

AMS 实验 RICH 探测器： 在轨标定、速度与电荷重建

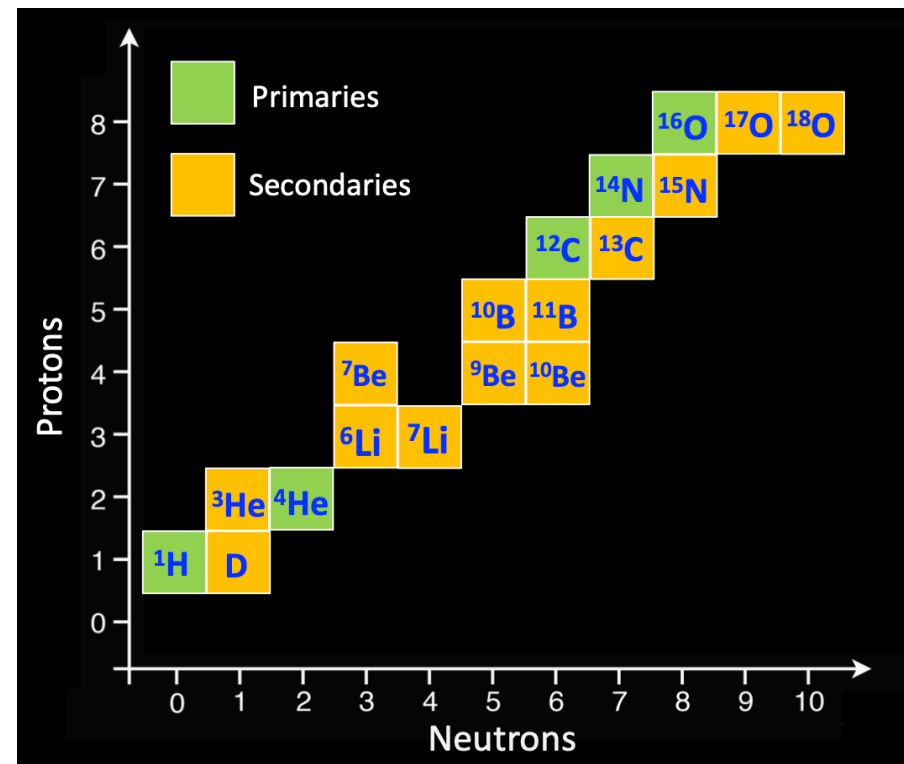
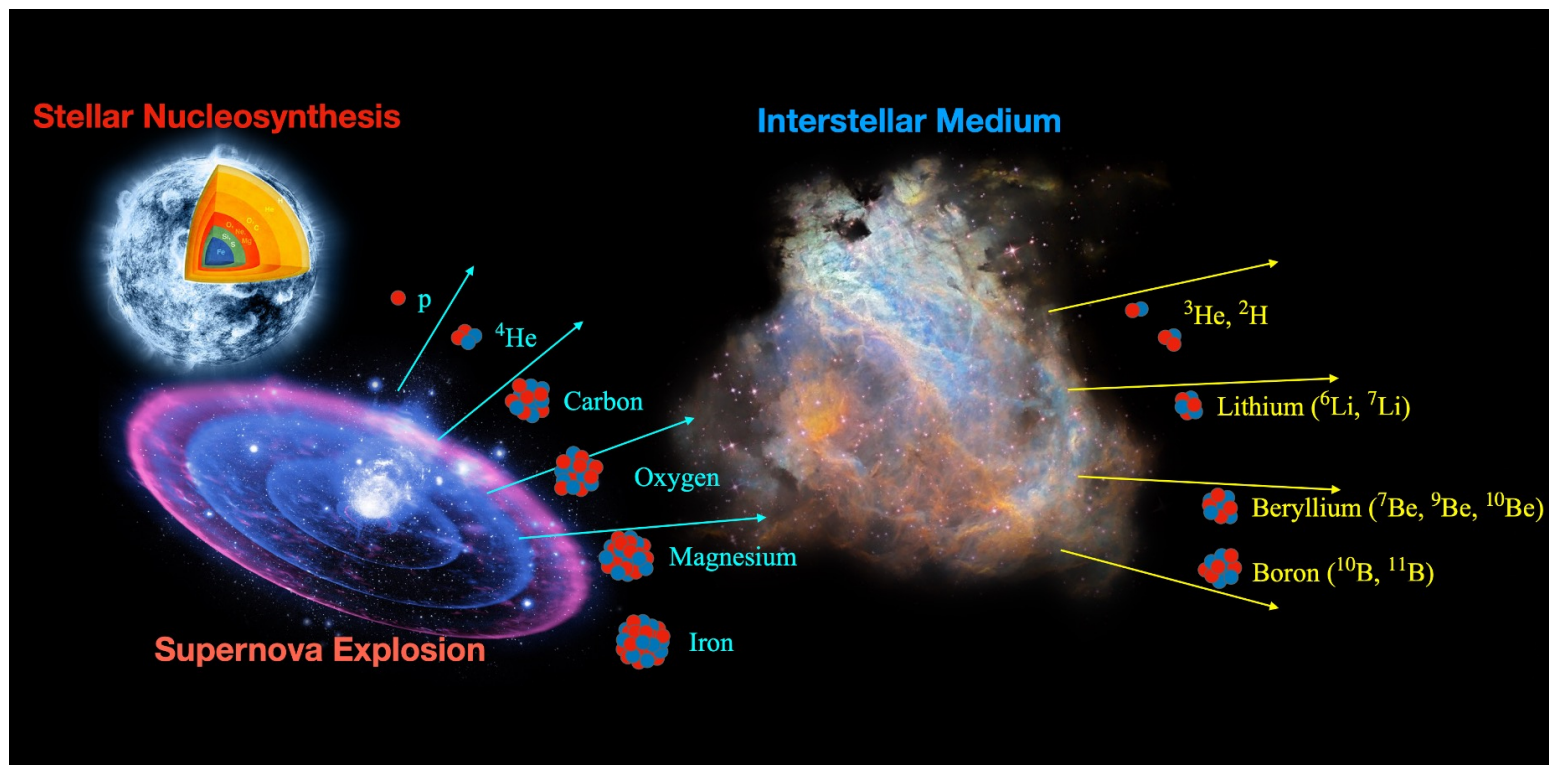
陈 海（浙江大学）

中国物理学会高能物理分会学术年会

2026/07/16, 广州

宇宙线同位素中的物理问题

- 宇宙线中的不同同位素具有初级、次级或者混合起源，对宇宙线传播过程非常敏感。
- 它们是研究宇宙线起源、加速与传播过程的重要探针；
- 同时也是研究银河系化学元素起源和演化，开展暗物质间接探测与反物质寻找的对象。

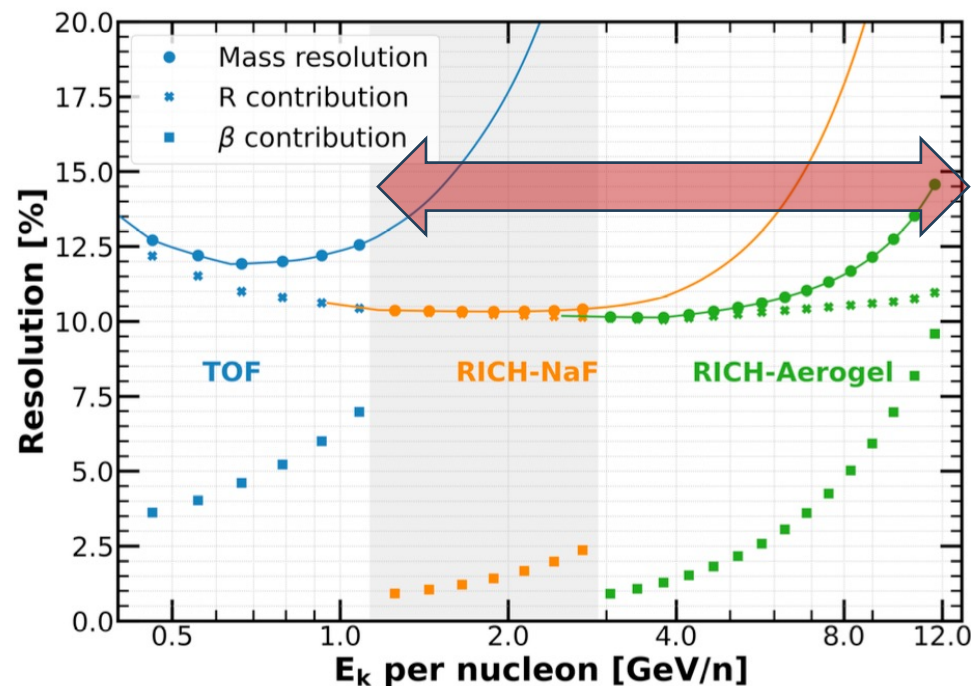
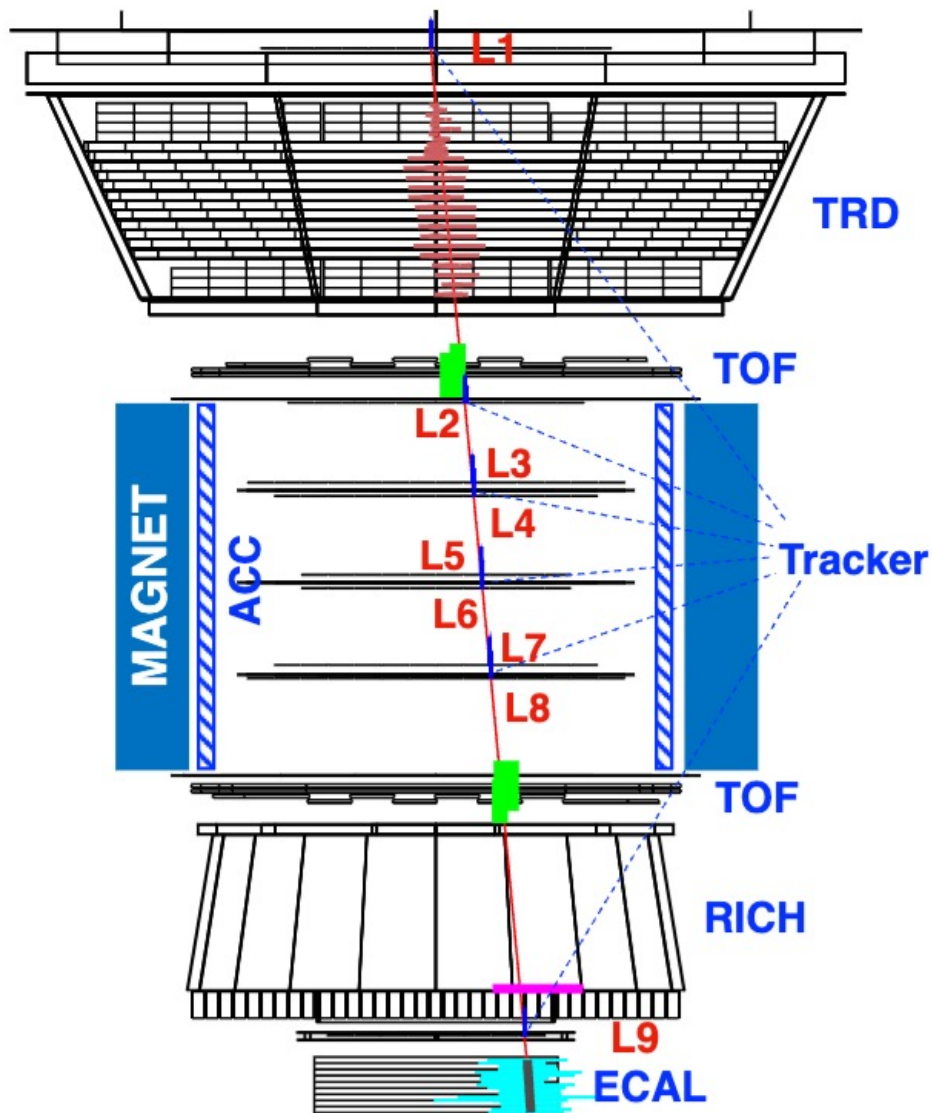


AMS 实验中的同位素测量

AMS实验: Tracker、TOF、RICH 的联合测量, 对电荷 Z 、
刚度 R 和 速度 β 的转化来测量同位素质量:

$$M = \frac{ZR}{\beta\gamma} \Rightarrow \frac{\Delta M}{M} = \sqrt{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 + \left(\gamma^2 \frac{\Delta\beta}{\beta}\right)^2}$$

同位素测量的能区和精度主要由 RICH 的性能决定



$\Delta M/M$

$\Delta R/R$

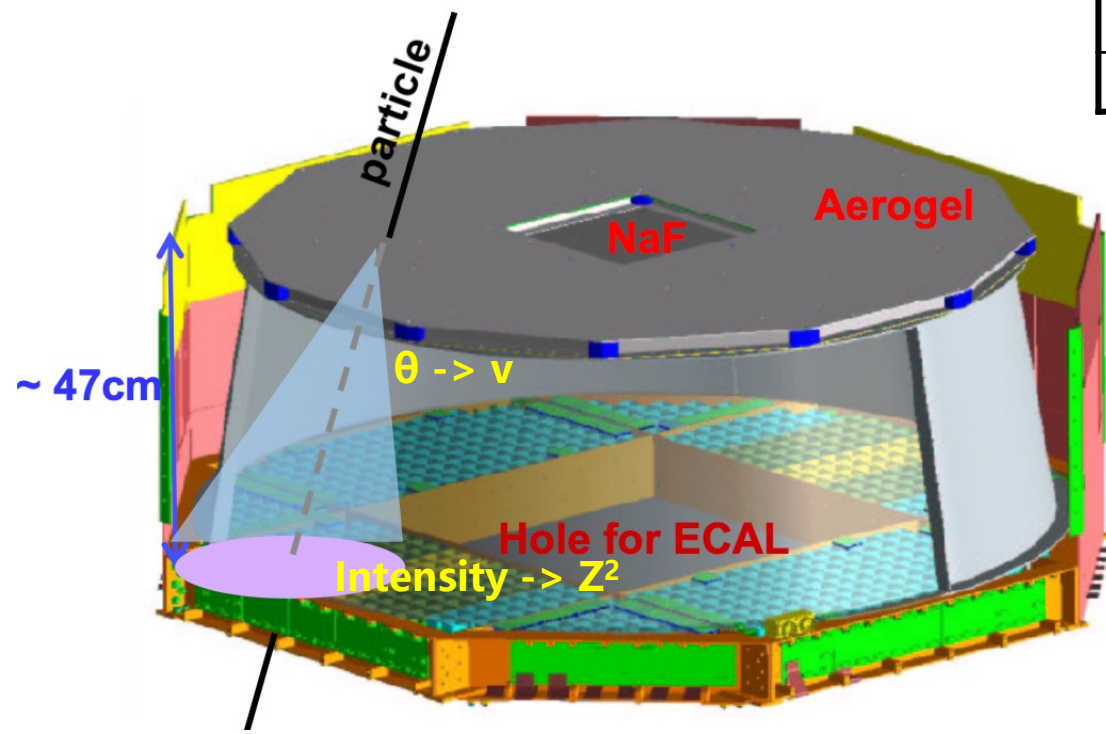
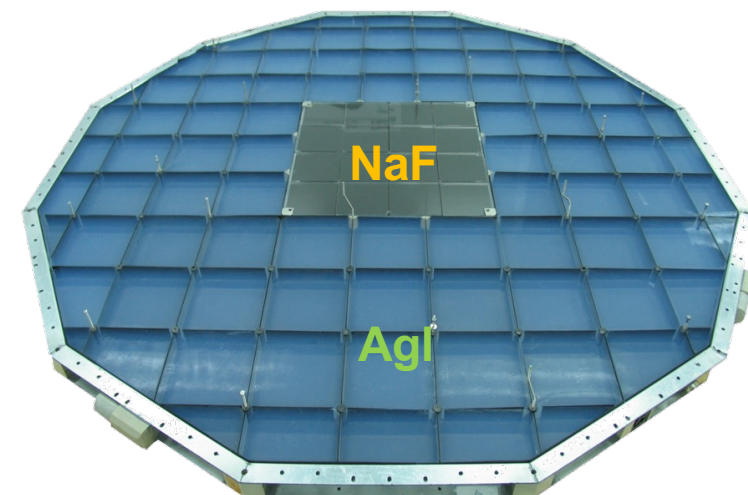
$\gamma^2 \Delta\beta/\beta$

RICH 探测器结构

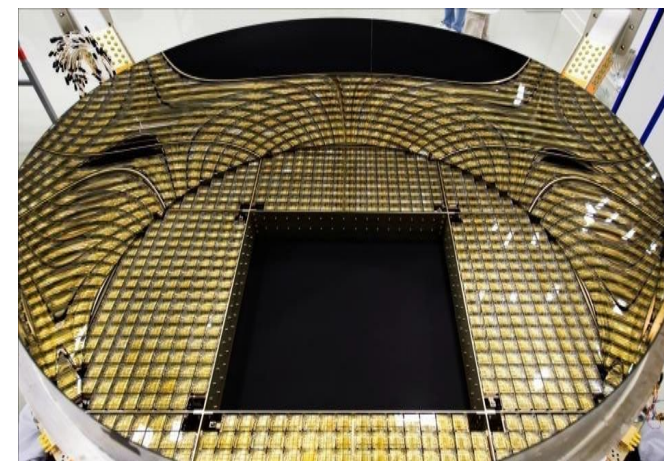
基于在轨宇宙线数据，建立了涵盖位置校准、折射率标定、PMT响应校正和光线追踪的RICH重建框架。

92 AgI tiles ($n=1.05$)

Catalysis Institute of Novosibirsk	
Refraction index	1.05
Thickness (mm)	25
Size (mm ²)	113 x 113
Opening Angle at $\beta \rightarrow 1$	17.8°
Threshold velocity	0.952



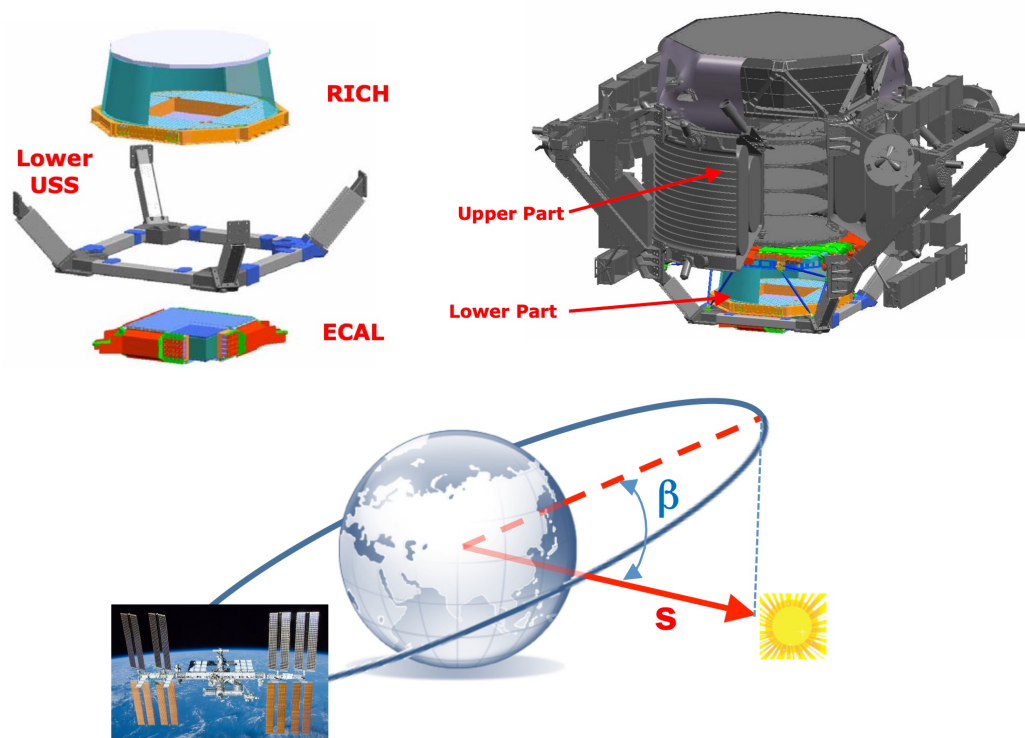
- ✧ 680 个 Hamamatsu PMT R7900-M16
- ✧ 共10880个像素单元 (像素尺寸: 8.5 x 8.5 mm²)



1. 位置校准: Alignment in Space

RICH 在太空中的在轨位置校准:

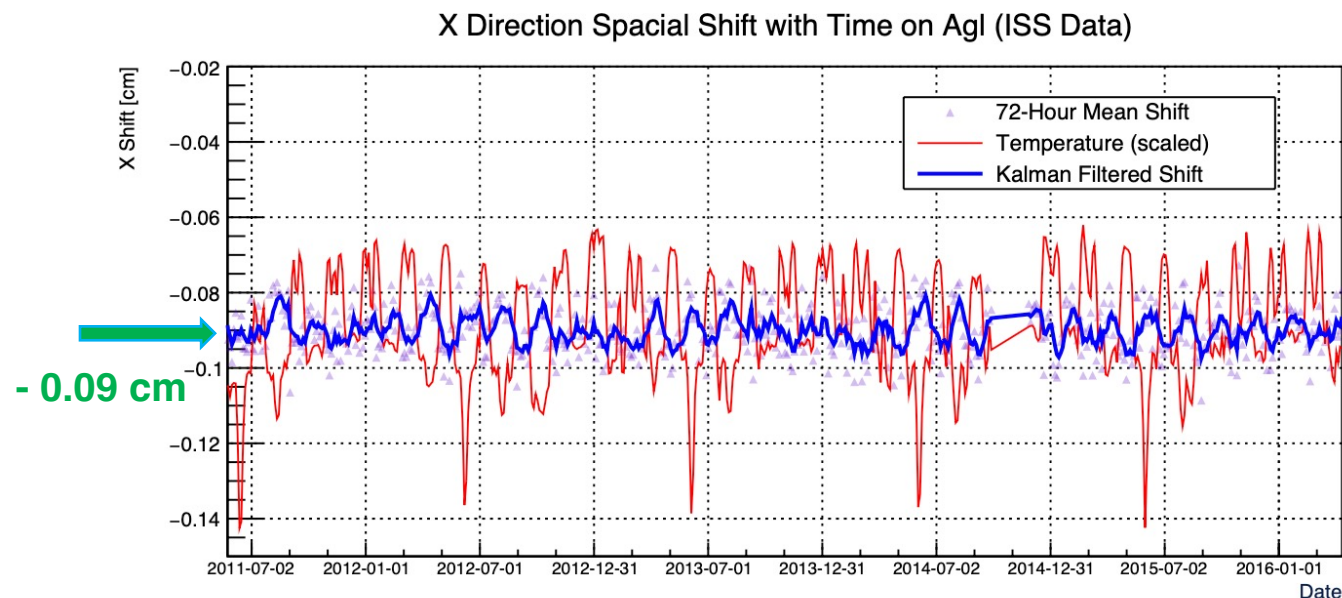
- 发射过程中由于加速应力产生整体相对偏移;
- 当太阳照射角度发生变化时, 热环境变化引起的热胀冷缩导致随位置随时间变化。



校准的过程:

1. 重建竖直方向入射的切伦科夫圆环 (R), 确定圆环中心位置
2. Tracker 径迹外推位置 (T)

计算残差: $\delta_{x,y} = \text{pos}_R - \text{pos}_T$

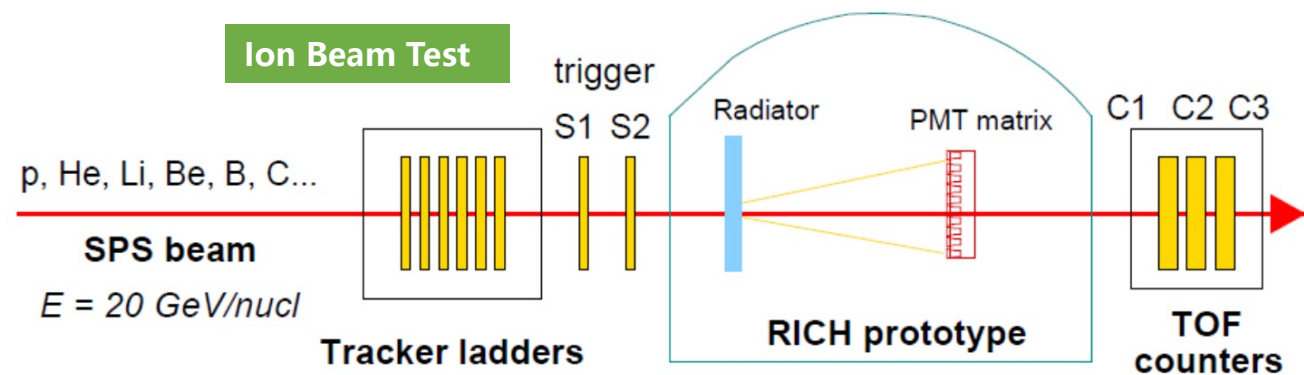
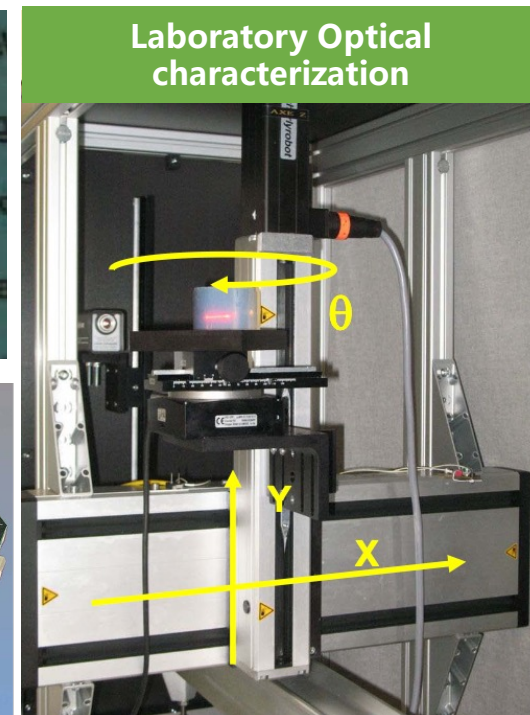
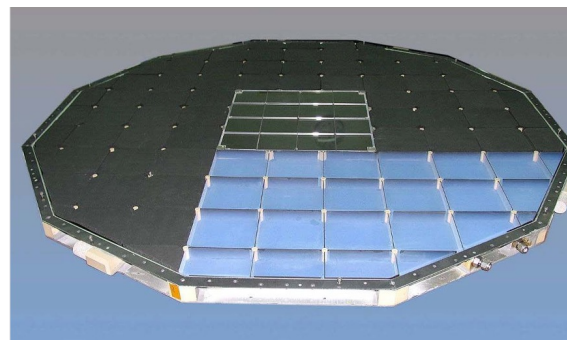


2. 折射率标定: Index Calibration

硅气凝胶 Agl : 极低的热导率, 以及极小的折射率,
决定速度测量的精度上限

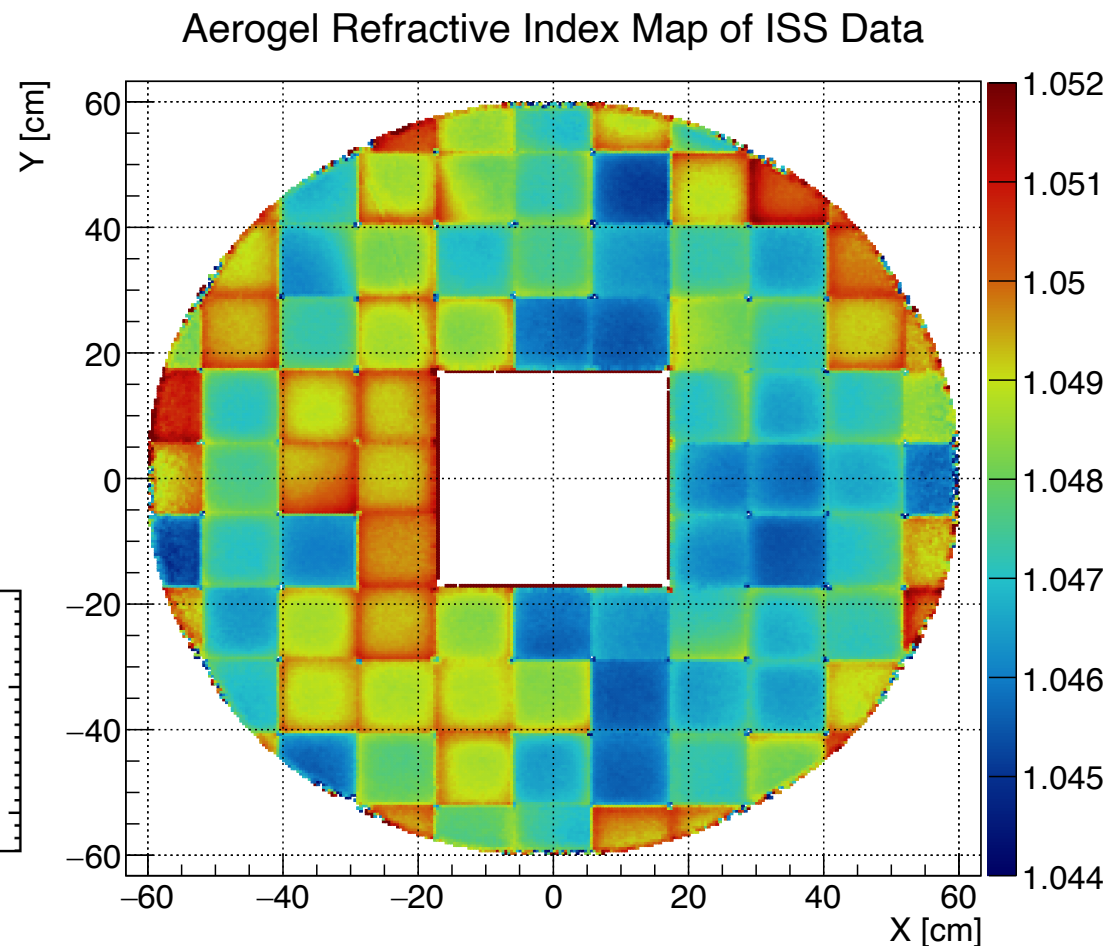
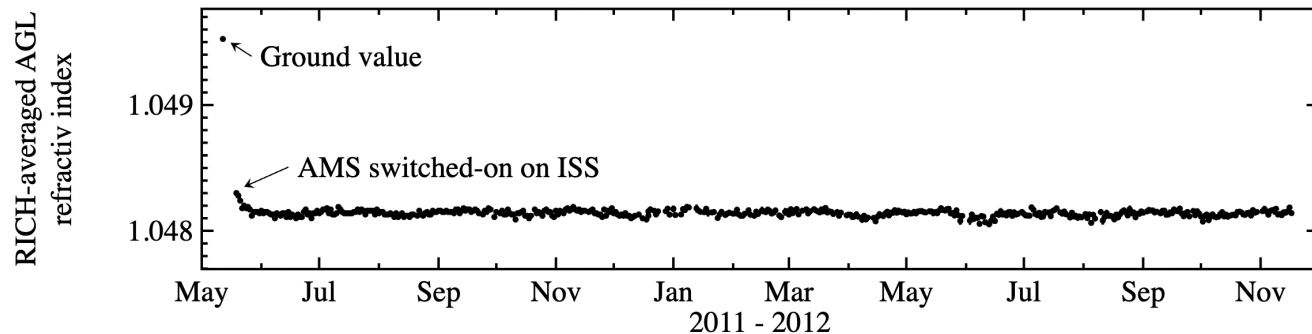
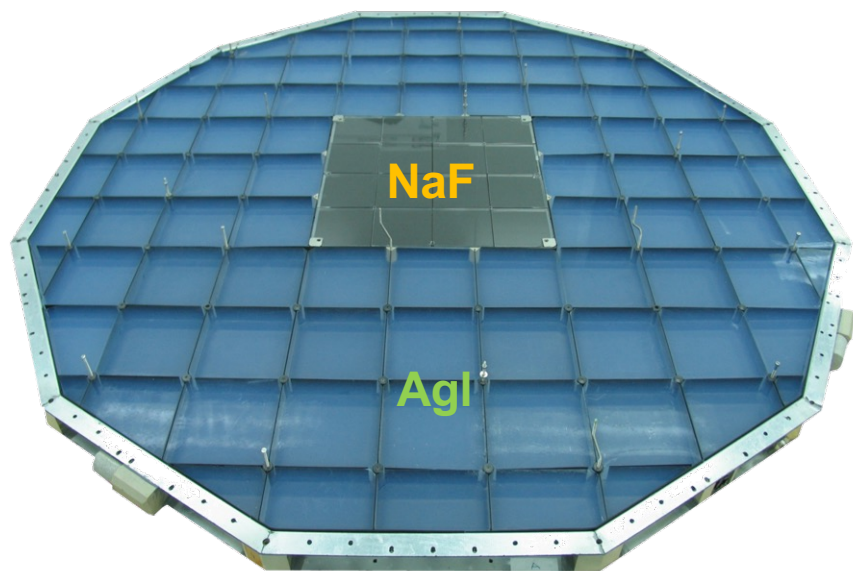
- 地面实验室进行了多次光学系统表征以及束流测试, 然而在轨的折射率存在差异;
- 空间各向同性的宇宙线为 Agl 折射率的标定提供了天然的样本;
- 基于 $\beta \rightarrow 1.0$ 的数据, 不依赖于 Tracker 刚度重建的直接标定方法, 大幅提高了折射率精度。

$$n(x, y) = \left\langle \frac{1}{\beta \cdot \cos(\theta_c)} \right\rangle \\ \approx \left\langle \frac{1}{\cos(\theta_c)} \right\rangle$$



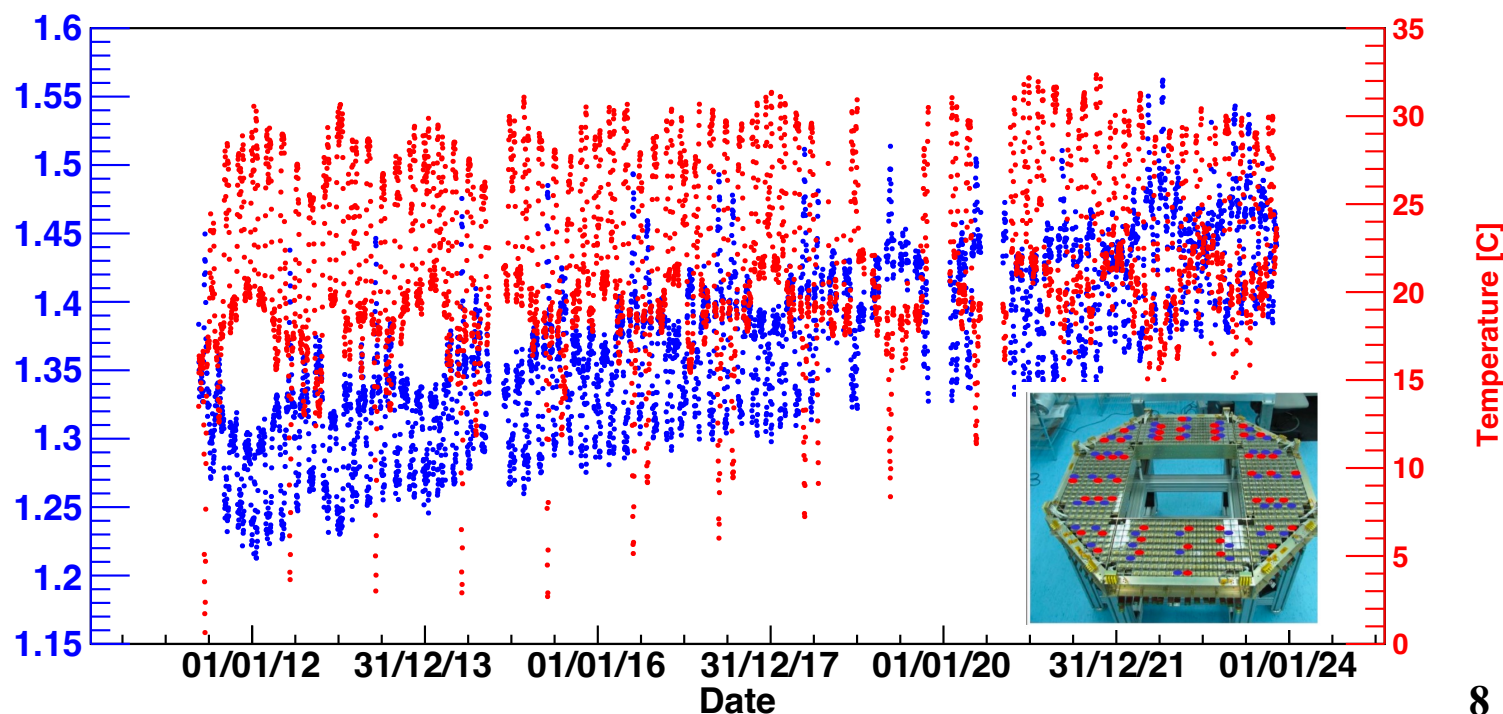
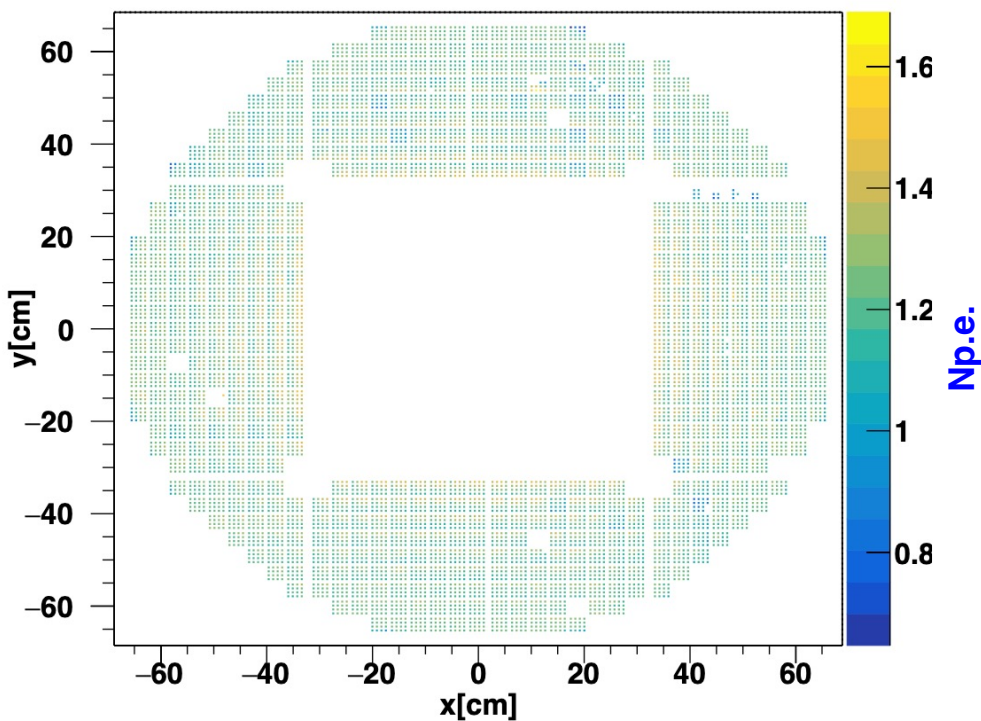
2. 折射率标定: Index Calibration

实现了两种辐射体材料 (Agl和NaF) 折射率的空间在轨精确测量, 并给出了其光学性能随时间变化趋势, 保证速度测量的稳定性。

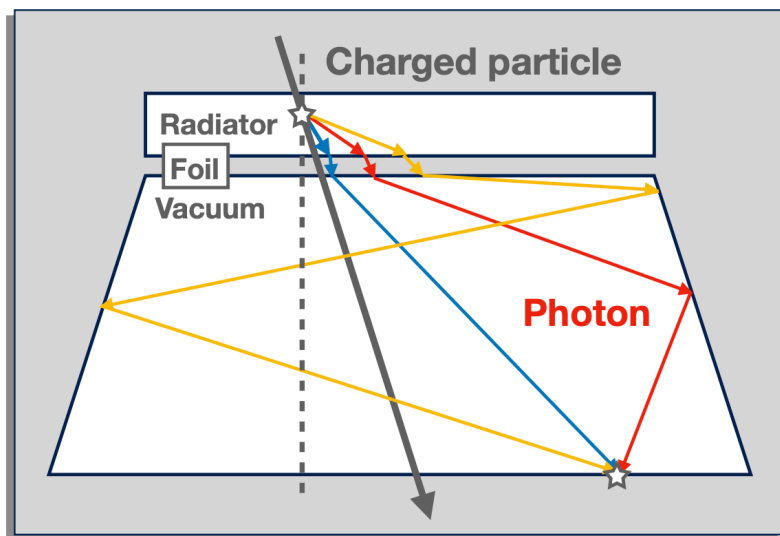


3. PMT 响应标定: Equalization in Space

- 在探测平面上, 不同PMT通道的增益和光子探测效率存在差异, 并且它们随着太阳照射角 (温度) 具有明显的时间依赖关系;
- 通过在轨原子核数据的标定, 探测平面上的10880 道读出的稳定性和均匀性保障了后续的电 荷和速度测量。



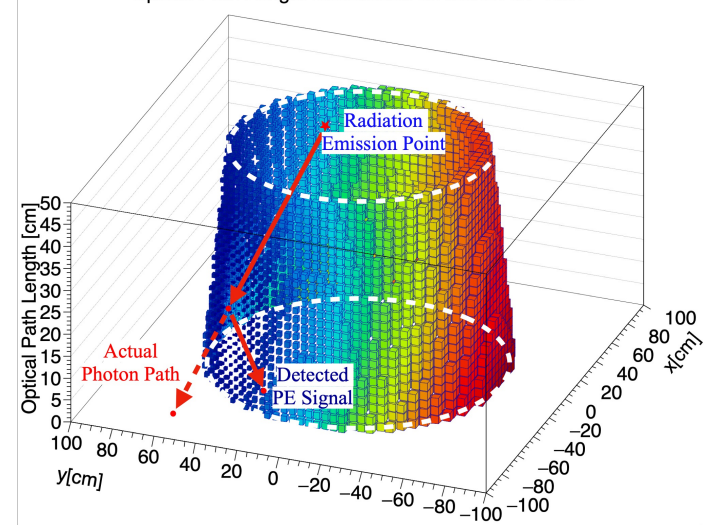
4. 物理重建：第一性原理的光线追踪



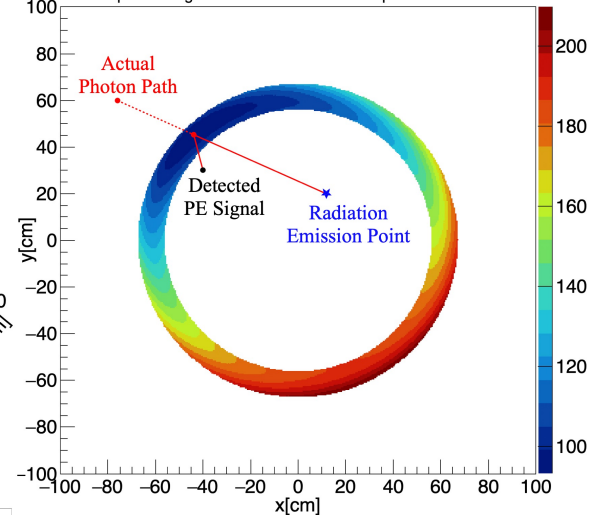
切伦科夫光在 RICH 中传播经历了一系列复杂过程，包括：

- Refraction, Reflection
- Chromatic Dispersion
- Rayleigh Scattering, Absorption

Optical Path Length Distribution on Mirror: 3D View



Optical Length Distribution on Mirror: Top View of RICH



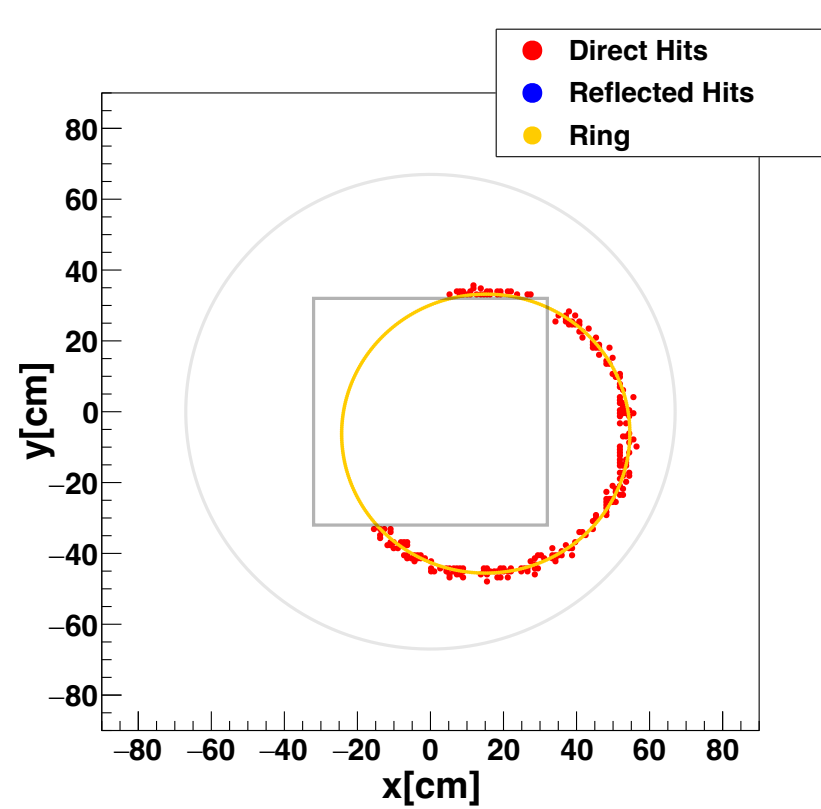
光线追踪方法 (Ray-Tracing): 从单光子的传播路径搜索还原圆环，基于朴素的费马原理：

$$\min_L L(x_r, \theta_c; \theta_T, x_i, x_f)$$

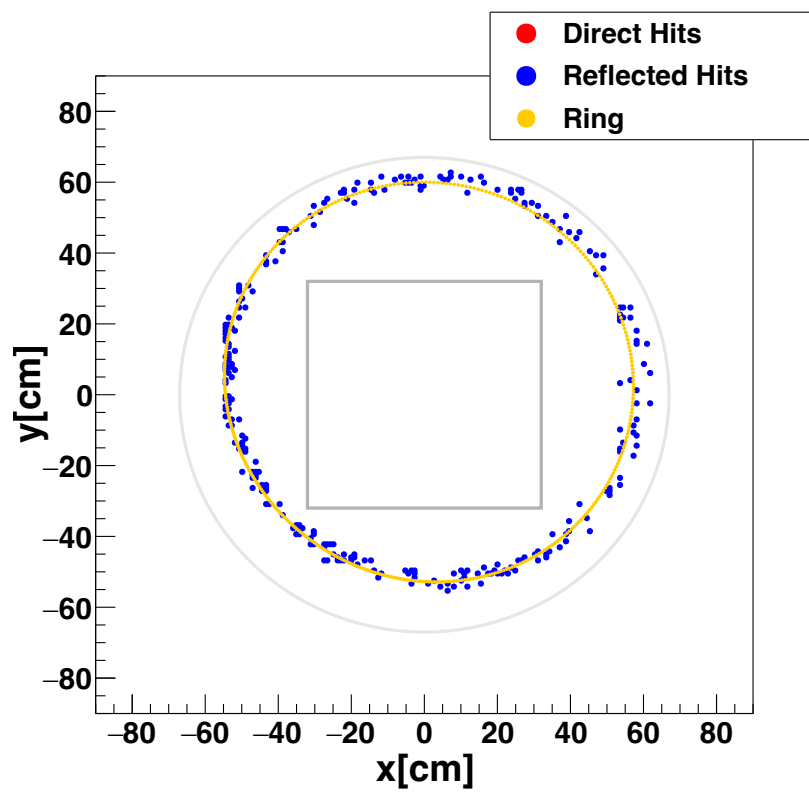
遍历直射以及镜面上所有的可能中继点 x_r ，选择光程最短的一条。

4. 物理重建：第一性原理的光线追踪

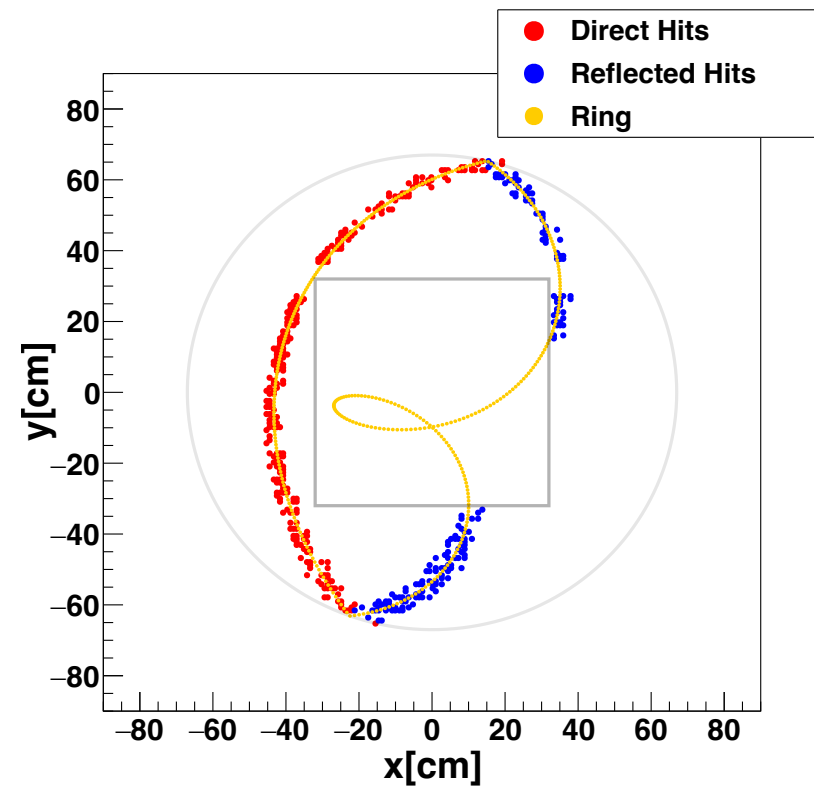
实现了对不同拓扑形状的切伦科夫光环的精准高效重建。



全部直射



全部反射



直射+反射

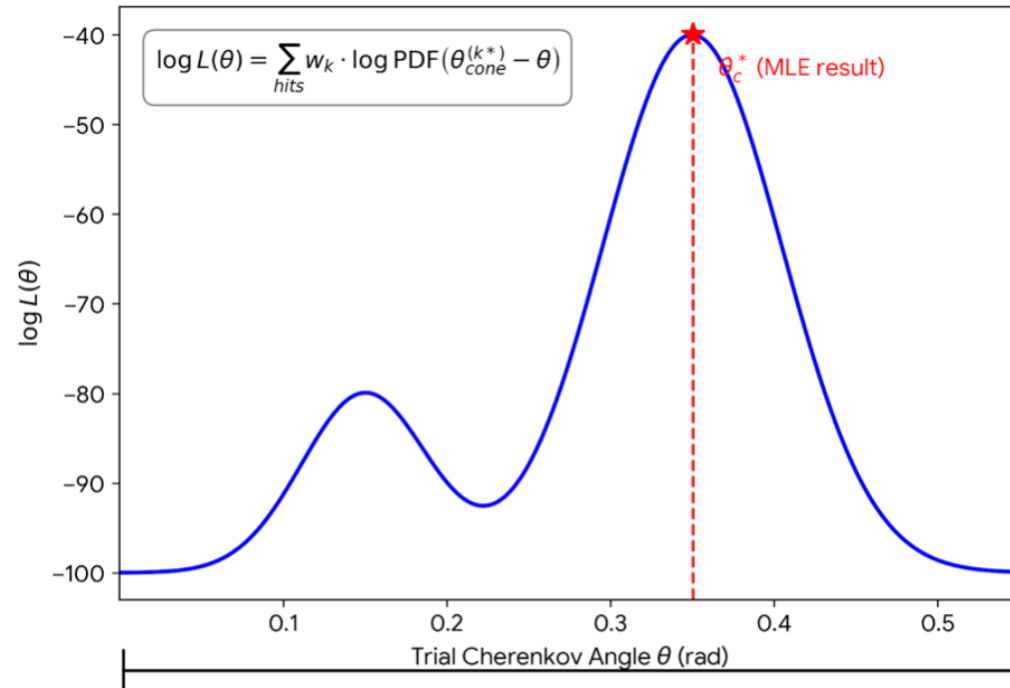
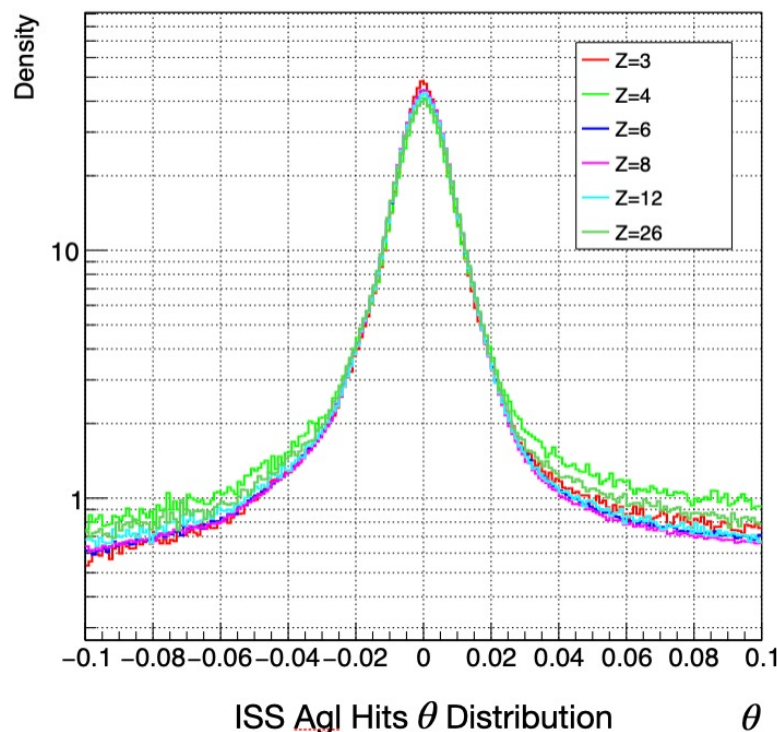
4. 物理重建：速度最似然估计

构造单个Hit的切伦科夫张角的概率密度分布并参数化:

$$P(\cos \theta \mid \cos \theta_C, \sigma, a) = \frac{a}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left[-\frac{(\cos \theta - \cos \theta_C)^2}{2\sigma^2} \right] + (1 - a)$$

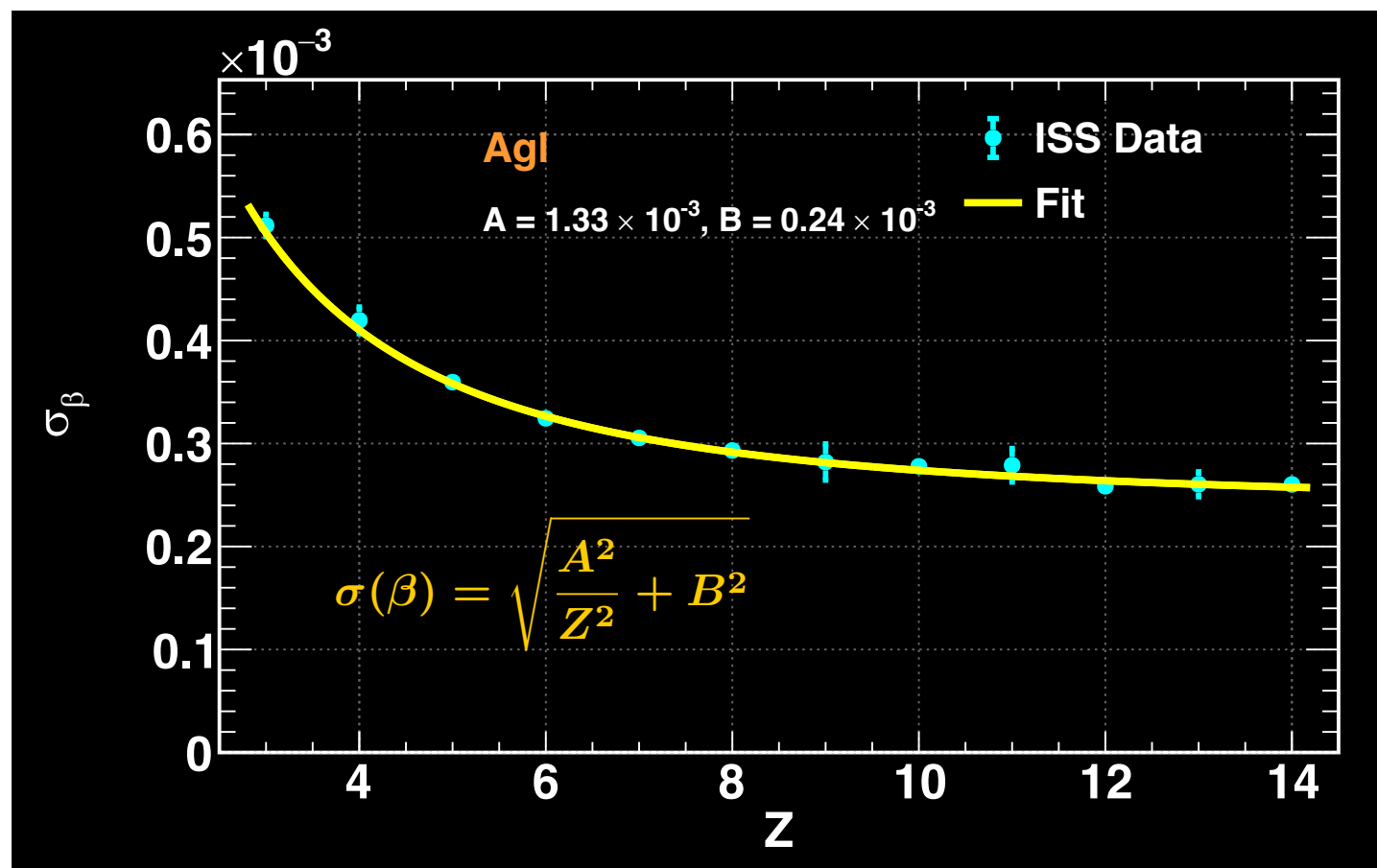
使用最大似然估计，计算在特定张角 $\cos \theta_h$ 下的联合概率并进行最优估计:

$$L(\cos \theta_h, \sigma, a \mid S) = P(S \mid \cos \theta_h, \sigma, a) = \prod_{i=1}^n P(\cos \theta_i \mid \cos \theta_h, \sigma, a)$$



6. RICH 速度分辨

- 经过精确标定和物理重建之后，对于锂 ($Z=3$) 的速度分辨达到了 0.5×10^{-3} ，以及在更高原子核达到了 0.24×10^{-3} ；
- 相较于传统的簇团聚类的重建算法，在有噪声的真实数据的表现得到了明显改善 ($\sim 15\%$)。

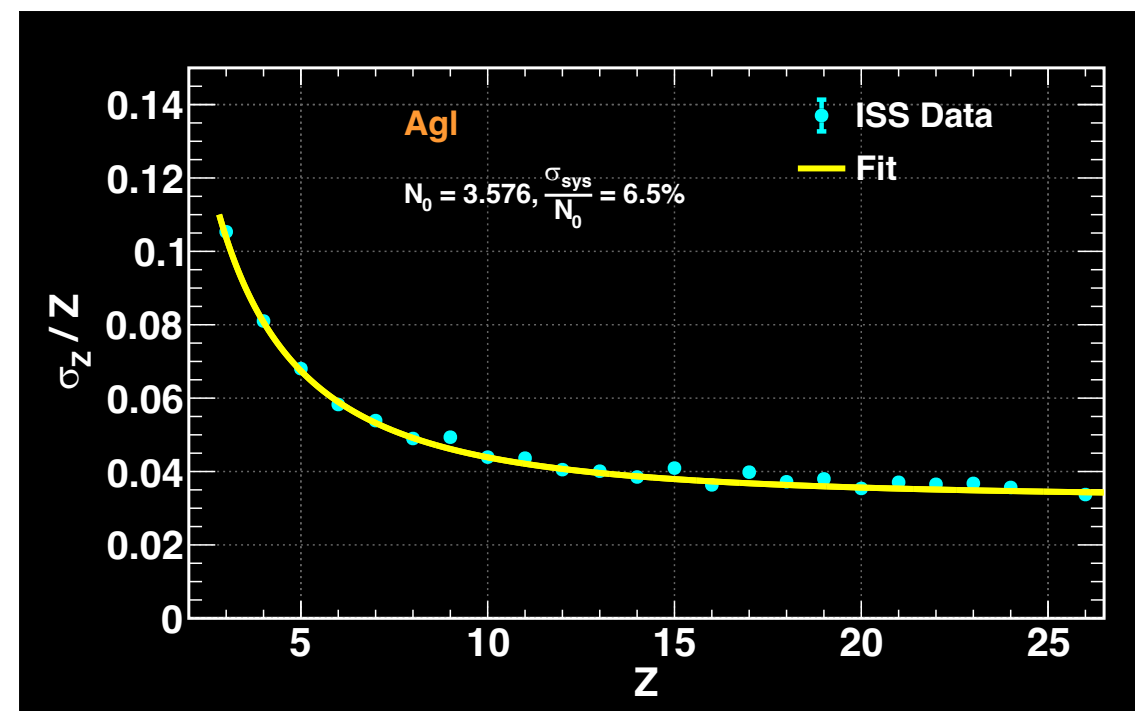
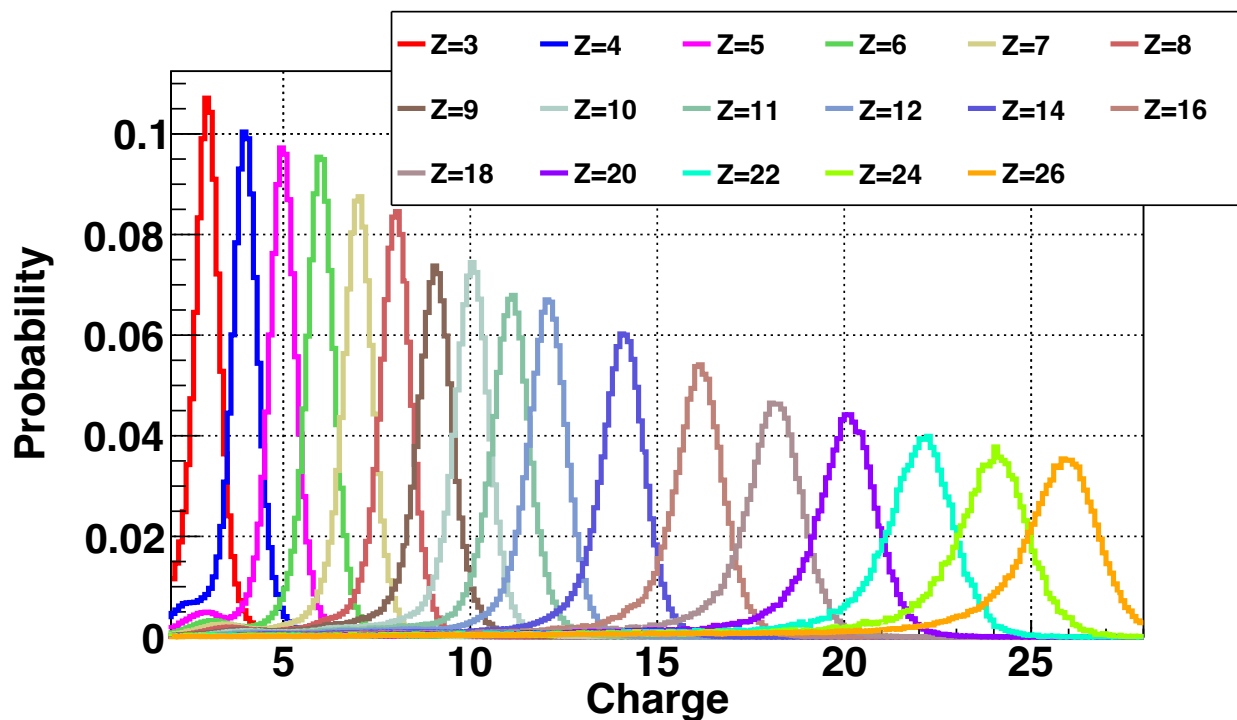


6. RICH 电荷分辨

- 在电荷重建方面，其分辨也有了显著提升，在重核处为 $\frac{\sigma_Z}{Z} \approx 0.04$;
- 为重原子核的分析、相互作用碎裂本底估计提供了下层探测器电荷独立测量。

$$N_{\text{pe}}^{\text{corr}} \propto Z^2 L \left(1 - \frac{1}{n^2 \beta^2} \right)$$

$$Z_{\text{RICH}} \propto \sqrt{\frac{N_{\text{pe}}^{\text{corr}}}{L \sin^2 \theta_c}}$$



总结

- ❑ 切伦科夫探测器是开展宇宙线传播研究、以及反氦、反氦探测的核心探测器之一；
- ❑ 在轨条件下的充足宇宙线样本增加了我们对切伦科夫探测技术的理解；
- ❑ 通过对RICH探测器的位置校准、折射率测量、信号标定，以及基于第一性原理的光线追踪物理重建，RICH 的在轨性能得到了大幅提升：
 - 速度分辨对于锂原子核 ($Z=3$) 优于 0.5×10^{-3}
 - 电荷分辨对于重原子核趋近 0.04
- ❑ 探测技术和物理研究相互促进的一个典型例子。

谢谢!