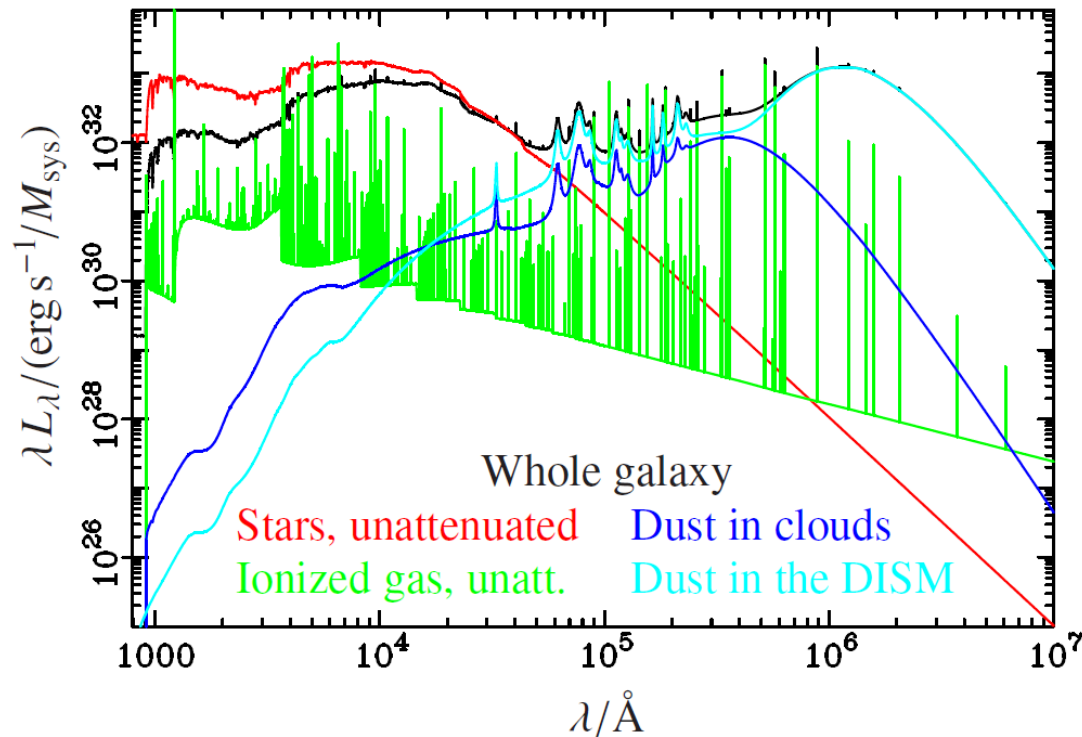


How to model the optical spectrum of a galaxy

沈世银



星系中的发光成分

- 恒星

- 不同年龄，不同金属丰度，不同质量
- 星族：同一时间诞生的一批恒星 (Stellar population)
 - IMF
- 不同年龄、金属丰度的星族

- 星际介质

- 气体 (多相)
 - 电离气体 (发射线)
 - 中性气体 (吸收)
- 尘埃
 - 吸收、散射 (紫外, 光学)
 - 发射 (红外波段)

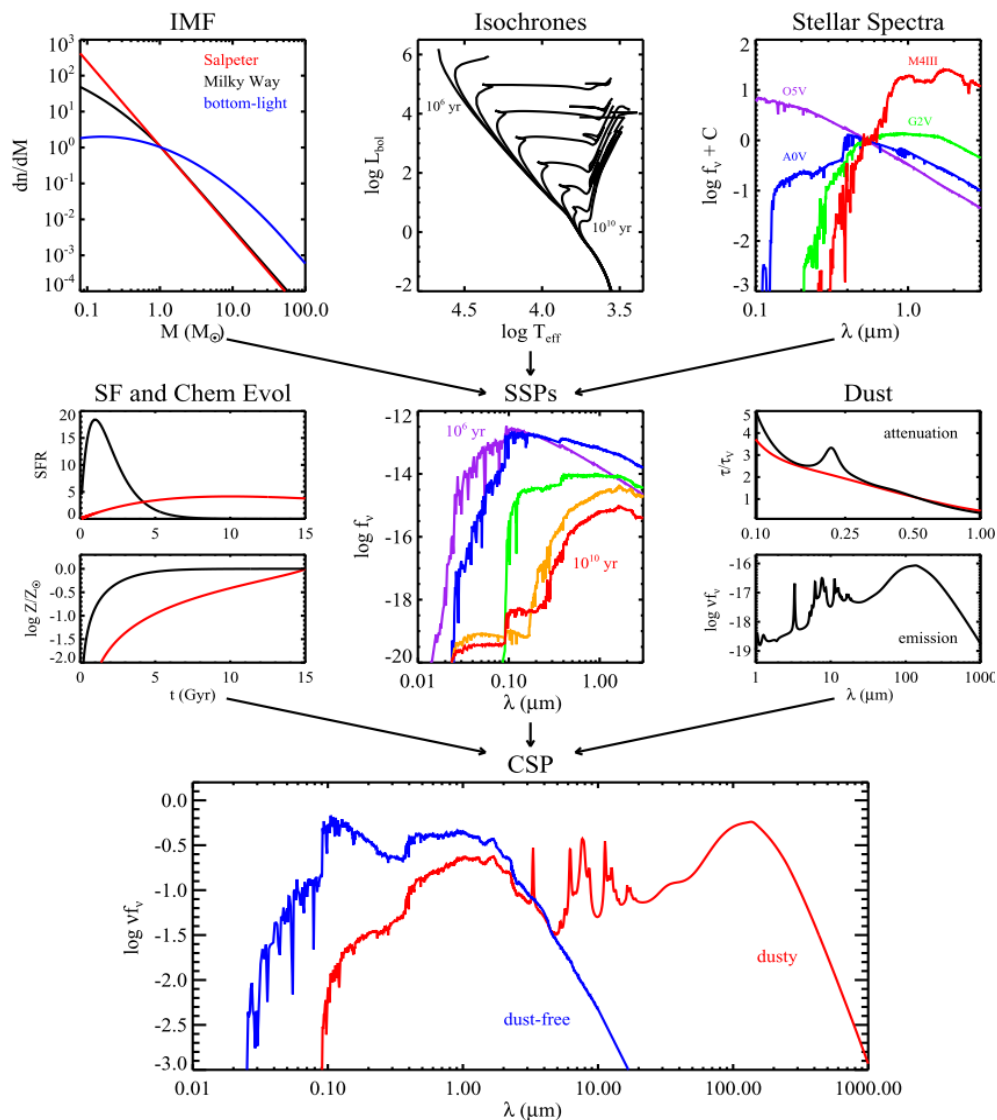
- 活动星系核

星系光谱：不同的发光成分的合成

SSP: single stellar population

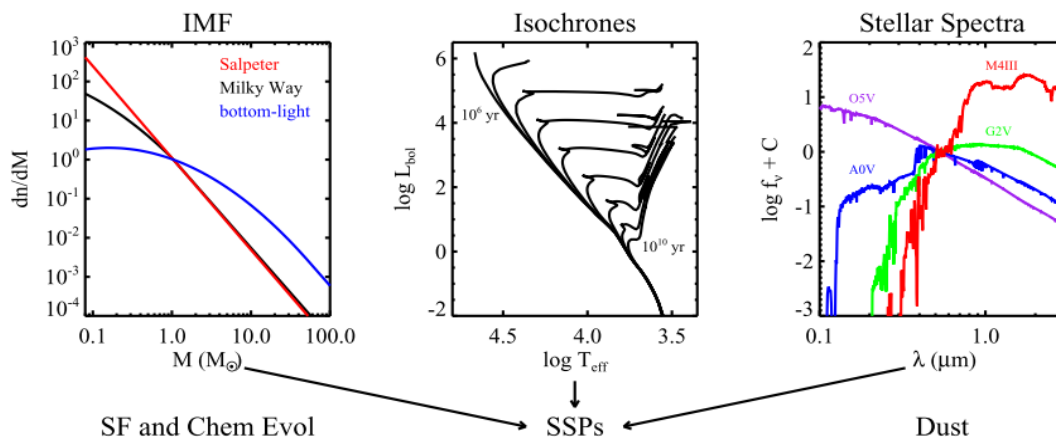
CSP: composite stellar population

星族合成模型框架
Conroy 2013



单星族 (SSP)

- IMF: Universal or 金属丰度, 星系质量的函数?
- SSP的构建
 - 等龄线
 - 恒星的理论光谱模板 VS 实测光谱模板
 - 实测数据缺少特定类型的恒星
 - 金属丰度的描述
 - $[Fe/H]$ $[\alpha/Fe]$

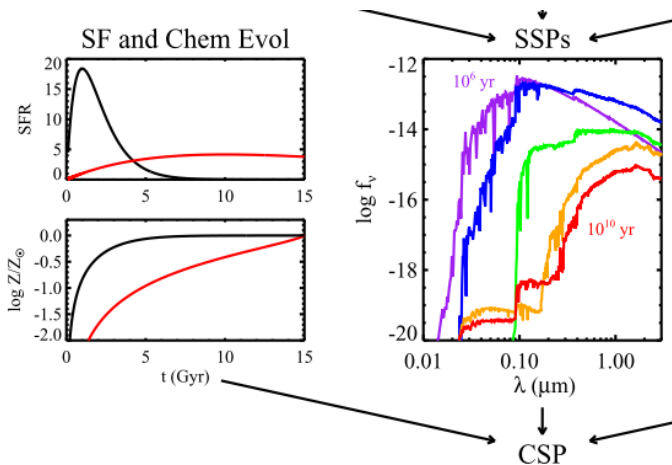
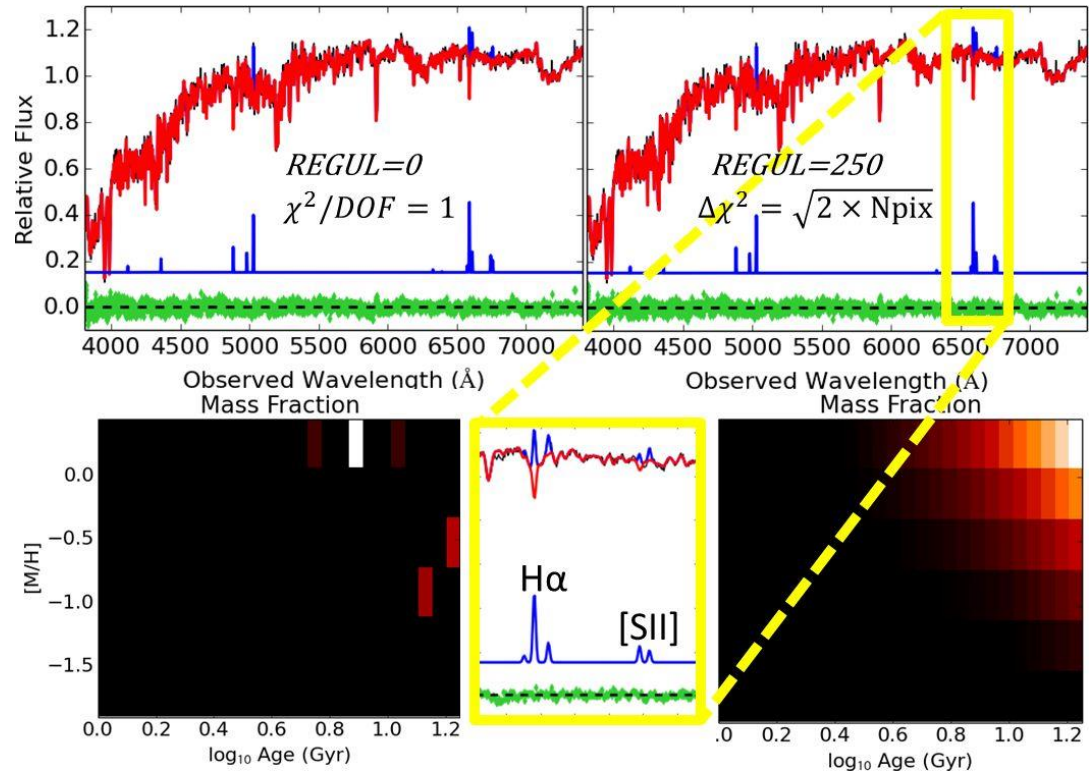


复合星族 (CSP)

$$s_i \approx \sum_{j=1}^n B_{i,j} x_j, \quad i \in \{1, \dots, m\},$$

$$B^0(\lambda, t, Z) \triangleq \int_{M_{\min}}^{M_{\max}} \text{IMF}(m) S(\lambda, m, t, Z) dm,$$

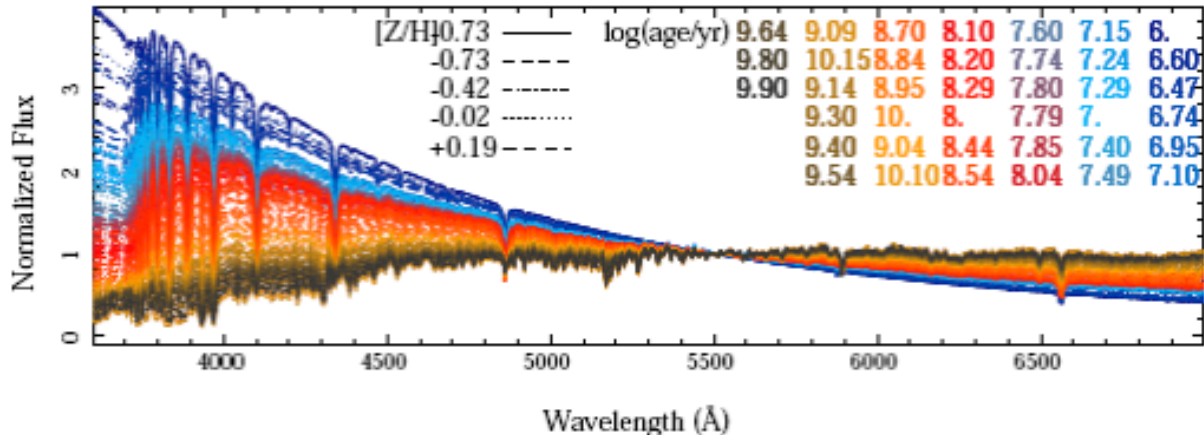
- x_j : 不同年龄和金属丰度的SSP占据的比例



复合星族： 年龄与金属丰度

- SSP在年龄上的差异在对数空间
- 不同的SSP在数学上不是独立矢量
 - 不存在唯一数学解, ill-posed problem
 - 主成分分析法
- 年龄和金属丰度在观测上的简并
 - 更老的星族 $\leftarrow \rightarrow$ 更富的金属丰度
- 年龄和金属丰度的内禀相关性: **不独立!**
 - 更老的星族 $\leftarrow \rightarrow$ 更贫的金属丰度

$$s_i \approx \sum_{j=1}^n B_{i,j} x_j, \quad i \in \{1, \dots, m\},$$



化学演化模型

恒星形成

$$\frac{d(M_{\text{ISM}} Z_{\text{ISM}})}{dt} = -(\psi Z_{\text{ISM}})(t)$$

内落

$$+ \sum_{j=1}^{n_{\text{res}}} \dot{M}_{\text{in}, j}(t) Z_{\text{in}, j} - (\dot{M}_{\text{out}} Z_{\text{ISM}})(t)$$

外流 (瞬时循环)

$$+ \int_{t'=0}^t \psi(t-t') \dot{M}_{\text{ej}, Z}^{\text{SSP}}(t', Z[t-t']) dt',$$

产额

元素的产额

- 大质量星 ($>5M_{\text{sun}}$)
 - SN Ib/Ic/II
 - 瞬时循环
- 小质量星 ($<5M_{\text{sun}}$)
 - RGB, AGB
- SNIa: 双星

- 不同的金属 \rightarrow 不同种类的尘埃

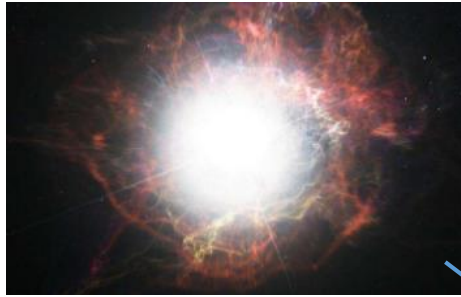
尘埃 (astronomical dust)

- 尘埃的化学组成
 - 硅酸盐尘埃
 - Si, Mg, S, Ca, Fe, O
 - C尘埃
 - 石墨, 无定型碳, PAH
- 尘埃颗粒的大小
 - $>0.1 \mu\text{m}$: 较大颗粒
 - 颗粒大小和吸收光子波长相关: 粒子处于热平衡态
 - $<0.025 \mu\text{m}$ (PAH)
 - 吸收截面和紫外光子的波长关系不大

尘埃含量

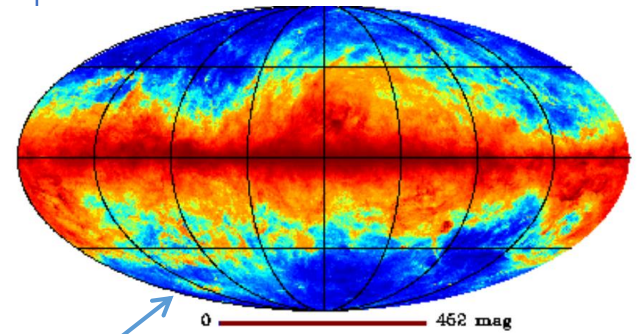
- 星系中的尘埃含量不是自由参数
- 尘埃含量正比于金属丰度
 - 金属的沉降→尘埃
- 尘埃含量与气体成正比
 - 原子气体
 - 分子气体

Supernova
wind of AGN stars



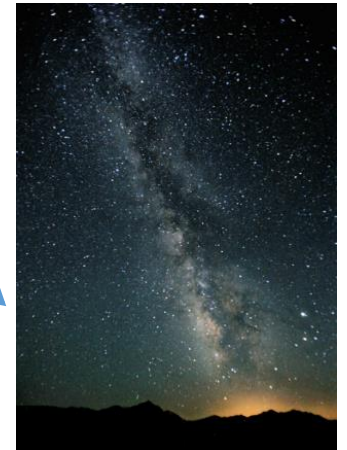
~1% mass of ISM

Dust emission



能量平衡

Dust extinction



Molecular gas
formation

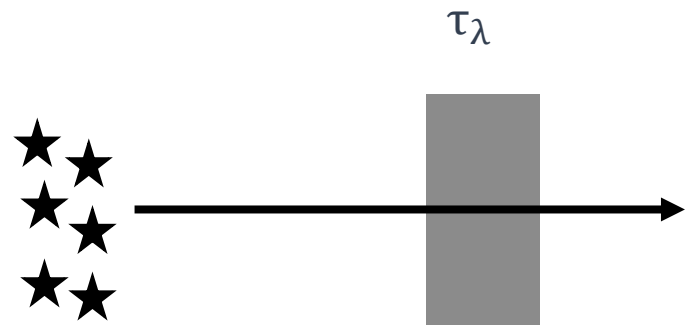


Key role in ISM evolution

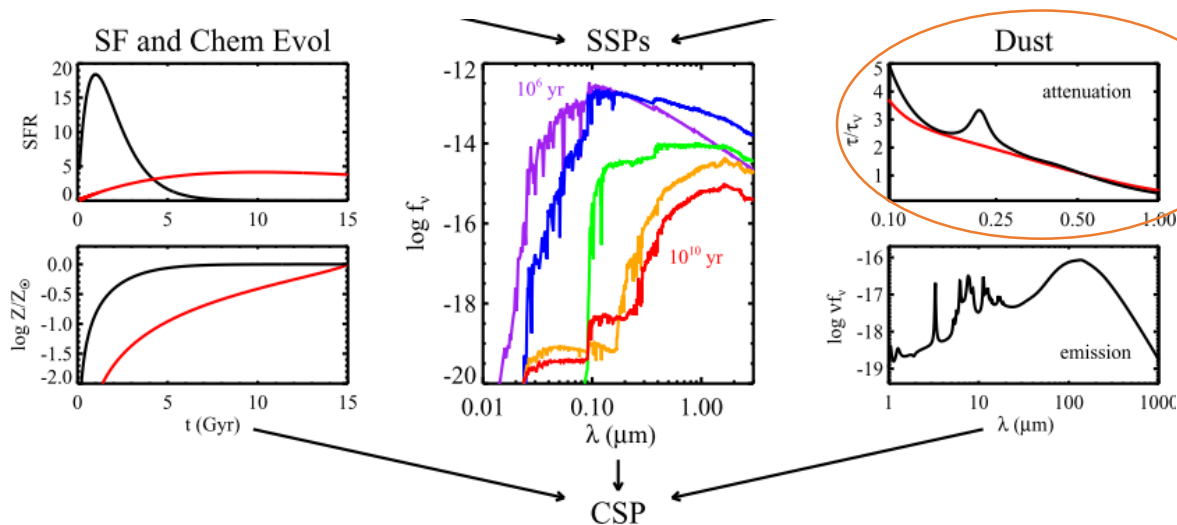
尘埃消光(extinction): Screen模型

- 消光: 吸收和散射
散射: 反射率、各向同性
- 不同颗粒大小的尘埃粒子的综合效应
不大大小粒子的吸收和散射截面: 光子波长的函数
小粒子数目更多, 因此对短波长光子的消光更强

- 光深: $I(\lambda) = I_0(\lambda)\exp(-\tau_\lambda)$
- 消光: $A_\lambda = 1.086\tau_\lambda$
- 红化: $E(B - V) = A_B - A_V$
- 消光曲线: $K_\lambda = A_\lambda / E(B - V)$
由尘埃粒子的性质决定



尘埃的减光效应 (dust attenuation)



- 减光: 有效消光 $A_{\lambda} = m_{\lambda} - m_{0,\lambda}$
(星系的观测星等与在假设没有尘埃情况下的差别)
- 等效为Screen模型下的光深

星系的减光除了和尘埃的多少相关外，还与尘埃和光源的几何分布密切相关

尘埃的空间分布

- 尘埃和光源具有不同的空间分布特征

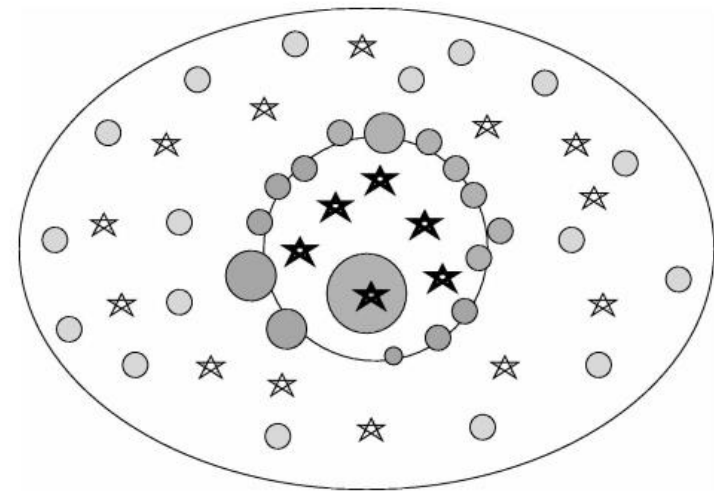
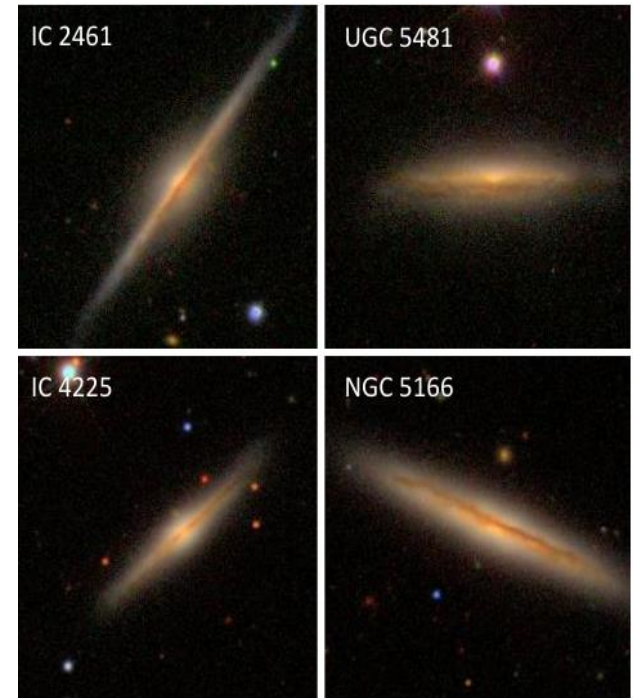
- 宏观上：尘埃分布的标高比恒星更小（旋涡星系）
- 标长？

- 微观上：恒星形成区，弥散电离介质

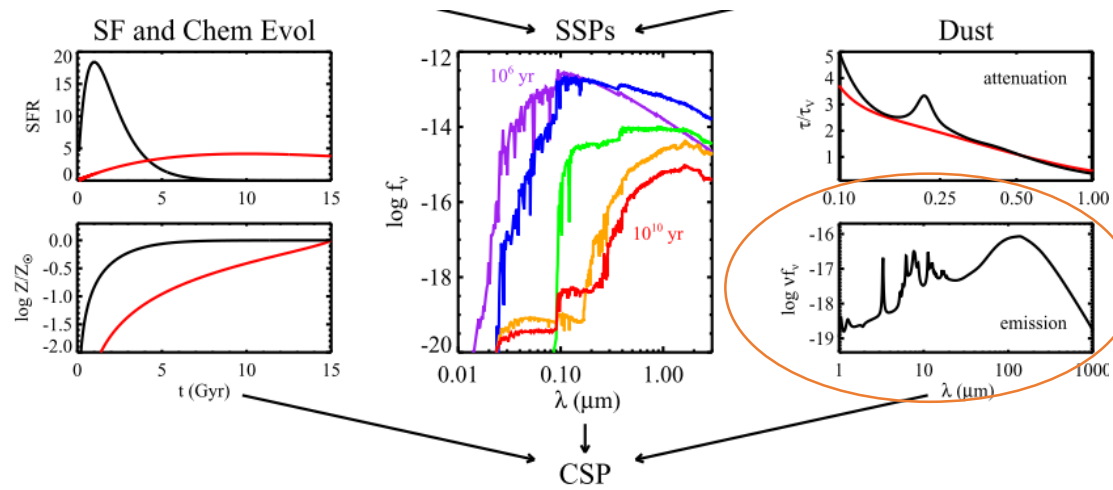
- HII区有更多的尘埃消光

$$E(B - V)_{\text{star}} = 0.44E(B - V)_{\text{gas}}$$

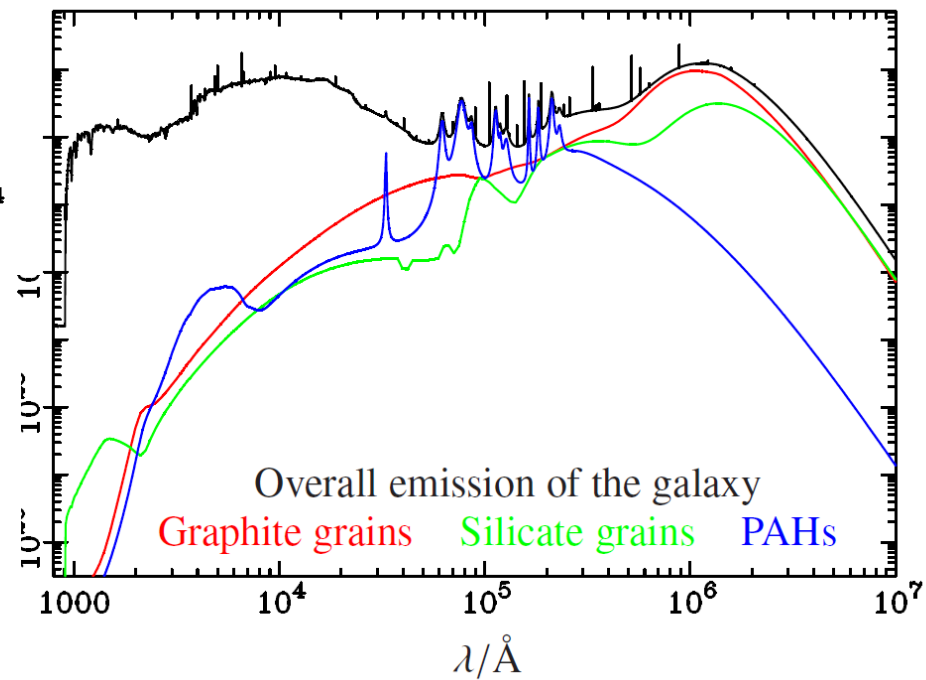
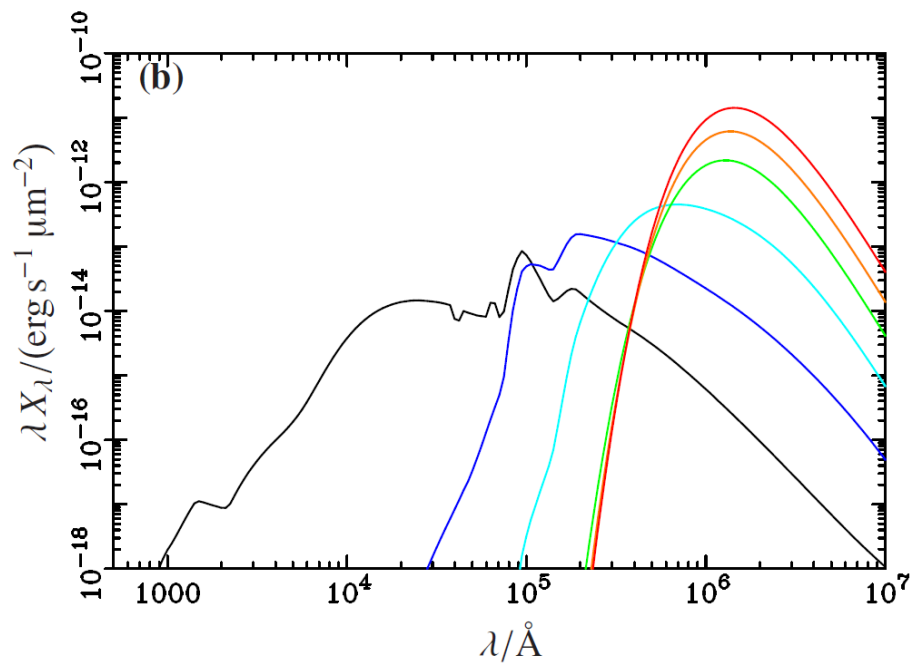
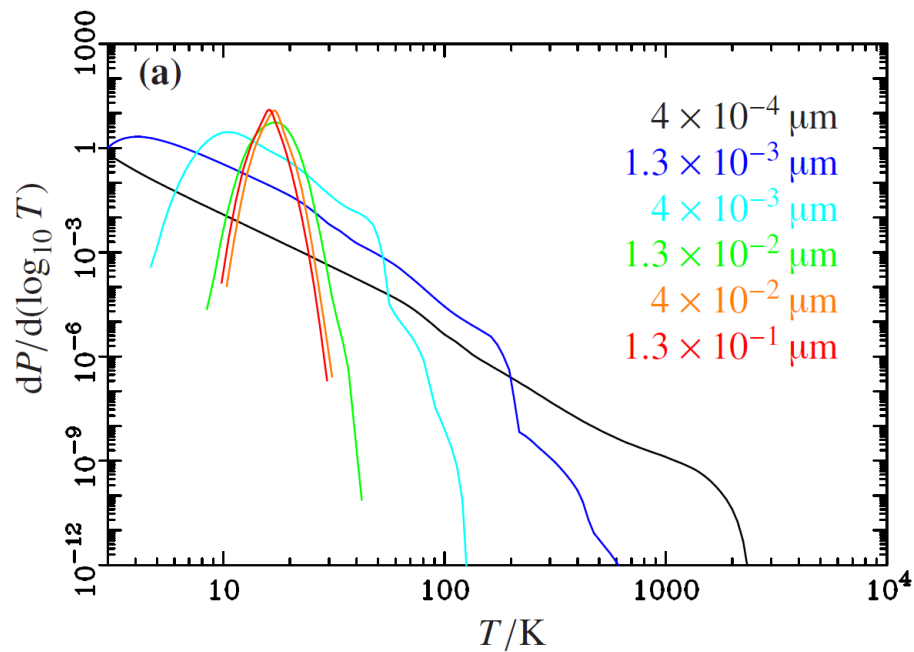
Calzetti 1997,2000



尘埃的辐射



- 大颗粒尘埃近似处于热平衡态
 - 远红外波段
- 小颗粒尘埃： Stochastic heating
 - 温度更高： 中红外
 - PAH 辐射： 分子键的震动 (Draine & Li 2001)
- 总量： 与辐射场有关
 - 消光之间的能量平衡
 - 粒子的演化



电离气体

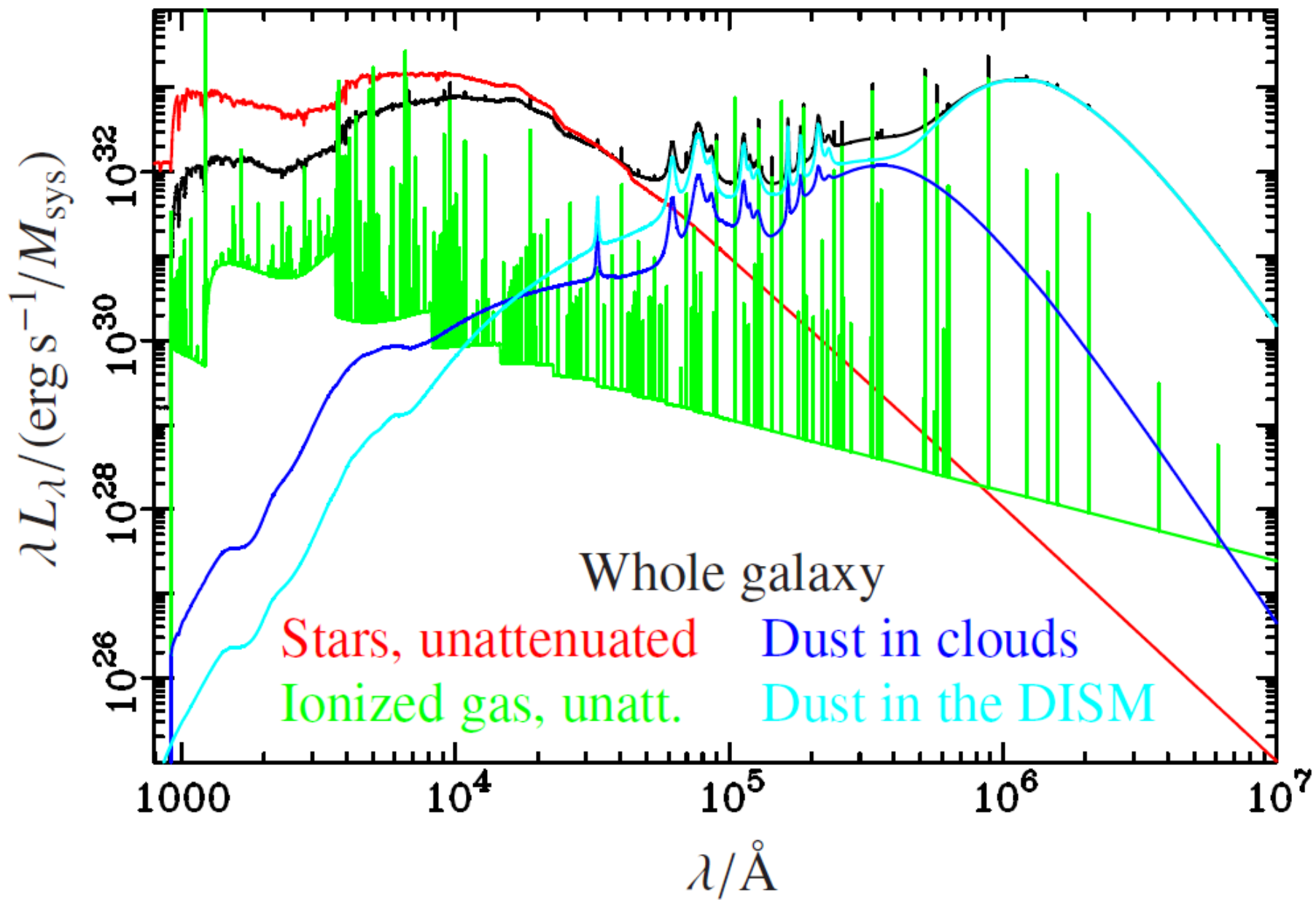
- 恒星形成区
 - 电离源：OB星
- 弥散电离气体
 - 电离源：？
 - 恒星形成区leak的Lyman光子
 - 白矮星等老年热星
- Shock（超新星遗迹）
- AGN
- 宇宙线

电离气体的辐射

- C,O等元素的密度远远小于H，但电离截面远远大于H
 - C,O大部分是电离态，对电子密度贡献不大
- 气体的金属丰度、电离度，电子的密度和温度决定了发射线特征
 - 电离度，电子密度由气体密度和电离源决定
 - 电子温度主要由电离源的能谱分布决定
- 电子的自由-自由辐射：连续谱
- 复合线 recombination lines
 - Case A, 电子温度很高 ($>10^6\text{K}$)，气体完全电离，对Lyman光子是光学薄的
 - Case B: 气体没有完全电离，Lyman光子是光学厚的
- 禁线

碰撞激发 碰撞退激发 自发辐射

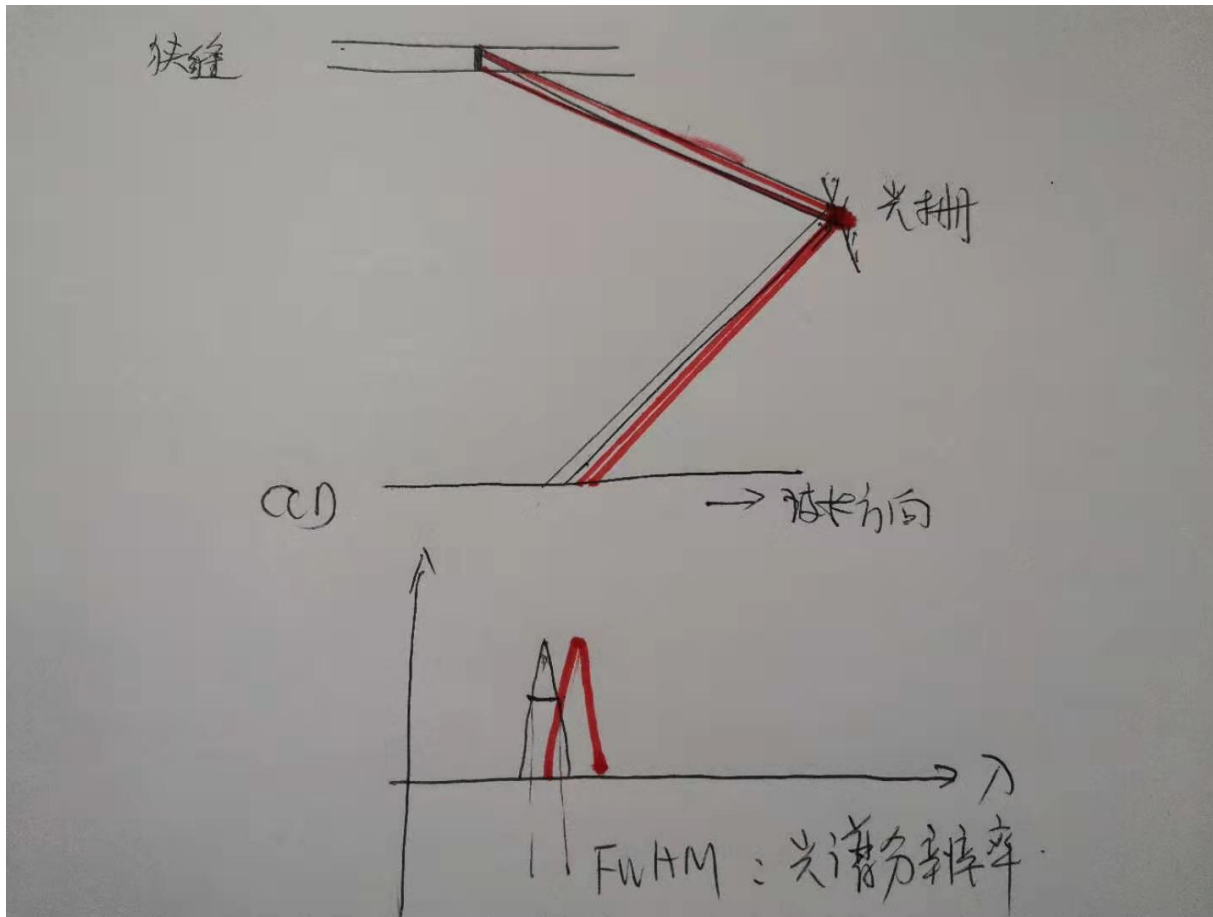
$$n_l n_e q_{lu} = n_u n_e q_{ul} + n_u A_{ul}$$



光谱中的宇宙学和运动学效应

- 宇宙学红移
 - $\lambda = \lambda_0(1+z)$
- 视向速度
 - $\lambda = \lambda_0(1+v/c)$ km/s
- 速度弥散度
 - σ : km/s
 - 谱线致宽: 在速度空间 (波长的对数空间)

光谱分辨率



光谱仪 $\Delta\lambda \sim$ 常数, 波长空间的分辨率

$R = \lambda / \Delta\lambda$: 速度空间的分辨率

总结

- 恒星、气体、尘埃、（AGN）的辐射的综合构成了星系光谱的主要成份
 - 这些辐射不是相互独立的
- 能量
 - 除了AGN外，恒星辐射提供了基础
 - Lyman光子电离气体，加热尘埃
 - 尘埃吸收和散射光子
 - 电离气体和尘埃辐射冷却
- 物质
 - 不同质量的恒星产生不同的金属元素
 - 不同的金属元素形成不同类型的尘埃
 - 辐射场环境： 金属 \leftrightarrow 尘埃

Unknown

- 星族：星系的化学演化过程由什么过程主导
 - 气体内落过程
 - 并合过程
- 电离气体
 - HII区中有多少Lyman光子逃逸
 - 弥散电离气体的电离机制由什么主导
- 尘埃
 - 尘埃粒子的物理化学模型
 - 尘埃的演化：与环境的物质和能量交换
 - 尘埃的几何分布