

“十三五”国家重点图书出版规划项目
物理学名家名作译丛

[法]阿兰·梅热 [法]文森特·勒布伦 著
罗舒译 邢志忠校

物质、暗物质和反物质

Matter, Dark Matter, and Anti-Matter

中国科学技术大学出版社

“十三五”国家重点图书出版规划项目
物理学名家名作译丛

[法] 阿兰·梅热 [法] 文森特·勒布伦 著
罗舒译 邢志忠校

物质、暗物质和反物质

Matter, Dark Matter, and Anti-Matter

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 12171795 号

Matter, Dark Matter, and Anti-Matter. First Edition was originally published in French in 2009. This translation is published by arrangement with DUNOD Editeur.

All rights reserved.

© DUNOD Editeur & 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 DUNOD Editeur 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

物质、暗物质和反物质/(法)阿兰·梅热(Alain Mazure),(法)文森特·勒布伦(Vincent Le Brun)著;罗舒译. —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:Matter, Dark Matter, and Anti-Matter

ISBN 978-7-312-04190-7

I. 物… II. ①阿… ②文… ③罗… III. ①暗物质—研究 ②反物质—研究 IV. P14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 081233 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://zgkxjsdxcbs.tmall.com>

印刷 安徽国文彩印有限公司

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 12

字数 184 千

版次 2018 年 2 月第 1 版

印次 2018 年 2 月第 1 次印刷

定价 58.00 元

暗物质是当前物理学面临的最重大科学难题之一，认识它的本质极有可能带来物理学的革命。我国发射了暗物质粒子探测卫星“悟空”，希望能在暗物质研究方面取得突破。常常会有人问我，暗物质是什么？它跟反物质有什么关系？暗物质有什么用？等等。本书为这些问题给出了最好的回答。我强烈推荐大家，特别是青少年朋友读读这本书，你会有意想不到的收获。

A stylized handwritten signature in black ink, consisting of two characters: '曹' (Cao) and '彬' (Bin).

（暗物质粒子探测卫星“悟空”首席科学家）

编 委 会

主 编 叶铭汉 陆 埏 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 埏(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所) 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)

内 容 简 介

如果把今天的可观测宇宙中的全部能量和物质想象成一个大蛋糕,平均切成 20 块,那么其中大约 14 块是推动宇宙加速膨胀的暗能量,5 块是神秘莫测的暗物质,而我们最为熟悉的重子物质只占其中的 1 块。人类自身、花鸟鱼虫、山川河流、满天繁星、绚丽的银河,所有这些已经被观测到的物质都属于“发光”的重子物质,但它们仅构成重子蛋糕的“一半”,另一半“不发光”的重子物质很长时间处于“失踪”的状态。本书的作者阿兰·梅热(Alain Mazure)和文森特·勒布伦(Vincent Le Brun)对研究宇宙中重物质的历史和寻找“失踪”的重子物质的相关理论、观测以及模拟做了精彩的回顾,将宇宙中的物质、反物质和暗物质做了清晰的梳理和描述,用通俗、简洁的语言解释了深刻的物理问题,并配以精美的插图。

本书不仅适合那些对宇宙的奥秘充满好奇的普通大众,也适合那些意欲在天文观测或者天体物理学领域开展科学研究的青年学子。

献给我们的家人们

为了与望远镜为伴
的无数个夜晚
以及与计算机为伴
的无数个白天……

序 言



对我们宇宙中的普通物质含量进行精确的测量毫无疑问是现代天体物理学的一个巨大成就。科学家们把宇宙的这部分组分称为重子物质。我们最为熟悉的重子物质是质子和中子，它们构成了宇宙中原子和分子质量的绝大部分。

大概在上一个世纪之交时，研究人员进行了两类相互完全独立的实验来“称量”我们宇宙中的重子物质。在其中一类实验中，数个研究团队利用各种由气球搭载的望远镜以及空间望远镜来测量宇宙大爆炸的遗迹辐射场(称为宇宙微波背景(Cosmic Microwave Background, CMB))温度分布中的微小波动。CMB中的这些波动的相对幅度对宇宙中重子物质的总量敏感，我们可以由此计算出宇宙中的重子物质含量。

而在另一类实验中，天文学家们则通过分析距离我们极为遥远的一些奇特的天体(类星体)的光谱，计算出了宇宙中氢以及比它更重一些的同位素氘这两种元素的相对丰度。他们的分析对宇宙重子物质的密度给出了一个完全独立的限制。上述这些实验中的每一个都有各自不同的一系列技术挑战和不确定因素，每一个都需要针对极早期宇宙进行复杂的理论计算。但令人惊讶的是，这两类实验的结果却高度地吻合，一致表明我们宇



宙的全部物质和能量中仅有 4% 是以重子物质的形式存在着的。

这一测量结果的深远影响表现在两个方面：首先，“宇宙中的物质和能量的绝大多数都是以我们日常经验里完全陌生的形式存在着的”这个结论被牢固地确立起来了。我们把这些陌生的其他组分称作“暗物质”和“暗能量”。事实上，探索我们宇宙中其余 96% 的这些暗组分是目前科学研究的一个首要关注点。

其次，这一结果使科学家们有机会将所统计出的当今宇宙中重子物质的总量与预计应有的总量进行比较。让我们大为惊讶的是，首个统计结果（由普林斯顿大学（Princeton University）的两位天体物理学家得到的）就提出了一个令人震惊的难题：恒星和星系内发光的重子物质、星系团中所探测到的热气体以及星系际介质中的氢，所有这些已经找到了的重子物质的总量仅占到当今宇宙应有的重子物质总量的一半。大体上来说，当今宇宙中有一半的重子物质“失踪”了！

这个发现促使世界各地的许多研究小组（包括我自己的研究小组）开始专门寻找这些失踪的重子物质。我们课题组最主要的研究工作是利用远紫外空间探测器（Far-Ultraviolet Space Explorer, FUSE）和哈勃空间望远镜来获得遥远的类星体（光度极高的星系核区，其辐射的能量来自星系中心的超大质量黑洞）紫外波段的高精度光谱。这些数据可以用于寻找处于温热、弥散状态的重子物质，这种状态的重子物质很难通过一般的探测方法被找到。尽管已经取得了一些成果，但寻找失踪重子物质的任务仍在持续进行中。这项任务需要结合细致的观测（利用世界上最强大的望远镜）和专门的理论计算（使用运算速度最快的超级计算机）来达成。

在这本书中，阿兰·梅热（Alain Mazure）和文森特·勒布伦（Vincent Le Brun）对测量宇宙重子物质的历史、失踪重子物质问题的发现、对当今和早期宇宙中的重子物质进行统计的各种技术手段以及指导这些研究的理论工作都做了精彩的回顾。他们的这本书第一次全面地介绍了科学家们所了解的关于普通重子物质的各个方面。本书用通俗、简洁的语言解释了深刻的物理问题，并配以精美的插图。我认为这本书无论是对于那些对

科学感兴趣的朋友们,还是对于打算在这一领域开展研究工作的一年级博士研究生们都是非常值得推荐的。

泽维尔·普罗查斯卡(J. Xavier Prochaska)

加利福尼亚大学圣克鲁斯分校(University of California, Santa Cruz)

天文学与天体物理学教授

加利福尼亚大学天文台(University of California Observatories)

天文学家

作者为英文版译著所作序



对我们两人而言,这本书是对宇宙学模型中尚未解决的那些问题的一次探索之旅的记录。我们所面对的这些尚未解决的问题当然包括大家所熟知的暗物质和暗能量之谜,它们仍有待“新物理”以及新的仪器设备的发展来给出进一步的解释,当然这些都需要天体物理学家和粒子物理学家付出相当大的努力。

然而,除了对“暗”领域的探索,在“普通”物质的问题上,在我们大体上已经非常了解的宇宙的“发光”部分,似乎也仍存在着一个未解决的“小”问题:有一部分重子物质似乎在我们当今的宇宙中丢失了!

普通物质中的这一小部分,在暗物质和暗能量的深深海洋中就好像浮在海面上的一点点“泡沫”,它们的失踪似乎是不重要的。但事实并非如此。首先,作为人类,我们必须关心这个问题,因为我们自己以及我们所生活的这个星球都是由这一点点“泡沫”构成的!此外,寻找这些失踪的重子物质还有另一个原因:不断地检查理论模型整体的自治性,确认模型中没有任何可能表示理论存在某些根本错误的矛盾之处,这始终是科学家的职责之一。



所以,我们这就开始寻找失踪重子物质之旅吧!

阿兰·梅热 文森特·勒布伦

马赛天体物理实验室(Laboratoire d'Astrophysique de Marseille)

2011年6月

致 谢



我们首先要感谢实践(Praxis)出版社和斯普林格(Springer)出版社,他们使得我们能够将本书的法文原版翻译成英文,并促成了这本译著的最终出版。

我们还要感谢在马赛(Marseille)的同事们,那些天体物理学家和粒子物理学家,感谢曾经与他们的那些关于暗能量、暗物质、再电离、原初恒星和星系以及失踪的重子物质的讨论。这本书在某种程度上来说正是那些热烈讨论的成果。

目 次



序言	(i)
作者为英文版译著所作序	(v)
致谢	(vii)
引言 迷人的缺失	(1)
第 1 章 聚集的物质	(4)
1.1 数星星	(5)
1.2 银河:从神话到科学	(10)
1.3 银河系的更深处	(15)
1.4 重要的关系式	(18)
第 2 章 星云的王国	(20)
2.1 宇宙岛屿	(20)
2.2 冰山般的星系	(23)
2.3 星系内的群落——星际介质	(26)
2.4 恒星与晕族大质量致密天体(MACHO)	(28)
2.5 暗重子物质的传奇	(30)



2.6 星系团	(33)
第 3 章 变暖	(41)
3.1 炙热如火	(41)
3.2 太空史诗	(43)
3.3 X 射线望远镜和 X 射线探测器	(44)
3.4 星系和“热”星团	(48)
3.5 热还是冷:并不容易推测	(52)
第 4 章 宇宙探秘:何时?何地?如何?	(55)
4.1 创生时期	(57)
4.2 暗物质和反物质何处安生?	(60)
4.3 头三分种的魔术	(62)
4.4 当质子拥抱中子	(65)
4.5 全部重子物质	(66)
第 5 章 宇宙 30 万年时正上演的故事:重子物质如数到齐	(68)
5.1 物质主导	(68)
5.2 天空中的化石	(70)
5.3 结构增长	(72)
5.4 天空中的和声	(74)
5.5 称量物质和光	(77)
第 6 章 宇宙的画布	(80)
6.1 宇宙结构的规则	(80)
6.2 第一代恒星和类星体	(82)
6.3 烹调残羹剩菜	(88)
6.4 一片神秘的森林	(90)
6.5 最终的估算	(93)
第 7 章 揭开面纱:计算机模拟	(95)
7.1 从一维到三维	(97)
7.2 驯服暗物质	(98)

7.3	半解析方法的必要性	(101)
7.4	Fiat lux	(102)
7.5	用计算机模拟宇宙	(104)
7.6	重子物质:终于被找到了	(108)
第8章	不间断的探索	(112)
8.1	可见光波段的天空:从裸眼到 CCD	(112)
8.2	太空探险	(119)
8.3	绚丽的“微波”四十年	(125)
8.4	望向宇宙的新窗口	(129)
第9章	从望远镜到加速器	(134)
9.1	粒子物理标准模型及其扩展模型	(135)
9.2	中微子是暗物质?	(137)
9.3	直接探测与间接探测	(139)
9.4	暗能量是什么?	(141)
9.5	接近大爆炸?	(144)
9.6	粒子物理有何新发现?	(147)
附录		(154)
术语表		(158)
译后记		(170)

引言

迷人的缺失

没有存在的证据并非证明不存在。

近十几年来,关于宇宙中不可见的“暗”组分的研究常常出现在新闻的头条。通过仔细研究螺旋星系的旋转曲线以及遥远天体的光线被星系团的引力弯曲而产生的多个虚像,天文学家们确信宇宙中存在着数量惊人的暗物质。20世纪90年代,又发现了我们的宇宙远非标准宇宙学模型所预言的那样正在减速膨胀,而是在不久之前(相对于宇宙学的时间尺度而言,具体来说是在40亿~50亿年前)进入了一个加速膨胀的阶段。这一发现暗示了暗能量的存在。这些“暗”组分的物理本质是什么仍是个未解之谜。我们是否应该修改引力定律来解释这些新的现象?暗物质/暗能量是否是由某些目前尚不能被探测到的粒子构成的?如果是的话,它们是否就是超出粒子物理标准模型的一些理论模型所预言的某种粒子?或者,我们是否应该从原初宇宙的量子真空能或类似的想法中寻找答案?但无论如何,它们最为引人注目之处是,这两个被天文学家和物理学家们热切关注的奇异组分的总量可能占了宇宙总物质/能量的95%之多(图0.1)。

那么,普通物质又都包括些什么呢?虽然我们始终被由暗物质粒子、宇宙早期辐射所遗留的中微子和光子构成的一大片海洋所包围,但我们生存的环境和我们本身都是由普通物质,即重子物质构成的。著名的门捷列夫元素周期表中所包含的各种元素都是构成我们这个世界的重子物质(图0.2)。尽管重子物质仅占宇宙全部组分的4%~5%,占宇宙总物质的