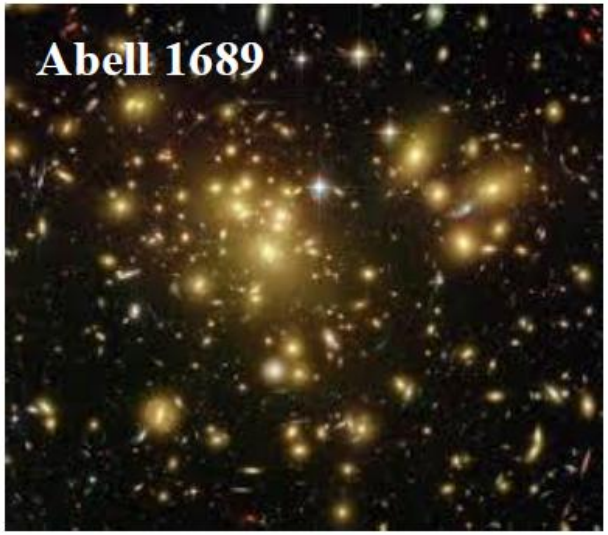
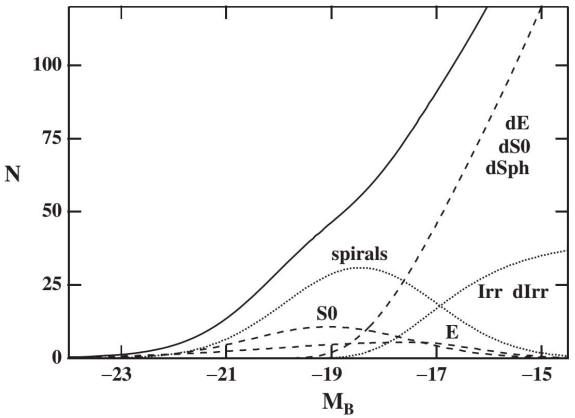
7.2 星系团

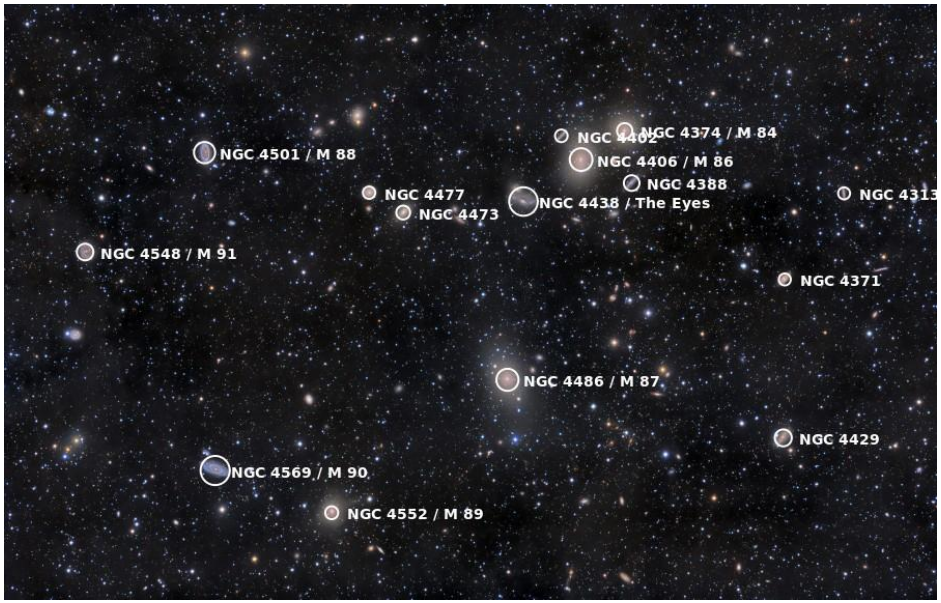
- 星系团：宇宙中星系数密度高的星系聚集区，有 $\Delta\rho/\langle\rho\rangle \sim 10^3$
  - 由数十个至数千个星系、星系际热气体和暗物质组成
  - 质量~ 10^{14} –$10^{15}M_{\odot}$; 团的大小 D ~ 2 –10 Mpc
  - 团成员星系的运动速度V ~ 800 –1000km/s.
- Abell星系团：最著名的星系团表
  - 包括全天4,073 富星系团；2712个北天星系团（1958年）；1361个南天星系团（1989年）
  - 团富度：星等介于m_3–m_3+2（星系团中第3亮成员星系的星等）之间星系数目，不少于50个
  - 密集性：必须有> 50个星系分布在星系团核心的“计数半径”内。“阿贝尔半径”：r ~ 1.5Mpc

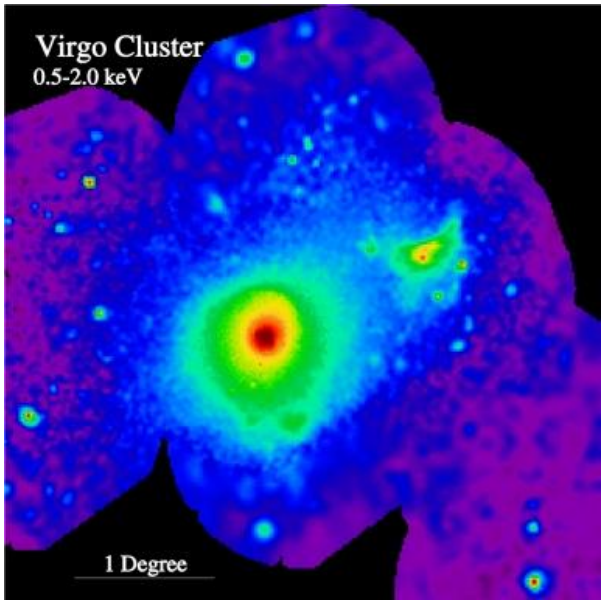


著名星系团

- 室女座（Virgo）星系团
  - 离地球最近的星系团
  - ~2000成员星系；~90%为矮星系
  - D~3Mpc（略大于LGs），距离d~16 Mpc；
  - 星系团中心为巨椭圆星系M87（NGC4486）
  - 动力学质量 $M_{dyn} = 1.2 \times 10^{15} M_{\odot}$

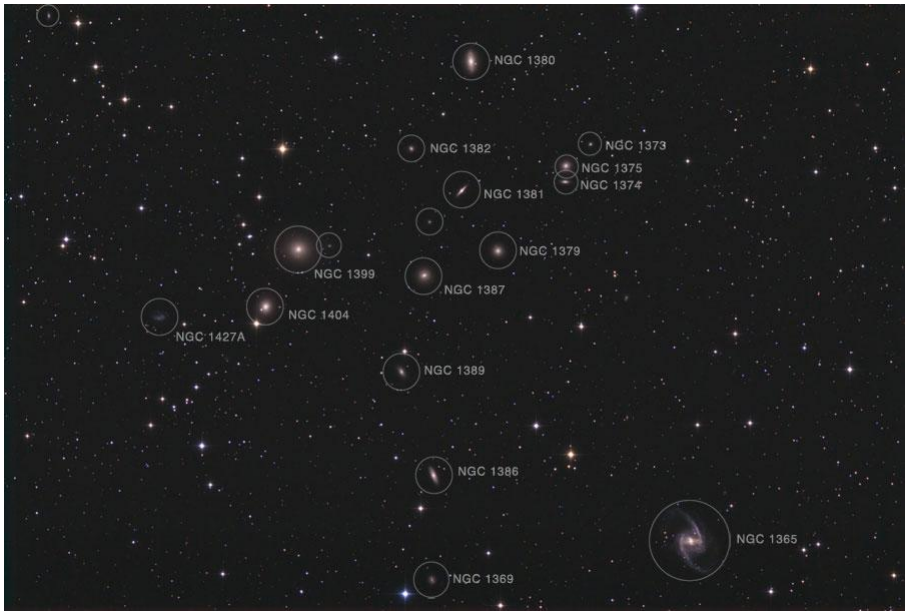


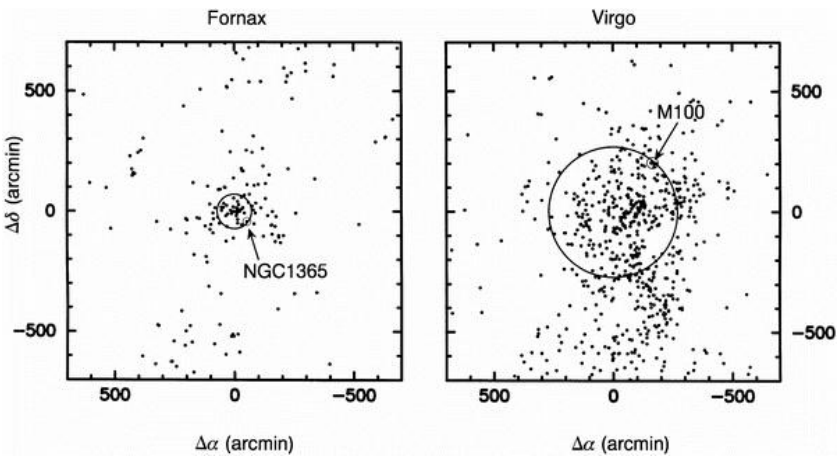




著名星系团

- 天炉座（Fornax）星系团：
  - 近邻宇宙中星系密度最高的地方
  - 距离LG第二近邻的星系团，距离d~20Mpc
  - 亮成员星系数目是室女团的1/5（~340星系）
  - 中心cD星系：NGC1399
  - 动力学质量 $M_{dyn} = 7 \times 10^{13} M_{\odot}$
  - 热气体与星光比例小于较亮的室女座星系团（和星系群的趋势一样）

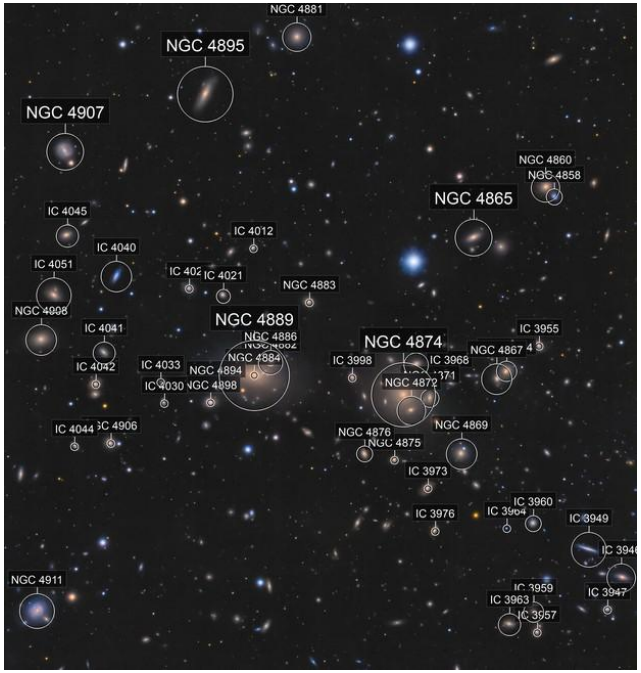


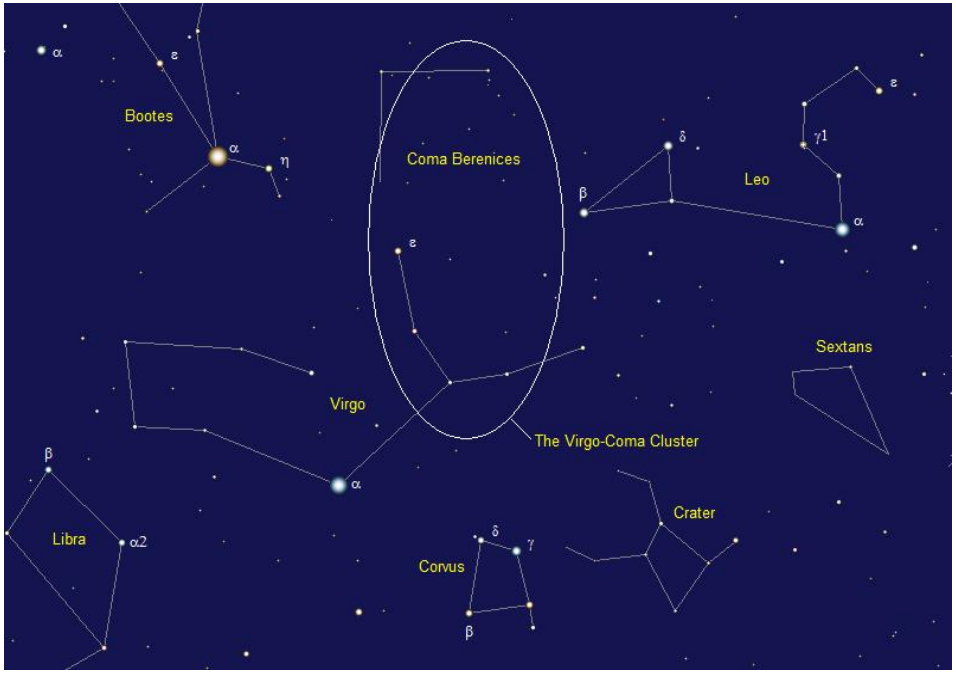


Fornax比Virgo更加致密

著名星系团

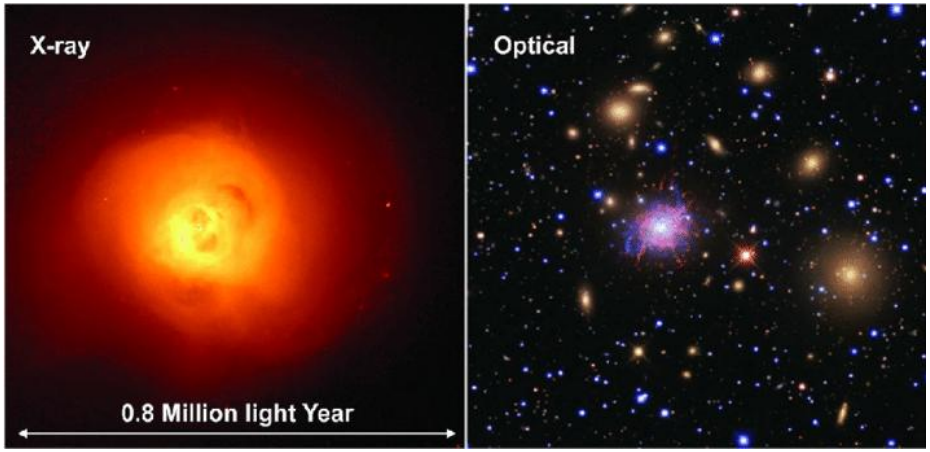
- 后发座（Coma）星系团
  - 比室女团更大：光度大3倍；d ~ 90 Mpc，D ~ 9 Mpc；
  - 成员星系的数目> 1000个，多为E和S0星系
  - 中心为亮椭圆星系：NGC4889 & NGC 4874
  - 动力学质量 $M_{dyn} = 7 \times 10^{14} M_{\odot}$

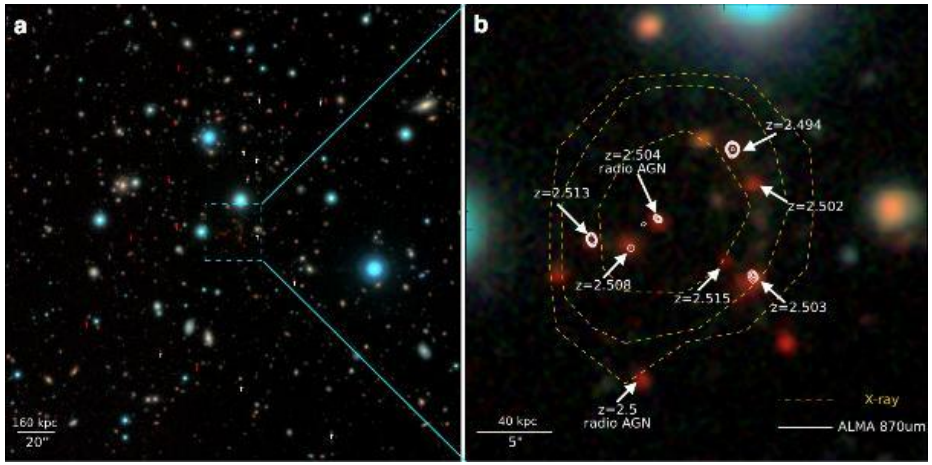




著名星系团

- 英仙座(Perseus)星系团
  - 英仙座星系团是天空中X射线最亮的星系团
  - 星系团中心附近有10-15 个亮星系，包括巨椭圆星系NGC1275





CL J1001+0220：目前已知的最高红移的星系团，z=2.506 (Wang et al. 2016)

Bullet Cluster：两个星系团碰撞，暗物质(蓝色) 和X射线发射云(红色) 分布。

Cluster vs Group

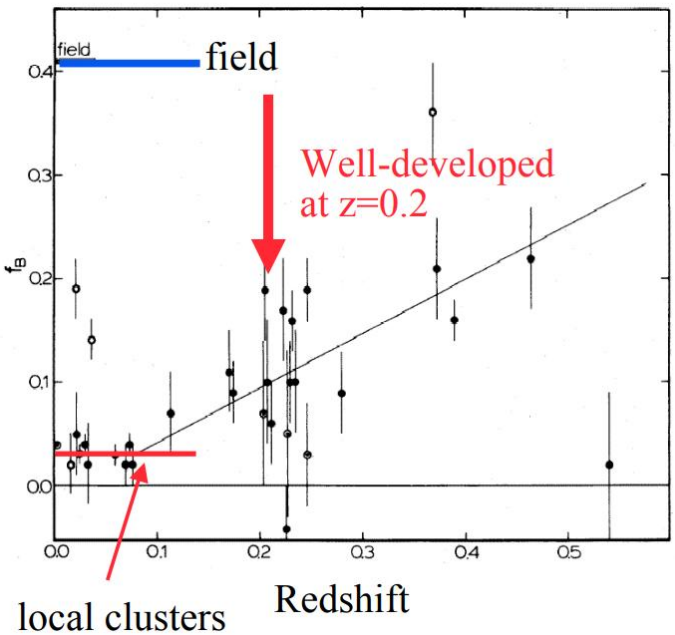
Table 7.1 Nearby galaxy clusters, compared with a distant cluster and a nearby group

	Virgo	*Fornax*	*Coma* A1656	*Perseus A426*	*RDCS* 1252.9–2927	*Stephan's Quintet*
Distance (Mpc)	16	20	100	80	[a] $z = 1.24$	85
Number of galaxies $>10^9 L_\odot$	150	30	450	350	120	4
B-band starlight L_B ($10^{10} L_\odot$)	130	20	500	300	[b] 300	7
Velocity dispersion σ_r (km s^{-1})	700–800	350	~ 1000	$1300 \rightarrow 600$	800	350
Core r_c (kpc)	400	200	200	250	100	25
X-ray L_X ($10^{10} L_\odot$)	1.3	0.03	25	50	20	0.005
Temperature T_X (10^7 K)	2	1–2	9	7	7	0.6
[c] Hot gas $\mathcal{M}_X$ ($10^{10} \mathcal{M}_\odot$)	2 000	$\gtrsim 60$	7 000	7 000	2 000	$\gtrsim 0.07$
[c] Mass $\mathcal{M}$ ($10^{10} \mathcal{M}_\odot$)	20 000	5 000	40 000	50 000	20 000	100
$\mathcal{M}/L_B$	150	250	80	180	[b] ~ 200	14
$\mathcal{M}/\mathcal{M}_X$	10	80	6	7	10	>1000

[a] At $z = 1.24$ the benchmark cosmology gives $d_L = 8.5$ Gpc, $d_A = 1.7$ Gpc.
[b] Luminosity in the z band at 9000 Å. [c] Mass within 1 Mpc of the cluster's center.
X-ray telescopes are less sensitive to gas with $T_X \lesssim 10^7$ K, so masses $\mathcal{M}_X$ may be underestimated.

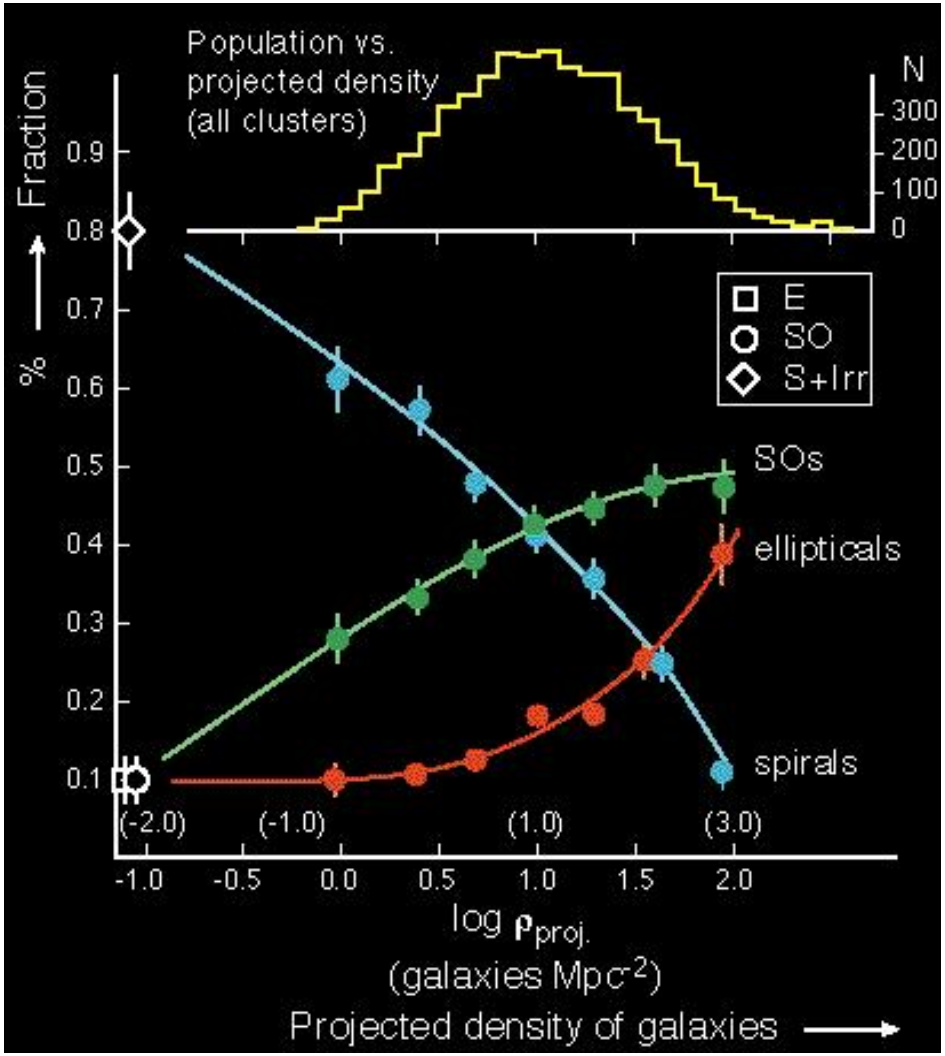
Butcher-Oemler Effect

- Butcher & Oemler(1978) 首次发现：中等红移（z ~ 0.3）星系团中心区域蓝星系比例高于低红移（z ~ 0.0）星系团
- 最近研究结果：z < 0.1 富星系团蓝星系比例 ~ 3%；z ~ 0.5时比例为~25%；z ~ 1时~ 70%
- 星系团中蓝星系比例与星系团富度、星系团中心区域大小、星系星等极限等有关
- 颜色蓝与恒星形成、核活动相关：高红移团恒星形成星系、星暴后星系和活动星系核比例大
- BO效应约束星系恒星形成历史
  - 原初气体塌缩模型：星系中恒星形成发生于宇宙早期星暴，星系由年轻（蓝）逐渐变老（红）
  - 星系并合模型：蓝色、晚型场星系掉入星系团中，气体被剥离or并合，形成红星系



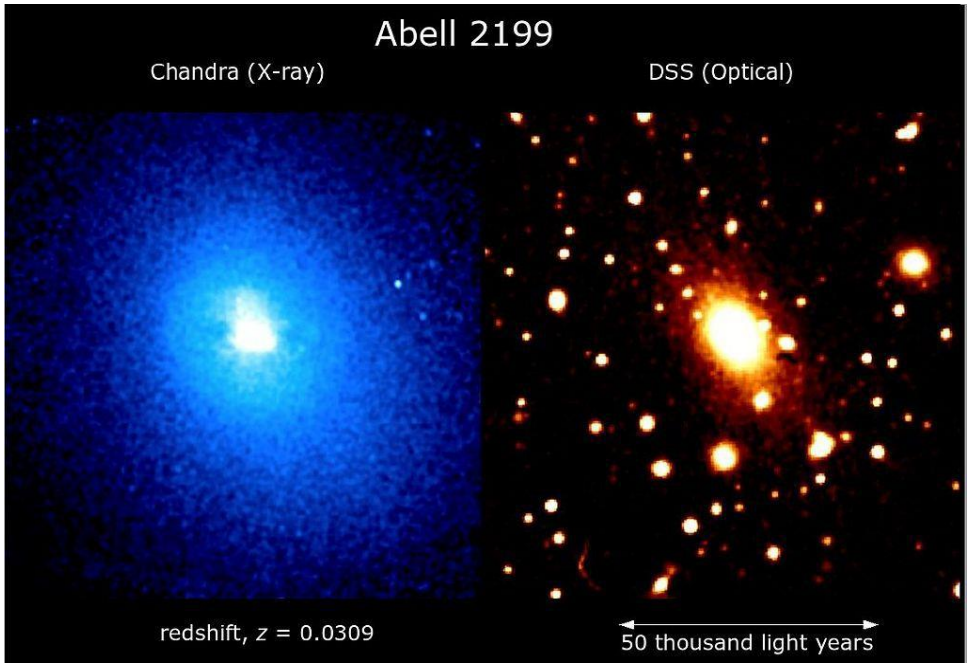
形态-密度关系

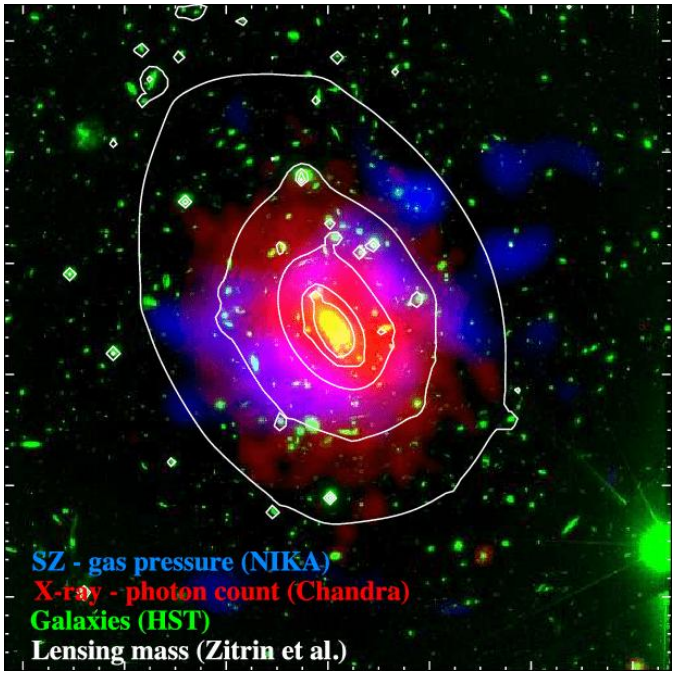
- 星系“形态-空间”分层：
  - 星系团核心区主要是E、S0星系，S星系多分布在星系团的外围和星系群
  - 松散团包含许多正在形成恒星的S星系；而富团最致密区域几无旋涡星系
- 星系团（cluster）中：
  - 亮星系多是红的；亮蓝星系较少
- 空洞（void）区域：
  - 亮星系有可能是蓝的恒星形成星系，也可能是‘红的死亡’星系
  - 矮星系则绝大多数是蓝的、正在形成恒星的不规则星系



星系团中的热气体

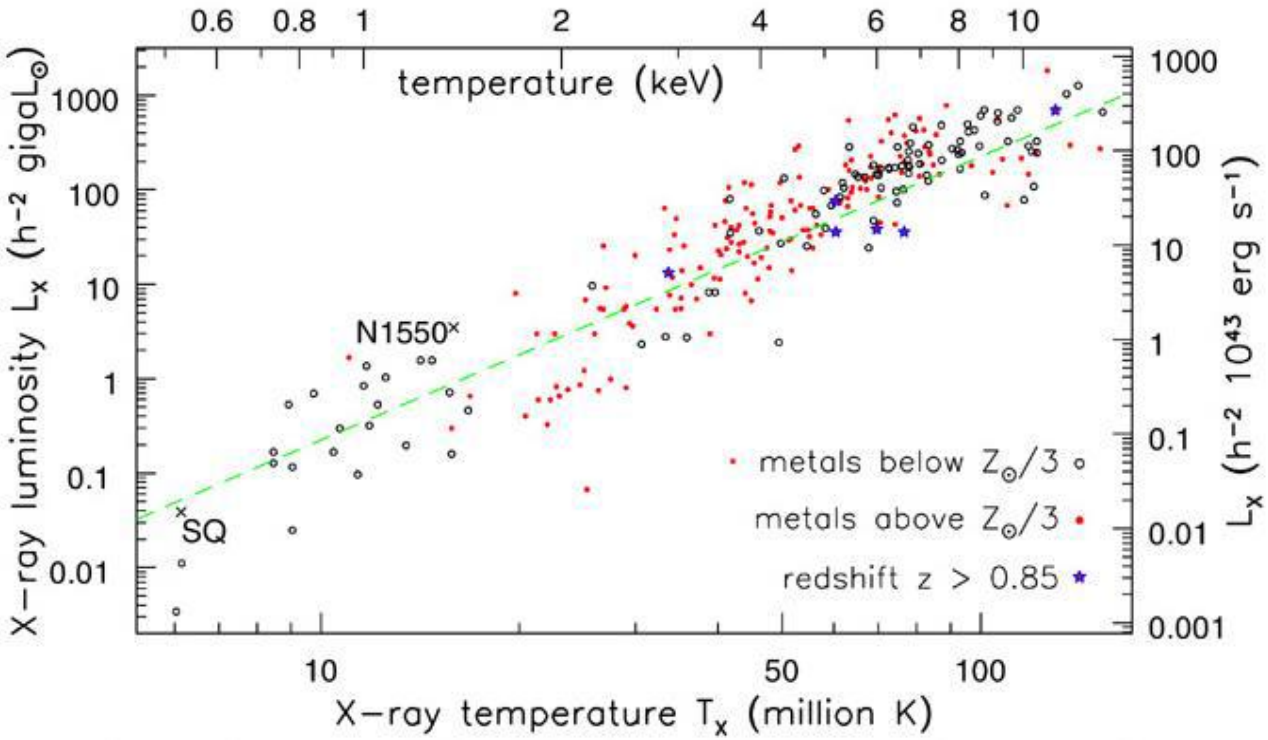
- 星系团中存在大量热气体；星系中热气体少
  - 贫星系团中，热气体的质量大致和恒星质量相等
  - 富星系团中，热气体的质量约是恒星质量的10倍
  - 越大越亮的星系团，将气体变为恒星的效率越低
- 探测：X-ray, tSZ效应





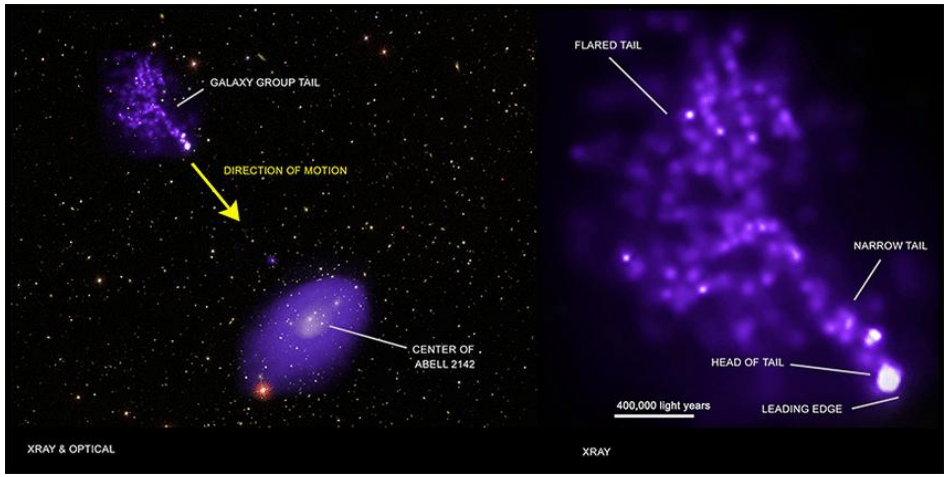
X射线光度与温度关系

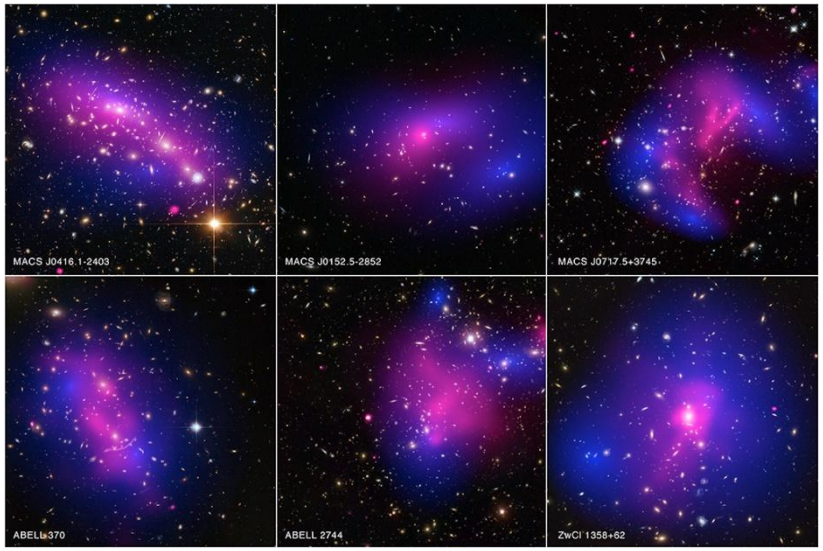
- 星系团X射线光度与气体温度相关：亮星系团，气体温度更高；$T \sim 10^8$K
- $L_X \propto T_X^3$：红移$z \approx 1$的星系（蓝色星符）与$z \approx 0$星系L_X与T_X关系几乎不变
- 星系团热气体金属丰度$Z \sim Z_\odot/3$；团中心附近的热气体，金属丰度会更高



星系团热气体来源？

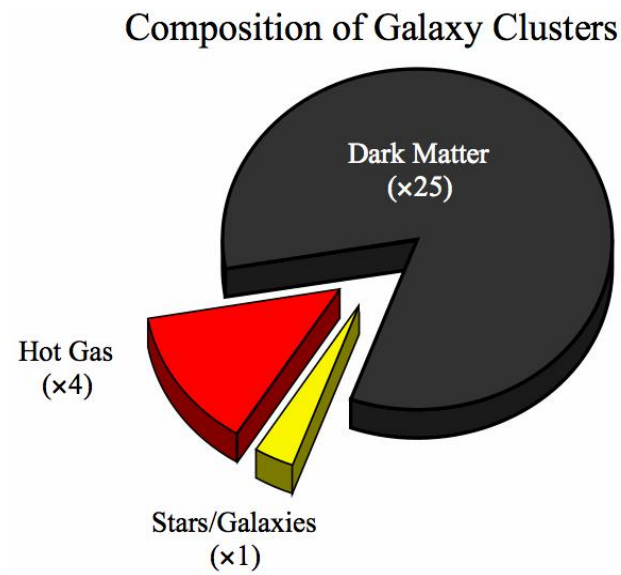
- 星系扰动(harassment)：群、团星系成员之间（多次）高速、近(~50kpc)相遇，剥离星系的恒星和气体。
- 冲压剥离(ram pressure stripping)：星系在星系团内介质（ICM）中穿行时，受到介质的拖曳力，气体被剥离。与潮汐作用不同，冲压只作用在气体上。
- 热蒸发(thermal evaporation)：ICM 的温度远远高于ISM 的温度，热量从ICM传递到ISM中，而使ISM的温度升高至足够挣脱星系的引力而逃逸。
- 气体反馈(feedback)：星系中超新星爆发和核区活动星系核的喷流，可将星系中的气体变为ICM。





星系团组成：重子物质+暗物质

- 星系：星系团平均有~10^2大星系，总星系数目10^3；典型运动速度 $V \sim 10^3 km/s$
- 恒星：富团的星系之间存在稀疏的恒星
  - 全部恒星10%- 20%处于星系团的星系间
  - 流浪恒星是在并合过程中从星系撕下来的
  - 可能是团中小星系被潮汐扯碎的遗迹
- 气体：星系团中有丰富的热气体
  - 温度$T \sim 10^{7-8}K$；密度$n \sim 10^{-3} cm^{-3}$；
  - $L_X \sim 10^{43-46} erg/s \sim 10^{-2} - 10^{-4} L_{opt}$：光学亮
  - $M_{gas} \sim 4 \times M_{gals}$：热气体质量大于星系质量
  - 热气体$Z \sim 0.3\ Z_{\odot}$：非宇宙早期的原初气体
- 暗物质：$M_{Dyn} \sim 5 \times (M_{gas} + M_{gals})$
  - 测量星系团内星系运动速度，利用位力定律，可求星系团的质量
  - 星系团中存在热气体，观测热气体光谱和分布，求星系团的质量
  - 根据星系团质光比M/L，可求星系团中重子物质与暗物质的比例

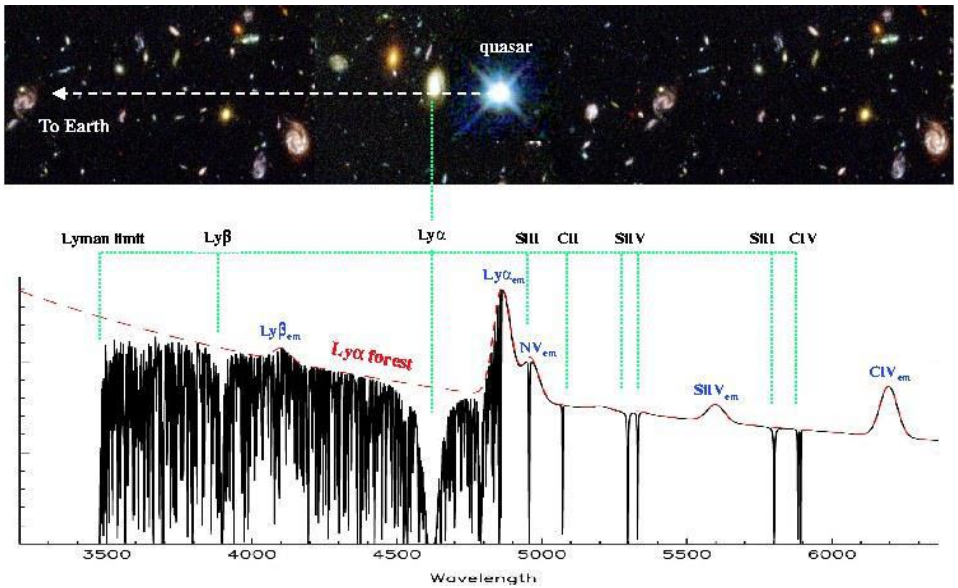


重子物质

- 宇宙中重子（质子+中子）密度：$\sim 45.0 \times 10^{-3}\rho_{crit}$
- 恒星和星系盘内的冷气体：$3.45 \times 10^{-3}\rho_{crit}$
  - 恒星和冷气体只贡献了总量 ~ 10%
- 星系团和E星系中热气体质量$\sim 1.8 \times 10^{-3}\rho_{crit}$
- 45.0-3.45-1.8=39.75：其余重子物质在哪里？

Table 7.2 The cosmic baryon budget

Where it is	*Density* ($10^{-3}\rho_{crit}$)
Total (benchmark cosmology)	45
Intergalactic gas	
Diffuse and ionized	≈40
Damped Lyman-α clouds	1
Hot gas in clusters and Es	1.8
Stars and stellar remnants	
Stars in Es and bulges	1.5
Stars in disks	0.55
Dead stars	0.48
Brown dwarfs	0.14
Cool gas in galaxies	0.78



- 高密度HI的阻尼莱曼α吸收(DLA) $\sim 1 \times 10^{-3}\rho_{crit}$
- 星系之间的弥漫电离气体 $\sim 40 \times 10^{-3}\rho_{crit}$！

7.3 星系形成：遗传 or 环境？

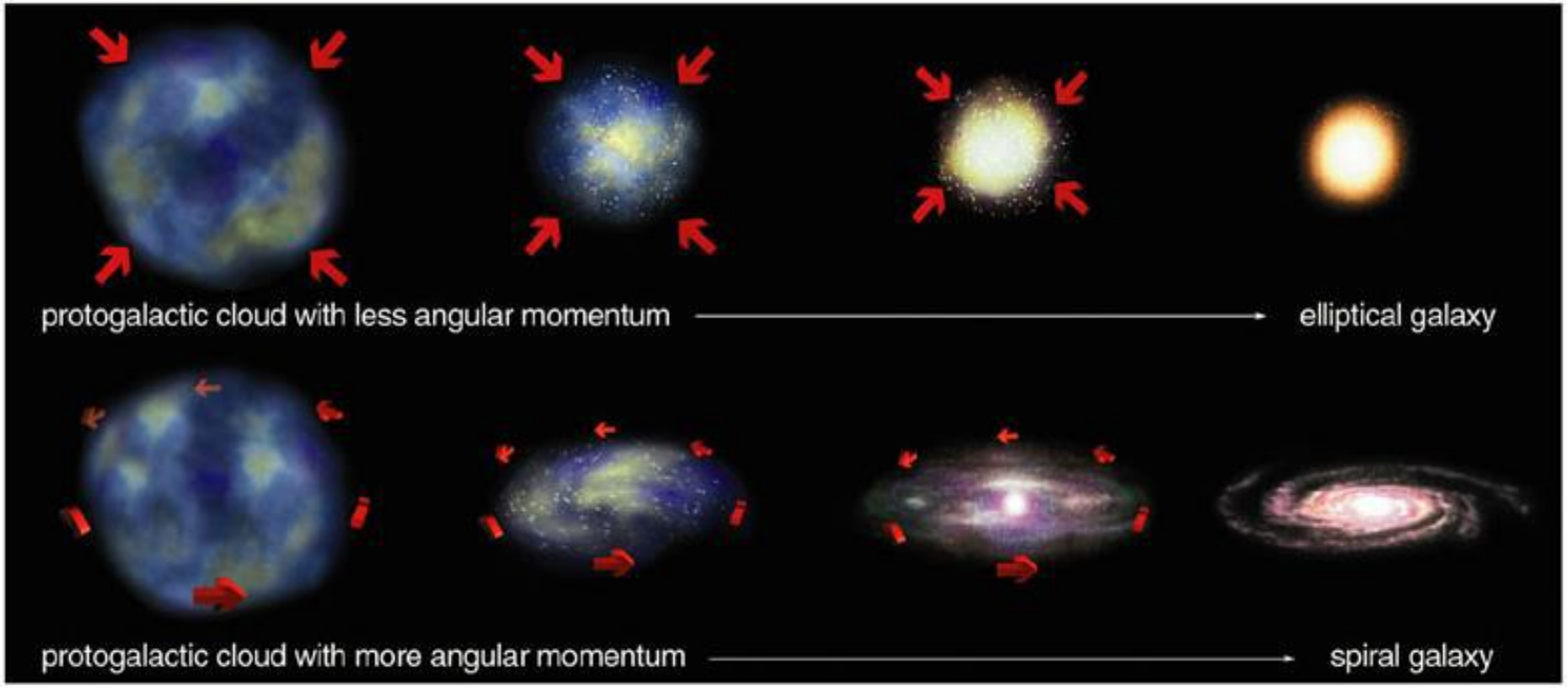
- 星系分层效应：亮、红星系位于富团的致密区，而恒星形成活跃的盘星系和不规则星系则位于稀疏区；即星系形态-密度关系
- 星系团和星系群，不仅仅只是宇宙空间星系密度较高的地方；在星系的形成演化过程中，星系密度可能起着十分重要的作用

- Nature
- “遗传”指的是“先天”因素造成了星系团分层效应：星系团形成时的状态保留到现在而能被观测到（环境决定了形成星系的种类，早型在星系团，晚型在低密度区）。

- Nurture
- “环境”（nurture, 培育）指分层效应是在星系团形成后的漫长时间内（后天），成员星系在不同环境下经历各自的演化过程，表现为目前所被观测到的状态。

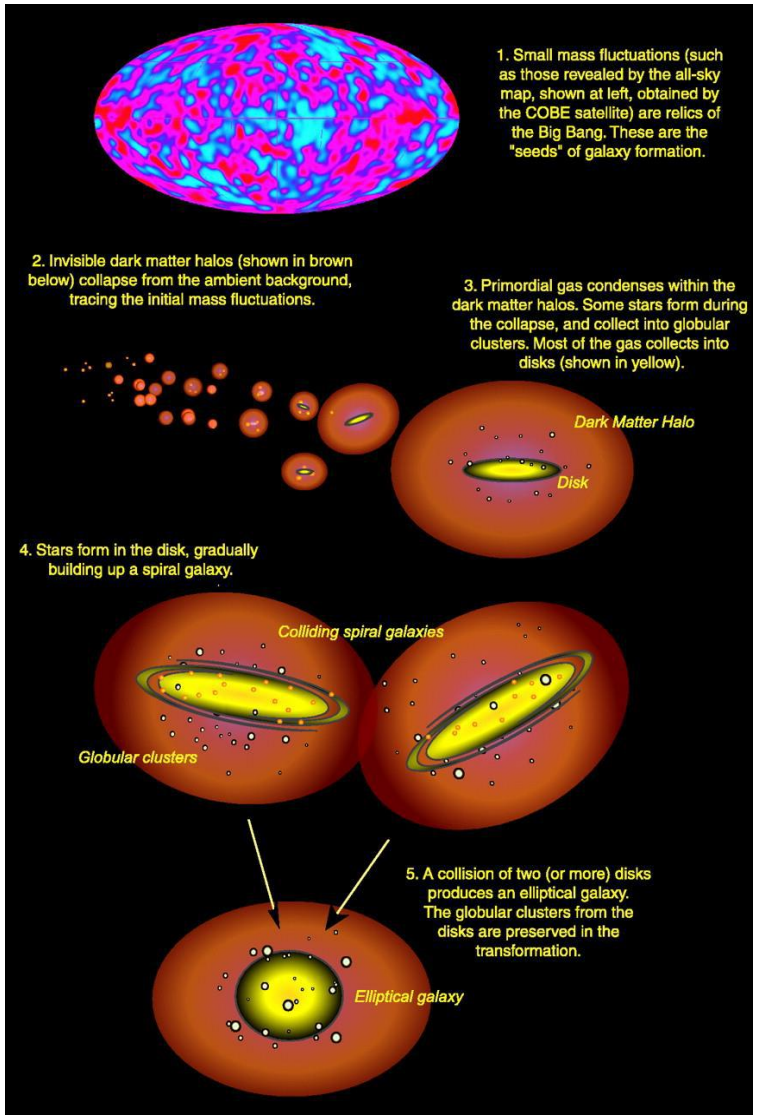
星系形成：遗传 or 环境？

- 先天：具有不同角动量气体云形成不同形态星系
  - 无角动量气体收缩快，较快的消耗完气体和尘埃，形成恒星：椭圆星系
  - 星系形成时，如果气体的角动量较多，不容易坍缩，形成盘：旋涡星系
  - 实际观测表明：星系不是孤立形成和演化，碰撞和并合主导着星系演化



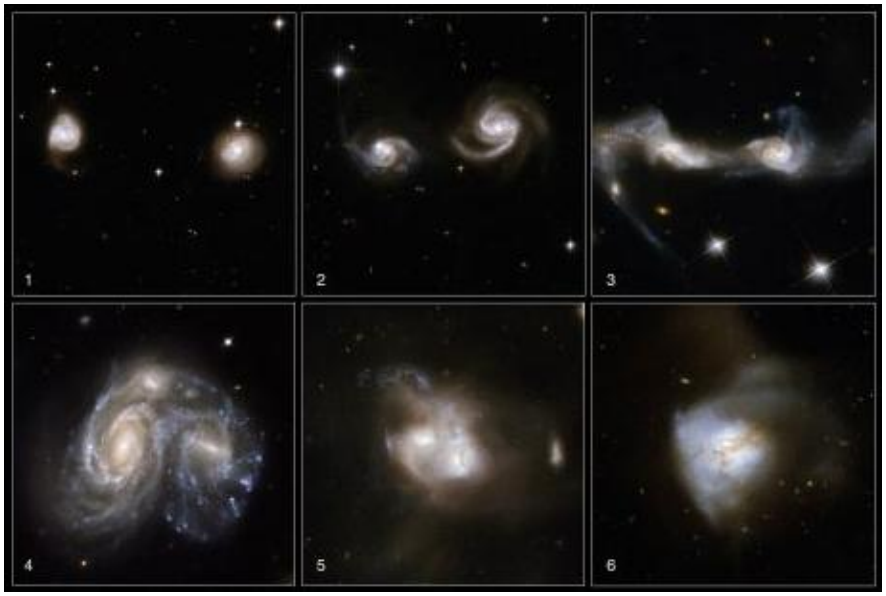
环境影响

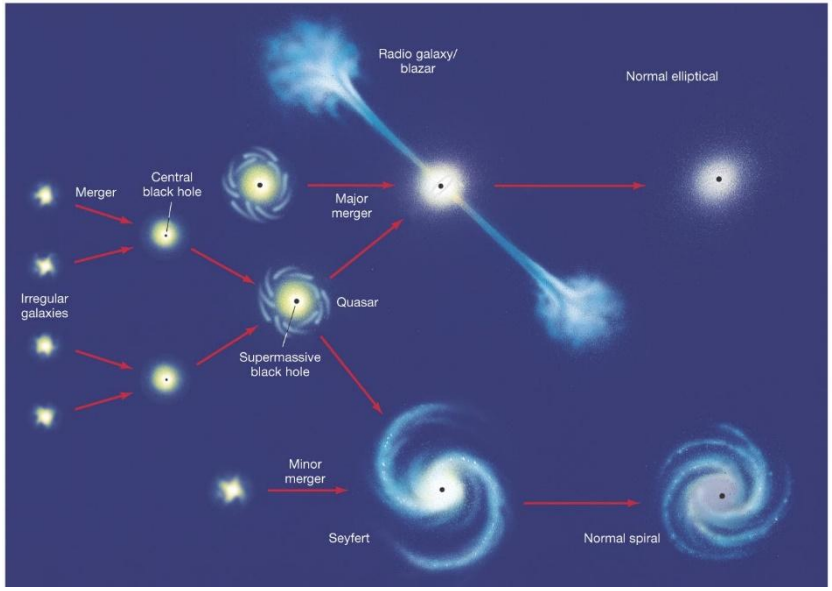
- “先天”因素令人困惑：
  - 当一个星系形成时，它怎么能够知道自己最后是位于星系团的中心（椭圆星系）；还是位于郊区（旋涡星系）？
  - 为什么星系团中心的气体角动量小（可以形成椭圆星系）；而团外围的气体角动量大（形成旋涡星系）？
- “后天”因素：星系环境对于星系的结构起着重要的作用；星系间的相互作用和碰撞，决定了星系演化
  - 星系之间的距离是其大小的~20倍
  - 恒星之间的距离是其半径的107 倍
  - 星系碰撞可能性大，恒星碰撞的概率小
- 星系密度高　星系并合频繁　形成更多的椭圆星系
- 宇宙早期（高红移）体积小，碰撞更频繁



星系形成

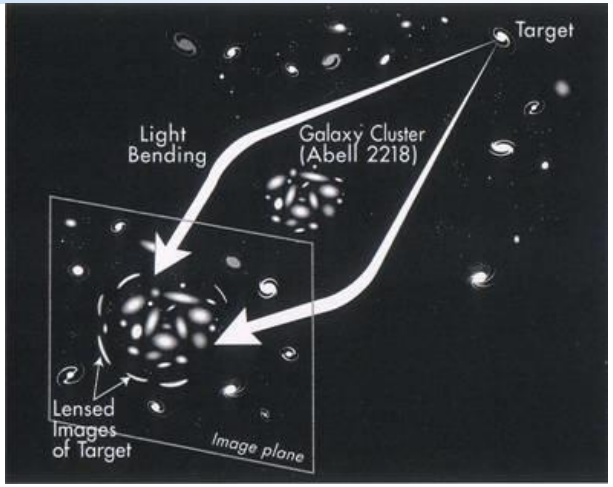
- 椭圆星系：富星系团中，星系并合概率大，并合触发恒星形成、快速消耗气体
- 旋涡星系：星系盘的存在，表明旋涡星系没有发生主并合或受到周围星系强烈潮汐力作用
- 棒旋星系：数值模拟结果显示，与周围星系的相互作用可以形成棒。棒是潮汐作用的结果
- 透镜星系：并合过程中，剧烈恒星形成爆发，产生强星风，吹走气体和尘埃，但盘被保留

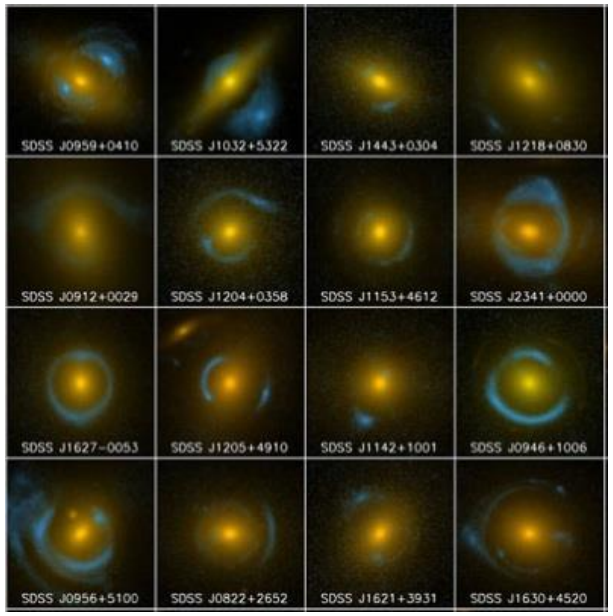




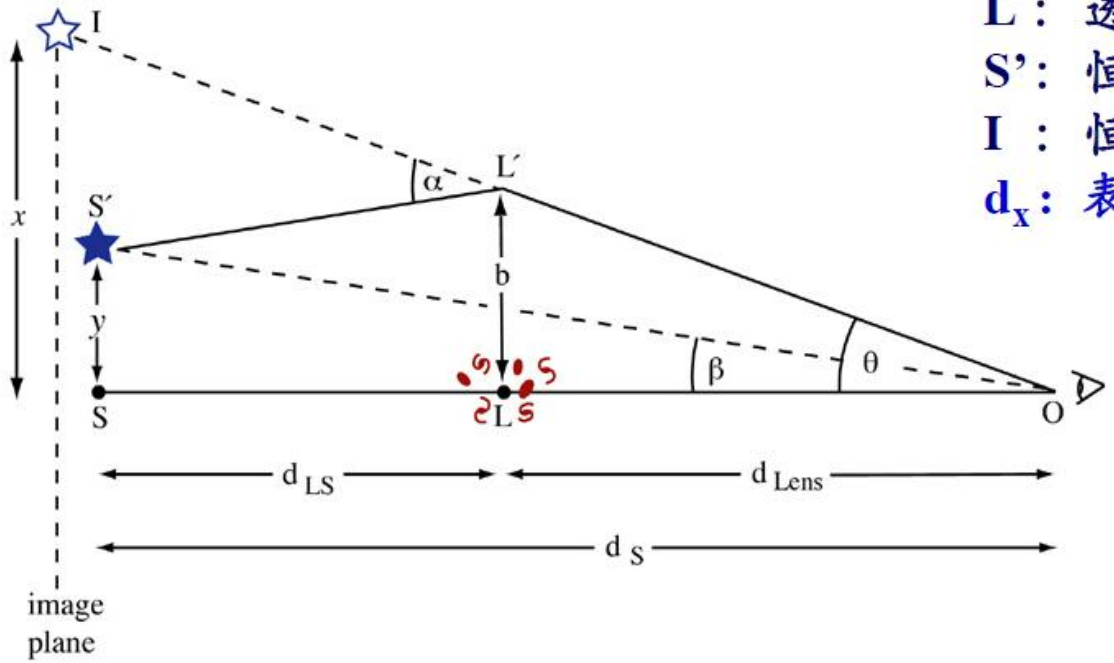
星系际暗物质：引力透镜

- 利用星系运动或者热气体估计星系团质量：
  - 假定星系系统已经位力化
  - 气体处于流体静力学平衡
  - 星系团系统是孤立的，结构不变化
- 对于多数星系群和星系团，这些假设都不成立
- 可靠的质量估计：利用光的引力偏折，测定质量。该方法即使在星系团仍然在增长和变化时，也能够应用。
- 引力透镜效应：当背景光源发出的光在引力场(比如星系、星系团及黑洞) 附近经过时，光线会像通过透镜一样，发生弯曲
- 光线弯曲的程度，主要取决于引力场的强弱，即星系团质量

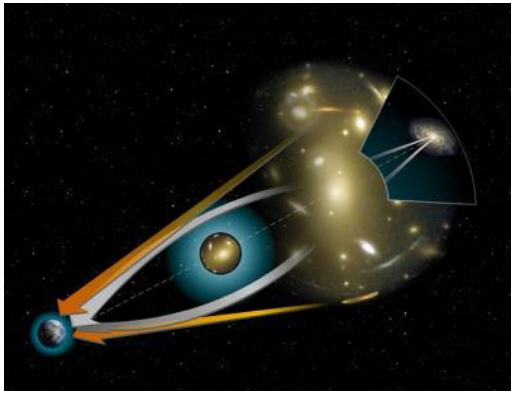




引力透镜：光被致密天体偏折



L：透镜源，质量为M的点状天体
S'：恒星的真实位置
I：恒星在像平面上的视位置
d_x：表示各种距离



爱因斯坦广义相对论：以距离b从质量M掠过的光，其偏折角：

$$\alpha \approx \frac{4G\mathcal{M}}{bc^2} = \frac{2R_S}{b}$$

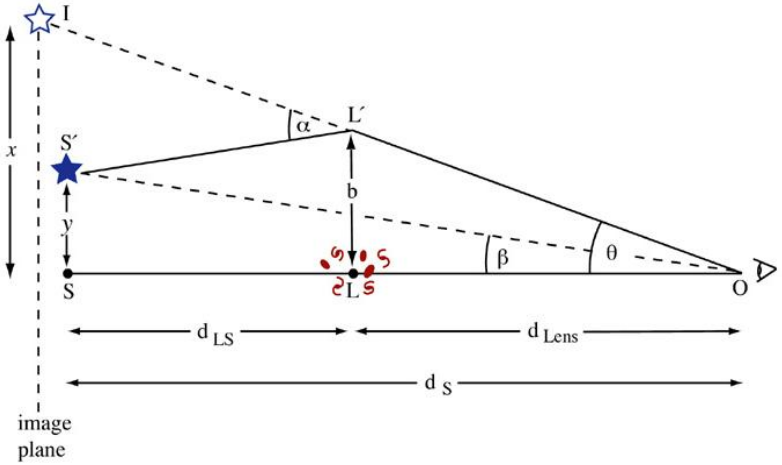
R_S是史瓦希半径，
$R_s = 2GM/c^2$

引力透镜：光被致密天体偏折

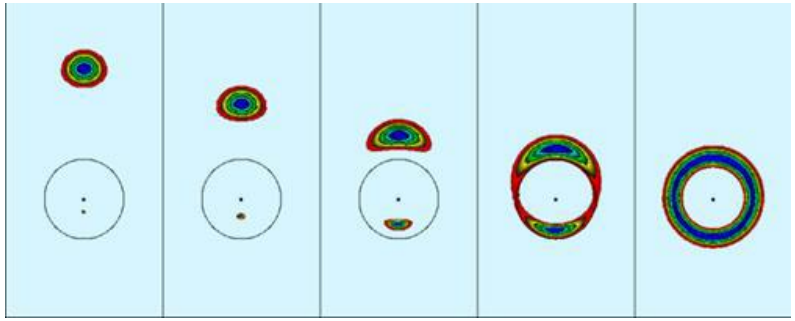
- **偏转角度**

$$\theta-\beta=\frac{\alpha d_{\mathrm{LS}}}{d_{\mathrm{S}}}=\frac{1}{\theta}\frac{4G\mathcal{M}}{c^2}\frac{d_{\mathrm{LS}}}{d_{\mathrm{Lens}}d_{\mathrm{S}}}\equiv\frac{1}{\theta}\theta_{\mathrm{E}}^2$$

  - θ_{E}称为爱因斯坦半径

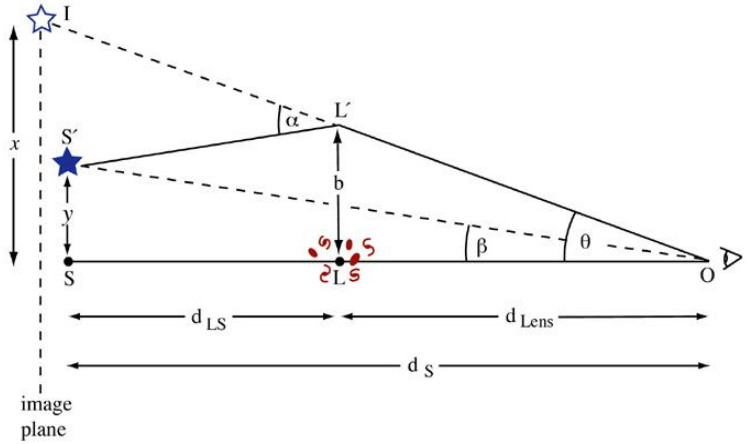


- 引力透镜效应不改变天体的面亮度，面元的视亮度与斑（图像）的面积成正比
- 源（星系）的每个像的视亮度正好正比于它们的面积
- 小亮斑通过引力透镜后，至少有一个像比源本身亮－亮度增强



- 当透镜是整个星系或星系团时，可将它看作质点集合：将透镜内所有质量的效应求和来计算偏折

引力透镜估计质量



- 投影在中心角θ_E内的质量为：

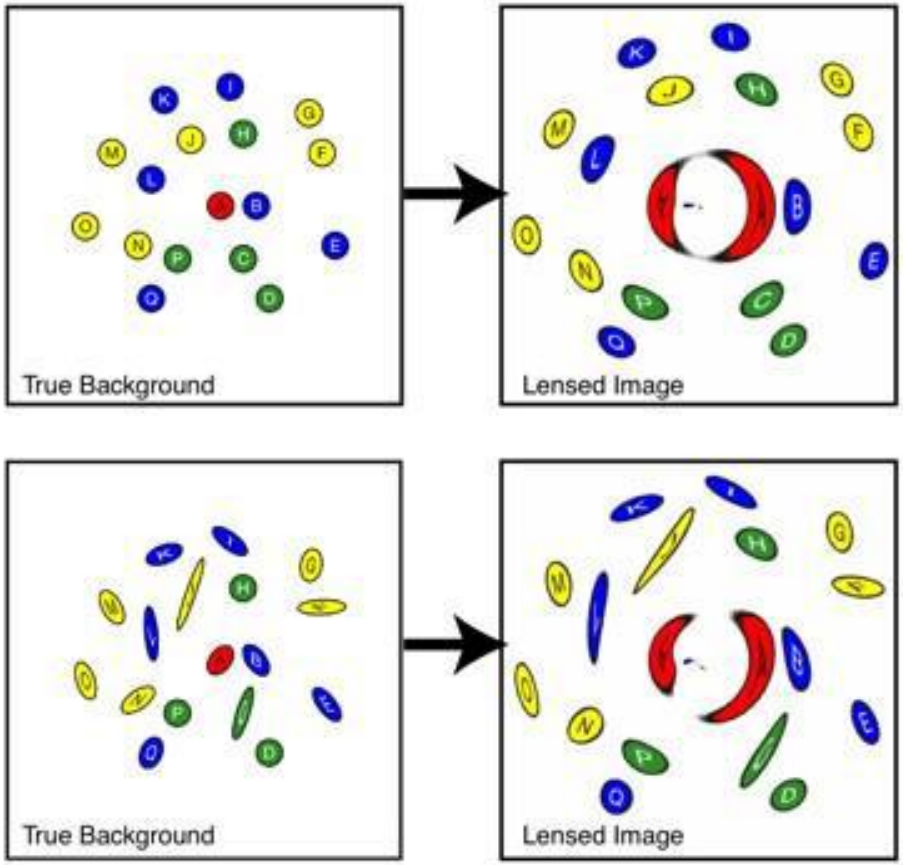
$$\mathcal{M}(<\theta_E) \approx \left(\frac{d_{\rm Lens}}{100\,{\rm Mpc}}\right)\left(\frac{\theta_E}{1''}\right)^2 10^{10}\mathcal{M}_\odot$$

- 利用像的位置和形状，可获得透镜星系或星系团内的质量以及质量分布

- 在同时观测到了透镜光弧和观测到热气体X射线发射的星系团中，可以比较利用这两种方法估计的质量
- 为了解释在非常远的星系团中半径数十角秒的光弧，需要的质量超过10^{14} $M_\odot$：与X射线观测得出的结果符合得很好

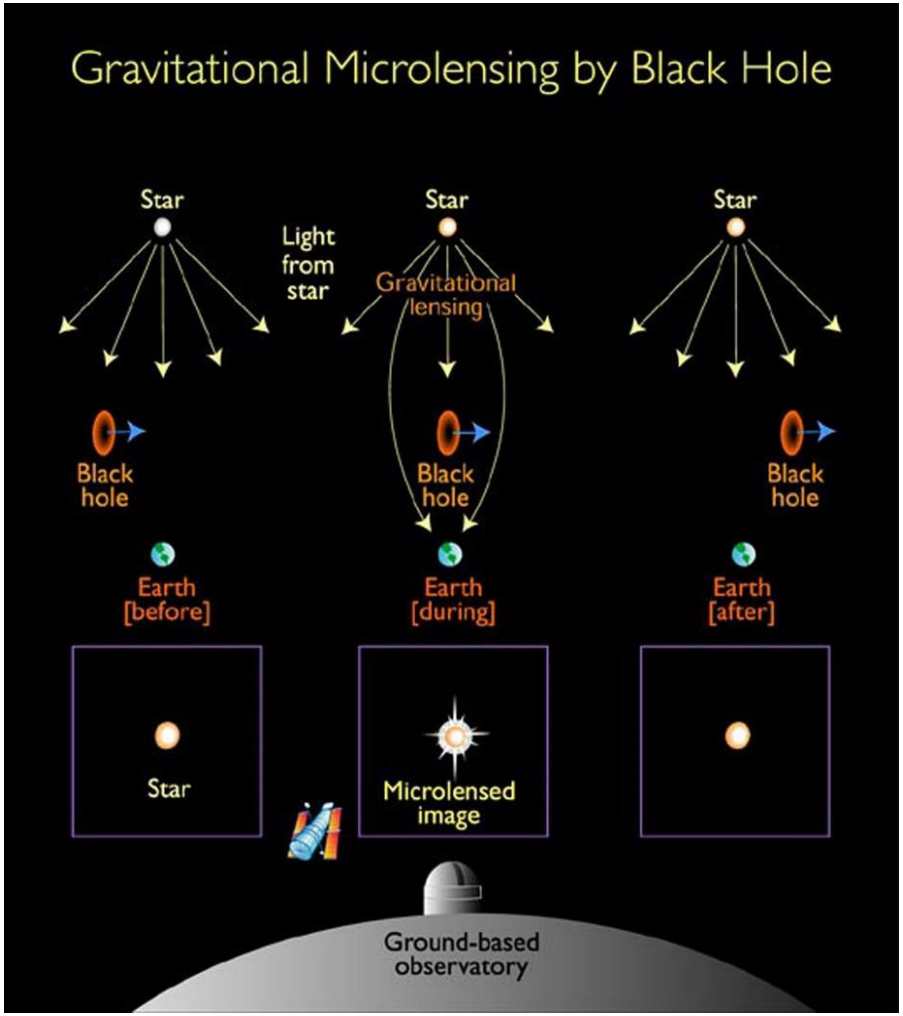
7.4.3 弱引力透镜

- 弱引力透镜，weak lensing
- 一个星系虽然处于一个星系团后面，如星系在星系团爱因斯坦半径之外时，星系的像只会被微弱放大、产生较小的扭曲.
- 弱引力透镜方法通过对大量背景源像微弱畸变，统计分析星系形状剪切，得到星系团外部的质量分布.
- 弱引力透镜法被认为是现在宇宙学中最好的测量暗物质的方法.



微引力透镜

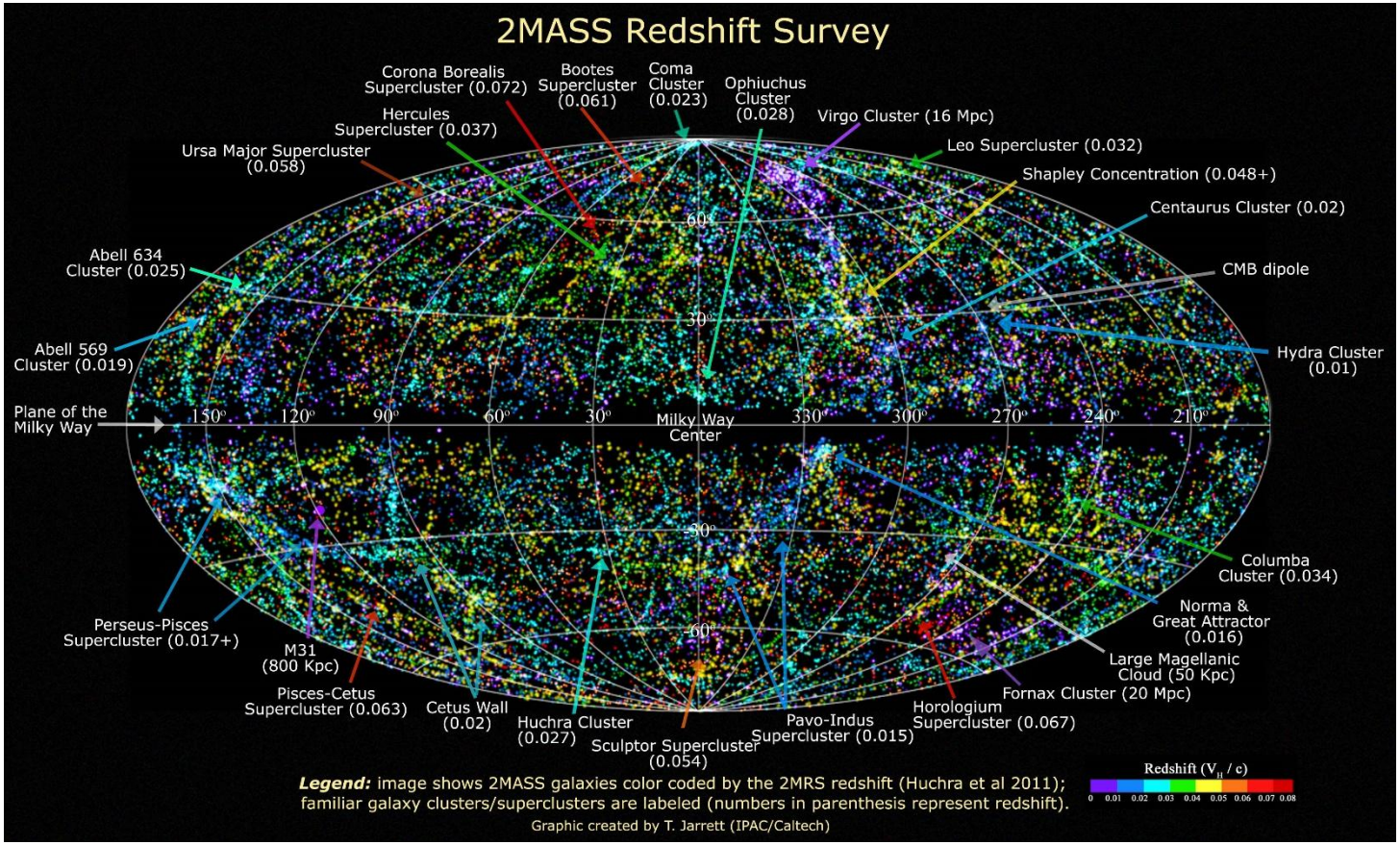
- 微引力透镜(microlensing)：是发生在恒星级天体中的一类引力透镜现象
- 微引力透镜源天体质量很小，光偏转小：难以直接看到微引力透镜所成的像；只能通过引力透镜的放大效应，观察天体光度在瞬间增强的现象
- 银河系存在相当数量的恒星级黑洞、褐矮星、红矮星、白矮星等较暗弱的天体，它们造成的微引力透镜现象能够在短时间内令背景光发生畸变。



第八章 星系大尺度空间分布

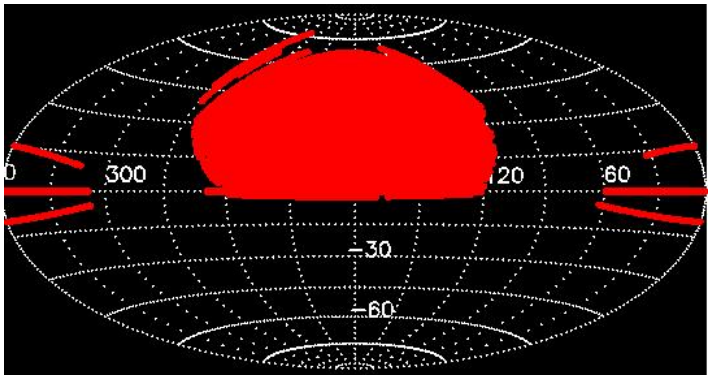
8.1 现在的大尺度结构

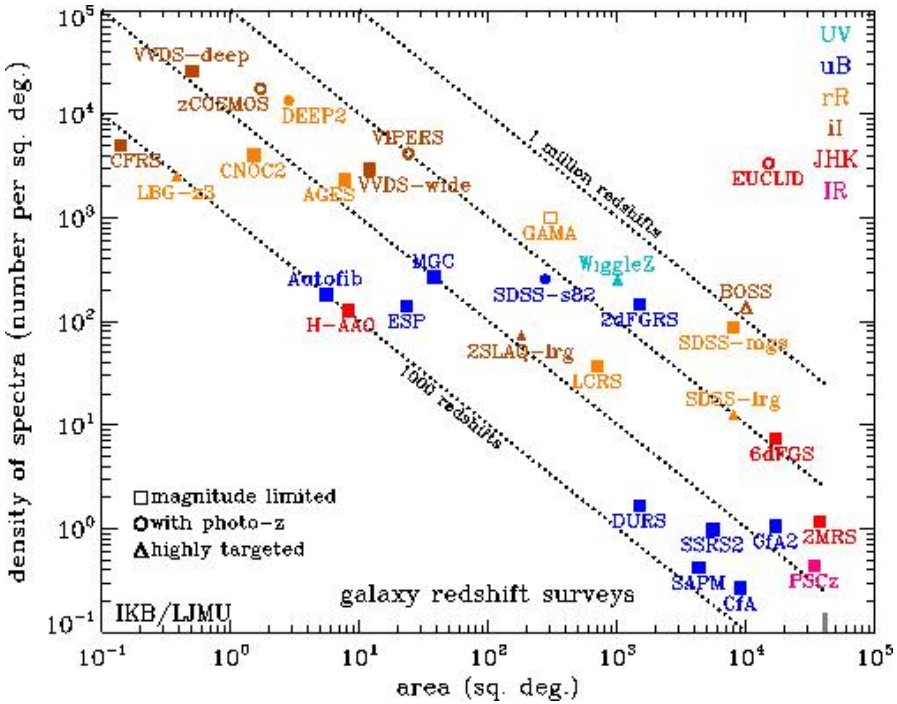
- 近邻宇宙15000 个亮星系在天球上的位置：星系在空间分布不均匀
- b=0：银河系盘平面附近光学隐带，银盘尘埃遮挡
- 富星系团和巨洞(星系数密度很低).



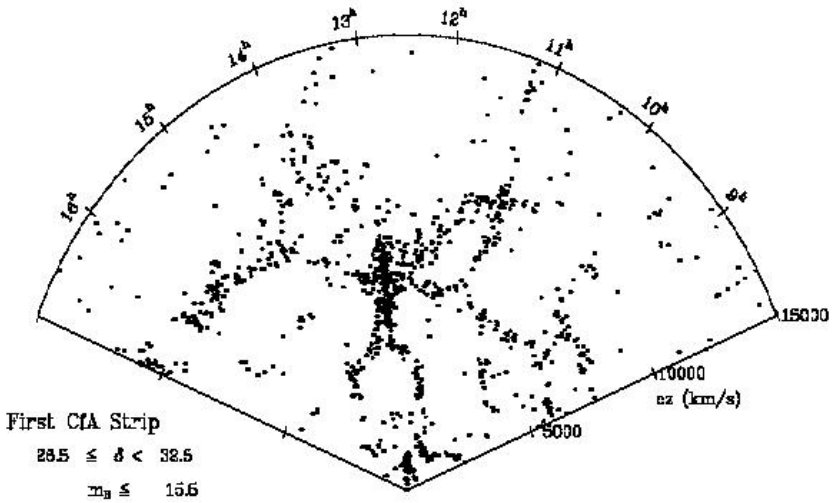
8.1.1 星系红移巡天

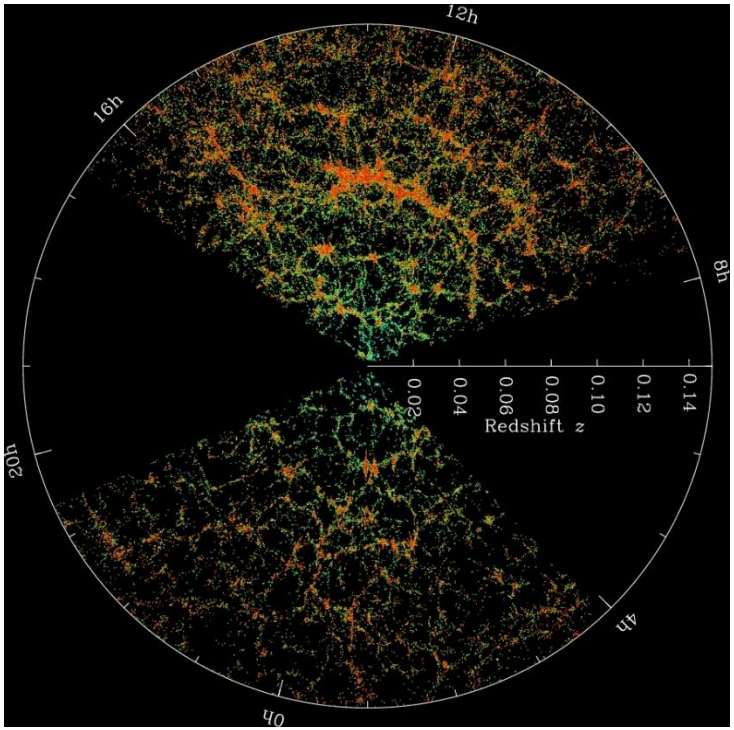
- 了解星系在更大尺度空间的分布，需要开展星系红移巡天：利用光谱，测量红移，得到星系距离
- 著名的星系红移巡天
  - CfA2：利用Hopkins山1.5米望远镜，观测17000平方度天区18000星系光谱，B<15.5
  - 2dF：利用3.9米AAT望远镜（2平方度视场，400根光纤）观测1500平方度天区20万个星系光谱，b_J<19.45.
  - SDSS：利用2.5米望远镜开展的图像和多光纤（I-III：640，IV：1000）光谱巡天，100万条星系光谱。
  - 其他红移巡天：GAMA、WiggleZ、DEEP2、VVDS、DESI、EUCLID、PFS等





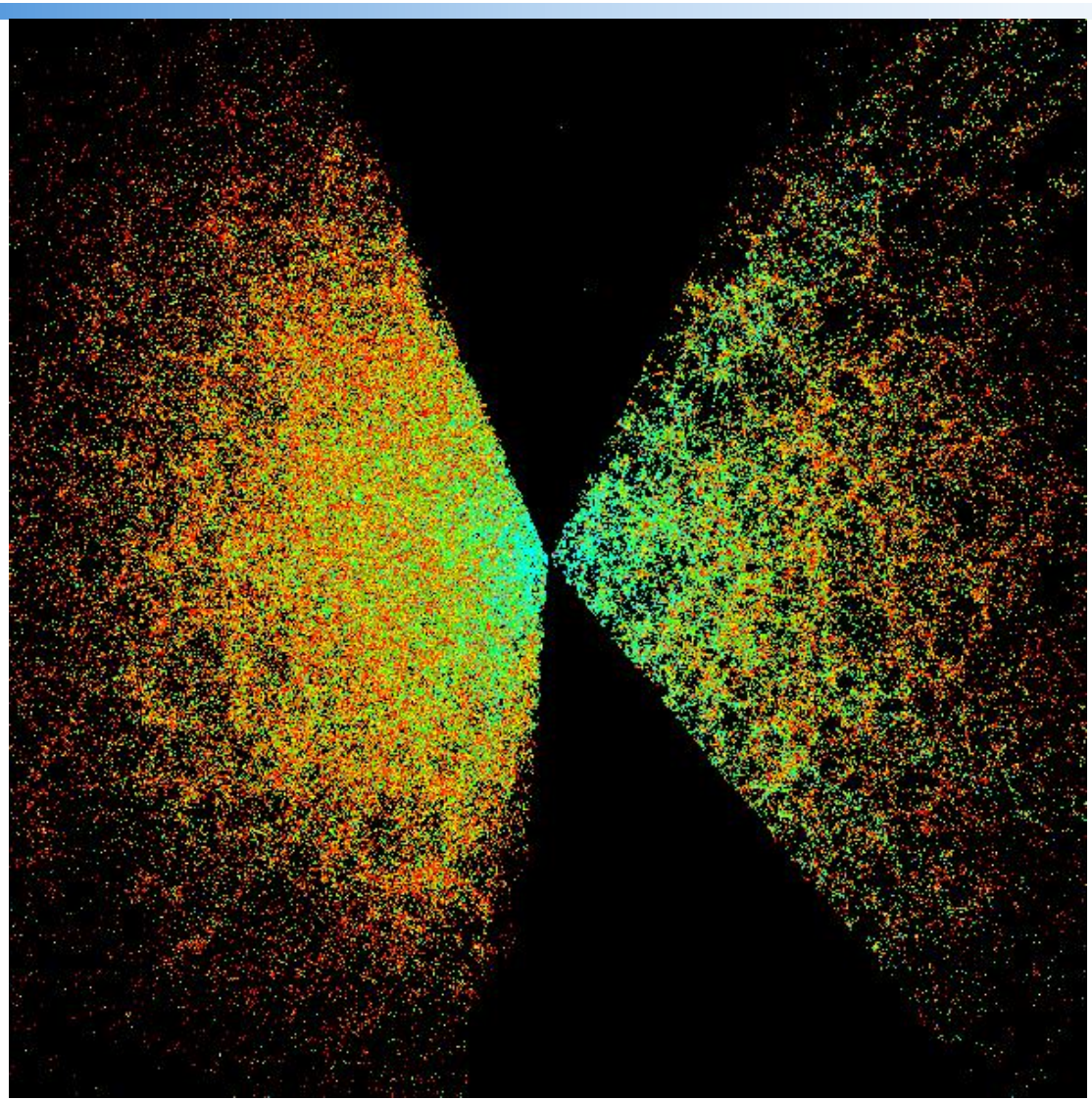
大尺度环境



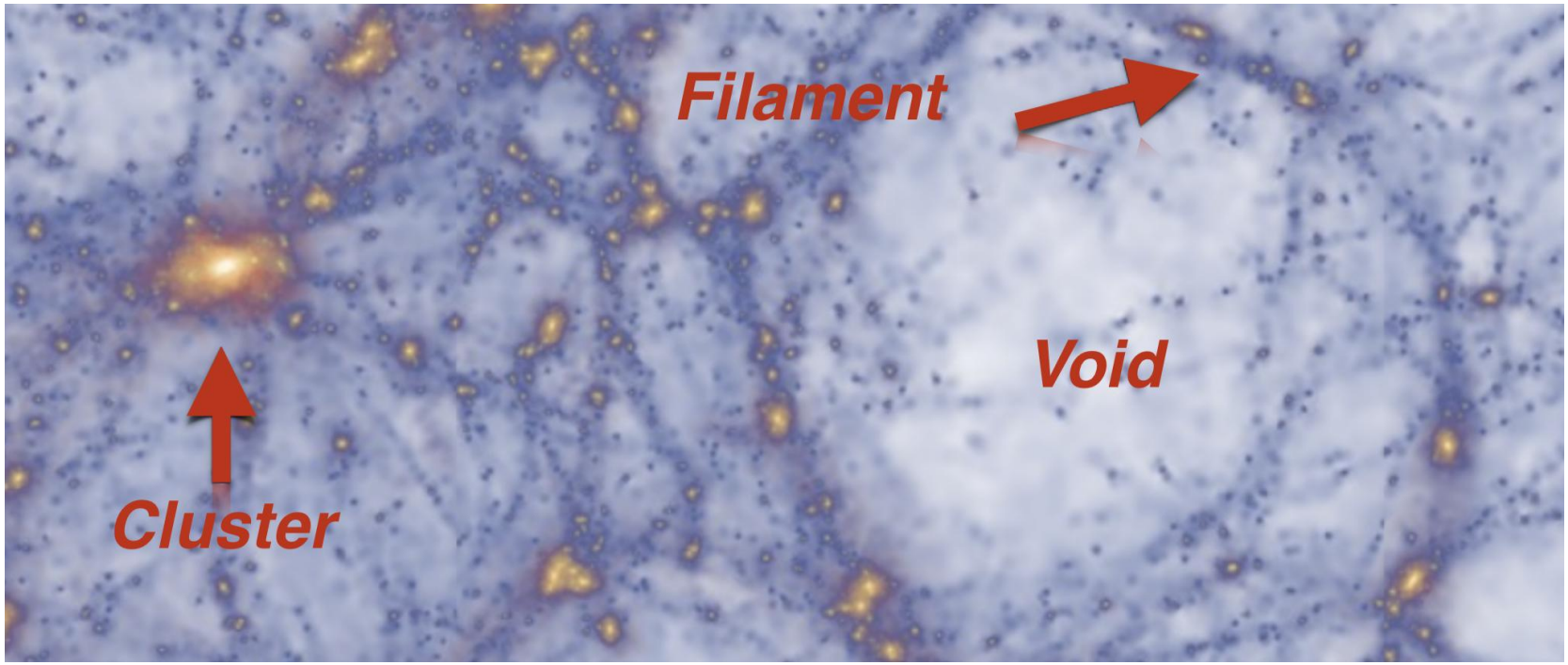


- 部分天区星系的楔形图：星系3维分布
- 忽略本动，$Vr \approx cz \approx H_0 d$，显示了$z < 0.2$的天区星系分布

大尺度环境



大尺度结构



- 星系在空间分布存在**明显的结构**：呈致密的线状特征、网壁和弦状纤维特征
- 在纤维之间有一些几乎没有亮星系的区域：称为‘**巨洞**’，典型的尺度≥ $50\ h^{-1}$Mpc

8.1.2 星系成团量度

- 如何定量描述星系空间分布的不均匀性？描述方法包括两点相关函数、功率谱、密度涨落
- 两点相关函数ξ(r)：计算在给定间距，发现成对星系的概率，得出两点相关性与距离的函数关系。
- 数学描述：
  - 假定星系的平均空间密度是n/Mpc^3；随机选择两个小体积ΔV_1和ΔV_2，
  - 则在ΔV_1中找到一个星系的概率是$n\Delta V_1$；在相距r_{12}的ΔV_2中也找到一个星系的联合概率为：

$$\mathrm{d}P = \bar{n}^2(1+\xi(r_{12}))\,\mathrm{d}V_1\,\mathrm{d}V_2$$

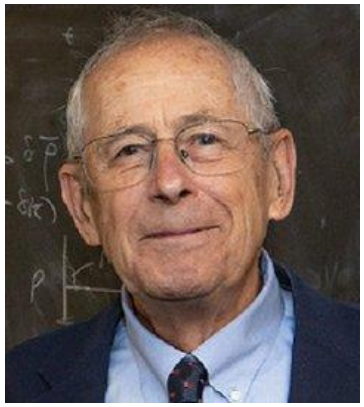
  - ξ(r)：在距给定星系距离r处找到另一星系高出平均的几率
  - 如果在小r处$\xi(r) > 0$，则星系成团；如果$\xi(r) < 0$，则反成团；较大体积ξ(r)的平均值应该为0.
  - 在$r \le 10h^{-1}$Mpc尺度，$\xi(r) < 0$可近似表达为：$\xi(r) \approx (r/r_0)^{-\gamma}$
  - 若$r < r_0$时，在距离一星系r以内找到一个星系的概率显著大于随机分布，则称r_0为相关长度（correlation length）。

两点相关函数

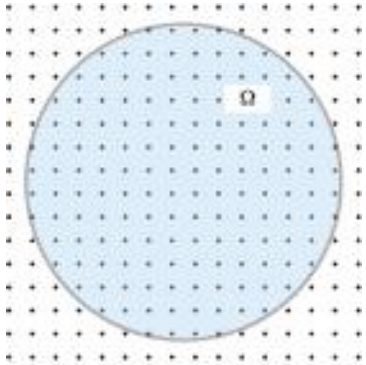
- Two-point correlation function, 2PCF
  - 对于不同的间隔r，在观测和随机数分布中，分别计算星系对数目

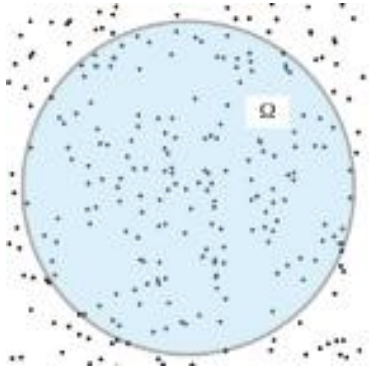
$$\xi(r) = \frac{DD(r)\,\Delta r}{RR(r)\,\Delta r} - 1.$$

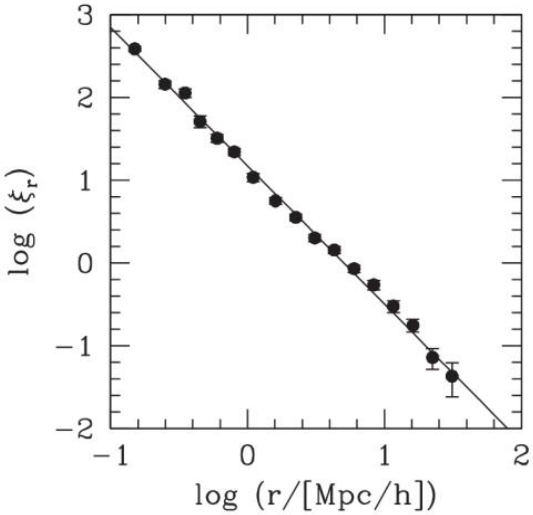
  - 其中$DD(r)\Delta r$表示真实观测中两个星系相距为r ± Δr/2的数量， $RR(r)\Delta r$表示星系随机分布时两个星系相距为r ± Δr/2的数量



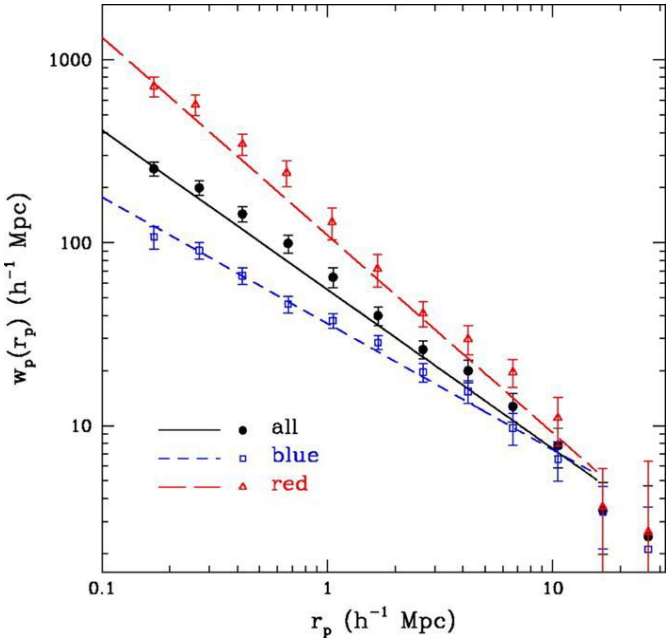
P. J. E. Peebles
2019 Nobel Prize

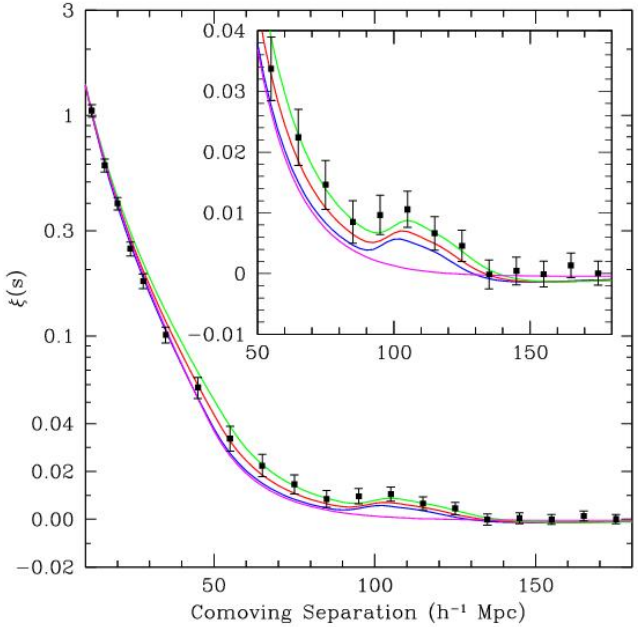






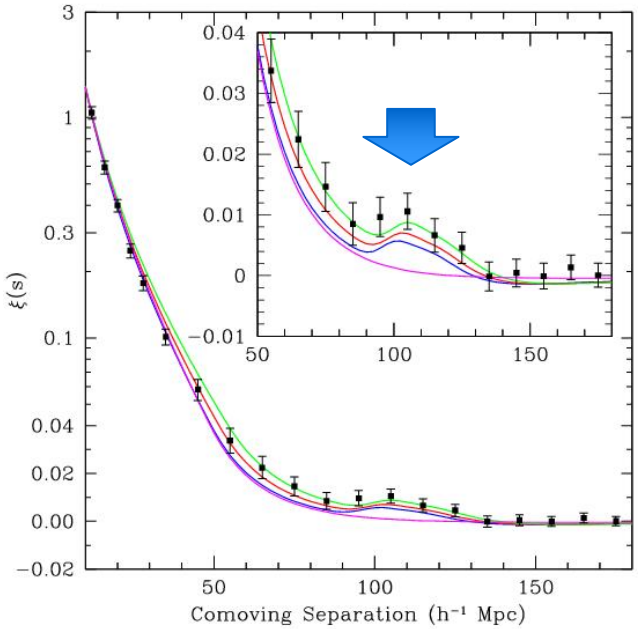
两点相关函数

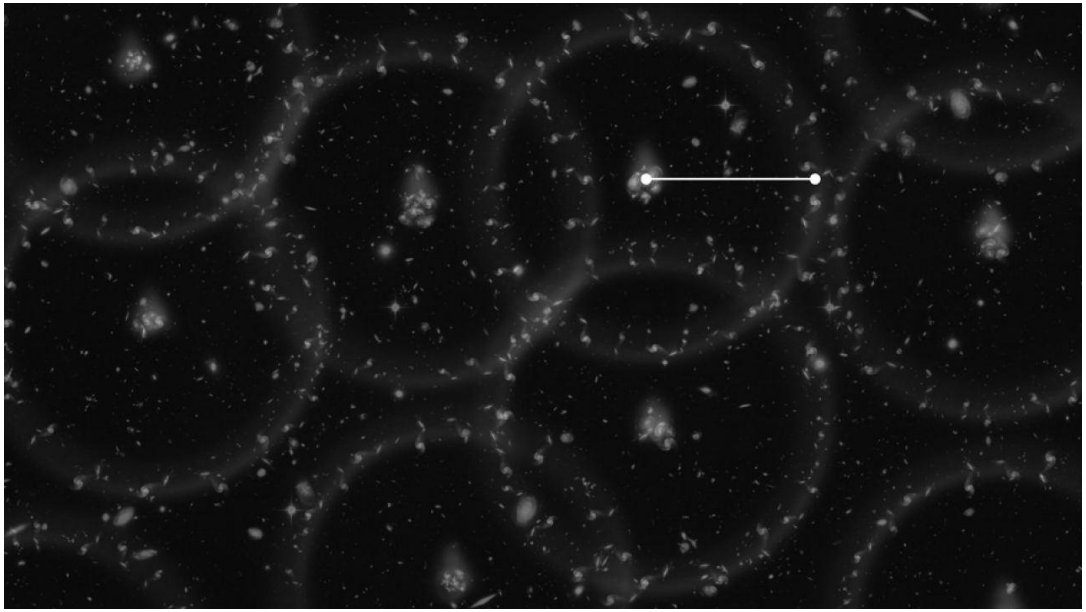




- 星系相关长度$r_0 \approx 5h^{-1}$Mpc
  - 椭圆星系的成团性强， $r_0 \approx 6h^{-1}$Mpc；
  - 恒星形成星系的r_0较小，成团性弱
- 在r_0附近，斜率$\gamma \approx 1.7$
- 对于$r \geq 50h^{-1}$Mpc， $\xi(r)$围绕0附近振荡：在较大尺度上，星系分布相当均匀

两点相关函数





- **重子声学振荡**（BAO，baryon acoustic oscillations）
  - 宇宙可见的重子物质密度的波动，是由早期宇宙原初等离子中的声学密度波引起的
  - ~ $150h^{-1}$Mpc（z=0的宇宙），可以作为量天尺