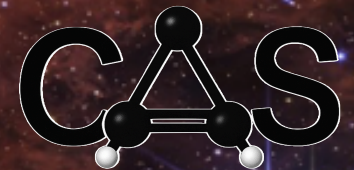


Le nostre origini astrochimiche

Paola Caselli

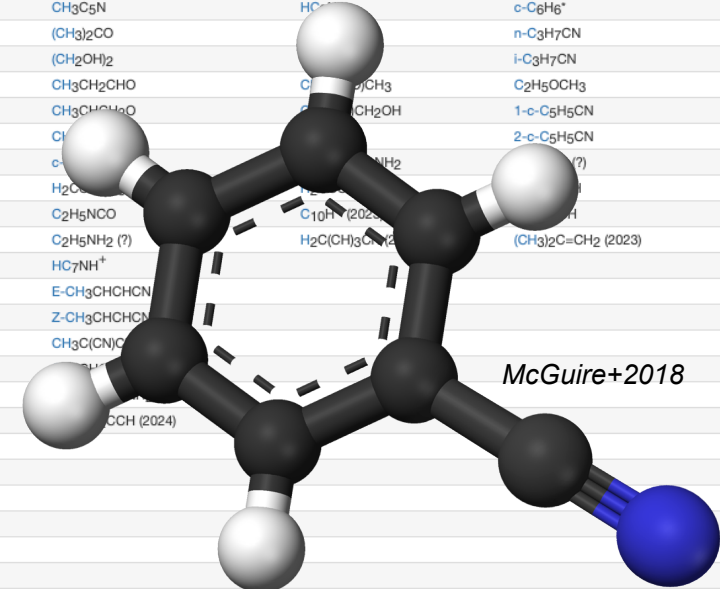
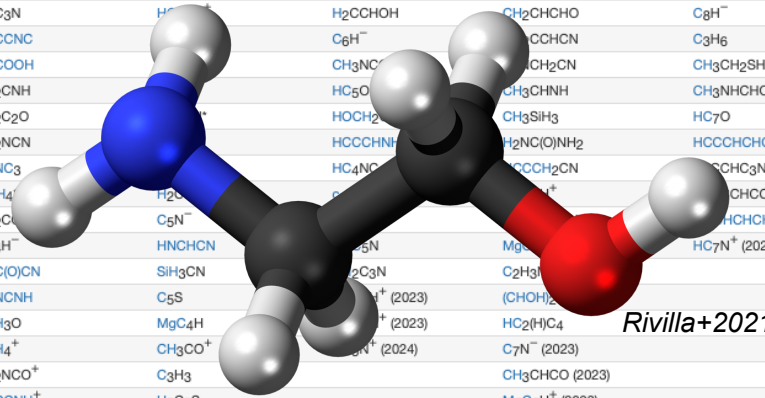
Centro per gli Studi Astrochimici

Istituto Max Planck per la Fisica Extraterrestre



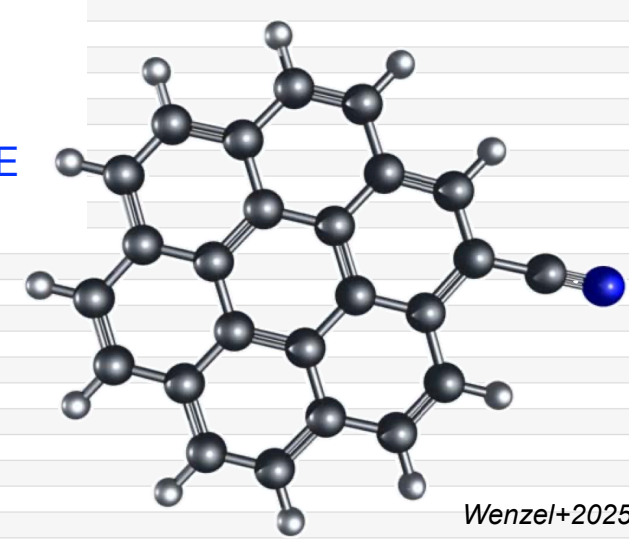
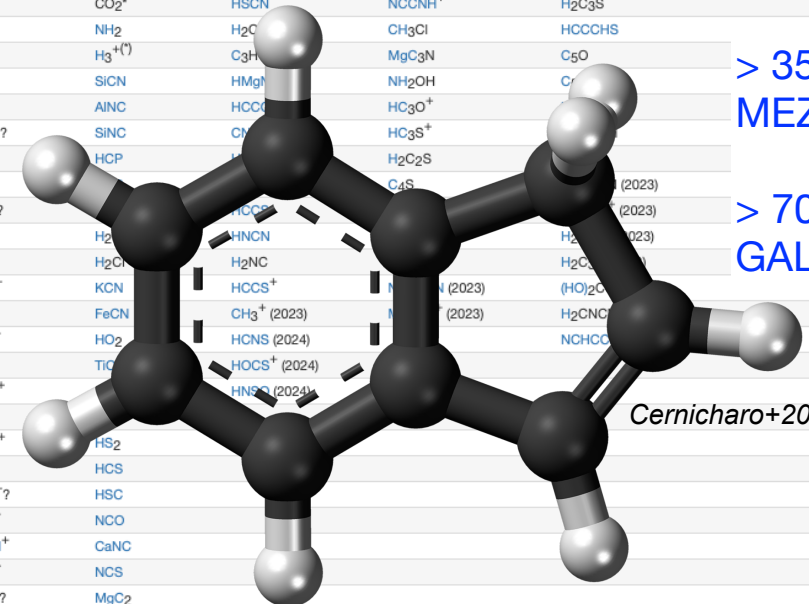
Credits: NASA, ESA, CSA, and STScI

2 atoms	3 atoms	4 atoms	5 atoms	6 atoms	7 atoms	8 atoms	9 atoms	10 atoms	11 atoms	12 atoms	>12 atoms
H ₂	C ₃ ⁺	c-C ₃ H	C ₅ ⁺	C ₅ H	C ₆ H	CH ₃ C ₃ N	CH ₃ C ₄ H	CH ₃ C ₅ N	HC ₇ N	c-C ₆ H ₆ ⁺	C ₆₀ ⁺
AlF	C ₂ H	I-C ₃ H	C ₄ H	I-H ₂ C ₄	CH ₂ CHCN	HC(O)OCH ₃	CH ₃ CH ₂ CN	(CH ₃) ₂ CO	C ₁₀ H ₇ N	n-C ₃ H ₇ CN	C ₇₀ ⁺
AlCl	C ₂ O	C ₃ N	C ₄ Si	C ₂ H ₄ ⁺	CH ₃ C ₂ H	CH ₃ COOH	(CH ₃) ₂ O	(CH ₂ OH) ₂	C ₁₀ H ₇ N	I-C ₃ H ₇ CN	C ₆₀ ⁺⁺
C ₂ ⁺⁺	C ₂ S	C ₃ O	I-C ₃ H ₂	CH ₃ CN	HC ₅ N	C ₇ H	CH ₃ CH ₂ OH	CH ₃ CH ₂ CHO	C ₁₀ H ₇ N	C ₂ H ₅ OCH ₃	c-C ₆ H ₅ CN
CH	CH ₂	C ₃ S	c-C ₃ H ₂	CH ₃ NC	CH ₃ CHO	C ₆ H ₂	HC ₇ N	CH ₃ CH ₂ CH ₂ O	C ₁₀ H ₇ N	1-c-C ₅ H ₅ CN	HC ₁₁ N
CH ⁺	HCN	C ₂ H ₂ ⁺	H ₂ C ₂ CN	CH ₃ OH	CH ₃ NH ₂	CH ₂ OHCHO	C ₈ H	CH ₃ CH ₂ CH ₂ OH	C ₁₀ H ₇ N	2-c-C ₅ H ₅ CN	1-C ₁₀ H ₇ CN
CN	HCO	NH ₃	CH ₄ ⁺	CH ₃ SH	c-C ₂ H ₄ O	I-HC ₆ H ⁺	CH ₃ C(O)NH ₂	c-C ₆ H ₅ CHO	C ₁₀ H ₇ N	C ₂ H ₅ CHO	2-C ₁₀ H ₇ CN
CO	HCO ⁺	HCCN	HC ₃ N	H ₂ C ₂ CH ₂	H ₂ CCHOH	CH ₂ CHCHO	C ₈ H ⁺	H ₂ C ₂ CH ₂ CH ₂ OH	C ₁₀ H ₇ N	C ₂ H ₅ CHO	c-C ₉ H ₈
CO ⁺	HCS ⁺	HCNH ⁺	HCCNC	C ₆ H ⁺	C ₆ H ⁺	CCHCN	C ₃ H ₆	C ₂ H ₅ NCO	C ₁₀ H ₇ N	C ₂ H ₅ CHO	1-c-C ₅ H ₅ CCH
CP	HOC ⁺	HNCO	HCCOH	CH ₃ NC	CH ₃ NC	CH ₂ CN	CH ₃ CH ₂ SH	C ₂ H ₅ NH ₂ (?)	C ₁₀ H ₇ N	(CH ₃) ₂ C=CH ₂ (2023)	2-c-C ₅ H ₅ CCH
SiC	H ₂ O	HNCS	H ₂ CNH	HC ₅ N	HC ₅ N	CH ₃ CHNH	CH ₃ NHCHO	HC ₇ NH ⁺	C ₁₀ H ₇ N	C ₂ H ₅ CHO	c-C ₅ H ₄ CCH ₂
HCl	H ₂ S	HOCO ⁺	H ₂ C ₂ O	HOCH ₂	HOCH ₂	CH ₃ SiH ₃	HC ₇ O	E-CH ₃ CHCHCN	C ₁₀ H ₇ N	C ₂ H ₅ CHO	2-C ₉ H ₇ CN
KCl	HNC	H ₂ CO	H ₂ CNC	HCCCHNH	HCCCHNH	H ₂ NC(O)NH ₂	HCCCHCHCN	Z-CH ₃ CHCHCN	C ₁₀ H ₇ N	C ₂ H ₅ CHO	C ₆ H ₅ CCH (2023)
NH	HNO	H ₂ CN	HNC ₃	HC ₄ NC	HC ₄ NC	CCH ₂ CN	CCH ₂ CN	CH ₃ C(CN)C	C ₁₀ H ₇ N	C ₂ H ₅ CHO	CH ₃ OCH ₂ CH ₂ O (2024)
NO	MgCN	H ₂ CS	SiH ₄	H ₂ C ₂ CH ₂	H ₂ C ₂ CH ₂	C ₅ N ⁺	Mg ₂ C ₃ N	C ₂ H ₃	C ₁₀ H ₇ N	C ₂ H ₅ CHO	
NS	MgNC	H ₃ O ⁺	H ₂ C ₂	C ₅ N ⁺	C ₅ N ⁺	HCNCHN	HCNCHN	HC ₇ N ⁺ (2024)	C ₁₀ H ₇ N	C ₂ H ₅ CHO	
NaCl	N ₂ H ⁺	c-SiC ₃	C ₄ H ⁺	HC(O)CN	HC(O)CN	C ₅ S	C ₂ H ₃	HC ₇ N ⁺ (2024)	C ₁₀ H ₇ N	C ₂ H ₅ CHO	
OH	N ₂ O	CH ₃ ⁺	HC(O)CN	SiH ₃ CN	SiH ₃ CN	C ₅ S	C ₂ H ₃	HC ₇ N ⁺ (2024)	C ₁₀ H ₇ N	C ₂ H ₅ CHO	
PN	NaCN	C ₃ N ⁺	HNCNH	C ₅ S	C ₅ S	HCNCHN	HCNCHN	HC ₇ N ⁺ (2024)	C ₁₀ H ₇ N	C ₂ H ₅ CHO	
SO	OCS	PH ₃	CH ₃ O	MgC ₄ H	MgC ₄ H	HC ₂ (H)C ₄	C ₇ N ⁺ (2023)	HC ₇ N ⁺ (2024)	C ₁₀ H ₇ N	C ₂ H ₅ CHO	
SO ⁺	SO ₂	HCNO	NH ₄ ⁺	CH ₃ CO ⁺	CH ₃ CO ⁺	C ₇ N ⁺ (2023)	C ₇ N ⁺ (2023)	HC ₇ N ⁺ (2024)	C ₁₀ H ₇ N	C ₂ H ₅ CHO	
SiN	c-SiC ₂	HOCN	H ₂ NCO ⁺	C ₃ H ₃	C ₃ H ₃	CH ₃ CHCO (2023)	CH ₃ CHCO (2023)	HC ₇ N ⁺ (2024)	C ₁₀ H ₇ N	C ₂ H ₅ CHO	
SiO	CO ₂ ⁺	HSCN	NCCNH ⁺	H ₂ C ₃ S	H ₂ C ₃ S	MgC ₆ H ⁺ (2023)	MgC ₆ H ⁺ (2023)	HC ₇ N ⁺ (2024)	C ₁₀ H ₇ N	C ₂ H ₅ CHO	
SiS	NH ₂	H ₂ C	CH ₃ Cl	HCCCHS	HCCCHS			HC ₇ N ⁺ (2024)	C ₁₀ H ₇ N	C ₂ H ₅ CHO	
CS	H ₃ ⁺ (⁺)	C ₃ H	MgC ₃ N	C ₅ O	C ₅ O			HC ₇ N ⁺ (2024)	C ₁₀ H ₇ N	C ₂ H ₅ CHO	
HF	SiCN	HCN	NH ₂ OH	C ₆	C ₆			HC ₇ N ⁺ (2024)	C ₁₀ H ₇ N	C ₂ H ₅ CHO	
HD	AlNC	HCCN	HC ₃ O ⁺					HC ₇ N ⁺ (2024)	C ₁₀ H ₇ N	C ₂ H ₅ CHO	
FeO?	SiNC	CH ₃ ⁺ (2023)	HC ₃ S ⁺					HC ₇ N ⁺ (2024)	C ₁₀ H ₇ N	C ₂ H ₅ CHO	
O ₂	HCP	H ₂ C ₂ S						HC ₇ N ⁺ (2024)	C ₁₀ H ₇ N	C ₂ H ₅ CHO	
CF ⁺		C ₄ S						HC ₇ N ⁺ (2024)	C ₁₀ H ₇ N	C ₂ H ₅ CHO	
SiH?		HCCN						HC ₇ N ⁺ (2024)	C ₁₀ H ₇ N	C ₂ H ₅ CHO	
PO	H ₂	H ₂ NC						HC ₇ N ⁺ (2024)	C ₁₀ H ₇ N	C ₂ H ₅ CHO	
AlO	H ₂ C	HCCS ⁺						HC ₇ N ⁺ (2024)	C ₁₀ H ₇ N	C ₂ H ₅ CHO	
OH ⁺	KCN	CH ₃ ⁺ (2023)						HC ₇ N ⁺ (2024)	C ₁₀ H ₇ N	C ₂ H ₅ CHO	
CN ⁻	FeCN	HCNS (2024)						HC ₇ N ⁺ (2024)	C ₁₀ H ₇ N	C ₂ H ₅ CHO	
SH ⁺	HO ₂	HCCS ⁺ (2024)						HC ₇ N ⁺ (2024)	C ₁₀ H ₇ N	C ₂ H ₅ CHO	
SH	TiC	HNS ₂ (2024)						HC ₇ N ⁺ (2024)	C ₁₀ H ₇ N	C ₂ H ₅ CHO	
HCl ⁺								HC ₇ N ⁺ (2024)	C ₁₀ H ₇ N	C ₂ H ₅ CHO	
TiO								HC ₇ N ⁺ (2024)	C ₁₀ H ₇ N	C ₂ H ₅ CHO	
ArH ⁺	HS ₂							HC ₇ N ⁺ (2024)	C ₁₀ H ₇ N	C ₂ H ₅ CHO	
N ₂	HCS							HC ₇ N ⁺ (2024)	C ₁₀ H ₇ N	C ₂ H ₅ CHO	
NO ⁺ ?	HSC							HC ₇ N ⁺ (2024)	C ₁₀ H ₇ N	C ₂ H ₅ CHO	
NS ⁺	NCO							HC ₇ N ⁺ (2024)	C ₁₀ H ₇ N	C ₂ H ₅ CHO	
HeH ⁺	CaNC							HC ₇ N ⁺ (2024)	C ₁₀ H ₇ N	C ₂ H ₅ CHO	
PO ⁺	NCS							HC ₇ N ⁺ (2024)	C ₁₀ H ₇ N	C ₂ H ₅ CHO	
SIP ?	MgC ₂							HC ₇ N ⁺ (2024)	C ₁₀ H ₇ N	C ₂ H ₅ CHO	
FeC (2023)	HSO (2023)							HC ₇ N ⁺ (2024)	C ₁₀ H ₇ N	C ₂ H ₅ CHO	
	CaC ₂ (2024)							HC ₇ N ⁺ (2024)	C ₁₀ H ₇ N	C ₂ H ₅ CHO	

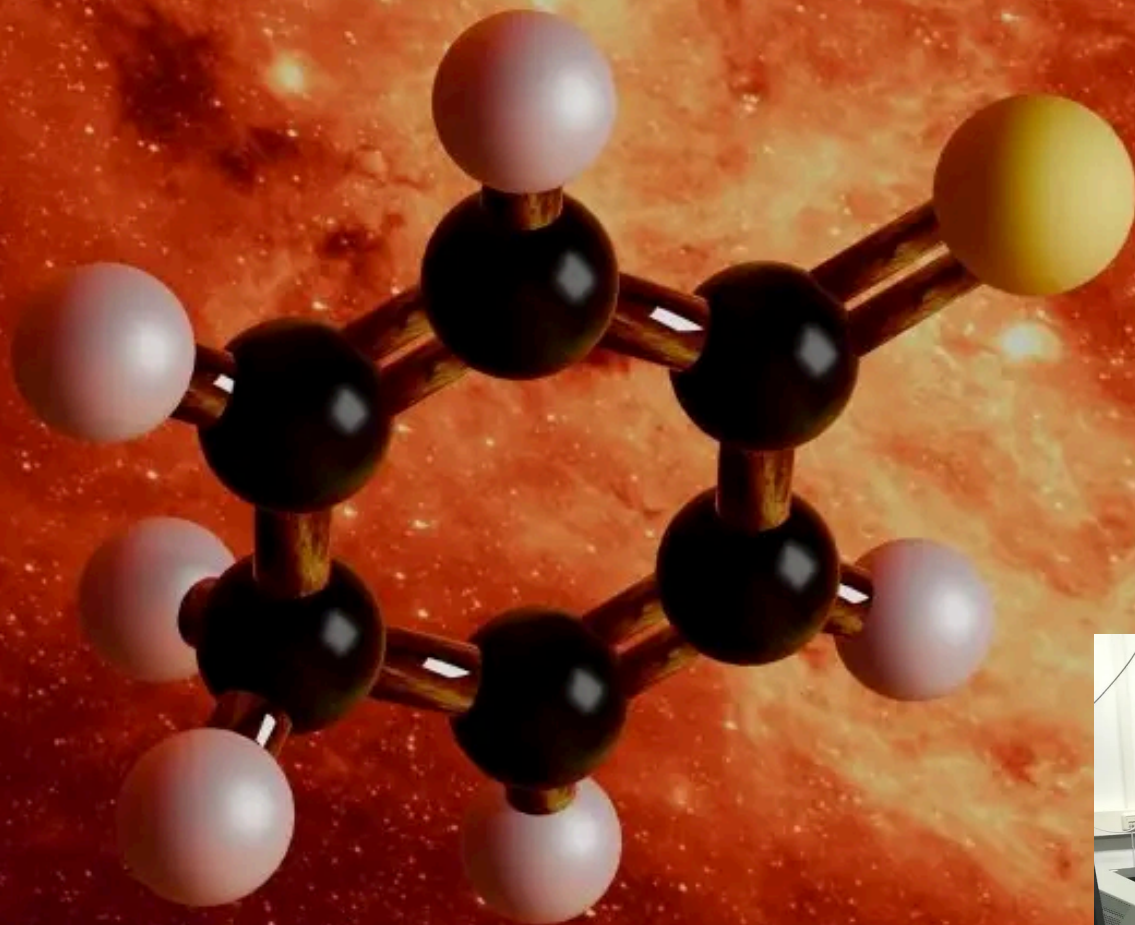


> 350 MOLECOLE OSSERVATE NEL
MEZZO INTERSTELLARE

> 70 MOLECOLE OSSERVATE IN ALTRE
GALASSIE



**Studio in laboratorio e
scoperta nello spazio
della più grande
molecola contenente
zolfo ed importante
per la chimica
prebiotica**



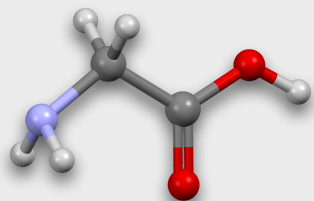
*Araki, Sanz-Novo, Endres, Caselli+2026
Nature Astronomy*



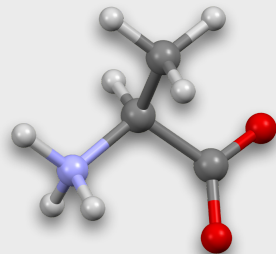
I meteoriti primitivi contengono molecole prebiotiche, i mattoni della vita



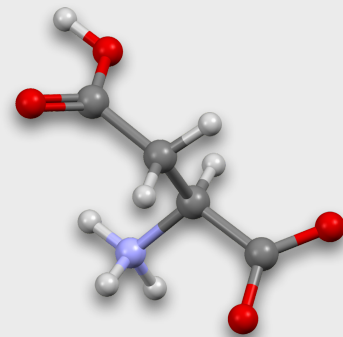
Nei meteoriti primitivi sono stati identificati >200 aminoacidi (gli esseri viventi sulla Terra ne usano 20), acidi grassi, tutte le basi dell'RNA e del DNA (adenina, citosina, guanina, timina, uracile), ribosio.



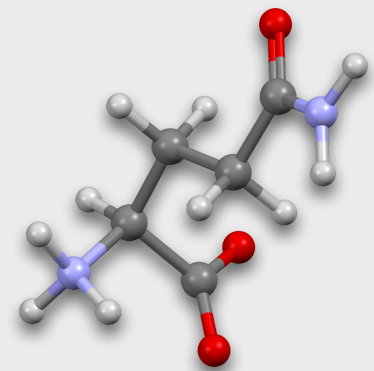
Glycine



L-Alanine



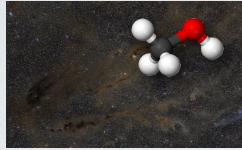
L-Aspartic Acid



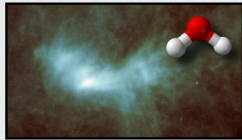
L-Glutamine



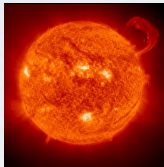
- Distanze astronomiche



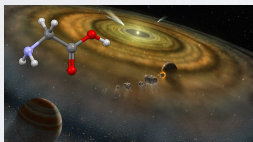
- Bioelementi, nubi scure ed i mattoni della vita



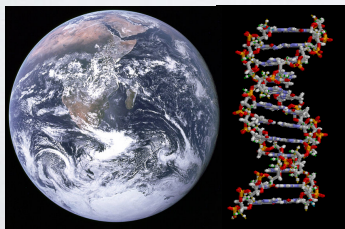
- Le nubi pre-stellari



- La nascita delle stelle



- La formazione dei pianeti



- L'origine della vita sulla Terra

Distanze Astronomiche:

La nostra città

100,000 cm = 1 km



Distanze Astronomiche:

La nostra città

100,000 cm = 1 km

x 10,000



Distanze Astronomiche:

*il nostro pianeta,
la Terra*

~10,000 km



Distanze Astronomiche:

*il nostro pianeta,
la Terra*

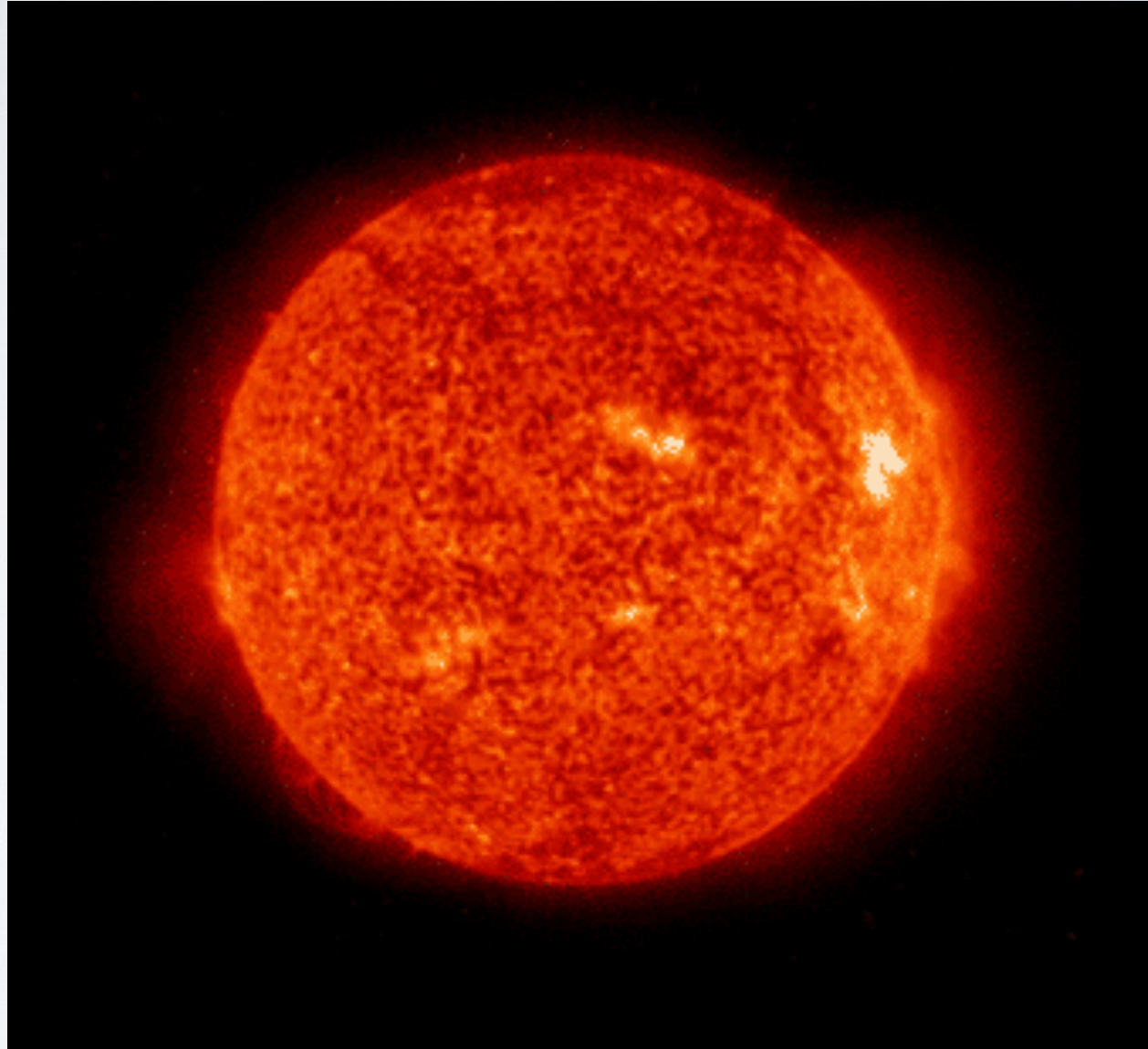
~10,000 km

x 100



Distanze Astronomiche: *la nostra stella, il Sole*

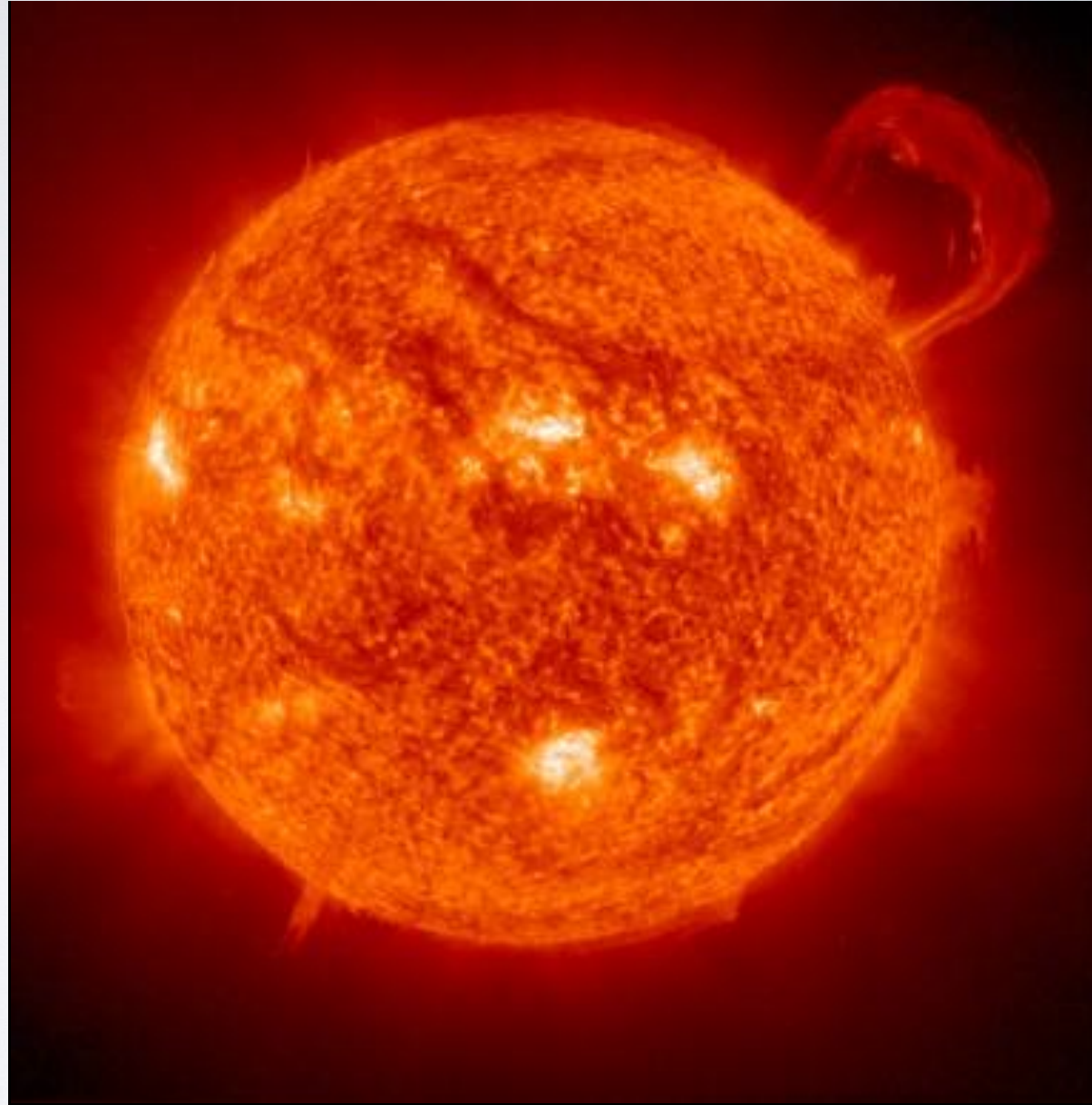
~1,000,000 km



Distanze Astronomiche: *la nostra stella, il Sole*

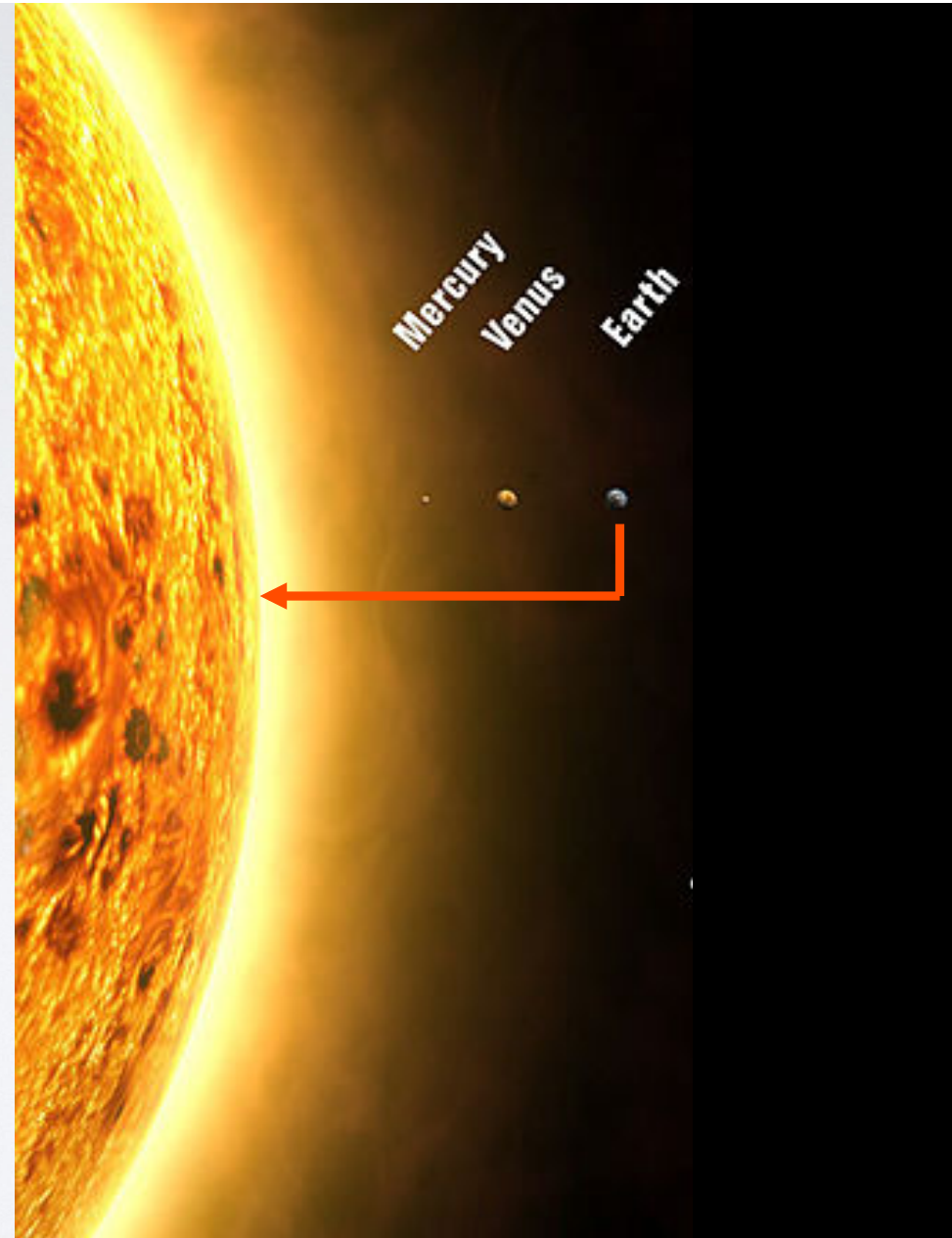
~1,000,000 km

x 100



Distanze Astronomiche: *La distanza Terra-Sole*

~100,000,000 km
=
 10^8 km



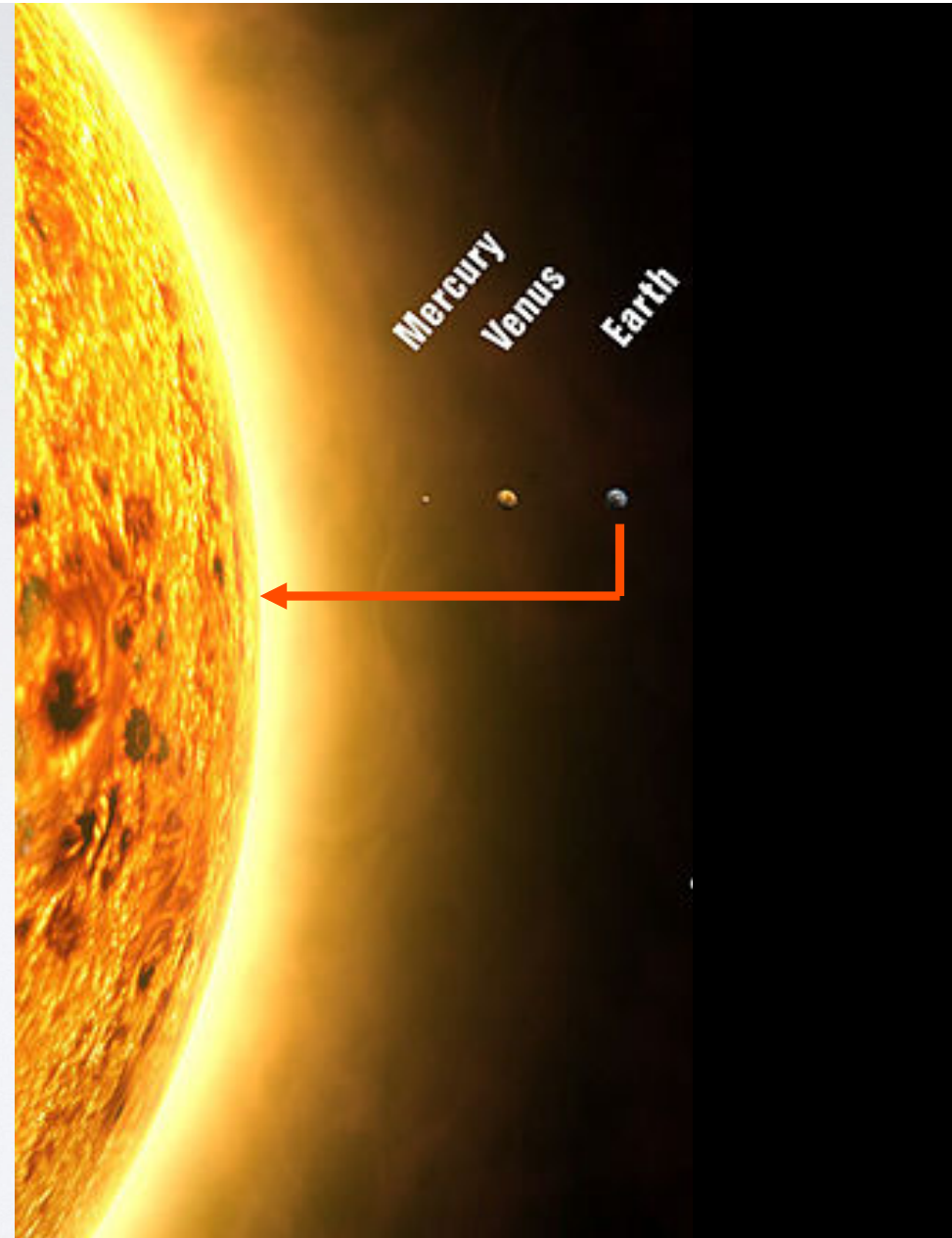
Distanze Astronomiche: *La distanza Terra-Sole*

~100,000,000 km

=

10^8 km

x 100,000



Distanze Astronomiche: *i confini del nostro sistema solare*

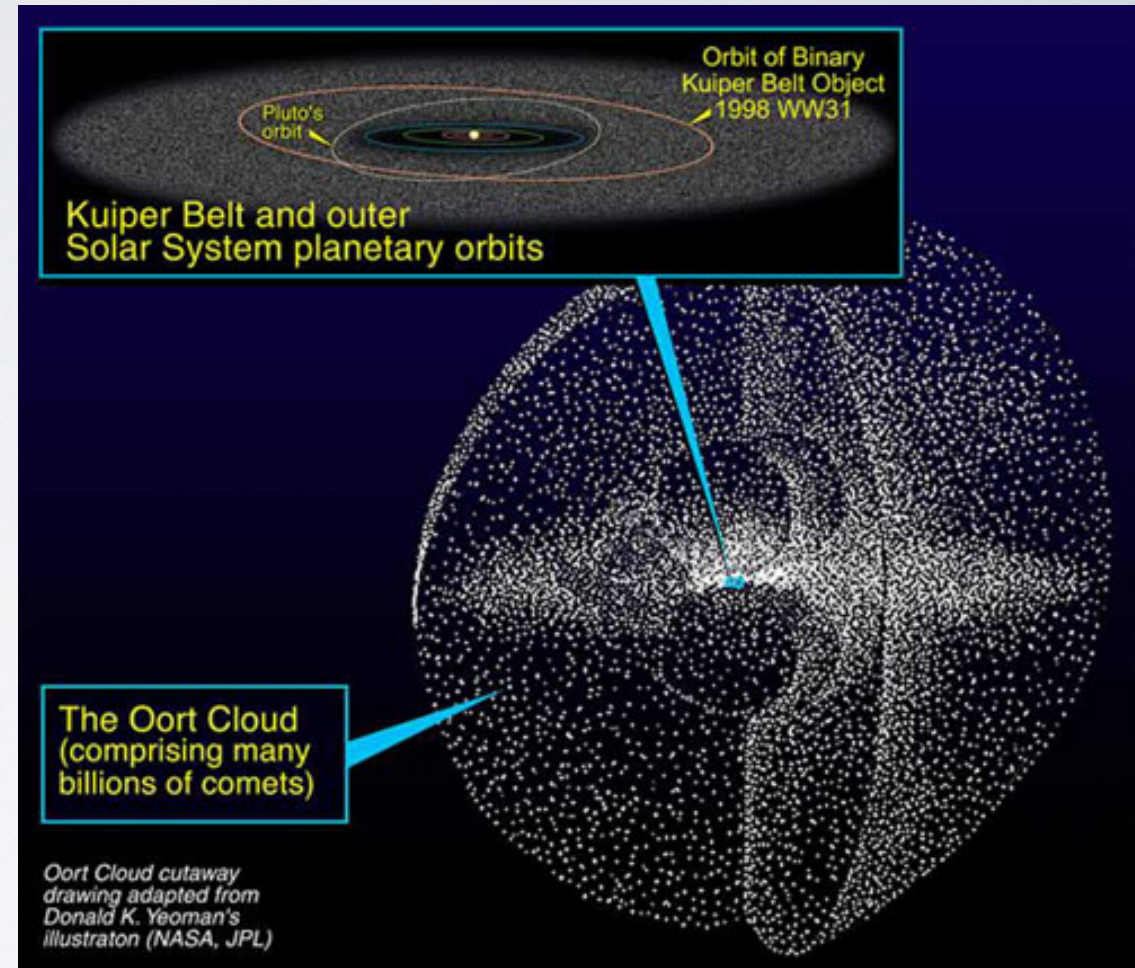
~10,000,000,000,000 km

=

10^{13} km

≈

1 anno luce



Distanze Astronomiche: *i confini del nostro sistema solare*

~10,000,000,000,000 km

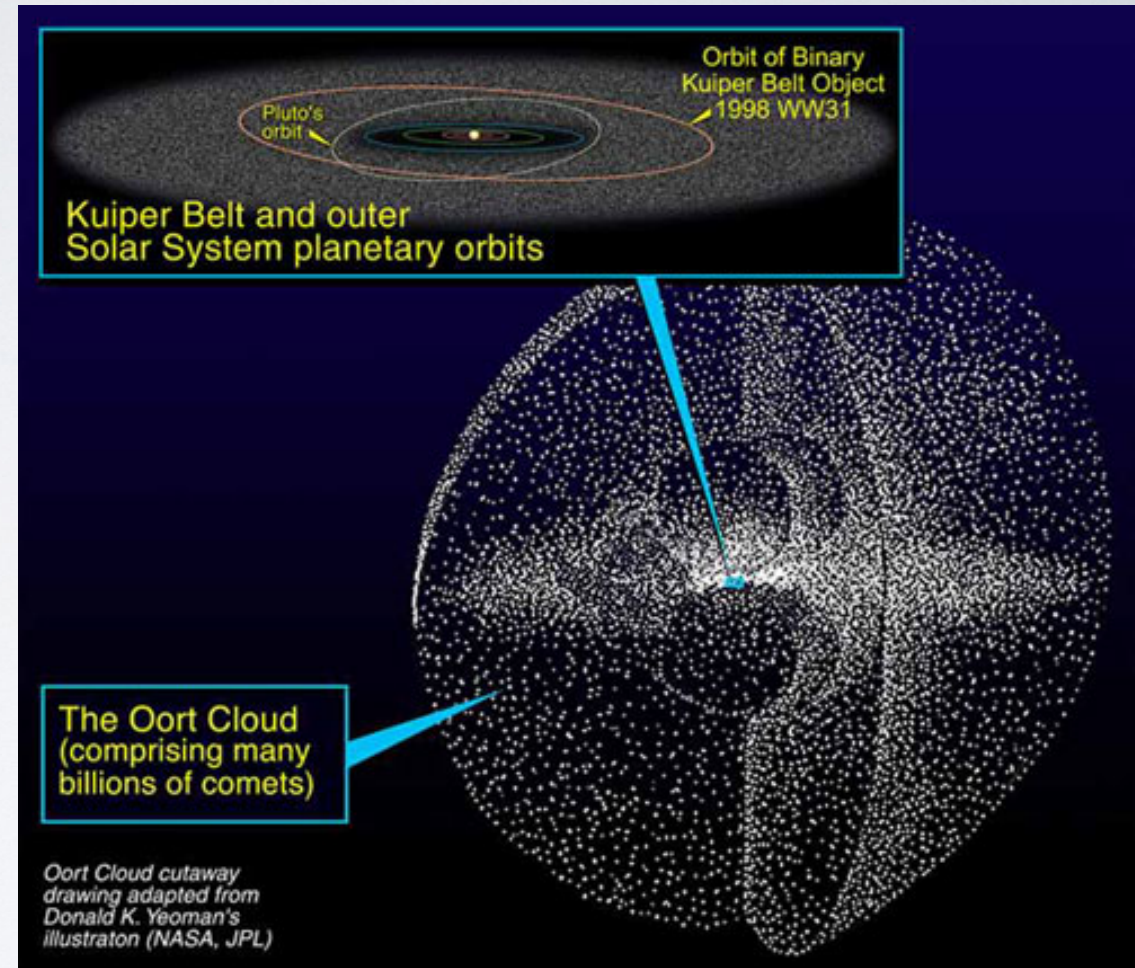
=

10^{13} km

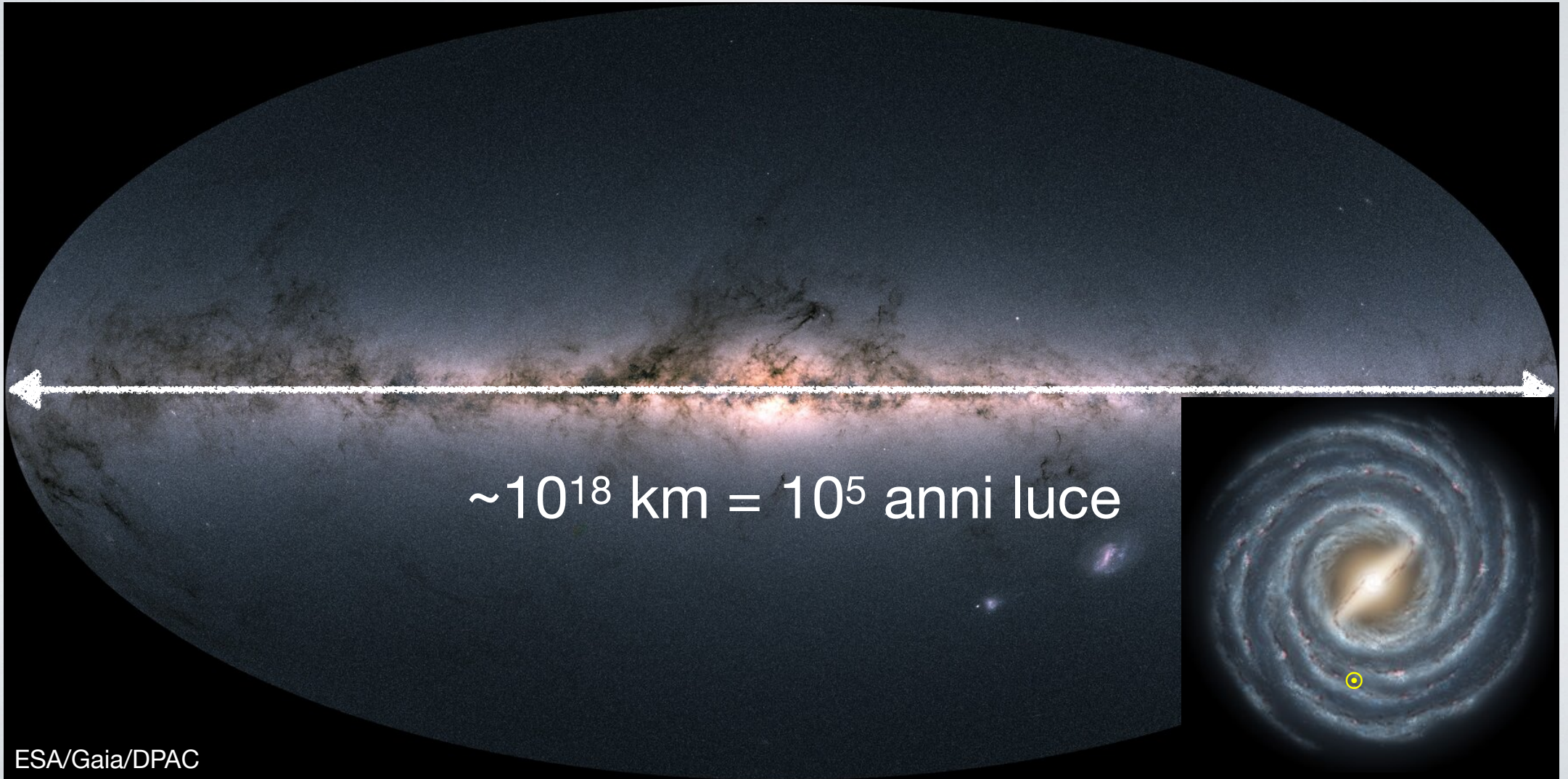
≈

1 anno luce

x 100,000



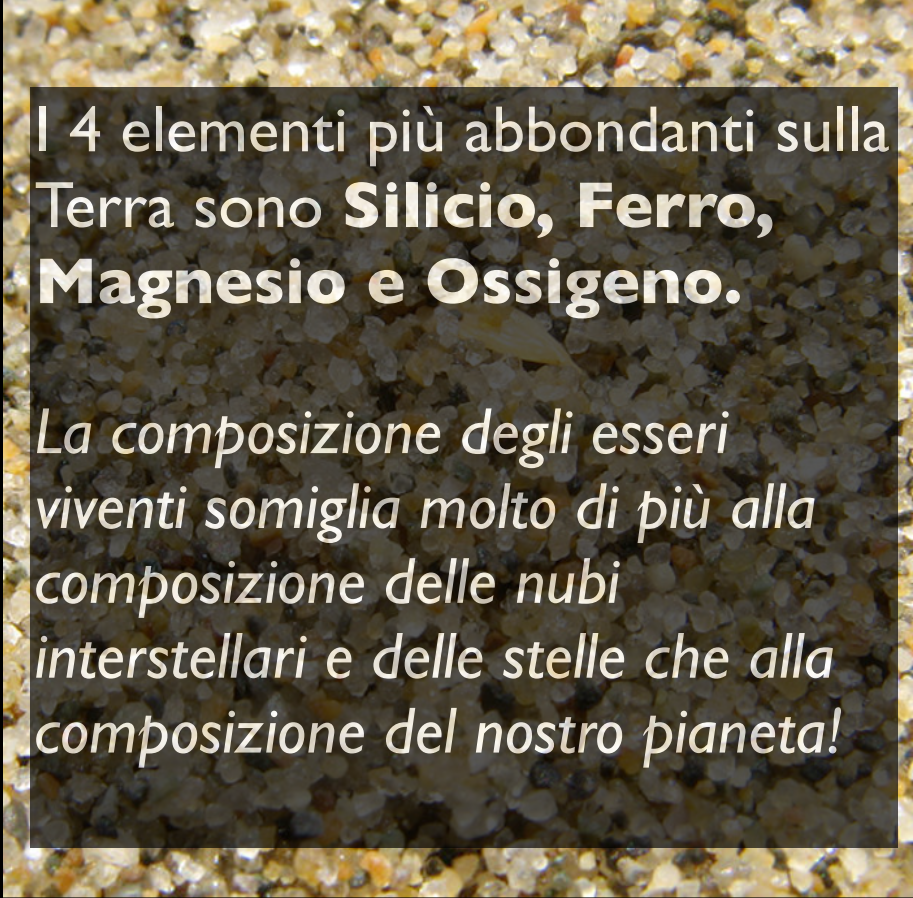
Distanze Astronomiche: *la nostra Galassia, la Via Lattea*



I BIOELEMENTI

Di cosa sono fatti gli esseri viventi?

In natura ci sono 83 elementi stabili, ma noi siamo costituiti (per il 95%) da solo 4 elementi: **H, O, C, N!**



I 4 elementi più abbondanti sulla Terra sono **Silicio, Ferro, Magnesio e Ossigeno.**

La composizione degli esseri viventi somiglia molto di più alla composizione delle nubi interstellari e delle stelle che alla composizione del nostro pianeta!

LA PRODUZIONE DEI BIOELEMENTI

Stelle Massicce: C, N, O, F, K, Na, Mg, P, S, Cl, Ca, Zn, Se, Fe



Stelle simili al Sole: C, N



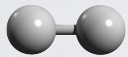
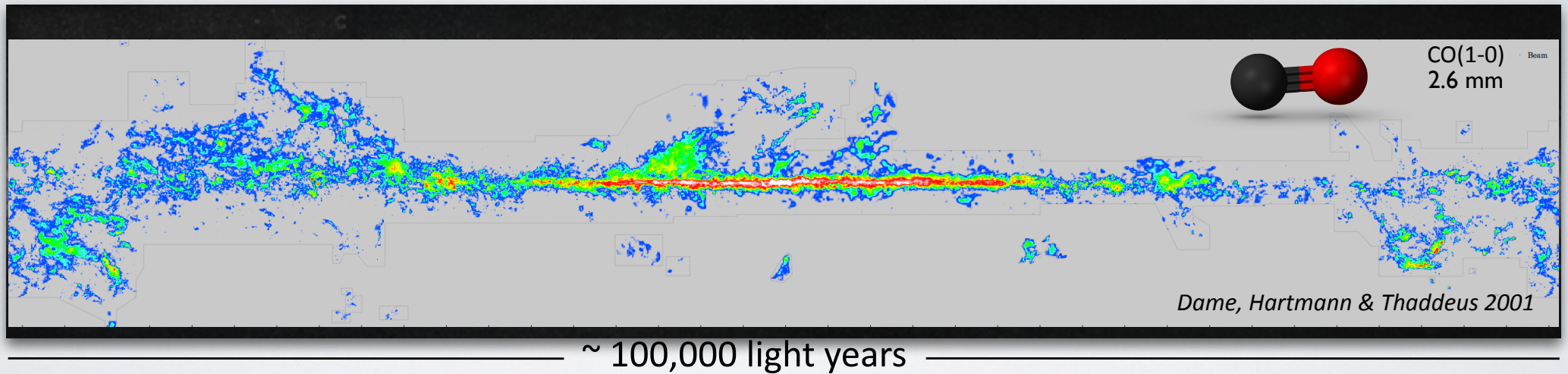
Le stelle producono carbonio, ossigeno, ferro, calcio ed altri elementi cruciali per la vita, e le particelle di polvere con cui si formano i pianeti.

LE NUBI SCURE

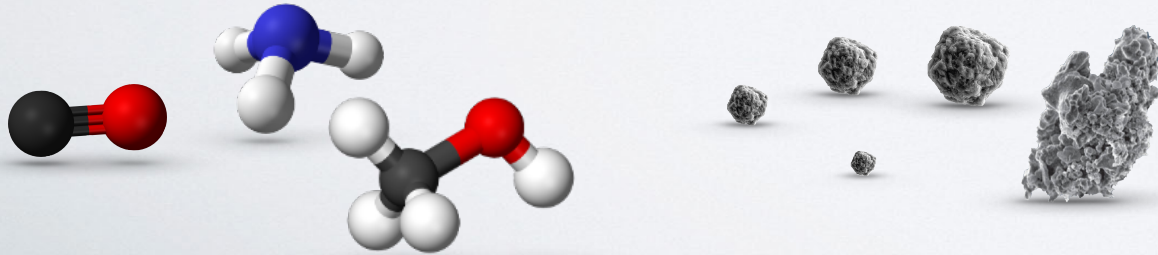
Le regioni scure erano considerate zone senza stelle:
“Qui c’è davvero un buco nel cielo!”
Sir William Herschel, 1785

Le regioni scure nella nostra Via Lattea sono piene di gas e polvere. Sono queste le regioni dove si formano stelle e pianeti!

Nubi scure ed i mattoni della vita



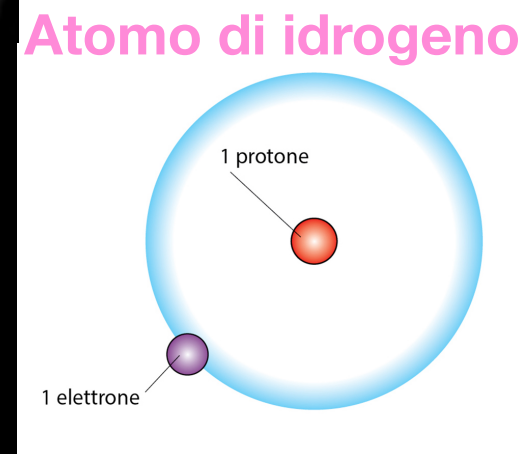
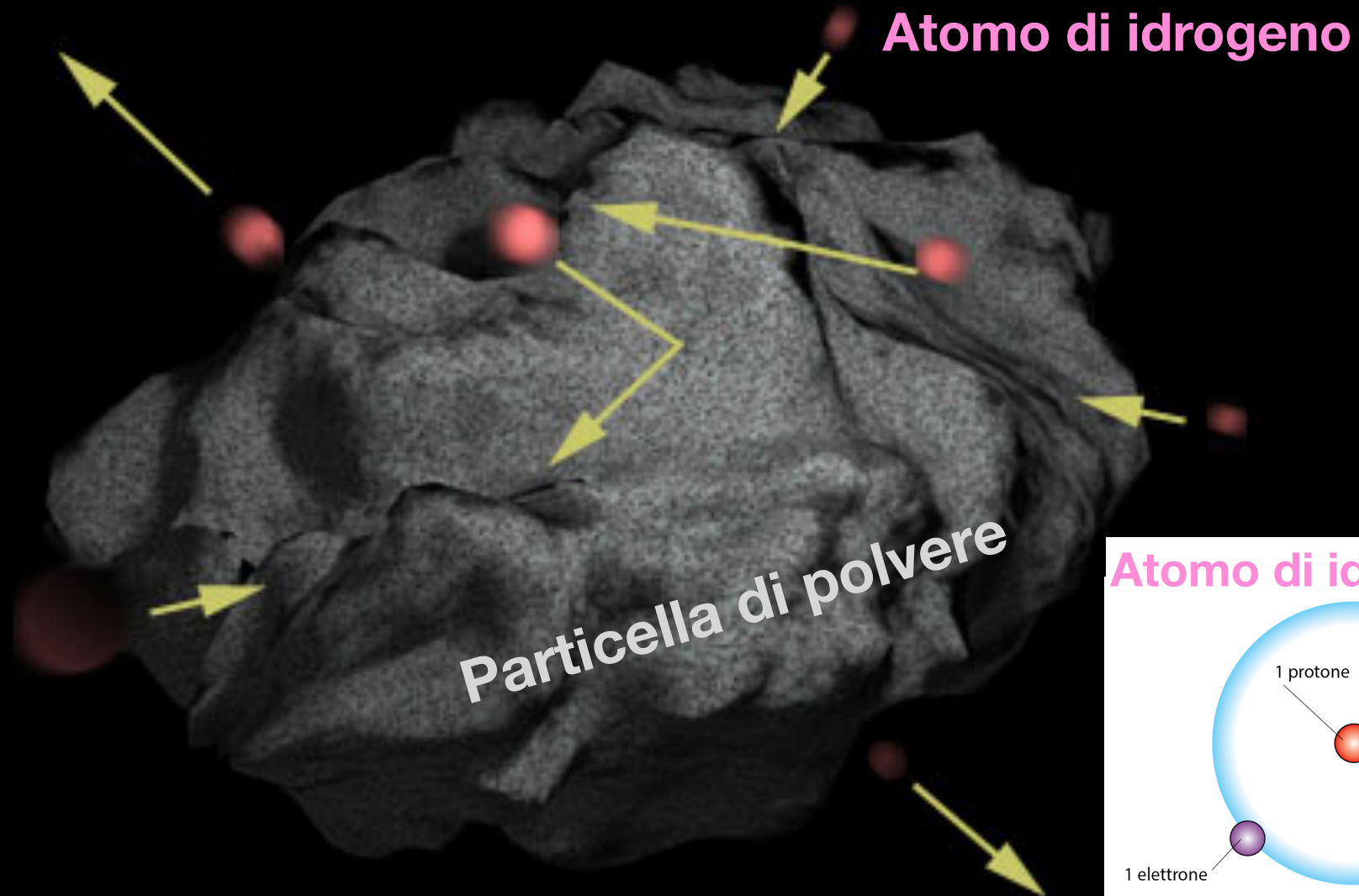
Molecole e polvere riempiono i “buchi nel cielo”!



**COME SI
FORMANO
LE
MOLECOLE
(MATTONI
DELLA VITA)
NELLE NUBI
SCURE ?**



Formazione di idrogeno molecolare, H_2



**Altro ingrediente fondamentale: i *raggi cosmici*,
accelerati da supernovae**

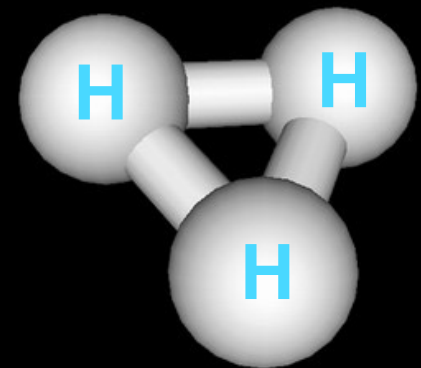
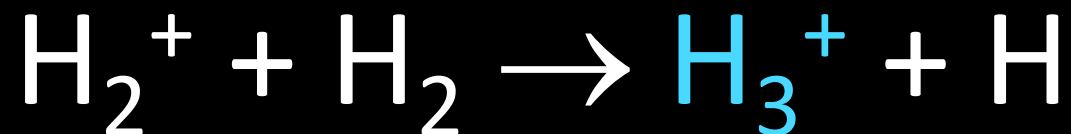


www.spacetelescope.org

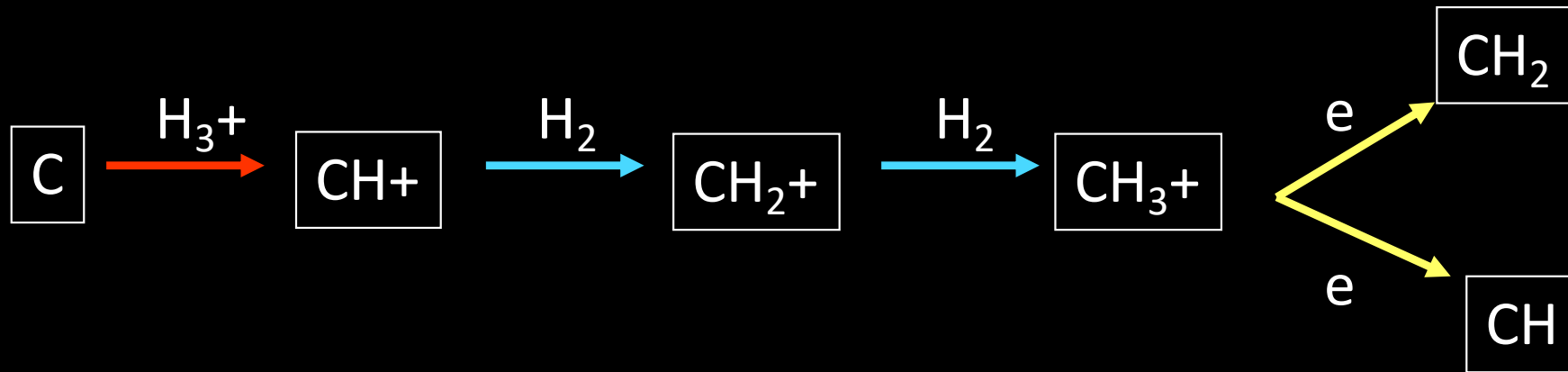
Dopo la formazione di H_2 , i raggi cosmici (r.c.) lo ionizzano (gli tolgono un elettrone, e^-) e formano H_2^+ :



H_2^+ reagisce molto rapidamente con H_2 per formare H_3^+ , lo ione molecolare più importante nella chimica interstellare:



CON H_3^+ INIZIA LA CHIMICA DEL CARBONIO



- A. **Trasferimento di protoni** da H_3^+ ad un atomo neutro;
- B. **Reazioni di astrazione di idrogeno** che terminano con uno ione molecolare che non reagisce velocemente con H_2 ;
- C. **Ricombinazione dissociativa** con gli elettroni.

La formazione di acqua sulle particelle di polvere interstellari

prof. Ewine F. van Dishoeck, PhD, A.L.M. “Thanja” Lamberts, MSc



**Universiteit
Leiden**
The Netherlands

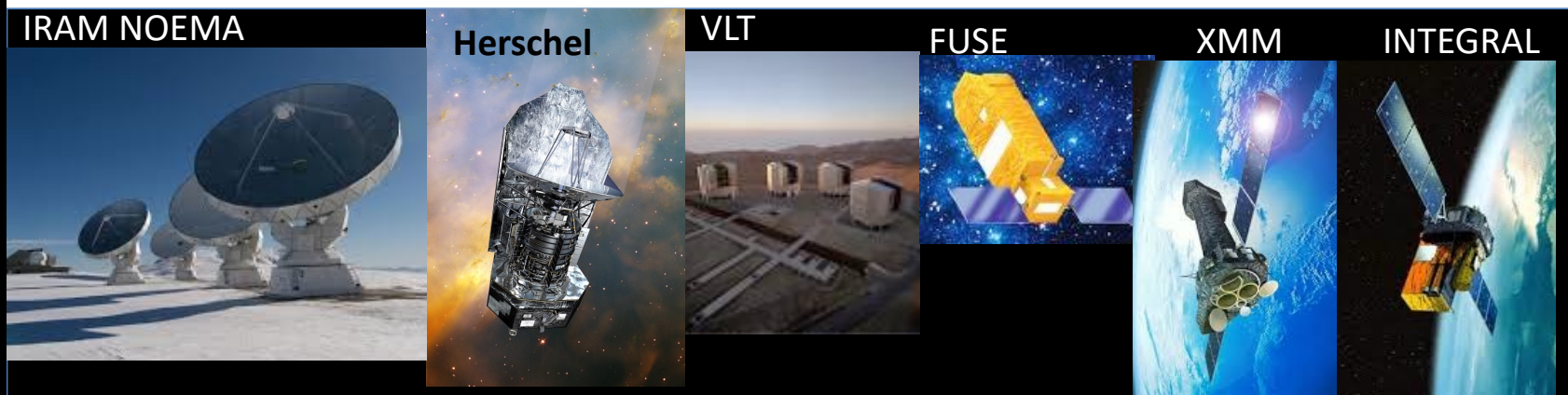
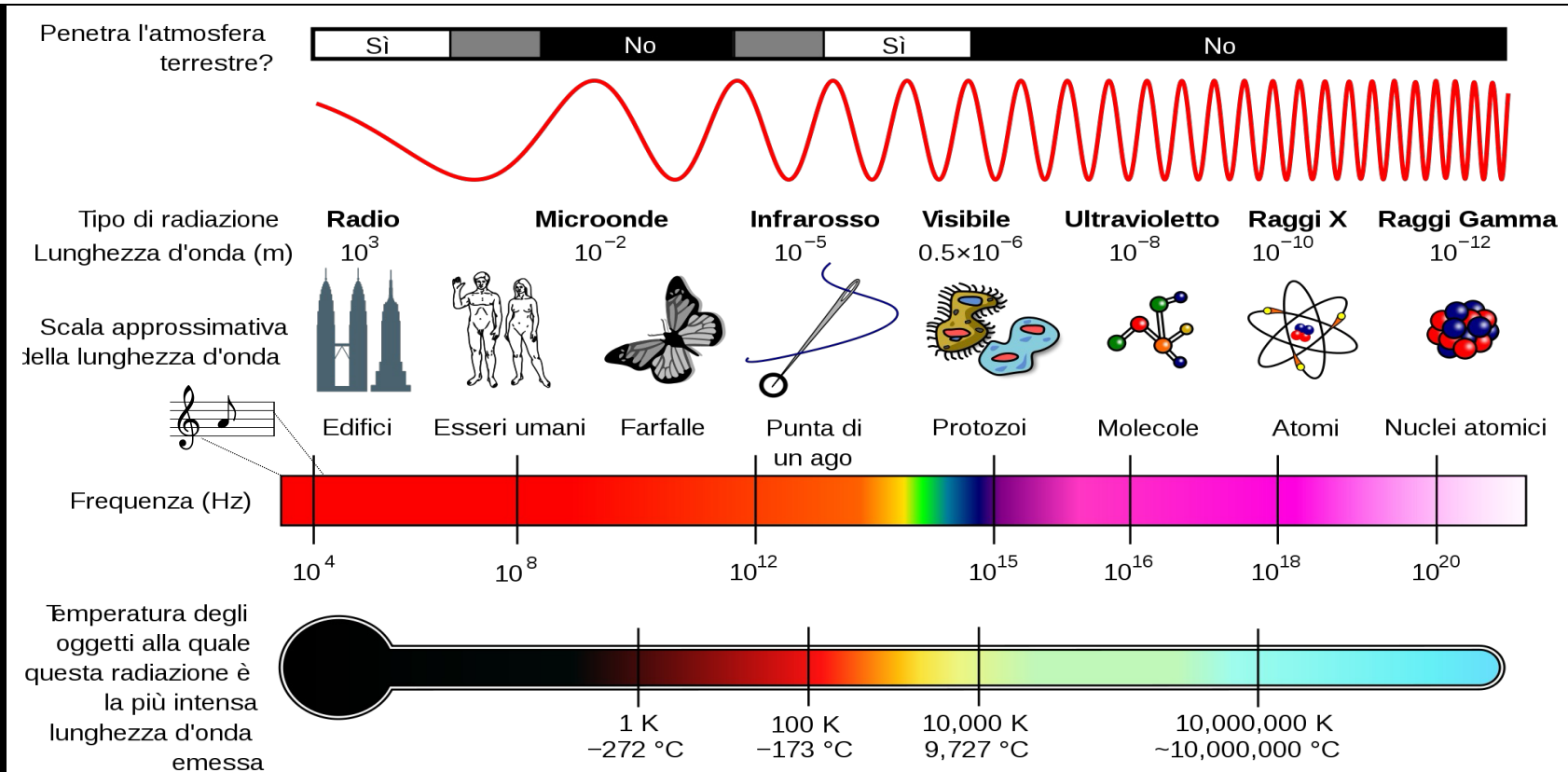


Discover the world at Leiden University

COME SI STUDIANO LE NUBI SCURE ?



Temperatura ~ -263 gradi centigradi



IRAM 30m Antenna

Sierra Nevada, Spagna - Altitudine: 2850 m



IRAM NOEMA: Northern Extended Millimeter Array



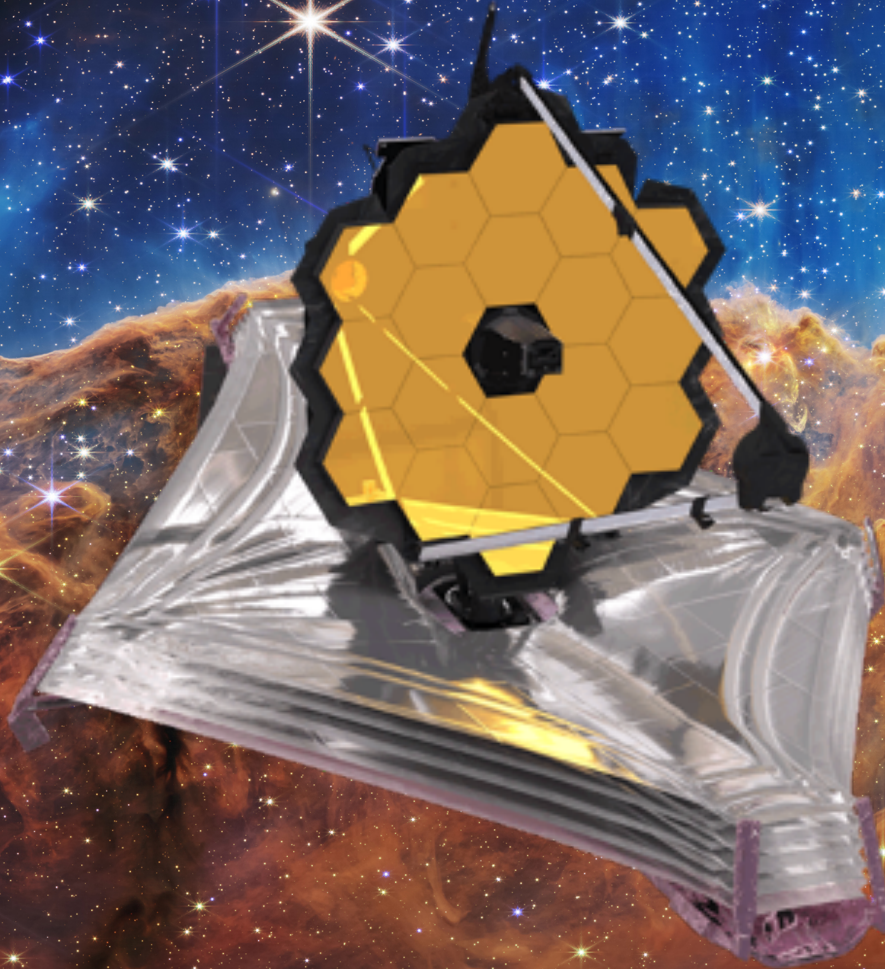
Plateau de Bure, Provence-Alpes-Côte d'Azur, Francia - Altitudine: 2552 m

ALMA: Atacama Large Millimeter Array



Deserto di Atacama, Antofagasta, Cile - Altitudine: 5000 m

Il telescopio spaziale James Webb JWST

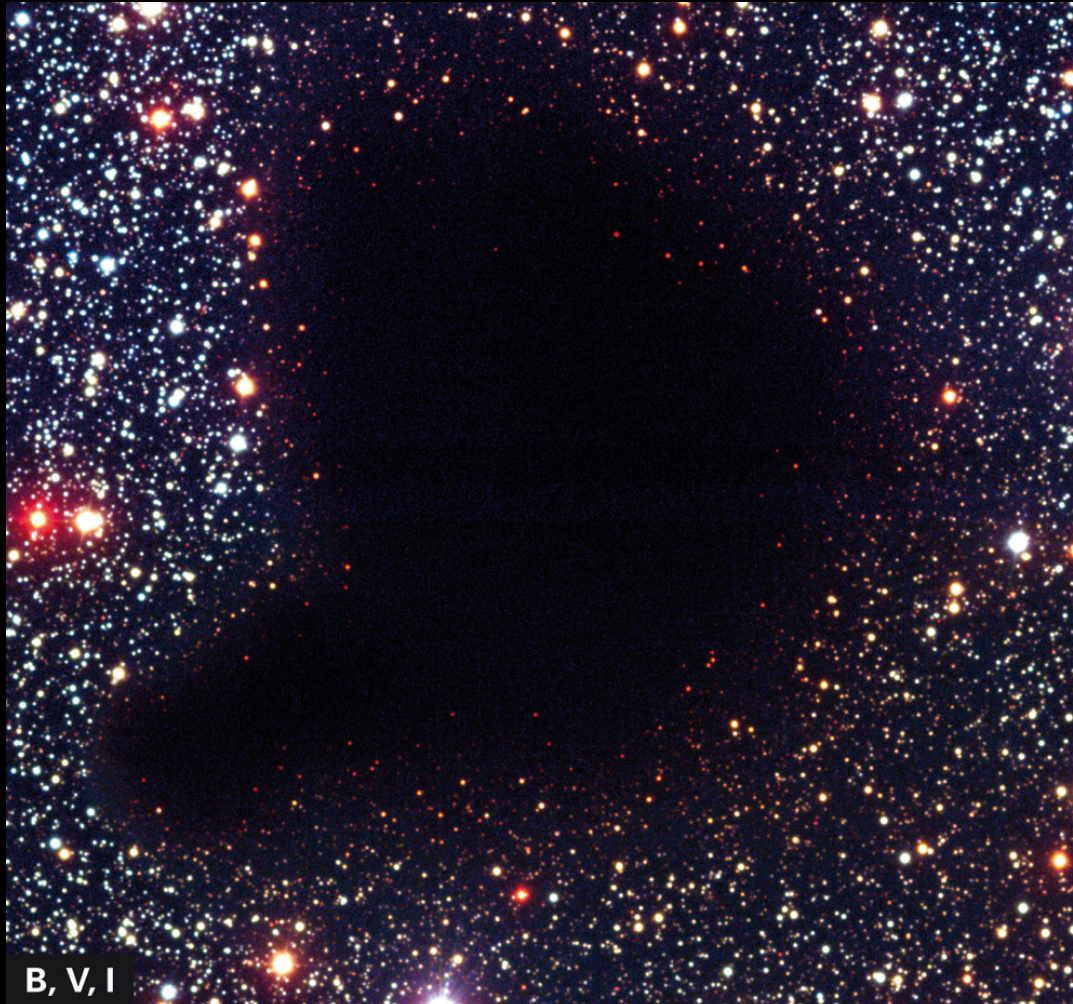


NASA, ESA, CSA, and STScI

**COSA
ABBIAMO
IMPARATO
SULLE
NUBI
SCURE?**



Poco prima della nascita di un nuovo sistema stellare: le nubi pre-stellari

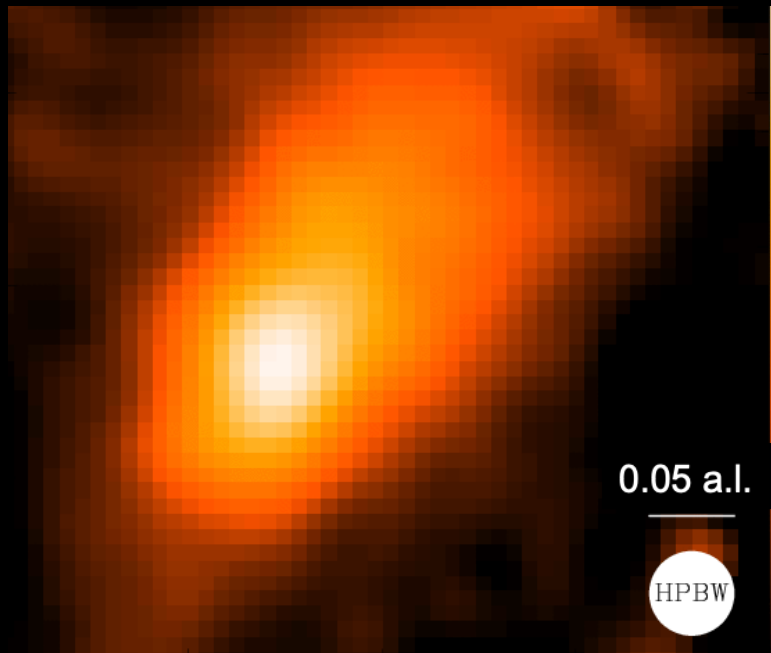


B, V, I

Alves et al. 2001

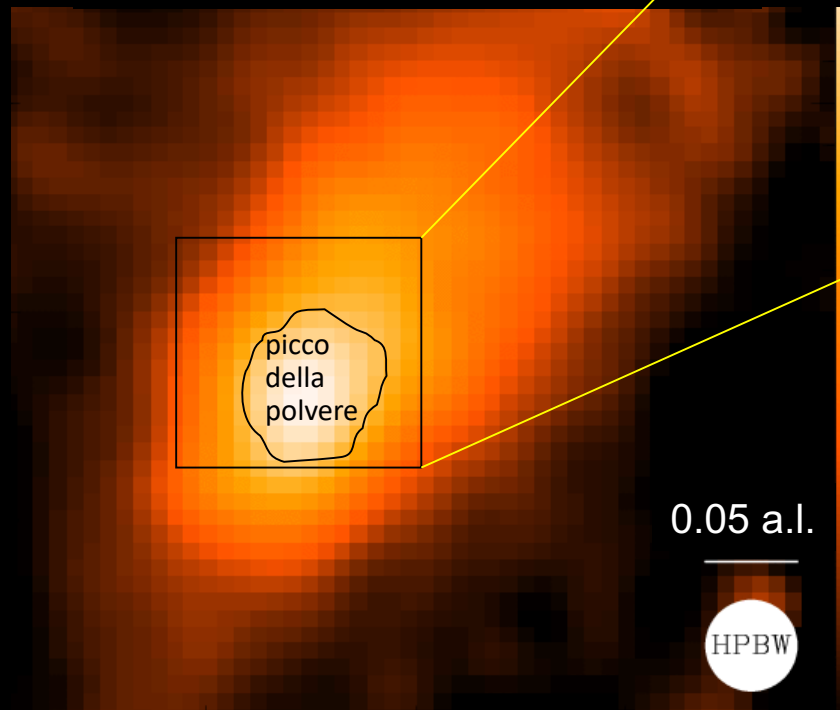
Poco prima della nascita di un nuovo sistema stellare: le nubi pre-stellari

Emissione della polvere in
una nube pre-stellare

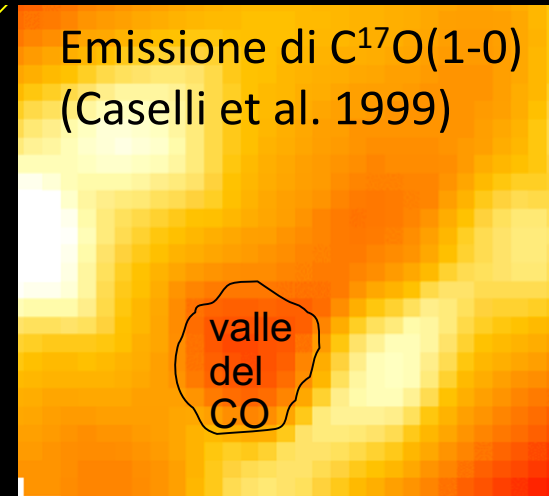


Poco prima della nascita di un nuovo sistema stellare: le nubi pre-stellari

Emissione della polvere in
una nube pre-stellare

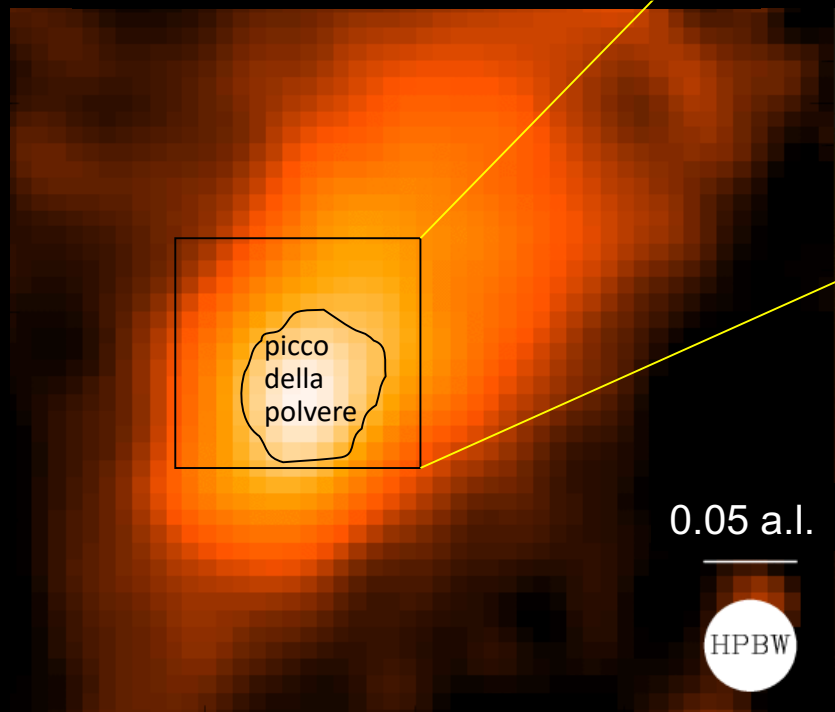


Emissione di $\text{C}^{17}\text{O}(1-0)$
(Caselli et al. 1999)

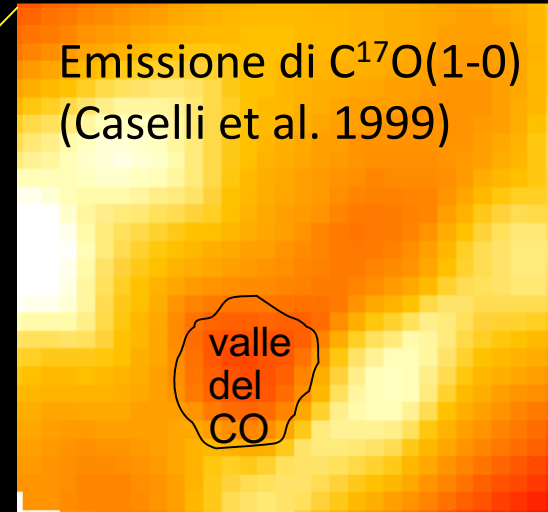


Poco prima della nascita di un nuovo sistema stellare: le nubi pre-stellari

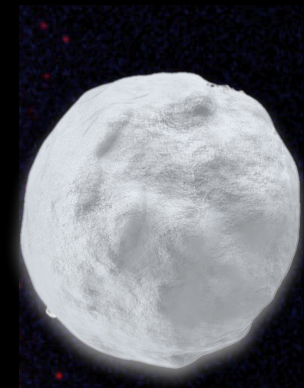
Emissione della polvere in
una nube pre-stellare

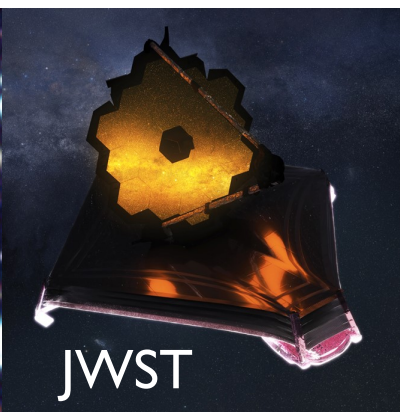


Emissione di $\text{C}^{17}\text{O}(1-0)$
(Caselli et al. 1999)



Nelle fredde
nubi pre-
stellari, le
molecole si
depositano
sulle
particelle di
polvere →





Poco prima della nascita di un sistema stellare, nel centro delle nubi pre-stellari, quasi tutti (99.99%) i bioelementi risiedono in mantelli ghiacciati che circondano le particelle di polvere (Caselli, Pineda, Sipilä+2022).

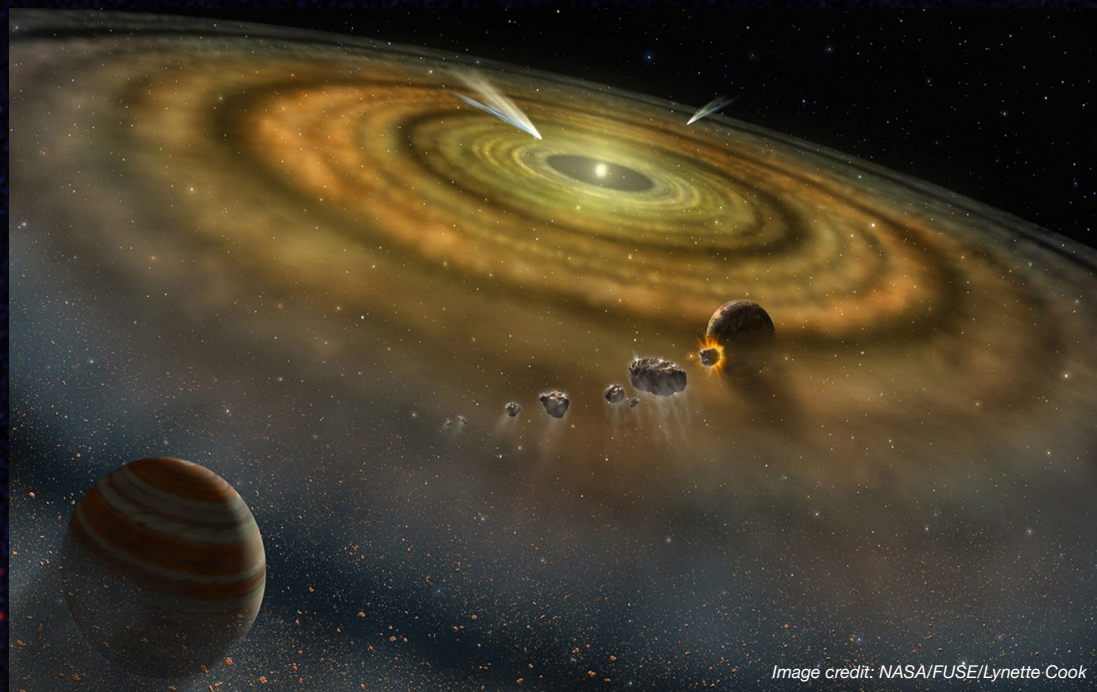


Image credit: NASA/FUSE/Lynette Cook

Le molecole pre-stellari vengono “conservate” nei mantelli ghiacciati fino alla formazione dei pianeti.

Image credit: Alves+(2001)

La nube scura molecolare Camaleonte I



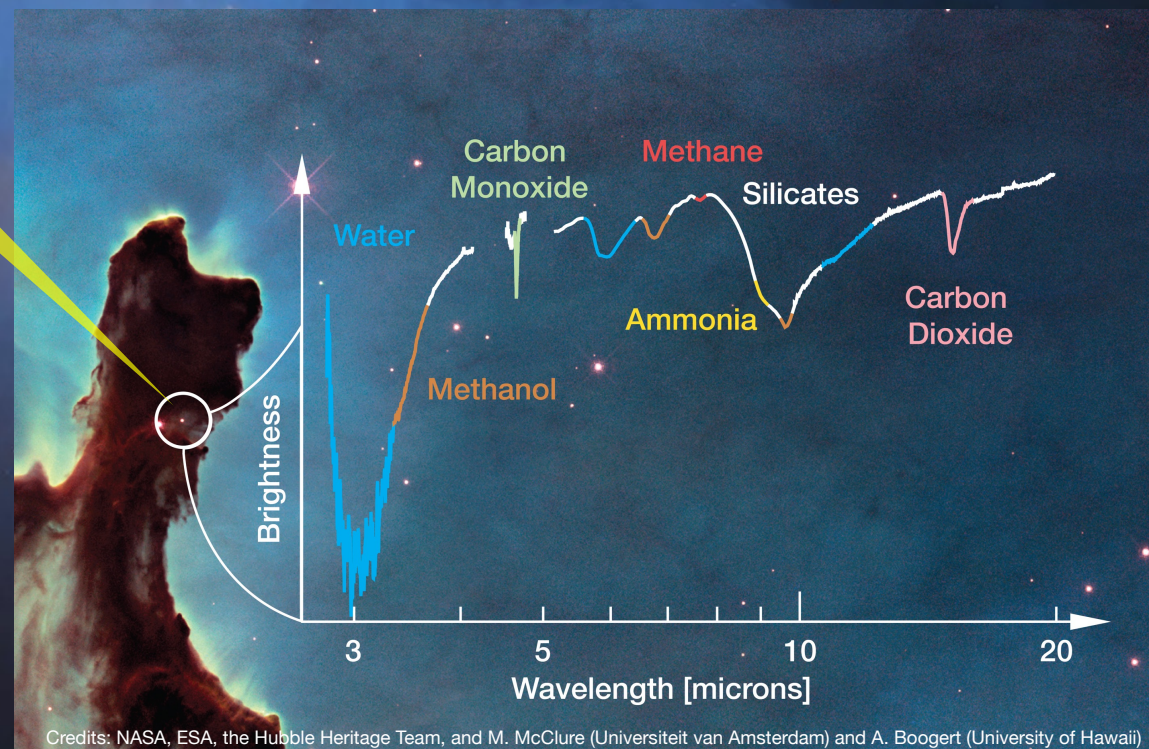
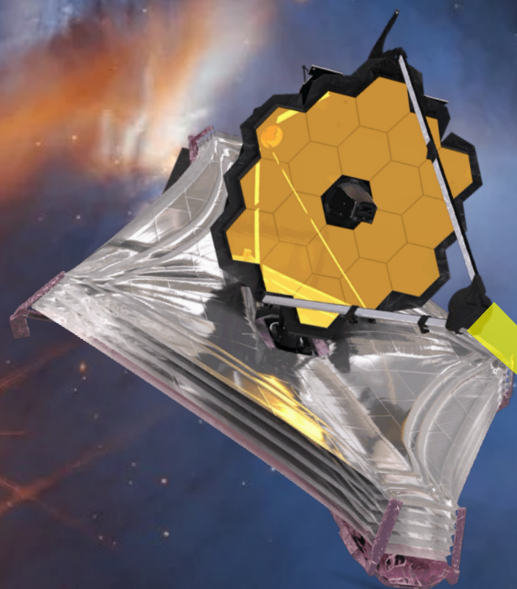
Ice Age Collaboration
PI: Mellissa McClure

Credit: NASA, ESA, CSA, and M. Zamani (ESA/Webb)

La nube scura molecolare Camaleonte I



Ice Age Collaboration
PI: Mellissa McClure

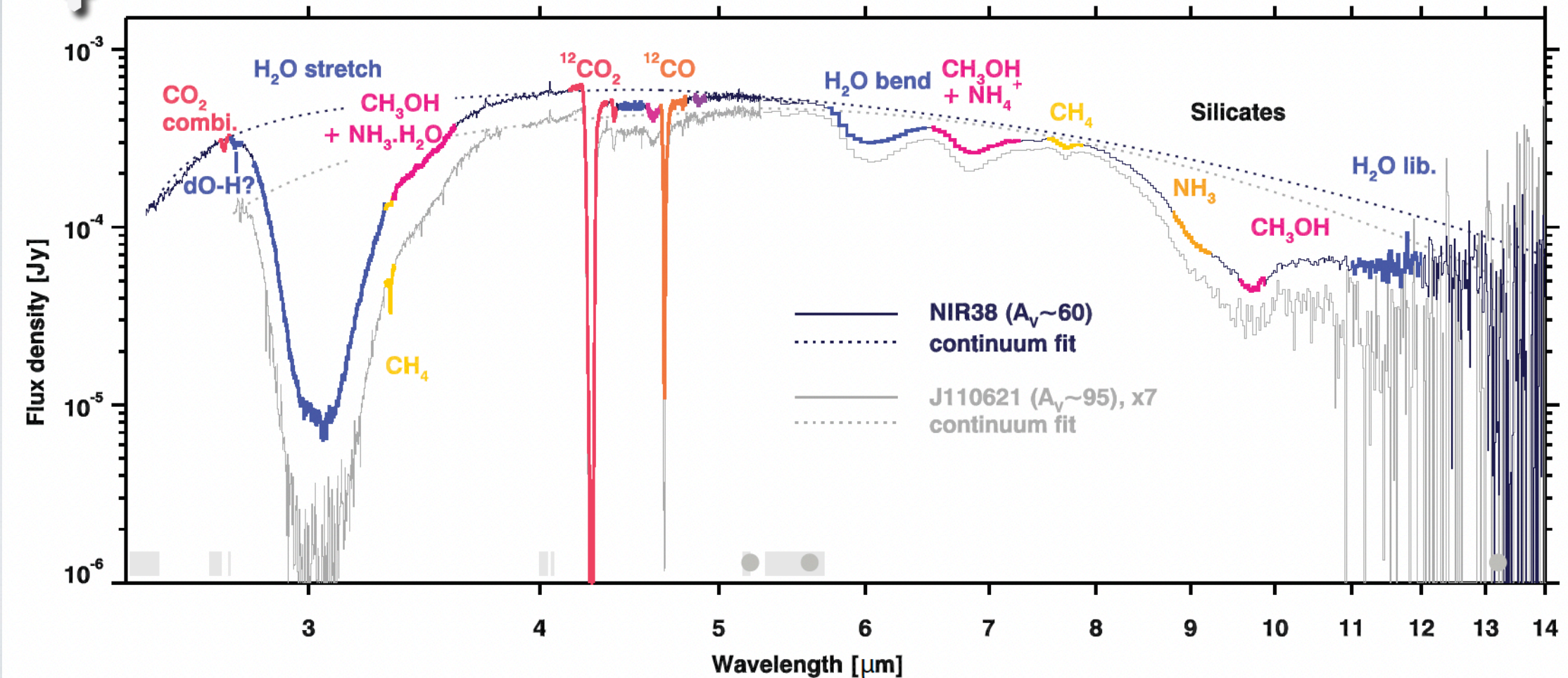


Credit: NASA, ESA, CSA, and M. Zamani (ESA/Webb)

Credits: NASA, ESA, the Hubble Heritage Team, and M. McClure (Universiteit van Amsterdam) and A. Boogert (University of Hawaii)



Ghiacci visti da JWST in una nube scura



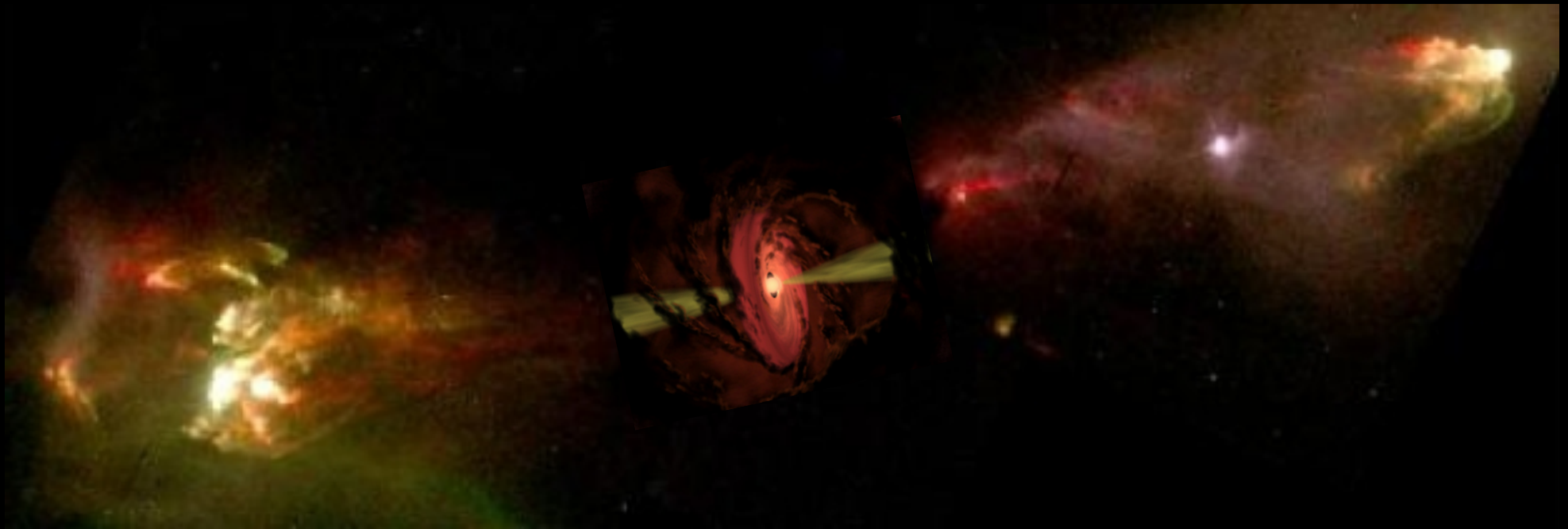
McClure, Rocha, Pontoppidan+ICE AGE collaboration 2023, Nature Astronomy

Nelle nubi scure nascono le stelle



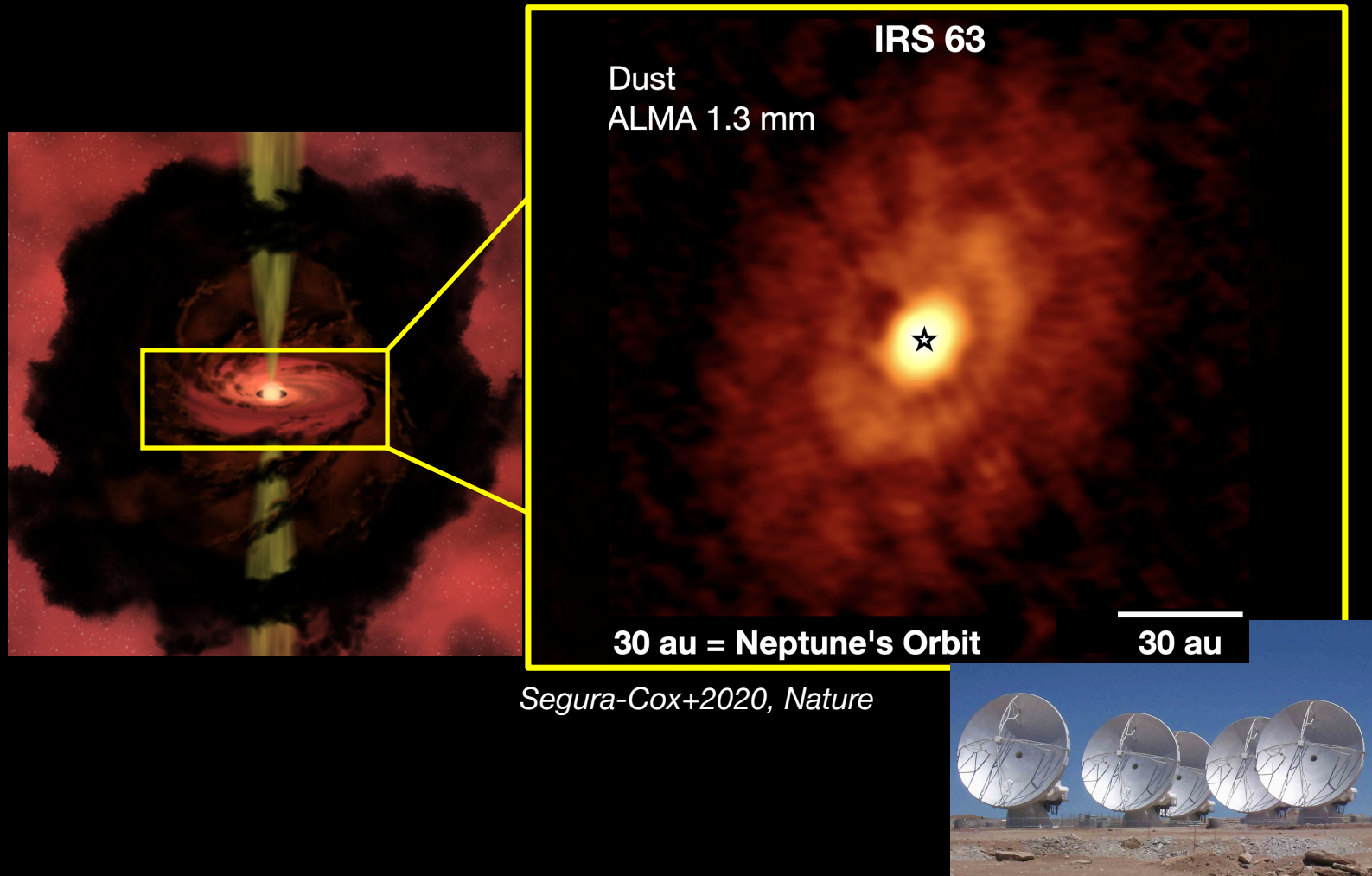
Hubble/WFPC2 – <http://hubblesite.org/gallery/album/entire/prl995024c/web/npp/16/>

La nascita delle stelle: venti bipolari



Hubble/WFPC2 – <http://hubblesite.org/gallery/album/entire/prl995024c/web/npp/16/>

La nascita delle stelle: dischi protoplanetari

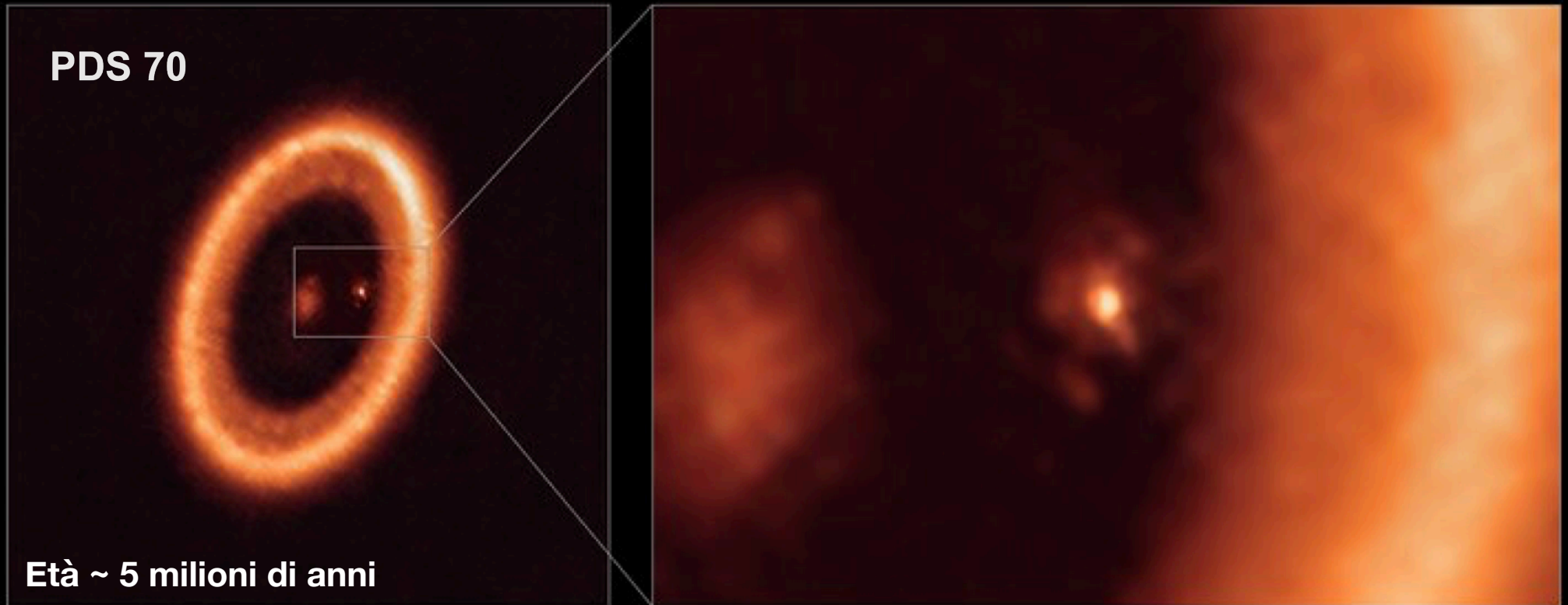


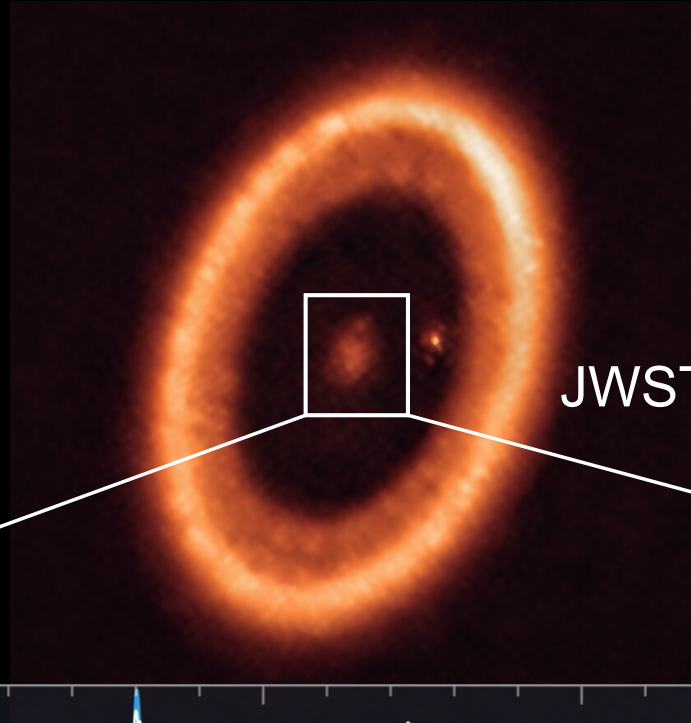
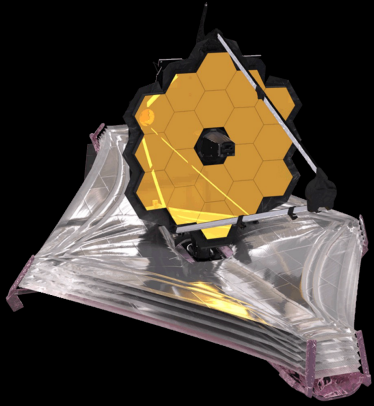
La formazione dei pianeti



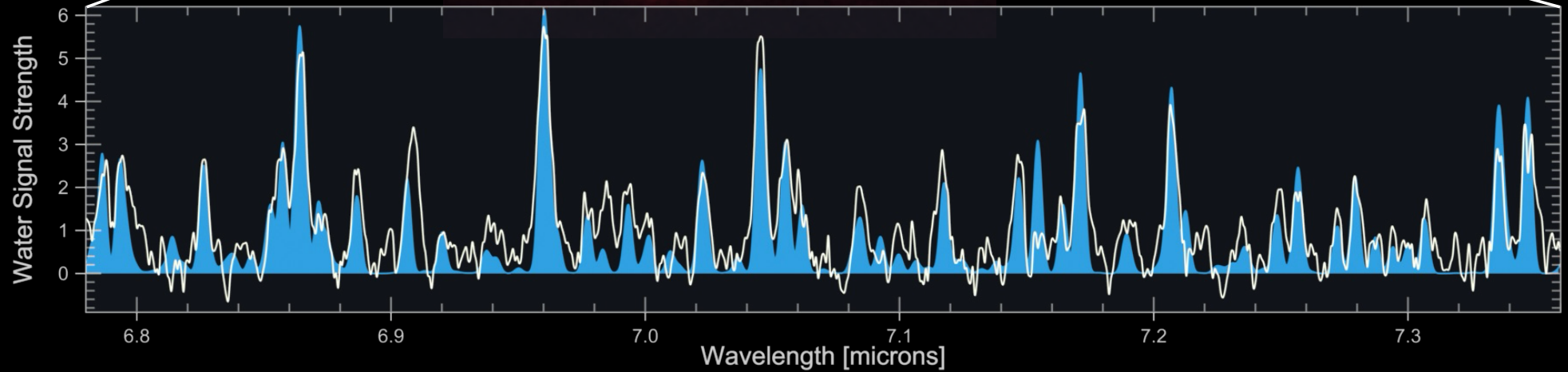
Credit: NASA/FUSE/Lynette Cook

La formazione di un pianeta in diretta





JWST vede tanta acqua in direzione
dei pianeti giovani!



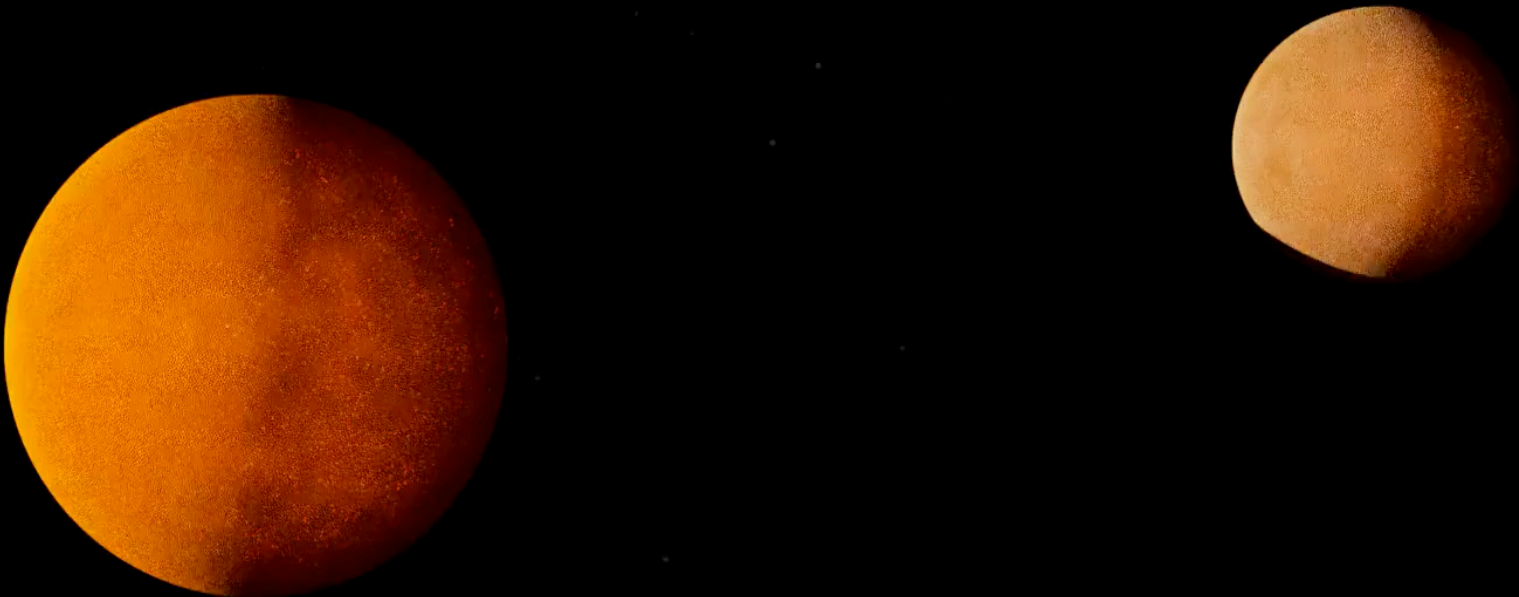
Benisty et al. 2021
Perotti et al. 2023

Courtesy of Sierra Grant

La formazione dei pianeti è un processo violento



La formazione della Luna (~4,5 miliardi di anni fa)



La Terra ~4 miliardi di anni fa



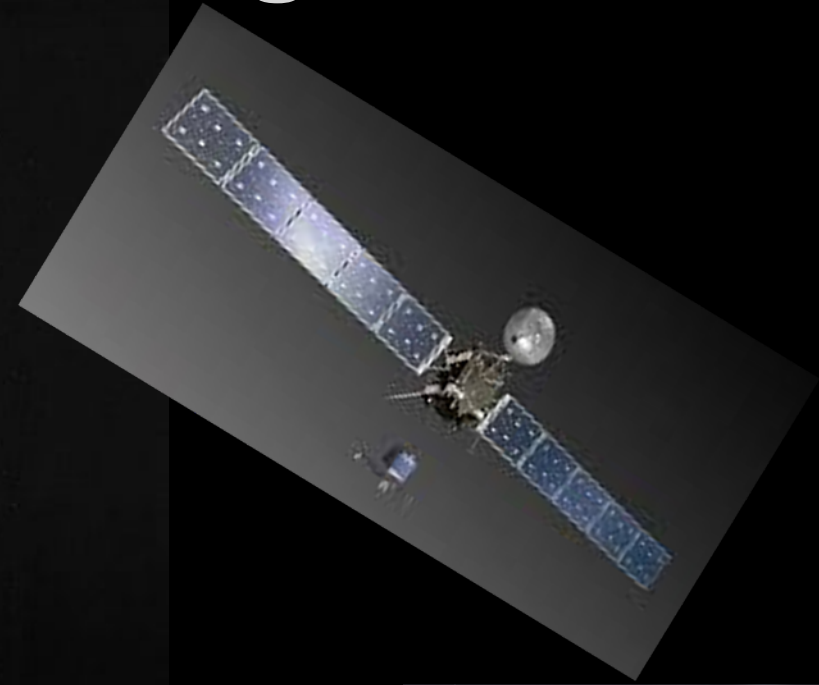
Le origini della vita sulla nostra Terra

Sul nostro pianeta, esseri viventi già esistevano circa **3.5 miliardi di anni fa**, come testimoniato dalla presenza di microrganismi fossili in rocce.

Tali microrganismi sono complessi! Devono essere stati preceduti da forme di vita più semplici, sviluppatesi da strutture inanimate.

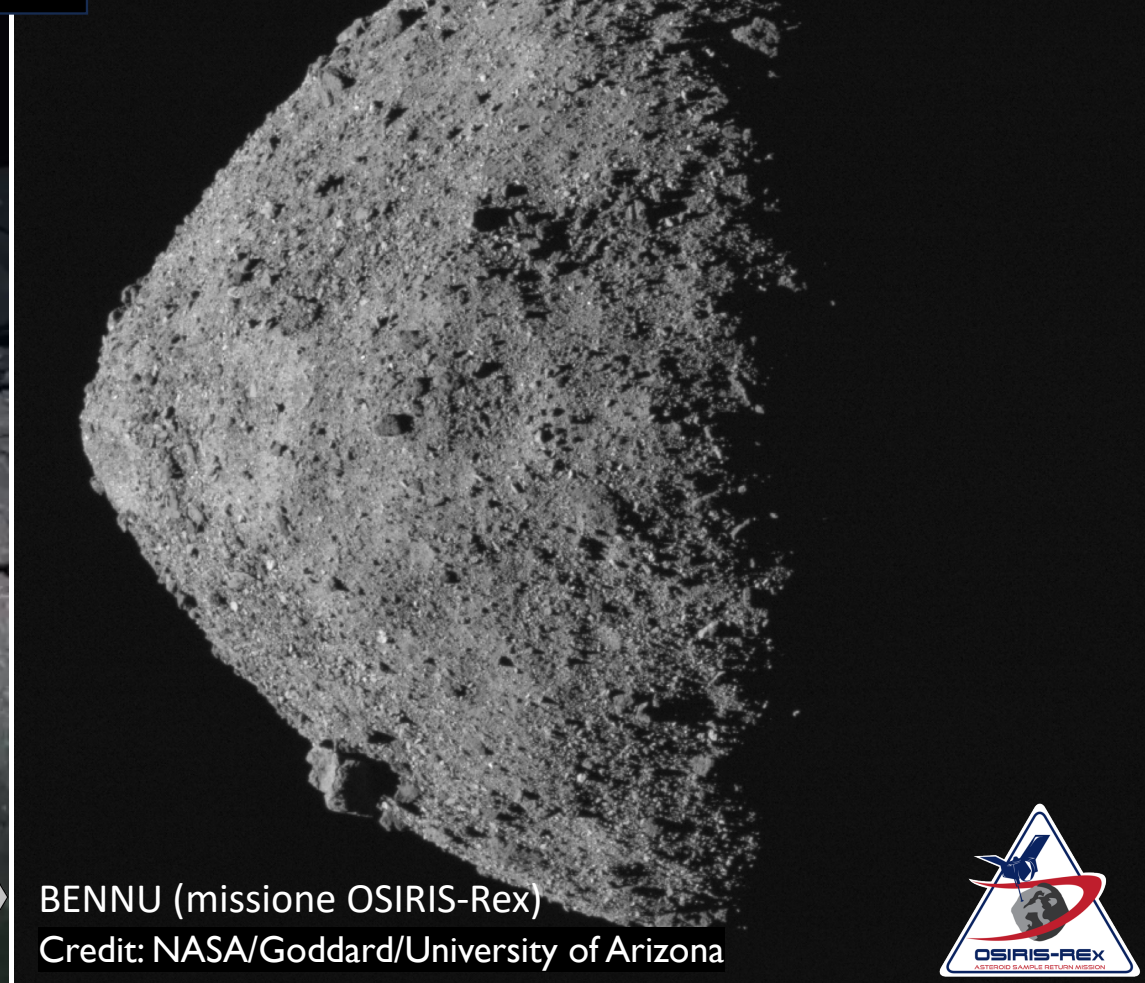
Sfortunatamente, la storia geologica della Terra nel suo primo miliardo di anni è stata cancellata e trasportata sotto la superficie.

**Le comete contengono
ghiacci ricchi di acqua e
molecole organiche**



ESA/Rosetta/NAVCAM

I METEORITI, PEZZI DI ASTEROIDI (TIPO RYUGU E BENNU) CHE RAGGIUNGONO LA SUPERFICIE TERRESTRE, CONTENGONO MOLECOLE PREBIOTICHE





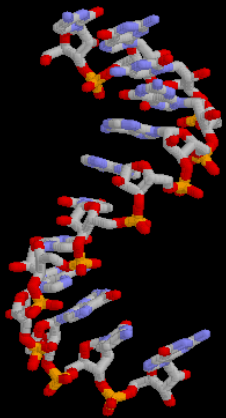
Condrite Carboniosa Murchison



L' ORIGINE DELLA VITA

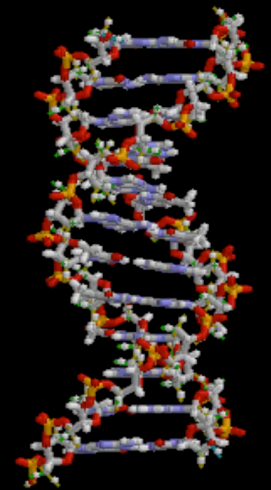
Come si fa a mettere assieme queste componenti e formare molecole più grandi?

Come si fa a mettere assieme le molecole in maniera ripetitiva (processo di polimerizzazione)?



RNA
(acido ribonucleico)

NON LO SAPPIAMO!
In laboratorio, nessuno è ancora riuscito a generare RNA o DNA a partire dai componenti semplici.



DNA
(acido deossiribonucleico)

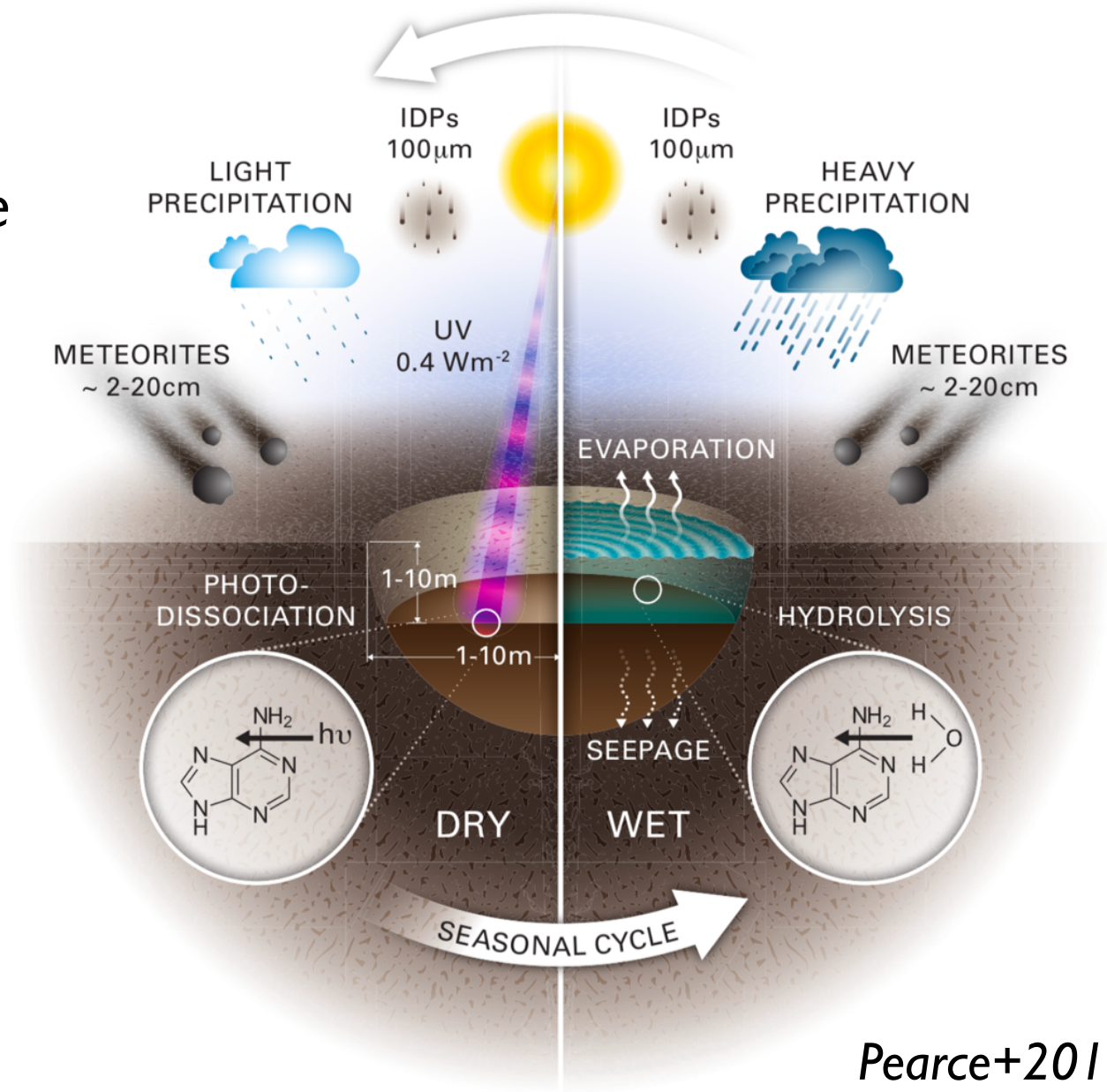
Dalla teoria:

*RNA si forma entro
~200 Myr dall'impatto che
ha formato la Luna*

**Ma abbiamo bisogno di
conferme sperimentali!**



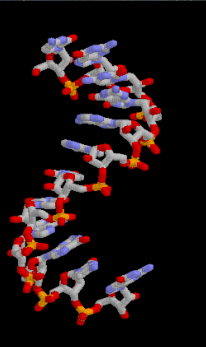
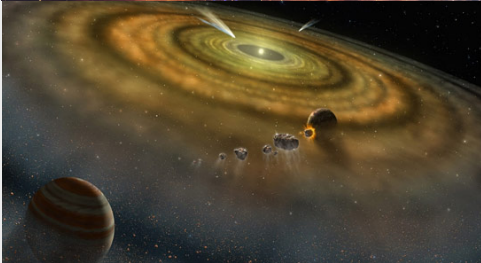
<https://www.origins-cluster.de/en/>



Pearce+2017, 2022

Le nostre origini astrochimiche

- I bioelementi C, N, O, S, P, Fe, Ca ... si formano nelle stelle come prodotti della combustione dell'idrogeno → ***NOI SIAMO POLVERE DI STELLE!***
- Le stelle ed i loro pianeti si formano nelle nubi scure, dove i bioelementi più leggeri si aggregano e formano molecole organiche.
- I pianeti si formano nei dischi attorno a stelle giovani, a partire da materiale composto da polvere, ghiaccio e gas molecolare proveniente dalla nube scura pre-stellare.
- Nei dischi, le particelle di polvere con mantelli ghiacciati coagulano, formando prima sassolini e poi planetesimi, i mattoni dei futuri pianeti.
- La stella riscalda i ciottoli/planetesimi e, al loro interno, avviene una chimica attiva: emergono molecole prebiotiche.
- La polvere e le rocce interstellari continuano a piovere sui pianeti una volta formati, portando molecole prebiotiche pronte all'assemblaggio.



La nostra Terra fotografata da Voyager 1, il 14 Febbraio 1990
ad una distanza di 6 miliardi di chilometri

