

第一页

各位老师好！

我是尹航，今天的报告题目是电弱物理的实验研究。

第二页

我是山东师范大学本科毕业，然后 2010 年在中国科学技术大学拿到博士学位。在博士期间，长期在美国费米国家实验室做访问学生。毕业后，继续留在费米实验室做博士后工作，先后参加了 D 零与 CMS 国际合作组。

第三页

在物理研究方面，先在导师的指导下，与他人合作一起完成了超对称新粒子寻找的工作。然后把精确测量弱混合角作为自己的毕业论文。在博士后期间，继续了弱混合角的测量，同时开展了 W 玻色子电荷不对称性的测量。在 12 到 14 年之间，担任 D 零合作组的电弱物理组召集人。

由于精确测量需要对探测器有更为深刻的理解，所以我先后参与了 D 零实验的量能器刻度工作以及能量测量研究，然后在 13 年后加入 CMS 实验，参与硅径迹探测器触发系统的研发。

第四页

粒子物理是研究物质世界最基本构成、及其之间的相互作用，并探寻质量与宇宙的起源的学科。

标准模型是描述基本粒子与相互作用力的理论：在标准模型中，有三代轻子与夸克，并由规范玻色子来传递相互作用，分别是强相互作用，弱相互作用与电磁相互作用。而弱相互作用和电磁相互作用已经被统一成电弱相互作用了。

电弱机制是标准模型里的核心机制之一，它决定着质量的起源，粒子的运动规律。因此电弱机制中的基本参数测量是对标准模型至关重要的检验。

其中电弱物理的重要研究对象是 W 与 Z 玻色子。

总体来说，粒子实验物理的特点是：大学科装置、尖端技术、高投入、长周期，需要全球性的国际合作，至今已产生了数十位诺贝尔奖。

第五页

我的主要科研时间都用在了 Tevatron 上。Tevatron 坐落在费米国家实验室，是高能量质子、反质子对撞机，其质心能量接近 2 万亿电子伏特，是世界上正反物质对撞的最高能量记录。它的周长有 6.28 公里，运行中会将质子、反质子加速到接近光速。

在其 28 年的运行中产生了大量的科学成果，例如顶夸克的发现。同时它也对标准模型进行了极为严苛的验证。

在 Tevatron 上总共有两个大型探测器，分别是 CDF 和 D 零。

第六页

D 零实验是 Tevatron 上一个大型探测器，是在 20 多年前针对强子对撞机设计的。它重约 5000 吨，有着近 100 万条电子学读出通道。

这张照片是 2001 年在探测器升级组装完成后拍摄的。D 零实验国际合作组现在仍然有大约 15 个国家参与，68 个单位，近 400 位物理学家。

第七页

我的学术贡献主要体现在以下三个方面：

第一是， Z 玻色子中测量弱混合角：弱混合角是标准模型里面的基本参量，我们的测量是至今为止强子对撞机上最为精确的测量。

第二个是， W 玻色子的电荷对称性测量：它为理论拟合提供了重要的实验输入。

第三个是与精确测量相关的探测器研究：大型强子对撞机高亮度环境下，硅探测器触发系统的研发。

第八页

弱混合角是标准模型中的基本参数。就像精细结构常数， W 、 Z 玻色子的质量， $Higgs$ 的质量一样。它关系到标准模型中电弱机制的自洽性，以及质量起源等核心问题，因此弱混合角的测量是电弱机制中的核心问题之一。

如左图所示，对弱混合角最为精确的两个测量来自正负电子对撞机，分别是欧洲核子中心的大型正负电子对撞机，与美国斯坦福直线加速器。可是他们的测量值相互偏离两倍标准误差以上，是标准模型中极为少见的不吻合。由于通过弱混合角可以间接测量 $Higgs$ 的质量区域，而 $Higgs$ 质量已经在欧洲的大型强子对撞机上测量出来，因此直接测量与间接测量之间的契合度直接关系到整个标准模型理论的自洽性。如右图所示，用不同的弱混合角测量值来间接测量 $Higgs$ 质量，斯坦福直线加速器的结果显示 $Higgs$ 质量要偏小，而欧洲核子中心的大型正负电子对撞机则显示是要偏大，并与大型强子对撞机的直接测量值差距很大。因此，再次精确测量弱混合角变得极为重要与紧迫。

作为上世纪上一代电子对撞机，对弱混合角的测量是其核心贡献。由于下一代电子对撞机 ILC 的不确定性，因此在可预见的 10 年内，不会有来自电子对撞机上的改进。由于强子对撞机上的束流的限制、高能量下的复杂探测器环境、以及对质子部分子函数理解的局限性，比如在欧洲的大型强子对撞机上，未来很难接近电子对撞机上的测量精度。人们曾经对强子对撞机上的结果不再抱有希望。

而我们在 $Tevatron$ 上利用现有条件，充分挖掘和利用各种实验上的潜力，包括对量能器的精确刻度、电子能量的精确测量等，在 D 零实验上首次测量了弱混合角。

第九页

我们的两次测量结果先后在 10 年与 12 被粒子物理领域中最权威的国际粒子数据库 PDG 收录，正如左边这两张图所示，我们作为最精确的强子对撞机结果出现在弱混合角的测量图上。

右边这张图是我们最新的结果，可以看到，与世界平均值吻合，其精度已经超过了电子对撞机上的强子测量结果。为弱混合角的标定作出了贡献。需要提一下的是，最大的系统误差来源于质子的部分子分布函数。

这个是我的毕业论文，是在博士导师的指导下完成的。然后最新的结果是我们共同指导学生完成的。

第十页

这个工作得到了费米实验室每周物理评论的高度评价。正如图中所示我是文章的四位作者之一。每周物理评论中提到，自九十年代以来，欧洲核子中心的正负电子对撞机实验一直统领 Z 物理的世界最精确测量。Tevatron/D 零实验首次超过电子对撞机上实验的相关测量精度，从而确定了一个新的实验标准。

第十一页

前面提到，在弱混合角的测量中，最大的的系统来源于质子的部分子分布函数。那么这个分布函数式什么呢？

我们知道质子中有两个上夸克，一个下夸克，那么当质子加速到接近光速以后，内部不单只有三个夸克，其内部有很多的海夸克，与胶子。所以部分子的能量是一个非常复杂的分布。PDF 就是用来描述质子中部分子分布函数的。

在强子对撞机上，它是一个极其重要的参数。它是几乎所有理论的上输入值，关系到反应截面的计算，是精确测量的误差来源，并且不能直接计算，只能用实验输入。

我们知道， W 玻色子可以通过两个夸克的湮灭产生。在 Tevatron 上，由于是质子，反质子束流，我们可以知道产生 W 的两个夸克来源，同时由于上夸克所携带的能量大于下夸克的能量。因此可以通过正负 W 玻色子的分布来得到夸克的部分子分布信息。

第十二页

自 2011 年，在意识部分子函数的重要性，我独立承担了整个物理分析，并在去年把结果发表在 PRL 上，最近经过合作组审核同意，将整个分析的细节提交到了 PRD 上，以方便各个 PDF 拟合组使用我们的数据。

这个分析同样得到了费米实验室每周物理评论的报道，指出： D 零的实验结果是目前为止最为精确的电荷不对称测量，为与质子相关的实验提供了至关重要的信息，例如欧洲的大型强子对撞机和中微子实验。

第十三页

在完成了上述的两个精确测量以后，我意识到物理分析是与探测器密切相关的。正确的物理结果来源于对探测器正确的理解。

于是我加入了 CMS，参与了硅探测器触发系统的研究。

我们知道良好的径迹分辨率是高能实验成功的必要条件。而硅探测器已经越来越广泛的应用到对撞机上。同时，如何处理大量的电子学信号成为了高能物理发展的一个瓶颈之一。

这张图是 CMS 径迹探测器升级之后的效果图，在高亮度升级完成之后，CMS 的硅径迹探测器会有大约 7500 万条电子学读出线路，其峰值数据量有 50T 每秒。这个数据量相当于 2,3 年前世界海底光缆的总带宽。因此，如何实时处理这些数据成为了升级的重点，而硬件触发是最自然地选择。

第十四页

一些关于 CMS 实验一级触发的信息，LHC20 年升级之后的对撞频率是每秒 4000 万次，而我们需要通过触发，筛选出其中的 10 万次的事例送到下一级触发。而允许的最大延迟是在 10 个微秒附近，意味着我们需要在 10 个微妙将一个事例处理完成，决定保留还是放弃这个事例。

整个硅探测器触发系统升级大约需要 2000 万美元。

这块板子是费米设计的，名字叫脉冲星二号。这张图上列出了所有设计与测试人员，我也是其中一个。

我在这个项目中负责硬件板的测试工作，并搭建演示系统。这是由于成个触发系统要求非常高，总来没有以前的经验可以借用，我们需要向美国能源部证明这个方案是可行的。我在这个过程中，学习并掌握了针对 ATCA，FPGA 等先进技术与系统的设计理念，可以在国内运用到其他方面。

第十五页

这页总结一下科研成果。在物理结果上面，总共在主流学术期刊上发表论文 5 篇，包括当时最精确地超对称模型新粒子需找、强子对撞机上对弱混合角的测量、最为精确的电荷不对称性测量。

同时在 12 到 14 年担任 D 零电弱物理组召集人。电弱物理组是 D 零实验的六个一级物理组之一，有 50 人左右，下设三个分组。

第十六页

受邀在国际大型物理会议上做报告 11 次，包括 moriond 电弱，LHC 物理等会议。受邀在费米实验室与芝加哥大学做电弱相关学术报告。

硬件方面，担任 D 零量能器刻度组召集人，负责最后一年的刻度工作，确保了能量流，电子，光子能量的精确测量。

由于硅探测器触发研究，受邀在 iee 上做报告一次，iee 是国际电气与电子师协会会议。

得到高能物理学会的第六届晨光杯青年优秀论文二等奖奖励，2012 年，与博士导师的团队一起收获安徽省科学技术二等奖。

同时受到费米实验室每周物理评论报道近 10 次。

第十七页

全职回国工作设想。华中师范大学物理学院是一个拥有国家重点学科，教育部重点实验室，和基金委创新群体的学院。在高能核物理实验上，参与了两个国际合作组，包括 RHIC-Star，与 LHC-Alice 实验。

在对撞物理方向上，在 2013 年在谢跃红教授的领导下加入 LHCb 实验。谢跃红教授是 LHCb 物理规划组成员，同时是 B 介子到粲偶素衰变的召集人。

粒子物理所先后引进了许怒、王新年两位千人计划专家。有着十分理想的工作平台和发展空间。

第十八页

回国后我的工作重点会放在 LHCb 实验，集中在 B 介子的精确测量。(由于 B 物理与我以前从事的电弱物理一样，都是通过精确测量检验标准模型，需找可能的新物理现象，华中师范大学在 LHCb 的未来规划与我现有的经验有着很好的符合，可以发挥我的作用)。同时进行参与硬件升级的研发工作。同时，利用华中师范大学原有的硅探测器实验室，积极参与硅探测器触发系统的研究工作，以及其他前沿硬件的研发。积极参与未来的高能物理对撞机。

同时从事教学与指导学生的工作，与华中师范大学的现有团队密切合作，提高整体的创新能力。

谢谢各位老师。