

# 《天体物理学》

## 第二章 辐射 (b)

---

讲授：徐仁新

北京大学物理学院天文学系

- 0, 信使与大气辐射窗口
- 1, 黑体辐射
- 2, 回旋辐射
- 3, 同步辐射
- 4, Landau能级与曲率辐射
- 5, Compton散射与逆Compton散射
- 6, 轫致辐射
- 7, Cherenkov辐射

# 5, Compton 散射与逆Compton 散射

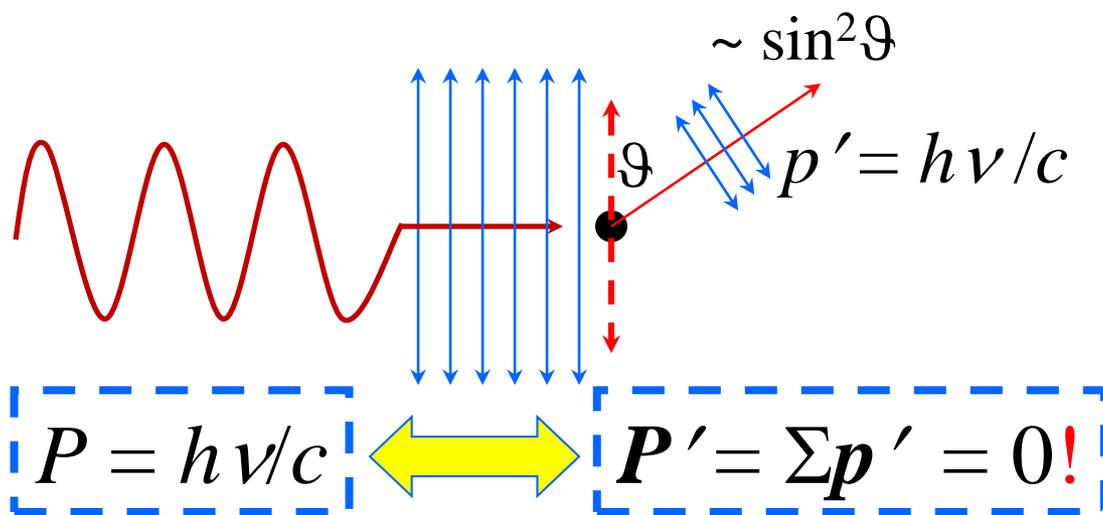
**Compton 过程:** 自由电子与光子间的碰撞过程

Compton 散射 —— 电子动能  $\ll$  光子能量

逆Compton 散射 —— 电子动能  $\gg$  光子能量  $\Rightarrow$  高能光子

**Thomson 散射:** 能量  $< 511\text{keV}$  光子被几乎静止电子散射

光子表现波动性而电子显示粒子性  $\Rightarrow$  经典电动力学问题!



**散射截面**

$$\sigma_T = (8\pi/3)r_e^2 = 6.65 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$$

$$r_e = e^2/(mc^2): \text{ 电子经典半径}$$

**散射后**

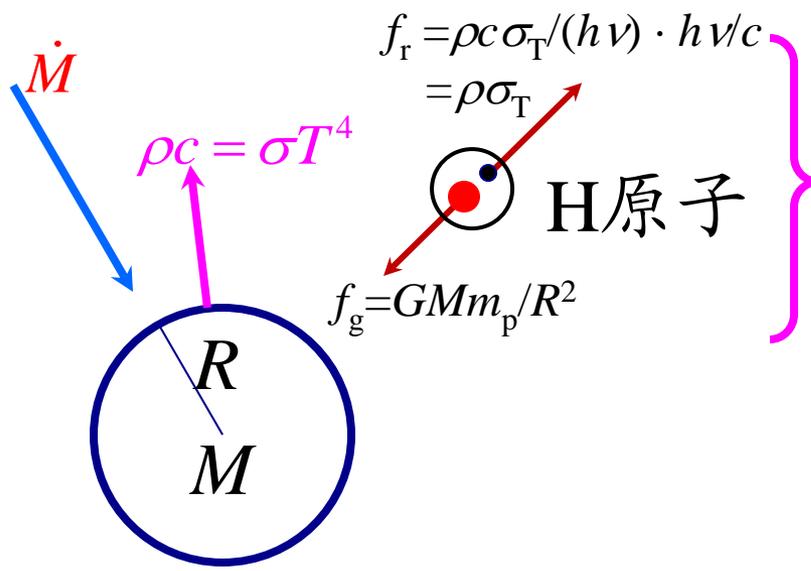
光子能量不变

电子每散射一次获得动量  $h\nu/c$

# 5, Compton散射与逆Compton散射

Eddington光度: 球对称引力束缚体最大光度

千倍要跟引力比?  
星星不能太亮咯~



$$f_g = f_r \Rightarrow \dot{M}_{\text{Edd}} = \frac{4\pi m_p c R}{\sigma_T}$$

Eddington吸积率

$$L_{\text{Edd}} = \frac{GM\dot{M}_{\text{Edd}}}{R} = \frac{4\pi m_p c GM}{\sigma_T} \sim 10^{38} \left( \frac{M}{M_{\text{sun}}} \right) \text{erg/s}$$

$$\frac{GM\dot{M}}{4\pi R^3} = \rho c = \sigma T^4$$

Eddington光度

# 5, Compton散射与逆Compton散射

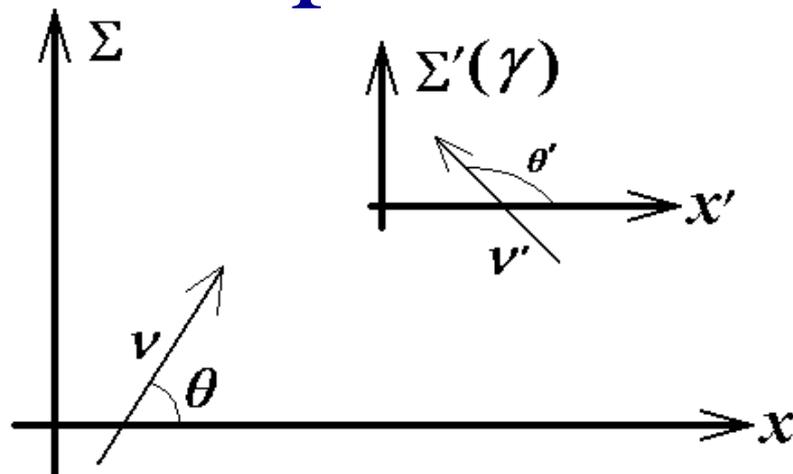
## 不同参考系中的光子

狭义相对论  $\Rightarrow$

$$\nu' = \gamma\nu(1 - \beta \cos \theta), \quad \tan \theta' = \frac{\sin \theta}{\gamma(\cos \theta - \beta)}$$

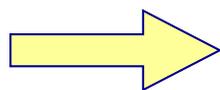
若  $\gamma \gg 1$ , 且  $\{\theta \in (0, \pi), \theta \neq 0\}$ , 则:

$\nu' \sim \gamma \nu$ ;  $\tan \theta' \rightarrow 0$ 。在  $\Sigma'$  系光子频率增加  $\gamma$  倍, “迎头而来”  
宇宙空间能远程传递的光子最高能量大约多少? (LHAASO...)



## 逆Compton散射 (ICS)

为了避免直接处理极端相对论粒子辐射的复杂性, 做Lorentz变换: 即从实验室系变换到电子静止系, 再变换回原实验室系。



出射光子  $\nu' \sim \gamma^2 \nu$ , 几乎沿电子方向

高能电子  $\oplus$  低能光子  $\Rightarrow$  ICS是高能辐射有效机制!

# 5, Compton散射与逆Compton散射

## ICS辐射功率

$$P_{\text{comp}} = (32\pi/9)r_e^2 c \rho \gamma^2 \sim 2.6 \times 10^{-14} \rho \gamma^2 \text{ (erg/s)}$$

$$\text{对比: } P_{\text{sy}} \sim 1.1 \times 10^{-15} \gamma^2 \beta^2 B^2 \sim 2.5 \times 10^{-14} \rho_B \gamma^2 \text{ (erg/s)}$$

## Sunyaev-Zeldovich (SZ) 效应

星系团中高温 (~keV) 热电子  
对CMB (2.7K) 的散射

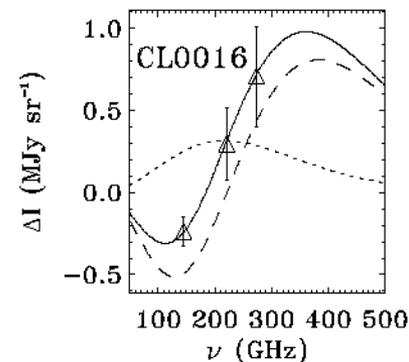
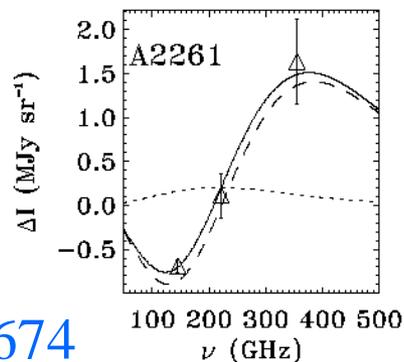
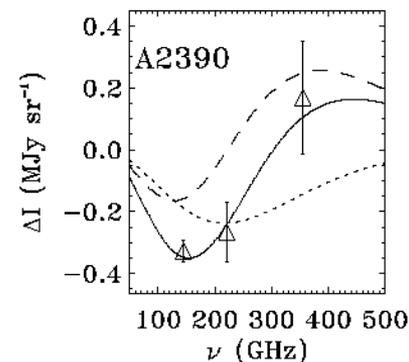
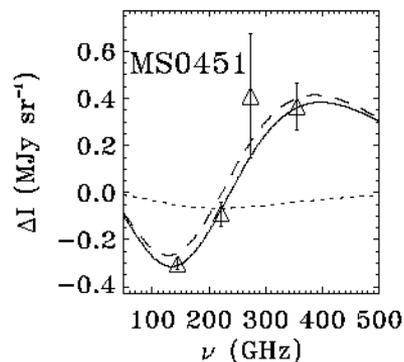
对Planck谱偏离  $\Delta I$  依赖于:

星系团的大小和距离

Hubble常数

星系团的重子丰度等

Benson et al. ApJ. 592 (2003) 674



# 6, 轫致辐射

又称“自由-自由”跃迁

自由运动电子受离子Coulomb场作用加速运动而产生的辐射

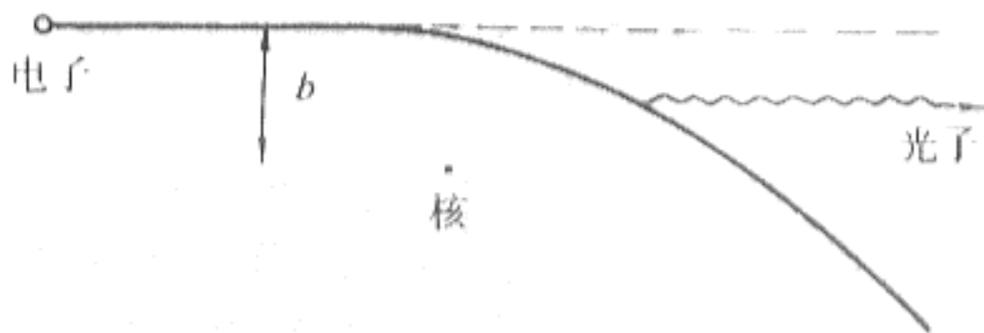
辐射功率

速度为 $v$ 的一个电子在正电荷数 $Z$ 、数密度 $N_z$ 的离子背景上运动时产生轫致辐射

的功率:

$$P \approx \frac{16}{411} N_z Z^2 r_e^2 mc^2 v$$

轫致辐射是弱磁场等离子体冷却的主要因素。



# 7, Cherenkov辐射

又称介质中的“电磁激波”

起源于介质粒子被运动电荷激发而产生电磁振荡的集体效应

辐射方向

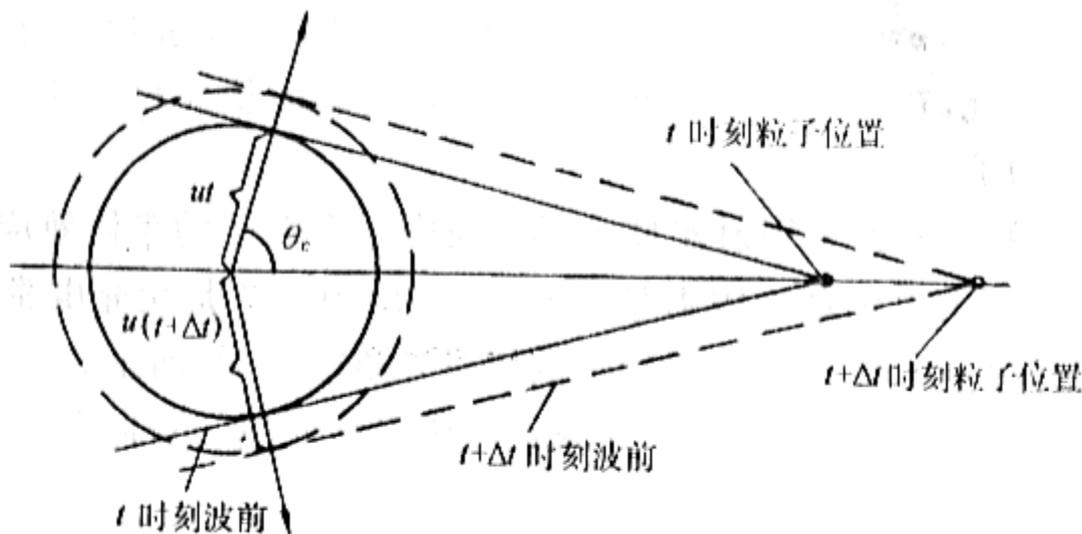
$$\theta_c(\omega) = \cos^{-1} \frac{1}{\beta n}$$

特点:

- 1, 加速度不是必须的
- 2, 不在 $1/\gamma$ 束内
- 3, 因减速,  $\theta_c$ 内均有

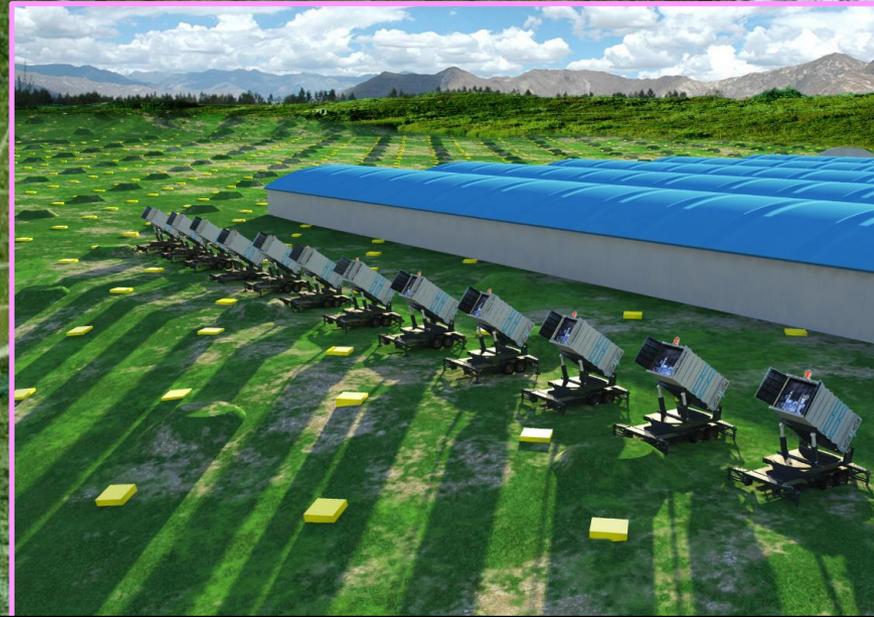
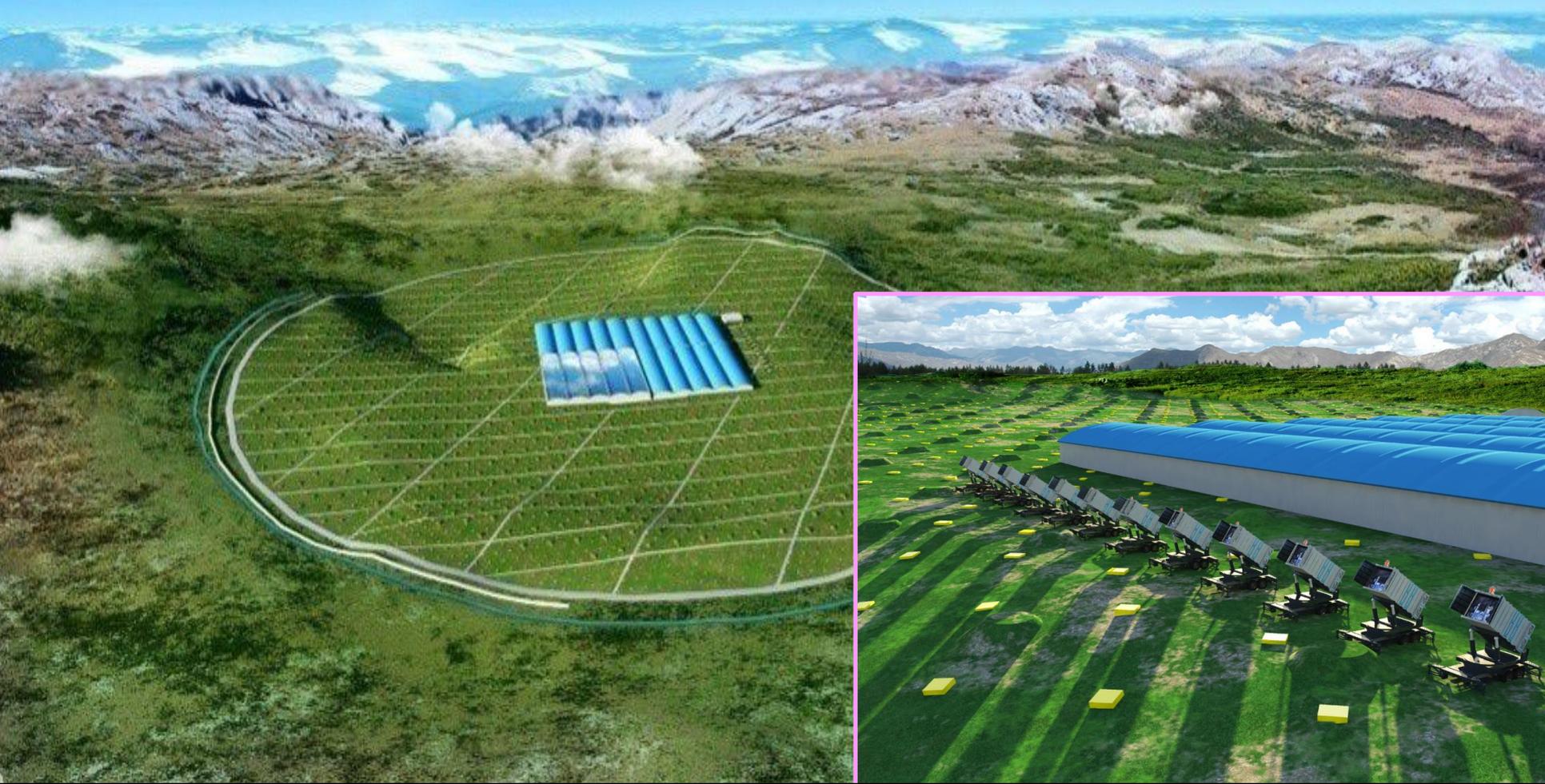
应用之一

水中宇宙线探测: 相对于空气中探测而言, 张角 $\theta_c$ 大且功率强



# 7, Cherenkov辐射

水Cherenkov “望远镜”：LHAASO（稻城）

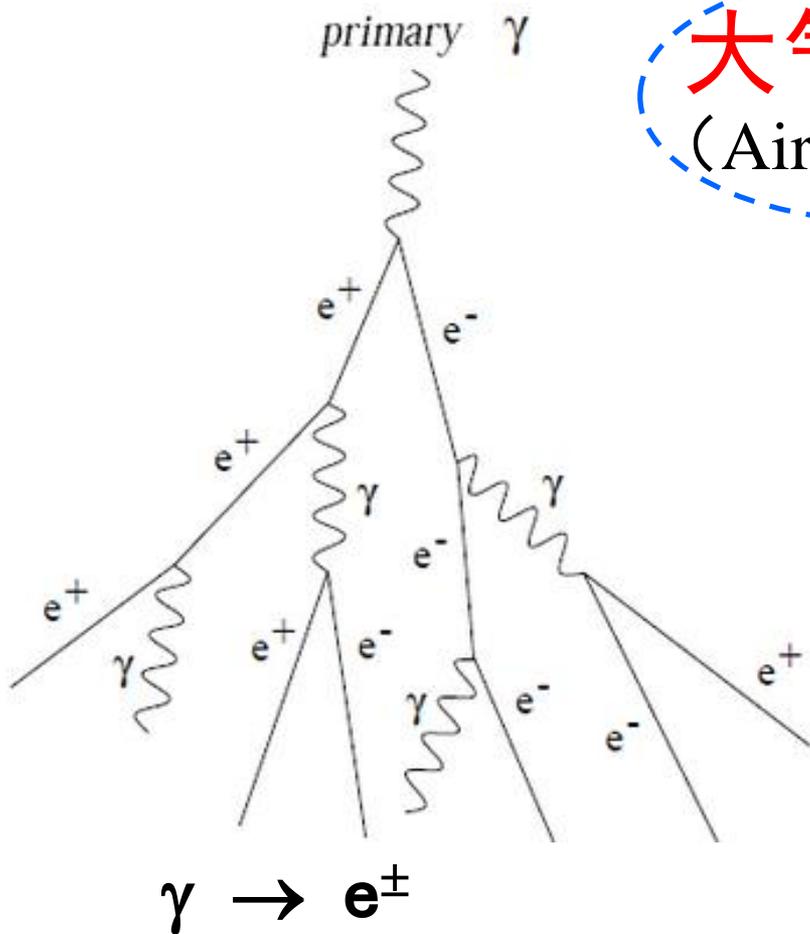


# 7, Cherenkov辐射

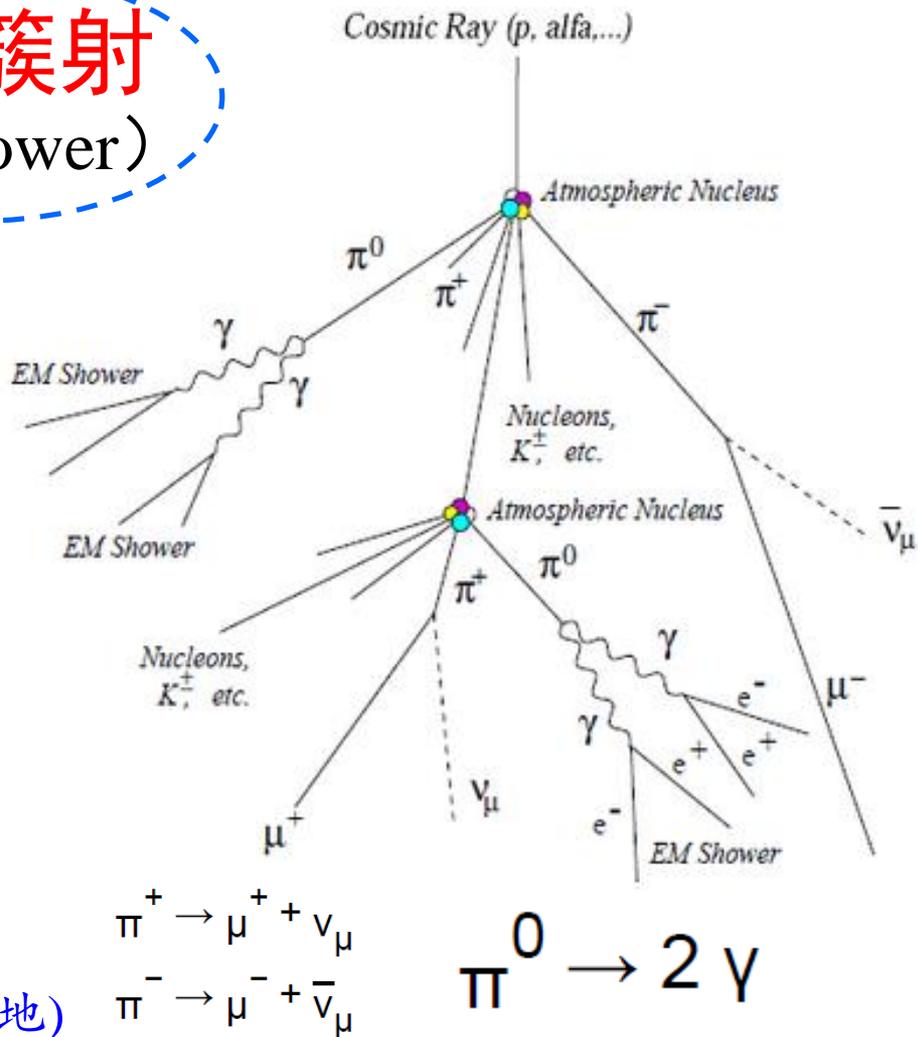
电磁级联

强子级联

大气簇射  
(Air shower)



OMG: 320EeV~50J (保龄球落地)



# 总 结

- 0, 信使与大气辐射窗口
- 1, 黑体辐射
- 2, 回旋辐射
- 3, 同步辐射
- 4, Landau能级与曲率辐射
- 5, Compton散射与逆Compton散射
- 6, 韧致辐射
- 7, Cherenkov辐射

# 作业

4、宇宙中普遍存在绝对温度为3K的黑体辐射，称为微波背景辐射。一个Lorentz因子 $\gamma = 100$ 的自由电子穿梭于微波背景辐射场中，该电子因逆Compton散射而损失能量。问：该电子行走多远距离后它的Lorentz因子才会发生明显改变？

6、证明两个电子碰撞不会产生电偶极辐射。

**补充：**宇宙空间能远程传递的光子最高能量大约多少？