

影响 γ 反散射光子计数因素的分析

郑欣,郑健,向新程

(清华大学核能技术设计研究院,北京 100084)

摘要: 推导了一般情况下反散射光子计数的理论公式,通过简化物理模型分析了影响反散射光子计数的各种因素,并且计算得到了不同几何条件下和不同物质的反散射光子计数的差异。
关键词: γ 射线反散射;光子计数;饱和厚度
中图分类号: TL81 文献标识码: A 文章编号: 0258-0934(2004) 02-0215-03

0 引言

γ 射线反散射利用光子在物质上的反散射强度与物质的密度、厚度和元素组成等性质相关,通过测量反散射光子计数可以确定物质的某些特征和存在。便携式违禁品探测仪正是利用了这一原理检测隐藏于容器表面下的违禁品是否存在以及存在的数量。反散射光子测量灵敏度是违禁品探测器的重要指标之一,由于违禁品探测仪中使用的放射源活度很低,所以为了获得高灵敏度就必须对影响反散射强度的因素进行研究。本文从理论推导入手,对影响反散射光子计数的因素进行了分析,并通过计算讨论了不同几何条件下和不同物质的反散射光子计数强度的差异,对仪器设计参数的选择具有参考价值。

1 反散射理论公式的推导^[1-3]

假设一束窄束 γ 射线入射到厚度为 M 的表面平整的物质中,如图 1 所示。 N_0 为入射 γ 射线的光子个数, N_s 为被探测器探测到的散射 γ

射线的光子个数, h 为入射 γ 射线与反散射物质表面的夹角, θ 为散射 γ 射线与反散射物质表面的夹角, T 为探测器的接收面与反散射物质表面的夹角, μ_0 为入射 γ 射线在反散射物质中的线性衰减系数, μ_θ 为散射 γ 射线在反散射物质中的线性衰减系数, n_e 为反散射物质的电子密度, x 为入射线进入反散射物质的深度, Δx 为入射光子在深度 x 处的薄层的厚度, c 为探测器接收面中心与反散射物质表面距离, b 为探测器的接收面的半径, D 为 γ 射线的入射点与探测器接收面中心的水平距离。 γ 射线入射到物质 x 深度后的强度为 N_x ,由指数衰减规律得到在 x 深度 Δx 薄层发生康普顿散射的光子数目为

$$N_x = N_0 \exp(-\mu_0 x / \sin h)$$
$$N_x n_e^e (\Delta x / \sin h) \tag{1}$$

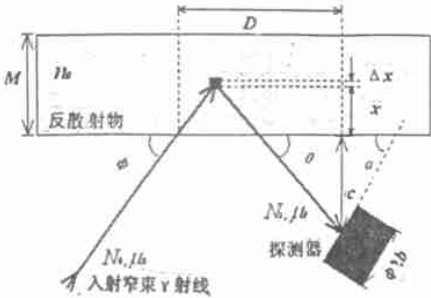


图 1 反散射物理模型
 e^e 表示光子对单个电子的积分散射截面,

收稿日期: 2002-12-18
作者简介: 郑欣 (1979-),男,内蒙古乌兰浩特人,清华大学核能技术设计研究院硕士生,主要从事便携式违禁品探测器的设计工作。

假设光子发生散射时各角度的微分截面基本相同(对于 350keV 的光子基本满足此条件),那么发生散射并且沿着探测器所张立体角方向出射的光子个数为

$$[K(x)/4\pi]e n_e(\Delta x/\sinh)N_x$$

$K(x)$ 表示探测器对 x 处的散射光子所张立体角,为 x 的函数。考虑到散射光子在物质中的衰减和探测器的探测效率,因此在物质中 x 深度处 Δx 薄层内发生散射被探测器探测到的光子数目为

$$\Delta N_s = X[K(x)/4\pi]e n_e(\Delta x/\sinh)N_x \exp(-\mu_0 x/\sinh) \quad (2)$$

其中 X 表示探测器的探测效率,对厚度 x 从 0 到 M 的积分得到探测器接收的总的反散射光子计数

$$N_s = \int_0^m X[K(x)/4\pi]e n_e(\sinh)N_x \exp(-\mu_0 x/\sinh) dx = [Xn_e N_0/(4\pi\sinh)] \int_0^m K(x) \exp\{-[(\mu_0/\sinh) + (\mu_0 x/\sinh)]\} dx \quad (3)$$

由式 (3)可见,反散射光子计数 N_s 和反散射物质的电子密度 n_e 成正比,和探测器对散射光子所张立体角 $K(x)$ 有直接关系,立体角越大,计数率越高,和反散射的物质的厚度有关,上式是对厚度的积分,物质厚度增加,反散射计数也增加。但是由于入射和反射光子以指数规律衰减,所以当物质厚度增加到一定程度后,反散射计数不再增加,这个厚度即为饱和厚度。

图 1 中探测器所张立体角 $K(x)$ 计算如下

$$\sin\theta = 1/(1 + \cot^2\theta)^{1/2} = (x + c)/[(x + c)^2 + (D - x/\tanh)^2]^{1/2} \quad (4)$$

$$\cos U = [(x + c)/\sinh]/[(x + c)^2/(\sinh^2 + b^2)]^{1/2} \quad (5)$$

$$K(x) = 2\pi(1 - \cos U)\sin(T + \theta) = \{2\pi[1 - ((x + c)/\sinh)]/[(x + c)^2/(\sinh^2 + b^2)]^{1/2}\}\sin(T + \theta) \quad (6)$$

$$N_s = [Xn_e N_0/(4\pi)] \int_0^m$$

$$[K(x)/\sinh]\exp\{-[(\mu_0/\sinh) + (\mu_0 x/\sinh)]x\}dx = K \int_0^m [2\pi(1 - \cos U)/\sinh]\sin(T + \theta)\exp\{-[(\mu_0/\sinh) + (\mu_0 x/\sinh)]x\}dx \quad (7)$$

2 影响反散射计数的因素的分析

由反散射公式可见:物质对入射和散射线的衰减,探测器立体角的大小,以及反散射物质电子密度和反散射物质的厚度是影响光子计数的主要因素

2.1 辐射源、探测器和反散射物质几何布置的影响

式 (7)中, φ 和 α 与几何布置相关,假设其他条件固定不变,图 2 表示这种条件下, φ 和 α 的变化对反散射光子计数的影响。如图 3 所示,反散射光子计数随 φ 的减小而增加。但是当 φ 很小时,射线进入物质的深度很小。在进行测量时,容器外壳的散射计数占总计数的比例很大,从而对探测隐蔽在容器外壳下的物质所形成干扰。

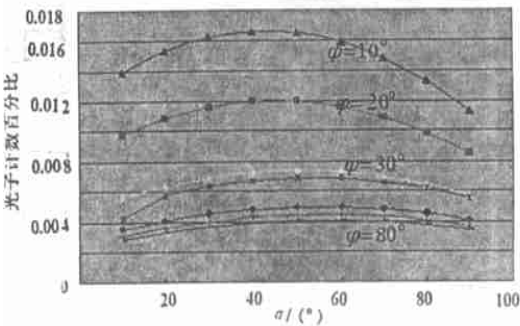


图 2 φ 和 α 对反散射光子计数的影响

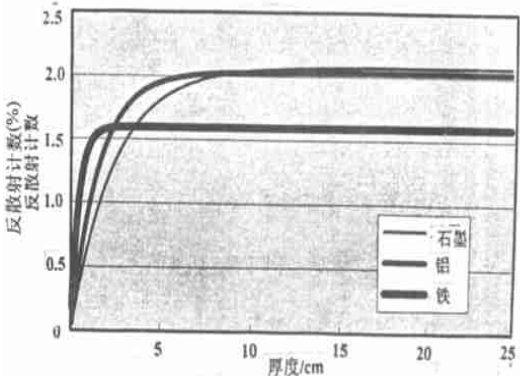


图 3 探测器物质距离较远情况下的反散射计数

2.2 不同种类的物质的反散射计数

当探测器和反散射物质之间的距离较大,远大于反散射物质的厚度时,可以认为探测器的立体角不随入射线深度而变化,即为常数 Ω ,此时反散射计数为

$$N_s = K n_e N_0 \{ [1 - \exp(-(\mu_0/\sinh + \mu_0 x/\sinh))] / (\mu_0/\sinh + \mu_0 x/\sinh) \} =$$

$$K(Z/A)N_0\{[1 - \exp(-(\mu_0/\sin\theta + \mu_{n0}/\sin\theta)M)]/(\mu_0/\sin\theta + \mu_{n0}/\sin\theta)\} \quad (8)$$
 μ_0 为入射 γ 射线在反散射物质中的质量衰减系数, μ_{n0} 为散射 γ 射线在反散射物质中的质量衰减系数,反散射计数与物质的 Z/A 成正比,与入射 γ 射线质量衰减系数和散射 γ 射线质量衰减系数之和成反比

固定几何参数计算不同物质的反散射光子计数与物质厚度关系曲线如图3所示。当物质厚度很薄时,由式(8)得到:反散射光子计数和反散射物质的厚度和 Z/A 成反比。 Z 不同的物质起始端曲线的斜率不同, Z 越高曲线斜率越大,饱和厚度也不同。当达到饱和厚度后,低 Z 元素组成的物质的反散射计数较高。此时,反散射测量对于低 Z 元素组成的物质更为有效

3 结论

在违禁品探测仪的设计中,为了获得更高的反散射探测灵敏度,必须提高反散射光子计

数。在探测违禁品的过程中,一般情况下隐藏在容器外壳下的反散射物质具有其和探测器距离相当的厚度,探测器所张的立体角随探测深度而变化,对反散射光子计数产生影响。通过前面的讨论,合理的源、探测器的尺寸和角度布置能有效地提高反散射光子计数。实验表明:入射光子在轻物质中穿行的路线较长,其饱和反散射厚度也大,光子在轻物质中发生散射时对探测器所张的平均立体角小于重物质。因此,在实际测量时,很多重物质(如铁)的反散射光子计数大于轻物质(如橡胶)。

参考文献:

[1] 安继刚. 电离辐射探测器[M]. 北京: 原子能出版社, 1995.
 [2] 肖瑞亭. 康普顿散射线成像的基本问题的研究[D]. 北京: 清华大学工程物理系, 1996.
 [3] 黄兴滨,等. 提高反散射测量方法灵敏度的研究[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2001, 18(1): 54.

The analysis of factors influencing γ ray backscattering count

ZHENG Xin, ZHENG Jian, XIANG Xin-cheng

(Institute of Nuclear Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Concluding the formula of backscattering photons count in common case, we analyze some factors influencing backscattering photons count by the analysis of simplified model, and find the difference of backscattering photons count of different matter and in different geometrical condition.
Key words γ ray Compton backscattering; photons count; saturated thickness

(上接第 20 页, Continued from page 201)

A new time-digital convert circuit based on digital delay line

LIU Hai-feng, GUO Ying, ZHANG Zhi

(Dept of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract An introduction of a new method of time-digital convert circuit based on digital delay line is given. High precision and good reliability can be realized when it is combined with traditional counting convert method in the measurement of large scale pulse width and low frequency self-excitation oscillator.
Key words digital delay line; time-digital convert circuit