

相对论问答录之三

赵 崢



问题一、狭义相对论遇到什么重要困难？

正当全世界为相对论的成功而欢欣鼓舞时，爱因斯坦本人却冷静地看到了自己的理论存在严重缺陷。

首先，作为“相对论”基础的惯性系，现在无法定义了。牛顿认为，存在绝对空间，所有相对于绝对空间静止和作匀速直线运动的参考系都是惯性系。爱因斯坦的相对论认为不存在绝对空间，牛顿定义惯性系的方法显然不适用了。有人建议，把惯性系定义为，不受力的物体在其中保持静止或匀速直线运动状态的参考系，也即把牛顿第一定律（即惯性定律）视作惯性系的定义。但是，什么叫不受力呢？也许有人会说，物体在惯性系中，保持静止或匀速直线运动的状态，就叫不受力。读者一下就会看出，这里存在逻辑上的循环。定义“惯性系”要用到“不受力”。定义“不受力”，又要用到“惯性系”。这样的定义方式，在物理学中是不可接受的。

爱因斯坦注意到的另一个缺陷是，万有引力定律写不成相对论的形式。有几年，爱因斯坦致力于把万有引力定律纳入相对论的框架，几经失败后，他终于认识到，相对论容纳不了万有引力定律。

在取得巨大成就的喜悦中，爱因斯坦冷静地看到，自己的理论存在着与“惯性系”和“万有引力”有关的两个基本困难。这两个困难非常严重。他的相对论是研究惯性系之间的关系的，也就是说，相对论是建立在惯性系的基础上的。现在，这个“基础”居然无法定义！另一方面，当时已知的力只有电磁力和万有引力两种，竟然其中的一种就放不进相对论的框架中，真是太令人遗憾了！

问题二、针对上述困难，爱因斯坦有什么新思路？

爱因斯坦反复考虑狭义相对论遇到的两个基本困难：① 惯性系无法定义；② 万有引力定律不能纳入相对论的框架。他想，既然惯性系无法定义，不如就抛开惯性系，把自己的理论建立在“任意参考系（包括非惯性系）”的基础之上。把原来的相对性原理：“物理规律在一切惯性系中都相同”推广为“物理规律在一切参考系中都相同”。他把后者称为

广义相对性原理，而把原来的相对性原理称为狭义

相对性原理。这样做确实躲开了定义惯性系的困难，但又产生了新的困难：非惯性系与惯性系不同，它有惯性力存在。如何处理惯性力呢？

爱因斯坦注意到惯性力的一个重要特点：惯性力与物体的惯性质量成正比。这个特点与万有引力非常相似，万有引力与物体的引力质量成正比。他又注意到：牛顿力学中引力质量与惯性质量精确相等的事实。他还想起了自己一直钦佩的物理学家兼哲学家马赫，关于惯性力与万有引力相似，都起源于物体间的相互作用的见解。爱因斯坦终于认识到，“惯性”问题应该和“引力”问题合在一起解决，狭义相对论所遇到的两个困难实际上是一个困难！

马赫对物理学的直接贡献并不大，但他的批判精神和他从哲学角度提出的某些见解，对物理学的影响却非常深远。小小的马赫，居然敢于批判伟大的牛顿，居然敢于说牛顿的绝对时空观和绝对运动观不对！马赫认为，根本不存在绝对空间，当然也不存在绝对运动，一切运动都是相对的，惯性起源于物体间的相互作用。

马赫的这些见解深刻地影响着年轻的爱因斯坦。马赫不惧权威的勇敢批判精神鼓舞着年轻的爱因斯坦。爱因斯坦曾多次强调，他提出狭义与广义相对论都与马赫的影响有关。

问题三、爱因斯坦升降机是怎么回事？

爱因斯坦关于升降机（电梯）的思想实验，最清楚地表达了他的等效原理思想。设想一个观测者处在一个封闭的升降机内，得不到升降机外部的任何信息（图1）。当他看到机内的一切物体都自由下落，下落加速度 a 与物体质量的大小及物质组成无关时（此时，他自己也感受到重力 Ma ， M 是他自身的引力质量），他无法断定自己处在下列两种情况的哪一种：

(1) 升降机静止在一个引力场强为 a 的星球的表面。

(2) 升降机在无引力场的太空中以加速度 a

运动。

当观测者感到自己和升降机内的一切物体都处于失重状态时，他同样无法断定自己处在下列两种情况的哪一种：

- (1) 升降机在引力场中自由下落。
- (2) 升降机在无引力的太空中作惯性运动。

造成上述现象的原因是，无法用任何物理实验来区分引力场和惯性场。即等效原理造成了上述不可区分性。

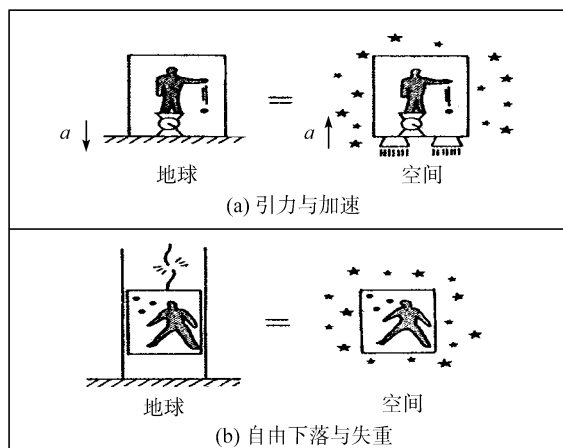


图1 爱因斯坦升降机

问题四、为什么说等效原理只在一点的邻域严格成立？

等效原理使人们无法用任何物理实验来区分引力场与惯性场，然而，引力场与惯性场还是有不同之处，它们在有限大小的时空范围内并不等效。例如，由于星球是球体，静置于星球表面的升降机，其内部的引力线有向星球中心汇聚的趋势，而在星际空间加速的升降机，其内部的惯性力线则是平行的。只要升降机不是无穷小，探测这些力线的灵敏仪器就可以区分这两种情况。所以等效原理是一个局域性原理。也就是说，引力场与惯性场仅在无穷小时空范围内不可区分。

经常有人忽略这一点，他们考虑两个以上的时空点，发现引力场和惯性场可以区分，于是以为找到了等效原理的毛病，试图否认这一原理。实际上他们没有搞清楚等效原理是一个局域性的原理，只在时空一点的无穷小邻域成立（注意，一点是指时空点，不是空间点，空间点在四维时空中是一根线）。

问题五、能否简单介绍一下广义相对论？

广义相对论，实际上是一个关于时间、空间和引力的理论。狭义相对论认为时间、空间是一个整体(四维时空)，能量、动量是一个整体(四维动量)，但没有指出时间-空间与能量-动量之间的关系。广义相对论进一步指出了这一关系，认为能量-动量的存在(也就是物质的存在)，会使四维时空发生弯曲！万有引力并不是真正的力，而是时空弯曲的表现！如果物质消失，时空就回到平直状态。



爱因斯坦给出了广义相对论的基本方程，这个方程被称为“爱因斯坦场方程”，

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \kappa T_{\mu\nu} \quad (1)$$

式中常数 κ 与万有引力常数 G 有关

$$\kappa = \frac{8\pi G}{c^4} \quad (2)$$

其中 c 是光速。爱因斯坦场方程是张量方程，式中带有下角标字母的 $R_{\mu\nu}$ 、 $T_{\mu\nu}$ 、 $g_{\mu\nu}$ 以及 R 都是张量。爱因斯坦之所以采用张量来表述广义相对论，是因为张量方程在坐标变换下形式不变，他认为这符合自己的广义相对性原理：物理规律不依赖于坐标系的选择。我们不想在此处做过于专门的讨论，感兴趣的读者可参看任何一本介绍广义相对论的书籍。

用爱因斯坦场方程，可以精确地算出，能量-动量的存在，如何影响时空的弯曲。该方程左端是描述时空曲率的量，右端是描述能量-动量的量：

$$\text{时空曲率} = \text{能量动量}$$

实际上，这是由 10 个二阶非线性偏微分方程组成的方程组，非常难解。

广义相对论认为，质点在万有引力作用下的运动(例如地球上的自由落体；行星的绕日运动等)，是弯曲时空中的自由运动——惯性运动。它们在时空中描出的曲线，虽然不是直线，却是直线在弯曲时空中的推广——“测地线”，粗略地说，“测地线”就是“短程线”，即两点之间的最短线或最长线（注意，相对论中把最短线和最长线都称为“短程线”）。当时空恢复平直时，测地线就成为通常的直线。需要说明的是，在通常的平直空间或正曲率空间中，

两点之间存在最短线。但在相对论的四维时空中，两点之间有的有最短线，有的却没有最短线，只有最长线。例如自由质点描出的测地线，实际上是两点间最长的世界线，而不是最短线。双生子佯谬问题中的直线就是测地线，是两点间的最长线。也就是说，在两个确定的时空点之间运动的一群人，其中处于惯性运动状态的那个人描出的世界线最长。由于世界线的长度就是他经历的真实时间，所以他经历的时间也就最长。

爱因斯坦采用数学家们已经得到的测地线方程，作为决定弯曲时空中自由质点如何运动的“运动方程”

$$\frac{d^2 x^\alpha}{ds^2} + \Gamma_{\mu\nu}^\alpha \frac{dx^\mu}{ds} \frac{dx^\nu}{ds} = 0. \quad (3)$$

方程中 s 是测地线的弧长， $\Gamma_{\mu\nu}^\alpha$ 称为“联络”，描述引力场强或惯性场强。

场方程表示“物质告诉时空如何弯曲”，运动方程则表示“时空告诉物质如何运动”。

爱因斯坦初建广义相对论时，认为广义相对论的基本方程有两个：场方程（1）和运动方程（3）。后来，爱因斯坦和福克分别证明，从场方程可以推出运动方程，因此，广义相对论的基本方程只有一个——场方程（1）。

另外，在他们的证明中还得到一个值得注意的副产品：场方程中作为场源的质量，在推出的运动方程中，同时出现在惯性质量和引力质量两个位置上。这告诉我们，在广义相对论的理论框架中，引力质量和惯性质量是同一个东西。

严格而美妙的数学物理体系，高深难懂的黎曼几何和张量分析，精密神奇的实验验证，再加上爱因斯坦发表狭义相对论和光子说的巨大影响，使广义相对论一下就得到了科学界的承认，爱因斯坦的威望也达到了一生中的顶峰。

问题六、能否对弯曲时空做一个形象的比喻？

我们打个比方来说明时空弯曲（图2）。假如四个人各拉紧床单的一个角，床单这个二维空间就是平的。放一个小玻璃球在上面，如果不去推它，它就会保持静止或匀速直线运动状态不变（假设床单足够光滑，床单的微小摩擦力可以忽略）。如果床单中央放一个铅球，床单就会凹下去，这个二维空间就弯曲了。这时，如果再放置一个小玻璃球在床单上，它就会滚向中央的大球。在这个例子中，大球

相当于“地球”，小球好比一个下落的物体。按照牛顿的观点，这是由于大球用“万有引力”吸引小球。按照爱因斯坦的观点，则是由于大球的存在使空间弯了，并不存在什么“引力”，小球落向大球乃是弯曲空间中的自由（惯性）运动。如果给小球一个横向速度，它就会绕大球转起来。这时可把大球看作太阳，小球比作行星。为什么小球不远离大球飞向远方呢？按照牛顿的观点，这是由于小球受到大球的“引力”，不能跑向远方，只能环绕大球运动。按照爱因斯坦的观点，小球并未受到任何力，只是由于空间弯曲了，在弯曲空间中它做自由（惯性）运动不能飞向远方。

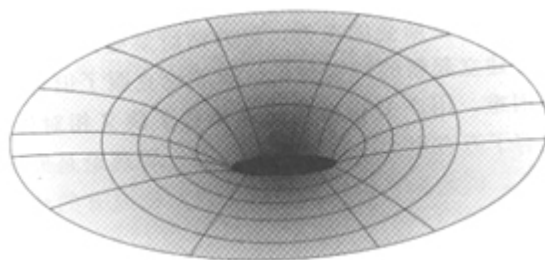


图2 弯曲的空间

对上述比喻应该加以解释的是，上面说的只是“空间”弯曲，而广义相对论说的则是四维“时空”的弯曲。太阳的存在使四维时空弯曲了，行星绕日运动，就是在弯曲时空中的惯性运动，行星轨道是四维时空中的测地线，根本就不存在什么万有引力。注意，这里所说的测地线不是指行星在三维空间中的椭圆轨道，而是指图中所示的行星在四维时空中描出的螺旋状轨迹。

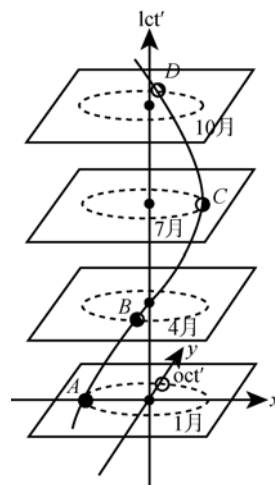


图3 四维时空中行星绕日的运动

我们看到，依照爱因斯坦广义相对论的观点，伽利略所认为的行星绕日运动（图3）是惯性运动的想法，其实是深刻而正确的。

问题七、广义相对论有哪些实验验证？

爱因斯坦发表广义相对论的时候，求出了场方程的一些近似解。他在发表自己理论的时候，同时提出了三个检验广义相对论的实验：①引力红移；

现代物理知识

②行星轨道近日点的进动；③光线偏折。这3个实验均被观测证实。除去这3个验证实验外，还有1970年前后所做的雷达回波延缓实验，以及1978年发现的脉冲双星运转周期减小，从而间接证实引力波存在的实验。

问题八、广义相对论建立后有哪些重要进展？

1915年，爱因斯坦构建起广义相对论的基本框架。

1916年史瓦西得到爱因斯坦场方程的一个重要的严格解，此解描写不随时间变化的球对称星体的外部时空的弯曲情况。利用这个解，可以严格算出爱因斯坦提出的三个实验验证。此前，爱因斯坦是用近似解算出这三个实验验证的。

1917年，爱因斯坦提出静态宇宙模型，并在场方程中引进宇宙项。

1922年，弗里德曼用爱因斯坦场方程算出了膨胀宇宙模型，1927年，勒梅特得到了类似的结果。膨胀宇宙模型得到1929年发现的哈勃定律的支持。

1937年前后，爱因斯坦与福克分别独立证明了从场方程可以推出运动方程，使广义相对论的基本方程减少到一个，即场方程。

1948年伽莫夫等人提出大爆炸宇宙模型，促进了膨胀宇宙学的发展。

就广义相对论理论本身而言，从20世纪40年代之后就没有突破性进展。

20世纪50年代更是广义相对论理论停滞发展的时期。1962年，在华沙举办了一次广义相对论研讨会，粒子物理学家费曼对会上的报告十分失望，忍不住在给妻子的信中写下了如下的感想：

“我没有从会上获得任何东西。我什么也没有学到。因为没有实验，这是一个没有活力的领域，几乎没有一个顶尖的人物来做工作。结果是一群笨蛋（126个）到这儿来了，这对我的血压很不好。以后记着提醒我再不要参加任何有关引力的会议了。”

不过，情况很快就有了重大变化。1963年克尔得到了转动星体外部时空的严格解，1967年天文观测又发现密度极高的中子星，这大大促进了黑洞物理学的发展。1964年微波背景辐射的发现，促进了大爆炸宇宙学的发展。这些成就都反过来推动了广义相对论的研究。

（北京师范大学物理系 100875）

22卷第6期（总132期）

读编往来

相对论问答

一、关于“宇宙学红移”

问：能否通过天文观测区分宇宙学红移和非宇宙膨胀的（超）星系（团）内运动引起的多普勒红移？是否存在后一种红移？

答：在《相对论百问》中我们谈到，哈勃定律描述的宇宙学红移不是多普勒效应，而是引力红移，二者之间存在本质区别。在天文观测中，宇宙学红移和非宇宙膨胀（仅由星系在空间中运动）造成的多普勒效应都已观测到。

天体物理学认为，在宇宙演化的初期，所有的星系都在随着宇宙的膨胀而相互远离。但是，由于各星系间存在时空弯曲造成的“万有引力效应”，这一吸引效应与宇宙膨胀的“排斥效应”的作用相反。当宇宙膨胀到一定程度后，星系团（或群）内部各星系间的万有引力效应将使得星系团（群）自身不再膨胀，团内各星系间的距离不再因宇宙膨胀而拉开。只是各星系团之间的距离仍在随着宇宙膨胀而增大。各星系团之间的远离表现为宇宙学红移，遵从哈勃定律。然而，星系团内部各星系围绕质心运动会产生本动速度造成的多普勒效应，多普勒效应叠加在宇宙学红移上，使得各星系谱线的红移产生微小的“弥散”。

对于我们银河系所处的本星系群而言，由于“群”自身不再膨胀，光谱线的移动主要起源于“群”中各星系围绕共同质心转动的多普勒效应，不属于宇宙学红移。本星系群内那些朝向我们银河系运动的星系，光谱线有蓝移，远离我们运动的星系有红移，都属于多普勒效应。

上述现象均已在天文观测中看到。详细情况可参看拙著《相对论百问》或更专门的天文学著作，例如，高等教育出版社出版的朱慈盛先生编写的《天文学教程（下册）》。

二、关于“霍金辐射”

问：霍金辐射是一种量子效应，通常用隧道效应，也就是位垒穿透来解释，定性地讲，这是可用不确定关系来解释的微观现象，而黑洞作为巨星演化的晚期归属，至少也是一个宏观尺度的天体。既然我们不可能观测到射出子弹的波动性，那么我们又怎么可能在黑洞上观测到霍金辐射呢？

答：正如读者所说：天体物理学研究的黑洞都是宏观尺度的天体。不过，黑洞的霍金（下转18页）

· 13 ·