

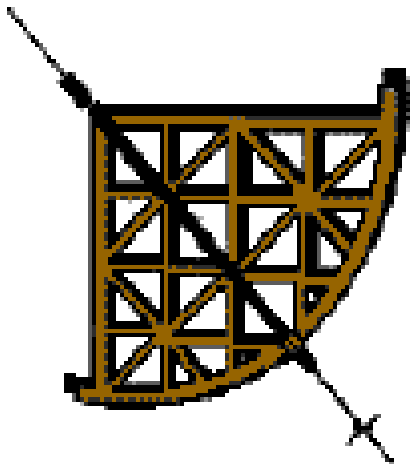
Introduzione alla Cosmologia Fisica Lezione 12

Le Galassie e la misura della materia scura

Giorgio G.C. Palumbo

Università degli Studi di Bologna

Dipartimento di Astronomia



Proprietà delle Galassie

- dimensione apparente (gradi) & distanza \rightarrow dimensione reale (kpc)
- brillantezza apparente & distanza \rightarrow luminosità (L_{sole})
- dimensione & velocità rotazionale \rightarrow massa (M_{sole})
- Grande intervallo: (paragone con Via Lattea)
Diametro : $0.01 - 5 \times D_{\text{VL}}$ (~ 30 kpc)
Massa : $10^{-4} - 50 \times M_{\text{VL}}$ ($\sim 10^{11} M_{\text{sole}}$)
Luminosity : $10^{-5} - 10 \times L_{\text{VL}}$ ($\sim 10^{10} L_{\text{sole}}$)

Le galassie più grandi sono Es Giganti

Le più piccole Es e Irr. nane

Le galassie massive sono molto rare $\times 1$

Le galassie piccole sono comuni $\times 1000$

M87 E Gigante



Collisioni/Merger delle Galassie

Molto comuni : (separazione $\sim 20 \times$ dimensioni)

Simulazioni seguono $\sim 10^6$ stelle

Le stelle non si scontrano mai: sono troppo piccole

mutua attrazione gravitazionale distorce
la forma delle galassie

→ bracci “mareali”; anelli; shells; disordine

merger: spirale + spirale → ellittica

cannibalismo : galassia “mangia” le altre

episodi di formazione di stelle:

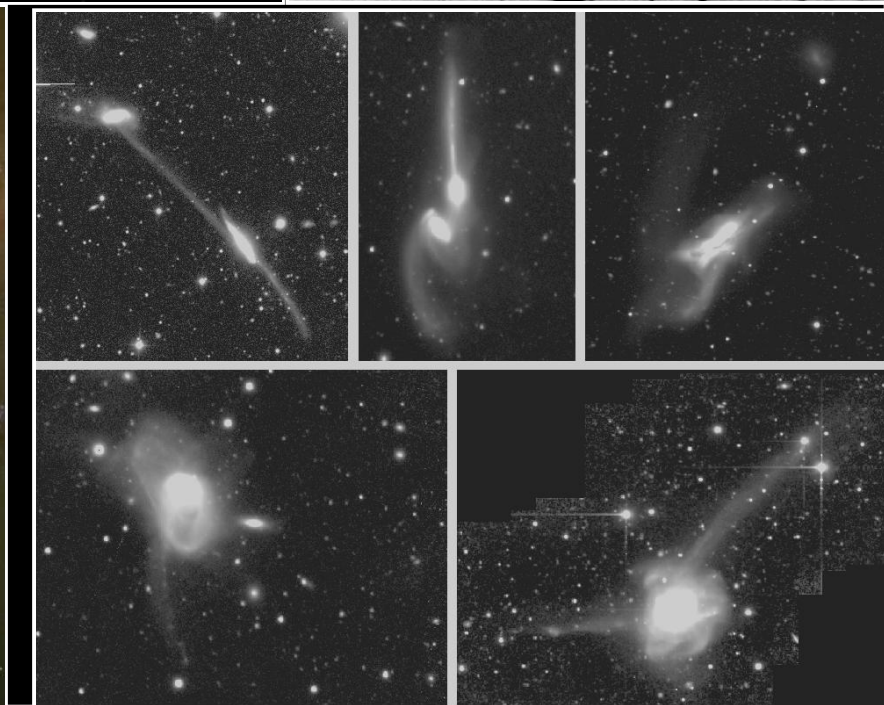
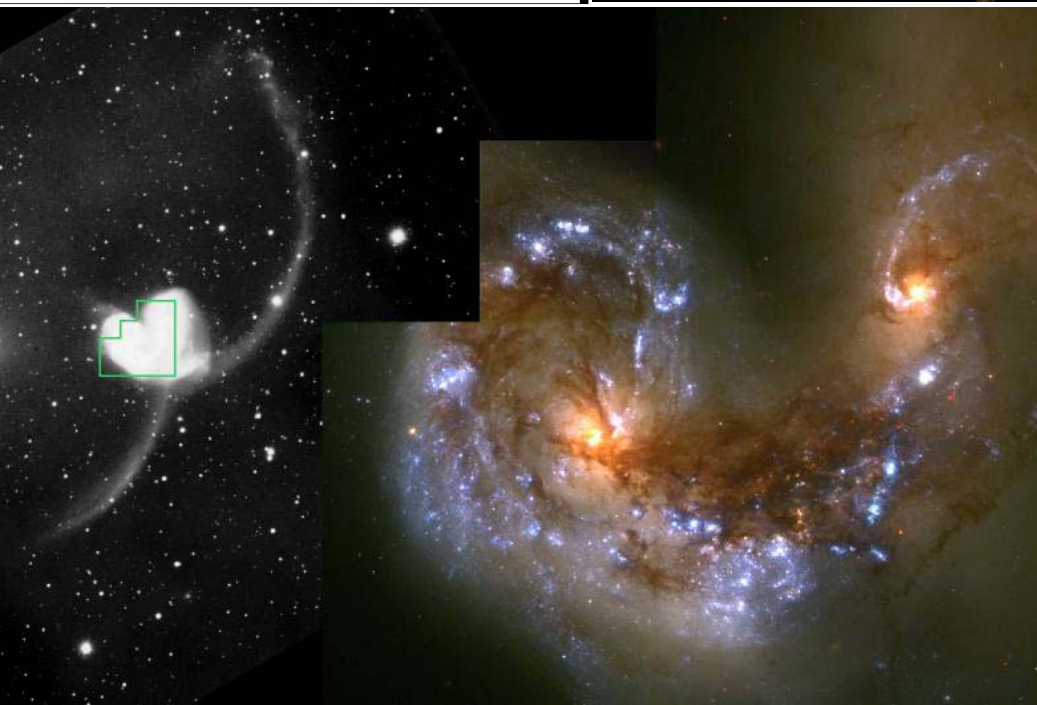
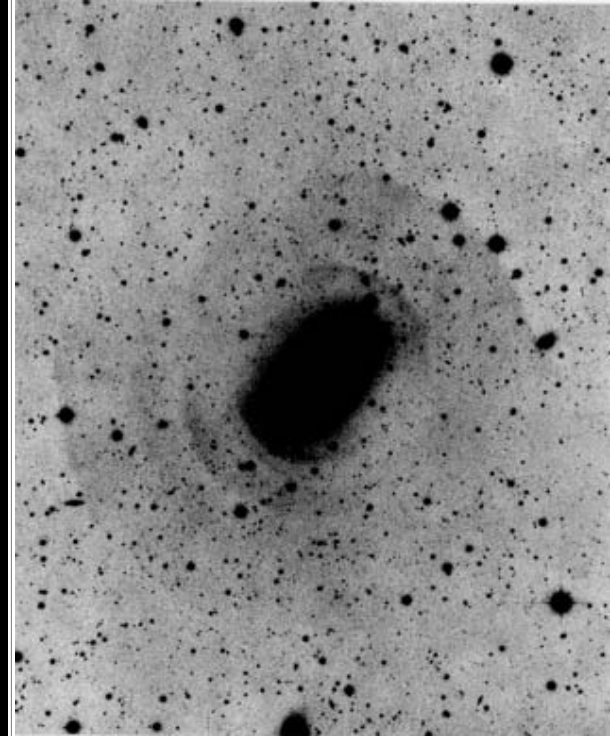
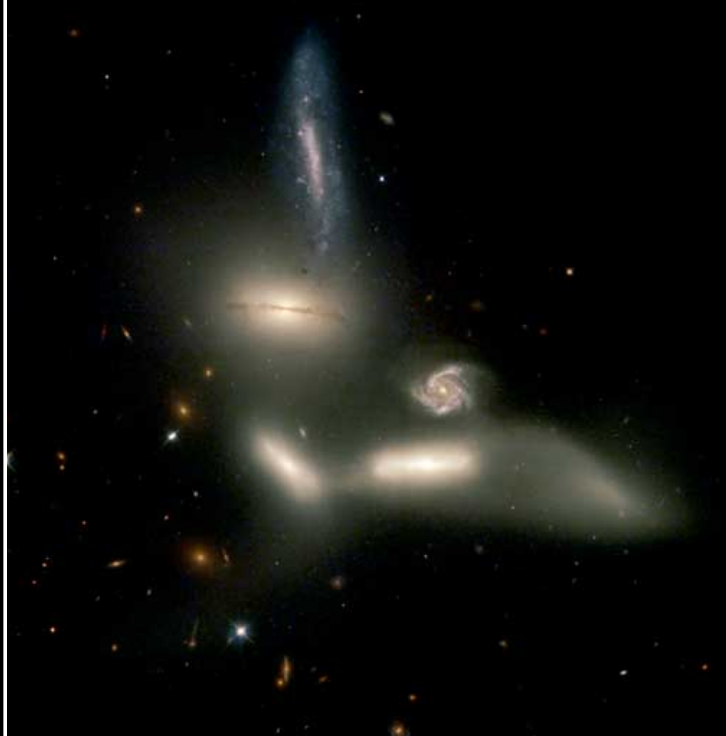
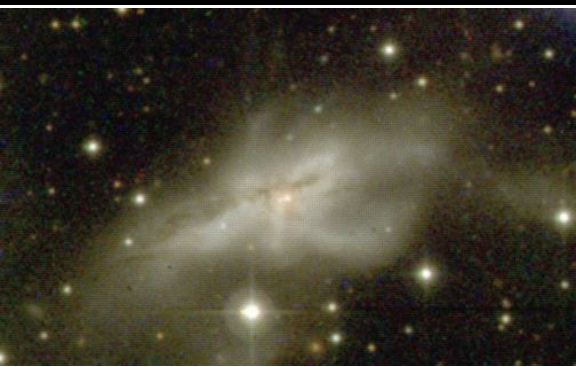
gas → centro → starburst

O, B + polvere → sorgenti IR luminose

Supernovae possono espellere il gas dalla
galassia



Esempi





Le Galassie sono

molto grandi

Sistema Solare = cristallo di sale

- Galassia = Roma

Le Galassie sono molto vuote

- Sole = virus (micron)
- @ sole : spaziatura = 1m
- @ nucleo : spaziatura = 1cm

Senza Collisioni

- Media scattering tra 2-corpi ~ 1 arcsecondo
- Significativo dopo 10^4 orbite = 100 x età dell' Universo
- Le stelle “Sentono” un potenziale liscio



Componenti

- **Materia Scura**
 - Domina su grande scala
 - Non-barionica & senza collisioni
- **Stelle**
 - Circa 10% della massa totale
 - Domina la parte luminosa
- **Gas**
 - Circa 10% della massa in stelle
 - Collisioni → perde energia per radiazione
 - Giace al fondo della buca di potenziale e fa stelle
 - Piano del Disco : gas genera le stelle del disco (“freddo” con piccole dimensioni di scala)
 - Nucleo/bulge : genera potenziali profondi & e ripidi
 - Storicamente TUTTE le stelle si sono formate dal gas.



Componenti delle Galassie

- **Nucleo**
- **Bulge**
- **Disco**
- **Alone**



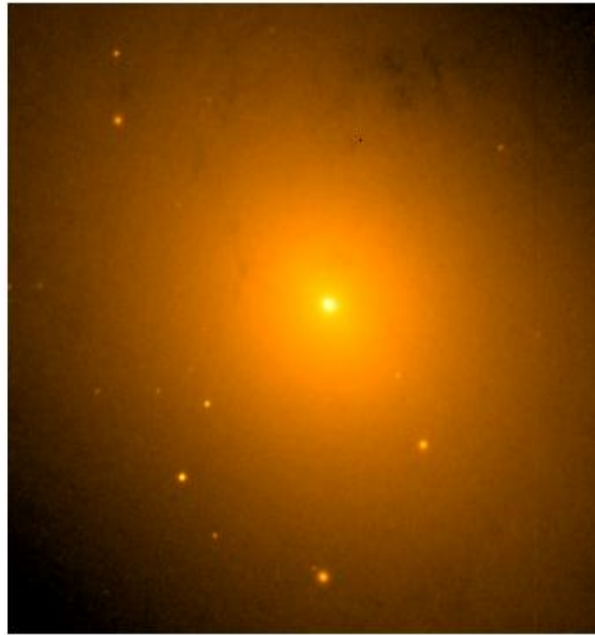
M 31

The Andromeda Galaxy



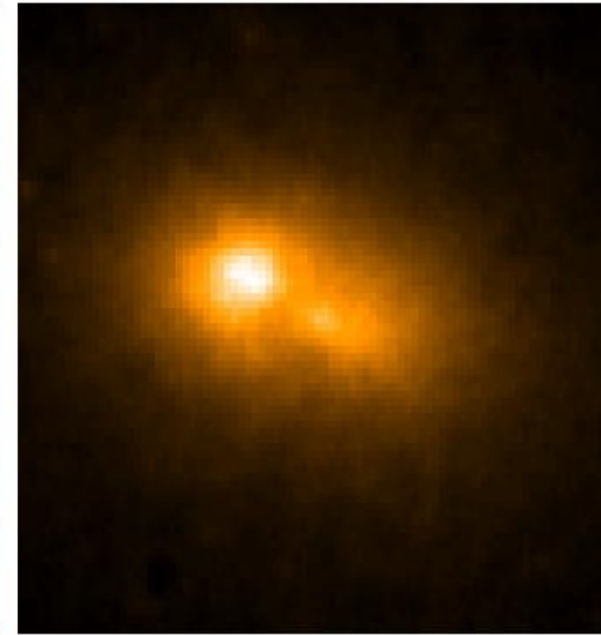
40,000 LY

Ground View of Galaxy



2,000 LY

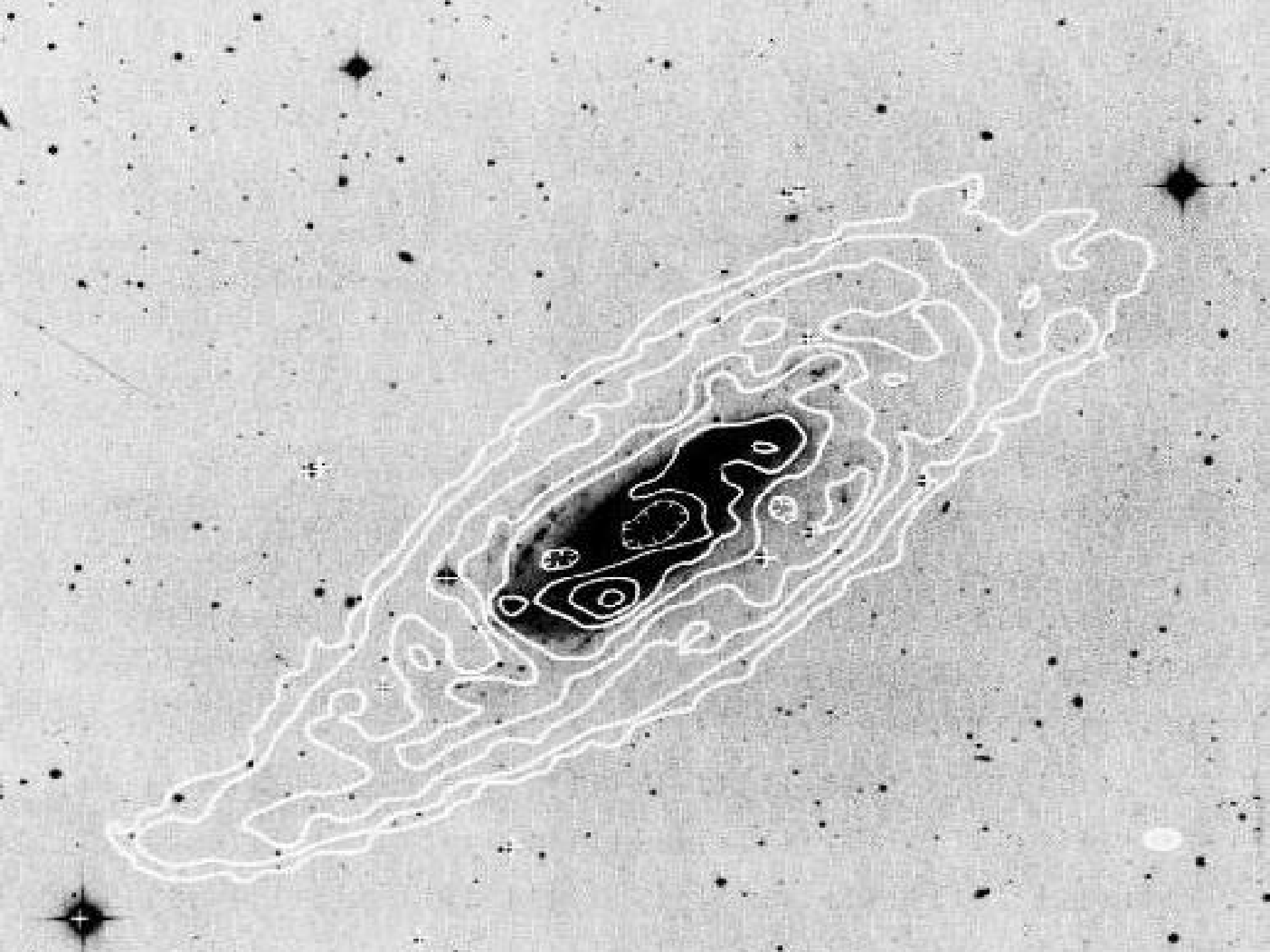
Ground View of Galaxy Core

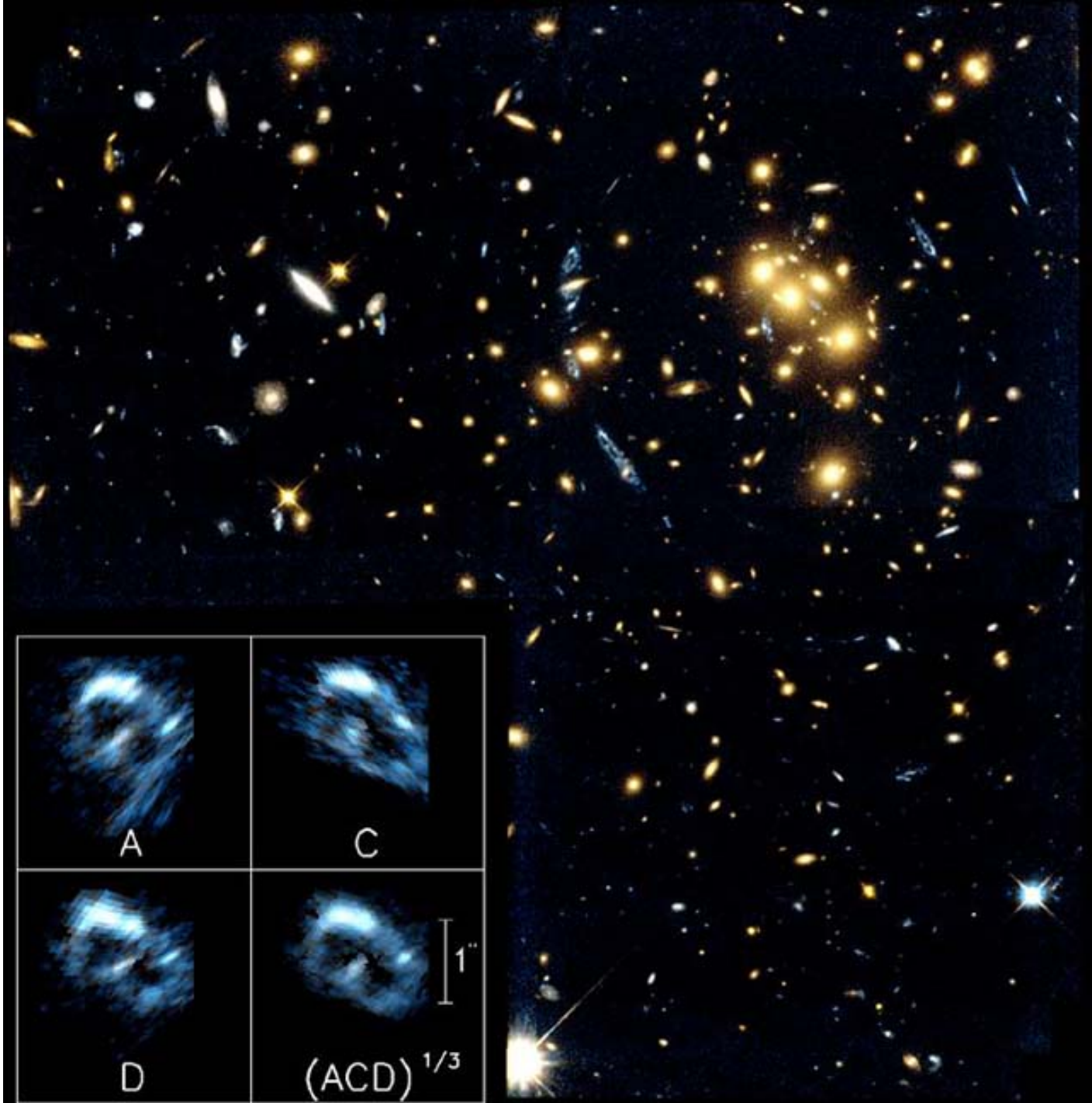


40 LIGHT-YEARS

HST View of Galaxy Nucleus







Bulges & Dischi

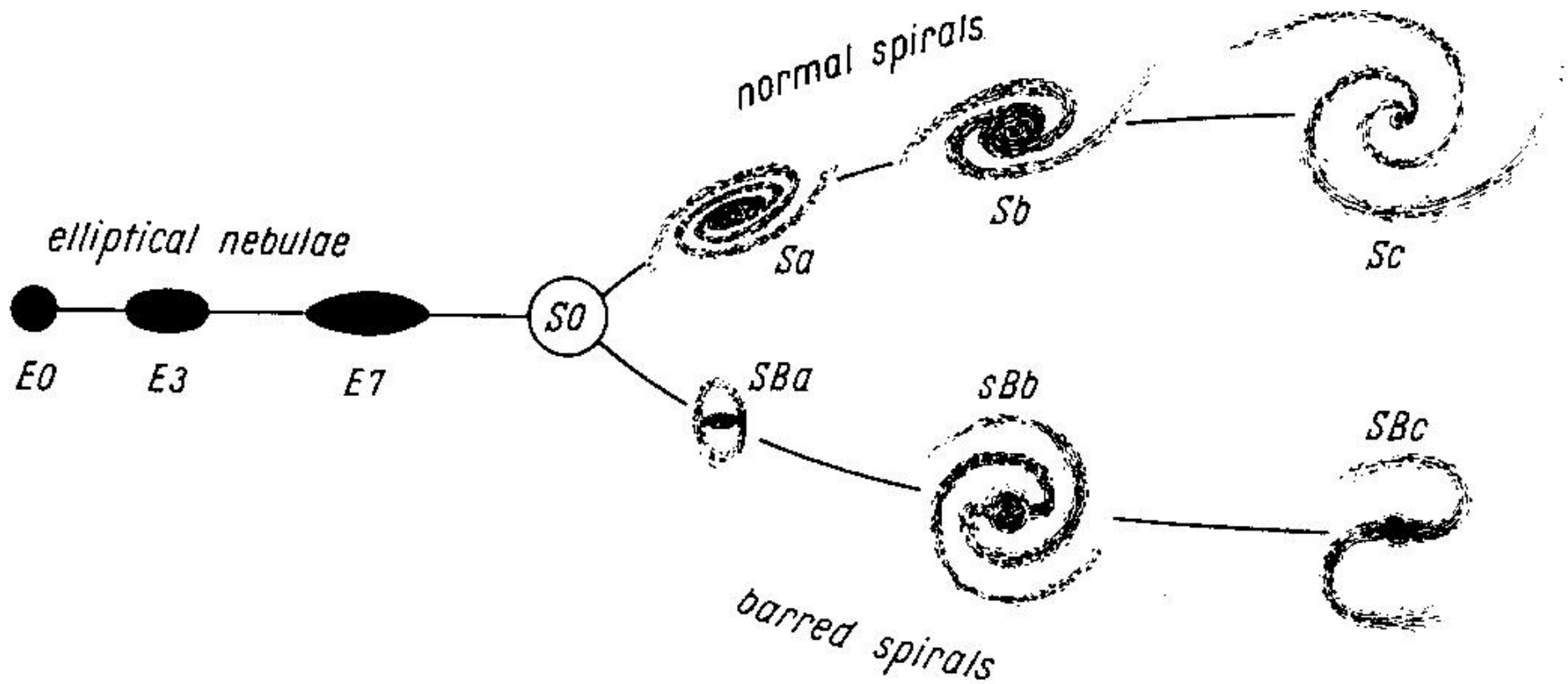
- **Componenti radicalmente diverse**
- **Diversi rapporti**
(E – S0 – Sa – Sb – Sc – Sd)
- **Diverse Concentrazioni (compatte vs estese)**
- **Diverse Dinamiche (dispersione vs rotazione)**
- **Storie Diverse (prima vs dopo)**



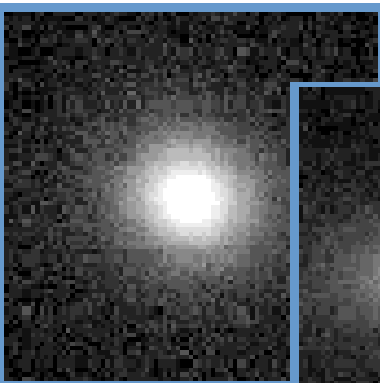
Edwin P. Hubble

(1889-1953)

Mt. Wilson
Observatory
Pasadena, CA



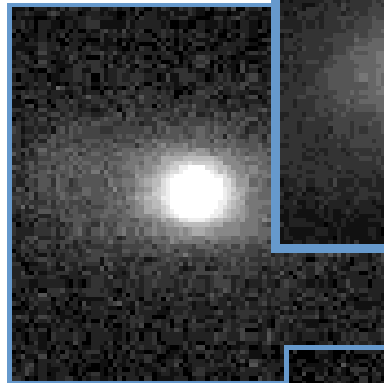
E0



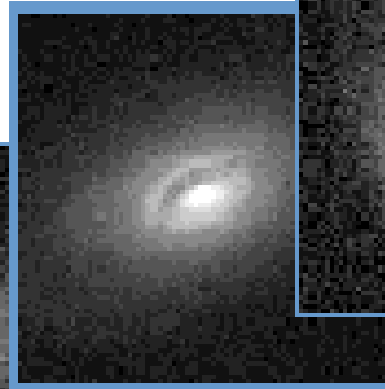
E7



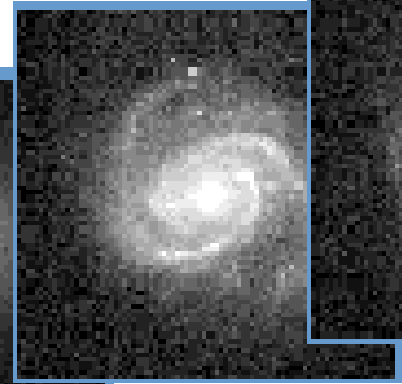
S0



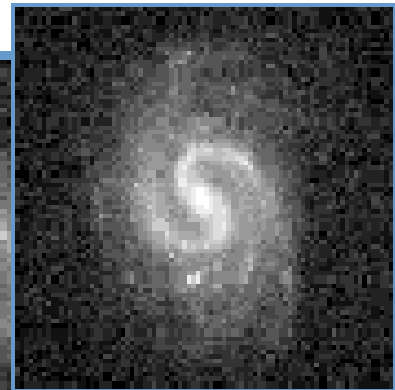
Sa



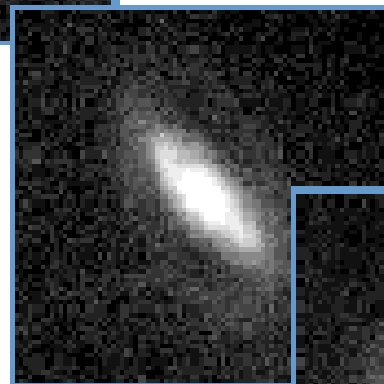
Sb



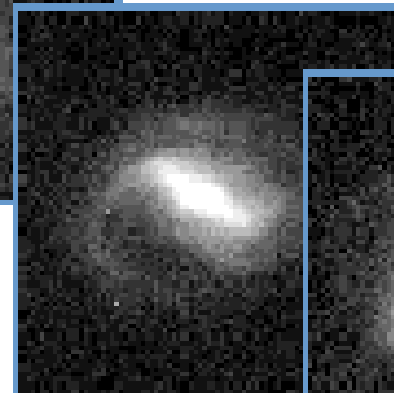
Sc



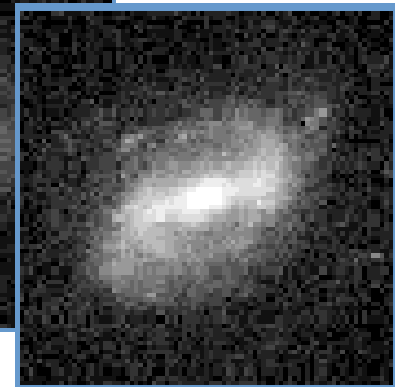
SBa



SBb



SBc

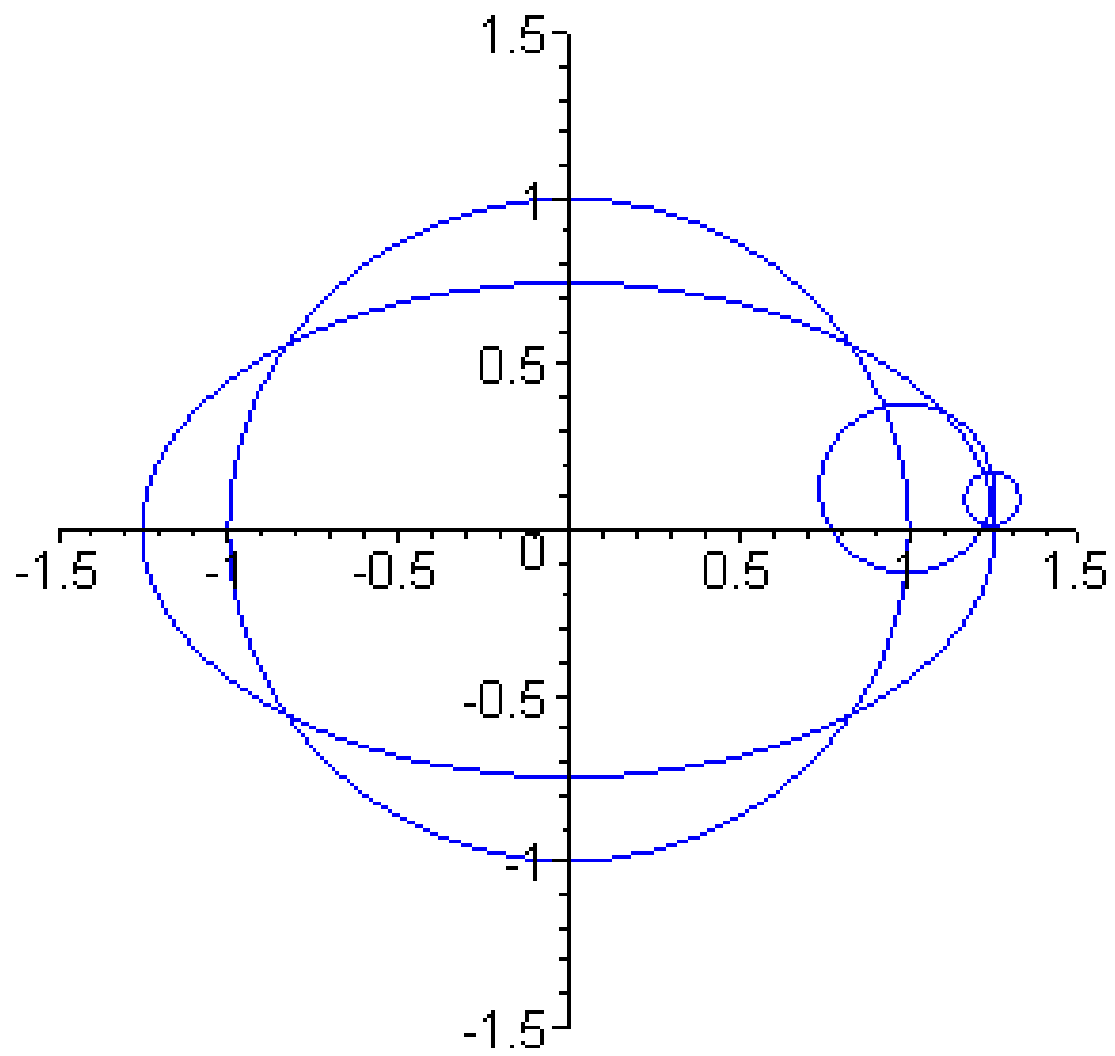


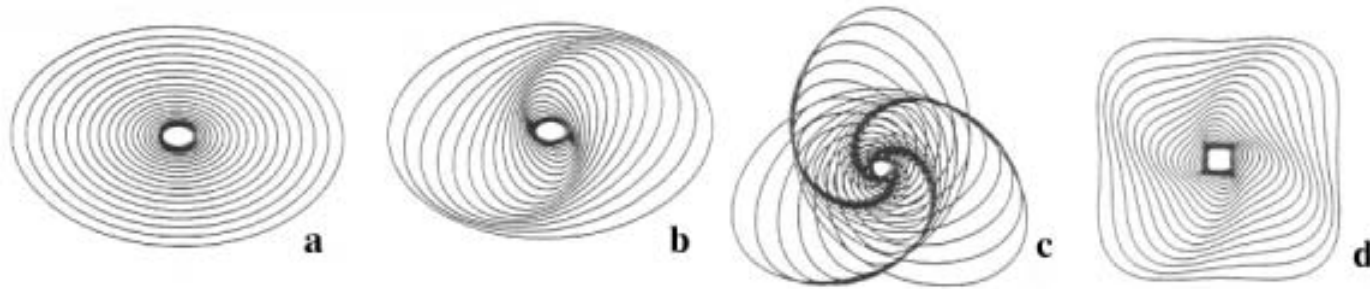
Dischi : Struttura a Spirale

- Le stelle del disco hanno orbite quasi circolari
 - **Orbite Circolari**, raggio R , frequenza angolare ω
 - **Piccoli sbalzi radiali** \rightarrow oscillazioni, frequenza κ

$$\kappa^2 = \left(\frac{\partial^2 \Phi_{\text{eff}}}{\partial R^2} \right)_{R_g} = \left(\frac{\partial}{\partial R} \left(\frac{\partial \phi}{\partial R} \right) \right)_{R_g} + \frac{L_z^2}{R_g^4} = \left(R \frac{d\Omega^2}{dR} + 4\Omega^2 \right)_{R_g}$$

- **Appaiono come epicicli retrogradi sovrapposti a un cechio**
- Solitamente, $\kappa = 1 - 2 \omega \rightarrow$ orbite non chiuse
 - (eccezioni Kepleriane : $\kappa = \omega \rightarrow$ ellisse con GC @ fuoco)
 - **Vicino al Sole : $\omega/\kappa = 27/37$ km/s/kpc**
- Considera sistema rotante ad $\omega - \kappa/2$
 - **orbite più vicine ed un ellisse con il GC al centro**
- Considera molte di queste orbite, con PA che varia con R

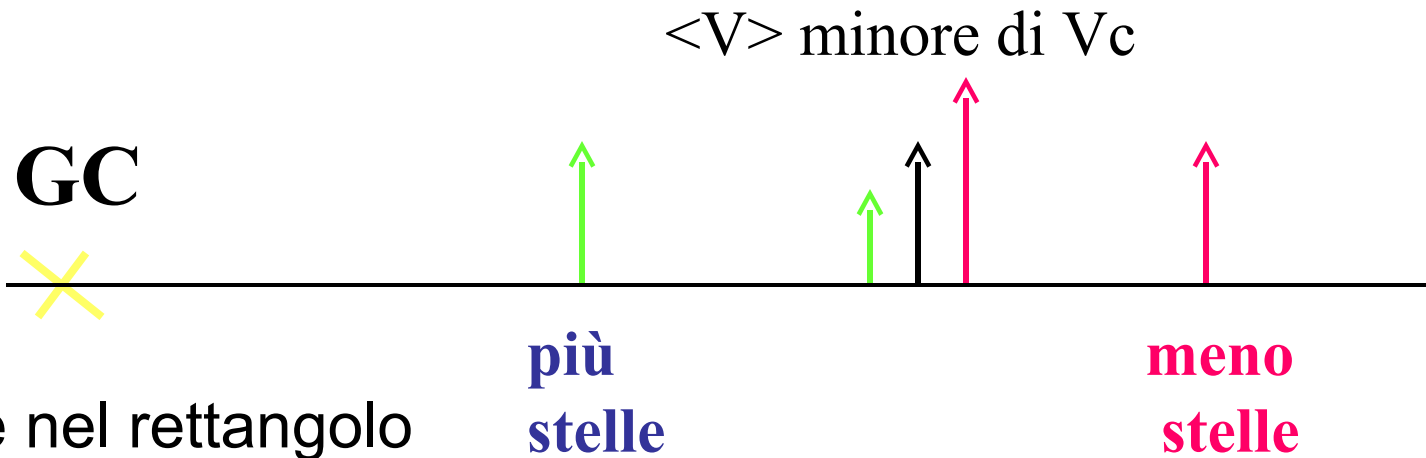




- **Dipende dalla fase se si ottengono barre o spirali**
- **Queste sono le onde di densità cinematiche**
- **Sono pattern risultanti da addensamenti di orbite**
- **Generati da :**
 - **Maree generate da vicini di passaggio**
 - **Barre e/o distorsioni ovali**
 - **Possono anche auto-generarsi (QSSS onde di densità)**
 - **Amplificarsi quando passano attraverso il centro (amplificazione a altalena)**
- **La reazione del Gas è violenta → shocks → formazione di stelle**

Dinamica del Disco & Bulge

- Entrambi sono sistemi auto-gravitanti
 - Dischi sostenuti rotazionalmente (dinamicamente freddi)
 - Bulges sostenuti dalla dispersione (dinamicamente caldi)
 - Due estremi su un continuo
 - Rotazione \rightarrow spostamento asimmetrico \rightarrow dispersione
- Cosa significa ?
 - Considera un'orbita circolare, raggio R velocità V_c
 - Piccolo sbalzo radiale \rightarrow oscillazione radiale (epiciclo)
 - Velocità orbitali : $V < V_c$ fuori da R , $V > V_c$ dentro a R
- Considera un insieme di tali orbite



- Stelle nel rettangolo
 - Velocità media \rightarrow rotazione media ($\langle V \rangle$)
 - Variazioni intorno alla media \rightarrow dispersione (σ)
- In generale $\langle V \rangle$ minore di V_c
- Per perturbazioni radiali maggiori, $\langle V \rangle$ diminuisce e σ aumenta
 - $V_c^2 \sim \langle V \rangle^2 + \sigma^2$
- Questo è lo spostamento **asimmetrico** (chiaramente visibile nelle stelle della VL)
- Casi estremi :
 - Dischi freddi $\langle V \rangle = V_c$ e $\sigma = 0 \rightarrow$ pura rotazione
 - Bulges caldi $\langle V \rangle = 0$ e $\sigma \sim V_c \rightarrow$ pura dispersione

- More complete analysis considers :
 - Distribution function = $f(\mathbf{v}, \mathbf{r}) d^3v d^3r$
- This satisfies a continuity equation (stars conserved)
 - The **collisionless Boltzmann equation**

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla f - \nabla \phi \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{v}} = 0$$

- Difficult to solve, so consider average quantities
 - $\langle Vr \rangle$, $\langle \sigma \rangle$, n (density), etc
 - This gives the **Jean's Equation** (in spherical coordinates)

$$\frac{1}{n} \frac{d(n\sigma_r^2)}{dr} + 2\beta \frac{\sigma_r^2}{r} - \frac{V_{\text{rot}}^2}{r} = - \frac{d\Phi}{dr}$$

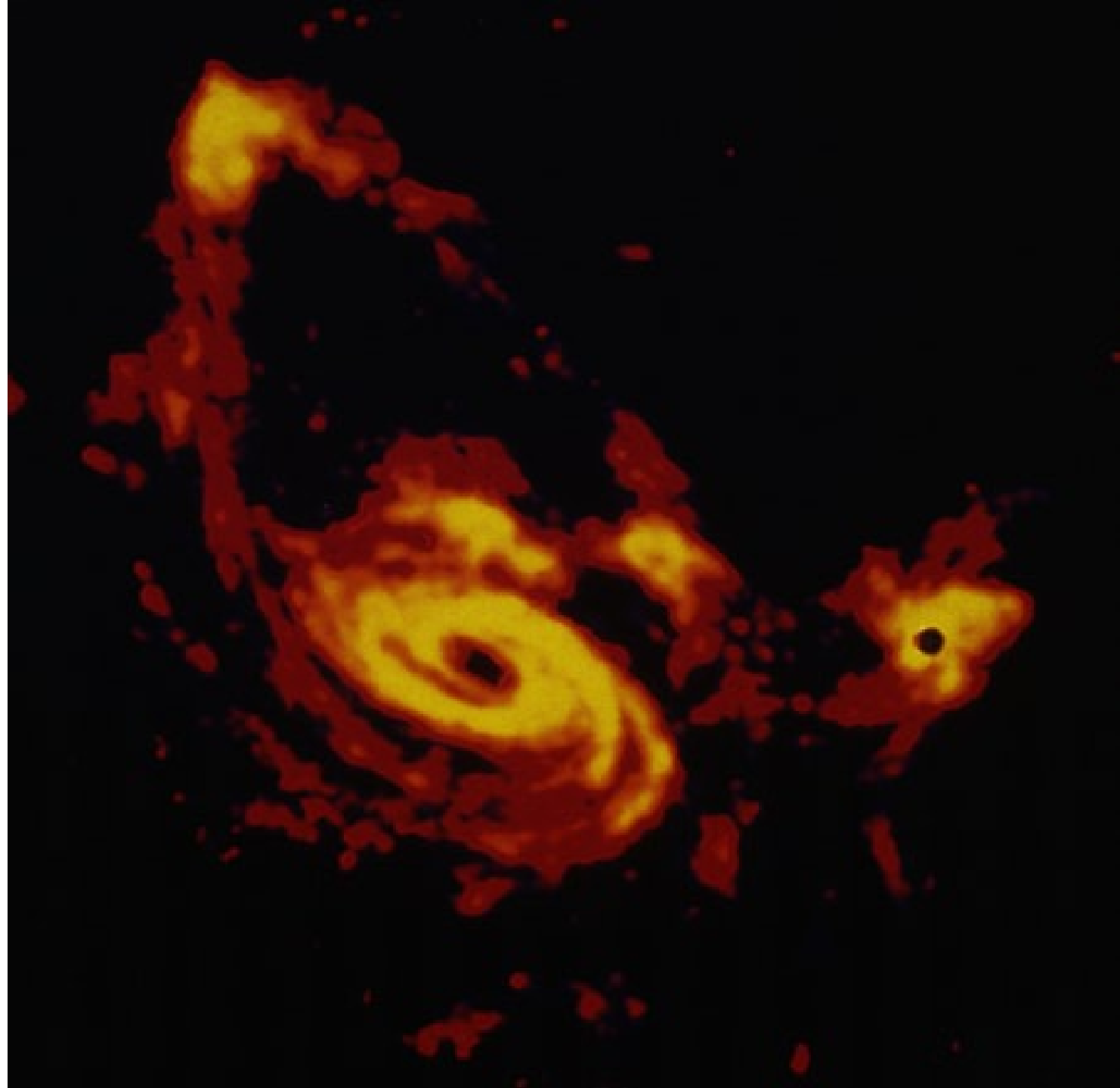
- Which mirrors the equation of hydrostatic support :

$$dp/dr + \text{anisotropic correction} + \text{centrifugal correction} = F_{\text{grav}}$$
- Hence, we speak of **stellar hydrodynamics**

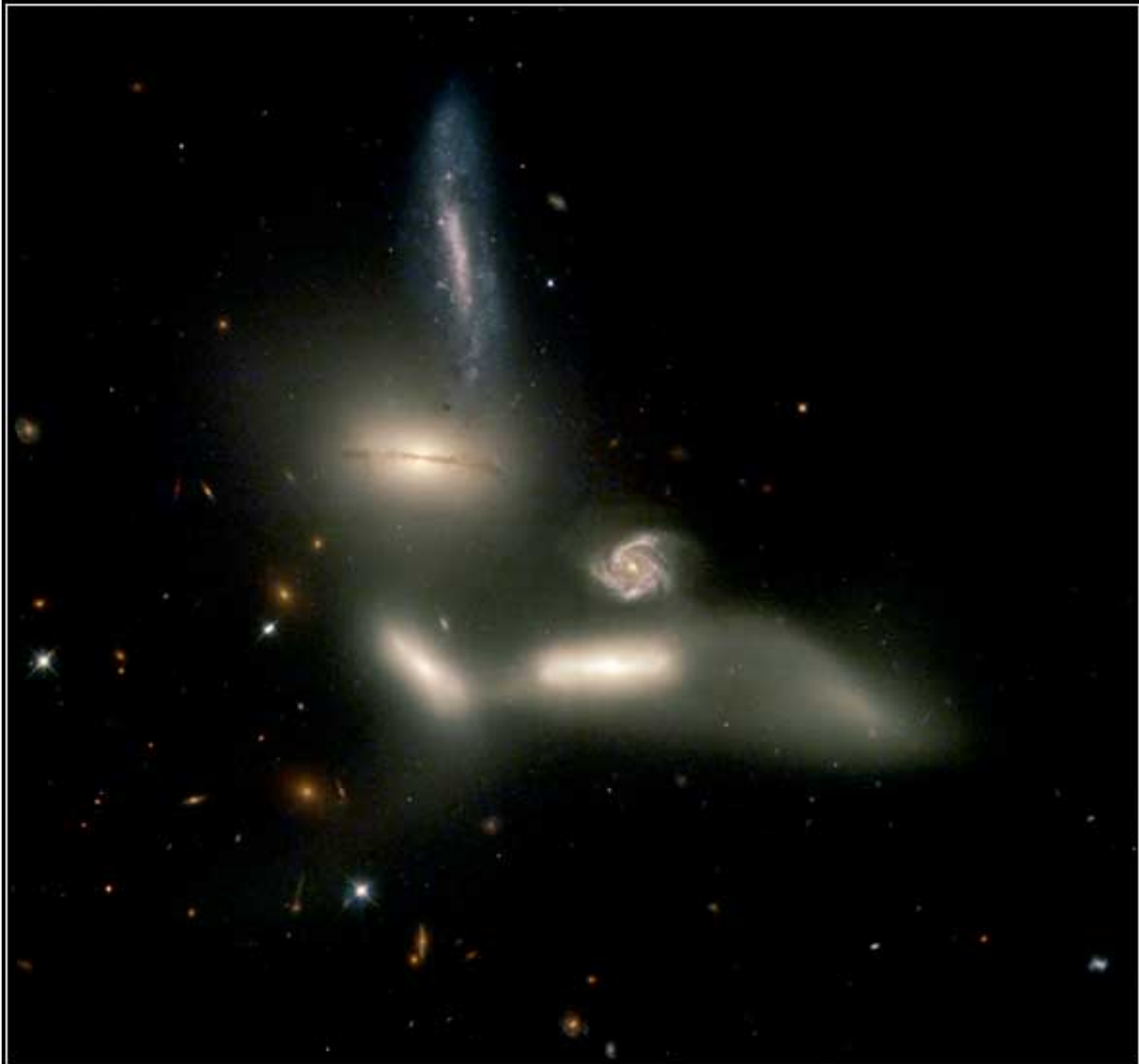
2. Interazioni & Mergers

- Generano bulge (spirale + spirale = ellittica)
- Gas va verso il centro (perde Mom. Ang.)
- Intensa formazione stellare (starbursts)
- Supernovae generano “superwinds”
- Contaminazione chimica dell’ambiente
- Storia cosmica della formazione stellare







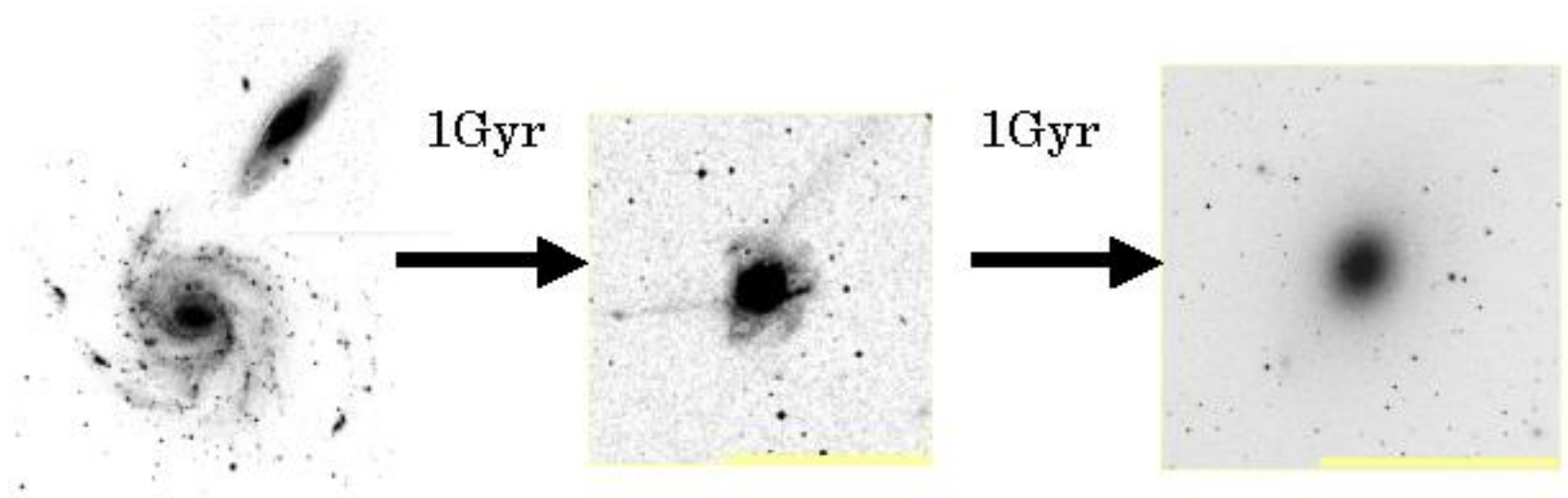


Galaxy Group Seyfert's Sextet

HST ♦ WFPC2

NASA, J. English (University of Manitoba)
and C. Palma (Pennsylvania State University) ♦ STScI-PRC02-22

Merger di galassie a spirale possono formare Ellittiche



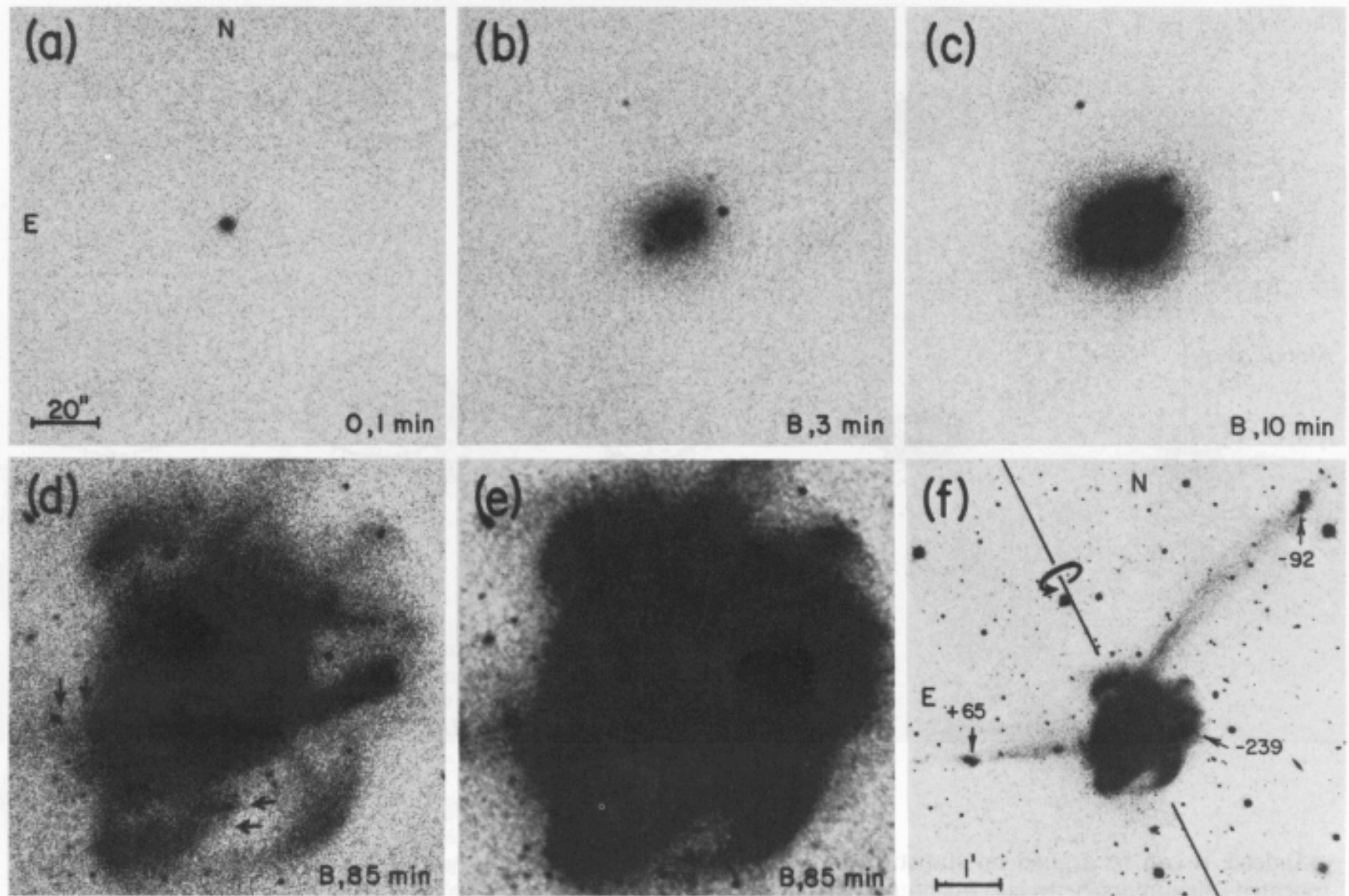


Figure 14.5. Successively deeper photographs (a–e) of NGC7252 reveals a complex set of filaments surrounding a central body that resembles a giant elliptical galaxy. Spectra of some of the features show the counter-velocities (f) in two tails that are characteristic of interacting disk galaxies of comparable mass. For these reasons, this system is regarded as an excellent candidate for a merger between two giant spiral galaxies. (From F. Schweizer, *Ap. J.*, 1981, in press.)

lead to bring the two galaxies close together, consistent with the constraints of the conservation of total angular momentum and total energy. This expectation is based on the second law of thermodynamics, which when applied to trillions of stars still states that order tends to be replaced by disorder (Chapter 4). The close encounter of two bound spiral galaxies, containing much energy in the ordered forms of spinning disks and orbiting

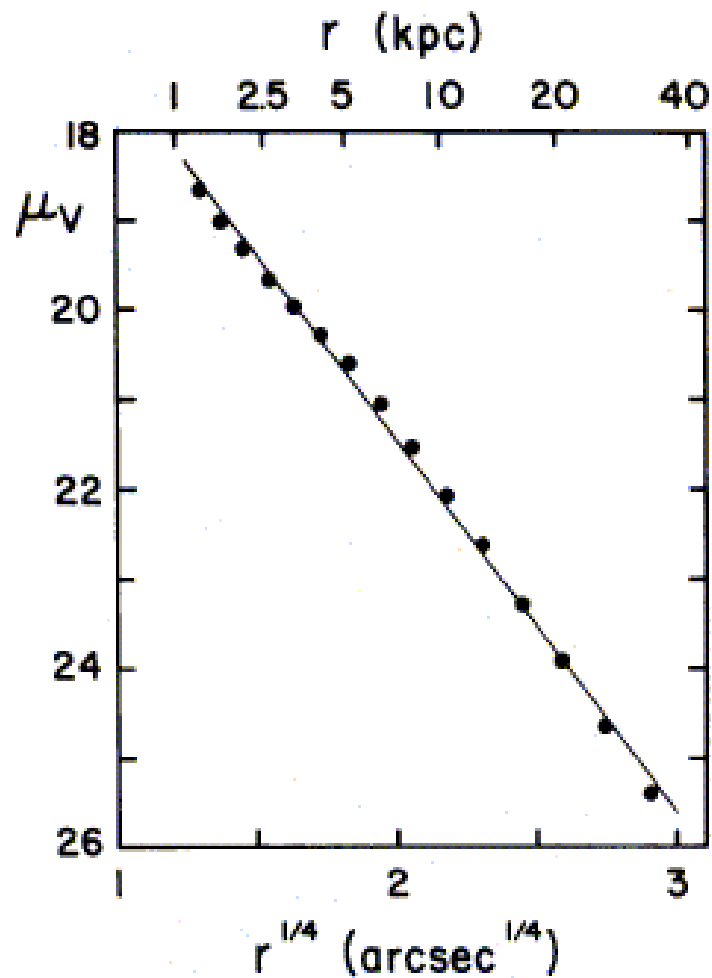
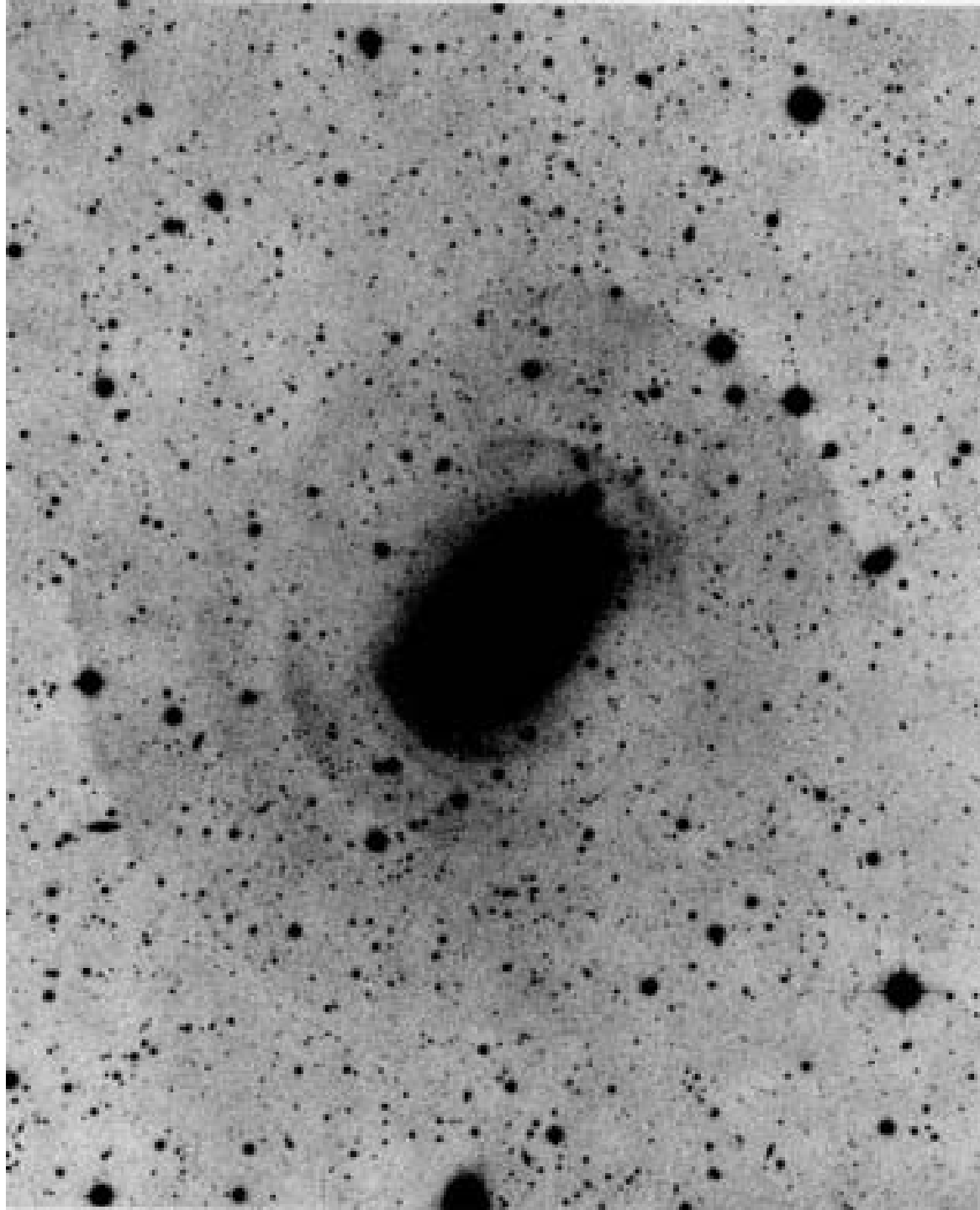
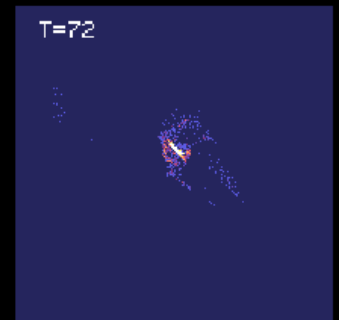
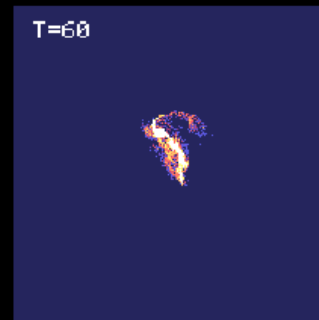
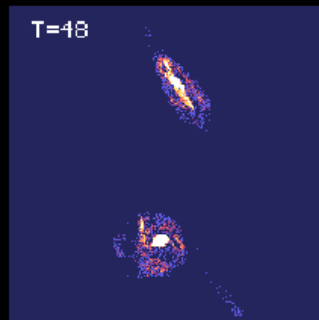
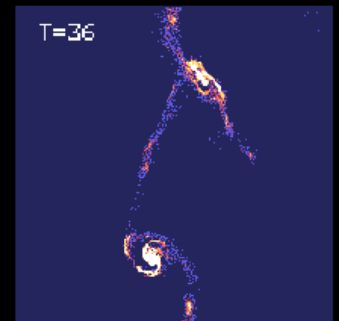
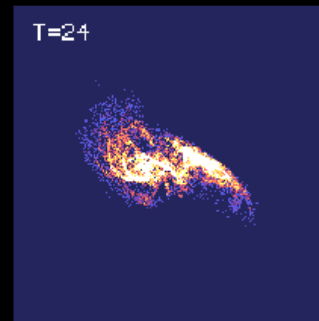
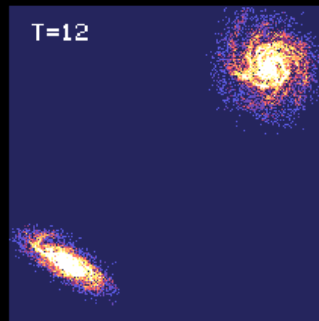
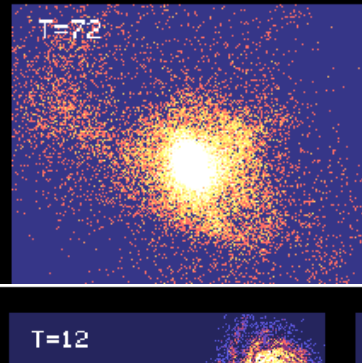
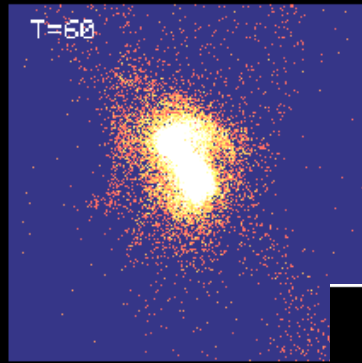
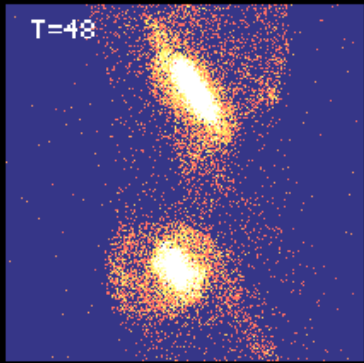
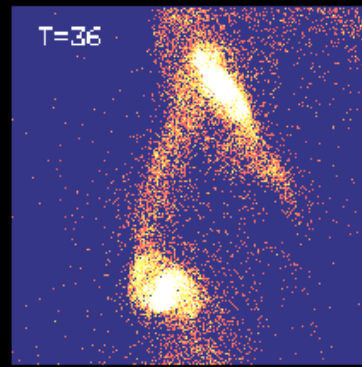
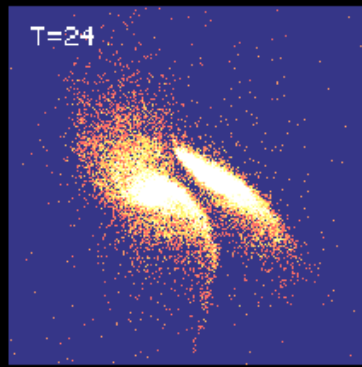
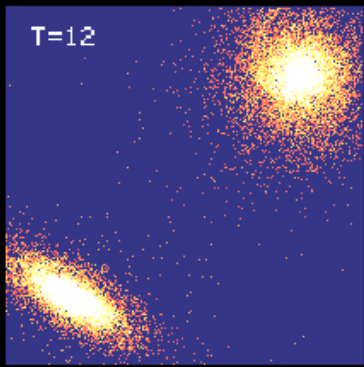


FIG. 6.—Radial light distribution of NGC 7252; visual surface brightnesses μ_V (in mag arcsec $^{-2}$) are plotted vs. the fourth root of the radius. The data points represent values calculated from the adopted growth curve of Fig. 5 by numerical differentiation. The light distribution closely resembles that of an elliptical galaxy, as illustrated by the least-squares-fitted $r^{1/4}$ law (*straight line*).



Durante l'interazione :



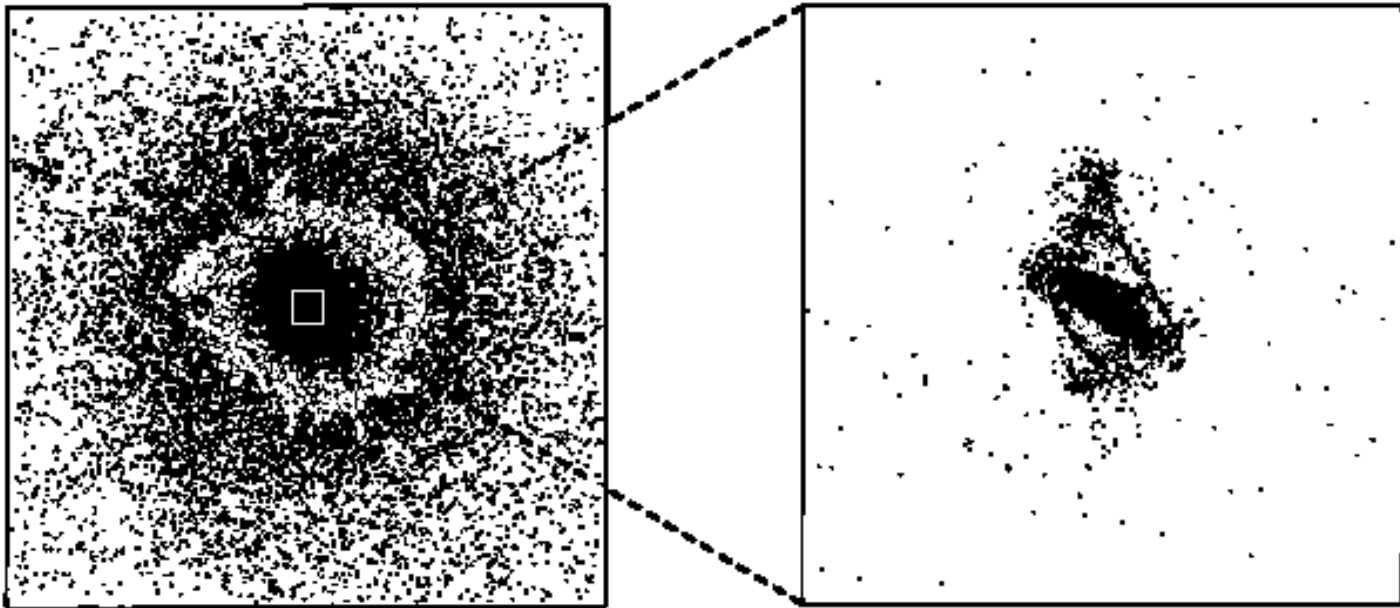
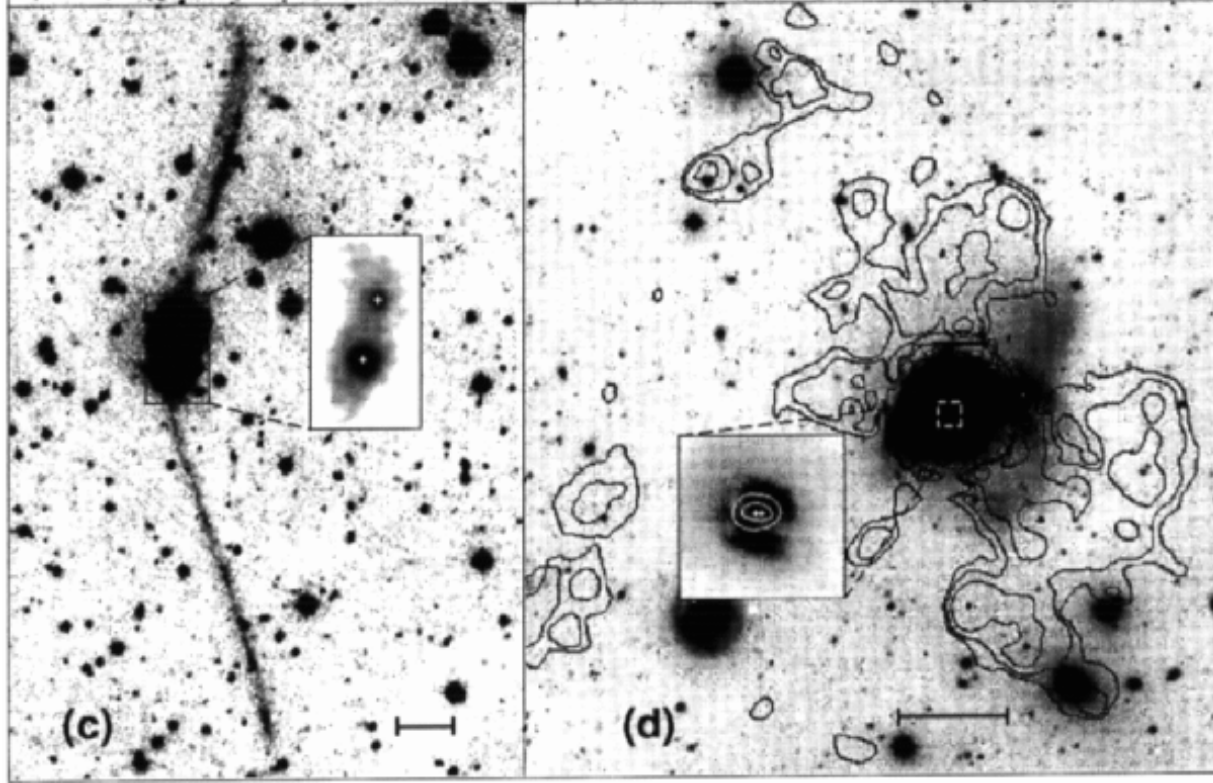
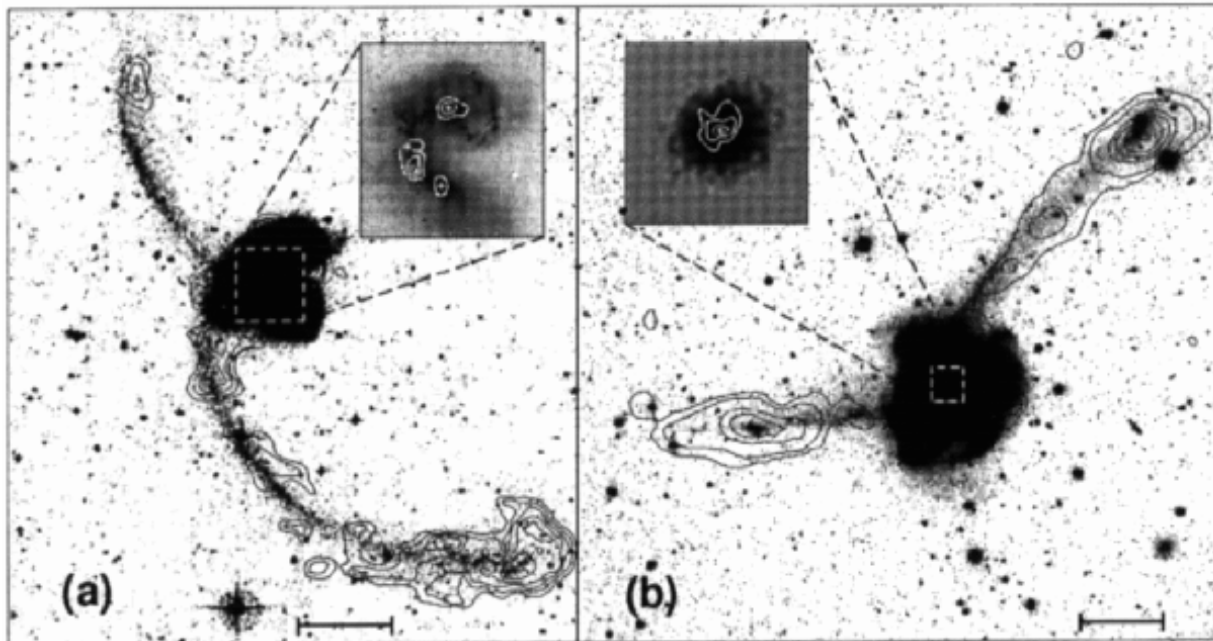
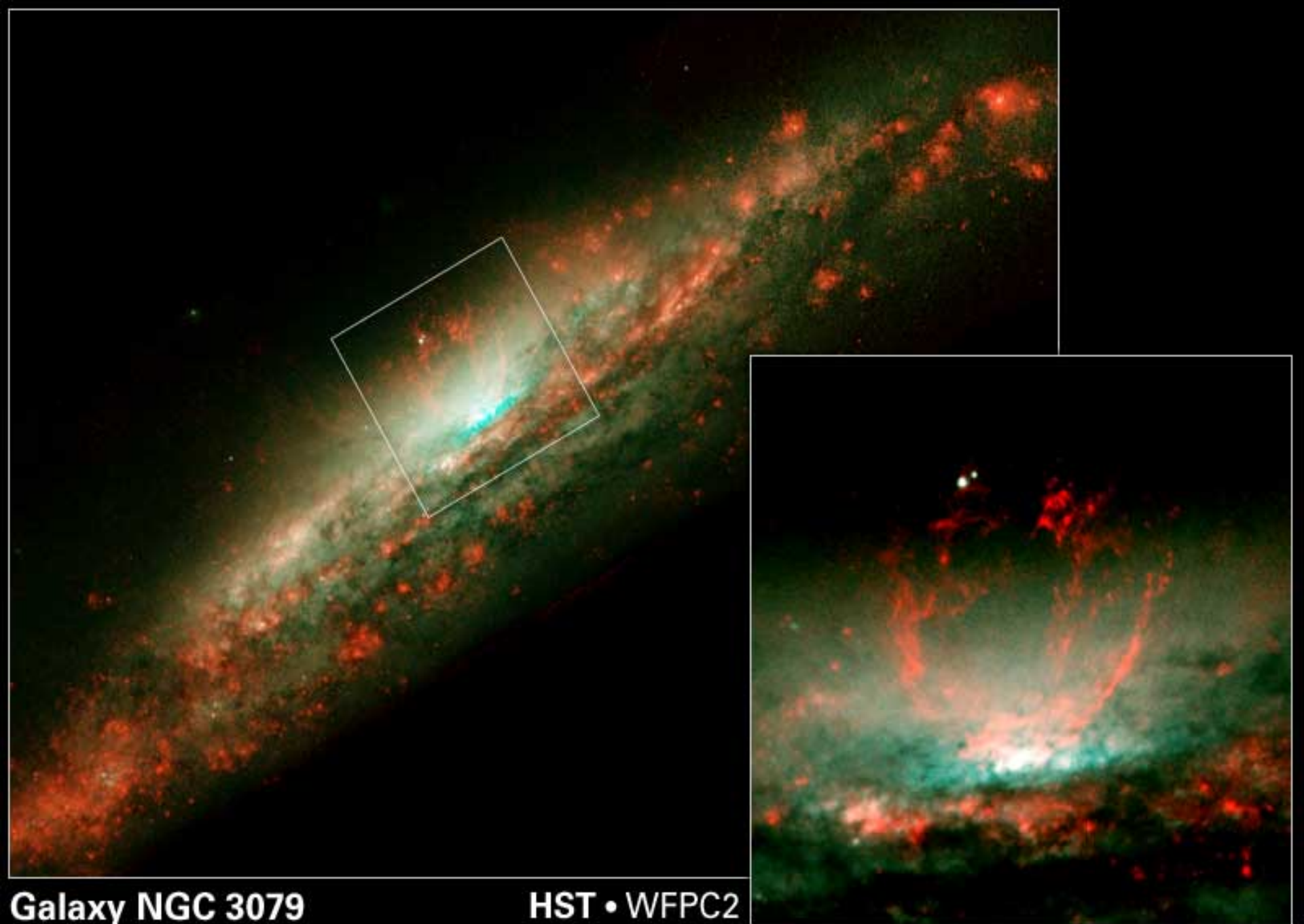


FIG. 14.—Views of stars (*left*) and gas (*right*) in the merger remnant produced by encounter A at time $t = 6$. The stellar view is 0.8×0.8 length units, while the view of the gas is enlarged by a factor of 20. Over 60% of all the gas in this remnant lies in this dense central blob.



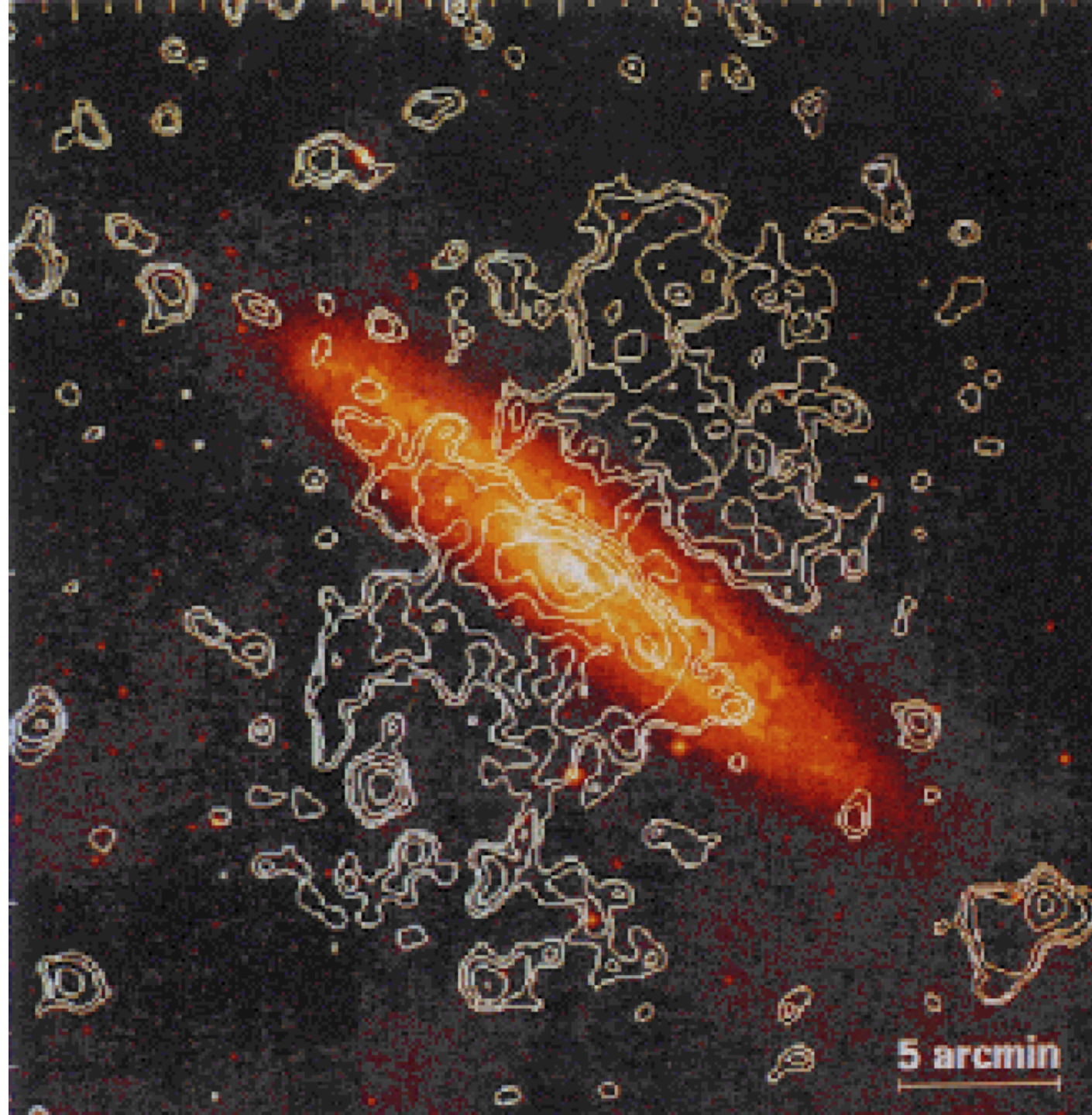


Galaxy NGC 3079

HST • WFPC2

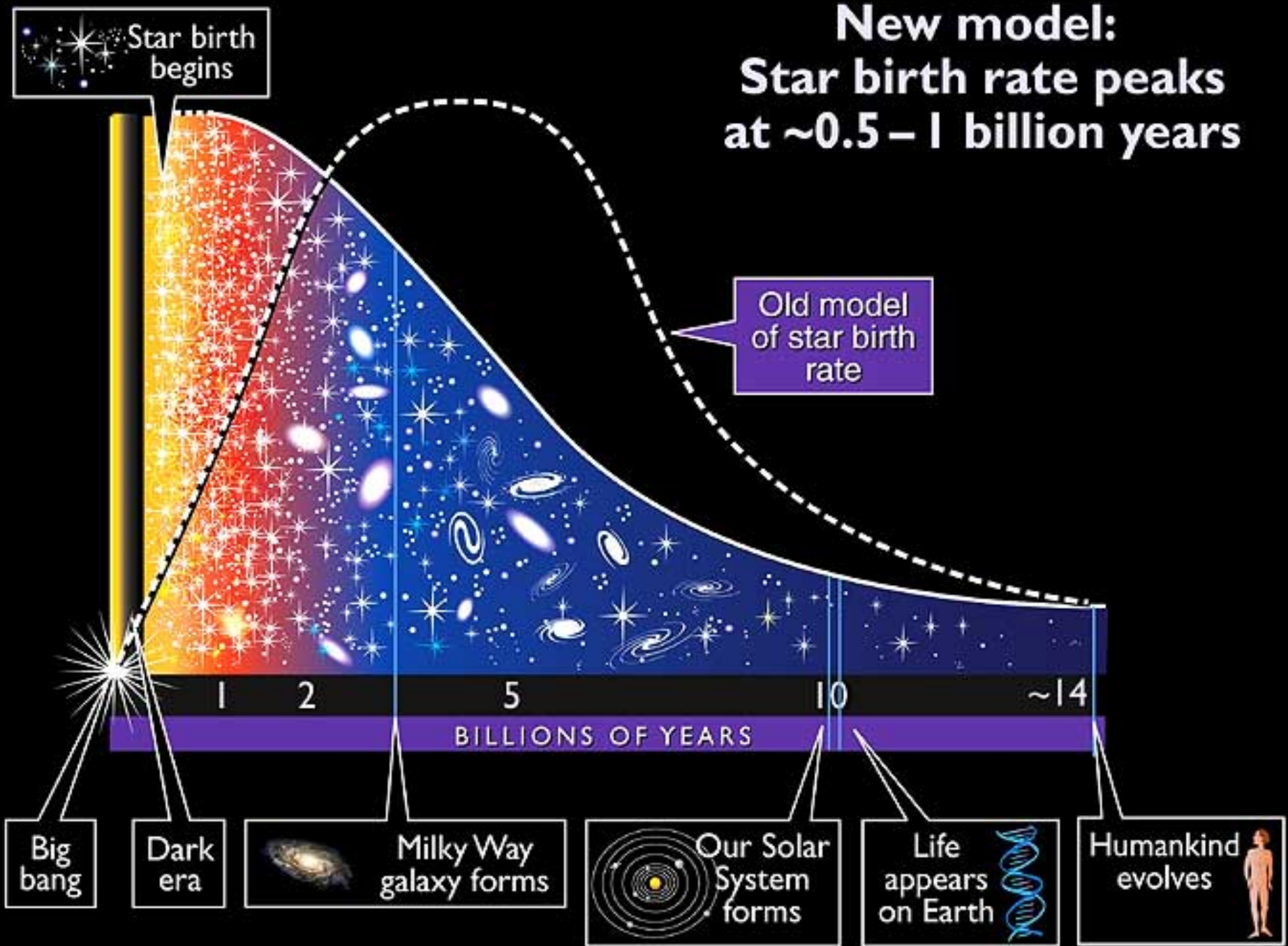
NASA and G. Cecil (University of North Carolina) • STScI-PRC01-28





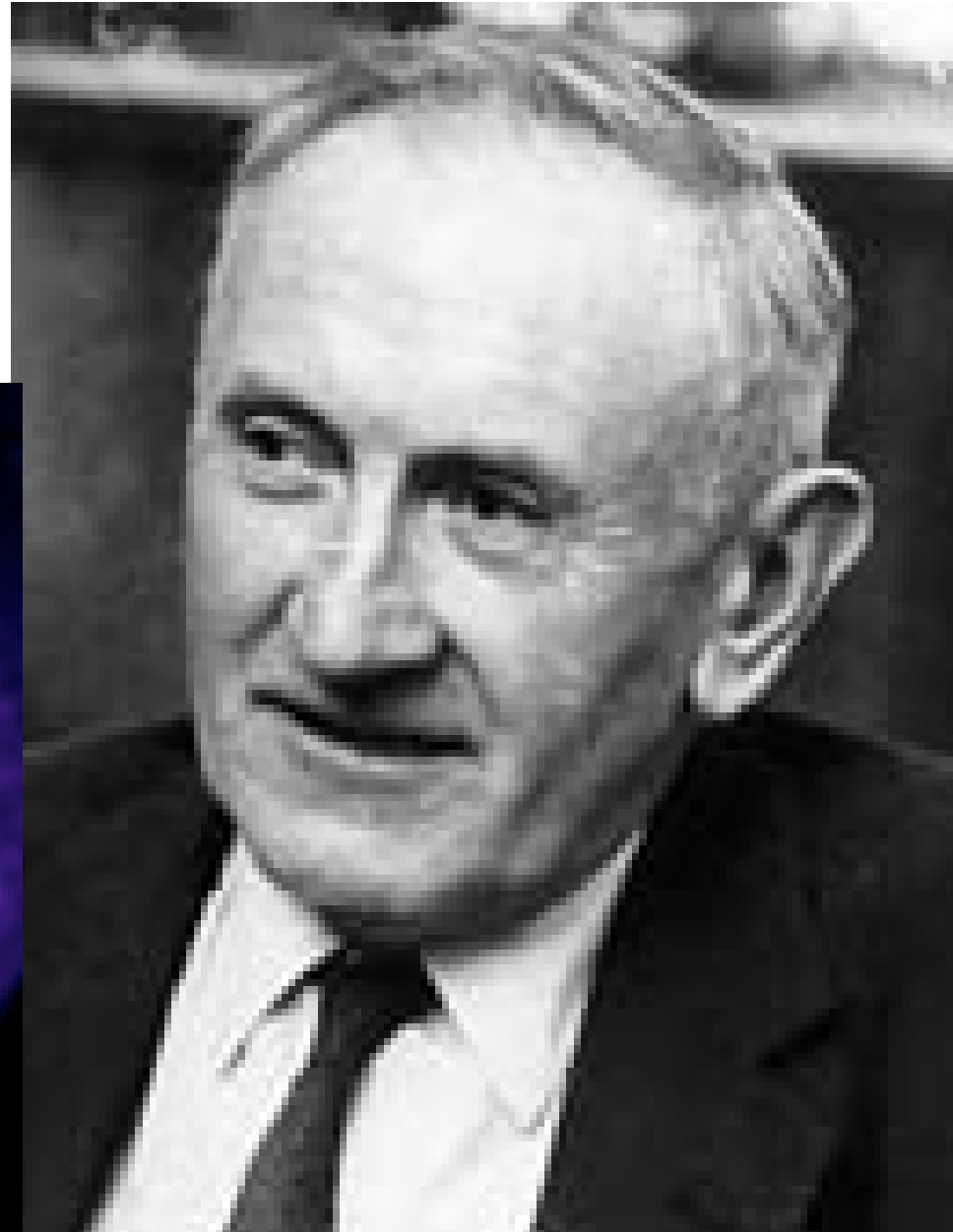
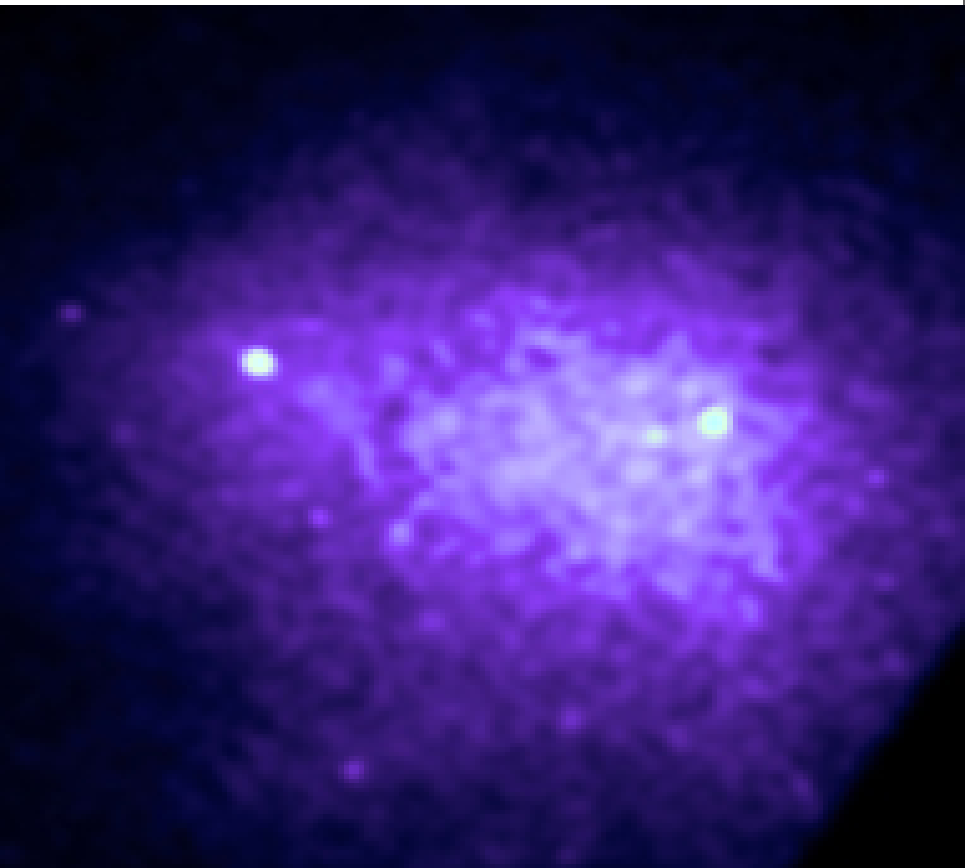
New model:

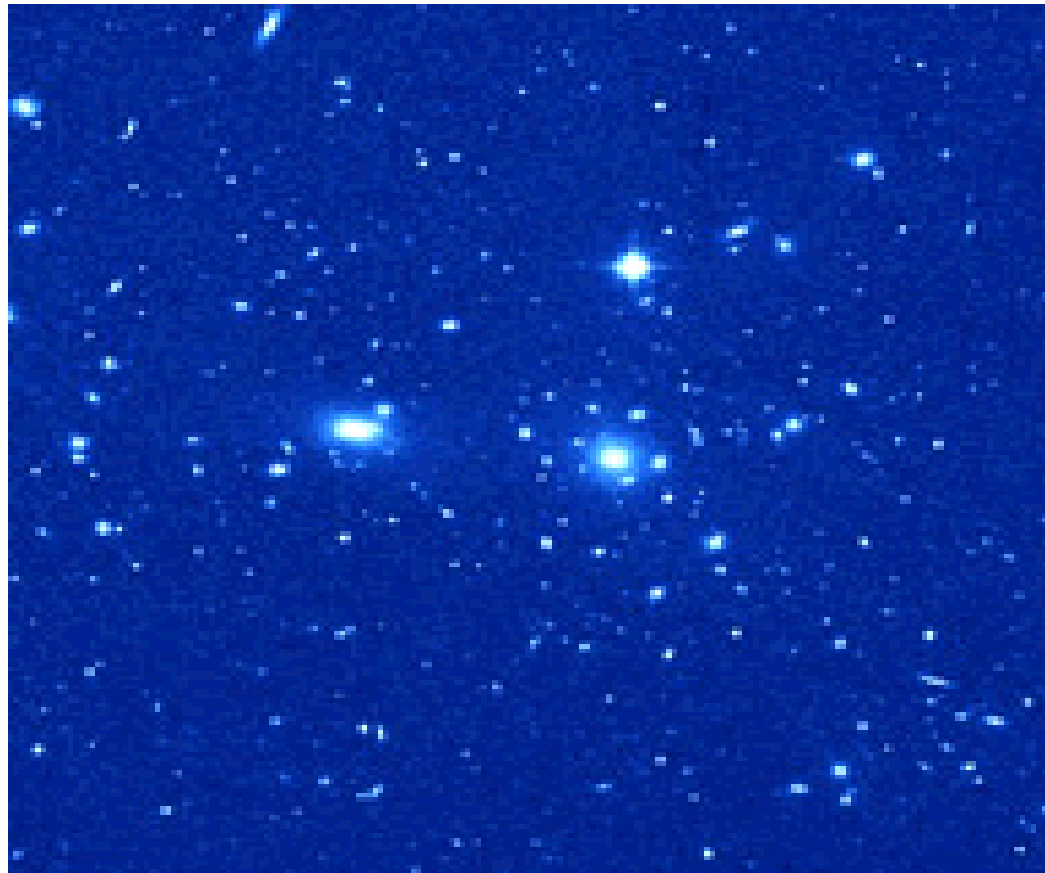
Star birth rate peaks at ~0.5 – 1 billion years



Velocità delle galassie nell'ammasso di COMA

- Zwicky
- ApJ 86, 217 (1937)

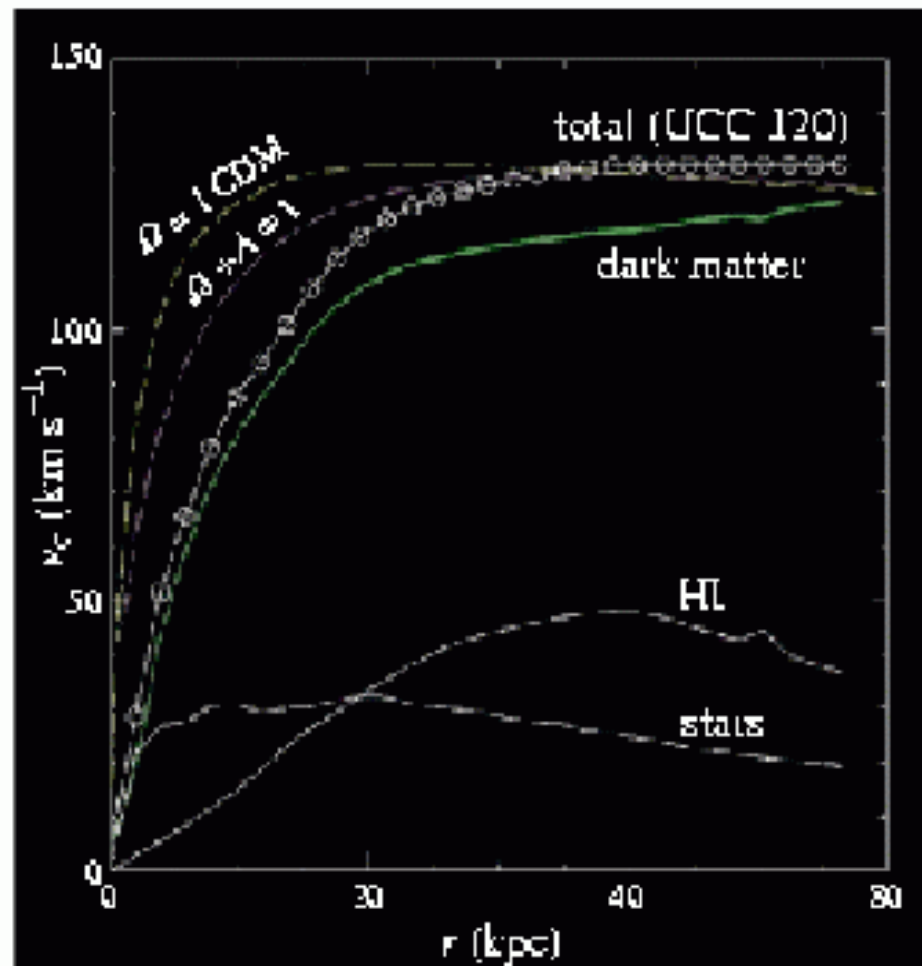
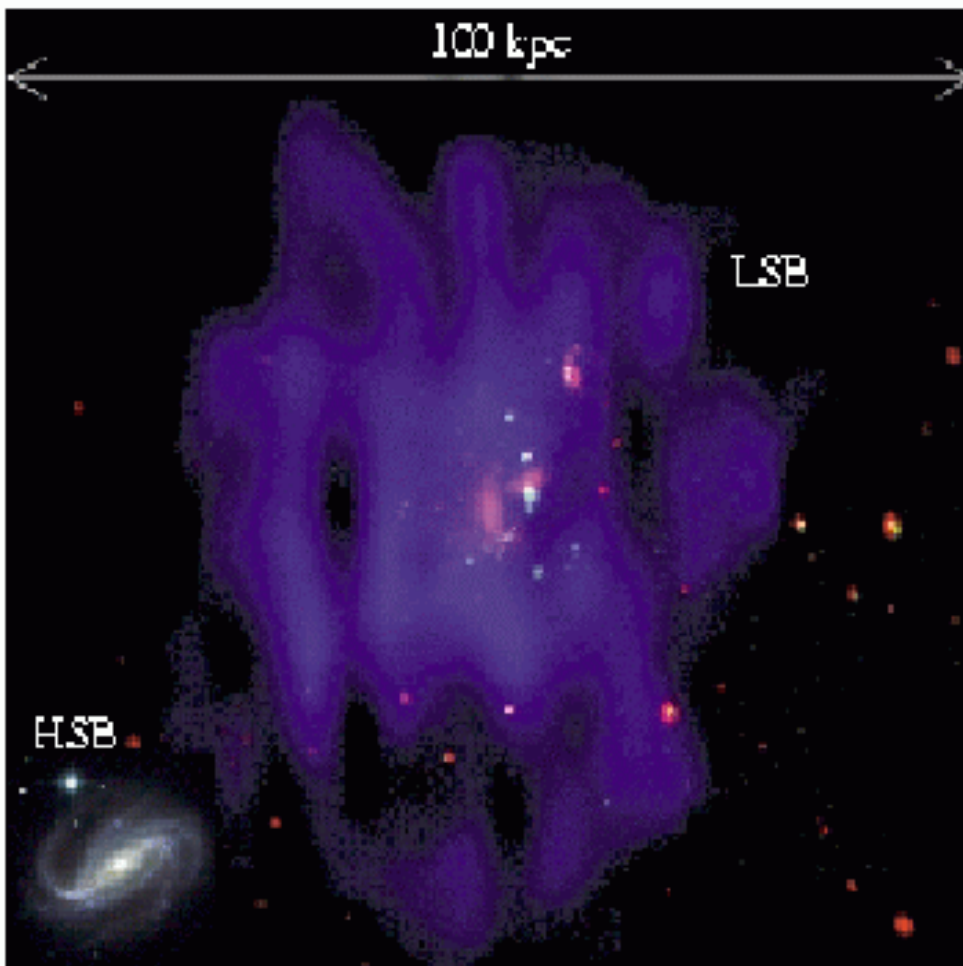




- Luce da COMA suggerisce $\sim 10^{13} M_{\odot}$
- $\sigma_v \sim 1200 \text{ km s}^{-1} \rightarrow M \sim 5 \times 10^{14} M_{\odot}$
- 50 volte più massa del previsto

Curve di rotazione delle galassie - concetto

- Dai redshift dell'HI nelle parti esterne delle galassie
- La velocità dovrebbe decrescere fuori dalla zona delle stelle



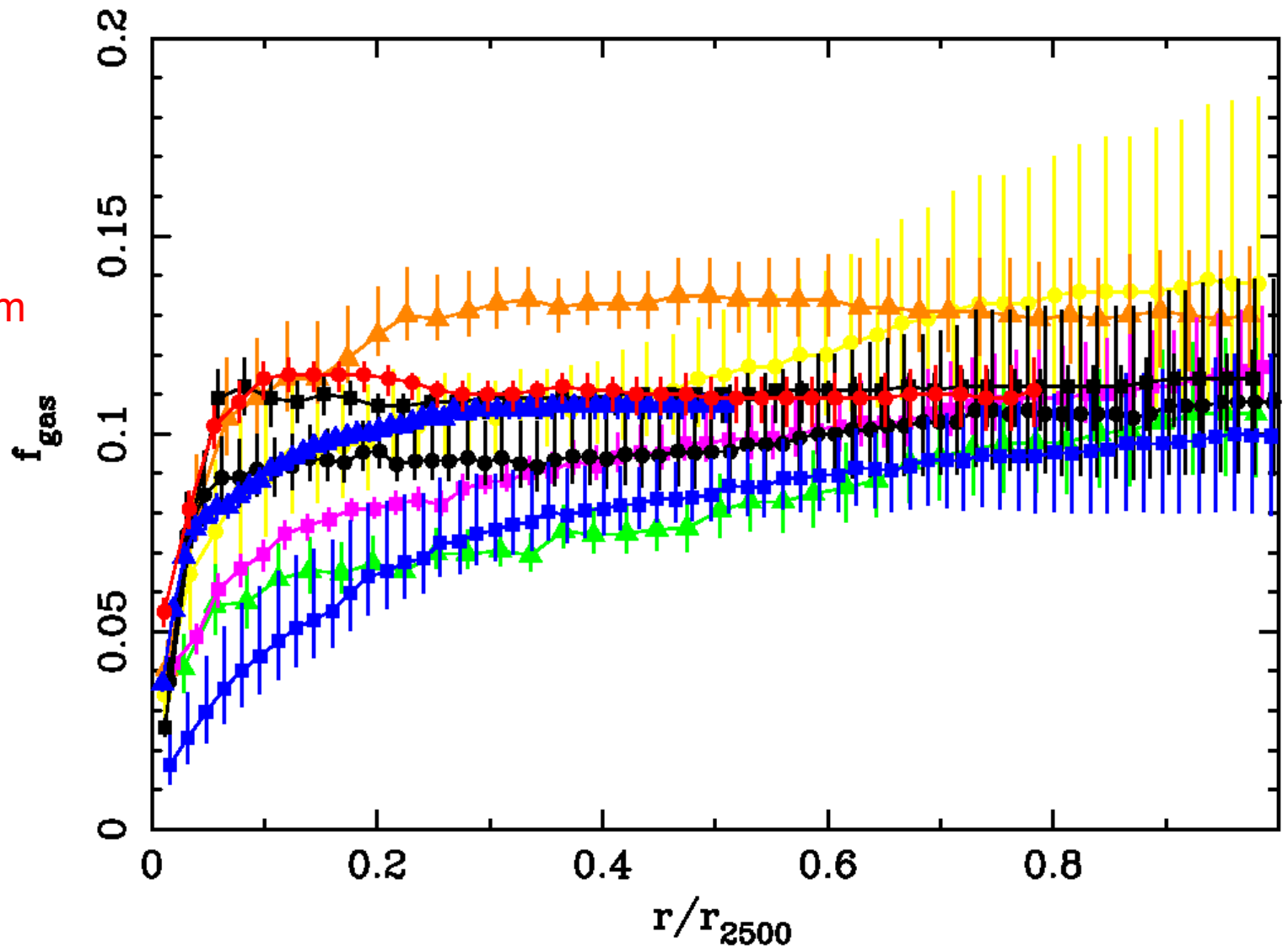
- Blue: H neutro, rosa: stelle
- Destra: velocità misurata cf predetta

Nucleosintesi

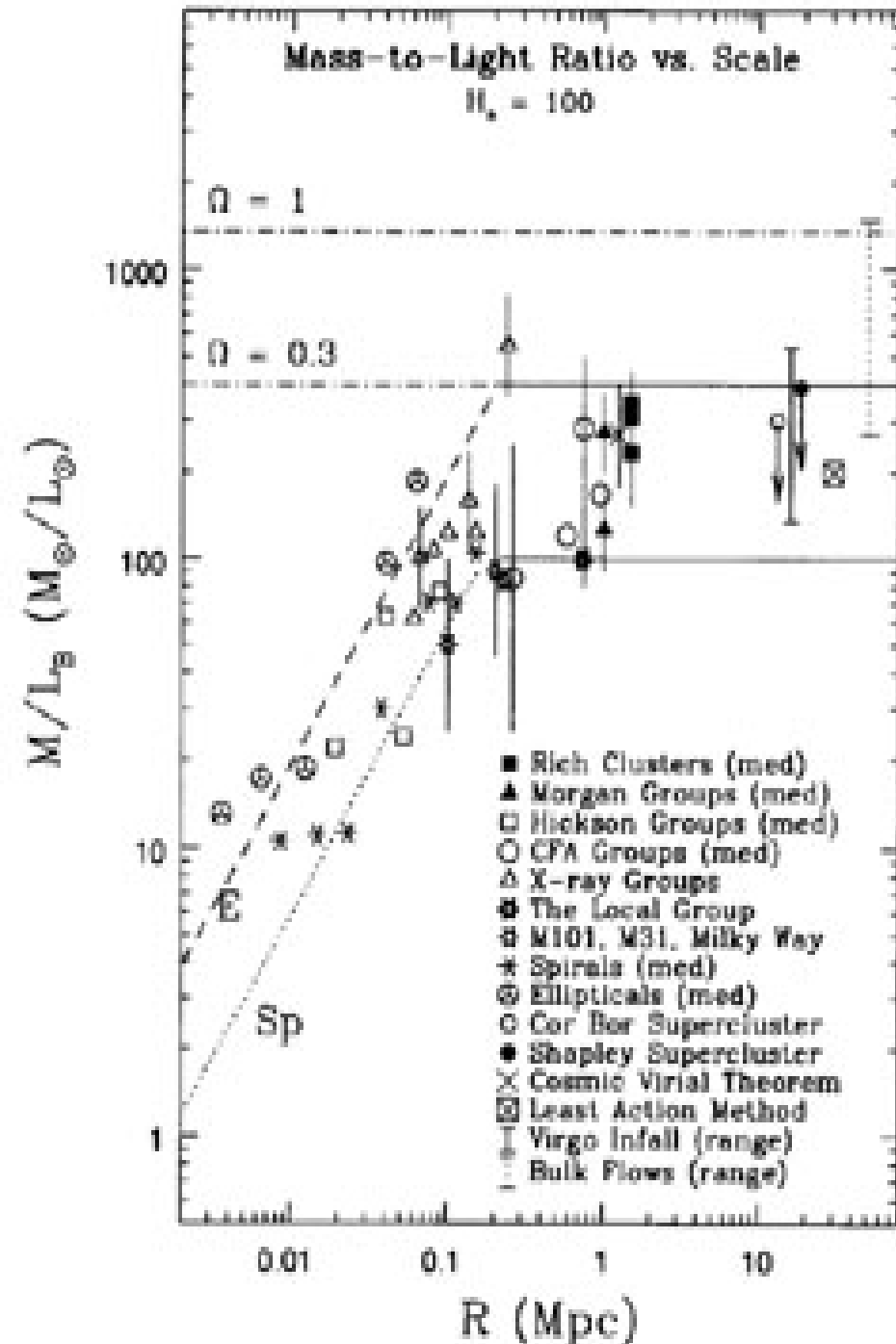
- I primi minuti dell'Universo
 - Il tasso delle reazioni è proporzionale al quadrato della densità dei barioni
 - He, D, Li indicano la densità fisica dei barioni
 - D/H derivato da righe di assorbimento dei quasar
- $\Omega_b h^2 = 0.02 \pm 0.002$
- Per $h=0.72$ $\Omega_b=0.04$
- Anche se $h=0.6$, $\Omega_b < 0.06$ Non abbastanza!
- **Serve materia** $h = H_0 / (100 \text{ kms}^{-1} \text{ Mpc}^{-1})$

Osservazioni di 9 ammassi di galassie

$$\sim \Omega_b / \Omega_m$$

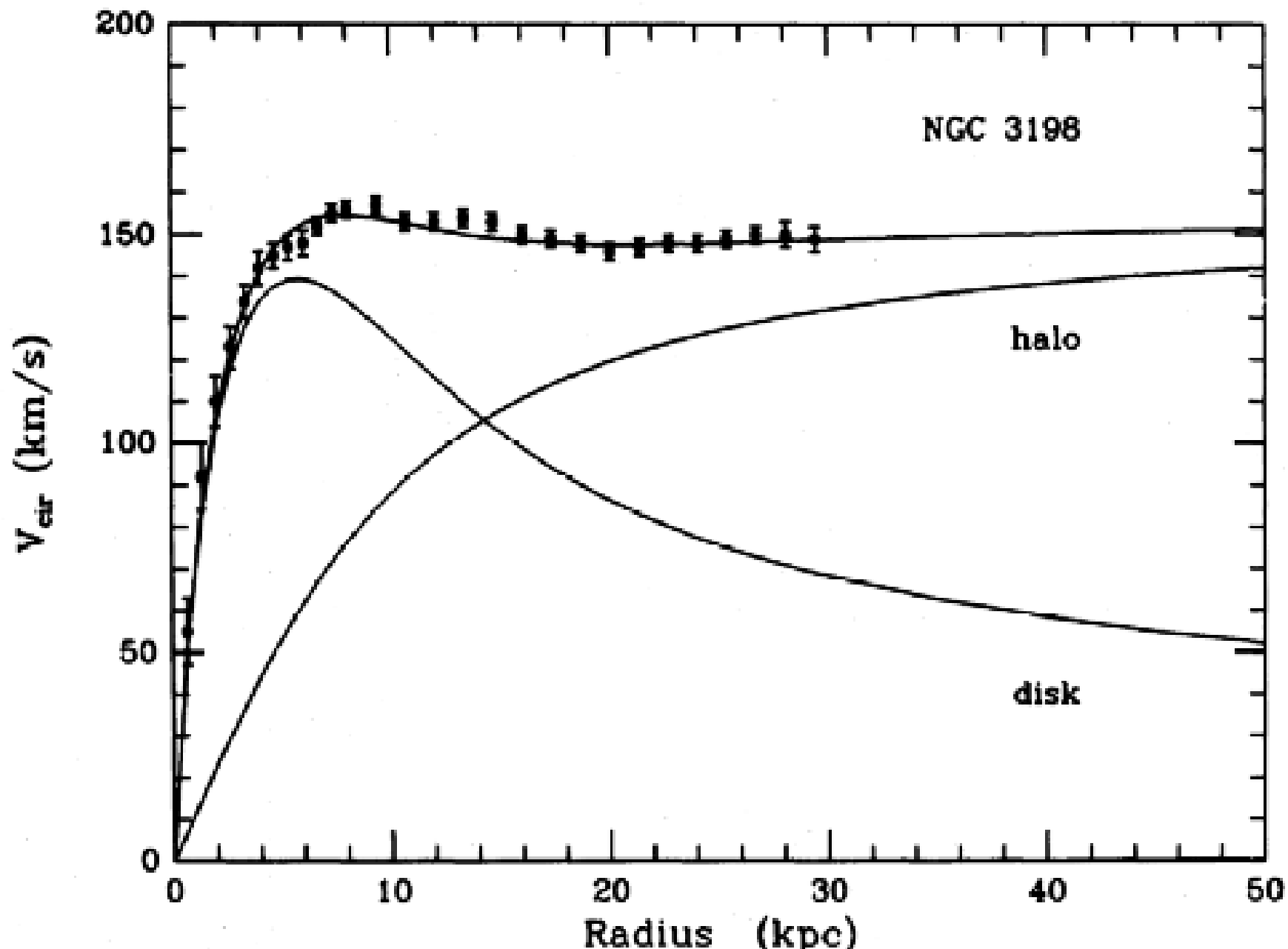


Rapporto massa/luce
su grande scala



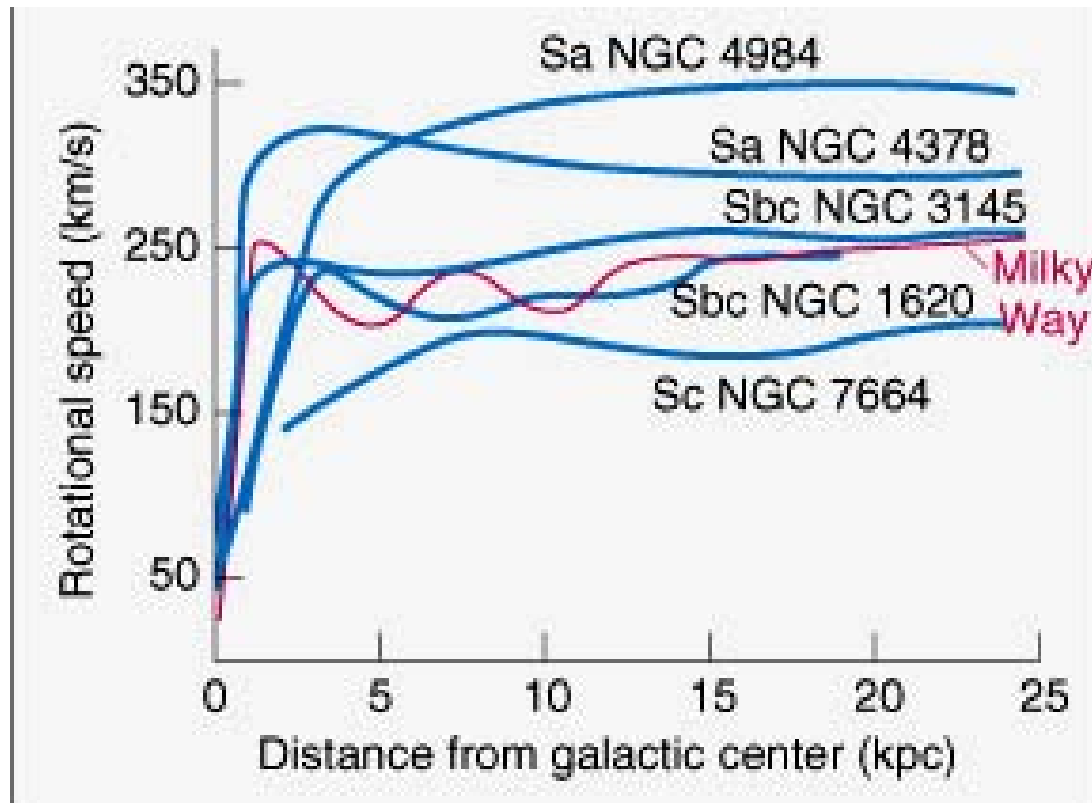
$$\Omega_m \sim 0.2$$

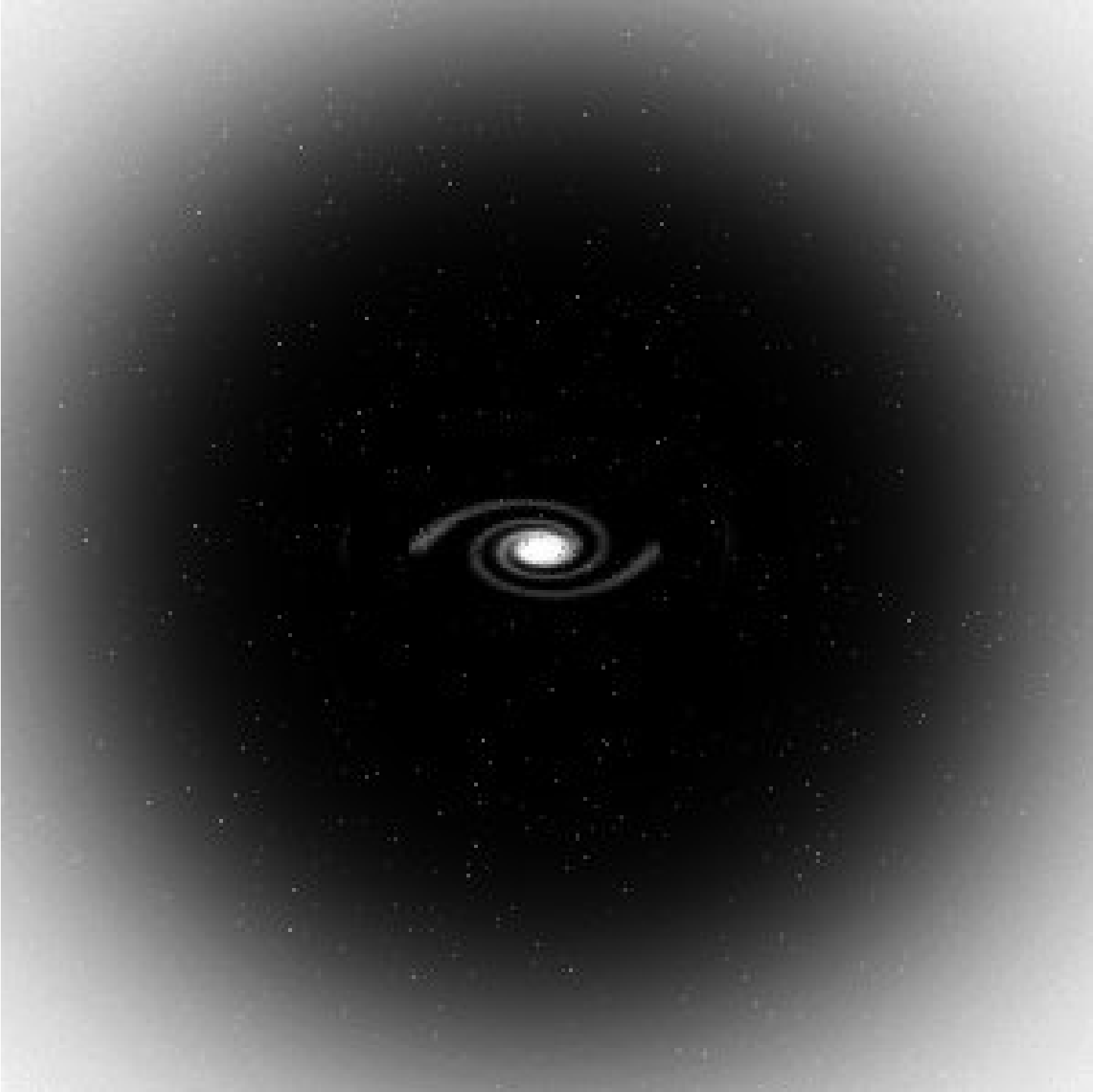
DISTRIBUTION OF DARK MATTER IN NGC 3198



Rotazione delle Galassie & Materia Scura

Si usano i Doppler shift per misurare le curve di rotazione
simile alla VL \rightarrow rapida salita, piatte sino ai bordi della galassia
 \rightarrow alone di materia scura : $M_{\text{halo}} \sim 10 \times M_{\text{stars}}$
natura dell'alone sconosciuta, probabilmente WIMP





Usiamo i numeri ...

- Una galassia come la Via Lattea o Andromeda ha una massa visibile totale di $\sim 6 \times 10^{10} M_{\text{sole}}$.
- La sua velocità di rotazione $\sim 220 \text{ km/s}$
- il raggio $\sim 30 \text{ kpc}$

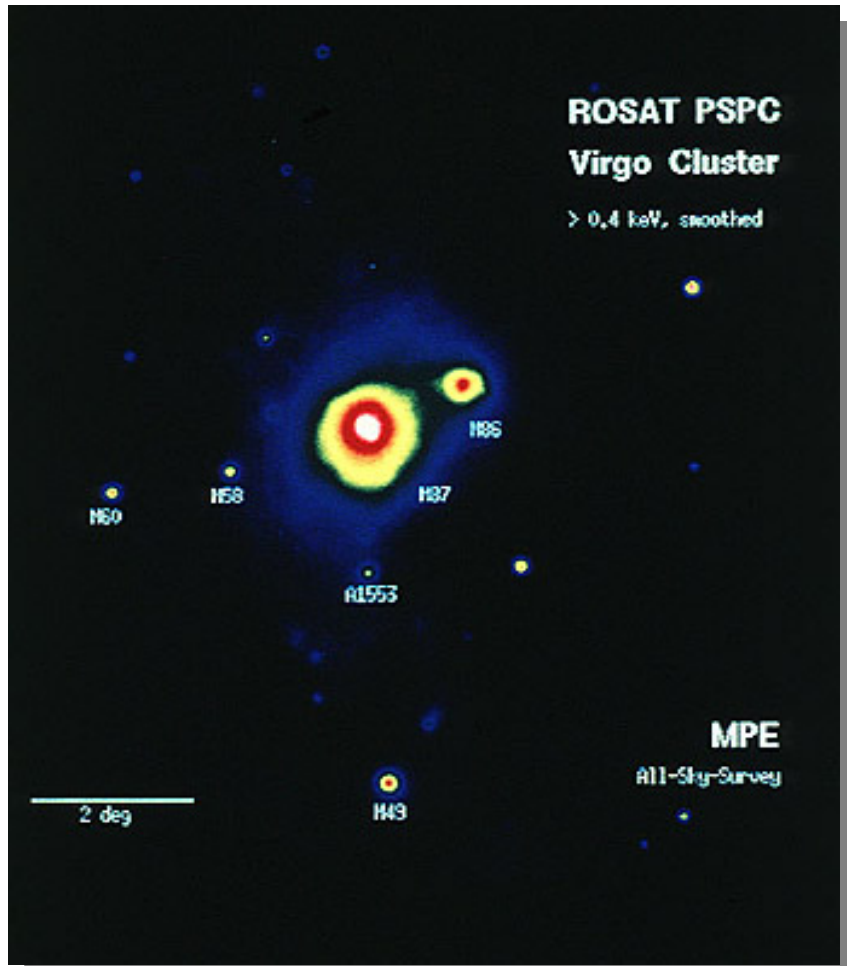
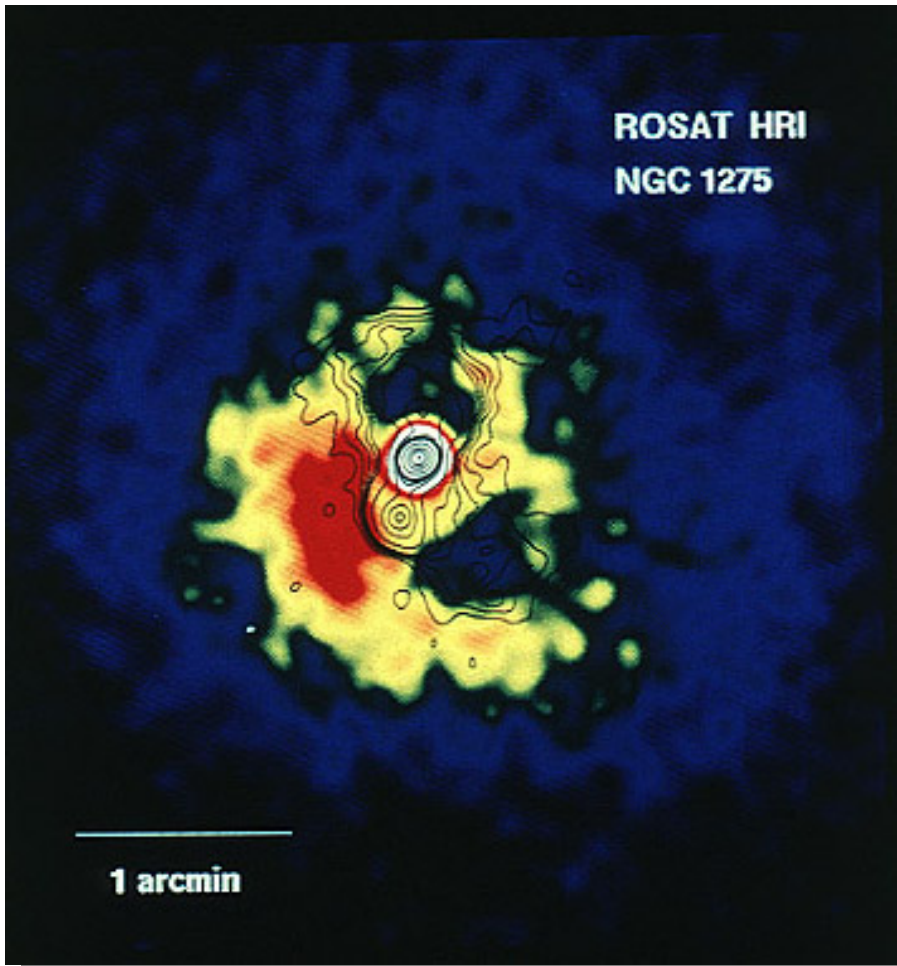
- Newton:

$$v_{\text{rot}} = \sqrt{\frac{GM}{R}} \Rightarrow M = \frac{v_{\text{rot}}^2 R}{G}$$

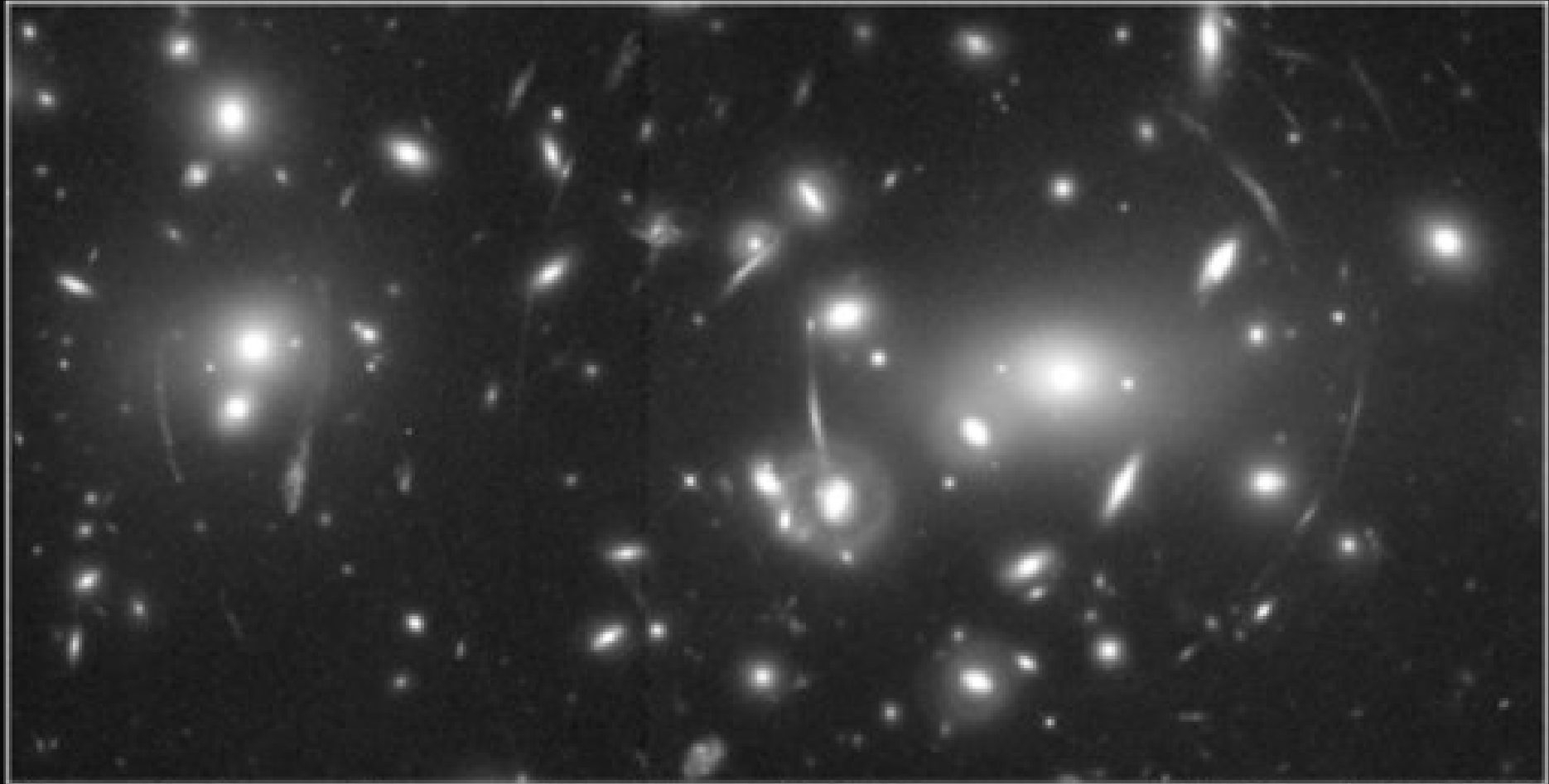
\Rightarrow massa totale: $\sim 3.3 \times 10^{11} M_{\text{sole}}$

\Rightarrow ~ 5 volte + massa di quella visibile

Evidenza di materia scura: cluster X



cluster di galassie

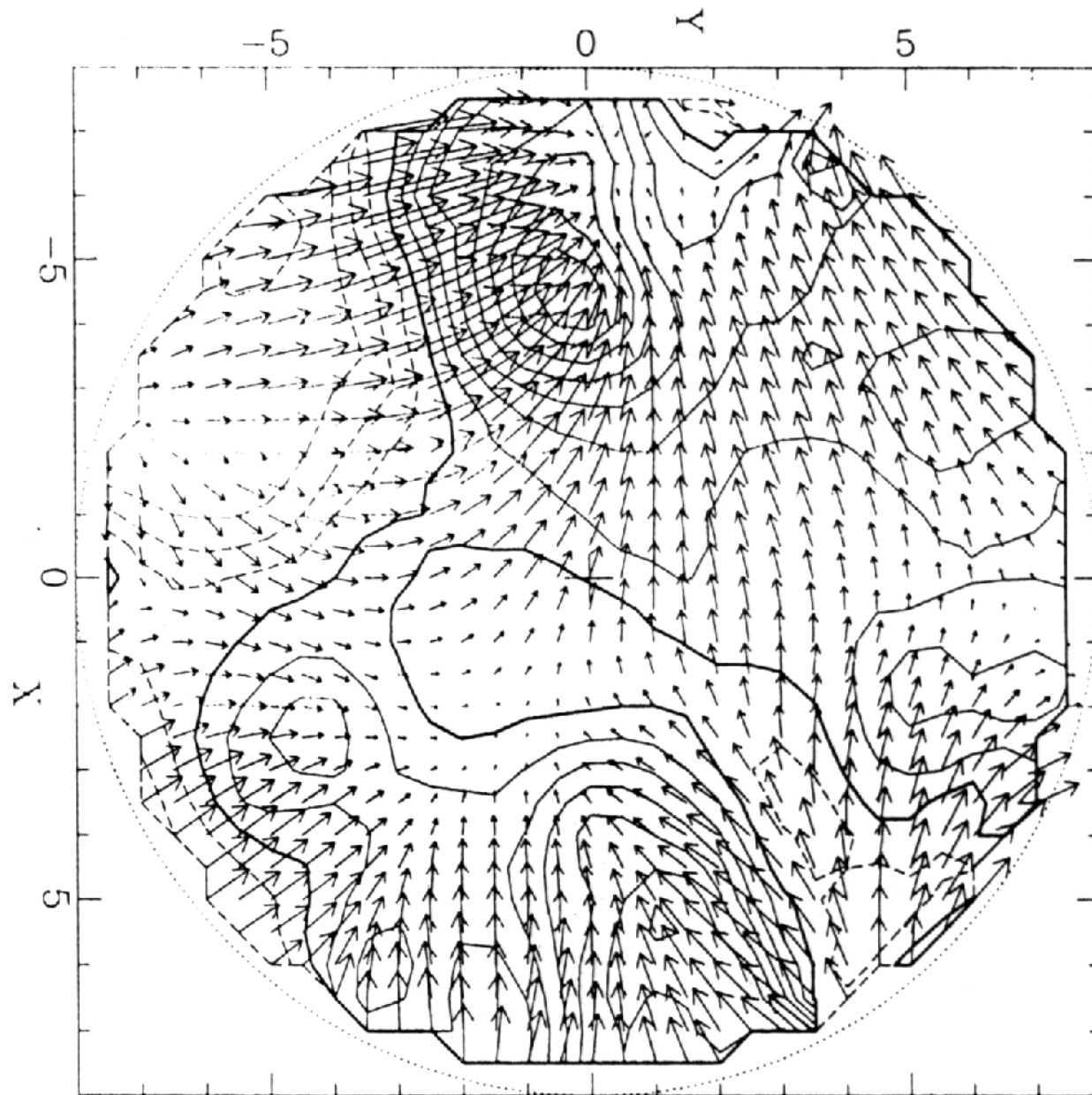


Gravitational Lens in Abell 2218

HST · WFPC2

PF95-14 · ST ScI OPO · April 5, 1995 · W. Couch (UNSW), NASA

Flussi su grande scala



**~90% della massa
dell'Universo è di un qualche tipo
di materia scura (dark),
probabilmente di natura diversa
da quella di cui siamo fatti noi.**

**90% materia scura ?
questi astronomi devono essere
pazzi !**

Contenuto di Materia

Se la densità totale di materia, Ω_M , è la somma della materia barionica (stelle e gas) e della materia scura (rivelata solo attraverso effetti gravitazionali)

$$\Omega_M = \Omega_B + \Omega_{DM}$$

Si riesce a misurare Ω_B da due eventi cosmici molto diversi:

- **Nucleosintesi del Big Bang**

- L'abbondanza degli elementi cosmici (deuterio, elio, idrogeno)
redshift = 1 miliardo! (età = pochi minuti)
Fisica nucleare (forze nucleari forti e deboli)

- **Ricombinazione**

- Forma dello spettro di **CMB** (dimensioni e forme dei picchi)
redshift = 1000 (età = 1 milione di anni)
Fisica atomica (forza elettromagnetica)

Entrambe le misure danno **$\Omega_B = 0.02$ (materia ordinaria)**

Il rapporto tra tutta la materia (tutto ciò che si raggruppa- **barioni, neutrini, materia scura) e la materia ordinaria (**barioni**) può essere misurato sia con lo **spettro del CMB** che tramite il **clustering delle galassie**.**

CMB dà $\Omega_M/\Omega_B = 7$

Clusters danno $\Omega_M/\Omega_B = 9$

Due punti:

- 8. Questi numeri sono consistenti tra loro, usando due fisiche diverse (CMB-ricombinazione e clustering-gravitazione).**
- 10. Il risultato implica che la materia scura è più abbondante della materia ordinaria di un fattore 7-9 (trascurando i neutrini)**

Da ciò si ricava: $\Omega_M = 0.33$

Massa visibile nell'Universo:

$$\Omega_* \approx 0.01$$

Implicazioni:

- Meno dei limiti imposti dalla nucleosintesi $\Omega_{\text{bary}} = 0.04$ in barioni \Rightarrow consistente
- Gran parte dei barioni nell'Universo ($\sim 90\%$) non brillano [o troppo deboli per essere rivelati]
 - **gas e polvere**
 - **Resti di stelle (Nane Bianche, Stelle di neutroni, Buchi Neri)**
 - **Nane Brune [stelle fallite]**

Risultato finale:

$$\Omega_m \approx 0.3$$

Implicazioni:

- Gran parte della massa nell'Universo è scura
- Gran parte di essa è anche non-barionica
- Il principio Copernicano perfetto
 - La Terra non è al centro del sistema solare
 - Il Sole non è al centro della Via Lattea
 - La Via Lattea non è al centro dell'Universo
 - E forse noi non siamo fatti della stessa materia che è la più abbondante nell'Universo

D: di cosa è fatta ?

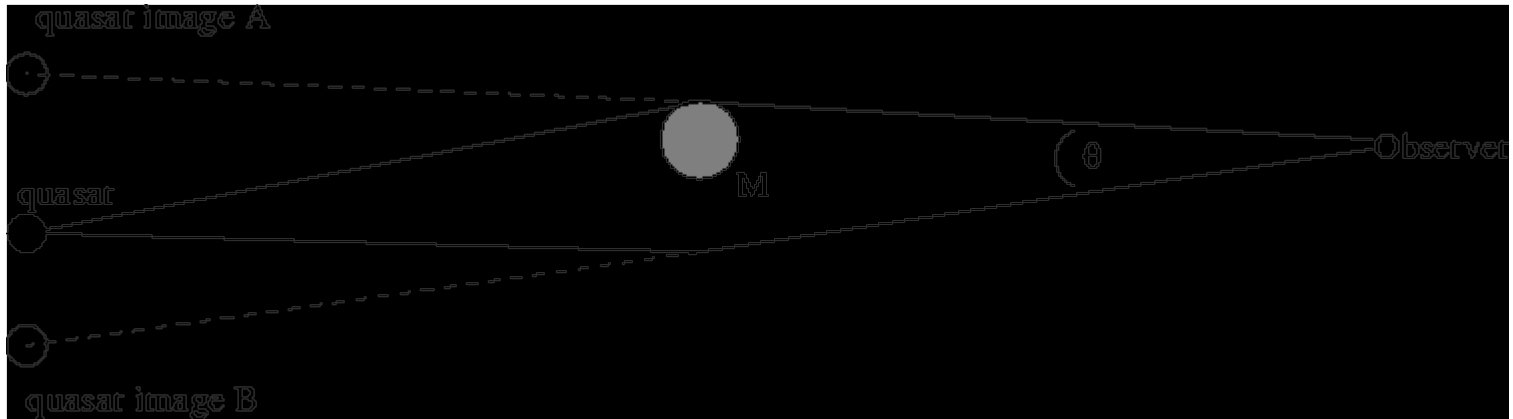
R: MACHOs o WIMPs

MACHOs ?

- MAssive Compact Halo Objects
- Nane Brune (stelle non massive a sufficienza da poter brillare)
- Nane Bianche deboli (relitti di stelle simili al Sole)
- Buchi Neri massicci (stelle così massicce che neppure la luce può uscire)
- **Ma:** se la DM sono MACHOs, qualcosa non funziona con la nucleosintesi.

Come vedere i MACHOs ?

- Attraverso Lenti Gravitazionali:

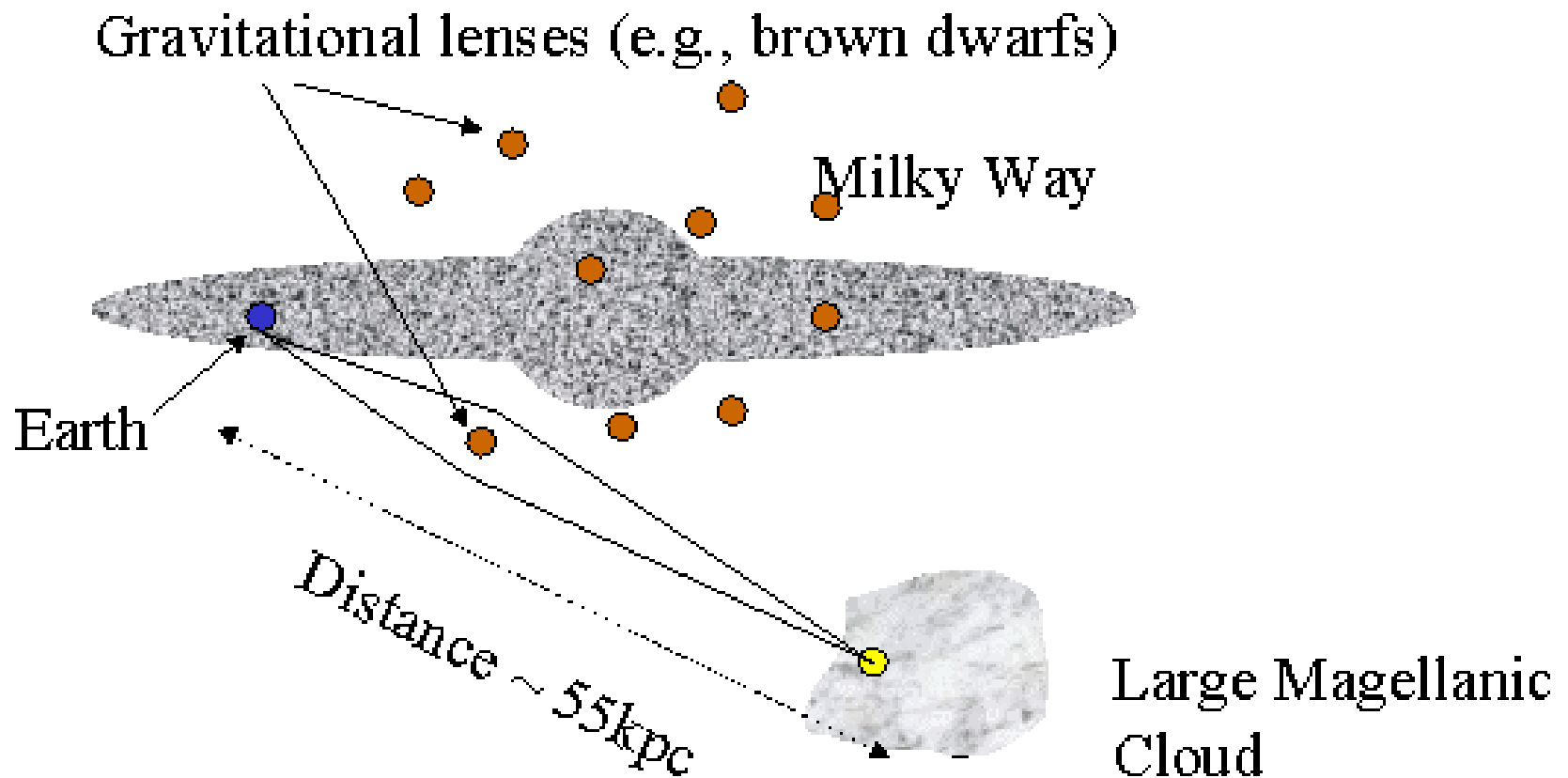


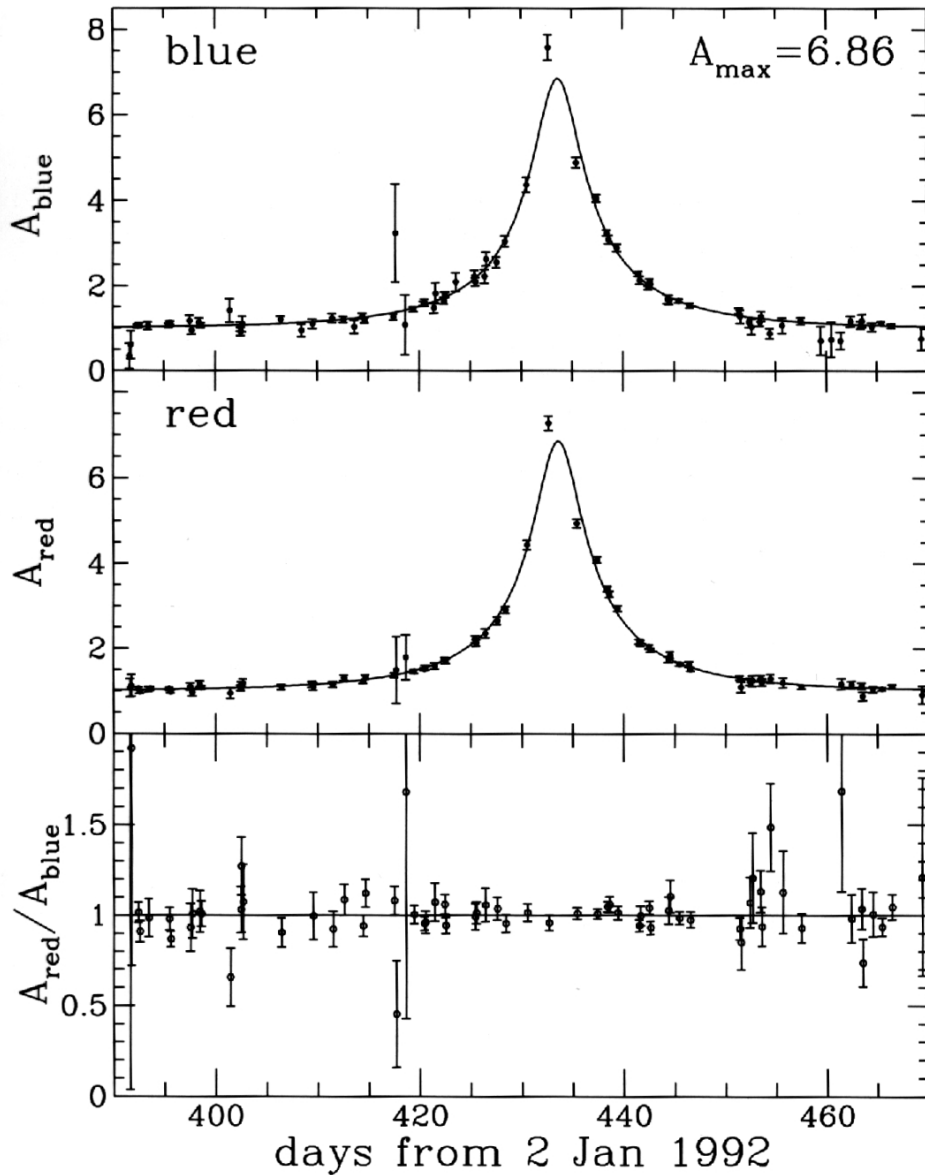
- Se l'oggetto davanti è di piccola massa, l'immagine è troppo piccola per essere osservata
- Ma l'amplificazione è osservabile



- Qual'è la probabilità di tale amplificazione per una stella nella Via Lattea ?
- Una ogni 10 milioni di anni

- Soluzione: osserva 10 milioni di stelle simultaneamente





Ingrandimento
dovuto a lenti
gravitazionali

Non ci sono
sufficienti Nane
Brune nella Via
Lattea per
giustificare la
Materia Scura.

WIMPs ?

- Weakly Interacting Massive Particles
- Neutrini massivi
 - Sappiamo che esistono!
 - Non è sicuro che abbiano massa
 - Materia scura calda (calda: in moto a velocità prossime a quella della luce)
- Altra particella (ancora non scoperta) predetta dai fisici delle particelle
 - Materia scura fredda (fredda: in moto a velocità molto inferiori a quella della luce)

If it's not Dark

It doesn't Matter

La legge di Hubble

Legge dovuta all'espansione cosmica

Le distanze delle galassie si ottengono dai redshifts

esempio: $V_{\text{gal}} = 7000 \text{ km/s}$; $[H] = \text{km/s/Mpc}$

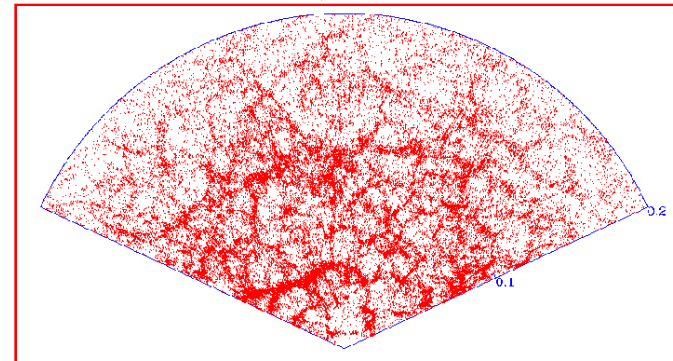
$$d = V / H = 7000 / 70 = 100 \text{ Mpc}$$

funziona fino a oltre $\sim 5 \text{ Mpc}$ (“casuale” $V \sim 300$)

noti $\sim 10^6$ redshifts di galassie

→ mappa della distribuzione delle

Galassie vicine

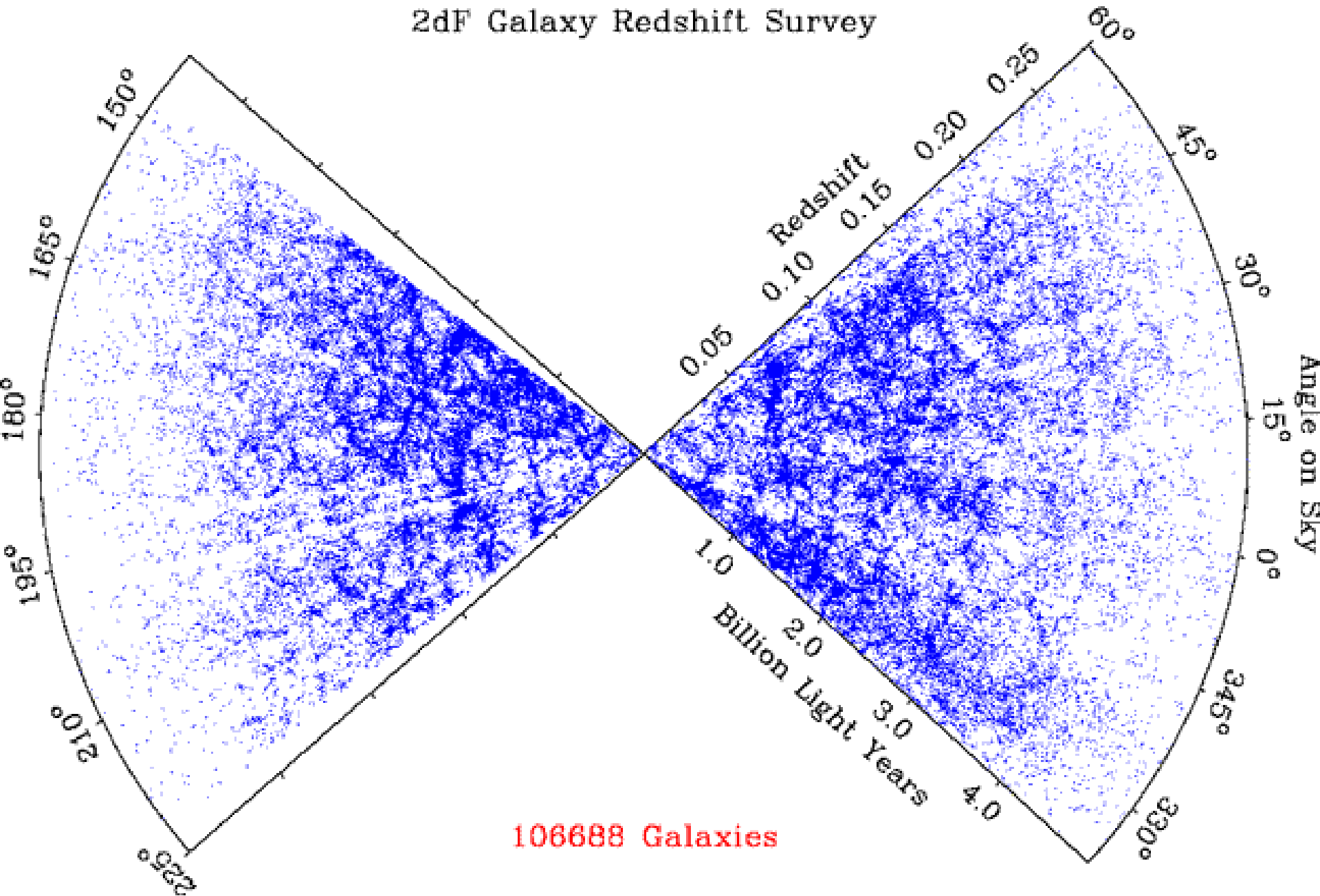


misura delle distanze delle galassie lontane

→ distanza ci dà “look-back time” → cronologia delle galassie

e.g. $3000 \text{ Mpc} = 10 \text{ Gyr} \rightarrow 4 \text{ Gyr}$ dopo il Big Bang

2dF Galaxy Redshift Survey



106688 Galaxies

