

Cosmic Large-scale Structure Formations

Bin HU

bhu@bnu.edu.cn

Astro@BNU

Office: 京师大厦9907

18 weeks

outline

Background (1 w)

- universe geometry and matter components (1 hr)
- Standard candle (SNIa) (0.5 hr)
- Standard ruler (BAO) (0.5 hr)

Linear perturbation (9 w)

- relativistic treatment perturbation (2 hr)
- primordial power spectrum (2 hr)
- linear growth rate (2 hr)
- galaxy 2-pt correlation function (2 hr)
- Baryon Acoustic Oscillation (BAO) (2 hr)
- Redshift Space Distortion (RSD) (2 hr)
- Weak Lensing (2 hr)

~~Einstein-Boltzmann codes (2 hr)~~

Non-linear perturbation (6 w)

- Non-linear power spectrum (2 hr)
- halo model (2 hr)
- N-body simulation algorithms (2 hr)
- Press-Schechter (PS) halo mass function (2 hr)
- Extended-PS (EPS) halo mass function (2 hr)
- halo bias & halo density profile (2 hr)

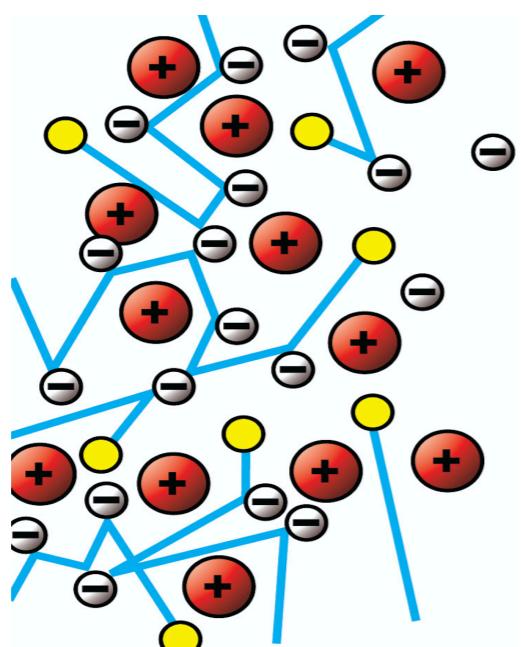
Statistical analysis (2 w)

- Monte-Carlo Markov Chain sampler (2 hr)
- CosmoMC use (2 hr)

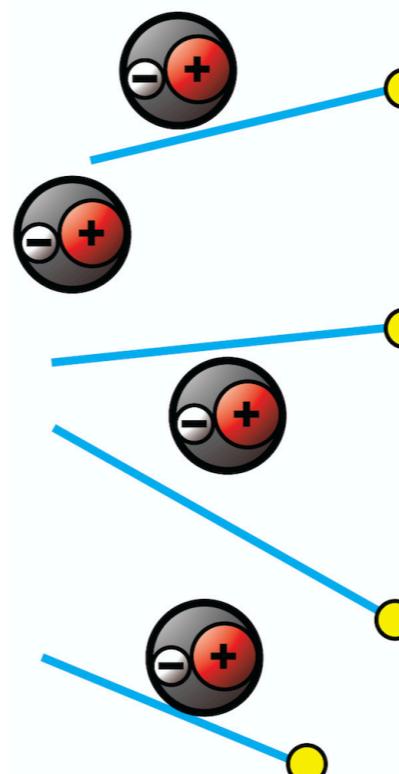
夏老师已讲 / 关于CMB数据部分，以后会单独开课

$T \sim 1\text{GeV}$
 quark \rightarrow proton&neutron
 $T \sim 1\text{MeV}$
 nucleosynthesis: create light element D, He, Li

$T \sim 0.1\text{eV}$
 recombination: $p^+ + e^- \rightarrow H$
 $z \sim (100, 1000)$
 $z \sim (6, 10)$
 dark ages
 reionization
 $z > 2$
 galaxy cluster
 $z < 1$
 Dark energy

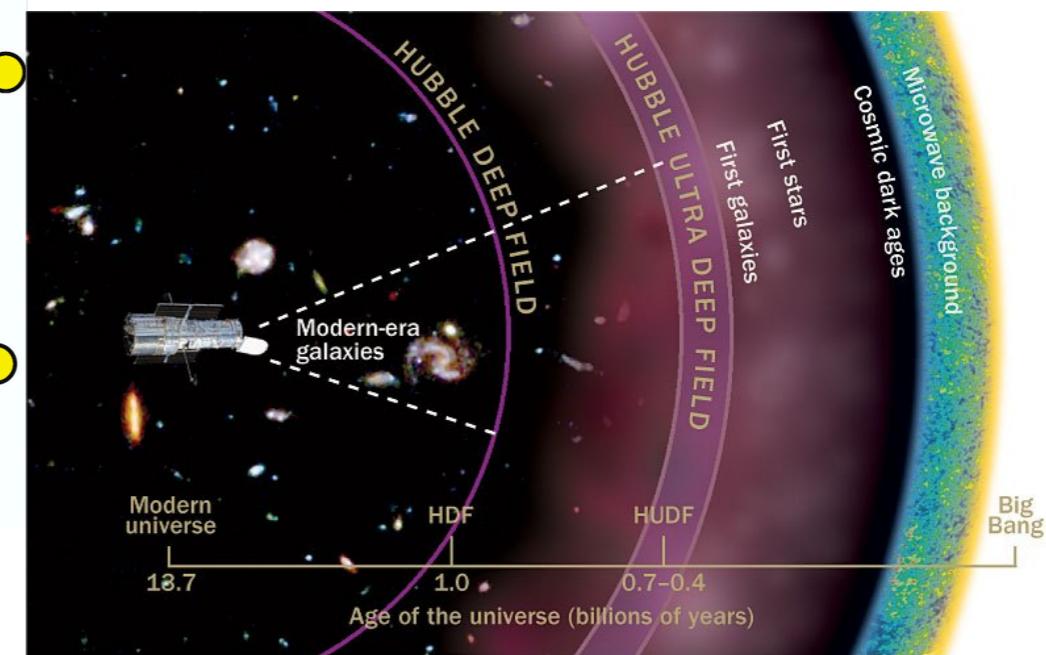


opaque



transparent

The faintest light from the very early universe.



1948 Gamow



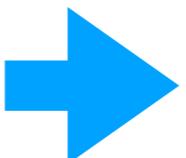
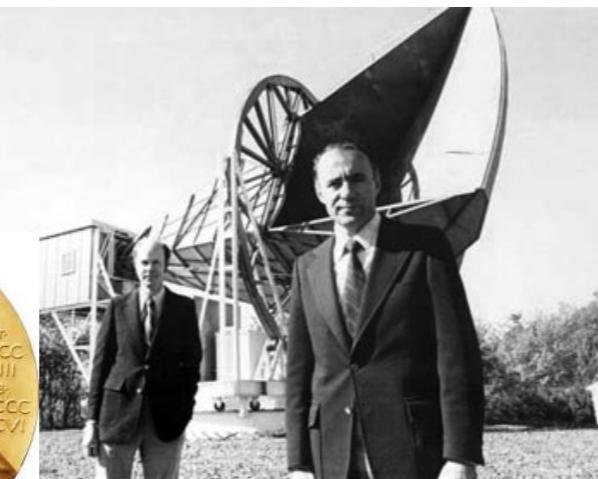
$T_{CMB} = 5K$

Hot Big Bang

1964

Penzias & Wilson

Nobel prize in Physics 1978



Dicke, Wilkinson, Peebles et. al.

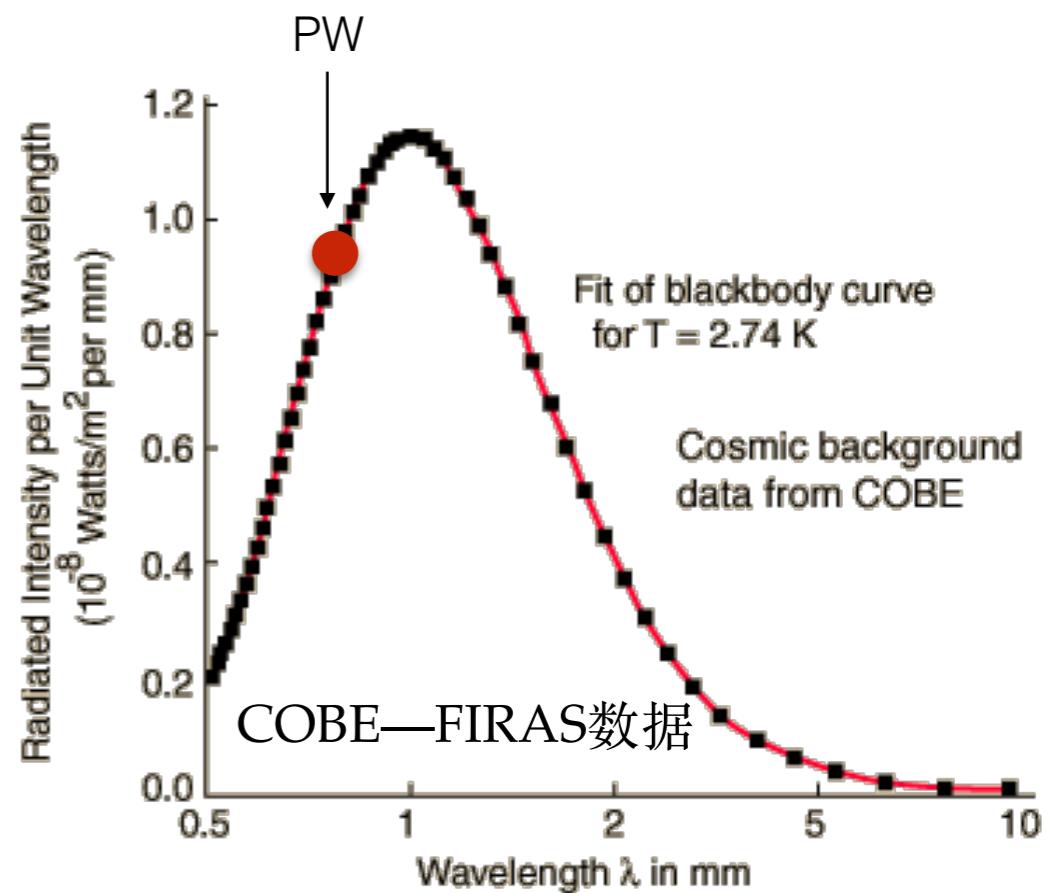
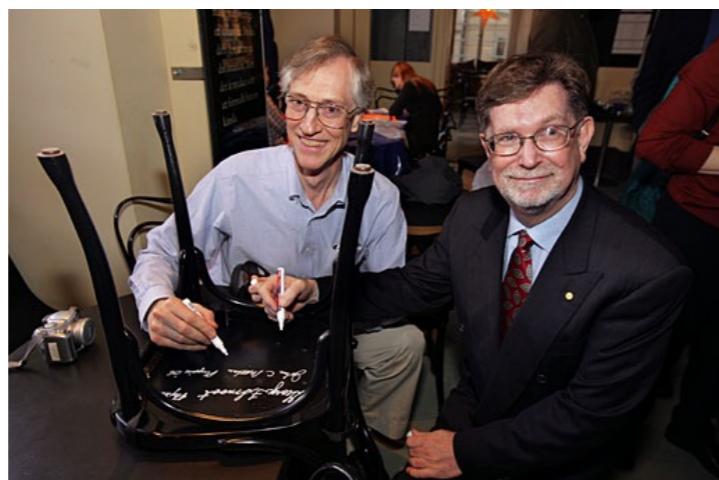


1992

COBE (NASA)

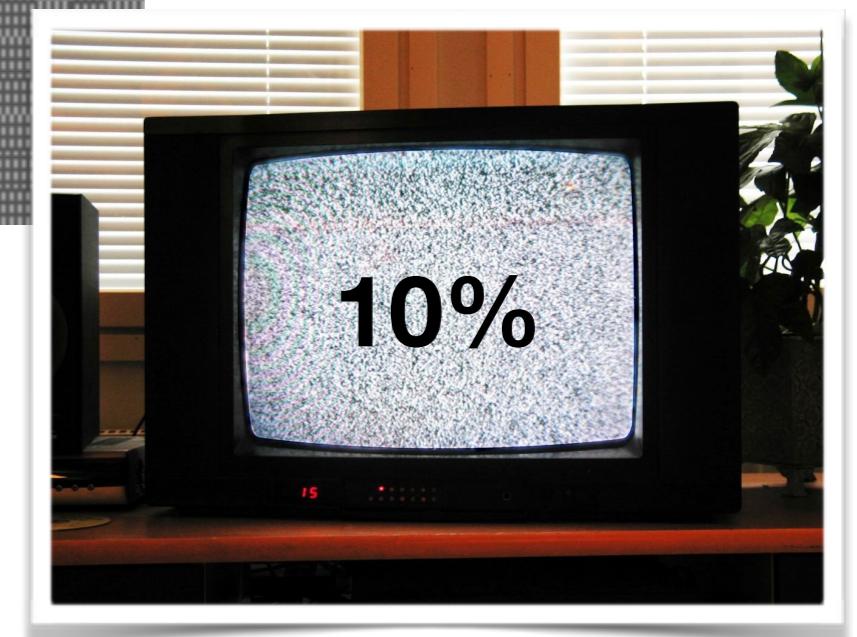
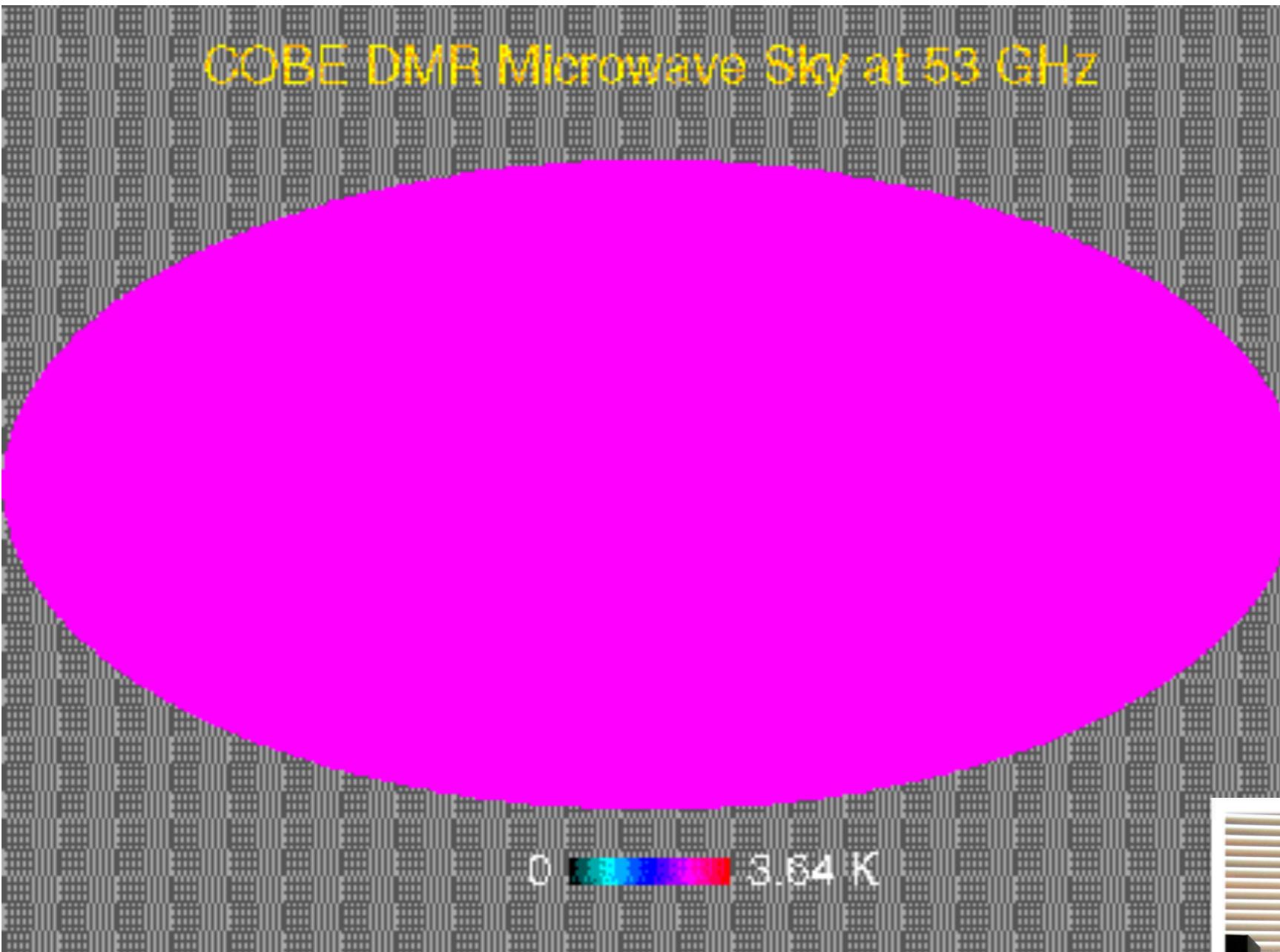


Mather & Smoot

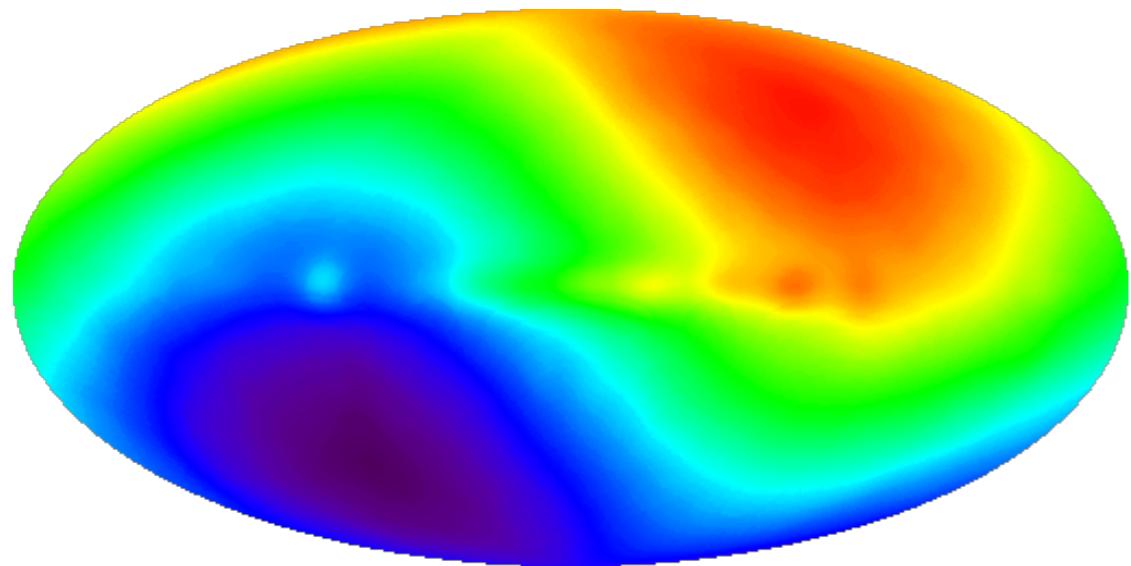


Nobel prize in Physics 2006

CMB isotropy



CMB anisotropy



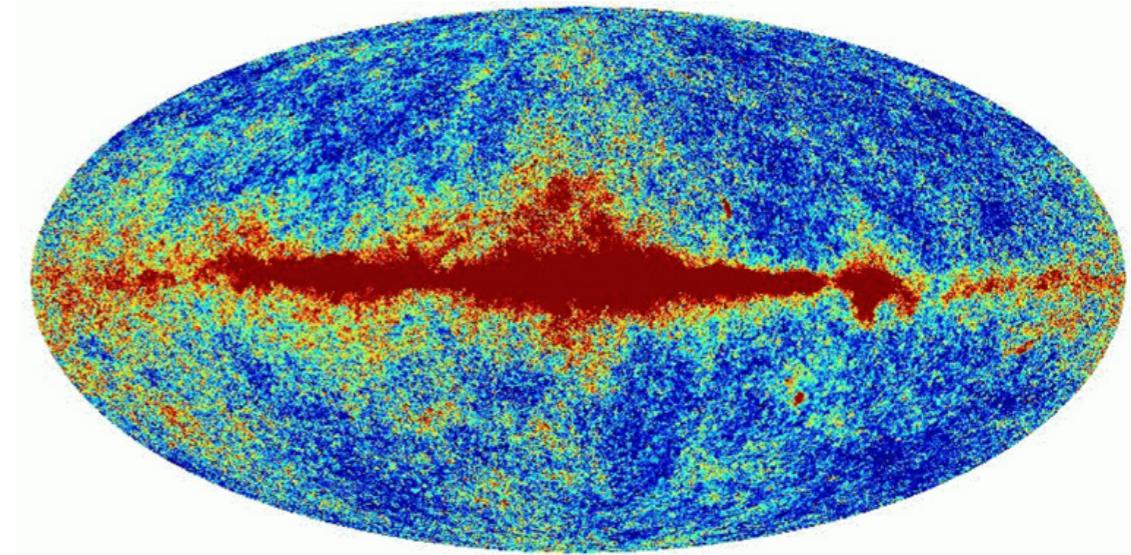
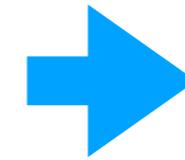
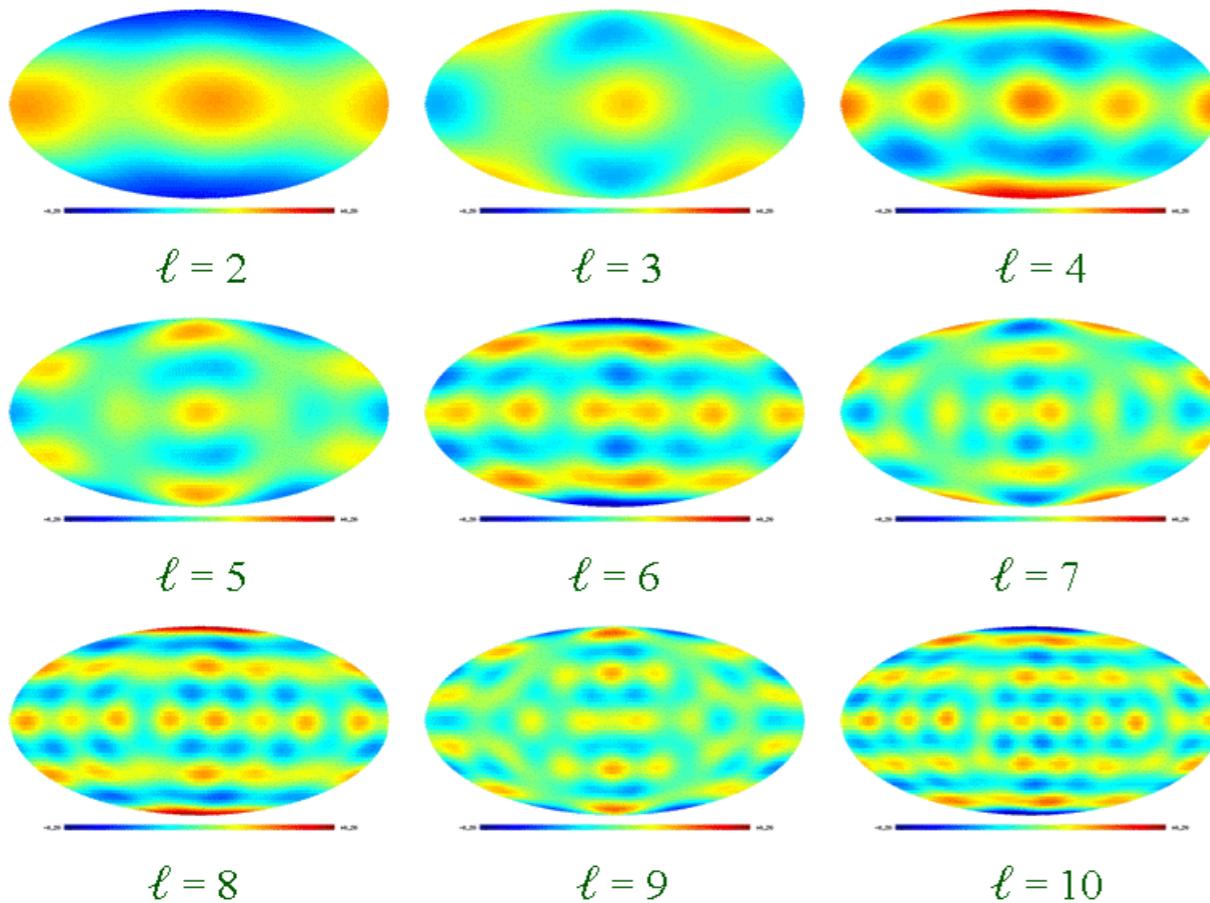
Dipole $\Delta T = 3.353\text{mK}$

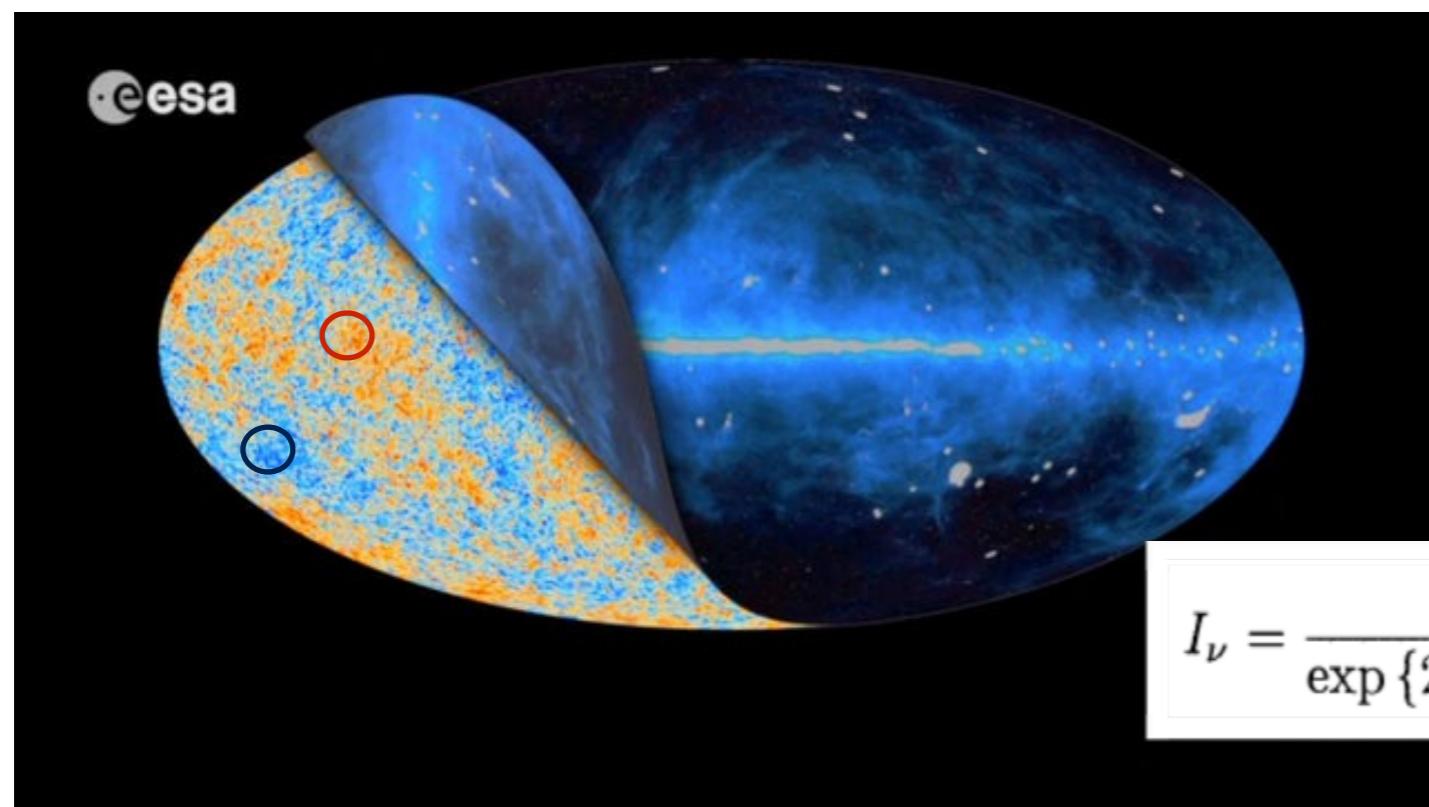
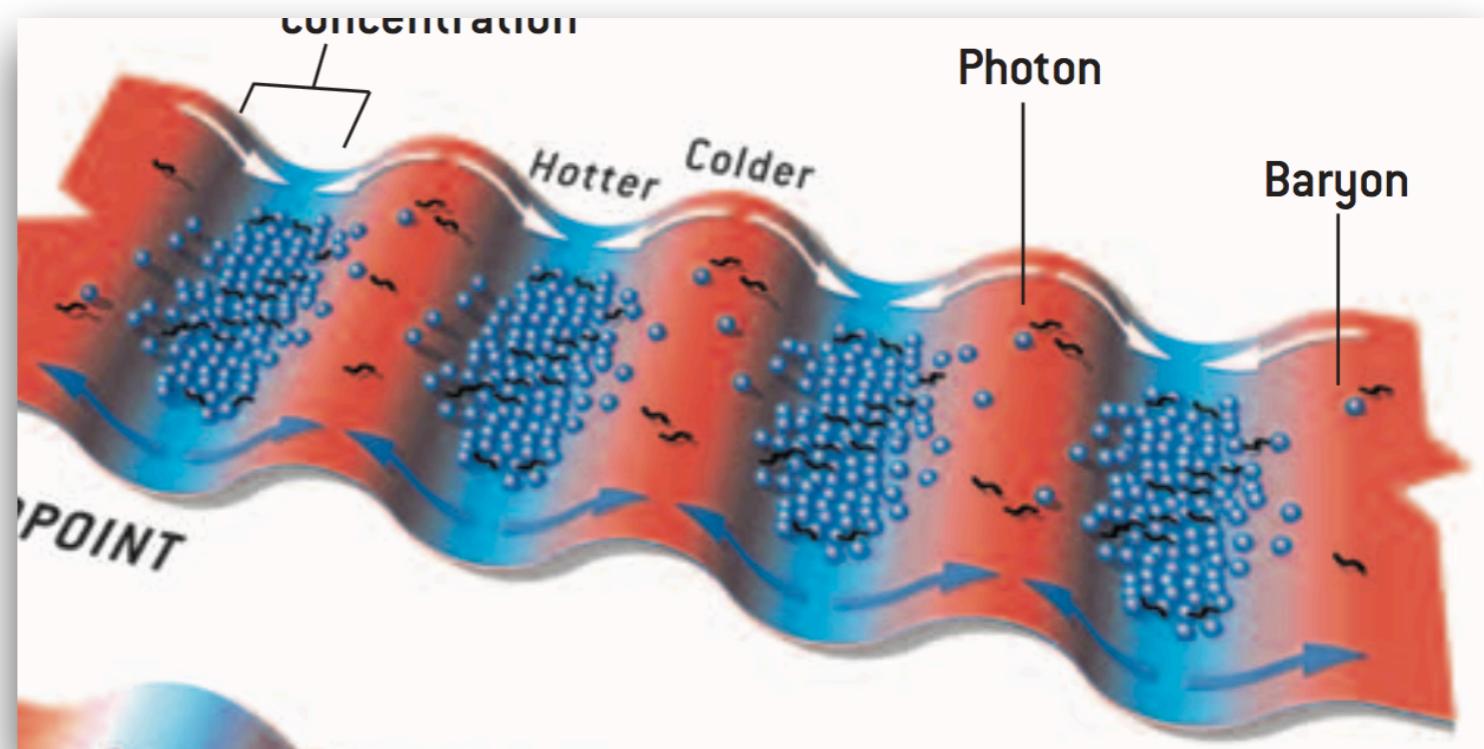
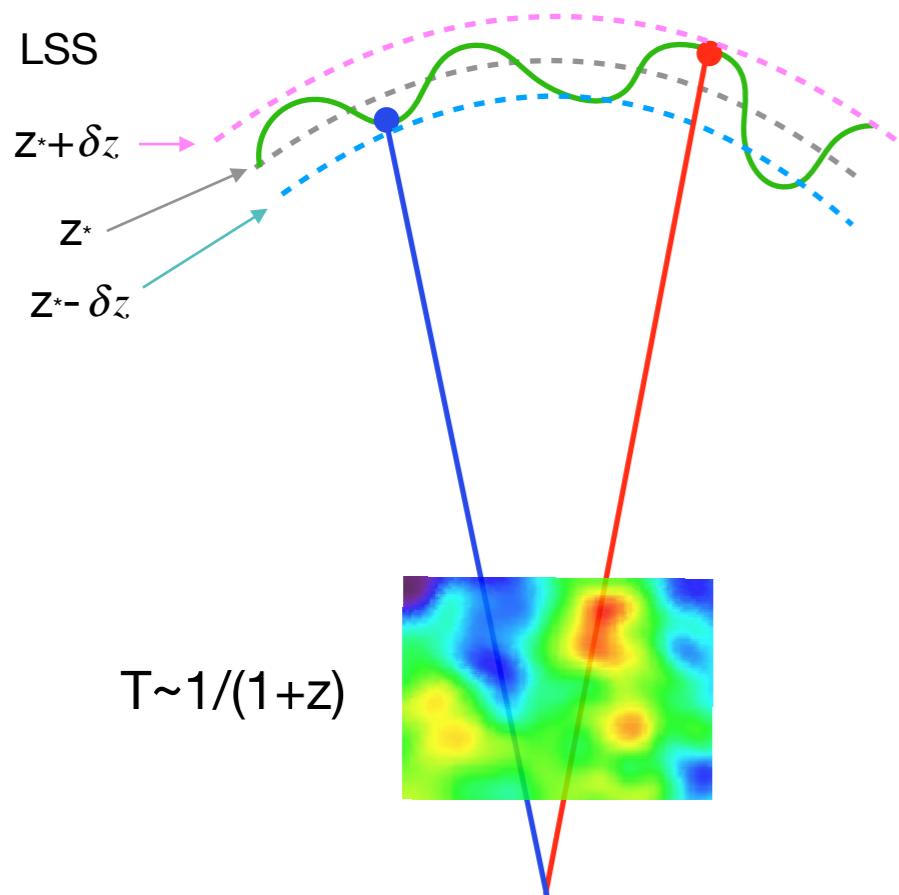
due to relative motion of our earth w.r.t. rest frame of CMB

higher multipoles

$\Delta T \sim 18\mu\text{K}$

due to primordial gravitational curvature pert.





every point is in a **local thermal equilibrium** (black body)

$$I_\nu = \frac{4\pi\hbar\nu^3/c^2}{\exp\{2\pi\hbar\nu/k_B T\} - 1}$$

$T(\underline{x}, t)$

Plane-wave inhomogeneity

gravitational well

(hot regime)

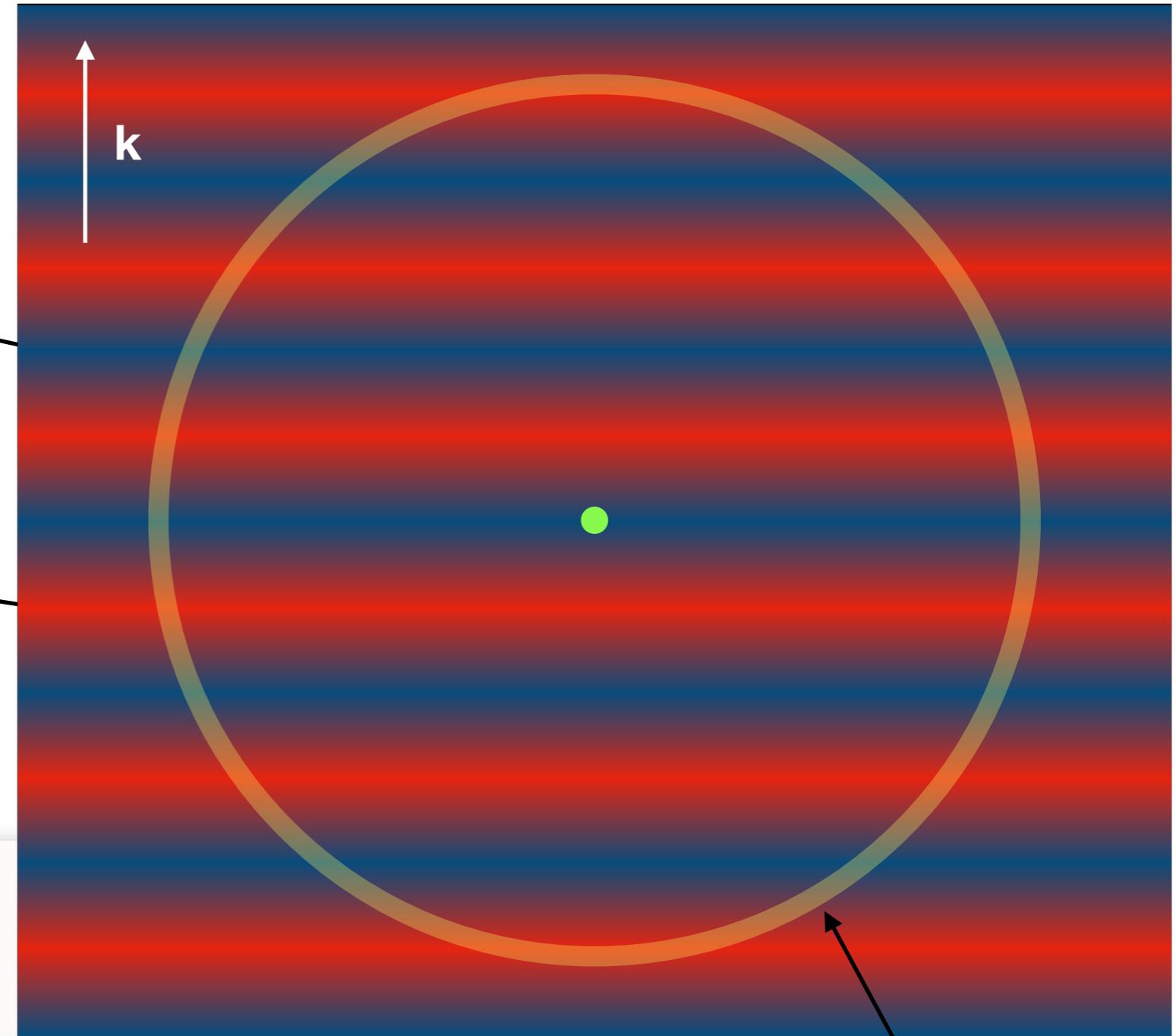
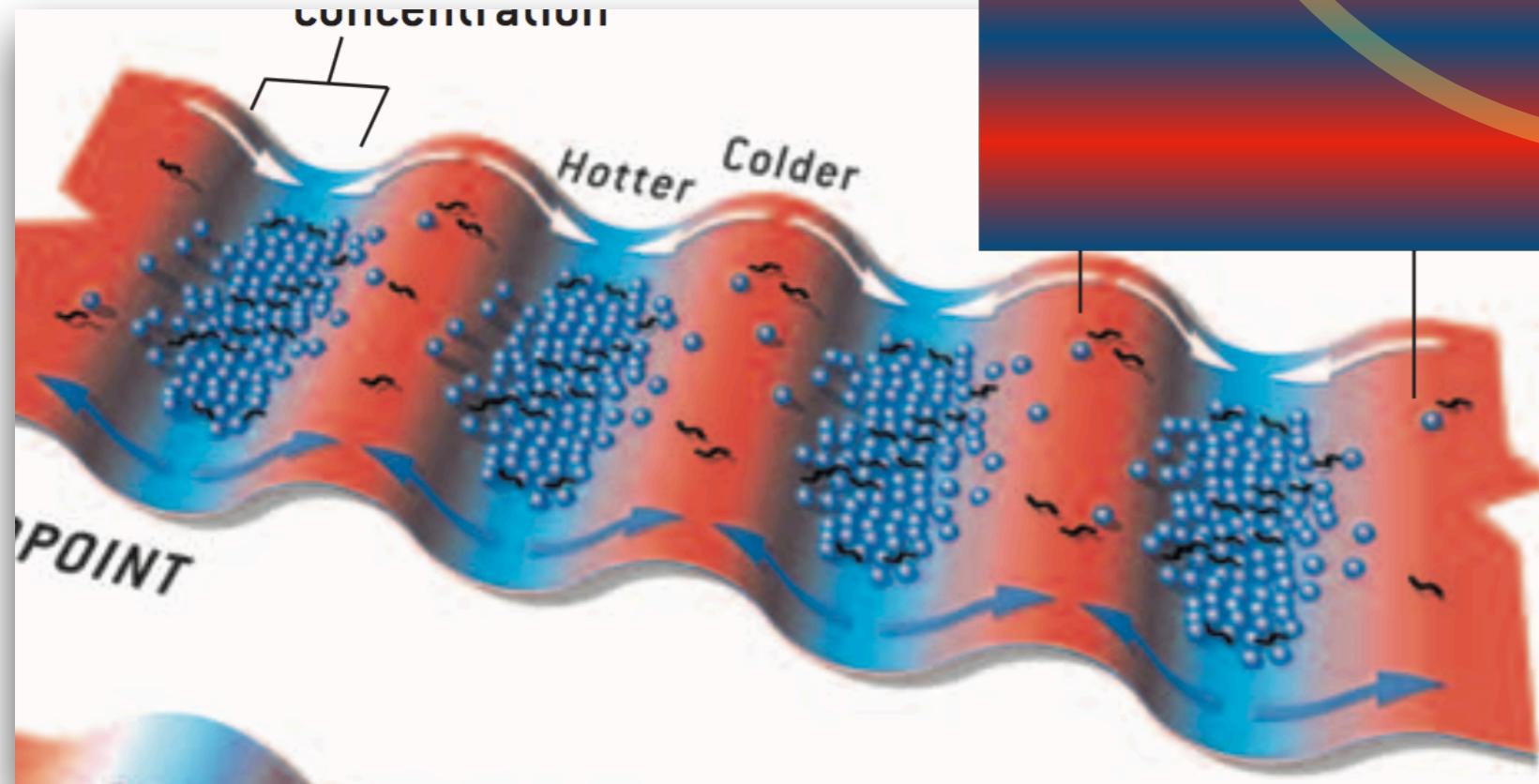
gravitational wall

(cold regime)

CONCENTRATION

Hotter

Colder

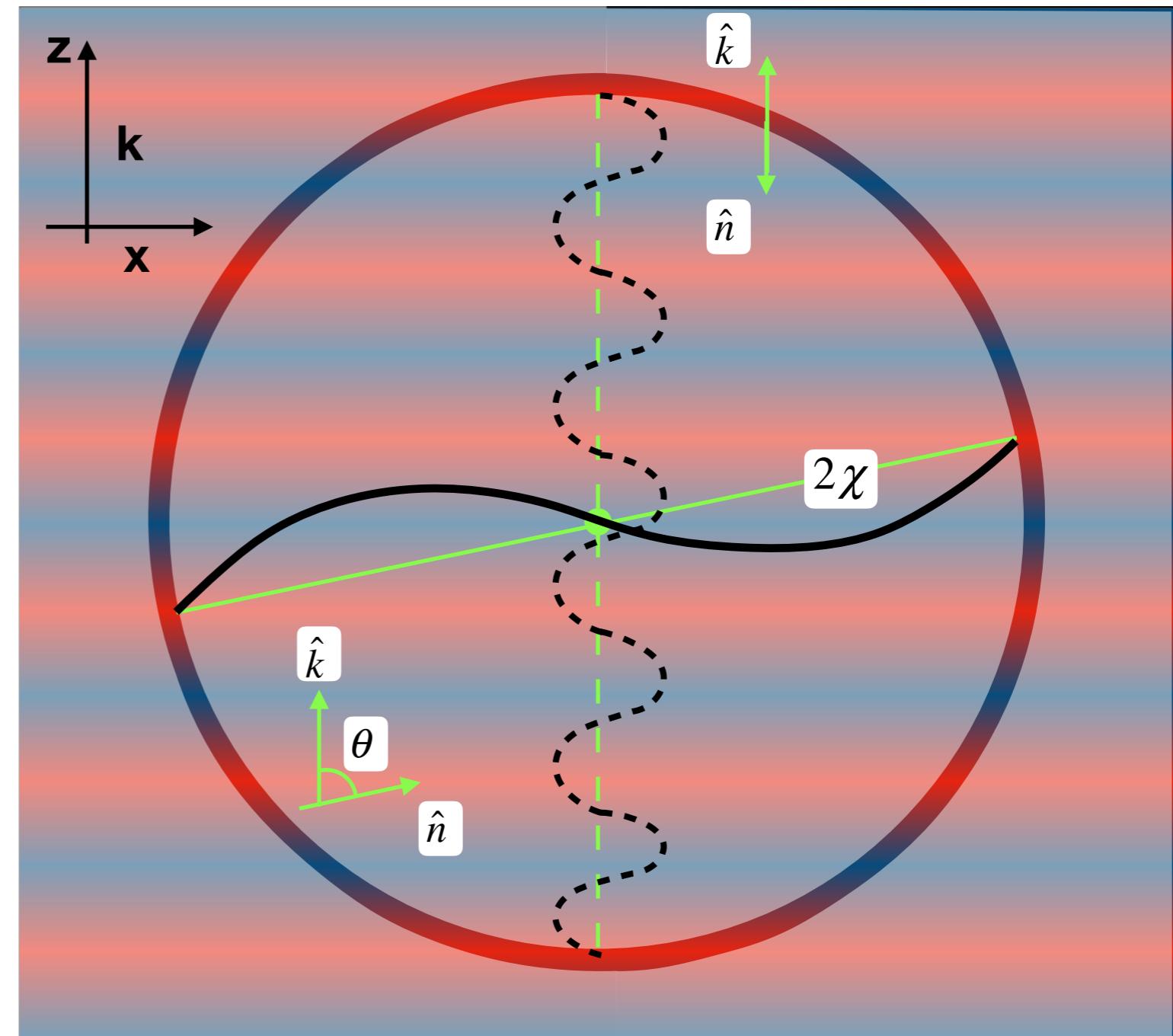
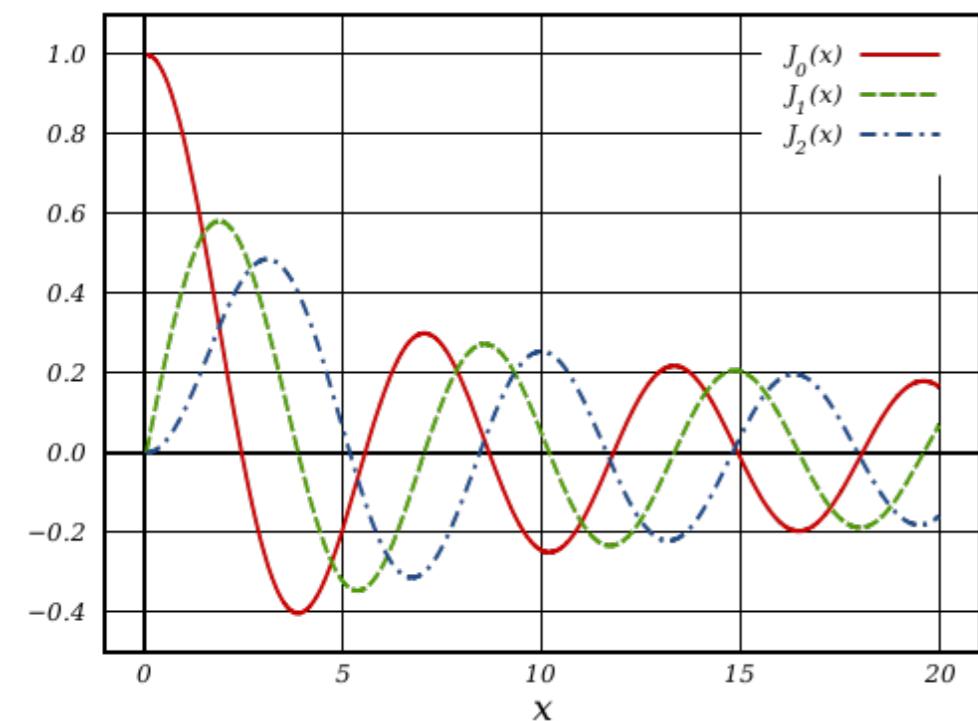


last scattering surface

$$\psi(\hat{n}) = \psi(\chi, \vec{k}) e^{i(\hat{k} \cdot \hat{n})k\chi}$$

$$= \psi(\chi, \vec{k}) \sum_{\ell, m} [4\pi i^\ell Y_{\ell m}^*(\hat{k}) j_\ell(k\chi)] Y_{\ell m}(\hat{n})$$

$$= \psi(\chi, \vec{k}) \sum_{\ell, m} \psi_{\ell m}(\chi, \vec{k}) Y_{\ell m}(\hat{n})$$

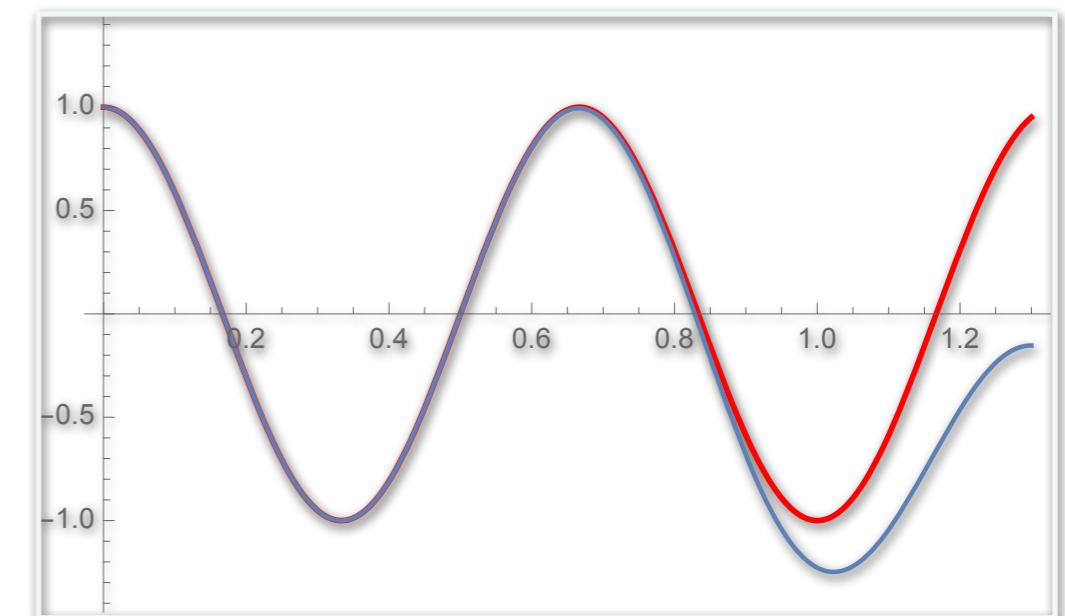
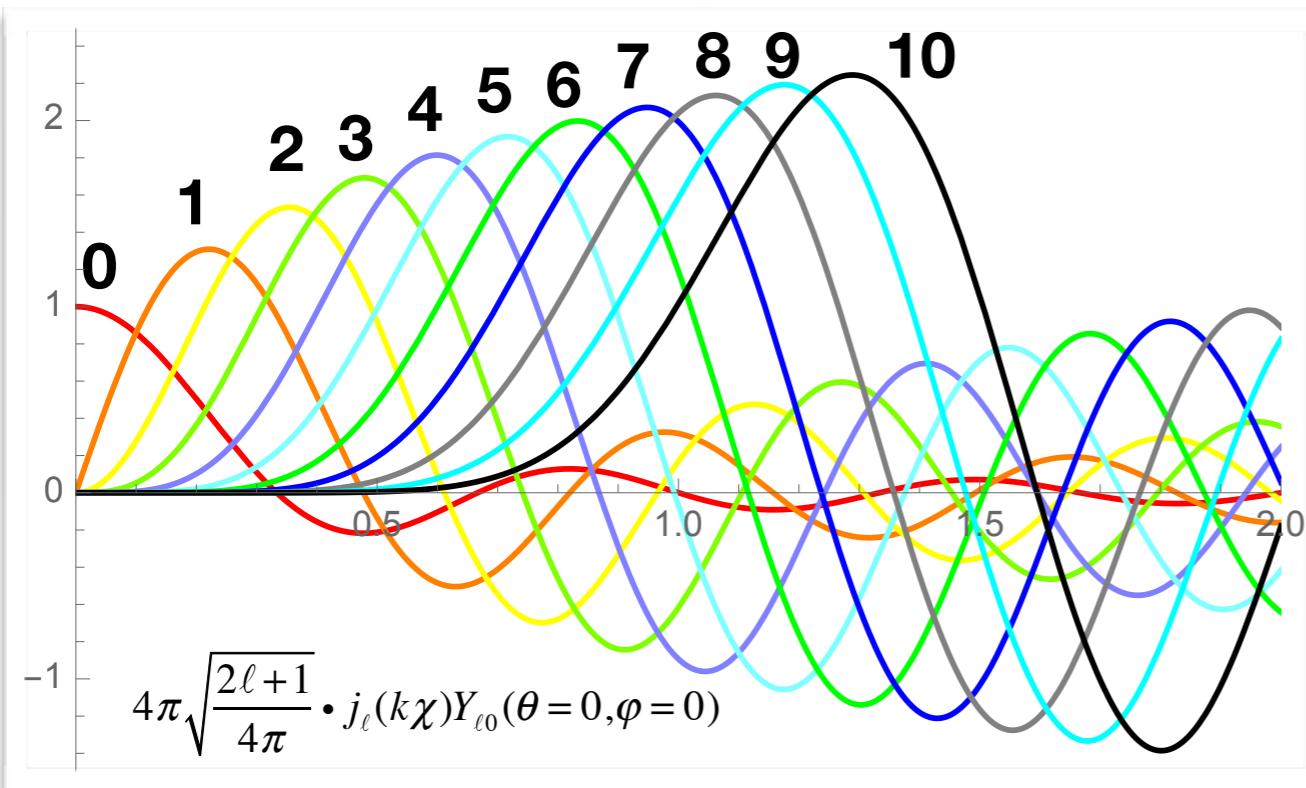


$$e^{i(\hat{k} \cdot \hat{n})k\chi} = 4\pi \sum_{\ell=0} \sqrt{\frac{2\ell+1}{4\pi}} \cdot i^\ell \cdot j_\ell(k\chi) Y_{\ell 0}(\hat{n}) \quad (\hat{z} \parallel \hat{k})$$

We use Spherical Harmonics and Spherical Bessel functions to expand the plane-wave

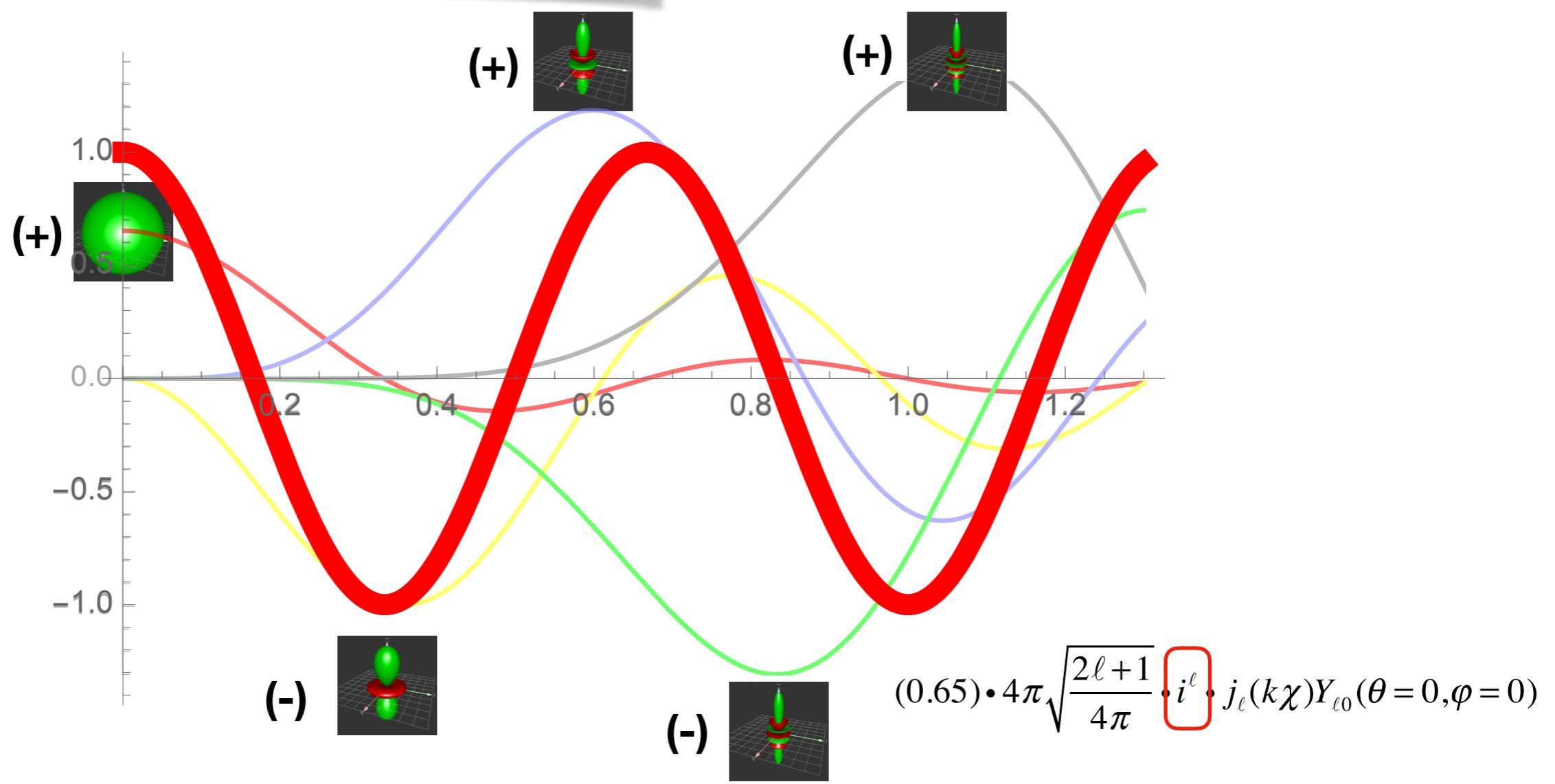
A plane wave can be expressed into a series of spherical wave

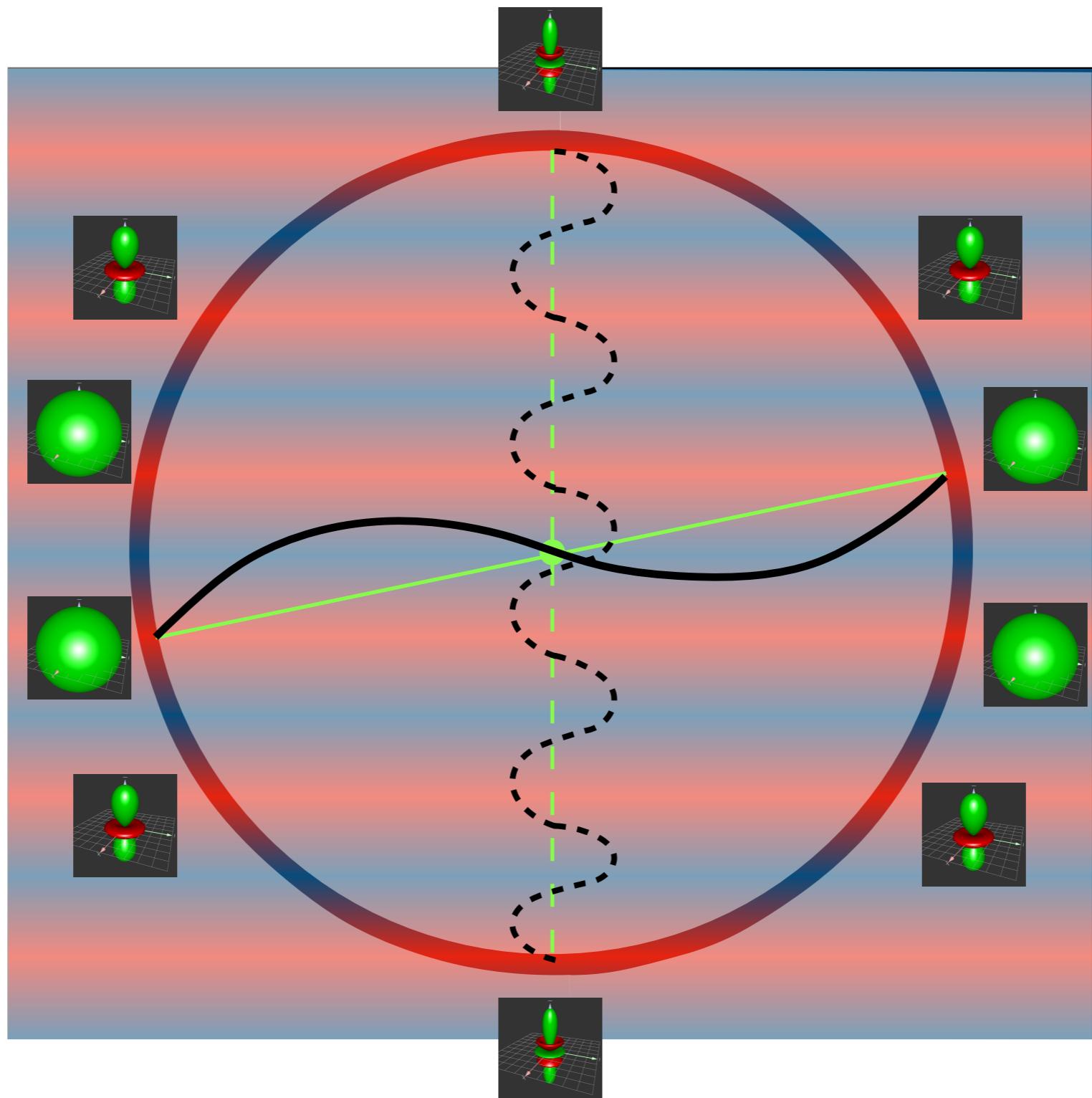
spatial inhomogeneity => angular anisotropy



[Pb.]
plot the
imaginary part

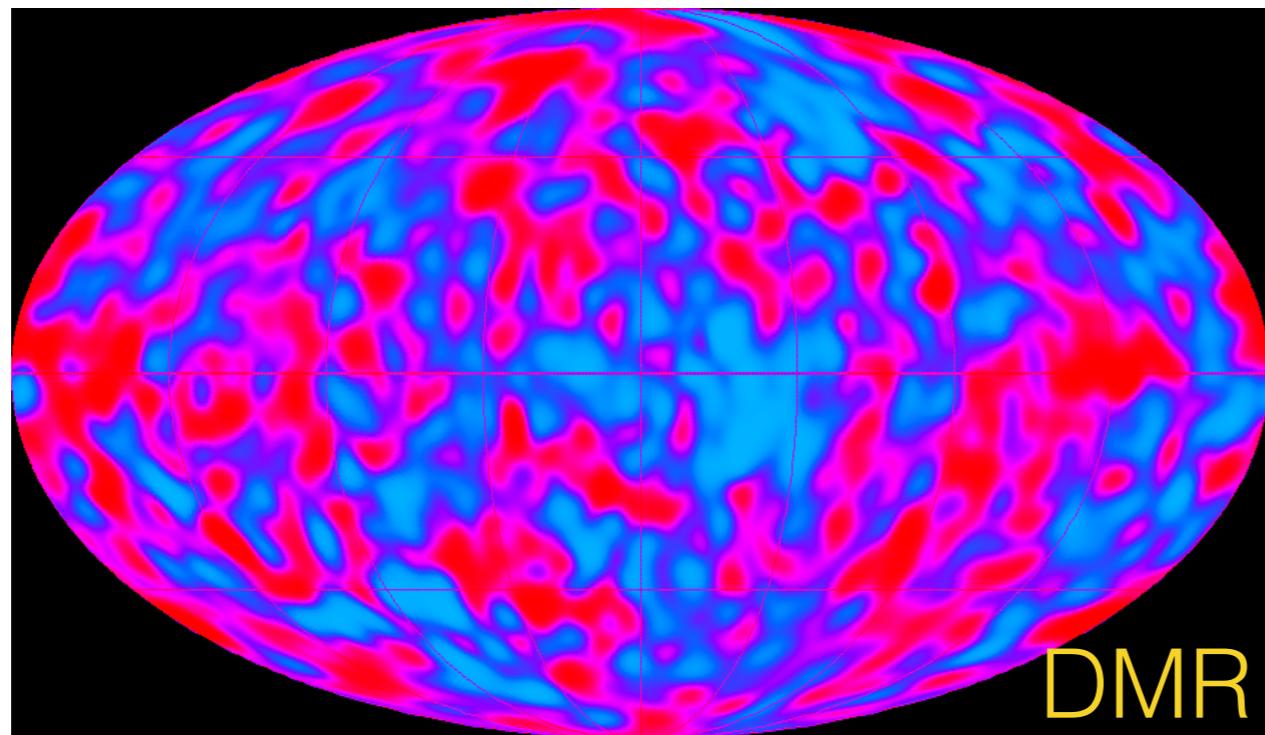
$$e^{i(\hat{k} \cdot \hat{n}) k \chi}$$





1992年，COBE卫星 (NASA)

DMR——测量各向异性的微分测量仪



陆琰老师：“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”

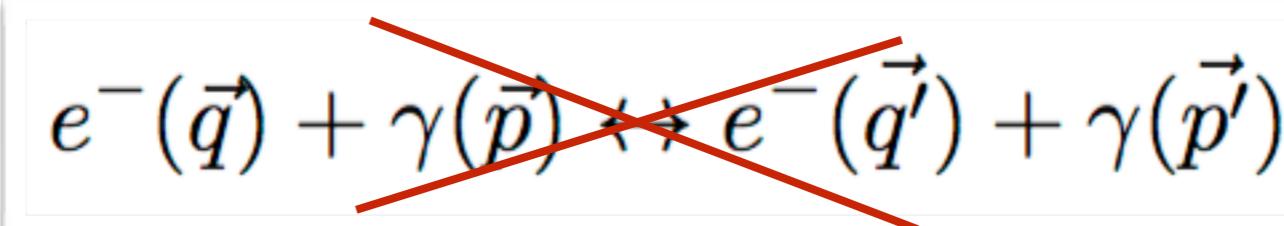
primordial anisotropy

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



之后, 光子几乎自由地传播至现在!
(free streaming)

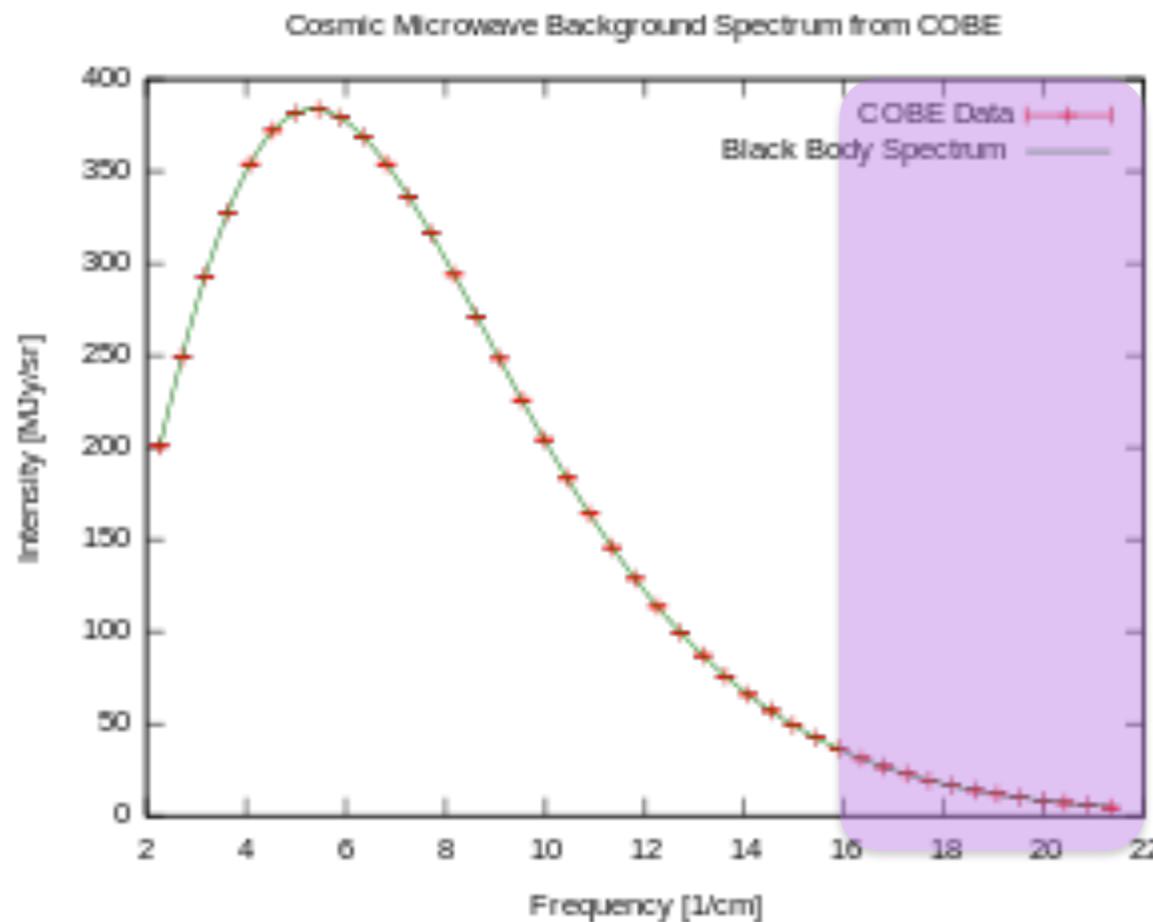
既然氢原子的第一电离能是13.6eV,

为什么Compton散射过程不在

宇宙温度降低到30万K时就停止呢?

宇宙中的，重子（电子） / 光子比，非常非常低！ $\eta \sim 10^{-10}$

一个电子周围包裹着一群光子，这些光子数目按照黑体谱分布



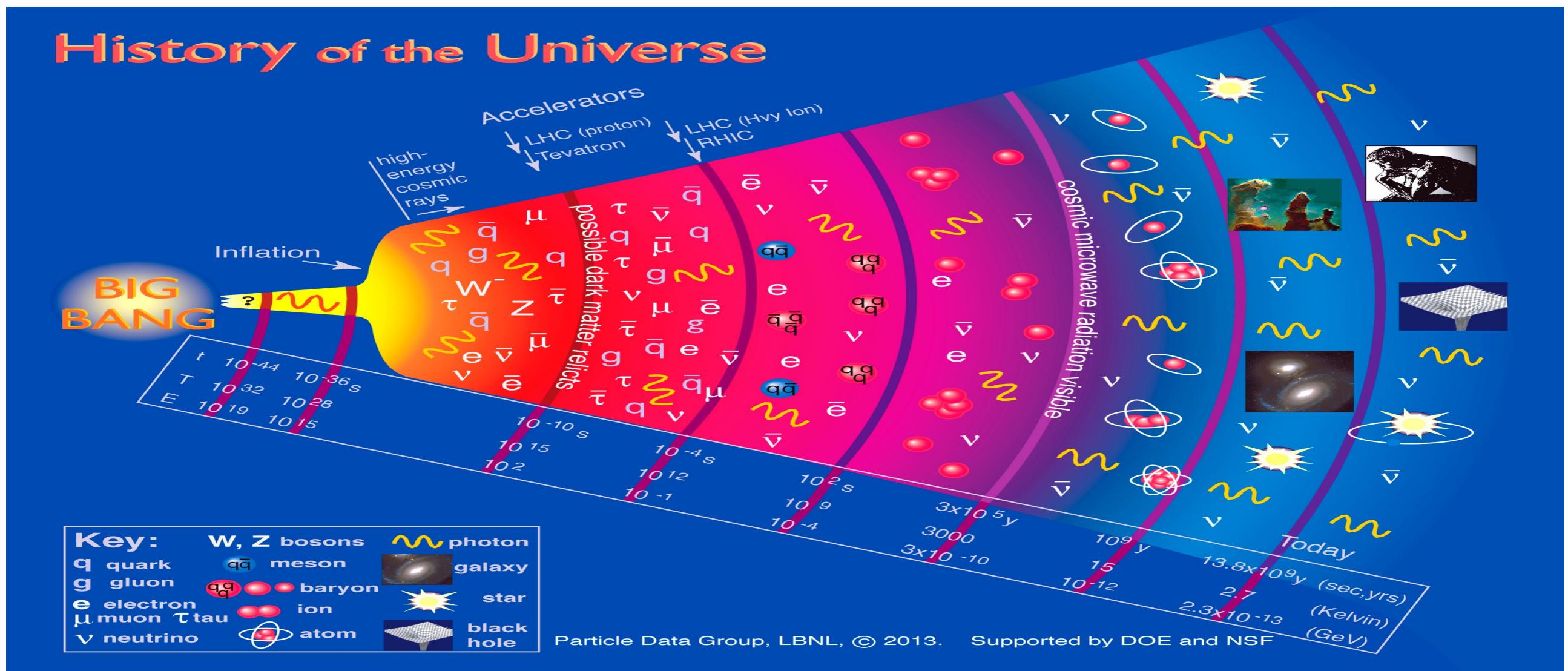
一个电子只需要一个光子
就能完成这个散射过程

高能光子比重小，
但是整体数目
相比于电子并不少

发生的能标比13.6eV要远低！

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

在红移1100时，该过程最后一次发生，之后自由电子和自由质子迅速形成中性氢。因此，在时空图上，这个过程可以看作是，薄薄的一层 (Last Scattering Surface)



上述过程的数学描述

1. 声学震荡 / acoustic oscillation

光子温度扰动

$$\Theta = \Delta T/T$$

$$m_{\text{eff}} \ddot{\Theta} + k^2 c^2 \Theta / 3 \simeq m_{\text{eff}} g$$

(受迫谐振子)

$$m_{\text{eff}} = 1 + R$$

$$g = -k^2 c^2 \Psi / 3 - \ddot{\Phi}$$

重子密度比

(静态势阱近似)

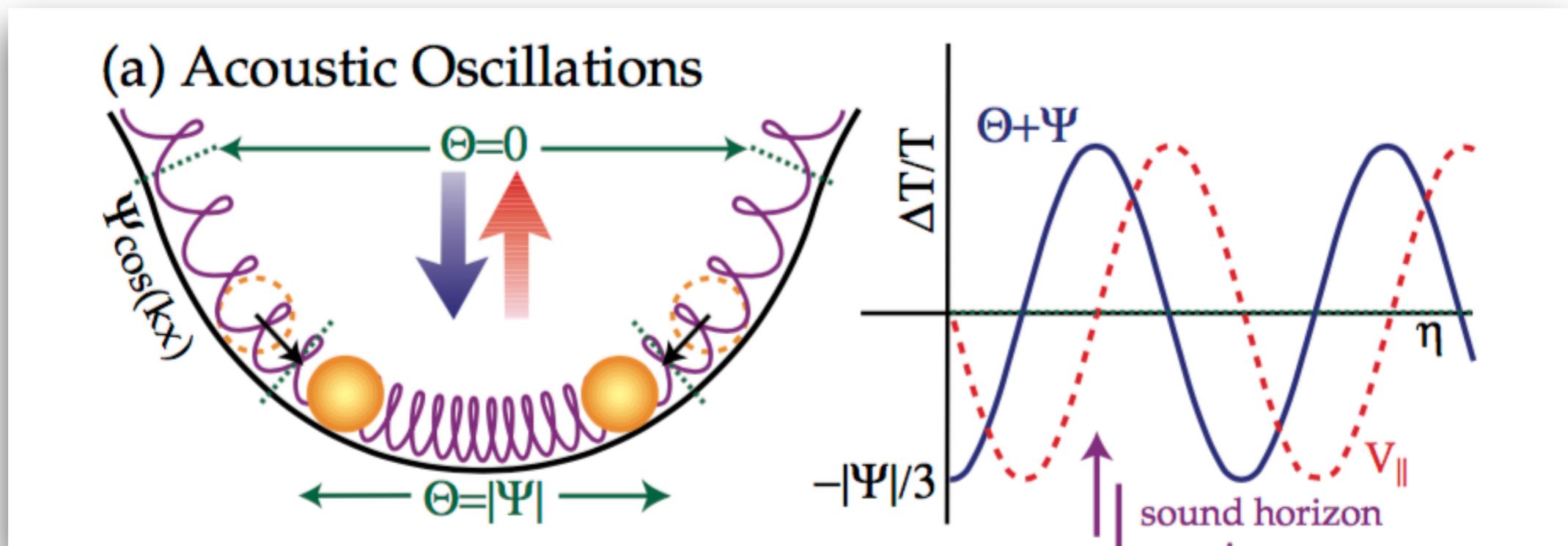
$$\tilde{\Theta} = \Theta + \Psi$$

$$\ddot{\tilde{\Theta}} + k^2 c^2 \tilde{\Theta} / 3 \simeq 0$$

绝热初始条件：

$$\Theta(0) = -2\Psi/3, \dot{\Theta}(0) = 0,$$

$$\tilde{\Theta} = \Psi \cos(ks)/3$$



重子-光子等离子体会塌缩到引力势阱中

压缩到等离子体声学视界半径之下，
光压就会阻止引力继续塌缩，从而形成声学震荡

就这样一直震下去。。。。

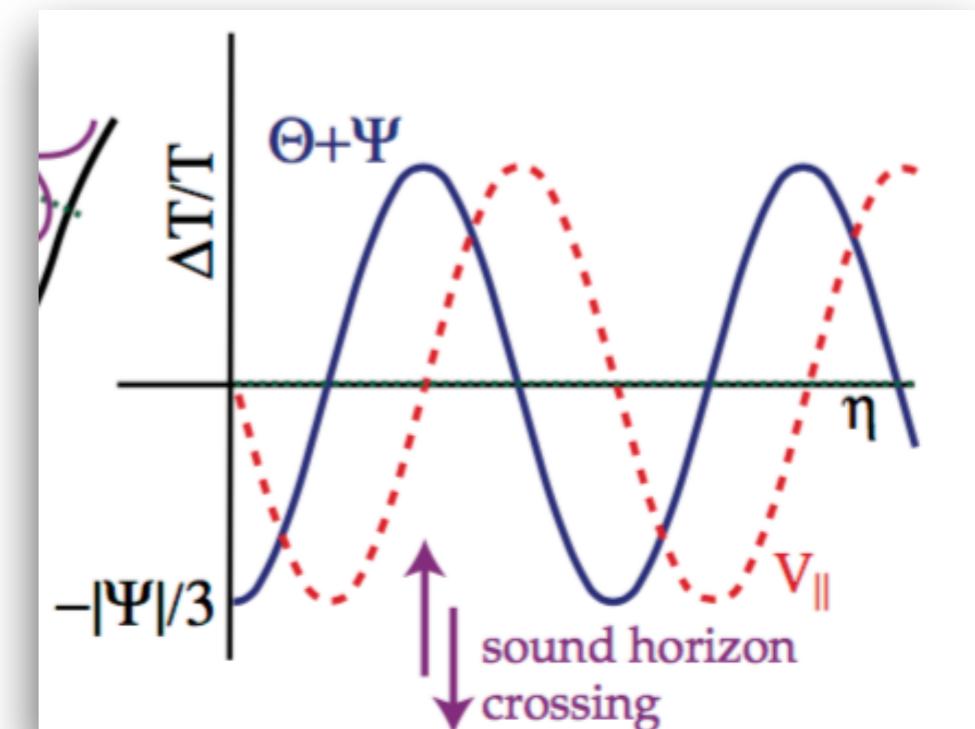
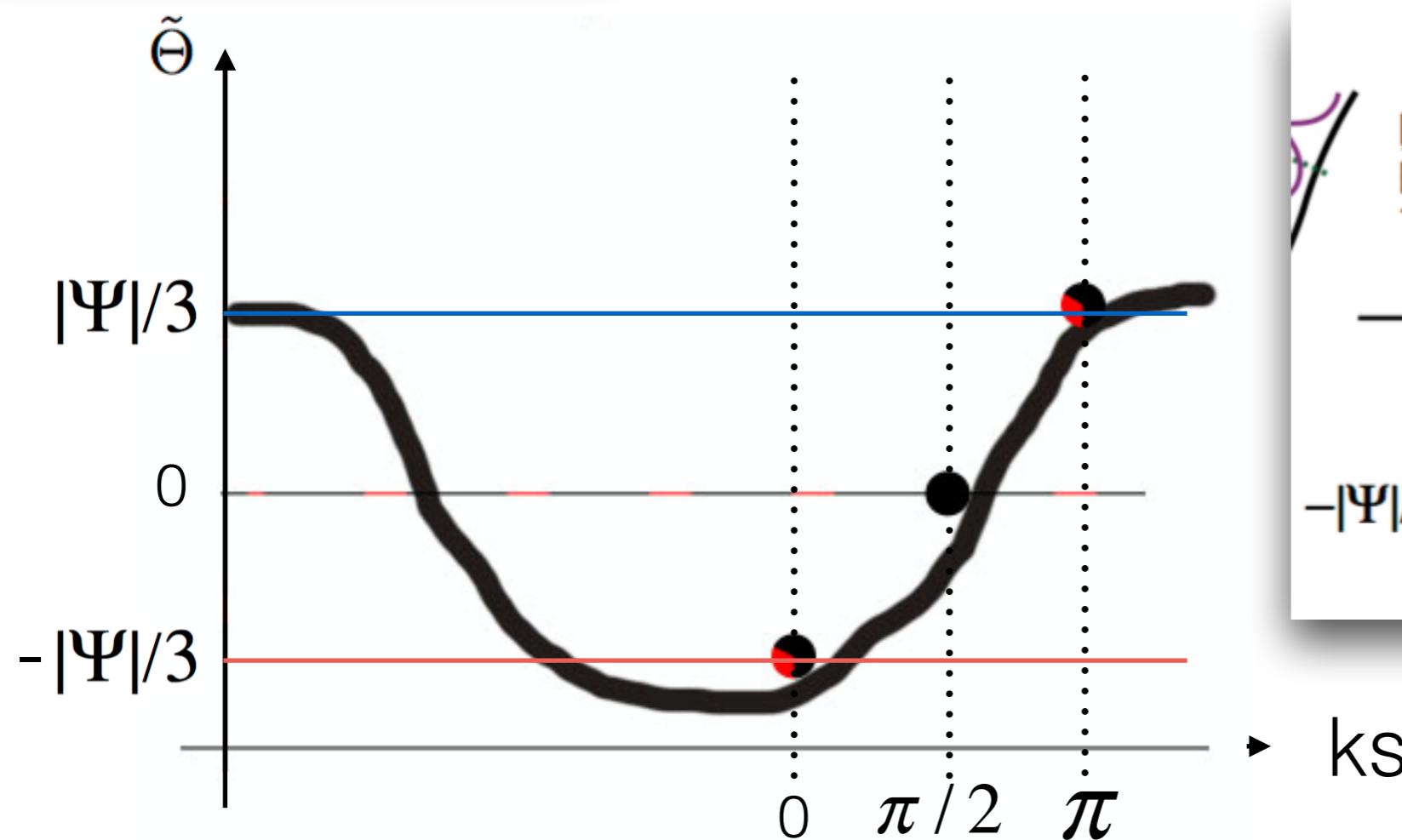
直到，形成中性氢

光子，不再受重子拖曳，从引力势阱中逃逸出去
其动能转化为引力势能，光子能量损失 $- |\Psi|$

考慮，一个特殊的波数 k^* ,
从一开始到最后散射，只震荡了半个周期 $(0, \pi)$

$$\tilde{\Theta} = \Psi \cos(ks)/3$$

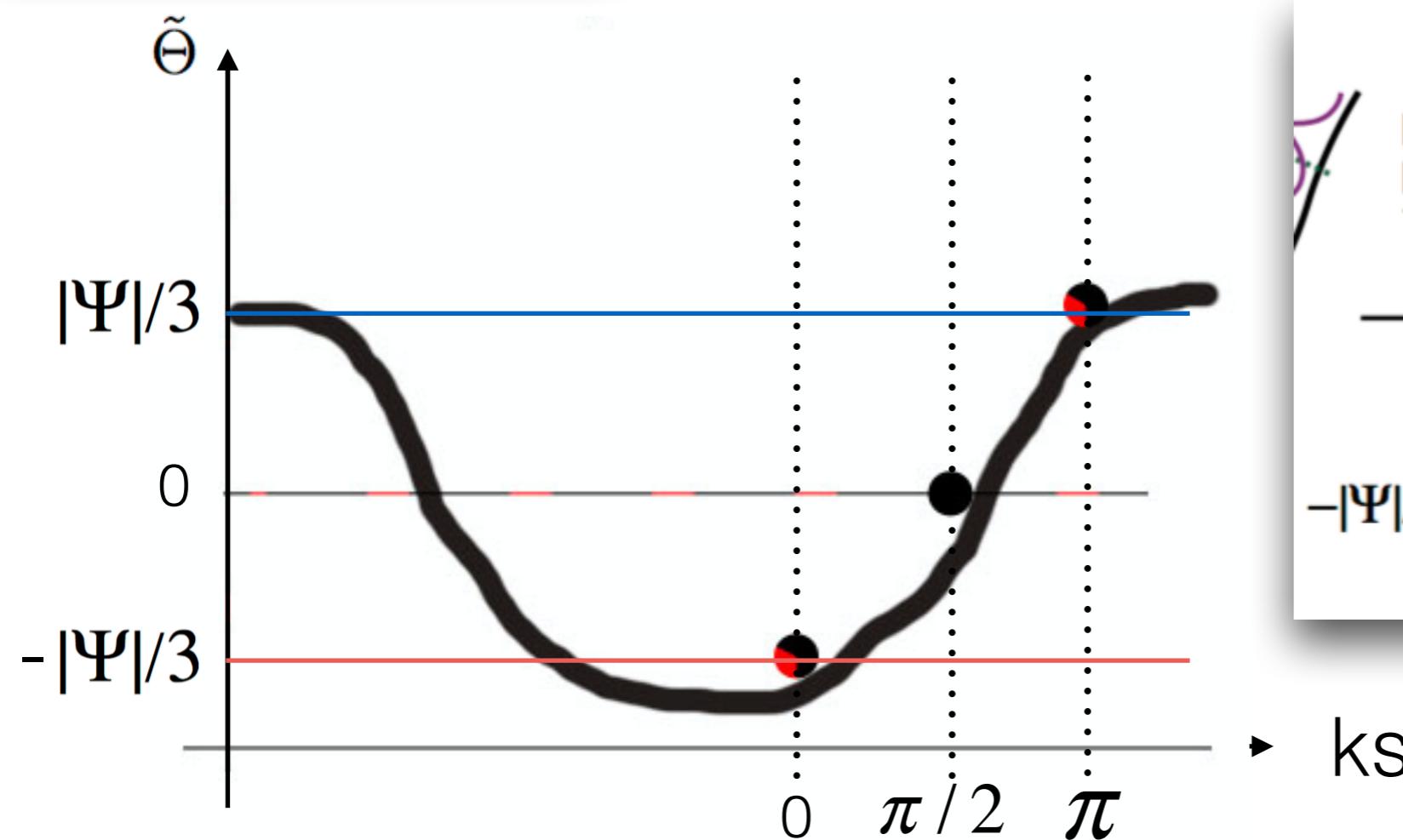
$$\tilde{\Theta}(0) = -|\Psi|/3$$



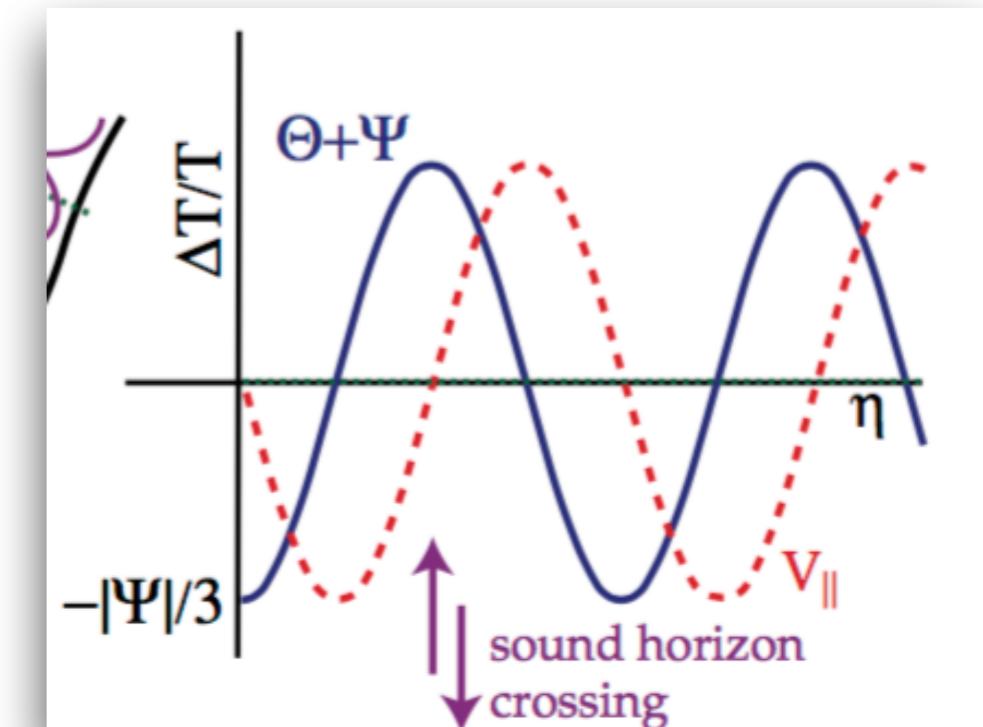
Hot spot $\Theta = |\Psi|/3 > 0$

再考慮，另外一個特殊的波數 k^* ，
從一開始到最後散射，震盪了1個周期 $(0, 2\pi)$

$$\tilde{\Theta} = \Psi \cos(ks)/3 \quad \tilde{\Theta}(0) = -|\Psi|/3$$



Cold spot $\Theta = -|\Psi|/3 > 0$



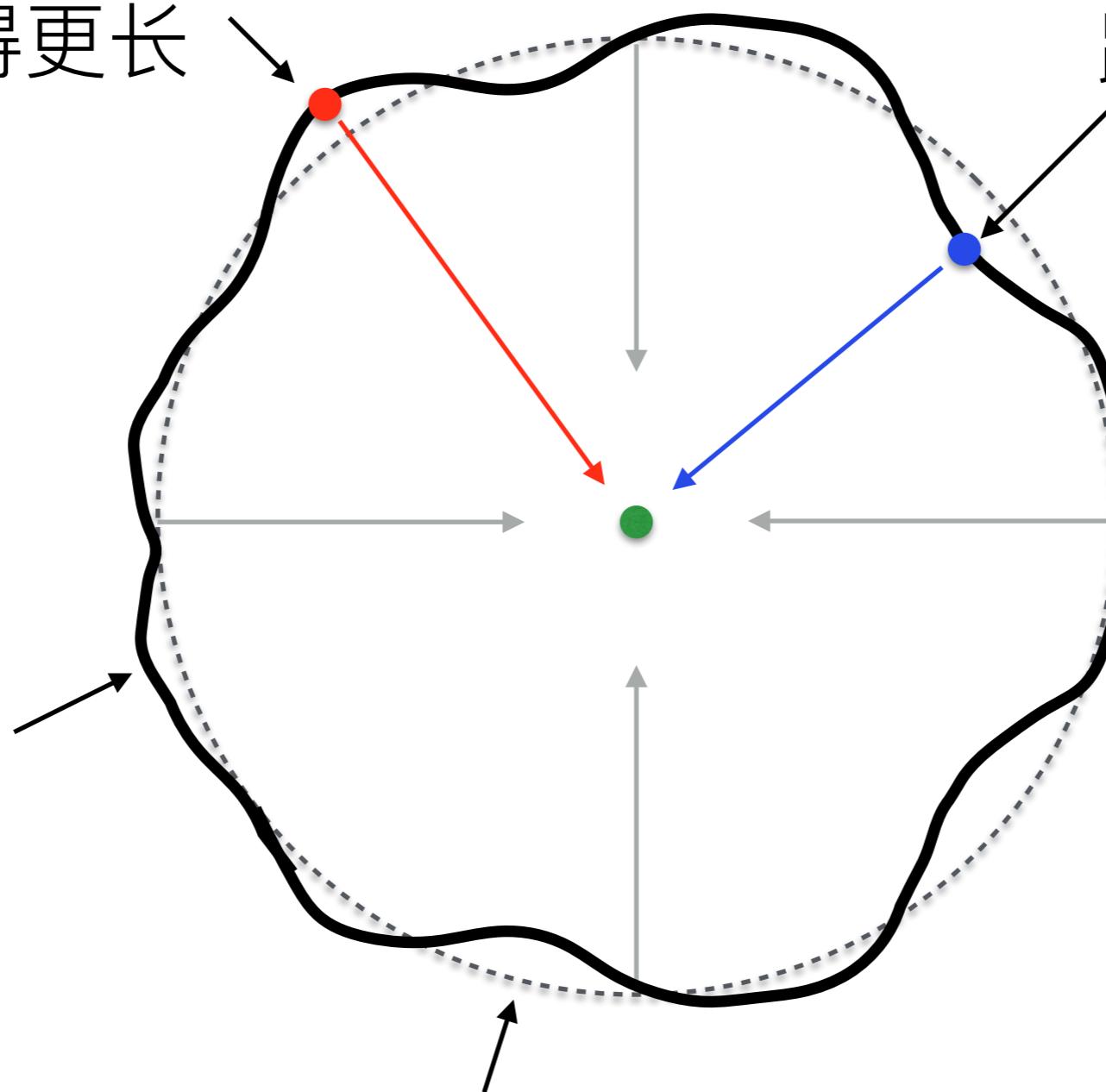
原初CMB各向异性之Sachs – Wolfe 效应

距离我们更远，
波长被拉得更长

距离我们更近，
波长相对较短

存在着
引力微小
扰动的
最后散射面

完美的最后散射面



Sachs-Wolfe 68'

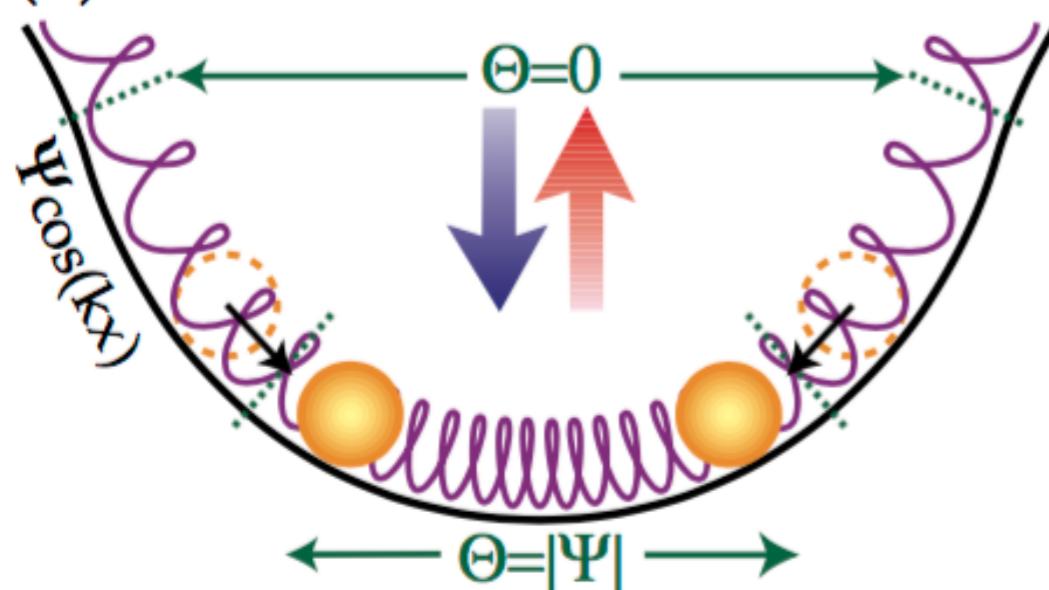
这就是， 著名效应Sachs-Wolfe effect

90%的CMB信号来自于此!

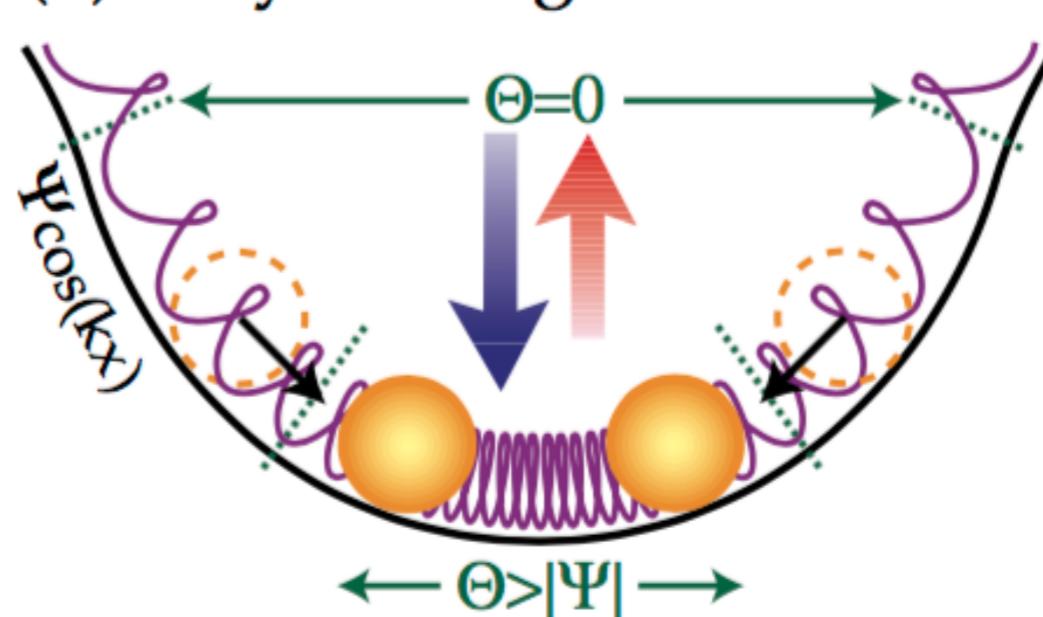
2. 重子拖曳 / baryon drag

之前的计算没有计入重子，加入重子后，由于
重子有质量（小球变重）、**（几乎）无压强**（弹簧弹性不变）
先不考虑，重子后势阱变深的效应（次领头阶）

(a) Acoustic Oscillations



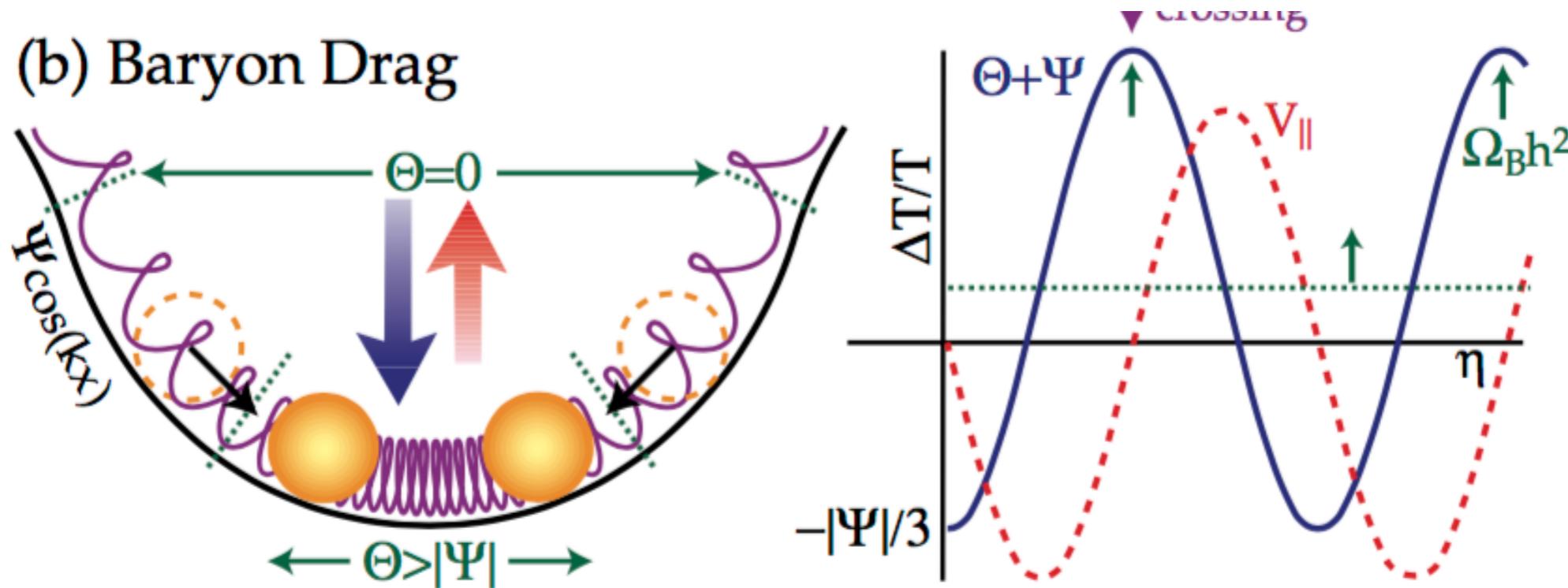
(b) Baryon Drag



2. 重子拖曳 / baryon drag

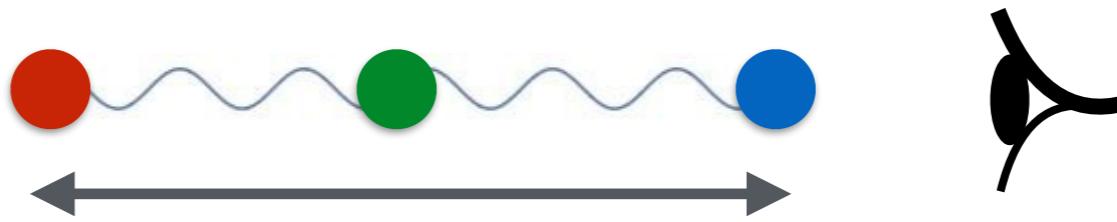
之前的计算没有计入重子，加入重子后，由于
重子有质量（小球变重）、**（几乎）无压强**（弹簧弹性不变）

先不考虑，重子后势阱变深的效应（次领头阶）



振幅变大，但为了保持IC，平衡点需要上移
IC来自暴胀理论，因此不能改变

3. 多普勒效应 / Doppler effect



注意，这里讨论的是**以1/3光速**震荡的等离子体。
其相对论效应**不可忽略**，如：多普勒效应

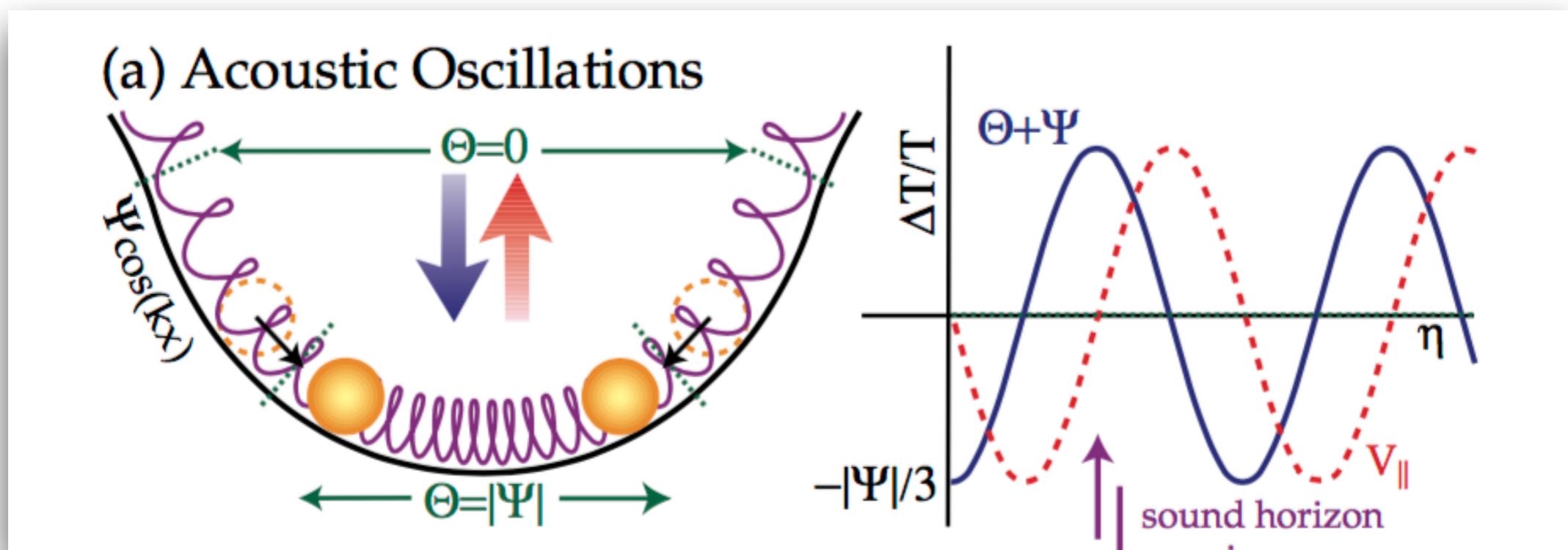
当它沿视线方向，向我们震荡时，发生**蓝移**，
光子能量增加，温度升高；反之，**红移**

$$f^{obs} = \left(1 + \frac{v}{c}\right) f^{rest} \quad f \propto T$$

Wien displacement law

$$\left. \frac{\Delta T}{T} \right|_{doppler} = -\frac{v}{c}$$

该效应，对光子温度的贡献为： $\Psi \sin(ks)/3$



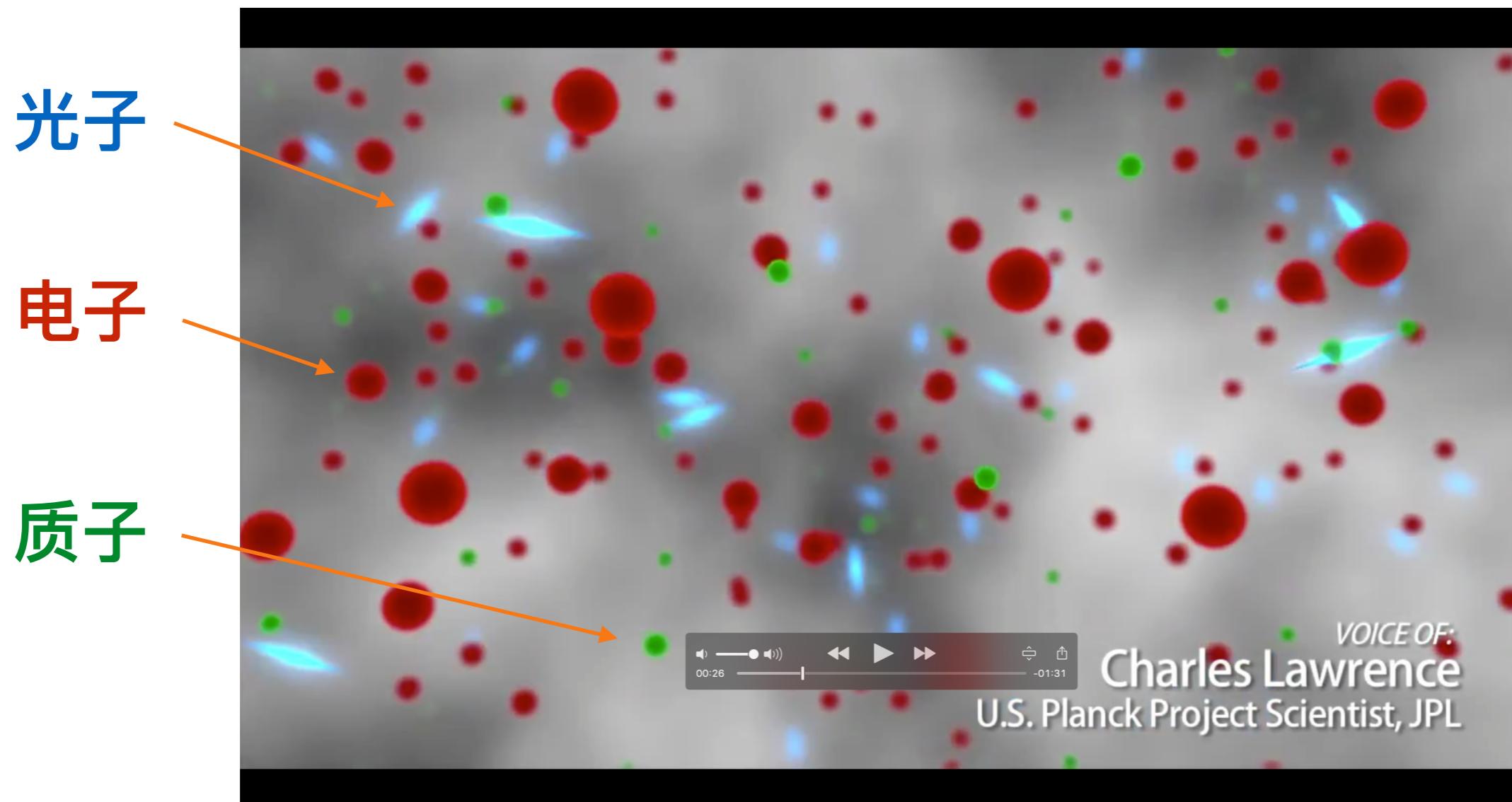
蓝线为等离子体**能量密度**扰动对光子温度的贡献

红线为等离子体**速度**扰动对光子温度的贡献

二者，相差一个 $\pi/2$ 的相位！

4. 光子弥散 / Diffusion

光子，与电子不断碰撞。在两次碰撞之间，光子自由穿行。
这个距离被称作，光子的平均自由程 / mean free path



光子在电子之间的随机行走，可以使得等离子体的冷热部分相互混合，从而抹平温度扰动，这称为光子弥散

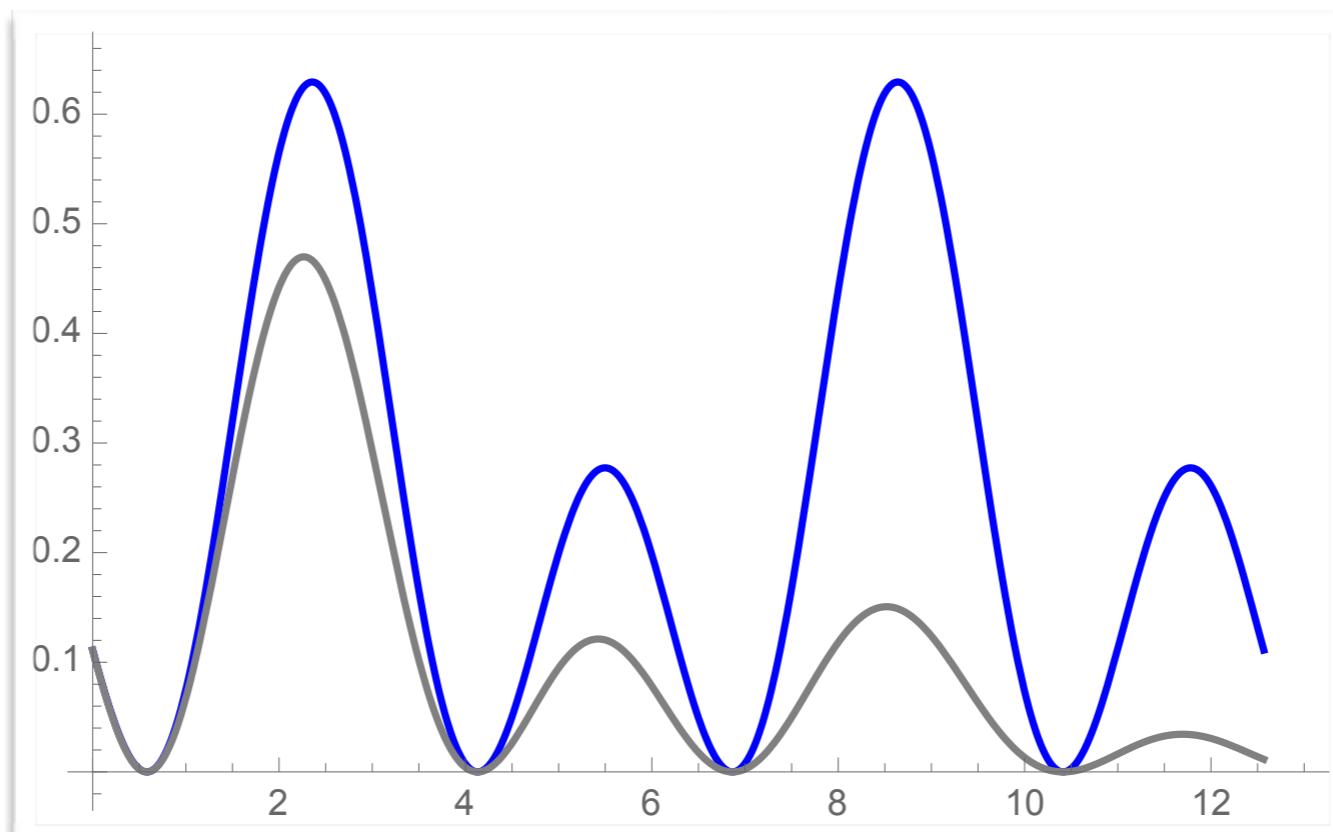
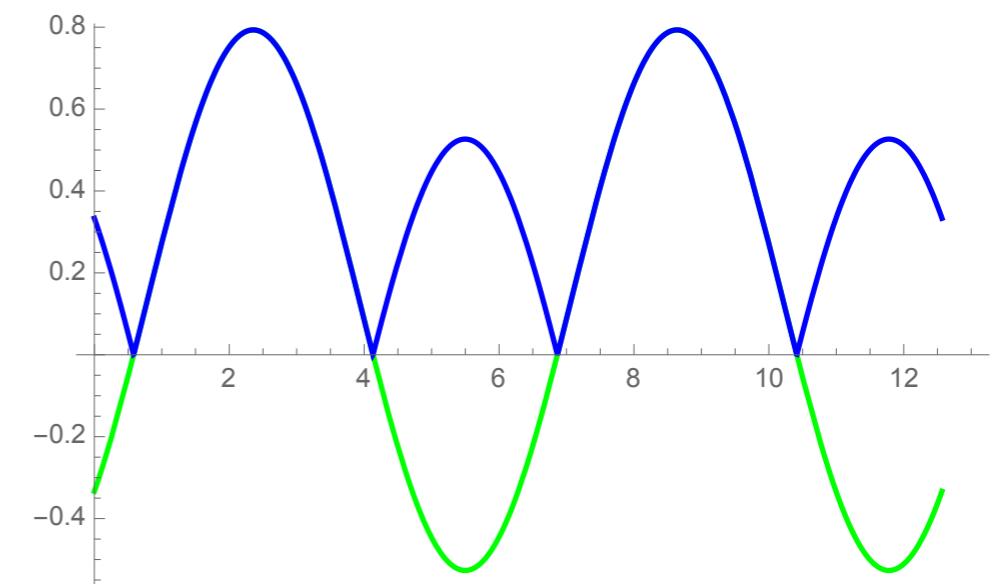
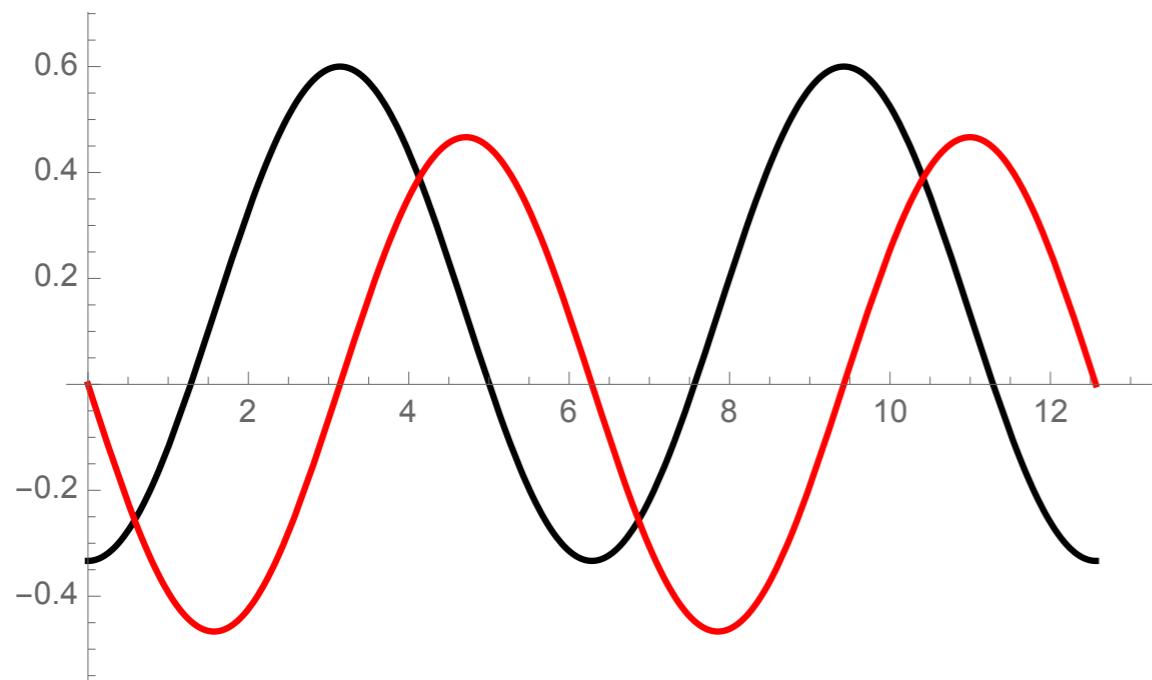
波长比光子平均自由程小的，光子温度扰动，

被光子弥散效应 ϵ 指数压低

(小尺度效应)

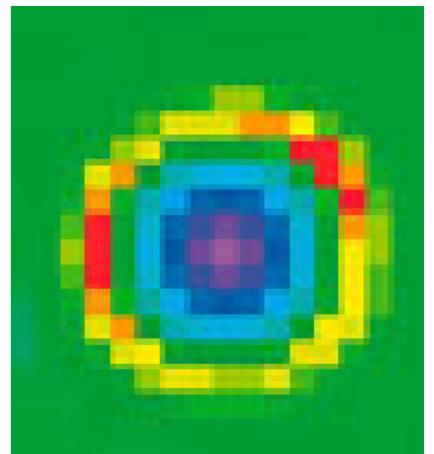
在最后散射发生之后，光子平均自由程近似于无穷大，即，宇宙38万年时刻的信息，经过138亿年的雨雪风霜，几乎毫无损失地保留到现在！

这就是，之前我们所说的“baby face”



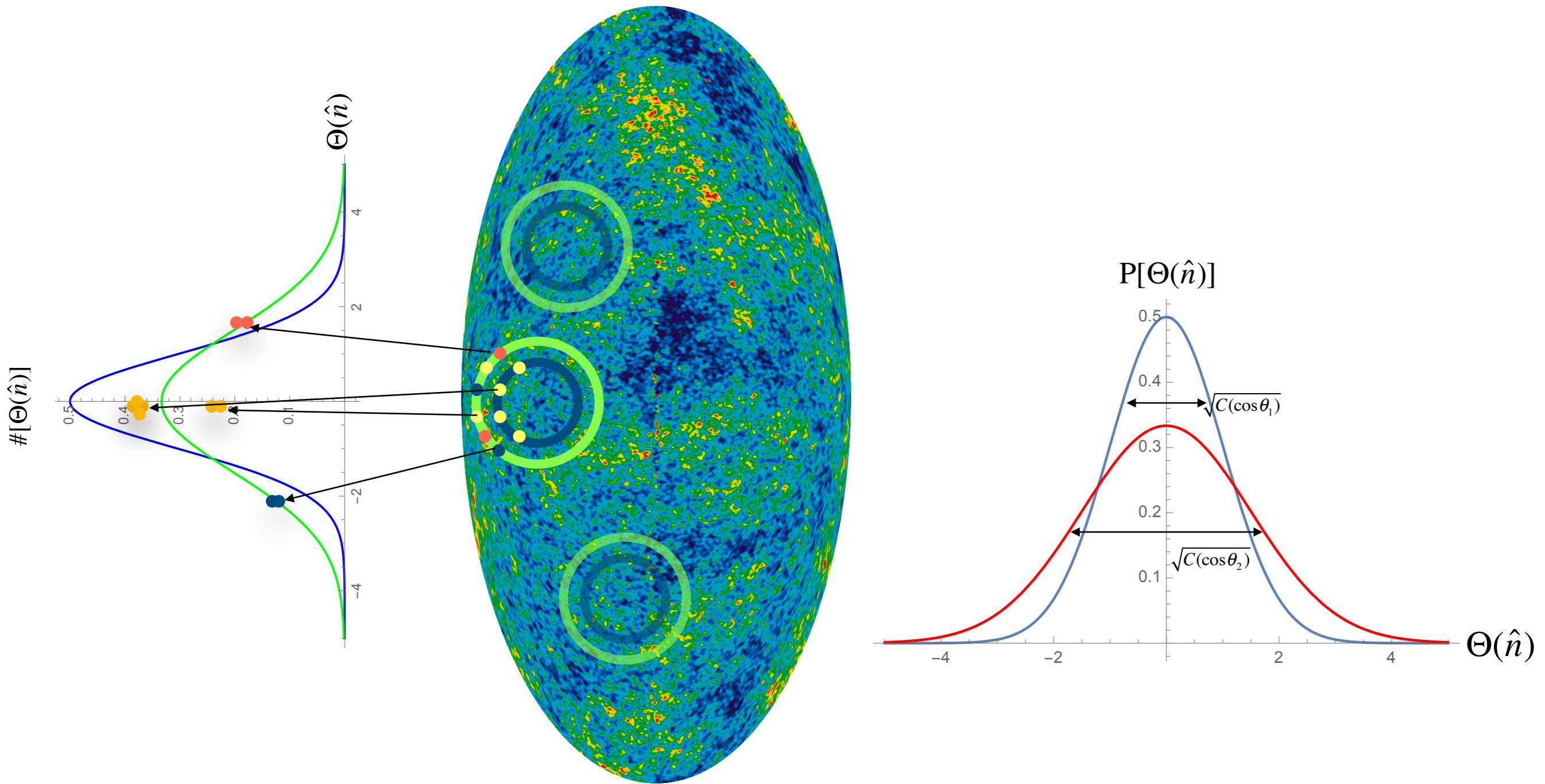
$$\Theta(\theta, \varphi) = \frac{\delta T}{T}(\theta, \varphi)$$

is a Gaussian random field on the 2D sphere

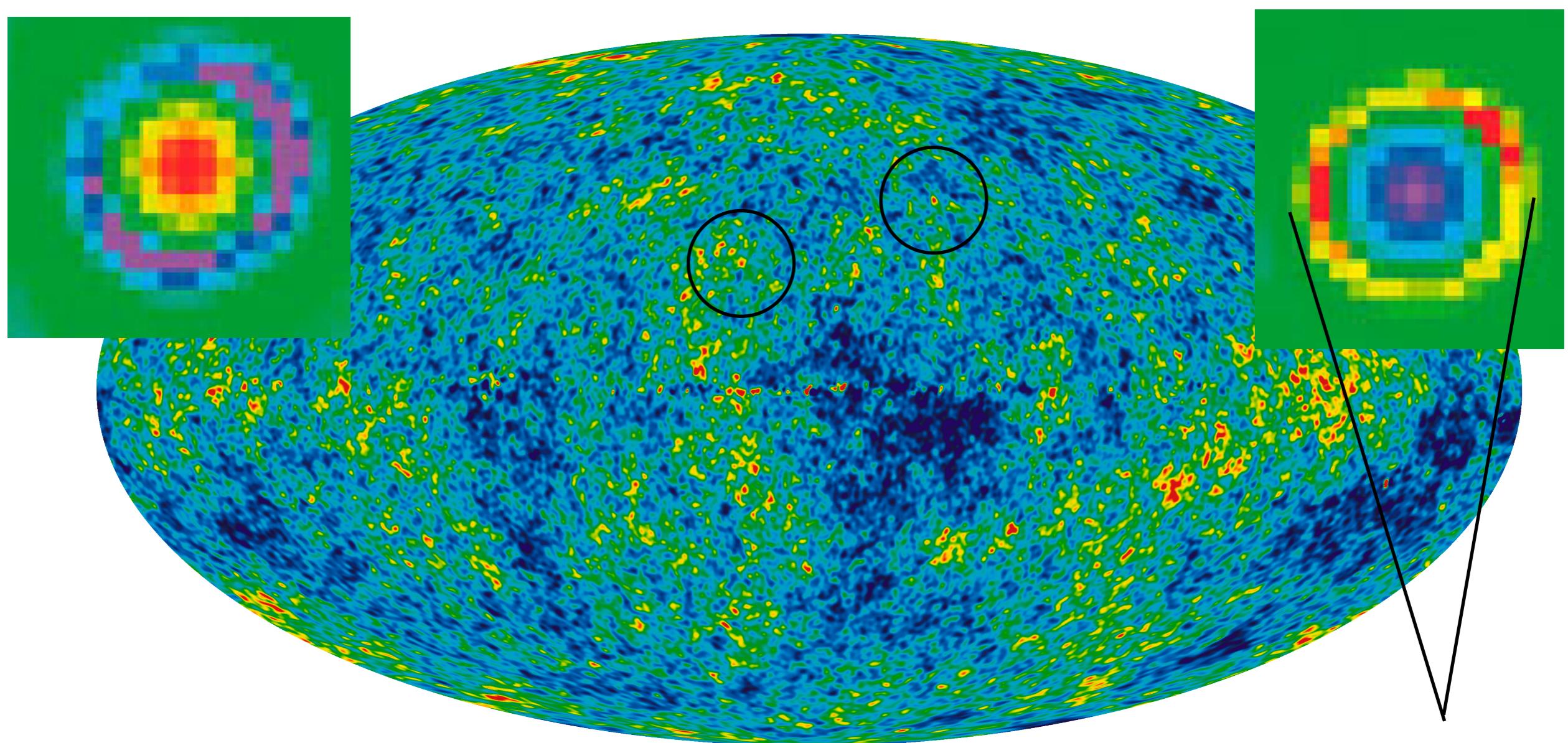


we will study the angular distribution of $\Theta(\hat{n})$

$$\langle \Theta(\hat{n})\Theta(\hat{n}') \rangle = \int d\hat{n} \int d\hat{n}' \Theta(\hat{n})\Theta(\hat{n}') = C(\hat{n} \cdot \hat{n}') = C(\cos \theta) \quad \text{statistical isotropy}$$



注意，对于单个扰动而言，其分布是各向异性的
但，扰动在各个方向上的平均值，则是各向同性的，
这称为**统计各向同性**



A smarter way

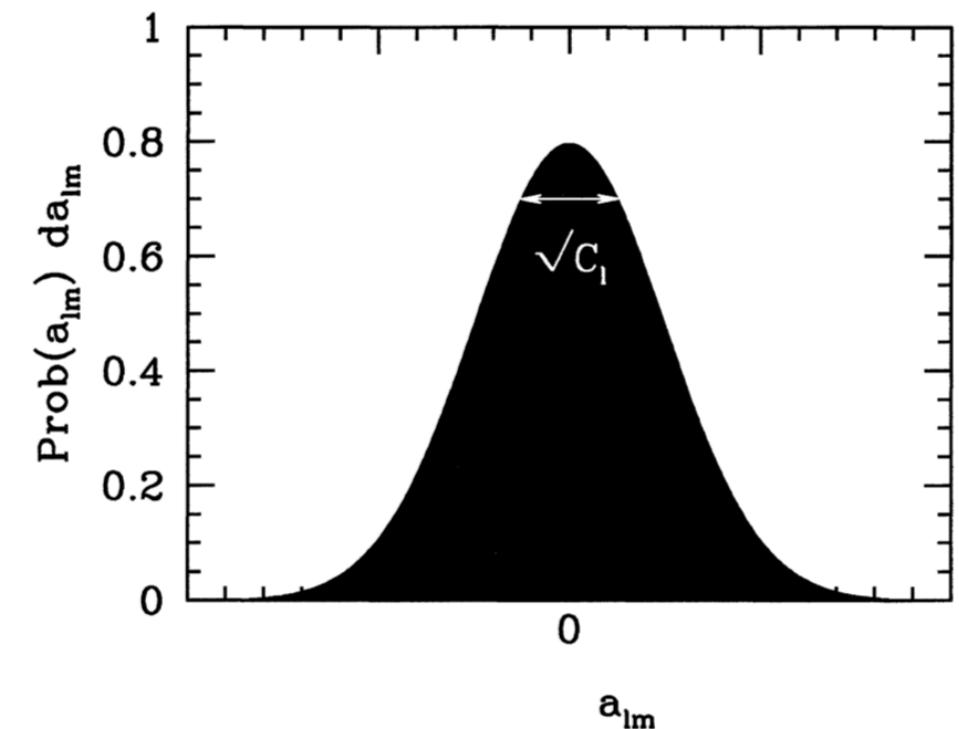
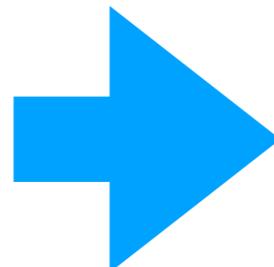
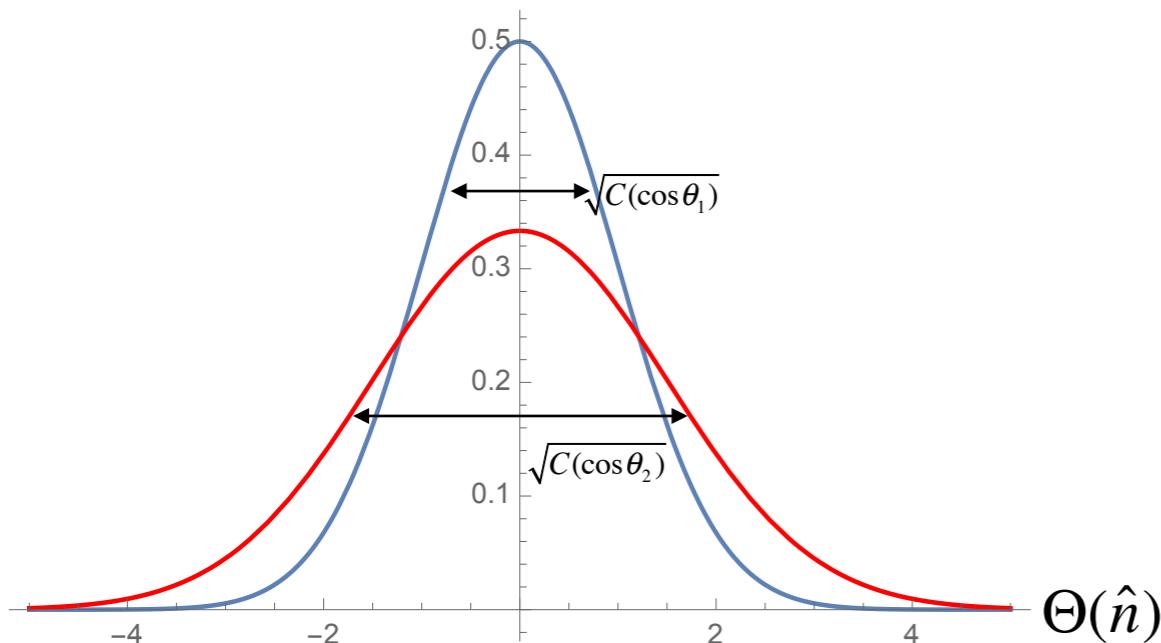
$$\Theta(\hat{n}) = \sum_{\ell,m} a_{\ell m} Y_{\ell m}(\hat{n})$$

$$\Theta(\hat{n}) \Rightarrow a_{\ell m}$$

gaussian random field

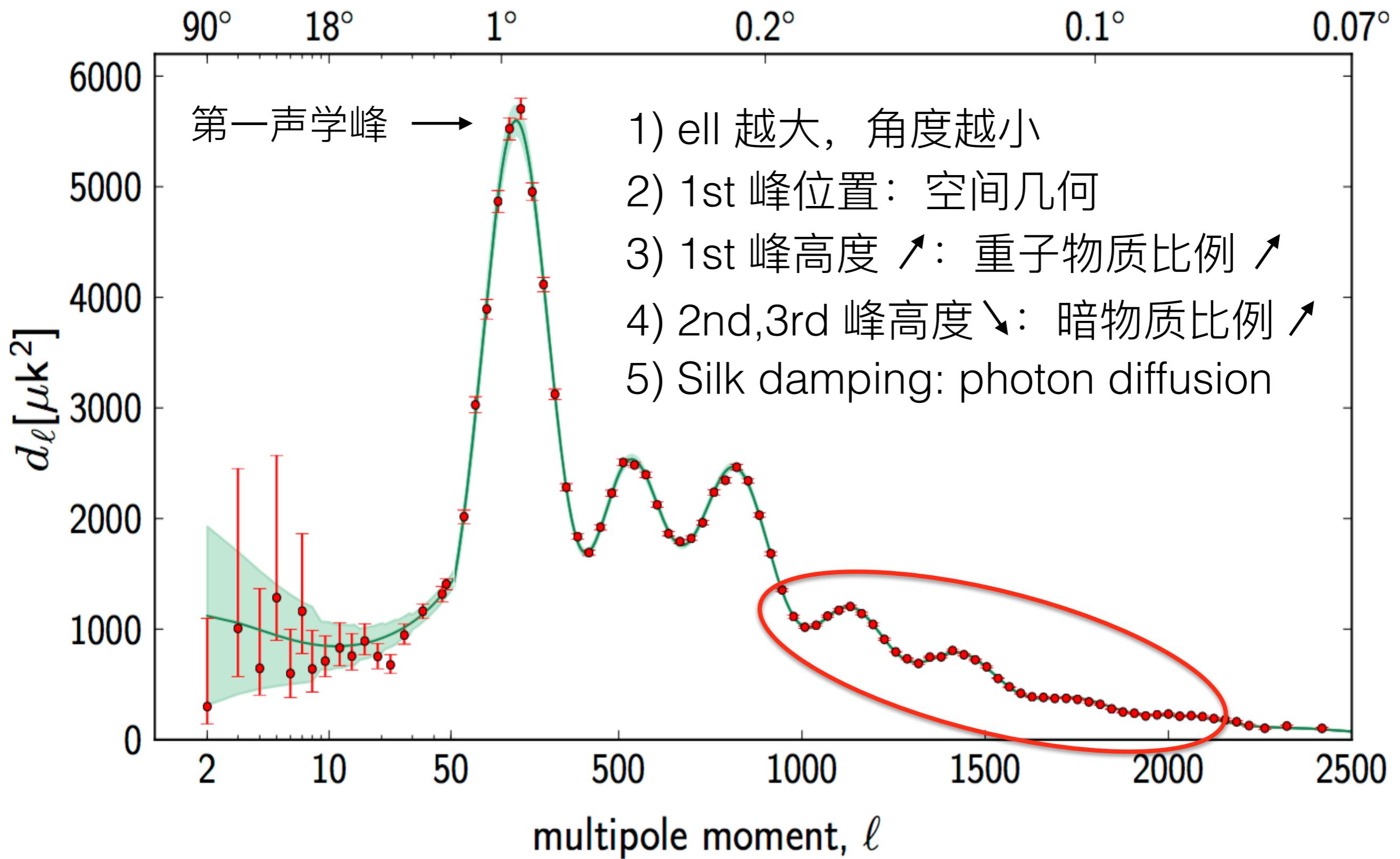
$$\left\langle \frac{\Delta T}{T}(\mathbf{n}) \frac{\Delta T}{T}(\mathbf{n}') \right\rangle_{\mathbf{n} \cdot \mathbf{n}' = \mu} = \sum_{\ell, \ell', m, m'} \langle a_{\ell m} \cdot a_{\ell' m'}^* \rangle Y_{\ell m}(\mathbf{n}) Y_{\ell m}^*(\mathbf{n}') = \sum_{\ell} C_{\ell} \underbrace{\sum_{m=-\ell}^{\ell} Y_{\ell m}(\mathbf{n}) Y_{\ell m}^*(\mathbf{n}')}_{\frac{2\ell+1}{4\pi} P_{\ell}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{n}')} = \frac{1}{4\pi} \sum_{\ell} (2\ell + 1) C_{\ell} P_{\ell}(\mu),$$

$P[\Theta(\hat{n})]$



our major task is to calculate/measure C_{ℓ}

angular scale



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

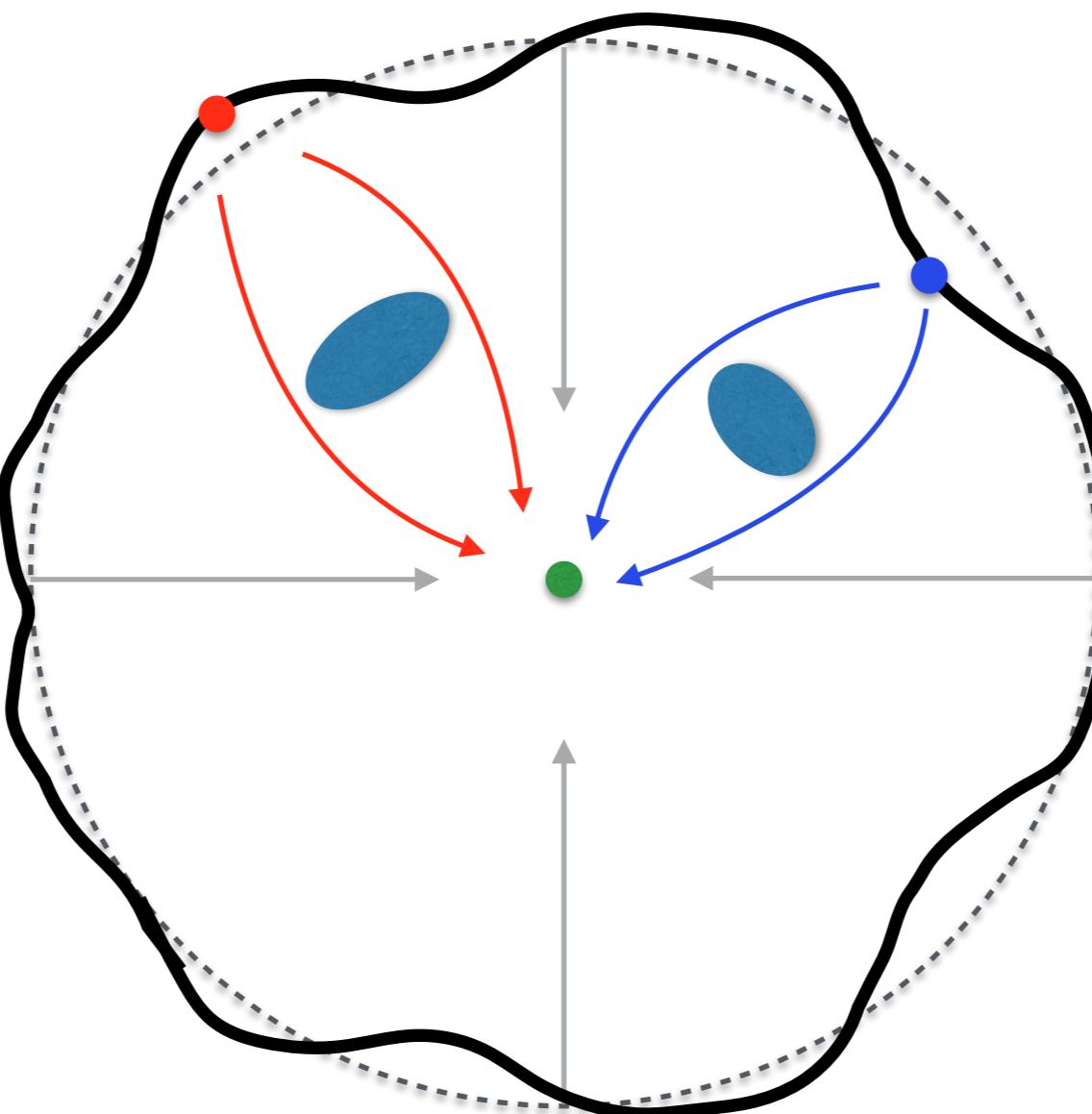
距离我们更远，
波长被拉得更长

存在着
引力微小
扰动的
最后散射面

距离我们更近，
波长相对较短

完美的最后散射面

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，

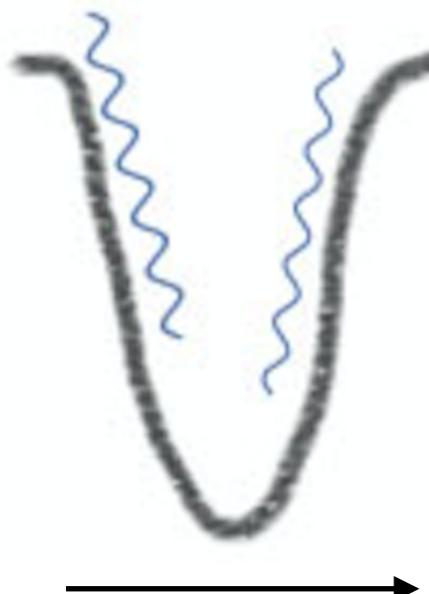
光子也要在

势阱中运动很久，

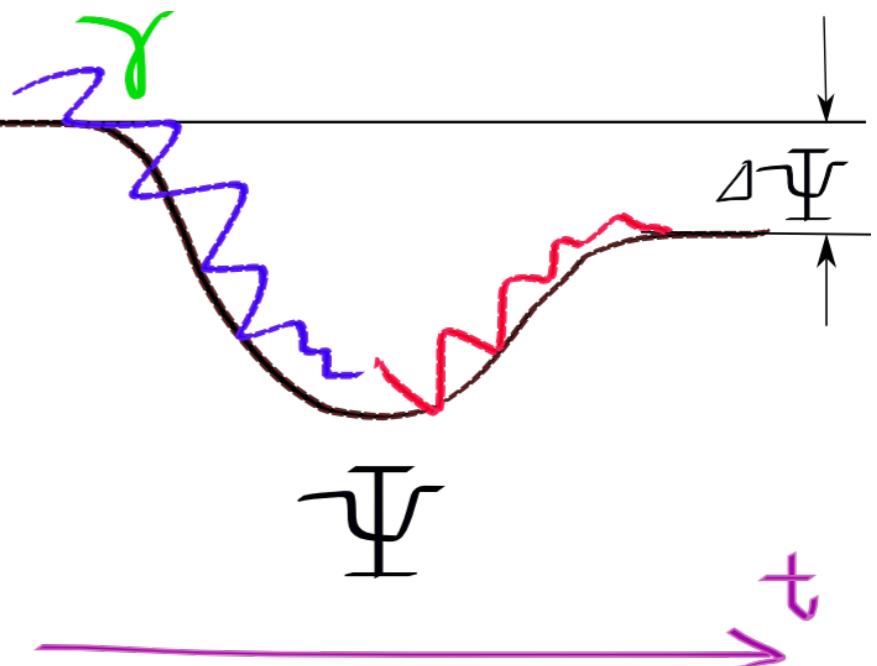
所以，有时间

来感受到

势阱深度的变化



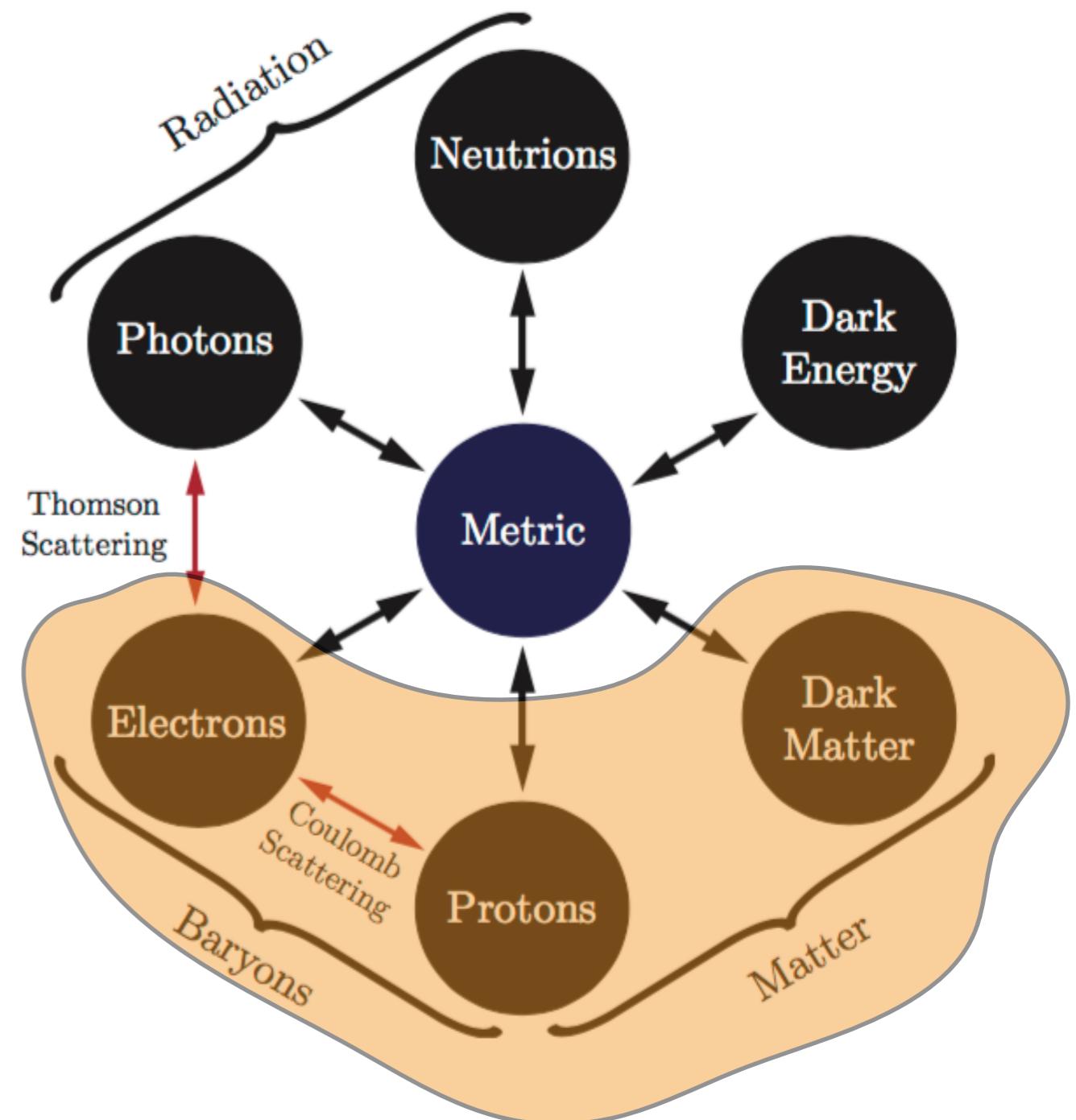
窄势阱



宽势阱

非相对论性物质：
采用流体力学
的语言来描述

(该物质组分的**平均自由程**
比我们**关心的尺度远小**。
在我们所研究的尺度上，
达到了热 / 动力学平衡。
所以，不关心其粒子属性，
只研究其整体行为。)



即，用为数不多的几个动力学量，如能量密度，速度，与能量耗散相关的体 / 剪切粘滞系数，等

$$T_{\mu\nu} = \left\{ \begin{array}{cccc} -\rho & v & v & v \\ v & P + \sigma & \sigma & \sigma \\ v & \sigma & P + \sigma & \sigma \\ v & \sigma & \sigma & P + \sigma \end{array} \right\} \quad (\text{不考虑热流交换})$$

$$\sigma_{ij} = -P\delta_{ij} + \mu \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] + \eta \delta_{ij}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}$$

能量 – 动量守恒方程： $\nabla_\mu T^{\mu\nu} = 0$

$$\partial_t \rho = -\nabla_r \cdot (\rho \mathbf{u}) \quad (\partial_t + \mathbf{u} \cdot \nabla_r) \mathbf{u} = -\frac{\nabla_r P}{\rho} - \nabla_r \Phi$$

连续性方程 / continuity eq.

欧拉方程 / Euler eq.

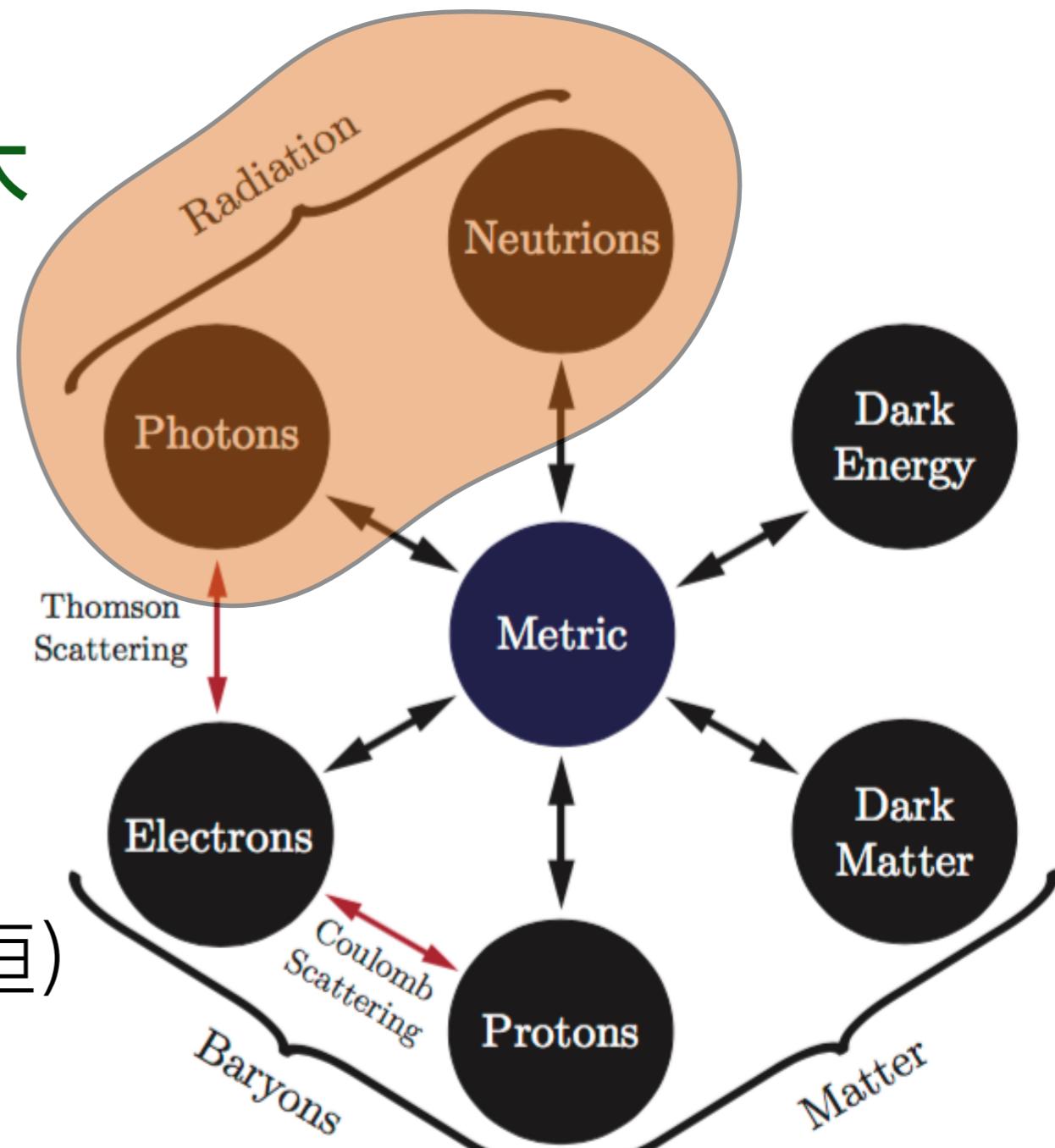
相对论性物质：其平均自由程与
我们关心的尺度相比差不多 / 更大
他们远未达到热 / 动力学平衡态

这体现了，其粒子属性，我们无法用
少数的几个热力学 / 动力学量来描述
需要借助，统计物理的方式来刻画，
即，相空间的配分函数 / partition func

刘维尔定律：（相空间中几率守恒）

$$\frac{df(\vec{x}, \vec{v}, t)}{dt} = C$$

C: 碰撞项
(Compton散射)



$$f = \frac{1}{\exp(\frac{\nu}{T + \delta T}) - 1}$$

↑ ↑
 t (t, \underline{x})

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial \bar{x}} \frac{\partial \bar{x}}{\partial t} + \frac{\partial f}{\partial \bar{v}} \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} = C$$

↑ ↑
 速度 加速度 / 外力 (引力)

要求解的量：

$$\Theta(\bar{x}, \hat{v}, t) = \delta T / T$$

不均匀性 各向异性 (不依赖于动量的绝对值)?

step1: 对 \underline{x} 进行 Fourier 变换，因为偏微分方程是很难求解的

$$\Theta(k, \hat{k}, \hat{v}, t)$$

step2: 对方位角 \hat{v} 积分，因为 CMB 光子温度是 **统计** 各向同性的

$$\int d\Omega_{\hat{v}}$$

CMB温度的多级矩 / multipoles

$$\Theta(k, \mu, t) \quad \mu = \hat{k} \cdot \hat{\nu}$$



$$\text{step3: } \Theta_\ell(k, t) = \int \Theta(k, \mu, t) P_l(\mu) d\mu$$

step4: CMB光子温度涨落是一个高斯性的随机变量，
该系统可以**完全**由其**两点相关函数**来刻画。

这里，我们用其**球谐空间 / spherical harmonics**中，
的两点相关函数，角度功率谱 / angular power spectrum

$$\left\langle \frac{\delta T}{T} \frac{\delta T}{T} \right\rangle \rightarrow C_\ell$$

计算和测量C_ell是CMB物理的**中心任务**！！！

玻尔兹曼方程/Boltzmann hierarchy

$$\begin{aligned}
 \dot{\delta}_\gamma &= -\frac{4}{3}\theta_\gamma - \frac{2}{3}\dot{h}, & (\text{ell}=0, \text{ 能量密度/单极距}) \\
 \dot{\theta}_\gamma &= k^2 \left(\frac{1}{4}\delta_\gamma - \sigma_\gamma \right) + an_e\sigma_T(\theta_b - \theta_\gamma), & (\text{ell}=1, \text{ 速度 / 偶极距}) \\
 \dot{F}_{\gamma 2} &= 2\dot{\sigma}_\gamma = \frac{8}{15}\theta_\gamma - \frac{3}{5}kF_{\gamma 3} + \frac{4}{15}\dot{h} + \frac{8}{5}\dot{\eta} - \frac{9}{5}an_e\sigma_T\sigma_\gamma + \frac{1}{10}an_e\sigma_T(G_{\gamma 0} + G_{\gamma 2}) \\
 && (\text{ell}=2, \text{ 剪切粘滞 / 四极距}) \\
 \dot{F}_{\gamma l} &= \frac{k}{2l+1} \left[lF_{\gamma(l-1)} - (l+1)F_{\gamma(l+1)} \right] - an_e\sigma_T F_{\gamma l}, & l \geq 3, \\
 \dot{G}_{\gamma l} &= \frac{k}{2l+1} \left[lG_{\gamma(l-1)} - (l+1)G_{\gamma(l+1)} \right] + an_e\sigma_T \left[-G_{\gamma l} + \frac{1}{2}(F_{\gamma 2} + G_{\gamma 0} + G_{\gamma 2}) \left(\delta_{l0} + \frac{\delta_{l2}}{5} \right) \right]
 \end{aligned}$$

耦合的线性常微分方程组, (方程数目**巨大!**)

数值实现起来, **十分费时!**



CMBFast软件包

成功地将，程序运行时间降为几分钟

Seljak

orders of magnitude reduction in CPU time when compared to standard methods and typically requires a few minutes on a workstation for a single model. The method should be especially useful for accurate determinations of

Seljak et. al. 96'

关键技巧：将与宇宙学模型无关的，
纯几何的球谐Bessel函数，分离，提前计算出来。

真正与模型相关的方程，数目只有**30个**左右。

现在，CMBFast已停止维护。代替其的，
是有Lewis开发的**CAMB** (CAMBridge) Lewis 99'

<http://camb.info> 运行时间大约为1s



Lewis

CAMB基于Fortran

除此之外，还有**CLASS**，Lesgourges 11'

CLASS基于C



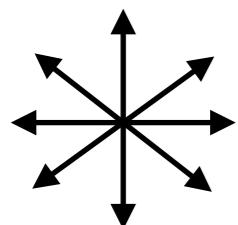
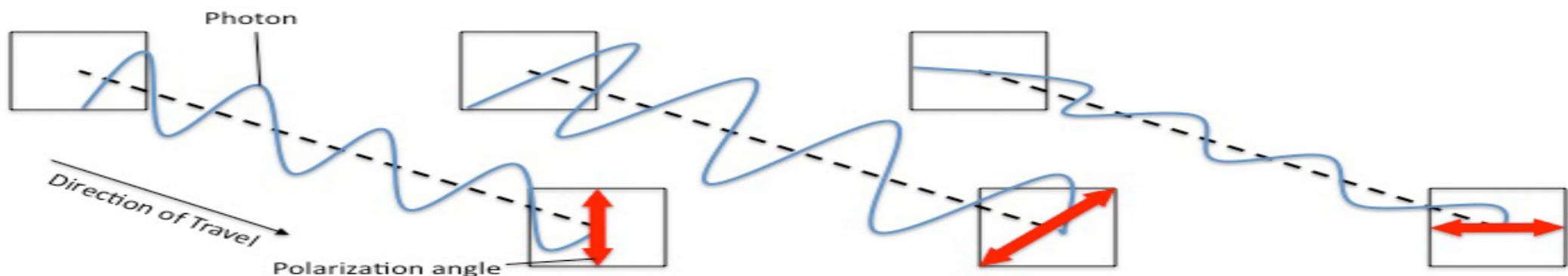
Lesgourges

CAMB开发时间更久，被测试得更为全面；
CLASS有许多算法上的优化，例如：中微子部分处理得更好

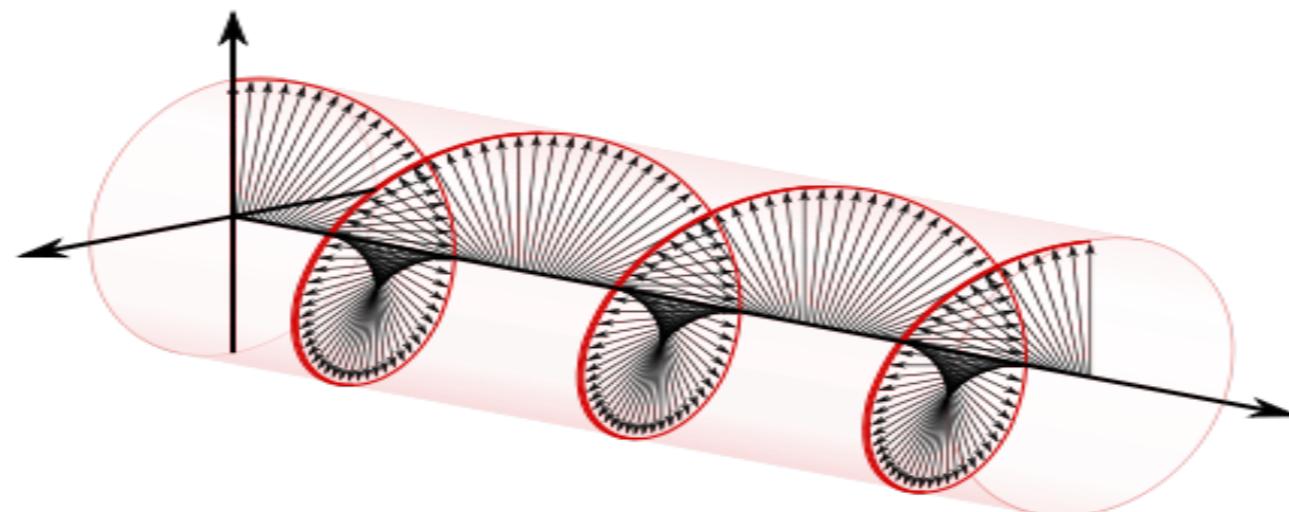
Polarization

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

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

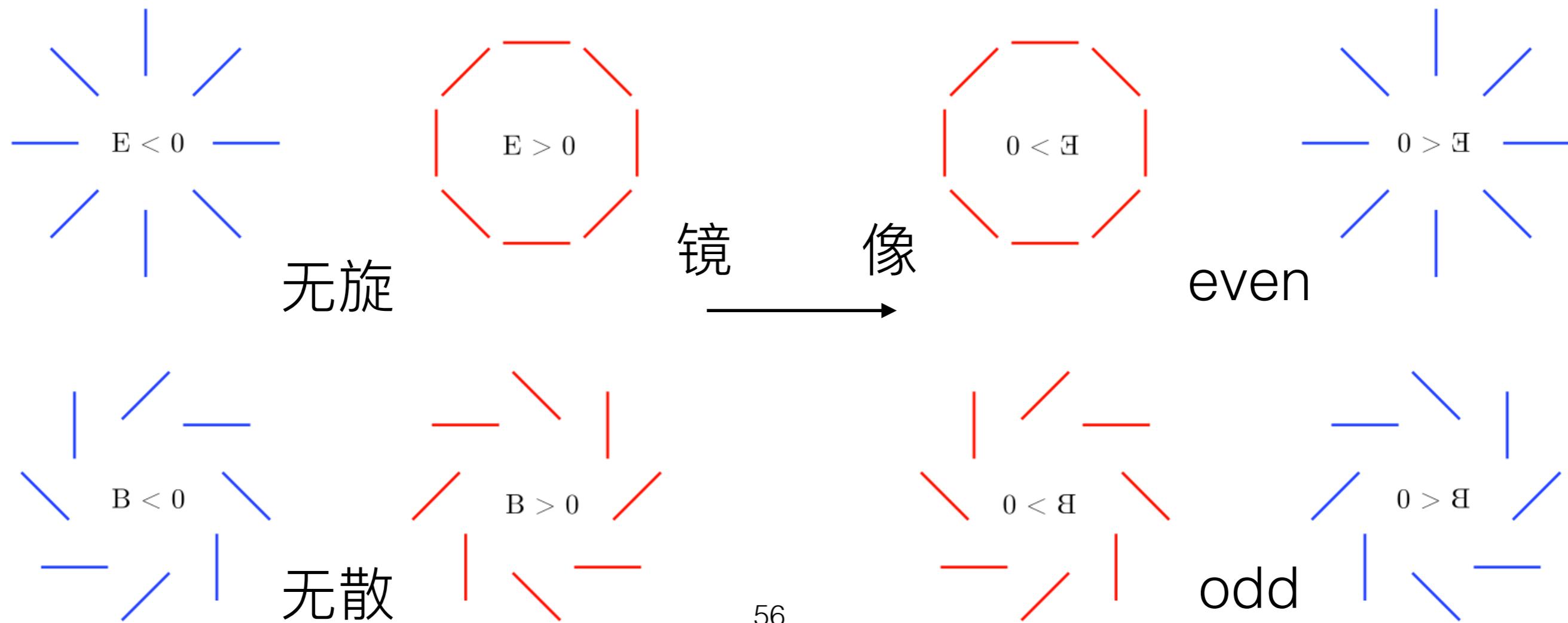
线性极化光

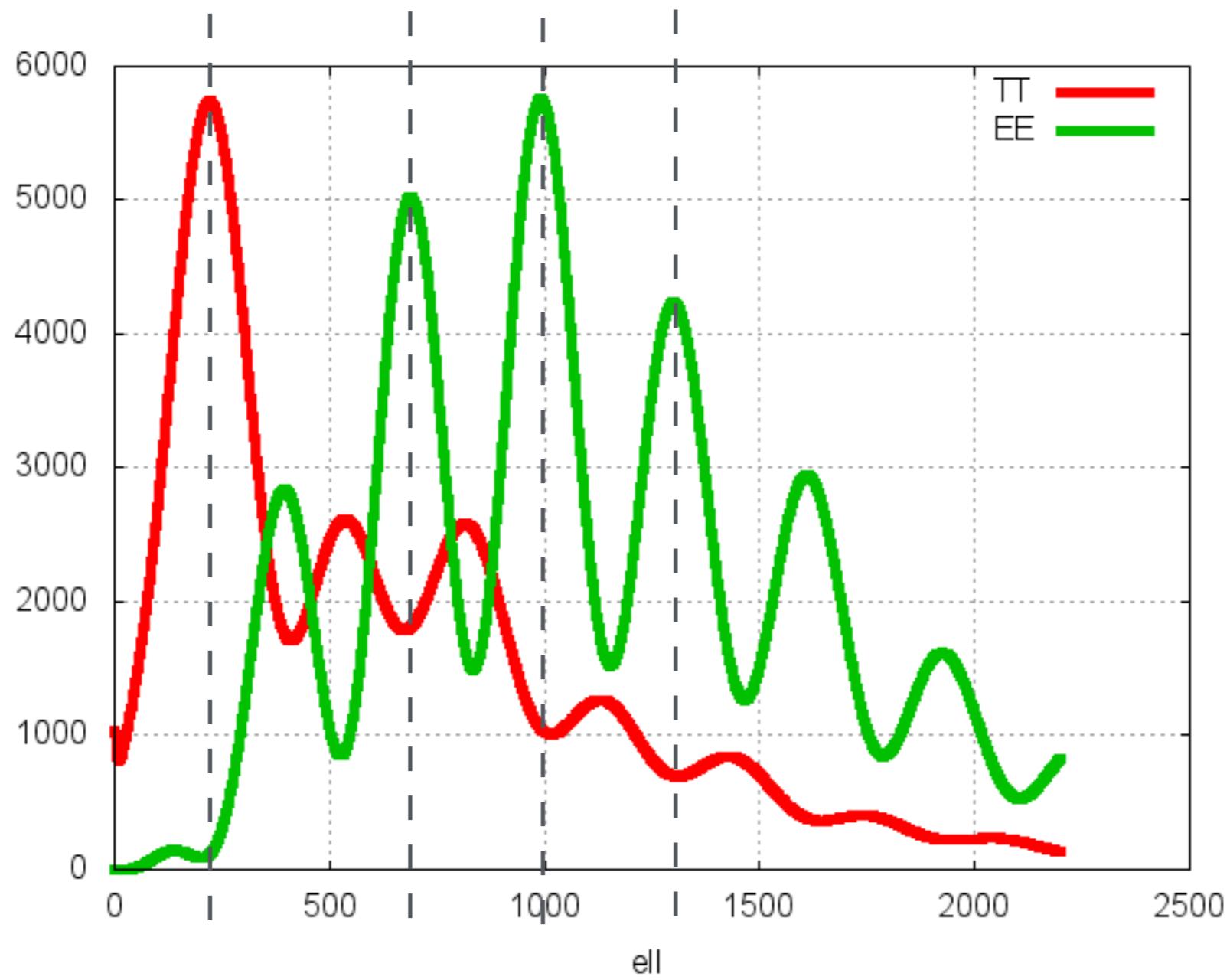
$$U = I_{12}/2$$

$$V = 0$$

圆性极化光

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





温度谱主要
response
物质密度扰动

T&E modes are out of phase!

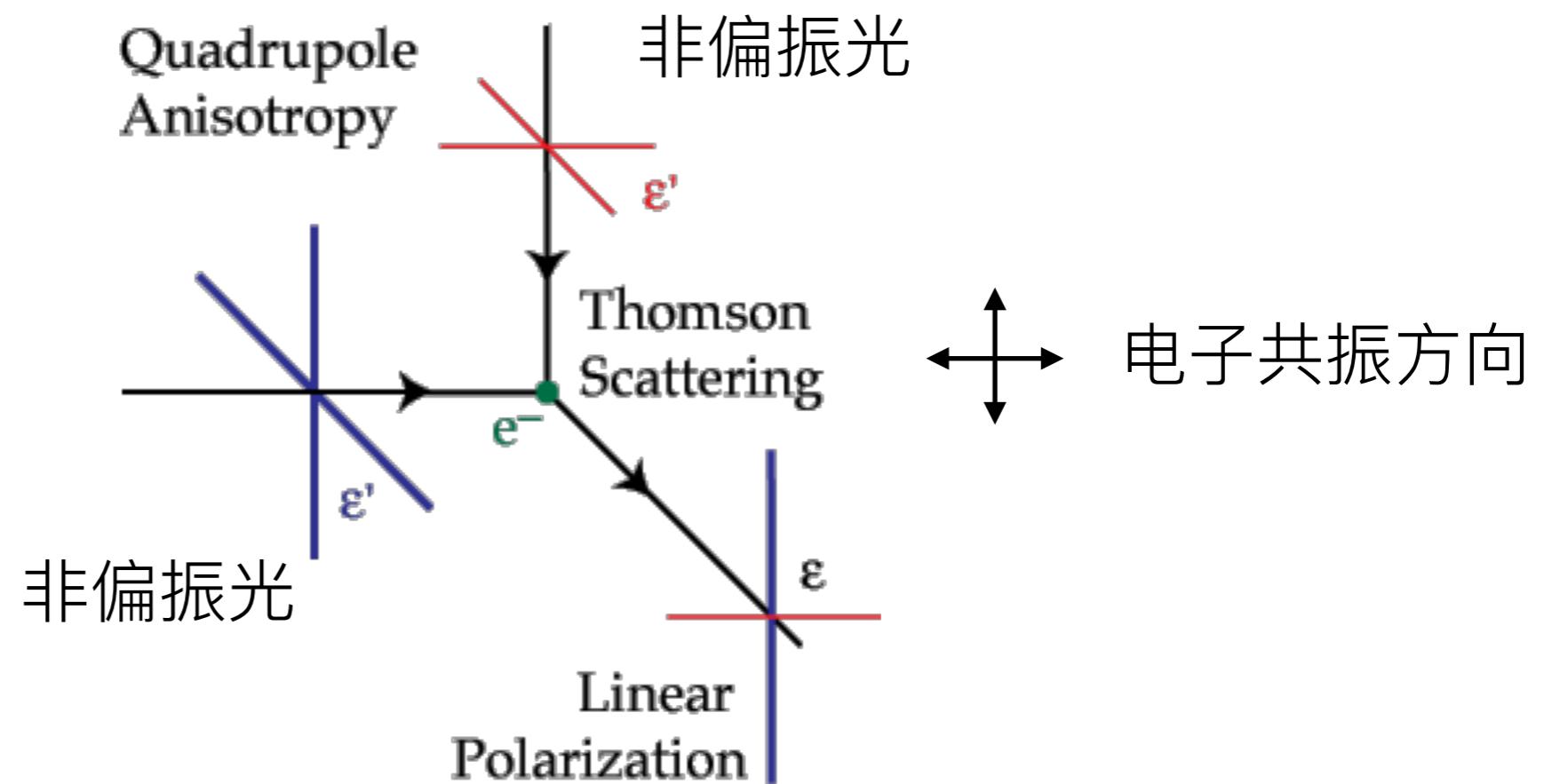
E模极化谱主要
response
速度扰动

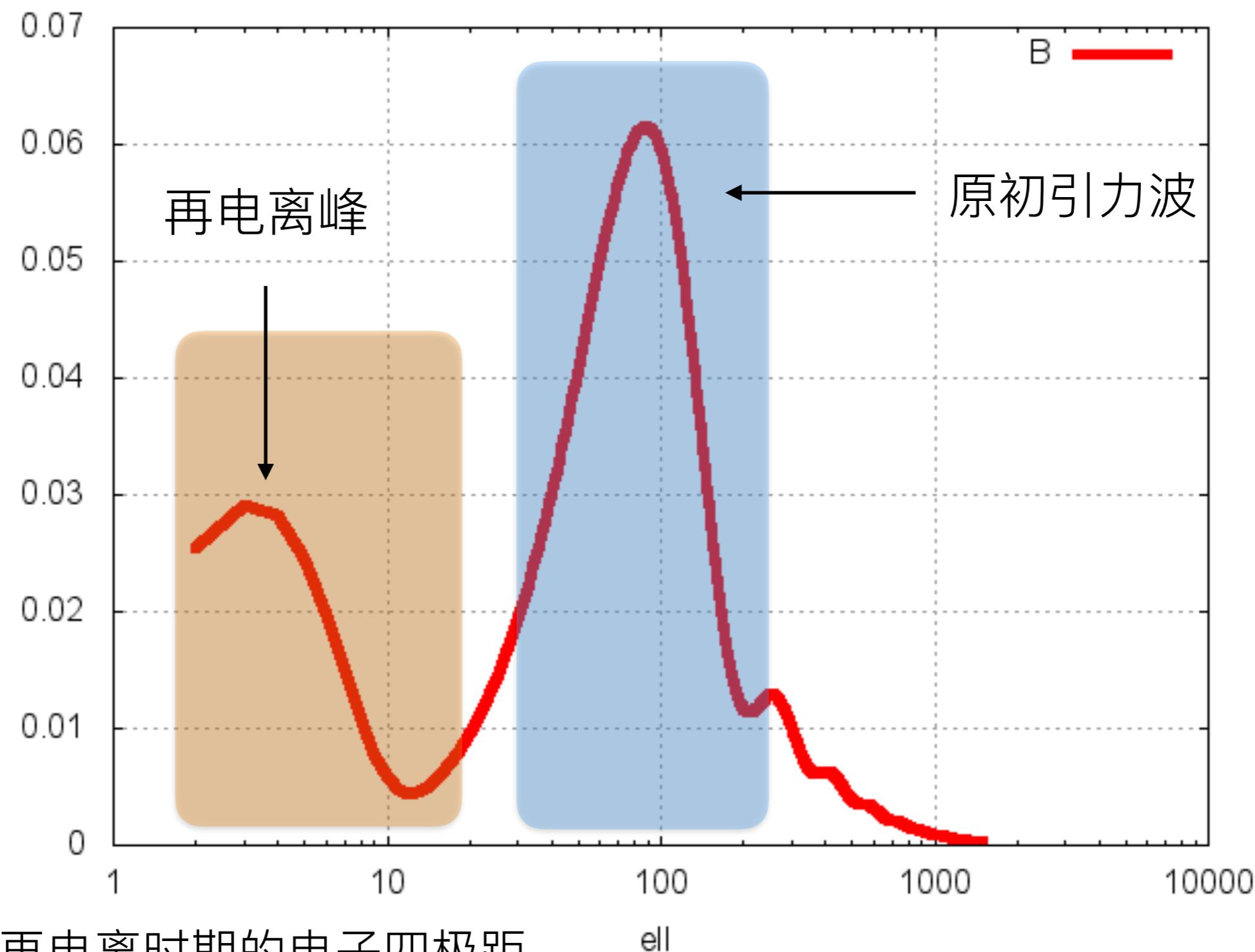
原初引力波扰动，会产生一定比例的B模计划

这是用来了解，宇宙极早期暴胀机制 / inflation，
研究量子引力的**最主要**窗口

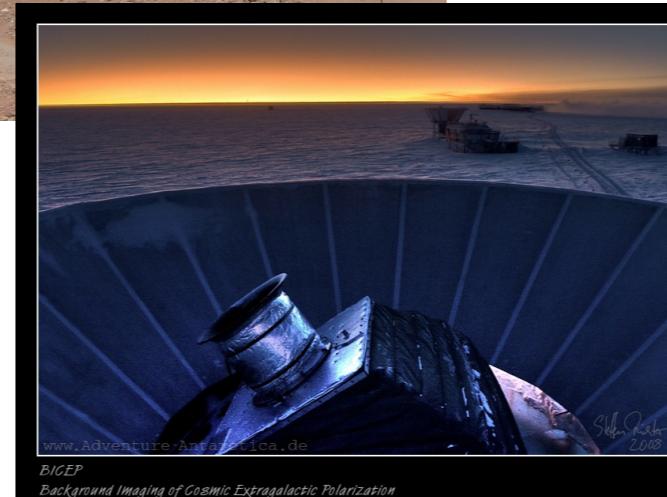
物质密度扰动（标量 / 自旋0/单极矩）、速度扰动（矢量 / 自旋1/偶极矩），
在最后散射面上，不会产生四极距（张量 / 自旋2）

前两者($360^\circ/180^\circ$)，
不会在 90° 方向上，
产生不均匀性，
只有引力波才有可能

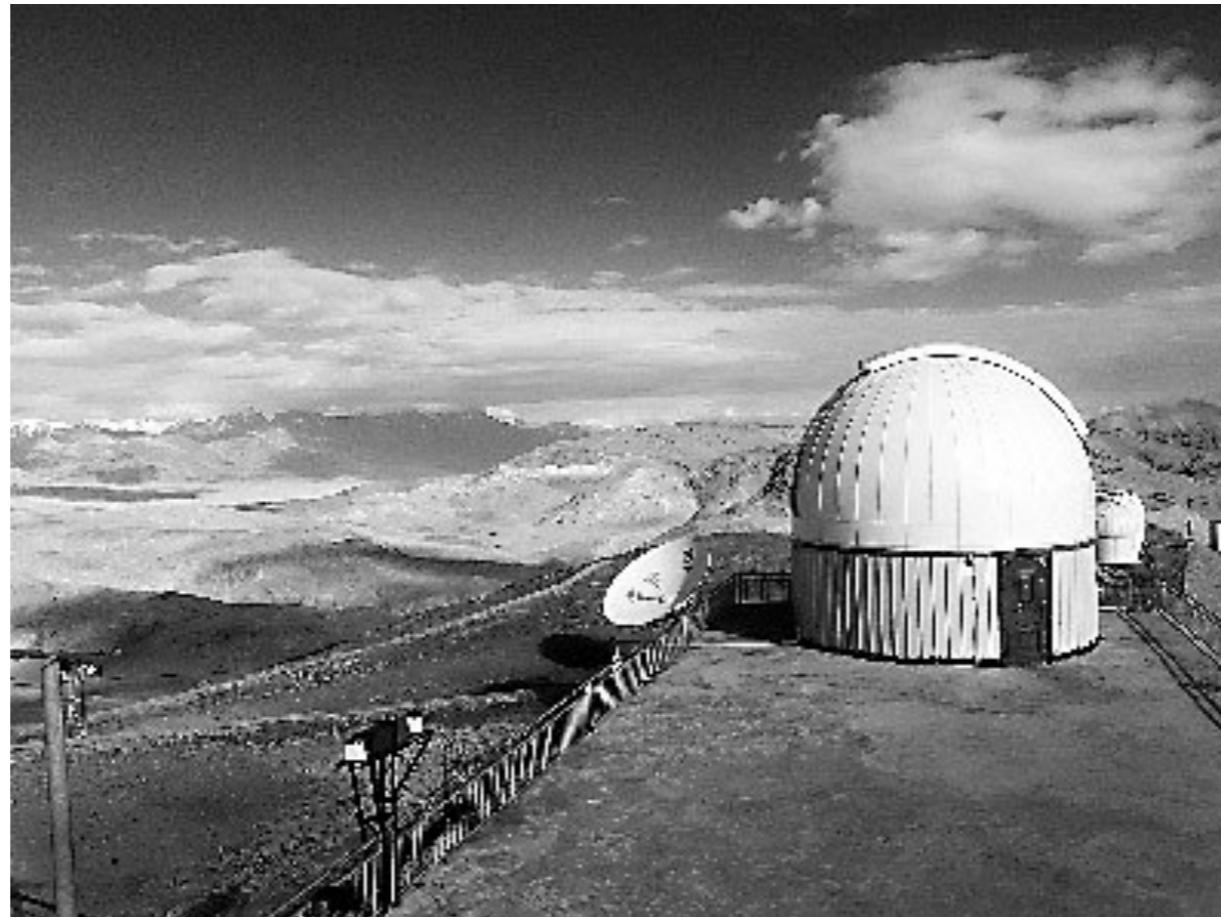




未来10~15年的CMB
实验，基本全部以测量
B模极化为目标



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！！！**



Further reading

CMB basics

- Wayne Hu’s excellent website (<http://background.uchicago.edu/~whu/>)
- Hu & White’s “Polarization primer” (arXiv:astro-ph/9706147)
- AC’s summer school lecture notes (arXiv:0903.5158 and arXiv:astro-ph/0403344)

[https://cosmology.unige.ch/sites/default/files/media/
Anthony Challinor CMB lectures jun13.pdf](https://cosmology.unige.ch/sites/default/files/media/Anthony_Challinor_CMB_lectures_jun13.pdf)

CMB lensing

- Lewis & AC’s “Weak gravitational lensing of the CMB” (arXiv:astro-ph/0601594)

Textbook

- *Morden Cosmology* by Dodelson
- *The Cosmic Microwave Background* by Ruth Durrer