

TURING

图灵新知

# 寻找时空的涟漪

# 引力波

【法】皮埃尔·比奈托利 著 叶欣欣 译

À la poursuite des ondes  
gravitationnelles

中国科学院高能物理研究所  
张双南教授审读推荐

开启“引力宇宙”的大门◆倾听宇宙创生与死亡的欢歌



中国工信出版集团



人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS

# 追踪引力波

## 寻找时空的涟漪

À la poursuite des ondes  
gravitationnelles

【法】皮埃尔·比奈托利 著 叶欣欣 译

人民邮电出版社  
北 京

## 图书在版编目(CIP)数据

追踪引力波:寻找时空的涟漪/(法)皮埃尔·比奈托利著;叶欣欣译.--北京:人民邮电出版社,2017.3

(图灵新知)

ISBN 978-7-115-44834-7

I. ①追… II. ①皮… ②叶… III. ①引力波—普及读物 IV. ①P142.8-49

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第026280号

Original title: *À la poursuite des ondes gravitationnelle: Dernières nouvelles de l'Univers*,  
by Pierre BINETRUY

© DUNOD Éditeur, Paris, 2015, 2016 second edition

Illustrations by Rachid Maraï

Simplified Chinese language translation rights arranged through Divas International, Paris  
巴黎迪法国际版权代理 (www.divas-books.com)

本书中文简体字版由 DUNOD Éditeur 授权人民邮电出版社独家出版。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书内容。

版权所有,侵权必究。

## 内 容 提 要

本书以浅显易懂的物理学和天文学知识为起点,详细讲述了引力的奥秘,阐释了引力波及其发现对物理学和天文学发展的深刻意义,介绍了在全球范围内,人们为探索引力波而创造的最新尖端技术。

---

◆ 著 [法]皮埃尔·比奈托利

译 叶欣欣

责任编辑 戴 童

责任印制 彭志环

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号

邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

三河市中晟雅豪印务有限公司印刷

◆ 开本:700×1000 1/16

印张:14.25

彩插:4

字数:205千字

2017年3月第1版

印数:1-3 000册

2017年3月河北第1次印刷

著作权合同登记号 图字:01-2016-1245号

---

定价:49.00元

读者服务热线:(010)51095186转600 印装质量热线:(010)81055316

反盗版热线:(010)81055315

广告经营许可证:京东工商广字第8052号

## 序

这本书是通往“引力宇宙”的大门。阅读这本书，你不需要掌握高深的科学知识，书里也没有爱因斯坦广义相对论的数学公式。不过，我会在书中介绍一些已获得广泛认可的观点与概念，它们既是当下最新的研究课题，也是科学界争论的热门话题。理解书中所有内容还是需要你付出一点努力。但无论如何，所有必须的基本知识工具，本书大致上都清晰地介绍了。

前言如同一张“路线图”，让大家对全书有个整体的了解。你可以一章接一章地去看。阅读过程中，你会发现一些框起的文字，它们解释了一些概念，或者阐述了更加技术性的信息。这些文字能够满足你的好奇心，当然，你也可以把它们先放在一边，不予理会。

或许，你没有耐心按顺序读完所有内容……不要紧，你可以按自己的方式选择浏览各章后的“焦点”版块。读完各章内容，“焦点”版块非常值得一看。这个版块往往专注于某个相对独立的话题，即使与相关章节分开阅读，也未尝不可。

我还想特别推荐一下本书最后的两个重要的阅读工具——“词汇解释”和“索引”。“词汇解释”连通了本书论述的各个主题。在这里，你将重新看到从不同角度展现出的概念，它们的轮廓也被勾勒得更清晰。随着阅读的深入，“词汇索引”和“人名索引”会帮助你快速在正文中找到词汇和人物的相关内容。

希望本书能帮助大家找到了了解宇宙的今天和明天的钥匙。

最后，我想感谢所有帮助过我的人，他们提出的问题与质疑萌生了我为大家讲述天体物理学知识的想法，并一点点完成本书的创作。这其中包括前来听我演讲的观众们，参加玛丽-奥迪尔·蒙西古尔和米歇尔·斯皮罗组织的“起源”实验室活动的记者、学生和我的朋友们。感谢法国 Dunod 出版社的编辑们，以及安娜·布尔吉尼翁和让-吕克·罗贝尔，是他们说服我写了这本书。此外，感谢格尔卡·阿尔达、杰拉德·奥热、玛丽·维勒尔认真审读了这本书，他们给予了我宝贵的帮助。

于法国安纳西，2014 年 12 月 30 日

在写第一版前言的时候，我完全没有想到“引力宇宙”的历史会被如此迅速地改写。仅仅在第一版出版 9 个月之后，也就是在爱因斯坦预言百年之后，一束引力波最终被探测到。这一重大事件令描述宇宙的全貌显得更加重要。

借新版问世的机会，我在此感谢法、英双语网络在线课程“引力!” (Gravité!) 的 9 万多位参与者，我非常荣幸与他们共同见证了那振奋人心的时刻。

于法国巴黎，2016 年 9 月

致 G. A.、G. G. 和 S. H.

# 前言

## 变幻的夜晚

永远努力在你的生活之上保留一片天空。  
——普鲁斯特，摘自《去斯万家那边》，1913年

每个人都有过这样的经历：在一个美丽夏夜走出门，夜空中没有月亮，满天繁星闪烁的美景让人心醉。在凝望天空几分钟之后，我们都能看到带状的乳白色银河，辨认出一些星座和不同颜色，猜测夜空中众多的光线都是什么。或许，我们还能隐约看见距离更远的星星。在我们眼里，宇宙无限延展，威严而壮丽，亘古长存。同时，我们深深感到自己的渺小，人类就如同被抛弃在这点点星光之中的尘埃一样。相对宇宙的时间而言，人类的存在感简直微不足道。几个世纪以来，诗人、哲学家、艺术家、小说家都曾经幻想过、描述过、争论过仰望星夜时呈现在人们眼前的这幅炫目景色，仿佛一切已经尽述……

然而，上个世纪的物理学家却向人们展示，宇宙远比人类肉眼能观察到的景象丰富得多，而且，我们在地球上就能触及宇宙丰饶的内涵。通过比人类的眼睛更强大的大型望远镜等探测工具，我们终于可以深入宇宙。从伽利略发明望远镜的时代起，我们就知道大型望远镜的存在了。除此之外，人类还发明了其他各种探测仪器。这些仪器深入宇宙，探测的不再是光线，而是其他类型的辐射。从此，人类开始模糊地感知到宇宙中的种种可能，并以不同的方式看待

宇宙，探求宇宙更深刻的本质。

让我们回到星空之下。夜空中的每个光点都被人们亲切地称为“星星”。在很久以前，人类就知道一些星星，包括我们所在太阳系的行星——水星、金星、火星、木星、土星、天王星和海王星。一百多年前，人类知道了这些光点中还包括星系，也就是数量庞大的恒星的集合。我们自己的恒星——太阳，就是我们自己的星系——银河系的一部分。由于太阳位于银河系的边缘，我们可以通过大气层看到银河系，所以透过天空看去，银河系的形状被拉长了。至于我们所看到的乳白色光晕，则是恒星在这个方向上集中所形成的。我们从别的方位也可以看到银河系的恒星，尽管它们显得更加分散了。所有在天空中肉眼能够辨别出的天体都属于我们的星系，其他的光点属于河外星系，也就是在我们的银河系之外。事实上，这是一些独立的星系，它们距地球如此之远，我们不可能把组成星系的每颗恒星都辨认出来。

20 世纪 20 年代，人们发现了这些光源的河外属性；简而言之，就是发现了其他星系。伴随这一发现，还有另一个更加惊人的发现：这些星系在不断远离我们。如此一来，宇宙并不像它表现得那么“亘古不变”，相反，宇宙其实是很活跃的。既然所有星系都在远离我们，应该可以推测出，假设观察者没有处于一个优先位置，那么宇宙的结构本身就是活跃的，所有星系都在彼此互相远离。人们将这种现象称为“宇宙膨胀”。

事实上，光提供了宇宙膨胀的证明。我们可以通过分析天体发出的光，尤其是光的颜色（与它的频率有关），来研究每个星系里的天体。不过，勒梅特和哈勃在 20 世纪 20 年代的研究显示，已知天体发出的光线的光谱有轻微地向红光光谱偏移，这就是所谓的“红移”，是恒星和观察者之间的相对运动导致的结果。发出光线的天体相对于我们来说是运动的，这确实是一些河外星系的

天体。

光除了颜色（频率）以外还有另一种特性：它拥有一种有限速度。这对于我们这些星空观测者来说会产生显著的影响。一个天体发出的光到达地球的时

间是有限的：来自太阳的光要花 8.32 分钟到达地球，从银河边缘发出的光需要 10 万年，从仙女座星系发出的光需要 250 万年。这就意味着，当我们注视天空的时候，看到的并不是当下的宇宙，而是一张张古老的照片。天体离地球越远，我们看到的照片就越古老。在我们眼前呈现的其实是一系列的静态电影！

对于那些宇宙史爱好者来说，这是一件大好事：此时此刻，宇宙历史正在我们眼前展开来。我们今天看到的最遥远的天体（在距地球大约 140 亿光年的地方）正处于宇宙最初始的状态。今天，它们变成了什么样子呢？想要知道答案，还需要再等上大概 140 亿年，等到它们现在发出的光到达地球。试想一下，一个身处仙女座星系的观测者在今天看到的地球，其实是它 250 万年前的样子，那时候猿人刚刚出现。

可以说，星系和天体发出的光向我们展现了一个穿越了时空的、真实的历史截面。在此基础上，我们可以重建宇宙在空间和时间上的全貌——这好比一棵刚刚被砍倒的树，年轮可以让我们了解这棵树及其生存环境的历史。

但是，谁应该为宇宙膨胀负责呢？让天体之间距离膨胀的能量又来自哪里？爱因斯坦给了我们答案。在 1915 年，爱因斯坦写出一组方程式，把人类对引力现象的描述统一到了他在此 10 年前构想出的狭义相对论框架下，这就是著名的爱因斯坦方程组。方程组量化了在质量的作用下——更普遍地说，是在能量集中的作用下所产生的时空变形，借此计算一个物体在靠近另一个物体时的运行轨迹。这些方程式构成了广义相对论的核心。

爱因斯坦立刻尝试运用这些方程式，不仅用在一些受引力相互作用的物体上（比如天体），而且还有整个宇宙。宇宙为什么会膨胀？答案是存在的。要弄清膨胀的根源，应该研究的是引力本身。换句话说，整体来看，宇宙是被引力驱动的！我们要改写亚里士多德说过的一句话，即上帝是宇宙演变的第一动力；而我们可以说，引力才是宇宙演变的第一动力。

有人不禁要问：引力是一种怎样的基本力？这是我们意识到的第一个力：想想幼儿学习直立和走路时需要付出的努力吧！然而，引力同时也是最微弱的

基本力。为什么会出现这种明显的悖论呢？要知道，引力的大小与质量成正比，而我们恰巧就生活在一个质量巨大的物体之上，这就是地球。可以肯定的是，如果人类生活在一个小行星上，我们很少会注意到引力。引力太微弱了，是最不容易被感知的力。但引力的力程很长，这就是它成为宇宙演变动力的原因。然而，相对于另一个力程长的力——电磁力而言，在短距离内，引力更少被感知。

事实上，在 20 世纪，引力理论一直脱离其他相互作用力的理论而独立发展。电磁学的发展使人们得以窥见微观世界，研究物质中的粒子，并从这一领域引申出了量子力学；而广义相对论则针对我们附近的宇宙，也就是太阳系，获得了不少极具说服力的验证，如光在太阳附近的弯曲、行星的运转等。

贯穿整个 20 世纪，人类始终没有停止对微观世界的探索：人们发现了核力，或者说强核力和弱核力（弱核力使元素产生放射性），并运用功率越来越大的粒子加速器探索微观世界。既然粒子在加速器里能以接近光速运转，量子力学与狭义相对论就应该能互相调和。20 世纪 40 年代至 50 年代，人们实现了两者的调和。

在电磁学框架下发展起来的概念归纳描述了强核力和弱核力，形成一个统一的理论体系，称为“标准模型”。2012 年，欧洲核子研究组织发现了希格斯粒子，确证了这个模型。希格斯粒子是论证该模型严密性不可或缺的最后一块拼图。

但是，广义相对论——同样是引力理论——基本上一直独立、平行地发展，研究主要围绕着引力的特殊性。这些特殊性是引力理论里的一些反常现象，要么发生在遥远的过去，如著名的宇宙大爆炸理论，要么发生在恒星发生引力坍缩时，即同样有名的黑洞理论。尽管某些特殊现象确实具有量子特征，比如斯蒂芬·霍金提出的“黑洞蒸发”理论，但广义相对论总是无法接受从量子理论的角度来研究这些现象。引力理论从本质上无法与量子理论相互调和吗？还是说，必须修正一下量子力学的定律，才能让广义相对论成功纳入量子理论？

20 世纪 70 年代至 80 年代，两种理论开始互相靠近。从引力之外的三种基本力的角度来看，这是迈向**统一力场**的关键一步。电磁力、强核力和弱核力很可能仅仅是统一力场的低能量变形；而统一力场只能在极高能量下才被探测到。我们意识到，从引力的角度来看，越往古代追溯，宇宙就温度越高、密度越大。在最初的时候，宇宙就像由基本粒子熬成的一碗汤。不过，引力的强度随着温度的升高而增大；结果就是，在宇宙的初始时刻，基本粒子之间的引力与其他三种基本力一样强——这与现在的情况大不相同，与其他三种基本力相比，引力十分微弱。因此，引力也是符合量子力学理论的。所有已知的基本力，包括引力，是否仅是一个统一力场的不同形式呢？

一个重要问题揭示了调和引力理论与量子物理学的困难，这就是**真空能量**的问题。在量子理论里，每个体系都有一个最基本的状态，人们习惯称之为“真空”。从真空状态开始，人们创建理论的其他状态。宇宙本身也有自己的真空状态，这个量子状态是（量子）变化的基石，给予了宇宙能量。然而，在广义相对论的框架下，每种能量形式都能让时空变形，因此，这些能量原则上都可以被测量出来，特别是真空能量。运用量子物理学和广义相对论特有的量值快速计算一下，竟然能测算出无可估量的巨大真空能量——达到  $10^{120}$  量级！这一量级与观察到的宇宙现实相比实在太大了。也就是说，人们尚未找到统一广义相对论和量子物理学的理论，而若想实现引力与其他基本作用力的终极统一，注定要从根本上重新考虑这两大理论。在 20 世纪 90 年代末，人们普遍认为，假如将来有一天确立了“统一理论”，到时候，真空能量理论将会自动废除。

然而，真空能量理论对解释大爆炸之后宇宙的持续飞速膨胀来说是不可或缺的。这就是所谓的“宇宙暴胀”阶段，它阐释了为什么我们今天从任何方向观测到的宇宙都如此一致：宇宙应该源自时空中一个特别小的区域。

历史加速进入世纪的转折点。在 1999 年，人们发现了宇宙的**加速膨胀**：某类超新星越古老，在爆炸时发出的光就越不明亮。确切地说，超新星当初能

够被人们观察到，就是因为其光度十分稳定。因此，它们与地球之间的距离应该比预期的要远。<sup>①</sup>也就是说，从超新星爆炸以来，宇宙的膨胀速度比预期的要快——膨胀在加速。这个发现最引人注意的地方在于，宇宙所有已知的组成部分——亮物质、暗物质、电磁辐射和中微子都在减慢宇宙的膨胀速度。如果宇宙目前仍处在加速膨胀阶段，那么宇宙中肯定还存在一种未知能量部分远超过已知部分，导致了宇宙膨胀的加速。人们称宇宙的这种未知能量为暗能量。

暗能量到底是什么？目前，真空能量是解释宇宙新阶段加速膨胀的最佳答案。如此一来，我们的宇宙将面临怎样的命运？膨胀得越来越快？

所有这些问题都让大众兴趣盎然，特别是自 2013 年以来，欧洲航天局“普朗克”（Planck）卫星的发现支持了膨胀模型的预测：我们在宇宙深处探测到的原子结构——宇宙大爆炸之后 38 万年发出的第一缕光线，似乎正是在宇宙暴胀阶段量子真空内部产生的余波。

同时，这一发现清除了阻挡在 20 世纪物理学的两大重要理论体系——量子力学与广义相对论之间的障碍。除了理论成果，这次发现还提供了很多观测数据，而这些观测数据还将不断丰富。为了明确暗能量的属性，人们已经在太空中和地面上开展了大量的观测活动。

然而，最非同凡响的还当属引力波的发现。1916 年，爱因斯坦预测了引力波的存在：如同运动的电荷会产生电磁波，运动的质量（比如在爆炸中）会产生时空曲率，而曲率就像落入水塘的石头在水面上激起的涟漪一样传播。当这些波穿过观测站的时候，时空曲率仿佛让物体之间发生了相互运动。但引力太微弱了，所以引力波的作用也特别微小。好在加速度的测量技术已经取得了长足的进步，我们现在可以测量到这些运动。科学家们在全球范围内布置了一个巨大的引力天线网，主要设在美国、欧洲，不久还会设在日本和印度，借此探测引力波。2016 年 2 月 11 日，一声巨雷在引力的天空响起：人们声称，LIGO 干涉仪天文台测到了来自 13 亿年前发生的一次双黑洞并合所产生的引

① 只有在光度稳定的情况下，距离越远，天体才会不如之前明亮。——译者注

力波！一百年的探寻终于有了回报。这一重大发现虽然揭开了引力波的神秘面纱，却也展现出“引力宇宙”更深不可测的未来。

未来的探索将依赖范围更广的地面天线网络：欧洲的“升级版”VIRGO 探测器将很快投入运作，日本和印度的探测器紧跟其后。2013 年底，欧洲航天局决定在未来 20 年间于太空中设立一个引力波的观测站。2015 年底，“LISA 探路者”肩负着测试核心技术重任飞向太空，确认了该计划切实可行。

几个世纪以来，光让我们观测并了解了宇宙。现在，我们很快就能利用引力波以及引力——宇宙演变的首要动力，来观测宇宙。

今天，宇宙学的基本概念正在发生重大变革。这本书将帮助大家更好地了解这一关键的历史时刻——这的确是一个关键的历史时刻：这一刻浓缩了人们对广义相对论（也是引力的第一理论）长达百年的思考；同时，在上世纪的最后 15 年间，涌现出众多重大发现都与引力在宇宙中发挥的角色有关；最终，科学家实现了一个观测“引力宇宙”的全球性项目。这一切终将改变我们对引力的理解。

理论研究和观测计划涉及的都是最基本的问题。这些问题至关重要，值得每个人关注，因为它们会改变人类对自己在宇宙中位置的认知。这就是为什么本书要写给所有充满好奇心的人，无论你是否接受过严格的科学教育。在本书中，你或许会碰到许多不熟悉的概念和定义。未知的事物通常都显得很复杂，但是，把复杂的东西变得简单而有序，不正是物理学家的一个重要职责吗？

## 图片版权

---

41: R. Hurt (SSC), JPL-Caltech, NASA; 43: NASA, ESA, R. Ellis (Caltech), and the UDF 2012 Team; 44: NASA, ESA, the Hubble Heritage Team; 47: V. Springer/Virgo Consortium; 51 (左图): NASA; 52: Niedzwiadek78; 54: John Dubinski/University of Toronto; 86: james633-Fotolia.com; 88: NASA/WMAP Science Team/NASA/JPL-Caltech/ESA; 89-90: ESA and the Planck Collaboration; 91: ESA, HFI & LFI consortial; 92: NASA/JPL; 98: NASA/CXC/M.Weiss; 99: Hubble Space Telescope NASA; 112: bennnn-Fotolia.com; 113: Attila Csorgo; 121: ASA/CXC-Digitized Sky Survey; 123: ESO; 124: Hubble ESA/NASA; 146: Caltech-Cornell; 158: University of Maryland (College Park, Md.); 177: ESA ; 190: ESA.

# 目 录

|                      |    |
|----------------------|----|
| 第一章 引力，未知的力量         | 1  |
| 引力是什么                | 1  |
| 伽利略与自由落体运动的普适性       | 3  |
| 牛顿和月亮的下落             | 7  |
| 爱因斯坦与时空              | 9  |
| 爱因斯坦的电梯              | 12 |
| 焦点 I 引力实验            | 15 |
| 第二章 广义相对论：从引力理论到宇宙理论 | 19 |
| 爱因斯坦方程组              | 19 |
| 当光勾勒出时空              | 21 |
| 宇宙会收缩到我们星系吗？         | 23 |
| 膨胀的宇宙                | 24 |
| 大爆炸模型                | 30 |
| 焦点 II 光的历史           | 32 |
| 第三章 观测宇宙             | 38 |
| 通往过去之路               | 40 |
| 星系、星系团、暗物质           | 45 |
| 复合与宇宙背景              | 48 |
| 焦点 III 从仙女座星系看宇宙     | 52 |
| 第四章 两个无穷：可调解，不可调解？   | 56 |
| 元素合成                 | 59 |

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 相变.....                           | 63  |
| 量子真空与希格斯场.....                    | 64  |
| 反物质之谜.....                        | 67  |
| 普朗克尺度与量子引力：连接无穷大与无穷小？.....        | 68  |
| 帕斯卡的“两个无穷”.....                   | 70  |
| 焦点 IV 大爆炸.....                    | 72  |
| <b>第五章 宇宙最初的时刻：从膨胀到第一缕光</b> ..... | 76  |
| 视界问题.....                         | 77  |
| 开放、闭合、平坦？.....                    | 79  |
| 暴胀时期.....                         | 82  |
| 宇宙微波背景各向异性.....                   | 85  |
| 焦点 V “普朗克”卫星.....                 | 90  |
| <b>第六章 暗能量与量子真空</b> .....         | 95  |
| 测量宇宙的烛光.....                      | 96  |
| 暗能量，只是一句漂亮话？.....                 | 100 |
| 暗能量是量子真空能量吗？.....                 | 106 |
| “存在”问题.....                       | 108 |
| 焦点 VI 量子真空，如何（自我）描述？.....         | 110 |
| <b>第七章 黑暗的教训：黑洞</b> .....         | 115 |
| 恒星之死.....                         | 117 |
| 黑洞和星系.....                        | 122 |
| 令人困惑的黑洞.....                      | 123 |
| 宇宙的引力实验室.....                     | 126 |
| 焦点 VII 视界.....                    | 130 |
| <b>第八章 引力波登场</b> .....            | 135 |
| 曲率的波动.....                        | 136 |
| 引力波是否存在？.....                     | 138 |
| 光速传播.....                         | 140 |
| 双人舞.....                          | 144 |
| 如何找出引力波？.....                     | 148 |
| 精确计量与干涉度量学.....                   | 148 |

|                           |            |
|---------------------------|------------|
| 多大的探测器? .....             | 151        |
| 准备测量引力波的干涉仪 .....         | 152        |
| 焦点 VIII 追踪引力波的百年之路 .....  | 157        |
| <b>第九章 我们做到了! .....</b>   | <b>161</b> |
| 13 亿年前 .....              | 161        |
| GW150914 .....            | 165        |
| 空间天线——“引力宇宙”的天文台 .....    | 167        |
| 空间天线可探测的科学 .....          | 171        |
| 当宇宙仍然不透光的时候 .....         | 174        |
| 原始引力波与宇宙暴胀 .....          | 176        |
| 焦点 IX eLISA 计划 .....      | 178        |
| <b>第十章 通往怎样的未来? .....</b> | <b>183</b> |
| 预测宇宙的未来? .....            | 184        |
| 时间的终结? .....              | 186        |
| 观测者的位置 .....              | 187        |
| 未来 20 年将是引力的时代吗? .....    | 188        |
| 焦点 X 时间问题 .....           | 191        |
| <b>词汇解释 .....</b>         | <b>195</b> |
| <b>词汇索引 .....</b>         | <b>208</b> |
| <b>人名索引 .....</b>         | <b>210</b> |

## 第一章

# 引力，未知的力量

### 引力是什么

我们对引力最直接的体验就是落体运动——这种引力就是重力，即物体与地球之间的引力。引力是最容易被直接感受的一种力，也是幼儿学习站立时所要克服的力。或许，正是在与地球引力作斗争并最终站立起来的过程中，人类在某种程度上确立了自身的特性。也正是从引力实验开始，力的概念在现代科学中被建立起来。

然而，引力是四大基本力中最微弱的，我们能直接感受到它仅仅是环境造成的：因为我们紧邻一个无比庞大的物体——地球。如果不是身处这个特殊的环境中，我们可能会通过电场力来发现力这个概念。此外，我们也可以凭空想象一下，哪种类型的力能够捕捉到一个远离地球且处于失重状态的生命体？我猜想，这很可能是一种摩擦力，比如勺子搅动蜂蜜时感到的阻力。这种力的本质是什么呢？其本质上是一种电场力——由摩擦产生的电场力，而摩擦来自于移动物体的分子与周围环境分子之间具有电属性的结合力，就如同上面提到的勺子和蜂蜜。

现在是时候来阐述一下基本力的概念了。基本力又称基本相互作用，一