

利用蒙特卡洛方法对钨酸铅长 晶体光收集均匀性的研究*

邵 明¹⁾ 刘衍文 张子平 陈宏芳

(中国科学技术大学近代物理系高能物理联合研究所 合肥 230026)

摘要 在电磁量能器中,晶体闪烁光收集沿长度方向的均匀性对能量分辨率有相当的影响.利用蒙特卡洛(MC)方法对钨酸铅(PbWO_4 或 PWO)长晶体的光传导与光收集过程进行了模拟计算,着重讨论了晶体吸收长度,折射率等因素对光收集的影响.

关键词 钨酸铅晶体 蒙特卡洛模拟 光收集 吸收长度 折射率

1 引言

利用晶体电磁量能器(ECAL)探测高能电子或 γ 射线时,为了使待测粒子的能量完全沉积在量能器中,晶体必须有足够的长度.然而,随着晶体长度的增加,发光位置对光收集效率的影响变得不可忽略.在晶体内电磁簇射的过程中,发光位置是满足一定规律的随机分布,这一因素必然给测量带来影响.对于欧洲正在建造的大型强子对撞机(LHC),其探测器 CMS 的 ECAL 能量分辨率可以表达为^[1]

$$\left(\frac{\Delta E}{E}\right)^2 = \left(\frac{a_1}{E}\right)^2 + \left(\frac{a_2}{\sqrt{E}}\right)^2 + a_3, \quad (1)$$

其中 E 代表能量(单位:GeV), a_1, a_2, a_3 均为常数,分别表示电子学噪声,光电子统计涨落和系统修正对能量分辨率的影响.晶体的光收集效率均匀性影响式中的常数项 a_3 并进而影响能量分辨率.

CMS-ECAL 所采用的闪烁晶体为 PWO,全长 23cm.近年来,人们对它进行了深入的研究^[2-4].而为了获得最好的能量分辨率,必须对晶体的光收集均匀性进行优化,对晶体内部光传导过程的了解因而变得尤其重要.本文采用 MC 方法,对荧光光子在 PWO 晶体内的传播过程进行模拟,由此计算出光收集效率及其均匀性,并同实验数据进行了比较.同时还进一步地讨论了晶体光吸收长度和折射率等因素对光收集性能的影响.

1999-12-28 收稿

* 中国科学院国际合作局和国家自然科学基金(19975044)资助

1) E-mail: swing@mail.ustc.edu.cn

2 算法原理

2.1 光学的引入

采用 MC 模拟方法,对每个光子进行跟踪.光子的传播包含一些随机过程,但其群体效应应可由光学原理描述.当光子到达界面时,反射和折射的概率比可以通过 Fresnel 公式给出的反射光与折射光的强度来确定.

$$r_{\text{TE}} = -\frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)}, \quad (2)$$

$$r_{\text{TM}} = \frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)}, \quad (3)$$

$$t_{\text{TE}} = \frac{2\sin\theta_i \cos\theta_t}{\sin(\theta_i + \theta_t)}, \quad (4)$$

$$t_{\text{TM}} = \frac{2\cos\theta_i \sin\theta_t}{\sin(\theta_i + \theta_t)\cos(\theta_i - \theta_t)}, \quad (5)$$

式中 θ_i 和 θ_t 代表入射角和折射角, r_{TE} , r_{TM} , t_{TE} , t_{TM} 分别代表反射光和折射光电矢量平行入射面与垂直入射面分量的比振幅.这样,折射光与反射光的强度之比为

$$r_{\text{ps}} = \frac{t_{\text{TM}}^2 + t_{\text{TE}}^2}{r_{\text{TM}}^2 + r_{\text{TE}}^2}, \quad (6)$$

计算过程中将 r_{ps} 作为光子被折射或反射的概率比.

2.2 算法流程

首先,根据 PWO 晶体的发光性质对光子进行初始化.由闪烁晶体的发射谱抽样得到光子的波长,然后根据波长计算出相应的折射率和吸收长度,并由吸收长度指数抽样得出该光子在晶体中能够传播的长度 D_0 .用 D 记录光子走过的总长度,将其初始化为 0.另外,还需给出光子的初始位置 r_0 .

在认为晶体发光是各向同性的前提下,抽样给出光子的初始方向 e_0 , e_0 满足空间立体角的均匀分布.

当光子在晶体中传播时,设某时刻光子的空间位置为 r ,波矢量方向为 e ,光子已经走过的长度为 D .若光子到达界面,判定其打在晶体哪个面上,修改光子走过的总长度 D .如果 $D \geq D_0$ 则认为该光子被吸收;反之,根据 Fresnel 公式决定发生反射还是折射,并计算新的波矢量方向.这时,如果光子打在收集面上并发生折射,则认为该光子将被探测器接收到;否则,如果光子没有逃出晶体,回到前面的步骤并继续跟踪.

2.3 折射率和吸收长度的计算

实验测得的折射率数据.可以利用 Sellmeier 公式很好地拟合^[5,6],这样,在模拟过程中,对于不同的光子波长,可以利用此公式根据拟合所得的参数直接计算出相应的折射率

来. Sellmeier 公式的表述形式为

$$n^2 - 1 = \sum_{i=0}^{m_s} \frac{c_{s_i}^2}{1 - \frac{d_{s_i}^2}{\lambda^2}} \quad (7)$$

式中 n 为折射率, λ 为光子的波长, m_s 为拟合的最大阶次, c_{s_i} , d_{s_i} 均为待拟合参数. 图 1 给出我们所采用的折射率数据及二阶 ($m_s = 1$) Sellmeier 公式拟合的曲线, 拟合得到的参数值也在图中一并给出.

实验上可以由晶体对不同波长的光的透射率来得到吸收长度曲线. 晶体的吸收长度 L 由下式给出^[7]

$$L = \frac{l}{\ln\{T(1 - T_s)^2\} / [\sqrt{4T_s^4 + T^2(1 - T_s^2)^2} - 2T_s^2]}, \quad (8)$$

其中 l 是晶体的长度, T 是实验测得的透射率, T_s 是晶体完全透明时的理想透射率, 可以由晶体及空气的折射系数 n 和 n_{air} 根据 Fresnel 公式得出

$$T_s = \frac{(n + n_{\text{air}})^2 - (n - n_{\text{air}})^2}{(n + n_{\text{air}})^2 + (n - n_{\text{air}})^2}, \quad (9)$$

图 2 中给出了掺铈(Sb)PWO 晶体 SIC-295 和掺钇(Y)晶体 SIC-S291 的透射率曲线及相应的吸收长度曲线.

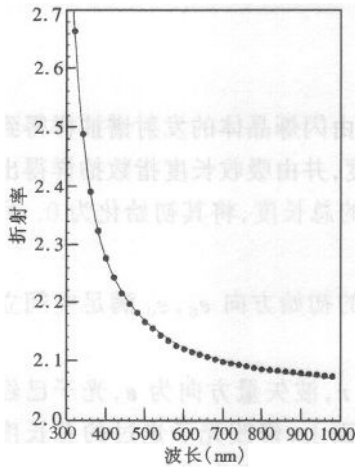


图 1 PWO 晶体的折射率曲线
实测数据, — Sellmeier 公式的拟合结果;

$$c_{s_0} = 1.433, d_{s_0} = 0, c_{s_1} = 1.073,$$

$$d_{s_1} = 270.9.$$

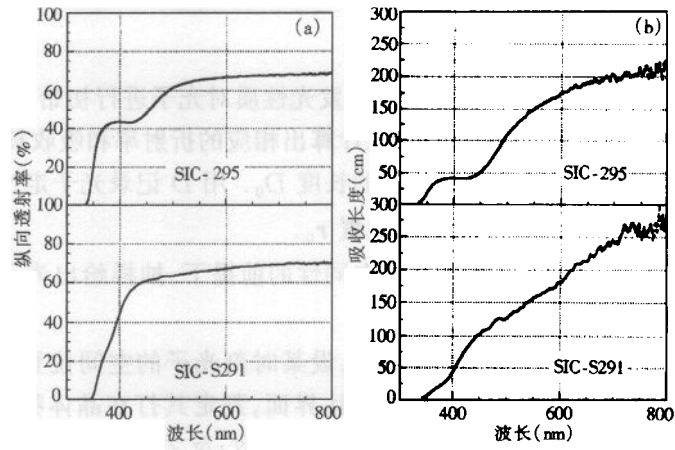


图 2 PWO 晶体 SIC-295 和 SIC-291 的透射率(a)
及相应的吸收长度曲线(b)

3 实例与讨论

3.1 吸收长度对光收集的影响

根据上述原理和方法对全尺寸 PWO 晶体进行模拟计算. 晶体的参数设定如下: 棱台形, 长度为 23cm, 上下底面分别为边长 2.2cm 和 2.6cm 的正方形. 为了防止光泄漏出去, 除收集面外, 晶体的其他各面都用 Tyvek 白纸包住, 认为光子在纸上发生漫反射, 但仍有 5% 的几率透射出去. 下底面为收集面. 为了提高收集效率, 晶体收集面与光探测器之间由 0.1mm 厚的硅油(折射率为 1.5)耦合.

影响光子沿晶体纵向收集效率的因素主要有两个. 其一, 由于晶体本身形状对光的“聚焦”作用, 使得荧光产生的位置离收集面越远, 光收集效率越高; 另一方面, 因为晶体不可避免地存在吸收, 光子在晶体中传播的距离越长, 被吸收的几率越大, 使得荧光产生位置离收集面越近, 光收集效果越好. 这两个因素互相竞争, 共同决定了晶体光收集均匀性曲线的形状. 模拟了吸收长度由 10cm 变化到 200cm 时光收集效率随发光位置变化的情况, 图 3(a) 是其中几个吸收长度的结果.

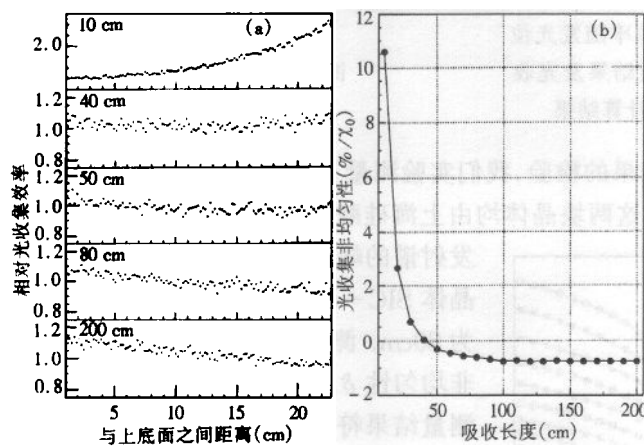


图3 不同吸收长度下光收集效率随发光位置的变化(a)及光收集非均匀性(b)

容易看出, 当吸收长度很短时, 晶体对光的吸收效应占主导地位, 随着发光位置离晶体上底面距离的增加, 光收集效率是上升的. 发光位置离收集面越远, 光子越难被收集到. 然而随着吸收长度的增加, 晶体的“聚焦”作用影响加强, 光收集效率曲线逐渐变得平坦. 当吸收长度继续增加时, “聚焦”作用占主导地位, 发光位置离收集面越远, 光收集效率越高, 因而曲线变得略为向右下倾斜, 并且当吸收长度大于 80cm 以后, 其形状基本不再变化. 通过引入光收集非均匀性的概念, 可以更清楚地看到以上光收集效率曲线形状的变化情况. 光收集非均匀性的定义为

$$\delta = \frac{(LC - LC_{mid})/LC_{mid}}{z - z_{mid}}, \quad (10)$$

这里 LC 表示光收集效率, z 为荧光产生位置与上底面之间的距离, δ 的单位是百分比每辐射长度 ($\%/ \chi_0$). 图 3(b) 为光收集非均匀性随吸收长度的变化情况. 可以清楚地看到 δ 随吸收长度的增加而趋于稳定.

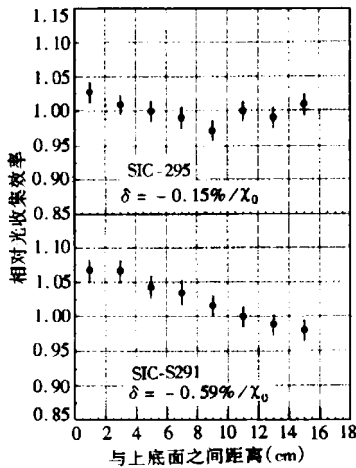


图 4 PWO 晶体 SIC - 295 和 SIC - 291 光收集效率随发光位置变化的实验测量结果及光收集非均匀性的计算结果

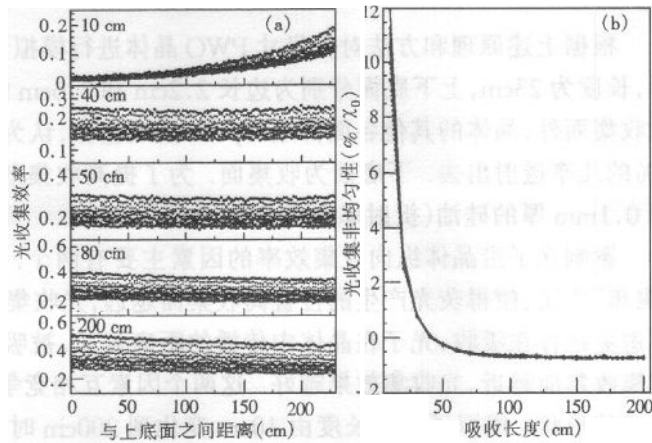


图 5 折射率扰动情况下,光收集效率曲线(a)和非均匀性(b)随吸收长度的变化
图中对应每个吸收长度,由下至上, δn 依次为 $-0.2, -0.15, \dots, +0.15, +0.2$.

作为对模拟结果的检验,我们实验测量了 SIC - 295 和 SIC - S291 两块 PWO 晶体的光收集效率曲线. 这两块晶体均由上海硅酸盐所(SIC)生产,其中,晶体 SIC - 295 的荧光发射谱的峰位在 $435\text{nm}^{[8]}$, 对应的吸收长度为 45cm ; 而晶体 SIC - S291 的发射峰为 $420\text{nm}^{[8]}$, 对应的吸收长度为 80cm . 测量结果如图 4 所示,并计算出相应的光收集非均匀性 δ . 比较图 4 和图 3 可以看出,模拟结果与实验测量结果符合得相当好.

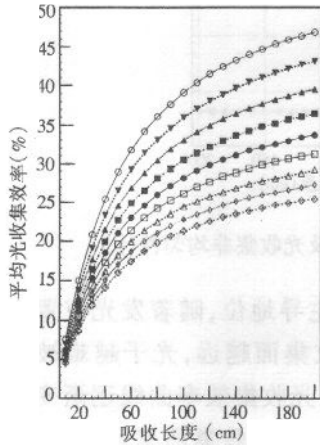


图 6 不同折射率下,平均光收集效率随吸收长度的变化
由上至下, δn 依次为 $-0.2, -0.15, \dots, +0.15, +0.2$.

3.2 折射率对光收集的影响

由于目前对折射率的测量还比较粗糙,为了讨论折射率的不确定性对上面结果的影响,我们将折射率曲线附加上一定的扰动 δn . δn 的变化范围为 $-0.2, -0.15, \dots, 0.15, 0.2$. 对应于每一个折射率的扰动,都按照同样的方法模拟得出不同吸收长度下的光收集效率曲线和平均收集效率. 总的结果如图 5 和图 6 所示.

可以看出,吸收长度较小时,折射率的变化对光收集非均匀性的影响较大,而当吸收长度增加,尤其是大于 80cm 以后,图 5(b) 中 9 条曲线基本上重叠在一起,折射率的变化对非均匀性几乎没有影

响. 平均光收集效率随折射率的改变则较为明显. 随着折射率的增大, 平均光收集效率逐渐减小.

总的看来, 晶体的光学性能与吸收长度之间有紧密的联系, 吸收长度的变化对光收集效率及其均匀性两方面都有很大的影响; 而折射率的扰动主要影响晶体的光收集效率, 对均匀性的作用较小.

4 结论

通过对光子在 PWO 晶体中传播过程的模拟, 可以看出吸收长度对光收集效率曲线形状有重要影响, 尤其在吸收长度较短时更是如此. 随着吸收长度的增加, 光子在 PWO 晶体中传播时被吸收的几率大为降低, 光收集曲线形状主要由晶体本身的几何尺寸决定. 吸收长度超过 80cm 以后, 其形状基本不再改变. 这对于 PWO 晶体的实际应用有重要意义. 由于 PWO 晶体在高辐射本底的环境中会受到损伤而导致吸收长度的变化, 进而可能引起光收集非均匀性的改变, 这将使电磁量能器的能量分辨率变差. 我们的模拟结果表明, 当吸收长度超过 80—100cm 时, 辐照对晶体光收集非均匀性的影响可以忽略不计.

为了获得好的能量分辨率, CMS-ECAL 中 PWO 晶体的光收集非均匀性绝对值必须小于 $0.35\%/\chi_0^{[1]}$ (即 $0.39\%/cm$), 而由我们模拟的结果来看, 吸收长度大于 80cm 时, 光收集非均匀性超过了允许的范围. 为了达到要求, 对晶体的表面性质和包装做一定的处理是必要的.

尽管折射率的变化使光收集效率有明显的改变, 但它对光收集非均匀性的影响不大, 尤其在吸收长度较大时更是如此. 这也表明折射率的测量精度对晶体光收集非均匀性可能没有显著的影响.

模拟中对 PWO 晶体的光学性质做了一定的近似, 将其作为各向同性介质处理, 然而实际上它是双折射 (n_o 和 n_e 相差 0.1 左右^[9]) 的各向异性晶体. 这样, 模拟结果和实际情况不可避免地存在一定的偏差. 下一步将在这方面进行改进, 以期获得更可靠的结论.

参考文献(Reference)

- 1 CMS Collaboration. CERN/LHCC 97—33, CMS TDR 4, 1997, **33**:304—309
- 2 WU Chong, LI Cheng, WANG Zhao-Min et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1999, **23**(12):1141—1147 (in Chinese)
(吴冲, 李澄, 汪兆民等. 高能物理与核物理, 1999, **23**(12):1141—1147)
- 3 LI Zu-Hao, HE Jing-Tang, LÜ Yu-Sheng et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1999, **23**(12):1148—1151 (in Chinese)
(李祖豪, 何景棠, 吕雨生等. 高能物理与核物理, 1999, **23**(12):1148—1151)
- 4 WU Jian, XU Tong, LI Cheng et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 1998, **22**(6):481—485 (in Chinese)
(伍健, 许彤, 李澄等. 高能物理与核物理, 1998, **22**(6):481—485)
- 5 Chipaux R. CMS—TN/95—184, 1995
- 6 Chipaux R, Geleoc M. CMS NOTE 1998/090
- 7 ZHU R Y, MA D A, Newman H. Nucl. Phys., 1995, **B44**: 547—556
- 8 QU X D, ZHANG L Y, ZHU R Y. The Fifth International Conference on Inorganic Scintillators and Their Applica-

tions. Moscow. August, 1999

9 Baccaro S, Barone L M, Borgia B et al. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res., 1997, A385:209—214

Study on Light Collection Uniformity of Long Lead Tungstate Crystal by Monte Carlo Method*

SHAO Ming¹⁾ LIU Yan-Wen ZHANG Zi-Ping CHEN Hong-Fang

(*Joint Institute of High Energy Physics, Department of Modern Physics, University of Science and
Technology of China, Hefei 230026, China*)

Abstract In electromagnetic calorimeter, Longitudinal light collection uniformity of crystal scintillator has sizeable influence on the energy resolution. Monte Carlo (MC) method is used to simulate the process of light transmission and collection in long lead tungstate (PbWO₄ or PWO) crystal. Discussion focused on the role of factors such as attenuation length and refractive index to light collection is presented.

Key words lead tungstate crystal, Monte Carlo, light collection, attenuation length, refractive index

Received 28 December 1999

* Supported by Bureau of International Collaboration, CAS and National Natural Science Foundation of China (19975044)

1) E-mail: swing@mail.ustc.edu.cn