

密级：



# SCEP粒子探测器研究进展

刘栋

深空探测实验室（天都实验室）

张玥、黄兴宇

中国科学技术大学

2025年10月



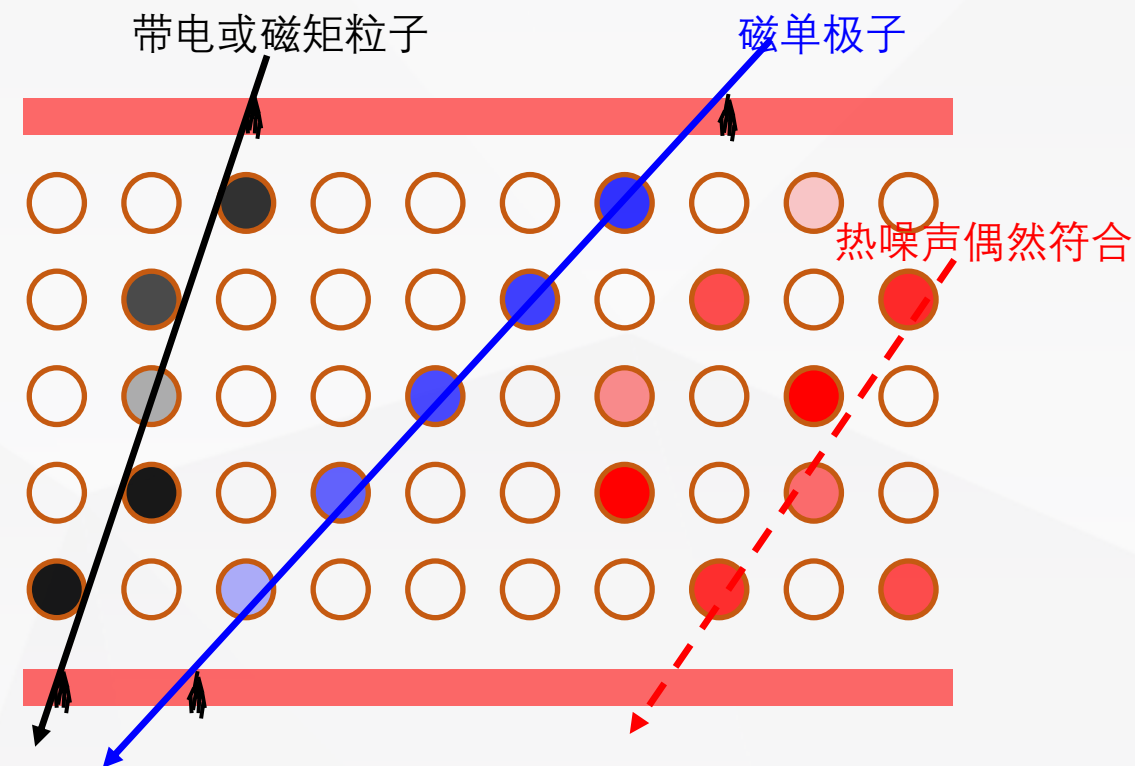
**一、粒子探测器的目标**

**二、粒子探测器研究进展**

**三、后续计划**

## 1.1 粒子探测器优化的内容

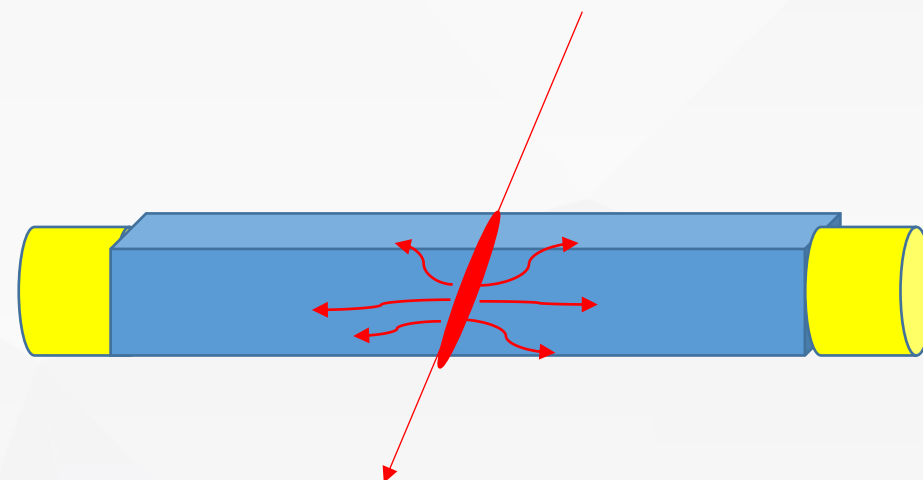
- 粒子鉴别能力，优化探测器的性能参数
  - 能量分辨率
  - 位置分辨率
  - 时间分辨率
- 空间中粒子本底高，需要优化结构
  - 不同粒子的分辨能力
  - 偶然符合概率



### 2.1 探测方案1：PMT读出

#### ➤ 方案概述

- 长条塑料闪烁体作为探测灵敏材料，四周贴上反射膜
- 两端用PMT作为光灵敏器件
- 粒子→电离→闪烁光→PMT



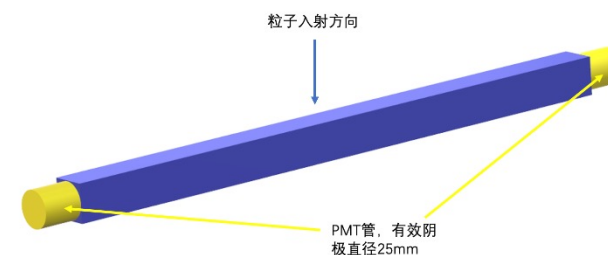
## 二、粒子探测器的研究进展

### 2.1.1 MC模拟

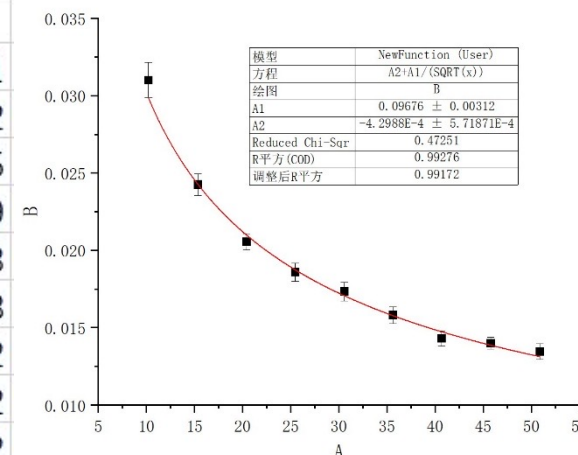
- 磁单极子建模：geant4提供的模版
- 探测器建模：长方体，PMT探测光
- 光学过程模拟
- 入射粒子： $\mu^-$
- 模拟结果
  - 能量沉积：5-6 MeV
  - 光产额： $\sim 340$  (考虑20%量子效率后 $\sim 70$ )
  - 能量分辨： $\sim 30\%$

PS仿真模拟

|        |                  |
|--------|------------------|
| 尺寸     | 25mm*25mm*1000mm |
| 光产额    | 9000/MeV         |
| 衰减常数   | 2.1ns            |
| 反射层反射率 | 0.9              |



| 能量沉积     | 能量分辨率    | 误差       |
|----------|----------|----------|
| 10.21831 | 0.031    | 0.001151 |
| 15.36317 | 0.024252 | 0.000692 |
| 20.40137 | 0.020551 | 0.000515 |
| 25.46799 | 0.018589 | 0.000579 |
| 30.57238 | 0.017336 | 0.000593 |
| 35.63    | 0.015817 | 0.000548 |
| 40.68763 | 0.014313 | 0.000492 |
| 45.8082  | 0.013995 | 0.000382 |
| 50.88561 | 0.013464 | 0.000512 |

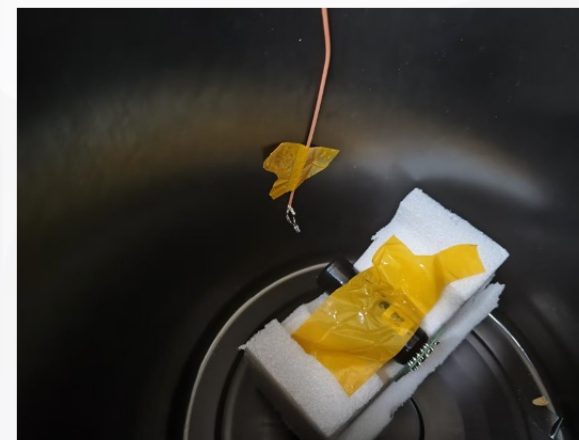
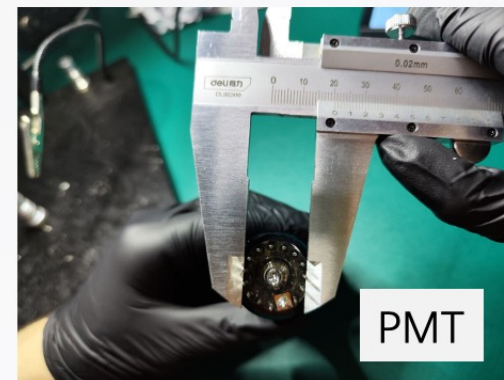


考虑到PMT的量子效率约为20%，  
实际数值会增大为该结果的 $\sqrt{5}$ 倍。

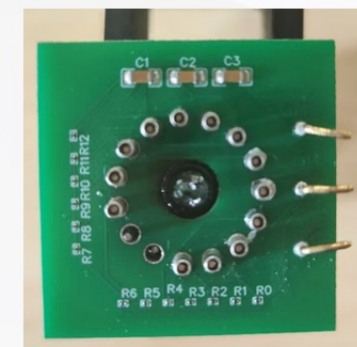
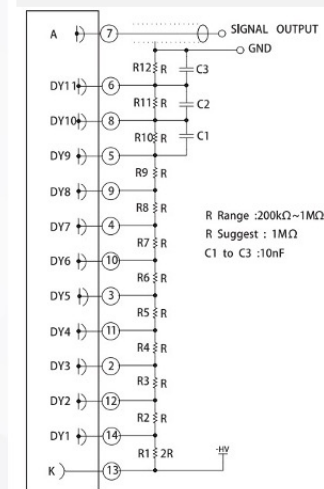
## 二、粒子探测器的研究进展

### 2.1.2 元器件测试

- 光敏感器件测试：光电倍增管PMT
  - PMT分压电路设计
  - LED产生信号：工作电压：1.215V；  
脉冲宽度：20ns
  - PMT设置不同电压，研究电光电子增益



#### PMT分压电路设计



## 二、粒子探测器的研究进展

### 2.1.2 元器件测试

#### ➤ 光电倍增管测试

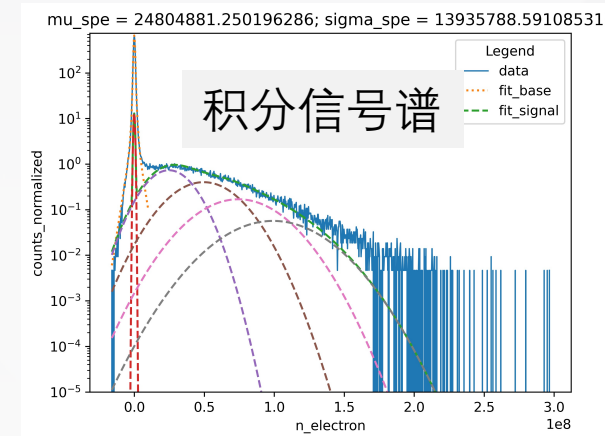
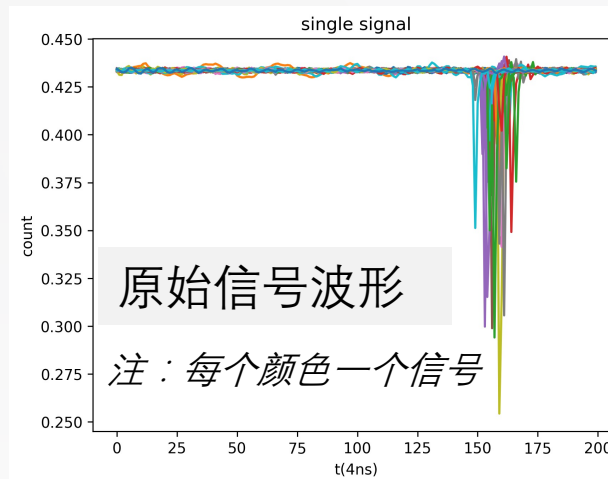
- 明显信号峰
- 对信号峰积分得到每个峰的面积 $S$ ，换算可得到电子数

$$n_e = \frac{S * time_{interval}}{R * e}$$

- 拟合提取多光电子峰，得到增益

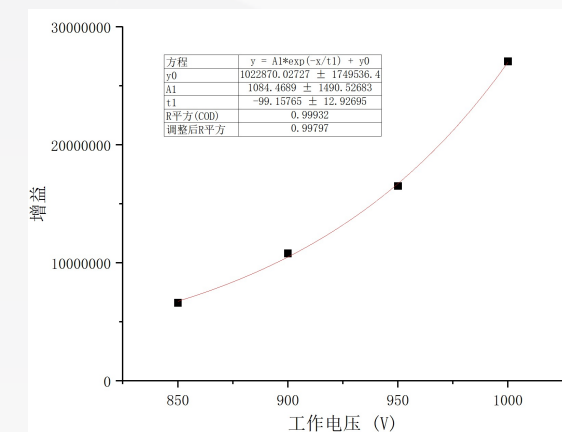
$$y = A \sum_{k=0}^{k_{max}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} * \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!} + \sum_{i=1}^2 B_i e^{-c_i|x|}$$

- 增益结果：增益随工作电压变化



| 工作电压 | gain     |
|------|----------|
| 850  | 6614703  |
| 900  | 10811505 |
| 950  | 16513059 |
| 1000 | 27077834 |

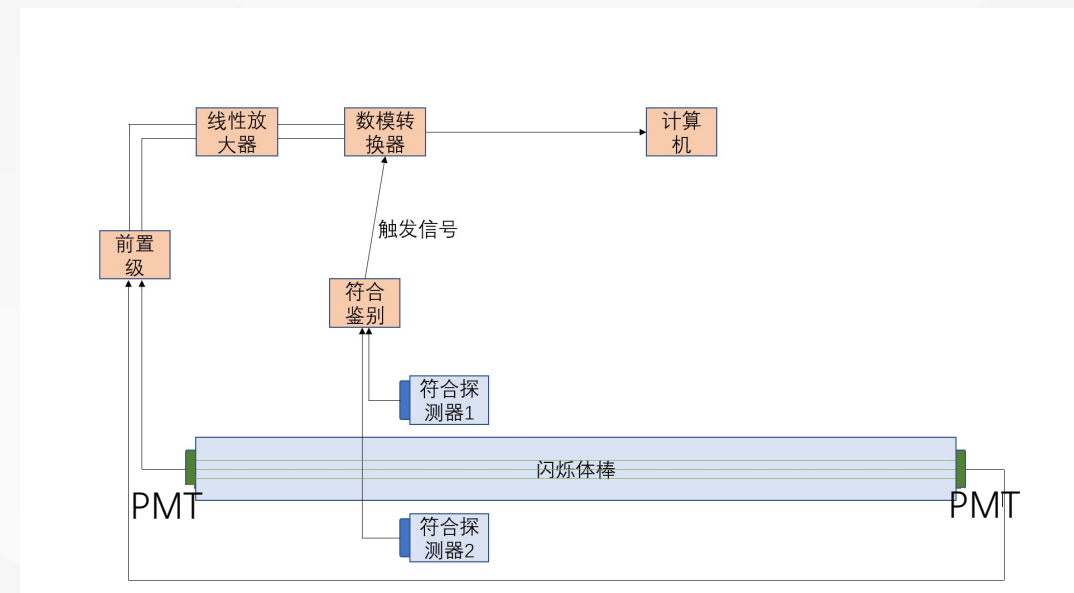
增益随工作电压的变化



### 2.1.3 探测单元测试

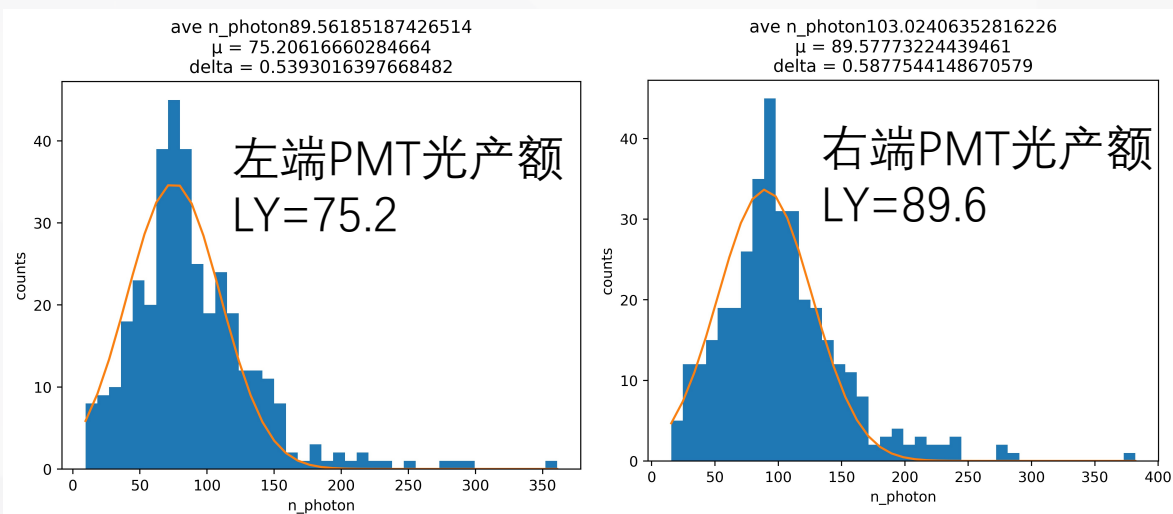
#### ➤ 宇宙线测试

- 宇宙线 $\mu$ 子作为信号源
- 上下布置两块小闪烁体作为准直和触发信号
- 准直的小闪烁体移动位置，测试宇宙线击中不同位置的信号响应情况



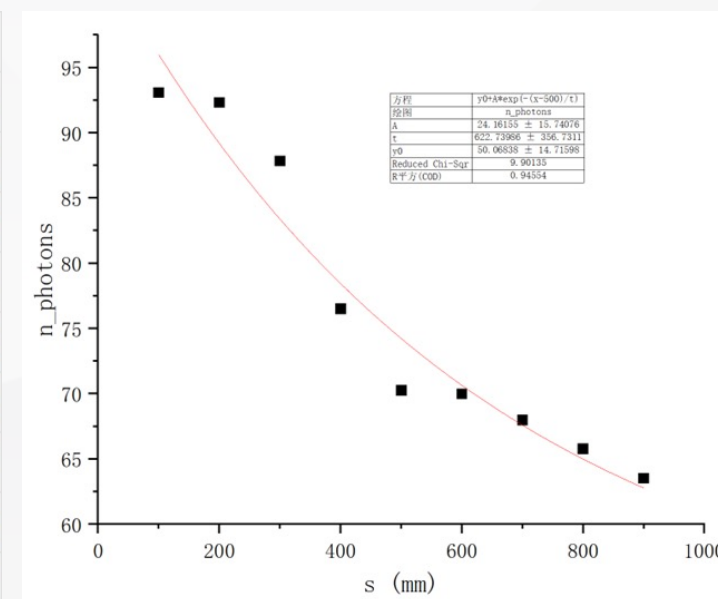
## 二、粒子探测器的研究进展

### 2.1.3 探测单元测试



左右PMT不对称，PMT量子效率不同  
量子效率的比值为  $Q2:Q1 = 1.19 \pm 0.01$

| s(mm) | 光子数   |
|-------|-------|
| 100   | 93.07 |
| 200   | 92.32 |
| 300   | 87.83 |
| 400   | 76.51 |
| 500   | 70.26 |
| 600   | 69.99 |
| 700   | 67.97 |
| 800   | 65.78 |
| 900   | 63.51 |



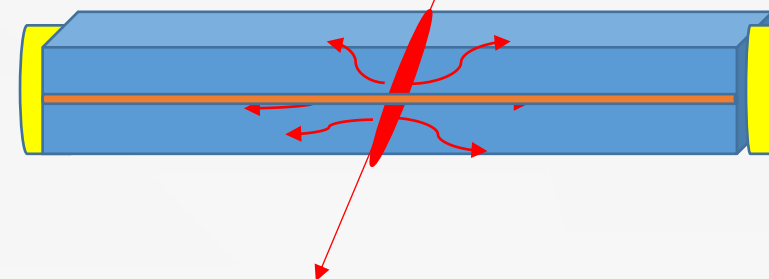
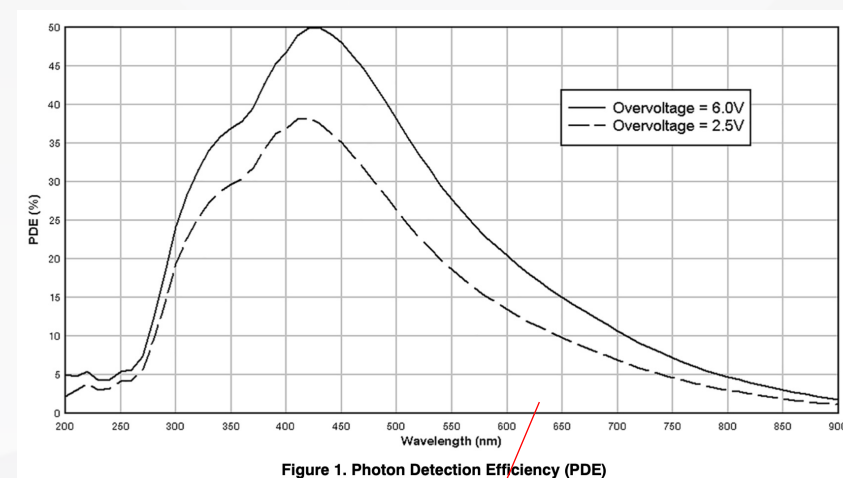
光子数与粒子入射位置的关系

测试得到的光产额与模拟结果基本一致，分辨率比模拟差

### 2.2 探测方案2：光纤+SiPM读出

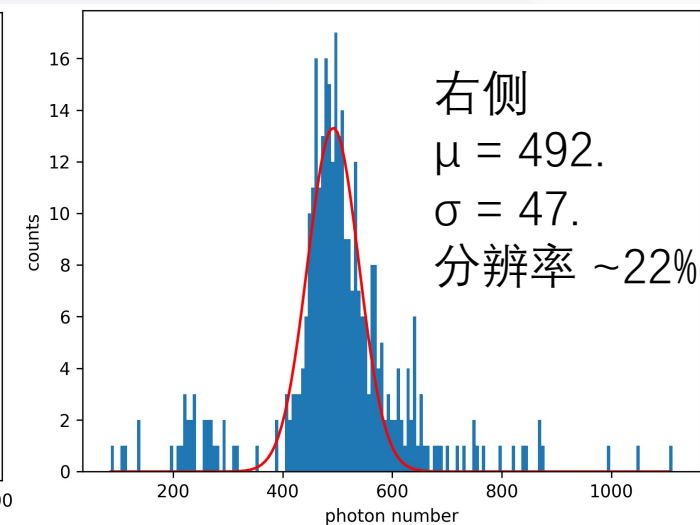
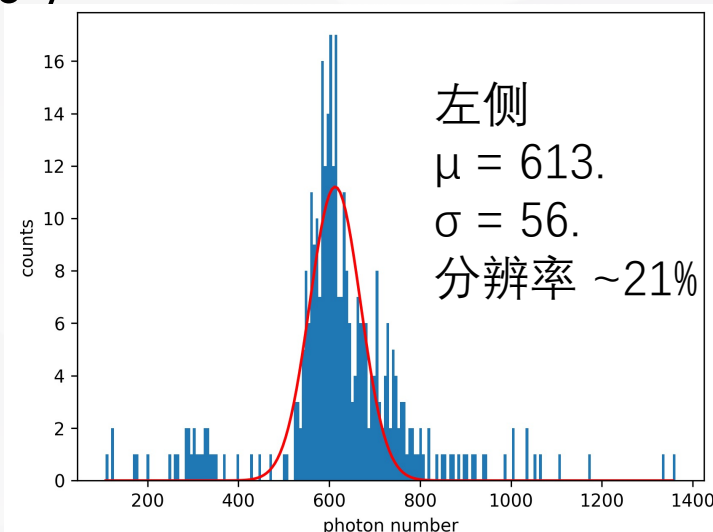
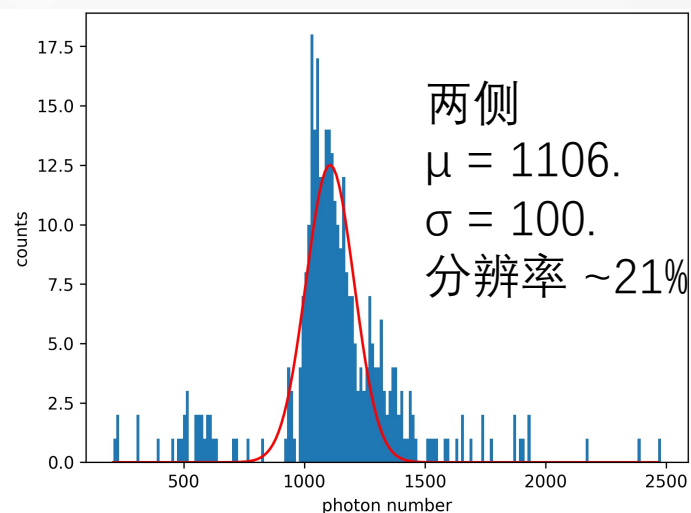
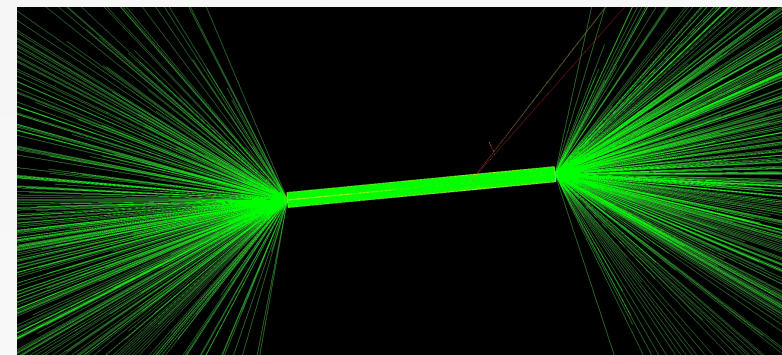
#### ➤ 方案概述

- SiPM相比PMT有更高的量子效率 ( 50% vs 20% ) 和能量分辨率
- 与方案1相比，采用SiPM作为光灵敏器件替代PMT，塑闪中埋入光纤提升光传播效率和匹配SiPM的灵敏波长
- 粒子→电离→闪烁光→SiPM  
+ 粒子→电离→闪烁光→光纤→SiPM



### 2.2.1 MC模拟

- 与PMT模拟采用相同程序
- 替换晶体为带光纤晶体，感光器件为SiPM
- 模拟结果
  - 光产额： $\sim 500-600$ （未考虑SiPM量子效率，50%量子效率假设下为 $\sim 250-300$ ）



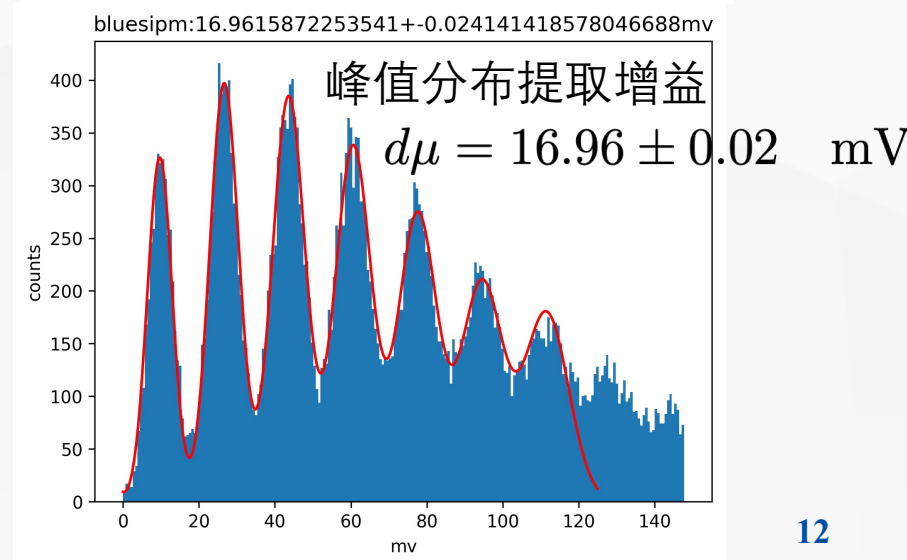
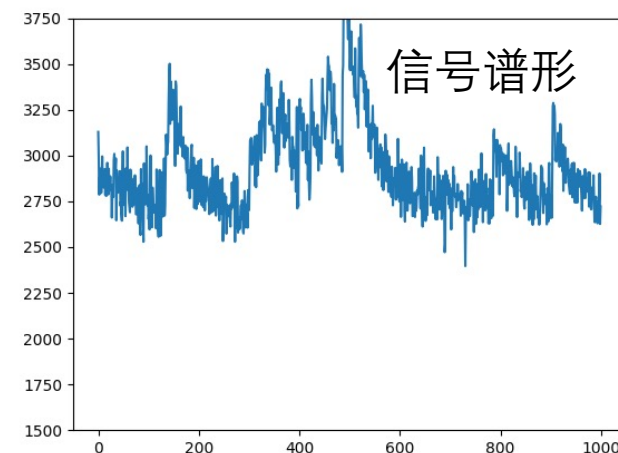
### 2.2.2 元器件测试

#### ➤ SiPM测试

- 原始信号谱形，能分辨出信号，但暗噪声较大
- 挑选基线波动小的信号，利用峰值提取信号
- 多高斯拟合，提取增益

$$\sum_{i=0}^n A_i \cdot e^{-\frac{(x-\mu_i)^2}{2\sigma_i^2}}$$
$$\mu_i = \mu_0 + i \cdot d\mu$$
$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_0^2 + i \cdot d\sigma^2}$$

LED测试



### 2.2.2 探测单元测试

- 测试装置与PMT测试类似
- 闪烁体中心埋入一根光纤
- 宇宙线 $\mu$ 子作为信号源
- 上下布置两块小闪烁体作为准直和触发信号
- 准直的小闪烁体移动位置，测试宇宙线击中不同位置的信号响应情况

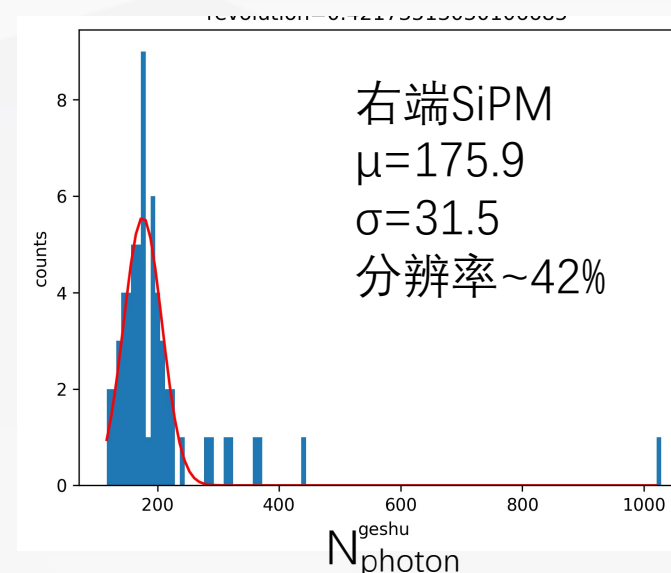
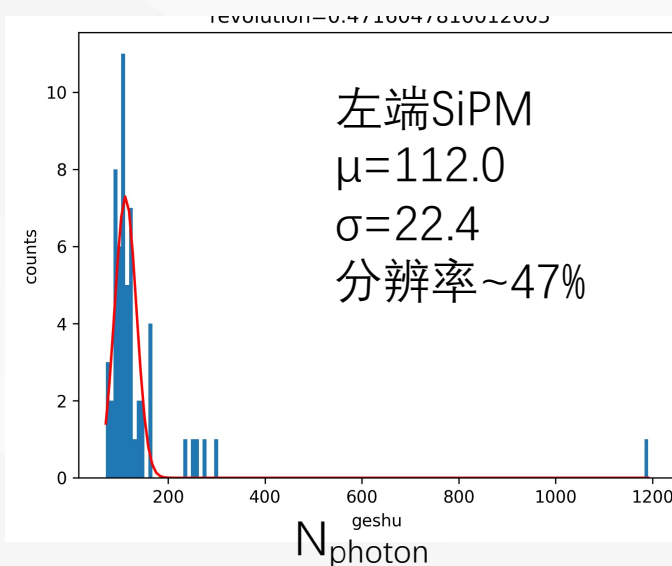
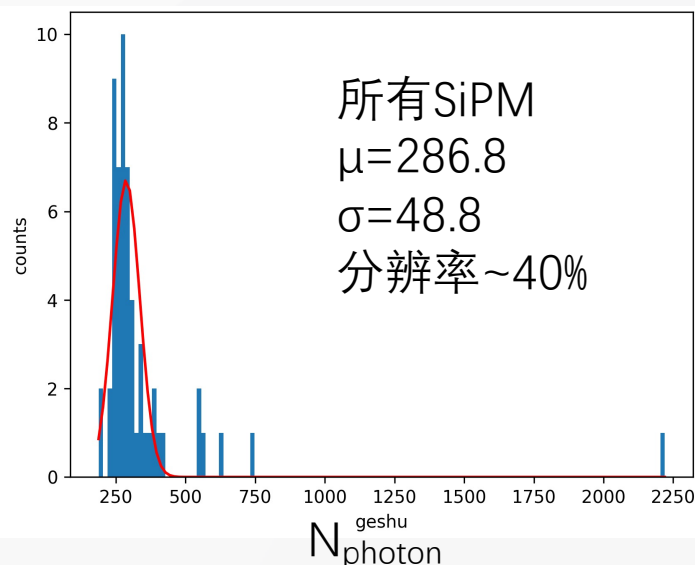
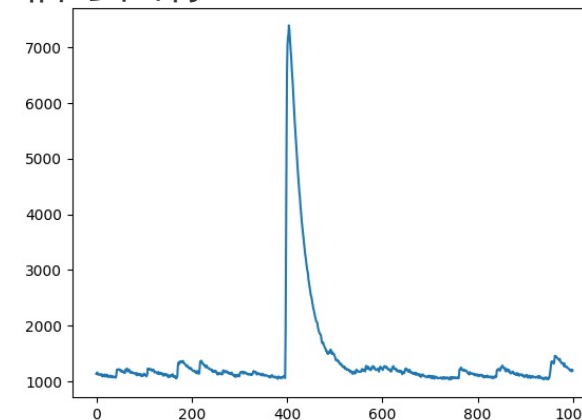
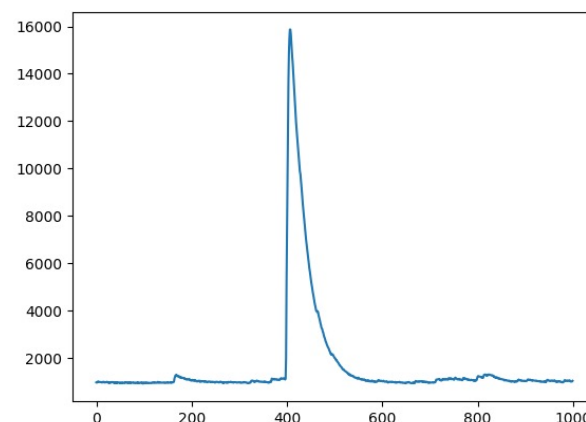


### 2.2.2 探测单元测试

#### ➤ 测试结果

- 可以观察到明显的信号
- 光产额，能量分辨

左右SiPM采集信号图像



## 二、粒子探测器的研究进展

### 2.3 两种探测方案结果对比

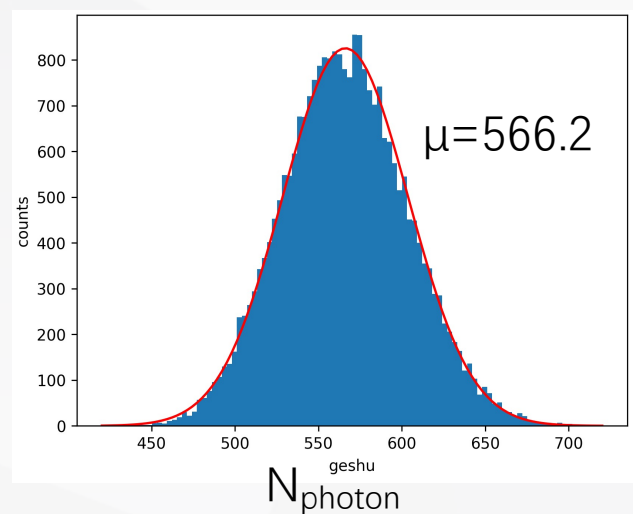
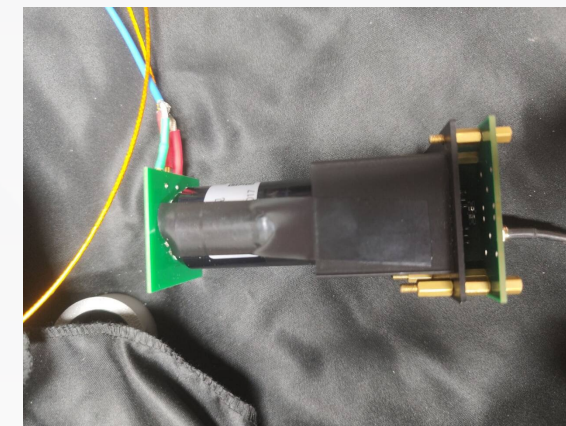
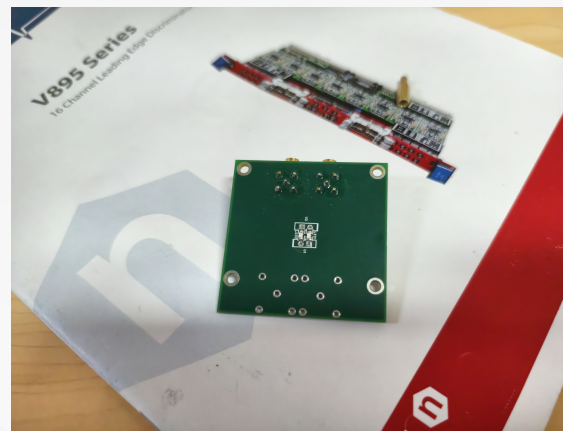
#### ➤ 量子效率对比

- LED光源测试
- 蓝光测试结果

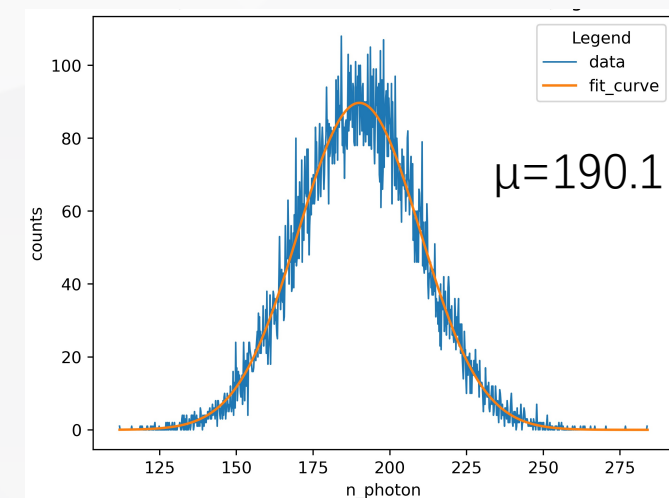
SiPM : PMT = 2.97

- 绿光测试结果

SiPM : PMT = 3.83



蓝光，SiPM测试结果



蓝光，PMT测试结果

### 2.3 两种探测方案结果对比

#### ➤ 光产额对比

- 无光纤晶体测试
- 有效接收面积

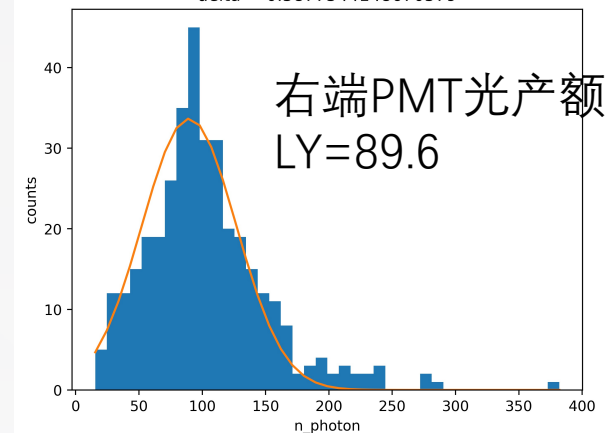
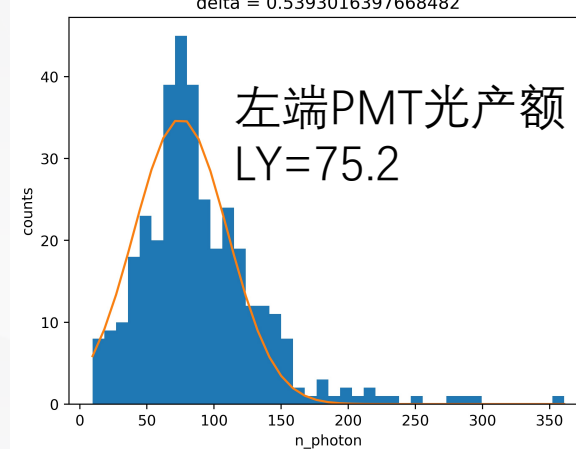
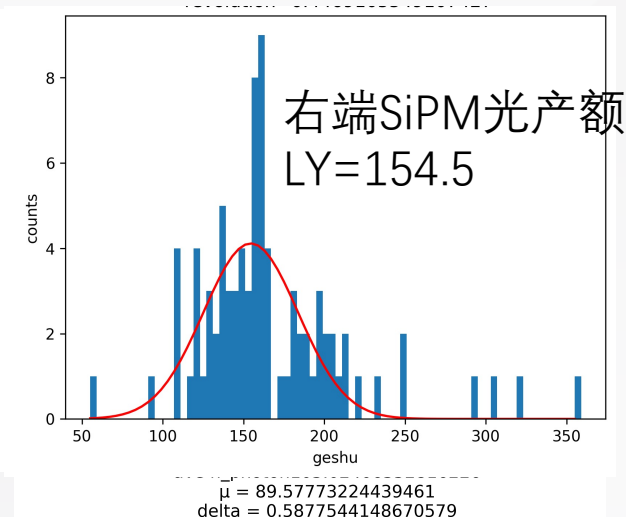
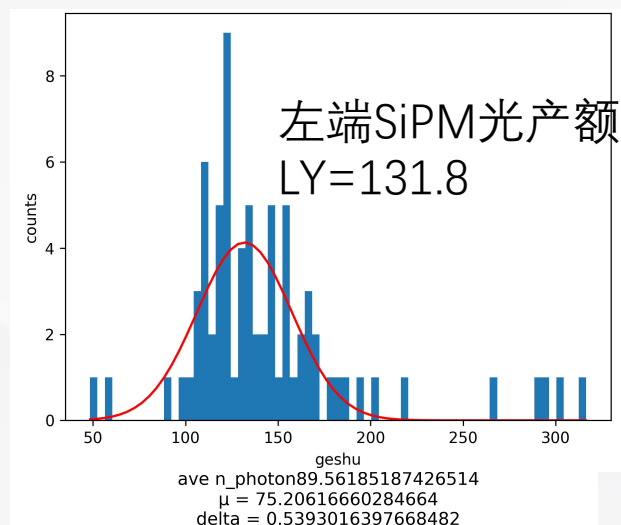
$$\text{SiPM} : \text{PMT} = (6 \times 6) : (8 \times 8) = 36:64$$

- 单位面积光产额之比

左端, SiPM : PMT = 3.11

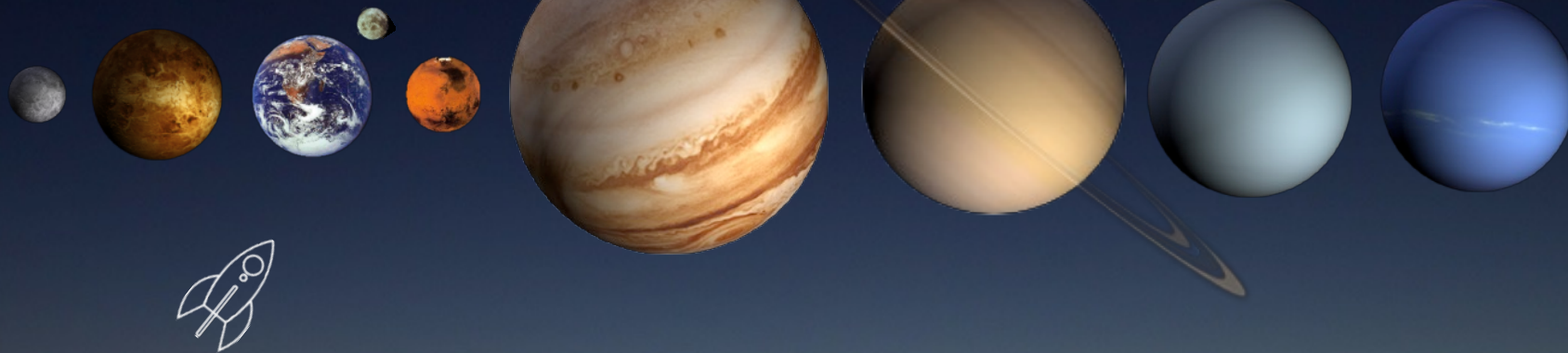
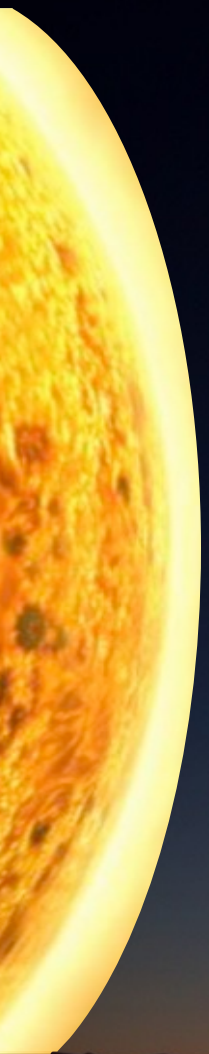
右侧, SiPM : PMT = 3.06

测试结果, SiPM与PMT光产额之比与LED测试基本一致



1. 进一步对PMT和SiPM开展更多测试，并对结果进行研究，理解测试结果与理论预期的差异
2. 模拟里考虑更多实验上元件的差异性，在模拟里重现实验结果，加深对实验的理解
3. 原理测试到样机搭建的推进

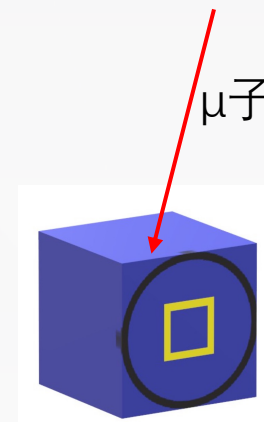
# 谢谢



### 3.1.1 MC模拟

#### ➤ 小方块晶体模拟

- 小块晶体尺寸：2.5\*2.5\*2.5 cm<sup>3</sup>
- 粒子：宇宙线 $\mu$ 子 GeV
- 设置晶体表面光学属性，研究信号幅度和能量分辨率



| 反射率 | 输出端面的遮罩情况 | light yeild | 能量分辨率系数 |
|-----|-----------|-------------|---------|
| 70  | 不反射       | 96.1        | 0.27822 |
| 80  | 不反射       | 115.6       | 0.24051 |
| 90  | 不反射       | 144.8       | 0.22853 |
| 95  | 不反射       | 166.7       | 0.21165 |
| 90  | 遮罩为反射面    | 274.3       | 0.13495 |
| 90  | 不设置遮罩     | 960.4       | 0.06671 |

# ■ 三、粒子探测器的研究进展

## 3.1.2 元器件测试

### ➤ 晶体测试

- 小块晶体尺寸： $2.5 \times 2.5 \times 2.5 \text{ cm}^3$
- 信号源：宇宙线 $\mu$ 子
- 小块晶体测试
  - 信号大小：76 ph/ $\mu$ 子
  - 信号数：6.98个/min
- 叠加测试：两块晶体互触发
  - 信号数：事例率1.55个/min  
vs 估计值1.81个/min
  - 两块晶体信号大小比值 $\sim 1.31$

