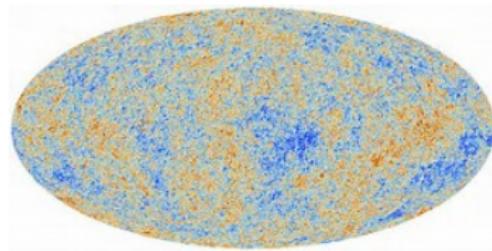


# 宇宙背景微波辐射



黃志琦

中山大学物理与天文学院

<http://spa.sysu.edu.cn>

2017年6月11日

# 形象地丈量长度的办法:熟知的速度×时间

- ▶ 从教学楼到兵哥食坊，大概5分钟步行路程。
- ▶ 从学校到扬名海底捞，大概20分钟车程。
- ▶ 从珠海到北京全聚德，大概4小时飞机 (加上在北京堵车6小时)。

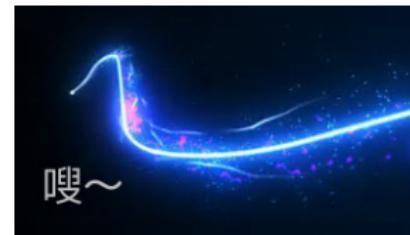
# 从中国到美国

飞机从中国飞到美国，大概需要十几小时。

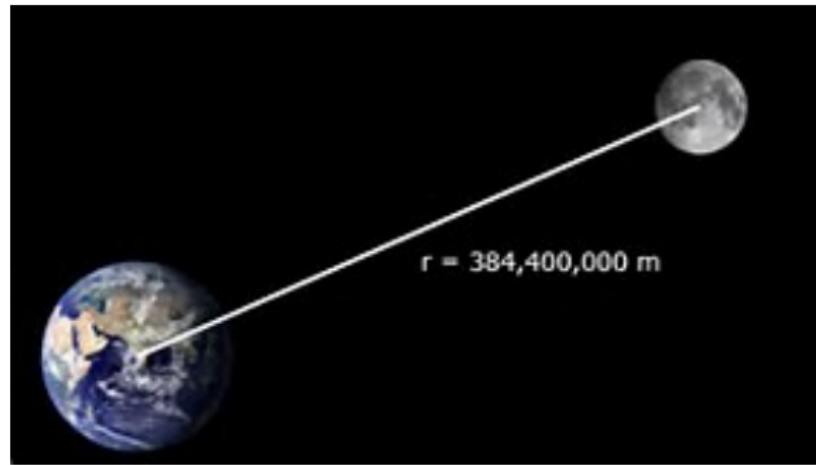


吭哧吭哧

而跑得最快的光，大概只需要几十毫秒。

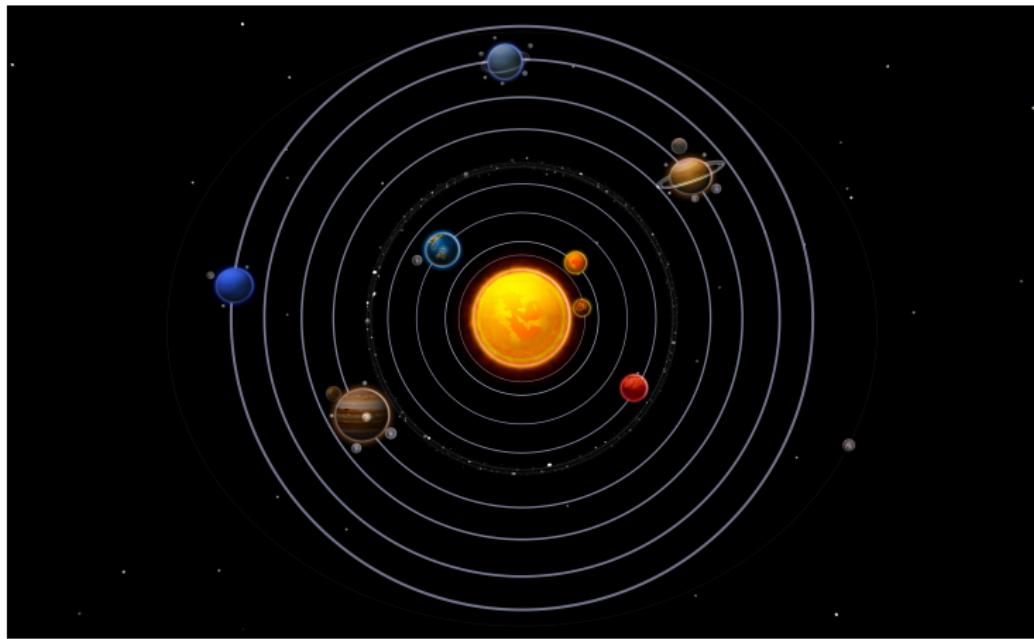


# 宇宙有多大：地月距离



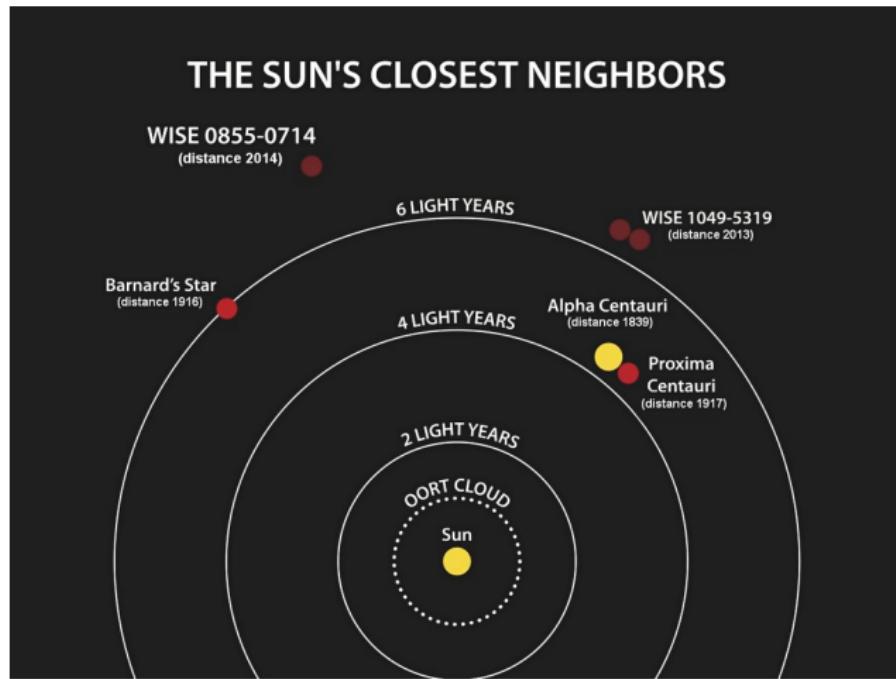
从地球到月球，光要跑大约1秒。

# 宇宙有多大：太阳系的行星



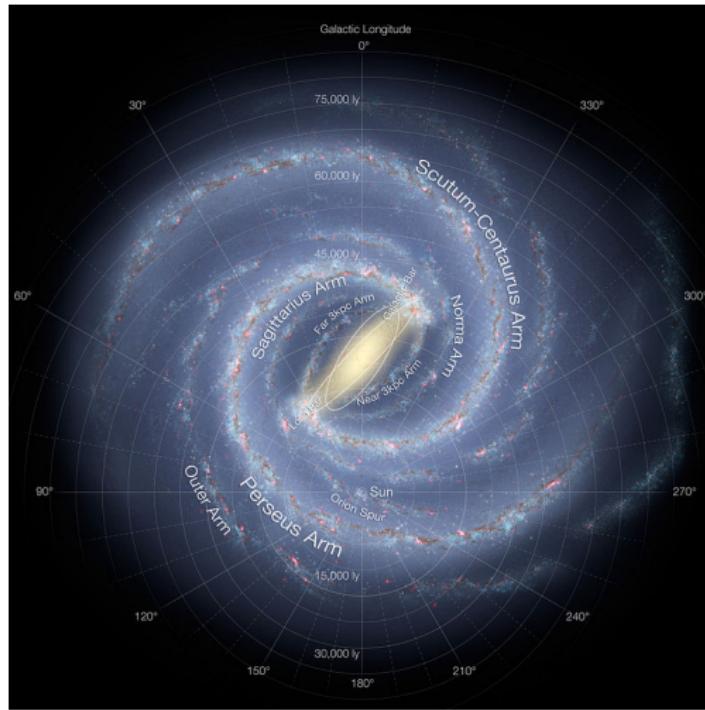
从太阳到地球，光要跑大约8分钟，即使跑到最远的海王星也只要大概几个小时。

# 宇宙有多大：附近的其他“太阳系”



光跑到离太阳最近的另一个“太阳”（恒星）大概需要4年。

# 宇宙有多大：银河系

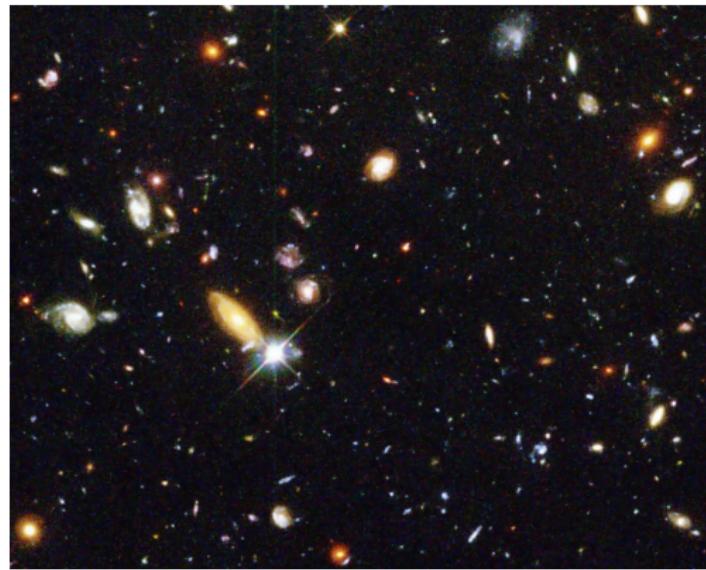


银河系里大概有一千亿个“太阳”（恒星）

光从银河系一边跑到另一边要10万年以上。

如果把太阳系比做一枚硬币，银河系大概有中国版图那么大。

# 宇宙有多大：其他星系



如果把银河系比做一块瓷砖，可观测宇宙大概有中国版图那么大。

可观测宇宙中  
大概有一千亿  
个“银河系”（星  
系）

我们看到的来  
自可观测宇宙  
的“边缘”的光  
大概已经跑了一百  
三十多亿年。

# 先生时代

在牛顿提出(?)万有引力之前，宇宙学基本是一个宗教和哲学问题。

# 佛教



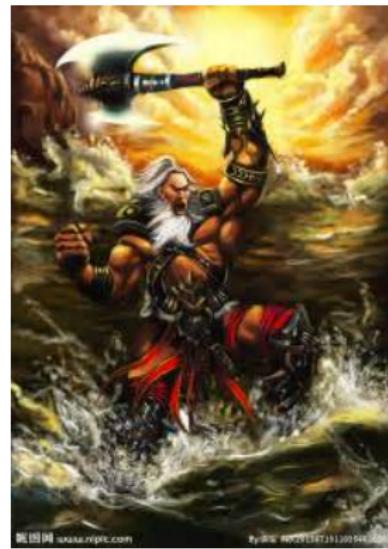
一花一叶一世界

# 道教



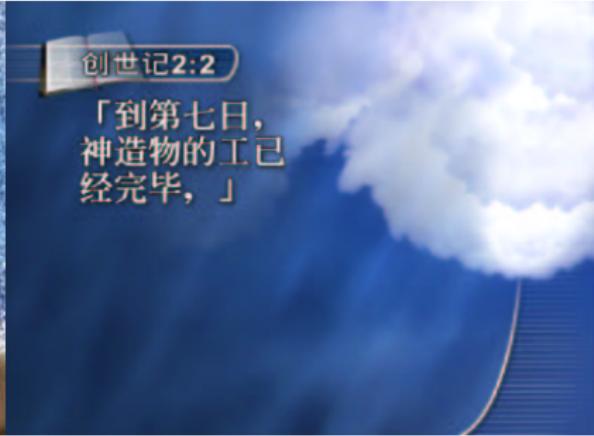
天下万物生于有，有  
生于无

# 远古神话



盘古开天地

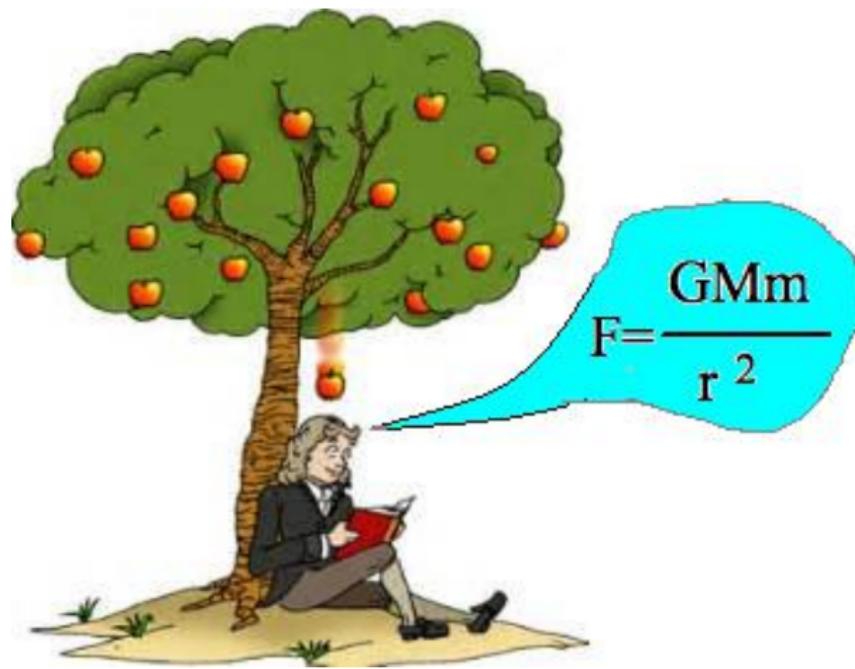
# 基督教



后来

大boss牛顿出现了.....

# 万有引力定律



正如大多数励志科学家故事



牛顿的苹果

# 胡牛之争

根据已经公开出版的牛顿信件(Page 297 in H W Turnbull (ed.), Correspondence of Isaac Newton, Vol 2 (1676-1687), (Cambridge University Press, 1960), document #235, 24 November 1679.):

在牛顿发表万有引力定律之前，胡克（就是玩弹簧的那位dalao）在和牛顿的信件中不仅提到了引力的平方反比律，而且提出了天体运动是由引力提供向心力所致。

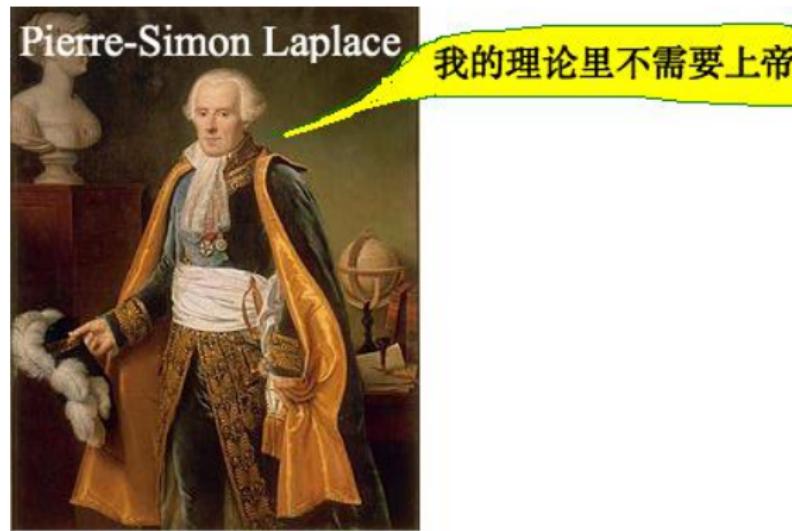
你胡说



你吹牛



# 拉普拉斯妖——牛顿力学的辉煌时期

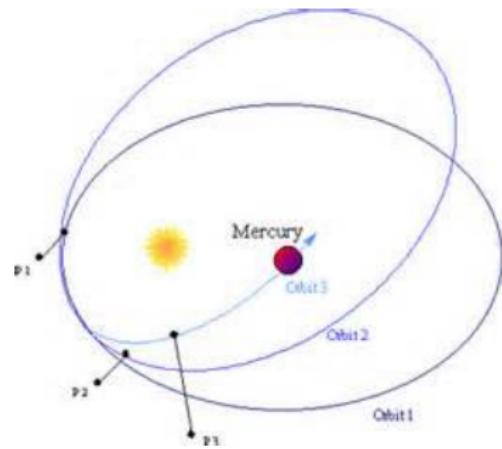


似乎除了牛顿提到的“上帝之第一推动”，其余问题都解决了。

然后

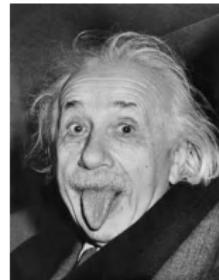
随着观测技术的不断进步，问题又来了……

# 牛顿引力的问题

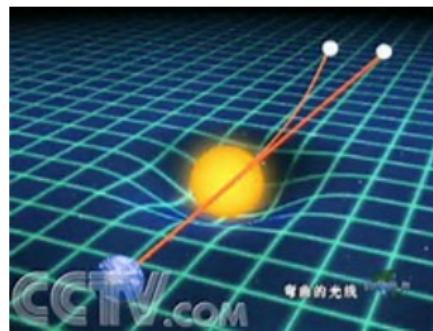


- A 水星进动
- B 光线经过恒星附近时的弯曲
- C 星系外围恒星运动速度
- D 超新星测距得出宇宙加速膨胀

# 广义相对论



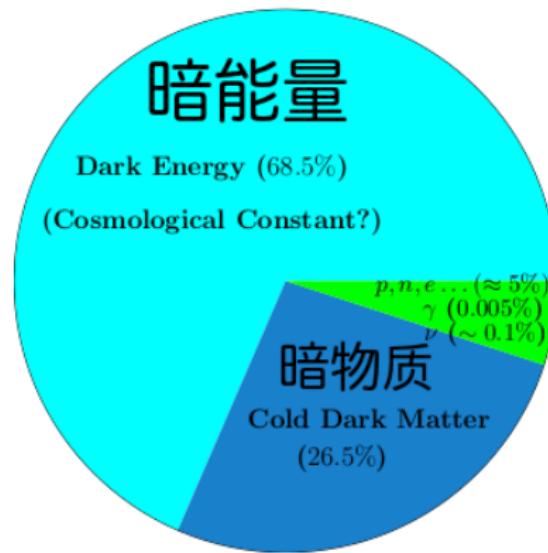
大概100年前，dalao爱因斯坦说：  
**引力？不存在的。只不过  
时空有些弯曲而已...**



- A 水星进动
- B 光线经过恒星附近时的弯曲
- C 星系外围恒星运动速度
- D 超新星测距得出宇宙加速膨胀

# 宇宙学基本模型“解决”了剩下两个问题

Current Universe Composition



- ▶ 69%暗能量  $\Rightarrow$  宇宙加速膨胀
- ▶ 26%暗物质  $\Rightarrow$  星系外围恒星运动
- ▶ 5%已知物质

# 现代版的“混沌初开”

- ▶ 宇宙一开始是很热的“一片混沌”



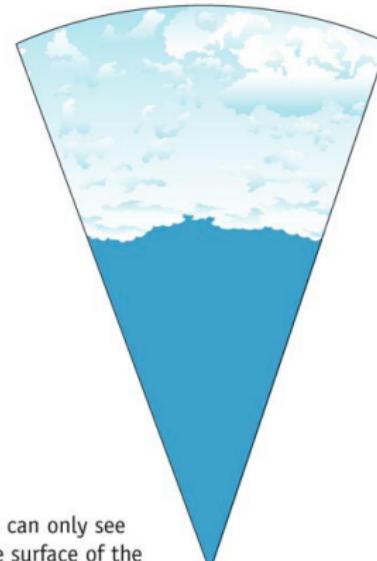
- ▶ 温度随着宇宙膨胀而降低
- ▶ 当温度降到大概太阳表面温度的一半时，“混沌初开”，宇宙变得透明

🤔 怎么听着跟盘古的故事那么像

# 宇宙背景微波辐射(CMB)的预言



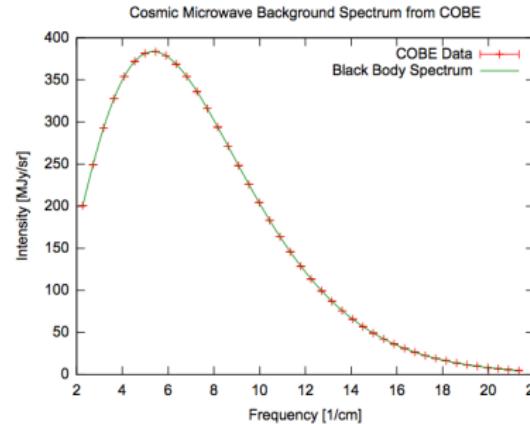
The cosmic microwave background Radiation's "surface of last scatter" is analogous to the light coming through the clouds to our eye on a cloudy day.



We can only see  
the surface of the  
cloud where light  
was last scattered

# CMB的预言和发现

- ▶ 1950年, Alpher 和 Herman 预言了CMB: 黑体谱, 温度大约几K
- ▶ 1964年, Penzias 和 Wilson 在射电望远镜噪声中意外发现了约3 K的背景辐射
- ▶ 1989年11月, COBE卫星带着测量CMB的使命升空
- ▶



1990年1月的美国天文学会一次会议上, J. C. Mather通过一张幻灯片展示观测到的CMB谱和黑体谱完全吻合时, 全场响起了热烈的掌声

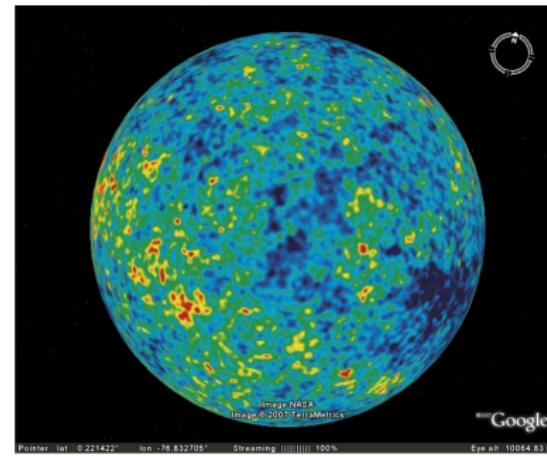
CMB在各个方向上温度非常均匀

2.73K的背景微波辐射



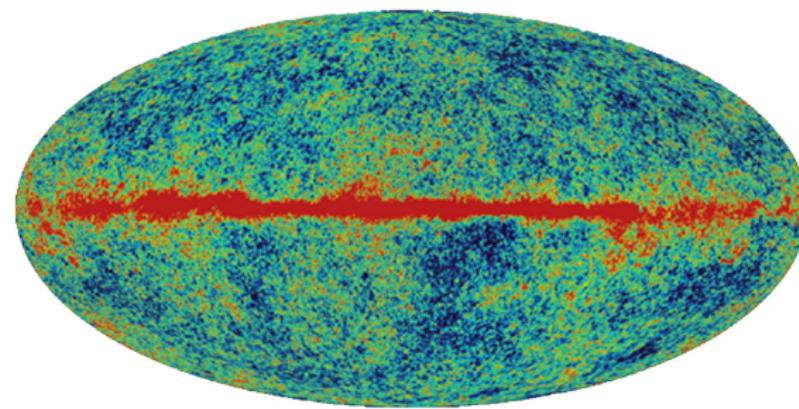
各个方向温度几乎完全一样

虽然非常均匀，但在各个方向上还是有大概十万分之一的起伏



把平均温度(2.72585 K)减掉后的CMB温度图

我们通常喜欢像画世界地图一样把天球展开到一个平面上



CMB在各个方向上的温度有大概十万分之一的起伏。

# 对极早期宇宙的猜测

即使物理规律相同，不同的初始条件也会演化出不同的结果。

那么，宇宙的初始条件是什么呢？

# 真空不空

场无处不在

每种场对应一种粒子（或一对正反粒子）。例如电磁场对应光子，Dirac场对应正负电子。



# 物理真空的定义



当所有场都处于最低能量态(即0个粒子的态)的时候，就是物理上定义的真空。

—	—	—	3 particles
—	—	—	2 particles
—	—	—	1 particle
—	—	—	0 particles → vacuum
field A	field B	field C	

注：本图的上面几行仅为示意，实际上一个粒子可以拥有比两个粒子更多的能量。

# “无中生有”没有你想象得那么容易

无论是经典理学还是量子力学都要求能量守恒。从最低能态变到不是最低的能态，势必破坏能量守恒。

所以正常情况下真空里什么都不会产生！

这个道理很显然



这样是不会发财的

当然，也有例外情况



例如：你家房子地段好，坐看房价起飞

# 粒子场住的“房子”

各种粒子的场都“住”在四维时空里。如果时空结构发生剧烈变化，就能“无中生有”。

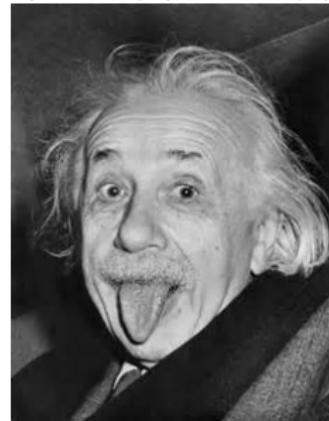
基于这种想法的理论：

- ▶ 霍金的黑洞蒸发理论
- ▶ 宇宙早期暴涨(**Inflation**)理论

等一下，我还有问题

- ▶ 早期宇宙时空为何会暴涨?
- ▶ 不是说量子场论和广义相对论还没统一吗？那怎么计算时空剧烈变化时的各种量子场的行为？

# 为何暴涨



第一个问题100年前已经被爱因斯坦解决了：

$$M_p^2 G^{\mu\nu} = T^{\mu\nu} - \rho_{\text{vacuum}} g^{\mu\nu}$$

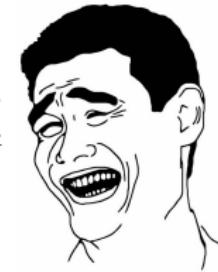
广义相对论里的Einstein方程：真空能和标量场的势能都具有排斥作用会使空间加速膨胀。

# 怎么计算弯曲时空里的量子场

关于第二个问题，有一个好消息和一个坏消息。

# 好消息和坏消息

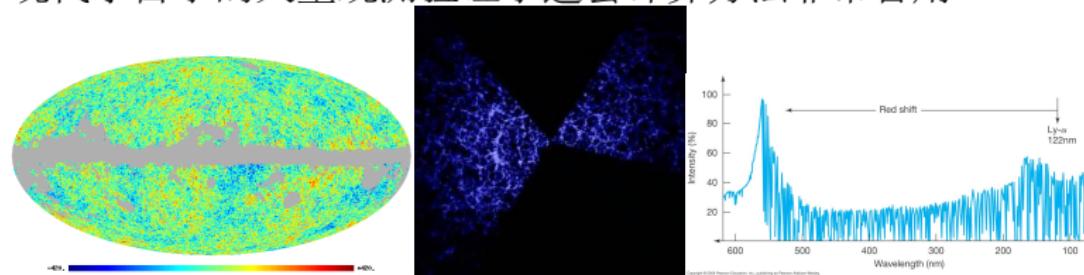
坏消息：我们无法从第一原理出发计算黑洞蒸发或者早期宇宙的时空暴涨。



好消息：霍金以及一批俄罗斯科学发展起来了一种在特殊情况下可以从平直时空外推到弯曲时空的计算方法。

# 有趣的是：这套计算方法管用

现代宇宙学的大量观测验证了这套计算方法非常管用。

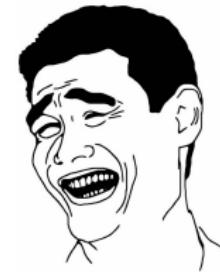


现在的宇宙学标准模型里只有6个自由参数。我们迄今已经检查了数百亿个观测数据，没有发现任何和理论预言矛盾的地方！

那么，这套计算方法为什么管用呢？

# 物理学革命呼之欲出？

谁知道它为什么管用！



还记得一百年前大家知道怎么算波尔半径，光电效应等等，却不知道为什么能这样算的情形么？

# CMB的统计性质

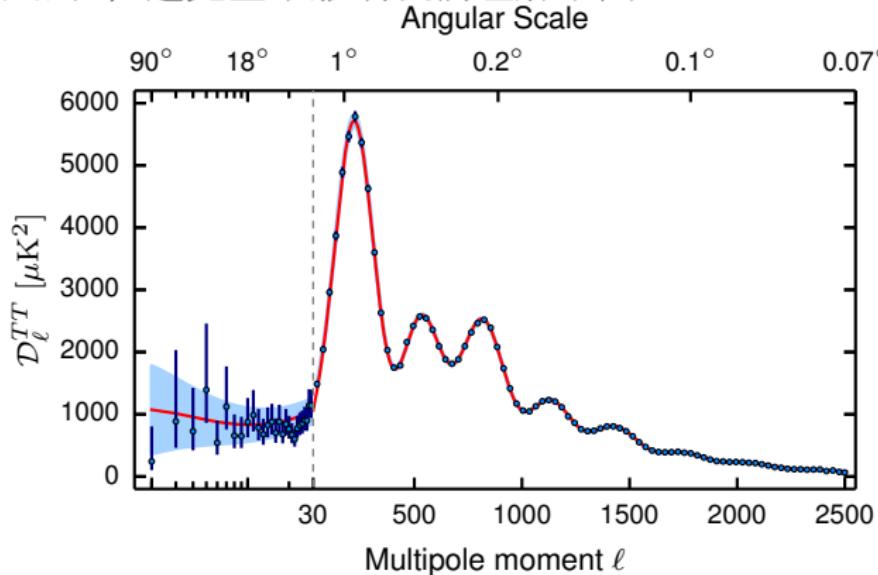
CMB温度起伏的根源可以一直追溯到最开始的真空暴涨。

真空态的统计性质  $\Rightarrow$  CMB的各种统计性质

最简单的，例如我们可以固定一个角度 $\theta$ ，然后计算夹角为 $\theta$ 的任意两个方向的CMB温度起伏的乘积的统计平均（这称为两点关联函数）。

# CMB的温度场两点关联函数测量

习惯上我们喜欢讨论  $C(\theta)$  的勒让德变换  $\mathcal{D}_\ell$ 。只要记住小的  $\ell$  对应大的  $\theta$ , 这完全不影响我们理解下图:

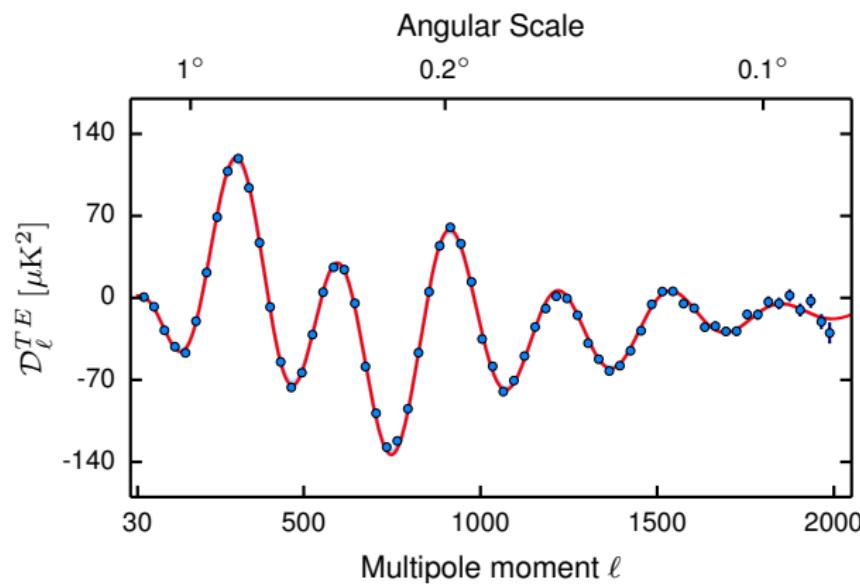


Planck卫星观测到的CMB温度场两点关联函数跟理论的比较。

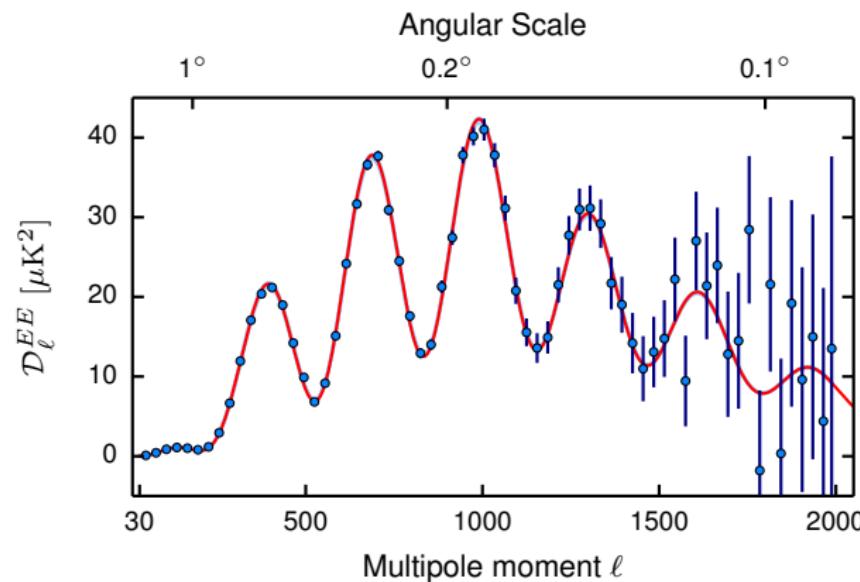
# CMB的极化度测量

实际上，对CMB我们不仅能观测它的温度，还能观测它的极化程度。（每个光子都有两个极化方向可以选择。）这又提供了一种检验理论的办法。

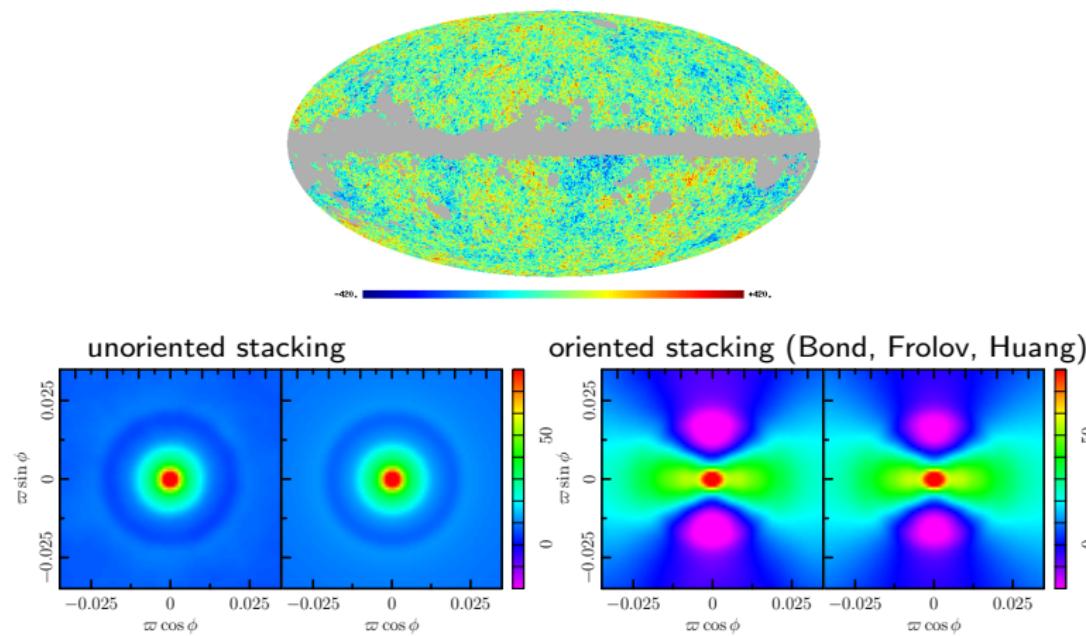
# Planck观测到的CMB温度场和极化场的两点关联函数



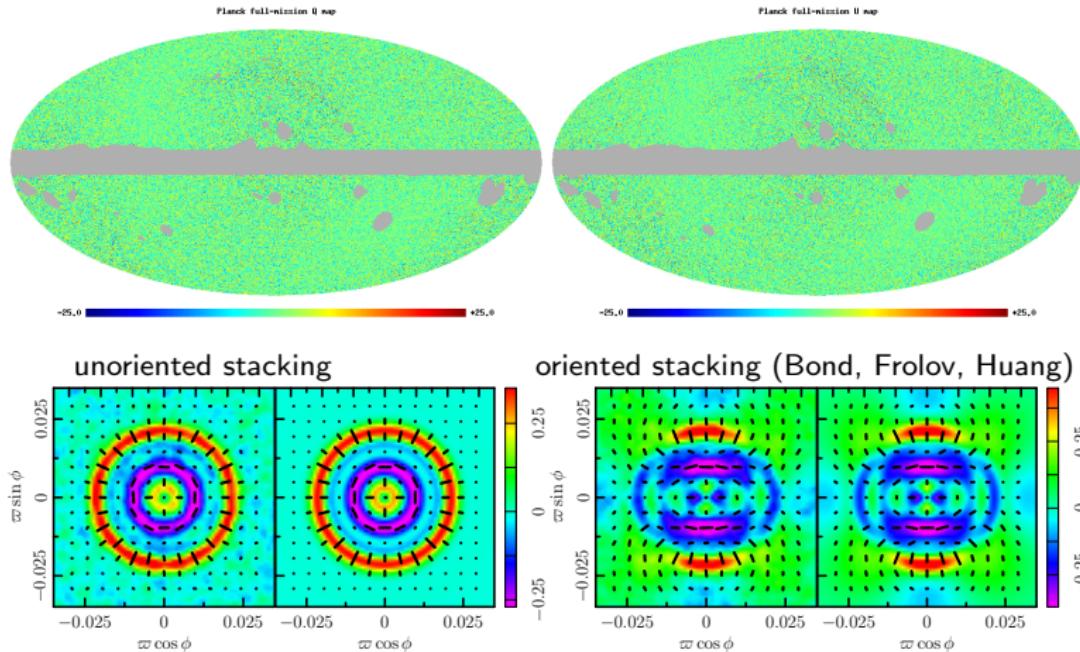
# Planck观测到的CMB极化场自身的两点关联函数



不喜欢关联函数？没关系，我们可以把温度场图进行直接叠加。

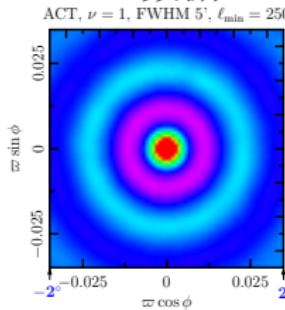


# The CMB Polarization Anisotropy Map from Planck

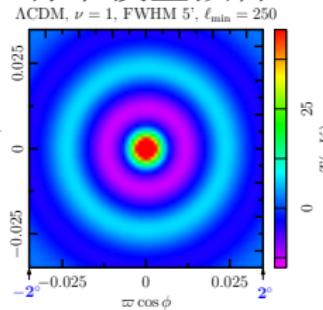


# 暗物质和暗能量存在的直观证据

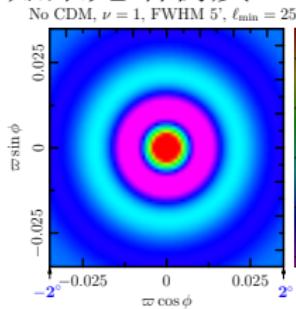
ACT数据



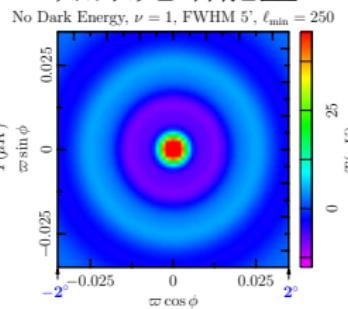
标准模型预言



如果无暗物质



如果无暗能量



# 宇宙学中还没有解决的问题

- ▶ 暗物质粒子的本质是什么？
- ▶ 暗能量的本质是什么？
- ▶ 早期宇宙暴涨造成的原初引力波是否能测到？
- ▶ 能否重建早期宇宙暴涨场的具体粒子物理模型？

这些都是宇宙学里比较热门的研究方向。

# 实际的研究往往复杂艰难

比如我最近在研究的Horndeski暗能量模型，它的作用量长成这样：

$$\begin{aligned} S = & \int \sqrt{-g} d^4x \left\{ G_2(\phi, X) + G_3(\phi, X)\square\phi + G_4(\phi, X)R \right. \\ & - 2G_{4,X}(\phi, X) [(\square\phi)^2 - (\nabla^\mu\nabla^\nu\phi)(\nabla_\mu\nabla_\nu\phi)] \\ & + G_5(\phi, X)G_{\mu\nu}\nabla^\mu\nabla^\nu\phi + \frac{1}{3}G_{5X}(\phi, X) \times [(\square\phi)^3 \\ & \left. - 3\square\phi(\nabla^\mu\nabla^\nu\phi)(\nabla_\mu\nabla_\nu\phi) + 2(\nabla_\mu\nabla_\nu\phi)(\nabla^\sigma\nabla^\nu\phi)(\nabla_\sigma\nabla^\mu\phi)] \right\} \end{aligned}$$

好了，不能再往下讲了……

你再这样讲下去要招不到  
研究生了



谢谢