

# 电子在水中产生 Cherenkov 辐射的 Geant4 模拟

李 建<sup>1</sup>, 王明勇<sup>2</sup>, 赵广义<sup>1</sup>, 马玉刚<sup>1</sup>, 易海云<sup>1</sup>, 马 赛<sup>1</sup>, 王二永<sup>1</sup>, 王 健<sup>3</sup>

(1. 吉林大学 物理学院, 长春 130012; 2. 鞍山师范学院 物理系, 辽宁 鞍山 114005;  
3. 吉林大学 学报编辑部, 长春 130012)

**摘要:** 用 Geant4 模拟能量分别为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 MeV 入射电子在水中的 Cherenkov 辐射角和辐射光谱, 分析电子产生 Cherenkov 辐射光子数与初级电子和次级电子的关系, 并模拟 Cherenkov 辐射光在水中传输不同距离的吸收情况. 结果表明: 电子在水中产生的 Cherenkov 辐射角随入射电子能量的增加而增大; 在 Cherenkov 辐射光传播过程中, 水介质对紫外波段辐射光的吸收较大.

**关键词:** Geant4 模拟; Cherenkov 辐射; 电子; 光谱; 角分布

**中图分类号:** O571.33 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5489(2015)01-0121-05

## Geant4-Based Simulation of Cherenkov Radiation Generated by Electron in Water

LI Jian<sup>1</sup>, WANG Mingyong<sup>2</sup>, ZHAO Guangyi<sup>1</sup>, MA Yugang<sup>1</sup>, YI Haiyun<sup>1</sup>,  
MA Sai<sup>1</sup>, WANG Eryong<sup>1</sup>, WANG Jian<sup>3</sup>

(1. College of Physics, Jilin University, Changchun 130012, China;  
2. Department of Physics, Anshan Normal College, Anshan 114005, Liaoning Province, China;  
3. Editorial Department of Journal of Jilin University, Changchun 130012, China)

**Abstract:** The angular distribution and spectrum of Cherenkov photons generated by electrons in water were simulated by means of Geant4. And the energies of the electrons were 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 MeV. Then the effect of the secondary electrons on the Cherenkov photons was discussed. Besides, the absorption of Cherenkov photons in water was discussed. It was found that the Cherenkov angular increased with the increase of the energy of incident electrons. And the absorption of ultraviolet band was obvious in the propagation process of Cherenkov photons in water.

**Key words:** Geant4 simulation; Cherenkov radiation; electron; spectrum; angular distribution

当带电粒子在透明介质中的速度大于光在该介质中的速度时, 会发射一种称为 Cherenkov 辐射<sup>[1]</sup>的微弱可见光. Cherenkov 辐射广泛应用于探测高能粒子<sup>[2]</sup>, 其探测器在生物学、医学、环境科学和核物理等领域应用广泛<sup>[3]</sup>.

目前人们利用“Cherenkov 环成像”确定入射粒子的速度并根据 Cherenkov 光子数确定入射粒子的电荷数<sup>[4]</sup>; 利用分子影像学方法 Cherenkov 核素光学成像, 可探索疾病的发生、发展、转归、药物疗效评价及从分子水平指导疾病的治疗等<sup>[5]</sup>; 利用 Cherenkov 辐射“双成像法”测量电子束的发射度可提高

收稿日期: 2014-03-18.

作者简介: 李 建(1987—), 男, 汉族, 硕士研究生, 从事核技术应用的研究, E-mail: li200713502120@126.com. 通信作者: 王 健(1971—), 男, 汉族, 博士, 副编审, 从事核结构与核技术应用的研究, E-mail: wang\_j@jlu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: J0730311).

加速器的束流品质<sup>[6]</sup>.

本文用 Geant4 模拟不同能量的入射电子在水中的 Cherenkov 辐射角与辐射光谱, 并分析不同入射电子能量和 Cherenkov 辐射光传输距离对电子产生 Cherenkov 辐射光的影响.

## 1 Geant4 模型

Geant4 是在 C++ 编程语言基础上发展起来的 Monte Carlo 通用程序包, 具有 C++ 源代码开放性的特点, 并包括完整的光学过程软件包, 可有效模拟 Cherenkov 辐射过程<sup>[7-8]</sup>. 图 1 为 Geant4 模拟 Cherenkov 辐射的几何示意图.

用 G4ParticleGun 类中相应的函数描述入射电子的位置、能量和运动方向等信息. 电子的入射位置为坐标原点, 放射方向为  $z$  轴方向. 电子能量分别为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 MeV.

入射电子的电磁相互作用主要针对电子的电离 (G4eIonisation) 以及多重散射 (G4eMultipleScattering) 和韧致辐射 (G4eBremsstrahlung), 其光学过程主要包括 Cherenkov 辐射过程 (G4Cerenkov)、光子闪烁过程 (G4Scintillation)、光子吸收 (G4OpAbsorption)、瑞利散射 (G4OpRayleigh) 和边界过程 (G4OpBoundaryProcess). 基于 Cherenkov 辐射光具有确定方向性的特点, 因此使用具有高计数效率的环探测器<sup>[9]</sup>.

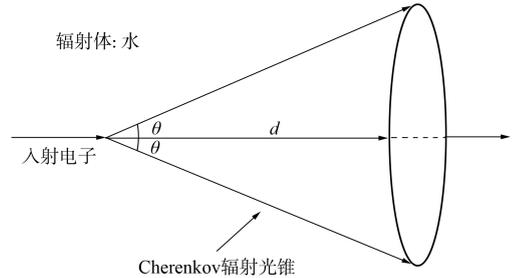


图 1 Geant4 模拟几何示意图

Fig. 1 Geometrical sketch of model Geant4

## 2 Geant4 模拟结果及分析

### 2.1 Geant4 模拟电子产生的 Cherenkov 辐射角

当入射电子在介质中的传播速度大于光在该介质中的传播速度时会发生 Cherenkov 辐射, 根据 Cherenkov 辐射具有确定方向的特点, 可知 Cherenkov 辐射角  $\theta$  满足<sup>[1]</sup>:

$$\cos \theta = \frac{c}{nv} = \frac{1}{n\beta}, \quad (1)$$

$$E = m_0 c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right), \quad (2)$$

其中:  $\beta = \frac{v}{c}$ ;  $n$  为介质的折射率;  $v$  为入射电子的速度;  $c$  为光在真空中的速度;  $E$  为入射电子能量;  $m_0$  为电子质量. 由式(2)可得电子在水中产生 Cherenkov 辐射所需的最小能量为 0.262 MeV.

模拟能量分别为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 MeV 入射电子在水中产生 Cherenkov 辐射光的角分布, 结果如图 2 所示, 其中入射电子数为 100 000 个. 由图 2 可见, 每条曲线均有一个尖锐峰, 峰对应的角度即为辐射角  $\theta$ .

能量分别为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 MeV 入射电子在水中的 Cherenkov 辐射角与能量的关系如图 3 所示. 由图 3 可见: 电子在水中的 Cherenkov 辐射角模拟值与理论值相差较小; 辐射角  $\theta$  随能量的增加逐渐变大. 这是由于  $\beta$  随能量  $E$  的增大而增大所致, 由式(1)可知,  $\beta$  增大使得辐射角  $\theta$  增大.

### 2.2 次级电子产生 Cherenkov 辐射对总 Cherenkov 辐射光的影响

能量分别为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 MeV 入射初级电子和次级电子在水中产生 Cherenkov 辐射的模拟结果如图 4 所示, 其入射电子数为 100 000 个. 图 4(A)为初级电子产生 Cherenkov 辐射角的分布结果; 图 4(B)为初级与次级电子产生总 Cherenkov 辐射角的分布结果; 图 4(C)为次级电子产生 Cherenkov 辐射角的分布结果; 图 4(D)为 0.5 MeV 初级电子与初级电子和次级电子共同产生 Cherenkov 辐射角的分布结果.

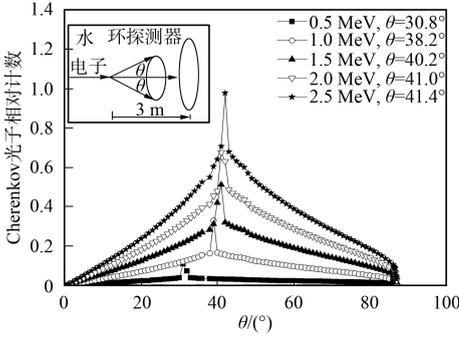


图 2 Cherenkov 辐射光在水中的角分布  
Fig. 2 Angular distribution of Cherenkov photons in water

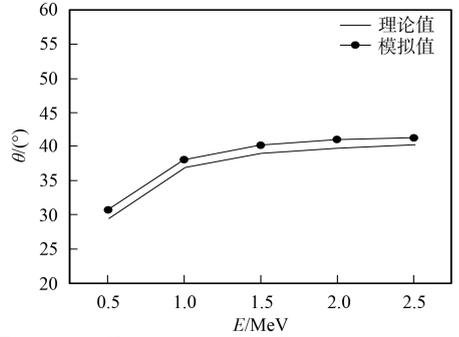


图 3 水介质中 Cherenkov 辐射角与能量的关系  
Fig. 3 Relationship between Cherenkov radiation angle and energy in water

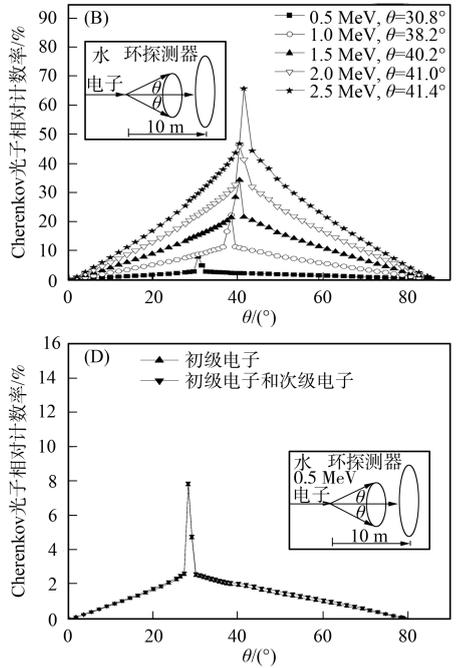
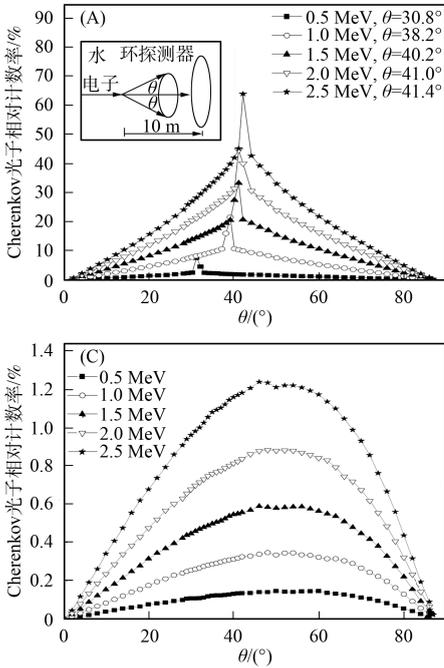


图 4 初级电子与次级电子产生 Cherenkov 辐射对比结果

Fig. 4 Contrast of Cherenkov radiation generated by primary  $e^-$  with that by secondary  $e^-$

由图 4(A), (B), (D) 可见, 入射初级电子产生 Cherenkov 辐射光与总 Cherenkov 辐射光的角分布一致, 由图 4(C) 可见, 次级电子产生 Cherenkov 的光子数约小于总 Cherenkov 的光子数 2 个量级, 且无明显辐射角。

初级电子和次级电子产生 Cherenkov 辐射的对比结果列于表 1。

表 1 初级电子与次级电子产生 Cherenkov 辐射的对比结果

Table 1 Contrast of Cherenkov photons generated by primary  $e^-$  with that by secondary  $e^-$

$E/\text{MeV}$	总光子数/个	初级电子产生光子数/个	次级电子产生光子数/个	次级电子产生光子与总光子比值/%
0.5	1 233 761	1 154 046	79 715	6.46
1.0	4 730 476	4 541 014	189 462	4.01
1.5	8 781 387	8 453 755	327 632	3.73
2.0	13 066 835	12 573 955	492 880	3.77
2.5	17 487 100	16 796 160	690 940	3.95

由表 1 可见, 初级电子和次级电子产生 Cherenkov 辐射的光子数均随能量的增加而增加, 但次级电子产生 Cherenkov 辐射的光子数所占比例较小。

### 2.3 入射电子在水中的 Cherenkov 辐射光谱

入射电子可在介质中产生微弱的 Cherenkov 辐射光, 假设单位长度辐射体辐射的光子数为  $N$ , 其波长在  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  之间, 若介质的折射率  $n$  在该波长范围内不随  $\lambda$  变化, 则

$$N = \frac{2\pi z^2 e^2}{c^2} \left(1 - \frac{1}{n^2 \beta^2}\right) \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{\omega d\omega}{hc} = \frac{4\pi^2 z^2 e^2}{hc} \left(1 - \frac{1}{n^2 \beta^2}\right) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\left(\frac{1}{\lambda}\right) = \frac{4\pi^2 z^2 e^2}{hc} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right) \sin^2 \theta = \frac{2\pi^2 z^2}{137} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right) \sin^2 \theta, \quad (3)$$

其中:  $z$  为入射带电粒子的电荷数;  $\theta$  为辐射角;  $\omega$  为频率<sup>[1]</sup>. 能量分别为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 MeV 入射电子在水中产生 Cherenkov 辐射光的光谱模拟结果如图 5 所示, 其中入射电子数为 100 000 个. 由图 5 可见: 电子产生 Cherenkov 辐射的光子数随能量的增加而增加, 这是由于 Cherenkov 辐射角随能量的增加而变大, 由式(3)可知,  $\sin^2 \theta$  变大, 使得电子产生 Cherenkov 的光子数增加所致; Cherenkov 辐射光为连续光, 其波长为 300~610 nm, 即辐射的大部分光在可见光区域, 紫外区辐射光子所占比例随能量的增加而增加.

### 2.4 Cherenkov 辐射光的吸收

光在介质中传播时光波的光强逐渐衰减, 其衰减服从指数分布规律, 即

$$N(\lambda) = N_0(\lambda) \exp\{-\alpha(\lambda)l\}, \quad (4)$$

其中:  $N(\lambda)$  为衰减后的光子数;  $N_0(\lambda)$  为衰减前的光子数;  $\alpha(\lambda)$  为衰减系数;  $l$  为衰减长度.

利用 Geant4 模拟不同能量电子在水中 10, 17, 24 m 处 Cherenkov 辐射光谱的吸收情况, 模拟结果如图 6 所示, 其中入射电子数为 100 000 个. 由图 6 可见: Cherenkov 辐射光的光子数随传播距离的增加逐渐减少, 由式(4)可知, 这是由于 Cherenkov 辐射光在水中传播时与水发生相互作用所致; 随着传输距离的增加, 紫外波段的光存在明显的吸收现象.

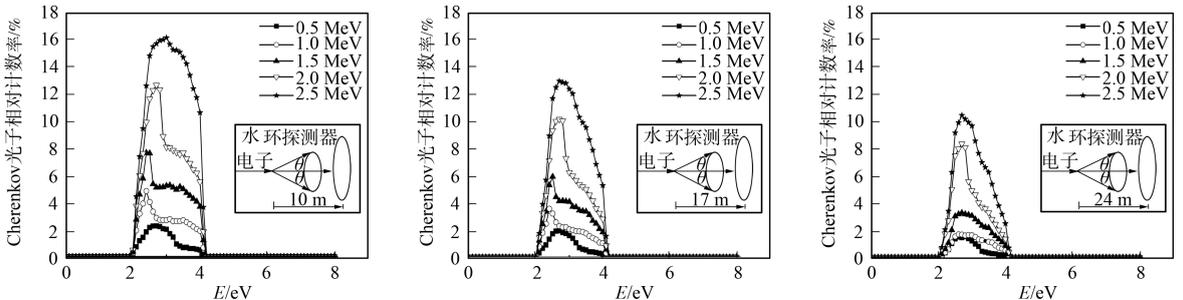


图 6 不同距离下的 Cherenkov 光谱

Fig. 6 Spectra of Cherenkov photons at different distances

综上, 本文可得如下结论: 高能入射电子在透明介质中产生的 Cherenkov 辐射角随入射电子能量的增大而增大; 高能入射电子在水中产生的 Cherenkov 辐射光主要由入射的初级电子产生, 次级电子可产生微弱的 Cherenkov 辐射光; 相同辐射体的 Cherenkov 辐射光子数与入射电子的能量正相关, 并随 Cherenkov 辐射光在介质中的传播逐渐减少.

### 参 考 文 献

- [1] 复旦大学, 清华大学, 北京大学. 原子核物理实验方法 [M]. 北京: 原子能出版社, 1997: 181-183. (Fudan University, Tsinghua University, Peking University. Nuclear Physics Experimental Methods [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1997: 181-183.)

- [2] 王遗宝, 张国强. 同位素示踪中的切伦科夫计数 [J]. 上海农业科技, 1979, 9(3): 22-25. (WANG Yibao, ZHANG Guoqiang. Isotopic Tracer in Cherenkov Counting [J]. Shanghai Academy of Agricultural Sciences, 1979, 9(3): 22-25.)
- [3] 赵启仁. 切伦科夫辐射测量方法概述 [J]. 国际放射医学核医学杂志, 1978, 11(3): 41-46. (ZHAO Qiren. Methods for Measurement of Cherenkov Radiation [J]. International Journal of Radiation Medicine and Nuclear Medicine, 1978, 11(3): 41-46.)
- [4] Cunha J P, da, Neves F, Lopes M I. On the Reconstruction of Cherenkov Rings from Aerogel Radiators [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2000, 452(3): 401-421.
- [5] 马晓伟, 杨卫东, 汪静. 切伦科夫光学成像研究进展 [J]. 中华核医学与分子影像杂志, 2012, 32(1): 72-74. (MA Xiaowei, YANG Weidong, WANG Jing. Cherenkov Optical Imaging Research [J]. Chinese Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging, 2012, 32(1): 72-74.)
- [6] 谷安佳, 丁原涛, 赵夔, 等. 切伦科夫辐射“双成像法”测量电子束发射度 [J]. 高能物理与核物理, 2003, 27(2): 163-168. (GU Anjia, DING Yuantao, ZHAO Kui, et al. A New Measurement of Electron Beam Emittance with Cherenkov Radiation “Double Imaging” Method [J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2003, 27(2): 163-168.)
- [7] Society of High Energy Physics. Geant4 Users Guide [EB/OL]. 2003-06-02. <http://GEANT4.web.cern.ch/GEANT4/G4Users Documents/UsersGuides>.
- [8] Agostinelli S, Allison J, Amako K, et al. Geant4—A Simulation Toolkit [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003, 506(3): 250-303.
- [9] 王振超, 马玉刚, 杨海芳, 等.  $^4\text{He}$  和  $^{12}\text{C}$  离子 Rutherford 背散射的 Geant4 模拟 [J]. 吉林大学学报: 理学版, 2013, 51(4): 712-714. (WANG Zhenchao, MA Yugang, YANG Haifang, et al. Geant4-Based Simulation of  $^4\text{He}$  and  $^{12}\text{C}$  Ions Rutherford Backscattering on Thin Films [J]. Journal of Jilin University: Science Edition, 2013, 51(4): 712-714.)

(责任编辑: 王 健)

## 欢迎订阅 2015 年《吉林大学学报(理学版)》

《吉林大学学报(理学版)》(原刊名为《吉林大学自然科学学报》)是由教育部主管、吉林大学主办的国家级中文综合性科学技术类核心期刊。以交流学术思想、推动科学研究、促进科教兴国和学校发展为办刊宗旨;以新(选题新,发表成果创新性强)、快(编辑出版速度快)、高(刊文学术水平和编辑出版质量高)为办刊特色;以研究论文、研究快报、研究简报和综合评述等形式报道吉林大学自然科学领域的基础研究、应用研究和开发研究中所取得的创新性研究成果。刊发国家重大科技项目和国家自然科学基金项目及各省和部委基金项目的文章数量逐年增加,其中有许多成果获得较大的社会效益和经济效益。本刊目前已被国内外 20 种数据库和文摘刊物收录,国外的有:英国《科学文摘》(SA),美国《数学评论》(MR),美国《化学文摘》(CA),俄罗斯《文摘杂志》(AJ of VINITI),德国《数学文摘》(Zbl Math),美国《剑桥科学文摘:材料信息》(CSA; MI)。

本刊 2001 年被选入“中国期刊方阵(双百期刊)”。在吉林省、教育部及全国优秀科技期刊评比中共获奖 21 次,其中获吉林省优秀科技期刊一等奖和十佳期刊共 6 次,教育部全国高校自然科学优秀学报一等奖等奖项共 12 次,全国优秀科技期刊评比二等奖 2 次。2008 年和 2011 年连续两次被评为“中国精品科技期刊”;2009 年获全国高校科技期刊优秀编辑质量奖,并被吉林省新闻出版局评为自然科学类“吉林名刊”;2008 年~2010 年连续 3 次获“中国科技论文在线优秀期刊”一等奖;2010 年获教育部“第三届中国高校优秀科技期刊”奖;2011 年和 2012 年连续两次获“中国科技论文在线优秀期刊”二等奖;2014 年获教育部“第五届中国高校优秀科技期刊”奖。

2015 年《吉林大学学报(理学版)》为双月刊,16 开本,国内定价 25 元,公开发售,刊号:ISSN 1671-5489, CN 22-1340/O;邮发代号:12-19(国内),BM304(国外)。国内读者请在邮局订购,国外读者请通过中国国际图书贸易集团有限公司订购,补订者可直接与本刊编辑部联系。

编辑部地址:长春市南湖大路 5372 号吉林大学南湖校区,邮编:130012;电话(传真):0431-88499428; E-mail: sejuj@mail.jlu.edu.cn; <http://xuebao.jlu.edu.cn/lxb>。