

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)

“十三五”国家重点图书出版规划项目
物理学名家名作译丛

托马斯·K. 盖瑟 编著

袁强 康明铭 译
余钊焕 冯磊

宇宙线和粒子物理

Cosmic Rays and Particle Physics

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 12181799 号

Cosmic Rays and Particle Physics, First Edition by Thomas K. Gaisser
First published by the Press Syndicate of the University of Cambridge 1990
All rights reserved.

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

© Cambridge University Press & University of Science and Technology of China Press 2018
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

宇宙线和粒子物理/(美)托马斯·K.盖瑟(Thomas K. Gaisser)编著;袁强等译. —合肥:中国科学技术大学出版社,2018.2

(物理学名家名作译丛)

“十三五”国家重点图书出版规划项目

书名原文: Cosmic Rays and Particle Physics

ISBN 978-7-312-03963-8

I. 宇… II. ①托… ②袁… III. ①宇宙线—研究 ②粒子物理学—研究
IV. O572

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 162863 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>
<https://zgkxjdxcs.tmall.com>
印刷 合肥华苑印刷包装有限公司
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 15.75
字数 309 千
版次 2018 年 2 月第 1 版
印次 2018 年 2 月第 1 次印刷
定价 49.00 元

内 容 简 介

本书内容涵盖粒子物理基础、宇宙线的物理(加速、相互作用)和天文(起源、传播)问题及其探测方法。针对目前广为采用的大气簇射实验,本书侧重讨论了大气簇射中宇宙线各成分(包括强子、光子、 μ 子和中微子)的理论模型及数值模拟方法。书中的理论分析简明直观,密切结合实验,具有较强的针对性。读者通过本书可以对宇宙线这个学科有整体和适当深度的了解。

本书适合作为物理学专业高年级本科生和研究生的入门教材。对粒子物理标准模型和天文学有基础性的了解有助于对本书的理解。本书亦适合工作在宇宙线领域的专家学者参考。

译者的话

我们很荣幸把 Thomas K. Gaisser 先生这本精彩的著作译成中文，推荐给我国的读者。对于从事宇宙线领域工作的学者和研究生，这本书是必读的。此书精练而清楚地介绍了宇宙线的物理基础和探测原理，刚入此门的同行可以从本书中迅速获取所需的基本知识和技术，有经验的研究者也可将它置于案头，以备参考。我们翻译并出版此书大体有两个原因：一是方便研究生的学习，二是有利于向其他领域的学者和本科生介绍这个历史悠久并且蓬勃发展的学科。

翻译工作肇始于读研究生时师兄弟们组建的一个兴趣小组。我们利用研究工作之余阅读经典，其中之一就是 Gaisser 先生的这本书。每个参与者负责书中部分章节的翻译和理解，而后大家坐在一起讨论。现在想想，当时融洽和欢乐的氛围依然环绕身旁，意犹未尽。几年后，新加入课题组的成员谈及此事并索求译稿，我们觉得有必要将稿子整理出来给需要的人，于是发动感兴趣的研究生们在原稿的基础上提高翻译质量。其间，余钊焕制作了整本书的插图，精美程度甚至超过原著，因此萌生了出版译著的想法。

决定出版后，我们几个译者的压力陡然增加，出版与随便看看有天壤之别。又经过两年多的时间，接近十轮的校对改善和交叉检查之后，才决定将译稿交出版社。此时距离最初兴趣小组学习已经六年有余，几位译者已经分处世界各地，坚守在各自的研究岗位了。

在当下出版本书也恰逢其时。我国的宇宙线研究虽然始于 20 世纪 50 年代，但其步伐始终缓慢，时至今日我国从事相关研究工作的人员

也屈指可数。最近我们迎来了新的机会，国家级大型科学装置“高海拔空气簇射观测站”落户于四川海子山，我国第一颗空间天文卫星“暗物质粒子探测卫星（悟空）”发射升空。可以预见在未来相当长一段时期内，国内对宇宙线相关领域的人才需求将非常可观。我们由衷希望本书能对培养宇宙线研究的新生力量起到一定的帮助作用。

现在，终于有机会对早期参与翻译工作的同学们道一声感谢！他们是：崔慧娴、樊超、冯朝阳、郭义庆、侯越云、李桃丽、李晔、刘加丽、刘焯、王博、张建立、张寿山、赵静。他们是我们坚持完成这件工作的原动力，他们付出的努力已经在这本书中结晶。

原著《Cosmic Rays and Particle Physics》由剑桥大学出版社于1990年出版，虽然近二三十年来宇宙线探测有了长足的进展，但本书侧重基础知识和一般方法的介绍，丝毫不显过时。唯请读者注意的是：书中的一些实验数据和结果，限于当时的技术发展，可能会显得相对陈旧。原著公式如有明显的印刷错误，译本中已作更正。若读者对某些地方有所疑虑，请务必参阅原著。

国内宇宙线领域的专家罕见有著书立说或编写教材的，但愿这个遗憾能在近期弥补，以适应学科发展的需求，鼓励更多学子投身进来。

尽管我们在翻译时充分认真和努力，但限于知识和能力，书中有不足和不当之处在所难免，盼望广大读者指正。

译 者

2017年10月

前 言

在过去十几年里，宇宙线与粒子物理之间的联系重新引起大家的关注。大型深地探测器在寻找核子衰变、磁单极子和中微子震荡等过程的同时顺带采集宇宙线 μ 子数据，并且研究大气中微子。地表探测器阵列测量大气级联，试图辨识天然存在的最高能粒子的产生源。本书介绍粒子天体物理学中宇宙线领域的唯象学和理论背景。本书适合对这个跨学科领域感兴趣的研究生和科研工作者（无论是实验工作者，还是理论工作者）阅读。

本书分为背景介绍和 3 个主要部分。背景介绍（第 1 章、第 2 章）简要介绍宇宙线物理和粒子物理的背景知识。第 1 个主要部分（第 3 章至第 8 章）关注大气中的宇宙线，包括强子、光子、 μ 子和中微子。第 2 个主要部分（第 9 章至第 13 章）涉及星系中宇宙线的传播、加速和起源。第 3 个主要部分（最后 4 章）的主题是大气簇射和相关话题。

我非常感谢 Bartol 研究所和其他地方的许多同事，他们帮助我了解这个领域的全貌。感谢 Alan Watson, Raymond Protheroe, Paolo Lipari, Francis Halzen, David Seckel, Todor Stanev, Floyd Stecker 和 Carl Fichtel 阅读各个章节并提出了有益建议。

感谢 Leslie Hodson, Jack van der Velde, Jay Perrett 和 Sergio Petrerá 提供照片以阐述相关问题。

目 次

译者的话.....	(i)
前言.....	(iii)
第 1 章 宇宙线	(1)
1.1 什么是宇宙线?.....	(1)
1.2 本书的目标.....	(1)
1.3 宇宙线实验的种类.....	(2)
1.4 成分.....	(5)
1.5 能谱.....	(7)
1.6 宇宙线能量密度.....	(9)
第 2 章 粒子物理	(11)
2.1 一个有用的例子: β 衰变.....	(11)
2.2 基本粒子间作用力的统一.....	(13)
2.3 点状夸克的动力学证据.....	(15)
2.4 强相互作用唯象学.....	(17)
第 3 章 级联方程	(22)
3.1 核子输运方程.....	(22)
3.2 边界条件.....	(24)
3.2.1 基本解.....	(24)
3.2.2 A 近似.....	(25)

3.3	中子和质子通量	(26)
3.4	耦合级联方程	(27)
3.5	大气	(28)
3.6	介子通量	(29)
第 4 章	强子和光子	(32)
4.1	介子衰变	(32)
4.2	强子和光子通量	(35)
4.3	乳胶室	(38)
4.3.1	直接测量	(38)
4.3.2	大型乳胶室	(40)
第 5 章	加速器数据	(43)
5.1	强子作用截面	(44)
5.2	核作用截面	(46)
5.3	单举截面	(49)
5.4	迷你喷注模型	(53)
5.5	谱加权矩	(54)
5.6	非弹性度	(56)
第 6 章	μ 子	(58)
6.1	大气 μ 子	(58)
6.2	原初宇宙线能量	(60)
6.3	μ 子电荷比	(62)
6.4	μ 子在物质中的穿越	(63)
6.5	地下 μ 子	(65)
6.5.1	深度 - 强度关系	(65)
6.5.2	地下 μ 子能谱	(66)
6.5.3	瞬发 μ 子	(68)
第 7 章	中微子	(72)
7.1	通量	(73)
7.1.1	π/K 产生的中微子	(74)

7.1.2 μ 子产生的中微子	(75)
7.1.3 $\pi \rightarrow \mu \rightarrow \nu$ 过程产生的中微子	(78)
7.2 大气中微子	(80)
7.2.1 通量	(80)
7.2.2 内含事例	(82)
7.2.3 中微子比例和振荡	(84)
第8章 中微子产生的 μ 子	(89)
8.1 事例率计算	(90)
8.2 大气中微子产生的 μ 子	(94)
8.3 天体物理中微子	(95)
第9章 传播	(97)
9.1 传播方程	(97)
9.2 银河系	(99)
9.3 传播模型	(101)
9.3.1 漏箱模型	(101)
9.3.2 嵌套漏箱模型	(103)
9.3.3 封闭银河系模型	(103)
9.3.4 扩散模型	(104)
第10章 伽马射线和反质子	(107)
10.1 概述	(107)
10.1.1 源函数	(108)
10.1.2 运动学	(109)
10.2 弥散伽马射线和中微子	(112)
10.2.1 韧致辐射	(113)
10.2.2 核相互作用	(113)
10.2.3 观测结果	(115)
10.3 反质子	(117)
10.3.1 次级反质子和观测结果	(117)
10.3.2 增强 \bar{p} 通量的模型	(119)

第 11 章 加速	(123)
11.1 功率	(124)
11.2 激波加速	(125)
11.2.1 费米机制	(125)
11.2.2 一阶和二阶费米加速	(126)
11.2.3 磁场几何	(130)
11.3 超新星冲击波	(131)
11.3.1 最大能量	(131)
11.3.2 电子的最大能量	(133)
11.3.3 组分和谱形	(134)
第 12 章 加速至 100 TeV 以上	(135)
12.1 弥散源	(135)
12.2 点源	(136)
12.3 加速大于 100 TeV 粒子所需的功率	(137)
12.4 年轻超新星遗迹	(138)
12.5 双星系统作为宇宙线加速源	(141)
12.5.1 吸积流中的激波	(143)
12.5.2 盘发电机	(144)
12.5.3 脉冲星风激波	(145)
12.5.4 湍动重联	(145)
12.5.5 武仙座 X-1 和天鹅座 X-3	(147)
第 13 章 天体物理束流收集器	(148)
13.1 数据的本质	(148)
13.1.1 X 射线双星	(149)
13.1.2 非常年轻的超新星	(149)
13.2 束流收集器的可能构造	(151)
13.3 源光度	(152)
13.4 中微子的产生和吸收	(154)
13.5 ν 与 γ 之比	(156)
13.6 高能中微子天文学	(158)

13.7 中子天文学	(160)
第 14 章 大气簇射	(162)
14.1 粒子组成	(162)
14.2 实验类别	(163)
14.2.1 大气切伦科夫实验	(163)
14.2.2 经典大气簇射实验	(165)
14.2.3 点源信噪比	(166)
14.2.4 蝇眼实验	(167)
14.3 级联的基本特征	(168)
14.3.1 解的一般形式	(168)
14.3.2 玩具模型	(169)
14.4 原初原子核	(170)
14.5 符合多重高能 μ 子	(172)
14.5.1 高能 μ 子的数量	(173)
14.5.2 地下 μ 子束	(174)
14.5.3 成分测量的灵敏度	(175)
第 15 章 电磁级联	(178)
15.1 对产生和韧致辐射	(178)
15.2 级联方程	(180)
15.2.1 幂律解	(181)
15.2.2 电磁大气簇射	(182)
15.2.3 总粒子数近似估计	(187)
15.3 涨落	(187)
15.4 横向扩展	(188)
第 16 章 宇宙线簇射	(190)
16.1 大气簇射中的 μ 子	(190)
16.1.1 1 GeV 以上总 N_μ	(192)
16.1.2 μ 子横向分布	(194)
16.2 N_e 和 E_0 的关系	(195)

16.2.1	带电粒子的横向分布	(196)
16.2.2	固定强度截取方法	(198)
16.2.3	簇射极大处的大小和 E_0 的关系	(199)
16.3	10^{15} — 10^{18} eV 原初能谱	(201)
16.4	10^{15} — 10^{18} eV 的原初成分	(202)
16.5	电磁级联中的 μ 子	(204)
16.5.1	常规预期	(204)
16.5.2	增加 μ 子含量	(206)
第 17 章	模拟技术	(208)
17.1	蒙特卡罗簇射	(208)
17.1.1	级联算法 UNICAS	(208)
17.1.2	核碎裂	(209)
17.1.3	强子相互作用的分割算法	(210)
17.2	大气簇射阵列的接收度	(213)
17.3	大气簇射能段的截面	(217)
参考文献	(219)
索引	(231)
部分短语汉英对照表	(233)

第 1 章 宇 宙 线

1.1 什么是宇宙线？

每秒钟每平方米的面积上约有 1000 个宇宙线粒子轰击到地球大气层上。它们都是电离后的原子核，其中有大约 90% 的质子、9% 的 α 粒子，还有其他更重的原子核。大多数宇宙线粒子是相对论性的，它们的能量与其静止质量相当或者更高。有极少量粒子具有极端相对论性的能量，高达 10^{20} eV (约 20 J)，比质子静止质量的等价能量高出 11 个数量级。宇宙线物理中有两个基本问题：这些粒子从哪里来？特别地，它们是如何被加速到这样高能量的？

宇宙线起源相关问题的答案至今仍不清楚。然而，基本可以肯定的是，它们几乎都来自太阳系之外、银河系之内。相对少量的太阳宇宙线与太阳上的剧烈活动相关，因而体现出快速变化的特征。与此相反，大部分宇宙线表现出与太阳活动的反相关性。当来自太阳的膨胀磁化等离子体——太阳风很强时，宇宙线会被有效地阻止进入太阳邻域。甚高能宇宙线在典型星际磁场中的回旋半径比银河系尺度还要大，它们很可能是河外起源的。

1.2 本书的目标

本书的焦点是粒子物理和宇宙线的交叉结合。在加速器出现以前，宇宙线及其相互作用是基本粒子信息的主要来源。虽然最高能的宇宙线仍然可以为超过加

速器能量的粒子物理提供线索，但这已经不再是粒子物理领域的主要方面了。尽管如此，在理解宇宙线数据中的天体物理含义时，仍然有许多关键地方需要基本粒子相互作用的知识。例如：

由原初宇宙线粒子与星际介质原子核碰撞导致的**次级宇宙线**（如反质子）的产生。通过这些次级粒子的相对数量我们可以推知宇宙线是怎样在星际介质中传播的，而且相应地可以了解构成星际介质的物质和场的性质。

宇宙线与其加速地点附近的物质碰撞导致的光子、中微子及其他粒子的产生。观测这些粒子的点源是认证宇宙线特定加速源和研究加速机制的途径之一。

宇宙线在地下的贯穿和大型深地探测器对 μ 子和中微子的探测。这些粒子既可能作为信号（例如来自上述点源的中微子），也可能成为背景（例如对于质子衰变或磁单极子的搜寻）。

大气级联簇射与产生它们的入射宇宙线间的关系。最高能的宇宙线由于数量稀少而不能用大气层外的小型探测器直接观测，只能通过地面大型大气簇射阵列进行长时间观测来间接研究。因此人们必须从次级级联粒子推断原初粒子的性质。

在宇宙辐射中寻找新的粒子和新的相互作用。

这些主题具有许多共同点。支配地球大气层中粒子级联簇射的方程也可用来描述由坍缩恒星加速的宇宙线与附近超新星包层或近邻伴星大气碰撞引发的粒子产生过程。决定地下探测器里中微子诱发信号的相互作用截面也决定了双星系统中被加速宇宙线产生的中微子有多少能量被伴星所吸收。本书的目的就是讨论相关的粒子物理，并用当前关注的范例阐明它们在宇宙线天体物理中的应用。同时笔者将尽力提供一个足够全面的宇宙线物理概览，使我们可以理解这些例子的重要性。

1.3 宇宙线实验的种类

宇宙线的首要数据（我们期望从中了解它们的起源）包括不同原子核的相对丰度（成分）和各成分的能量分布（能谱）。比较不同天体的化学成分，例如太阳、

星际介质、超新星或中子星，能够提供宇宙线是在何处被加速的线索。宇宙线的能谱可能具有特定加速机制的特征。

图 1.1 给出了宇宙线全粒子谱的概况。由于通量延展到很宽的范围，以单位对数能量间隔的通量 ($E dN/dE = dN/d \ln E$) 来作图会更方便。即便如此，纵轴仍然被极度地压缩了。简单思考一下图 1.1 中事例率的跨度便很容易明白，研究全能段宇宙线需要不同种类的探测器。在 1 GeV 附近，对于一架由两片面积为 100 cm^2 、间距为 20 cm (图 1.2) 的探测器组成的望远镜，每秒钟能够接收到大约 10 个粒子。因此，大气层顶部的气球或空间飞船中的一个小型探测器便足以研究 GeV 能区的宇宙线成分细节，精度能达到十万分之一的水平。

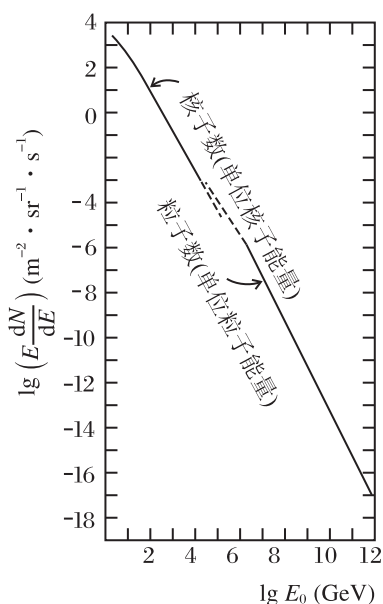


图 1.1 宇宙线能谱

高能部分表示每原子核总能量处的粒子数，低能部分表示每核子能量处的核子数。

相反，太空实验室中的芝加哥大学探测器 (图 1.3) 是迄今航飞过的最大探测器之一，因此它对于能量高得多的宇宙线仍然灵敏。它于 1985 年 7 月 29 日由“挑战者”号航天飞机搭载升空，运行至 8 月 6 日，有效观测时间为 94 小时，孔径约 $2 \text{ m}^2 \cdot \text{sr}$ 。从图 1.1 我们可以估计，在这段工作时间内大约有 100 000 个能量介于 1—2 TeV 的宇宙线粒子穿过该探测器。然而，由于宇宙线能谱太陡，100 TeV 以上的粒子只有大约 50 个在此期间穿过探测器，而且其中大部分粒子的电荷会低于该探测器的电荷阈值 (该探测器原本是设计来测量重核的)。更早期的苏联飞船实验 (Grigorov et al., 1970)，以及日本—美国气球实验 (Burnett et

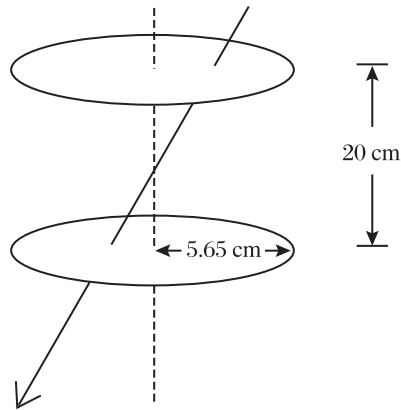


图 1.2 一个小型宇宙线望远镜示意图

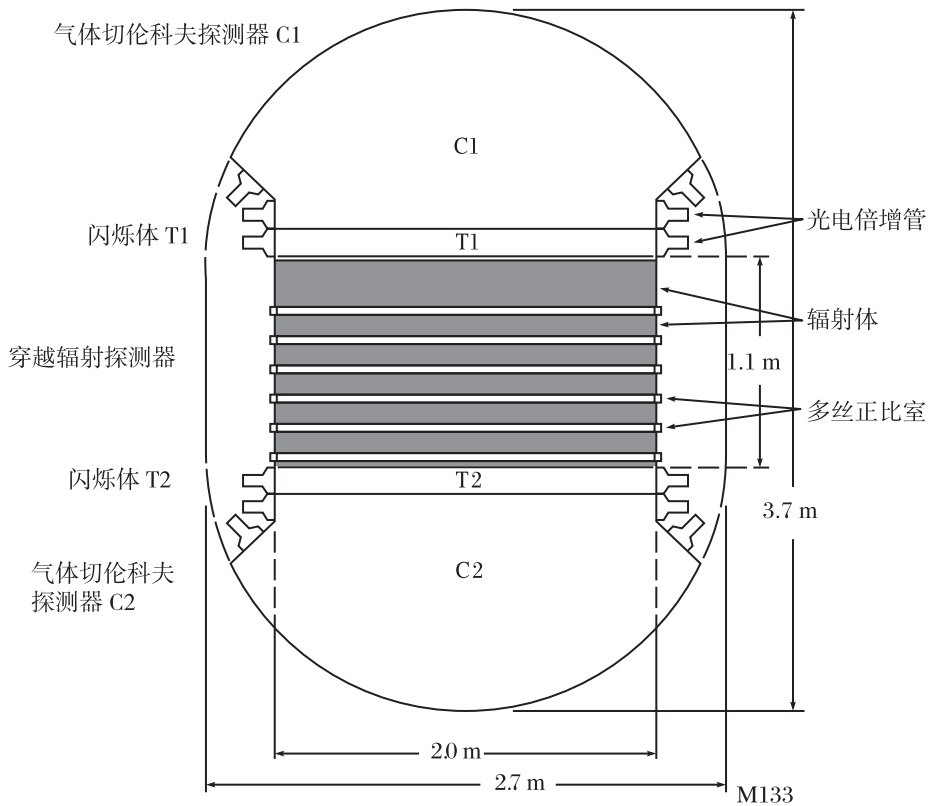


图 1.3 太空实验室中芝加哥大学宇宙线原子核实验装置的剖面图 (Grunsfeld et al., 1988)

经 *The Astrophysical Journal* 许可复制。

al., 1983) 也测量到了类似的能段。目前看来, 由于有效曝光量的限制, 能够用大气层顶部探测器直接研究的宇宙线最高能量大约为 100 TeV。

习题 图 1.2 中的设备由两个同轴圆形探测器组成, 每个面积约为 100 cm^2 , 间距为 20 cm。能够触发探测器的粒子最大入射角依赖于入射径迹与第一个探测器的交点位置以及径迹方向。证明对于下行粒子, 该探测器的接收度约为 $22 \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}$ 。

研究更高能量的宇宙线需要更大面积的探测器和更长的观测时间。目前, 克服高能段低通量问题的唯一办法是在地面建造大型探测器。这样的探测器称为大气簇射阵列, 其面积可以达到平方千米级别, 而探测时间几乎不受限制, 只需要实验工作者足够耐心且基金部门足够慷慨。地面探测器不能直接探测原初宇宙线, 只能探测入射粒子通过大气级联簇射过程产生的次级粒子。因而对原初粒子性质只能给出间接有限的信息。尽管这种项目存在明显的困难, 极高能粒子仍然有足够的吸引力激励人们去探测。要解释级联簇射并反推原初粒子的信息, 粒子物理知识是非常重要的。在本书的末尾我们将回到这个问题上来。本章余下部分我们主要讨论低能宇宙线。

1.4 成 分

图 1.4 比较了宇宙线相对丰度和太阳系元素丰度。图中各种符号的意义如下: 实心圆点代表 70—280 MeV/A 的低能宇宙线数据, 空心圆圈为 1000—2000 MeV/A 的高能数据; 太阳系丰度用空心菱形表示。太阳系和宇宙线元素丰度都表现出奇偶效应, 结合得更紧的偶 Z 核相对要多一些。然而, 这两类元素的丰度还是有两个明显的不同。

首先, 宇宙线中 $Z > 1$ 的原子核相对质子的丰度比太阳系物质中的高很多。其原因还不完全清楚, 可能与注入加速区的过程中氢相对难以电离有关, 也可能反映了源的成分差异。

第二个差别的原因比较清楚, 而且是理解宇宙线在银河系中传播和束缚过程的重要工具。Li, Be, B 和 Sc, Ti, V, Cr, Mn 这两组元素在宇宙线中的丰度比太阳系丰度高出许多个数量级。这些元素在恒星核合成的最终产物里非常稀少, 然而在宇宙线中它们却可以作为富元素 C 和 O (Li, Be, B), 以及 Fe (Sc,

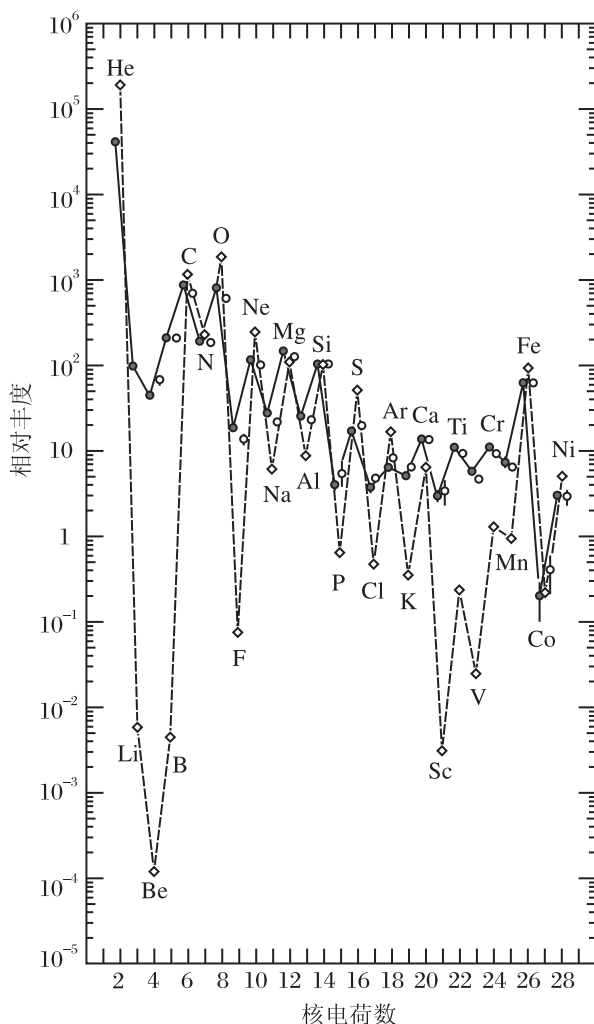


图 1.4 地球上测得的宇宙线元素丰度 (He-Ni) 与太阳系丰度比较, 归一到硅丰度 (Simpson, 1983)

经授权复制, 取自 *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, Vol. 33,

©1983 Annual Reviews Inc.。

Ti, V, Cr, Mn) 的碎裂产物而存在。它们由宇宙线在星际介质 (ISM) 中的碰撞产生。根据碎裂相互作用截面, 我们可以推断宇宙线从产生到观测穿过了多少物质。(注意这同时意味着次级粒子, 例如光子、中微子和反质子, 也在宇宙线经星际介质传播的过程中以一定的速率产生, 我们将在第 10 章讨论这个问题。) 对于大多数宇宙线, 平均穿过的物质量为 $X = 5 - 10 \text{ g/cm}^2$ 。银盘中物质密度 ρ_N 大约是 1 个质子 / cm^3 , 所以这样一个物质厚度对应的距离为

$$l = X/(m_p \rho_N) = 3 \times 10^{24} \text{ cm} \approx 1000 \text{ kpc}$$

由于宇宙线可能会在更弥散的银晕中消耗一些时间，这只是宇宙线经历距离的下限。无论如何， l 都远大于银盘的半高度 $d \approx 0.1 \text{ kpc}$ 。这表明宇宙线的束缚是一个扩散过程，在逃逸到星系际空间之前，它们会在银河系中逗留很久。

1.5 能 谱

图 1.5 给出了几种宇宙线元素的能谱。几种主要成分 (铁除外) 的相对比例随能量的变化基本上保持为常数 (参见表 1.1)。它们可以由一个能量的负幂函数很好地描述，其微分通量为

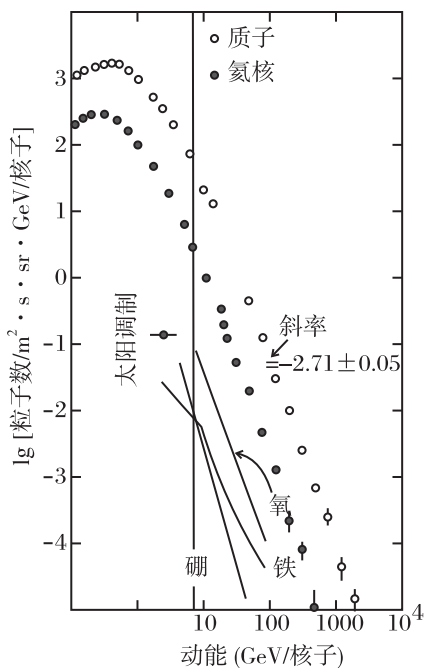


图 1.5 几种宇宙线成分的能谱

根据 Ormes et al. (1978) 综述整理。竖线左边的宇宙线通量在太阳活动周期内剧烈变化，这种效应称为“太阳调制”。

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-(\gamma+1)}$$

能量小于 $\sim 10^6$ GeV 时, 谱指数 $\gamma \approx 1.7$; 在此能量之上能谱变陡为 $\gamma \sim 2.0$ 。

然而, 有一点很重要, B 的能谱比其母核 O 和 C 的能谱更陡。事实上, 所有的次级粒子 (即由含量丰富的核素碎裂产生的宇宙线粒子) 能谱都比原初核要陡很多。随着能量升高, 次级粒子与原初粒子的比值下降。这告诉我们更高能的宇宙线将更快地扩散出银河系。

10—100 GeV 的宇宙线成分相对于质子的比例列于表 1.1 中。表中用 4 种不同方式显示了宇宙线原子核相对于质子的比例。宇宙线通量通常用第 (1) 列表达: 每单位核子能量对应的粒子数。如果我们定义第 (1) 列的值为 F_A (例如, 氦核为 $F_4 = 0.036$), 则第 (2) 列的值为 $2^\gamma F_A$, 第 (3) 列为 $A F_A$, 第 (4) 列为 $A^\gamma F_A$ 。这些关系对幂律谱 $N_A(> E) \propto E^{-\gamma}$ 成立。注意这些关系是针对积分通量 (即高于阈能 E 的粒子数) 来说的。表中所列名称 M (中等核)、H (重核) 和 VH (超重核) 是宇宙线领域中这些元素组的标准术语。轻核 ($Z=3-5$, 用 L 表示) 的丰度太低而在表中略去。

表 1.1 不同核素相对于质子的比例

质量组	$\langle A \rangle$	(1) 粒子 ($> E/A$)	(2) 粒子 ($> R$)	(3) 核子 ($> E/A$)	(4) 粒子 ($> E/\text{原子核}$)
p	1	1	1	1	1
α	4	0.036	0.12	0.14	0.38
M($Z = 6-9$)	14	0.0025	0.0083	0.035	0.22
H($Z = 10-20$)	24	0.0007	0.0023	0.017	0.15
VH($Z = 21-30$)	56	0.0004	0.0013	0.022	0.40

表 1.1 不同列所示的比例在不同情况下适用。第 (1) 列 (每单位核子能量对应的原子核数) 在计算传播过程时比较有用, 因为在碎裂过程中每核子的能量基本上保持不变。刚度 $R \equiv pc/(Ze)$ 适用于任何跟磁回旋半径相关的过程, 例如在地磁场中的加速和传播。根据第 (2) 列, 在某给定位置, 假如有 1000 个质子穿过地磁场到达大气层顶部的探测器, 那么同时到达的还有 120 个 α 粒子, 8 个 M 组、2 个 H 组和 1 个 VH 组原子核。刚度的量纲为能量除以电荷, 若能量以 GeV 为单位, 则刚度单位为 GeV/e 或十亿电子伏每电荷, 记作 GV。每单位核子能量对应的核子数目 (第 (3) 列) 在计算次级粒子 (如 μ 子、反质子和 π 介子等) 的通量时经常用到, 因为这些粒子实质上由核子-核子碰撞产生, 即便发生碰撞的核子被束缚在原子核中也一样 (虽然有些许原子核效应)。最后 (第 (4) 列), 每原子核的总能量与大气簇射相关, 因为簇射大小反映了入射粒子总能量。注意到以每原子核总能量分类时, 质子在宇宙线中所占份额还不到一半!

1.6 宇宙线能量密度

宇宙线被束缚在银河系中是因为带电粒子会与星际介质中的磁力线相互耦合。比较宇宙线能量密度和磁能密度可以看出这是合理的。宇宙线能谱和能量密度的关系可从通量和数密度 ρ_{CR} 的关系

$$\text{通量} \left(\frac{\text{粒子数}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr}} \right) = \frac{\rho_{\text{CR}} \beta c}{4\pi} \quad (1.1)$$

得到。因而能量密度为

$$\rho_E = 4\pi \int E \frac{dN}{dE} \frac{dE}{\beta c} = \int \frac{4\pi E^2}{\beta c} \frac{dN}{dE} d \ln E \quad (1.2)$$

之所以将积分进一步写成 (1.2) 式最右边的形式, 是为了使半对数图中被积函数下的面积正比于积分值。这对于呈现能量延伸几个数量级且急剧下降的能谱是非常有用的技巧, 同时也给出在此情形下进行积分运算的恰当方法。

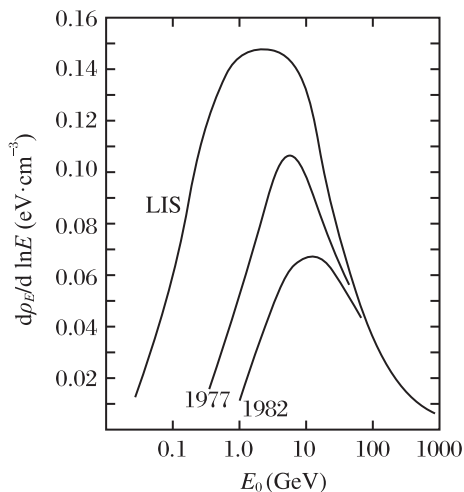


图 1.6 宇宙线能量密度分布 ((1.2) 式中被积函数)

注意我们在这里感兴趣的是银河系内的宇宙线能谱。由于太阳系的影响, 它不同于我们在地球大气层顶部观测到的宇宙线能谱。太阳吹出的等离子体星风携

带的磁场倾向于阻止低能银河宇宙线进入日球层。日球层是太阳风远强于背景等离子体的区域，它具体延伸到多远还不是很清楚，但肯定远大于地球轨道。太阳风强度随着 11 年的太阳活动周期变化，而地球上测得的宇宙线通量也呈现出与太阳活动的反相关性。图 1.5 中空心圆圈表示在某个太阳活动极小时 (例如 1977 年左右) 地球上测量的质子通量。在太阳活动剧烈时期 (如 1982 年)，1 GeV 以下的通量能够被压低一个量级以上。本地星际 (LIS) 介质中的宇宙线能谱可以通过太阳调制理论拟合不同时期的观测数据加以推断 (Evenson, 1988)，当然有较大的不确定性。

图 1.6 给出太阳活动极小和极大时在地球上测得的质子能量密度谱 ((1.2) 式中的被积函数)，以及推断出来的 LIS 结果。可以看出宇宙线携带的一半或者更多的能量并没有在地球上直接测量到。LIS 质子谱下的面积是 0.83 eV/cm^3 ，He 和其余重核的贡献 $\sim 0.27 \text{ eV/cm}^3$ 。这与 $B \approx 3 \text{ } \mu\text{G}$ 的典型银河系磁场具有的磁能密度 $\epsilon \approx 0.25 \text{ eV/cm}^3$ 相当。因此银河宇宙线和星际磁场之间相互影响便不足为奇。宇宙线可以影响磁场构型，反之亦然。

索引^①

- μ 子, 大气, 2
- μ 子电荷比, 62
- μ 子横向分布, 175
- μ 子束, 65
- π 介子化, 43
- A 近似, 25
- Akeno 大气簇射实验, 191
- Alfvén 半径, 143
- Alfvén 速度 (v_A), 100
- Chacaltaya 实验, 201
- EAS 阵列的接收度, 213
- EAS 中的涨落, 187
- Glauber 理论, 46
- Greisen 近似, 横向, 185,188
- Heitler 级联模型, 169
- Hillas 分割算法, 211
- Kolar 岩石, 66
- Molière 单位, 166
- NKG 公式, 188
- SHOWERSIM, 208
- UNICAS, 208
- 爱丁顿光度 (L_{edd}), 141
- 标度性, 21
- 标度变量, 20
- 标高, 28
- 标准岩石, 66
- 部分子截面 ($\hat{\sigma}$), 17
- 测试粒子近似, 130
- 产生谱 (\mathcal{P}), 31
- 超新星, 2
- 成分, 宇宙线, 2
- 垂直激波, 130
- 次级 / 初级比, 8, 97, 107
- 簇射极大, 163
- 大气, 1
- 大气簇射, 2
- 大气簇射实验, 24
- 大气中微子, 66
- 地磁截断, 85
- 地下实验, 65
- 叠加模型, 170
- 对产生, 13
- 多重 μ 子, 54
- 惰性, 184
- 反物质, 117
- 反质子 / 质子比, 118
- 反质子源函数, 108
- 非弹性度, 56
- 费米加速, 125
- 费米耦合常数, 91
- 辐射长度, 25

^① 本索引为原著索引, 部分词条不能在正文中找到对应文字, 需按内容对应索引词条。

- 伽马射线, 扩散, 97
伽马射线源函数, 108, 113
刚度, 8
各向异性, 104
核子谱, 110
基本解, 24
激波加速, 97
级联方程, 22
极化, 在 $\mu \rightarrow \nu$ 中, 76
加速率, 129
截面, 单举, 19
截面, 强子的, 14
截面, 原子核, 2
介子衰变常数 (ϵ_i), 95
夸克模型, 11
扩散系数 (D), 98
漏箱模型, 101
路程分布, 105
路径积分, 163
洛希瓣, 142
脉冲星风, 139
每电子最大能量, 133
每粒子最大能量, 131
迷你喷注, 48
秒差距 (pc), 99
内含 ν -事例, 82
年龄参数, 185
平行激波, 130
谱, 宇宙线, 2
谱加权矩 ($Z_{i,j}$), 26
千秒差距 (kpc), 99
切伦科夫望远镜, 149
倾斜深度 (X), 22
韧致辐射, 13
韧致辐射, μ 子, 64
乳胶室, 38
衰减长度, 25, 30
射程 - 能量关系, 90
受创核子, 171
深度-强度关系, 65
输运方程, 22
衰变谱 (\mathcal{D}), 32
双星, 2
瞬发 μ 子, 68
碎裂区, 19
太阳调制, 7
逃逸长度, 102
逃逸时间, 102
天鹅座 X-3, 145
停止 μ 子, 66
统一理论, 13
武仙座 X-1, 145
物质振荡, 87
吸积, 137
吸积盘, 78
相互作用长度 (λ), 22
信噪比, 166
赝快度 (η), 20
银河系, 参数, 1
银晕, 7
蝇眼实验, 57
宇宙线时钟, 102
源函数, 104
延伸率, 203
指数 (δ), 201
质子超出, 63
中微子, 大气, 2
中微子比, 89
中微子产生的 μ 子, 70
中微子截面, 91
中微子矩, 79
中微子振荡, 84
中心区, 20
中子星, 3
重加速, 102
纵向, 19

部分短语汉英对照表

B

本地起源 local origin, 72
本地星际 local interstellar, LIS, 10
标高(均匀大气高度) scale height, 28
标度(标度性) scale (scaling), 19
波后气体 shocked gas, 127
波前气体 unshocked gas, 127

C

粲夸克 charm, 33
测试粒子 test particle, 130
产额函数 yield function, 168
产生谱 production spectrum, 31
潮汐突起 tidal bulge, 142
朝前碎裂区 forward fragmentation region,
26
成流不稳定性 streaming instability, 130
成像乳胶 photographic emulsion, 38
冲击波 blast wave, 97
传播方程 propagation equation, 97
穿透成分 penetrating component, 58
簇射前锋面 shower front, 54
簇射极大 shower maximum, 163
D
大气簇射 air shower, 2

单举截面 inclusive cross section, 19
等效克重 grammage, 97
等效束流动量 equivalent beam momenta,
45
电磁级联 electromagnetic cascade, 25
电荷阈值 charge threshold, 3
叠加近似 superposition approximation, 24
定标 calibration, 164
动量中心系 center of momentum, CM, 19
对称产生参考系 symmetry system, 111
对产生 pair production, 13
惰性中微子 sterile neutrino, 85
多重散射 multiple scattering, 18

F

封闭银河系模型 closed galaxy model, 103
非弹性度 inelasticity, 56
分布式加速 distributed acceleration, 120
辐射长度 radiation length, 25

G

光图样 light pattern, 71
光池 light pool, 163

H

核碎裂 nuclear fragmentation, 73
黑盘极限 black disk limit, 46

- 横向扩展 lateral spread, 188
- 红外发散 infrared divergence, 179
- J**
- 激波波前 shock front, 127
- 级联方程 cascade equation, 22
- 集束 beaming, 152
- 基准质量 fiducial mass, 82
- 极高能 ultra-high energy, 5
- 简单部分子 simple-minded parton, 44
- 结构函数 structure function, 17
- 接收度 acceptance, 5
- 截止刚度 cutoff rigidity, 80
- L**
- 离散爆发 discrete burst, 64
- 量能器 calorimeter, 17
- 漏箱模型 leaky box model, 101
- M**
- 梅林变换 Mellin transform, 183
- 迷你喷注 minijet, 48
- 母 parent, 8
- N**
- 内含相互作用 contained interaction, 82
- 内含事例 contained event, 82
- 拟设 ansatz, 31
- P**
- 抛射粒子 projectile particle, 44
- 喷注 (粒子)/ 喷流 (天体) jet, 17
- 碰撞参量 impact parameter, 179
- 谱加权矩 spectrum weighted moments, 26
- Q**
- 嵌套漏箱模型 nested leaky box model, 103
- 强度 intensity, 10
- 强子核心 hadronic core, 162
- 强子级联 hadronic cascade, 38
- 侵蚀风 ablated wind, 146
- 倾斜深度 slant depth, 22
- R**
- 日球层 heliosphere, 10
- 软过程 soft process, 44
- S**
- 上行 (下行) 中微子 upward (downward) neutrino, 81
- 上游 / 下游 upstream/downstream, 127
- 射程歧离 range straggling, 65
- 甚高能 very high energy, 1
- 食双星 eclipsing binary, 157
- 束流 beam, 20
- 束流收集器 beam dump, 78
- 输运方程 transport equation, 22
- 衰减长度 attenuation length, 25
- 瞬发 prompt, 33
- T**
- 太阳调制 solar modulation, 7
- 通量 flux, 3
- 同重核子 π 介子化 isobar-pionization, 43
- 投射角散射 pitch angle scattering, 130
- W**
- 外部事例 external events, 92
- 味 flavor, 6
- 味表象 flavor representation, 86
- X**
- 膝 knee, 201
- 相互作用长度 interaction length, 22
- 响应曲线 response curve, 60
- 斜率参量 slope parameter, 47
- Y**
- 赝快度 pseudorapidity, 20
- 延伸率 elongation rate, 203
- 隐蔽源 shrouded source, 121
- 蝇眼实验 Fly's Eye experiment, 57

约化能量 scaled energy, 75

晕 halo, 7

运动学 kinematic, 20

Z

占空比 duty cycle, 152

遮挡效应 shadowing, 46

正规解 normal solution, 30

终端激波 termination shock, 136

中心坪 central plateau, 53

柱密度 column density, 28

转移函数 transfer function, 168

子簇射 subshower, 149

“十三五”国家重点图书出版规划项目

《物理学名家名作译丛》

半导体的故事/姬 扬

粒子物理和薛定谔方程/刘 翔 贾多杰 丁亦兵

粒子探测器/朱永生 盛华义

光的故事/傅竹西 林碧霞

粒子天体物理/来小禹 陈国英 徐仁新

夸克胶子等离子体/王 群 马余刚 庄鹏飞

统计力学的基本原理/毛俊雯 汪秉宏

地球与行星科学中的热力学/程伟基

临界现象的现代理论/马红孺

生物医学光学:原理和成像/邓 勇 江 旭 洪 烨 骆清铭

材料的透射电子显微学与衍射学/吴自勤 石 磊 何 维 张庶元

物理学中的理论概念/向守平 郑久仁 朱栋培 袁业飞

物质、暗物质和反物质/罗 舒 邢志忠

宇宙线和粒子物理/袁 强 康明铭 余钊焕 冯 磊

现代晶体学(1):晶体学基础:对称性和结构晶体学方法/吴自勤 孙 霞

现代晶体学(2):晶体的结构/吴自勤 高 琛

天猫 Tmall.com



中国科大出版社旗舰店

搜索