

## 摘要

深海高能中微子探测阵列可以促进中微子驱动的多信使天文学发展, 加深宇宙的认知以及极端条件下物理规律的理解。海铃计划(TRIDENT)旨在南海三千米以下深海建设大型中微子探测阵列, 并于2021年9月进行了远洋选址预研(TRIDENT Pathfinder)[1]。选址预研实验主要考察深海原位海水的光学性质, 为望远镜阵列设计提供关键参数输入。我们同时使用光电倍增管(photon multiplier tube, PMT)和照相机两套系统来测量海水的散射和吸收长度。为了精确构建光子中的海水传播模型, 理解两套系统测得的数据, 论证相应的海水性质测量方法, 我们进行了基于Geant4[2]的模拟, 刻画了光子在海水中经历吸收、瑞利散射和米散射后时间和空间分布。通过模拟, 光子的空间分布能重现照相机系统中的照片, 时间分布可以复现PMT系统的测量结果, 为数据分析提供了有力的支持。

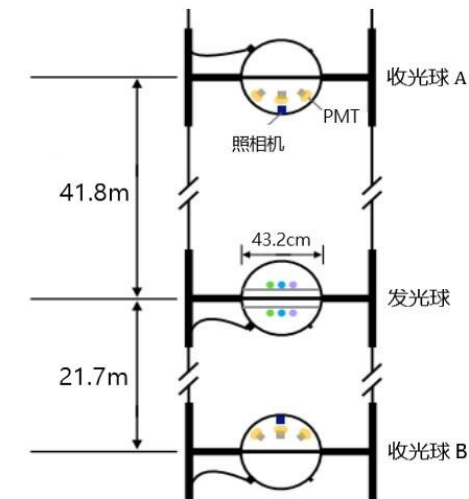
## 模拟设置

### 模拟物理

海水中直线传播的光束中的直接光子的衰减(decay of direct photons)满足  $I(x) = I_0 \cdot \exp(-\frac{x}{\lambda_{att}})$  [4] (直接光子为未经历过散射的光子)

- 吸收(absorption),  $\lambda_{abs}$
- 瑞利散射(Rayleigh Scattering),  $\lambda_{Ray}$
- 米散射(Mie Scattering),  $\lambda_{Mie}$
- 米散射平均散射角(Mie Angle),  $\langle \cos(\theta) \rangle_{Mie}$

$$\lambda_{att}^{-1} = \lambda_{abs}^{-1} + \lambda_{Ray}^{-1} + \lambda_{Mie}^{-1}$$



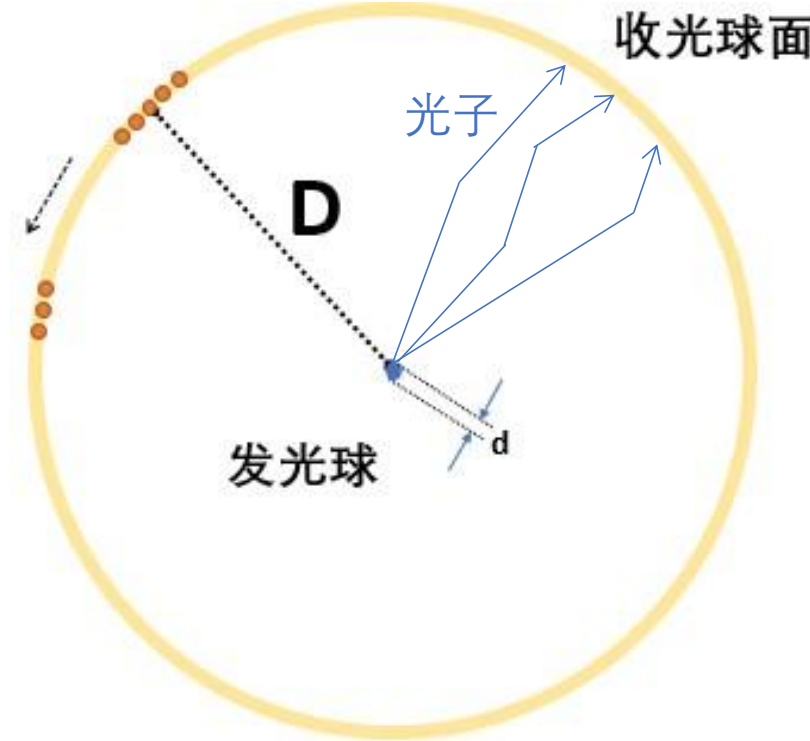
1. 海底的硬件布置  
 发光球上下两面对称放置LED灯和漫射体。发光球上约40米处和下约20米处放置收光球, 内置照相机和PMT

### 模拟几何

#### 2. 发光球—收光球面系统

模拟中, 将收光球扩展为全立体角的球面来全面记录光子的时间和空间信息, 增加光子利用效率。

光子从发光球出发, 经历介质的吸收和散射作用达到收光球。收光球通过到达光子的空间分布和时间分布来解码介质的吸收和散射性质



### 参数输入及默认值

距离D/m	发光球径d/cm	折射率n	波长/nm
41.62 / 21.56	21.62	1.345	405/465/505
$\lambda_{Mie}/m$	$\langle \cos\theta \rangle_{Mie}$	$\lambda_{abs}/m$	$\lambda_{Ray}/m$
70	0.97	27	200

### 参数输出

光子发出位置	光子到达位置	光子到达动量	光子被散射次数
$\vec{x}_{emi}$	$\vec{x}_{hit}$	$\vec{p}_{hit}$	$n_{scatter}$

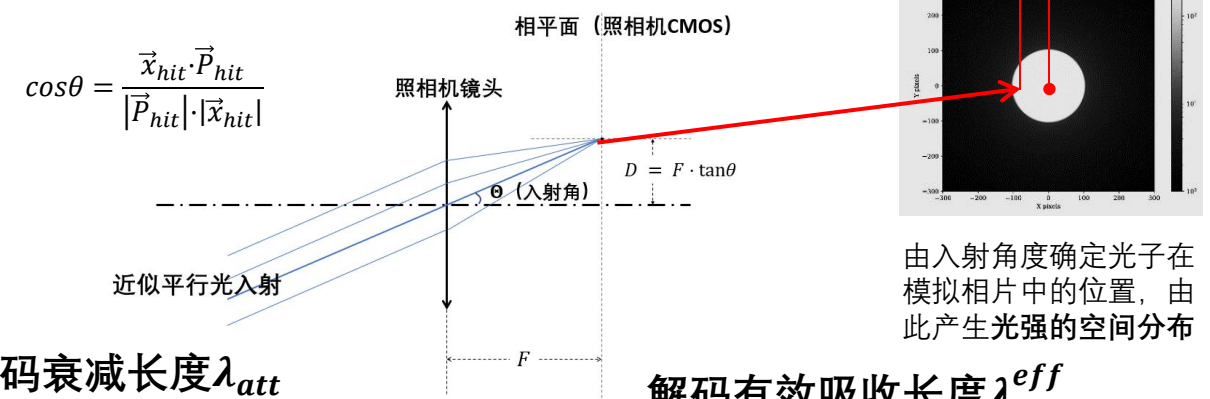
### 参考文献&联系人

[1] Ye, Z. P., et al. "Proposal for a neutrino telescope in South China Sea." *arXiv preprint arXiv:2207.04519* (2022).  
 [2] S. Agostinelli, et al., GEANT4—a simulation toolkit, Nucl. Instrum. Meth. 230 A 506 (2003) 250–303. doi:10.1016/S0168-9002(03)01368-8  
 [3] Bohren, C.F., Huffman, D.R.: Absorption and scattering of light by small particles. John Wiley & Sons (2008)

[4] Aguilar, J.A., et al.: Transmission of light in deep sea water at the site of the ANTARES Neutrino Telescope. *Astropart. Phys.* 23, *arXiv:astro-ph/0412126v1*  
 魏振宇: Zhenyu.wei@sjtu.edu.cn  
 胡帆: fan\_hu@pku.edu.cn  
 徐东莲: donglianxu@sjtu.edu.cn

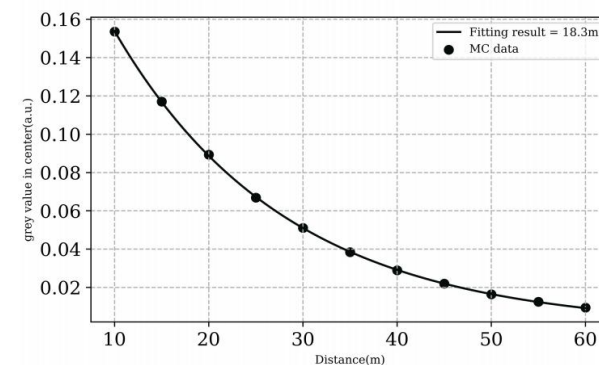
## 模拟照相机系统

### 针孔模型模拟成像



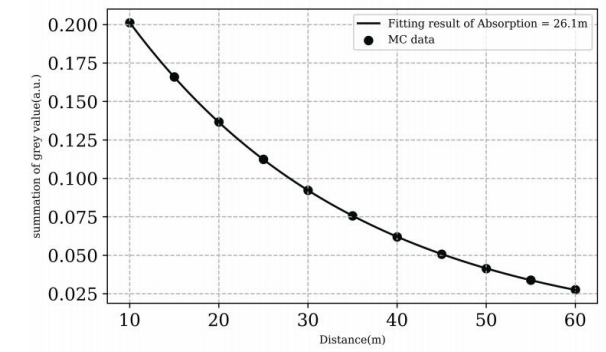
### 解码衰减长度 $\lambda_{att}$

- 图相中心的直接光子的比例为常数
- $N_{center}(x) = N_{center}(0) \cdot \exp(-\frac{x}{\lambda_{att}})$
- 输入数值为17.8m, 而拟合结果为18.3m



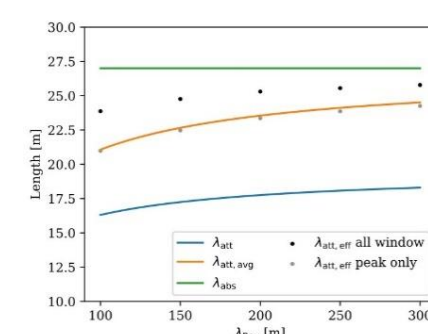
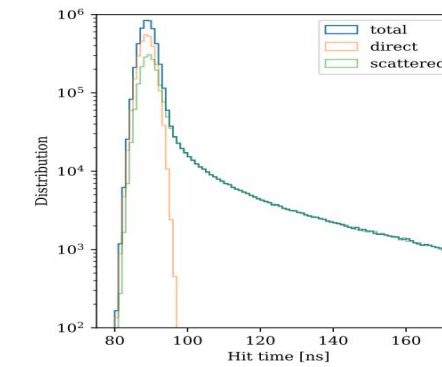
### 解码有效吸收长度 $\lambda_{abs}^{eff}$

- $N_{total}(x) = N_{total}(0) \cdot \frac{1}{x^2} \cdot \exp(-\frac{x}{\lambda_{abs}^{eff}})$
- 输入数值为27m, 而拟合结果为26.1m, 光子经过散射而产生额外的光程, 其会导致吸收效应的增加。故而拟合的吸收长度会偏小。



## 模拟PMT系统

### 模拟PMT探测时间分布



右图为不同定义的衰减长度随着瑞利散射长  $\lambda_{Ray}$  度增加的变化。随着  $\lambda_{Ray}$  增大, 其呈现收敛的特征

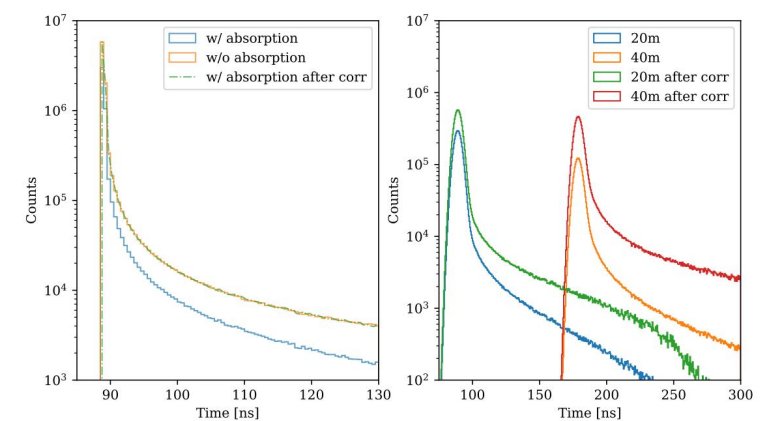
$$\frac{1}{\lambda_{att,avg}} = \frac{1}{\lambda_{abs}} + \frac{1}{\lambda_{Ray}} + \frac{1 - \langle \cos\theta \rangle}{\lambda_{mie}}$$

$$N_{integral}(x_2) = N_{integral}(x_1) \cdot \exp(-\frac{x_2 - x_1}{\lambda_{att,eff}})$$

上图为散射光子、直接光子以及全部光子到达的时间分布图, 直接光子集中于峰处, 而散射光子贯穿整个分布。

### 解码吸收长度

- $\int_{-\infty}^{\infty} N_1(t) \exp(\frac{ct}{n\lambda_{abs}}) dt \times d_1^2 = \int_{-\infty}^{\infty} N_2(t) \exp(\frac{ct}{n\lambda_{abs}}) dt \times d_2^2$
- 时间分布中, 每一个bin对应不同的光程L, 利用光程  $L = ct$  可以计算权重因子  $\exp(\frac{ct}{n\lambda_{abs}})$
- 该权重因子可以完全补偿吸收效应。补偿过后, 40m处的分布和20m处的分布的积分获得光子数, 使光子数的加权积分能够满足距离平方反比。



模拟产生到达光子的时间分布, 并且验证  $\exp(\frac{ct}{n\lambda_{abs}})$  加权的有效性