

天文学正在发现

Bin HU

bhu@bnu.edu.cn

Astro@BNU

Office: 京师大厦9907

outline

1. 膨胀宇宙的发现
2. 暗物质的发现
3. 暗能量的发现
4. 宇宙微波背景辐射的发现
5. 中微子的发现
6. 引力波地发现
7. 脉冲星的发现
8. 宇宙第一缕曙光的“发现”



the
BIG BANG
THEORY



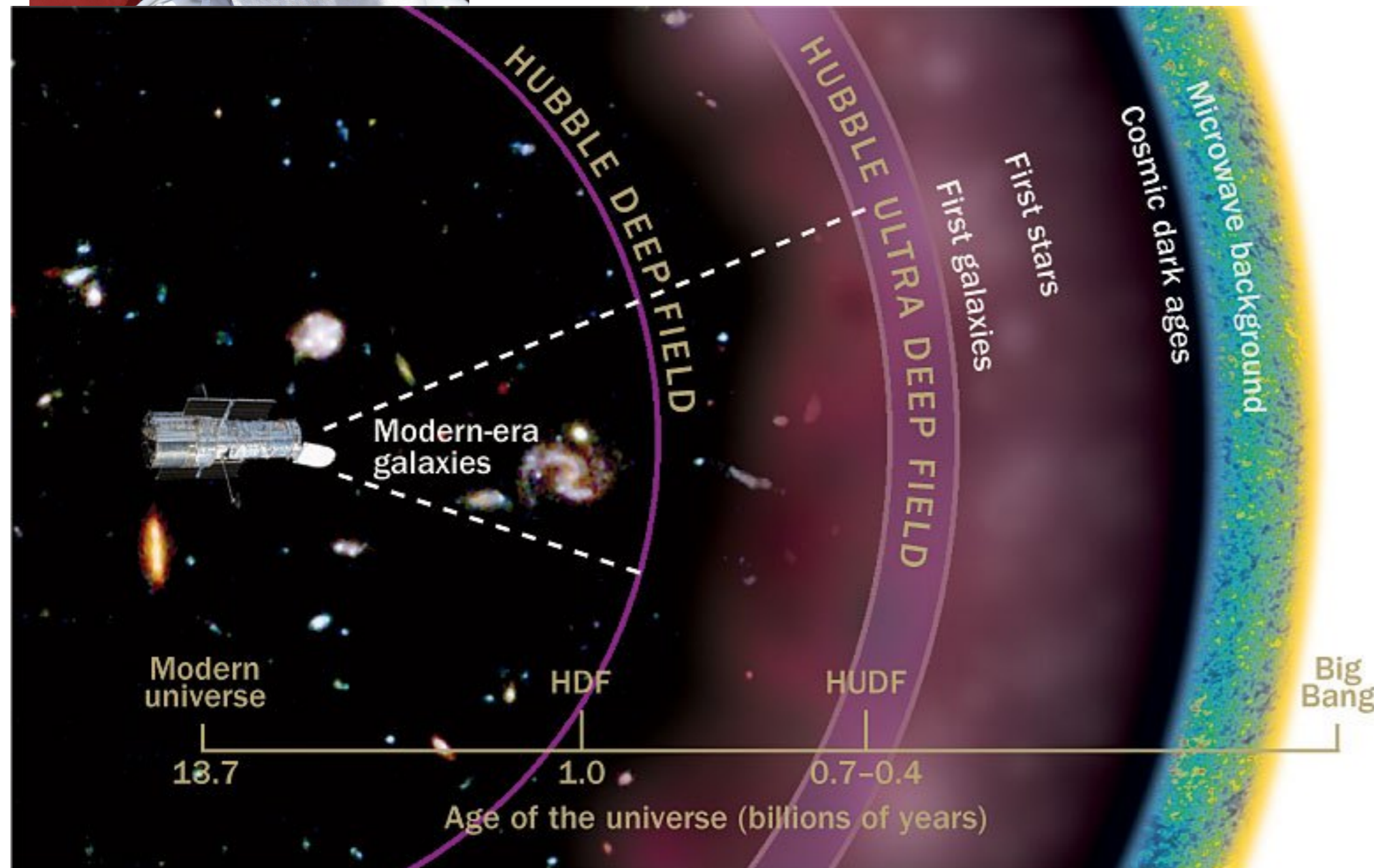




CMB: 热大爆炸残留下来的光子余晖



宇宙中最黯淡的光。。。。



A dim view

A map of the universe looks back in time to the cosmic dark ages, the interval between the time when radiation left over from the Big Bang streamed freely into space and when galaxies produced enough ultraviolet light to reionize the universe. Hubble, shown, cannot see that far back.

1948 Gamow



Hot Big Bang

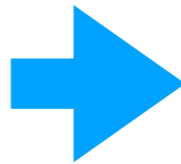
$$T_{\text{CMB}} = 5\text{K}$$

Dicke, Wilkinson, Peebles et. al.

1964

Penzias & Wilson

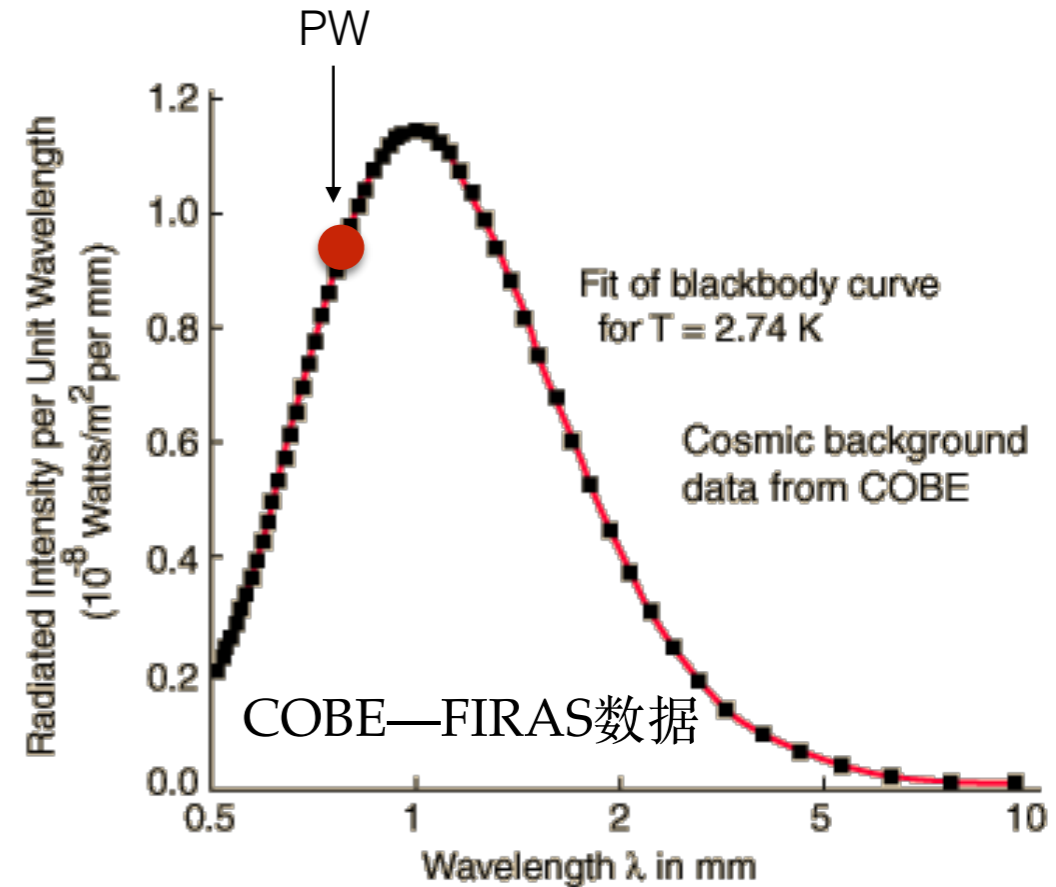
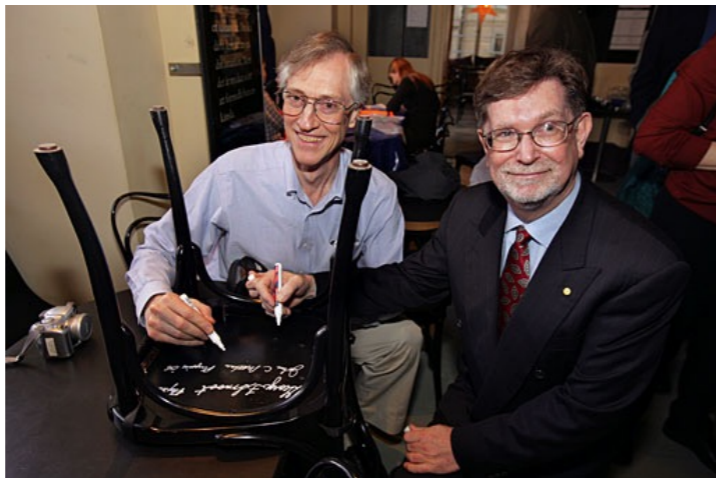
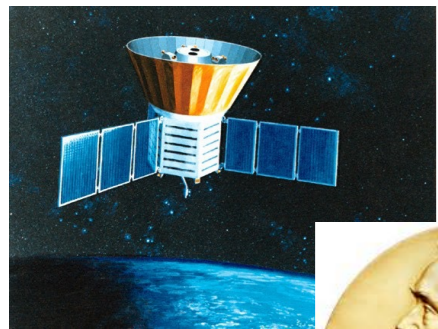
Nobel prize in Physics 1978



1992

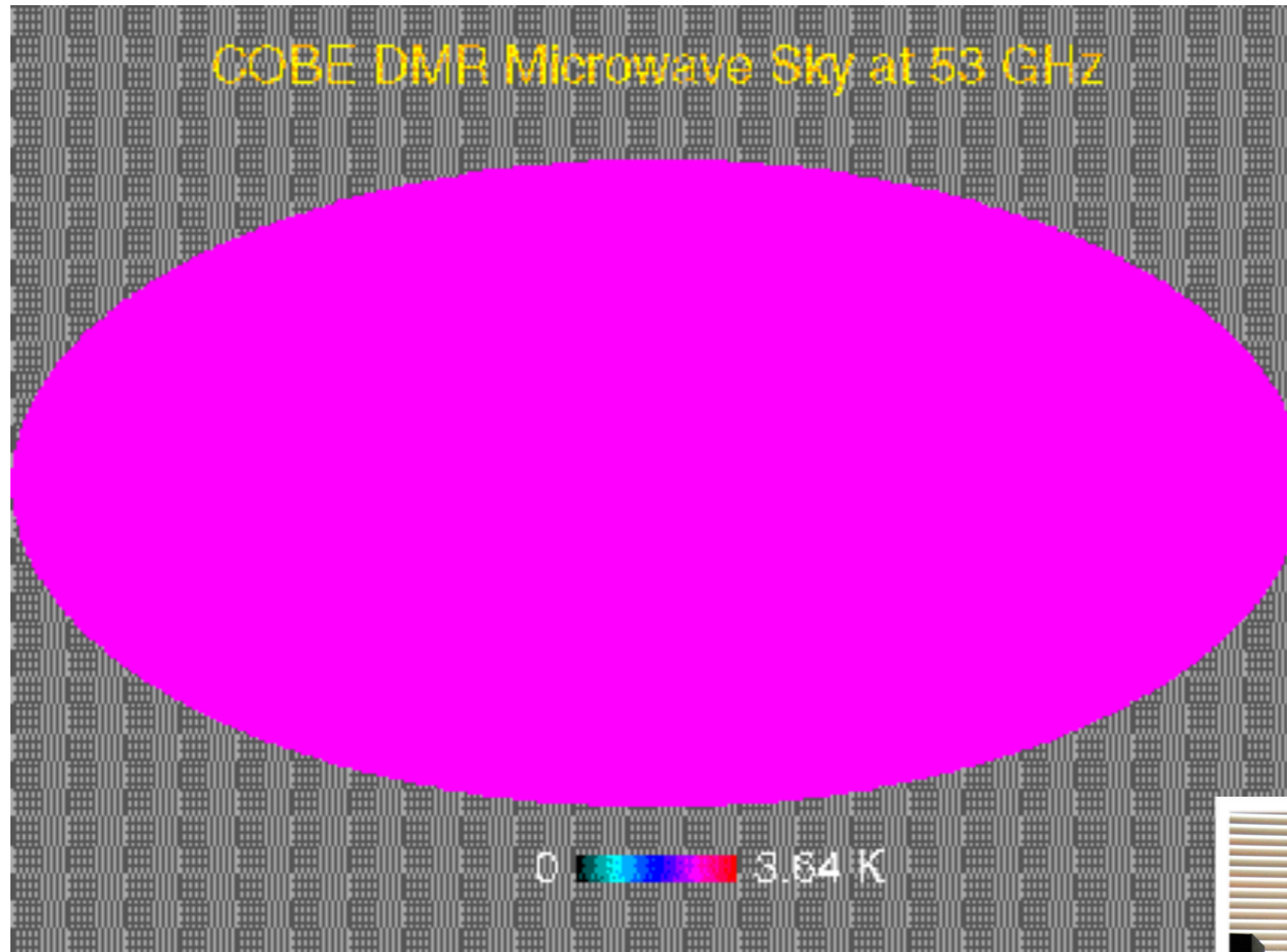
COBE (NASA)

Mather & Smoot



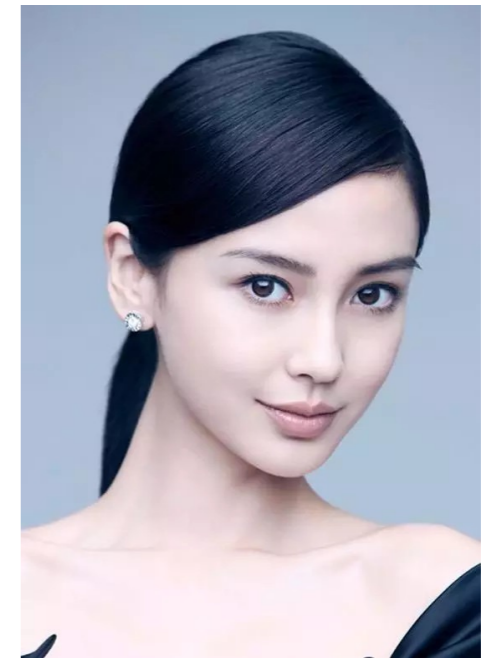
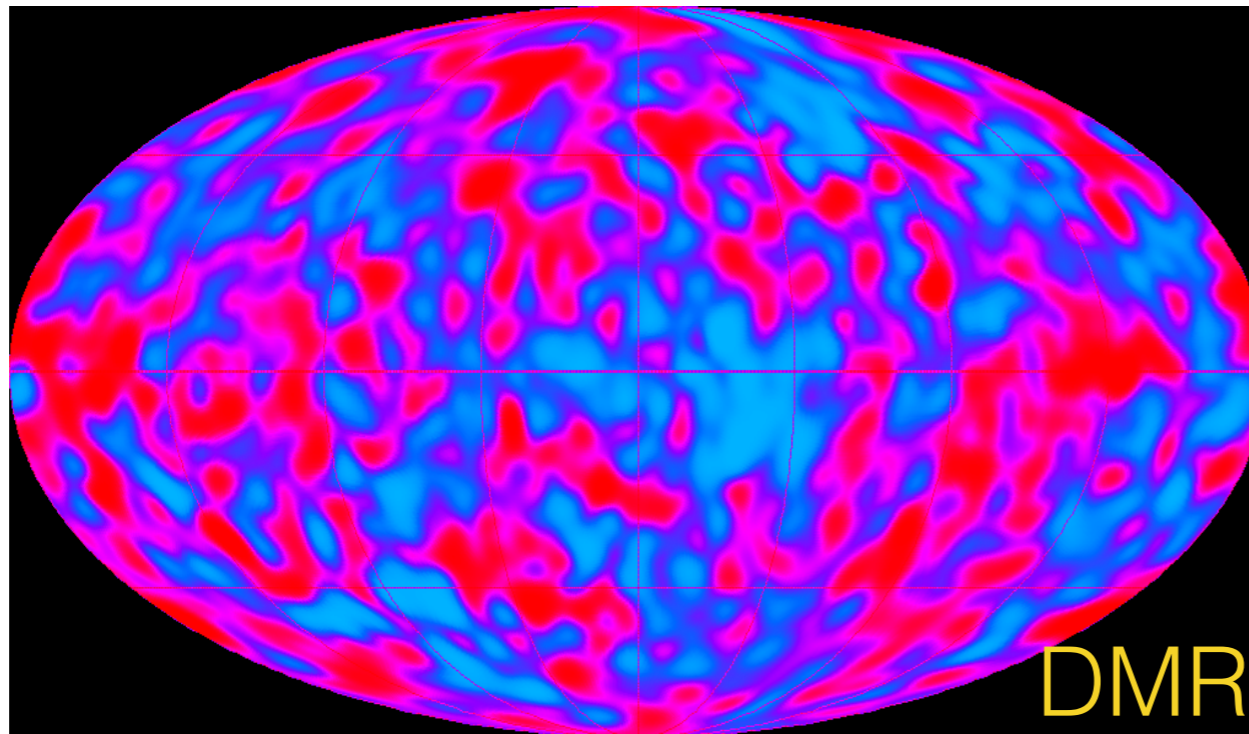
Nobel prize in Physics 2006

CMB isotropy



1992年，COBE卫星 (NASA)

DMR——测量各向异性的微分测量仪



陆埏老师：“她是我们能够用光学手段看到的宇宙自诞生之日起的第一张baby face”

primordial anisotropy

在红移1100之前(宇宙诞生38万年之前), 宇宙的物质状态为“一锅等离子体热汤”, 各种物质组分紧紧地耦合在一起, 其中最主要的是自由电子和光子的 Compton 散射(非弹性散射, 光子获得 / 损失能量)

$$e^{-}(\vec{q}) + \gamma(\vec{p}) \leftrightarrow e^{-}(\vec{q}') + \gamma(\vec{p}')$$

该过程在红移1100之前, 频繁发生无数次!
从而使得, “这锅等离子体热汤”达到热平衡。

当“这锅热汤”的温度降到大约3000K（约0.1eV）时，电子动能（系统热能），不足以抵抗氢原子的第一电离能（13.6eV），电子-质子形成中性氢原子。该过程几乎瞬时完成，之后就几乎没有自由电子

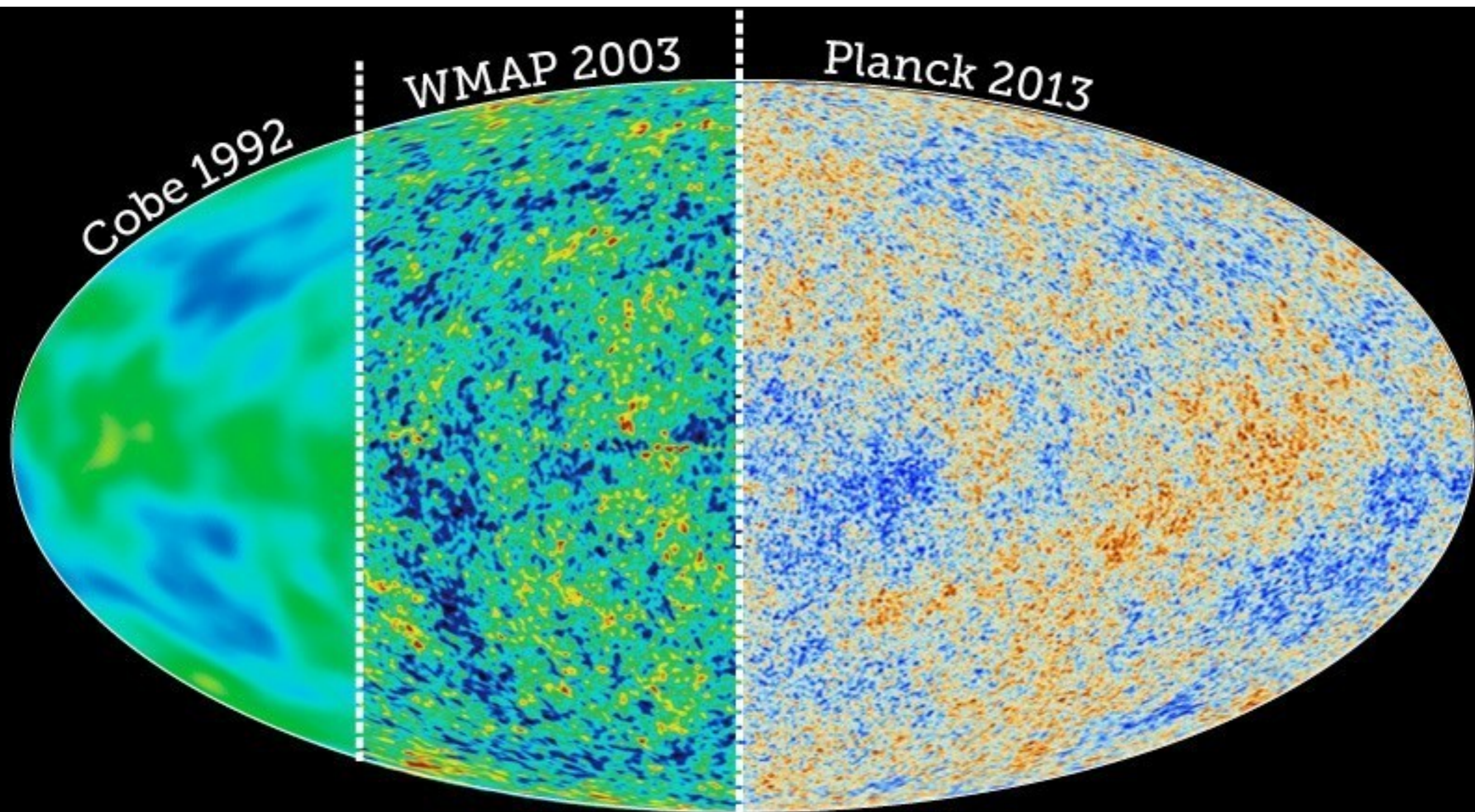
$$\cancel{e^{-}(\vec{q}) + \gamma(\vec{p}) \leftrightarrow e^{-}(\vec{q}') + \gamma(\vec{p}')}$$

之后，光子几乎自由地传播至现在！
(free streaming)

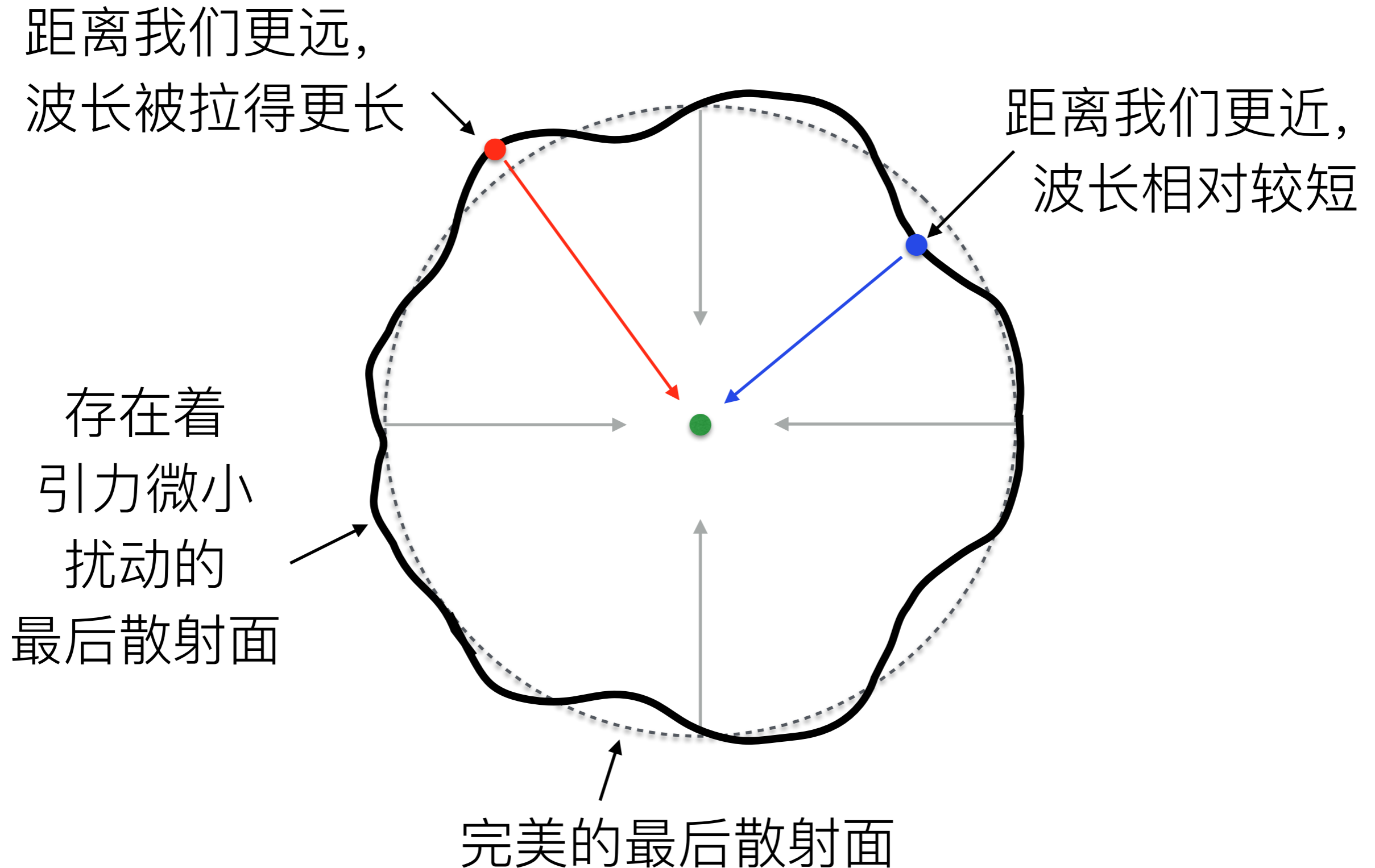
A Journey of Light



through Space and Time



原初CMB各向异性之Sachs – Wolfe 效应



secondary anisotropy

之前假设，经历了最后散射的CMB光子，自由地传播到现在。
其实，不然！宇宙，在之后的138亿年间，怎能什么都没发生
呢？

先看，在这之后，都发生了些哪些“大事件”

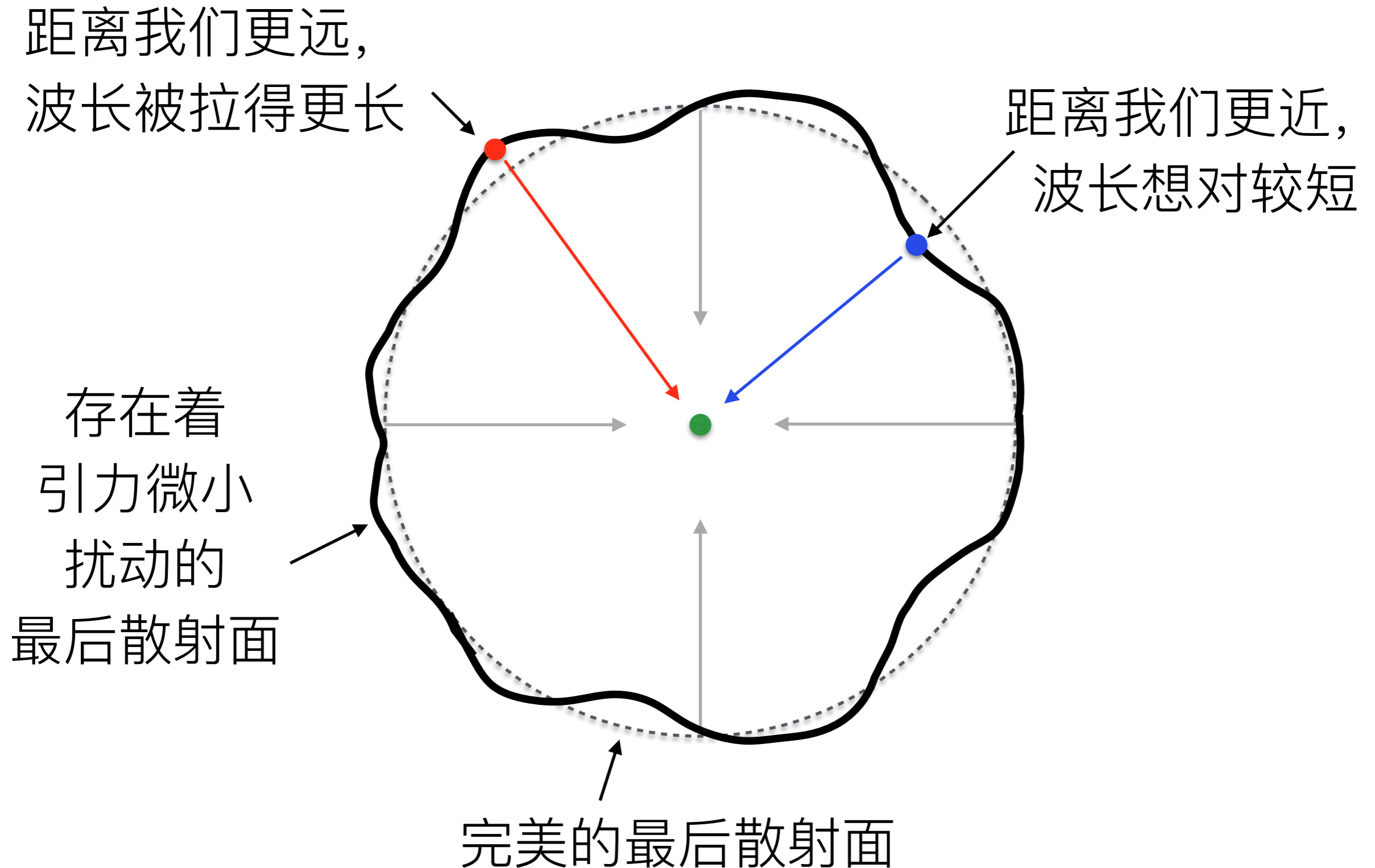
- 宇宙中的暗物质，在自引力的作用下，形成“暗物质晕”
dark matter halo
- 恒星被相继点燃，其周围的气体，“重新”被恒星电离/
reionization
- 红移为1之后，进入到暗能量为主时期，开始加速膨胀
dark energy

之前假设，经历了最后散射的CMB光子，自由地传播到现在。
其实，不然！宇宙，在之后的138亿年间，怎能什么都没发生
呢？

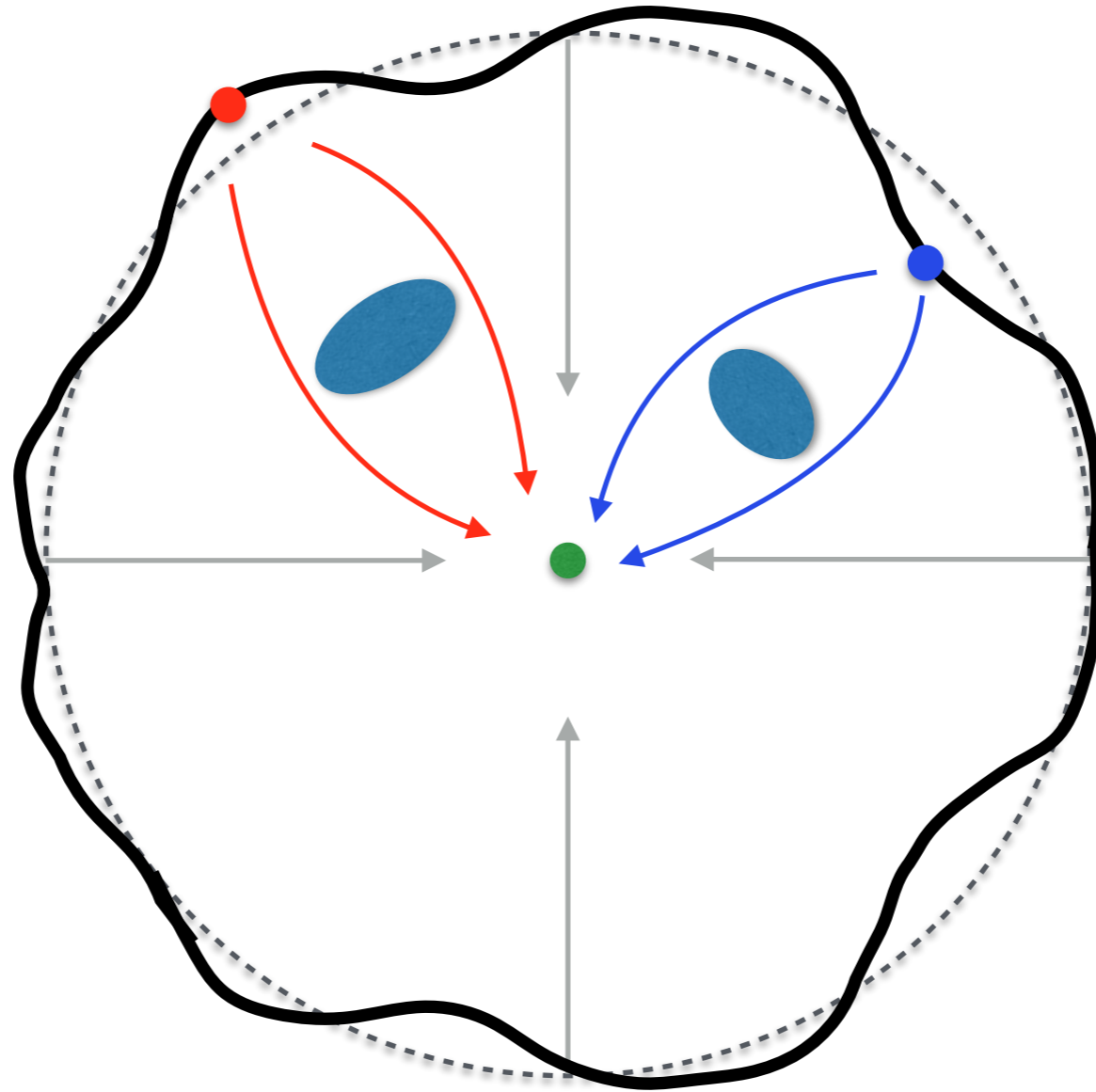
先看，在这之后，都发生了些哪些“大事件”

- **宇宙中的暗物质，在自引力的作用下，形成“暗物质晕”
dark matter halo**
- 恒星被相继点燃，其周围的气体，“重新”被恒星电离/
reionization
- 红移为0.3之后，进入到暗能量为主时期，开始加速膨胀
dark energy

原初CMB各向异性之Sachs – Wolfe 效应



CMB Lensing效应



混合不同方向来的光

之前假设，经历了最后散射的CMB光子，自由地传播到现在。
其实，不然！宇宙，在之后的138亿年间，怎能什么都没发生
呢？

先看，在这之后，都发生了些哪些“大事件”

- 宇宙中的暗物质，在自引力的作用下，形成“暗物质晕”
dark matter halo
- **恒星被相继点燃，其周围的气体，“重新”被恒星电离/
reionization**
- 红移为0.3之后，进入到暗能量为主时期，开始加速膨胀
dark energy

红移10，恒星大气被加热到10万K左右，中性氢原子重新被电离。当 CMB光子穿过由这些恒星组成的星系时，再次与其自由电子发生 Compton 散射。原初信息被擦除，CMB光子温度再一次被均匀化，90%的原初信息还得以保留。

因此，经过再电离过程之后的有效CMB光子温度为

$$e^{-\tau} \delta T / T$$

再电离过程的光学深度

之前假设，经历了最后散射的CMB光子，自由地传播到现在。
其实，不然！宇宙，在之后的138亿年间，怎能什么都没发生
呢？

先看，在这之后，都发生了些哪些“大事件”

- 宇宙中的暗物质，在自引力的作用下，形成“暗物质晕”
dark matter halo
- 恒星被相继点燃，其周围的气体，“重新”被恒星电离/
reionization
- **红移为0.3之后，进入到暗能量为主时期，开始加速膨胀**
dark energy

在上帝的第一推动之后，宇宙经历的各个历史时期中，虽然宇宙的大小（size）不断在变大 / 膨胀。但是，其膨胀速度是慢慢变小的，即减速膨胀。

这是由于，引力是一个吸引力，使各种物质组分聚集到一起。从而，阻碍着宇宙膨胀。

而在，大约红移为0.3的时候，（大约当前宇宙的一半大小），宇宙开始**加速**膨胀，进入到**暗能量**为主时期。

$$a=1/(1+z)$$

在物质为主时期，引力势 Ψ 不随时间变化， $\dot{\Psi} = 0$

这是由于，引力不稳定性所产生的对引力势的增加，
被背景膨胀所抵消。

泊松方程 $-k^2\Psi = 4\pi G a^2 \bar{\rho}\delta$

积分Sachs-Wolfe效应 / Integrated Sachs-Wolfe Effect

在暗能量为主时期，引力不稳定性不足以抵消背景膨胀， Ψ 开始衰减， $\dot{\Psi} < 0$

由于光子运动速度很快，对于窄势阱而言，势阱来不及反应

而对于，

视界尺度上的宽势阱而言，

即便是以光速运动，

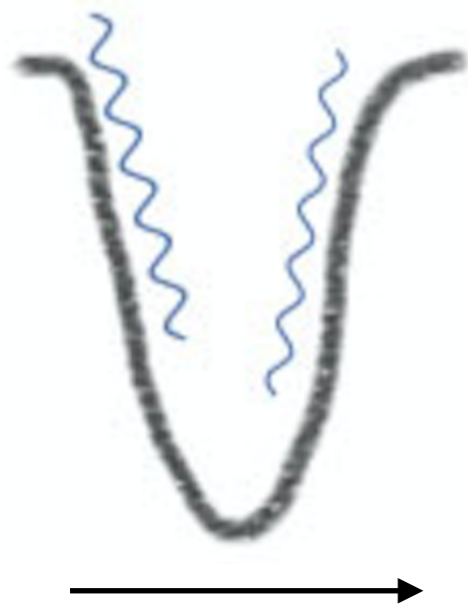
光子也要在

势阱中运动很久，

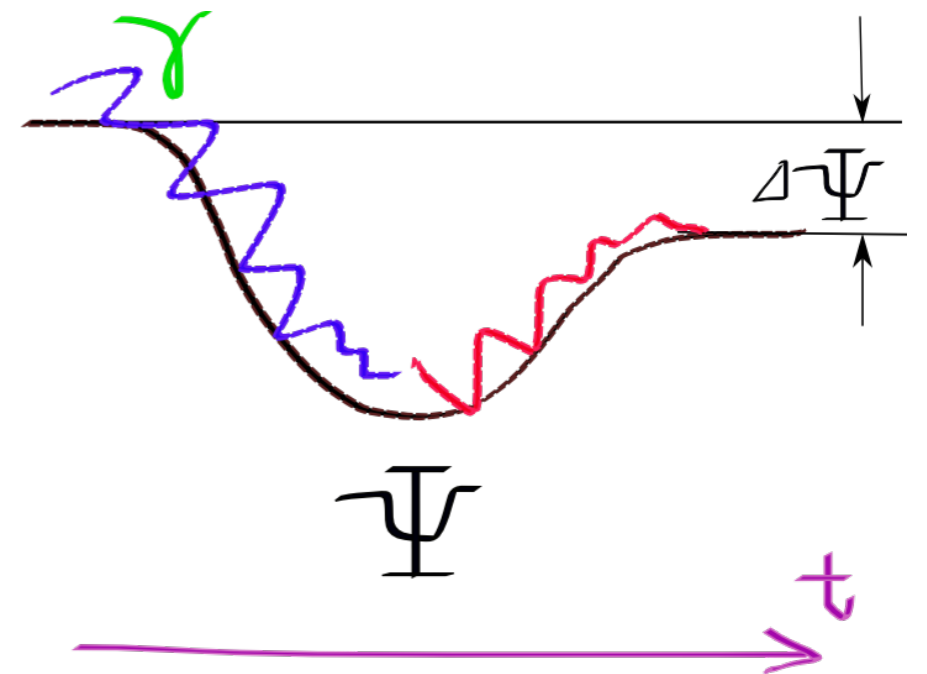
所以，有时间

来感受到

势阱深度的变化



窄势阱

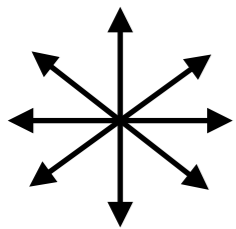
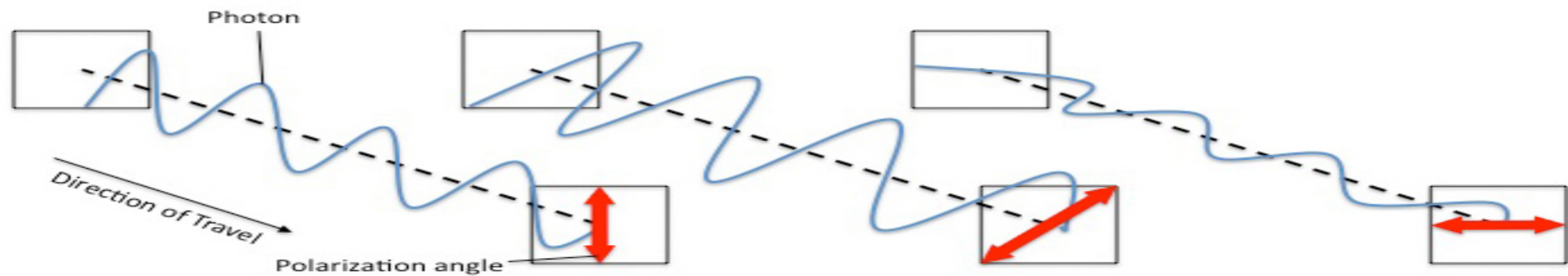


宽势阱

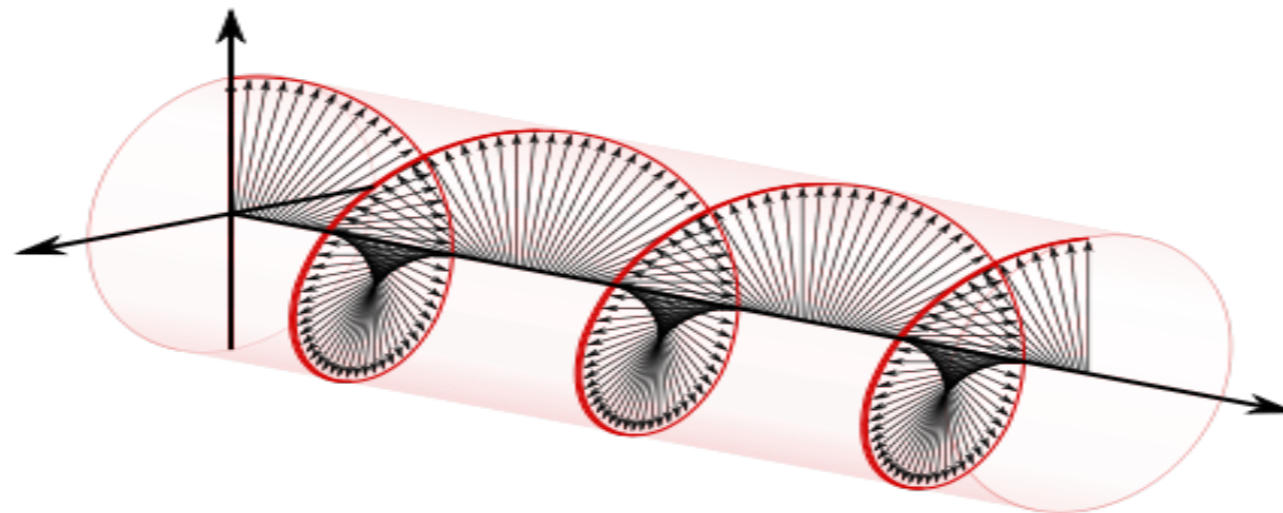
Polarization

至此，我们讨论的都只是**无偏振**CMB光子的温度扰动

但实际上，大约**5%**的CMB光子存在着**线**偏振 / linear polarization



CMB光子**不**存在**圆**偏振



光学中，描述光子强度张量 I_{ij} ，有4个Stokes参量

$$T = (I_{11} + I_{22})/4$$

非极化光

$$Q = (I_{11} - I_{22})/4$$

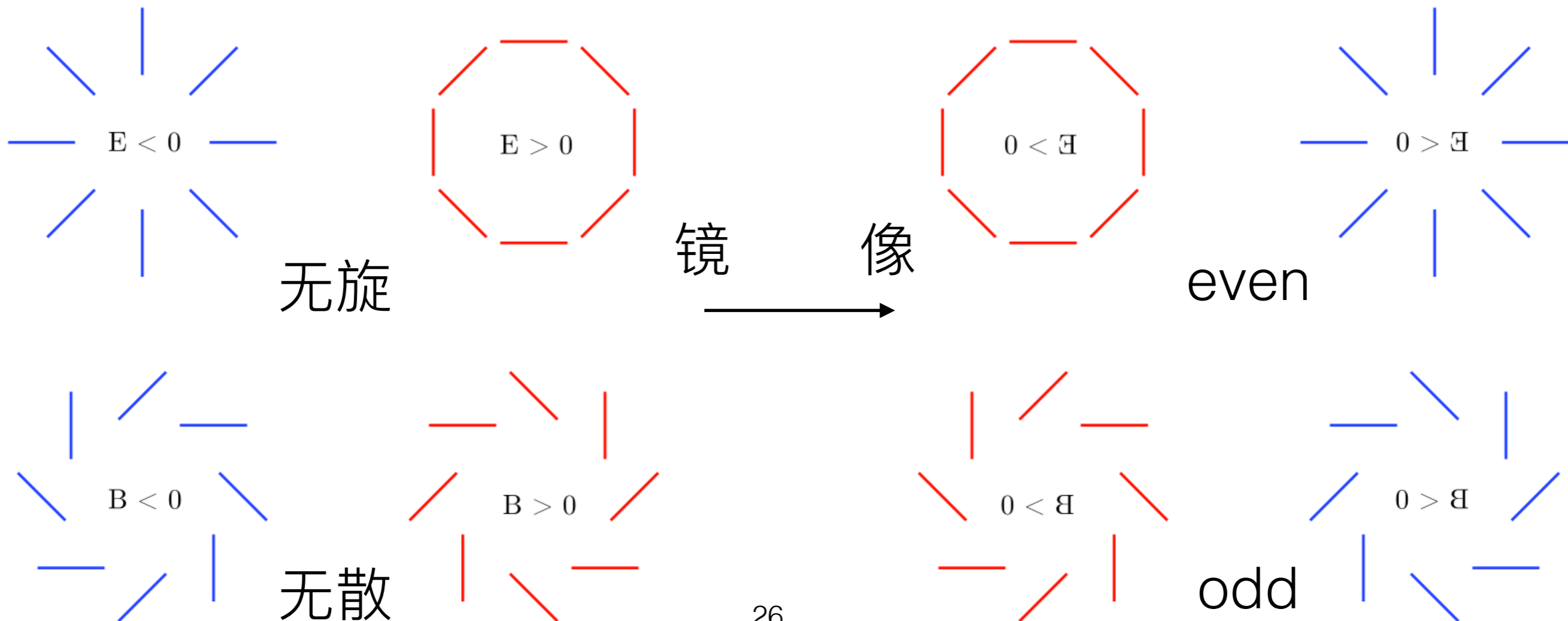
线性极化光

$$U = I_{12}/2$$

圆性极化光

$$V = 0$$

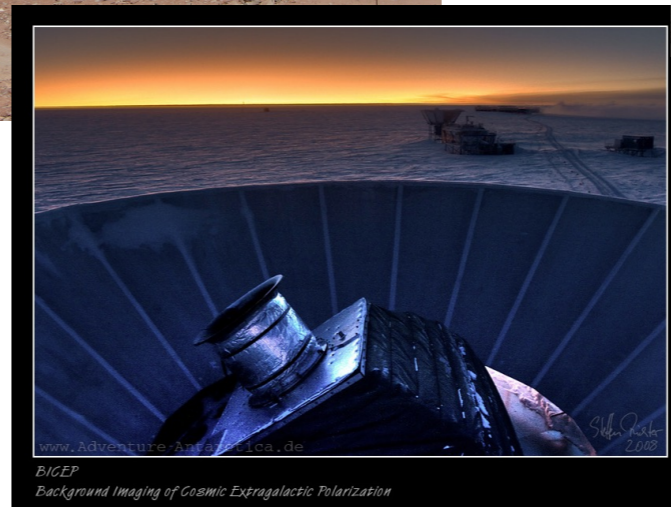
进一步，将 (Q, U) 组合成我们更为熟悉的，
电磁场的电部分 / E模，和磁部分 / B模



未来10~15年的CMB
实验，基本全部以测量
B模极化为目标



BICEP



PolarBear

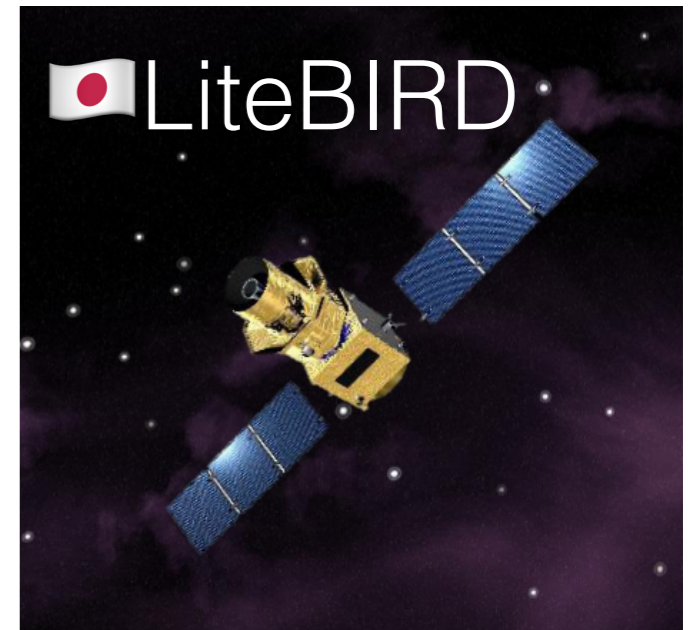


SPT

阿里计划



LiteBIRD



未来10~15年内的CMB实验，以将对 r 的测量精度提高到**0.01**，为科学目标。我国在西藏阿里天文台也正在积极展开，相关CMB的B模测量项目。**欢迎大家积极参与其中!!!**



欢迎大家通过“大学生科研项目”参加AiCPT项目!

已参加：15级李霄，17级王正一

problem-7: CMB对于精确宇宙学时代的到来有什么贡献?

problem-8: CMB Lensing 效应对于原初引力波的测量有什么效应?