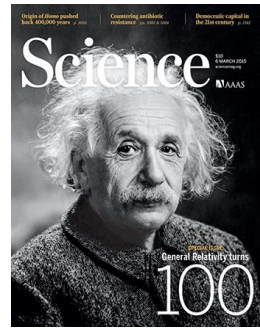


# 广义相对论——爱因斯坦的引力理论



1



爱因斯坦的《广义相对论》  
论文发表于1915年12月2日

2

爱因斯坦说：

- 狭义相对论如果我不发现，五年之内就会有人发现。
- 广义相对论如果我不发现，50年之内也不会有人发现！

3

惠勒用两句“诗”概括广义相对论：

物质告诉时空如何弯曲，  
时空告诉物质如何运动。



——物理学家约翰·阿奇博尔德·惠勒  
(John Archibald Wheeler)

4

## 1 广义相对论的两条基本原理

### 1.1 狭义相对论的局限性

牛顿力学

狭义相对论

进一步的思考

一切惯性系对  
力学规律平权

一切惯性系对所  
有物理规律平权

非惯性系与惯性系  
会平权吗？惯性系  
更优越吗？

无法在引力场中写出满足相对论假设的运动方程

时空与运动  
速度无关

时空与运动  
速度有关

时空与物质有  
什么关系？

关于惯性和引力的思考，是开启这一迷宫大门的钥匙，最终导致广义相对论的建立。

5

## 1.2 等效原理

### 1. 惯性质量与引力质量

依据牛顿第二定律定义的质量叫惯性质量

$$F = m_i a \quad m_i \text{ —— 惯性大小的量度}$$

依据万有引力定律定义的质量叫引力质量

$$F = G \frac{M}{r^2} m_g = g m_g \quad m_g \text{ —— 产生和接受引力的能力}$$

比萨斜塔实验揭示出重力场中同一地点，任何自由下落的物体都有相同的加速度。当物体在地球附近作自由落体时：

$$F = G \frac{M}{r^2} m_g = m_i a \quad a = \frac{GM}{r^2} \left( \frac{m_g}{m_i} \right) \text{ 普适常量}$$

爱因斯坦把两种质量等效提高到基本原理的高度

$$m_g = m_i \text{ —— 称为惯性质量与引力质量相等定律}$$

6

## 结论

惯性质量与引力质量相等，在引力场中自由飞行的物体，其加速度 $\vec{a}$ 必等于当地的引力强度 $\vec{g}$ 。

## 2. 惯性力与引力

### 问题

万有引力普遍存在      大量物理定律  
物质参考系总有加速度      包括狭义相对论  
真正的惯性参考系不存在      都只适用于惯性参考系  
惯性系在自然界却不存在！  
能否找到一个消除引力的真正的惯性参考系？

7

## 惯性力

观察者甲：

有重力 $\vec{G}$ 和加速度 $\vec{g}$  即  $\vec{G} = m\vec{g}$   
——牛顿定律适用

观察者乙：

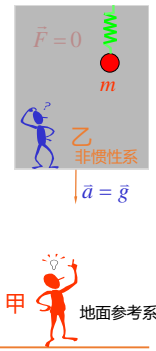
有重力 $\vec{G}$ 无加速度 $\vec{g}$  即  $\vec{G} \neq m\vec{g}$   
——牛顿定律不适用

引入虚拟力或惯性力  $\vec{F}_0 = -m\vec{a}$   
则  $\vec{G} + \vec{F}_0 = 0$

牛顿第二定律形式上成立

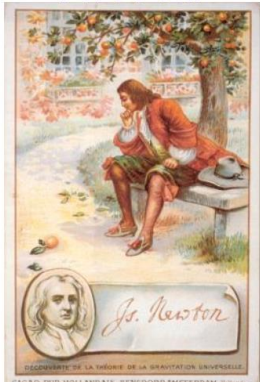
## 说明

在非惯性系中引入惯性力后，可应用力学规律。



8

## 牛顿与苹果落地



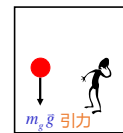
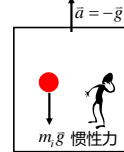
9

## 爱因斯坦两个假想实验（爱因斯坦电梯——局部惯性系）

实验一 自由空间加速电梯

比较

引力场中静止的电梯



封闭在电梯中的观察者观察小球的运动规律相同：

物体均以 $g$ 的加速度竖直下落

惯性力与引力的效应相同，无法判断小球加速下落的原因？

## 结论

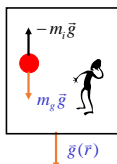
惯性力等效于引力。

10

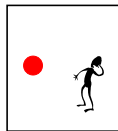
## 实验二

引力场中某一时空点自由下降的电梯（加速参考系）

远离引力场的自由空间中相对某一恒星静止的电梯（惯性系）



两个参考系中观察到的物体运动状态相同——静止或匀速运动



## 结论

- (1) 自由下落的参考系与惯性系等效。
- (2) 可以在引力场中的任何一个时空点（局部区域）找到一个在该引力场中自由下落的惯性系——局部惯性系。

11

## 3. 广义相对论的等效原理

局域内加速参照系形成的物理效应与引力场的一切物理效应等效。即一个均匀的引力场与一个匀加速参照系完全等价。

## 说明

在局部惯性系内可以将引力消除，但其它力没有这样的性质！例如：不能依靠选择参照系来消除电磁力，“引力的本性就是没有引力”。

## 1.3 广义相对性原理

### 1. 问题

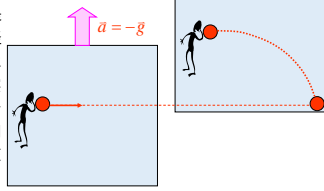
物理规律是否会受到加速参考系的影响？即非惯性系和惯性系是否平权？

### 2. 思想实验

12

在加速上升的电梯参考系中看到的物理规律与在地面上看到的相同：小球运动轨迹为一抛物线。

实验结论无法告诉你是否处在以  $a = -g$  加速度竖直上升的电梯中还是静止地站在地面上。或者说实验无法告诉你是否处在一个没有引力加速上升的密闭电梯中，还是静止地处在一个引力场中。



### 3. 广义相对性原理

一切参考系都是平权的，物理规律具有适合于任何参考系的性质，即物理规律在一切参考系中可以表达为相同的形式。

13

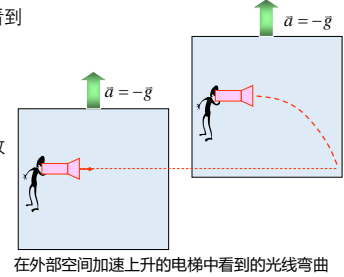
## 2 引力场的时空弯曲

### 2.1 引力场中光线的弯曲

在加速参考系中看到的光线是弯曲的！

匀加速参照系等效于均匀引力场

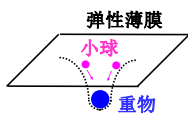
引力使光线弯曲



在外部空间加速上升的电梯中看到的光线弯曲

14

任何质量都使它周围的空间区域产生向着它的“弯曲”。比喻：



绷紧的弹性薄膜向重物下陷或弯曲，使小球滚向重物，相当于重物“吸引”小球。

**爱因斯坦提出：**引力不同于其它种类的力，它只不过是时空不平坦的这一事实的后果。物体并非由于称为引力的力而沿弯曲轨道运动，而是沿着弯曲空间中最接近直线的称作**测地线**的轨迹运动。

15

爱因斯坦的引力场方程

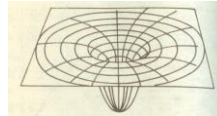
$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

$T_{\mu\nu}$  是依赖于物质分布及运动的张量

$G_{\mu\nu}$  是描述时空弯曲性质的曲率所决定的张量

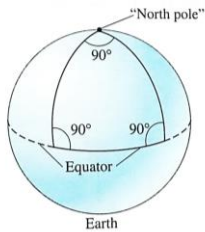
这个方程描述了处于时空中的物质是如何影响其周围的时空几何，并成为了爱因斯坦的广义相对论的核心。

1916年施瓦西求得在特定条件下-静止球对称质量分布、在质量分布以外空间-爱因斯坦引力场方程的严格解



16

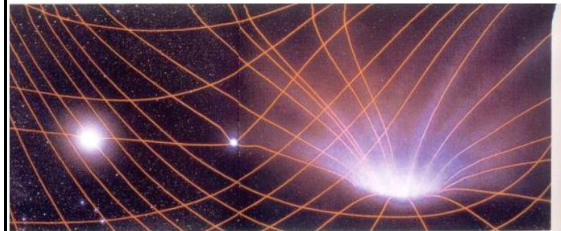
FIGURE 44-16 On a two-dimensional curved surface, the sum of the angles of a triangle may not be  $180^\circ$ .



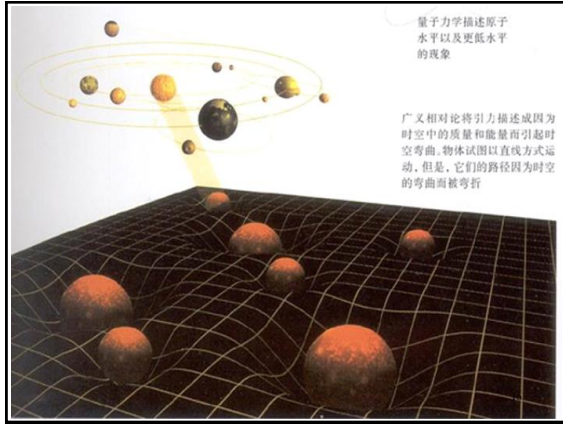
The shortest distance between two points:  
a geodesic (测地线)

17

## 弯曲的时空



18



通常我们并没有感觉到光线有弯曲

- ◆ 光速太快
- ◆ 地球引力太小

太阳的引力应该使恒星发出的光弯曲。

- ◆ 白天：看不到星光
- ◆ 晚上：星光灿烂，没有经过太阳的引力场

日全食（有太阳引力，有星光）

1919年5月29日~日全食  
引力场使光线弯曲 得到证实,举世轰动。

日全食照片

真位置

视位置

太阳

$\alpha = 1.76''$

### 光线偏折

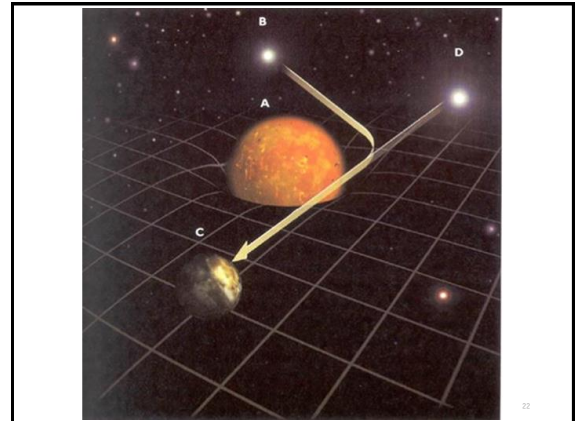
广义相对论:  $\Delta\theta = 1.75''$

牛顿理论:  $\Delta\theta = 0.875''$

实验观测: (1918年: 爱丁顿  
西非普林西比;  
巴西, 阴雨)

$\Delta\theta = 1.98 \pm 0.12''$

今天:  $\Delta\theta = 1.89''$



### Relativity revolution

Actual position of star

Path of light from star

Sun

Earth

Apparent position

“物质告诉空间如何弯曲，空间告诉物质如何运动”

### 3.2.2 弯曲空间的概念

广义相对论打破了我们头脑中固有的平直空间的概念。弯曲的空间中，欧几里德几何学不再适用。

测地线 即两点间距离的极值线  
由测量判定空间是否弯曲。

平面	球面
测地线是直线	测地线是弧线 如 $OA$
三角形内角和 $\pi$	三角形 $OAB$ 内角和 $> \pi$
圆周长 $2\pi R$	圆周长 $< 2\pi R$
二维平直空间	二维弯曲空间

### 2.3 引力场的空间弯曲

以爱因斯坦转盘为例说明

在此涉及两个惯性系：

$S$  系：即实验室系

$S'$  系：与盘边缘  $P'$  点相连的局惯系

研究的问题：两参考系中测量圆周长

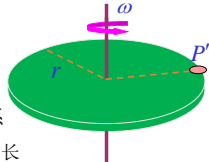
分别在两个参照系中测量圆盘半径 径向无相对运动  $r = r'$

分别在两个参照系中测量圆盘周长（尺子沿长度方向有速度  $\rightarrow$  收缩）

由洛伦兹变换可得  $l = l' \sqrt{1 - \frac{(r\omega)^2}{c^2}}$   $l = 2\pi r$   $l' > 2\pi r$

结论

$S'$  是非惯性系，存在惯性力和引力场等效，等效的引力场强大小是  $g = r\omega^2$ 。引力场使空间弯曲，场愈强弯曲愈烈。



### 2.4 史瓦西场中固有时与真实距离

#### 1. 基本概念

史瓦西场 在远离其它星球引力场的外部自由太空中，一个星球的外场。

标准钟 在无引力的地方有一系列的走时完全一样的钟，然后把它们分别放到引力场中的各时空点——称各地的标准钟。

标准尺 在无引力的地方有一系列的完全一样的刚性微分尺，然后把它们分别放到引力场中的各时空点——称各地的标准尺。

某处的固有时 由静止在该处的标准钟测得的时间间隔。

某处真实距离 由静止在该处的标准尺测得的空间间隔。

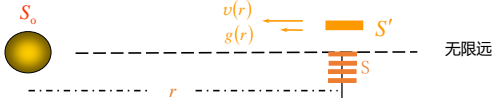


### 2. 引力场中的固有时与真实距离

$S_0$  系 —— 史瓦西场

$S$  系 —— 瞬时静止在  $S_0$  系中确定时空点的局惯系；

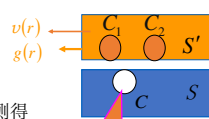
$S'$  系 —— 飞来局惯系，由无限远处沿径向自由飞到史瓦西场确定的时空点。



$C_1, C_2$   $S'$  系中先后与  $C$  相遇的两只钟

$C$   $S$  系中的一只标准钟

$S$  系的确定时空点处的标准钟  $C$  测得的是原时，该点的标准尺测的是原长



原时，原长

设原时  $d\tau$ 、原长  $d\sigma$ ， $dt$ 、 $dx$  为飞来局惯系中测得的相应时间和长度

$$d\tau = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} dt \quad d\sigma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} dx$$

由机械能守恒，飞来局惯系  $S'$  到达  $r$  处的速度由下式定出

$$\frac{1}{2}mv^2 + \left(-\frac{GMm}{r}\right) = 0 \rightarrow v^2 = \frac{2GM}{r}$$

$$d\tau = \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right)^{\frac{1}{2}} dt \quad d\sigma = \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right)^{-\frac{1}{2}} dx$$

二式充分反映和说明了引力场对时空的影响。可以看出：引力场愈强，钟愈慢，尺缩愈烈，空间弯曲愈烈。

讨论

(1) 天体引力场的强弱由  $\frac{GM}{c^2 r}$  决定，一般天体为弱场，牛顿引力适用。

弱场条件： $v = \sqrt{\frac{GM}{R}} \ll c$  即  $\frac{GM}{Rc^2} \ll 1$  强场条件： $\frac{GM}{Rc^2} \approx 1$

物体	质子	人	地球	月球	太阳	银河	蟹状星云脉冲星	天鹅座X-1	NGC 6624 星系核心
$\frac{GM}{c^2 R}$	$10^{-40}$	$10^{-25}$	$10^{-8.9}$	$10^{-10.1}$	$10^{-5.4}$	$10^{-6}$	$10^{-1}$	$\approx 1$	$\approx 1$

(2) 引力场愈强，钟愈慢，尺缩愈烈，时空弯曲愈烈。

(3) 时空与物质分布紧密相关。

上述结果是对史瓦西场得出的。

但是，注意到变换式：

$$d\tau = \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right)^{\frac{1}{2}} dt \quad d\sigma = \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right)^{-\frac{1}{2}} dr$$

$-\frac{GM}{r}$  是  $r$  处的引力势  
这种讨论具有典型性。

可分析加速参考系

◆ 前往太空旅行后返回地球的飞船上的钟比地上的钟慢——“双生子效应”



### 铯钟环球飞行实验（地球自西向东转）

•1971年，美国海军天文台，哈菲尔、吉丁等

5只铯钟：1只放在地球赤道上（对照钟）；  
4只放在赤道上空的喷气飞机上向东飞行；  
然后，再放在向西飞行的喷气飞机上，环球一周。

#### 飞行钟与地面钟时差（ns）

实验结果 (4只飞行铯钟的平均值)		向东飞行	向西飞行
		-59±10	273±7
理论值 (ns)	运动学效应	-184±18	96±10
	引力效应	144±14	179±18
	总效应	-40±23	275±21

31

### 关河道中

韦庄【唐末五代】

槐陌蝉声柳市风，驿楼高倚夕阳东。  
往来千里路长在，聚散十年人不同。  
但见时光流似箭，岂知天道曲如弓。  
平生志业匡尧舜，又拟沧浪学钓翁。

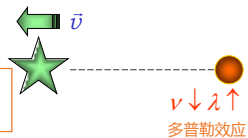
32

### 3 宇宙的形狀和命运

宇宙的三种模型及未来预言

星系光谱的红移现象

星系光谱的红移现象说明  
星系在退行，宇宙在膨胀



宇宙的膨胀率 $\gamma$ 和平均质量密度与某一临界密度的比值 $\Omega$   
决定了宇宙的几何形状、宇宙的未来和命运。

$$\Omega = \frac{\text{平均质量密度}}{\text{临界质量密度}}$$

预言的三维宇宙的三种几何形状：

33

闭合宇宙：三维球形空间，体

积有限  $\gamma$ 小、 $\rho$ 大

膨胀变慢  $\rightarrow$  膨胀停止

集中于一点  $\leftarrow$  向内收缩

开放宇宙：马鞍形的结构，体

积无限  $\gamma$ 大、 $\rho$ 小

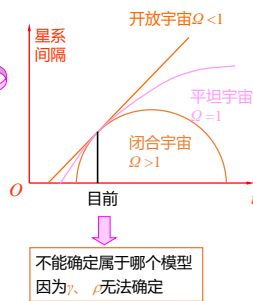
膨胀快  $\rightarrow$  膨胀变慢

永远膨胀下去

平坦宇宙：无大规律的弯曲

$\gamma$ 、 $\rho$ 符合一定条件

膨胀变慢  $\rightarrow$  膨胀停止  $\rightarrow$  星系永久分开



34

### 4 宇宙的起源——大爆炸与宇宙膨胀

#### 4.1 宇宙膨胀——哈勃红移

##### 1. 星系红移现象

星系的光谱线波长变长的现象叫星系红移。

用多普勒效应解释星系红移现象可知：星系在远离我们  
运动——星系退行。退行速度由哈勃定律给出。

##### 2. 哈勃定律

$$v = H_0 r \rightarrow \text{星系与地球的距离}$$

退行速度  $\rightarrow$  哈勃常数 15(km/s)/百万光年

哈勃定律描绘的是一幅宇宙正在膨胀的图像，和爱因斯坦引力场方程的运动解完全一致，所以，宇宙膨胀是广义相对论的一个自然结果。它彻底改变了在大尺度上天体应处于静止的传统观念。

35

#### 4.2 宇宙大爆炸

既然宇宙正在膨胀，那么宇宙的未来、现在和将来又如何呢？

1946年，美籍俄裔物理学家伽莫夫提出：宇宙是从一个爆炸的火球开始的，并预言了大爆炸的遗迹——微波背景辐射。

目前盛行的热大爆炸理论描绘的宇宙演化过程如下表

宇宙时间	时代	事件	主要阶段	温度 (K)	距今年限
0	奇点	大爆炸	大爆炸开始	$\infty$	~140亿年
$10^{-44}$ s	普朗克时代	时间、空间、真空场		$10^{32}$	
$10^{-35}$ s	大统一时代	暴涨，粒子产生，强力		$10^{27}$	
$10^{-6}$ s	强子时代	质子—反质子湮灭，弱力，电磁力	所有粒子处于平衡	$10^{13}$	
1s	粒子时代	电子—正电子湮灭	平衡终止	$10^{10}$	

36

宇宙时间	时代	事件	主要阶段	温度 (K)	距今年限
1分	辐射代	中子、质子聚变为氦核		$10^9$	
20分		氢、化学元素形成			
30分		粒子间停止强相互作用		$10^8$	
70万年		复合			
100万年	退耦代	光子、电子分离, 宇宙透明, 原子生成		$3 \times 10^3$	
50亿年		星系、恒星形成	星系形成		
100亿年		银河系、太阳、行星形成			40亿年
101亿年	始生代	最老地球岩石			39亿年
120亿年	原生代	生命产生			20亿年
130亿年		今天宇宙			10亿年
138亿年	中生代	哺乳类			2亿年
140亿年	中生代	智人		36	10万年

#### 4.3 大爆炸理论预言的一些验证

##### 1. 氦丰度

根据大爆炸理论, 在大爆炸之初的几分钟里, 宇宙温度极高, 质子聚变产生氦, 可推算出反应后的氢和氦的丰度的质量比为3:1, 并根据宇宙膨胀速度及热辐射温度的测量, 计算出宇宙早期产生的氦丰度数值恰为30%, 这种比值在半小时后就保持了下来。

宇宙大爆炸理论解释了氦丰度问题, 提供了支持宇宙大爆炸理论的证据。

##### 2. 天体的年龄

按宇宙大爆炸理论, 假定宇宙过去一直以现在的速度膨胀

$$v = H_0 r \rightarrow t = r/v = 1/H_0 = 140 \text{ 亿年}$$

约 100~200 亿年

放射性年代法估算为 70~150 亿年  
星系演化理论估算为 90~150 亿年  
和宇宙大爆炸理论相符  
目前公认的宇宙年龄为 150 亿年

##### 3. 宇宙(微波)背景辐射

宇宙背景辐射是来自空间背景上的各向同性的微波辐射。

1946年, 伽莫夫预言: 100多亿年前宇宙大爆炸产生的光子仍存在于太空之中, 并推算出其光子的波长  $\lambda = 1 \text{ mm}$ , 温度  $T = 5 \text{ K}$  左右。

1964年, 美国科学家彭齐亚斯、威尔逊在实验中发现消除不掉的“噪声”干扰, 此背景辐射的等效黑体温度为3K, 这就是大爆炸理论预言的宇宙辐射, 二人获1978年诺贝尔物理学奖。

宇宙背景探索卫星得到的微波背景辐射的另外两个特点

- (1) 微波背景辐射的频谱分布严格遵从平衡态黑体辐射的普朗克公式。
- (2) 宇宙背景辐射具有高度的各向同性, 微波背景辐射是早期宇宙留下的“化石”。

宇宙背景辐射的发现被认为是20世纪天文学的一次重大成就, 是对大爆炸宇宙学的有力支持。

##### 4. 太阳的年龄

按宇宙大爆炸理论推算的目前公认值为50亿年左右。用放射性同位素测定天体方法估算出太阳系的年龄约45亿年, 和宇宙大爆炸理论相符, 又一次支持了大爆炸宇宙学。

#### 5 引力坍缩——星系的诞生与演化

引力坍缩: 物质在引力作用下凝聚在一起的过程, 是星系演变的原动力。

星系的诞生: 弥散气体 (H原子)

涨落  
偶然聚集



引力作用



漩涡星系  $\rightarrow$  新星诞生

气体云吸引物质增多

稳定的条件: 热核聚变

引力增大

压力=引力 稳定 新星生成

星际物质飞向中心的  $v$  增大

向外的压力

撞击越猛烈

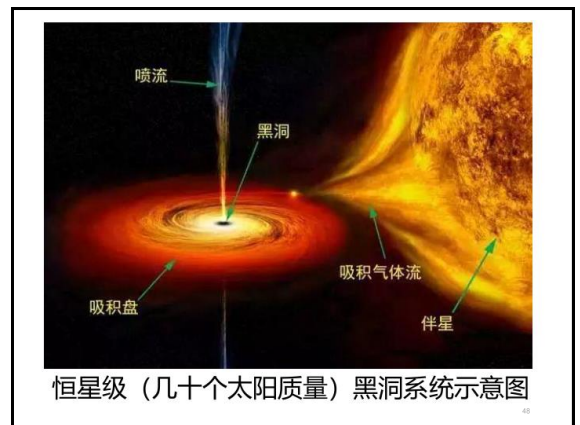
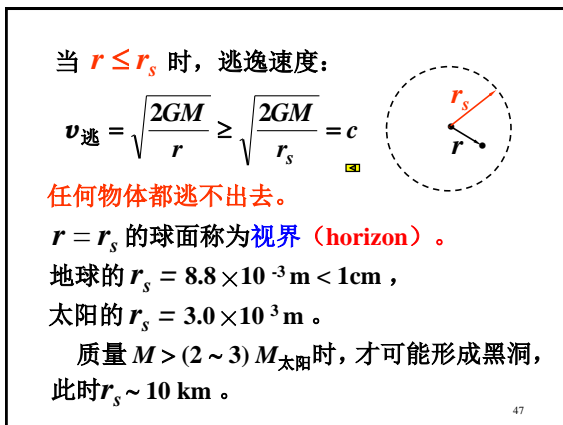
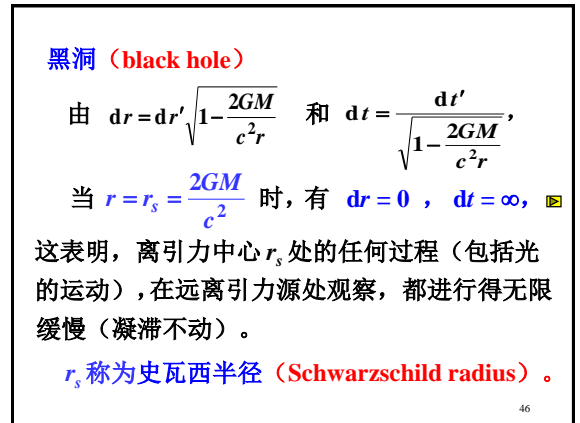
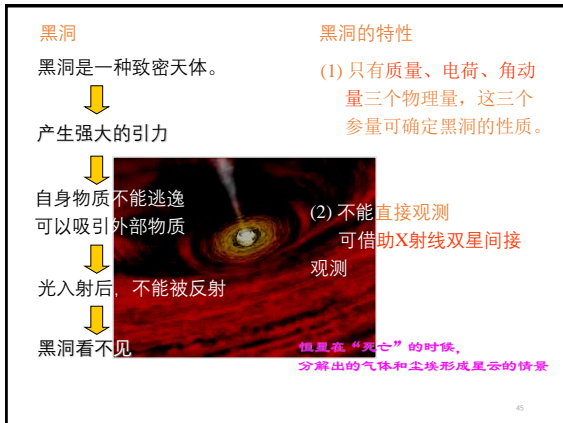
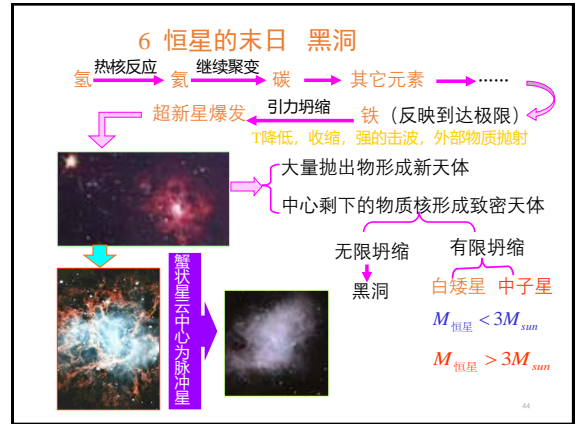
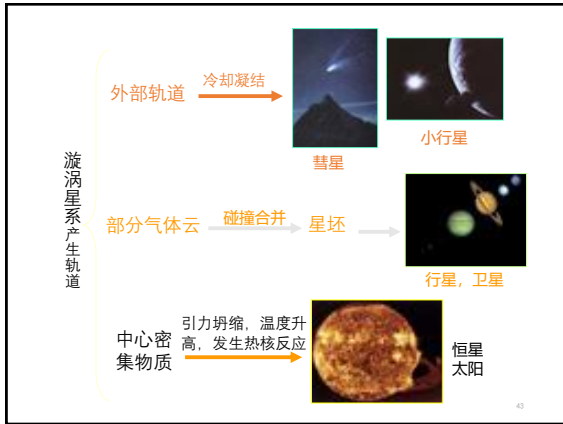
内部高温  $\rightarrow$  热核聚变 ( $H \rightarrow He$ )

产生转动

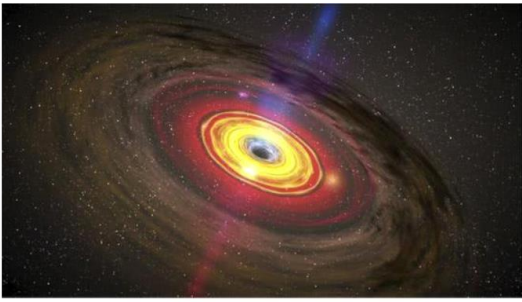
漩涡星系

收缩, 质量集中, 转动加速

气体云形状  $\rightarrow$  馅饼状



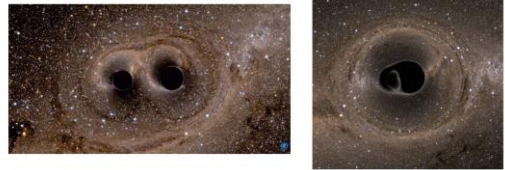




类星体中心超大质量（百万到百万亿倍太阳质量）  
黑洞及吸积盘、喷流示意图

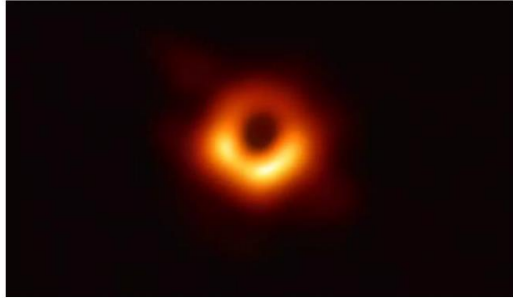
49

## 融合前后的两个黑洞



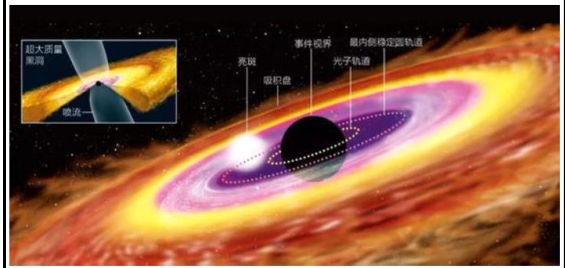
50

2019.04.11报道第一张黑洞照片：超200名科学家耗时10余年8台望远镜同时观测5500万光年外室女座方向射电星系M87中心的超大质量黑洞(65亿倍太阳质量)



这个圆环的一侧亮一些，另一侧暗一些，原因在于吸积盘的运动效应——朝向我们视线运动的区域因为多普勒效应而变得更亮，远离我们视线运动的区域会变暗。中间黑色的区域就是黑洞本身——光线无法逃离之处。

51



## 黑洞及周围结构图

52



左图：钱德拉X射线望远镜与事件视界望远镜同时拍摄的照片，显示了M87星系中心黑洞的“相对论性喷流”。右图：事件视界望远镜(EHT)拍摄的M87星系中心黑洞图像。

图片来源：美国趣味科学网站

相对论性喷流：所有超大质量黑洞都能吞噬附近物质，吸收穿过黑洞事件视界的物质，并以接近光速的速度将其余物质喷射到太空中。

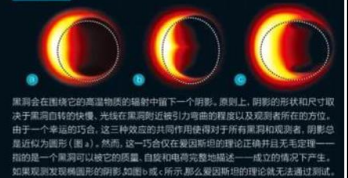
此次事件视界望远镜(EHT)的拍摄的M87星系中心黑洞喷射的物质和辐射遍布整个太空。它的“相对论性喷流”如此庞大，以至于它们可以完全逃离周围的星系。

53

## 利用黑洞对 广义相对论进行测试

天体物理学家基于广义相对论建立起了精确的理论模型。这些模型预言了物质在黑洞附近的行为。事件视界望远镜对银河系中心黑洞的观测告诉我们现实与理论预言是否一致。如果不一致，爱因斯坦的理论就可能需要修改。

### 阴影的形状



黑洞会在围绕它的高温物质的辐射中留下一个阴影。原则上，阴影的形状和尺寸取决于黑洞的自转速度。光线在黑洞附近引力弯曲的程度以及观测者所在的位置。由于一个幸运的巧合，这三种效应的共同作用使得对于所有黑洞和观测者，阴影总是近似为圆形（图a）。然而，这一巧合仅在爱因斯坦的理论正确且并无定理——即的是一个黑洞可以被它的质量、自旋和电荷完整地描述——成立的情况下产生。如果观测发现椭圆形的阴影（如图b或c所示），那么爱因斯坦的理论就无法通过测试。

## 爱因斯坦的广义相对论再次得到了证实

54

## 7 广义相对论的可观测效应

### 7.1 水星近日点的进动

1895年发现，水星的运动轨迹并非严格椭圆。每转一圈长轴也略有转动，称为**进动**。

进动角速率：

实测值： $1^{\circ}33'20.73''/100$ 年

牛顿值： $1^{\circ}32'37.62''/100$ 年

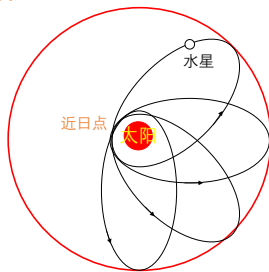
差值： $43.11''/100$ 年

原因是什么？

预言：太阳附近有尚未发现的小行星

观测：没有找到

经典引力理论存在缺陷



广义相对论的解释：

1916年，爱因斯坦广义相对论终于为行星近日点进动提供了解释。太阳质量使它周围的**时空发生弯曲**，行星是在沿着弯曲时空的测地线运动，这个测地线**并非是闭合的**，也**并不是严格的椭圆或双曲线**，轨线的轴会随时间而缓慢**进动**，这样就有了水星近日点进动。

由此得出水星和其它行星进动的后牛顿修正值

行星	观测值	理论值
水星	$43.11'' \pm 0.45''/100$ 年	$43.03''/100$ 年
金星	$8.4'' \pm 4.8''/100$ 年	$8.6''/100$ 年
地球	$5.0'' \pm 1.2''/100$ 年	$3.8''/100$ 年
伊卡鲁斯(小行星)	$9.8'' \pm 0.8''/100$ 年	$10.3''/100$ 年

观察值和理论值符合相当好，间接说明了广义相对论的正确性。

### 水星轨道近日点的进动

★  $5600.73 \pm 0.41''/百年$ ，（观测）

$5557.62 \pm 0.20''/百年$ ，（计算）

★  $43.11''/百年$ 的进动无法解释

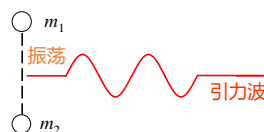
★ 勒维叶的猜测，火神星

（勒维叶与亚当斯发现海王星）

★ 广义相对论的回答： $43''/百年$

### 7.2 引力波

由广义相对论，加速运动的物体将发射出引力辐射或**引力波**



两个质量分别为 $m_1$ 和 $m_2$ 的物体构成的体系在振荡时，将发射引力波，到1978年，通过对双星辐射阻尼的检测证实了引力波的存在。

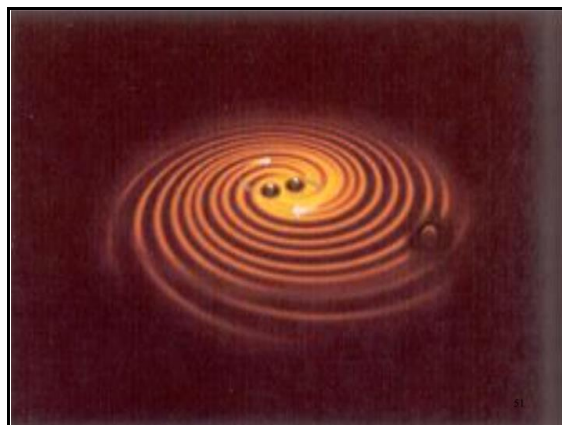
**双星**是由两颗沿椭圆轨道相互绕转的中子星组成，是一个典型的引力辐射源。引力辐射将双星的能量慢慢带走，使其能量减少，周期变慢，这个性质称为引力辐射阻尼。经长期观测，表明双星的运动周期在稳定变短，周期随时间的变化率为 $dT/dt = -2.6 \times 10^{-12}$ ，这有力地提供了引力波存在的证据，**再次证明了广义相对论的正确性**。

## 引力波

• 广义相对论预言：有引力波，以光速传播。

• J.H.Taylor,R.A.Hulse发现脉冲双星(PSR1913+16)轨道周期每年减少约万分之一秒，恰好可用引力辐射来解释。

由于对脉冲双星研究的贡献获1993年诺贝尔物理学奖，但未明确指明发现引力波。



## 引力波的探测

科普导读材料: Earth as Giant Gravitational Wave Detector

Upper Limit on a Stochastic Background of  
Gravitational Waves from Seismic Measurements  
in the Range 0.05–1 Hz

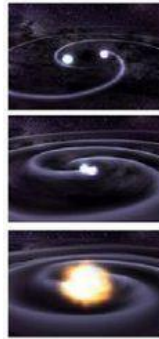
Michael Coughlin and Jan Harms

Phys. Rev. Lett. 112, 101102 (2014)

Published March 13, 2014

61

## 引力波成功探测——爱因斯坦百年预言证实

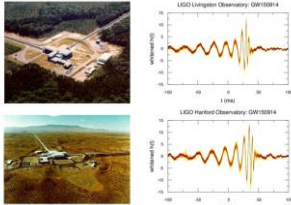


2016年2月11日, 美国国家科学基金和欧洲引力天文台, 正式宣布第一次直接观测到了来自13亿年前两个黑洞撞击合并瞬间产生的时空涟漪——引力波。

两个超大质量的物体互相旋转, 周围被弯曲的空间就会发生持续的拉伸和收缩震荡。扭曲时空的引力波也在这个过程中以光速向外传播出去。

2015年9月14日, 研究人员利用**激光干涉引力波天文台 (LIGO)** 探测器探测到两个黑洞合并的引力波。据估计, 两个黑洞的质量分别相当于36个与29个太阳质量, 合并后的总质量为62个太阳质量。合并过程中, 有3个太阳质量的能量以引力波的形式释放。

62



这一引力波信号由分别位于美国路易斯安那州列文斯顿 (Livingston, Louisiana) 和华盛顿州汉福德 (Hanford, Washington) 的**激光干涉引力波天文台 (LIGO)** 的一对探测器同时探测到。

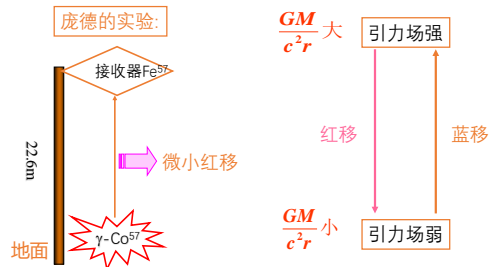
探测器LIGO拥有巨大的L形测量臂, 每边各4km长, 两端设有反射镜面。发出的一束激光沿着L形互相垂直的两边前进并被来回反射。一般情况下, 激光由于干涉而互相抵消, 探测器接收不到光信号, 但一旦引力波经过, 便会改变激光通过的距离, 从而被观测到。

**引力波探测获2017年诺贝尔物理学奖**

63

## 7.3 引力红移

由广义相对论: 光在引力场中传播, 波长或频率会发生变化

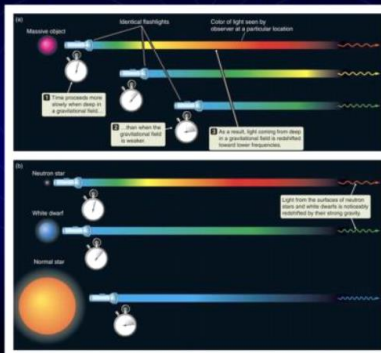


实验值与理论值之比为  $0.9990 \pm 0.0076$

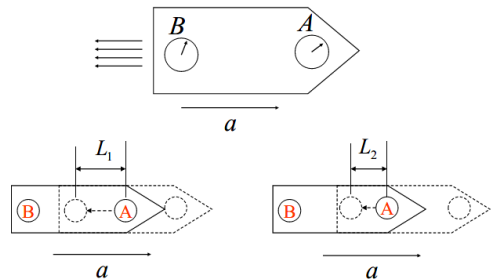
测量结果和理论预言符合得非常好, 又一次说明广义相对论的正确性。

64

## Gravitational Redshift



## The speed of clocks in a gravitational field



A钟比B钟快

65

根据等效原理，地面高处钟比低处的快

引力使时间变慢

$$\begin{aligned} & \text{A} \quad \text{---} \quad h\nu_A \quad \text{---} \quad E_1 \\ & \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad E_0 \\ & \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad H \\ & \text{B} \quad \text{---} \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad E_B = h\nu_A + \frac{h\nu_A}{c^2} gH = h\nu_B \end{aligned}$$

光子  $\nu_B = \nu_A \left(1 + \frac{gH}{c^2}\right)$

光周期与当地钟有关  $\Delta t_B = \Delta t_A \left(1 - \frac{gH}{c^2}\right)$   
实验证实

67

相对论时间延迟是不是与实际应用很远？

GPS或者北斗定位系统

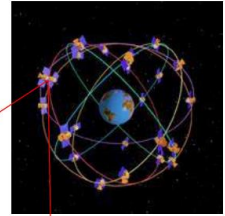
位置由距离测算  
距离 = 光速 × 时间

动钟变慢  $\Delta t = \gamma \tau$

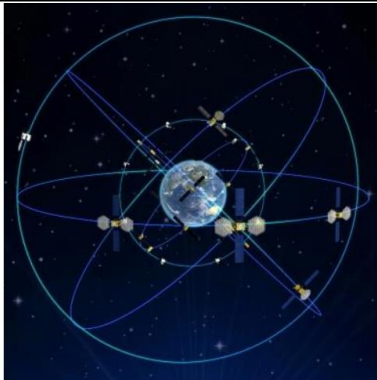
引力使时间变慢

$$\Delta t / \sqrt{1 - \frac{2GM}{Rc^2}} = \tau / \sqrt{1 - \frac{2GM}{rc^2}}$$

一天差几十微秒，一天岔出去十公里



68



北斗三号全球卫星导航星座

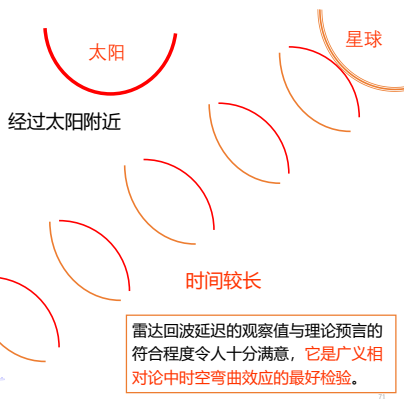
69

#### 7.4 雷达回波延迟

引力场会造成电磁波的传播时间加长



70



雷达回波延迟的观察值与理论预言的符合程度令人十分满意，它是广义相对论中时空弯曲效应的最好检验。

71

“惯性质量与引力质量”最早由伽利略于1591年发现和提出，1991年（400周年）我国发行了由李政道设计的纪念明信片。

-----《物理》2008年第12期

“以天之语解物之道”

-----中国物理学会期刊网

2015年10月11日刊载

1610年1月7日，伽利略通过自制的望远镜首次观察到木星有自己的小卫星！

72

1993年5月8日，梵蒂冈教皇约翰·保罗二世代表天主教为伽利略平反，并向全球的科学家道歉。

当时由李政道代表全球的科学家发言。

李政道面对教皇说：“是地球绕太阳转，还是太阳绕地球转，这两个说法都不错，因为这是相对的。在伽利略时代，人们还不明白这个原理。不对的是教皇强迫伽利略放弃自己的观点，强迫伽利略不能讲学并将他软禁。现在能为他平反，我感到很高兴。”

73

## 伽利略受审

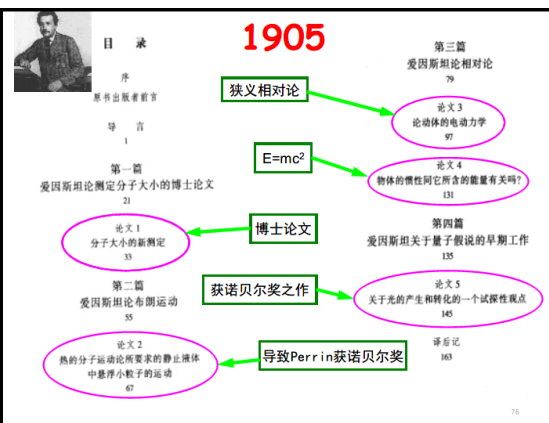


74

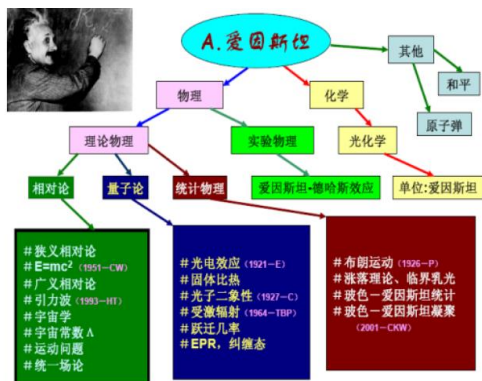
## 附录：

## 爱因斯坦学术成就与影响

75



76



77

## 爱因斯坦： 怎样获得诺贝尔奖？

78



## 提名Einstein的领域

- 相对论；量子论；引力论；布朗运动；光量子；统计力学；临界乳光；比热；数学物理；光电效应；爱因斯坦—德哈斯效应等。
- 提名最多的领域是相对论，包括狭义和广义相对论。但是，获奖的却是光电效应。

79

## 1921 光电效应



- 得奖年：1921
- 得奖人：A. Einstein
- 得奖项目：for his services to theoretical physics, and especially for his discovery of the law of the photoelectric effect
- 瑞典皇家科学院秘书的信：“...但是没有考虑您的相对论和引力理论一旦得到证实所应获得的评价”

80

检验爱因斯坦理论或  
与爱因斯坦理论密切相关的  
研究工作而  
获诺贝尔奖的

81

## 1926 布朗运动



- 得奖年：1926
- 得奖人：J.B. Perrin
- 得奖项目：for his work on the discontinuous structure of matter, and especially for his discovery of sedimentation equilibrium
- 说明：首次实验证明Einstein的布朗运动理论

82

## 1927 康普顿效应



- 得奖年：1927
- 得奖人：A.H. Compton
- 得奖项目：for his discovery of the effect named after him
- 说明：首次证明光子同时具有能量、动量、频率、波长——“ $E=h\nu$ ,  $p=h/\lambda$ ”

83

## 1951 $E=mc^2$



- 得奖年：1951
- 得奖人：Sir J.D. Cockcroft & E.T.S. Walton
- 得奖项目：for their pioneer work on the transmutation of atomic nuclei by artificially accelerated atomic particles
- 说明：“a verification was provided by this analysis for Einstein's law concerning the equivalence of mass and energy”

84

## 1964 受激辐射



- 得奖年：1964
- 得奖人：C.H. Townes, N.G. Basov, A.M. Prochorov
- 得奖项目：for fundamental work in the field of quantum electronics, which has led to the construction of oscillators and amplifiers based on the maser-laser principle
- 说明：maser—laser based on 受激辐射

85

## 1993 引力波



- 得奖年：1993
- 得奖人：R.A. Hulse, J.H. Taylor, Jr
- 得奖项目：for the discovery of a new type of pulsar, a discovery that has opened up new possibilities for the study of gravitation
- 说明：验证了引力波

86

## 2001 Bose – Einstein凝聚



- 得奖年：2001
- 得奖人：E.A. Cornell, W. Ketterle, C.E. Wieman
- 得奖项目：for the achievement of Bose-Einstein condensation in dilute gases of alkali atoms, and for early fundamental studies of the properties of the condensates

87

爱因斯坦的工作  
还会导致哪些诺贝尔奖？

88

## 量子信息学与量子纠缠

- EPR effect
- Entanglement
- 量子信息学
- 量子计算机

89

## 类星体与引力透镜效应

- 1979: Walsh, Carswell, Weymann 发现了首个类星体 (0957+561) 的引力透镜现象。
- 随后，一大批引力透镜现象（包括爱因斯坦环、爱因斯坦弧等）被发现。

90

## 微波背景辐射各向异性的发现

- COBE卫星
- WMAP卫星  
导致精确宇宙学、和谐宇宙学的建立

91

## 黑洞物理及其观测

- 黑洞物理以及黑洞天体物理
- 黑洞吸积及辐射
- 黑洞观测与证认

92

## 引力波的探测

- 间接检验引力波  
已有Hulse-Taylor工作（已获奖）  
双脉冲星观测
- 已有许多方案和卫星设计直接观测引力波  
（很可能导致新奖）

93

## 宇宙学与宇宙常数 $\Lambda$

- 爱因斯坦宇宙
- 宇宙常数 $\Lambda$ —万有斥力
- 宇宙常数 $\Lambda$ —三起三落
- 宇宙年龄
- 减速因子—**加速膨胀的发现**
- 暗能量
- 精确宇宙学、和谐宇宙学
- 大突破的前夕

94

## 爱因斯坦的主要成就

- 1905 狭义相对论（受马赫思想启发）  
光子说
  - 1915 广义相对论（受马赫思想启发，得到格罗思曼与希尔伯特的帮助）
- 其他成就：
- 分子运动论，量子统计，激光原理，统一场论，与哥本哈根学派的论战

95

### 爱因斯坦是人而不是神

他曾经：

- 不同意膨胀宇宙模型；
- 不同意白矮星存在质量上限；
- 不同意有黑洞存在；
- 不同意H.Weyl的规范场论；
- 始终不同意量子力学的统计解释

... ..

这些不同意见有对有错，他从正反两方面推动了物理学的发展。

96

爱因斯坦作出划时代的成就是

在25岁—45岁之间

•26岁：狭义相对论，光量子论

•36岁：广义相对论

97

我没有什么别的才能，只不过喜欢  
刨根问底地追究问题罢了。

———爱因斯坦

98

时间、空间是什么，别人在很小的  
时候就搞清楚了，我智力发展迟缓，  
长大了还没有搞清楚，于是一直揣摩  
这个问题，结果也就比别人钻研得更  
深一些。

———爱因斯坦

99

爱因斯坦的成就，只有牛顿可以  
与之比美。

（谁是第二伟大的物理学家？）

100

爱因斯坦领导了20世纪的科学革命，  
奠定了现代物理学的基础。

101