

〔苏联〕Л. И. 多尔曼 著

宇宙线天体物理学实验 和理论基础

科学出版社



宇宙线天体物理学实验 和理论基础

[苏联] Л. И. 多尔曼 著

周志文 朱邦耀 周定伍 译

郭自强 王 水 校



874074

内 容 简 介

本书介绍了宇宙线天体物理学的基本理论和实验方法,总结了近年来在这一领域的研究进展。全书共八章,第1—4章为基本理论,第5、6章为实验基础,第7、8章为统计方法,本书可供从事宇宙线物理、天体物理、地球物理、太阳物理、宇宙等离子体物理方面的科研工作者及高等院校有关专业师生参考。

Л. И. Лорман
Экспериментальные
и теоретические основы
астрофизики космических лучей
Издательство «НАУКА», 1975

宇宙线天体物理学实验 和 理 论 基 础

[苏联] Л. И. 多尔曼 著
周志文 朱邦耀 周定伍 译
郭启强 王 水 校
责任编辑 侯建勤

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1982年5月第1次印刷 开本: 787×1092 1/32
1982年5月第一次印刷 印张: 20 1/4
印数: 0001—1,350 字数: 496,000

统一书号: 14014·150

本社书号: 4102·1—1

定价: 4.75 元

译 序

随着宇航技术的发展,近年来人们对宇宙天体研究的兴趣与日俱增,宇宙线粒子具有广阔的能量范围,各类宇宙线粒子携带着河际空间、银河系、太阳及近地空间环境的许多信息,因此它是研究宇宙天体及远地空间环境的重要手段。“宇宙线天体物理学”是近年来迅速发展起来的一门新兴学科,它是宇宙线物理学、天体物理学、地球物理学、太阳物理学和宇宙等离子体物理学等学科之间的一门边缘学科。《宇宙线天体物理学实验和理论基础》一书总结了这一重要领域所取得的成果,不仅扼要介绍了本学科的基本理论,尤其较系统地介绍了宇宙线天体物理的实验方法。书中内容理论与实验兼顾,是一本内容丰富的专著。

本书俄文版出版于1975年,次年美国宇宙航行局即将它译成英文出版。在译成中文时,我们以俄文版为主,参照了英译本内容。

本书第一、二、三、六章由周志文翻译,第四、五、八章由朱邦耀翻译,第七章由周定伍翻译。全书译稿由周志文进行了整理。译稿第一、二、三、五、六、七章由郭自强校订,第四、八章由王水校订。

由于水平有限,时间仓促,难免有不妥和错误之处,敬请读者指正。

译 者

前 言

在宇宙线物理学中,我们很容易划分出两个基本方向:核物理方向和天体物理方向。前者研究宇宙线与物质的相互作用,基本粒子的性质及其相互作用;后者研究初级宇宙线的能谱、电荷和同位素的组成,银河系和河外星系中宇宙线的产生和传播,宇宙线的时间变化,宇宙线与地球磁层、太阳风、激波以及行星际空间各种扰动的相互作用,宇宙辐射的捕获,太阳宇宙线的产生和传播,银河宇宙线和太阳宇宙线的气象效应、电离层效应及其它地球物理效应。随着加速器技术的发展,核物理方向的应用逐渐移向高能。天体物理方向有类似的趋势:随着用宇宙线为工具对邻近空间深入研究以及在卫星和火箭上进行直接测量,天体物理方面的重心逐渐移向更远的宇宙天体。从这个意义上说,利用宇宙线所得到的科学结果,通常具有先驱探索的性质。而且它对核物理、天体物理、太阳物理及地球物理的发展都有着重要的意义。

图1列出了现阶段宇宙线天体物理研究的主要方向、它们之间的相互联系和所研究现象的一览表。高能(10^7 — 10^{10} 电子伏)宇宙线带电粒子在银河磁场中的曲率半径可能大于或者近于我们银河的尺度(还有宇宙辐射中不受磁场影响的 γ 射线和中子)。这些带电粒子携带着星际空间及远空的环境资料。而低能粒子(10^{11} — 10^{15} 电子伏)则携带着银河系性质的信息。宇宙线不仅是空间环境的信息源,而且具有高的能量密度(与行星际磁场的能量密度、运动等离子体的动能密度相比),这对银河系动力学(特别在晕物理中)、超星体和类星体射电源的爆发过程以及脉冲星的磁球层等方面都起着重要的作用。更低能量的粒子,既易受行星际空间磁场的影响,也易受近地周围电磁过程的直接影响。最后,能量为几百兆电子伏到几十亿电子伏的起源于太阳的粒子流,对于在太阳大气中发生的过程(太阳宇宙线在这里产生),对于太阳日冕和超日冕、行星际空间、地球的磁球层和电离层(它们在其中传播)中的过程都将提供有价值的资料。因为太阳宇宙线的能量密度与太阳大气层中太阳等离子体的动能密度、磁能密度和其它能量密度相近,所以这些粒子在太阳各种过程中显然起着重要作用。宇宙线在地球大气层、陨石、宇宙尘埃中产生稳定和不安定同位素(所谓宇宙同位素)方面,以及在引起电离层高层(尤其是D层)的电离方面的作用也是确定无疑的了。

大约十年以前“宇宙线天体物理”这个词才第一次出现在文献^[1]中。宇宙线天体物理是一门快速发展的学科,它是宇宙线物理、天体物理、地球物理、太阳物理和宇宙等离子体物理等门学科之间的一门边缘学科。宇宙线天体物理学的最初基础是一些专题论文(包括理论和实验)。这些论文讨论了快速粒子与宇宙等离子体的相互作用;核的与电磁的相互作用和分裂;受磁场的散射,加速和减速,宇宙线粒子对等离子体状态的反作用,宇宙线传播的理论描述问题,能谱和电荷谱组成,强度的时间和空间变化及宇宙线的各向异性等(本书第一至四章)。

本书第五章和第六章是从天体物理观点叙述近期研究宇宙线的直接和间接实验方法。现在已经在许多人造地球、月球卫星以及在向太阳和远离我们的行星发射的深空火

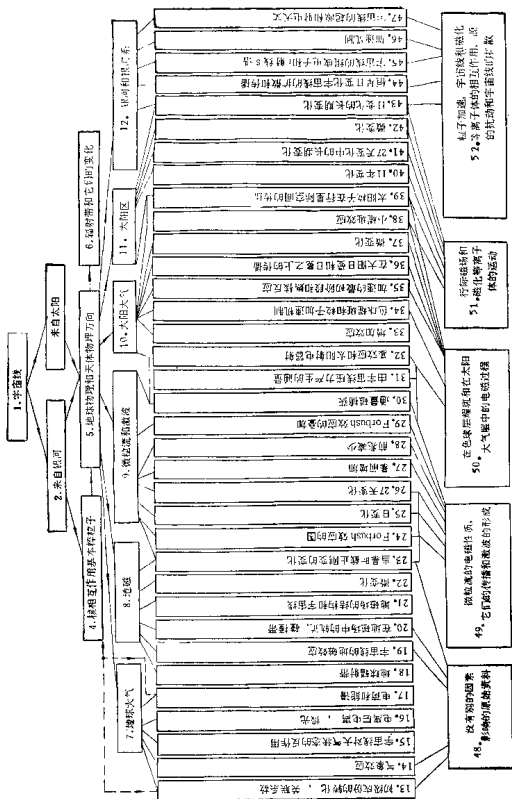


图 01 字谱线天体物理研究的方框图

箭上连续测量宇宙线的通量、成分和能谱。在空间的测只从根本上开辟了直接研究下列问题的新的可能性：如能谱、电荷谱、同位素组成；在很宽的能量范围内银河宇宙线和太阳宇宙线的空间分布和时间变化。在研究宇宙线的宇宙物理的课题方面，地面观测过去是不可缺少的基础，现在仍然如此，亦即装备有超中子堆、计数管和闪烁体望远镜，用来记录广延大气簇射的仪器以及可放在气球和地球物理火箭上进行测量的仪器的世界范围的宇宙线台站网和实验室。大约四十年以前就开始建立连续记录宇宙线的台站网，现有台站已达 150 个之多，它遍布六大洲，有的还建立在航行于世界海洋的一些船队上。在一年中的任何时刻，这些台站都日以继夜地仔细跟踪来自不同天区、不同能量范围的宇宙线强度变化。研究宇宙线的间接方法也很有希望。它们包括：对大气层中各种半衰期同位素的含量进行测量（特别是广泛应用的放射性 C¹⁴ 方法）；测量陨石、月球样品、宇宙尘埃的同位素含量；从低电离层的扰动来间接研究宇宙线等。用宇宙线同位素方法，我们获得了广阔空间和遥远过去的宇宙线重要资料。电离层方法能够告诉我们关于太阳宇宙线通量和能谱的时间变化以及地球磁层的变化等。

本书第七、八章还讨论了从宇宙线的观测中提取天体物理信息的理论方法。它包括统计方法、观测资料的自动处理以及初级和次级宇宙线之间关联系数方法等问题。

最后我利用这个机会对 С. И. Вернов, В. Л. Гинзбург, Е. Л. Фейнберг 表示深深的谢意，感谢他们对这项工作不断的关心。М. Е. Кац 和 Г. Б. Христиансен 仔细审阅原稿，并提出了宝贵意见，在此一并致谢。

作 者

目 录

前言.....	ix
第一章 空间宇宙线和它们的相互作用.....	1
§ 1 宇宙等离子体的特性	1
§ 2 宇宙辐射——信息源	3
2.1 初级宇宙线的能量和核组成	3
2.2 宇宙线的时间变化和起源问题	5
2.3 宇宙线通过地球大气层, 关联系数和气象效应	7
2.4 地磁场对宇宙线的影响	8
§ 3 宇宙线和空间物质的相互作用	9
3.1 宇宙线碎裂	9
3.2 核相互作用形成次级粒子	10
3.3 固态物质(星体、行星、星状云、陨石和尘埃)对宇宙线的吸收	10
3.4 通过宇宙空间的宇宙辐射核子的电离能量损失	11
3.5 电子的电离和韧致辐射损失	12
§ 4 宇宙线与光子场的相互作用	13
4.1 核和光子场的相互作用	13
4.2 电子与光子场的相互作用	13
§ 5 与磁场相互作用时宇宙线能量的变化	13
5.1 宇宙辐射粒子在磁场中引起的磁致辐射能量损失	13
5.2 与运动磁场相互作用时粒子的加速和减速	14
§ 6 宇宙线粒子在磁场中的运动和非均匀磁场对它们的散射	15
6.1 宇宙线粒子在冻结于运动等离子体中的规则磁场中的运动	15
6.2 简单形式的非均匀磁场下宇宙线粒子散射的初级模式	15
6.3 单一尺度孤立磁云型非均匀磁场散射时的输运自由程	19
6.4 多尺度非均匀磁场散射时粒子的输运自由程	19
6.5 云型磁非均匀场连续谱粒子散射时的输运自由程	21
6.6 某些简单模式的非均匀场散射对粒子输运自由程	23
6.7 在非均匀场中考虑漂移时粒子散射的输运自由程	26
6.8 存在规则背景场散射时粒子的输运自由程	26
§ 7 宇宙线的磁捕获	27
7.1 存在非均匀场时规则磁场的捕获	28
7.2 非规则磁场的捕获	32
7.3 混合型捕获	33
7.4 捕获区的力学性质和捕获辐射的强度变化	34
§ 8 宇宙线对外空环境的影响	35
8.1 宇宙线对磁化等离子体施加的压力	35

8.2 宇宙线对磁化等离子体结构的可能影响	35
8.3 低能宇宙线粒子使宇宙等离子体电离和加热	36
第二章 宇宙线传播	37
§ 9 用动力学方程描述宇宙线的传播	37
9.1 磁场涨落现象	37
9.2 弱规则场和各向同性无规场下的动力学方程	39
9.3 等离子体速度涨落时宇宙线传播的动力学方程	40
9.4 考虑等离子体的无规则电场时宇宙线传播的动力学方程	40
9.5 在弱湍动的磁化等离子体中(其中有强规则场和 Alfvén 振荡)宇宙线传播的动力学方程	41
9.6 在动量空间的扩散	44
9.7 低能宇宙线的各向异性传播	46
9.8 扩散近似	48
9.9 宇宙线在行星际传播时的涨落现象	49
§ 10 各向异性扩散近似	53
10.1 一般方程的推导	53
10.2 银河臂中的传播情况	53
10.3 行星际空间的传播情况	54
10.4 各向异性扩散近似的应用范围	58
第三章 宇宙线加速机制	59
§ 11 统计加速机制	59
11.1 粒子与运动磁云相碰撞的 Fermi 统计加速机制	59
11.2 重核的注入和优先加速问题	60
11.3 加速粒子谱	62
11.4 等离子体湍流的加速机制	63
§ 12 规则加速机制	66
12.1 感应加速机制	67
12.2 激波引起的加速机制	67
12.3 磁捕获区崩溃的粒子加速	67
12.4 靠近磁场零线的累积加速机制	71
§ 13 在各种宇宙天体中宇宙线的加速	74
13.1 太阳上击波对粒子的加速	74
13.2 太阳上等离子体湍动对粒子的加速	74
13.3 太阳上磁场耗散机制引起的粒子加速	75
13.4 在行星际空间太阳宇宙线的附加的统计加速	76
13.5 捕获区中在太阳上被加速粒子的迁移和在行星际空间介质粒子的加速	76
13.6 在超新星爆发时激波对宇宙线的加速	78
13.7 脉冲星旋转时宇宙线的加速	79
§ 14 在源中宇宙线谱的形式	82
14.1 根据实验资料划分宇宙线的类型	82
14.2 $D(F_R) \propto F_R^{-\gamma}$ 类型谱的形式	82
14.3 $D(R) \propto R^{-\gamma}$ 类型谱的形式	82

14.4	$D(R) \propto e^{-R/R_0}$ 类型谱的形式	83
14.5	当加速粒子和外部磁场之间压力相等时的宇宙线谱	83
第四章 宇宙线变化——研究空间的一种方法		85
§ 15	宇宙线变化研究的简史	85
15.1	宇宙线变化研究历史中的五个时期	85
15.2	第一期(1926—1935年)	86
15.3	第二期(1936—1950年)	86
15.4	第三期(1951—1956年)	87
15.5	第四期(1957—1963年)	90
15.6	第五期(1964年开始)	90
§ 16	苏联宇宙线变化的研究情况	91
§ 17	宇宙线变化的基本概念和分类	92
17.1	研究宇宙线变化中的困难和克服它们的途径	92
17.2	不考虑相互干涉效应时宇宙线变化的基本概念和分类	93
17.3	宇宙线变化的类型	93
§ 18	考虑各种效应可能相互干涉时变化的分类	96
§ 19	宇宙线的地球变化性质	98
19.1	两类宇宙线的地球变化	98
19.2	大气起源的宇宙线变化性质	98
19.3	地磁起源的宇宙线变化性质	99
§ 20	宇宙线地球外变化的性质	100
20.1	地球外变化的三个亚类	100
20.2	第一亚类——在行星际空间中银河宇宙线的调制	102
20.3	第二亚类——太阳宇宙线的产生和传播	103
20.4	第三亚类——银河起源的变化	104
第五章 测量宇宙线的变化、能谱和核组成的直接方法		105
§ 21	世界台站网、人造卫星和火箭是宇宙线天体物理的实验基础	105
21.1	连续记录的主要要求	105
21.2	实验方法及其特性	105
21.3	仪器的全球分布情况和观测台站的地磁截止刚度	107
21.4	世界台站网的渐近方向	108
§ 22	计数管望远镜	109
22.1	计数管望远镜的特点	109
22.2	用作连续记录的计数管	110
22.3	计数管望远镜的电子线路	114
22.4	计数管望远镜的各种几何形状	117
22.5	供给计数管的高压电源	124
22.6	计数管望远镜中自动记录宇宙线爆发的装置	125
22.7	计数管望远镜工作的自动监督	126
22.8	排除宇宙线望远镜中的漏计数和偶然符合	126
22.9	计数管望远镜的方向阈	127
22.10	宇宙线介子探测器的方向性质	128

§ 23 利用闪烁探测器连续记录宇宙线强度	131
23.1 闪烁探测器的优点	131
23.2 用塑料闪烁体作为带电粒子的探测器	131
23.3 应用液体闪烁体的可能性	132
23.4 闪烁记录器的电子线路	133
23.5 实际塑料闪烁体宇宙线记录器	134
23.6 闪烁望远镜的方向图	135
§ 24 连续记录高能粒子通量的大型切伦科夫塔形计数器望远镜	136
§ 25 记录中子成分的方法	138
25.1 宇宙线中子成分的上要性质	138
25.2 中子探测器的类型和特性	138
25.3 局部产生中子的探测器(中子堆)	139
25.4 Simpson 型中子堆的改进	141
25.5 气压的自动记录	141
25.6 超中子堆	142
25.7 用闪烁体和充以 He^3 的计数管连续记录中子成分的可能性	143
25.8 中子堆对各种次级宇宙线成分的灵敏度	143
25.9 中子堆的方向图	144
25.10 记录中子的增殖倍数	145
25.11 在小中子堆和超中子堆中记录中子增殖倍数的仪器	147
25.12 宇宙线中子谱仪	149
25.13 为同时记录中子和 μ 介子成分的全套仪器(中子堆-望远镜)	150
25.14 记录中子的增殖倍数时仪器误差的消除	151
§ 26 研究广延大气簇射频率变化的实验	154
§ 27 用气球和飞机研究宇宙线在平流层内的变化	156
27.1 利用飞机研究宇宙线变化	156
27.2 用气球在平流层内记录宇宙线强度变化	156
27.3 在气球上研究核组成和不同粒子能谱变化的装置	157
27.4 在气球上对强离子化粒子采用聚合物探测器 ^[187]	158
§ 28 用地球物理宇宙火箭以及人造卫星研究宇宙线变化	159
28.1 在地球物理火箭上记录宇宙线的实验	159
28.2 在宇宙空间测量电子、质子、 α 粒子和 γ 射线总强度的方法	159
28.3 在火箭和人造地球卫星上研究核子通量的时间变化	162
28.4 在卫星上研究高能范围宇宙线能谱和变化的仪器	163
第六章 宇宙线天体物理间接测量方法	165
§ 29 用陨石方法研究宇宙线	165
29.1 同位素方法	165
29.2 根据同位素资料确定宇宙线时空变化的方法	166
29.3 计算结果和由陨石同位素得到的模型	167
29.4 化石轨迹法	168
29.5 根据星际尘埃的放射性研究宇宙线变化的可能性	169
29.6 根据月球样品的径迹和宇宙同位素的相对含量来研究地球附近宇宙线变化的可能	

性	170
§ 30 用地球上形成的同位素来研究宇宙线变化的方法	170
30.1 在大气层中宇宙同位素的形成	170
30.2 大气层中宇宙同位素形成速率局部变化的基本方程	171
30.3 宇宙同位素的行星生成速率	173
30.4 用放射性碳方法研究宇宙线变化	174
30.5 研究宇宙线变化的新方法	178
§ 31 利用宇宙线与电离层的作用以及射电天文的方法来研究宇宙线	178
31.1 1956年2月23日低电离层反常电离和用射电方法研究宇宙线的实例	179
31.2 计算由太阳宇宙线引起的低电离层离化	183
31.3 用噪声探测仪测量极盖吸收作为研究宇宙线的方法	184
31.4 银河宇宙线对低电离层的影响	185
31.5 在太阳宇宙线的影响下离子形成速率的数值计算	186
31.6 地磁场变化时离子形成速率的变化	191
31.7 解逆问题的方法: 从电离层资料确定太阳宇宙线的谱和地磁刚度	195
31.8 对于电离层方法的分析表达式	197
31.9 通过无线电波偏振面的旋转记录太阳宇宙线电子成分的可能性	200
31.10 在地磁场中通过磁制辐射发现太阳电子流的可能性	200
第七章 宇宙线天体物理的统计方法	201
§ 32 宇宙线通量的统计性质、观测误差、统计关系及其分类	201
32.1 宇宙线变化是一定的规律性和偶然作用的综合表现	201
32.2 实验资料的误差	202
32.3 资料的平均	204
32.4 宇宙线变化现象分类	208
§ 33 解析相关法	209
33.1 两变量间的直线相关	211
33.2 多变量的线性相关	214
33.3 局部相关	214
33.4 非直线相关	215
33.5 采用抛物线相关法确定宇宙线强度的极值位置	216
§ 34 周期性关系的判别和研究	217
34.1 统计周期分析法	217
34.2 谐波分析	218
34.3 谐波周期分析法	222
§ 35 周期函数和非周期函数的鉴别	224
35.1 时间叠加法	225
35.2 判定重现性趋势	225
35.3 滑动平均法	226
§ 36 观测资料的滤除和可靠性的确定	227
36.1 滤除法	227
36.2 确定资料可靠性的方法	228
§ 37 观测资料的计算机处理	229

37.1	宇宙线观测资料 and 检测参数的编码系统	229
37.2	抽样检测	230
第八章 关联系数法(从观测到的次级宇宙线变化确定初级变化)		232
§ 38	关联系数法的基础	232
38.1	各种宇宙线记录情况下的关联系数	232
38.2	根据地磁效应确定关联系数	235
38.3	地下测量的关联系数	237
38.4	广延大气簇射关联系数的确定	240
§ 39	根据不同类型的实验资料确定关联系数	243
39.1	利用有关宇宙线变化的资料确定关联系数	243
39.2	根据地磁效应确定关联系数	245
39.3	根据地磁效应资料用中子堆测量的关联系数	247
39.4	介子和游离子成分方向测量的地磁效应和关联系数	250
39.5	平流层中测量的关联系数和增殖倍数	252
§ 40	关联系数随太阳活动性的变化及该法应用的某些实际问题	254
40.1	随太阳活动性的改变关联系数的变化	254
40.2	确定初级变化的某些实际问题	254
40.3	仪器的全球校验和从地面台站网的资料决定初级变化	257
40.4	用大气吸收方法测量宇宙线变化	258
§ 41	高能区的增殖倍数和关联系数	260
41.1	与高能区外推关联系数有关的可能误差	260
41.2	对于中子成分的增殖倍数和关联系数的计算	261
41.3	用外推法估计倾斜 μ 介子通量的增殖倍数和关联系数	262
41.4	在不考虑产生面的涨落和假设产生的 π 介子之间的能量均分情况下增殖倍数的近似计算	263
41.5	考虑初级作用中 π 介子的产生谱、 μ 介子的衰变谱和产生高度的混溶性后, 计算 μ 介子增殖倍数	268
41.6	μ 介子成分在 高能区的关联系数 ^[21]	273
41.7	μ 介子成分倾斜测量的关联系数(一维近似)	274
41.8	地下 μ 介子望远镜对初级粒子的灵敏度	275
41.9	考虑次级粒子产生的三维初级模型的关联系数	277
41.10	用非寻常的 Markov 过程方法计算宇宙线中子成分的增殖倍数、关联系数和部分气压系数	282
§ 42	在超高能区域按广延大气簇射数据得到的次级成分的增殖倍数	286
42.1	在超高能区域增殖倍数的理论计算	286
42.2	在超高能区域电子-光子成分增殖倍数的实验数据	288
42.3	在超高能区域 μ 介子增殖倍数的实验数据	288
42.4	在超高能初级粒子情况下核子的增殖倍数	289
附录 关系函数方程的推导		290
参考文献		293

第一章 空间宇宙线和它们的相互作用

宇宙线在产生和传播过程中与宇宙等离子体发生强烈的相互作用。在这里,不只是宇宙等离子体对宇宙线有很大影响,而且反过来,宇宙线也强烈影响宇宙等离子体的结构和行为。快速粒子可以说是宇宙等离子体主要特征之一。本章第1节研究宇宙等离子体的特性,第2节研究初级宇宙线的性质、能谱、核组成以及它们与地球大气层、磁球层的相互作用。正如前言中所指出的,宇宙线中的许多天体物理效应是由于空间存在各种过程,它引起宇宙线的产生、加速(或阻尼)、核组成的变化和散射。运动的磁化等离子体和充满宇宙的各种辐射,对宇宙线也发生类似的作用。了解这些过程的物理性质,有助于我们从观察到的效应获得空间现象的间接知识。首先,我们研究宇宙线与空间物质相互作用的问题(§3),然后研究宇宙线与各种辐射的相互作用问题(§4),宇宙线与磁场作用时能量的变化问题(§5),各类非均匀场对粒子散射机制问题,散射迁移的平均自由路程问题(§6),在不同类型的磁捕获区中粒子的行为问题(§7)。最后,我们研究宇宙线对磁化等离子体的反作用问题,特别是宇宙线的压力问题,宇宙线引起等离子体的离化和加热问题以及各向异性流引起的等离子体非稳定激发问题(§8)。

§1 宇宙等离子体的特性

宇宙等离子体通常是强电离的气体,其中粒子之间的主要作用是库仑相互作用。

宇宙等离子体的 Debye 特征半径(以厘米为单位)

$$r_D = (\kappa T / 4\pi N e^2)^{1/2} \approx 6.9(T/N)^{1/2} \quad (1.1)$$

(这里 T 是以 $^{\circ}\text{K}$ 为单位的等离子体温度, N 是粒子浓度,以 厘米^{-3} 为单位)比系统的特征尺度小许多量级。例如在太阳风中 ($T \leq 10^6 \text{K}$, $N \approx 1 \text{厘米}^{-3}$) $r_D \lesssim 2 \times 10^3$ 厘米。在太阳日冕中 $r_D \leq 10$ 厘米。在星际介质中 $r_D \lesssim 10^3$ 厘米等等。在这种意义上,我们可以说宇宙气体是具有通常特性的等离子体。然而宇宙等离子体还具有一系列特殊的性质,它们在粒子加速过程中起决定性的作用(Сыроватский^[1], Цытович^[2])。这些性质如下:

1. 与通常实验室等离子体不同,在宇宙等离子体中,一些熟知的耗散过程,如粘性和欧姆电阻起着次要的作用(或者通常可以略去)。这里,很好地满足‘冻结’磁场条件。实际上,在多数场合,宇宙等离子体几乎是完全电离的氢。对于这种类型的等离子体,电导率是

$$\sigma = 2 \times 10^7 T^{3/2}, \quad (1.2)$$

磁粘性系数为

$$\nu_m = c^2 / 4\pi\sigma = 4 \times 10^{12} T^{-3/2}, \quad (1.3)$$

对尺度为 L 的磁场,欧姆耗散的时间(以秒为单位)是

$$t_\sigma = L^2 / \nu_m = 2.5 \times 10^{-13} L^2 T^{3/2}. \quad (1.4)$$

对于星际空间的非均匀等离子体 ($T \sim 10^5 \text{K}$, $L \geq 10^9$ 厘米) $t_\sigma \geq 10^{13}$ 秒。对于太阳黑

子附近的过程 ($T \sim 6 \times 10^{10} \text{K}$, $L \sim 3 \times 10^9$ 厘米) $t_0 \sim 10^{12}$ 秒。在星际空间 ($T \sim 10^{40} \text{K}$, $L \geq 10^{15}$ 厘米) $t_0 \sim 10^{20}$ 秒 $\sim 3 \times 10^{12}$ 年。在超新星爆发中 ($T \geq 10^{10} \text{K}$, $L \geq 10^{12}$ 厘米) $t_0 \sim 3 \times 10^{17}$ 秒 $\sim 10^{10}$ 年等等。在宇宙条件下,相应过程的特征时间,至少增加几个量级,而在有些情况下,它比人类历史还长。

2. 在多数情况下,宇宙等离子体可以看成是无碰撞的。实际上,在完全电离的氢等离子体中,离子的平均自由程(以厘米为单位)是

$$\lambda_i = 2 \times 10^4 T^2 N^{-1}, \quad (1.5)$$

例如,太阳风 ($T \sim 10^5 \text{K}$, $N \leq 10$ 厘米 $^{-3}$) 的 $\lambda_i \geq 2 \times 10^{11}$ 厘米。这就意味着,我们可以忽略与粒子碰撞有关的耗散过程。

3. 通常,宇宙等离子体是受激励的磁湍流等离子体,它具有强烈的微观集团运动。等离子体激励源是星体的爆发,其它可能的激励源还有银河核心(在银河中)的爆发,引起磁场的热对流(在太阳上以太阳黑子形式出现),非均匀的太阳风流通过磁场(地球磁球层)等等。大尺度的运动在等离子体中引起电流和电磁场,最后导致粒子加速。

4. 粒子加速、电磁辐射、产生和增强磁场是宇宙等离子体动能转化的主要途径(图 1.1)。若以密度 ρ 和速度 u 描述动能,则磁场增至平衡值 H 可由下述关系确定:

$$\frac{H^2}{8\pi} = \frac{\rho u^2}{2}, \quad (1.6)$$

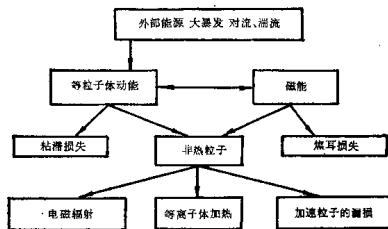


图 1.1 在空间等离子体中能量转化的途径(引自 Сыроватский 的工作^[11])

5. 骤然看来,在宇宙等离子体中粒子加速现象严重违背热力学第二定律。实际上,由于宇宙等离子体加速过程显然是非平衡态:热等离子体加上小量的加速粒子,后者的能量密度等于甚至大于热等离子体的能量密度。然而,正如 Сыроватский 在文献[1]中所提出的,在这里并无任何矛盾,问题在于粒子发生加速的时间比宇宙等离子体热弛豫时间短很多。因此,这个系统实际上离热力学平衡态很远。从统计学上说,粒子的分布在高能区具有一个翘起来的尾巴是有利的。这就是说,在实际上,加速过程是宇宙等离子体变到一个统计学上最可几的状态,也就是(与热力学第二定律完全一致)具有熵最大状态。

空间加速过程的实质在于,个别加速粒子相互作用并立即和等离子体粒子集团交换能量。由于在宇宙等离子体中常常存在电场和磁场,加速是一个受电场磁场影响的集体

过程。所有加速过程可以分为两大类：一类是统计加速机制，由于其中有大量能量的获得和损失，粒子能量增加只是平均而言，另一类是规则加速机制，其中粒子能量是单调增加（见第三章）。

§2 宇宙辐射——信息源

2.1 初级宇宙线的能量和核组成

在银河系以致整个宇宙，宇宙线起着重要的作用：它们的能量密度与运动等离子体的动能密度、磁能密度以及星光辐射能量密度相近。当合成反应出现在星体内部时，从轻核形成重核。而在宇宙线中发生相反的过程，即从重核形成轻核。只是对于星体附近，在那里其它形式的能量密度急剧增加，宇宙线的作用才有所下降。对于大多数过程来说，如前所述，宇宙线的作用是很大的。

宇宙线的能谱和核组成在空间和时间上都不是恒定的。首先，随着与星体的接近，宇宙线性质有显著变化，而且它还是银河系位置的函数。例如有许多证据表明，逐渐靠近太阳，银河宇宙线强度随时间发生显著变化——能谱和核组成出现不同类型的时间变化。此外，严格说来，宇宙线流也并非各向同性。由于地球的旋转，这种空间各向异性引起了宇宙线的日变化。实际上，在能量 $\geq 10^{10} - 10^{11}$ 电子伏时，所有这些变化都很小。因而在这个能量范围内，当我们说到地球附近的能谱和核组成时，它是具有确定意义的。但在较小的能量时，宇宙线受太阳活动的影响很大，所以当我们说到某一资料时，必须指出它的时间期间。在很小的能量范围内（ ≤ 1 千兆电子伏），我们观察到特别剧烈的变化。在这种能量范围内，低能粒子通量几乎随太阳活动性变化 10 倍。因此，对于这个能量范围，当说到宇宙线的强度、能谱、核组成的某一平均值时，显然没有任何意义。此外，在太阳耀斑和磁暴期间，上面所指出的宇宙线特性都发生重大变化。

在第四至第十四节我们将仔细讨论这些重要问题，这里我们只给出初级宇宙辐射中（每个核子的能量 > 2.5 千兆电子伏）比较稳定部分的数据。

表 2.1 在宇宙线中和宇宙中元素的分布

组	Z	粒子强度 I (米 ⁻² ·球面度 ⁻¹ ·秒 ⁻¹)	I/I_H	
			宇宙线中	宇宙中
P	1	1300	520	6830
α	2	88	35	1040
L	3—5	1.9	0.76	10^{-2}
M	6—9	5.6	2.24	10.1
H	≥ 10	2.5	1	1
VH	≥ 30	0.7	0.28	0.05

表 2.1 (引自文献 [3]) 给出了初级宇宙线的核组成资料，这些资料中质子 (p) 和氦核 (α) 的通量是在太阳活动最小时期，也就是宇宙线强度最大时期。在能量大于 2.5 千兆电子伏范围，这些粒子的总通量随着太阳活动周期大约变化 30%。至于重核粒子通量，它们的测量精确度一直很低，无论对于任何太阳时期，准确确定它都没有意义（这里将不同

时期的资料放在一起)。为了进行比较,在同一表中给出了宇宙中核子含量的相对分布^[4] I/I_H (H 组相对于重核)。表 2.1 指出,平均说来,宇宙线中的氢比宇宙中氢要少得多[如果我们把核子流和它们在自然界的丰度与超重核流(VH 按表 2.1)联系起来,这个差别就更为明显]。一个重大的差别还表现在如下事实:假设在宇宙中没有 Li, Be 和 B 核($Z=3-5$),但在初级宇宙线中它们确有可探测的含量。出现这些差别的原因与宇宙粒子产生机制的特点(重核的优先加速)有关,也与它们在银河系的传播特性有关(当重原子核与星际物质相互作用时,从重核形成了轻核)。大约在十年以前,曾获得在宇宙线中存在着初级电子这一重要结果^[5,6]。按照这些资料,能量大于 1 千兆电子伏的电子流大约占宇宙线总通量的百分之一(这与宇宙线起源的射电天文理论^[7]的预计很相符)。根据在同步辐射和高能粒子碰撞中不稳定核的 α 和 β 衰变,文献 [8,9] 对初级 γ 射线通量作了估计,同时还得到了 γ 射线通量的首次实验资料。

现在转向研究初级宇宙辐射的能谱。在能量 $E \geq 2.5$ 千兆电子伏/核子(以后章节中 E 表示总能量, E_K 表示动能)直到能量为 $\sim 3 \times 10^{15}$ 电子伏范围, A 组核子强度的积分谱可以表示成简单的幂公式:

$$I_A(>E) = K_A E^{-\gamma+1}, \quad (2.1)$$

这里 $I_A(>E)$ 是每秒、每平方米、每球面度内的粒子,在表 2.2 中列出了 K_A 和 γ 的值。

从表 2.2 我们看到,对于不同的电荷组, γ 是相同的并接近于 2.5。正如已经指出的,

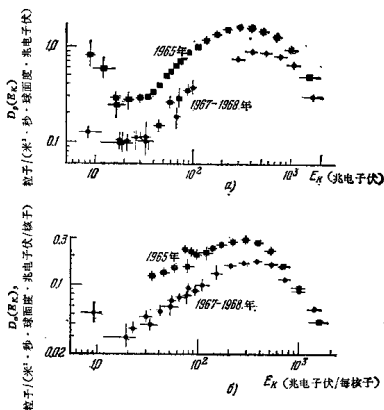


图 2.1 微分能谱 $D(E_K)$

a) 质子, b) α 粒子。测量是在空间装置 OGO-4, IMP-3, IMP-4, Pioneer-8 和 1965 年气球上进行的(正方形)以及 1967—1968 年期间观测结果(圆形)