

文章编号: 1001-4322(2013)01-0196-05

# 水下切伦科夫光光斑的蒙特卡罗模拟\*

刘 斌, 贾清刚, 张天奎, 胡 光, 胡华四

(西安交通大学 核科学与技术学院, 西安 710049)

**摘 要:** 分别采用分出截面法和积累因子法计算了水下放射性源透过一次屏蔽体的中子与  $\gamma$  射线的剂量场分布,并在这些分布条件下,利用 Geant4 软件  $\gamma$  射线在穿越二次屏蔽体后继而穿越后续水层,计算出在 3 m 水层中产生的切伦科夫(Cherenkov)光通量分布和光谱分布。以纯水为传播介质,在考虑 Cherenkov 光在不同水层中传播所造成的几何衰减和水层吸收等因素后,由计算获得了 Cherenkov 光光斑大小和强度分布。

**关键词:** 放射源; 切伦科夫辐射; 分出截面法; 积累因子法; Geant4 模拟

**中图分类号:** O536 **文献标志码:** A **doi:**10.3788/HPLPB20132501.0196

设水下放射源可发射一些中子、 $\gamma$  射线和电子,它们又可经由源的二次屏蔽体透射出来,其中  $\gamma$  射线也可以产生高能次级电子。这些电子在穿过透明介质水时,必能引起水分子极化接着又退极化,则沿与电子运动方向有一定夹角的锥面向前发射出覆盖紫外-可见光-近红外宽谱切伦科夫(Cherenkov)光元光,其数目与波长成平方反比关系。若电子运动速度超过电磁波在介质中的传播速度,一路所发出的元光会干涉相长,宏观上可以观察到这些光。比如,许多核应用装置的水池中就可以看到深蓝色的光<sup>[1-2]</sup>。由于 Cherenkov 光具有良好的方向性,可以通过这些 Cherenkov 光实现对水下放射源的侦测与搜索。本文采用分出截面法和积累因子法计算透过一次屏蔽的中子、 $\gamma$  射线的剂量场分布<sup>[3-5]</sup>,再以此为初始条件,利用 Geant4 软件模拟出它们在水中产生的 Cherenkov 光光斑的大小和强度分布,最后根据不同波长在水中的吸收系数计算 Cherenkov 光在不同厚度水层中的几何衰减与吸收量<sup>[6-7]</sup>,从而得到不同水深条件下的 Cherenkov 光光斑的大小和强度分布。

## 1 中子、 $\gamma$ 能谱

在本研究中,放射源为裂变产物源,射线能谱近似于裂变谱,一次屏蔽体主要为铁水交替屏蔽层,其中包括 2 层 10 cm 厚的铁和 1 层 50 cm 厚的铅硼聚乙烯,二次屏蔽体为 10 cm 厚的钢板。由图 1 可见,经过一次屏蔽后,中子通量减弱很大,对于 12.2~15.0 MeV 能量区的中子,经过一次屏蔽后通量下降为  $10^{-4}$  量级,与初始通量相比下降了 22 个量级。而  $\gamma$  能谱明显变硬且相对于中子还具有大得多的通量。

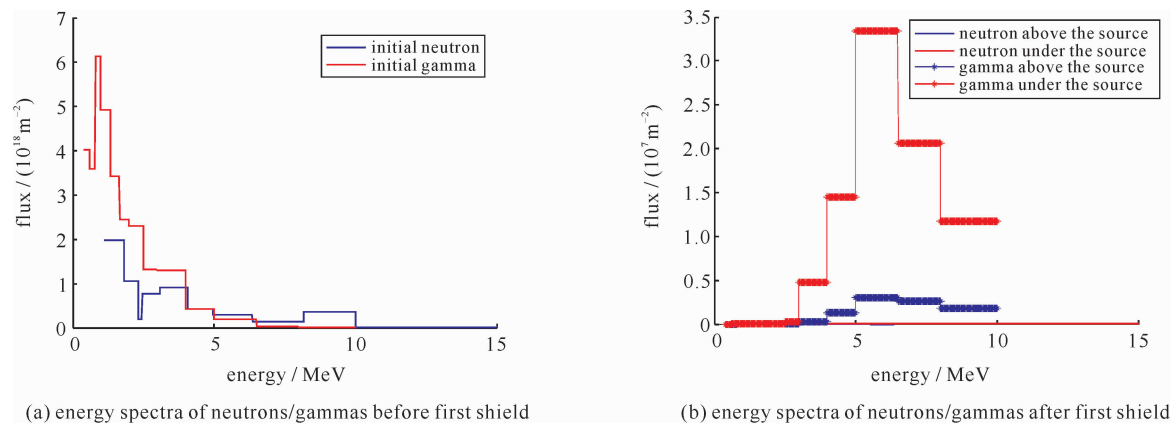


Fig. 1 Energy spectra of neutrons/gammas before and after first shield

图 1 初级中子、 $\gamma$  能谱及经过一次屏蔽后的中子、 $\gamma$  能谱

\* 收稿日期:2012-06-26; 修订日期:2012-08-03

基金项目:国家高技术发展计划项目;国家自然科学基金项目(10975113)

作者简介:刘 斌(1987—),男,博士研究生,主要从事核辐射测量研究;liubin871204@126.com。

通信作者:胡华四(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事核技术应用、辐射测量与防护等研究;huasi\_hu@mail.xjtu.edu.cn。

## 2 切伦科夫光产生的 Geant4 模拟及水中衰减的计算

### 2.1 产生机理

若电子运动速度超过电磁波在介质中的传播速度,一路所发出的元光会干涉相长,从而产生从可见光到紫外的连续光谱。电子 Cherenkov 光产生的阈能为

$$\begin{cases} E_{\text{th}} = \left( \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right) m_0 c^2 \\ \beta = v/c \\ v = c/n \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $m_0$  为电子静止质量;  $c$  为光在真空中的速度;  $n$  为介质折射率;  $v$  为电子速度。由式(1)可知,电子在水中产生的 Cherenkov 光的阈能约为 0.264 1 MeV。

放射源在水中产生 Cherenkov 光的过程严格来说是一个中子、 $\gamma$  耦合运输的过程,从放射源产生的中子在屏蔽体中通过俘获非弹、弹性散射和直穿等作用被减弱,同时也产生次级  $\gamma$ ,而源发的  $\gamma$  也可通过光致反应产生中子。最终  $\gamma$  射线通过光电效应、康普顿散射及电子对效应产生次级电子透过屏蔽体或者  $\gamma$  射线直接在水中产生次级电子,超过阈能的次级电子在水中产生 Cherenkov 辐射。

由于经过一次屏蔽体后的中子通量下降到很低,故本次计算中只考虑一次屏蔽后由  $\gamma$  产生的 Cherenkov 光。这样,Geant4 模拟以经过一次屏蔽体后的  $\gamma$  射线作为源, $\gamma$  射线透过二次屏蔽体并穿过 3 m 厚的水层(10 MeV  $\gamma$  减弱 2 个量级的水层厚度),这个水层也就被估计为产生光的全部 Cherenkov 辐射体。图 2 为打入  $1 \times 10^5$  个光子数以后 Geant4 模拟的装置上方和下方 Cherenkov 光子数随垂轴半径的分布。

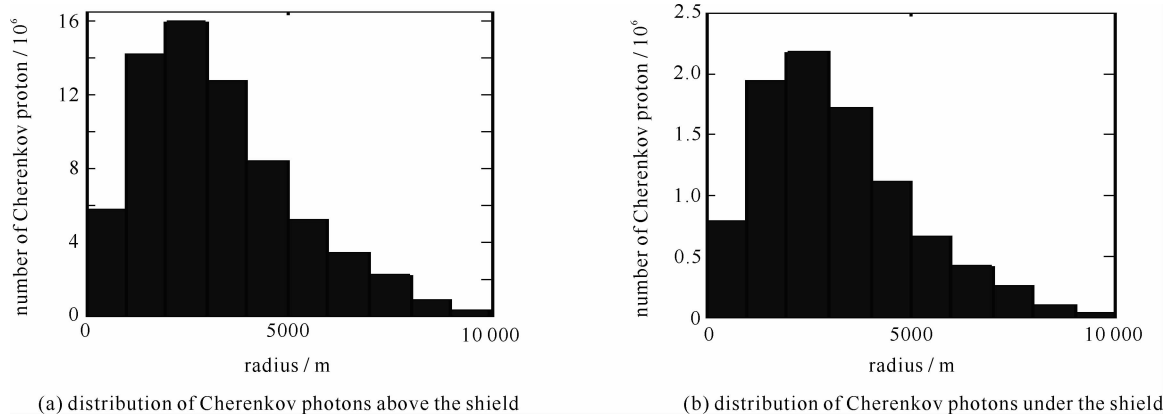


Fig. 2 Distribution of number of Cherenkov photons along horizontal radius

图 2 屏蔽装置 3 m 处 Cherenkov 光子数随垂轴半径分布

由图 2 可知,Cherenkov 光会在放射源的上方和下方半径为 10 m 的范围内形成一圈一圈圆环状的光晕,其光子数目最多的地方集中在半径为 2~3 m 的圆环内。设光子数目最大的地方为 2.5 m,则 Geant4 模拟的 Cherenkov 发射角为  $39.8^\circ$ 。根据 Cherenkov 光确定的方向性

$$\cos\theta = \frac{1}{n\beta} \quad (2)$$

式中:  $\theta$  为切伦科夫光传播方向同带电粒子运动方向之间的夹角;  $\beta$  为带电粒子速度与光速的比值。可知,理论的角度为  $41.2^\circ$ ,相对误差小于 3.8%,间接说明 Geant4 模拟的结果的可靠性。

### 2.2 切伦科夫光在水中的传播

由于散射和光子角分布等作用,光在介质中传播会面临光强的衰减和光斑的扩散,衰减服从指数规律且衰减系数随波长分布。

$$N(\lambda) = N_0(\lambda) \exp[-\alpha(\lambda)l] \quad (3)$$

式中:  $\lambda$  为光波长;  $N$  为衰减后的光子数;  $N_0$  为衰减前的光子数;  $\alpha(\lambda)$  为相应波长的衰减系数;  $l$  为衰减长度。本次计算假定光传输介质为纯水,采用光在纯水中的吸收系数来计算不同波长的 Cherenkov 光在水中的衰减情况<sup>[8]</sup>。

根据式(2)即纯水中的光吸收系数,计算放射源顶部和底部 3, 13, 103, 303 m 处的光谱分布,结果如图 3

所示。Cherenkov 光子能量与波长的对应关系为

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{1240}{E} \tag{4}$$

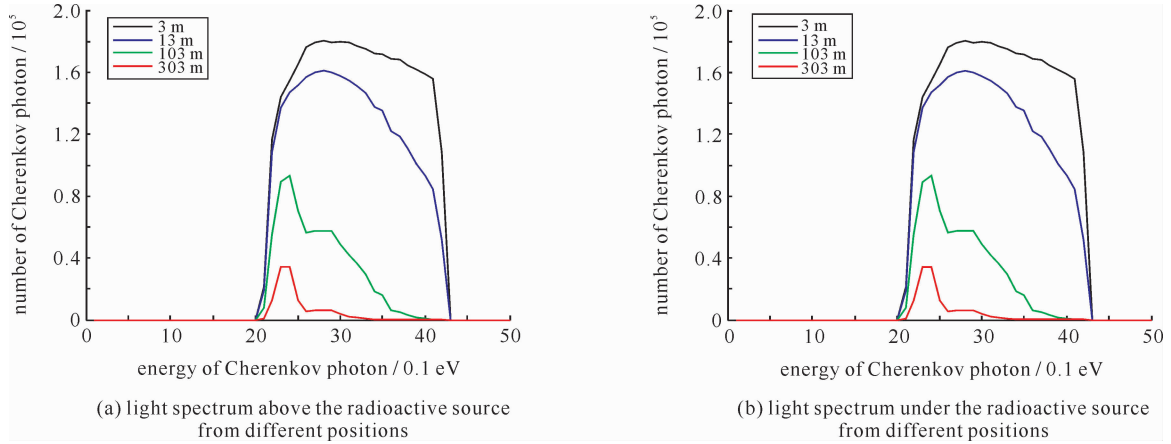


Fig. 3 Light spectra above and under the radioactive source from different positions

图 3 放射源顶部和底部不同位置处的光谱分布

由图 3 可知,随着 Cherenkov 光在水中的传播,紫外和红外部分变少,可见光(偏红光)的份额变多,到距离放射源 303 m 的位置,波长范围衰减为 355~620 nm,为可见光范围,且红光居多。

### 2.3 Cherenkov 光在距离放射源不同位置处的光能量分布

根据已计算得的光子数随垂轴半径的分布(图 2)和源发 Cherenkov 光光谱以及不同波长对应的衰减系数对光子数随垂轴半径的分布加以离散,推得 Cherenkov 光的光能量分布,如图 4 所示。

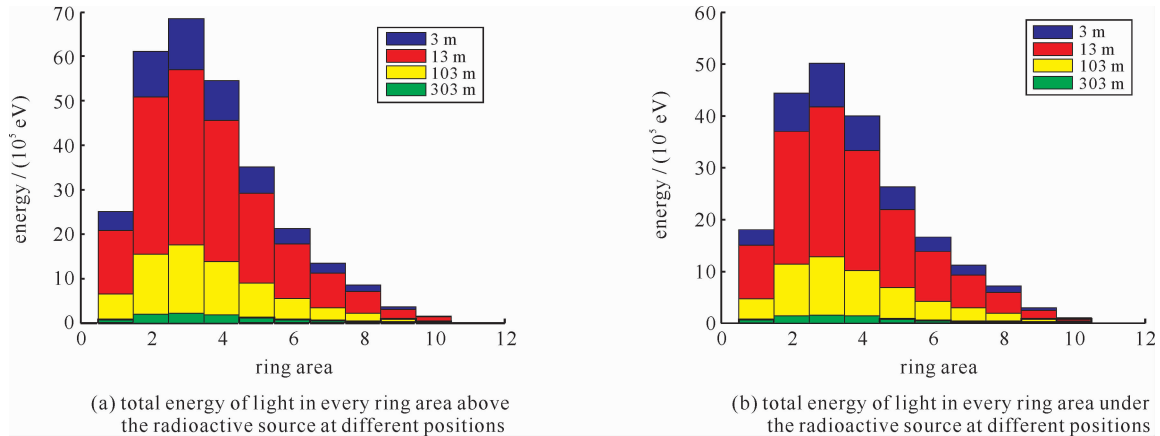


Fig. 4 Total energy of light in every ring area above and under the radioactive source at different positions

图 4 放射源顶部和底部不同位置处各垂轴环面光能总量

### 2.4 距离放射源不同位置处 Cherenkov 光光晕模拟

根据 Cherenkov 光在水中传播的衰减和光斑扩散规律,我们对放射源不同位置处的 Cherenkov 光光晕做了模拟,模拟的结果如图 5~6 所示。

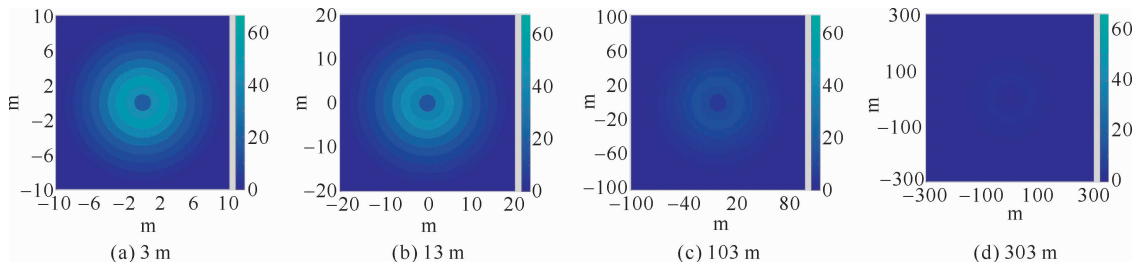


Fig. 5 True color picture above the radioactive source at different positions

图 5 放射源上方不同位置处的真彩图

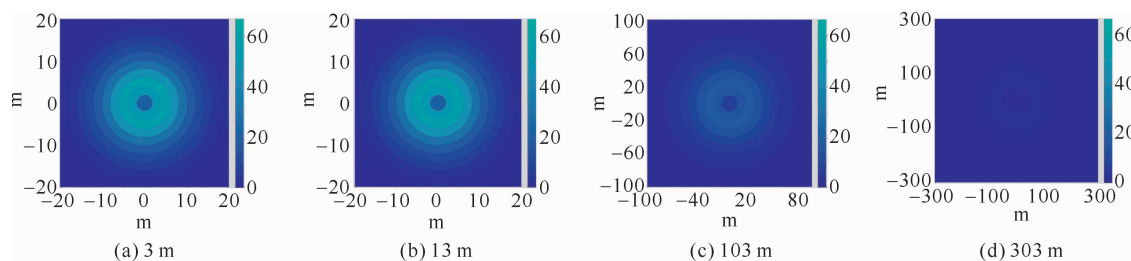


Fig. 6 True color picture under the radioactive source at different positions

图 6 放射源下方不同位置处的真彩图

由图 5~6 可知：在距离放射源 3 m 处，Cherenkov 光晕分布在水中半径 10 m 的范围，光强最大处为半径 2~3 m 的圆环内部；在 13 m 处，光晕分布在半径为 20 m 左右的水中，其光强最强的区域为半径 4~6 m 的区域；在 103 m 处，Cherenkov 光分布在半径为 100 m 左右的水中，光强最大的区域为 20~30 m；在 303 m 处，Cherenkov 光分布在半径为 300 m 的水域，最大光强区域为 60~90 m。这些结果均列在表 1 中。

表 1 距离放射源上/下方各距离处光强

Table 1 Light intensity above / under the radioactive source

distance from radioactive source/m	radius of highest light intensity/m	highest light intensity/(W · m <sup>-2</sup> )
above radioactive source	3	2~3
	13	4~6
	103	20~30
	303	60~90
under radioactive source	3	2~3
	13	4~6
	103	20~30
	303	60~90

### 3 结 论

在距离水下放射源 303 m 时，切伦科夫光强为  $3.56 \times 10^{-16} \text{ W/m}^2$ ，相当于每平方米几百个光子，而目前的 CCD 成像技术已能对几十个光子成像，故在环境干扰因素很小的情况下，可利用 CCD 相机对水面进行拍照搜寻放射源<sup>[9]</sup>。对此，本文对中子和  $\gamma$  经一次屏蔽体的减弱采用了解析法计算，从而忽略了中子非弹散射和辐射俘获产生的次级  $\gamma$ 。虽然这些  $\gamma$  射线所属能量区间均处于产生次级电子超过 Cherenkov 辐射阈能之上的能段，实际产生的 Cherenkov 光强度会更大些，但由于中子通量相较原始  $\gamma$  射线小得多，故而中子对 Cherenkov 光强度的影响是可以忽略的。

### 参考文献：

[1] 弗兰克 I M, 塔姆 I Y. 关于 Cherenkov 辐射的解释[M]. 1958. (Frank I M, Tamm I Y. Explanation of Cherenkov radiation. 1958)

[2] 清华大学, 复旦大学, 北京大学三校联编. 原子核物理实验方法[M]. 北京: 原子能出版社, 1997. (Qinghua University, Fudan University, Peking University. Nuclear physics experimental methods. Beijing: Atomic Energy Press, 1997)

[3] 胡华四. 辐射防护基础[M]. 西安: 西安交通大学, 2002. (Hu Huasi. Radiation protection. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2002)

[4] 古雪夫 H Г. 电离辐射防护[M]. 北京: 原子能出版社, 1988. (Gusev H Г. Ionizing radiation protection. Beijing: Atomic Energy Press, 1988)

[5] 王明谦, 桂立明, 方杰. 辐射防护导论[M]. 北京: 原子能出版社, 1991. (Wang Mingqian, Gui Liming, Fang Jie. Introduction to radiation protection. Beijing: Atomic Energy Press, 1991)

[6] Pope R M, Fry E S. Absorption spectrum (380-700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurement[J]. *Appl Opt*, 1997, **36**(33): 8710-8723.

[7] Quickenden T I, Irvin J A. The ultraviolet absorption spectrum of liquid water[J]. *J Chem Phys*, 1980, **72**(8): 4416-4428.

[8] Fry E S. Visible and near-ultraviolet absorption spectrum of liquid water: comment[J]. *Appl Opt*, 2000, **39**(16): 2743-2744.

[9] 梅遂生. 光电子技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008. (Mei Suisheng. Optoelectronic technology. Beijing: National Defense Industry Press, 2008)

## Monte Carlo simulation of Cherenkov light spot produced by underwater radioactive source

Liu Bin, Jia Qinggang, Zhang Tiankui, Hu Guang, Hu Huasi

(*School of Nuclear Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*)

**Abstract:** The removal cross section method and the buildup factor method have been used to calculate the dose equivalent distribution of neutron and gamma rays permeating through the primary shielding layer of underwater radiator respectively. With this distribution, Cherenkov light spectrum and flux distribution in 3 m water layer radiator after  $\gamma$ -rays permeating through secondary shielding layer and follow-up water layer have been simulated with Geant4. In addition, considering the geometry dilution and water attenuation for Cherenkov light propagating through some thickness of the pure water layer, the size of Cherenkov light spot and the intensity distribution were obtained.

**Key words:** radioactive source; Cherenkov radiation; removal cross section method; buildup factor method; Geant4 simulation