



山东大学
SHANDONG UNIVERSITY

课程论文（设计）

题目： $H \rightarrow \mu\mu$ 衰变的测量中运用的粒子物理实验技术

姓 名	屈可立
学 号	202200161276
学 院	前沿交叉科学青岛研究院
专 业	物理学
年 级	2022 级
指导教师	刘彦麟

2025 年 6 月 30 日

摘要

本报告以 ATLAS 合作组于 2025 年发布的内部笔记《Search for the Higgs boson decaying to a pair of muons in pp collisions at $\sqrt{s} = 13.6$ TeV with the ATLAS detector》为分析对象，旨在学习 ATLAS 实验中对标准模型 $H \rightarrow \mu\mu$ 这一稀有过程的最新搜寻策略。该过程是检验希格斯粒子与第二代费米子汤川耦合的关键探针，其测量面临着分支比极低和巨大 Drell-Yan 本底的双重挑战。本文主要结合《粒子物理实验方法》课程中的一些实验技术，对论文中运用到的方法进行简单的分析。报告将重点聚焦于 ggF 和矢量玻色子融合 VBF 这两个主要产生道，通过从对象重建、事件分类到信号提取的完整流程的学习，将课程知识和 ATLAS 实验的实际应用相结合。

关键词: Higgs; ATLAS; $H \rightarrow \mu\mu$; ggF; VBF; 粒子物理实验; 多变量分析

目 录

第一章 引言	1
1.1 粒子物理标准模型	1
1.2 大型强子对撞机 (LHC)	1
1.3 ATLAS 探测器	2
第二章 物理对象的重建与鉴别	4
2.1 缪子的重建、鉴别与动量测量	4
2.2 Jet 的重建与筛选	5
2.3 末态辐射 (FSR) 光子的恢复	6
第三章 ggF 与 VBF 事件分类策略	8
3.1 基于喷注数目的初步物理分类	8
3.2 BDT 技术的应用	9
3.3 防止过拟合的方法	9
3.3.1 交叉验证的具体实现	10
总结与展望	11
致 谢	12
Bibliography	13

第一章 引言

1.1 粒子物理标准模型

粒子物理标准模型是描述基本粒子及其电磁、弱、强三种相互作用的最成功的理论框架。该模型将物质的基本组元归为两类费米子：夸克和轻子，它们各有六种味道，并按质量递增分为三代。夸克带有色荷并参与强相互作用，而轻子则不参与。这些粒子间的相互作用通过交换规范玻色子来传递：强相互作用由胶子传递（量子色动力学 QCD 描述），电磁相互作用由光子传递（量子电动力学 QED 描述），弱相互作用则由 W 和 Z 玻色子传递。电磁与弱相互作用在更高能量下被统一为电弱理论。

标准模型的一个核心特征是 Higgs 机制，它通过引入一个遍布宇宙的标量场（Higgs 场）及其非零的真空期望值，解释了 W/Z 玻色子和费米子质量的起源。2012 年 LHC 上希格斯玻色子的发现，是对该机制的决定性验证。尽管标准模型取得了巨大成功，但它并非终极理论，其局限性包括未能包含引力、无法解释暗物质/暗能量、中微子质量问题等，这些都指向了超出标准模型新物理的存在。

1.2 大型强子对撞机 (LHC)

大型强子对撞机 (LHC) 是位于欧洲核子研究中心 (CERN) 地下的周长近 27 公里的环形粒子加速器，是目前世界上能量最高的对撞机。它通过数千个超导磁体将两束质子加速到接近光速，并在四个指定的相互作用点 (IP) 进行对撞，ATLAS 探测器即围绕其中一个 IP 建造。LHC 利用极高的质心能量模拟宇宙早期条件，产生新粒子以检验标准模型和寻找新物理。其性能关键在于质心能量 (\sqrt{s}) 和亮度，后者决定了数据获取速率。

LHC 的运行按阶段进行，不断提升能量和亮度。Run 1 (2010-2012, $\sqrt{s} = 7 - 8$ TeV) 的主要成就就是发现了希格斯玻色子。经过第一次长停机升级后，Run 2 (2015-2018, $\sqrt{s} = 13$ TeV) 积累了大量数据 (约 150 fb^{-1})，使希格斯性质测量进入精密时代并广泛搜寻了新物理。在第二次长停机进行更大规模升级后，Run 3 (2022 至今, $\sqrt{s} = 13.6$ TeV) 正在进行中，旨在获取更大数据样本以进行更深入的研究，但同时也面临着更严峻的 Pileup 挑战。。表 1.1 总结了各运行阶段的关键参数。

表 1.1: LHC 质子-质子运行参数简要概览 (ATLAS/CMS 近似值)。

运行阶段	年份	\sqrt{s} (TeV)	$\langle\mu\rangle$ (平均)	记录 L_{int} (fb^{-1} /实验)
Run 1	2010-2012	7 & 8	~ 20	~ 25
Run 2	2015-2018	13	~ 35	~ 140
Run 3	2022-至今	13.6	$\sim 40 - 70$	> 160 (截至 2024 年底)
Run 3 目标	2022-2026	13.6	~ 60	~ 280 (预计)

注：数值为近似或典型值。记录亮度指用于物理分析的数据量。

1.3 ATLAS 探测器

ATLAS 是安装在 LHC 上的大型通用粒子探测器之一，其设计目标是在高能量、高亮度、高 Pileup 的环境下精确测量对撞产生的各种粒子的信息。它是一个长约 46 米、直径 25 米、重达 7000 吨的庞然大物，围绕对撞点呈洋葱状多层圆柱结构布局（见图 1.1）。当粒子从中心飞出时，会依次穿过不同功能的子探测器系统。

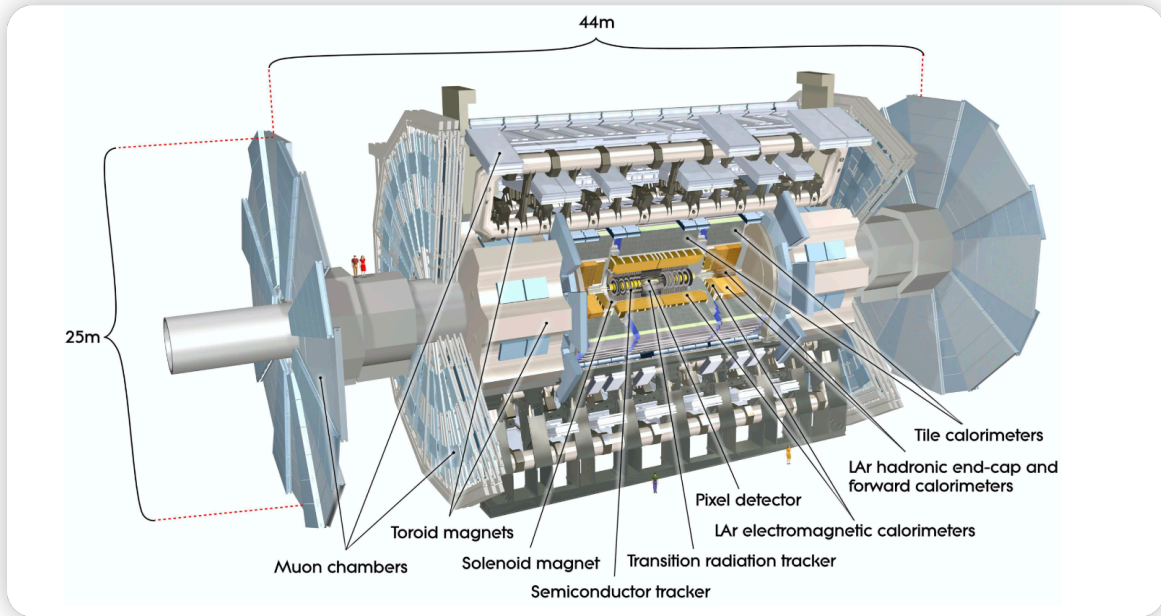


图 1.1: ATLAS 探测器子系统示意图，展示了其多层同心结构。图片来源: ^{ATLAS:2024jinst}

为了应对 Run 3 及未来更高亮度带来的挑战，ATLAS 在 LS2 期间进行了重要升级^{ATLAS:2024jinst}。关键升级包括用于一级触发的液氩量能器电子学系统，以及用新技术建造的新小轮替换 子谱仪端盖内层探测器以抑制假触发。此外，触发与数据获取系统

也进行了升级，引入了 FELIX 等新架构以处理更高的数据率。这些升级确保了 ATLAS 在高 Pileup 环境下继续高效地获取高质量物理数据。

第二章 物理对象的重建与鉴别

在高能物理中，任何物理分析的起点都是将探测器记录下的海量、离散的电信号，通过各种算法还原为实验者能够理解的“物理对象”——如电子、缪子、喷注等。这一过程被统称为物理对象重建。ATLAS 对 $H \rightarrow \mu\mu$ 过程的搜寻，其分析的每一步都建立在对这些对象精确重建和鉴别的基础之上。本章将主要围绕论文中对缪子、喷注等关键对象的处理方式，并阐明其背后所依赖的、在《粒子物理实验方法》课程中学习的核心实验原理。

2.1 缪子的重建、鉴别与动量测量

作为 $H \rightarrow \mu\mu$ 衰变道的直接产物，两个末态缪子的精确重建与动量测量是本次分析中至关重要的环节，直接决定了最终不变质量分布的分辨率，以及从海量本底中分辨出信号的能力。

论文第 4.1 节中描述，缪子的重建综合利用了内部径迹探测器 (ID) 和缪子谱仪 (MS) 的信息。分析主要依赖于最高质量的组合缪子，它通过全局拟合将在内层径迹探测器和缪子谱仪中留下的径迹信息结合起来，以获得最精确的动量测量。

对 μ 子的探测中，横向动量的测量直接影响了分辨率。在学习径迹和顶点部分内容的时候，介绍了带电粒子在均匀磁场中的横动量 p_t 的分辨率公式，其形式可写为

$$\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} = \frac{8p_T}{0.3BL^2}\sigma_s \quad (2.1)$$

从公式中可以看出，粒子的横动量越小，分辨率越高；探测器的颗粒度越高，分辨率越高；磁场强度越高，分辨率越高；探测器尺寸越大，分辨率越高。ATLAS 探测器的升级，如采用高精度的硅像素和微条探测器，正是为了提高颗粒度；而 CMS 相对于 ATLAS 的优势，则是在于其磁场更大。此外论文中还提到了对缪子动量进行的细致刻度，以精确修正这些探测器实际运行过程中的问题，确保数据和蒙特卡洛模拟之间的一致性。


除了动量，对缪子来源的鉴别同样关键。为剔除来自重味强子衰变或宇宙线等产生的假缪子，分析对缪子径迹的撞击参数施加了严格限制。同样是在径迹与顶点-分辨率部分的课程，引入了横向和纵向撞击参数的概念，横向撞击参数 d_0 和纵向撞击参数 z_0 分别代表到 z 轴最近点的距离和到 z 轴最近点的 z 坐标。一个真正源于主相互作用点的

缪子，其 d_0 和 z_0 理论上应为零，但在实际实验中往往会受到各方面的影响。论文中采用的筛选条件是 $|d_0^{BL}/\sigma_{d_0^{BL}}| < 3$ 和 $|z_0^{PV} \cdot \sin \theta| < 0.5 \text{ mm}$ 正是利用了这一原理，要求径迹的撞击参数与其测量误差相比不能过大，从而高效地保证了入选缪子的符合要求。

2.2 Jet 的重建与筛选

喷注由夸克或胶子经过强相互作用的“碎裂”和“强子化”形成，是区分 ggF 和 VBF 这两个主要产生道的关键线索。论文第 4.2 节中，喷注的重建采用了如下做法：首先通过粒子流算法整合径迹和量能器信息，再利用 $anti - k_t$ 算法对这些粒子流对象进行聚类。

$anti - k_t$ 和 k_t 算法是喷柱重建算法中的顺序重组算法。这个算法的核心是定义一个距离变量 d_{ij} （粒子 i 和 j 之间）和 d_{iB} （粒子 i 和束流之间）。对于 anti-kt 算法，其距离定义方式 $d_{ij} \sim \Delta R_{ij}^2 / \max(p_{Ti}^2, p_{Tj}^2)$ 的结果是，算法会优先围绕能量最高的粒子开始聚合，将周围的低能粒子纳入其中，最终形成的喷注边界清晰、形状规整，方便了后续的能量刻度和物理分析。



顺序重组 (sequential recombination)

- 如果相关的分裂过程存在大的发散 (divergence)，那么两个粒子很可能来自共同的母体 (parent)
- Divergence: $\frac{1}{\min(E_i, E_j)\theta_{ij}} \sim \frac{1}{\min(p_{Ti}, p_{Tj})\Delta R_{ij}}$
- 当较柔软的粒子相对于较硬的粒子具有较小的横向动量(k_t)时

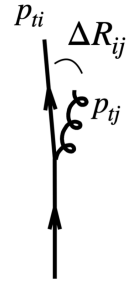
$$\Delta R_{ij}^2 = (y_i - y_j)^2 + (\phi_i - \phi_j)^2$$


图 2.1: $anti - k_t$

在 LHC 的高亮度环境下，Pileup 效应是一个无法回避的挑战。Pileup 效应产生的“假喷柱”会给分析过程带来巨大的噪声，为了应对这一挑战，论文采用了喷注顶点标记器 (Jet Vertex Tagger, NNJVT) 技术。该技术的核心思想与 Jet Area 方法有很多相似之处。但 JVT 更为先进，它不再是宏观地减除一个平均的能量密度，而是利用与喷注

关联的径迹信息，通过机器学习算法，在单个喷注的层面上判断其来自主顶点的概率，从而实现更精准的 Pileup 抑制。

2.3 末态辐射 (FSR) 光子的恢复

在 $H \rightarrow \mu\mu$ 衰变中，末态的缪子有一定几率通过电磁相互作用辐射出一个或多个光子。这会使得探测器测量到的缪子能量低于其真实能量，从而导致重建出的双缪子不变质量系统性地偏低，并且信号峰的分布被展宽。

为了修正这一效应，论文中采用了一种 FSR 恢复技术。该技术通过在每个缪子的特定的 cone 内，主动寻找可能由其辐射出的光子。一旦找到符合条件的光子，其四动量就会被加到缪子的四动量上，从而得到一个更接近真实情况的双缪子系统不变质量。论文图 4.1 清晰地展示了这一技术的效果：在 FSR 恢复后，信号峰的均值从 118.4 GeV 被修正回了更接近真实值的 125.4 GeV，同时均方根也减小了约 3%，这意味着信号峰变得更窄、更集中。

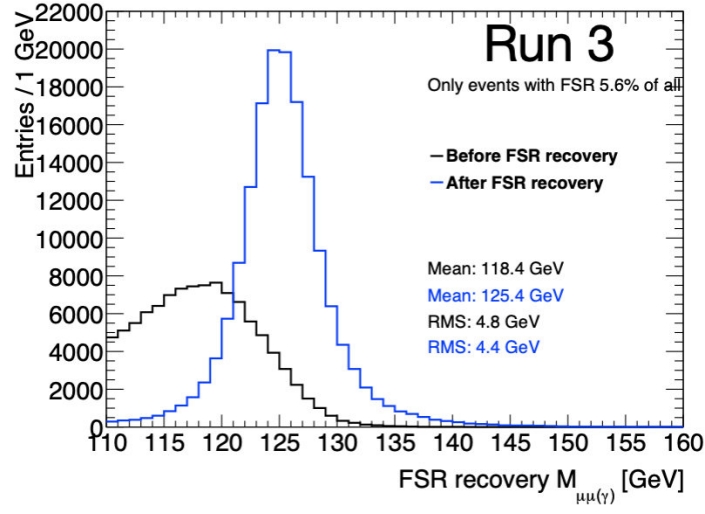


图 2.2: (a) Invariant mass distribution of $\mu\mu(\gamma)$ final states for events with the FSR photon found.

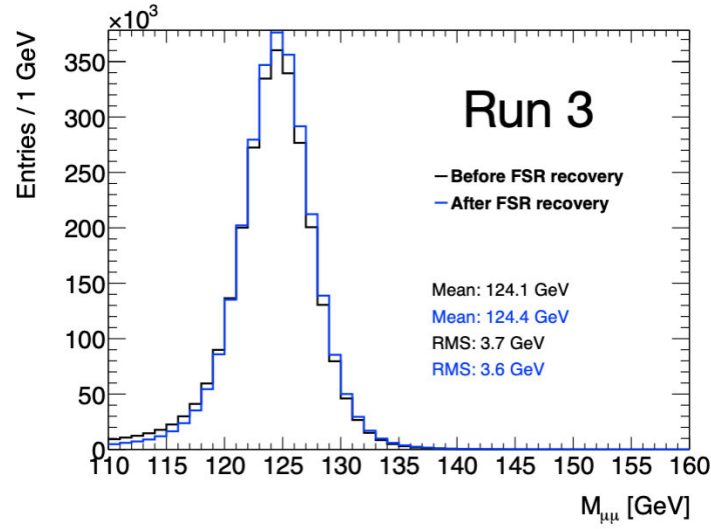


图 2.3: (b) Invariant mass distribution for all ggF signal events.

第三章 ggF 与 VBF 事件分类策略

在精确重建出构成事件的每一个物理对象之后，分析工作便从“微观”的粒子层面，进入到“宏观”的事件层面。对于 $H \rightarrow \mu\mu$ 这样信噪比极低的分析而言，仅仅进行简单的事件筛选是远远不够的。为了从巨大的本底中分离出微弱的信号，必须根据信号产生机制的独特运动学特征，设计精细的事件分类策略，将信号富集到特定的分析区域中。本章将简单说明论文中针对胶子-胶子融合 (ggF) 与矢量玻色子融合 (VBF) 这两个主要产生道所设计的、从宏观到精细的分类策略。

3.1 基于喷注数目的初步物理分类

面对 Run 3 及未来高亮度 LHC 时期日益复杂的数据环境，传统的基于简单阈值或规则的分析方法逐渐显现出局限性。机器学习因其强大的从高维复杂数据中学习模式和规律的能力，在现代高能物理实验的数据分析中扮演着越来越重要的角色。机器学习算法，特别是监督学习方法，被广泛应用于各种任务，例如区分稀有的物理信号与巨大的背景、精确识别不同类型的粒子或喷注、改进粒子能量或动量的重建精度等。通过利用事件中丰富的运动学信息，机器学习能够有效地提升物理分析的灵敏度和精度。

在进行任何复杂的机器学习分析之前，一个基于明确物理图像的初步分类是至关重要的第一步。论文的分析流程正是遵循了这一原则，根据事件中重建出的喷注数目，将所有候选事例分为了 0-jet、1-jet 和 2-jet 三个大类。之所以要这样分类，是源于对不同希格斯产生机制的深刻理解。课程中我们知道，在质子-质子对撞中，产额最高的胶子-胶子融合 (ggF) 其末态本身是纯净的，不伴随任何额外的喷注。实验中观测到的其他伴随喷注，绝大部分事例都落在了 0-jet 和 1-jet 的事件类别中。

与此形成鲜明对比的是产额次之的矢量玻色子融合 (VBF) 过程。它的物理图像是两个质子中的夸克各自辐射出一个 W 或 Z 玻色子，这两个矢量玻色子再融合产生一个希格斯粒子。在这个散射过程中，发射了矢量玻色子的两个夸克会继续沿着近束流管方向前进，在探测器中形成两个高能喷注。因此，VBF 信号的典型特征就是存在两个这样的喷注，使其天然地富集在 2-jet 的事件类别中。通过这样看似简单但物理意义明确的喷注数目分类，分析得以在第一时间将不同物理过程的 ggF 和 VBF 信号进行了有效的

“分流”，使后续的精细化分析更加方便。

3.2 BDT 技术的应用

XGBoost 在 ATLAS 数据分析中最常见的应用之一是信号与背景事件的分类任务。在寻找稀有物理过程，如特定的希格斯衰变道、超出标准模型的新粒子信号等时，信号事件往往淹没在数量级远超自身的背景事件中。为了提高分析的灵敏度，经常利用 XGBoost 训练一个分类器来区分信号和背景。

训练分类器时，会选取一系列能够有效区分信号和背景的物理观测量作为输入特征。比如轻子、光子、喷注、缺失横向能量等计算得出粒子的动量、能量、角分布信息、不变质量、事件形状变量等信息。利用已知的信号和背景样本对 XGBoost 模型进行训练。训练完成后，该模型可以为每一个待分析的事件计算一个输出得分，该得分反映了该事件更像信号还是更像背景的可能性。

通过对这个 XGBoost 输出得分设定一个阈值，研究人员可以选择得分较高的事件样本进行后续分析。这可以显著抑制背景事件的数量，同时保持较高的信号事件接受效率，从而有效提高信号的统计显著性或测量的精度。这种基于机器学习的分类方法已成为许多 ATLAS 物理分析的标准流程，尤其是在处理复杂末态或低信噪比的场景中。

3.3 防止过拟合的方法

在使用 XGBoost 进行信号/背景分类时，防止过拟合是一个重要的挑战。过拟合会导致模型在训练集上表现良好，但在实际应用中对新数据的泛化能力较差。为了解决这个问题，常用的方法有以下几种：

- **正则化：** XGBoost 内置了 L1 和 L2 正则化项，可以有效抑制模型的复杂度，防止过拟合。
- **交叉验证：** 在训练过程中使用交叉验证来评估模型在不同数据子集上的表现，从而选择最佳的超参数组合。
- **早停法：** 在训练过程中监控验证集的性能，当验证集性能不再提升时提前停止训练，以避免过拟合。
- **特征选择：** 通过分析特征的重要性，去除冗余或无关的特征，减少模型的复杂度。

- **数据增强：**在训练数据不足的情况下，可以通过数据增强技术，比如对现有样本进行变换，来增加训练样本的多样性。

本文中程序使用的方法主要是交叉验证法，通过将数据集划分为多个子集，轮流使用其中一个子集作为验证集，其余作为训练集，从而评估模型的泛化能力。这种方法可以有效地减少过拟合的风险，并提高模型在实际应用中的可靠性。

3.3.1 交叉验证的具体实现

在 Run 3 的 XGBoost 应用中，交叉验证是评估模型性能和防止过拟合的重要手段。具体实现步骤如下：

Fold	set	set	set	set
Fold 0	Test set	Validation set	Training set	Training set
Fold 1	Training set	Test set	Validation set	Training set
Fold 2	Training set	Training set	Test set	Validation set
Fold 3	Validation set	Training set	Training set	Test set

如表所示，数据集被划分为四个部分，每次选择一个部分作为测试集，另一个部分作为验证集，其余部分作为训练集。通过这种方式，可以充分利用数据集中的信息，同时评估模型在不同数据子集上的表现。在每一轮交叉验证中，XGBoost 模型会在训练集上进行训练，并在验证集上评估性能。通过计算验证集上的各项指标，可以判断模型的泛化能力和稳定性。最终，将所有轮次的验证结果进行平均，得到模型的整体性能评估。

总结与展望

本论文以大型强子对撞机上的 ATLAS 实验为核心，回顾了粒子物理标准模型的基本理论和实验基础，并重点探讨了该实验在希格斯玻色子物理研究方面取得的关键进展以及数据分析技术的演进。从 LHC Run 1 期间里程碑式的希格斯玻色子发现，到结合 Run 1 和 Run 2 数据对稀有衰变过程 $H \rightarrow \mu\mu$ 的深入探索，再到 Run 3 时期利用机器学习技术应对高亮度、高 Pileup 挑战的实践，ATLAS 实验生动地展现了现代高能物理实验如何通过不断提升的加速器性能、探测器精度和数据处理能力，一步步地验证标准模型并探索其可能存在的局限。

展望未来，LHC 将进入 HL-LHC 运行阶段，计划将总积分亮度提升一个数量级以上，达到 $3000-4000 \text{ fb}^{-1}$ 的量级。这将为 ATLAS 实验提供前所未有的海量数据集，开启粒子物理研究的新篇章。然而，HL-LHC 带来的巨大机遇也伴随着严峻的技术挑战。极高的瞬时亮度将导致平均 Pileup 事件数达到 140 甚至 200 的极端水平，远超 Run 3 的条件。同时，探测器也将承受前所未有的辐射剂量。为了应对这些挑战并充分利用 HL-LHC 的物理潜力，ATLAS 探测器正在进行大规模的 Phase-II 升级，涉及内部径迹探测器、子谱仪以及触发和数据获取系统等所有关键子系统。这些升级旨在提高探测器在高计数率和强辐射环境下的性能、粒度和寿命。与此同时，面对 HL-LHC 产生的海量、高复杂度数据，机器学习和人工智能技术将在数据重建、对象识别、信号提取和分析解释等各个环节发挥更加核心的作用，其算法的开发、优化和验证将是未来研究的重要方向。

总之，ATLAS 实验在 LHC 的运行中已经取得了辉煌的成就，极大地深化了我们对基本粒子和相互作用的理解。随着 HL-LHC 的到来和探测器的不断升级，结合持续创新的数据分析方法，ATLAS 实验有望在未来十几年乃至更长时间内，继续引领粒子物理学的前沿探索，揭示更多宇宙的奥秘。

致 谢

感谢各位老师在这学期粒子物理实验导论中对粒子物理实验各个方向的技术与研究进展的精心介绍。同时也感谢刘彦麟老师和各位学长对我在 ATLAS 实验中学习 XGBoost 相关技术的详尽指导与帮助。

Bibliography

- [1] The ATLAS Collaboration, “Search for the Higgs boson decaying to a pair of muons in pp collisions at $\sqrt{s} = 13.6$ TeV with the ATLAS detector,” ATLAS Note ANA-HIGP-2024-11-INT1, CERN, 2025.
- [2] 刘彦麟, “课程: 粒子物理实验导论,” 课程 ppt, 2025.