

Il Mezzo Interstellare

Lezione 9

Sommario

Nebulose

- a emissione (regioni HII, nebulose planetarie, resti di supernove);
- a riflessione;
- oscure.

La polvere interstellare

- estinzione e arrossamento.

Le componenti del mezzo interstellare

- le dimensioni delle regioni HII;
- le nubi di idrogeno neutro;
- le nubi molecolari giganti;
- il gas coronale caldo.

Il ciclo stelle-gas.

Lo spazio interstellare

Lo spazio interstellare non è vuoto e contiene gas e polvere, il cosiddetto mezzo interstellare.

Questo gas e questa polvere formano strutture bellissime e complesse ...

... ma sono anche parte del ciclo della vita della stelle.

Le stelle “nascono” in nubi di gas molecolare denso.

Quando “muoiono”, le stelle re-immettono gas arricchito chimicamente nel mezzo interstellare.

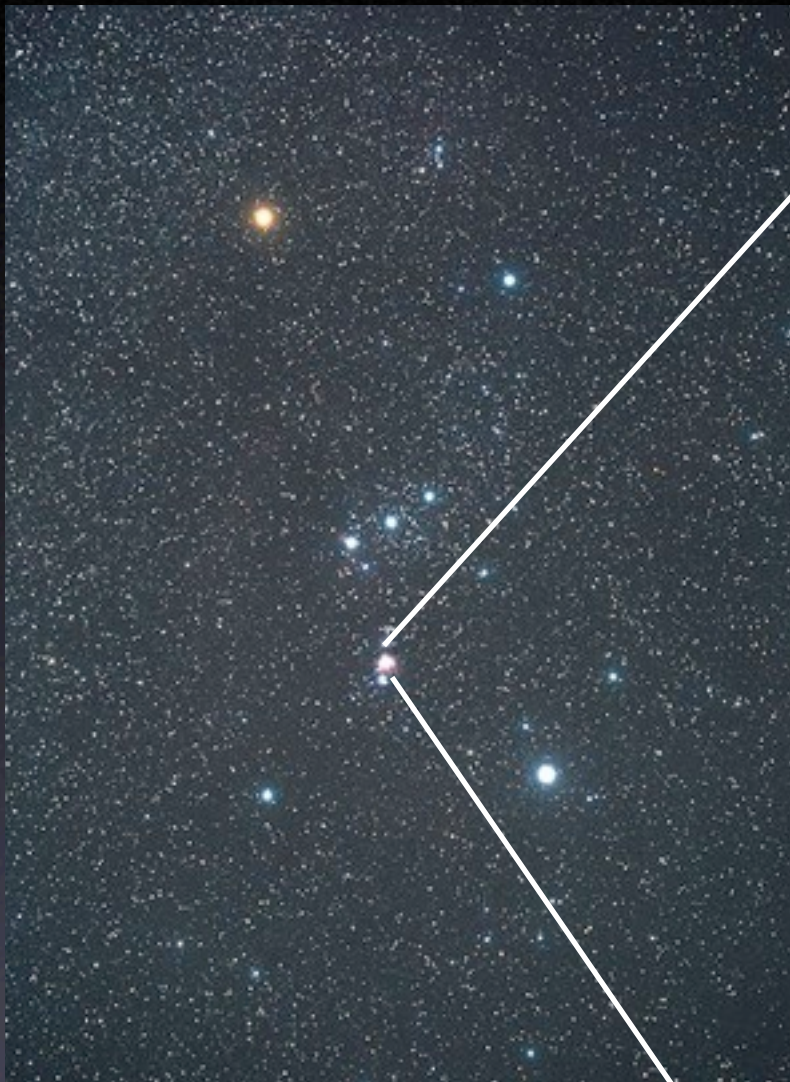
La polvere interstellare assorbe e arrossa la luce delle stelle.



© Anglo-Australian Observatory

La nebulosa a riflessione
Corona Australis

La nebulosa di Orione



Una **nebulosa** è una nube di gas e polvere interstellare. La nebulosa di Orione è la nebulosa a emissione più grande e brillante, visibile a occhio nudo.



La nebulosa di Orione

La radiazione UV emessa da un ammasso di stelle appena formate ionizza il gas circostante che produce le righe di emissione.

Ammasso del Trapezio

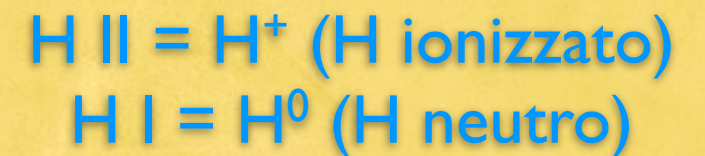
The Orion Nebula  HUBBLESITE.org

Le nebulose nella luce visibile

Tradizionalmente gli astronomi hanno diviso le nebulose in 3 tipi:

- ★ **Nebulose a emissione**

in cui una o più stelle calde ionizzano ed eccitano il gas circostante che emette una varietà di righe di emissione; talvolta note come regioni HII.



- ★ **Nebulose a riflessione**

prodotte dalla diffusione (*scattering*) della luce stellare da parte della polvere;

- ★ **Nebulose oscure**

nubi dense di gas e polvere che sono opache alla luce delle stelle sullo sfondo.

In realtà esistono anche altri due tipi di nebulose a emissione:

- ★ **Nebulose planetarie**

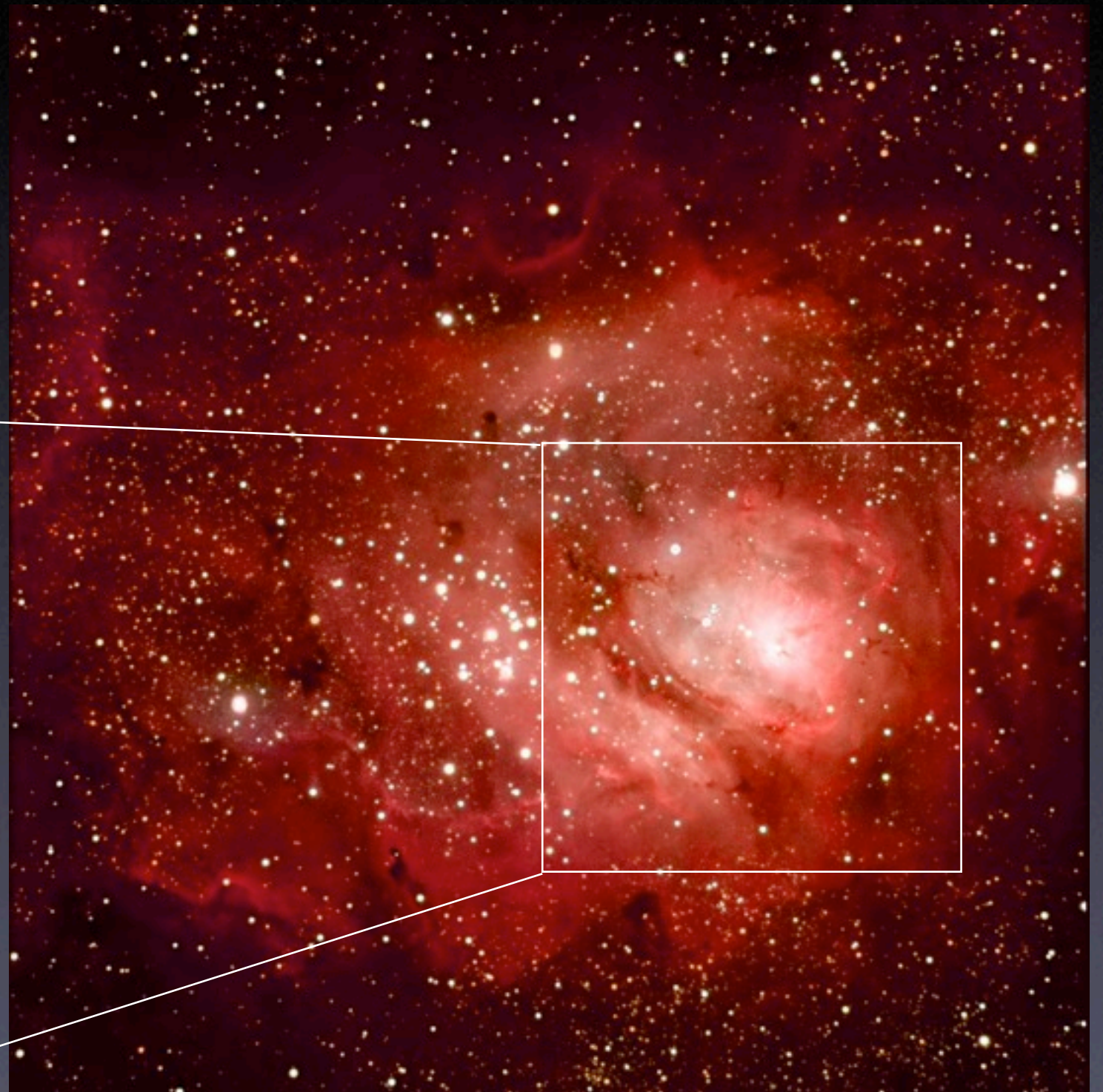
gli strati più esterni dell'atmosfera di una stella “morente” espulsi dalla stella stessa.

- ★ **Resti di supernova**

gas espulso dall'esplosione di una stella (supernova).

La nebulosa Laguna

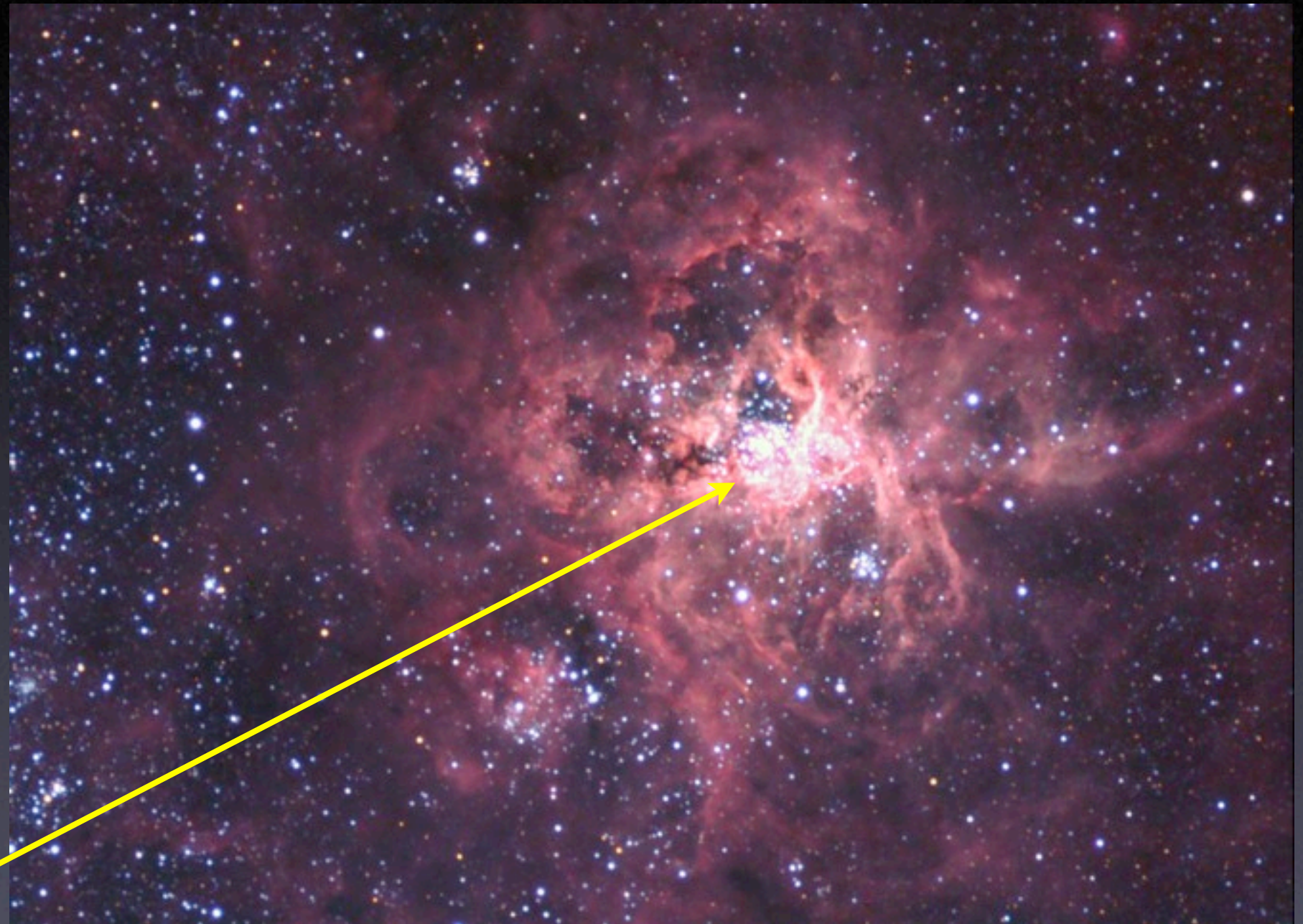
La nebulosa Laguna
nel Sagittario è
dominata
dall'emissione di $H\alpha$.



La nebulosa Tarantola

La nebulosa Tarantola nella Grande Nube di Magellano (galassia satellite della Via Lattea) è l'unica nebulosa extragalattica che si può vedere ad occhio nudo (emisfero Sud).

E' eccitata dall'ammasso di stelle calde e massicce 30 Doradus.



La nebulosa Trifide

La nebulosa Trifide nel Sagittario è la combinazione di una nebulosa a emissione circondata da una nebulosa a riflessione.

Nebulosa a riflessione
(luce stellare diffusa
da grani di polvere).

Bande di polvere che
oscurano la luce dalla
regione H II.

Regione H II: gas
ionizzato da stelle
calde che emette $H\alpha$
(ed altre righe).



Complesso di Orione

E' la combinazione di nebulose a emissione, riflessione e oscure.

Regione HII, che emette $H\alpha$, eccitata dalla stella σ -Orionis (al di fuori della figura).

Nebulosa Testa di Cavallo, un "braccio" di una più grande nube di polvere che si delinea sulla regione HII.

NGC 2023, una nebulosa a riflessione prodotta dalla stella immersa nella nube di polvere.



La nebulosa Testa di Cavallo

Immagine dettagliata della nebulosa Testa di Cavallo ottenuta con il Very Large Telescope dell'European Southern Observatory.



The Horsehead Nebula
(VLT KUEYEN + FORS 2)

ESO PR Photo 02a/02 (25 January 2002)

© European Southern Observatory



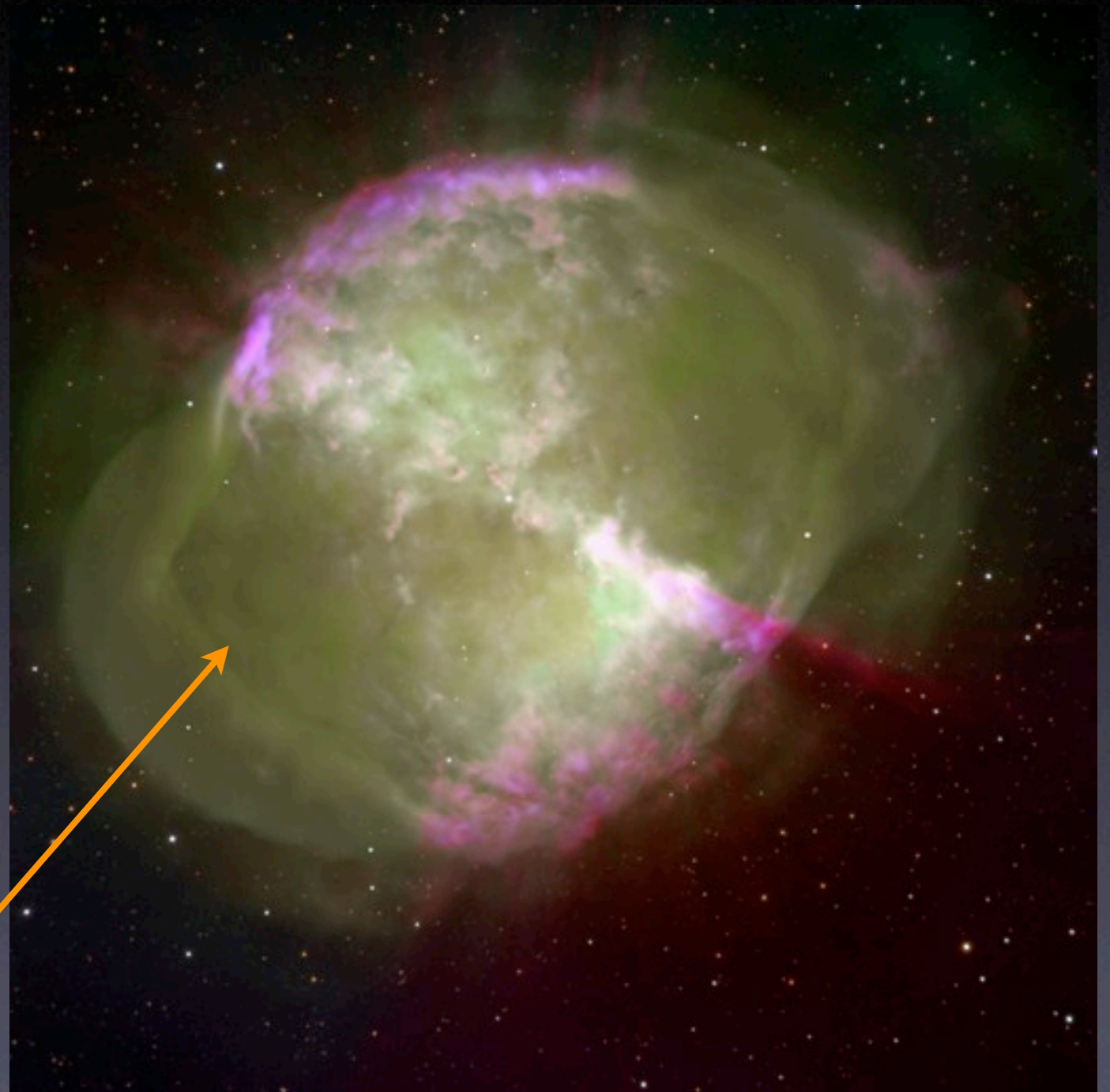
Nebulosa Manubrio

La nebulosa Manubrio (*Dumbbell*) è una nebulosa planetaria.

Le nebulose planetarie sono più compatte delle regioni HII (< 1 pc) .

Sono formate negli ultimi stadi dell'evoluzione stellare quando una **gigante rossa** espelle gli strati esterni dell'atmosfera con un vento durante la sua trasformazione a **nana bianca**.

Il colore verde è dovuto all'emissione dalla riga di O^{++} (OIII) a 500.7 nm.



La nebulosa dal Granchio

La nebulosa del Granchio (*Crab*) è un **resto di supernova**.

E' ciò che resta dopo l'esplosione di una supernova quando gli strati esterni di una stella massiccia vengono espulsi violentemente e spazzano via il mezzo circumstellare creando un'onda d'urto come nel caso di una vera e propria esplosione.

Il gas viene riscaldato a temperature $\sim 10^6$ K, emette raggi X, righe di emissione nell'ottico e radiazione di sincrotrone (emissione di elettroni relativistici in campo magnetico).



Regioni HII e Sfera di Strömgren

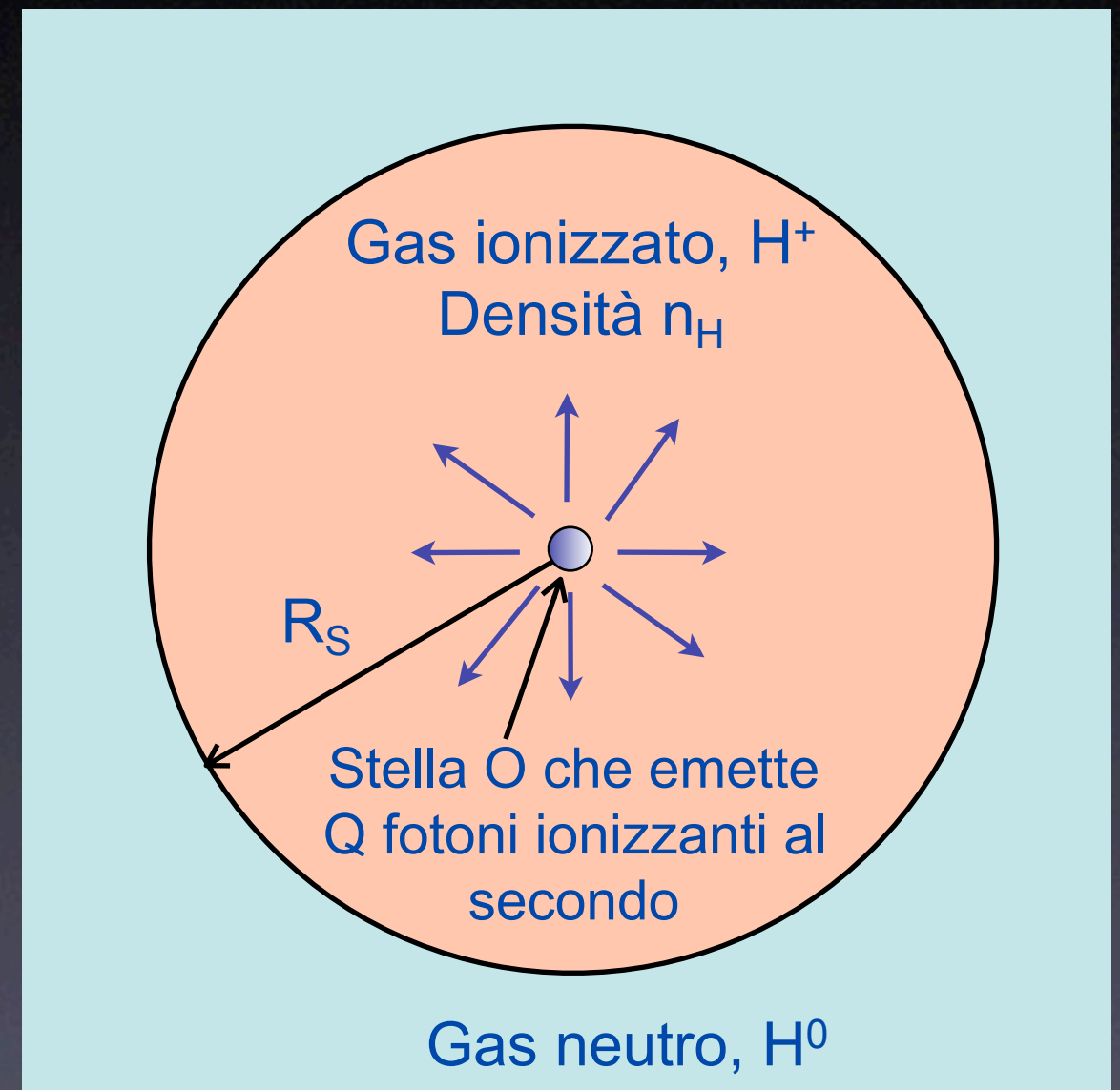
Le stelle calde O e B emettono grosse quantità di fotoni UV.

I fotoni con energia ≥ 13.6 eV ($\lambda = 91.2$ nm) fotoionizzano l'idrogeno (fotoni ionizzanti).

Attorno alla stella si forma una regione HII (ovvero H ionizzato, $H^+ = \text{HII}$).

I fotoni vengono assorbiti dal gas creando una sfera di gas ionizzato con raggio R_S .

All'interno della regione HII, all'equilibrio, ogni fotone ionizzante viene assorbito e, nell'unità di tempo, il numero di ionizzazioni bilancia esattamente il numero di ricombinazioni.



Numero di ionizzazioni al s

$$Q = \frac{4}{3} \pi R_S^3 n_e n_H \alpha_H$$

Volume

Numero di ricombinazioni $H^+ + e^-$ per m³ per s

Il raggio di Strömgren

Dal bilancio del tasso di ionizzazioni e ricombinazioni all'interno della sfera di Strömgren si ottiene:

$$Q = \frac{4}{3}\pi R_S^3 n_e n_H \alpha_H$$

Coefficiente di ricombinazione che tien conto di tutte le ricombinazioni agli stati eccitati ($n > 1$).
Le ricombinazioni allo stato fondamentale ($n=1$) producono un altro fotone ($E \geq 13.6$ eV) ionizzante che è rapidamente riassorbito dal gas.

Da cui si ricava il raggio di Strömgren: $R_S = \left(\frac{3Q}{4\pi n_H^2 \alpha_H} \right)^{1/3}$

Valori tipici:

$$Q \sim 10^{49} \text{ fotoni/s}$$

$$n_H \sim 10^9 \text{ m}^{-3}$$

$$\alpha_H \approx 10^{-19} \text{ m}^3/\text{s}$$



Il raggio di una regione HII prodotta da una singola stella O è
 $R_S = 2.9 \times 10^{16} \text{ m} \approx 1 \text{ pc}$

Poiché $n_e \sim n_H$ per gas completamente ionizzato.

L'assorbimento interstellare

Le nebulose oscure sono nubi dense di gas e polvere, completamente opache alla luce visibile.

Ma la polvere è anche distribuita nello spazio interstellare e questo causa una generale diminuzione dell'intensità della luce stellare: l'assorbimento interstellare (o estinzione).

L'assorbimento interstellare altera il modulo di distanza e la quantità di estinzione interstellare viene misurata in magnitudini, A_V .

Una stella vista attraverso uno "schermo" di polvere più spesso apparirà più debole e più rossa:

$$m_V - M_V = 5 \log_{10} d - 5 + A_V$$

Schermo di polvere più sottile



Stelle con la stessa
magnitudine
assoluta M_V e con lo
stesso colore.



Schermo di polvere più spesso

L'arrossamento interstellare

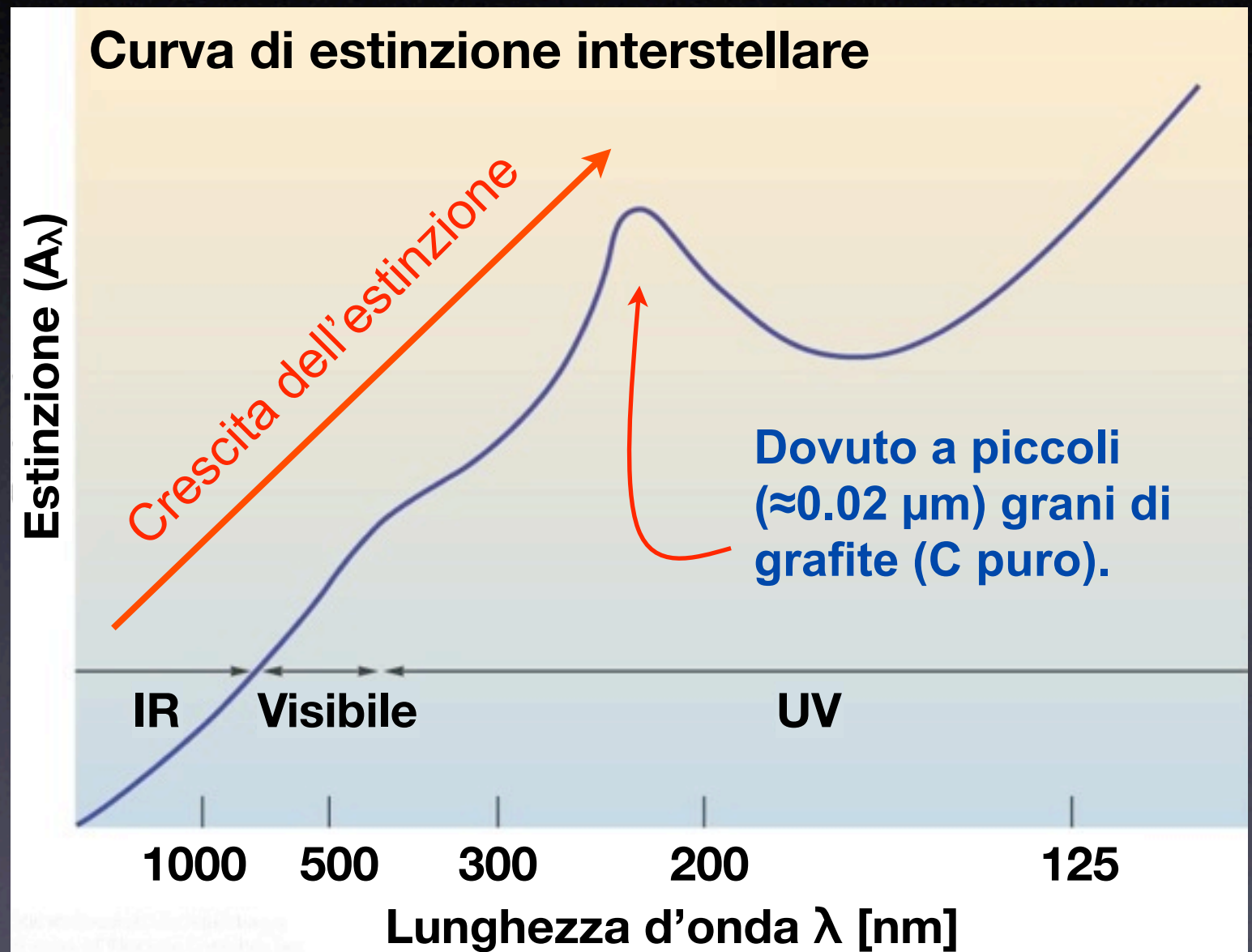


Dipendenza da λ dell'estinzione

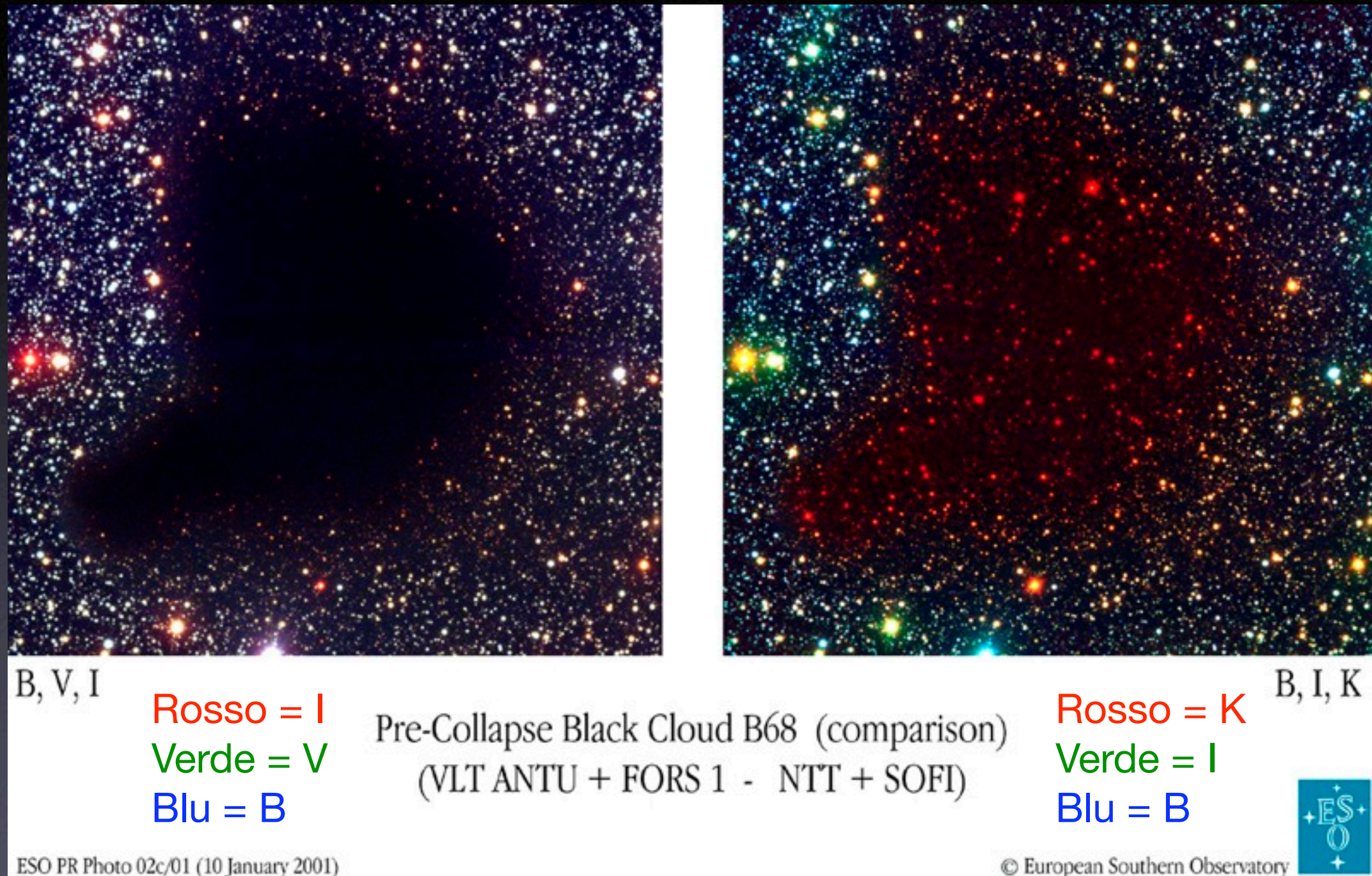
L'estinzione dovuta alla polvere aumenta moltissimo alle λ più corte.

A 200 nm (UV) l'estinzione è quasi 10 volte superiore di quella a 2000 nm (vicino IR).

Nel visibile $A_\lambda \propto 1/\lambda$.

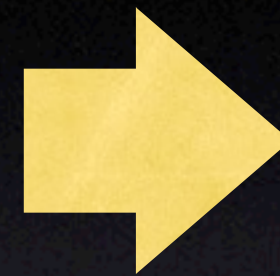
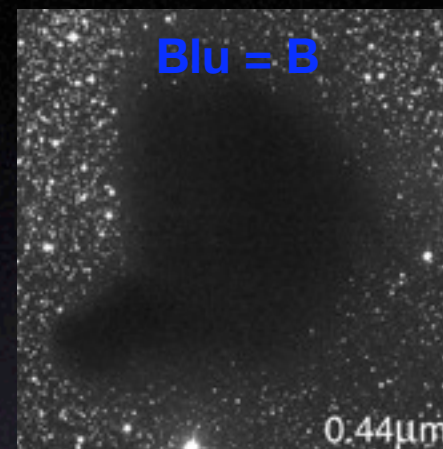
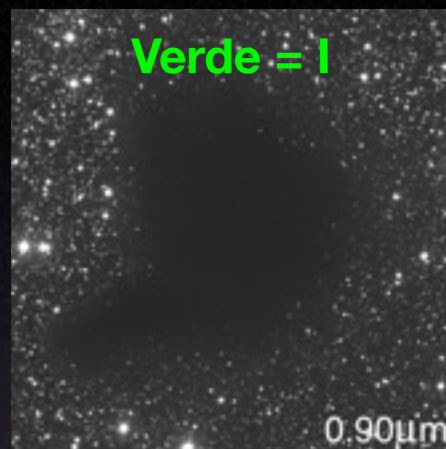
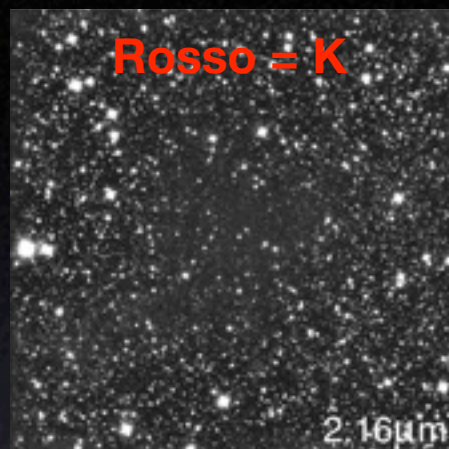


La nube oscura Barnard 68



Alle lunghezze d'onda più lunghe (infrarosse) la polvere è quasi trasparente.

Immagini a “colori reali”



- Le osservazioni astronomiche non forniscono immagini a colori ma in “bianco e nero” ovvero immagini in un determinato filtro (es. V o B). Ciascuna immagine è una matrice dove ogni elemento (pixel) è proporzionale all'intensità della luce.
- Per esempio, posso visualizzare l'immagine in un dato con gradazioni di grigio, dove i chiari e gli scuri dipendono dall'intensità dell'immagine.
- Immagini a colori reali. Una immagine a colori si può sempre considerare come data dalla composizione di tre immagini di colore Rosso, Verde e Blu (RGB, *Red-Green-Blue*), ciascuna caratterizzata dell'intensità della luce nel colore corrispondente.
- Quindi, se ho 3 immagini in 3 filtri diversi, p.e., B, I e K posso associare ciascuno di questi filtri al “color” Blu, Verde e Rosso ed ottenere un'immagine a colori reali”.

La polvere interstellare

La composizione e la natura della polvere interstellare non sono stati ancora capiti completamente.

Deve essere composta di particelle solide (grani).

Le curve di estinzione osservate richiedono delle particelle di composizione e dimensioni ben definite.

A_λ nel visibile: grani con nuclei di silicati, grafite o ferro rivestiti con “mantelli” di ghiaccio; dimensioni 0.05-0.2 μm .

“bozzo” a 0.2 μm : grani di grafite di 0.02 μm .

A_λ nell'UV: grani di silicati con dimensioni 0.005-0.02 μm .

Immagine dal satellite IRAS (lontano IR) di nubi di polvere tipo “cirri”.



Origine della polvere:

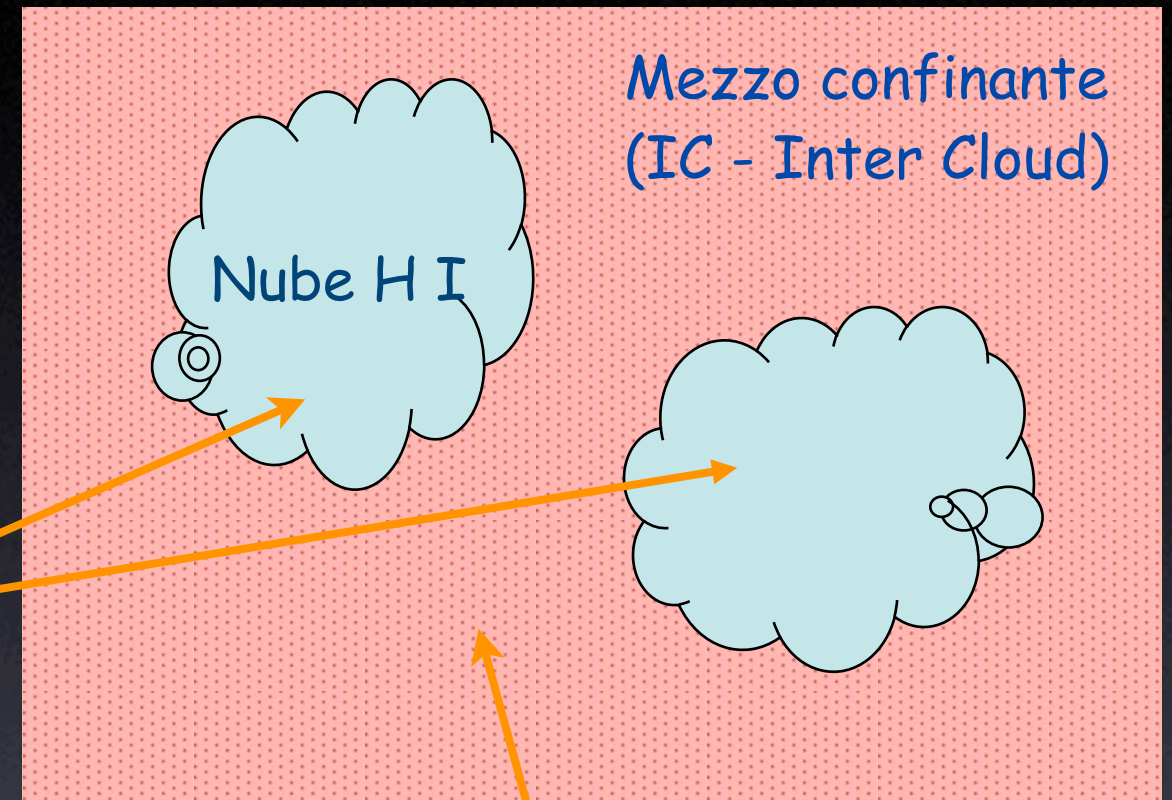
i grani si sono probabilmente formati nelle atmosfere di stelle “vecchie” e fredde (giganti rosse).

Nubi di Idrogeno Neutro

Le righe di assorbimento strette viste negli spettri stellari indicano la presenza di nubi fredde di HI immerse in un mezzo confinante più caldo.

Temperatura $T_{\text{HI}} \sim 100 \text{ K}$
Principalmente H neutro
Dimensioni $\sim 10\text{-}100 \text{ pc}$
Densità $n_{\text{HI}} \sim 10^8 \text{ atomi/m}^3$

Queste due fasi del mezzo interstellare sono in equilibrio di pressione.



Temperatura $T_{\text{IC}} \sim 5\text{-}10\,000 \text{ K}$
 $\sim 20\%$ ionizzato (H II)
Densità $n_{\text{IC}} \sim 3 \times 10^5 \text{ atomi/m}^3$

Pressione $P = nKT$



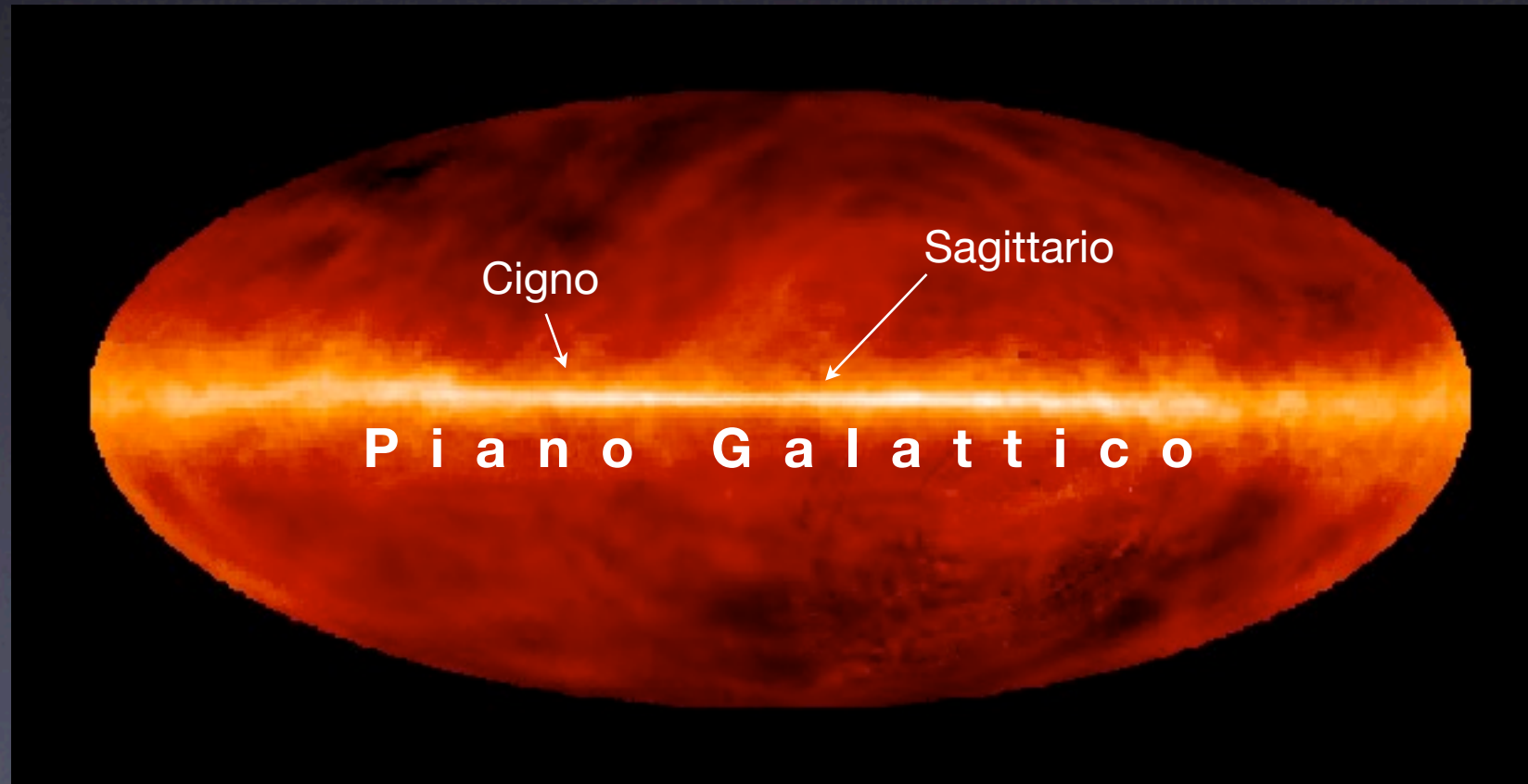
$$n_{\text{IC}} / n_{\text{HI}} = T_{\text{HI}} / T_{\text{IC}}$$

Mappa della galassia in HI 21 cm

L'idrogeno neutro non emette alle λ visibili ma può esser rivelato tramite la sua emissione nella riga a $\lambda = 21$ cm.

L'elettrone nello stato fondamentale dell'idrogeno neutro ha energie leggermente diverse a seconda che il suo "spin" sia allineato o meno con quello del protone.

Lo stato eccitato a energia più alta decade spontaneamente dopo $\sim 10^6$ y emettendo un fotone alla lunghezza d'onda di 21 cm.



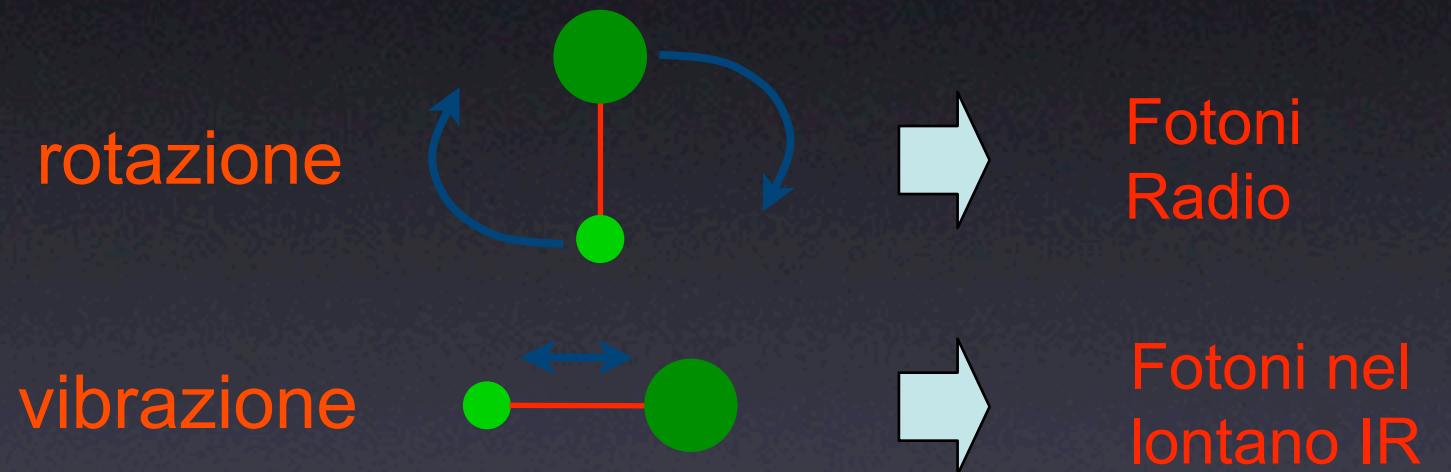
Mappa a tutto cielo dell'emissione di HI nella riga a 21 cm.

Emissione molecolare

Oltre ad atomi, ioni e grani di polvere, il mezzo interstellare contiene molti tipi di molecole, per esempio H_2 , H_2O , CO , CH_4 , ecc.

Queste molecole possono essere rivelate dall'emissione in riga delle transizioni rotazionali o vibrazionali.

Gli stati di più alta energia sono eccitati da collisioni e decadono emettendo fotoni.



La molecola più comune è di gran lunga H_2 che però non ha transizioni a lunghezze d'onda lunghe $\Rightarrow$ può essere facilmente “nascosta” dalla polvere.

La distribuzione di H_2 è tracciata dalla misura dell'emissione del CO a 2.6 mm.

Molecole nel mezzo interstellare

Le righe molecolari sono spesso molto intense nelle nebulose oscure. I grani di polvere sono probabilmente la sede della formazione delle molecole: gli atomi si legano alle superfici dei grani di polvere dove si legano a loro volta per formare le molecole.

Alcune molecole rivelate nello spazio interstellare

H ₂	molecular hydrogen	H ₂ S	hydrogen sulfide
C ₂	diatomic carbon	N ₂ O	nitrous oxide
CN	cyanogen	H ₂ CO	formaldehyde
CO	carbon monoxide	C ₂ H ₂	acetylene
NO	nitric oxide	NH ₃	ammonia
OH	hydroxyl	HCO ₂ H	formic acid
NaCl	common table salt	CH ₄	methane
HCN	hydrogen cyanide	CH ₃ OH	methyl alcohol
H ₂ O	water	CH ₃ CH ₂ OH	ethyl alcohol

Il più abbondante
Forti emettitori radio

Si trovano comunemente molecole relativamente complesse (es. alcoli, molecole usate per sintetizzare gli amminoacidi).

Le nubi molecolari

I legami chimici delle molecole sono relativamente deboli.
Le molecole sono facilmente distrutte (dissociate) dai fotoni UV emessi dalle stelle calde.

La maggior parte delle molecole sopravvive dentro nubi dense e ricche di polvere dove la radiazione UV non può penetrare.

Nubi molecolari giganti.

Diametro $\sim 15 - 60$ pc.

Densità $\sim 10^{11}$ H₂/m³

Temperatura ~ 10 K

Massa totale $\sim 10^5$ M_☉

Sono il luogo dove si formano le stelle!

I fotoni UV provenienti dalle stelle vicine sono diffusi e assorbiti dalla polvere nelle zone più esterne della nube.



Il gas coronale

Osservazioni X e UV rivelano la presenza nel mezzo interstellare di bolle (*bubbles*) di gas caldo ed estremamente ionizzato:

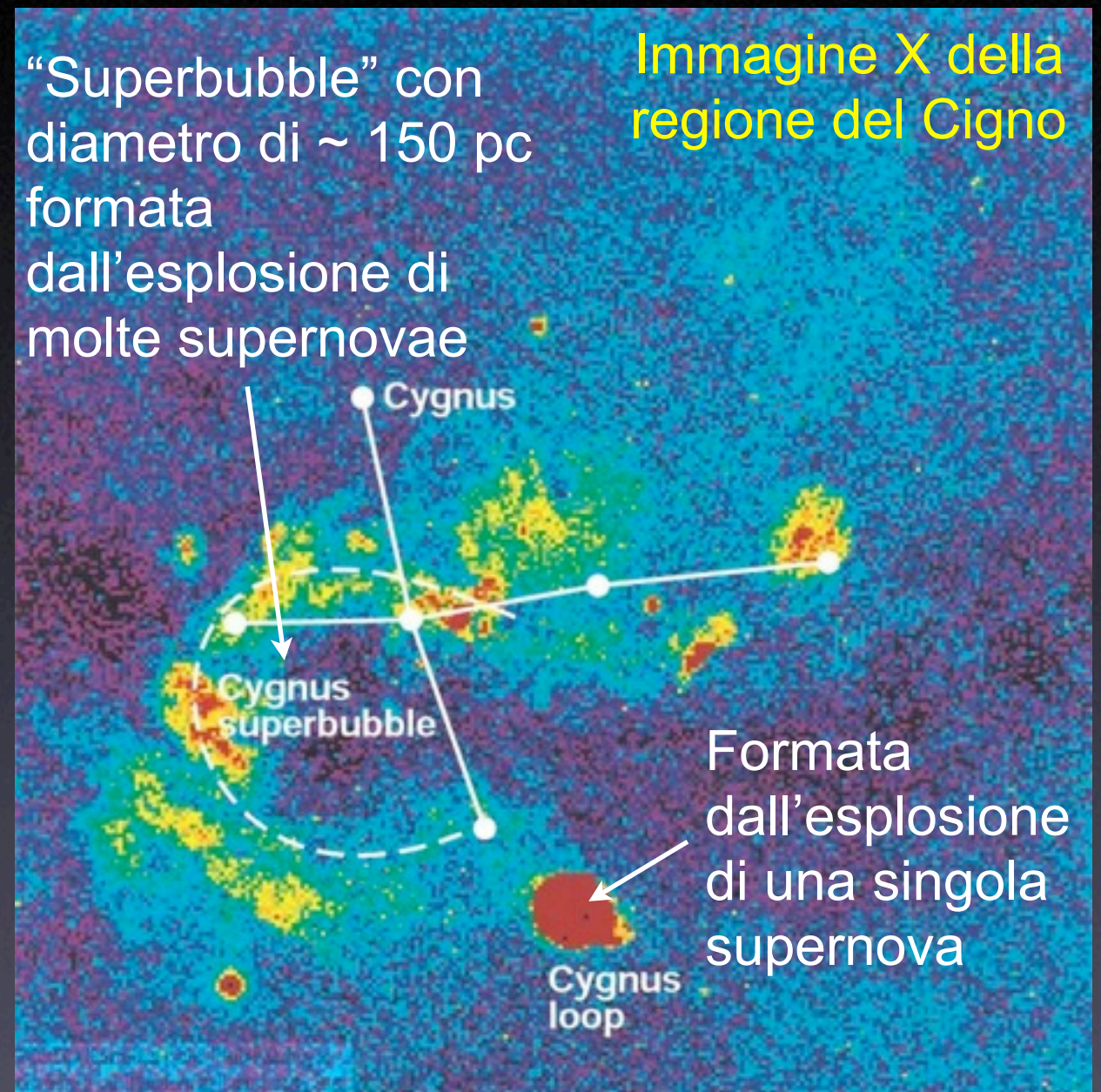
$T \sim 10^6 \text{ K}$ ed emette fotoni con energia $h\nu \sim kT \sim 100 \text{ eV}$

Questo gas “coronale” (condizioni simili alla corona solare) si è probabilmente formato a seguito dell’esplosione di supernovae.

Probabilmente contribuiscono anche i venti da stelle calde.

Bolle vicine possono fondersi per formare bolle più grandi (*superbubbles*).

Il Sole si trova entro una bolla di gas coronale.



Componenti del mezzo interstellare

Il mezzo interstellare è un misto di nubi dense e fredde di H₂/HI immerse in gas caldo, semi-ionizzato e in gas caldissimo fortemente ionizzato.

Componente	Temperatura [K]	Densità [atomi/m ³]	Frazione in Massa	Frazione in Volume	Costituenti principali
Nubi molecolari	10 - 50	10 ⁹ - 10 ¹¹	~45%	≤ 1%	H ₂ ; molti tipi di molecole; polvere
Nubi H I	50 - 150	10 ⁶ - 10 ⁹	~30%	~3%	H (neutro), H ₂ ; CO; altre molecole diatomiche; polvere
Mezzo intranubi	10 ³ - 10 ⁴	10 ⁵ - 10 ⁶	~20%	~30%	~80% H; ~20% H ⁺ ; altri atomi ionizzati
Gas coronale	10 ⁵ - 10 ⁶	10 ² - 10 ³	≤ 0.1%	~60%	H ⁺ ; tutti gli atomi fortemente ionizzati
Regioni H II	10 ⁴	10 ⁶ - 10 ⁷	~1%	~10%	H ⁺ ; altri atomi ionizzati
Nebulose Planetarie	10 ⁴	10 ⁹	piccolissima	piccolissima	H ⁺ ; altri atomi ionizzati
Resti di Supernovae	10 ⁵ - 10 ⁶	10 ⁶	piccolissima	⇒ gas coronale	H ⁺ ; tutti gli atomi fortemente ionizzati

Il ciclo del mezzo interstellare

Stelle, gas e polvere sono legate nel ciclo di nascita e morte delle stelle.

Le stelle si formano nei nuclei densi delle nubi molecolari.



Le stelle giovani e calde ionizzano il gas formando le regioni HII.

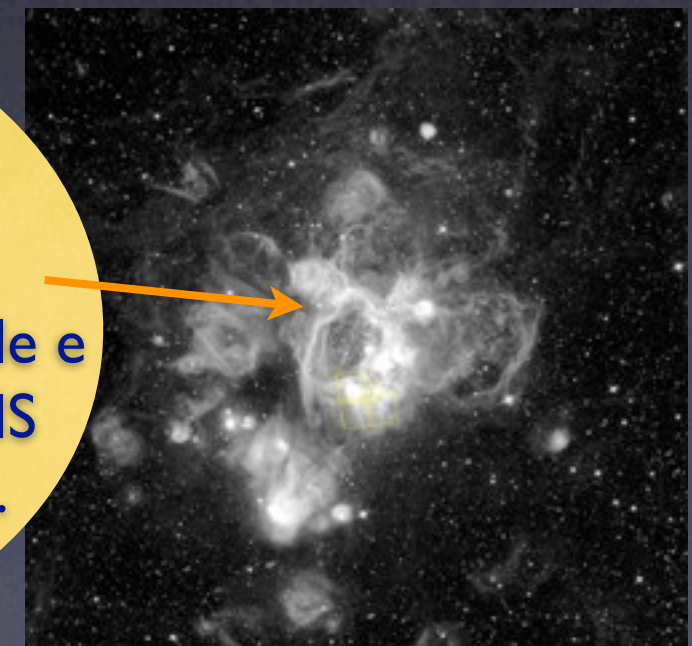


Gli ammassi di stelle giovani illuminano i resti delle nubi da cui si sono originate dando luogo alle nebulose a riflessione.

Le onde d'urto prodotte dalle supernovae comprimono il mezzo IS formando nubi dense e dando il via a nuova formazione stellare.



Le stelle massicce muoiono come supernovae producendo gas coronale e arricchendo il mezzo IS con elementi pesanti.



Sommario

Ci sono 3 tipi di nubi in luce visibile:

- a emissione (gas ionizzato intorno a stelle calde);
- a riflessione (nubi di polvere che riflettono la luce);
- oscure (nubi di polvere che nascondono le stelle sullo sfondo).

La polvere nel mezzo interstellare estingue ed arrossa la luce delle stelle.

Complessivamente il mezzo interstellare ha 4 componenti:

- nubi molecolari fredde e dense - il sito della formazione stellare;
- nubi meno fredde di idrogeno neutro;
- mezzo intranube caldo e parzialmente ionizzato;
- mezzo coronale (mezzo intranube caldissimo).

Siti Internet

Gallerie di immagini di nebulose:

Anglo-Australian Observatory

<http://www.aao.gov.au/images/>

National Optical Astronomy Observatory

http://www.noao.edu/image_gallery/

European southern Observatory

<http://www.eso.org/outreach/ut1fl/astroim-nebula.html>

HubbleSite (Telescopio Spaziale Hubble)

<http://hubblesite.org/gallery/album/>