



山东大学

2025年超级陶浆装置研讨会

# Application of CNN for DTOF

姚志鹏, 李腾, 黄性涛

山东大学

2025.07.04 湖南科技大学

**I. 研究背景**

**II. CNN重建算法**

**III.  $\pi/K$  鉴别性能**

**IV. 五分类的初步扩展**

**V. 总结和展望**

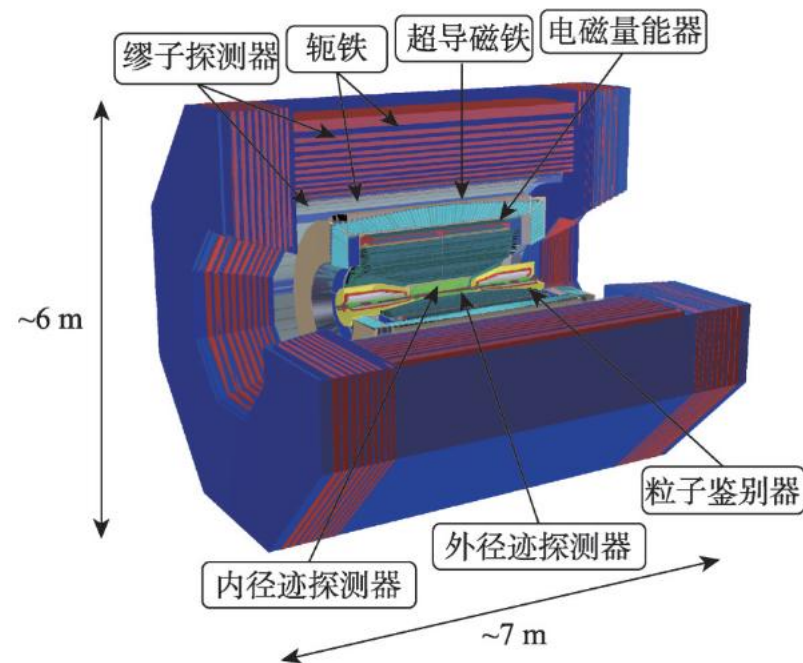
# 1 超级陶粲装置 (STCF)



超级陶粲装置 (STCF) 是中国新一代的正负电子对撞机

- 质心能量 2-7 GeV
- 峰值亮度  $0.5 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
- 具备未来进一步提升峰值亮度和实现束流极化的空间
- $c$ 夸克和 $\tau$ 轻子的物理研究
- 非微扰强相互作用和强子结构
- 新物理寻找

径迹系统 (ITK 和 MDC), 粒子鉴别器(PID), 电磁量能器 (ECAL), 超导线圈 (SCS), 缪子探测器 (MUD)

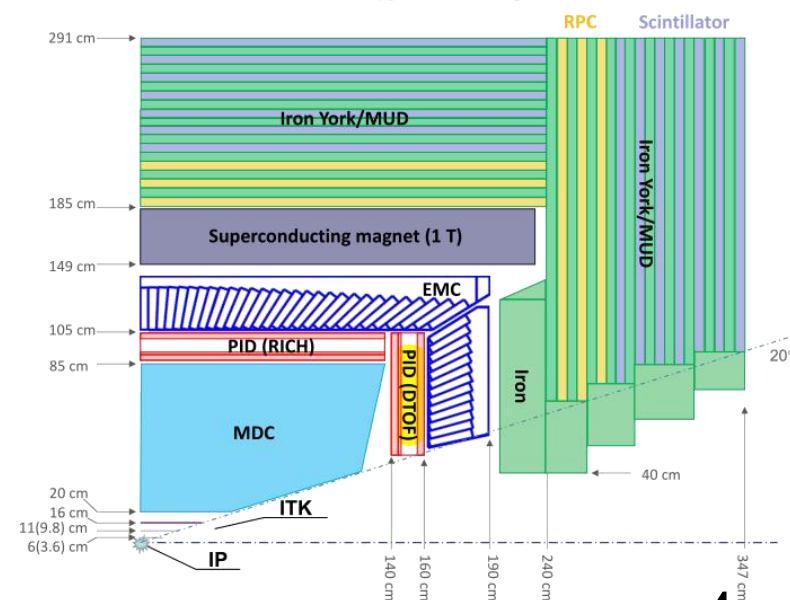
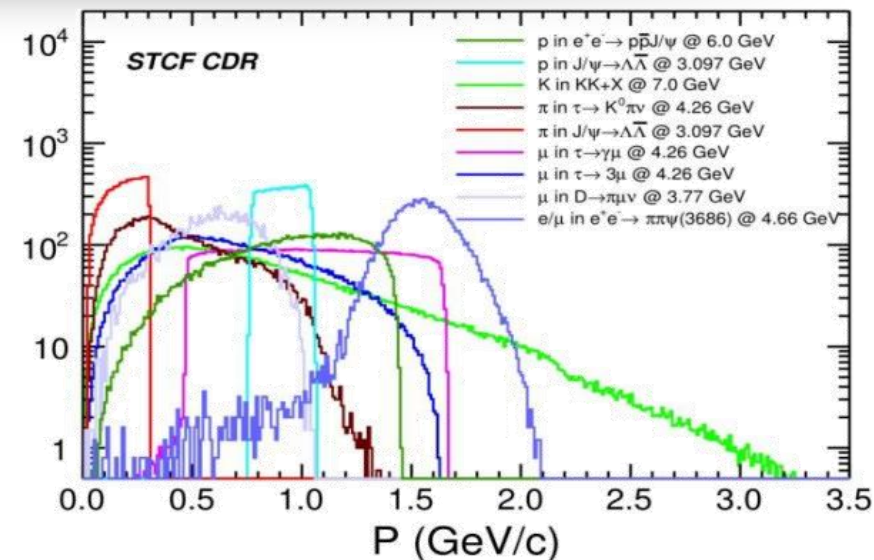


粒子鉴别 (**PID**) 是离线数据处理中用于判定粒子类型的技术  
PID性能影响物理量的测量精度以及分析流程的可靠性

- $p < 2 \text{ GeV}/c$ 时,  $\pi/K$  误判率  $< 2\%$ 时, 相应鉴别效率  $> 97\%$
- $p > 0.7 \text{ GeV}/c$ 时,  $\mu$ 子鉴别效率  $> 95\%$ ;  $0.5 < p < 0.7$ 时, 其  $> 70\%$
- 良好的中性粒子鉴别能力

专用PID系统, 使用两种不同的切伦科夫探测技术:

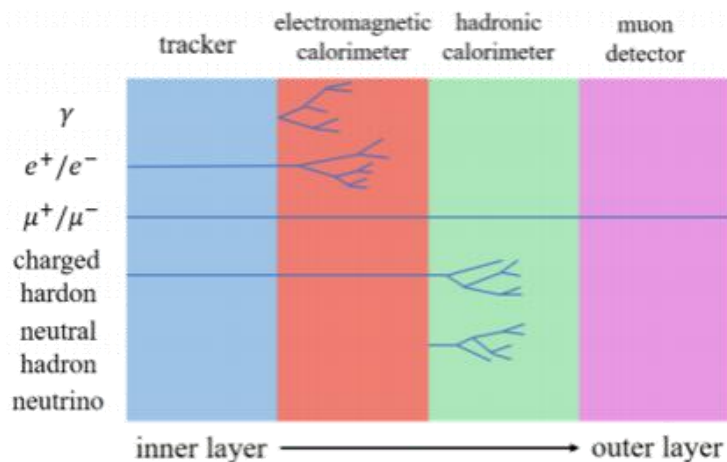
- 端盖: 基于探测内部全反射切伦科夫光的飞行时间探测器 (**DTOF**)
- 桶部: 环形成像的切伦科夫探测器 (**RICH**) / (**BTOF**)



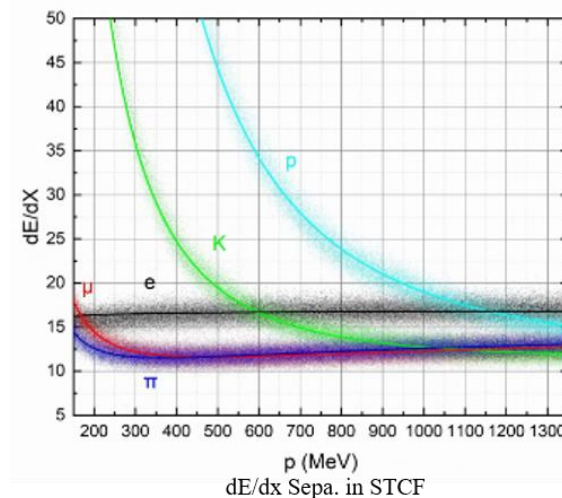
# 基于机器学习的PID技术

不同粒子在各子探测器中的响应不同，仅依赖单个子探测器的信息很难准确地分辨粒子

机器学习凭借在高维空间中大规模数据处理的能力，在PID领域表现出优异的性能

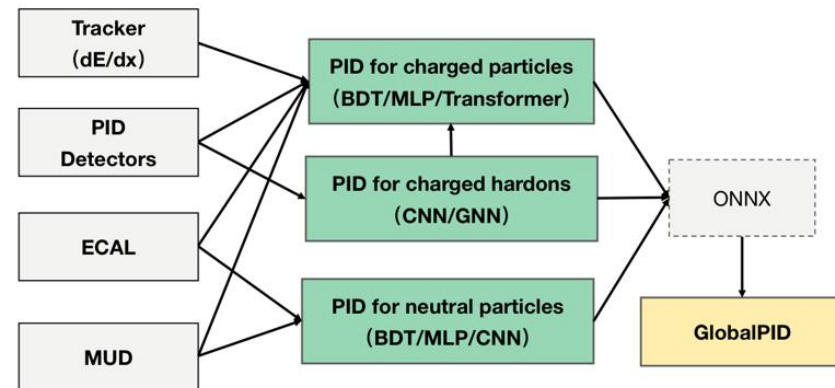


- 联立多个子探测器的信息
- 充分利用探测器的原始响应



针对不同探测器，开发定制的机器学习PID算法，可基于ONNX技术移植到OSCAR框架

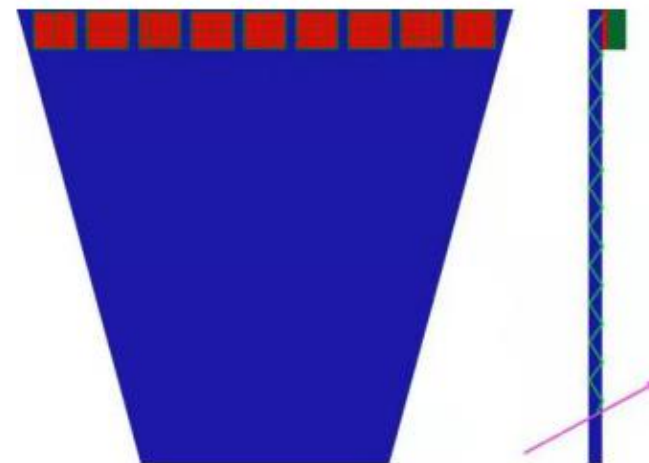
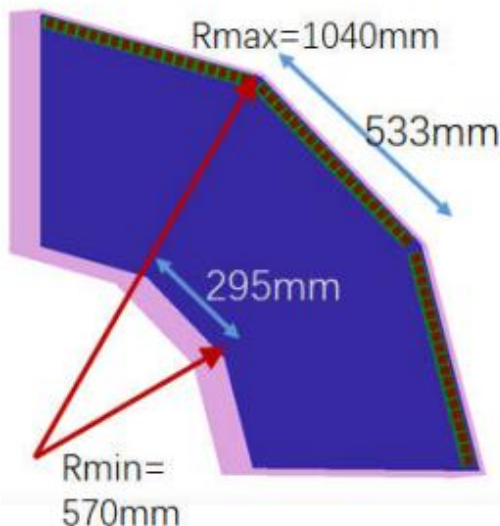
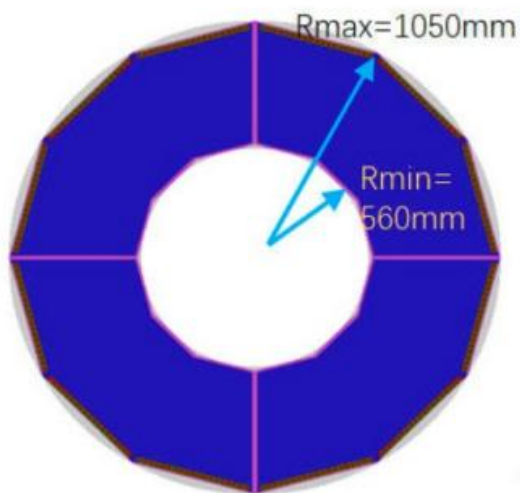
本报告针对DTOF  $\pi/K$ 鉴别，利用探测器原始响应和径迹级信息来开发卷积神经网络（CNN），以满足STCF对其高PID能力的要求



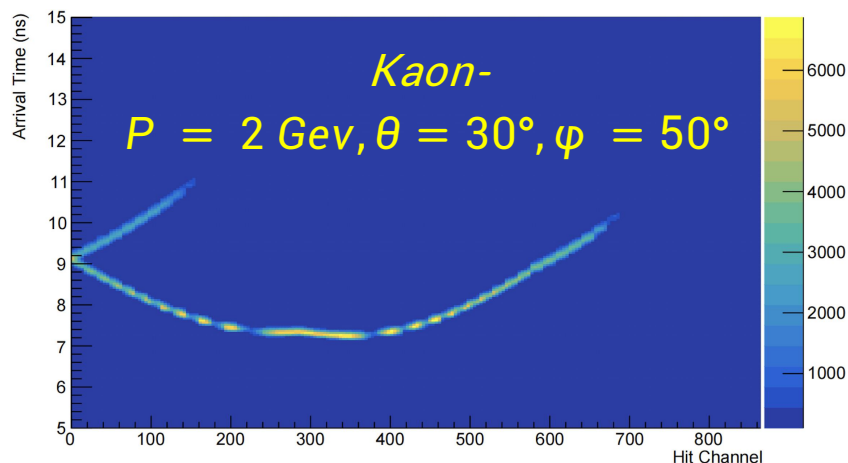


DTOF作为STCF的端盖PID探测器，是基于探测内部全反射切伦科夫光的技术

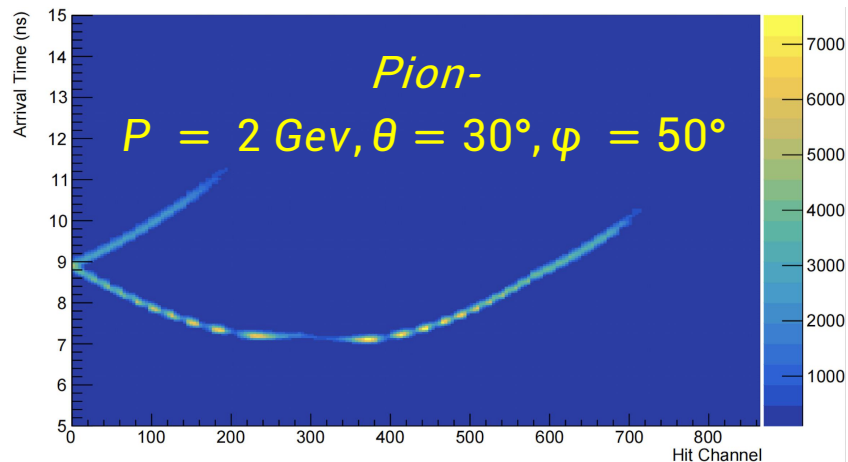
- 由两个相同的圆盘组成，每个含多个相同的扇区单元
- 探测器覆盖的极角约为  $20-39^\circ$
- 熔融二氧化硅作为切伦科夫辐射体产生光子，兼作光导
- 外侧耦合多阳极微通道光电倍增管 (MCP-PMTs) 探测切伦科夫光子



利用 DTOF 探测器原始响应：切伦科夫光子的到达时间和击中位置，构建二维pixel map：



- X-label: PMT所接收的切伦科夫光子的击中通道
- Y-label: PMT所接收的切伦科夫光子的到达时间
- Value: bin内探测到的切伦科夫光子数目



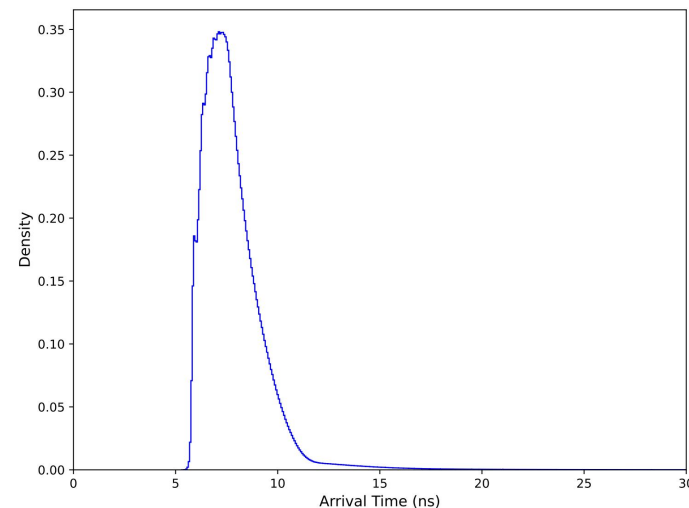
- ◆ 构建的图像表示产生的切伦科夫光子的时空模式，能反映出不同粒子产生的拓扑结构
- ◆ 图像中像素值更大的区域表示在当前时间，光子有更大的概率击中对应的PMT通道上

对于类图像数据，计算机视觉中拥有局部连接、权值共享等特点的CNN是一个合适的选择

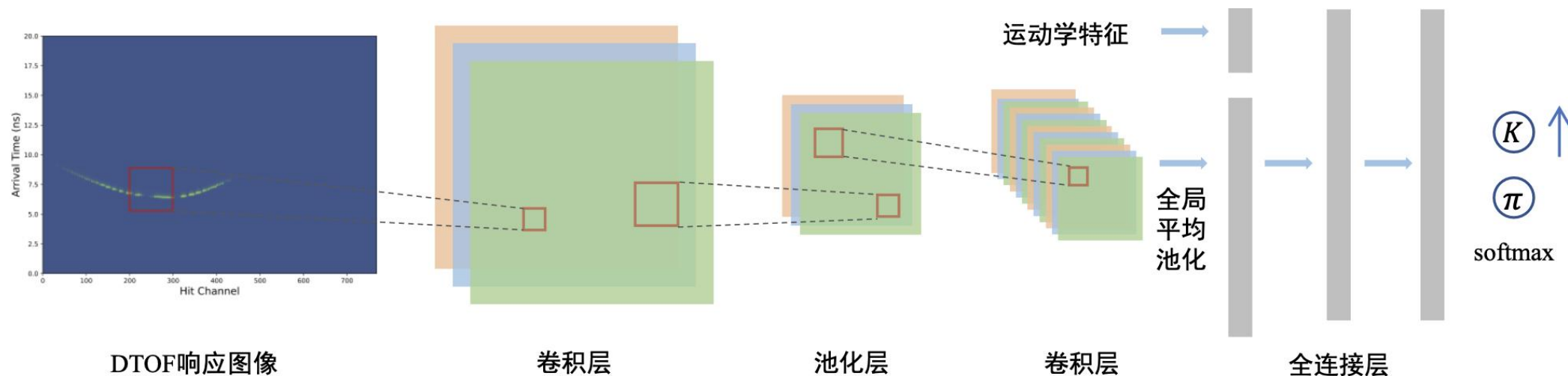
OSCAR2.6.2模拟单粒子 $\pi/K$ ，动量0.3-2.4 Gev，数据量达1500w（击中DTOF时，单扇区单径迹）

根据大量数据的Channel和Time分布：

- $0 \leq 4 * \text{Channel\_x} + \text{Channel\_y} \leq 768$
- $5 \leq \text{Time} \leq 20 \text{ ns}$  (时间分辨：50 ps)
- 分bin:  $\text{Channel} * \text{Time} = 192 * 300$
- 径迹级信息：入射粒子击中DTOF时的三维动量和位置



CNN 完全基于数据本身进行学习，隐式地建立响应特征和粒子类型之间的非线性映射关系



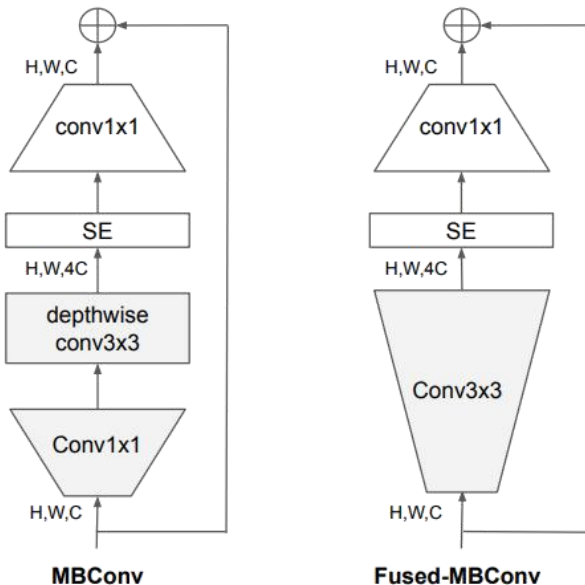


## 谷歌 EfficientNet 家族

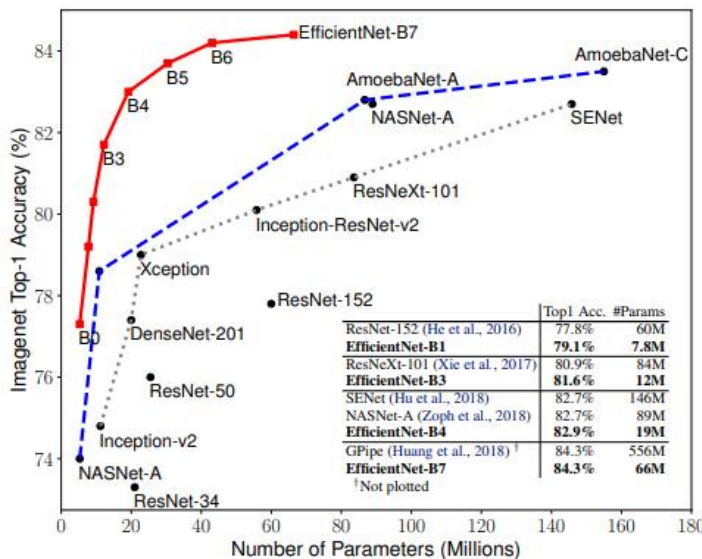
**Version1:** 采用复合系数均匀缩放网络深度/宽度/输入图像分辨率的大小, 能力强大

**Version2:** 更轻量化的网络, 相较于V1, 减少了参数量, 加快了计算速度, 兼顾效率和精度

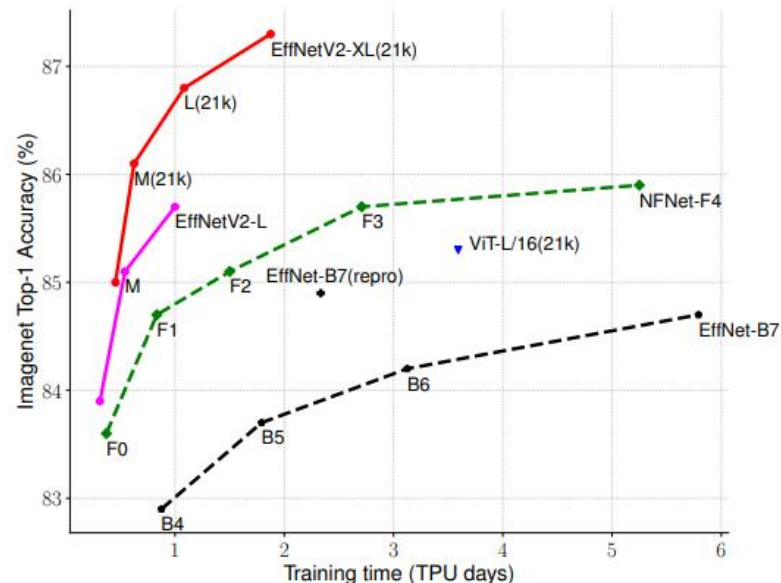
移动翻转瓶颈卷积



V1准确率



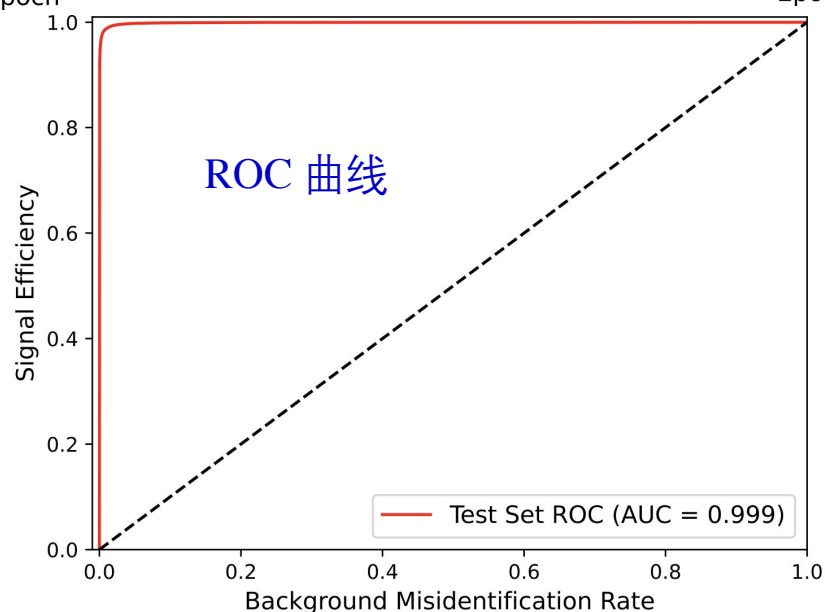
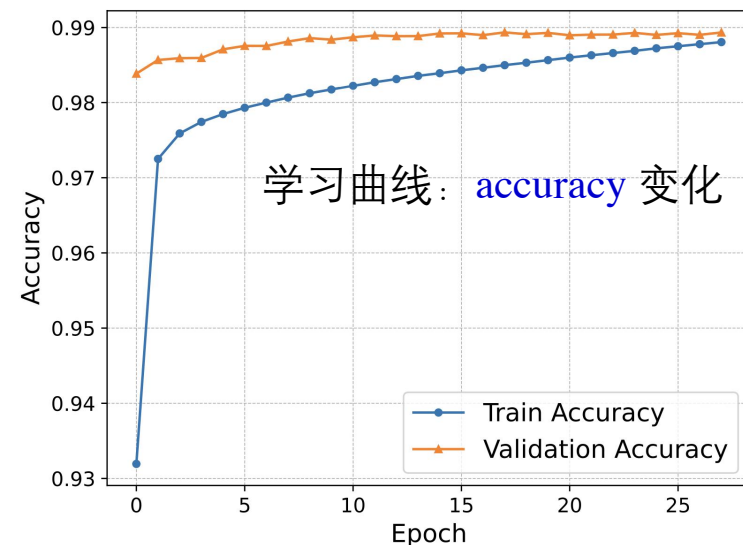
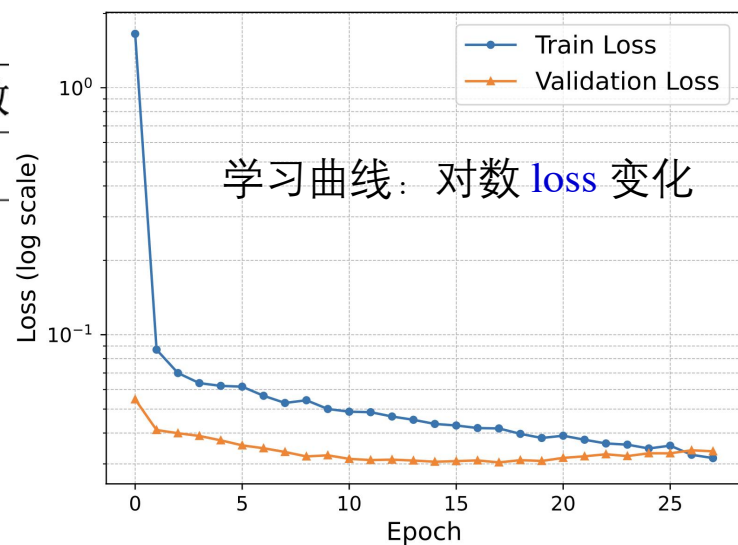
V2改进



EfficientNetV2-Small 作为基准模型并进行定制性调整与优化

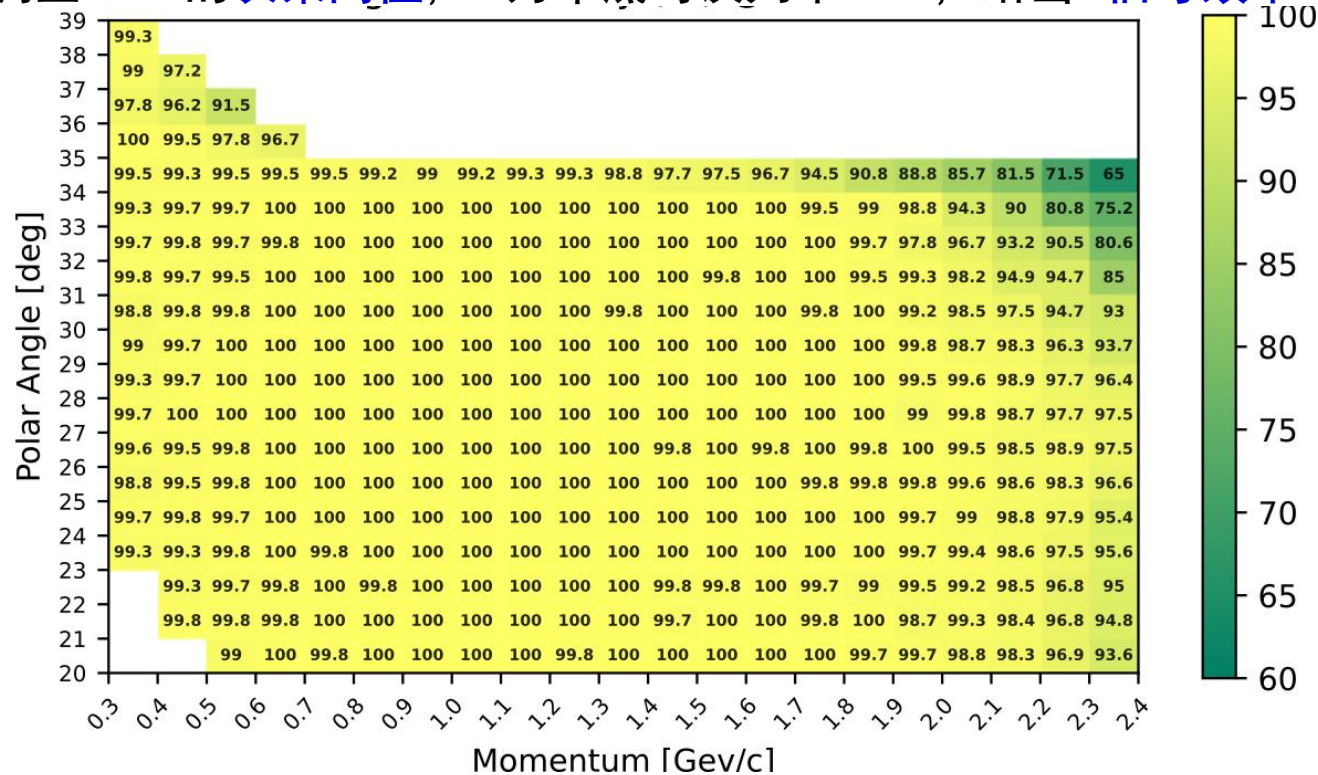
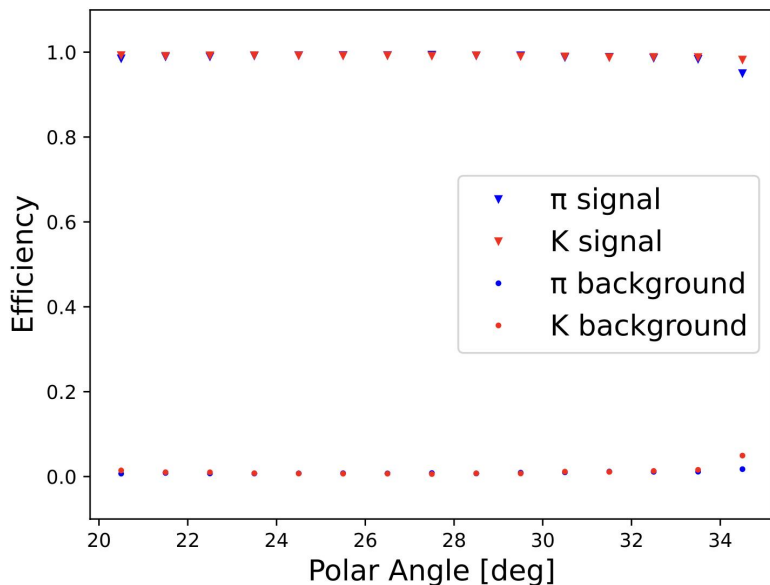
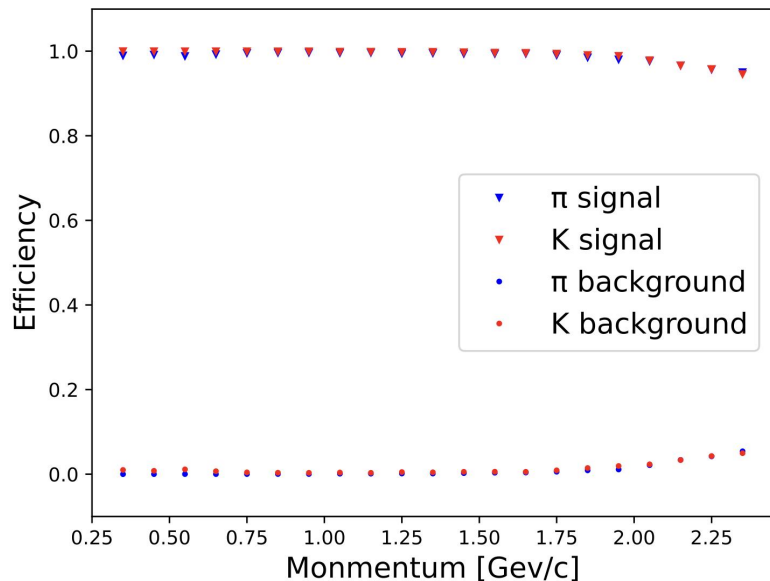
STCF DTOF 下定制的 EfficientNetV2-S 网络架构

| 阶段                                       | 操作类型                        | 步长 | 输出通道 | 层数 |
|------------------------------------------|-----------------------------|----|------|----|
| 图像主干路径: DTOF 输入图像 (尺寸 $300 \times 192$ ) |                             |    |      |    |
| 1                                        | $3 \times 3$ 卷积             | 2  | 24   | 1  |
| 2                                        | Fused-MBConv1_ $3 \times 3$ | 1  | 24   | 2  |
| 3                                        | Fused-MBConv4_ $3 \times 3$ | 2  | 48   | 4  |
| 4                                        | Fused-MBConv4_ $3 \times 3$ | 2  | 64   | 4  |
| 5                                        | MBConv4_ $3 \times 3$       | 2  | 128  | 6  |
| 6                                        | MBConv6_ $3 \times 3$       | 1  | 160  | 9  |
| 7                                        | MBConv6_ $3 \times 3$       | 2  | 256  | 15 |
| 8                                        | $1 \times 1$ 卷积 + GAP       | -  | 1280 | 1  |
| 辅助路径: 粒子运动学输入向量 (5 维)                    |                             |    |      |    |
| 8                                        | 全连接映射                       | -  | 32   | 1  |
| 多模态融合与分类头                                |                             |    |      |    |
| 9                                        | 拼接 + 全连接层                   | -  | 256  | 1  |
| 10                                       | $\pi / K$ 概率输出              | -  | 2    | 1  |



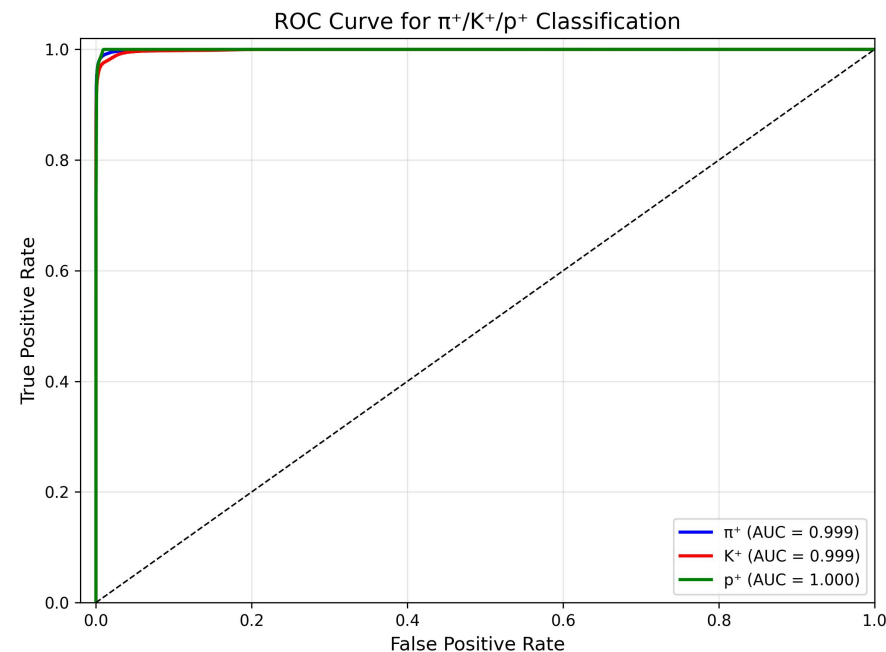
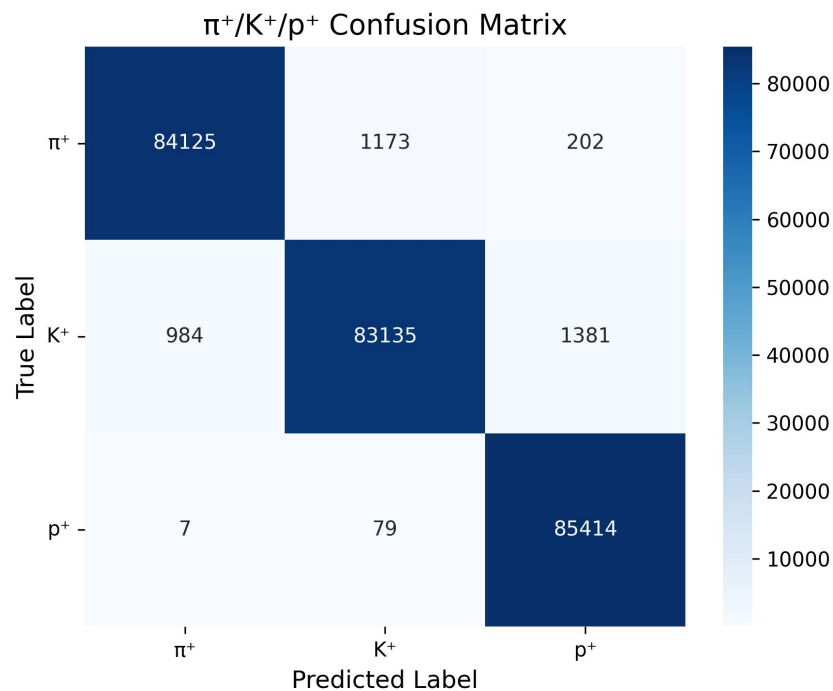
$\pi/K$ 在不同动量和极角范围下的信号效率和本底误判率

调整CNN的决策阈值,  $K$ 为本底时误判率 $<2\%$ , 给出 $\pi$ 信号效率:



- 在动量达2Gev时, 能够满足STCF对 $\pi/K$ 鉴别效率的要求
- 高动量、大角度区域效率有所衰减, 存在进一步优化空间
- CNN模型通过ONNX技术已部署至OSCAR作为重建算法

使用 $e^+$ 、 $\mu^+$ 、 $\pi^+$ 、 $k^+$ 、 $p^+$ 五种带电粒子进行训练，并检查其中带电强子 $\pi^+$ / $k^+$ / $p^+$ 的性能



五分类**整体训练**结果与挑选出其中 $\pi^+$ / $k^+$ 粒子**单独训练**得到的结果，进行对比，性能一致

基于CNN的DTOF重建算法可以推广至五分类，能为Global\_PID提供高级重建特征



- 对于STCF DTOF上的PID开发了一个CNN模型，利用原始探测器响应构建结构化像素图像，同时合并径迹级运动学特征进行训练
- 目前 $\pi/K$ 鉴别的性能满足了STCF的需求，端到端的CNN重建算法也可以推广到五分类
  
- 针对性的增加数据以继续优化高动量、大角度的 $\pi/K$ 鉴别性能，同时性能扩展到3.5 Gev
- 五分类模型在高统计量下的继续训练，在性能检查与验证后部署至OSCAR
- DTOF CNN 重建的思路可以直接推广到RICH和BTOF上进行尝试