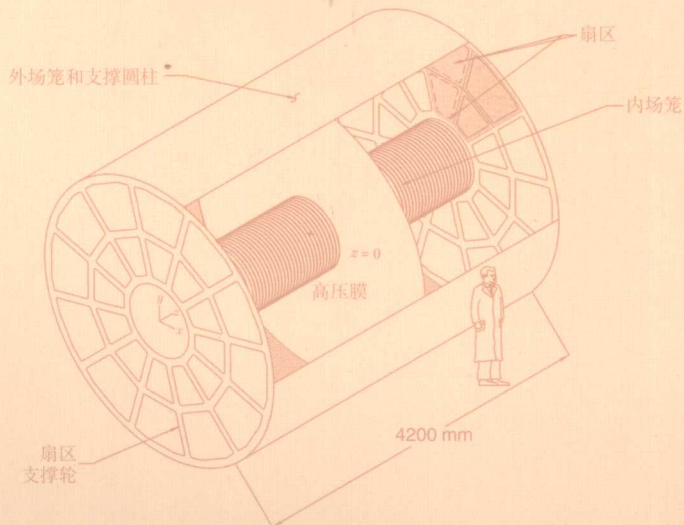



“十一五”国家重点图书 中国科学技术大学 精品 教材

粒子探测技术

汪晓莲 李澄 邵明 陈宏芳 编



中国科学技术大学出版社



中国科学技术大学精品教材

粒子探测技术

LIZI TANCE JISHU

汪晓莲 李 澄 邵 明 陈宏芳 编

中国科学技术大学出版社

内 容 简 介

本书是物理类本科生专业基础选修课及核与粒子物理学研究生学位课程的教材,主要介绍微观粒子和辐射与物质相互作用的物理机制,粒子和辐射的探测原理,主要类型粒子探测器的工作原理、构造、性能和应用,并在附录中介绍了辐射和辐射防护的基本知识及常用放射性核素的特性。

图书在版编目(CIP)数据

粒子探测技术/陈宏芳等编. —合肥:中国科学技术大学出版社,2009.6
(中国科学技术大学精品教材)

“十一五”国家重点图书

ISBN 978-7-312-02299-9

I. 粒… II. 陈… III. 粒子探测—高等学校—教材 IV. 0572.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 168083 号

中国科学技术大学出版社出版发行

安徽省合肥市金寨路 96 号,230026

<http://press.ustc.edu.cn>

安徽辉隆农资集团瑞隆印务有限公司印刷

全国新华书店经销

开本: 710×960 1/16 印张: 27.5 插页: 2 字数: 524 千

2009 年 6 月第 1 版 2009 年 6 月第 1 次印刷

印数: 1—3000 册

定价: 45.00 元

总 序

2008年是中国科学技术大学建校五十周年。为了反映五十年来办学理念 and 特色,集中展示教材建设的成果,学校决定组织编写出版代表中国科学技术大学教学水平的精品教材系列。在各方的共同努力下,共组织选题281种,经过多轮、严格的评审,最后确定50种入选精品教材系列。

1958年学校成立之时,教员大部分都来自中国科学院的各个研究所。作为各个研究所的科研人员,他们到学校后保持了教学的同时又作研究的传统。同时,根据“全院办校,所系结合”的原则,科学院各个研究所在科研第一线工作的杰出科学家也参与学校的教学,为本科生授课,将最新的科研成果融入到教学中。五十年来,外界环境和内在条件都发生了很大变化,但学校以教学为主、教学与科研相结合的方针没有变。正因为坚持了科学与技术相结合、理论与实践相结合、教学与科研相结合的方针,并形成了优良的传统,才培养出了一批又一批高质量的人才。

学校非常重视基础课和专业基础课教学的传统,也是她特别成功的原因之一。当今社会,科技发展突飞猛进、科技成果日新月异,没有扎实的基础知识,很难在科学技术研究中作出重大贡献。建校之初,华罗庚、吴有训、严济慈等老一辈科学家、教育家就身体力行,亲自为本科生讲授基础课。他们以渊博的学识、精湛的讲课艺术、高尚的师德,带出一批又一批杰出的年轻教员,培养了一届又一届优秀学生。这次入选校庆精品教材的绝大部分是本科生基础课或专业基础课的教材,其作者大多直接或间接受到过这些老一辈科学家、教育家的教诲和影响,因此在教材中也贯穿着这些先辈的教育教学理念与科学探索精神。

改革开放之初,学校最先选派青年骨干教师赴西方国家交流、学习,他

前 言

探索物质的基本构成及粒子间的相互作用一直是物理学研究的前沿。物理学家利用离子或粒子加速器来产生一定能量的粒子束,并使粒子束和靶粒子碰撞,用各种粒子探测器测量碰撞的反应产物。各种反应产物可以是带电粒子,不带电的中性粒子以及电磁辐射的场量子。如何精确地探测这些粒子的产额和分布是粒子物理和核物理研究的重要课题之一。探测技术和方法的研究和发展,导致了物理学中许多的重大发现。它不仅在粒子物理和核物理,而且在医学物理、天文物理、考古和地质勘探等学科有广泛的应用。

《粒子探测技术》是中国科学技术大学理学院物理类本科生专业基础选修课及核与粒子物理学科研究生学位课程的教材。本书主要介绍微观粒子和辐射与物质相互作用的物理机制,粒子和辐射的探测原理,主要类型粒子探测器的工作原理、构造、性能和应用。附录中有辐射和辐射防护的基本知识和常用放射性核素的特性。

随着电子技术的发展,在实际应用中大量使用的是电子记录的探测仪器。早期基于照相和显微扫描技术一些径迹探测器,如云雾室、气泡室,尽管它们在粒子物理发展中的一些重大发现起了关键作用,但现在已很少应用。进入 21 世纪,为了适应原子核物理和粒子物理的实验规模和测量精度的要求,粒子和辐射探测在技术和方法上出现了很多新的研究成果。本书作者在中国科学技术大学长期讲授“粒子探测技术”和“粒子物理实验方法”课程,并长期从事在原子核和粒子物理实验研究及粒子和辐射探测器的研制和应用研究。在中国科学技术大学徐克尊等编的《粒子探测技术》(1981 年上海科学技术出版社出版)的基础上对原书进行了

目 次

总序	(i)
前言	(iii)
第 1 章 粒子简介	(1)
1.1 构成世界的基本粒子	(2)
1.2 粒子的分类	(4)
1.3 粒子的寿命	(7)
1.4 重离子	(10)
参考文献	(10)
习题	(11)
第 2 章 粒子探测的物理基础	(12)
2.1 带电粒子和物质的相互作用	(12)
2.1.1 电离和激发能量损失	(14)
2.1.2 多次散射	(25)
2.1.3 辐射能量损失	(26)
2.1.4 切伦科夫辐射	(31)
2.1.5 穿越辐射	(33)
2.1.6 电磁相互作用引起的能量损失	(35)
2.2 光子和物质的相互作用	(42)
2.2.1 光电效应	(43)
2.2.2 康普顿效应	(44)
2.2.3 对产生	(46)
2.2.4 光子总截面	(48)
2.2.5 电磁簇射	(49)
2.3 强子和物质的强相互作用	(51)
2.3.1 强相互作用简介	(51)
2.3.2 中子与物质的相互作用	(54)

4.2.2	正比计数器	(116)
4.2.3	G-M 计数器	(126)
4.3	气体多丝室	(131)
4.3.1	多丝正比室	(131)
4.3.2	多丝漂移室	(142)
4.3.3	时间投影室	(152)
4.4	平行板电极型气体探测器	(156)
4.4.1	火花室和平行板室	(156)
4.4.2	电阻板室和多气隙电阻板	(160)
4.5	微电极型气体探测器	(170)
4.5.1	微电极气体探测器的工作原理和特性	(171)
4.5.2	微电极气体探测器的性能参数	(175)
4.5.3	微电极型气体探测器的应用	(179)
4.5.4	气体探测器的工作寿命	(181)
	参考文献	(182)
	习题	(185)
第 5 章	半导体探测器	(188)
5.1	半导体探测器的工作原理	(188)
5.1.1	半导体的基本知识	(188)
5.1.2	PN 结	(193)
5.1.3	半导体探测器的工作原理	(195)
5.2	半导体探测器的种类	(197)
5.2.1	PN 结型半导体探测器	(197)
5.2.2	锂漂移型半导体探测器	(199)
5.2.3	高纯锗半导体探测器	(201)
5.2.4	全耗尽型半导体探测器	(202)
5.2.5	化合物半导体探测器	(203)
5.2.6	特殊类型的半导体探测器	(206)
5.3	径迹测量的半导体探测器	(208)
5.3.1	硅微条探测器	(208)
5.3.2	电荷耦合器件	(211)
5.3.3	硅像素探测器	(212)
5.3.4	硅漂移探测器	(213)

6.5.3 在医学中的应用	(286)
参考文献	(290)
思考题	(291)
习题	(292)
第7章 切伦科夫计数器与穿越辐射探测器	(294)
7.1 切伦科夫计数器的组成和工作原理	(294)
7.1.1 切伦科夫辐射	(294)
7.1.2 切伦科夫辐射的产生	(295)
7.1.3 切伦科夫辐射的特点	(296)
7.1.4 切伦科夫探测器的组成	(300)
7.2 切伦科夫计数器的类型和应用	(306)
7.2.1 粒子鉴别器	(306)
7.2.2 全吸收量能器	(318)
7.2.3 环像切伦科夫计数器 RICH	(321)
7.2.4 探测全反射的切伦科夫探测器 DIRC	(324)
7.2.5 测量传播时间的切伦科夫探测器 TOP	(326)
7.3 穿越辐射探测器	(327)
7.3.1 穿越辐射	(327)
7.3.2 穿越辐射的特性	(328)
7.3.3 穿越辐射探测器的最优设计	(332)
7.4 穿越辐射探测器的应用	(335)
7.4.1 穿越辐射探测器的组成和工作原理	(335)
7.4.2 穿越辐射探测器的几个实例	(336)
参考文献	(342)
习题	(343)
第8章 粒子探测系统	(344)
8.1 粒子探测系统的组成和工作原理	(344)
8.1.1 计数测量系统	(344)
8.1.2 幅度分析系统	(346)
8.1.3 符合测量系统	(347)
8.2 探测器信号输出回路	(350)
8.2.1 RC 成形回路	(350)
8.2.2 前置放大器	(353)

第1章 粒子简介

科学家追求新发现、理解大自然的根本动力是好奇心,通过对自然的仔细思考和实验而获得进步。为了对实验进行分析,必须首先记录实验结果。最简单的装置就是人类本身的感观器官,但对于现代科学,这种“自然”的探测器要么灵敏度不够,要么适用范围不广。以人眼为例,要产生视觉影像,需要至少 20 个光子,而一个光电倍增管可以容易地观测单个光子;人眼观察的光谱集中在可见光区(400~800 nm),即动态范围只有两倍,而自然界的电磁波频率从市电、广播到微波、红外辐射、可见光、紫外光、X 射线和 γ 射线,足足跨越了 23 个量级!

由此可见,解决自然界的问题,大都需要精确的测量仪器或探测器,能够在各种动态范围获得确实的结果。通过发展测量方法和探测器技术,人类强化和扩展了自身的感观能力。在许多情况下,需要采用新的、特定的探测器,而且通常不止一种测量。时至今日,还没有一种多功能探测器能够同时测量所需的所有参数。

为了深入研究微观领域的科学规律,人们需要“放大”器。放大的程度,或者说可观测到的微观尺度,由探测方法相应的波长决定,例如若使用可见光去探测,精度约为 $0.5 \mu\text{m}$ 。当今粒子物理研究采用的“放大”器是各种加速器及其上的探测器。由于微观粒子的波长和动量成反比(德布罗意关系),因而动量越高的粒子能够探测的结构越精细。目前,人类可分辨的空间尺度可达 10^{-17}cm ,比光学显微镜高了十万亿(10^{13})倍。而在宇观领域,为了研究宇宙的结构,需要探测、记录的能量范围从约 $100 \mu\text{eV}$ (宇宙微波本底辐射水平)直至 10^{20}eV (高能宇宙射线)。

为了研究所有这些(与原子核和粒子物理相关)的问题,探测器需要对粒子的各种参数诸如能量、动量、速度、时间和空间坐标进行测量,并需进一步鉴别粒子的特性。这就需要多种不同探测技术的综合应用。

克、电子(及其他轻子)仍可看作几何上的点粒子,没有更进一步的内部结构,因此我们认为它们就是基本粒子^①。图 1.1.1 给出了从原子到夸克的空间尺度的变化。

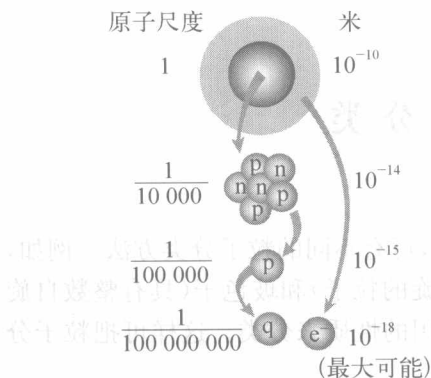


图 1.1.1 原子、原子核、质子和夸克、电子的空间尺度(其中夸克和电子的大小由于实验条件的限制只给出了上限)

		基本粒子			
夸克	u	c	t	γ	
	up	charm	top	photon	
	d	s	b	g	
	down	strange	bottom	gluon	
轻子	ν_e	ν_μ	ν_τ	Z	
	electron neutrino	muon neutrino	tau neutrino	Z boson	
	e	μ	τ	W	
	electron	muon	tau	W boson	
三代物质组分					

图 1.1.2 基本粒子图表

随着加速器等有力工具的出现和发展,人们已经发现了几百种微观粒子,它们绝大多数都不是基本粒子,而是由基本粒子通过一定的相互作用结合而成。根据目前的理论(指的是标准模型[1], standard model),从各种微观粒子直到整个宇宙,构成它们的基本粒子和相互作用可以归结为以下简单的几种:6种夸克,6种轻子,以及对应于4种相互作用的规范玻色子。如图 1.1.2 所示。夸克是带有分数电荷的费米子,上(up)夸克、粲(charm)夸克和顶(top)夸克都是带 $+2/3$ 电子电量的粒子,而下(down)夸克、奇异(strange)夸克和底(bottom)夸克带 $-1/3$ 电子电量。轻子则包括电子和电子中微子、 μ 子和 μ 子中微子以及 τ 子和 τ 子中微子,电子、 μ 子和 τ 子都带有单位电子电量,而中微子都不带电。轻子均为费米子。此外,夸克和轻子还存在相应的反粒子,正反粒子有相同的质量、自旋和同位旋,但电荷、重子数、轻子数、奇异数、粲数等则相反。这些就是已知的所有基本粒子,更详细的数据可参考文献[2]。

^① 但随着物理理论的发展,人们对夸克和电子(及其他轻子)是否是最基本的粒子也存在怀疑——尽管实验上还无法证明。

