



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

La nostra galassia & il mezzo interstellare

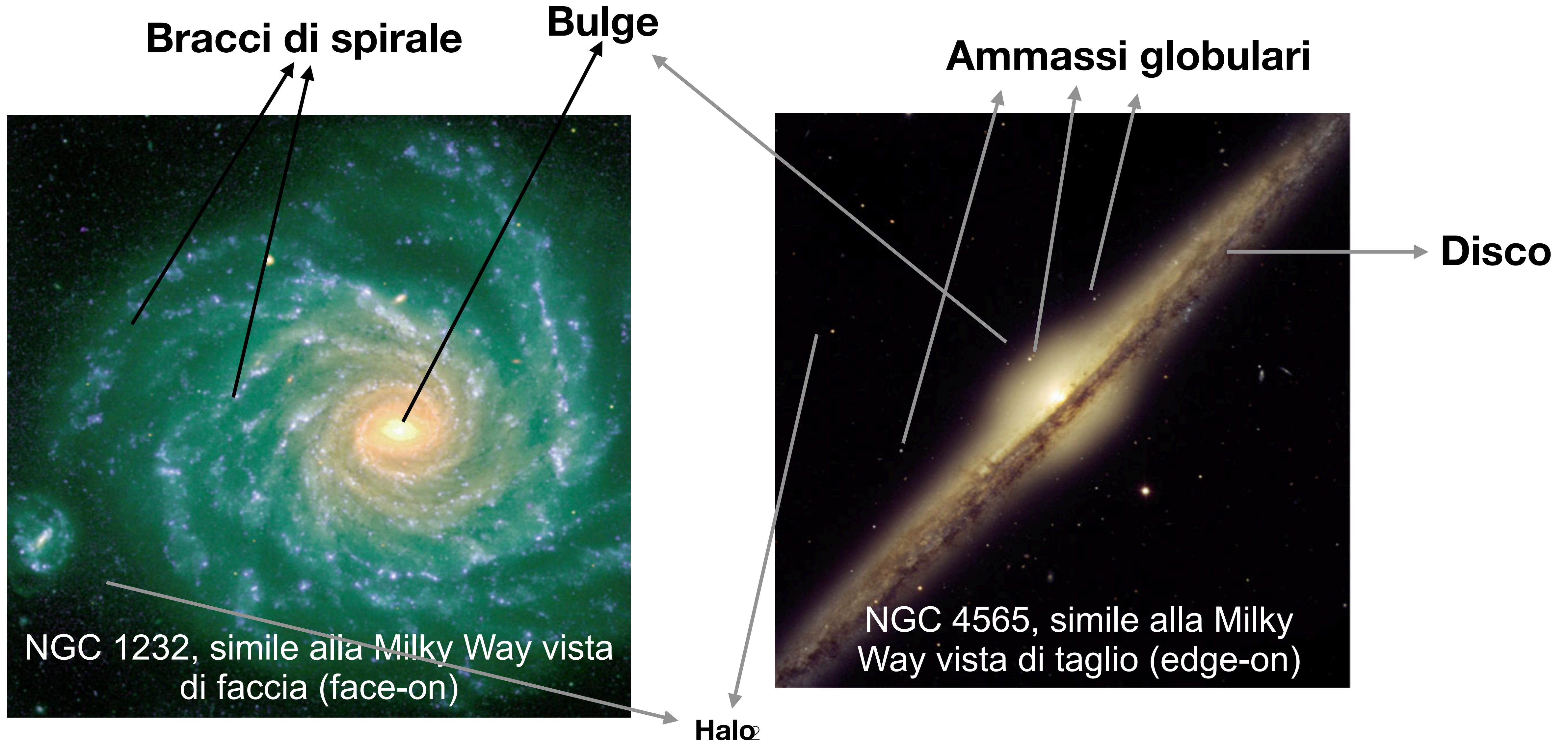
Argomento 6

Materiale da

Cap. 19 “The cosmic perspective”, by J. O. Bennett, M. O. Donahue, N. Schneider & M. Voit
e Cap. 2 “Extragalactic Astronomy and Cosmology”, by P. Schneider, 2nd edition
(or Cap. 16&18 “Fundamental Astronomy” edition, by H. Karttunen, H. Oja, M. Poutanen, K.
J. Donner)



La nostra galassia





UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

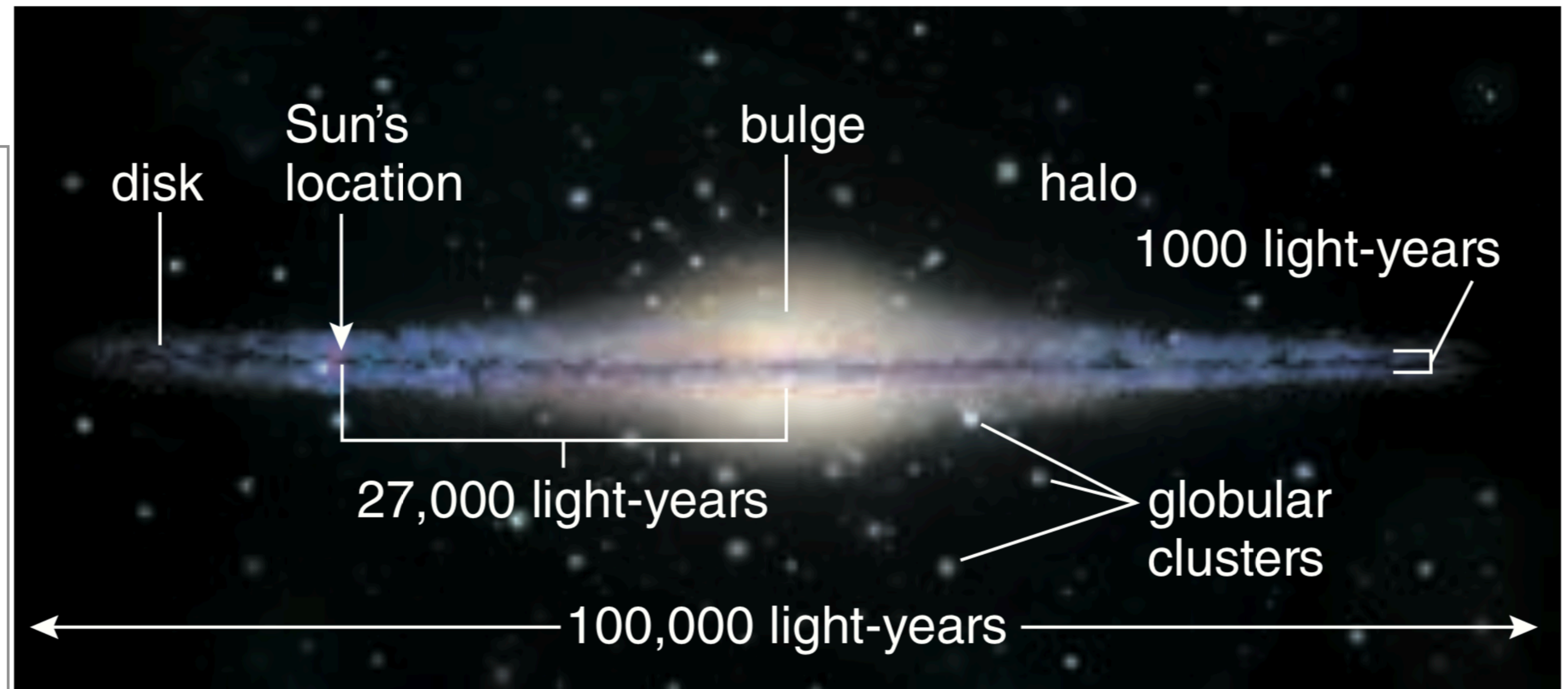
La vera via Lattea



- 6000 stelle visibili ad occhio nudo
- una fascia di polvere

La nostra galassia

- La nostra galassia è una **spirale**, con estesi bracci ospitati nel **disco**
- Il **bulge** è uno sferoide brillante intorno al centro
- La galassia è immersa nell'**alone**, molto debole e sferico
- Gli **ammassi globulari** (circa 200) sono nell'alone



- La galassia contiene **100 miliardi** di stelle, la sua massa è $\sim 10^{11} M_{\odot}$
- È solo una delle 100 miliardi di galassie dell'Universo

Qualche numero

1 anno luce [*ly*]=distanza percorsa dalla luce in un anno

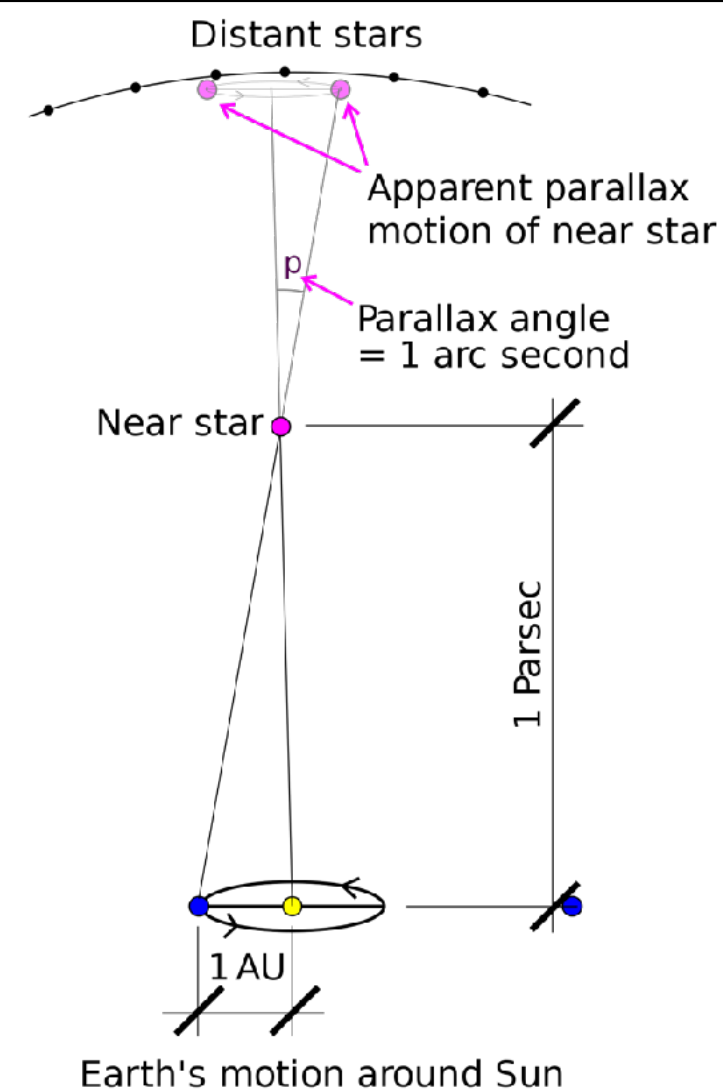
$$c=299\,792\,458\text{ m/s}$$

$$1\text{ ly}=?\text{ km?}$$

1 parsec [*pc*]=distanza alla quale una *UA* sottende un arco di 1''

$$1\text{ UA} = \text{distanza terra Sole}$$

$$1\text{ UA} = 150\,000\,000\text{ km}$$



$$1\text{ pc}=206265\text{ UA}$$

$$1\text{ kpc}=?\text{ km?}$$

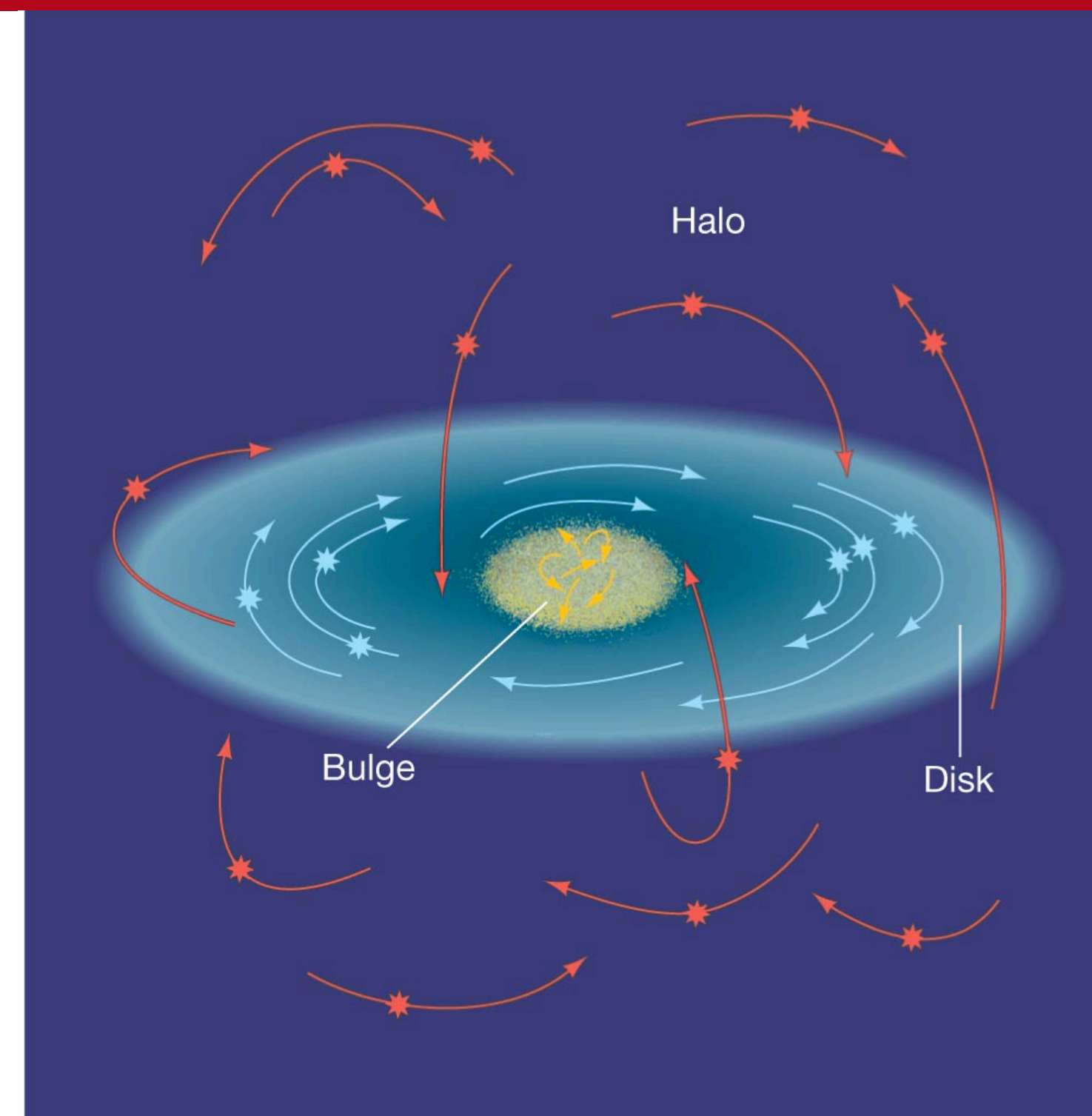
$$1\text{ M}_{\odot} = \text{massa del Sole}$$

$$= 2 \times 10^{30}\text{ kg}$$

$$1\text{ L}_{\odot} = \text{luminosità solare}$$

$$= 3.8 \times 10^{33}\text{ erg/s} = 3.8 \times 10^{26}\text{ Watt}$$

Moti delle stelle



- Nel disco i moti sono quasi-circolari, intorno al centro galattico.
- Il Sole ha un'orbita circolare di raggio 27,000 anni luce, con velocità 220 km/s
- Nell'alone le stelle orbitano intorno al centro galattico, ma le orbite sono orientate casualmente
- Il bulge è intermedio, con alcune orbite distribuite casualmente, altre allineate col disco

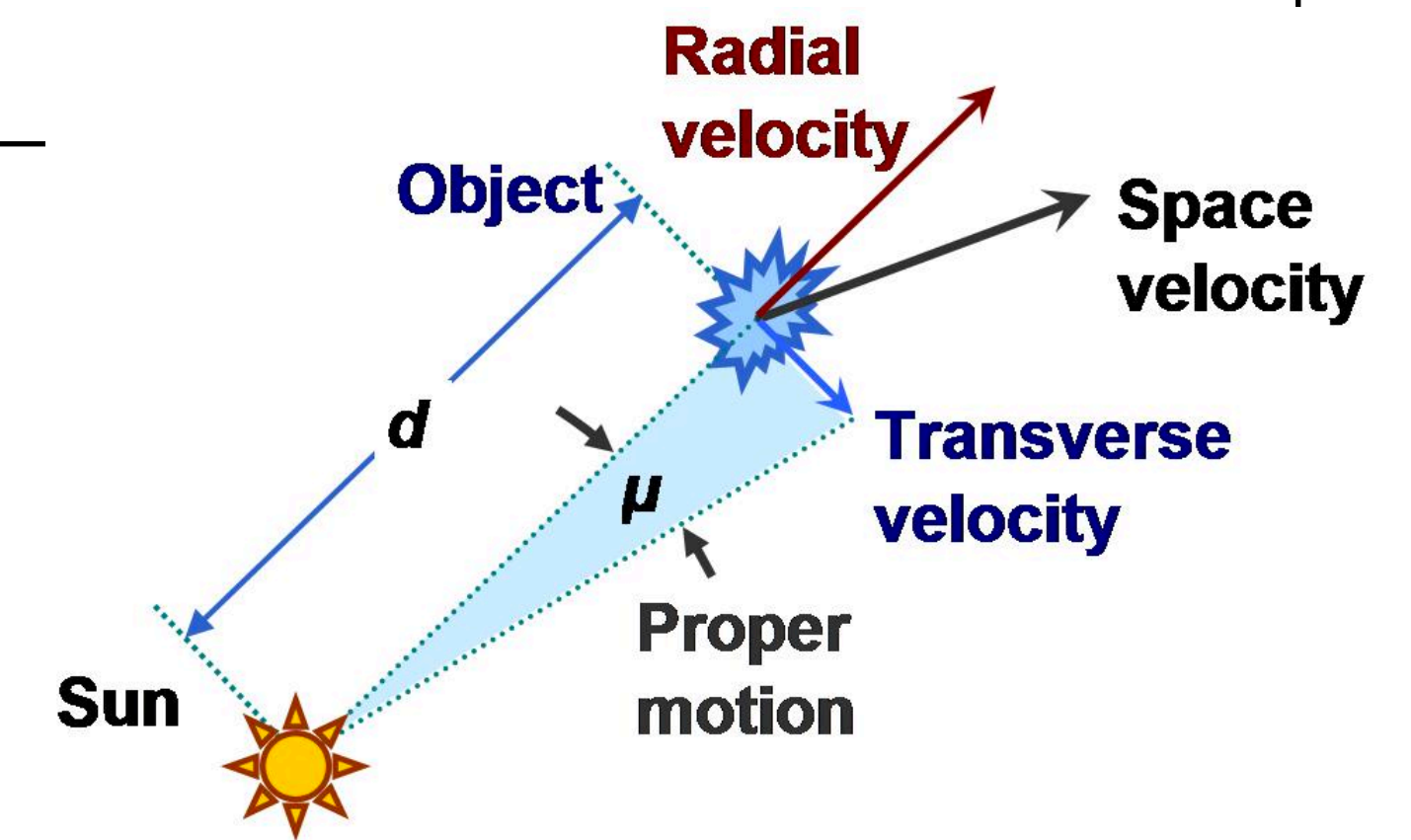
Come conosciamo la struttura della Galassia?

Come conosciamo la struttura?

- Le stelle visibili di notte sembrano distribuite uniformemente intorno al Sole: il Sole è il centro della galassia?
- No: l'assorbimento da parte della polvere ci preclude di vedere le stelle del disco lontane da noi
- Gli ammassi globulari appaiono distribuiti sfericamente intorno ad un punto a 27,000 anni luce dalla Terra (Shapley): questo punto è il centro della Galassia
- Le osservazioni di polvere e gas (riga 21cm nel radio) permette di stabilire la struttura a spirale del disco
- Bulge: stelle e popolazioni stellari più vecchie, tutte più o meno in una direzione

Come conosciamo le orbite stellari?

- Studiando il moto di molte stelle rispetto al Sole. Come?
- Doppler effect: moto radiale
- Moto tangenziale: tramite *moti propri*, il moto apparente delle stelle nel cielo a distanza di molto tempo
- Per convertire i moti propri in velocità occorre conoscere la distanza
- La velocità rispetto al sole è la somma vettoriale della velocità tangenziale e di quella radiale





Esercizio: massa della galassia usando l'orbita solare

- La massa della galassia è molto maggiore di quella di ciascuna stella o nube di gas, quindi si può applicare la terza legge di Keplero

$$\frac{4\pi^2}{T^2} = \frac{Gm}{a^3} \quad G = 6,67408 \times 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg s}^2}$$

m massa della galassia entro l'orbita del Sole, di raggio a , in orbita di periodo T intorno al centro della galassia (*dati reperibili dalle altre slides*)

derivare m

$$c = 300,000 \text{ km/s}$$

$$1 \text{ anno luce} = 9.5 \cdot 10^{15} \text{ m}$$

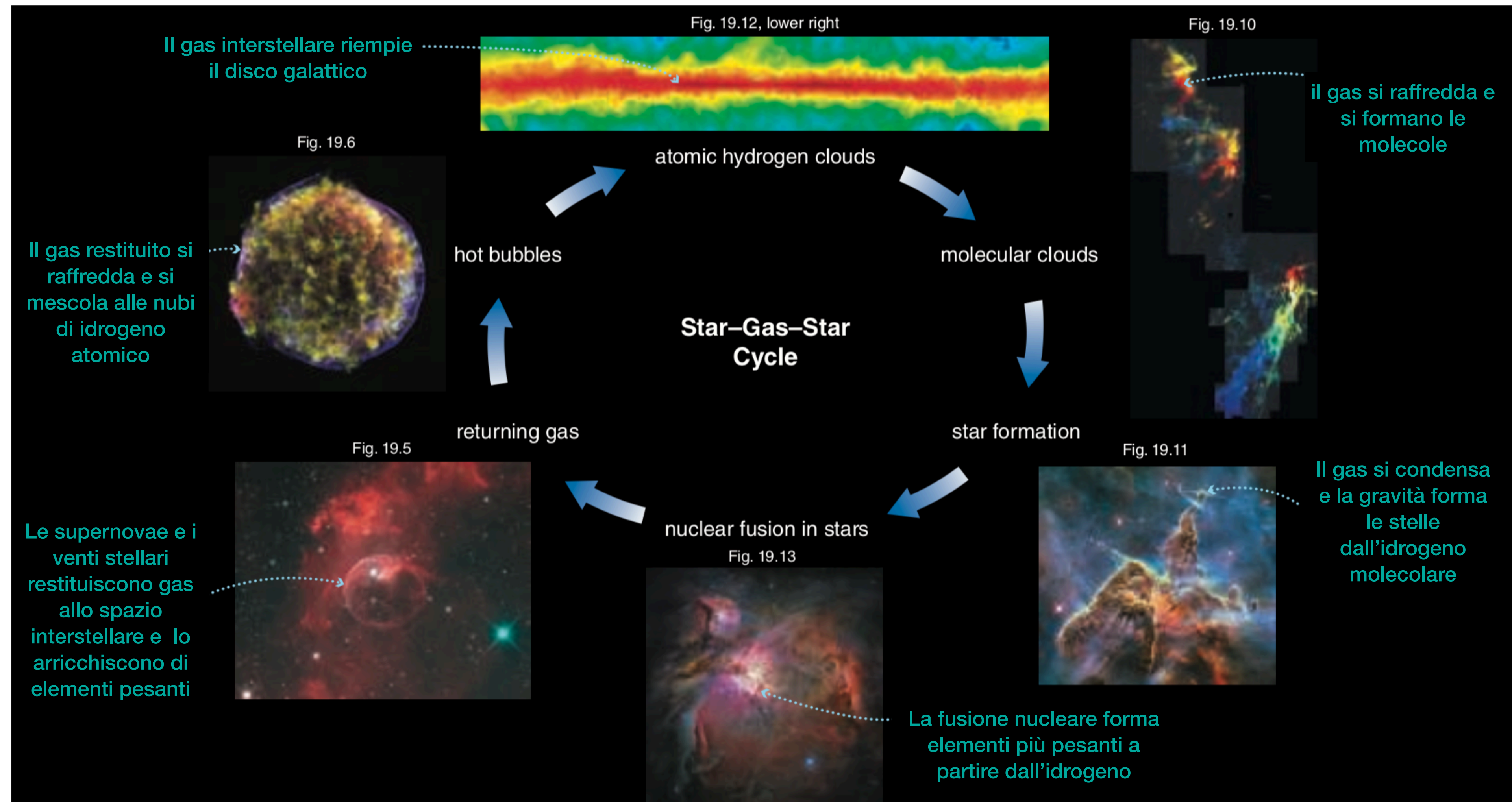
$$\text{Soluzione: } m = 2.4 \cdot 10^{41} \text{ kg} = 10^{11} M_{\odot}$$

Via Lattea: galassia star-forming



- La Via Lattea è una galassia che forma stelle costantemente nel tempo
- In media, forma $1 M_{\odot}$ di nuove stelle all'anno, quindi ha un tasso di formazione stellare modesto
- se continuasse a formare stelle con lo stesso ritmo, impiegherebbe 100 Gyr per raddoppiare la sua massa ($M_{\text{gal}}=10^{11}M_{\odot}$; per produrre lo stesso numero di stelle ci vorrebbero $10^{11} \text{ yr}=100 \text{ Gyr}$)
- quale meccanismo consente alla galassia di continuare a formare stelle a questo ritmo costante?

Il ciclo del gas nella galassia



Mantiene attiva la formazione di stelle nella galassia

Il ciclo del gas nella galassia

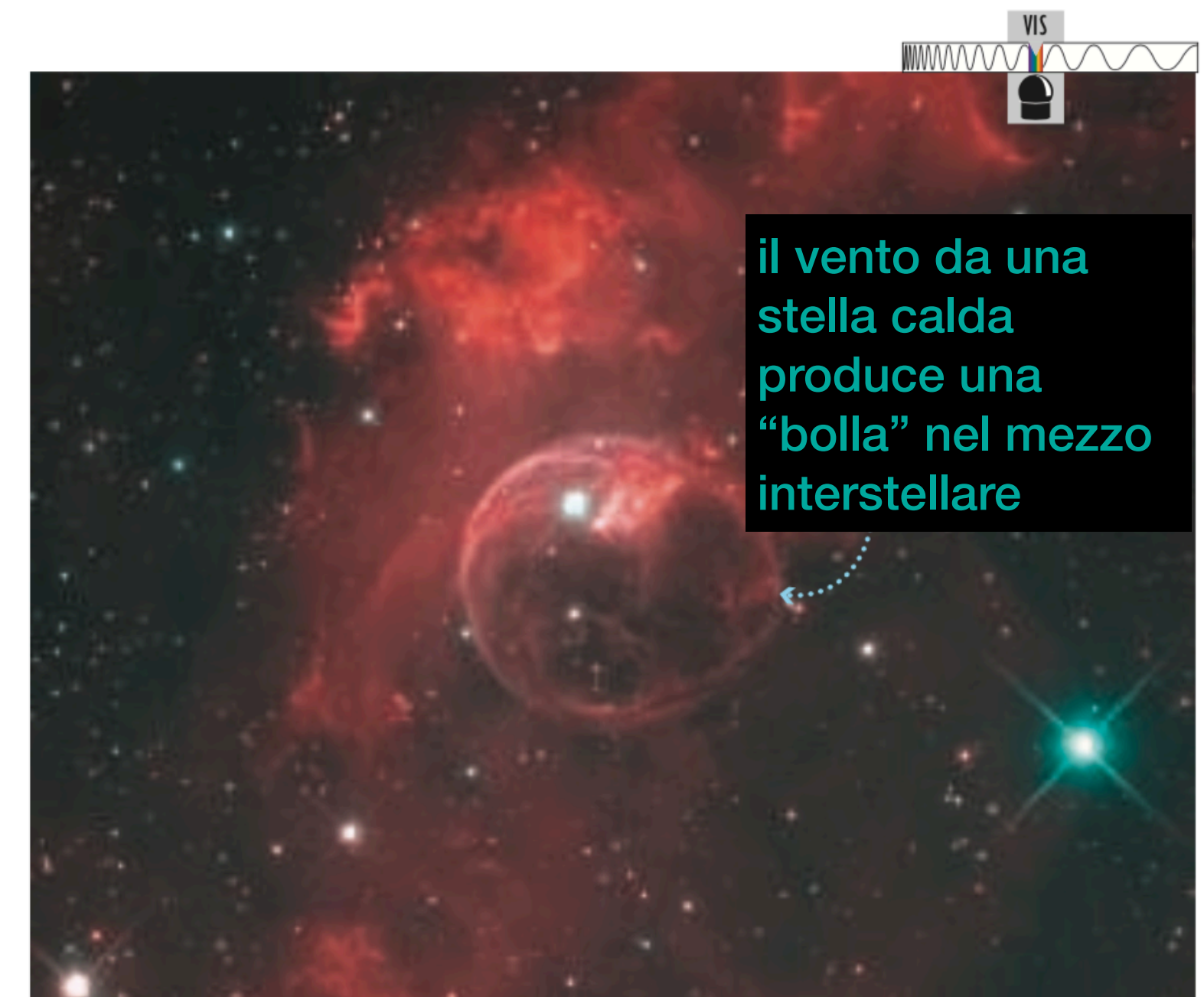
Fase 1: gas espulso da stelle

Tutte le stelle restituiscono gran parte della loro massa originale allo spazio interstellare, attraverso venti stellari (durante la loro vita) o eventi catastrofici: nebulose planetarie (per stelle di piccola massa) o supernovae (per stelle di grande massa)



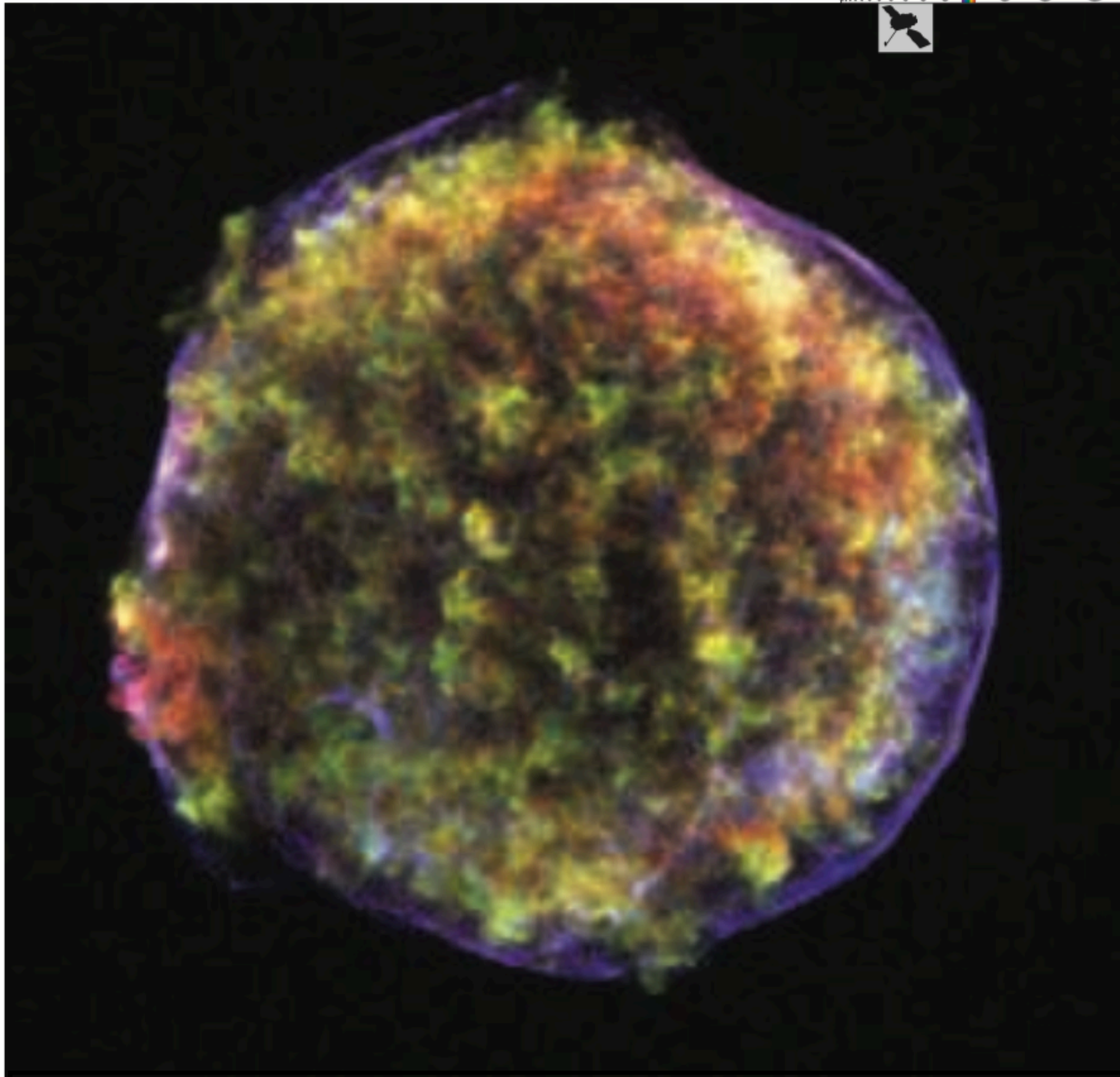
Nebulosa planetaria

La morte di una stella di piccola massa: circa il 50% della sua massa originale viene restituita allo spazio interstellare



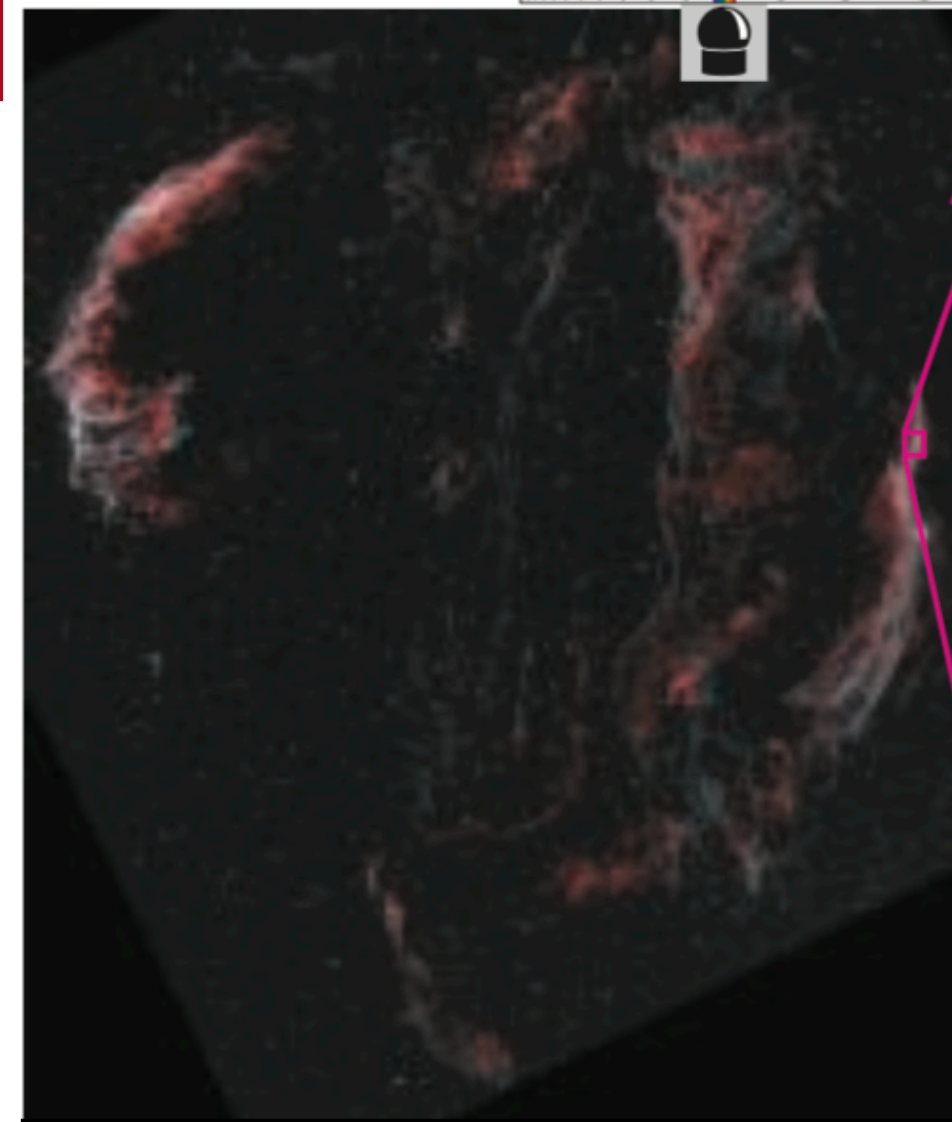
il vento da una stella calda produce una "bolla" nel mezzo interstellare

Shell di gas caldo in espansione

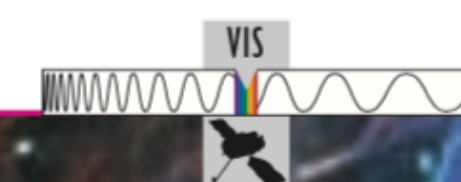


Giovane resto di supernova

- esplosione di stelle massicce $M > 8M_{\odot}$
- blu: gas a 20,000,000 °K, shock front
- verde/rosso: gas a 10,000,000 °K, prodotto dell'esplosione, scaldato dal fronte di shock



x40



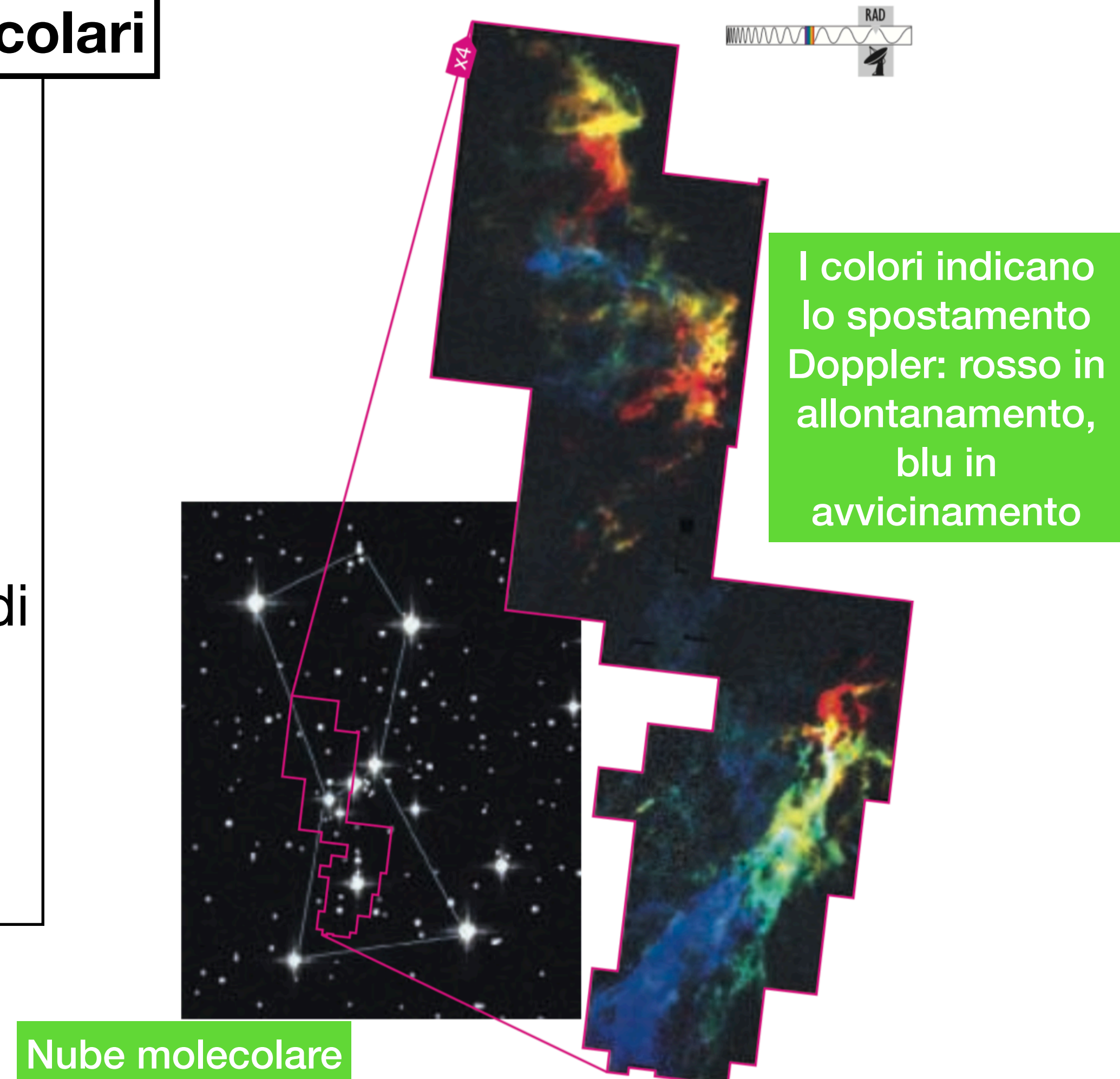
Resto di supernova evoluto

- Più freddo, perché il fronte di shock si è espanso, ha spazzato più materiale e si è raffreddato
- Alla fine il gas scaldato dallo shock si raffredda (irraggia tutta l'energia termica) e si mescola con il mezzo interstellare circostante

Elementi pesanti come C, O, Fe, ... sono creati nel nucleo delle stelle e trasferiti al mezzo interstellare con eventi di questo tipo

Fase 2: raffreddamento del gas e formazione di nubi molecolari

- Una volta che il gas espulso dalle stelle si raffredda, si meschia con l'idrogeno atomico interstellare
- l'idrogeno atomico si trova in 2 forme:
 - nubi tenui di gas tiepido (warm, 10,000 °K)
 - nubi più dense di gas freddo (cold, 100 °K)
- con il passare del tempo (milioni di anni) il gas si condensa, e così facendo si raffredda
- questa fase è molto lunga, perciò la maggior parte del gas di una galassia è in questo stato
- al raffreddarsi ulteriormente, l'idrogeno atomico si combina in idrogeno molecolare, formando nubi molecolari (circa il 5% della massa della galassia è in questa forma)



Fase 3: formazione stellare

- Una volta formata, la nube molecolare si frammenta e forma un ammasso stellare
- Si formano stelle di diverse masse; le più massicce e calde (O, B) ionizzano e scaldano il gas circostante, i venti spazzano via il gas feedback
- Il feedback impedisce alla maggior parte del gas molecolare di formare stelle

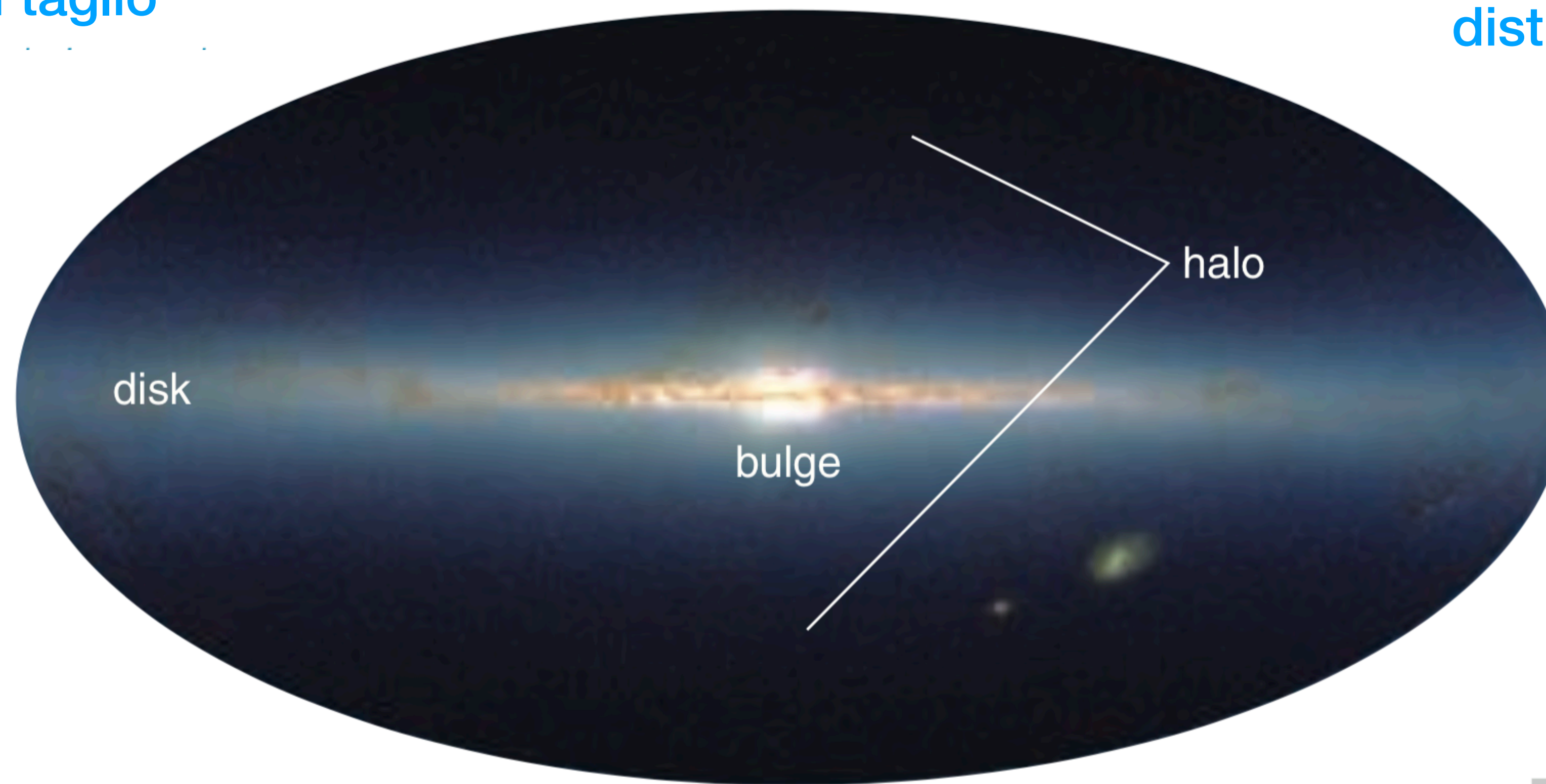




Distribuzione di gas e stelle nella nostra galassia

Queste immagini tutto cielo
mostrano il disco
galattico di taglio

Lunghezze d'onda del
vicino infrarosso
mostrano la
distribuzione spaziale
delle stelle



infrared (short wavelength)

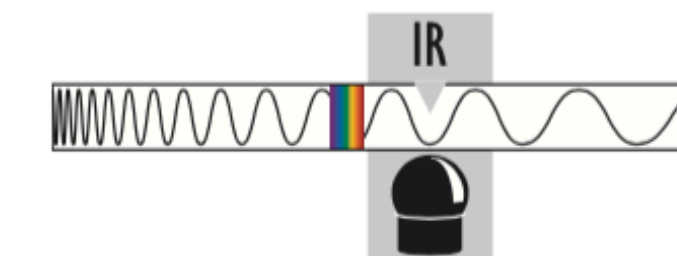




Table 16.1 Main properties of interstellar gas and dust

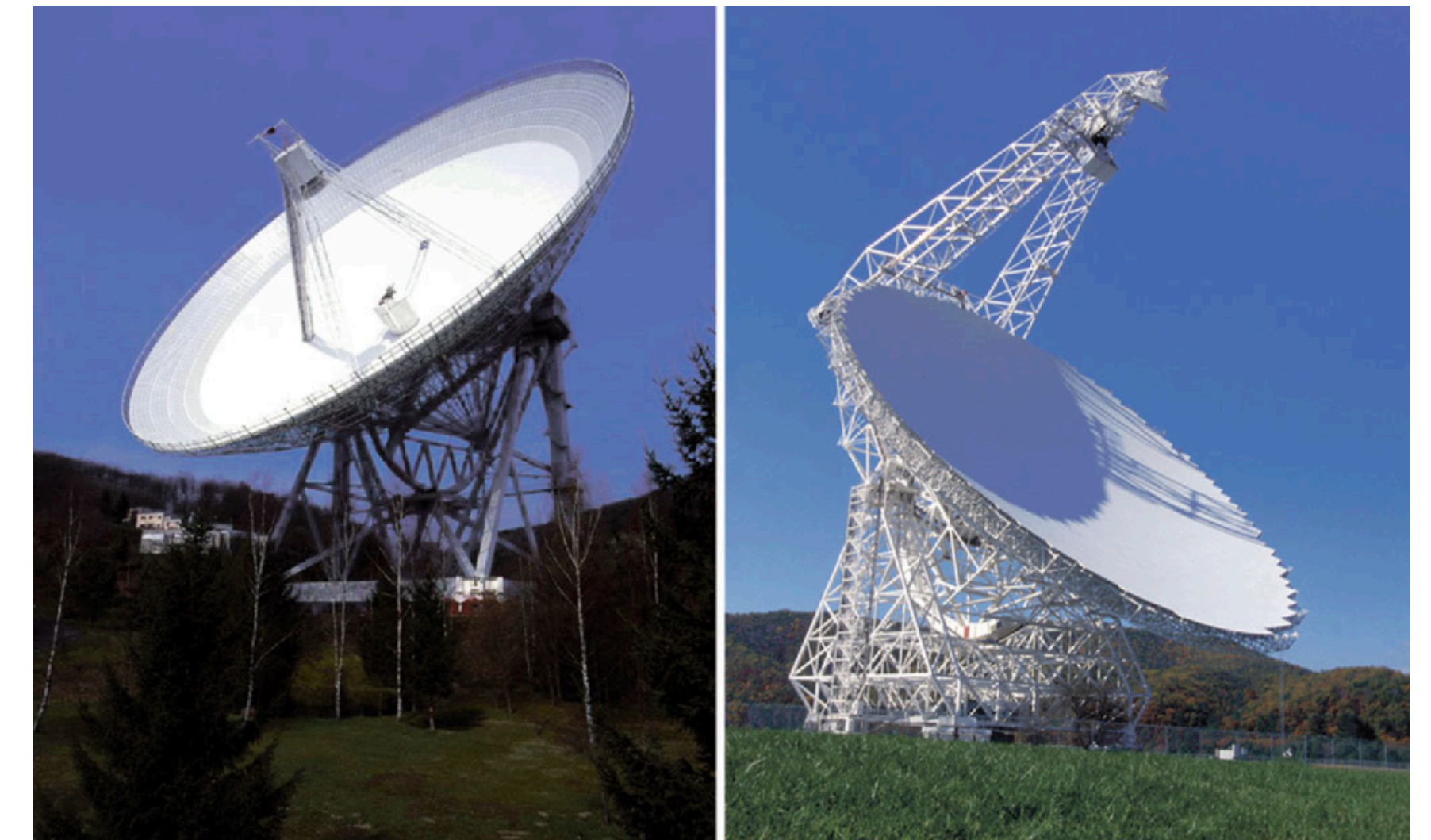
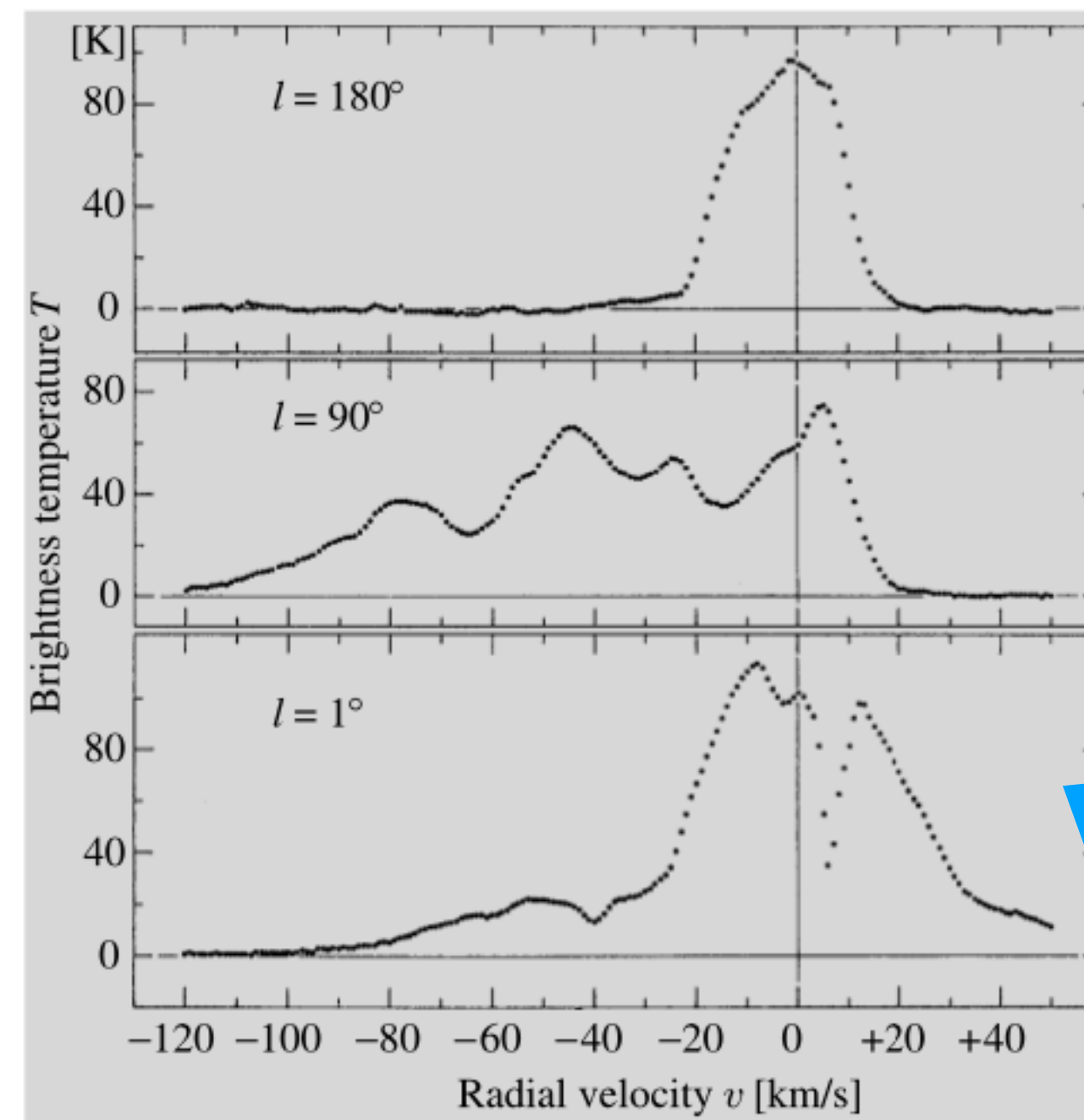
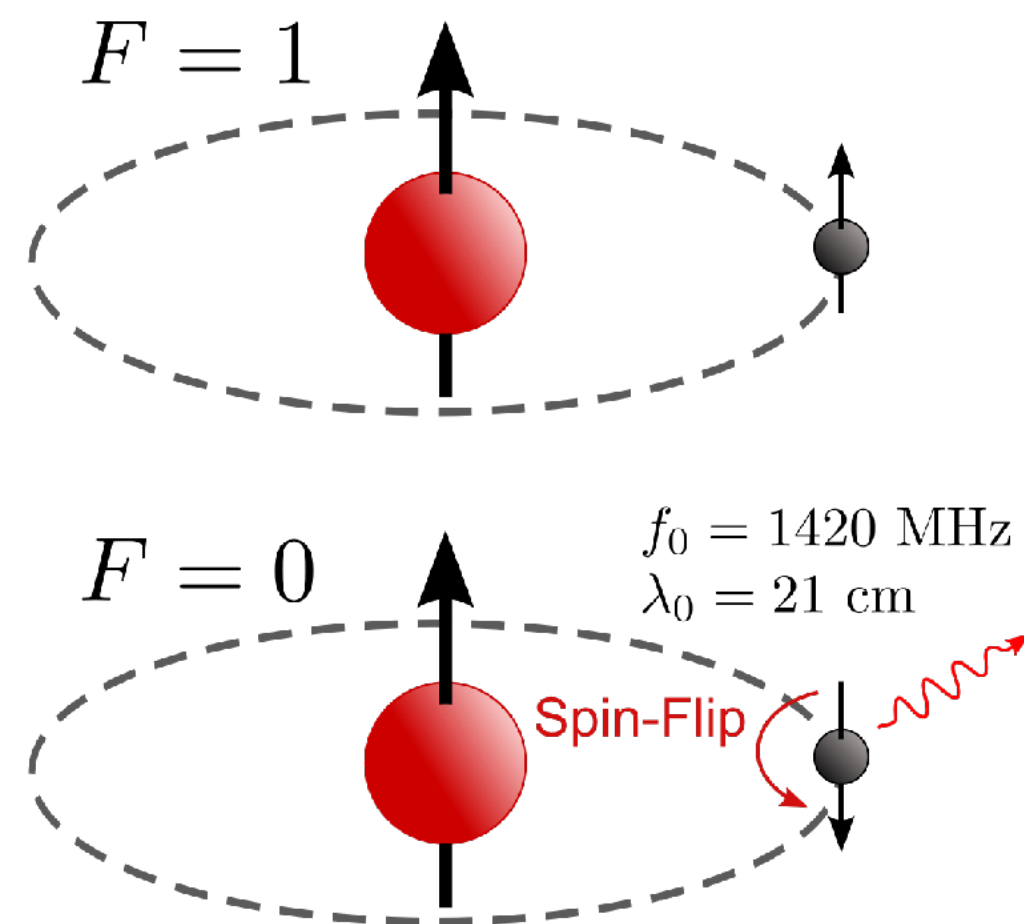
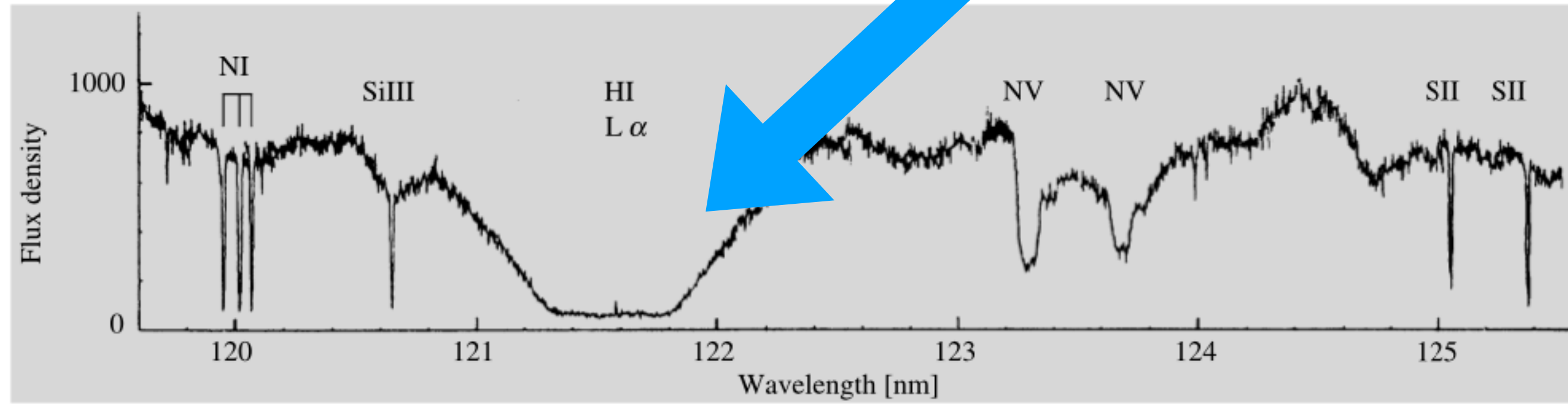
Property	Gas	Dust
Mass fraction	10 %	0.1 %
Composition	H I, H II, H ₂ (70 %) He (28 %) C, N, O, Ne, Na, Mg, Al, Si, S, ... (2 %)	Solid particles $d \approx 0.1\text{--}1 \mu\text{m}$ H ₂ O (ice), silicates, graphite + impurities
Particle density	1 /cm ³	10 ⁻¹³ /cm ³ = 100 /km ³
Mass density	10 ⁻²¹ kg/m ³	10 ⁻²³ kg/m ³
Temperature	100 K (H I), 10 ⁴ K (H II) 50 K (H ₂)	10–20 K
Method of study	Absorption lines in stellar spectra. Optical: Ca I, Ca II, Na I, K I, Ti II, Fe I, CN, CH, CH ⁺ Ultraviolet: H ₂ , CO, HD Radio lines: hydrogen 21 cm emission and absorption; H II, He II, C II recombination lines; molecular emission and absorption lines OH, H ₂ CO, NH ₃ , H ₂ O, CO, H ₂ C ₂ HCN, C ₂ H ₅ OH	Absorption and scattering of starlight. Interstellar reddening Interstellar polarisation Thermal infrared emission



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

Idrogeno neutro

In assorbimento



In emissione

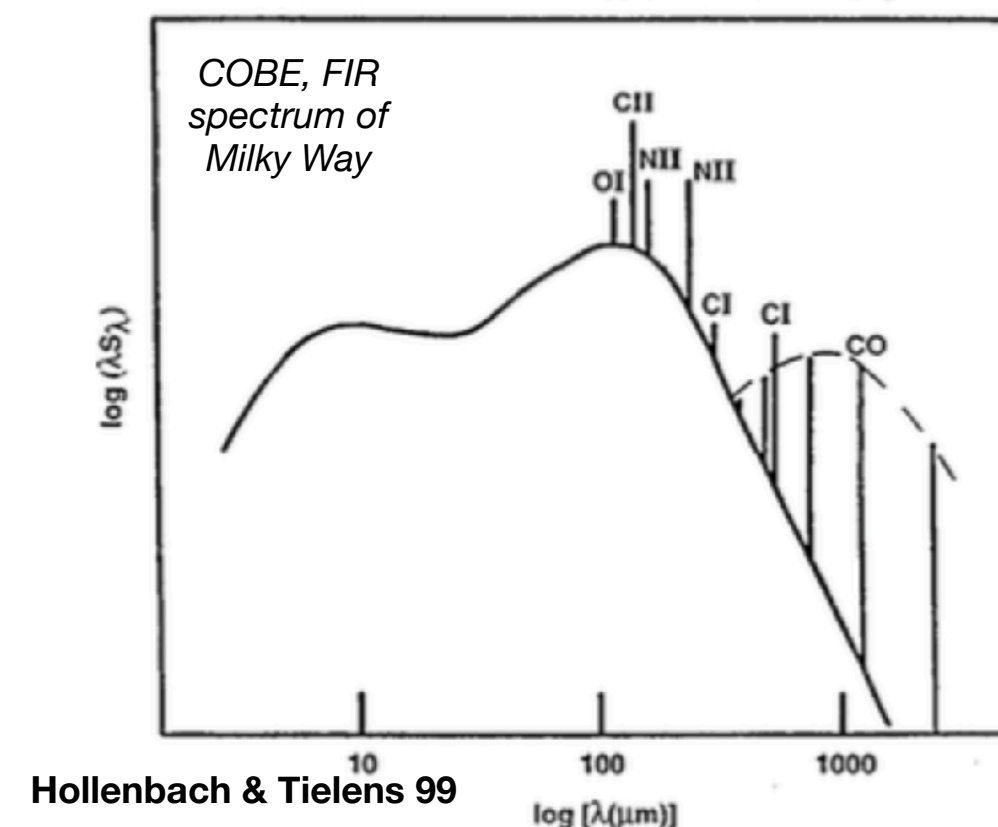


Table 16.4 Some molecules observed in the interstellar medium

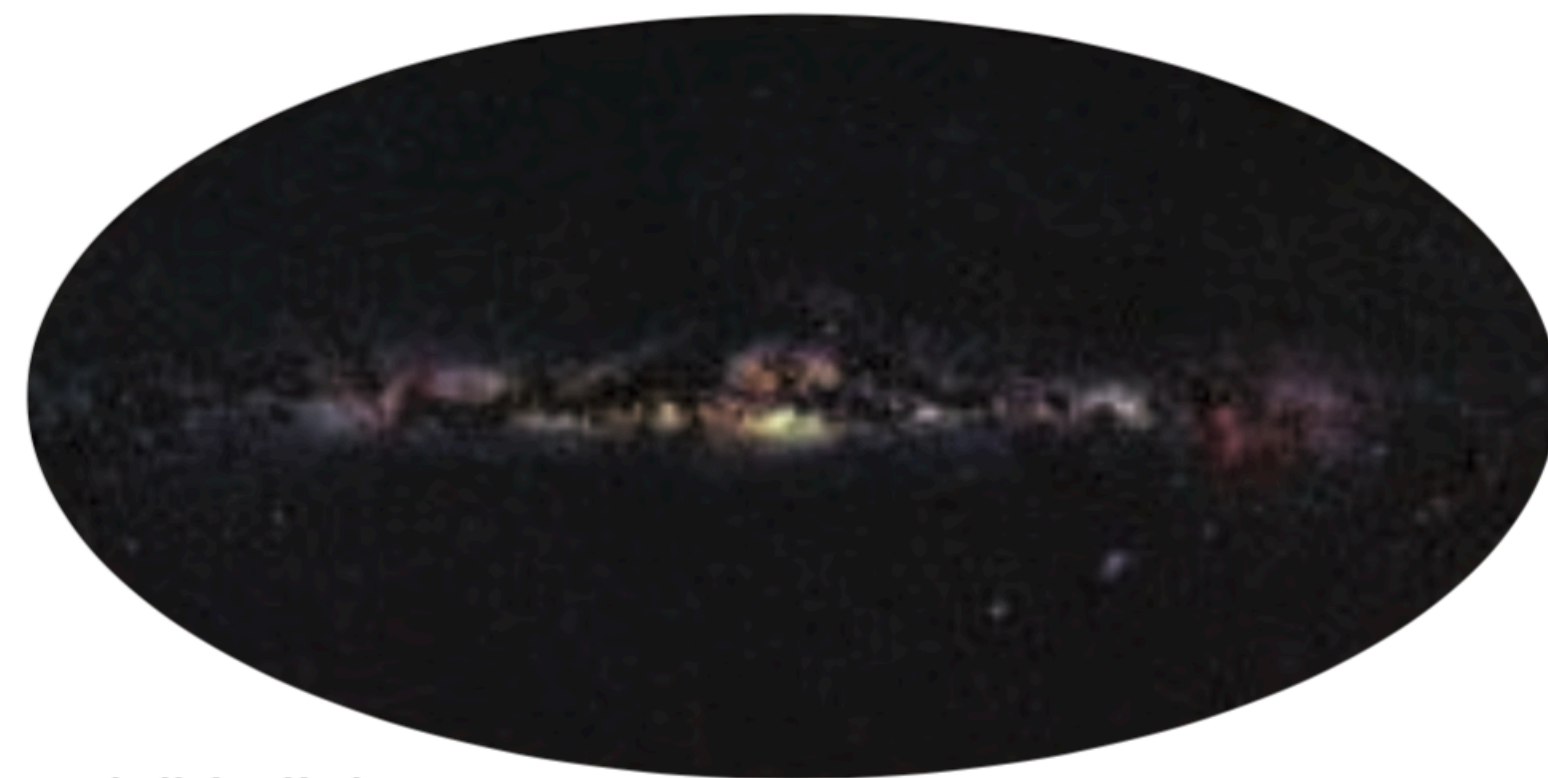
Molecule	Name	Year of discovery
<i>Discovered in the optical and ultraviolet region:</i>		
CH	methylidyne	1937
CH ⁺	methylidyne ion	1937
CN	cyanogen	1938
H ₂	hydrogen molecule	1970
CO	carbon monoxide	1971
<i>Discovered in the radio region:</i>		
OH	hydroxyl radical	1963
CO	carbon monoxide	1970
CS	carbon monosulfide	1971
SiO	silicon monoxide	1971
SO	sulfur monoxide	1973
H ₂ O	water	1969
HCN	hydrogen cyanide	1970
NH ₃	ammonia	1968
H ₂ CO	formaldehyde	1969
HCOOH	formic acid	1975
HCCNC	isocyanoacetylene	1991
C ₂ H ₄ O	vinyl alcohol	2001

- è la molecola più comune
- contiene la maggior parte della massa di idrogeno del mezzo interstellare $M_{H_2}/M_{HI}=2$
- praticamente non osservabile, non ha momento di dipolo

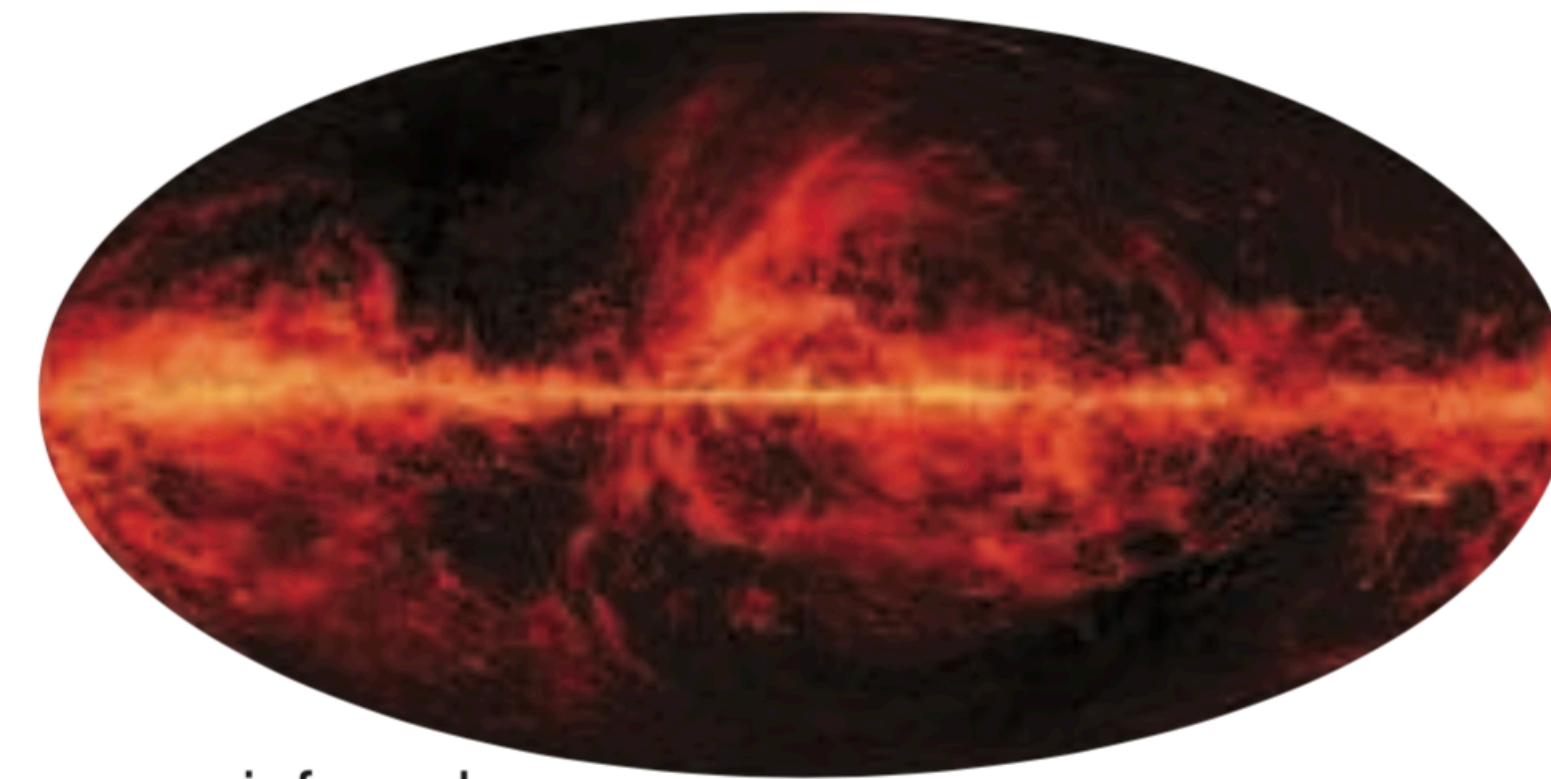
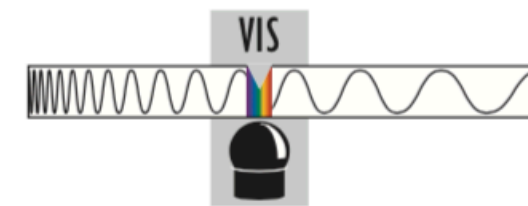
- è la seconda molecola più comune
- osservabile nel FIR (ad esempio ALMA)
- **si usa per tracciare H₂**



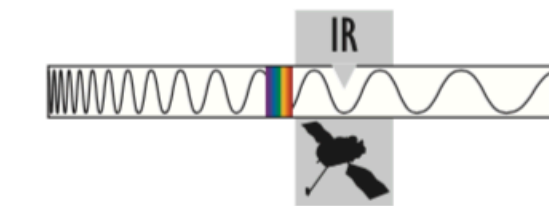
La galassia a diverse lunghezze d'onda



visible light



infrared
(long wavelength)



Luce visibile

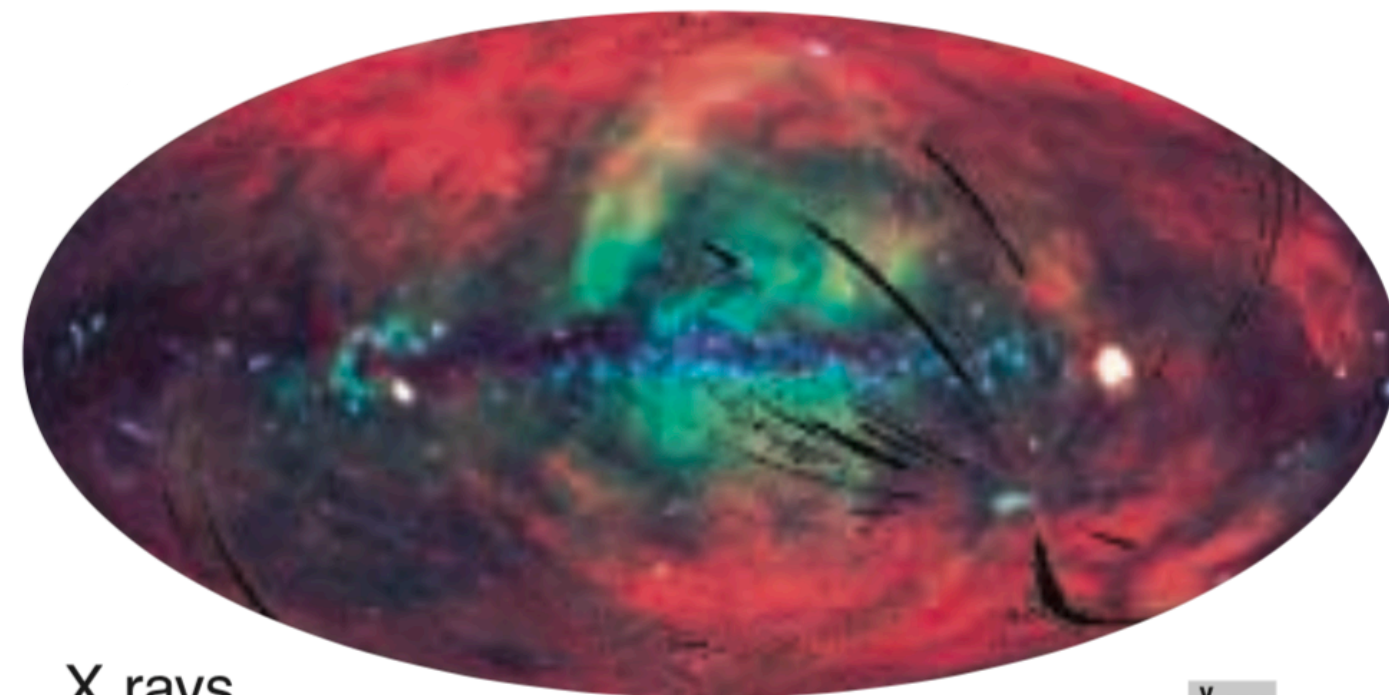
- Stelle di tipo solare emettono la maggior parte della luce a queste lunghezze d'onda
- Però la polvere nel disco galattico assorbe la luce stellare
- Quello che si vede sono linee di vista casualmente non bloccate da polveri

Infrarosso lontano

- La polvere galattica assorbe la luce UV e visibile, scaldandosi
- La polvere emette l'energia assorbita sotto forma di energia termica di corpo nero
- Quello che si vede sono le regioni di attiva formazione stellare, ricche di polvere

La galassia a diverse lunghezze d'onda

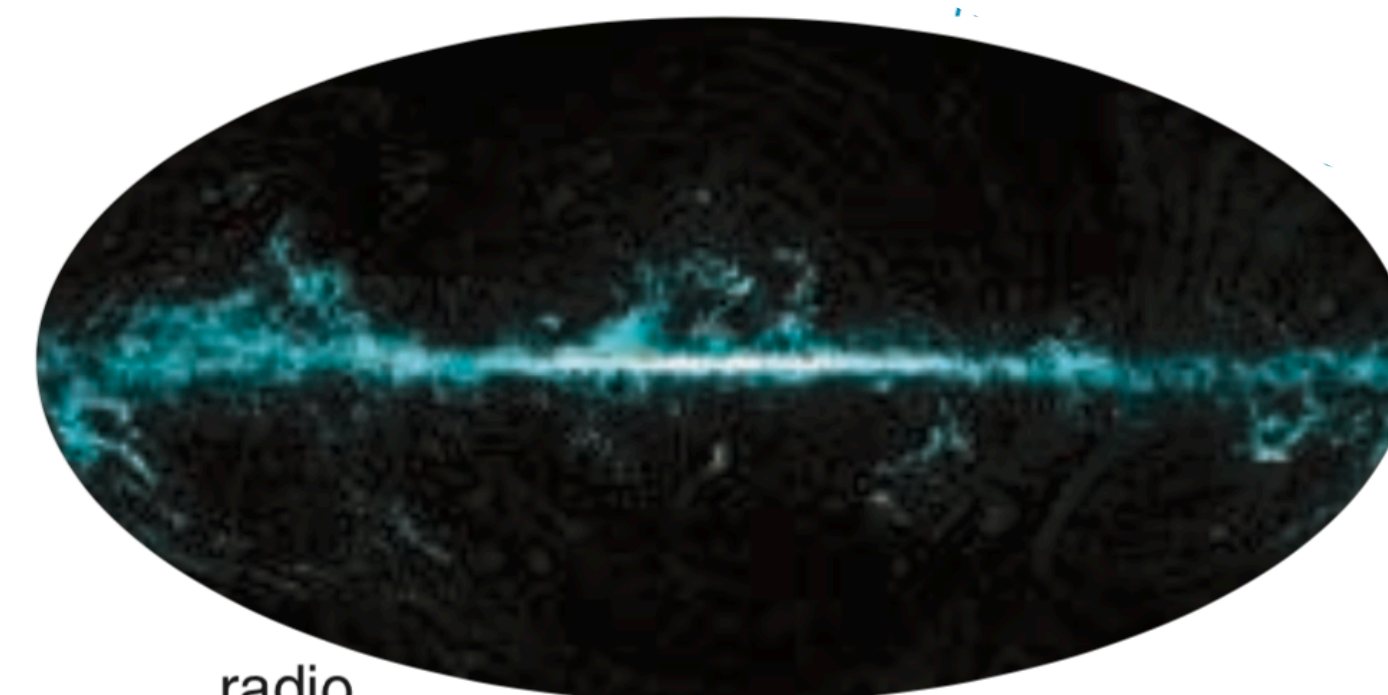
A lunghezze d'onda X l'alone è più brillante del disco: è riempito di gas ionizzato caldo



X rays



A lunghezze d'onda radio vedo il gas molecolare freddo



radio
(CO molecules)



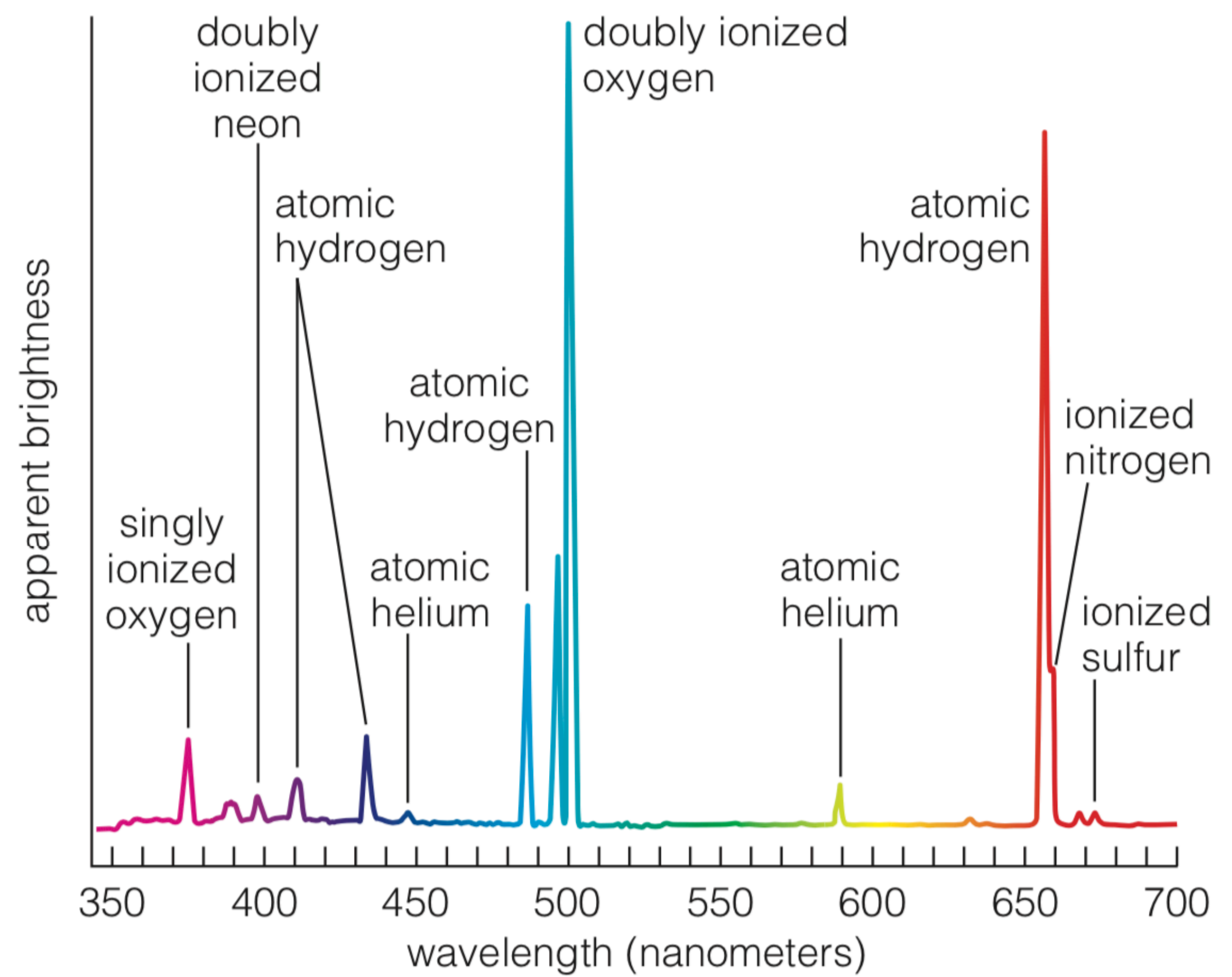
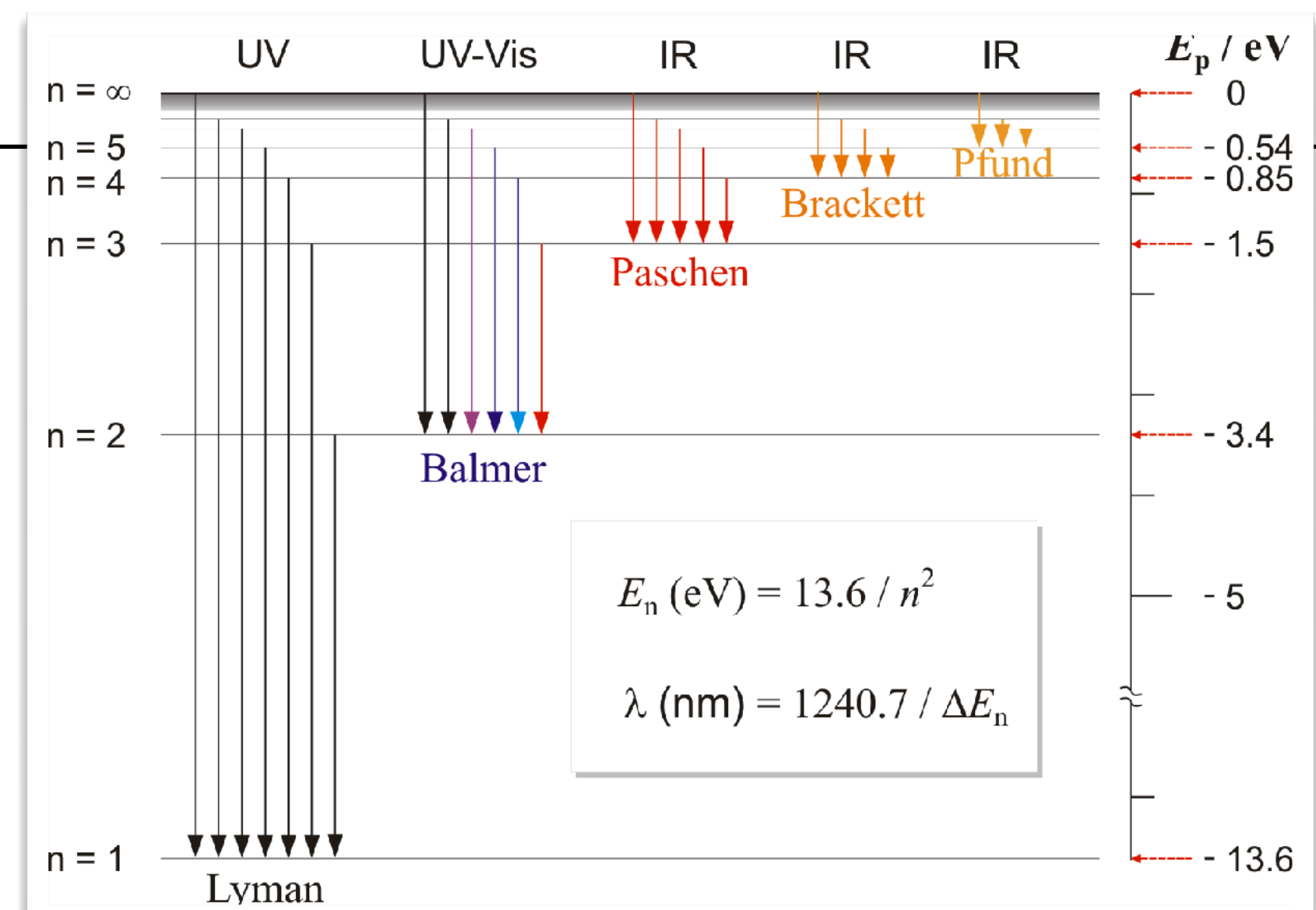
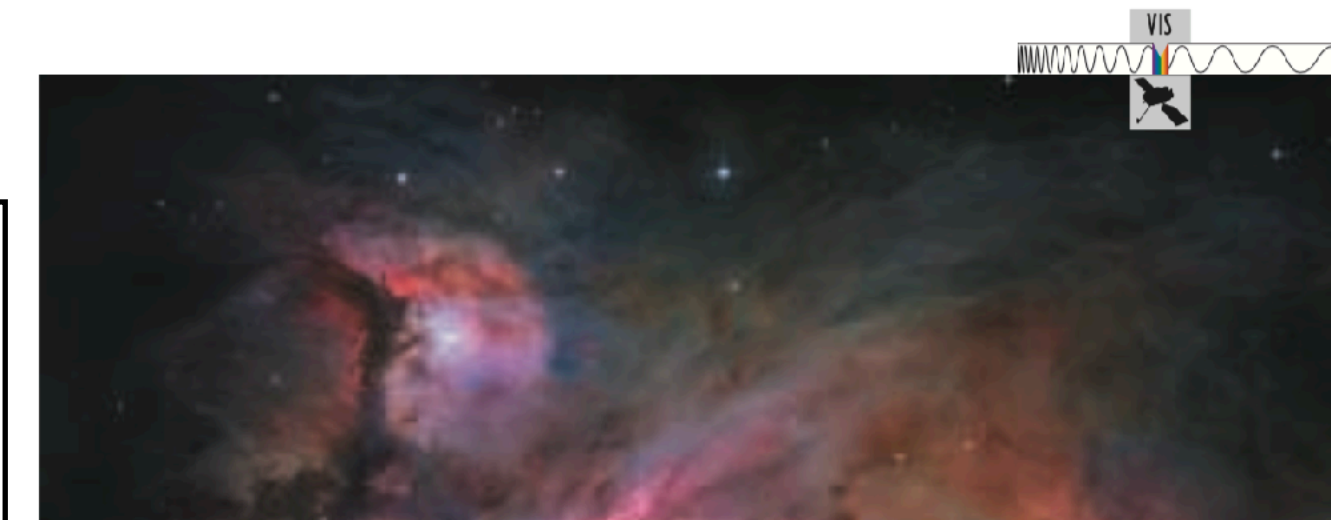
	Fase del gas		
	Bolle calde	Nubi di idrogeno atomico	Nubi molecolari
Costituente principale	Idrogeno ionizzato	Idrogeno atomico	Idrogeno molecolare
Temperatura (circa)	1,000,000 K	100–10,000 K	30 K
Densità (circa) (atomi/cm³)	0.01	1–100	300
Descrizione	Porzioni di gas scaldate da venti stellari e supernovae	Fase più comune del gas, riempie la maggior parte del disco galattico	Regioni di formazione stellare



Distribuzione della formazione stellare nella nostra galassia

Come identificare zone di formazione stellare recente?

- Le stelle si formano nelle nubi molecolari, che sono oscure (la luce UV/ottica viene assorbita dalle polveri)
- Stelle calde e blu sono ottimi indicatori di luoghi di formazione stellare recente. Le stelle O e B vivono poco tempo, non hanno tempo di spc formazione
- La radiazione UV da stelle calde e giovani ionizza il gas eccita/ionizza emettendo luce quando si ricombina/disecc

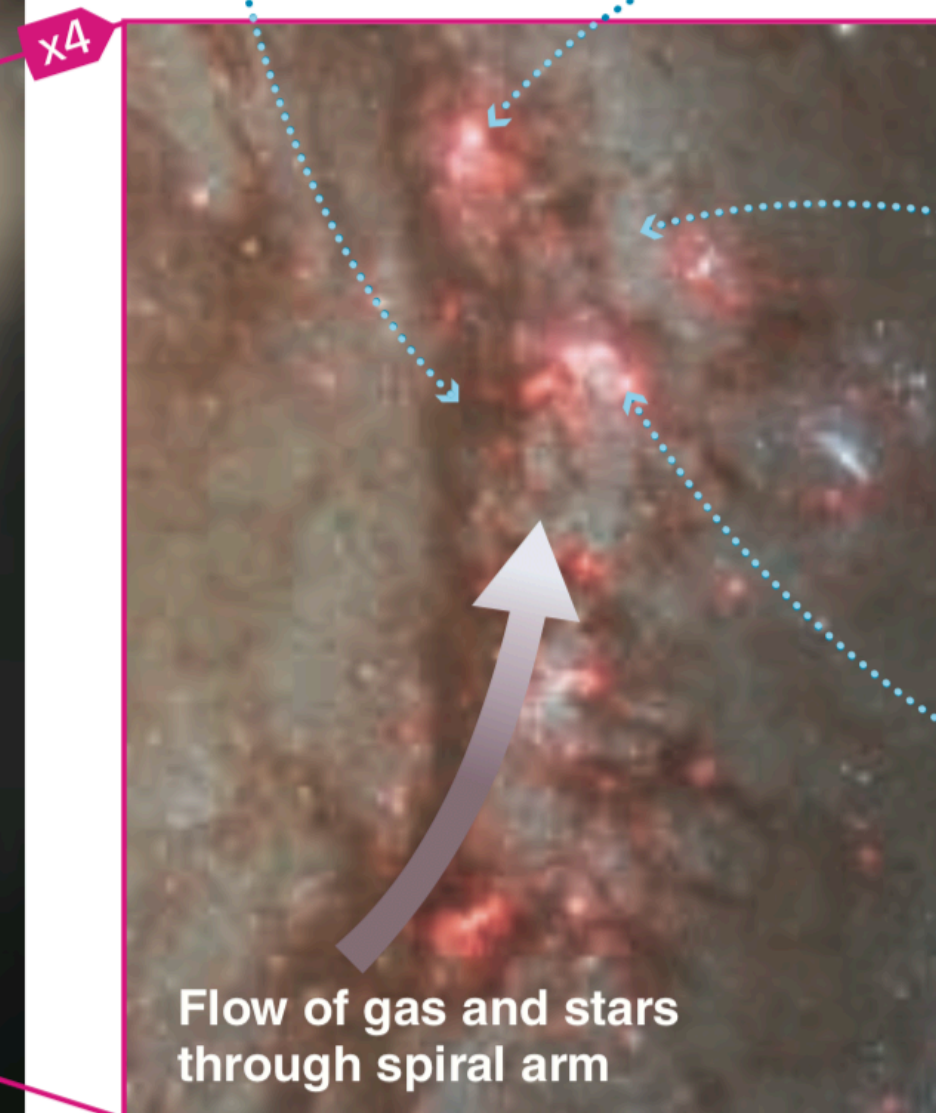


Formazione stellare: principalmente nei bracci a spirale



Le zone scure indicano dove le nubi di gas si condensano...

...e la compressione fa partire la formazione di stelle nel braccio

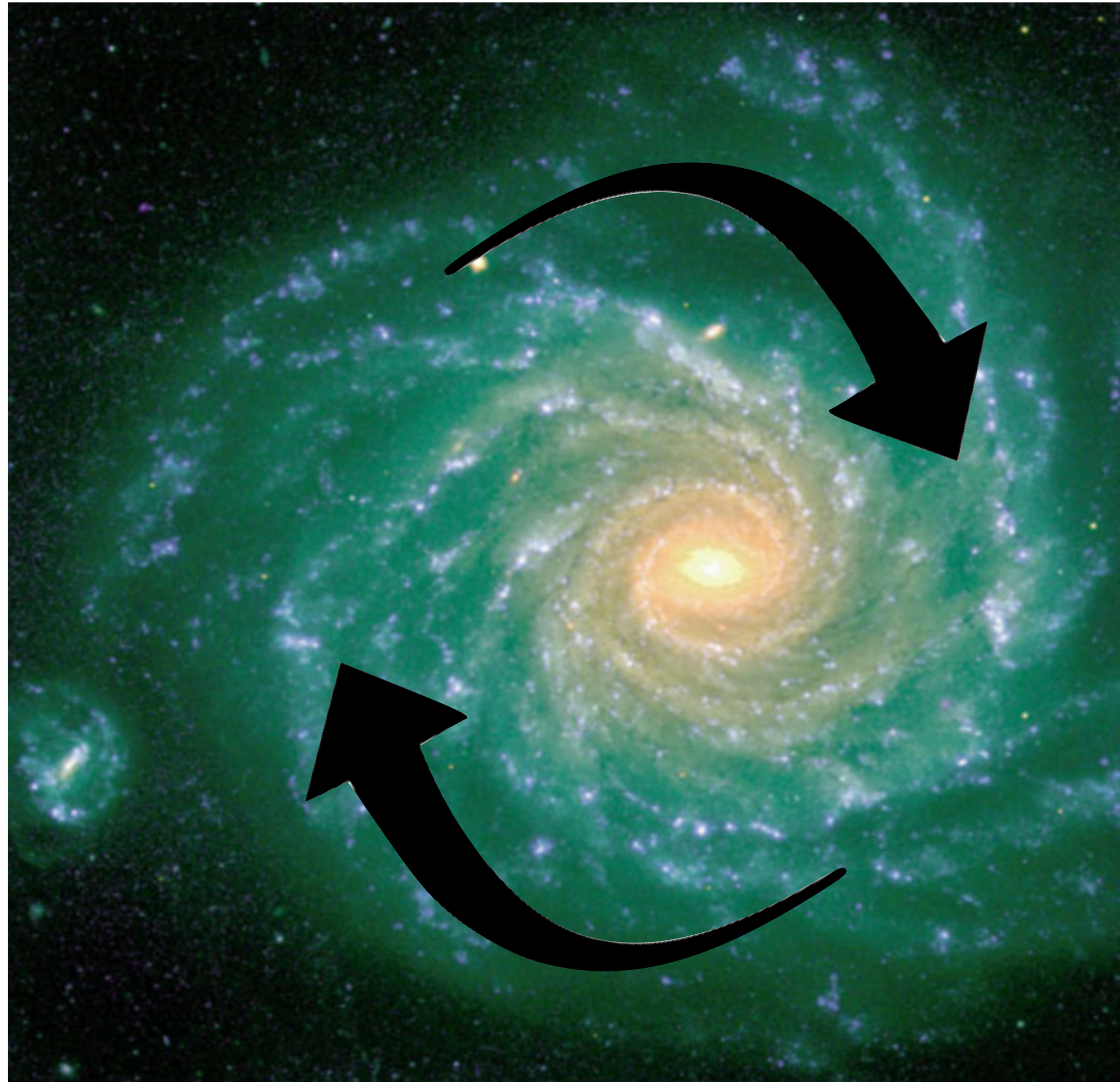


I punti blu sono stelle giovani, massicce e calde che si sono formate nel braccio a spirale

Le macchie rosse sono nubi di ionizzazione attorno alle stelle più calde e giovani



Cinematica della galassia

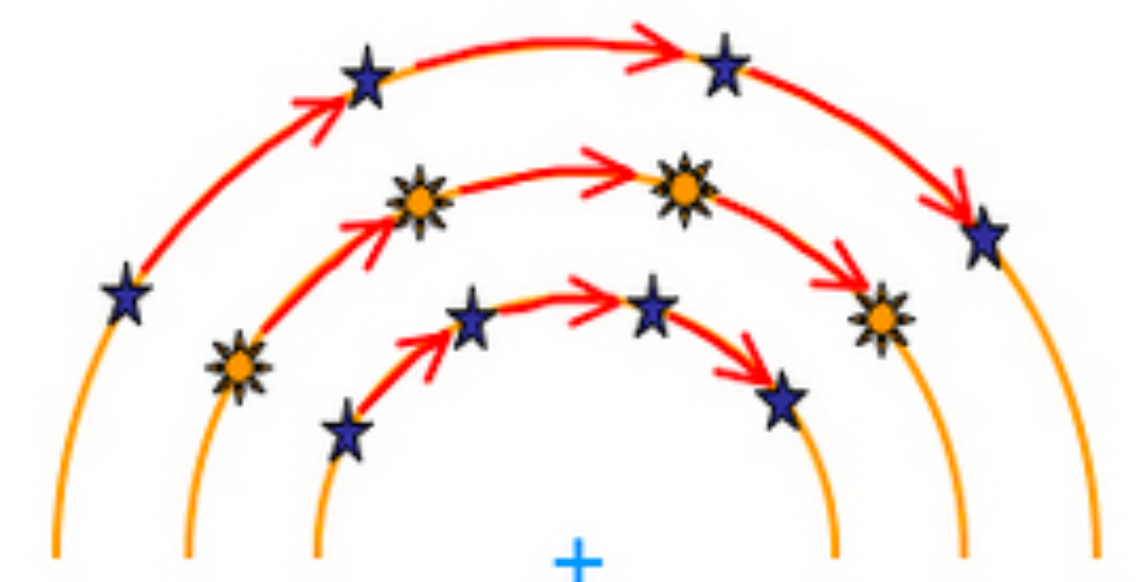
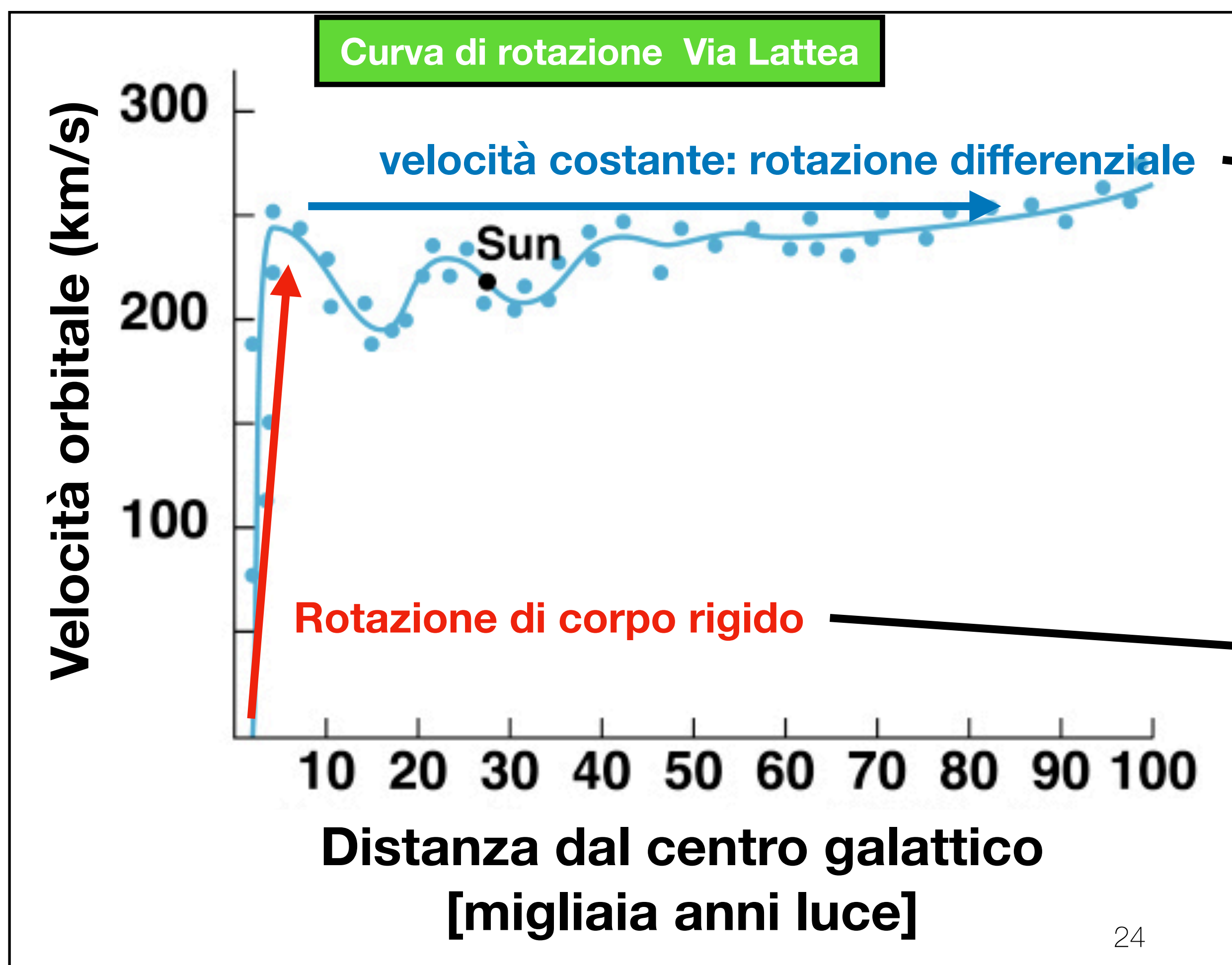


I bracci a spirale ruotano
insieme alle stelle?

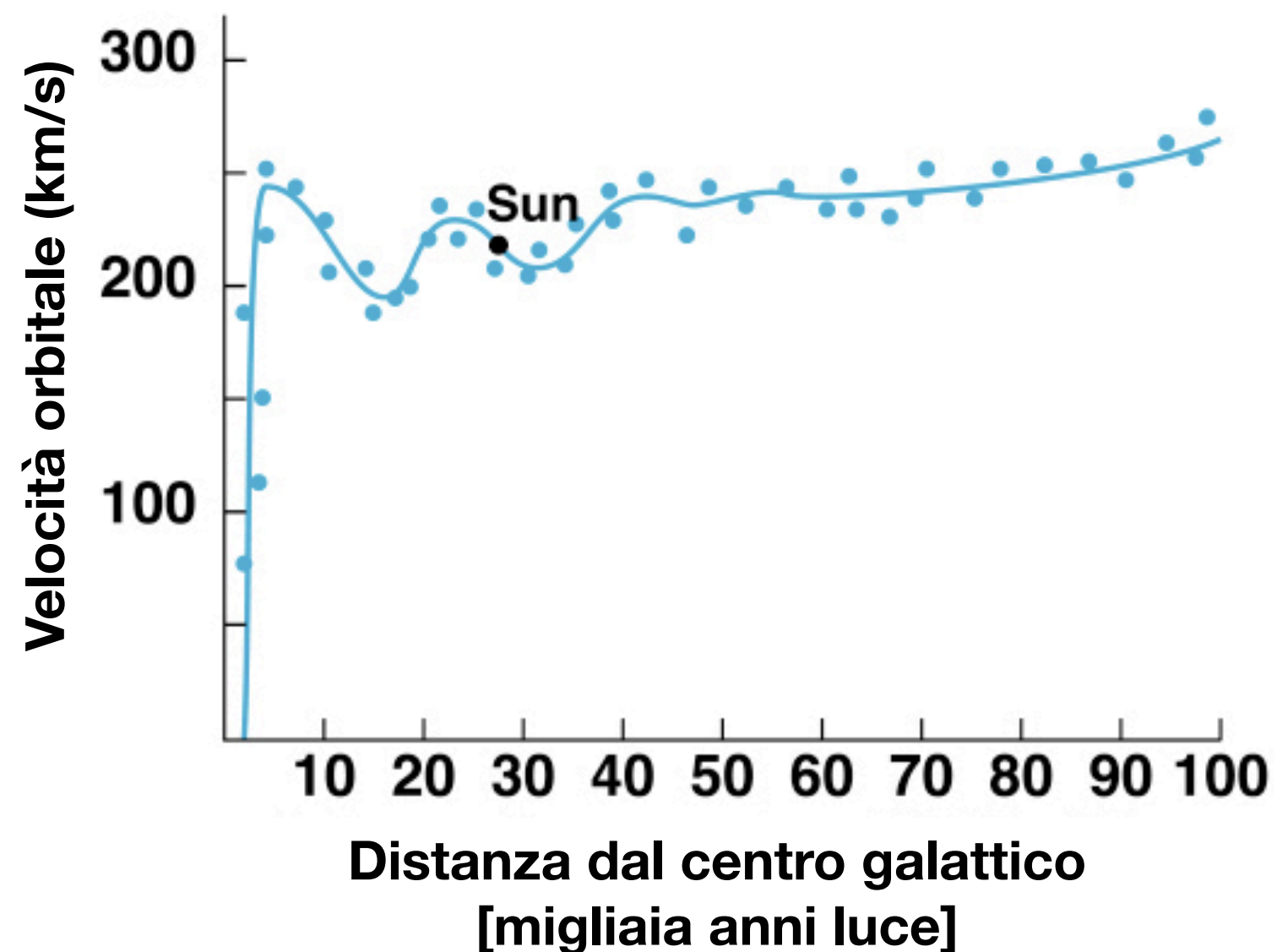
I bracci a spirale ruotano insieme alle stelle?

Potrebbe sembrare che i bracci a spirale ruotino intorno al centro della galassia insieme alle stelle. È così?

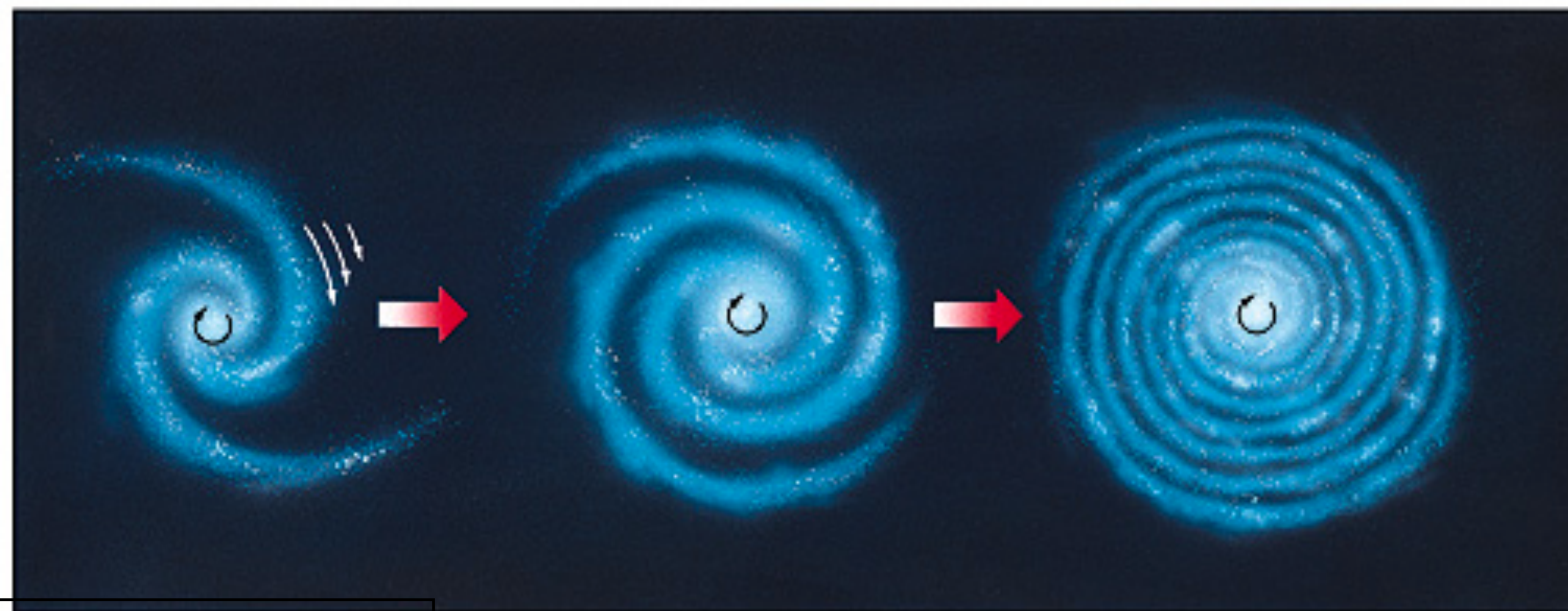
se la velocità lineare è costante, gli oggetti vicini al centro hanno un periodo orbitale più breve; quelli distanti “rimangono indietro”



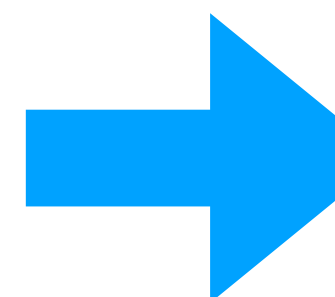
in una rotazione di corpo rigido, i punti mantengono la stessa posizione: la velocità orbitale aumenta con la distanza



La parte esterna dei bracci, più lontana dal centro, rimarrebbe “indietro” rispetto alla parte interna; i bracci si “avvolgerebbero” molto rapidamente intorno al centro, per poi dissolversi.



Non osserviamo galassie con molti cerchi concentrici di bracci, ma vediamo che la maggior parte delle galassie ha pochi bracci



I bracci non ruotano di rotazione differenziale assieme alle stelle



Prima prova dell'esistenza della materia oscura

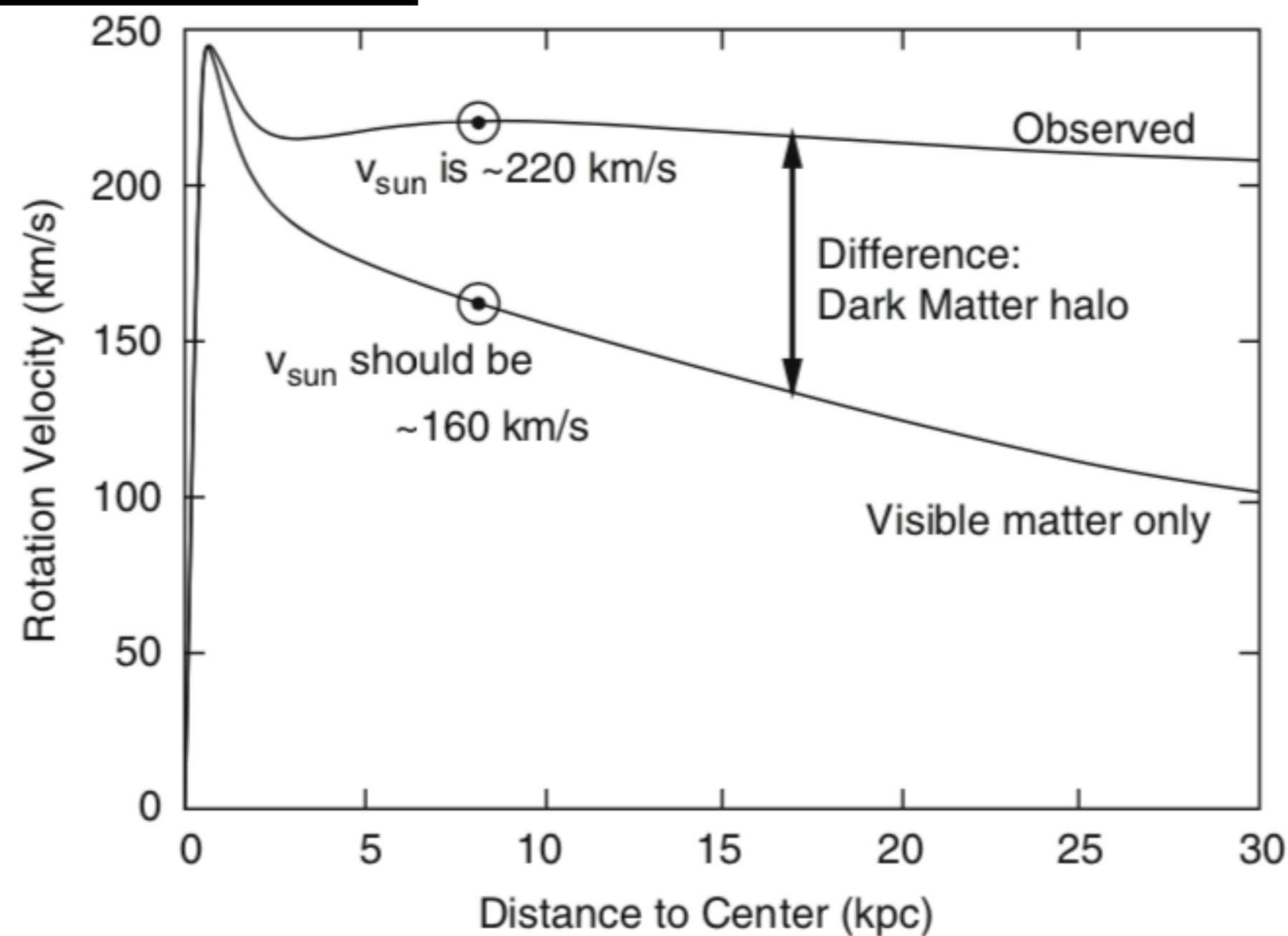
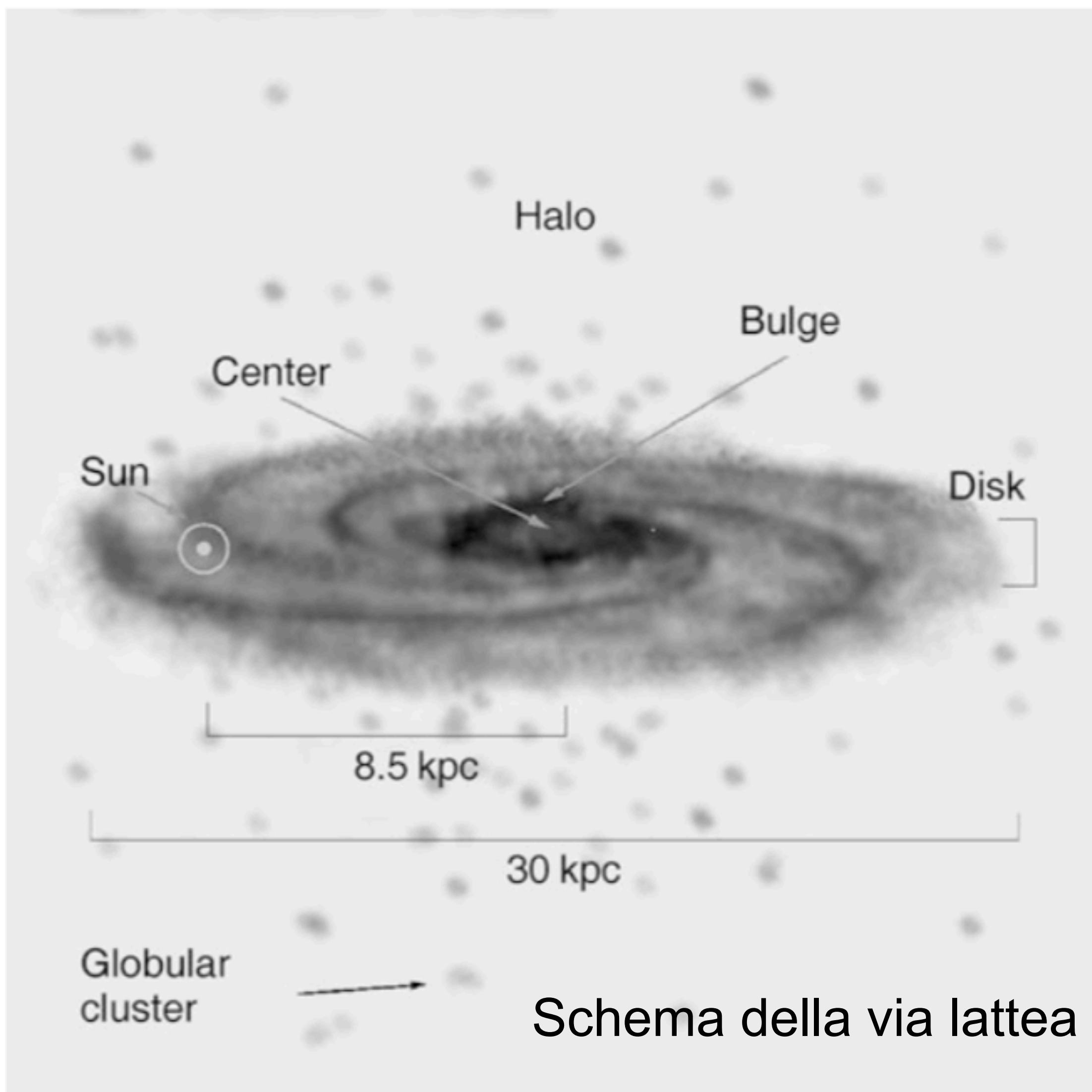
La via lattea ruota...

3 legge Keplero

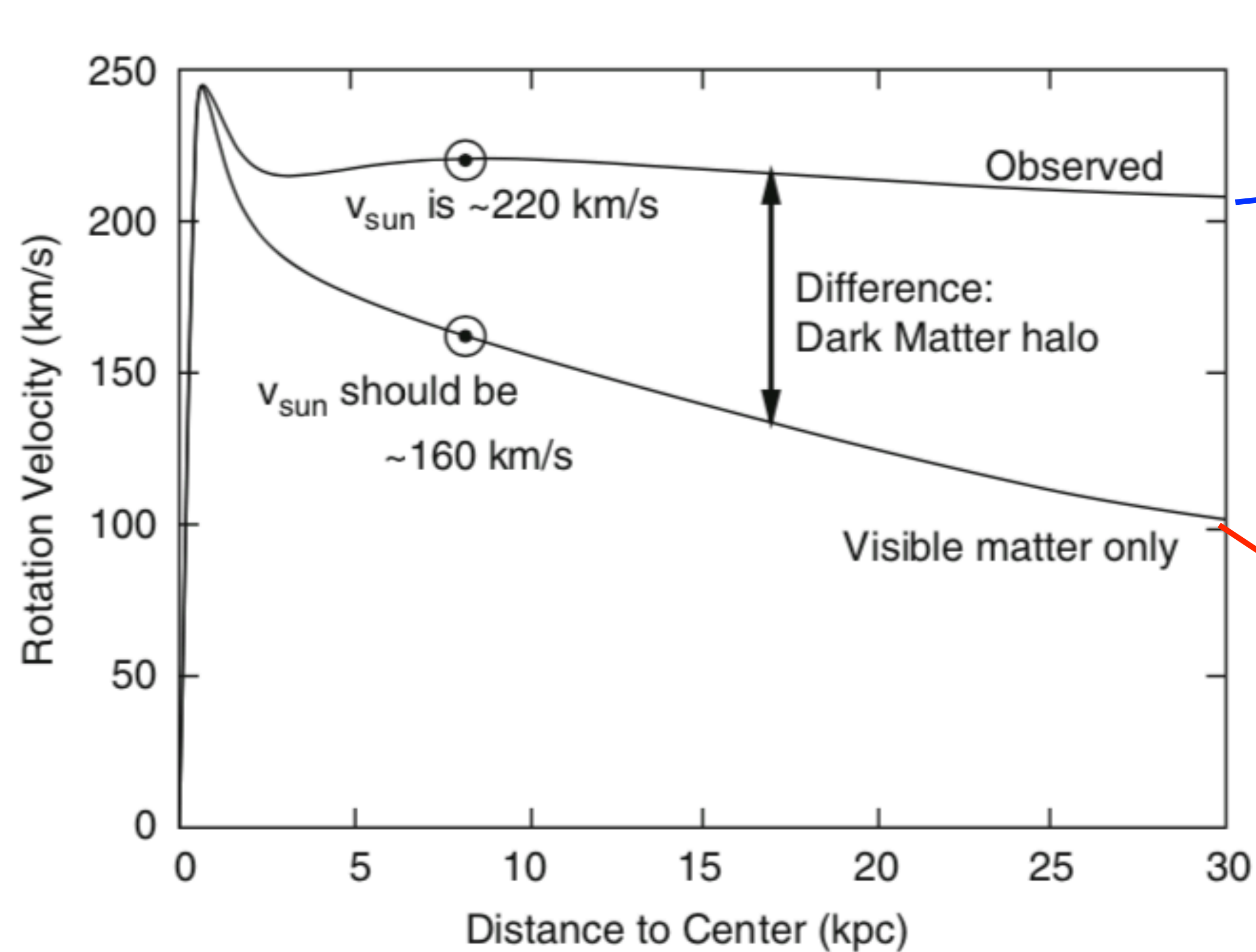
$$\frac{4\pi^2}{T^2} = \frac{Gm}{a^3}$$

➔

$$V_0 = \sqrt{\frac{G M(R_0)}{R_0}}$$



...più veloce di quanto dovrebbe, in base alla luce (materia) visibile



Osservata

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

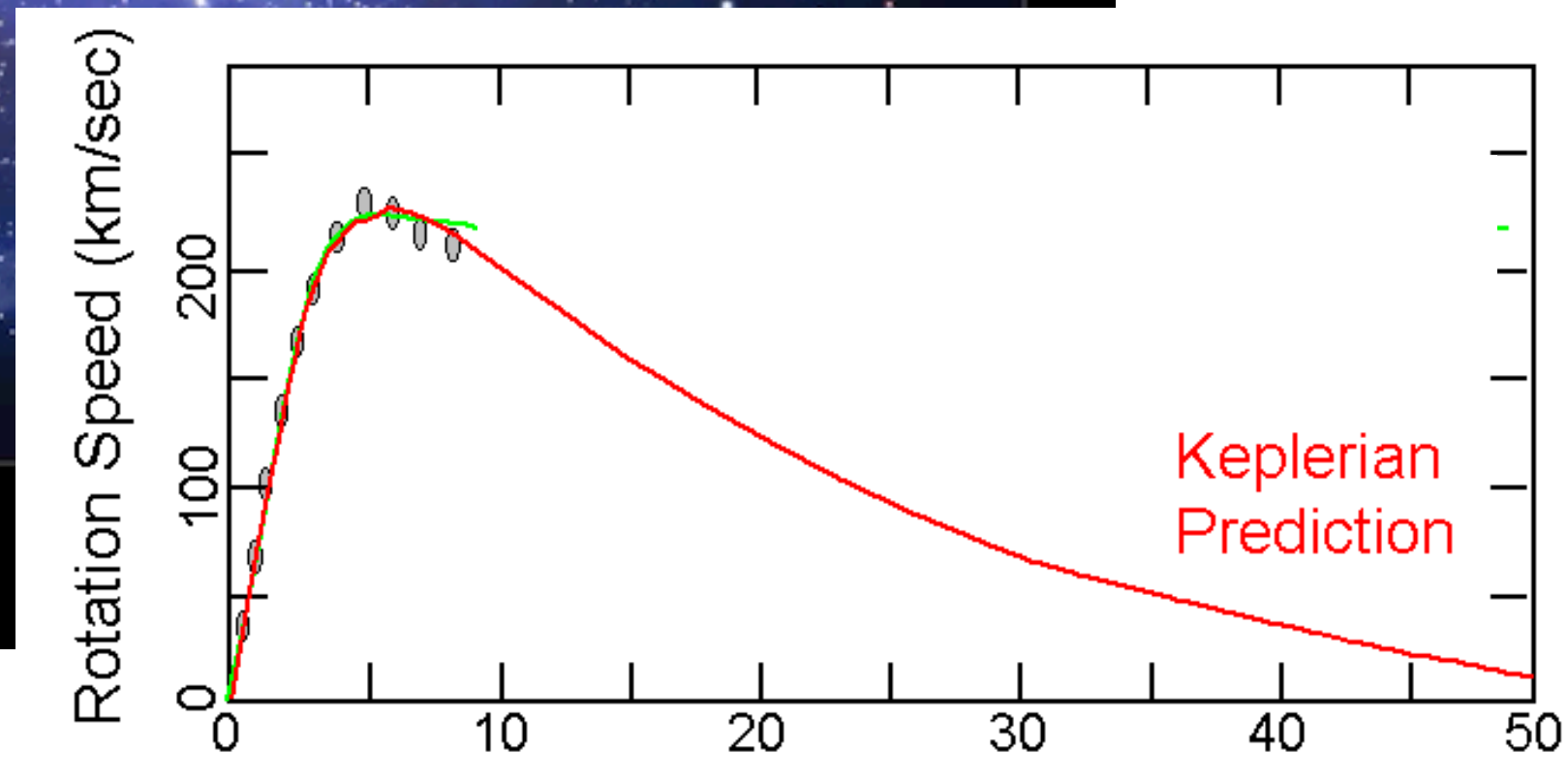
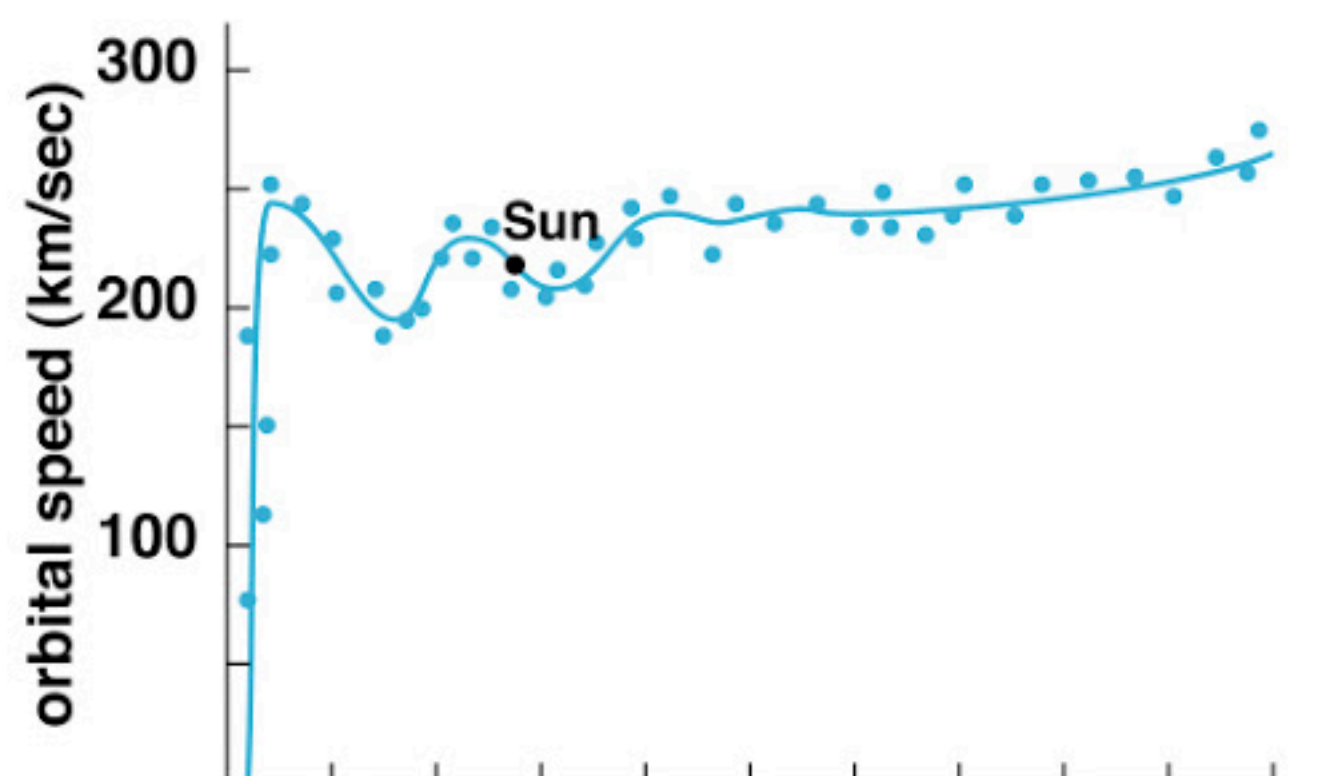
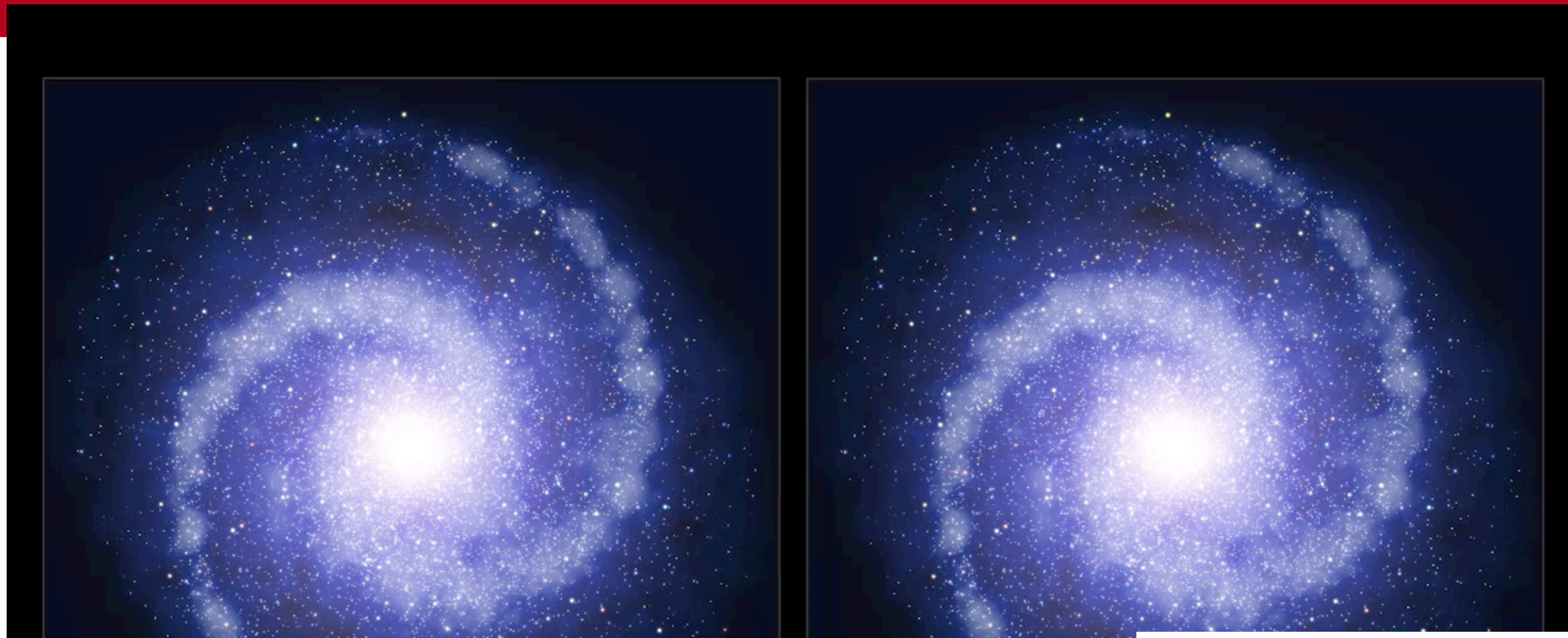
Dark matter

$$v_{\text{lum}}^2(R) = GM_{\text{lum}}(R)/R$$

Come sarebbe se ci fosse solo materia visibile



Dark matter





Le proprietà della Via Lattea ci danno informazioni sulla sua storia

Indizi

- Le stelle nell'alone hanno orbite disordinate
- Le stelle nel disco hanno orbite ordinate e circolari
- Non si trovano stelle giovani nell'alone
- Le stelle di alone hanno pochi elementi pesanti (metalli)

Stelle di popolazione I

- Popolazione di disco
- Stelle giovani e vecchie
- Tutte con contenuto di metalli del 2% (come il Sole)

Stelle di popolazione II

- Popolazione *sferoidale*
- Stelle di bulge e alone
- Stelle vecchie (quindi poco massicce)
- Tutte con pochi metalli (fino a 0.02%, 100 volte meno del Sole)

Possibile teoria



La teoria deve spiegare le osservazioni, in particolare che:

- Le stelle di alone sono vecchie
- Hanno pochissimi metalli
- Le orbite sono orientate in maniera disordinata

1. La nube protogalattica da cui si formano le stelle di alone ha composizione primordiale (no metalli, stelle vecchie)

2. Le stelle si formano finché il gas ha distribuzione sferica senza rotazione (orientazione casuale dell'orbita)



La teoria deve spiegare le osservazioni, in particolare che:

- Le stelle di disco sono giovani
- Sono ricche in metalli
- Le orbite sono orientate in maniera ordinata

3. Il gas residuo della nube protogalattica collassa, per la conservazione del momento angolare si forma un disco (stelle giovani in disco)

4. Nel disco il ciclo gas-stelle-gas contribuisce a mantenere attiva e regolata la formazione di nuove stelle, che saranno arricchite in metalli dalle generazioni precedenti

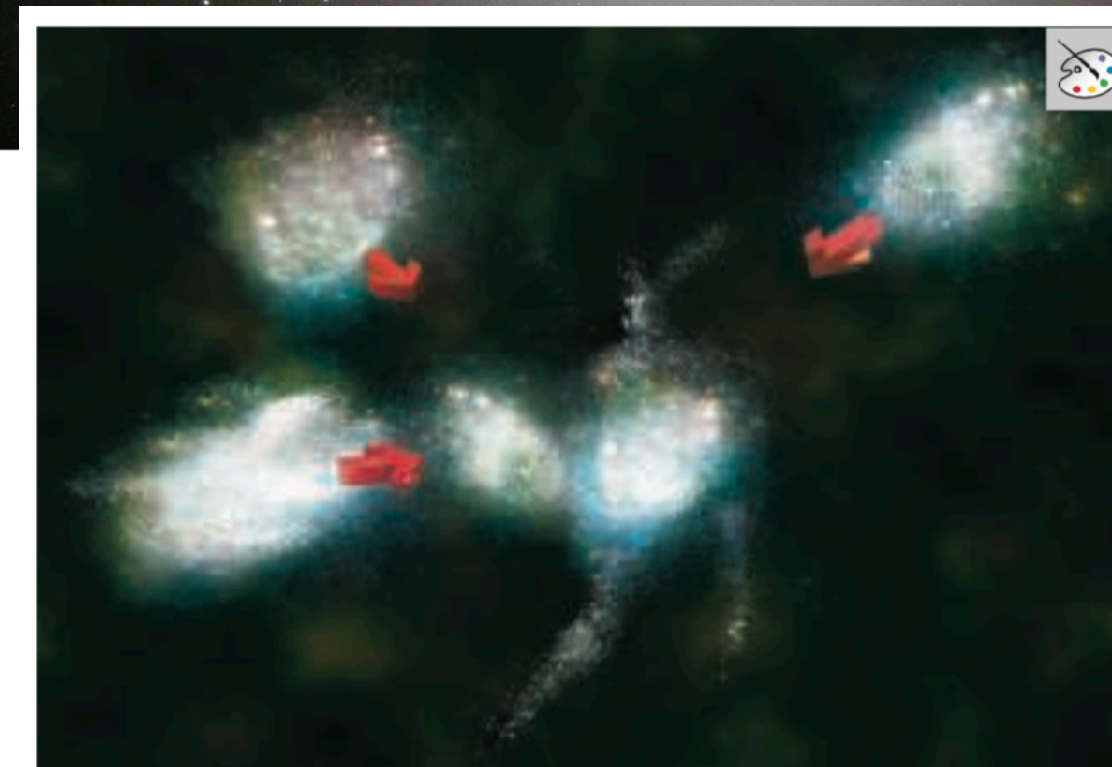
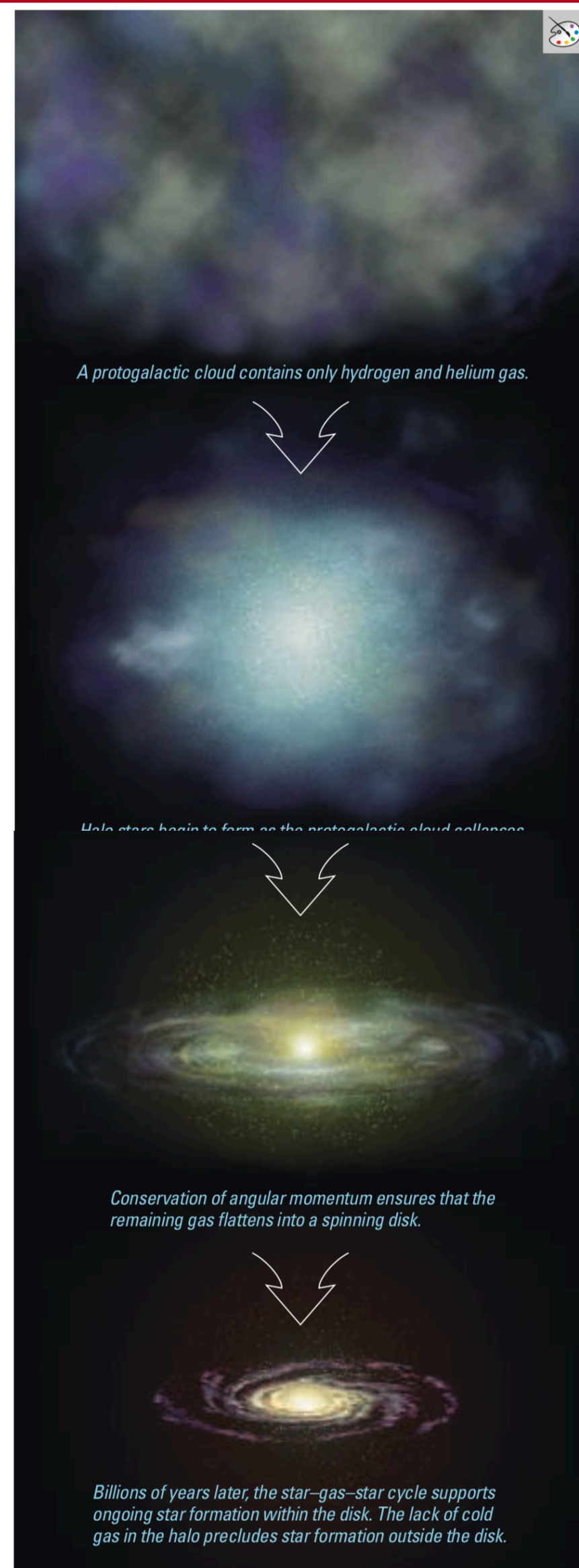
Possibile teoria

Questa semplice teoria spiega la maggior parte delle osservazioni, ma è un po' troppo semplicistica

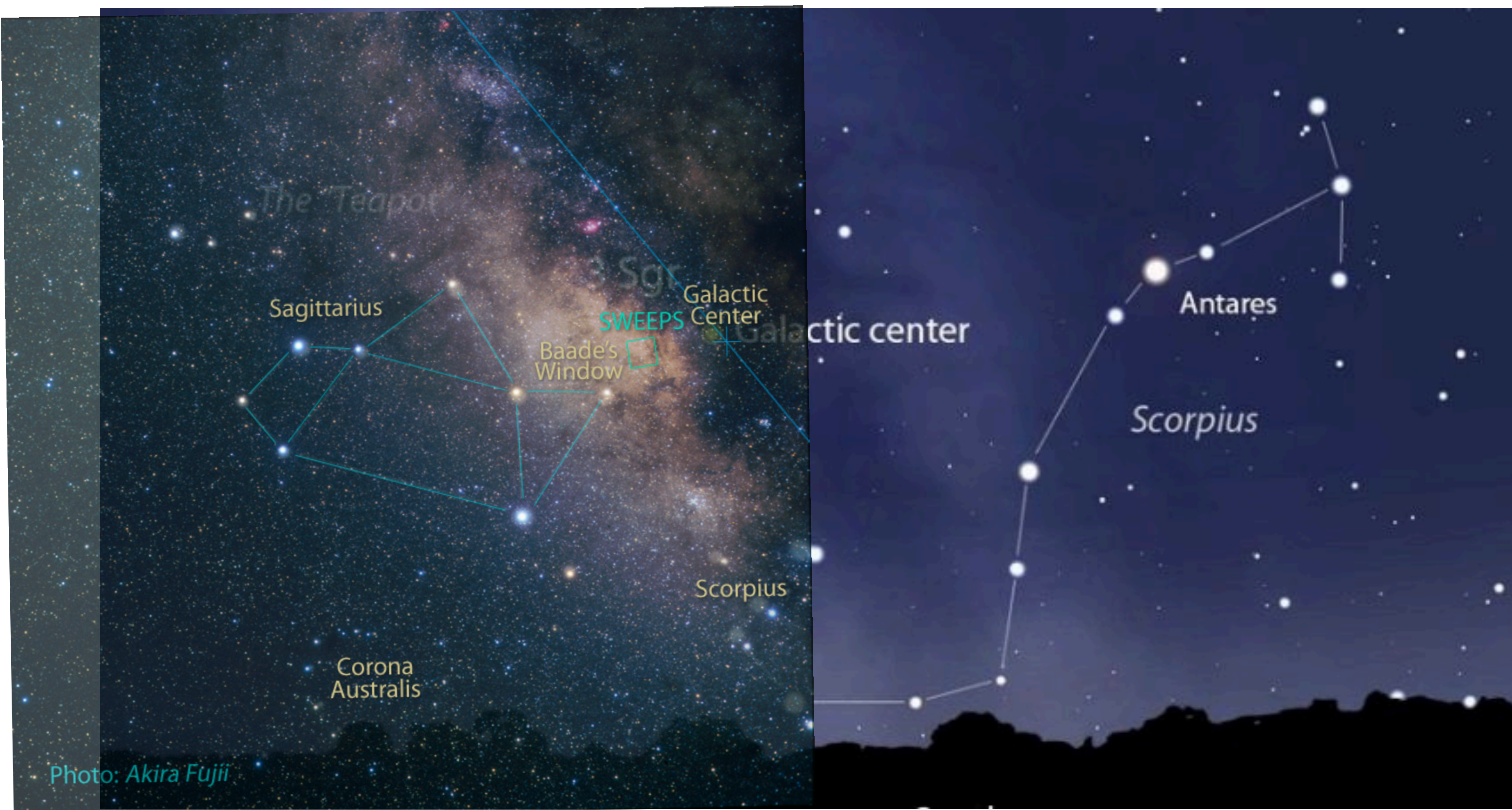
Se fosse vera, le stelle di alone che orbitano distanti dal centro galattico dovrebbero essere più vecchie e più povere di metalli di quelle che orbitano più vicine, ma non è quello che si osserva

Ci sono differenze in contenuto di metalli, ma non in funzione della distanza

È più plausibile che l'alone si sia formato per collisione di varie nubi protogalattiche



Il centro galattico



- Il centro galattico si trova nella costellazione del Sagittario, vicino a quella dello Scorpione
- è visibile d'estate, basso sull'orizzonte, non facile da vedere
- apparentemente è una regione molto ordinaria, ricca di polvere e quindi oscura

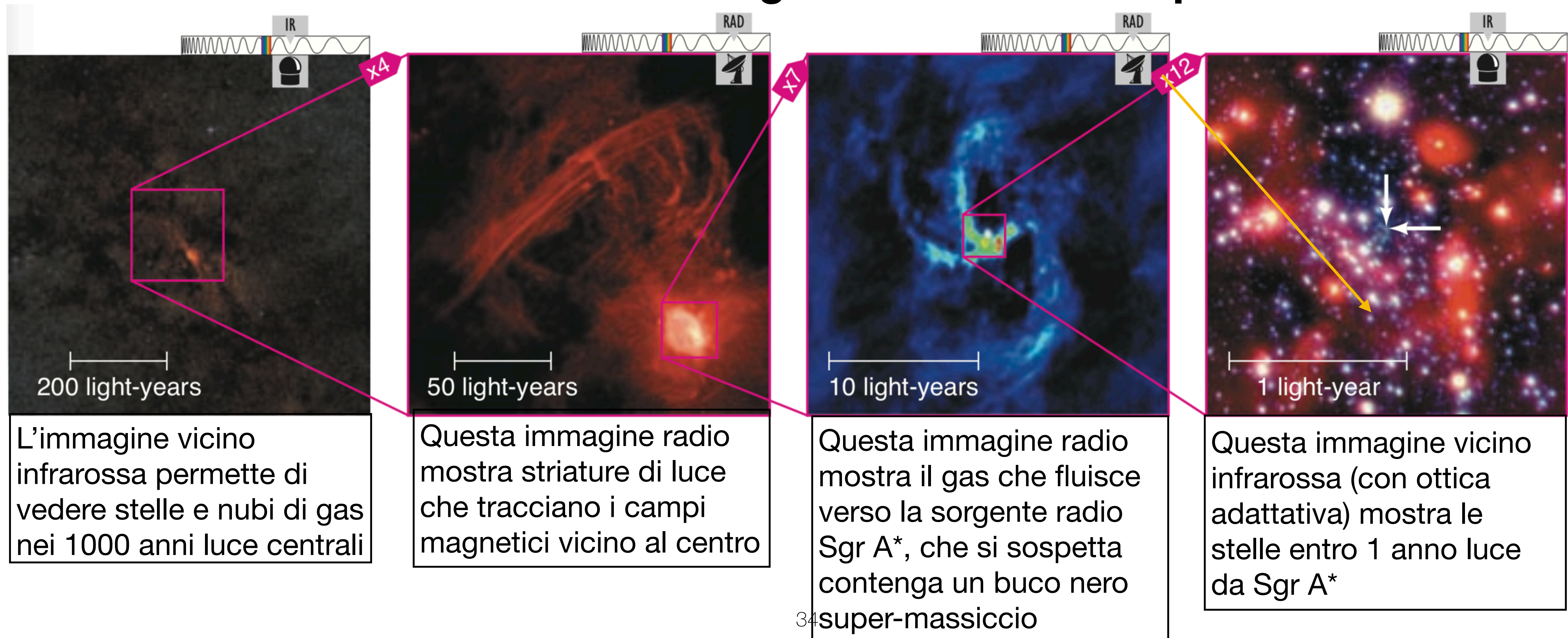
Tuttavia, cosa vedremmo se potessimo sollevare la cortina di polveri?

Prova a pensare: come posso osservare attraverso la polvere?

Il centro galattico

Basta spostarsi a lunghezze d'onda infrarosse o radio, che sono meno assorbite dalle polveri

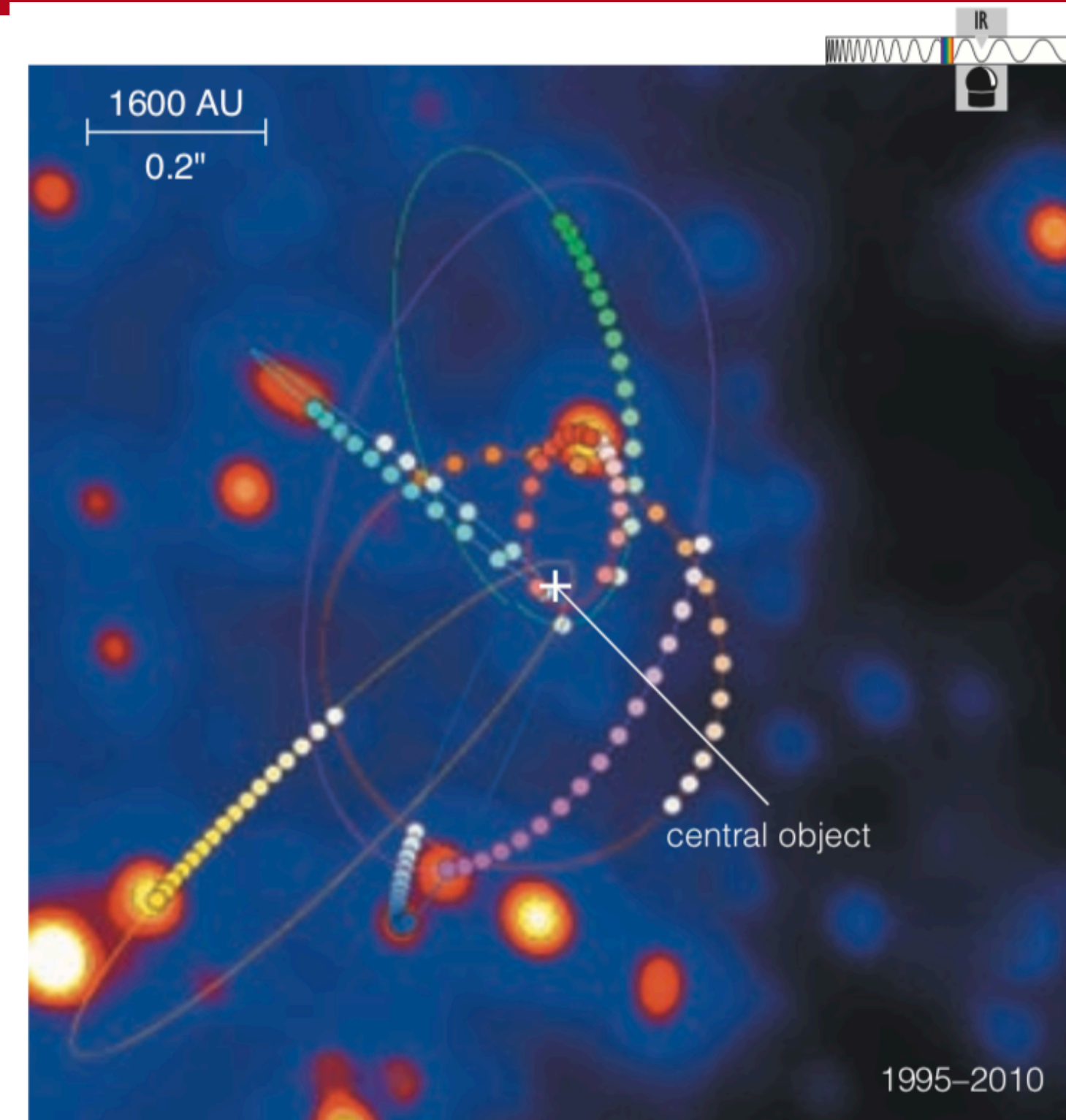
Sgr A*: Buco nero super-massiccio



Il centro galattico



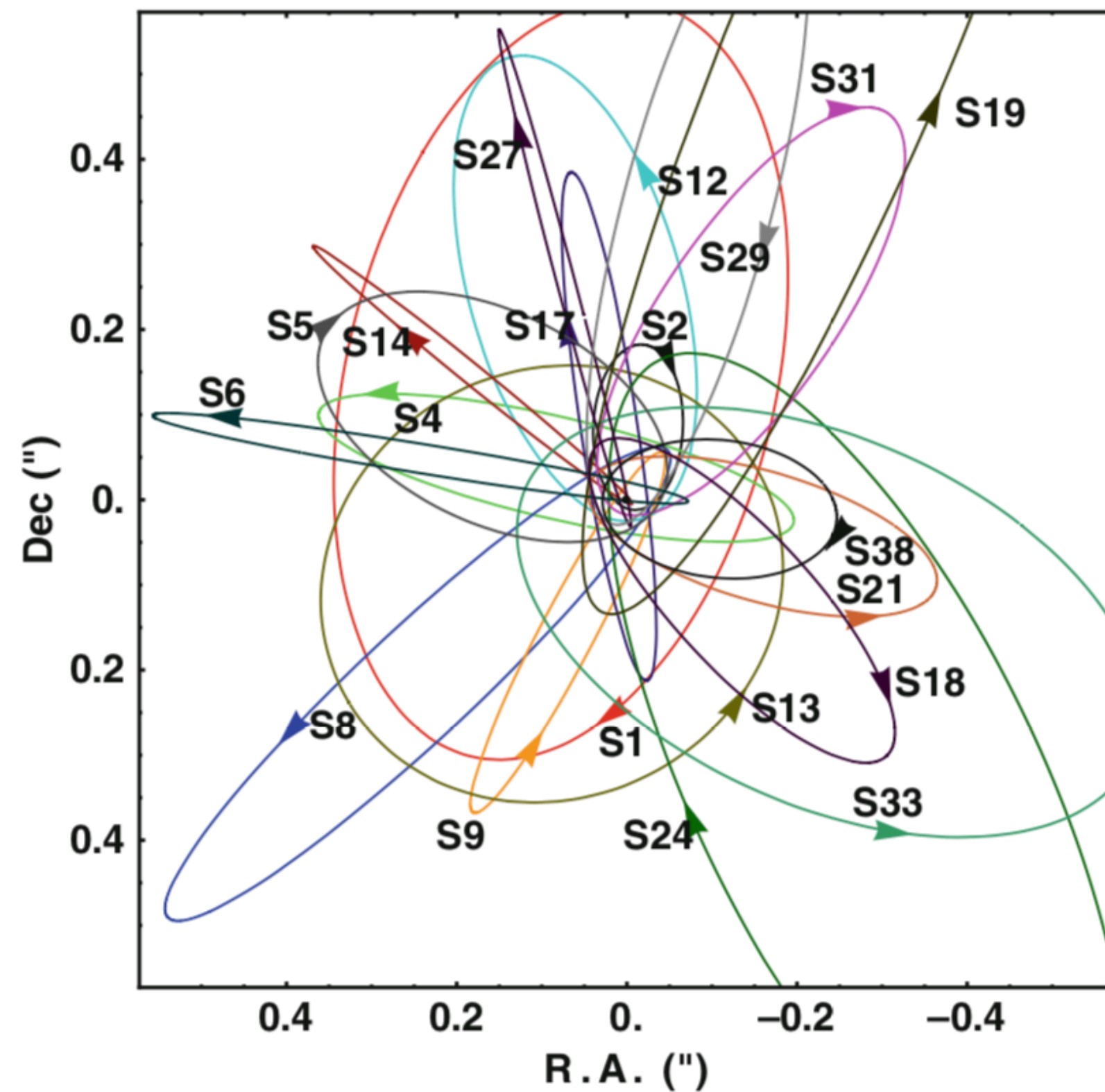
Quest'immagine X mostra i 60 anni luce intorno al centro galattico: si evidenzia la presenza di gas caldo, accelerato finché cade verso il buco nero. L'emissione centrale è intermittente: quando una bolla di materiale si avvicina al buco nero, si ha un'"esplosione" di luce



Prova dell'esistenza di un buco nero al centro della nostra galassia (in corrispondenza di Sgr A*): ciascun set di punti colorati mostra le posizioni di una stella, separate da un anno, in un intervallo di 15 anni. Applicando la versione di Newton della terza legge di Keplero, si ottiene che l'oggetto centrale ha una massa 4 milioni di volte quella del nostro sole, concentrata in una regione così piccola che deve per forza essere un buco nero



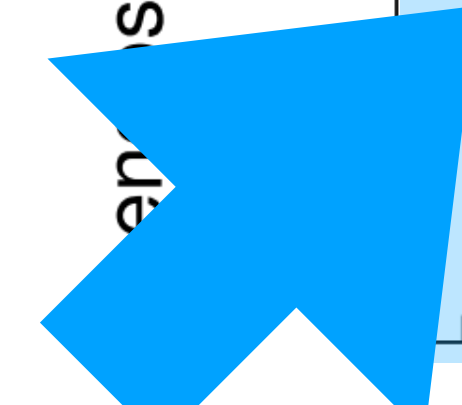
Il centro galattico



~25 stelle che orbitano nell'arcosecondo centrale intorno al centro galattico.

$$\frac{4\pi^2}{T^2} = \frac{Gm}{a^3}$$

enclosed mass (solar masses)



Solo in questa regione il campo gravitazionale del buco nero domina (è misurabile)

