博士学位论文评审意见修改反馈表

（对全部评审专家（包含初审、复审）提出的意见和建议修改学位论文、并且按顺序逐条在本表中填写修改反馈情况，签字、时间必填，并扫描成 PDF 上传）

院 系	近代物理系	学 号	BA19004051
姓 名	魏传顺	导 师	赵政国

学位论文题目	在 ATLAS 实验上基于双轻子和不可见末态精确测量 ZZ 玻色子对产生截面并探测暗物质				
初审专家总数	5	复审（或申诉增评）专家总数	0	低于 80 分评审意见总数	0

针对所有评审专家提出的评语及建议中全部修改意见和建议，对学位论文作出的修改如下（须对每位专家评审意见逐一完整复制，并说明修改情况；如果某专家没有提出具体修改意见，须列出对应专家后写无评审修改意见）：

_____平台专家 1，评分：___91___（评审时间：2026 年 07 月 20 日）

总体评语：

该博士学位论文选题紧扣大型强子对撞机前沿物理与探测器升级两大核心方向，兼具基础物理探索与技术创新的双重价值。

对学位论文的学术评语:

论文在物理分析上实现了高精度的标准模型检验与新物理探寻，特别是对暗物质模型的约束与探测器硬件研发的结合，体现了作者宽广的学术视野。研究思路清晰，从精确测量到新物理搜寻，再到探测器升级，逻辑层层递进，展现了系统完整的科研训练。写作规范，结构严谨，论述详实，反映出作者对粒子物理理论与实验方法均有深入掌握。整体而言，该论文工作量大、创新性突出，是一篇高水平的高能物理实验博士学位论文。

学生回复：感谢评审专家的意见！

专家 1-意见 1：

1. 论文的题目“在 ATLAS 实验上基于双轻子和不可见末态精确测量 ZZ 玻色子对产生截面并探测暗物质”，过于繁琐，虽然有必要追求准确性，但是也要尽量保证简洁性，现在是把做的物理分析的工作都放进来了。还有一个建议是，“探测暗物质”建议修改成“寻找暗物质”；

学生回复：

感谢您的建议，这个标题确实是按照这个意见修改是更好的。但是目前已经使用该标题上传至学校系统，现阶段对标题的修改会非常繁琐，所以现在只能保持这个标题。后续在答辩和论文存档时才能使用按您意见修改的标题。望谅解，谢谢！

专家 1-意见 2：

2. 第一句话“希格斯（Higgs）玻色子被发现后，粒子物理标准模型的理论体系得以进一步完善。”，其实我们都知道，希格斯发现很久之前，理论体系已经在那里了，它的发现没有促进理论体系的完善，只是确定了理论体系的合理性。类似的这种措辞，一定要准确。

学生回复：

摘要的这部分按照您的修改意见改为了“希格斯（Higgs）玻色子的发现，为粒子物理标准模型提供了关键的实验证据，证实了该理论体系的预言与合理性。”，英文部分也进行了相应修改。

专家 1-意见 3：

3. 几个具体工作之间的起承转合做的不好。一篇博士论文不是简单的工作的记录，是要体现作者对这个行业的思考逻辑等细节部分的。

学生回复：

在章节的总结部分增加了对后续章节的引入，现在应该会比之前的更流畅一些。

（意见及回复可以往后延续）

_____平台专家 2，评分：___95___（评审时间：2026 年 07 月 22 日）

总体评语：

该博士学位论文围绕粒子物理标准模型的精确检验、暗物质寻找以及探测器升级这三个前沿课题，基于大型强子对撞机上 ATLAS 实验的 Run-2 数据集，开展了系统而深入的研究。论文选题具有重要的科学意义和前沿性，研究内容充实，成果显著。论文结构合理，逻辑清晰，撰写规范，表明作者已具备坚实宽广的基础理论和系统深入的专门知识，具有很强的独立从事高水平科学研究的能力。

对学位论文的学术评语:

论文主要优点与创新性成果如下： 1. 实现了迄今最高精度的 ZZ 产生截面测量： 1）论文在 ZZ→？？νν末态中，通过精巧的多区域联合拟合和严格的本底压制策略，将单举基准截面测量的总不确定度由以往的 7.0%显著降低至 4.6%，达到了当前国际最高精度。这一结果是标准模型电弱部分的一项重要精密检验。 2）首次在该末态中，基于标准模型有效场论框架给出了对中性反常三玻色子耦合的严格限制，拓展了标准模型的检验边界。 2. 给出了更为先进的暗物质与新物理探测限制： 1）在 Mono-Z 暗物质搜寻中，引入 BDT 算法，将希格斯玻色子不可见衰变分支比的上限在 95%置信度下显著收紧至 18.7%，相比以往结果有大幅提升。 2）针对简化暗物质模型及 2HDM+a 模型给出了更为严格的排除边界，并将其转化为与地下直接探测实验可比的散射截面限制，有力地证明了对撞机探测在低质量暗物质区间具有独特的物理互补性。 3. 为探测器升级做出关键硬

件贡献： 作者深度参与了 ATLAS 探测器为高亮度 LHC 升级的关键硬件工作，负责并完成了 50 个新型小径监测漂移管（sMDT）高精度探测器的组装与严格性能测试。宇宙射线测试结果表明其性能满足 HL-LHC 的要求，为未来大型强子对撞机的高精度物理研究奠定了坚实的硬件基础。

学生回复：

感谢评审专家的意见！

专家 2 意见 1：

章节 2.2.3 格式一致性问题： 该章节第一段内容的字体、段落格式及行间距与论文整体排版存在明显差异，建议统一调整，以确保全文格式规范一致。

学生回复：

这部分是 latex 在编译时的格式错误，将后续的公式格式套用到了这一段。现在将公式单独分为一段后，模板不会处理错误了。

专家 2 意见 2：

图 3.2 时间节点更新： 当前图表中红星标识仍位于 Run-3 阶段，但鉴于目前已进入 2026 年，Run-3 取数已实际结束，建议将红星位置同步更新至 LS3（长停机 3）阶段，以准确反映 LHC 运行的实际时序进展。

学生回复：

这部分确实是需要按照您的建议更新到 2026 年下半年，现在已更新到 LS3，谢谢！

值得说明的一点是，LHC Run-3 的对撞结束时间是 2026 年 6 月 29 日，刚好和毕业论文提交日期重合。所以论文在提交前仍是 Run-3 阶段，在校内外审核期间 Run-3 刚好正式结束。

专家 2 意见 3：

ATLAS 探测器介绍篇幅： 第三章 ATLAS 探测器部分的介绍略显冗长，建议适当精简各子探测器的技术细节描述，使论述更加聚焦于与本文物理分析和硬件研究直接相关的关键性能参数。

学生回复：按照您的建议调整了第三章的篇幅分布，调整后的版本应该会更突出 Muon 探测器部分的介绍和相关参数。

专家 2 意见 4：

Run-2 积分亮度数值统一： 论文中 ATLAS Run-2 数据集的积分亮度表述存在 140 fb？1 和 139 fb？1 两种数值，建议全文统一采用实验合作组最新推荐的标准数值，以避免歧义。

学生回复：

这两个数字的差异是源于 ATLAS 在 2023 年进行的 run-2 亮度精确校准。在这之前的分析都是使用 run-2 初步亮度校准结果 139 fb^{-1} 发表，而之后的分析都更新到了 140 fb^{-1}。而本论文中的两个分析刚好一篇是 2023 年前发表，另一个在 2023 年后发表，所以虽然都是 run-2 的结果，两个分析中使用的积分亮度确实是存在微小差异的。

现在在第二个分析的介绍中添加了这部分的说明，解释了为什么在 2023 年后更新到了新的亮度以及对应的系统误差。

（意见及回复可以往后延续）

_____平台专家 3，评分：___91___（评审时间：2026 年 07 月 23 日）

总体评语：

该论文基于大型强子对撞机上 ATLAS 实验在 Run 2 期间采集的全部 140 fb？1 质子-质子对撞数据，围绕粒子物理标准模型的精确检验与新物理探测两大核心目标，系统性地开展了三项紧密关联的研究工作。

对学位论文的学术评语:

论文的核心物理分析是利用 ZZ → 双轻子加不可见末态的衰变道，对 ZZ 玻色子对的产生截面进行精确测量。该末态相较于四轻子末态拥有更大的产生截面，能提供更高的统计量。随后利用同一数据集开展了对暗物质及相关新物理现象的搜寻，主要聚焦于希格斯玻色子的不可见衰变。研究不仅针对希格斯不可见衰变，还检验了简化的暗物质模型和包含额外赝标量媒介子的双希格斯二重态模型等。最后，为应对未来高亮度 LHC 带来的极端辐射环境和高事例率挑战，ATLAS 探测器正在进行全面升级。论文作者深度参与了缪子谱仪中新型小型监测漂移管探测器的研发与建设工作。完成了 50 个新型 sMDT 高精度探测器的完整组装，包括精密管的制备、腔室结构的搭建以及服务系统的安装。对所有组装完成的探测器进行了严格的质量控制和性能测试，包括宇宙射线测试，结果表明，sMDT 探测器的单管空间分辨率优于 90 μm，完全满足 HL-LHC 升级后的苛刻技术要求。此项硬件研究工作为 ATLAS 缪子谱仪在 HL-LHC 时代保持高精度的径迹重建能力和触发效率奠定了坚实的基础，保障了未来高亮度环境下物理分析的可靠性。

专家 3 意见 1：

（1） 不是自己做的图，应该给出参考文献。例如第一章的几个图，以及第三章的若干个图。只是我注意到第三章有一些图是有引用的，为什么不统一呢？

（2） 第三章的表格，如果数据不是自己测的，也应该给出参考文献。

学生回复：

这两个建议都是关于第一、三章的图表，所以统一修改并回复。

第一章的标准模型与基本粒子的图来自 wiki，而 wiki 的来源是 Fermilab，现已增加参考文献。

第三章的图和表格大都来自 ATLAS TDR，并且会在运行过程中更新其运行表现和相关性能参数。现在已将涉及到的其他数据来源都尽可能地标注在图表上了。

专家 3 意见 2：

（3）第二章的内容过于理论化，这在一个实验为主的文章里比较怪异，另一方面，内容与后续实验部分没有直接联系，给人一种悬浮在表面的感觉。我建议把前两章合并，可以在 1.1 介绍粒子物理，1.2 介绍标准模型，1.3 介绍超越标准模型，1.4 介绍原来的 1.2 内容，1.5 介绍原来的 1.3 内容，1.6 介绍论文内容安排。

学生回复：

感谢您详尽的意见！这部分意见很好，而且是更为清晰的论文架构。

在现在的论文结构中，第二章的内容主要是作为实验结果的物理基础，虽然没有直接联系，但是实验部分的理论预测，包括引入暗物质模型后的实验预期结果都是与这部分密切相关的。所以我准备保持当前结构，同时将会根据您的下一个建议，将具体分析中过于冗长的说明迁移到第二章中。

专家 3 意见 3：

（4）另外，之前 SM 和 BSM 的内容过于宽泛，建议缩减泛泛的理论部分（那些拉氏量对后面的内容没什么帮助），然后把后面 chapter5 和 chapter6 第一节的大部分内容（即相关的理论模型介绍等等）挪过来。后面每个章节前面，只需要介绍这个测量的目的和意义即可，如此读者在第一章会了解到你这个论文要研究的东西与什么物理有关，然后在看到具体工作章节时，可以聚焦于这个工作的重要性、以及后面的工作细节。

学生回复：

感谢您详尽的意见，这部分内容已经进行了论文结构上的重构，将这部分内容的主题迁移至理论部分，并相应删减了部分理论部分。现在的理论部分会自然延伸到两个分析相关的具体理论部分。

_____平台专家 4，评分：___89___（评审时间：2026 年 07 月 31 日）

总体评语：

对学位论文的学术评语:

The research content of this doctoral dissertation is highly specialized and specific. Focusing on both theoretical research and experimental detection, it is confined to the precise measurement of the ZZ boson pair production cross-section and the search for dark matter via the dilepton and invisible final states in the ATLAS experiment. Its purposes are twofold: first, to test the Standard Model, and second, to probe dark matter. This indeed represents a frontier topic in current particle physics. The innovative achievements are primarily threefold: First, the precise measurement of the total and differential cross-sections for the pp→ZZ→？？？？ν ν ̄ process, which improves the measurement precision to 4.6%, thereby providing a high-precision test of the electroweak interaction in the Standard Model; Second, the search for dark matter particles via the Mono-Z channel, which found no significant deviation from the Standard Model predictions and set robust exclusion limits within multiple theoretical frameworks; Third, the construction and testing of the small-diameter monitored drift tube (sMDT) detector chambers for the ATLAS detector upgrade at the High-Luminosity Large Hadron Collider (HL-LHC), involving the rigorous assembly and quality control testing of 50 detector chambers. Overall, the above three aspects of innovation are incremental in nature. While they are conducive to the advancement of this research direction, they do not constitute disruptive breakthroughs within the field. The author possesses a solid theoretical foundation and experimental competence, with multiple papers published in important domestic and international academic journals. The dissertation is written in accordance with scientific norms, featuring clear logic, thorough narration, sound reasoning, and reliable conclusions. In summary, I consider this dissertation to have met the standards required for a doctoral thesis.

专家 4 意见 1：

As for the future development of this research topic, on the one hand, regarding the test of the Standard Model, the author merely relies on the future capabilities of Run？3 and the HL LHC—this is overly narrow. In fact, the author could also consider the following two avenues: 1. Explore rarer processes: study processes such as ZZγ (two Z bosons with one photon) and tri boson production. These processes are highly sensitive to anomalous quartic gauge boson couplings (aQGC) in the Standard Model, and any tiny deviation could be a sign of new physics. 2. Combine multi channel analyses: merge the results from the ZZ→？？？？ν ν ̄ channel with those from other decay channels (e.g., 4？ and ？？？？jj) to maximize experimental sensitivity and provide the most stringent combined test of the Standard Model.

学生回复：

Thank you for the insightful suggestions. The processes you mentioned are important tasks of ATLAS collaboration. In ATLAS, explorations of rarer processes (like ZZγ and triboson) are handled by parallel, independent analysis groups, and multi-channel combinations are driven by dedicated teams. While I contributed to the combination efforts, I only included analyses in this thesis where I made core contributions to ensure a

cademic rigor. Nevertheless, I have added a discussion of these essential directions to the outlook section.

感谢您的回复和建议！您提到的这部分工作的确是 ATLAS 分析组所承担的重要任务之一。您提到的 rarer processes，在 ATLAS 有独立的其他分析组在进行，与这里做的工作是平行关系。而 combination 的工作也有相应的分析组在进行，我虽参与了部分联合工作，但为保证论文严谨性，仅收录了由我作为核心贡献者的分析。同时，您提到的这部分建议确实是进一步提升标准模型检验的思路，我将这部分建议加入了展望的部分，作为对未来工作的指导方向。

专家 4 意见 2：

On the other hand, for dark matter searches, the author is currently only in the stage of "looking for signals". In the future, the focus should shift toward "characterizing the properties of dark matter particles". The following two aspects are suggested: 1. Search for new signals such as "dark radiation": look for final states that, in addition to missing energy, also contain a dilepton resonance peak from the decay of a new Z' boson. 2. Combine multi messenger indirect detection: jointly analyze the collider results from Mono Z/Z' with those from astrophysical indirect detection experiments (e.g., Fermi LAT, AMS 02) and underground direct detection experiments (e.g., LZ, XENONnT).

学生回复：

Thank you for the constructive comments. Shifting towards 'characterizing dark matter properties' is indeed a crucial future trend. I fully agree with your suggestions regarding 'dark radiation' and multi-messenger detection, and have incorporated them into the 'Outlook' chapter of the thesis. These insights will serve as vital guidance for my future research.

感谢这两条极具建设性的意见。这部分确实是未来的核心趋势。我完全认同您的观点，并已将寻找暗辐射新信号及多信使联合探测的建议补充至论文的‘展望’中。如果我未来有幸参加相关工作的话，这将对我未来的相关研究提供重要的指导。

_____平台专家 5，评分：___90___（评审时间：2026 年 08 月 03 日）

总体评语：

对学位论文的学术评语:

This thesis presents the most precise measurement of Standard Model ZZ boson pair production at 13 TeV using 140 fb-1 of ATLAS data, achieving a fiducial cross-section of 21.0±1.0 fb with a total uncertainty reduced from 7.0% to 4.6%. It sets stringent constraints on anomalous gauge couplings and, using a BDT-based search, limits the Higgs invisible branching ratio to <18.7% at 95% CL. The collider results are translated into WIMP-nucleon scattering limits, demonstrating significant complementarity and a discovery advantage over direct detection experiments in the low dark matter mass region. Additionally, the work includes hardware contributions to the construction and quality control of sMDT chambers for the ATLAS HL-LHC upgrade. The researches presented in this thesis are generally well-motivated. The thesis is rich in research content, well-structured, logically coherent, thoroughly detailed, and written in a rigorous and formal academic style.

专家 5 意见 1：

It%ss not very clear what is the exact contribution of the author to the two ATLAS physics analysis when working in a large collaboration. Please emphasize this a bit more.

学生回复：

Thank you for the valuable comment. To clarify my specific roles in the analysis, I have detailed my officially recorded CERN membership contributions in the 'Publication' section of the thesis.

For the two primary physics analyses presented in the main text, I served as a core analyzer and was deeply involved in the entire analysis workflow. Specifically, my direct hands-on contributions spanned almost every crucial stage, ranging from the initial Monte Carlo sample generation and event selection, to the final background estimation and unfolding procedures.

感谢专家提出的宝贵意见。为了明确我的具体工作，我已在论文的‘Publication’部分详细列出了 CERN 官方系统记录的每个分析的贡献清单。对于这两个主要物理分析，我作为核心分析人员，深度参与了完整的分析工作流。具体而言，我的实际工作涵盖了分析的几乎每一个核心环节，包括从早期的 MC 样本生成、事例选择，到后期的本底估计以及 unfolding 过程。

专家 5 意见 2：

Minor comments:

●2.3：Please provide some references for the theory of Supersymmetry (SUSY), Extra Dimensions and Hidden Sector Models.

●Figure 4.3： What is the physics process used to determine the electron reconstruc

tion and identification efficiency? What is the pileup level? Is the figure from Ref. [82]? Maybe it's better to add such information in the caption.

●Period(s) are missing in a few places, e.g. 5.5.3 last paragraph, 5.5.5 first and second paragraphs

●5.6.1 〇The response matrix is not defined here but later at page 97. 〇Point 2. Since the systematic variation (e.g., a jet energy scale shift) affects not only the signal but also the background shapes and normalizations, we should subtract the varied background (which has been re-estimated under the same systematic variation) before unfolding, no? 〇Point 4. For detector systematics, we should compare the unfolded varied distribution to the unfolded nominal distribution, not to the nominal truth, right?

●5.7： The profile likelihood method is already used here, right? Maybe it's better to introduce the statistical analysis method as shown in 6.1.2 a bit already here.

学生回复：

Thanks a lot for the extremely detailed comments, they are very helpful!

2.3: updated the references

4.3: added the necessary information and cite

5.5.3&5.5.5: corrected mistakes using inline "%"

5.6.1:

〇Added a brief sentence to introduce the response matrix

〇Added the information in proper position

〇Thanks for pointing it out, I used the expression testing with pseudo-data(where unfolded nominal = nominal truth)

5.7: The likelihood method is briefly introduced in the introduction chapter. Additionally based on advice from another expert, I have rebuild the introduction and theory part by migrating the detailed theory parts in each analysis to Chapter 2. It is defined in Chapter 2 now.

_____平台复审(或申诉增评)专家 1，评分：_____（评审时间：20　年　月　日）

总体评语：

学生回复：

复审(或申诉增评)专家 1-意见 1：

学生回复：

复审(或申诉增评)专家 1-意见 2： 学生回复： （意见及回复可以往后延续）
_____平台复审(或申诉增评)专家 2，评分：_____（评审时间：20　年　月　日） 总体评语： 学生回复： 复审(或申诉增评)专家 2-意见 1： 学生回复： 复审(或申诉增评)专家 2-意见 2： 学生回复： （意见及回复可以往后延续）
导师对学位论文修改情况的评价

<table>
<tr><td>评审意见修改情况审核</td><td>是否已按照全部评审专家的意见（特别是低于 80 分）逐条修改到位？</td><td>☐ 是，已按要求逐条修改
☐ 有遗漏或修改不充分，需补充</td></tr>
<tr><td rowspan="4">修改后论文质量审核</td><td>学术（撰写）规范性</td><td>☐ 优 ☐ 良 ☐ 中 ☐ 差</td></tr>
<tr><td>学术创新性（学术博士）
研究内容与实践创新性（工程博士）</td><td>☐ 优 ☐ 良 ☐ 中 ☐ 差</td></tr>
<tr><td>研究系统性和深度（学术博士）
专业基础及工程实践能力（工程博士）</td><td>☐ 优 ☐ 良 ☐ 中 ☐ 差</td></tr>
<tr><td>研究与学科相关性（学术博士）
研究与专业类别相关性（工程博士）</td><td>☐ 优 ☐ 良 ☐ 中 ☐ 差</td></tr>
<tr><td>导师审核意见</td><td colspan="2">（在此说明修改成效并给出认定评价）

导师(签字)：　　年　　月　　日（必填）</td></tr>
</table>

评审意见修改情况审核	是否已按照全部评审专家的意见（特别是低于 80 分）逐条修改到位？	☒ 是，已按要求逐条修改 ☐ 有遗漏或修改不充分，需补充
修改后论文质量审核	学术（撰写）规范性	☒ 优　☐ 良　☐ 中　☐ 差
	学术创新性（学术博士） 研究内容与实践创新性（工程博士）	☒ 优　☐ 良　☐ 中　☐ 差
	研究系统性和深度（学术博士） 专业基础及工程实践能力（工程博士）	☒ 优　☐ 良　☐ 中　☐ 差
	研究与学科相关性（学术博士） 研究与专业类别相关性（工程博士）	☒ 优　☐ 良　☐ 中　☐ 差
导师审核意见	（在此说明修改成效并给出认定评价） 对评审意见逐一进行了修改或补充完善，同意答辩 导师(签字)：郭正纲　　2026 年　8　月 14　日	