



*Produzione di H₂ nelle nubi
interstellari*

CODAS – 25 ottobre 2013

Prof.ssa Daniela Averna

**Production of molecular hydrogen by
cosmic rays in interstellar clouds:**

A relevant process?

Astron.Astrophys. 196, 201-206 (1988)

V. Pirronello, D. Averna

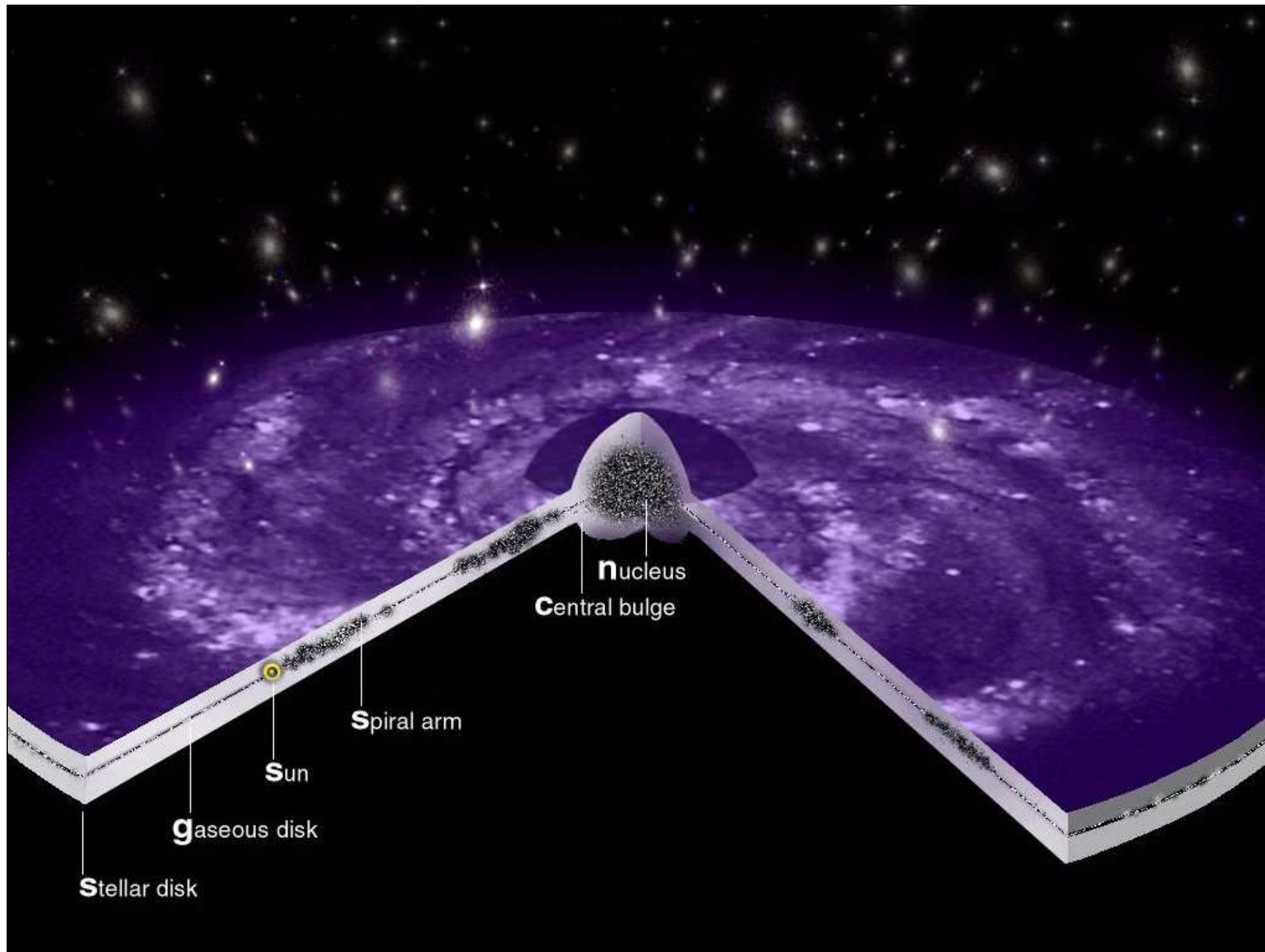


Sommario

- Il mezzo interstellare: gas e polveri
- Il problema della formazione dell'idrogeno molecolare
- I raggi cosmici

- Il modello utilizzato dal gruppo di Catania
- Risultati vecchi e nuovi



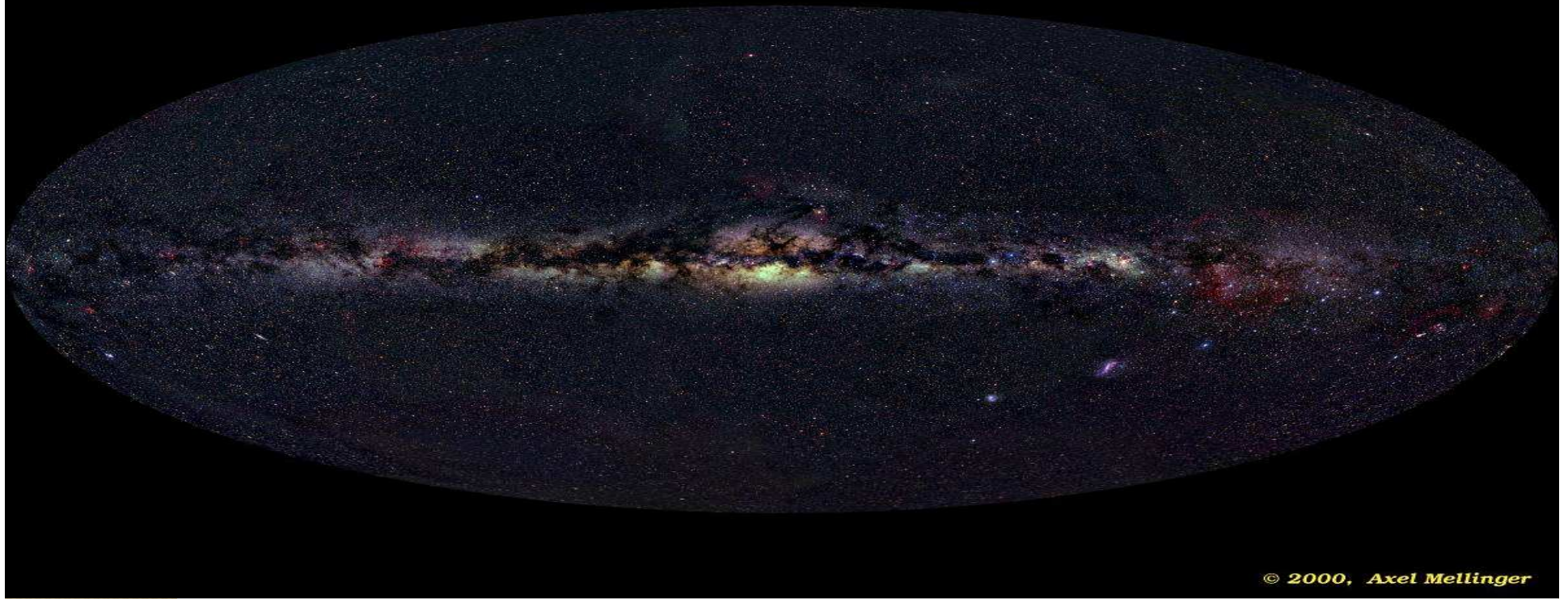


La Via Lattea

A destra come appare ad occhio nudo, al centro e a sinistra osservata all'infrarosso da COBE, rispettivamente alle lunghezze d'onda di 1.2 - 3.4 μm e 25 - 60 μm .



The Deep Sky



© 2000, Axel Mellinger

Massa della Galassia: 10^{44} g

90% stelle

10% ISM

“Il buio della notte”

Nel 1610 Keplero per primo formulò il paradosso del buio della notte: se l’universo è infinito, prima o poi lo sguardo deve incontrare una stella, quindi il cielo dovrebbe apparire luminoso in ogni direzione.



**Nel 1720 Halley ripropose e affrontò il
paradosso.**

Halley ipotizzò che la luminosità per stelle lontane decrescesse più rapidamente di $1/r^2$.

In questo modo, la luce delle stelle più lontane non sarebbe percepibile.



Nel 1823 Olbers affrontò il paradosso in termini di assorbimento interstellare.

L'Universo non è vuoto, c'è materia allo stato gassoso che assorbe energia luminosa.
Pertanto le stelle lontane non sono visibili.

**Nel 1861 Mödler propose la finitezza
dell'Universo.**

L'Universo, pur essendo grande, è finito e la
luce delle stelle lontane non ci ha ancora
raggiunto.

Perciò noi osserviamo il cielo buio.


Nel 1901 Thomson e Kelvin assunsero che ogni stella ha una vita finita.

Le stelle nascono, vivono e muoiono.

L'umanità non osserverà mai contemporaneamente tutte le stelle esistite o esistenti dell'Universo, ma solo quelle visibili al tempo dell'osservatore. Per questo nel cielo notturno il buio è preponderante.

Le ipotesi introdotte per giustificare il buio sono:

- 1) nell'Universo è presente del gas diffuso che assorbe la luce visibile;
- 2) l'Universo è finito, ma la luce di alcune stelle non è ancora arrivata a noi;
- 3) le stelle hanno anch'esse una vita finita.



Le osservazioni astronomiche effettuate nel corso degli anni inizialmente solo con telescopi ottici, poi con telescopi radio ora anche mediante sonde installate su satelliti, hanno confermato la presenza di materia interstellare.

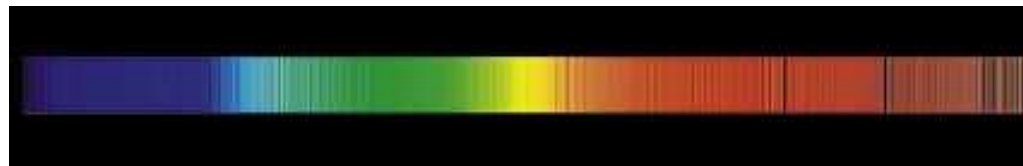
Il Mezzo interstellare: 99% gas

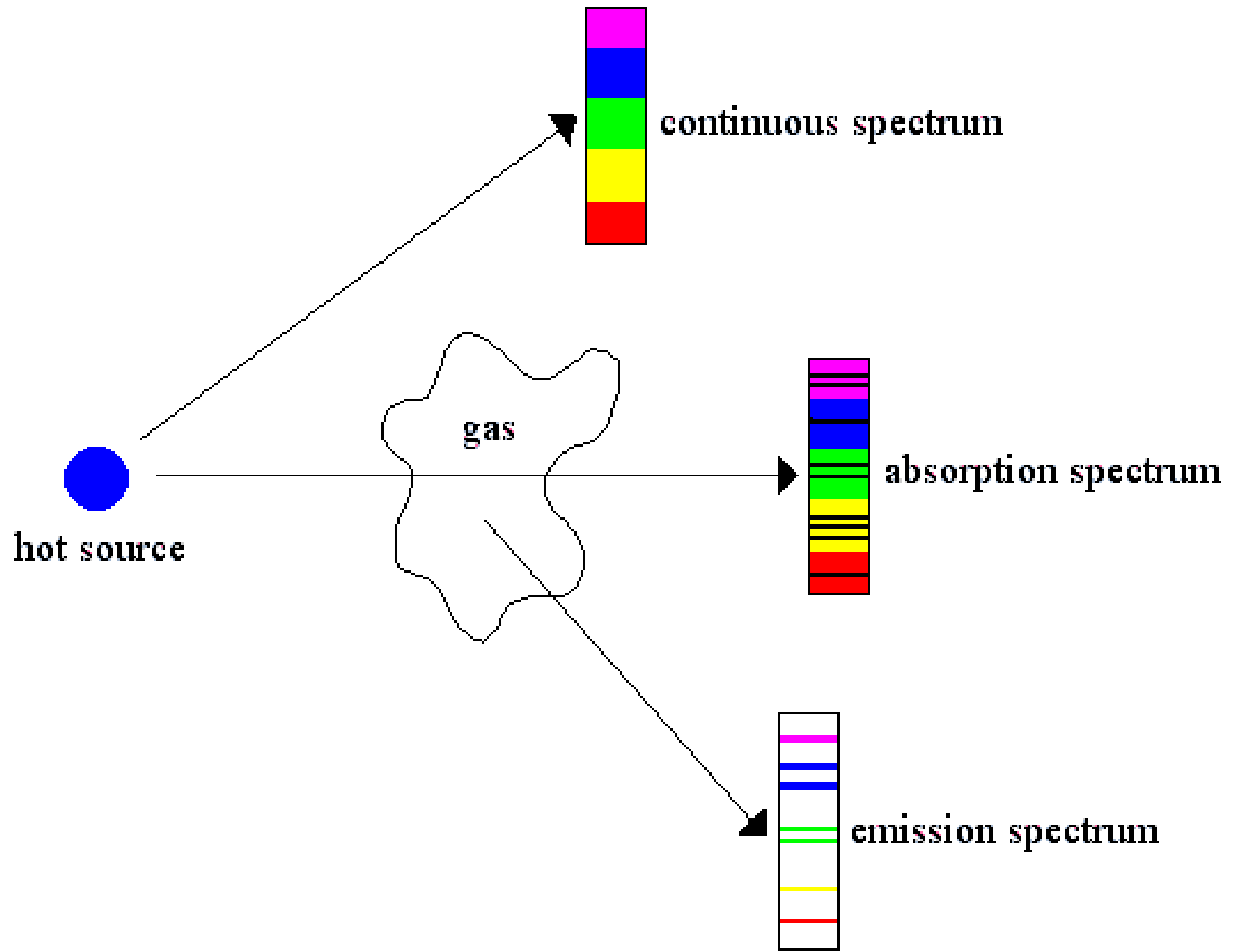
- idrogeno (73% in massa), elio (25% in massa) e da minime percentuali di altri elementi e composti (ammoniaca, formaldeide,ossido di carbonio, etc.)
- bassa densità e pressione
- in forma atomica (neutra o ionizzata) o molecolare.

Come si distinguono i diversi tipi di idrogeno?

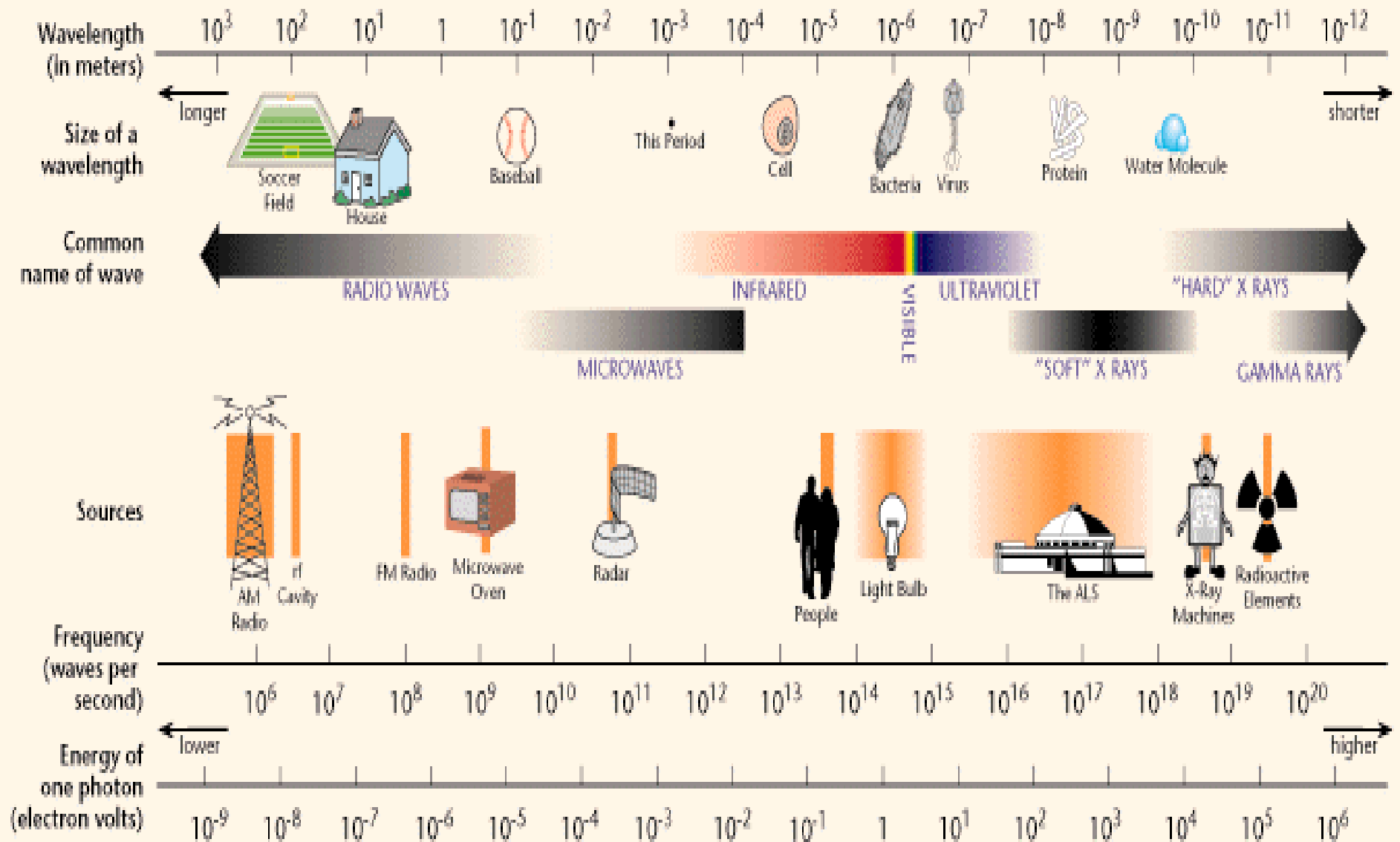
SPETTRI DI EMISSIONE

- un corpo solido scaldato diventa prima rosso e poi sempre più chiaro fino a divenire bianco
- un corpo nero emette uno spettro continuo
- la luce che proviene da un gas rarefatto ad alta temperatura dà uno spettro di emissione a righe
- il tipo di righe emesse è specifico e caratteristico per ciascun elemento o composto.
- analizzando le righe spettrali è possibile eseguire una vera e propria analisi chimica a distanza



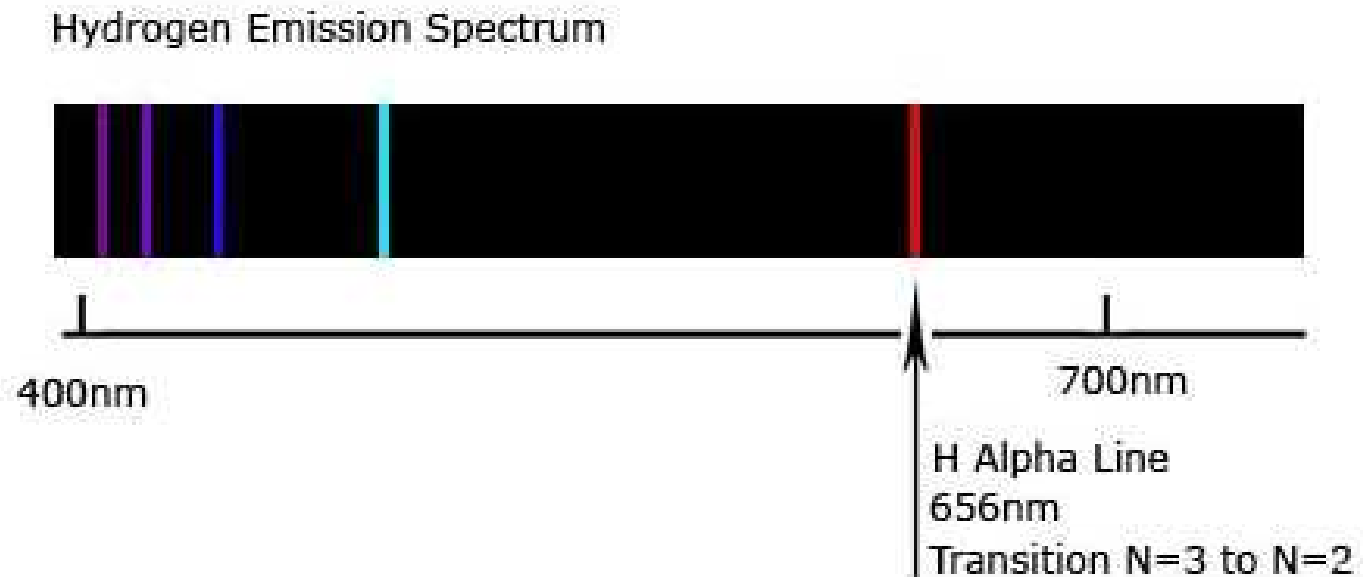


THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM

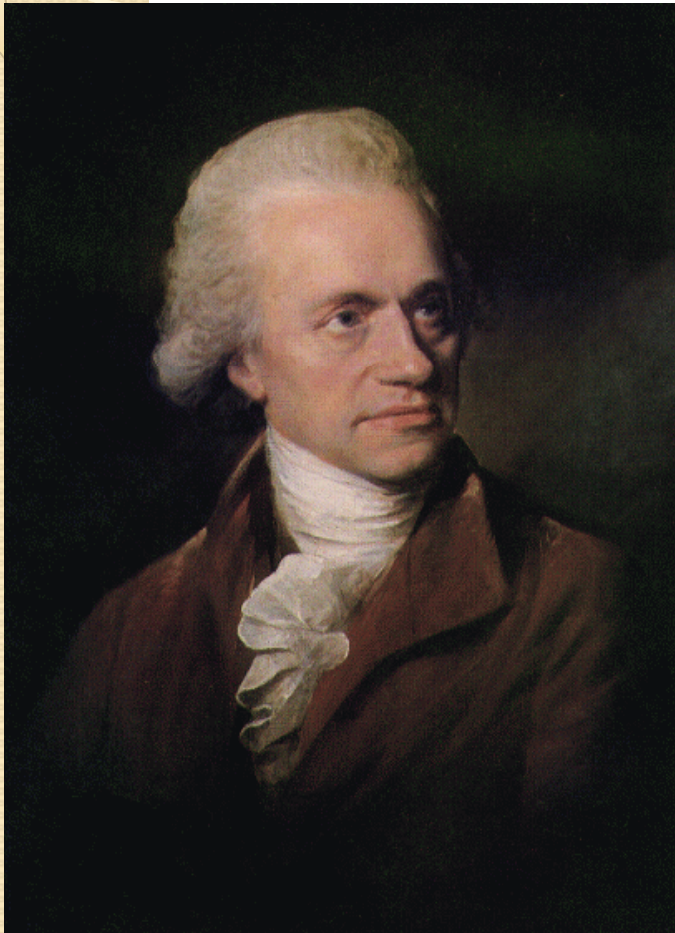


Spettro di emissione dell'idrogeno atomico

- neutro o Regioni HI emette una riga a lunghezza d'onda di 21 cm (onde radio)
- ionizzato (Regioni HII) emette la riga H α nel rosso
- in forma molecolare (H₂) è difficile da osservare




Il Mezzo interstellare: 1% polveri



William Herschel (1738-1822)

- La polvere è formata da particelle solide ghiacciate di minuscole dimensioni (0,1-1 μ m).
- L'effetto principale della polvere è quello di assorbire e di diffondere (scattering) la luce.
- Ne consegue una diminuzione della luminosità delle stelle.

- 
- Nel 1912 Hartman si accorse che alcune righe del Call in sistemi binari non partecipano al moto Doppler tipico delle righe formate nelle atmosfere di quelle stelle.
 - Nel 1927 Struve notò che l'emissione di tali righe aumenta con la distanza del sistema binario dalla Terra, dunque dipende da qualcosa di interposto tra l'osservatore e le stelle.

La scoperta della polvere interstellare



Robert Julius Trumpler (1886-1956)

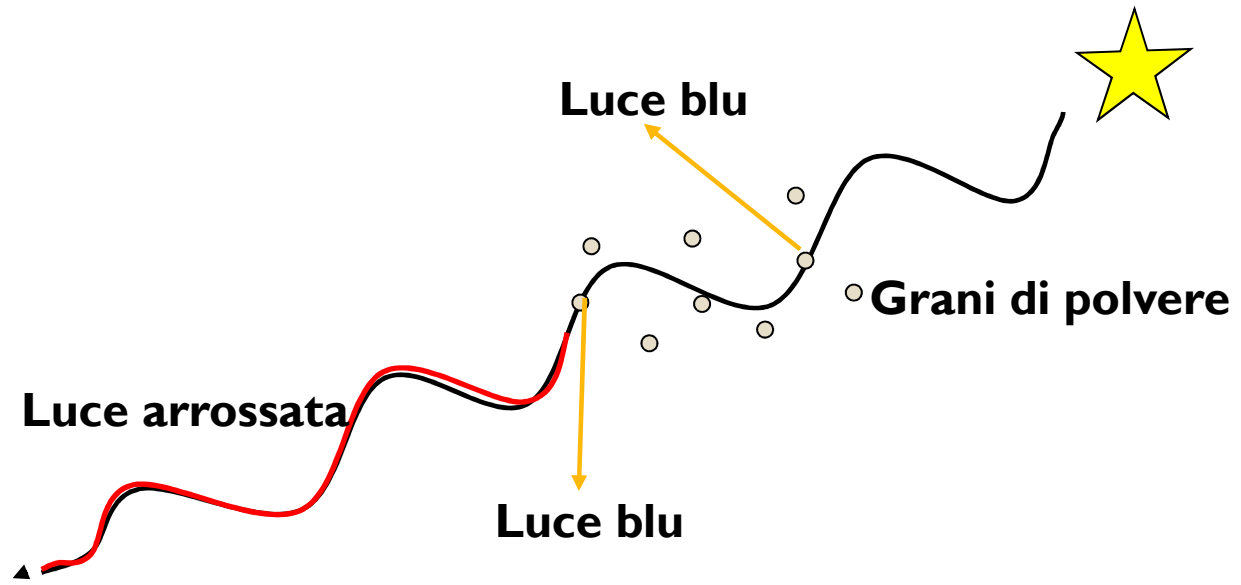
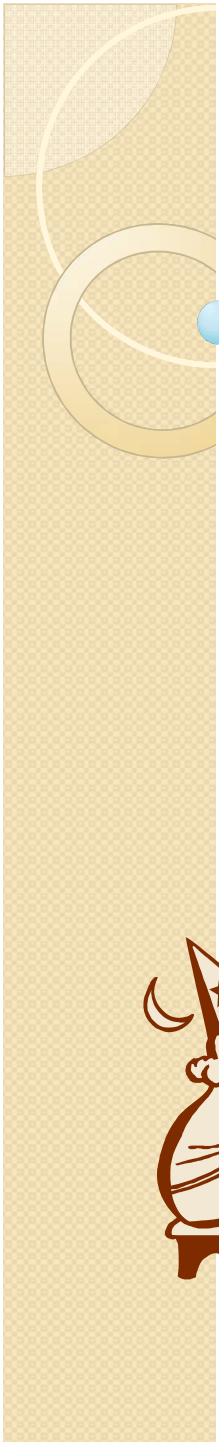
Da studi su distanze, dimensioni e distribuzione spaziale degli ammassi stellari aperti dedusse che la relazione tra magnitudine apparente e assoluta va corretta di un fattore detto “coefficiente di estinzione”, che tiene conto della presenza di ISM.



La polvere interstellare

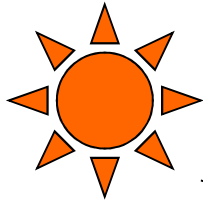
La polvere interstellare provoca:

- l'**estinzione** (*extinction*) della luce stellare attraverso una combinazione di assorbimento e scattering
- l'**arrossamento** (*reddening*) della luce stellare a causa della dimensione dei grani (< della λ ottica)

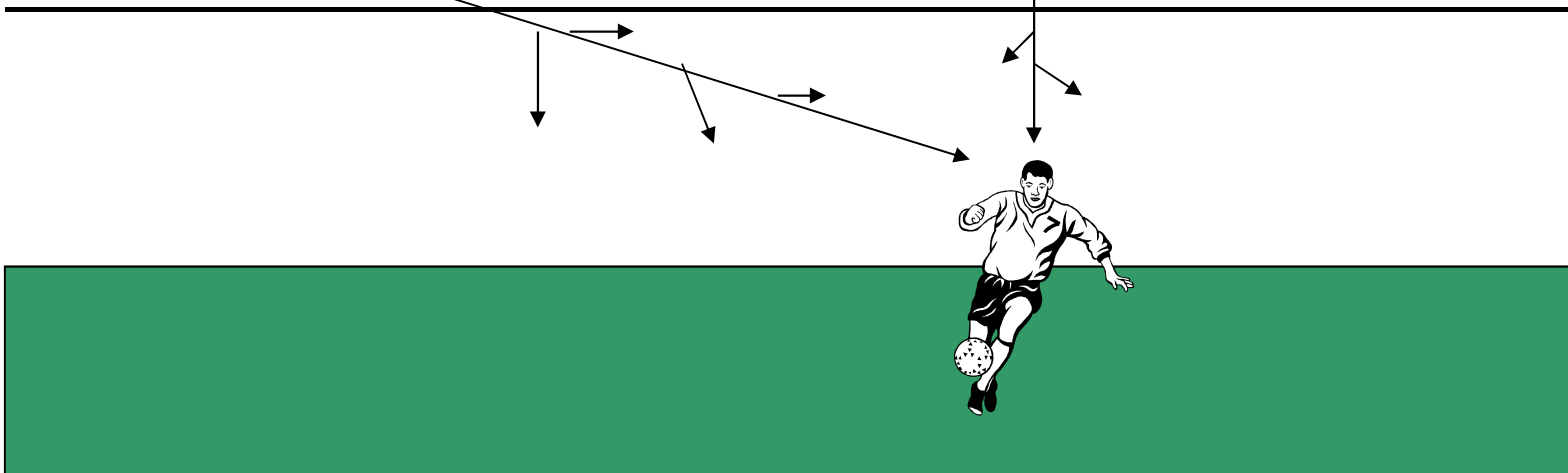
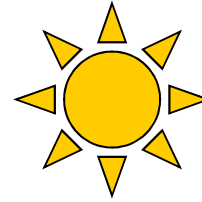




Tramonto



Mezzogiorno



Nebulose

- Il 50% del mezzo interstellare si concentra in nubi gravitazionalmente legate.
- Esse sono luoghi ideali per la formazione di nuove stelle.
- La materia nebulare può interagire in modo diverso con la radiazione proveniente dalle stelle vicine o in formazione.
- Le nebulose ci appaiono come macchie di luce diffusa o zone buie e possono essere di tre tipi:
 - Oscure o ad assorbimento
 - In emissione
 - a riflessione

Nebulose oscure

Si manifestano come macchie scure sul fondo stellato





Nebulose in emissione

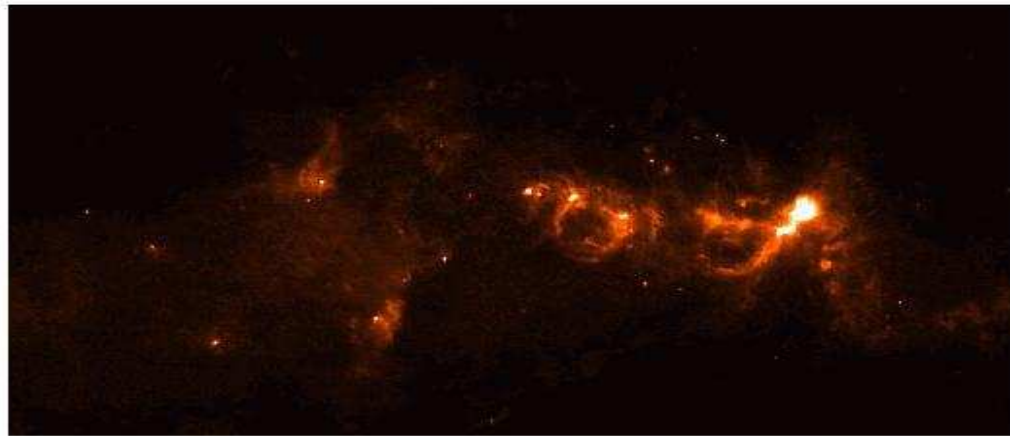
Sono regioni contenenti stelle giovani e massicce
Mostrano emissione di luce rossastra (Neb. Di Orione) derivante dall'idrogeno ionizzato (regioni H II)



η Carinae

La nebula emette luce per effetto del riscaldamento a 10000 K prodotto dalle stelle in essa contenute.





Dust Emission
100 microns



Dust Emission
12 microns



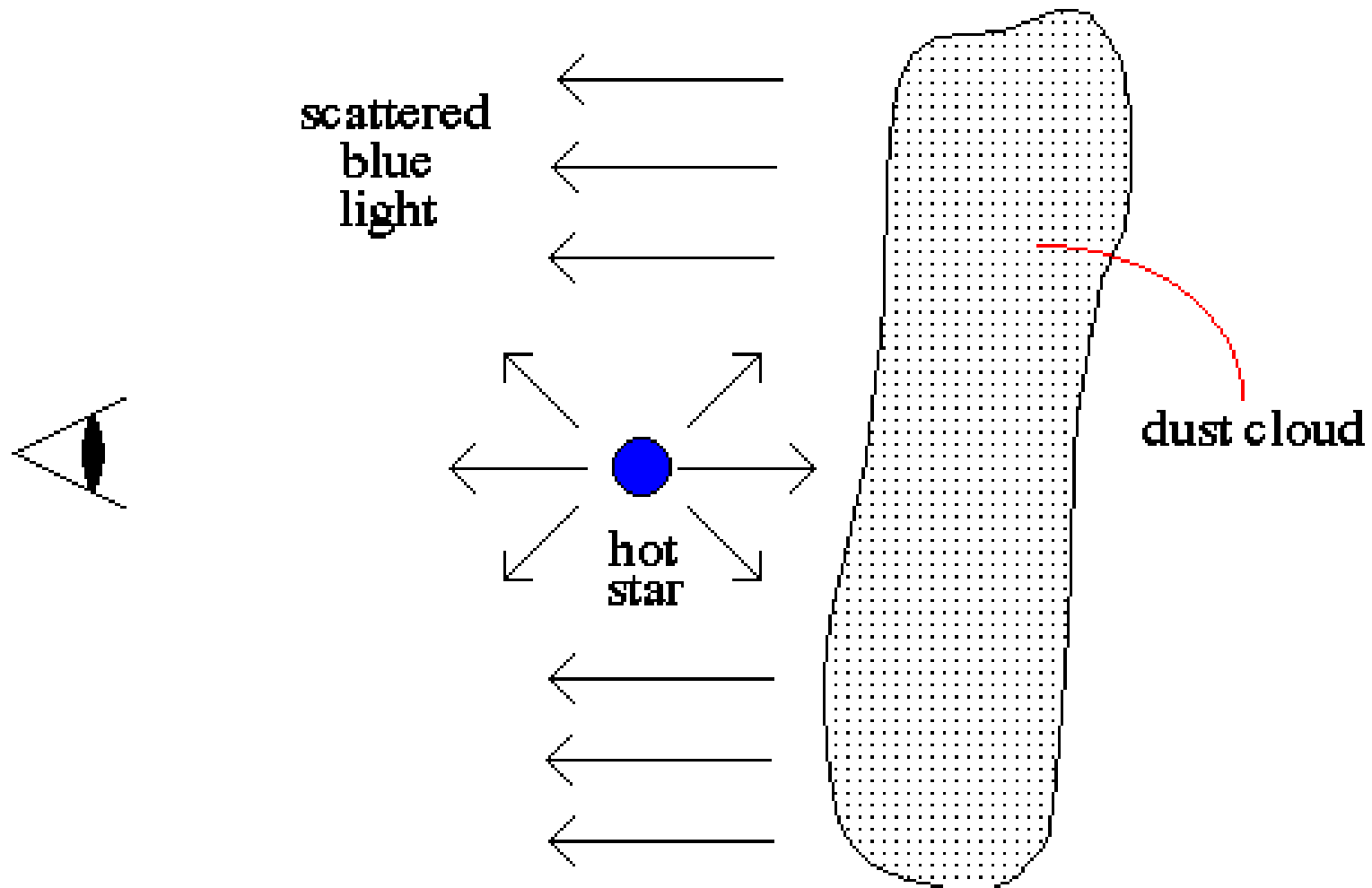
Radio
408 MHz

Nebulose a riflessione

- Se le stelle nella nebulosa sono più fredde il gas e le polveri diffondono e riflettono la radiazione emessa (colori bluastri)
- Non è presente idrogeno ionizzato

Reflection Nebula

Reflection nebula are caused by the forward scattering of light from a nearby hot star by a dust cloud.



Pleiadi

La luce diffusa dalla materia interstellare evidenzia la nebula a riflessione che circonda le stelle del cluster.

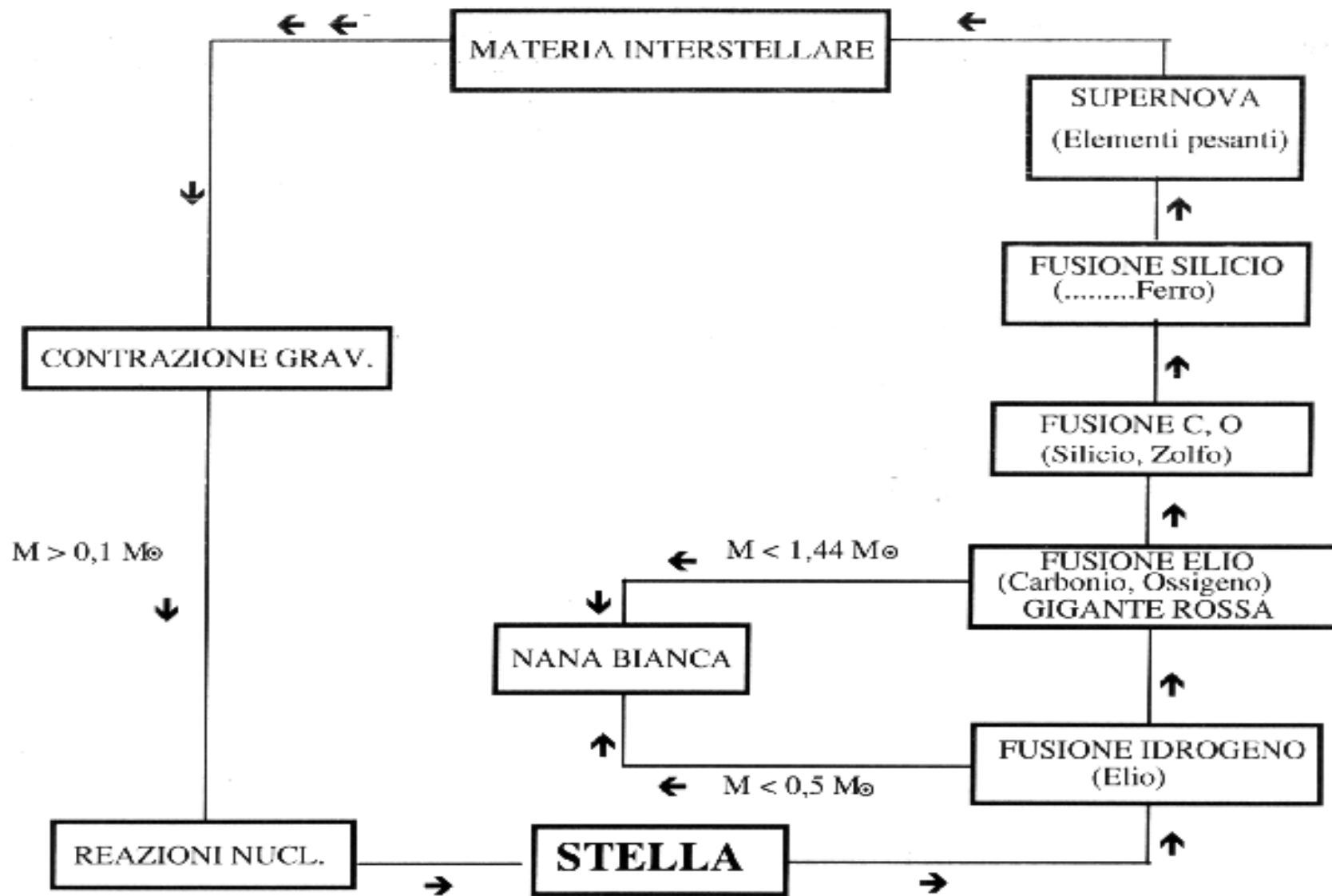


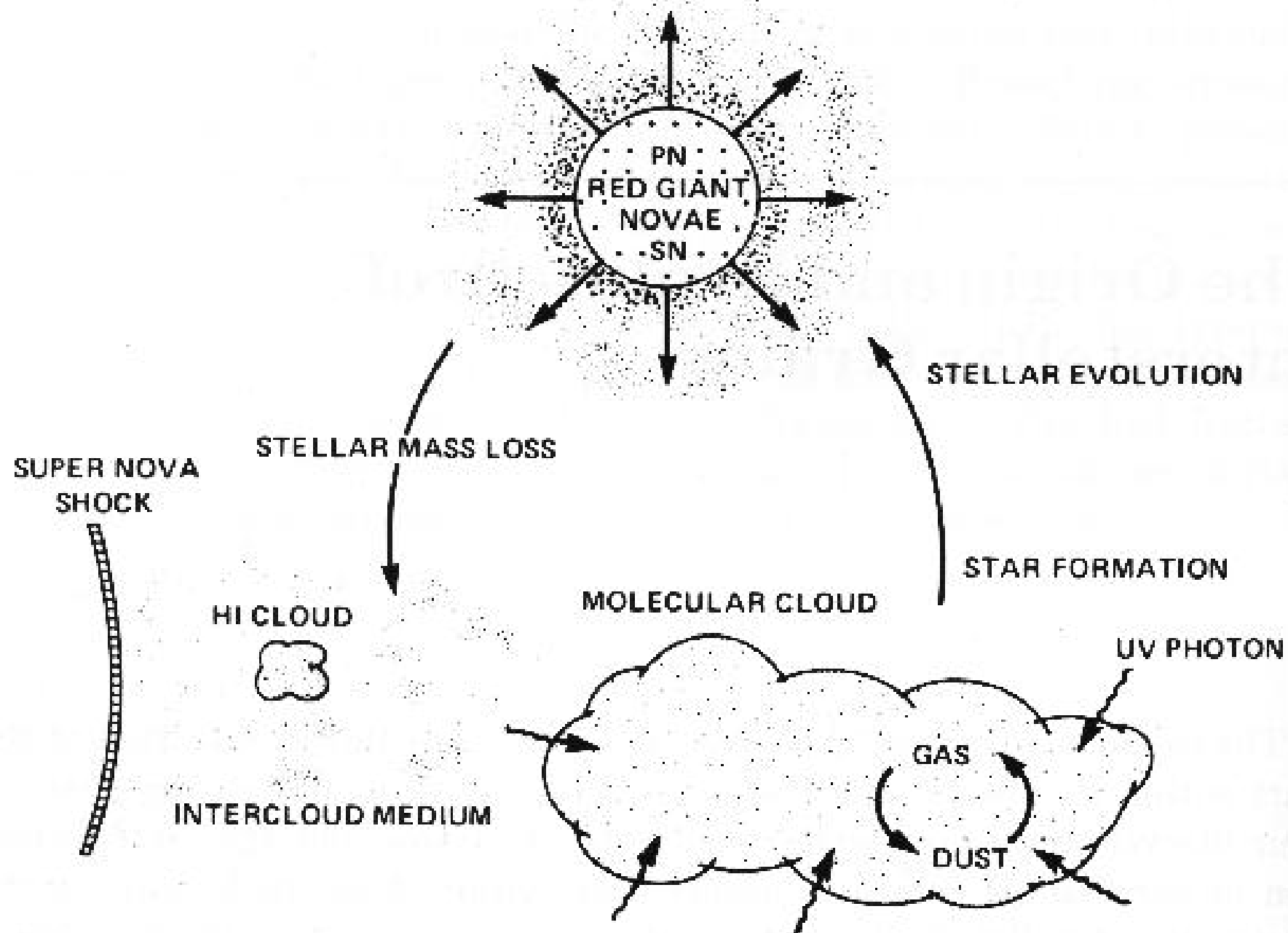




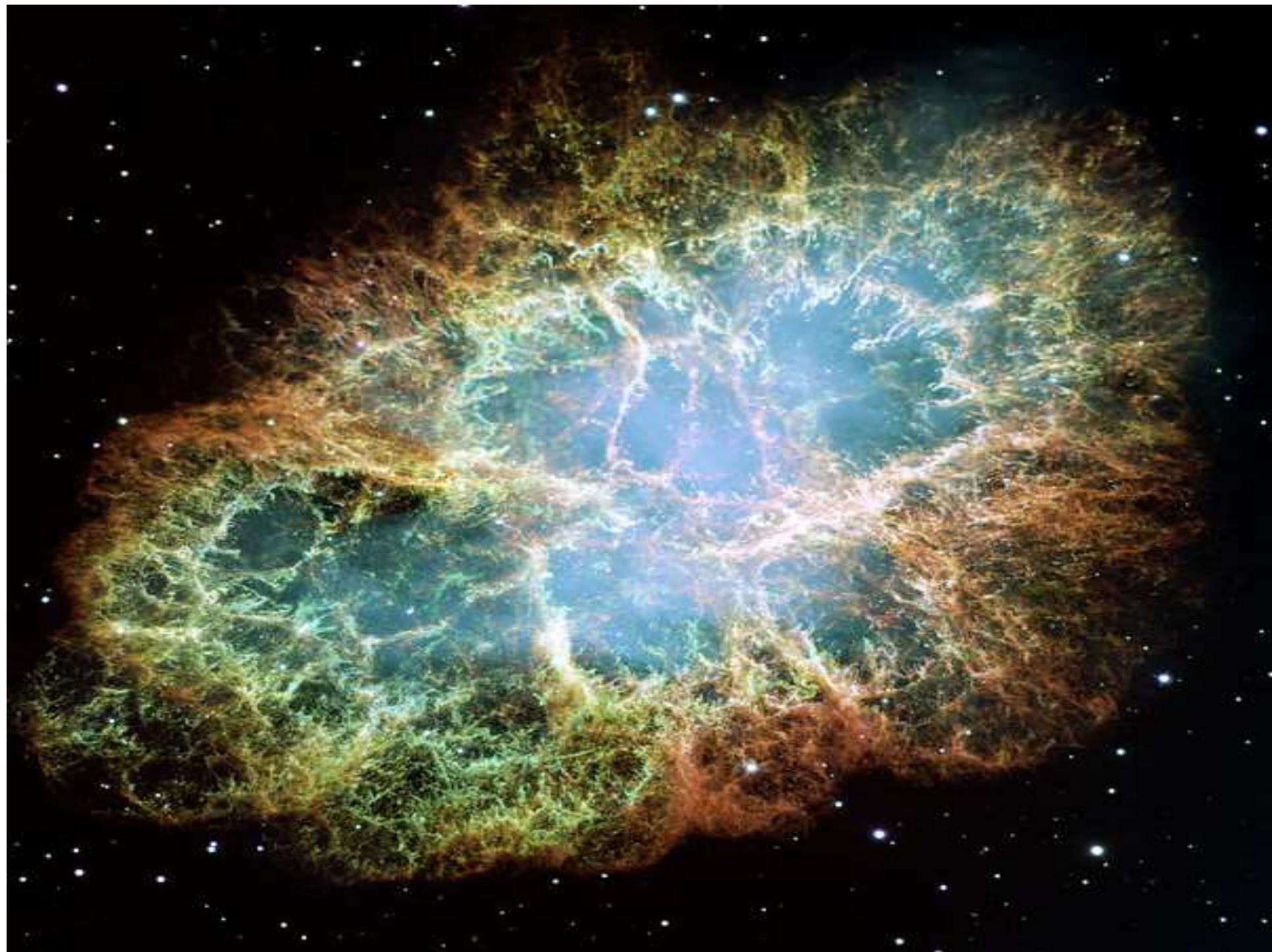
© Anglo-Australian Observatory Photograph by David Malin











Componenti di partenza

- La **vita sulla Terra** è oggi basata sulla presenza di alcune **molecole organiche fondamentali**:

- ◆ DNA
- ◆ RNA
- ◆ proteine
- ◆ amminoacidi

- Tutte queste molecole sono formate da sei atomi fondamentali:

CARBONIO - IDROGENO - OSSIGENO - AZOTO - FOSFORO - ZOLFO
CHONPS

- Si parte dagli elementi atomici più abbondanti nell'universo
- **H** circa 75% in massa
- **He** circa 24% in massa o 6% in nuclei sintetizzati nell'universo primordiale (per gran parte) e negli interni stellari.

Componenti di partenza: elementi pesanti

- ✦ **C, N, O, P e S** si formano nelle successive fasi evolutive delle stelle a seconda della massa iniziale.
- ✦ Le stelle di massa iniziale maggiore di 8 masse solari esplodono come **supernovae**.
- Il fronte di shock della supernova ha diversi effetti importanti:
 - **Creazione** di elementi più pesanti del ferro per cattura neutronica
 - **Disseminazione** di elementi pesanti nel mezzo interstellare
 - **Compressione** del mezzo interstellare dando origine a nuovi collassi di protostelle

Componenti di partenza: quando furono scoperti

- Lo studio quantitativo del mezzo interstellare iniziò dopo che la spettrografia rese possibile l'analisi dettagliata della luce proveniente dalle stelle.
- **1904** **calcio ionizzato** e il **sodio neutro** nello spazio interstellare.
- **1937** si scoprì che l'**idrogeno** è l'elemento più abbondante dell'Universo e che perciò doveva costituire la maggior parte del mezzo interstellare. Si riteneva che l'idrogeno fosse presente più come atomo singolo che come molecola biatomica **H₂**.

PRIME MOLECOLE: quando e dove furono scoperte

- **1937** prima molecola interstellare
il radicale chimico di carbonio e idrogeno **CH**
- **1940** il radicale cianogeno **CN**
identificato negli spettri di alcune stelle brillanti di tipo O e di tipo B nella Nebulosa di Orione.
- **1941** radicale ionizzato **CH⁺**
CH e **CH⁺** identificati nella Grande Nube di Magellano

PRIME MOLECOLE:

riga a 21 cm

- 1951 avvento della **RADIOASTRONOMIA**:
uno dei maggiori trionfi di questa tecnica fu la scoperta della riga alla lunghezza d'onda di 21 cm (1420 Mhz) dovuta a transizione iperfina dello spin dell'idrogeno atomico (da spin paralleli a spin antiparalleli).

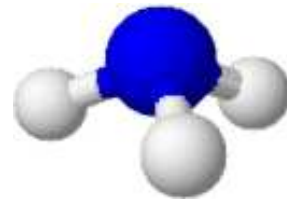
Le radioonde non sono assorbite in maniera apprezzabile dalle polveri interstellari.

- **1963** scoperto l'ossidrile **OH** in emissione in regioni HII della galassia M82.
- **1970** scoperta la molecola di **H₂** in nubi interstellari

PRIME MOLECOLE: ammoniaca

- **1968** fu scoperta la prima molecola composta da più di due atomi .

Si trattava della molecola dell'ammoniaca scoperta in IC342 la galassia a spirale gigante in Camelopardalis



è presente in numerose nubi interstellari in direzione del centro della nostra galassia.

PRIME MOLECOLE → NH₃ → ASTROCHIMICA → MOLECOLE COMPLESSE

- **1968** nascita dell'**ASTROCHIMICA**, nuova branca dell'Astronomia.

Fino a quel momento infatti si riteneva che

la bassa densità del mezzo interstellare (ISM) rendesse difficile, se non impossibile, la combinazione di più di due atomi.

Si prevedeva di trovare al più molecole biatomiche e che anche queste avessero una vita breve a causa degli effetti distruttivi della radiazione UV e dei raggi cosmici.

COME SI FORMANO

ipotesi

- I^a ipotesi → degradazione di grani di polveri nello spazio interstellare
 - non regge per 2 motivi:
 1. può spiegare meno dell'1% rispetto a quanto richiesto dai dati osservati
 2. nello spazio interstellare interviene una rapida dissociazione delle molecole per effetto della radiazione UV
- II^a ipotesi → espulsione delle molecole da parte di stelle "fredde" (1000-2000 °K). Gli spettri delle atmosfere di stelle "fredde" mostrano, infatti, bande molecolari.
 - non regge per il motivo 2.

COME SI FORMANO

deduzioni

Le molecole interstellari si sono formate **in situ** nelle nubi molto dense (con bassa temperatura e alta estinzione, che scherma la radiazione ultravioletta impedendo la dissociazione) attraverso **reazioni dirette in fase gassosa** o per intervento delle polveri di cui le nubi, specie quelle molecolari, sono ricche.



Gli atomi e gli ioni più abbondanti sono convertiti in molecole per mezzo di **reazioni chimiche** e tali molecole, a loro volta, prendono parte a successive reazioni che conducono a molecole sempre più complesse.

COME SI FORMANO

problemi

PROBLEMA CHIMICO → le basse temperature caratteristiche della materia interstellare, 10 K, non permettono i processi chimici noti tra molecole neutre, reazioni che procederebbero a velocità talmente basse da non poter in alcun modo spiegare le abbondanze molecolari suggerite dalle osservazioni.

Molte catene di reazioni sono dovute a ioni.

COME SI FORMANO

problemi

PROBLEMA ASTROFISICO → dove e come troviamo gli ioni?

Esistono situazioni diverse nelle nubi diffuse ed in quelle oscure

In generale la ionizzazione degli atomi nella materia interstellare avviene per l'interazione con:

- Raggi cosmici
- Raggi X
- Raggi UV

I fotoni con energia maggiore di 13,6 eV vengono utilizzati nella ionizzazione dell'idrogeno, l'elemento più abbondante, che si trova nelle immediate vicinanze delle stelle.

Lo ione H^+ è di fondamentale importanza, poiché costituisce uno dei punti di partenza della chimica in fase gassosa, tramite un tipo di reazione che va sotto il nome di **reazioni di trasferimento di carica**: $\text{H}^+ + \text{O} \rightarrow \text{O}^+ + \text{H}$

Nelle nubi diffuse:

H, He, O, N, Ne vengono ionizzati dai raggi cosmici o dai raggi X.

Elementi con energie di ionizzazione superiori a 13,6 eV tra cui **C, S, Si**, possono venire ionizzati anche dai fotoni UV, nei confronti dei quali le nubi diffuse sono trasparenti.

Il flusso dei fotoni UV è maggiore di quello dei raggi cosmici e dei raggi X di un fattore $10^6 - 10^7$

LO IONE PIÙ ABBONDANTE NELLE NUBI DIFFUSE È C⁺

meno abbondante di H, ma certo più abbondante di S e Si.

Questo spiega il fatto che tra le diverse chimiche organiche possibili, nella materia interstellare è privilegiata quella che si basa sulla **CHIMICA DEL CARBONIO**

6: Carbon

2,4

14: Silicon

2,8,4



In linea di principio, non vi sarebbero controindicazioni, stante la capacità del silicio di sostituire il carbonio nelle catene molecolari, avendo la **stessa valenza**. Ma il silicio ha **minore reattività** a differenza del carbonio e **non dà doppi legami**. Inoltre **il Si è meno abbondante di un fattore 10 del C**, in quanto può essere formato nelle stelle (*giganti rosse*) in fasi evolutive successive a quella che produce carbonio e quindi in stelle più pesanti e conseguentemente più rare.

LA CHIMICA DEL CARBONIO È LA PIÙ PROBABILE.

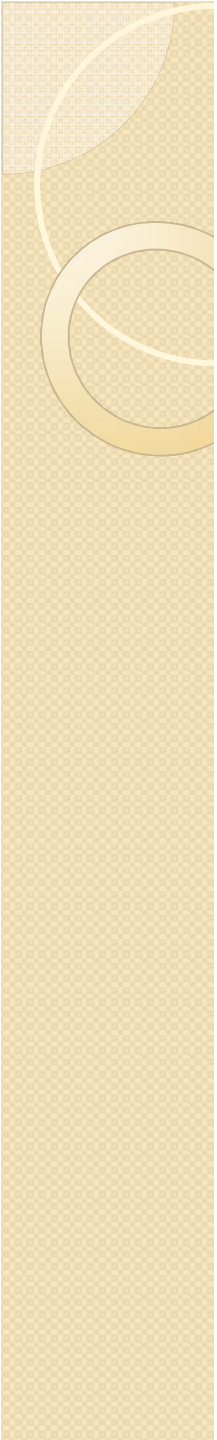


Nelle nubi oscure:

il flusso UV è trascurabile perché schermato dall'alta densità di tali nubi, dunque i **processi di ionizzazione**, necessari per la chimica tra specie ionizzate, **sono affidati unicamente ai raggi cosmici.**

La frazione di ioni presenti è minore di quella che si riscontra nelle nubi diffuse di un fattore che varia da 100 a 1000.

**Alta densità della nube → libero cammino medio delle particelle ionizzate assai ridotto
→ vita media (delle molecole) più lunga**



Ne consegue la possibilità di reazioni che formano molecole anche nelle nubi oscure.

Ad esempio, nel corso della condensazione cui va incontro una nube diffusa per divenire molecolare, una gran parte degli ioni C^+ viene trasformata in CO attraverso una serie di reazioni, alla luce delle quali

la molecola CO risulta la più abbondante dopo quella dell'idrogeno ($CO/H_2 = 10^{-4}$).

DOVE LE TROVIAMO

- ✦ **Nebulose diffuse**
- ✦ **Nebulose dense**
- ✦ **Comete e meteoriti - Pianeti e planetoidi - Nane brune** ($\text{CH}_4, \text{H}_2\text{O}, \text{NH}_3, \text{CO}$)

Per quanto riguarda la Via Lattea:

140 → sono state osservate nelle nubi interstellari e circumstellari

50 → nelle comete e altrove.

H₂O in ISM

- **Importanza:** è osservata ovunque ed è fondamentale per l'origine della VITA.
- E' la specie più abbondante in forma solida nei mantelli di ghiaccio dei grani in nubi dense, dove si forma direttamente tramite reazioni di superficie.
- Le reazioni in fase gassosa non spiegano la sua abbondanza.

Importanza di H₂

- E' la molecola più abbondante nell'Universo
- E' stata definita “molecola seminale” (Duley e Williams, 1984).
- Gioca un ruolo centrale nella chimica interstellare e nel raffreddamento delle nubi.
- La sua formazione è rilevante nel processo di collasso e frammentazione delle nubi e dunque per la formazione di stelle, per la struttura e la dinamica delle galassie

Il Problema della formazione di H₂

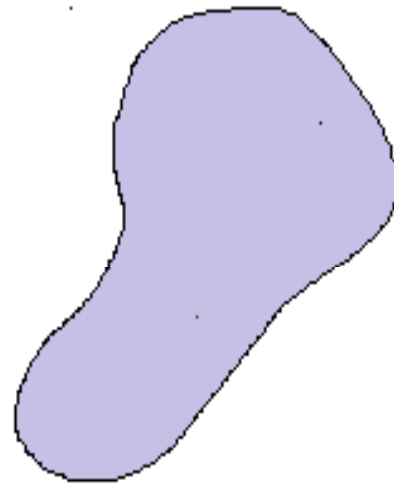
- H₂ non può formarsi in fase gassosa per associazione di due atomi H



Nel 1948 Van de Hulst propose il grano interstellare quale necessario “terzo corpo”.

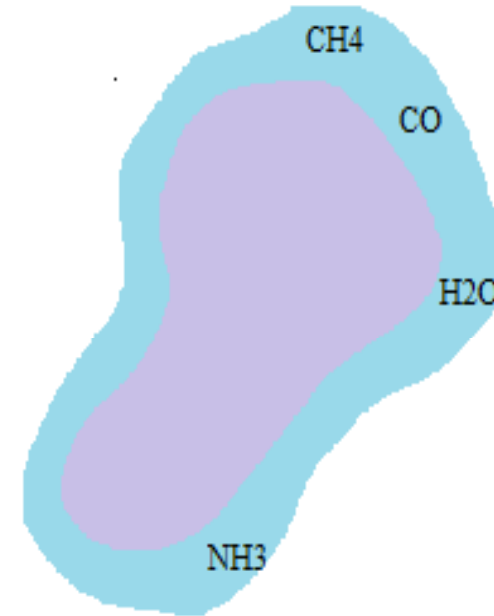
Modelli di grano

(Mathis et al. 1977)



Nubi diffuse

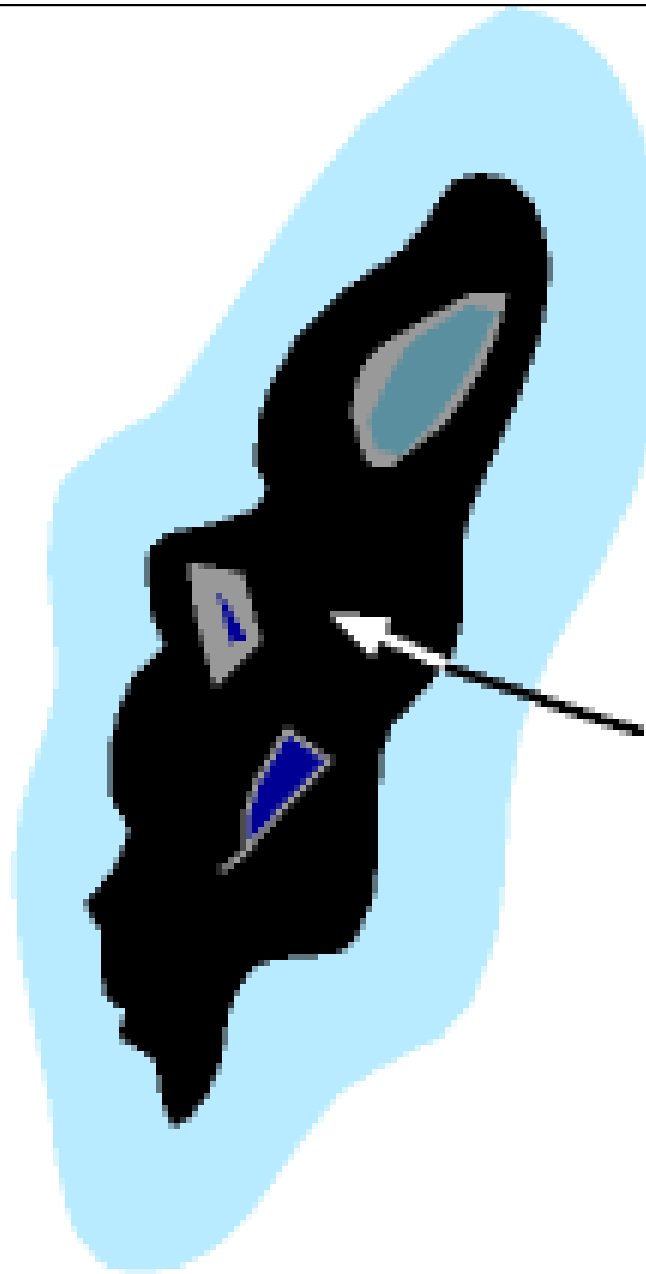
Core di Carbonio amorfo o silicati



Nubi dense

Core + Mantello ghiacciato

100
nanometers

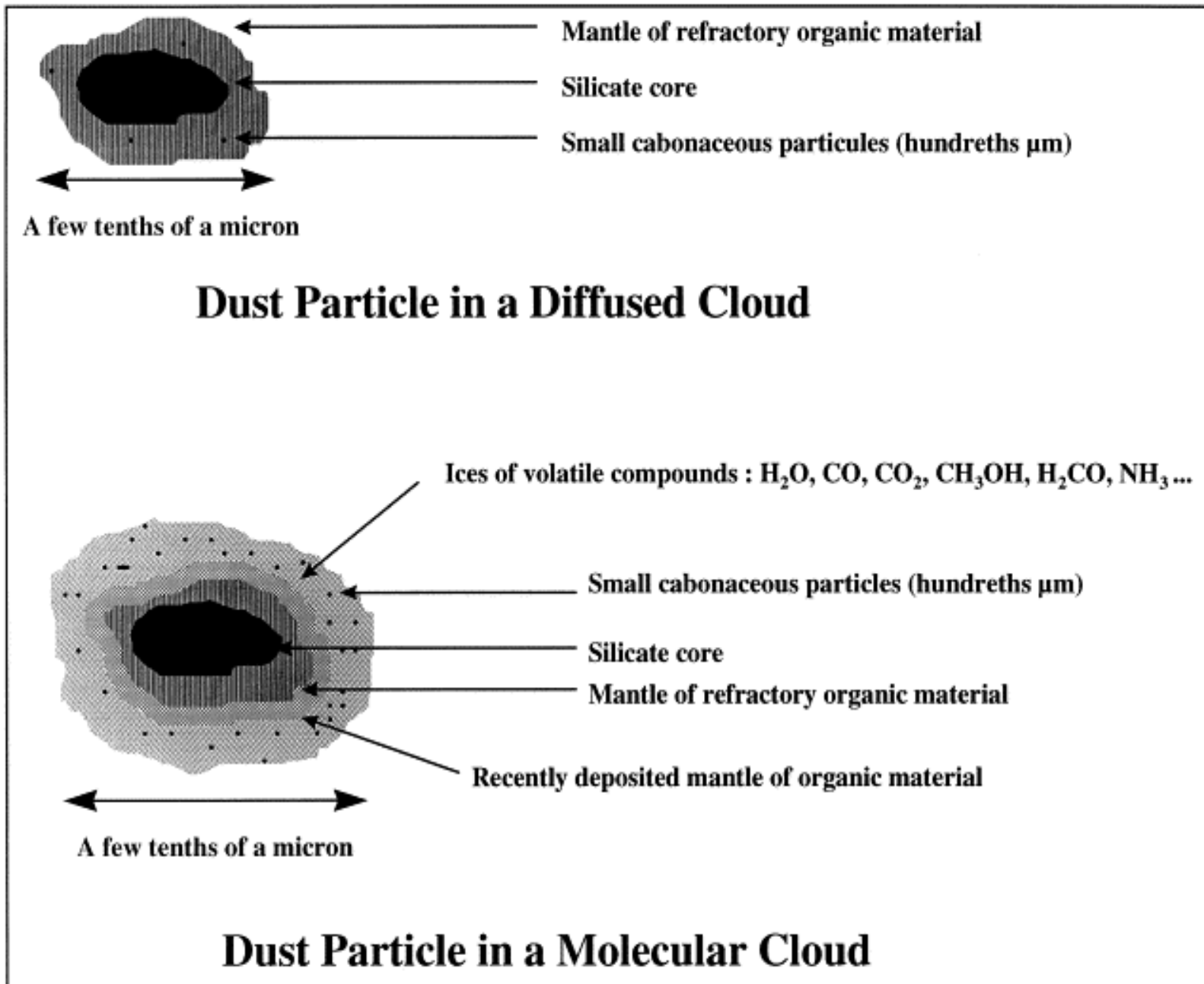


ice coating

graphite and
silicates

A typical dust grain (note the tiny scale!).

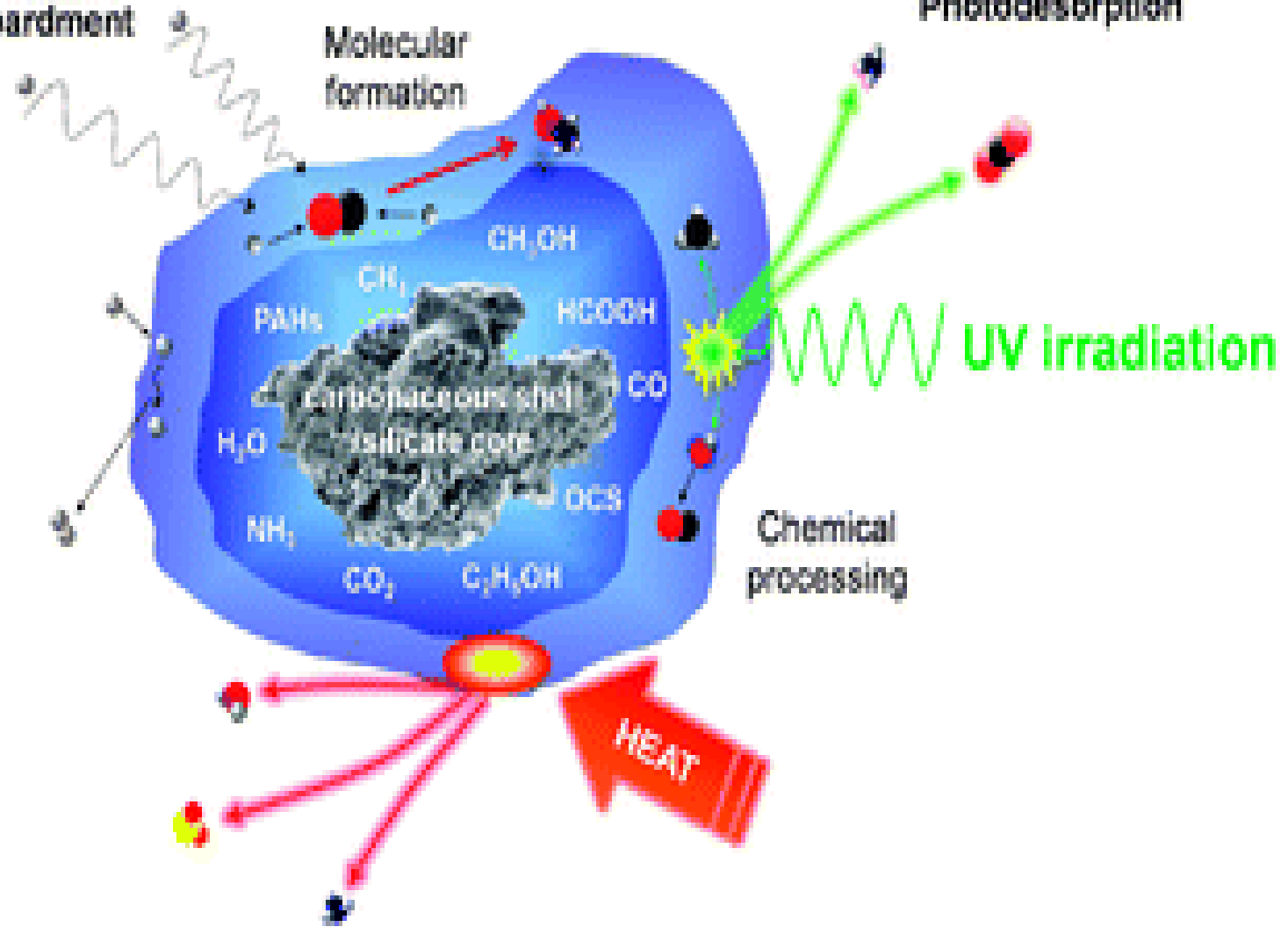
Il Modello di Greenberg (1983)

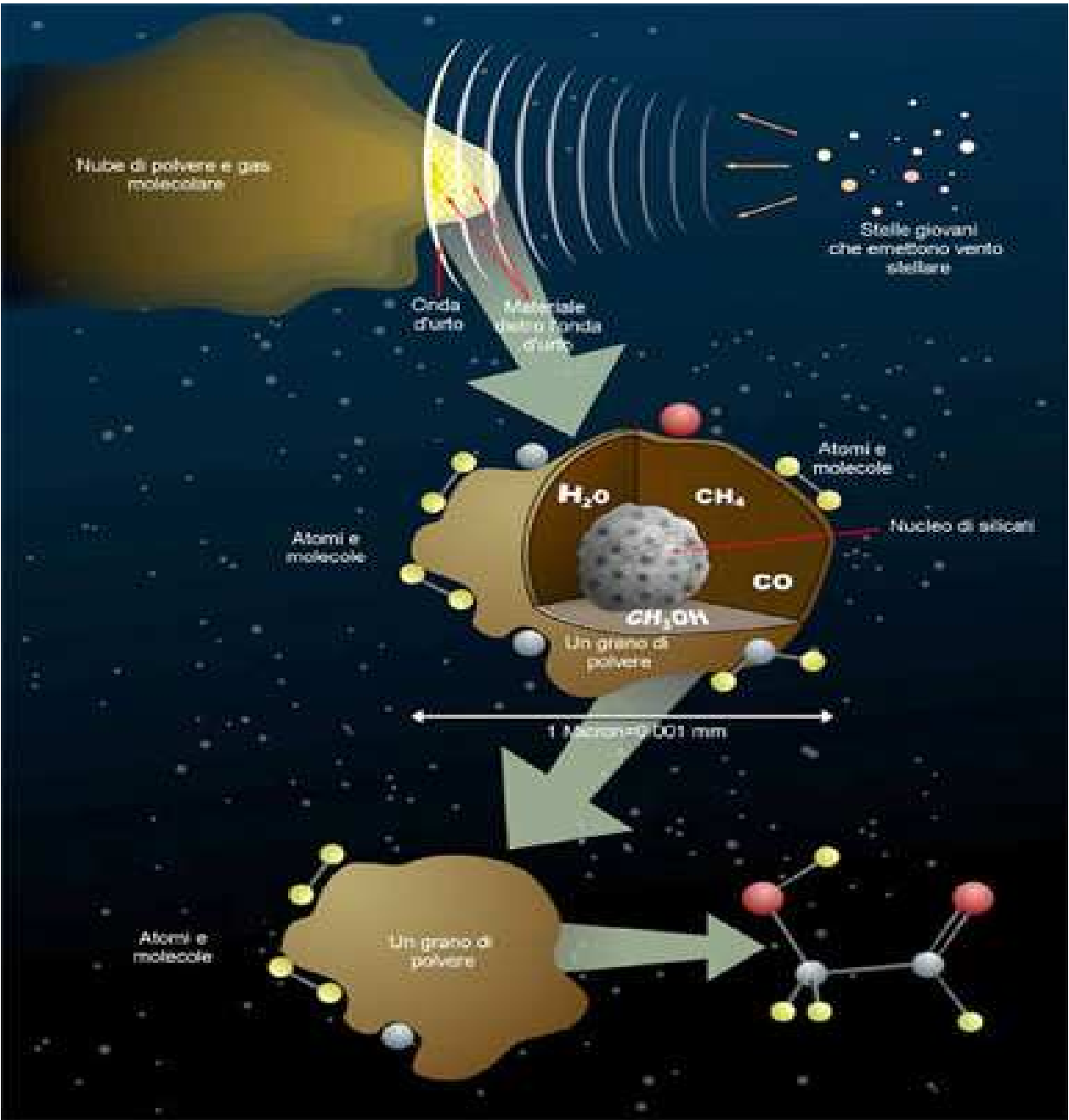


Gas-phase
bombardment

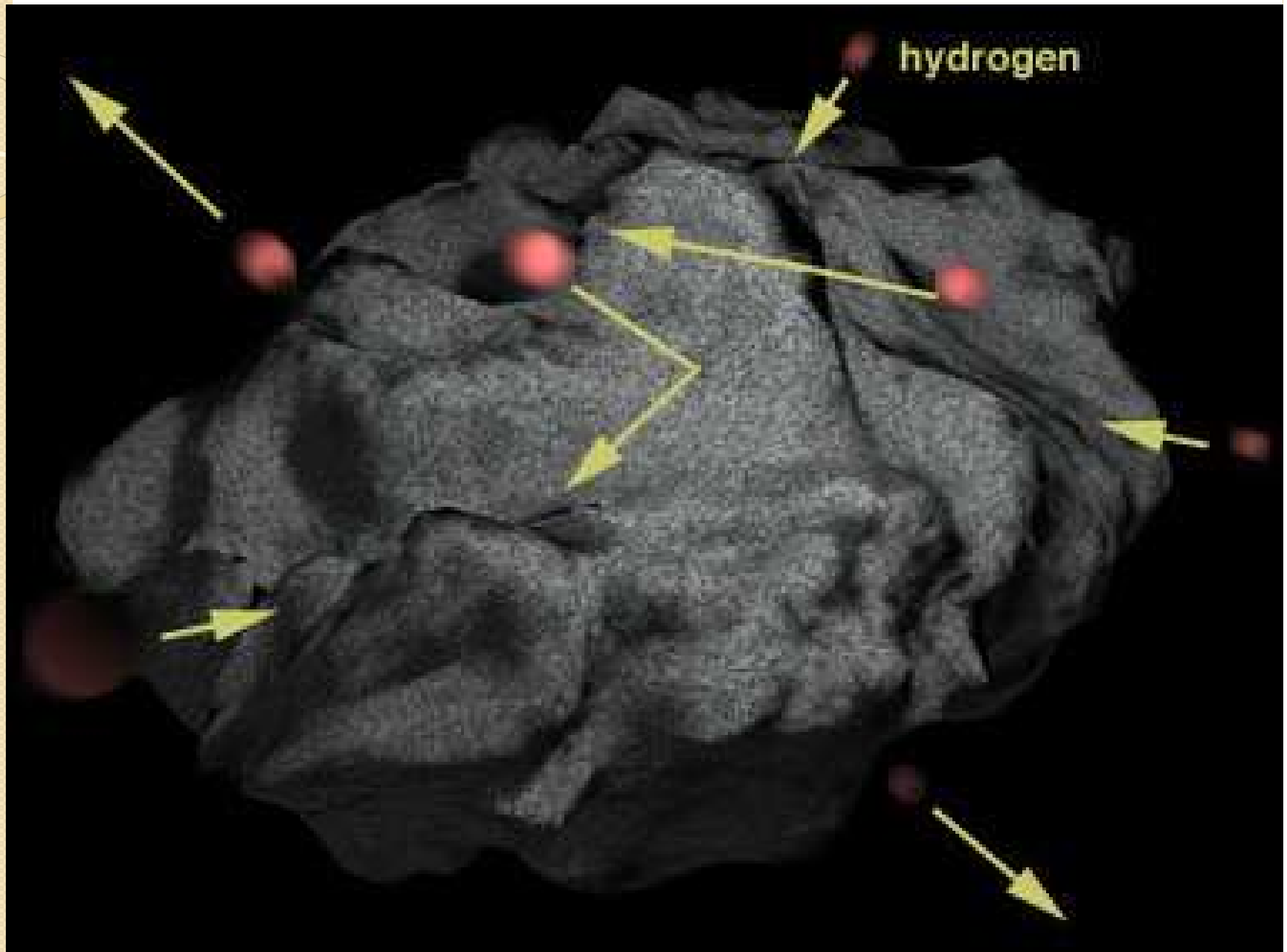
Molecular
formation

Photodesorption



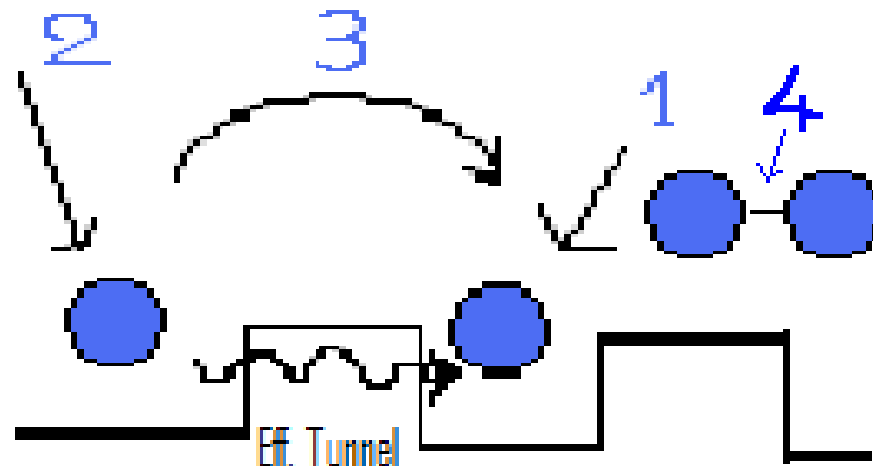


L'approccio di Hollenbach e Salpeter (1970)



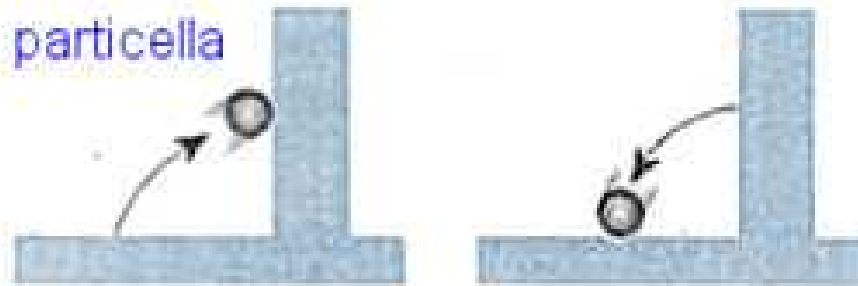
Chimica di superficie sui grani di polvere

I grani di polvere hanno una struttura irregolare che serve da **“rifugio”** per le molecole del gas interstellare, **schermandole dalla radiazione UV** (la cui λ è minore delle dimensioni dei grani) e fungendo da **catalizzatori** per la sintesi di nuove molecole attraverso diversi tipi di reazioni chimiche.



FISICA CLASSICA

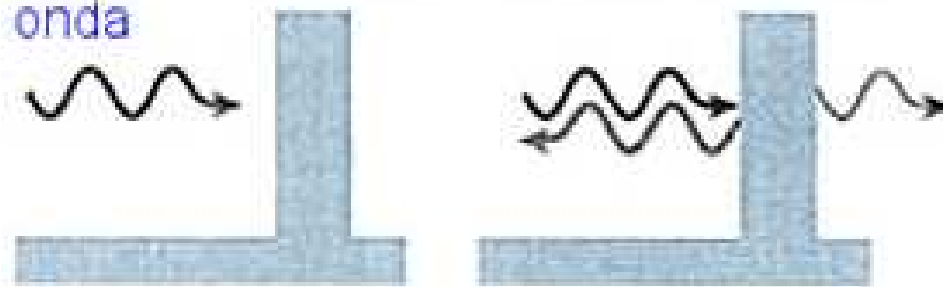
particella



la particella è
riflessa dalla barriera

FISICA QUANTISTICA

onda



parte dell'onda
è riflessa e parte
attraversa la barriera

La critica di Smoluchowsy

- I mantelli ghiacciati dei grani hanno una struttura amorfa e non cristallina.
Ciò implica una mancanza di periodicità nella distribuzione delle molecole e quindi dei siti di adsorbimento.
- La ricombinazione avviene solo in un ristretto intervallo di temperature ($10\text{K} < T < 30\text{K}$)
- In tal modo il tasso di formazione di H_2 si abbassa di almeno un fattore 1000.
- Si riapre il problema della formazione dell'idrogeno molecolare



Accretion Disks and Magnetic Fields in Astrophysics

Astrophysics and Space Science Library Volume
156, 1989, pp 185-190

Monte Carlo Simulation of H₂ Formation by Cosmic Rays: Effect of the Grain Model

D.Averna, V. Pirronello

Chemistry in Space

NATO ASI Series Volume 323, 1990, pp 447-449

The Effect of the Choice of the Grain Model on the H₂ Production by Cosmic Rays in Dense Clouds

D.Averna, V. Pirronello



Cosmic Rays, Supernovae and the Interstellar Medium

NATO ASI Series Volume 337, 1991, pp 81-85

Comparison Between Greenberg and Mathis Models of Grains for the H₂ Formation Induced by Cosmic Rays

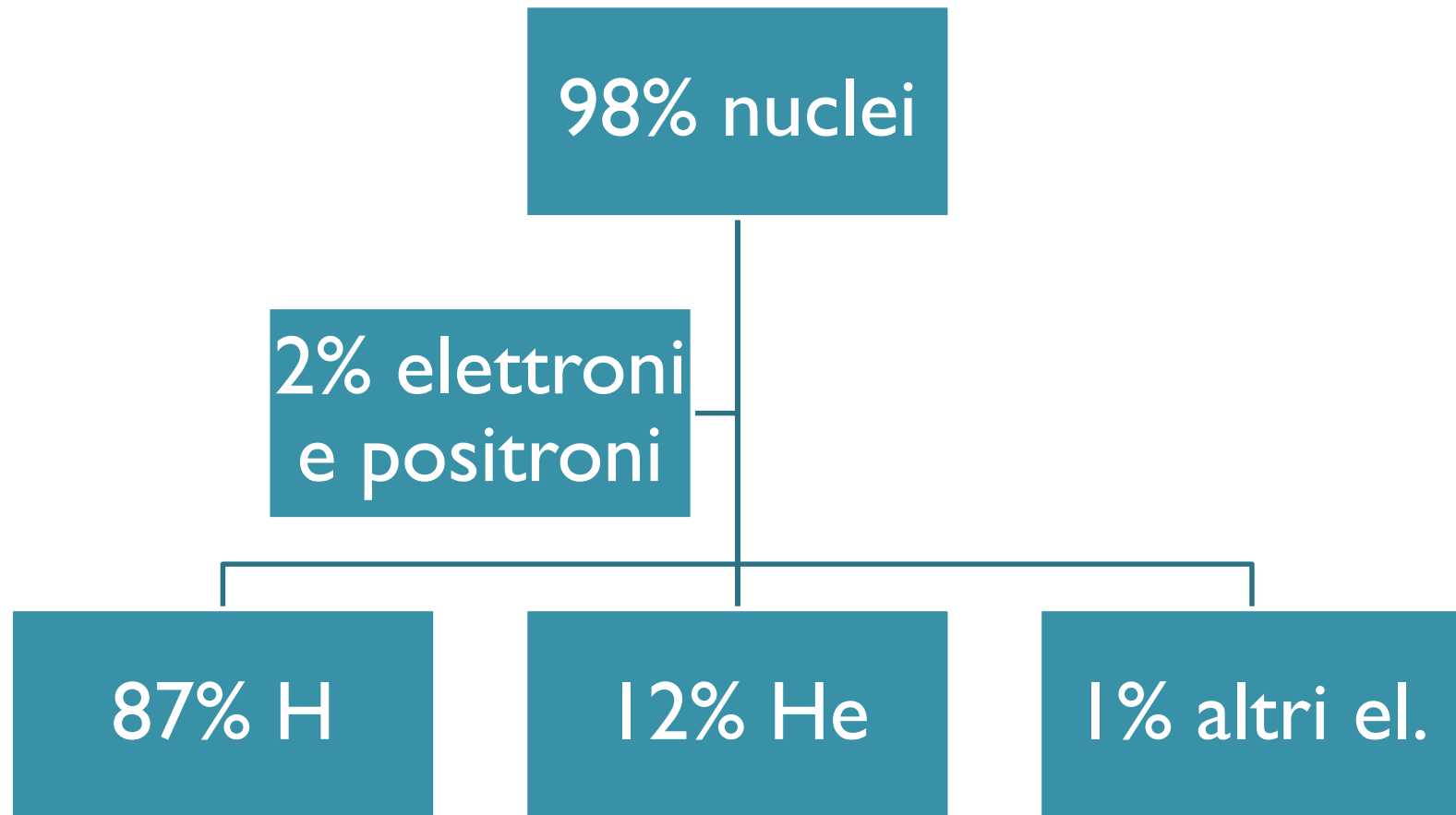
D. Aversa¹, V. Pirronello², W. L. Brown³, L. J. Lanzerotti³

1 Istituto di Astronomia Università di Catania

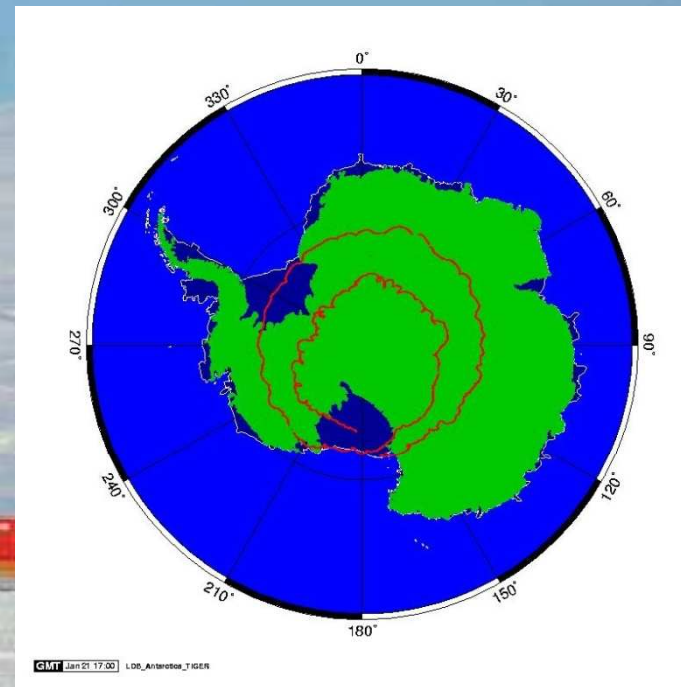
2 Dipartimento di Fisica, Università della Calabria

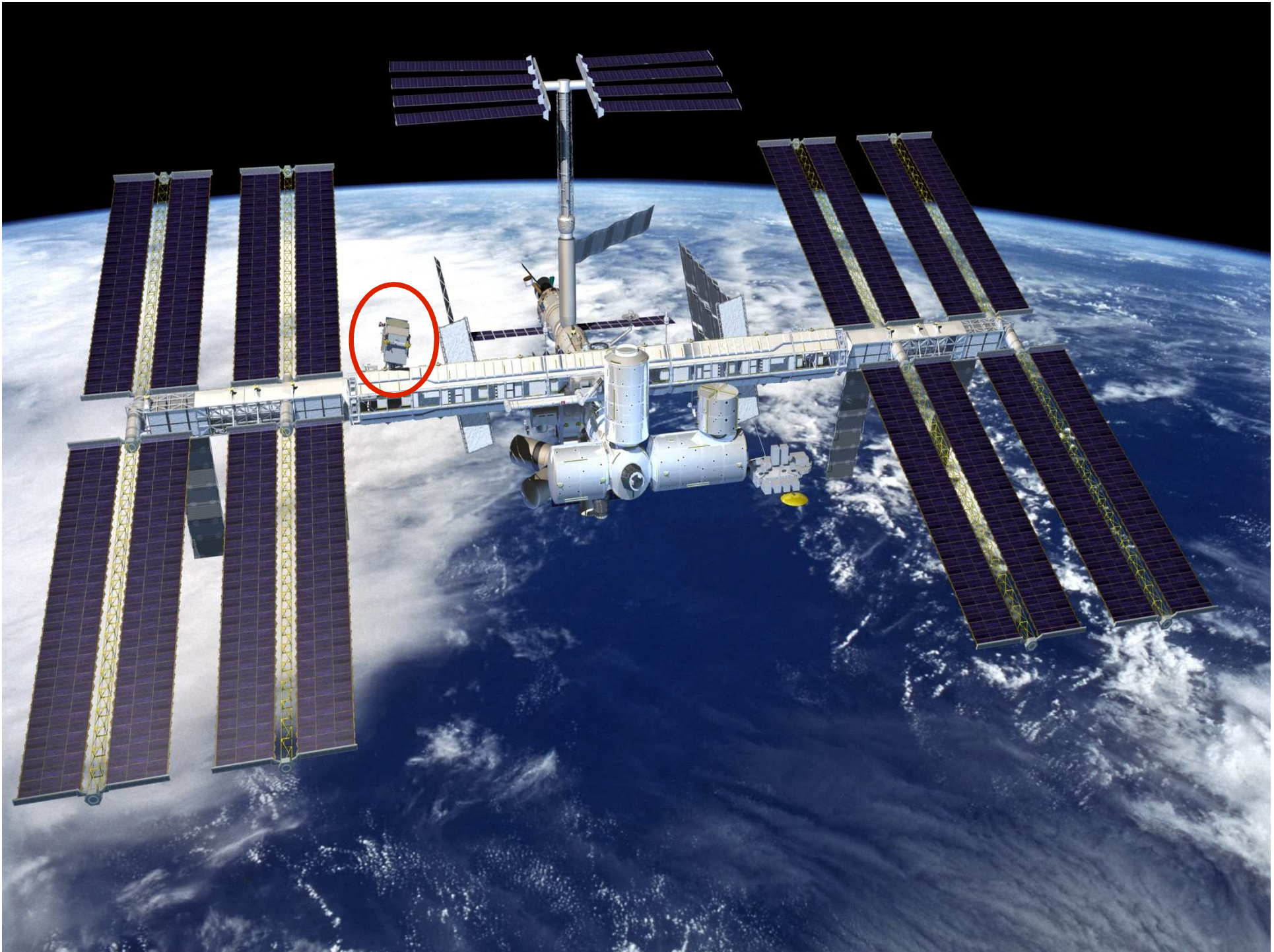
3 AT & Bell Laboratories, Murray Hill, NJ, USA

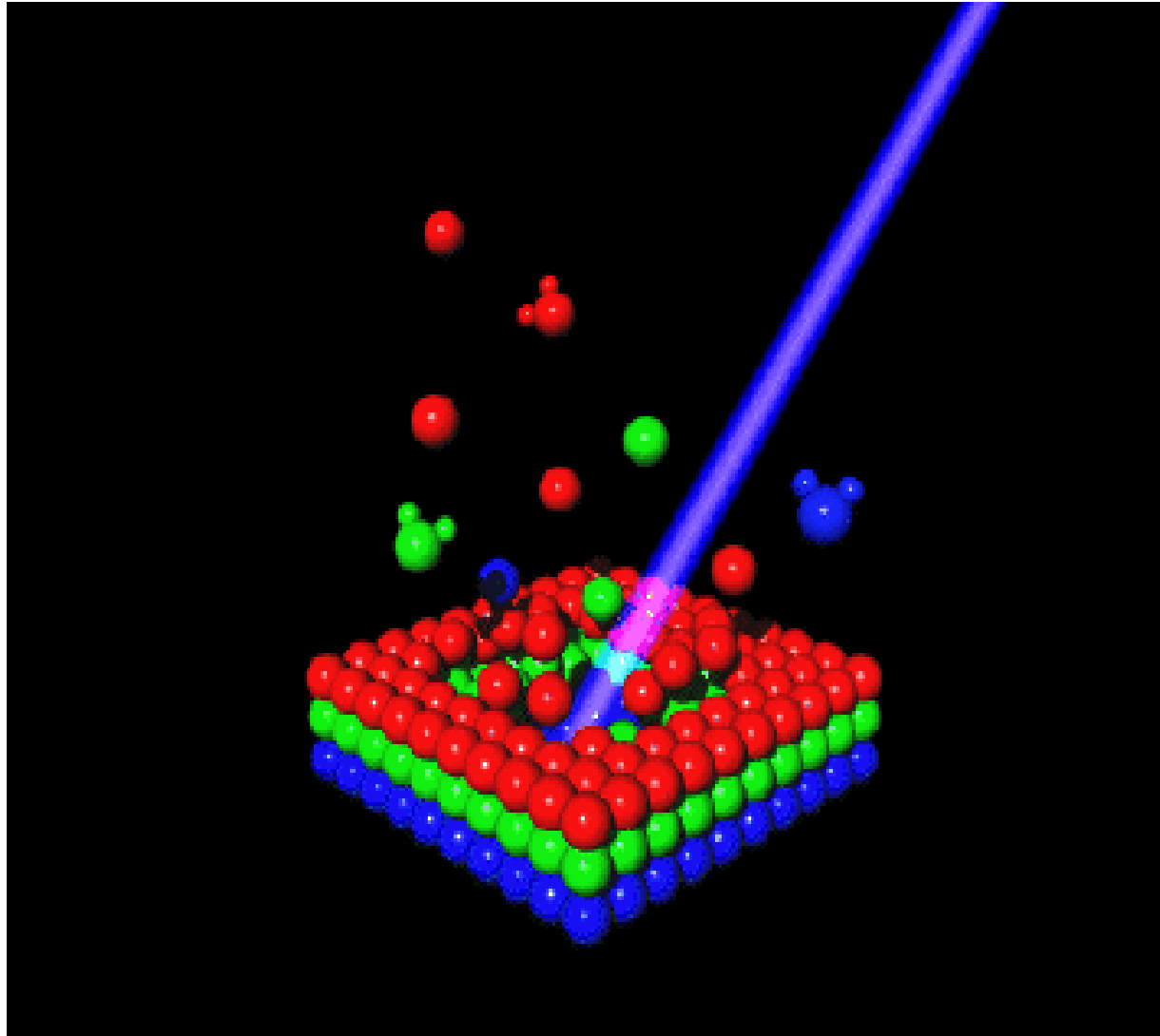
I Raggi Cosmici



Esperimenti su pallone





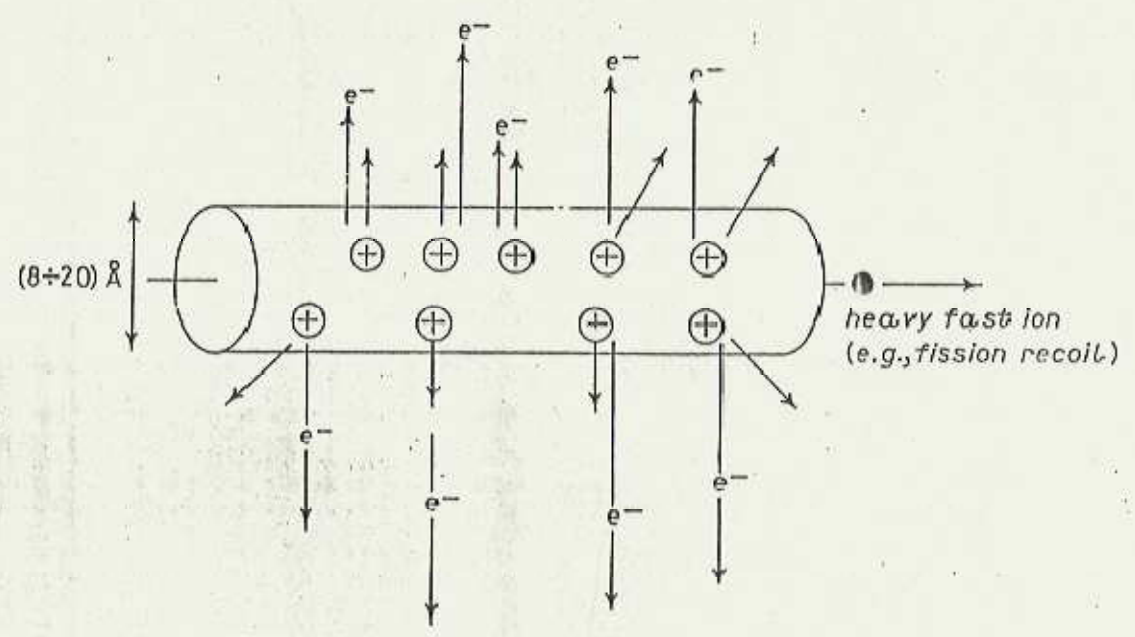


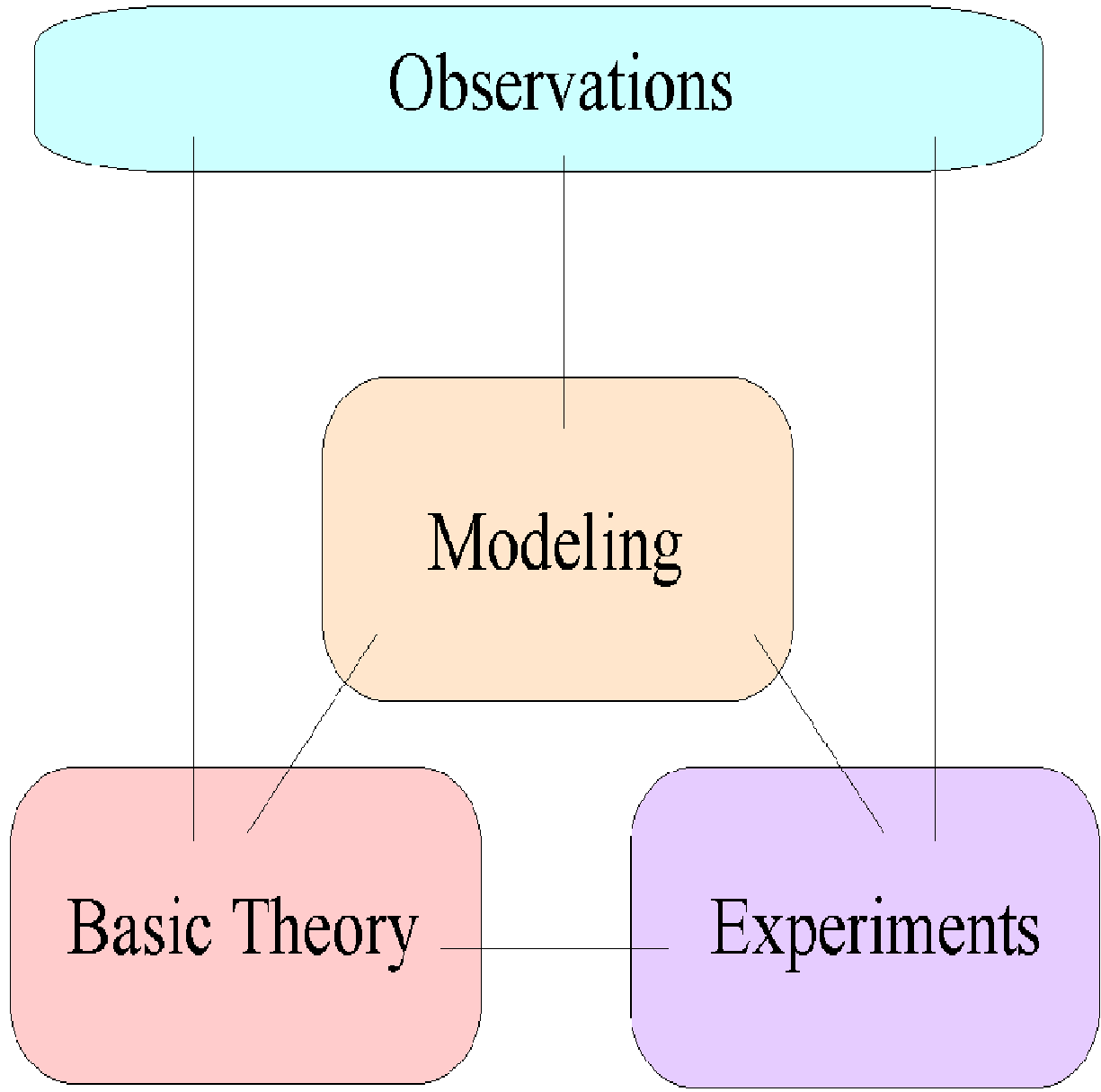


Al passaggio di un raggio cosmico

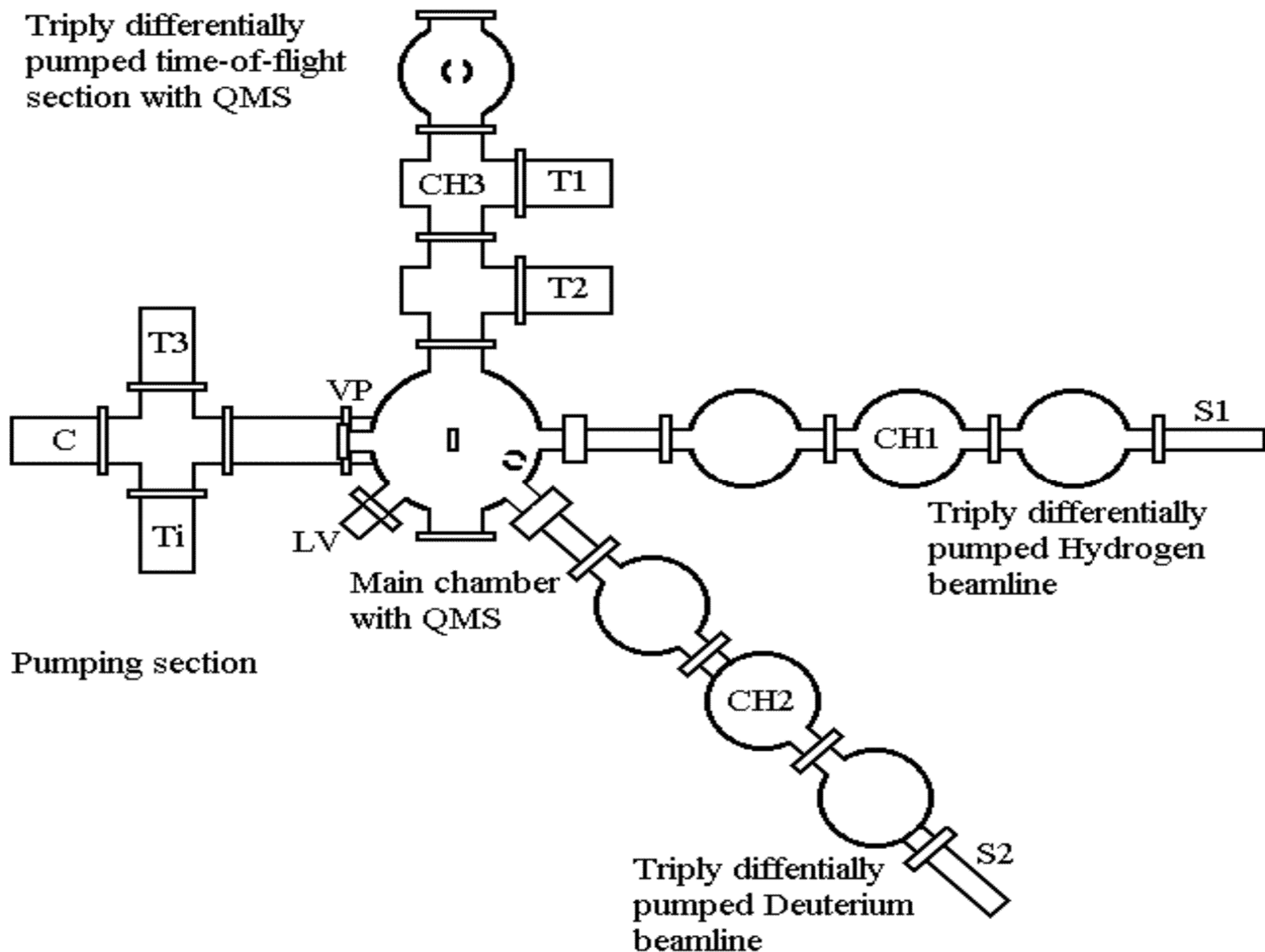
- Il rilascio di energia in una regione cilindrica intorno alla traccia frammenta le molecole.
- L'energia rimane confinata per un tempo sufficientemente lungo da essere “termalizzata”.
- I frammenti molecolari acquistano mobilità e possono combinarsi con differenti partner.

6





Triply differentially pumped time-of-flight section with QMS

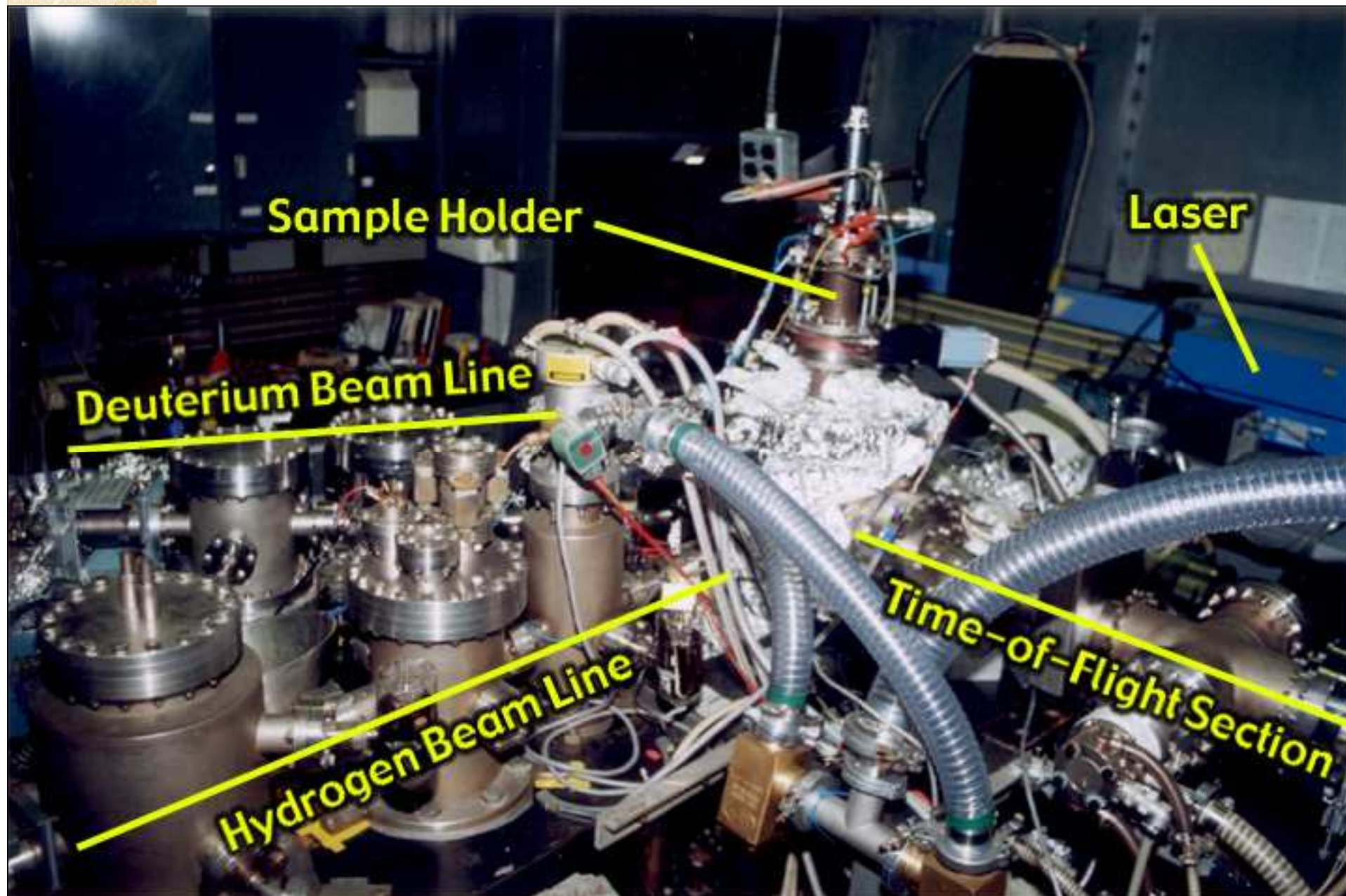


Pumping section

Main chamber with QMS

Triply differentially pumped Hydrogen beamline

Triply differentially pumped Deuterium beamline



Sample Holder

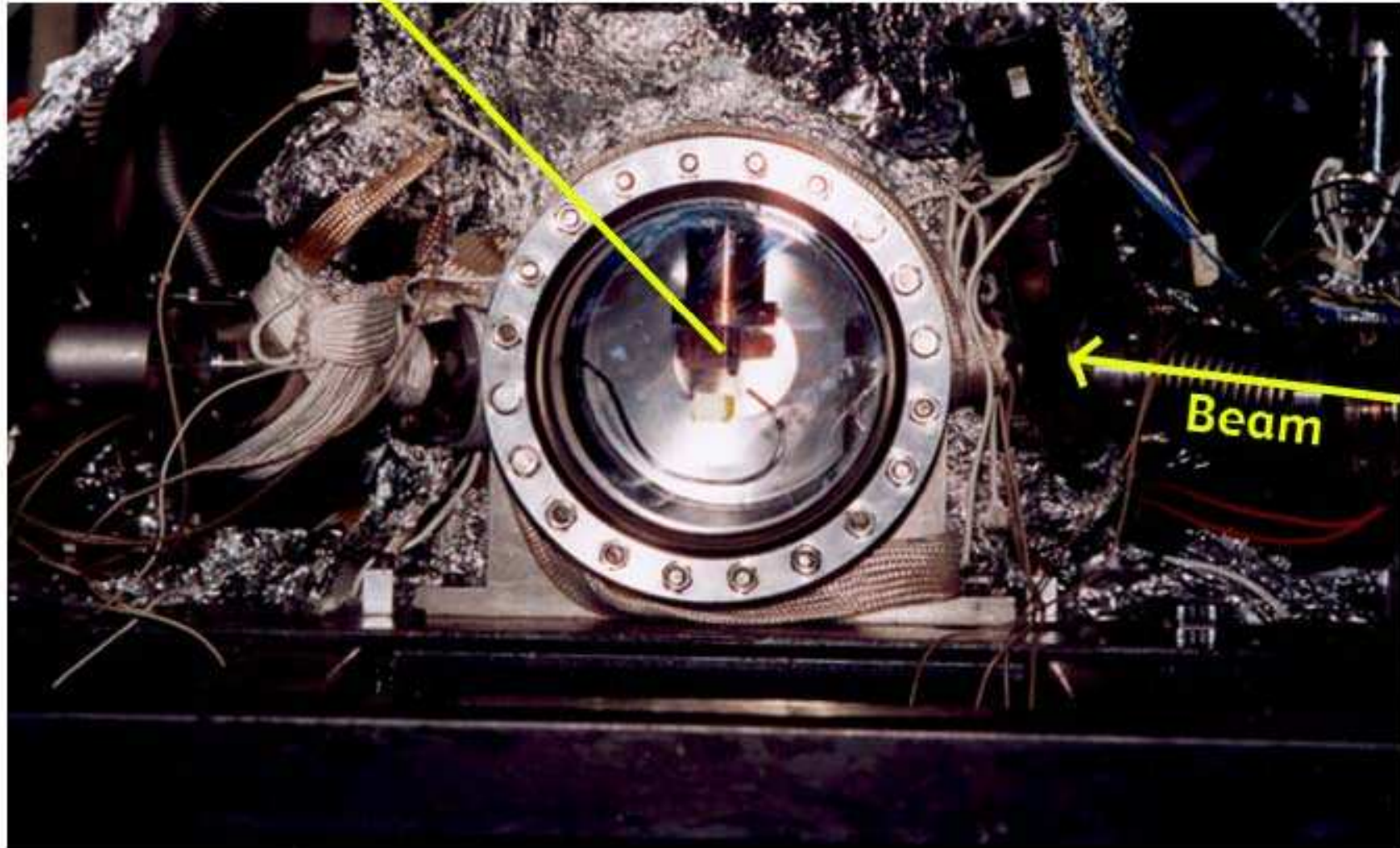
Laser

Deuterium Beam Line

Hydrogen Beam Line

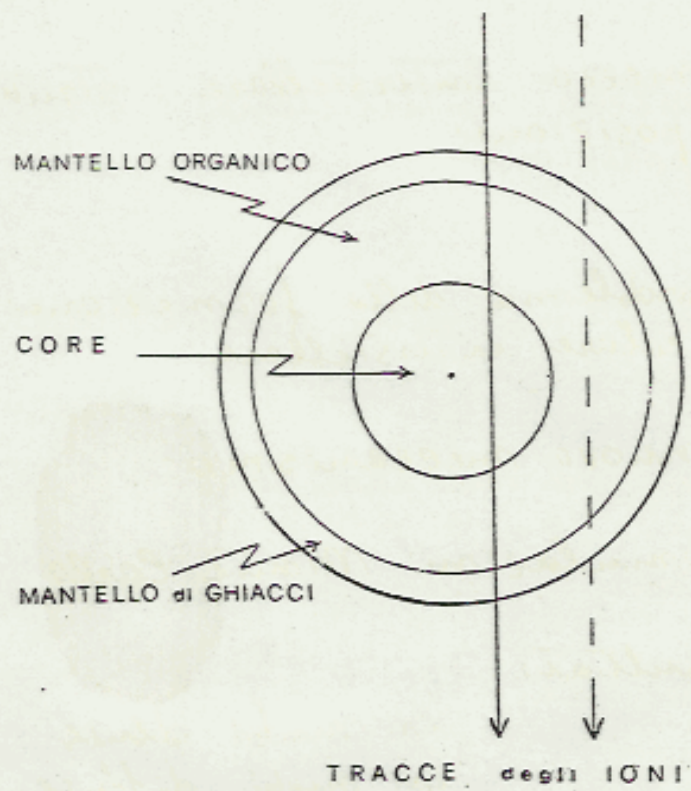
Time-of-Flight Section

Sample Holder



Il Modello

- **Grani:** sferici di Mathis e Greenberg (messi a confronto) di dimensioni comprese tra $400 \mu\text{m}$ e $4000 \mu\text{m}$.
- **CR:** H e He di bassa energia ($E < 1 \text{ GeV}$).
- **Nubi:** molecolari secondo il modello di Boland e De Jong (1984), con campi magnetici trascurabili.
- **Trattazione indipendente dal tempo** (erosione dei grani trascurabile, specie in nubi dense)

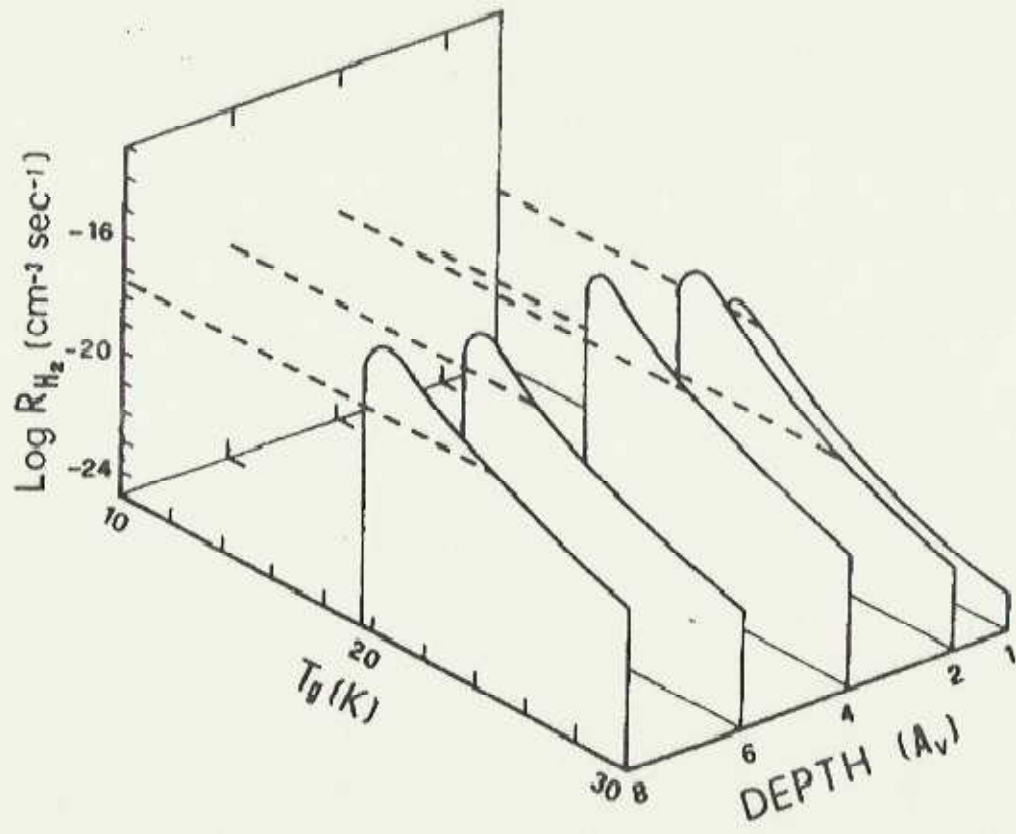


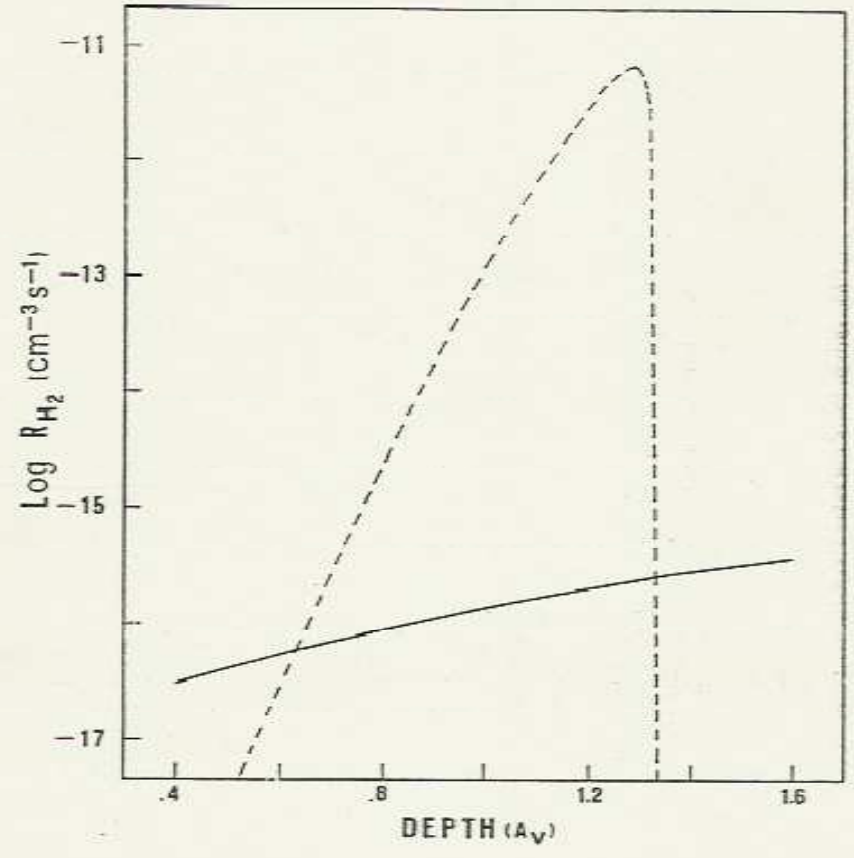
La Simulazione al computer

- Tipo Montecarlo: generazione casuale associata al tipo di ione cosmico, alla sua energia e al punto d'impatto sul grano.
- I tassi di produzione di H_2 misurati in laboratorio a 1.5 MeV sono stati rapportati alle energie in gioco, secondo una relazione lineare.
- Bombardamento con 40000 CR
- Differenti profondità nella nube

I Risultati

La produzione di H_2 secondo il meccanismo di bombardamento da CR (linea tratteggiata) è più efficiente della ricombinazione (curva continua) sia in nubi diffuse che in nubi dense.





Nuovi fronti di ricerca

- Intervista a *Simone Casolo* del Dipartimento di Chimica dell'Università di Milano (13 Maggio 2013)

<http://www.ilsussidiario.net/News/Scienze/2013/5/14/SCOPERTE-II-supercomputer-rivela-agli-astrochimici-come-l-idrogeno-diventa-H2/392854/>

Conclusioni

- chimica in fase gassosa
- chimica di superficie
- fotolisi dei grani di polvere

sembrano al momento vie capaci di spiegare la sintesi, nella materia interstellare, di molecole anche alquanto complesse

Nell'Universo sono dunque disponibili i "*mattoni*" della vita in grande abbondanza.

**CHONPS → MOLECOLE INORGANICHE →
MOLECOLE ORGANICHE → VITA?**

NON È DETTO! Ma si spera!

**PER PARLARE DI ORGANISMI VIVENTI BISOGNA ANDARE BEN
OLTRE**

IL SALTO SUCCESSIVO NECESSARIO
è che queste piccole molecole organiche diano origine
per
POLIMERIZZAZIONE
a macromolecole
proteine, acidi nucleici e soprattutto RNA



FINE