

聚变研究物理

[日] 菊池满 著

四川大学等离子体物理研究室 译

核工业西南物理研究院 校



科学出版社

聚变研究物理

〔日〕 菊池满 著

四川大学等离子体物理研究室 译
核工业西南物理研究院 校

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是原作者根据在等离子体研究领域 25 年来的科研经历,从基础等离子体理论出发编写的一本等离子体研究专著。本书在讲解等离子体物理基础理论的同时,从更严格、更通俗的角度阐述了等离子体物理的理论基础,深入浅出地介绍了当前磁约束等离子体研究的一些热点与前沿问题。全书内容丰富,涵盖了目前磁约束等离子体研究的方方面面,对基础理论的讲解出发点独特,文字由浅入深,力求用更准确、更完美的方式介绍磁约束聚变等离子体物理的基础理论和研究进展。

本书适合作为高等院校具备一定物理基础的本科生和聚变科学类研究生教材,同时也可以作为从事聚变科学理论研究人员的学习参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

聚变研究物理 / (日) 菊池满著; 四川大学等离子体
物理研究室译. —北京:科学出版社, 2013
ISBN 978-7-03-037226-0

I. ①聚… II. ①菊… ②四… III. ①等离子体物理
学-研究 IV. ①O53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 056006 号

责任编辑: 杨岭 张展 莫永国/封面设计: 陈思思

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013年3月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2013年3月第一次印刷 印张: 11.5

字数: 210千字

定价: 45.00元

作者简介

作者菊池满 1954 年出生于日本。1981 年毕业于日本东京大学。自 1983 年以来，一直在日本原子能研究所（JAERI）和日本原子能机构（JAERI / JAEA）工作，担任等离子体分析部主任、大型托卡马克实验第一部门主任、托卡马克计划部主任、聚变等离子体研究部副主任、先进等离子研究部（JT-60）董事以及核聚变研究与发展局顶级研究员。

2008 年担任日本京都大学客座教授，至今担任九州大学和大阪大学客座教授。自 2005 年以来，一直担任核聚变杂志编委会主席，曾担任国际 50 周年聚变能源会议程序委员会主席。

2012 年 4 月

中文版序言

很高兴能为本书《聚变研究前沿》的中译本作序。中国以加入国际热核聚变实验堆（ITER）计划为契机，在核聚变研究上投入了大量的人才和资金，也吸引了活跃在国外研究第一线的一批研究人员回到中国本土开展研究工作。期待着本书能进入中国年轻的物理专业学生的视野，激发他们对以实现核聚变能源为目的的高温等离子体研究的兴趣。



磁场核聚变等离子体物理学在大量吸收基础物理学和基础数学成果的基础上，获得了快速的进步和发展，并构筑了这一作为物理学重要领域的基础，本书虽然仅仅涉及了这一重要领域的入门知识，但全书的整篇论述非常重视该领域发展前沿与基础物理学之间的关系。

本书的日文版于2009年由京都大学学术出版社出版，英文版于2011年由斯普林格出版社出版。特别感谢为本书中文版的出版给予大力支持的核工业西南物理研究院段旭如副院长、四川大学物理与技术学院唐昌建教授以及在本书中文翻译、审校中付出大量辛勤劳动的四川大学等离子体物理研究室和核工业西南物理研究院的诸位老师们。

菊池満

2013年3月于日本水户

前 言

本书旨在系统概述核聚变和等离子体约束研究中的最新物理原理，向已具备量子论和分析力学基础的学生介绍这个学科，希望他们在未来选择工作时会对此感兴趣。自 1958 年磁约束聚变研究开始的 50 多年以来（图 0.1），人们对等离子体磁约束科学进行了系统的研究。希望将本书介绍给其他领域的研究人员，他们可能会发现其从事的研究与磁约束等离子体在科学原理上存在的共性和差异，从而有所借鉴。

学术领域已发展出两种方式，一是为了满足人们对未知世界的好奇心而形成的学科，二是在实现一个目标（如制造一个更快的飞机，或预测台风的路径）的过程中，为解决该过程中存在的物理问题而形成的学科。聚变等离子体的主要研究对象为物理与核聚变之间的关系，显然这个学科属于后一类。



图 0.1 为庆祝核聚变研究启动 50 周年的第 22 届国际原子能机构聚变能大会开幕仪式

在任何情况下，一个物理领域通常由一个有趣的现象所引发，人们希望通过对这些现象的研究找出适用于其他领域研究的根本规律。同时，新的物理学也可以通过数学得以发展（如相对论中的非 Euclidean 几何学），而新的数学可能由新

的物理学进化而来，如通过脉冲函数在量子力学中的需求发展起来的分布理论。

20 世纪，物理学以对称性为关键词发展。而 21 世纪可称为复杂性科学的时代，例如，在生活、天气以及社会现象中，支撑性的定律都牵涉复杂的过程。通过核聚变燃烧而自主形成其结构的国际热核聚变实验堆（ITER）等离子体，将成为同时包含这种对称性和复杂性的新的物质科学的研究对象（图 0.2）。

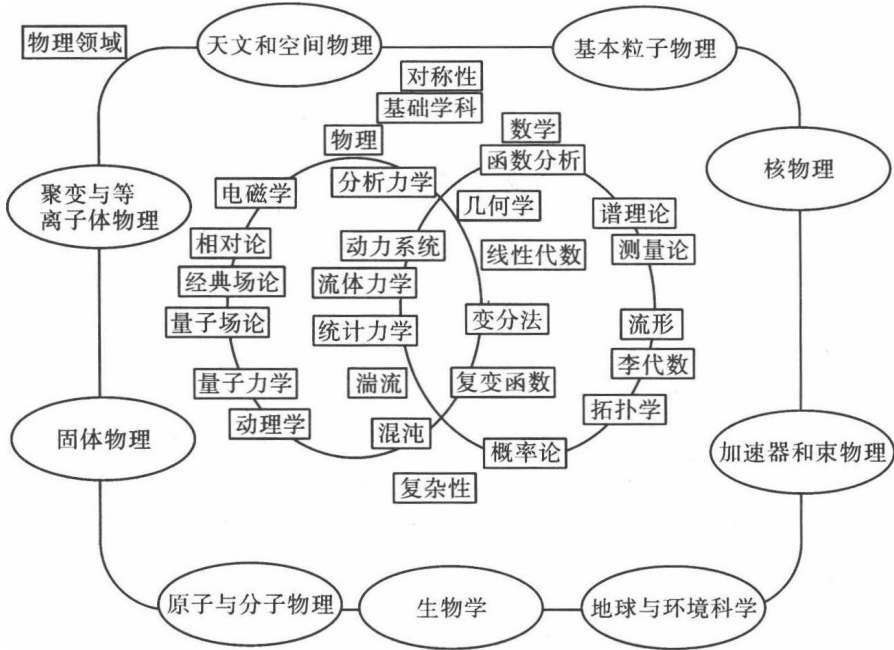


图 0.2 物理学和基础学科领域之间的层次结构（物理和数学）

我花了 25 年的时间，也就是 50 年核聚变历史的后 25 年，工作在世界上最大的核聚变装置 JT-60 上。等离子体物理和聚变是一个研究领域，并通过世界核聚变研究得以系统化。通过与基础学科的交叉，这个研究领域得到极大的进展。

本书的第 1 章，鉴于宇宙形成时为什么产生了那么多的氢燃料问题，在太阳的中心究竟发生着什么，通过引入人类努力实现“地球上的太阳”为开始并以等离子体为研究对象，介绍了聚变。在第 2 章中，介绍了支配着发生聚变的“微观世界”方程。另外，还介绍了“地球上的太阳”的参与者，即氘、氚、中子以及氦的属性。最后，由核反应理论推导出“聚变截面”。

第 3 章至第 9 章着重介绍了等离子体磁约束原则。第 3 章用 Euler 指数讨论了磁约束装置为什么应该是一个环的拓扑要求，这个问题涉及 Poincaré 定理。在用分析力学方法描述了二维和三维的平衡之前还引入了“坐标”、“力线动力学”、“磁面”、“通量坐标”和“各态遍历”等概念。本章的重点放在分析力学中的可积性和对称的等价性以及磁面的存在等方面。

第 4 章用 Lagrange-Hamilton 方程讨论了磁面上的粒子轨道动力学，指出了

新的变分原理：Little-John 变分原理，以满足导向中心相空间的 Liouville 定理，这是在 20 世纪 80 年代建立起来的理论。相比之下，在 Alfvén 的导向中心方程中，相空间体积不守恒。这种变分原理适用于导向中心在通量坐标中的运动，接着还引入了绝热不变量的概念。

第 5 章描述了等离子体动理学理论的基础。为了澄清动力学和动理学之间的差异，针对 L. Boltzmann 分子混沌论中牛顿运动方程的时间可逆性与动理学方程中时间不可逆性之间的冲突，作者对照 Poincaré 递归定理进行了讨论。等离子体物理中出现了一个类似但又不尽相同的问题。从时间可逆的动理学方程 Vlasov 方程出发，连续谱和相混会引起 Landau 阻尼。库仑碰撞在等离子体中是作为集体行为来考虑的。最后介绍现代回旋动理学理论，这是高温等离子体湍流研究的前沿。

第 6 章的主题是稳定性。在对稳定性进行简要介绍之后，通过 Euler-Lagrange 方程给出能量原理和稳定判据，并用来描述等离子体的不稳定性。例如，通过一个厄密共轭的线性算子描述线性磁动流体力学 (MHD) 下的扭曲模和气球模。一个有理面上的耗散会产生撕裂模，这是一种与磁重联有关的不稳定性。在包含平衡流时，MHD 算符是非 Hermitian 共轭的，这是可控等离子体研究中的一个前沿课题。

第 7 章介绍了等离子体波传播的程函方程和波能量的 Von Laue 形式。然后考虑了漂移波和 Alfvén 共振，这些在实际的磁约束研究中都是非常重要的。此外，引入 Hasegawa-Mima 方程来描述漂移波之间的非线性相互作用，并以此作为等离子体湍流研究前沿的一个出发点。

第 8 章讨论了无碰撞区中环形等离子体的碰撞输运。在无碰撞等离子体中，自生电流或自举电流是由压力梯度产生的，这对托卡马克核聚变反应堆的高效稳定运行是至关重要的。新经典的黏滞力是由非碰撞区中分布函数的偏离产生的。通过热力学力的形式在一个更普遍的欧姆定律中引入自举电流。此外，本章还讨论了横越磁场的新经典输运。

第 9 章讨论了约束等离子体湍流输运中的前沿课题。同时引入动力学系统的基本概念，给出了等离子体约束的基本描述。在低模式约束下的热扩散可谓自组织临界性 (SOC)，这是一个复杂科学中的重要概念，而输运垒 (TB) 是打破湍流元的剪切流驱动的 SOC 局部松弛。

第 10 章对未来能量的核聚变特性及其研究现状作了简要介绍。

我想表达对 JT-60 前任董事安积正史、德田伸二博士、长崎百伸教授和吉田善章教授的感激之情，感谢他们对此书的鼓励。对于职业生涯，我非常感激过去的教授园田正明、井上幸倍和内田岱二郎。最后，非常感谢我的妻子贵子对我的宽容，让我花时间完成本书。

菊池满

2010 年 12 月于水户市

目 录

译者序

前言

第 1 章 人造太阳：来自氢的无穷能量	(1)
1.1 大爆炸：聚变燃料之源	(2)
1.2 太阳：受引力约束的聚变反应堆	(4)
1.3 聚变：对地面人造太阳的挑战	(7)
1.4 等离子体：物质的第四态	(9)
参考文献	(11)
第 2 章 氢聚变：轻核与聚变反应理论	(12)
2.1 聚变：核聚变	(12)
2.2 氘：由中子和质子结合成的弱束缚核	(15)
2.3 氚：释放电子和中微子的核	(17)
2.4 中子：不带电的基本粒子	(19)
2.5 氦：具有一个幻数的稳定元素	(21)
2.6 聚变截面：隧道效应和共振	(23)
参考文献	(27)
第 3 章 约束位形：闭合磁场的拓扑结构和力学平衡	(28)
3.1 磁场和闭合磁场位形	(28)
3.2 拓扑结构：没有固定点的封闭结构	(31)
3.3 坐标系与环	(33)
3.4 场线动力学：磁场的 Hamilton 动力学	(36)
3.5 磁面：可积磁场与隐性的对称性	(38)
3.6 通量坐标：Hamada 和 Boozer 坐标	(41)
3.7 各态历经性：圆环面上密集覆盖的场线	(43)
3.8 显式对称性：轴对称圆环的力学平衡	(46)
3.9 三维力学平衡：寻找隐式对称性	(48)
参考文献	(50)

第 4 章 带电粒子的运动: Lagrange-Hamilton 轨道动力学	(52)
4.1 变分原理: Hamilton 原理	(52)
4.2 Lagrange-Hamilton 力学: 电磁场中的运动	(55)
4.3 Littlejohn 变分原理: 导心的轨道动力学	(57)
4.4 轨道动力学: 磁面坐标中的 Hamilton 轨道动力学	(60)
4.5 周期性与不变性: 磁矩和纵向绝热不变量	(62)
4.6 坐标不变性: 非正则变分原理与 Lie 变换	(64)
4.7 Lie 微扰论: 回旋中心轨道动力学	(67)
参考文献	(69)
第 5 章 等离子体动理学理论: 相空间集体方程	(70)
5.1 相空间: Liouville 定理和 Poincaré 重现定理	(70)
5.2 动力学和动理学: 单体可逆和集体不可逆方程	(73)
5.3 Vlasov 方程: 不变量, 时间反演对称性和连续谱	(75)
5.4 Landau 阻尼: 由可逆的方程导致的不可逆现象	(78)
5.5 Coulomb 对数: Coulomb 场中的集体行为	(80)
5.6 Fokker Planck 方程: 软 Coulomb 碰撞的统计学	(83)
5.7 回旋中心动理学: 漂移动理学和回旋动理学	(85)
参考文献	(87)
第 6 章 磁流体不稳定性: 能量原理、流与耗散	(89)
6.1 稳定性——从拓扑学上来看	(89)
6.2 理想磁流体动力学: 作用量原理和 Hermite 算符	(90)
6.3 能量原理: 势能和谱	(93)
6.4 Newcomb 方程: 理想 MHD 的 Euler-Lagrange 方程	(95)
6.5 磁张力: 扭曲模与撕裂模	(98)
6.6 磁场的曲率: 气球模与准模展开	(100)
6.7 流: 非 Hermite 的 Frieman-Rosenbluth 方程	(102)
参考文献	(104)
第 7 章 波的动力学原理: 波在非均匀等离子体中的传播与谐振	(106)
7.1 程函方程: 波传播的动力学原理	(106)
7.2 Lagrange 波动力学: 理想与耗散系统	(108)
7.3 等离子体电介质: “冷”、“热”等离子体	(110)
7.4 非均匀等离子体: Alfvén 波共振与连续波谱	(113)
7.5 漂移波: 约束等离子体中的波	(115)
参考文献	(118)
第 8 章 碰撞输运: 闭合磁位形中的新经典输运	(119)
8.1 无碰撞等离子体: 矩方程和新经典黏性系数	(119)

8.2	不可压缩流: 磁面上的一阶流	(122)
8.3	摩擦力和黏性力: 动量和热流平衡	(124)
8.4	平行电流: 广义 Ohm 定律	(126)
8.5	捕获粒子效应: 电导率	(127)
8.6	热力学力: 自举电流	(129)
8.7	动量输入: 束驱动电流	(131)
8.8	旋转: 环向旋转和离子、杂质和电子间的通量关系	(133)
8.9	新经典输运: 横越磁场的输运	(136)
8.10	新经典离子热扩散系数: Coulomb 碰撞产生的离子热扩散系数	(138)
	参考文献	(139)
第 9 章	等离子体湍流: 自组织现象的临界性及其局域崩塌	(141)
9.1	非线性动力学概念: 动力学系统与吸引子	(141)
9.2	自组织临界态: 湍流输运和临界温度梯度	(143)
9.3	混沌吸引子: 等离子体漂移波满流中的三波相互作用	(146)
9.4	结构的形成: 剪切流与带状流对湍流的抑制	(148)
	参考文献	(150)
第 10 章	聚变能的实现	(152)
10.1	能源与环境问题和聚变能	(152)
10.2	聚变等离子体条件与三大托卡马克约束研究的进展	(156)
10.3	ITER 项目和 BA (更宽领域研究) 计划	(162)
10.4	聚变能是低碳社会的选择	(165)
	参考文献	(168)
	后记	(169)

第 1 章 人造太阳：来自氢的无穷能量

137 亿年前，大爆炸创造了宇宙。宇宙中充满着氢，氢的聚变形成了漂亮的夜空。聚变是一种核反应，通过轻核(如氢)之间的反应可以生成氦核。

太阳是一个被其巨大质量引力约束所形成的高温稠密等离子体系统，不断地发生着大规模的聚变反应，并将产生的巨大能量以光等形式传到行星系统，地球上的所有生命都依赖于太阳的能量。

20 世纪中期以来，很多科学家极具挑战性地提出了在地球上建造一个人造太阳以开发聚变能源的设想。为了实现这个设想，人们致力于在地球上建造一个聚变能量装置 ITER(如图 1.1 所示)这样一个人造太阳，并让人们通过相关物理问题的研究去验证人造太阳在科学上的可行性。

核聚变反应需要达到几亿摄氏度的高温，此时聚变燃料氘和氚处于等离子体态，即物质的第四态。等离子体以各种形式存在于我们的周围，了解和控制等离子体对于发展可用的聚变能是很有必要的。

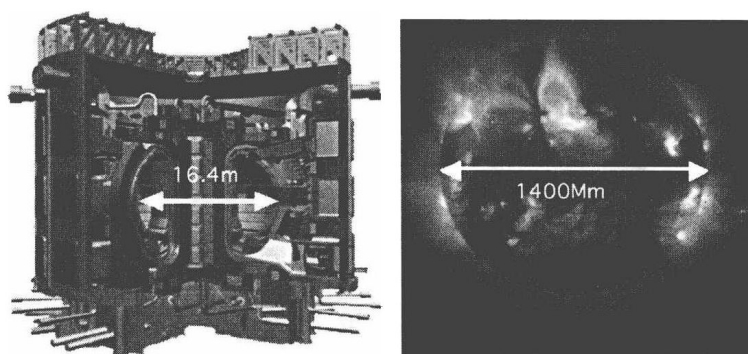


图 1.1 ITER 和太阳

注：运行轨道距离太阳 1.5 亿公里的地球得益于太阳的聚变能。ITER 这样一个地球上的人造太阳，用磁约束实现相当于太阳中心 10 倍的温度，而其几何尺寸仅为太阳的亿分之一。

1.1 大爆炸：聚变燃料之源



图 1.2 Einstein

宇宙中，除了暗物质，组成其他物质的元素 75% 都是氢。星体更是由丰富的氢组成的。夜空中有很多光，这些光是由星体上物质的聚变产生的。为什么星体的主要元素是氢？我们所赖以生存的宇宙结构，是由德国物理学家 Einstein(1879~1955, 图 1.2) 在 1915 所提出的广义相对论引力场方程式(1.1)决定的^[1~5]。

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad (1.1)$$

式中， $R_{\mu\nu}$ 、 $g_{\mu\nu}$ 、 R 、 $T_{\mu\nu}$ 以及 G 分别表示 Ricci 张量、度规张量(长度微分 $ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$)、Ricci 标量、能量及动量张量、万有引力常量。重力使空间产生弯曲，Euclidean 几何的平行公理不再成立。假定 a 是宇宙尺度，由 Einstein 的引力方程可得到 Friedman 方程

$$\frac{1}{2} \left(\frac{da}{dt} \right)^2 - \frac{GM(a)}{a} = -\frac{1}{2} Kc^2 \quad (1.2)$$

该方程是俄国物理学家 Friedman 于 1922 年推导的。式中， G 代表万有引力常量， $M(a)$ 是宇宙尺度中的质量， c 为光速， K 为常量。 $K > 0$ 对应一个封闭的宇宙总能量为负的情况， $K = 0$ 对应一个平坦宇宙的情况， $K < 0$ 对应宇宙是开放且具有正的总能量的情况。而任何情况下，式(1.1)都意味着一个膨胀的宇宙。因此，宇宙的开始被称为“大爆炸”^[6]。利用 Friedman 方程，可以将宇宙的初始温度 T 唯一地确定作为时间 t 的函数

$$T[\text{k}] = \frac{1.5 \times 10^{10}}{g^{1/4} \sqrt{t(s)}} \quad (1.3)$$

式中， g 是超相对论修正因子，且 $g = 1.68 (T < 6 \times 10^9 \text{ } ^\circ\text{C})$ ， $g = 5.38 (6 \times 10^9 \text{ } ^\circ\text{C} < T < 1 \times 10^{12} \text{ } ^\circ\text{C})$ 。日本物理学家林忠四郎指出，宇宙大爆炸一旦发生，由于质子和中子之间的转化和逆转化能够通过弱相互作用发生，其比率服从 Boltzman 分布 $n_n/n_p = \exp(-Q_n/kT)$ 。 Q_n 为质子和中子的质量差，1.3MeV 相当于 $1.5 \times 10^{10} \text{ } ^\circ\text{C}$ 。当 $kT \geq Q_n$ 时，宇宙中的中子与质子数量几乎相同，而随着温度的降低，中子数减少。宇宙大爆炸一秒钟后，宇宙的温度下降到 $1 \times 10^{10} \text{ } ^\circ\text{C}$ (0.86MeV)，质子和中子比率下降到 $n_n/n_p = 0.223$ 。当温度低于 $0.8 \times 10^{10} \text{ } ^\circ\text{C}$ ，质子和中子的比率被固定为 $n_n/n_p = 0.157$ ，由于低于这一温度时弱相互作用不起作用。因而在 12 分钟的半衰期内，中子通过 β 衰变为质子。

如果质子和中子处于高温状态，氘则通过反应 $n+p \rightarrow D+\gamma$ 生成。但是当温度高于氢的结合能(2.23MeV, 相当于 $2.6 \times 10^{10}^{\circ}\text{C}$, 见本书 2.2 节)时, 氘核就会分解。低于这个温度时, 质子和中子之间可以发生反应, 原则上能够形成氘, 但早期宇宙里的高能光子会立即摧毁氘。因此, 质子和中子一般是分离的, 直至高能光子的减少。宇宙大爆炸的两分钟后, 温度下降到 $1 \times 10^8^{\circ}\text{C}$, 随着高能光子数目的减少, 氘的数目开始增加, 如图 1.3 所示。氘核能够通过氘反应, 即 $D+D \rightarrow {}^3\text{He}+n$ 以及 ${}^3\text{He}+D \rightarrow {}^4\text{He}+p$ 生成。几乎所有的剩余中子形成 ${}^4\text{He}$, 其质量数由 $m_{\text{He}} = 2n_n/(n_n+n_p) = 0.25$ 给出。

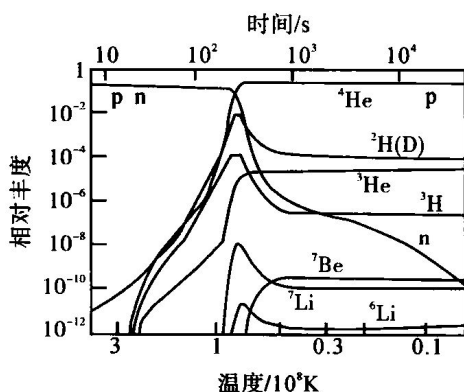


图 1.3 质子、中子、 ${}^4\text{He}$ 、 ${}^2\text{H}(\text{D})$ 、 ${}^3\text{He}$ 、 ${}^3\text{H}$ 等粒子在宇宙大爆炸之后相对丰度随时间和温度的变化情况^[7]

注: $273.15\text{ K} = 0^{\circ}\text{C}$ 。

宇宙大爆炸的几分钟后, 氦的产生使得宇宙元素的形成就几乎结束了。所观察到宇宙中的氦和氢的丰度比值几乎与大爆炸宇宙论的预测值相等。氘的结合能很大, 因此不容易发生分裂。氦的形成要早得多, 最初的大爆炸可能导致重元素的形成, 否则星星也许不会在夜空中闪烁, 地球上由太阳孕育出来的一切生命也可能不复存在。

【注释】关于广义相对论和非 Euclidean 几何问题

狭义相对论仅适用于匀速运动, Einstein 从匀速运动的狭义相对论出发建立了包括加速运动的广义相对论, 并提出了对非 Euclidean 几何的要求。在非 Euclidean 几何中, Euclidean 的平行公理是不成立的^[8]。在一个均匀旋转圆盘中, 周长将发生收缩, 并且圆周率也不再是 2π 了。

在没有重力的情况下, 自由落体会变成惯性系。惯



图 1.4 Bernhard Riemann

性系(狭义相对论的基本假设)中光的直线运动意味着原始系统中光的弯曲运动,加速系统中会得到相同的结果。Einstein 提出光的直线运动产生弯曲是因为当地的引力弯曲了时空。

非 Euclidean 几何是由 Gauss、Bolyai 和 Lobachevskii 创建的,德国数学家 Bernhard Riemann(1826~1866, 图 1.4)由此发展了普遍的 Riemannian 几何^[9]。他通过公式 $ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$ ($\mu, \nu = 0, 1, 2, 3$) 给出了弯曲空间的距离元 ds , 其中, $g_{\mu\nu}$ 表示度量张量。

1.2 太阳: 受引力约束的聚变反应堆

太阳是银河系中两千亿个星球中的一个, 为我们的生活提供光明和能源。它的半径($R_{\text{Sun}} = 70 \times 10^4 \text{ km}$)是地球半径的 110 倍, 其质量($M_{\text{Sun}} = 2 \times 10^{30} \text{ kg}$)是地球的 32 万倍。它是一个巨大的氢球(图 1.5)。从太阳表面释放的能量发光度为 $L = 3.86 \times 10^{26} \text{ W}$ 。

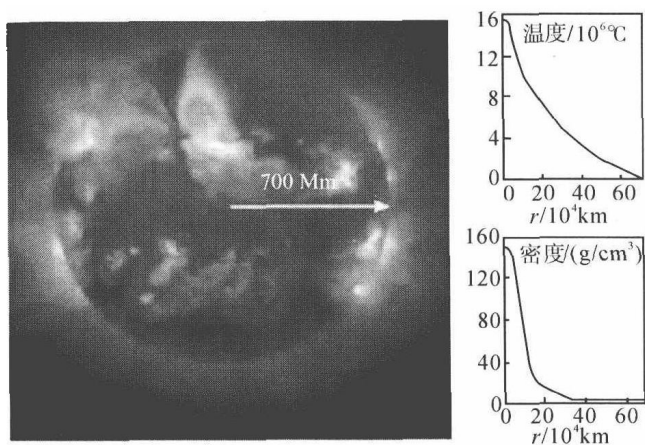


图 1.5 太阳温度与密度的径向分布

太阳在 45 亿年前形成的过程中, 从质量中心释放的引力能量为

$$E_g = \frac{GM^2}{R_{\text{Sun}}} = 3.8 \times 10^{41} \text{ J} \quad (1.4)$$

式中, 引力常数为 $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 / (\text{kg} \cdot \text{s}^2)$, 这与离子或电子的平均动能(约 1keV)相一致(相当于 $7.7 \times 10^6 \text{ °C}$)。太阳中心温度约为 $15 \times 10^6 \text{ °C}$, 这与最初从引力能获得的温度相似。在这一温度下, 原子被电离成为原子核和电子, 称为等离子体。也就是说, 太阳是一个稠密等离子体的巨大球体, 它的中心密度为 150 g/cm^3 , 并且太阳一半的质量是集中在中心的 $1/4$ 半径内。1905 年, Einstein 发表了狭义相对论, 这一理论表明能量和质量具有相同的起源, 其紧密联系为

$$E = mc^2 \quad (1.5)$$

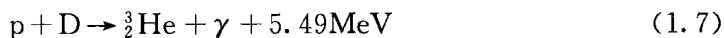
在太阳和星体中, 根据 Einstein 的方程, 能量可以通过质量转变而来。在太阳中心, 两个质子(氢核)碰撞不会产生不稳定的 ^2He , 氦是由一个质子通过弱相

互作用释放一个正电子转变成一个中子，并且释放 0.42MeV 的能量所形成的，即

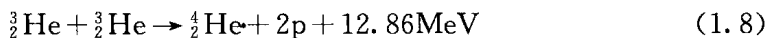


其中， p 、 D 、 e^+ 和 ν_e 分别表示氢、氘、正电子和电子中微子。

第一个质子反应和宇宙早期的情况相似。在大约一百亿年这一相当漫长的过程中，太阳处于适合氦形成的低温状态。一个正电子立即与一个负电子湮灭放出 1.02MeV 的能量。形成的氘核与另一个质子反应形成 ^3He



其中， γ 和 ^3_2He 分别表示 γ 射线和氦的一种同位素氦 3。另外，两个氦 3 原子反应形成氦 4



最终，4 个氢核形成了一个氦 4



除了中微子携带的 0.26MeV 能量，每个氢产生的能量为 $26.46\text{MeV}/4 = 6.55\text{MeV}$ 。在大爆炸过程中，宇宙中产生了大量的氢，氢的聚变使夜空闪耀着星光。太阳中心氢的燃烧率与光度 $L/6.55\text{MeV} = 3.7 \times 10^{38}/\text{s}$ 有关，也就是说每秒钟消耗 6.2 亿吨氢。可以近似地说，每秒钟大约有 440 万吨的质量转化为能量。这意味着在 45 亿年里有 6% 的氢转化成氦。1 g 氢产生 $6.4 \times 10^{11}\text{J}$ 的能量，相当于 15 吨石油产生的能量。

对于比太阳温度更高的星球[通常为 $(14 \sim 30) \times 10^6\text{℃}$ (比太阳更大的星球)]，另一种被称为 CNO 循环的聚变机理起主要作用。这是由出生于德国的美籍物理学家 H. Bethe(1906~2005, 图 1.6)发现的，他于 1967 年获得诺贝尔物理学奖。

在太阳中心产生的能量通过对流和辐射到达其表面。太阳的中心部分被称为内核，聚变反应在这里发生。中间部分($0.2a \sim 0.7a$, a 为太阳的半径)被称为辐射运输区，在这里能量是通过辐射运输的。表面区域($0.7a \sim 1a$)被称为对流层，这里对流元控制着能量的输运过程。太阳表面温度约为 5800℃ ，其能量以黑体光谱辐射。在太阳表面的外面还有色球层、科洛纳和日珥。

【注释】关于太阳年龄和它能量的来源问题

19 世纪，人们对太阳能量的来源尚不清楚。最初，没有人知道太阳已经燃烧了几十亿年。了解太阳的年龄对探索太阳能的来源非常重要。可以从陨石中放射性子体核素的比例去推测太阳系的年龄。利用钾 $40 \rightarrow$ 氩 40 的长半衰期(半衰期为 11.9 亿年)衰变，能够从溶解的陨石中通过放射性衰变形成的子体核素的积累来估计太阳的年龄。大多数陨石的测量显示，太阳在 45.5 亿年前便已经形成。

1920 年，英国天文学家 A. S. Eddington(1882~1944, 图 1.7)提出太阳能可能来自于氢聚变成氦所释放的能量。1929 年，美国天文学家 H. N. Russell(1877~1957)在研究太阳的光谱时发现，在太阳的原子中，90% 为氢，9% 为氦^[10]。毫无疑问，太阳的能量只能是来源于氢的聚变^[10]。



图 1.6 H. Bethe



图 1.7 A. S. Eddington

【注释】狭义相对论

正如后面的 4.2 节所述, 对于 Lorentz 变换, 按狭义相对论, 变分原理的作用量积分一定是对 Lorentz 变换不变的。满足这个条件的作用形式是宇宙间隔 s 的积分 [$ds \equiv (c^2 dt^2 - dx^2)^{1/2}$], 因为 s 的 Lorentz 变换是不变量。下面给出运动自由粒子的作用量积分

$$S = -m_{a0}c \int_1^2 ds = -m_{a0}c^2 \int_{t_1}^{t_2} d\tau \quad (1.10)$$

其中, $\tau = s/c$ 被称为本征时间, 是物体在静止状态下的时间, 即在 $dx/dt = 0$ 处的时间坐标。这一作用量积分与 Fermat 光的传播变分原理有很明显的相似之处 (见第 4 章)。将 $\tau = t[1 - (dx/dt \cdot dx/dt)/c^2]^{1/2}$ 代入方程 (1.10) 可以得到

$$S = \int_{t_1}^{t_2} L dt \quad (1.11)$$

$$L = -m_{a0}c^2 \sqrt{1 - \left(\frac{dx}{c dt}\right)^2} \quad (1.12)$$

这里, m_{a0} 通常称作静止质量。自由粒子的动量 p 定义为 $p = \partial L / \partial \dot{x}$ ($\dot{x} = v$)。

$$p = \frac{m_{a0}v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (1.13)$$

能量或者哈密尔顿量可以由公式 $E = p \cdot \dot{x} - L$ 导出

$$E = \frac{m_{a0}c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (1.14)$$

方程 (1.14) 是由 Einstein 的著名方程 (1.5) 导出。该方程指出, 在一些惯性坐标系中, 即使 $v=0$ 时, 自由粒子仍具有能量。如果一个速度为零的粒子在 x 方向具有重力势能 $\phi(x)$, 则它不再处于一般情况的惯性系, 而是进入一个在有势场 $\phi(x)$ 中的自由落体惯性系。如果假设势能为 ϕ 时速度远小于 c , 则可以用一个非相对论的方程来表示 $L \sim -m_{a0}c^2 + m_{a0}v^2/2 - m_{a0}\phi$, 而且也可以假设 $t' = t$ 。在引力