

# Velocità stellari

- La velocità media del sistema stellare relativamente al sole e':

$$(\bar{U}, \bar{V}, \bar{W}) = \left( \sum U_i/N, \sum V_i/N, \sum W_i/N \right)$$

- dove N è il numero totale di stelle. Questo è il moto del LSR
- Il moto del sole relativo a LSR è:

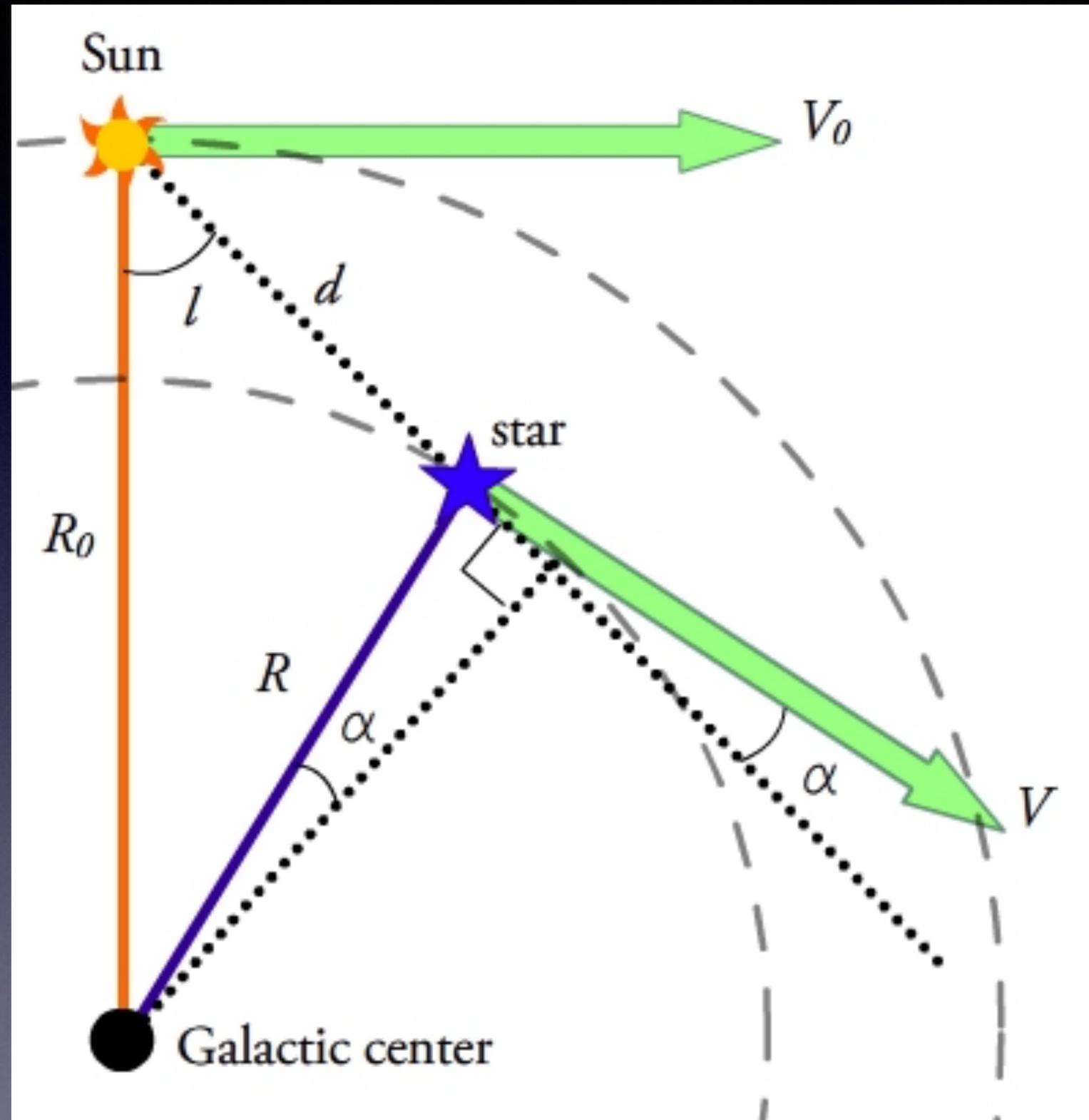
$$(U_{\odot}, V_{\odot}, W_{\odot}) = -(\bar{U}, \bar{V}, \bar{W})$$

- La prima proprietà che si osserva è la distribuzione delle velocità stellari casuali ed esse non sono distribuite isotropicamente rispetto a LSR

$$(U_i - \bar{U}, V_i - \bar{V}, W_i - \bar{W})$$

- In particolare, le stelle hanno moti casuali maggiori nella direzione radiale. Questo è dovuto alla rotazione differenziale della Galassia

# Le costanti di Oort e il moto delle stelle vicine al Sole



# Le costanti di Oort e la rotazione galattica

- Data una stella a distanza  $d$  dal Sole, di longitudine galattica  $l$ , si assuma che sia la stella che il Sole percorrono orbite circolari attorno al centro galattico di raggi  $R$  ed  $R_0$
- Le velocità rotazionali siano  $V$  e  $V_0$ , vogliamo calcolare la velocità radiale e la velocità tangenziale della stella, come osservate dalla posizione del Sole

# Velocità radiale e trasversale

$$V_R = \omega R \cos(\alpha) - \omega_0 R_0 \sin(l)$$

- Dove  $V_R$  e  $V_T$  sono la velocità radiale e trasversale della stella

$$V_T = \omega R \sin(\alpha) - \omega_0 R_0 \cos(l)$$

# Costanti di Oort

- Dalla Figura si vede che  $R\cos(\alpha)=R_0\sin(l)$  e che  $R\sin(\alpha)=R_0\cos(l)$ :

$$V_R = (\omega - \omega_0)R_0\sin(l)$$

- Sostituendo nelle espressioni di  $V_R$  e  $V_T$  si ottiene:

$$V_T = (\omega - \omega_0)R_0\cos(l) - \omega d$$

# Costanti di Oort

- Sviluppiamo  $(\omega - \omega_0)$  in serie di Taylor ed otteniamo:

$$(\omega - \omega_0) = (R - R_0)(d\omega/dr)_{R_0}$$

- con la derivata calcolata in  $R_0$
- E sostituendo nelle espressioni della velocità radiale e trasversale otteniamo:

$$V_R = A d \sin(2l)$$

$$V_T = A d \cos(2l) + B d$$

- avendo anche imposto  $R_0 = \omega + d \cos(l)$

# Costanti di Oort

- Dove

$$A = -1/2R_0(d\omega/dR)_{R_0}$$

- è la costante di shear e

$$B = -1/2R_0(d\omega/dR)_{R_0} - \omega_0$$

- è la costante di vorticity

# Come si misurano le costanti di Oort

- Le costanti di Oort si misurano partendo da :

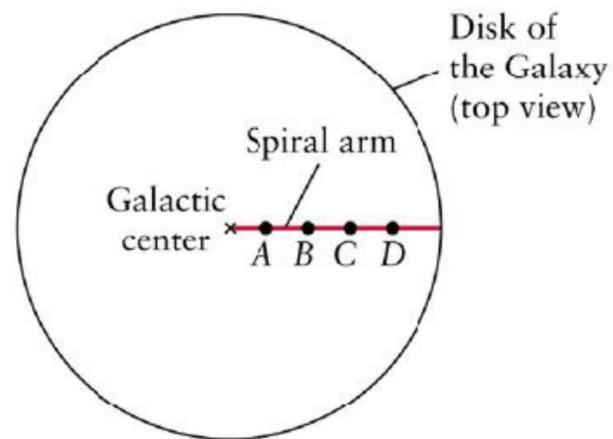
$$v_R/d = A \sin 2l$$

- graficando il valore di  $v_R/d$  quando sia noto, in funzione di  $\sin 2l$ . Questo da' una sinusoide di ampiezza A.
- La costante B la si deriva, una volta nota A, dai moti propri perché  $v_T = \mu d$  dove  $\mu$  e' il moto proprio
- I valori delle costanti di Oort sono:
- A=14 km/sec/kpc e B=-12 Km/sec/kpc (IAU 1985)

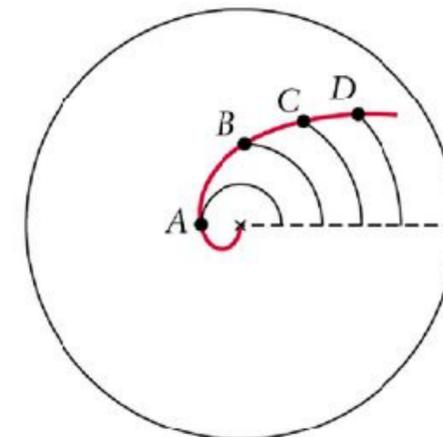
# Struttura di spirale: winding dilemma

## The Winding Dilemma

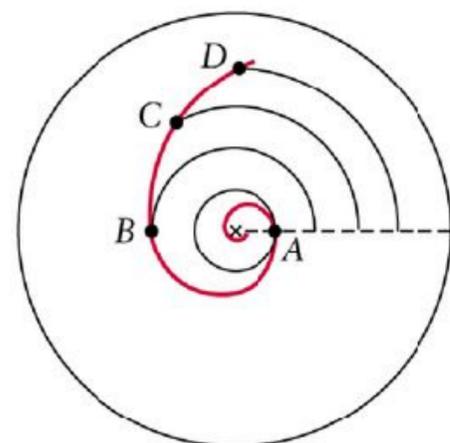
A consequence of  $v = \text{const}$  is that the angular velocity,  $\omega = v/r$ , decreases with radius, which leads to the dilemma that the spiral arms should wind up very quickly;



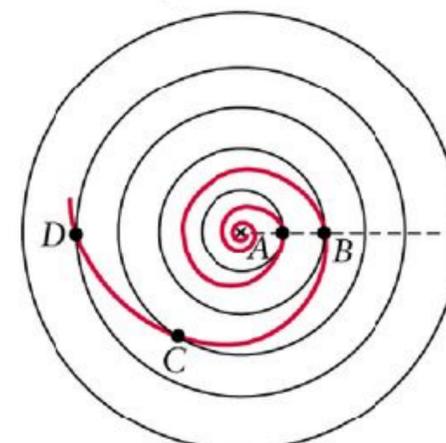
a



b After  $\frac{1}{2}$  orbit of star A



c After one orbit of star A



d After two orbits of star A

# Struttura di spirale

- A causa della rotazione differenziale sul disco galattico, dovremo vedere bracci di spirale avvitatissimi dopo  $10^{10}$  anni di rotazione!
- Lin & Shu (1963) proposero la teoria delle onde di densità di spirale, secondo la quale i bracci di spirale non sono fatti sempre della stessa materia
- La struttura di spirale non è altro che un'onda di densità mantenuta dall'autogravità dovuta alla distribuzione di materia su larga scala nella Galassia
- Dobbiamo pensare ad un'autostrada galattica con diverse corsie e in cui ci siano dei lavori in corso (perturbazioni del potenziale gravitazionale). Si crea un ingorgo ma le macchine nell'ingorgo non sono mai le stesse. Le perturbazioni creano contrasti di densità (onde) che sono massimi nei bracci di spirale che corrispondono ai lavori in corso



# L'evoluzione delle galassie

- Le galassie sono fatte di stelle, gas e polveri
- Le galassie evolvono perché evolvono le stelle e cambia nel tempo la percentuale di stelle, gas e polveri
- Le stelle sintetizzano elementi pesanti nel loro interno e li restituiscono al gas interstellare alla loro morte
- Dal gas interstellare nascono stelle continuamente e la loro composizione chimica rispecchia quella del gas da cui si sono formate
- Questa si chiama **evoluzione chimica delle galassie**
- Anche il contenuto luminoso delle galassie evolve perché le stelle evolvono. Questa è **l'evoluzione spettro-fotometrica delle galassie**

# Evoluzione Chimica delle Galassie

- Ingredienti fondamentali:
- a) Condizioni iniziali
- b) Funzione di nascita stellare
- c) La massa restituita al mezzo interstellare dalle stelle singole sotto forma di elementi chimici
- d) Possibili flussi di gas (entranti o uscenti)
- e) La composizione chimica dei flussi di gas

# La funzione di nascita stellare

- La funzione di nascita stellare e' data dal prodotto del tasso di formazione stellare x la funzione iniziale di massa (IMF):

$$\psi(t)\phi(m)dt dm$$

- La IMF si normalizza come:

$$\int_{0.1}^{100} m\phi(m)dm = 1$$

# I dintorni del Sole

- Definizione dei dintorni solari (solar neighbourhood): una sezione cilindrica di 1 kpc di raggio ed 1 kpc di altezza, centrata nel Sole
- Tale zona viene considerata chimicamente omogenea

# Evoluzione chimica dei dintorni solari (modello semplice)

- L'evoluzione chimica delle galassie studia come si è evoluto il gas e la sua composizione chimica in una galassia
- Consideriamo i dintorni solari e calcoliamo l'evoluzione chimica del gas in essi contenuto
- Il Modello Semplice di evoluzione chimica ha 4 ipotesi:
- a) il sistema è chiuso, b) il gas iniziale è privo di metalli, c) IMF costante nel tempo, d) gas chimicamente omogeneo ad ogni tempo  $t$

# Modello Semplice

- Definisco la frazione di gas:

$$\mu = M_g / M_T$$

- La massa in stelle e':

$$M_* = (1 - \mu) M_T$$

- La metallicita' e':

$$Z = M_Z / M_g$$

# Modello Semplice

- Condizioni iniziali

$$M_g(0) = M_T$$

$$Z(0) = 0$$

- Gas primordiale (zero metalli) all'inizio

# Equazioni del Modello Semplice

- Equazione del gas:

$$dM_g/dt = -\psi(t) + E(t)$$

- Dove  $\psi(t)$  e' il tasso di formazione stellare e  $E(t)$  e' il tasso di restituzione di materia da parte delle stelle morenti:

$$E(t) = \int_{m(t)}^{\infty} (m - m_{rem})\psi(t - \tau_m)\phi(m)dm$$

# Ipotesi del riciclaggio istantaneo

- Le masse  $< 1M_{\text{sun}}$  non muoiono mai mentre quelle  $> 1M_{\text{sun}}$  muoiono istantaneamente
- Equivale a trascurare i tempi di vita delle stelle  $> 1M_{\text{sun}}$
- Ipotesi non corretta ma consente di risolvere analiticamente le equazioni chimiche

# Frazione di ritorno di gas di una generazione di stelle

- La frazione di massa di gas restituita da una generazione di stelle nell'ipotesi del riciclaggio istantaneo e':

$$R = \int_1^{\infty} (m - m_{rem}) \phi(m) dm = \text{costante}$$

- La parola frazione si riferisce al fatto che R e' divisa per la normalizzazione dell'IMF

$$\int_{0.1}^{100} m \phi(m) dm = 1$$

# Equazione del gas

- Applicando l'ipotesi di riciclaggio istantaneo, l'equazione del gas si trasforma in:

$$E(t) = \psi(t)R$$

$$dM_g/dt = -\psi(t)(1 - R)$$

# Equazione dei metalli

- L'equazione dei metalli in generale si scrive come:

$$d(ZM_g)/dt = -Z\psi(t) + E_Z(t)$$

$$E_Z(t) = \int_{m(t)}^{\infty} [(m - m_{rem})Z(t - \tau_m) + mp_{zm}] \psi(t - \tau_m) \phi(m) dm$$

# Yield per generazione stellare

- Lo yield per generazione stellare è il rapporto tra i metalli nuovi prodotti da una generazione di stelle e la frazione di massa sotto forma di remnants (nane bianche, stelle di neutroni e buchi neri) e di stelle mancate (brown dwarfs):

$$y_Z = \frac{1}{(1 - R)} \int_0^\infty m p_{Zm} \phi(m) dm$$

- dove  $p_{Zm}$  è lo yield di una stella di massa  $m$ , ovvero la massa in metalli nuova prodotta ed espulsa dalla stella

# Equazione dei metalli

- Applicando l'ipotesi di riciclaggio istantaneo all'equazione dei metalli si ottiene

$$d(ZM_g)/dt = -Z\psi(t) + RZ(t)\psi(t) + (1 - R)y_Z\psi(t)$$

- Dopo alcune manipolazioni algebriche si arriva a:

$$dZ/dM_g = -y_Z/M_g$$

- Che integrata tra 0 e Z e  $M_g(0)$  e  $M_g(t)$  da' la soluzione

# Soluzione del modello semplice

- Applicando l'ipotesi di riciclaggio istantaneo, le equazioni del gas e dei metalli si possono risolvere analiticamente
- La soluzione del modello semplice per i metalli e':

$$Z = y_Z \ln(\mu)^{-1}$$

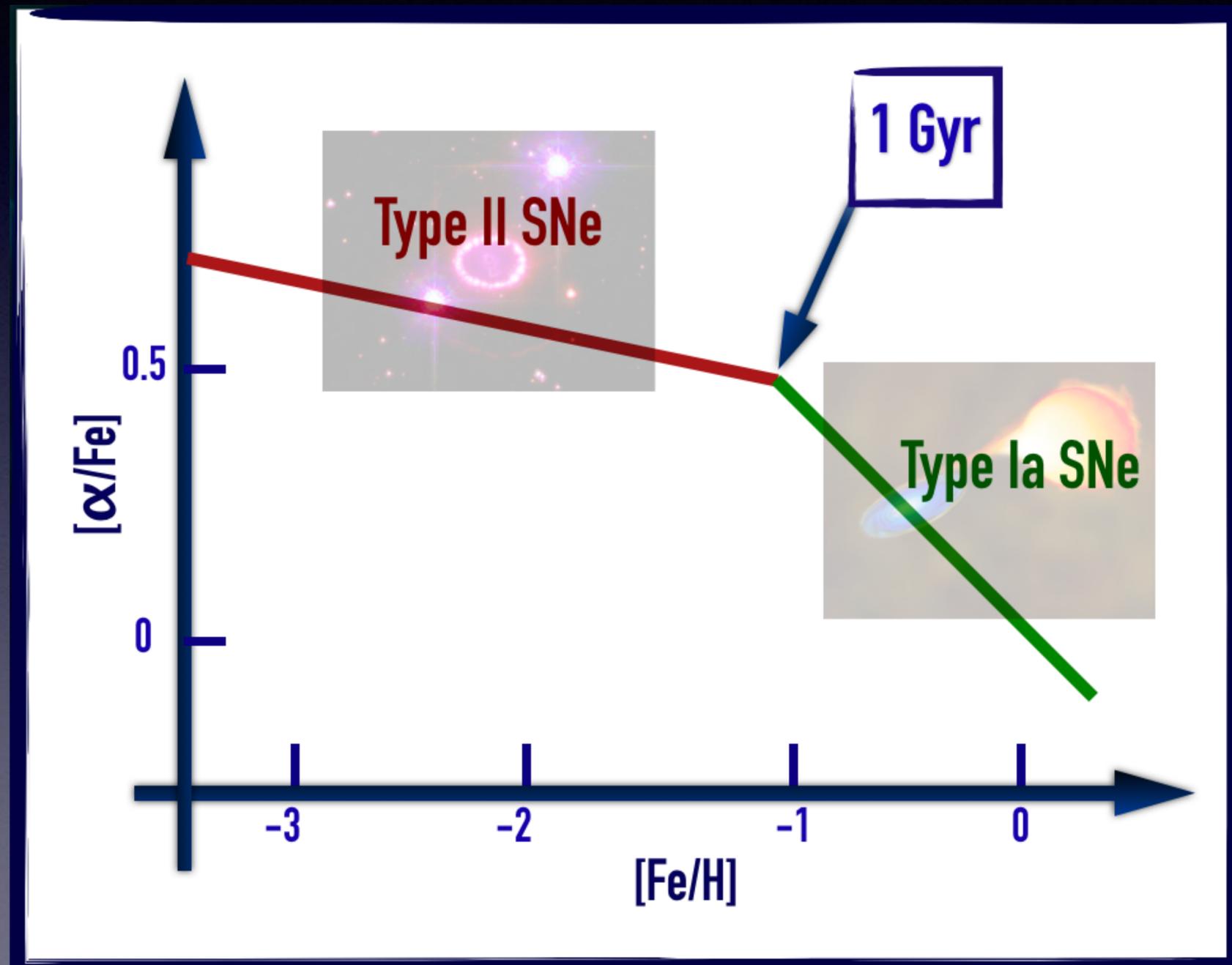
- Dove  $y_Z$  e' lo yield per generazione stellare e  $\mu$  e' il rapporto massa gas/massa totale
- Questo yield e' detto "yield effettivo"

# Conseguenze del Modello Semplice

- La soluzione del Modello Semplice e' ottenuta assumendo il riciclaggio istantaneo, ovvero trascurando i tempi di vita stellari
- Cio' implica che il rapporto tra le abbondanze di due metalli qualsiasi A e B e' sempre costante ed uguale al rapporto tra gli yields

$$X_A/X_B = y_A/y_B = \text{cost}$$

Molti rapporti di abbondanze non sono costanti: time-delay model



# Conseguenze del Modello Semplice

- I rapporti tra elementi alfa (come l'ossigeno) e il ferro nelle stelle galattiche appare non costante in funzione dell'abbondanza del Fe che cresce nel tempo
- L'asse delle X del grafico precedente e' da considerarsi come un asse temporale
- Il cambio di pendenza del rapporto [alfa/Fe] e' dovuto all'intervento ritardato delle SNe Ia nell'arricchimento chimico in ferro. Questa interpretazione e' nota col nome di "time-delay model"
- Le SNe core-collapse formano tutti gli alfa ed una parte del Fe, mentre le SNe Ia formano soprattutto Fe

# Conseguenze del Modello Semplice

- Il problema delle nane G consiste nel fatto che il Modello Semplice non puo' spiegare la distribuzione delle stelle del disco sottile nei dintorni solari in funzione della loro metallicita'
- Il Modello Semplice predice infatti troppe stelle povere di metalli rispetto a quelle che si osservano
- La risoluzione del problema delle nane G piu' accettata e' che i dintorni solari non sono evoluti come prevede un modello chiuso, ma l'accrescimento di gas extragalattico e' stato importante

# Il problema delle nane G

- La frazione in massa delle stelle fino a metallita'  $Z$  in funzione di  $\log(Z/Z_1)$  dove  $Z_1$  e' la metallicita' attuale
- I dati osservativi sono rappresentati dalla linea continua, mentre le previsioni del Modello Semplice sono rappresentate dalla linea tratteggiata
- Nella figura sono mostrate anche le previsioni del modello "infall estremo" (linea punteggiata) e del modello PIE (prompt initial enrichment)

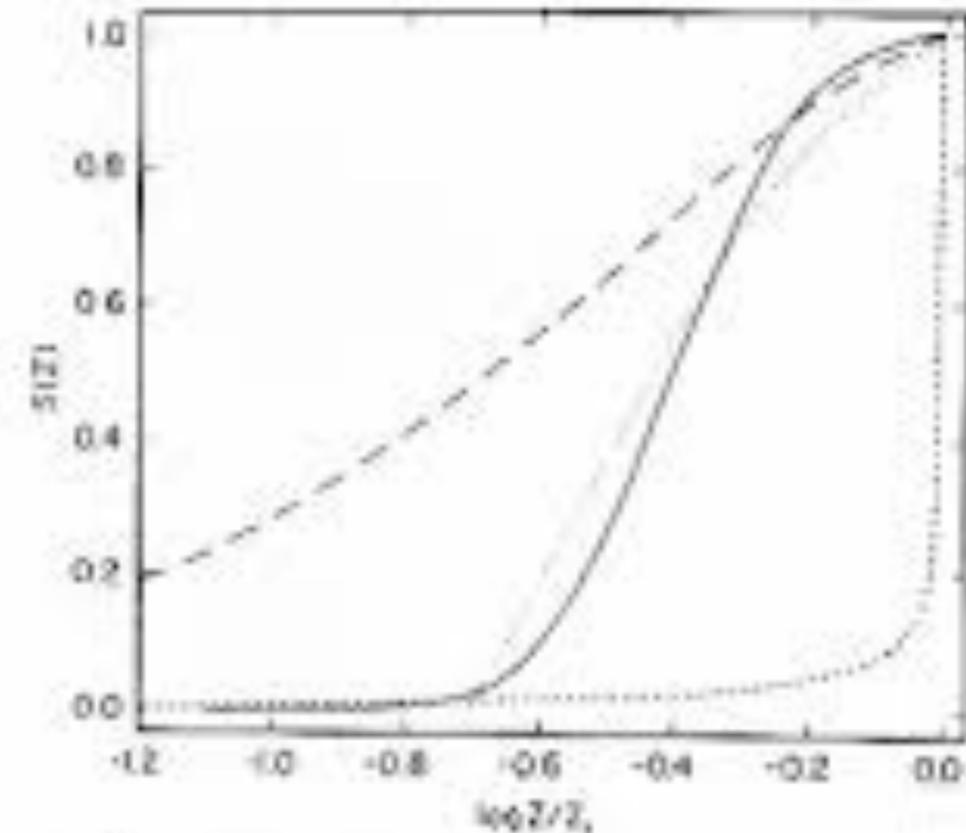


FIGURE 8 Cumulative stellar metallicity distributions.  $S(Z)$  is the fraction of stars that have metallicities  $\leq Z$ , with a maximum value  $Z_1$ . Solid line: log-normal representation of the data for stars in the solar neighborhood;  $Z_1$  is taken as  $2 \cdot Z_\odot$  since more metal-rich stars are very rare;  $\langle \log Z/Z_\odot \rangle = -0.1$ , and  $\sigma(\log Z/Z_\odot) = 0.15$ , allowing for observational errors (e.g., Pagel, 1979a). Long dashes: the "simple" model for chemical evolution (Section 4.2). Short dashes: an extreme infall model (Section 4.2.1). Dots: a model with a finite initial metallicity (Section 4.2.2).

# Modelli numerici di evoluzione chimica

- Per studiare in dettaglio l'evoluzione di singoli elementi chimici occorre considerare i tempi di vita stellari
- Pertanto occorre risolvere le equazioni di evoluzione chimica con un modello numerico
- Modelli numerici sviluppati per la nostra Galassia hanno dato eccellenti risultati (es. il modello “two-infall”)

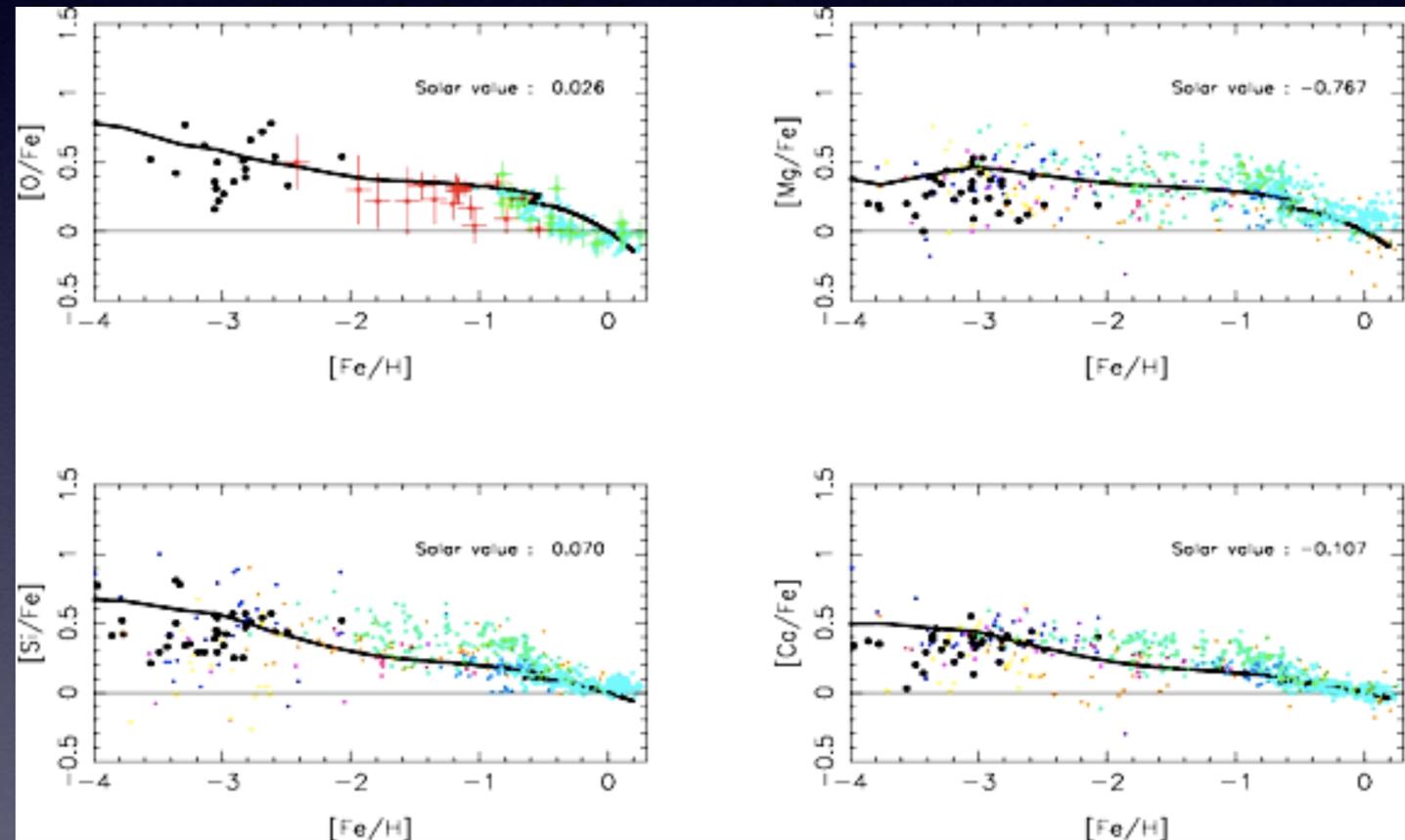
# Il modello “two-infall”

- Il modello “two-infall” assume che alone e disco spesso si formino in un primo evento di accrescimento di gas extragalattico ( su un tempo scala di 1 miliardo di anni circa)
- Durante questo tempo si forma anche il bulge molto rapidamente
- Durante un secondo evento di accrescimento si forma il disco su tempi scala molto piu' lunghi (diversi miliardi di anni) e la formazione e' “inside-out”. Le regioni interne si formano piu' in fretta



# Confronto con i dati stellari nella Galassia

- Confronto tra dati osservativi di  $[\alpha/\text{Fe}]$  vs.  $[\text{Fe}/\text{H}]$  coi risultati del modello “two-infall”
- Come si puo' notare gli elementi alfa (O, Mg, Si, Ca) sono ben riprodotti dal modello sia per le stelle di alone che per quelle di disco



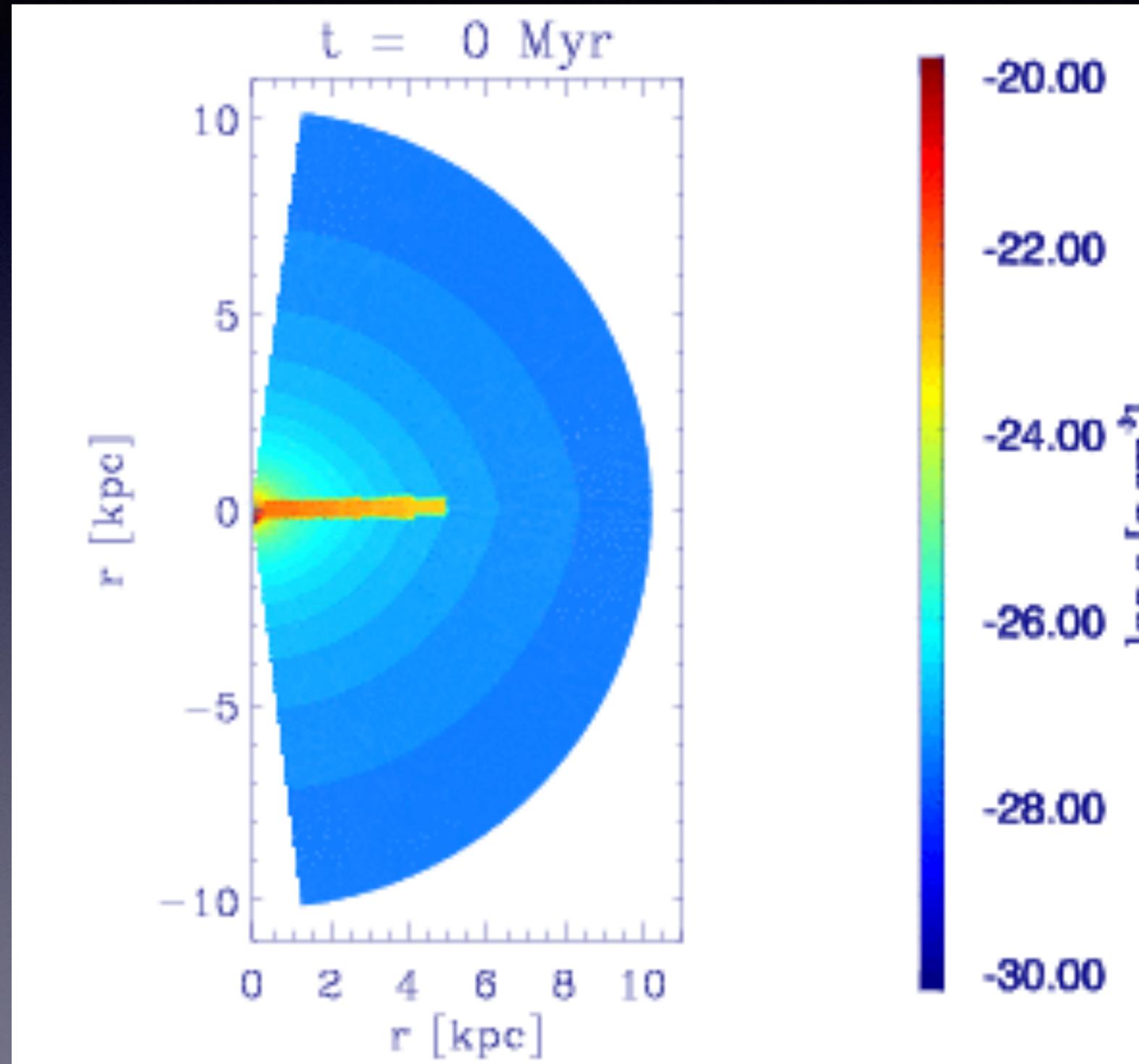
# I venti galattici

- Le galassie possono accrescere (infall) o espellere gas (outflow)
- L'outflow di gas o vento galattico è provocato dalle esplosioni di supernovae che scaldano il gas e dall'energia emessa dal buco nero (AGN) centrale delle galassie
- L'energia trasmessa al gas da questi fenomeni porta il gas a raggiungere la velocità di fuga
- Venti galattici sono osservati in galassie nane (blue compact galaxies)

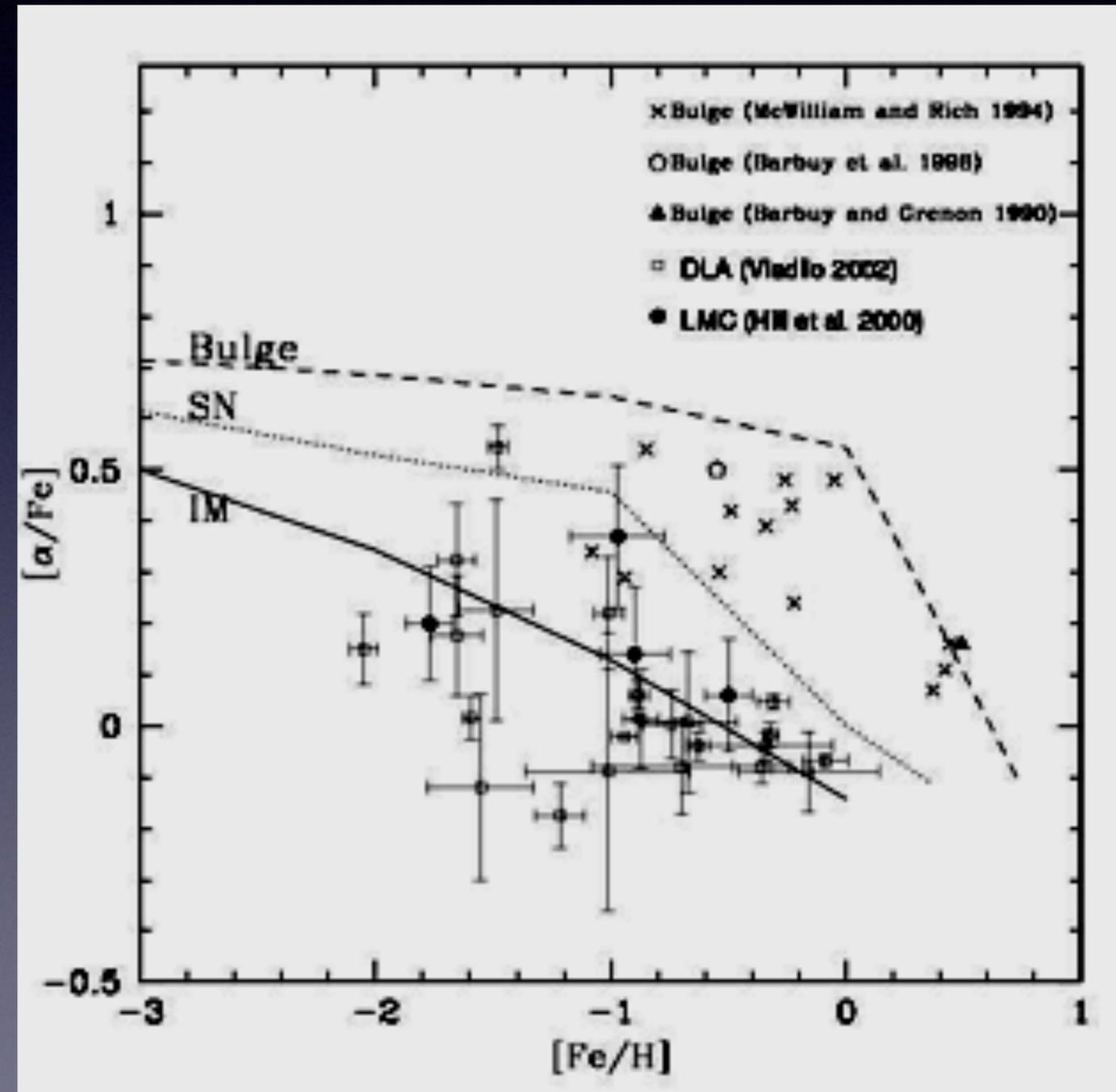
# Flussi di gas

- I flussi di gas, entranti o uscenti, contribuiscono ad abbassare lo **yield effettivo** che compare nella soluzione del Modello Semplice
- L'infall perche' ha una composizione chimica primordiale (no metalli) o con meno metalli di quelli che sono nel sistema e il vento perche' portando via gas deprime il tasso di formazione stellare

# SN driven galactic wind



Il time-delay model: diversi  $[\alpha/\text{Fe}]$  con diversa storia di formazione stellare



# Time-delay model in galaxies

- Galassie di diverso tipo morfologico posseggono diverse storie di formazione stellare e di conseguenza diverse relazioni eta'-metallicita'
- Queste diverse relazioni eta'-metallicita' producono diverse relazioni  $[\alpha/\text{Fe}]$  vs.  $[\text{Fe}/\text{H}]$  come mostrato nelle figure

## EVOLUZIONE IN GALASSIE DIVERSE

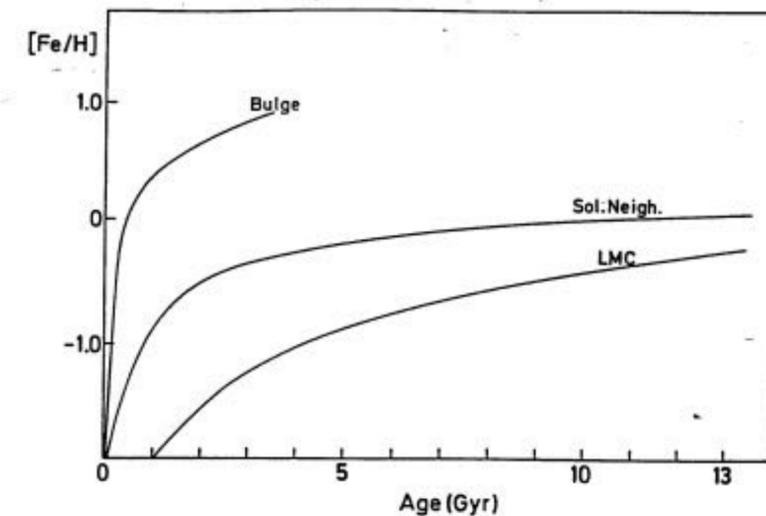


Fig. 47a Predicted age-metallicity relations for different systems (Magellanic Clouds, Galactic bulge and Solar Neighbourhood).

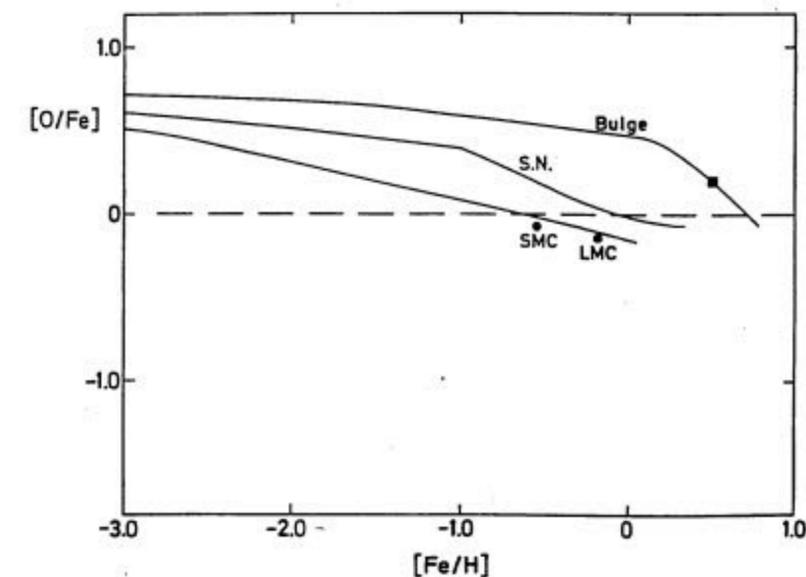


Fig. 47b Predicted  $[\text{O}/\text{Fe}]$  vs.  $[\text{Fe}/\text{H}]$  relations for the same systems as in Fig. 1. The black dots represent the observed  $[\text{O}/\text{Fe}]$  ratio for the two Clouds, from Russel et al. (1988) and Spite and Spite (1990). The black square is the  $[\text{O}/\text{Fe}]$  ratio as measured by Barbuy and Grenon (1990) in bulge stars.

# Dwarf galaxies

- Le galassie nane possono essere divise in due categorie: nane irregolari e nane sferoidali
- Le nane irregolari possono essere quiescenti o con formazione stellare attiva, queste ultime si chiamano **blue compact galaxies**
- Le nane sferoidali non hanno più gas e non formano più stelle, le irregolari ne hanno tanto e hanno formazione stellare attiva
- Tutte le nane presentano rapporti  $\alpha/\text{Fe}$  che indicano un tasso di formazione stellare molto inferiore a quello dei dintorni del Sole (time-delay model)

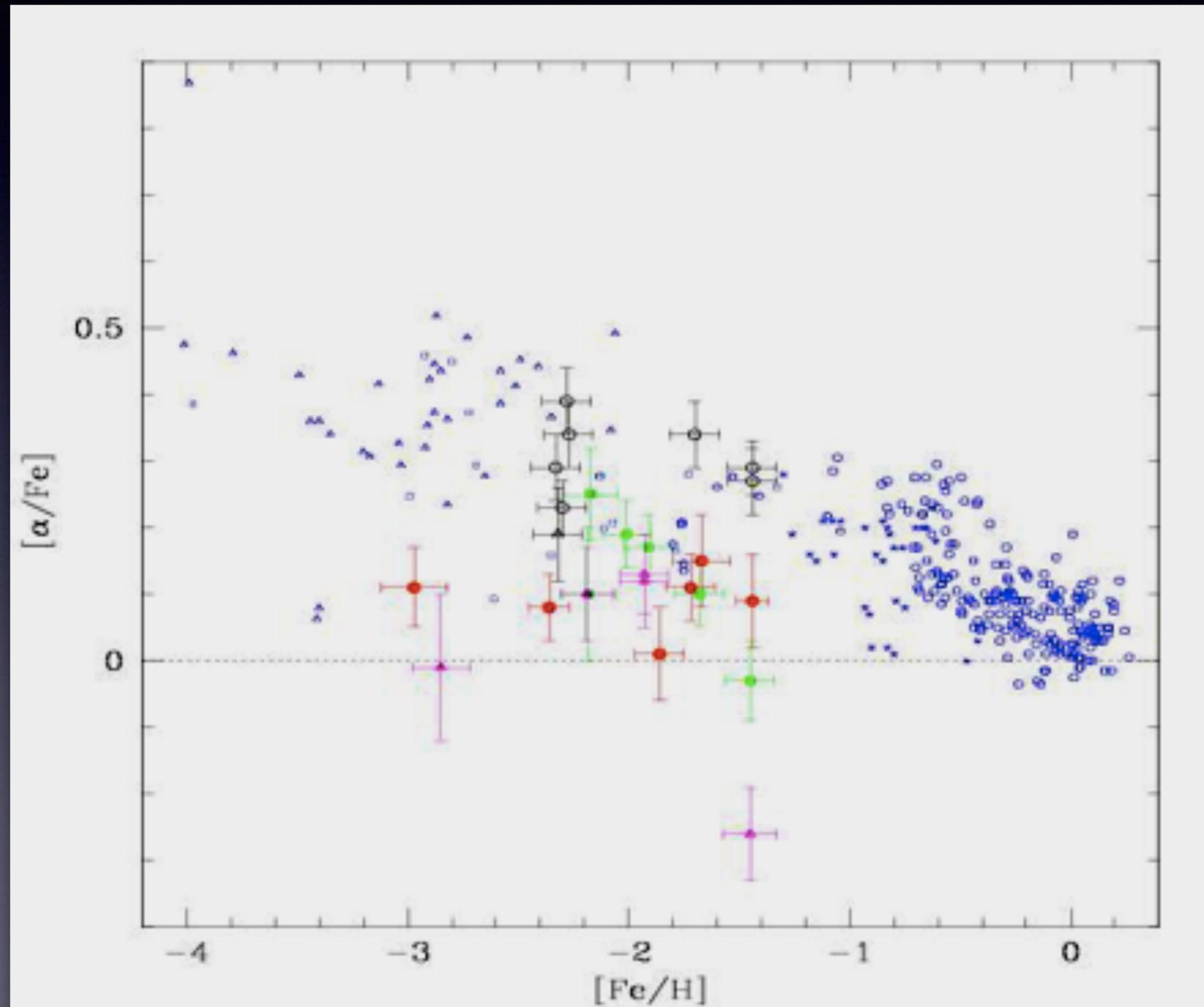
# Dwarf Spheroidals: NGC147 and Fornax



# Blue Compact Galaxies: IZw18



# Alfa/Fe nelle nane sferoidali



Nane Ultra-Deboli (Masse di  $10^3$ - $10^4$  Msun)-  
Eridanus II



# Ellittiche e bulges

- Gli sferoidi ( privi di gas) mostrano alti rapporti alfa/Fe ad alte metallicita'
- Questo fa pensare che abbiano avuto un'intenso tasso di formazione stellare
- Mostrano un lungo plateau per il rapporto alfa/Fe ed un cambio di pendenza a metallicita' maggiore che nei dintorni solari (time delay model)
- Nelle nane e' il contrario: troviamo bassi rapporti alfa/Fe a basse metallicita'

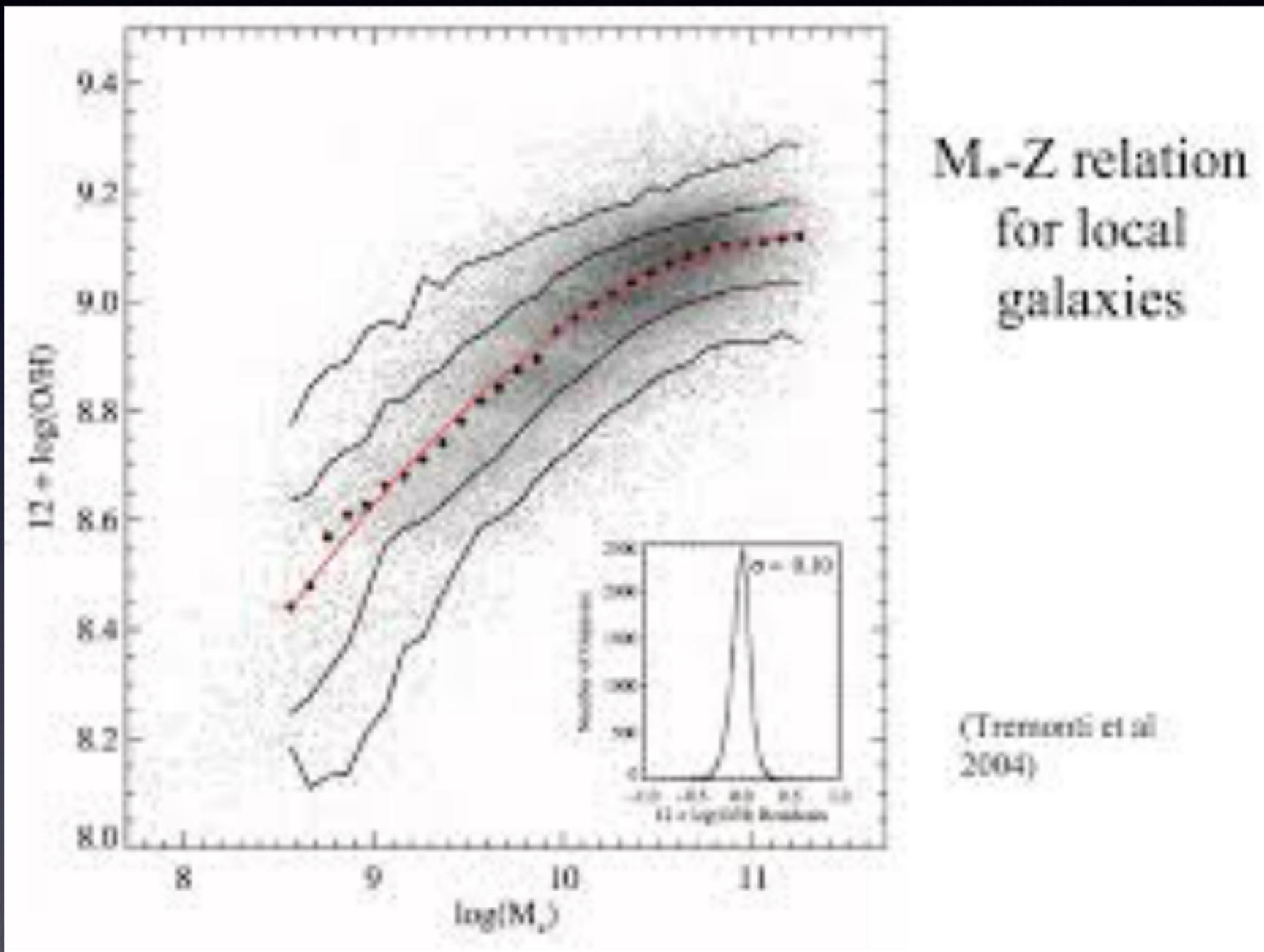
# Modelli per l'evoluzione delle ellittiche

- Modelli di evoluzione chimica delle galassie che ben riproducono le loro proprietà osservative suggeriscono che:
- Hanno subito un intenso burst di formazione stellare con IMF top-heavy (molte stelle massive) di corta durata ( $< 1\text{Gyr}$ ), seguito da un vento galattico indotto da SNe e AGN centrale
- Da questo momento in poi la galassia diventa passiva. Stop alla formazione stellare

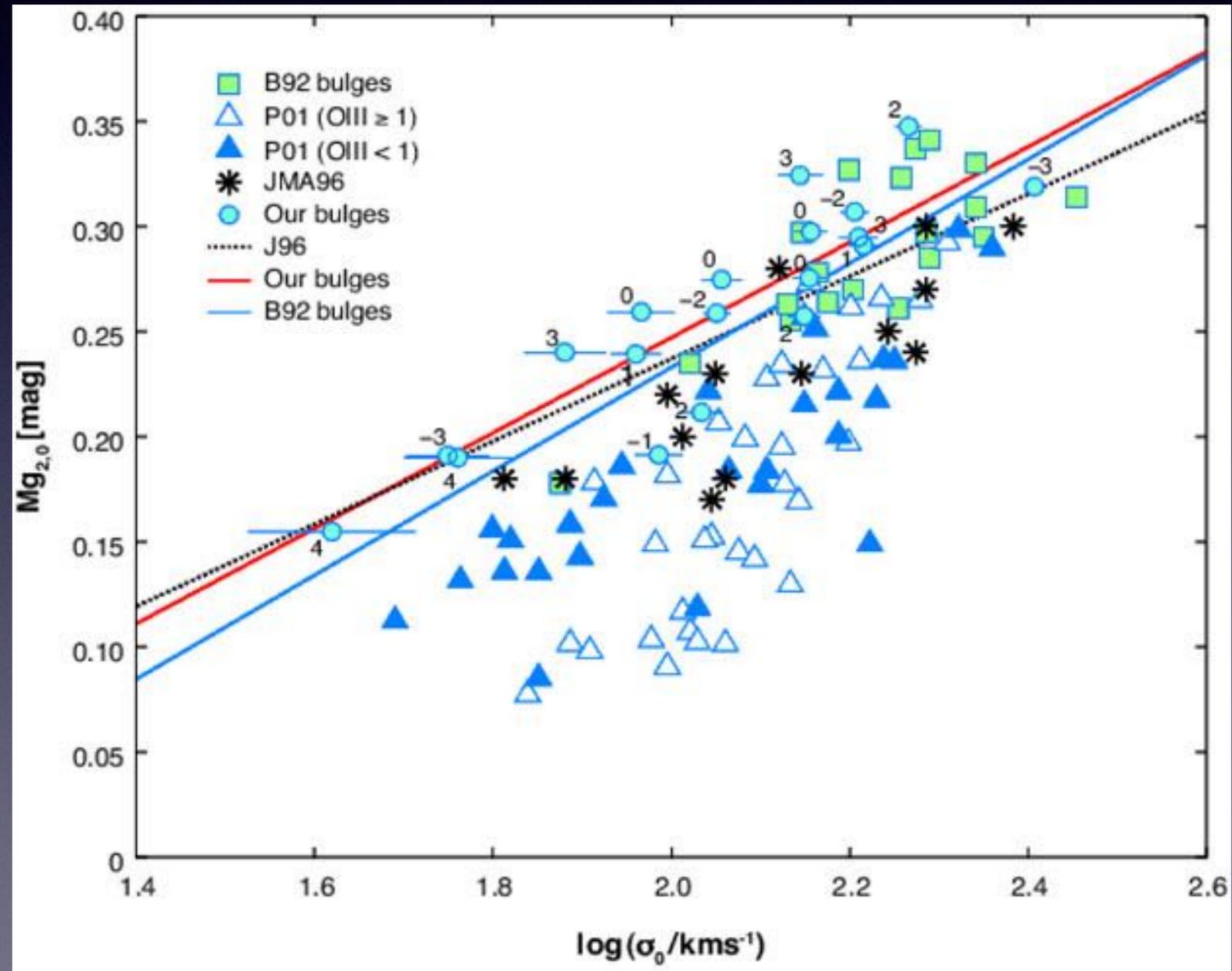
# Modelli di evoluzione per le ellittiche

- Il vento galattico e' mantenuto dalle SNeIa che continuano ad esplodere anche in assenza di formazione stellare
- Questo vento e' ricco di Fe che e' l'elemento maggiormente prodotto da queste SNe
- Integrando i contributi delle varie galassie sulla IMF dell'ammasso si ottiene il Fe osservato

# Relazione Massa-Metallicita': galassie con formazione stellare attiva



# Relazione M-Z per galassie ellittiche Mg2 vs. Sigma (dispersione delle velocità)



# Interpretazione della relazione M-Z

- La relazione M-Z la si può spiegare assumendo che l'efficienza di formazione stellare aumenti in galassie più massive
- Oppure la si può spiegare coi venti galattici che sono più efficienti nelle galassie piccole
- Oppure con la variazione dell'IMF (meno stelle massive nelle galassie più piccole) con la massa galattica, ma manca la motivazione fisica

# Galassie attive ovvero con nuclei galattici attivi (AGN)

- **Galassie di Seyfert**- Galassie spirali con nucleo brillante. Righe di emissione e continuo radio non termico.
- **Radio Galassie**- Generalmente galassie ellittiche. Nucleo simile alle galassie di Seyfert. Radio lobi e jets
- **BL Lacertae**-Non presentano righe di emissione ma un intenso continuo che va dal radio agli X. Rapidissima variabilità
- **QUASARS**-Oggetti puntiformi che si trovano soprattutto ad alto redshift. Eccezionalmente luminosi a tutte le frequenze, Rapida variabilità. Sono prevalentemente ospitati da ellittiche, Alcuni sono radio-attivi ed altri radio-quieti

# Classificazione degli AGN

## Main AGN Classifications

	Radio quiet	Radio loud
Q	Radio quiet quasar (RQQ) <i>Broad absorption line (BAL)</i>	Radio loud quasar (RLQ) <i>Steep radio spectrum (SSRLQ)</i> <i>Flat radio spectrum (FSRLQ)</i>
Sy	Seyfert 1 <i>Sy 1.0.....1.9</i> <i>Narrow line Sy 1 (NLS1)</i>	Broad line radio galaxy (BLRG)
Sy	Seyfert 2 <i>NL X-ray galaxy (NLXG)</i>	Narrow line radio galaxy (NLRG)
L	LINER	Weak line radio galaxy (WLRG)
		Blazar: BL Lac/OVV
		Fanaroff Riley class I (FRI) Fanaroff Riley class II (FRII)



# Radio-Galassie

- Alcune galassie emettono grandi quantità di radiazione dal loro nucleo, soprattutto nel radio (100 volte una galassia normale). Esempi: M82, M87, Centaurus A
- Le radio-galassie mostrano due lobi di emissione lontano dal nucleo. Sono jets di particelle e fotoni sparati fuori dalla galassia e si possono estendere fino ad 1Mpc!
- La maggior parte dell'emissione radio proviene da radiazione di sincrotrone (elettroni accelerati in un campo magnetico)
- Generalmente le radio galassie sono ellittiche giganti. L'attività è iniziata da esplosioni o da un buco nero massiccio



# Quasars (quasi stellar objects)

- Il nome quasar fu coniato da H.Y. Chiu (1963) poiche' appaiono puntiformi come le stelle
- A differenza delle stelle mostrano pero' righe di emissione molto larghe che indicano alti redshift ( $z=6.5$  il massimo finora trovato corrisponde a  $v = 0.94c!$ )
- Si trovano dunque a parecchi miliardi di anni luce di distanza (12Gyr)
- Sono circa 100 volte piu' luminosi delle galassie normali alla stessa distanza (magnitudini tipiche di  $M_B < -23$  che corrispondono a luminosità bolometriche di  $L_{bol} = 10^{47}$  erg/sec)
- Galassie normali:  $-9 > M_{BE} > -23$ ;  $-15 > M_{BS} > -21$ ;  $-13 > M_{IR} > -18$

# QSO radio-loud e radio-quiet

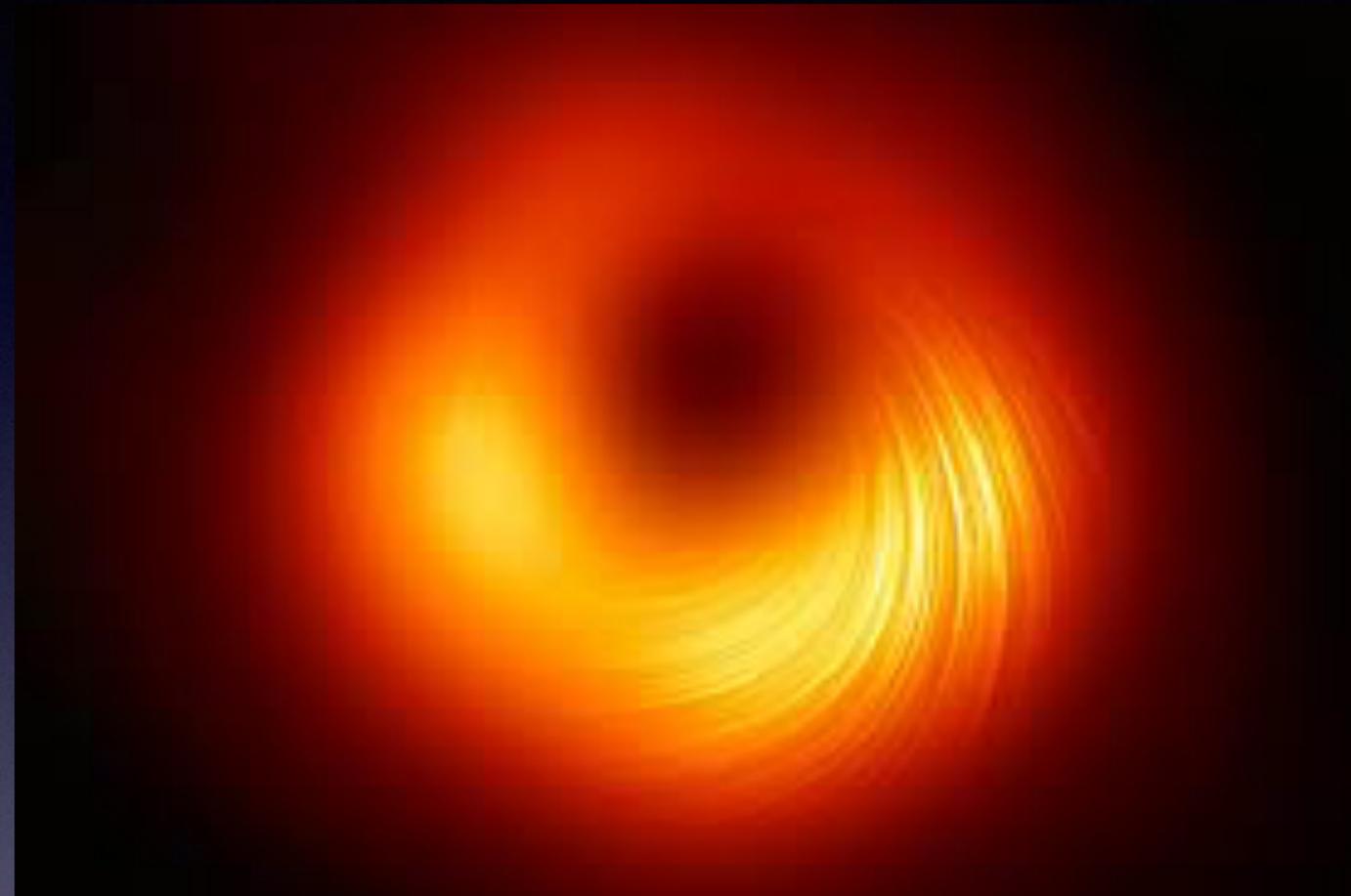
- Il criterio di Kellerman (1989) e' che una galassia e' radio-quiet se:
- $R = L_{5\text{GHz}} / L_{4400\text{GHz}} < 10$
- Le radio-loud sono sempre ellittiche, mentre le radio-quiet sono al 50% in ellittiche e al 50% in spirali

# Quasars

- Il meccanismo che rende attivi i QSO e' dovuto alla materia che viene ingoiata da un buco nero centrale supermassiccio e che si trova in un disco di accrescimento attorno al buco nero
- Alcuni QSO presentano jets e questi sono perpendicolari al disco di accrescimento e sono collimati
- Questo vuol dire che c'e' un campo magnetico come nelle radio-galassie

# La prima foto di un buco nero (6 miliardi di masse solari)

Il buco nero al centro di M87 la cui foto è stata ottenuta da un array di radiotelescopi, l'Event Horizon Telescope, ovvero la collaborazione EHTC  
Risoluzione angolare  
=lunghezza d'onda /  
dimensioni del telescopio

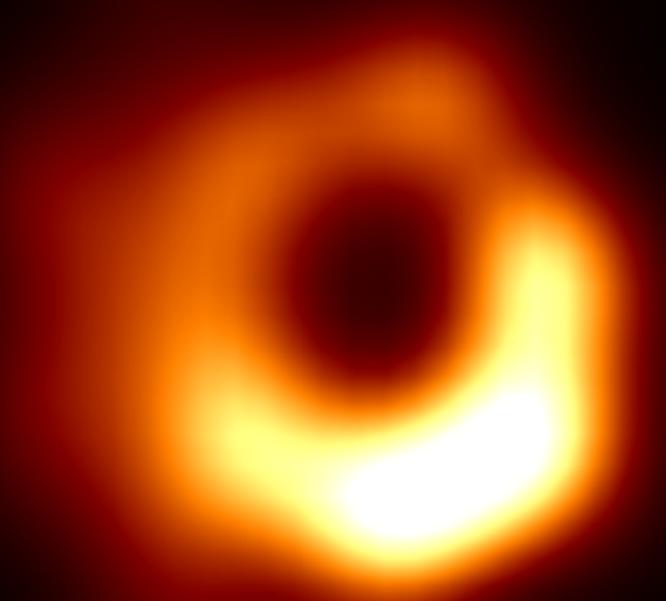


## Simulation



$50 \mu\text{as} = 7 R_{\text{Sch}}$

## EHT Reconstruction



# Quasars

- I QSO mostrano anche una spiccata variabilità. Il che implica che la loro luminosità varia su tempi dell'ordine dei mesi o anni
- Questo vuol dire che la regione che emette non è più grande di alcuni mesi o anni luce
- I QSO sono molto piccoli ed emettono grandi quantità di energia!
- Cosa può produrre tanta energia in un volume così piccolo?

$$\Delta l = c\Delta t$$

- Enormi buchi neri con masse da  $10^8$  a  $10^9 M_{\text{sun}}$  che ingoiano circa  $1-10 M_{\text{sun}}$ /anno
- La materia cadendo nel buco nero si scalda ed irradia energia (buco nero di Kerr  $\eta=30\%$ )

$$L = \eta \dot{M} c^2$$

# Lo spettro di un QSO con le righe di assorbimento di oggetti Interposti

