

水基契伦科夫量能器单元的蒙特卡罗模拟*

陈明君 张峰 王贻芳

(中国科学院高能物理所 北京 100039)

摘要 详细描述了作为中微子探测器的水基契伦科夫量能器单元的结构,并用 GEANT4 软件包对水箱单元契伦科夫光的光学过程做了仔细的蒙特卡罗模拟.结果显示水箱的设计是合理的,且此结果对探测器设计与优化具有重要意义.

关键词 中微子 量能器 光学模拟

1 引言

水基契伦科夫量能器是一种用于长基线中微子实验的新型探测器^[1].它具有性能好、价格低的优点,比目前已在使用的契伦科夫成像型探测器(如 Super-Kamiokande)和以铁为主材的量能器(如 Minos)要便宜 10—50 倍,而性能则优越许多(如对本底的鉴别能力等),特别是在中微子能量大于 4GeV 时.由于这种探测器的基本原理是契伦科夫光的产生与收集,因此,系统、完整地研究与模拟探测器中的光学过程就显得极为重要.

GEANT4^[2]是一个基于 C++ 语言,能有效而全面地模拟粒子与探测器物质的相互作用,并包括完整的光学过程^[3]的软件包,它包括了实验装置的描述,粒子在材料和磁场中的运动,以及所有粒子与物质相互作用物理过程的模型.本文详细介绍了水箱探测器的结构及工作原理,Cherenkov 光子的光学过程模型,并给出模拟结果和相应的讨论.

2 探测器的构造与工作原理

带电粒子穿过透明介质(如水),当其速度超过波长为 λ 的光在该介质中的相速 $c/n(\lambda)$ 时,粒子将诱发 Cherenkov 光辐射. Cherenkov 辐射与粒子运动方向成一 θ 角,且 $\cos\theta = 1/n(\lambda)\beta$,形成以粒子运动轨迹为轴的张角为 2θ 的光锥. Cherenkov 光子的波长远

小于典型的原子尺寸,所以可认为是光学光子,对单位电荷粒子的光谱可由下式表示:

$$\frac{d^2 N}{dx d\lambda} \approx \frac{2\pi\alpha}{\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{n^2 \beta^2} \right) \quad (1)$$

可见 Cherenkov 光集中在紫外段.在可见光区(300—600nm), $\beta \sim 1$ 的单位电荷粒子在水中的 Cherenkov 光产额约为 300/cm.

水基契伦科夫量能器由大量的水箱叠加而成,通过测量每个水箱中的契伦科夫光子数而获得能量沉积信息.多个水箱测得的能量分布可给出中微子事例的特殊结构,以区别于本底.单个水箱的基本结构为 10m × 1m × 1m 的长方体,内盛有 10T 纯水,如图 1 所示.水箱由聚氯乙烯塑料板构成,内贴反射膜.带电粒子穿过水箱,产生的契伦科夫光子经过反射膜反射后,由水箱两端的波长转换棒(Wavelength shifter, WLS)收集,再由光电倍增管读出.波长转换棒也可由 Winston cone^[4,5]代替.

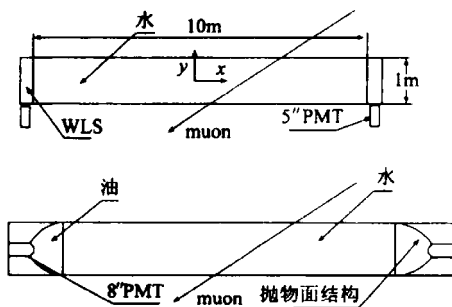


图 1 Cherenkov 光子水箱探测器的两种构造图

2003-03-05 收稿

* 国家自然科学基金(10225524),中国科学院百人计划(U-18)资助

1015—1018

WLS 通常是有机玻璃,它可以吸收入射光,再在 4π 立体角内均匀发出不同波长的可见光. 将条状的 WLS 折转方向后,以 1:1 的面积比例与一个 12.7cm 的光电倍增管耦合. 对于 1cm 厚的 WLS,其折转后的光收集效率大约为 25%^[6]. Winston cone 是用一贴了镜反射膜的抛物面结构作为聚光接收(见图 1),由位于聚焦点的光电倍增管读出. 整个系统浸泡在折射率为 1.49 的矿物油中,这种结构类似于一个光学陷阱,光在高折射率的油中会由于全反射而减少返回水中的几率,从而提高光收集效率. 浸在油中的光电倍增管其性能也易得到保证.

水箱的内反射膜可有多种选择,主要需考虑其反射率及其在纯水中的稳定性. 经过试验,我们发现 Tyvek 膜和一种镀有保护层的铝膜较稳定,其测得的反射率随波长的变化如图 2 所示. Tyvek 是一种由美国杜邦公司生产的漫反射膜,已应用于许多大型水契伦科夫探测器,其在水中的光学特性已经有了充分的研究^[7,8],反射率接近 90%. 铝膜的反射率在理论上可以达到 98%,但因为不稳定,必须加保护膜,因此会损失约 10% 的光子.

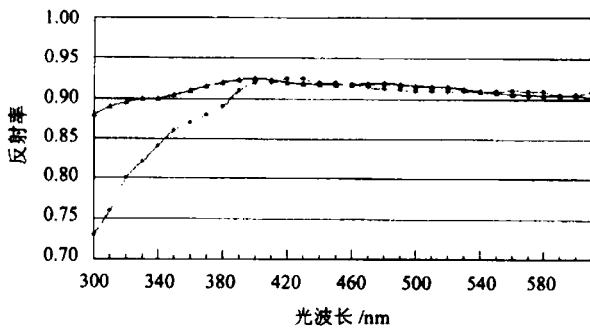


图 2 铝膜和 Tyvek 的反射率随光波长变化图
—▲—铝膜反射率;—●—Tyvek 反射率.

水的折射系数和吸收长度是一随光波长变化的函数. 图 3 所示为选用的水的吸收长度函数. 考虑到水箱中的水比起大型探测器来过滤更难,这比目

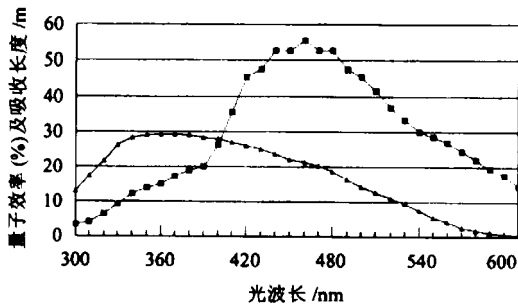


图 3 水的吸收长度和 9372 型光电倍增管量子效率图
—▲—量子效率;—■—吸收长度.

前国际可以达到的水准要低一倍左右.

我们考虑的是英国电子管公司的光电倍增管系列,其中在 WLS 方案中选用 12.7cm 的 9372 型管子以降低造价,而在 Winston cone 方案中选用 20.3cm 的 9355 型管子以提高光收集效率. 由于 Cerenkov 光主要集中在紫外波段,而此两种管子均是 SbCs 光阴极,它在光波长 300—600nm 波段内的量子效率相当高,最高可接近于 30% (图 3). 另外光子到达光电倍增管第一打拿极的收集效率取为 0.6^[9].

3 光学模型

GEANT4 是一个在高能物理实验中得到广泛应用的蒙特卡罗程序,它不但可以像 GEANT3 一样模拟粒子与物质的相互作用,也可以模拟完整的光学过程. 它一共提供了两种光学模型:GLISUR 模型和 UNIFIED 模型^[10,11],两种界面类型(半导体-半导体和半导体-金属),6 种表面模式. 对于第一种 GLISUR 模型,它继承自 GEANT3,过于简单. 我们模拟程序中所采用的 UNIFIED 模型起源于 DETECT 光学模型中的蒙特卡罗模拟,它允许调试的参数涉及光学表面的平均表面和微表面的镜反射系数,漫反射,可能存在的背反射等等,如图 4 所示.

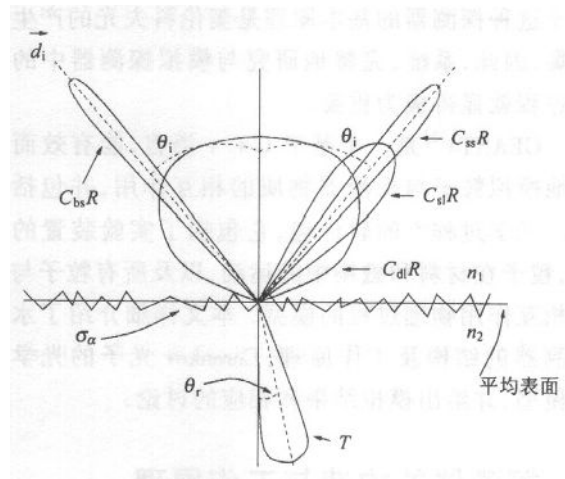


图 4 UNIFIED 模型中的光强度极坐标图

UNIFIED 模型中的反射强度公式如下:

$$J_r \approx C_{dl} e^{-\sigma_\alpha^2} + C_{dl} \cos \theta_r + C_{sl} \delta(\theta_r - \theta_i) \delta(\phi_r) + C_{bs} (\theta_r + \theta_i) \delta(\phi_r), \quad (2)$$

这里 θ_i 是入射角, θ_r 和 ϕ_r 是平均表面的反射角, 参数 σ_α 表征光学表面的粗糙度(α 是模型中微表面和平均表面的夹角), C_{dl} 表示微表面的镜反射几率, C_{sl}

表示平均表面的镜反射几率, C_{bs} 表征背反射几率(这种几率发生在极粗糙的光学表面,如光子正入射到微表面,经过多次反射后折回), C_{dl} 则表示漫反射几率. 显然,这 4 个几率参数满足下面的等式:

$$C_{sl} + C_{ss} + C_{bs} = 1 - C_{dl} \quad (3)$$

所以在 UNIFIED 模型中,需要确定如下参数:入射介质和传输介质的折射率 n_1 与 n_2 , C_{dl} , C_{ss} , C_{bs} , C_{sl} 和 σ_e . 对于 Tyvek,文献[9]已作了系统的研究,这里取他们选定的参数: $C_{dl} = 0.2$, $C_{ss} = 0$, $C_{bs} = 0$, $\sigma_e = 0.2$. 采用铝膜时,将其表面设置为“完全镜面”: $C_{sl} = 1$, $\sigma_e = 0$. 事实上,当改变 C_{sl} , C_{ss} , C_{bs} , C_{dl} 参数值时(例如从 0 到 1),模拟结果显示,探测到的光子数变化不是很明显(小于 10%),而当改变水箱内反射膜 Tyvek 或铝膜的反射系数时,表 1 显示其变化是极其显著的(在水箱中部垂直入射).

表 1 不同结构的水箱探测器探测到的 Cerenkov 光子数与内反射膜的反射率的关系

水箱内壁类型		反射率				
		0.85	0.87	0.90	0.93	0.96
接收端为 WLS	Tyvek	122	147	187	247	344
	铝膜	127	155	210	282	386
接收端为抛物面	Tyvek	41	46	51	73	112*
	铝膜	20	25	30	44	65

注: 标有 * 数据的这种情况,它的光收集效率为 8.79%.

表 1 中列出了接受端分别为 WLS 和抛物面结构这两种情况. 对于当接收端为抛物面结构时,收集光的效果很差(光收集效率不大于 14%). 它的原因在于 GEANT4 中没有提供抛物面这种几何形状,采用了锥面叠加来近似描述抛物面结构. 但从实际模拟结果来看,这种近似的抛物面结构并没有起到很好的聚光作用. 文献[4,5]等对抛物面结构的光收集效率进行了深入的研究,指出其收集效率在一定的条件下应在 25% 以上.

4 模拟结果

用 1GeV 的 μ 子垂直射入水箱,平均能量损失为 0.204GeV,光产额为 38.340. 采用如上讨论的光学模型参数值和考虑 WLS 作为接收端,对水箱 Cerenkov 量能器光子探测器进行了一系列的模拟,包括不同内壁类型,不同位置,不同角度等. 表 2 给出模拟结果,图 5 为光子总效率随 μ 子入射角与位置的变化,其中光子数为水箱两端两个光电倍增管所得

之和. 由此可以看出,光子探测效率不仅仅是粒子入射位置的函数(由反射次数和水的透射率决定),也是粒子入射角度的函数(光子路径和反射次数与光子角度有关). 因此为了获得粒子在水箱中的能量损失,需对探测到的光子作角度与位置的修正. 位置可由水箱两端信号到达的时间来确定,角度则需多个水箱的位置重建来决定,这会对能量分辨率有一定影响,特别是角度. 另外,综合来说,Tyvek 是一个较好的选择.

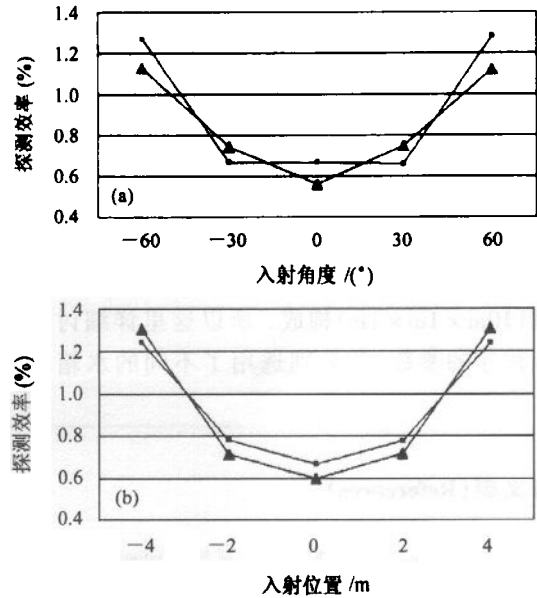


图 5

(a) 在水箱中部在 xy 平面(定义见图 1)以不同角度入射,光电倍增管探测到光子数与产生的 Cerenkov 光子数之比的探测效率;(b) 垂直入射粒子在 x 方向入射位置变化,光电倍增管探测到光子数与产生的 Cerenkov 光子数之比的探测效率. —▲—Tyvek, —■—铝膜.

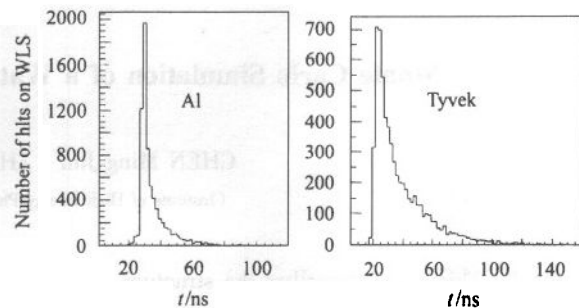


图 6 Cerenkov 光子到达 WLS 的时间

我们也考虑了 Cerenkov 光子到达 WLS 的时间. 在此情况下,光子的衰减长度是 15m. 图 6 表示了粒子从水箱中部垂直入射时的两种内壁材料对应的时间间隔. 可见绝大部分光子都在 20—80ns 时间内到达,其结果是令人满意的.

表 2 GEANT4 模拟程序的系列模拟结果表

入射条件	PMT 探测到光子数		产生 Cerenkov 光子数		探测效率(%)		
	Tyvek	铝膜	Tyvek	铝膜	Tyvek	铝膜	
在水箱中部 xy 平面上以不同角度入射	- 60°	814	897	72080	70607	1.129	1.270
	- 30°	300	270	40455	40546	0.744	0.666
	0°	209	234	35159	35146	0.560	0.667
	30°	302	267	40458	40568	0.747	0.659
	60°	799	915	71211	71528	1.121	1.279
垂直入射粒子在 x 轴上从 -4m 到 4m 移动	- 4m	459	435	35100	35058	1.307	1.242
	- 2m	351	272	35185	35096	0.713	0.777
	0m	211	233	35085	35154	0.602	0.666
	2m	352	272	35189	35108	0.716	0.776
	4m	459	435	35068	35129	1.309	1.239

契伦科夫水箱探测器的关键是它的反射材料选择问题. 计划建造中的北京极长基线的中微子探测器^{1,2}, 准备用日本的高强度质子加速器(HIPA)(或中微子工厂)作为粒子源, 探测器将由 10000 个大型水箱(10m × 1m × 1m)构成. 所以这里详细讨论了其模拟程序的参数, 并分别选用了不同的水箱内壁类

型 Tyvek 和铝膜作对比. 同时我们正在构造一个小型水箱模型, 以便将来更精确地检测模拟程序.

作者感谢 Tom Paul 和 Peter Gumplinger 在光学模型构造上提供了有益的帮助.

参考文献 (References)

- 1 WANG Y F. hep-ex/0010081, Proc. of New Initiatives on Lepton Flavor Violation and Neutrino Oscillation with High Intense Muon and Neutrino Sources, Singapore: World Scientific, 242
- 2 <http://pcitapiww.cern.ch/geant4/G4UsersDocuments/UsersGuides/ForApplicationDeveloper/html/index.html>
- 3 Anchordoqui L A et al. astro-ph/0006142
- 4 Roland Winston. J. Opt. Soc. Amer., 1970, **60**:245
- 5 Roland Winston, Jay M. Enoch. J. Opt. Soc. Amer., 1971, **61**:1120
- 6 Saint-Gobain industrial Ceramics, Inc. Bicon, Product Manual, 1997
- 7 Filevich A et al. Nucl. Instr. Meth., 1999, **A423**:108—118. GAP-97-065
- 8 Hasenbalg F, Ravignani D. GAP-97-035
- 9 Tom McCauley, Tom Paul. GAP-2000-055
- 10 Peter Gumplinger. USER's Workshop at SLAC, Feb. 2 2002, Optical Photon Process in GEANT4
- 11 Levin A, Moisan C. TRI-PP-96-64(1996)
- 12 CHEN H S et al. hep-ph/0104266

Monte Carlo Simulation of a Water Tank of the Cerenkov Calorimeter*

CHEN Ming-Jun ZHANG Feng WANG Yi-Fang

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

Abstract This paper describes the structure of the water tank of the Cerenkov calorimeter for neutrino detection. Based on the GEANT4 Monte Carlo package, the detailed optical processes for the Cerenkov light in the water tank are simulated. Results show that the design of the water tank is appropriate and they are useful for the detector optimization.

Key words neutrino, calorimeter, optical simulation

Received 5 March 2003

* Supported by NSFC(10225524), 100 Talents Programme of CAS(U-18)