

现代物理学基础的思考之四——《广义相对论的思考》

李学生 (Li Xuesheng)

山东大学副教授, 理论物理教师, 中国管理科学院学术委员会特约研究员, 北京相对论研究联谊会会员, 中国民主同盟盟员

xiandaiwulixue@21cn.com, 1922538071@qq.com

摘要 (Abstract): 物理学是科学的基本学科。本文章分析探讨了现代物理学的重要问题, 广义相对论, 供参考。

[李学生 (Li Xuesheng). 现代物理学基础的思考之四——《广义相对论的思考》. *Academ Arena* 2017;9(14s): 276-307]. (ISSN 1553-992X). <http://www.sciencepub.net/academia>. 4. doi:10.7537/marsaaj0914s1704.

关键词 (Keywords): 质点; 电荷; 引力; 电力; 空间; 方程; 量子力学; 广义相对论

第二章 广义相对论的时空观

1、广义相对论的引力场方程

1955年, 物理学家玻恩在一次报告中评价道: “对于广义相对论的提出, 我过去和现在都认为是人类认识大自然的最伟大的成果, 它把哲学的深奥、物理学的直观和数学的技艺令人惊叹地结合在一起。” 德布罗意 (Louis de Broglie, 1892-1987) 在《阿尔伯特·爱因斯坦科学工作概况》中谈到广义相对论时说: “依靠黎曼 (G·Riemann, 1826-1866) 的弯曲空间理论, 借助于张量运算, 广义相对论提出一种万有引力现象的解释, 这种解释的雅致和美丽是无可争辩的, 它该作为 20 世纪数学物理学的一个最优美的纪念碑而永垂不朽。” 1983 年诺贝尔物理学奖获得者昌德拉塞卡说得更清楚: 爱因斯坦是“通过定性讨论一个与对于数学的优美和简单的切实感相结合的物理世界, 得到了他的场方程。” 相对论实在可以说是对麦克斯韦和洛伦兹的伟大构思画了最后一笔, 因为它力图把场物理学扩充到包括引力在内的一切现象。爱因斯坦在 1905 年发表了狭义相对论公式之后的几十年内, 他就对数学的各个领域烂熟于心了, 而同时代的大多数物理学家则对这些领域知之甚少甚至一无所知。在他迈向广义相对论的最终等式的过程中, 在将这些数学结构同他的物理学直觉结合在一起这个方面, 爱因斯坦展示出了罕见的天赋。

广义相对论理论的核心是新的引力场定律和引力场方程。有人说, 麦克斯韦在电磁场上做过什么工作, Einstein 在引力场也做过什么工作。广义相对论引人注目的特征之一是将牛顿力学中的引力简化为四维时空中的弯曲, “宇宙图景”的新情景不再是“三维空间中一片以太海洋的受迫振动”, 而是“四维空间世界线上的一个纽结”。1914年, Einstein 与洛伦兹的学生福寇一起发表了一篇严格遵守广义协变性要求的引力理论的简短论文, 发现从绝对运算和广义协变性的要求出发, 可以证明诺茨屈劳姆的理论只是 Einstein—格罗斯曼理论的一种特殊情况, 其标志是真空光速不变这一附加条件; Einstein—格罗斯曼理论包含着光的弯曲, 而诺茨屈劳姆的理论没有光的弯曲。广义相对论具有最简单, 最优雅的几何基础 (三个公理: (1) 具有度规; (2) 度规由爱因斯坦方程 $G=8\pi T$ 支配; (3) 在度规的局部洛伦兹标架中所有狭义相对论的物理规律是正确的)。

1. 广义坐标变换

设一个时空区域同时被旧坐标系 $x^\mu(x^0, x^1, x^2, x^3)$ 和新坐标系 $x'^\mu(x'^0, x'^1, x'^2, x'^3)$ 所覆盖, 其中 $x^0 = ct, x'^0 = ct'$, c 是光速, t 与 t' 是时间。新旧坐标之间的关系可表示为 $x'^\mu = x'^\mu(x^0, x^1, x^2, x^3) = x'^\mu(x^a)$ ($\mu, a = 0, 1, 2, 3$) (1), 每一个新坐标都是四个旧坐标的函数。微分

$$(1) \text{ 式, 得到广义坐标变换下微分的变换关系} \quad dx'^\mu = \frac{\partial x'^\mu}{\partial x^\nu} dx^\nu \quad (\mu, \nu = 0, 1, 2, 3) \quad (2) \text{ 这里采用了 Einstein}$$

惯例。(2) 的逆变换为 $dx^\nu = \frac{\partial x^\nu}{\partial x'^\mu} dx'^\mu \quad (\mu, \nu = 0, 1, 2, 3)$ (3) 定义在坐标变换中不变的量为标量。在广

义坐标变换下, 向坐标微分元一样变换的量, 称为逆变矢量, $A'^\mu = \frac{\partial x'^\mu}{\partial x^\nu} A^\nu \quad (\mu, \nu = 0, 1, 2, 3)$ (4) 在广

义坐标变换下, 变换规律为 $A'^{\mu} = \frac{\partial x^{\nu}}{\partial x'^{\mu}} A_{\nu} (\mu, \nu = 0, 1, 2, 3)$ (5) 的量称为协变矢量。容易看出, 逆变和协

$$\Gamma'^{\mu\nu} = \frac{\partial x'^{\mu}}{\partial x^{\alpha}} \frac{\partial x'^{\nu}}{\partial x^{\beta}} \Gamma^{\alpha\beta} \quad (6)$$

$$\Gamma'_{\mu\nu} = \frac{\partial x^{\alpha}}{\partial x'^{\mu}} \frac{\partial x^{\beta}}{\partial x'^{\nu}} \Gamma_{\alpha\beta} \quad (7)$$

$$\Gamma'^{\mu}_{\nu} = \frac{\partial x'^{\mu}}{\partial x^{\alpha}} \frac{\partial x^{\beta}}{\partial x'^{\nu}} \Gamma^{\alpha}_{\beta} \quad (8)$$

变矢量都有四个分量组成。在广义坐标变换下按变换的量分别称为逆变张量、协变张量、混合张量。

2. 张量的运算:

$$A_{\mu\nu} + B_{\mu\nu} = C_{\mu\nu} \quad (9) \quad A_{\mu\nu} B^{\sigma} = D_{\mu\nu}{}^{\sigma} \quad (10) \quad \text{缩并运算: } A^{\mu} B_{\mu} = u \quad (11)$$

3. 度规张量

在四维时空中, 我们把两点间的距离推广为“间隔”。在直角坐标系中, 它可表示为 $ds^2 = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2$ (12)

间隔的平方应与坐标微元的二次方有关 $ds^2 = -dx^{\mu} dx^{\nu}$ (13), 但左边是标量, 而右边是逆变矢量, 必须让坐标微分元与一个二阶协变张量缩并

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^{\mu} dx^{\nu} \quad (14)$$

张量 $g_{\mu\nu}$ 称度规张量共十六个分量, 可用矩阵表示

$$\begin{pmatrix} g_{00} & g_{01} & g_{02} & g_{03} \\ g_{10} & g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{20} & g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ g_{30} & g_{31} & g_{32} & g_{33} \end{pmatrix} \quad (15) \text{, 它是一个对称张量 } g_{\mu\nu} = g_{\nu\mu} \text{。}$$

3、时间与空间

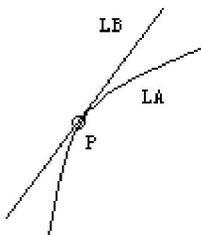
在广义相对论中, 跟据等效原理, 可对时空中的任意观测者 A 引入相对于他瞬时静止的互补惯性系 B, 并仿照狭义相对论, 定义静止于 B 系中的“真实钟”为坐标钟, 它所记录的时间为惯性系中所固有的时间。

$$d\tau = \frac{ids}{c} \quad (16)$$

由狭义相对论系 B 的固有时间为

$$ds_A = ds_B \quad (17)$$

所以, 我们可以合理的定义观测者 A 的固有时间图 3 观测者 A 与 B



$$d\tau_A = \frac{ids_A}{c} = \frac{ids_B}{c} = d\tau_B \quad (18)$$

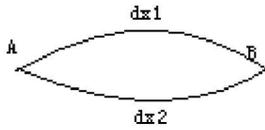
的世界线

下面我们来考察相对于某一个坐标系 x^{μ} 静止的观测者, 寻找它的坐标时间和固有时间的关系。

由 (12) 和 (18), 不难得到此关系为

$$d\tau = \frac{ids}{c} = \frac{1}{c} \sqrt{-g_{\mu\nu} dx^{\mu} dx^{\nu}} = \frac{1}{c} \sqrt{-g_{00}} dx^0 = \sqrt{-g_{00}} dt \quad (19)$$

在图 4 中, 假定 A 与 B 空间相邻点, 光信号从 B 射向 A, 再从 A 射向 B, 所需坐标时间为



$$\Delta x^0 = dx_{(1)}^0 + dx_{(2)}^0 \quad (20)$$

未假定光速的各向同性，所以 $dx_{(1)}^0$ 不一定等于 $dx_{(2)}^0$ ，在 B 引入局部惯性系 Δx^0 相应的固有时为

$$\Delta \tau = \frac{1}{c} \sqrt{-g_{00}} dx^0 \quad (21)$$

图 4 固有距离的测量

在局部惯性系中，光速各向同性等于 c ，因此，两相邻点的纯空间距离为

$$dl = \frac{c \Delta \tau}{2} = \frac{1}{2} \sqrt{-g_{00}} \Delta x^0 \quad (22)$$

此即用标准尺测得的纯空间距离。

由 $ds^2 = 0 = g_{00}(dx^0)^2 + 2g_{0i}dx^0 dx^i + g_{ik}dx^i dx^k$ ($i, k = 1, 2, 3$) (23)

$$dx^0 = \frac{-g_{0i}dx^i \pm \sqrt{(g_{0i}g_{0k} - g_{00}g_{ik})dx^i dx^k}}{g_{00}} \quad (24)$$

$$\Delta x^0 = \frac{2\sqrt{(g_{0i}g_{0k} - g_{00}g_{ik})dx^i dx^k}}{g_{00}} \quad \text{代入 (21) 可得} \quad dl = \sqrt{\left(g_{ik} - \frac{g_{0i}g_{0k}}{g_{00}}\right)dx^i dx^k} \quad (25), \text{ 其中}$$

$$\gamma_{ik} = g_{ik} - \frac{g_{0i}g_{0k}}{g_{00}} \quad \text{是纯空间度规。}$$

4、短程线

A、B 之间的一根曲线长度可用积分给出 $I = \int_A^B ds$ (26)，由变分原理得到 $\delta \int_A^B ds = 0$ (27)

沿曲线人选一个标量参数 λ 并注意到 $ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$ 上式可写为 $\delta \int_A^B L d\lambda = 0$ (28)

$$\frac{ds}{d\lambda} = (g_{\mu\nu} \dot{x}^\mu \dot{x}^\nu)^{\frac{1}{2}} \quad (29), \text{ 而广义速度} \quad \dot{x}^\mu = \frac{dx^\mu}{d\lambda}$$

$$\frac{\partial L}{\partial x^\mu} - \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}^\mu} \right) = 0 \quad (30), \text{ 可得短程线方程} \quad \frac{d^2 x^\alpha}{d\lambda^2} + \Gamma_{\mu\nu}^\alpha \frac{dx^\mu}{d\lambda} \frac{dx^\nu}{d\lambda} = 0$$

(31)

它也是广义相对论中的运动方程。

1915 年 11 月 25 日，爱因斯坦在《引力场方程》论文中，给出了引力场方程的完整形式： $R_{\mu\nu} = -k(T_{\mu\nu} - 1/2 g_{\mu\nu} T)$ ， $R_{\mu\nu}$ 是黎曼曲率张量， $T_{\mu\nu}$ 是能量动量张量。

回到广义协变原理之后，Einstein 在 1915 年 10 月与 11 月，集中精力探索新的引力场方程。先后于 11 月 4 日，11 日，18 日和 25 日，每周一次，一连四周向普鲁士科学院递交了四篇论文。在 11 月 4 日的论文中，他提出了废弃 1913 年提出的场方程的原因。这些理由在 11 月 28 日写给索末菲的信中，提得更加明确。

他说：“我认识到，到现在为止，我的引力场方程是完全站不住脚的。关于这一点，有如下线索：（1）我证明了，在一个均匀转动的参照系中，引力场并不满足场方程。（2）水星近日点进动每一百年不是 18"而是 45"。（3）在我去年的论文中，协变的考察没有提供哈密顿函数 H。如果把它加以适当推广，它就会允许任意的 H，于是，要适应坐标系的协变，是徒劳无功的。在对以前的讨论结果和方法失去一切信心之后，我清楚地看到，只有与普遍的协变理论，即黎曼协变理论联系起来，才能得到令人满意的解决。”[3]摆脱了引力场方程只能在线性变换下协变的限制之后，广义相对论的进展来自于 Einstein 对张量的重新认识。他保留了“对泊松方程推广”的原有形式。但现在他认为牛顿引力理论的泊松方程 $\nabla^2\varphi=4\pi G\rho/c$ 中的 ρ ，应对应于引力源体系的质量，能量，动量以及全部的有关部分，能将这些量做统一描述的只有能量张量 $T_{\mu\nu}$ ；而牛顿引力势 φ 则对应于时空度规张量 $g_{\mu\nu}$ ，再根据张量的对称性，协变散度为零以及缩并的规则，最后终于找到了协变形式的引力场方程： $R_{\mu\nu}-g_{\mu\nu}R/2=8\pi GT_{\mu\nu}/c^4$ ，其中 G 为牛顿引力常量， $R_{\mu\nu}$ 为里奇张量，R 为标量曲率张量。引力场方程的左侧描述了引力场时空的弯曲性质，而右侧描述了引力源物质体系，它们在方程中的结合，恰恰反映了马赫思想的思想。大约在公元前 387 年，希腊哲学家柏拉图认为，几何学研究是通向认识宇宙本质的道路。

5、场方程

时空曲率=能量动量 (32) 物质的能量动量可写成二阶张量 $T^{\mu\nu}$ 。时空曲率可写成 $R^{\alpha}_{\lambda\mu\nu}$ 。可以把曲率张量缩并，得到一个二阶张量 $R_{\lambda\mu}$

$g^{\nu\rho}R_{\rho\lambda\mu\nu} = R^{\nu}_{\lambda\mu\nu} \equiv R_{\lambda\mu}$ (33)，称 Ricci 张量，它是对称张量，有十个独立分量。代入 (32)， $R_{\mu\nu} = -\kappa T_{\mu\nu}$ (34 用逆变张量写出就是 $R^{\mu\nu} = -\kappa T^{\mu\nu}$ (35)

$T_{\mu\nu}$ 应满足能量—动量守恒定律

$$T_{;\nu}^{\mu\nu} = 0 \quad (36)$$

$$T_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} \varepsilon & S_1/c & S_2/c & S_3/c \\ cM_1 & T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ cM_2 & T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ cM_3 & T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{pmatrix} \quad (37)$$

由
此式用三维空间的矢量写出来就是

$$\nabla \cdot S = -\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (55)$$

$$\nabla \cdot T = -\frac{\partial M}{\partial t} \quad (56)$$

其中 $\varepsilon = T_{00}$ 是能量密度， $S_i = cT_{0i}$ 是能流密度，M 是动量密度，三维空间的张量 T_{ij} (i, j=1, 2, 3) 是动量流密度。(38)、(39) 分别是能量和动量守恒定律。

(36) 要求 (35) 左端满足 $R_{;\nu}^{\mu\nu} = 0$ 。但这一般不可能。
由毕安基恒等式

$$(R^{\mu\nu} - \frac{1}{2}g^{\mu\nu}R)_{;\nu} = 0$$

$$R = g^{\mu\nu}R_{\mu\nu} \quad (40)$$

R 称曲率标量因此，如果把方程 (34)、(35) 改写成

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = -\kappa T_{\mu\nu} \quad (41)$$

$$R^{\mu\nu} - \frac{1}{2} g^{\mu\nu} R = -\kappa T^{\mu\nu} \quad (42)$$

矛盾就消除了。这两个方程就是Einstein给出的广义相对论的基本方程——场方程。它们通常称为Einstein场方程，反映物质的能量—动量如何决定时空曲率。引力场的表达式中起参量作用的物理量数目比牛顿引力理论中的要多。其中不但有引力质量，还有电荷、磁荷、电的(或磁的)偶极矩、宇宙常数等等，其中只有引力质量是广义相对论和狭义相对论所共有的引力参量。

由于有物质的存在，空间和时间会发生弯曲，而引力场实际上就是一个弯曲的时空。Einstein根据这一结论，给出了著名的引力场方程式：

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} G_{\mu\nu} R = -\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Einstein 引力场方程是二阶的，以时空为自变量，以度规为因变量的，带有椭圆型约束的双曲型偏微分方程。当然，Einstein 的这个引力场方程并非完美，在具体计算中，使用的只是一个近似解，而真正的球面对称的准确解——史瓦兹解，是在此之后才找到的。

广义相对论认为：一个物体使自己周围 space-time 弯曲，另一物体在弯曲 space-time 中沿短程线运动，这就是引力的本质。由广义相对论引力场方程和短程线方程，在线性近似下得到另一组方程

$$\Delta v^{(\sigma)} = \frac{2GM_0 w}{c^2} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_0} \right) \quad (1-3), \quad \Delta v^{(\sigma)} = 0 \quad (1-4)$$

这组方程成功解释了行星近日点的移动。光子经过太阳附近时受到太阳的吸引而改变方向，由(1-3)——(1-4)式求出的光偏折角是 Newton 理论预期值的一倍。实际观察结果是与广义相对论一致，Einstein 取得巨大胜利。

随后人们观察到从太阳发出的光线到达地球时其频率由 ν_0 变为 ν ，
$$\Delta\nu = \nu - \nu_0 = -\frac{GM_0 \nu_0}{c^2 R} \quad (1-5)$$

广义相对论用引力势场中不同点时间间隔不同解释了这个实验结果。所以人们认为上述三个经典相对论引力实验支持广义相对论，并且进一步得到 space-time 是弯曲的结论。广义相对速度表达式

$$v = \frac{\sum \frac{m_i}{r^2} (v_i - v_2)}{\sum \frac{m_i}{r^2}}$$

式中表明，近处物体或大质量物体对研究物体的广义相对速度影响较大。一个小质量物体 A 从远处靠近一个大质量且广义相对速度不为零的物体 B ，如果它相对 B 的速度不变，那么它的广义相对速度必然发生变化。然而在不受力的作用、物体处于惯性运动的情况下，它的广义相对速度是保持不变的，所以上面所说的过程， A 相对 B 的速度要发生相应的调整。定性分析得知， A 接近 B 时，为了保证 A 的广义相对速度不变， A 、 B 之间的相对速度必将减小，从而可以说，大质量的 B 部分地同化了小质量的 A 的运动速度。当然， A 也部分地同化了 B 的运动速度，只是质量比例很小而表现得更加微弱。

近代黎曼几何在广义相对论里得到了重要的应用。在物理学家爱因斯坦的广义相对论中的空间几何就是黎曼几何。在广义相对论里，爱因斯坦放弃了关于时空均匀性的观念，他认为时空只是在充分小的空间里以一种近似性而均匀的，但是整个时空却是不均匀的。在物理学中的这种解释，恰恰是和黎曼几何的观念是相似的。黎曼张量和物质能量-动量张量间的关系

1927年 Einstein 等人提出，质点系统的运动方程应该包括在引力场方程之中。1938年，Einstein 及其合作者完成了这一理论。他们采用后来称为后牛顿近似的方法，在对质点系能量动量张量的简单假定下，从引力场方程中推导出了质点系的运动方程，这就是著名的广义相对论的运动理论。50年代以来，一些物理学家指出，质点运动方程也可以直接从能量动量张量的守恒定律推导出来。A. 巴巴别特鲁由运动理论导出了自旋粒子会受到的自旋和曲率的耦合项。

$$G_{ij} = R_{ij} + \frac{1}{2}Rg_{ij} = T_{ij}$$

引力场方程包含着粒子运动方程，这是广义相对论的一个重要特点。60年代以来，彭罗塞等人系统地运用整体微分几何的方法来研究广义相对论。彭罗塞和霍金等人建立的奇性理论，提示了广义相对论时空结构的重要性质和问题。

不过 Penrose 与 Hawking 等人的方法虽然不需要直接求解场方程，但它与描述物质分布的能量动量张量的性质仍有着密切的关系。这一点从物理上讲是显而易见的，因为正是物质的分布决定了时空的结构。

黎曼关于度规、距离法则决定了一种几何学的思想，对于广义相对论的创建有着特殊的启发力。度规张量表征着弯曲空间的内禀性质，协变导数解决了弯曲空间中的矢量求导和无穷小平移问题，仿射联络能恰当刻画弯曲空间矢量的平移性质与度规张量（空间内禀性质）之间的确定联系，黎曼联络是引力势对坐标偏微分（变化率）的组合，体现着引力场的分布等等。联络解决了弯曲空间中不同时空点测量标尺的差异和可换算性问题，后来成为规范场理论思想的一个源头。宇宙奥秘深藏于数学规律的毕达哥拉斯主义理念，在爱因斯坦的引力场论中被具体化和精细化了。Einstein 曾经把他的场方程比喻为一座建筑，这座建筑的一半是用精美的大理石砌成的，另一半却是用劣质的木材建造的。用精美的大理石砌成的一半是方程的左端： $R_{\mu\nu} - (1/2)g_{\mu\nu}R$ ，那是一个描述时空结构的优美的几何量，被称为 Einstein 张量。而用劣质木材建造的那一半则是方程的右端，也就是描述物质分布的能量动量张量： $8\pi GT_{\mu\nu}$ 。为什么说这部分是用劣质木材建造的呢？因为自然界的物质分布种类繁多，物态方程千差万别，找不到一个普适的能量动量张量来描述所有已知的物质分布。不仅如此，在广义相对论所涉及的许多极端条件（比如某些星体内部的超高温、超高压、超高密度等条件）下还可能大量未知的物质形态与分布，而且所有这些物质分布还可能在空间及时间上相互混合。广义相对论存在三种解释。首先，爱因斯坦把可称重物体看作完全决定引力场与时空的几何结构的唯一物理实在，引力场方程真空解的发现使得这个解释站不住脚。尔后，外尔和爱丁顿提出了另一种观点：时空的几何结构被视为物理实在，而引力场可约化为这个几何结构，称作强几何纲领。爱因斯坦从不欣赏这个纲领，后来爱因斯坦在统一场论中把引力场看作代表终极物理实在的整体场的一部分，时空是整体场的结构属性，称作弱几何纲领。

3、广义相对性原理分析

(1)对于力学相对性原理的批判

地恒动而人不知，譬如闭舟而行不觉舟之运也。——汉《尚书纬·考灵曜》

马赫关于惯性的思想萌发于贝克莱的著作中，大体上可归结为：（1）空间本身并不是一件“东西”，它仅仅是从物质间距离关系的总体中得到的一种抽象。（2）一个质点的惯性是该质点与宇宙中所有其他物质相互作用的结果。（3）局部的无加速度判断决定于宇宙中全部运动的某种平均值。（4）力学的全部本质是所有物体的相对运动。1880年，奥地利物理学家马赫《力学发展史》：“牛顿的旋转水桶实验仅仅告诉我们，水对桶壁的相对旋转不产生任何显著的离心力，而它对地球及其他天体质量的相对转动才产生这种力。没有一个人能够断言，如果桶壁的厚度和质量都增加，直到几英里时，这个实验会有什么结果。”马赫反对牛顿把惯性系、惯性质量和惯性力与绝对空间联系起来。他认为，一切运动都是相对的，惯性质量、惯性力也是相对的，它们与周围的天体有关，根本不存在绝对空间。《力学发展史》：“如果我们立足于事实的基础上，我们就会发现自己只知道相对空间和运动，绝对空间是个没有用处的形而上学的概念。”爱因斯坦《自述》：“当我是一个学生的时候，这本《力学发展史》正是在这方面给了我深刻的影响。”1913年，爱因斯坦给马赫的信：“完全按照您对牛顿水桶实验的批判，一个必然的后果是：惯性来源于一种相互作用。”马赫认为，惯性必须归结为物体的相互作用。爱因斯坦将马赫关于惯性的思想称为“马赫原理”，并把马赫原理作为广义相对论的基本原理之一。

一个旋转着的弹性球在其赤道附近鼓起。这个球是怎样“知道”它在旋转而必须是鼓起的呢？对于这个问题，马赫可以这样回答：它“感觉”到围绕它旋转的宇宙物质的作用；这是一种由于转动造成的宇宙物质对球体的万有引力失去原来的平衡达到的剩余引力。但对牛顿来说，这是相对于绝对空间的转动形成的（惯性）离心力，和万有引力截然不同。Einstein 将这些思想的综合称为“马赫原理”。当然，马赫的这些思想还不成熟，因为还根本没有一个“质量感应”效应的定量理论。在通向广义相对论的某个阶段，Einstein 曾经设想，牛顿的平方反比律与一个完善的引力理论的差别，就像仅仅以库仑定律为基础的简单电学理论与麦克斯韦最

终理论的差别一样。1953年，夏马复活并发展了1872年蒂斯朗的麦克斯韦形式的引力理论，发现它在很大程度上包括马赫原理：惯性力对应于宇宙的引力“辐射场”，并与距离的一次方成反比。不幸的是，这个理论在其他方面和相对论相抵触。例如，在狭义相对论中质量随速度而变化，但在麦克斯韦理论中电荷应当是不变量。再者，由于质能关系式，物体的引力结合能具有负能量（负质量），因而系统总质量不等于部分质量之和。而在麦克斯韦理论中，作为线性理论的直接结果，电荷（类似于质量）是严格可加的。在引力理论的发展史上，类似麦克斯韦理论的引力磁场理论有不少，最后证明多半是广义相对论的弱场近似形式。

关于牛顿力学有关惯性系的概念，Einstein有这样的批评：“古典力学想要说明一个物体不受外力，必须证明它是惯性的，想要说明一个物体是惯性的，有必须证明它不受外力。”从而犯了逻辑循环的错误。Einstein认为：“一个物理学家在一个没有窗子的房间内工作，另外有一个人开玩笑把整个房子旋转起来，于是，这位物理学家将不得不放弃惯性定律。如果这位物理学家在进入房间以前就对物理学的概念已有坚定的信念，那么他就能解释力学定律之所以被推翻，是因为房子转动，用力学实验甚至可以决定它是怎样转动的。”【2】马赫的信仰者爱因斯坦在《物理学的进化》第148页写道：“古：在您的坐标系中欧几里得几何学是无效的。我观察了您的测量，我承认在您的坐标系中两个圆周之比不等于两个半径之比。这正表示您的坐标系是被禁用的。可是我的坐标系是惯性的，我能够放心地应用欧几里得几何学。您的圆盘在作绝对运动，而根据经典物理学的观点看来，它是一个被禁用的坐标系，在它里面力学定律是无效的。”

今：我不愿意听取任何关于绝对运动的说法。我的坐标系和您的一样好。我看见您相对我的圆盘在旋转。没有人能够禁止我把一切运动都关联于我的圆盘。

古：但是您不觉得有一种奇怪的力使您离开圆盘的中央吗？假如您的圆盘不是一个很快地旋转着的回转木马，那么您所观察到的两种情况一定不会发生。您不会感觉到有一种力把您推向盘的边缘，也不会感觉到欧几里得几何学在您的坐标系中是不能应用的。难道这些论据都不足以使您相信您的坐标系是在作绝对运动吗？

今：一点也不！我自然注意到您所说的两种情况，但是我认定它们都是由于作用在我的圆盘上的引力场所引起的。从圆心指向圆盘外面的引力场，使我的坚硬的杆变形，使我的钟改变步调。引力场、非欧几何、步调不同的钟，在我看来都是密切相关的。不管采用哪一种坐标系，我必须同时认定相应引力场的存在以及它对坚硬杆和钟的影响。”

(2) 广义相对性原理

在狭义相对论中，如果用不是闵氏坐标的任意坐标来描述匀速直线运动，就会出现“惯性力”；任意一条不是直线的类时世界线所描述的运动都是非惯性运动。写下相应的运动方程，其中出现的克氏联络就相当于惯性力。然而，时空仍然是平直的闵氏时空，黎曼曲率张量为零。当然没有出现引力。另一方面，按照广义相对论，时空一旦弯曲，就出现了引力，黎曼曲率张量就不为零。由于黎曼曲率张量是张量，只要其某一分量不为零，那么，无论选取什么坐标系，都不可能把黎曼曲率张量的所有分量变为零。在描述粒子运动的测地线方程中的克里斯多菲联络却不同，可以在一个坐标邻域内选取特殊坐标，使得克氏联络在一点对于所有的测地线为零，或者在该邻域内沿一条测地线为零。在广义相对论早年的文献中，往往没有认真区分到底是什么描述引力：是克氏联络还是黎曼曲率张量？追溯其根源，就是爱因斯坦的“引力与惯性力等效”。爱因斯坦还常用转动圆盘来说明一旦出现与转动相联系的惯性力，圆盘就会“弯曲”，不再服从欧几里德几何；并以此来说明与惯性力等效的引力会使时空弯曲。这样，从惯性力与引力等效、前者引起空间弯曲这两个并不正确的论证出发，爱因斯坦却到达引力引起时空弯曲，这一广义相对论的核心思想。不过，无论在爱因斯坦的著名专著《相对论的意义》，还是在他著名的通俗读物《狭义与广义相对论浅说》中，从开始出版，直到他去世前不久的再版，并没有修改原来的论述。广义相对论要求描述引力场的伪黎曼几何的度量具有与闵氏时空度量的符号差相同而已。通常认为，这个在广义相对论中占据核心地位的原理要求：在宇宙中任何时刻、任何地点都存在局域洛伦兹时空（或者洛伦兹标架、参考系），在这类局域洛伦兹时空中，除了引力之外的一切物理规律的形式与狭义相对论中一样。这是所谓的“强等效原理”，如果只要求“自由降落粒子的运动规律”，则称为“弱等效原理”。一般认为，这样表述的等效原理是广义相对论中最重要的原理。但是，这样表述的等效原理并没有要求狭义相对论及其物理定律完整的庞加莱对称性。对于局域洛伦兹时空而言，在广义相对论中留下的仅仅是齐次洛伦兹对称性，时空平移对称性丢失了。

德国数学家希尔伯特也于1915年11月20日，几乎同时得到了满足广义相对性原理的引力场方程。虽然马赫原理在广义相对论的起源中，起了重要的启发作用，而且Einstein相信广义相对论实现了马赫原理所要求的废除绝对空间的哲学愿望。但是，马赫拒绝承认相对论；严格的分析表明，广义相对论不完全符合马赫原理，马赫原理既不是广义相对论的逻辑前提，也不是它的推论。

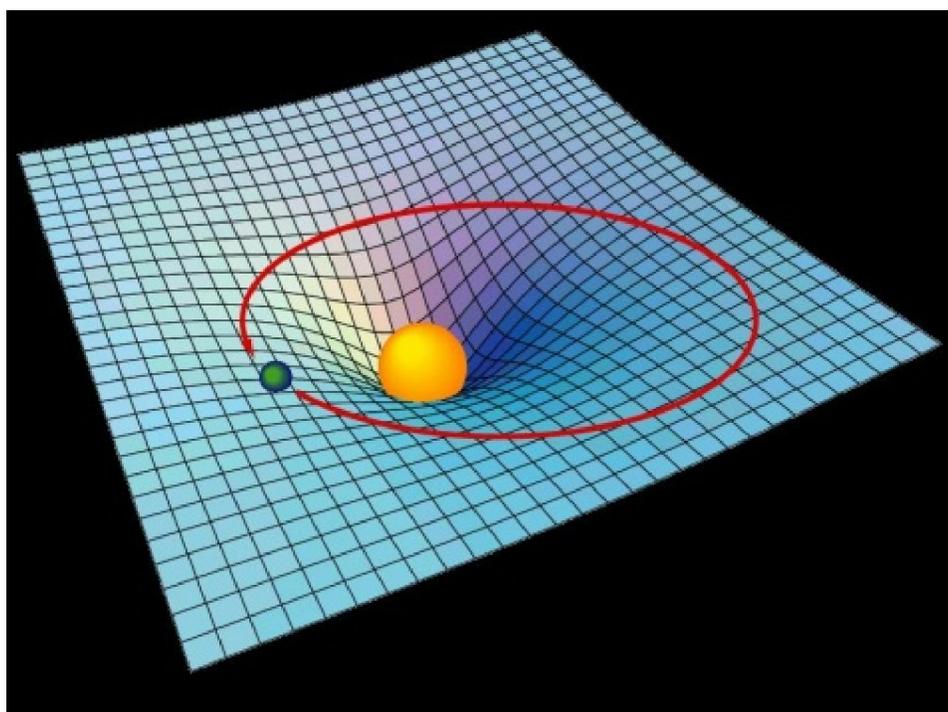
Einstein 对惯性问题的解决方法，即广义相对论，要比麦克斯韦理论复杂得多。在“一级近似”下，它简化为牛顿理论；在“二级近似”下，它实际上具有麦克斯韦理论的特征。至于在什么意义上，它是真正“马赫主义”的，还有争论。任何时候都应当注意：（1）马赫原理是扎根于经典运动学之中的；（2）它没有考虑可能作为空间内容的“场”。因此，它在近代物理学中完整的公式表述还是成问题的。Einstein 内心期望的广义相对论是符合等效原理的：“在一个贯彻一致的相对论中，不可能有相对于‘空间’的惯性，而只有物体相互的惯性。因此，如果我使一个物体距离宇宙中别的一切物体在空间上都足够远，那么它的惯性必定减到零。”不过，场方程的很多解不符合这个要求。

美国科学哲学家 Michael Friedman 指出，Einstein 在对相对论作哲学解释时，混同了运动相对化的两种策略：马赫的相对化纲领和广义相对性纲领。马赫的相对化纲领要求用相对性术语定义所有绝对项（比如把惯性原理解释为相对运动变化带来的引力的变化效应）；广义相对性纲领只要求运动方程可以写成广义协变性的形式，并不要求象莱布尼兹的相对化纲领所主张的消去所有绝对项。从牛顿力学转向相对论时，相对论只部分地实现了马赫的纲领（加速和转速现象部分地由远处质量决定而不是完全由外部质量决定）。造成这种误解的原因是，在广义相对论以前的物理理论中，规定理论中的客体的对称性，惯性系等价和等效原理所决定的局部等价造成的惯性力场与引力场的不可分辨性，以及物理规律的数学协变性这三者是一致的。而在广义相对论中，这三者是不同的：例如，主张惯性系与非惯性系可以分辨的牛顿力学也可以写成广义协变性的数学形式，只要在牛顿力学方程中增加与加速度有关的项，就能在平直时空中把牛顿力学表述成广义协变的方程；等效原理只能在局部保证惯性力场与引力场不可分辨，而在整体上永久引力场不可能采用坐标协变的方式消去，等等。在 Einstein 的《广义相对论的基础》这一经典文献中，他从讨论假想的空虚时空中的两个球在相互旋转时是否会出现一个球鼓起为椭球的思想实验中包含的马赫原理开始，悄悄地溜向需要扩展相对性原理使得惯性运动和非惯性加速和转动在物理规律上不可区分，然后把这种要寻求的广义相对性等同于运动方程的广义协变性。当然，这条思路是误导人的。运动方程数学形式的相同和协变性不足以保证惯性系和非惯性系的物理等价，也不足以表达 Einstein 心目中要寻求的广义相对性原理。物理定律数学形式的相同和协变性的概念只有在平直时空理论的文本中对应于物理等价性和相对论的概念，而在平直时空中存在着一个优先的惯性系。在广义相对论中，无引力场太空中静止或作匀速直线运动的参照系和引力场中无自转的自由下落的无穷小参照系都是严格的惯性系，称为局域惯性系；局域的绝对加速和绝对转动可以从局域的惯性运动中分离出来，和以前的物理理论一样，非惯性运动和惯性运动的运动定律不同：在非惯性运动中，具有用弯曲时空度规描述的惯性力和相对论修正项【1】。

广义相对论使物理学没有必要引进惯性系，这是它的根本成就。有关广义相对性原理在广义相对论中是否必要的问题是有争论的。苏联物理学家 B.A. 福克认为，由于自然规律未必一定得具有微分方程的形式，而协变性正是对着这种形式而言的。那么除了方程以外，还必须加上初始条件，边界条件等其它条件。但初始条件和边界条件不是协变的，同样的公式在不同的参照系中对应着不同的物理内容。这说明在两个参照系中，实现两种具有同一形式补充条件的过程，一般是不可能的，因此广义相对性原理是不存在的。由此福克进一步认为：对表达 Einstein 引力理论，广义相对性原理也是没有必要的。实际上，只是从这个原理的全部逻辑结论中，应用了场的微分方程的协变性。福克和 M.Friedman 一样，把广义协变性视为数学或逻辑的要求，而且不应把广义协变性等同于 Einstein 所设想的，但并非为相对论所必需的广义相对性。而中国物理学家周培源认为，物理学规律满足协变性的要求，不仅是逻辑和数学的要求，更是因为物理规律本身具有在各参照系通用和变换的客观性；福克等人把相对性理解为物理过程的相似性，而不是物理过程在坐标变换下的协变性，这就引伸出了错误的哲学理解。

广义协变性是表达物理规律的广义相对性的一个数学理想，它要求物理规律在四维黎曼时空保持协变性。四维黎曼时空虽然不像欧几里德空间或闵可夫斯基时空那样成为牛顿力学或狭义相对论的先验几何，其中运动学是独立于动力学的；但是，四维黎曼时空却对引力场的几何化提供了定性的约束，黎曼时空中的质点运动学是与引力场的动力学紧密相关的。四维黎曼时空的引入，并不是任意的约定，而是因为非惯性运动引起的相对论效应必然导致欧氏几何和闵氏几何失效，时空出现弯曲；根据等效原理，引力场局域地等效于惯性力场，就可以证明相对论的引力场需要引入弯曲时空。在建立广义相对论的过程中，Einstein 考虑了一个转动的刚性圆盘的理想实验。他发现，当刚性圆盘转动时，在不同的半径处，由于旋转的线速度不同，引起的洛伦兹收缩也不同，圆周与其半径之比不再是 2π ，从而使欧几里得定理在匀速转动参照系中，极有可能不再成立。然而旋转圆盘的惯性力与引力等效，由此，Einstein 认识到，在引力场中，欧几里得几何学不严格成立。Einstein 的广义相对论本质上就是将引力场与弯曲时空的度规联系起来的产物，广义协变性是通过引入黎曼时空的柔性度规自然出现的，等效原理保证了引力场的黎曼几何化处理具有物理意义。

通过 Einstein 的学生 N. 罗森等人的努力，弯曲时空规范的广义相对论也建立起了平直时空的新形式，它们之间可以通过数学变换形式相互转换。弯曲时空规范以三组已经建立的数学化定律为基础：Einstein 方程，它描述物质如何产生时空曲率；告诉我们理想尺钟测量 Einstein 弯曲时空的长度和时间的定律；告诉我们物质和场如何在弯曲时空中运动。平直时空规范也以三组定律为基础：描述平直时空中的物质如何产生引力场的定律；描述场如何决定理想尺寸的收缩和理想的时钟流如何膨胀的定律；描述引力场如何决定粒子和场在平直时空中运动的定律。在弯曲时空里，Einstein 场方程在口头上可以说“质量产生时空曲率”。用平直时空规范的语言，场方程被说成“质量产生决定尺度收缩和时钟膨胀的引力场”。虽然 Einstein 场方程的这两种说法在数学上是等价的，但在语言上却大不相同，可以相互推导出来[7]。平直时空规范与弯曲时空规范的关系非常类似于彭加勒——洛伦兹理论与 Einstein 狭义相对论的关系。如果在能量动量张量中考虑引力场本身的能量贡献，新的平直时空引力论就与广义相对论不完全等价了，这就是所谓的平直时空引力理论 (FSG) 或狭义相对论时空理论 (SR 时空理论)；它目前没有被证伪，但在强调引力场的物质性，消除能量动量张量的二阶张量与引力场曲率张量的四阶张量的不对称性，保证引力场和物质场总能量——动量守恒等方面比广义相对论要满意。



广义相对论，相较于狭义相对论，进一步指出时间——空间与能量——动量之间的关系。广义相对论认为，能量——动量的存在，会使四维时空弯曲。引力是一个历史概念，并不是客观存在，引力效应只是时空弯曲的一种表现形式而已。物理学原理其实与虚构的神话有相通之处，只是它们能反映世界深藏的真相。在牛顿的机械力学世界观中，“力”的概念就是这部神话中最大的虚构。而在今天，“力的概念已经从我们物理学基本理论的大多数公式中消失了”，2004 年诺贝尔奖得主、马萨诸塞理工学院的物理学家维尔泽克在《当代物理学》中写道。Einstein 的相对论将重力理解为一种时空的几何学现象，其中不需要作用力概念。不过，力的概念在 21 世纪并未消亡，其实活得很好。维尔泽克博士解释说，在处理应用物理学问题时，如果取消作用力概念，做起来过于复杂了。力的概念尽管含义模糊，仅适用于近似处理有限尺度内的物理现象(不适用于微观尺度和大尺度的宏观世界)，但在实际生活中，它已经足够了。“力的概念仍被沿用的另一主要原因，无疑是人们思想上的惯性。”维尔泽克补充道。

目前物理思想的特点，和整个自然科学思想的特点一样，是在原则上力求完全用‘类空’概念来说明问题，力求借助于这些概念来表述一切具有定律形式的关系……完全用‘类空’概念来理解一切关系在原则上是可能的（因为‘物质’已失去了作为基本概念的地位）——“‘物质’已失去了作为基本概念的地位。事实上，广义相对论在主流物理学界中也是有争议的。尤其是广义相对性原理，说一切加速坐标系都等效，

就使得哥白尼的太阳中心学说与地球是世界中心的本轮均轮学说没有区别了。福克-周培源与 Einstein-因菲尔德关于是否要引入谐和坐标系的争论就是对广义相对性原理的质疑。

广义协变性原理或者广义相对性原理，并没有实现马赫“任何运动都是相对的”观点。为了进一步具有更多实质内容，必须代之以“几何形式的简单性”、等效原理等等。其实，广义相对论并没有任意运动之间的“广义相对性”。事实上，3+1 维黎曼时空上的“连续坐标变换”一般并不构成群。在给定时空点，可微分的坐标的局部基底 $(\partial / \partial x_i)$ 或其对偶基底 (dx_i) 之间的所有变换矩阵才构成群，即局域一般线性群 $GL(4, R)$ ；对于该点两个坐标邻域交集的连接函数，同样取值在这个群上。在广义相对论中，要求几乎所有物理量都是这类变换下的张量（的分量），或者带上相应数量的基底成为与坐标无关的几何量。局域齐次洛伦兹群是这个群的子群，但是，局域平移却不是。这又导致等效原理没有要求局部平移对称性的同样问题和后果。如果要求度规在取值在 $GL(4, R)$ 代数上的克氏联络所定义的平行移动下不变，那么克氏联络就约化为取值在齐次洛伦兹群 $SO(1, 3)$ 的代数上的洛伦兹联络。这就是局域洛伦兹时空具有齐次洛伦兹变换的原因。

[参考文献]

【1】 [美] A. 佩斯：《上帝是微妙的——Einstein 的科学与生平》，陈崇光 德清等译，科学技术文献出版社，1988 年 8 月第 1 版，p p354。

【2】 Einstein、英费尔德,1962, 物理学的进化（中译本），上海科学技术出版社。110 页。

4、两种时空观的对比

	牛顿时空观	相对论时空观	
		狭义相对论	广义相对论
对时空的看法	平直的, 时空相互分离	平直的, 时空为一个整体	时空是弯曲的为一个整体
物质与时空	物质和时空分离, 物质在三维空间运动, 时序符合因果律	物质运动和时空不分离, 时空描述是观察者对物质运动状态表述	物质运动和时空不能分离, 并决定着时空弯曲, 而弯曲时空又决定物质如何运动
对引力看法	万有引力是一种超距力, 其作用无需传递时间	万有引力的超距作用与光速不变原理相矛盾	万有引力不是一种力, 它是时空弯曲的一种表现
对惯性系看法	不受力而保持静止或直线运动物体及相对绝对空间保持静止或直线运动的物体可选为惯性系	沿用了牛顿时空观的惯性系的概(但否定了绝对空间的存在)	有引力场存在的空间中, 以某一时空点处的引力强度自由下落的参考系为该点处一个局域惯性系

Steven Weinberg 说, “Newton 理论确实解释了太阳系的所有观测到的运动, 但代价是引进来一些多少有些随意的假设。例如, 引力定律说, 任何物体产生的引力随离开物体的距离的平方反比例地减小。在 Newton

理论中,没有什么特别的需要平方反比律的东西。Newton提出平方反比律的思想是为了解释太阳系的一些已知事实,如Kepler的行星轨道大小与行星环绕太阳1周所需时间的关系。除了这些观测事实而外,在Newton理论中,我们可以用立方反比律或2.01次方反比律取代平方反比律,那一点也不会改变理论的概念框架,只是可能改变理论的一些次要的细节。

Einstein理论严格得多,远没有那么自由。对于在引力场中缓慢运动的物体,即我们可以在寻常意义上谈论引力的情形,广义相对论要求力必须以平方反比的形式减小。在广义相对论中,如果想调整理论得出平方反比律以外的什么东西,不可能不违背理论的基本假设。1907年以后,Einstein化了10年的时间为他的那些思想寻找恰当的数学框架。最后他找到了需要的东西,原来,引力在物理学中的角色,跟曲率在几何学中的角色存在着深刻的相似。”“从引力与曲率这点类比出发,Einstein得到一个结论:引力恰好就是空间和时间的曲率效应。”“广义相对论之最终形式,无非就是以引力重新解释了弯曲空间的数学,以一个场方程决定一定物质和能量产生的曲率。”在广义相对论中,相对运动不是简单的匀速运动,因此,在时空连续、光滑的几何特性之下,时间和空间的度量体系将逐点变化。但在广义相对论的坐标系中,极小邻域的区间内,狭义相对论依然有效。 $ds^2=dx^2+dy^2+dz^2+d(ict)^2$ 依然有不变量的特性。因坐标系是位置的函数,因此用张量方程表示为: $ds^2=\Sigma g_{ik}dx^i dx^k$, g_{ik} 为张量。广义相对论得出:引力是时空弯曲的结果。时空不再是平直的,任意的时空坐标系中,每一个点上, $ds^2=\Sigma g_{ik}dx^i dx^k$ 成立,坐标系及时空度量逐点变化。万有引力是时空弯曲的表象。

在物质平均密度大(引力场强),的较大时空范围内研究宏观物体高速运动时,物质和时空的相互依存关系遵循广义相对论的时空理论,在这个时空范围中的某一时空点研究物体高速运动的时空理论是狭义相对论,这恰恰反映了时空整体弯曲、局部平直的特性。而牛顿力学的规律只是在描述了宏观物体低速运动时才能取得和实际较为一致的结果。

5、广义相对论的奇点问题

霍金(S.W. Hawking)和彭罗斯(R. Penrose)于1970年证明了“宇宙奇点定理”:在极一般的条件下,按照广义相对论,宇宙大爆炸必然从一个奇点开始。由此,他们共同获得1988年的沃尔夫物理奖。然而宇宙在大爆炸奇点处,一切科学定律包括广义相对论本身都失效了,连时空概念也失效了。所以奇点是不可能真实存在的,是非物理的。这就构成宇宙学最大的疑难:奇性疑难。因此,奇点定理也表明,广义相对论是不完备的,它无法告诉我们宇宙是如何开始的。霍金说:“广义相对论导致了自身的失效:它预言它不能预言宇宙。”1973年,霍金和埃利斯出版了《时空的大尺度结构》一书,在这本书里,霍金对奇点定理做了总结,并在此基础上,提出了关于宇宙的两个预言:第一,宇宙中存在黑洞。第二,我们的过去存在奇点,它构成了宇宙的开端。霍金说:“有一次爱因斯坦问道:‘在建造宇宙时,上帝有多少选择呢?’如果无边界假设是正确的,在选取初始条件上,它就根本没有自由。它只有选择宇宙要服从的定律的自由。”

大家知道,广义相对论中的场方程(即Einstein场方程): $R_{\mu\nu} - (1/2)g_{\mu\nu}R = 8\pi GT_{\mu\nu}$,是一组有关时空度规的二阶非线性偏微分方程,求解这样的方程组是极其困难的。在二十世纪六十年代初以前,物理学家们对Einstein场方程的很大一类研究局限于在各种简化条件(比如特定的对称性)下求解场方程。在这方面最著名的成果是K. Schwarzschild(1873-1916)于1916年得到的Schwarzschild解,其度规为(m为质量参数): $ds^2 = (1-2m/r)dt^2 - (1-2m/r)^{-1}dr^2 - r^2d\Omega^2$ 以及A. Friedmann(1888-1925)于1922年得到的Friedmann解,其度规为(R为标度因子,取值为0、-1或1,分别对应于平直、负常曲率及正常曲率空间): $ds^2 = dt^2 - R^2(t) [dr^2/(1-kr^2) + r^2d\Omega^2]$,这两个度规分别是广义相对论在天体物理及宇宙学上应用最为广泛的度规。但这两个解的发现也带来了一个共同的问题,那就是它们所对应的度规均具有奇异性。Schwarzschild度规是一个静态度规,它的奇异性(由上面的表达式中可以很容易地看到)出现在 $r=0$ 及 $r=2m$ 处。这其中 $r=2m$ 处的奇异性(一度被称为Schwarzschild奇点)后来被证明只是坐标选择所导致的表观奇异性,可以通过坐标变换予以消除;而 $r=0$ 处的奇异性则是真正的物理奇点,时空曲率在趋近这一点时趋于发散。这个奇点被称为曲率奇点。

Robertson-Walker度规由于是一个动态度规,其情形稍微复杂些。当 $k=1$ (即空间具有正曲率)时这一度规在 $r=1$ 处似乎具有奇异性,但这也是坐标选择所导致的表观奇异性。除去这一表观奇异性,从形式上看Robertson-Walker度规似乎没有其它显而易见的奇异性。但把这一度规代入到场方程中,研究它的动力学演化就会发现,对于我们观测到的膨胀宇宙来说,只要宇宙当前的物质分布满足一个很宽泛的条件,Robertson-Walker度规中的标度因子 $R(t)$ 在过去某个有限时刻就必定等于零。在那个时刻(通常定义为 $t=0$)宇宙的空间线度为零,物质密度则发散,因此那是一个物理奇点,被称为宇宙学奇点,或大爆炸(The Big Bang)。

很明显，这些奇点的出现是物理学家们所不乐见的，因为物理世界中并不存在真正意义上的无穷大。对于一个物理理论来说，出现无穷大往往意味着它的失效。因此奇点的出现对广义相对论是一种危机。不过当时物理学家们所知道的 Einstein 场方程的解十分有限，而且这些解大都具有很高的对称性（因为只有这种情形下的场方程才容易求解），比如 Schwarzschild 解具有球对称性，Friedmann 解则是均匀及各向同性的。这就给物理学家们提出了这样一个问题：由这几个特殊解所引发的危机究竟有多大的普遍性？或者说奇点会不会只是那几个解所具有的特殊对称性导致的特殊效应（如果是的话那危机就不算太严重，因为那些对称性在现实世界里是不可能绝对严格实现的）？在二十世纪六十年代，物理学家们对这一问题有两种不同的看法。一种看法认为奇点的出现只是对称性所导致的特殊效应，如果考虑一般（即没有严格对称性）的情形，奇点将不会出现。持这种观点的代表人物是前苏联的 E. Lifshitz (1915-1985)、I. M. Khalatnikov、V. A. Belinsky 等。与之相反的一种看法则认为奇点在广义相对论中的出现是具有普遍性的。持这种观点的代表人物是英国的 R. Penrose (1931-) 与 S. W. Hawking (1942-) 等。

这两组物理学家在奇点问题上不仅观点迥异，而且研究中所用的具体方法也很不相同。Lifshitz 等人主要把精力放在求解一般情形（即没有严格对称性）下的场方程，以便探讨在这种情形下理论是否存在奇点；而 Penrose 与 Hawking 等人则大量运用微分几何手段，通过所谓的全局方法 (Global Techniques)，在不直接求解场方程的情况下对奇点及奇点产生的条件进行系统分析。如果说 Lifshitz 等人的方法是正面强攻，那么 Penrose 与 Hawking 等人的方法则属于旁敲侧击。结果 Lifshitz 等人的正面强攻收效不大。Einstein 场方程委实太过复杂，虽然 Lifshitz 等人的胃口并不贪婪，他们只研究宇宙学奇点 $t=0$ 附近的解而非全局性解，同时不奢望精确求解而采用近似手段，但在不具有对称性的情况下，他们的努力依然遭到了巨大的困难。另一方面，Penrose 与 Hawking 等人的旁敲侧击却获得了极大的成功，他们证明了一系列著名的奇点定理，成为经典广义相对论中登峰造极的成就之一。

“奇点定理”是彭若斯和霍金证明的一个与时间有关的数学定理。该定理可以粗略地表述为：只要广义相对论成立，因果性良好，有物质存在，就至少有一个物理过程，其时间存在开始或存在结束，或既有开始又有结束。该定理的实质内容是：在因果性成立、广义相对论正确，而且有物质存在的时空中，至少有一个可实现的物理过程，它在有限的时间之前开始，或在有限的时间之后终结。也就是说，至少有一个物理过程，它的时间有开始，或有终结，或者既有开始又有终结。换句话说，至少有一个时间过程，它的一头或两头是有限的。

该定理的证明过程可以简述为：如果有一根类光或类时测地线，在未来或过去方向上，在有限的仿射距离内断掉，不能再继续延伸，那么，这根测地线就被认为是碰到了时空的“洞”。如果这个洞补不上，那么它就是奇点。彭若斯和霍金证明：只要广义相对论正确，并且因果性成立，那么，任何有物质的时空，都至少存在一个奇点。

有奇点的时空称为奇异时空。奇异时空中，即使把奇点挖掉，也不会改变奇异时空的性质。但是，挖掉奇点以后会留下空洞，这样时空中任何一条线经过此空洞时都会在此断掉。于是，彭若斯和霍金建议，干脆把奇点从时空中“去掉”，认为它不属于时空，或者干脆把奇点看作时空中的“空洞”（此空洞是不能修补的）。据此，彭若斯和霍金证明了，时空中至少存在一条具有如下性质的类光或类时曲线：它在有限的距离内会断掉，而且断掉的地方不能用任何手段修补，以使这条曲线可以延伸过去。

按照广义相对论，因为时空中亚光速曲线（即类时测地线）的长度可以看作是沿此线运动的物质所经历的固有时间，所以此曲线碰到空洞（即奇点）断掉，就可以看作是此时间过程断掉。据此，彭若斯和霍金认为“奇点”就是时间过程断掉的地方，并且由此来证明他们的奇点定理。

他们证明：在强因果时空中，不一定有最长线，如果有，则一定是无共轭点的测地线；在整体双曲时空中，一定有最长线，并且一定是无共轭点的测地线；在广义相对论正确，强能量条件成立，并且时空中至少有一个存在物质的时空点时，则测地线在有限的仿射距离内必定存在共轭点。

按照他们证明的结论，就是说因果条件（包括双曲时空）要求要有最长测地线，并且一定是无共轭点的测地线；而能量条件、广义相对论和物质的存在又要求此测地线上一定要有共轭点，并且在有限的仿射距离内就出现共轭点。

显然，此测地线不能同时满足既要有共轭点，又要无共轭点这个条件，这是一个矛盾的条件。解决这个矛盾条件的唯一方法只有：让此测地线不要无限延伸，让它在出现共轭点之前，在有限的仿射距离内就碰到奇点（即空洞）而断掉。换句话说就是，此测地线一定会遇到奇点（即空洞）而断掉，时间过程一定会断掉，时间一定有限（时间有开始与终结），时空一定存在奇异性。这样，他们就证明了奇点定理。

早已知道在广义相对论中存在奇性。例如,史瓦西度规在 $r=2MG/C^2$ 以及 $r=0$ 处是奇异的。直到 1959 年才发现,只要引入两个坐标系来覆盖时空,就可以避免 $r=2MG/C^2$ 处的奇点。但是 $r=0$ 处的奇点却不是这种由于坐标选取不当而带来的虚假的奇异。又如,弗里德曼-罗伯孙-沃耳克宇宙度规在宇宙时 $t=0$ 处奇异,这也不是由于坐标选取不当带来的。在时空等于零时,广义相对论的引力方程就出现一个奇点,在奇点处包括相对论在内的一切物理定律都失效。

一般认为,出现这种运动起始或终止于奇性的现象反映了广义相对论理论上的某种不完善,并不一定是客观世界所固有的。当前,有关奇性的深入研究以及如何避免这类奇性的问题,是一个很活跃的领域,克服广义相对论的这个重大疑难,将会使物理学对于时间、空间和引力的认识达到更高的境地。

在奇点处,曲率和密度无限大、一切物理规律都已失效。对于这样一种只在数学定义中出现却威胁到物理学的东西,是不受物理学家欢迎的。人们普遍相信,考虑到引力场在微观尺度上的量子效应,奇点应该是可以避免的,就像当年用量子论来解释黑体辐射从而避免了紫外发散一样。

按照等效原理,如果宇宙中时时处处都存在局部洛伦兹参考系的话,就不应该出现这类病态的奇性。奇性的不可避免暗示着广义相对论作为一个理论体系,内部存在某些不自洽。著名学者夏玛指出:“我们面临着理论物理的危机。或者经典广义相对论要破坏,或者存在着等效的负能密度,或者因果性不再成立,或者在自然界中存在奇性。”爱因斯坦的追随者、著名学者伯格曼也指出:“膨胀宇宙极早期存在奇性,这是现有理论观念并不适合于极高密度物质的一个信号。”

第三章 广义相对论的实验验证

1、引力的传播速度

(1)广义相对论的场方程的解

广义相对论的发展,在很大程度上取决于引力场方程的解和它们的物理解释。因此,引力场方程的严格解是爱因斯坦引力理论的重要内容。一般来说,只要给出一个严格解,就会预言一系列新的引力效应,但由于数学上的复杂性,获得引力场方程的严格解是非常艰难的。自广义相对论问世以来,我们只获得十几个既有明显物理意义,又有明显形式的严格解。其中第一个严格解是著名数学家、天文学家K Schwarzschild于1916年求得。此解的唯一性于1967年由W Israel给出。1963年,新西兰数学家Roy Kerr通过解爱因斯坦场方程,得到了质量为M、角动量为J的质量外部解,此解描述匀角速转动球体的外部引力场,我们称之为Kerr解;1965年,数学物理学家Ezra Newman等人把Kerr解推广到带电的情况,得到了Kerr-Newman解,它描述匀角速转动荷电球体的外部引力场。

1982年,日本物理学家Masahiro Kaguya又将Kerr-Newman解推广到场源含电荷和磁荷的情况,得到了Kerr-Newman-Kasuya解,此解描述带有电荷和磁荷的匀角速旋转的球体的外部引力场^[21]。这三个解是目前所知的惟一用来描述具有自旋的质量外部引力场的爱因斯坦场方程的严格解。不过,爱因斯坦引力场方程正是以其复杂而美妙著称,任何曾与之打交道的人都会为之倾倒,留下深刻的印象。而爱因斯坦场方程解也为我们研究各类引力场提供了基础。爱因斯坦引力场方程和场源物质及试验粒子的运动方程都是相当复杂的,由这些方程可以引出许多新的推论。这些推论对牛顿引力理论进行了修正,给出了若干含有新参量的场方程或运动方程的新的特解和新的附加条件,这些推论中,有一些具有明显的物理意义,我们称之为引力效应。

近年来,随着实验技术的迅速发展和测量精度的显著提高,人们不仅仅局限于讨论某些理论预言的直接实验验证,而且还讨论这些引力效应与广义相对论各基本原理之间的联系。这些新的进展激励人们在解决广义相对论一些特殊问题的同时,扩展对引力效应和引力实验的研究,并进一步得出具体的推论。因此,除了分析广义相对论预言的四个著名的引力效应以外,我们有必要把广义相对论预言的许多其他引力效应进行分类研究。许多引力效应因为比较微弱,或者因为夹杂在其他效应中难以分出,在近期内还不能被实验所检验。但是,随着观测技术、引力辐射探测技术和空间技术等的发展将会有更多的引力效应为新的实验所检验。

在引力场很弱,时空曲率很小的情况下,广义相对论的结论同牛顿引力理论的结论趋于一致;而在引力场较强,时空曲率较大的情况下,两者的区别就变得明显。虽然广义相对论已经被公认为比较精确地描写了引力相互作用,但其引力场方程是一组非线性方程,形式比较复杂,理论问题的研究远没有完成。广义相对论曾一度被称为“理论物理学家的天堂,实验物理学家的地狱”。因为广义相对论的实验验证难度非常高,且不易提出新的实验思想,加上技术水平的限制,到现在,在太阳系中,还只有四种实验能检验出这种区别。它们分别是:(1)水星近日点进动阻;(2)光线偏折(3)引力红移;(4)雷达回波的时间延迟。后来,关于脉冲双星的观测间接地验证了广义相对论对引力波存在的预言。

(2)引力的传播速度

在托勒密，哥白尼，第谷，开普勒对太阳系星体运动精密观测的基础上，牛顿总结出了万有引力定律，并据此给出了开普勒行星运动三定律的精妙证明。

万有引力定律是 17 世纪自然科学最伟大的成果。它第一次解释了一种基本相互作用的规律，把地面上物体运动和天体运动的规律统一了起来。哈雷彗星、海王星、冥王星的发现，都是应用万有引力定律取得重大成就的例子。牛顿还解释了月亮和太阳的万有引力引起的潮汐现象。现在，天文学、天体力学研究，人造卫星、宇宙飞船都离不开万有引力定律。但牛顿万有引力定律并非圆满无缺。

牛顿万有引力公式不包含时间，物体间引力作用不需要时间瞬间完成。牛顿无法解释这种瞬间超距作用，故他从来没有在他的文字中“赋予产生这种能力的原因”，也拒绝对引力产生的起因提出假设。

进一步深入了解引力，就要对引力现象作更细致的实验和观测。牛顿之后三百余年，物理学家一直没有测得引力作用传播速度的数据。牛顿认为引力是瞬时作用的，爱因斯坦设想它以光速传播，至今物理学家们对引力相互作用的传播或联络速度究竟是无穷大（瞬间完成）还是有限速度（如光速）尚无一致看法。物理学家在想尽办法测量引力速度。

大多数的科学家们都明确地认为，引力作用应该与电磁力作用相似，不是一种瞬态作用，而是有一定的作用的，但是用实验的方法确定引力的速度比较困难。2002 年 9 月 8 日，土星巡弋在类星体 JO842+1835 的附近，虽然土星没有一般恒星的质量大，但它仍有相当大的引力。按照广义相对论的推测，在天空中类星体的位置在土星引力的作用下，将在若干天内完成一个小小的回路。美国 Missouri 大学的 S.Kopeiken 教授和国家射电天文观测台的 E.Fomolont 教授观察到了这个回路，这两位科学家使用了具有非常长的基线阵列射电望远镜，因为这种抛物型探测器的配置可以提供 $10 \mu\text{s}$ 的角度分辨率，实验观察到的回路是按瞬态传播的引力所产生的回路间存在着一个微小的位移，位移的产生是由于引力具有一定的速度所致，他们计算出引力的速度是光速的 1.06 倍（其误差约为 20%）。当他们将这个观测结果在 2003 年 1 月，在位于美国西雅图召开的“美国天文学年会”上报告后，就受到了来自美国华盛顿大学的 C.Will 教授与日本 Hirosaki 大学的 Hideki Asada 教授的质疑，他们认为射电望远镜实验只能很粗略地测量光速，而不可能提供引力速度的数据，因此这两种不同意见的争论要等待新实验的验证。【1】笔者认为，上面测量引力速度的方法应当是有效的，引力的速度应当严格地等于光速，实验数据在误差范围内也说明了这一点。2004 年 1 月 12 日，由中国科学院和中国工程院 582 名院士投票，评选科学家首次测出引力速度为 2003 年世界十大科技进展新闻之一。

参考文献：

【1】《物理》 第 32 卷第 5 期 301 页。

2、引力红移问题

1907 年，Einstein 在《关于相对论原理和由此得出的结论》一文中，作出了关于引力对时钟的影响及引力红移的预言。他根据引力场与惯性力场等效的思想得出，一个处于引力场中的时钟，当所在点引力势为 Φ 时，它所指示的当地时间读数将是与它调准的不在引力场中的同样读数的 $(1+\Phi/c^2)$ 倍。“在这个意义上，我们可以说，在过程发生地点的引力势愈大，在时钟中发生的过程——一般说来是任何物理过程——也就进行得愈快。”同样的结论在 1911 年 4 月所发表的《引力对光传播的影响》一文中也给出了。在这篇论文中，Einstein 从等效原理出发，得出了光从无引力场的真空中的频率 ν_0 到引力势为 Φ 中的频率 ν 的变化与引力势间的关系是 $\nu=\nu_0(1+\Phi/c^2)$ ，这与引力场中时钟读数的变化一致；同时结合波传播的惠更斯原理，得出光在经过引力场时传播方向发生朝向天体偏折的结论，偏折角为以后实际测量结果和广义相对论计算结果的一半。在这篇论文中，Einstein 根据等效原理还论证了静态引力场的光速不是常数，处于引力场为 Φ 的场中光速为 c 与真空中光速 c_0 的关系是 $c=c_0(1+\Phi/c^2)$ 。半年后，亚伯拉罕首次把这个结论推广到非静态场中，他尝试后发现把非恒定光速的思想推广到狭义相对论是不可能的。亚伯拉罕对此评论说：“ c 的可变性意味着洛伦兹群只能在无限小区域中成立。”这一论断后来被 Einstein 马上发现【1】。

著名的 Pound-Rebka 实验——重力红移现象的发现已经证明了光速在地球垂直的方向上是在发生变化的。由于采用穆斯堡尔效应，科学家在实验室中验证了引力红移。庞德（R.V.Pound）与瑞布卡（G.A.Rebka）哈佛塔的著名实验证明了引力场可以使光子产生蓝移。从而间接地证明了 Einstein 广义相对论的引力红移的

存在。这个实验运用光子在地面重力场中的能量守恒关系得出方程
$$\nu = \nu_0 \left(1 + \frac{gh}{c^2}\right)$$
。其中 ν_0 是光子在塔顶的频率， ν 是光子经过重力场后到达塔底的频率， h 为塔高， g 为重力加速度。从上式可以看出光子频率的变化与它在引力场中运动的距离有关。在这个实验中，假设我们在塔顶与地面之间设定几个不同的测量点，

根据上式，光子在这些不同的点上应当有不同的频率。1960年，哈佛大学的物理学家以千分之一的精度测出了沿垂向下落23米的伽玛射线的频率移动(伽玛射线是一种高能电磁辐射)。从1976年起，超稳定即精确度为一千万亿分之一的钟被放到了高空飞机上，那里的引力比地面上减弱的程度应当可以测量出来。这种飞行的电磁钟与在地面实验室里同样的钟作了比较。二者的速率确有差别，而且与广义相对论预言的结果完全一致。

如果一个巨大的物体正好位于地球与恒星之间，那么来自恒星的光线就会受到时空弯曲的影响，它的传播路径就会被扭曲而偏离一定的角度。这种效应还会形成一种有趣的引力透镜现象，它使远处的恒星变得更亮，有时还会形成双像。广义相对论频移的物理机制，爱因斯坦做出的解释是：“一个原子吸收或发出的光的频率与该原子所处的引力场的势有关”；而霍金的解释是“当光从地球引力场往上走，它失去能量，因而其频率下降”。

在球对称引力场中距原点 R 处的光源发射周期为 T_0 的光波，则无穷远处接受到的周期：

$$T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \frac{2GM}{c^2 R}}}$$

$$\nu = \nu_0 \sqrt{1 - \frac{2GM}{c^2 R}}$$

相应的频率

笔者认为——广义相对论频移的本质是时空平权的反映，因为时空弯曲相当于距离的增加，等价于时间的延缓。

3、行星的进动问题

(一)水星进动问题的由来

自1687年天体力学由牛顿建立后，天体力学就同牛顿力学(牛顿的运动三大定律、万有引力定律和绝对时空观)密切联系在一起。拉普拉斯在1798年正式提出天体力学的学科名称和内容，并在1799年到1825年间，编写出版了历史性巨著《天体力学(Mecanique Celeste)》五卷，成为天体力学的奠基著作。1846年，根据勒威耶(Leverrier)按天体力学理论计算的预报，发现了海王星；因而证实了天体力学的可靠性。

尽管牛顿力学获得一次又一次的巨大成功，人们还是发现有一个现象无法解释，那就是水星近日点进动，水星进动指水星近日点在其绕日公转轨道上的移动。1859年，勒威耶在任巴黎天文台台长期间，根据大量的观测资料，发现水星近日点进动速率的计算值，比观测值小38"/百年。但他是牛顿力学的信徒，1845年他提出，水星的反常运动是受到一颗尚未发现的行星的影响，他称这颗行星为“火神星”，于是号召全世界天文台寻找这颗行星。结果未找到。

1895年前后，美国的纽康(Newcomb)等人根据更多的观测资料，把这个偏差值订正为43"/百年；同时也发现了金星、地球、火星的近日点进动有类似偏差，只是数值小些。开始，认为这是发出黄道光弥散物质使水星的运动受到阻尼，后来又有人企图用电磁理论作解释，但均以失败告终。他们开始怀疑牛顿的万有引力定律，并试图修改引力与距离的2次方成反比规律。纽康曾认为，这是由于牛顿万有引力定律

$$P = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^n}$$

中的 n 不是整数2，而是一个略大于2的数造成的，也就是水星进动是万有引力减小引起的。纽康在对四颗内行星的研究后得出， $n = 2 + 1.574 \times 10^{-7}$ ，但当用这一结论来研究月球的运动时，却出现了矛盾，以致无法解释水星的进动。

(二)广义相对论对于水星进动问题的解释

1915年11月25日，爱因斯坦把题为“万有引力方程”的论文提交给了柏林的普鲁士科学院，完整地论述了广义相对论。在这篇文章中他不仅解释了天文观测中发现的水星轨道近日点移动之谜，而且还预言：星光经过太阳会发生偏折，偏折角度相当于牛顿理论所预言的数值的两倍。第一次世界大战延误了对这个数值的测定。1919年5月25日的日全食给人们提供了大战后的第一次观测机会。英国人爱丁顿奔赴非洲西海岸的普林西比岛，进行了这一观测。11月6日，汤姆逊在英国皇家学会和皇家天文学会联席会议上郑重宣布：得到证实的是爱因斯坦而不是牛顿所预言的结果。他称赞道“这是人类思想史上最伟大的成就之一。爱因斯

坦发现的不是一个小岛，而是整整一个科学思想的新大陆。”泰晤士报以“科学上的革命”为题对这一重大新闻做了报道。消息传遍全世界，爱因斯坦成了举世瞩目的名人。广义相对论也被提高到神话般受人敬仰的宝座。

对地球和其它行星公转轨道的不同描述，不仅仅是一个天文观测值精确不精确的问题，而是在天体运动的力学性质上正确不正确的问题，即关系到分支学科的研究方向，也关系到宇宙观会不会出现又一次根本变革的问题。在爱因斯坦提出狭义相对论后，用狭义相对论预言的水星进动也只有实际观测结果的六分之一，直到爱因斯坦发表了广义相对论之后，这个疑团才得以解开。

爱因斯坦认为太阳的引力场适用于史瓦西解，由此应该对水星的近日点进动作出解释。他认为，水星应按史瓦西场中的自由粒子方式运动，其轨迹就是按史瓦西度规弯曲的空间中的测地线。1916年，爱因斯坦用自己提出的广义相对论，计算出水星近日点进动速率，与观测值符合得很好。这就肯定了在讨论行星运动中，牛顿力学的精度不够。1938年，爱因斯坦同另两人(Infeld, Hofmann)提出了后牛顿的多体问题运动方程，即著名的EIH方程。建立了后牛顿天体力学。法国勒韦里耶于1859年，牛柯姆[NEWCOMB]于1895年发现水星近日点绕太阳进动速度和牛顿力学的估计每年差+43秒。即是说，在Einstein提出其广义相对论前半世纪，已观察到这一事实。爱因斯坦1915年提出对水星的进动计算应当进行广义相对论改正，爱因斯坦提出的改

$$\Delta \omega = \frac{24\pi^3 a^2}{c^2 T^2 (1-e^2)}$$

正公式为： $\Delta \omega = \frac{24\pi^3 a^2}{c^2 T^2 (1-e^2)}$ ，式中c为光速，T、a、e分别为轨道周期、半长径和偏心率。对于水星，此值与牛顿万有引力定律所得的差值为每世纪43.03。这与观测值十分接近，被认为是天文学对广义相对论的最有力的验证之一。

Einstein这样解释：“这个效应是由v/c不为零，或者说，是由于v²/c²不为零造成的。什么量会与v²/c²成正比呢？一种合理的可能性是水星每转一圈超前的角度，或超前的角度被2π除。假定轨道是以半长轴为半径的圆，那末利用周期我们得出

$$v = \frac{2\pi a}{T} = \frac{2\pi \times 0.39 \times 1.5 \times 10^8}{7.6 \times 10^6} \approx 4.8 \times 10^6 \text{ 厘米/秒}$$

$$\text{周期} = 7.6 \times 10^6 \text{ 秒}$$

$$v/c \approx 1.6 \times 10^{-4}$$

$$v^2/c^2 \approx 2.6 \times 10^{-8} = \delta \theta / 2\pi$$

$$\delta \theta (\text{度}) \approx 360 \times 2.6 \times 10^{-8} \approx 9 \times 10^{-6}$$

$$\delta \theta \approx 3 \times 10^{-8} \text{ 弧秒/每圈}$$

常用的数字是每世纪的秒数。既然周期为0.24年，那末可以料想这效应的数量级为：

$$\delta \theta (\text{每世纪}) = 100 \times (3 \times 10^{-8}) / 0.24 \approx 13''$$

实验值为42.9''，广义相对论的预言是43.0''。

20世纪20年代，由于当时所测的太阳扁率较大，对水星近日点经度的摄动也大，这就使得按广义相对论计算值有4''/百年左右的偏差。物理学家们纷纷提出很多种新的引力理论。为了检验这些理论，1972年由Will, Nordtvedt建立起一种名为“参数化后牛顿”(简称PPN)方法。其中有10个参数，不同理论有不同的参数值。1972年，俄罗斯的天体力学专家勃隆别格(Brumberg)第一次出版俄语著作，正式用“相对论天体力学”做书名。其中提出了相对论天体力学的内容，是“以爱因斯坦的广义相对论或其他新引力理论为基础的天体力学”。由于懂俄语人少，影响不大。到1985年才受到广泛重视，IAU召开了相对论天体力学的专题讨论会。1987年，勃隆别格又用英语出版了《相对论天体力学》修订本，得到大家承认。高精度的运动理论都采用后牛顿天体力学。1991到1994年间，由法国人Damour，德国人Sofel和中国人须重明(Xu Chong-ming)合作发表一系列论文，提出了适用于任意形状和内部结构天体情况的完整后牛顿理论体系。并得到公认，命名为DSX体系。他们的论文总题目为“广义相对论天体力学”。随着观测精度不断提高，后牛顿精度的天体运动理论已开始感到不足；而高阶后牛顿天体力学还很不完善，需要相对论天体力学继续发展。

1974年9月由麻省理工学院的泰勒和他的学生惠斯勒，用305米口径的大型射电望远镜进行观测时，发现了脉冲双星，它是一个中子星和它的伴星在引力作用下相互绕行，周期只有0.323天，它的表面的引力比太阳表面强十万倍，是地球上甚至太阳系内不可能获得的检验引力理论的实验室。经过长达十余年的观测，他们得到了与广义相对论的预言符合得非常好的结果。由于这一重大贡献，泰勒和惠斯勒获得了1993年诺

贝尔物理奖。

对于金星： $V=3.5 \times 10^4(\text{m/s})$, $a=1.082 \times 10^{11}(\text{m})$, $t=100$ 年实际观测结果为： $\Delta \Phi = 8.4''$ ；“Einstein 广义相对论”的理论值为 $8.64''$ 。

对于地球： $V=2.98 \times 10^4(\text{m/s})$, $a=1.5 \times 10^{11}(\text{m})$, $t=100$ 年实际观测结果为： $\Delta \Phi = 5''$ ；“Einstein 广义相对论”的理论值为 $3.84''$ 。

南京大学黄天衣教授讲：“近二十年来关于太阳系天体轨道的观测精度逐年提高，发现观测不能和牛顿力学相符，但和广义相对论的很好。国际学术界认为广义相对论是目前最正确的理论。”

4、引力波问题

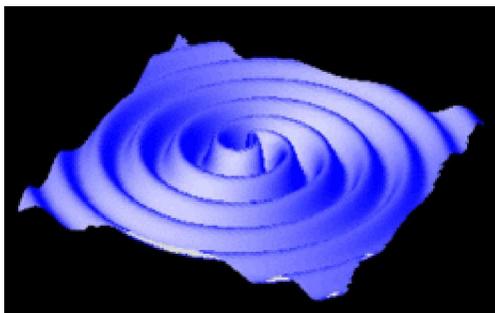
《自然杂志》19卷4期的‘探索物理学难题的科学意义’的97个悬而未决的难题：4。引力能否被屏蔽？7。引力子，你在何方？

(一) 引力波问题的广义相对论基础

爱因斯坦广义相对论预言，引力波的主要性质有：① 在真空中以光速传播；② 携带能量和与波源有关的信息；③ 是横波，在远源处为平面波；④ 最低次为四极辐射；⑤ 辐射强度极弱（如两个质子组成的旋转体系辐射的引力波强度约为它所辐射的电磁波强度的 $1 / 1057$ ）；⑥ 物质对引力波吸收效率极低，穿透性极强（如地球对引力波几乎是透明的）；⑦ 其偏振特性为两个独立的偏振态等。（摘自《2000年电子版中国大百科全书》天文学“引力波”中内容，作者秦荣先 陈嘉言）

早在1916年，Einstein 就根据弱场近似预言了弱引力波的存在，但最初关于引力波的理论是同坐标的选取有关的，以致引力波到底是引力场固有的性质，还是某种虚假的坐标效应，以及引力波是否从发射系统中带走能量等问题，长时间没有得到澄清。Einstein 引力场方程是双曲型偏微分方程，它意味着引力场的扰动将以一个有限速度传播，这种扰动就是以光速传播的引力波。引力波方程可从 Einstein 引力场方程的弱场近似解导出，把弱场情况下的引力场势函数简化为一个二阶齐次偏微分方程，这个方程与电磁波方程在数学上完全相同，所以引力场的运动也是波动，其解也是普通的平面波方程，引力波是横波，速度等于光速。

线性爱因斯坦方程



引力波——时空的波纹（示意图）

广义相对论预言下的引力波是以波形式传播的时空扰动，被形象地称为“时空涟漪”（Ripples in Spacetime）。广义相对论下的弱引力场可写作对平直时空的线性微扰：（以下采用自然单位，引力常数 $G=$ 光速 $c=1$ ）。 $g_{\alpha\beta} = \eta_{\alpha\beta} + h_{\alpha\beta}$ ，其中 $|h_{\alpha\beta}| \ll 1$ ，这里 $\eta_{\alpha\beta} = \text{diag}(-1, 1, 1, 1)$ 是平直时空的闵可夫斯基度规， $h_{\alpha\beta}$ 是弱引力场带来的微扰。在这个度规下计算得到的黎曼张量为

$$R_{\alpha\beta\mu\nu} = \frac{1}{2} (\partial_\mu \partial_\beta h_{\alpha\nu} - \partial_\mu \partial_\alpha h_{\beta\nu} + \partial_\nu \partial_\alpha h_{\beta\mu} - \partial_\nu \partial_\beta h_{\alpha\mu})$$

$$\text{爱因斯坦张量为 } G_{\alpha\beta} = -\frac{1}{2} (\partial_\mu \partial^\mu \bar{h}_{\alpha\beta} + \eta_{\alpha\beta} \partial^\mu \partial^\nu \bar{h}_{\mu\nu} - \partial_\beta \partial^\mu \bar{h}_{\alpha\mu} - \partial_\alpha \partial^\mu \bar{h}_{\beta\mu})$$

这里 $\bar{h}_{\alpha\beta} = h_{\alpha\beta} - \frac{1}{2} \eta_{\alpha\beta} h$ ， $h = \eta^{\alpha\beta} h_{\alpha\beta}$ ， $\bar{h}_{\alpha\beta}$ 被称作迹反转度规微扰（trace-reverse metric perturbation）。

如果采用洛伦茨规范，爱因斯坦张量的后三项将为零，这里洛伦茨规范的形式为 $\partial^\beta \bar{h}_{\alpha\beta} = 0$ 。

波方程的一般解为如下本征函数的线性叠加： $\bar{h}_{\alpha\beta} = A_{\alpha\beta} \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{x})$ ，其中 $A_{\alpha\beta}$ 是四维振幅， \mathbf{k} 是四维波矢，满足条件 $\eta_{\alpha\beta} k^\alpha k^\beta = 0$ ，这表明引力波传播经过的测地线是零性的，即其传播速度是光速。四维波矢 $k^\alpha = (\omega_{\vec{k}}, \vec{k})$ ，其中 $\omega_{\vec{k}}$ 是波的角频率， \vec{k} 是经典的三维波矢。由于洛伦茨规范并不唯一，此时坐标还不是完全确定的。如果再加上条件： $\bar{h}_{ti} = 0$ ， $\eta_{\alpha\beta} \bar{h}^{\alpha\beta} = 0$ ，第一个条件表示引力波张量中所有与时间 t 有关的分量都为零，第二个条件表示引力波张量矩阵的迹为零。因此这组规范条件叫做转置无迹规范（transverse traceless gauge），简称 TT 规范。在 TT 规范下， $\bar{h}_{\alpha\beta} = h_{\alpha\beta}$ 。由洛伦茨规范和 TT 规范共同决定下的引力波张量只有两个分量是独立的，它们实际对应着引力波两种偏振态。对于在 z 方向传播的波矢 $k^\alpha = (\omega, 0, 0, \omega)$ ，这两个振动分量垂直于传播方向，这表明引力波和电磁波一样是横波，



其张量形式写作

引力波的 h_+ 偏振对质点位置的调制

$$h_{\alpha\beta} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_+ & h_\times & 0 \\ 0 & h_\times & -h_+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

引力波的 h_\times 偏振对质点位置的调制

h_+ 和 h_\times 是引力波两种偏振态，右图中示意了两种偏振各自不同的振动形式。

广义相对论的弱场辐射解具有如下的特点：在真空中以光速传播的横波没有偶极辐射，只有四极或更高级的辐射，它携带有能量，穿透能力极强等等。从物理图像上看，弱场近似下的辐射解毕竟是值得注意的，一方面，任何可观测到的引力辐射的强度都非常低，另一方面，弱场近似下的引力辐射理论，有可能沟通广义相对论同微观物理学之间的鸿沟，赋予引力学概念以确切的含义。

从 50 年代末到 70 年代初，广义相对论经典理论的研究也大大深化了，其中引人注目的是引力波的进展。对于广义相对论是否存在引力波的问题一直争论不休，因为人们当时搞不清广义相对论中的引力波会不会仅仅是一种坐标效应，这在很大程度上是对广义相对性原理的不恰当的理解而引起的。直到 50 年代末，同坐标选取无关的引力辐射理论才开始形成，随后，科学家求出了 Einstein 真空场方程的一种以光速传播的平面波前、平行射线的严格的波动解，并证明了检验粒子在引力波作用下会产生运动，从而表明了引力波携带着能量，不过，由于 Einstein 方程是非线性的，有关引力波的一些理论问题仍有待继续澄清。60 年代初，人们弄清了在理论上的确存在引力波。引力波可以看作是以光速传播的力场，它和电磁波在许多方面类似，和坐标系的选择毫无关系。由于引力波与物质的相互作用十分微弱，这给探测引力波的工作带来了很大的困难，用实验方法产生引力波的困难尤为严重。

（二）引力波的探测经历

爱因斯坦于 1916 年曾预言，加速的质量可能有引力波存在，但他提出的引力波与坐标选取有关，在某一个参考系看来，引力波可能有能量，而换一个参考系可能就没有。因此在初期，包括爱因斯坦本人在内的大多数人对引力波都持怀疑态度。1956 年，皮拉尼提出一个与坐标系选取无关的引力波定义；1957 年，邦迪进而从理论上证明与坐标选取无关的平面引力波的存在。1959 年，邦迪、皮拉尼和罗宾森更进一步证明，静止物体在引力波脉冲作用下会产生运动，这就间接地证明引力波携带着能量，并可被探测到。

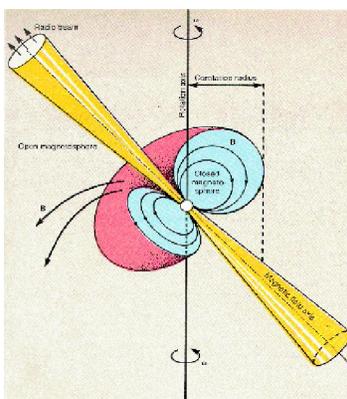
长期以来，科学家一直在构思各种实验方法以探测引力波，并通过射电脉冲双星 PSR1913+16 公转周期变化的研究间接证实了引力波的存在，但迄今直接测量引力波实验尚未成功。根据广义相对论，当物体

做加速运动时就会对原有的引力场产生干扰从而辐射出引力波，这就好像将一块石头扔到平静的水面上出现的波纹一样。因此，任何物体都在无时无刻地辐射引力波，它在宇宙中是无处不在的。例如，地球绕着太阳运行就一定会发出引力波。地球由此而丧失能量，因而渐渐地沿着螺旋线越来越向太阳靠拢。使原子保持为一个整体的电磁力要比引力强 1000 万亿亿倍（即 10^{39} ）倍。我们之所以感受到引力，惟一的原因乃是地球极其巨大，组成地球的无数粒子的引力拉曳累加起来便相当可观了。但是，引力波是自然界中最微弱、最不易察觉的波，它不会产生我们通常能察觉到的任何效应。例如，地球绕太阳公转时辐射引力波而丧失的能量只有大约 0.001 瓦，因而在几十亿年中，它向太阳靠拢的距离简直微不足道。而假如 500 亿颗直径为 1 公里的速度撞向地球，所产生的引力波能量也仅能点亮一只灯泡。不过没有人能活着看到这个结果。Einstein 的广义相对论预言：引力波（也称重力波）的主要性质有：在真空中以光速传播；携带能量和与波源有关的信息；是横波，在远源处为平面波；最低次为四极辐射；辐射强度极弱；物质对引力波吸收效率极低，引力波穿透性极强，地球对引力波几乎是透明的；其偏振特性为两个独立的偏振态等。美国马里兰大学韦伯 (J.Weber) 教授于 1958 年开始进行引力波实验，经过 10 余年的努力，曾宣布检测到来自银河系中心的引力波，但结果不十分可靠，目前尚无定论。

70 年代末，J.H. 泰勒等人公布了对射电脉冲双星 PSR 1913+16 公转周期变短的长期观测的结果。泰勒等人认为，这种效应是由于引力辐射不断带走能量所引起的，他们的结果在 20% 的误差范围内同引力辐射的理论计算一致。1978 年泰勒等人通过对一颗射电脉冲双星 (PSR193+6) 轨道周期所作的多年观测，间接证实了引力波的存在。这也是对广义相对论的重要验证。

1982 年，他们又进一步发展了减小误差后的结果。不过，人们还希望利用多普勒跟踪法或激光测距法观测两天体在引力波作用下间距的变化来直接探测引力波。现在，美国航天局和欧洲航天局正在加速这方面的研究，并使测距精度大大提高(例如地球和月亮的距差为 ± 5 厘米)，其灵敏度 $\Delta l/l$ 已达 $10^{-13} \sim 10^{-16}$ ，即便如此，还需把精度提高四个数量级才有可能探测到引力波。为此，欧美曾计划在 1985 年发射两艘深空间飞船（伽利略号和国际太阳任务号），届时可望将测量精度提高到 10^{-20} 。一旦引力波探测工作取得成功，就可以进而研究引力波的性质，从而就会判明那种度规理论对宏观引力现象的描述更符合客观事实。

(三) 脉冲星的发现及其意义



2007 年是脉冲星发现 40 周年，期间诺贝尔物理学奖曾两次光顾脉冲星的发现，其原因何在？爱因斯坦关于引力波的预言是如何被验证？脉冲星发现者的举世成就和诺贝尔奖的是非恩怨再次成为关注话题。

1、发现脉冲星

1967 年 8 月，剑桥射电天文台的女研究生贝尔 (Jocelyn Bell) 在纷乱的记录纸带上察觉到一个奇怪的“干扰”信号，经多次反复钻研，她成功地认证：每隔 1.33 秒地球接受到一个脉冲的源（之后被命名为 PSR 1919+21）。得知这一惊人消息，她的导师休伊什 (Antony Hewish) 曾怀疑这可能是外星人——“小绿人”——发出的摩尔斯电码。但是，进一步的观测表明，这个天体发出脉冲的频率精确得令人难以置信。接下来，贝尔又找出了另外 3 个类似的源，所以排除了外星人信号，因为不可能有三个“小绿人”在不同方向、同时向地球发射信号。再经过认真仔细研究，1968 年 2 月，贝尔和休伊什联名在英国《自然》杂志上报告了脉冲星的发现，并认为脉冲星就是物理学家预言的超级致密的中子星（也许是夸克星）。这是 20 世纪的一个重大发现，为天文学研究开辟了新的领域，而且对现代物理学的发展产生了深远影响，成为 1960 年代天文学的四大发现之一（另三个发现：星际分子，类星体，微波背景辐射）。1974 年，科学家们选定了天鹰座中距地

球 17000 光年的一对双星脉冲星进行观测。在那以后的 12 年中，测得它们的轨道周期以每年 76 毫秒的速度在减小。这与根据爱因斯坦理论的计算结果精确地相符。既然宇宙中存在引力波，那么，在地面上就应该能检测从太空传来的引力波。从理论上说，像电磁波引起天线振荡一样，引力波也会使物体产生某种振荡，如使弹性物体产生轻微的波动，使刚性物体产生伸长和缩短的变形等。检测到这些振荡，也就是检测到了引力波。

如果在地面上检测到了引力波，不仅证明宇宙中引力波的存在，而且可以知道每一个引力波源的方向和它的主要特性。因为物体波动或伸缩的方向就是引力波源的方向，物体中两点之间的距离在引力波作用下发生的变动，反映引力波的振幅，而波的振幅是它的能量的量度。因此，引力波探测器也就成了引力波望远镜。

2、脉冲星发现的意义

经过 40 年的努力，天文学家已发现大约 1900 颗脉冲星。人们已基本清楚，脉冲星是高密度星体，其主要成分是中子（但部分脉冲星也许是夸克星，有待进一步证实），半径大约 10 公里，其密度相当于将整个太阳压缩到北京市区的范围，因此具有超强的引力场。乒乓球大小的中子星物质相当于地球上的一座山的重量。脉冲星磁场是地球的万亿倍（地磁场约 10^4 特）。脉冲星的强引力场可用来验证爱因斯坦广义相对论，其超高密度用来验证核物理理论。所以，脉冲星被誉为物理学的“空间实验室”。天文学家认为，脉冲星是超新星爆发后留下的残余部分。在蟹状星云内发现的脉冲星 PSRO531-21，周期只有 0.0333 秒，而它的遗迹早在宋朝（公元 1054 年）就被我国古代的天文学家记录，这也是人类历史上第一次记录的一颗恒星的演化史。在恒星塌缩的过程中，它所包含的物质挤压在一起，密度越来越大，由于角动量守恒，星体会越转越快。这与花样滑冰运动员两臂在向内收紧时，也会越转越快的道理相同。有些脉冲星旋转快得惊人，而且高度稳定。最近已发现每秒可旋转 1122 次的脉冲星。据估计，在银河系中，可能有多达 6 万颗脉冲星，大部分还没有被发现。

脉冲星的脉冲从何而来？有点像地球的磁场形状，脉冲星的磁轴与旋转轴之间成一定角度，当星体旋转时，磁极区的辐射能量就像灯塔的光束一样扫过太空。当此辐射束照射到地球时，人们用射电望远镜可能探测到脉冲星。虽然很多脉冲星在银河系被发现，但它们距离遥远，人类无法用肉眼看到，只能借助望远镜探测它们发射出的强大辐射。除了射电波段，在红外、紫外、光学、X 射线、 γ 射线波段都已观测到脉冲星。脉冲星的重要性还在于其应用价值。毫秒脉冲星具高度稳定性，可与原子时（atomic time）的长期稳定度媲美。在长期计时观测成果的基础上，毫秒脉冲星可作为计时参考。随着脉冲星计时阵的实施，国际上，在时间标准研究方面将会取得重要成果，预期可用于航天器全程高精度自主导航。

在地球上和太阳系里，爱因斯坦广义相对论的四个预言得到验证，但引力波预言一直无法证实。激动人心的消息来自美国波多黎各山谷的阿雷西博天文台（Arecibo Observatory），这里安装了世界最大的单口径（300 米）射电望远镜。1974 年，两名普林斯顿大学天文学家泰勒（J.Taylor）和赫尔斯（R.Hulse）首次发现脉冲星双星系统（命名 PSR1913+16）。此发现是一个天赐良机，可用它来检验爱因斯坦关于引力波的预言。双星绕转运动将辐射引力波，导致能量和角动量损失，双星轨道收缩。这个效应很小，无法在太阳系测到，但在脉冲星双星系统应当可以测到。先把轨道周期的变化率精确地计算出来，通过精确观测脉冲双星轨道周期的变化检测引力波的存在。脉冲星双星系统 PSR1913+16 由两颗中子星组成，其中一颗发射脉冲信号，它们轨道周期为 7.75 小时，通过对其周期变率的测定后得到与爱因斯坦理论预言符合的结果。此消息一经传出，世界为之轰动，在地面上不易验证的爱因斯坦理论，在遥远的脉冲星系统找到了证据。这好比牛顿关于苹果下落的猜想，印证月球围绕地球转动的理论。为此，泰勒和赫尔斯获得了 1993 年度诺贝尔物理学奖。一种天体的发现能获 2 次诺贝尔奖，绝无仅有。这次诺贝尔奖委员会已有前车之鉴，赫尔斯发现脉冲双星时也是学生，但这次与导师一起获奖。为了弥补以往的过失，诺贝尔奖委员会请来贝尔参加此次颁奖仪式。如果没有贝尔 1967 年的发现，也就没有这次颁奖了，当然科学发现的历史也将改写。直到 2005 年，历经 30 年观测表明（1975—2005 年），爱因斯坦理论和观测吻合的很好。

2004 年，不负众望，天文学家又取得了突破性进展。澳大利亚帕克斯（Parkes）64 米口径天文望远镜发现了一对互相绕行的脉冲星，命名为 PSRJ0737-3039A/B，距离地球 2000 光年。它们轨道周期仅为 2.4 小时，相距 100 万公里的这两颗中子星都发射电波，这是已知的唯一一对相互环绕的可观测射电脉冲双星系统。与先前发现的脉冲双星相比，PSRJ0737-3039A/B 轨道周期更短，引力辐射更强，是一个优越的引力波实验室。美国 GBT 望远镜（Green Bank Telescope，100 米口径）对双脉冲星长达三年的精确测量，得到双星的间距以每天 7 毫米的速度变小，这与广义相对论引力波预言的结论一致。在检验中，还观测到了其他的相对论效应，如脉冲星附近的时空弯曲导致的时钟变慢，即夏皮罗（I.Shapiro）延迟，它的测量误差在 0.05% 以内，这是目前为止对广义相对论最精确的检验。

美国在路易斯安那州和华盛顿州建造了两台激光干涉仪引力波观测台，它们相距 3000 千米。每个观测台上有一个 L 形真空管探测臂，长 4 千米，在管的两端和转弯处有反射镜，让激光束在镜面之间来回反射。激光在弯处的镜面上通过干涉产生明暗条纹光带。如果有引力波通过，由于时空畸变，会使相互垂直的探测臂一个伸长、一个缩短，光带因而发生变化。相隔 3000 千米设两个观测台，是为了排除地球上地震、雷暴和火车行驶、飞机飞行等各种干扰因素，因为这些因素不可能在两地同时发生。这个观测台 2002 年开始启用，能探测到 10-18 米的长度变化。但迄今没有探测到引力波。

美、欧科学家计划在 2012 年发射航天器，利用太空的广阔距离对引力波进行探测。其方案是，将 3 对探测器送入太空，让它们组成等边三角形，相邻两对探测器之间的距离为 500 万千米，它们在地球后面以 20 度的夹角一起绕太阳运行。3 对探测器之间用激光测量距离。如果有引力波传来，它会挤压时空，使 3 对探测器之间的距离发生微小的变化。灵敏的激光可测出一个原子直径大小的位移。由于它们所占的地域比地球上的探测器大得多，因而可能探测到更多的引力波源；灵敏度也更高。

现在的各种望远镜，都是通过接收电磁波进行宇宙探测的，但是，在宇宙大爆炸后的头 100 万年中没有电磁辐射；黑洞一般不发射电磁波；中子星、超新星核等致密星体和超密物质一般电磁辐射都较弱，通过电磁辐射所能揭示的信息很少。但它们却是最强的引力辐射源。由此可见，引力波望远镜与传统望远镜有很强的互补性；还有，引力波与电磁波不同，它可穿透任何物体，也不被任何物体所吸收，来自遥远引力辐射源的引力波，不会损失任何所携带的信息。因此，引力波望远镜可以探测到许多原始信息。一句话，引力波望远镜为我们探测宇宙开设了一个崭新的窗口

附录 1: 《自然》：科学家首次锁定引力波探测范围——这是寻找引力波过程中“第一次有意义的实验进展”

爱因斯坦在广义相对论中预言了引力波的存在，科学界一百多年来一直苦苦探寻引力波。一个国际科研小组在 8 月 20 日出版的新一期《自然》杂志上报告说，他们终于锁定了引力波的探测范围。

这个科研团队利用位于美国的“激光干涉引力波观测台”，成功地锁定了引力波的“出没范围”，显示其能量值比原有推测值要小很多。他们预计，目前探测仪器的灵敏度到 2014 年可提高 1000 倍，到时极有可能直接观测到引力波。

引力波是爱因斯坦在广义相对论中提出的，即物体加速运动时给宇宙时空带来的扰动。通俗地说，可以把它想象成水面上物体运动时产生的水波。但是，只有非常大的天体才会发出较容易探测的引力波，如超新星爆发或两个黑洞相撞时，而这种情况非常罕见。因此相对论提出一百多年来，其“水星进动”和“光线偏转”等重要预言被一一证实，而引力波却始终未被直接探测到。

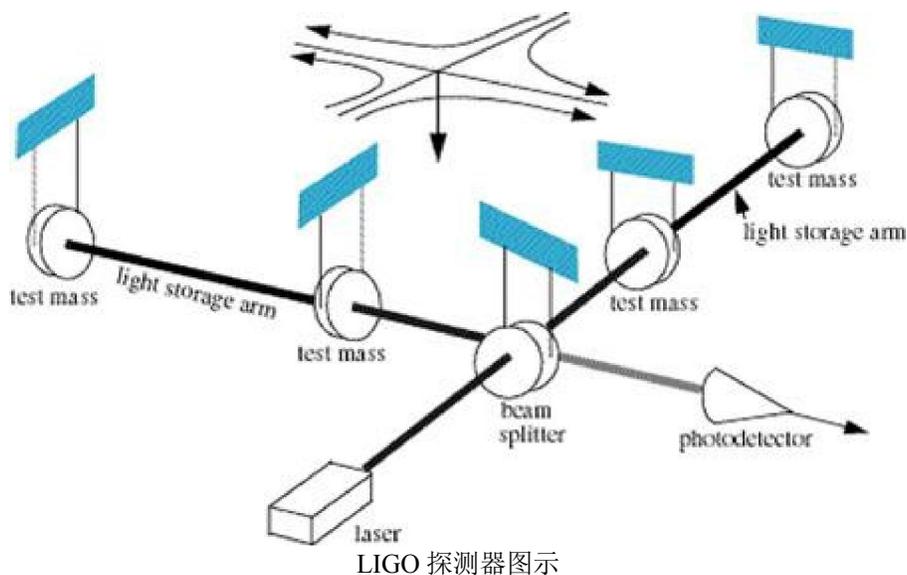
在“激光干涉引力波观测台”中，科学家便是努力在长达 4 公里的激光光线中，寻找“随机引力波背景”带来的比一个原子核还小的扰动。

研究人员说，他们的研究成果是寻找引力波过程中“第一次有意义的实验进展”，如果真能在近期探测到引力波，将极大推动对时空本质的理解。正缘于此，全球科学家都积极投入到这项工作中。在《自然》杂志发表的这篇论文中，作者列表不是通常的几个或十几个人名，而是遍布全球的 79 所大学、实验室和研究机构。当前全球有 4 个引力波探测器处于运行之中，科学家建议建造更多的引力波探测器，分别安置在日本、澳大利亚和印度。届时搜寻宇宙引力波存在的概率将显著增加。这项研究是由德国阿尔伯特-爱因斯坦学会物理学家伯纳德-舒茨(Bernard Schutz)负责，研究报告发表在 5 月 27 日出版的《经典引力和量子引力》杂志上。引力波是爱因斯坦的广义相对论中预言过，被认为是宇宙中最猛烈的事件，比如：两颗中子星碰撞时产生。中子星是超新星爆炸之后残留的密集死亡恒星，当两颗中子星彼此合并时，将预示着释放强大的引力波，且能从地球上观测到。美国宇航局/欧洲宇航局发射卫星系统至太空搜寻引力波的任务由于缺乏资金而取消，这一项目叫做“丽莎(LISA)”。2010 年，另一项研究评估截至 2016 年 4 个现有引力波探测器将能够探测运行，平均每年可观测到 40 颗中子星合并事件。这一探测比率将随着数据分析技术的提高而达到每年观测到 160 颗中子星合并事件。

其它科学家称，当前引力波探测器网络的位置不太可能增大探测概率。然而，舒茨指出，使用其它 3 个推荐的新引力波探测器，将显著地提高探测概率。添加 3 个探测器能确保每年探测大约 370 颗中子星，经过几年探测运行，其探测数量将达到 500 颗中子星。

附录 2: 美将升级探测器有望发现弯曲时空引力波(图)

2008 年美国国家科学基金会(NSF)批准了总计 2.05 亿美元的激光干涉引力波天文台升级计划。升级完成后，这台引力波探测器能对成千上万个星系展开监控，找到神秘的引力波成为可能。



LIGO 探测器正在建设中

原设备探测能力有限

负责激光干涉引力波天文台(LIGO)的科学家相信,如爱因斯坦的广义相对论所预测的那样,先进激光干涉引力波天文台计划将首次从中子星和黑洞中探测到引力波。美国加州理工学院激光干涉引力波天文台副主任艾伯特·拉泽里尼表示:“在激光干涉引力波天文台探测范围有限的情况下,不能保证一定会探测到引力波。”

他接着说,“现在有了先进激光干涉引力波天文台的帮助,从相对论视角考虑,如果我们还是一无所获的话,那确实会令人颇感吃惊。”引力波是时空曲率的扰动以行进波的形式向外传递,而时空曲率则是星际碰撞、爆炸,或是诸如中子星等体积大、密度大的天体极端活动引起的。这些波纹接着穿过地球占据的时空,引起轻微扰动,而先进激光干涉引力波天文台的任务就是去捕捉这些扰动。

升级工作在年内展开

激光干涉引力波天文台通过使用高精度激光去测量光在经过两面镜子之间所用的时间,达到探测引力波的目的。两面镜子被摆放成 90 度角,在相交点形成字母“L”形。一束激光束从相交点的“L”形分裂器(splitter)穿过,随后分裂器将这束激光分成两束激光,分别直射到每面镜子上。激光干涉仪测量出这束激光在折回“L”形相交点的光探测器前,在“L”形直角边的两面镜子之间回来反弹的长度。

从理论上讲，激光会同时返回光探测器，因为两面镜子的距离是相同的，除非“恰好”经过的引力波干扰时空曲率，改变了它们同镜子之间的距离。激光干涉引力波天文台早在 2002 年便投入使用，但迄今尚未发现神秘的、至今只存在于理论的引力波。科学家预测，随着激光技术和镜子制造工艺的不断发展，与最早提出建造激光干涉引力波天文台时相比，它的敏感度一定会大有提高，所以，先进激光干涉引力波天文台就自然而然成了它的升级版。

美国国家科学基金会日前批准了在今后 7 年逐步升级激光干涉引力波天文台的提议。升级工作将从 2008 年开始，前期将投入 3275 万美元。拉泽里尼表示：“升级后的新设备数小时的观测量几乎相当于激光干涉引力波天文台当前设备一年的观测量。我们使用激光干涉引力波天文台能探测到像太空中数百个星系以及室女星系团(距地球 5900 万光年远)这样的天体，如果把这一观测能力增强千倍，你能观测到包括数万个星系的更广阔的宇宙。”

拟使敏感度增强十倍

科学家只要将激光干涉引力波天文台的敏感度提高 10 倍，覆盖范围增长千倍的目标就能轻松实现。据介绍，用先进材料制作的大型镜面能减少室温(约 20 摄氏度)状态下原子任意活动产生的背景“噪音”，激光功率也能从 10 瓦猛增至 180 瓦。另外，来自地面的波动对先进激光干涉引力波天文台的影响还更小，因为一套最新的主动随动控制系统取代了过时、被动的弹力系统。

拉泽里尼指出：“我们通过激光干涉引力波天文台的初始敏感度取得了多个里程碑目标。”安放在美国华盛顿州汉福德和路易斯安那州利文斯通的两台主要设备已经完成了历时两年的新设计敏感度测试工作。激光干涉引力波天文台要求至少两个相隔很远、能同时投入工作的探测器，去排除错误信号，确定引力波何时穿越地球。

各国加强引力波探测力度

鉴于国际社会强有力的合作，先进激光干涉引力波天文台最终可能会成为一个范围更广的全球性引力波探测器网络的一部分。德国和英国方面将分别为升级后的激光干涉引力波天文台提供激光系统和镜子悬架系统。实际上，先进激光干涉引力波天文台已在逐渐加强同位于意大利比萨市的欧洲室女星系团探测器的合作力度。

日本也启动了建设一个引力波探测器的工作。英国格拉斯哥大学物理学家吉姆·哈夫说：“从事引力波研究的各界给予激光干涉引力波天文台升级工作大力支持。这种升级工作其实从激光干涉引力波天文台项目一出台就已经定好了，始终是探测器性能既定更新的重要组成部分。”

附录：参考消息网 2014 年 9 月 24 日报道外媒称，科学家打算查明“大爆炸”之后非常、非常、非常短的时间内发生了什么，而宇宙尘埃可能毁掉了这项尝试。

英国《每日邮报》网站 9 月 22 日报道发表题为《“大爆炸信号”不过是尘埃吗？》的报道称，今年 3 月，美国科学家认为他们看到了宇宙扩张、万物初始之际一个非常短暂的瞬间。

但是，其他研究团队很快对这项惊人的发现提出质疑。他们认为，哈佛大学 BICEP 观测小组可能低估了银河系中尘埃的影响。

现在，欧洲航天局最近通过“普朗克”卫星进行的一项研究给后一种说法提供了更大可信度。

他们的研究显示，BICEP 观测小组观察的天空所包含的宇宙尘埃比之前估计的要多。

该研究建立在另外两项独立研究的基础之上。这两项独立研究认为，对于科学家观察到的扭曲图案，既可以用早期宇宙的“引力波”来解释，也可以简单地用尘埃来解释。

尽管这对 BICEP 观测小组的研究结果构成了打击，但这并不意味着他们的努力完全错了。BICEP 团队和“普朗克”团队现在正合作进行最后评估，评估结果将在明年之前公布。

他们的研究围绕爱因斯坦的一个理论进行。该理论认为，当巨大的爆炸发生时，它会在时空中留下涟漪，这种涟漪叫做“引力波”。

最初的“引力波”可以让我们了解宇宙的诞生。科学家已经发现了它们在宇宙微波背景辐射中留下的印记。宇宙微波背景辐射是“大爆炸”的余晖。

该理论认为，这场最初的爆炸使得处于婴儿期的宇宙从无限小变成接近一个弹子的大小。

今年早些时候，专家们认为，他们已经看到这些“引力波”，并称赞该实验是一项重大进展。

帮助制造“引力波”探测仪器的彼得·埃德教授当时对《每日邮报》报记者说：“老实说，真是难以置信。对我而言，这是在证实一个古怪的想法。”

为了这项研究，天文学家花了三年时间用安装在南极的一架望远镜搜索了大约 2% 的天空。

几十年来,科学家一直未能观察到“引力波”,这是因为很难区分“引力波”制造的光的卷曲和今天银河系产生的尘埃。

英国广播公司的一则报道说,BICEP 团队希望观察最清晰的天空——南极洲上空——来克服这个问题。但他们未能利用欧洲“普朗克”卫星收集的尘埃数据。“普朗克”卫星观测天空的频率远比其他卫星高。“普朗克”团队宣称,BICEP 团队观察的天空区域四处存在尘埃热辐射偏振。“普朗克”团队的科学家塞西尔·雷诺对英国广播公司新闻频道的记者说:“这是可能的,但我们测量中的误差相当高。”

5、时空弯曲的天文学依据

对于广义相对论,Einstein 在实验证据不足的情况下是十分自信的,他曾这样说过:“当 1919 年日蚀证明了我的推测时,我一点也不惊奇。要是这件事没有发生,我倒会很惊讶。”爱因斯坦预言:遥远的星光如果掠过太阳表面将会发生一点七秒的偏转。现代天文学观测到:在两张重叠的底片上可以清晰地看到一条笔直的星光在穿过阴影中的太阳时,竟然发生了偏转,偏转角是 1.7 秒。

Einstein 在 1916 年写了一本通俗介绍相对论的书《狭义相对论与广义相对论浅说》,到 1922 年已经再版了 40 次,还被译成了十几种文字,广为流传。以后,每逢日全食都进行了观测,但由于种种不确定的因素,光学测量精度的提高受到了限制。1973 年,光学测量所得偏转角同理论值之比为 0.95 ± 0.11 。60 年代末,由于射电天文学的发展,使人们有可能用高于光学观测的精度来测量太阳引起的射电信号的偏折。这类观测所得偏转角同理论值之比在 1975 年已达到约 1 ± 0.01 。有人早已通过测量人造卫星中悬浮陀螺的进动,来验证广义相对论。70 年代初,又有人通过测量对遥远行星的雷达回波的方式检验了广义相对论。70 年代末,几家大天文台同时报道采用射电天文学的方法测量某些类星体发出的射电信号经过太阳的弯曲程度,大大提高了检验光线偏折的精度,对广义相对论提供了新的实验支持。意大利和美国的两位物理学家最近发现了一对人造地球卫星的“Einstein 弯曲效应”。1974 年 9 月由麻省理工学院的泰勒和他的学生赫尔斯,用 305 米口径的大型射电望远镜进行观测时,发现了脉冲双星,它是一个中子星和它的伴星在引力作用下相互绕行,周期只有 0.323 天,它的表面的引力比太阳表面强十万倍,是地球上甚至太阳系内不可能获得的检验引力理论的实验室。经过长达十余年的观测,他们得到了与广义相对论的预言符合得非常好的结果。由于这一重大贡献,泰勒和赫尔斯获得了 1993 年诺贝尔物理学奖。

根据 Einstein 广义相对论的预言,地球会弯曲周围的时间和空间,因此使地球卫星的轨道发生微妙的变化。两位物理学家通过对人造卫星上亿个位点数据的仔细研究,最终发现这种极细微的效应。据意大利莱切大学的库夫里尼(Ignazio Ciufolini)和美国航空航天局戈达德航天中心的帕乌里斯(Erriico Pavlis)介绍,他们的数据分析有 10%的误差,但已足以证实 Einstein 的地心引力理论(Einstein 将地心引力解释为一种时空弯曲效应)。此次实验涉及的两颗卫星(名叫 LAGEOS 和 LAGEOS2)并未装载什么仪器,外形呈球状,表面覆盖许多小的反射镜。利用这些反射镜对激光束的反射能够非常精准地测定卫星的位点数据。两位物理学家在《自然》杂志上发表了相关文章,他们还表示,希望应用新的“重力探测 B”卫星可将误差减少到 1%左右。这种卫星通过装载的陀螺仪来探测时空弯曲效应。近几年来,由于空间探测技术的发展,使人们对广义相对论的验证又取得了新的进展。1997 年 11 月初,在美国天文学会于科罗拉多州埃斯特帕克举行的会议上,科学家们宣布,他们所发现的证据证实了 Einstein 广义相对论作出的一个奇妙的预言。两个天文学家小组观测到这样的显示信号,即致密天体,例如中子星,由于它们的自转能吸引附近的空间与时间围绕它们一同转动。这种现象被称作“框架拖曳”。加州理工学院天体物理学家基普·索恩说,这是对 Einstein 思想的一个极其重要的检验。除了对引力波的直接探测外,框架拖曳也许是最重要的一种效应了。Einstein 曾表明,任何一个自转着的天体,由于它的转动,都会拖曳空间与时间。不过,效应是如此微弱,以致仅当空间与时间能靠近一个具有强大引力场的天体,例如中子星或黑洞时,它才能被观测到。当有一颗恒星围绕这样的致密天体运行时,天体的强大引力可以将物质从恒星上吸引出来,并使物质形成一个以天体为中心的不断扩展着的圆盘。当圆盘上的物质不断地向着天体增加时,物质会变热并辐射出 X 射线。如果撇开广义相对论,你可以预言,以致密天体为中心向外看,则圆盘在所有方向均会保持相同的形状,但是框架拖曳改变了这一情景,它导致圆盘上物质运行的轨道围绕着天体的自转轴并以轴为中心发生脉动。由马萨诸塞理工学院崔伟领导的小组通过观测若干围绕某些可能的黑洞旋转着的圆盘的运动情况而寻找到这一效应。由意大利罗马天文台路易吉·斯特拉领导的另一小组通过对 15 颗中子星的观测,也取得了相同的结果。两个小组均利用美国航空与航天局发射的罗西 X 射线同步辐射卫星对圆盘辐射出的 X 射线强度作了测量。两个小组的观测表明,圆盘辐射出的 X 射线亮度的变化以某种方式暗示,每个圆盘确实在脉动着。“你可以看到 X 射线辐射区域面积的变化”,崔说“脉动程度与预言相一致。这里有着某种效应,它对我们产生了极大的刺激”,斯坦福大学物理学家引力探测 B 计划——通过放置在轨道上的陀螺仪,卫星将能探测到拖曳效应——实施者弗朗西斯·埃弗特说。“不

过，上述两个小组的观测，还没有得到定量的结果”，他说，埃弗特希望引力探测 B 计划能够揭示效应的强度。科罗拉多大学米奇·别格斯利曼认为，进一步的观测是必要的。“要使明智的学者们毫不怀疑地相信它是困难的，这里要求对准圆盘或它转动时发出的闪光”，他说，“不过，如果效应得到确认，那么，它将是一个极其重要的发现。”

光线在不均匀引力场中（特别是在大质量物体附近）的传播方向因其受引力作用而改变。这种效应已经被很多天文观测所证实。另外，如果在发光的天体与地球之间存在强大的引力源，光线偏折效应可以产生该天体的“像”，那么我们看到的不再是一个天体而是两个（或两个以上）相似的天体（“引力海市蜃楼”）；这种强大的引力源被称为**引力透镜**。第一个引力透镜现象是在 1979 年发现的。1988 年发现有四个类星体的“引力海市蜃楼”，后来还找到了包含更多像的“引力海市蜃楼”。由于星系的空间区域大，星系的像会呈弧形或圆环。至今已经观察到了很多“引力海市蜃楼”事例。

附录：1、[路透社华盛顿 2004 年 10 月 21 日电] Einstein 又一次被证明是正确的。美国航天局今天说，由各国科学家和大学研究人员组成的研究小组首次发现了地球自转时拖曳周围时空的直接证据。美国航天局说，这一发现首次直接测出并证明 Einstein 广义相对论的一个重要方面——一个旋转的天体能使组成三维空间以及四维时间的“结构”发生偏转和扭曲。美国航天局物理学家迈克尔·萨拉蒙说：“地球在旋转时确实在拖曳时空。离地球越近，扭曲的幅度就越大。”“时空的这种扭曲，也称框架拖曳，以前从未直接观测到过。”“这是首次找到真实、有力和直接的证据，说明旋转天体能拖曳时空。”美国航天局的佩里科斯·帕夫利斯等人在观察了绕地球旋转的两颗卫星后发现，它们的确随着地球拖曳空间发生了偏转。帕夫利斯说：“我们以毫米的精确度测量了地球与卫星之间的距离。”他们的研究成果刊登在《自然》杂志上。两颗激光地动卫星 LAGEOS I 和 LAGEOS II 的外部都覆盖有反射罩，这样就比较容易从地面进行跟踪和测量。它们的蝶形轨道是为了模仿旋转回转仪的运动。Einstein 的理论认为，附近一个旋转的天体——比如地球——会拖曳空间，使得回转仪轻微偏离轴线。帕夫利斯说，还没有证据证明没有其他力作用于卫星，不过这种情况的可能性不大。他说：“那必须是一种灵巧的、恰好与广义相对论相似的力。”“我们已经排除了已知的所有的力——如潮汐等等，还有引力模型的误差。”帕夫利斯将这种作用比喻成在蜜罐子里搅动的勺子。“与其类似，当地球旋转时，它会拖动周围的时空，这就会改变绕地运行的卫星轨道。”萨拉蒙说，以前也有过框架拖曳的间接证据，但这是首次直接测量的结果。今年四月，美国航天局发射了携带有 4 个回转仪的“引力探测器 B”。科学家说，等明年它的探测结果出来后，就能用更高的精确度证明 Einstein 的理论。

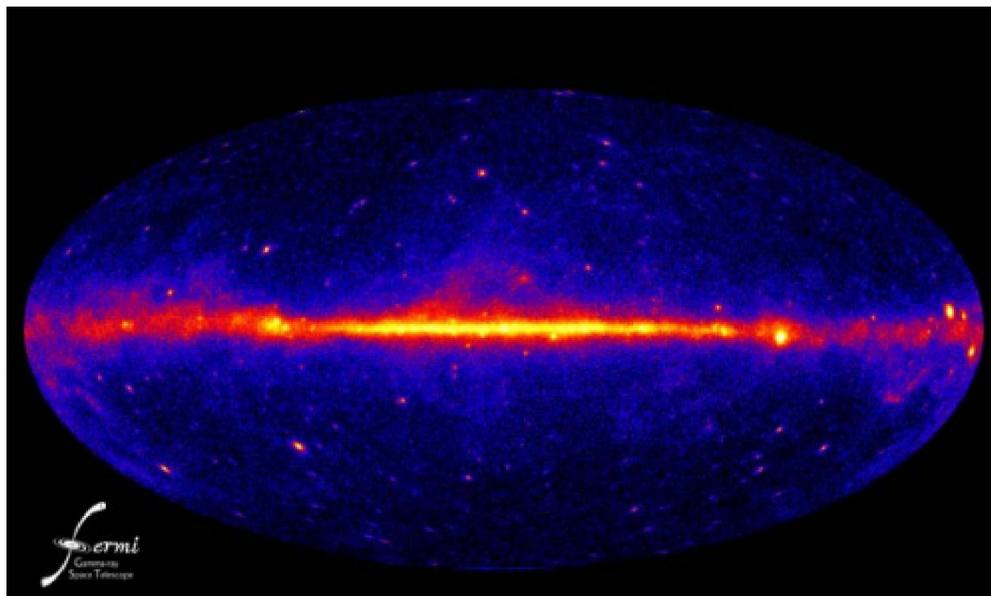


美国科学家 10 月 21 日表示，稍稍脱离轨道的卫星显示，地球自转时的确在扭曲时空构造。他们称，这是首次直接测量到并证实了 Einstein 广义相对论的一个重要层面-旋转天体会使由三维(度)空间和四维时间构

成的时空结构产生扭曲。图为奋进号太空梭 2002 年 6 月 15 日在地球上空飞行的资料照。

2、经过 45 年酝酿和开发，耗资 7.5 亿美元的美国“引力探测器 B”卫星，2005 年 20 日下午从加利福尼亚州范登堡空军基地成功升空，这项美国宇航局历史上耗时最长的探测计划的使命，是以前所未有的精度对 Einstein 1916 年提出的广义相对论进行验证。“引力探测器 B”将对广义相对论的两项重要预测“短程线效应”和“惯性系拖曳效应”进行验证，主要采用 4 个超高精度的回转仪，来测量地球自身质量以及自转给回转仪所处时空造成的弯曲和扭曲效应。卫星将主要在距离地球约 640 公里的极地轨道上运转，其探测预计将持续一年半左右。在探测开始时，4 个回转仪自转轴和卫星上的一台望远镜的方向同时对准一颗遥远恒星。按照理论假设，随着时间推移，回转仪自转轴会因地球的“短程线效应”和“惯性系拖曳效应”而分别发生偏移。通过测量偏移情况，就可以“看到”地球对其周围时空到底产生了什么样的影响。这种影响将是非常细微的。科学家们说，回转仪自转轴偏转的角度之小，就好比是从 400 米之外去看人的一根头发丝。

3、最新时空观测结果证实爱因斯坦相对论合理性



NASA 费米空间望远镜观测到的剧烈爆炸

据美国太空网报道，美国航天局“费米伽马射线空间望远镜”在一年来的观测中，发现了最新的高能光线，从而证明了爱因斯坦关于光速理论的正确性。

费米空间望远镜是去年才发射升空的最新天文望远镜，致力于探寻宇宙中最剧烈的大爆炸所产生的伽马射线。最新的发现令科学家能够看到实验室中无法复制的高能光线的作用，从而能帮助科学家更清晰地研究爱因斯坦的相对论。

“爱因斯坦在其相对论中提出了万有引力观念，但有些物理学家总喜欢用其他力的来源取而代之。”加州帕罗奥多斯坦福大学科学家、费米广域望远镜(LAT)首席观测师皮特-迈克逊说：“人们有各种各样的想法，但缺乏途径来进行验证。”

爱因斯坦相对论是正确的

许多试图证明万有引力理论的努力都将时空关系描绘成一种飘忽不定的空洞结构，在物理层级上比电子还要微小数万亿倍。这样的模型打破了爱因斯坦的假设，即所有的电磁辐射——无线电波、红外线、可见光、X-射线和伽马射线在通过真空时速度是相同的，即都是以光速运行。

2009 年 5 月 10 日，费米望远镜和其他探测卫星观测到一次所谓的“短伽马射线爆发”，被命名为“GRB 090510” (GRB:美国地球物理研究委员会)。天文学家认为这种爆炸发生在中子星相撞时。进一步研究表明爆炸发生在 73 亿光年外的星系中。

费米广域望远镜观测到了 2.1 秒的剧烈爆炸，放射出很多伽马射线量子，形成两股巨大能量流，其中一股比另一股高出近一百万倍。经过 70 多亿光年的旅行，它们之间的速度仅有 0.9 秒的差别。

“此次研究结果排除了任何关于万有引力理论的新观点，即有人认为超高能量会导致光速发生变化。”迈克逊说：“在十亿亿分之一内，两股量子的速度都是一致的。爱因斯坦的相对论是正确无误的！”

创造新的记录

费米望远镜的次级装置伽马射线监视器在超过 250 次的爆炸中发现了低能量伽马射线。广域望远镜则观测到 12 次的高能爆炸，其中三次还创下了新的记录。

上文提到的 GRB 090510 是观测到的最远爆炸，释放出的物质以光速的 99.99995% 运行。9 月份观测到的 GRB 090902B 是放射出的伽马射线能量最高的爆炸，释放出相当于 334 亿伏特的电量，是可见光能量的 130 亿倍！去年观测到的 GRB080916C 释放出的总能量最多，相当于诞生了 9000 个超新星！

前景无限

广域望远镜每三小时会扫描整个天空一次，并为费米天文台的科学家提供越来越详尽的资料，帮助他们不断探索深度宇宙的奥秘。

“我们已经发现了一千多个持续的伽马射线源——比以前知道的高出了 5 倍。”美国航天局戈达德太空飞行中心科学家朱莉-麦克恩雷说：“我们还利用其它射线与其中的近半数进行了信息互动。”

耀变体是一种遥远的星系，其巨大的黑洞会向我们释放出高速物质流。人们普遍认为已知超过 500 个的耀变体是伽马射线的主要来源。在银河系内，伽马射线源包括 46 个脉冲星和两个双子星系。在双子星系中，一颗中子星正围绕一颗炙热的新星高速运行。

4、中子星附近发生时空扭曲

新浪科技讯 北京时间 2007 年 8 月 28 日消息，据国外媒体报道，美国的科学家们近日称，他们最近在中子星附近成功地观测到了时空扭曲现象，这再次证明了 Einstein 时空扭曲理论的正确性。

美国宇航局和密歇根大学的天文学家们称，在中子星周围观测到一些铁气体的线形拖尾，证明的确存在时空扭曲，并称可以据此推算出天体的大小限度。美国宇航局戈达德太空飞行中心和马里兰大学的研究小组成员苏蒂普-巴塔查耶表示，由于科学家们曾在黑洞甚至地球周围观测到过同样的扭曲，因此此次发现并非惊人之事，然而它对于解答物理学的基本问题意义重大。巴塔查耶说：“这属于基础物理学范畴，在中子星中心可能存在着各种奇异的粒子或物态，如夸克物质，由于我们无法在实验室进行模拟实验，因此找出答案的唯一方法就是去了解中子星。”

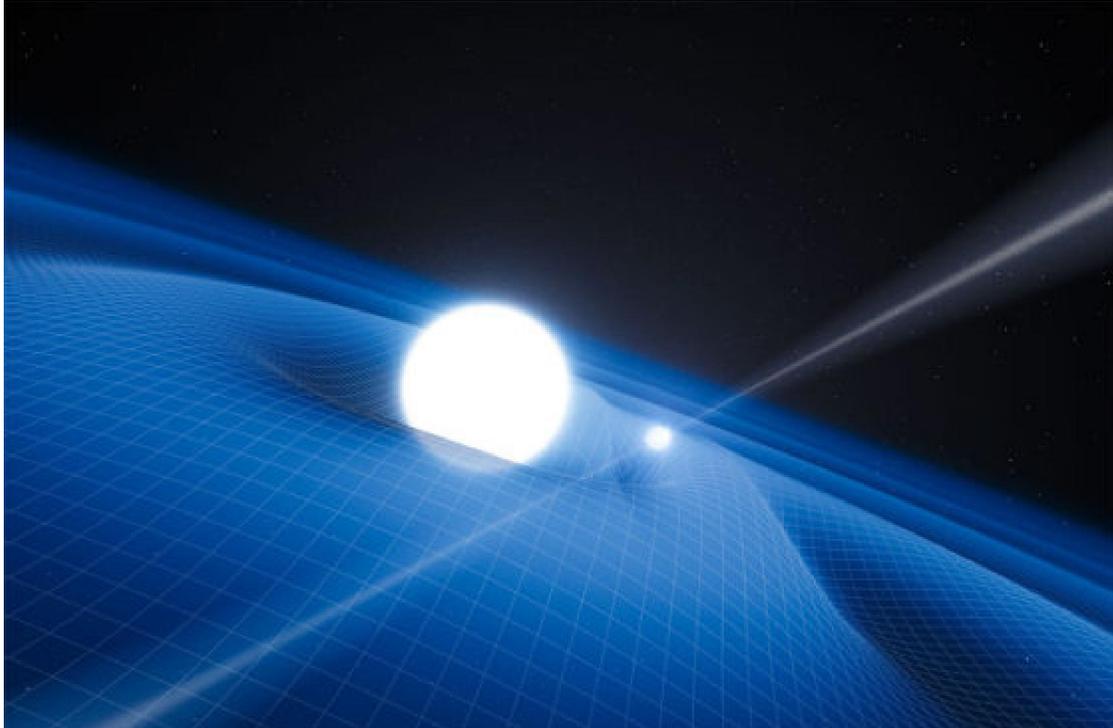
中子星是一种密度极高的恒星，它相当于把有比太阳还重的物质压进一颗城市大小的球体中，几茶杯中子星物质的重量就可以超过珠穆朗玛峰。天文学家们用这些碎裂的中子星作为天然实验室，研究物质是如何在极端的自然界压力中被紧密挤压的。然而，在开始着手解开隐藏在那些衰变中子星之下的谜之前，科学家们必须非常精准地测量出它们的直径和质量。在目前进行的两项研究中，天文学家们使用了欧洲太空总署的 XMM-牛顿 X 射线天文台和日本/美国宇航局的朱雀 X 射线天文台，对 3 对双中子星进行了观察测量，它们分别是巨蛇座 X-1, GX349+2 和 4U 1820-30。科学家们还研究了炙热的铁原子发出的光谱线，这些铁原子在中子星表面上方急速旋转形成圆盘状，旋转速度高达 40% 光速。

通常来说，测量到的过热的铁原子光谱线应有均匀对称的峰值。然而，天文学家们的测量结果却显示出了歪斜的峰值，这意味着出现了相对论效应的扭曲。他们认为，气体的飞速运动(和相对强大的地心引力)导致了光谱线的扭曲，形成更长波长的拖尾。同时，这些测量工作使得科学家们可以判定恒星的尺寸。密歇根大学的 XMM 牛顿小组成员爱德华-卡卡特说：“我们看到铁气体就在中子星表面外部飞速旋转，由于该圆盘内部显然不可能比中子星表面绕行更紧密，因此这些测量使我们可以确定中子星直径的最大尺寸。根据我们估算，中子星直径最大不过 20.5 英里(33 公里)。”

Einstein 提出的广义相对论是现代物理学的奠基石，其要义是两个物体间之所以存在引力，是因为重力场使四维时空发生扭曲。1919 年发生日食时的观测结果证实太阳的重力使星光弯曲。1976 年，美国宇航局的重力探测 A 计划，把一个原子钟送入离地 1 万公里的太空中，证实了 Einstein 提出的重力会使时间慢下来的推测。理论上说，可以通过监视绕地球运行的一个陀螺仪的转轴位置来验证时空扭曲的发生。在确定了参考星座后，如果发生时空扭曲，那么陀螺仪的转轴和参考星座的方向关系就会发生改变。根据牛顿力学原理，一个陀螺仪和一个参考星座方向对齐后，如果没有外力干扰，就会始终保持对齐。但是根据 Einstein 理论，由于地球自转和重力场引起的时空扭曲会造成陀螺仪和参考星座的相对方向发生改变。

在 8 月 1 日出版的《天体物理通讯杂志》上，已经发表了 XMM 牛顿研究小组的论文，其它相关论文也将在该杂志上陆续发表。

5、7000 光年外双星系统再次验证爱因斯坦相对论



艺术示意图：脉冲星 PSR J0348+0432 和它的伴星——一颗白矮星，它们强大的引力场造成时空弯曲

新浪科技讯北京时间 2013 年 5 月 3 日消息，中子星是一类具备极端密度的奇异星球，然而对于 PSR J0348+0432 而言，高密度还并非其最奇特的特征。这颗星球的直径仅有约 13 英里(约合 21 公里)，但其质量却和两个太阳质量相当，每秒自转 25 圈，在此过程中发出稳定的无线电波脉冲信号。另外，它还有一颗伴星，一颗白矮星，其自转速度也不慢：每分钟 144 圈。

搞清楚这里的实际状况花费了很大一番功夫，但是当天文学家们终于意识到这里的情形之时，他们很快就有了一个想法：在这样极端的引力场环境下，这样两颗天体是理想的实验对象，它们是否会像爱因斯坦在广义相对论中所预言的那样，按照一个可以通过相对论计算出来的特定速率相互靠拢？又或许这种极端情形根本就不再适用于引力理论而需要套用量子论的观点来进行理解？

德国马克斯·普朗克射电天文研究所的约翰·安东尼亚蒂斯(John Antoniadis)表示：“目前有很多描述物质在这种极端环境下行为的理论。”而要想对此情形进行精确的测量，需要极大的耐心和细致，但最后的结果显示，爱因斯坦的广义相对论做出的预言与实际测量值相吻合。就这一具体的案例而言，由于引力波辐射造成的能量损失，这两颗星体构成的系统相互绕转周期每年大约减缓 800 万分之一秒。有关此项研究的详细报告将于近期发表在《科学》杂志上。

加拿大麦吉尔大学的天文学家瑞安·林奇(Ryan Lynch)表示：“我们必须非常精确的知道这一系统中中子星和白矮星成员的质量数据，因为不管是广义相对论还是其他理论，这一质量数据都是用于进行轨道衰减计算的极重要的参数。”

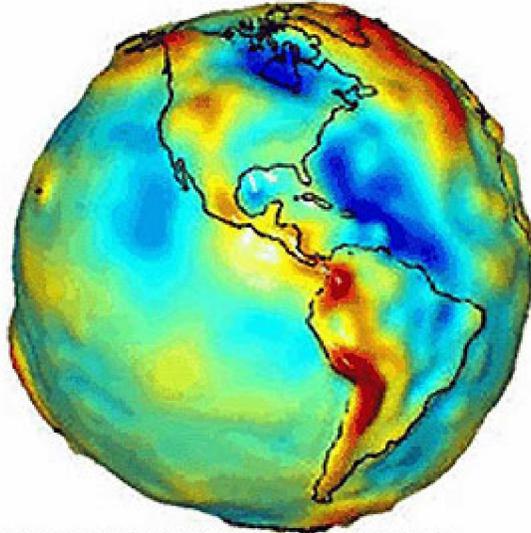
天文学家们还需要精确测定这两颗星体之间相互绕转周期的变化情况。而这颗中子星的脉冲辐射恰好可以充当这一测量的计时器。林奇表示：“这些因素放在一起，让中子星 J0348 成为一个强大的工具。”

天文学家们还在对这一系统开展进一步的细致研究以便确定其成因。他们相信这一系统维持目前的状况已经至少有大约 20 亿年之久。宇宙是最好的实验室。目前天文学家们还在继续寻找更加极端的环境用以检验爱因斯坦的理论。他们尤其希望找到的情况是一个围绕一个黑洞运行的脉冲星。黑洞是密度甚至比中子星还要高的天体，它的引力场已经强大到即使连光线也无法逃脱的地步。安东尼亚蒂斯表示：“如果真能找到这种情况，那么我们将可以对黑洞开展详细得多的考察，看看它们是否符合爱因斯坦的理论预期。”

PSR J0348+0432 是目前所发现的质量最大的中子星，其地表的引力场强度大约是地球表面是 3000 亿倍。而在其核心部位，一颗食糖颗粒那么微小的物质团块质量可以达到 10 亿吨。林奇表示：“广义相对论不断通

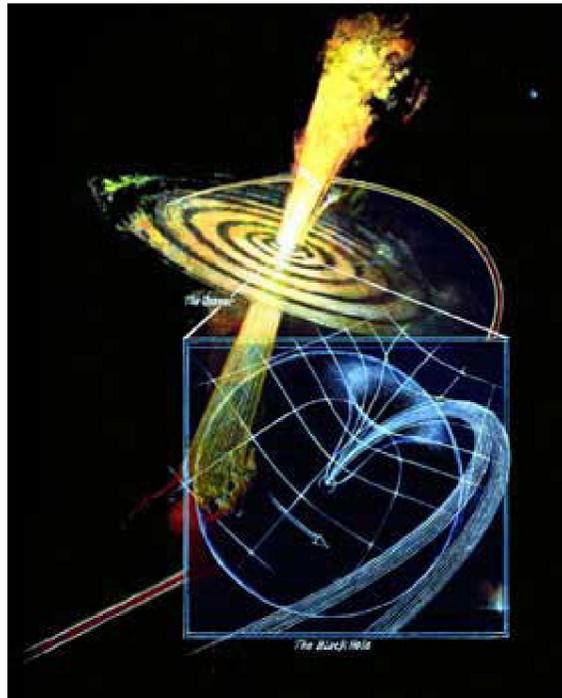
过我们为其设置的各项测试，因此我们必须不断寻找宇宙中最极端的环境以对相对论进行不断接近极限的测试，直到找出其崩溃的地方，并在那里找到新的物理学规律。”(晨风)

附录 6：地球旋转扭曲时空：爱因斯坦相对论再被证实图

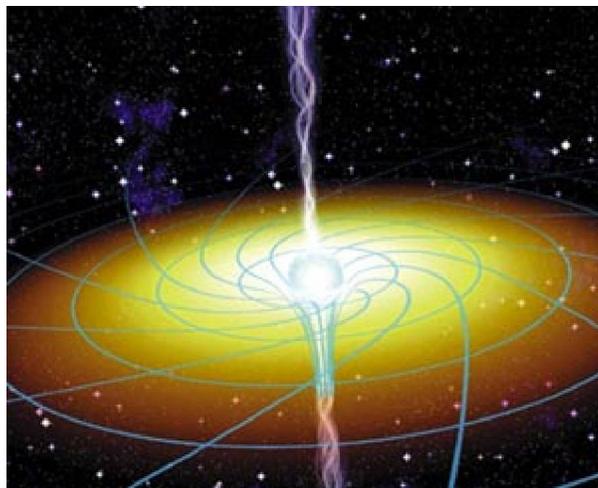


GEOFORSCHUNGSZENTRUM POTSDAM/CSR/JU TEXAS/JPL/NASA

图一：地球上由于物质密度各处存在差异，使得地球重力场并不均匀，增加了判断时空扭曲存在难度。NASA“葛雷斯”重力探测卫星得出的地球重力分布图，红色代表高重力区域，蓝色则代表低重力区。



图二：图为地球周围引力场和时空结构拖曳扭曲时的情形。



图三：宇宙中黑洞旋转引发的时空扭曲效应，以及黑洞猛烈物质喷射时的场景

近日一项最新研究表明，早先物理学家利用爱因斯坦广义相对论所做出的预测再次被证实：在旋转行星周围，的确有时空平面扭曲现象存在。

在研究中，天文学家通过分析两枚绕地球轨道的人造卫星 11 年来的运行轨迹，发现由于地球旋转所造成特异的时空结构，使得这些卫星平均每年出现大约 2 米的轨道偏移现象。参与该项研究的科学家表示，他们在上世纪九十年代末曾得出过同样的发现，但是这次所得出结果将更加精确可靠。

6、时间延缓的广义相对论效应

由地球发射雷达脉冲，到达行星后再返回地球，测量雷达往返的时间，比较雷达波远离太阳和靠近太阳两种情况下，回波时间的差异。太阳引力将使回波时间加长，称为雷达回波延迟。例如地球与水星之间的雷达回波的最大时间差可达 $240\mu s$ 。这类测量是目前对广义相对论中空间弯曲的最好检验。70 年代末，测量值与理论值之差约为 1%，到 80 年代，利用火星表面的“海盗着陆舱”宇宙飞船，已将回波延迟测量的不确定度从 5%减小到 0.1%，大大提高了检测精度。空间探测器的出现使得测量太阳引力场更显著一些的时间弹性效应成为可能。用雷达发射器向位于太阳另一侧的一个空间探测器发出一个无线电信号，讯号被探测器反射并返回地球。全程的时间在地球上记量。被太阳引力变曲的几何使得这个时间与讯号在平坦真空中传播的时间不同。这个实验是在 1971 年用水手号探测器进行的，它再次证实了时间延迟效应。1968 年沙皮罗设计的广义相对论的第四个验证“雷达波传播中的时间延迟”取得成功。它证实广义相对论的预言是正确的。这个预言是说，由于光线在引力场中一般沿曲线传播，与无引力场时相比，其传播时间要变慢。所有这些广义相对论实验都只涉及太阳系的引力场，而这个场是处处都很弱的，也是定常态的(即不随时间变化)。这个繁荣的实验引力时代激发了理论家们的想象，许多引力理论被提出来与 Einstein 理论竞争。那些理论大多含有一些附加参量，可以由发明者随意调节。这类理论中最著名的一个是由德国物理学家帕索·约丹和法国物理学家叶维·台里提出，后来由美国物理学家卡尔·布兰斯和罗伯特·迪克所发展的(迪克本人对实验引力的发展有着卓越的贡献)。由于附加参量的灵活性，那些理论可以被调节得能说明太阳系里观测到的所有效应。那么，怎么能确定究竟那一个理论是正确的呢？只有通过分析所有这些理论对强的、动态的(即随时间迅速变化)引力场情况所作的预测，才得作出回答。然而在相当长的时期里，自然界并未给我们提供合适的检验场历，直到 1974 年双脉冲星的发现，情况才有大变。这两个靠得很近且相互绕转的中子星的轨道周期在变短(由于辐射出引力波，双星系统的能量减少)，观测结果与 Einstein 理论一致，而与所有其他参与竞争的理论都不相符

1. 夏皮洛于 1964 年建议，测量雷达信号传播到内行星再反射回地球所需的时间，来检验广义相对论，为此他进行了长期的测量。到 70 年代末期，这类测量所得的数据同广义相对论理论值比较，相差约 1%。这类实验也可以在地球引力场中，通过测量人造卫星的雷达回波的时间延迟来进行。

有一高塔和两个一模一样的钟，将两钟调到同一时间，然后一个放在塔顶，一个放在塔底，请问哪个快

呢？还是一样快呢？(A)。根据常识人们会说两个都一样快。(B)。根据钟摆的等时性

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

，下边的 g

大一些, T 小一些, 下边的快。(C)。根据狭义相对论, 这两个钟没有相对运动, 一样快。(D)。若考虑地球自转, 塔顶的钟线速度大一些, 根据狭义相对论, 上边的钟慢一些。(E)。根据广义相对论, 在象地球这样的大质量的物体附近, 时间显得流逝得更慢一些, 也就是下边的钟慢一些。笔者认为 E 的观点是正确的。

1、很多科学家认为除了速度可以影响时间进程之外, 重力也会放慢时间前进的脚步, 计算表明地球的重力每 300 年可以让钟表慢 1 微秒, 这一点已在实验中得到验证。1971 年美国的学者曾做过一个实验, 在环球飞行的飞机上放了 4 个与地面校对好且精度极高的原子钟, 虽然飞机的速度无法与光的速度相比, 但实验结束时, 人们还是惊奇地发现飞机上的钟比地面慢了 59 纳秒。1976 年美国物理学家罗伯特·维索特向太空中发射了一枚载有时钟的火箭, 他观察到这个时钟与放置在地球上同样的时钟相比, 多获得了 1/10 微秒。全球定位系统——GPS 的应用也已普及化了, 许多城市的公共汽车、出租车上都安装了它。早期的 GPS 接收器确定物体位置的误差是在 15 米范围内, 这个误差实际是需要爱因斯坦相对论来修正。每个 GPS 卫星载原子钟每天要比地球上的钟慢 7 微秒。卫星所受的较弱引力添加了另一种相对论效应, 使得时钟每天快 45 微秒。因此, 为了得到准确的 GPS 数据, 将星载时钟每天拨回 38 微秒的修正项必须计算在内。因为广域增强系统依赖从地面基站发出的额外信号, 配备了该系统的 GPS 接收器, 就消除了相对性误差。根据爱因斯坦的相对论, 原子钟在强重力下比在弱重力下摇摆频率更慢, 由于国际空间站上的重力比地球表面的弱, PARCS 原子钟每过 10000 年, 就会比地球上的原子钟延长 1 秒钟。

2、科学家以万倍精度验证爱因斯坦相对论研究团队成员包括诺贝尔奖得主朱棣文

北京时间 2010 年 2 月 24 日消息, 据国外媒体报道, 一支由著名华裔物理学家、诺贝尔奖得主朱棣文等人组成的美国科学家团队近期验证了爱因斯坦相对论关于时间流逝的精确性, 他们通过验证得出的精确度比以前提高了 10000 倍。

在爱因斯坦相对论中, 描述了关于重力对时间流逝的影响。理论认为, 时间流逝的速度依赖于你所在的位置。距离重力源越远, 时钟运转的越快; 反之, 越靠近重力源, 时钟运转的越慢。

一百年来, 科学家们进行了各种试验对爱因斯坦相对论进行了论证和研究。1976 年, 科学家们曾经利用火箭将一个原子钟送到距离地面 10000 千米的高空, 共用了 115 分钟。他们发现, 火箭上的原子钟所测量出的时间比地面上的原子钟所测量的时间要长。

现在, 美国科学家则更进一步, 他们以比以前精确 10000 倍的精确度验证了爱因斯坦的时间相对论。研究团队成员还包括了著名的华裔物理学家、诺贝尔奖得主、美国现任能源部长朱棣文, 他们的研究成果发表于《自然》杂志上。

科学家们利用一个其中包含三束激光的激光陷阱来射击铯原子波, 使其像喷泉一样上下起伏。这种波被用作超高速时钟, 振荡速度接近每秒 10^{24} (10 的 24 次方) 次。科学家们所采用的技术实际上调用了一个奇怪但真实的量子力学现象, 即原子可以被同时刺激成两种状态。在其中一种状态中, 原子会被激光脉冲推移大约 1 毫米的十分之一, 这样它就会与地球的重力场远离一点点。而在另外一种状态中, 原子仍然保持不动。瞬间后, 第二束激光束再将这些被推移的原子送到下方, 然后将保持不动的原子送到上方。接着, 第三束激光束继续将同一个原子再生为两种状态。科学家们的目标就是测量在这些状态中原子波的能量振荡差异。

在 0.3 秒的自由落体时间里, 这些波共额外振荡了大约 100 万次。换句话说, 重心引力的稍微减弱, 引起了时间多流逝一点。美国加利福尼亚大学伯克莱分校助理教授霍尔格·穆勒认为, 这一数字是正确的。穆勒介绍说, “如果自由落体的时间延长到宇宙的年龄 140 亿年的话, 那么上下路线之间的时间差异将只有百分之一秒, 而测量的精确度将达到 60 微微秒。”

穆勒认为, 这一结果将有力地支持爱因斯坦的理论。他表示, “这项实验证明了重力确实在改变时间的流逝速度, 这也是广义相对论的基本概念。”这项研究也对实践应用有很大的帮助, 比如, 卫星定位系统可以发出更精确的同步信号, 卫星导航仪用户在定位自己的位置时精确度可达到毫米级。当然, 这种精确度也很容易受到影响。哪怕卫星的高度出现仅仅一米的变化时, 就可能会破坏这种精确度。

作者 (Author):

李学生 (Li Xuesheng), 男, 山东大学副教授, 理论物理教师, 中国管理科学院学术委员会特约研究员、北京相对论研究联谊会会员, 中国民主同盟盟员, 中国科学院高能物理所研究员。2002 年撰写的论文《数学归纳法的推广》在《济南教育学院学报》上发表, 2004 年 8 月撰写的理论物理学论文《引力质量与电磁质量之间的关系新探》在北京相对论研究联谊会第三届年会上发表, 得到了与会专家的初步认可; 2005 年 12 月至今我撰写的论文《现代理论物理学的九个问题》、《真空不空》、《以太的发展史》在《香港新科技杂志》上发表。2007 年在《格物》上发表论文《暗物质、暗能量和宇宙常数问题》; 2007 年 12 月在《新科技》(香港)杂志上发表论文《以太的发展史》; 2002 年在《山东师范大学学报(自然科学版)》教学

科研上发表《在物理教学中注意培养科学美的观念》；多篇有关文章在学术争鸣杂志 (Academia Arena, <http://www.sciencepub.net/academia>)上发表。 xiandaiwulixue@21cn.com, 1922538071@qq.com。

主要深入理解阅读的部分文献:

1. [日] 浅野四郎 浅野诚一 著 师华译。《狭义相对论的新图示法——space-time 圆图法——》 高等教育出版社 1992 年版。
2. 《介质浮力存在的普遍性》 段灿光著 本文集。
3. 《没有太阳辐射, 大气将静止吗?》 段灿光著 本文集。
4. 《以太浮力论》 段灿光著 本文集。
5. 《再论以太浮力 —— 关于万有引力变化的讨论》 段灿光著 本文集。
6. Baidu. <http://www.baidu.com>. 2016.
7. Google. <http://www.google.com>. 2016.
8. H.C. 瓦尼安, R. 鲁菲尼, 引力与时空, 科学出版社, 北京, 2006, pp150-153。
9. Ma H, Cherng S. Nature of Life. Life Science Journal 2005;2(1):7 - 15.
10. Ma H. The Nature of Time and Space. Nature and science 2003;1(1):1-11. Nature and science 2007;5(1):81-96.
11. National Center for Biotechnology Information, U.S. National Library of Medicine. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed>. 2015.
12. Wikipedia. The free encyclopedia. <http://en.wikipedia.org>. 2015.
13. 狄拉克。《现代物理学参考资料》第 3 集[C]。科学出版社,1978.38。
14. 王存臻、严春友 著。《宇宙全息统一论》山东人民出版社 1995 年版。
15. 《彗星漫谈》 徐登里编著 32K、P107 1975 年 7 月科学出版社。
16. 《数学在天文学中的运用》 刘步林编著 32K、P316 1979 年 9 月科学出版社。
17. 《中国大百科全书·天文学》 主编: 张钰哲 1980 年 12 月中国大百科全书出版社。
18. 《哈雷彗星今昔》 张钰哲著 32K、P97 1982 年 3 月知识出版社。
19. 《天体力学浅谈》 [苏]尤·阿·里五波夫著, 李五行、陈晓中译 32K、P201 1984 年 11 月科学普及出版社。
20. 《地学基本数据手册》 主编: 张家诚, 副主编: 李文范 16K、P1377 1986 年 3 月海洋出版社。
21. 《彗星十讲》 胡中为、徐登里编著 32K、P158 1986 年 4 月科学出版社。
22. 《中国百科年鉴·1986》 1986 年 10 月中国大百科全书出版社。
23. 《简明天文学词典》 叶叔华主编 32K、P880 1986 年 12 月上海辞书出版社。
24. 《中国百科年鉴·1987》 1987 年 12 月中国大百科全书出版社。
25. 《哈雷彗星及彗星-地球关系》 天地生综合研究论文集 胡中为、阎林山 16K、P471. 1989 年 11 月中国科学技术出版社。
26. 1995 年 6 月 21 日 《中国青年报》。
27. 1997 年 12 月 19 日 《中国科学报》。
28. Einstein 著, 方在庆、韩文博、何维国 译。《Einstein 晚年文集》 海南出版社 2000 年 3 月第 1 版。

5/4/2017