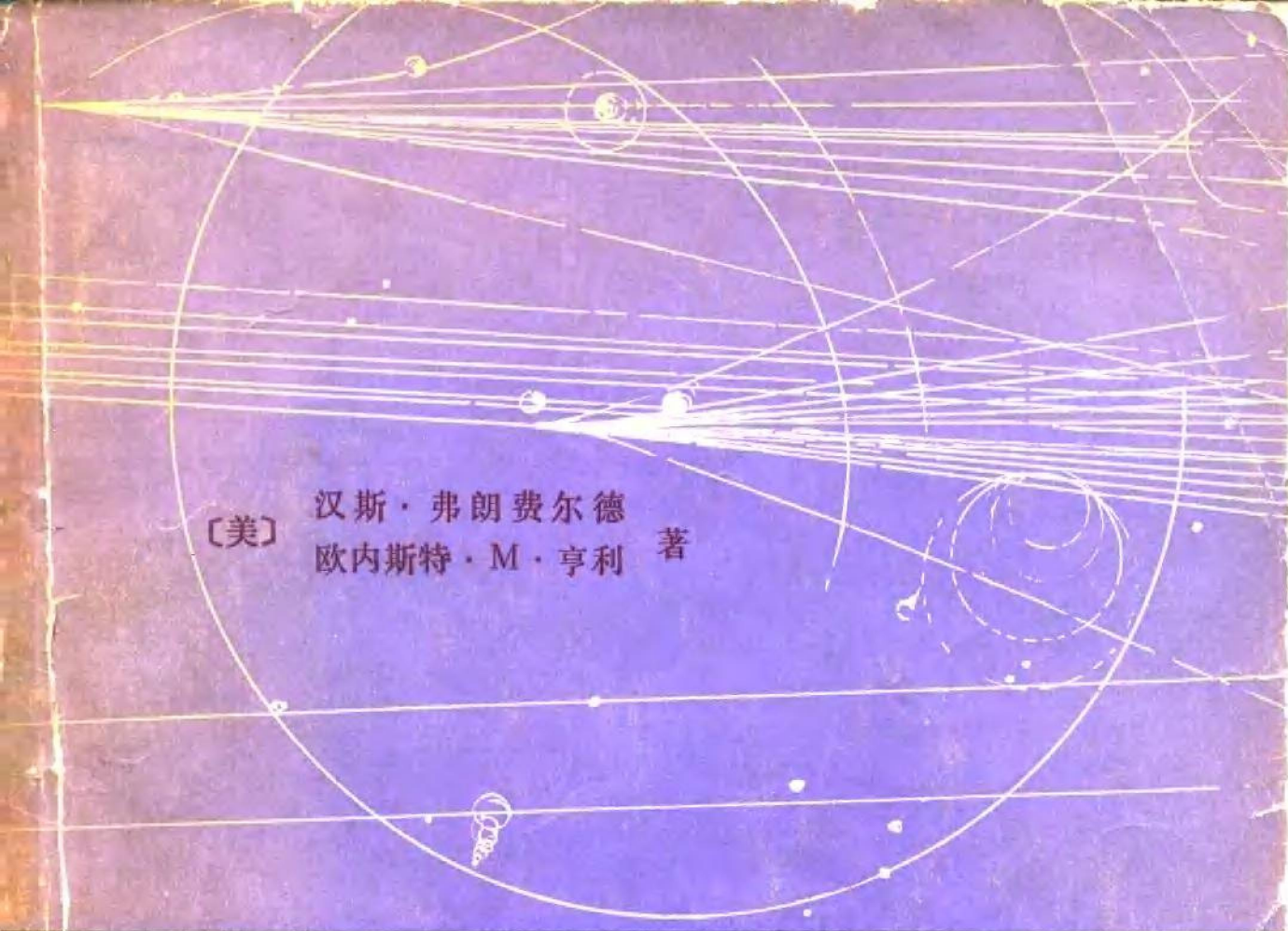




〔美〕 汉斯·弗朗费尔德 著
欧内斯特·M·亨利

亚原子物理学

原子能出版社

亚原子物理学

〔美〕 汉斯·弗朗费尔德 著
欧内斯特·M·亨利
王忠民、韩荣典、王韶舜等译

原子能出版社

内 容 简 介

本书是作者为美国大学高年级学生、研究生和一般科技人员编写的一本介绍原子核物理和基本粒子物理的理论及其应用的入门书。它把这两个领域结合在一起论述，着重在阐明基本物理概念，而不详细描述具体的实验安排和引用烦琐的理论推导。在亚原子物理领域中，这是一部内容较全面，而又容易读懂的书。书中各章都附有参考文献及评论，并有大量习题，这对深入领会书中内容及进一步学习是非常有益的。

亚 原 子 物 理 学

[美] 汉斯·弗朗费尔德 著
欧内斯特·M·亨利

王忠民、韩荣典、王韶舜等译

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

国防科委印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张 $27^{1/2}$ ·字数 655 千字

1981年12月第一版·1981年12月第一次印刷

印数001—2700·统一书号：15175·304

定价：3.55元

德文版序言

自从英文原著出版以来已过去了四个年头。在这四年中，亚原子物理学经历着暴风雨般的发展。质量较大 ($\sim 3\text{GeV}/c^2$) 和寿命较长的、称为 J/ψ 的新粒子在布鲁克海文 (Brookhaven) 和斯坦福 (Stanford) 被发现了。更令人惊异的是，在 $9.6\text{MeV}/c^2$ 处出现了比之更重的那些以 v (upsilon) 命名的粒子。在欧洲核子研究中心 (CERN)、费米国立实验室 (FNAL) 和在布鲁克海文人们在中微子反应中观察到了弱的中性流。新的量子数 (“色”、“粲”) 大体上已被肯定，其他的似乎尚在出现，还存在着质量大约为 $1.8\text{GeV}/c^2$ 的重轻子。对于所有这些新发现，我们由于两种原因还没有把它们收入到本书中来。一方面因为各种新发现尚在不断出现，以致存在着一种希望，几年之后这整个领域可以更简单和更统一地来予以描述。另方面我们是这样给本书起稿的，使得读者能把各种新发现自己归进书的各部分内容中去。例如，新的粒子 J/ψ 最好用 §10.7 中已描述过的方法来研究。弱中性流在 §11.11 中已经提到。新量子数适合于第七章所描述的一般图象；由于新量子数而引进的附加夸克，当然可以嵌进第十三章中已说明的图象之中。因此我们相信，本书即使在今天仍然为亚原子物理学的初步入门提供了基础。

我们对二位译者曼弗雷德·皮佩尔 (Manfred Pieper) 和克劳斯·哈克施泰因 (Klaus Hackstein) 先生的杰出工作，埃德加·吕舍尔 (Edgar Lüscher) 教授先生对德译本的鼓励和促进，以及对 M·约翰 (M. John) 先生的细致审阅，表示感谢。

汉斯·弗朗费尔德
欧内斯特·M·亨利

中译本前言

本书是作者为美国大学高年级学生、研究生和一般科技人员编写的一本介绍原子核物理和基本粒子物理的理论及其应用的入门书。它把这两个领域结合在一起论述，着重在阐明基本物理概念，而不详细描述具体的实验安排和引用繁琐的理论推导。本书文笔比较优美，同时结合书中内容有生动的比喻，因此一般读者读起来不会感觉象读通常的科技书那样枯燥。在亚原子物理领域中这是一部内容较全面，而又容易读懂的好书。凡具有原子物理、量子力学和电动力学基础知识的读者都可以阅读本书，并从中获得亚原子物理学各方面清晰的物理图象。书中各章都附有参考文献及评论，并有大量习题，这对深入领会书中内容及进一步学习是非常有益的。尽管原书于1974年出版时某些重要物理实验尚未完成，但并未影响本书对基本物理概念论述的正确性。

我们曾在教学中用过本书，这次译出以供我国高等院校师生和科技人员参考。书末部分附录采用了最近发表的1978年的新数据。

参加本书翻译工作的除王忠民、韩荣典、王韶舜外，还有尚世鑫、王明谦、卞祖和、林趾荣、范扬眉、林晓满、汪兆民、叶云秀、叶恺蓉、王砚方、张振华、莫富云等同志。

本书全部译稿承杨福家同志、尹鸿钧同志校阅并提出了宝贵的修改意见。德文版序言是由王福山同志翻译的。

由于我们水平所限，译文中难免有错误和不当之处，请读者指正。

译 者

1980年1月28日

序 言

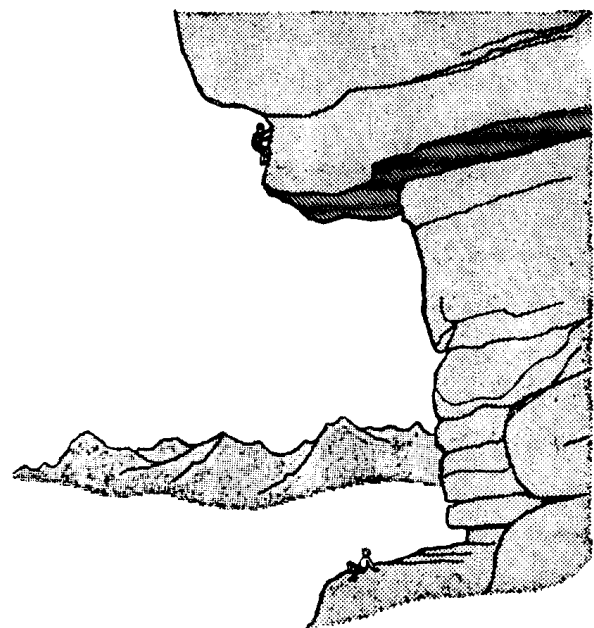
亚原子物理学——原子核和基本粒子物理学——自1896年诞生以来就一直是前沿科学之一。从放射性原子核所放出的辐射的研究到证明核子中存在着亚单元的散射实验，从发现强子的相互作用到认识光子具有强子的（强作用的）特性，以及认识到弱作用力和电磁力可能有密切关系，亚原子物理学已经以崭新的概念和对自然规律更深刻的见解丰富了科学。

亚原子物理学并不是孤立存在的，它影响到生活的许多方面。从亚原子世界的研究中出现的观念和事实不断改变我们关于宏观世界的图象。亚原子物理学中揭示的概念是了解元素的形成及其丰度，了解恒星上能量的产生所必需的。核动力可能提供未来的大部分能源。 π 介子束也许能成为一种治癌的手段。示踪法和穆斯堡尔（Mössbauer）技术在固态物理学、化学、生物学、冶金学和地质学方面给出有关结构和反应的信息。

由于亚原子物理学涉及如此广泛的领域，所以不仅物理学家，而且其他科学家和工程师都应了解它。固然，观察穆斯堡尔效应的化学家，使用放射性测年法的地质学家，注射放射性同位素的医师或设计核电站的工程师，并不直接需要了解同位旋或非弹性电子散射，但若掌握了亚原子物理学的基本原理，他们的工作可能更令人满意，从而也可能找到他们自己的学科与亚原子物理学之间的新联系。虽然本书主要是为物理学家们写的一本导论，但我们希望它对其他学科的科学家和工程师也是有用的。

亚原子物理学研究一切小于原子的客体，它把原子核物理学和粒子物理学结合在一起。这两个领域有很多共同的概念和特点，因此我们一起研究它们，并着重于统一的思想、概念

以及目前尚未解决的问题。我们还要说明亚原子物理学与动力生产、天体物理学和化学有怎样的关系。本书的深度是针对已有一定电磁学、狭义相对论和量子论知识的高年级大学生或一年级研究生。虽然亚原子物理学的许多概念可以用手势和类比来说明，但要真正理解还需要公式。在教科书中最令人烦恼的语句之一就是：“可以证明……”。我们希望避免这种语句，但这却是不可能的。我们这里包括了大部分推导，但在下述两种情况下只引用公式而不予证明。第一种情况，从其他领域引用了许多公式而不推导是为了节省篇幅和时间；第二种情况，那些特殊工具如狄喇克（Dirac）理论或场的量子化太深邃了。我们不妨打个比喻来说明为什么在这两种情况下略去推导：登山运动员总



喜欢尽快到达未被攀登过的部分，而不愿漫步在熟悉的地方消磨时光。从量子论和电动力学

引用公式就好比乘汽车或缆车到达一个冒险旅行的出发点。某些山峰只有通过艰难的道路才能到达，一个没有经验的爬山者，还不可能征服那样的道路，但他仍可以从一个安全的地方通过观察来学习。同样，某些公式须经过困难的推导才能得到，但读者仍可能通过研究这些公式本身来学习，而不必追究其推导过程。因此，我们将引用一些关系式而不加证明，但力图使其结果看来是有道理的并探索其物理结论。一些更难的部分将用圆点“●”标明，初读时可跳过这些部分。

总 参 考 书 目

假定本书的读者对电磁学、狭义相对论和量子论已有了一些理解。我们将从这些领域里引用很多公式而不予证明，但却指出从那里可以找到这些公式的推导。在正文中引用下列书籍时只引作者的名字。

电 动 力 学

J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, Wiley, New York, 1962. 虽然杰克逊 (Jackson) 的这部书不纯粹是大学教科书，但文笔很美，且对经典电动力学讲解得异常透彻。

现 代 物 理

R. M. Eisberg, *Fundamentals of Modern Physics*, Wiley, New York, 1961. 引用时只写埃斯伯格 (Eisberg)。这部书提供了狭义相对论、量子力学和原子论中所需的大部分基础知识。

量 子 力 学

量子力学方面的书是很多的，如果埃斯伯格或类似的大学教科书中所包含的资料不够的话，最好继续参考更高深的课本。经验证明，仅一种教科书不见得能同样清楚地回答所有的疑问。因此，对于一个给定的问题，最好先浏览一下两三种课本的有关论述，然后学习最吸引人的那一种。我们将参考下列书籍：

R. P. Feynman, R. B. Leighton, and M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics*, Addison-Wesley, Reading, Mass., 1965. 引用时简写为费因曼 (Feynman) 讲义。

A. Messiah, *Quantum Mechanics*, Wiley, New York, 1961.

D. Park, *Introduction to the Quantum Theory*, McGraw Hill, New York, 1964.

E. Merzbacher, *Quantum Mechanics*, Wiley, New York, 1970.

数 学 物 理

J. Mathews and R. L. Walker, *Mathematical Methods of Physics*, Benjamin, Reading, Mass., 1964, 1970. 这是一部简明易读的书，它包括了所需的数学工具。如果所需资料从这部书里找不到的话，可查阅内容广博的书：

P. M. Morse and H. Feshbach, *Methods of Theoretical Physics*, 2 Vols, McGraw Hill, New York, 1953.

最后我们愿指出，抛开冷漠的外表不谈，物理学乃是一个有强烈人情味的领域。它的进步取决于勤劳的人们。每一个新思想都来自数不尽的不眠之夜和为了弄清问题而作的长期奋

斗。每一项重大的实验都少不了强烈的情感、经常激烈的竞争和几乎总是密切的协作。每前进一步都伴随着失望；每一项进展都蕴藏着失败。许多概念联系着有趣的故事和有时是滑稽的奇闻轶事。象我们这样一部书不可能详细叙述这些方面，但我们增列了一个与亚原子物理学有关的书目，我们曾愉快地读过这些书：

L. Fermi, *Atoms in the Family*, University of Chicago Press, Chicago, 1954.

L. Lamont, *Day of Trinity*, Atheneum, New York, 1965.

R. Moore, *Niels Bohr*, A. A. Knopf, New York, 1965.

V. F. Weisskopf, *Physics in the Twentieth Century: Selected Essays*, MIT Press, Cambridge, 1972.

G. Gamow, *My World Line*, Viking, New York, 1970.

E. Segre, *Enrico Fermi, Physicist*, University of Chicago Press, Chicago, 1970.

M. Oliphant, *Rutherford Recollections of the Cambridge Days*, Elsevier, Amsterdam, 1972.

W. Heisenberg, *Physics and Beyond; Encounters and Conversations*, Allen and Unwin, London, 1971.

Robert Jungk, *The Big Machine*, Scribner, New York, 1968.

目 录

中译本前言

德文版序言

序言

第一章 背景和语言	(1)
§1.1 数量级	(1)
§1.2 单位	(2)
§1.3 语言——费因曼 (Feynman) 图	(3)
§1.4 参考文献	(5)
习题	(6)

第一篇 工 具

第二章 加速器	(8)
§2.1 为什么需要加速器?	(8)
§2.2 静电加速器 (范德格喇夫)	(10)
§2.3 直线加速器 (Linacs)	(11)
§2.4 束流光学	(12)
§2.5 同步加速器	(14)
§2.6 实验室系和动量中心系	(17)
§2.7 对撞束	(18)
§2.8 参考文献	(19)
习题	(20)
第三章 射线通过物质	(22)
§3.1 概念	(22)
§3.2 重带电粒子	(23)
§3.3 光子	(25)
§3.4 电子	(26)
§3.5 参考文献	(28)
习题	(28)
第四章 探测器	(30)
§4.1 闪烁计数器	(30)
§4.2 统计方法	(32)
§4.3 半导体探测器	(34)
§4.4 气泡室	(36)
§4.5 火花室	(37)

§4.6 计数器电子学·····	(38)
§4.7 电子学：逻辑单元·····	(39)
§4.8 参考文献·····	(40)
习题 ·····	(41)

第二篇 粒 子 与 核

第五章 亚原子“动物园”·····	(44)
§5.1 质量与自旋，费米子与玻色子·····	(44)
§5.2 电荷与磁偶极矩·····	(47)
§5.3 质量的测量·····	(49)
§5.4 亚原子“动物园”一瞥·····	(52)
§5.5 光子·····	(53)
§5.6 轻子·····	(55)
§5.7 衰变·····	(55)
§5.8 介子·····	(59)
§5.9 重子基态·····	(61)
§5.10 激发态与共振·····	(62)
§5.11 重子的激发态·····	(64)
§5.12 参考文献·····	(69)
习题·····	(70)
第六章 亚原子粒子的结构·····	(73)
§6.1 研究方法：弹性散射·····	(73)
§6.2 截面·····	(73)
§6.3 卢瑟福散射和莫脱散射·····	(75)
§6.4 形状因子·····	(77)
§6.5 球形核的电荷分布·····	(80)
§6.6 轻子是点粒子·····	(81)
§6.7 核子的弹性形状因子·····	(84)
§6.8 深度非弹性电子散射·····	(88)
§6.9 散射和结构·····	(91)
§6.10 参考文献·····	(105)
习题·····	(106)

第三篇 对称性和守恒定律

第七章 相加性守恒定律·····	(109)
§7.1 守恒量 and 对称性·····	(109)
§7.2 电荷·····	(112)
§7.3 重子数·····	(114)
§7.4 轻子数和 μ 子数·····	(115)

§7.5	粒子和反粒子	(117)
§7.6	超荷 (奇异性)	(120)
§7.7	参考文献	(124)
	习题	(124)
第八章	角动量和同位旋	(126)
§8.1	空间转动下的不变性	(126)
§8.2	磁场引起对称性破坏	(127)
§8.3	强作用力的电荷无关性	(128)
§8.4	核子的同位旋	(128)
§8.5	同位旋不变性	(129)
§8.6	粒子的同位旋	(131)
§8.7	原子核的同位旋	(133)
§8.8	参考文献	(136)
	习题	(137)
第九章	P、C 和 T	(139)
§9.1	宇称运算	(139)
§9.2	亚原子粒子的内禀宇称	(141)
§9.3	宇称守恒和破坏	(144)
§9.4	电荷共轭	(147)
§9.5	时间反演	(149)
§9.6	两种态的问题	(151)
§9.7	中性K 介子	(153)
§9.8	CP 不变性的破坏	(156)
§9.9	参考文献	(158)
	习题	(158)

第四篇 相互作用

第十章	电磁相互作用	(163)
§10.1	黄金定律	(163)
§10.2	相空间	(166)
§10.3	经典电磁相互作用	(169)
§10.4	光子的发射	(171)
§10.5	多极辐射	(175)
§10.6	轻子的电磁散射	(178)
§10.7	光子-强子相互作用: 矢量介子	(180)
§10.8	光子-强子相互作用: 真实光子和类空光子	(184)
§10.9	总结和存在的问题	(189)
§10.10	参考文献	(190)
	习题	(191)

第十一章 弱相互作用	(194)
§11.1 连续 β 谱	(194)
§11.2 β 衰变的寿命	(197)
§11.3 流-流相互作用	(198)
§11.4 弱过程概观	(201)
§11.5 μ 子衰变	(203)
§11.6 轻子的弱流	(205)
§11.7 弱耦合常数 G	(208)
§11.8 非奇异弱流和奇异弱流	(209)
§11.9 核物理学中的弱流	(211)
§11.10 高能情况下的强子弱流	(214)
§11.11 总结和存在的问题	(219)
§11.12 参考文献	(222)
习题	(223)
第十二章 强相互作用	(226)
§12.1 强相互作用的力程和强度	(226)
§12.2 π -核子相互作用——述评	(228)
§12.3 π -核子相互作用的形式	(232)
§12.4 核力的汤川理论	(233)
§12.5 核子-核子作用力的性质	(235)
§12.6 核子-核子作用力的介子理论	(241)
§12.7 高能强作用过程	(243)
§12.8 参考文献	(247)
习题	(248)

第五篇 模 型

第十三章 夸克和雷吉 (Regge) 极点	(253)
§13.1 原始粒子	(253)
§13.2 夸克	(255)
§13.3 寻找夸克	(257)
§13.4 作为夸克束缚态的介子	(258)
§13.5 作为夸克束缚态的重子	(259)
§13.6 强子的质量	(261)
§13.7 自举和雷吉再现	(262)
§13.8 展望和问题	(266)
§13.9 参考文献	(267)
习题	(268)
第十四章 液滴模型和费米气体模型	(270)
§14.1 液滴模型	(270)

§14.2 费米气体模型·····	(273)
§14.3 参考文献·····	(275)
习题·····	(275)
第十五章 壳层模型·····	(278)
§15.1 幻数·····	(278)
§15.2 闭合壳层·····	(281)
§15.3 自旋-轨道相互作用·····	(285)
§15.4 单粒子壳层模型·····	(286)
§15.5 单粒子模型的推广·····	(288)
§15.6 同量异位相似共振·····	(289)
§15.7 参考文献·····	(293)
习题·····	(294)
第十六章 集体模型·····	(296)
§16.1 核形变·····	(296)
§16.2 无自旋核的转动谱·····	(299)
§16.3 转动族·····	(302)
§16.4 形变核中的单粒子运动 (尼尔逊模型)·····	(304)
§16.5 球形核的振动态·····	(307)
§16.6 核模型——结束语和几个问题·····	(310)
§16.7 参考文献·····	(312)
习题·····	(313)

第六篇 原子核科学和技术

第十七章 核动力·····	(318)
§17.1 裂变过程·····	(318)
§17.2 裂变反应堆·····	(322)
§17.3 聚变和聚变能源·····	(324)
§17.4 核爆炸装置·····	(326)
§17.5 原子电池·····	(328)
§17.6 核推进器·····	(329)
§17.7 参考文献·····	(330)
第十八章 核天体物理学·····	(332)
§18.1 宇宙线·····	(332)
§18.2 星体的能量·····	(335)
§18.3 中微子天文学·····	(337)
§18.4 核合成·····	(339)
§18.5 中子星·····	(341)
§18.6 参考文献·····	(344)
第十九章 在化学中的原子核·····	(346)

§19.1	合成元素	(346)
§19.2	化学分析	(350)
§19.3	化学结构	(351)
§19.4	放射性示踪	(360)
§19.5	辐射化学	(361)
§19.6	参考文献	(362)
附录		(364)
表 A1	最常用的常数表	(365)
表 A2	更完整的常数表	(365)
表 A3	稳定粒子表	(366)
表 A4	介子表	(373)
表 A5	重子表	(378)
表 A6	原子核数据表	(385)
表 A7	原子量A系列的累积索引	(396)
表 A8	球谐函数	(398)
索引		(400)

第一章 背景和语言

亚原子物理学的探索是由 1896 年贝克勒耳 (Becquerel) 发现放射性开始的。此后，它一直是惊人事件、意外现象和人们对于自然规律新见解的不断来源。在一个科学幻想故事（后来拍成了电影）中，叙述了一队宇宙航员飞越太空到一个遥远的星系去。经过一番惊险的旅行之后，在一个恐怖的洞穴里和巨兽搏斗。最后他们发现原来自己已经飞越太空进入地球上的一条毛虫体内并受到微生物的侵袭。在亚原子物理学中情况恰好相反。原子核是原子的重的、致密而又微小的中心。当物理学家们深入到这个小客体内部时，他们却遇到了宇宙。由此他们弄清了太阳里的热核反应，制造了新奇的物质形态，并面临着有关宇宙中元素形成的种种问题。

在第一章里，我们将描述亚原子物理学中遇到的数量级，定义我们所使用的单位，并介绍研究亚原子现象所必需的语言。

§1.1 数量级

亚原子物理学区别于所有其他学科的一个特点在于：它是三种不同相互作用的舞台，而其中两种只有在物体彼此非常接近时才发生作用。生物学、化学、原子物理学和固态物理学是由长程电磁力所支配的。宇宙界的各种现象由两种长程力，即引力和电磁力所支配。但是，亚原子物理学则是三种相互作用，即强相互作用、电磁相互作用和弱相互作用微妙地相互影响着。在原子尺度和更大的距离上，强相互作用和弱相互作用消失了。（至少还可能存在着另一种相互作用，即超弱相互作用，但还没有确凿的证据。）强子作用力（或称强作用力或核力）保持原子核为一整体，其力程很短，却很强。弱相互作用的力程甚至更短。现在，我们把强子的、弱的和短程的都只是当作名字提一下，往后我们将会逐渐熟悉这些力。

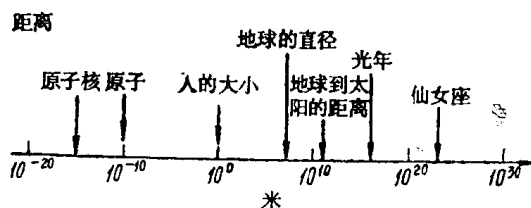


图1.1 典型的距离。大约低于 10^{-17} 米的区域还未被探索，尚不知是否有新的力和新的现象出现

激发能

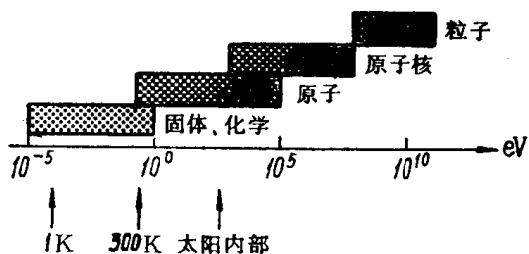


图1.2 激发能的范围。图中也给出了和能量相对应的温度

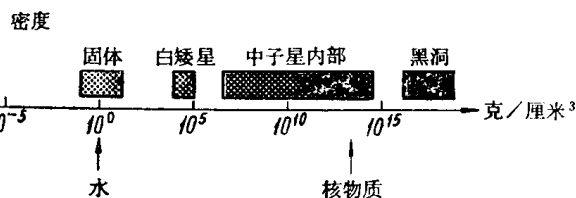


图1.3 密度的范围

图1.1、1.2、1.3给出了在各种现象中所涉及的数量级的概念。我们在这里只介绍它们而不进行讨论，它们是不言而喻的。

§1.2 单 位

在表 1.1 中给出了我们要用到的**基本单位**。表 1.2 中所定义的词头表示这些基本单位乘以10的正整数幂和负整数幂。

表1.1 基本单位 (c 是光速)

量	单 位	符 号
长 度	米	m
时 间	秒	sec
能 量	电子伏特	eV
质 量		eV/c^2
动 量		eV/c

表1.2 10 的 幂 的 词 头

幂	名 称	符 号	幂	名 称	符 号
10^1	十	da	10^{-1}	分	d
10^2	百	h	10^{-2}	厘	c
10^3	千	K	10^{-3}	毫	m
10^6	兆	M	10^{-6}	微	μ
10^9	吉(千兆)	G	10^{-9}	纳(毫微)	n
10^{12}	太(兆兆)	T	10^{-12}	皮(微微)	p
			10^{-15}	飞(毫微微)	f
			10^{-18}	阿(微微微)	a

例如， 10^6 电子伏=兆电子伏， 10^{-12} 秒=皮秒。以及 10^{-15} 米=飞米。最后那一单位飞米也常称做**费米**，广泛应用于粒子物理学中。引进电子伏做能量单位还需作如下说明：一电子伏就是一个电子被一伏特的电位差加速时所获得的能量。

$$\begin{aligned}
 1 \text{ 电子伏} &= 1.60 \times 10^{-19} \text{ 库仑} \times 1 \text{ 伏特} \\
 &= 1.60 \times 10^{-19} \text{ 焦耳} \\
 &= 1.60 \times 10^{-12} \text{ 尔格}
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

由于给定能量的粒子通常是由在电磁场中加速所产生的，所以电子伏（或把它乘以10的任意整数次幂）是一个方便的能量单位。为了说明质量和动量单位，要用到狭义相对论中最重要的公式之一，这个公式给出一个自由粒子的总能量 E 、质量 m 和动量 p 之间的关系⁽¹⁾：

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4. \tag{1.2}$$

这个公式表明一个粒子的总能量由两部分组成：一部分是与运动无关的**静止能量** mc^2 ；另一部分则取决于粒子的动量。对于一个**无质量的粒子**，式(1.2)可写成

$$E = pc; \tag{1.3}$$

(1) Eisberg, Eq(1.25), 或 Jackson, Eq(12.11)。