



中国科学院高能物理研究所

北京谱仪III离线软件系统 发展与升级

季晓斌（代表BESIII离线软件组）

中国科学院高能物理研究所

全国粒子物理学术会议

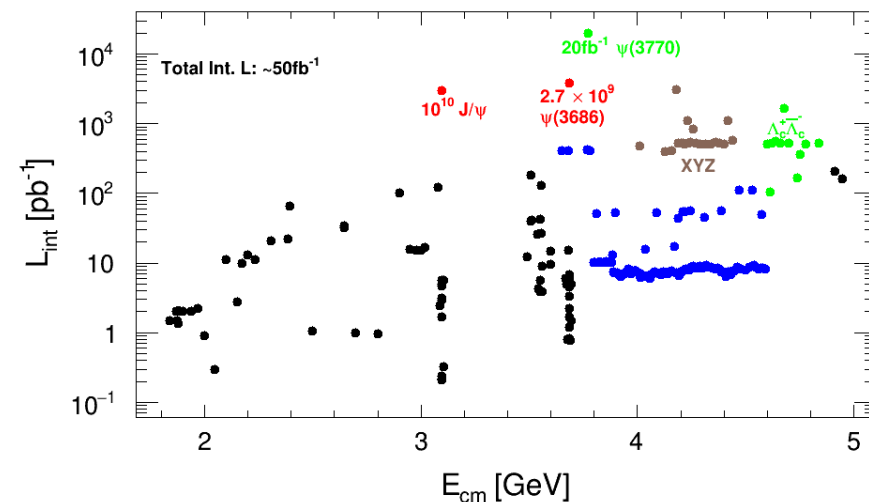
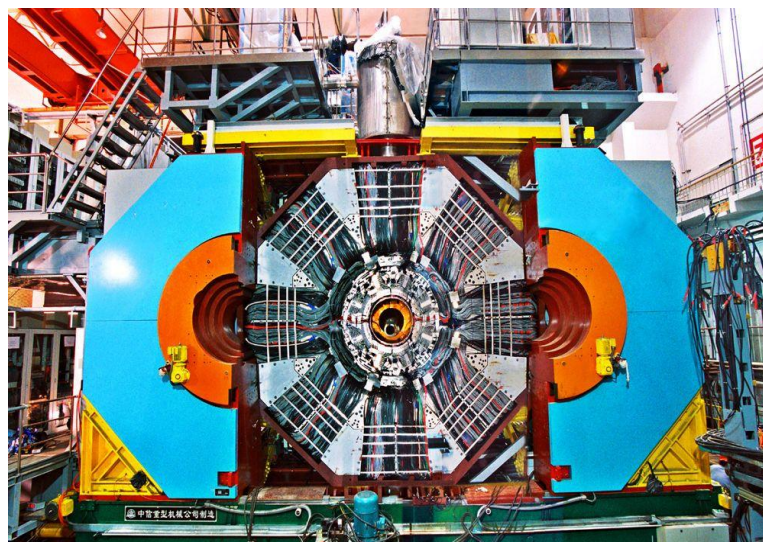
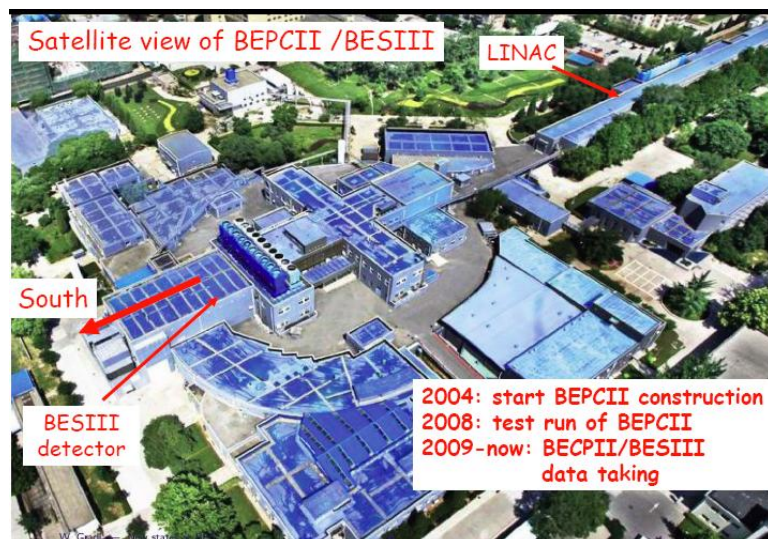
2026.7.15-19，广州

内容提要

- 北京谱仪III（BESIII）实验介绍
- 离线数据处理流程
- 离线软件系统
- 离线软件升级
- 总结

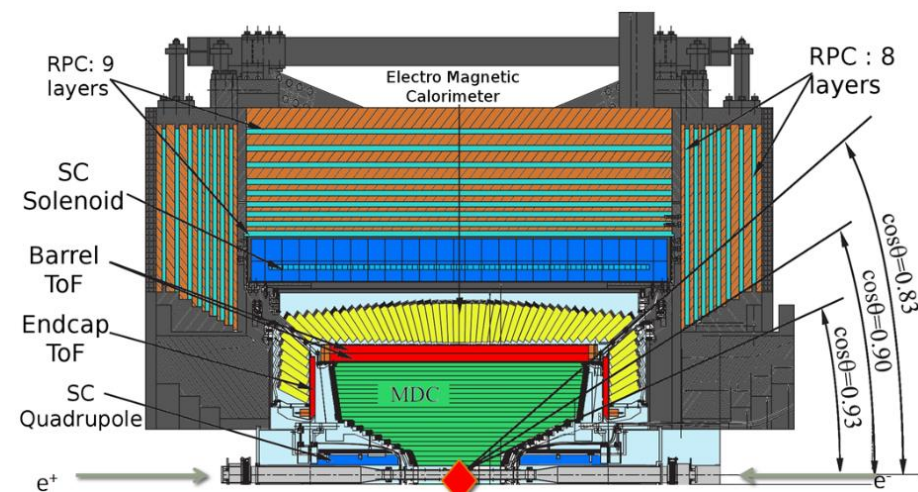
北京谱仪III（BESIII）实验

- BESIII实验是运行在北京正负电子对撞机（BEPC II）上国际领先的陶-粲物理实验装置，从2009年开始取数
- 能区在2-5 GeV，升级后可达1.8 - 5.6 GeV
- 峰值亮度达到 $1.1 \times 10^{33} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ，总积分亮度超过 50fb^{-1}



BESIII探测器

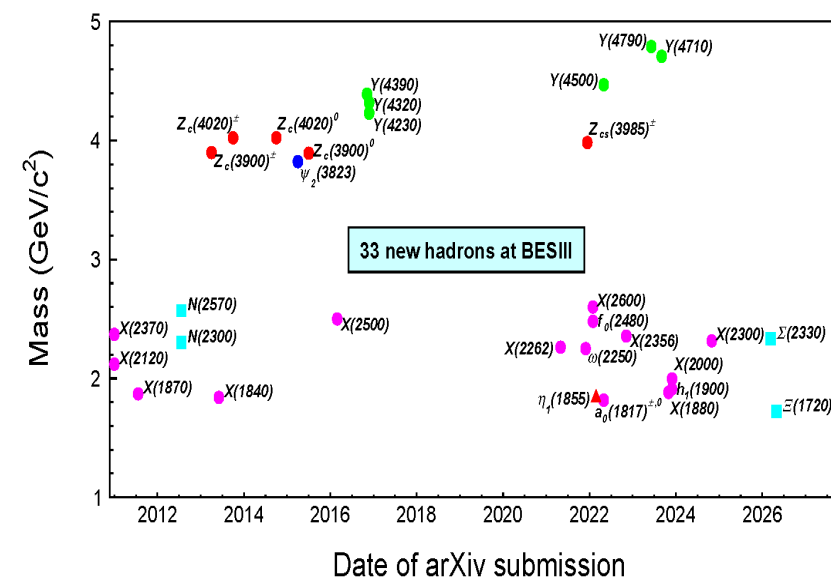
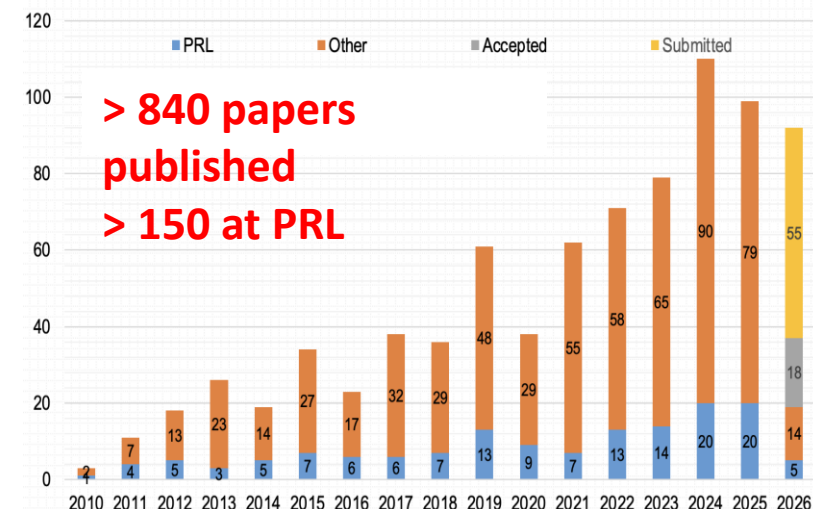
- Main Drift Chamber (MDC)
 - Inner chamber -> CGEM in 2025
- Time of Flight (TOF)
 - ETOF -> MRPC in 2016
- Electromagnetic Calorimeter (EMC)
- Muon Chamber (MUC)
- 1T SC Magnet
- 自2009年以来，探测器运行良好



Sub-Detector	Channels
MDC (T+Q)	6796+6796
EMC	6240
TOF (T+Q)	448+448 / 2080+2080
MUC	9088
Total	~ 30K

Trigger rate: 4KHz
Data bandwidth: 48MB/s

BESIII实验



离线软件：物理发现的基础系统工程

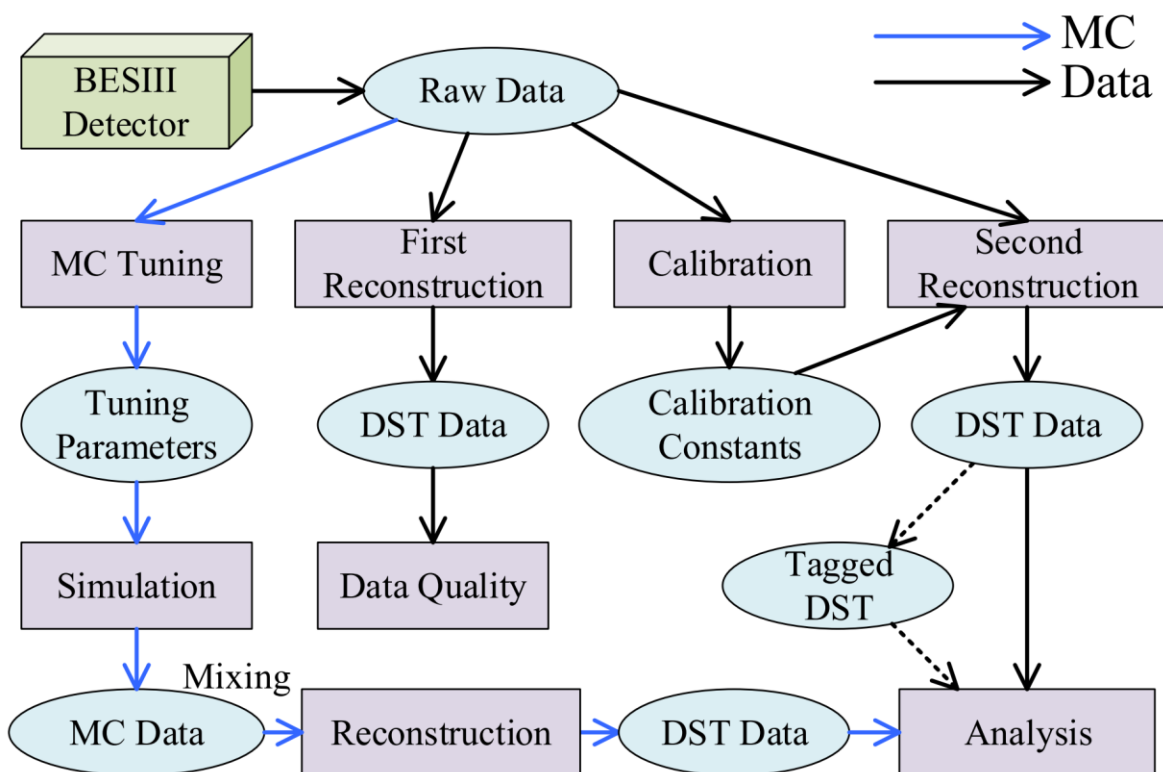
- 离线软件是连接原始数据与物理发现的纽带，致力于为全合作组的物理分析提供最坚实的底座与全方位的赋能
 - 生产高质量的数据基石（刻度与重建）
 - 构筑高可靠的模拟底座（Data-MC一致性）
 - 打造标准化的分析利器（物理分析工具）
 - 加速科研成果的迭代周期（计算与架构优化）



The Critical Importance of Software for HEP

Prepared by the HEP Software Foundation, with inputs from the HEP community.

BESIII离线数据处理流程



• 离线软件的核心设计需求

• 统一且灵活的底层架构

- 高内聚低耦合：模块化设计，数据与算法彻底分离，共享通用服务（如I/O）
- **Data-MC 统一**：真实数据与蒙特卡洛（生成/模拟）无缝集成于同一处理框架。
- 灵活的数据模型：事件数据模型（EDM）支持多流输入、高效过滤

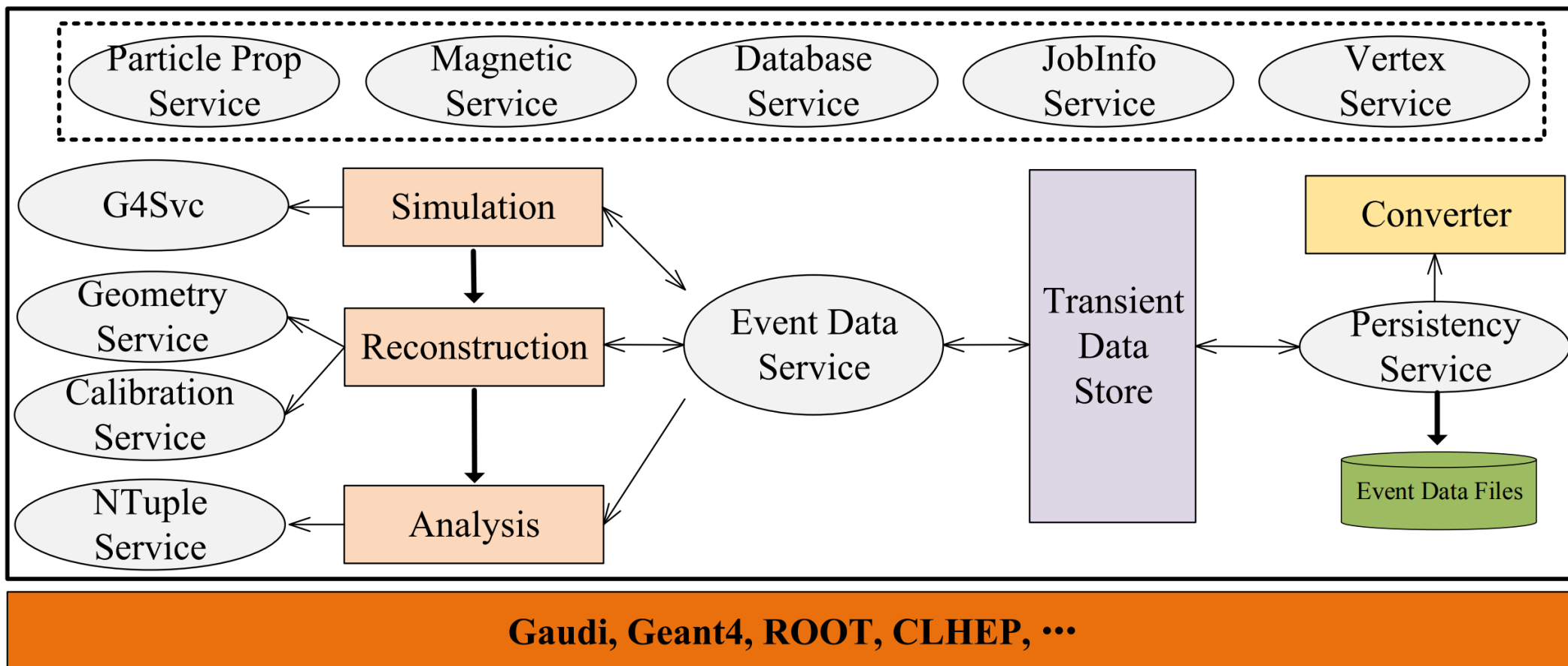
• 全局一致的数据源

- 几何一致性：模拟、重建与分析共享同一套几何描述
- 统一数据库：刻度常数与关键参数集中管理，提供统一访问接口

• 持续演进与算力突围

- 环境兼容：持续升级以适配最新的 OS 和外部依赖库
- 精明计算：以优化的分析策略，化解海量数据生产与有限 CPU 资源之间的矛盾

BESIII离线软件系统（BOSS）



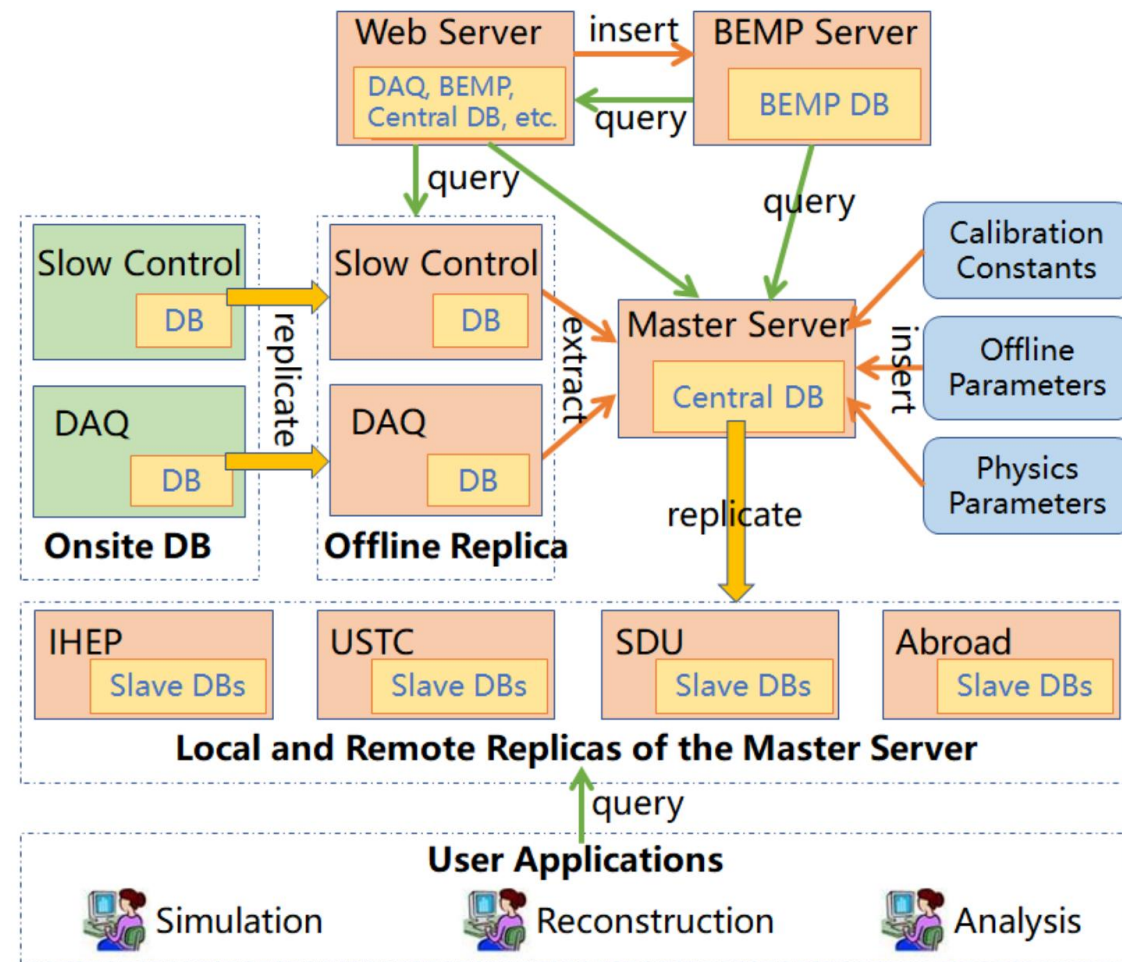
- 基于Gaudi开发，实现了算法、数据和服务的彻底分离
- 采用GDML进行全谱仪的几何描述

蒙特卡洛模拟与事例显示

- 探测器模拟是粒子物理实验的一个关键部分，用于探测器设计、事例选择效率的确定、优化事例选择条件、本底估计等
- BESIII的模拟软件基于Geant 4构建，精准模拟粒子在探测器物质中的相互作用，**测试和调优低能区的强子相互作用模型（Physics Lists）**
- 各个子探测器的模拟采取模块化设计
- 包括了非常精细地**数字化调优**，并引入了**随机混合本底技术**，极大地提升了Data-MC的一致性
- 事例显示是基于ROOT开发的可视化工具，是软件调试和物理分析的最直观的辅助工具

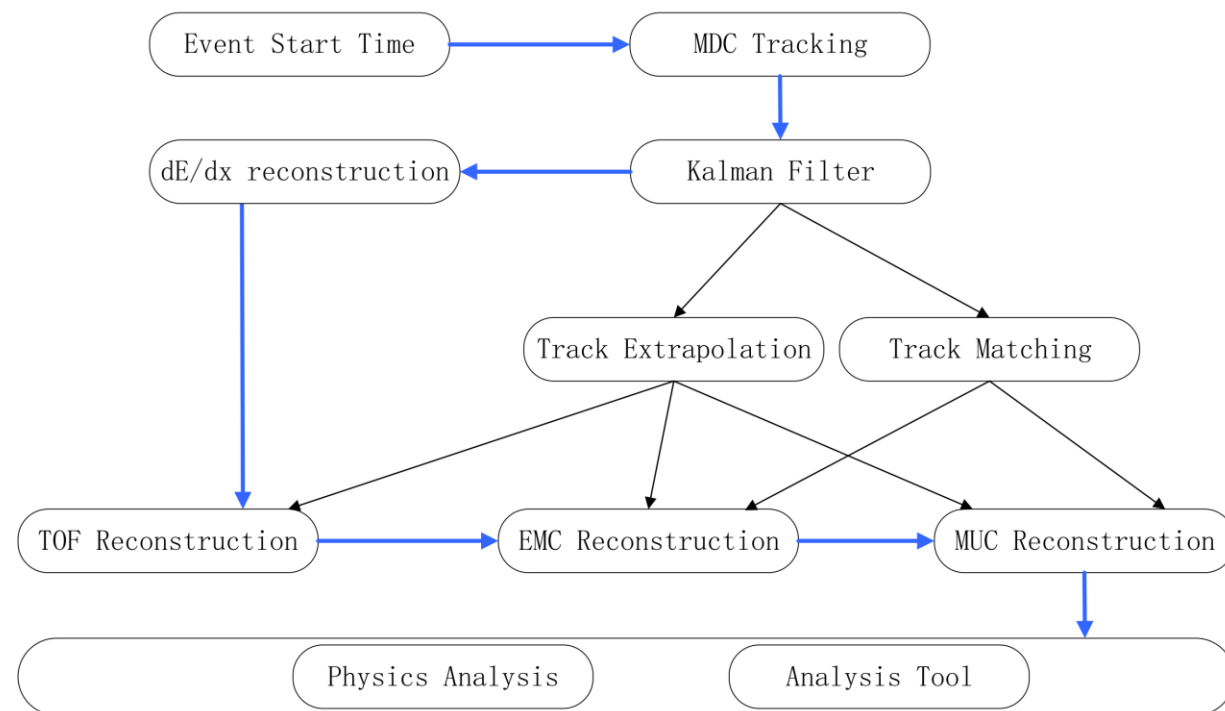
刻度与数据库

- 刻度系统为各子探测器提供状态常数
 - 如MDC的丝漂移时间、EMC的能量增益系数等
- 规范化的离线刻度流程，能够精细处理随时间变化的探测器状态
- 不同取数区间，不同软件版本的刻度常数在数据库中统一管理
- 中央数据库采用MySQL



事例重建与分析

- 数据处理的中心任务，从探测器信号到物理参数，如动量、能量等
- 主要包含
 - 事例起始时间重建
 - MDC中带电粒子寻迹与拟合
 - dE/dx重建
 - 径迹外推
 - TOF重建
 - EMC中的簇射重建
 - MUC重建



数据流转、高效分析与物理验证

- 事例数据模型与IO

- 架构解耦：依托 Gaudi TDS，实现内存数据操作与底层物理存储的彻底解耦
- 数据转换与过滤：提供 Raw/ROOT 双格式转换服务；内置事例过滤，高效应对加速器升级带来的高噪声本底

- 基于标签的分析策略

- 提前进行物理对象的预选与标签化
- 大幅剥离无效本底。典型的3770数据的物理分析，速度提高三十多倍

Mode	User Time (s)	Total Time (s)	CPU Usage (%)
Full	14450.9	16613.6	87.0
Tag	409.6	442.2	92.6

- 物理验证

- 建立成百上千个物理分布的统计学检验框架
- 在操作系统升级、框架重构或外部库升级时保证结果的可靠性
- 验证物理结果的可重复性（不同机器、不同系统）

数据流转、高效分析与物理验证

- 事例数据模型与IO

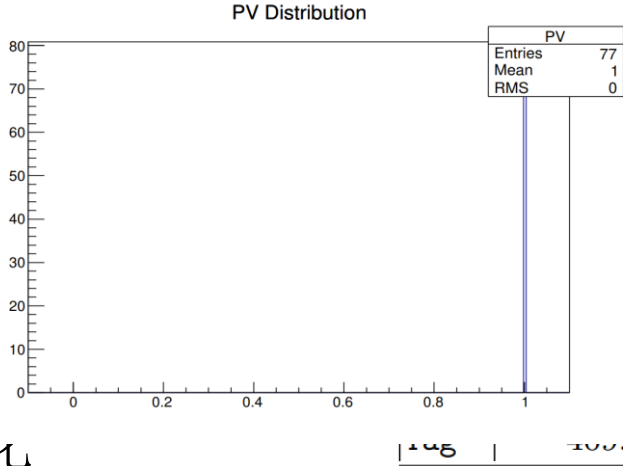
- 架构解耦：依托 Gaudi TDS，实现
- 数据转换与过滤：提供 Raw/ROO 加速器升级带来的高噪声本底

- 基于标签的分析策略

- 提前进行物理对象的预选与标签化
- 大幅剥离无效本底

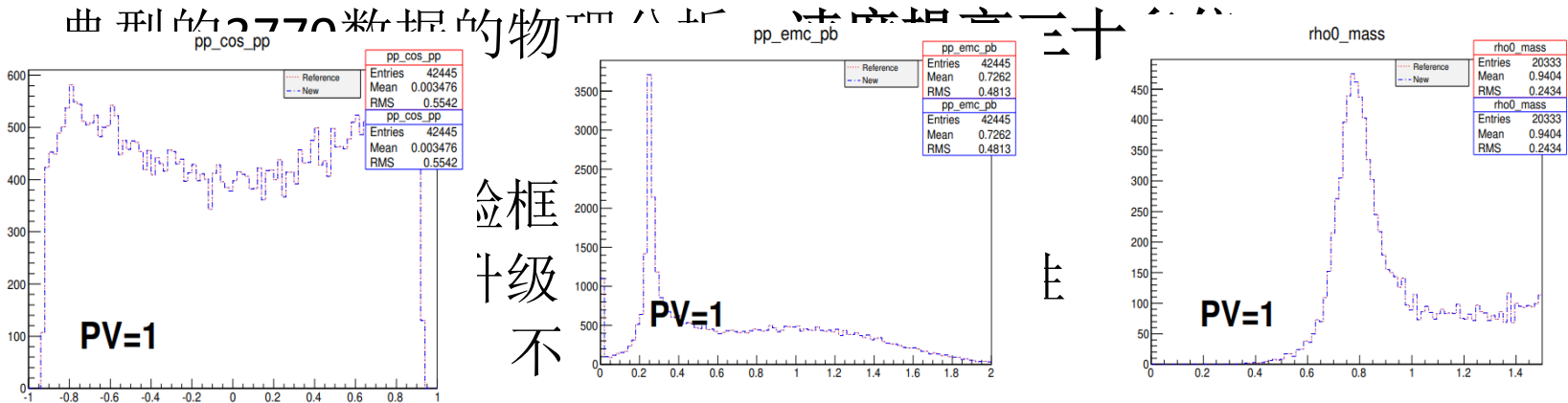
- 物理验证

- 建立成百上千个物
- 在操作系统升级、
- 验证物理结果的可



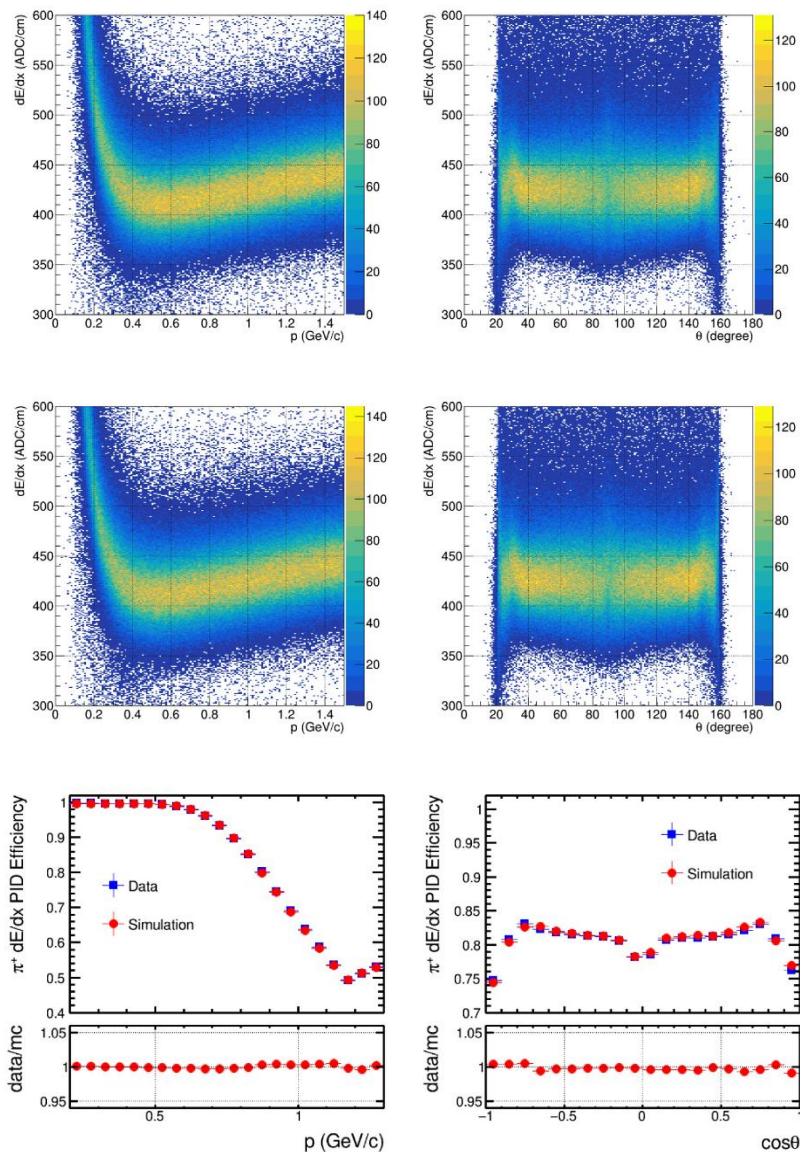
存储的彻底解耦
事例过滤，高效应对

e (s)	Total Time (s)	CPU Usage (%)
9	16613.6	87.0
	442.2	92.6

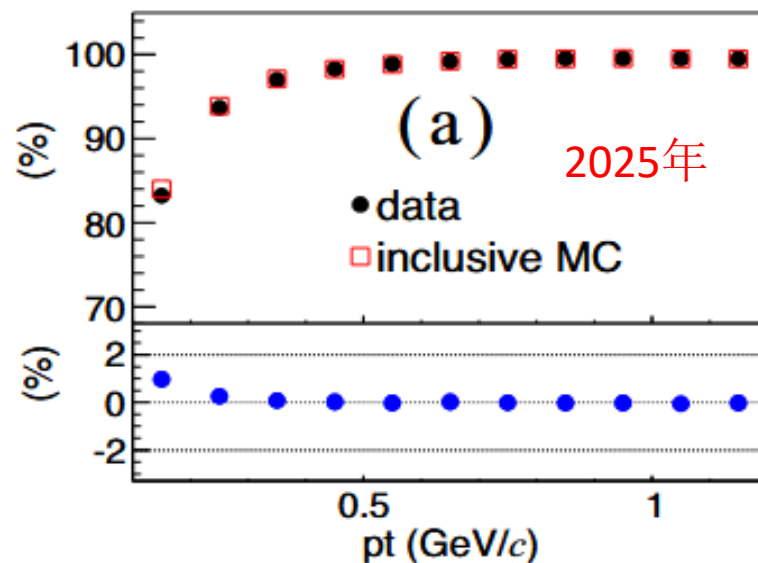
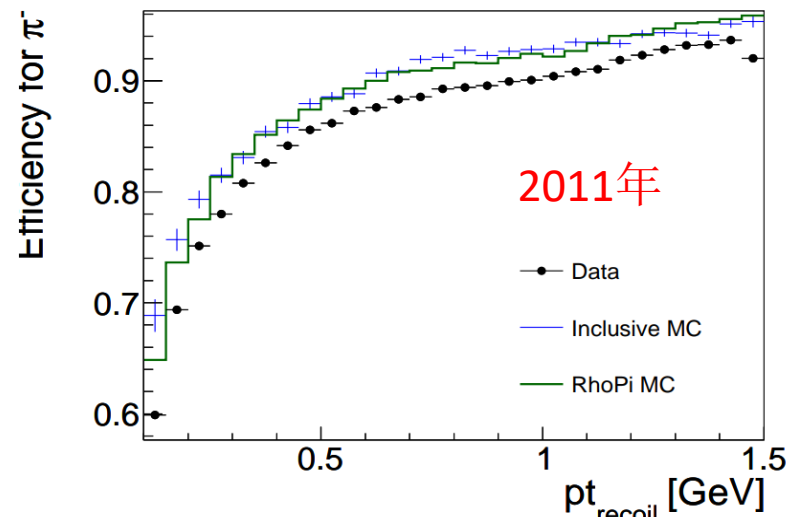


BOSS升级

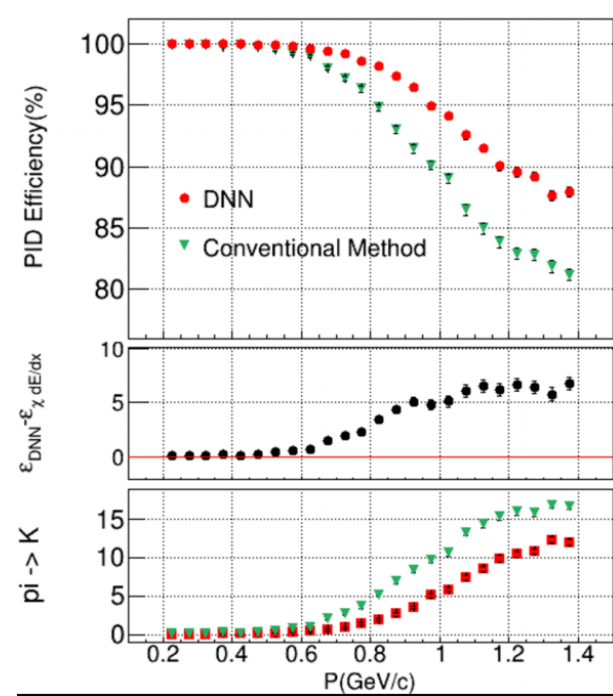
- 探测器硬件升级适配： ETOF -> MRPC, 内漂移室 -> CGEM
- 性能优化： 软件通过算法迭代和深度调优，持续拔高探测器性能，不断逼近系统误差极限
- 新功能、新算法： 如更精确的次级顶点拟合、机器学习PID等
- **OS与外部库升级**



使用ML的 π 的dEdx模拟



π 的tracking效率的系统误差，从最初的2%减小到<0.5%



机器学习方法提高了PID效率，减小了误判率

BOSS的升级

Year	2009	2010	2011	2012	2015	2016	...	2023	2024	2025
BOSS Release	6.5.1	6.5.2 6.5.3 6.5.4 6.5.5	6.6.0 6.6.1	6.6.2	6.6.5 7.0.0	7.0.1 7.0.2	...	7.1.0	7.1.1 7.1.2 7.1.3	8.0.0
Operating System	SL4	SL5	SL5 64-bit		SL6			CentOS7		AlmaLinux 9
Gaudi	v19r4		v21r6		v23r9			v27r1		v38r2
Geant4	9.0	9.3						10.7		
ROOT	5.14		5.24		5.34			6.06		6.32.02
Build Tool	CMT									CMake
GCC	3.4.6		4.3.2		4.6.3			4.9.3		GCC 13
Version Control	CVS									GIT

Software building 60% faster

Application (sec/event)	simu (rhopi)	simu-reco	real-reco	simu-ana (rhopi)	real-ana (rhopi)
64-bit	0.95	0.21	0.12	0.0088	0.00107
32-bit	1.09	0.43	0.25	0.0170	0.00275
improvement	~13%	~50%	~50%	~48%	~61%

Physics users benefit from new Geant4 & ROOT .

Sim → Rec → Ana of $J/\psi \rightarrow \rho\pi$, 10000 events			
	713	800pre5	Improve
Simulation	302 ms/evt	229 ms/evt	24.25%
Reconstruction	83 ms/evt	53 ms/evt	35.62%
Analysis	1.91 ms/evt	1.18 ms/evt	38.02%

总结：BOSS --- BESIII物理发现的工程底座（840+论文）

稳健兼容 16年跨代演进 探测器升级适配	精度攀升 不断提升性能、 减小误差
高效吞吐 加速分析	持续演进 ML

稳定优先 · 长寿命维护 · 面向未来

谢谢！

backup

Exps.	MDC wire reso.	MDC dE/dx reso.	EMC energy reso.
CLEO	110 μm	5%	2.2-2.4 %
Babar	125 μm	7%	2.67 %
Belle	130 μm	5.6%	2.2 %
BESIII	115 μm	<5% (Bhabha)	2.3%

Exps.	TOF time reso.
CDFII	100 ps
Belle	90 ps
BESIII	68 ps (Barrel) 98 ps (Endcap) 60 ps (Endcap, MRPC)