丁衡高　贺晓霞　高钟毓　编著

The Application of Inertial Technology
for Testing General Relativity-2013

应用惯性技术验证广义相对论

——2013年新版

Ding Henggao He Xiaoxia Gao Zhongyu

清华大学出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

The Application of Inertial Technology for Testing General Relativity

应用惯性技术验证广义相对论

（2013 年新版）

丁衡高　　贺晓霞　　高钟毓　　编著

Ding Henggao　He Xiaoxia　Gao Zhongyu

清 华 大 学 出 版 社

北 京

PREFACE 序言

我以喜悦的心情欢迎本书的问世。我所熟悉的或是素不相识的中国朋友们，像我的 Gravity Probe B 团队一样关注着精确测量的美妙，我向你们表示由衷的问候。科学具有国际性：苏格兰的同仁发明了测量熔凝石英陀螺转子均匀度的仪器；意大利的两个科研机构(ICRA 和 ICRANet)给我们提供了理论和工程上的支持；自 2008 年以来，沙特阿拉伯的科学工程核心 KACST 在关键的后期数据分析中与我们建立了关键性的合作，这一合作延续至今。而今，中国清华大学的校园里出现了对 Gravity Probe B 团队完全独立的里程碑式的评估并利用 NASA 提供的数据对爱因斯坦的两个效应之一进行的独立分析。Gravity Probe B 团队三个创始人之一，威廉·费尔本克(William Fairbank)曾经引用另一个著名物理学家的话："绝不要低估倾听旁人在你熟悉领域的讲座的乐趣——你也许能学到很多。"本书给 Gravity Probe B 团队提供了这样的乐趣。

爱因斯坦的引力理论、广义相对论，奇妙地与技术科技发展交织演变。他的起点不是引力，而是力学。麦克斯韦的电磁学理论与牛顿力学是不匹配的，这在 19 世纪末已经很明朗。爱因斯坦认为答案应该是保留电磁学理论而修改力学。如此生成的理论，及现今称作"狭义相对论"的理论，有着极深的实验后果，其中包括解释放射性过程中所释放的巨大能量。那么引力呢？牛顿的思想需要又一次修正。1916 年爱因斯坦提供了修正的要素，他提出引力不是以力的方式相互作用，而是通过时空的弯曲而作用。这一提议极为深奥，但从实验的角度，牛顿的理论却已经极为成功。爱因斯坦只能提出三个效应很小的定量实验：光在引力场向上运动会产生红移，光线掠过太阳时会偏转 1.7″及水星近日点的运动会有 0.4%的修正。其中两个效应，近日点修正和光线偏转，很快就被验证了。爱因斯坦也成为我们现今所知的世界名

人。接下来，一直寂寂无声。40 年后，Pound 与 Rebka 第一次测量了引力红移。在这期间，没有人提出过第二个定量的实验验证。更糟糕的是，1960 年 Leonard Schiff 提出先前的实验对爱因斯坦理论的证实比大家想象的还要少。但难以料及的是科技的发展提供了新的机遇。Schiff 和 Pugh 独立提出太空将为两个新效应的测量开路——陀螺的坐标系拖曳及短程线进动。射电天文的发展开拓了其他的验证实验，诸如 Shapiro 时间延迟效应，Taylor-Hulse 脉动星测量，Vessot 与 Levine 的 Gravity Probe A 氢微波激射器使得引力红移的精确测量成为现实。

45 年的探索，Gravity Probe B 团队要测定坐标系拖曳及短程线进动，要求陀螺的漂移精确度在 $10^{-10}\sim10^{-11}°/h$，引发了一系列新技术的发展，这些技术都将由本书介绍。

Francis Everitt

王肃文 译

2013 年 4 月

PREFACE（新版）前言

2011年5月4日，NASA新闻发布会上，B型引力探测器(GP-B)的项目负责人Francis Everitt宣布了GP-B实验的最终结果：短程线效应为$(6602\pm18)\times10^{-3}(″)/a$，坐标系拖曳效应为$(37.2\pm7.2)\times10^{-3}(″)/a$。广义相对论预测值分别为$6602\times10^{-3}(″)/a$和$39.2\times10^{-3}(″)/a$，即GP-B实验测得的短程线效应的精度为0.3%，而更小的坐标系拖曳效应的精度为20%。而GP-B的预期目标是二者的精度分别为0.01%和1%，也就是说，GP-B的实验结果为：**GP-B作为一个概念简单的实验，验证了广义相对论的两个推测，但是精度未达到预期目标**。

在GP-B历时半个世纪的实验过程中，他们制造了荣膺最完美球体吉尼斯世界纪录的乒乓球大小的陀螺转子、用5年的时间坚持不懈地对陀螺仪干扰力矩进行建模和数据处理，不断地降低实验误差以及反复校核实验结果，堪称是一个特殊的艰难历程。到底是什么未曾预料的棘手的问题导致一个概念简单的实验需要如此长的数据处理时间？

本书在旧版的基础上，向读者介绍GP-B的实验结论以及实验中的一些问题。

新版主要在如下方面进行了增补和调整：

(1) 扩充了第6章的数据提取和处理方法，介绍了4个层次的科学数据和采用的数据处理方法；

(2) 把原来的第7章移到第9章，并给出了对GP-B实验的思考；

(3) 新增GB-P实验结果及问题作为第7章，新增媒体和学术界对GP-B的评论作为第8章。

编写新内容的过程中，作者曾到斯坦福大学访问过GP-B项目负责人Francis Everitt和技术管理人Barry Muhlfelder，并和技术人员Suwen Wang和G. M. Keiser讨论了相关技术问题。作者根据他们的讲解，勘误了初稿中的一些错误。Suwen Wang

需要全本请访问 www.ertongbook.com

还对本书的初稿进行了全面的审阅,提出了不少中肯的意见,作者根据他的意见作了修改后,才最终成稿。在此,向帮助过我们的 Francis Everitt、Barry Muhlfelder、Suwen Wang 和 G. M. Keiser 表示感谢。由于水平有限,书中一定会有缺点和错误,还请读者批评指正。

作者

于清华大学

2012 年 12 月

PREFACE (第一版) 前言

2005年6月17日，为了纪念爱因斯坦狭义相对论发表100周年及配合国际物理年纪念活动，中国惯性技术学会与清华大学在中国科技会堂联合召开了“应用惯性技术验证广义相对论预测效应”的学术报告会，笔者应邀作了报告。此外，笔者曾先后应邀在中国惯性技术学会测试技术年会、航天科工集团和航天科技集团等有关单位作了类似的学术报告。这些报告引起了广大听众的极大兴趣和反响，因此，我们在讲稿的基础上，经过修改补充，完成了本书，以飨读者。

航海、航空、航天及科学研究的需求，牵引了惯性技术的发展。同时惯性技术也是一门多学科交叉的科学技术，在其发展的历程中，带动了一系列新兴学科和技术的发展，也为本身增添了生机和活力。本书的目的是向广大有兴趣的读者介绍在最富挑战性的科学实验中惯性技术应用的最新成就。通过本书，希望读者能了解惯性技术具有独特的功能和惊人的探测本领，在科学研究、国民经济发展及国防建设中都是大有可为的。同时，还希望本书对发展我国太空科学实验中的惯性技术有一些启示作用。

由中国惯性技术学会组织，本书的初稿经过陆元九院士、章燕申教授、杨畅研究员、吕应祥研究员及冯培德院士等学者的审阅。在编写本书有关广义相对论的基础知识的过程中，得到了张元仲研究员的帮助。借此机会一并致谢。

由于水平所限，书中一定会有缺点和错误，敬请读者批评指正。

作者

于清华大学

2005年7月

CONTENTS 目录

引言 …… 1

1 爱因斯坦广义相对论的预测及验证原理 …… 3

1.1 广义相对论 …… 3
1.2 对广义相对论所预言的新物理效应的预测 …… 6
1.3 短程线效应和坐标系拖曳效应引起的陀螺进动 …… 8
1.3.1 短程线效应引起的陀螺进动 …… 10
1.3.2 坐标系拖曳效应引起的陀螺进动 …… 13

2 引力探测器卫星(GP-B) …… 15

2.1 GP-B 实验的目的和意义 …… 16
2.2 测量短程线效应和坐标系拖曳效应的原理和方法 …… 17
2.3 GP-B 的轨道及向导星选择 …… 19
2.4 卫星的结构和参数 …… 21
2.5 卫星搭载的仪器装置 …… 25
2.5.1 杜瓦瓶 …… 25
2.5.2 真空金属筒 …… 26
2.5.3 石英块 …… 29
2.5.4 陀螺和加速度计 …… 31
2.5.5 超导量子干涉仪(SQUID) …… 32
2.5.6 望远镜 …… 32
2.6 对引力探测器卫星的要求 …… 34
2.6.1 总要求及误差树 …… 34
2.6.2 陀螺受到的干扰加速度应小于 $10^{-11}g$ … 37
2.6.3 卫星核心部件的低温工作环境 …… 38

2.6.4 低磁场环境 …… 38
2.6.5 真空罐内的真空度 …… 40
2.6.6 其他 …… 40
2.7 GP-B系统层次和系统复杂性 …… 42
2.7.1 系统目标 …… 43
2.7.2 系统组成的层次和工程阶段 …… 44
2.7.3 系统复杂性 …… 45

3 陀螺结构及关键技术 …… 47

3.1 静电陀螺的结构 …… 47
3.2 陀螺转子制造和参数测量 …… 48
3.3 陀螺支承 …… 50
3.4 陀螺加转与阻尼 …… 52
3.5 陀螺信号读取 …… 54
3.6 陀螺装配 …… 57
3.7 小结 …… 58

4 陀螺及其部件在地面的测试和标定 …… 59

4.1 太空中与地面上陀螺工作状态的差别 …… 60
4.2 太空中陀螺受到的干扰力矩 …… 60
4.3 太空中陀螺漂移模型 …… 64
4.4 地面上的陀螺漂移 …… 65
4.5 支承系统在地面的测试 …… 66
4.6 SQUID在地面的测试 …… 67
4.7 陀螺精度实验及误差分析 …… 71
4.8 其他 …… 78
4.9 小结 …… 79

5 GP-B卫星测量数据可信度的保证 …… 81

5.1 实验数据内部一致性的保证 …… 81
5.2 实验数据外部一致性的保证 …… 82

需要全本请访问 www.ertongbook.com

5.3 太空中的标定 …… 84

6 科学数据提取和估计 …… 87

6.1 科学数据提取 …… 87
6.2 数据介绍 …… 88
6.3 数据处理与估计 …… 90
6.3.1 发射前拟采用的数据处理模型 …… 90
6.3.2 最终采用的数据处理模型 …… 92
6.4 GP-B 实验系统误差 …… 103

7 GP-B 实验结果及问题 …… 105

7.1 GP-B 实验的结论 …… 106
7.2 两个始料未及的事情及它们对实验的影响 …… 109
7.2.1 碎磷效应引起的陀螺时变极迹运动及对实验的影响 …… 109
7.2.2 不对准力矩和谐振力矩 …… 113
7.3 数据处理的主要方法 …… 115

8 评论 …… 117

8.1 美国国家航空航天局的评论 …… 117
8.2 《AAAS Science Now》评论 …… 118
8.3 《American Surveyor》评论 …… 118
8.4 《Aviation Week》评论 …… 119
8.5 《BBC NEWS》评论 …… 119
8.6 《Big Think》评论 …… 119
8.7 《Bloomberg》评论 …… 120
8.8 《Physics》评论 …… 120
8.9 《Inside GNSS》评论 …… 121
8.10 《Nature.com NEWs》评论 …… 121
8.11 《NYTimes》评论 …… 122
8.12 《Science News》评论 …… 123

8.13 《SF Chronicle》评论 …… 123
8.14 施昊的质疑文章 …… 123
8.15 张操的质疑评论 …… 124

9 GP-B实验给我们的启示 …… 125

9.1 GP-B陀螺为惯性技术的空间应用开辟了新思路 …… 125
9.2 严格“安静”的环境条件是陀螺仪工作的必要条件 …… 125
9.3 新材料、新技术的应用是提高陀螺精度的基础 …… 126
9.4 缜密的太空检测与可靠的实验数据处理是
实验成功的重要环节 …… 127
9.5 正确有效的管理是成功的有力保证 …… 128
9.6 GP-B在带动相关学科发展、培养人才方面
做出了历史性的贡献 …… 128
9.7 勇于探索,不断创新 …… 129

附录A …… 131

A.1 GP-B发展大事记 …… 131
A.2 专业术语中英文对照 …… 143
A.3 科学术语解释 …… 144
A.4 一些有关的网站资源 …… 147

参考文献 …… 149

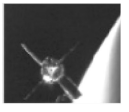
引 言

2004 年 4 月 20 日，美国宇航局发射了 B 型引力探测器卫星(Gravity Probe B，GP-B)来验证爱因斯坦的广义相对论，这在全世界引起了巨大的反响。GP-B(见图 0.1)也许是曾经发射过的最精密的卫星。为了使静电力矩和噪声干扰降到最小，卫星搭载了大量的子系统，每个子系统需协同工作来获得预定的测量精度，因此卫星构造非常复杂。这项任务被美国宇航局前任首席科学家法兰克·麦克唐纳博士称作是“新千年美国宇航局将要完成的最富挑战性的实验”，由此可见它的难度和重要意义。这项实验，不仅吸引了不少相对论物理学家的目光，同时也引起了惯性技术学界有关人士的兴趣和关注。因为在引力探测器里用到了 4 个静电陀螺(其中 1 个充当无拖曳控制用的引力基准加速度计)。我们对 GP-B 项目，尤其对其中的惯性技术进行了研究，并在本书中介绍了 GP-B 中用到的惯性技术，希望对惯性技术在太空科学实验中的应用及惯性技术的发展有一些启示和帮助。

GP-B 发射—— 2004 年 4 月 20 日



2004 年，美国太平洋时区时间 4 月 20 日上午 9:57:24，引力探测器卫星从南加州的范登堡空军基地发射升空。约 1h11min 后，卫星太阳能板展开，搭载的照相机记录了卫星从二级运载火箭中分离的过程。波音 Delta Ⅱ 型运载火箭准确地把卫星放置到预定的距地球 400mile (1mile=1609.344m)的极地轨道上。



从 4 月到 8 月， GP-B 卫星进入了初始化和轨道校验阶段，在此期间，陀螺加转到约 4000r/min，卫星姿态和搭载的各个子系统都被调整到准备进行接下来为期 10 个月的科学实验阶段。在 2004 年 8 月末，GP-B 卫星开始正式从 4 个陀螺中收集实验数据。数据收集阶段过后，是为期 2 个月的实验后标定阶段。

图 0.1　GP-B 的发射

1 爱因斯坦广义相对论的预测及验证原理

1916 年是人类思想史上辉煌的一年。在这一年，爱因斯坦发表了巨作《广义相对论基础》。在这篇论文中，爱因斯坦首先将以前适用于惯性系的相对论称为狭义相对论，将物理规律的协变性只在惯性系中成立的原理称为狭义相对性原理，并进一步表述了广义相对性原理：物理学定律必须对于无论以哪种方式运动着的参照系都适用。爱因斯坦广义相对论是比牛顿万有引力定律更精确并与狭义相对论相容的引力理论。

1.1 广义相对论

相对性原理最先由牛顿在他的运动定律的其中一个推论中陈述："在一个给定的空间中，各个物体的运动是彼此相同的，无论这个空间是静止的还是作匀速直线运动的。"此后，伽利略进一步完善了这个原理，因此这个原理被称为伽利略相对性原理。然而，麦克斯韦方程组似乎不遵从伽利略相对性原理。后来，洛伦兹(Lorentz)在麦克斯韦方程组中实施下面的变换时发现方程组在两个坐标系中保持形式不变！

$$
\begin{aligned}
x' &= \frac{x-ut}{\sqrt{1-u^2/c^2}} \\
y' &= y \\
z' &= z \\
t' &= \frac{t-ux/c^2}{\sqrt{1-u^2/c^2}}
\end{aligned}
$$

这就是著名的"洛伦兹变换"。式中，u 表示坐标系 $x'y'z'$ 相

对于坐标系 xyz 沿 x 方向的运动速度,c 是光速。当然,最普遍的洛伦兹变换是相当复杂的,全部 4 个变量都混合在一起。洛伦兹变换的基本性质是它保持四维时空间隔不变,其中包含"原时"不变(由一个运动的时钟所测得的时间常常叫做原时或固有时)。

但是,洛伦兹对他这个新变换(特别是对其中的时间坐标)的物理解释仍然沿用了牛顿的时空观念,因而他没有发现光速的不变性和新的时空理论。是爱因斯坦提出了狭义相对性原理:一切物理方程在洛伦兹变换下保持形式不变。进而他又提出了光速不变原理:光在真空中总是以不变的速度传播,且与光源的运动无关。由狭义相对性原理和光速不变,爱因斯坦得到了洛伦兹变换(但其物理解释与洛伦兹完全不同),继而建立了狭义相对论。

根据狭义相对性原理,爱因斯坦 1905 年在他的第一篇狭义相对论的论文中对牛顿力学第二定律施以洛伦兹变换,得到了形式不变的方程式。同时他给出了真空中电磁场的变换形式,因而也使真空中的电动力学即真空中的麦克斯韦电磁场方程和洛伦兹力得以满足狭义相对性原理。后来闵柯夫斯基在 1908 年给出了满足狭义相对性原理的运动介质中的电动力学,至此唯一迫切需要修改的另一个基本理论就是牛顿万有引力定律。如果像修改牛顿力学第二定律那样,仍然把时间和空间看做是平直的,那么无论如何也不可能把牛顿万有引力定律修改成满足狭义相对性原理的形式。为此爱因斯坦借助于弯曲空间的黎曼几何才得以把牛顿引力定律推广成与狭义相对论相容的新型理论。这就是 1916 年公布的广义相对论——一种弯曲时空的度规(metric)理论。

这个理论的问世引起了当时物理学界的很大反响,因为这个理论太抽象,很难直观地想像和理解,并且与牛顿对引力的解释截然不同。牛顿的万有引力定律(1687 年)认为两个物体之间有相互的吸引力——引力,但是他没有指出这个引力以什么方式传递及以多快的速度传递,他仅假设这个引力是超距作用的(没有引力子的交换)。牛顿的万有引力定律和牛顿力学第二定律一起解释了物体、行星和星系的运动,但是水星近日点每百年的进动数值还剩下 42″(角秒)不能解释。

早在 19 世纪,人们就已经用实验测量证明了光在真空中传播速度是有限的(大约 $3\times10^8\,\mathrm{m/s}$)。爱因斯坦提出的狭义相对论也显示:任

何物质在宇宙中的速度极限是光速。因此，牛顿引力的瞬时超距作用与这一结论相抵触。

为了解决以上这些问题，爱因斯坦根据等效原理和广义协变原理在弯曲时空中建立起了一个新的引力理论即广义相对论。这个理论表明，物质决定了时空的弯曲，而时空的弯曲又决定了物质的运动。

爱因斯坦指出了这个弯曲空间的曲率。爱因斯坦给出的有关曲率的规则如下：如果存在一个有物质分布于其中的空间区域，取一个足够小的球面，使其中的物质密度 ρ 近似为常数，那么，这个球面的半径超出量正比于球面内的质量，即

$$\text{半径超出量}=GM/3c^2$$

式中，M——球面内物质的质量；

G——牛顿万有引力常数，$G=6.67\times10^{-11}\ \mathrm{N\cdot m^2/kg^2}$；

c——真空光速。

这就是空间平均曲率的爱因斯坦定律。这条定律给出，在各个曲率分量与平均曲率随位置的变化之间存在某种关系，因此假如知道了每一点的平均曲率就能够计算出每一点上曲率的细节。地球上方的平均曲率随高度而改变，因此空间是弯曲的。

关于时间，爱因斯坦所用的观念是：时间能够在各点不一样，即在不同的地点，时间以不同的速率演进。爱因斯坦给出了在引力场中一个时钟的快慢是如何随高度而改变的。只有当这个有关引力场中的时钟的预言正确无误时，有关相对论量子物理学和能量守恒的观念才会全部吻合。

因此，空间的度量和时间的度量是相互关联的，它们必须被组合起来形成时空。一个自由降落的物体在这个弯曲的时空中沿着“直线”(短程线)运动。例如，我们可以想像太阳使时空变形，如同重物使橡皮膜变形一样，因而彗星的轨道弯向太阳可以看成是为了保持其路径尽可能的短。这是一种几何的类比。图 1.1 可以形象化地表示空间弯曲，想像一个保龄球放置在一块绷紧的桌布中央，桌布由于保龄球所受的重力而凹陷。当一个小质量物体经过一个大质量物体时，由于空间自身向大质量物体弯曲，因此小质量物体将向大质量物体加速靠近，这一现象又叫做短程线效应(geodetic effect)。

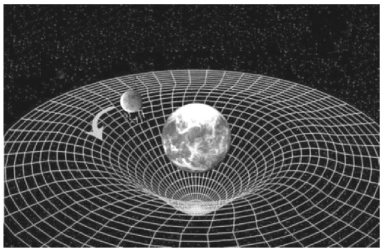


图 1.1 短程线效应引起的空间弯曲

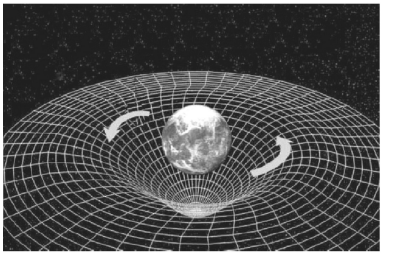


图 1.2 坐标系拖曳效应示意图

1918年,J. Lense 和 H. Thirring 根据广义相对论推导出如果物体自转,那就不只局限于时空弯曲了,它还会有"拖曳"结构,形成漩涡(空间扭曲)。这称为坐标系拖曳效应(frame-dragging effect)。当引力与经典的电动力学类比时,产生坐标系拖曳效应的引力叫磁型引力(gravitomagnetism)。坐标系拖曳效应可以如图 1.2 形象地表示。如果把保龄球放置在一个很大的盛有容易流动的黏性流体的容器中,当球旋转时,会带动周围的流体一起旋转,这个现象可以类比坐标系拖曳效应。

1.2 对广义相对论所预言的新物理效应的预测

只有通过实验验证才能让人们接受爱因斯坦的弯曲时空理论。在历史上,已有过几次重要的实验验证了爱因斯坦广义相对论所预言的几个新的物理效应。

第 1 个验证是关于水星进动(图 1.3)的。天文学家观测到水星近日点的进动速率是 574(″)/100a,用牛顿的万有引力定律和力学第二定律计算出来的水星近日点的进动数值比观测值小 43(″)/100a。爱因斯坦应用他的方程计算的相对论效应则恰好是 43(″)/100a。

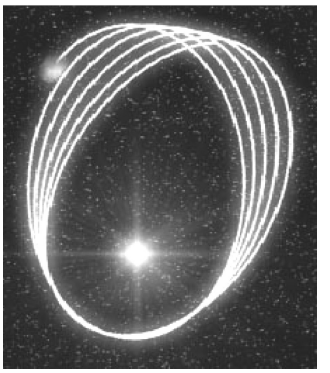


图 1.3 水星进动

广义相对论的第 2 大预言是引力场使光线偏转，遥远的星光如果掠过太阳表面将会发生偏转。图 1.4 中，图(a)表示星体的视位置；图(b)表示星体的实际位置；图(c)表示星光弯曲的原理示意。1919 年，在南美和西非观察日全食(日食的一种，月球转到太阳和地球中间，遮住全部太阳)，证明了星光在太阳附近的确发生了偏转。后来通过测量中子星电波辐射，也证明了光线的弯曲。

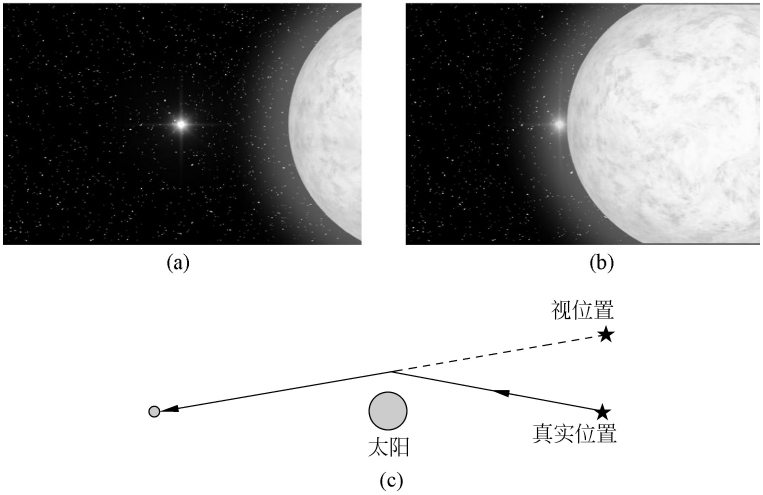


图 1.4 星光弯曲

广义相对论的第 3 大预言是引力红移，即在强引力场中光谱向红端移动。1960 年，哈佛大学的电梯上的高能 γ 射线被检测到红移，检测精度为 10%。1976 年，NASA 引力探测-A (GP-A)实验将一个氢微波受激发射器时钟送入离地 1 万 km 的太空中，据预测，氢微波受激发射器时钟到达弱的引力场后要走得快一些，这有效地模拟了光的红移。GP-A 实验证实了爱因斯坦提出的引力会使时间变慢的推测，对引力红移作了最精确的测量，测量精度为 0.1%。图 1.5 是地面上(引力场强)和太空中(引力场弱)的两只时钟的快慢显示和光的频率显示，可以看到，强引力场中的时钟变慢，光波长变长，频率变慢，即光谱向红端移动了。(红光比紫光的波长长，频率慢。)

需要全本请访问 www.ertongbook.com