

哲人石
丛书

当代科普名著系列



哲人石
丛书

『一个

与我们相反的世界』

反物质

世界的终极镜像

上海科技教育出版社

反物质

戈登·弗雷泽 著 江向东 黄艳华 译

上海科技教育出版社

哲人石
丛书

当代科普名著系列

Philosopher's Stone Series

反物质

世界的终极镜像

戈登·弗雷泽 著

江向东 黄艳华 译



上海科技教育出版社

**Antimatter:
the Ultimate Mirror**

by

Gordon Fraser

Copyright © 2000 by Cambridge University Press
Chinese (Simplified Characters) Trade Paperback copyright © 2002 by
Shanghai Scientific & Technological Education Publishing House

Published by arrangement with
the Syndicate of the Press of the University of Cambridge, England

ALL RIGHTS RESERVED.

上海科技教育出版社业经剑桥大学出版社许可
授予本书中文简体字版权

责任编辑 柴元君 封面设计 陶雪华
版式设计 汤世梁

哲人石丛书

反物质

——世界的终极镜像

戈登·弗雷泽 著

江向东 黄艳华 译

上海科技教育出版社出版发行

(上海冠生园路 393 号 邮政编码 200235)

www.sste.com

各地新华书店经销 常熟华通印刷有限公司印刷

ISBN 7-5428-3029-5/N·495

图字 09-2001-082 号

开本 850 × 1168 1/32 印张 7.5 插页 2 字数 172 000

2002 年 12 月第 1 版 2002 年 12 月第 1 次印刷

印数 1—5 000 定价: 16.60 元

序

反物质,这是一个如此熟悉同时又令人费解的名词。给一个日常概念加个简单的前缀反,马上就能扰乱人的理解并激发想像力。科学幻想小说的好素材出自富于想像力的头脑。最初的一个例子是天才的阿西莫夫(Isaac Asimov)发明了以智能驱动的机器人,它用反粒子(正电子)来确定其行动路线。然后是威廉森(Jack Williamson)的“反地球”(CT)物质。《星际迷航》(Star Trek)的创造者罗登伯里(Gene Roddenberry)也曾介绍过用反物质驱动的超光速宇宙飞船。

这种科学幻想小说的成功使得反物质对公众产生了不可思议的吸引力。1996年1月,一家普通报纸发表了一条来自瑞士日内瓦欧洲核子研究中心(CERN)的消息,称一个小型实验已经合成了第一批反氢原子——化学形式最简单的反物质。由于科学幻想所产生的巨大影响,这个消息引起的轰动是惊人的——几个小时之内,这几个反原子就占据了世界各地电视节目的黄金时段和无数报纸的头条。基础物理学引起公众如此丰富的想像,除了核武器的发展有过这样的影响之外,这乃是绝无仅有的。

撇开这些不谈,本书将要说明为什么反物质是严肃的科学——基本的物理学。感谢在此项工作中

给予我帮助的布尔坎 (Maurice Bourquin)、克洛斯 (Frank Close)、坎迪 (Don Cundy)、伊兹斯 (John Eades)、吉利斯 (James Gillies)、雅各布 (Maurice Jacob)、兰杜亚 (Rolf Landua)、默尔 (Dieter Möhl)、奥尔勒特 (Walter Oelert)、胡德布霍伊 (Pervez Hoodbhoy)、侯赛因 (Faheem Hussain)、德鲁瑞拉 (Alvaro de Rujula)、萨顿 (Christine Sutton) 和丁肇中 (Sam Ting)。另外, 还要感谢米顿 (Simon Mitton) 及其剑桥大学出版社的小组。

目录

序

第一章

科幻小说成为
科学事实

1

第二章

镜像世界

15

第三章

一套不均衡的
电部件

31

第四章

量子大师

49

第五章

正电子的证据

71

哲人石
丛书

PHILOSOPHER'S

STONE

SERIES

第六章

时间的反向通道

83

第七章

夸克和反夸克

101

第八章

破缺的镜像

117

第九章

宇宙的塞钻

137

第十章

反粒子的对撞过程

153

第十一章

为反物质设个陷阱

171

第十二章

胶与反化学

185

第十三章

反物质在战斗

197

第十四章

极大引力的反物质

211

第一章

科幻小说成为科学事实

科学家也和其他人一样读报看电视,不过,他们并不期望以这种方式了解多少专业知识。他们用自己的方式来跟上专业方面的新发展。科学的进展被翔实地记录,并有其自身的规则和约定。然而,在1996年1月发生的事情却非同寻常。经过年底的休假之后,正准备回到自己的实验室的全世界的物理学家们,从大众媒体的报道中惊讶地获悉,一个小型实验取得了一项重大突破。伦敦《泰晤士报》的标题赫然写道:“科学家创造出科学幻想小说中的燃料”;《华盛顿邮报》则宣称:“这一发现会导致对宇宙的不同的理解”;《解放报》写的是:“在反物质的门口”;《明镜周刊》写的是:“影子王国之门”。透过这些媒体的夸张渲染,物理学家们意识到,这个实验已经合成了第一批反氢原子,即化学形式最简单的反物质。

科学宣传的巨大效应是由来自瑞士日内瓦的欧洲核子研究中心* (CERN)的4段新闻短讯引起的。反响是不可思议的——在短短几个小时内,这个朴实的报道就占据了全世界的电视黄金时段和各大报纸的头版。几种语言的新闻杂志都度过了重要而忙碌的一天。更为不可思议的是,这一天正是伦琴(Wilhelm Röntgen)报道他发现X射线之后的100年。当年在维尔茨堡的伦琴寄出一封信,讲述他发现了奇异的“X射

* 原文为 the European Laboratory for Particle Physics,即欧洲粒子物理实验室,但更常用的是与其英文简称 CERN 相对应的现译名。——译者

线”，而且他还用 X 射线拍摄了他妻子手骨的照片。伦琴的发现的影响是迅速的，受大众欢迎的报纸用的是“整个身体的所有部位对辐射都是暴露的”这样诙谐的描述，有的还建议妇女们穿加铅衬的衣服，以防 X 射线之眼的窥视。有了因特网的传播，CERN 的新闻发布比伦琴的 X 射线所产生的影响还要迅速。奇怪的是，当物理学家们还蒙在鼓里的时候，这么一则报道又怎么能吸引起公众的想像呢？

不可测知的量子世界挑战着人们的理解力，它的极端不可测知性更是激发了人们的想像力。究竟是什么在统治着我们难以形成清晰的精神图景的这个王国呢？在量子世界所有稀奇古怪的科学概念中，反物质已成为科学幻想小说的题材，这是使不可能成为可能的关键。幻想的以反物质为动力的宇宙飞船穿梭在时空的曲径之中。反物质是科幻小说中采用的“科学事实”，可是在 1996 年 1 月，这个流行的科幻小说真的变成了科学事实。

原子性别的改变

1603 年，德国天文学家拜尔（Johann Bayer）在他的天体测量天图中给出了大约 2000 颗已知恒星的位置。如今我们知道，即使是我们自己所在的星系——银河系中，也有大约 1000 亿颗恒星，超过全世界人口的 10 倍。天文学家估计，宇宙包含大约 1000 亿个星系，每个星系中都有像银河系这么多的恒星，因此宇宙中会有大约 100 万亿亿（ 10^{22} ）颗恒星，就像把大不列颠联合王国那么大的一个国家，用几厘米厚的沙土覆盖起来所用的沙粒那么多。

世界上所有的东西，动物、蔬菜或矿物，都是由原子构成的。可是原子非常小，一块方糖中的原子数比宇宙中的恒星

还要多。方糖中的每一个原子的电性都是正负相抵完美无缺的,可每一个原子却又都是很不对称的。如果有恒星遗传学这回事,那么设法使宇宙中的每颗星都成为雄性似乎就是它的规律。

原子的动力是电。原子是复合而成的东西,它们的组分带有等量的正电荷和负电荷,但总的来说是电中性的。原子中的单个正电荷以电的方式与负电荷相结合,从而达到平衡。在一些遥远而巨大的恒星中也是如此,在其中普通原子被引力那无情的压力所挤碎。可是我们知道,在原子中并不存在相称的配对方式——电的性别分离是完全的:每个原子都有一团带负电的电子云,围绕着带正电的很小的原子核转动着。

虽然原子的电荷如此平衡,但是它的质量却并不均匀。我们这个世界的 99.9% 以上的质量是带正电的。把原子弄成碎片,我们既可以得到正电,也可以得到负电。可在我们的世界中,前者重而后者却非常轻,因此就比较容易形成这样的格局。在整个宇宙中这种不平衡被反映出来了吗?或者说,有没有一个原子的质量是由负电主导的补偿的世界? 1898 年,物理学家舒斯特(Arthur Schuster)在写给《自然》杂志的一封信中猜测:“如果存在带负电的电荷而其质量又占优势的东西的话,为什么不会有像我们现有的金子一样呈黄色的负的金子?”在随后的 30 年中,舒斯特的猜想一直被尘封。

物理学家们称确定性理论的方程是“优美的”,意思是这些方程简洁、对称而且自洽,没有任意性。如果这种方程表明某件事能发生,那么往往就会发生。1864 年苏格兰物理学家麦克斯韦(James Clerk Maxwell)写下的著名的方程组就是一例。19 世纪初期,物理学家们发现载流导体产生磁场,运动磁体产生电流。在某种程度上,电和磁是彼此相关的双重形式。在电磁场的麦克斯韦方程组的对照中,这种精确的双重

性令人难忘。

1927年,另一名英国物理学家保罗·狄拉克(Paul Dirac)写下了一个方程,预言了一个新的双重性,这又强调了舒斯特1898年曾作的猜测(可此时几乎没有谁记得这件事了)。到了狄拉克所处的时代,物理学家们已发现原子就像一个微型的太阳系,电子绕原子核的周围旋转,一个中心的原子核中包含着质子。与太阳系不同的是,电子带负电荷,质子带正电荷,因此原子内电荷的分布状况为:外层是带负电的电子云,中间是带正电的很小的核。它们所带的电荷电性相反,而且质子比电子重得多,实际上要重2000倍,因此电子对原子质量的贡献是非常小的。

狄拉克提出的新方程是用来描述电子的,而且描述得非常好。可是该方程还表明,一个电子必须有一个等量但带着相反的电荷的对应粒子。最初狄拉克认为他的方程属于他所熟悉的那个世界,并且以为他的电子方程中的带相反电荷的粒子是质子。然而,狄拉克方程的对称性就是宇宙自身的对称性,它是如此的完美,以致不可能有这么难以容忍的缺陷:一个粒子竟会是另一个粒子的2000倍那么重。由我们这个头重脚轻的原子的世界想开去,狄拉克认识到,必然存在着互补的电性对称,其原子有一种新的遗传物质。他称这些新粒子为“反粒子”。反粒子世界是我们这个世界的镜像,其中轻量级的粒子是带正电的而不是带负电的。

在狄拉克那个时代之后,物理学家们陆续发现了许多种亚原子粒子,其中多数是非常奇异的,而且在普通原子中根本找不到。尽管这些奇异的粒子与我们的日常世界不太相关,可在宇宙存在的最初一秒钟内的第一个瞬间,它们曾是这个锦绣乾坤的一部分,当时的温度大约为100亿度。随着宇宙慢慢地冷却下来,这些不稳定的粒子就逐渐衰变掉,形成了我

们现在所知的这种结构。要想合成这些奇异的粒子,就需要供给足够的能量来再生这种最初的温度。按照狄拉克的理论,这些粒子也应该有反粒子。

在一块由普通原子组织构成的电中性物质中,原子结构的电本性是隐含着的。可是,如果把这个样品放到一个强电场中,它就会发生电的扭曲:负电荷被推到一边,正电荷被推到另一边,整个样品变得带有电偏压。而一旦周围的电场被切断,因原子电弹性而产生的张力得到松弛,原子的电荷就会回到它们的平衡位置,样品也回复为明显的电中性。

与原子的结构相比,有一种更为基本的电恢复力。在创世之时,“地是空虚混沌”。虚空是一种至轻至薄的可能的结构,可即使是这种电中性的原初虚空,也被在大爆炸中释放的力分离成了粒子和反粒子。大爆炸是指我们的宇宙创世时的爆炸。在大爆炸中拉伸的原始“橡皮圈”仍在膨胀,而且其一端的粒子形成了我们熟知的这个世界。可是无论怎么找,物理学家们也只见得到由粒子构成的物质。在原始弹性伸展力中另一端的反粒子对应物到哪里去了呢?粒子和反粒子似乎是以各自的方式各行其是。可是,不论这个反粒子的镜像世界在哪里,总有一天它是会回来的。一旦大爆炸的力最终耗尽,连接粒子和反粒子的原始弹性伸展力就会很快回复,并且重建创世时的空虚。

物理学家们虽然不知道到哪里去寻找反粒子,可他们知道如何来制造它们。在狄拉克认识到必定存在反粒子后不久的1932年,第一种这样的反粒子被发现了——电子的反物质对应物,它很轻,并且带有一个单位的正电荷,因此称其为正电子。正电子是正电的载体。随着物理学家们实验技艺的提高,他们发现了越来越多的反粒子事例。可是这些孤立的反粒子并不是原始的,而且也不是从创世的海底打捞上来的。

它们是合成的,是在从小范围模仿大爆炸如何第一次把电中性的虚空分离成粒子—反粒子对这一过程中创造出来的。

物理学家们已逐渐学会如何驯服反粒子,先是正电子,接着是反质子,还建成了能随时提供这些反粒子的反粒子源。可只有在反粒子源有持续的能量供应时,才会有反粒子出现。而物质粒子似乎是惟恐失掉自己的垄断地位,它们放肆地攻击任何闯入的反粒子,湮灭它们并产生一阵阵辐射爆发。反粒子必须小心地保存,且在保存期间一般只保留单个的反粒子,而不必拘泥于原子的形状或结构。可是,反物质应该像遵守物理定律一样遵守化学定律。合成的反粒子能用来制造物质——真正的反物质原子吗?即使供给丰富,在精心挑选的粒子和反粒子被彼此“引见”并提供原子联姻的适当条件之前,反粒子也总是与周围的物质发生湮灭。

第一种反物质

1995年9月12日,就在舒斯特给《自然》写那封推测性的信之后差不多100年,一位名叫奥尔勒特(Walter Oelert)的德国物理学家看着他的计算机的输出,意识到他的实验可能已经制造出了大约一打反物质的原子。在1993年和1994年,他就曾尝试去实现他的目标,而其他人的尝试已经以失败告终。也许1995年是他第三次走运。

已经忙碌几周了,首先是做实验,尝试着在记录仪中搜索,然后再分析所得的大量信息。在超过3周的时间里,实验人员只有48小时能够被特许打开这个世界上最宝贵的管状设备——反质子源。许多物理学家都竞相争夺珍贵的反质子,奥尔勒特的小组只分配到两天的时间。通过和其他实验交换用于粒子束的时间,奥尔勒特得以充分利用这一狭窄的

通道。

实际实验做完,将所有数据安全地输入计算机中,就可以开始第二个阶段的工作:从积累的大量信息中费力地筛选。10亿个反质子在用作实验的计算机中产生了300 000个信号。从中选出23 000个合宜的计数为下一步作准备,然后再一个一个地仔细分析。

经过两周细致的工作,实验小组把所能想到的所有事情都编成了计算机程序,有几个计数不论用什么方法检验总能保留下来。“我觉得不错,”奥尔勒特说,“我相信它们是正确的。”该小组转而分析其他数据,在接下来的几周中,共找到了11个“镀金的”计数。这些是不是物理学家们等待了几乎整个20世纪想看到的那些东西?或者只是令人失望的统计把戏,只是一些偶然地凑到一起的数据所形成的一个科学的海市蜃楼?

奥尔勒特在CERN这个世界上最大的科学实验室所做的实验,以当今大科学的标准来看是个中等规模的课题。这个小组只有16位物理学家。在CERN的其他地方,由几百位研究人员组成的小组正在进行着耗资几亿美元的实验项目。奥尔勒特的小组只不过是更充分地利用了这些设备而已。“与大型实验相比,我们的费用几乎为零。”他强调说。

大型的物理实验要用几年的时间来计划、设计和建造。接着是更多年头的运行和数据分析。一个大学研究者毕生的工作时间可能就在某一个这样的实验中耗尽。比较起来,奥尔勒特的有节制的提议是在1994年10月提出并最终在1995年2月获得批准的。实验的编号为PS210,6个月后实验就完成了。从批准到完成用了不到一年的时间,PS210甚至未被列入《CERN实验》的年编中。《CERN实验》年编是厚达500页的一个册子,其上列有136项即将在实验室中进行的科学

实验的名单。由于注意力都集中在大型探测器和高度国际化的小组的策略上,CERN的其他人员很少了解到PS210实验正在进行,也几乎没有人留心PS210的实验人员何去何从。

PS210计划听起来并不壮观。该计划是要在一个精密的氙气喷射器上发射一束反质子。在地球上不存在天然的反质子。它们只能被人工合成,而且只有两个地方随时可以获得。CERN是一个,另一个是费米实验室,它是建在芝加哥附近的伊利诺伊平原的一个美国粒子物理实验室。这些粒子极为珍贵,甚至在准备就绪后要进行一个实验时,反质子供给都经常要在几个用户之间共享,而且是严格按比例分配的。像PS210这种小型反质子实验必须一直保持警觉状态,就像赛跑者站在其起跑器上时那样,时刻等待信号枪发令。“一次,一个学生错把一个探测器的复位按钮当成了开始,我们就错过了反质子喷射。”奥尔勒特懊丧地说。但借助氙气喷射器,PS210有了一个新想法。其方案是用这个反质子束再去产生更多的反粒子。利用双重的反粒子,可能会有更多的机会提供恰当的条件来把粒子和反粒子结合起来,从而合成反物质原子。

对亚原子粒子束来说,即使是固体金属靶,其原子结构看起来也像是鸡笼子的网格一样。在大部分时间里,束中的粒子会径直通过。其中只有极少一部分会“打湿”原子网格。监测任何实验的是“探测器”,完善的监测系统会在每次有一个粒子接触靶的网格时进行精确的电子快照。物理学家们所称的“事例”,每一个都可以使物理学家去重构入射粒子真正碰到东西时的情况。由于有监测系统,大部分记录数据都是常规的。那些粒子物理学家,亚原子世界的警察们,只是小心翼翼地监视着任何不寻常的迹象。

实验的计算机扫描已记录下的数据,仔细地把没有价值

的背景杂质筛选出去,以便找到有价值的矿石。和金矿勘探一样,筛选后常常是空手而归,研究者或勘探者只好再回到源头,去搜寻更多的原始数据。经过几次尝试,如果实验仍一无所获,那实验人员就会转向其他区域。在经过几次这样的不成功的尝试之后,他们就可能打算放弃这个实验领域而转向其他课题。可是物理学史上也不乏这样的探索例子,有人重新回到某个旧领域进一步挖掘,最终找到了宝藏。研究者应该具有想像力、洞察力,再加上极大的耐心。

数据经过计算机处理之后,偶尔也会出现一小块闪光的矿石作为对实验者努力工作的奖励。即便如此,闪光的也未必都是金子。在志得意满地宣示成功之前,还必须仔细地分析,以确认这矿石并不是谚语中所称的昙花一现的东西。同样,科学史上也有许多贸然宣布了尚未经过最后检验的结果的鲁莽实例。

在科学上,标明一个观点的含义是,撰写一篇论文并提交到一份学术期刊上发表。这种“科学文献”不是用来娱乐的。对其他研究者来说,即对该领域之外的人来说,这些论文大体上是难以看懂的。即使是最引人注目的科学进展,也是用不太自然的短语来描述的,还会使用模糊不清的术语和难以理解的符号。论文避开了丰富多彩的语言,而用其由来已久的特有方式陈述出实验是什么,它是如何做的,最后宣布发现了什么。奥尔勒特小组准备的论文谈的是“测试 CPT 不变性”。

PS210 着手制造反氢。氢是所有原子中最简单的,每个普通的氢原子由单个电子绕原子核中的单个质子旋转而组成。反氢原子应该是一个正电子绕原子核中的一个反质子旋转。有了这 11 个实实在在的反氢原子的候选者,PS210 小组认为他们的梦想已变为现实。1995 年 11 月,他们的论文的定稿润色完毕,并被寄往欧洲物理研究的一流期刊《物理快报》



图 1.1 奥尔勒特(CERN 提供)。奥尔勒特领导他的小组发现了化学反物质的第一批原子。

编辑部。奥尔勒特和他的组员们急切地等待着结果。

像《物理快报》这种学术期刊的编辑,是根据他的学识以及他鉴别学术主张的能力来挑选的。可是,没有哪一个编辑能对像粒子物理这样复杂的领域有足够的了解,以致能由自己来审定每一篇论文。编辑一般会征求某位“审稿人”的意见,“审稿人”应该是不直接参与实验但又有学识的研究者,他应该起到一位客观公正的裁判的作用。在筛选掉过分乐观的或是假充内行的论文的同时,审稿过程还应该对实验有所帮助,提出能改进陈述和结果质量的建议。从原则上讲,论文的作者不知道审稿人是谁,所有联系都要通过编辑。

奥尔勒特的论文的审稿人是一位也在 CERN 工作的年轻的德国研究人员兰杜亚(Rolf Landua)。兰杜亚是位富于想像而又工作认真的人,年轻时曾是德国蝶泳比赛的冠军。他深