

铁道游：引力波的故事 (现代篇)

发表于 2024 年 05 月 16 日 由 舟巷

每个新的时代的到来，都会造就新的科学巨匠。于是爱因斯坦出场了。

和牛顿一样，童年时期的爱因斯坦也不是一个神童，即使大学毕业后找一份大学助教的工作都没有成功，只能委身在瑞士伯尔尼的专利局做一名技术职员。所幸专利局的工作并不繁重，他得以利用自己的业余时间从事自己热爱的科学研究，从而开启了他一生的辉煌。

爱因斯坦一生中最重要的科学贡献就是创立了狭义相对论和广义相对论。如果说狭义相对论是对牛顿时空观的修正，那么广义相对论则把对牛顿万有引力理论拓展到一个崭新的高度，是更广义上的牛顿万有引力定律。

其实，爱因斯坦的初衷并不是要解决牛顿万有引力定律遗留的问题，而仅仅是想把牛顿第二定律和万有引力定律统一在一个体系下。

那么爱因斯坦的广义相对论的物理基础是什么呢？是等效原理。牛顿在建立第二运动定律和万有引力定律时都分别独立地用到了物体质量的概念，即惯性质量 m_i 和引力质量 m_g ，但这两个质量在物理上是不是等价呢？我们不可能通过这两个运动定律找到答案。

牛顿本人也意识到了这一点。于是他设计单摆实验检验两种质量是不是等价的。单摆在重力的作用下来回摆动作周期运动，同时受到加速度和重力的作用，从而可以检验惯性质量与引力质量的等价性。牛顿的实验证明这两种质量在千分之一的精度范围内是等价的。直到二十世纪末期，科学家们把实验的精度提高到 $10E-12$ 。

既然在那么高的精度范围内都没有发现惯性质量和引力质量的差别，爱因斯坦提出了他的等效原理。为了形象地解释他的等效原理，他设计了一个电梯理想实验。设想一个乘客在一个封闭的电梯里以自由落体的方式向下降落，他将分辨不出他所受到的加速度是来自一个惯性加速系或是地球的重力场。

于是爱因斯坦认为惯性质量和引力质量的物理意义完全是等价的。我们可以用更准确的科学语言来表述这一原理，在重力场中的任何一点都可以找到一个与之等价的惯性加速系，反之亦然。

这就是著名的等效原理，是广义相对论的物理源点。

广义相对论的数学源点是张量理论。在爱因斯坦苦苦思索广义相对论的年代，张量理论作为数学的一个新型分支还不被大众所熟悉，即使在一百年后的今天，它还一如既往地玄奥无比。

爱因斯坦本人对这一描述弯曲多变的空间微分几何学并不熟悉，当他看到协变张量和逆变张量在不同坐标下被不同度规互相变换，不断弯扭时，也是一脸茫然。在得到大名鼎鼎的数学家格罗斯曼(Marcel Grossmann)和希尔伯特(David Hilbert)的鼎立协助后，他才得以把广义相对论用明确的张量几何公式确定下来。

当时，爱因斯坦猜测，引力是空间弯曲效应，而引力的根源在于质量，所以质量导致时空弯曲。于是广义相对论的两个基本因素是质量和曲率。相对论大家惠勒(John Archibald Wheeler)曾经风趣的把时空弯曲论概括为，物质告诉时空如何弯曲，时空告诉物质怎样运动。

在广义相对论理论中，引力势是一个重要概念。任何一个质量m的质点向空间产生的引力势可以用以下公式表述：

$$U = - Gm/r$$

可以看出，它的引力势是以球形向周边弥漫的，在半径为r的球面上，引力都是相同的。负号意味着引力是一种吸引力，而不是斥力。

在传统的概念中，我们认识的时空是欧几里德(Euklid von Alexandria)的平面空间，但在太阳系中，甚至整个宇宙中，星球几乎无一例外地呈现球形，这就是宇宙的球形引力场的物理基础，物质的运动在这样的球形的引力场下作球形的弯曲运动。

经过几番修改，爱因斯坦终于在1915年11月提出了广义相对论引力方程的完整形式，并用此成功的解释了水星近日点进动。1916年3月，他发表那篇著名的论文<<广义相对论基础>>，从此，广义相对论方程以不依赖任何坐标系的张量形式著称于世。

广义相对论的核心内容是下面的场方程，

$$R_{\mu\nu} - 1/2g_{\mu\nu}R = \kappa T_{\mu\nu}$$

方程的左边是爱因斯坦本人引入的一个张量，被命名为爱因斯坦张量，它由两部分组成。第一部分 $R_{\mu\nu}$ 是里奇张量，是张量在空间移动过程中形成的一个张量，是表达空间弯曲率的张量，也即空间的弯曲程度，由意大利数学家里奇(Gregorio Ricci Curbastro)发现并以他的名字命名。第二部分中的另一个张量 $g_{\mu\nu}$ 则是度量空间曲线长度的二阶张量。第二部分中的另一个量R是里奇张量和度规张量缩并后形成的一个标量。张量的下标 μ 和 ν 是空间的维数，如果我们在相对论的时空观中把时间也计为一个时空维度，它们的值分别等于0, 1, 2和3。这个零维度就是人们司空见惯的时间维度，在广义相对论中与其他三维的空间维度精美有机地联系在一起了。

方程的右边 $T_{\mu\nu}$ 是计量物质运动特性的能量动量张量。爱因斯坦在引进这一张量时曾经经过一番痛苦的思索，才得以确定这个张量，因为它必须满足能量动量守恒原则，在不同的参照系下各个分量保持不变。

公式中的 κ 是爱因斯坦引入的一个常数，性质有点类似于牛顿万有引力公式中的常数G。在弱引力场下，场方程退化为万有引力定律，我们可以推导出 κ 和G存在以下的线性关系：

$$\kappa = 8\pi G/c^4$$

公式中的常数c是真空中光速。

整个场方程是爱因斯坦天才大脑思考下的神来之笔，像牛顿万有引力定律一样，不可能从其他理论或公式推导出来。现在我们已经难以考证，他在推导出这个方程的过程中，经历了怎样的思考，彷徨和苦闷。也许他曾站在阿尔卑斯山脚下，凝望着缓缓下落的夕阳散发出缕缕彩色霞光，从而产生了弯曲时空，弯曲光线的遐想。

毕竟，牛顿在建立万有引力定律时，还有大量的天文观测数据做参考，而爱因斯坦弯曲时空的场方程只有靠脑海中弯曲的灵光一现。所以爱因斯坦曾洋洋得意地说过，如果他不发现广义相对论的话，今后五十年内不会有人发现它。

在引力场比较弱的情况下，广义相对论的非线性因素减弱，时空的弯曲效应退化，可以简化为牛顿万有引力定律。但在物理意义上，两者有着本质的差别。第一，广义相对论认为引力并非一种真正的力，而是时空弯曲产生的效应，而牛顿万有引力则是平面空间中一种客观存在的力，与时空没有关系。第二，万有引力是一种不需要时间传播的瞬间超距作用力，而广义相对论则认为引力场在时空中以光速传播。

广义相对论的第一次成功在于它精确地计算出了水星近日点进动，然后预测了光线弯曲以及引力红移。

早在广义相对论理论最终成型前，爱因斯坦就它用求解出水星轨道的进动值。但也许他的求解过程繁琐或者过于晦涩难懂，也或许不甚完善，以至于各种文献呈现给我们的都是德国天文学家史瓦西(Karl Schwarzschild)在1916年求得精确解。

史瓦西从小就受到了良好的教育，展示了超强的数学天赋，年纪轻轻就成为哥廷根大学的教授，可惜他在求得广义相对论的精确解后不久就被疾病夺走了生命。

正是由于宇宙中众多的恒星，行星的外形基本都是球形，它们的引力场以球面形向外辐射，所以史瓦西把广义相对论的场方程在球坐标下展开来，求得引力场中物体运动方程。他的解只依赖天体的总质量，而不论它的具体分布，但它的质量必须是球对称分布的，通俗地说，天体必须是一个球体。

在离这个天体无穷远地方，史瓦西的解就退化为平面解，也即牛顿的万有引力公式。

史瓦西解的另一个精妙之处在于，不论物体还是光线都是按短程线运动。在广义相对论的时空观中，时间和空间不是相互独立的，而是彼此联系在一起。而短程线就是从时空的一点到另一点距离最短的线路。在平面空间中，短程线就是简单的直线。但在广义相对论的时空中，短程线在弯曲的空间中不再为直线，而是被压迫成了一条曲线。

在弯曲的时空中的行星的运动方程理所当然就不再是线性微分方程了，于是它的椭圆轨道也不再是固定的，所以有了近日点进动现象。

广义相对论精确地解答了水星每一百年进动43秒，和观测值完全吻合。在那一时刻，爱因斯坦欣喜无比，透过漫长的百年时光，我们仍然可以想象到他高兴得手舞足蹈样子。

广义相对论的解不仅仅定量地解释了水星近日点进动，而且还告诉我们，近日点进动不仅仅是水星的独特现象，而是所有行星的普遍行为，只是太阳系中的其他行星远离太阳，并且质量大出许多，进动值太渺小，根本就无法用任何仪器测量出来。

同理，光线在弯曲的时空中也沿着短程线运动，描写其运动的微分方程也是非线性的。当光线经过质量巨大的星体附近时，必然被其引力场压迫而发生弯曲。广义相对论的光线运动方程预测了经过太阳时会发生1.75秒的偏转。

但要验证光线会不会绕太阳时发生弯曲是一件很不容易的工作，因为太阳本身发出耀眼的光芒，足以遮挡住任何其他企图绕过太阳的光线。但此等困难绝对抑制不了科学家们探测宇宙奥秘对他们产生的诱惑。

机会终于来临。1919年5月29日是日全食日，彼时月亮将遮蔽太阳的光芒。英国天文学家艾丁顿勋爵(Arthur Stanley Eddington)带领他的团队来到距英国遥远的非洲小岛上，利用用现代眼光看来还比较落后的照相技术，拍得了从太阳背后恒星透射过来的光线弯曲相片，验证了光线弯曲度基本和爱因斯坦预测值相符。

这一结果不仅仅在天文学界引起轰动，而且在媒体的渲染下，连街头巷尾的市井平民以及矿井下的挖煤工人，都在惊叹光线的弯曲，唏嘘牛顿建立的经典科学体系的坍塌。一瞬间，相对论成了时髦语，爱因斯坦从一介民科荣升为最耀眼的科学新星。

爱因斯坦还预测了光线的引力红移现象。引力红移其实就是引力波从巨大的天体，如黑洞出发后，经过漫长的星际旅行抵达观察者后，频率降低的现象。为什么称这一天际现象为红移呢？这是从可见光谱导出的一个名词。可见光谱按频率从低到高分为赤橙黄绿青蓝紫，这里的赤即红光，处于频率的低端，紫光则是高频率的可见光。红移即是波的频率向低端移动。反过来，如果我们说紫移(有些文献称为蓝移)，则是指波谱向频率的高端移动。

引力红移与其说是广义相对论的推论，到不如说是狭义相对论的延续，因为时间在不同速度的坐标系中快慢也不同，时间快慢不同，测得的频率自然不同。

广义相对论则是定量地确定引力波红移值。辐射引力波的天体质量越大，则红移量越大。但它却与该天体的半径成反比。这意味着，当天体由质量疏散的低密度的气体组成，或者是半径巨大的球体时，红移量就微不足道。

美国天文学家亚当斯(Walter Sydney Adams)早在1925年就公布他对天狼星的一个伴星测量的红移值。但他的测量由于没有考虑光线散射效应而精度不高。直到1954年，第一个红移的精确值才由另一个美国天文学家波普尔(Daniel M. Popper)测得。他测量了一个距离太阳系16.5光年之遥的波江座三合星系的伴星，结果与理论值比较近似。

即使在测量技术高度发达的今天，测量引力红移仍然是一个极具挑战性且富有吸引力的科学探测任务，天文学家现在还在如火如荼地从事这项工作。

从史瓦西的解答中还可推导出一个更为惊人的结果，它预测了在茫茫星际中黑洞存在的可能性。这缘于史瓦西时空坐标系中的径向度规：

$$g_{11} = 1/[1 - 2GM/(c^2r)]$$

当 $r < 2GM/c^2$ 时，这一度规是个虚数，它具有什么物理意义？曾许几何，天文学家对此懵懂不解。经过一段时期的争论，他们终于明白这个球面内部的奇异性。在这个球面内部，时空的曲率不能够发散，任何物质，包括光线都不可能逃逸，于是黑洞概念就形成了。

这一球面半径在天文学界被称为史瓦西半径。

其实，早在十八世纪末，英国科学家米歇尔(John Michell)和法国科学家拉普拉斯(Pierre Simon-marquis de Laplace)就用牛顿的万有引力定理分别独立地导出了黑洞的存在，其球面半径和史瓦西半径完全一致。那个时候的科学家虽然已经知道光的速度是有限的，但却还不知道光速是速度的极限，从而没有提出黑洞的概念。既然光速都不能逃离密度这么高的星体，人类就不可能用肉眼看到它，所以他们仅仅把这类天体称为暗星。

时光流逝到二十一世纪，天文学家对黑洞的探究已经是天文学内一个相当热门的分支，他们又发现了其他形式的黑洞，如克尔-纽曼黑洞(Roy Patrick Kerr, Ezra Ted Newman)。克尔1935年出生在新西兰，成年后迁往英国，并

于1959年在剑桥大学获得博士学位。在美国空军一个研究所做研究员期间，他发现了爱因斯坦场方程的一个解，描述黑洞作为一个定向陀螺如何带动周边时空做旋转运动，使得这一区域的时空看上去就像一个巨大的旋涡。

而纽曼则是一个美国本土出生的天文学家。1965年，纽曼把广义相对论的电动力引入克尔黑洞，于是这个黑洞模型就成了今天的带静电的旋转黑洞。

这一类型的黑洞，不释放任何信息。人类只能确定其三个物理量，质量M，角动量J和电量Q。黑洞的这一特点在天文界被定义为三毛定理，意思为黑洞在信息辐射上虽非一毛不拔，但却吝啬地只释放三条基本特征参数。

试想，我们如果把这些电能，旋转动能引到地球上，人类何愁能源不足？

著名的英国物理学家霍金(Stephen William Hawking)更是在1973年证明了黑洞的热辐射性质，其内部的温度是真正热力学温度，并满足各个热力学定律。这是一个重大发现，它表明黑洞不再是一个只吸收而不辐射任何物质的天体，宇宙不会以黑洞的方式而最终消亡。继黑洞后，宇宙还会继续演化发展。这让担心宇宙消亡的芸芸众生长长地舒了一口气。

既然引力在空间以波的形式传播，那么探测引力波自然也是天体研究的一个分支。虽然爱因斯坦和艾丁顿早就预言了引力波的存在，但引力能量太弱了，比电磁能低了三十七个量级，致使对引力波的理论研究和实验探测进展相当缓慢。

虽然美国天文学家韦伯(Joseph Weber)在1959年就提出了探测引力波的方案并于1969年宣布探测到了引力波，但他的工作长期以来无法被复制，不能确认其真实性。

直到2016年，对引力波的探测才取得了实质性的进展。这一年的2月11日，三位美国科学家韦斯(Rainer Weiss), 巴里什(Barry Clark Barish)和索恩(Kip Stephen Thorne)宣布他们探测到了离地球相距13亿光年的两个黑洞融并时辐射出的引力波信号。次年10月3日，他们为此项卓越的贡献荣获诺贝尔物理学奖。

这是诺贝尔奖历史上少有的头年公布成果，次年就获奖的特殊例子。他们如此快地就获得了诺贝尔奖，说明诺贝尔委员会对他们的成果的严谨性和准确性早已了然于心。一般来说，一项科学成果公布后，诺贝尔委员会都会等几年，十几年，甚至更长的时间，让别的科学家或团队来检验，重复，确认该成果的正确性，才会颁奖。

他们使用的探测器简称LIGO(Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory)，是利用激光干涉原理建造的超大引力波探测器，由两部分组成，分别位于相距千余公里的美国西北的[华盛顿州](#)的[汉福德](#)与南部的[路易斯安那州](#)的[利文斯顿](#)。根据激光干涉原理，两地的干涉器组成了一个直径相当于两地距离的超大透镜，可以捕捉从天际传来任何细微的波动信号。

这种利用相距遥远的天文探测器共同组成一个大透镜来大规模提高探测器的分辨率的物理原理，是英国天文学家赖尔(Martin Ryle)的一项重大科学发现。他由于此项成果在1974年获得诺贝尔物理学奖。

如今，天文学家利用此探测器继续深入地探测宇宙中的种种神奇引力玄机。当然，其他的天文探测机构，如欧洲航天局，以及许多其他国家，都加入了探测引力波的行列。

随着人类对宇宙的探测越遥远，对宇宙的了解认识越深入，人类更是以前所未有的力度和规模继续着对宇宙的探究。

(待续)

作者投稿

 [参加论坛上关于本文的讨论](#)

此条目发表在 作者投稿, 华夏快递, 历史回顾, 科普知识 分类目录, 贴了 HXKD、作者投稿 标签。将[固定链接](#)加入收藏夹。

本文短链接为 <http://hx.cnd.org/?p=233924>

CND刊物和论坛

自豪地采用 *WordPress*。

网站问题请访问<http://self-support.hxwk.org/>.

Use of CND web sites is subject to [CND's Terms of Use and Discussion and Submission Guidelines](#).