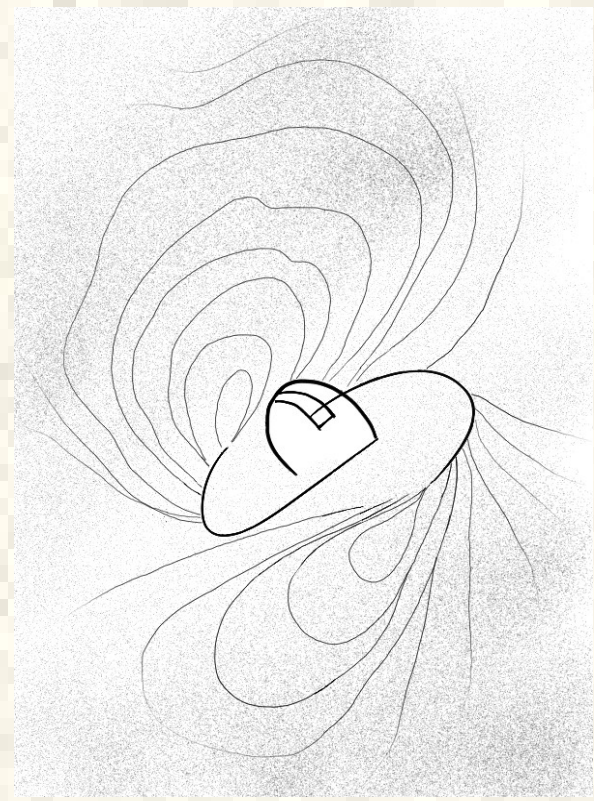




Радиогалактики – монстры Вселенной

Олег Верхованов



Введение:

Филология

Введение:

Филология

Черные дыры

Темная материя

Темная энергия

Темный сектор

Темная эпоха (смутное время)

Ось Зла

Великое Ничто

Большой Взрыв

Введение:

Общее представление

Общие понятия

1) Звездная величина m

Характеристика яркости: $m_1 - m_2 = -2.5 \lg(L_1/L_2)$

Абс. величина $M = m - 5 \lg(d / 10 \text{ пк})$

2) Плотность потока излучения S

Количество энергии через ед. площадь за ед. вр.

в ед. интервале частот, $1 \text{ Ян} = 10^{-26} \text{ Вт/м}^2 \text{ Гц}$

3) Спектр объекта:

зависимость энергии от частоты $S(f)$ или $S(\lambda)$

4) Красное смещение $z = (l_{\text{набл}} - l_{\text{излуч}}) / l_{\text{излуч}}$

5) Картина Мира:

расширение и z ,

Локальный закон Хаббла: $cz = HR$

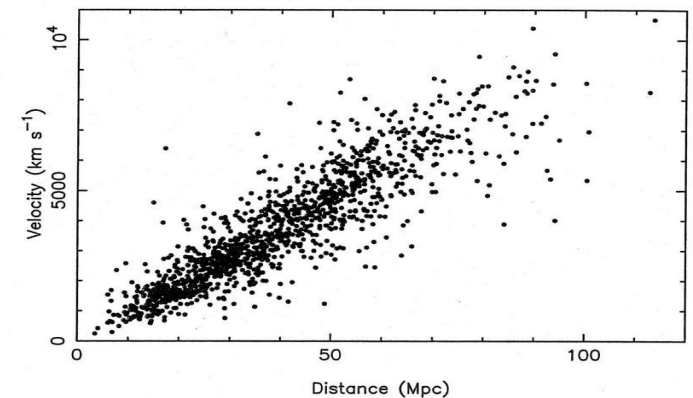
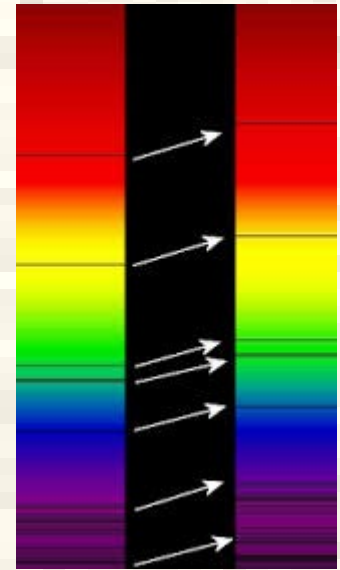


Figure 2.5 A plot of velocity versus estimated distance for a set of 1355 galaxies. A straight-line relation implies Hubble's law. The considerable scatter is due to observational uncertainties and random galaxy motions, but the best-fit line accurately gives Hubble's law. [The x -axis scale assumes a particular value of H_0 .]

Изменился ли взгляд на Мир ?



Изменился ли взгляд на мир ?

$Z=1000$

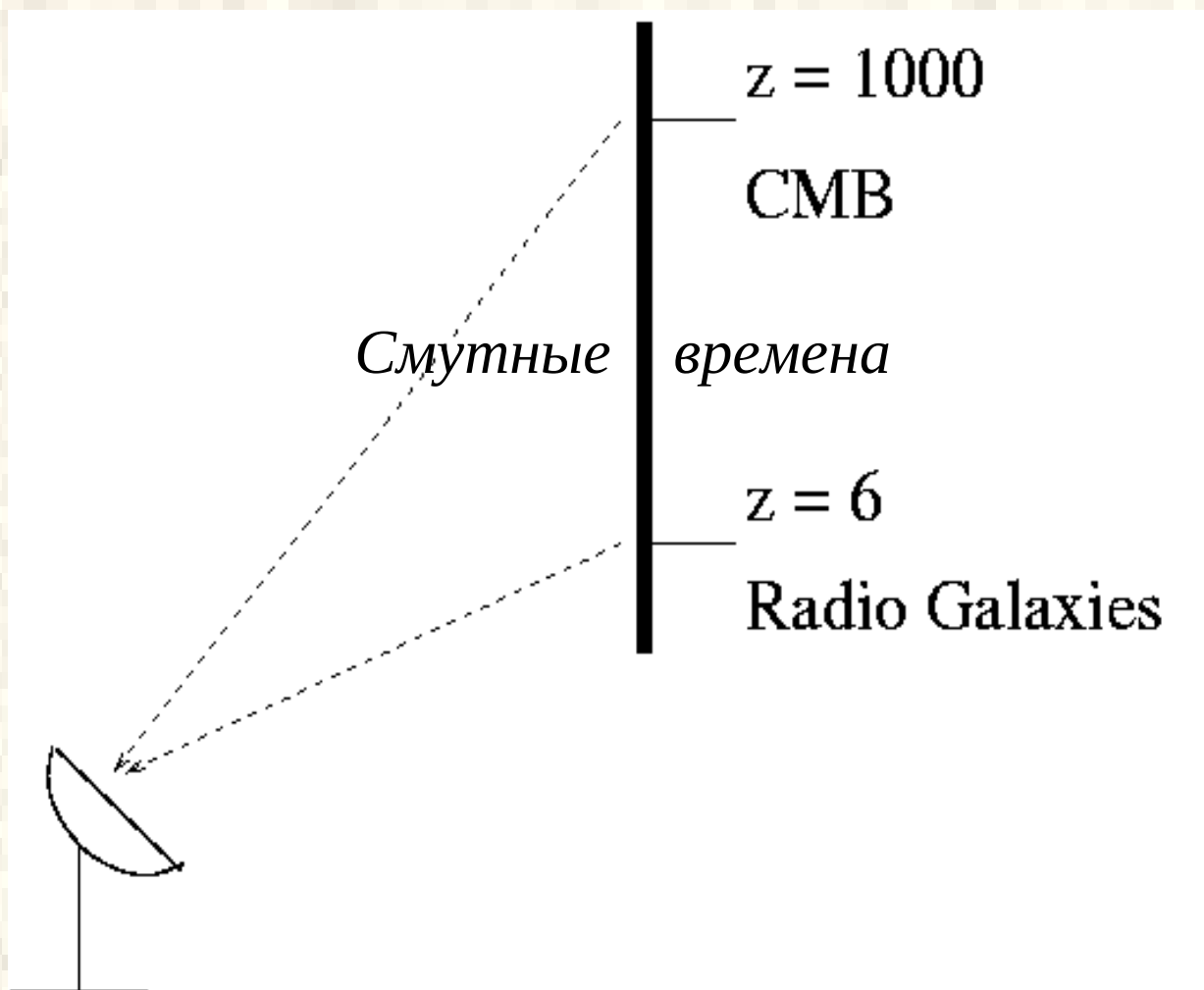
(400 тыс. лет)

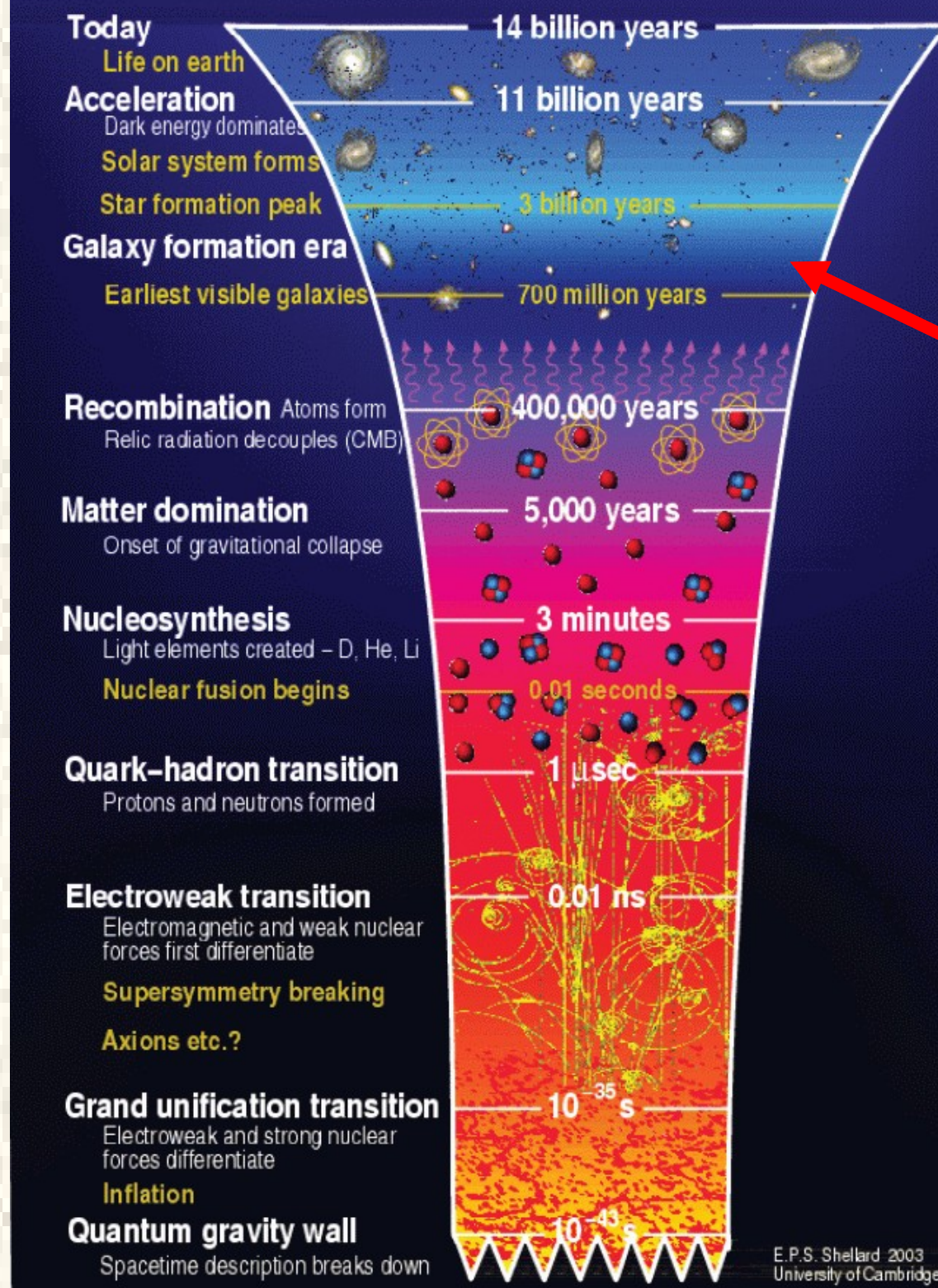
$14 > z > 6$

(0.4 – 1 млрд. лет)



Радиокосмология





Начало эры
радиогалактик

$$Z \sim 6$$

($T = 1$ млрд.лет)

Феноменология

Что такое *РАДИОГАЛАКТИКА ?*



РАДИОГАЛАКТИКА

- 1) Радиоизлучение сравнимо с оптическим
- 2) Радиоизлучение связано с активностью ядра

Мощность излучения до 10^{48} эрг/с

(e.g., PKS 0637-752, *Tavecchio et al. 2000*)

Размеры до 10 Мпк (как скопления галактик)

Для сравнения

Мощность излучения Вселенной 10^{56} эрг/с

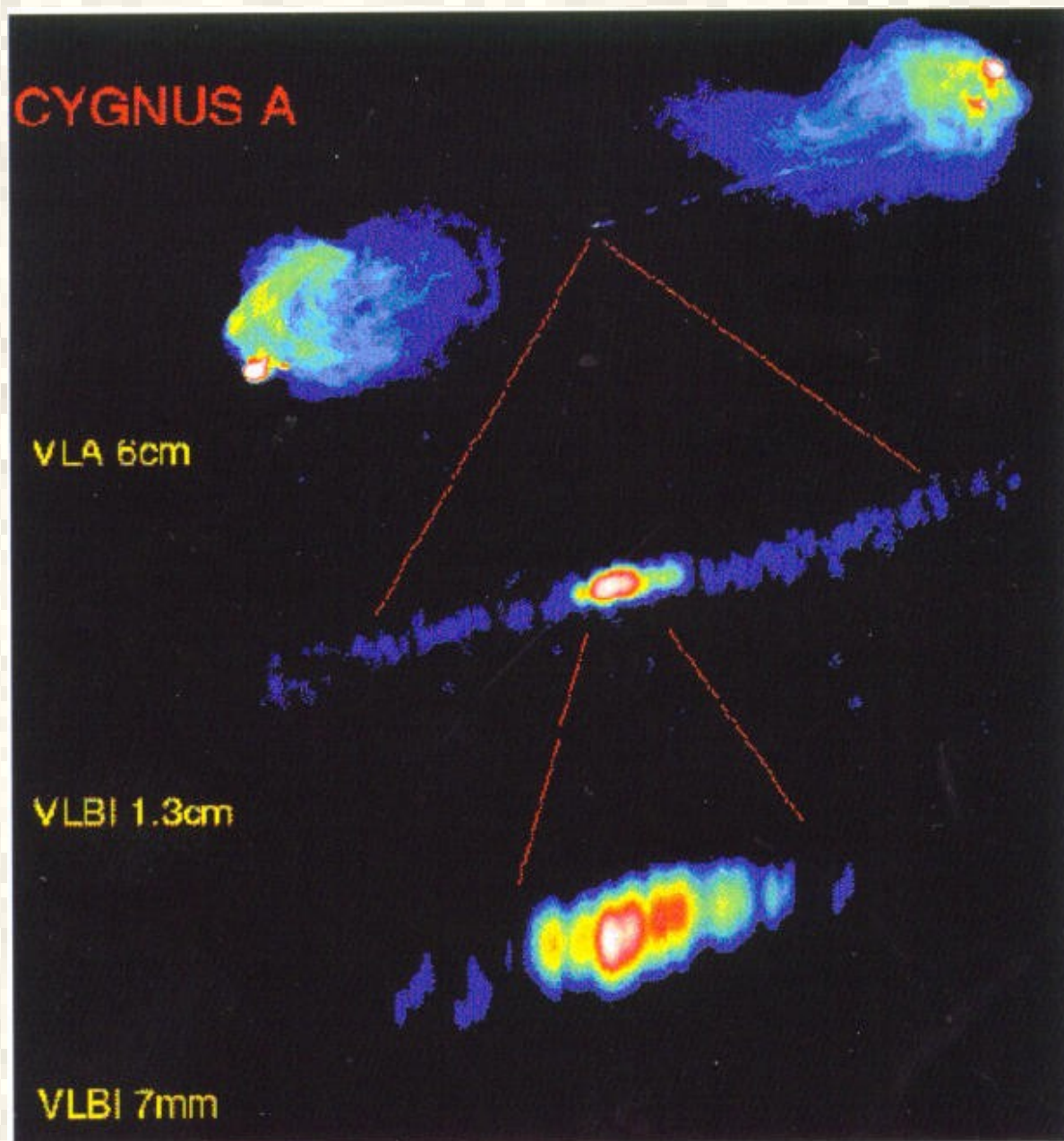
Светимость Солнца $3.86 * 10^{33}$ эрг/с

РГ:

Мощность излучения до 10^{48} эрг/с

Первые открытые радиогалактики

Лебедь А



Отождествление: 1951 г.

Е-галактика 16-ой величины

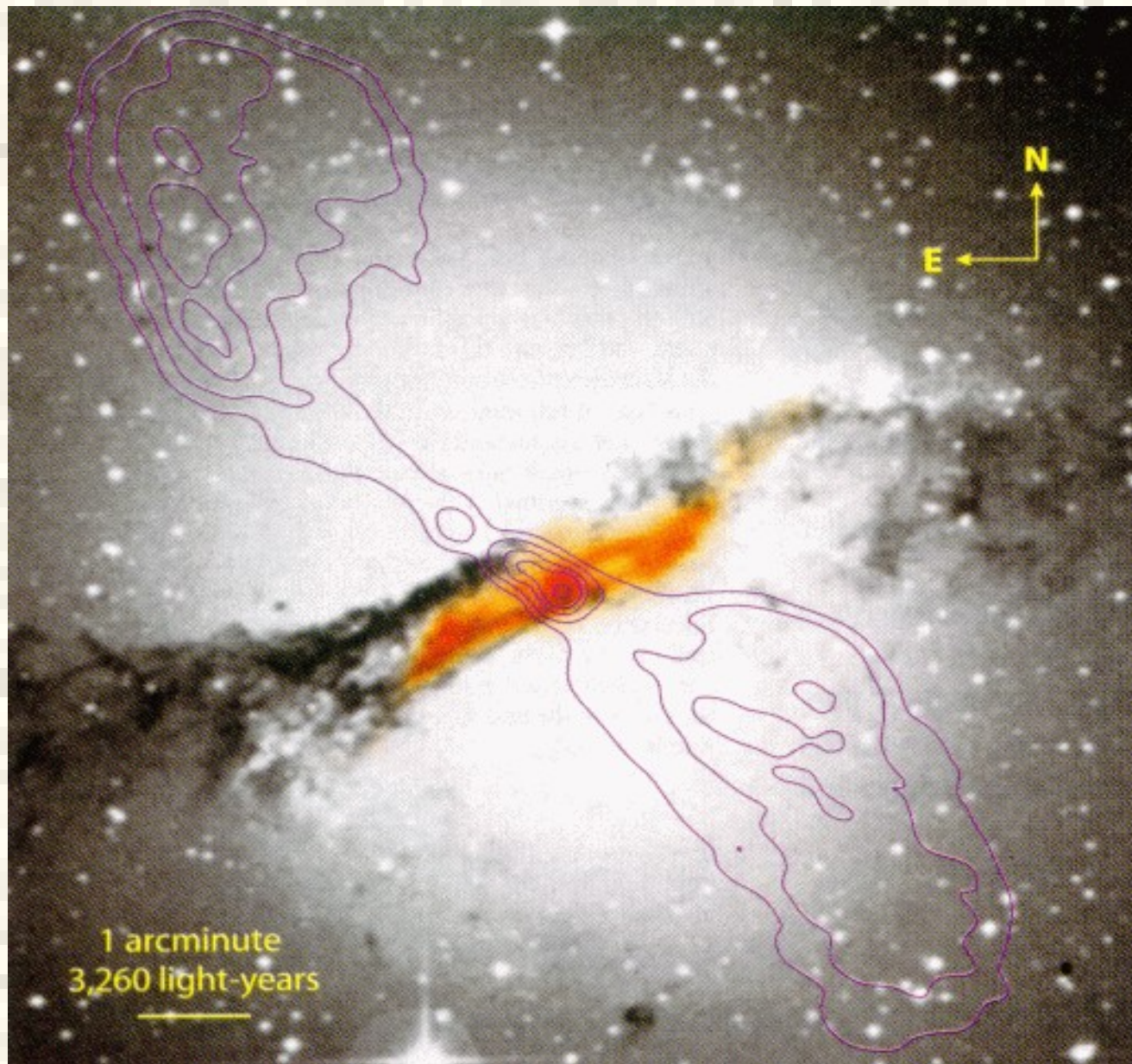
$Z = 0.057$ ($R = 6 \cdot 10^8$ св. лет),

$\theta = 2'$ (80 кпк),

$v = 0.02c$,

$P = 3 \cdot 10^{44}$ эрг/с

Центавр А (NGC 5128)



$$P = 10^{42} \text{ эрг/с,}$$

$$d = 500 \text{ кпк}$$

$$z = 0.0018 \text{ (4 Мпк)}$$

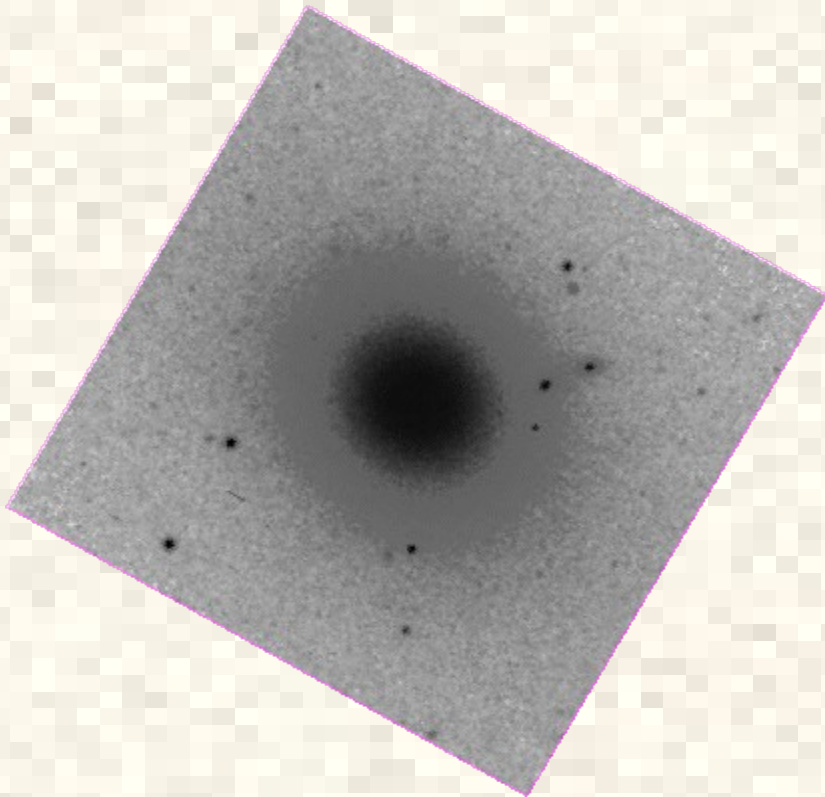
Дева А (NGC 4486, M87)

$P = 10^{42}$ эрг/с,

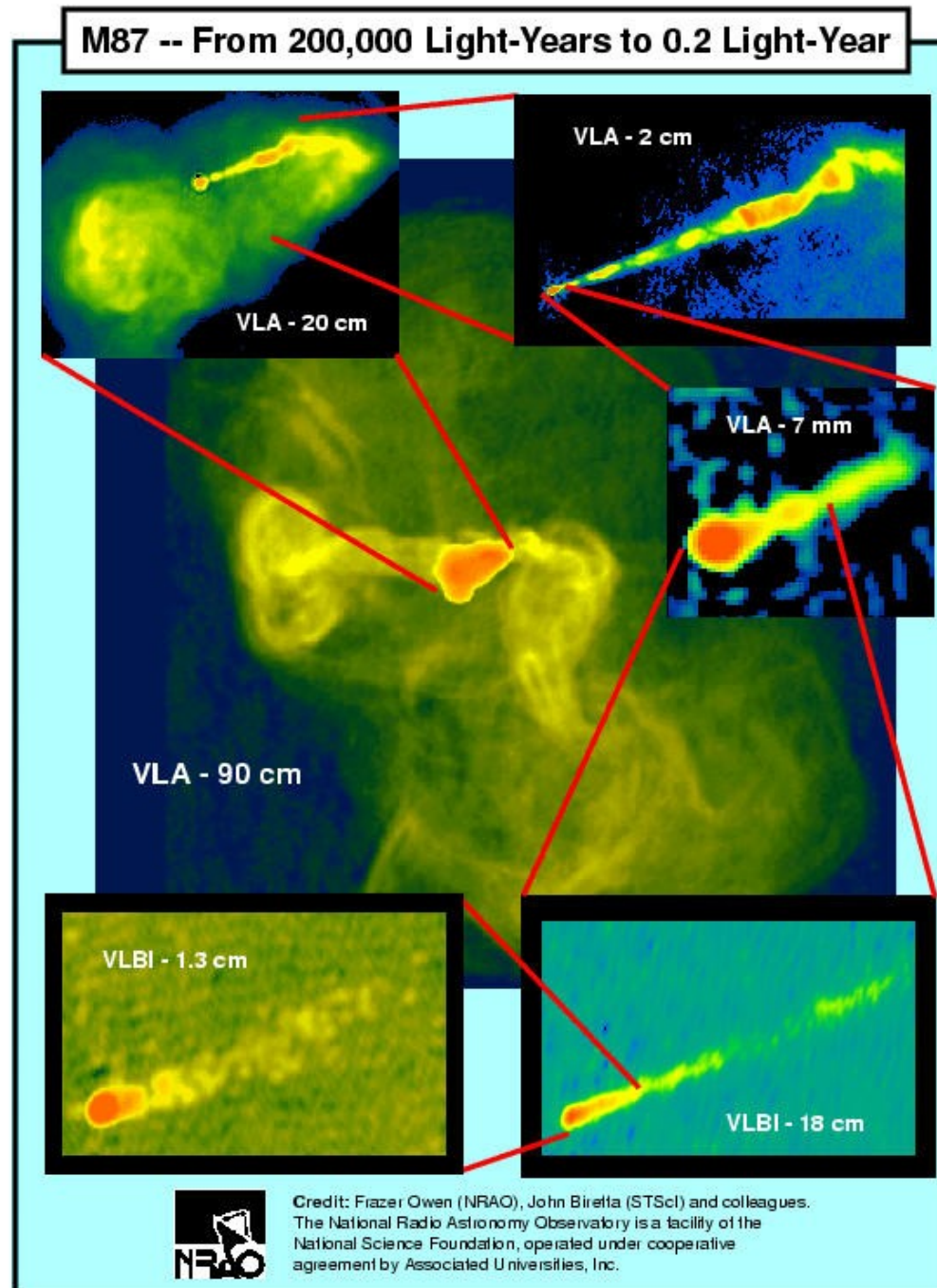
выброс: $20''$ (1.5 крс),

cD – галактика

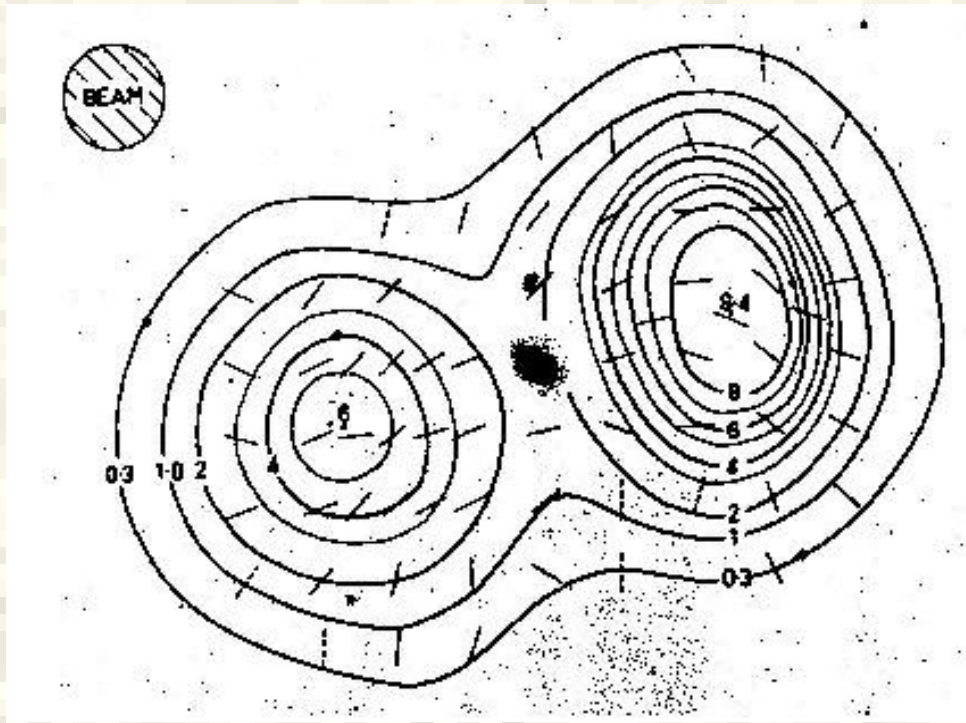
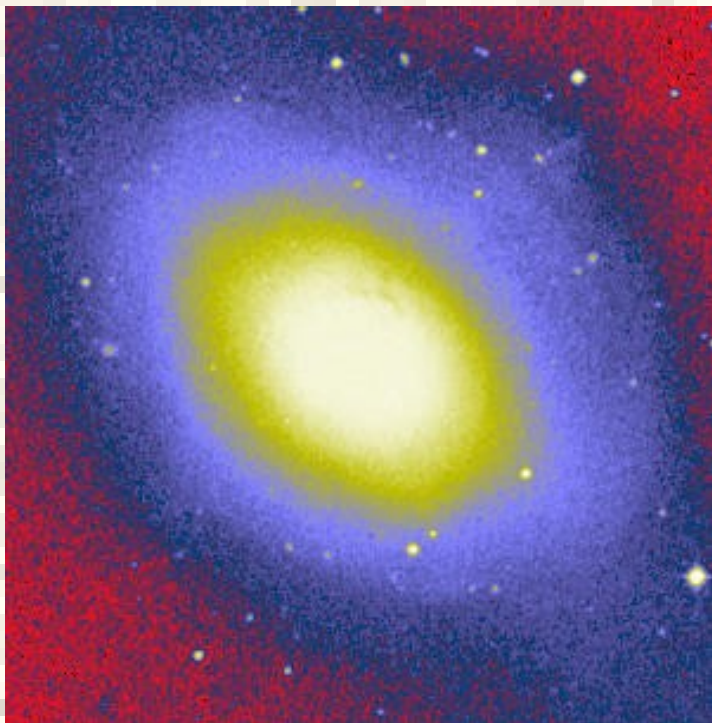
$z = 0.00436$ (60 млн.св.лет = 18 Мпк)



Дева А



Печь А (NGC 1316)



Размер компонент: 200 кпк

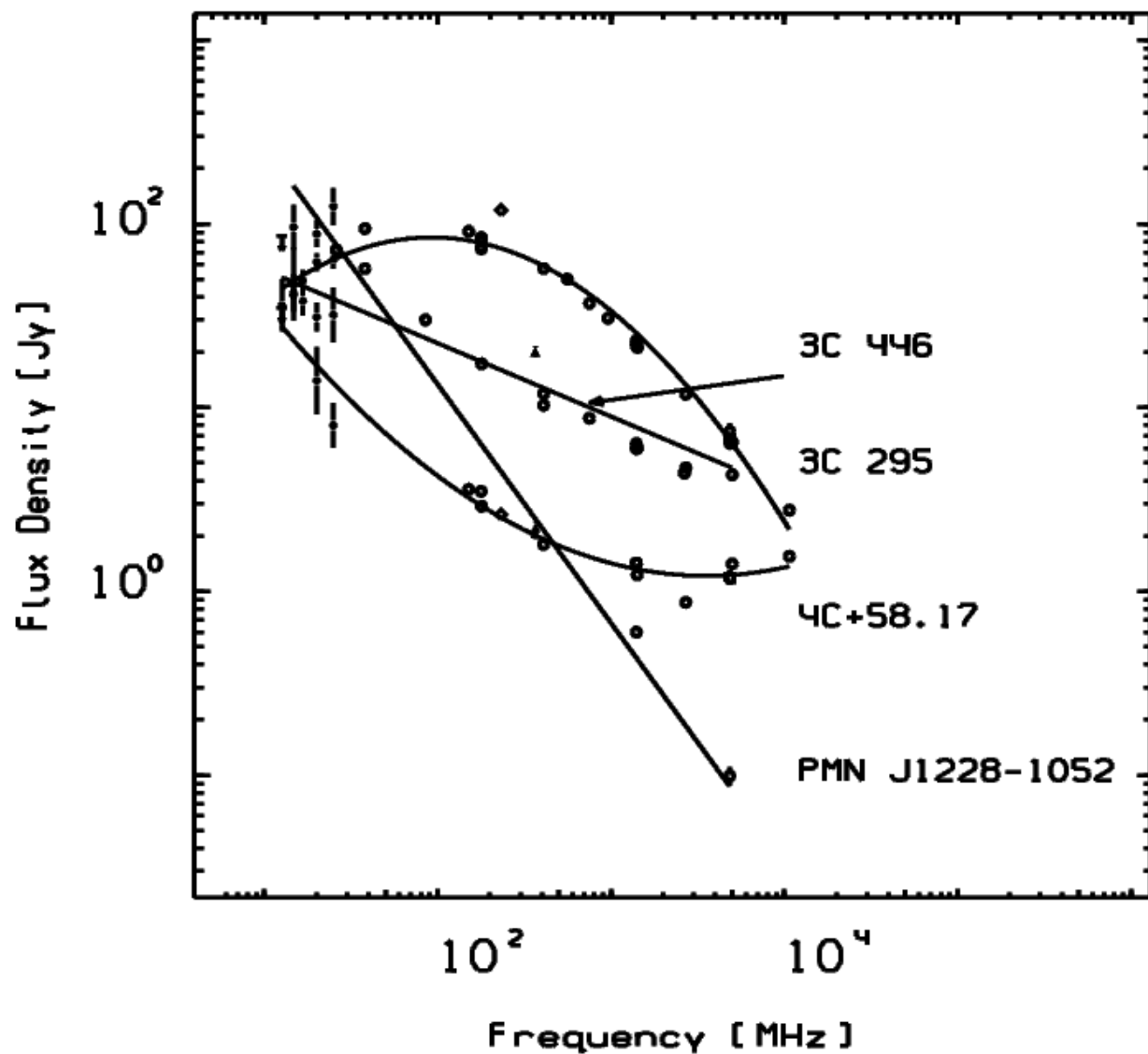
$z = 0.00587$

Изофоты на 13 см (Мофет, 1966)

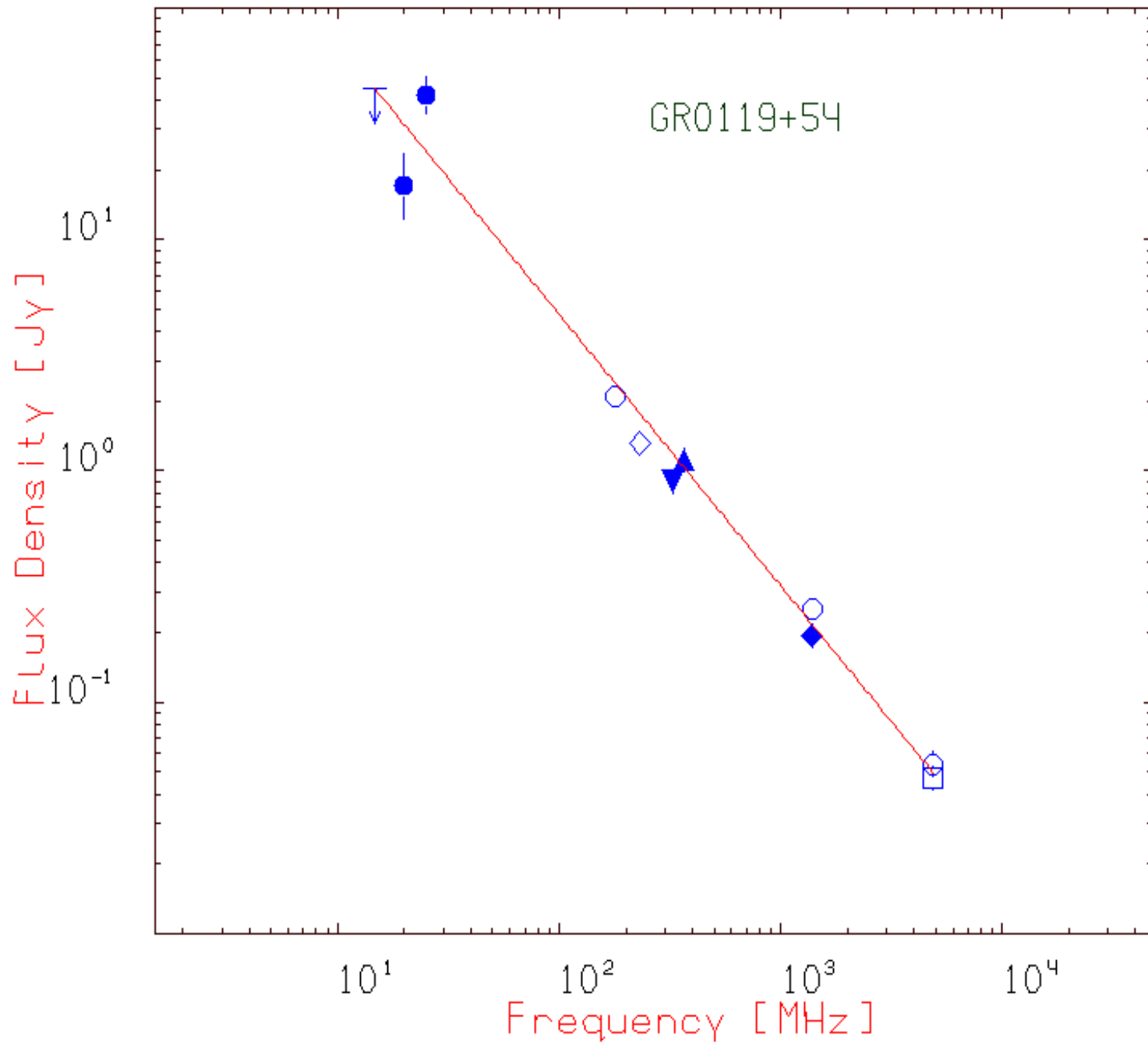
Классификация радиогалактик

- 1) По непрерывному радиоспектру
- 2) Морфологическая (*ботаническая*)

Непрерывные радиоспектры радиогалактик



Непрерывные радиоспектры радиогалактик



Непрерывные радиоспектры радиогалактик

$$S \sim \nu^{\alpha}$$

S - плотность потока, ν - частота,
 α -спектральный индекс (наклон касательной в данной точке спектра)

Типы спектров в общем случае:

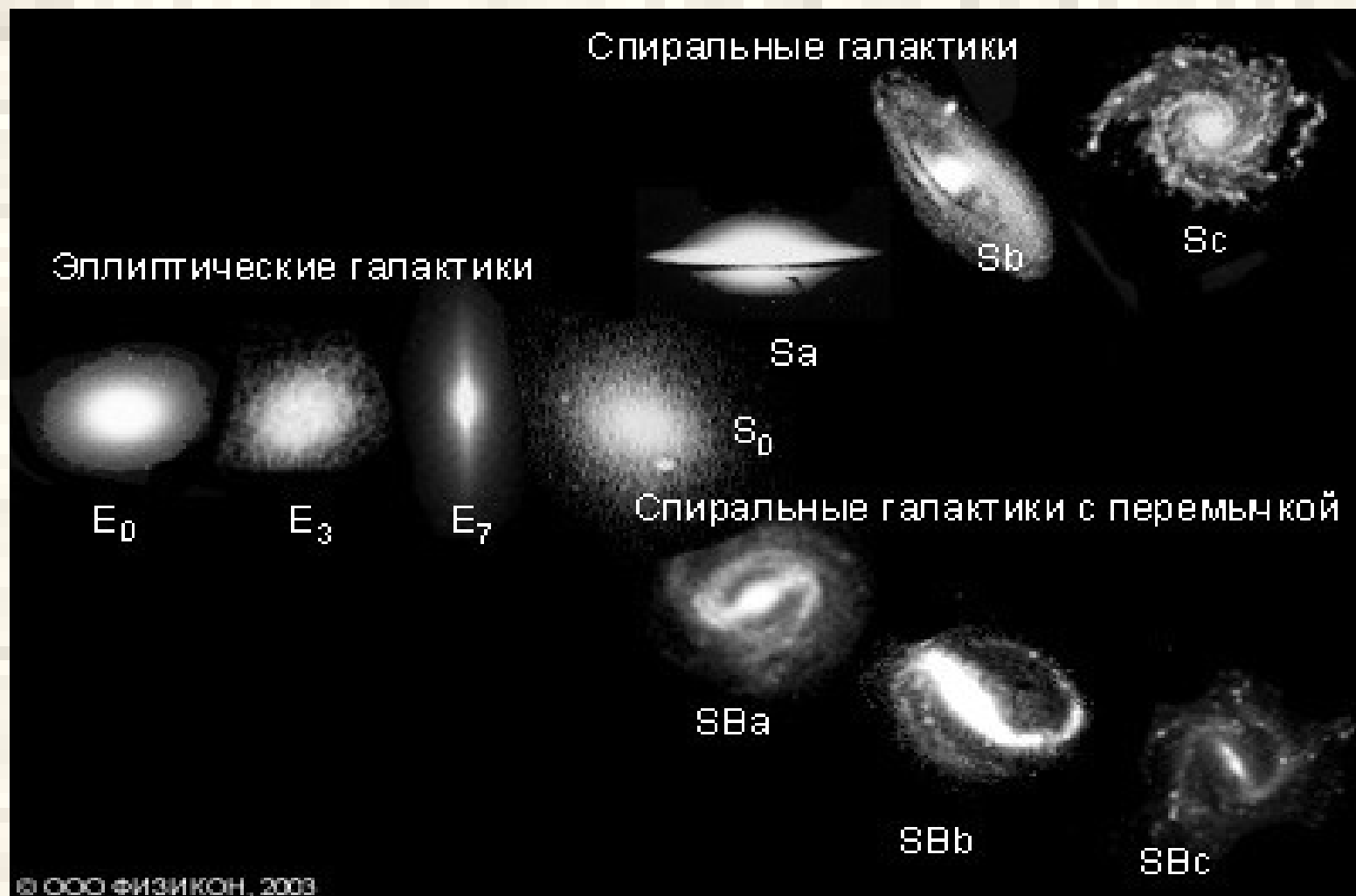
- $y = A + Bx$ ($B = \alpha$)
- $y = A + Bx + Cx^2$
- $y = A + Bx + Ce^x$
- $y = A + Bx + Ce^{-x}$

где $y = \log S$, $x = \log \nu$

Классификация по спектральному индексу:

- 1) $\alpha > 0$ - инвертированный спектр,
- 2) $-0.5 < \alpha < 0$ - плоский спектр,
- 3) $\alpha < -0.5$ - крутой спектр,
- 4) $\alpha < -1.0$ - ультракрутой спектр

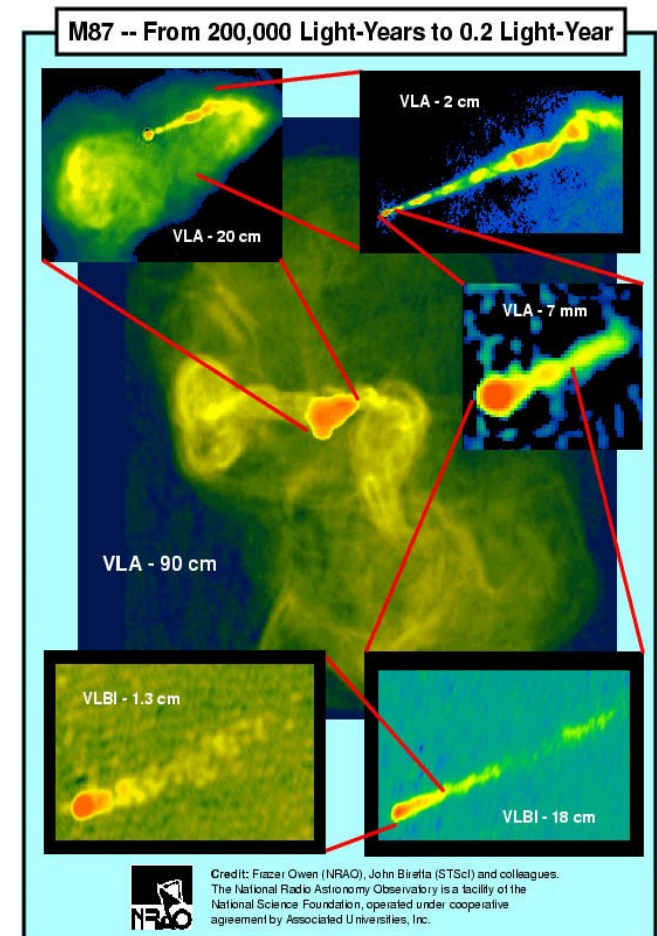
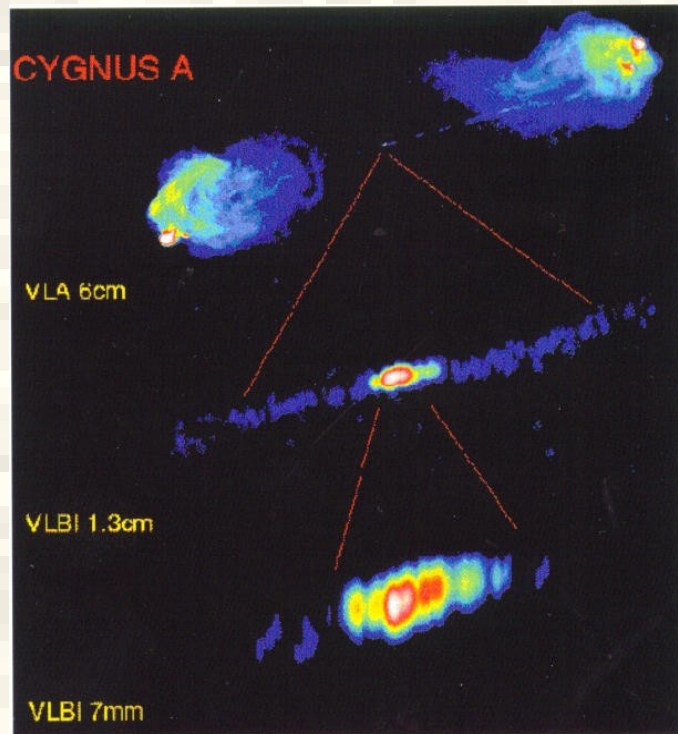
Морфологическая классификация галактик Хаббла (по форме галактики)



Морфологическая классификация р/галактик

Морфологические особенности:

- Ядро $<0.1''$, совпадает с ядром в оптике)
- Протяженные структуры (radio lobes)
- Джеты
- Горячие пятна (hot spots)
- Узлы
- Гало

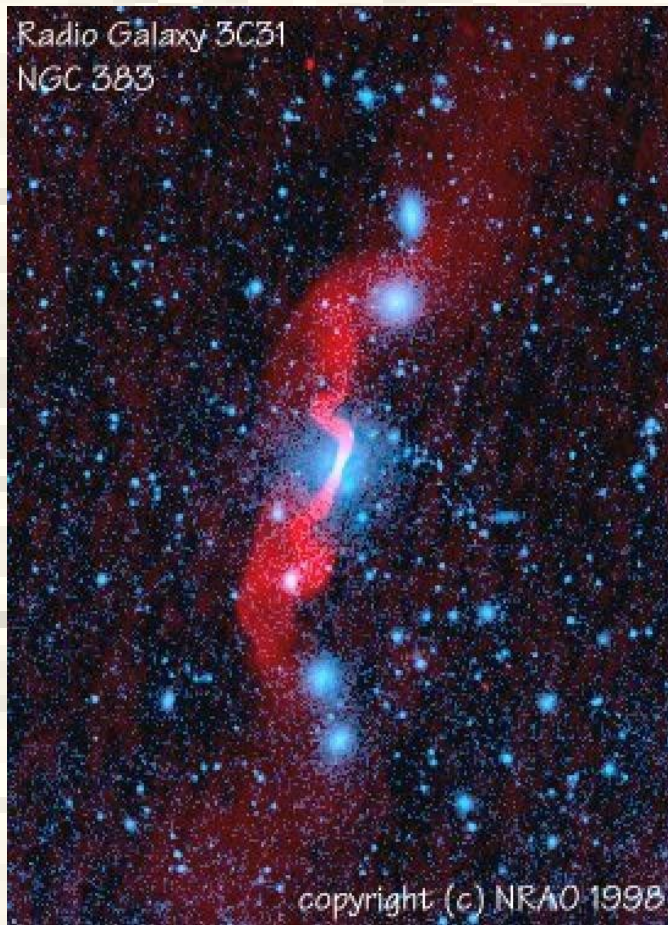


Морфологическая классификация р/галактик

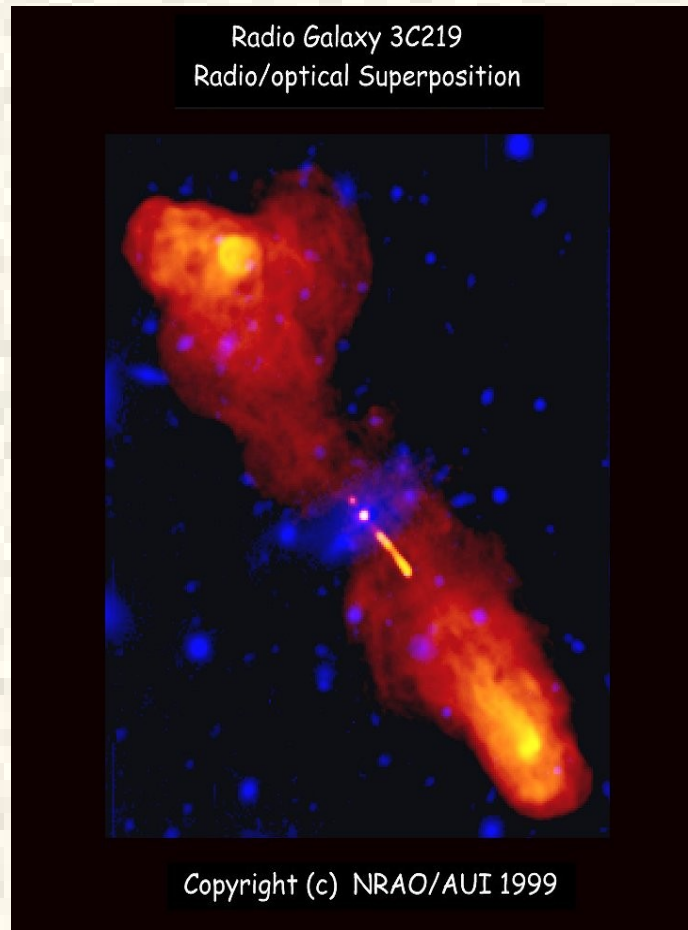
Классификация по типу распределения радиояркости
(*Fanaroff, Riley, 1974*)



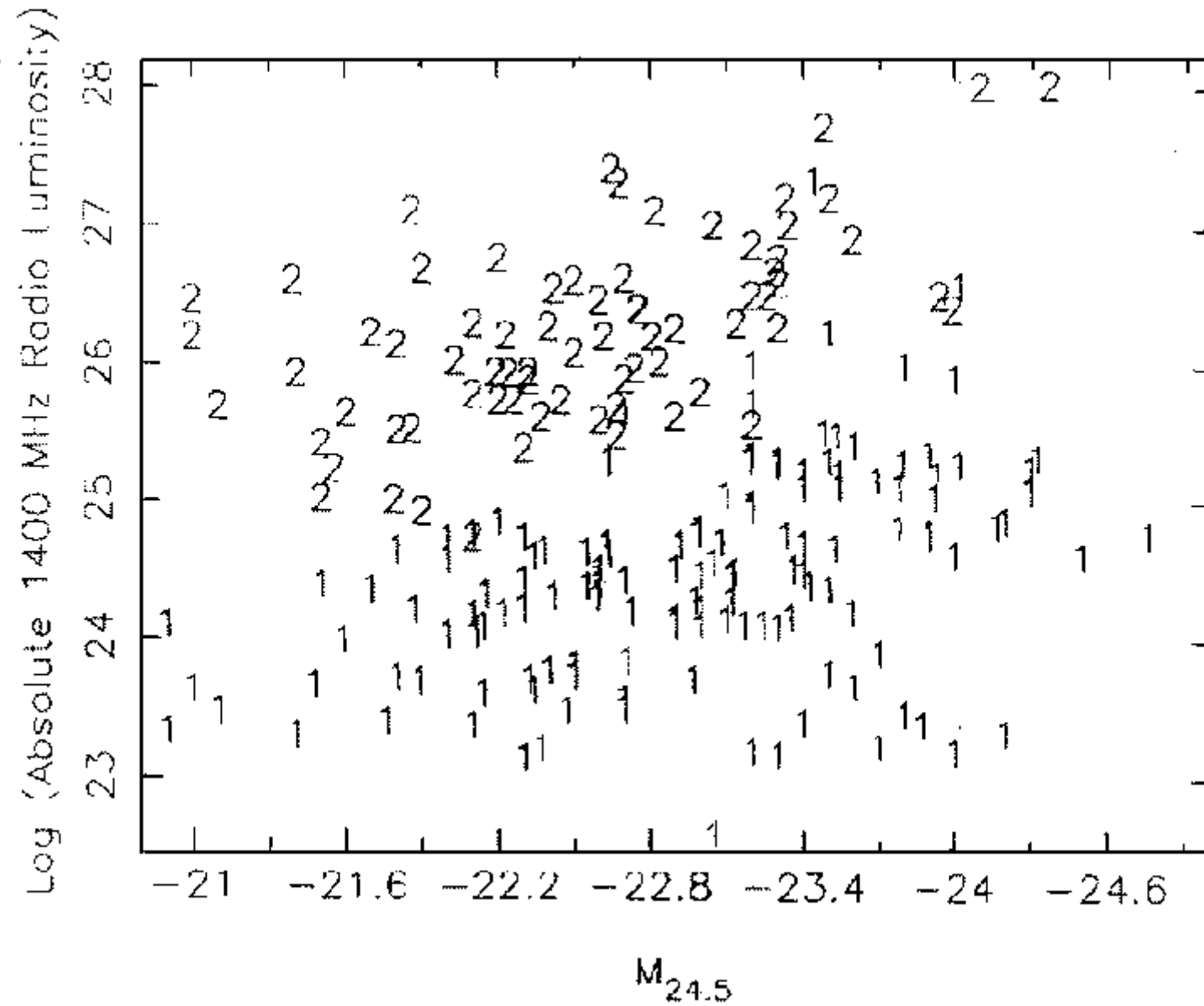
2 основных морфологических типа РГ



Fanaroff – Riley I



Fanaroff – Riley II



(Owen , Ledlow, 1994)

Физические различия

FR II – гладкая структура джетов (сверхзвуковое движение)

FR I - искаженная структура джетов (субзвуковое)

1) центральные машины одинаковые, среда разная

2) центральные машины разные

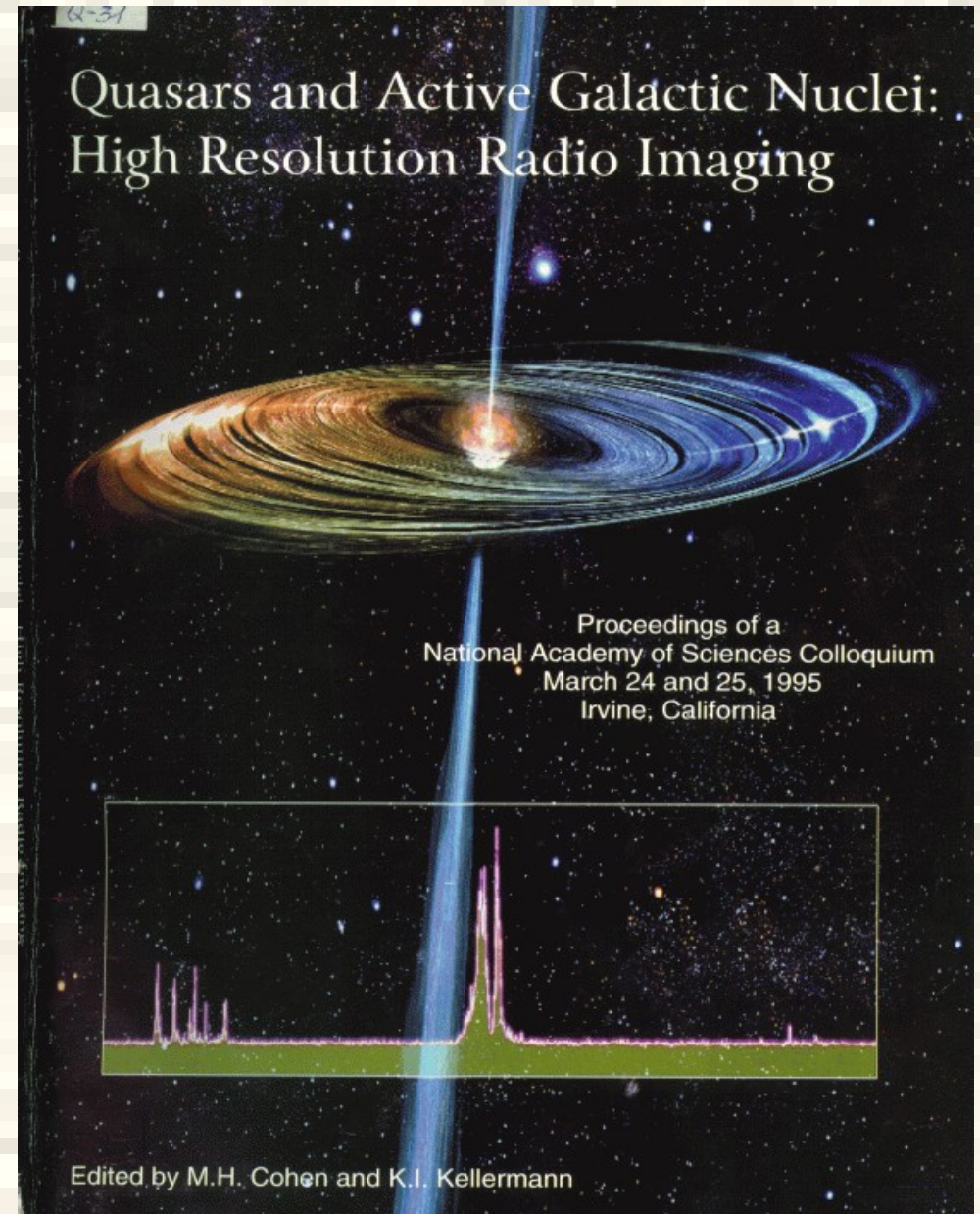
Отождествление:

FR II – гигантские эллиптические галактики gE

FR I - гигантские галактики cD, в центрах близких скоплений

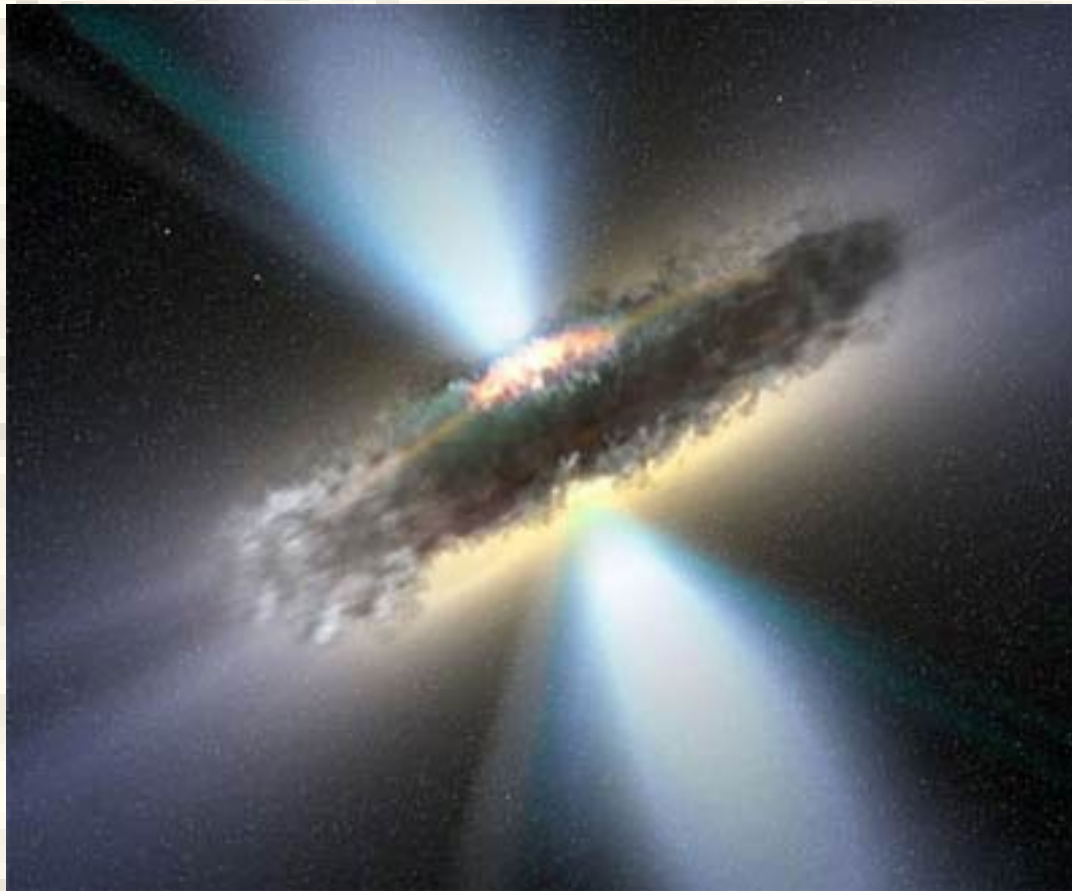
Эмиссионные линии у FR II ярче за счет ионизирующего излучения ядра

Объединенная модель



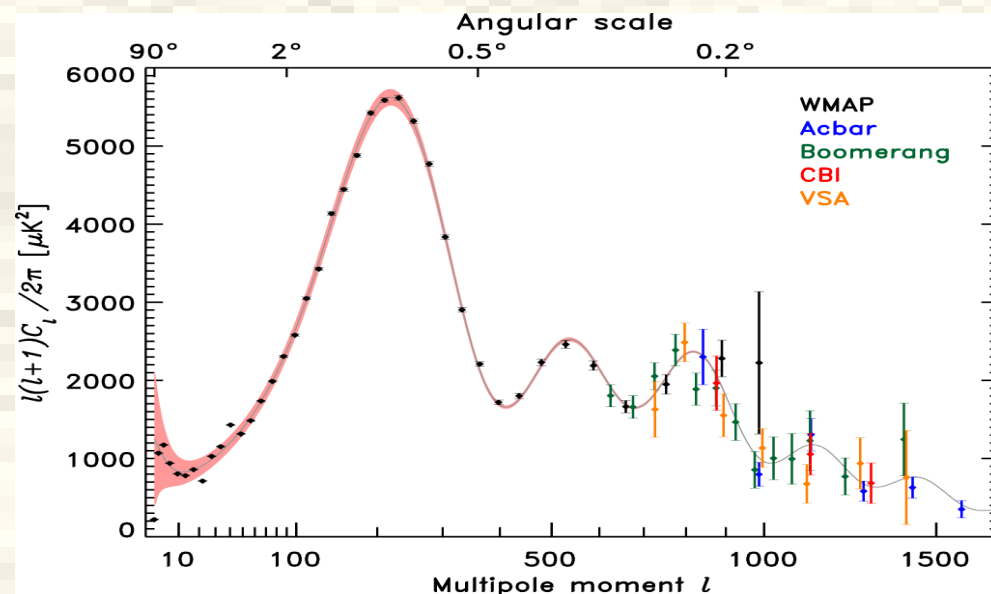
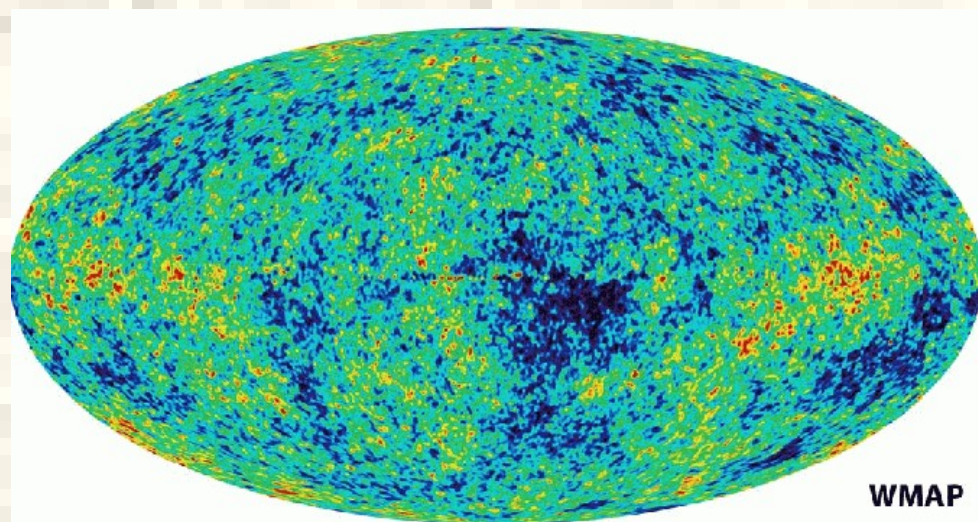
Объединенная модель

+ толстый пылевой тор



Космология

Космология решена ?



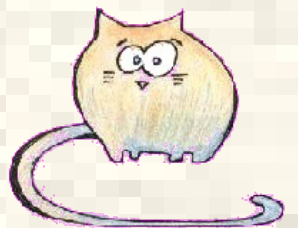
$$C_\ell \equiv C_\ell(h, \Omega_b h^2, \Omega_{CDM} h^2, \Omega_\Lambda, \Omega_\nu, n, \dots)$$

Мы знаем: постоянную Хаббла,
плотность видимой и темной материи, плотность темной энергии,
параметры первых возмущений вакуума

Космология решена ?



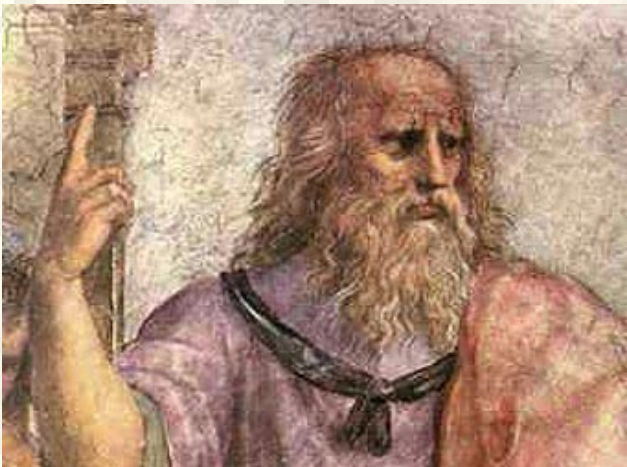
Модель должна быть согласованной !



Космология решена ?

Модель должна быть согласованной !

А что мы знаем ?



- 1) Химсостав Вселенной (75% H , 25% He , +0.01%)
- 2) Вселенная расширяется, ускоряясь
- 3) Есть СМВ и его искажения
- 4) Крупномасштабная структура Вселенной

Чему соответствует LCDM.

И это, наверное, хорошо...

Радиогалактики – реперы Вселенной

Самая далекая радиогалактика: $z=5.19$
(*van Breugel et al., 1999*)

Jim Condon:

Все далекие радиогалактики есть в обзоре
GB6 (6 см, 18 мЯн) (*Gregory & Condon, 1991*)



Радиогалактики – реперы Вселенной

Самая далекая радиогалактика: $z=5.19$
(*van Breugel et al., 1999*)

Jim Condon:

Все далекие радиогалактики есть в обзоре
GB6 (6 см, 18 мЯн) (*Gregory & Condon, 1991*)

А самая далекая известная галактика ?
 $z=8.55$! $T_{\text{вселенной}}=600$ млн.лет

Селекция далеких радиогалактик

Программа “Большое Трио”

(Парийский, Соболева, Копылов и др.)

- 1) Радиоисточники обзора Холод на РАТАН-600 (>10 мЯн, 7.6см)
- 2) Отбор источников с крутыми спектрами
- 3) VLA: радиоморфология (FR II)
- 4) Отождествление на Паломарском Атласе Неба
- 5) 6м: отождествление, BVRI-фотометрия, спектроскопия (z)

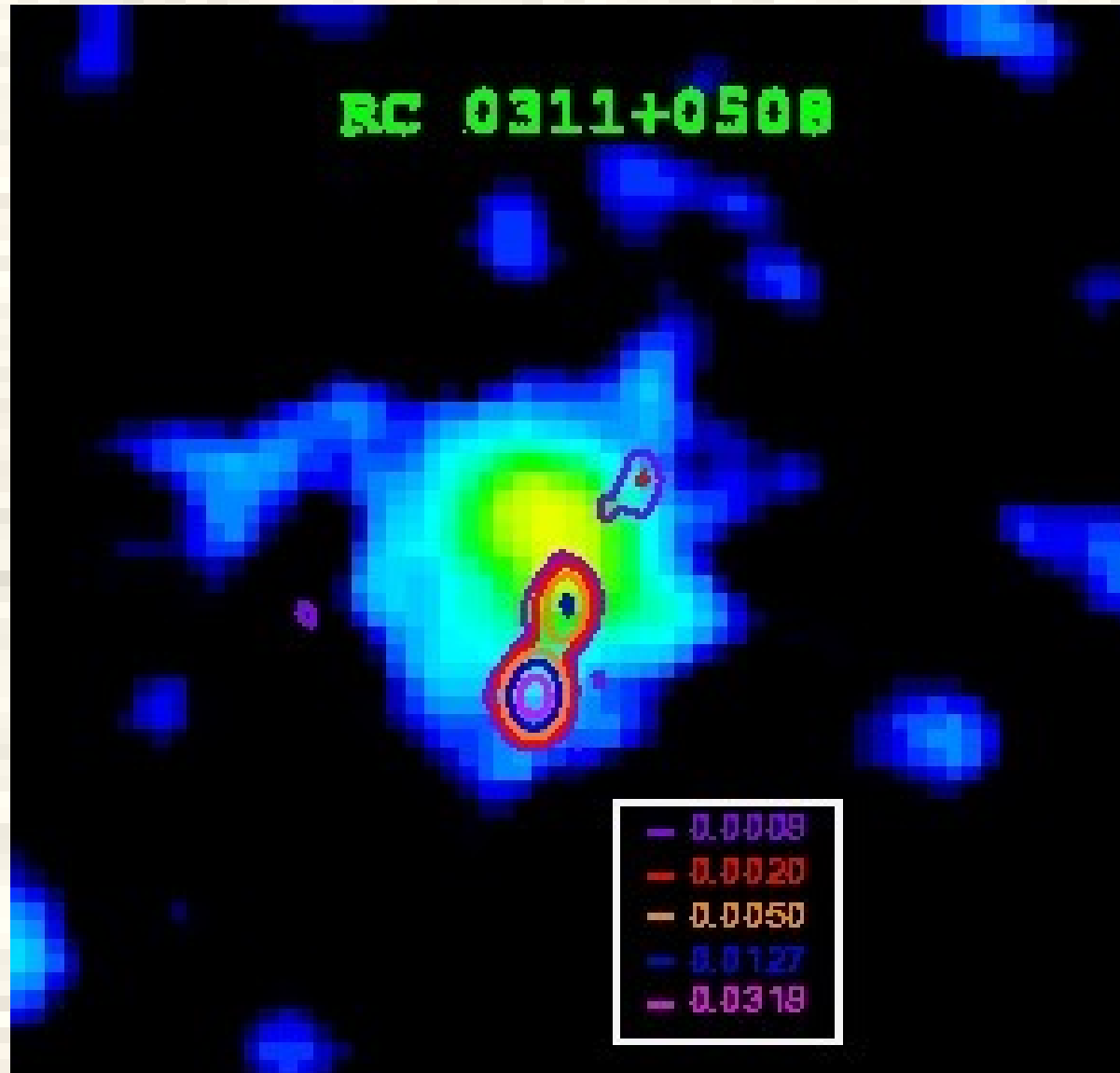
1993-2010



Большое Трио

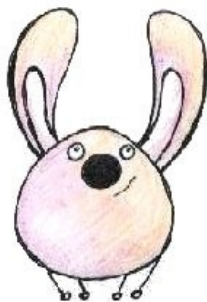
$z = 4.514$

(Kopylov *et al.*, 2006)



Космология с радиогалактиками

- a) “размер – красное смещение” (стандартная линейка)
- b) “светимость – красное смещение” (стандартная свеча)
- c) "Log N – Log S" (число источников – плотность потока)
- d) Гравитационное линзирование
- e) Скучивание и образование крупномасштабной структуры
- f) Возраст звездных систем
- g) Формирования сверхмассивных ЧД на больших z
- h) Поиск темной материи в гало

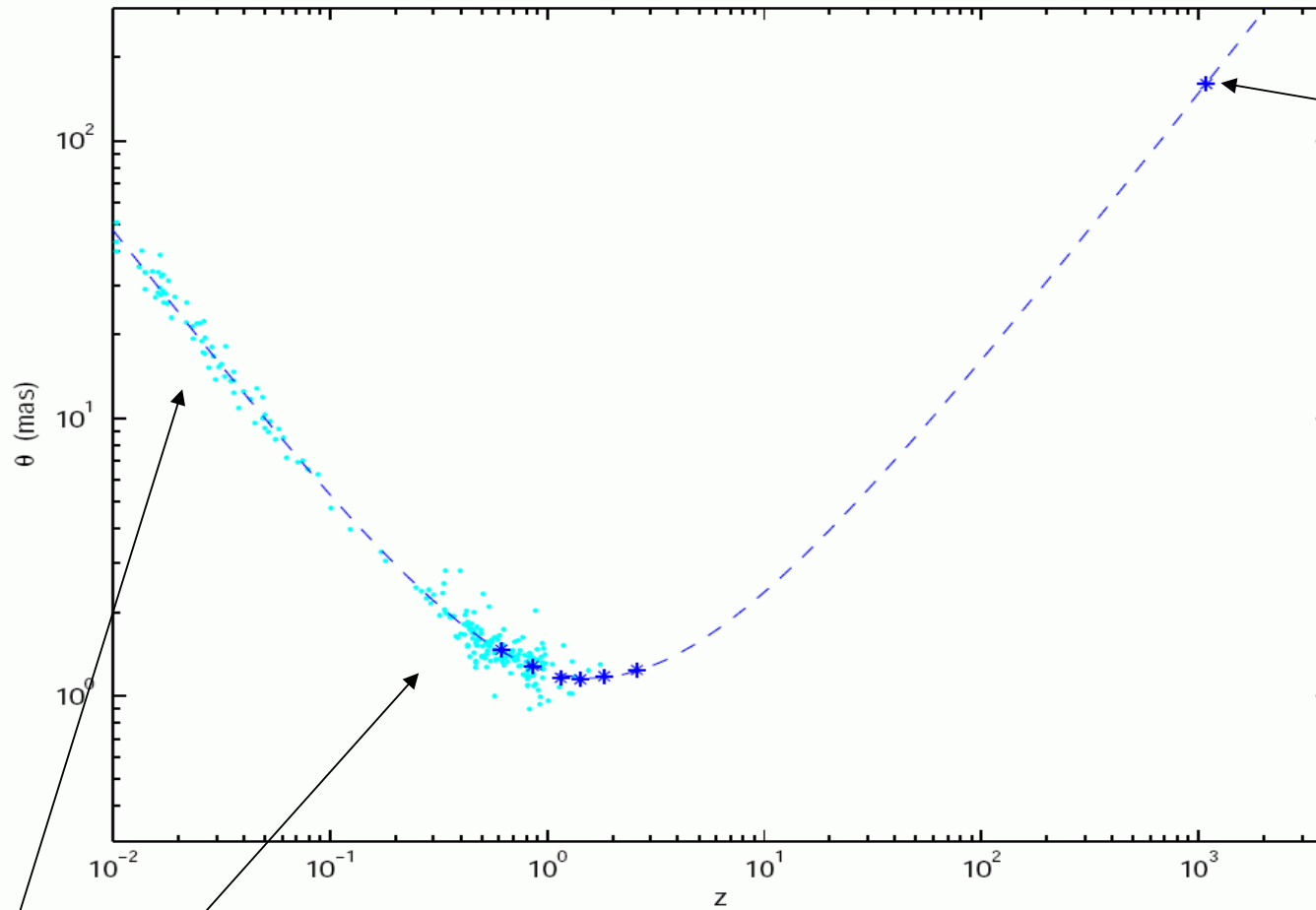


a) Размер – красное смещение

$$d_A(z) = \frac{1}{1+z} \int_0^z \frac{dz'}{H(z')},$$

$$H(z) = H_0 [\Omega_R(1+z)^4 + \Omega_m(1+z)^3 - (\Omega_0 - 1)(1+z)^2 + \Omega_\Lambda]^{1/2}.$$

а) "Размер – z " для р/и и СМВ



Размер
горизонта
на $z=1100$
(для пятен
на $L=220$)

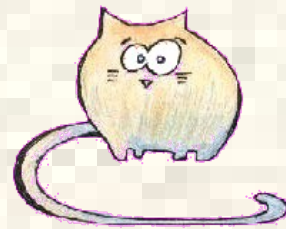
(Jackson, Janneta, 2006)

Галактические
ядра

$$\Omega_m = 0.303_{+0.025}^{-0.022}$$

$$\Omega_\Lambda = 0.694_{+0.030}^{-0.033}$$

$$K = 0.013_{+0.012}^{-0.012}$$



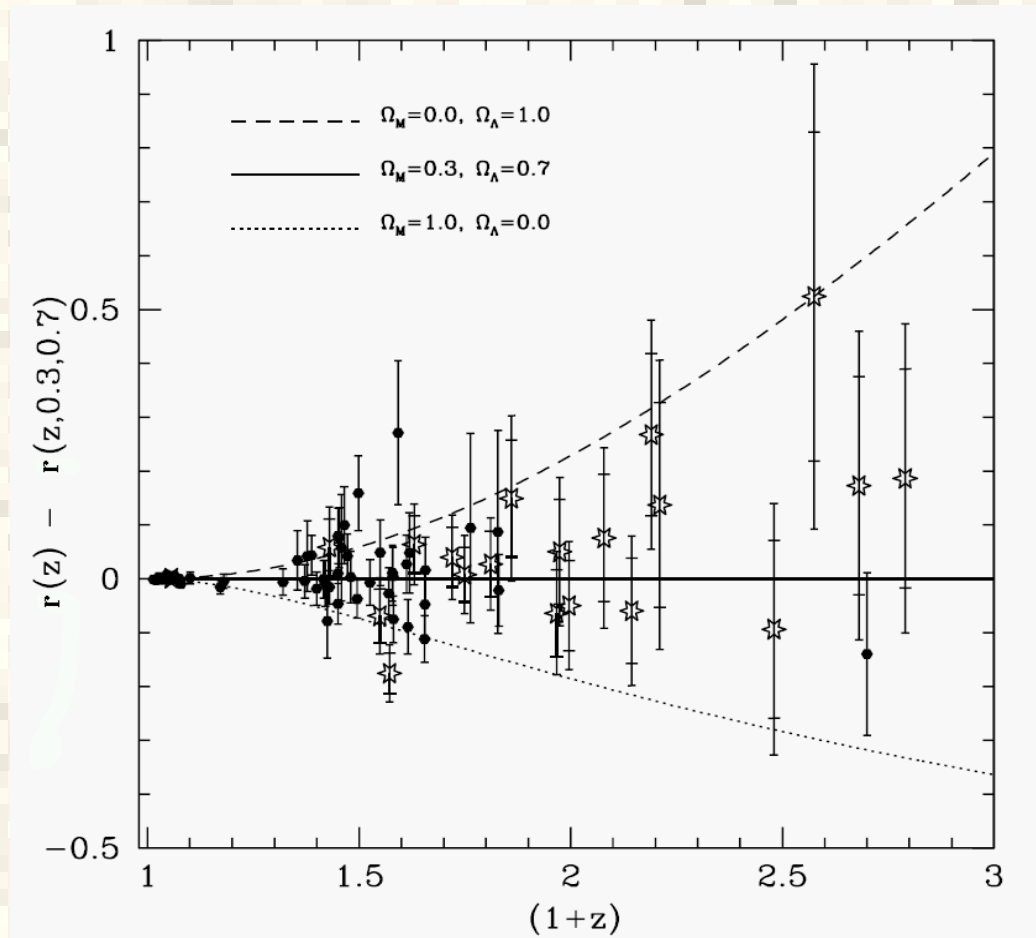
Любопытно

Gurvits (1999, 2003): $q_0 = 0.21 \pm 0.3$

По тем же данным, но после WMAP, Chen, Ratra (2003):

$\Omega_L \sim 0.7$

a) "Размер – z" для радиогалактик FR II



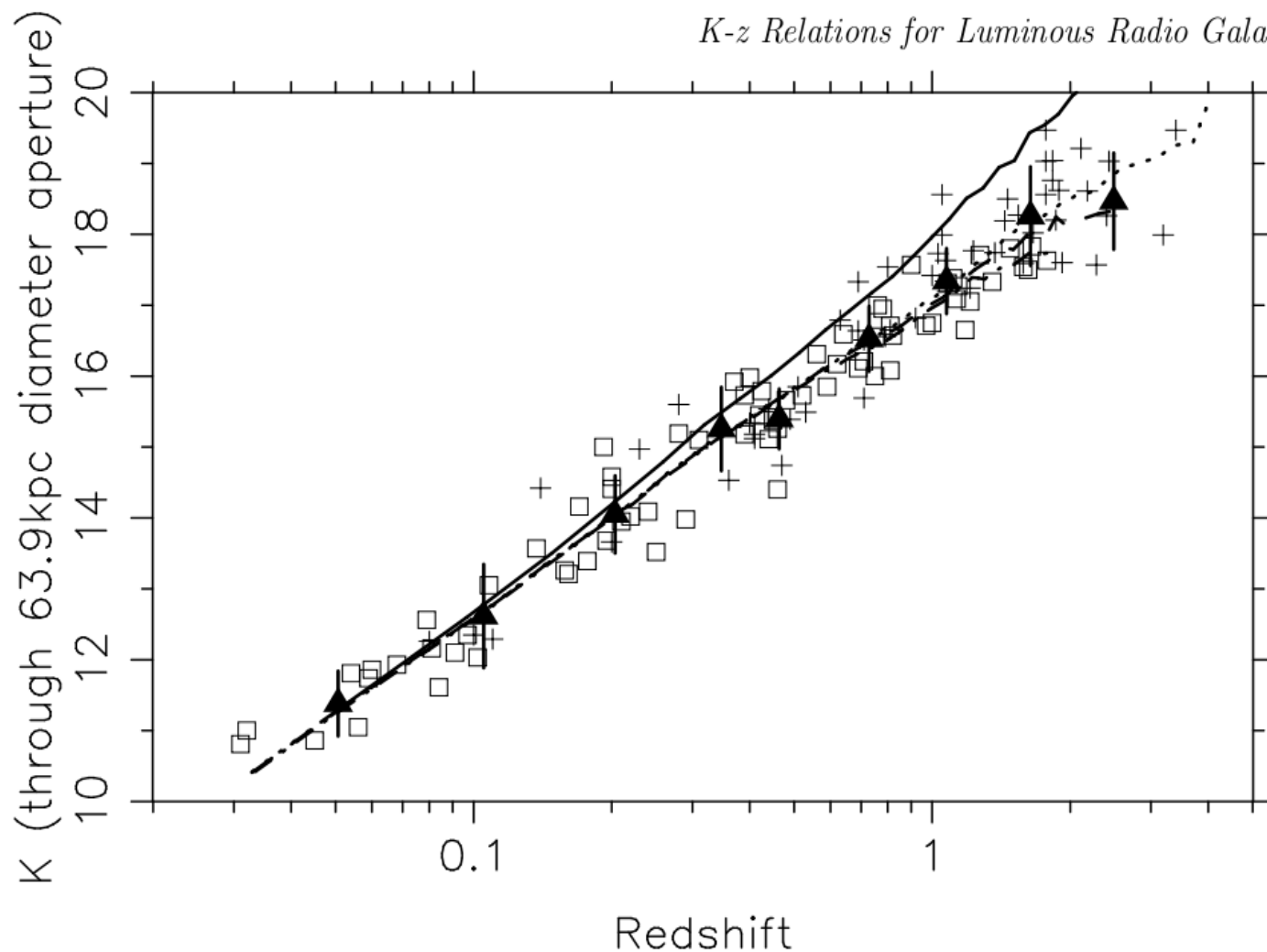
Daly, 2002: $\langle D \rangle / D^*$,

где $\langle D \rangle$ - ср. набл. размер в популяции,

D^* - ожидаемый размер из скорости джета

b) Величина К - z (*Inskip et al., 2002*)

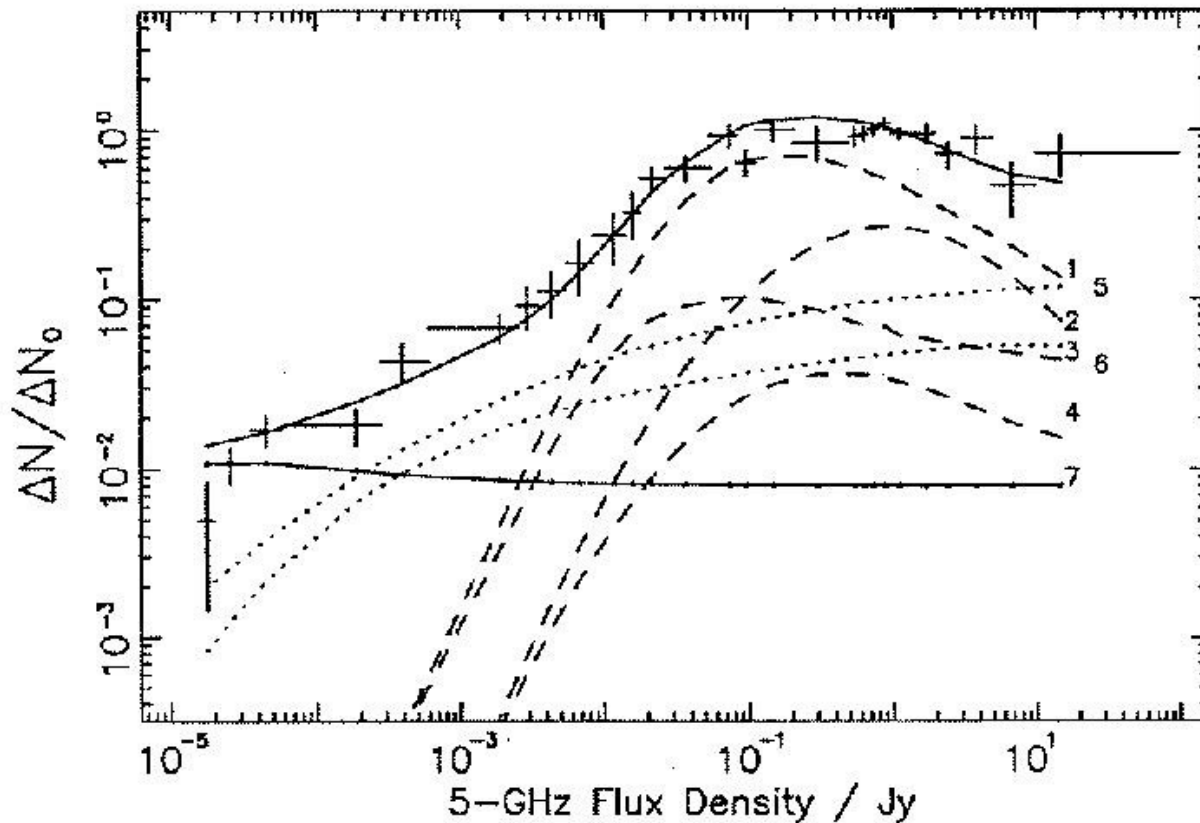
K-z Relations for Luminous Radio Galaxies



Non-evolving: solid
passively evolving:
dot-dashed: $z_f = 3$
dashed: $z_f = 5$
dotted : $z_f = 20$

$$K = 17.37 + 4.53 \log_{10} z - 0.31 (\log_{10} z)^2,$$

с) Подсчеты источников $\text{Log } N - \text{Log } S$ (Condon, 1984; Jackson, Wall, 1999)



FR II:

- 1) FR II & QSR, $\alpha < -1$
- 2) QSR with flat S_p
- 3) RG, $\alpha < -1$
- 4) BL Lac, $\alpha > -1$

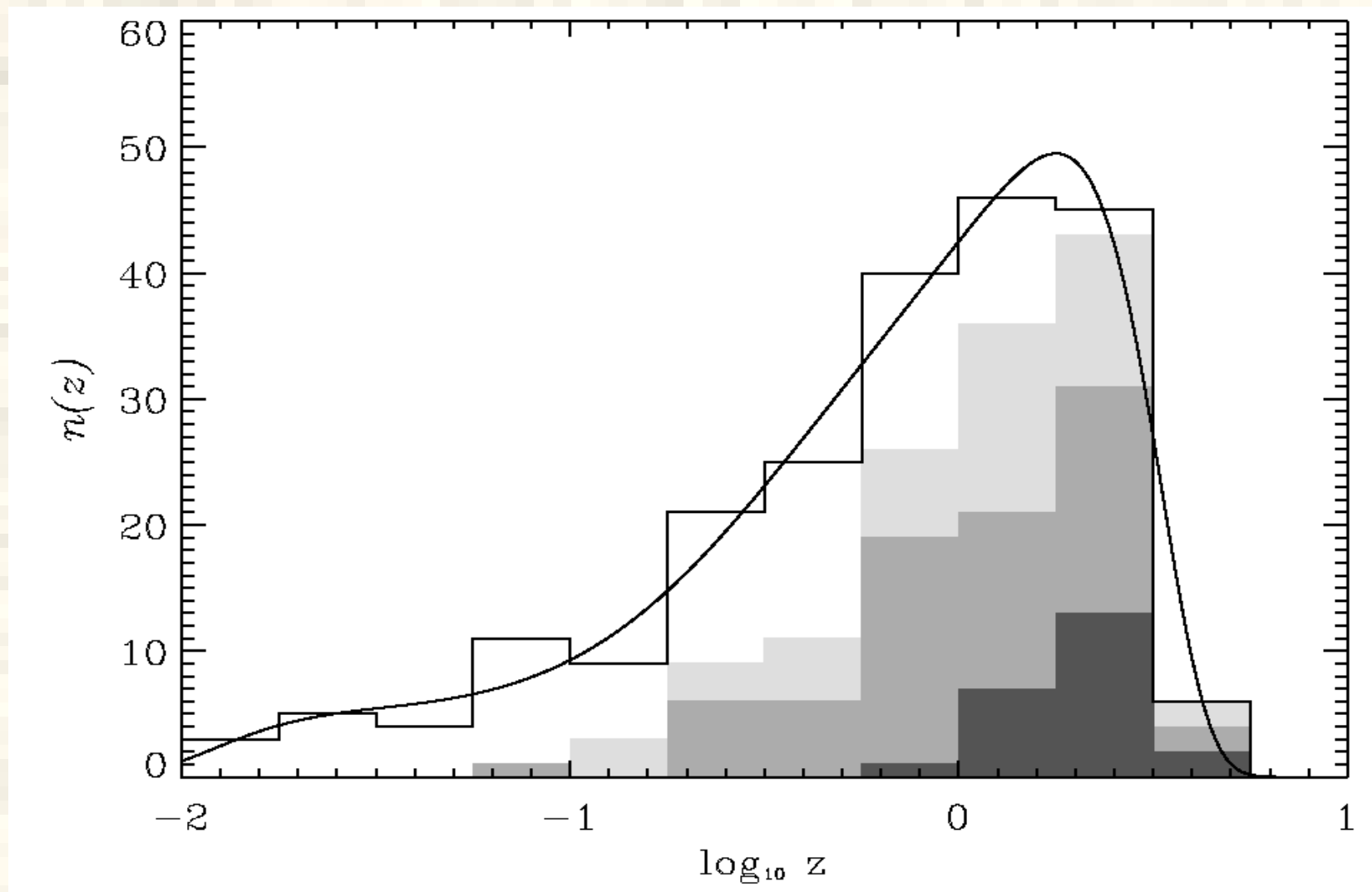
FR I:

- 5) FR I, $\alpha > -1$
- 6) BL Lac, $\alpha > -1$
- 7) Starburst galaxies

(Jackson, Wall, 1999)

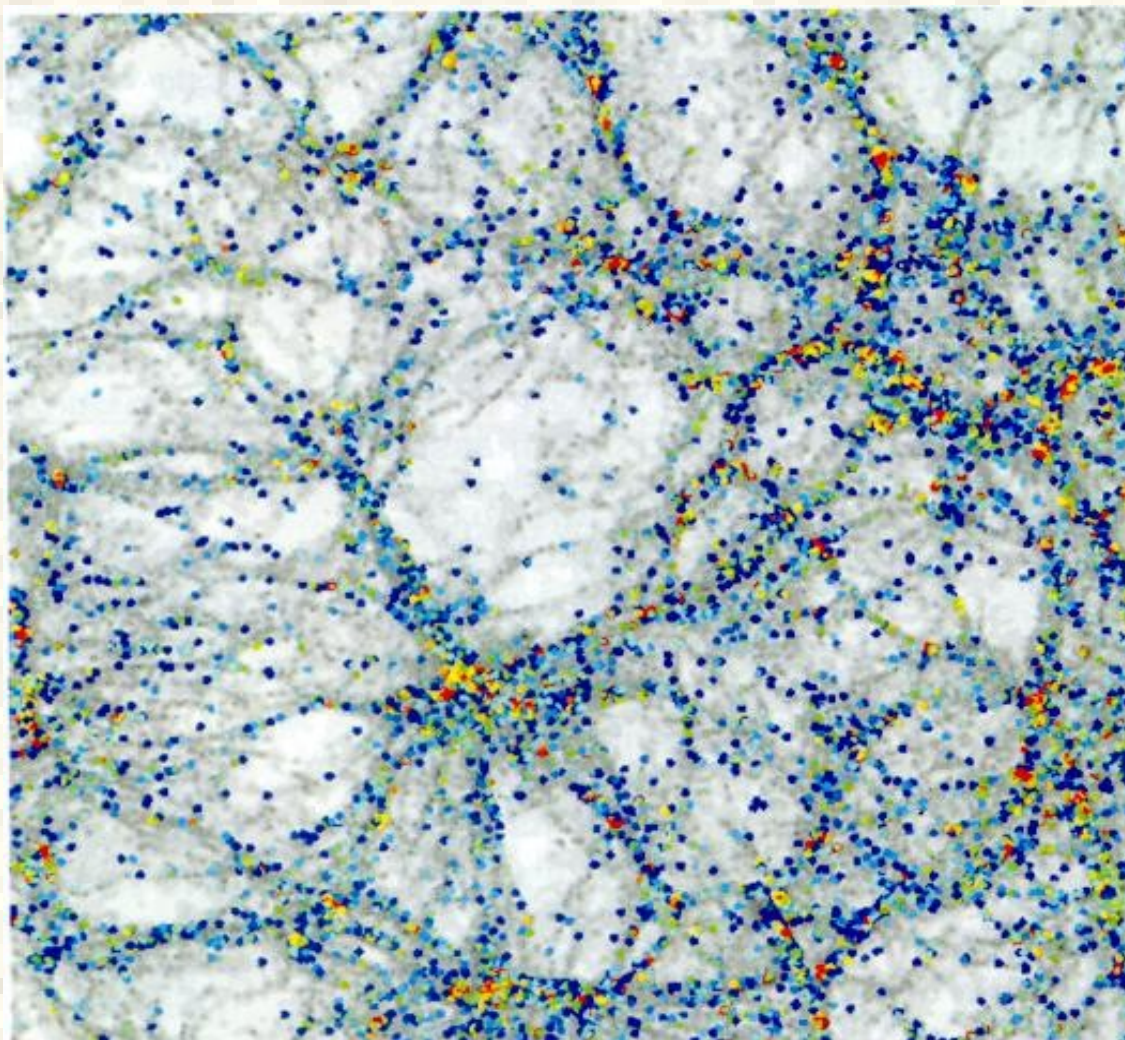
$$S^{5/2} n(S) dS = \frac{1}{4\pi} \int_0^\infty S^{5/2} \eta(S, z) dz dS, \quad \eta(S, z) = \frac{c A^2 (1+z)^\alpha \rho(L, z)}{H_0 (1 + \Omega_0 z)^{1/2}},$$

с) Распределение $p(z)$ Кэмбриджских каталогов



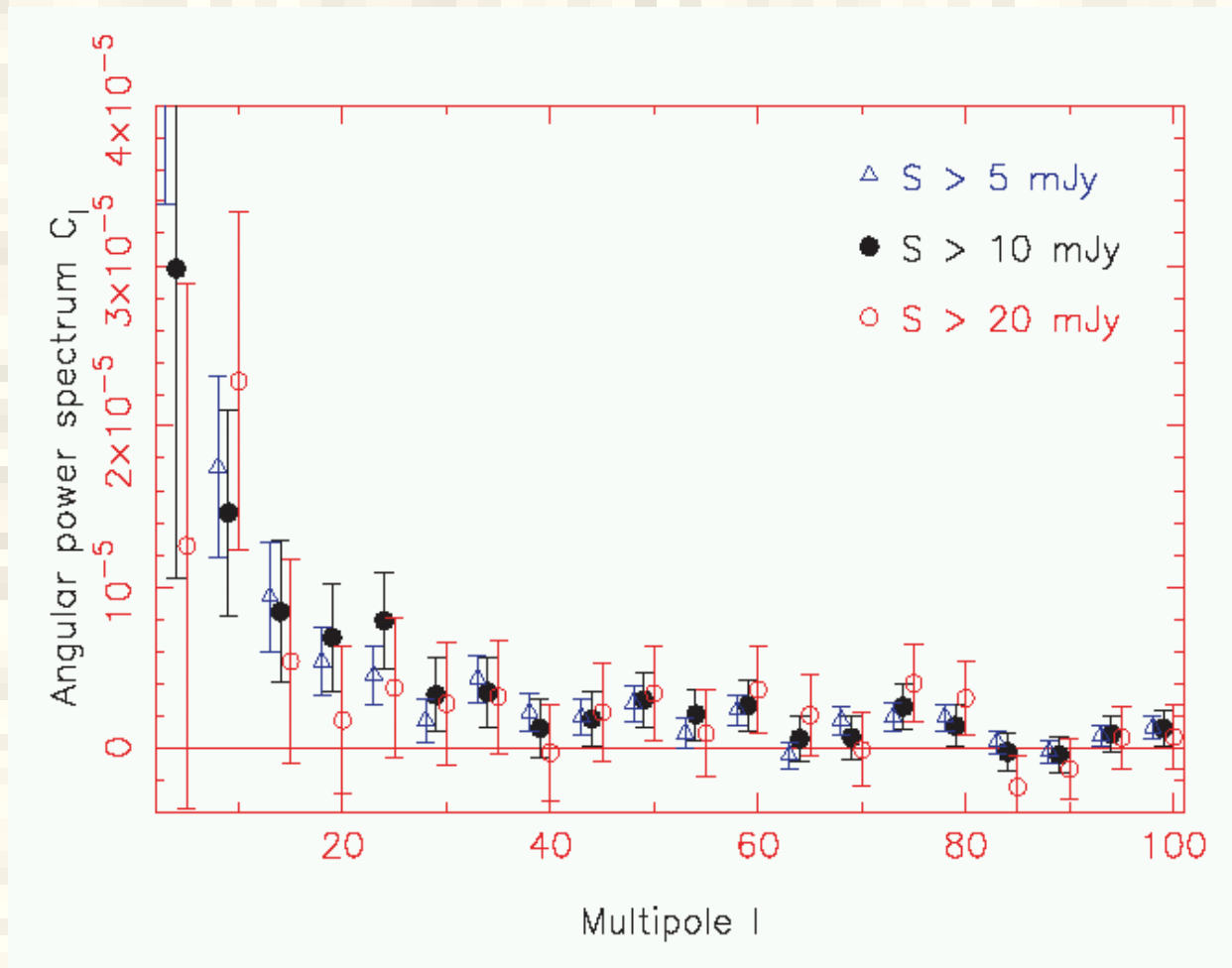
(Cruz et al., 2007)

d) Радиогалактики и
крупномасштабная структура



(Peacock, 1998)

d) Скучивание радиоисточников



(Blake et al., 2004)
данные NVSS

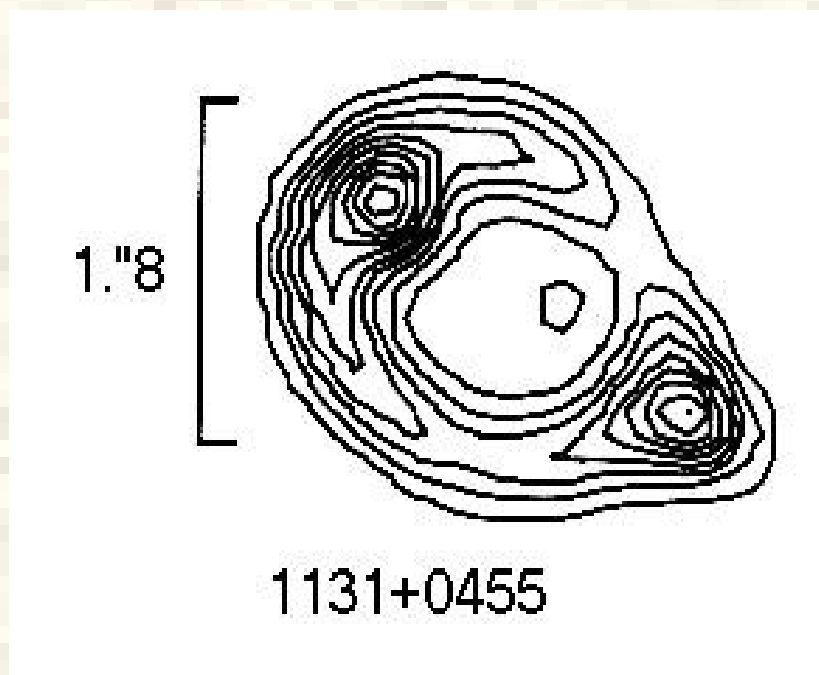
$$C_\ell \approx \frac{1}{\ell} \int P_0(k) f(\ell/k)^2 dk,$$

$$C_\ell \propto b_0^2 \sigma_8^2,$$

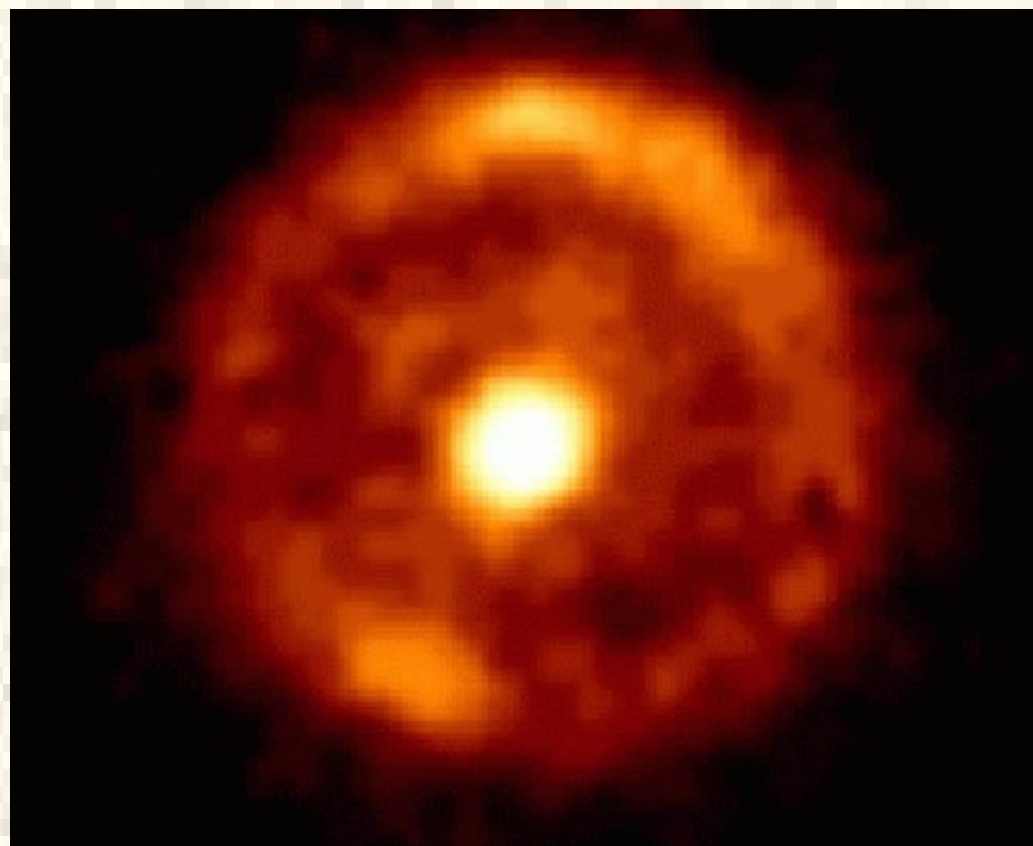
$$1.53 < b_0 \sigma_8 < 1.87.$$

Параметр скупивания: $r_0 \sim 6h^{-1} \text{ Мпс}$

e) Гравитационные линзы

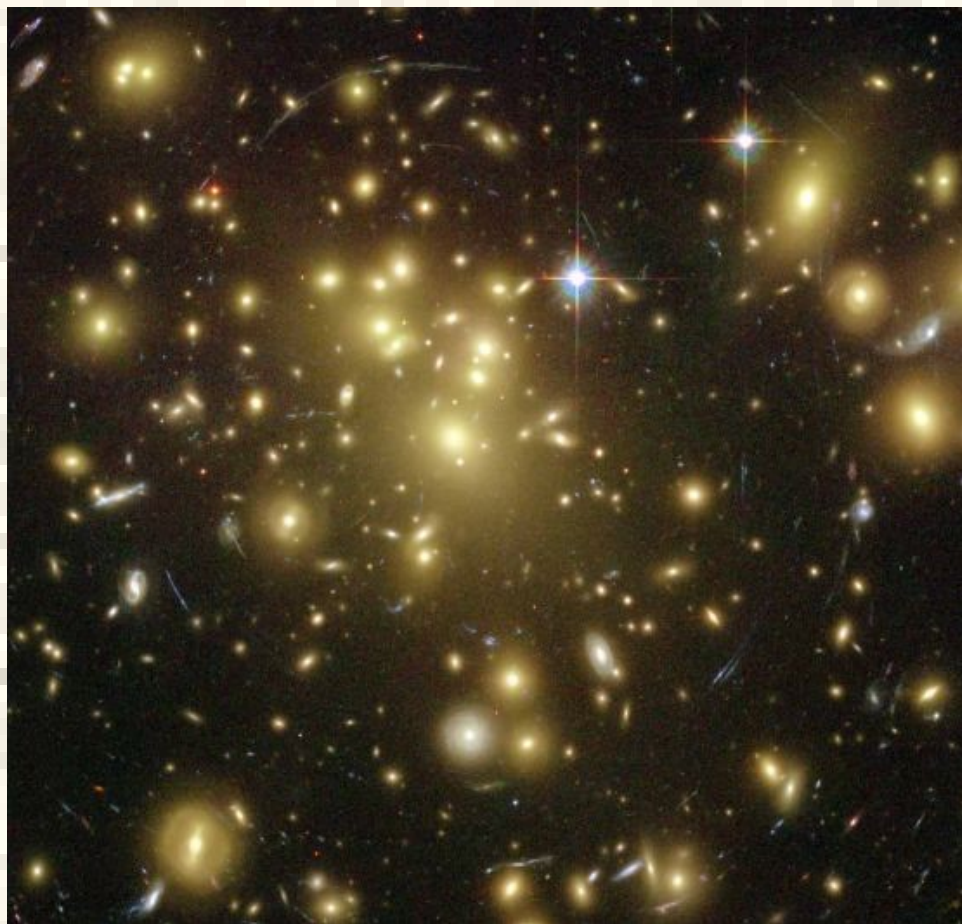


Einstein ring
(RC 1131+0456)

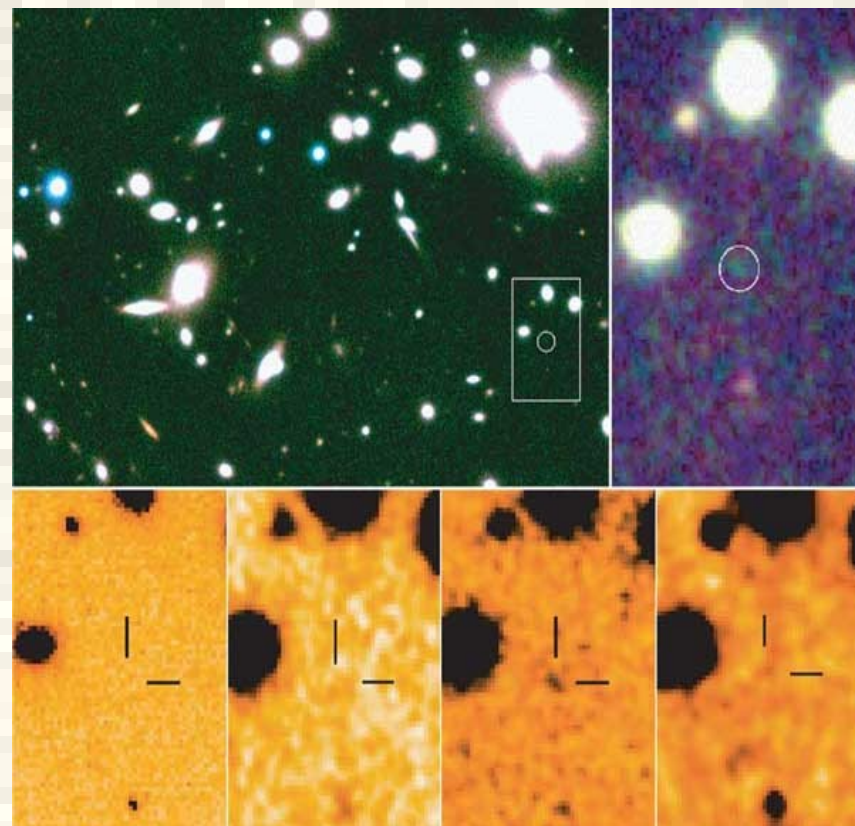


B 1938+666

e) Гравитационные линзы



Abell 1689



WFPC2/R

J

H

K

Abell 1835,
галактика с $z=10$?

e) Гравитационные линзы

Cooray, 1999:

статистика на разных z  вероятность линзирования

$$p(z, \Omega_m, \Omega_\Lambda)$$



$$\Omega_m = 0.31^{+0.27}_{-0.14} \text{ (68\% } ^{+0.12}_{-0.10}\text{)},$$

$$w < -0.55^{+0.18}_{-0.11} \text{ (68\%).}$$

f) Возраст звездных систем

$$t(z) = H_0^{-1} \int_z^{\infty} \frac{d\tilde{z}}{(1 + \tilde{z})h(\tilde{z})}$$

$$h(z) = [\Omega_\gamma(1+z)^4 + \Omega_m(1+z)^3 - (\Omega_0 - 1)(1+z)^2 + \Omega_\Lambda]^{1/2}$$

gE единый момент начала формирования $\tau < 400$ млн. лет

De Lucia et al., 2006:

Millenium: 2160^3 частиц

Иерархическая схема: слияние сотен мелких галактик

Гигантские эллиптические галактики с высокой радиосветимостью со старым звездным населением → исследование фотометрическими методами и возможность существования на $z \sim 4$ (*Pipino & Mantteucci, 2004*).

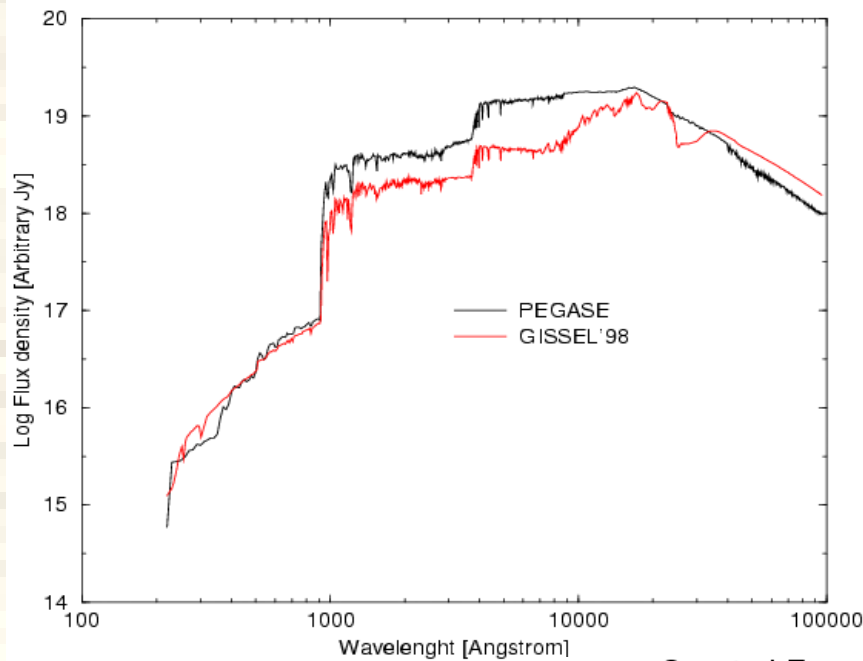
Селекция далеких gE ($z > 0.5$) с помощью радиогалактик → радиоастрономические методы (*Pedani, 2003*).

Возможность определения возраста (хронометрирования) звездных систем независимым методом (*Sandage, 1997*) среди основных достижений XX века:

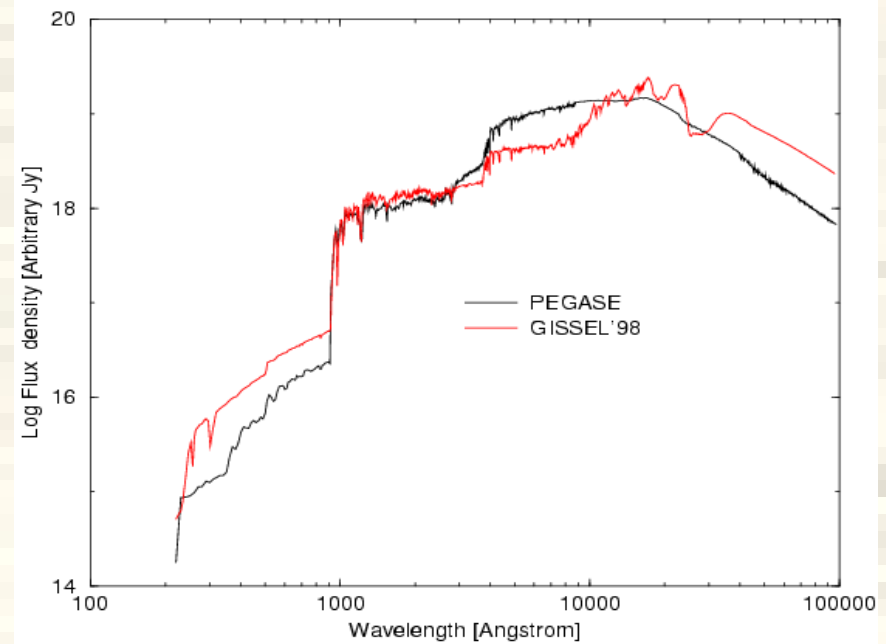
- (A) Звездное население как индикаторы возраста (с 1940),
- (B) Звездная эволюция → датировка возраста галактик (с 1950).

Две модели синтетических спектров

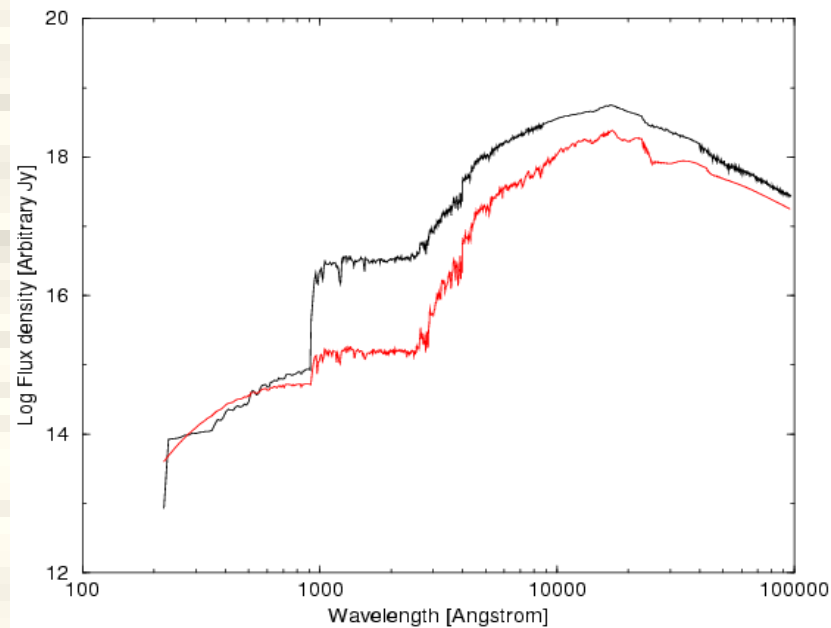
Spectral Energy Distribution for age=0.6 Gyr

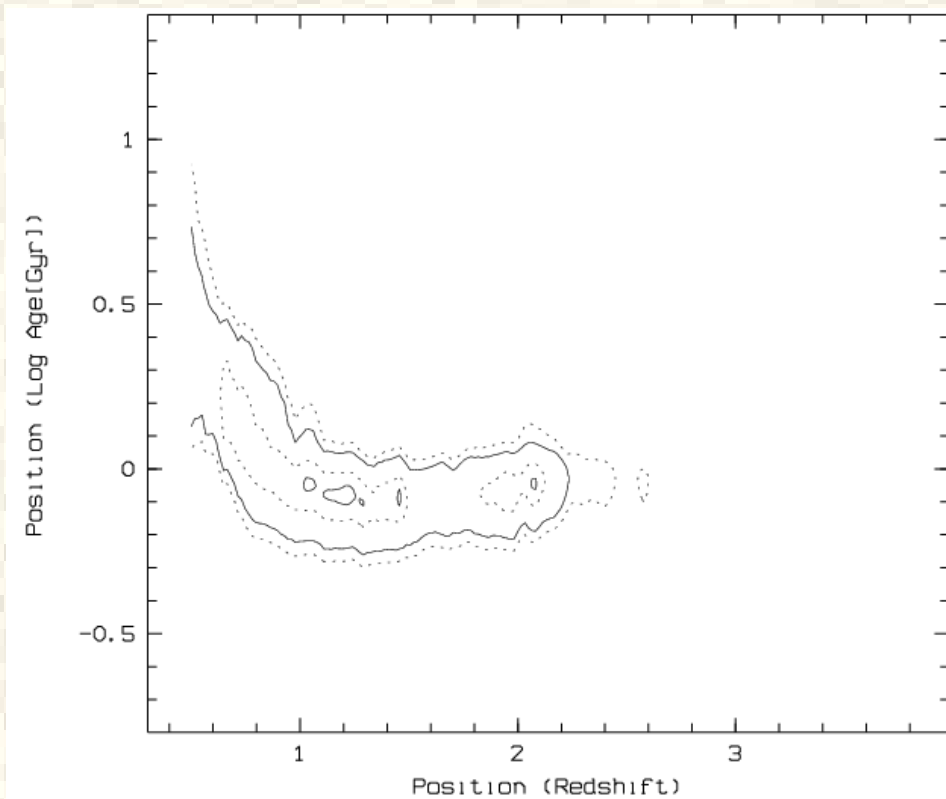
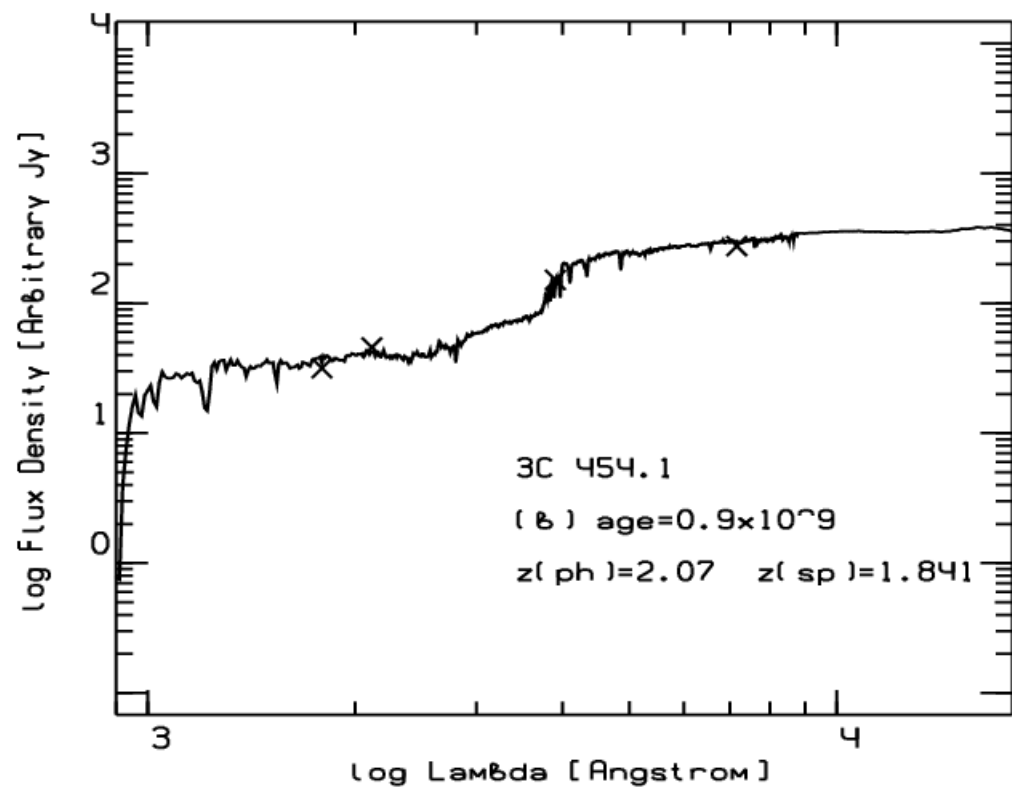


Spectral Energy Distribution for age=1 Gyr



Spectral Energy Distribution for age=10 Gyr





Огибающая $t(z)$ и определение H_0 и Ω_{Λ}
(Verkhodanov, Parijskij, Starobinsky, 2005)

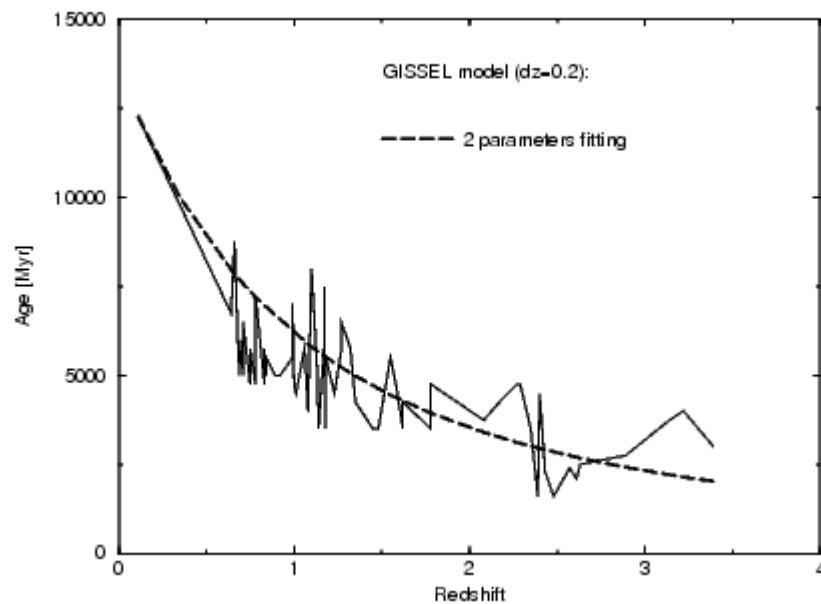
$$t(z) = \int_z^{\infty} \frac{d\tilde{z}}{(1 + \tilde{z})H(\tilde{z})},$$

$$H^2(z) = H_0^2[\Omega_m(1+z)^3 + \Omega_{\Lambda} + (1 - \Omega_0)(1+z)^2].$$

- Sample binning: $dz=0.2$, $dz=0.3$
- Take maximum in each bin

Огибающая $t(z)$ и определение H_0 и Ω_{Λ}

(Verkhodanov, Parijskij, Starobinsky, 2005)



модель	Δz	Ω_m	Ω_Λ	H_0	
SED					[Млет]
GISSSEL	0.2	0.2	0.8	77.7	1695
GISSSEL	0.3	0.2	0.8	71.5	1367

Влияние ошибок

- Металличность: ошибка ~ 100 Млет (*Jimenez, Loeb, 2002*)
- начальная функция масс мало влияет (*Bolzonella et al., 2001*),
- ошибка в выборе типа галактики,
- ошибка в построении выборки: устойчивость определения

Метод бутстрэпа:

коэффициент размножения 100, вариация H_0 порядка 10%

g) Сверхмассивные черные дыры

Проблемы формирования: $M \sim 10^9 M_{\text{sun}}$

$z = 5.19$ (*van Breugel et al., 1999*)

$z = 4.514$ (*Копылов и др., 2006*)

Возможное решение: иерархическая схема

Кстати,

$z_{\text{QSO}} = 6.43$ (*Willot et al., 2007*)

7.085 (*Morlock et al., 2011*)

$z_{\text{G}} = 6.545$ (*Stern et al., 2005*),

8.55 (*Lehnert et al., 2010*), 10.3 (?)

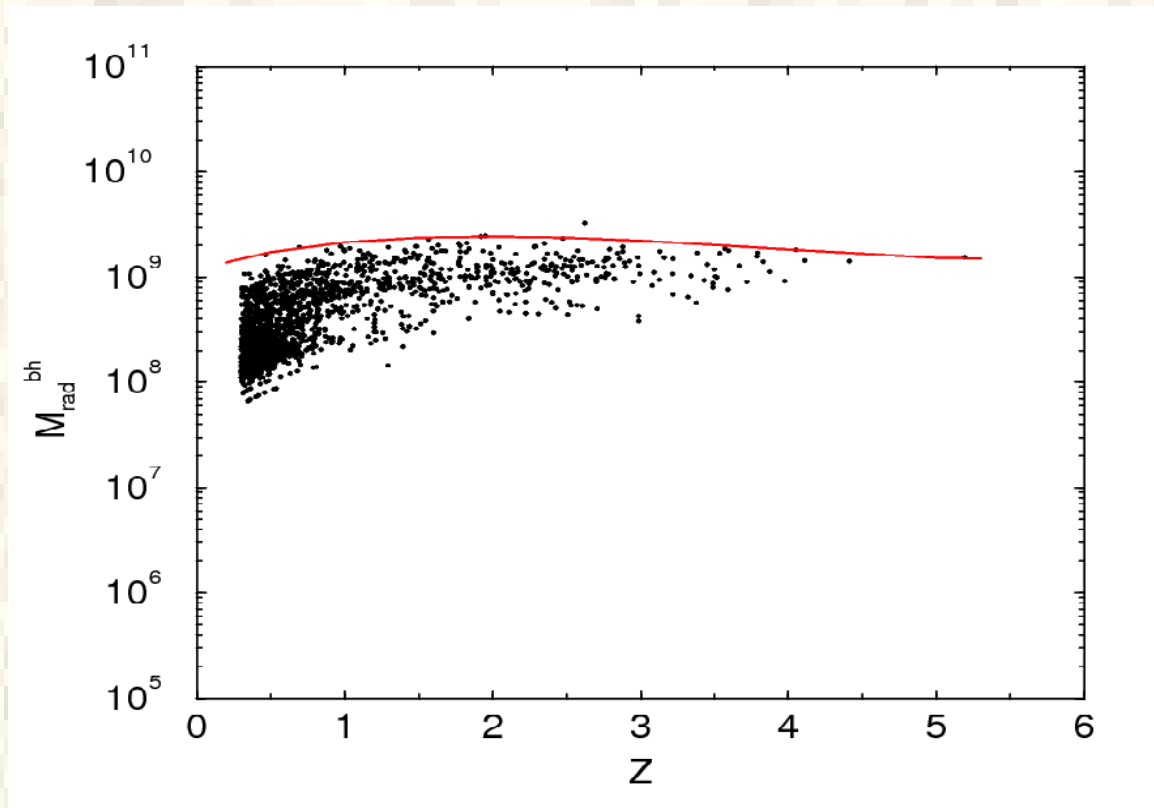
$z_{\text{gamma-b}} = 8.2; 9.4$ (?).

Фундаментальная плоскость радиогалактик

Корреляции массы, светимости, цвета,
мощности излучения в линиях, радиомощностью и т.д.
(для начала *Disney et al, 2008*)

Оценки M_{BH} для 2400 радиогалактик

(Khabibullina, Verkhodanov, 2011)



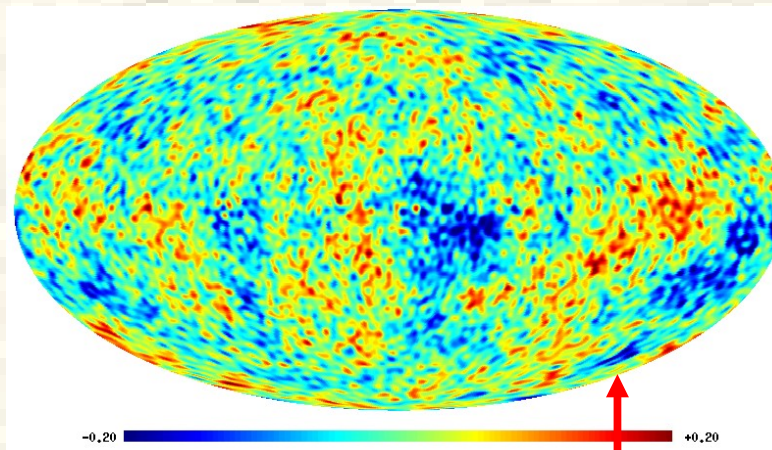
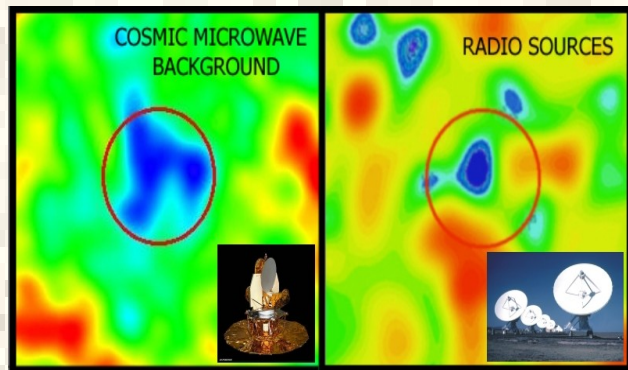
$z_{\text{max}} \sim 2$ иерархической модели соответствует (которой, по-видимому, все соответствует, даже не иерархические сценарии (*De Lucia et al.*, 2006))

h) Радиогалактики и СМВ

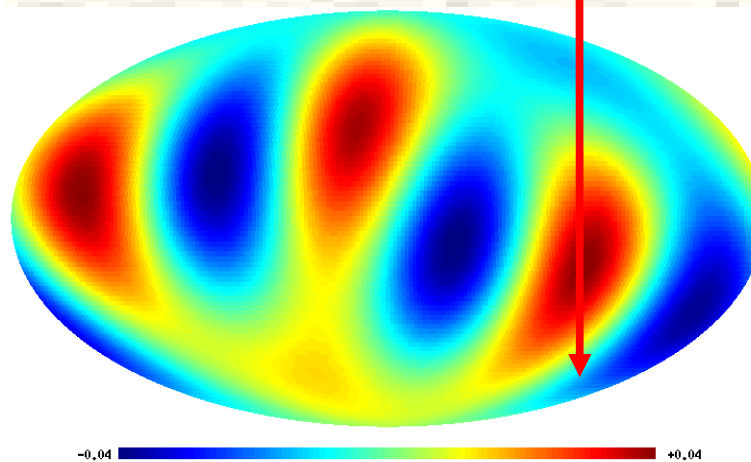
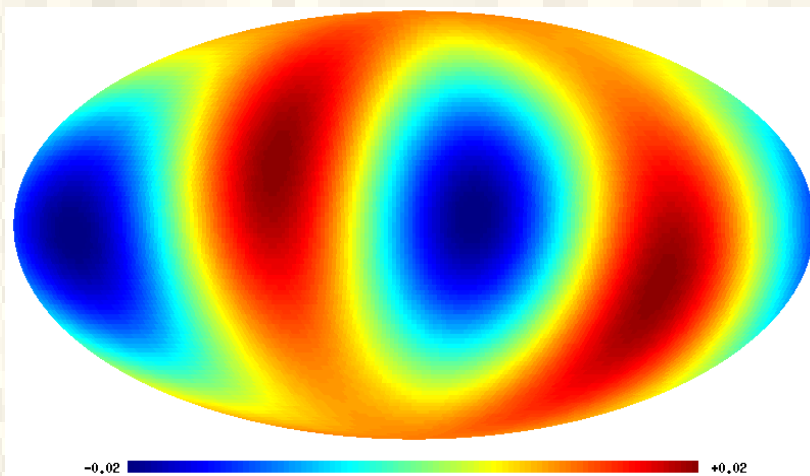
Эффект Сакса-Вольфа: $\theta > 2^\circ$
фотон в переменном грав.потенциале

$$\Delta^T(\omega) = \frac{\Delta T(\omega)}{T_0} = -2 \int d\eta \dot{\Phi}(\eta, \omega),$$

(Rudnick et al., 2007)



Плоскость
Галактики ?



Ось зла ?

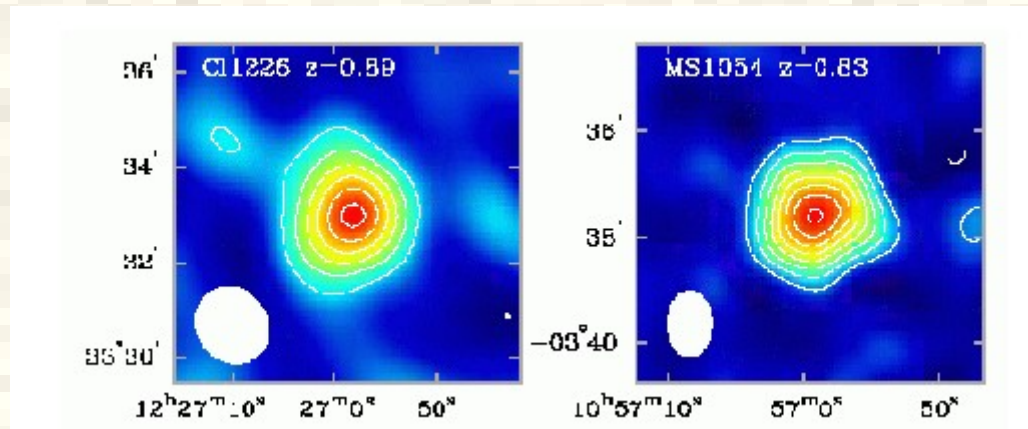
А такой ли вообще квадруполь ?...
(Naselsky, Verkhodanov, 2007
Doroshkevich, Verkhodanov, 2011)

- 1) Эффект Сакса-Вольфа ?
- 2) Текстура ?
- 3) Артефакт ?



h) Радиогалактики и СМВ

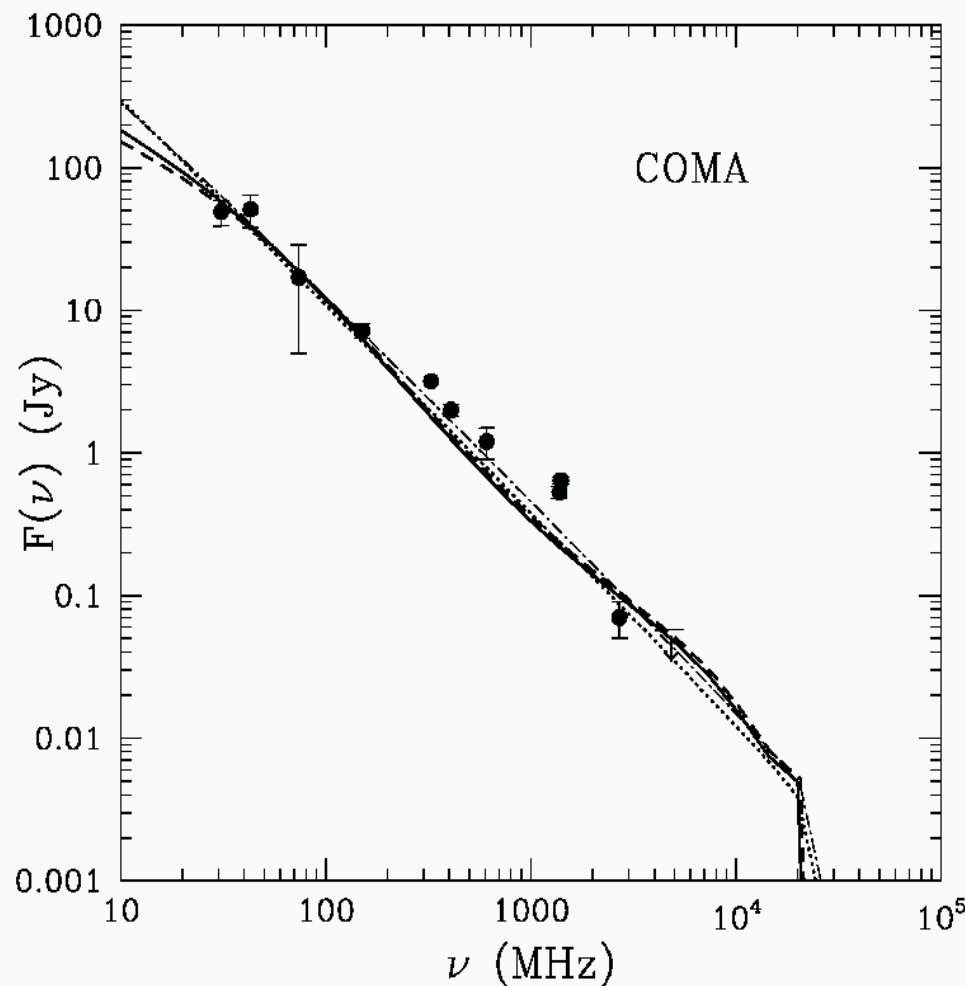
Эффект Зельдовича-Сюняева: $\theta < 5'$
обратный Комптон-эффект



$$T(M, z) = T_{15} h^{2/3} \left[\frac{\Omega_0 \Delta_c(\Omega_0, z)}{180} \right]^{1/3} \left(\frac{M}{M_{15}} \right) (1 + z),$$

i) Темная материя

Спектр частиц при аннигиляции нейтралино
(Colafrancesco & Mele, 2001)



Распад с доминированием
фермионов: $\chi\chi \rightarrow f\bar{f}$
в магнитных полях:
1) однородных (15 мкГс),
2) радиальных от 8 Гс

$$M_\chi \geq 54.6 \text{ ГэВ}$$

нейтралино



Сколько радиогалактик на небе ?

Тип населения	Предельная плотность потока					
	10 μ Ян		1 μ Ян		100 нЯн	
	N / град ²	Площадь покрытия	N / град ²	Площадь покрытия	N / град ²	Площадь покрытия
FRI	1.207	4 · 10 ⁻²	4.028	0.136	10.162	0.340
FR II	55	3 · 10 ⁻³	56	3 · 10 ⁻³	56	3 · 10 ⁻³
гал. со звездообр.	7.361	2 · 10 ⁻³	52.798	2 · 10 ⁻²	135.806	0.05
Всего	8.623	5 · 10 ⁻²	56.822	0.162	146.024	0.394
Миним. разрешение (сек. дуги)	0".86		0".17		0".07	
% источников с наложением (по линии наблюдения)	10%		25%		60%	

Красное смещение	Предельная плотность потока								
	10 μ Ян			1 μ Ян			100 нЯн		
	n1	n2	n3	n1	n2	n3	n1	n2	n3
$z < 1$	718	2	2.556	1.636	2	9.759	2.570	2	14.238
$z < 3$	1.145	21	6.740	3.202	21	42.865	6.551	21	100.453
$z < 5$	1.190	42	7.361	3.644	42	52.798	7.955	42	135.806
$z > 5$	17	13	0	384	13	0	2.207	13	0

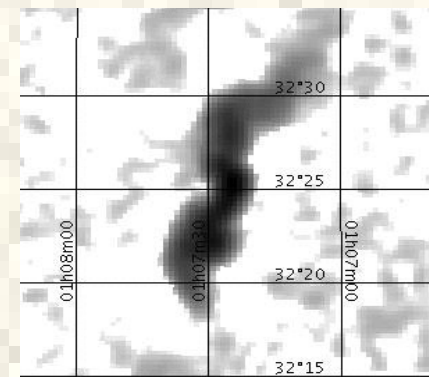
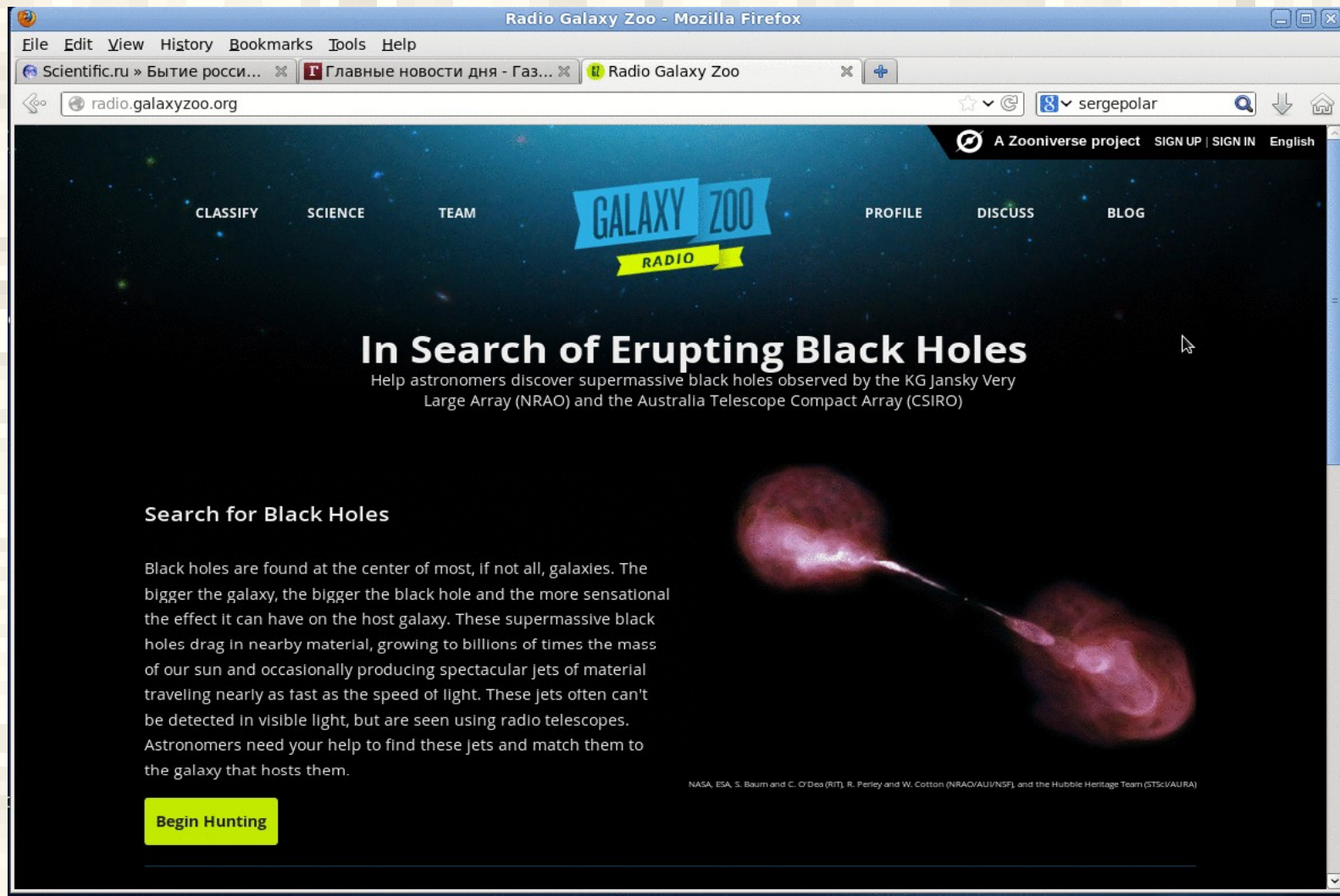
$$n1 = N(FRI)$$

$$n2 = N(FRII)$$

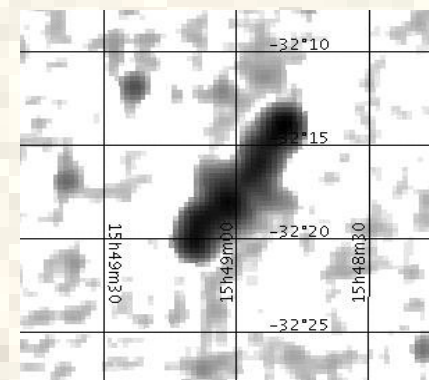
$$n3 = N(SF)$$

(Jackson, 2004)

Эволюция СМЧД через морфологию РГ: Проект «Radio Galaxy Zoo»



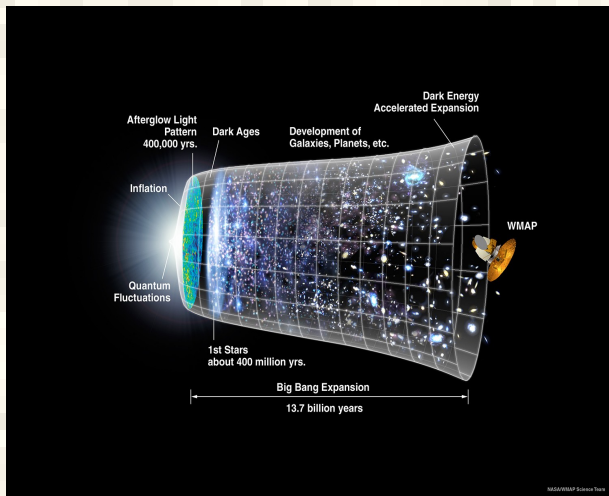
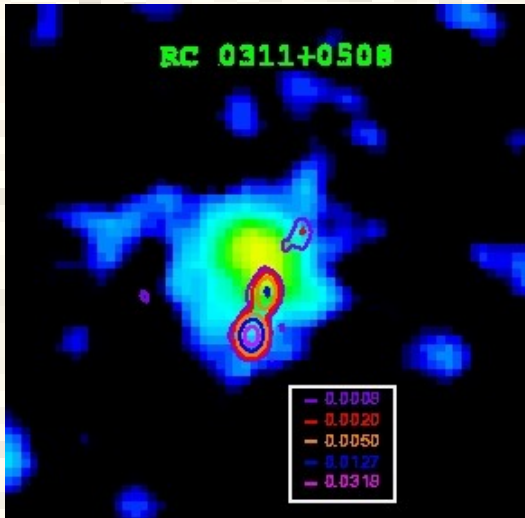
j010725+322439



j154901-321747

Что дальше ?

SKA, ALMA, LOFAR, Planck, LISA, OVL... ?



Old Universe – **New** Numbers

$$\Omega_{\text{tot}} = 1.02^{+0.02}_{-0.02}$$

$$w < -0.78 \text{ (95\% CL)}$$

$$\Omega_{\Lambda} = 0.73^{+0.04}_{-0.04}$$

$$\Omega_b h^2 = 0.0224^{+0.0009}_{-0.0009}$$

$$\Omega_b = 0.044^{+0.004}_{-0.004}$$

$$n_b = 2.5 \times 10^{-7} {}^{+0.1 \times 10^{-7}}_{-0.1 \times 10^{-7}} \text{ cm}^{-3}$$

$$\Omega_m h^2 = 0.135^{+0.008}_{-0.009}$$

$$\Omega_m = 0.27^{+0.04}_{-0.04}$$

$$\Omega_{\nu} h^2 < 0.0076 \text{ (95\% CL)}$$

$$m_{\nu} < 0.23 \text{ eV (95\% CL)}$$

$$T_{\text{cmb}} = 2.725^{+0.002}_{-0.002} \text{ K}$$

$$n_{\gamma} = 410.4^{+0.9}_{-0.9} \text{ cm}^{-3}$$

$$\eta = 6.1 \times 10^{-10} {}^{+0.3 \times 10^{-10}}_{-0.2 \times 10^{-10}}$$

$$\Omega_b \Omega_m^{-1} = 0.17^{+0.01}_{-0.01}$$

$$\sigma_8 = 0.84^{+0.04}_{-0.04} \text{ Mpc}$$

$$\sigma_8 \Omega_m^{0.5} = 0.44^{+0.04}_{-0.05}$$

$$A = 0.833^{+0.086}_{-0.083}$$

$$n_s = 0.93^{+0.03}_{-0.03}$$

$$dn_s/d \ln k = -0.031^{+0.016}_{-0.018}$$

$$r < 0.71 \text{ (95\% CL)}$$

$$z_{\text{dec}} = 1089^{+1}_{-1}$$

$$\Delta z_{\text{dec}} = 195^{+2}_{-2}$$

$$h = 0.71^{+0.04}_{-0.03}$$

$$t_0 = 13.7^{+0.2}_{-0.2} \text{ Gyr}$$

$$t_{\text{dec}} = 379^{+8}_{-7} \text{ kyr}$$

$$t_r = 180^{+220}_{-80} \text{ Myr (95\% CL)}$$

$$\Delta t_{\text{dec}} = 118^{+3}_{-2} \text{ kyr}$$

$$z_{\text{eq}} = 3233^{+194}_{-210}$$

$$\tau = 0.17^{+0.04}_{-0.04}$$

$$z_r = 20^{+10}_{-9} \text{ (95\% CL)}$$

$$\theta_A = 0.598^{+0.002}_{-0.002}$$

$$d_A = 14.0^{+0.2}_{-0.3} \text{ Gpc}$$

$$l_A = 301^{+1}_{-1}$$

$$r_s = 147^{+2}_{-2} \text{ Mpc}$$



“Big Trio” Program

RATAN-600



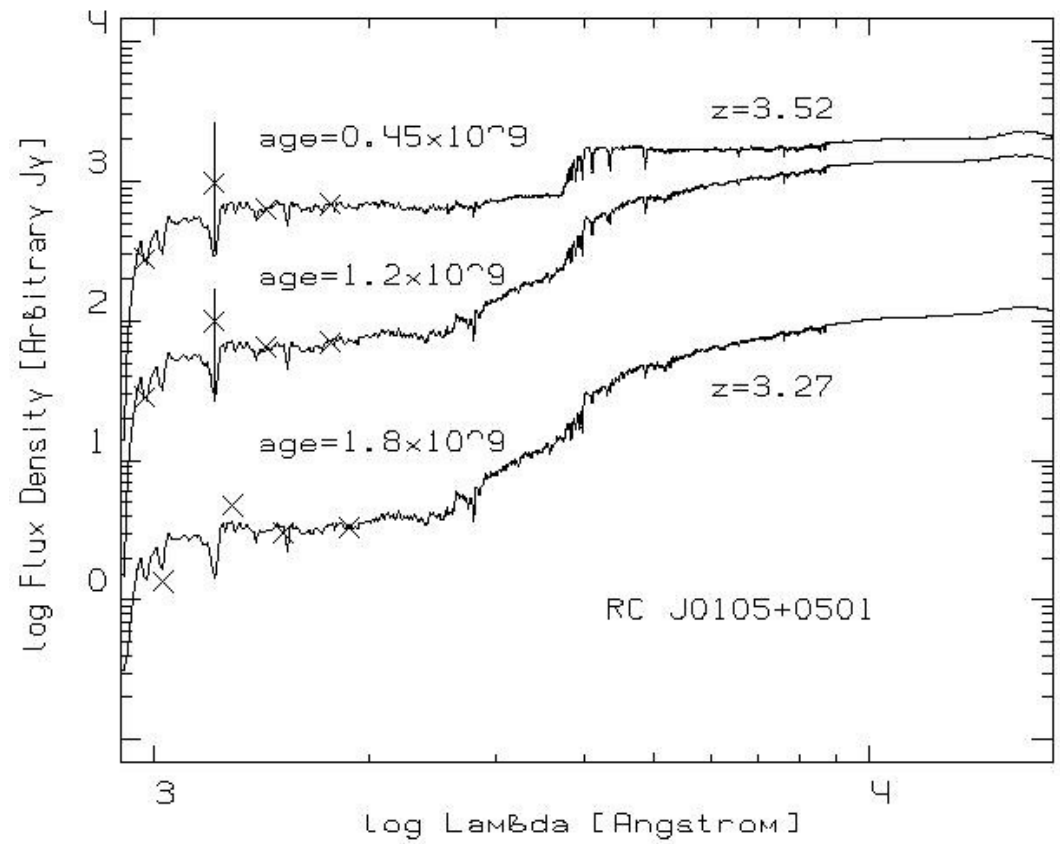
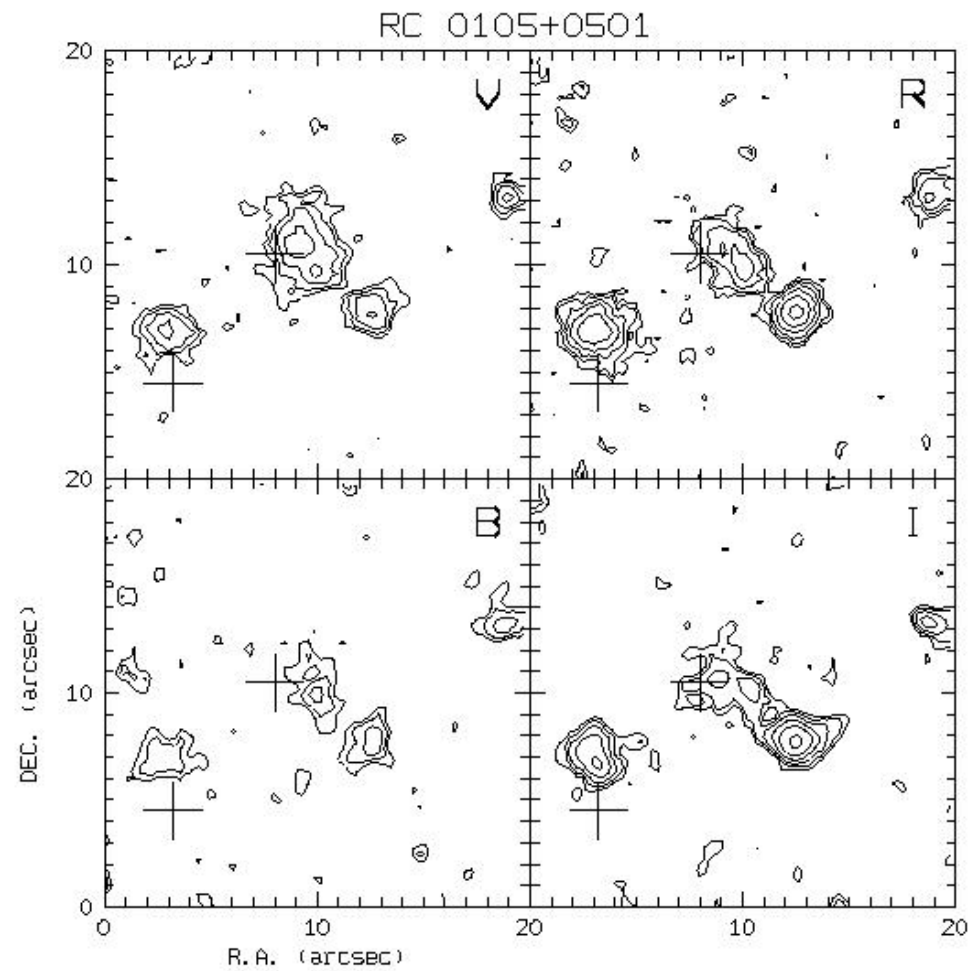
VLA



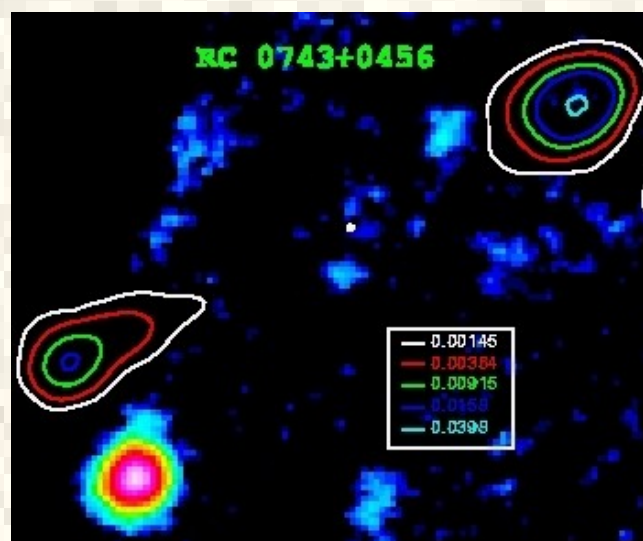
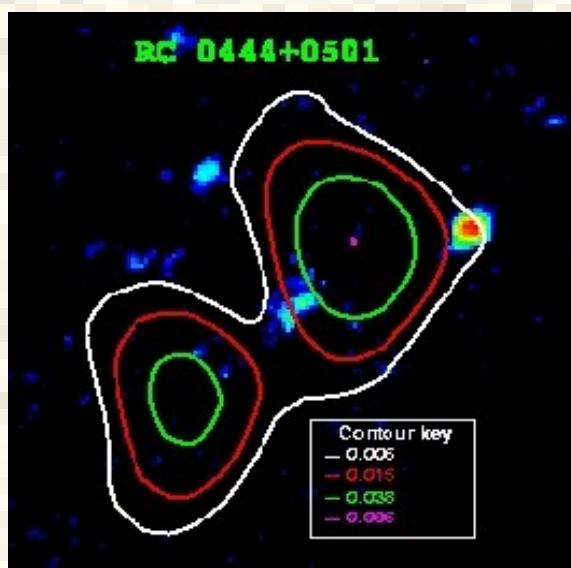
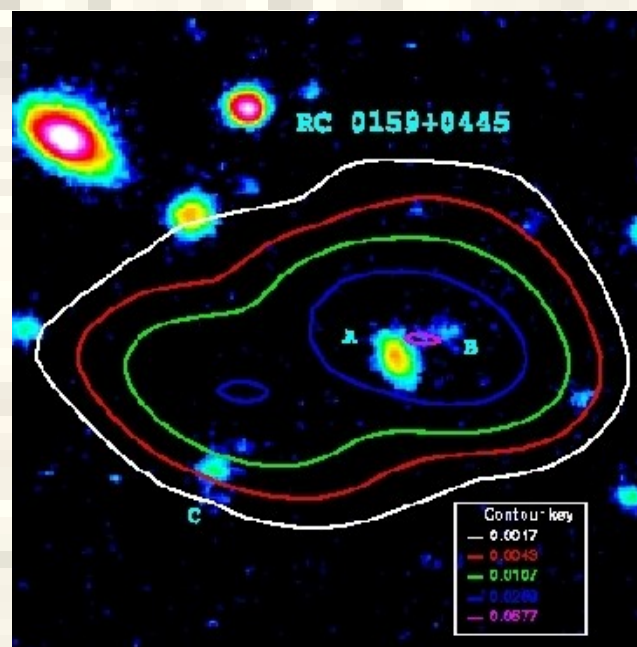
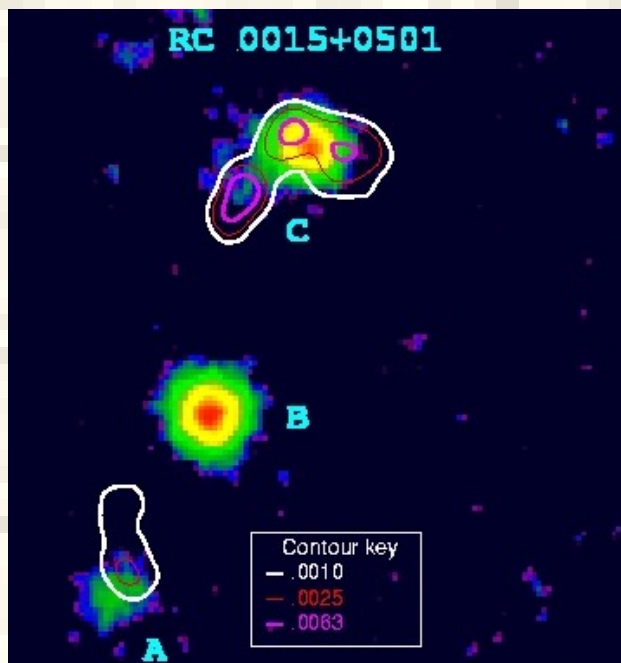
BTA



“Big Trio” program

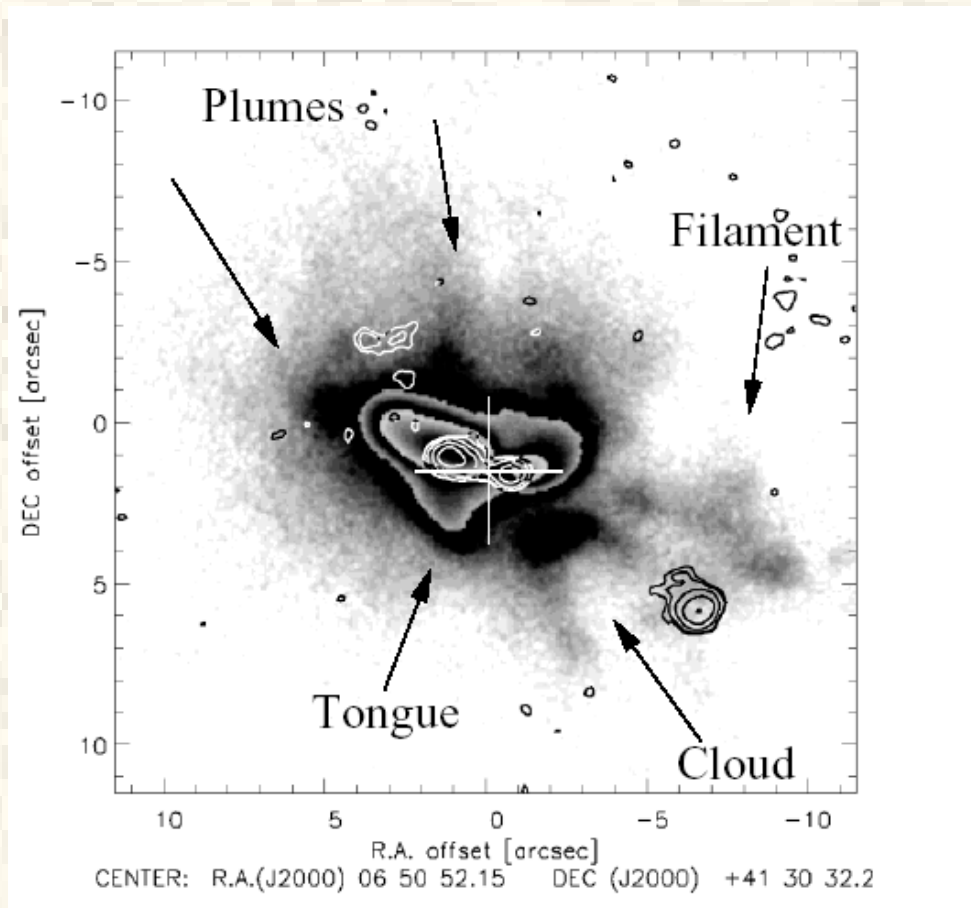


Проект “Большое Трио”



Эволюция радиогалактик

- $6 > z > 3$ - эпоха формирования протоскоплений, радиогалактики имеют клочковатую структуру
- $3 > z > 2$ – эпоха слияния и формирования гигантских эллиптических галактик
- $z < 2$ – эпоха сформировавшихся радиогалактик



Ly-alpha image (Reuland et al., 2003)

$z = 3.798$



Wide-Field VLA Radio Image of the Galactic Center

$\lambda = 90\text{ cm}$

(Kassim et al. 1999, LaRosa et al. 1999)

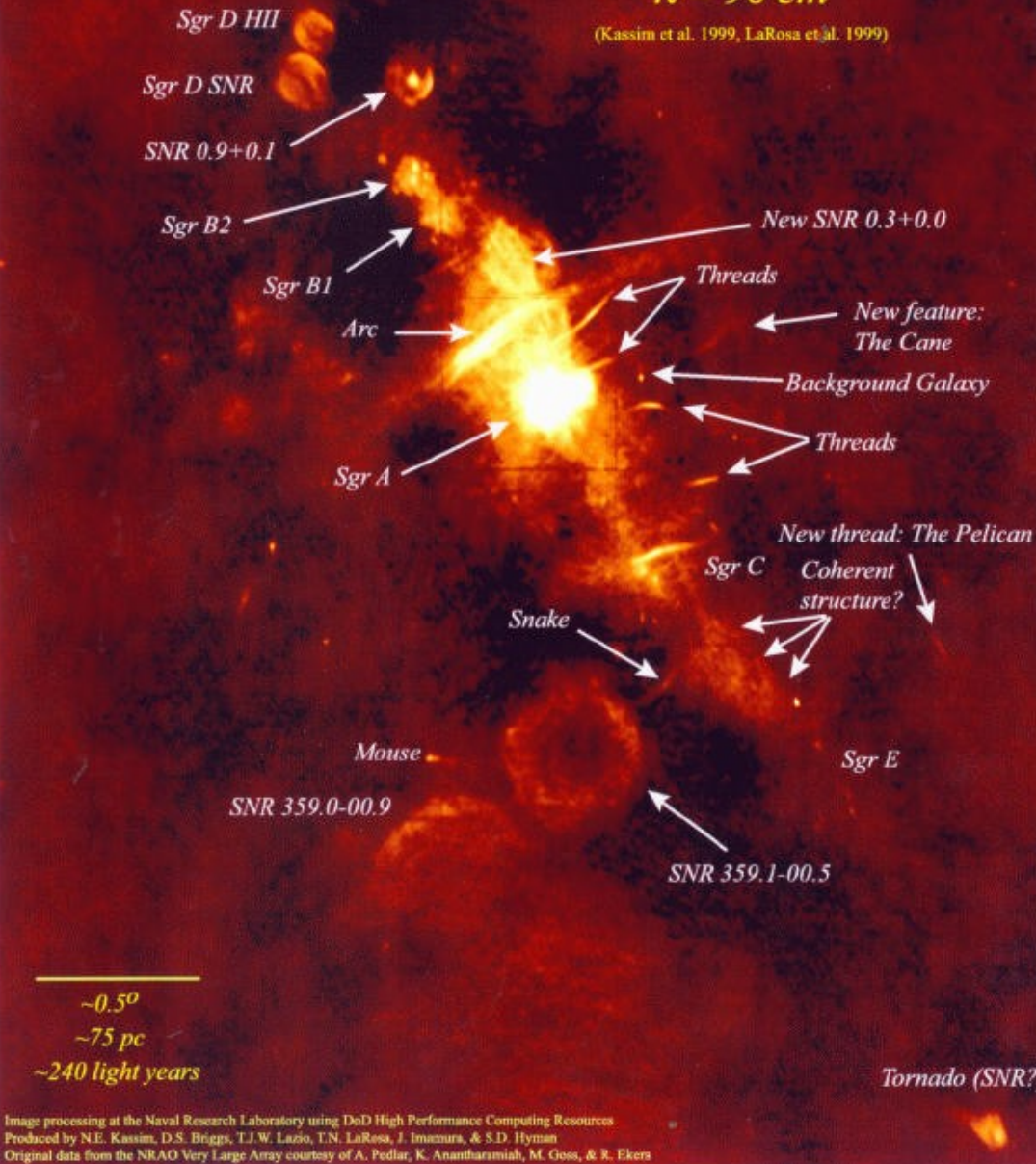


Image processing at the Naval Research Laboratory using DoD High Performance Computing Resources
Produced by N.E. Kassim, D.S. Briggs, T.J.W. Lazio, T.N. LaRosa, J. Imamura, & S.D. Hyman
Original data from the NRAO Very Large Array courtesy of A. Pedlar, K. Anantharamiah, M. Goss, & R. Ekers