

飞行时间计数器端盖模型中光产生和传输的蒙德卡罗模拟

胡幼华 董宝中
(中国科学院高能物理研究所)

摘 要

描述了北京谱仪中端盖飞行时间闪烁计数器模型的光产生和传输的蒙德卡罗模拟。其结果与实验符合较好。

一、引 言

带电粒子穿过闪烁体时,引起闪烁体原子(或分子)激发后,退激发光的发光点位置和发光方向均是满足一定概率分布的随机变量,因此研究闪烁体中发光和光传输的过程,很难用解析的方法完成,而要采用蒙德卡罗方法,即随机抽样法,根据物理过程中每一随机因素的概率分布(概率分布由实验或坚实的理论给出),用数学的方法来模拟实际过程,从而比较完全地反映物理量的统计性质。

二、模拟的实施

我们要研究飞行时间计数器的下列性能:

1. 光传输效率 ϵ .
2. 光子的传输时间的分布谱.
3. 光子在闪烁体中的有效传输速度 $V_{\text{有效}}$. 为此,要采用蒙德卡罗模拟方法得到:
 1. 光子经传输过程中的衰减后,到达光电倍增管(简称 PM)的光子数目.
 2. 每一光子的传输时间.

然后,经过统计,可得到 ϵ 、 $V_{\text{有效}}$ 和光子的时间分布谱.

程序框图见图 1. 采用的坐标系如图 2 所示.

我们研究带电粒子垂直入射到闪烁体的对称轴线上(即沿 z 轴方向入射,入射点的 x 坐标等于零)的情况.

程序对入射在某一位置(入射点到闪烁体的右端面的距离称为 A)的带电粒子所产生

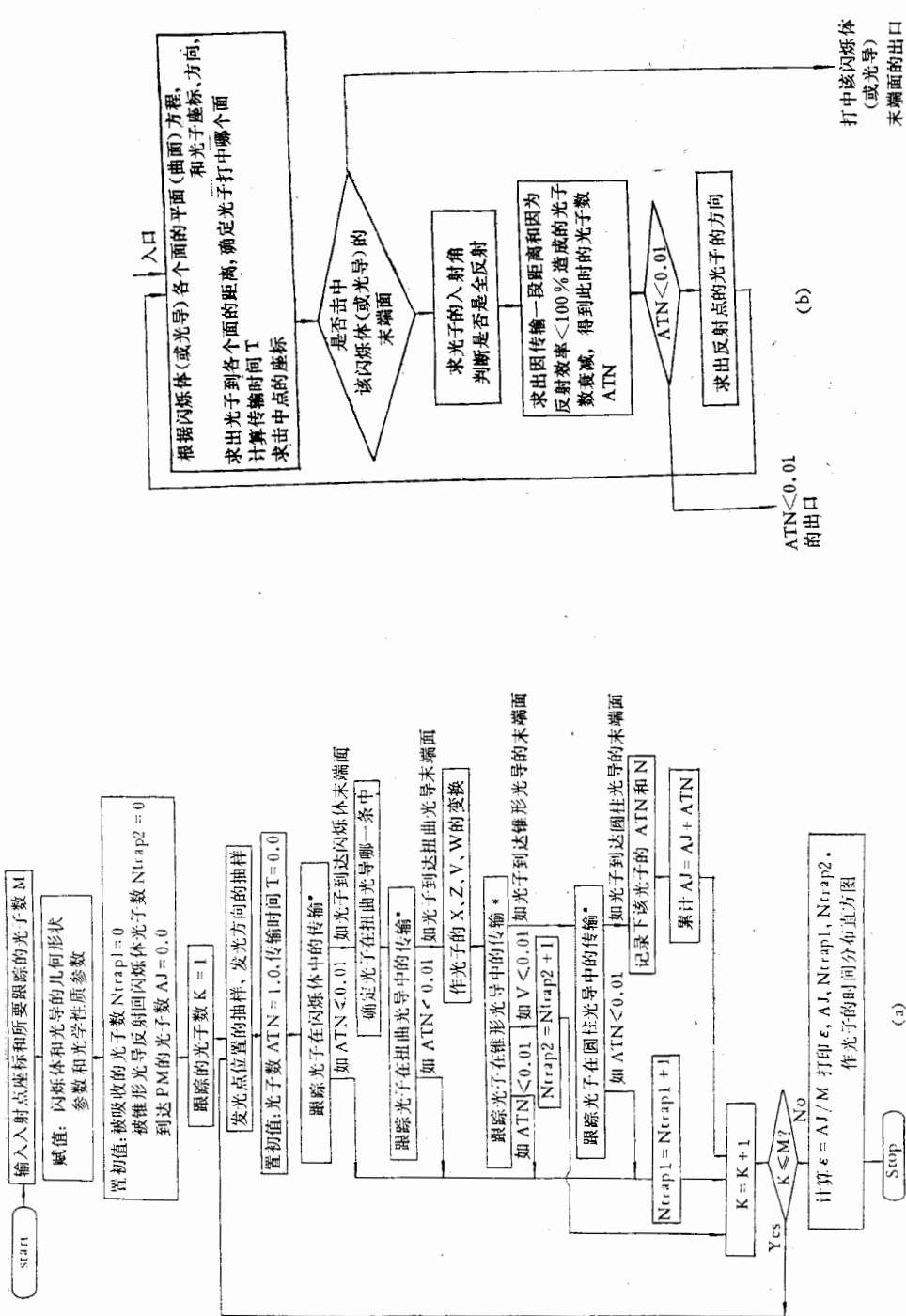


图 1 跟踪光子在闪烁体(或光导)中传输的部分的框图

图 1 方案 3 的程序框图 (有*记号的部分详见图 1(b))

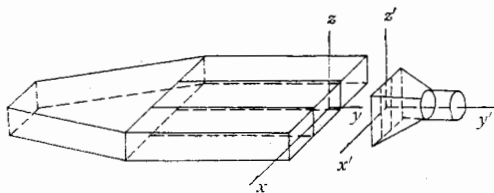


图 2 方案 2 的光导处理方式

的 M 个光子的产生和传输过程逐一进行模拟:

1. 模拟光子产生的过程——用随机抽样的方法得到每一光子的起始位置和方向.

可认为一个带电粒子所产生的所有光子, 是同时产生并沿径迹均匀分布. 利用计算机中产生的 $0 \sim 1$ 之间均匀分布的随机数的函数, 可随机抽样得到发光点的位置和方向, (发光方向是用光子方向与三条坐标轴夹角的余弦 U, V, W 来表示的)

2. 跟踪光子——得到光子的传输径迹

列出闪烁体, 光导各个表面的方程, 根据每一光子的起始位置和方向, 算出该光子首先击中哪个表面, 光子到该面的距离(从而得到光子经过这一段径迹所需的时间), 击中点的坐标, 入射角和反射后的方向. 重复上述过程, 得到经反射后的该光子击中哪个面……, 直至得到每一个光子在闪烁计数器中的全部径迹, 进而也就得到了每一光子到达 PM 所需的传输时间.

在传输过程中, 引起光子数衰减的原因是:

1. N_0 个光子经过距离 L 后, 光子数衰减到 $N = N_0 e^{-\frac{L}{\lambda}}$. λ 是闪烁体或光导的衰减长度.

2. 光子在传输中击中闪烁体或光导表面时, 如入射角 $>$ 临界角, 光子全反射. 否则, 光子镜反射. 每次全反射和镜反射分别使光子数衰减为原来的 98% 和 80%.

对每一光子的跟踪中, 每当光子经过一段距离和经过一次反射后, 都必须算出光子数衰减到多少.

三、模拟扭曲光导中光传输的几个方案

光导连接闪烁体和光电倍增管. 闪烁体的截面是较大的长方形, 光电倍增管的截面是较小的圆形. 扭曲光导的始端的截面是与闪烁体截面面积以及形状相同的长方形, 而其末端截面变成与始端截面面积相等的正方形. 这样, 扭曲光导把长方形截面过渡为与之等面积的正方形. 锥形光导把正方形截面逐渐缩小并变为圆形. 经过圆柱光导, 和光电倍增管相连接.

设闪烁体的厚度 c , 闪烁体在与扭曲光导相连接处的宽度 b , 扭曲光导分为 n 条, 而 $n \approx \sqrt{\frac{b}{c}}$ (我们取 $n = 3$). 每一条在弯曲过程中逐渐扭转 90° . 因为其形状复杂, 无法列出其曲面方程, 因此在蒙特卡罗模拟中, 须把它近似成简单的形状来处理.

根据资料[1]介绍, 当 $\frac{\text{光导厚度 } W}{\text{弯曲半径 } R}$ 足够小时, 扭曲光导的光传输效率和长方体光导相当接近, 因此往往把扭曲光导近似处理为长方体光导.

我们考虑了三种方案:

1. CERN (西欧核子研究中心) 的 GUIDE7 程序是模拟光在闪烁计数器中传输的通用程序. 它把扭曲光导近似处理为一整块长方体, 其截面的大小、形状与真实的扭曲光导的末端正方形截面相同. 为使闪烁体能和它相耦合, 就把真实的宽而扁的闪烁体(截面为长方形)变成一块截面面积与之相等的窄而厚的闪烁体(其截面为正方形)来处理.

这种方案有较明显的不足之处:

- (1) 没有把扭曲光导分条;
- (2) 改变了闪烁体的形状;

因此, 采用这种处理方法的模拟结果会与真实情况相差较大. 为使模拟尽量接近真实情况, 我们提出下列 2、3 两种方案.

2. 闪烁体和扭曲光导仍作与方案 1 相同的形状处理, 但扭曲光导分条, 即把它作为三块独立的长方体来处理. 如图 2 所示.

这种方案可改正方案 1 的缺点(1).

3. 闪烁体不作形状变换, 扭曲光导作为三条独立的长方体来处理. 三条扭曲光导的总截面是与闪烁体截面形状, 大小相同的长方形. 在扭曲光导的末端, 作坐标变换, 把三个条的截面均分别旋转 90° , 从而使扭曲光导的总截面变为正方形(第 1, 第 2 条光导的旋转方向相同, 与第 3 条的旋转方向相反).

程序中, 当光子到达扭曲光导的末端面时, 根据光子是在哪条光导中, 作相应的 x 和 z 坐标变换, 同时也改变光子的方向余弦 U 和 W .

因为方案 3 能改正方案 1 的两个缺点, 预期可得到较好的模拟结果.

四、模拟结果

根据上述三种方案, 分别编了三套模拟程序, 结果如下:

1. 光传输效率曲线

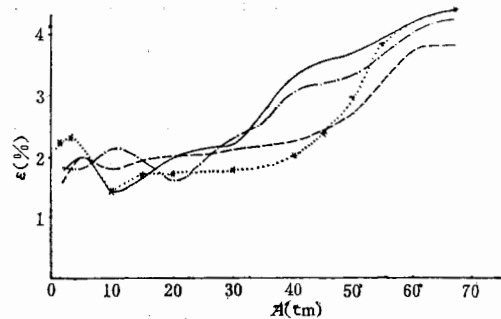
模拟程序得到了对应于不同入射点的 ϵ 值, 可作出 $\epsilon-A$ 曲线.

显然, ϵ 的大小与闪烁计数器输出的电脉冲幅度相对应. 实验已测定了带电粒子入射在不同位置时的输出脉冲幅度, 把它与三种模拟方案所得的 $\epsilon-A$ 曲线相比较(见图 3), 可检验三种方案的优劣.

由图 3 可见, 无论是方案 2 或方案 3 的模拟结果, 都比方案 1 (即 CERN 的 GUIDE 7 的方案)的结果有明显的改进(其中尤以方案 3 的模拟结果和实验结果符合得最好), 可见模拟扭曲光导中的光传输时, 把扭曲光导分条处理是关键性的、不宜省略的措施. 下文介绍的是方案 3 的结果.

2. 光子的时间分布谱

同一带电粒子所产生的各个光子, 因为发光点和方向不同, 不是同时到达 PM 的. 模

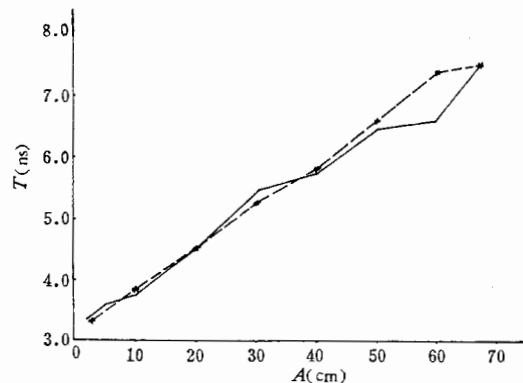
图 3 $\varepsilon-A$ 曲线

---方案 1 模拟曲线 ——方案 2 模拟曲线 ——方案 3 模拟曲线 实验曲线 *实验点

拟程序作出对应于某些入射位置的带电粒子所产生的光子的传输时间直方图。这些时间分布谱的大致形状与实验结果符合。

3. 光子在闪烁体中的有效传输速度 $V_{\text{有效}}$

以模拟程序所作出的对应于某一入射位置的光子的时间分布谱的峰值位置所对应的 T , 作为在该入射位置所产生的光子的传输时间, 可得到 $T-A$ 曲线, 并与实验测得的 $T-A$ 曲线相比较, 如图 4 所示, 二者趋势符合。

图 4 $T-A$ 曲线

——M-C 模拟曲线 ----实验曲线 *实验点

$T-A$ 曲线的斜率的倒数即为光在闪烁体中的有效传输速度 $V_{\text{有效}}$ 。

实验测得 $V_{\text{有效}} = 15.7 \text{ cm/ns}$

模拟得到 $V_{\text{有效}} = 15.4 \text{ cm/ns}$ 。

二者符合得很好。

综上所述, 采用方案 3 进行蒙特卡罗模拟, 可得到与实验基本一致的结果。因此设计使用扭曲光导的闪烁计数器时, 可采用这一模拟方案来选择闪烁计数器的形状和尺寸, 以期得到好的性能指标。

感谢郑志鹏同志和李金同志对这项工作的热情帮助。

参 考 文 献

- [1] Thomas Massam Light Guide Design for Timing Measurements in Large Counters.

THE MONTE-CARLO SIMULATION OF PRODUCTION AND TRANSMISSION OF PHOTONS IN THE PROTOTYPE OF END CAP TIME OF FLIGHT COUNTER

HU YOU-HUA DONG BAO-ZHONG

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

The Monte-Carlo simulation of production and transmission of photons in the prototype of end cap time of flight (scintillation) counter is described. The simulation results agree with the experimental data.