant F, Maire M, et al GEANT 3 Users' Guide DD/E/84 1, CERN 1987.

[11] Yang YF, Gono Y, Motomura S, et al A Compton Camera for Multitracer Imaging [J]. IEEE Trans on Nucl Sci 2001, 48 (3): 656~ 661.

[12] Momayezi M, Warburton W K, Kröger RA. Position Resolution in a Ge Strip Detector [EB/OL]. <http://www.xia.com>. 1999 07.



YANG Yong feng<sup>1</sup>, Y. Gono<sup>2</sup>, S. Motomura<sup>2</sup>, S. Enomoto<sup>3</sup>, Y. Yano<sup>3</sup>

1. 中国科学院高能物理研究所北京正负电子对撞机加速器组, 北京 100049
2. 日本大阪大学工学部核融合工学科, 大阪府吹上 565 0871
3. 日本大阪大学工学部核融合工学科, 大阪府吹上 565 0871

A Compton camera consisting of two position sensitive germanium detectors is proposed for multitracer technique. Its principle is briefly introduced and the various factors that affect its spatial resolution are discussed. The efficiency and spatial resolution of the proposed Compton camera for a point source emitting different energy gamma rays from different positions are calculated by Monte Carlo simulations. An Experiment is performed to measure the positions of three point sources simultaneously by using two existing segmented germanium detectors. The feasibility of the proposed Compton camera for multitracer is demonstrated.

□ 正负电子对撞机; ▽ 多晶锗; ○ 蒙特卡罗模拟