

# POLAR 塑料闪烁体的非线性能量响应研究

张晓峰

zhangxf@ihep.ac.cn

中国科学院高能物理研究所  
粒子天体物理重点实验室

第十七届全国核电子学与核探测技术学术年会

## Outline

1. Introduction
  - 1.1 Introduction to POLAR
  - 1.2 Motivation
2. Method
  - 2.1 Compton coincidence technique
  - 2.2 Experimental setup
3. Data reduction
  - 3.1 Drift modification
  - 3.2 Event selection
  - 3.3 Error analysis
  - 3.4 Result
4. Discussion

## Introduction to POLAR

- **科学目标:** 探测伽玛射线暴 (GRB) 释放出的硬 X 射线/软  $\gamma$  射线的偏振;

## Introduction to POLAR

- **伽玛射线暴**：极端高能；复杂光变；复杂能谱；爆发机制尚不清楚；天体物理领域的前沿与热点；
- **科学目标**：探测伽玛射线暴（GRB）释放出的硬 X 射线/软  $\gamma$  射线的偏振；

## Introduction to POLAR

- **伽玛射线暴**：极端高能；复杂光变；复杂能谱；爆发机制尚不清楚；天体物理领域的前沿与热点；
- **科学目标**：探测伽玛射线暴（GRB）释放出的硬 X 射线/软  $\gamma$  射线的偏振；
- **探测原理**：Compton 散射中，散射光子的角分布在垂直于入射光子的偏振的方向上取最大值；

## Introduction to POLAR

- **伽玛射线暴**：极端高能；复杂光变；复杂能谱；爆发机制尚不清楚；天体物理领域的前沿与热点；
- **科学目标**：探测伽玛射线暴（GRB）释放出的硬 X 射线/软  $\gamma$  射线的偏振；
- **探测原理**：Compton 散射中，散射光子的角分布在垂直于入射光子的偏振的方向上取最大值；
- **探测介质**：1600 根 EJ-248 型塑料闪烁体棒；

## Introduction to POLAR

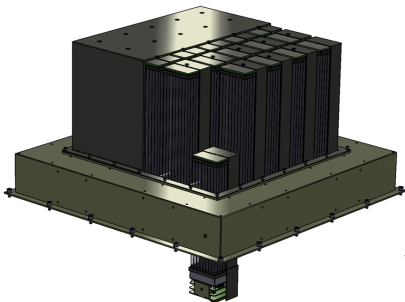
- **伽玛射线暴**：极端高能；复杂光变；复杂能谱；爆发机制尚不清楚；天体物理领域的前沿与热点；
- **科学目标**：探测伽玛射线暴（GRB）释放出的硬 X 射线/软  $\gamma$  射线的偏振；
- **探测原理**：Compton 散射中，散射光子的角分布在垂直于入射光子的偏振的方向上取最大值；
- **探测介质**：1600 根 EJ-248 型塑料闪烁体棒；
- **预期结果**：将在 GRB 的偏振探测方面取得突破，从而大大促进 GRB 的理论研究；

## Introduction to POLAR

- **伽玛射线暴**：极端高能；复杂光变；复杂能谱；爆发机制尚不清楚；天体物理领域的前沿与热点；
- **科学目标**：探测伽玛射线暴（GRB）释放出的硬 X 射线/软  $\gamma$  射线的偏振；
- **探测原理**：Compton 散射中，散射光子的角分布在垂直于入射光子的偏振的方向上取最大值；
- **探测介质**：1600 根 EJ-248 型塑料闪烁体棒；
- **预期结果**：将在 GRB 的偏振探测方面取得突破，从而大大促进 GRB 的理论研究；
- **发射时间**：将搭载在“天宫二号”空间实验室上，于 2015 年年底发射。

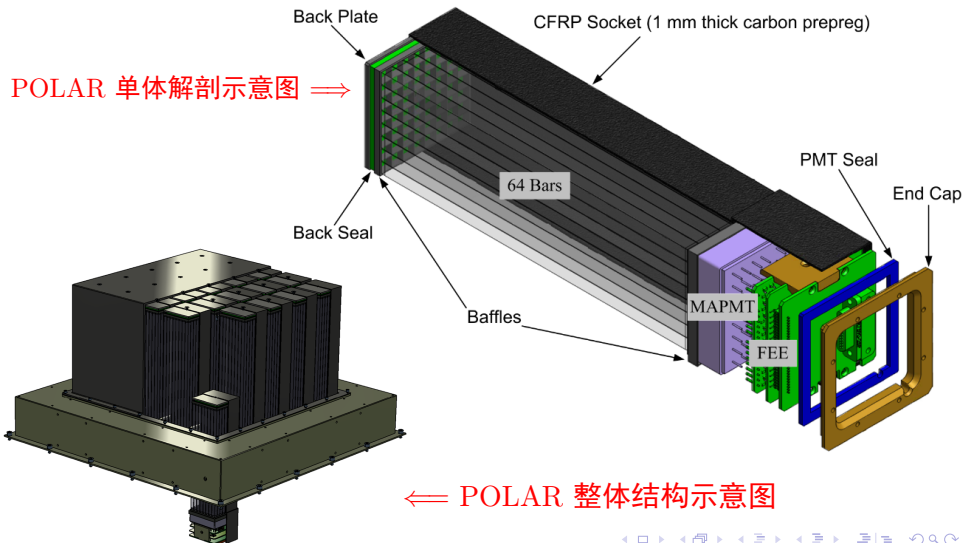


## POLAR 整体结构及单体解剖示意图



← POLAR 整体结构示意图

## POLAR 整体结构及单体解剖示意图



## Motivation

- 电子在塑料闪烁体（PS）内沉积能量，PS 的分子被电离或激发，并在退激发过程中释放出荧光。**荧光产额与电子损失的动能之间的关系是非线性的**，可由半经验性的 Birks' law 来描述：

## Motivation

- 电子在塑料闪烁体（PS）内沉积能量，PS 的分子被电离或激发，并在退激发过程中释放出荧光。**荧光产额与电子损失的动能之间的关系是非线性的**，可由半经验性的 Birks' law 来描述：

$$L = s \cdot \int_0^{E_e} \frac{dE}{1 + kB \cdot dE/dx} \quad (1)$$

- $kB$ : 由闪烁体材料唯一决定的常数；

## Motivation

- 电子在塑料闪烁体（PS）内沉积能量，PS 的分子被电离或激发，并在退激发过程中释放出荧光。**荧光产额与电子损失的动能之间的关系是非线性的**，可由半经验性的 Birks' law 来描述：

$$L = s \cdot \int_0^{E_e} \frac{dE}{1 + kB \cdot dE/dx} \quad (1)$$

- $kB$ : 由闪烁体材料唯一决定的常数；
- 这种非线性的能量响应会导致重建的沉积能量**偏低**。

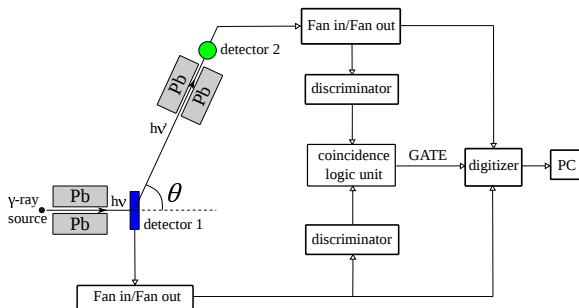
## Motivation

- 电子在塑料闪烁体（PS）内沉积能量，PS 的分子被电离或激发，并在退激发过程中释放出荧光。**荧光产额与电子损失的动能之间的关系是非线性的**，可由半经验性的 Birks' law 来描述：

$$L = s \cdot \int_0^{E_e} \frac{dE}{1 + kB \cdot dE/dx} \quad (1)$$

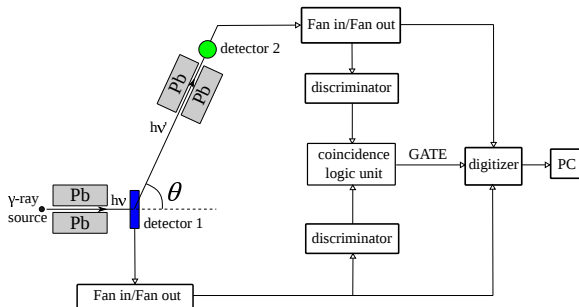
- $kB$ : 由闪烁体材料唯一决定的常数；
- 这种非线性的能量响应会导致重建的沉积能量**偏低**。
- 研究这种非线性的能量响应，评估对 **POLAR** 性能的影响。

## 研究方法: Compton coincidence technique



Schematic diagram of Compton coincident technique

## 研究方法：Compton coincidence technique



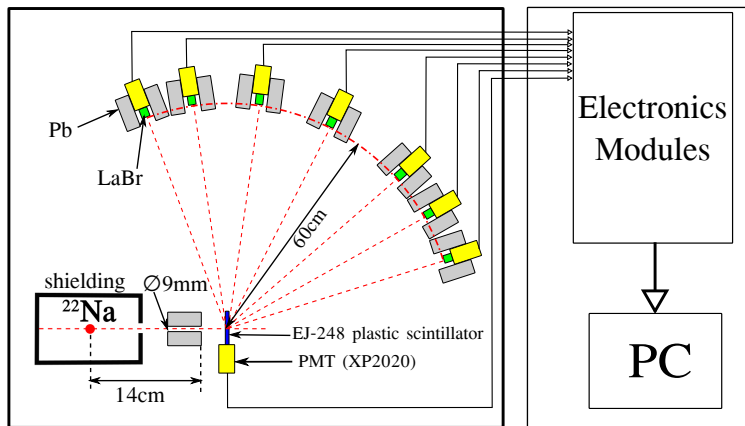
Schematic diagram of Compton coincident technique

反冲电子的动能  $E_e$  与散射角  $\theta$  的关系：

$$E_e = \frac{E_\gamma^2 (1 - \cos \theta)}{m_e c^2 + E_\gamma (1 - \cos \theta)} \quad (2)$$

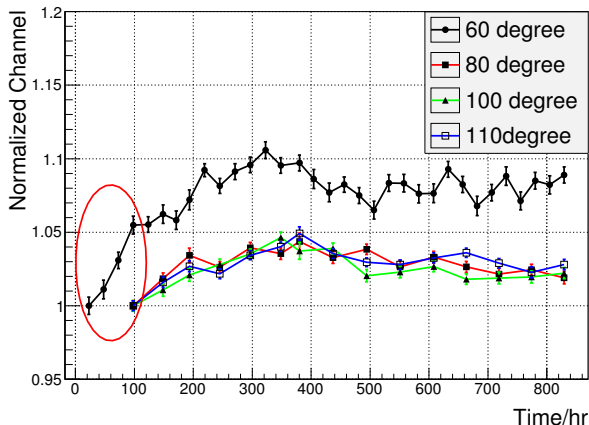


## Experimental setup



$$E_{\gamma} = \begin{cases} 0.511 \text{ MeV;} \\ 1.275 \text{ MeV.} \end{cases} \quad \theta = \begin{cases} 20^{\circ}, 30^{\circ}, 40^{\circ}, 60^{\circ}, 80^{\circ}, 100^{\circ}, 110^{\circ}, & \text{First stage;} \\ 15^{\circ}, 25^{\circ}, 35^{\circ}, 60^{\circ}, 80^{\circ}, 100^{\circ}, 110^{\circ}, & \text{Second stage.} \end{cases}$$

## Drift Modification



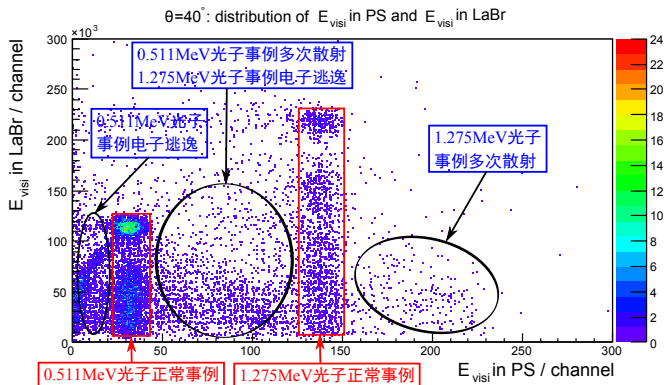
整个实验阶段的漂移情况示意图 ( $E_\gamma = 0.511$  MeV)。图中椭圆内的点代表的数据，即**实验初始约 100 小时内的数据被舍弃**。

## Event selection

- $E_{\text{visi}}$ : 反冲电子损失的动能  $E_{\text{real}}$  中**转化为荧光**的那部分能量。

## Event selection

- $E_{\text{visi}}$ : 反冲电子损失的动能  $E_{\text{real}}$  中**转化为荧光**的那部分能量。



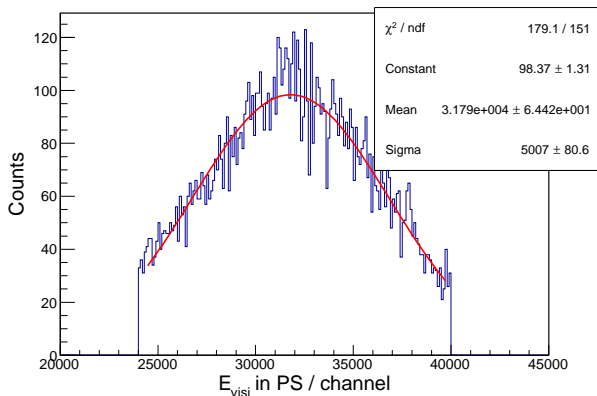
PS 与 LaBr 中的  $E_{\text{visi}}$  的分布 ( $\theta = 40^\circ$ )。按此图挑选符合事例，可排除电子逃逸和多次散射的干扰。

## Event selection

- 挑选出有效的符合事例后，就可得到  $E_{\text{visi}}$  分布。取其最可几值作为  $E_{\text{visi}}$  的实验值。

## Event selection

- 挑选出有效的符合事例后，就可得到  $E_{\text{visi}}$  分布。取其最可几值作为  $E_{\text{visi}}$  的实验值。



Distribution of  $E_{\text{visi}}$  in PS ( $E_\gamma = 0.511 \text{ MeV}, \theta = 40^\circ$ )

## Error analysis

- $E_\gamma = 1.275 \text{ MeV}$  的事例被舍弃:
  - $E_{\text{real}} \gtrsim 100 \text{ keV}$  的事例对非线性的能量响应没有贡献 [2];
  - $E_\gamma = 1.275 \text{ MeV}$  时 Compton 截面低, 统计量小;

## Error analysis

- $E_\gamma = 1.275 \text{ MeV}$  的事例被舍弃:
  - $E_{\text{real}} \gtrsim 100 \text{ keV}$  的事例对非线性的能量响应没有贡献 [2];
  - $E_\gamma = 1.275 \text{ MeV}$  时 Compton 截面低, 统计量小;

### 实验中可能的误差来源及分析结果

可能的误差来源	分析结果
光电倍增管的非线性	$< 4\%$
电子学系统的非线性	$< 1\%$
统计误差	$< 0.7\%$
温度变化	可以忽略
塑料闪烁体和 LaBr 的尺寸	$< 0.5\%$
LaBr 摆放的角度偏差	$< 2.5\%$



## Result

- $E_{\text{real}}$  越大, 能量响应越趋于线性 [2];

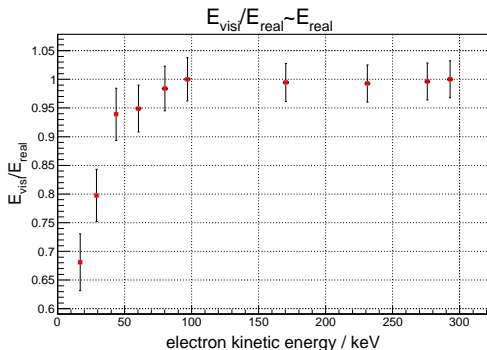
## Result

- $E_{\text{real}}$  越大, 能量响应越趋于线性 [2];
- Normalization: let  $E_{\text{visi}}/E_{\text{real}} = 1$  when  $E_{\gamma} = 0.511\text{MeV}, \theta = 110^{\circ}$ ;

## Result

- $E_{\text{real}}$  越大, 能量响应越趋于线性 [2];
- Normalization: let  $E_{\text{visi}}/E_{\text{real}} = 1$  when  $E_{\gamma} = 0.511\text{MeV}, \theta = 110^{\circ}$ ;

$E_{\text{real}}$ (keV)	$E_{\text{visi}}/E_{\text{real}}$ (%)
16.84	$67.91 \pm 4.96$
29.06	$79.65 \pm 4.56$
43.78	$93.77 \pm 4.54$
60.37	$94.79 \pm 4.09$
80.10	$98.27 \pm 3.88$
96.88	$99.98 \pm 3.75$
170.33	$99.31 \pm 3.34$
231.21	$99.14 \pm 3.23$
275.91	$99.48 \pm 3.21$
292.81	$100.00 \pm 3.21$



Nonlinear energy response to electron of POLAR plastics scintillator.

## Discussion

- 电子动能越低，POLAR 塑料闪烁体对电子的响应的非线性越显著；当电子动能  $E_e \gtrsim 100 \text{ keV}$  时，能量响应趋于线性；

## Discussion

- 电子动能越低，POLAR 塑料闪烁体对电子的响应的非线性越显著；当电子动能  $E_e \gtrsim 100 \text{ keV}$  时，能量响应趋于线性；
- 非线性的能量响应使得电子的一部分动能无法被探测到，尤其是低能端。在实际的数据处理中，如果不能进行相关修正，将使得**重建出的沉积能量谱整体偏低**，进而导致部分有效事例因低于能量阈值而被排除掉，最终使得**统计量下降，统计误差变大**。

## Discussion

- 电子动能越低，POLAR 塑料闪烁体对电子的响应的非线性越显著；当电子动能  $E_e \gtrsim 100 \text{ keV}$  时，能量响应趋于线性；
- 非线性的能量响应使得电子的一部分动能无法被探测到，尤其是低能端。在实际的数据处理中，如果不能进行相关修正，将使得重建出的沉积能量谱整体偏低，进而导致部分有效事例因低于能量阈值而被排除掉，最终使得统计量下降，统计误差变大。
- 进一步的研究需要设法求出 Eq. (1) 中的常数  $k_B$  的值。

## References



N. Produit et al.

POLAR, a compact detector for gamma-ray burst photon polarization measurements.

Nucl. Instr. and Meth. A, 2003, 506, 616-625.



J. B. Birks.

The Theory and Practice of Scintillation Counting.

Landon: Pergamon Press, 1964