

文章编号: 1001-4322(2004)03-0385-05

# 闪烁光纤在 射线辐照下部分特性的蒙特卡罗模拟\*

马庆力, 阴泽杰, 吴孝义

(中国科学技术大学 近代物理系, 安徽 合肥 230027)

**摘 要:** 闪烁光纤在射线成像方面的应用越来越广泛。为了进一步了解闪烁光纤在射线辐照下的基本特性, 基于蒙特卡罗方法, 利用计算机模拟分析了 射线在闪烁光纤中的好事例率与光纤长度及射线能量的关系, 能量沉积效率与光纤长度及射线能量的关系。此项工作对于闪烁光纤阵列在射线成像, 剂量场测量等方面的研究很有价值。

**关键词:** 蒙特卡罗方法; Geant4; 闪烁光纤; 能量沉积

**中图分类号:** TN25; O571.33 **文献标识码:** A

自然界中许多过程是随机的过程, 如粒子的衰变过程, 粒子在介质中的输运过程等。蒙特卡罗方法是一种随机模拟方法或统计实验方法。它通过不断产生随机数序列来模拟过程。当然, 它也可以借助概率模型来解决不直接具有随机性的确定性问题。因此蒙特卡罗方法的基本思想就是根据待求随机问题的变化规律, 根据物理现象本身的统计规律, 或者人为地构造出一个合适的概率模型, 依照该模型进行大量的统计实验, 使它的某些统计参量正好是待求问题的解。

我们采用的模拟软件包是 Geant4, 它是由欧洲核子研究中心(CERN)开发的一个包容大量探测器描述和模拟工具的软件系统, 它模拟粒子与探测器相互作用是通过蒙特卡罗方法来实现的。Geant4 主要应用在两个方面: (1) 对穿越实验装置的粒子径迹进行跟踪, 并模拟粒子与探测器的相互作用; (2) 给出实验装置的几何描述和粒子径迹的图形表述。

## 1 模拟分析模型的建立

### 1.1 闪烁光纤材料特性参数

计算中选择闪烁光纤的光纤纤芯材料为聚苯乙烯( $C_6H_5CH=CH_2$ ), 包层材料是聚乙烯醇( $CH_2=CHOH$ )。聚苯乙烯的密度为  $1.032g/cm^3$ , 聚乙烯醇的密度为  $1.26g/cm^3$ 。光纤几何结构如图 1 所示。图中  $R_f$  为光纤纤芯半径,  $R_o$  为光纤外半径(包括包层厚度),  $L_f$  为光纤长度。在模拟计算中, 我们没有考虑包层影响, 直接将其参数设置为与真空一致。

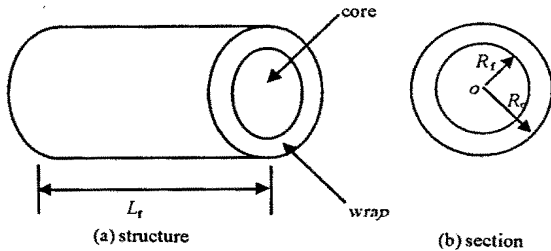


Fig. 1 Sketch of the structure of fiber  
图 1 光纤结构示意图

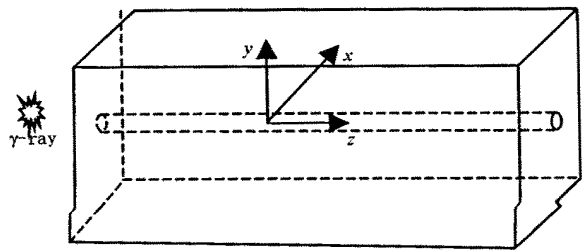


Fig. 2 Sketch of the geometrical structure of detector  
图 2 探测器几何结构示意图

### 1.2 探测器几何结构

由于我们关心的是光纤的辐照特性, 根据 Geant4 模拟系统的优势, 在此我们可以特别地研究单根光纤作为探测敏感单元时的能量特性。在设计探测器的几何结构时, 我们注重了简单的原则, 其空间结构如图 2 所示。图中光纤的几何中心与探测器空间(长方体)的几何中心相重叠, 解析坐标如图所示,  $z$  轴沿光纤中心轴向,  $x$  和  $y$  则沿光纤径向。模拟时为了模型简单起见, 选取长方体空间的材料(介质)为空气, 基本不与 粒子

\* 收稿日期: 2002-12-24; 修订日期: 2003-09-22

基金项目: 中国工程物理研究院基金资助课题

作者简介: 马庆力(1975—), 男, 博士生, 主要从事信息处理和核电子学的研究; E-mail: maql@ustc.edu.cn.

作用。对于 射线源的位置选取,我们仍然采用沿  $z$  轴方向对准光纤探测器中心位置,距离探测器为 13cm(由于假设空间介质空气不会对 射线产生作用,因此在距离的设定方面可以随意选取)。

### 1.3 Good event- $L_f$ 关系的模型

Good event- $L_f$  关系可以很直观地说明为“ 射线在闪烁光纤中的好事例率与光纤长度的关系”。我们知道, 射线与物质相互作用的三种效应(光电效应,康普顿散射,电子对效应)的发生几率(与作用截面有关)在不同的情况下是有很大的不同的,但无论哪种效应, 射线都会在物质中产生能量沉积,我们称这种事例为好事例;反之,当 射线穿越物质,没有能量沉积时称之为坏事例。此模拟试验就是要考虑好事例率与光纤长度之间的关系,从而基本得出光纤阵列的最佳长度。

### 1.4 Good event- $E$ 关系的模型

Good event- $E$  关系是为了考虑 射线在闪烁光纤中的好事例率与入射能量的关系。因为 射线与物质发生三种效应的比率与射线能量有关。简单地概括起来就是,在物质原子序数一定的前提下,光电效应在低能区占优势,康普顿散射在中能区占优势,电子对效应在高能区占优势。因此考察好事例率与入射能量之间的关系对于在实践中采用何种能级的射线起着关键作用。

### 1.5 Energy deposition efficiency- $L_f$ 关系的模型

Energy deposition efficiency- $L_f$  关系是为了考虑 射线在闪烁光纤中能量沉积效率与光纤长度之间的关系。在产生好事例的情况下,考虑光纤的探测效率成为至关重要的问题。由于能量沉积与闪烁光纤的输出光子成比例,因此通过此模拟计算可以得到选取多长的光纤,才能使得光纤探测效率达到最高,这对于研究闪烁光纤阵列成像质量问题意义重大。

### 1.6 Energy deposition efficiency- $E$ 关系的模型

Energy deposition efficiency- $E$  关系反映了 射线在闪烁光纤中能量沉积效率与入射能量之间的关系。同样的道理,通过此项模拟,可以得到欲使光纤探测效率达到较高,应该选择何种能级的射线,从而指导我们进行闪烁光纤阵列的射线成像实验。

### 1.7 其他参数及条件控制

在模拟计算时,Geant 提供了很多的控制参数,其中用户在模拟时常用的参数以 mac 文件,即宏文件的形式提供。在 Geant 系统中与光子( 粒子)有关的物理过程主要是电子对效应、康普顿散射、光电效应、重核的光子裂变以及瑞利效应。考虑到 与物质相互作用的机制,在以碳,氢,氧为主要成分的材料中,重核裂变和瑞利效应不予考虑(Geant 的默认设置)。

另外,模拟跟踪的过程中,次级粒子的能量阈值选择也会影响计算结果。这些参数可以通过在程序中定义 CUTVALUE 值来设置,我们的模拟计算中只需要考虑光子和电子的能量阈值就可以了。在 Geant4 中,CUTVALUE 的值在默认条件下以距离(cut in range)的形式出现,它与能量阈值(cut in energy)是一一对应的关系,表示在某个能量阈值下,射线粒子在物质中所经过的距离。在此模拟中我们定义 射线的 CUTVALUE 为 1mm,该值在空气和光纤中对应的能量阈值如表 1 所示。

表 1 与  $e^-$  在空气与聚苯乙烯中的距离阈值与能量阈值的对照

Table 1 Comparison of cut in range and cut in energy of  $\gamma$  and  $e^-$  in air and polystyrene

	air		polystyrene	
	cut in range/ mm	cut in energy/ eV	cut in range/ mm	cut in energy/ keV
$\gamma$	1	990	1	2.37
$e^-$	1	990	1	351

## 2 模拟结果

### 2.1 Geant4 模拟时选择合适的事例数

由于 Geant4 中模拟粒子与探测器相互作用是通过蒙特卡罗方法来模拟的,这就要求我们在模拟计算过程中考虑相当的事例数目。事例过少,则随机效应便过于显著而不能真实地反映结果;事例过多,则会消耗宝贵的计算资源,得不偿失。因此,我们用不同的随机种子研究了随机数效应对不同事例数目计算结果的影响。可以想见,事例数越大则随机效应越小。计算中事例数选取在 100~1 000 之间时结果涨落幅度最高达 200%,显然可靠性很差。我们考察了  $10^4$ ,  $10^5$  和  $10^6$  个事例的情况,发现使用 100 000 个事例进行计算比较合适( $10^6$  个

事例固然会减小随机影响,但是将增加 10 倍的计算量,不利于计算资源的有效利用)。图 3 比较了  $10^4$  个事例和  $10^5$  个事例累计 1 000 组的计算结果。以  $E_{loss}$  为纵坐标,运算次数为横坐标,用一次函数  $y(x) = A_0 + A_1 x$  来进行回归拟合,结果如下:对于  $10^3$  个事例情况,  $A_0 = 0.756\ 49 \times 10^{-5}$ ,  $A_1 = -0.106\ 54 \times 10^{-9}$ ,  $\chi^2 = 0.848\ 8 \times 10^{-7}$ ;对于  $10^4$  个事例的情况,  $A_0 = 0.761\ 62 \times 10^{-5}$ ,  $A_1 = -0.375\ 86 \times 10^{-10}$ ,  $\chi^2 = 0.767\ 6 \times 10^{-8}$ 。

由于拟合参数使用最小二乘法,  $\chi^2$  值代表了拟合程度的好坏。从上面参数可以看出,使用  $10^4$  个事例时斜率已基本接近于 0,  $\chi^2$  值也较好;使用  $10^5$  个事例时斜率减小了 60%,  $\chi^2$  值减小了一个数量级,达到  $10^{-8}$ 。在实际模拟计算中我们选取  $10^5$  个事例作为标准。

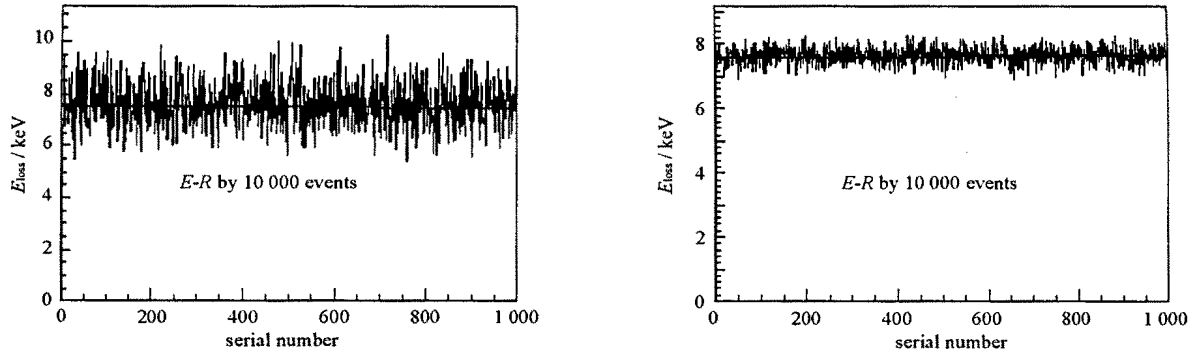


Fig. 3 Selection of the suitable number of event

图 3 合适事例数的选择

### 2.2 Good event- $L_f$ 关系模拟

计算中选取入射能量为 35keV, 4MeV 和 12MeV 三种情况考察 Good event 与  $L_f$  的关系。光纤长度从 4 ~ 30cm 变化,步长为 2cm,另外在 30 ~ 300cm 采用抽样进行模拟(注:由于在 35keV 下光纤长度在 20cm 以后的 Good event rate 已趋于平缓,因此不必进行 30cm 长度之后的模拟),模拟结果如图 4 所示。从图中看出在较低能入射时,好事例率在光纤某个长度时出现最大值,而在较高能入射时,好事例率与光纤长度基本成正比关系(在光纤长度 80cm 之前)。

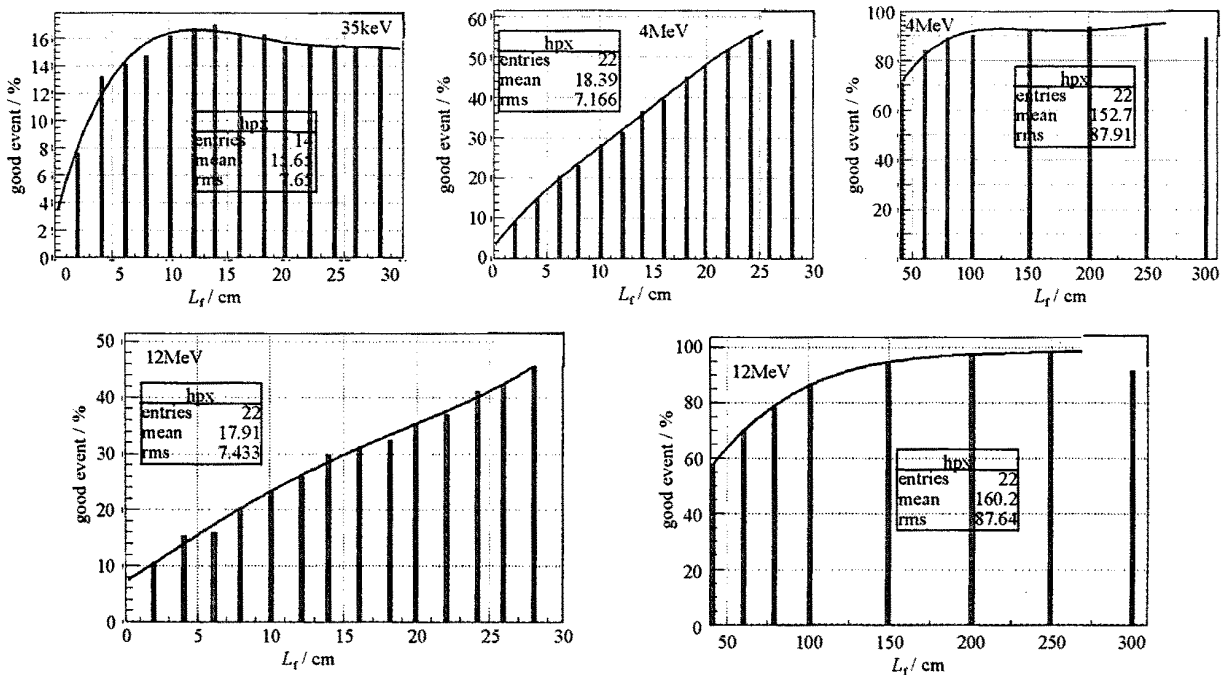


Fig. 4 Relationship between the good event rate and fiber length under different energy

图 4 不同能量下的好事例率与光纤长度之间的关系

### 2.3 Good event- $E$ 关系模拟

计算时我们选取光纤长度为 10cm,入射能量 10 ~ 500keV,记录 射线在光纤中产生能量沉积的好事例率。

模拟结果见图5。从图可以看出随着入射能量的增大,好事例率减小,在K壳层结合能附近,好事例率显著增大。

#### 2.4 Energy deposition efficiency- $L_f$ 关系模拟

在此模拟中,可以选取10, 20, 50, 100, 150和200keV几种情况考察能量沉积效率与光纤长度之间的关系。闪烁光纤变化范围为2~14cm,步长为2cm。模拟结果如图6所示。从此关系曲线可以得到,随着闪烁光纤长度的增大,不同入射能量下的能量沉积效率均增大,当光纤长度在达到10cm左右后,能量沉积效率增长极为缓慢,出现饱和状态。

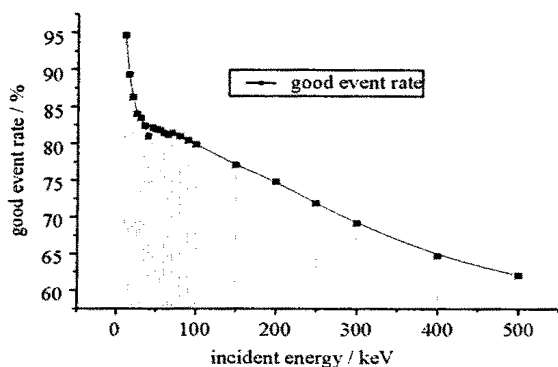


Fig. 5 Relationship between the good event rate and input energy at  $L_f = 10\text{cm}$

图5 好事例率与入射能量之间的关系

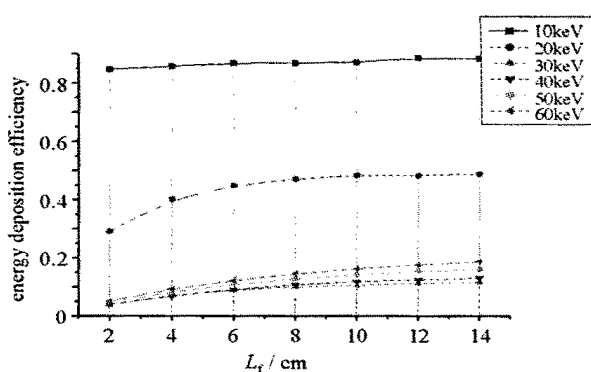


Fig. 6 Relationship between the energy deposition efficiency and fiber length under different energy

图6 不同入射能量下能量沉积效率与光纤长度之间的关系

#### 2.5 Energy deposition efficiency- $E$ 关系模拟

模拟计算时光纤长度选取10cm,入射能量10~500keV变化,记录射线在闪烁光纤中产生的能量沉积效率,结果如图7所示。从图可以看出,在K壳层结合能附近之前,随着入射能量增加,光纤能量沉积效率显著减小,在K壳层结合能附近之后,随着入射能量的增加,光纤能量沉积效率开始缓慢增加。

#### 2.6 电子能量阈值的影响

在Geant4模拟的过程中,应当注意到电子能量阈值对于结果的影响。以上提到在模拟时设定CUT-VALUE为1mm,这对于光纤物质来说,电子能量阈值为351keV,因此在模拟计算时,当粒子入射能量小于或等于351keV时,在跟踪过程中将只考虑粒子作用时所损失的能量,而不考虑次级电子的行为,将它们统一记录到能量沉积中。例如在上述模拟中选取的入射能量为35keV就是这种情况。反之,若粒子入射能量大于电子能量阈值时,考虑能量沉积时应不包括次级电子的行为。

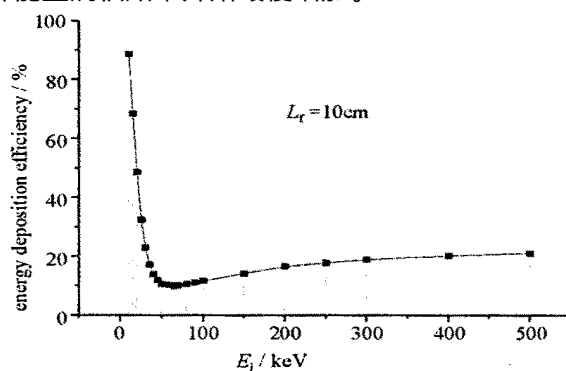


Fig. 7 Relationship between the energy deposition efficiency and input energy

图7 能量沉积效率与入射能量之间的关系

### 3 结论

根据模拟计算的结果,射线穿越圆柱体结构的闪烁光纤时,能量沉积的好事例率与光纤长度的关系是:在较低能入射情况下,在某个长度时具有最大值,并在此长度之后,好事例率变化较为平缓;在较高能入射情况下,两者成正比关系,并随光纤无限增长时,好事例率逐渐趋近于百分之百。能量沉积的好事例率与入射能量之间的关系(以光纤长度10cm为例)则是:随着入射能量的增大,好事例率减小,在K壳层结合能附近,好事例率显著增大。而闪烁光纤中的能量沉积效率与光纤长度的关系则是随着闪烁光纤长度的增大,能量沉积效率增大,当光纤长度达到10cm左右后,能量沉积效率增长缓慢,并趋向饱和。这说明若想得到尽可能多的输出光子,选取10cm左右长度的闪烁光纤最佳。最后,在闪烁光纤的能量沉积效率与入射能量之间的关系中,在K壳层结合能附近之前,随着入射能量增加,光纤能量沉积效率显著减小,在K壳层结合能附近之后,随着入射能量的增加,光纤能量沉积效率开始缓慢增加。这说明闪烁光纤在用于成像方面时,不适宜采用高能入射。根

据以上的模拟计算结果,在光纤辐照测量中可以对入射能量和光纤长度所产生的影响进行修正,从而可构成实用的高精度辐射光纤探测系统。我们将该结果应用于“剂量场实时成像测量”系统中的光纤探测器,进行数据修正,取得了良好效果。

#### 参考文献:

- [1] CERN staff. Geant4 user 's guide[M]. 2001.
- [2] Chakarova R. Monte Carlo study of light transport in scintillating fibers[J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A*, 1995, **364**: 90—94.
- [3] Stavina P, Tokar S, Budagov A, et al. Simulation studies of the electromagnetic energy resolution of scintillating fiber calorimeter[J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A*, 1995, **364**: 124—132.
- [4] 唐淳,杨成龙,江孝国,等. 发光玻璃转换屏空间分辨率研究[J]. *强激光与粒子束*, 2000, **12**(6): 673—676. (Tang C, Yang C L, Jiang X G, et al. Study on spatial resolution of luminescent glass conversion screen. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(6): 673—676)
- [5] 潭肇,李泽仁,江孝国. 辐射照相系统中转换屏的分辨率研究[J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(3): 302—304. (Tan Z, Li Z R, Jiang X G. Study of scintillator resolution in radiography system. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(3): 302—304)

## Characters of $\gamma$ -ray irradiated scintillation optical fiber by simulation based on Monte Carlo method

MA Qing-li, YIN Ze-jie, WU Xiao-yi

(Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract:** Scintillation optical fiber is applied to ray imaging more and more widely. In order to know more about some characters of scintillation optical fiber under ray radiation, the article analyses the relationships between good event rate of  $\gamma$ -ray and fiber length and ray energy, and between energy deposition efficiency of  $\gamma$ -ray and fiber length and ray energy by computer simulation based on Monte Carlo method. According to them, we can conclude some important results. For example, the scintillation fiber's optimal length is about 10cm when applying it to imaging; its detecting efficiency is higher under low incident photons and lower under high incident photons. The work is very useful in the field of scintillation fiber imaging and dosage measurement.

**Key words:** Monte Carlo; Geant4; Scintillation optical fiber; Energy deposition