

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（作者为中国科学院高能物理所研究员）
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(13s): 201-316]. (ISSN 1553-992X). <http://www.sciencepub.net/academia>. 4. doi:10.7537/marsaaj0913s1704.

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

目录

第一章：广义相对论之前对于引力场的研究

- 1、万有引力常数的测定
- 2、引力场的数学特征
- 3、刚体的转动惯量
- 4、万有引力定律的困难
- 5、引力与斥力问题

第二章：广义相对论的时空观

- 1、广义相对论的引力场方程
- 2、马赫对于经典力学的批判
- 3、广义相对性原理分析
- 4、两种时空观的对比
- 5、广义相对论的奇点问题

第三章：广义相对论的验证

- 1、引力的传播速度问题
- 2、引力红移问题
- 3、行星的进动问题
- 4、引力波问题
- 5、时空弯曲的天文学依据
- 6、时空延缓的广义相对论效应

第四章：中微子问题

- 1、中微子的发现的过程及其在现代物理学中的意义
- 2、中微子的种类
- 3、中微子的质量问题
- 4、太阳中微子失踪之谜

第五章：广义相对论的困难

- 1、Einstein 场方程的 Schwarzschild 局限
- 2、宇宙常数问题
- 3、现代物理学对于宇宙常数的认识
- 4、广义相对论与宇宙学原理之间的不协调性
- 5、广义相对论的几个疑难问题

第六章：暗物质与暗能量

- 1、暗物质与暗能量在现代物理学中的意义
- 2、暗物质问题的提出过程
- 3、现代物理学对于暗物质的理论研究

- 4、现代物理学对于暗物质问题的天文观察简介
- 5、暗能量问题的提出过程
- 6、现代物理学对于暗能量实验研究综述
- 7、现代物理学界对于暗物质与暗能量的实验探究
- 8、现代物理学对于暗物质、暗能量的质疑

第七章：万有引力与弱相互作用之间的关系新探

- 1、宇观世界、宏观世界、微观世界
- 2、弱相互作用力简介
- 3、弱相互作用与电磁相互作用统一的研究
- 4、电弱统一作用质疑

第八章：广义相对论困难的思考

- 1、弱相互作用与万有引力是互为反作用力的实验根据
- 2、薛定谔猫佯谬的重新认识
- 3、“DI 海格立斯双星进动”问题和 β 衰变的新解释
- 4、“提丢斯——波得 (J. D. Titius - J. E. Bode) 法则”
- 5、行星进动问题
- 6、太阳角动量的逃逸问题
- 7、太阳系主要特征演化成因
- 8、行星自转速度的现状
- 9、月亮远离地球现象
- 10、卡西米尔效应(Casimir effect)
- 11、太阳光谱线“红移”理论推导错误
- 12、地球光谱线“蓝移”理论推导错误
- 13、最新关于天文学报到的难以解释的几个天文现象

第九章：时空的相对性与绝对性

- 1、时空的相对性
- 2、现代物理学对于真空的认识
- 3、引力场的能量属性
- 4、相对时空的本质
- 5、广义相对论与马赫原理关系一窥
- 6、广义相对论与以太
- 7、时空的绝对性
- 8、时空的相对性与绝对性原理

第一章 广义相对论之前对于引力场的研究

1、万有引力常数的测定

美国物理学家 J. B. 福斯勒利用 2 个原子干涉重力仪，找到了测量万有引力常数的新方法，测量精度可达百万分之一。该科研成果发表在近期的美国《科学》杂志上。

万有引力常数 G 的精确测量不仅对弄清引力相互作用的性质非常关键，而且对于理论物理学、地球物理、天文学、宇宙学以及精确测量等具有重要的理论与现实意义，但它的精度至今仍不理想。自 1798 年英国科学家卡文迪许采用精密扭秤获得历史上第一个较为精确的万有引力常数 G 测量值以来，人们虽经努力，但迄今对 G 的测量精度仍低于万分之一。因此，万有引力常数 G 的精确测量作为一个热点和难点为各国科学家所关注，并投入大量人力和物力进行研究。目前测 G 的方法大致分三大类。地球物理学方法引力效应明显，但实验精度较低；空间测量方法面临着很多新的技术难题，目前仍在探索之中；实验室内测量是目前获得高精度 G 值的主要方，常用工具是精密扭秤，但其工作艰巨而又困难，实验精度的提高主要受到引力相互作用十分微弱的限制。近年来出现的利用原子干涉测量 G 的方法，测量精度也不高。美国研究人员为此对原子干涉测量方法进行了改进，他们将 2 个相同的原子干涉重力仪安装在不同的高度，在两者之间固定了重 540 千克的铅垂，铅垂对 2 个重力仪中原子所受的重力影响不同，由于增加铅垂的引力，上面的重力仪所受的重力很容易增加，下面的很容易减少，这样就可以获得仅来自于铅垂引力的差别。由于地球的引力不会影响这种差

别，而与所处高度有关的地球引力作用可以通过多次重复实验消除。在这一过程中，铅垂的重量和位置的测定精度很高，因此，从该实验中计算万有引力常数相对容易。研究人员指出，虽然该实验测量 G 的精度达到了 10 万分之一，仍比要求的低 20 倍，但该实验证明这种方法可行。他们已经准备进行新的实验，新实验中对 G 精度的测量将达到百万分之一。另外，有关专家指出，利用这种方法不仅可用来测量 G ，还可对在实验室中研究广义相对论有重要意义。

2、引力场的数学特征

1. 引力场是客观存在的物理学事实、具有连续的数学特征。虽然引力场不能被描述为具体的客观物质对象，但是我们可以给出一个密度函数来描述引力场的性质，在空间中不同地方引力场可以通过不同的密度函数表征出来。

定义 1: 假设在给定的空间区域，引力场不随时间变化，则我们可以引入一个变量 Φ ，将引力场在该空间区域的密度描述为： $\Phi(X, Y, Z)$ 。其中 Φ 表述了引力场在该空间的引力场密度，也描述了空间该点的势能密度，两者描述的角度不一样，实质上是等效的。

定义 2: 假设在给定的空间区域，引力场不随时间变化，则我们可以引入一个变量 T ，将引力场在该空间区域的能量张量描述为： $T(X, Y, Z)$ 。能量张量 T 属于力的范畴，是一个矢量。其大小与空间该点的引力场密度函数 $\Phi(X, Y, Z)$ 成正比。需要说明的是，能量张量 T 与传统的力的性质是不一样的，这类力平时由于对称的缘故，并不表现出来，而且对于给定空间的任意一点，这样势能张量有无穷多个。

定义 3: 假设在给定的空间区域，引力场不随时间变化，并且空间该点以恒定的速度 V 运动（这个速度是广义的速度，对于该点虚拟的基元可以做直线或者曲线运动），则我们可以引入一个变量 \mathcal{K} ，将该点的物理状态表述为 $\mathcal{K}(Q, V)$ ，其中 Q 为广义坐标， V 为广义速度。

定义 4: 假设在给定的空间区域，引力场不随时间变化，并且空间该点以恒定的速度 V 运动，则我们乐意定义一个广义的动量 A 来表征该点的物理状态。与传统的理论物理学中动量不同的是，对于一个基元而言，传统理论物理学中的方向只能有一个，对于变量 A 来说，对于空间一点来说，它的方向可能有无穷多个。

在上述 4 个基本定义的基础上，将 4 个基本变量与我们现代物理学中所使用基本变量的对应关系以及他们之间的关系做一个简单的说明：

变量 Φ 的物理意义：

其一：变量 Φ 类似于现代物理学势能的定义，但是也不尽相同，变量 Φ 是空间的函数，对与给定的空间任意一点他在各个方向的变化可能是不一样的，而传统的势能仅仅是一个标量，并且也不具有什么物理意义。

其次：对于一个具有几何对称性质构成的物体，其惯性质量 M 和 Φ 通过下面的数学方程相互关联： $\oint \Phi(X, Y, Z) = MC^2$ ，只有将待考察的对象浓缩为一个质点时， $\Phi(X, Y, Z)$ 与惯性质量 M 等效。其他的情形我们一般可以认为两者成正比，也就是说惯性质量不考虑其大小、形状等等因素，他描述的物质对象的整体性质。当用 $\Phi(X, Y, Z)$ 来表述客观物质对象时，他不仅可以描述客观物质对象的整体性质，也可以描述客观物质对象的局部性质。 C 为光速。

变量 T 的物理意义：变量 T 其本质就是一个能量张量，这个能量张量的大小与该点的引力场密度函数 $\Phi(X, Y, Z)$ 成正比。与 $\Phi(X, Y, Z)$ 函数一样，对于空间该点，我们可以理解 $\Phi(X, Y, Z)$ 是由无穷多个 T 矢量变量叠加而成。一般的情形下由于满足局域对称， T 函数并不表现出来。比如说一个平静的液体内部存在有能量张量，这个张量的大小与液体的质量密度成正比。

变量 \mathcal{K} 的物理意义：变量 \mathcal{K} 类似于现代物理学中动能的概念。但是变量 \mathcal{K} 具有更加广义的意义。通常我们指某一个系统的动能，这个系统的动能的方向只有一个，但是对于变量 \mathcal{K} 描述的对象其运动方向可能有多个，或者无穷多个。对于多个或者无穷多个运动方向的空间该点的物理状态，我们要考虑变量 \mathcal{K} 的叠加问题。举一个例子：比如一个绕两个轴同时旋转的球体上的任意一点，其状态函数就有必要考虑变量 \mathcal{K} 叠加问题。

变量 A 的物理意义：变量 A 的物理意义。类似于传统物理学中动量的概念。与变量 \mathcal{K} 一样，我们需要考虑他在空间某一点的叠加问题。

变量 Φ 、 T 、 \mathcal{K} 以及 A 之间的关系：

上述四个变量与现代物理学基本量的对应关系：

Φ ----- 势能、惯性质量

T ----- 无对应

\mathcal{K} ----- 动能

A ----- 动量

1: 变量 Φ 与变量 T 成正比

2: 变量 \mathcal{K} 与 Φ 关系如下: $\mathcal{K}=\Phi V^2/C^2$ (不考虑该点虚拟基元的多方向运动)

3: 变量 A 与 Φ 的关系如下: $A=\Phi V/C^2$ (不考虑该点虚拟基元的多方向运动)

以上的1, 2, 3是建立在对空间某一点的描述之上, 如果该点有大小, 则上面三式未必成立。

在上述4个基本定义的基础上, 我们就可以对客观物质对象作出完备地描述。

比如万有引力场可以表述为: $E=\partial\Phi/\partial R$

其中 R 为矢径(理想的球对称的万有引力场)

真空表述为: $\Phi=\text{常数}$ 静电场表述为: $E=\partial\mathcal{K}/\partial R$

还有许多稳定的不含时的物理现象的细节都可以通过上述4个变量表述出来。

2. 局域对称和整体对称原理

局域对称: 考虑一个物理对象或者系统中空间的任意一点, 如果满足下述方程, 则这个物理对象或者系统所在的空间满足局域对称: $\sum T_{IJK}(X, Y, Z) + \sum A_{IJK}(X, Y, Z) = 0$

上式对空间某一点的 T 或者 A 值积分。

整体对称: 考虑一个系统中空间的全部点, 给定空间的取值区间为 $\mathcal{R}(X, Y, Z)$, $\mathcal{R}(X, Y, Z)$ 的取值空间一般满足几何上对称。如果下述方程成立, 则该物理对象或者系统满足整体对称。

$$\sum T_{IJK}(X, Y, Z) + \sum A_{IJK}(X, Y, Z) = 0$$

上式对给定空间的所有点 T 或者 A 值积分。

推论1: 如果一个系统是稳定且不含时的, 则该系统所处的空间的任意一点必满足局域对称, 该系统的全部空间必满足整体对称; 反之, 该系统所处的空间任意一点满足局域对称, 该系统所处的全部空间满足整体对称, 则该系统必然是稳定的且不含时。

{说明: 上述说法成立的前提是绝对温度为零, 既整个系统不存在热交换, 实质上我们通常所遇到的所有系统是不可能满足这个条件的, 在这里我想强调的是, 即使是系统存在热交换或者其他形式的量子现象等等, 那也是在这个“稳定的不含时的系统的背景下”发生的, 如果没有这个稳定的“背景”。系统将瓦解。}

推论2: 如果系统满足局域对称和整体对称, 则对于满足该局域对称或者整体对称条件的区域(这样的区域一般在几何上是对称的, 如圆、椭圆等等)该系统必然满足下述方程:

$\sum \nabla\Phi + \sum \nabla\mathcal{K} = 0$, 其中 $\nabla\Phi$ 是万有引力场的作用量, 实质就是万有引力场强; $\nabla\mathcal{K}$ 是电场的作用量, 实质上就是电场场强。并且对于满足局域对称和整体对称的系统, 不存在磁场。

推论3: 在满足局域对称和整体对称的空间区域, 有一类非常特殊的空间, 在这样的空间中函数 Φ 值为常数; 函数 \mathcal{K} 值为常矢量。很明显, 这样的空间对应我们通常所说的各向同性的均匀的真空和介质, 其中函数 Φ 值为常数的空间对应相对于参考系静止的空间; 函数 \mathcal{K} 值为常矢量的空间对应于相对于参考系做匀速运动的空间。并且函数 Φ 值决定了电磁波在其中传播的速度。我们通常所说的真空光速不变与函数 Φ 值不变相对应。

推论4: 由推论3可知, 在自然界不存在一无所有的空间, 我们通常所理解的真空是客观存在的物理实体。其本质是由引力场构成。基于以上原因, 我们对惯性系的定义就需要重新考虑。惯性系本身是具体的客观存在的实体。在新的惯性系的定义中, 我们要考虑两个因素。一个惯性系本身的 Φ 值, 一个惯性系的广义速度(相对于我们所选择的参考系的速度)。而且这样的惯性系不仅仅存在于我们通常所知道的真空之中, 同时也存在于场和物质的空间之中。既可以是做直线运动, 也可以做曲线运动。

3. 理想的球对称的万有引力场: 我们知道万有引力场的场强是空间的函数, 也就是说万有引力场是不含时的系统。由此我们推断描述万有引力场的函数 Φ 值是不含时的, 又因为万有引力场是没有旋转的, 所以我们可以不考虑函数 \mathcal{K} 值的变化。

根据局域对称和整体对称原理, 对于万有引力场空间的任意一点有:

$$\sum T_{IJK}(X, Y, Z) = 0$$

采用球坐标来描述上式可以改写为:

$$\sum T_{R\theta\Psi}(R, \theta, \Psi) = 0$$

据万有引力场是由一系列的等势能面构成, 所以对于给定的 R_0 在等势面上有:

$$T_{R\theta\Psi}(R, \theta, \Psi) = \text{常数}$$

在万有引力场的径向, 有如下的关系:

$$4\pi R^2 T_{R\theta\Psi}(R, \theta, \Psi)_{\text{外}} = T_{R\theta\Psi}(R, \theta, \Psi)_{\text{内}}$$

由于函数 Φ 值与能量张量 T 成正比, 则函数 Φ 值也有如下的关系:

$$4\pi R^2 \Phi_{R\theta\Psi}(R, \theta, \Psi)_{\text{外}} = \Phi_{R\theta\Psi}(R, \theta, \Psi)_{\text{内}}$$

由上式我们立即可以得到如下的关系:

$$\partial \Phi / \partial R = K/R^2 \quad 1$$

将上式与万有引力定律比较, 我们可以得到如下的关系:

$$K = GM/4\pi$$

其中 G 是万有引力常数, M 是引力质量。

与牛顿的万有引力定律比较, 我们只需要选择合适的 Φ 值的物理量单位, 就可以将 1 式与万有引力定律统一起来。

参考文献:

【1】恩格斯《自然辩证法》、1984 年, 第 141 页。

3、刚体的转动惯量

1. 刚体的转动惯量的三要素

刚体对某轴的转动惯量, 是描述刚体在绕该轴的转动过程中转动惯性的物理量。有转动惯量的定义式

$$I = \sum m_i r_i^2$$

可看出, 刚体的转动惯量是与下列三个因素有关的。

(1) 与刚体的质量有关。例如半径相同的两个圆柱体, 而它们的质量不同, 显然, 对于相应的转轴, 质量大的转动惯量也较大。

(2) 在质量一定的情况下, 与质量的分布有关。例如质量相同、半径也相同的圆盘与圆环, 二者的质量分布不同, 圆环的质量集中分布在边缘, 而圆盘的质量分布在整个圆面上, 所以, 圆环的转动惯量较大。

(3) 还与给定转轴的位置有关, 即同一刚体对于不同的转轴, 其转动惯量的大小也是不等的。例如, 同一细长杆, 对通过其质心且垂直于杆的转轴和通过其一端且垂直于杆的转轴, 二者的转动惯量不相同, 且后者较大。这是由于转轴的位置不同, 从而也就影响了转动惯量的大小。刚体的转动惯量的三要素: 刚体的总质量、刚体的质量分布情况、转轴的位置。

2. 转动惯量的普遍公式

(1) 转动惯量的定义式
$$I = \sum m_i r_i^2 \dots \dots \dots \textcircled{1}$$

可知, 对于形状规则、质量均匀分布的连续刚体, 其对特殊轴的转动惯量的计算可借助于定积分。这是, 可设想将刚体分成许多小线元、面元、体元。

$$dm = \lambda dx$$

$$dm = \sigma dS$$

$$dm = \rho dV$$

于是

$$I = \int r^2 dm = \int_l r^2 \lambda dx$$

$$I = \int r^2 dm = \int_S r^2 \sigma dS$$

$$I = \int r^2 dm = \int_V r^2 \rho dV$$

一般说来, 这是个三重的体积分, 但对于有一定对称性的物体, 积分的重数可以减少, 甚至不需要积分。

(2) 刚体对某轴的转动惯量

刚体对 z 轴的转动惯量

$$I_z = \int (r^2 - z^2) dm = \int (x^2 + y^2) dm \dots \dots \dots \textcircled{2a}$$

刚体对 x 轴的转动惯量

$$I_x = \int (r^2 - x^2) dm = \int (y^2 + z^2) dm \dots \dots \dots \textcircled{2b}$$

刚体对 y 轴的转动惯量

$$I_y = \int (r^2 - y^2) dm = \int (x^2 + z^2) dm \dots\dots\dots ②$$

仿照刚体对某轴的转动惯量来定义刚体对于某点的转动惯量：刚体中各质点的质量各自与其至某(参考)点的距离的平方的乘积，所得总和称为刚体对该点的转动惯量。

(3) 刚体对某点的转动惯量

刚体对坐标原点 O 的转动惯量可表示为

$$I_O = \int (x^2 + y^2 + z^2) dm \dots\dots\dots ③$$

由式②、③，得

$$I_O = \frac{1}{2}(I_x + I_y + I_z) \dots\dots\dots ④$$

即，质点系(刚体)对于坐标原点的转动惯量(或极转动惯量)，等于它对于三个坐标轴的转动惯量之和的一半。

3. 刚体的平行轴定理(许泰乃尔定理)

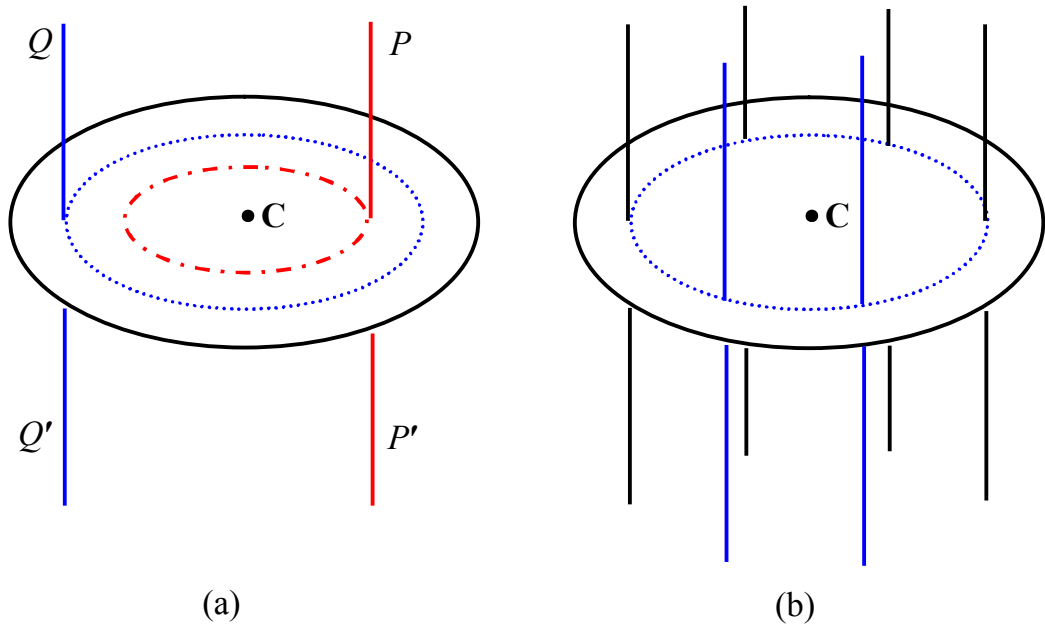
$$I = I_C + md^2 \dots\dots\dots ⑤$$

即，刚体对于任何一轴的转动惯量，等于刚体对于通过它的质心并与该轴平行的转动惯量，加上刚体的质量与两轴间距离平方的乘积。

注意：平行轴定理与刚体对质心轴的转动惯量紧密联系在一起，应用此定理的参考点是刚体对质心轴的转动惯量。

根据平行轴定理，可得到如下关系：

- (1) 刚体绕通过质心的轴的转动惯量小于绕另一平行轴的转动惯量，二者之差为 md^2 。
- (2) 设有两条平行轴 PP' 与 QQ' 均不通过质心 C 。如果 PP' 比 QQ' 靠近 C ，则刚体绕 PP' 轴的转动惯量小于绕 QQ' 轴的转动惯量(如图所示)。



平行轴定理的应用 (a) 在不同圆上；(b) 同一圆上

(3) 如果有一簇与质心 C 的距离相等的平行轴，那么，刚体绕这些轴的转动惯量均相等(如图 7.52(b) 所示)。

4. 刚体的垂直轴定理(正交轴定理、薄片定理)

设想刚体为平面薄片，即厚度可以略去不计，因而刚体为平面图形。

$$I_z = I_x + I_y \dots \dots \dots \textcircled{6}$$

即，平面图形对于图形内的两条正交轴的转动惯量之和，等于这个图形对过二轴交点且垂直于图形平面的那条转轴的转动惯量。

注意：正交轴定理对于有限厚度的板不成立。

5. 转动惯量的叠加原理

实际上，有些物体是由几种形状不同的刚体的组合。它对于某轴的转动惯量，可视为各部分对于同一转轴的转动惯量之和，因而，

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots \dots \dots \textcircled{7}$$

即，由几个部分组成的刚体对某轴的转动惯量，等于各部分对同轴的转动惯量之和。此即转动惯量的叠加原理。

叠加原理是根据加法的组合定则，把属于各部分的项分别相加，然后求和而得。

同理，设有一物体挖去若干部分，则剩余部分的转动惯量，等于原物体的转动惯量，减去挖去部分的转动惯量。

4. 万有引力定律的困难

300 多年来，物理学家们对基本常数 G 的值极感兴趣，自光速的测量以来，它有着最长的测量历史。In spite of the central importance of the universal gravitational constant, it is the least well defined of all the fundamental constants. 不管我们的现代科技如何发达，几乎所有对 G 的测量都是使用了由 17 世纪的 Cavendish 设计的古典的扭秤(利用扭力测量微力的一种仪器)技术。科学技术数据委员会 (ICSU) 于 1986 年给出的 G 值是 $G = (6, 67259 \pm 0.00085) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ ，是基于 Luther 和 Towler 在 1982 年的测定值。

1971 年，日本东京大学教授藤伊安仪通过理论计算试图将基本粒子物理与万有引力联系起来，他的研究得出了一个出乎意料的结论：引力常数的大小与两个物体之间的距离有关。在近距离内，例如两个物体的距离缩短到 $1\text{cm} \sim 10\text{cm}$ ，甚至 1cm 之下时，G 值是变化的。

1976 年，美国东华盛顿大学的丹尼尔声称，以物理学的实验为依据说明万有引力定律在近距离是错误的。科学家们在矿井、钻孔或海水内的真空中进行地球物理实验，来测定物体间的万有引力常数，得出的引力常数都高于地表实验室中的测定值。实验室测得， $G_0 = 6.67259 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ ，而地球物理测得的

平均值为， $G = 6.730 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ 。科学家们一直不理解，同样是真空中，引力常数为什么会有区别呢？1981 年 7 月，澳大利亚昆士兰大学的斯特塞和图克在实验室里做了一系列实验，也声称实验结果证明万有引力定律在近距离是失效的。这在物理学界引起了强烈的“地震”。

1982 年，一个研究组得到的万有引力常数精度为 0.0128%。这一数值看起来很精确，但与其它物理常数的精度相比却差了足有一千倍。更为奇怪的是，这与最近来自德国、新西兰、俄罗斯的一些很有名的研究组的新测量值存在着显著的差异。例如，德国标准研究所得到的数值比公认值大了 0.6%，德国乌培尔达尔大学 (University of Wuppertal) 得到的数值却低了 0.06%，新西兰计量标准实验室得到的结果低 0.1%。俄罗斯一个研究组更发现了万有引力常数值随测量时间地点的变动范围高达 0.7%。位于法国巴黎附近原子能委员会的科学家基恩-泊尔·比勒克 (Jean-Paul Mbelek) 和马克·拉赤责-雷 (Marc Lachieze-Ray) 对此提出了他们的解释，他们指出这是因为实验是在不同的地点进行的，不同地点不同的地磁场与隐藏的维度相互作用造成了引力大小常数的不同。他们研究工作的理论基础是理论物理中的弦论。在提交给《经典和量子引力》杂志的文章和欧洲天文学会在葡萄牙波尔托市的召开的一个会议报告中，他们给出了不同纬度万有引力常数的计算值。计算结果表明，磁场越强，引力常数越大，地球上万有引力常数在南北两磁极达到最大。现有的万有引力常数在不同地点的测量值与他们的结论吻合，对太阳的观测结果也与他们的理论相符。科学家们早就发现要使太阳内部的数学模型符合实验观测，他们不得不采用比公认数值更低的引力常数值。引力虽然是科学家们研究的最早的相互作用，但它同时也是科学家们了解得最少，长期以来使科学家们最头疼的一种相互作用，它的很多性质与其它相互作用力格格不入，与一些重要的物理理论如量子场论也不相容。)

J.P. Schwartz 和 J.E. Faller 曾作过一个尝试，他们设计了一个实验，用半顿的重物影响物体自由落体的轨迹。他们使用激光干涉测量法跟踪下落中的物体。这个实验并不用任何支撑机构悬挂测试物体，因

此可以减少很多像 Cavendish 一类的装置中悬挂机构引起的系统误差。用上述自由落体方法测量的 G 值分布图。错误栅线表示了标准偏差。1997 年的数据是每天都处理的，得到的 G 值分布在 6.66^{11} 到 6.71^{11} 的范围内。每天进行大约 7200 次落体实验的测量。尽管事实上相比于 Cavendish 的实验装置已经排除了所有可能的实验误差，观测数据再一次显示了 G 值随着时间的不同而改变，有超过万分之十四的不确定性。就在几年前，Mikhail Gershteyn，一个在 MIT Plasma 科学与核聚变中心的访问学者，与他的伙伴们成功的用实验证明了公知的两个测试物体间的引力随其在空间中的方位的改变而改变，相对于一个遥远的恒星系统。他们的非凡的发现已经公布在一个叫“《引力作用与宇宙论》(Gravitation and Cosmology)的期刊上。Randolph-Macon 学院物理系主任 George Spagna 争辩认为 Mikhail 和他的伙伴必须从理论上作出令人信服的证明。

“2004 年 8 月，荷兰 Delft 技术大学的 C. Duif 发表一文，论述了‘日蚀时单摆的神秘现象’。众所周知 1851 年法国物理学家 L. Foucault 曾解释单摆的运动。单摆自由摆动时，在空间的路径应相同；但由于地球自转，单摆的运动平面缓慢转动。1954 年夏天，一位法国工程师 M. Allais 发现，在日蚀时单摆的运动规律反常。原来，单摆的运动平面按顺时针缓慢转动；日蚀开始后，单摆的运动平面急剧地按反时针旋转；日蚀结束后恢复正常。著名火箭专家 W. von Braun 曾敦促 Allais 用英文发表报道文章。但 Allais 仅用法文写作并发表在刊物上，今天有人讲这是‘Allais 所犯的最大的错误’。后来（1961 年、1970 年），别的科学家也发现了这个现象；但现在我们称其为‘Allais 效应’。Allais 认为是以太 (ether) 的影响造成上述现象，但一直少有人同意他。他说：‘相对论学者们说我错了，但却不拿出证据来；其实他们之中大多数人并未读过我的文章’。后来逐渐有更多的人注意到此事，例如 E. Saxl 和 M. Allen（在 1970 年），重做了实验，得到的结论是‘引力理论确实需要修改’。再后的研究者有 D. C. Mishra 和 B. S. Rao（1995 年，在印度）等；在美国工作的 T. van Flandern 也曾关注此事。英国的 E. T. Goodey 现在有一系列观测计划：2005 年 4 月 8 日在南美 Bogota，2006 年 10 月 3 日在葡萄牙。另外，利用月蚀也能作类似的研究。”宇宙探测器在飞临地球、木星火星可获加速度，如伽利略号飞临木星它的速度比预想的要 5 毫米/秒，NEAR 探测器飞临地球，它的速递比预想的要快 13 毫米/秒。

2005 年 9 月 2 日《自然》杂志网络版(www.nature.com)头版头条新闻中报道了国家天文台学者关于宇宙暗物质基本问题的研究成果。由于此项研究牵涉到物理学中一些根本性问题，论文在国际上引起了极大关注。国家天文台的秦波博士与多伦多大学的 Ue-Li Pen 及牛津大学的 Joseph Silk 教授通过对天文观测所揭示的暗物质粒子的基本属性的研究，发现万有引力可能在小于一个纳米的微小尺度上开始偏离牛顿引力的平方反比率，而呈现 $1/r^5$ 。这暗示着我们的空间存在着三个尺度为 1 纳米的较大的额外维。这可能是人们首次找到额外维存在的证据，并对超弦理论作出实验或观测检验。

G 值的变化并不仅仅存在于 Cavendish 的实验和自由落体装置中。自然界已经用好几种我们现在已经能够了解的方式记录下了这种变化，而且我们可以据此寻找很久以来万有引力常数变化的约束条件。在天体物理学上对 G 值变化的约束条件已经通过不同的观测方法获得，这些方法包括月球的圆缺变化法 (Muller et al 1991)，行星和月球探测雷达法 (Shapiro 1990)，helioseismology 法 (Guenther et al 1998)，原始核合成法 (Olive et al 1990)，重力透镜化 (Krauss & White 1992)，以及白矮星发光度函数法 (Garcia et al 1995) 等。基于天体力学的测定证明了 G 值变化的约束为 $(dG/dt)/G_0 \leq 10E-12/\text{年}$ 。还有其他方法，像利用中子星质量法 (Thorsett 1996)，球状星团寿命法 (Degl' Innocenti et al 1995)，二进制计时脉冲星法 (Damour & Gundlach 1991) 以及日温计法 (Demarque et al) 等。另外一个测定 G 值长期平均变化量的方法是通过分析行星半径的变化。最好的结果来自对水星的观察，其得到的 G 值变化的限制范围是 $(dG/dt)/G \leq 8E-12/\text{年}$ ，这个结果来自一个事实——即水星的半径在过去的 30~40 亿年间最多改变了 1 千米。

这些新测得的数据似乎暗示某些地方搞错了，或者在我们理解 G 的过程中出现了偏差。在 1999 年底，国际委员会 CODATA 决定正式把万有引力常数 G 的误差范围由 0.0128% 提高到 0.15%。制定这个不平常的措施就是用来反映上述实验中出项的种种差异。在我的物质绝对速度理论中，我会展示所有这些实验中的变化量，不仅不是实验的误差，而且这些数值变化所具有的重要性，除了体现在我们对物理定律的理解中，还体现在我们对整个宇宙的理解中。包括 Arthur Eddington 和 Paul Dirac 在内的几位物理学家已经推测过了‘基本常数’中的一些会随时间而改变。特别是 Dirac 曾提议，宇宙万有引力常数 G 跟宇宙的年龄 T 有关系，而且这个比例系数为 $Gmp^2/hc^2 T^{-1}$ 。然后随者年龄的变化，一些常数或者它们的组合参数一定会随之改变。Dirac 认为原子常数更为稳定，所有他选定了 G 的变化是 T 的倒数，也就是说，随者宇宙的膨胀，万有引力会变弱。Richard Feynman 在他的一次演讲中说过“……相比较于两个电子间的排斥力，引力作用是 $0.24E-42$ 。。。光线穿越质子的时间跟宇宙年龄的比值为 $0.63E-42$ 。。。这个关系并不意外（同样知名的还有 Dirac 的大

数假设), 在这种情况下, 重力常数会随着时间的变化而变化, 因为宇宙变得越来越老, 宇宙的年龄跟光线穿越质子所花时间的比值会逐渐增大。” 万有引力的一些现代 generalised 理论同样承认或预言 G 值是随时间而变化的。Brans-Dicke 以及相似的理论再次复兴, 变化的 G 值, 事实上是由超弦理论的出现而引起的, 其中的 G 被认为是一个动态变量。G 值是常数的观点似乎从实验中被不断地否定, 接受 G 值不是恒定不变的这个事实, 将自然而然要求修正或扩充原先认为 G 是常数的广义相对论。接受一个变化的 G, 无疑会导致出现新物理学的黎明。

万有引力常数是物理学中除光速外研究得最早的物理常数。然而长期以来, 万有引力常数 G 却是测量精度最差的一个物理常数。目前两组精确度最高的测量值精度虽达万分之一, 但是奇怪的是, 这两个数值彼此相差超过实验精度的 10 倍以上。所以现在人们仍然不知到它到底应该是多少。据新科学家网站 9 月 22 日消息, 法国科学家声称在不同地点测量到的万有引力常数 G 各不相同, 磁场越强, 引力常数越大, 地球上万有引力常数在南北两磁极达到最大, 是因为隐藏著的另外空间维度导致万有引力常数受到地球磁场的影响。如果这一结论被证实, 将成为证实另外空间维度存在的第一个科学证据。

测量万有引力常数的最常用的方法是基于早在 300 年前英国科学家卡文迪许发明的扭摆法。1982 年, 一个研究组得到的万有引力常数精度为 0.0128%。这一数值看起来很精确, 但与其它物理常数的精度相比却差了足有一千倍。更为奇怪的是, 这与最近来自德国、新西兰、俄罗斯的一些很有名的研究组的新测量值存在显著的差异。例如, 德国标准研究所得到的数值比公认值大了 0.6%, 德国乌培尔达尔大学 (University of Wuppertal) 得到的数值却低了 0.06%, 新西兰计量标准实验室得到的结果低 0.1%。俄罗斯一个研究组更发现了万有引力常数值随测量时间地点的变动范围高达 0.7%。位于法国巴黎附近原子能委员会的科学家基恩-泊尔比勒克 (Jean-Paul Mbelek) 和马克-拉赤责-雷 (Marc Lachieze-Ray) 对此提出了他们的解释, 他们指出这是因为实验是在不同的地点进行的, 不同地点不同的地磁场与隐藏的维度相互作用造成了引力大小常数的不同。他们研究工作的理论基础是理论物理中的弦论。在提交给《经典和量子引力》杂志的文章和欧洲天文学会在葡萄牙波尔托市的召开的一个会议报告中, 他们给出了不同纬度万有引力常数的计算值。计算结果表明, 磁场越强, 引力常数越大, 地球上万有引力常数在南北两磁极达到最大。现有的万有引力常数在不同地点的测量值与他们的结论吻合, 对太阳的观测结果也与他们的理论相符。科学家们早就发现要使太阳内部的数学模型符合实验观测, 他们不得不采用比公认数值更低的引力常数值。

下表是最近 200 年来对 G 值的测量情况:

Data Set number	Author	Year	G ($\times 10^{11} \text{ m}^3 \text{ Kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$)	Accuracy	% Deviation from CODATA
1	Cavendish H.	1798	6.74	± 0.05	+0.986
2	Reich F.	1838	6.63	± 0.06	-0.662
3	Baily F.	1843	6.62	± 0.07	-0.812
4	Cornu A, Baille J.	1873	6.63	± 0.017	-0.662
5	Jolly Ph.	1878	6.46	± 0.11	-3.209
6	Wilsing J.	1889	6.594	± 0.015	-1.202
7	Poynting J.H.	1891	6.70	± 0.04	+0.387
8	Boys C.V.	1895	6.658	± 0.007	-0.243
9	Eotvos R.	1896	6.657	± 0.013	-0.258
10	Brayn C.A.	1897	6.658	± 0.007	-0.243
11	Richarz F. & Krigar-Menzel O.	1898	6.683	± 0.011	+0.132
12	Burgess G.K.	1902	6.64	± 0.04	-0.512
13	Heyl P.R.	1928	6.6721	± 0.0073	-0.031
14	Heyl P.R.	1930	6.670	± 0.005	-0.063
15	Zaradnicek J.	1933	6.66	± 0.04	-0.213
16	Heyl P., Chrzanowski	1942	6.673	± 0.003	-0.018
17	Rose R.D. et al.	1969	6.674	± 0.004	-0.003
18	Facy L., Pontikis C.	1972	6.6714	± 0.0006	-0.042

Data Set number	Author	Year	G ($\times 10^{11} \text{ m}^3 \text{ Kg}^{-1} \text{ s}^2$)	Accuracy	% Deviation from CODATA
19	Renner Ya.	1974	6.670	± 0.008	-0.063
20	Karagioz et al	1975	6.668	± 0.002	-0.093
21	Luther et al	1975	6.6699	± 0.0014	-0.064
22	Koldewyn W., Faller J.	1976	6.57	± 0.17	-1.561
23	Sagitov M.U. et al	1977	6.6745	± 0.0008	+0.004
24	Luther G., Towler W.	1982	6.6726	± 0.0005	-0.024
25	Karagioz et al	1985	6.6730	± 0.0005	-0.018
26	Dousse & Rheme	1986	6.6722	± 0.0051	-0.030
27	Boer H. et al	1987	6.667	± 0.0007	-0.108
28	Karagioz et al	1986	6.6730	± 0.0003	-0.018
29	Karagioz et al	1987	6.6730	± 0.0005	-0.018
30	Karagioz et al	1988	6.6728	± 0.0003	-0.021
31	Karagioz et al	1989	6.6729	± 0.0002	-0.019
32	Saulnier M.S., Frisch D.	1989	6.65	± 0.09	-0.363
33	Karagioz et al	1990	6.6730	± 0.00009	-0.018
34	Schurr et al	1991	6.6613	± 0.0093	-0.193
35	Hubler et al	1992	6.6737	± 0.0051	-0.008
36	Izmailov et al	1992	6.6771	± 0.0004	+0.043
37	Michaelis et al	1993	6.71540	± 0.00008	+0.617
38	Hubler et al	1993	6.6698	± 0.0013	-0.066
39	Karagioz et al	1993	6.6729	± 0.0002	-0.019
40	Walesch et al	1994	6.6719	± 0.0008	-0.035
41	Fitzgerald & Armstrong	1994	6.6746	± 0.001	+0.006
42	Hubler et al	1994	6.6607	± 0.0032	-0.202
43	Hubler et al	1994	6.6779	± 0.0063	+0.055
44	Karagioz et al	1994	6.67285	± 0.00008	-0.020
45	Fitzgerald & Armstrong	1995	6.6656	± 0.0009	-0.129
46	Karagioz et al	1995	6.6729	± 0.0002	-0.019
47	Walesch et al	1995	6.6685	± 0.0011	-0.085
48	Michaelis et al	1996	6.7154	± 0.0008	+0.617
49	Karagioz et al	1996	6.6729	± 0.0005	-0.019
50	Bagley & Luther	1997	6.6740	± 0.0007	-0.003
51	Schurr, Nolting et al	1997	6.6754	± 0.0014	+0.018
52	Luo et al	1997	6.6699	± 0.0007	-0.064
53	Schwarz W. et al	1998	6.6873	± 0.0094	+0.196
54	Kleinvoss et al	1998	6.6735	± 0.0004	-0.011
55	Richman et al	1998	6.683	± 0.011	+0.132
56	Luo et al	1999	6.6699	± 0.0007	-0.064
57	Fitzgerald & Armstrong	1999	6.6742	± 0.0007	± 0.01
58	Richman S.J. et al	1999	6.6830	± 0.0011	+0.132
59	Schurr, Nolting et al	1999	6.6754	± 0.0015	+0.018
60	Gundlach & Merkowitz	1999	6.67422	± 0.00009	+0.0003

Data Set number	Author	Year	G ($\times 10^{11} \text{ m}^3 \text{ Kg}^{-1} \text{ s}^2$)	Accuracy	% Deviation from CODATA
61	Quinn et al	2000	6.67559	± 0.00027	+0.021
--	PRESENT CODATA VALUE	2004	6.6742	± 0.001	± 0.0150

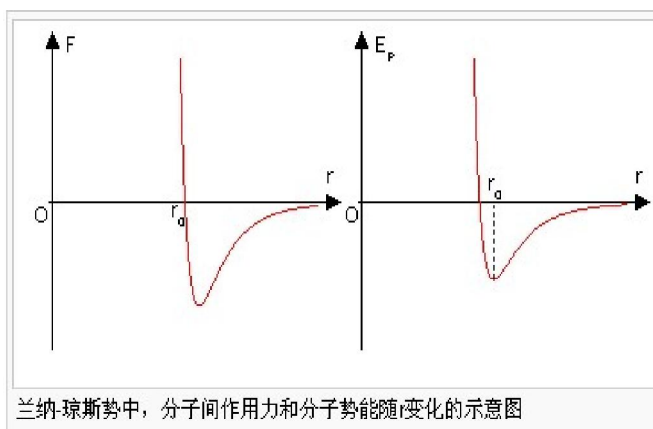
自从牛顿时代以来，虽然经过很多人的努力，还没有人能对万有引力提出圆满的机械解释，而且从爱因斯坦的研究看来，这个问题已经转移到非欧几里得几何学的领域去了。这一事实证明牛顿的小心谨慎的真正科学精神是非常明智的。牛顿在《原理》中说，“到现在为止我还不能从现象发现重力的那些性质的原因，我也不愿建立什么假说。”他仅用问题的形式，在他的《光学》书中发表了一项意见，在那里他假设行星际间有以太存在，并假设其压力离物质愈远而愈密，因而压迫物质使其互相接近。但在他对事实进行归纳研究的时候，在他从他的理论中得出数学推论的时候，猜度是没有地位的。

5、引力与斥力问题

《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：1。自然界是否存在五种以上的基本作用力？5。负引力存在吗？1998年12月29日《科技日报》评选出世界十大科技新闻之一：宇宙中存在反引力，1998年美国《科学》杂志评选出世界十大科技突破之一：宇宙中存在反引力。

谈到广义相对论时，爱因斯坦说：“这理论主要吸引人的地方在于逻辑上的完备性。从它推出的许多结论中，只要有一个被证明是错误的，它就必须被抛弃；要对它进行修改而不摧毁其整个结构，那似乎是不可能的。”

笔者认为宏观世界以及微观世界中引力与斥力的关系类似于微观世界中分子的引力与斥力的关系，也就是说具有全息现象。



分子力实际上来源于多个方面，精确的计算与各分子内部结构有很大关系，会变得十分复杂。对于无极性分子，两分子间作用力可近似用以下半经验公式表示：

$$F(r) = \frac{\lambda}{r^s} - \frac{\mu}{r^t}$$

其中正表示排斥力，负表示牵引力；r为两分子间距， λ 、 μ 、s、t为常数，随两分子不同而不同，且s>t。这种力的特点是

- 在某一个值 r_0 以内，分子表现为排斥力并且随r减小而急剧上升；
- 在 r_0 以外表现为牵引力，分子力逐渐增大，到某最大值后减小；
- 力程短，在r约为 r_0 十倍时已几乎为零。

由此，对无极性分子间的相互作用势能有以下几个常用曲线。一个典型且常用的模型是兰纳-琼斯势，该势能仅与两分子间距有关，具有球对称性，其函数解析式为：

$$E_p(r) = E_{p_0} \left[\left(\frac{r_0}{r} \right)^{12} - 2 \left(\frac{r_0}{r} \right)^6 \right]$$

其中, r 为两分子距离, E_0 为分子势能的势阱 (势能最低处的势能绝对值), r_0 为势阱处两分子间距。 E_0 与 r_0 需要对于具体分子通过实验确定。

$$E_p(r) = \begin{cases} \infty & r \leq d \\ -E\left(\frac{d}{r}\right)^6 & r > d \end{cases}$$

对兰纳-琼斯势在排斥力部分简化, 成为苏则朗势 (Sutherland potential), 即:

$r \leq d$
 $r > d$

其中 E 、 d 为常数, 因分子而异。满足苏则朗势的气体称为范德瓦尔斯气体, 分子力又称作范德瓦尔斯力, 满足范德瓦尔斯方程。

对苏则朗势在引力部分再次简化, 成为刚球势, 即:

$$E_p(r) = \begin{cases} \infty & r \leq d \\ 0 & r > d \end{cases}$$

$d=0$ 时, 分子势能完全忽略, 变为质点势, 这时气体称作理想气体, 满足理想气体状态方程。

北京天文台胡景耀研究员讲: “在数学, 天文和物理等学科高度发展的今天, 理论界无法解释的天文现象还很多”。南京大学曲钦岳院士讲: 目前研究主流是采用已知的物理规律去解释新的天文观测现象, 很有必要弘扬由已知的天文现象综合新的物理规律的科学方法。对于公转角速度大于或等于其绕转行星自转角速度的卫星或者逆向卫星就不一定成立, 如火卫一公转周期, 正在每周 1 毫秒的速度缩短, 就无法解释。2003 年 2 月 11 日, 美国太空总署公告当时探测到的宇宙学参数, 证明宇宙中确实存在“反引力”, 因为观测结果表明许许多多的星系正在“加速远离”, 而不是在引力作用下减速。美国著名的《科学》杂志也把“宇宙反重力”的发现列为二十世纪几项重大科学发现之一。在物理学上往往因为看出了表面上互不相关的现象之间有相互一致之点而加以类推, 结果竟得到很重要的进展。

(1) 经典物理对于引力和斥力的研究

牛顿在论及引力时所说: “我谈到吸引与排斥, 正如有同一意义上使用加速力和运动力一样……对这些力不从物理上面而只从数学上加以考虑……把力归因于某个中心 (它只不过是数学点而已)。” 【1】康德 (1724—1804) 说: “不去钻研而满足于直接提出上帝的意志来, 是一个苦恼的决断, 牛顿对于斥力没有象对引力说得那么清楚, 应当只用引力、斥力来说明大自然的秩序发展。”黑格尔 (1770—1831) 说: “‘一’的否定的自身关系就是排斥, 这排斥作为多个一的建立。”黑格尔又说: 牛顿“既然假定排斥为非有, 对于斥力的规定也就得不到更多的结果。”马赫 (1838—1916) 说: 吸引和排斥就是运动的根据, “当我们谈及物体的吸引和排斥时, 不必想象其它更深刻的原因。”但牛顿那里没有排斥, 他颇失望。康德在《宇宙发展史概论》中, 用引力和斥力的观点描述天体的发展变化: 构成太阳系星球的物质, 在最初时都分解为基本微粒, 充满整个宇宙空间。这些微粒具有促使它们相互运动的基本能力, 密度较大而分散的一类微粒, 凭借引力把周围密度较小的微粒聚集起来。这种情况一直继续下去, 直到形成诸团块天体。在这同时, 斥力使凝聚起来的团块天体发生旋转运动, 并且逐渐向一个垂直于其转动轴的平面集中, 最后形成行星绕太阳运行的圆盘状结构的天体系统。辩证唯物论的伟大导师恩格斯明确地指出了牛顿引力理论的缺陷, 他说: “吸引和排斥就象正和负一样是不可分离的”、“只以吸引为基础的物质理论是错误的, 不充分的, 片面的。”

现代物理学认为引力引起的引潮力则有排斥作用。地球与月亮的吸引使月亮绕地球公转, 引潮力的排斥使月亮越来越远离地球 (同时地球的自转越来越慢, 直到其自转与月亮的公转同步, 过程再逆转), 不仅引起面对月亮一面的地球水层涨潮, 也同时使背向月亮一面的地球水层涨潮。所以, 每个天体周围的时空流形不是单纯由引力的吸引, 还有引潮力的排斥, 再加电磁场的排斥作用, 这种排斥类似于反引力 (另外, 根据我的多宇宙理论, 与我们的宇宙对应的反物质宇宙对我们有反引力作用), 所有这些综合效果形成各个天体时空的洛希面层层叠叠, 成为疏密相间的天体集团的分层结构。**笔者认为引潮力的本质就是弱相互作用。**恩格斯曾有过这样的表述: “一切运动都存在于吸引与排斥的交替之中。然而运动只在每一个吸引被别处一个之相当的排斥所抵偿时, 才会发生。……所以, 宇宙中的一切吸引和一切排斥, 一定是互相平衡的。……宇宙中一切吸引的总和等于一切排斥的总和。”。我们的天文学家所观测到的是太阳半径正在不断缩短, 地球半径正在不断缩短, 万有引力常数 G 随时间不断衰减, 月球随时间再逐渐远离地球, 存放于法国 100 多年以来国际标准 1 千克圆柱形砝码神秘减轻 50 毫克。1986 年 1 月 6 日美国人菲施巴赫等在《物理学评论快报》上发表文章, 坚持认为厄卓实验已表明不同物质、不同化学结构的物体的重力加速度是不同的。更为吃惊的是, 他们认为造成这种重力加速度值偏小的原因是: 地球和物体之间除引力之外还存在微小的斥力, 它只在两物体间距离小于 200 米时才表现出来。

(2) 宇宙飞船的轨道异常问题

科学家们发现了宇宙飞船的轨道有三种不同的异常情况：

(1)。“先驱者 10”为 1972 年发射，用以探测行星际介质、木星磁层和大气，1983 年越过海王星轨道；“先驱者 11”于 1975 年发射用于探测木星；“伽利略”号探测器于 1989 年 10 月发射，1990 年 2 月飞越金星，1996 年历时 6 年，行程 3.7×10^8 公里，终于到达木星周围，2 年内绕木星 11 圈，对木星进行考查。“先驱者 10”和“先驱者 11”访问过木星和土星，两艘“旅行者号”飞船接近天王星和海王星，这四艘飞船现在都已飞抵太阳系边缘。美国反射的宇宙飞船先锋 10 号正在经历一种朝着太阳的神秘减速，这种力量很微弱：只相当于地球表面引力的一亿分之一，但事实证明了这种作用的持久性。而且它还在不断加大。如今先锋 10 号离太阳的距离是地球的 80 倍，比原定计划落后了 40 万公里，先锋 11 号在与航天局失去联系之前也在经历着同样的减速。先锋 10 号飞向金牛座，先锋 11 号飞向天鹰座，两者方向相反，受到的拉力都是太阳方向。

美国航天局科学家对宇航器提出的减速问题对牛顿万有引力定律的质疑，科学家们排除了燃料或热量的泄露外，提出了暗物质的假说与镜物质的假说，但是他们都没有圆满解释这种现象。因此后面分析弱相互作用是引力的反作用，它与万有引力的共同作用使宇宙处于相对稳定状态，它们是矛盾的两个方面。

1990 年 12 月伽利略探测器飞掠地球时第一次发现了这一异常。当时“伽利略”距离地球大约 200 万千米，正以每秒 8891 米的速度向地球靠近。科学家们预计当“伽利略”离开地球到相当的距离的时候也应该具有相同的速度。然而，测量却发现它超速了每秒 4 毫米。尽管这个值非常小，但是它实实在在的就在观测数据里。观测发现，1998 年 1 月的舒梅克近地小行星探测器也存在着加速现象。它的加速效应大约是“伽利略”的 3 倍，达到了每秒 13.5 毫米。在 2005 年 3 月的罗塞塔探测器上观测到了类似的现象，这次它的反常速度为每秒 2 毫米。速度测量的精确度是 0.1 毫米/s。这些结果着实把科学家们给难住了。是什么为探测器注入了能量并且让它们加速的呢？为什么大行星的运动都符合牛顿引力定律呢？这些都是新引力理论应该作出解释的。

1. 先驱者号轨迹反常

前几年，美国航空航天局（NASA）报道先驱者 10 号、11 号和尤利西斯号等航天器的运行轨道明显偏离根据“万有引力”计算出的轨道，他们说那些航天器受到了“神秘加速度”的牵引。这些都使科学家们不得不承认：万有引力理论可能存在问题。

先驱者号轨迹反常还有一个令人不解之处，就是我们太阳系中自然存在的行星都没有发现这种反常加速度。难道“自然存在”的行星和人造的飞船的“万有引力”存在着某些不为我们所知的差异吗？或者“自然存在”的行星轨道有什么特殊之处？这不禁使人想起了原子中的电子轨道。在原子中，电子的“定态轨道”的确是一些很特殊的“轨道”，也许微观和宏观世界存在着某种还不为我们所知的相通之处。

(2)。在火星上有 3 个和飞机上所使用的非常相似的无线电应答器。这些应答器分别装载在“海盗”1 号着陆器、“海盗”2 号着陆器以及“火星探路者”探测器上。由此美国宇航局深空探测网可以测量着陆器和地球之间的距离。在分析了大量的观测数据之后，天文学家发现天文单位正在以每世纪 7 米的速度增长。换句话说地球正在以这个速度离开太阳。在考虑了所有已知的相互作用之后，目前天文学家依然无法解释这一现象。

(3)。重力异常现象

相同的物体在相同纬度、相同的海拔高度的不同的地方显示的重量不同，这就是一种重力异常现象。早在 1953 年法国巴黎大学的科学家阿勒就发现了这样的情况，由于无法用牛顿“万有引力”和爱因斯坦的引力理论加以解释，所以一直被称为“重力异常”之谜。其实，在世界各地，有很多地理现象都可以看成是重力异常现象。

美国著名的“俄勒冈旋涡”，对人体有巨大的引力；加利福尼亚的圣塔斯镇“神秘地带”，会使树木倾斜生长，游人无法直立；中国沈阳的一处称为“怪坡”的地方，上坡省力，下坡费力；中国台湾的一段河流呈现“水向高处流”的奇观……

此外，登月宇航员还发现月球上的个别地区存在着“重力瘤”现象。特别是五十年代以来，一些国家的科研部门分别在四次日全食期间观测到了“重力异常”现象，这使人们不得不用怀疑的目光重新对待万有引力理论。这些引力反常现象是推翻“万有引力”的突破口。这些怪异现象有的被科学界解释为视觉误差，有的被解释为密度差别，这实在不能令人信服。

(4)。反重力效应

反重力这一概念最先由爱因斯坦提出，他发现宇宙中恒星间的关系无法用万有引力来解释，为此，他把后半生的大部分精力都放在这方面的研究上，并且创立了广义相对论。为了能用自己的理论合理解释恒星

间彼此远离现象，他曾经给宇宙方程加了一个常数，直到“宇宙大爆炸”理论的提出，他才取消了这个常数。

1923年一位科学家发现充电7万伏以上的电容器会沿正极板方向向上移动，但不明其中原理，因此没有引起科学界重视；1980年英国的一个叫约翰·西尔的人发现，把一个圆盘形的电容器（正极在中心，负极在边沿）充电至10万伏时，整个电容器会快速旋转并飞向空中，这就是一直让人莫名其妙的“悬浮盘”。——两位前辈都已经发现了反重力，他们的实验装置都是强负电场对重力产生了影响。

1987年，中国四川的刘武青先生通过实验发现，电磁力对重力有影响，他于当年向中国专利局提交了一名名为“建立电磁力减轻物体重量概念的教具”的发明申请，他的实验结果已被许多人的重复实验所证实。其后不久，一位在芬兰坦佩雷大学就职的俄国物理学家欧仁·波德克勒特诺夫也声称自己的一项试验表明电磁力对重力有影响。

与此同时，美国一位叫做雷宁（音译）的女科学家也在多家科学杂志发表论文，阐明可以通过实验证实电磁力能够影响物体重量。经过近两年的等待，位于美国阿拉巴马州(Alabama)杭茨维尔市(Huntsville)的NASA马沙尔太空飞行中心(MarshallSpaceFlightCenter)即将迎来有希望挑战万有引力定律的仪器。

NASA的这个实验起源于1992年物理杂志C(PhysicaC)上俄国物理学家EvgenyPodkletnov的一篇论文。Podkletnov在论文中宣布他发现了“引力屏蔽”效应。他把引力减小了0.05-0.3%。虽然听起来不怎么样，但对于物理学界来说，却象爆炸了一颗炸弹。因为万有引力定律是现代科学最神圣的原理之一，对它的任何违背都是对现代理论框架的威胁。如果Podkletnov的实验被证实的话，那无疑会给它的发现者带来诺贝尔奖金。虽然仪器可能很复杂，但其基本的原理却是很简单的。它有一个直径6英寸、厚度转时，置于盘上的物体就开始失去重量。Podkletnov在论文中对他的发现是这样解释的：“重量的部份减小可能与低温下超导体晶体结构内存在的某种能量态有关。这种不同寻常的能量态可能改变了固体内电磁力、核力和引力间的相互作用，从而产生了引力屏蔽效应。”在Podkletnov之后，有一些物理学家重复了他的实验，有的说成功，有的说失败。还有一些物理学家从理论上论证了“引力屏蔽效应”的可行性，也有的认为不行。

虽然大多数物理学家对NASA的实验不抱乐观的态度，但NASA“突破推进物理项目”(BreakthroughPropulsionPhysicsProject)的负责人航空工程师马克·米立斯(MarcG. Millis)说，“NASA将会保持一个开放的思想。历史告诉我们，新的发现可能来自看起来最不可能的方向。”

牛顿的万有引力理论完全忽视了斥力的存在，他认为物质的质量产生了引力，这种引力不仅存在于物质与物质之间，而且普遍存在于宇宙各星体之间。万有引力是一个古老的话题，也是近代物理的一个理论基石。然而从最近的研究和观测结果来看宇宙天体是受到限制的，是由拮抗重力的神秘高能量所主宰的，并非象哈勃(Hubble)所提出的那样：大爆炸(BigBang)及以后的膨胀进而产生宇宙。

附录：

1999年，美国宇航局“火星气候探测器”号发现它距离火星比科学家预测的近了60英里左右。这不是因为时空关系出现了问题，而是因为“火星气候探测器”号开发中出现了文化冲突。美宇航局科学家在计算中采用的是公制单位(如米和厘米等)，但提供导航软件的洛克希德-马丁公司的工程师在研究中采用的却是英尺、英寸等英制单位。结果，由于运行轨道总不稳定，耗资8000万英镑建造的“火星气候探测器”号最终撞向火星表面报销。

第二章 广义相对论的时空观

1、广义相对论的引力场方程

1915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)式，得到广义坐标变换下微分的变换关系

$$dx'^\mu = \frac{\partial x'^\mu}{\partial x^\nu} dx^\nu \quad (\mu, \nu = 0, 1, 2, 3) \quad (2)$$

(2)这里采用了 Einstein

惯例。(2)的逆变换为 $dx^\nu = \frac{\partial x^\nu}{\partial x'^\mu} dx'^\mu$ ($\mu, \nu = 0, 1, 2, 3$) (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， $A'^\mu = \frac{\partial x'^\mu}{\partial x^\nu} A^\nu$ ($\mu, \nu = 0, 1, 2, 3$) (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：

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

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)

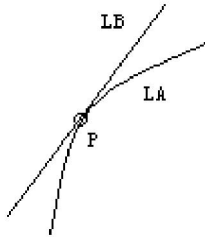
间隔的平方应与坐标微元的二次方有关 $ds^2 = -dx^\mu dx^\nu$ (13)，但左边是标量，而右边是逆变矢量，必须让坐标微分元与一个二阶协变张量缩并 $ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$ (14)

张量 $g^{\mu\nu}$ 称度规张量共十六个分量，可用矩阵表示

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

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

微分几何告诉我们 $ds_A = ds_B$ (17)

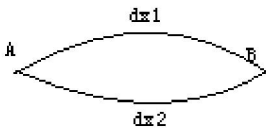
$$d\tau_A = \frac{ids_A}{c} = \frac{ids_B}{c} = d\tau_B \quad (18)$$

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 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之间的关系。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



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

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

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

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)

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

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

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

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)

$$\frac{ds}{d\lambda} = (g_{\mu\nu} \dot{x}^\mu \dot{x}^\nu)^{\frac{1}{2}} \quad \dot{x}^\mu = \frac{dx^\mu}{d\lambda}$$

其中拉格朗日函数 $L = \frac{ds}{d\lambda}$ (29)，而广义速度

$$\frac{\partial L}{\partial x^\mu} - \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}^\mu} \right) = 0 \quad \frac{d^2 x^\alpha}{d\lambda^2} + \Gamma_{\mu\nu}^\alpha \frac{dx^\mu}{d\lambda} \frac{dx^\nu}{d\lambda} = 0$$

将(29)带入拉格朗日方程 (30)，可得短程线方程 (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 $\nabla^2 \phi = 4\pi G\rho/c$ 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 these 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： $R_{\mu\nu} - g_{\mu\nu} R/2 = 8\pi G T_{\mu\nu}/c^4$ ，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，它们在引力场方程中的结合，恰恰反映了马赫原理的思想。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 $R_{\lambda\mu}$

$$g^{\nu\rho} R_{\rho\lambda\mu\nu} = R^{\nu}_{\lambda\mu\nu} \equiv R_{\lambda\mu} \quad (33), \text{ 称 Ricci 张量, 它是对称张量, 有十个独立分量。代入 (32),}$$

$$R_{\mu\nu} = -\kappa T_{\mu\nu} \quad (34 \text{ 用逆变张量写出就是 } R^{\mu\nu} = -\kappa T^{\mu\nu}) \quad (35)$$

$T_{\mu\nu}$ 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

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

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

$$\Delta v = v - v_0 = -\frac{GM_0 v_0}{c^2 R} \quad (1-5)$$

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 ，

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

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

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。

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

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。

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。

2、马赫对于经典力学的批判

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）局部的无加速度判据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头木，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。”

[参考文献]

【1】 [美] A. 佩斯：《上帝是微妙的——Einstein 的科学生平》，陈崇光 德清等译，科学技术文献出版社，1988年8月第1版，p 354。

【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。

3、广义相对性原理分析

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化纲领。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）；广义相对性化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的一组优先的惯性系。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。

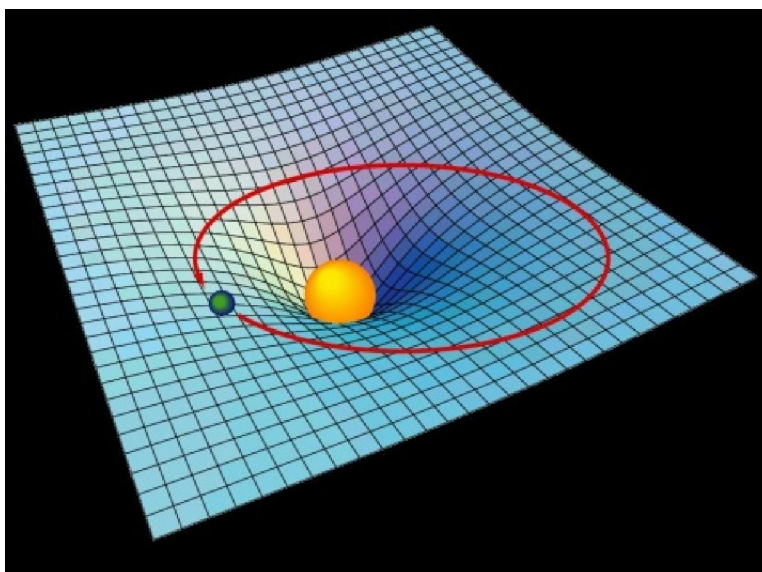
广义协变性是表达物理规律的广义相对性的一个数学理想，它要求物理规律在四维黎曼时空保持协变性。四维黎曼时空虽然不像欧几里德空间或闵可夫斯基时空那样成为牛顿力学或狭义相对论的先验几何，其中运动学是独立于动力学的；但是，四维黎曼时空却对引力场的几何化提供了定性的约束，黎曼时空中的质点运动学是与引力场的动力学紧密相关的。四维黎曼时空的引入，并不是任意的约定，而是因为非惯性运动引起的相对论效应必然导致欧氏几何和闵氏几何失效，时空出现弯曲；根据等效原理，引力场局域地等效于惯性力场，就可以证明相对论的引力场需要引入弯曲时空。在建立广义相对论的过程中，Einstein 考虑了一个转动的刚性圆盘的理想实验。他发现，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，引起的洛仑兹收缩也不同，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。事实上广义相对论也是有争议的，例如一切加速坐标系都等效，使得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 $GL(4, \mathbb{R})$ ；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 $GL(4, \mathbb{R})$ 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。

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: $ds^2 = \sum g_{ik} dx^i dx^k$, 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, $ds^2 = \sum g_{ik} dx^i dx^k$ 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：奇点疑难。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,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,它描述匀角速转动带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 f_{211} 。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J0842+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Missour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 $10\mu s$ 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处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：

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

相应的频率

$$v = v_0 \sqrt{1 - \frac{2GM}{c^2 R}}$$

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 v^2/c^2 不为零造成的。什么量会与 v^2/c^2 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

$$2\pi a = 2\pi \times 0.39 \times 1.5$$

$$v \approx 4.8 \times 10^6 \text{ 厘米/秒}$$

$$\text{周期} = 7.6 \times 10^6$$

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

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

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

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

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：

$$\delta\theta \text{ (每世纪)} = 100 \times (3 \times 10^7) / 0.24 \approx 13''$$

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 年诺贝尔物理学奖。

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 9 7 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）

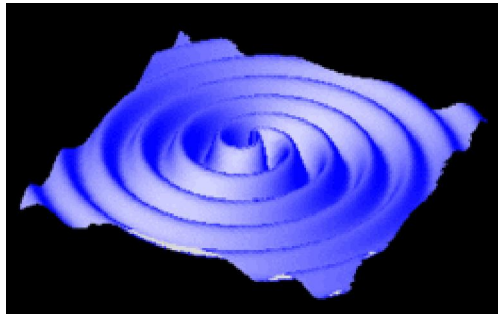
早在1916年，Einstein就根据弱场近似预言了弱引力波的存在，但最初关于引力波的理论是同坐标的选取有关的，以致引力波到底是引力场固有的性质，还是某种虚假的坐标效应，以及引力波是否从发射系统中带走能量等问题，长时间没有得到澄清。Einstein引力场方程是双曲型偏微分方程，它意味着引力场的扰动将以一个有限速度传播，这种扰动就是以光速传播的引力波。引力波方程可从Einstein引力场方程的弱场近似解导出，把弱场情况下的引力场势函数简化为一个二阶齐次偏微分方程，这个方程与电磁波方程在数学上完全相同，所以引力场的运动也是波动，其解也是普通的平面波方程，引力波是横波，速度等于光速。

爱因斯坦发现非惯性（有相互作用力）牵引运动系有时空弯曲特性，欧基里得平直时空的闵可夫斯基矢量已不适用于时空各点，就不得不放弃使用欧基里得平直时空的矢量而采用曲线坐标直接表达时空各点的位置，并找到数学中已发展了的黎曼空间微分几何、张量运算作为工具，利用黎曼时空“度规张量”的各“元”作为参量，类比由库伦(Coulomb)静电定律转变到马克斯威尔(Maxwell)方程组的变换规律，建立起相应的“引力场方程”。

也确曾由此提此过“存在引力波”的预言，但是，不久，于1936年6月1日，爱因斯坦就与内森·罗森(Nathan Rosen)投稿给美国物理学会主办的《物理评论》期刊的，题为“Do Gravitational Waves Exist? (引力波存在吗?)”的学术论文，更正，指出：

“...，引力波并不存在，尽管在初级近似下它们的存在曾被认为是确定无疑的。这表明非线性的广义相对论波动场方程可以告诉我们更多东西，或者更确切地说，对我们的限制远多于我们迄今为止所相信的。”在1936年10月普林斯顿高等研究院为爱因斯坦安排的一个学术报告会演讲结束时，无可奈何地总结道：“如果你们问我引力波是否存在，我必须回答：我不知道。但这是一个极为有趣的问题。”，既不能肯定，也未否定，他“引力波并不存在”的观点。

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

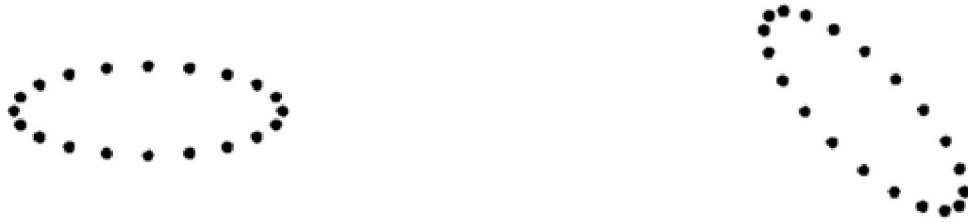
$$R_{\alpha\beta\mu\nu} = \frac{1}{2} (\partial_\mu \partial_\beta h_{\alpha\nu} - \partial_\mu \partial_\alpha h_{\beta\nu} + \partial_\nu \partial_\alpha h_{\beta\mu} - \partial_\nu \partial_\beta h_{\alpha\mu})$$

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

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的两种偏振态。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 是引力波的两种偏振态，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。

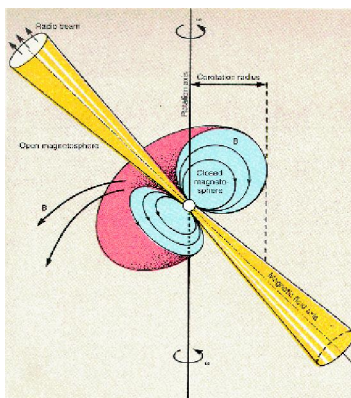
长期以来，科学家一直在构思各种实验方法以探测引力波，并通过射电脉冲双星 PSR1913+16 公转周

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的实验尚未成功。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 万亿亿亿亿（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 年开始进行引力波的实验，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极任务号），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PSR0531-21，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。

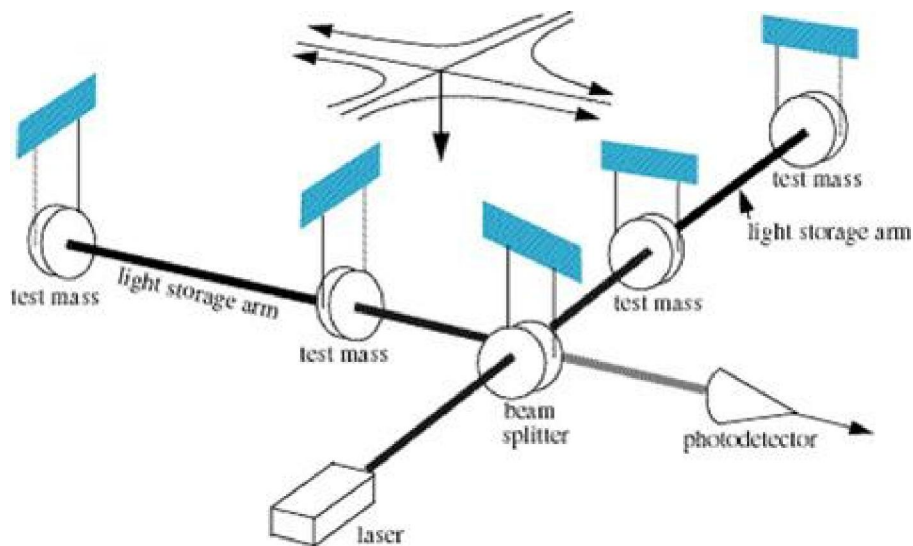
引力波是爱因斯坦在广义相对论中提出的，即物体加速运动时给宇宙时空带来的扰动。通俗地说，可以把它想象成水面上物体运动时产生的水波。但是，只有非常大的天体才会发出较容易探测的引力波，如超新星爆发或两个黑洞相撞时，而这种情况非常罕见。因此相对论提出一百多年来，其“水星进动”和“光线偏转”等重要预言被一一证实，而引力波却始终未被直接探测到。

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 探测器图示



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 4：参考消息网 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。

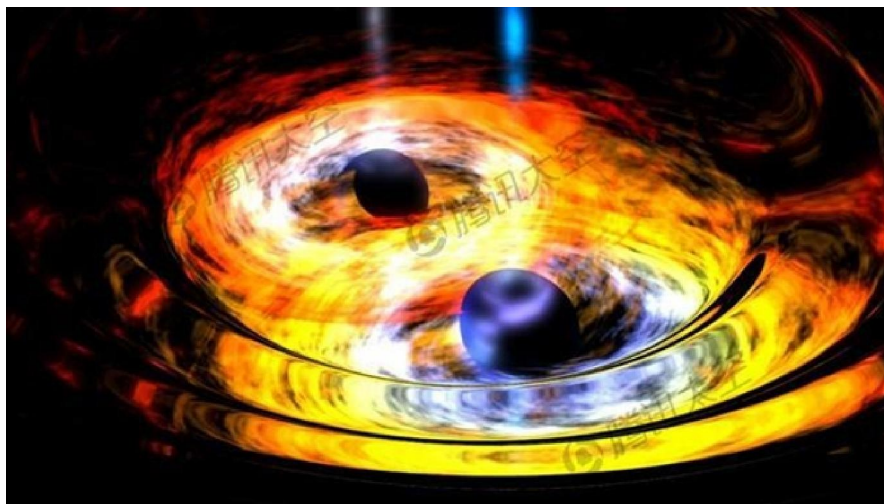
他们的研究围绕爱因斯坦的一个理论进行。该理论认为，当巨大的爆炸发生时，它会在时空中留下涟漪，这种涟漪叫做“引力波”。

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》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。

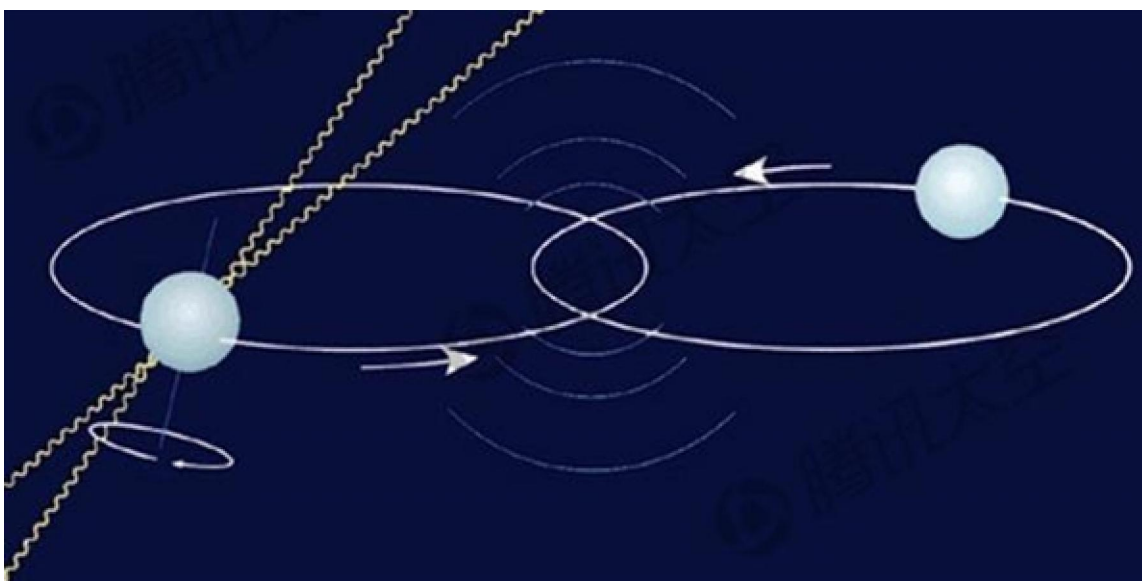
英国广播公司的一则报道说，BICEP 团队希望观察最清晰的天空——南极洲上空——来克服这个问题。但他们未能利用欧洲“普朗克”卫星收集的尘埃数据。“普朗克”卫星观测天空的频率远比其他卫星高。“普朗克”团队宣称，BICEP 团队观察的天空区域四处存在尘埃热辐射偏振。“普朗克”团队的科学家塞西尔·雷诺对英国广播公司新闻频道的记者说：“这是可能的，但我们测量中的误差相当高。”

附录5： 人类首次直接探测到引力波



两颗黑洞相互盘旋发出引力波示意图

腾讯太空 乔辉 2月11日报道



美国当地时间2月11日上午10点30分(北京时间2月11日23点30分),美国国家科学基金会(NSF)召集了来自加州理工学院、麻省理工学院以及LIGO科学合作组织的科学家在华盛顿特区国家媒体中心宣布:人类首次直接探测到了引力波!

这次探测到的引力波是由13亿光年之外的两颗黑洞在合并的最后阶段产生的。两颗黑洞的初始质量分别为29颗太阳和36颗太阳,合并成了一颗62倍太阳质量高速旋转的黑洞,亏损的质量以强大引力波的形式释放到宇宙空间,经过13亿年的漫长旅行,终于抵达了地球,被美国的“激光干涉引力波天文台”(LIGO)的两台孪生引力波探测器探测到。

什么是引力波?

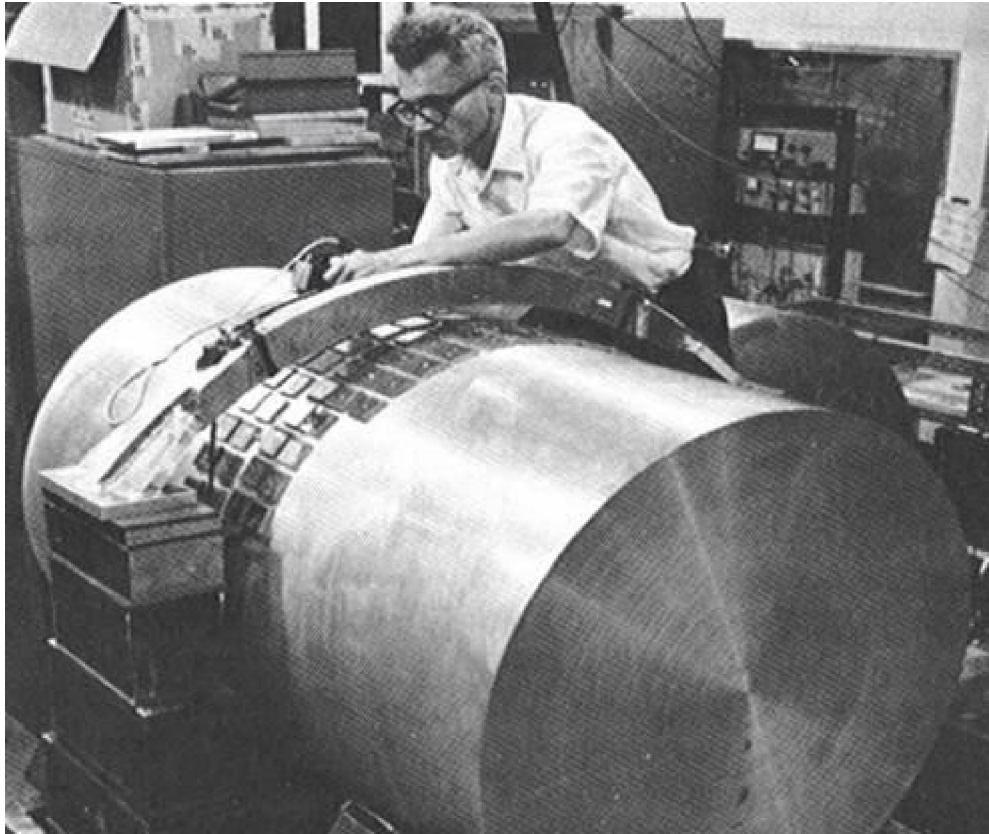
在物理学上,引力波是爱因斯坦广义相对论所预言的一种以光速传播的时空波动,如同石头丢进水里产生的波纹一样,引力波被视为宇宙中的“时空涟漪”。通常引力波的产生非常困难,地球围绕太阳以每秒30千米的速度前进,发出的引力波功率仅为200瓦,还不如家用电饭煲功率大。宇宙中大质量天体的加速、碰撞和合并等事件才可以形成强大的引力波,但能产生这种较强引力波的波源距离地球都十分遥远,传播到地球时变得非常微弱。

根据广义相对论,该双星系统会以引力波的形式损失能量,轨道周期每年缩短76.5微秒

1974年物理学家约瑟夫·泰勒(Joseph Hooton Taylor, Jr)和拉塞尔·赫尔斯(Russell Alan Hulse)发现了一颗编号为PSR B1913+16的脉冲星,他们发现该脉冲星处于双星系统中,其伴星也是一颗中子星。根据广义相对论,该双星系统会以引力波的形式损失能量,轨道周期每年缩短76.5微秒,轨道半长轴每年减少3.5米,预计大约经过3亿年后发生合并。

自1974年,泰勒和赫尔斯和对这个双星系统的轨道进行了长时间的观测,观测值和广义相对论预言的数值符合得非常好,这间接证明了引力波的存在。泰勒和赫尔斯也因这项工作于1993年荣获诺贝尔物理学奖。

共振型引力波探测器



韦伯教授在调试他的引力波探测器(1965年)

上世纪 60 年代，马里兰大学的物理学家韦伯（Joseph Weber）首先提出了一种共振型引力波探测器。该探测器由多层铝筒构成，直径 1 米，长 2 米，质量约 1000 千克，用细丝悬挂起来。当引力波经过圆柱时，圆柱会发生共振，进而可以通过安装在圆柱周围的压电传感器检测到。韦伯曾经在相距 1000 千米的两个地方同时放置了相同的探测器，只有两个探测器同时检测到相同的信号才被记录下来。1968 年，韦伯宣称他探测到了引力波，立刻引起了学界的轰动，但是后来的重复实验都一无所获。

激光干涉引力波探测器



两台孪生引力波探测器分别在华盛顿州的汉福德（左）和路易斯安那州的列文斯顿，彼此相距 3000 公里。上世纪 70 年代，加州理工学院的物理学家莱纳·魏斯（Rainer Weiss）等人意识到用激光干涉方法探测引力波的可能性。引力波的探测对仪器的灵敏度要求非常高，要能够在 1000 米的距离上感知 10^{-18} 米的变化，相当于质子直径的千分之一。直到上世纪 90 年代，如此高灵敏度所需的技术条件才逐渐趋于成熟。1991 年，麻省理工学院与加州理工学院在美国国家科学基金会（NSF）的资助下，开始联合建设“激光干涉引力波天文台”（LIGO）。LIGO 的主要部分是两个互相垂直的干涉臂，臂长均为 4000 米。在两臂交会处，从激光光源发出的光束被一分为二，分别进入互相垂直并保持超真空状态的两空心圆柱体内，然后被终端的镜面反射回原出发点，并在那里发生干涉。若有引力波通过，便会引起时空变形，一臂的长度会略为变长而另一臂的长度则略为缩短，这样就会造成光程差发生变化，因此激光干涉条纹就会发生相应的变化。两台孪生引力波探测器分别在华盛顿州的汉福德和路易斯安那州的列文斯顿，彼此相距 3000 千米。只有当两个探测器同时检测到相同的信号才有可能为引力波。LIGO 于 1999 年初步建成，2002 年开始运行。2007 年，LIGO 进行了一次升级改造，包括采用更高功率的激光器、进一步减少振动等。升级后的 LIGO 被称为“增强 LIGO”。2009 年 7 月，增强 LIGO 开始运行直到 2010 年 10 月结束。

在 2002 年到 2010 年期间，LIGO 没能探测到引力波存在的可靠证据。

2010 年，LIGO 进行了为期五年的重大升级改造，改造之后的探测器灵敏度要求提高 10 倍，被称为“先进 LIGO”。2015 年 9 月 18 日，先进 LIGO 开始试运行。据悉，本次探测到的引力波是升级前的 LIGO 于 2015 年 9 月 14 日探测到的信号。

目前主流的引力波探测器都是这种基于迈克耳孙干涉仪的原理。世界范围内，除了美国的 LIGO 引力波探测器之外，还有德国和英国合作的 GEO600、法国和意大利合作的 VIRGO、日本的 TAMA300 以及计划中的 LCGT、澳大利亚计划中的 AIGO 以及印度计划中的 LIGO-India。

地基探测器探测引力波的频率范围是 1 赫兹~ 10^4 赫兹。除了地基引力波探测器之外，科学家也在积极筹备“激光干涉太空引力波天线”（LISA/ eLISA）。理论上，eLISA 探测引力波频率范围为 10^{-5} 赫兹~1 赫兹。

值得一提的是，科学家也在利用一种叫“脉冲星计时阵列”（PTA）的射电天文方法探测更低频率（纳赫兹）的引力波。PTA 与 eLISA、LIGO 在探测频率上形成互补关系。

引力波探测的意义？

引力波天文学将是继传统电磁波天文学、宇宙线天文学和中微子天文学之后，人类认识宇宙的全新窗口，必将引发一场天文学的革命。

引力波探测除了能够检验广义相对论之外，还有助于证明其它版本的引力理论正确与否，还将推动引力量子化的研究，最终把引力融入其它三种基本相互作用，完成爱因斯坦的伟大梦想。引力波像其它的波一样，携带着能量和信息。电磁波（宇宙背景微波辐射）只能让我们看到大爆炸 38 万年之后的景象，而引力波能够让我们回望宇宙大爆炸最初瞬间，检验宇宙大爆炸理论的正确与否。

附录 6：1936 年 6 月 1 日，爱因斯坦就与内森·罗森（Nathan Rosen）投稿给美国物理学会主办的《物理评论》期刊的，题为“Do Gravitational Waves Exist?（引力波存在吗？）”的学术论文，更正指出：“…，引力波并不存在，尽管在初级近似下它们的存在曾被认为是确定无疑的。这表明非线性的广义相对论波动场方程可以告诉我们更多东西，或者更确切地说，对我们的限制远多于我们迄今为止所相信的。”。

时任《物理评论》期刊主编的约翰·泰特（John T. Tate）将这篇重要的学术论文，交由普林斯顿大学副教授霍华德·罗伯逊（Howard P. Robertson）匿名审稿提出批评意见，请予修改，而爱因斯坦则愤怒地用德文写道：“亲爱的先生，我们（罗森先生和我）投稿给您是为了发表，并没有授权您在论文发表之前让任何专家过目。我认为没必要回复您的匿名专家那些无论如何都是错误的意见。基于这种情况，我宁愿把论文发表在其它地方…”，而把该文投稿给了《富兰克林研究所学报》。

然而收到该文校样后，爱因斯坦发现原稿有错，而对原“场方程”采用圆柱坐标变换，给出了圆柱型引力波的解，并将原稿文题，改为语气上缓和、弱化了些的“关于引力波（On Gravitational Waves）”发表，但仍然保留着原文的观点。

但是并未能具体分析到原“场方程”是：放弃矢量，类比由库伦（Coulomb）静电定律转变到马克斯威尔（Maxwell）方程组的变换规律，“非线性的广义相对论引力场方程”，而导致未能具体证明：“引力波”就是因为“非线性的广义相对论引力场方程”中，混进了实际是电磁力的“更多东西”。

因而在 1936 年 10 月普林斯顿高等研究院为爱因斯坦安排的一个学术报告会演讲结束时，无可奈何地总结道：“如果你们问我引力波是否存在，我必须回答：我不知道。但这是一个极为有趣的问题。”，既不能肯定，也并未否定，他“引力波并不存在”的观点。

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，我倒会非常惊讶。”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（Eric S. 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重力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，还没有得到量化的结果”，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。

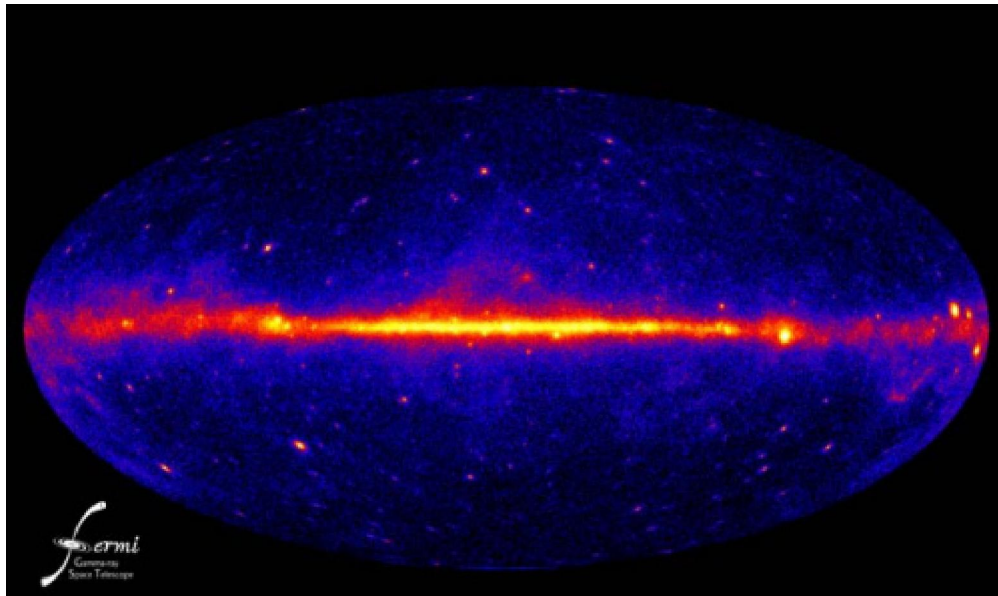
附录：1、[路透社华盛顿 2004 年 10 月 21 日电] Einstein 又一次被证明是正确的。美国航天局今天说，由各国科学家和大学研究人员组成的研究小组首次发现了地球自转时拖曳周围时空的直接证据。美国航天局说，这一发现首次直接测出并证明 Einstein 广义相对论的一个重要方面——一个旋转的天体能使组成三维空间以及四维时间的“结构”发生偏转和扭曲。美国航天局物理学家迈克尔·萨拉蒙说：“地球在旋转时确实在拖曳时空。离地球越近，扭曲的幅度就越大。”“时空的这种扭曲，也称框架拖曳，以前从未直接观测到过。”“这是首次找到真实、有力和直接的证据，说明旋转天体能够拖曳时空。”美国航天局的佩里科斯·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。它们的螺旋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。”

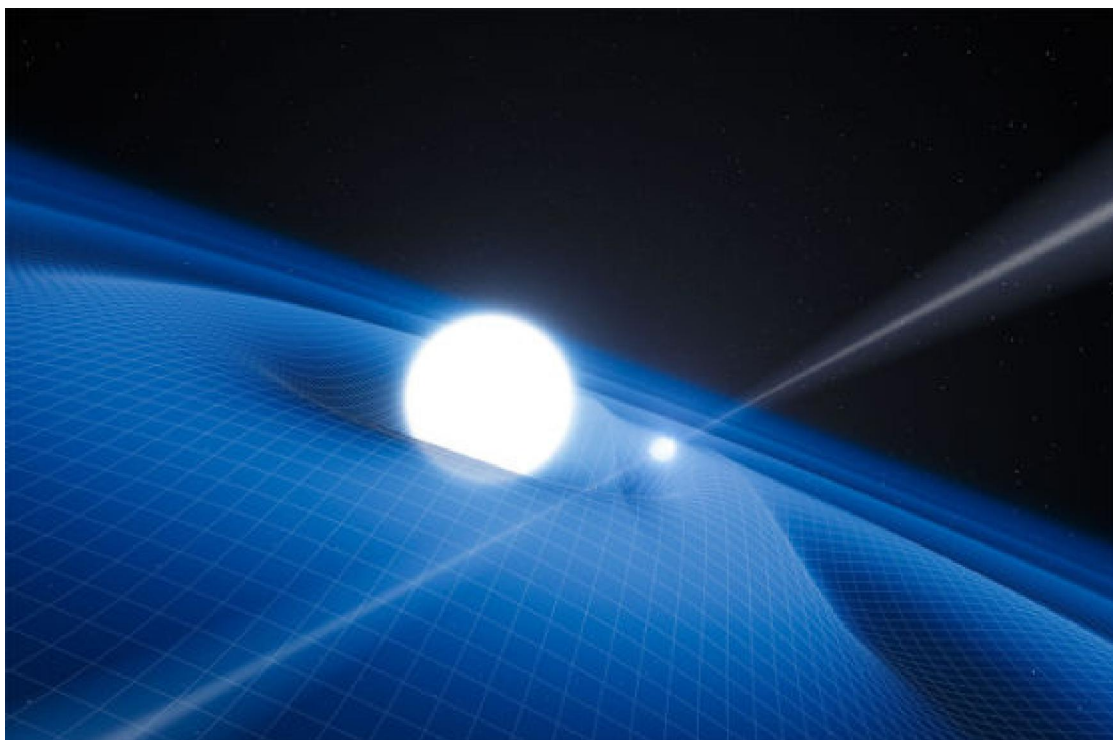
中子星是一种密度极高的恒星,它相当于把有比太阳还重的物质压进一颗城市大小的球体中,几茶杯中子星物质的重量就可以超过珠穆朗玛峰。天文学家们用这些碎裂的中子星作为天然实验室,研究物质是如何在极端的自然界压力中被紧密挤压的。然而,在开始着手解开隐藏在这些衰减中子星之下的谜之前,科学家们必须非常精准地测量出它们的直径和质量。在目前进行的两项研究中,天文学家们使用了欧洲太空总署的XMM-牛顿X射线天文台和日本/美国宇航局的朱雀X射线天文台,对3对双中子星进行了观察测量,它们分别是巨蛇座X-1, GX349+2和4U 1820-30。科学家们还研究了炙热的铁原子发出的光谱线,这些铁原子在中子星表面上方急速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

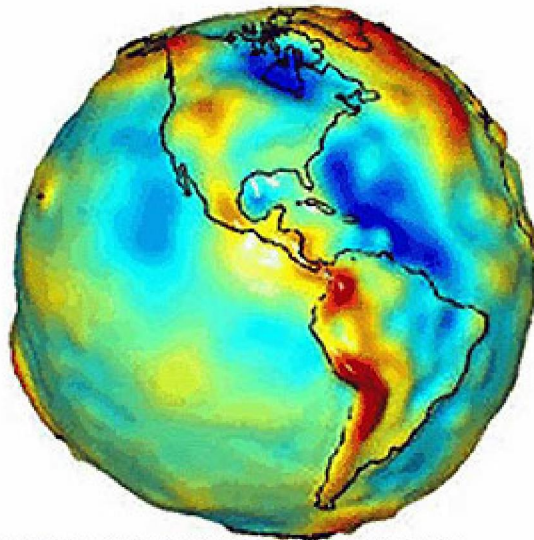
加拿大麦吉尔大学的天文学家瑞安·林奇(Ryan Lynch)表示：“我们必须非常精确的知道这一系统中中子星和白矮星成员的质量数据，因为不管是广义相对论还是其他理论，这一质量数据都是用于进行轨道衰减计算的极重要的参数。”

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/CSRU TEXAS/PLI/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

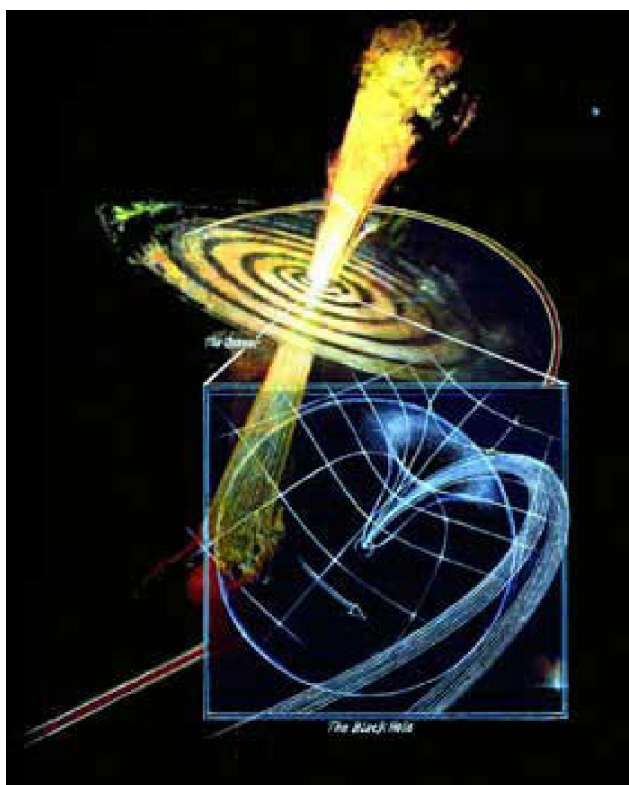
近日一项最新研究表明，早先物理学家利用爱因斯坦广义相对论所做出的预测再次被证实：在旋转行星周围，的确有时空平面扭曲现象存在。

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。

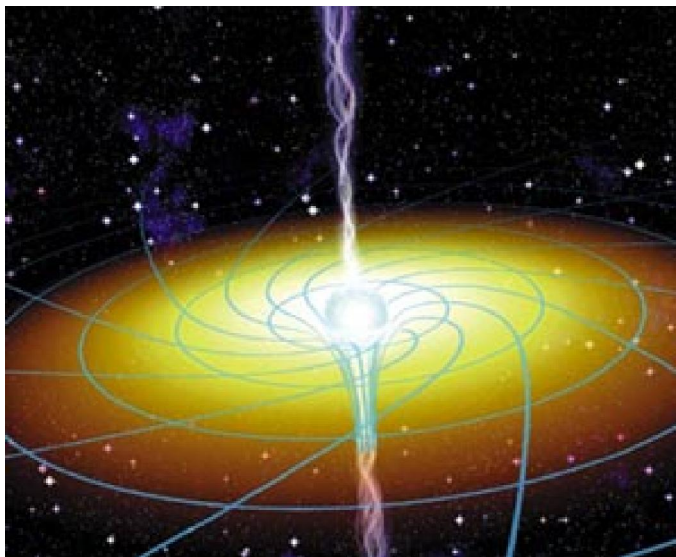
6、时间延缓的广义相对论效应

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 $240\mu\text{s}$ 。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。



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

I. 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处的位置。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。

第四章 中微子问题

1、中微子的发现的过程及其在现代物理学中的意义

(1) 中微子的提出

要追溯中微子发现的经过,还要从 19 世纪末 20 世纪初对放射性的研究谈起。当时科学家们发现,在量子世界中能量的吸收和发射是不连续的。不仅原子的光谱是不连续的,而且原子核中放出的阿尔法射线和伽马射线也是不连续的。这是由于原子核在不同能级间跃迁时释放的,是符合量子世界的规律的。奇怪的是,物质在 β 衰变过程中释放出的由电子组成的 β 射线的能谱却是连续的,而且电子只带走了它应该带走的能量的一部分,还有一部分能量失踪了。

瑞士物理学家泡利在 1931 年最先假设有种新粒子“窃走了”能量。在 1931 年,泡利在美国物理学会的一场讨论会中提出,这种粒子不是原来就存在于原子核中,而是衰变产生的。1932 年真正的中子被发现后,意大利物理学家费米将泡利的“中子”正名为“中微子”。1933 年意大利物理学家费米提出了 β 衰变的定量理论,指出自然界中除了已知的引力和电磁力以外,还有第三种相互作用——弱相互作用。 β 衰变就是核内一个中子通过弱相互作用衰变成一个电子、一个质子和一个中微子。他的理论定量地描述了 β 射线能谱连续和 β 衰变半衰期的规律, β 能谱连续之谜终于解开了。如果中微子有引力质量,那么根据 Einstein 的质能方程,必须把能量 E^* 的一部分用来产生中微子,这样留给电子的能量就比 E^* 小。泡利推算出中微子是没有质量的观点是错误的,由于中微子的引力质量非常小,因此在埃里斯的实验中发现电子也偶尔确实会有能量为 E^* 的情况。泡利的中微子假说和费米的 β 衰变理论虽然逐渐被人们接受,但终究还蒙上了一层迷雾:谁也没有见到中微子。就连泡利本人也曾说过,中微子是永远测不到的。

(2) 中微子的发现

在泡利提出中微子假说的时候,我国物理学家王淦昌正在德国柏林大学读研究生,直到回国,他还一直关心着 β 衰变和检验中微子的实验。1941 年王淦昌写了一篇题为《关于探测中微子的一个建议》的文章,发表在次年美国的《物理评论》杂志上。1942 年 6 月,该刊发表了美国物理学家艾伦根据王淦昌方案作的实验结果,证实了中微子的存在,这是当年世界物理学界的一件大事。但当时的实验不是非常成功,直到 1952 年艾伦与罗德巴克合作,才第一次用成功地完成了实验,同一年,戴维斯也实现了王淦昌的建议,并最终证明中微子不是几个而是一个。在电子俘获试验证实了中微子的存在以后,进一步的工作就是测量中微子与质量相互作用引起的反应,直接探测中微子。由于中子与物质相互作用极弱,这种实验是非常困难的。直到 1956 年,这项试验才由美国物理学家弗雷德里克·莱因斯完成。首先实验需要一个强中微子源,核反应堆就是合适的源。这是由于核燃料吸收中子后会发生裂变,分裂成碎片时又放出中子,从而使其再次裂变。裂变碎片大多是 β 放射性的,反应堆中有大量裂变碎片,因此它不仅是强大的中子源,也是一个强大的中微子源。因为中微子反应几率很小,要求用大量的靶核,莱因斯选用氢核(质子)作靶核,使用了两个装有氯化镭溶液的容器,夹在三个液体闪烁计数器中。这种闪烁液体是一种在射线下能发出荧光的液体,每来一个

射线就发出一次荧光。由于中微子与构成原子核的质子碰撞时发出的明显的频闪很有特异性，从而证实了中微子的存在。其检测机制是：1) 核反应堆里的 beta 衰变会产生中微子和反中微子（泡利的假设）；2) 一部分反中微子应该会被质子俘获而变成中子和正电子；3) 正电子会碰到电子而湮灭，产生一对伽玛光子；4) 中子会被镉核子俘获而产生光子（比正负电子对湮灭约晚几个微妙）。这样，这一理论机制应该意味着同时有三个光子的产生。所以，实验物理学家就用一种“符合电路”检测三个光子同时出现的事件。只要同时检测到了三个光子，就认为检测到了反中微子。但是其中的每一步理论预言的反应是无法单独检测的。

1978 年，斯坦福大学物理学家马丁·佩尔和同事发现了 τ 轻子，在理论上这意味着 τ 中微子的存在，因为中微子是轻子的“前辈”。但是，由于 τ 中微子几乎没有质量，又不带电，且几乎不与周围物质相互作用，因而一直难寻踪迹。1982 年，费米实验室的科学家用实验支持了 τ 中微子存在的假设。1989 年，欧洲核子研究中心科学家证实 τ 中微子是标准模型中的第三个，也是最后一个轻中微子。1980 年，前苏联的科学家曾对 b 能谱的测量推得中微子有静止质量。1998 年 6 月，日本科学家经过一段时间的观测后，也证实了中微子具有静止质量。根据电子、放射性核和子核的旋转情况，泡利推算出中微子具有自旋，是左手征的。在量子力学中，场的能量集中在波包中，electric field 的能量集中在光子中，因此引力场的能量应当集中在中微子中。光波是 electromagnetic field（即电磁质量）的传播，机械波是中微子（即引力质量）的传播。它们具有共性。

(3) 现代物理学对于中微子的研究

新华社东京 2006 年 2 月 15 日电（记者 钱铮） 日本、美国等 8 个国家的科学家 15 日正式启动“冰立方”计划，准备借助南极点附近的冰观测宇宙的高能基本粒子——中微子。共同社 15 日援引日本千叶大学副教授吉田滋的话说，“冰立方”计划将依靠 4800 个检测仪，观测中微子和冰撞击时所产生的微弱的光，目前安装完成的 540 个检测仪已经投入观测工作。目前，8 个国家的科学家正在南极点附近的冰层垂直向下挖洞，最深处冰面以下 2500 米。他们将间隔 17 米设置的 60 个检测仪用电缆连接起来，并把电缆下放到冰洞中深 1400 米至 2500 米的位置。科学家们打算在六角形的广阔冰层上，以 125 米的间隔设置 80 个这样的冰洞。到 2009 年，科学家们计划在南极建成体积为 1 立方公里的中微子观测站——“冰立方”。它的体积将是目前世界最大的中微子观测装置——日本的“超级神冈”体积的 2 万倍，主要观测来自北极方向穿过地球的中微子。据悉，“冰立方”计划将耗资约 300 亿日元（约合 2.57 亿美元），其中美国承担 80%，剩下的 20% 由日本、英国、德国、比利时、荷兰、瑞典和新西兰 7 个参与国分担。中微子是一种非常小的基本粒子，广泛存在于宇宙中。它可以自由穿过地球，不与任何物质发生作用，因而难以捕捉和探测，被称为宇宙间的“隐身人”。中微子研究是当前物理学研究的一大热点，美国科学家雷蒙德·戴维斯和日本科学家小柴昌俊因为在探测宇宙中微子方面取得的成就而获得 2002 年诺贝尔物理学奖。

据新华社北京 2006 年 6 月 8 日电 中国和美国科学家将联手在大亚湾核电站进行大规模的粒子物理实验。这项耗资近 5000 万美元的实验是中美两国迄今最大的基础科学研究合作项目。主持这个项目的中国科学院院士、中国科学院高能物理研究所所长陈和生 8 日在接受新华社记者专访时说：“国际合作组将在大亚湾核电站附近设置 3 个探测器进行中微子测量。”他说：“我们将在 2008 年建成隧道，2009 年安装探测器，2010 年开始获取数据。”根据计划，中方将投入 1.5 亿元人民币（约合 1870 万美元），负责基本建设和建造一半探测器；美方投入 2500 万至 3000 万美元，负责建造另一半探测器。陈和生说：“比较国际上目前进行的太阳、大气、反应堆和加速器这几类中微子实验，反应堆中微子实验最有可能获得突破性成果。”大亚湾与岭澳核电站群目前共有 4 个反应堆。大亚湾核电站紧邻高山，可以提供中微子实验必需的宇宙线屏蔽，这是一个巨大的优势。世界上其他可用于反应堆中微子实验的核电站附近都缺乏足够的岩石覆盖。陈和生说：“我们已完成大量深入研究和计算，并多次实地考察，提出利用大亚湾反应堆群精确测量中微子混合角 θ_{13} 的设想。这是目前世界上精度最高的实验方案。”中微子探测器为半径 2.6 米、高 5 米的圆柱体，每个重约 100 吨，里面分隔成 3 层同心圆柱。3 个探测器将分别放置在山腹内，最近的距核电站 360 米，最远的 2000 米。一条隧道从地面进入山腹，连接 3 个放置探测器的地下实验室。联合投资这个重要实验并将参加合作研究的机构包括美国的布鲁克黑文国家实验室、劳伦斯·伯克利国家实验室。陈和生说：“大亚湾反应堆中微子实验投入相对较少而物理意义重大，有可能获得重大创新成果，这是中国基础科学研究领域的一次重大机遇。”

2、中微子的种类

中微子质量可能只有电子的百万分之一，中微子产生于太阳内的放射性衰变过程，或者宇宙射线中。中微子是基本粒子中的成员，分为三代。本世纪六七十年代，格拉肖、温伯格和萨拉姆三位科学家对基本粒子进行了分类，提出粒子物理学的框架是标准模型，即特质由 12 种基本粒子构成。它们包括 6 种夸克和 6 种

轻子。夸克和轻子的大小不足原子的十亿分之一。夸克包括下、上、奇、粲、底、顶，共6种。轻子分为三代，第一代包括电子、电子中微子；第二代包括 μ （缪子）子和 μ 中微子；第三代包括 τ 子和 τ 中微子。第一代电子中微子和第二代 μ 中微子已分别在1956年和1962年通过实验被证实存在。1982年，费米实验室的科学家用实验支持了 τ 中微子存在的假设。1989年，欧洲核子研究中心科学家证实 τ 中微子是标准模型中的第三个，也是最后一个轻中微子。

由于中微子和电子都是一种轻子，但是中微子是电中性的，核力和电磁力都对中微子不起作用，因此实际上它与任何物质只能发生引力作用与弱相互作用。电子（同时具有引力质量和电磁质量）参与弱相互作用，但弱相互作用的主角是中微子（只具有引力质量），中微子具有波粒二象性，它的能量用 $h\nu$ 表示。

1994年，两个“天才设计师”——加利福尼亚大学研究生维多里奥·保罗内和费米国家实验室物理学家拜伦·伦德伯格提出了建立“ τ 型中微子直接观测器”的构想，这一想法得到费米国家实验室的支持，并在两年后建成了观测器。

从1997年起，54位来自美国、日本、希腊和韩国的科学家在费米实验室合作探测 τ 中微子。他们用粒子加速器制造一股可能含有 τ 中微子的中微子束，然后让中微子束穿过“ τ 中微子直接观测器”内一个约1米长的铁板靶。这一铁板靶被两层感光乳剂夹着，感光乳剂类似于胶卷，能够“记录”粒子与铁原子核的相互作用。物理学家用3年时间从靶上的600多万个粒子轨迹中鉴定出了4个表征 τ 轻子存在和衰变的痕迹，这也是表明 τ 中微子存在的关键线索。 τ 轻子的痕迹被科学家拍摄下来，并在计算机中形成三维图像，其主要特征就是其轨迹里有个结，这是 τ 轻子在形成后迅速衰变的表现。据估算，几十万亿个 τ 中微子中只有1个与靶中的铁原子核相互作用并生成一个 τ 轻子。由此，科学家第一次找到了 τ 中微子存在的直接证据。

美国加利福尼亚大学物理学家菲利普·雅格尔接受记者电话采访时说，发现 τ 中微子存在的直接证据具有重要意义，它使科学家对物质基本粒子有个完整认识。雅格尔是“ τ 中微子直接观测器”的建设者之一，观测器构想提出者之一维多里奥·保罗内曾是他带的研究生。雅格尔说：“由于我们现在有能力探测到 τ 中微子，我们就能够设计出将物理学带到超越标准模型层次的实验。在不久的将来，将诞生更加激动人心的中微子物理学。”

1956年宇称不守恒发现后，为解释有中微子参与的弱相互作用过程，李政道、杨振宁提出了二分量中微子理论，其物理实质是假定自然界只存在左旋中微子与右旋反中微子而不存在右旋中微子与左旋反中微子。中微子这种永久纵向极化的性质之所以可能，是因为当时中微子质量被认为等于0，因而左旋中微子与右旋反中微子永远以光速运动，同时一切观察者所在的惯性系间的相对速度 v 都不可能超过 c 的缘故。假如中微子是亚光速的Dirac粒子，具有微小的质量 m ，设它在 S 系以速度 $u < c$ 运动，则当 S' 系观察者以速度 v 相对于 S 系运动，又设 v 平行于 u 且 $v > u$ 时，他将看到一个左旋中微子变成右旋中微子，一个右旋反中微子变成左旋反中微子，于是中微子不可能永久纵向极化的了，出现了宇称守恒的四分量中微子理论。即中微子的静止质量不为0与宇称不守恒的实验事实相矛盾。【1】证明宇称不守恒的实验—钴在低温下的 β 衰变。在【1】中倪光炯教授提出了中微子可能是超光速粒子，但这又和狭义相对论矛盾。在1957年前后，当时的确需要用光速的中微子（二分量Dirac方程）来解释宇称不守恒。后来，温伯格—萨拉姆理论建立，宇称不守恒是用左右手征旋量来体现的（电子与中微子的左右手征旋量不对称，中微子没有右手分量），不再需要“光速的中微子”，也就是中微子可以为亚光速运动，只要它没有右手分量。著名的核物理学家吴健雄教授验证了，在极化核 ^{60}Co 的 β 衰变的实验室产生的中微子确实是一个左旋中微子。在自然界和实验中探测到中微子的自旋都与其运动方向相反，即服从左手定则，而成为左旋中微子；它的反粒子应该是右旋中微子。可是经实验证明在自然界中和实验里不存在右旋中微子。这就证明了中微子具有一定的方向性。

An. Lee认为中微子就是由正负电子结合的产物，正负电子可组成为一正一负两个自绕一组的稳定结构，也可以两对正负电子组成四个一组具有相互传递缠绕的稳定结构，还可以组成为六个一组的具有立体空间相互缠绕的稳定结构。他认为中微子的正负电子学说推导出中微子应当具有基本三种类型，这和我们实际中探测到的三种中微子（电子中微子、 μ 中微子和 τ 中微子）是完全一致的。他说中微子的正负电子学说可以通过中微子相互碰撞和正负电子零速度下飘逸实验来证实。他表示，物理学世界及其研究还要以正负电子作为基点来考虑才行。按照这个思路，具有正引力质量的中微子至少应当是三种情况，即两倍电子的质量 $2m_e$ ， $4m_e$ ， $6m_e$ 。中微子的质量可能关系到宇宙平衡。宇宙中如果弥漫这种东西，而且是相对比较一致的，那么我们的宇宙就是一个均衡态的宇宙。光的传递可能是需要中微子作用的，只是我们觉察不到。笔者认为中微子是正负电子中和的引力质量部分。

现代物理学认为，粒子可分为三代轻子（ $\nu_e, e; \nu_\mu, \mu; \nu_\tau, \tau$ ）和三代夸克（ d, u, s, c, b, t ）。在一定的条件下，这些轻子和夸克之间可以互相转化。但它们之间并不是你包含我或我包含你，而似乎是你中有我，我中有你。这

反映粒子并不都是基本的。那么，在粒子世界中，是否能找出基本要素呢？根据有关事实认为：中微子（ ν_e, ν_μ, ν_τ ）和电荷是构成轻子和夸克的二大要素——中微子加上整份电荷构成了荷电轻子（ e, μ, τ ）；中微子加上分数电荷构成了夸克。中微子有三种，这是粒子分为三代的基础。这三种中微子是同一物质的三种不同状态，正如同一种物质会有固态、液态、气态一样。下面就以部分粒子的衰变为例，来作一下描述。

符号： $\xrightarrow{h_1(-a)+h_2}$ 表示 h_1 向 h_2 转移 a 份电荷；用[]括起来的表示一实物粒子或中间状态的 h 组成（中括号前的字母为该粒子的代表符号）；在{ }内的为虚粒子的 h 组成； \Rightarrow 后为符合能量守恒的衰变结果。

1、不稳定强子的衰变：其不稳定性在于，构成强子的夸克和虚胶子可以不通过转移电荷而直接组合成新的粒子。如： $\Delta^- [ddd \{u-\bar{u}\}] \Rightarrow n [ddu] + \pi^- [d\bar{u}]$ 。

2、稳定的奇异重子的衰变：一般（除 Σ^0 以外）在虚胶子（由于能量的制约，只能是 $d-\bar{d}, u-\bar{u}$ ）参与下，夸克 s 与 u 之间转移一份电荷后， s 变成了 u ， u 变成了 d ，然后重新组合：

$$\Lambda^0 [uds \{u-\bar{u}\}] \xrightarrow{s(-1)+u} [udu\bar{d}] \Rightarrow p [udu] + \pi^- [d\bar{u}], \text{或} n [ddu] + \pi^0 [u\bar{u}]$$

$$\Lambda^0 [uds \{d-\bar{d}\}] \xrightarrow{s(-1)+u} [ddu\bar{d}] \Rightarrow n [ddu] + \pi^0 [d\bar{d}]$$

$$\Sigma^+ [uus \{u-\bar{u}\}] \xrightarrow{s(-1)+u} [uus\bar{d}] \Rightarrow p [uud] + \pi^0 [u\bar{u}]$$

$$\Sigma^+ [uus \{d-\bar{d}\}] \xrightarrow{s(-1)+u} [udu\bar{d}] \Rightarrow p [uud] + \pi^0 [d\bar{d}], \text{或} n [duu] + \pi^+ [u\bar{d}]$$

$$\Sigma^- [dds \{u-\bar{u}\}] \xrightarrow{s(-1)+u} [ddu\bar{d}] \Rightarrow n [ddu] + \pi^- [d\bar{u}]$$

$$\Xi^0 [uss \{u-\bar{u}\}] \xrightarrow{s(-1)+u} [usud\bar{u}] \Rightarrow \Lambda [sud] + \pi^0 [u\bar{u}]$$

$$\Xi^0 [uss \{d-\bar{d}\}] \xrightarrow{s(-1)+u} [dusd\bar{d}] \Rightarrow \Lambda [dus] + \pi^0 [d\bar{d}]$$

$$\Xi^- [dss \{u-\bar{u}\}] \xrightarrow{s(-1)+u} [dsud\bar{u}] \Rightarrow \Lambda [dsu] + \pi^- [d\bar{u}]$$

$$\Omega^0 [sss \{u-\bar{u}\}] \xrightarrow{s(-1)+u} [ssudu] \Rightarrow \Lambda [dsu] + \bar{K}^0 [s\bar{u}], \text{或} \Xi^0 [ssu] + \pi^- [d\bar{u}], \text{或} \Xi^- [dss] + \pi^0 [u\bar{u}]$$

至于 Σ^0 的衰变，是其内部的胶子衰变成了光子（这是一种电磁相互作用，速度较快）：

$$\Sigma^0 [uds \{d-\bar{d}\}] \xrightarrow{d(-\frac{2}{3})+\bar{d}} [uds \{e-\bar{e}\}] \Rightarrow \Lambda [uds] + \gamma [e\bar{e}]$$

一些非主要的衰变方式，全是 h 间转移分数电荷的结果，如：

$$\Sigma^- [dds \{u-\bar{u}\}] \xrightarrow{d(-\frac{2}{3})+\bar{d}} [dde(\mu)\bar{\nu}_\mu(\bar{\nu}_\mu)u] \Rightarrow n [ddu] + e + \bar{\nu}_e, \text{或} n [ddu] + \mu + \bar{\nu}_\mu$$

3、中子和荷电轻子的衰变：由于能量的制约，中子同荷电轻子一样，在虚光子的参与下进行衰变：

$$n [udd] \{e-\bar{e}\} \xrightarrow{d(-\frac{2}{3})+\bar{d}} p [udu] + \bar{\nu}_e + e$$

$$\mu \{e-\bar{e}\} \xrightarrow{\mu(-1)+\bar{e}} \nu_\mu + \bar{\nu}_e + e$$

τ 的衰变方式同 μ 类似，但因其能量巨大，还可激发出强子来。

参考文献:

【1】《物理》第31卷4期255页2002年北京

3、中微子的质量问题

《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：65。中微子有无静止质量？66。有无中微子振荡？

在微观世界中，中微子一直是一个无所不在、而又不可捉摸的过客。中微子产生的途径很多，如恒星内部的核反应，超新星的爆发，宇宙射线与地球大气层的撞击，以至于地球上岩石等各种物质的衰变等。尽管大多数科学家承认它可能是构成我们所在宇宙中最常见的粒子之一，但由于它穿透力极强，而且几乎不与其他物质发生相互作用，因此它是基本粒子中人类所知最少的一种。被誉为中微子之父的泡利与费密曾假设它没有静止质量。根据物理学的传统理论，稳定、不带电的基本粒子中微子的静止质量应为零，然而美国科学家的研究从另一个角度有可能推翻这一结论。

据俄《知识就是力量》月刊报道，美国斯坦福大学的科研人员对最近24年来人类探测中微子所获数据进行分析后发现，从太阳飞向地球的中微子流运动具有某种周期性，每28天为一个循环，这几乎与太阳绕自己的轴心自转的周期相重合。美国科学家认为，这种周期性是由于太阳不均等的磁场作用造成的。磁场强度的变化，使部分中微子流严重偏移，致使探测器难以捕捉到。对此似可得出结论：中微子流有着自己的磁矩，既然有磁矩，就应有静止质量。在上世纪90年代以前，国际主流科学家们也认为中微子是没有质量的，因为这是标准模型的需要。然而近年包括我国在内的世界上的中微子振荡实验、观察，都探知到中微子有质量。令人惊讶的是，1938年意大利理论物理学家埃托雷·马约拉纳(Ettore Majorana)早就认为中微子有质量，并提出马约拉纳方程式。

1998年6月12日，东京大学的一个国际研究小组在美国《科学》杂志上发表报告说，他们利用一个巨大的地下水槽，证实了中微子有静止质量。这一论断在世界科学界引起广泛关注。由日、美、韩三国科学家组成的科研小组日前在此间宣布，他们在实验中观测到了250公里远处的质子加速器发出的中微子。这是人类首次在如此远的距离内观测到人造粒子。

日本文部省的高能加速器机构位于筑波科学城，东京大学宇宙射线研究所设在岐阜县的神冈，两地相距250公里。6月19日下午，科学家在高能加速器研究机构使用质子加速器向宇宙射线研究所的神冈地下检测槽发射中微子，并通过检测槽检测到了中微子。由于这批中微子来自筑波科学城方向，并且是在发射之后大约0.00083秒时检测到的，科学家因而断定，它们就是质子加速器发出的那批中微子。

这项实验是为了证实中微子有静止质量而设计的。1998年6月，日、美两国科学家宣布探测到中微子有静止质量。如果这一点被证实，现有的理论物理体系将受到巨大冲击。为了验证这一发现，科学家计划人工发射和接收中微子，观察中微子经过远距离传输后发生的变化，推断中微子是否有质量。

为了研究宇宙中的中微子，各种新型望远镜不断出现并投入使用。今年9月，一台专门研究中微子的特殊望远镜在地中海中开始安装。它不像普通望远镜那样直指天空，而是“反其道行之”面朝海底。这台“面海观天”的中微子望远镜名为“安塔雷斯”。它由英国、法国、俄罗斯、西班牙和荷兰等国科学家联合设计，安装地点位于距法国马赛东南海岸40公里处。望远镜在海面2.4公里以下，由13根垂入海中的缆状物组成，每个缆状物上将带有20个足球大小的探测器。2000年7月，日本文部省高能加速器研究机构发表实验结果称，由日本、美国和韩国科学家组成的实验小组在迄今的实验中，确认“中微子有质量”的概率已经达到95%。不过要最后作出“中微子有质量”的科学结论，需要99%以上的概率。CERN等一些其它研究机构也在筹划测中微子质量的试验。

参与该国际合作项目的英国设菲尔德大学科研人员介绍说，来自宇宙的中微子能畅行无阻地穿越包括地球在内的很多物体。虽然中微子无法直接探测到，但它在穿透地球过程中，偶尔会产生少量的高能量缪子中微子，并发散出特殊辐射光——切伦科夫光。“安塔雷斯”主要通过高灵敏度探测器检测该辐射来研究中微子。由于“安塔雷斯”面向海底，绝大部分宇宙射线会被厚厚的地层屏蔽掉，大大减少了观测过程中的本底噪音。专家说，这台望远镜的安装有可能为更深入揭示伽马射线爆发以及暗物质等宇宙奥秘提供重要线索。北京大学的刘川教授认为：中微子有质量（假设中微子振荡实验正确），它的速度小于光速。所谓“中微子运动速度等于光速”，是指1950年之前的说法，那时以为中微子没有静止质量。现代科技界认为中微子总质量上限确定到不及10亿分之一的氢原子质量，使暗物质的一种可能形式，它们在全部分暗物质中最多只占有1/8的份额。【1】

因发现第二代 μ 中微子而与人分享 1988 年诺贝尔物理学奖的莱昂·莱德曼评论说，找到 τ 中微子的直接证据是非常重要的且等待已久的结果。说其重要，是因为科学家将据此进一步研究三代中微子之间的关系；说等待已久，是因为 25 年前 τ 轻子就已经被发现，现在“另一个鞋子终于掉了下来”。 τ 轻子的发现者、荣获 1995 年诺贝尔物理学奖的马丁·佩尔说，证实 τ 中微子的存在具有里程碑的意义。在找到粒子家庭全部成员之前，粒子间相互转换的研究难以展开，现在这一障碍已被扫除。 τ 中微子的发现会给现实生活带来什么改变？这还是科学家们无法预言的。不过，正如居里夫人 100 年前发现原子核裂变时没有人知道这一发现会有什么用处、而 40 年后人们用它制造原子弹和发电一样， τ 中微子的发现也将给科学的发展带来深远影响。

美国能源部 LANL 实验室的液体闪烁体中微子探测器、加拿大 Sudbury 中微子观测站和日本超级神冈加速器实验的最新结果给出有力的证据：中微子以各种形式“振荡”，因此必定会具有质量。虽然质量很小，但宇宙中大量的中微子加起来可使总的质量达到相当高。美国费米国家实验室新的加速器实验 MiniBooNE 和 MINOS 将研究中微子震荡和中微子质量。

宇宙告诉我们，当今宇宙中一定存在着大量的中微子。物理学家们最近发现越来越多的证据，表明它们具有小质量。甚至可能有超越现行标准模型 3 个以外更多类型的中微子。

加拿大 Sudbury 中微子观测站 (SNO) 发布的第一批结果和日本超级神冈的实验结果，对丢失的太阳中微子进行的证据越来越多。这两项实验均系国际合作，得到美国能源部的大力支持。

称为 MINOS 的长基线实验，利用费米实验室中微子主注入器工程建造的设备，寻找具有极小质量的中微子存在的证据。费米实验室新的主注入器作为 MINOS 实验的中微子源，实验的长基线从这里开始，探测器放在 735 公里之外的明尼苏达州北部原 Soudan 铁矿里。(Soudan 矿中现有 1000 吨探测器)。

参加 MINOS 实验的科学家们对从费米实验室出来的中微子和到达 Soudan 铁矿中的探测器的中微子的特性进行测量和比较。这两个探测器中中微子相互作用的特点之别提供不同类型的中微子振荡的证据，因此得出中微子质量。

1995 年美国 LANL 的液体闪烁体中微子探测器 (LSND) 发现了缪子中微子变成电子中微子的证据。费米国家实验室有一台探测器称为 MiniBooNE，用来研究这一现象。因为更强的中微子束流，它比 LSND 获得更多的数据。MiniBooNE 的中微子束流由比 LSND 束流短约 10000 倍强脉冲组成。这大大提高了实验将来自自然产生宇宙线相互作用的束流感应中微子事例分开的能力。

现行的理论假设中微子根本就没有质量。中微子具有质量要求对理论进行修改，它起码有助于解释构成 90% 以上宇宙的暗物质。中微子质量以及其他所有轻子和夸克的来源，被认为是由因黑格斯玻色子传递的“黑格斯潮引起的独特相互作用。这个玻色子是费米实验室 TeV 能级加速器大力寻找的目标。如果找不到，可能会在 CERN 的 LHC 上找到。能形成重元素的核反应也能形成大量奇异的亚原子群，即中微子。它们属于轻子粒子群，比如常见的电子， μ 介子和 τ 介子。因为中微子几乎不与普通物质发生相互作用，所以可以通过它们直接看到星体中心，要做到这一点，我们必须能够捕捉到它们并对它们进行研究，物理学家正在朝这个方向努力。

不久前，物理学家还认为中微子没有质量，但最近的进展表明，这些粒子可能也有些许质量，任何这方面的证据也可以作为理论依据，找出 4 种自然力量中的 3 种——电磁、强力和弱力——的共性，即使很小的重量也可以叠加，因为大爆炸留下了大量的中微子。

参考文献：

【1】《物理》第 31 卷 11 期 759 页 2002 年 北京

4、太阳中微子失踪之谜

《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：64。太阳中微子之谜能否解决？

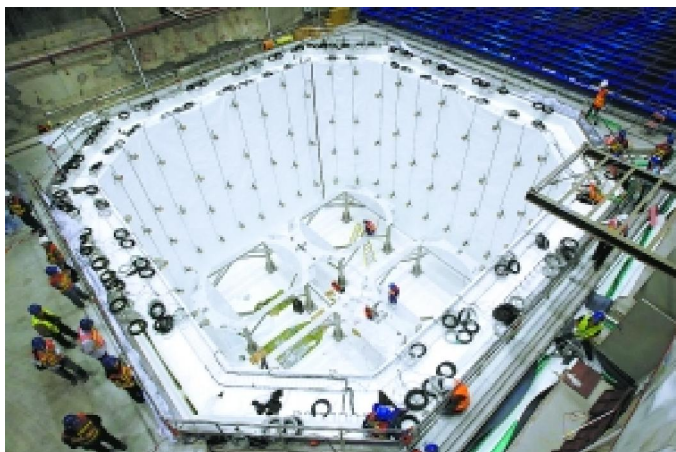
从 1993 年及 1995 年开始运行的水切连科夫探测器和镓探测器，长期对太阳中微子的测量证明，太阳中微子到达地球后确实有很大一部分失踪了。后来科学家又发现，就在大气圈上空产生的中微子，在运行过程中同样有很大一部分失踪了，大多数科学家都同意“味震荡”假说：它是说，中微子有少许静质量，质量本征态与弱作用本征态不简并，不同味道中微子在运行中就允许发生“味震荡”，就是说电子型中微子在运行过程中变成了难以探测的其他“味道”的中微子，为了证明这一假说的可靠性，科学家又把测量的对象对准了人工源（反应堆）中微子，虽然各有说词，但问题的严重性也终于浮出了水面：“震荡假说”如果成立，

就会同时存在 5 个佐证：（1）找到可重复检测的双 β 衰变的观察依据；（2）中微子震荡的运行距离（L）具有线性数学结构；（3）高能端的观察事例数大于低能端；（4）可测量的 μ 中微子数量与太阳运动方向相统一；（5）不出现中微子质量平方值为负的事例。然而事实恰好相反，由铃木厚人领导的“卡姆兰德”实验组提供了（2）（3）二项相反的测量依据，其它实验提供了（4）（5）二项相反的依据，第（1）项还没有找到。这就是目前的进展状况，实验能提供的都是证伪“震荡假说”的依据。简单的中微子失踪案向现有的科学理论提出了严重的挑战。

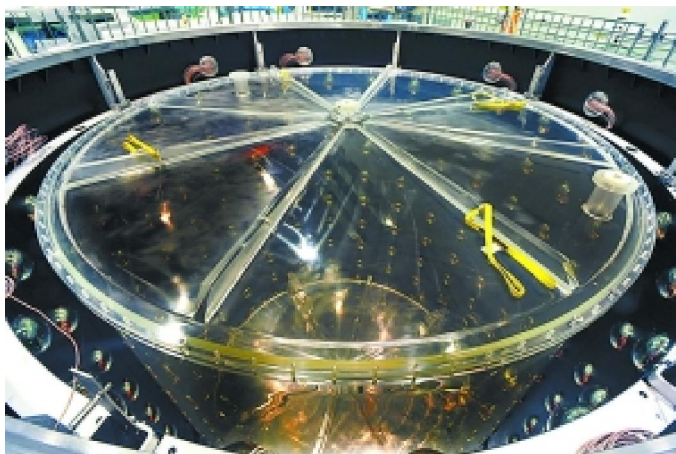
30 年前，科学家计算出了从太阳流失的电子中微子的数量，但实际观测到的中微子的数量小于计算值。2001 年加拿大萨德伯里中微子观测站的科学家证实了早先一些实验得出的假设：中微子事实上并没有失踪，只是在离开太阳后转化成了 τ 中微子和 μ 中微子，因此躲过了科学家的探测。笔者认为这三种中微子可以互相转化，说明它们都是只具有引力质量。中微子质量 m_0 的实验测定值是根据相对论公式： $E^2=P^2c^2+m_0^2c^4$ 来定义的，1966 年全球平均的实验数据显示 $m^2(\nu_e)=-27\pm 20eV^2$ 。后来实验上进一步控制 β 粒子能量在源中的损失，把 1991—1995 年间被认为不可靠的 9 个实验数据排除掉，在 2000 年的粒子表中给出新的全球平均值， $m^2(\nu_e)=-2.5\pm 3.3eV^2$ ， $m^2(\nu_\mu)=-0.016\pm 0.023eV^2$ ，式中的负号说明中微子的引力质量为负数，实验中观察到的只是其数值，没有考虑到其量纲。现代物理学认为：由于中微子比其它物质粒子的总数多十几亿倍，因此整个宇宙中中微子质量的总和大大超过其它物质的质量总和，占宇宙总质量的 99% 以上，中微子可能是控制宇宙运动变化的关键性因素。根据引力场的本质是相对 space-time 的观点，谈论中微子的总质量是没有意义的。

附录：据新华社北京 2012 年 3 月 8 日电（记者 吴晶晶 许林贵）

大亚湾首次发现新中微子振荡 反物质消失之谜有望破解



科研人员在广东大亚湾反应堆 3 号中微子实验厅内紧张忙碌（资料图片）



大亚湾中微子实验在洁净间中组装的中心探测器。新华社发



通往大亚湾中微子实验厅的隧道

(1)新闻背景：3月8日下午，大亚湾反应堆中微子实验国际合作组中方发言人、中国科学院高能物理研究所所长王贻芳研究员向全世界宣布：大亚湾实验以5.2倍标准偏差的置信度(>99.9999%)测得中微子混合角 θ_{13} 不为零，首次实验发现了中微子的第三种振荡模式。由于这一方案具有独特的地理优势和独到的设计，得到了国际上的广泛支持，目前汇集了来自中国大陆、美国、俄罗斯、捷克、中国香港和中国台湾等6个国家和地区的200多名科学家共同参与。据介绍，大亚湾实验是一个中微子“消失”的实验，它通过分布在三个实验大厅的8个全同的探测器来获取数据。每个探测器为直径5米、高5米的圆柱形，装满透明的液体闪烁体，总重110吨。周围紧邻的核反应堆产生海量的电子反中微子，近点实验大厅中的探测器将会测量这些中微子的初始通量，而远点实验大厅的探测器将负责寻找预期中的通量减少。在2011年12月24日至2012年2月17日的实验中，科研人员使用了6个中微子探测器，完成了实验数据的获取、质量检查、刻度、修正和数据分析。结果表明中微子第三种振荡几率为9.2%，误差为1.7%，从而首次发现了这种新的中微子振荡模式。这项来自中国的物理学发现在世界上引起了轰动，在不到一天的时间里，即有1000多条海外网络报道和评论，掀起了一股中微子的热潮。

(2)“宇称不守恒”原来是中微子“捣鬼”——1956年华人物理学家李政道和杨振宁提出了宇称不守恒定律。宇称就是左右方向性。在微观世界中，“左”和“右”是不对称的。比方说，一辆汽车沿着公路向右方行驶。如果对着镜子做一辆一模一样的车，这样所有零部件都反过来设计，方向盘换到右边，发动机也左右对称地反过来，然后向左开，那会怎么样？在日常生活中，当然没有任何问题，反过来的汽车也会像在镜子里看第一辆车一样，开得好好的。可是到了微观世界，这辆车居然开不动了，因为它违背了基本的物理规律，这个规律就是宇称不守恒。这么匪夷所思的规律，当然引起了人们的极大兴趣和怀疑。华人女物理学家吴健雄因此马上改变了去欧洲休假的计划，夜以继日地进行实验，花了几个月时间，终于清楚地证明，钴60同位素的衰变过程，确实是左右不对称的。李政道和杨振宁也因此获得了1957年的诺贝尔物理学奖，这是诺贝尔奖史上获奖最快的一次。微观世界的左右为什么会不对称呢？就在李杨提出宇称不守恒的同一年，两个美国人柯万和雷因斯找到了中微子。后来人们才渐渐意识到，这实际上是中微子捣的鬼。1930年，奥地利物理学家泡利为了解释贝塔衰变中能量似乎不守恒，提出可能存在一种看不见摸不着的粒子，是它偷走了能量。这种粒子不带电，没有质量，几乎不与物质发生相互作用，因此捕捉不到它。泡利自己说：天啊！我预言了一种永远找不到的粒子。人们想尽了办法，终于在26年后，柯万和雷因斯在反应堆附近第一次找到了中微子存在的实验证据。雷因斯获得了1995年的诺贝尔奖。中微子极难探测，曾被人称为“鬼粒子”，它却像一只看不见的手，控制着微观世界的基本规律，甚至是宇宙的起源和演化。它具有很多奇怪的性质，宇称不守恒，本质上是因为不存在右旋的中微子，只有左旋的中微子。既然右旋的中微子都不存在，如果一个反应涉及到了中微子，当然就不能发生它的左右镜像过程了。

(3)“中微子消失”缘由是中微子振荡，第三种模式却一直没找到——在找到中微子后，人们发现总共有三种不同的中微子，分别是电子中微子、缪中微子和陶中微子。很多物理过程都能产生中微子，比如太阳能够发光，是因为太阳内发生着核聚变，这些核聚变同时也产生着中微子。太阳中微子跟太阳光一样，向四面八方飞出，地球上指甲盖大小的地方，每秒钟就会落下600亿个太阳中微子。反应堆发电的能量来自核裂变，它同样产生大量的中微子，大亚湾核电站的6个反应堆，每秒钟产生35万亿亿个中微子。宇宙起源于

137 亿年前的一次大爆炸，在第一秒钟就产生了无穷多的中微子，它们一直存留到现在，地球上指甲盖大小的地方，每秒钟就会落下 10 万个宇宙大爆炸残留的中微子。当柯万和雷因斯在反应堆边寻找中微子的时候，另一个美国科学家戴维斯开始在地下 1500 米的一个废旧金矿中寻找来自太阳的中微子。去这么深的地底下，是为了屏蔽地面上宇宙线对实验的干扰。由于太阳离我们太远，所以到达探测器的中微子远不如在反应堆附近的多，戴维斯比雷因斯晚了很多才看到太阳中微子。不过他发现了一个奇怪的现象，太阳中微子的数量只有预期的三分之一，这个困扰科学家几十年的问题，称为“太阳中微子失踪之谜”。在宇宙中，有很多能量非常高的宇宙射线，它们进入地球的大气层后，会打出中微子，称为大气中微子。从上世纪 80 年代起，人们就发现大气中微子似乎没有我们预计的多，称为“大气中微子反常”。1998 年，日本的超级神冈实验以确凿的证据，证明中微子存在振荡现象，一种中微子，能够在飞行中变成另一种中微子，然后再变回来。太阳中微子和大气中微子的丢失，都是因为它们变成了其它种类的中微子。更多的实验也证实了这个发现。戴维斯和超级神冈的领导者小柴昌俊获得了 2002 年的诺贝尔奖。根据中微子振荡理论，大气中微子振荡和太阳中微子振荡，对应着两个中微子混合角 23 和 12。还应该存在第三种振荡模式，对应中微子混合角 13。这个振荡小得多，因此一直没有找到，但是它关系到中微子物理的未来发展，也跟宇宙起源相关。因此引起了科学界的极大关注。

(4) 大亚湾场地佳精度高，引来众多合作者——从 2003 年起，中国的物理学家就开始规划利用大亚湾核电站发出的中微子来寻找这第三种振荡模式，测出 13。由于科学意义重大，世界上先后有 7 个国家的 8 个小组提出了类似的计划。大亚湾核电站的总功率世界第二，能发出更多的中微子，同时紧临高山，适合建立地下实验室，排除来自宇宙线的干扰，是世界上测量 13 的最佳场所。中科院高能所提出的实验方案，是世界上精度最高的，因此吸引了众多的国际合作者。美国也放弃自己的两个方案，转而加入大亚湾实验。经过八年的准备和建设，挖了 3 公里的隧道，建立了三个地下实验厅，研制了 8 个 110 吨重、却异常精密的中微子探测器，放置在实验厅内巨大的水池中。大亚湾实验的第一个实验厅于 2011 年 8 月 15 日开始运行。四个月后，三个厅全部投入运行，开始获取有意义的物理数据。又过了三个月，研究人员不分昼夜地分析实验数据，只用了 55 天的数据，就发现远厅的中微子数丢失了 6%，以确凿的证据证明 13 不为零。13 的大小大约在 9 度左右，虽然比另外两个混合角小得多，但却比我们最初预计的要大得多！诺贝尔奖获得者李政道、卡罗·鲁比亚教授以及十几位各大实验室负责人和粒子物理实验的发言人向中国高能物理研究所发来贺信。李政道先生说：“这是物理学上具有重要基础意义的一项重大成就！”大亚湾实验能够捷足先登，某种意义上可以说是运气不错。去年日本的大地震，不仅震出了福岛核事故，也震坏了 T2K 实验的加速器，直到今年才修好。和大亚湾同时起步的法国和韩国的实验规模只有大亚湾的四分之一，建设周期短，如果 13 这么大的话，他们是可抢先的。不过，运气只会光顾不懈拼搏的人。为了赢得国际竞争，大亚湾人从没有节假日的概念，每天两班倒工作 16 个小时。有的研究人员经常连续工作 30 多个小时。

(5) 新发现为破解“反物质消失之谜”开辟蹊径——大亚湾实验的发现让所有研究中微子的科学家都感到兴奋。即使是大亚湾的竞争对手、日本 T2K 实验的发言人小林隆和郑章基教授也来信祝贺，表示：“中微子振荡实验的光明前景令人激动不已。有了这个大的 13 混合角，若上天继续眷顾我们，或许在我们有生之年可以揭开物质层次和 CP 破坏的奥秘。”美国《科学》杂志在线版“科学此刻”栏目发表文章《中国物理学家揭露中微子测量的关键》，评价：“此次成果完成了一幅中微子的概念图”，并称“这为‘中微子与反中微子行为间不对称’的实验铺平了道路。其将可以解释为何现在的宇宙中有如此多的物质，却只有那么一丁点的反物质这一问题”。原来，宇宙起源中的物质与反物质不对称很可能与它有关。当宇宙大爆炸发生时，根据粒子物理规律，正反物质应该成对产生，是一样多的。可是我们现在的宇宙中，并没有发现大量反物质存在的迹象。那么反物质哪里去了？中微子存在振荡现象，同时意味着可能存在另一种不守恒，即电荷—宇称不守恒，就是上文说到的 CP 破坏（电荷用 C 表示，宇称用 P 表示）。李政道和杨振宁发现了宇称不守恒后，人们发现电荷和宇称乘起来一般来说却是守恒的，但也有很少的例外，称为 CP 破坏。如果存在大的 CP 破坏，那么在宇宙早期，反物质就有可能衰变得更快，导致现在的宇宙中只剩下了正物质。不过 CP 破坏很难测，现在还没有发现中微子的 CP 破坏现象。如果 13 很大，那么我们就可以设计实验，去测量 CP 破坏的大小，破解宇宙的奥秘。当然，这个发现对中微子研究的其它方方面面也有着重要影响。比如，我们将更容易确定三种中微子哪个最轻，哪个最重，也许会更难确定中微子是不是它自己的反粒子等等。

第五章 广义相对论的困难

1、Einstein 场方程的 Schwarzschild 局限

爱因斯坦晚年曾经说过：“我一直在怀疑这个公式仅仅是为了给广义相对性原理提供了一个初步的表述

而采取的权宜之计”。理由是他的这一方程只是移植了黎曼几何方程的引力的时空曲率方程，它本身不但没能将物质的时空弯曲曲率为什么单单具有椭圆坐标的度规特点，而不是圆坐标、双曲坐标之度规特点的这样问题解释清楚；而且它与狭义相对论方程的时空坐标之间也不存在任何可加推导的关联函数关系。

爱因斯坦用他的睿智建立了广义相对论，把引力场几何化(非欧伪黎曼空间)，给出时间，空间和物质的统一理论，使物理学达到“完美化”，然而这个理论却把引力作用和其它三种作用：电磁作用，弱作用，强作用作了形式完全不同的表述。并且广义相对论本身还包含了巨大的困难。当把引力场几何化后，它的(引力场)几何方程中，有独立的10个时空对称曲率张量方程，一个物态方程。要满足4个独立的在坐标条件，4个比安基恒等式，一个4-速度条件。这个欠定问题不能给出确定的时空几何和物质运动。即必须加入人为因素(如谐和参考系，物理参考系…)才能给出一些结果(如被称为严格解的 Schwarzschild 解)。广义相对论，尽管美侔绝伦，但存在多处内在的不协调的问题，这暗示着广义相对论只是一个低能有效理论。譬如：(1) 爱因斯坦引力场方程与 Yang-Mills 方程形式大不相同。Yang-Mills 方程支配了四种基本力的三种(强、弱、电)，但引力却例外；(2) 在 Yang-Mills 理论中，仿射联络与动力学变量是同一个量，都是四维电磁势，但在爱因斯坦引力理论中，仿射联络是 Christoffel 符号，而动力学变量却是度规，两者不是同一个量；(3) 在爱因斯坦引力场方程中，描述引力的物理量是曲率，可是这个曲率(局域 Lorentz 群规范场张量)的源却是能量-动量张量(局域时空平移对称性的奈特流)，搭配不当。局域时空平移对称性的变量出现了，就是度规，可是其规范场张量(挠率)却不出现。局域 Lorentz 群规范场张量出现了，但其仿射联络(自旋联络)和奈特流(自旋密度张量)却不出现。总之，对称性与守恒流不是一道出现；(4) 爱因斯坦引力场方程还有一颗赘瘤，即具有质量量纲为-2的引力常数，而 Yang-Mills 方程无有量纲的耦合系数出现，后者才令人满意；(5) 依据理论，将有巨大的量子真空零点涨落能量密度所导致的引力效应，但实际上测量到的引力效应却比理论预言小120个数量级。这些都说明爱因斯坦引力背后还隐藏着一个更基本的理论。

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

“奇点”的存在：相对论的引力场方程为：

这个方程是高度非线性的，一般不能严格求解。只有在对时空度规附加一些对称性或其他要求下，使方程大大简化，才有可能求出一些严格解。

在引力场球对称的假定下，可以得到方程的史瓦西解：

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2MG}{c^2 r}\right) c^2 dt^2 - \left(1 - \frac{2MG}{c^2 r}\right)^{-1} dr^2 - r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2)$$

度规在 $r=2MG/c^2$ 和 $r=0$ 处奇异(趋于无穷大)。但是， $r=2MG/c^2$ 处的奇异是由于坐标系带来的，可以通过适当的坐标系变换来避免。 $r=0$ 处的奇点是本质的。在奇点上，时空曲率和物质密度都趋于无穷大，时空流形达到尽头。不仅在宇宙模型中起始的奇点是这样的，在星体中引力坍缩终止的奇点也是这样，无穷大的出现显然是广义相对论的重大缺陷。

另外，对于广义相对论的数学形式复杂性，世界著名物理学家波恩说：“它的形式复杂得可怕”。

广义相对论有三点困难：

1、引力场的量子化至今尚未解决，如使引力场与描述其它相互作用的规范场的统一尚未做到。

2、彭罗斯和霍金提出的奇性定理，产生有奇性困难，如时间有开始与终结。奇性不可避免暗示着，广义相对论存在某些不自洽。难怪著名学者席阿玛(D. w. Sciama)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。”伯格曼(P. G. Bergmann)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讯号。”(《宇宙学作为科学》，1971)

3、相对论与热力学的不协调。如整个物理学、天文学中只有广义相对论中的时空是弯曲的，但它没有考虑时间方向性。量子理论同样也没有考虑时间方向性问题。热力学是物理学中唯一考虑时间方向性的一个分支，认为真实的物理过程不应该处在绝对零度，但它没有考虑时空弯曲的特性。

Einstein 和 D. 希耳伯特几乎同时在 1915 年得到了完整的引力场方程。方程左边是描述引力场的时空几何量，右边是作为引力场源的物质能量动量张量。显然，这个方程反映了 Einstein 的马赫原理的思想。谈到广义相对论时，Einstein 说：“这理论主要吸引人的地方在于逻辑上的完备性。从它推出的许多结论中，只要有一个被证明是错误的，它就必须被抛弃；要对它进行修改而不摧毁其整个结构，那似乎是不可能的。”广义相对论不可能是物理理论的终结，寻求一个包含广义相对论基本特点的更普遍的理论，是一种合乎逻辑和经验的努力。为了描述时空中某点的弯曲，Einstein 的广义相对论需要有 20 个坐标的函数来描写。“在解 Einstein 引力场方程中，存在着数学上的困难。Einstein 的引力度规张量 $g_{\mu\nu}$ 所满足的场方程是一组

10 个二阶非线性偏微分方程。除个别例子外，这种非线性偏微分方程的解在满足初始或边界条件之后的唯一性，在数学上还没有得到证明……因此，在物理学中遇到一些非线性偏微分方程只能用实验来检验接的正确性。”另外，“在 Einstein 场方程解中存在着解的不确定性。Einstein 的度规张量 $g_{\mu\nu}$ 共有 10 个分量，满足上面提到的 10 个分量场方程。但在这 10 个偏微分方程中存在着 Bianchi 恒等式的 4 个偏微分关系。就是说 $g_{\mu\nu}$ 的 10 个分量只满足 6 个独立的方程，因此它们的解是不确定的。”

Schwarzschild 时空和 Robertson-Walker 时空的度规分别为（设光速 $c=1$ ）， $-d\tau^2 = -(1+2\phi) dt^2 + (1+2\phi) [-dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2\theta d\phi^2]$ (1)

$$-d\tau^2 = -dt^2 + R^2(t) [dr^2/(1-kr^2) + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2\theta d\phi^2] \quad (2)$$

在 Schwarzschild 时空中只有球心这一个点是球对称的，而 Robertson-Walker 时空的每一个点都是球对称的。那么，诞生于 Schwarzschild 时空的 Einstein 场方程适用于 Robertson-Walker 宇宙吗？先回顾 Einstein 场方程的“推导”过程^[11]。

非相对论物质 ρ 所产生的“弱的定态场”的度规的时时分量近似为 $g_{00} = -(1+2\phi)$ ，(3)，其中牛顿势 ϕ 决定于 Poisson 方程 $\nabla^2 \phi = 4\pi G\rho$ ，而非相对论性物质的能量密度 $\rho \sim T_{00}$ ，于是得到 $\nabla^2 g_{00} = -8\pi G\rho = -8\pi G T_{00}$ ，(4)

这启发人们猜测对于一般的能动张量 $T_{\alpha\beta}$ ，弱场方程取如下形式 $G_{\alpha\beta} = -8\pi G T_{\alpha\beta}$ ，(5)， $G_{\alpha\beta}$ 是度规和它的一阶及二阶导数的线性组合，于是由等效原理推得，支配任意强度的引力场的方程即 Einstein 场方程为 $G_{\mu\nu} = -8\pi G T_{\mu\nu}$ ，(6)，其中： $G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - g_{\mu\nu} R/2$ ， $R = g^{\lambda\nu} g^{\mu\kappa} R_{\lambda\mu\nu\kappa}$ 。

$G_{\mu\nu}$ 有五个性质：1、 $G_{\mu\nu}$ 是一个张量；2、 $G_{\mu\nu}$ 由总阶数为 2 的度规的导数组成，这样引力场方程才是均匀的；3、 $T_{\mu\nu}$ 是对称的 $G_{\mu\nu}$ 也是对称的；4、 $T_{\mu\nu}$ 是守恒的 $G_{\mu\nu}$ 也是守恒的；5、对非相对论物质产生的弱的定态场， $G_{00} \approx \nabla^2 g_{00}$ 。——引进 λ 后条件 2 和 5 就难以严格满足了， λ 破坏了场方程的简谐。

在 Robertson-Walker 度规中 $g_{00}=1$ 、 $\phi=0$ ，所以有 $\nabla^2 g_{00} \equiv -2\nabla^2 \phi \equiv 0$ 。(7)

这就是“宇宙（在理论上）是动态的”的根源。在 Robertson-Walker 宇宙近似有

$$G_{00} = (\partial^2 g^{i1}/\partial t^2 + \nabla^2 g_{00}) = -8\pi G\rho \quad (8)$$

若不考虑式 (7) 所表述的 Robertson-Walker 度规的特征，而是在形式上认为根据式 (4) 可将式 (8) 的中式的 $\nabla^2 g_{00}$ 与右式的 $-8\pi G\rho$ 相抵消，则自然得到 $\partial^2 g^{i1}/\partial t^2 = 0$ ，(9)，即宇宙是静态的。 $\nabla^2 g_{00} = -8\pi G\rho$ 是在“推导”Einstein 场方程时不分明时空强行要求的，从这一点来看，并不是由 Einstein 场方程推导出 Robertson-Walker 宇宙是动态的，而是在导出 Einstein 场方程之前就已先验“假设”的。

Schwarzschild 时空是二维最大对称的，Robertson-Walker 时空是三维最大对称的，Einstein 宇宙是四维最大对称的。四维最大对称宇宙的能动张量必取四维最大对称形式——常数 $g_{\mu\nu}$ 。Einstein 引入宇宙常数 λ 之后人们才提出 Schwarzschild、Robertson-Walker 度规形式，所以不能不顾历史条件苛求 Einstein 考虑 Einstein 场方程的 Schwarzschild 局限问题。

2、宇宙常数问题的提出

Einstein 曾多次表示，他的理论绝不是完美无缺的终极理论，它们将来一定会被其他更完善的理论来代替。当年还是无名小卒的罗素将“理发师悖论”论文寄给德国著名逻辑学家特洛伯。弗理兹，此时特洛伯。弗理兹已完成他的最重要著作《算法基础》，自认可以作为整个数学的基础，准备付印。看完罗素信特洛伯。弗理兹一声长叹，便在书的最后加上一段话：“一个科学家所遇到的最不合心意的事，莫过于在他的工作即将结束时发现其基础崩溃了，我把罗素的来信发表如下。。。”

1916 年，Einstein 在分析宇宙时发现，根据广义相对论，宇宙是不平衡的，它要么是膨胀，要么是收缩。如果仅仅存在万有引力，那么星系之间应吸引而相互靠近，宇宙应是在收缩。为了使宇宙趋于平衡而完美，Einstein 给宇宙方程加了一个常数。

1917 年，Einstein 提出，宇宙间存在一种与万有引力相反的力量，使所有星系保持一定距离，这样宇宙才不会因星体间的万有引力而不断收缩。Einstein 认为这种与万有引力相反的力量是恒久不变的，称之为“宇宙常数”。Einstein 场方程为 $R_{\mu\nu} - 0.5g_{\mu\nu}R + \nu g_{\mu\nu} = -8\pi G T_{\mu\nu}$ ， ν 称为宇宙常数，由于增加了 $\nu g_{\mu\nu}$ 项，该方程在稳态、弱场非相对论近似下，回不到引力方程。因此只有假定 ν 非常小，在一般 space-time 范围与 Newton 引力势相比可以略去，上面的场方程才可能成立。故 $\nu g_{\mu\nu}$ 项，只有 space-time 在宇宙级上才有显示。

上世纪中叶人们就试图对 Einstein 场方程进行修正。Brans 和 Dicke 认为标量场和引力场同样起作用，正确的引力场方程应当是 $R^{\mu\nu} - g^{\mu\nu}R/2 = -8\pi (T_{\mu\nu}^{\mu\nu} + T_{\phi}^{\mu\nu})/\phi$ ，(1)， $\phi \sim 1/G$ 是同宇宙的质量密度相联系的标量场， $T_{\phi}^{\mu\nu}$ 是包含 ϕ 场的能动张量。另一种简洁的方式是把 Einstein 方程等价地写成 $R^{(1)}$

$$\mu\nu - \eta_{\mu\nu} R^{(1)\lambda}{}_{\lambda}/2 = -8\pi G (T_{\mu\nu} + t_{\mu\nu}) \quad , \quad (2) \quad t_{\mu\nu} \equiv (R_{\mu\nu} - g_{\mu\nu} R^{\lambda}{}_{\lambda}/2 - R^{(1)\mu\nu} + \eta_{\mu\nu} R^{(1)\lambda}{}_{\lambda}/2) \quad , \quad g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$$

$R^{(1)}$ 是 Ricci 张量中与 $h_{\mu\nu}$ 成线性的部分, 上式说明场 $h_{\mu\nu}$ 是由总的能量和动量的密度和流产生的, $t_{\mu\nu}$ 只是引力场本身的能动张量。

以上修正未考虑不同时空形式下的修正。我们曾试图寻找 Einstein 场方程的一般形式, 它普适于 Schwarzschild 时空、Robertson-Walker 时空和四维最大对称时空, 但后来发现, Einstein 场方程可能是普适的, 问题在于 ρ 。

当代著名的天体物理学家 F. Hoyle 等人强烈主张稳态的宇宙模型, 并作了许多工作。但如不从根本上找到 Newton 万有引力理论和 Einstein 广义相对论本身的缺陷, 则很难建立令人信服的稳态宇宙模型。【1】自从牛顿在《自然哲学的数学原理》中提出万有引力定律以来, 人们应用引力理论取得了许多成就, 也多次试图对该定律进行修正。如: 纽科 (Newcomer) 等人曾提出修正牛顿引力中的平方反比律【3】, Poincare 用推迟时 $t=r/c$ 修正牛顿引力的瞬时超距作用【4】, Einstein 则对应提出广义相对论——引力理论, 至今, 许多人还在从事这方面工作, 吕家鸿应用相对论理论直接对牛顿万有引力定律进行修正【5】、【6】, 国外, 也有人试图从测量万有引力常数变化中, 找出第五种基本作用力【7】, [美]R. D. Newman 还通过实验提出系数公式 $G(r) = G_{\infty} (1 + \alpha e^{-r/\lambda})$ 【8】。

$$G_{ij} - \Lambda g_{ij} = R_{ij} - \left(\frac{1}{2} R + \Lambda \right) g_{ij} = T_{ij}$$

牛顿理论导致其在宇宙论方面的困难, 按照牛顿的理论, 来自无限远处而终止于质量 m 的“力线”的数目与质量 m 成正比, 如果平均说来质量密度 ρ , 在整个宇宙中是一个常数, 则体积为 V 的球, 即包含平均质量 ρV 。因此, 穿过球面 F 进入球内的力线数目与 ρV 成正比, 对于单位球面积而言, 进入球内的力线就与 $\rho V/F$ 或 ρR 成正比, 因此, 随着球半径 R 的增长, 球面上的场强最终就变为无限大, 而这是不可能的【9】。Einstein 的广义相对论场方程如下: $G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}$ (1), $G_{\mu\nu}$ 是描述时空几何特性的 Einstein 张量。 $T_{\mu\nu}$ 是物质场的能量-动量张量。 $\Lambda g_{\mu\nu}$ 是宇宙学项, 其中 Λ 被誉为宇宙学常数。 $\Lambda g_{\mu\nu}$ 具有排斥力, 它是 Einstein 为了保持我们宇宙中引力和斥力的平衡后来才加进去的。为了便于分析, $T_{\mu\nu}$ 可分为下面三项: $T_{\mu\nu} = T^1_{\mu\nu} + T^2_{\mu\nu} + T^3_{\mu\nu}$ (2)。

按照当今的较准确的观测和理论计算, $T^1_{\mu\nu} \approx 4\% T_{\mu\nu}$, [3] $T^1_{\mu\nu}$ 代表可见的有引力的普通物质, 如星星星际间物质等。根据对许多星系旋转速度分布的观测和理论计算, $T^2_{\mu\nu} \approx 22\% T_{\mu\nu}$, [3] i. e. $T^2_{\mu\nu} \approx (5 \sim 6) T^1_{\mu\nu}$ 。 $T^2_{\mu\nu}$ 代表有引力的不可见的暗物质。 $T^3_{\mu\nu} \approx 74\% T_{\mu\nu}$, [3] 它就是除 $(T^1_{\mu\nu} + T^2_{\mu\nu})$ 之外的所谓的暗能量。暗能量与 $(T^1_{\mu\nu} + T^2_{\mu\nu})$ 一起的总量必需品能保持我们宇宙的平直性和 $(\Omega \rightarrow 1)$, 即 $\Omega = \rho_r / \rho_0 \approx 1$ 。因为 Guth 和 Linde 所提出的宇宙暴涨论的预言以及宇宙动力学均要求宇宙的平直性和 $\Omega = \rho_r / \rho_0 \approx 1$, 也就是要求宇宙的实际密度 ρ_r 必须极为接近其临界密 ρ_0 。近来, 许多较准确的观测已证实 $\Omega = 1.02 \pm 0.02$, 而较好地符合理论的要求。当然, 这里所提到的暗能量是指具有有引力暗能量。

然而, 为了解释新近对遥远的 Ia 型超新星爆发所发现的宇宙的加速膨胀, 许多科学家提出了一些新理论。他们将 $(T^3_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu})$ 合并到一起成为 $\Lambda g_{\mu\nu}$, 认为 $\Lambda g_{\mu\nu}$ 是 $(T^3_{\mu\nu} = 74\% T_{\mu\nu})$ 而具有排斥力的未知的和神秘的暗能量。新理论最著名的代表是量子场论。在该理论中, 把 $(T^1_{\mu\nu} + T^2_{\mu\nu} = 0)$ 当作真空状态, 或者说最低能量状态或量子场的基本态, [4] 也是微观宇宙的零点能。而将宇宙中 $(T^1_{\mu\nu} + T^2_{\mu\nu} \neq 0)$ 的宏观能量物质即普通物质作为量子场的激发态。对宇宙真空状态的观测到是非常符合于 $(T^1_{\mu\nu} + T^2_{\mu\nu}) = 0$, 于是, $\Lambda g_{\mu\nu}$ 正好作为具有排斥力的 $T^3_{\mu\nu}$ 的真空能。不幸的是, 按照量子场论所计算的 $\Lambda g_{\mu\nu}$ 值比在真空中实际的观测值要大 10^{120} 倍。由于这种原因, 用量子场论来解 Einstein 的广义相对论场方程就会遇到无法克服的困难。很显然, 由量子场论所计算出来的如此庞大的真空能量值是无法保持宇宙的平直性和使张量 $G_{\mu\nu}$ 在 Einstein 的广义相对论场方程中与实际的观测值相符合。量子场论似乎把真空能量当作“无限的免费午餐”。在宇宙中任何一点究竟储藏有多少真空能量和能被取出来多少? 为什么从真空中出来的负能量不和宇宙中现有的正能量发生湮灭? 如何使 74% 的具有负能的暗能量 $\Lambda g_{\mu\nu}$ 保持宇宙的真实平直性? 用量子场论解决上述问题就难免不违反宇宙的根本规律——因果律。由此可见, 任何新理论, 包括量子场论在内, 如要恰当的解释我们宇宙的加速膨胀就必不可违反宇宙的平直性, 而且要使 Ω 比当今的准确的观测值 $(\Omega = 1.02 \pm 0.02)$ 还要准确。

尽管希来哲对此困难进行修正, 但这些修正和复杂化, 既无经验根据亦无理论根据。Einstein 广义相

对论在宇宙论方面的困难，根据广义相对论可推出宇宙的空间尺度与宇宙的物质平均密度之间的简单关系

$$R^2 = \frac{2}{k\rho}$$

为：其中，在 cm. g. s 制中，得出 $2/k=1.08 \times 10^{27}$ ； ρ 是物质的平均密度， k 是与牛顿引力常数有关的一个常数【10】。实际的平均宇宙密度，无论怎么小，都不可能为零，因而 R 总是有限的，无论宇宙是准球形，还是准椭球形，按此理论，宇宙总是处于一个有限的空间，对此，Einstein 曾说“要建立一个既反对‘灭绝论’，又承认星体的速度很小的边界条件是不可能的”，按 W. 泡利的说法“宇宙空间是有界的”【2】。

1976 奥哈尼安在他的书中说：“虽然这一项的本质是宇宙学的，但这一项的起源要到量子理论而不是宇宙学中去寻找。正如我们看到的，这一项能够被解释为真空的能量密度。【11】2001 年，剑桥大学的天体物理学家迈克尔·墨菲领导的一个小组分析了几十亿光年外一些类星体的光谱，发现其中金属元素谱线有微小变化。事实上，宇宙学第一原理就已经指出，在零阶近似上，宇宙是处处相等的，所以如果没有宇宙学常数，那么任何地方都没有引力——但注意，这是零阶近似。宇宙学上，早期宇宙的微小量子涨落决定了现代宇宙在很大程度上是偏离零阶近似的。这个宇宙学的计算机模拟已经证明了这点。”

参考文献：

- 1、何香涛，乔戈，“霍伊尔和他的稳恒态宇宙”，《自然辩证法研究》，Vol. 9, No. 1, 1993. (He Xiangtao, Qiao Ge, “Sir Fred Hoyle and His Theory of Steady State Universe”, Studies in Dialectics of Nature, Vol. 9, No. 1, 1993.)
- 2、W. 泡利，《相对论》，凌德洪，周万生 译，上海科学技术出版社，1979。(W. Pauli, THEORY OF RELATIVITY, Pergamon Press, 1958.)
- 3、周培源，“论 Einstein 引力理论中坐标的物理意义及场方程的解”，中国引力与相对论天体物理讨论会，1981 年。
- 4、See, W. Deritter, Mon. Not. R. Astro. Soc. 71, 388 (1911)。
- 5、吕家鸿，“对牛顿万有引力的一种可能的修正”，《中国科技大学学报》，No. 1, 1984。
- 6、吕家鸿，“修正牛顿万有引力定律的哲学意义”，《自然辩证法研究》，Vol. 2, No. 1, 1986。
- 7 A. P. French, 汪培伟译，“宇宙间第五种基本力”，《世界科学》，No. 3, 1987 年。
- 8、R. D. Newman, Tests of the Gravitational Inverse Square Law on Laboratory Distance Scale, Presented at The third Marcel Grossman Meeting on Recent Development in General Relativity, Shanghai, China, September, 1982。
- 9、W. G. V. 罗瑟，《相对论导论》，岳曾元，关德相 译，科学出版社，1980。(W. G. V. Rosser, AN INTRODUCTION TO THE THEORY OF RELATIVITY, Butterworths, London, 1971.)
- 10、A. Einstein,《狭义与广义相对论浅说》，杨润殷 译，上海科技出版社，1979。(Albert Einstein, RELATIVITY The Special and The General Theory, Methuen & Co. Ltd. London, 1955.)
- 11、Hans C Ohanian. Gravitation and Spacetime (1976) p270。

3、现代物理学对于宇宙常数的认识

郭汉英先生说：“把可有可无的宇宙常数当作真空零点能密度——理论值比观测值大几十乃至一百二十多个量级，是典型的佯谬表现之一。但我们认为，这并不是 Einstein 的错误，更不是庞加莱的错误，进而不是黎曼的错误。这只是人们在运用 Einstein 相对论中发生的错误。惯性原理及其发展存在两条不同的途径，如何更好地实现局域化、建立相应的引力理论，考虑一个以无量纲常数 g 表征引力强度的模型是合理的。精确宇宙学已经揭示、并将进一步证实：德西特相对论更好地描述我们的宇宙。”爱因斯坦的相对论是交换信息，德西特的相对论也是交换信息，并不等于我们真实的宇宙。

1、德西特时空与大量子论

原始的德西特相对论或德西特时空，是荷兰天文学家威廉·德西特于 1917 年根据爱因斯坦方程式导出的。所以德西特应是爱因斯坦的学生。

对于全息概念来说，德西特时空比反德西特时空重要，原因就在于它拥有一个位于“无限”处的边界，这一点和我们的日常时空非常相似，也与庞加莱设计的有限而无界的宇宙模型相似。从实现全息性原理的反德西特/共形场理论说，1995 年科学家们引入的 D 膜，亦可称德西特空间；反 D 膜亦可称反德西特空间。全息论指出，我们周围的物理事件都可以完全通过定义在更低维世界的方程来说明。这是因为反德西特空间背

景与共形场论的对偶性，在规范理论-引力等价性、规范理论-弦理论等价性、体积-边界面积对应等方面都能应用，也能联系非对易几何蕴涵着一类特殊的指数正规化方案，即导致非对易几何体系的世界熵远远小于通常几何体系的世界熵。

(1) 反德西特空间，即为点、线、面内空间，是可积的，因为点、线、面内空间与点、线、面外空间交接处趋于“超零”或“零点能”零，到这里是一个可积系统，它的任何动力学都可以有一个低一维的场论来实现。也就是说，由于反德西特空间的对称性，点、线、面内空间场论中的对称性，要大于原来点、线、面外空间的洛仑兹对称性，这个比较大一些的对称群叫做共形对称群。当然这能通过改变反德西特空间内部的几何来消除这个对称性，从而使得等价的场论没有共形对称性。这可叫新共形共形。如果把马尔代森那空间看作“点外空间”，一般“点外空间”或“点内空间”也可看作类似球体大量子论空间。反德西特空间，即“点内空间”是场论中的一种特殊的极限。“点内空间”的经典引力与量子涨落效应，其弦论的计算很复杂，计算只能在一个极限下作出。例如类似反德西特空间的宇宙质量轨道圆的暴涨速率，是光速的 8.88 倍，就是在一个极限下作出的。在这类极限下，“点内空间”过渡到一个新的时空，或叫做 pp 波背景，可精确地计算宇宙弦的多个态的谱，反映到对偶的场论中，我们可获得物质族质量谱计算中一些算子的反常标度指数。

(2) 把“点内空间”与“点外空间”的大量子论相对，与 D 膜和反 D 膜的大量子论相对映射，如果再把我们处在的“点外空间”看作是一个环量子膜，“点内空间”自然是一个反环量子膜；把环量子膜和反环量子膜，与 D 膜和反 D 膜的映射，并认为它们是等价的，那么，即使“点内空间”、“线内空间”，也是多维的，并能证明“线内空间”与 D 膜和反 D 膜可垂直。D 膜和反 D 膜充满了我们的三维空间，即“点外空间”，但可能和其余空间垂直，如与“点内空间”或“线内空间”垂直。这把“黎曼切口”连通处的“喉管”拉长，就可类似演示证明。以此为基础，加上宇宙暴胀光锥模型、真空撕裂质量轨道圆的物质族质量谱计算公式，我们生存的宇宙是可以精确计算的。这是把宇宙人择原理转换为宇宙人测原理的双向计算。

2、从德西特大量子论到 D 膜与反 D 膜

因为最近几年引力理论的另一重大进展，是阿卡尼-海姆德等人及兰德尔和森德拉姆分别于 1998 年和 1999 年提出的膜 (brane) 世界绘景。在这一图像里，物理时空是高维的，宇宙是一个嵌入在这个高维时空中的三维膜。标准模型中的物质被禁闭在这一膜上，而引力可以在整个时空中传播。这一膜世界绘景对高能粒子物理、引力理论、宇宙学等具有深刻的影响，也是近几年引力和宇宙学界极其活跃的研究领域。D 膜，D 是 Dirichlet (狄利克雷) 的第一个字母，D 膜是超弦/M 理论组成部分，黏附其上的弦坐标满足垂直膜的狄利克雷边界条件。

D 膜的无能涨落，由超对称规范理论来描述；不稳定是与真空量子场起伏或涨落等价的，这就为刻画“虚质量粒子”的快子出场，打下基础。1982 年，印度物理学家森把广义相对论引力场方程表述成简单而精致的形式。1986 年，A. Ashtekar 研究了森提出的方程，认为该方程已经表述了广义相对论的核心内容。一年后，他给出了广义相对论新的流行形式，从而对于在 Planck 标度的空间时间几何量，可以进行具体计算，并作出精确的数量性预言。同年，T. Jacobson 和 L. Smolin 在此基础上求出 Wilson 圈解。此后，他们又找到了即使在圈相交情况下的更多解。1990 年代以来，基础物理理论和天文观测方面都取得了长足的进步。从 D 膜与反 D 膜到德西特时空与反德西特时空，人们发现引力不同于其他相互作用的最重要本质是它具有全息性。所谓的反德西特时空 (AdS) 就是一类全息原理能成立的具体例子。1997 年马尔代森那提出的反德西特/共形场论 (AdS/CFT) 对偶性，即一种 AdS 空间中的 IIB 型超弦及其边界上的共形场论之间的对偶性假设，这种对偶性对于建立量子场论和超弦/M 理论的统一，起作奠基性的作用，人们称为马尔代森那猜测。这一猜测说，AdS 空间上的弦理论或 M 理论与在此 AdS 空间边界上的共形场论等价。这个猜测对于我们世界的 Randall-Sundrum 膜模型的提出及霍金确立果壳中宇宙的思想，都有不少的启示。时至今日，马尔代森那的文章已成为弦论中引用率最高的文章。其实，马尔代森那猜测中的量子重力，就是弦论。他的猜测基于 1998 年前弦论中的许多重要发展，如 D 膜，用 D 膜构造的黑洞以及矩阵理论。标准模型中的物质被禁闭在这一膜上，而引力可以在整个时空中传播。

郭汉英先生的分析是：1、对宇宙尺度的物理学，什么是定义物理量和引进物理规律的一致与自洽的基准？其重大发展离不开对这个问题的再认识。在牛顿力学中，惯性定律对于其他力学量和定律的定义及引进起到非常关键的基准作用。这个原理要求，在不同惯性系之间的伽利略变换下，力学规律不变。即伽利略惯性原理起着基准作用。而 Einstein 狭义相对论的基准，是具有庞加莱群——ISO (1, 3) 不变性的庞加莱惯性原理，具有惯性系的 4 维闵可夫斯基时空是平坦的。即 Einstein 放弃了惯性原理，以广义协变性原理和等效原理作为基本原理。相应的局域对称性是一般线性群 GL (4, R)，或等价地，局域齐次洛伦兹群 SO

(1, 3), 一般以它们作为定义物理量、引进物理规律的基准。而在量子力学和量子场论中, 惯性原理及其对称性的作用似乎不那么直接和明显。由于庞加莱群和(局域)齐次洛伦兹群不同, Einstein 一直没有意识到, 局域平移对称性在广义相对论中的丢失, 引力可否忽略的物理基准就不完全相同。2、从原理上解决问题, 以陆启铿为首的学者指出, 应该存在三种狭义相对论: Einstein 狭义相对论的闵氏时空, 宇宙学内涵是平庸的, 不能反映宇宙常数所表征的特征。德西特狭义相对论把作为真空的德西特时空的半径 R 与宇宙常数相联系, 其宇宙学内涵为具有非引力视界熵的加速膨胀的 3 维球面, 曲率极小, 为宇宙常数量级。反德西特狭义相对论在常曲率为负的反德西特时空上, 同样包含曲率半径, 但相应的宇宙常数为负; 其宇宙学内涵是震荡的 3 维罗巴切夫斯基空间, 没有视界和熵。于是应有三种引力理论, 即局域庞加莱、局域德西特与局域反德西特不变的引力理论。这样, 惯性原理及其对称性, 以及局域惯性原理及其局域对称性, 分别作为不存在或存在引力的物理基准, 在对称性及其局域化的意义上是一致的。在三种相对论中, 即三种狭义相对论及其局域化的引力理论之中, 应有一种描述真实宇宙。真实宇宙的宇宙常数为正、具有熵, 因而必然选择德西特相对论。观测表明确实如此: 宇宙在加速膨胀, 宇宙常数对暗能量密度起主导作用; 这样, 宇宙不仅必然渐近于德西特时空, 而且大致是加速膨胀着的 3 维球面, 不过半径很大、曲率在宇宙常数的量级。这也不与现有观测事实冲突。

3、从伽利略惯性原理到庞加莱惯性原理是怎么回事呢? 郭汉英先生的分析是: 1630 年代伽利略利用著名的伽利略大船主舱内乘客, 无法断定大船的静动, 驳斥托勒玫学说维护者对哥白尼的非难, 对他命名的相对性原理给出了最初的表述。后人总结出伽利略惯性原理, 牛顿定律在伽利略变换下不变的基准上建立了体系。这里, 我们假定把牛顿定律体系、伽利略变换下不变基准, 称为“点外空间”球或德西特时空球, 那么法拉第、麦克斯韦电磁学理论中出现的真空光速 c , 确定了点外空间球或德西特时空球的一处边界, 接近这一处边界就会与伽利略惯性原理冲突。发现这个秘密的起因是, 人们以为法拉第、麦克斯韦电磁学理论只对充满“以太”的绝对空间静止的惯性系才严格成立——尽管这会失去惯性原理, 但“以太漂移”的零结果挑战了伽利略变换下不变基准。这样, 惯性原理仍然是物理学的基准, 但对称性必须改变为庞加莱不变性, 后者包括真空中光速 c 这一普适常数。郭汉英先生的《我们的宇宙与德西特相对论》是一篇挑战文章, 挑战的是爱因斯坦。他认为, 1990 年代末以来, 人们发现宇宙在加速膨胀; 暗能量和暗物质在宇宙演化中起主导作用, 于是以爱因斯坦相对论为基础的物理理论和宇宙论, 不得不面对越来越精确、丰富的天文观测数据的检验和挑战。精确宇宙学揭示, 宇宙尺度的物理学应以极小的正宇宙常数为标志。较之爱因斯坦相对论, 德西特相对论, 包括德西特狭义相对论和以其局域化为基础的德西特引力, 才能更好地反映这一特征。即宇宙并不渐近于闵氏时空, 而很可能渐近于宇宙常数为正的 4 维常曲率时空, 即德西特时空。郭汉英先生说, 跨越爱因斯坦的一条途径是, 从伽利略相对性原理到庞加莱相对性原理, 发展为常曲率时空的惯性原理, 描述引力相互作用, 并与宇宙相联系, 应考虑惯性原理及其对称性的局域化, 这就应该有三种狭义相对论及其局域化。其方法是, 应把惯性原理从 10 个参数的庞加莱对称性扩展到同样具有 10 个参数的德西特和反德西特对称性, 在德西特与反德西特这两种常曲率时空中建立狭义相对论; 除了真空中的光速 c 之外, 曲率半径 R 也是普适常数。这三种对称性共同具有齐次洛伦兹群对称性, 可以通过惯性运动之间的其他变换相互联系, 分别具有不同的“平移”。这里对于德西特和反德西特狭义相对论, 如果把曲率半径 R 直接与宇宙常数相联系, 正或负的宇宙常数作为基本普适常数, 就可在原理的意义上引进。通过改变同时性, 从坐标同时性改为固有时同时性, 就分别得到它们的宇宙学内涵: 宇宙常数为正、具有非引力视界熵的加速膨胀的 3 维球面, 半径极大、曲率极小; 或宇宙常数为负、没有视界、没有熵的震荡的 3 维罗巴切夫斯基空间。同时, 宇宙常数的起源问题, 就并非在闵氏时空中的真空能密度, 而是与牛顿引力常数 G 、光速 c 和普朗克常数 h 的起源一样, 由这些常数可以构成一个无量纲常数 g , 其平方即普朗克尺度的平方与宇宙常数之积, 恰恰为 10 的⁻¹²²次方。这样, 演化的宇宙就不仅渐近于德西特宇宙, 以其视界熵为熵界, 而且应大致是一个加速膨胀的半径很大的 3 维球面, 曲率在宇宙常数量级。后者不与观测事实冲突。由于真实宇宙的时间箭头趋向于德西特宇宙的宇宙时间轴, 后者的方向就确定了; 进而, 通过变换同时性, 将德西特宇宙时换到贝尔特拉米-克莱因坐标时, 就可确定德西特时空中贝尔特拉米-克莱因惯性系的时间轴方向, 这样, 惯性系也就确定了。于是, 宇宙的演化就确定了德西特狭义相对论中的惯性系和惯性运动。在这个意义上, 演化的宇宙也就成为惯性运动的起源。所有其他具有惯性原理的运动学及其惯性系, 都可以看成是德西特惯性系在光速 c 和半径 R 的不同极限下的退化, 因此, 作为德西特惯性系的退化情形, 所有这些惯性系都可以间接地由宇宙演化所确定, 从而也就绕开了所谓的“循环论证”。

郭汉英先生说: “德西特本人、泡利、薛定谔等都曾注意到这类坐标系, 但却错过了发现德西特与反德西特惯性原理的机会。”郭汉英先生说, 在欧氏几何、黎曼球几何与罗巴切夫斯基伪球几何等这些几何中,

都有点、直线、度量，各自在笛卡儿或贝尔特拉米-克莱因坐标系中，度量的测地线就是直线；这些性质在各自变换群的线性变换或分式线性变换下不变。对于4维情形，它们在物理上分别对应于闵氏时空、德西特时空与反德西特时空；其中都有事件、直的世界线、具有物理号差的度量，在相应的闵氏坐标系或贝尔特拉米-克莱因坐标系中，度量的测地线就是直的世界线；同样，这些性质在庞加莱群的线性变换、德西特群与反德西特群的分式线性变换等各自变换群的变换下不变。在爱因斯坦狭义相对论中，沿着直的世界线的运动是惯性运动，相应的坐标系是惯性系。那么，在德西特时空与反德西特时空中，沿着直的世界线的运动也应该是惯性运动，相应的坐标系也应该是惯性系。

如果说闵氏时空、德西特时空与反德西特时空的惯性原理和坐标系的选择有关，欧氏几何、黎曼球几何与罗巴切夫斯基伪球几何的宇宙描述和笛卡儿坐标系、闵氏坐标系或贝尔特拉米-克莱因坐标系的发现密切相关，那么永动的宇宙没有中心、没有静止的全动坐标系，并没有被它们掌握。目前除三旋坐标系外，所有的坐标系都还带有割不断的静止的直线，或静止的点、度量的“尾巴”。轻松跨越爱因斯坦的密码，是否就在无静止的直线，或静止的点、度量“尾巴”的坐标系呢？第三次超弦革命还在风暴的洗礼之中，时间会有评论。

4、广义相对论与宇宙学原理之间的不协调性浅议

根据对 Seeliger 佯谬的讨论我们可以看到，如果宇宙学原理假设成立，宇宙中物质是均匀分布，则在宇宙中任意一个空间点都不应当存在引力场。我们还可以换个角度来讨论这个问题：如果宇宙中引力场不为0，则根据宇宙学原理，引力场至少应当是均匀的。因为引力场是一个矢量场，如果宇宙中存在有均匀的引力场，则宇宙就不可能是各向同性。因为引力场的矢量方向就是一个特殊的方向。因此如果宇宙学原理成立，宇宙中任意一个空间点都不应当存在有强度不为0的引力场。

在没有引力场存在的宇宙空间中，均匀分布物质的运动和演化应当如同理想气体。因此有学者提出，可以把星系看成是这个宇宙理想气体中的分子，以此来说明宇宙学原理的正确性。均匀分布的理想气体的运动和演化主要因素应当是理想气体的温度和压力。然而即使在标准宇宙学模型中，宇宙学家也认为，在宇宙演化的现阶段，宇宙中物质主要是以非辐射的状态存在，宇宙学方程中压力项应当为0。

实际上宇宙中的星系是在星系团的引力场中运动，不像理想气体中的分子运动是随机的，分子运动的变化是由分子之间的随机碰撞引起的，和引力场无关。而宇宙中物质不均匀分布的成团结构是和宇宙空间中的引力场分布联系在一起。和理想气体中物质密度起伏分布的成因完全不是一回事。因此通过把星系看成是理想气体中的分子来说明宇宙学原理的正确性是没有意义，也是不合理的。

要用广义相对论引力理论研究讨论宇宙中不均匀分布物质的运动和演化，就必须抛弃不合理的‘宇宙中物质是均匀分布’的宇宙学原理假设。代之以‘球对称引力场’的假设。因为宇宙中物质的分布存在有不同层次的成团结构，在这些成团结构中物质的分布基本上是球对称的，因此，由这样球对称分布的物质产生的引力场也应当是球对称的。由此可见俞允强教授‘球对称引力场’的假设要比宇宙学原理的均匀分布假设更符合宇宙物质分布的客观实际。要用广义相对论引力理论来研究宇宙中物质的运动和演化，必须采用俞允强教授的‘球对称引力场’假设来代替爱因斯坦不合理的宇宙学原理假设。只有这样才能对宇宙中物质的运动和演化得到符合客观实际的合理结果。

在实际宇宙中，‘球对称引力场’假设只适用于一个有限的区域。对宇宙中不同尺度层次的成团结构，存在有不同尺度的‘球对称引力场’。这种情况并不能说明‘球对称引力场’假设不适合宇宙学研究。正好相反，它符合广义相对论引力理论只能用于局部有限区域的要求。俞允强教授的具体计算结果表明，在一般情况下，用牛顿力学进行计算可以得到精度极高和广义相对论一致的结果。由此可见，广义相对论引力理论并没有否定牛顿引力理论的正确性。牛顿力学是广义相对论精度极高的近似，这一点理论物理学家李森先生也承认。但是在宇宙学原理假设下，无法直接从广义相对论引力方程得到这个结论。只有在‘球对称引力场’假设下，才能从广义相对论引力方程得到这个结论。

爱因斯坦深受马赫“任何运动都是相对的”观点的影响。为了取消狭义相对论中惯性运动与惯性参考系的特殊地位，他提出广义相对性原理，要求“物理学定律具有对于无论以什么方式运动的参考系都成立的性质”。“普遍的自然规律是由对一切坐标系都有效的方程来表述的；也就是说，对于无论那种(坐标)代换都是协变的(广义协变)。”(《广义相对论的基础》，1916)其实，自然规律的广义协变与任何运动的相对性是两个不同的概念。具体的运动过程，除了运动规律之外，还要有其他条件。如边界条件、初始条件等。后者往往不可能做到广义协变。因而，即使自然规律具有广义协变性。也并不意味着任何运动之间的相对性。不仅如此，很快就有人指出，自然规律的“广义协变”在数学上并没有什么意义，任何在特殊坐标中的物理定律，都可以在局部写为广义协变、或者与坐标无关的几何形式。嘉当(E. Cartan)指出。牛顿引力理论也可

以几何化。后来。爱因斯坦的表述也有所改变，他提出在广义协变形式下的“简单性”要求：“自然定律应该表述为在连续坐标变换群下协变的方程。这个群替代了狭义相对论中的洛伦兹变换群，后者形成前者的一个子群。”“当然。这一要求自身作为导出物理的基本观念的出发点并不充分……广义相对性原理突出的启发式的意义在于它导致我们去寻求在广义协变形式下尽可能简单的方程组”。（《自述》1946。

在几何学中，点是没有大小，而只有位置差别的抽象概念。但一个点的位置只有在与其他点的相互关系中才能体现出来，而不能自己规定自己的位置，通常把一个点放到一个坐标系中而得到点的位置。这就意味着点的外面还有他物与它对立，点具有边界，存在着内与外的对立。无论我们把奇点设想得多么特殊，它只要是一个点，它也同样存在着内与外的截然对立，它具有边界，而这个边界只有通过外在的空间来设定。正如德谟克里特的原子离不开虚空一样，虚空才能为原子设定边界，把一个原子与其他原子隔离开来，没有虚空，原子也不能存在。在大爆炸宇宙模型中，既然认为所有宇宙物质以及时空都被包涵在奇点中，那么奇点作为包容一切的整体，在它外面就不存在着与它对立的“他物”，也不存在着虚无的空间来设定它的边界，那么所谓的“奇点”就不是一个“点”，宇宙作为包容一切的整体就不能作为一个“点”而存在。可见，当我们把奇点作为宇宙的开端时，在潜意识中，奇点还是悬置在牛顿的绝对空间中，正是外在的空间才使“奇点”成为一个点。

也有科学家否认奇点的存在，例如温伯格说：“一种可能性是，宇宙从来就没有真正达到过无限大密度状态。宇宙现在的膨胀可能开始于从前的一次收缩的末尾，当时的密度达到了一个非常高的，但仍然是有限的密度。”爱因斯坦认为，奇点的出现是广义相对论无限外推的结果，当宇宙物质的密度达到一定程度时，广义相对论的方程就已经不适用了，所以，奇点根本不存在。霍金在早期证明，只要广义相对论是正确的，奇点的存在就是不可避免的，但后来他把量子力学的不确定原理应用到**大爆炸理论**中，认为宇宙是从一个量子态自发创生出来的，从而否定了奇点的存在。在爱因斯坦的引力方程中，为了排除方程中无穷散发奇点问题，克鲁斯科提出了一个数学协变，将时空坐标 (r, t) 变换到了一组没有物理意义的抽象坐标 (u, v) ；这种变换不仅把散发奇点赶到别的地方 (u, v) 宇宙的边缘，而且还变出了多重宇宙，变出了白洞和虫洞。紧靠参考系的选择就可以排除时空结构的散发奇点，这是对经典相对性原理的最大违背！

5、广义相对论的几个疑难问题

Einstein广义相对论深刻地揭示了时间、空间和运动物质之间内在关系，然而Einstein引力场方程的一些特殊引力场精确解中却存在不能消除的奇点，像具有球对称静态引力场Schwarzschild外部解及匀速转动引力场外部解[2]等。另外，用Einstein引力场方程处理宇宙演化解中，存在与直接观测到的质量密度相矛盾的结论，即质量缺失问题（也就是所谓的暗物质）。Penrose和Hawking认为只要关于物质、能量、以及因果性一些合理物理条件成立，在Einstein广义相对论中就不可避免存在着奇点。在这类奇点处，时空流行达到尽头，象在星体中引力坍缩终止于黑洞中心奇点就是这样的。由于不知道奇点所准循的规律，物理学、包括广义相对论将随着奇点出现而失效。一般认为出现这种运动终止于奇点现象反映了广义相对论引力场理论某种不完善，并不一定是客观世界所固有的。

1. 由于地球观察者与宇宙物质间存在相对运动速度，描述膨胀宇宙必须采用动态能量动量张量，不能采用静态能量动量张量。采用动态能量动量张量后的计算结果表明，爱因斯坦引力场方程不可能用来描述均匀且各向同性膨胀的宇宙，现代标准宇宙学面临基础缺失的危机。

2. 广义相对论：广义相对论在所有尺度上都是正确的吗？

3. 超弦理论最终可能会放弃时间和空间这两个概念。

4、是否存在额外的时空维度？对重力真正性质的研究也会带来这样的疑问：空间是否不仅仅限于我们能轻易观察到的四维，要确定这一点，我们可能首先要怀疑自然是否是自相矛盾的：我们是否应该接受这样的观点，即有两种力作用于两个不同的层面——重力作用于星系这个大层面，而其它三种力作用于原子的微小世界？统一场论会说这是一派胡言——肯定有一种方法将原子层面的三种力量与重力连接起来。这就将我们引向了一些线性理论学家对重力的解释，其中就包括其它维的空间，开始的宇宙线性理论模型将重力和其它三种力在复杂的11维宙中结合起来，在那个宇宙——也就是我们宇宙中——其中的7维隐藏在超乎想象的微小空间中，以至于我们无法觉察到，弄懂这些多维空间的一个办法是，想象一个蛛网的一根丝，用裸眼来看，这根细丝只是一维的，但在高倍放大镜下，它就分解成了一个有相当宽度、广度和深度的物体，线性理论学家说，我们之所以看不见其它维的空间，只是因为缺少能将它们分解的精密仪器。我们可能永远无法直接看到这些多维空间，但有了天文学家和粒子物理学家的仪器，也许可以找到它们存在的证据。在试图引申爱因斯坦理论和了解引力的量子性质时，粒子物理学家们假设存在着超出已知四维时空的高维时空。它们的存在对宇宙的诞生和演化具有隐含，可能会影响基本粒子的相互作用，并改变近距离时的引力。

高能核物理在弦理论方面的研究表明有额外维。TeV 能级加速器和其他对撞机的实验，通过寻找两个加速的粒子（如 TeV 能级加速器的质子与反质子）在对撞中产生粒子时丢失的能量，来寻找额外维。

5、什么是引力？在爱因斯坦改进牛顿的理论时，他扩展了重力的概念，将巨大的重力场和以接近光速运动的物体都计算在内，这一扩展形成了著名的相对论和时空理论，但爱因斯坦的理论没有涉及极小领域的量子力学，因为重力在很小范围内可以忽略不计，而且还没有人对个别少量的重力进行过试验性的观察。然而，自然界也有重力被压迫在小物体之内的极端情况，比如说，在靠近黑洞中央的地方，大量物质被挤在量子大小的空间里，重力就在很小的距离内变得非常强，大爆炸时期混沌的初始宇宙中一定就是这种情况。黑洞在宇宙中普遍存在，可以探讨它们的巨大引力。早期宇宙中的强引力效应应具有客观观测到的重要性。爱因斯坦理论也应适用于这些情况，正像它适用于太阳系一样。完整的引力理论应该包括量子效应—爱因斯坦引力理论不包括—或不解释为什么它们不相关。高能和核物理理论学家研究弦理论和额外维空间的可能性，有助于解释引力的量子方面。像在费米实验室（左图）TeV 能级加速器和 CERN 的 LHC 上开展的实验将能够在未来几年内对一些这样的思想进行检验。弦理论已经导致对黑洞的熵进行计算。

6、为了能与地球近平直参考系中的实际测量结果进行比较，必须将弯曲时空中对引力问题的计算换算成用平直时空中的标准尺和标准钟（或局部惯性系的标准尺和标准钟）来计量。这在弯曲时空引力理论中被认为是基本原则，但目前广义相对论对具体问题计算的过程中却普遍地忽略了这个原则。采用标准尺和标准钟计算的结果表明，水星近日点进动是实际观察值的 4.8 倍，而且方向相反，雷达波延迟只是观察值的 53%，这样的结果显然是根本不可能的。因此广义相对论实际上并未得到实验证实，除非爱因斯坦引力场方程描述的已经是平直时空中的结果，不是弯曲时空中的结果，但这与爱因斯坦弯曲时空引力理论的前提相矛盾。

7、美国宾夕法尼亚州大学的爱德华·吉南和弗兰克·马洛尼两位天文学家发现距我们 2000 光年的 DI 海格利斯双星的运动与相对论完全相悖，它们的质量都很大，分别为 4.5 和 5.2 个太阳质量，公转周期为 10.55 天，轨道偏心率 0.489 左右。据此，按相对论计算，其轨道应该有明显的最近点进动现象。然而事实上，当两星的其中之一运动到另一个星体之前并发生全食时，人们只观测到两次较明显的亮度衰变。天文学家根据时间建立了该双星的亮度曲线，计算出偏全食时间，并据此演绎出双星相应位置。鉴于 DI 海格利斯双星的观测已有 84 年的历史，人们拥有丰富的资料，经对 3000 多轨道进行详细分析，吉南和马洛尼两位天文学家计算出两星最近点进动仅为 0.64 度，而相对论理论推算的结果却是 2.34 度！

第六章 暗物质与暗能量

1、暗物质与暗能量在现代物理学中的意义

《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：28。宇宙中的暗物质是由什么粒子构成的？

美籍华人著名的物理学家、诺贝尔奖金获得者李政道把“一些物理现象理论上对称，但实验结果不对称”、“暗物质问题、暗能量问题”、“类星体的发能远远超过核能，每个类星体的能量竟然是太阳能量的 10^{15} 倍”、“夸克禁闭”称为是 21 世纪科技界所面临的四大难题。“暗物质是笼罩 20 世纪末和 21 世纪初现代物理学的最大乌云，它将预示着物理学的又一次革命。”

现代宇宙学观测表明宇宙中存在暗物质和暗能量。但是它们的起源仍然是个谜。我们能找到的普通物质仅占整个宇宙的 4%，各种测算方法都证实宇宙的大部分是不可见的。要说宇宙中仅仅就是暗色尘云和死星体是很容易的，但已发现的有力证据说明，事实并非如此。正是对宇宙中未知物质的寻找，使宇宙学家和粒子物理学家开始合作，最有可能的暗物质成分是中微子或其它两种粒子：neutralino 和 axions（轴子），但这仅是物理学的理论推测，并未探测到，据认为这三种粒子都不带电，因此无法吸收或反射光，但其性质稳定，所以能从创世大爆炸后的最初阶段幸存下来。

杨振宁讲：“所谓暗物质、暗能量就是非常稀奇的事物，这里面我想是可能引出基本物理学中革命性的发展来的……假如一个年轻人，他觉得自己一生的目的就是要做革命性的发展的话，他应该去学习天文物理学。”

在新世纪之初，美国国家研究委员会发布研究报告，列出了在新世纪需要解答的 11 个与宇宙有关的难题，并同时建议美国政府的研究机构加强协调，集中资源为这些难题寻找答案。这份题为《建立夸克与宇宙的联系：新世纪 11 大科学问题》的报告，是由 19 位权威物理学家和天文学家联合执笔。科学家们在报告中认为，暗物质和暗能量应该是未来几十年天文学研究的重中之重。“什么是暗物质”和“暗能量的性质是什么”，在报告所列出的 11 个大问题中分列为第一位和第二位。

李政道教授曾多次指出：“暗物质是笼罩 20 世纪和 21 世纪初现代物理学的最大乌云，它将预示着物理

学的又一次革命。”李政道指出：“20世纪初的大问题是太阳能的来源；21世纪初的大问题是暗能量的来源”，“了解暗物质和暗能量，是人类在21世纪科学的大挑战。”李政道指出，“21世纪初科学最大的谜是暗物质和暗能量。它们的存在，向全世界年轻的科学家提出了挑战。暗物质存在于人类已知的物质之外，人们目前知道它的存在，但不知道它是什么，它的构成也和人类已知的物质不同。在宇宙中，暗物质的能量是人类已知物质的能量的5倍以上。宇宙中的暗能量是已知物质能量的14倍以上。宇宙之外可能有很多宇宙。”李政道先生2009年访问上海交通大学，并做了“以天之言，解物之道”的精彩演讲，其中他如是谈暗物质与暗能量：宇宙的总能量中只有5%是已知物质的能量，其中95%我们都不了解，其中25%是暗物质，70%是暗能量。现在暗能量也是交大物理系研究的重点。什么叫暗物质，什么是暗能量我们不知道，但是我们知道他占据了宇宙的95%。我们现在知道的物质是由电子、质子、中子和极少量的正电子、反质子等等构成。

李政道在《科技导报》2005年第5期上发表的专稿《在我的祖国纪念 Einstein》，其中关于能量，有以下四段话：“我们人类能感知到的常规物质的能量（也就是已了解部分的宇宙），只占整个宇宙能量的5%或者更小些，其它95%的能量都不是由我们现在所知的物质构成的。”“我们宇宙中的能量大多数是暗物质和暗能量，既看不见，也不知道是什么东西。暗物质对所有我们能测量的光、电场、磁场、强作用（核的力场）都不起任何作用，可是，暗物质有引力场（地心吸力就是引力场）。通过引力场我们知道有暗物质存在，而且，暗物质的总能量比我们这类物质的总能量要大了5倍，或5倍以上。可是对暗物质的其它性质，我们完全不知道！”“暗能量的性质更是奇怪，它能产生一种负的压力。Einstein在20世纪早期就曾假设过负压力这种性质的存在。后来，因为没有实验的支持，Einstein就放弃了这一个方向。在裂变和聚变反应中，反应前后物质的质量有少量的差异。按照Einstein的著名质能公式 $E=mc^2$ ，这些少量的质量差异能够转化为巨大的能量。而暗能量可以将物质质量全部消失，完全转化为能量！”“最近几年，通过哈勃太空望远镜，我们发现，我们的宇宙不仅是在膨胀而且是在加速地膨胀。从它膨胀的加速度可以推算出，它是由于一种负压力也就是暗能量的存在才膨胀的。而这暗能量的总量占据全宇宙能量的70%。”

李政道、杨振宁观点截然不同：2005年4月18日《中国科学报》登载李政道、杨振宁的文章。李文认为广义相对论更重要的作用是在21世纪，因为要弄清暗物质、暗能量的问题，还得靠爱因斯坦的理论来指导；杨文却认为物理学的基本规律在20世纪，已全部被发现了，21世纪将是基本规律在各领域的应用。

《中国科学报》登载了《我科学家挑战现代物理学“两朵乌云”》，报道由中科院多个研究所、上海交通大学、中国原子能科学院等多家科研单位参与的国家“973”计划项目“暗物质、暗能量的理论研究及实验预研”。认为19世纪末，经典物理学已经非常成熟，但是上空漂浮着“两朵乌云”：一是迈克尔逊-莫雷实验，一是黑体辐射实验。后来，它们却分别促使了相对论和量子论的发现，极大地推进了人类对物质世界的认识。和19世纪末相似，20世纪末的物理学上空也漂浮着“两朵乌云”，一是暗物质，一是暗能量。杨振宁先生所指出的方向，实际上全国都在努力进行20世纪物理学成果的应用。李政道先生所指出的方向，有一批人取得国家的经费支持，国内以中科院理论物理所等单位为主的主流理论物理学家是沿此方向前进的。希望对两种观点都能一视同仁，在基本粒子和宇宙学方面既发表主流派的意见，也发表对主流派质疑甚至反对的意见。

牛顿发现引力定律，但不知其所以然。爱因斯坦的广义相对论认为，引力是物质和能量所产生的时空弯曲。近来有迹象表明，原子等“可见物质”只占宇宙中总物质的5%，其余25%是暗物质，70%是暗能量。现有的引力理论未能解释宇宙的95%，显然这不可能是完整的理论。一些科学家提出不同的解释，其中包括具有11维时空的超弦理论。——摘自奥弗比（Dennis Overbye）的文章。

2、暗物质问题的提出过程

天文学家已经证明：宇宙中的天体从比我们银河系小100万倍的星系到最大星系团，都是由一种物质形式所维系在一起的，这种物质既不是构成我们银河系的那种物质，也不发光。这种物质可能包括一个或更多尚未发现的基本粒子组成，该物质的聚集产生导致宇宙中星系和大尺寸结构形成的万有引力。同时，这些粒子可能穿过地面实验室。

上个世纪30年代，诺贝尔奖获得者密立根，曾致力于将位于美国加利福尼亚州南部城市帕萨迪纳的加州理工学院，建成世界一流的研究机构。他聘用的第一位从事天体物理研究的学者，是瑞士籍科学家弗里兹·兹威基。1934年，兹威基研究了星系团内星系的运动，首次提出暗物质存在的可能性。星系在宇宙中有一种成团倾向，彼此之间有引力联系，由其构成的体系称为星系群；若受引力束缚在一起的星系群不止几十个，而是几百个、上千个、几千个，那么就称为星系团。星系团中成百上千的星系，因被自身引力束缚，运动速度与引力必须达成平衡才不致出轨；而且引力越强，运动速度越快。然而，兹威基发现，星系团内星系

远远不足以产生如此大的引力，一定还存在人类看不见的其他物质，他称之为暗物质。

暗物质存在的直观证据，是引力透镜现象：当遥远星系发出的光途经某个星系团附近时，光线就会因星系团引力偏折，这时的星系团就好像一个透镜，朝这个方向望去就会看到巨大的光弧甚至同一个星系的几个不同镜像。

暗物质存在的一个重要证据是，天文学家观测到一些恒星的运动速度比理论上计算的要快得多，显然有许多看不见的暗物质在吸引着这些恒星。如果暗物质也是由原子或分子组成的话，它们在宇宙早期就会参加核反应，从而使这些元素的丰富程度低于今天的观测值。它不和这些粒子发生任何作用。科学家把它起名为“WIMP”，它的中文意思是“弱相互作用重粒子”。由于暗物质的存在，远离星系中心的物质的速度不随距离的增大而减少。这种现象不是个别的，对所有测量过的 967 个星系，所有测量结果都是这样的，没有一个例外。就是说所有的星系里面绝大多数的物质都是暗物质。中国科学院何祚庥院士认为，宇宙中是否除质子、中子，电子等“会”发光的物质以外，还存在着在原则上就不会发光的物质，或者说宇宙中是否存在占 95% 以上的暗物质和暗能量亦即透明物质的问题，这是当前宇宙论研究中一个重大的热点。其实，在宇宙学的领域，直到现在也还没有解决“何谓暗物质”？暗物质有两种形式：一是热暗物质；二是冷暗物质。热暗物质的最佳候选者是中微子。但中微子构成暗物质的前提，是三种中微子之中，至少有某一种中微子具有静止质量。至于冷暗物质，一般公认为带有超对称性质的中性重粒子。

由于真空的特殊地位，李政道等许多理论物理学家都认为：现代物理的疑难可能都与真空有关。李政道教授说：暗物质的存在有什么根据呢？现在我重点讲一下。我们随便看一个星系，它的直径大约为 20 千秒差距（Kiloparsec）。在星系的周边，随便哪个星，哪个灰尘或者气体云，都各以某一速度运动，离心力是速度的平方除以那一物体离中心的距离 r ，这个离心力应跟引力相平衡，引力是牛顿常数跟星云里的质量相乘，

除以 r 的平方（即公式 $\frac{GM}{r^2} = \frac{V^2}{r}$ ，等式左边是重力加速度，右边是圆周运动的向心加速度，李政道教授在这里说的离心力，是因为物体在作圆周运动时，向心力与离心力的大小是相等的。）。所以如果你已知某个星体离星云中心的距离 r ，我们测量这个星体的速度 V ，就可以算出在这个星云里面有多少物质存在。以星系 NGC3192 为例，它的发光区域长约 15 千秒差距，但是到距离中心 30 千秒差距处，星的速度还在增加，这表示除了看得见的物质外还有绝大多数是看不见的物质。看得见是什么意思呢？除了眼睛看得见，也包括用电磁波、红外光可以测量。看不见的暗物质不放可见光、红外光或电磁波，但它也有万有引力。由于暗物质的存在，远离星系中心的物质的速度不随距离的增大而减少。这种现象不是个别的，对所有测量过的 967 个星系，所有测量结果都是这样的，没有一个例外。就是说所有的星系里面绝大多数的物质都是暗物质。（引自 李政道。《物理学的挑战》。【1】）

为了完善宇宙 Big Bang Cosmology 理论，1980 年科学家引入了暴胀宇宙的概念。它是说宇宙在较早的时期膨胀得较快。这一概念解决了一对矛盾：如果我们回溯今日可见的宇宙膨胀历史，当宇宙的年龄为 10^{-35} 秒的时候，宇宙将被压缩到一个半径 3 毫米的区域中。但是从宇宙膨胀开始到那时，光能行进的距离只有 3×10^{-25} 厘米。这是任何信号能传播的距离。根据暴胀理论的推算，宇宙的平均密度应为 2×10^{-29} 克 / 厘米³。但人们观测到的宇宙中发光物质密度至多为这一密度的 0.1。就是说，宇宙中有 90% 以上的物质我们至今几乎一无所知。科学家把它们称作暗物质。

威尔金森微波背景各向异性探测器 (WMAP) 和斯隆数字巡天 (SDSS) 天文观测以其对宇宙学参数的精确测量，进一步强有力地支持了这一模型。这在人类探索宇宙奥秘和物质基本结构的道路上无疑是一个光辉的成就。WMAP 的结果告诉我们，宇宙中普通物质只占 4%，23% 的物质为暗物质，73% 是暗能量，SDSS 也给出类似的结果。从物质基本结构的观点出发，普通的物质，如树木、桌子以及我们人类本身，是由分子、原子构成。然而分子、原子不是最基本的，目前已知的最基本的粒子是由粒子物理标准模型所描述的夸克和轻子以及传递相互作用的粒子（如光子，胶子等）。北京正负电子对撞机就是系统地研究其中的粲 (charm) 夸克和陶 (tau) 轻子。

大量间接证据表明，宇宙中确实存在着暗物质。一种理论认为，暗物质是由弱相互作用大质量粒子 (Wimp) 构成的。计算机模拟显示，如果缺少了这部分物质，就无法构成现实的宇宙。但由于暗物质本身的特性，要直接找到它们极为困难。证实暗物质存在的最有效方法，就是找到弱相互作用大质量粒子。

麦克斯韦在 1879 年即将逝世时强调写道：“在形成一个前后不出现矛盾的以太结构的问题上，不论我们有多大的困难，而行星际之间和星际之间决不是空无所有的，而是被我们所不大了解的而且可能是最均匀的无疑是最大量的物体或物质实体所占据。”

宇宙中普遍存在着“暗物质”（目前未能科学证实的物质存在形式），有三点确认的证据：一是可观察宇宙具有确认的扁平结构，这是宇宙背景辐射探测器和威尔金森各向异性探测器一致得到的观察结论。既

然是扁平体的宇宙结构，就必然有相应的宇宙总质量密度。二是得到天文观察证明的星系或星系团的运动学质量值，这些我们已知的物质，充其量只能满足这个扁平体结构所需要的总质量密度的 4%。三是螺旋星系内部空间的运动学效应，例如要保持太阳目前在银河系中的运动速度（每秒 220 千米），如果需要太阳所在位置的质量为 1 个单位的话，太阳实际的质量只占 2.6%，97.4% 的质量真还不知道藏在什么地方。问题的严重性只需要用一句话就可以概括了；如果 20 世纪的科学理论只能让世人面对 4%（或 2.6%）可看得见的物理学天空（现有科学理论适用的范围），问题该有多么严重。

参考文献：

【1】李政道——科学的发展：从古代中国到现在。朱长超主编。《世界著名科学家演讲精粹》百花洲文艺出版社 1995 年 3 月第 1 版 第 3 次印刷。

3、现代物理学对于暗物质的理论研究

暗物质有诸多基本粒子候选者。最被粒子物理学家看好的是 WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles) 冷暗物质，一般认为其质量比质子重得多，最著名的 WIMP 是 neutralino，典型质量 102 GeV（即 10^{-22} g）。其它的冷暗物质如通过非热机制产生的 Axion，典型质量 10^{-6} eV（即 10^{-39} g），（当然还有质量再小很多很多数量级的 fuzzy cold dark matter）。其它如 MeV 冷暗物质、SuperWIMP，及非常重的 WIMPzillas（质量 10^{13} GeV）。

尚未发现的其它粒子有可能存在，例如一种称为超对称的新对称理论预言有一种大的新类型的粒子，其中有些可解释暗物质。现正在费米实验室 TeV 能级加速器进行的和计划在 CERN 正建造的大型强子对撞机（LHC）上开展的实验，以及地下低温暗物质寻找和空间利用伽马射线大面积天体望远镜所进行的实验，目的都是要寻找超对称粒子。

阿尔法磁谱仪（AMS）安装在国际空间站上，寻找反物质星系和带有我们星系多数质量的神秘暗物质的任何证据。该项目由 MIT 丁肇中领导，国际上（包括中国）广泛参加。

尽管科学家用了精确的宇宙测量方法，但据目前所知，宇宙能量中仅有约 4.6% 是由重子物质（正常原子）构成，23% 由暗物质构成，剩下约 72% 由暗能量构成。而且，在可见宇宙中，几乎所有的重子物质都是物质（重子带正电荷）而不是反物质（重子带负电荷）。提出新机制的研究小组包括美国纽约布鲁克海文国家实验室和英属哥伦比亚大学的科学家，研究发表在最近出版的《物理评论快报》上。他们称这种新机制为“原质起源论”（hylogenesis）。

英属哥伦比亚大学克里斯·西格森说：“我们正在努力把理论物理中的两个问题一起解释。这一机制将原子形成和暗物质联系在一起，有助于解开重子不对称的秘密，作为对整个暗物质加可见重子的平衡宇宙的一种重建。”

根据研究人员构建的机制，在物质形成景象中，早期宇宙产生了一种新粒子 X 和它的反粒子 X-bar（带等量相反电荷）。X 和 X-bar 在可见部分能结合成为夸克（重子物质的基本组成，如质子和中子），在“隐匿”部分组成了粒子（由于这种粒子可见部分的相互反应是微弱的），如此，在大爆炸开始后的第一时刻，宇宙膨胀变热时会有 X 和 X-bar 产生。

随后，X 和 X-bar 会衰变，部分变成可见的显重子（尤其是中子，由一个上夸克和两个下夸克组成），部分变成不可见的隐重子。据科学家解释，X 衰变成中子的频率比 X-bar 衰变成反中子的频率更高，同样地，X-bar 衰变为隐反粒子的频率比 X 衰变为隐粒子的频率要高。夸克形成的重子物质组成了我可见物质，隐反重子形成了我们所说的暗物质。这种阴—阳衰变方式使得可见物质的正重子数量和暗物质的负重子数量达到平衡。

英属哥伦比亚大学特里姆研究中心的肖恩·图林说：“可见物质和暗物质的能量密度非常接近（1/5 的不同）。在许多情况下，在广大宇宙的早期，生成可见物质和暗物质的过程是互不相关的。于是，这 1/5 的因素要么是早期出现的一个大偶然，要么是两种物质共同起源的重要线索。我认为，这为构建可见物质与暗物质起源的统一模型提供了主要依据。”

物理学家预测，这种物质形成机制将为寻找暗物质提供一个全新途径，它们会留下一些可在实验室探测到的特征标记。科学家解释说，当暗物质反粒子和一个普通原子粒子相撞而湮灭时，就会产生爆发的能量。尽管这非常稀有，但在地球上寻找质子自发衰变的实验中，能探测到暗物质。

在天体物理学观测和离子加速器数据中，也可能会出现其他原质起源的信号。研究人员表示，今后也会在研究中考虑这些可能性。

暗物质分为重子暗物质（例如星系际星）和非重子暗物质。非重子暗物质可能有：有质量的中微子、光微子（photino）、引力子（graviton）、引力微子（gravitino）、中性微子（neutralino）、轴子（axion）等。李政道（T. D. Lee）：“整个宇宙至少 90% 以上（很可能 99% 以上）是暗物质，而不是已知的物质。”

4、现代物理学对于暗物质问题的天文观察简介

1:哈勃望远镜发现暗物质环 跨度约有 260 万光年 2007 年 05 月 16 日 13:07:12



这张由哈勃太空望远镜拍摄的照片显示的是太空中一个跨度约为 260 万光年的暗物质环。美国宇航局 15 日报告说，一个天文学家小组利用哈勃太空望远镜探测到了位于遥远星系团中呈环状分布的暗物质。天文学家们称，这是迄今为止能证明暗物质存在的 strongest 有力的证据。

2:新华社/路透 新华网华盛顿 5 月 15 日电（记者张忠霞）美国宇航局 15 日报告说，一个天文学家小组利用哈勃太空望远镜，探测到了位于遥远星系团中呈环状分布的暗物质。天文学家们称，这是迄今为止能证明暗物质存在的 strongest 有力的证据。所谓暗物质是指宇宙中存在的一种不明性质的物质粒子，它的电磁放射和折射非常微弱，所以不能被直接探测到。按照天文学界目前流行的理论，暗物质才是宇宙物质的“主宰”，而我们肉眼能见的普通物质如恒星、行星，所占质量只是宇宙中很小一部分。暗物质不能被“看”到，但可测量到其存在的痕迹。天文学家介绍说，借助“引力透镜”效应探测到的这个奇特暗物质环位于距地球 50 亿光年的一个编号为“CL0024+17”的星系。

3、据英国《每日电讯报》（2008 年）报道，暗物质被认为是宇宙研究中最具挑战性的课题，它代表了宇宙中 90% 以上的物质含量，而人类可以看到的物质只占宇宙总质量的不到 10%。美国科学家称，他们通过一种最新的理论研究发现，地球和月球之间其实隐藏着大量神秘的暗物质。

暗物质无法被人类直接观测得到，但它却能干扰星体发出的光波或引力，其存在能被明显地感受到。科学家曾对暗物质的特性提出了多种假设，但直到目前还没有得到充分的证明。新理论认为，在地球与月球之间存在着大量神秘的暗物质。这一观点也许可以用来解释所谓的“飞行异常”奇怪现象。当太空飞行器进入太空之前、尚在地球周围不断加速的过程中，所有飞行器都曾有过奇怪的速率变化过程。而根据已知的万有引力定律，不应该出现这种现象。于是有些科学家认为，这种飞行异常表明现有物理定律以及万有引力定律存在问题，爱因斯坦的广义相对论需要修正。当然这只是一较为激进的看法。

对此，美国普林斯顿高等研究院理论家斯蒂芬-阿德勒博士持有不同的看法，他认为飞行异常现象是由一种看不见的暗物质所造成。阿德勒解释，飞行器在穿越暗物质的过程中，受到了来自暗物质引力作用，于是就引起了飞行器速率的不规则变化。美国宇航局近日发表的一份分析报告也认为，卫星或太空探测器在飞离或返回地球的过程中，其往返轨道越不对称，飞行异常现象也就越明显。美国“近地小行星交会”“舒梅克”号探测器的飞行速度就比预计的要快得多。在许多太空探测器近地 4 小时的飞行期间，有的出现减速现

象，有的出现加速现象。

基于此，阿德勒的观点是地球周围存在着大量的暗物质。阿德勒估计，地球周边的暗物质应该位于月球的公转轨道与低空卫星的轨道之间，其总质量肯定不超过地球质量的十亿分之四。这一质量限度使得地球周围可以存在高密度的暗物质。他认为，这一观点虽然仍存在争议，但却是对此前关于宇宙存在暗物质证据的有力补充。阿德勒解释，地球周边暗物质应该集中于地球周围半径大约为7万公里的空间内，其密度远远高于此前天文学家们所估算的密度。“这些暗物质主要局限于月球公转轨道之内，最终衰竭于地球表面附近。它的密度极高，比银晕密度高出2000亿倍。”

当然，暗物质可以用来解释飞行异常现象，但同时又引出了一个新的谜团。这些暗物质是如何汇集于地球周围的呢？阿德勒认为，要达到如此高的密度，肯定存在一种层叠堆积的机制。科学家们认为，正是暗物质促成了宇宙结构的形成，如果没有暗物质就不会形成星系、恒星和行星，也就更谈不上今天的人类了。宇宙尽管在极大的尺度上表现出均匀和各向同性，但是在小一些的尺度上则存在着恒星、星系、星系团、巨洞以及星系长城。而在大尺度上能过促使物质运动的力就只有引力了。但是均匀分布的物质不会产生引力，因此今天所有的宇宙结构必然源自于宇宙极早期物质分布的微小涨落，而这些涨落会在宇宙微波背景辐射(CMB)中留下痕迹。

几十年前，暗物质刚被提出来时仅仅是理论的产物，但是现在我们知道暗物质已经成为了宇宙的重要组成部分。暗物质的总质量是普通物质的6.3倍，在宇宙能量密度中占了1/4，同时更重要的是，暗物质主导了宇宙结构的形成。暗物质的本质现在还是个谜，但是如果假设它是一种弱相互作用亚原子粒子的话，那么由此形成的宇宙大尺度结构与观测相一致。不过，最近对星系以及亚星系结构的分析显示，这一假设和观测结果之间存在着差异，这同时为多种可能的暗物质理论提供了用武之地。通过对小尺度结构密度、分布、演化以及其环境的研究可以区分这些潜在的暗物质模型，为暗物质本性的研究带来新的曙光。

在引入宇宙膨胀理论之后，许多宇宙学家相信宇宙是平直的，而且宇宙总能量密度必定是等于临界值的（这一临界值用于区分宇宙是封闭的还是开放的）。与此同时，宇宙学家们也倾向于一个简单的宇宙，其中能量密度都以物质的形式出现。如果人类不了解暗物质的性质，就不能说我们已经了解了宇宙。现在已经知道了两种暗物质——中微子和黑洞，但是它们对暗物质总量的贡献是非常微小的，暗物质中的绝大部分现在还不清楚。

4: 多国天文学家办 GREAT10 挑战赛 搜寻暗物质存在证据

北京时间12月11日消息，据国外媒体报道，宇宙学家希望游戏爱好者、程序员、计算机科学家和各行各业奇才们来帮助他们确定暗物质存在的证据。一个由多国天文学家组成的国际研究小组近日举办了一项名为“GREAT10”挑战赛（引力透镜准确性试验挑战赛），邀请广大天文爱好者和计算机天才来共同探索一种能够更好地分析星系扭曲图像的方式，旨在发现潜伏于宇宙中的不可见暗物质的证据。

宇宙中大块的物质块实际上可以起到一种巨型透镜的作用，可以在最临近的区域内扭曲时空。穿过物质块的光线往往会被扭曲变形，这种现象被称为“引力透镜”效应。有些时候，这种扭曲是非常明显的，比如美国宇航局“哈勃”太空望远镜所拍摄的一些遥远星系族的图像，都可能存在扭曲现象。

但是有时这种扭曲太过微妙，以致于人类肉眼根本识别不出来。此外，天文学家们在利用望远镜拍摄星系图像时，也常常会受到望远镜噪音的影响。因此，宇宙学家们转而希望有人能够利用机器学习算法“教会”计算机来识别模式。挑战赛组织者之一、美国宇航局宇宙学家贾森-劳德斯表示，“在星系形状图像受到各种各样噪音影响的情况下，我们正在努力教计算机挑出其中最正确的图像。”

挑战赛组织者希望，机器学习领域和计算机科学领域的专家和天才们能够带来最新的思想。不过，挑战赛并不仅仅局限于上述专家们，任何人都可以参与。挑战赛组织者之一、英国爱丁堡大学天体物理学家托马斯-基特青表示，“应用于游戏和数码相机中的图像处理软件和技术都非常相似。任何在图像处理和软件开发领域中有经验的人都可以参与挑战赛。”

劳德斯认为，“GREAT10”挑战赛与其他的民间科学工程挑战赛相似。不过，“GREAT10”挑战赛获奖者除了得到物质奖品外，他们或许还能够帮助科学家解答天文学中最奥妙也是最基本的一个谜团：宇宙究竟是由什么组成的？最终，挑战赛中研发的计算机程序将被用于揭开暗物质和暗能量的神秘面纱。

通过研究轻微扭曲的星系，科学家们或许能够绘制出宇宙中暗物质的详细地图。暗物质被认为是占据宇宙24%的不可见填充物。知道了暗物质在哪里以及如何变化将能够帮助天文学家更好地解密暗能量。暗能量又是一种更加神秘的事物，它构成了宇宙的72%。

劳德斯表示，“最令人兴奋的是，我们将采用一种多学科综合方法去解决所有科学中最压抑的问题之一。最终目标就是发展出一种关于宇宙的组成以及宇宙最终命运的研究方法。即使你没有终生研究宇宙学，但你

同样也可以通过‘GREAT10’挑战赛做出真正的贡献。”

5、新华社电 中国日报网站特稿

它无所不在，却又无迹可寻。没有它就没有我们的宇宙，更谈不上今天的人类。它就是暗物质，一个让物理学界追寻半个多世纪的谜。2013年4月3日，诺贝尔奖获得者、美籍华裔物理学家丁肇中及其阿尔法磁谱仪(AMS)项目团队宣布18年来首个实验成果，其团队借助阿尔法磁谱仪已发现40万个正电子，这些正电子可能来自人类一直寻找的暗物质。此前科学家从未明确探测到暗物质粒子。

或需数月才能得到更明确答案

这项研究成果是安装在国际空间站上的价值20亿美元的阿尔法磁谱仪(AMS)发现的，该设备重约7吨，2011年5月安装在空间站上。

国际科学家团队经过观察，发现了一种极其罕见的高层反物质电子。而这种电子的出现与暗物质粒子相碰撞会相互破坏并产生正电子的理论相吻合。“这种现象可以支持暗物质存在的理论，不过目前还无法排除另一种来源的可能性。”AMS项目负责人丁肇中博士介绍说。

暗物质理论权威人物、芝加哥大学的迈克尔·特纳教授也认为AMS的研究数据显示出暗物质存在的可能性，但还需要进一步实验确定。丁肇中博士也表示，研究团队有可能会在几个月时间内得到更加明确的答案。

AMS有颗“中国芯”来自中科院电工所

3日发表的丁肇中团队报告，后附一份长长的作者名单。阿尔法磁谱仪项目荟萃了全球54个科研机构的数百名研究人员，其中名列第七的是中国的中科院电工所。阿尔法磁谱仪有颗“中国芯”，它最关键的大型磁体来自中科院电工所。

据介绍，要将一个大型磁铁放入太空是AMS项目的最大挑战之一。中国科学家选择新型高磁能积钕铁硼材料，采用独特的磁路设计，完全符合实验要求，可以使磁谱仪使用寿命长达18到20年，并顺利通过了美国国家航空航天局严格的安全审查，成为人类送入宇宙的第一块大型磁体。

小知识 没有暗物质星系、恒星不会形成

暗物质是宇宙中看不见的物质。现在我们看到的天体，要么发光，如太阳，要么反光，如月亮，但有迹象表明，宇宙中还存在大量人们看不见的物质。它们不发出可见光或其他电磁波，用天文望远镜观测不到。迄今的研究和分析表明，暗物质在宇宙中所占的份额远远超过目前人类可以看到的物质。宇宙中最重要的成分是暗物质和暗能量，暗物质占宇宙25%，暗能量占70%，我们通常所观测到的普通物质只占宇宙质量的5%。

暗物质被认为是宇宙研究中最具挑战性的课题。人们认为暗物质促成了宇宙结构的形成，如果没有暗物质，就不会形成星系、恒星和行星，更谈不上今天的人类了。暗物质的存在是通过天文观测推测出来的，然而目前被广泛认可的粒子物理学标准模型预言的62种基本粒子中不包含能解释暗物质的基本粒子，因此，探测和研究暗物质很可能导致物理学界新的革命。

-----原标题：或能首次证明暗物质存在

6、传统理论认为宇宙中的暗物质应该是紧密地聚集在星系的中心，但最近一项新的研究表明，暗物质均匀地散布在星系之中，使神秘的暗物质进一步复杂化，越来越让科学家迷惑不解，这说明人们对暗物质还知之甚少，从而提醒理论学者对传统理论进行修正。该研究结果刊登在即将出版的《天体物理学》杂志上。

暗物质与暗能量被认为是宇宙研究中最具挑战性的课题，它们代表了宇宙中90%以上的物质含量。暗物质无法直接被观测到，人们目前只能通过引力产生的效应得知宇宙中有大量暗物质的存在。尽管不知道暗物质具体是什么，科学家们已经逐步建立了一个很好的模型来描述其特性。标准的宇宙模型认为，暗物质由冷的、运行缓慢的奇特粒子构成，由于重力作用，它们聚集在一起，形成暗物质团。宇宙中充满暗能量和暗物质，随着时间的流逝，暗物质团会成长并吸引正常物质，形成如今所见的星系。这种“冷暗物质”模型做得非常好，模拟了暗物质在大多数情况下的行为模式，它设想暗物质应该紧密地聚集在星系的中心。然而，当把它应用到“迷你型”的矮星系时，却不适用了，暗物质的分布情形似乎比模型设想得更分散。

在哈佛-史密松天体物理中心(Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics)的一项新研究中，不依赖于任何传统暗物质理论，研究人员使用一种新的方法计算出两个矮星系的暗物质分布。他们研究的是天炉座(Fornax)和玉夫座(Sculptor)这两个银河系附近的矮星系(dwarf galaxies)。研究人员之所以选择矮星系作为研究对象，是因为矮星系由99%的暗物质和1%的正常物质(例如：恒星)所构成，这种差异性使它们成为研究暗物质的理想对象。天炉座和玉夫座只有100万至1000万颗恒星，相较之下，银河系拥有大约4000亿颗恒星。研究人员测量这些矮星系的方位、速度和1500至2500颗恒星的基本化学成分。测量数据显示，这两个矮星系的暗物质均匀地分布在横跨几百光年的较大区域中，与理论预测结果相违背。而之前的预测认为，暗物质的密度应该朝向星系中央明显增加。此项研究的负责人马特·帕尔默(Matt Palmer)

表示：“我们的测量结果否定了有关“冷的”暗物质在矮星系中的结构的基本预测。除非理论家修正这些预测，否则“冷的”暗物质不符合我们的观测数据。”

英国剑桥大学研究员豪尔赫（Jorge Peñarrubia）在一份声明中说：“如果一个矮星系是一个桃子，标准宇宙模型认为，我们应该在桃子中心找到暗物质“核”，相反，我们研究的这两个矮星系却像是无核的桃子。测量结果表明，标准理论模型可能有误。”

研究人员推测，也许是正常物质影响暗物质的程度超过预期，或者是暗物质并不“冷”，移动速度也不慢。研究人员还将进一步研究更多矮星系，特别是暗物质比例较高的矮星系，以确认上述何者正确。

据悉，在宇宙学中，暗物质是指那些不发射任何光及电磁辐射的物质，但它却能干扰星体发出的光波或引力，其存在能被明显地感受到。暗物质存在的最早证据来源于对球状星系旋转速度的观测。科学家曾对暗物质的特性提出了多种假设，但直到目前还没有得到充分的证明。我们必须知道，暗物质促成了宇宙结构的形成，如果没有暗物质就不会形成星系、恒星和行星，更谈不上今天的人类了。如果我们不了解暗物质的性质，就不能说我们已经了解了宇宙。现在已经知道了两种暗物质——中微子和黑洞，但是它们对暗物质总量的贡献是非常微小的，暗物质中的绝大部分现在还不清楚。2007年1月，暗物质分布图终于诞生了，70位研究人员经过4年的努力绘制出了一幅三维的暗物质“模拟图”，勾勒出相当于从地球上看到，8个月亮并排所覆盖的天空范围中暗物质的轮廓。更妙的是这张分布图带给我们的信息，首先我们看到，暗物质并不是无处不在，它们只在某些地方聚集成团状，而对另一些地方却不屑一顾。但最近的测量结果表明，占据宇宙中大部分空间的暗物质的分布情形与传统理论相悖，暗物质均匀地散布在这些星系之中，这表示标准的宇宙暗物质模型图的某些部分可能要修改。

表 1, 根据光度方法测量质量的星系物质密度

星系名称	星系半径 R (千 Pc)	星系质量 M ($10^{10} M_{\odot}$)	星系质量密度 ρ (g/cm^3)
NGC 5248	R=12.1	M=4.2	$\rho = 4.2 \times 10^{-25}$
NGC 5383	R=19.9	M=4.6	$\rho = 1 \times 10^{-25}$
NGC 6181	R=14.3	M=6	$\rho = 3.6 \times 10^{-25}$
NGC 7331	R=15.5	M=6.1	$\rho = 2.9 \times 10^{-25}$
NGC 157	R=12.7	M=5	$\rho = 4.3 \times 10^{-25}$
NGC 253	R=9.9	M=12	$\rho = 2.2 \times 10^{-24}$
NGC 598	R=8.7	M=3.9	$\rho = 1.0 \times 10^{-24}$
NGC 613	R=17.7	M=13	$\rho = 4.1 \times 10^{-25}$
NGC 681	R=8.8	M=1.8	$\rho = 4.6 \times 10^{-25}$
NGC 1084	R=9.5	M=1.5	$\rho = 3 \times 10^{-25}$
NGC 1808	R=8.7	M=2.4	$\rho = 6.4 \times 10^{-25}$
NGC 1792	R=8.8	M=1.8	$\rho = 4.6 \times 10^{-25}$
NGC 2903	R=14.2	M=6.1	$\rho = 3.8 \times 10^{-25}$
NGC 3034	R=6.4	M=1	$\rho = 6.7 \times 10^{-25}$
NGC 3227	R=14.6	M=3.6	$\rho = 2 \times 10^{-25}$
NGC 3504	R=9.4	M=1.0	$\rho = 2 \times 10^{-25}$
NGC 3521	R=13.6	M=8.6	$\rho = 6 \times 10^{-25}$
NGC 3646	R=15.2	M=18.6	$\rho = 2.5 \times 10^{-24}$
NGC 3623	R=12.1	M=10.5	$\rho = 1 \times 10^{-24}$
NGC 4258	R=14	M=7.5	$\rho = 4.8 \times 10^{-25}$
NGC 4605	R=3.3	M=0.1	$\rho = 2.5 \times 10^{-25}$

星系名称	星系半径 R (千 Pc)	星系质量 M ($10^{10} M_{\odot}$)	星系质量密度 ρ (g/cm^3)
NGC 5005	R=10.2	M=5.9	$\rho = 5.1 \times 10^{-24}$
NGC 5055	R=10.7	M=4.3	$\rho = 6.2 \times 10^{-25}$
NGC 5194	R=9.5	M=6.4	$\rho = 1.3 \times 10^{-24}$

表 2, 根据动力学分析测量质量的星系物质密度

星系名称	星系半径 R 千 pc	星系质量 M ($10^{10} M_{\odot}$)	星系质量密度 ρ (g/cm^3)
NGC 45	R=4.2	M=2.1	$\rho = 5 \times 10^{-24}$
NGC 55	R=19.2	M=2.9	$\rho = 7.2 \times 10^{-26}$
NGC 224	R=19.8	M=31.0	$\rho = 7 \times 10^{-25}$
NGC 247	R=9.8	M=1.8	$\rho = 9 \times 10^{-24}$
NGC 300	R=8.6	M=3.2	$\rho = 8.9 \times 10^{-25}$
NGC 428	R=6.3	M=2.1	$\rho = 1.48 \times 10^{-24}$
NGC 628	R=13.6	M=3.9	$\rho = 2.7 \times 10^{-25}$
NGC 772	R=25.4	M=23	$\rho = 2.3 \times 10^{-25}$
NGC 925	R=13.8	M=4.9	$\rho = 3.3 \times 10^{-25}$
NGC 1055	R=19	M=6.6	$\rho = 1.7 \times 10^{-25}$
NGC 1097	R=20.1	M=64	$\rho = 1.4 \times 10^{-24}$
NGC 1156	R=5.4	M=0.63	$\rho = 7 \times 10^{-25}$
NGC 1365	R=28.6	M=17	$\rho = 1.2 \times 10^{-25}$
NGC 1637	R=6.3	M=1.3	$\rho = 9.2 \times 10^{-25}$
NGC 1744	R=11.8	M=9.6	$\rho = 1 \times 10^{-24}$
NGC 2366	R=4.8	M=0.16	$\rho = 2.5 \times 10^{-24}$
NGC 2403	R=13.9	M=7.8	$\rho = 5 \times 10^{-25}$
NGC 2683	R=10.2	M=2.8	$\rho = 4.7 \times 10^{-25}$
NGC 2835	R=10.1	M=5.8	$\rho = 5 \times 10^{-25}$
NGC 2841	R=9.9	M=4.2	$\rho = 7.6 \times 10^{-25}$
NGC 3079	R=19.2	M=5.7	$\rho = 1.4 \times 10^{-25}$
NGC 3109	R=5.9	M=0.60	$\rho = 5.1 \times 10^{-25}$
NGC 3198	R=16.6	M=6.0	$\rho = 2.3 \times 10^{-25}$
NGC 3319	R=11.8	M=1.5	$\rho = 1.6 \times 10^{-25}$

表 3, 哈勃 1964 年根据质光比计算星系质量密度表

哈勃类型	质量太阳单位 M_{\odot}	质光比太阳单位 M_{\odot}	平均密度 M_{\odot} / pc^3	星系质量密度 g / cm^3
E	2×10^{11}	20-70	0.16	1.2×10^{-23}
Sa	1.6×10^{11}	6.6	0.08	5.9×10^{-24}
Sb	1.3×10^{11}	3.6	0.025	1.8×10^{-23}
Sc	1.6×10^{11}	1.4	0.013	9.6×10^{-25}

Irr		0.9	0.003	2.2×10^{-25}
-----	--	-----	-------	-----------------------

5、暗能量问题的提出过程

问题导引：《科学》杂志 2004 年第 10 期的劳伦斯·M·克罗斯专访中提到：目前最让物理学家困惑的问题有三个：A、暗能量的本质是什么？B、怎样调和黑洞蒸发与量子力学？C、是否存在额外维度？

“我们至今所能达到的最远的距离为 1.5 亿光年，但在这个距离内我们已经发现天体在分散着，好像是受了一种扩散力似的。我们暂时在这里这样结论，宇宙斥力已获得胜利，而支配着扩散。”——A·S·爱丁顿，1932 年。

宇宙学最近的两个发现证实，普通物质和暗物质还不足以解释宇宙的结构，还有第三种成分，它不是物质而是某种形式的暗能量。这种神秘成分存在的第一个证据，来源于对宇宙构造的测量，爱因斯坦认为，所有物质都会改变它周围时空的形状。因此，宇宙的总形状由其中的总质量和能量决定。最近对大爆炸剩余能量的研究显示，宇宙有着最为简单的形状——是扁平的，这也反过来提示了宇宙的总质量密度。但天文学家在将所有暗物质和普通物质的可能来源加起来之后发现，宇宙的质量密度仍少了 2/3。

第二个证据表明该成分一定是能量。对遥远超新星的观测显示，宇宙扩张速度并不像科学家设想的那么慢；事实上，扩张速度正在加快，宇宙的加速很难解释，除非有一股普遍的推动力持续将时空结构向外推。最近的实验表明，宇宙膨胀正在加速而不是放慢。这一结论有悖引力具有吸引力的基本概念。如果这些测量成立，就能量的物质形式存在，它的引力具有排斥性而不是吸引力。对膨胀率的详细测量有助于对提出的各种解释暗能量的理论模型加以区别。美国劳伦斯伯克利国家实验室 (LBNL) 超新星宇宙学项目的研究人员，利用从观测 1a 型超新星得到的数据直接观测宇宙的加速膨胀。要研究这种类型的超新星，必须观测大量的星系，因为每 400 年每个星系才只有唯一的一种类型的超新星。这个合作组使用智利天体望远镜、Keck 天体望远镜和哈勃望远镜观测和收集 1a 型超新星的数据。

到目前为止，利用哈勃望远镜仅对 25 个超新星进行了深入研究。2003 年 1 月，被称为“超新星工厂”开始利用近地星形描述天体望远镜 (GLAST) 观测 Haleakala 和 Palomar I 和 II，每隔 4 夜获得 1a 型超新星一个接近峰值亮度。这些观测每夜产生 50 千兆字节的数据，由美国国家能源研究计算中心 (NERSC) 的超级计算机和法国超新星观测组合作进行处理。NERSC 超级计算机可产生模拟，支持其他数据收集方法。通过超新星爆发中的中等大小的星，这些方法可直接对从原始星到超新星爆发后核心的核合成进行测量。

NERSC 超级计算机产生的模拟也可用于 LBNL 超新星宇宙学项目组领导的超新星加速探测卫星和高- Z 超新星寻找组进宇宙加速膨胀的研究。

自从牛顿提出万有引力定律以来，有关引力机制问题一直未得到完全解决。实验和研究证明引力统治着整个宏观世界，自从天文学家证实有暗能量存在以后，统治宇宙的不再是仅占 4% 可以看得见的物质之间的引力作用，而是一种称之为“暗能量”的反引力作用。于是人们重新审视了太阳和其邻居比邻星 (4.28 光年) 的关系，发现太阳的经典引力范围仅有 0.055 光年 (它包括最近发现的太阳系第 10 号行星)，即相当于现在的太阳系边缘 (柯伊伯峭壁) 的 70 倍，也就是说 97.4% 的范围变成了反引力的表达，它和太阳在银河系中的质量表达相一致。同一个太阳，为什么有两种方向相反的引力和反引力的表达？问题的严重性就在于太阳的物理学天空是透明的，反引力 (暗能量) 能藏在什么地方呢？后来，科学家在实验室里又发现了冷中子的反常表现。人们看到，不论何种分子构成的物质，等效原理总是成立，既然冷中子具有静止质量，理应遵循这条规则，然而实验却替冷中子作了“不”的回答。同一个中子，也有两种引力的表达。20 世纪的引力理论显然对此无能为力。

1916 年，Einatein 把狭义相对论进一步上升为广义相对论，建立起一种几何化的引力理论，把引力归结为物质的存在所导致的“时空弯曲”，取得很大成功。1929 年，Hubble 通过天文观测提出了反映星系退移速度与距离关系的哈勃定律；1937 年，P. Dirac 提出大数假说【2】，推测引力常数可能反比于宇宙时标，原子尺度等微观量也可能随着宇宙的膨胀而发生相应的变化。在由 Brans—Dicke 建立的标量——张量引力理论中，引力常数被认为是与宇宙的质量密度相关，当考虑膨胀宇宙模型时，理论上预言了引力常数随时间减小。进而有多种不同的实验，探讨引力常数的变化规律【3】【4】。1965 年，K. L. Stanjukovich 从 Einatein 引力场方程出发并类比给出本底引力子，其能量约为 10⁻⁵¹ 焦耳，还推断哈勃常数 H_0 即是本底引力子频率【5】。1975 年，S. Malin 把宇宙膨胀与物质静质量变化联系起来，指出随着宇宙的膨胀，静质量约按 10⁻¹⁰/年的比率而减少【1】。对于宇宙的膨胀，现在大都倾向于宇宙大爆炸理论的解释，并认为引力起着减缓宇宙膨胀速度的作用。1998 年，发现宇宙实际上在加速膨胀，令人们感到震惊和困惑，激发了对可能支持膨胀理论的寻找。目前，对宇宙加速膨胀的一种解释是假定存在着一种“暗能量”，它和引力作用相反，推动着

宇宙膨胀的越来越快。天文学家发现，在遥远的宇宙空间（约 50 亿光年）， 1α 型超新星的红移值明显变大了。就是说宇宙在加速膨胀，宇宙膨胀不仅有爆炸发生后的余力，还有一种根本不了解的反引力存在。按照 20 世纪的科学理论，就必须存在着一种普通的相互作用力保持着空间结构向外扩张，这就是科学界通常所称的“暗能量”。“暗能量”会是什么呢？我有位朋友持否定态度，他怀疑这些观察有失误或作秀的嫌疑，我向他提了两个问题：一是地球和月球之间，引力的大小与距离平方严格成反比，也就是说纽康系数为零；而行星之间或地日之间，还需要增加 1 个纽康系数，或者说有一部分引力被反引力抵消了，这是一种什么样的反引力？既然类地行星就有，地面实验室也应该有，我给他设计了一个实验：过冷中子的反引力表达在午夜（24:00）时有 1 个极大值，在正午（12:00）时有 1 个极小值，对超流体的多普勒测速也能得到相同的结论。这些实验，有条件的人都可以重复，这是实实在在的一种反引力，您能解开这个死结吗？这是过去任何一种理论都无法解析的。

1998 年以来，为解释宇宙加速膨胀运动，一些科学家又提出“暗能量”概念，认为暗能量作为一种巨大的斥力在推动宇宙加速膨胀。揭示宇宙中这两种“黑势力”之谜成为了当前宇宙学的最大一个热点。日前，美国范德比尔特大学的理论物理学家罗伯特·谢勒提出一个新模型，把这两个谜缩减为一个，即认为暗物质和暗能量只是单一一种未知力量的两个方面。6 月 30 日一期《物理学评论通信》杂志上刊载了描述他的这一模型的一篇文章。他说：“思考这个问题的一个方式是：宇宙充塞着一种看不见的流体，这种流体会对常规物质施加压力，并改变宇宙扩张的方式。”谢勒认为，他的这一模型极其简单，并可避免先前试图把暗物质和暗能量统一起来的一些理论模型中的困难。谢勒在其理论模型中，把暗物质和暗能量统归为一种称为“标量场”的奇特能量形式。这种能量场有着严格的定义，而且性质复杂。在此，“场”是指一种具有能量和压力、遍及整个空间物理量。宇宙学家最先是用量子场来解释宇宙大爆炸之后的暴涨过程。根据暴涨理论，宇宙在大爆炸后即经历了一个持续时间不到一秒但暴涨了几万万亿倍的急剧膨胀过程。谢勒在其模型中引入了一个第二代标量场，称为“K-本质”。“K-本质”这一概念是由普林斯顿大学的理论物理学家保罗·斯泰恩哈德等人解释暗能量而提出来的，但谢勒是第一个指出一种简单的“K-本质”标量场也可以用来解释暗物质的人。科学家们之所以提出“暗物质”和“暗能量”两个不同概念，原因是它们的表现不同。暗物质好像有质量并会形成巨大的团块，宇宙学家事实上计算出这些暗物质团块的引力作用在使常规物质形成星系的过程中起了关键作用。而暗能量相反地似乎是没有质量的，并均匀分布在宇宙空间，其作用与引力相反，是一种斥力，把宇宙推开来。“K-本质”标量场能随时间而改变其行为。谢勒在研究一种非常简单的“K-本质”标量场——其中潜在的能量是固定的——时，发现这种标量场在其演化的某一个阶段时会发生团聚，导致看不见的暗物质粒子的效果，而随后在另一个阶段则会均匀分布在宇宙空间，具有暗能量一样的性质。谢勒说：“这个模型在一段时间很自然地演化成为一种像是暗物质的状态，然后又进到像是暗能量的状态。当我认识到这一点时，我想，‘这看来很有启发意义，值得好好研究一下。’”于是，谢勒更详尽地检查了这个模型，发现它不会产生先前那些试图把暗物质和暗能量统一起来考虑的理论模型的困难。

1915 年，Einstein 发表他的广义相对论。1917 年，他将广义相对论公式应用到整个宇宙，指出宇宙正在膨胀。那时，科学家们相信宇宙是静止不变的，宇宙膨胀的理论似乎是荒谬的。面对着不符合“常识”的公式，Einstein 觉得唯一的选择就是引进一个附加因素，以使他的理论导出一个静止不变的宇宙。而到 20 世纪 20 年代晚期，天文学家发现宇宙的确在膨胀，因此 Einstein 的附加因素是不必要的。一位名叫艾伦·古思的美国年轻理论家 1981 年发表了一篇革命性的文章，认为“大一统理论”说明一种极为强大的宇宙力可能在大爆炸中出现，导致宇宙不可思议地快速膨胀。尽管古思的观点某些细节还有缺陷，但其他理论家抓住了“宇宙膨胀”这一基本观点，这主要是由于它从技术角度解决了大爆炸的一些难题。现在天文学家必须解释为什么曾经普遍的宇宙常数在大爆炸发生几个月之后就完全结束了。在 20 世纪 80 年代，霍金等人试图找出能够解释宇宙常数为何消失的论据，但没有一个人令人信服。美国获得诺贝尔奖的物理学家温伯格因此声称，宇宙常数是物理学上一个名副其实的危机。10 年后的 1998 年，这个危机被天文学家证明，宇宙常量在大爆炸后根本没有结束，而是似乎继续在宇宙中起作用。并从重力手中夺得了控制权，以前所未有的速度推动宇宙膨胀。这种力量很快被称为“暗能量”。

最早描述暗能量的理论模型是修改广义相对论，引入“宇宙常数”这个量。“宇宙常数”是 Einstein 建立静态宇宙模型时提出的一个概念，为的是和引力作用平衡，防止这样的宇宙模型在引力作用下收缩成一个点。但是，在天文学家观察到宇宙在膨胀后，Einstein 放弃了这个概念，因为他觉得这个概念已经不必要了。现在一些解释暗能量的理论模型重新引入“宇宙常数”概念，可以在很大程度上说明暗能量所导致的效应，但是这并不能解释暗物质。一种试图把暗物质和暗能量统一起来的努力是恰普雷金气体模型，这种理论模型以一位俄罗斯科学家上世纪 30 年代的工作为基础，能够先形成类似暗物质的状态随后形成类似暗能量

的状态,但它不能说明星系的形成过程。今年初,哈佛大学的尼玛·哈卡尼-海默等人也提出了一种把暗物质和暗能量统一起来的模型,他们认为暗物质和暗能量是由一种看不见的、无所不在的流体的不同行为导致的,他们把这种流体称为“幽灵冷凝物”。这个模型和谢勒的模型有类似之处。谢勒本人承认,尽管他的模型有许多积极特征,它还是有一些缺陷。例如,它需要特别细微的“微调”才能使模型工作。谢勒本人还警告说:还需要进行更多的研究来判断该模型的表现是否和其他观察材料相一致。另外,这个模型也不能回答这样一个“巧合”问题:为什么我们生存在一个计算所得的暗物质和暗能量的密度大体相当的时期?许多科学家怀疑这是否意味着目前的时期有什么特殊之处。1970年Isaak做的转动圆盘上的穆斯堡尔效应实验给出的以太风速上限只有0.05m/s,如何解释?其实,穆斯堡尔效应实验能证明的仅仅是:以太风昼夜变化的差不大于0.05m/s【2】。

2004年,美国空间望远镜科学研究所里斯为首的小组宣称,他们测量了哈勃空间望远镜新发现的红移值达到1.6的16个Ia型超新星,发现宇宙明显地是在40~60亿年前之间开始加速膨胀的。他们认为,这是当空间中物质密度因宇宙膨胀稀薄到一定程度时,暗能量的斥力胜过物质间的引力吸引所致。暗能量究竟是什么?一种意见认为,暗能量就是Einstein在用广义相对论说明宇宙时,为使宇宙模型维持静止状态而引进的宇宙常数所标志的暗能量。其主要特征是能量密度在宇宙历史的所有时期保持不变,是一个恒量;另一种意见认为,是充斥在空间中的第五要素,这种形式的暗能量不是恒定不变的,因时间和空间而异。若是前者,宇宙膨胀一直以相对平稳的方式进行,恒星、星系和星系团也一直保持在一起;若暗能量是后者,则有可能使宇宙膨胀得越来越快,以至于使恒星、行星,甚至于原子产生破裂状态。近几年来,由于微波背景辐射的细致观测,也导致了以下一些惊人的结果:a)宇宙年龄是 137 ± 2 亿年;b)哈勃常数是 $0.71 \pm$ 公里/秒/Mpc;c)宇宙呈现以下结构,宇宙总质量(100%) \cong 重子+轻子(4.4%)+热暗物质($\leq 2\%$)+冷暗物质($\approx 20\%$)+暗能量(73%),而总密度 $\Omega_0 = 1.02 \pm 0.02$,亦即恰好差不多等同于平直空间所要求的临界密度。由此可以推断出,我们的宇宙经历了一个先减速后加速的膨胀过程,原因就是暗能量的负引力作用和物质的引力作用综合决定宇宙的膨胀速率。

通常物质(包括暗物质)的特点是:如果状态方程由 $P = W\rho/n$ 所表示,(其中P是压力, ρ 是密度,W是某一常数,n是某一数值),那么对普通物质恒有 $W \geq 0$,而暗能量的状态方程却是 $W = -1$,意味着压力P是负值,而在通常的状态方程中,压力P是正值。过去,物质的密度越大,压力P越大,而现在压力P却“负”得越大!即我们宇宙中必定存在的一种新物质形式——暗能量,与普通物质显著不同的是:具有“负引力”,而物质具有引力。暗能量大约是宇宙总成分的70%。在任何一个给定的空间里,暗能量的负引力作用很小。在日常生活之中不会被感觉出来,但在广漠的宇宙空间中,其作用非常强大,足以使星系和星系团分开。关于它的深入了解,将对我们了解时间、空间、物质和能量,具有关键作用。

天文学家认为,如果50亿光年以远的深处的I型超新星的光度可以作为有效的标准烛光,宇宙中就还应该存在一种与引力作用相反的斥力,表现为与引力相反的能量——暗能量。美国著名的物理学家、诺贝尔奖金获得者史蒂文·温伯格认为,宇宙常量(即暗能量)是物理学上一个名副其实的危机。天文学家按已有的知识和认识将宇宙物质的类别和份额的落阔勾画如下:物质占35%,其中5%是发光和不发光的已知天体,30%是暗物质;暗能量占65%。李政道(T. D. Lee)把这个问题列为21世纪当代科技所面临的四大问题之一,暗物质与暗能量的发现列为2003年十大科技发现的第一位。

参考文献:

1. K. L. Stanjukovich: Gravitational field and elementary particle. Moscow science publishing house, 1965, 208-210.
2. (美) J. D. 杰克逊 著《经典电动力学》(高等教育出版社1980年5月第1版第46~51页)。
3. Dirac P A M. The cosmological constants. Nature, 1937, 139:323.
4. Chin C W, Stothers R. Limit on the secular change of the gravitational constant based on studies of solar evolution. Phys Rev Lett, 1976, 36:833-835.
5. Long D R. Experimental examination of the gravitationa inverse square law. Nature, 1976, 260:417-418.

6、现代物理学对于暗能量实验研究综述

(一) 暗能量合作计划先行一步 成为超越爱因斯坦计划领航员

作者: 刘霞 来源: 科技日报 发布时间: 2007-9-11 9:56:20

美国国家研究委员会的最新报告声称，美国宇航局和美国能源部将把“暗能量合作计划（JDEM）”作为“超越爱因斯坦”计划的第一步来先行实施。

报告说，本来，使用空间激光干涉天线探测引力波的计划应是“超越爱因斯坦”的旗舰计划，它由美国宇航局和欧洲空间局联手进行。然而，在空间激光干涉天线被发射到太空以前，需要做大量测试，且必须等待欧洲空间局2009年升空的“探路者”的结果。因此，“暗能量合作计划”是目前最具技术可行性的选择。

美国宇航局的“超越爱因斯坦”计划是在2003年出台的，主要目的是针对爱因斯坦提出的一些最基本问题进行新的探索，研究黑洞并追溯宇宙大爆炸。它计划2009年上马，由两个天文学观测计划——空间激光干涉天线和“星群-X计划”组成，包括黑洞发现者探测器及暗能量探测器等一系列探测器。黑洞发现者探测器用于更大范围地搜索太空，来寻找黑洞线索，帮助科学家为“星群-X计划”挑选目标；暗能量探测器则将通过观察超新星，使天体物理学家依靠导向目标，追踪暗能量的属性。在国会和科技政策办公室支持下，美国宇航局和美国能源部要求该委员会对这5个项目进行评估，推荐一个“领头羊”。

美国加州大学环境和可持续发展研究专家查尔斯·科勒说：“‘超越爱因斯坦’计划可能改变我们对宇宙的理解。‘暗能量合作计划’可以直达计划的核心，最具有技术可行性。同时与其它任务相比，并不需要很大的技术改进。”

研究人员最感兴趣的是宇宙扩展的速度是否随时间而改变。迄今为止，在该领域，科学家已开始研究超新星加速探测器、暗物质太空望远镜和高级暗物质物理望远镜。“暗能量合作计划”可能建立在其中一个或几个的基础上。

2004年1月，布什总统宣布，美国宇航局将集中精力在机器人和对月球、火星的探索上，“超越爱因斯坦”计划因为与这一目标不吻合而被搁置。2004年8月，美国宇航局和欧洲空间局达成协议，双方将联手完成“超越爱因斯坦”计划，总投入高达10亿美元。但是，由于目前的技术还需要较大改进，因而造成了成本大幅超额，致使计划再次搁浅。

(二) 2011年10月4日，瑞典皇家科学院宣布，将2011年诺贝尔物理学奖授予索尔·珀尔马特、布莱恩·施密特和亚当·里斯三位科学家。

“过去认为在万有引力的作用下，宇宙是在减速膨胀。而他们的发现颠覆了这一观点，并且证明了暗能量的存在。”在接受《科学时报》采访时，中科院院士、天体物理学家陈建生说，为此，世界各国开始着手暗能量的理论和观测研究，我国也相继启动了“973”项目等相关研究和大型光学望远镜的建设。

虽然目前仍不清楚暗能量的物理本质，但对该问题的研究，陈建生认为“很可能是未来基础物理学发展的突破口”。

暗能量的发现

2006年，邵逸夫天文奖曾颁发给同样的三位科学家及其发现。担任该奖评审委员会主席的陈建生认为，宇宙的加速膨胀是一个惊人的重大发现，获得诺贝尔奖也在意料之中。“这项研究已成为科学前沿问题，各国都非常关注，是一个可以跟爱因斯坦相对论相比拟的新领域。”中科院院士、中科院理论物理所所长吴岳良说。“在地球上抛一个苹果上去，其上升的速度不可能越来越大，但在宇宙尺度上，确实是这样的现象。”中科院理论物理所研究员李淼对《科学时报》记者解释说，宇宙中存在一种具有负压强的物质形态，它可以解释天体正在以越来越快的速度远离我们，这类物质被称为暗能量。

理论物理学计算表明，如果用暗能量解释宇宙的加速膨胀，那么宇宙的73%左右由暗能量构成，22%是暗物质，而可通过常人直觉和经典理论描述、印证的物质只占4%多一点。因此，2011年诺贝尔物理学奖的发现，向人类揭露了一个近96%的成分仍然未知的宇宙。国家天文台研究员陈学雷在接受本报记者采访时说，宇宙加速膨胀的结果公布之后，仍有少数学者怀疑超新星的观测或数据分析有错误。但13年来，人们又陆续观测了几百颗超新星。“虽然还存在一些疑点，但数据经过许多天文学家反复验证，迄今并未发现大问题。”物理学家也提出了一些假说：如果宇宙持续膨胀，那么宇宙最终将变成无比寒冷的世界。对此，陈建生解释说，宇宙膨胀的结果是物质被稀释掉，而暗能量不稀释，到最后单位体积内的物质几乎就没有了。不过，“尽管宇宙在膨胀，但地球所在的太阳系内部并不膨胀，地球不会因为宇宙膨胀而死亡”。“宇宙目前有137亿年的历史，如果全宇宙要变得寒冷无比，还需要四五百亿年以上。”李淼说。

(三) 时间轴显示，宇宙的不断膨胀和膨胀加速与暗能量有关。

新浪科技讯 北京时间2月17日消息，据国外媒体报道，意大利都灵天文台天体物理学家最新提出的一项理论认为，普通物质与反物质之间的一种强大的排斥力或许可以用来解释暗能量这一神秘力量。不过，这一争议性理论也引起了诸多质疑。

1998年，科学家发现宇宙不仅仅正在膨胀，而且这种膨胀正在不断加速。这种完全意料之外的行为在

物理学上被称为“最深刻的问题”，因为我们目前对引力的理解认为，宇宙中物质之间的相互吸引力可能会导致宇宙膨胀放慢。

在解释宇宙膨胀加速的问题时，当前主流理论认为，这主要是一种假想的排斥力的存在，即暗能量。但是，意大利都灵天文台天体物理学家马西莫-维拉塔的最新研究成果表明，暗能量产生的效果实际上应该归因于一种“反重力”，这是普通物质与反物质相互排斥产生的结果。

维拉塔表示，“通常情况下，这种排斥性归因于神秘的暗能量。但是没有人知道它是什么，也不知道它的行为方式。我们现在根据众所周知的反物质的排斥力，用一种未知的元素代替一种未知的力量。”

反物质隐藏于宇宙空洞之中？

维拉塔认为，宇宙膨胀加速的关键在于广泛分布于宇宙中的大范围空隙。这些宇宙空洞每一个都有数百万光年宽，它们内部既没有星系也没有星系团，显得异常空旷。距离我们地球最近的宇宙空洞被称为“本地空洞”，位于处女座超星系团中。

维拉塔认为，这些宇宙空洞中含有大量的反物质，这些反物质可能组成反物质星系、反物质恒星和反物质行星。所有这些反物质都不会发出现有传感器能够探测到的辐射，因此我们现在很难看得到它们。“宇宙空洞中的反物质为什么会看不到，可能有许多原因和解释，但是我们并不能确定究竟是哪一种。此外，实验室中的反物质行为完全不同，因为它已完全融入物质世界中。”

维拉塔表示，尽管我们看不到反物质的上层建筑，但是我们可以看见宇宙中观测到它们的影响，因为在星系中反物质肯定会排斥普通物质，并将普通物质推开离得越来越远。维拉塔的最新研究成果即将发表于《天体物理学与空间科学》杂志之上，这一理论将有可能解决其他的宇宙奥秘，如宇宙“迷失的反物质”问题。

根据标准物理学，宇宙大爆炸中产生的物质与反物质粒子应该数量相等。然而，可见宇宙似乎主要由普通物质所主宰。为了测定“本地空洞”中究竟含有多少反物质，维拉塔首先计算究竟需要多少反物质产生的排斥力才能强大到足以解释所谓的“本地薄片”。普通物质，包括银河系和附近其他星系的普通物质都以同样的速度运行。维拉塔解释说，“如果每一个空洞包含的反物质质量与‘本地空洞’计算出的结果相近，那么我们宇宙中拥有的反物质与普通物质应该数量相等，因此最终宇宙将是一个物质与反物质对称的宇宙。”

物质与反物质会排斥吗？

当然，维拉塔的理论是建立在一种未经验证的假设之上，即物质与反物质是相互排斥的。英国牛津大学物理学家弗兰克-克洛泽认为，“没有任何实验证据证明反物质会排斥物质。不过，欧洲粒子物理研究所正计划验证这一观点。”

事实上，欧洲粒子物理研究所物理学家德拉甘-哈杜科维奇前不久已经提出了一个独立的反重力理论来解释暗能量和暗物质问题，该理论也是建立在物质与反物质相互排斥的基础上。哈杜科维奇认为维拉塔的理论“很有趣”，但是他并不认同宇宙是一个物质与反物质对称的宇宙的假设。

哈杜科维奇表示，“主要问题是，空洞中既然有如此大量的反物质，那为何无法看到。”哈杜科维奇的理论认为，量子空间中，反物质粒子本能地突然出现和消失。“为了解释反物质的不可见性，物质与反物质对称宇宙的支持者们将被迫采用另一种假设。如果一个理论是建立于一个假设基础上，而这个假设又马上需要另一个假设来支持，这不是一个好现象。”不过，维拉塔辩称，其理论中的假设都是根据现有物理学中某些确定的理论提出的，根本不需要再引入另一种假设。(彬彬)

7、现代物理学界对于暗物质与暗能量的实验探究

(一) 欧洲在天体粒子物理领域的发展战略

2008年9月29日布鲁塞尔消息，欧洲今天向全世界宣布了欧洲在天体粒子物理(Astroparticle Physics)领域的发展战略。

什么是暗物质(Dark Matter)?宇宙射线(Cosmic Ray)的起源是什么?宇宙中星体经历的剧烈过程起什么样的作用?我们是否可以探测引力波(Gravitational Wave)?物理学家们期望通过这七类大型天体粒子物理项目找到这些问题的答案，这七类项目分别是：

1. CTA: 用来探测高能宇宙伽马射线(Cosmic High-Energy Gamma Ray)的大型契伦科夫望远镜阵列(Array of Cherenkov Telescope)；
2. KM3NeT: 放置在地中海中的一个千米见方的中微子望远镜(Neutrino Telescope)；
3. 搜索暗物质的吨级探测器；
4. 测定中微子质量和基本性质的吨级探测器；
5. 研究中子衰变(Proton Decay)、中微子天体物理(Neutrino Astrophysics)以及探测中微子性质

的百万吨级探测器；

6. 探测带电宇宙射线的探测器阵列；

7. 第三代地下引力波探测器 (Gravitational Antenna)。

来自德国电子同步加速器实验室 (DESY: Deutsches Elektronen Synchrotron) 的 Christian Spiering 是路线图委员会 (Roadmap Committee) 的主席, 他说: “新的激动人心的发现就在我们前面; 在下一个十年中能否引领潮流取决于我们现在做出什么样的决定”。在花了两年的时间规划战略路线图之后, 《欧洲天体粒子物理战略》(The European Strategy for Astroparticle Physics) 的发表标志着欧洲在这个领域日趋国际化的探索过程中为谋求领导地位跨出了重要的一步。

从海底到地下、再到无垠沙漠以及外太空的实验室, 天体粒子物理实验接受了激动人心的挑战。这个领域是粒子物理 (Particle Physics)、宇宙学 (Cosmology) 和天体物理 (Astrophysics) 的交叉学科, 它的目标是探测难以捉摸的粒子, 探索宇宙最深层次的奥秘, 是一个非常有望取得重大进展的领域。

为了确保欧洲各国在天体粒子物理学研究方面能够相互协调, 来自十三个国家的研究机构加入了欧洲天体粒子物理研究网 (ASPERA: AstroParticle ERA-Net), 这是一个由欧洲委员会 (European Commission) 资助的欧洲研究网 (ERA-Net: European Research Area Net)。经过欧洲天体粒子物理研究网的努力, 欧洲国家第一次有一个共同的平台一起参与项目, 并分享他们在天体粒子物理方面的成果。

这个雄心勃勃的计划将联合欧洲国家一起开启一扇探索宇宙的窗口, 并于 2012 年启动像 CTA 和 KM3NeT 这样一批最为先进的项目, 这是非常激动人心的。这个项目的全部预算达到数十亿, 为了实现这个目标需要从现在就开始就逐年增加对于天体粒子物理的投入, 并在十年之后达到百分之五十的增幅。

欧洲天体粒子物理研究网的协调员 Stavros Katsanevas 教授说: “要按时地实现这个七大项目是一个很大的挑战, 但是我们非常自信, 这些项目不会像电影里发生的那样被突然砍掉, 因为欧洲的研究机构都非常支持这几个优先发展的项目, 在其它几个洲也是同样的情况。”

这就是为什么欧洲天体粒子物理研究网将于 2008 年 9 月 29 日和 30 日欢迎来自欧洲之外的全世界 200 位科学家以及基金会的官员, 以谋求国际合作。欧洲的天体粒子物理学家们重申了他们支持致力于探索暗能量 (Dark Energy) 现象的地面和空间计划。他们还呼吁建立一个地下实验室之间的合作网、以及天体粒子物理领域中进行技术创新。此外他们还表示希望能建立欧洲天体粒子物理理论中心 (European Centre for Astroparticle Physics Theory)。

(二) 我科学家挑战现代物理学“两朵乌云”——国家“973”计划项目“暗物质、暗能量的理论研究及实验预研”启动

暗物质和暗能量被称为 21 世纪现代物理学和天文学晴朗天空中的“两朵乌云”, 揭开暗物质、暗能量之谜, 将是人类认识宇宙的又一次重大飞跃, 可能导致一场新的物理学革命。3 月 18 日, 国家“973”计划项目“暗物质、暗能量的理论研究及实验预研”在京启动。这标志着中国科学家将向揭开“两朵乌云”之谜发起挑战。

“随着越来越多和越来越精确的宇宙学数据的获得, 暗物质、暗能量存在的证据变得越来越清楚。而伴随着一系列更高精度的天文学观测实验的实施, 预示着宇宙学研究的黄金时代已经开启。”项目首席科学家、中科院院士、中科院理论物理所所长吴岳良说。

上世纪 30 年代, 美国加州理工学院从事天体物理研究的瑞士籍科学家弗里兹·兹威基研究了星系团内星系的运动。星系团中的星系因被自身引力束缚, 运动速度与引力必须达成平衡才不致出轨。而兹威基发现, 星系团内星系远远不足以产生如此大的引力, 一定还存在人类看不见的其他物质, 并首次提出暗物质存在的可能性。暗物质存在的直观证据是引力透镜现象。当遥远星系发出的光途经某个星系团附近时, 光线就会因星系团引力偏折, 这时的星系团就好似一个透镜, 朝这个方向望去就会看到巨大的光弧甚至同一个星系的几个不同镜像。

“现代宇宙学认为, 整个宇宙中物质占 27%左右, 暗能量占 73%左右。而在这 27%的物质中, 暗物质占 90%, 夸克物质占 10%。”吴岳良解释说, 所有已知物质都是由基本粒子组成, 夸克物质也就是现今为止人类能解释其基本粒子构成的所有物质。但暗物质是由什么组成的仍然是个谜, 甚至对于暗物质粒子的质量是多大, 仍在几十个数量级上无法确定。

19 世纪末物理学晴朗天空中的“两朵乌云”: 迈克尔逊—莫雷实验和黑体辐射实验给物理学界带来了革命性变革, 促使“新理论”——“量子论”和“相对论”的发现, 极大地推进了人类对物质世界的认识。

吴岳良认为, 理解暗物质和暗能量问题同样需要发展和建立新的理论, 一旦取得突破, 将带来一场重大的物理学和天文学革命。根据爱因斯坦引力理论和目前关于宇宙加速膨胀的天文观测, 暗物质、暗能量与宇

宙将来的演化密切相关,通过暗物质、暗能量的研究,人类对物质、时空和宇宙的起源等基本问题将会有更深的认识。为此,2009年,科技部批准“暗物质、暗能量的理论研究和实验预研”项目,中科院多个研究所、上海交通大学、中国原子能科学院等多家科研单位参与其中。吴岳良介绍说,目前,我国科学家对暗物质和暗能量的研究,无论在理论模型和方法,还是实验探测和技术方面都已迈出了重要的一步。

在实验方面,中科院紫金山天文台利用先进薄电离量能器(ATIC)探测器发现高能电子能谱的“超”,可能与暗物质湮灭有关,结果发表在2008年11月20日的英国《自然》杂志上,并入选美国物理协会和欧洲物理协会各自评选的2008年度世界物理学领域重大研究进展;中科院高能物理所多位实验物理学家参与了意大利DAMA实验组对暗物质的长期探测,报道了有关暗物质粒子的可能信号;上海交通大学在暗物质直接探测的XENON探测技术方面已有基础;清华大学在低本底、低能量阈高纯锗探测器方面开展了长期研究。

在理论方面,中科院理论物理所、中科院高能物理所、中科院国家天文台、北京大学、清华大学、中国科技大学、复旦大学等单位的研究人员提出了解释暗物质和暗能量的理论模型和机制,做出了具有国际影响的工作。

“很多方面已有了长期的工作积累和研究结果。我国已具备了开展这方面理论研究和实验探测的基础以及实验所需的合适条件。”吴岳良说。

与此同时,我国科技领域已有的一些重要进展也为破解这一世界重大难题提供了必要条件。例如,我国现有的卫星平台完全能满足暗物质空间探测要求。

据了解,目前清华大学和二滩水电站合作,正在建设全世界最大埋深的暗物质地下探测实验室——四川省锦屏山地下实验室,埋深达2500米(水当量埋深达6000多米),预计年内可完工。

此外,我国科学家已经登上南极冰穹A(Dome A),而南极冰穹A有可能成为世界上条件最好的开展暗能量和暗物质研究的地面观测站址之一,因为这一地点具有最佳视宁度、最佳大气透明度、最长的连续观测时间等有利条件。

据吴岳良介绍,该“973”计划项目课题设置为5个,分别是暗物质的理论研究及相关新物理唯象、暗物质的空间探测实验研究、暗物质的地下探测的前沿技术预研、暗物质吨级液氙探测器的预研和暗能量的理论研究及地面探测方案研究。

该项目的总体学术思路是:发挥理论先行和实验预研的作用,强调理论研究与实验探测设计相结合和多学科交叉融合的优势,从地下、地面到空间多种手段互为补充,构成有机整体,为开展对暗物质的间接和直接探测提供可靠的物理依据和可行的实验设计及有效的探测方案,推进我国空间卫星的天体粒子物理实验平台、四川锦屏山国家深部地下实验室,南极冰穹国家地面天文望远镜观测实验基地的建设。

“项目集中了国内在暗物质和暗能量领域的主要优势单位,组成了一个跨学科的研究队伍。”吴岳良说,研究队伍有开展暗物质和暗能量理论研究需要具备的坚实理论基础,包括粒子物理理论、引力理论、大统一理论(如超弦理论)等基本理论;有加速器、探测器建造和相关技术及国际合作的丰富经验;有长期相关实验组的研究并取得重要成果,积累了丰富的经验。

诺贝尔奖获得者李政道曾说:“了解暗物质和暗能量,是人类向21世纪科学史的大挑战。”据了解,美国和欧洲已分别于2006年和2008年开展了暗物质、暗能量的研究计划。“暗物质研究的发展趋势,必将从天文观测转向对暗物质粒子性质的实验探测。从现在开始到10至20年将是暗物质探测最重要和关键的时期。在暗物质、暗能量国际重大前沿研究领域,我国科学家应该有所作为。”吴岳良说,“希望我国科学家齐心协力、优势互补、通力合作、努力拼搏,经过项目5年的支持,获得跨越式发展。”柯什纳将这看成是一个挑战。他说:“这并不意味着我们的理论中存在着任何瑕疵。我们也并不会因此而失望,相反,我们深受鼓舞。”

8、现代物理学对于暗物质、暗能量的质疑

中国科技大学物理学教授李淼说过:“有多少个暗能量的学者,就能想像出多少种暗能量”

据新华社电通过对遥远星系团发出的X射线进行观测和分析,欧洲航天局科学家最近得出了与暗能量理论不符的结果。不过专家指出,新结果是否意味着人们一直探讨的宇宙暗能量“或许并不存在”,仍需更多的观测研究来证明。Einstein的广义相对论做出过暗能量的假设。据推测,不可见的暗能量可能占据了宇宙质量的大部分,能够产生与引力相反的排斥力,这也许可以解释为什么宇宙会出现加速膨胀现象。关于暗能量理论目前仍有争论。一些科学家认为,要验证暗能量是否存在,办法之一是比较各星系团中炽热气体的比例。星系团由成百上千个星系组合而成,其半径达数百万光年。星系团的特点之一是其中有大量炽热气体,温度在1000万到1亿摄氏度之间。欧洲航天局的XMM牛顿天文望远镜最近捕捉到了古老的遥远星系团发出的X射线。科学家对此进行分析后得出了这些古老星系团中炽热气体所占的比例。他们将这些数据与距

地球最近也就是最年轻的星系团中炽热气体所占比例进行了比较，结果发现二者没有差别。科学家称，新获得的观测结果表明，炽热气体比例在古老星系团和年轻星系团中都是一样的。他们认为，只有假设宇宙中没有暗能量才能解释这一现象。

1981年，伊丽莎白·A·劳舍尔博士解决了纯粹想象时一空中麦克斯维尔公式。该结果表明该解决方案是全 solitons 的（非弥散波；海浪是这样的例子）。在超球面中，一个复杂的（具有涉及-1平方根）超球面是允许的，因为它能够解释粒子对称性的根源（复杂球面的振动造成了它）。数年前在 AAAS 会议上我了解到，如果电磁 soliton 能够发射到宇宙空间中，它将破坏其对称性并造成物质。黑格斯（Higgs）粒子破坏对称性而创造夸克（quarks）。一个电磁 soliton 将破坏对称性；因此，看来我们具有描述在想象中的超球面中如何通过扰乱创造物质的数学工具。此外，是否可能由于想象中的（相）宇宙的超球面的振动造成了重力本身？

中国科学院资深院士沈致远说过：“我有一种预感，但也不敢肯定，就是天文学的两暗与以前的两云很相像，很可能最后出来的东西不是暗能量。所以两暗的问题很有挑战性。”美国著名物理学家斯莫林最近写了一本新书《物理学的困惑》（中译本），他对弦论、暗物质和暗能量理论所持的批判态度以及物理学需要第二个爱因斯坦的呼吁，是令人深思的。早在 1943 年英国物理学家阿瑟·米恩已经证明，利用牛顿引力理论可以很简单地导出弗里德曼方程，而弗里德曼方程就是现代标准宇宙学的基本方程。参考俞允强先生的《大爆炸宇宙学》第 16 页。现有宇宙学中许多结果，包括暗物质和暗能量的推论，以及宇宙学中所有的奇谈怪论，都是在弗里德曼方程基础上导出的。罗伯逊-沃克度规导致膨胀宇宙中天体发出光的运动速度满足伽利略相加规则，违背光速与光源运动状态无关这一现代物理学基本规则，破坏光速不变原理。因此罗伯逊-沃克度规描述的实际上是牛顿力学意义上的时空结构，不是现代物理学相对论意义上的时空结构。其次是用了静态能量动量张量。然而地球观察者与膨胀宇宙的物质之间存在相对运动速度，描述膨胀宇宙必须采用动态能量动量张量，不应当用静态的能量动量张量。如果采用满足相对论光速不变的度规和动态能量动量张量，在爱因斯坦引力场方程基础上就得不到现有的弗里德曼方程。

附录 1：英国最新研究称暗物质和暗能量或不存在

2010-06-18 10:10:57 来源：网易探索

英国天文学家的最新研究却发现，据以确定宇宙物质组成的标准宇宙模型可能是错误的，暗物质和暗能量也许根本就不存在。网易探索 6 月 18 日报道 神秘的暗物质和暗能量的确切性质，一直是天文学界争论的焦点。然而英国天文学家的最新研究却发现，据以确定宇宙物质组成的标准宇宙模型可能是错误的，暗物质和暗能量也许根本就不存在。自上个世纪 60 年代宇宙微波背景辐射被发现后，作为“大爆炸”的遗迹，其被众多天文学家作为构建标准宇宙模型的基础，而关于宇宙物质构成的确认也主要依据宇宙微波背景辐射图谱的分析。2001 年 6 月，美国宇航局(NASA)发射了威尔金森微波各向异性探测器(WMAP)，该探测器在宇宙学参量的测量上提供了许多比早先仪器更准确的数值，依据它提供的数据，宇宙是在不断加速膨胀的。科学家据此提出是暗能量、暗物质的存在导致了宇宙的加速膨胀。认定宇宙是由 4%的“正常”物质，如行星、恒星、小行星和气体等、22%的即不辐射也不吸收光线的暗物质和 74%的暗能量组成。而英国达勒姆大学的汤姆·尚克斯教授和他的学生尤坦恩·萨万维特在向英国皇家天文学会提交的最新研究报告中却称，他们对 WMAP 望远镜的图像平滑方式进行了更为细致的分析，结果发现，图像的平滑处理程度远比以前认为的要大，这意味着对宇宙微波背景辐射的测量并不像过去认为的那样准确，实际的微波背景辐射起伏远比过去认为的要小得多，而目前据此建立的宇宙标准模型可能是错误的，暗物质和暗能量也许根本就不存在。英国皇家天文学会的罗伯特·梅西博士称，这一发现对目前流行的宇宙假说是一个极大的挑战，如果真的如此，则意味着宇宙膨胀的速度正在减缓，并会慢慢停止。对于宇宙的产生和未来发展的认识，都需要重新审视。

尚克斯教授则表示，宇宙微波背景辐射是一个十分有用的分析工具，但还不足以用来作为判定宇宙中暗物质和暗能量存在的充分证据。“如果我们的结果是正确的，那么关于暗物质和暗能量充斥宇宙的说法就不会再有说服力。”他指出，目前的宇宙标准模型需要经过更多的检验，希望正在服役的欧洲普朗克卫星会收集更多的宇宙微波背景数据，并提供更多关键信息以助科学家解答关于宇宙的一系列基础问题。

来源：科技日报

附录 2：

【英国《自然》：迄今同类研究中最广泛且最全面的未能搜寻到暗物质】据英国《自然》杂志网站 4 月 19 日报道，在迄今最大型的同类调查中，在太阳系周围彻底搜寻暗物质踪迹的宇宙学家们空手而归。科学家

们认为，最新研究将颠覆传统的暗物质理论。

暗物质是一种假定中的不可见物质，据信其占据了宇宙总物质的 80%。宇宙理论学家们认为，暗物质是宇宙中的隐形支架，其揭示了结构如何在宇宙中出现，解释了星系如何形成以及快速旋转的银河系为何没有分崩离析。

在最新研究中，智利康塞普松大学的克里斯蒂安·莫尼-比丁和同事使用欧洲南方天文台（ESO）2.2 米的望远镜和其他三台望远镜，测量了太阳系周围一个有限空间内（一个 15 度的圆锥体，最远距离地球 1.3 万光年，在银河系展平圆盘的下方，为以前观察区域的四倍多）的 400 多颗恒星的运行图，原本预期能发现绕着太阳旋转的暗物质存在的证据，结果一无所获。

莫尼-比丁说：“我们得到的太阳周围区域恒星、尘埃与气体的总质量和观测到的结果非常吻合。但我们期待的暗物质却并没有现身，结果表明，那儿最多只存在理论预测的十分之一的暗物质。”如果暗物质的密度如此之低，那么，旨在直接探测暗物质粒子的巨大实验“注定会以失败告终”。

该文章目前已被美国《天体物理学报》杂志接受。澳大利亚斯威本科技大学的天文学家克里斯·弗林评论该文章时称：“我并不会立刻将暗物质抛弃。最新测量的很多方面可能导致他们将暗物质遗漏，即使暗物质就在那里。”尽管如此，他仍然支持发表该文章。但也有研究人员对该研究方法和结论提出了质疑：普林斯顿大学高级研究所的天体物理学家斯科特·特里梅因表示，除非其他研究团队独立观察，得出同样令人不安的结论，才能证实该结果的正确性。

美国伦斯勒理工学院的天文学家海蒂·纽伯格强调称，最新测量由银河系平面附近的物质所支配，这一地方与银河系别处不同，可能主要由正常物质组成，这就使科学家们更难厘清这一区域可能存在哪些暗物质成分。她也怀疑“很多支持这一结论的常规假设的细节可能都是错误的”。她举例说，科学家们假设他们观测的星星群光滑地分布于该银河系平面的上下方，但如果这种分布凹凸不平，那么，计算出的暗物质的密度就是错误的。弗林也认为，莫尼-比丁团队使用的很多方法“可能都是错误的”。莫尼-比丁表示，他并不确定暗物质是否存在，但他们的调查是迄今同类研究中最广泛且最全面的，这一令人震惊的结论必须被慎重对待。“我无法解释我们所观察到的现象。”

第七章：万有引力与弱相互作用之间的关系新探

1、宇观世界、宏观世界、微观世界

当今的理论物理学并不缺乏坚实的数学演绎，缺乏的只是理论发展所需要的活力：新视角、新概念、新思想和深刻的洞察力。新的科学体系的诞生无不是在固有体系的基础上，根据当时所了解的知识，理想化出一系列基本理论，并在这些基本理论基础上发展出来整个体系。但没有人能保证这些基本理论始终有效。当我们学习这些科学体系时，对权威的崇拜，对这些科学体系魅力的迷恋，对整个科学体系坍塌的恐惧使得我们的自由意志与既有结论或权威对立时，我们的第一个反应就是逃避。而作为科学基本的态度和精神的怀疑与批判，则早已被我们置之脑后。逐渐地，我们就把这些基本理论看成神圣不可侵犯的“公理”，即使它们已经不合时宜。

在二十一世纪物理学将在三个方向上继续向前发展（1）在微观方向上深入下去；（2）在宏观方向上拓展开去；（3）深入探索各层次间的联系，进一步发展非线性科学。吴水清先生认为：“在科学研究的路上，我们要以实验为根据，以数学位工具，以实用为目标，以理论为基础，进行开拓和创新。”李政道教授讲：“地球村人面临第三次物理学革命的挑战。”【1】

宇观世界：指宇宙学和天文学研究的范围。长度单位使用天文学单位 $1.496 \times 10^{11} \text{m}$ （等于地球到太阳的距离）或大尺度单位 $9.5 \times 10^{15} \text{m}$ （即光年）；宏观世界：指现实生活涉及到的经验世界。长度主单位使用 m，大单位用 km，小单位用 mm；经典物理学就是适用于这一领域的、添加了许多假设和近似的、非常实用的理论；微观世界：指跟非牛顿范式物理学所研究的热、光、电磁现象相关的，辐射能 ϵ 从粒子中放出、在空间中传播、或被粒子吸收的整个系统。长度单位使用纳米 10^{-9}m 或者埃 10^{-10}m 。宏观描述只描述宏观物质体而不追究其内部的微观结构或超微观结构。微观描述到分子，原子止。超微观描述则到原子以下范围内。宇观只是一般意义下的宏观的扩展，本质还是宏观。所以物质的空间范围应分为：宏观，微观，超微观三大领域。宏观现象、宇观现象和微观现象中都有许多是人们已有的观念和理论所无法解释，这就要求我们修改旧有的观念和理论，甚至创立新的观念和理论。客观世界永远是人类不可超越的老师！我们能够做的是用一个改善的观念和理论去取代旧有的观念和理论，一代接一代地进行下去。这一切不能仅仅靠理论思索，更重要的是科学的实践。经得起客观实践检验的观念和理论才是有生命力的。

力的类型	发生作用的距离	力的强度(以强力为 1)	传递此力的粒子	粒子的引力质量
引力	延伸到非常大的距离	10^{-38}	没有发现	不知道
弱力	约小于 10^{-17} cm	10^{-13}	中间玻色子 W^+ 、 W^- 和 Z^0	约 90 吉电子伏
电磁力	延伸到非常大的距离	10^{-2}	光子	0
强力	约小于 10^{-13} cm	1	胶子	假定为 0

注：1 吉 = 10 亿

玻尔的对对应原理在某种意义上应该看作是一种物理学思想，它表明在原子范围内的微观现象和宏观现象，各自遵循本范围的规律，但微观范围内的规律和宏观范围内的规律间存在对应关系，当把微观范围内的规律延伸到宏观范围时，应与宏观规律一致。

参考文献：

【1】 T. D. Lee: 《Particle Physics and Introduction to Field Theory 》， Science Press, Beijing , 1981.

2、弱相互作用力简介

如果你坚持非要力的精确定义不可，那你永远也得不到!——费曼，《费曼物理学讲义》

弱力是在基本粒子之间还存在另一种短程相互作用力，弱力的作用距离比强力更短，作用力的强度仅力强力的 10^{-13} 倍。弱力在 β 衰变中起重要作用， β 衰变中放出电子和中微子，电子和中微子之间只有弱力作用，弱力也存在其它基本粒子之间。

费米作了一个大胆的尝试，他假定：从质子到中子的衰变过程，是由于自然界中某种新的力引起的。经过一番琢磨，费米得出了几个新颖奇特的结论：

1. 这个力要比电磁力弱 10^{11} 倍，但比万有引力要强得多；
2. 这个力只能发生在四个自旋为二分之一的基本粒子之间；
3. 这个力的作用力程非常短，几乎为零，即参与相互作用的粒子彼此一离开，力就迅速地消失了。

弱力没有本领把任何粒子束缚在一个较复杂的体系中，它只存在于一些粒子发生衰变和俘获的一瞬间，粒子之间一离开，弱力马上就消失。

在已经发现的自然力中，弱力是最独特的一种，费米理论在解释弱作用过程中，尽管获得成功；但他提出：弱力只发生在基本粒子直接接触的一霎那间。

人们认为自然界果真是存在着一种新的自然力——弱力。费米也因创立了弱力理论而闻名天下，他的理论得到了举世公认。

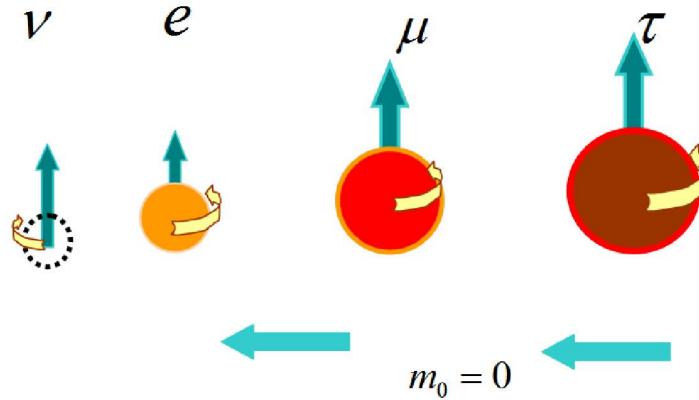
50 年代末，李政道、费曼和盖尔曼等人，提出了一种新的理论——荷电中间玻色子理论。这种理论的建立，在相当大的程度上是基于电磁理论的启发。从中间玻色子理论来看，弱力和电磁力之间，只要把“电荷”换成“弱荷”，把“电流”换成“弱流”，把传递电磁力的“光子”换成传递弱力的“中间玻色子”，就立即可以得到有关弱力理论的新概念。弱力被描写成交换一种叫中间荷电玻色子（这种中间荷电玻色子记作 W^{\pm} 粒子）的过程，根据测不准关系，作用力的力程与交换的粒子的质量成反比。（测不准关系即一个微观粒子和某些成对的物理不可能同时具有确定的数值，其中一个量愈确定，则另一个量的不确定程度就愈大。）电磁力和引力的作用力程为无限大，被交换的光子和猜想的引力子的质量为零。而弱力的作用力程如此之短（小于 10^{-15} 厘米），那么，被交换的 W^{\pm} 粒子的质量必然很大。理论计算出这种粒子的质量，约为质子质量的 75 倍，为几亿电子伏特。正因为中间玻色子太重，现在的高能加速器很难把它产生出来，弱力的中间玻色理论，和费米理论一样，也可以用来解释基本粒子中的弱过程，并且很难区分哪一种理论更好些。

从上面所说的弱力的最基本性质之一就是：弱力是在基本粒子之间存在的一种短程相互作用力。弱力的作用距离比强力更短，只发生在基本粒子直接接触的一霎那间。粒子之间一离开，弱力马上就消失。

对于弱相互作用力来说，表现为中子的 β 衰变。即：中子衰变成质子、电子与电子中微子。上个世纪末，在发现 β 衰变的时候，关于弱相互作用是一个不同的物理作用力的想法，其演化是很缓慢的。只有当实验上发现了其它弱作用，如 μ 衰变， μ 俘获等等，并且理论上认识到所有这些作用能够近似地用同一个耦合常数来描述之后，这一看法才变得明朗起来，才产生了普适的弱相互作用力的看法。只有在此之后，人们

才慢慢地认识到，弱相互作用力形成一个独立的领域，或许可与万有引力，电磁力和强作用核力及亚核力等等量齐观。最早观察到的原子核的 β 衰变是弱作用现象。弱作用仅在微观尺度上起作用，其力程最短，其强度排在强相互作用和电磁相互作用之后居第三位。其对称性较差，许多在强作用和电磁作用下的守恒定律都遭到破坏（见对称性和守恒定律），例如宇称守恒在弱作用下不成立。弱作用的理论是电弱统一理论，弱作用通过交换中间玻色子 ($W^{+/-}$, Z) 而传递。弱作用引起的粒子衰变称为弱衰变，弱衰变粒子的平均寿命大于 10^{-13} s。在费曼图中表现为：中子与电子中微子发生碰撞，在碰撞过程中发生了力的作用，这种力就是弱相互作用力。碰撞后的中子改变方向，其固有能量与动量都发生改变，变成了质子（准确的说是：碰撞后中子改变运动方向，与观测时空成角，被观测成了质子）。同样，电子中微子也改变方向，固有能量与动量也发生改变，变成了电子（准确的来说是：碰撞后电子中微子改变运动方向，与观测时空成角，被观测成了电子）。

弱作用场存在于基本粒子的内部。弱力作用于所有的夸克和轻子。我们来看图 1。



弱作用改变粒子
图 1 弱作用场

弱相互作用由三种基本类型：轻子—轻子过程，即只有轻子参与的弱作用，又称为纯轻子过程。如轻子的衰变、中微子与带电轻子的散射等， $\mu \rightarrow e + \bar{\nu} + \nu$ ， $\nu_{\mu} + e^{-} \rightarrow \nu_e + \mu^{-}$ 。轻子—强子过程，既有轻子又有强子参与的弱作用，又称为半轻子过程。如电子中微子和中子的散射， $\nu_e + n \rightarrow e^{-} + p$ 。强子—强子过程，即只有强子参与的弱作用，又称为强子过程。如强子的衰变， $K^{+} \rightarrow \pi^{+} + \pi^{0}$ 。

先说一下轻子。轻子有三种：电子、 μ 轻子和 τ 轻子。它们具有相同的自旋和相同的电荷。 μ 轻子比电子重约 200 多倍， τ 轻子比电子重约 3500 倍。轻子就是这三种粒子的统称。弱力主要的效应是改变粒子，粒子的质量会发生改变。例如弱力导致 τ 轻子衰变成比它轻的 μ 轻子、 μ 轻子在弱作用下变为电子。弱力的强度比电磁力小得多，只有电磁场强度的千分之一。弱力作用范围很小，目前认为小于 10^{-16} 厘米。量子味动力学也是在量子电动力学基础上建立的描述基本粒子之间弱相互作用的理论。

3、弱相互作用与电磁相互作用统一的研究

到二十世纪中叶，粒子世界呈现出非常复杂的局面，粒子数目众多，而且实验上发现和确证的粒子还在不断地增加，粒子之间的相互作用有电磁作用、引力作用、强作用、弱作用四种，它们的区别很大，电磁作用和引力作用是长程力，强作用和弱作用是短程力，它们的强度差别非常大，强作用最强，电磁作用次之，弱作用更次，引力作用最弱，在粒子物理中引力作用可以不考虑。对于电磁作用，已经建立起量子电动力学，它是物理学中最成功的理论。在这个理论中，力的传递者是电磁场，场的量子是光子，电磁作用是通过交换光子而传递的，光子的静质量为零，与电磁作用的长程性联系在一起。关于弱作用，在弱作用宇称不守恒基础上发展了弱作用的中间玻色子理论，认为弱作用是交换中间玻色子 W^{\pm} 而传递的，中间玻色子的质量很大，与电磁作用中的光子不同，它是与弱作用的短程性联系在一起。

20 世纪 60 年代末，美国物理学家格拉肖、温伯格和巴基斯坦物理学家萨拉姆等人建立了弱电统一理论，把电磁场和弱作用场进行成功的统一，他们因此获得 1979 年诺贝尔物理学奖。在弱电理论背后的基本

对称性更加奇怪一些，它跟空间或时间的视点改变无关，而是关于不同类型的基本粒子的识别。在弱电理论中，如果在方程里处处以一种既非电子，也非中微子的混合粒子态来取代电子和中微子，则物理定律的形式是不会改变的。因为其他许多不同的粒子也跟电子和中微子发生作用，所以同时需要把那些粒子族也混合起来。如上夸克与下夸克，光子、带正电和带负电的 W 粒子、中性的 Z 粒子。这是与电磁力相联系的对称性，源于光子的交换。对于弱核力来说，那种对称来自 W 粒子和 Z 粒子的交换。在弱电理论中，光子、W 粒子和 Z 粒子分别表现为 4 种场的能量束，那些场是对弱电理论的对称性的响应，就像引力场响应广义相对论的对称性一样。弱电理论背后的这种对称性被称为内在对称性。内在对称性比作用在寻常时间和空间上的那些对称性更加陌生，物理定律这种一来自于时间和空间的对称变换下的不变性称为局域对称性。还有一类精确的局域对称性，跟夸克的一种内在性质相关，那种性质叫做夸克的颜色。通常称为红、白、蓝三色。当然它跟普通意义上的颜色一点关系也没有，不过是用来区别不同夸克个体的标签。而在不同颜色之间确实存在着精确的对称性。红夸克和白夸克间的力与白夸克和蓝夸克间的力是一样的；两个红夸克间的力与两个蓝夸克间的力也是一样的。但这种对称性不仅限于颜色的相互交换。

我们人类对于弱相互作用其实了解得很少，主要是原子核的 β 衰变现象。 β 衰变就是核内一个中子通过弱相互作用衰变成一个电子、一个质子和一个反中微子。凡是涉及到中微子的反应都是弱相互作用过程。弱相互作用仅在原子核内起作用，力程非常短（大约在 10^{-18} m 范围内）。为了得到弱和电的统一，物理学家大胆假定有 W 粒子作为中间粒子，它的质量要比核子大 100 多倍。人们设想弱相互作用与电磁相互作用有着相同的作用机制，并假设弱相互作用通过 W 玻色子来传递，但是，理论的结果却又出现了无穷大困难。后来，人们将弱相互作用与电磁相互作用作类比，假定粒子除了带有电荷以外，还带有弱荷，并且弱相互作用也遵循一种人们还没有发现的规范不变性，人们将它称为隐藏的对称性，因而弱荷也是守恒的。采用这种办法不仅克服了无穷大困难，而且理论还证明存在四种规范粒子，它们是带电的 W^+ 、 W^- 和中性的 Z^0 ，第四种就是光子，它们分别传递三种弱相互作用和电磁相互作用。因而，这一理论不仅克服了无穷大困难，而且还将弱相互作用和电磁相互作用统一了起来，因而这一理论被称为弱电统一理论。弱电统一理论所预言的三种中间玻色子经过人们长期的不懈努力，最终在实验中被全部发现，并且它们的质量与主要性质理论与实验也符合得很好。

参与碰撞的粒子称为费米子，其自旋为半整数。由于两粒子间的碰撞是间隔一定距离的，这种碰撞并不是超距作用，而是要通过媒介粒子来传递，这个起传递作用的粒子就象是一个“媒婆”，被称为玻色子，其自旋为整数。传递力的作用的粒子以虚态存在。对于弱相互作用来说该粒子为 W、Z 光子（光子的运动速度为光速，由于其运动速度的下降，被观测成了低速运动的 W、Z 粒子）。在量子力学中，粒子从初态到末态的跃迁，涉及到粒子的湮灭与产生。可以近似的用费米公式和量子场论的相应公式进行计算。计算中，4 个费米子（中子、质子、电子、电子中微子）通过一个中间玻色子联系。通过跃迁前后费米子场与玻色子场的关系，将弱作用力的耦合常数用电磁精细结构常数（也就是电磁力的作用强度 $1/137$ ）进行替代，引入距阵元与费米相互作用常数的关系。计算出 W、Z 光子的理论质量。这个计算结果与实验相符。从而反过来证实了弱电的统一性，即：弱相互作用与电磁相互作用是一种力——这就是 1979 年诺贝尔物理学奖。

多年以来，关于电磁力已有了很成功的理论，人们认为带电粒子之间的相互作用是由于交换光子而产生的。但是按照这种解释，不能正确地理解弱力。因为如果这样，传送弱力的粒子就应质量很大，而不象光子那样静止质量为零。另外，依据这种理论的计算总是包含无法理解的无穷大。1967-68 年，温伯格和萨拉姆各自独立地提出了一种电磁作用和弱作用统一的量子场论，从而解决了这些问题。但是，他们的理论有一个不能令人满意的局限性：它只适用于一类基本粒子。1970 年，格拉肖将这一概念作了进一步推广，证明了亚核粒子的某种数学性质（他称之为粲）能够使人们将电磁力和弱力之间的这种联系推广到所有的基本粒子。温伯格、萨拉姆和格拉肖的弱电统一理论预言：由于弱力的作用，当电子猛烈撞击原子核后弹回时，检测到的左旋电子和右旋电子的数目将会有明显的差别。这种“宇称破坏”，后来在斯坦福大学的直线加速器实验中心确实被发现了。根据他们的弱电统一理论，除了存在电荷流的弱相互作用外，还应存在中性流的弱相互作用，即在反应过程中入射粒子和出射粒子之间没有电荷交换。例如， $p + e^+ \rightarrow p + e^+$ 。后来美国费米国家实验室和西欧核子研究中心都在实验中发现了他们预言的中性流。弱电统一理论现已为许多实验所证实，它使现存的四种基本相互作用实现了部分统一。

1933 年费米首先将电磁相互作用的原理推广到弱相互作用，1954 年美籍物理学家杨振宁和美国物理学家密耳斯提出了对同位旋场规范化的 SU(2) 规范理论，称为非阿贝尔规范理论，1961-1971 年格拉肖、黑格斯、温伯格、萨拉姆、特胡夫特等人经过十年探索最终解决了理论的缺陷和困难，1982-1983 年实验相继发现了弱电统一理论所预言的三种玻色子。虽然弱电统一理论取得了一定成果，但是这一理论还有一些问题没

有解决，例如这一理论为了使参与弱作用的三种中间玻色子获得质量，黑格斯曾经引入一种标量粒子，后来人们将其称为黑格斯粒子，这种粒子（对应于黑格斯场）至今还没有找到。弱电统一理论所引进的一些参数还没有得到充分的理论解释，甚至这一理论还没有解释弱作用的所有主要性质。

萨拉姆(A. Salam)和温伯格(S. Weinberg)的弱电统一理论，把分别描述电磁力和弱力的两条规律，简化为一条规律。而M理论的最终目标，是要用一条规律来描述已知的所有力（电磁力、弱力、强力、引力）。当前，有利于M理论的证据与日俱增，已取得令人振奋的进展。M理论成功的标志，在于让量子力学与广义相对论在新的理论框架中相容起来。同弦论一样，M理论的关键概念是超对称性¹。所谓超对称性，是指玻色子和费米子之间的对称性。玻色子是以印度加尔各答大学物理学家玻色(S. N. Bose)的名字命名的；费米子是以建议实施曼哈顿工程的物理学家费米(E. Fermi)的名字命名的。玻色子具有整数自旋，而费米子具有半整数自旋。相对论性量子理论预言，粒子自旋与其统计性质之间存在某种联系，这一预言已在自然界中得到令人惊叹的证实。在超对称物理中，所有粒子都有自己的超对称伙伴。它们有与原来粒子完全相同的量子数（色、电荷、重子数、轻子数等）。玻色子的超伙伴必定是费米子；费米子的超伙伴必定是玻色子。尽管尚未找到超对称伙伴存在的确切证据，但理论家仍坚信它的存在。他们认为由于超对称是自发破缺的，超伙伴粒子的质量必定比原来粒子的大很多，所以才无法在现有的加速器中探测到它的存在。

4、电弱统一作用质疑

笔者认为，弱相互作用与电磁相互作用之所以能够统一是因为对于微观粒子而言，在原子核内它们都是斥力。现代物理学认为弱相互作用和电磁力是一种力，中微子不带有电荷，没有电磁力，可是存在弱相互作用，如何理解这些关系？

(1) 王令隽的观点

标准模型的建立需要做一系列的追加的关键假定：

第一个就是“弱同位旋”假定。理论家们首先假定一个中性玻色子的存在以保证理论的规范协变性。这一中性玻色子和带电的玻色子组成“弱同位旋”等于1的叁个本征态，称为“规范玻色子” W_0 , W , 和 W^- 。第二个假定就是存在某种“中性电磁场”中的“弱同位旋单重态粒子”（B粒子）。第叁个假定是：光子和Z粒子是由B粒子和中性的 W_0 粒子的线性组合。这些组合系数可以表示成某一角度的正弦和余弦函数。这个抽象的弱同位旋空间中的“角度”叫做“温伯格角”。

弱同位旋假定是由核同位旋假定推广而来的。核同位旋假定将质子和中子看成同一个粒子的不同状态。其理由是，原子核的体积正比于核子的个数。这使人们猜想核力与电荷无关。可是，仅仅因为原子核的体积正比于核子的个数，就将质子和中子看成同一个粒子的不同状态，实在是太牵强附会了。这两个粒子的物理特性极不相同。质子带电，中子不带电。带电的粒子如何能在某种抽象的同位旋空间中旋转一下就转掉了电荷？

所谓旋转，应该可以停在某一个任意角度，而不是只能停在零度或九十度。比如在弱同位旋中，温伯格角就是大约28度。那末，核同位旋的角度是不是也可以是任意的一个角度？如果可以，是不是就对应于某个介于质子与中子之间的东西？这种粒子存在吗？它的电荷是多少？就是这样的一个逻辑上经不起推敲的“同位旋”概念，居然被理论家们当作当然的原理推广至弱相互作用和强相互作用理论中，以至于假定没有质量的光子是由有质量的B粒子和 W_0 粒子的线性组合，将组合系数表示成“弱同位旋”空间中的“温伯格角”的正弦和余弦函数。在这里，部分小于全体的经典逻辑被违背了。光子的质量等于零，而 W_0 粒子的质量是81 GeV，相当于质子质量的85倍。把一个质量等于零的基本粒子说成是两个有质量的玻色子的组合，有道理吗？难道两个有质量的粒子组成在一起总质量反而变成零了？

在该理论中，粒子衰变是中间矢量玻色子 W^\pm 与 Z_0 传递弱作用的结果，并有如下结论：1、估计计算了 W^\pm 与 Z_0 粒子的质量约为80Gev左右。2、如果是轻子与中间矢量玻色子 Z_0 耦合的弱作用，参与粒子反应的轻子就不会有电荷的改变；即弱作用中有所谓的中性流事件。

(二) 苟文俭的观点

1973年，美国费米实验室和欧洲核子中心在实验中相继发现了中性流事件就是弱中性流。在1983年，欧洲核子中心在质子-反质子对撞机上，又先后发现了与 W^\pm 、 Z_0 的质量相当的粒子，其中质量为80.8GeV的正负带电粒子被认为就是 W^\pm 而质量为92.9GeV的电中性粒子，认为也就是 Z_0 。因此在当代的主流物理学界，一致认为弱电统一理论已得到了实验的有力支持。

标准模型的弱电统一理论始于上世纪六十年代的温伯格-萨拉姆模型。该模型是用 $SU(2) \times U(1)$ 群描述轻子的对称性，要求在场的定域 $SU(2) \times U(1)$ 变换下不变，这就必须引入四个规范场，其中三个组成弱同位旋矢量场 W_μ ，另一个则是弱同位旋标量场 B_μ 。 W_μ 的前两个带电分量就形成了带电的矢量玻色子 W^\pm ，而 W

μ 的第三个分量与标量场 B_μ 都不带电，它们组成了不带电的中性矢量玻色子 Z_0 及光子 A_μ 。上式中的 θ_w 称温伯格角。使用希格斯机制使对称性破缺，并适当选择 θ_w 的取值，就使矢量玻色子获得了质量 E_μ ，而让光子 A_μ 仍保持零质量。

该模型除了有 W^\pm 、 Z_0 及光子外，还需要一个有质量的希格斯粒子。这是一种自旋为零的标量粒子，现在俗称为上帝粒子，其质量最新估计范围在 110 至 155GeV 之间。

对弱电统一理论预言中间矢量玻色子及其质量大小，从以上事实就清楚表明：1、使用矢量玻色子描述弱作用的关键是要有希格斯粒子。在 110GeV 至 155GeV 的质量范围，只有证实了希格斯粒子确实存在，矢量玻色子才可能成为弱作用量子。2、理论中的中间矢量玻色子质量大小，完全依赖于温伯格角 θ_w 的取值，所谓理论预言，实际是根据实验的需要不断人为调整 θ_w 的取值；而从定域 $SU(2) \times U(1)$ 变换自身，根本就无法得到它需要的矢量玻色子质量到底应该是多少。说理论预言了中间矢量玻色子质量，完全言过其实。弱作用过程中，若始末态粒子电荷相差 1，就称是弱带电流，始末态粒子电荷不变，就称是弱中性流。由于电磁作用过程是中性流（交换的光子为中性），因此，要实现弱电统一，就必然有弱中性流。普遍认为 Z_0 传递了弱作用就会形成弱中性流。

实验发现的中性流，是 μ 中微子打击核子，它们发生了作用但没有改变其自身。对此很容易提出来的问题是：1、用 μ 中微子打击核子发生的作用、与理论所述的 Z_0 参与粒子衰变完全是两回事。中微子与核子运动都构成了物质波，它们在碰撞中完全可以因为波动条件的改变（如迭加）、而使物质波发生改变，从而形成相互作用，如此就不会有衰变发生，当然也就不会有 Z_0 参与的弱作用发生。而 Z_0 参与的粒子衰变， Z_0 本身就要参与衰变生成物的产生。2、实验确定的 Z_0 质量超过 90GeV，但 μ 中微子打击核子的中性流事件的能量，却远低于 90GeV，即只有它们波的迭加而不是 Z_0 存在的空间。相反，在接近 90GeV 的能区，即在 Z_0 存在的空间，根本就无中性流事件！这一基本事实就说明：实验中发生的中性流事件并没有 Z_0 参与；实验发现的中性流并非是弱中性流。

以上陈述表明，对实验有力支持了弱电统一理论的命题，就有如下两点认识：1、对中性流实验，由于 μ 中微子打击核子发生的作用、与理论所述的 Z_0 参与粒子衰变完全是两回事，认为 μ 中微子打击核子的中性流事件、也就是 Z_0 参与粒子衰变的弱中性流，显然就违背了推理必须遵循的充足理由律这种最基本的逻辑常规。2、全世界长期反复地实验搜索的事实证明，现实世界根本就没有质量在 110 至 155GeV 之间的希格斯粒子，使用有希格斯粒子使矢量玻色子获得质量的理论表述并不成立。认为实验中质量为 80.8GeV 的正负带电粒子就是 W^\pm 质量为 92.9GeV 的电中性粒子就是 Z_0 ，与质量在 110 至 155GeV 之间无希格斯粒子存在的基本事实完全矛盾。说实验有力支持了弱电统一理论，这同样也是当代物理主流理论的常识悖论。

第八章 广义相对论困难的思考

1、弱相互作用与万有引力是互为反作用力的实验根据

现代物理学认为弱相互作用只适用于微观世界，可是微观与宏观没有截然的界限，这显然存在着不协调性。广义相对论认为万有引力时空用黎曼几何表述，笔者认为弱相互作用空间应该利用罗氏几何表述，这样才符合对称的绝对性与相对性原理。黑格尔说：“虚空，所谓原子的另一补充原则，实即是斥力自身，不过被表像为各原子间存在着的虚无罢了。…象近代科学这样于斥力之外假设一个引力与之并列，”《小逻辑》第 215 页。斥力与引力的两种对立的分布规律与之并列，斥力与引力是客观事物自在自为的矛盾，斥力与引力相互作用是自然界万事万物千变万化的终极原因。力学就是物质绝对自身的矛盾。引力的分布规律：引力产生实物结构（原子、分子、天体），引力产生上下密度差、产生上下压强差。斥力的分布规律：斥力破坏实物结构（产生虚空、真空、空隙），斥力消灭密度差、消灭压强差。

万有引力与弱相互作用是互为反作用力，是对称的绝对性的表现形式，其变化规律不同，是对称的相对性的表现形式，进一步说明了对称的相对性与绝对性原理的正确性，这样在宇宙中它们大体处于平衡之中，应该近似满足欧式空间，这样对于宇宙学原理认识就深刻了。

笔者认为，既然中微子具有引力质量，那么除了弱力外，还有万有引力，现代物理学中所指的引力可能是引力与弱相互作用的合力，由于弱相互作用比引力减小的快，这样可以解释上述问题。万有引力与斥力同时存在，是对称的绝对性的表现形式，它们的变化规律不同，是对称的相对性的表现形式。

下面的一些现象说明了引力与弱相互作用是相互反作用力——

(1)美国发射的 4 颗航天器在飞向太阳系行星方向飞行时所观察到的“来自背后太阳方向一个附加的力”！

(2)美国发射的阿波罗登月飞船在飞到月球背后时，地球上的观测站本应无线电中断，却有 52 秒钟在月中天观测到了来自月亮背后飞船的信号，“为有史以来同类型最强的信号”。

(3)阿波罗登月飞船 15 号和 17 号在飞引月亮背后与月亮与地球接收站成“三点一线”时，地球接收站不但收到了来自月亮背后飞船发出的信号(没有被挡往)，而且收到了的是“有史以来同类型最强的信号”。“美国发射的 4 颗航天器在飞向太阳系行星方向飞行时所观察到的‘来自背后太阳方向一个附加的力’”。

(4)与“美国 1972 年发射的‘先驱者’ 10 号和 1973 年发射的‘先驱者’ 11 号在飞向太阳系行星方向飞行时当时少走了 40 万 km 的原因所在(美航 72 约翰·安德森说：先锋 10 号经历一种朝着太阳的神秘减速，约 1 亿分之一的微力。有持久性，并不断扩大，如先锋距太阳距是日-地距的 80 倍，比原定计划落后了 40 万 km，相当于月地距离。1995 年与先锋 11 号联系，它也经历着同样的减速。)”。

(5)与“2002 年 9 月 12 日《参考消息》报导的英国新科学马库斯·乔恩称：在太阳系最黑暗的边缘冥王星以外，好象有股神秘力量作用于宇宙飞船。在 240 亿 km 之外的另一个方向，另一个探测器也受到了相同的力量”。

(6)与“2007 年 3 月 30 日《参考消息》报导的美国太空网 2007 年 3 月 27 日塔里克·马利克的文章 1972 年发射的“先驱者” 10 号和 1973 年发射的“先驱者” 11 号在目前(2007 年)都距离地球有数十亿英里，而现在(2007 年)它们正在以 3 万英里的时速从相反方向向太阳系边界飞出去的状态下，目前(2007 年)其和太阳的距离和按目前(2007 年)常态未发现新理论情况下的牛顿引力定律计算的相比跟太阳接近了 24 万英里，而按目前常态未发现新理论情况下的牛顿引力定律，引力是随着距离增加而减弱的，从而产生出这种飞离太阳系的时候，所受到的不可解释的力量的回拉牵引的‘先驱者号异常’”。

(7)与“伽里略木星探测器和尤里西斯太阳探测器出现了受到来自太阳方向的额外的引力异常影响”等的定量的理论证明！

(8)为什么所有的航天飞行器在飞临地球、木星、火星、小行星带时，会获得意外的加速度，而飞离太阳系时做减速运动。【1】

(9)本报讯 记者王杰铭、丁柯报道：目前人们认为在宇宙中有四种力决定着原子结构，即磁力、重力、强作用力和弱作用力。但据美国物理学会 1 月 6 日出版的一期《物理通讯》报告说，一些物理学家在对 20 世纪早期的一些实验作新的分析研究之后，认为宇宙中还存在未被发现的第五种力——“超电荷力”。

新的研究认为，与伽利略的结论相反，在真空中从同样高度落下时，羽毛比金属币落得快。这是因为对物体超作用的不仅是重力，另外还有一种称作“超电荷”的力。它使不同结构的物体产生稍为不同的加速度。

这个新的研究是由以印第安那州普杜大学物理学教授阿弗雷姆·费赫巴赫博士为首的一个科学家小组完成的。费赫巴赫博士的小组重新分析研究了匈牙利科学家罗兰德·冯·埃特伏斯在 20 年中所进行的实验数据，这些数据是 1922 年公布的。

埃特伏斯的实验包括把不同结构和质量的物体悬挂在一个扭力秤上。它的实验结果与伽利略在 17 世纪早期的观察基本相符。17 世纪末期，牛顿根据伽利略的实验提出了他的重力公式。1916 年爱因斯坦发表他的相对论时，也根据埃特伏斯的实验认为，在一个统一的重力场里，所有物体以同样加速度下落。

但根据费赫巴赫的研究，即使在埃特伏斯的研究中也已记录了与伽利略的理论不符的结果。但他认为这些数字没有重大意义，所以被忽略了。在详细的研究了这些数据后费赫巴赫发现，在“原始实验”数据中一些不符合伽利略理论的数据已大到足以使人认为，除重力以外，还可能其它的力作用于物体。根据报告认为，“超电荷力”是重力的百分之一。这是已知的力中最弱的。它的作用距离为 600 英尺多一点。

科学家们认为这个新研究结果如果为以后的实验所证实，将对物理学和宇宙学的研究产生深远的影响。笔者注：这里的“超电荷力”可能就是弱相互作用，当然需要进一步分析。宇宙正是在“平衡趋势”与逆“平衡趋势”的双重作用下，不断地进行着循环变化的过程。所以，她是永恒的、并且是美丽的。万有引力和弱相互作用是物质的同一属性。物体在一个环境里，它有一个趋势，就是本身的引力场强度要和环境的引力场强度相一致。如果把引力场定义为时空弯曲的曲率，那就可以说，物体本身所产生的时空曲率和环境的时空曲率相当才能使得物体保持原来的运动趋势不变。否则，就会改变原来的运动趋势以适应环境。这种适应，既可以是靠近的趋势，也可以远离的趋势，取决于曲率差的方向。科学家就是将人们实践中的自然现象连结起来，得出高一些层次的概念与规则，知识越丰富，站的层次越高，事实证明，以前人类认为是天生的、内禀的概念被一个个的突破，变为可掌握的，与其他现象有共生，同发展，相互转换的关系，人们也从中得益，走向自由。

美国伊利诺伊州巴达维亚市国家实验室的研究人员最近在美国《物理学回顾》上撰文指出，构建现代物理学的一些基本原理可能存在一些漏洞，这些基础原理需要修正。研究人员称，他们几年前开始进行一项实

验, 观察中微子束穿过粒子探测器的状态。结果发现, 这种不带电荷、几乎没有质量的粒子大部分都“穿场而过”, 但有一小部分中微子束却发生了偏移, 轰击了粒子探测器的铁原子, 并下起了一场“粒子雨”。在对数百万次的粒子碰撞分析后, 科学家们发现, 实验结果与按照现代物理学原理推测出来的结果相差 0.25%。科学家们称, 根据现代物理学原理, 仅仅在弱力的作用下, 不应该有那么多的中微子发生了偏移。他们认为, 如果实验没有大的误差的话, 那么就表明现代物理学一些原理可能存在漏洞, 必须由更先进、更准确的理论指导实践。引力以物体为主体, 物体具有系统特征, 将现象组成一个系统去进行研究物理学一开始就有牛顿范式和非牛顿范式之分。非牛顿范式的现象论物理学坚持把现象组成系统, 去发现“那些始终不能被观察到的现象的实际秩序”, 而“不追求自然界中这些现象的真正原因”(董光壁:《世界物理学史》)。爱因斯坦在总结回忆时说:“它象在爬山一样, 越是往上爬, 越是得到宽广的视野, 并且越能显示出我们的出发点与其周围广大地域之间的出乎意外联系。”

参考文献

【1】2007年3月30日《参考消息》塔里克·马利克。

附录: 新华网华盛顿 11 月 21 日专电 美国伊利诺伊州巴达维亚市费米国家实验室的研究人员最近在美国《物理学回顾》上撰文指出, 构建现代物理学的一些基础原理可能存在一些漏洞, 这些基础原理需要修正。

研究人员称, 他们几年前开始进行一项实验, 观测中微子束穿过粒子探测器的状态。结果发现, 这种不带电荷、几乎没有质量的粒子大部分都“穿场而过”, 但有一小部分却发生了偏移, 轰击了粒子探测器的铁原子, 并下起了一场“粒子雨”。在对数百万次的粒子碰撞分析后, 科学家们发现, 实验结果与按照现代物理学原理推测出来的结果相差 0.25%。科学家称, 根据现代物理学原理, 仅仅在弱力的作用下, 不应该有那么多的中微子发生偏离。他们认为, 如果实验没有大的误差的话, 那么就表明现代物理学一些原理可能存在漏洞, 必须由更先进、更准确的理论来指导实践。

弱力是物理学中与强力、电磁力以及引力并列的四种最基本的力之一。发生弱力作用的粒子质量非常小, 约为 90 吉电子伏。

笔者认为, 这是弱相互作用与万有引力共同作用的结果。

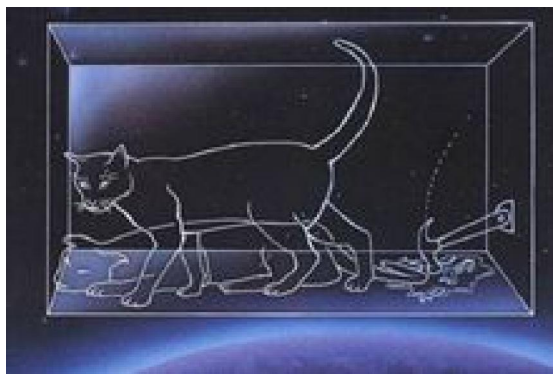
以色列约贝肯斯坦因引力黑洞陷阱(爱因斯坦并未认识到这点), 试图以相对论结构内部的缺陷来否定相对论。这里所说的引力陷阱, 是指吸引力条件下一个圆球, 在双曲面表面作斜平面圆周运动时, 产生逐渐收敛(缩小)偏心的椭圆形轨迹。这个现象正是广义相对论的产物, 这是个玻色子现象, 成为引力场的基础。反之, 斥力条件下这个圆球, 在双曲面表面作圆周运动时, 产生逐渐发散(扩张)椭圆形轨迹。同理, 这个圆球在椭圆形表面作圆周运动时, 亦产生双曲形轨迹, 这是个费米子现象。广义相对论仅仅只提到了引力椭圆空间, 爱因斯坦本人也未对斥力双曲面空间和中性的圆作进一步描述。加上纯数学的复杂推导, 让人一时不易掌握。倒是其他科学家在意它, 利用广义相对论拓展为量子论中的能量方程, 也就是说“斥力能加引力能加中性力能”组成的万能能量方程。标准模型, 规范场等也还得依靠广义相对论的框框建立。上述物理现象还可用: 黎曼-克莱因空间, 特别是圆对数等都能很好地统一解释。“玻色子现象”与“费米子现象”两种场现象具有通过中性圆实现相对对称(加上相对两字可以处理 CP 不对称)、共生、互补、转化。它们都是大自然普适规律之一。争议促进了相对论拓展与完整, 看来新相对论作为新型分析工具, 以其在数学物理领域的普适性, 使相对论又一次经受考验。

2、薛定谔猫佯谬的重新认识

把一只猫放进一个不透明的盒子里, 然后把这个盒子连接到一个包含一个放射性原子核和一个装有有毒气体的容器的实验装置。设想这个放射性原子核在一个小时内有 50% 的可能性发生衰变。如果发生衰变, 它将会发射出一个粒子, 而发射出的这个粒子将会触发这个实验装置, 打开装有有毒气体的容器, 从而杀死这只猫。根据量子力学, 未进行观察时, 这个原子核处于已衰变和未衰变的叠加态, 但是, 如果在一个小时后把盒子打开, 实验者只能看到“衰变的原子核和死猫”或者“未衰变的原子核和活猫”两种情况。薛定谔在 1935 年发表了一篇论文, 题为《量子力学的现状》, 在论文的第 5 节, 薛定谔描述了那个常被视为恶梦的猫实验: 哥本哈根派说, 没有测量之前, 一个粒子的状态模糊不清, 处于各种可能性的混合叠加。比如一个放射性原子, 它何时衰变是完全概率性的。只要没有观察, 它便处于衰变/不衰变的叠加状态中, 只有确实地测量了, 它才会随机的选择一种状态而出现。那么让我们把这个原子放在一个不透明的箱子中让它保持这种叠加状态。薛定谔想象了一种结构巧妙的精密装置, 每当原子衰变而放出一个中子, 它就激发一连串连锁反应, 最

终结果是打破箱子里的一个毒气瓶，而同时在箱子里的还有一只可怜的猫。事情很明显：如果原子衰变了，那么毒气瓶就被打破，猫就被毒死。要是原子没有衰变，那么猫就好好地活着。

这个理想实验的巧妙之处，在于通过“探测器—原子—毒气瓶”这条因果链，似乎将铀原子的“衰变—未衰变叠加态”与猫的“死—活叠加态”联系在一起，使量子力学的微观不确定性变为宏观不确定性；微观的混沌变为宏观的荒谬——猫要么死了，要么活着，两者必居其一，不可能同时既死又活！难怪英国著名科学家霍金听到薛定谔猫佯谬时说：“我去拿枪来把猫打死！”



笔者认为，原子衰变主要是弱相互作用，不是随机的，因此薛定谔猫佯谬根本不存在。因为对于宏观测量引力质量讲，对应于每一个确定的辐射，不存在几率问题。何祚庥认为：“引入波粒二象性或几率解释是各种佯谬出现的本质。”【1】

参考文献

【1】《物理教学》2001年第6期 2—7页 华东师范大学出版社。

3、“DI 海格立斯双星进动”问题和 β 衰变的新解释

(1) “DI 海格立斯双星进动”问题

Einstein 广义相对论的缺陷之一在于：无法解释“DI 海格立斯双星进动”问题。与我们相距 2000 光年之遥的“DI 海格立斯双星”的引力场强度远大于太阳对水星的引力场强度，各种引力理论都将面临严峻考验，它的进动问题一直困扰着天文学界。美国的两位天文学家爱德华·吉南和弗兰克·马洛尼，根据 84 年观测到的 3000 多个轨道历史数据，分析该双星运行规律，计算出其累计进动值为 0.64 度。按照“广义相对论”的时空弯曲公式进行计算得到“进动值”为 2.34 度，这与实际观察值相差很大！

2003 年 4 月，科学家发现双脉冲星 PSR J0737-3039A/B，它的引力场强度更大。双星进动实际观测值为：
A 星 $\Delta\varphi_A = 75$ (度/年)，B 星 $\Delta\varphi_B = 71$ (度/年)。按照“广义相对论”得到“进动值”为 14.7 度。

笔者认为：只要考虑到弱相互作用是万有引力的反作用力，就可以定性地理解进动值低于广义相对论的数值。

(2) β 衰变

在一百多年前，物理学家们发现了原子核具有天然放射 α 、 β 、 γ 射线的放射性，分别被称为三种不同的“核衰变”；其中的 β 衰变指的是“原子核”在衰变过程中，子核与母核相比电荷数会增加一个单位。“如果能量守恒还正确的话，那么放出电子的能量应当是一个确定值。但是……实验表明，放出的电子的能量是不确定的”。

当时许多著名科学家都投入了对这个问题的诠释工作，最后，由费米在 1934 年提出的 β 衰变理论被学界所接受。“这个理论认为， β 衰变是中子衰变成质子而放出电子和中微子： $n \rightarrow p + e^- + \nu$ ，……后来证明，质子也可以衰变成中子而产生正电子和中微子： $p \rightarrow n + e^+ + \nu$ ，费米不仅提出了这种以基本粒子转化为基础的 β 衰变理论，同时他还证明这种转化根源于一种尚未理解的新的相互作用——弱相互作用”（董光璧：《世界物理学史》）。

中子比质子多两个电子质量，这是尽人皆知的常识；由 p 衰变成 n 本来就增加了两个电子的质量，又怎么还会放出“正电子和中微子”呢？“一切正、反粒子的共同特点：它们具有严格相等的质量和寿命，比

如电子 e^- 和正电子 e^+ 的质量都等于 $m=0.511\text{MeV}/c^2$ e^- 是稳定的, 即寿命为 ∞ , e^+ 也是一样” (倪光炯:《近代物理》)。

在“稳定”粒子表中明确写着: 中子的平均寿命为 (918 ± 14) 秒, 而质子的平均寿命为 $(>2\times 10^{30})$ 年。

1933 年贝尔提出: “ β 衰变过程首先是原子核放出 γ 射线而变成另一种原子核。然后 γ 射线产生正负电子对, 而电子被原子核吸收而增加一个核电荷, 残余的正电子作为射线被观测到。这种理论的缺点是允许中间过程能量不守恒” (董光壁:《世界物理学史》)。

笔者认为: 只要考虑到弱相互作用是万有引力的反作用力, 就可以定性地理解 β 衰变的本质主要是弱相互作用的结果, 在衰变过程中电荷守恒, 中间过程表面看不守恒, 实际是时空参与了变换。

4、“提丢斯——波得 (J.D. Titius - J.E. Bode) 法则”

1766 年, 德国的一位中学教师提丢斯 (J.D. Titius) 发现行星与太阳的平均距离从里向外成倍地增加, 符合某个倍增数列的规律, 并且空出了一个位置。

	水星	金星	地球	火星	?	木星	土星
数 列 子 项	0	1	2	4	8	16	32
太阳行星距离	0.387	0.723	1	1.524	?	5.203	9.539
法则计算距离	0.4	0.7	1	1.6	2.8	5.2	10

当时的柏林天文台台长波得 (J.E. Bode) 将其归纳成一个经验公式即“提丢斯——波得 (J.D. Titius - J.E. Bode) 法则”。即数列的每一项乘以 0.3 再加上 0.4 就等于行星到太阳中心的距离 (天文单位)。用公式表示为: $L=0.3n+0.4$ (1), L ——行星与太阳系中心距离 (天文单位), n ——数列项。这一定则, 虽然早已为国际天文学界所公认, 但至今不明其物理意义。因为火星与木星之间出现了一个空缺, 他们大胆推测, 其间应该存在一个行星。

1800 年 1 月 1 日, 意大利天文学家皮亚齐发现了一颗小行星——谷神星, 距离为 2.77, 与计算距离 2.8 几乎完全吻合。在此之后, 人们又在这个区域发现了数千颗小行星, 证明这个预测是正确的。1781 年英国伟大的天文学家威廉·赫歇尔发现了天王星, 与太阳的距离为 19.267, 与计算距离 19.6 相差不大。但是, 之后发现的海王星距离为 30.1, 与计算距离 38.8 相差较大。

附表: a_m 和 a_n 的理论值与观测值的比较 (天文单位)

	水星	金星	地球	火星	谷神星	木星	土星	天王星	海王星	冥王星
观测值	0.387	0.723	1.000	1.52	2.7	5.2	9.5	19.2	30.1	39.4
理论值	0.4	0.7	1.0	1.6	2.8	5.2	10	19.6	38.8	77.2
m	0	1	2	4	8	16	32	64	128	256
n	$-\infty$	2	3	4	5	6	7	8	9	10

20 世纪初期赴法勤工俭学的刘子华, 通过研究周易, 利用八卦推演, 得出太阳系存在第十颗行星 (“木王星”)。他的博士论文: “八卦宇宙论与现代天文”【1】一书, 受到论文审查委员会的高度评价, 被认为: “在易经和八卦的各种变化中, 隐藏着一种非常发达的非常奥妙的科学”, “计算的大量数据是非常准确的”。当时的法国布尔日天文台台长说: 该“博士论文为指出中国古圣先哲的宇宙科学, 竟如此与我们在近 4 个世纪中若干代学者所费极大艰辛而得之甚难的一些结论相吻合”。由此, 1940 年, 刘子华被授与巴黎大学博士学位, 3 年后又获得法国国家博士学位。有人认为, 近年新发现的 2003UB313 (比冥王星大) 有可能是刘子华推测的“木王星”。国际天文联合会通过决议将冥王星不再属于太阳系的经典行星, 但仍将冥王星、谷神星和 2003UB313 均归属为矮行星。

参考文献:

【1】刘子华, 八卦宇宙论与现代天文——一颗新行星的预测·日月的胎时地位。成都四川科学技术出版社, 1989 年 12 月, 1-82。

5、行星进动问题

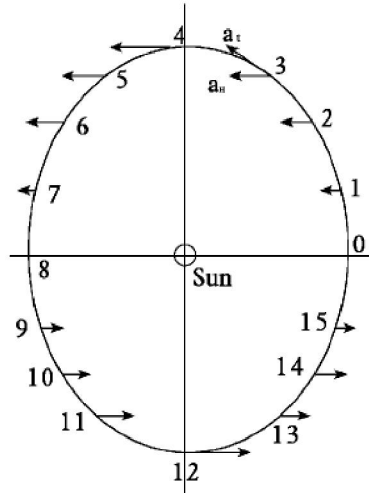
1915年爱因斯坦在《用广义相对论解释水星近日点运动》计算了水星近日点的剩余进动。(注1:郭亦玲,沈慧君:《物理学史》,北京,清华大学出版社,1993.229-231)。这等于说,勒维利埃的38角秒是计算错了,纽康经过重新计算的每百年快43角秒是正确的。这就使得广义相对论成了科学明珠。其实勒维利埃的38角秒也是正确的,因为:法国天文学家勒威耶的计算值是38"。3/百年,他是根据发生在1677~1848的171年间的15次水星凌日计算的,其间还参考了近400次巴黎天文台的水星中天时刻。美国天文学家纽康的计算值是43"。37/百年,他是根据发生在1861~1894的33年间的6次水星凌日计算的。如何对待这两个不同的数据呢?不同的观念的对待方法不同:静态观念认为两者只能有一个是正确的,由于纽康值符合广义相对论的计算值,于是都认为43"/百年是正确的,而勒威耶的计算有误。其实勒威耶的计算是可靠的,他依据15次水星凌日和近400次水星中天的观测资料,这些天文事实,是可靠的,他的计算也不会出错,因为海王星就是他"计算"出来的。那么,纽康值错了吗?他仅6次水星凌日来计算,可靠吗?可靠!这两个不同的数字并不矛盾?它说明在1677~1848的171年间水星近日点进动是38角秒/百年,在1861~1894的33年间是43"。37/百年。这说水星轨道是在不断演化的过程中。如恩克彗星的轨道也是在不断演化的过程中:发现于1786年的恩克彗星,柏林天文台台长恩克,用了毕生精力,不厌其烦地消除了摄动影响,计算了它的轨道能量变化,结果发现该彗星的公转周期在不断缩短,轨道能量在不断减小:每公转一周,周期要缩短3小时。恩克死后,后人继续他的研究,发现周期缩短值并非固定不变的,而是在不断减小:由3小时变为2小时、再变为1小时。(《科学技术百科全书》6天文学 北京科学出版社198177)。在不同的年代恩克彗星的轨道处在不同的状态。地球轨道也是在不断演化的过程中:在火星上有3个和飞机上所使用的非常相似的无线电应答器。这些应答器分别装载在"海盗"1号着陆器、"海盗"2号着陆器以及"火星探路者"探测器上。由此美国宇航局深空探测网可以测量着陆器和地球之间的距离。在分析了大量的观测数据之后,天文学家发现天文单位正在以每世纪7米的速度增长。这说明在不同的年代地球的轨道处在不同的状态。广义相对论是对称理论,它认为天体轨道是固定不变的,每百年43角秒就只能是每百年43角秒,就不能是每百年38角秒。

天王星近日点进动的实测值却比广义相对论的计算值大1565倍,近日点进动就是椭圆长轴绕焦点(太阳)转动,于是椭圆上的每一个点都在进动,自1781到1845的64年间,天王星的位置偏离了理论位置120角秒/64年,(文献都记载的是天王星偏离理论位置2角分),有人认为这一定是一个未知行星的摄动力使得天王星的运行产生了进动。于是勒威耶就以这120角秒为依据来计算未知行星的位置和质量等等。1846年,果然在勒威耶计算的位置偏离52角分的地方发现了一个新的行星,这就是太阳系的第八大行星即海王星。但是它的质量只有勒威耶计算值的一半多一点(即实际质量只有0.62计算质量)。天文学家们按海王星的实际质量和位置代入摄动方程,求出海王星对天王星的摄动力只能使天王星在1781到1845的64年间获得118角秒的进动,还有2角秒的进动找不到力学原因^[4],可称之为反常进动(或简称为进动):2角秒/64(年)=0.0313角秒/年=3.13角秒/百年。按广义相对论的进动公式 $\omega = 24\pi^3 a^2 / c^2 T^2 (1-e^2)$ (1),其中 a 是轨道长半轴, T 是公转周期, e 是轨道偏心率, ω 是天体每转一周的进动的弧度值,还应化为角秒。这样可以计算出:天王星近日点进动值是:0"。002/百年。天王星近日点进动的实测值3.13角秒/百年比广义相对论的计算值0"。002/百年大1565倍。

在爱因斯坦考虑太阳引力场时,曾把太阳的引力场看成一个球对称的引力场,但这只是一个近似,由于太阳25天自转一周,使其引力场并非完全成球对称分布,这种影响的结果相当于一个扁球场所产生的引力场,我们把这种效应称为自转引起的日扁率。1966年,美国的迪克和格尔顿伯格观测的日扁率是 $5.0 \pm 0.7 \times 10^{-10}$,根据这个结果预计,在水星43"的进动效应中,将有8%即3"的贡献来自于日扁率效率,这也就是说,若将日扁率的实际观测计算在内,由广义相对论所计算出来的结果就会和实际观测结果有3弧秒的偏离,如再考虑介质阻尼,岁差常数误差等的影响,其误差可能达到5角秒/百年左右。

水星进动是受弱相互作用的结果。在太阳系内,类地行星绕日运动的轨道半径变化均很小,轨道具有近圆性,加速度变化幅度较小,轨道上引力场场强基本不变化。加之类地行星体积较小,密度较大,所以,多数类地行星受弱相互作用的影响极弱,基本可以忽略不计。事实上,现有的天体力学结论正是在 $\gamma_0=0$, $K=1$, $F=0$ 的基础上推得的。但是,类地行星中,水星的运动轨道最扁,离心率 e 最大,距日最近,又处在太阳的稀薄大气层内运动,引力场场强,最容易受到弱相互作用的明显影响,尤其在近日点附近运动时更是如此。由于太阳引力场场强会随太阳活动而变化,所以水星受到的弱相互作用也会随水星运动及太阳活动的变化而变化。这种变化着的、较大的弱相互作用削弱了太阳引力,使得水星公转周期变化,轨道半径伸缩。而

轨道半径和绕日周期的变化，就可形成水星的进动。



6、太阳角动量的逃逸问题

在对太阳系角动量问题的研究中，人们发现：质量占太阳系质量 99.865% 的太阳，其角动量只占太阳系总角动量的 0.6% 以下，而只占太阳系总质量的 0.135% 的行星、小行星、卫星等，它们的角动量却占了太阳系总角动量的 99.4% 以上，这称为“太阳系的角动量分布异常”。1755 年，德国哲学家康德 (Immanuel Kant) 首先提出了太阳系起源的星云假说。他认为，太阳系是由原始星云按照万有引力定律演化而成。在这个原始星云中，大小不等的固体微粒在万有引力的作用下相互接近，大微粒吸引小微粒形成较大的团块，团块又陆续把周围的微粒吸引过来，这样，团块越来越大，而“天体在吸引最强的地方开始形成”。引力最强的中心部分吸引的物质最多，先形成太阳。外面的微粒在太阳吸引下向其下落时，与其它微粒碰撞而改变方向，变成绕太阳作圆周运动；运动中的微粒又逐渐形成引力中心，最后凝聚成朝同一方向转动的行星。

41 年后，法国著名的数学家和天文学家拉普拉斯 (Pierre Simon Laplace) 也独立提出了关于太阳系起源的星云假说。与康德的星云说不同之处在于，他认为太阳系是由炽热气体圆盘组的星云形成的。圆盘一旦形成，气体由于冷却马上收缩起来，因此自转加快，离心力也随之增大，于是星云变得十分扁平。在星云外缘，离心力超过引力的时候圆盘便定时地遗弃一些小型的环圈或蒸汽环带，这些形成物由于停止收缩也就脱离了主圆盘。每个独立的环圈通过自身形成一只小型的旋涡而聚合成为一颗行星；而这种气旋的旋转会再产生更小的气体环圈，由此又形成行星的卫星。圆盘的中心部分形成太阳。拉普拉斯举出土星环作为“土星大气的原始范围及其不断凝缩过程的现存证据”。

这一解释是符合太阳系的主要特征的。例如：(1) 行星运行轨道都接近圆形 (近圆性)。(2) 行星运行轨道几乎位于同一轨道平面上 (共面性)，只有水星和冥王星的轨道有较大倾斜。(3) 行星公转方向和太阳自转方向都是逆时针的。(4) 除金星外行星自转方向和太阳自转方向也是逆时针的。

但星云假说有一个困难，这就是它无法说明太阳系的一个极为重要的特征，即行星和太阳之间的角动量分布极不均匀这一现象。太阳的质量虽然远远超过其体系的其余部分质量的总和，太阳占全系总质量的 99.8%，然太阳的角动量居然只有全体系的 2%。这一情况的物理含义是，太阳旋转极慢，但拥有全体系 98% 的角动量而体积却不大的诸行星，竟然在距离中心甚远的地方高速转动着。根据康德-拉普拉斯理论并结合自康德-拉普拉斯之后所获得的补充知识来计算一下太阳的自转周期，就能验证康德-拉普拉斯假说是否正确。天文学家不仅能估计气体云在收缩之前的体积，还可测出所观测星云中气体的自转速度。根据这个估计的体积，自转的观测速度和角动量守恒定律，康德-拉普拉斯理论计算出的太阳的自转周期应在 1/2 天左右，而实际的观测周期却是 26 天。理论与观测之间相差竟如此悬殊，是令人无法接受的。因此，太阳角动量一定有一种人们至今没有探测到的逃逸方式。

笔者认为太阳角动量的逃逸的原因是由于弱相互作用的结果。

7、太阳系主要特征演化成因

外太阳系以及更大的星系范围内表面上看引力也破坏了平方反比定律，现在观测到的恒星和星系的运动速度远比用邻近的全部物质施与的引力所能解释的快得多。任何天体都存在“反引力”。我们从天文观察可

以看到：地球会喷发火山；恒星会喷发物质；星系核会喷射大量的物质，甚至喷出一个星系团的物质；超星系团的星系会从中心向边缘运动，最后演化为空心的大气泡。我们将比较熟悉的六大行星的有关物理量作了一些分析、比较，列表如下（有关数据取自【1】）

物理量	水星	金星	地球	火星	木星	土星
轨道运动平均速度 v	1.6076	1.176	1	0.81	0.4384	0.3236
质量 m	0.0558	0.8150	1	0.1074	317.893	95.147
自旋周期 t	58.81	243.675	1	1.03	0.41	0.43
磁矩 p	上限 5×10^{-5}	上限 5×10^{-5}	1	0.004	19000	550
$\left(\frac{mv^2}{t}\right)^2$	6×10^{-6}	2×10^{-5}	1	0.0047	22206.31	536.89

$$p \approx \left(\frac{mv^2}{t}\right)^2$$

从表中可知：

附表：太阳系九大行星轨道半长径、公转恒星周期及各自的万有引力系数参照表
（本表前两项参数由北京天文台怀柔太阳观测基地提供）

行星	水星	金星	地球	火星	木星	土星	天王星	海王星	冥王星
轨道半长径 R (米)	57.9×10^9	108.2×10^9	149.6×10^9	227.9×10^9	778.3×10^9	1427.0×10^9	2882.3×10^9	4523.9×10^9	5917.1×10^9
公转恒星周期 T (秒)	87.70×86400	224.70×86400	365.26×86400	686.98×86400	4332.71×86400	10759.5×86400	30685×86400	60190×86400	90800×86400
$K=R^3/T^2$	338×10^{16}	336×10^{16}	336×10^{16}	335×10^{16}	336×10^{16}	336×10^{16}	340×10^{16}	342×10^{16}	336×10^{16}
$G = \frac{4\pi^2 k}{M_{\text{天}}}$	6.663×10^{-11}	6.659×10^{-11}	6.659×10^{-11}	6.639×10^{-11}	6.659×10^{-11}	6.659×10^{-11}	6.738×10^{-11}	6.778×10^{-11}	6.659×10^{-11}

太阳质量 $M_s = 1.99 \times 10^{30} \text{kg}$ ，地球质量 $M_e = 5.98 \times 10^{24} \text{kg}$ ，引力常数 $G_0 = 6.6720 \times 10^{-11} \text{m}^3 \cdot \text{S}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1}$

例一：对于离地球 36000 公里的地球同步卫星，其万有引力系数为： $G = \frac{4\pi^2}{M_{\text{地}}} \cdot \frac{R^3}{T^2}$

$$= \frac{4 \times 3.14^2}{5.98 \times 10^{24}} \cdot \frac{[(36000+6370) \times 10^3]^3}{(1 \times 24 \times 60 \times 60)^2} = 6.7199464 \times 10^{-11} \text{m}^3 \cdot \text{S}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1}$$

例二：1970 年 4 月 26 日中国第一颗人造地球卫星重量 173 公斤，卫星运动轨道距地球最近点 439 公里，最远点 2384 公里，轨道平面和地球赤道平面夹角 68.5° ，绕地球一周 114 分钟。其万有引力系数为： $G = \frac{4\pi^2}{M_{\text{地}}} \cdot \frac{R^3}{T^2} = \frac{4 \times 3.14^2}{5.98 \times 10^{24}} \cdot \frac{\{[(439+2384)/2+6370] \times 10^3\}^3}{(114 \times 60)^2} = 6.6419527 \times 10^{-11} \text{m}^3 \cdot \text{S}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1}$

例三：1971 年 3 月 3 日发射成功的中国科学实验人造地球卫星，卫星重量 221 公斤，近地点 266 公里，远地点 1826 公里，绕地一周 106 分钟。其万有引力系数为：

$$G = \frac{4\pi^2}{M_{\text{地}}} \cdot \frac{R^3}{T^2} = \frac{4 \times 3.14^2}{5.98 \times 10^{24}} \cdot \frac{\{[(266+1826)/2+6370] \times 10^3\}^3}{(106 \times 60)^2} = 6.6498674 \times 10^{-11} \text{m}^3 \cdot \text{S}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1}$$

计算结果表明：随着人造地球卫星轨道的降低，人造地球卫星与地球相互作用的万有引力系数的实际值一般都略小于正常的理论值。一般而言，人造地球卫星离地球表面越近，万有引力系数越小，越偏离正常值，因此在对人造地球卫星与地球之间的引力（确切地说应该是向心力）进行计算时，就必然会造成按牛顿万有引力理论算出的理论值大于实际值。

参考文献

【1】。萨根，新太阳系，张钰哲译，上海科学技术出版社。

8、行星自转速度的现状

(A) 地球自转长期减慢成因，目前的理论认为是潮汐作用。但是潮汐理论又很难解释：在类地行星中，地球自转又是最快的。(B) 内六大行星的自转速度（行星日长），六大行星（水星，金星，地球，火星，木星和土星）自转现状看，自转速度与轨道半径没什么关系。由于它们的密度不一样，自转速度没有比较的标准。将行星的密度转换成统一值，计算行星的自转速度及行星日长（详见表1）。

表1 行星的自转速度及行星日长

行星	水星	金星	地球	火星	木星	土星
轨道半径(A)	0.39	0.72	1.0	1.52	5.2	9.54
密度(g/cm ³)	5.4	5.3	5.5	3.9	1.3	0.7
自转周期	58.8d	243d	23.93h	24.92h	9.92h	10.6h
($\rho = \rho$) 自转周期	58.44d	235.17d	23.93h	19.6h	3.87h	2.66h
公转周期	88d	224.7d	365.26d	687d	11.96yr	29.46yr
行星日长	175.85d	116.74d	23.99h	24.657h	9.921h	10.68h
($\rho = \rho$) 行星日长	173.98d	112.82d	23.995h	19.735h	3.843h	2.7h

从表1 得六大行星的日长在考虑密度因素后有：离太阳近的行星，行星的日长就长，相对自转速度就慢；离太阳远的行星，相对自转速度就快。

9、月亮远离地球现象

近年来，世界各国的一些科学家和科技工作者经过深入观测研究，发现月球正逐渐离我们远去，并且将越来越暗。

美国和法国的科学家利用1969年美国宇航员登月时放置在月球上的镜子进行测量的结果表明，28年来地球与月球的距离增加了一米多，美法两国科学家是利用精确的时间测量法来测量月地之间距离变化的，这种方法使激光脉冲投射到镜面上然后又反射回地面上的探测器，一个来回约为2.5秒钟，不断测量来回所用时间的变化，就可得知月地距离的变化。多次测量表明，地球与月球之间的距离由于地球表面上潮汐的磨擦作用每年增加将近4厘米。

科学家认为，在月球引力的作用下地球产生潮汐，这种潮汐运动中的一部分能量就分散到地球的海洋里，由于这种能量的失去——月球系统的运动就受到影响，这就是月球逐渐远离地球的原因。

美国两位地理学家通过对鹦鹉螺化石的研究，也发现月球确实正在远离地球。这两个科学家观察了现存的几种鹦鹉螺化石的研究，发现其贝壳上的波状螺纹具有树木年轮一样性能，螺纹分许多隔，虽宽窄不同，但每隔上细小波状生长线在30条左右，与现代农历一个月的天数完全相同。观察发现，鹦鹉螺的波状生长线每天长一条，每月长一隔。这种特殊生长现象使两位科学家得到极大启发，他们又观察了古鹦鹉螺化石，惊奇地发现，古鹦鹉螺的每隔生长线数随着化石年代的上溯而逐渐减少。而相同地质年代的螺壳生长线却是固定不变的。研究显示，现代鹦鹉螺的贝壳上，生长线是30条，新生代渐新世的螺壳上，生长线是26条，中生代白垩纪是22条，侏罗纪是18条，古生代石炭纪是15条，奥陶纪是9条，由此推断，在距今4.2亿年前的古生代奥陶纪时，月亮绕地球一周只有9天。两位地理学家又根据万有引力定律等物理学原理，计算了那时月亮和地球之间的距离，得到结果是，在4亿多年前，月球与地球之间的距离仅为现在的43%。

科学家们还对近 3000 年来有记录的蚀月蚀现象进行了计算研究，结果与上述推理完全吻合，证明月亮正在逐渐远去。

10、卡西米尔效应(Casimir effect)

在 1948 年，荷兰物理学家亨德里克·卡西米尔(Hendrik Casimir, 1909–2000)提出一项检测这种能量存在的方案。从理论上解释，真空能量以粒子形态出现，并不断以微小的规模形成与消失。在正常情况中。真空中充满着几乎各种波长粒子，但卡西米尔指出，假如使两个不带电的金属薄盘紧紧靠在一起，较长的波长就被排除出去。接着，金属盘外的其他波就会产生一种往往使其相互聚拢的力，金属盘越靠近，两者之间吸引力就越强，这种现象就是所谓的卡西米尔效应。1996 年，物理学家首次对它进行测定，实际测量结果和理论计算结果十分吻合卡西米尔效应(Casimir effect)就是在真空中两片平行的平坦金属板之间的吸引压力。这种压力是由平板之间空间中的虚粒子(virtual particle)的数目比正常数目减小造成的。这一理论的特别之处是，“卡西米尔力”通常情况下只会导致物体间的“相互吸引”，而并非“相互排斥”。

笔者认为：根据万有引力与弱相互作用是互为反作用力的观点，当距离缩小到一定程度，这种效应就不存在了。

带电体静电能相互作用能与自能的有关理论也可以推广至引力场，可以进一步探讨自能与引力能之间的关系。例如一个半径为 R 、引力质量为 m 的均匀球体引力自能为 $W_{自} = 3Gm^2/5R$ ，令 $W_{自} = mc^2$ ，得 $m/R = 5c^2/3G$ ， $R = 3Gm/5c^2$ ，根据此可得电子的半径约为 $4.04646 \times 10^{-60}m$ ，而电子的经典半径约为 $2.8 \times 10^{-15}m$ ，说明电子并未达到最大密度或者说存在与万有引力相反的作用力，因为宇宙中物体的最大密度 $\rho = m/V = 3m/(4\pi R^3) = 125c^6/(36\pi G^3m^2)$ ，所以随着引力质量的增加，密度将逐渐减小，与经典观念差异很大，因此物体之间应存在反引力，它就是 Einstein 所提到的宇宙常数。

11、太阳光谱线“红移”理论推导错误

爱因斯坦在世时，人们称有 3 大实验支持广义相对论：太阳光谱线“红移”、恒星光线的偏折和水星的“附加进动”。但实际上，太阳光谱线“红移”的观测值并不支持相对论，恒星光线的偏折的观测值与相对论的理论值相差 25%。故只能说 3 大实验中只有一个半支持相对论。

太阳光谱线“红移”的实际观测结果为 $\Delta v/v_0 = -2.12 \times 10^{-6}$

相对论指出，在强引力中时钟要走得慢些，因此从巨大质量的星体表面发射到地球上的光的谱线，会向光谱的红端移动，在众多相对论文献中称，光线在太阳表面和到达地球时，其频率变化理论值为 $\Delta v/v_0 = -GM/Rc^2 = -2.12 \times 10^{-6} \dots \dots (1)$ 。

虽然不能用实验直接证明相对论关于在引力场中时钟运转快慢的正确与否，这不仅是因为太阳温度太高无法测量太阳上某原子能级跃迁的光波频率，更主要是因为引力场影响光的频率的同时也影响测量频率的仪器，使得在同一坐标系中不同地点的引力势不同虽然会导致各处的频率不同，但直接测量的结果却是处处频率相同。

1919 年 5 月，两组科学观测队分别进行第一次实际观测到，恒星光线擦过太阳边缘到达地球的“总偏角”为 $1.98'' \pm 0.30$ 和 $1.61'' \pm 0.12$ ”。在各次日蚀中，至今已对 400 多颗恒星作了这种测量，观测数据的范围是从 $1.57''$ 到 $2.37''$ ，平均值是 $2.2''$ 【1】。平均值 $2.2''$ 比相对论的理论值 $1.75''$ 大 25%，如此大的误差在科学中是不允许的。

但是相对论推导 (1) 式的过程犯有严重错误：爱因斯坦在《相对论的意义》一书第五版中，是用度规的时间分量（钟慢效应）得到 (1) 式的，度规的空间分量（尺缩效应）对光波频率的影响并没有被考虑，而光子的速度并不满足 $v \ll c$ 的条件，为什么忽略尺缩效应，爱因斯坦没有作解释。但是，他在推导恒星光线偏折的过程中，却同时考虑了“钟慢效应”和“尺缩效应”，这说明爱因斯坦在处理类似的物理问题时使用了“双重标准”，这在科学中是禁止的！

也许是为了“解决”以上矛盾，以温伯格为代表的科学家们多用等效原理来推导 (1) 式，推导中以光波传播在引力场中频率不变化为前提条件(这当然是错误的，因其违反能量转化与守恒定律)，而更为明显的错误是，温伯格在推导过程中采用了双重的时间标准：在光子的发射和接收的量子跃迁过程中用的是固有时 τ 决定的频率；在光的传播过程中用的是世界时 t 决定的频率。在发射——传播——接收的整个过程中更改了频率的定义，这在逻辑上是错误的！更违反了广义相对论中与坐标选取无关的可观察量必须由固有时 τ 构成的原则。(1) 式显然不是严格的相对论的预言。【2】

如果按相对论的严格解法得出的结论是对的，这意味着有 3 大物理定律需要同时修改：一是普朗克量子关系式 $E = h\nu$ ，二是质能关系 $E = mc^2$ ，三是功能关系式 $\Delta E = W = \int F dr$ （其本质是能量转化与守恒定律），而这种修改是不可能的。

参考文献

- 【1】胡宁。广义相对论和引力场理论。科学出版社，2000。45。
 【2】陈绍光。谁引爆了宇宙。2004。136-139。

12、地球光谱线“蓝移”理论推导错误

1959年，在哈佛大学，庞德等人首次在地面上直接验证了引力频移。利用 ^{57}Fe 在塔顶发射 γ 射线，在塔底接收。塔高H为22.6m。实际观测发现光频率变大，为 $\Delta v/v_0=2.46 \times 10^{-15}$ 。

庞德称光谱线“蓝移”的相对论理论值为 $\Delta v/v_0=gH/c^2=2.46 \times 10^{-15} \dots \dots (1)$

从而理论与实际观测结果一致。但庞德在实验报告中使用了一个错误的洛伦兹吸收线形状公式： $C=(\Gamma/2)^2/[(\Delta v)^2+(\Gamma/2)^2]$ ，正确的公式是： $C=\Gamma^2/[(\Delta v)^2+\Gamma^2]$

若改用正确的公式，相对论的理论值为 $\Delta v/v_0=2gH/c^2=5.92 \times 10^{-15}$ 【1】，这与实际观测结果不一致。1965年诺贝尔物理奖获得者费曼在其所著的《费曼讲物理-相对论》中，用了三种方法推导(1)式，其中第一种方法用的是广义相对论中的等效原理进行推导。推导过程中出现两个明显错误【2】：

第一、认为在加速向上飞行的飞船中，由于飞船加速导致第二次闪光的速度增大，从而第二次闪光从A到达B的时间，比第一次闪光从A到达B的时间要短一些。这明显违反了光速不变原理。

第二、书中写明“v是发射源与接收器之间的相对速度”，“发射源与接收器在任意瞬间都以相等的速度运动”，这表明 $v=0$ ，从而 $\omega=\omega_0$ （表明时钟运转的快慢与其所处的引力场强弱无关），但书中又自相矛盾地认为相对速度为 $v=gH/c$ （这是飞船速度的增量），从而得到 $\omega=\omega_0[1+(v/c)]/[1-(v/c)]^{1/2} \approx gH/c^2$ 的正确结论。

费曼书中的第二、第三种推导方法是正确的，但用的是能量守恒定律、普朗克量子关系式 $E=h\omega$ ，以及质能关系式 $E=mc^2$ ，与广义相对论无关。

参考文献

- 【1】陈绍光。谁引爆了宇宙。2004。156。
 【2】费曼。费曼讲物理-相对论。周国荣译。湖南科学技术出版社，2004。141-147。

13、最新关于天文学报到的难以解释的几个天文现象

(一) 土星光环问题

据俄罗斯媒体报道，土星光环最早由伽利略在1610年发现。而土星最细的F环直到1979年才被天文学家们观测到。美国的“航海者-1”号探测器于1980年拍摄到了首批有关F环的详细照片。科学家们通过这些照片发现，F环的结构极不均匀——有些部位凝结到了一起，有些部位又非常纤细，而还有一些部位则显得极不平整。现在，“卡西尼”号探测器又传回了有关土星F环细节的最新照片。最近，一个由法国巴黎大学Sebastien Charnoz教授领导的研究小组在对现存的有关F环的整体和局部照片进行研究后得出一个令人吃惊的结论。今年11月25日出版的《科学》杂志刊登了他们对土星F环的最新研究论文。Sebastien Charnoz等人认为，F环有着非常特殊的螺旋形结构，其边缘部分——最初曾被认为是许多互不相连的片段——事实上也构成了一个包含有三条细环的完整螺旋形结构。科学家们还指出，这一螺旋形结构的参数目前仍在快速变化之中。例如，通过比较“卡西尼”号从2004年11月至2005年5月传回的数据，专家们发现构成该螺旋结构的三条细环的间距正在变小。种种证据表明，这一密闭螺旋体的各边缘地带将会逐渐相交并最终演化为一结构更为均匀的新光环。除此之外，有部分科学家认为，土星的两颗卫星——“普罗米休斯”和“潘多拉”——会起到F环保护者的作用：可防止F环中的物质飞散到周围的空间中。但Sebastien Charnoz教授等人却认为，这两颗卫星距离F环过近，用不了多久，它们就将成为F环的破坏者。他们还猜测，F环可能曾遭到过某一不明天体的撞击：可能正是这次撞击造就了不久前新发现的一颗土星卫星——S/2004 S6。毫无疑问，Sebastien Charnoz等人发表的论文必将在天文学界引发激烈的讨论，同时还会促进科学家们对土星F环进行更为深入的研究。

(二) 天文学家发现巨无霸恒星 亮度是太阳320倍

(2010-07-23 08:33 出处：腾讯网作者：叶孤城)

[导读]日前，天文学家最新研究发现迄今宇宙中最重的恒星，这颗被命名为“R136a1”的恒星质量是太阳320倍。

据美国太空网站报道，日前，天文学家最新研究发现迄今宇宙中最重的恒星，这颗被命名为“R136a1”的恒星质量是太阳 320 倍，是之前观测到最重恒星质量的两倍。同时，这颗巨无霸恒星的亮度是太阳的 1000 万倍，目前受强烈的宇宙风侵蚀，其质量逐渐减少。



天文学家最新研究发现迄今宇宙中最重的恒星，这颗被命名为“R136a1”的恒星质量是太阳 320 倍。这颗巨无霸级恒星的发现可帮助天文学家更好地理解超大质量恒星的特性，以及揭开它们诞生之前为什么会具有超级质量。英国设菲尔德大学天体物理学教授保罗·克劳瑟 (Paul Crowther) 领导这支欧洲研究小组，他们发现 R136a1 恒星位于两个年轻恒星簇之间，这两个恒星簇分别是 NGC 3603 和 RMC 136a。研究小组使用欧洲南方天文台甚大望远镜和哈勃望远镜的观测数据进行了深入研究。

R136a1 恒星诞生时质量是太阳的 320 倍，亮度是太阳的 10000 万倍

NGC 3603 恒星簇距离太阳 22000 光年，它被天文学家称为“恒星诞生工厂”，大量的恒星形成于扩展的气体和灰尘云。RMC 136a 恒星簇是一个年轻的恒星簇，其内部有大量的年轻超大质量炽热恒星，位于狼蛛星云之中，狼蛛星云位于大麦哲伦星系，这个星系距离地球 165000 光年。包括 R136a1 恒星在内，天文学家此次发现几颗温度超过 39700 摄氏度的恒星，它们的温度至少是太阳的 7 倍。同时，这些恒星的质量是太阳的数十倍，亮度是太阳的数百万倍。研究人员通过计算机模型对比这些观测数据，他们研究发现这些恒星在诞生之初质量是太阳的 150 多倍。事实上，R136a1 恒星位于 R136 恒星簇，它是迄今发现最大质量的恒星。当前它的质量是太阳的 265 倍，估计在诞生时其质量是太阳的 320 倍。同时，R136 恒星也是迄今发现最明亮的恒星，它的亮度是太阳的 1000 万倍。

超大、肥胖的婴儿恒星

研究人员称，从这些恒星诞生之后，这些超大质量恒星的质量便逐渐溢出，比如遭受强烈宇宙风侵蚀，最终减少这些恒星的质量。克劳瑟说：“不像人类，这些恒星诞生时质量非常大，但随着时间的推移，它们的质量越来越少。这颗寿命大约 100 万年步入‘中年’的恒星，其质量已损耗了五分之一，这些损耗质量相当于太阳的 50 倍。”

如果将 R136a1 恒星存在于太阳系，那么这颗恒星释放的强烈放射线将更有效地对地球进行杀菌。英国基尔大学的拉斐尔·赫希 (Raphael Hirschi) 是该研究小组成员之一，他说：“这颗恒星位于太阳系，地球公转的时间将缩短至 3 周，同时地球将遭受非常强烈的紫外线辐射，使地球上很难生存生命。”

发现更多超大质量恒星

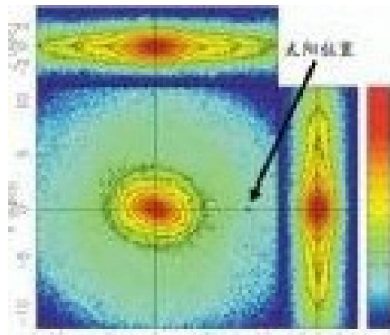
在 NGC 3603 恒星簇，天文学家能够直接观测到两颗超大质量双子恒星，该双子星的每颗恒星诞生之初质量是太阳的 150 多倍。超大质量恒星非常罕见，仅形成于浓密和恒星簇。研究人员通过高分辨率的甚大望远镜的红外仪器进行了观测。在这项研究中，研究人员评估了两个恒星簇中质量最大的恒星，以及超大质量恒星的数目。德国波茨坦市天体物理学协会的奥利维·施努尔 (Olivier Schnurr) 是研究小组成员之一，他说：“其中质量最小的恒星都是木星质量的 80 倍，我们的这项最新研究证实超大质量恒星的上限是之前的两倍，大约是太阳质量的 320 倍。”

神秘的“巨无霸恒星”

目前，天文学家仍致力于研究这些超大质量恒星的形成，由于它们较短的生命和遭受强烈的侵蚀，使得对于它们的形成过程研究变得非常复杂。克劳瑟说：“它们可能是诞生之初就质量非常大，或者之后较小的恒星进行了合并。”质量是太阳 8-150 倍的恒星，将以超新星爆炸形式结束其短暂的生命，其残留物质以中子星或者黑洞形式存在。当它们以超新星爆炸结束生命时，不太可能残留太多的物质。

克劳瑟说：“R136a1 恒星将保留多个超大质量恒星的纪录头衔，它是迄今发现质量最大和亮度最高的恒星，估计在短时间内我们很难再发现超越它的‘巨无霸恒星’。”

(三) 银河系核球最新成果挑战现有星系形成理论



根据最新模型,银河系棒的长度应该是约 2.5 万光年左右,与太阳—银心方向成约 20 度角。

本报讯 中国科学院上海天文台研究员沈俊太在银河系及其核球结构的研究工作上取得了新的进展。这项与美国加州大学洛杉矶分校及得克萨斯大学奥斯汀分校的天文学家合作的研究结果,以通讯快报的形式发表在最新出版的国际学术期刊《天体物理杂志》(ApJL)上。

银河系是一个巨大的旋涡星系,通常认为它是由星系盘、中心核球以及暗物质晕组成。现有的星系形成理论一般认为旋涡星系中心的核球是在星系碰撞与并和过程中形成的。沈俊太利用最新银河系核球视向速度巡天计划(Bulge Radial Velocity Assay, BRAVA)的观测结果,结合高精度多体模拟来研究银河系的动力学结构,证实了银河系的盒状核球其实是侧面看到的银河系的棒。并且发现我们所在的银河系几乎是由一个纯星系盘演化而来,并不包含一个显著的由星系并和形成的经典核球。这一结果与目前宇宙学模拟预言的结果相悖。

目前的星系形成理论认为,像银河系这样大质量的棒旋星系的形成,必须经过若干次星系并和的过程,而星系并和不可避免地会在星系中心形成显著的经典核球。而本研究结果表明银河系是一个大质量的纯星系盘,所以现有的宇宙学模型必须在星系尺度上有大的改进,即必须解决如何形成众多类似银河系的大质量纯星系盘(giant pure-disk galaxies)。这是目前研究星系形成和演化的一个尚未解决的重要难题。

这项研究结果在 2010 年哈佛大学举行的 Sackler 银河系研究会议上被著名天体物理专家 Simon White 教授重点讲述,已引起国际同行的关注。(黄辛)

第九章 时空的相对性与绝对性

1、时空的相对性

19 世纪末的爆发的第三次数学危机,导致了后起之秀——操作主义思潮在欧洲横行,对于物理学的直接作用就是物理量的可测量性问题。如今人们已经明白,不能要求所有基本物理量都具有所谓的测量性。但是基本定律所给出的物理量的解,原则上必须具有可测性。放宽地讲,不要求基本原理本身的每一个物理量均具有可测量性。个别物理量数学上能够满足伽利略的思想实验即可。贝索说:“牛顿在他的《自然哲学的数学原理》中说,时间是绝对的,空间也是绝对的。绝对的意思就是和一切事物都没有关系。既然空间、时间和任何事物都没有关系,你又怎么知道空间和时间存在呢?”一般认为,牛顿提出了绝对时空观,实际上,这是片面的。牛顿说“我没有定义时间、空间、处所和运动,因为它们是人所共知的。唯一必须说明的是,一般人除了通过可感知客体外无法想象这些量,并会由此产生误解。为了消除误解,可方便地把这些量分为绝对的与相对的,真实的与表象的以及数学的与普通的。”所以,牛顿的时空观既包含绝对时空,也包含相对时空。

在 Einstein 的思维中这纯粹是运动学的问题,为了讨论这个问题他假定了一个理想的刚杆测量系统和一个基于理想时钟的时间测量系统,他没有假定这两个测量系统会随着观测者的不同运动状态而有所改变。经过对空间测量系统以及物体的运动对于空间测量系统的改变的分析发现正是此假设隐含着绝对空间的假设。在高速运动状态或者宇观世界里,物质的引力质量比较大,影响了空间与时间的结构,此时以相对空间为主。【1】(笔者注:后面将要说明相对空间即物体激发的引力场,绝对空间是宇宙中所有引力质量激发

的引力场)在广义相对论中,空间和时间不再是与物理学的其它方面无关的了,物体的几何特性和钟的运动依赖于引力场,这些场本身又是物质产生的。在广义相对论中,过程持续性、空间尺度、粒子引力质量以及有限与无限的概念也是依赖于参考系的。

下面的考虑是以相对性原理和真空光速不变原理为依据的,这两条原理我们定义如下:

1、物理体系的状态据以变化的定律,同描述这些状态变化时所参照的坐标系究竟是用两个在互相匀速移动着的坐标系中的哪一个并无关系。

2、任何光线在“静止的”坐标系中都是以确定的速度 V 运动着,不管这道光线是由静止的还是运动的物体发射出来的。由此,得:
$$\text{速度} = \frac{\text{光的路程}}{\text{时间间隔}}$$

这里的“时间间隔”是依照 § 1 中所定义的意义来理解的。

设有一静止的刚性杆;用一根也是静止的量杆量得它的长度是 L 。我们现在设想这杆的轴是放在静止坐标系的 X 轴上,然后使这根杆沿着 X 轴向 x 增加的方向做匀速的平行移动(速度是 v)。我们现在来考查这根运动着的杆的长度,并且设想它的长度是由下面两种操作来确定的:

a) 观察者同前面所给的量杆以及那根要量度的杆一道运动,并且直接用量杆同杆相叠合来量出杆的长度,正像要量的杆、观察者和量杆都处于静止时一样。

b) 观察者借助于一些安置在静系中的、并且根据 § 1 做同步运行的静止的钟,在某一特定时刻 t , 求出那根要量的杆的始末两端处于静系中的哪两个点上。用那根已经使用过的在这种情况下是静止的量杆所量得的这两点之间的距离,也是一种长度,我们可以称它为“杆的长度”。

由操作 a) 求得的长度,我们可称之为“动系中杆的长度”。根据相对性原理,它必定等于静止杆的长度 L 。

由操作 b) 求得的长度,我们可称之为“静系中(运动着的)杆的长度”。这种长度我们要根据我们的两条原理来加以确定,并且将会发现,它是不同于 L 的。

通常所用的运动学心照不宣地假定了:用上述这两种操作所测得的长度彼此是完全相等的,或者换句话说,一个运动着的刚体于时期 t , 在几何学关系上完全可以用静止在一定位置上的同一物体来代替。

此外,我们设想在杆的两端(A和B),都放着一只同静系的钟同步了的钟,这些钟在任何瞬间所报的时刻,都同它们所在地方的“静系时间”相一致;因此,这些钟也是“在静系中同步的”。

我们进一步设想,在每一只钟那里都有一位运动着的观察者同它在一起,而且他们把 § 1 中确立起来的关于两只钟同步运行的判据应用到这两只钟上。设有一道光线在时间①(注:①这里的“时间”表示“静系的时间”,同时也表示“运动着的钟经过所讨论的地点时的指针位置”)。从 t_A 从 A 处发出,在时间 t_B 于 B 处被反射回,并在时间 t'_A 返回到 A 处。考虑到真空光速不变原理,我们得到:

$$t_B - t_A = \frac{r_{AB}}{V - v} \quad \text{和} \quad t'_A - t_B = \frac{r_{AB}}{V + v}$$

此处 r_{AB} 表示运动着的杆的长度——在静系中量得的。因此,同动杆一起运动着的观察者会发现这两只钟不是同步运行的,可是处在静系中的观察者却会宣称这两只钟是同步的。

由此可见,我们不能给予同时性这概念以任何绝对的意义;两个事件,从一个坐标系看来是同时的,而从另一个相对于这个坐标系运动着的坐标系看来,它们就不能再被认为是同时的事件了。

微观领域中,当一个粒子轰击另一个粒子时,分离后的粒子的空间尺度不一定比原来的小,此时指的是相对空间。相对时间是宇宙中一切具体物质系统的时间方向性,是由它本身的内在矛盾及其与环境的相互作用而决定的。爱因斯坦说:没有场的空间是不存在的。时空和场是一个互相制约、互相依存的整体,是一个东西的两种不同的表述,理解物理时空就是理解场。爱因斯坦一直所说的就是“时空就是引力场”。时空是由场表征的,前者是后者的本质,后者是前者的显现,这可以从作为广义相对论基础的“等效原理”中看出。场作为时空的表征,只是一种数学工具。在几何纲领中,场就是时空,时空就是场,没有区别。引力场的本质是时空,是爱因斯坦所发展的几何纲领的要求。

参考文献:

【1】(英) Newton 原著 王克迪 译 袁江洋 核。《自然哲学之数学原理》陕西人民出版社。

2、现代物理学对于真空的认识

《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：6。宇宙中不断有物质创生吗？29。为什么宇宙中反物质如此少？30。反物质世界存在吗？31。反物质能源能否实现？84。真空的本质是什么？

道生一，一生二，二生三，三生万物。道者，无也。——老子《道德经》。西方哲学是把所有的客观存在统称为“物质”，这种自然观被叫做“物质一元论”；20世纪物理学的诸多成果都在证明，未来科学必须用物质~空间系统论的自然观取代实体物质一元论。物理学抛弃 ether, electromagnetic field 可以在真空中传播，真空的本质是什么，为什么在真空中可以激发出各种粒子？李政道(T.D.Lee)认为，真空和 ether 不同，它是 Lorentz 不变的，可它有很多复杂的性质。【1】

100年以前的一位物理学家就预言：真空中充满了能量，取之不尽，用之不竭。在几十年前的彼得堡学术会议上，关于真空问题的讨论，使门捷列夫，开尔文爵士，特斯拉等科学家被错误的冠以伪科学家的头衔。特斯拉对电磁波深有研究，他研究电磁波的标量部分，并且成功地实现了无线的电流传送。李政道博士也认为：真空就是介质的凝固态。一些科学家认为，真空是一种能量海，取之不尽，用之不竭。NASA在1998年把真空能的研究列入NASA的研究计划。美国能源部在当时强烈的反对，认为不可能从什么都没有的真空里提取出能量来，并宣称不会给任何NASA的关于真空能的研究计划拨款。而两年后，美国能源部也把真空能纳入其研究计划中。真空并不是一无所有的虚无（这是经典物理的理解，相对论本质上也是经典物理），而是所有粒子的基态，也即没有粒子被激发的状态。而有粒子的状态是真空的一种激发态——要准确理解这些概念，需要先理解量子理论的基础与本质。

真空是所有粒子的基态，而在一般情况下，我们都希望这种基态本身是稳定的。比如我们经常遇到的势阱，它的最低能态（也就是基态）是稳定的，粒子都被局限在了这个势阱中，而激发态是不稳定的，比如粒子获得能量而离开势阱。

真空破缺，就是上述真空态本身不稳定，使得整个物理系统不再处于真空这个基态，而进入了某种激发态——这里你需要了解基态和激发态并不就一定就表示激发态肯定比基态的能量要高。比如说，粒子的态分布满足一种中间微微隆起的势阱，基态位于中央，从而是微微隆起的部分，那么很自然，粒子有一种离开这个隆起的部分而进入更低能量要求的“激发态”的趋势，从而一旦这种趋势达成，真空就破缺了——不再是真空了，而是进入了有粒子的激发态。这就是真空自发破缺。

真空破缺自然不一定是自发破缺，在有外界能量刺激的情况下，真空也可以被动破缺，比如原子周围的轨道电子就可能被激发从而放出光子，现代激光原理就利用了这点。还比如重粒子周围单光子可以激发出电子-正电子对，也是如此。量子规范场论中的“跑动耦合常数”的概念建立在一系列理论事实上，即规范理论正确地描述了相互作用力，而量子场论存在发散问题，为了解决这个问题就必须使用重整化技巧，这与规范场论结合在一起，就发现重整化理论中的重整化群方程对应了这么一个现象，即如果我们用不同的能量去探测同一个对象的耦合常数（规范场论给出），会得到不同的结果。

在广义相对论中，物理真空的观念被彻底排除了。ether概念重新获得了一定的内容。。。。。。广义相对论的 ether 是本身失去了任何力学和运动学性质的介质，但同时它能决定力学（或电磁学）过程。Dirac 方程 $(\hat{p}c\alpha + mc^2\beta)\psi = E\psi$ ，对原子结构及分子结构都给予了新的层面和新的极标准的了解。Dirac 关于真空中被无数 electric charge 充满的理论可以推广至被无数正引力质量充满着，进一步理解负引力质量空穴——场。由此类比广义相对论中的 ether 依然是真空，因为 space-time 与引力质量是对称的，能量是它们之间的相互作用，因此实物通常是定域在绝对空间的确定区域内，而场则弥漫于绝对空间中，electromagnetic field 的传播也需要介质——绝对 space-time。物理学家保罗·戴维斯在他的《上帝与新物理学》中说：“运动的能量和质量的能量总是正的，但引力的能量，如某些场的引力是负的。有时会出现这样的情况，创造新物质粒子质量的正能量正好被引力的负能量抵消了。”爱因斯坦说：“我们今后在这样的意义上把‘场’同‘物质’加以区别，除了场之外的任何东西都叫‘物质’，因此它不仅包括通常意义上的物质，而且也包括电磁场。”爱因斯坦在1917年的文章《广义相对论的宇宙学》里说的“这样构成的一个宇宙，就其场来说，该是没有中心的，所以用不着假定在空间无限远处密度应该减少，而只要假定平均势和平均密度一直到无限远处都是不变的就行了。”他1918年在《论引力波》里又说：“在我们的宇宙中，固然物质不是均匀分布的，而是集中于各个天体之中；固然物质不是静止的而是处于（比光速慢得多的）相对运动之中。可是，十分可能，在包含许许多多恒星的空间中得到的物质的平均（‘自然量度的’）空间密度，在宇宙中接近一个常数。”

李政道提出，在21世纪会出现四个重大的研究领域：目前在原来的物理学框架上，理论发展已经很困难，应该有一个大的突破。应该着眼于微观的基本粒子和宏观的真空态统一起来研究，这比20世纪初的理

论革命会有更加大的突破。

参考文献:

【1】李政道——科学的发展：从古代中国到现在。朱长超主编。《世界著名科学家演讲精粹》百花洲文艺出版社 1995年3月第1版 第3次印刷。

附录:

2012年6月6日,据美国物理学家组织网报道,瑞典物理学家称,他们运用特制的设备,在“什么都没有”的真空中,制造出了可见光(该研究论文已发表在物理学界著名的免费电子网站 arXiv.org 上)。并说:“如果该实验获得证实,将是近年来量子效应最奇异的实验证据之一”,同时也是一个“意义重大的里程碑”。

这种“量子理论”认为:真空实际上是一片不停波动的能量之海,粒子在其中和万物之间来回转化。这些粒子稍纵即逝,而被认为是“虚拟粒子”,它们拥有切实的“量子效应”。例如:几十年前,就有“理论学家”,据此,预言:一块快速移动的镜子也能产生同样的效应,即:一块镜子能从落在其表面上的“虚拟”光子那儿获得能量,接着,像真实的光子一样重新发出这些能量。不过,只有当运动的镜子以非常接近光速的速度通过真空时才会出现这种效应,但普通的机械装置很难做到这一点。

1948年,荷兰的亨里克·卡什米尔最初提出,如果两个镜子被极端接近地放置在一起,能够存在于其间的“虚拟”光粒子(光子)的数量是有限的。这意味着更多虚拟光子存在于镜子之外而非镜子之间,它们会创造出一种卡什米尔力,让这两面镜子紧紧依附在一起,经典物理不能解释,而认为是一个纯粹的量子效应。

瑞典查尔姆斯理工大学的物理学家佩尔·德尔辛和其同事使用一块名为超导量子干涉设备(SQUID)的装置,该设备对磁场相当敏感,用于测量极端微弱的(例如人体电磁场的微弱变化)信号,将 SQUID 放置于一个超导电路中,它会随着每秒几十亿次地改变的磁场方向,轻微的“摆动”,速度可达到光速的5%,此时还观察到,一大片光子(震动的微波),如天女散花般,“从真空中落下”。进一步分析后发现,正如量子效应所预测的那样,产生光子的脉冲频率几乎是其“摆动”频率的一半。

同样从事量子效应研究的美国哈佛大学物理学家费德里克·卡帕索表示,这是一个非常重要的进步。尽管该效应因其无法产生大量的光子而目前没有实际用途,但却能很好地演示量子效应。未来,一块运动的金属会从真空中制造出可探测的光线。

3、引力场的能量属性

道生一,一生二,二生三,三生万物。道者,无也。——老子《道德经》

西方哲学是把所有的客观存在统称为“物质”,这种自然观被叫做“物质一元论”;20世纪物理学的诸多成果都在证明,未来科学必须用物质~空间系统论的自然观取代实体物质一元论。物理学抛弃 ether, electromagnetic field 可以在真空中传播,真空的本质是什么,为什么在真空中可以激发出各种粒子?

设有两个相距无限远的,密度均匀,半径R,质量m的自由球体的孤立体系。由万有引力吸引,在一条直线两端相向作自然靠近运动。最后相遇并结合成密度均匀,半径为R,质量2m的球体。这个孤立体系的初

态总能量,由质能关系是:总静能量 $E_{i0} = 2mc^2$;根据引力场物理理论,总场能 $E_{i0g} = -12Gm^2/5R$ 之和,

也就是 $E_i = E_{i0} + E_{i0g} = 2m(c^2 - 6Gm/5R)$ 。末态的总能量是:总静能量 $E_{r0} = 2mc^2$;总场能

$E_{fg} = -24Gm^2/5R$,与两个球在引力作用下获得了显示的总动能与结合能的总和 $E_k = 12Gm^2/5R$ 三者

相加 $E_f = E_{r0} + E_{fg} + E_k$ 。根据孤立体系在任意物理过程中,必须遵守普适的能量守恒定律: $\delta E = 0$;

$E_f = E_i$ 。能量守恒定律告诉人们,体系获得的这个能量 E_k 不是“无中生有”,而是以引力场的总能量变

得更负为代价的: $E_k = 12Gm^2/5R = E_i - (E_{r0} + E_{fg}) = (-12Gm^2/5R) - (-24Gm^2/5R)$ 。这就是说,

引力场具有负能量。它为自然的运动和演化过程起了负能量库的作用。物理学家卡西米尔发现真空中两个平行导体板之间会出现负的能量密度,并预言这样一对导体板之间存在微弱的相互作用,后来这个预言被实验证实,从而为负能量的存在提供了直接证据。

100年以前的一位物理学家就预言:真空中充满了能量,取之不尽,用之不竭。在几十年前的彼得堡学

术会议上,关于真空问题的讨论,使门捷列夫,开尔文爵士,特斯拉等科学家被错误的冠以伪科学家的头衔。特斯拉对电磁波深有研究,他研究电磁波的标量部分,并且成功地实现了无线的电流传送。李政道博士也认为:真空就是介质的凝固态。一些科学家认为,真空是一种能量海,取之不尽,用之不竭。

NASA 在 1998 年把真空能的研究列入 NASA 的研究计划。美国能源部在当时强烈的反对,认为不可能从什么都没有的真空里提取出能量来,并宣称不会给任何 NASA 的关于真空能的研究计划拨款。而两年后,美国能源部也把真空能纳入其研究计划中。在广义相对论中,物理真空的观念被彻底排除了。ether 概念重新获得了一定的内容。。。。。。广义相对论的 ether 是本身失去了任何力学和运动学性质的介质,但同时它能决定力学(或电磁学)过程。Dirac 方程 $(\hat{p}c + mc^2\beta)\psi = E\psi$, 对原子结构及分子结构都给予了新的层面和新的极标准的了解。Dirac 关于真空中被无数 electric charge 充满的理论可以推广至被无数正引力质量充满着,进一步理解负引力质量空穴——场。由此类比广义相对论中的 ether 依然是真空,因为 space-time 与引力质量是对称的,能量是它们之间的相互作用,因此实物通常是定域在绝对空间的确定区域内,而场则弥漫于绝对空间中,electromagnetic field 的传播也需要介质——绝对 space-time。物理学家保罗·戴维斯在他的《上帝与新物理学》中说:“运动的能量和质量的能量总是正的,但引力的能量,如某些场的引力是负的。有时会出现这样的情况,创造新物质粒子质量的正能量正好被引力的负能量抵消了。”爱因斯坦说:“我们今后在这样的意义上把‘场’同‘物质’加以区别,除了场之外的任何东西都叫‘物质’,因此它不仅包括通常意义上的物质,而且也包括电磁场。”爱因斯坦在 1917 年的文章《广义相对论的宇宙学》里说的“这样构成的一个宇宙,就其场来说,该是没有中心的,所以用不着假定在空间无限远处密度应该减少,而只要假定平均势和平均密度一直到无限远处都是不变的就行了。”他 1918 年在《论引力波》里又说:“在我们的宇宙中,固然物质不是均匀分布的,而是集中于各个天体之中;固然物质不是静止的而是处于(比光速慢得多的)相对运动之中。可是,十分可能,在包含许许多多恒星的空间中得到的物质的平均(‘自然量度的’)空间密度,在宇宙中接近一个常数。”

霍金辐射和量子真空卡西米尔效应与能量量子隧道效应是同理的,也是缠结的。即卡西米尔效应也是真空量子起伏引起的。量子起伏是由不确定性原理决定的,这其中就含有能量守恒原理。卡西米尔效应中,两片平行板之间的吸引压力,是由平板之间的虚粒子的数目比正常数目减小造成的,这是卡西米尔在 1948 年提出的一项检测真空能量存在的方案。而早在上世纪 40 年代,荷兰科学家卡西米尔和奥弗比克从流行的胶体理论存在的缺陷中发现这个秘密后,就开始做起的这种“游戏”。他们给予的实验证明和解释是,真空能量以粒子的形态出现,并不断以微小的规模形成和消失。在正常情况下。真空中充满着几乎各种波长的粒子,如果使两个不带电的金属薄盘紧紧靠在一起,较长的波长就会被排除出去。接着,金属盘外的其他波就会产生一种往往使它们相互聚拢的力,金属盘越靠近,两者之间的吸引力就越强。到 1996 年物理学家首次对这种卡西米尔效应进行的测定,实际测量结果与理论计算结果也是十分吻合。真空卡西米尔效应和能量量子隧道效应不但紧密相连,而且是量子色动化学的增长极。

当把物质-场相互作用能归为场的能量,则引力能是负数,如果将我们研究的宇宙看作是从真空中产生,开始总能=0,随着它的创生引力能负值越来越大,物质的正值也会越来越大,星系越来越多。“人们从未见到过负质量物体,未必一定意味着负质量不能存在,而可以只是因为原先存在的物体都是正质量的。在经典物理学中,一切运动是连续的,一个原先为正能量的物体,不可能通过连续变化而越过能隙区变成负能量。但是在量子物理中情况完全不同。量子力学容许有不连续的变化,原来正能量粒子可以跃迁到负能量去。将量子力学与相对论结合而建立的狄拉克方程就有两种解,正能解描述正能量粒子的运动,负能解描述负能量粒子的运动。狄拉克没有回避负能态的存在,他假设了在真空中所有的负能态均已经被负能量电子所充满。狄拉克方程和他提出的新的真空图像使他预言了反电子的存在,并在随后的实验中被证实。”【1】“狄拉克在其一篇论文中写道:“最近正电子的发现,又重新复活了旧的负动能的理论,因为到目前为止,实验发现完全和理论相符。”他建议人们应当去“发现负能态的物理意义”。【2】

参考文献:

【1】陆琰 罗辽复 物质探微从电子到夸克 [M] 北京:科学出版社,2005.7。

【2】薛晓丹 量子真空物理导引 [M]. 北京:科学出版社,2005.8。

4、相对时空的本质

《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?6。宇宙中不断有物质创生吗?8。新以太是否存在?27。可观测宇宙的空间有多大?29。

为什么宇宙中反物质如此少？ 3 0。反物质世界存在吗？ 3 1。反物质能源能否实现？ 7 5。轴子，畴壁能否找到？ 8 4。真空的本质是什么？

基本粒子的本性不能和空间本身的结构孤立起来加以考虑。在 1960 年某日，终于将我的苦心思索结晶为基元域的概念：如果任何形式的能量开始和真空发生联系了，那么，按照这种联系方式的不同，我们就可以把它看成一种物质和粒子式的表现，甚至看成一个基本粒子。如果我们想象这个区域变得无限地小，那么，在极限情况下，它就将和一个点粒子相当，从而我们的理论表述就会和从前一样地遇到困难。因此，我们就给这个区域的尺寸规定一个下限，即一个对应于最小时空量子的极限，这就是一个不能再进一步有意义地细分的区域。我们可以把它叫做基元域。——汤川秀树。

在弹性介质中其振动的传播方程不是 Galileo 变换下不变的，只成立于与介质相对静止的参考系中。如果把介质看成“绝对静止系”，利用它即可测量任何惯性系的绝对速度。其次，同一介质之间不是总能保持相对静止的。由于绝对 space-time 并非“绝对静止系”，所以它们之间并不矛盾。由于绝对 space-time 是由理论推理得到，在实验中不可能测量，与相对性原理并不矛盾。李政道(T. D. Lee)认为，真空和 ether 不同，它是 Lorentz 不变的，可它有很多复杂的性质。【1】笔者认为：引力场和时空应该是一个概念，只是提法不同。场的本质是 space-time，是相对 space-time，Einstein 的相对论反映了这个问题。温格伯说，广义相对论是一种引力理论。等效原理使引力场强和试验质点加速度相等，而加速度是时空组合物，因此引力场是时空，引力场用时空度规来描写。Einstein 一直所说的就是“时空就是引力场”。场作为时空的表征，只是一种数学工具。在几何纲领中，场就是时空，时空就是场，没有区别。引力场的本质是时空，是 Einstein 所发展的几何纲领的要求。爱因斯坦说：没有场的空间是不存在的。时空和场是一个互相制约、互相依存的整体，是一个东西的两种不同的表述，理解物理时空就是理解场。爱因斯坦一直所说的就是“时空就是引力场”。时空是由场表征的，前者是后者的本质，后者是前者的显现，这可以从作为广义相对论基础的“等效原理”中看出。场作为时空的表征，只是一种数学工具。在几何纲领中，场就是时空，时空就是场，没有区别。引力场的本质是时空，是爱因斯坦所发展的几何纲领的要求。

广义相对论说的就是如何将引力作用几何化，尽管空间有点弯曲，它仍然是广义相对论的杠杆可以丈量的，并得到宇宙空间是三维的结论。21 世纪前的全部空间理论就是由上面的 2 支杠杆决定的（并用它丈量数学空间和引力空间）。如同空间是三维的概念一样，上面的两个限制性词句，也是作为补充性公理一并被人们接受的。现在的问题是，这 2 支杠杆是否管用？如果不管用，除去先验以外，你是如何得知宇宙空间是三维的？这两支杠杆真的管用吗？例如我们居住的地球，从卫星上看，它是 1 个三维的椭球体，它与外部的天体仅有惟一的引力作用，符合上面的补充性“公理”，因此至少可以使用广义相对论的杠杆。后来人们发现，连续的地球半径在离地心 3480 千米处，被分成了两个运动学空间，内核的自转速度比地壳表面要更快些，地球如此，行星体如此，太阳如此，唯独卫星体和其它小星体没有；人们又检查了纽康系数，卫星体，纽康系数为零，行星之间、行星和太阳之间纽康系数不为零。这意味着，除了卫星和其它小星体可以继续使用广义相对论的杠杆外。超出这一范围后，如果不对纽康系数进行修正，继续使用这样的杠杆就会得到错误的结论（它无法丈量反引力空间）。问题变得越来越多。曾在比萨斜塔一显身手的自由落体实验，它曾为 Einstein 的“等效原理”立过功勋，细心的科学家从同时落地的物体中取出分子，再从中取出原子核和中子，把中子冷却后放进实验室的中子干涉仪里。结果发现，冷中子存在着反引力作用。就是说，如果继续使用这 2 支杠杆，就会出现，同 1 个中子，同在地球表面，既可表现为引力又可表现为反引力。人们又把目光转向太阳和太阳系，太阳是 1 个三维空间的大火球，它和被捆着的太阳系成员，在经过微小的纽康系数修正后，太阳系的运动服从开普勒规则（引力与作用距离平方成反比），它符合上面的补充性“公理”。然而太阳又在绕银心转动，人们发现太阳也好，作为邻居的比邻星也罢，它们的运动不再服从开普勒规则了，引力仅与作用距离一次方成反比，即银河系中的 $v(r)$ 值保持不变。并且还发现，太阳和比邻星之间，97.4 % 的距离不是相互吸引，而是相互排斥的，它成了小星体的自由市场。换句话说，同一个太阳，如果上述两个限制性词句构成的补充性“公理”成立，广义相对论的刚杆继续可以使用的话，太阳同样成了一只既死又活的薛定谔猫。也就是说，要么两个补充性“公理”和广义相对论杠杆仅适用于卫星一类小星体，而不适用于大部分天体和宇宙的大部分空间，要么冷中子和地球及太阳可以在三维空间变成一只既死又活的薛定谔猫。这样的空间结构显然不是数学语言的杠杆可以单独丈量的，广义相对论的杠杆，也仅在对纽康系数修正后，能勉强使用到 0.055155 光年的范围。“引力场直接同时空度规性质发生关系，前面引入的 $g_{\mu\nu}$ 黎曼度规张量……一身而二任，既规定了四维空间在每点的度规性质，同时也表示了在各点的引力场”。“引力场是由什么产生的？回答自然是：物质产生引力场。这里的‘物质’是同‘引力场’对立而定义的，引力场以外的一切东西，都叫做物质”（倪光炯《近代物理》P83）。

由海森堡测不准原理给出了说法：认为物质可以在突然的能量起伏中从“空空间”出现，足够小的时空范围颇象个取之不尽的物质库，其多少可以无限制的借来暂用。相对论本身是几何学，但广义相对论包含了时空结构的演化规律，所以和场论有密切联系。场的传播速度是由时空的四元数结构决定的，这些正说明了场的时空本质，根据场的时空本质对海森堡测不准原理有了更深刻的认识，这是广义相对论的最伟大的发现和本质所在。

“天文学家们能够测量诸星系的质量，星系间的平均距离，以及它们的退行速度。把这些数字代进一个公式，就能得出一个数字，物理学家们已经把这个数字解释成宇宙的总能量了。这个数字在可观测的精度里确实是零！为什么会有这个结果？宇宙学家们长久以来一直迷惑不解。有些宇宙学家提出，有一个深藏不露的宇宙原理在起着作用，根据这一原理，宇宙的能量就得恰好为零。”【4】“宇宙的总能量刚好是零。宇宙的物质是由正能量构成的。然而，所有的物质都因引力而吸引。两块互相靠近的物质比两块分得很开的物质具有更少的能量，因为你必须消耗能量去克服把它们拉在一起的引力而将其分开。这样，在一定意义上，场具有负能量。在空间上大致一致的宇宙情形中，人们可以证明，这个负的引力能刚好抵消了物质所代表的正能量，所以宇宙总能量为零。”【5】“Einstein的广义相对论保证，宇宙中所有物质和运动具有的总的正能量精确地被宇宙中引力产生的负势能之和所平衡，总能量为零。”【6】

“一个孤立系的总能量E不可能改变”【7】物理学家卡西米尔发现真空中两个平行导体板之间会出现负的能量密度，并预言这样一对导体板之间存在微弱的相互作用，后来这个预言被实验证实，从而为负能量的存在提供了直接证据。

1999年，霍金在剑桥大学的一次演讲中预言，将会以数学的形式发现一种“适用于一切事物的理论”。他还说：“要想发现这种适用于一切事物的理论，我们将在很大程度上依赖于数学的美感和确定性。”“他表示‘深信’，所谓的一切事物理论——某种数学‘圣杯’——将会在今后100年内被发现，甚至有可能在今后20年内被发现。”【8】江正杰先生认为超越相对论有两条基本思路：（一）是对Einstein相对论的原初形态及相对论效应进行新的物理解释。（二）是建立在新的基本假定基础上的物理理论，使之能包含相对论的全部结论。

“当我力图在狭义相对论的框子里把引力表示出来的时候，我才完全明白，狭义相对论不过是必然发展过程的第一步。”【9】因为在真实即现实的物理世界中“不存在空虚空间这种东西，即不存在没有场的空间。”【10】——空间是“场”！爱因斯坦把许多物理性质包括惯性都归结为单一的场的性质。牛顿在《自然哲学的数学原理》一书中指出，只有进行更多的关于以太的实验才能够掌握重力、磁力、静电力的根本规律【11】，随后法拉第提出了“磁场弹力说”，而爱因斯坦在接受了“或者以太随着地球一起运动”【12】这一判断之后通过广义相对论描述出了动体周边类似于空间的物质弯曲成的重力场，以及场论学家们借用数学工具和场概念随后表明了空间中具有能量的存在。

19世纪、20世纪物理学最成功的发现是相对space-time(场)的发现，正如Einstein所讲的：“Faraday和Maxwell的electric field理论摆脱了这种不能令人满意的状况，这大概是从Newton时代以来物理学的基础所经历的最深刻的变化。”Einstein常常把相对论称为场论，也说明了这一点。在经典物理学中对于一个物体的动能的测量值不同的观察者测量的结果可以是不同的，那么能量为何有差异？笔者认为主要是时空参与了能量交换，场对于一切有质量的物质都会产生吸引作用，可以说场的符号为负，与物质的质量符号相反，场即是负能量物质，它的空间为负。在较强的场中时间会发生膨胀，引力增强，时间也增多延长【13】。

现代物理学认为，时间——空间结构在Planck长度的极小尺度下会有基本改变，也表明了场的space-time本质。由于场的本质是space-time，因此能量是物质与space-time的相互作用。从场角度与space-time角度研究引力质量间的作用力得到的结论一致，万有引力定律是广义相对论的一级近似。由于场的本质是相对space-time，因此倘若考虑到相对space-time的分离速度为光速，物理学中超距作用从space-time角度考虑作用力与从场的观点得到的结论一致。场是space-time弯曲的表现形式，因为：其一，存在等效原理。即惯性质量与引力质量相等，质点的运动轨迹只与初始条件有关而与引力质量毫无关系，在弯曲space-time中自由质点的运动轨迹是测地线，其测地线也只与初始条件有关而与引力质量毫无关系。而质点在其它任何形式的力场中运动均没有这种效应。其二，若把相对某天体静止的参考系看成是惯性系，在其场中的局域space-time内，总可以找到相对该天体运动的非惯性系，用惯性力抵消引力，则其非惯性系成为局部惯性系。在弯曲space-time中，任何一个space-time点的足够小的邻域，均可认为近似存在统一的空间，它是平直的。相应space-time流形上的坐标近似可看成局域平直空间的曲线坐标，从而等价于某个局域非惯性系。其惯性力“相当”于引力，自然存在某一类坐标transformation，相当于局部惯性系的transformation，使局域曲线坐标变成闵氏空间的仿射坐标，其局域仿射坐标所对应的参考系即是局部

惯性系，在这个参考系中其引力效应全部消失。【14】

现代物理学认为场不等价于弯曲 space-time，原因在于把场建立在平直的 Minkowski 空间且独立于其空间的物理场，它们的存在对 space-time 结构没有任何影响，或影响全可忽略。而弯曲 space-time 是 space-time 结构的自身改变，本质上异于平直的 Minkowski 空间上的物理场。其次，场中的局部惯性系能抹掉引力的一切效应，而在弯曲 space-time 中的局部惯性系并不能严格作到这一点。如在场中的局部惯性系里，检验其惯性系的自由质点的速度，原则上没有任何限制，而在弯曲 space-time 的局部惯性系里，检验其惯性系的自由质点的速度，要远远小于光速。其实场的存在将改变 space-time 中各点的相对位置，不可能独立于其空间，平直的 Minkowski 空间是绝对 space-time，场与弯曲 space-time 本质上是统一的。根据 Lorentz transformation 在场中运动的质点其引力质量随着速度的增加而增加，达到光速是为无穷大，因此在场中的局部惯性系里，检验其惯性系的自由质点的速度，也不可能超过光速。场的深入的研究必须把 Euclid 几何（抛物几何）与罗氏几何（双曲几何）、Riemann 几何（椭圆几何）统一用射影几何研究。两质粒间的场效应（感应）传播所需时间仅与起传点至到达点的空间距离有关（与传播过程中质粒间因相对运动发生距

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

离变化并不矛盾），而与质粒间相对运动速度无关，且在真空中的传播速度为常数 $\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ （ ϵ_0 、 μ_0 分别为真空介电常数和真空磁导率），数值上等于光速。场效应的传播速度独立特性充分证明了空间的客观性、均匀性。引力场直接同空时度规性质发生关系，前面引入的 $g_{\mu\nu}$ 黎曼度规张量……一身而二任，既规定了四维空间在每点的度规性质，同时也表示了在各点的引力场，【2】在广义相对论中，弯曲时空本身就是引力场。【3】爱因斯坦讲：“古代的几何学家所研究的是概念上的东西（直线、点、面），并没有真正研究到空间本身。”

现在假设真空中一个不旋转，不带电荷，体积有限，球型对称且密度均衡的理想试验物体以及两位虚拟的观测者，进行一次坐标转换的试验。第一位观测者相对试验物体是静止的，没有任何其它参照系，也没有其它引力场的影响。假设观测者的存在与否不对试验物体产生任何影响。测量结果使观测者得到了物体的质量、体积、不旋转、不带电荷等属性。他还计算了物体表面及周围因物体惯性质量而存在的引力场的情况。他要是懂得广义相对论，就可以得到物体表面及周围时空曲率的表达式。他也可以用质能方程 $E=MC^2$ 来计算物体的总能量。但因为没有任何参照系，他不知道物体的运动状况。他得到这些情况后就离开了。

第一个观测者离开之后，一个外力作用于物体之上，段时间之后，外力撤销。这时，第二个观测者出现了。同样假设这位观测者的存在与否不对试验物体产生任何影响，他相对于物体是静止的，也没有任何的参照系，没有其它引力场的存在。第二位观测者对物体进行同样的测量。他得到一组数据，质量，体积，不带电荷，不旋转等等，他也计算物体表面及四周引力场的情况，也知道时空弯曲的情况。

根据能量守恒原理，因为有外力的作用，因此试验物体的总能量肯定发生了变化，设为 ΔE 。因此，物体的惯性质量也会改变， $\Delta E = \Delta MC^2$ 。又根据广义相对论，物体的惯性质量使时空弯曲，现在惯性质量变了，物体表面及四周的时空曲率也必然改变。这些改变均相对于第一位感测者得到的数据而言。在外力发生作用时，这些数据就改变了。设惯性质量与时空曲率的关系式为： $g=M/R^2$ ，与地球引力加速度的表达式一样。如果用微分几何方程式 $ds^2 = \sum g_{ik} dx^i dx^k$ 来表达，则 g_{ik} 为一个张量，在球型对称的时空弯曲中，同一球面的 g_{ik} 在数值上是相同的，方向不同，因此，可以用 $g=M/R^2$ 来简化计算。在上面的实验中， g 的变化量为 $\Delta g = \Delta M/R^2 = \Delta E/R^2 C^2$ ， R 为物体表面的球面半径， Δg 为物体表面时空曲率变化量。

现在的问题是：物体受外力作用时，到底先改变了物体的惯性质量，从而改变时空曲率，还是先改变时空曲率再改变了物体的惯性质量？

我们并不能确定，惯性质量与时空弯曲之间是否是因果关系，我们所知道的只是能量的变化。因此，可以这样认为，物质和它周围的时空，根本就是不可以分割开来的。抛开时空去讨论物质的物理规律或抛开物质去讨论时空的几何性质都是片面的。因为我们不知道，是时空曲率的改变从而改变了物质的惯性度量，还是物质的惯性质量改变导致了时空度量的改变。把这个问题与能量关联到一起，就成了这样的问题：是弯曲的时空改变曲率抵消了能量的变化，还是物体惯性质量的改变抵消了能量的改变？我们无从区分。于是，根据等效的原则，得出这样的结论：弯曲的时空蕴含能量。曲率的变化会吸收或释放能量，并通过与之紧密相连的物质表现出来。将时空弯曲直接与能量联系起来，物质成为这一关联的载体，或者叫表现形式。（想起弹簧没有？）时空和能量成了宇宙的主角。这样好像不太习惯，但仔细想，一切物理现象均在时空中发生，均涉及能量的变化，如果抛开时空来研究物理规律，是不全面的，只有将时空变化放到物理现象中一起来研究，才更合理。把上面的结论反过来，将得到一个更重要的结果：如果平直的时空产生扰动，从而有时空

曲率的变化，就会有能量的产生，而代表能量的物质，或者说能量的载体，物质就会产生。也就是说，能量和物质会从平直时空的扰动中，凭空产生，而总体上，能量依旧保持平衡。那么，现今的宇宙完全可以从平直时空的扰动开始，慢慢演化成现在的样子。时空和物质的存在是自洽的，不存在大爆炸这样一个奇怪的起始点。

现代基本粒子理论中质量量纲为 space-time 量纲的倒数也说明了场的 space-time 本质的观点是正确的。根据能量是物质与 space-time 的相互作用与 space-time 平权理论，可以进一步将质量守恒定律与 space-time 守恒定律统一为 law of conservation of energy，进而把 law of conservation of energy 与动量守恒定律结合在一起。注：本文中的场其实是引力与弱相互作用的合力激发的场。

参考文献：

- 【1】李政道，科学的发展：从古代中国到现在。朱长超主编。《世界著名科学家演讲精粹》百花洲文艺出版社 1995 年 3 月第 1 版 第 3 次印刷。
- 【2】倪光炯，李洪芳著 近代物理，上海科术出版社，1979 年。
- 【3】郭汉英 空间、时间和宇宙理论面临挑战 《科学文化评论》（双月刊）2004 年 1 月（56 卷 1 期）。
- 【4】保罗·戴维斯 上帝与新物理学 [M]。湖南：湖南科学技术出版社，2003.10。
- 【5】史蒂芬·霍金。时间简史 [M]。湖南：湖南科学技术出版社，2002.2。
- 【6】约翰·D·巴罗 无之书 [M]。上海：上海科技教育出版社，2003.6。
- 【7】哈里德 物理学基础 [M]。北京：机械工业出版社 2005.8。
- 【8】《霍金再谈人类的未来[N]。参考消息，1999.3.15。。
- 【9】《爱因斯坦文集》商务印书馆，1977 年，第一集，第 28 页。
- 【10】《爱因斯坦文集》第一集，第 558 页。
- 【11】牛顿，自然哲学的数学原理，中文第三版，6、651。
- 【12】I. Asimov: 'S GUIDE TO SCIENCE, Basic Books, Inc., New York, 1972; 何笑松等译，北京科学出版社，第 2 版，1979，150~160。
- 【13】泡利，相对论，上海科学技术出版社（1979），205。
- 【14】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、广义相对论与马赫原理关系一窥

1913年，爱因斯坦在创立广义相对论之后，在给马赫的一封信中说：“如果（广义相对论）真正站得住，那末，您对力学基础所作的天才研究，将不顾普朗克的不公正的批评而得到光辉的证实。因为完全按照您对牛顿水桶实验的批判，一个必然的后果是：惯性来源于物体的一种相互作用。”

尽管爱因斯坦的广义相对论取得了辉煌的成功，但加速参照系中惯性力的起源仍然是一个迷。牛顿曾通过水桶实验试图证明加速运动是绝对的，他认为水面变凹是由于水相对于绝对空间的旋转所导致。马赫则否认绝对空间的存在，他认为一切运动（包括加速运动）都应当是相对的。对于牛顿水桶实验，马赫认为导致水面变凹的惯性离心力是由于水相对于地球和其他天体做相对转动而产生的。这暗示惯性离心力是由宇宙中其他物质（如遥远星系）对物体的引力产生的。在此基础上，爱因斯坦曾提出马赫原理，即一切物体的惯性效应都来自宇宙空间中物质做相对加速运动时的引力作用T。根据这一原理，惯性力本质上就是引力，惯性现象都是由物质间的引力作用所产生的。然而，现有实验尚未发现马赫原理所预言的结果。此外，惯性力的瞬时性与引力的有限传播特性似乎也不相容，因此，利用引力似乎无法解释惯性力。尤其是，马赫原理与广义相对论实际上并不一致PT。例如，对于只包含一个实验质点的宇宙，广义相对论的场方程（即使包含宇宙常数项）仍然有解，而且当实验质点做加速运动时，加速坐标变换仍将给出惯性力；而根据马赫原理将不存在惯性力，因为没有产生它的遥远星系。此外，人们对转动空壳内的引力场的分析也显示，不仅存在通常的惯性离心力，还存在与此径向力具有相同数量级的轴向力。这也与马赫原理不一致。

那么，马赫原理是否正确呢？如果马赫原理是正确的，那么必须修正广义相对论来满足这条原理；而如果马赫原理不正确，那么我们似乎又得回到运动的绝对性，而这无疑违反了广义相对论的初衷。面对马赫原理与广义相对论的不和，爱因斯坦后来对它失去了热情，并且在晚年曾断言，“人们根本用不着再谈马赫原理了。”然而，事实并非如此。原因在于，广义相对论只是说惯性力与引力的所有物理效应都是不可区分的，但它并没有回答惯性力的起源问题。而马赫原理则正是对这一问题的进一步探索，它直指惯性力的本质！因此，对马赫原理的深入研究是十分必要的。

从逻辑上分析，如果两种力的所有物理效应都是相同的，那么这两种力应当具有相同的本质，或者说，它们应当是同一种力。因此，广义相对论所基于的等效原理事实上已经隐含了惯性力就是引力。然而，广义相对论并没有给出惯性力起源于引力的具体机制。实际上，它的场方程不能导出惯性离心力来自于遥远星系对转动物体的引力（不一定直接来自遥远星系？！），或者说，广义相对论并不能得出“惯性力即引力”的结果。这似乎暗示了广义相对论在逻辑上是不一致的，由前提导出的结果竟然不符合前提！问题似乎出在等效原理的绝对有效性上。如果等效原理是近似有效的，那么惯性力不必来自引力，至少不必完全来自引力。这样，近似正确的广义相对论不能得出“惯性力即引力”的结果也是合理的。实际上，考虑到时空的分立性，关于马赫原理与相对论的关系可以用著名物理学家*R·H迪克*的下面一段话来概括：“空间的几何和惯性性质对空虚空间是无意义的观点，空间的物理性质根源于它所包含的物质的观点，以及一个粒子的唯一有意义的运动是相对于宇宙中其他物质的运动的观点，从未在物理理论中找到其完全的表述。这个图像是旧的，它可以追溯到见克萊主教”和*马赫*的著作中。这些思想在广义相对论中找到了有限的表述，但是必须承认，虽然在广义相对论中空间几何受物体分布的影响，但几何不由该分布唯一地决定。

如果惯性起源于物体与遥远星系之间的相互作用，那么将不得不求助于似乎非物理的超前波，即向过去以光速传播的波*T*。最后我们指出，即使（静止）质量起源于希格斯机制，我们仍需解释质量产生惯性的原因，即为什么质量具有抵抗加速度的惯性？或者说，为什么具有质量的物体在加速时会受到惯性力？惯性的起源仍将是一个谜！它来自最平凡的事实，但却是如此深邃、神秘。

物理学的每一重大进展都更进一步地揭示了绝对空间与有质量的粒子发生相互作用时所产生的丰富的物理效应，即所谓狭义相对论效应、广义相对论效应、真空效应等，因而物理学的每一重大进展都事实上向绝对空间存在的证明更近了一步，*Einstein*晚年明确宣布放弃*马赫原理*，并承认他未战胜*牛顿*的绝对空间概念。

6、广义相对论与以太

(1) 广义相对论与以太

1920年，他在专题演讲“以太和相对论”中曾指出：“依照广义相对论，一个没有以太的空间是不可思议的。因为，在这样一种空间里，不但光不能传播，而且量杆和时钟也不可能存在，因此，也就没有物理意义上的空间-时间间隔。但是，又不可认为，这种以太会具有那些为重媒质所特有的性质，也不可认为，它是那些能够随时间追踪下去的粒子所组成的，而且也不可把运动概念用于以太。”在这里，*Einstein*既指出以太的存在性，又对以太的性质提出了看法：1、以太是光的传播媒介。2、长度和时间的标准由以太决定。3、以太不同于一般的有质量的实物（重媒质）。4、以太不能用相对论时空观进行描述——他实际上是把以太（物理真空）描述成了四维时空连续体，而用相对论的时空观去描述相对论的四维时空连续体。*Einstein*本人对以太论的心态是很矛盾的，他既意识到以太的存在，又搞不清它的真面目。1952年，*Einstein*在《狭义与广义相对论浅说》的序言中补充说：“空间-时间未必是一种可以认为离开物理实在的实际客体而独立存在的东西。物理客体不是在空间之中，而是这些客体有着空间的广延性。这样，‘空虚空间’这概念就失去了它的意义。”

通俗著作《狭义与广义相对论浅说》（1916年原版）推出第15版之际，*Einstein*结合对于相对论的历史性总结，把自己晚年对于时空问题的新见解及其新思路，补写到一个新的附录即附录五《相对论与空间问题》之中。*Einstein*特别提出：“在这个附录中阐述了我大体上对空间问题以及对我们的空间观如何在相对论观点影响下逐渐改变的看法。我想说明，空间-时间未必能看作是可以脱离物质世界的真实客体而独立存在的东西。并不是物体存在于空间中，而是这些物体具有空间广延性。这样看来，关于‘一无所有的空间’的概念就失去了意义。”【1】

1952年，*Einstein*在《狭义与广义相对论浅说》的序言中补充说：“空间-时间未必是一种可以认为离开物理实在的实际客体而独立存在的东西。物理客体不是在空间之中，而是这些客体有着空间的广延性。这样，‘空虚空间’这概念就失去了它的意义。”实际上，*Einstein*并不否定真空的物质性。不过，他认为，应该用“场”来替代以太。他说：“为了揭示笛卡尔观念的真正内核，就要求把场的观念作为实在的代表……‘没有场的空间是不存在的’。”时空弯曲与引力场是等价的。在*牛顿*的理论中时空只是讨论问题的一个参数，但是在广义相对论中是客观存在的。

*Einstein*在晚年，力图想纠正自己理论中的偏见，他意识到，时空并非实体。他曾说——“物理客体有着空间的广延性”。这里所谓的“空间的广延性”，本质上就是用易学揭示的与物质世界共存的反物质世界。这是一个对物质世界进行平衡和自组的“形上”世界。【4】相对论加强了场的概念在物理学中的重要性，使时间与空间联姻。在广义相对论中，他认为空间的性质应由“物质的分布”来决定，实物体可以“弯

曲”周围的空间。这些都显然与前面的空虚空间的定义相矛盾。空间既然一无所有，那它就不可能具有象物质一样的性质。还有，如果空间中真的一无所所有，那么各实物体就成了一个个的孤立个体，彼此间互相隔绝，互不相关。Einstein讲：“可以假定有以太存在。只是必须不再认为它有确定的运动状态，也就是说，必须抽掉洛伦兹给它留下的那个最后的力学特征。”“狭义相对论不允许我们假定以太是由那些可以随时间追踪下去的粒子所组成的，但是以太假说本身同狭义相对论并不抵触。”【5】

Einstein在以太问题上也曾犹豫不定，他在题为《以太和相对性原理》的讲演中说：“根据广义相对论，空间没有以太是不可思议的。实在的，在这种（空虚的）空间中，不但光不能传播，而量杆和时钟也不可能存在，因此也就没有物理意义上的空间——时间间隔。……因此在这种意义上说，以太是存在的。但是，又不可认为，这种以太会具有那些为重媒质所特有的性质，也不可认为，它是那些能够随时间追踪下去的粒子所组成的，而且也不可把运动概念用于以太。”他甚至说到：“至于这种新以太在未来物理学的世界图象中注定要起的作用，我们现在还不清楚。”现在，面对宇宙背景辐射等实验事实，许多著名物理学家都认为应当恢复以太假设。伯格曼认为，在宇观尺度上，相对性原理被破坏了；宇宙背景辐射只在独一无二的参考系中各向同性，在这个意义上，那个参考系代表“静止”。韦斯科夫认为，无论如何，观察到的2.7K辐射决定了一个各向同性的绝对坐标系。迈克尔逊和莫雷的梦想变成了事实，即找到了我们太阳系的绝对运动。斯塔普认为，2.7K背景辐射定义了一个优越的参考系，利用它可以决定事件发生的绝对顺序。

Einstein说：“马赫思想在广义相对论的以太中得到了充分的发展。根据这种理论，在各个分开的时空的附近，时空连续区的度规性质是各不相同的，并且共同取决于该区域之外存在的全部物质。……广义相对论的以太是这样一种媒质，它本身完全没有一切力学和运动学的性质，但它却参与力学（和电磁学）事件的决定。”Einstein进一步认为：“更加精确的考察表明，狭义相对论并不一定要求否定以太，可以假定有以太存在；只是必须不再认为它有确定的运动状态，也就是必须丢掉洛伦兹给它留下的那个最后的力学特征。”按相对论宇宙学真空具有负密度，从引力场方程拉姆达项已计算出来了。

Einstein曾说过（Einstein文集，第一卷，“以太和相对论”p128-129）：“依照广义相对论，空间已被赋予物理性质，因此，在这种意义上说，存在着一种以太。在这里，Einstein既指出以太是存在的，又对以太的性质提出了看法：1、以太是光的传播媒介。2、量杆和时钟（长度和时间的标准）由以太决定。3、以太不同于一般的有质量的实物（重媒质）。4、以太不能用相对论时空观进行描述。

现代物理探索中，真空的以太组成一直是许多人挥之不去的思想，Einstein认为：相对论虽然也抛开了真空以太，这是因为不能把电磁场解释成以太状态而逼着这样做的；把场作为独立的物理实在，这是客观存在的二元论。他进一步说：“我们希望后代将能克服这个二元论概念”，“从而不再视场为独立的物理实在”，还说“理论物理决不能没有以太”。真空 V_0 作为新以太，它的存在是不同于现实世界的全新领域，遵循的规律也一定不会与现实世界物质存在的机械规律相同；如原子中价电子做变速运动不满足经典电磁理论的辐射规律一样，真空中源于 V_0 的组成也可以不满足机械运动规律，不会发生可观测的漂移，迈克尔逊和莫雷等人自然也就不会观测到漂移速度，当然这也有可能完全不对电磁波的传播产生任何影响。具有机械特征的真空旧以太确实并不存在，但要对真空由自身的客体单元组成做否定判定，上述历史上的两个理由并不充分。

（2）爱因斯坦论述场与以太的关系

Einstein曾经讲过：“我一生的主要工作：结合对空间、时间和引力的新认识，创立相对论；提出质能等价定律和统一场论（未完成）；对量子论发展的贡献。相对论是从场的问题上兴起的。场是从牛顿时代以来最重要的发明。实物可以看作是场特别强的一些区域，因而，场是唯一的实在【6】。

在1938年，Einstein与英费尔德合著的《物理学的进化》中有一段话：“我们力图发现以太的性质，但一切努力都引起了困难和矛盾。经过这么多的失败以后，现在应该是完全丢开以太的时候了，以后也不要提起它的名字了。我们说，空间有传播电磁波的性质。”在这字里行间，流露了他内心的无奈。为了应对这一无奈，他搬出了“场”的观念。在“相对论和空间问题”一文中，他说“当笛卡尔相信他必须排除空虚空间的存在时，他离开真理并不怎么远……为了揭示笛卡尔观念的真正的内核，就要求把场的观念作为实在的代表，并同广义相对性原理结合在一起；‘没有场’的空间是不存在的。”（《Einstein文集》第1卷，558页。）“最近Einstein引伸了以太这个概念。它不应再被认为是一种实物，只不过是跟真空相联系的那些物理量的总和。”【3】

实际上，Einstein并不否定真空的物质性。不过，他认为，应该用“场”来替代以太。他说：“为了揭示笛卡尔观念的真正内核，就要求把场的观念作为实在的代表……‘没有场的空间是不存在的’。”

（3）现代物理学对于以太的看法

相对论的先驱者洛仑兹认为，除了相对论时间外，还应该存在一种“真实”的时间（True Time）。作为洛仑兹时间观的表述，一种推广伽利略变换的时间，它对应于宇宙的格林尼治时间。当采用这种时间定义时，同时性是绝对的，其时间箭头都是正向的。洛仑兹在世纪之交虽然积极参与了物理学的几个前沿领域，却极力设法修补旧理论，总想在不妨碍经典理论框架的前提下把力学和电动力学调节器加起来。但是，1887年迈克尔逊实验否定了为电磁理论所要求的菲涅耳的静止以太说，使电磁力学的基础受到了冲击。洛仑兹为此而郁郁不乐，他于1892年写信给瑞利说：“我现在简直不知道怎样才能摆脱这个矛盾。不过我仍然相信，如果我们不得不抛弃菲涅耳的理论，……我们就根本不会有一个合适的理论了”。……直到晚年，他还认为以太是具有一定优点的概念。据玻恩回忆说：“我在洛仑兹逝世前几年看望他时，他对相对论的怀疑态度没有改变。”据板田昌一讲，洛仑兹面对波粒二象性的新概念，曾绝望地哀叹：“在今天，人们提出了和昨天所说的绝然相反的主张。这样一来，已经没有真理的标准了，也不知道科学是什么了，我真后悔我未能在这些矛盾出现前五年死去。”

玻耳兹曼直到1902年还公开宣称：“力学是整个理论物理大厦赖以建立的基础，是所有其他科学分枝赖以产生的根源。”迈克尔逊设计试验的目的是为了证明“以太”的存在，可是事与愿违。为此他非常失望，以至于试验没按原计划完成，而是草草收场。他至死（1931年）还念念不忘“可爱的以太”。J.J. 汤姆生在1909年宣称：“以太并不是思辩哲学家异想天开的创造，对我们来说，就象我们呼吸空气一样不可缺少。”

科学史上有这样一种现象，即某些科学概念在特定的场合里被提出，后来被否定，之后又在新的场合里复出，且复出后的概念往往具有更深刻的含义，并会对相关科学领域的发展起重要作用。1970年狄拉克指出：“以太观念并没有死掉，只要基本问题仍未得到解决，必须记住这里还有一种可能性。”美籍物理学家张操说：“……现代物理学一方面否定以太的存在，另一方面却引入了物理真空的概念。其实，‘物理真空’仅是以太的一个代名词。‘物理真空’这个术语很容易被人误解为虚空，并与空间概念相混淆。所以，笔者宁愿采用19世纪的物理学常用的术语‘以太’来代替‘物理真空’。”【2】

协同学创始人哈肯也认为，狭义相对论否定了特殊参考系的存在，但宇宙背景辐射却成了一个绝对的参考系。罗森甚至认为，宇宙学的最新发现要求回到绝对空间的观念。胡宁认为，在迈克尔逊实验的零结果和以太模型之间并不存在任何矛盾。最后，我们看一看当代著名物理学家狄拉克对此作出的评论。早在1970年，狄拉克就指出：“以太观念并没有死掉，只要基本问题仍未得到解决，必须记住这里还有一种可能性。”

广义相对论中的度规场就是以太：分析到最后，否定以太存在就是否定空的空间有任何物理性质；广义相对论的以太是经过洛仑兹以太的相对论化而导出的，它应该作为惯性作用的介质而起作用。”牛顿的绝对空间概念并没有被物理学至今为止的发展所驳倒，物理学的每一重大进展都更进一步地揭示了绝对空间与有质量的粒子发生相互作用时所产生的丰富的物理效应，即所谓狭义相对论效应、广义相对论效应、真空效应等。

时空不是独立的存在，时空是物质的时空，时空是物质世界的表象，物质本体改变了，其表象必随其变。空间与时间在表述物质时，各有侧重：空间侧重于表述物质相对静止的状态，时间侧重于表述物质相对变动的过程。物质的存在是相对变动中的存在，静止是变动中相对的静止，从这一角度可以认为：物质是变动与静止的统一体，是时间和空间的统一体。

笔者认为Einstein广义相对论中所说的以太就是绝对时空——引力场。

参考文献：

- 【1】Einstein, 《狭义与广义相对论浅说》第15版（1964年），上海科学技术出版社。
- 【2】张操，物理时空探讨，香港，华夏文化出版有限公司，2005，P5。
- 【3】泡利 著 《相对论》。
- 【4】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】许良英，范岱年编译：《Einstein文集》，第1卷，商务印书馆（1976）120。
- 【6】Einstein, 英费尔德。物理的进化。上海科学技术出版社，1962. 178~181。

7、时空的绝对性

1954年，Einstein讲：我认为非常可能，物理学不能建立在场的概念上。如果是这样，那么，我的全部空中楼阁（包括引力理论在内），甚至连其他现代的物理理论也一样，将荡然无存【8】。如果以场作为基本概念的客观描述是不可能的话，那么，就得找到一种完全避免连续统（连同空间和时间）的可能性。但

是，这样一种理论中可以使用什么样的基本概念，我没有一丁点主见【9】。在1953年的《M·雅梅的〈空间概念〉序》一文中，爱因斯坦说：“需要经历一场严酷的斗争，才得到了为理论发展所必需的独立的和绝对的空间概念。以后要克服这种概念，仍然也需要作同样顽强的努力——这一过程，大概远还没有完结。没有一个人会肯定地认为牛顿的伟大创造会真正地被这种或其他任何一种理论所代替。他的清晰和广阔的观念作为我们已经建立的现代物理学观念的基础将永远保持它们的意义。”

任何场都具有一定的时间和空间，所以说，场是由物质构成的，而场具有使物质运动的能力，只有一个原因就是构成场的物质分布不均匀。也就是说，场是由于构成场的物质在有的地方密度大即能量大，而有的地方密度小即能量小形成的。相对论时空观是一种物质依托性的时空观，它由真空所造就，要弄清它的实质，应从真空人手。绝对时空观是一种科学抽象性的时空观，它不依托任何物质。在绝对时空观中，真空态的物质是存在于时空中的一种可压缩的超流体。绝对时空观是第一性的；相对论时空观是通过变换实现的，是第二性的。总的说来，相对论时空观有一定的局限性，但在人类现有的认识范围中，它是定量描述的基础。不过，它不能有效地描述真空，对此必须结合绝对时空观作定性描述。场论真空结构和性质的研究具有重要意义，真空具有许多效应，如反映真空具有零点能的Casimir效应、真空极化导致兰姆移动、激态原子与真空零点能作用导致原子自发辐射等。真空作为量子场的基态，具有普适的对称性。

第一个物理的宇宙模型是Einstein在1917年提出的，当时人们对宇宙的整体面貌还完全没有了解，他主要凭直觉提出了宇宙学原理——宇宙物质在空间上是均匀的和各向同性的。爱因斯坦说：“战胜绝对空间概念，亦即战胜惯性系概念之所以成为可能，只是因为场的概念逐渐代替了物质实体的概念，而成为物理学的基本概念。在法拉第和麦克斯韦思想影响下，发展了这样的想法，认为整个物理实在大概能被表示为这样的一种场，它的分量取决于四个空间、时间参数。如果这种场的定律是广义协变的，也就是说，如果它们是同坐标系的特殊选择无关，那末，独立的（绝对的）空间的引用就不再是必要的了。构成实在的空间特征的，因而也就不过是场的四维性而已。因此，不存在什么‘空虚的’空间，也就是说，没有场的空间是不存在的。”因为根据广义相对论，不是物质存在于空间和时间之中，而是物质具有空间和时间的广延性，引力场可以使space-time发生变化，但是运用光学或射电望远镜会发现，除了一些局部的聚集外，星系大体均匀分布于整个空间，宇宙在非常大的尺度下显得相当均匀。【3】考虑直径为 λ 的球形区。把宇宙的不均匀性完全抹平后，这球区内质量为M。在不均匀的实际宇宙中，这区内的质量记为 $M + \delta M$ ， δM 反映它对均匀背景的偏离。显然不同地方有不同的偏离大小。对全宇宙讲， δM 的平均值必定为0。因此我们应当把各处的 δM 平方后再做平均，得到 $\langle \delta M^2 \rangle$ ，它表示整个宇宙偏离均匀的程度，现在天文学观测证实 $\langle \delta M^2 \rangle$ 值随 λ 的增大而减小，这就是宇宙观地均匀的证据，它是实际宇宙的一个合理的近似描写。所以整个宇宙形成的绝对空间是平直的Galileo、Minkowski空间，绝对时间意味着中性时间（流速均匀），绝对空间对所有事物的作用是相同的，这表现了空间的绝对性，从某种意义上说，这是Newton空间的复活【1】。

从原理上看，广义相对论的引力理论同Newton的理论全然不同。但其实际结果又如此接近，以致很难找到经验能及的标准来区别它们。、、作为自然哲学领域中整个现代观念的结构的基础，其伟大而清晰的思想将始终保持其独特的意义。【2】但是它与Newton的绝对space-time观不完全一致，在这里时间与空间有联系，而且space-time与外界事物密切联系。现代物理学认为，如果质量——能量必须存在某处的话，那么应该处于这个平坦的空的时空中——一个没有任何种类的物质和场的区域（笔者注：绝对space-time）。【4】

很多学者相信，哥德尔所给出的广义相对论旋转宇宙模型表明时空的确具有绝对性，宇宙可以绕着自己的时空框架旋转不息，绝对空间和绝对时间的幽灵仍然萦绕于广义相对论的理论内核中。即使否定牛顿的全域静止的绝对时空会在广义相对论中出现，相对于一组定域惯性系的绝对加速和绝对转动确实存在。这里的绝对时空恰好是因为旋转宇宙在无限远处的度规不同于惯性时空度规的渐近平坦性而被识别出来的。哥德尔解需要非零的宇宙常数，具有空间均匀性而不具备各向同性，出现了封闭的类时线，物质在这些宇宙中相对于局部惯性框架旋转等特点。不少学者怀疑哥德尔解的物理真实性，Einstein在怀疑的同时指出哥德尔解重视对时间概念的深入分析，并且注意到在哥德尔的新解中，对于按宇宙论意义隔得很远的世界点而言，早迟之分（过去，现在和未来的差别）被抛弃了。Newton认为space-time与外界事物、时间与空间无关的观点具有一定的局限性，而且它们相互之间是矛盾的，既然绝对空间是不动的，为何相对空间又是可动的部分？Newton没有真正认识观测者的时空尺度的真正含义，他在观测其它物体变化的同时完全忽视了观测者自身物质变化。观测者的时空尺度就是其“自身”，其在对别的物质观测的同时会以自身作为直接或间接的参照系进行对。认为时空尺度是凌驾于物质运作之外的东西，无疑等同于将自身凌驾物质运作之外。

在美国，以怀特海为先驱的过程哲学学派有着广泛的影响。过程哲学学派认为，世界即过程，过程由事

件构成,事件表现出有秩序的连续性。怀特海的世界模式仍然服从相对论的光锥要求,即形成有秩序的连续序列的只是类时分离事件而不包括类空分离事件。远距关联实验(即贝尔不等式的实验检验)揭示了类空分离事件存在着因果联系,因此,它们也应当具有绝对的(与参考系无关的)先后次序。许仲平从四维对称标架中钟系的校准过程分析时间,指出相对论时间并不是唯一可能的,他提出了一种具有普适时间($t' = t$)的理论。在现代物理学的最新实验事实和理论思维成果之中,我们应当选取哪些事实作为探索新 space-time 理论的逻辑起点呢?

众所周知,狭义相对论确立了时间和同时性的相对性概念。但是宇宙背景辐射提供了一个优越的参考系,它可以用来确定时间的绝对次序。对此,哈肯指出:“在某种意义上讲,这个新的绝对空间导致了一个有趣的时间概念。……在狭义相对论中,作任意运动的不同观察者不可能找到一个共同的时间,而宇宙漂泊的观察者却经历着一个宇宙的或者说普适的时间。”

我们对于物理学基本概念的分析表明:绝对空间这一最基本的物理概念不仅没有被物理学至今为止的发展所抛弃,相反,却越来越接近于被证明。由于绝对空间在物理学中起着至关重要的作用,具有丰富的物理性质,我们不得不将其视为一个独立的物理实在。任何将绝对空间等同于一无所有的虚空的观点在物理学上都是不可思议的。

我们对于物理学基本概念的分析表明:绝对空间这一最基本的物理概念不仅没有被物理学至今为止的发展所抛弃,相反,却越来越接近于被证明。由于绝对空间在物理学中起着至关重要的作用,具有丰富的物理性质,我们不得不将其视为一个独立的物理实在。任何将绝对空间等同于一无所有的虚空的观点在物理学上都是不可思议的。但是,至今为止我们对绝对空间这一实在到底是什么还没有确定的认识,对其物理性质我们通常是在真空的概念之下进行探讨,并且视真空为某种基态的量子场,但这种场又不能确定地认为是某种我们已经可以确定把握和描述的场。我们只是就其作为一个物理实在的意义上将其看作是场,它与所有已知的场在物理性质上没有什么共同之处。任何已知场(如电磁场、引力场等)都有明显的动力学效应,而真空场的基本物理效应是惯性;已知场是运动的,但真空场本身却没有明显可描述的运动特性。声名卓著的开尔芬就十分热衷于构造以太的力学模型。他在 1884 年宣称:“在我没有给一种事物建立起一个力学模型,我是永远也不会满足的。”1890 年,他提出电效应是由以太的平动引起的,磁现象是由以太的转动引起的,而光是却是由以太波动式的振动引起的。

到 20 世纪中期以后,人们又逐渐认识到真空并非是绝对的空,那里存在着不断的涨落过程(虚粒子的产生以及随后的湮没)。这种真空涨落是相互作用着的场的一种量子效应。今天,理论物理学家进一步发现,真空具有更复杂的性质。真空态代表场的基态,它是简并的,实际的真空是这些简并态中的某一特定状态。目前粒子物理中所观察到的许多对称性的破坏,就是真空的这种特殊的“取向”所引起的。在这种观点上建立的弱相互作用和电磁相互作用的电弱统一理论已获得很大的成功。这样看来,机械的以太论虽然死亡了,但以太概念的某些精神(不存在超距作用,不存在绝对空虚意义上的真空)仍然活着,并具有旺盛的生命力。

时空弯曲与引力场是等价的。在牛顿的理论中时空只是讨论问题的一个参数,但是在广义相对论中是客观存在的。而它的载体就是量子,量子的频率之倒数就是时间,波长就是空间,红移就是时空弯曲,红移率越大曲率越大,场越强。场的存在,或者说以太的真实存在,至少有四个依据:1、位移电流:与“电荷移动”无关的位移电流能够产生磁场,这对超距作用说是不可思议的,这就说明真空不空,真空具有极其复杂的物质,位移电流(电场)、磁场依据这一物质而存在。2、真空极化现象:1947 年,物理学家发现,真空具有极化现象,即外界电荷会使真空物质的正负电荷偏离,兰姆的微粒氢原子光谱实验和日本的朝永振的计算都证实了这一点,这一现象说明真空具有物质属性。3、广义相对论:Einstein 在狭义相对论中否定以太的存在,但广义相对论的建立体现了 Einstein 思想的明显改变。他指出:广义相对论“是一种场论”,“如果用常数代替那些描述广义相对论以太的函数,同时不考虑任何决定以太的原因,那末广义相对论以太就可以在想象中变为洛伦兹以太。”Einstein 甚至试图把各种场统一起来,形成一种完美无瑕的理论。他认为,这个理论将可以根源性地导出现在的所有物理定律,更加深刻地阐述自然奥秘。“以太—物质这种对立就会逐渐消失,整个物理学将通过类似几何学、运动学和引力理论那样的一种完备的思想体系。”4、量子力学:量子力学中的许多现象,例如测不准原理、粒子运动的波函数、几率性等,如果不借助真空的物质属性,人们很难理解。然而,所有这些,只要假定真空中存在着一种物理实在的东西——不管我们称它为“以太”还是“场”——便可能凭着数学推理及计算,对它们作出根源性的理解。甚至,我们可以由此试图建立一种人们梦寐以求的所谓“终极理论”。

研究表明:各种介子的最终衰变物包括正反粒子湮灭反应产物只是几种基本粒子:正负电子和正反中微子及光子中的某几种,而且正反中子、正反质子等强子也有迹象表明是由某些更基本的粒子组成。

Einstein 在晚年，力图想纠正自己理论中的偏见，他意识到，时空并非实体。他曾说——“物理客体有着空间的广延性”。这里所谓的“空间的广延性”，本质上就是用易学揭示的与物质世界共存的反物质世界。这是一个对物质世界进行平衡和自组的“形上”世界。【7】相对论加强了场的概念在物理学中的重要性，使时间与空间联姻。二十世纪初，Einstein 面对所有一切探测“以太风”的实验都失败的事实，认为“引入以太”本来就是“多余的”，这样空间就又回到了一无所有的“空虚”状态。可是这样的认定在当时就不能自圆其说。面对空间能够传播电磁波的事实，Einstein 又认为空间“具有一种发送电磁波的性能”，是“物理空间”；在后来的广义相对论中，他认为空间的性质应由“物质的分布”来决定，实物可以“弯曲”周围的空间。这些都显然与前面的空虚空间的定义相矛盾。空间既然一无所有，那它就不可能具有象物质一样的性质。还有，如果空间中真的一无所有，那么各实物体就成了一个个的孤立个体，彼此间互相隔绝，互不相关。Einstein 讲：“可以假定有以太存在。只是必须不再认为它有确定的运动状态，也就是说，必须抽掉洛伦兹给它留下的那个最后的力学特征。”“狭义相对论不允许我们假定以太是由那些可以随时追踪下去的粒子所组成的，但是以太假说本身同狭义相对论并不抵触。”【5】因为没有中间物质相连接，所以物体间的相对位置变得没有意义且无法确定；因为没有连续的物质被跨越，所以物体间的相对运动也变得没有意义和无法确定；同时因为没有背景物质作参考，所以运动路径也就无所谓和测不出曲直多少。【10】李政道教授指出：如果真空是粒子物理微观世界中一些奇妙现象的根本来源，那么它也会对宇宙中宏观的物质与能量的分布起着一定的作用，我们应当把真空、微观和宏观现象统一加以考虑，21 世纪是真空的世纪。【6】

“还有一种可能性更令人惊讶，这就是从能量为零的状态中创造物质。之所以会出现这种可能性，是因为能量既可以为正也可以为负。运动的能量和质量的能量总是正的，但引力的能量，如某些引力场和电磁场的引力是负的。有时会出现这样的情况，创造新物质粒子质量的正能量正好被引力或电磁力的负能量抵消了。”“天文学家们能够测量诸星系的质量，星系间的平均距离，以及它们的退行速度。把这些数字代进一个公式，就能得出一个数字，物理学家们已经把这个数字解释成宇宙的总能量了。这个数字在可观测的精度里的是零！为什么会有这个结果？宇宙学家们长久以来一直迷惑不解。有些宇宙学家提出，有一个深藏不露的宇宙原理在起着作用，根据这一原理，宇宙的能量就得恰好为零。”【12】

“宇宙的总能量刚好是零。宇宙的物质是由正能量构成的。然而，所有的物质都因引力而吸引。两块互相靠近的物质比两块分得很开的物质具有更少的能量，因为你必须消耗能量去克服把它们拉在一起的引力而将其分开。这样，在一定意义上，引力场具有负能量。在空间上大致一致的宇宙情形中，人们可以证明，这个负的引力能刚好抵消了物质所代表的正能量，所以宇宙总能量为零。”【13】

“爱因斯坦的广义相对论保证，宇宙中所有物质和运动具有的总的正能量精确地被宇宙中引力产生的负势能之和所平衡，总能量为零。”【14】“一个孤立系的总能量E不可能改变”【11】

参考文献：

- 【1】王存臻、严春友 著。《宇宙全息统一论》山东人民出版社 1995 年版。
- 【2】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。
- 【3】史蒂芬·霍金 著 吴忠超 译。《果壳中的宇宙》，湖南科学技术出版社，2002 年 2 月。
- 【4】（英）Roger Penrose 著 许明贤 吴忠超译。《皇帝新脑》——有关电脑、人脑及物理定律 254 页湖南科学技术出版社。
- 【5】许良英，范岱年编译：《Einstein 文集》，第 1 卷，商务印书馆(1976)120。
- 【6】李政道——科学的发展：从古代中国到现在。朱长超主编。《世界著名科学家演讲精粹》百花洲文艺出版社 1995 年 3 月第 1 版 第 3 次印刷。
- 【7】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。
- 【8】许良英等编译。Einstein 文集第三卷。北京：商务印书馆，1979. 504。
- 【9】1954 年 10 月 28 日 Einstein 致玻姆的信。大自然探索：1987 年第一期。
- 【10】马国梁。《经典相对论》丁一宁网站。
- 【11】哈里德 物理学基础 [M]。北京：机械工业出版社 2005. 8。
- 【12】保罗·戴维斯 上帝与新物理学 [M]。湖南：湖南科学技术出版社，2003. 10。
- 【13】史蒂芬·霍金。时间简史 [M]。湖南：湖南科学技术出版社，2002. 2。
- 【14】约翰·D·巴罗 无之书 [M]。上海：上海科技教育出版社，2003. 6。

8、时空的相对性与绝对性原理

问题导引：牛顿的绝对时间和空间与爱因斯坦的相对时间和空间之间存在什么关系？

以太观念并没有死掉，它不过是一个还未发现有什么用处的观念，只要基本问题仍未得到解决，必须记住这里还有一种可能性。——狄拉克

在时间观念上，作为现代物理学两大支柱的相对论和量子力学一直存在着抵触。量子力学在绝对意义上使用时间的概念，而相对论认为这是不允许的。正如狄拉克所说：“这里我们就碰到了巨大困难的开头。……这个抵触是最近四十年来物理学的主要问题。”【3】按照 Einstein 的想法，不能说相对论提供了详尽的世界图景，它只是提供了这幅图景所应当服从的某些要求，而且没有指明空间与时间的本质及区别。因此相对论本身并不是一个理论，而是对物理学理论的一个要求，空间与时间应当是绝对性与相对性的统一。

相对空间、相对时间、相对 space-time 是绝对空间、绝对时间、绝对 space-time 的表现形式【1】。绝对 space-time 由相对 space-time 组成，无穷个相对 space-time 组成绝对 space-time，在研究两个物体的相互作用时，可以把第三个物体激发的相对 space-time 作为绝对 space-time（此时绝对空间并不均匀，绝对时间流速也不均匀）。这一点类似于地理学中的高度都是相对的，但是若以海平面为基准，则可以成为绝对高度。地方时是相对的，但是倘若规定一个标准，则可以认为是绝对的，例如中国的北京时间。

根据这一观点可知广义相对论的正确，例如不是物质存在于空间、时间中，而是物质具有空间和时间的广延性，当一个物体消失时，它所激发的相对 space-time 消失，但是绝对 space-time 依然存在。因此绝对时空有宇宙中所有的场——相对时空组成，真空是绝对 space-time，Newton 的绝对 space-time 观有其正确性的一面，因此 Einstein 认为场论未能成功地提供整个物理学的基础。Einstein 的相对 space-time 观与 Newton 的绝对 space-time 观分别看到了问题的一个方面，有一定的局限性，因此应正确理解 space-time 的绝对性与相对性的辩证关系。广义相对论中的以太其实就是绝对时空，一个物体在宇宙中其它物体激发的相对时空的总和——绝对时空中总是沿着短程线在运动。

在宇宙的展现过程中，相对空间与绝对空间各司其职，两者对事物的作用以绝对空间为主，以相对空间为辅，尤其在低速世界中是这样。因为物质对 space-time 结构的影响极其微弱，只有在具有大引力质量的天体的周围才能找到。弯曲 space-time 中的 space-time 流形坐标的意义，是长期困扰相对论理论的最基本的问题之一。如果区分两类 space-time 坐标，一类不能与直接测量相联系，纯属数学描述引入的 space-time 坐标，另一类能与直接测量相联系的 space-time 坐标。【2】笔者认为前者应当是绝对 space-time 坐标，后者应当为相对 space-time 坐标。

一般认为：相对论时空观已经否定了绝对时空观。其实，它们是二种不同性质的时空观，具有一定的互补性：前者弥补了后者在定量上的不足；而只有在后者的基础上才能说明前者的物理机制。绝对时空观认为，时间和长度的标准都是不变的，可以用一个标准，去统一地衡量整个世界，这为时空关系的相互比对提供了一个统一的平台。不过，在现实中，总是用实物工具，如时钟、尺、某种波长的光等，来衡量时间和长度，而这些实物工具都会随着环境（温度、速度、引力势等等）的不同而变化，不存在绝对不变的衡量时间和长度的工具。因此，在绝对时空观与测量数据之间总会存在着一定的差异，它是由现实的时空标准的可变性造成的。目前，最精确的时间和长度的标准是根据光来定义的，在这里，认定光速不变，这与相对论一致。可见相对论是一种以光作为时空测量工具的定量理论，它认为时空本身是会变化的。但是，站在绝对时空观的立场上来看，这种变化不是时空本身的变化，而只是衡量工具，即现实的时空标准的变化——狭义相对论反映了时空标准随运动速度的变化；广义相对论反映了时空标准随引力势的变化。因此，情况看来是这样的：二种时空观之间的关系，不是一个否定另一个，而是具有互补性。以光在引力场里的传播来说，雷达回波延迟实验已经证明：光在引力场里的速度变慢了。不过，这是用地球上的时空标准来统一地观察整个太阳引力场中的光速的结果，是站在绝对时空观的立场上来说的；如果站在相对论的立场上，由于引力场里的时空标准是不一致的，若用每一点现实的时间和长度的标准去衡量经过该点的光速，光速仍将处处相同【4】。爱因斯坦讲过：“因为运动是相对的，任何参考系都可以用，似乎没有什么理由认为一个坐标系会比另外一个好些。……于是，在科学早期的托勒密和哥白尼的观点之间的激烈斗争，也就变成毫无意义了。我们应用任何一个坐标系都一样。‘太阳静止，地球在运动’或‘太阳在运动，地球静止。’这两句话便只是对两个不同坐标系的两种不同习惯的说法而已。我们是否能够建立起一种在所有的坐标系中都有效的名副其实的相对论物理学呢？或者说，能否建立只有相对运动而没有绝对运动的一种物理学呢？事实上，这是可能的。”绝对时空观是一种科学的抽象，它为所有事物提供了统一的时空平台，从这个角度来看，它是比相对论时空观更基本的时空观。

空间和时间的绝对性是指空间和时间的客观实在性。空间和时间是运动着的物质存在的基本形式，在空间和时间之外不可能有任何物质的存在。既然运动着的物质是不依赖于人的意识而客观存在着，是永恒的，无条件的，绝对的，那么，空间和时间也必然具有客观实在性，是永恒的，无条件的，绝对的。空间和时间的相对性是指空间和时间的具体性、可变性。空间的广延性是指运动着的物质的广延性，时间的顺序性、持续性是指运动着的物质的顺序性，持续性。因此，空间和时间随着物质特性和运动状况的不同而不同，随着物质运动状况的变化而变化。辩证唯物主义关于空间和时间是绝对性和相对性的辩证统一的原理已为科学的发展所证实。爱因斯坦的相对论不仅证明了空间和时间的客观实在性，而且深刻揭示了空间和时间同物质运动的内在联系，揭示了物质运动的特性制约着空间和时间的特性。

从静止惯性系观测运动惯性系时，静止惯性系与运动惯性系的固有时（绝对时间）同时，即固有时是恒定不变的【5】。这一点类似于数学中同一条曲线，由于建立的坐标系不同得到的曲线方程也不同。根据量子力学的测不准关系，标准 space-time 永远测不到，与测量仪器（产生相对 space-time）有关。Planck 讲：“在相对之物背后寻找绝对之物，我们甚至可以完全肯定地认为：我们简直不可能把握住绝对的东西，倒可以说绝对的东西构成一个理想的图标，它总在我们面前而不能达到。”

参考文献:

- 【1】王存臻、严春友 著。《宇宙全息统一论》山东人民出版社 1995 年版。
- 【2】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。
- 【3】狄拉克。《现代物理学参考资料》第 3 集[C]。科学出版社，1978. 38。
- 【4】H. C. 瓦尼安，R. 鲁菲尼，引力与时空，科学出版社，北京，2006，pp150-153。
- 【5】[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。

5/4/2017