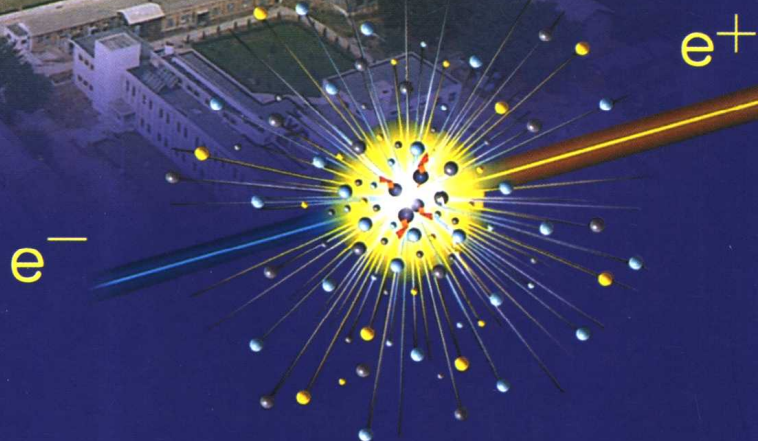




粒子探测器与数据获取

谢一冈 陈昌 王曼 吕军光 编著
孟祥承 王锋 顾树棣 过雅南

北京谱仪
BES

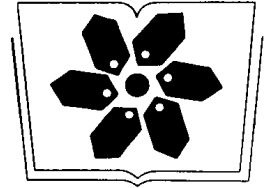


科学出版社

www.sciencep.com

0572.21

X 524



中国科学院科学出版基金资助出版

粒子探测器与数据获取

谢一冈 陈 昌 王 曼 吕军光 编著
孟祥承 王 锋 顾树棣 过雅南

科学出版社

北 京

内 容 简 介

实验粒子物理是当今物理学研究的前沿之一。在粒子物理实验中,由粒子源轰击其他粒子产生反应,探测器系统测量反应产物获取实验数据,再通过离线数据分析取得物理结果。在这一过程中,粒子探测器与数据获取是核心环节。

本书作者在广泛、深入掌握本学科发展的基础上,结合自己多年的实际工作经验,详细地介绍了粒子物理实验中常用的各种类型的探测器,包括多丝正比室、多种类型的漂移室、闪烁计数器、硅微条探测器、切伦科夫计数器、穿越辐射探测器、量能器、大型谱仪等,以及读出电子学与仪器的总线标准,触发判选系统和在线数据获取系统。本书对粒子探测器的物理基础、性能、应用的叙述简明扼要,包括了近 20 年来本领域的新发展的内容,注意实用性。

本书适合于从事粒子物理实验与核物理实验的科研人员,大学相关专业高年级学生、教师及研究生使用,也可供从事粒子探测器应用与从事在线数据获取系统工作的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

粒子探测器与数据获取/谢一冈等编著. —北京:科学出版社,2003
ISBN 7-03-011086-2

I. 粒… II. 谢… III. ①基本粒子-探测器 ②基本粒子-数据处理
IV. O572.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 106823 号

策划编辑 童安齐 责任校对 包志虹
文案编辑 徐一帆 封面设计 张放
责任印制 刘士平

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2003年7月第一版 开本:787×1092 1/16

2003年7月第一次印刷 印张:40 3/4 插页:4

印数:1—1 500 字数:938 000

定价:80.00元

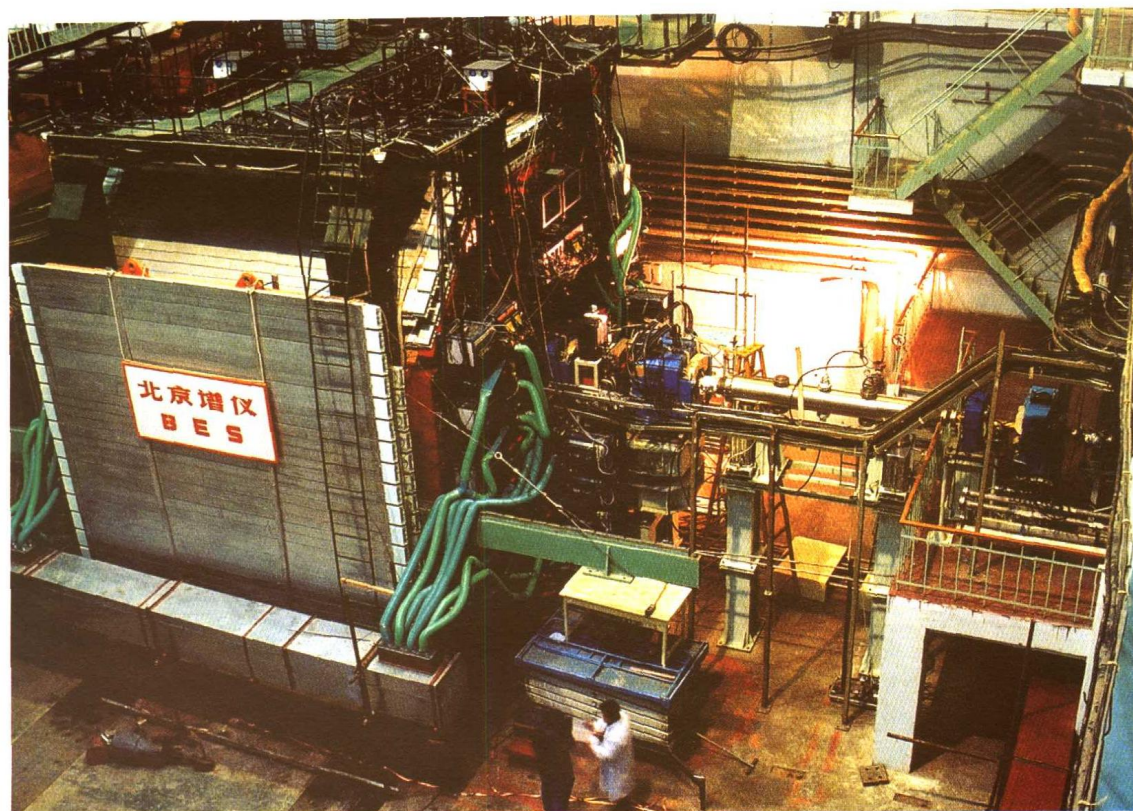
(如有印装质量问题,我社负责调换(新欣))



北京正负电子对撞机鸟瞰。正负电子由直线加速器（照片右上方）区加速至分叉区进入储存环。北京谱仪位于储存环南端（左下方）对撞点处。沿环东西侧切线方向为同步辐射区



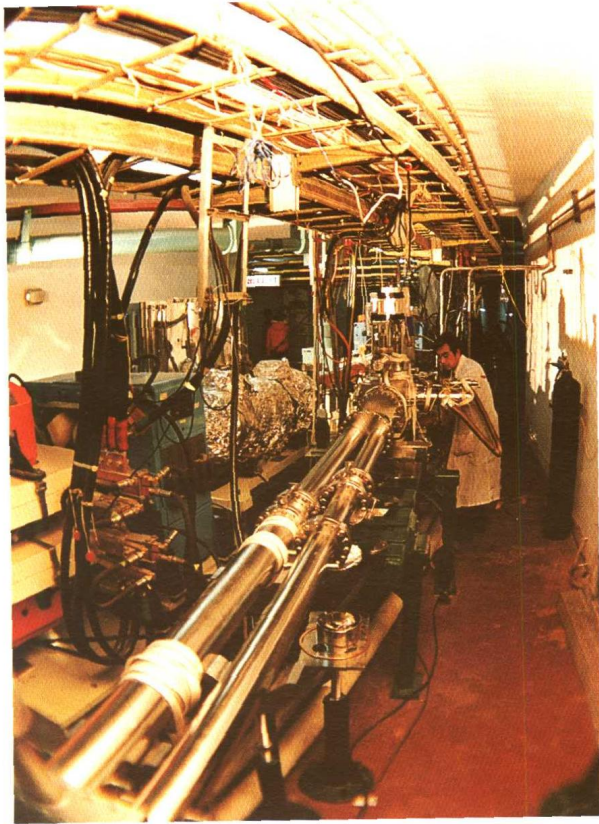
对撞机运输线正负电子分叉区



北京谱仪全景



同步辐射东厅光束线与实验站



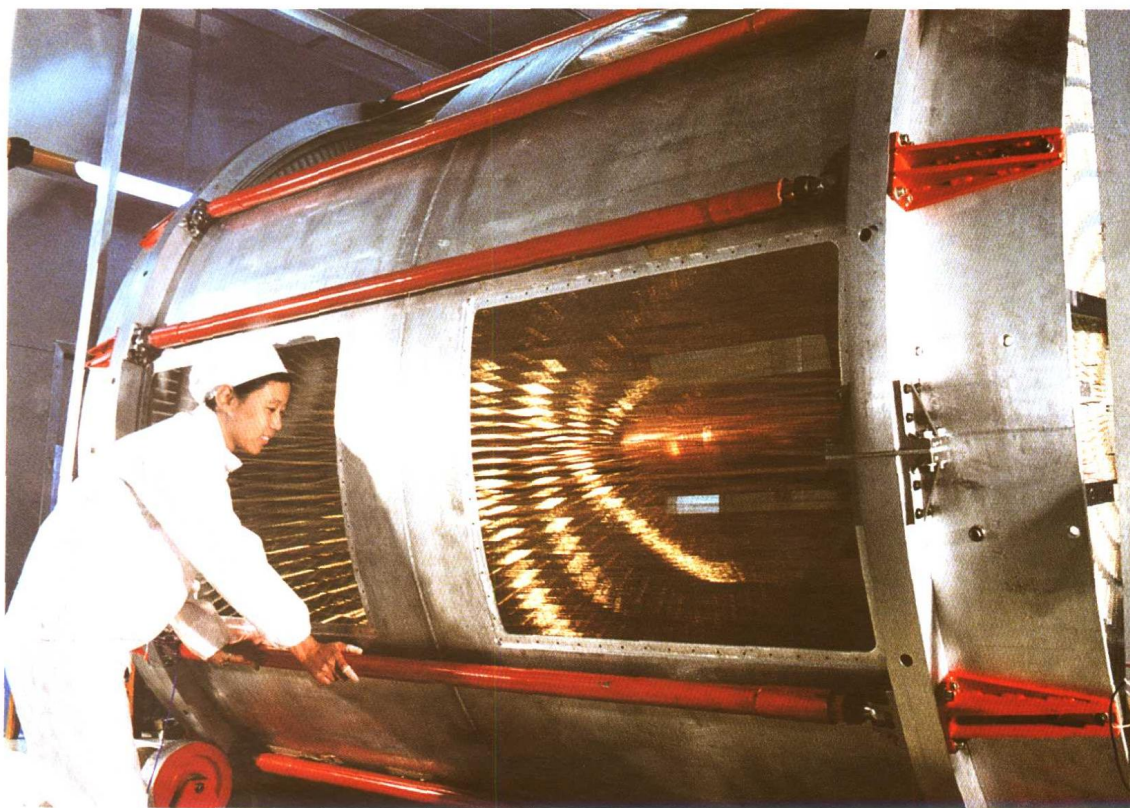
同步辐射扭摆器光束线的前端区（侧看）



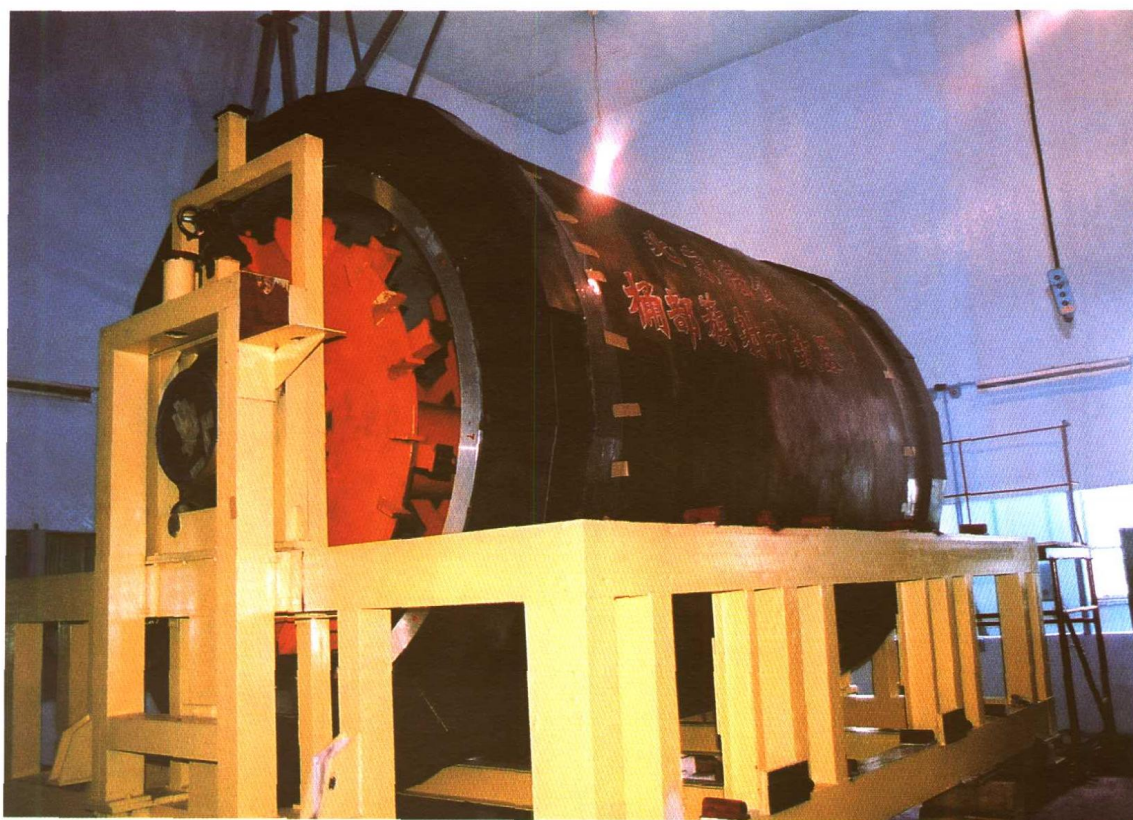
北京谱仪主控制室



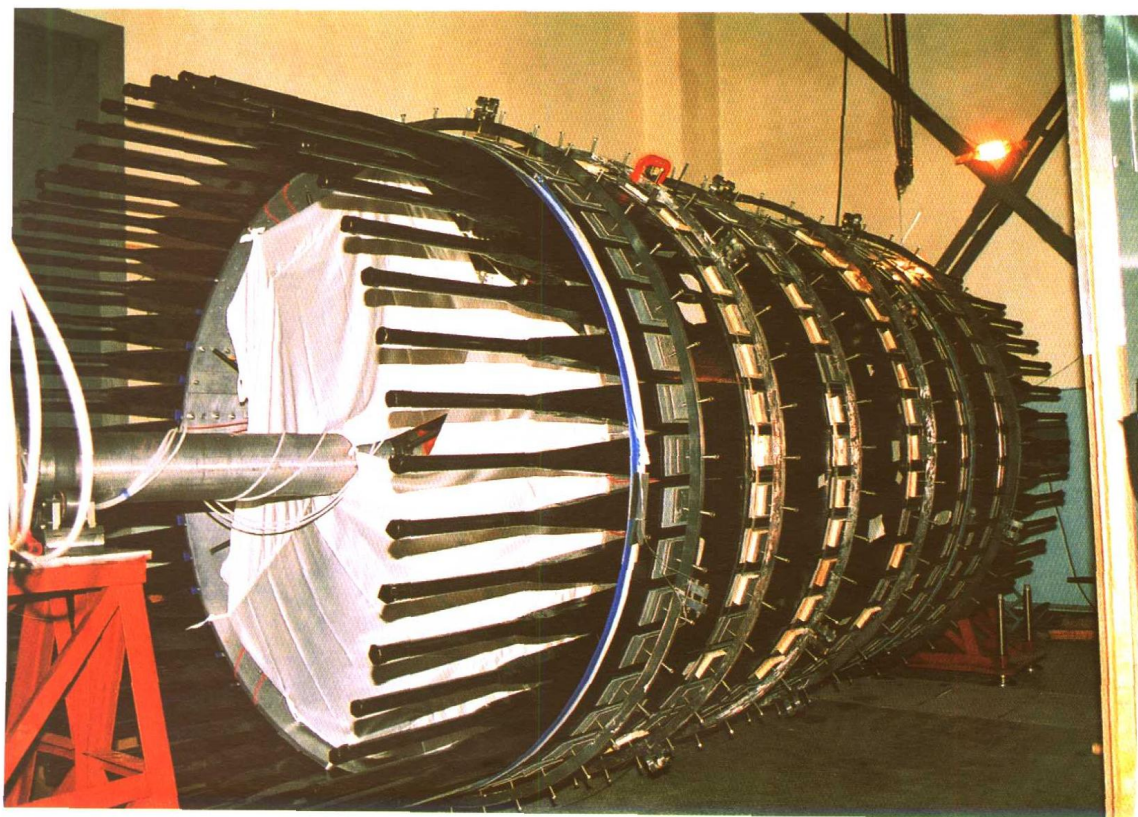
北京谱仪电子学与在线数据获取系统



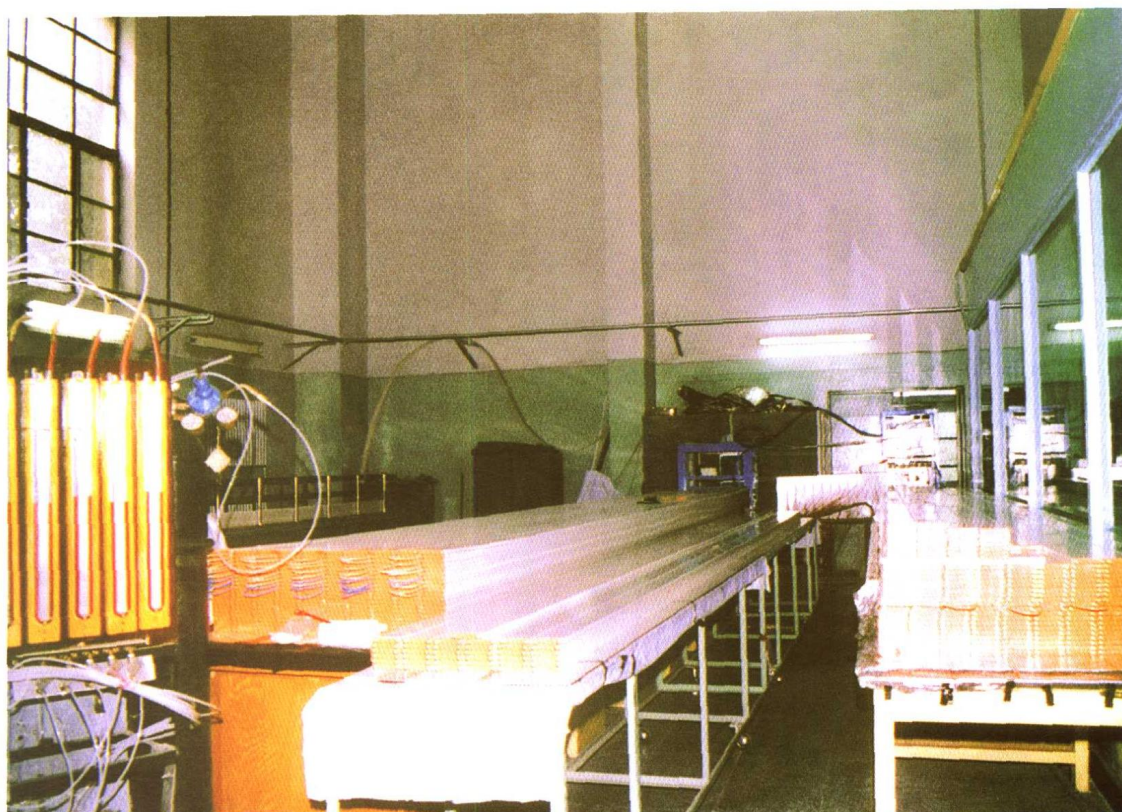
北京谱仪主漂移室



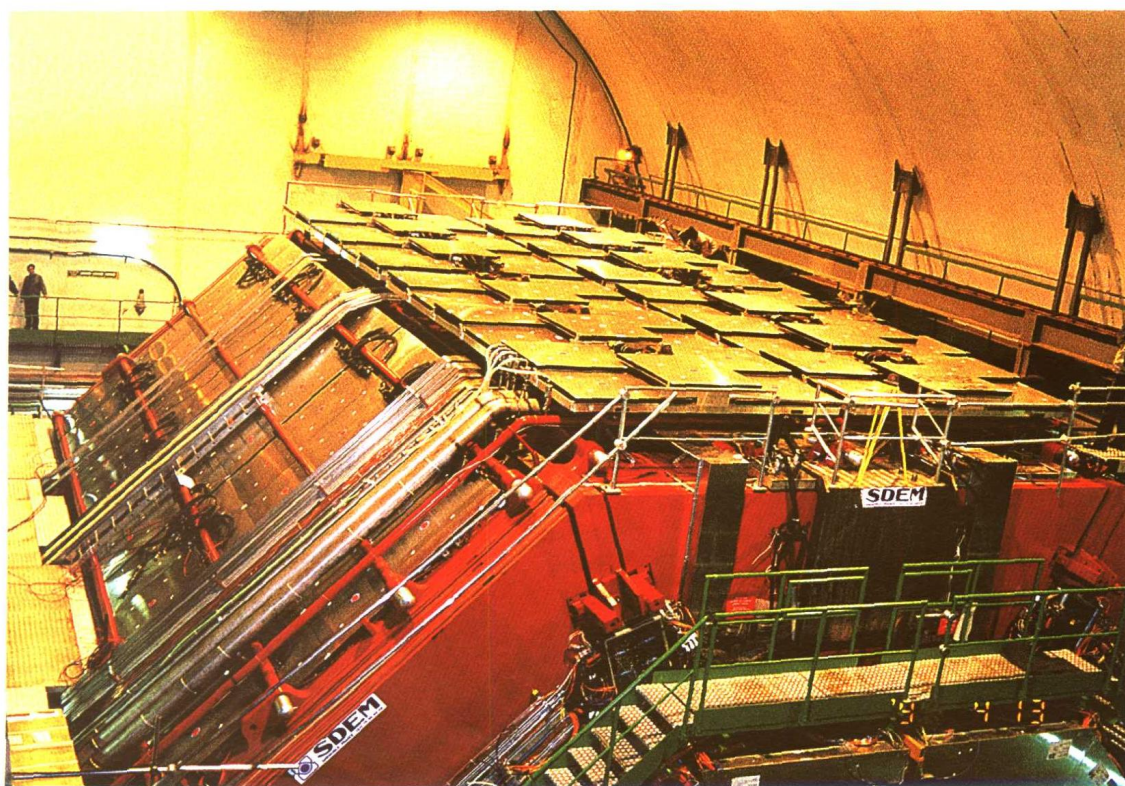
北京谱仪桶部簇射计数器（电磁量能器）



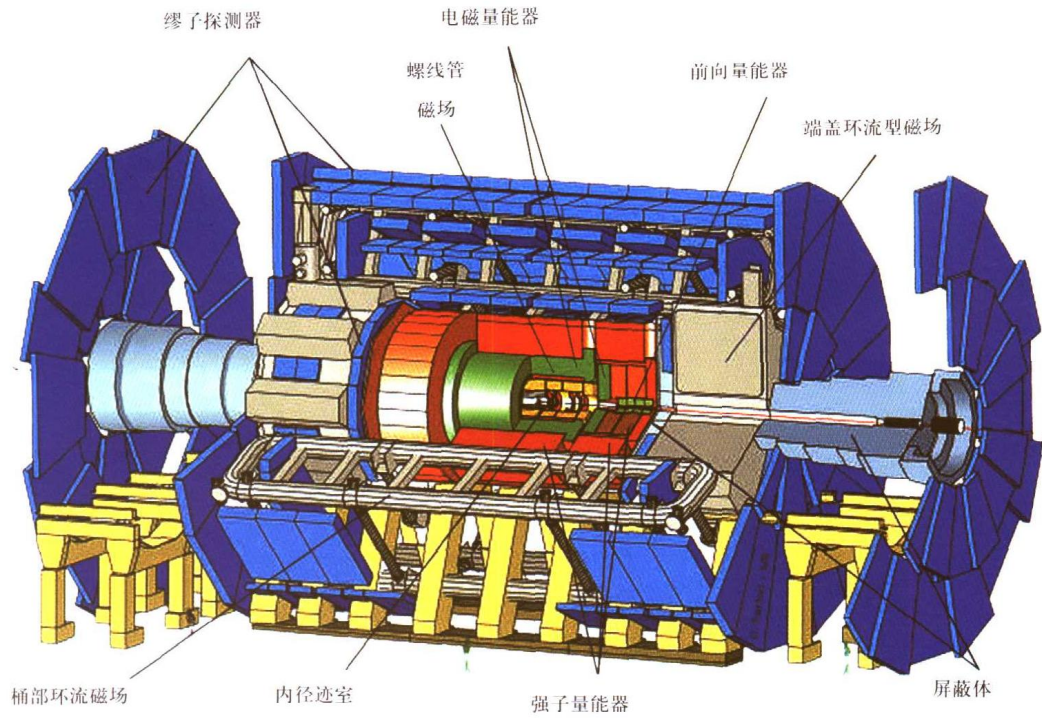
北京谱仪飞行时间计数器



高能物理研究所为 CERN 的 ALEPH 国际合作研制的 4500 支（2~7m 长）塑料流光管



以高能物理研究所为主为 CERN 的 L3-Cosmic 研制的 202m^2 定时 (T_0) 闪烁计数器

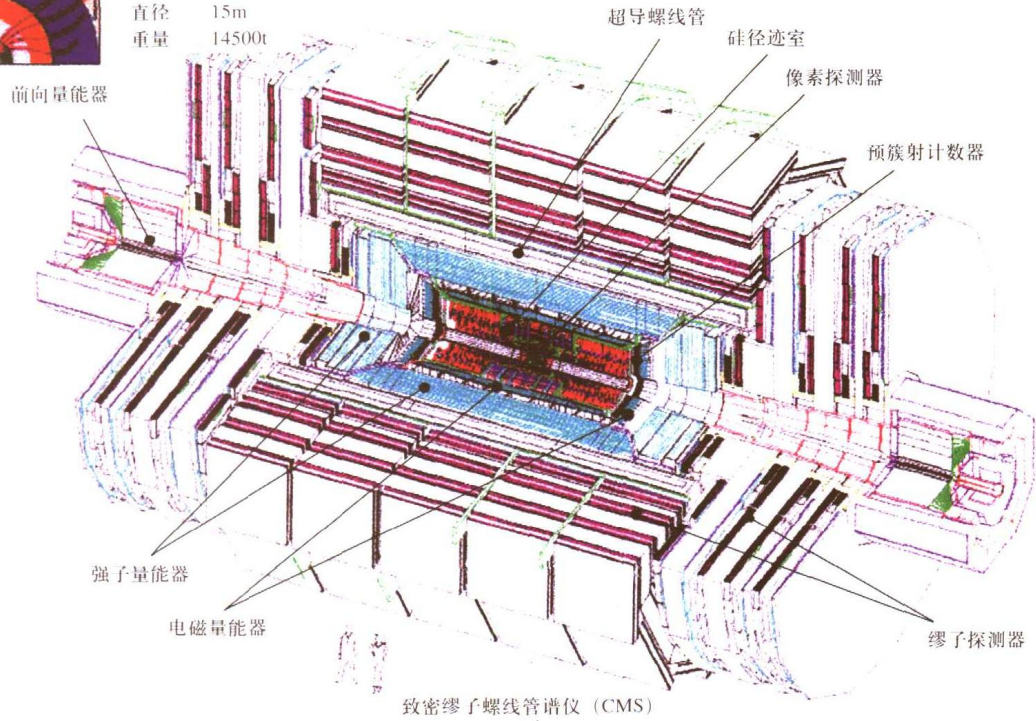


CERN 大型强子对撞机 (LHC) 上将于 2007 年运行的 ATLAS 实验装置



探测器特性

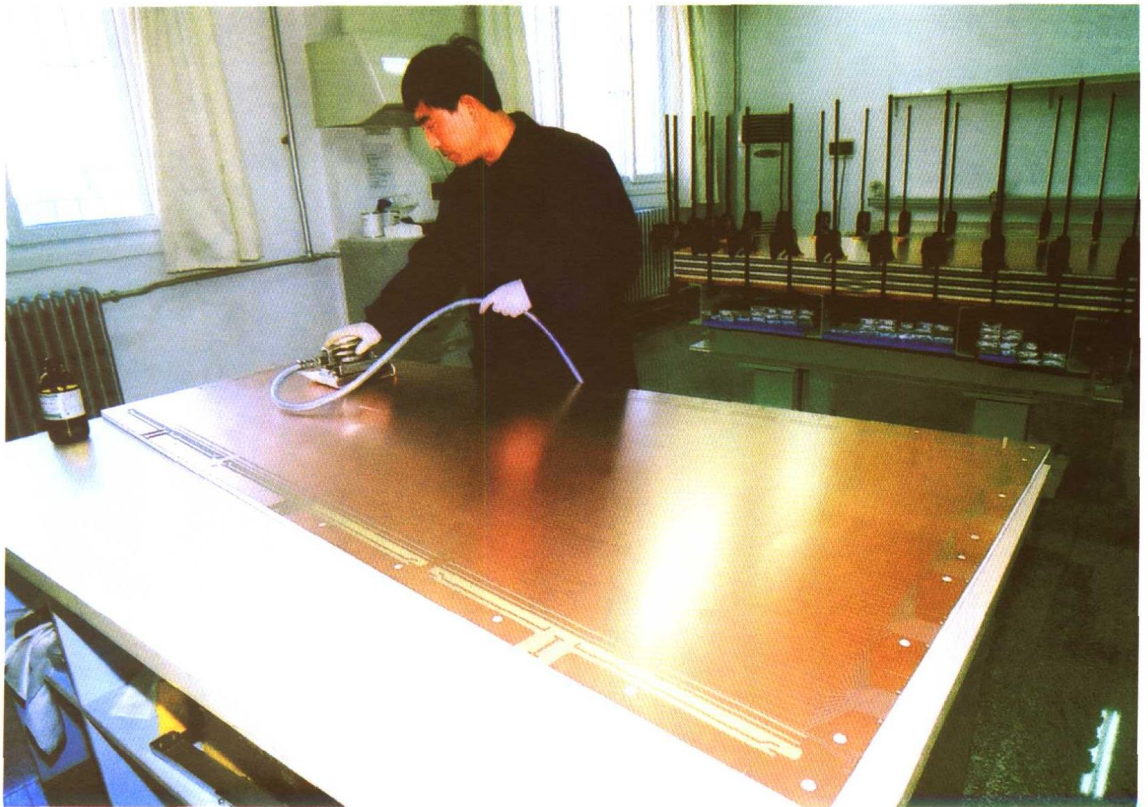
宽 22m
直径 15m
重量 14500t



将于 2007 年运行的 CERN 的 LHC 上的 CMS 实验装置



高能物理研究所承担为 ATLAS 研制 7000 支监控漂移管 (MDT) 与 48 个 MDT 室



高能物理研究所承担为 CMS 研制 160 个多层阴极条室 (CSC)

序

人类对于物质结构的认识在 20 世纪有一飞跃的进展,从原子深入到电子、原子核、质子、中子,再进一步到夸克和轻子。现在我们知道,已知的物质是由 12 种基本粒子及其反粒子组成的。它们是 6 种夸克和 6 种轻子及其反粒子。粒子物理实验上的飞速发展,主要归功于粒子加速器和粒子探测器的不断发展。

探测技术的创新时常导致实验上的重大突破和发现。就粒子探测技术的发展而言,曾经有 C. T. R. 威尔逊等 6 位科学家因此获得了诺贝尔物理奖。经过我国科学家几代人的奋斗,1988 年我国建成了北京正负电子对撞机(BEPC)和北京谱仪(BES),开始了我国加速器高能物理实验研究。10 多年来,北京谱仪取得了许多重要的物理成果,粲物理实验研究、 τ 轻子质量精确测量、强子 R 值的精确测量等处于国际领先地位,国际权威的粒子数据表(PDG)引用了北京谱仪的 116 项成果。我国在世界高能物理领域占领了一席之地。北京谱仪合作组(Beijing Spectrometer Collaboration)是一个国际合作的高能物理实验合作组,现有国内外 20 所研究所、大学参加,其中除中国外有美国、韩国、日本等三个国家的 8 个单位。我国高能粒子物理实验研究学者除了在北京谱仪上进行研究工作以外,还在西藏开展了大规模的宇宙线研究。此外,我国学者还参加了多项高能物理前沿的国际合作研究。

2000 年 7 月,国家科教领导小组第七次会议认为:“发展高能物理和先进加速器对提高我国综合科学技术实力、保持我国在该领域的应有地位、稳定一支精干的高能物理科研队伍,有着重要意义。会议同意在北京正负电子对撞机(对撞机和北京谱仪)取得成功的基础上,投入 4 亿元对该装置进行重大改造,用较少的投入,继续取得高水平的研究成果。”我国高能物理的研究和今后的发展,不断地需要大批青年科技人员投入。作为一个实验粒子物理研究人员,必须掌握粒子探测技术,这是必要的基础知识。

近年来,粒子探测技术发展很快,但是我国缺少全面、综合介绍粒子探测器的参考书籍。年轻科学工作者要学习探测器有关知识,不得不主要依靠杂志上的文献。这样时常事倍功半,使得年轻科学工作者往往不能很快进入有关领域。

谢一冈、王曼、陈昌、过雅南、王锋、顾树棣、吕军光、孟祥承等八位专家编著的《粒子探测器与数据获取》是一本很好的探测技术方面的参考书。他们一直活跃在高能粒子物理实验第一线,在探测技术的开发、探测器及其配套电子学系统的研制、大型谱仪的研制和运行、粒子物理实验数据的获取和分析等方面有 20 多年的工作经验。在本书中,他们结合自己的工作经验和体会,详细介绍了粒子物理实验中常用的各种类型探测器,包括正比计数器、多丝正比室、多种类型漂移室、时间投影室、闪烁计数器、硅微条探测器、切伦科夫计数器、穿越辐射探测器、量能器等,以及读出电子学与仪器的总线标准,触发系统和在线数据获取系统。现在的高能粒子物理实验,都用多种探测器集成大型谱仪,本书有一章专门

对此进行介绍。对于探测器技术在其他学科与国民经济方面的应用,本书也做了介绍。编写本书时,作者力求系统性和实用性并重,以便读者可以较快地掌握基本原理,同时能够较快地解决实际工作中遇到的问题。谨向从事粒子物理实验与核物理实验的科研人员,高等院校有关专业高年级学生、教师和研究生及教师推荐本书。

叶铭汉

2002年8月6日

前 言

近 20 年来,粒子物理实验与粒子探测器技术发展得很快,但是我国目前尚缺少包括该领域新进展的专门著作。基于掌握近年来国际发展动态和从事粒子物理实验与探测器技术方面的工作经验,我们编写了本书。在编写上,我们力求系统性、实用性,较全面地反映国内外最新进展和成果;对基本原理、工作性能的叙述与公式、结论的引出力求简明扼要,避免烦琐的数学推导,但又有一定深度。在内容上,我们对于许多新发展的技术予以全面介绍,包括中国专家的贡献。为加强实用性,书中给出了若干常用的图表、数据以及参考文献以备随时查用。有关粒子探测器的基本性能参数(如效率和位置、时间、能量分辨率等)的测量方法,测量中的电子学设备的选用,消除快脉冲信号反射畸变和常用放射源和辐射剂量与屏蔽等这些在常规测量中非常实用的问题也分别在正比计数器、多丝正比室与漂移室、闪烁探测器、总线(NIM 部分)、同步辐射屏蔽和射线治疗等有关章节及附录中做了适当介绍。

本书分为物理基础、粒子探测器、数据获取和综合应用四部分。在内容编排上没有像国外有关著作那样按照测量目的,即按位置、动量、能量、时间和粒子鉴别等分类,而主要是按照探测器类型分类,以便对探测器本身及其发展作较深入的阐述。上述各物理量的测量及粒子鉴别则融入有关章节讨论。粒子物理实验需要综合应用多种探测器。我们写入大型谱仪一章,使读者对如何应用各种探测器进行实验有一定的概念,并对粒子鉴别作了较详细的综述。由于在粒子物理实验中量能器已形成独立完整的系统,故能量测量独立成章。半导体探测器的能谱测量部分主要用于低能核物理和射线应用方面,本书则主要介绍在粒子物理实验中常用的硅微条探测器。“非电子学型”的径迹探测器因近年来已很少使用,故未收入本书。中子探测器和同探测器有关的蒙特卡罗模拟软件如 GEANT、EGS 和 GARFIELD 等,以及数据处理的统计方法与粒子探测器在非加速器物理(粒子天体物理)实验方面的应用虽然都很重要,但限于篇幅和已有或将另有专著,本书未做全面介绍,读者可参阅其他有关书籍。

随着我国科技兴国战略的深入实施,前沿基础科学研究及其应用必将进一步得到发展。希望本书能对在粒子探测器技术、数据获取、粒子物理实验和低能核物理实验以及射线应用等方面工作的专业人员和高等院校师生有所裨益。

本书涉及的专业知识面较广,由多位作者集体执笔完成。因此,各章的侧重面、撰写风格等不尽相同,有的章节间也不免略有重复之处。在内容分量和取舍方面也有一定考虑。例如,注意到国内目前介绍有关 VME 总线的书籍很少,但其应用面已很广,因此叙述较详,而发展很快的虚拟仪器系统 LabView 与 LabWindow 在粒子物理、核探测领域已逐步应用,但国内已有书籍,因此本书不再介绍。另外,关于流光形成机制,到目前为止,国际上尚无统一成熟的理论,因此在有关章节中未做详细介绍,仅列出文献及附录供读者参考比

较。本书作者虽然皆在科研第一线工作多年,有较深的阅历和实际经验,且部分作者参加研究生教学,但因日常科研工作繁忙,加之粒子探测技术和数据获取领域近年来发展十分迅速,因此书中难免有不够完善甚至错误之处,敬请读者批评指正。

本书各章的作者是:谢一冈:绪论、第十五章;陈昌:第一、二、三、五、六章;王曼:第四、九、十、十四章;吕军光:第七章;孟祥承:第八章;王锋:第十一章;顾树棣:第十二章;过雅南:第十三章。谢一冈审阅了全书,盛华义审阅了第三篇。陈昌及过雅南、谢一冈分别在本书编著的前期及中、后期做了一定的组织工作;过雅南与谢一冈补充了部分内容(附录和第三篇部分内容等)。

在本书的编写出版过程中,得到中国科学院院士唐孝威、张焕乔,中国工程院院士叶铭汉[中国高等科技中心(CCAST)主任、原中国科学院高能物理研究所所长兼中国高能物理学会理事长],高能物理研究所前任所长兼中国高能物理学会副理事长郑志鹏,原中国高能物理学会理事长、原高能物理研究所科技委员会主任郑林生,高能物理研究所所长陈和生,高能物理研究所副所长李卫国,以及高能物理研究所科技委员会主任杜东生,高能物理研究所科技委员会副主任马基茂诸位研究员的大力支持,特别是叶铭汉院士为本书作序,马基茂研究员在本书编写出版的初、中期做了大量的组织工作和部分内容的审阅工作,提出指导性意见并提供了绪论的部分内容,特借此机会深表谢意。

此外,中国科学院高能物理研究所、北京核仪器厂和中国科学院半导体研究所的有关科技人员分别阅读过有关章节,提出了有益的意见或提供素材:陈元柏(第四章);刘建北(第五章);郑志鹏、李金、周莉(第七章);朱国义、李国华和李侃(第八章);郁忠强、赵棣新、刘振安、朱科军(第十三章);郑志鹏(第十四章);唐鄂生、崔明启、胡朝辉、李云山、王乃善、张家铨、唐锦华、李建平和王林林(第十五章第 15.1 至第 15.6 节)。高能物理研究所学术秘书室钟元元设计了本书的封面,刘杰提供了部分照片。特在此一并致谢。

最后,感谢中国科学院科学出版基金委员会和高能物理研究所对本书出版经费的支持。

目 录

序

前言

绪论..... 1

第一篇 粒子探测器的物理基础

第一章 粒子与介质的相互作用..... 5

1.1 带电粒子通过介质时的电离能损..... 5

1.1.1 Bethe-Bloch 公式..... 6

1.1.2 电离能量损失的相对论上升和密度效应..... 6

1.1.3 电离能量损失的涨落和分布..... 7

1.1.4 δ -电子..... 8

1.1.5 混合物和化合物中的电离能量损失..... 9

1.1.6 电离产额..... 9

1.2 带电粒子通过介质时的多次库仑散射..... 10

1.3 快速带电粒子的韧致辐射..... 12

1.4 切伦科夫辐射、穿越辐射和同步辐射..... 16

1.4.1 切伦科夫(Cherenkov)辐射..... 16

1.4.2 穿越辐射..... 17

1.4.3 同步辐射..... 18

1.5 光子和物质的相互作用..... 19

1.5.1 光电效应..... 19

1.5.2 康普顿-吴有训效应..... 21

1.5.3 电子对产生..... 23

1.6 电磁簇射..... 25

1.7 强子簇射..... 29

参考文献..... 32

第二章 电子与离子在气体中的运动..... 33

2.1 带电粒子在气体中的能量损失及其分布..... 33

2.2 原电离和总电离..... 36

2.3 气体中电子和离子在无电场情况下的扩散..... 37

2.4 离子的迁移率..... 38

2.5 电子的漂移和扩散..... 40

2.5.1 电子的漂移	40
2.5.2 电子的扩散	42
2.6 在外加磁场和强电场影响下的电子	43
2.6.1 在磁场中电子的漂移	43
2.6.2 强电场影响下的激发和电离	44
2.7 负电性气体的影响	49
2.8 气体探测器中收集的电荷与外加电场的关系	51
参考文献	54

第二篇 粒子探测器

第三章 正比计数器	55
3.1 正比计数器的工作原理	56
3.1.1 雪崩倍增过程	56
3.1.2 圆柱形正比计数器的倍增因子	58
3.2 正比计数器信号特征	59
3.3 表征正比计数器性能的几个参数的实验确定	62
3.3.1 计数率坪特性曲线	62
3.3.2 能量分辨率	63
3.3.3 倍增因子	63
3.3.4 探测效率	63
3.3.5 正比计数器的寿命(老化)	64
3.4 空间电荷效应	64
3.5 工作气体的选择	66
3.5.1 正比计数器对工作气体的要求	66
3.5.2 惰性气体作为主要成分	67
3.5.3 多原子分子气体加入的影响	67
3.5.4 粒子工厂的气体探测器对工作气体的要求	68
3.6 正比计数器应用的一个实例	68
参考文献	69

第四章 多丝正比室与漂移室	71
4.1 多丝正比室	71
4.1.1 多丝正比室(MWPC)的工作原理	71
4.1.2 气体放大系数的唯像参数化(phenomenological parametrization)理论	73
4.1.3 丝室的几何参数及其公差对 MWPC 气体放大特性的影响	76
4.1.4 重力和静电力对丝的稳定性的影响	78
4.1.5 工作气体的选择	81
4.1.6 信号读出方法	82