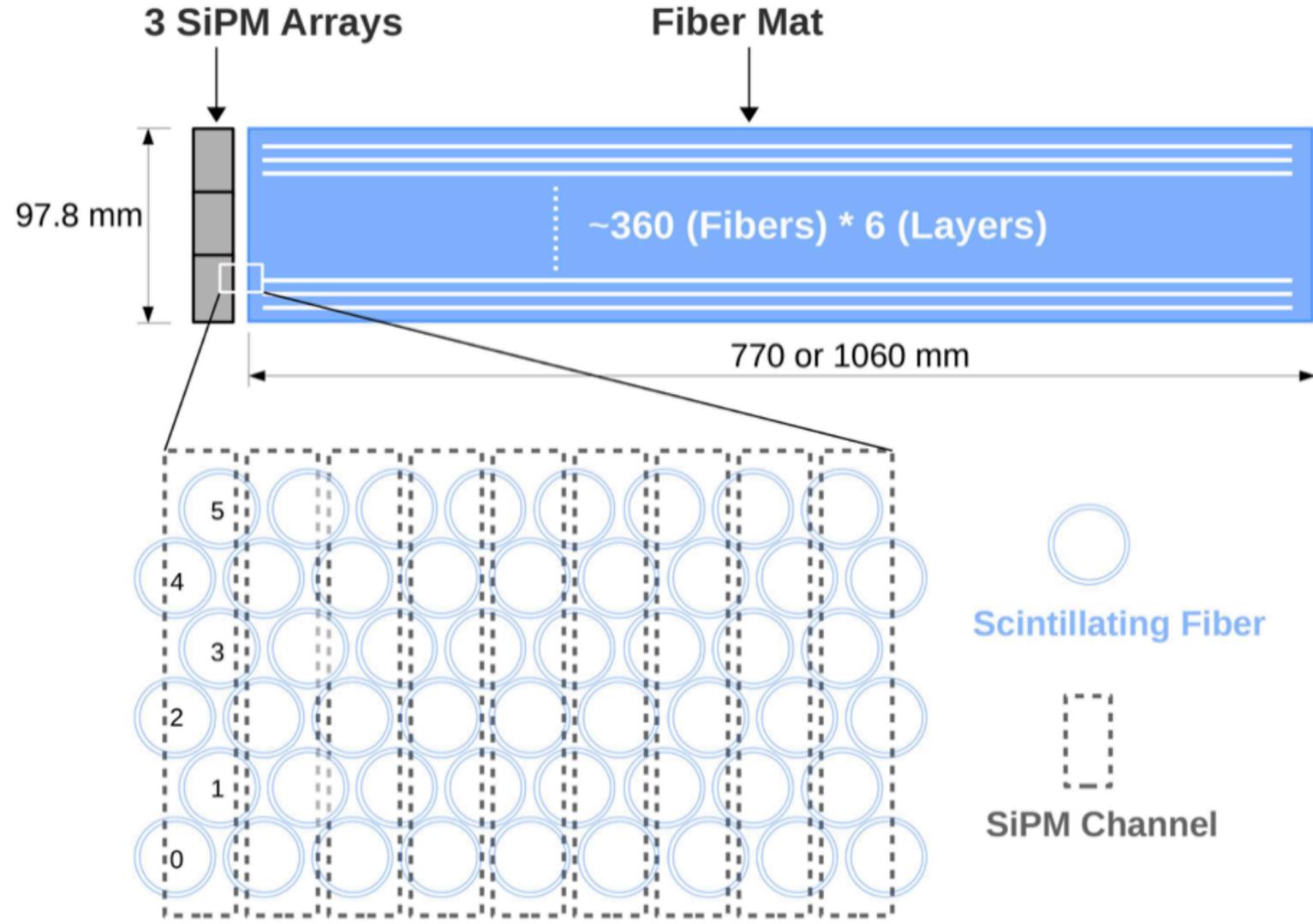


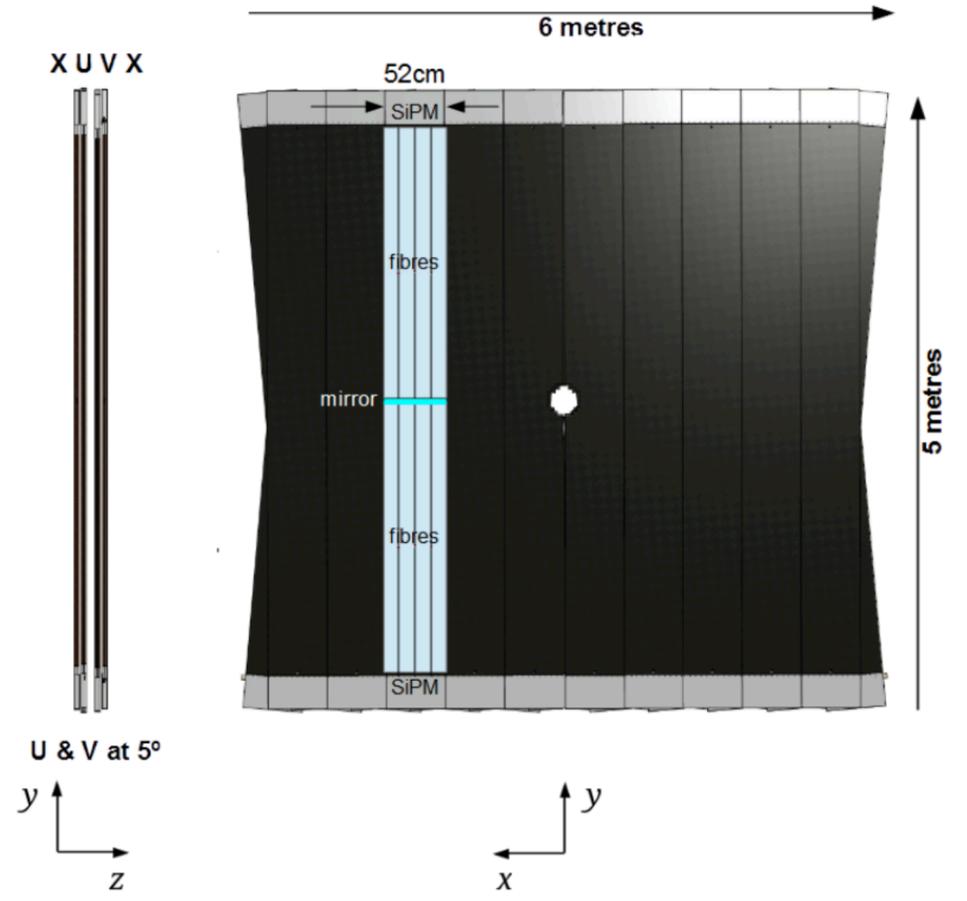
# 基于SiPM读出的塑料闪烁光纤探测器的 精细光学响应模型

李益玥 山东大学

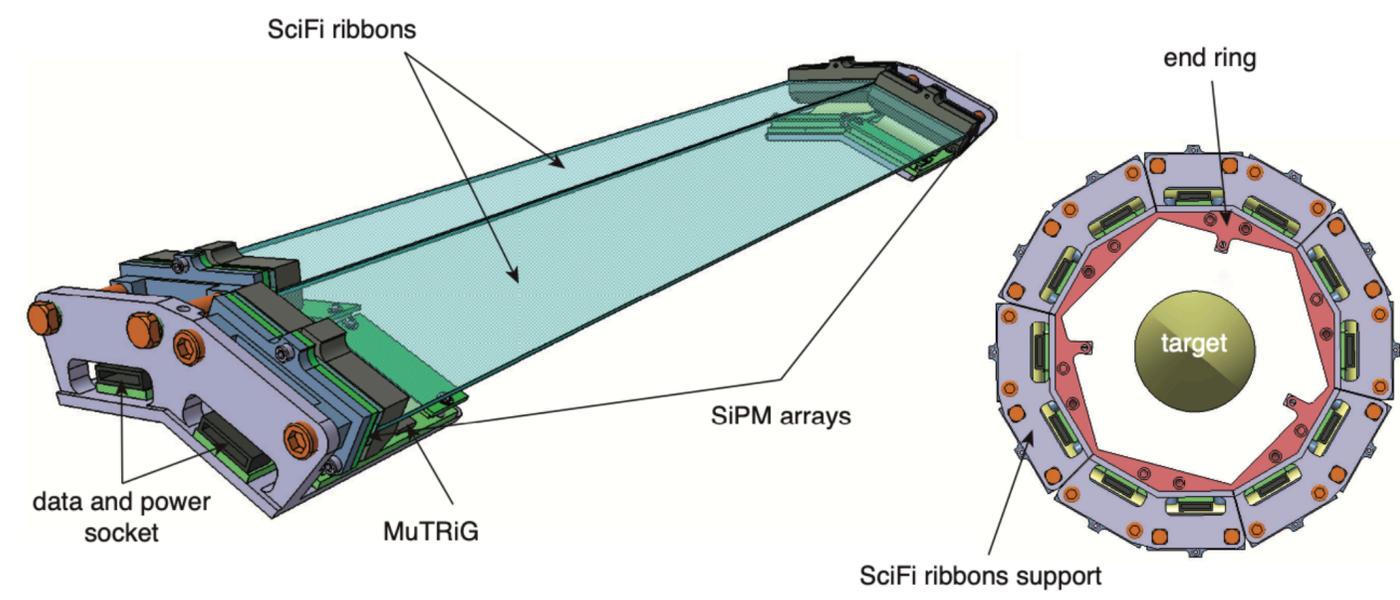
2023年8月10日 湖北恩施



A fiber mat of HERD FIT detector



Schematic view of the upgraded LHCb detector



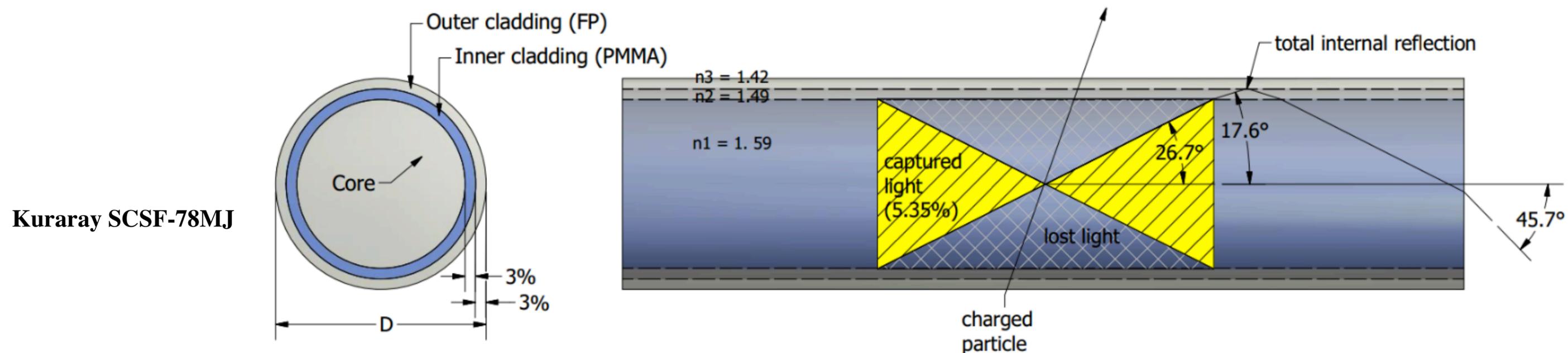
A submodule of the Mu3e SciFi detector

# 闪烁光纤

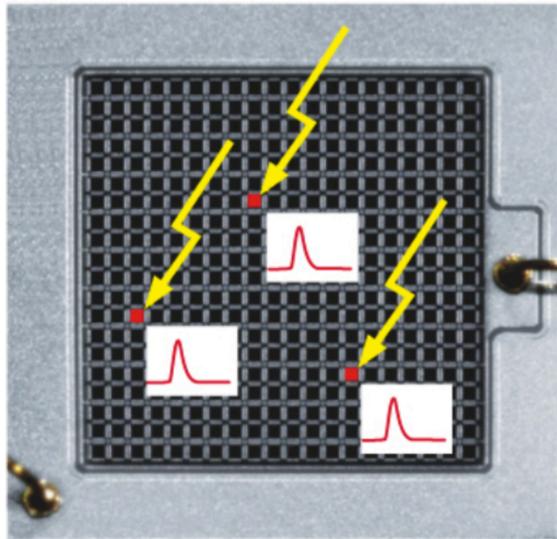
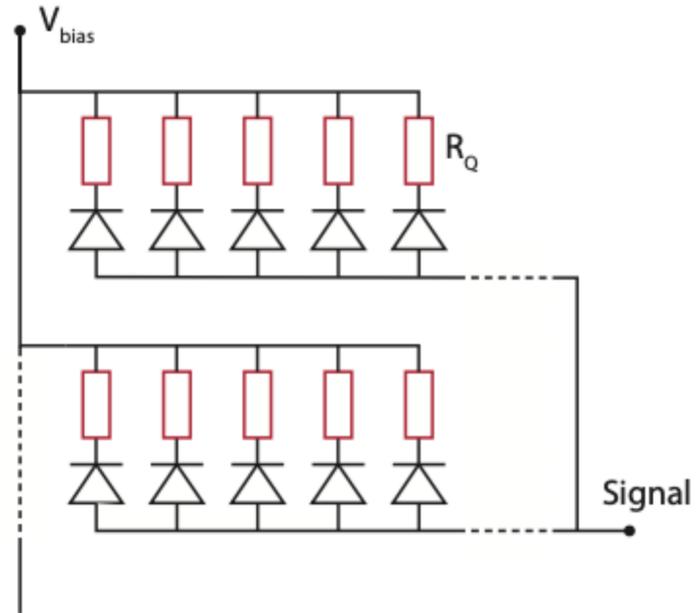
塑料闪烁光纤是一种兼具粒子探测和光导功能的特殊光纤，被广泛用于高能物理实验和辐射测量领域。

闪烁光纤具有以下几个优点：

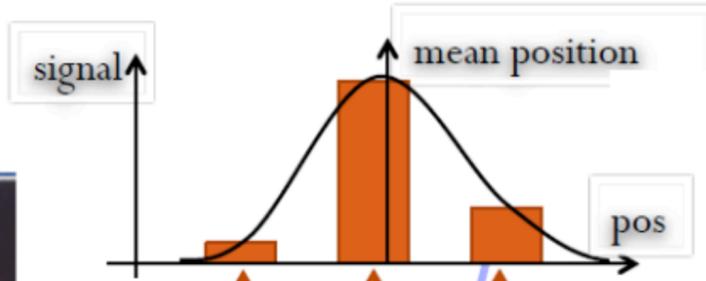
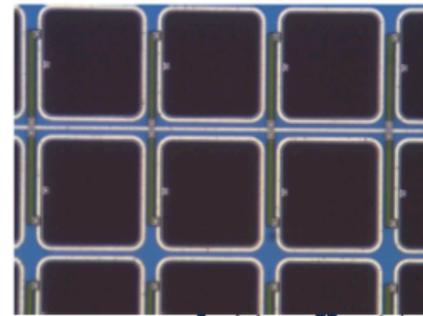
- 1、高的颗粒度：用于位置测量和成像，能够实现良好的空间分辨率。
- 2、快速响应：闪烁光纤具有快速的响应时间，适用于高计数率的场合工作。
- 3、衰减长度大且有一定柔性：可以灵活制成多种形状、尺寸的探测器阵列。
- 4、价格便宜：闪烁光纤的主要成分是塑料闪烁体，成本低廉，可以大面积使用。



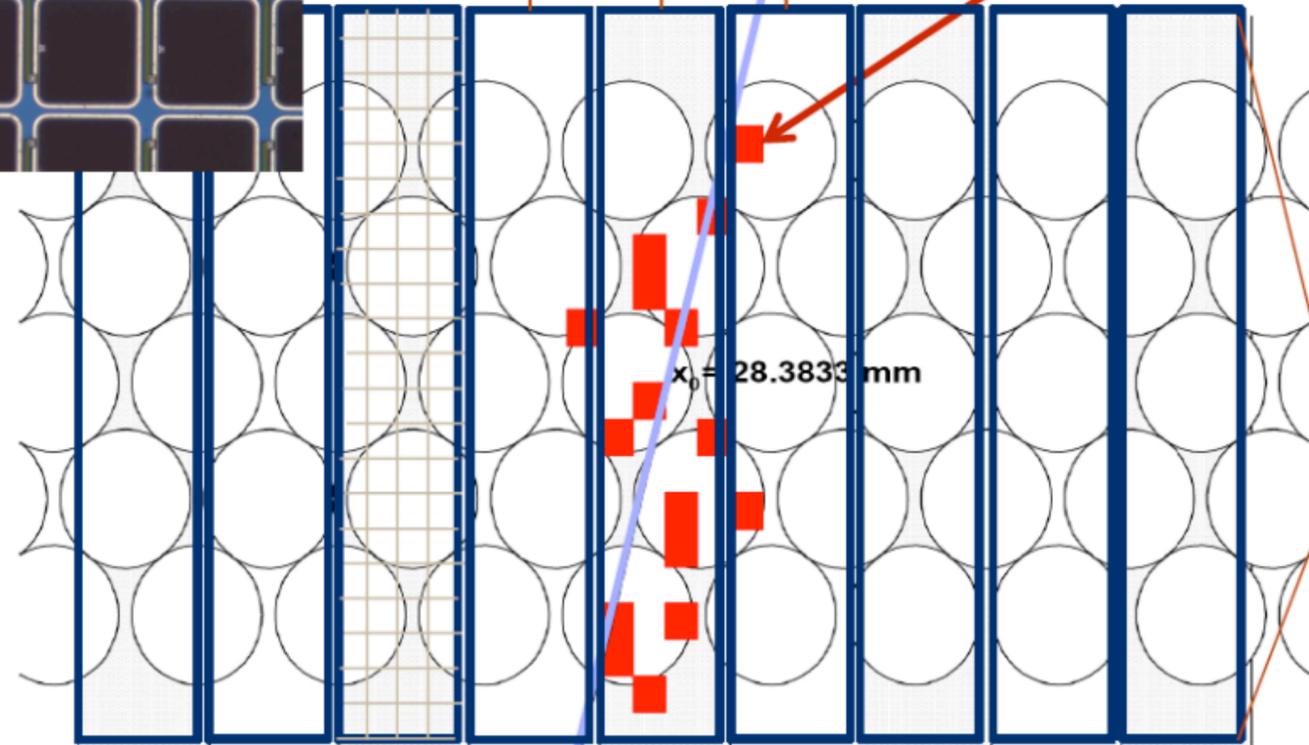
# 硅光电倍增器(SiPM)



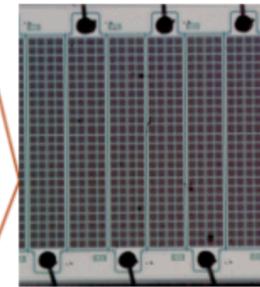
Pixel structure on on SiPM channel



Photons can create avalanche in a pixel (red squares)



Particle creates photons in fibers



Channel structure on SiPM chip

# 光学响应模型

## 一、光子的产生过程

- 闪烁发光过程
- 波长位移过程

## 二、光子的传输过程

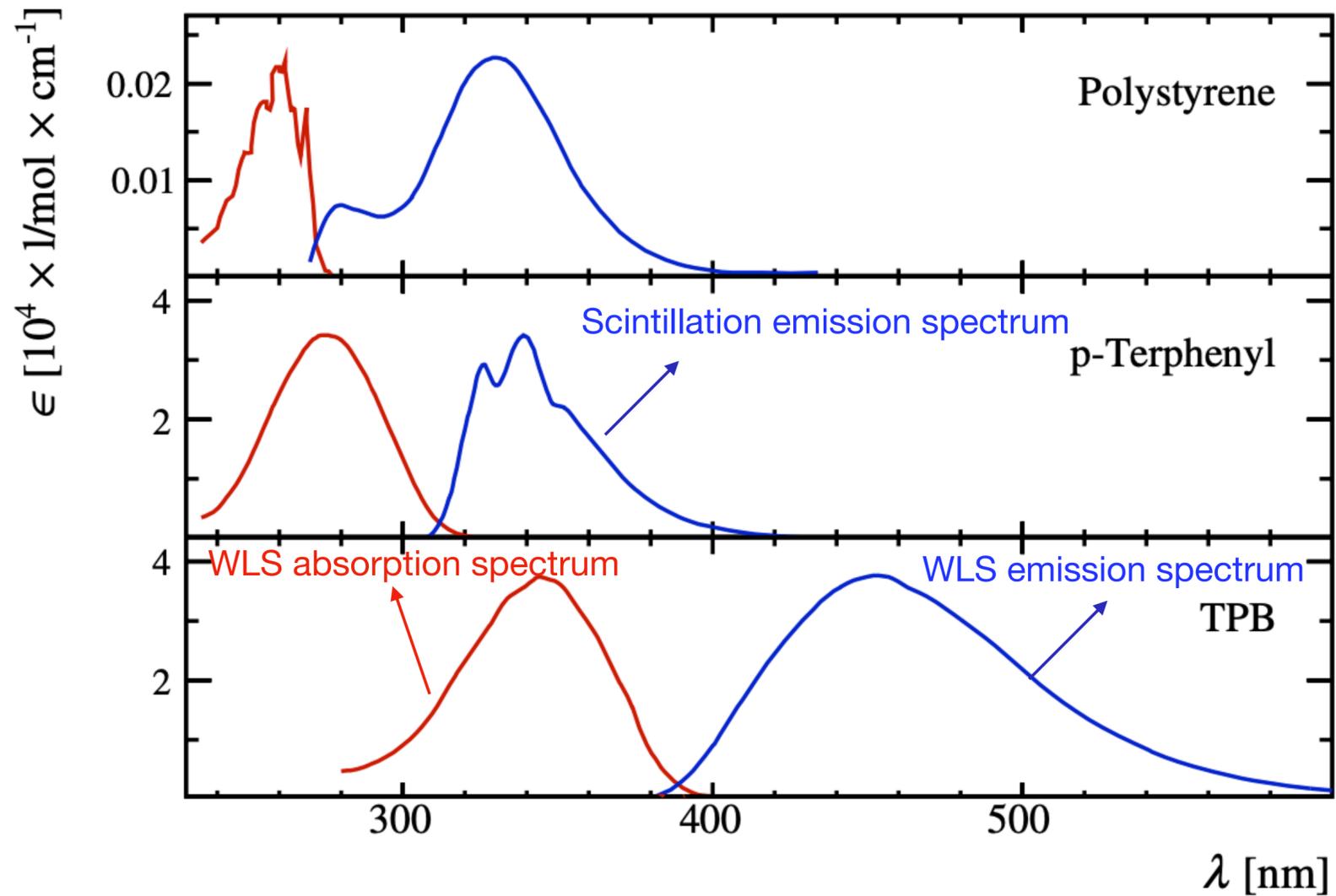
- 光导过程
- 传输衰减
- 光纤串扰

## 三、光子的探测过程

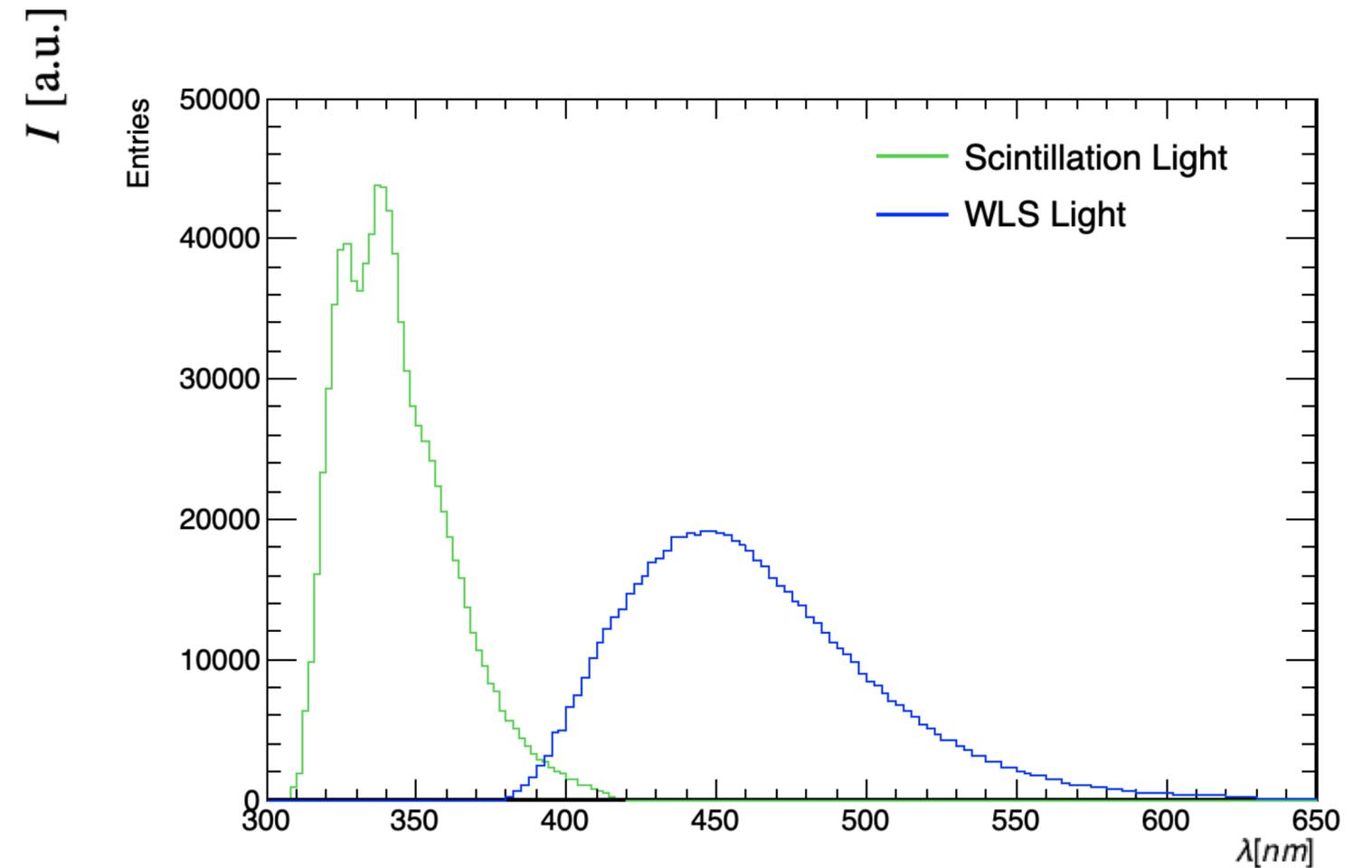
- 探测效率
- 饱和效应
- 暗计数率

# 光子的产生过程

## 闪烁发光过程 + 波长位移过程(Wavelength Shifting)

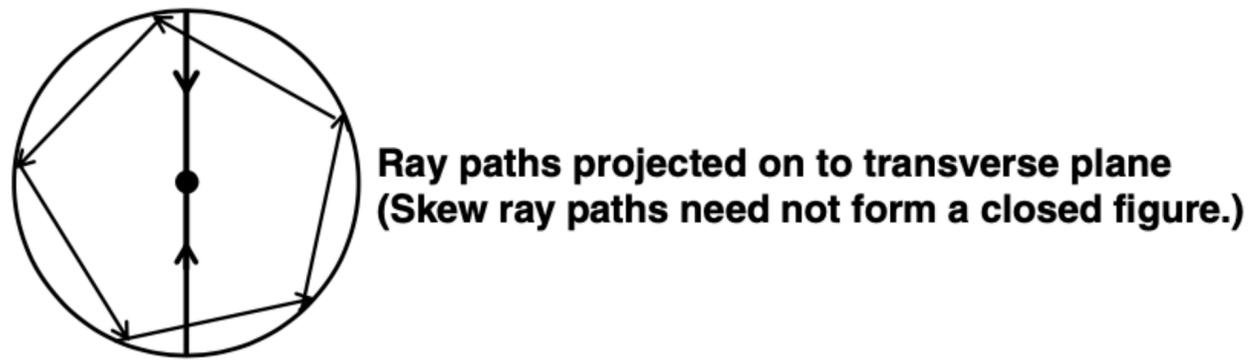
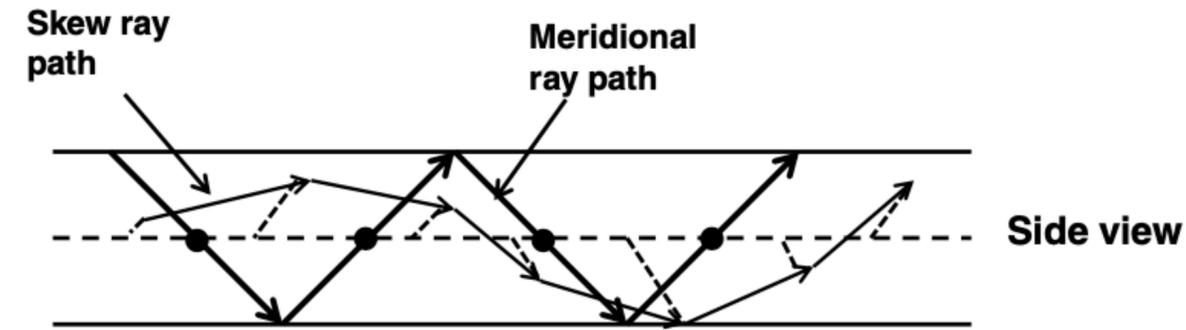


Absorption and emission spectra of compounds used in plastic scintillators

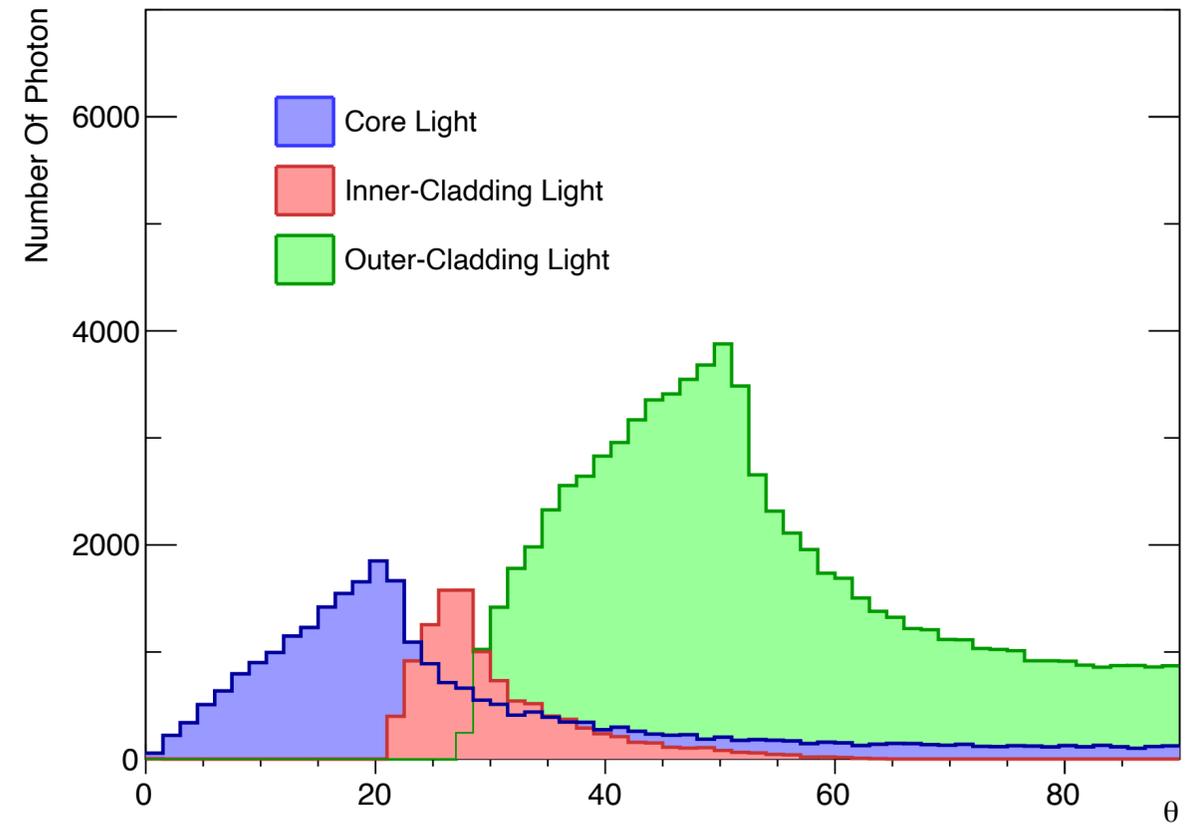
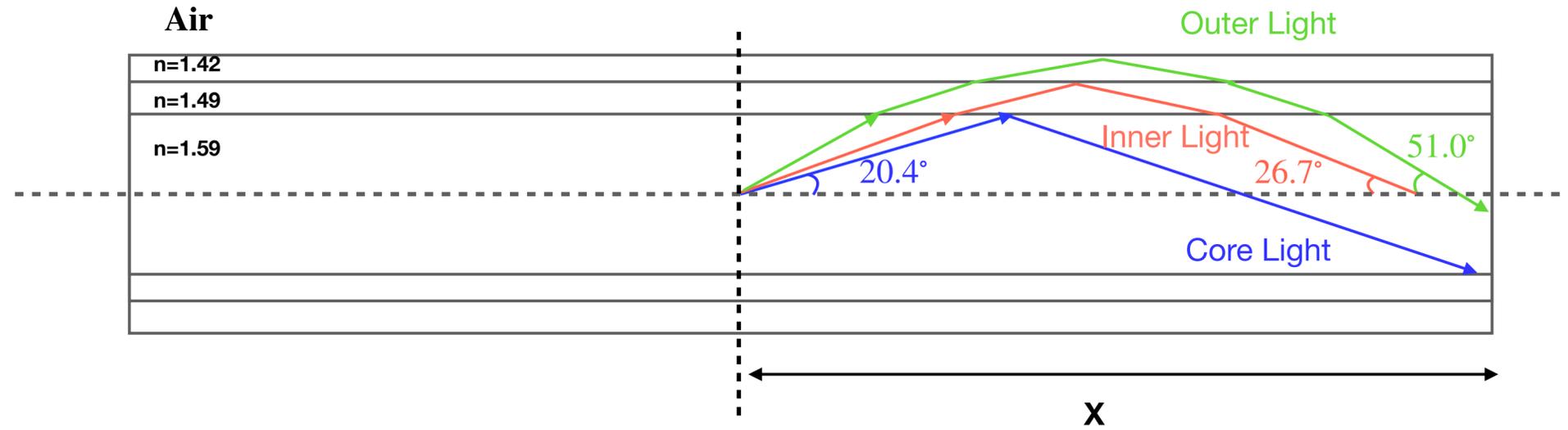


# 光子的传输过程

## 光导过程



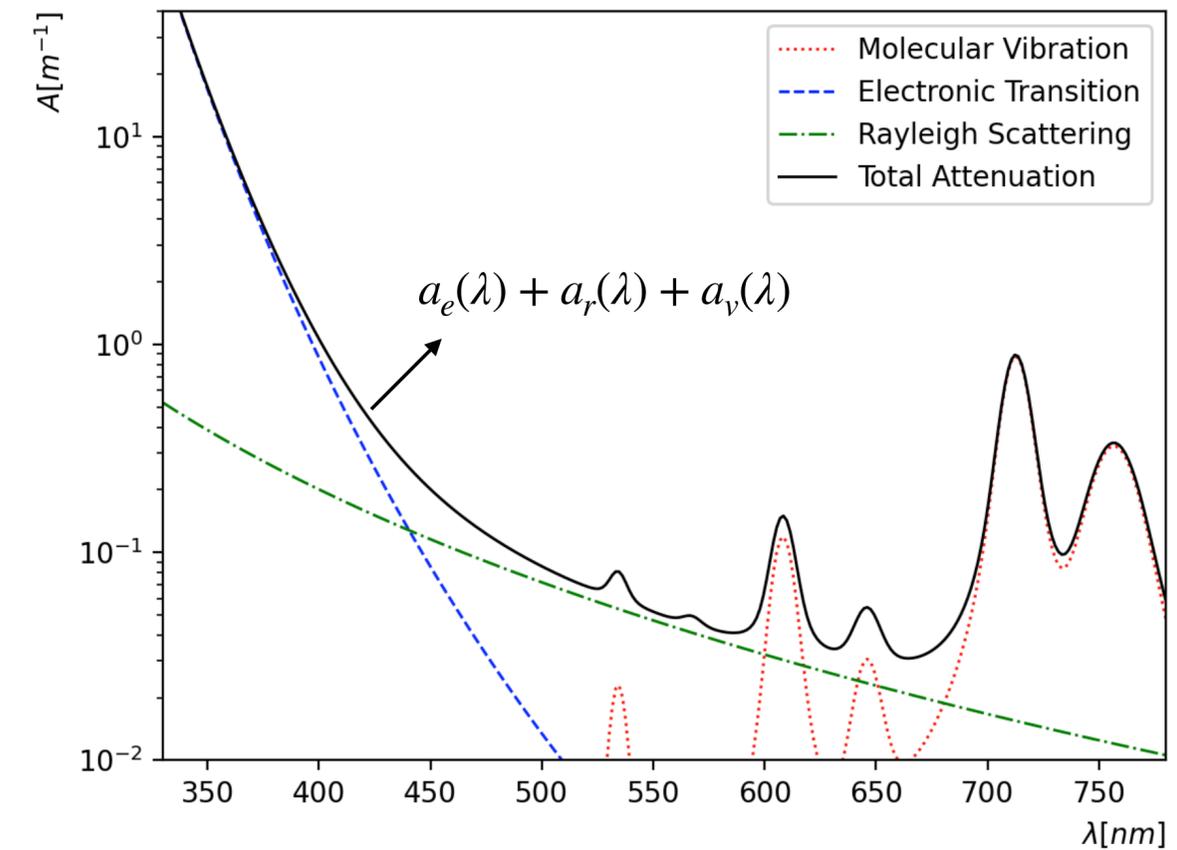
Trapping Efficiency : 5.4% (only meridional ray)



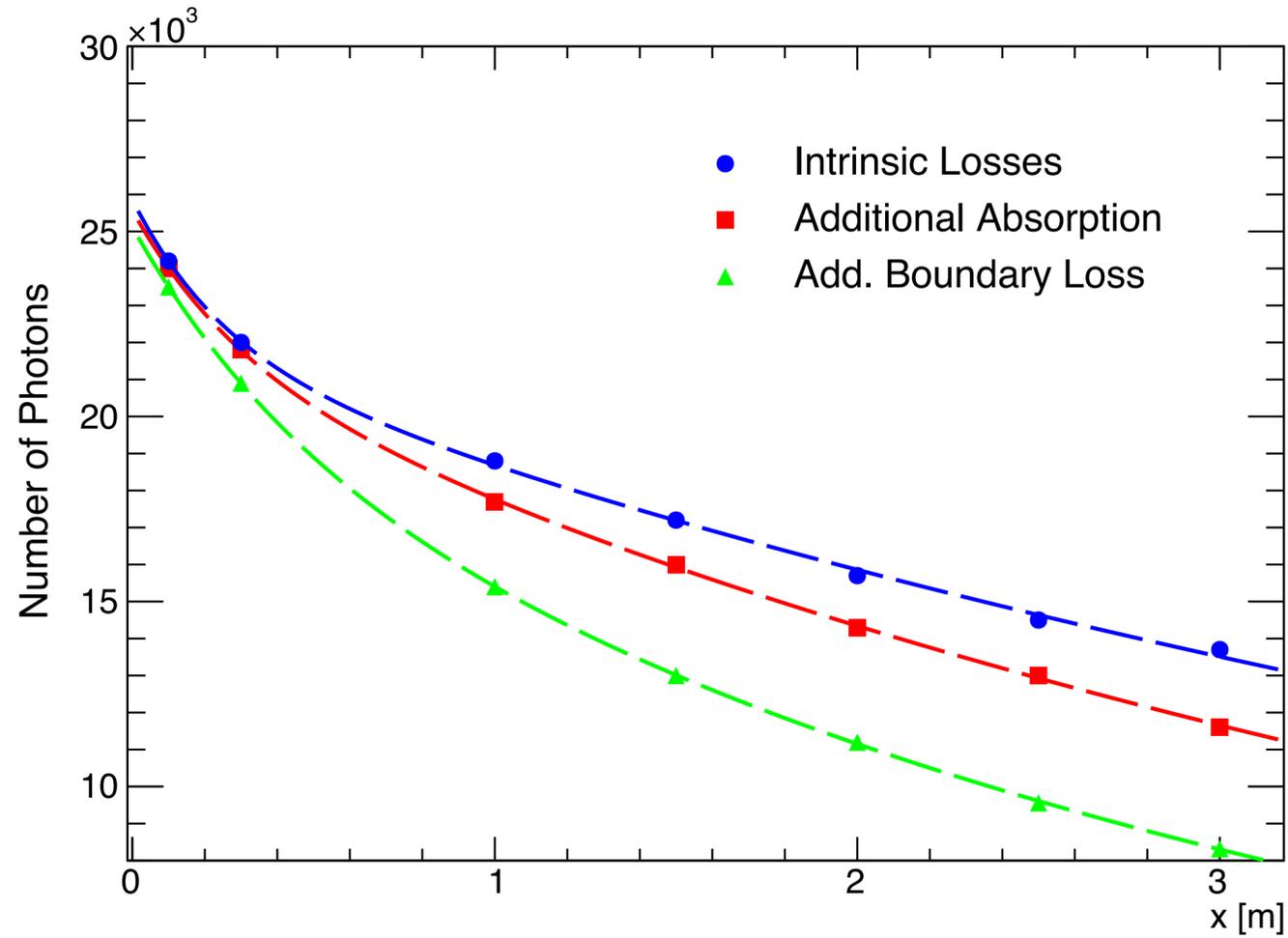
# 光子的传输过程

## 光衰减过程

Transmission Losses in Optical Fiber			Loss factor [ $m^{-1}$ ]
Intrinsic	Absorption	High harmonics of CH absorption	$a_v$
		Electronic transition	$a_e$
	Scattering	Rayleigh scattering	$a_r$
Extrinsic	Absorption	Transition metals	$a_{AA}$
		Organic contaminants	
	Absorbed water		
	Scattering	Dust and micro voids	
		Fluctuation of core diameter	
		Core-cladding boundary imperfections	



# 光子的传输过程



## 衰减长度

$$\varepsilon^{trans}(x) = F_S e^{-\frac{x}{\Lambda_{short}}} + (1 - F_S) e^{-\frac{x}{\Lambda_{long}}}$$

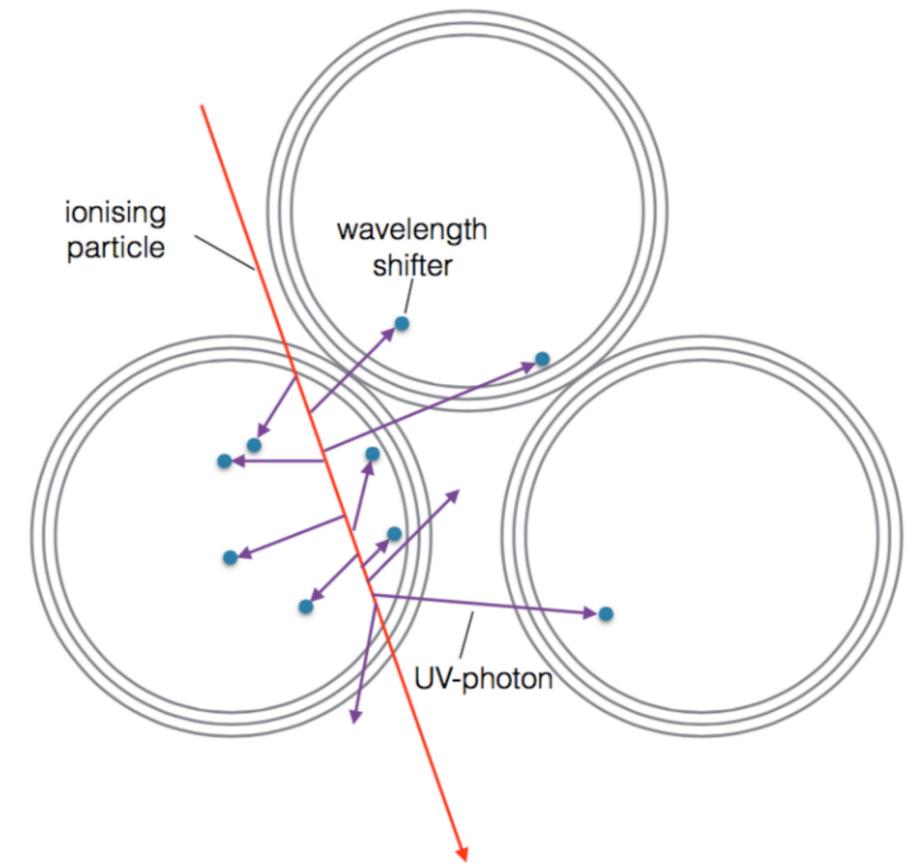
Transmission Losses	Loss factors	$N_0 [10^4]$	$F_S$	$\Lambda_{short} [m]$	$\Lambda_{long} [m]$
intrinsic	$a_v(\lambda) + a_e(\lambda) + a_r(\lambda) + a_{e,2nd}$	$2.59 \pm 0.06$	$0.16 \pm 0.02$	$0.25 \pm 0.08$	$6.24 \pm 0.35$
additional absorption	$a_{AA} = 4.65 \cdot 10^{-2} [m^{-1}]$	$2.55 \pm 0.02$	$0.15 \pm 0.01$	$0.30 \pm 0.03$	$4.83 \pm 0.10$
additional boundary loss	$p_{BL} = 5 \cdot 10^{-5}$	$2.50 \pm 0.01$	$0.22 \pm 0.02$	$0.52 \pm 0.07$	$3.53 \pm 0.16$

# 光子的传输过程

## 光纤串扰

当带电粒子穿过光纤时，通过闪烁发光过程产生的紫外光子可能会被近邻光纤中移波剂吸收，从而造成光纤串扰。

- 光纤串扰的主要来源于紫外光子，这些光子被移波剂吸收重发射后，有一部分满足全反射条件而传导至光纤末端被光电探测器件探测；
- 对于可见光子，发生波长位移过程的概率很低，假设在传播过程中没有发生散射，那么它们在近邻光纤中同样不满足全反射条件，对探测信号贡献极小；



THESIS-Stephan Escher-2017-331

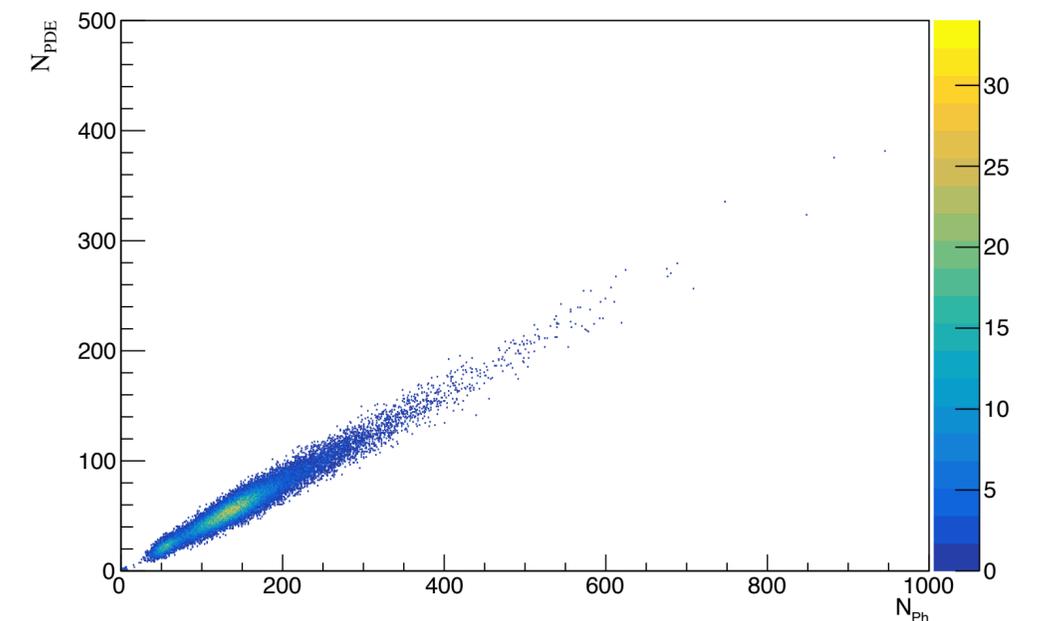
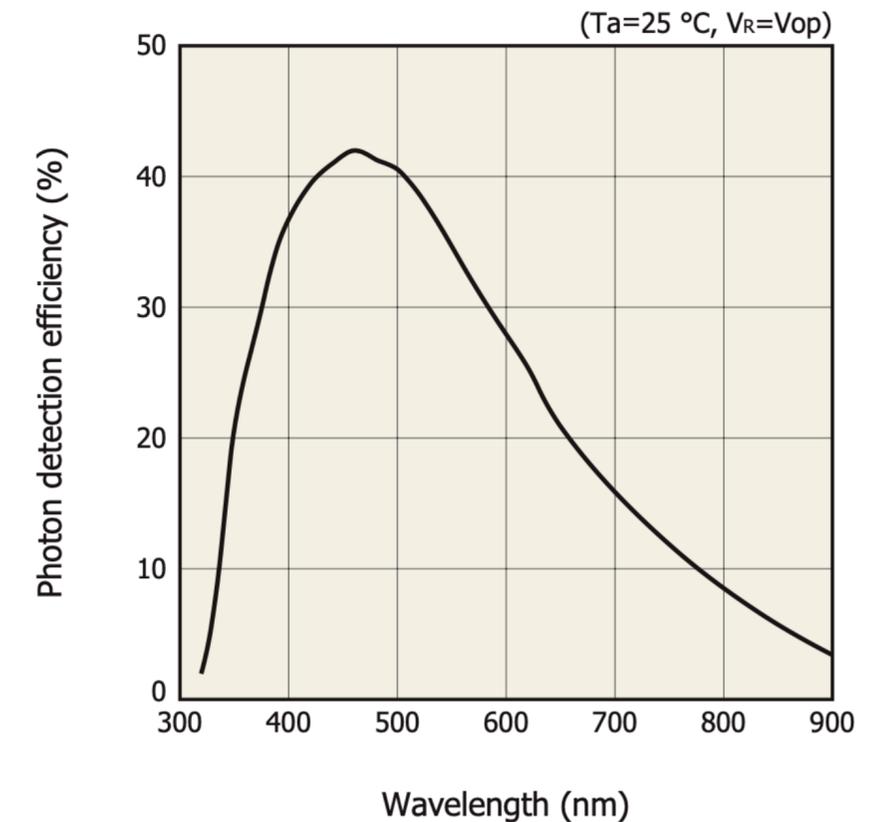
# 光子的探测过程

## 探测效率

光子入射到SiPM表面产生电流脉冲的统计概率就是光子探测效率。探测效率作为波长和偏置电压的函数，可以用量子效率、雪崩倍增概率和几何填充因子的乘积来表示。

$$PDE(V_{ov}, \lambda) = \epsilon_{QE}(\lambda) \cdot \epsilon_{Av}(V_{ov}) \cdot \epsilon_{GF}$$

- 量子效率是指光子在p-n结耗尽层产生电子空穴对的概率；
- 雪崩概率则是光生载流子发生雪崩倍增的概率；
- 几何填充因子是SiPM光敏面积与总面积的比值，由于各个像素单元相互独立，且有电阻和电极的存在，不是所有表面区域都能探测光子；



# 光子的探测过程

## 饱和效应

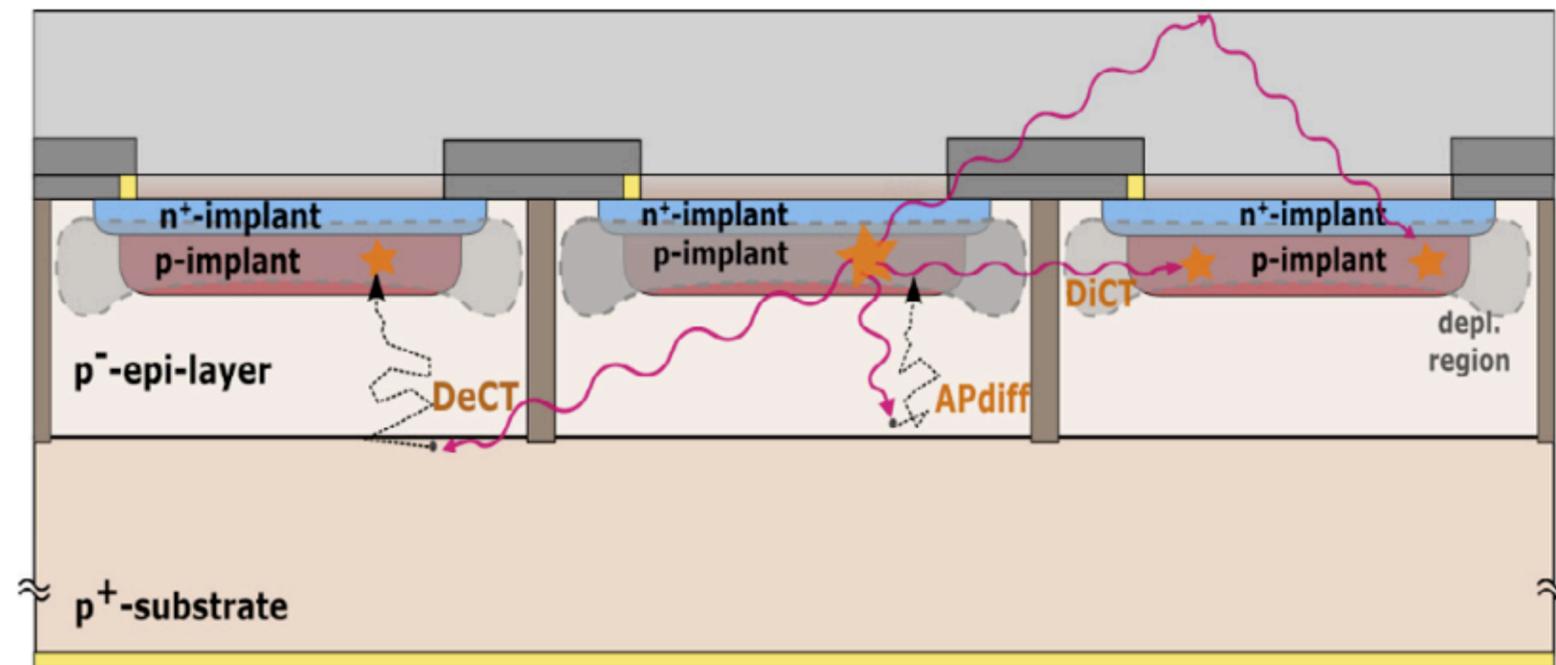
SiPM的饱和效应是指多个光子同时入射到一个像素单元时，该像素只产生与单个光子入射一样的响应信号。由于像素单元的数量是有限的，所以器件会呈现一个非线性状态。考虑饱和效应后，SiPM实际探测到的光子数可以用下式进行修正。

$$N_{fired} = N_{pixel} \times \left(1 - e^{-\frac{N_{ph} \cdot PDE}{N_{pixel}}}\right)$$

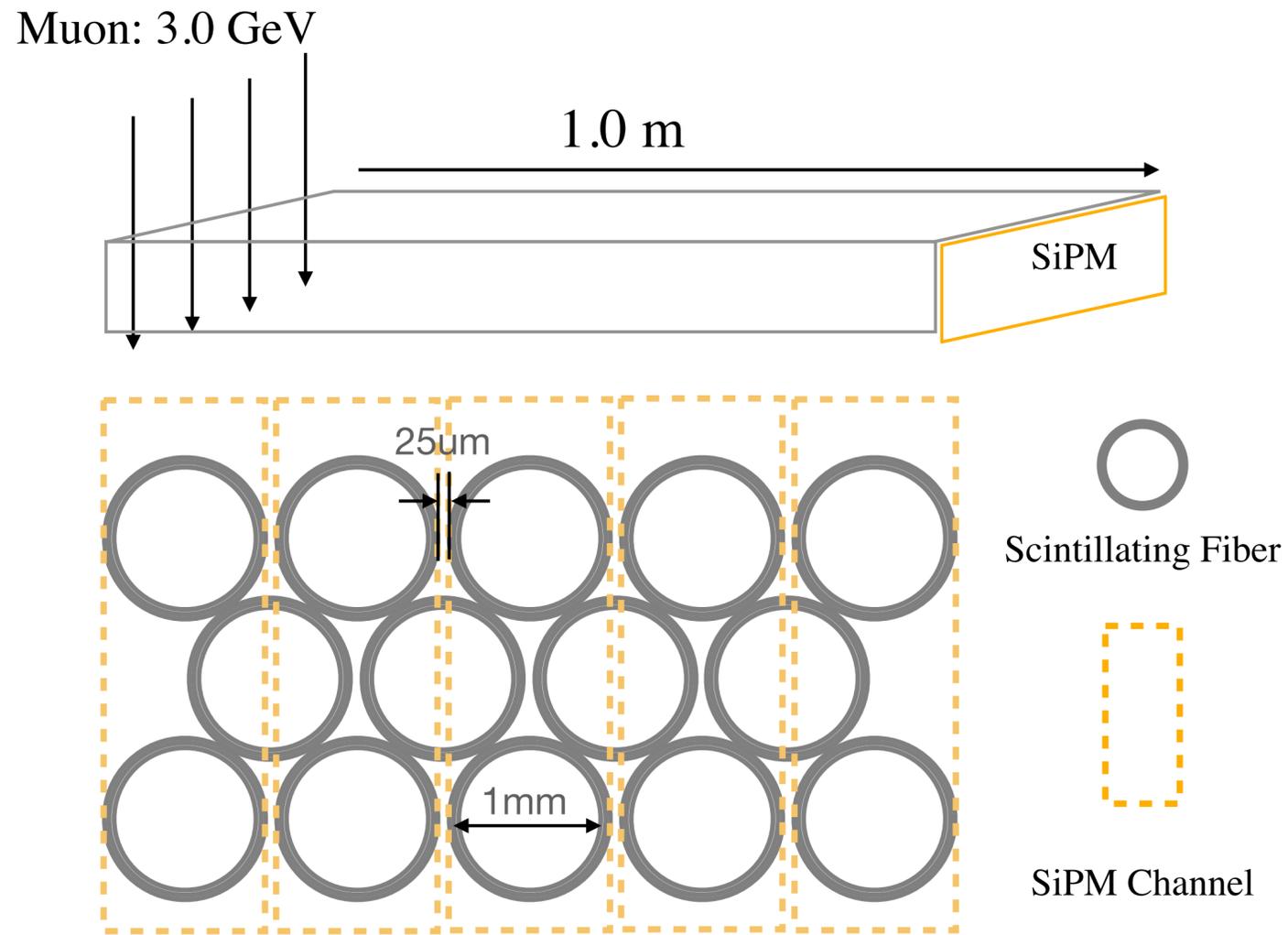
# 光子的探测过程

## 暗计数率

SiPM 的暗计数是指光敏区内由热激发的载流子发生雪崩倍增效应产生的，并且同单光子信号具有相同幅度的信号，暗计数率用于表征该信号的频率。暗计数率是限制 SiPM 性能和微元尺寸大小的主要因素。



# 探测效率和空间分辨率

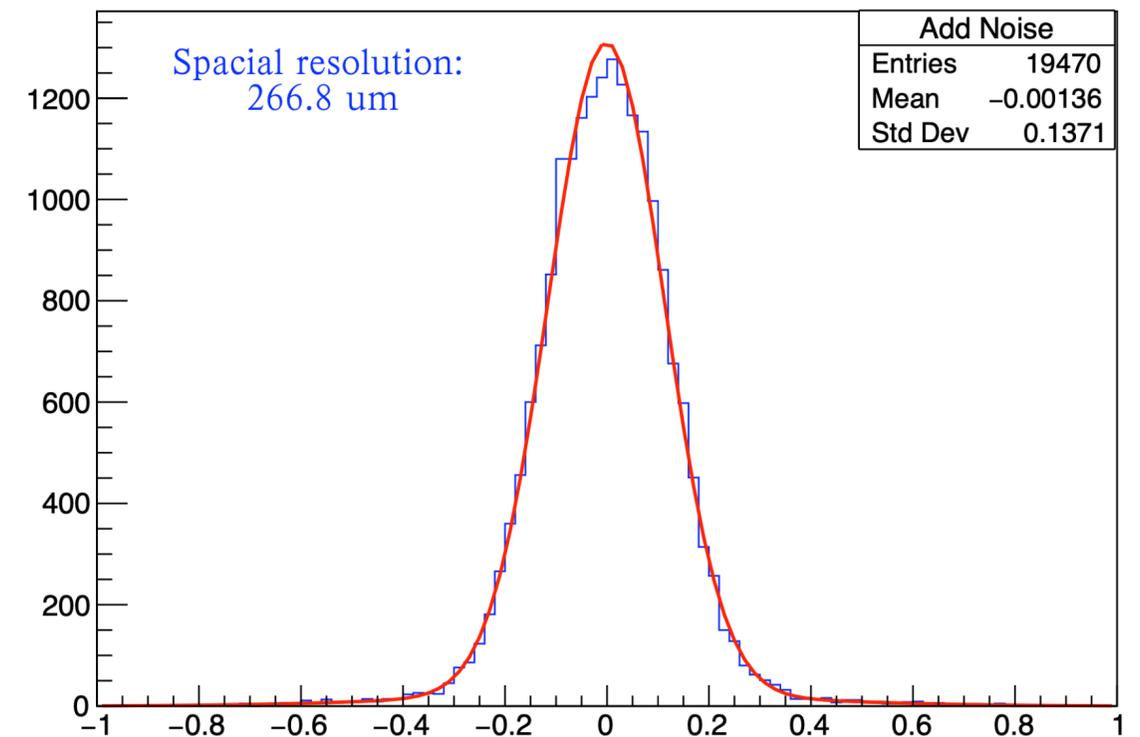
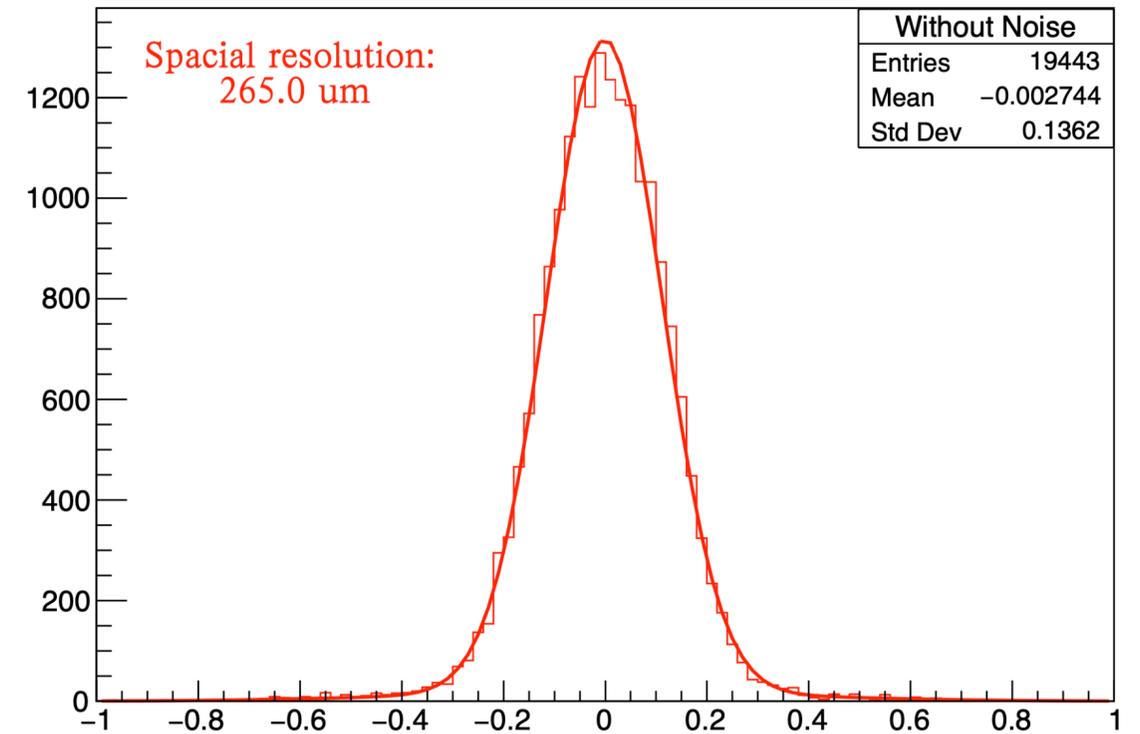


Threshold setting:

$$A(th_{seed}, th_{sum}, th_n) = A(2.5, 4.5, 1.5)$$

Detection efficiency:

99.64%



# 总结与展望

- 基于Geant4模拟软件，建立了单根光纤的精细光学响应模型；
- 在单根光纤模拟的基础上，研究了多根光纤之间的串扰问题；
- 构建SiPM的响应模型，描述了其探测效率，饱和效应以及暗噪声等；
  
- 配合测试，优化探测器的响应模型；
- 模拟过程的参数化，加快模拟速度；
- 指导器件选型和探测器的研制；