

·现代科学理论丛书

黑洞与弯曲的时空

赵 峥 著

山西科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

黑洞与弯曲的时空 / 赵峥著. - 太原: 山西科学技术出版社, 2000.1

(现代科学理论丛书)

ISBN 7-5377-1652-8

I. 黑… II. 赵… III. ①爱因斯坦空间-普及读物②黑洞-普及读物 IV. D412.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 62528 号

·现代科学理论丛书·

黑洞与弯曲的时空

赵 峥 著

*

山西科学技术出版社出版 (太原建设南路 15 号)

山西省新华书店经销 山西人民印刷厂印刷

*

开本: 850×1168 1/32 印张: 10 字数: 239 千字

2000 年 1 月第 1 版 2000 年 1 月山西第 1 次印刷

印数: 1—3 000 册

*

ISBN 7—5377—1652—8

0·65 定价: 13.80 元

如发现印、装质量问题, 影响阅读, 请与印刷厂联系调换。

前 言

沸腾的黑洞，
你将把物理学引向何方？
透过奇异的黑暗，
辐射出新世纪的曙光。

19世纪、20世纪之交，是物理学发生重大变革的时期。至19世纪末之时，牛顿力学、热力学、统计物理、电磁学和波动光学，都已取得了长足的进展和巨大的成功。当时的物理学家普遍对本专业的成就感到自豪，学术界有一种大功已近告成、物理学已发展到尽头的满足情绪。1900年，在英国皇家学会迎接新世纪的庆祝会上，著名热力学专家开尔文致辞说，物理学的大厦已经建成，未来的物理学家们只需要做些修修补补的工作就可以了。不过，在自豪之余，开尔文也谈到，明朗的天空中还有两朵乌云，一朵与黑体辐射有关，另一朵与迈克尔孙实验有关。

1901年，从第一朵乌云中降生了量子论，1905年，从第二朵乌云中降生了相对论，经典物理学的大厦被彻底动摇，一个崭新辽阔的未知世界展现在人类的面前。

在20世纪的100年中，量子论和相对论都获得了极大的成功。从波尔的量子论到薛定谔、海森伯的量子力学，从二次量子化、重正化到规范场论的建立，从弱电统一、大统一到超弦理论的提出，从原子弹、氢弹到原子能的和平利用，量子论已发展成为成

熟的理论,并广泛地深入到人类的科研、生产和生活中。

爱因斯坦最初提出的狭义相对论,是一个研究宏观高速运动的理论。它把时间和空间联系为一个不可分割的整体(四维时空),把能量和动量也联系为一个不可分割的整体(四维动量)。后来发展的广义相对论则进一步认为物质(能量、动量)与时空也不可分离,物质的存在和运动会造成时空的弯曲,时空的弯曲又反过来影响物质的运动。按照广义相对论原理,万有引力不是真正的力,而是时空弯曲的表现,行星绕日的运动,是沿弯曲时空中“直线”(测地线)的惯性运动。广义相对论后来被用来研究宇宙的结构和演化,使人们认识到,宇宙也同生物界及人类自身一样,处在不断演变和进化的过程之中。

特别值得赞颂的是,广义相对论预言和描述了一朵至今尚未发现的灿烂花朵——黑洞。其实,黑洞最早是由牛顿理论预言的。大约200年前英国的米歇尔和法国的拉普拉斯指出,最大的星有可能是看不见的。他们认为,当星体的万有引力强大到能把自己发射的光子拉回去时,外界就看不见这颗星了。他们预言的暗星形成条件与今天广义相对论预言的黑洞形成条件恰好相符。从今天的观点来看,米歇尔和拉普拉斯的论证中有一些错误,但这些错误相互抵消使他们导出了正确的结论。

黑洞最初被视为一颗死亡的星,被认为是恒星演化的最终归宿。起初,人们的着眼点只放在研究它的力学行为上。后来才突然发现黑洞有着丰富的内涵,它不仅有一般的力学性质,而且有量子性质和热性质。黑洞不是一颗死亡了的星体,它有着充沛的生命力。黑洞不是天体演化的最终归宿,而是天体演化的一个中间阶段。

最为奇妙的是,黑洞有温度,有热辐射,黑洞的表面积可以看作熵。黑洞具有负的热容量,发出热辐射后,自身温度不仅不降低反而会升高。因此,黑洞与外界很难形成稳定的热平衡。大黑洞温度很低,小黑洞具有极高的温度,最终会发生爆炸。我们

最近的研究表明，两个黑洞碰撞时，接触点的温度会降到绝对零度，而尾部会产生高温喷流。

广义相对论的研究，特别是黑洞理论的研究，引导出物理学的一个基本困难——奇点困难。奇点是时空曲率发散（无穷大）的地方，是时空的病态部分。目前认为，奇点本身不应属于时空。奇点可以看作时间开始或终结的地方。彭若斯和霍金等人严格证明了一条奇点定理。该定理的内容可粗略表述如下：

只要广义相对论正确，因果性良好，而且时空中至少有一点存在物质，那么这个时空就一定有奇点，或者说，就至少有一个物理过程，时间有开始，或者有结束，或者既有开始又有结束。

他们似乎证明了，任何物理时空中的时间，都不可能全是无限的。彭若斯和霍金证明了时间的有限性！奇点定理对物理学和哲学的重要影响是显而易见的。不过，今天知道奇点定理的人还很少，因为它太专门化、太难于理解了。

现代物理学的另一个重要困难也来自弯曲时空的研究。多年的探讨表明，引力场量子化后不能重正化，其中有一些无穷大的项（发散部分）没有办法消除，即使采用现在的任何一种超对称、超引力和超弦方案也解决不了这一困难。爱因斯坦的广义相对论明确指出有引力波存在，而且引力波带有能量，引力能应该能够量子化。把引力场量子化的想法看来是合理的。但是，实际上总是不能成功。人类总共只知道四种相互作用，前三种相互作用的场都量子化了，惟独引力场碰到了大麻烦。

“奇点困难”和“引力场量子化困难”，是 21 世纪前夜摆在物理学工作者面前的两大难题，它们有可能把物理学导向一场新的革命。

这里，黑洞的研究最值得注意。它把热力学与时空弯曲联系起来。物理学中有两个规律比较特别，一个是广义相对论，另一个是热力学第二定律。所有的物理理论都把时空看作平直的，都

认为时空是与物质和运动无关的背景，只有广义相对论认为时空与物质和运动不可分离，时空不是平直的，而是弯曲的。所有的物理理论（甚至包括广义相对论）都认为时间是可逆的，只有热力学第二定律显示了时间演化的箭头。热力学与时空理论（广义相对论）的结合，很有可能是物理学革命的新起点。

作者及其合作者长期从事广义相对论、特别是黑洞物理的研究，我们希望向感兴趣的读者介绍这一充满活力的研究领域。为此，我们对本书的内容做了精心的选择，突出了物理思想的表述，避开了繁杂的计算，但又不完全放弃数学。作者曾写过一些没有数学公式的较浅显的科普书籍，这使没有大学数学物理背景的读者能够对相对论和黑洞有一个定性的、粗浅的了解，但在深度上是很不够的。作者还写了一部介绍黑洞物理的学术专著，但对于非物理专业的读者来说，看起来会十分困难。

喀兴林教授和山西科学技术出版社建议作者写一本介于二者之间的读物，让具有大学理工科一二年级数学物理知识的读者，有机会比较深入地了解这一领域的基本内容、所遇到的研究困难和该领域的发展前景。

作者希望本书也能对理论物理和天体物理专业的大学生、研究生学习广义相对论和黑洞物理有所帮助，使他们能够更为容易地把握住这一专业的物理思想。

感谢我的导师刘辽教授把我领进黑洞物理研究的天地。感谢喀兴林教授引导我学习量子论的知识并促成此书的出版。感谢刘文彪、徐永利老师及我的夫人帮助打印书稿并协助整理文稿。书中所含的作者个人的研究成果是在国家自然科学基金的长期资助下获得的，在此深表谢意。

赵 峰

于北京师范大学

目 录

第一章 对时空和宇宙的早期认识	(1)
第二章 相对论与量子论	(12)
第一节 相对论的提出	(12)
第二节 相对论的内容	(19)
第三节 相对论的若干重要概念	(26)
第四节 量子论的进展	(33)
第三章 弯曲的时空	(41)
第一节 广义相对论的物理基础	(41)
第二节 黎曼几何中的张量	(50)
第三节 广义相对论中的时间与空间	(63)
第四节 短程线	(69)
第五节 爱因斯坦场方程	(76)
第六节 广义相对论的实验验证	(81)
第四章 辽阔的宇宙	(93)
第一节 太阳系	(93)
第二节 银河系与河外星系	(101)
第三节 恒星的演化、白矮星与中子星	(109)
第四节 膨胀的宇宙	(118)
第五节 宇宙的起源	(126)

第五章 黑洞	(130)
第一节 史瓦西黑洞	(130)
第二节 克鲁斯卡坐标和彭若斯图	(138)
第三节 带电的黑洞	(148)
第四节 转动的黑洞	(154)
第五节 最一般的稳态黑洞	(162)
第六章 黑洞附近的量子效应与热效应	(168)
第一节 能层与非热辐射	(168)
第二节 黑洞的热性质	(179)
第三节 黑洞的卡诺循环	(186)
第四节 黑洞的热辐射	(190)
第五节 黑洞的负热容量与热平衡	(202)
第七章 黑洞热效应的几何根源与物理根源	(208)
第一节 匀加速观测者处在热浴中	(208)
第二节 黑洞热效应的几何根源	(216)
第三节 有视界就有热效应	(223)
第四节 真空的边界效应	(230)
第五节 非稳态黑洞的热性质	(236)
第六节 用变加速黑洞模拟黑洞的碰撞	(247)
第七节 寻找黑洞	(257)
第八章 奇点, 时间的开始与终结	(264)
第一节 奇点与时间的有限性	(264)
第二节 奇点定理概述	(268)
第三节 奇点的若干性质	(274)

第四节	热力学第三定律与宇宙监督·····	(279)
第五节	热力学第三定律与时间的无限性·····	(283)
第六节	热力学第零定律等价于钟速同步的传递性·····	(291)
第七节	引力、热与时间·····	(302)

第一章 对时空和宇宙的早期认识

“上下四方曰宇，往古来今曰宙”，宇宙就是时间、空间与物质的总称。

最早对宇宙有较为科学认识的人，是古希腊数学家兼哲学家毕达哥拉斯，他的老师泰勒斯在公元前 584 年，第一次预报了日全蚀的发生。毕达哥拉斯以他的定理著称于世，这条定理说，直角三角形斜边的平方等于两条直角边平方的和（即中国人所说的勾股定理）。

毕达哥拉斯提出了第一个宇宙模型，他也是最早认识到大地是一个球体的人。毕达哥拉斯认为，火是最圣洁的东西，应该位于宇宙的中心。地球、月亮、太阳、金星、水星、火星、木星和土星依次镶在一个个天球上，围绕着中心火转动。恒星则镶在最外层的天球上，也围绕着中心火转动。他认为 10 是最完美的数字，而上述天球只有 9 个，是一个缺陷。于是毕达哥拉斯又设想了一个叫做“对地”的天体，位于中心火的另一侧，与地球遥遥相对。这样，天球的个数就达到了完美的“10”。他还认为，由于人类生活在地球上背对中心火的一侧，因此看不到中心火和“对地”，只能看见太阳、月亮、行星和恒星。毕达哥拉斯的宇宙结构图见图 1.1 所示。

大约 200 年后（公元前 300 多年），古希腊百科全书式的哲学家亚里士多德（“物理学”这个词的创造者）提出了地心说，见图 1.2 所示。他抛弃中心火，把地球放在了宇宙的中心，而月亮天、太阳天、水星天、金星天、火星天、木星天、土星天和恒

星天这 8 个天球都围绕地球转动。恒星天之外还有一个原动天，第一推动者（上帝）生活在那里，他推动恒星天，恒星天则进一步带动内层诸天球转动。亚里士多德把宇宙分为“月下世界”和“月上世界”。“月下世界”包括离地球距离近于月亮的那部分宇宙，它们由土、水、火、气四种元素构成，那里的万物是混浊的、可变的、会腐朽的。“月上世界”则是永恒的、不变的，由透明而无重量的“以太”构成。

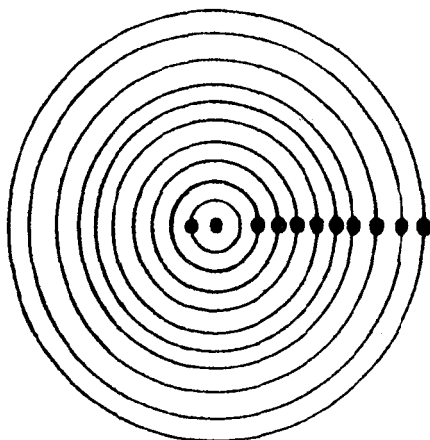


图 1.1 毕达哥拉斯的宇宙结构图
中央为中心火，从内至外分别为地对、地球、月亮、
太阳、金星、水星、火星、木星、土星和恒星天

公元前 100 多年，生活在埃及的另一位希腊哲学家托勒密，进一步完善了亚里士多德的地心说，使之流传于后世 1000 余年。这一学说后来被天主教会所利用，成为宗教理论的一块基石。按照教会的观点，上帝造出了人类并将他们安排在地球上生活、繁衍，自己则在原动天（又称水晶天）上观察、照料着人类。上帝推动恒星天，从而带动诸天球围绕地球旋转。在上帝的旨意下，太阳、月亮和群星都向着地球闪光，使人类沐浴在上帝的光辉和

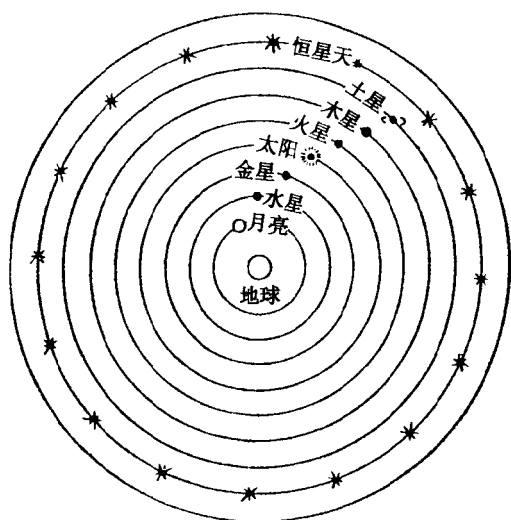


图 1.2 地心说

恩泽之中。

公元 1543 年，哥白尼（1473~1543）出版了《天体运行论》，提出日心说，见图 1.3 所示。哥白尼认为，位于宇宙中心的是太阳而不是地球，地球和诸星一起围绕着太阳旋转，这一学说的提出可以看作是现代自然科学的开端。它把颠倒了的世界重新颠倒回来，震动了全社会。实际上，早在公元前 200 多年，即亚里士多德提出地心说约 100 年之后，另一位希腊天文学家阿利斯塔克就曾提出过日心说，但被表面显得“简单”、“直观”的地心说击败而湮没了。哥白尼的时代比阿利斯塔克的时代大大进步了，宗教改革、文艺复兴和环球航行极大地解放了人们的思想，天文观测也比以前精密多了。地心说理论所导致的观测上的漏洞越来越多，而一旦使用日心说理论，这些漏洞所导致的困难就自然的迎刃而解了。

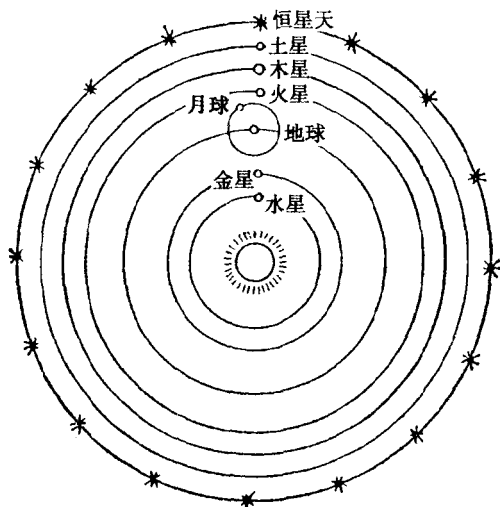


图 1.3 日心说

按照哥白尼的模型，太阳外面依次是水星天、金星天、地球天、火星天、木星天和土星天，上述天球围绕太阳旋转，月亮则围绕地球转。恒星镶嵌在最外层的天球上，固定不动。

哥白尼的学说遭到教会的压制。意大利神学院的学者布鲁诺（1548 ~ 1600）勇敢地站出来捍卫、宣传和发展哥白尼的日心说。他进一步认为，宇宙没有中心，恒星都是遥远的太阳，宇宙是无限的，在大尺度上是均匀的，从而挑起了宇宙是有限还是无限的论战。布鲁诺的思想已经非常接近现代的宇宙观。

与哥白尼同时代的丹麦天文学家第谷（1546 ~ 1601），不同意哥白尼的日心说，但也不完全赞同原来的地心说。他提出了一个改良的地心宇宙模型，见图 1.4 所示，认为位于宇宙中心的仍然是地球，但行星不直接围绕地球旋转。它们围绕太阳转，再与太阳一同围绕地球转。而直接围绕地球旋转的只有月亮、太阳和恒星天。

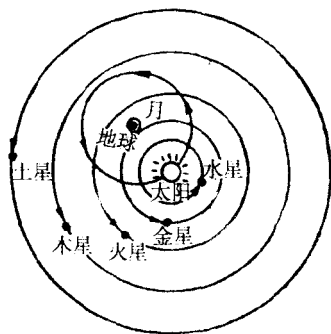


图 1.4 第谷的宇宙模型

他的运动。他首先认识到行星绕日运动的轨道不是圆而是椭圆。开普勒得出了著名的行星运动三定律：

第一定律——行星绕日运动的轨道是一个椭圆，太阳位于椭圆的一个焦点上。

第二定律——行星矢径在单位时间内扫过的面积相同。

第三定律——行星运动周期的平方和轨道平均半径的立方成正比。

后来的观测进一步修正了开普勒的第三定律。与行星运动周期的平方成正比的，不是轨道平均半径的立方，而是椭圆轨道半长轴的立方。

开普勒三定律不仅给出了行星运动的全部规律，而且奠定了万有引力定律的基础。伽利略(1564~1642)与开普勒一样拥护哥白尼的日心说，他们二人之间进行过学术交流，但伽利略在天文观测上不及开普勒准确。他虽然发现了太阳黑子、月亮环形山、木星的卫星和土星的光环，却始终以为行星绕日运动的轨道是正圆。

伽利略是物理学的真正开创者，他把“实验”和“测量”系统地引入物理研究。伽利略对物理学的贡献是多方面的，其中最值得称道的有三点。

(1) 提出了“相对性原理”。此原理认为相对静止和做匀速

第谷以观测精密而著称，他虽然在宇宙观上不如哥白尼正确，但他对天体运动的观测要比哥白尼准确 20 倍。第谷积累了大量的准确的观测资料，并培养了一位优秀的助手开普勒。

开普勒(1571~1630)十分赞同哥白尼的日心说，他运用老师留给他的珍贵资料，仔细研究了行星

直线运动的参考系是等价的，物理规律在这些参考系中有相同的表现形式。

(2) 重述了惯性定律。古希腊的德漠克利特（公元前 460 ~ 公元前 370）等人曾猜测，不受力的原子在真空中会保持静止或做匀速直线运动的状态。此观点遭到亚里士多德的反对。亚氏断言：力是维持物体运动的原因，不受力的运动物体会逐渐静止下来。伽利略重新阐述了德漠克利特等人提出的惯性定律：不受外力的物体将保持静止或做惯性运动的状态不变。

伽利略认为匀速直线运动是惯性运动，这无疑是正确的。但他又说匀速圆周运动也是惯性运动，这就出了问题。今天我们知道，匀速圆周运动肯定不是惯性运动。长期以来，人们都为伽利略的这一错误所困惑。实际上，伽利略是想说行星绕日运动是惯性运动。他觉得，没有什么力推动行星转动，而这种转动却能无限制地维持下去，因此，它应该是一种惯性运动。伽利略和当时的大多数学者一样，以为行星绕日的轨道是正圆。于是，他认为匀速圆周运动应该属于惯性运动。伽利略把匀速圆周运动看作惯性运动的观点显然是错误的。但是，在广义相对论发表后人们认识到，行星绕日运动确实是惯性运动。广义相对论认为，万有引力不是真正的力，而是时空弯曲的表现。行星绕日的转动并没有受到力，它们的轨迹是四维时空中的“测地线”（直线在弯曲时空中的推广），因而是一种惯性运动。

(3) 提出了“自由落体定律”。这条定律说，在重力作用下，任何物体在真空中自由下落的加速度都相同，与它们的重量和组成材料都没有关系。

历史上一直传说伽利略在比萨斜塔上做过自由落体实验，发现重物与轻物同时落地，从而得到了上述落体定律。但这是不确实的。伽利略没有在比萨斜塔上做过这一实验。倒是伽利略的反对者在比萨斜塔上做过落体实验，结果是重物比轻物先落地，得

到否定落体定律的结果，这一实验曾引起双方的辩论。实际上，用人的两只手“同时”放开一重一轻两个物体，让它们“同时”自由下落是很难准确完成的。另外，空气阻力的影响（与物体横截面积成正比）也不能忽略。所以，上述反例实验是不可靠的。后来，人们用机械装置在真空中做自由落体实验，得到了与伽利略落体定律精确一致的实验结果。

那么，伽利略是怎样得到落体定律的呢？其实他依据的是理想实验。古希腊的亚里士多德曾断言，重物下落得比轻物快。

在伽利略之前，已有人对亚里士多德的观点产生怀疑，觉得实验似乎不能表明重物比轻物下落得快。至少不像亚里士多德学说所预期的那样：重量大一倍的物体下落也快一倍。

伽利略有一个直观的猜测：真空中的自由落体运动应该最简单。他用极限的观点来推想这一运动。他设想把大小相同的金球、铅球和木球放在水银里。从阿基米德的浮力定律可知，只有金球下落，铅球和木球将浮在水银面上。如果把它们放在水里，则只有木球浮在水面上，金球和铅球都会下落，但金球会比铅球落得快一些。假如把它们放在空气中，它们都会下落，金球与铅球的落速差不多，木球会慢一些。伽利略说：“鉴于这点，我认为，如果完全排除空气阻力，所有的物体将下落得同样快。”

伽利略进一步用理想实验来反驳亚里士多德。他设想把一块重物和一块轻物用带子捆在一起，让它们自由下落。这两块物体加在一起的重量肯定大于其中任何一块的重量。如果亚里士多德的观点正确，捆在一起的物体应该比它们各自单独下落时落得更快。但是，如果依据亚里士多德的观点从另一个角度考虑，重物应比轻物落得快，这两块捆在一起的物体相互影响，慢的轻物会被快的重物拖快，快的重物又会被慢的轻物拖慢。因此，捆在一起时的下落速度，应该比单独下落的轻物快，而比单独下落的重物慢。于是，同样依据亚里士多德的观点，得到了两个相互矛盾

的结论。如果反过来，认为轻物下落比重物快，同样会导致类似的相互矛盾的结论。克服此矛盾的惟一出路，就是否定亚里士多德的观点，转而认为下落速度与物体重量无关。假如所有物体的下落速度都相同，上述矛盾自然就不存在了。

伽利略仔细做了小球沿斜面下滚的实验。他发现下滚的加速度与小球的重量无关。斜面越陡，小球下滚的加速度越大。但不管斜面有多陡，加速度有多大，有一点是肯定的：下滚加速度与小球的重量无关。伽利略再次发挥理想实验的威力。他想，假如把斜面完全竖直起来，小球下滚运动就成了自由落体运动，下滚加速度就成了自由落体加速度。可见，自由落体加速度应该与下落物体的重量无关。于是他得到了落体定律。

伽利略虽然没有做自由落体实验，但他仔细做了斜面实验。他正确地认识到，斜面上小球的下滚运动，即是“冲淡了”或“减缓了”的自由落体运动。伽利略是通过理想实验得到落体定律的。

实际上，惯性定律也是依据对斜面实验的理性思维得到的。斜面实验表明，斜面倾角越小，小球的下滚加速度就越小。他想，假如把光滑的斜面完全放平，小球的加速度就会变到零，小球将永远沿直线做匀速运动。于是，伽利略得到了惯性定律，正确地指出维持物体的运动状态不需要力，只有改变物体的运动状态时才需要力。

在本书的其他章节中我们会看到，伽利略的上述3项发现在物理学中的重要地位。它们都是涉及时空观念、涉及物理学基础、影响300年来物理学发展的规律。而且，今后还将对物理学特别是对时空理论的进一步发展产生重大影响。

牛顿（1642~1727）诞生于伽利略逝世之年，他的主要研究成果集中在《自然哲学之数学原理》一书中，这本书可以看作经典物理学的《圣经》。牛顿在此书中建立了一个完备自洽的物理学体系。