

现代物理学基础的思考之十：黑洞问题

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): 本文章分析探讨了现代物理学的重要问题，黑洞问题，供参考。

[李学生 (Li Xuesheng). 现代物理学基础的思考之十：黑洞问题. *Academ Arena* 2017;9(13s): 568-605]. (ISSN 1553-992X). <http://www.sciencepub.net/academia>. 10. doi:10.7537/marsaaj0913s1710.

关键词 (Keywords): 质点; 电荷; 引力; 电力; 空间; 方程; 黑洞

目录

第一章: 黑洞问题的提出

- 1、经典力学框架中的黑洞问题
- 2、广义相对论下黑洞的概念
3. 能量条件
4. 奇点定理与能量条件
- 5、施瓦西黑洞与拉普拉斯黑洞完全相同
- 6、量子力学与黑洞

第二章: 黑洞问题的研究

1. 黑洞活动的证据
2. 彭罗斯和霍金的争论

第三章: 黑洞的存在性质疑

1. 席瓦西度规并没预言黑洞一定存在-----黑洞不存在的一个简单证明
2. 黑洞的存在性质疑
- 3、现代天文学实验对于黑洞存在性的质疑
- 4、美科学家称宇宙间不存在黑洞 引发激烈讨论

第一章 黑洞问题的提出

1、经典力学框架中的黑洞问题

(1) 拉普拉斯黑洞概念的提出过程回顾

虽然黑洞这个名字直到 1968 年才由美国科学家惠勒(Wheeler)提出来【1】。然而，有关黑洞研究的历史却可追溯到 200 多年以前。在整个 18 世纪，科学家们大都相信牛顿的光粒子学说，这个学说认为光是由光源以极高的速度发出的粒子组成。

1783 年，英国科学家米歇尔(Michell)假定光粒子也像其他物体一样受到引力的作用，他计算了一个具有太阳密度的天体必须多大，才能使逃逸速度大于光速。米歇尔得出，直径为太阳直径 500 倍的这样一个天体，其逃逸速度应该超过光速。如果这样的天体存在，光也不能逃离它们，所以，这样的天体人们是看不见的【2】。

1795 年，法国的拉普拉斯(P. S. Laplace, 1749~1827)首次提出了“黑洞”的概念，他认为，地球的逃逸速度是 11.186 公里/秒，如果地球的半径 r 缩小到几厘米，其密度将非常大，地球表面物体的逃逸速度将超过光速 3×10^8 的 5 次方公里/秒，这时，外部的光可以射到地球上，但地球上的光却无法逃逸到太空中去，太空外部的人看不到地球云层反射的光，地球就成了宇宙中的一只“黑洞”。同理，如果宇宙中有某些天体的密度特别大，也就会变成宇宙中的“黑洞”。

1798 年，法国著名数学家和天文学家拉普拉斯(Laplace)也独立地推导出与米歇尔相同的结果。米歇尔和拉普拉斯所提出的看不见的天体，就是今天所说的黑洞。

米歇尔和拉普拉斯的工作都是建立在牛顿引力理论基础上的。由于米歇尔的研究没有引起人们的注意，直到 20 世纪 80 年代才被重新发现，因此用牛顿力学得出的黑洞一直被称为拉普拉斯黑洞。

给定一个质量为 M ，半径为 R 的星球，并假设星球的质量是均匀分布的，再给定一个静止质量为 m_0 的

质点, $m_0 \ll M$, 下面研究质点 m_0 在星球引力作用下的运动规律, 由于讨论静态球对称的情况, 因此可进一步假设质点 m_0 只在星球的径向做直线运动。首先将球坐标系固定在星球 M 上, 并令坐标原点与星球球心相重合。

在牛顿力学中, 质点质量是一个常量, 根据牛顿第二定律和万有引力定律, 质点运动方程为:

$$m_0 \frac{du}{dt} = -\frac{GMm_0}{r^2} \quad (1), \text{ 公式(1)中的 } u \text{ 是质点的径向速度, 在球对称问题中, 速度 } u \text{ 只是 } r \text{ 的函数,}$$

$$\text{因此有: } \frac{du}{dt} = \frac{du}{dr} \frac{dr}{dt} = u \frac{du}{dr} \quad (2), \text{ 将公式(2)代入公式(1)中, 整理后可得: } udu = -\frac{GM}{r^2} dr \quad (3),$$

对上式积分, 并注意边界条件: $r = \infty$ 时, $u = 0$, 积分后可得速度公式为:

$$u = \sqrt{\frac{2GM}{r}} \quad (4), \text{ 在后}$$

面研究中, 需要经常使用参数 β , 即速度与光速之比, 由公式(4)可得:

$$\beta = \frac{u}{c} = \sqrt{\frac{2GM}{rc^2}} \quad (5),$$

注意公式(3)的右端只是 r 的函数, 因此可以引入势函数 φ , 其中 φ 满足:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial r} = \frac{GM}{r^2} \quad (6), \text{ 对上式}$$

积分, 并引入边界条件 $r = \infty$ 时, $\varphi = 0$ 于是得到:

$$\varphi = -\frac{GM}{r} \quad (7), \text{ 将引力势 } \varphi \text{ 代入运动方程(3)中, 则}$$

牛顿引力场中的运动方程为:

$$m_0 \frac{du}{dt} = -m_0 \frac{\partial \varphi}{\partial r} \quad (8), \text{ 对公式(8)取积分, 并注意利用公式(2), 再代入边}$$

界条件, 在 $r = \infty$ 时, $u = 0$, $\varphi = 0$ 于是得到:

$$m_0 \frac{u^2}{2} + m_0 \varphi = 0 \quad (9), \text{ 公式(9)就是牛顿引力场的能量守恒方程。}$$

按照牛顿引力理论, 一个质点的动能若超过它的引力势能, 质点就能摆脱星球的引力而逃逸, 对于一个质量为 M , 半径为 R 的星球来说, 在它表面上一个质量为 m_0 质点, 根据能量守恒方程(9), 该质点能够从星

球表面逃逸的最小速度 u_e 很容易算出来, 把(7)代入(9), 我们有:

$$\frac{1}{2} m_0 u_e^2 = \frac{GMm_0}{R} \quad (10), \text{ 由公式(10)可}$$

求得逃逸速度:

$$u_e = \sqrt{\frac{2GM}{R}} \quad (11), \text{ 从上式可以看出, 质量越大半径越小的星球, 其逃逸速度越大。}$$

令逃逸速度等于光速, 由方程(11)求出半径, 这个半径就是拉普拉斯半径。用这一方法, 我们最终得到:

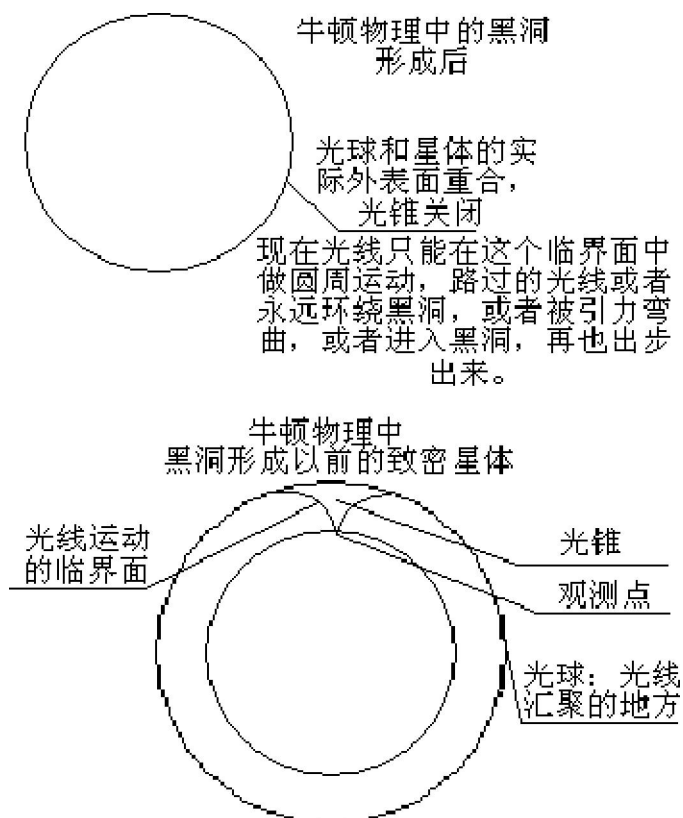
$$r_L = \frac{2GM}{c^2} \quad (12), \text{ 式中 } c \text{ 代表光速, } r_L \text{ 称为拉普拉斯半径, 利用公式(11)很容易得到, 当星球的半径小于}$$

拉普拉斯半径时, 即 $R \leq r_L$ 时, 我们有: $u_e \geq c$ (1-3), 这个公式表明, 如果光也同一般物体一样受万有引力作用, 那么在 $R \leq r_L$ 的条件下, 光线就不能克服引力场而逃逸。

换句话说, 根据牛顿引力理论, 我们可以得出宇宙中存在这样一种星球, 它的半径满足 $R \leq r_L$ 的条件,

$$\text{即: } R \leq \frac{2GM}{c^2} \quad (14), \text{ 这种星球的引力是如此之强, 光也不能从其表面逃脱, 以至一个远方的观测者无法接收到从星球表面发出的光, 这种星球拉普拉斯称之为看不见的星, 也就是今天所说的黑洞。}$$

定义 1.1: 一个星球, 如果它的逃逸速度 u_e 大于光速, 即光也不能从其表面逃出, 这个星球就是黑洞。



(2) 拉普拉斯黑洞的局限性

黑洞问题属于强引力问题，在强引力场质点的速度可以接近光速。当用相对论的方法计算的质点速度大于光速的 0.79 倍时，用牛顿力学公式 (4) 得出的速度就会大于光速，而此时牛顿力学早已不适用了。因此，黑洞问题是不能用牛顿力学研究的。

然而，在 200 多年前，拉普拉斯在不知道牛顿力学的适用范围的情况下，用牛顿力学研究了黑洞，并推导出拉普拉斯黑洞。虽然用牛顿力学可以推导出黑洞，由于黑洞属于强引力问题，超出了牛顿力学的适用范围，因此，拉普拉斯推导黑洞的方法是错误的。

笔者认为，根据引力质量与电磁质量之间的关系，引力质量与电磁质量没有相互作用，因此在经典力学范围内不存在黑洞。

参考文献：

- 【1】 Wheeler J A. American Scientist, 1968, 56: 1.
 【2】 Michel, J. Philos. Trans. 1783, 74: 35-57.

2、广义相对论下黑洞的概念

米歇耳和拉普拉斯的工作提出不久，托马斯·杨(Young)发现了光的干涉与衍射现象。在以后的一百多年间，光的波动学说代替了光的粒子学说，米歇耳和拉普拉斯建立在光的粒子学说基础上得出的结论，逐渐被人们淡忘了。直到 1916 年从爱因斯坦(Einstein)的广义相对论中导出了与他们相同的结果，米歇耳和拉普拉斯的工作才再度引起人们的关注。1916 年，在爱因斯坦广义相对论发表后不久，施瓦西(Schwarzschild)导出了爱因斯坦场方程的一个准确解，即施瓦西解。这个解给出了对静态球对称黑洞，即施瓦西黑洞的描述，这标志着用广义相对论研究黑洞的开始。【2】

按照广义相对论，物质决定时空如何弯曲，而光和物质的运动将由弯曲时空的曲率决定，当曲率大到一定程度时，光线就无法跑出去了，广义相对论中黑洞的概念就是这样产生的。

下面是钱德拉塞卡 (Chandrasekhan S) 给出的黑洞定义。

定义 1: 黑洞将三维空间分为两个区域，一个是以称之为视界的二维光滑曲面为边界的内区域，一个是

视界以外渐进平直的外区域，而且内区域的点不能与外区域的点交换讯息。

定义 2: 一个星球，如果它的逃逸速度 u_e 小于光速，即物体可以以小于光的速度从其表面逃逸，那么这个星球一定不是黑洞。

Einstein 在广义相对论中所建立的引力场方程为： $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$ ，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：

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

显然，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。1960 年代，克鲁斯科(Kruskal)提出一个说法。他说爱因斯坦场方程的解之所以会无穷发散，是因为坐标系选择得不好。如果我们选择一个适当的坐标系，便可以消除这个奇点。他提出以下的坐标变换，把时空坐标 (r,t) 变换到一对没有物理意义的抽象的数学坐标 (u,v) ，叫做克鲁斯科坐标：

$$\begin{cases} u = \sqrt{\frac{r}{r_s} - 1} \exp\left(\frac{r}{2r_s}\right) \cosh\left(\frac{t}{2r_s}\right) \\ v = \sqrt{\frac{r}{r_s} - 1} \exp\left(\frac{r}{2r_s}\right) \sinh\left(\frac{t}{2r_s}\right) \end{cases} \quad (r > r_s) \quad (2a)$$

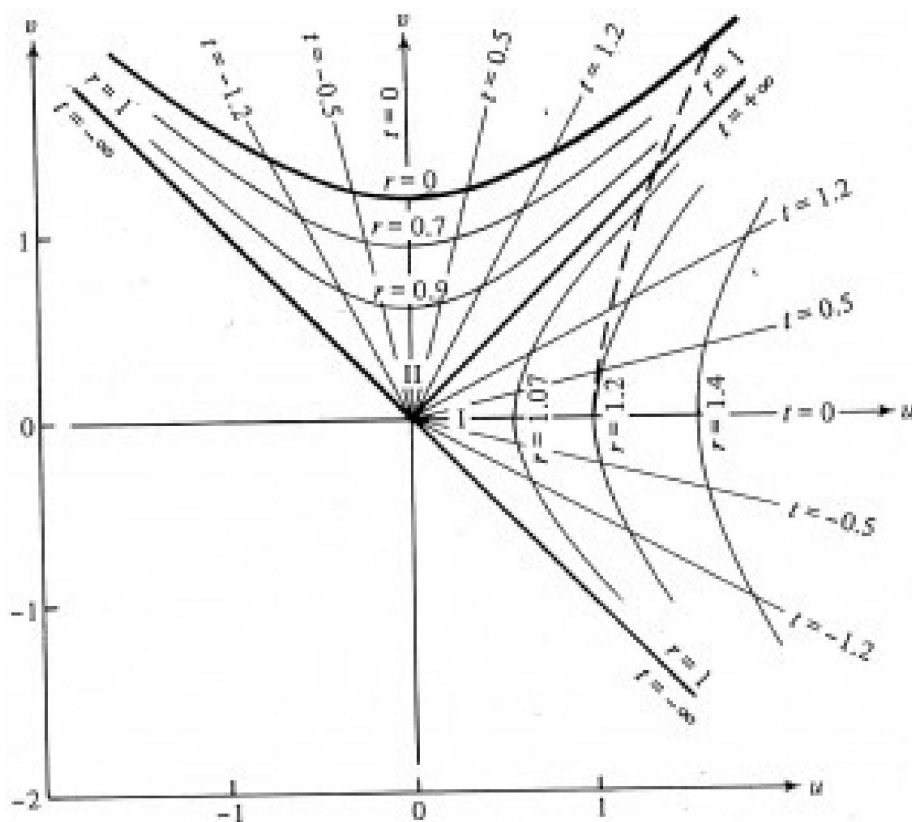
$$\begin{cases} u = \sqrt{1 - \frac{r}{r_s}} \exp\left(\frac{r}{2r_s}\right) \sinh\left(\frac{t}{2r_s}\right) \\ v = \sqrt{1 - \frac{r}{r_s}} \exp\left(\frac{r}{2r_s}\right) \cosh\left(\frac{t}{2r_s}\right) \end{cases} \quad (r < r_s) \quad (2b)$$

其中 $r_s = 2GM$ 是施瓦兹查尔德半径。
逆变换为：

$$\begin{cases} \left(\frac{r}{r_s} - 1\right) \exp\left(\frac{r}{r_s}\right) = u^2 - v^2 \\ t = 2r_s \tanh^{-1}\left(\frac{v}{u}\right) \end{cases} \quad (r > r_s) \quad (3a)$$

$$\begin{cases} \left(\frac{r}{r_s} - 1\right) \exp\left(\frac{r}{r_s}\right) = u^2 - v^2 \\ t = 2r_s \tanh^{-1}\left(\frac{u}{v}\right) \end{cases} \quad (r < r_s) \quad (3b)$$

将这一变换画成图像，就得到克鲁斯科变换的图像。



克鲁斯科变换的几个特征:

1) 空间的原点 $r = 0$ 从一个几何点变成了一条最上面的抛物线。(其实是一个四维曲面。别忘了极角和方位角坐标。)

2) 施瓦兹查尔德半径被变换到了 $u-v$ 坐标系中的两条对角线。但是奇点并没有消失。

3) 整个时空宇宙占据了 $u-v$ 坐标系中以对角线 $u = -v$ 为界的右上方和以抛物线 $r = 0$ 为界的下面所界定的区域。

4) 施瓦兹查尔德半径以内的区域变换到了两条对角线以上，原点抛物线以下的区域 II。

5) 施瓦兹查尔德半径以外的空间变换到了两条对角线右面的区域 I。

从图表上我们看到，克鲁斯科变换并没有把施瓦兹查尔德半径变掉，而是变成了 $u-v$ 坐标系中的两条对角线。 $u-v$ 坐标系没有物理意义。真正有物理意义的是 $r-t$ 坐标。时空坐标系中度规是否发散是可以观测到的物理现象。一个无穷发散的物理现象不应该仅凭坐标系的选择而消除，这是常识，也是常理。克鲁斯科认为一个坐标变换就可以改变物理现象，是对相对性原理的根本违反。

$r = 0$ 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。在奇点处，“一切科学预见都失去了效果”，没有时间，也没有空间。无穷大的出现显然是广义相对论的重大缺陷。20世纪初，Einstein 认为“黑洞”的成因是引力造成了空间弯曲，故光子无法逃到这种至密天体的引力场外。后来，施瓦西 (Karl Schwarzschild, 1873~1916) 为 Einstein 的“相对论”黑洞确立了一个“视界”，光子只能被禁闭在“视界”之内，“视界”之外的空间仍然是平直的欧几里德空间，光子仍然遵守地球空间中的一切物理定律。广义相对论预言，当大质量的恒星达到极高密度时，就在空间形成了一只很深的“引力陷阱”，最终把空间弯曲到这样一个程度，以致附近的任何物体，包括光线在内被其吞灭，就好像一个无底洞，这样的天体称为黑洞。在黑洞的中心是一个奇点，那里所有的物质都被无限压缩，时空被无限弯曲。按照广义相对论，黑洞并不是通常意义上的物质实体，而是一个区域，一个极度弯曲了的空间。一旦物质落入这一弯曲了的空间，它就立刻消失得无影无踪，不管黑洞吞掉了多少物质，它本身依旧是弯曲的空间。根据广义相对论，引力场将使时空弯曲。当恒星的体积很大时，它的引力场对时空几乎没什么影响，从恒星表面上某一点发的光可以朝任何方向沿直线射出。而恒星的半径越小，它对周围的时空弯曲作用就越大，朝某些角度发出

的光就将沿弯曲空间返回恒星表面。等恒星的半径小到一特定值（天文学上叫“史瓦西半径”）时，就连垂直表面发射的光都被捕获了。到这时，恒星就变成了黑洞。说它“黑”，是指它就像宇宙中的无底洞，任何物质一旦掉进去，“似乎”就再不能逃出。黑洞是引力汇点。史瓦西的这个解奠定了整个黑洞物理学的基础，此后在 60 年代克尔等人又找到另一个轴对称解，被称作克尔度规，在此基础上又有克尔黑洞。

自 20 世纪 70 年代以来，英国的霍金（Stephen Hawking, 1942~）相继提出了“微型黑洞”、“量子黑洞”的概念，认为“微型黑洞”可以在宇宙间四处游荡，甚至经常光顾太阳系，并曾对太阳与行星的引力场产生过影响。“量子黑洞”是一种“灰色天体”它里面的某种“虚粒子”可以从黑洞中“蒸发”出来，故“黑洞不黑”，仍然可以与“视界”外的空间交换能量。严格说来，“黑洞”理论本身就是另外一种“引力佯谬”或“引力悖论”，它是按牛顿“万有引力”理论推导出来的一种“极限天体”，现实宇宙无法满足这种“极限天体”所要求的物理条件，故它不可能得到任何观测与实验的检验。当我们在实验室里把某种物质的密度加大到一定程度时，这种物质必然因理化环境的改变而抗拒密度的增加，或始终维持在固态的最小密度状态，根本不可能实现黑洞所要求的密度条件。就天文观测的角度讲，如果某种天体的体积与质量达到了一定极限，其内部热能必然导致它溶解、气化、等离子化，通过向外“蒸发”来减少自己的质量，从而使自身的物质密度维持在一个有限范围之内。比如银心的直径已达 1 光年多，它就不得不以蒸发、辐射的方式向外界排泄质量，以减少自己的质量或扩大自身的体积，来维持一个合理的平均密度。黑洞的辐射很像另一种有相同颜色的东西，就是黑体。黑体是一种理想的辐射源，处在有一定温度表征的完全热平衡状态。它发出所有波长的辐射，辐射谱只依赖于它的温度而与其它的性质无关。【1】现今的主流科学家们对黑洞的霍金辐射的权威解释包括霍金在内都用“真空中的能量涨落而能生成基本粒子”的概念。他们认为：“由于能量涨落而躁动的真空就成了所谓的狄拉克海，其中偏布着自发出现而又很快湮灭的正-反粒子对。量子真空会被微型黑洞周围的强引力场所极化。在狄拉克海里，虚粒子对不断地产生和消失，一个粒子和它的反粒子会分离一段很短的时间，于是就有 4 种可能性：【1】。两个伙伴重新相遇并相互湮灭。反粒子被黑洞捕获而正粒子在外部世界显形。正粒子捕获而反粒子逃出。双双落入黑洞。霍金计算了这些过程发生的几率，发现过程《2》最常见。于是，能量的账就是这样算的：由于有倾向性地捕获反粒子，黑洞自发地损失能量，也就是损失质量。在外部观察者看来，黑洞在蒸发，即发出粒子气流。”【1】霍金对黑洞发射霍金辐射的解释是：真空里的虚粒子对中的反粒子易被黑洞俘获，而后与黑洞中的一个正粒子湮灭，使黑洞内损失一个正粒子，导致黑洞损失能量而缩小。并使黑洞外面的真空中多出一个正粒子。

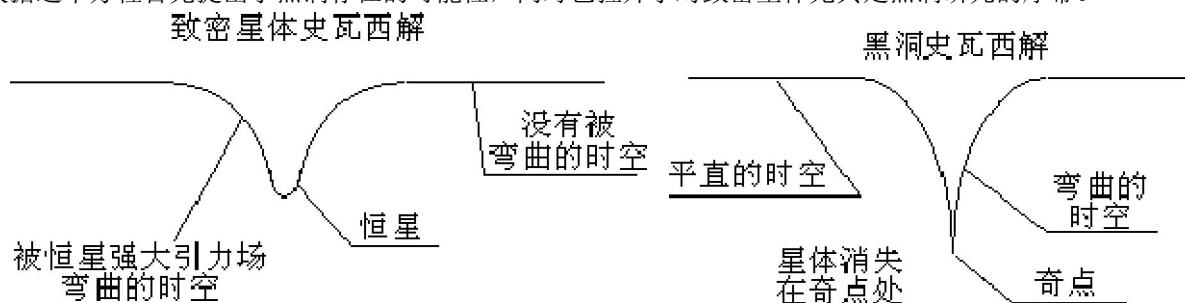
谈到黑洞，离不开史瓦西半径 (Schwarzschild radius)。史瓦西半径的是说，在史瓦西半径之内的物体，即使加速到接近光速，也没有办法逃离黑洞。而在史瓦西半径之外的物体，可以逃离黑洞的重力场。史瓦西半径 (Schwarzschild radius) 的公式如下 (文献 1)： $R_s = 2 * G * M / C^2$ 上式中： R_s 为史瓦西半径，单位为 m； G 为万有引力常数，毕姆斯 (Beams, J.W.) 等人得到的值为 $6.674 * 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1}$ (文献 2)； M 为黑洞的质量，单位为 kg； C 为光速，其值为 $299\,792\,458 \text{ m/s}$ ；这个公式是史瓦西将静态球对称引力场代入广义相对论场方程得到的史瓦西解 (Schwarzschild Solution)。史瓦西解告诉我们，广义相对论预言一种物体，那就是黑洞。只要接近黑洞到一个限度，你就会发现时空被一个球面 (半径为史瓦西半径) 分割成两个性质不同的区域，这个球面称为“事界” (Event horizon)。史瓦西半径的公式是说：一个物体囚禁光的半径与该物体的质量成正比。已知太阳和地球的质量，我们不难求出太阳的史瓦西半径是 3km，也就是说，质量跟太阳一样的黑洞，如果光接近到 3km 以内，就逃不出来了。而地球的史瓦西半径为 0.9cm。

广义相对论的引力场在理论上存在着奇性，这种奇性具有十分奇特的性质，沿着短程线运动的粒子或光线会在奇性处“无中生有”或不知去向。按照广义相对论，演化到晚期的星体只要还有两三个太阳的质量，就会迟早变为黑洞，包括光线在内的任何物体都会被黑洞的强大引力吸到里面而消失得无影无踪。不仅如此，黑洞还要不断坍缩到时空奇性。时间停止了，空间成为一个点，一切物理定律，包括因果律都失去意义，一切物质状态都被撕得粉碎。此外，经典理论中的一个黑洞永远不能分裂为两个黑洞，只能是两个或两个以上的黑洞合为一个黑洞，其结果很可能是整个宇宙变为一个大黑洞，并且早晚要坍缩到奇性。寻找黑洞的观测工作也在稳步进展。1970 年底，美国和意大利联合发射了载有 X 射线探测装置的卫星，这颗卫星工作到 1974 年，共探测到 161 个射线源，经筛选确认，天鹅座 X-1 最有希望是一个黑洞。另外，圆规座 X-1 与天鹅座 X-1 数据非常相似，也很有希望被证认为黑洞。现在关于黑洞的理论的研究正在进展，观察结果还有待进一步证实。无论如何，广义相对论竟然要求这类难以接受的奇性，无疑是一个难题。或者广义相对论本身要修改，或者物理学的其他基本概念和原理要有重大变更。

不管黑洞如何定义，无论是用牛顿力学的方法定义，还是按照广义相对论的方法定义，定义 2 均能成立，因为，所谓黑洞是这样一种星球，任何物质都不能逃离出去，如果物质可以以小于光的速度逃到无穷远处，

那么，这个星球显然不是黑洞。由此我们不难看出，黑洞概念与星球的逃逸速度密切相关

在爱因斯坦提出广义相对论后，史瓦西首先得到了描述时空的方程，也就是著名的史瓦西方程。这个方程描述了一种被称为标准的恒星模型周围的空间。史瓦西方程主要描述恒星外的时空和恒星内的时空。惠勒根据这个方程首先提出了黑洞存在的可能性，同时也拉开了对致密星体尤其是黑洞研究的序幕。



参考文献:

【3】 约翰—皮尔卢考涅：“黑出版社，2000。

【4】 Kip, S. Thorne, *Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*, W. W. Norton, New York, 1994.

3、能量条件

纵观人类科学史，可以发现，一切理论或模型的成败，关键就在于，由人类经验语言构筑的用作认知标准的被称为“基本观念”的“刚杆或标尺”（scale），是否与客观存在物的本质相一致，是否与客观存在物的边界条件相一致。这对任何形式表述的理论，特别是空间理论，都是一样的。

物理学家们所用的能量条件主要分为两类：一类被称为逐点能量条件（pointwise energy condition），它们给出的是每个时空点上能量动量张量所满足的条件；另一类被称为平均能量条件（average energy condition），它们给出的是能量动量张量在平均意义上沿特定的类时或类光曲线所满足的条件。这两类中的每一类都包含几种不同的能量条件，下面着重介绍逐点能量条件。

首先对能量动量张量本身的形式做一个简单分析。为了让度规张量的形式尽可能简化，人们通常在所谓的正交标架场（tetrad）下讨论能量动量张量的形式^[28-1]。正交标架场（以下简称标架场）由一组正交归一的基矢量 $(e_a)^\mu$ 张成，其中拉丁字母 a, b, \dots 标识标架场的基矢量，希腊字母 μ, ν, \dots 表示基矢量的时空指标。标架场的基矢量满足下列正交归一条件：

$$\eta^{ab}(e_a)^\mu(e_b)^\nu = g^{\mu\nu}, \quad g_{\mu\nu}(e_a)^\mu(e_b)^\nu = \eta_{ab}$$

很明显，标架场不是唯一的，对一个标架场作局域 Lorentz 变换得到的仍然是标架场。由于 Lorentz 群具有旋量表示（切空间中的一般线性变换群 $GL(4, \mathbb{R})$ 则没有旋量表示），因此标架场在讨论引力场与旋量场的相互作用时是非常重要的工具。对于我们所要讨论的能量条件来说，标架场的优点在于能量动量张量在标架场中的分量具有明确的测量意义。

Hawking 曾经把标架场下的能量动量张量分为四种类型，每种类型均可通过标架场中的 Lorentz 变换约化为一个正则形式（canonical form）。这其中最重要的是第 I 类，其正则形式为：

$$T^{ab} = \text{diag}(\rho, p_1, p_2, p_3)$$

其中 diag 表示对角矩阵， ρ 为标架场中的静止观测者（即世界线切线沿基矢 e_0 方向的观测者）测量到的能量密度， p_i 则为沿三个正交空间方向的主压强。除了极少数特殊情形外，这种类型的能量动量张量涵盖了几乎所有物理上有意义的物质分布情形，下面将只讨论这种类型。

第 I 类能量动量张量的正则形式其实就是该张量的对角化，但能量动量张量是一个实对称张量，按照线性代数中熟知的定理，实对称张量必定可以通过正交变换对角化，既然如此，能量动量张量岂不都应该是第 I 类的？为什么在 Hawking 的分类中会出现不止一种类型呢？这其中的原因在于普通线性代数所讨论的内积空间具有正定的度规，而广义相对论中的时空度规不是正定的（请读者想一想，度规的非正定性是如何破坏线性代数中有关实对称张量对角化的证明的？）。

下面对几种主要的逐点能量条件做一个简单介绍：

弱能量条件（weak energy condition）：对所有类时矢量 V_a ， $T^{ab}V_aV_b \geq 0$ 。

利用 T^{ab} 的正则形式，我们可以证明：弱能量条件等价于 $\rho \geq 0$ 及 $\rho + p_i \geq 0$ ($i=1, 2, 3$)。充分性的证明非常简单：取 $V_a = e_0$ (即静止观测者) 可得 $\rho \geq 0$ ；取 $V_a \rightarrow e_0 + e_i$ (注意 V_a 是趋于而非等于 $e_0 + e_i$ ，因为后者是类光的) 则可得 $\rho + p_i \geq 0$ 。接下来再证必要性：假设 $\rho \geq 0$ 及 $\rho + p_i \geq 0$ ，则

$$T^{ab}V_aV_b = \rho V_0^2 + \sum_i p_i V_i^2 \geq \rho (V_0^2 - \sum_i V_i^2) \geq 0$$

其中第一个“ \geq ”用到了 $\rho + p_i \geq 0$ ，第二个“ \geq ”用到了 $\rho \geq 0$ 及 V_a 类时。

在弱能量条件中最重要的部分是 $\rho \geq 0$ ，它表明能量密度处处为正。需要注意的是，虽然上面的推导是在使正则形式成立的特殊标架场中进行的，但 $\rho \geq 0$ 这一结果适用于沿任意类时世界线运动的观测者所测得的能量密度 (请读者想一想这是为什么?)。由于物理上可以实现的所有观测者都是沿类时世界线运动的，因此弱能量条件表明任何物理观测者测得的能量密度都处处为正。

在弱能量条件中让 V_a 趋于类光，由能量条件的连续性可以得到：

零能量条件 (null energy condition): 对所有类光矢量 k_a ， $T^{ab}k_ak_b \geq 0$ 。

显然 (请读者自行证明)，零能量条件等价于 $\rho + p_i \geq 0$ ($i=1, 2, 3$)。零能量条件是一个非常弱的能量条件，比弱能量条件更弱。

强能量条件 (strong energy condition): 对所有类时矢量 V_a ， $[T^{ab} - (1/2)g^{ab}T]V_aV_b \geq 0$ 。

由于 Einstein 场方程可以改写为 $R^{ab} = 8\pi G[T^{ab} - (1/2)g^{ab}T]$ (其中 $T = T^a_a$ 为能量动量张量的迹)，因此强能量条件等价于一个几何条件 $R^{ab}V_aV_b \geq 0$ ^[注-1]。从物理上讲，强能量条件等价于 $\rho + \sum_i p_i \geq 0$ 及 $\rho + p_i \geq 0$ ($i=1, 2, 3$)。这一点的证明非常简单，只需注意到在正则形式下：

$$T^{ab} - (1/2)g^{ab}T = (1/2)\text{diag}(\rho + \sum_i p_i, \rho + 2p_1 - \sum_i p_i, \rho + 2p_2 - \sum_i p_i, \rho + 2p_3 - \sum_i p_i)$$

然后做与弱能量条件相同的论证即可 (请读者自行推导上式并完成论证)。

显然，强能量条件比零能量条件强。但是与强弱二字的正常含义不符的是，强能量条件与弱能量条件互不包含，而非前者强于后者。事实上，多数物质的主压强 p_i 是正的，对于这些物质，强能量条件其实比弱能量条件还弱^[注-3]。

主能量条件 (dominant energy condition): 对所有类时矢量 V_a ， $T^{ab}V_aV_b \geq 0$ ，并且 $T^{ab}V_b$ 非类空。

这个能量条件是在弱能量条件之上增添了能流密度矢量 $T^{ab}V_b$ 非类空这一额外限制。在正则形式下这一额外限制可以表述为： $\|T^{ab}V_b\|^2 = \rho^2 V_0^2 - \sum_i p_i^2 V_i^2 \geq 0$ 。取 $V_b \rightarrow e_0 + e_i$ 可得 $\rho^2 \geq p_i^2$ 。这比弱能量条件中的 $\rho + p_i \geq 0$ 要强。为了证明 $\rho^2 \geq p_i^2$ 也是保证额外限制成立的充分条件，只需注意到：

$$\|T^{ab}V_b\|^2 = \rho^2 V_0^2 - \sum_i p_i^2 V_i^2 \geq \rho^2 (V_0^2 - \sum_i V_i^2) \geq 0$$

这里第一个“ \geq ”用到了 $\rho^2 \geq p_i^2$ ，第二个“ \geq ”用到了 $\rho \geq 0$ 及 V_b 类时。将这一结果附加到弱能量条件上可得：主能量条件等价于 $\rho \geq |p_i|$ ($i=1, 2, 3$)。从定义及上述结果均可看出，主能量条件显然比弱能量条件强 (从而也比零能量条件强)。但它与强能量条件互不包含。

看到这里，有些读者可能会产生这样一个疑问：那就是主能量条件中的额外限制是说能流密度矢量非类空。我们知道，在相对论中如果一个四维矢量类空，就必定可以找到一个参照系，使该矢量的时间分量为负。对于能流密度矢量来说，时间分量就是能量密度，因此如果能流密度矢量类空，就说明必定存在一个参照系，在其中能量密度为负。但弱能量条件已经表明任何物理观测者测得的能量密度都处处为正，这岂不等于排除了能流密度矢量类空的可能性？如果这样的话，主能量条件中的额外限制变成了弱能量条件的推论，而这两种能量条件岂不变成等价的了？这种推理显然是错误的，但它究竟错在哪里呢？有兴趣的读者不妨思考一下，以加深对能量条件及其观测意义的理解。

迹能量条件 (trace energy condition): $T \equiv T^a_a \geq 0$ 。

这是我们要介绍的最后一种逐点能量条件。它的表述与度规张量的符号约定有关，在本系列中我们所用的约定是 $\eta_{ab} = \text{diag}(1, -1, -1, -1)$ 。如果做相反的约定，则迹能量条件的表述为 $T \leq 0$ 。在正则形式下，迹能量条件等价于 $\rho - \sum_i p_i \geq 0$ ，它与其它能量条件互不包含。

注释

[注-1] 标架基矢 $(e_a)^{\mu}$ 是时空坐标的函数，因此叫做标架场。Tetrad 这个名称通常是指四维的标架场，tetra- 这个词头的含意是“四”。标架场的另一个常见的名称是 vierbein，源于表示“四”的德语词头 vier。在其它维数下，标架场还有一些常用的名称，比如 triad, pentad, funfbein, elfbein, vielbein, 等。

[注-2] 这里不考虑宇宙学项。其它能量条件也可以用类似的方式改写成几何条件。

[注三] 由于强能量条件可以写成 $T^{ab}V_aV_b \geq (1/2)T$, 而弱能量条件为 $T^{ab}V_aV_b \geq 0$, 由于通常 $T \geq 0$, 因此如果把这两个能量条件视为是对 $T^{ab}V_aV_b$ 的约束条件, 则强能量条件比弱能量条件强。当然这种命名理由也不严格, 因为 $T \geq 0$ 其实就是迹能量条件, 并非是无条件成立的物理事实。

4. 奇点定理与能量条件

广义相对论的经典解 - 比如 Schwarzschild 解 - 存在奇异性。这其中有的奇异性 - 比如 $r=2m$ - 可以通过坐标变换予以消除, 因而不代表物理上的奇点; 而有的奇异性 - 比如 $r=0$ - 则是真正的物理奇点。很明显, 在奇点研究中, 真正的物理奇点才是我们感兴趣的对象。

那么究竟什么是广义相对论中真正的物理奇点 (简称奇点) 呢? 初看起来, 这似乎是一个很简单的问题。奇点显然就是那些时空结构具有某种“病态性质” (pathological behavior) 的时空点。但稍加推敲, 就会发现这种说法存在许多问题。首先, “病态性质” 是一个很含糊的概念, 究竟什么样的性质是病态性质呢? 显然需要予以精确化。其次, 广义相对论与其它物理理论有一个很大的差异, 那就是其它物理理论都预先假定了一个背景时空的存在^[註一], 因此, 那些理论如果出现奇点 - 比如电磁理论中点电荷所在处的场强奇点 - 我们可以明确标识奇点在背景时空中的位置。但是广义相对论描述的是时空本身的性质。因此广义相对论中一旦出现奇点, 往往意味着时空本身的性质无法定义。另一方面, 物理时空被定义为带 Lorentz 度规的四维流形^[註二], 它在每一点上都具有良好的性质。因此, 物理时空按照定义就是没有奇点的, 换句话说, 奇点并不存在于物理时空中^[註三]。

既然奇点并不存在于物理时空中, 自然就谈不上哪一个时空点是奇点, 从而也无法把奇点定义为时空结构具有病态性质的时空点了。但即便如此, 象 Schwarzschild 解具有奇异性这样显而易见的事实显然是无法否认的, 因此关键还在于寻找一个合适的奇点定义。

为了寻找这样的定义, 我们不妨想一想, 为什么即便把 $r=0$ 从时空流形的定义中去除, 我们仍然认为 Schwarzschild 解具有显而易见的奇异性? 答案很简单 (否则就不叫显而易见了): 当一个观测者在 Schwarzschild 时空中沿径向落往中心 (即 r 趋于 0) 时, 他所观测到的时空曲率趋于发散。由于观测者的下落是沿非类空测地线进行的^[註四], 这启示我们这样来定义奇点: 如果时空结构沿非类空测地线出现病态性质, 则存在奇点。这个定义不需要将奇点视为时空流形的一部分, 从而避免了上面提到的困难。但是, 这个定义还面临两个问题: 一是“病态性质” 这个含糊概念仍未得到澄清, 二是在这个定义中, 假如观测者沿非类空测地线需要经过无穷长时间才会接触到时空结构的病态性质, 那么奇点的存在就不具有观测意义。为了解决这两个问题, 我们进一步要求定义中涉及的非类空测地线具有有限“长度”, 并且是不可延拓的 (inextendible)^[註五]。这种具有有限“长度”的不可延拓非类空测地线被称为不完备非类空测地线 (incomplete non-spacelike geodesics)。

有了这一概念, 我们可以这样来定义奇点: 如果存在不完备非类空测地线, 则时空流形具有奇点。这就是多数广义相对论文献采用的奇点定义。这种存在不完备非类空测地线的时空流形被称为非类空测地不完备时空, 简称测地不完备时空 (geodesically incomplete spacetime)。在一些文献中, 按照不完备测地线的类型, 还将测地不完备时空进一步细分为类时测地不完备与类光测地不完备[注六]。这个定义的合理性体现在: 在一个测地不完备的时空流形中, 试验粒子可以沿不完备的非类空测地线运动, 并在有限时间内从时空流形中消失。这种试验粒子在有限时间内从时空流形中消失的行为 - 即测地不完备性 - 可以视为是对时空结构具有“病态性质” 这一含糊用语的精确表述。这样我们就既解决了“病态性质” 精确化的问题, 又使奇点具有了观测意义。在一些文献中, 还对奇点存在于过去还是未来进行区分: 如果所涉及的非类空测地线是未来 (过去) 不可延拓的, 则对应的奇点被称为未来 (过去) 奇点。细心的读者可能注意到我们在前面的“长度” 一词上加了引号。一般来说, 类时测地线的长度定义为本征时间: $\tau = \int ds$, 但这一定义不适合描述类光测地线, 因为后者对应的本征时间恒为零。因此, 我们需要对长度的定义进行推广, 将之定义为所谓的广义仿射参数 (generalized affine parameter)。对于一条时空曲线 $C(t)$ (t 为任意参数), 广义仿射参数定义为: $\lambda = \int [\Sigma a V_a(t) V_a(t)]^{1/2} dt$, 其中 $V_a(t)$ 为曲线在 $C(t)$ 处的切向量 $\partial/\partial t$ 沿该处某标架场 $ea(t)$ 的分量, 曲线上各点的标价场定义为由某一点的标价场平移而来, 求和则是欧式空间中的分量求和。显然, 这样定义的广义仿射参数是恒正的, 它的数值与标架场的选择有关。但可以证明, 广义仿射参数的有限与否与标价场的选择无关。因此它对于我们表述奇点的定义已经足够了。需要注意的是, 广义仿射参数的定义适用于所有 C^1 类 (即一次连续可微) 的时空曲线, 而限于测地线。不难证明, 类时测地线的本征时间是广义仿射参数的特例 (请读者自行证明)。

作为一个例子，我们来看看 Schwarzschild 解中 $r=0$ 的奇点是否满足上面所说的奇点定义。为此我们来证明从 Schwarzschild 视界 ($r=2m$) 出发沿 r 减小方向的径向类时测地线的长度 (即本征时间) 是有限的。由 Schwarzschild 度规可知：

$$ds^2 = -(2m/r-1)dt^2 + (2m/r-1)^{-1}dr^2$$

因此 (请读者补全被省略的计算细节)

$$\tau = \int ds < \int (2m/r-1)^{-1/2}dr \leq \pi m < \infty$$

由此可见这种测地线的长度是有限的。另一方面，沿这种测地线趋近 $r=0$ 时，Kretschmann 标量 $R^{\mu\nu\rho\sigma}R_{\mu\nu\rho\sigma}$ 发散，因此这种测地线是不可延拓的。这表明 Schwarzschild 解中 $r=0$ 的奇点满足上面所说的奇点定义。从物理上讲，这个结果表明落入 Schwarzschild 视界的观测者会在有限本征时间内从物理时空中消失 (形象地说是“落入奇点”)。

现在我们再回到定义上来，奇点的定义要求时空流形具有测地不完备性。读者也许会问：测地线究竟由于什么原因而不完备？另外，虽说测地不完备性是对时空结构所具有的病态结构的精确描述，但这“精确”二字是以数学上无歧义为标准的。在物理上，我们仍然可以问这样一个问题：当观测者沿不完备的测地线运动时，究竟会观测到什么样的时空病态性质？或者简单地说，奇点究竟是什么样子的？对此，人们曾经试图给予直观描述，可惜一直没能找到一种直观描述足以涵盖所有可能的测地不完备性。比如，人们曾经认为奇点的产生意味着某些几何量 (比如曲率张量) 或物理量 (比如物质密度) 发散，相应地，沿不完备非类空测地线运动的观测者观测到的将是趋于无穷的潮汐作用或其它发散的物理效应。Schwarzschild 奇点及大爆炸奇点显然都具有这种性质。但细致的研究发现，并非所有的奇点都是如此。一个最简单的反例是锥形时空：

$$ds^2 = dt^2 - dr^2 - r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2)$$

其中 $r>0$, $0<\phi<a<2\pi$, 并且 $\phi=0$ 与 $\phi=a$ 粘连在一起。这个时空是局部平坦的 (曲率张量处处为零)，显然没有任何发散性。但这一时空无法延拓到 $r=0$ (被称为锥形奇点)，因而是测地不完备的 (类时与类光都不完备)^[注七]。这个反例表明奇点不一定意味着发散性。

对奇点的另一种直观描述是：奇点是时空中被挖去的点 (或点集)。比如 Schwarzschild 奇点与锥形奇点是被挖去的 $r=0$ ，大爆炸奇点是被挖去的 $t=0$ 。这种描述如果正确的话，那么通向奇点的所有测地线 - 无论类时还是类光 - 必定都是不完备的。换句话说，如果奇点是时空中被挖去的点 (或点集)，那么它的存在将同时意味着类时测地不完备性与类光测地不完备性。我们上面举出的所有例子都具有这一特点。但细致的研究表明，这一描述同样不足以涵盖所有的奇点。1968 年 R. P. Geroch 给出了一个共形于 Minkowski 时空的时空 $(R^4, \Omega^2\eta_{ab})$ ，其中共形因子 Ω^2 具有球对称性，在区域 $r>1$ 恒为 1，在 $r=0$ 上满足 $t^2\Omega \rightarrow 0$ ($t \rightarrow \infty$)。显然 (请读者自行证明)，类时测地线 $r=0$ 沿 $t \rightarrow \infty$ 具有不完备性，因此这个时空流形具有类时测地不完备性。另一方面，所有类光测地线都将穿越区域 $r \leq 1$ 而进入平直时空，因而都是测地完备的。由此可见这个时空具有类时测地不完备性，但不具有类光测地不完备性^[注八]。这个反例表明奇点并非都能理解为是从时空中被挖去的点 (或点集)。

注释

[注一] 当然，这里所谓的“其它物理理论”指的是不把时空本身作为研究对象的理论。

[注二] Lorentz 度规是指 signature 为 (1, -1, -1, -1) 的度规 (有些文献的定义与本文差一个整体符号)。除 Lorentz 度规外，人们常常在时空定义中附加一些其它条件，比如 Hausdorff 性质、连通性，等。对于度规的可微性则有的假定为 C^∞ ，有的假定为 C^r (r 为正整数 - 请读者思考一下， r 最小应该是多少?)，等。

[注三] 有些物理学家试图将奇点视为时空流形的边界 - 被称为奇异边界 (singular boundary)，但迄今尚未建立令人满意的处理方式。

[注四] 非类空即类时与类光的总称。这里我们所说的“观测者”是广义的，即试验粒子，其中包括零质量粒子。

[注五] 这里我们首先要求时空流形本身是“不可延拓”的，即无法等度规地 (isometrically) 嵌入更大的流形中。这一要求排除了一些 trivial 的奇点，比如在 Minkowski 时空中挖去一个时空点所造成的“奇点”。测地线的不可延拓性可以用来排除诸如 Schwarzschild 视界这样的表现奇点。

[注六] 显然我们也可以定义类空测地不完备性，但由于沿类空测地线的运动是物理上不可实现的，因此这种测地不完备性在奇点研究中不如其它两种测地不完备性那样受重视。

[注七] 这个例子比较平凡，一个更复杂的例子是所谓的 Taub-NUT 空间，它具有 $R^1 \times S^3$ 拓扑结构，曲率张量处处有界，但同样是测地不完备的（类时与类光都不完备）。

[注八] 这个例子比较特设，一个更具物理意义的例子是 Reissner-Nordström 解，它描述的是带质量及电荷的球对称时空，Reissner-Nordström 解具有类光测地完备性，但不具有类时测地不完备性。

5、施瓦西黑洞与拉普拉斯黑洞完全相同

虽然用广义相对论研究黑洞已经将近 100 年了，然而仍有一些问题至今无法给出合理的解释，而令人困惑，其中一个问题是为什么广义相对论的施瓦西黑洞与牛顿力学的拉普拉斯黑洞完全相同？

由于黑洞概念出自两个不同的物理理论，根据这两个理论可以各自推出一个黑洞。

历史上第一个黑洞是拉普拉斯用牛顿力学方法得到的。给定一个质量为 M ，半径为 R 的星球，并假设星球的质量是均匀分布的，再给定一个静止质量为 m_0 的质点， $m_0 \ll M$ ，下面研究质点 m_0 在星球引力作用下的运动规律，由于讨论静态球对称的情况，因此可进一步假设质点 m_0 只在星球的径向做直线运动。首先将球坐标系固定在星球 M 上，并令坐标原点与星球球心相重合。

在牛顿力学中，质点质量是一个常量，根据牛顿第二定律和万有引力定律，质点运动方程为：

$$m_0 \frac{du}{dt} = -\frac{GMm_0}{r^2} \quad (1), \text{ 公式(1)中的 } u \text{ 是质点的径向速度, 在球对称问题中, 速度 } u \text{ 只是 } r \text{ 的函数,}$$

$$\text{因此有: } \frac{du}{dt} = \frac{du}{dr} \frac{dr}{dt} = u \frac{du}{dr} \quad (2), \text{ 将公式(2)代入公式(1)中, 整理后可得: } u du = -\frac{GM}{r^2} dr \quad (3), \text{ 对}$$

$$\text{上式积分, 并注意边界条件: } r = \infty \text{ 时, } u = 0, \text{ 积分后可得速度公式为: } u = \sqrt{\frac{2GM}{r}} \quad (4), \text{ 在后面研究}$$

$$\text{中, 需要经常使用参数 } \beta, \text{ 即速度与光速之比, 由公式(4)可得: } \beta = \frac{u}{c} = \sqrt{\frac{2GM}{rc^2}} \quad (5)$$

$$\text{注意公式(3)的右端只是 } r \text{ 的函数, 因此可以引入势函数 } \varphi, \text{ 其中 } \varphi \text{ 满足: } \frac{\partial \varphi}{\partial r} = \frac{GM}{r^2} \quad (6), \text{ 对}$$

$$\text{上式积分, 并引入边界条件 } r = \infty \text{ 时, } \varphi = 0 \text{ 于是得到: } \varphi = -\frac{GM}{r} \quad (7), \text{ 将引力势 } \varphi \text{ 代入运动方程(3)}$$

$$\text{中, 则牛顿引力场中的运动方程为: } m_0 \frac{du}{dt} = -m_0 \frac{\partial \varphi}{\partial r} \quad (8), \text{ 对公式(8)取积分, 并注意利用公式(2), 再代}$$

$$\text{入边界条件, 在 } r = \infty \text{ 时, } u = 0, \varphi = 0 \text{ 于是得到: } m_0 \frac{u^2}{2} + m_0 \varphi = 0 \quad (9), \text{ 公式(9)就是牛顿引力场的能量守恒方程.}$$

按照牛顿引力理论，一个质点的动能若超过它的引力势能，质点就能摆脱星球的引力而逃逸，对于一个质量为 M ，半径为 R 的星球来说，在它表面上一个质量为 m_0 质点，根据能量守恒方程(9)，该质点能够从星球表面逃逸的最小速度 u_e 很容易算出来，把(7)代入(9)，我们有：

$$\frac{1}{2} m_0 u_e^2 = \frac{GMm_0}{R} \quad (10), \text{ 由公式(10)可}$$

$$\text{求得逃逸速度: } u_e = \sqrt{\frac{2GM}{R}} \quad (11), \text{ 从上式可以看出, 质量越大半径越小的星球, 其逃逸速度越大.}$$

令逃逸速度等于光速，由方程(11)求出半径，这个半径就是拉普拉斯半径。用这一方法，我们最终得到：

$$r_L = \frac{2GM}{c^2} \quad (12), \text{ 式中 } c \text{ 代表光速, } r_L \text{ 称为拉普拉斯半径, 利用公式(11)很容易得到, 当星球的半径}$$

小于拉普拉斯半径时, 即 $R \leq r_L$ 时, 我们有: $u_e \geq c$ (1-3), 这个公式表明, 如果光也同一般物体一样受万有引力作用, 那么在 $R \leq r_L$ 的条件下, 光线就不能克服引力场而逃逸。

换句话说, 根据牛顿引力理论, 我们可以得出宇宙中存在这样一种星球, 它的半径满足 $R \leq r_L$ 的条件,

即:
$$R \leq \frac{2GM}{c^2} \quad (14)$$
 这种星球的引力是如此之强, 光也不能从其表面逃脱, 以至一个远方的观测者无法接收到从星球表面发出的光, 这种星球拉普拉斯称其为看不见的星, 也就是今天所说的黑洞。

我们知道, 黑洞问题属于强引力问题, 在强引力场质点的速度可以接近光速。后面我们将证明, 当用相对论的方法计算的质点速度大于光速的 0.79 倍时, 用牛顿力学公式 (4) 得出的速度就会大于光速, 而此时牛顿力学早已不适用了。因此, 黑洞问题是不能用牛顿力学研究的。

然而, 在 200 多年前, 拉普拉斯在不知道牛顿力学的适用范围的情况下, 用牛顿力学研究了黑洞, 并推导出拉普拉斯黑洞。虽然用牛顿力学可以推导出黑洞, 由于黑洞属于强引力问题, 超出了牛顿力学的适用范围, 因此, 拉普拉斯推导黑洞的方法是错误的。

历史上的第二个黑洞是施瓦西黑洞, 这个黑洞是施瓦西从爱因斯坦场方程中推导出来的。1916 年, 在爱因斯坦广义相对论发表后不久, 施瓦西导出了爱因斯坦真空场方程的一个准确解, 即静态球对称引力场的

施瓦西解:
$$ds^2 = c^2 \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right) dt^2 - \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right)^{-1} dr^2 - r^2 d\theta^2 - r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \quad (15)$$
 施瓦西解描述的

是一个球对称天体的外部空间。从(15)可以看出, 当 $r = \frac{2GM}{c^2}$ (16)时, (15)中的第二项趋于无穷大, 即:

$$g_{11} \rightarrow \infty \quad (17)$$
 这表明, 球面 $r = r_s$ 是施瓦西解的一个奇面, 其中 r_s 称为施瓦西半径: $r_s = \frac{2GM}{c^2}$ (18)

在广义相对论里, 球面 $r = r_s$ 称为施瓦西视界, 也就是施瓦西黑洞的外边界。一个星球如果它的半径小于施瓦西半径, 即: $R \leq r_s$ (19), 这个星球就被称为施瓦西黑洞。

前面我们用牛顿力学研究黑洞得出: 对于任何给定质量的星球, 都存在一个临界半径, 当一个星球的半径小于临界半径时, 这个星球就是黑洞。用牛顿力学得出的临界半径是拉普拉斯半径, 一个质量为 M 的星球,

它的拉普拉斯半径由公式
$$r_L = \frac{2GM}{c^2} \quad (12)$$
 确定。

将施瓦西半径公式(18)与拉普拉斯半径公式(12)相对比, 可以看出 $r_s = r_L$ (20), 即广义相对论中的施瓦西黑洞与牛顿力学中的拉普拉斯黑洞二者完全重合。

现在出现一个问题: 同一个结果——静态球对称的黑洞, 可以用两种方法推导出来, 一种是牛顿力学的方法, 另一种是广义相对论的方法, 而且人们已经知道牛顿力学的方法是错误的, 在这种情况下, 人们不禁会问:

① 为什么广义相对论的施瓦西黑洞与牛顿力学的拉普拉斯黑洞完全相同?

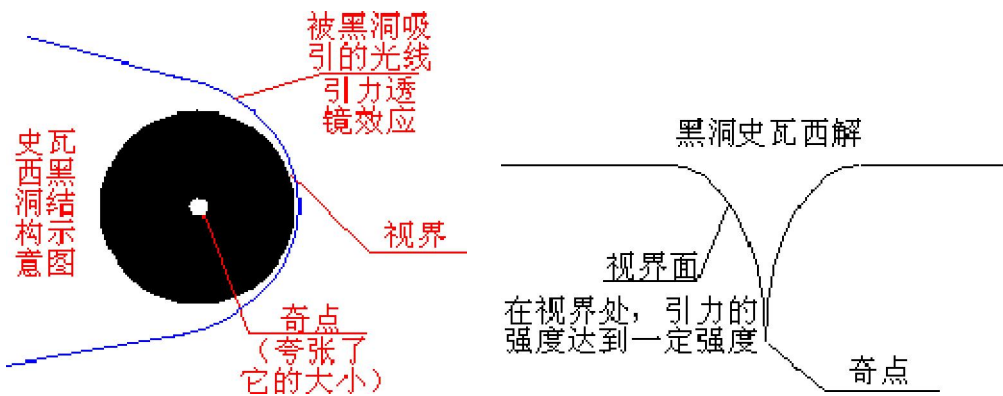
② 如果认为广义相对论的结果是正确的, 而拉普拉斯推导黑洞的方法是错误的, 那么, 为什么拉普拉斯用错误的方法, 还能得到正确的结果呢?

目前在广义相对论的许多书里, 没有对这个问题进行详细的分析, 少数几本书给出一个简单的解释:

例如文献【1】对这个问题是这样解释的: 有趣的是今天从广义相对论得出的黑洞条件, 与当年拉普拉斯等人从牛顿理论给出的暗星条件完全相同。从今天的眼光看, 拉普拉斯的推导犯了两个错误, 第一把光子

的动能 mc^2 写成了 $\frac{1}{2}mc^2$, 第二把广义相对论的时空弯曲当作了万有引力。这两个错误相互抵消, 最终却得到了正确的结果。

史瓦西黑洞, 是一切黑洞的发祥地。它有一个视界和一个奇点。



视界，是物体能否回到外部宇宙的分界面（视界的准确定义有两种，会在下文介绍量子理论对黑洞的作用时介绍），在视界外面，物体可以离开或者接近黑洞而保持安全。而在视界上，只有光速运动的物体可以保持不进入毁灭熔炉黑洞，但是连光也无法从这个面中逃脱了。

笔者认为电磁质量光子的能量应该是 KQC^2 ，引力质量的动能公式为 $0.5mc^2$ 。

笔者认为广义相对论是从万有引力定律出发得到的，只是考虑到引力质量之间的相互吸引作用，没有考虑到它的反作用力——弱相互作用得到的结果类似。

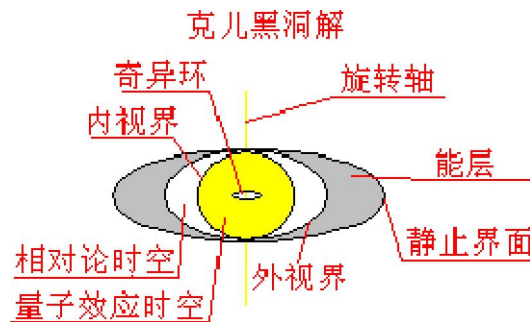
参考文献：

【1】刘辽，赵峥，田贵花，张靖仪。 黑洞与时间的性质。 北京：北京大学出版社， 2008。

6、量子力学与黑洞

广义相对论结合量子理论的产物，现在还没有最终成形。就已经掌握的科学理论来说，这种理论中，即便考虑电磁力、强力和弱力，也依然会产生黑洞——事实上，奥本海默最初计算出恒星的黑洞演化时就已经考虑了这些因素了。辐射粒子，准确地说是因为黑洞视界面附近的量子隧穿效应。在量子世界中，没有什么绝对的，所以不存在绝对只吸不出的物理。

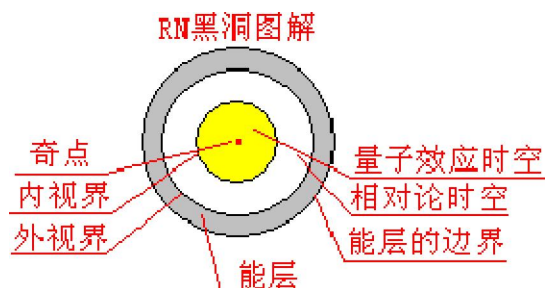
克尔黑洞的结构比史瓦西黑洞复杂了许多。



在克尔黑洞的最外层，由于黑洞旋转产生的对周围时空的拖曳效应（伦斯——梯林效应），因为存在着一个判断物体是否可以静止于时空中的静止界面。静止界面外的物体，可以通过推进器等装置在被拖曳的时空旋涡中相对于极远处的观测者静止不动，而在静止界面内，可以断定，物体一定会被黑洞的强大引力拖动，开始旋转。在这个界面内部，和史瓦西黑洞一样存在着视界，但是它和史瓦西视界不一样，比它更加复杂，因为在这里，视界分为两个：内视界和外视界。外视界是物体能否与外界通讯的分界面（这里使用的是霍金对视界定义的升华：绝对视界的定义。关于绝对视界和显视界，我们会有一次探讨），而内视界是奇点的奇异性能否影响外界的分界面。也就是说，进入外视界的物体，必定会被吸入奇点，然后本摧毁，但是还可以在达到内视界以前享受一段相对“安宁”的日子，而一旦进入了内视界，那么任何物体都会在内视界中奇点奇异性质的面前屈服，在达到奇点以前便被摧残待尽。在外视界和静止界面之间，有一个相对十分广阔的区域，叫“能层”。在能层中蕴藏着黑洞旋转时的旋转能。从理论上，可以在静止界面外建立一个空间站，

然后利用抛物投射来提取黑洞的旋转能，得到几乎无穷尽的能源（因为大型黑洞的寿命几乎可以肯定比质子的寿命长）。此外，在能层中，由于黑洞旋转带来的拖曳会将时空撕裂，产生虫洞。在早期引用量子效应来处理黑洞的时候，第一个选择的就旋转黑洞，而且得到了第一个量子黑洞定理：旋转黑洞辐射。后来在霍金的推动下成了霍金辐射。在内视界内部，和史瓦西黑洞一样有一个奇异性性质汇聚的地方，但是不像史瓦西黑洞那样是一个奇点，而是一个独特的奇异环，一个充满了量子效应奇异性质的面，安静地平躺在黑洞赤道面上，带来的却是彻底的破坏和随机。

雷斯勒——诺斯特朗姆黑洞（以下简称为 RN 黑洞）。



RN 黑洞没有自旋，但是带有电荷。它和史瓦西黑洞、克尔黑洞在许多方面相似。比如对于带有相反电荷的物体来说，它有一个在视界外的静止界面，它的视界有两个：内视界和外视界。不过和克尔黑洞不同的是，RN 黑洞内视界和外视界在一般情况下完全独立，而克尔黑洞的内视界和外视界在黑洞的两极相切；RN 黑洞的两个视界是绝对球形的，而克尔黑洞的视界是椭球形的。在静止界面和外视界之间也有能层，但是蕴藏的不是黑洞的旋转能，而是电能。RN 黑洞的中央有一个史瓦西黑洞的奇点，不是克尔黑洞的奇异环。

不过 RN 黑洞并不十分著名，至少不像史瓦西黑洞那样普遍，没有克尔黑洞那样出名，因为在自然界中，一个带有电荷的黑洞会在十分短的时间内从外界空间中吸收一定数量的相反电荷，是自己的电荷被严格控制在极限电量的 10^{-44} 范围以下，因而 RN 黑洞比史瓦西黑洞还要“学术气”，所以没有得到广泛应用和发展。

所谓的极限电量，和极限角速度一起，分别是 RN 黑洞和克尔黑洞允许带有的电量和角速度的极限值。为什么会有极限值呢？是因为内视界和外视界与它们之间的联系产生的。在克尔黑洞中，外视界会由于角速度的增大而缩小，而内视界会随着角速度的增大而增大（想一下牛顿引力定律和角速度的综合应用产生的在轨道上运动的物体的受力变化就可以明白了，不过这样得到的是近似的推导）。当内、外视界重合的时候，两层视界会同时消失，将一个裸露的奇点展现在宇宙时空中。而这个使黑洞的两个视界重合在一起的极限角动量和电量，就是极限速度和极限电量。

迄今为止在 Loop Quantum Gravity 领域中取得的重要物理结果有两个：一个是在 Planck 尺度上的空间量子化，另一个来自于对黑洞热力学的研究。1972 年，Princeton 大学的研究生 J.D. Bekenstein 受黑洞动力学与经典热力学之间的相似性启发，提出了黑洞熵的概念，并估算出黑洞的熵正比于其视界面积。稍后，S.W. Hawking 研究了黑洞视界附近的量子过程，结果发现了著名的 Hawking 辐射，即黑洞会向外幅射粒子（也称为黑洞蒸发），从而表明黑洞是有温度的。由此出发 Hawking 也推导出了 Bekenstein 的黑洞熵公式，这就是所谓的 Bekenstein-Hawking 公式。黑洞熵的存在表明黑洞并不象此前人们认为的那样简单，它含有数量十分惊人的微观状态。这在广义相对论的框架内是完全无法理解的，因为广义相对论有一个著名的“黑洞无毛定理”，它表明黑洞的内部性质由其质量，电荷和角动量三个宏观参数所完全表示，根本就不存在所谓微观状态。

黑洞熵的计算，Loop Quantum Gravity 的基本思路是认为黑洞熵所对应的微观态由能够给出同一黑洞视界面积的各种不同的 spin network 位形组成的。按照这一思路进行的计算最早由 K. Krasnov 和 Rovelli 分别完成，结果除去一个被称为 Immirzi 参数的常数因子外与 Bekenstein-Hawking 公式完全一致。因此 Loop Quantum Gravity 与 Bekenstein-Hawking 公式是相容的。而超弦理论与量子引力最直接相关的一个，那就是利用 D-brane 对黑洞熵的计算；即超弦理论对黑洞熵的计算利用了所谓的“强弱对偶性”，即在具有一定超对称的情形下，超弦理论中的某些 D-brane 状态数在耦合常数的强弱对偶变换下保持不变。利用这种对称性，处于强耦合下原本难于计算的黑洞熵可以在弱耦合极限下进行计算。在弱耦合极限下与原先黑洞的宏观性质相一致的对应状态被证明是由许多 D-brane 构成，美中不足的是，由于上述计算要求一定的超对称性，因此只适用于所谓的极端黑洞或接近极端条件的黑洞。

第二章 黑洞问题的研究

1、黑洞活动的证据

《自然杂志》1994年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：68。黑洞何时可以露真容？

美国天文学家借助“钱德拉”X射线天文望远镜在双鱼座发现一个新级别黑洞。科学家们通过研究该黑洞的X射线爆发持续时间和爆发周期而大致确定了它的级别--质量相当于一万个太阳。科学家们称，新发现的这个黑洞只能算作是一种中等级别的黑洞。此前，科学家们所探测到的黑洞主要有两种类型，一种是质量仅相当于太阳质量十倍多的类恒星黑洞，另一种则是质量为太阳数十亿倍的超级黑洞。本次发现的这个黑洞位于双鱼座的M74星系中，它与地球的距离约为3200万光年。科学家们解释称，该黑洞的X射线爆发周期约为2小时，其强度约相当于10--1000个中子星或类恒星黑洞。科学家们认为，该黑洞X射线辐射的周期性变化与其周围聚集的热气体盘的变化有关。此前，科学家们还通过长期的研究得知，黑洞辐射的周期与其质量大小也有着密不可分的关系。根据上述这二个因素，科学家们才能判定该黑洞质量约相当于10000个太阳的质量。科学家们还表示，此类黑洞的产生一般有两种途径：一，这种中等质量的黑洞由高密星群中央的数十个甚至上百个恒星级黑洞合并而来；二，它是大型星系逐渐吞噬小型星系而形成的小星系核的残留物质。黑洞的辐射很像另一种有相同颜色的东西，就是黑体。黑体是一种理想的辐射源，处在有一定温度表征的完全热平衡状态。它发出所有波长的辐射，辐射谱只依赖于它的温度而与其它的性质无关。”

(一) 美探测器发现黑洞活动确凿证据

北京时间2010年6月2日消息，据国外媒体报道，美国天文学家近日根据“雨燕”卫星的长期观测数据，发现了黑洞活动的确凿证据。2010年5月26日，美国宇航局就“雨燕”卫星的最新发现发布了新闻简报。这一发现将有助于天文学家解答数十年来一直困扰他们的神秘难题，即为为什么一小部分黑洞可以释放出巨大的能量。

据科学家介绍，只有百分之一的超大质量黑洞有此行为。新的发现证实，当星系发生碰撞时，这些黑洞可以“点亮”。通过“雨燕”卫星的观测数据，天文学家可以更加深入地了解银河系黑洞的未来行为。天文学家们的研究成果将发表于6月20日出版的《天体物理学杂志通讯》(*The Astrophysical Journal Letters*)上。

从星系中心或星系核发出的强烈辐射通常在超大质量黑洞附近产生，这种超大质量黑洞的质量大约是太阳质量的100万倍到10亿倍之间。这些活动星系核所发出的能量大约是太阳能量的100亿倍，是宇宙中最明亮的事物，它们包括类星体和耀变体。美国马里兰大学帕克分校的迈克尔-科斯是该项研究的主要负责人。科斯表示，“理论家已经证明，强烈的星系合并可以形成一个星系的中心黑洞。这项研究可以解释黑洞是如何结合的。”

在获得“雨燕”卫星高透力X射线观测数据之前，天文学家一直无法确信，他们是否已经将活动星系核的大部分都已数清。在一个活动星系中，黑洞周围通常包围着厚厚的尘埃和气体。这种尘埃和气体可以阻挡紫外线、可见光和低透力X射线。尽管从黑洞附近的温暖尘埃中所发出的红外辐射能够穿透尘埃，却容易与星系中恒星形成区的辐射相混淆。“雨燕”卫星的高透力X射线可以帮助天文学家们直接探测到活跃的黑洞。

自2004年起，“雨燕”卫星上的爆发警报望远镜已经开始利用高透力X射线绘制天空图。美国宇航局戈达德太空飞行中心“雨燕”卫星首席科学家尼尔-格雷尔斯介绍说，“经过数年的建设和曝光，‘雨燕’卫星爆发警报望远镜高透力X射线探测已经成为最大、最敏感和最全面的太空普查项目。”该探测器揭开了数个此前未被承认的系统的面纱，它甚至对6.5亿光年外的活动星系核都非常敏感。

研究团队发现，爆发警报望远镜所发现的星系，大约有四分之一正在合并或形成了紧密的双子星系。科斯认为，“‘雨燕’卫星爆发警报望远镜高透力X射线探测项目让我们对活动星系核有了完全不同的认识。在这些星系中，大约有60%将会在未来十亿年中完全合并。我们认为，我们已经发现了理论家此前预测的由合并所引发的活动星系核的确凿证据。”

研究团队的其他成员还包括：马里兰大学的理查德-穆什斯基、席尔瓦-维尔列克思和科罗拉多大学天体物理学和太空天文学中心的利萨-温特等。密歇根大学天文学家乔尔-布莱格曼没有参与该项研究，但他表示，“我们从来没有如此清晰地看到活动星系核活动的开始。‘雨燕’研究团队利用高透力X射线探测器肯定可以识别出这一过程的早期阶段。”

笔者认为，巨大能量的来源可能是电磁质量的释放，不是黑洞活动的证据。

附录:



图片显示一个中心拥有强大黑洞的星系，正在迅速向外喷发射电辐射

新浪科技讯北京时间 12 月 25 日消息，英国 e-Merlin 望远镜阵列最近拍到第一张图片，这些图片显示一个中心拥有强大黑洞的星系，正在迅速向外喷发射电辐射。

这是一个距离地球 90 亿光年的遥远类星体，它喷出的物体形成弧形。类星体是中心区域拥有向外喷发能量的超大质量黑洞的星系，它们是宇宙中最明亮的天体。科学家表示，这种特殊天体又被称作“双类星体”，因为它发出的光通过空间曲率变弯曲，围绕在前景星系(距离地球较近)周围。这种畸形空间导致“引力透镜”形成，产生相同类星体的多重放大图像。

形成透镜效应的前景星系在一些最新图片上也能看到，它位于靠近图片底部的那个类星体的上面。在 e-Merlin 拍摄的图片上看到的射电光，暗示这个前景星系也有一个黑洞，只是体积更小。曼彻斯特大学的尼尔·杰克逊在声明里说：“第一批双类星体图片显然证明了 e-Merlin 望远镜对我们研究引力透镜现象是多么有帮助。通过查看光线的曲率，我们可以研究恒星和暗物质在星系里的分布方式，以及它们是如何随宇宙的演变而变化的。”

作为英国国家射电天文学设备，e-Merlin 望远镜阵列将帮助天文学家研究有关星系、恒星和行星起源及演变的关键问题。该阵列利用分布在英国长达 137 英里(220 公里)的 7 个望远镜，今后将会产生更加清晰的恒星及星系射电图。研究人员表示，这些分布很广的望远镜就像一批变焦透镜，科学家利用它们可以研究宇宙边缘的天文事件。曼彻斯特大学 e-Merlin 项目主管西蒙·贾林戈顿说：“我们迫切希望未来几年该望远镜阵列能产生更多新科研成果。”

这是一张由广角 e-Merlin 射电望远镜和哈勃太空望远镜(光学)获得的双类星体的广视场合成图。在透镜效应的作用下，在图片上可以看到两个明亮的天体，一个位于另一个之上。e-Merlin 望远镜发现的射电辐射是由星系中心的黑洞产生的。这张图片也显示出被认为是由位于起透镜效应的星系(前景星系)中心的黑洞产生的射电辐射。从图中可以看到，弧状射电喷射物正在快速离开上方的类星体。(孝文)

附录 2: 计算机模拟黑洞碰撞 破解爱因斯坦的代码

科学家们正在计算机中模拟两个黑洞的碰撞，以便对爱因斯坦的相对论做最后的检验。

模拟两个黑洞的并合绝对是科学上的一次飞跃。一方面，它需要进行只有超级计算机才能胜任的大规模计算；另一方面，它还需要数值求解爱因斯坦广义相对论下用于描述两个黑洞及其运动的复杂方程。这就是

现如今正在如火如荼开展的数值相对论研究。使用超级计算机，数值相对论领域的科学家们希望能了解诸如黑洞并合或者中子星碰撞这些宇宙中最高能事件背后所暗藏着的物理本质。

但是数值相对论要求科学家们完全采纳爱因斯坦的广义相对论，而精确求解广义相对论下的方程却是十分困难的。除此之外的另一个困难则是要把隐藏在这些方程背后的复杂运动通过数字表现出来。

尽管还必须面对诸多困难，但是而留给数值相对论科学家的时间已经不多了。可以用来探测时空涟漪的新一代引力波探测器即将闪亮登场。这些引力波天文台就是专门用来探测黑洞并合这样的事件的。不过，这些探测器并不能独立地工作，它们需要计算机模型的指引，以便来识别出这些特定的信号。这一特殊的需要使得数值相对论成为了科学家们格外感兴趣的一大挑战。



[图片说明]: 引力波是时空结构中的一种扰动，它就像是时空海洋表面泛起的阵阵涟漪。

多年来，数值相对论的核心程序只能进行极其简单的黑洞碰撞模拟。所有的路看上去似乎都堵死了，没有一个代码能真正地工作。30年来尽管世界上最聪明的头脑都被吸引到了这个问题上，但是一无所获，有的科学家甚至都放弃了希望。模拟爱因斯坦的宇宙可能并不仅仅是太困难，而也许根本就是不可能的。

但是最近数值相对论科学家在计算模型中所取得的突破却使得整个领域绝处逢生。他们发现一种可以在目前的计算机所能承受的条件下用来求解黑洞碰撞的新方法。用这个方法计算出的结果显示，两个互相绕转的黑洞轨道会不断地收缩，最后会爆发性地释放出引力辐射进而并合。

就犹如 X 射线之于可见光，这一研究也为宇宙打开了一扇新的窗口，通过它天文学家们就能观测到时空的扰动。

聆听黑洞

在美国西雅图东南约 800 千米的汉福德核禁区中，有一样东西印证着数值相对论存在的价值。它就是由两个长长的、呈“L”形的真空腔所组成的激光干涉引力波天文台（简称 LIGO）。

除了在汉福德之外，LIGO 在美国路易斯安那州的利文斯顿还有一个孪生天文台。这两个天文台可以同时进行观测，这样它们所组成的观测网就可以确认彼此的结果。



[图片说明]: 为美国西雅图东南约 800 千米的汉福德核禁区中，激光干涉引力波天文台（简称 LIGO）。它由两个长 4 千米、互相垂直的真空腔组成，专门用来测量引力波造成的距离变化。版权：LIGO/CALTECH。

LIGO 是专门设计来探测引力波的。引力波就像是时空海洋表面泛起的涟漪，是爱因斯坦广义相对论的一个关键预言。前后摇晃一个有质量的物体就能产生可穿行于时空之中的引力波。而如果你能晃动一个如黑洞一般的大质量致密天体，就能产生可以在天文学距离上能被探测到的引力波。这正是 LIGO 的探测目标。在它两个相互垂直的真空腔中，两束互相干涉的激光可以测量出由于引力波经过所造成的时空变化。但问题是必须先知道当引力波经过的时候时空是如何变化的。

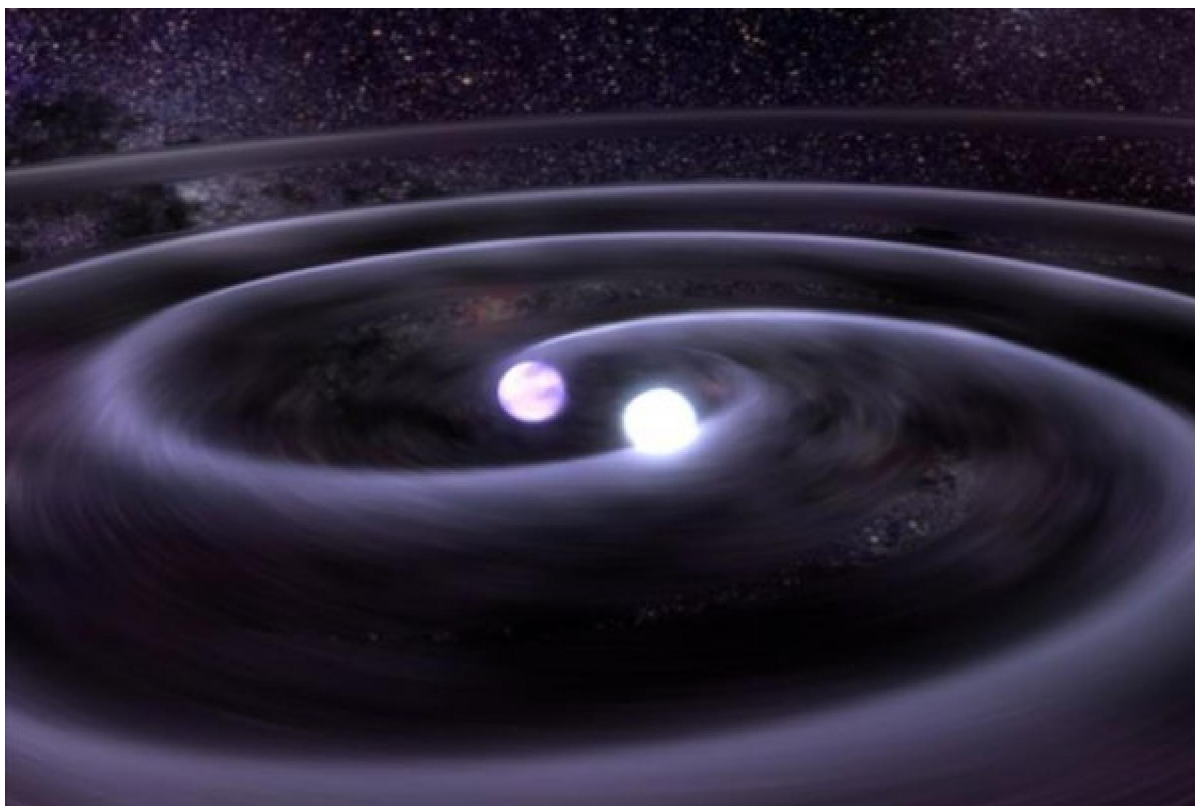
在科学家们刚开始构想 LIGO 的时候，他们就意识到两个互相绕转并且最终并合的黑洞会产生巨大的引力波辐射。当两个黑洞互相绕转的时候，它们就会向外辐射出引力波。而由于引力波带走了它们的能量，于是这两个黑洞就会慢慢靠近。它们之间靠的越近，其周围局部的时空所受到的扰动就越大，进而就会释放出更多的引力波。其结果就是两个黑洞发生剧烈碰撞，此时时空会被强烈地扭曲，引力波辐射也达到最强。在这之后，这两个黑洞就会合二为一，并且慢慢平静下来。

LIGO 正是用来聆听这些并合中的黑洞所发出的引力波信号的。由此它也把大量的科学家吸引到了黑洞合并这一问题上。多年来，科学家们一直致力于使用广义相对论来计算 LIGO 可能会探测到的引力波信号。如果这一理论计算的结果和实际的测量数据相匹配，那么就说明 LIGO 探测到了黑洞的并合。

致命的螺旋

黑洞的并合可以分为三个阶段。第一个阶段被称为“内旋”（inspiral）。这个时候两个黑洞在距离较远的轨道上相互绕转，而它们之间的引力也和牛顿引力差不多，只需要在此牛顿引力定律的基础上做小小的修正即可。

随着它们彼此不断靠近，问题就开始变得越来越复杂。当两个黑洞即将要发生碰撞的时候，就必须使用完整的广义相对论来描述，不能做任何的化简或者近似。此时两个快速运动的黑洞会剧烈地搅动时空，向外产生引力波洪流，而这时 LIGO 所能观测到的引力波信号强度也会上升到峰值。



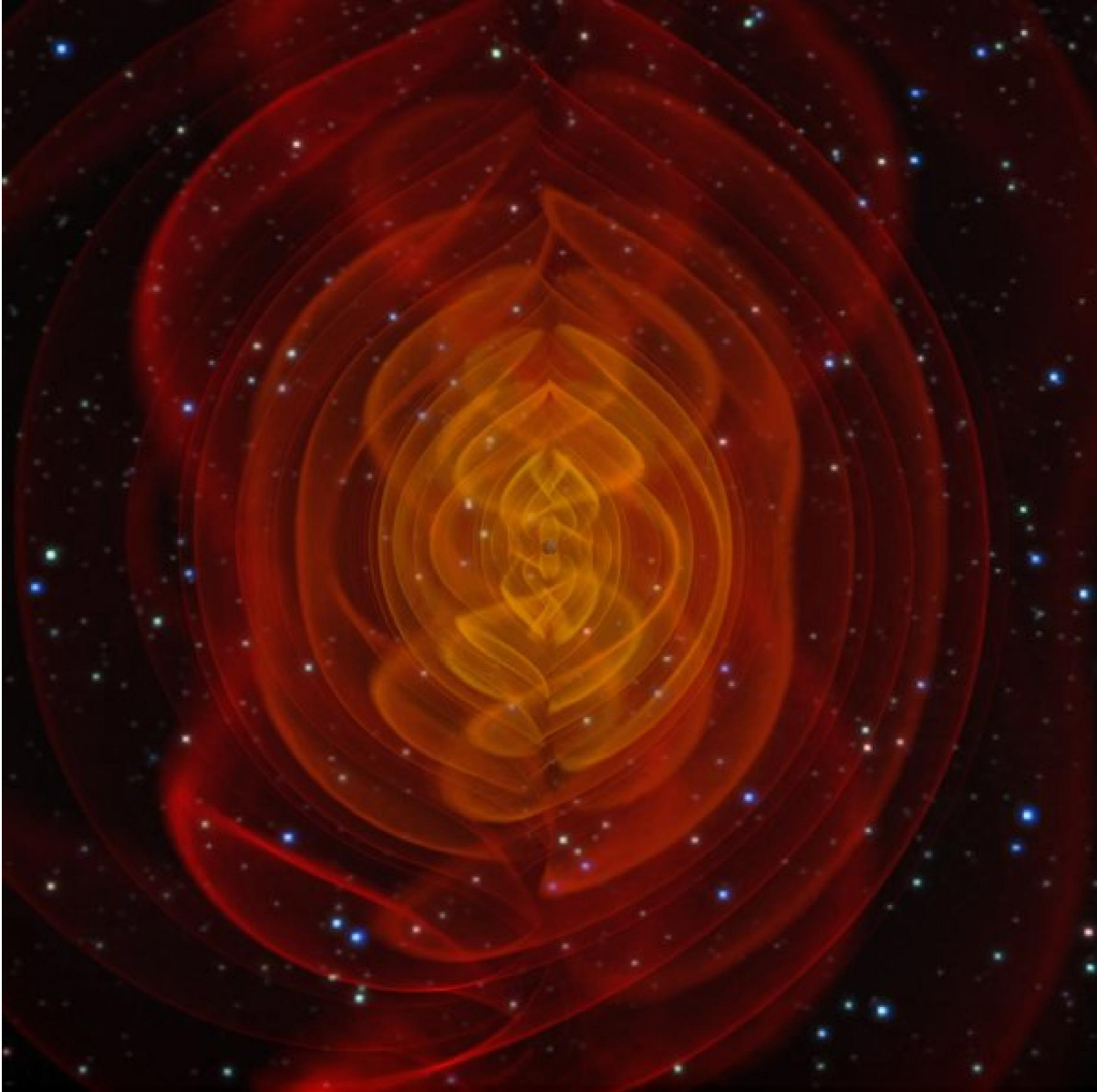
[图片说明]: 按照广义相对论的预言，任何两个互相绕转的天体都会由于辐射引力波而不断靠近，最终发生并合碰撞。版权：NASA。

和内旋阶段一样，两个黑洞并合的第三阶段，也就是碰撞之后的阶段，是相对容易计算的。两个黑洞会形成一个更大的黑洞，并且在震荡的过程中辐射出引力波，以使得自己趋于稳定。

精确的计算黑洞碰撞过程中所发出的引力波信号是一大艰巨的挑战。这是一项人人都想问鼎的桂冠，攻克它就意味着破解了爱因斯坦的密码。爱因斯坦的不可能神话

广义相对论的复杂性使得数值相对论的道路变得极为艰难。为了处理像黑洞并合这样的问题，科学家们必须同时求解 10 个相互交织在一起的方程，而即使仅仅算几步就会牵涉到方程中的好几百项。这就像是在龙卷风的中心做代数和微积分一样。

因此做为第一步，科学家们必须要想办法把广义相对论的方程转化成计算机可处理的形式。最初的尝试可以追溯到上个世纪 70 年代，堪称是一部数值相对论的史诗。



[图片说明]: 计算机模拟显示, 黑洞并合阶段会释放出大量的引力波。版权: NASA。

最初科学家们的努力都集中在两个黑洞的直接迎头碰撞上。虽然当时的计算很粗糙, 但是却为未来的进展打下了基础。为了取得真正的突破, 科学家们开始摸索如何在计算机上模拟爱因斯坦的四维时空, 并且使得这些模拟即使是在最复杂的条件下也依然能成立。

在广义相对论中, 时间和空间从一开始就是互相纠缠在一起的。时空中的所有物体, 包括你、我, 都是四维的。我们每个人除了都占据了三维的空间, 同时还有第四维的时间。这意味着每个人的一生都会在四维的时空中画出一条轨迹。黑洞也不例外。

黑洞的怪异

为了能在计算机中求解广义相对论的方程, 科学家们必须要发展出一种处理四维物体复杂性的方法。随后他们还要想办法把四维的计算结果形象的表示成二维或者三维的动画。而真正的挑战则是对黑洞本身的模拟。

每一个黑洞周围都有一个视界。位于视界之内的任何东西都无法逃出黑洞的引力。它就是我们的宇宙和黑洞内部怪异世界的分界面。任何进入黑洞视界的物体都将会永远从我们这个宇宙中消失。毫无疑问, 要把这样一个东西“放”到计算机里肯定会造成数不清的麻烦。

视界内部的时空是无法模拟的，而不在模型中建立起黑洞的话数值相对论又无法进行。多年来，科学家想出了有两种策略来解决这个问题。要么你可以把黑洞从你的计算中抽取出来，这被称为“抽取法”，要么你就在黑洞周围减缓计算的速度并且用一个已知的黑洞解代入其中，这被称为“穿刺法”。

这两种方法都有着各自的问题，并且效果都不是很好。计算上的困难使得数值相对论整个领域陷入了停滞。就在几年前，情况甚至开始变得令人绝望。程序一而再、再而三的崩溃，黑洞之间甚至连完整的相互绕转一圈都做不到。



[图片说明]: 美国宇航局的“哥伦比亚”超级计算机。非凡的计算能力是数值相对论所必需的。版权: NASA。

广义相对论与生俱来的数学复杂性以及把它们转换成计算机代码的极端困难性使得用于计算的模型极为不稳定。只需几步计算机就会遇到分母为零或者其他无法处理的数学状况而崩溃。

那时是一个黑暗的时期。每个人都失去了希望，有的人甚至已经在编写计算机代码上花了数年的时间。然而所有这些已经做的工作、所有这些繁琐的数学都使得没有人愿意把它弃置一边，然后从头来过。

然后突然有一天，在忧郁的愁思中一切却发生了变化。

孤独的枪手

时间是2005年4月19日。在一次有数值相对论科学家参加的会议上，美国普林斯顿大学的教授弗里斯·普雷托里斯（Frans Pretorius）向在场的大家展示了一个“秘密”。

在介绍了他的代码的数学背景之后，普雷托里斯展示了两个黑洞完整地互相绕转五圈的数值模拟。这简直太惊人了！他一个人解决了这个问题。这就像当所有人都在辛苦地爬山的时候，结果一抬头却发现普雷托里斯已经站在了山顶。

在普雷托里斯的新方法中，爱因斯坦的方程被处理成了类似普通波方程的形式。这是一种非常抽象而不直观的做法。但是这一进展并不是一蹴而就的。普雷托里斯自己说，他的第一次尝试是以失败而告终的，第二次尝试也只比第一次稍稍好一些。

在普雷托里斯放完有关的动画并且结束他的演讲之后，整个数值相对论界就开始试图消化他的新方法。普雷托里斯的成功虽然也招来了一些人的敌意，但是他无疑证明了数值相对论并不是一场不可能的梦。而接下去发生的则更是超出了所有人的预计。

改变过程

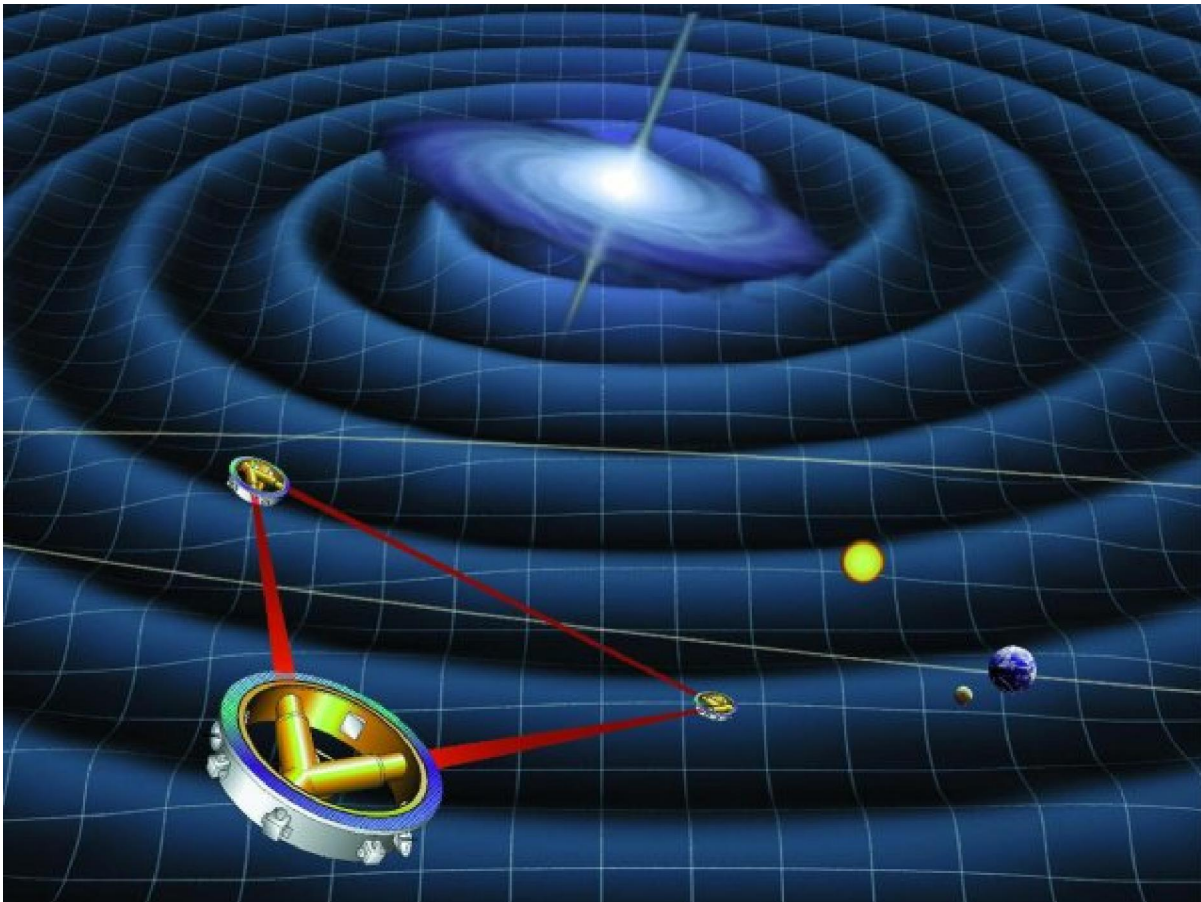
在普雷托里斯成功的鼓舞下，所有人都在问自己一个同样的问题：普雷托里斯的方法成功了，那么是不是要全盘转向使用他的方法？一些科学家决定继续推进他们自己已有的代码。

美国罗切斯特理工学院的科学家决定把他们的注意力集中在用穿刺法模拟运动的黑洞上。对于他们来说这是一个主要的问题，但是不久他们就找到了解决办法。数值相对论领域的许多人相信，用穿刺法所描述的黑洞是无法运动的。因此他们只能把这根“刺”固定在计算的网格中，而让时空围绕着它运动。但是现在在罗切斯特理工学院的曼纽拉·坎帕内利（Manuela Campanelli）和她的同事决定让这根“刺”动起来。出乎所有人意料的是，这一方法取得了巨大的成功。突然之间，坎帕内利的小组可以模拟两个黑洞一直到并合阶段了。在随后的数值相对论会议上，他们公布了这一最新的结果，但是一些与会者都对此表示怀疑。他们都不明白坎帕内利的小组是如何让黑洞动起来的。幸好另一个小组也展示了使用同一方法所得到的结果。至此对黑洞并合从头到尾的模拟终于成为了可能。

黑洞的明亮未来

有了这些方法，科学家们也开始马不停蹄地研究黑洞并合的性质，例如不同质量和自转的黑洞之间并合会出现什么结果等等。在这方面目前还有很多工作需要去做。

不过，现在也已经有了一些新发现。计算机模拟显示两个黑洞并合之后形成的新黑洞会受到一个强大的反冲力的作用。在有些情况下，并合之后的黑洞甚至可以被加速到每秒 1,000 千米。

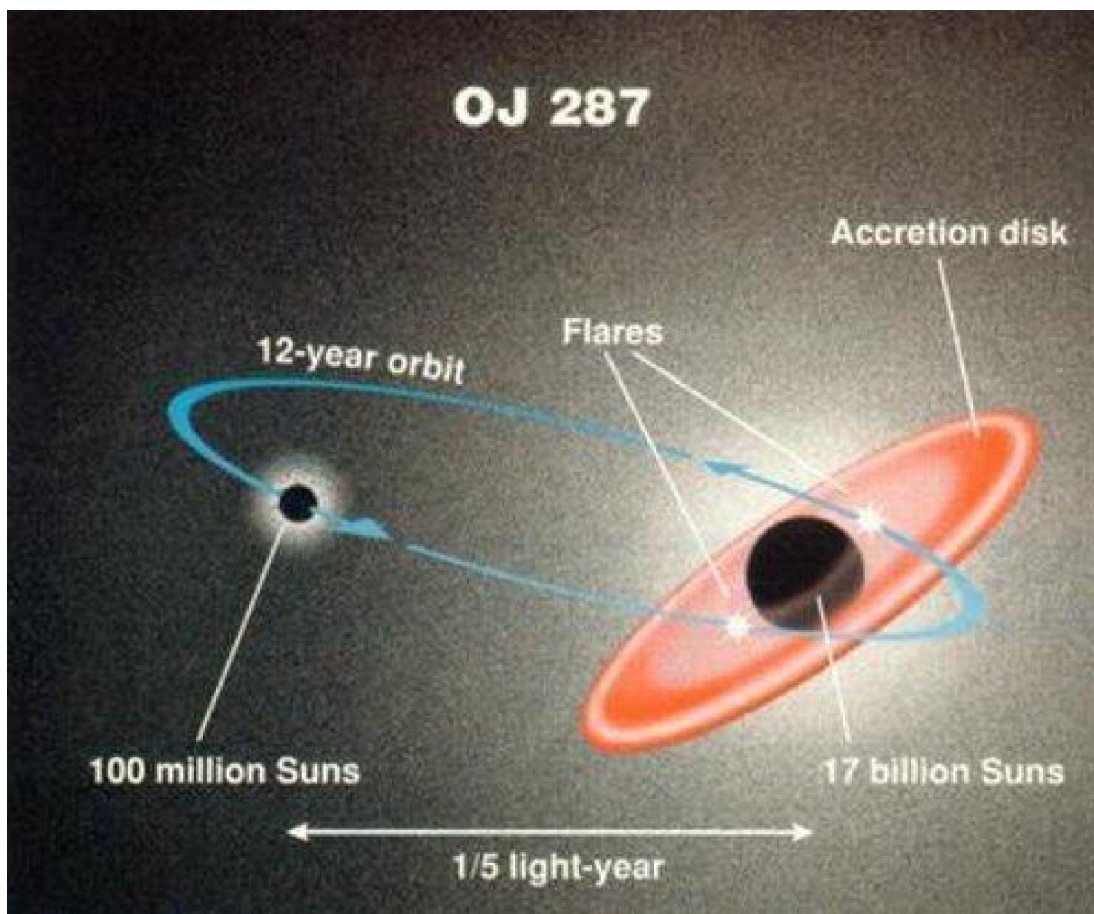


[图片说明]: 未来太空中的引力波探测器: 激光干涉空间天线 (LISA), 它将专门聆听两个超大质量黑洞并合所发出的低频引力波。版权: ESA。

现在计算机模拟的黑洞并合可以为全世界的引力波天文台提供指引。到 2013 年左右, LIGO 将会进行升级, 之后它会具有比现在更高的灵敏度。这一对灵敏度的提升将最终使得天文学家有机会能真正地一窥黑洞的碰撞。

对于 LIGO 的科学家而言, 他们距离实际探测到黑洞并合可能还有很长的路要走。而数值相对论领域的科学家们已经度过了他们最艰难困苦时期, 迎来了新的蓬勃发展。现在只要 LIGO 一切就位就能聆听宇宙深处黑洞并合的呢喃了。

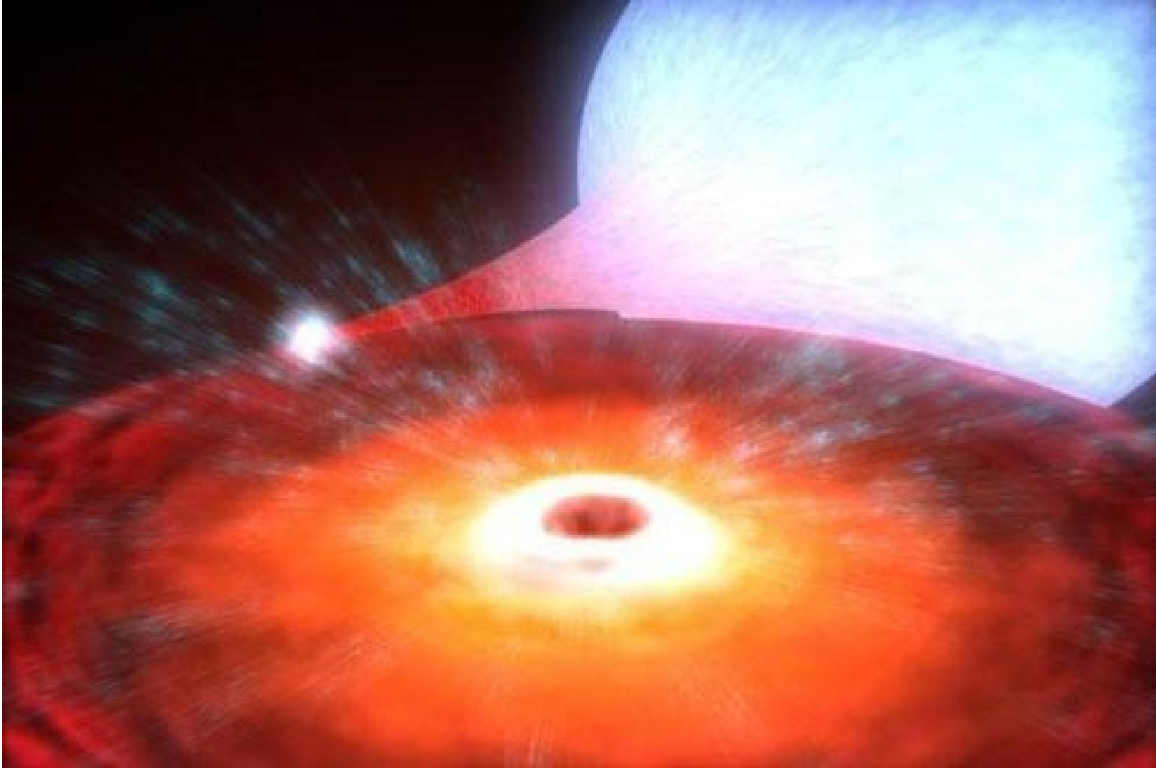
1、最大的黑洞



质量超太阳 180 亿倍的迄今最大黑洞

今年 1 月, 芬兰图尔拉天文台发现了宇宙中最大的黑洞。该黑洞质量大约是太阳的 180 亿倍, 是之前天文学所记录最大黑洞的 6 倍。这个黑洞的质量相当于一个小型星系, 它距离地球 35 亿光年, 形成于 OJ287 类星体的中心位置。类星体是一种极端明亮的星体, 它的物体将持续螺旋状进入一个大型黑洞并释放大量辐射线。然而十分特殊的是, OJ287 类星体包含着两个黑洞, 除此之外还有一个质量略小的黑洞, 这样的星体组合使天文学家能够更为精确地对宇宙中最大的黑洞“量体重”。在 OJ287 类星体中, 较大黑洞的重力场作用导致小黑洞的运行轨道出现难以置信的倾斜 39 度, 这种作用显著地影响小黑洞碰撞大黑洞的周边物质。

2、最小的黑洞



最小的黑洞质量仅为太阳的 3.8 倍

今年 4 月，美国宇航局戈达德太空飞行中心尼可拉-沙波斯尼科夫等天文学家发现了宇宙中最小的黑洞。该黑洞位于 XTE J1650-500 双星系统之中，质量仅为太阳的 3.8 倍，直径只有 24 公里左右。这个最小的黑洞是在银河系天坛星座中一个双星系统中发现的。天坛星座是南半球靠近矩尺座及望远镜座的一个星座。美国宇航局罗希 X 射线时变探测器(RXTE) 2001 年发现了此双星系统，之后天文学家很快认识到此系统中有一个相对轻型黑洞。但此黑洞的质量一直没有进行精确的测量。沙波斯尼科夫说，“这个黑洞真正推进了最小黑洞的极限。多年来天文学家一直想知道最小黑洞的大小是多大，如今这个黑洞的发现是回答这一问题的一个重要突破。”

【法新社巴黎 2012 年 5 月 2 日电】科学家今天说，他们目睹了特大质量黑洞吞噬一颗与它靠得太近的恒星的罕见奇观。这种现象大约 1 万年才会出现一次。

能够吞噬物质的黑洞通常都在星系的中心处于蛰伏状态，令人难以探测，不过科学家偶尔会从它们享用恒星“大餐”过后留下的蛛丝马迹中探寻到其踪迹。

美国哈佛史密森天体物理学中心的研究员赖恩·乔尔诺克说：“黑洞给公众留下了一种错误的印象，人们将它们视为永恒的杀戮机器，就像鲨鱼一样。”

他说：“事实上，它们在大多数时候都是安静的。偶尔有恒星离它们太近时，才会开启饕餮盛宴。”如果恒星运行到距离黑洞太近的位置，黑洞的引力会先将其撕碎，然后吞噬，恒星被撕碎后产生的气体因摩擦而被加热，并开始发光，从而泄露了这个沉默杀手的藏身地点。乔尔诺克和同事在 2010 年 5 月通过架设在夏威夷哈莱阿卡拉山上的望远镜和美国航天局的卫星观测到了这样的发光。

科学家说，发光点的亮度在 2010 年 7 月达到顶峰，在之后一年里逐渐熄灭。这项研究的负责人之一、美国约翰斯·霍普金斯大学的苏薇·热扎里说：“起初我们不知道这团亮光到底是什么，因为它太亮了，以至于当我们观察这个星系时，根本看不清星系中的恒星，因而无法确定这个星系离我们有多远。”

几个月的观测让研究小组断定，这个黑洞位于距离地球 27 亿光年以外的一个星系的中心，它的质量是太阳的 300 万倍，与位于银河系中心的黑洞的大小相当。

被它吞掉的可能是一颗处于生命后期的红巨型阶段的恒星，它不小心进入了与这个黑洞相距 1/3 个天文单位的范围内。一个天文单位相当于 1.5 亿公里，是地球与太阳之间的距离。热扎里说：“这是我们第一次真正拥有足够详细的信息来确定被黑洞撕裂的是哪种恒星，以及这个黑洞到底有多大。”她说，这是科学家

首次从头到尾观测到这样的太空奇观，“这非常令人兴奋，因为我们可以通过这一过程的持续时间来判定这个黑洞的大小”。科学家的结论是，被吞噬的恒星在前一次经过这个黑洞附近时已经被扯掉了氢外壳，在第二次经过黑洞附近并被吞噬时只剩下了氦核。热扎里说，包括太阳在内的银河系恒星距离黑洞都非常远，没有被吞噬的危险。“我们要想看到银河系的黑洞吞噬恒星，至少需要等上1万年”。

附录 3：天文学家发现目前堪称最大最古老的黑洞(图)

<http://www.sina.com.cn> 2004 年 06 月 30 日 07:52 新浪科技



这个宇宙巨人位于遥远的星系中央



它在大爆炸后十亿年内就形成了



它不断吞噬宇宙物质来壮大自己

新浪科技讯 北京时间6月29日消息,美国斯坦福大学的天文学研究小组在遥远的宇宙中发现了到目前为止堪称最庞大最古老的黑洞。其质量是太阳质量的100多亿倍,这意味着这个被称为Q0906+6930的黑洞能够在自己的引力场中吸纳上千个太阳系,其质量也相当于银河系内所有恒星的质量之和。

这个巨型黑洞位于大熊座星系中央,与地球的距离约为127亿光年。据来自斯坦福大学的罗格-鲁曼尼表示,科学家们初步确定这个黑洞的年龄约为127亿岁,也就是说,它在“大爆炸”之后10亿年内就已经形成了。

然而,令天文学家们疑惑不解的是这个巨型黑洞是如何在如此短暂的时间内聚集如此之巨的质量的。据罗格-鲁曼尼教授解释称,为了揭开这个庞然大物的质量之谜,天文学家们使尽了全身的解数---包括测量微粒的运动速度和多普勒效应强度(离我们远去的天体发出的光波长变长,谱线向红端移动,这种现象叫多普勒效应。--译者注)。

众所周知,黑洞是看不见的,因此科学家们只能依靠它发出的辐射和对相邻恒星的万有引力作用来判定它的存在。一般来讲,天文学家们将黑洞分为两类:星状黑洞和超大质量星状黑洞。星状黑洞由质量相当于几个太阳的恒星坍缩形成,而超大质量星状黑洞的质量则可达十亿个太阳质量。

罗格-鲁曼尼认为,研究这类奇异的天体有助于更好地研究宇宙的构成。(编译/久亮)

2、彭罗斯和霍金的争论

长期以来,人们认为黑洞会吞噬一切。1974年,霍金通过研究黑洞外的量子力学,发现黑洞不仅能够吸收黑洞外的物质,而且能以热辐射的形式向外“吐出”物质这一量子力学现象,Hawking推导出了Bekenstein的黑洞熵公式,并确定了比例系数,这就是所谓的Bekenstein-Hawking公式: $S = k (A/L_p^2) / 4$,式中k为Boltzmann常数,它是熵的微观单位,A为黑洞视界面积, L_p 为Planck长度,它是由广义相对论和量子理论的基本常数组成的一个自然长度单位(大约为 10^{-35} 米)。由于黑洞在向外蒸发物质的同时,温度也随之升高;黑洞不断地向外蒸发物质,它的温度越来越高,蒸发越来越快,最后将以大爆炸的形式向外吐出所有的物质而结束它的生命。黑洞一旦形成就会“蒸发”辐射出能量,同时损失质量,称为霍金辐射,亦称黑洞蒸发。黑洞辐射的预言是把爱因斯坦广义相对论和量子原理合并的第一个非平凡的结果。它显示引力坍缩并不像过去以为的那样是死亡的结局。黑洞中粒子的历史不必在一个奇点处终结。相反的,它们可以从黑洞中逃逸出来,并且在外面继续它们的历史。量子原理也许表明,人们还可以使历史避免在时间中有一个开端,也就是在大爆炸处的创生的一点。霍金这一理论是黑洞研究中的一个重大进展。但与此同时,霍金在1976年的另一篇论文中对此的阐述是:黑洞辐射并不含有任何黑洞内部的信息,在黑洞损失殆尽之后,所有信息都会丢失。而根据量子力学的定律,信息是不可能被彻底抹掉的。这与霍金的说法似乎产生了矛盾,这就是“黑洞信息悖论”;而劳伦斯·M·克罗斯把它称为“怎样调和黑洞蒸发与量子力学?”仅是表达“黑洞信息悖论”如何解答的进一步说法。黑洞信息丧失问题上的争论,首先由彭罗斯和霍金引起。这是因为在奇点和奇环是不同拓扑结构问题上,霍金和彭罗斯采取了不同的立场。霍金的宇宙,永远膨胀类似一个球面;反之,收缩也应是球面,而球面是有奇点的。而彭罗斯利用扭量理论理解的宇宙是复数的;扭量理论迈向了实、虚、正、负、零五元数量子时空,是一次飞跃,但扭量理论对复数的量子时空,仅用共形投影的黎曼球来处理,这是

不完整的,所以扭量理论至今发展不大。如果复数量子时空的虚部分,可以看成是在“点内空间”,黎曼球的整个球面或者半个球面占据的地方,就类似一个环面。

1、史瓦西黑洞是球对称的,是有奇点的。转动的克尔黑洞,内部有一个奇环,是没有奇点的。另外,带电的纽曼黑洞或既带电又旋转的克尔-纽曼黑洞,有复杂的奇环结构,也是没有奇点的。

2、霍金认为,如果在宏观黑洞中信息丧失,那么信息也应在因度规量子起伏出现的微观的虚黑洞过程中丧失。在霍金看来,事件视界的出现和内禀引力熵的存在,以及相伴随的量子纯态向混合态的演变,在原来的量子不确定基础上引入了额外的不确定性。

3、这里如果用虚黑洞的方生方灭,来理解纯态向混合态的演变,霍金思维和彭罗斯的扭量思维是等价的。从相互作用实在论的立场看,虚过程和所谓的可能发展趋势,是相对于实过程来定义的。如果把波函数相位视为信息,虚过程丧失的只是相位信息。

4、彭罗斯认为虚黑洞对的涨落,会导致量子体系的相空间体积和信息的丧失,而作为量子测量的R过程,会导致波函数塌缩并引起相空间体积的补偿增益,而且这个过程不是时间对称的。如果上述过程是时间对称的,应该容许封闭量子体系内有白洞出现,但他认为这违背热力学第二定律;而真正的量子引力论一定会涉及时间不对称性。其实彭罗斯忽视了类似大小相等、方向相反而对称的力线,也可以不作用在同一点上。即量子理论的“时间对称”曾被笼统地理解了。虚黑洞可以有时间是对称的,也可以有时间不是对称的。宇宙大爆炸,就类似虚数的封闭量子体系运动到“零”出现的白洞。或者如霍金认为,在一定程度上,量子力学的霍金辐射可被看作是经典的物质被黑洞“吞没”的时间反演。

5、在量子宇宙学中,霍金将黑洞的熵与时空拓扑的变化联系起来,也是与彭罗斯的设想是一致的。彭罗斯的扭量复数量子时空,认为黑洞产生的概率是与量子测量得到的信息量非定域地关联在一起的,即使不出现黑洞,量子测量也能进行。而霍金按照费曼路径积分的方法来理解量子理论,一个粒子不像在经典理论中那样,不仅只有一个历史;相反地,它被认为是通过时空中的每一条可能的途径,每一条途径有一对相关的数,一个代表波的幅度,一个代表它的相位。粒子通过一指定点的概率是将通过此点的所有可能途径的波叠加而求得。但人们不是对发生在你我经验的“实”时间内的路径求和,而是对发生在所谓的“虚”时间内的粒子的路径求和,把波加起来,这就是量子场论中的维克旋转,用 it 代替 t 实现时间轴的旋转,同时把闵可夫斯基空间翻译成欧氏空间,在欧氏理论中量子场论的某些表达式(譬如路径积分)可被更好地定义。霍金进一步把“维克旋转”运用到洛化度规这一类弯曲时空的度规中,以便得到欧氏度规的空间的更高水平上的维克旋转。

即依据霍金的说明,要用费曼的历史求和方法确定宇宙波函数,在数学上非常困难,要运用鞍点近似和维克旋转等数学技巧,这就要求时间值取虚值,并且虚时间所对应的度规还要周期等同。在实时间中,只能朝着时间将来的方向前进,或沿着时间将来方向夹一个小角度的方向前进,在这个方向上不可避免地会遭遇奇性,实时间在此到达尽头,而虚时间和实时方向夹直角,在虚时间中就可转弯绕过奇性了。在霍金看来,虚时的引入意味着时间和空间之间的差别完全消失了;在欧几里德时空里,在时间方向和空间方向之间没有任何区别,而在闵氏时空或普通弯曲时空中,所有点上的时间方向都位于光锥里,而空间方向则位于外面。霍金认为,在普通量子力学中虚时和欧几里德时空的运用,仅仅视作一种计算实时空答案的数学方法的理解。但是,霍金同时又推测对虚时间概念作实在论解释的可能性,认为虚时间很可能比实时间更基本,广义相对论中的实时间在合理的因果性和物质分布的条件下不可避免地导致奇点,而量子引力论中的虚时间可以回避奇点,从中可以延拓出实时间,很可能是更为基本的时间概念。这里,实际是霍金超越或解读了彭罗斯的扭量时空理论。

6、其实量子引力作用量,虚时间的引入平心而论,就类似在“点内空间”的事情,而且这只不过在强化实在性结构。实际上各种描述,包括真空和物理场在内的非实物的相互作用量,就都预设了类似“点内空间”的物质过程的存在,这在不同的理论中,可以指称不同类型的真空态量子场,它们的物理场及其涨落也可以不同,其宇宙的边界条件也就自然成了它没有边界。而有了无边界条件和虚时间,通过对宇宙所有可能的时空度规求和,也能类似如霍金找到那个理想化宇宙波函数,即“点内空间”能更多更好描写一个没有物质只有宇宙常数的理想化宇宙自发创生的过程。这个过程可想象成半个欧氏四维球面或环面,或者旋转的整个球面或环面。这里也能满足彭罗斯需要的,把场论分解为正频和负频部分,因这实际是指趋向于零的正虚数与负虚数频部分、正实数与负实数频部分。

7、不管是牛顿还是 Einstein 引力公式,对质量巨大的星体,都会形成将三维空间分为两个区域:一个是以称之为视界的二维光滑曲面为边界的内区域;一个是以视界以外的渐近平直的外区域;而且要求内区域中的点不能与外区域中的任何点通信息。球面和环面拓扑结构不分的人,认为只要与坐标系的选择无关,就

能反映时空的内在性质，而不必区分奇点和奇环的存在，或者认为在奇点和奇环处，就都只是时空的曲率无穷大（弯曲程度无穷大），物质的密度也无穷大。

由于他们只是希望时空中最好不存在奇点，也就推测真实的时空中没有奇点。其实这是对的，情形也简单，只要了解宇宙大爆炸类似起于奇环就行。因为上述奇点的出现，是由于他们把时空的对称性只想象得如球面造成的。彭罗斯也认为，只要 Einstein 的广义相对论正确，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。而霍金参加进来，只是补充了另外的证明。不过，彭罗斯提出了“宇宙监督假设”来改善奇点的处境。他提出，“存在一位宇宙监督，它禁止裸奇点的出现”。也就是说，“宇宙监督”要求奇点必须包含在黑洞里面，这样生活在黑洞外面的人，不会受到奇点的“不良”影响。因为任何信息都不可能跑到黑洞外面来。

8、但研究也表明，裸奇点出现时，黑洞的温度会处在绝对零度。因此这位“宇宙监督”很可能类似就是热力学第三定律。奇点定理表明，时空中至少存在一条具有如下性质的类光（光速）或类时（亚光速）曲线，它在有限的长度内会断掉，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。即“奇点”就是时间过程断掉的地方。彭罗斯等人相信真正的量子引力论应该取代奇性处的时空的目前观念，以一种明晰的方式来谈论经典广义相对论中的时空奇点。彭罗斯主张把实际的“奇异点”以及“无穷远处的点”，也就是理想点合并到时空中去。例如，令 IP 是不可分解的过去集。“过去集”是包括自身过去的一个集合，类似宇宙“膜”外的“点外空间”或“膜”内的“点内空间”。“不可分解”是指它不能被分离成两个互不包含的过去集合，即“点外空间”和“点内空间”不能被分离成两个互不包含的集合。IP 有两个范畴，即 PIP 和 TIP。一个 PIP 是一个正规的 IP，即一个实际时空点的过去。一个 TIP 是一个终端的 IP，而不是时空中的一个实际点的过去。TIP 是未来理想点的过去。如果这个理想点“在无穷”，则称为 ∞ -TIP，类似“点外空间”；如果这个理想点是奇点，称为奇性 TIP，类似“点内空间”。彭罗斯指出，为了使一切分类行得通，我们必须假定没有两点有相同的未来或相同的过去。这样一来，黑洞内部的那些封闭类时线在彭罗斯看来可能是没有物理意义的数学虚构；即使它们是实在的，由于被视界所包围，因果性和时序的混乱也不会影响黑洞外部的物理过程。霍金后来也提出“时序保护猜想”，认为时空的真空量子涨落必然会堵塞封闭类时线构成的虫洞或时间机器；而且，霍金从量子论的费曼图计算中得出 Godel 宇宙解出现的概率趋向于零。

9、彭罗斯相信在引入宇宙监督假设后，经典广义相对论可以保证因果性和时序。而霍金却相反，他认为在引入虚时和无边界条件，“点内空间”也可以倾向于一个闭合的宇宙；当然这仅是相对于他认为经典的广义相对论无法给出明确的时间箭头而说的。而彭罗斯认为，大爆炸奇性不同于黑洞奇性，由韦尔曲率假设，初始奇点（大爆炸）的韦尔曲率为零，而终结奇点（大挤压和黑洞）的韦尔曲率可能会发散；两种类型的奇性也许满足完全不同的定律，可能量子引力对于它们的定律是完全不同的。其实，这不是怀疑统一场论的可能存在，不是否定宇宙演化遵循统一的规律。彭罗斯和霍金的不同理解，都是把连续统中实数与虚数分开的，都是对的。例如，霍金认为，这种分开后，奇点的经典分类对于量子引力定律是无意义的。实际上，如果在宇宙“膜”内考虑引力熵和韦尔曲率假设的联系，热力学第二定律也可以从物质系统趋向稳定运动分布的这一更普适的事实中推导出来。

第三章 黑洞的存在性质疑

1、席瓦西度规并没预言黑洞一定存在-----黑洞不存在的一个简单证明

1916 年，在爱因斯坦广义相对论发表后不久，施瓦西推导出爱因斯坦场方程的一个准确解——施瓦西解。这个解给出了对静态球对称黑洞，即施瓦西黑洞的描述，这标志着用广义相对论研究黑洞的开始。

1930 年，印度学者钱德拉塞卡(Chandrasekhar)提出了恒星演化过程的临界质量的概念，钱德拉塞卡证明：白矮星仅当其质量小于 1.4 倍太阳的质量时才是稳定的，任何恒星在演化结束时的质量若超过这个数值，将会继续塌缩下去，现在人们将这个数值称为钱德拉塞卡极限。1932 年，朗道(Landau)也独立地得到了钱德拉塞卡极限，并进一步推测恒星内部可能存在着中子核。这个工作直接导致了奥本海默(Oppenheimer)的中子星理论。

1939 年，奥本海默等人提出了天体演化中可能存在中子星，并根据广义相对论进一步推测，当某个时空弯曲得非常厉害的时候，光线将不能从这个区域逃离到远方，在远方的观测者看来，这个区域将是一颗看不见的“暗星”。【3】奥本海默的“暗星”也就是今天人们所说的黑洞。

无论是施瓦西对黑洞的数学描述，还是奥本海默对黑洞所做的物理预测，并没有得到普遍的认同，许多物理学家，例如爱因斯坦和爱丁顿，都对黑洞表示过明确的反对。爱因斯坦虽然得到了广义相对论的精华——爱因斯坦场方程，但是他本人还是对黑洞抱着怀疑态度。爱因斯坦和爱丁顿这两个当时科学界的巨人对黑洞十分抵制，虽然他们在推进相对论引力理论发展中有着十分重要的作用。奥本海默，和惠勒一起是与爱

因斯坦、爱丁顿齐名的几个重要理论物理学家之一，对黑洞的看法和惠勒一样，认为是存在的。于是奥本海默和惠勒向致密星以及爱因斯坦、爱丁顿对黑洞不可能存在的理论发动了挑战。1939年，爱因斯坦在一篇文章中专门论述了施瓦西黑洞在物理时空中不可能存在。

在这篇文章里，爱因斯坦利用狭义相对论的一个规律——任何物体的速度不能超过光速，解释了施瓦西黑洞不能存在的原因。虽然，用今天的眼光看，爱因斯坦的论述并不完美，然而这篇文章中所包含的一个思想，即施瓦西黑洞如果存在，必然与狭义相对论中任何物体的速度不能超过光速这一规律相矛盾，这一观点对我们今天研究黑洞仍有重要的价值。

在20世纪60年代以前，大多数物理学家们都持有与爱因斯坦相同的观点。但是到20世纪60年代中期，人们对黑洞的态度发生了转变，造成这一情况的原因有两个：

第一个原因是脉冲星的发现。1967年，脉冲星的发现表明奥本海默对中子星的预测是正确的，于是人们开始对他的另一个预测——黑洞产生了兴趣。

第二个原因是奇点定理的证明。在1965年至1970年之间，彭罗斯和霍金证明了几个奇点定理，他们得出：在广义相对论中奇点是不可避免的，即只要爱因斯坦的广义相对论正确，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。

由于上面两个原因，导致一些物理学家开始改变他们的观点，他们认为广义相对论是正确的，奇点是不可避免的，于是与奇点密切相关的“暗星”有可能是存在的，惠勒还给“暗星”起了一个新名字“黑洞”。自此之后，黑洞逐渐成为物理学的一个热点。

从1916年至今已将近100年了，回顾黑洞研究的这段历史，我们不难发现，在20世纪60年代之前的50年，大多数物理学家并不相信黑洞，他们的一个理论依据是：爱因斯坦狭义相对论是正确的，任何物体的速度不能超过光速，并由此得出在真实的物理时空中，不应该存在黑洞。在20世纪60年代之后的50年，大多数物理学家又改变了观点，他们相信黑洞存在，其理论依据是：爱因斯坦广义相对论是正确的，根据这个理论奇点不可避免，于是得出与奇点密切相关的黑洞似乎应该存在。

现在又出现一个令人困惑的问题，为什么爱因斯坦狭义相对论和广义相对论在黑洞问题上会产生矛盾，宇宙中真的存在施瓦西黑洞吗？

黑洞是广义相对论的一个预言，同时也是物理学中一个有争议的问题。虽然黑洞是爱因斯坦广义相对论的预言，但是，爱因斯坦本人却拒绝接受这一结果，1939年，爱因斯坦专门写了一篇文章，论述施瓦西黑洞在真实的物理时空中不会存在。【1】然而，最近几十年，一些理论物理学家，在黑洞是否存在这一问题还没有确定的情况下，从数学上推导出黑洞的许多性质。用霍金的话说：“黑洞是科学史上极为罕见的情形之一，在没有任何观测到的证据证明其理论是正确的情形下，作为数学的模型被发展到非常详尽的地步。”【2】

我们知道，对于静态的球对称物质，其引力源外的度规是

$$d\tau^2 \equiv ds^2 = \left(1 - \frac{2GM}{r}\right) dt^2 - \frac{1}{1 - \frac{2GM}{r}} dr^2 - r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2) \quad (1)$$

τ 是固有时，即固定在该质点上的钟的记时。因为度规应是连续的时空坐标的函数，所以(1)应能适用于引力源边界上的质点。因此对于半径为 R 的引力源边界上的一个静止质点来说应有

$$d\tau^2 \equiv ds^2 = \left(1 - \frac{2GM}{r}\right) dt^2 = \left(1 - \frac{2GM}{R}\right) dt^2 \quad 1 - \frac{2GM}{R} \geq 0$$

。因此必有 $1 - \frac{2GM}{R} \geq 0$ 。所以对于在引力

源外 ($r > R$) 沿径向运动的光子来说有

$$0 = d\tau^2 \equiv ds^2 = \left(1 - \frac{2GM}{r}\right) dt^2 - \frac{1}{1 - \frac{2GM}{r}} dr^2$$

， 即

$$v^2 \equiv \left(\frac{dr}{dt}\right)^2 = \left(1 - \frac{2GM}{r}\right)^2 > 0$$

这说明源外的光速不能为零，静态黑洞不存在。对于沿径向振荡的源来说，其边界上的点必有静止的一

$$1 - \frac{2GM}{R} \geq 0$$

瞬间，同样有 $\frac{2GM}{R}$ ，因此振荡的引力源也不导致黑洞。收缩的源边界上的点总有静止的时后，因此收缩的源也不会导致黑洞。膨胀的源最终解体也不会导致黑洞。总之席瓦西度轨并没真正地预言黑洞一定存在。以往忽视了引力源的作用，才出现了有黑洞的错误预言。

参考文献:

【1】Einstein, A., On a stationary system with spherical symmetry consisting of many gravitating masses. Ann. Math. 1939, 40, 922-936.

【2】霍金 S W. 时空简史。许明贤，吴忠超，译。长沙：湖南科学技术出版社，1994。

【3】Oppenheimer J R, Snyder H. On continued gravitational contraction. Phys. Rev. 1939, 56: 455.

附录：推翻现代宇宙学说 宇宙间可能根本不存在“黑洞”

简单说来，黑洞就是空间中的一个点，它的万有引力趋于无限大。在距离黑洞中心一定范围之内，它的引力大得连光都无法逃脱，这个范围就是所谓的“视界”(event horizon)。1974年，理论物理学家史蒂芬·霍金提出，量子物质能够以某种“狡猾”的方式逃出黑洞。他认为，粒子-反粒子对有一定的随机几率能够瞬间以实物形式“跨”于“视界”之上——其中一个坠入黑洞，另一个则将能够自由。这就是著名的“霍金辐射”(Hawking Radiation)。这一理论表明，黑洞并非只进不出，它可以缓慢地释放出一些物质，被吸入黑洞的一切事物都最终能在几十亿甚至几万亿年后“重见天日”。

这样看来，黑洞就成了一个矛盾体：即“密不透风”，又有所疏漏。这个两难的问题已经困扰了科学家40年之久。

在最新的研究中，美国凯斯西储大学(Case Western Reserve University)的物理学家 Lawrence Krauss 和同事构建了一个复杂的数学公式，能够证明黑洞并不存在。Krauss 表示，公式的关键在于引入了爱因斯坦提出的时间延缓效应(relativistic effect of time)。

爱因斯坦在广义相对论中指出，飞向黑洞的宇宙飞船中的乘客会感觉到飞船在加速，而在黑洞外部的观测者看来，飞船的速度却在变慢。而当飞船到达“视界”时，这个速度可以慢到观测者认为飞船似乎会永远停在那里，但永远不会被湮没。Krauss 表示，时间能够在那个点上停止下来，这就意味着时间对于黑洞而言是无限的。如果黑洞会不断向外释放物质，质量逐渐减少，那么它们在形成之前就已经蒸发消失了。他说，这就好比是向一个没有底的瓶子里倒水，永远倒不满。

Krauss 表示，没有人真正见过黑洞。科学家会认为宇宙中遍布着黑洞，可能是由能够产生巨大引力的特大质量恒星遗骸引起的类似效果。实际上，Krauss 不是第一个这样认为的人。2005年3月，美国天体物理学家乔治·钱普拉因表示，宇宙中没有黑洞，所谓黑洞是由“暗能量”组成的巨大星体(参见更多阅读4)。而在2006年7月，另一位美国科学家席尔德也发现了一个一直被当作黑洞的类星体(参见更多阅读5)。

NASA 戈达德空间飞行中心(Goddard Space Flight Center)的天文学家 Kimberly Weaver 评论说，人们对黑洞和宇宙的认识不会如此之快。尽管她十分欣赏凯斯西储大学科研小组所描述的结论，但问题是人类目前的观测还没有找到任何能够支持这一观点的事实证据。Weaver 说，天文学家确实在银河系中央的超大黑洞附近观测到星际物质毫无踪迹地消失。不过，到目前为止，也没有人真正探测到“霍金辐射”，找到黑洞蒸发的证据。(科学时报)

2、黑洞的存在性质疑

“黑洞”理论家们正是把牛顿的“万有引力”绝对化，只强调宇宙物质相互吸引的一面，避而不谈物质吸在一起之后的离异与“蒸发”，只强调“万有引力”定律的数学结果，而回避“万有引力”造成的物理演化，只看到“万有引力”趋势所接近的极限，而不思考接近这一极限时出现的必然转化。因此，“黑洞”理论不是物理学说，而是片面的数学理论，是“万有引力”悖论群中的一种。近几十年来，随着“相对论”物理学的走红，“黑洞”这一传统“引力佯谬”又繁衍了一些现代版的“引力悖论”。一些“科学家”相信，支配宇宙运动的唯一力量是“万有引力”，在前宇宙时期，这种力曾经把整个宇宙星体吸在了一起，成了一个超大无比、独一无二的宇宙体，因为它质量太大，表面的地块不断向中心挤压，造成了一层层引力坍塌，最后塌缩成了一个半径为0的宇宙奇点，这个奇点包含了全部宇宙的热量、质量与能量。150亿年前，这个宇宙奇点再也忍受不住宇宙引力的禁锢，以“大爆炸”的形式来释放它内部的热量、质量与能量，最后就

形成了我们现在所居住的宇宙。另一个版本的解释是，“万有引力”并没在奇点形成后失去作用，而是继续吸引收缩，只不过这时的引力矢量换向，由原来的实数值变成了虚数值，宇宙由半径为0的奇点状态向半径为负值的虚数状态演进，这种虚数宇宙就是“白洞”。

有关黑洞方面的研究，大体有两类问题：①关于黑洞是否存在的问题。②如果黑洞存在，它具有什么性质。目前有关黑洞的研究，大多属于第二类问题。即在假设黑洞存在的前提下，得出许多有关黑洞的性质，然而对黑洞是否存在这个问题，目前还没有一个明确的回答。显然，目前黑洞研究存在一个问题：人们在黑洞是否存在这个问题尚未解决之前，就花费了大量的时间和精力研究黑洞的各种性质，例如，量子力学性质或热力学性质。我们认为，黑洞是否存在这个问题，应该是黑洞研究中首先解决的问题。这个问题不解决，即使研究得出黑洞的许多性质，一旦最终证明宇宙中根本就不存在黑洞，这些研究都将失去意义。

Einstein并不相信黑洞，查普林争辩道，“不幸的是，他不能清楚地说明为什么。”爱因斯坦自己就说过：“对于很大的场密度和物质密度，场方程以及这些方程中的场变数，都不会有实在意义……这些方程不可扩展到这样的一些区域中去。”【1】]对此，霍金也说：“广义相对论导致了自身的失败，它预言它不能预言宇宙。”1970年，彭罗斯和霍金证明了：如果广义相对论正确，那么，时空一定存在奇点。这里所谓的奇点，就是场密度和物质密度趋向无限大的点，这是广义相对论局限性的一个表现。

在广义的相对论中，并没有一种所谓的“格林尼治时间”让其它地方的时钟以同样的速度转动。相反，在不同的地方，重力让时钟以不同的速度运转。但量子力学主要是描述细微空间中的物理现象，因而它只有在宇宙通用的时间的前提下才会体现其理论价值，否则就没有任何意义。这个问题在“视界(event horizon)”——黑洞的边界尤为显著。对于一个遥远的观察者而言，这里的时间看似是静止的。一艘掉入黑洞的飞行器在遥远的观察者看来，似乎永远地陷在了黑洞的边界；但飞船中的宇航员们却能感觉到自己在继续下降。“广义相对论预示，黑洞边界并没有发生任何变化。”查普林说。然而，早在1975，量子物理学家们曾经提出争议：在黑洞边界确实会发生奇怪的事情：遵守量子法则的物质对轻微干扰变得极为敏感。“这一结果很快地就被忘记，”查普林说，“因为它与广义相对论的预言不符。但是实际上，它是完全正确的。”他认为，这种奇怪的活动正是时空“量子相变(quantum phase transition)”的证据。卓别林认为，死亡后的恒星并不会简单地形成一个黑洞，而是在该时空内部，充斥着暗能量，而且这具有一些有趣的重力的效应。

查普林称，暗能量星的“表面”外看，它的“行为”与黑洞十分相似，能够产生强大的重力牵引。但是内部，暗能量的“负”重力可能会引起物质重新反弹回来。而且查普林预言，如果暗能量星足够的大，任何反弹出的电子将会被转变成为正电子，它将在高能辐射中消灭其它电子。卓别林表示，这种情况可以解释我们观察到的银河系中心辐射现象。而此前对于这种现象，天文学家们认为是银河系中存在着一个巨大黑洞的证据。

查普林还认为，宇宙可能充满着大量“原始”的暗能量星。这类星体并不是由恒星死亡而形成，而是由于时空自身的波动起伏所导致的，就像是从冷却的液态气体中自然冒出的气泡。这些与普通物质一样具有重力效应，但是无法被观察到，它们就是人们经常提到的暗物质。

1974年，霍金通过研究黑洞外的量子力学，发现黑洞不仅能够吸收黑洞外的物质，而且能以热辐射的形式向外“吐出”物质这一量子力学现象。由于黑洞在向外蒸发物质的同时，温度也随之升高；黑洞不断地向外蒸发物质，它的温度越来越高，蒸发越来越快，最后将以大爆炸的形式向外吐出所有的物质而结束它的生命。黑洞一旦形成就会“蒸发”辐射出能量，同时损失质量，称为霍金辐射，亦称黑洞蒸发。霍金这一理论是黑洞研究中的一个重大进展。但与此同时，霍金在1976年的另一篇论文中对此的阐述是：黑洞辐射并不含有任何黑洞内部的信息，在黑洞损失殆尽之后，所有信息都会丢失。而根据量子力学的定律，信息是不可能被彻底抹掉的。这与霍金的说法似乎产生了矛盾，这就是“黑洞信息悖论”；而劳伦斯·M·克罗斯把它称为“怎样调和黑洞蒸发与量子力学？”

另外可能存在带 electric charge 的黑洞，一个带 electric charge 的黑洞既有 electric field 又有引力场，二者都可以储存能量。例如，有人提出在带电球对称黑洞中的量子不可克隆定理，如 Susskind 等在讨论史瓦西黑洞中提出量子克隆监督，即在史瓦西黑洞中，永无可能探测到被克隆的量子信息，并进一步得出结论，量子不可克隆定理和黑洞互补原理是两个相容的理论；但如果把讨论的范围扩大到一般球对称黑洞，在带电球对称黑洞中量子不可克隆定理和黑洞互补原理也似乎存在着不可调和的矛盾。黑洞中信息的丧失以及黑洞的体积随着质量的增加，密度逐渐减小。现代物理学已经证明，一个处在稳定状态的黑洞只能有引力质量、电荷和自转角动量三个物理量，最简单的一类黑洞既没有电荷，也没有自转，而只有引力质量。既然引力质量之间同时存在着引力与斥力，那么自然界中应当不存在黑洞，而万有引力定律与广义相对论都无法排除黑洞的存在，而天文学又无法观察到黑洞。加利福尼亚大学洛杉矶分校的布拉德·汉森等人近年来却发现，在

距离银河系巨型黑洞不到 0.5 光年的星团中，却存在着许多年轻的恒星，它们的年龄都不足 1000 万年【2】。那么，它们又是如何在巨型黑洞的眼皮底下形成的呢？——显然，这是一个极为突出的矛盾！因此说，现有的关于黑洞存在证据的科学解释，并没有自圆其说！他们认定大于三个太阳质量的中子星就会被引力压缩为一个黑洞，如果按天体原子模型，中子星并不是恒星的死尸，而实际上，中子星内部能级很高，反引力很大，考虑了反引力存在以后，大于三个太阳质量的中子星，引力就不可能把这颗中子星压缩为黑洞了。

在黑洞理论中有一个定理，即黑洞的无毛(no hair)定理。这个定理表明，黑洞只有 3 个性质，即质量、电荷和角动量，只要这 3 个参数定了，黑洞的全部性质也确定了，除此之外黑洞就没有任何其他性质了。根据这个定理，宇宙中只有下面 4 种类型的黑洞。

①施瓦西黑洞：只有质量的最简单的黑洞。

②RN(Reissner-Nordstrom)黑洞：只有质量与电荷，而角动量为 0 的黑洞。

③克尔黑洞：只有质量与角动量，电荷为 0 的黑洞。

④克尔-纽曼黑洞：质量、电荷和角动量均不为 0 的黑洞。

上面这 4 种黑洞中，施瓦西黑洞是最简单也是最基本的黑洞，其他的黑洞，如果令电荷和角动量为 0，均可以简化成施瓦西黑洞。换句话说，其他几种黑洞实际上是在施瓦西黑洞基础上，再增加电荷和角动量等性质而形成的。【3】——【6】

当黑洞在其视界半径(Event Horizon)上因发射霍金辐射 (Hawking Radiation)而收缩或者因吞噬外界能量-物质而膨胀时，其视界半径上各种物理量（参数）的变化，与其内部结构和物质密度的分布无关，而只与黑洞质量 M_b 有关。从而证明：黑洞的视界半径最后只能因不停地发射霍金辐射而收缩成为最小黑洞 $M_{bm} = (hc/8\pi G)^{1/2} = 10^{-5} g = m_p$ ，即普朗克粒子时，就在普朗克领域爆炸消失。因此，黑洞就不可能在其视界内部的中心出现“奇点”。

如果万有引力定律、大爆炸理论和黑洞理论都是正确的话，那么现在宇宙的总质量为定值，宇宙的临界

密度 ρ_c 定义为 $\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G}$ (1), H_0 ——哈勃常数， G ——引力常数。现假定宇宙一个典型的区域，其体积

为 V ，内含质量 M_c ，则这个区域的平均密度 ρ_0 为 $\rho_0 = \frac{M_c}{V}$ (2), 再进一步假定这个区域塌缩成黑洞，则体积 V 是

$$V = \frac{4}{3} \pi R_g^3 \quad (R_g \text{——引力半径}) \quad (3)$$

将 (3) 代入 (2) 得

$$\rho_0 = \frac{3M_c}{4\pi R_g^3} \quad (4)$$

令 $\rho_0 = \rho_c$ ，即令 (4) = (1)，化简得：

$$\frac{M_c}{R_g^3} = \frac{H_0^2}{2G} \quad (5)$$

R_g 可表为 $R_g = \frac{2GM_c}{c^2}$ (6), 将 (6) 代入 (5) 化简得 $M_c = \sqrt{\frac{c^6}{4H_0^2 G^2}} = \frac{c^3}{2H_0 G}$ (7)。取 $H_0 = 150$ 公里/(秒·1 千万光年) (需化成 CGS 制), $G = 6.67 \times 10^{-8}$ 厘米³·克⁻¹·秒⁻², $c = 3 \times 10^{10}$ 厘米/秒, 代入 (7) 算得 $M_c \approx \pm 1.28 \times 10^{56}$ (克) (8), 相当于 6.4×10^{22} , M_\odot 的质量 ($M_\odot \approx 2 \times 10^{33}$ 克)。

参考文献：

【1】 爱因斯坦，相对论的意义，北京，科学出版社，1961，P84-85。

【2】 中国科技网：银河系中心可能存在黑洞。

【3】 R M Wald. General Relativity. Chicago: Chicago University Press, 1984.

【4】 R P Kerr. Gravitational Field of a Spinning Mass as an Example of Algebraically Special Metrics. Phys. Rev. Lett, 1963(11).

【5】 E T Newman. Metric of a Rotating Charged Mass. J. Math. Phys, 1965(6).

【6】 Hans, Stephani. General Relativity. Cambridge: Cambridge University Press, 1982.**3、现代天文学实验对于黑洞存在性的质疑**

1、美国当地时间4月2日(北京时间4月3日)消息,美国加州劳伦斯-利弗莫尔(Lawrence Livermore)国家实验室物理学家乔治-卓别林(George Chapline)表示,宇宙中并不存在着所谓的“黑洞”,并认为人们通常所指的黑洞神秘物质实际上是“黑能(dark-energy)星体”。

长期以来,黑洞已经成为了科幻小说中的重要材料之一。不少人认为,天文学家可以通过间接方式来观察到黑洞的存在,而巨型恒星死亡后就会形成黑洞。但卓别林认为,恒星死亡只会形成“黑能”物质。过去数年中,天文学家对银河系的观察表明,宇宙的70%左右是一种奇怪的“黑能”所组成,正是它们在加速着宇宙的膨胀。卓别林说:“几乎可以肯定地说,宇宙中并不存在着黑洞。”

黑洞是Einstein广义相对论中最为著名的预言之一。广义相对论解释了受巨型恒星重力影响,会导致时空结构产生扭曲的现象。该理论认为,当某颗恒星死亡后,会受自己的重力影响而缩成一个点。但卓别林却认为,Einstein本人也不相信黑洞的存在。卓别林说:“不幸的是,他也无法说出准确的原因。”而解决该问题的根源就在于20世纪物理学的另一项革命性理论:量子力学。

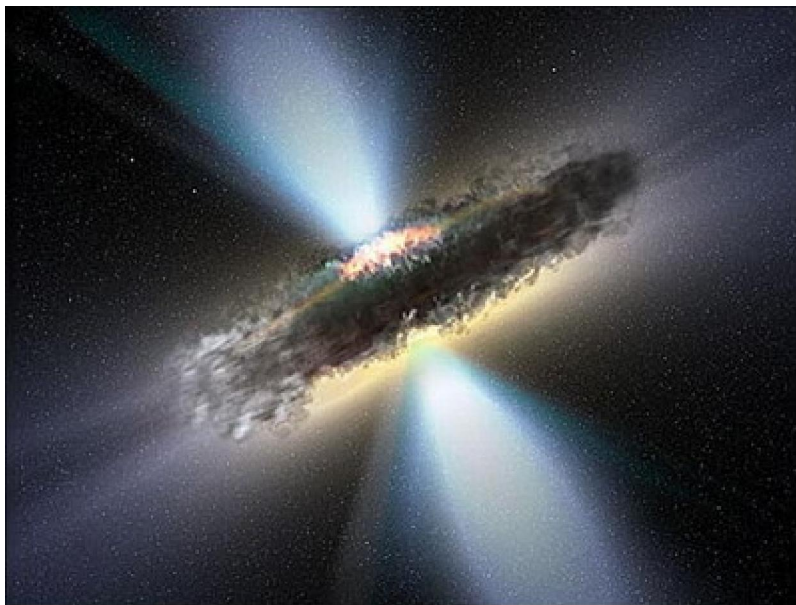
广义相对论认为,并不存在使任何一处时钟速度都相同的“宇宙时间”,相反,不同地方的重力不同,所导致的时钟速度也各不相同。但量子力学主要是描述细微空间中的物理现象,因而它只有在“宇宙时间”的前提下才会体现其理论价值,否则就没有任何意义。卓别林认为,问题解决的焦点就在于黑洞边界(event horizon)。对一个非常遥远的观察者来说,我们这儿的时间看起来会处于停止状态。同理,如果一艘飞船落入了某个黑洞之后,对遥远的观察者来说,飞船似乎被永远陷在了黑洞边界上,但飞船中的宇航员们却能感觉到自己在继续下降。卓别林说:“广义相对论预示,黑洞边界并没有发生任何变化。”

1975年期间,量子力学专家们表示,黑洞边界确实发生了一些奇怪的事情:遵守量子法则的物质对轻微干扰变得极为敏感。卓别林说:“这个发现很快就被大家忘记了,因为它不符合广义相对论的预言。然而今天看来,它却是完全正确的发现。”他认为,这种奇怪的活动正是时空“量子阶段转变”的证据。卓别林认为,死亡后的恒星并不会简单地形成一个黑洞,而是在该时空内部,它却充斥着黑能,并具备重力影响。

卓别林称,在某颗黑能星的“表面”,它看起来很象一个黑洞,并能制造强大的重力牵引。然而在它的内部,黑能的“负”重力又有可能将物质重新弹出来。如果某颗黑能星体积很大,任何反弹出来的电子转变成了正电子,然后会在高能辐射中消灭其它电子。卓别林表示,这种情况可以解释我们观察到的银河系中心辐射现象。而此前对于这种现象,天文学家们认为是银河系中存在着一个巨大黑洞的证据。

卓别林还认为,宇宙中还有可能充满了大量“原始”类黑能星,这类星体并不是由恒星死亡而形成,而是由于时空自身的波动起伏所导致。而这种星体有可能就是人们通常据说的暗物质:它们与普通物质一样具有引力,只是无法被观察到。

2、美国宇航局9月9日宣布,钱德拉X射线太空天文台监测到来自距地球两亿五千万光年的英仙座星系巨大黑洞声波的证据。这是人类首次发现黑洞可以发射声波,有媒体将此戏称为“黑洞在歌唱”。然而黑洞的“歌声”实在是太过低沉,它比钢琴的中央C低57个八度音阶,远远超出了人类的听力范围,使得人类无法直接欣赏到黑洞的“美丽歌喉”,这也是目前人类在宇宙中监测到的最低音调。“黑洞”很容易让人望文生义地想象成一个“大黑窟窿”,其实不然。所谓“黑洞”,就是这样一种天体:它的引力场是如此之强,就连光也不能逃脱出来。当英国科学家霍金根据量子力学研究物质在黑洞邻近的行为时,非常惊讶地发现,黑洞如同平常热体那样产生和发射粒子,这就意味着黑洞不是完全黑的。为了进一步研究黑洞,很多科学家把重点集中在物质被黑洞吸进之前,也就是研究黑洞边缘的情况。英国剑桥天文研究所的安迪·费边教授和他的同事研究钱德拉天文台的X射线图片时发现,英仙座星系黑洞附近的太空气体以其为中心呈同心圆排列,波的距离为3万光年,据此可确定声波的音调。科学家认为黑洞声波是由双重压力造成的。也就是说在物质被吸引进黑洞时会对太空气体产生的压力,而黑洞自身喷射物质时也会产生压力。在此之前,科学家已经发现黑洞可以发光发热,但黑洞可以发声还是首次为人类所发现。该发现除了有助于人类了解英仙座星系的形成外,还有助于解开人类多年未解的谜团,即英仙座黑洞周围的太空气体为什么不会冷却下来,形成星体。科学家认为可能是由于黑洞声波的巨大能量对太空气体加热造成的。(2005年9月18日)摘自天文探索



科学家新的研究表明，黑洞可能并不存在

没有人知道宇宙中到底有没有黑洞。从黑洞这个概念提出的第一天起，科学家关于黑洞存在与否的争论就没有停止过。尽管黑洞理论能够解释一些问题，但宇宙也变得越发“诡异”和难以捉摸。最近，美国科学家在《物理评论 D》(Physical Review D)上撰文指出，黑洞是不可能存在的。如果他们的认识是正确的，那么天文物理学将经历一次新的变革，困扰科学家 40 余年的难题也将不攻自破。

3: 美天文学家：黑洞根本不存在

2006 年 07 月 30 日 09:39:00 来源：解放日报

黑洞：宇宙中的另类

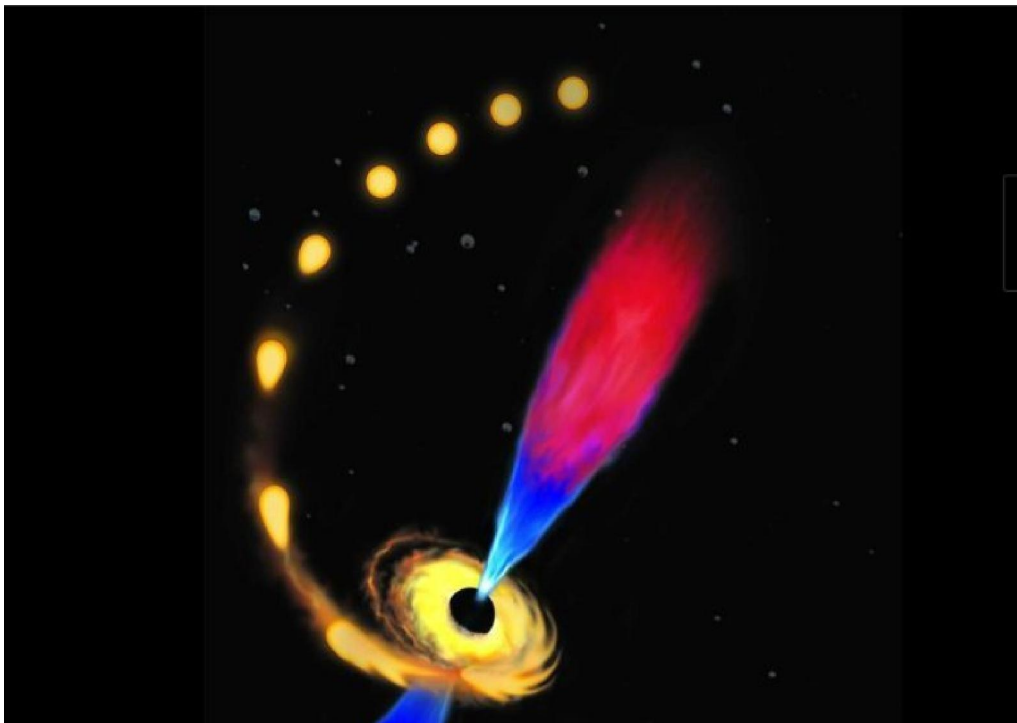
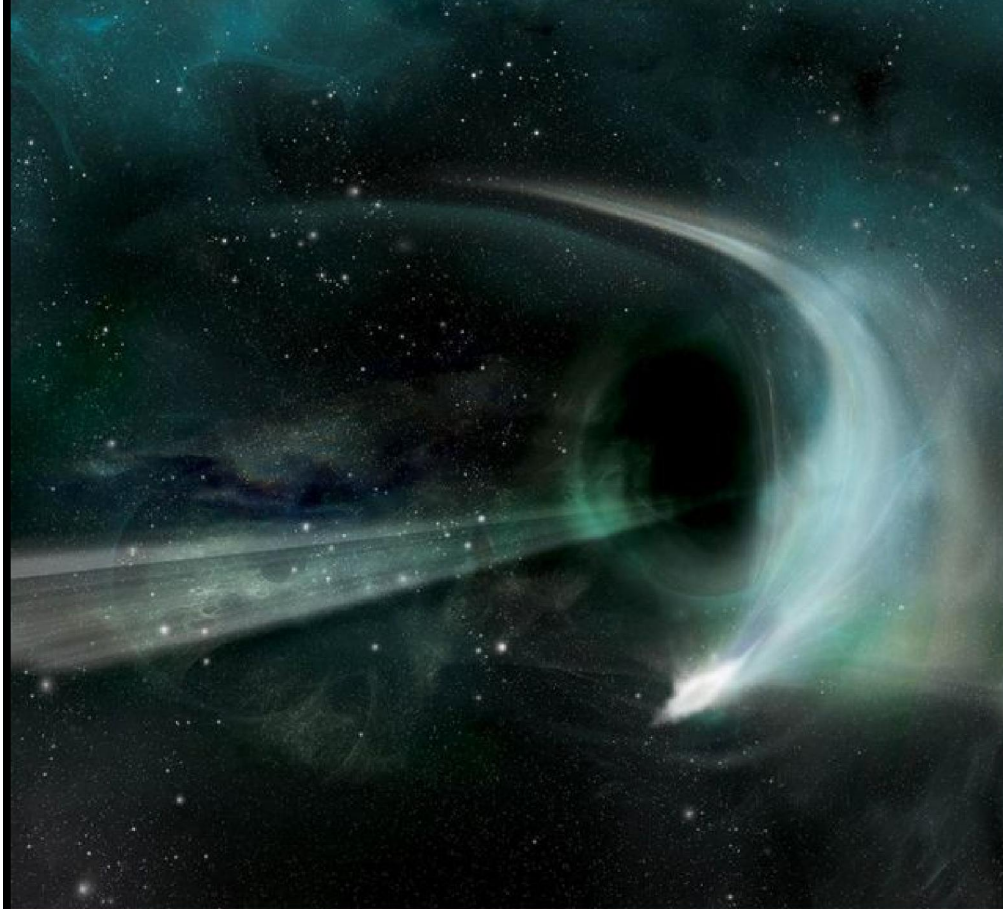
多年来，神秘的黑洞理论令众多顶级科学家心驰神往，为如何描述它而费尽心力。然而，一批美国科学家日前却提出全新的看法，认为所谓的黑洞根本是子虚乌有。据《卫报》7 月 29 日报道，提出该理论的是科学家席尔德领导的哈佛—史密森天体物理研究中心的研究小组。他们观察到在距离地球 90 亿光年以外的宇宙间有一个类星体，它有很大的红移（光源远离观测者时，接受到的光波频率比其固有频率低，即向红端偏移）并放射出大量的蓝光，而且经常还有无线电波发出。此前科学家一直相信，类星体中央便是黑洞。研究小组动用 14 部天文望远镜，对这个类星体进行前所未有的全面观察，通过分析其光谱，深入探测了其内部结构。他们发现，类星体的中央周围有一圈碟形的物质形成的洞，宽度相当于地球与太阳距离的 4000 倍。他们相信，那个洞是由一个强力磁场喷发出大量物质形成的，其中有许多等离子形成的奇特圆球体。黑洞理论最早于 1784 年由一名英国地质学家提出，后经爱因斯坦加以确认。英国著名天体物理学家霍金也在不久前进一步确定黑洞的存在。根据黑洞理论，这个可以吞噬一切的无底黑洞是没有磁场的。科研小组据此提出，类星体中央带有磁力的等离子球体的存在就排除了黑洞的可能。该研究小组的科学家莱特表示：“我相信，这是第一个能证明整个黑洞理论错误的证据。”（康娟）

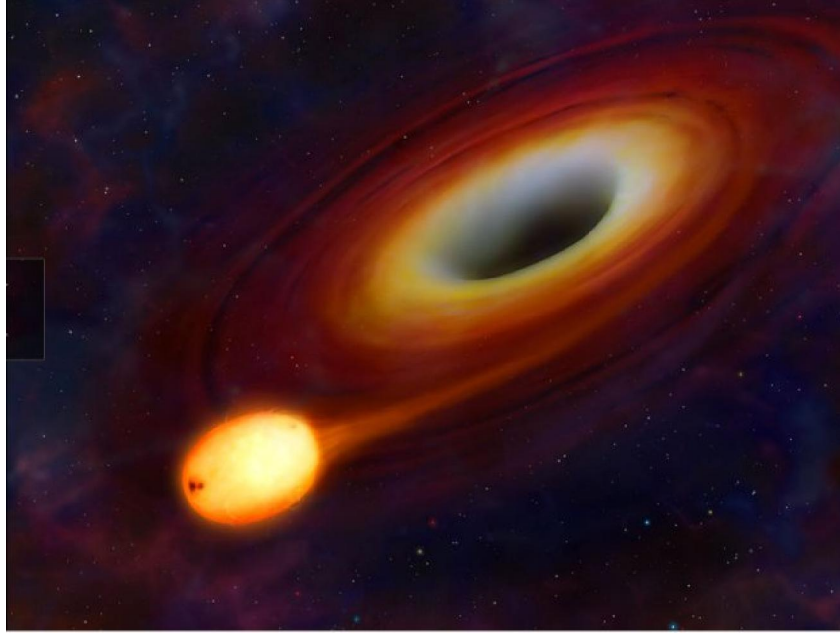
4、中国科学院吕勇军统一能量论：宇宙不存在黑洞（美国宇航局造假天龙星座的黑洞正在吞噬一颗恒星图）

（美国宇航局造假天龙星座的黑洞正在吞噬一颗恒星图）

美国宇航局造假：天龙星座的黑洞正在吞噬一颗恒星。美国宇航局雨燕伽马射线探测器扫描天龙星座时，发现其内部出现神秘能量源，大约距离地球 40 亿光年，科学家将其编号为 Sw 1644+57。这股神秘的能量来自黑洞的中心，这个现象让科学家感到非常奇异，后来被证实：这个黑洞正在吞噬一颗恒星！而且整个过程被天文学家目击到了，这是一个相当罕见并且非常特殊的宇宙事件，概率小到每 1 亿年才有可能被观测到一次。

这些图片资料是美国宇航局造假资料，宇宙不存在黑洞，更不存在黑洞吞噬恒星这种宇宙现象。宇宙的本源是宇宙能量。





附录 5: 美科学家欲推翻黑洞理论 爱因斯坦可能出错

<http://www.sina.com.cn> 2006 年 07 月 31 日 18:16 城市快报

城市快报/综合消息据《羊城晚报》报道,多年来,神秘的黑洞理论令众多世界顶级科学家心驰神往。然而,一些美国科学家日前却提出全新的看法,他们认为所谓的黑洞根本是子虚乌有。

据英国媒体 29 日报道,提出该理论的是席尔德领导的哈佛·史密森天体物理研究中心的研究小组。他们观察了一个距离地球 90 亿光年的类星体后提出这一理论。此前科学家一直相信,类星体中央便是黑洞。席尔德表示,该类星体的中央有一圈碟形物质形成的洞。他们相信,该洞是由强力磁场发射出的物质形成的。黑洞理论是 1784 年由一名英国地质学家提出的,后被爱因斯坦证实。根据黑洞理论,可以吞噬一切物质的

黑洞是没有磁场的。席尔德的科研小组据此提出，类星体中央由强力磁场发射出的物质形成的洞将推翻黑洞理论。

附录 6: 霍金推翻自创黑洞理论

据英国媒体 2014 年 1 月 24 日报道，英国著名科学家斯蒂芬·威廉·霍金教授再次以其与黑洞有关的理论震惊物理学界。他在日前发表的一篇文章中承认，黑洞其实是不存在的，不过“灰洞”的确存在。

黑洞并不存在

在这篇名为《黑洞的信息保存与气象预报》的论文中，霍金指出，由于找不到黑洞的边界，因此黑洞是不存在的。如果霍金的理论正确，黑洞核心的奇点根本就不存在，甚至不排除“一切事物原则上能逃离黑洞”这种极端局面的可能性。霍金说：“在经典理论中，黑洞不会放过任何东西；但量子理论允许能量和信息逃离黑洞。”因为现代量子物理学认定这种物质信息是永远不会完全消失的，这种说法与量子力学的相关理论出现相互矛盾之处。

30 多年来，霍金试图以各种推测来解释这一自相矛盾的观点。霍金曾表示，黑洞中量子运动是一种特殊情况，由于黑洞中的引力非常强烈，量子力学在此时已经不再适用了。但是霍金的这种说法并没有让科学界众多持怀疑态度学者信服。

现在看来，霍金终于给了这个当年自相矛盾的观点一个更具有说服力的答案。霍金称，黑洞从来都不会完全关闭自身，它们在一段漫长的时间里逐步向外界辐射出越来越多的热量，随后黑洞将最终开放自己并释放出其中包含的物质信息。

霍金认为，受到黑洞引力的影响，能量和物质先是靠近——但不会到达——黑洞中心，最终还会被释放出去。不过，它们的信息在黑洞中不会毁灭，但是被完全打乱，逃离之后面目全非，几乎无法还原。

提出“灰洞”理论

霍金的最新“灰洞”理论认为，物质和能量在被黑洞困住一段时间以后，又会被重新释放到宇宙中。他在论文中承认，自己最初有关视界的认识是有缺陷的，光线其实是可以穿越视界的。当光线逃离黑洞核心时，它的运动就像人在跑步机上奔跑一样，慢慢地通过向外辐射而收缩。

霍金同时指出，对于这种逃离过程的解释需要一个能够将重力和其他基本力成功融合的理论。在过去近一百年间，物理学界没有人曾试图解释这一过程。

对于霍金的“灰洞”理论，一些科学家表示认可，但也有人持怀疑态度。美国卡夫立理论物理研究所的理论物理学家约瑟夫·波尔钦斯基(Joseph Polchinski)指出，根据爱因斯坦的重力理论，黑洞的边界是存在的，只是它与宇宙其他部分的区别并不明显。

其实，早在 2004 年霍金就曾做出过类似表示。当年 7 月 21 日，霍金在“第 17 届国际广义相对论和万有引力大会”上指出，黑洞并非如他和其他大多数物理学家以前认为的那样，对其周遭的一切“完全吞噬”，事实上被吸入黑洞深处的物质的某些信息可能会在某个时候释放出来。

1976 年，霍金称自己通过计算得出结论，黑洞在形成过程中其质量减少的同时，还不断在以能量的形式向外界发出辐射。这就是著名的“霍金辐射”理论。但是，该理论提到的黑洞辐射中并不包括黑洞内部物质的任何信息，一旦这个黑洞浓缩并蒸发消失后，其中的所有信息就都随之消失了。这便是所谓的“黑洞悖论”。

否认存在火墙

霍金此举意在解答黑洞的“火墙”之谜。

黑洞的边界又称“视界”。经典黑洞理论认为，黑洞外的物质和辐射可以通过视界进入黑洞内部，而黑洞内的任何物质和辐射均不能穿出视界。

此前研究人员猜测过，假如一位倒霉的宇航员不幸落入黑洞将是什么情景。长久以来，物理学家以相对论为基础，默认宇航员会毫不知情地落入黑洞，在黑洞核心奇点处灰飞烟灭。后来又有科学家根据量子理论提出新的见解，认为黑洞的视界是一块类似“火墙”的高能区域，会把掉进去的宇航员直接烧焦。

霍金理论的核心内容是，量子在黑洞周围造成剧烈的时空波动，所以像“火墙”一样的边界根本不可能存在。

4: 美科学家称宇宙间不存在黑洞 引发激烈讨论

<http://www.sina.com.cn> 2006 年 08 月 02 日 14:24 新浪科技

新浪科技讯 俄罗斯彩带网 8 月 1 日消息，来自美国马萨诸塞州的哈佛-史密森天体物理学研究中心的科学家们通过观测 Q0957+561 类星体得出结论称，他们对黑洞理论的正确性表示怀疑。这是多年来天文学家们首次对黑洞理论提出疑问。

据《新科学家》杂志刊文称，哈佛-史密森天体物理学研究中心的科学家们在他们的观测中发现，Q0957+561 类星体拥有强大的磁场，这与风靡全球的黑洞基本理论很不相符。可以说，Q0957+561 类星体根本就不是一个“洞”，而是一个磁场急剧收缩体(MECO)。

根据科学家们的这一理论，宇宙间的天体就根本不会浓缩成黑洞。当某个天体变得足够密实和炽热时，其中的亚原子微粒就开始被破坏，这会导致大量的辐射产生。而引发这一事件的外部压力也开始停止作用，这样该天体就变成了一颗炽热的等离子体火球，而不会坍缩成黑洞理论描绘的那种状态。

在此次研究过程中，科学家们也采用了重力透镜效应理论(该理论认为，当观察者和被观察天体之间存在其它大型天体时，被观察天体发出的光由于受其它大型天体引力作用的影响而发生扭曲，这时观察者看到的被观察天体形状也就会发生扭曲)。研究人员发现，围绕在该类星体周围的物质盘中央有一个直径约达 4000 天文单位的“洞”。科学家们认为，这个“洞”是由中心天体强大的磁场作用形成的，也就是说，其中心是个磁场急剧收缩体，而并不是所谓的黑洞。

美国科学家们的这项研究现已引发天文学界的激烈讨论，某些科学家甚至认为，这是为传统的黑洞理论敲响的第一声丧钟。(久亮)

5/4/2017