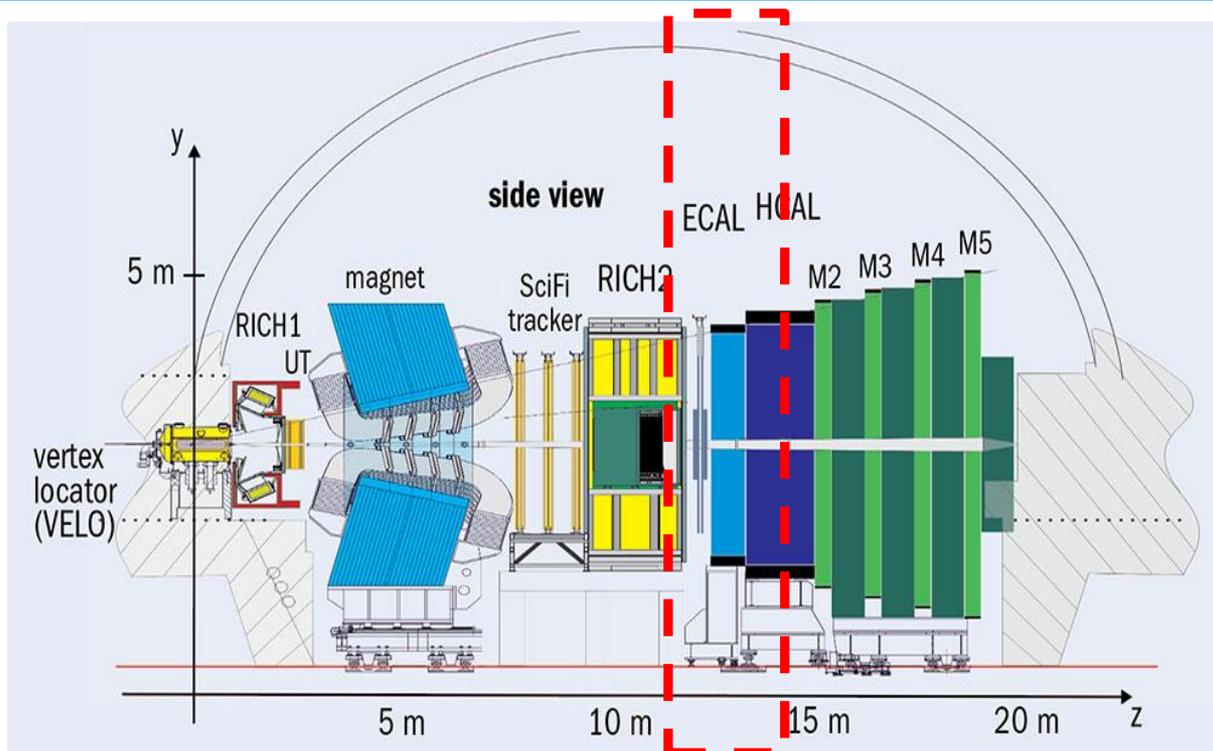


LHCb 实验升级二期混合型电 磁量能器模拟研究

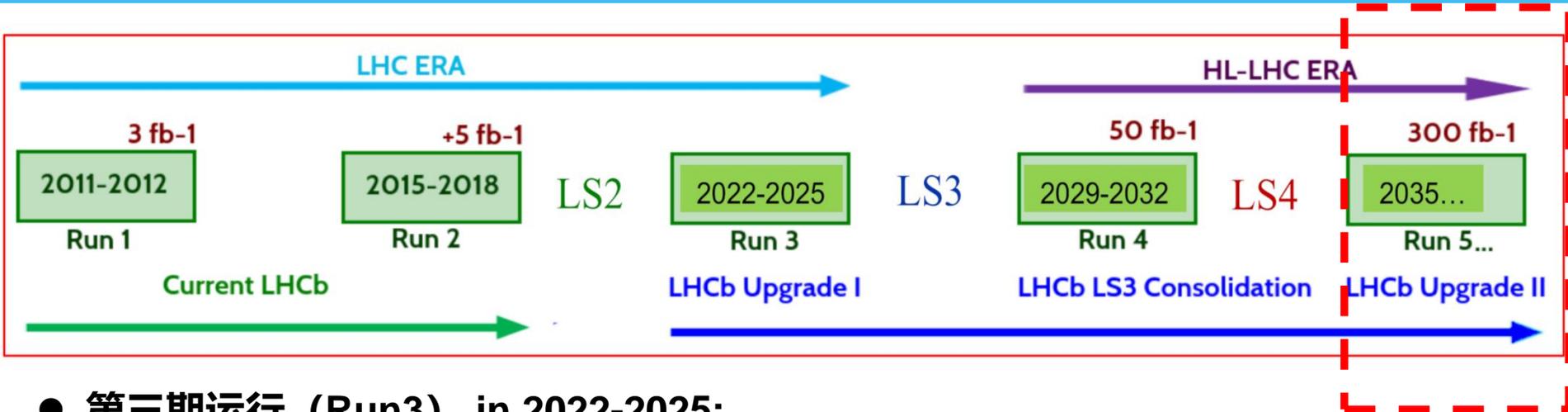
王纪科 (武汉大学)

LHCb探测器



- LHCb探测器是一个单臂前向的谱仪，对应于前向 η 范围 $2 < \eta < 5$ 。它在大型强子对撞机上专门用于重味物理。
- 探测器布局包括一个高精度的径迹探测系统、两个环形的切伦科夫探测器、一个量能器系统和一个 μ 介子探测器。
- **电磁量能器 (ECAL)** 对所有的跟光子/电子有关的物理是关键

LHCb 运行路线



- **第三期运行 (Run3) in 2022-2025:**

ECAL基本不变, 仍然使用Shashlik modules at $L = 2 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

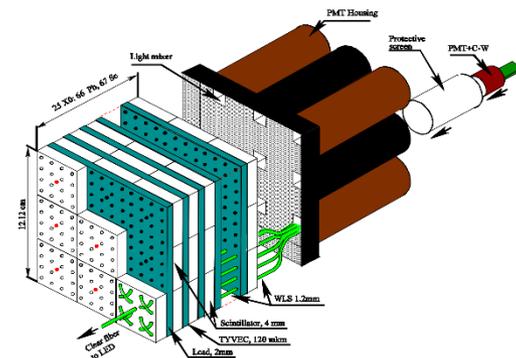
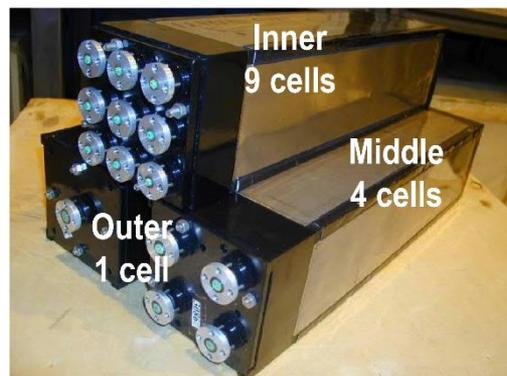
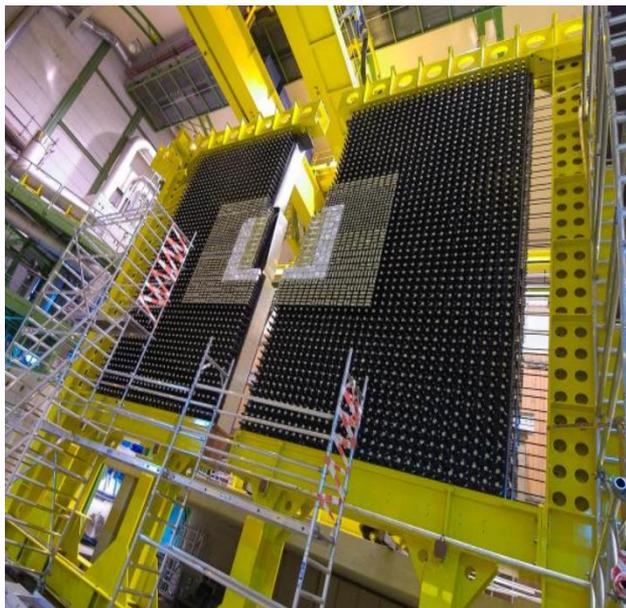
- **第3次长停机 (LS3) 2026-2028:**

Introduce single-section rad. tolerant SpaCal (2×2 and $3 \times 3 \text{ cm}^2$ cells) in inner regions
→ 32 SpaCal-W & 144 SpaCal-Pb modules with plastic fibres compliant with Upgrade II conditions
→ Could include timing information with single-sided readout to inner regions

- **第4次长停机 (LS4) 2032-2035; 进行升级-II (最大的一次升级) :**

Introduce double-section rad. hard SpaCal (1.5×1.5 & $3 \times 3 \text{ cm}^2$ cells) and improve timing of Shashlik modules for a luminosity of up to $L = 1.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
→ Innermost SpaCal-W modules equipped with crystal fibres
→ Include timing information and double-sided readout for pile-up mitigation

LHCb目前电磁量能器



- 横向尺寸为 $12 \times 12 \text{ cm}^2$ 的Shashlik型模块；由2mm厚的铅片交替和4mm厚的闪烁体片交替
- 分成三个不同粒度的区域。内部：单元大小为 $4 \times 4 \text{ cm}^2$ ，中间：单元大小为 $6 \times 6 \text{ cm}^2$ ，以及单元大小为 $12 \times 12 \text{ cm}^2$ 的外部区域。
- Shashlik模块的辐射耐受性已通过辐照活动进行了深入研究，结论：40 kGy是极限。对于内部区域，预计第三次长停机时（LS3）将达到这一剂量。

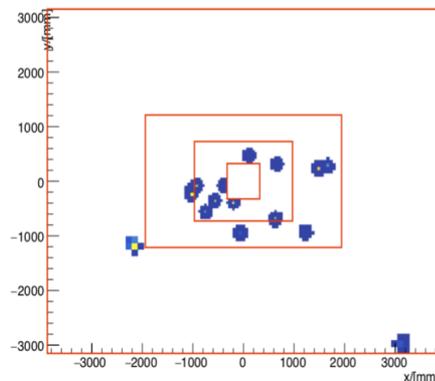
LHCb升级-II的物理要求

要求电磁量能器在将来
 $1.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 极高
亮度的情况下:

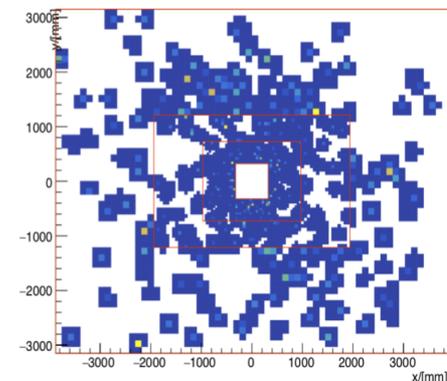
- 仍然保持能量分辨
- 耐辐照
- 处理高占有率

(occupancy) 和堆
积效应 (pile-up)
- 增加粒度
- O(10)ps量级时间测量
精度

Present $L = 2 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

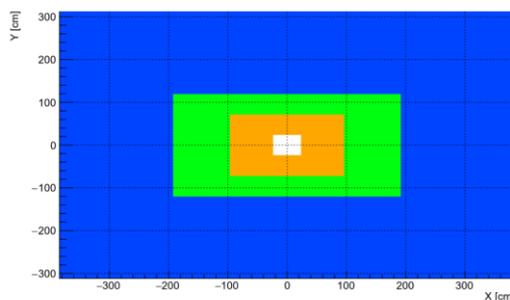


Upgrade II with $L = 1.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

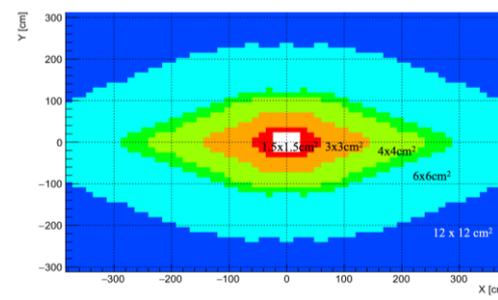


Current geometry:

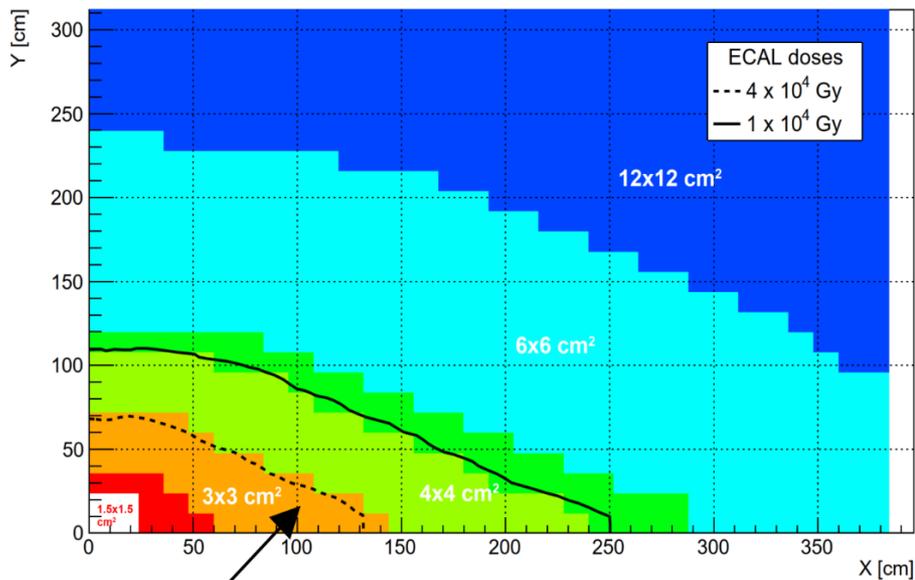
Cell size



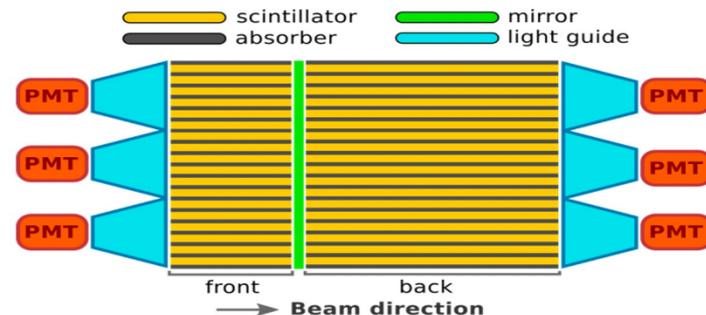
升级-II



LHCb升级-II电磁量能器 (基准)



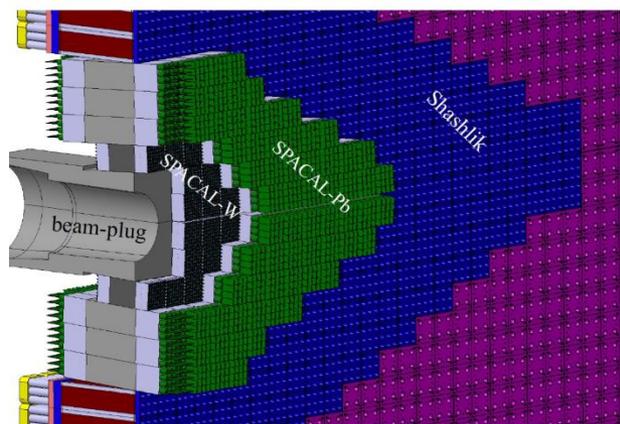
Radiation limit of current Shashlik technology



区域	Region-1	Region-2	Region-3和 Region-4	Region-5	Region-6
种类	Shashlik	Shashlik	Shashlik	SPACAL	SPACAL
粒度	12*12 cm ²	6*6 cm ²	4*4 cm ²	3*3 cm ²	1.5*1.5 cm ²

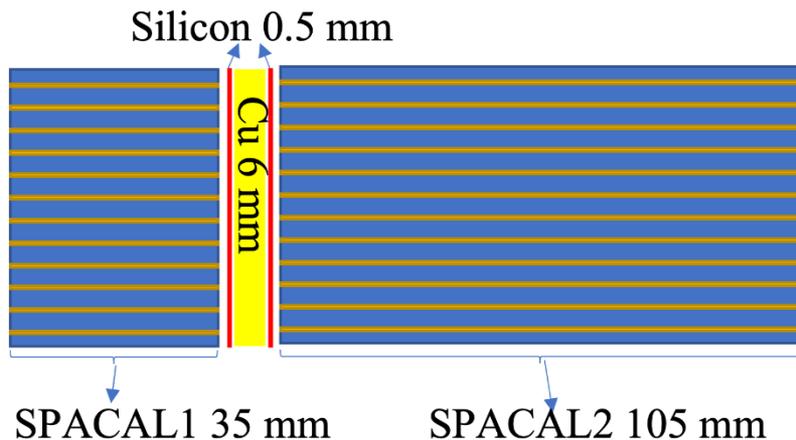
升级-II的量能器的基准方案:

- 更多不同粒度的区域 (5个)
- 在中央区域 (红、橙), 引入新技术模块
- 引入纵向分隔 (更好时间分辨、重建、PID等等)



- 最里面的区域模块: W型吸收器配备了石榴石晶体纤维构成 (SPACAL W/GAGG)
- 稍外的一个区域模块: 铅吸收器和聚苯乙烯纤维构成 (SPACAL Pb/PS)

LHCb升级-II中混合型电磁量能器



- 对最里面2个区域使用的SPACAL模块，在它们的中间插入2层硅层
- 硅层的厚度定为0.5 mm，中间是6 mm的金属Cu冷却层。硅层中每个单元的大小是 $5*5 \text{ mm}^2$ 。

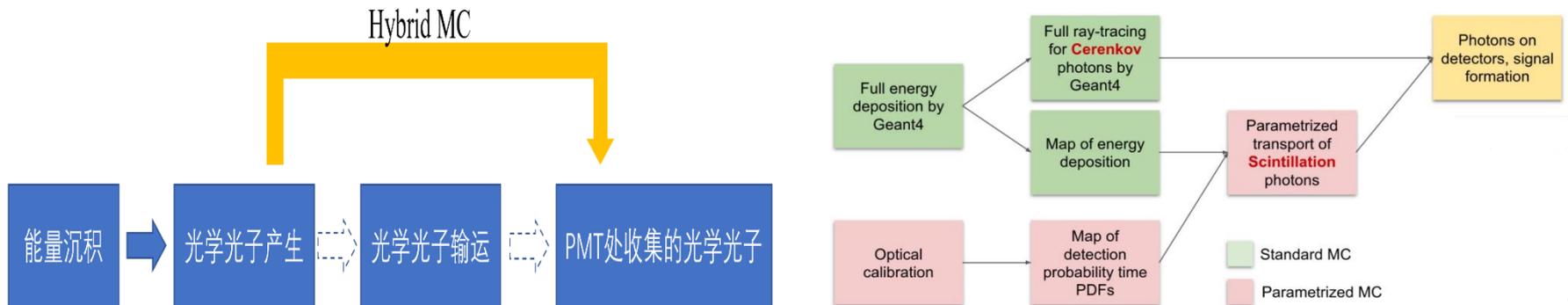
该新型混合型电磁量能器不同区域的模块和粒度

区域	Region-1	Region-2	Region-3和 Region-4	Region-5	Region-6
种类和 粒度	$12*12 \text{ cm}^2$ Shashlik	$6*6 \text{ cm}^2$ Shashlik	$4*4 \text{ cm}^2$ Shashlik	$3*3 \text{ cm}^2$ for SPACAL and $5*5 \text{ mm}^2$ for silicon	$1.5*1.5 \text{ cm}^2$ for SPACAL and $5*5 \text{ mm}^2$ for silicon

- 更进一步提升：位置分辨、时间分辨等；更多纵向信息（→多变量分析）

Hybrid混合式MC模拟

- MC模拟仿真中，光学光子数量极多，且非常多的光子并不会到达PMT，使用G4来仿真闪烁体的光学过程将消耗大量的CPU时间。使得仿真效率很低
- **Hybrid混合式模拟本质是通过参数化的方式替代MC模拟仿真运输的过程：**
 - 对于闪烁体产生的光学光子进行参数化的模拟，而对包括切伦科夫光子在内的其他部分进行常规的粒子追踪模拟：
 - 首先模拟一大批光学光子产生后在某个闪烁体晶体的运输过程，得到PMT进入面处此晶体的光学运输时间与效率分布的数据集。
 - 通过Geant4仿真能量沉积，然后根据闪烁体中的能量沉积和闪烁体的光产额进行泊松抽样，得到光学光子信息

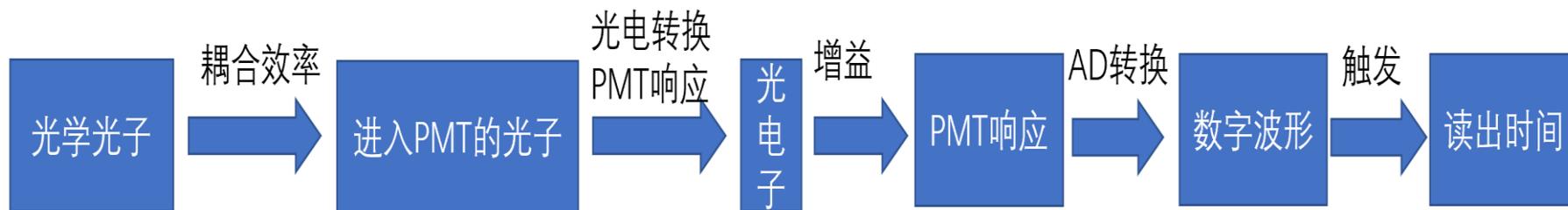


电子学系统的模拟仿真

在G4中完成能量沉积与光子输运的模拟后，可以得到PMT进入面的光子数目与到达时间。

基于这些然后对电子学系统按如下步骤进行模拟仿真：

- 仿真光子进入PMT的耦合成功率，即每多少个光子可以成功进入一次PMT。仿真光阴极量子效率，即此光子激发电子的概率，此概率与光波长相关。
- 仿真PMT对光子存在的响应时间，因此需要对光子的到达时间加入高斯模糊，同时考虑一下光子耦合的延时，最终可以得到每个光子的响应时间戳。仿真PMT的光电子增益，以及单光电子输出响应分布。
- 将所有光电子的分布在时间线上叠加得到PMT的输出响应波形。
- 仿真AD转换与触发过程。
 - 根据ADC设置采样精度与参考电压噪声
 - 软件模拟CFD触发。触发界限设置为0.2倍参考电压，触发方向为负电压

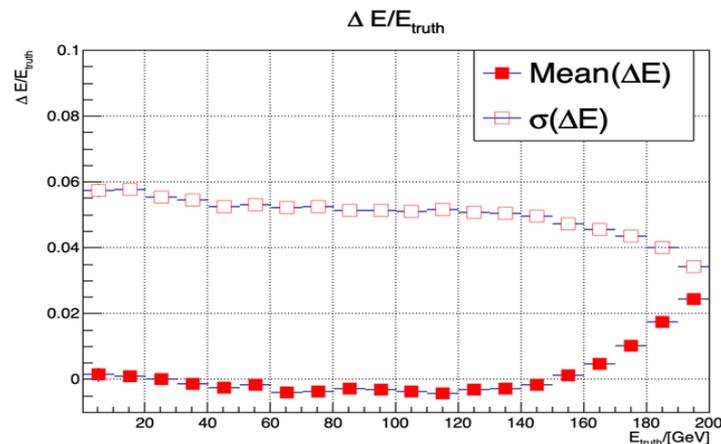
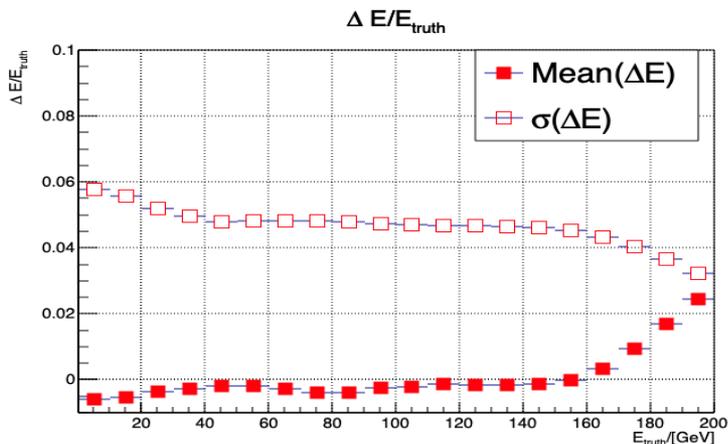
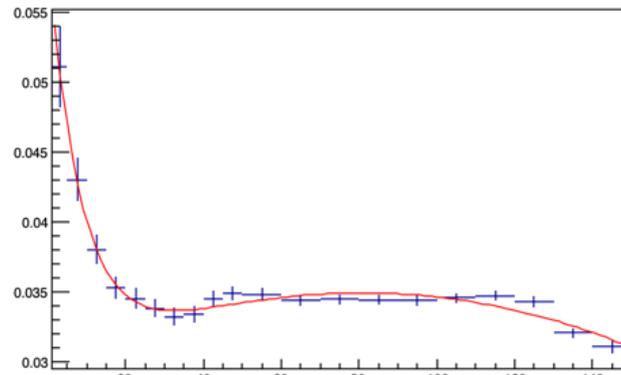
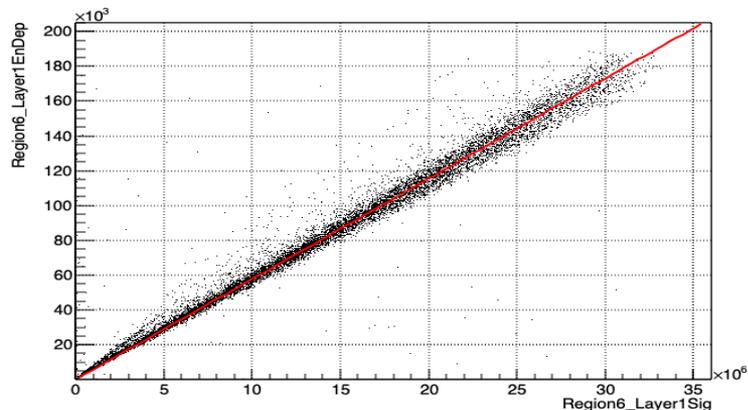


能量分辨的改进

- 能量刻度分为两步，第一步把cell的读出信号刻度为cell的沉积能量。如下， E_{Cell} 为刻度后的能量， Sig_{Cell} 为cell的读出信号， $[n]$ 为拟合参数。 $E_{Cell} = [0] + Sig_{Cell} * [1]$

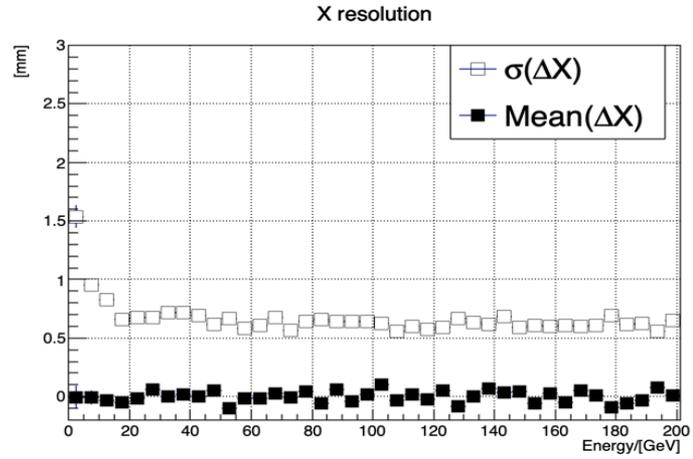
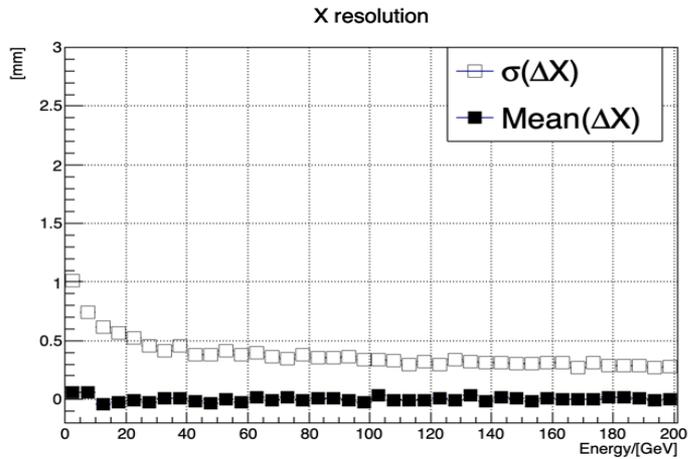
- 第二步把簇团 (cluster) 的能量校准为入射粒子的能量：

$$E_{Corr} = ([0] + [1] * e^{[2]*e}) * ([3] + [4] * e + [5] * e^2)$$



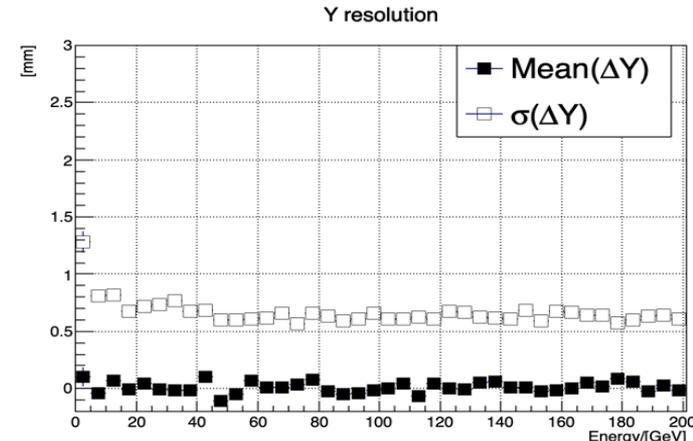
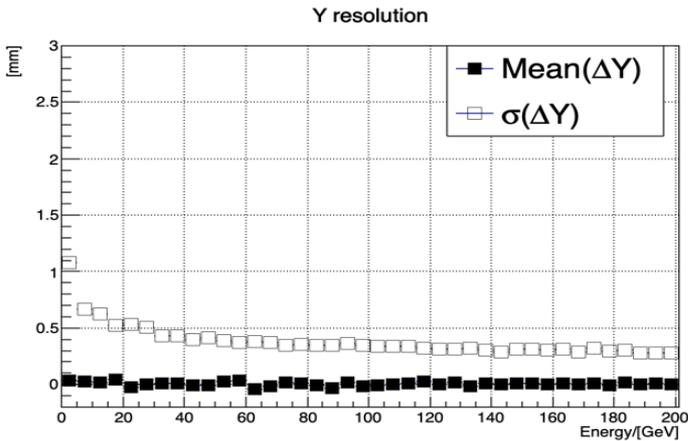
左：该新型混合型量能器；右：基准量能器。能量分辨随着能量的变化。

空间分辨的改进



左：该新型混合型量能器；右：基准量能器。X-向空间分辨随着能量的变化。

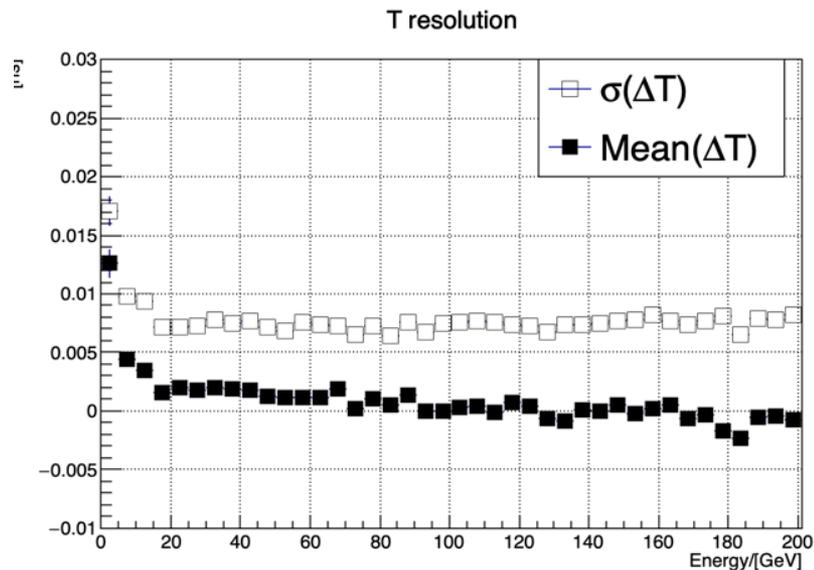
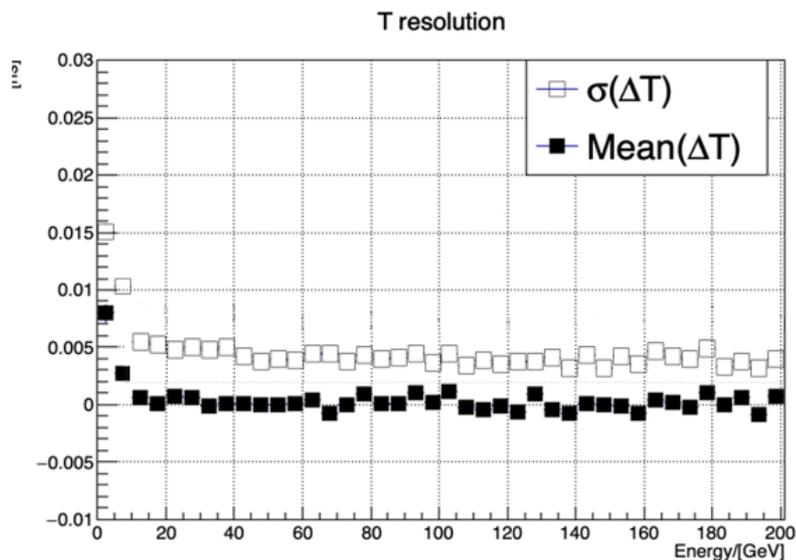
较大改进



左：该新型混合型量能器；右：基准量能器。Y-向空间分辨随着能量的变化。

时间分辨的改进

- 各层时间权重为: $W_{layer_i} = \frac{1}{(\sigma_{layer_i}^t(E))^2}$

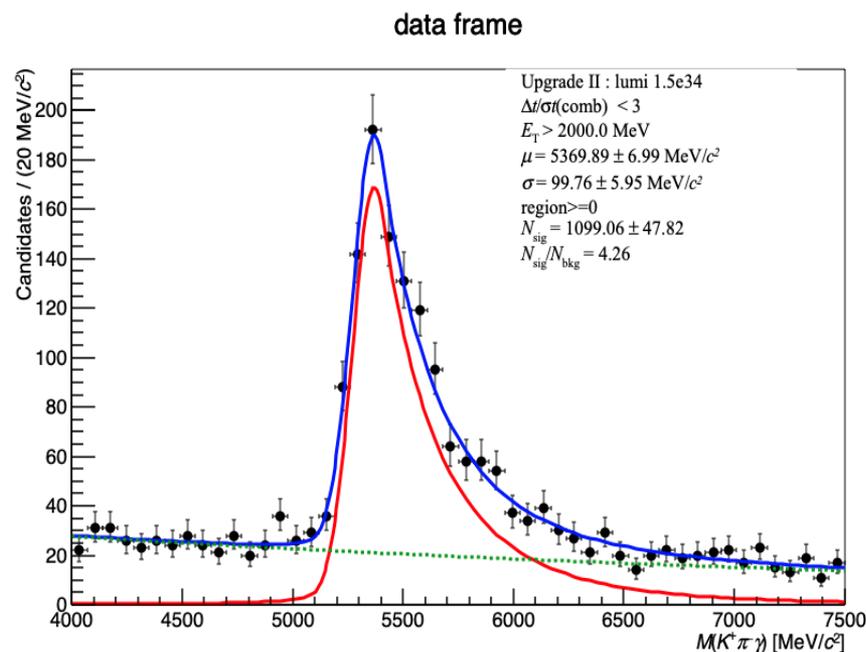
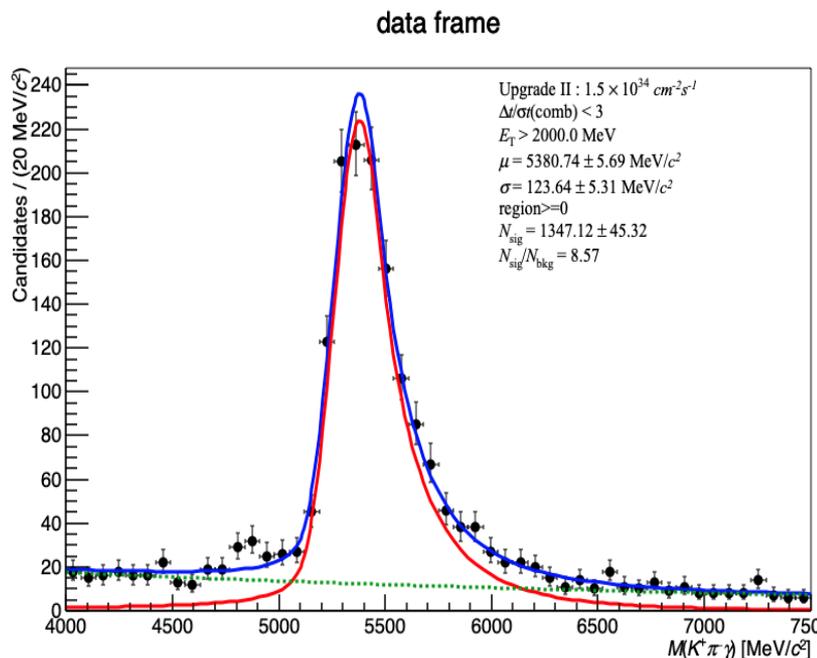


左：该新型混合型量能器；右：基准量能器。Y-向空间分辨随着能量的变化。

较大改进

物理分析道 $B^0 \rightarrow K^* \gamma \rightarrow (K\pi)\gamma$ 的结果

- 使用高亮度环境下（亮度为 $1.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ）模拟产生的物理衰变道
- 对 K 和 π 粒子的真实动量进行了 10% 的 smearing 来代替前面探测器的效应。
- $792 < M(K\pi) < 992 \text{ MeV}, p_T(K/\pi) > 500 \text{ MeV}, p_T(\gamma) > 2000 \text{ MeV};$
光子满足 $\Delta t/\sigma t < 3$

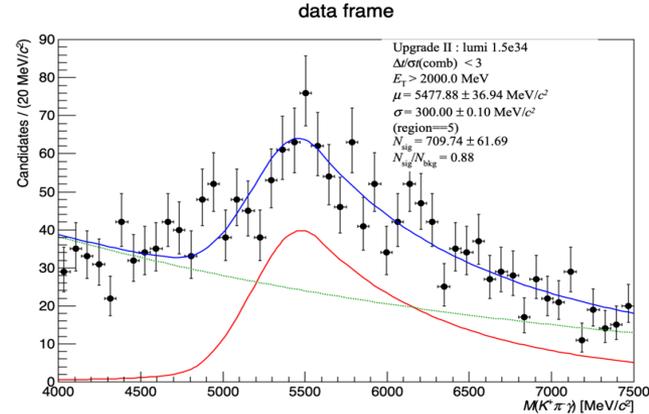
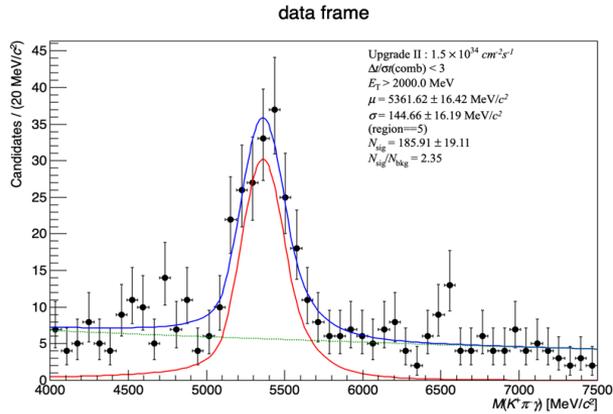


左：该新型混合型电磁量能器对应的 $M(K\pi\gamma)$ 分布，右：基准电磁量能器。

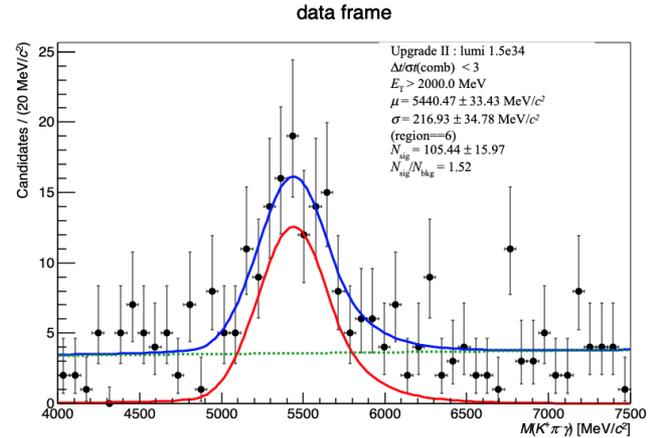
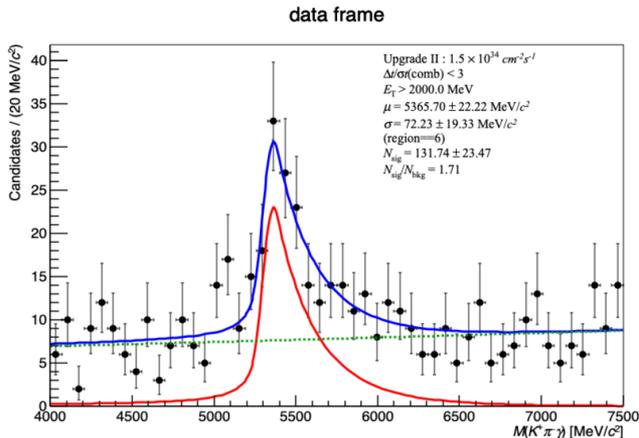
显著度：8.57 vs. 4.26

物理分析道 $B^0 \rightarrow K^* \gamma \rightarrow (K\pi)\gamma$ 的结果

- 由于只在Region-5和Region-6插入了Si层，在这2个区域内的事例进行单独的比较：



Region-5, 左：该新型混合型电磁量器，右：基准电磁量能器。显著度：2.35 vs. 0.88



Region-6, 左：该新型混合型电磁量器，右：基准电磁量能器。显著度：1.71 vs. 1.52

总结

- 针对未来高亮度运行情况，与传统的单一型量能器不同，设计了一种新颖的带有硅层与闪烁体层的混合型量能器
 - 并且对该新型混合型量能器的性能从单粒子分辨和物理道灵敏度的角度，进行了较全面研究。
 - 初步结果表明，该混合型量能器（相对于基准的纯闪烁体型量能器）能提高空间分辨、时间分辨和能量分辨；能提高物理道的显著度
 - 样机模块准备中
- 将对 LHCb Upgrade II 电磁量能器的设计的确定以及建造提供较为有意义的参考

*Thanks for your
listening!*