

物理学名家名作译丛

粒子天体物理

唐纳德·帕金斯 编著  
来小偶 蔺国英 徐仁新 译

# 粒子天体物理

Particle Astrophysics

中国科学技术大学出版社

中国科学技术大学出版社

## 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)

物理学名家名作译丛

唐纳德·帕金斯 编著  
来小禹 陈国英 徐仁新 译

# 粒子天体物理

Particle Astrophysics

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 12151483 号

**Particle Astrophysics**, Second Edition by Donald Perkins

first published by Oxford University Press 2003

All rights reserved.

This simplified Chinese edition for the People's Republic of China is published by arrangement with Oxford University Press Inc., New York, United States.

© Oxford 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 Oxford 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

粒子天体物理/(英)唐纳德·帕金斯编著;来小禹,陈国英,徐仁新译. —合肥:中国科学技术大学出版社,2015.6

(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 Astrophysics

ISBN 978-7-312-03557-9

I. 粒… II. ①唐… ②来… ③陈… ④徐… III. 粒子物理学—天体物理学  
IV. ①O572.2 ②P14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 311039 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** 安徽省瑞隆印务有限公司  
**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** 22.75  
**字数** 471 千  
**版次** 2015 年 6 月第 1 版  
**印次** 2015 年 6 月第 1 次印刷  
**定价** 68.00 元

## 内 容 简 介

过去几十年来,基本粒子物理和天体物理两个领域之间的交叉研究日益紧密.本书阐述了这一课题的背景及最新进展,适合高年级本科生和低年级研究生阅读.该书开始几章介绍了基本粒子的性质与相互作用,接着讨论了早期宇宙,包括暴胀、暗物质与暗能量、星系结构演化等.最后两章分别讨论宇宙线和恒星内部的粒子物理.粒子相互作用和宇宙大尺度演化之间的密切关联是贯穿于本书的主题,本书同时强调实验与理论的相互促进.

本书是在几年前第1版的基础上扩展、更新而成的.在这个快速发展的研究领域,侧重点当然是放在最新进展方面.然而,也借这个机会重新组织了材料,并更详尽且大幅度地进行了阐述.

# 译者序

物理学追求物质世界的简单性和统一性.自公元前三百多年前古希腊学者探讨特殊正多面体为自然基本元素开始,人类一直尝试着简单地认识复杂现象.粒子天体物理学正传承着这一基本精神,活跃于当今科学前沿.

认识微观世界的任何进展均会影响到人们对宇观自然现象的理解.举一个致密物质方面的例子.古代哲学家认为原子是构成物质的基本粒子,不可分.但继 1897 年汤姆森发现了原子含有极轻的、带负电的电子后,1911 年卢瑟福得出这样的图像:原子的质量及正电荷其实集中于一极小的核.鉴于原子如此“空旷”,福勒于 1926 年就推测:仅受原子核和电子自身体积所限,密度达到  $10^{14} \text{ g/cm}^3$  的物质是可能的.这是关于最密物质最早的、带有猜测性的思考.存在这种物质吗?怎么形成它?它的基本成分如何?这些属于后来的研究.我们现在知道,大质量恒星演化至晚期时强大的引力塌缩可产生这种密度最高的物质,伴随着超新星爆发,并表现为脉冲星.不过,关于如此庞大且极高密度物质的基本组分至今尚无定论,相关研究涉及夸克之间强相互作用的非微扰行为.

尽管物质世界以不熟悉的暗物质、暗能量为主,但自然界的精彩却要归功于那些相对少量的重子物质.粒子物理标准模型是伟大而成功的,其预言的关键粒子——希格斯玻色子——也在本书英文版出版之后被发现.无疑,即便要探究暗物质和暗能量的本质,我们也要借助重子物质的表现才得以实现.

唐纳德·帕金斯教授曾任教于牛津大学物理系.此书是他在讲授相关课程的基础上撰写而成的,分 3 个部分较系统地介绍了粒子天体物理领域,值得物理学和天文学相关学者阅读或参考.

译者  
2014 年 11 月

## 第 2 版 序

本书是在 2003 年第 1 版的基础上扩展、更新而成的。在这个快速发展的领域，侧重点当然是放在最新进展方面。然而，也借这个机会重新组织了材料，并更详尽且大幅度地进行了阐述。

为方便起见，本书分如下 3 个部分：

第 1 部分包括第 1 章至第 4 章，基本上是介绍实验室涉及的基本粒子及其之间的相互作用，属于所谓的粒子物理标准模型范畴。尽管包括希格斯玻色子<sup>①</sup>在内的一些推测尚待实验检验，但标准模型对于全世界加速器获得的大量数据给出了极精确和详尽的解释。这里也介绍了在原先标准模型之外的发展，特别是中微子质量和味混合等话题，并阐述了标准模型的可能拓展（如超对称和基本相互作用的大统一等）。我也借这个机会在第 2 章简要解释了相对论变换、等效原理以及广义相对论场方程的解（这跟天体物理有重要联系）。

第 2 部分（第 5 章至第 8 章）描述宇宙大尺度的现代图像，重点是早期宇宙的基本参数；这些参数在所谓的宇宙学一致性模型（Concordance Model）中被精确地测量和表达。这部分也强调宇宙学中若干重大问题和疑难：暗物质本质，暗能量本质及宇宙学常数大小，宇宙中物质与反物质的对称性，暴胀的确切机制，以及一致性模型中参数的任意性（正如描述粒子物理标准模型需要约 20 个参数那样）。

第 3 部分（第 9 章和第 10 章）关系到来自外太空轰击我们的粒子和辐射的研究，并涉及若干恒星现象（如脉冲星，活动星系核，黑洞，超新星等；它们似乎导致了宇宙线“雨”的形成）。在这里我们碰到了宇宙中一些最有活力的和奇异的过程，几乎每天都有新的这类实验发现。

以上各部分题材某种程度上也大体反映了我们在 3 个方面的认识状况。

有人会说，第 1 部分加速器粒子物理方面的课题已被极好地理解了；对于

---

<sup>①</sup> 欧洲核子中心（CERN）继 2012 年 7 月 4 日宣布发现希格斯玻色子后，2013 年 3 月进一步确认该发现。François Englert 和 Peter W. Higgs 因此荣获 2013 年度诺贝尔物理学奖。（译者注）

量子电动力学而言,理论与实验之间的吻合程度好于百万分之一.但不管最终的“万理论论”——如果有的话——形式如何,粒子物理标准模型一定是其中的一部分,即使这个模型只能解释宇宙总能量密度微不足道的4%.

正如在第2部分中一致性模型所述,我们对宇宙基本参数的认识,尽管目前尚不准确,但相较于十年前而言达到了可喜的精度.相反,第3部分中有关众多粒子与辐射的研究却遗留了太多未解决的问题,这可能是粒子天体物理领域内认识得较差的方面.例如,尽管一个世纪之前就发现了宇宙线,但关于它如何被加速只是最近我们才有了些想法,而已经探测到的最高能量的宇宙线,量级上为 $10^{20}$  eV.再如,我们至今不知道三十多年前就发现的 $\gamma$ 射线暴的物理机制,这种爆发或许是现今宇宙中发生的最激烈事件.

还有一些属于粒子天体物理的话题这里没有介绍,主要是受篇幅所限或因我认为那些课题太成熟或太不成熟了.第1版并未涉及广义相对论,但在本版第2章我基于等效原理和狭义相对论尝试了合理论证,给出了爱因斯坦场方程的几个重要解.不管怎么说,同为牛津硕士系列(Oxford Master Series)、由郑大培(T. P. Cheng)所著的《引力、相对论和宇宙论》已充分地阐述了广义相对论.

本书第1版拟适用于三、四年级物理专业的本科生,因此我在合理范围内保留了原先的叙述和数学处理.我相信重要的是去关注显著的进展以及在热点和多学科方面亟待解决的问题,而不是花大量的时间和篇幅赘述理论.为简单明了起见,很多时候我毫不犹豫地牺牲了数学上的严谨性.本书中我也安排了一些例题,并辅以每章末的习题.书末给出了习题的答案或提示.

## 致谢

感谢如下个人、实验室、杂志社、出版社等允许我在本书中采用了有关作者的图和表.

- [1] Addison Wesley Publishers for Figure 5.9, from *The Early Universe*, by E. W. Kolb and M. S. Turner (1990); for Figure 10.1, from *Introduction to Nuclear Physics*, by H. A. Enge (1972); for Figures 1.12, 1.13, 1.14, 5.4, 5.7, 5.10, 9.8 and 9.9 from *Introduction to High Energy Physics*, 3<sup>rd</sup> edition, by D. H. Perkins.
- [2] American physical Society, publishers of *physical Review*, for Figure 1.2, and publishers of *physical Review Letters*, for Figure 7.12; *Astronomy and Astrophysics*, for Figure 7.2.
- [3] *Astrophysical Journal*, for Figure 5.2, 7.13, 7.14 and 7.6.



- 
- [ 4 ] *Annual Reviews of Nuclear and Particle Science* for Figure 9.2.
  - [ 5 ] Elsevier Science, publishers of *Physics Reports*, for Figure 9.13, and publishers of *Nuclear Physics B*, for Figure 10.3.
  - [ 6 ] Institute of Physics, publishers of *Reports on Progress in Physics*, for Figure 1.7.
  - [ 7 ] CERN information Services, Geneva for Figures 1.1 and 1.6.
  - [ 8 ] DESY Laboratory, Hamburg, for Figure 1.5.
  - [ 9 ] European Southern Observatory, for Figure 9.6.
  - [10] Fermilab Visual Media Services, Fermilab, Chicago for Figure 1.11.
  - [11] Prof. D. Clowe for Figure 7.6; the SNO collaboration for Figure 9.25.
  - [12] Prof. M. Tegmark for Figure 8.7; Prof. A. G. Riess for Figure 7.13 and 7.14; Prof. Chris Carilli, NaRO, for Figure 9.20; Prof. Y. Suzuki and Prof. Y. Totsuka of the superkamiokande Collaboration for Figure 9.22 and Figure 4.7; Prof. Trevor Weekes, Whipple Observatory, Arizona for Figure 9.11.

# 目 录

译者序 ..... ( i )

第 2 版序 ..... ( iii )

## 第 1 部分 粒子和相互作用

第 1 章 夸克与轻子及其相互作用 ..... ( 3 )

1.1 概述 ..... ( 3 )

1.2 夸克和轻子 ..... ( 4 )

1.3 费米子和玻色子:自旋-统计关系,超对称 ..... ( 9 )

1.4 反粒子 ..... ( 10 )

1.5 基本的相互作用:玻色子的交换 ..... ( 12 )

1.6 玻色子和费米子的耦合 ..... ( 14 )

1.7 夸克-胶子等离子体 ..... ( 21 )

1.8 相互作用截面 ..... ( 22 )

1.9 基本粒子散射截面的例子 ..... ( 25 )

1.10 衰变和共振态 ..... ( 30 )

1.11 共振态的例子 ..... ( 33 )

1.12 新粒子 ..... ( 35 )

1.13 总结 ..... ( 36 )

习题 ..... ( 37 )

第 2 章 相对论变换和等效原理 ..... ( 41 )

2.1 狭义相对论中的坐标变换 ..... ( 41 )

2.2 不变间隔和四矢量 ..... ( 44 )

2.3 等效原理:引力场中的钟 ..... ( 45 )

2.4 广义相对论 ..... ( 50 )

2.5 史瓦西线元、史瓦西半径及黑洞 ..... ( 51 )

2.6	质点引起的光的引力偏折(爱因斯坦星移)	(53)
2.7	夏皮罗延迟	(55)
2.8	轨道进动	(55)
2.9	Robertson-Walker 线元	(56)
2.10	牛顿引力的修正?	(58)
2.11	相对论运动学:四动量,多普勒效应	(59)
2.12	有固定靶和碰撞束的加速器	(60)
	习题	(61)
<b>第3章</b>	<b>守恒律、对称性以及粒子物理标准模型</b>	<b>(63)</b>
3.1	变换以及欧拉-拉格朗日方程	(63)
3.2	转动	(64)
3.3	宇称算符	(65)
3.4	宇称守恒及内秉宇称	(66)
3.5	弱相互作用中的宇称破坏	(68)
3.6	螺旋度和螺旋度守恒	(69)
3.7	电荷共轭不变性	(72)
3.8	规范变换和规范不变性	(72)
3.9	超弦	(76)
3.10	电弱理论中的规范不变	(77)
3.11	对称性自发破缺的希格斯机制	(78)
3.12	跑动的耦合常数:弱电理论和量子色动力学与实验的比较	(80)
3.13	规范理论中的真空结构	(87)
3.14	CPT 定理与 CP 和 T 对称	(87)
3.15	中性 K 介子衰变中的 CP 破坏	(88)
3.16	标准模型中的 CP 破坏:CKM 矩阵	(90)
3.17	总结	(93)
	习题	(94)
<b>第4章</b>	<b>标准模型的拓展</b>	<b>(96)</b>
4.1	无中微子的双贝塔衰变	(96)
4.2	中微子质量与味道振荡	(98)
4.3	大统一理论:质子衰变	(102)
4.4	大统一和中微子跷跷板机制	(105)
4.5	等级与超对称	(107)

4.6 总结 .....	(109)
习题 .....	(109)

## 第2部分 早期宇宙

<b>第5章 膨胀宇宙</b> .....	(113)
5.1 哈勃膨胀 .....	(113)
5.2 奥伯斯佯谬 .....	(119)
5.3 弗里德曼方程 .....	(119)
5.4 能量密度源 .....	(123)
5.5 观测的能量密度 .....	(126)
5.6 宇宙的年龄和尺度 .....	(128)
5.7 减速参数:真空能/宇宙学常数的效应 .....	(131)
5.8 CMB 辐射 .....	(132)
5.9 微波辐射的各向异性 .....	(135)
5.10 早期宇宙中的粒子和辐射 .....	(136)
5.11 光子和中微子密度 .....	(138)
5.12 辐射和物质时期:物质和辐射的退耦 .....	(140)
5.13 物质-辐射相等的时期 .....	(142)
5.14 总结 .....	(144)
习题 .....	(145)
<b>第6章 核合成和重子产生</b> .....	(147)
6.1 原初核合成 .....	(147)
6.2 大爆炸中的重子产生以及物质-反物质不对称 .....	(150)
6.3 大爆炸中的重子-光子之比 .....	(153)
6.4 Sakharov 判据 .....	(155)
6.5 重子-反重子不对称:可能的情形 .....	(156)
6.6 总结 .....	(159)
习题 .....	(159)
<b>第7章 暗物质和暗能量组分</b> .....	(161)
7.1 概述 .....	(161)
7.2 星系和星系团中的暗物质 .....	(162)
7.3 引力透镜 .....	(164)
7.4 从引力透镜得到的暗物质证据 .....	(165)

7.5	引力透镜产生的放大效应:微引力透镜和 MACHOs	(168)
7.6	透镜概率:光深	(171)
7.7	重子暗物质	(172)
7.8	中微子	(172)
7.9	轴子	(174)
7.10	类轴子粒子	(175)
7.11	弱相互作用大质量粒子	(176)
7.12	期待的 WIMP 反应截面和事件率	(179)
7.13	WIMP 的实验搜寻	(181)
7.14	暗能量:高红移超新星和大 $z$ 值处的哈勃图	(183)
7.15	真空能:卡西米尔效应	(189)
7.16	宇宙学常数和暗能量中存在的问题	(190)
7.17	总结	(192)
	习题	(193)
<b>第 8 章</b>	<b>早期宇宙的结构形成</b>	<b>(195)</b>
8.1	概述	(195)
8.2	星系和星系际的磁场	(196)
8.3	视界和平坦性疑难	(197)
8.4	暴胀	(199)
8.5	混沌暴胀	(203)
8.6	量子涨落和暴胀	(205)
8.7	原初涨落谱	(206)
8.8	大尺度结构:引力塌缩和金斯质量	(208)
8.9	膨胀宇宙中的结构增长	(211)
8.10	辐射时期涨落的演化	(212)
8.11	从涨落谱得出的中微子质量的宇宙学极限	(217)
8.12	物质主导时期涨落的增长	(218)
8.13	CMB 的温度涨落和各向异性	(219)
8.14	各向异性的角谱:分布中的“声学峰”	(222)
8.15	CMB 各向异性的实验观测和解释	(227)
8.16	宇宙微波辐射的偏振	(229)
8.17	总结	(230)
	习题	(231)

### 第 3 部分 宇宙中的粒子和辐射

<b>第 9 章 宇宙粒子</b> .....	(235)
9.1 概述 .....	(235)
9.2 宇宙线的成分和谱 .....	(236)
9.3 地球磁场和太阳效应 .....	(239)
9.4 宇宙线的加速 .....	(243)
9.5 次级宇宙辐射: $\pi$ 介子和 $\mu$ 子——硬成分和软成分 .....	(245)
9.6 带电粒子和辐射在物质中的穿行 .....	(246)
9.7 电磁级联的形成 .....	(249)
9.8 广延大气簇射:核子和光子导致的簇射 .....	(251)
9.9 广延大气簇射的探测 .....	(251)
9.10 $\gamma$ 射线点源 .....	(253)
9.11 $\gamma$ 射线暴 .....	(255)
9.12 超高能宇宙线簇射:GZK 截断 .....	(257)
9.13 超高能宇宙线的点源 .....	(259)
9.14 射电星系和类星体 .....	(260)
9.15 大气层中微子:中微子振荡 .....	(264)
9.16 太阳中微子 .....	(267)
9.17 物质中的中微子振荡 .....	(270)
9.18 高能中微子的点源 .....	(271)
9.19 引力辐射 .....	(273)
9.20 脉冲双星 .....	(274)
9.21 引力波的探测 .....	(276)
9.22 总结 .....	(277)
习题 .....	(279)
<b>第 10 章 恒星与星系相关的粒子物理</b> .....	(281)
10.1 概述 .....	(281)
10.2 恒星的早期演化 .....	(281)
10.3 氢燃烧:太阳内部的 p-p 链 .....	(284)
10.4 氦燃烧及碳氧产物 .....	(287)
10.5 重元素产物 .....	(288)
10.6 电子简并压与恒星的稳定性 .....	(289)

---

10.7	白矮星	(292)
10.8	恒星塌缩: II 型超新星	(293)
10.9	来自 SN1987A 的中微子	(295)
10.10	中子星与脉冲星	(298)
10.11	黑洞	(300)
10.12	黑洞的霍金辐射	(302)
10.13	总结	(304)
	习题	(304)
附录 A	物理常数表	(306)
附录 B	汤川理论和玻色子的传播子	(308)
附录 C	早期宇宙中结构的微扰增长	(310)
附录 D	太阳中微子相互作用的 MSW 机制	(314)
	习题答案	(317)
	参考文献	(330)
	参考书目	(335)
	索引	(337)



**第 1 部分**  
**粒子和相互作用**



# 第 1 章 夸克与轻子及其相互作用

## 1.1 概 述

高能粒子物理学所研究的对象是组成物质的最基本构成,以及这些基本组分之间的相互作用.高能粒子物理的实验研究主要是通过制造大型的加速器以及探测装置进行的.利用这些实验设施,人们可以探测物质小到  $10^{-17}$  m 尺度上的结构,这一尺度大约为质子大小的百分之一.与此相反,天体物理学研究的是宇宙的大尺度结构与演化,其研究范围包含最大约  $10^{26}$  m 的极大尺度的物质的行为和辐射性质.实验上的观测手段主要是利用在地球上和卫星上的望远镜和探测器.这些各式各样的望远镜所能探测的范围包括可见光、红外、紫外等波段,而探测器能探测到射电波、X 射线、 $\gamma$  射线还有中微子.这些观测给出了大量的地球以外的现象,它们中的某些甚至来自于宇宙最遥远的地方.

本书所要叙述的是一门到目前依然有太多未知内容的学问,因此本书的目的在于表明实验室所进行的粒子物理研究有助于人们理解宇宙的演化,同样天空中的观测也有助于理解粒子间的相互作用.尽管在本章中,我们所讨论的物质的组成成分都是由地球上的加速器所研究出来的,但是越来越多的迹象表明在宇宙学尺度上另一未知形式的物质和能量可能很重要,甚至占主导地位,在后面的章节中我们将讨论这一问题.无论如何,对实验室中的基本粒子的性质和它们之间相互作用的透彻理解对于大尺度的天体物理的研究是不可或缺的.

首先,我们要介绍基本粒子物理所采用的单位.长度的单位通常用飞米(fm)来表示( $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ ),比如质子的电荷半径为  $0.8 \text{ fm}$ .典型的能量标度是千兆电子伏特 GeV( $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$ ),比如质子等价的质能为  $M_p c^2 = 0.938 \text{ GeV}$ .表 1.1 列出了高能物理中通常采用的单位,以及它们相应的国际单位值.附录 A 则给出了各个物理常数的值.

在量子水平上描述粒子之间的相互作用,经常要用到常量  $\hbar = h/(2\pi)$  和  $c$  一个简单的方法是使用自然单位制,即取  $\hbar = c = 1$ .确定这两个单位之后,我们只需再随意地确定一个单位,即能量的单位,取为  $\text{GeV} = 10^9 \text{ eV}$ (十亿电子伏特).这样

其他物理量的单位也就可以确定,比如质量单位为  $Mc^2/c^2 = 1 \text{ GeV}$ ,长度的单位为  $\hbar c/(Mc^2) = 1 \text{ GeV}^{-1} = 0.1975 \text{ fm}$ ,时间的单位为  $\hbar c/(Mc^3) = 1 \text{ GeV}^{-1} = 6.59 \times 10^{-25} \text{ s}$ .

表 1.1 高能物理中的单位

物理量	高能物理单位	SI 单位制中的数值
长度	1 fm	$10^{-15} \text{ m}$
能量	1 GeV	$1.602 \times 10^{-10} \text{ J}$
质量, $E/c^2$	1 GeV/ $c^2$	$1.78 \times 10^{-27} \text{ kg}$
$\hbar = h/(2\pi)$	$6.588 \times 10^{-25} \text{ GeV} \cdot \text{s}$	$1.055 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
$c$	$2.998 \times 10^{23} \text{ fm} \cdot \text{s}^{-1}$	$2.998 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
$\hbar c$	0.1975 GeV · fm	$3.162 \times 10^{-26} \text{ J} \cdot \text{m}$

## 1.2 夸克和轻子

粒子物理的标准模型是一个被大量实验所验证的理论模型,我们将在第 3 章中详细地讨论这一模型.在粒子物理的标准模型中,我们的物质世界是由少数的几个基本粒子所构成的,它们是夸克和轻子.表 1.2 中给出了这些夸克和轻子的名字以及它们所带的电荷.这些粒子都是费米子,即它们的自旋为  $1/(2\hbar)$ .对于表 1.2 中的每个粒子都存在一个反粒子,反粒子带相反的电荷和磁矩,但是它们和相应的正粒子具有相同的质量和寿命.比如说,正电子  $e^+$  (见图 1.2)是电子  $e^-$  的反粒子.与质子和中子不同,夸克和轻子非常小而且没有内部结构,它们被认为是点状的——时至今日,我们依然没有发现夸克和轻子是由更基本的粒子所构成.

表 1.2 夸克和轻子的味道

记号	名字	$Q/ e $	记号	名字	$Q/ e $
u	上	+2/3	e	电子	-1
d	下	-1/3	$\nu_e$	电子中微子	0
c	粲	+2/3	$\mu$	$\mu$ 子	-1
s	奇异	-1/3	$\nu_\mu$	$\mu$ 子中微子	0
t	顶	+2/3	$\tau$	$\tau$ 子	-1
b	底	-1/3	$\nu_\tau$	$\tau$ 子中微子	0

首先考虑带电的轻子,大家最为熟悉的的就是电子了. $\mu$ 子和 $\tau$ 子比较重,它们是电子的不稳定版本,其平均寿命分别为 $2.2 \times 10^{-6}$  s和 $2.9 \times 10^{-13}$  s.这些带电轻子的性质,比如质量、寿命、磁矩都已被精确测定.值得一提的是由量子电动力学算出的磁矩在百万分之一的精确度范围内与实验吻合.对于中性轻子-中微子,情形就比较复杂了,而且目前也比较不清楚.

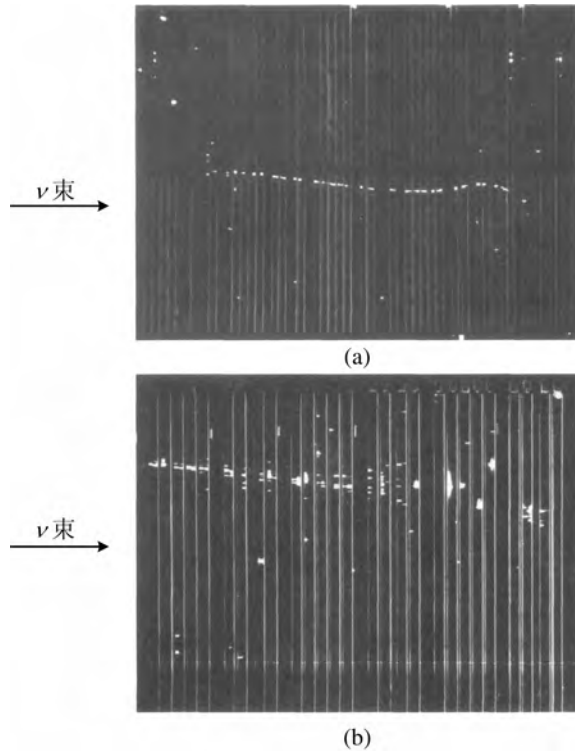


图 1.1

注:在 CERN 的实验中利用火花室探测器测量到的从左边入射的能量约为 1 GeV 的中微子束流的相互作用.该探测器由一系列相互平行的竖直且带高电压的金属板组成.一个带电粒子会电离平行板之间的气体,导致气体的火花(盖革)放电.因此带电粒子的径迹就是一行火花.图(a)的事例是 $\mu$ 子中微子.通过与金属板的相互作用它转化成一个 $\mu$ 子,该 $\mu$ 子在静止前穿过了许多金属板.图(b)的事例是电子中微子转化成电子.图(b)情形中分散的火花代表电子-光子簇射,正如在第9章中将提到的,这与 $\mu$ 子的直线轨迹是截然不同的.在这两种情形中,反应都是弹性的, $\nu_l + n \rightarrow l + p$ ,其中 $l = \mu$ 或 $e$ ,反冲的质子会停留在金属板中.(承蒙 CERN 资讯服务的允许)

### 1.2.1 中微子

对于每一带电轻子,都存在一相应的中性轻子,称之为中微子,通常用 $\nu$ 来表示.相应于不同种类或不同味道的带电轻子 $e, \mu, \tau$ ,有 $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ 三种中微子.例如,