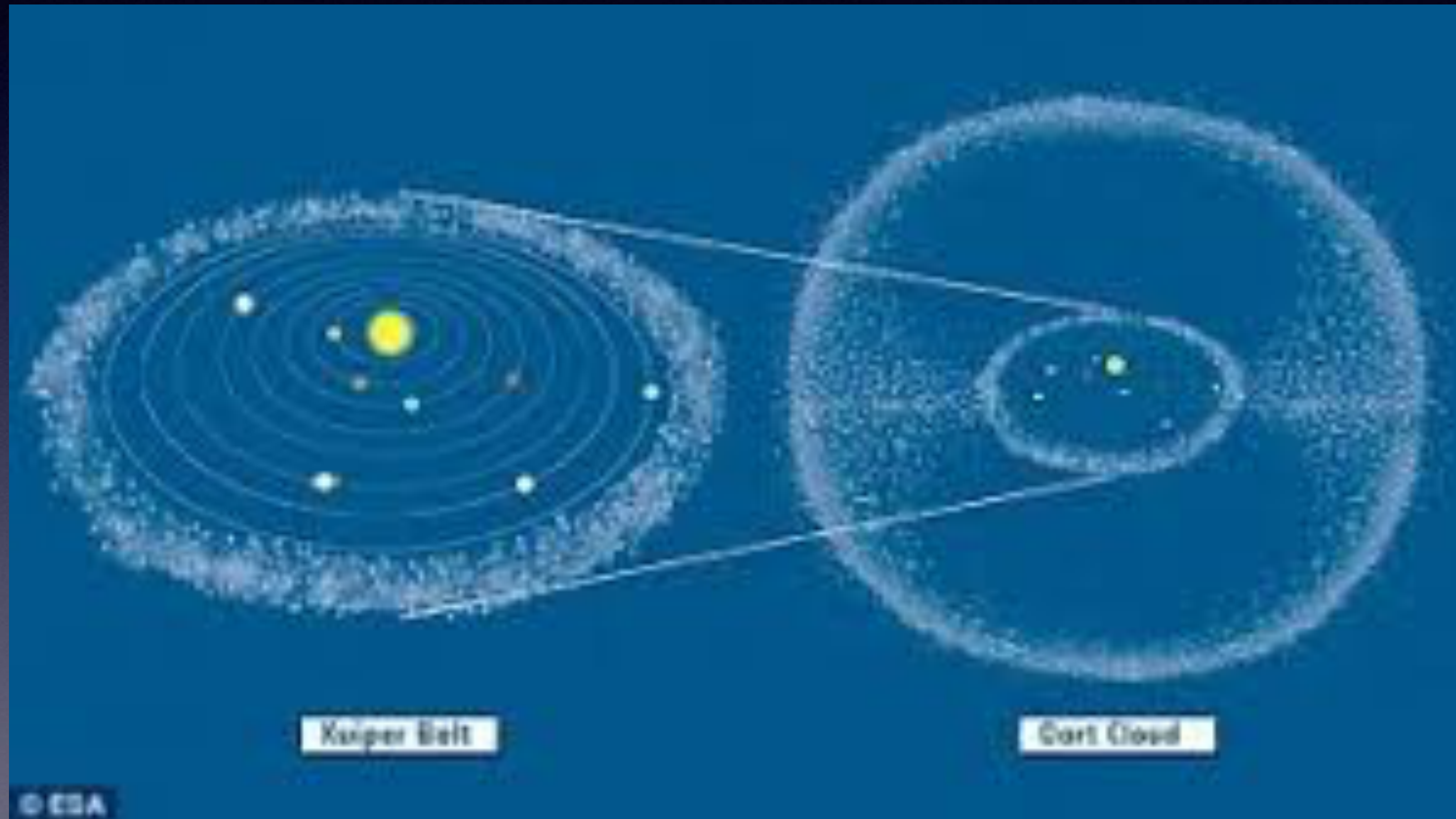


Nube di Oort



- Mercurio è un piccolo pianeta roccioso senza atmosfera che orbita molto vicino al Sole
- La precessione del perielio di Mercurio fu spiegata per la prima volta dalla teoria della relatività generale di Einstein



Il pianeta Venere

- Il pianeta Venere è di poco più piccolo della Terra e riesce a mantenere gli elementi volatili in un'atmosfera che è così densa da generare un effetto serra di 400 K!
- L'atmosfera di Venere è fatta al 96% da anidride carbonica



Il pianeta Marte

- Marte ha una tenue atmosfera costituita al 95% da anidride carbonica che si solidifica in calotte ai due poli
- Marte ha due satelliti: Phobos e Deimos



Il pianeta Giove

- Giove e' una stella mancata
- Grazie alla sua massa è riuscito a trattenere gli elementi volatili per cui e' costituito al 95% di H ed He, mentre la composizione dei metalli e' simile a quella solare
- Giove ha 63 satelliti. I 4 piu' grandi furono scoperti nel 1610 da Galileo
- Si chiamano: Io, Europa, Callisto e Ganimede



Il pianeta Saturno

- Il suo sistema di anelli, visibili anche da Terra, e' composto da polvere e ghiacci i quali riflettono molto bene la luce
- Il satellite maggiore di Saturno, che ha 30 lune, e' Titano ed e' uno dei siti piu' interessanti per trovare forme di vita primordiali nel sistema solare
- La sonda Cassini ha scoperto un ulteriore satellite, Enceladus, che e' un enorme geyser di acqua
- E' un pianeta roccioso dove sono state trovate tracce di vapore acqueo



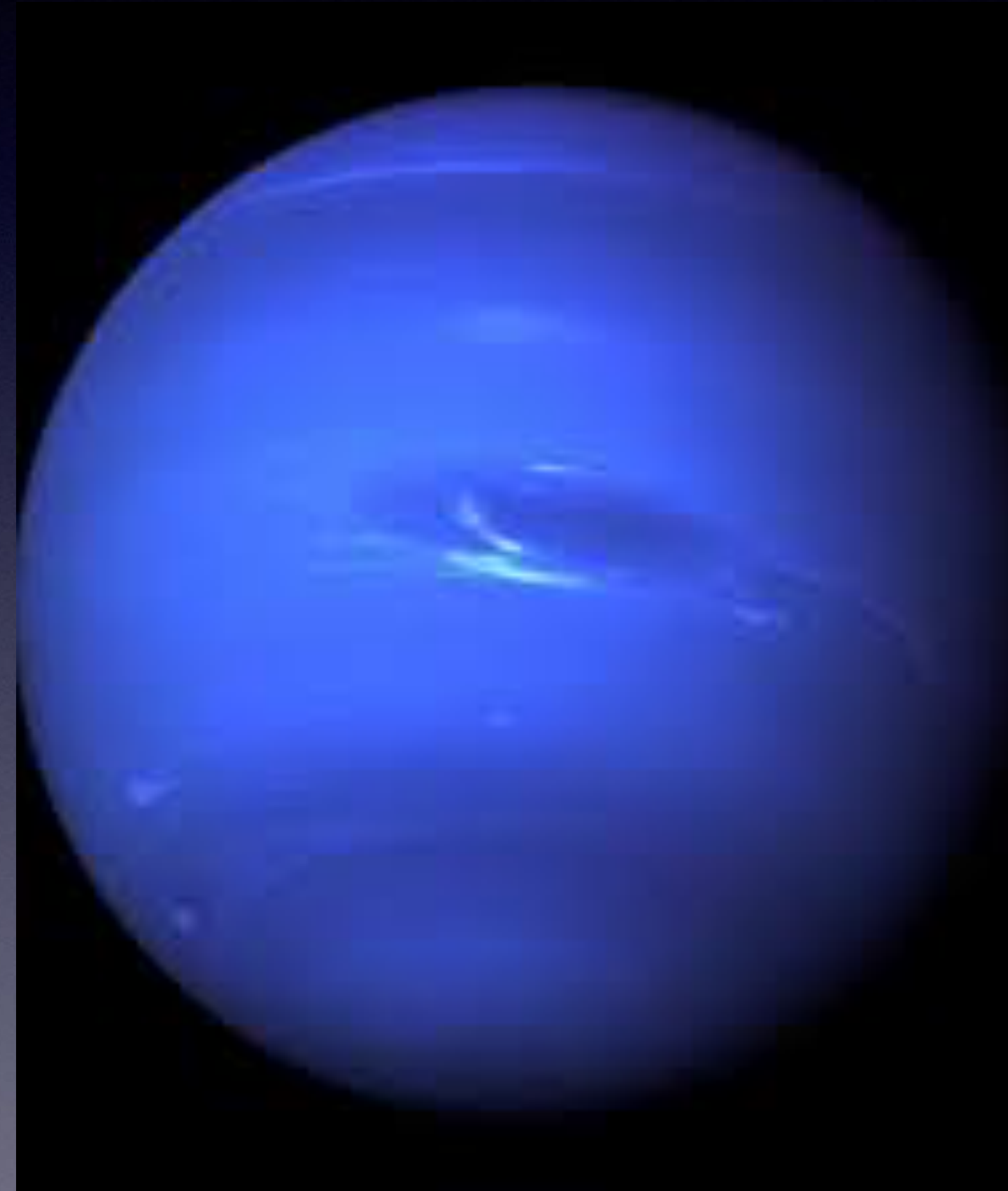
Il pianeta Urano

- Il pianeta Urano fu scoperto da William Herschel nel 1781
- Ha la peculiarità di ruotare su di un asse quasi allineato al piano del sistema solare. Ha 27 lune
- E' costituito soprattutto da ghiaccio fatto di acqua, metano e ammoniaca. Ha un'atmosfera con H ed He non superiori al 20%



Il pianeta Nettuno

- Nettuno e' composto principalmente da ghiaccio di acqua, metano e ammoniaca ed una percentuale di H e He non superiore al 20%, Fu scoperto da Le Verrier e Challis nel 1846. Ha 13 lune
- Oltre Nettuno c'e' la fascia di Kuiper dove si trova il pianeta nano Plutone che ha un satellite chiamato Caronte
- La fascia di Kuiper testimonia un troncamento del processo di formazione dei pianeti nel disco proto-planetario del Sole

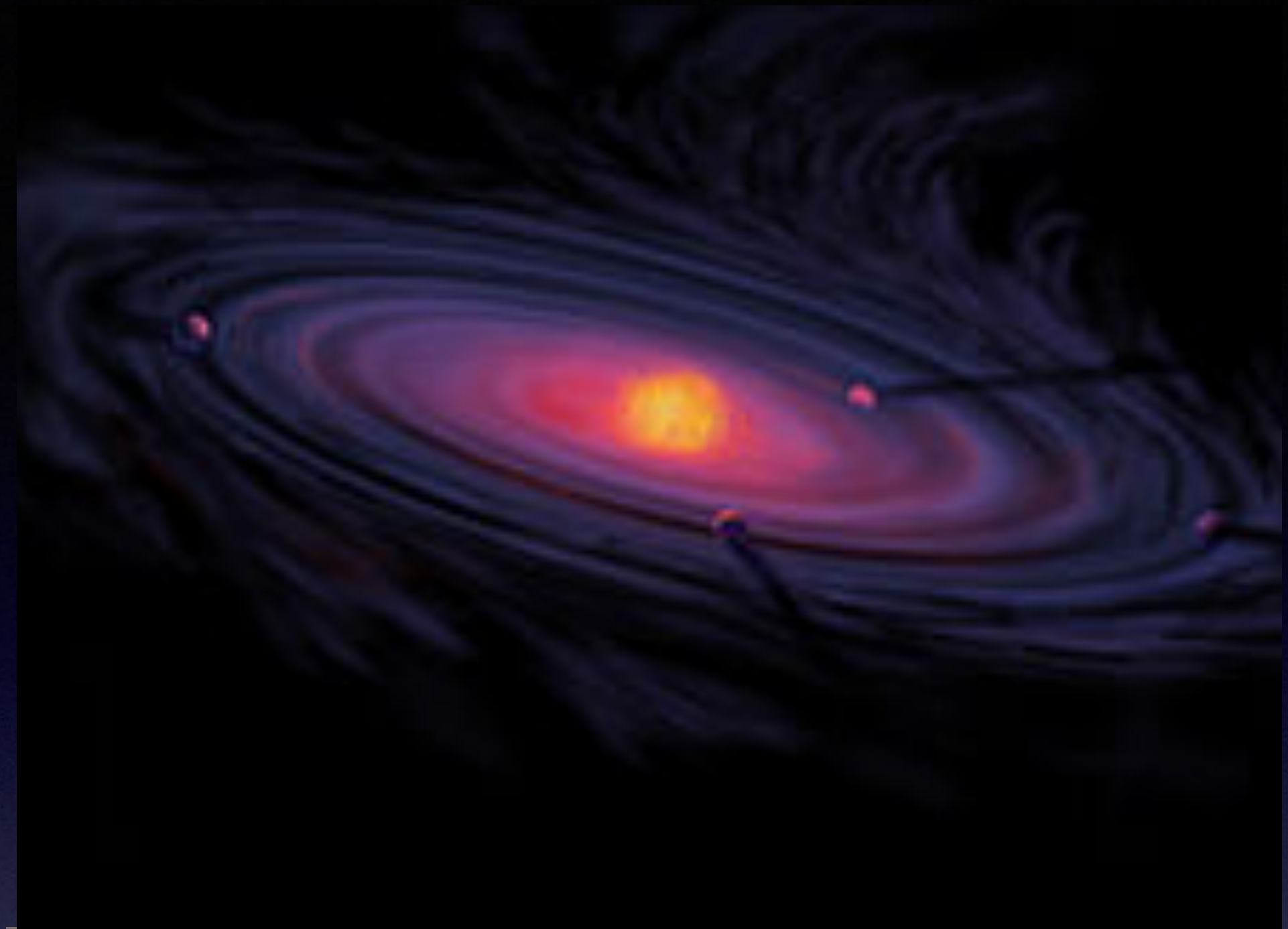


Teorie sulla formazione del sistema solare

- La formazione del sistema solare avvenne 4.6 miliardi di anni fa dal collasso gravitazionale di una piccola parte di una nube di H molecolare
- La maggior parte della massa collassante si addensò al centro formando il Sole. Il resto della materia si distribuì su un disco proto-planetario attorno al Sole
- Dal disco nacquero i pianeti insieme alla Luna, gli asteroidi e gli altri corpi minori
- Questo modello fu sviluppato per la prima volta nel XVIII secolo da Swedenborg, Kant e Laplace

Formazione dei pianeti

- I dischi proto-planetari sono ben visibili nelle regioni di formazione stellare, come evidenziato dalle immagini di Hubble Space Telescope e del telescopio infrarosso Spitzer
- Due sono i possibili meccanismi per spiegare la formazione dei pianeti nei dischi proto-planetari
- La polvere interstellare, concentrata nel disco, si addensa, tramite collisioni successive, in asteroidi di dimensioni di 1km, chiamati planetesimi
- I planetesimi si formano su brevi tempi scala 10^4 — 10^6 anni



Formazione dei pianeti

- I planetesimi continuano a scontrarsi tra di loro e nel giro di 10^6 - 10^8 anni tutti i planetesimi che si trovano su una stessa orbita si coagulano per formare un unico pianeta
- I nuclei piu' massicci successivamente accrescono gas; se il pianeta e' troppo vicino alla stella madre, l'evaporazione dei volatili (soprattutto H ed He) preclude la formazione di un gigante gassoso

Formazione dei pianeti

- L'altra teoria sostiene che i pianeti si formino per frammentazione del disco proto-planetario dovuta alla crescita non-lineare delle perturbazioni per instabilità gravitazionale
- Probabilmente tutti e due i meccanismi sono stati contemporaneamente in atto
- I pianeti appena formati sono sottoposti a vari processi evolutivi. Uno è l'evaporazione delle atmosfere che avviene se il pianeta è vicino alla stella
- L'altro è il processo di migrazione delle orbite dei pianeti
- I pianeti possono migrare, per interazioni gravitazionali, da orbite più interne a orbite più esterne

Eso-Pianeti e vita nell'universo

- In ogni galassia ci sono centinaia di miliardi di stelle come il Sole e ci sono centinaia di miliardi di galassie nell'universo, pertanto la probabilità che esistano altri pianeti come il nostro ospitanti la vita, è molto alta
- Non altrettanto alta è la probabilità di trovare un altro pianeta come il nostro
- Fino a novembre 2016 si sono contati 3537 eso-pianeti rilevati dal telescopio Kepler
- Una recente scoperta di un pianeta simile alla Terra è stata fatta da telescopio da 3.6 metri a La Silla (E.S.O.) ed è Proxima b un planetino che orbita attorno a Proxima Centauri, la stella a noi più vicina, che si trova a soli 4 anni luce da noi
- Affinchè ci sia vita occorre acqua allo stato liquido. Proxima b è alla giusta distanza per avere acqua liquida ma non sappiamo ancora se abbia atmosfera

Immagine artistica di Proxima Centauri b



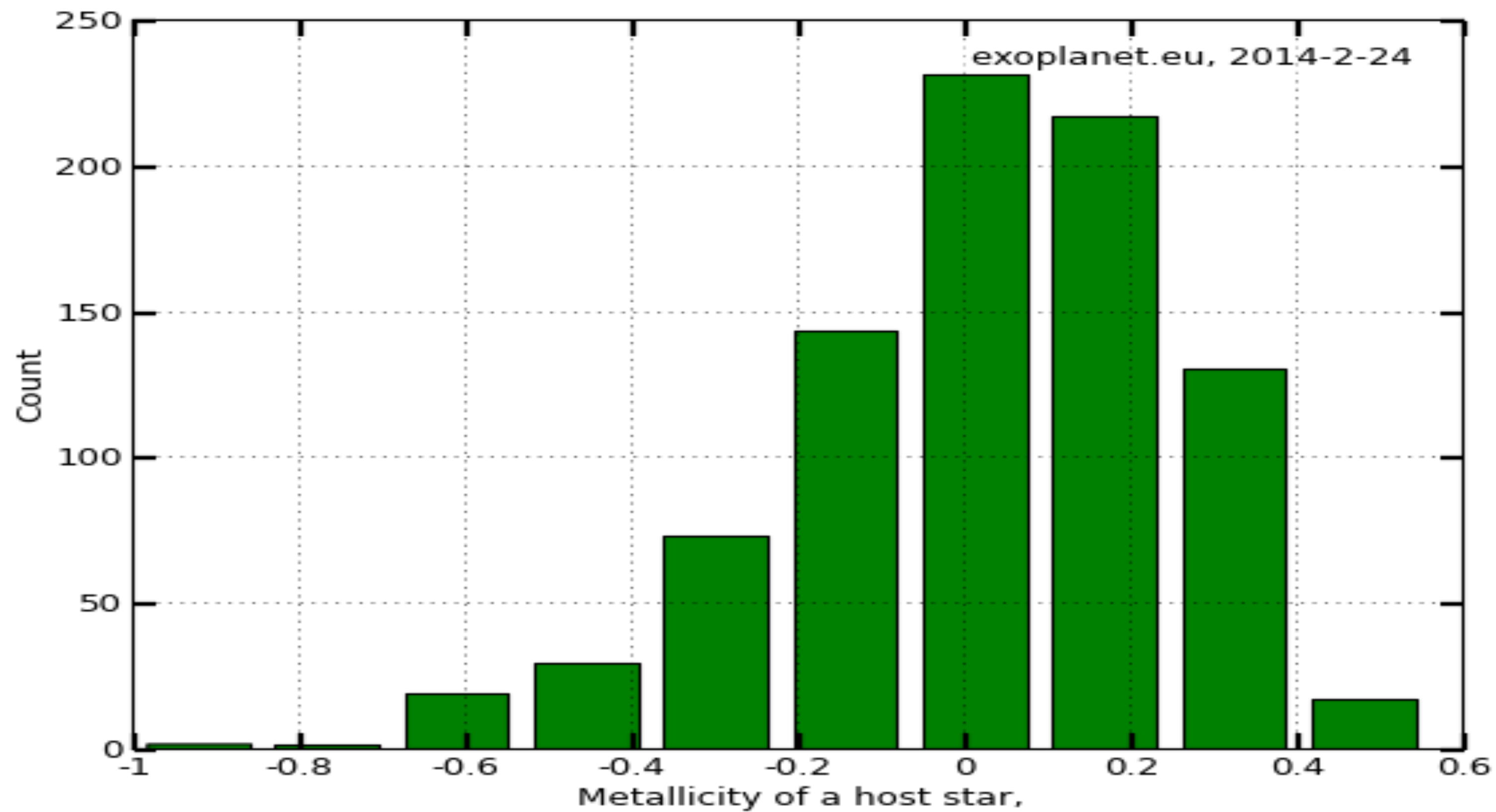
Il telescopio Kepler a caccia di eso-pianeti

- Il telescopio Kepler è una missione della NASA il cui scopo è la scoperta di pianeti simili alla Terra in orbita attorno a stelle diverse dal Sole
- E' stato progettato per esplorare una regione della Via Lattea. A tale scopo un fotometro montato su Kepler monitora la luminosita' di 145.000 stelle per scoprire se ci sono variazioni dovute al transito di un pianeta
- Il suo campo di vista si trova nelle costellazioni del Cigno, della Lira e del Drago

Il telescopio Kepler (visione artistica)



Ci sono piu' eso-pianeti
laddove ci sono piu' metalli



Come nacque la vita

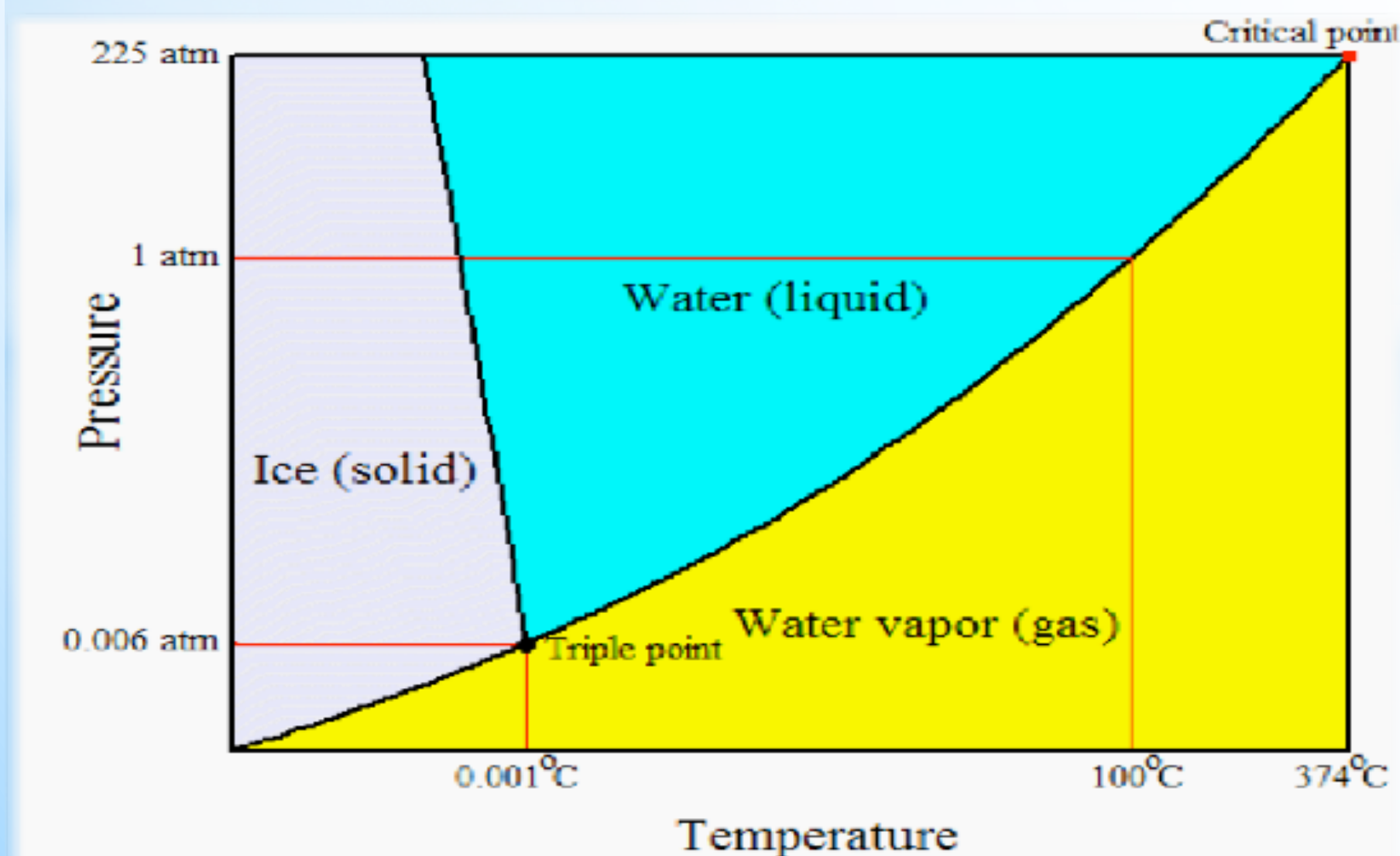
- La vita sulla Terra iniziò circa 3.2 miliardi di anni fa
- A quel tempo la Terra era esposta ad un forte bombardamento di asteroidi e comete. Si pensa che la fase finale del bombardamento corrisponda alla formazione dell'atmosfera e degli oceani formati dall'acqua portata dagli asteroidi e dalle comete
- Anche se forse è più probabile che gli oceani si formarono da acqua venuta dall'interno della Terra

- * **Come si sono formati gli oceani sulla Terra?**
- * Dall'attività vulcanica della Terra primordiale che rilascia nell'atmosfera grandi quantità di vapore acqueo
- * Da impatti con asteroidi, comete ed embrioni planetari
- * È cruciale confrontare l'analisi della composizione chimica dell'acqua sulla Terra e nelle comete e nei meteoriti
- * Recentemente, misure di D/H (D è idrogeno pesante o deuterio) nella cometa di Hartley 2, effettuate dal telescopio Herschel, hanno mostrato che questo rapporto è lo stesso dell'acqua che beviamo



La formazione degli oceani

- * Le particolari proprietà dell'acqua indicano che l'acqua è indispensabile per la vita
- * Il punto di partenza per la ricerca di vita nell'universo è dunque la ricerca di acqua
- * Non basta che l'acqua sia abbondante, affinché ci sia vita l'acqua deve essere liquida. La vita ha bisogno di un mezzo liquido in cui si possano muovere le molecole e che sostenga la struttura
- * Precisi valori di temperatura e densità

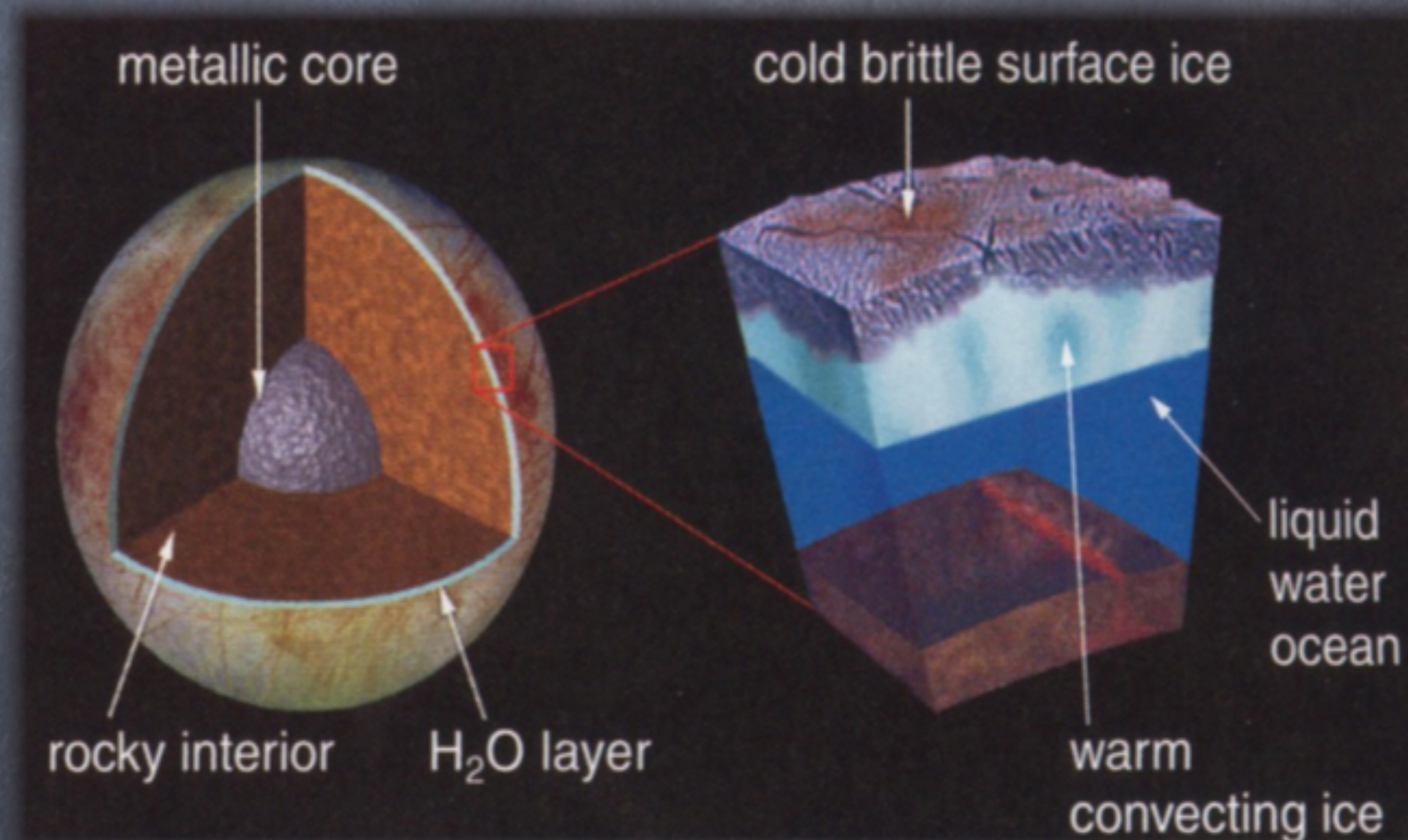
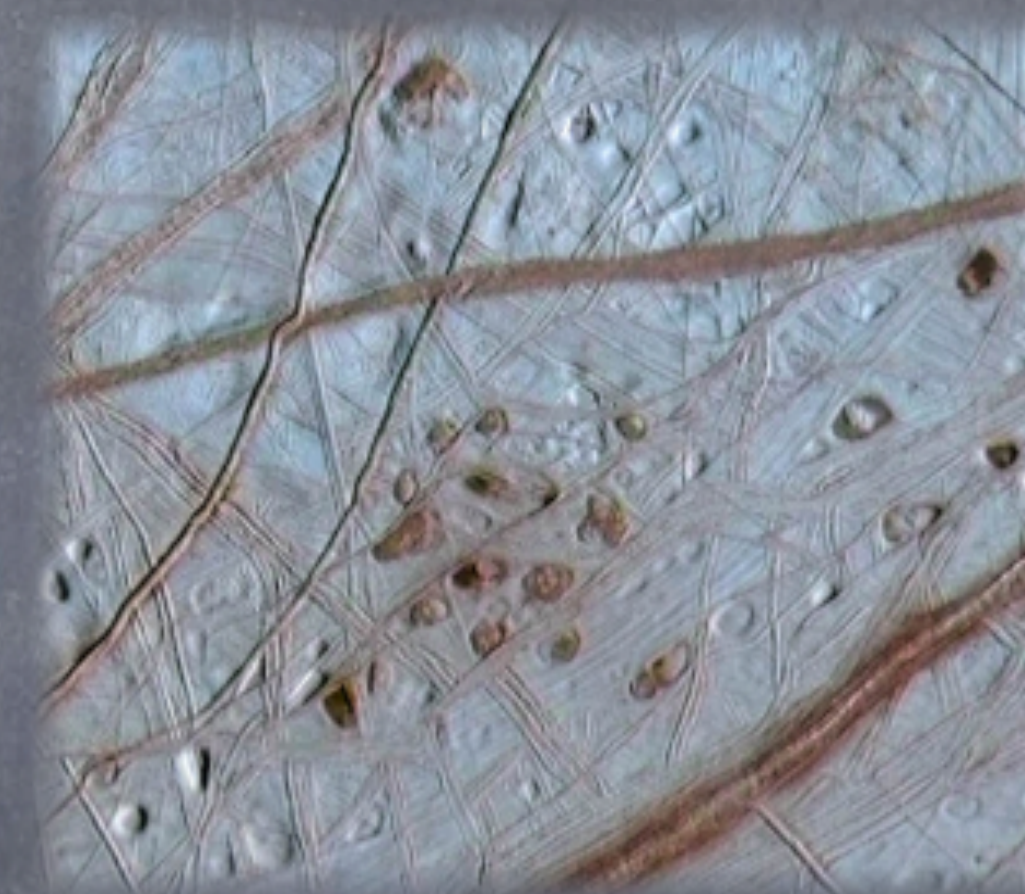
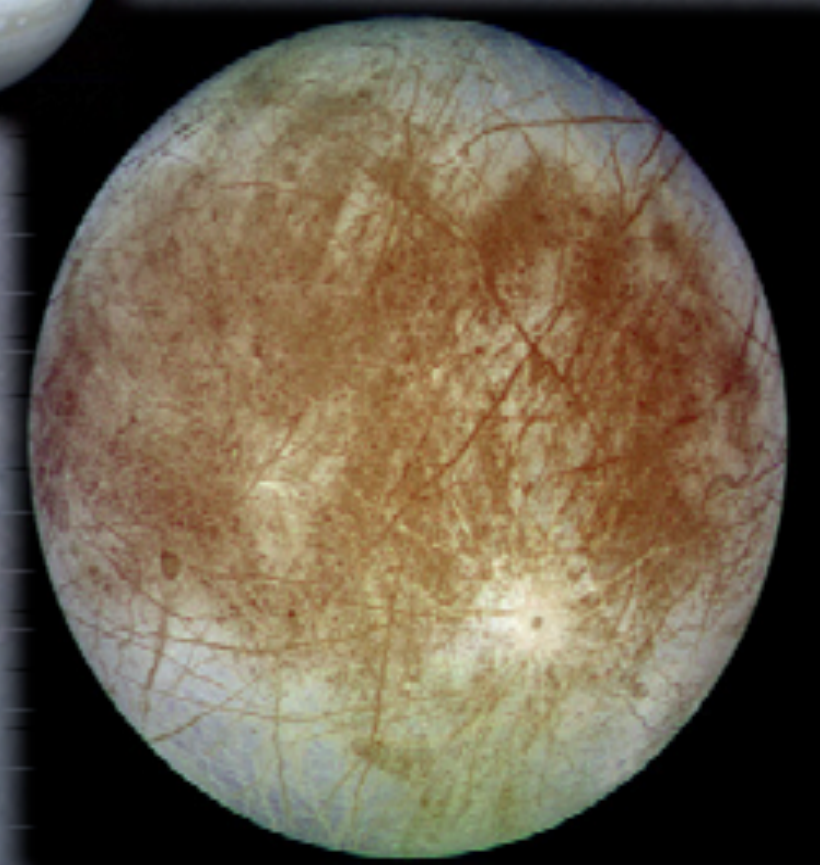


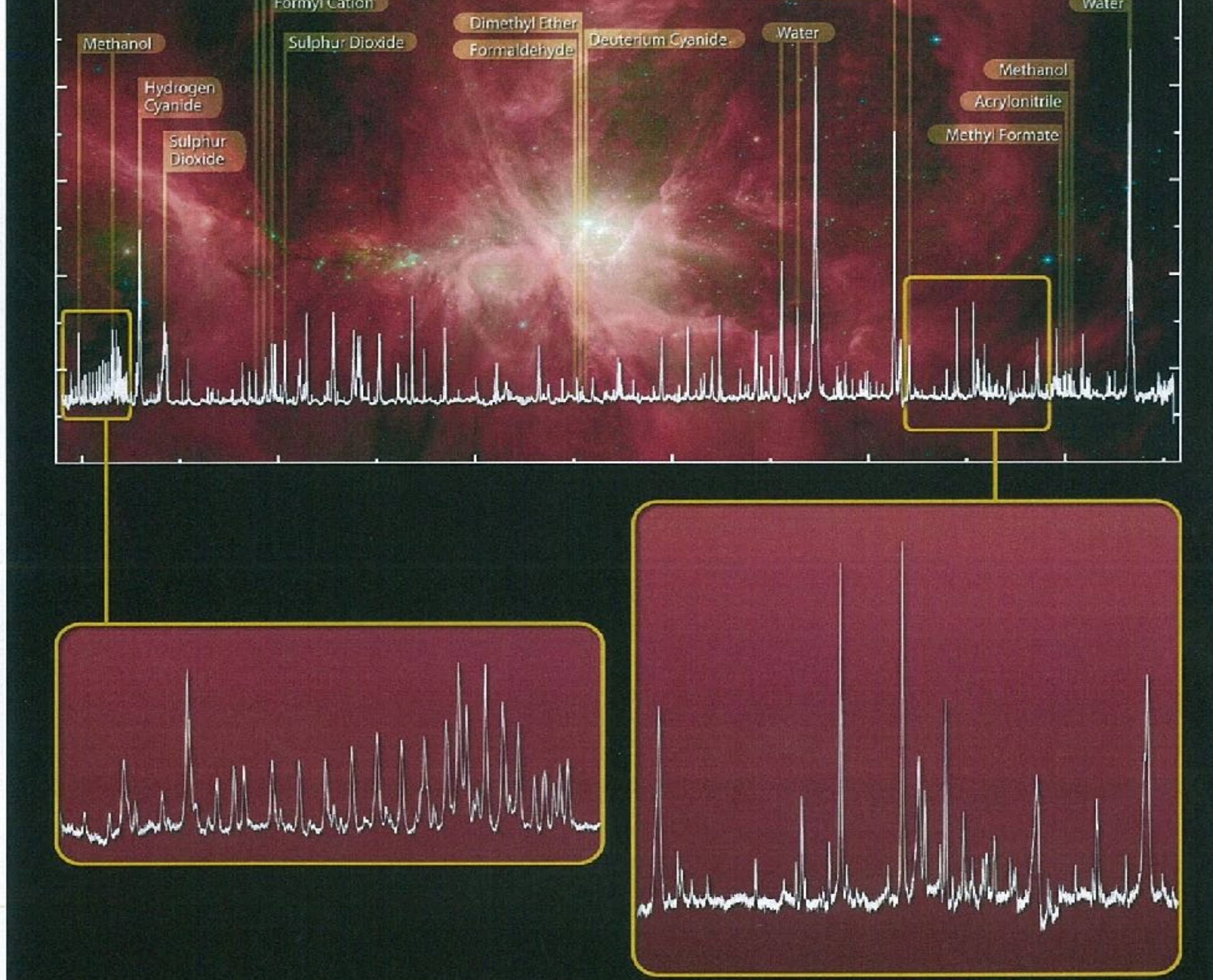
* **Vita e acqua
liquida**

Europa

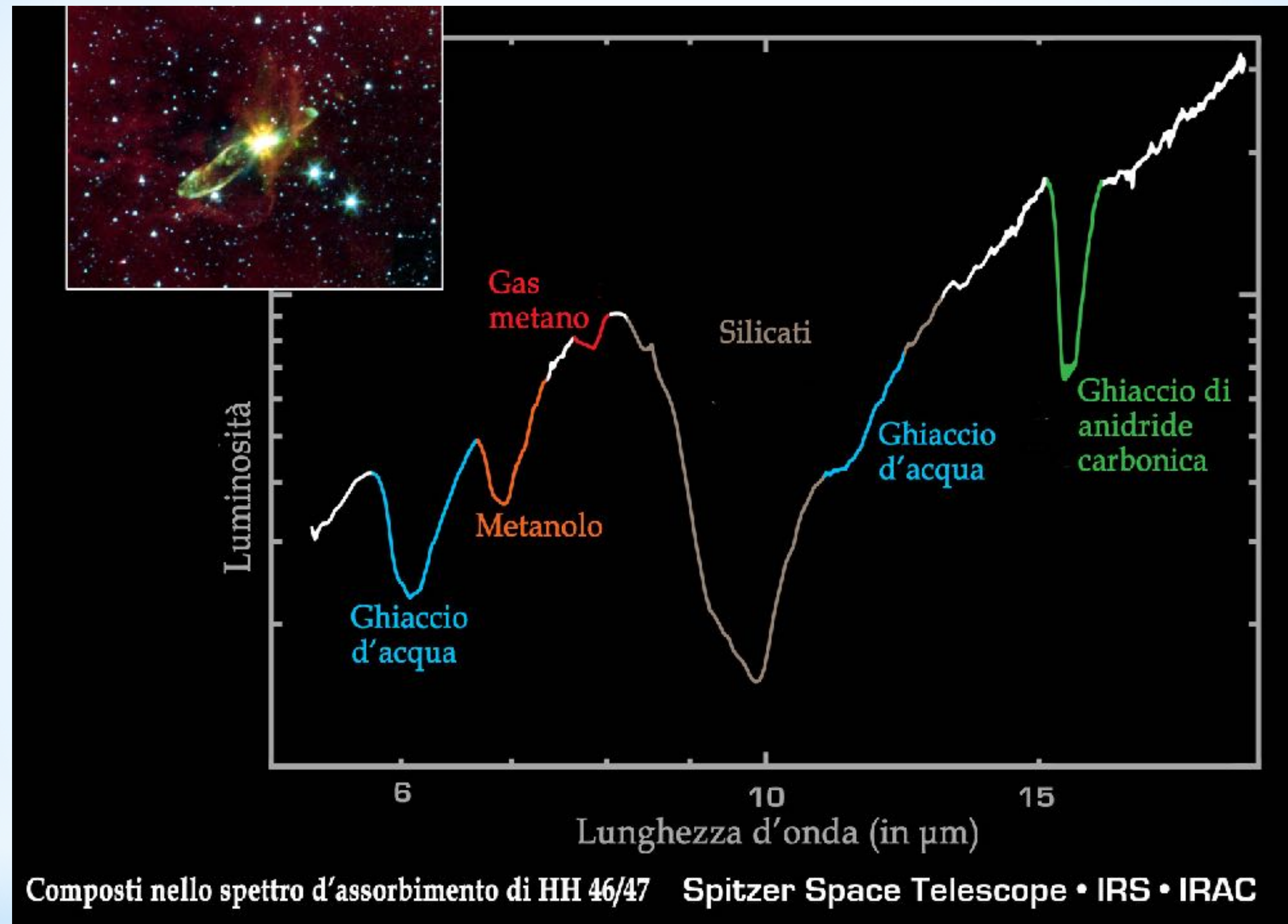
Questo satellite di Giove ha un oceano di acqua liquida sotto uno strato di ghiaccio superficiale

Europa è un candidato per la ricerca di vita nel Sistema Solare





**Acqua nel mezzo interstellare:
nebulosa di Orione**



* **Acqua nella nebulosa di Herbig-Haro HH46**

La probabilità di vita nel cosmo

- Frank Drake nel 1961 propose che il numero di civiltà tecnologiche nella nostra Galassia con cui possiamo comunicare è dato da quella che chiamiamo equazione di Drake:

$$N = R^* \cdot f_p \cdot n_e \cdot f_l \cdot f_i \cdot f_c \cdot L$$

- dove R^* è il tasso di formazione stellare della Galassia, n_e è il numero di pianeti rocciosi, f_p la frazione di stelle che ospita pianeti, f_l la frazione di pianeti che ospita la vita, f_i la frazione che sviluppa vita intelligente, f_c la frazione di civiltà che possono e vogliono comunicare, L la durata di una civiltà tecnologica

Nel regno delle galassie

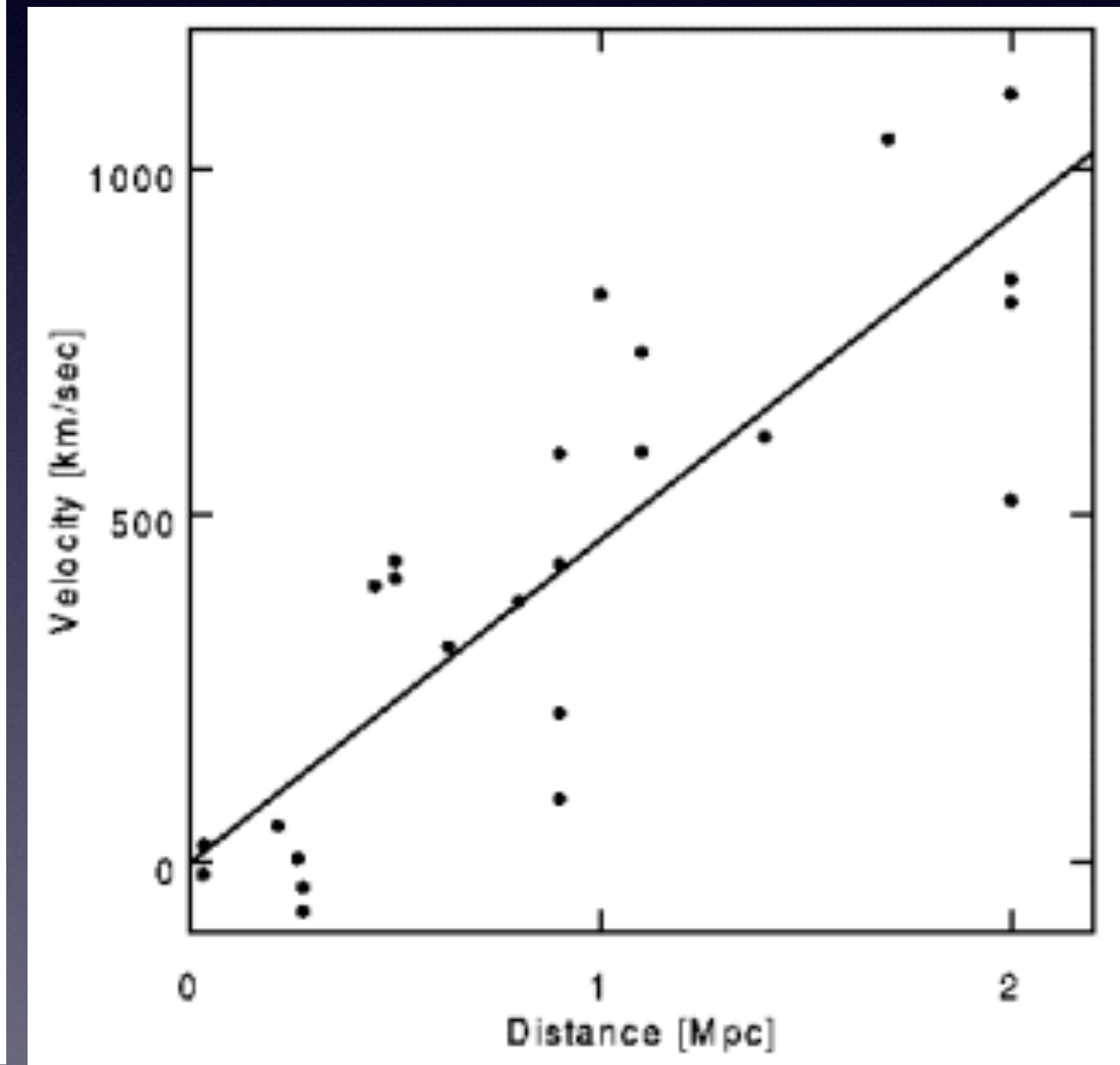
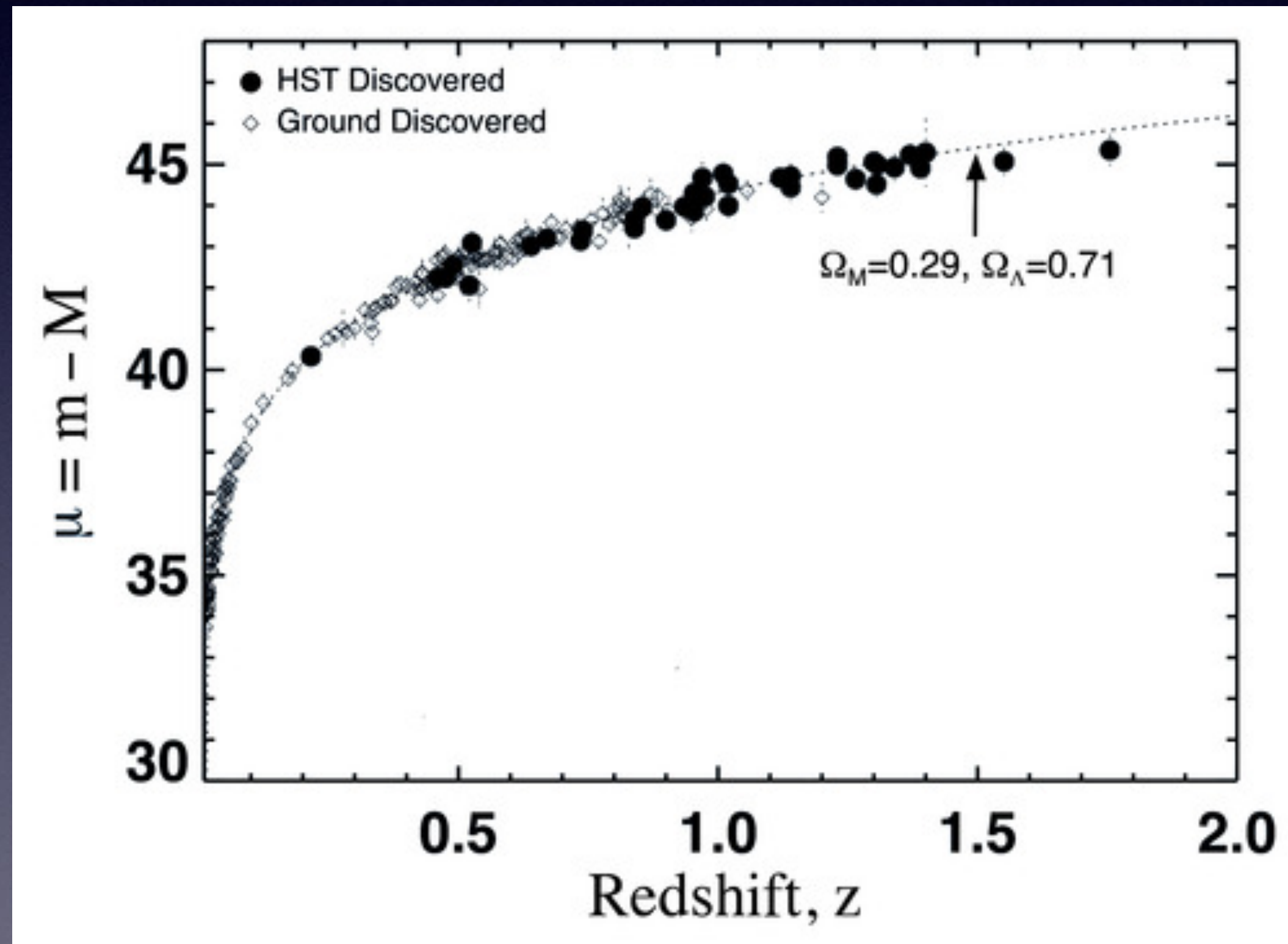
- Una galassia è un insieme di centinaia di miliardi di stelle, di gas e polveri, legati insieme dalla gravità
- Il nome galassia deriva dal sistema stellare in cui ci troviamo e vuol dire latte in greco
- La nostra Galassia è nota anche col nome “Via Lattea”
- Ci sono centinaia di miliardi di galassie nell’universo

La scoperta delle galassie

- La scoperta delle galassie la si deve ad Edwin Hubble che nel 1930 misurò le distanze delle cosiddette “nebulae”, utilizzando le Cefeidi, e scoprì che sono sistemi molto lontani da noi e non fanno parte della nostra Galassia come si era creduto fino ad allora



Il diagramma di Hubble: SNe Ia e originale- Legge di Hubble-Lemaitre



La sequenza di Hubble

*Edwin Hubble's
Classification
Scheme*

Ellipticals

E0 E3 E5 E7 S0



Sa



Sb



Sc



Spirals

SBa

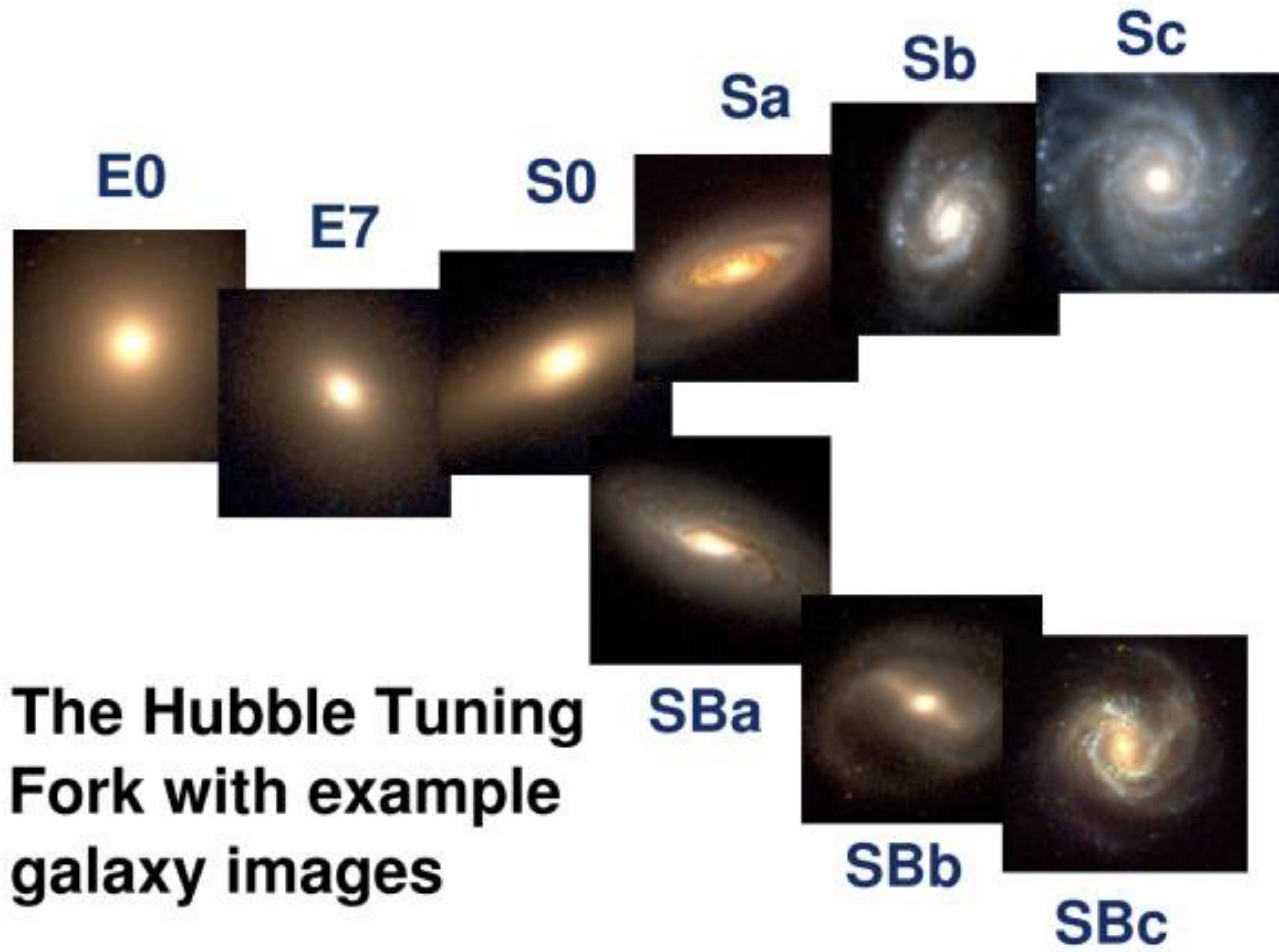


SBb



SBc





The Hubble Tuning Fork with example galaxy images

La sequenza di Hubble

- Hubble classificò le galassie in tre tipi maggiori:
- Ellittiche (solo stelle vecchie e no gas, sferoidi)
- Spirali e spirali barrate (formazione stellare attiva e gas e polveri, presenza di disco con bracci di spirale)
- Irregolari (formazione stellare attiva, gas e polveri, struttura irregolare)
- Per studiare le galassie abbiamo informazioni chimiche e cinematiche

Galassie ellittiche

- Galassia ellittica gigante ESO 325-G004
- Galassie come questa si trovano di solito al centro di ammassi di galassie
- Le ellittiche si indicano con E_n dove n rappresenta il grado di ellitticità, n va da 0 a 7
- Le ellittiche contengono ammassi globulari come l'alone della nostra Galassia
- Un ammasso di galassie è un sistema gravitazionalmente legato dove si trovano più di 50 galassie. Per meno di 50 galassie si parla di gruppo di galassie



Galassie spirali

- La galassia spirale Messier 101
- Le spirali sono caratterizzate da bracci di spirale che si dipartono da un nucleo centrale detto bulge
- Se nel bulge c'è una barra di gas e stelle la spirale si dice barrata
- La nostra Galassia è una spirale con una piccola barra



Galassie irregolari

- Le nubi di Magellano sono galassie vicine e sono irregolari come si puo' vedere dall'immagine
- Le galassie irregolari hanno masse inferiori alle ellittiche e alle spirali e si indicano anche col nome di galassie nane
- Le nane possono essere irregolari o sferoidali
- Le nane sferoidali si trovano attorno alla nostra Galassia



Galassie nane sferoidali

- Le galassie sferoidali nane sono satelliti della nostra Galassia
- Non posseggono gas ma hanno avuto una formazione stellare estesa nel tempo
- Non hanno formazione stellare attiva e sono dominate da stelle relativamente vecchie

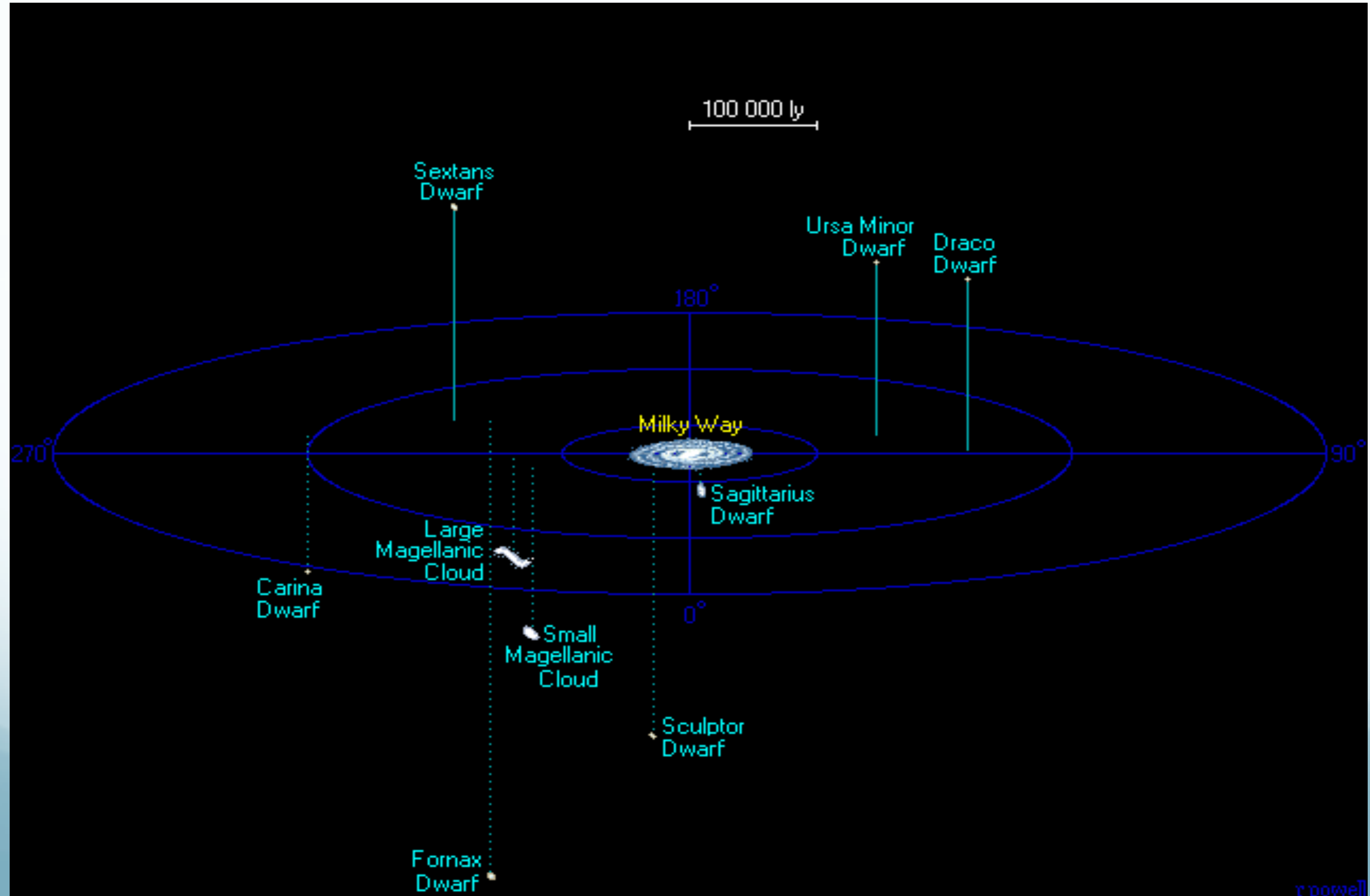


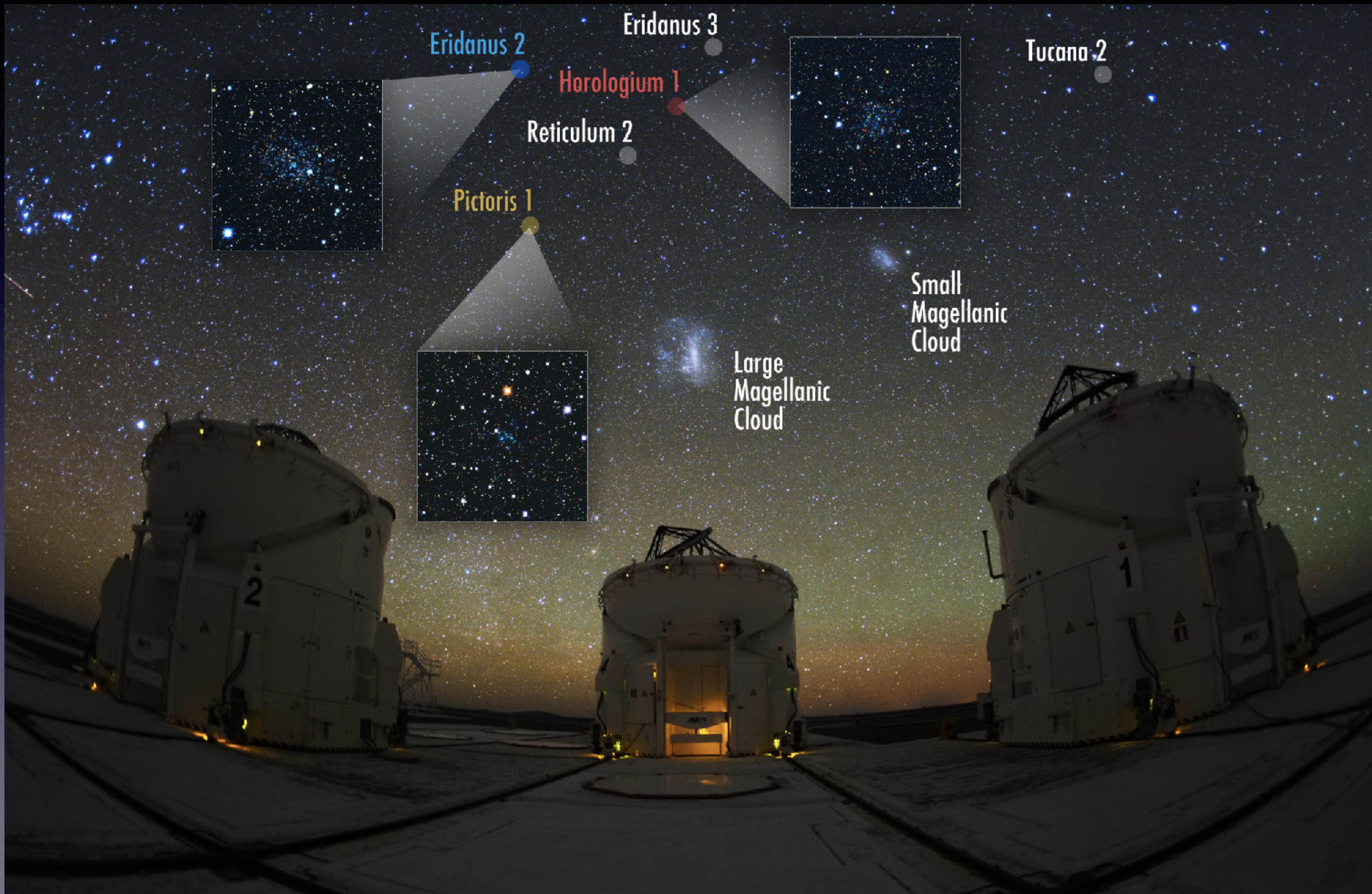
Galassie Ultra Deboli

- Negli anni '80 furono scoperte delle piccolissime galassie, chiamate “ultra-faint-dwarfs”
- Esse hanno solo stelle e niente gas. La loro massa stellare oscilla tra le mille e diecimila masse solari!
- Il loro contenuto metallico e' molto basso ($[Fe/H] < -1.0$ dex)
- Mostriamo qui Reticulum II nell'immagine a destra



Il Gruppo Locale





Eridanus 2

Eridanus 3

Tucana 2

Horologium 1

Reticulum 2

Pictoris 1

Small
Magellanic
Cloud

Large
Magellanic
Cloud

Le masse delle galassie

- Le masse delle galassie ellittiche (essenzialmente stelle) vanno da 10^7 a $10^{12} M_{\text{sun}}$
- Le masse delle galassie spirali (stelle+gas+polveri) vanno da 10^{10} a $10^{11} M_{\text{sun}}$
- Le masse delle irregolari magellaniche (gas+stelle+ polveri) vanno da 10^8 a $10^9 M_{\text{sun}}$
- Le masse delle sferoidali nane (solo stelle) vanno da 10^6 a $10^7 M_{\text{sun}}$
- Le masse delle galassie “ultra-faint” (solo stelle) vanno da 10^3 a $10^4 M_{\text{sun}}$

Come si derivano le masse delle galassie (Milky Way)

- Conosciamo la velocità di rotazione del Sole attorno al centro galattico, assumiamo che l'orbita del Sole sia circolare e che tutta la massa interna a tale orbita sia concentrata in un punto
- Per il teorema del Viriale ($2E_{\text{cin}} + E_{\text{grav}} = 0$) possiamo scrivere (dove M_G e' la massa della Galassia entro il raggio R_o):

$$M_G v_{\text{rot}}^2 = \frac{GM_G^2}{R_o}$$

- Si ottiene $M_G = 1.3 \cdot 10^{11} M_{\text{sun}}$

Come si derivano le masse delle galassie (ellittiche)

- La curva di rotazione delle ellittiche e' molto difficile da ottenere poiche' i moti casuali delle stelle non sono trascurabili relativamente ai moti ordinati
- Anche in questo caso si applica il teorema del Viriale ma utilizzando la dispersione delle velocità σ^2 ed integrando entro un raggio effettivo (o di meta' luce)
- Si definisce "dispersione delle velocità" la dispersione delle velocità stellari attorno alla velocità media. Puo' essere applicata anche alle velocità delle galassie in un ammasso

La materia oscura nelle galassie

- La curva di rotazione delle spirali mostra la presenza di materia oscura a larghe distanze
- Cio' è evidente dalla piattezza della curva che non segue un andamento kepleriano che indicherebbe il seguente andamento per la velocità circolare:

$$v_c = \sqrt{GM/R} \propto R^{-1/2}$$

Materia oscura nella Via Lattea

- Poichè in equilibrio rotazionale si ha che la velocità rotazionale di una stella a distanza R dal centro galattico è data da:

$$GM(R)/R^2 = v_c^2(R)/R$$

- Si può ottenere $M(R)$ dalla velocità rotazionale
- Modelli raffinati per calcolare la massa della Galassia suggeriscono che, per riprodurre la curva di rotazione osservata, la Galassia deve essere composta da un nucleo, un disco appiattito ed un alone massiccio

- La materia oscura nella nostra Galassia diventa importante alla distanza di 200 kpc!
- La massa stellare nel disco sottile predomina sulle altre componenti ed è $6 \times 10^{10} M_{\text{sun}}$ mentre la massa del bulge è $2 \times 10^{10} M_{\text{sun}}$

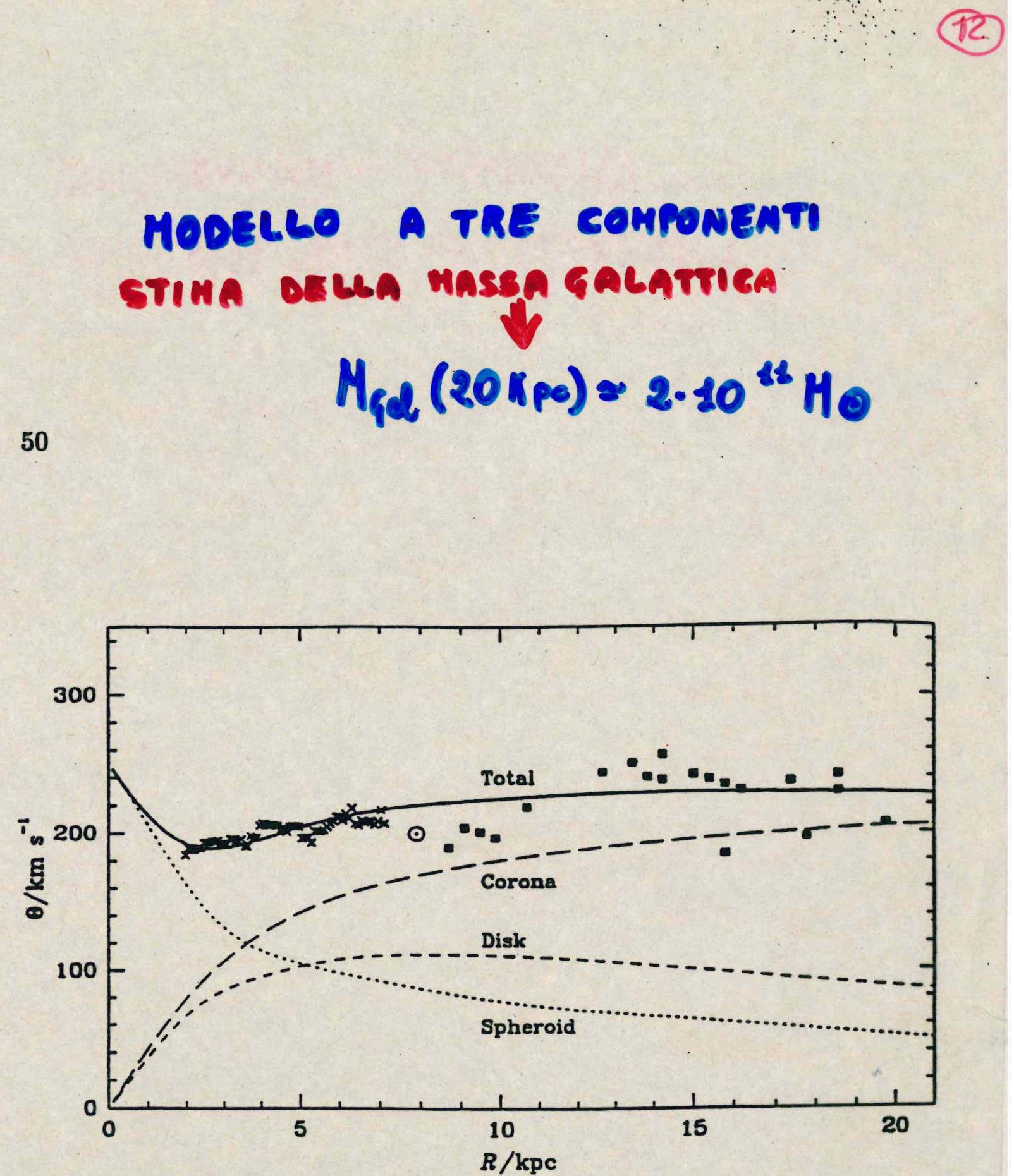
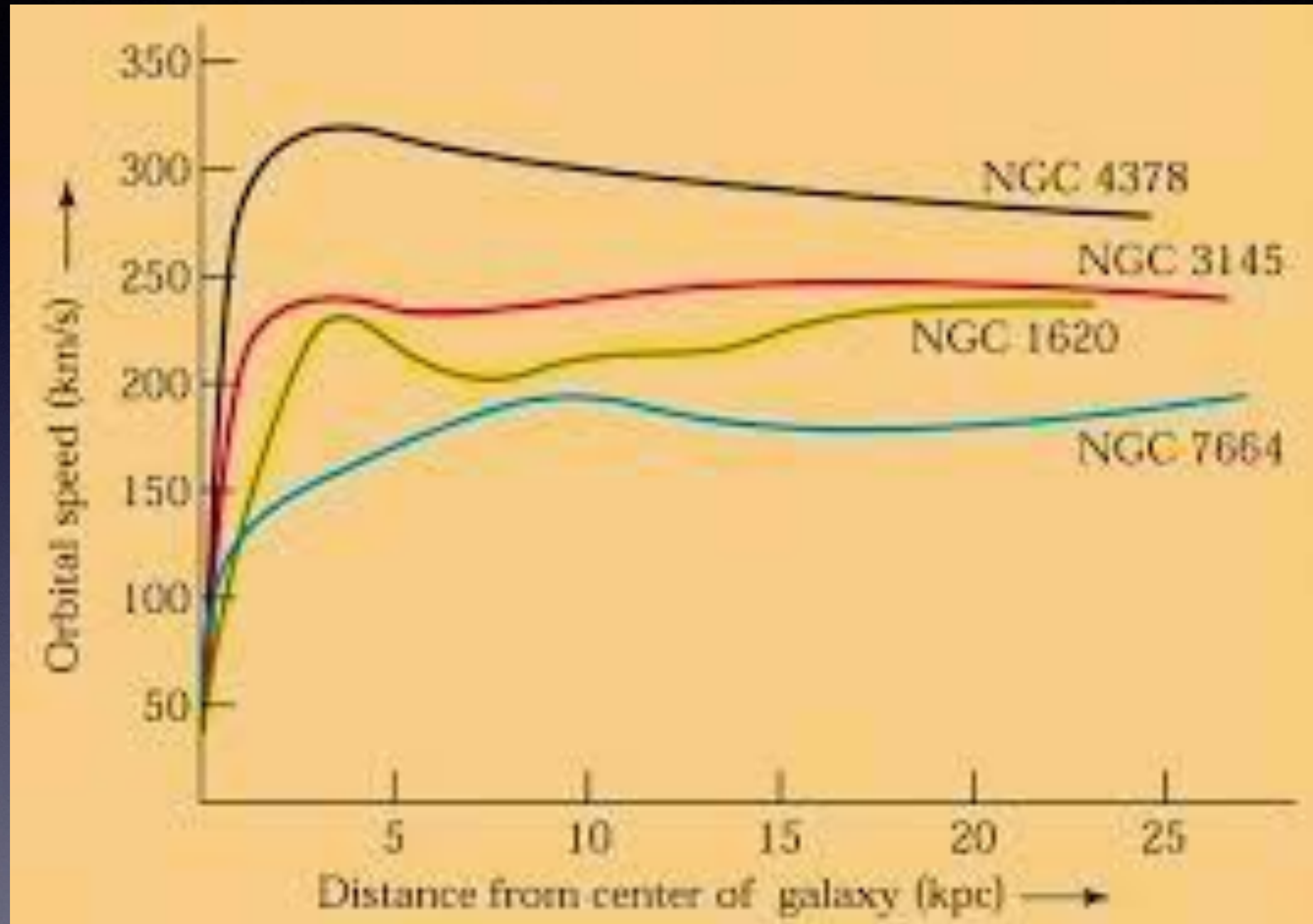


Figure 1.23. A three-component model of the Milky Way fitted to the rotation curve of the Galaxy. The curve labelled "corona" refers to the dark matter halo. From Merrifield 1992, A.J. Vol. 103, 1552; reproduced here by kind permission of M. Merrifield and the University of Chicago Press (copy right 1992).

$M(200 \text{ kpc}) \approx 2 \cdot 10^{12} M_{\odot}$
Wilkinson + Evans (1999)

Le curve di rotazione delle spirali:
piatte a grandi distanze indicano materia oscura



Il contenuto luminoso delle galassie

- La luce delle galassie ellittiche segue il profilo di De Vaucouleurs

$$I(R) = I(0)e^{(-kR^{0.25})} = I_e e^{(-7.67[(R/R_e)^{0.25} - 1])}$$

- Dove R_e è il raggio effettivo, ovvero il raggio dell'isofota contenente metà della luminosità totale e I_e è la brillantezza superficiale ad R_e
- Nota come legge $R^{1/4}$

Il contenuto luminoso delle galassie

- Il contenuto luminoso delle spirali (misurato nella banda blu):

$$I(R) = I(0)e^{(-R/R_D)}$$

- dove R_D è la scala di lunghezza del disco della Galassia ed è circa 3.5 kpc
- La brillantezza superficiale centrale delle spirali è costante e vale $I(0) \sim 140L_{\odot}pc^{-2}$

Le relazioni di Faber-Jackson e di Tully-Fisher

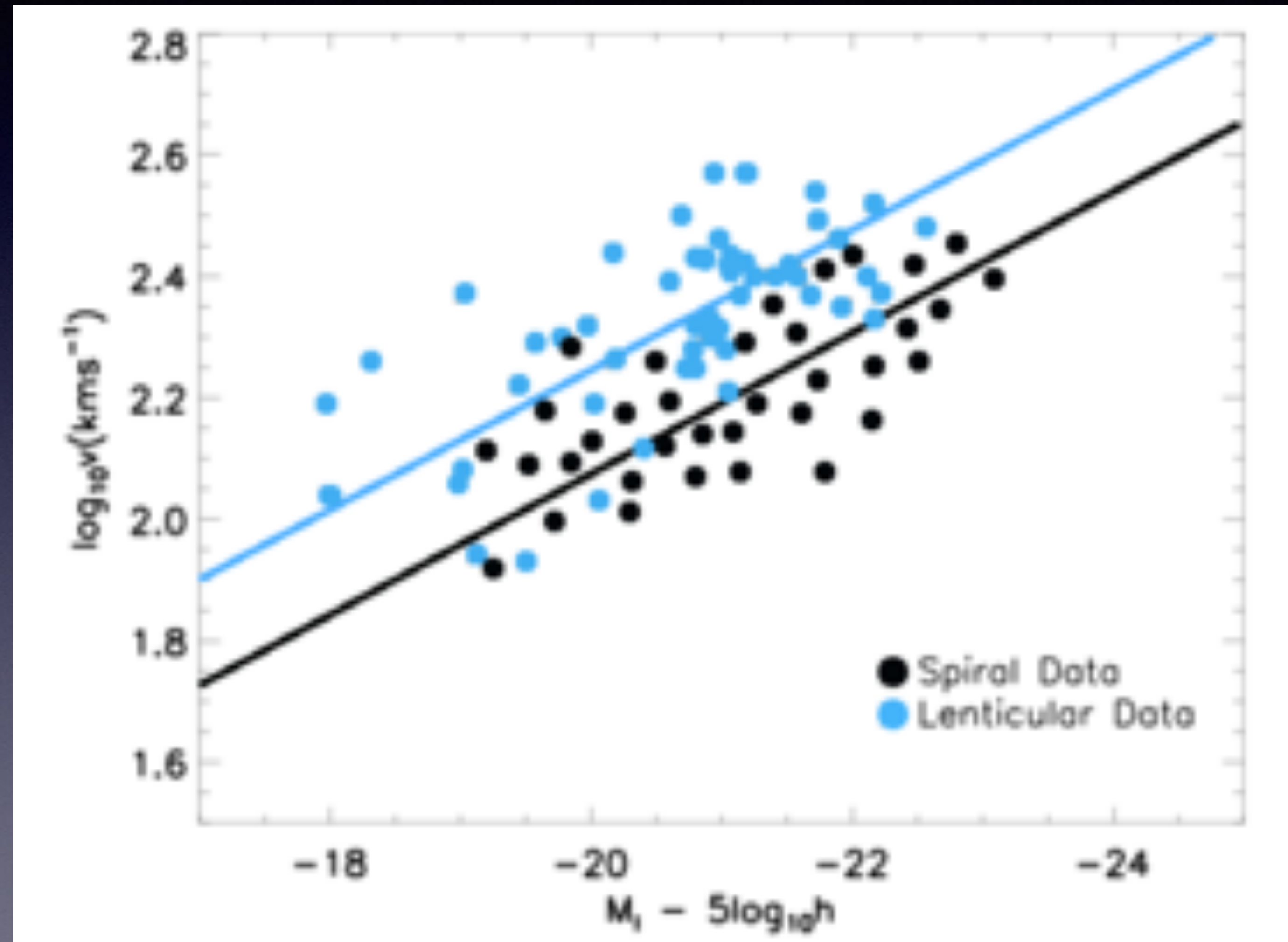
- Esiste una correlazione tra la luminosità (nella banda blu) delle ellittiche e la loro dispersione delle velocità (relazione di Faber-Jackson):

$$L \propto \sigma^4$$

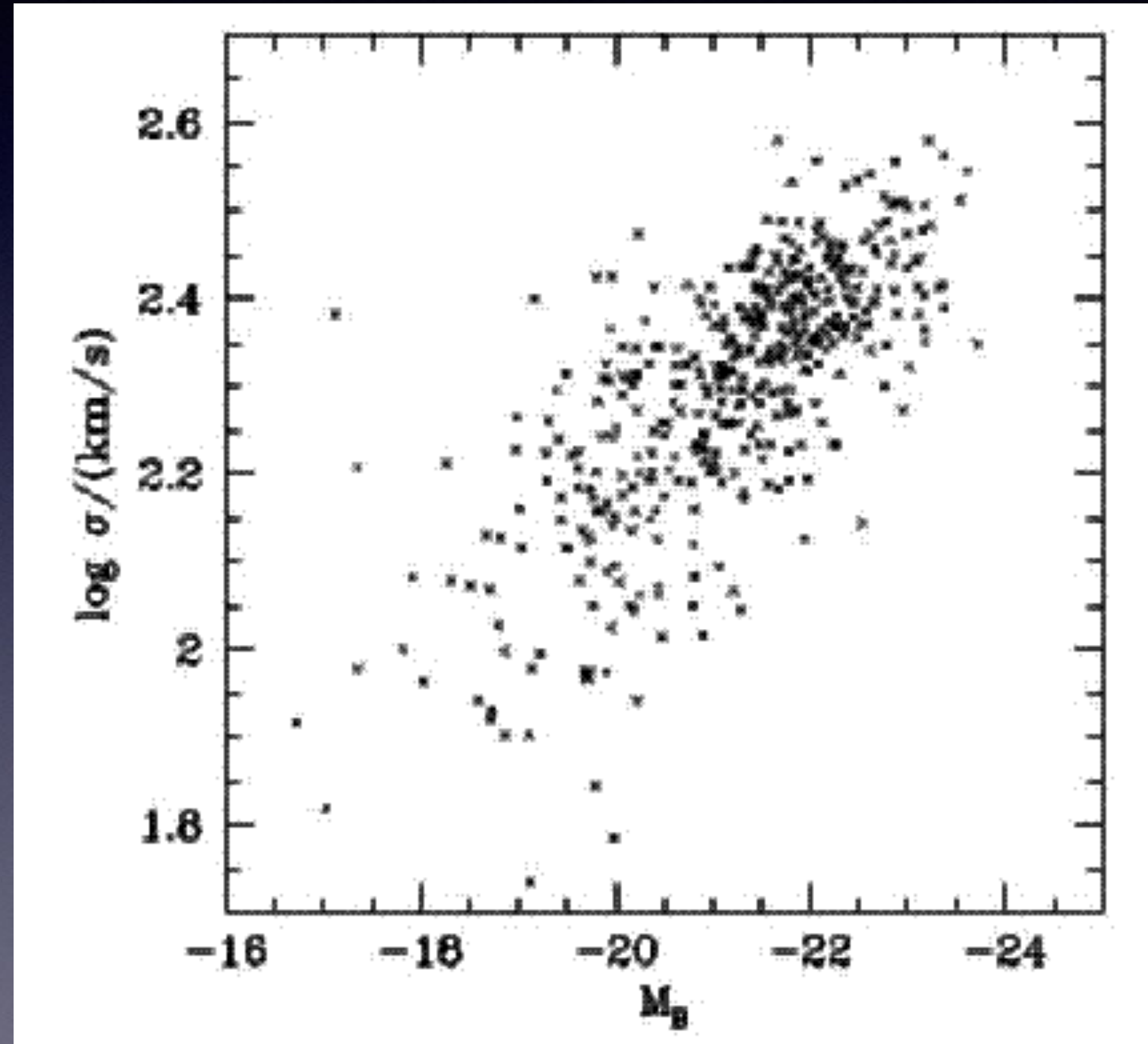
- Esiste una analoga correlazione per le spirali tra la luminosità (infrarossa) e la velocità circolare (relazione di Fisher-Tully):

$$L \propto v_c^4$$

Tully-Fisher relation



Faber-Jackson relation for ellipticals



Fundamental Plane

- Le galassie ellittiche occupano un piano particolare nello spazio tridimensionale definito dalla **brillanza superficiale**, dal **raggio effettivo** e dalla **dispersione delle velocità**, questo piano è noto col nome di “piano fondamentale”
- In particolare, c’è una stretta relazione tra queste quantità, se si assume un M/L costante, di cui la Faber-Jackson è una proiezione:

$$I_e R_e \propto \sigma^2$$

Fundamental plane

- In realtà c'è una leggera correlazione tra M/L ed L nelle ellittiche (tilt del piano fondamentale) che è il piano visto di taglio:

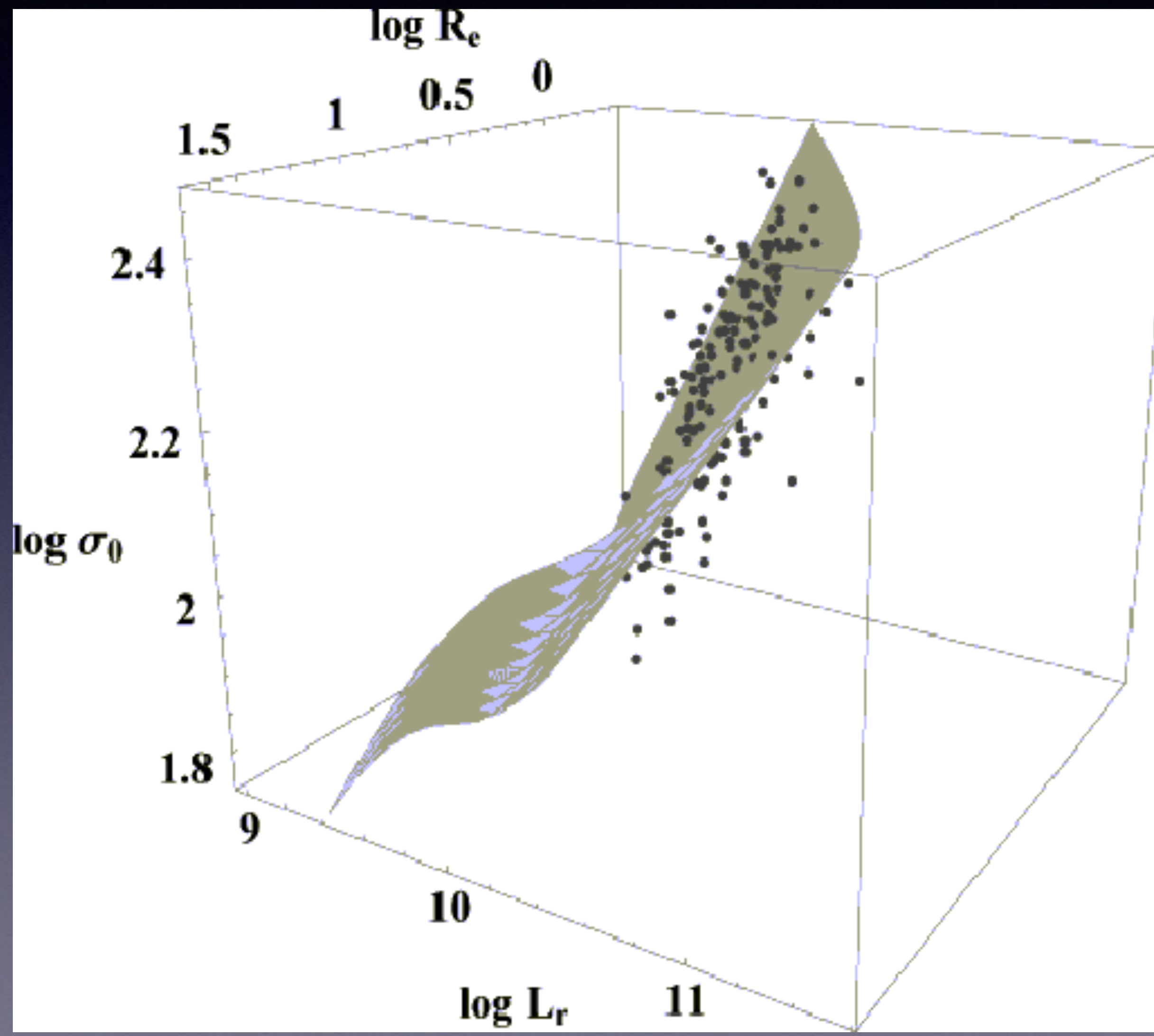
$$M/L \propto L^{0.2}$$

- per cui la relazione effettivamente mostrata dalle ellittiche è:

$$R_e \propto \sigma^{1.4} I_e^{0.9}$$

- I bulges delle spirali sono molto simili alle ellittiche anche in termini di relazioni strutturali

Piano fondamentale



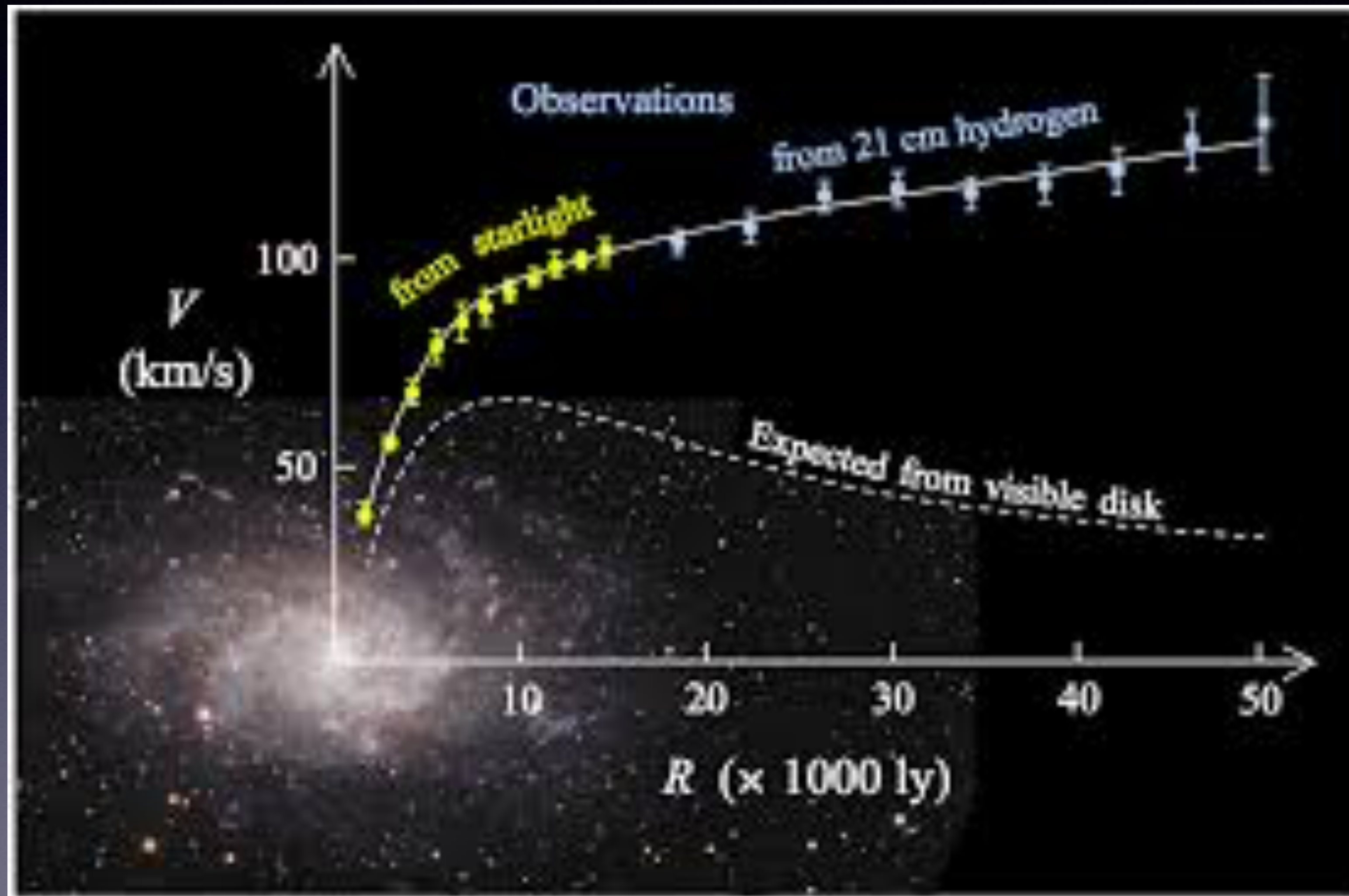
La Via Lattea (Galassia)



La rotazione differenziale della Galassia

- La rotazione galattica nei dintorni del Sole la si deriva misurando le velocità delle stelle locali
- A distanze maggiori la si misura dalle velocità delle nubi di HI che emettono nel radio a 21 cm
- La Galassia ruota in modo differenziale nel senso che la velocità angolare aumenta al diminuire dalla distanza dal centro
- Fu scoperta contemporaneamente da Oort e da Lindblad negli anni 1920

Curva di rotazione della Galassia



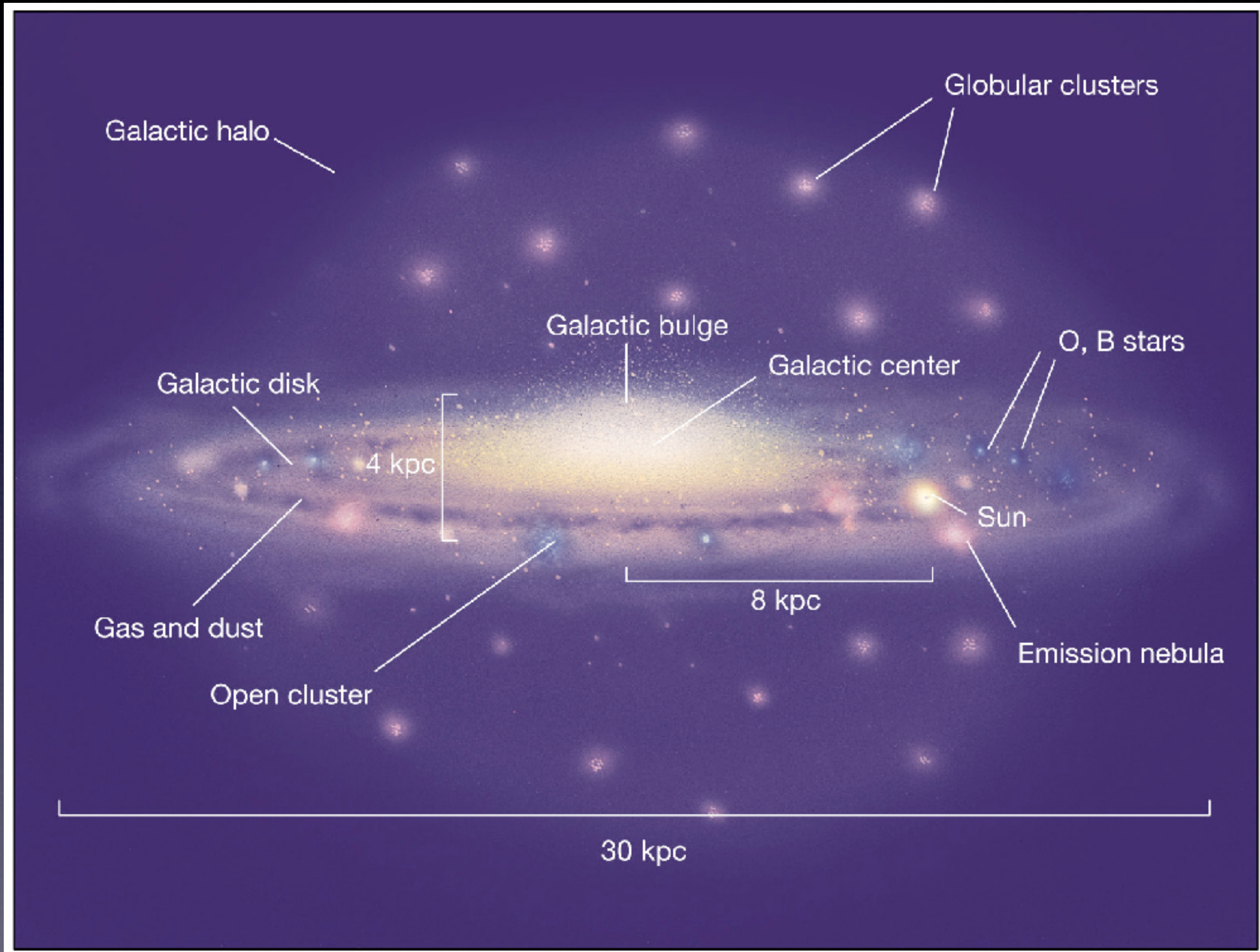
Le velocità stellari

- Le osservazioni indicano che la maggior parte delle stelle nella nostra Galassia sono confinate in un disco sottile
- Il piano della Galassia è ben definito dalla Via Lattea. Il centro galattico si trova nella direzione dove le stelle sono più dense, nella costellazione del Sagittario
- Il Sole è vicino al piano galattico ma non sta fermo poiché si muove come tutte le altre stelle sotto l'effetto del potenziale galattico
- Appena una stella muove al di sopra o al di sotto del piano galattico, viene attratta indietro dalle forze gravitazionali esercitate dalle altre stelle
- Oscilla dunque su e giù attraverso il disco durante il suo moto circolare attorno al centro galattico. Ciò implica equilibrio statistico

Le abbondanze chimiche delle stelle

- Ci sono 4 popolazioni stellari principali nella nostra Galassia:
- La popolazione di alone e' costituita da stelle piccole e vecchie e povere di metalli. Ci sono anche ammassi globulari che contengono stelle vecchie e poco metalliche. In generale $[Fe/H] < -1.0$ dex
- La popolazione di disco spesso e' costituita da stelle vecchie con metallicità tra -1.0 e -0.6 dex
- La popolazione di disco sottile e' giovane ed ha metallicita' tra -0.6 e $+1.0$ dex
- La popolazione di bulge ha stelle essenzialmente vecchie con metallicita' tra -2.0 e $+1.5$ dex

La nostra Galassia



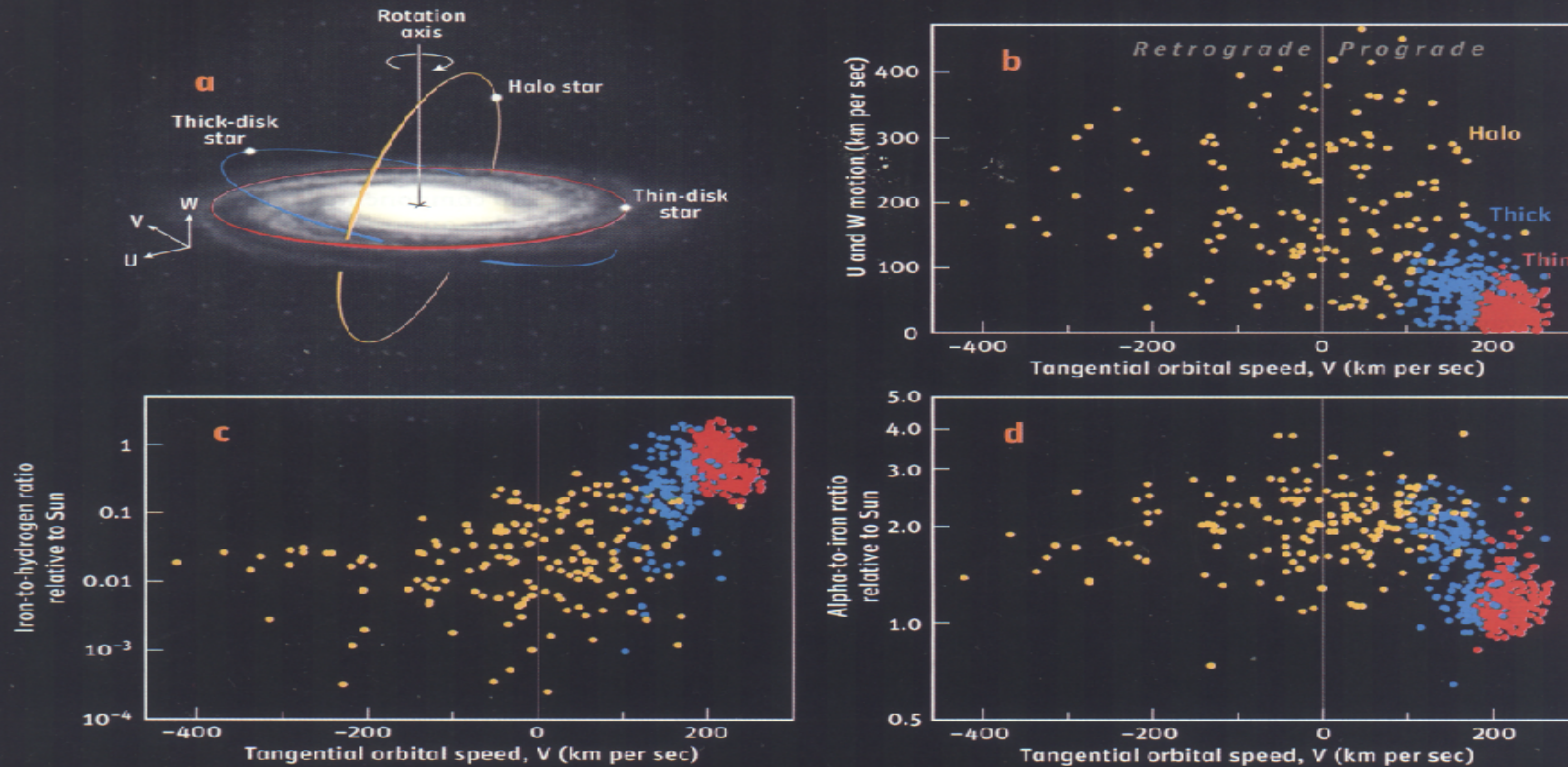
Ammasso globulare



Le velocità stellari: Local Standard of Rest

- Consideriamo un campione di stelle dei dintorni solari (un cilindro di raggio= 1kpc)
- La stella i -esima avrà tre componenti di velocità, U_i , V_i , W_i in un sistema di riferimento centrato nel Sole e dove il Sole è in quiete
- Questo è il Local Standard of Rest (LSR) ovvero il Riferimento Locale di Quietè
- U_i è la velocità radiale, V_i è la velocità circolare e W_i la perpendicolare al piano

Milky Way Anatomy: Motion vs. Composition



The Milky Way's history is reflected both in the abundances of key chemical elements in stellar atmospheres and in stellar motions. (a) A star's motion can be decomposed into a circular component (V), a radial motion within the disk (U), and a motion (W) perpendicular to our galaxy's midplane. (b) Thin-disk stars follow nearly circular orbits, with their motions being mostly tangential; halo stars are equally likely to follow prograde or retrograde orbits and cross the midplane at high speeds. (c) These orbital distinctions are mirrored by differences in iron content, with halo stars being the most metal-poor, as if they formed from relatively primordial material. (d) The galaxy's varied stellar populations also differ in their alpha-to-iron ratios, where "alpha" means oxygen and other elements built by core-collapse supernovae. Together these trends suggest that the Milky Way's halo stars formed well before those in the thin disk, with the thick disk being intermediate.