



物理学名家名作译丛



# 粒子探测器

Particle Detectors

克劳斯·格鲁彭 著 朱永生 译  
鲍里斯·施瓦兹 盛华义

中国科学技术大学出版社

当代科学技术基础理论与前沿问题研究丛书

# 物理学名家名作译丛

## 粒子探测器

Particle Detectors

克劳斯·格鲁彭  
鲍里斯·施瓦兹 著

朱永生  
盛华义 译

中国科学技术大学出版社

安徽省版权局著作权合同登记号:第 20131015 号

**Particle Detectors**, Second Edition (ISBN 978-0-521-18795-4) by C. Grupen, B. A. Shwartz  
first published by Cambridge University Press 2008

All rights reserved.

This simplified Chinese edition for the People's Republic of China is published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

© Cambridge University Press & University of Science and Technology of China Press 2015

This book is in copyright. No reproduction of any part may take place without the written permission of Cambridge University Press and University of Science and Technology of China Press.

This edition is for sale in the People's Republic of China (excluding Hong Kong SAR, Macau SAR and Taiwan Province) only.

此版本仅限在中华人民共和国境内(不包括香港、澳门特别行政区及台湾地区)销售。

### 图书在版编目(CIP)数据

粒子探测器/(德)格鲁彭,(俄罗斯)施瓦兹著;朱永生,盛华义译. —合肥:中国科学技术大学出版社,2015.1

(当代科学技术基础理论与前沿问题研究丛书:物理学名家名作译丛)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

书名原文:Particle Detectors

ISBN 978-7-312-03216-5

I. 粒… II. ①格… ②施… ③朱…④盛… III. 粒子探测器 IV. O572.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 221276 号

出版 中国科学技术大学出版社  
安徽省合肥市金寨路 96 号,230026  
<http://press.ustc.edu.cn>

印刷 合肥市宏基印刷有限公司

发行 中国科学技术大学出版社

经销 全国新华书店

开本 710 mm×1000 mm 1/16

印张 32.75

字数 674 千

版次 2015 年 1 月第 1 版

印次 2015 年 1 月第 1 次印刷

定价 78.00 元



## 编 委 会

主 编 叶铭汉 陆 燧 张焕乔 张肇西 赵政国

编 委 (按姓氏笔画排序)

马余刚(上海应用物理研究所) 叶沿林(北京大学)

叶铭汉(高能物理研究所) 任中洲(南京大学)

庄鹏飞(清华大学) 陆 燧(紫金山天文台)

李卫国(高能物理研究所) 邹冰松(理论物理研究所)

张焕乔(中国原子能科学研究院) 张新民(高能物理研究所)

张肇西(理论物理研究所) 郑志鹏(高能物理研究所)

赵政国(中国科学技术大学) 徐瑚珊(近代物理研究所)

黄 涛(高能物理研究所) 谢去病(山东大学)

## 内 容 简 介

粒子探测器中的探测技术范围极为广阔,它取决于测量的目的.每一种物理现象都可能作为某一粒子探测器的物理原理.基本粒子需要通过不同的方法加以鉴别,对相关的物理量如时间、能量、空间坐标等等必须进行测量.粒子物理需要利用多功能的装置以及精细的实验设备对这些物理量进行精度极高的测量.根据不同的测量目的,需要利用不同的效应.不同的探测器可以覆盖极低能量( $\mu\text{eV}$ ,微电子伏)到宇宙线中才能观测到的极高能量的能量测定.

本书阐述高能物理和粒子天体物理实验仪器当前最新的发展水平,包括径迹探测器、量能器、粒子鉴别、中微子探测器、动量测量、电子学和数据分析.本书还讨论了这些探测器在其他领域,如核医学、辐射防护和环境科学中的近期应用.每一章后面都附有习题,并提供了相关的启发性材料,可作为粒子物理研究生和研究人员的有用参考.

Claus Grupen 是德国 Siegen 大学物理系教授,是 PLUTO 国际合作组的一员,由于与他人独立且同时确认了胶子的存在,曾荣获 1995 年欧洲物理学会颁发的高能和粒子物理特别奖.

Boris Shwartz 是俄罗斯 Budker 核物理研究所的资深研究员.他在若干项目的探测器研发和建造中作出了贡献,包括 KEDR 和 CMD-2 探测器,以及 WASA 和 Belle 实验.

## 译者的话

关于粒子探测器的书籍可以找到很多,但 Claus Grupen 和 Boris Shwartz 所著的《Particle Detectors》一书有其自身的特点,已成为了一本关于粒子探测器的值得推荐的参考书。

首先,它包含了从最古老的探测器直到最近期的先进探测器,从最简单的探测器单元到复杂、精细、大型的探测装置的丰富内容,系统、历史地介绍了林林总总各类探测器的基本原理及其发展和沿革。其次,与探测器相关的电子学已经成为粒子探测密不可分的有机组成部分,因此相关电子学的讨论亦占据了较多的篇幅。本书相当部分的内容超出了对于探测器性能的单纯描述,而涉及了怎样利用原始数据来获得最终实验结果的许多重要的中间环节,粒子鉴别、动量测量、数据分析等章节都属于这一范畴。粒子探测器在粒子物理之外领域的应用则用鲜活的实例证明了,粒子探测器虽然主要是为了基本粒子物理、核物理和宇宙线研究而研发的,但在天文学、宇宙学、生物物理学、医学、材料科学、地球物理学、化学、考古、艺术、地下工程、土木工程、环境科学、航空找矿、食物储藏、害虫防治、机场检查等领域获得了广泛的应用。最后,本书每章后面的习题具有典型意义,相当详细的习题解答则为读者提供了理解和掌握本书内容、解决实际问题的一种有益的指导。

本书各章的开头都引用了一段名人名言。显然,作者的意图是以此作为阅读该章内容的一个提示。这类文字反映了这些名人对于事物的自然属性或社会属性的一种深刻思考和理解。由于文化背景和中英文的差异,它们的汉译相当困难,因此我们将英文与汉译一并呈现于译本中。如蒙专家和读者不吝赐教,将十分感激。

本书第 13 章的部分内容和第 14 章由盛华义翻译,其余部分由朱永生翻译。为了尽可能准确、完整地表述原文的含义,采用了直译与意译相结合的方法。对于重要的或相对冷僻的科技术语,首次出现时除汉译之外还保留了英文原文以便对照。此外,在某些必要的地方,以译者注的方式增加了一些说明,以帮助读者理解原文的含义。

在本书翻译过程中,与中国科学院高能物理研究所的张闯、胡红波、胡海明、曹俊、马力、刘宝旭、陈元柏、刘振安诸位研究员,陈昌副研究员和中国科学院大学物理科学学院博士后宁洁女士就一些物理概念和科技术语进行了有益的讨论,谨致谢意.

尽管我们做了很大的努力,但囿于水平,不足甚至错漏之处恐有难免,诚望得到专家和读者的批评指正.

朱永生 盛华义

2014年9月

## 第 2 版 序

科学知识是一系列确定性程度不同的陈述或结论的集合体,其中某些结论的确定性很差,某些结论则几乎可以肯定是成立的,然而,没有一个结论可以肯定是绝对正确的。<sup>①</sup>

——理查德·费恩曼<sup>②</sup>

《粒子探测器》原著是 1993 年以“曼海姆学院丛书”(Bibliographisches Institut Mannheim)的形式用德语(Teilchendetektoren)出版的。1996 年被作者之一(Claus Grupen)译成英文且内容有了大量更新,由剑桥大学出版社再次出版。自那以后,又有许多新型探测器面世,现有的探测器也有了实质性的改进。特别是在建的 CERN 质子对撞机——大型强子对撞机(LHC)<sup>③</sup>、未来正负电子直线对撞机中的新型探测器计划以及粒子天体物理研究中的实验,都要求现有探测器进一步精密化和建造新型的粒子探测器。随着研发步伐的不断加快,当代探测器的性能可以实现时间测量、空间分辨、能量和动量分辨,以及粒子鉴别等领域中的高精度测量。

过去,正负电子储存环,如 CERN 的 LEP,已经在电弱作用尺度的能量区域(约 100 GeV)研究了电弱作用物理和量子色动力学。ps 量级的寿命测量要求达到几微米量级的高空间分辨。大型强子对撞机和费米实验室的 Tevatron 有希望通过找到希格斯(Higgs)粒子的实验证据以解决长期以来悬而未决的质量产生机制问题。这些对撞机也能解决关于超对称性的相关问题。这些实验中的探测器需要有精密的量能器和高的空间分辨,以及极精确的时间分辨和极高的事例选择性,以能够处理极高的本底。密集于喷注中的大量粒子必须都鉴别出来,以对短寿命粒子进行不变质量的重建。在强子对撞机中,探测器的耐辐照性肯定也是一个热门话题。

---

① 原文:Scientific knowledge is a body of statements of varying degrees of certainty — some most unsure, some nearly sure, but none absolutely certain.

② Richard Feynman(1918~),美国物理学家,1965 年获诺贝尔物理学奖。

——译者注

③ LHC 已经建成并投入运行。

——译者注



粒子天体物理中的粒子探测也是一个具有挑战性的问题. 极高能宇宙线的起源, 即使不考虑近期发现的与活动星系核心可能的相互关联, 仍然是一个有待解决的问题. 俄歇(Auger)实验中的探测器, 或建造中的南极洲 IceCube 阵列探测器看来极有可能在我们的星系或河外星系中找到高能宇宙线源. 同时, 当前或未来加速器和储存环不可企及的极高能区的相互作用机制, 将通过测量超出预期的 Greisen 截断的原初宇宙线谱的形状和基本成分来加以探究, 在 Greisen 截断处高能质子或高能核会损失一大部分能量, 例如, 通过质子-光子碰撞以无处不在的黑体辐射的形式损失能量.

本书第 2 版包含了粒子探测器领域中这些当前的发展, 与英文第 1 版相比, 内容有了实质上的充实和更新. 同时, 对于第 1 版中仅仅简要提及的现代微结构探测器的新成果, 以及加速器和中微子探测器, 第 2 版都有专门的章节进行讨论. “电子学”和“数据分析”两章则完全重新被改写.

我们愿意在此提及关于粒子探测器已有的若干优秀图书. 不期望涵盖所有的书籍, 可以提到的有 Kleinknecht<sup>[1]</sup>, Fernow<sup>[2]</sup>, Gilmore<sup>[3]</sup>, Sauli<sup>[4]</sup>, Tait<sup>[5]</sup>, Knoll<sup>[6]</sup>, Leo<sup>[7]</sup>, Green<sup>[8]</sup>, Wigmans<sup>[9]</sup> 以及 Leroy 和 Rancoita<sup>[10]</sup> 的著作. 文献中也发表了该领域的许多优秀的综述性论文.

我们衷心地感谢许多同事的帮助. 特别要感谢 Helmuth Spieler 撰写了“电子学”一章. Archana Sharma 对于微结构探测器和  $\mu$  子动量测量提供了一些好的主意. Steve Armstrong 在“数据分析”一章的重新改写中提供了协助. Iskander Ibragimov 将第 1 版中的人工粘贴的图重复利用于第 2 版时, 仔细地转换成电子文件格式. 他同时统一了所有图的标注. T. Tsubo-yama, Richard Wigmans 和 V. Zhilich 提供了若干张图, A. Buzulutskov 和 Lev Shekhtman 为我们解释了关于微条探测器的若干细节. 他们还建议了几篇相关的文献. 与 A. Bondar, A. Kuzmin, T. Ohshima, A. Vorobiov 和 M. Yamauchi 的一些有益的讨论对我们很有帮助. Simon Eidelman 和 Tilo Stroh 仔细地阅读了全书并检查了所有的问题. Tilo Stroh 还担负了键入 LaTeX 文本、改善图的品质、安排格式和准备内容丰富的索引这些花费大量精力的艰巨任务. 这对我们是巨大的帮助.

## 参考文献

- [1] Kleinknecht K. Detectors for Particle Radiation [M]. 2nd ed. Cambridge University Press, 1998. Detektoren für Teilchenstrahlung [M]. Wiesbaden: Teubner, 2005.
- [2] Fernow R. Introduction to Experimental Particle Physics [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.

- 
- [ 3 ] Gilmore R S. Single Particle Detection and Measurement [M]. London: Taylor and Francis, 1992.
  - [ 4 ] Sauli F. Instrumentation in High Energy Physics [M]. Singapore: World Scientific, 1992.
  - [ 5 ] Tait W H. Radiation Detectors [M]. London: Butterworths, 1980.
  - [ 6 ] Knoll G F. Radition Detection and Measurement [M]. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons Inc. , 2000.
  - [ 7 ] Leo W R. Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments [M]. Berlin: Springer, 1987.
  - [ 8 ] Green D. The Physics of Particle Detectors [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
  - [ 9 ] Wigmans R. Calorimetry: Energy Measurement in Particle Physics [M]. Oxford: Clarendon Press, 2000
  - [10] Leroy C, Rancoita P-G. Principles of Radiation Interaction in Matter and Detection [M]. Singapore: World Scientific, 2004.

# 第 1 版 序

推动科学家对于自然界作出新的发现和新的理解的基本动机是好奇心. 通过实验仔细地探寻自然界的性质, 使我们对于自然界的理解能够获得进展. 为了能够分析这些实验, 必须记录下实验的结果. 最简单的设备是人的感官, 但是对于当前的问题而言, 这类天然的探测装置不够灵敏, 或者其灵敏范围过于局限. 考查一下人眼的功能, 这一点就十分明显. 为了对光有视觉, 人眼需要看到约 20 个光子. 而光电倍增管能够“看到”单个光子. 人眼的动态范围仅包含半个频段(波长从 400 nm 到 800 nm), 而电磁波的全谱, 从无线电波、微波、红外辐射、可见光、紫外光直到 X 射线和  $\gamma$  射线, 共覆盖了 23 个频段.

因此, 对于自然界的许多问题, 必须研发精密的测量装置或探测器以获得大动态范围的客观结果. 人类用这种方式锐化了人眼的“感知”能力, 并研发了新的设备. 对于许多实验而言, 需要有新型、专用的探测器, 在绝大多数情形下, 它们并不仅仅用于一类测量. 但是, 至今尚不存在能够同时测量所有参数的多功能探测器.

为了探视微观世界, 我们需要显微镜. 能够分辨清楚的结构尺寸与观测客体时所使用的波长相当; 对于可见光, 该尺度约为  $0.5 \mu\text{m}$ . 基本粒子物理的显微镜则是当代的带有探测器的加速器. 由于波长与动量成反比(德布罗意关系式), 利用高动量粒子可研究很细小的结构. 当前可达到的空间分辨率的数量级为  $10^{-17} \text{ cm}$ , 较之光学显微镜, 改善因子达  $10^{13}$ .

为了研究宇观世界, 即研究宇宙的结构, 必须记录能量范围从几百微电子伏( $\mu\text{eV}$ , 宇宙微波背景辐射)直到  $10^{20} \text{ eV}$ (高能宇宙线)的现象. 要想掌控所有这些问题, 需要有能够测量粒子和辐射的时间、能量、动量、速度和空间坐标等参数的粒子探测器. 此外, 必须对粒子的属性, 即种类加以鉴别. 这一点可以通过不同探测方法的组合来实现.

本书阐述了应用于基本粒子物理、宇宙线研究、高能天体物理、核物理以及辐射防护、生物学和医学等领域的各种粒子探测器. 除了描述粒子探测器的工作原理及其特征性质, 还介绍了这些装置的多种应用领域.

本书起源于过去 20 年间我所作演讲的讲稿. 在多数情形下, 这些演讲冠名为“粒子探测器”. 不过, 在另一些冠名为“辐射防护导论”、“宇宙线中的基本粒子过程”、“伽马射线天文学”、“中微子天文学”的讲演中, 也讨论了粒子探测器的某些特定内容. 本书试图全面地呈现辐射和粒子探测方方面面的内容. 不过, 粒子探测器在基本粒子物理和宇宙线实验中的应用是最主要的方面.

我愿意提及关于粒子探测器的已经面世的若干优秀的图书. 我要特别着重提到 Kleinknecht<sup>[1]</sup>著作的第 4 版, 以及可能略微过时的 Allkofer<sup>[2]</sup>的著作. 还有该领域的其他一些著作也值得重视<sup>[3-25]</sup>.

如果没有我的诸多同事和学生的积极支持, 本书的编写是不可能完成的. 我感谢 U. Schäfer 博士和 S. Schmidt 硕士对于本书的完善所提出的许多建议. R. Pfitzner 先生和 J. Dick 先生仔细地校阅了书稿. G. Cowan 博士和 H. Seywerd 博士对于我的书稿的英文翻译做了显著的改进. 我感谢 U. Bender, C. Tamarozzi 和 R. Sentker 三位女士制作了可供印刷出版的书稿版本, 以及 M. Euteneuer 先生、C. Tamarozzi 女士和 T. Stöcker 女士制作了大量的附图. 我还要感谢 J. Dick 先生、K. Reinsch 工程硕士、T. Stroh 硕士、R. Pfitzner 先生、G. Gillissen 硕士和 Cornelius Grupen 先生在书籍正文和图表的计算机排版方面提供的帮助.

## 参考文献

- [1] Kleinknecht K. Detektoren für Teilchenstrahlung [M]. Stuttgart: Teubner, 1984; 1987; 1992. Detectors for Particle Radiation [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- [2] Allkofer O C. Teilchendetektoren [M]. München: Thiemig, 1971.
- [3] Fernow R. Introduction to Experimental Particle Physics [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.
- [4] Gilmore R S. Single Particle Detection and Measurement [M]. London: Taylor and Francis, 1992.
- [5] Sauli F. Instrumentation in High Energy Physics [M]. Singapore: World Scientific, 1992.
- [6] Tait W H. Radiation Detectors [M]. London: Butterworths, 1980.
- [7] Leo W R. Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments [M]. Berlin: Springer, 1987.
- [8] Rice-Evans P. Spark, Streamer, Proportional and Drift Chambers [M]. London: Richelieu Press, 1974.
- [9] Sitar B, Merson G I, Chechin V A, et al. Ionization Measurements in High Energy Physics (in Russian) [M]. Moskau: Energoatomizdat, 1988.
- [10] Sitar B, Merson G I, Chechin V A, et al. Ionization Measurements in High Energy

- Physics; Springer Tracts in Modern Physics, Vol. 124 [M]. Berlin: Springer, 1993.
- [11] Ferbel T. Experimental Techniques in High Energy Nuclear and Particle Physics [M]. Singapore: World Scientific, 1991.
- [12] Delaney C F G, Finch E C. Radiation Detectors[M]. Oxford: Oxford Science Publications, 1992.
- [13] Fernow R C. Fundamental Principles of Particle Detectors [C]. Summer School on Hadron Spectroscopy, University of Maryland, 1988; BNL-Preprint, BNL-42114, 1988.
- [14] Knoll G F. Radiation Detection and Measurement [M]. New York: John Wiley & Sons Inc. , 1979.
- [15] Ritison D M. Techniques of High Energy Physics[M]. New York: Interscience Publishers Inc. , 1961.
- [16] Siegbahn K. Alpha, Beta and Gamma-Ray Spectroscopy; Vols. 1 and 2 [M]. Amsterdam: Elsevier-North Holland, 1968.
- [17] Anjos J C, Hartill D, Sauli F, et al. Instrumentation in Elementary Particle Physics [M]. Singapore: World Scientific, 1992.
- [18] Charpak G, Sauli F. High-Resolution Electronic Particle Detectors [J]. Ann. Rev. Nucl. Phys. Sci. , 1984, 34; 285-350.
- [19] Price W J. Nuclear Radiation Detectors [M]. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1964.
- [20] Korff S A. Electron and Nuclear Counters [M]. 2nd ed. Princeton: Van Nostrand, 1955.
- [21] Neuert H. Kernphysikalische Ne $\beta$ verfahren zum Nachweis für Teilchen und Quanten [M]. Karlsruhe: G. Braun, 1966.
- [22] Stolz W. Messung ionisierender Strahlung; Grundlagen und Methoden [M]. Berlin: Akademie-Verlag, 1985.
- [23] Fenyves E, Haimann O. The Physical Principles of Nuclear Radiation Measurements [M]. Budapest: Akadémiai Kiadó, 1969.
- [24] Ouseph P J. Introduction to Nuclear Radiation Detectors [M]. New York: Plenum Press, 1975.
- [25] Fabjan C W. Detectors for Elementary Particle Physics [R]. CERN-PPE-94-61, 1994.

# 目 次

译者的话 .....	( 1 )
第 2 版序 .....	( 3 )
第 1 版序 .....	( 5 )
导言 .....	( 1 )
第 1 章 粒子、辐射与物质的相互作用 .....	( 4 )
1.1 带电粒子的相互作用 .....	( 5 )
1.1.1 电离和激发导致的能量损失 .....	( 6 )
1.1.2 沟道效应 .....	( 12 )
1.1.3 电离产额 .....	( 14 )
1.1.4 多次散射 .....	( 17 )
1.1.5 韧致辐射 .....	( 18 )
1.1.6 直接电子对产生 .....	( 21 )
1.1.7 光核作用导致的能量损失 .....	( 21 )
1.1.8 总能量损失 .....	( 21 )
1.1.9 带电粒子的能量-射程关系 .....	( 23 )
1.1.10 同步辐射损失 .....	( 26 )
1.2 光子的相互作用 .....	( 27 )
1.2.1 光电效应 .....	( 28 )
1.2.2 康普顿效应 .....	( 29 )
1.2.3 对产生 .....	( 31 )
1.2.4 光子吸收总截面 .....	( 32 )
1.3 强子的强相互作用 .....	( 35 )
1.4 气体中的漂移和扩散 .....	( 36 )
习题 1 .....	( 41 )
参考文献 .....	( 42 )

<b>第 2 章 探测器的本征性质</b> .....	( 48 )
2.1 分辨率和基本统计性质 .....	( 48 )
2.2 特征时间 .....	( 52 )
2.3 死时间修正 .....	( 53 )
2.4 偶然符合 .....	( 54 )
2.5 效率 .....	( 55 )
习题 2 .....	( 57 )
参考文献 .....	( 58 )
<b>第 3 章 辐射测量单位和辐射源</b> .....	( 59 )
3.1 辐射测量单位 .....	( 59 )
3.2 辐射源 .....	( 63 )
习题 3 .....	( 66 )
参考文献 .....	( 67 )
<b>第 4 章 加速器</b> .....	( 68 )
习题 4 .....	( 72 )
参考文献 .....	( 73 )
<b>第 5 章 用于粒子探测的主要物理现象和基本的计数器类型</b> .....	( 74 )
5.1 电离计数器 .....	( 74 )
5.1.1 无放大功能的电离计数器 .....	( 74 )
5.1.2 正比计数器 .....	( 79 )
5.1.3 盖革计数器 .....	( 85 )
5.1.4 流光管 .....	( 86 )
5.2 液体电离计数器 .....	( 89 )
5.3 固体电离计数器 .....	( 90 )
5.4 闪烁计数器 .....	( 98 )
5.5 光电倍增管和光电二极管 .....	( 105 )
5.6 切伦科夫计数器 .....	( 113 )
5.7 穿越辐射探测器( TRD ) .....	( 117 )
习题 5 .....	( 119 )
参考文献 .....	( 120 )
<b>第 6 章 历史上的径迹探测器</b> .....	( 130 )
6.1 云室 .....	( 130 )
6.2 气泡室 .....	( 132 )
6.3 流光室 .....	( 135 )
6.4 氦闪光管室 .....	( 137 )

6.5 火花室 .....	(138)
6.6 核乳胶 .....	(140)
6.7 银卤化物晶体 .....	(141)
6.8 X射线胶片 .....	(142)
6.9 热释光探测器 .....	(143)
6.10 辐射光致发光探测器 .....	(144)
6.11 塑料探测器 .....	(144)
习题 6 .....	(145)
参考文献 .....	(146)
<b>第 7 章 径迹探测器 .....</b>	<b>(151)</b>
7.1 多丝正比室 .....	(151)
7.2 平面漂移室 .....	(155)
7.3 圆柱形丝室 .....	(159)
7.3.1 圆柱形正比室和漂移室 .....	(160)
7.3.2 放射形(Jet)漂移室 .....	(164)
7.3.3 时间投影室(TPC) .....	(166)
7.4 微结构气体探测器 .....	(169)
7.5 半导体径迹探测器 .....	(171)
7.6 闪烁光纤径迹室 .....	(174)
习题 7 .....	(176)
参考文献 .....	(176)
<b>第 8 章 量能器 .....</b>	<b>(185)</b>
8.1 电磁量能器 .....	(185)
8.1.1 电子-光子级联 .....	(185)
8.1.2 均质量能器 .....	(191)
8.1.3 取样量能器 .....	(195)
8.2 强子量能器 .....	(199)
8.3 量能器的刻度和监测 .....	(206)
8.4 低温量能器 .....	(208)
习题 8 .....	(212)
参考文献 .....	(213)
<b>第 9 章 粒子鉴别 .....</b>	<b>(219)</b>
9.1 带电粒子鉴别 .....	(220)
9.1.1 飞行时间计数器 .....	(220)
9.1.2 利用电离损失鉴别粒子 .....	(223)



9.1.3 利用切伦科夫辐射鉴别粒子 .....	(226)
9.1.4 穿越辐射探测器 .....	(230)
9.2 量能器鉴别粒子 .....	(232)
9.3 中子探测器 .....	(235)
习题 9 .....	(238)
参考文献 .....	(239)
<b>第 10 章 中微子探测器 .....</b>	<b>(245)</b>
10.1 中微子源 .....	(245)
10.2 中微子反应 .....	(247)
10.3 中微子探测的历史 .....	(248)
10.4 中微子探测器 .....	(248)
习题 10 .....	(258)
参考文献 .....	(259)
<b>第 11 章 动量测量和 <math>\mu</math> 子探测 .....</b>	<b>(262)</b>
11.1 固定靶实验磁谱仪 .....	(263)
11.2 专用磁谱仪 .....	(269)
习题 11 .....	(273)
参考文献 .....	(274)
<b>第 12 章 老化和辐照效应 .....</b>	<b>(276)</b>
12.1 气体探测器中的老化效应 .....	(276)
12.2 闪烁体的耐辐照性 .....	(281)
12.3 切伦科夫计数器的耐辐照性 .....	(283)
12.4 硅探测器的耐辐照性 .....	(284)
习题 12 .....	(285)
参考文献 .....	(286)
<b>第 13 章 通用探测器实例: Belle .....</b>	<b>(289)</b>
13.1 Belle 子探测器 .....	(290)
13.1.1 硅顶点探测器(SVD) .....	(291)
13.1.2 中心漂移室(CDC) .....	(292)
13.1.3 气凝胶切伦科夫计数器系统(ACC) .....	(295)
13.1.4 飞行时间计数器(TOF) .....	(296)
13.1.5 电磁量能器(ECL) .....	(299)
13.1.6 $K_L$ 和 $\mu$ 子探测系统(KLM) .....	(303)
13.2 粒子鉴别 .....	(304)
13.3 数据获取电子学和触发系统 .....	(306)