

Astronomia Osservativa C  
**Introduzione all'Astrobiologia**

Capitolo 4  
Ricerca di vita e ambienti abitabili  
nell'Universo

5. Ricerca di vita e ambienti abitabili  
nell'Universo

**5.1 Ricerche nel Sistema Solare**

## Confronto tra alcune proprietà di abitabilità della Terra e degli altri pianeti rocciosi del Sistema Solare

Pianeta	Attività vulcanica	Attività tettonica	Campo magnetico	Atmosfera	Effetto serra	Idrosfera
Mercurio	NO	NO	SI	NO	...	NO
Venere	Nel passato recente	NO	NO Forse nel passato	SI	$\Delta T=500$ K	NO
Terra	SI	SI	SI	SI	$\Delta T=33$ K	SI
Marte	NO Nel passato	Nel passato?	NO Forse nel passato	NO Nel passato	NO Nel passato	NO Nel passato

Astronomia Osservativa C, SP 1, Vladilo (2010)

3

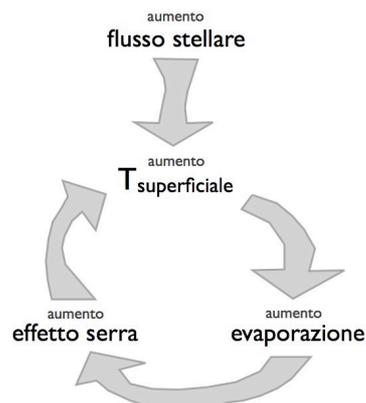
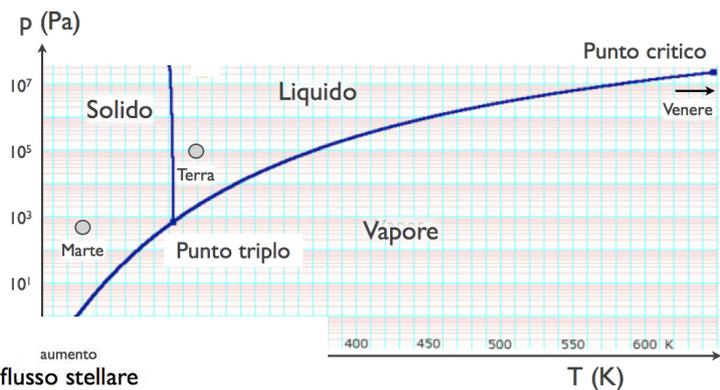
### Pianeti non abitabili

#### ➤ Venere

$$T_s = 735 \text{ K}$$

$$P_s = 92 \times 10^5 \text{ Pa}$$

Si pensa che abbia subito un “runaway greenhouse effect” nelle prime fasi della sua storia e non abbia quindi mai avuto condizioni di abitabilità



## Pianeti non abitabili

### ➤ Giove

Esistono strati atmosferici con pressioni comprese tra  $\sim 10^5 - 10^7$  Pa e temperature  $\sim 300 - 500$  K

Tali valori consentono, in linea di principio, l'esistenza di acqua in fase liquida in tali strati atmosferici

Le condizioni per la adattabilità della vita in tali ambienti, privi di una superficie solida, sono però estremamente restrittive

Le ipotetiche forme di vita dovrebbero rimanere in sospensione in tali strati

Sebbene alcuni autori abbiano preso in considerazione l'abitabilità di tali strati atmosferici di Giove (Sagan & Salpeter 1976), l'abitabilità di pianeti giganti non viene solitamente presa in considerazione

## Marte

### ➤ Abitabilità superficiale

### ➤ Al momento attuale Marte non è abitabile in superficie

La pressione superficiale è leggermente al di sotto del punto triplo dell'acqua

$$T_s = 210 \text{ K}$$

$$P_s \sim 600 \text{ Pa} (\sim 6 \text{ mbar})$$

### ➤ In strati al di sotto della superficie ci si aspetta un gradiente di pressione e temperatura e pertanto condizioni di abitabilità

Dove la pressione sale al di sopra di quella del punto triplo dell'acqua

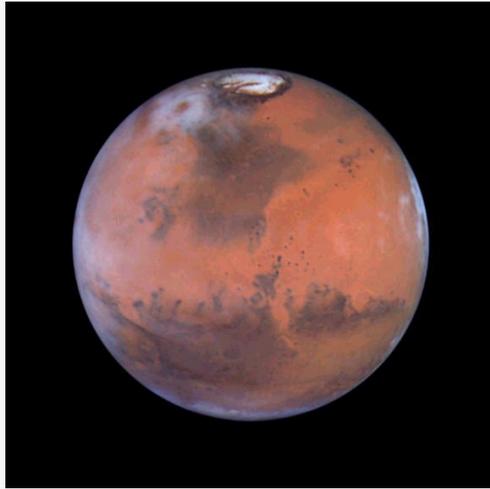


## Ricerche di acqua su Marte

### ➤ Evidenze della presenza di acqua all'epoca attuale

Sebbene le calotte polari siano principalmente costituite da ghiaccio  $\text{CO}_2$ , la calotta Nord deve contenere anche una frazione di  $\text{H}_2\text{O}$

per spiegare perchè tale calotta riesca a persistere in parte durante l'estate marziana, quando il  $\text{CO}_2$  sublima in atmosfera

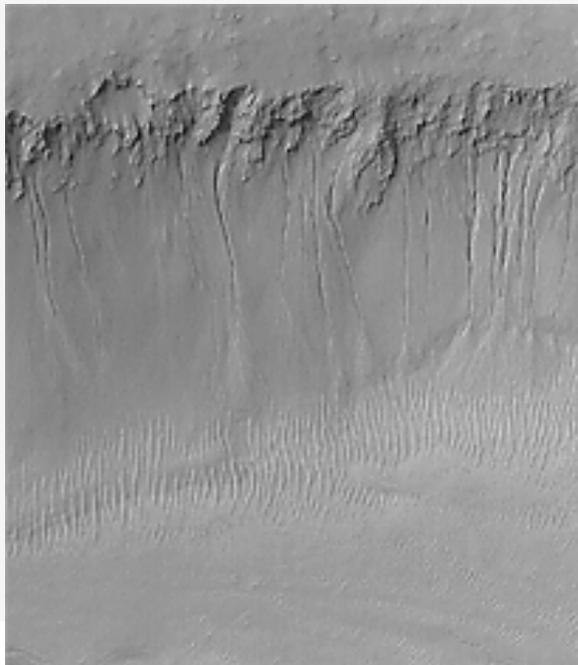


## Ricerche di acqua su Marte

### ➤ Evidenze della presenza di acqua all'epoca attuale

Tracce recenti di erosione al bordo di crateri

Interpretate come fuoriuscite di acqua temporaneamente in fase liquida ("gullies")



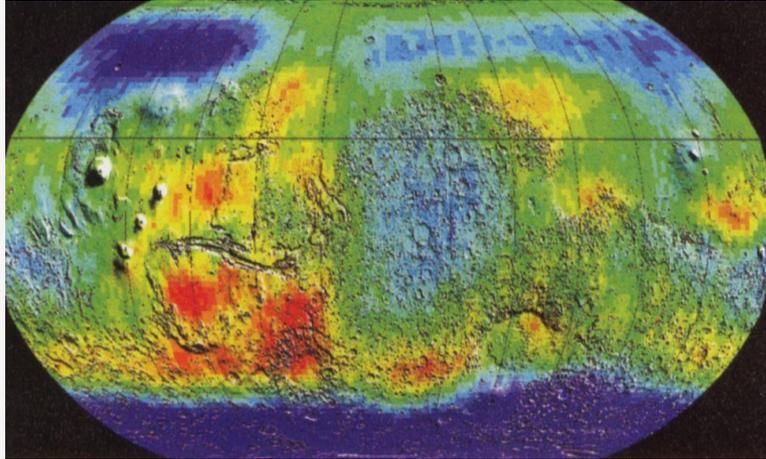
## Ricerche di acqua su Marte

### ➤ Evidenze della presenza di acqua all'epoca attuale

Diverse sonde spaziali stanno raccogliendo evidenze sempre più convincenti sulla presenza di ghiaccio d'acqua su Marte

La distribuzione dell'idrogeno nel suolo, dedotta dai dati raccolti dalla sonda "Mars Odyssey" suggerisce che esista uno strato di ghiaccio d'acqua ad una profondità di circa un metro

Zone blu: massima concentrazione



## Possibili evidenze di metano su Marte

### ➤ Recentemente sono state scoperte delle fuoriuscite di metano su Marte

Mediante spettroscopia infrarossa ad alta dispersione da Terra

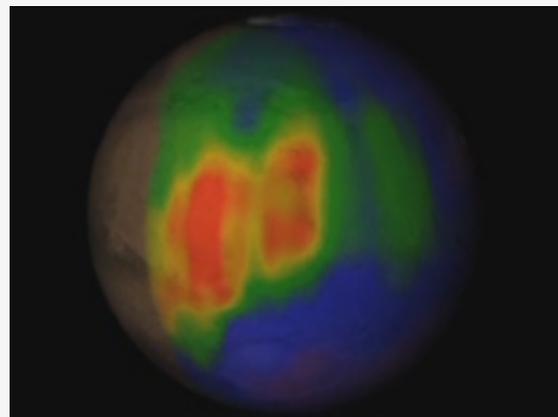
Il metano viene emesso in regioni discrete e le fuoriuscite hanno carattere stagionale

Villanueva et al. (2009)

### ➤ L'origine di tale metano è tuttora sconosciuta

Vengono prese in considerazione sia l'ipotesi di un'origine geochimica che quella di un'origine biologica

### ➤ Qualunque sia l'origine, la scoperta è indicativa della presenza di attività sotterranea



## Abitabilità di Marte nel passato

➤ **Esistono numerose evidenze che Marte sia stato abitabile nel passato**

Tali evidenze sono particolarmente importanti nell'ambito degli studi di astrobiologia in relazione alla possibilità che possa essersi originata la vita

➤ **Le evidenze di abitabilità nel passato sono di vario tipo**

Statistica dei crateri d'impatto

Evidenze geomorfologiche

Meteoriti di origine marziana

## Abitabilità di Marte nel passato

➤ **Evidenze della presenza di un'atmosfera nel passato**

Statistica dei diametri dei crateri d'impatto

Deficit di crateri di piccolo diametro antichi rispetto a quelli recenti

La presenza di un'atmosfera può aver causato tale deficit mediante:

Fusione dei meteoroidi di piccolo diametro per attrito nel corso dell'attraversamento dell'atmosfera

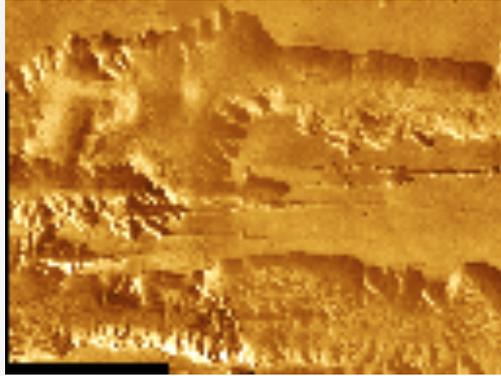
Erosione dei crateri meno profondi da parte di agenti atmosferici

## Abitabilità di Marte nel passato

### ➤ Evidenze della presenza di acqua nel passato

Evidenze di tipo geomorfologico

Ad esempio, reti di vallate simili a quelle scavate dai fiumi terrestri

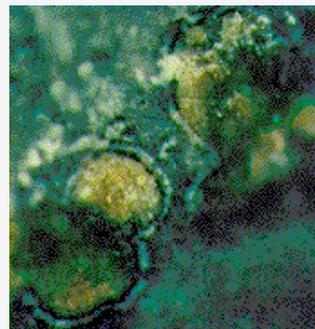


## Abitabilità di Marte nel passato

### ➤ Evidenze della presenza di acqua nel passato

Dallo studio di alcuni meteoriti SNC, di origine marziana, recuperati nell'Antartide, si trova evidenza della presenza di acqua su Marte anche in epoche non molto remote

ALH 84001, recuperato nel 1984



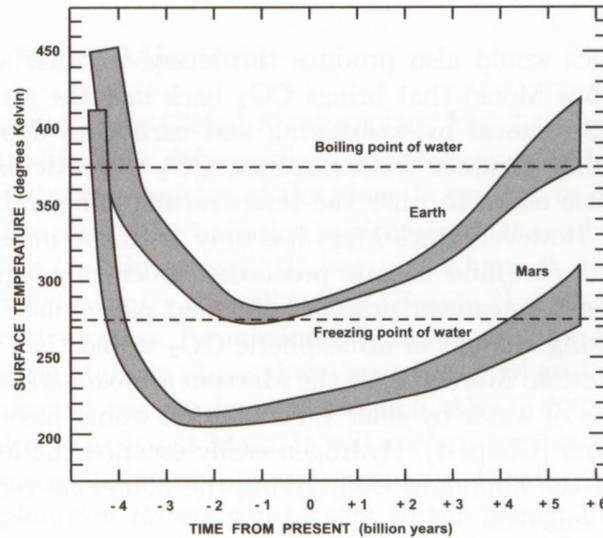
## Abitabilità di Marte nel passato

- Si ritiene che l'atmosfera di Marte primitivo avesse una maggior pressione di  $\text{CO}_2$  generata da attività vulcanica

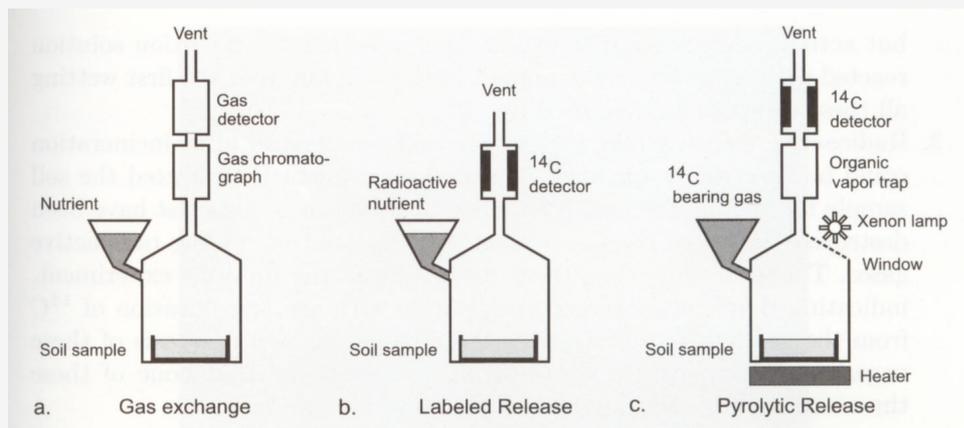
L'effetto serra del  $\text{CO}_2$  avrebbe permesso il riscaldamento del pianeta  
Ci sarebbero dunque state condizioni per l'esistenza di acqua in fase

Analogamente a quanto successo sulla Terra

“Faint Young Sun paradox”



## Ricerche di vita su Marte



Esperimenti Viking (1976) hanno cercato tracce di attività biologica dall'analisi di campioni prelevati in diversi siti marziani

Al fine di cercare evidenze di processi biochimici sono stati condotti tre diversi tipi di esperimenti svolti ed analizzati *in situ*

Uno dei tre esperimenti ha dato un segnale interpretabile come evidenza di processo biochimico, ritenuto però essere un falso positivo in quanto non confermato dalle analisi degli altri due esperimenti

## Ricerche di vita su Marte

I risultati in qualche modo ambigui degli esperimenti Viking sono indicativi della difficoltà di rivelare presenze di vita persino quando possiamo analizzare campioni

L'analisi di campioni in situ è meno accurata di quella che si potrebbe fare nei laboratori terrestri, ma il costo di riportare a terra il campione raddoppierebbe il costo della missione

I risultati degli esperimenti Viking non escludono che vita possa esistere in altri siti di Marte; eventuali processi biologici attivi potrebbero aver luogo in strati di opportuna profondità, favoriti dall'esistenza di un gradiente di temperatura e pressione

17

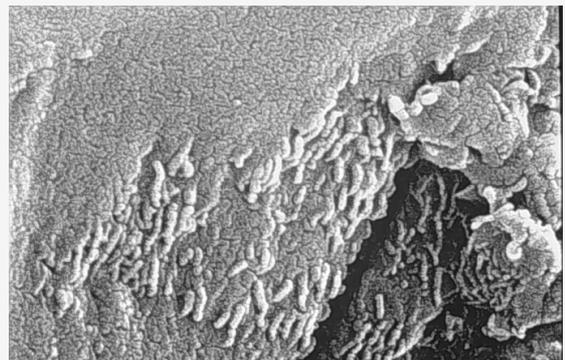
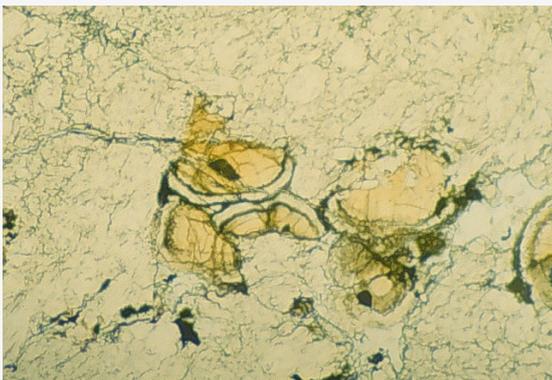
## Ricerche di vita su Marte

### ➤ Ricerche di tracce di vita nel passato di Marte

L'analisi del meteorite ALH 84001 ha rivelato microstrutture con morfologia che poteva suggerire un'origine biologica

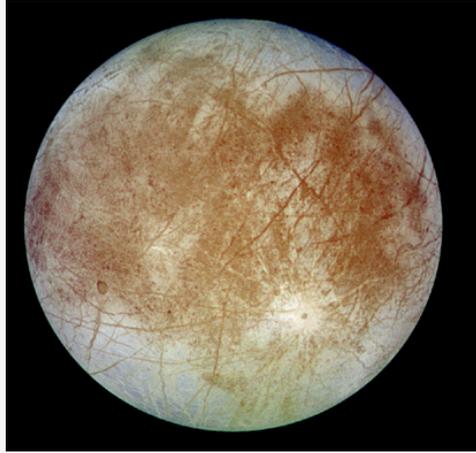
All'interno di globuli carbonati datati 3.9 Ga

Le dimensioni di tali strutture, tra 20 e 100 nm, sono però troppo piccole per poterle ritenere originate in cellule viventi quali noi conosciamo





Europa

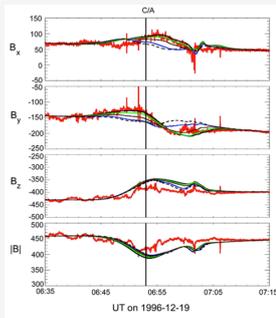


- Il secondo dei 4 satelliti galileiani di Giove
- La sua superficie non è abitabile  
 $\langle T_s \rangle = 103 \text{ K}$ ,  $P_s = 10^{-6} \text{ Pa}$
- Ciononostante, è uno dei corpi più interessanti dal punto di vista delle ricerche astrobiologiche nel Sistema Solare

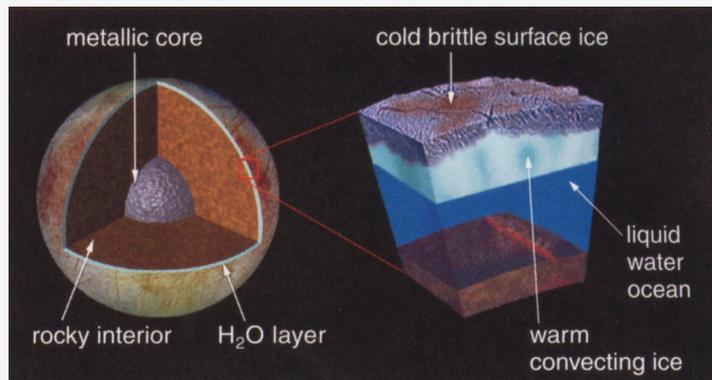
Europa



- È stato l'oggetto di numerose osservazioni spaziali
- Le osservazioni più dettagliate sono state ottenute dalla sonda Galileo  
Lanciata nel 1989, ha fatto passaggi ravvicinati attorno a Europa nel 1997
- La superficie di Europa è costituita da uno strato di ghiaccio  $\text{H}_2\text{O}$   
La morfologia superficiale, con pochissimi crateri d'impatto, suggerisce che la superficie sia costantemente rimodellata  
La superficie mostra diversi tipi di strutture poco profonde  
Enfatizzate dai loro diversi valori di albedo



## Europa



- Sotto lo strato di ghiaccio si ritiene che esista un oceano di acqua liquida

Non si conosce lo spessore dello strato di ghiaccio (da pochi km a decine di km)

- L'evidenza di acqua liquida è indiretta

Misure magnetometriche effettuate dalla sonda Galileo indicano la presenza di uno strato interno con conduttività elettrica simile a quella dell'acqua salata

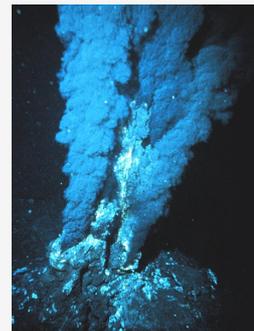
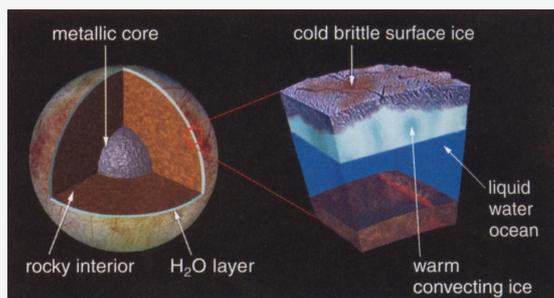
Khurana et al. (1998)

Si ritiene inoltre che possano esistere sorgenti di energia termica in profondità, indotte dalle forze mareali dovute all'interazione gravitazionale con Giove

- La densità media,  $\rho=3.0 \text{ g cm}^{-3}$ , è simile a quella dei silicati

L'interno dev'essere roccioso

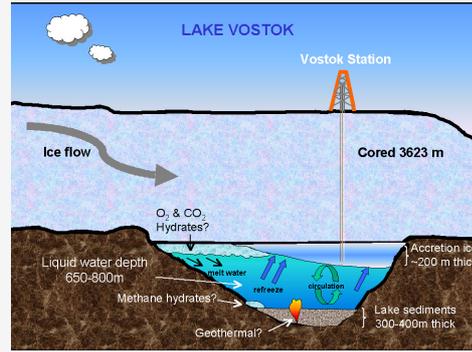
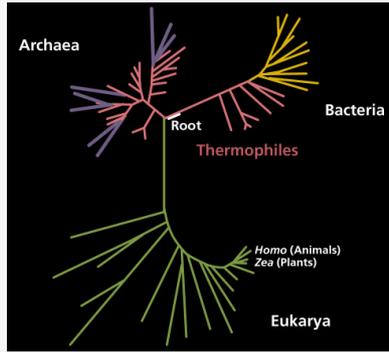
## Abitabilità dell'interno di Europa



?

- La presenza di acqua liquida sotto la superficie rende Europa il principale candidato per gli studi di abitabilità al di fuori della “zona abitabile circumstellare” (riferita all'abitabilità superficiale)
- E' plausibile che all'interfaccia tra gli oceani e i fondali oceanici vi siano condizioni simili a quelle degli “hydrothermal vents” terrestri
- Esisterebbero dunque i principali ingredienti dell'abitabilità  
Acqua liquida, fonti di energia, protezione da radiazioni esterne

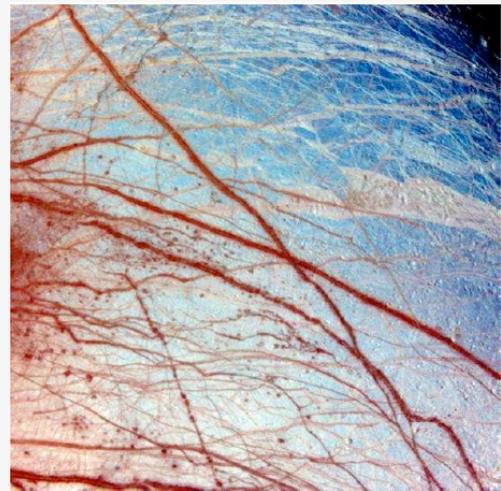
## Motivazioni della ricerca di vita su Europa



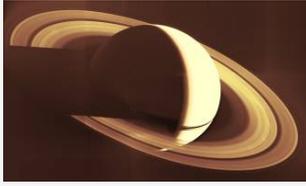
- Il fatto che gli organismi termofili presenti nei fondali oceanici terrestri si trovino alla radice dell'albero filogenetico, e quindi relativamente vicino all'origine della vita terrestre, aggiunge un particolare interesse per lo studio di Europa dal punto di vista astrobiologico, data la plausibile esistenza di condizioni fisico-chimiche simili nei fondali degli oceani di Europa
- L'esistenza di organismi criofili terrestri e le ricerche di vita nei laghi sotterranei dell'Antartide sono fortemente motivati dalla possibilità di applicare risultati e tecnologie alla ricerca di vita sotto i ghiacci di Europa

## Ricerche di biomarcatori sulla superficie di Europa

- La superficie ghiacciata di Europa mostra striature rossastre dovute a diversi composti, tra i quali sali di solfato e acido solforico  
La loro presenza suggerisce che vi sia scambio di materiale tra la superficie e gli strati sottostanti, compresi quelli liquidi
- I possibili percorsi chimici che portano alla formazione di tali composti sono attualmente studiati allo scopo di evidenziare possibili tracce di attività biologica  
Nella vita terrestre lo zolfo può essere prodotto biologicamente, nel qual caso il rapporto isotopico  $^{32}\text{S}/^{34}\text{S}$  tende ad aumentare
- Nelle future missioni spaziali su Europa si intendono fare misure dei rapporti isotopici dello zolfo in superficie, allo scopo di cercare evidenze di attività biologica



## Titano



### ➤ Principale satellite di Saturno

Raggio 40% di quello terrestre

Non abitabile in superficie

$\langle T_s \rangle = 94 \text{ K}$     $P_s = 1.47 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

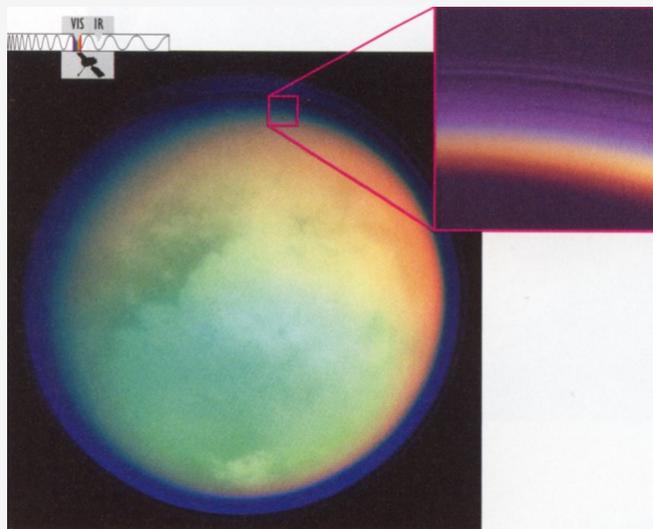
### ➤ Principali osservazioni dallo spazio

NASA Pioneer 11, Voyager 1 e 2 tra il 1979 e il 1982

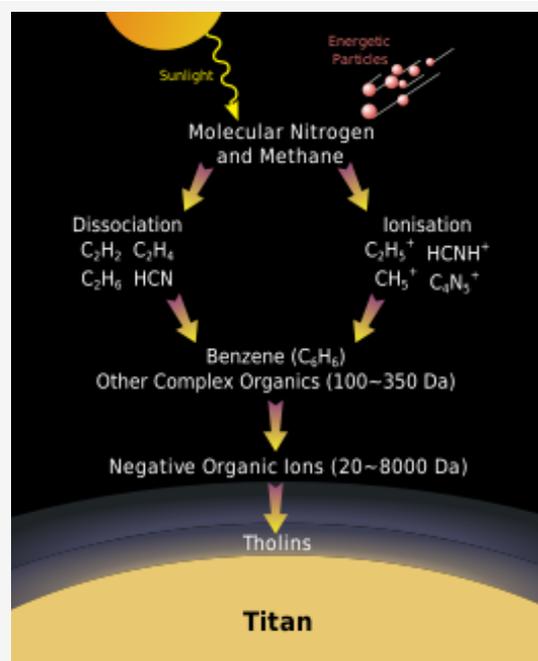
Missione NASA/ESA Cassini-Huygens, dal 2004

Mappe ravvicinate fatte da Cassini

Atterraggio in superficie del modulo Huygens, nel 2005



L'atmosfera di Titano



Il principale composto atmosferico è  $N_2$ , come sulla Terra

L'atmosfera superiore contiene una foschia (*haze*) di tolina (*tholin*)

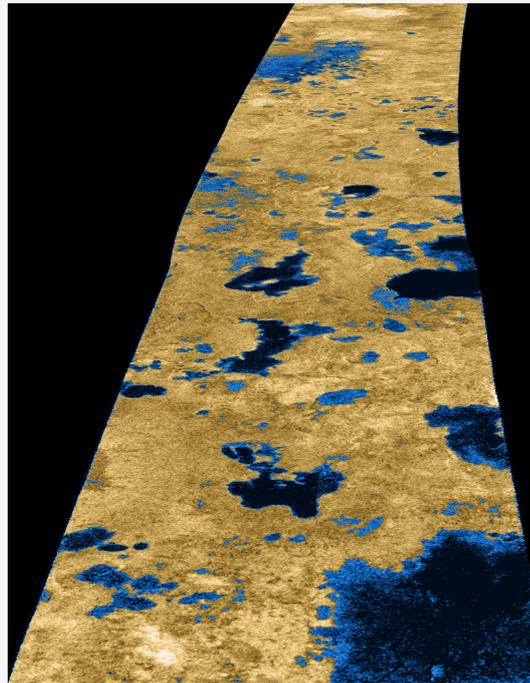
Composti organici derivanti dal processamento di semplici molecole organiche

## La superficie di Titano

- La pressione atmosferica superficiale è leggermente superiore a quella della Terra  
 $P_s = 1.47 \times 10^5 \text{ Pa}$
- Ciò che rende particolarmente interessante Titano è la presenza di grandi quantità di molecole organiche in fase liquida che formano laghi superficiali di idrocarburi

Principalmente metano ( $\text{CH}_4$ ) ed etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ )

Tali laghi sono stati scoperti dalla sonda *Cassini* e, con maggior dettaglio, nel sito di atterraggio del modulo *Huygens*



## Titano come laboratorio di astrobiologia

- La presenza di grandi quantità di materiale organico rende possibile la formazione di materiale organico complesso su Titano  
Simulazioni di laboratorio dell'atmosfera di Titano hanno dimostrato la possibilità di formazione di materiale prebiotico, tra cui amminoacidi e i nucleotidi degli acidi nucleici  
Horst et al. (2010)
- Laboratorio ideale per capire se sia possibile una biochimica basata su un liquido diverso dall'acqua, quali metano ed etano  
Le molecole del metano e dell'etano non sono però polari  
Non sappiamo se sia possibile l'esistenza di vita basata su di un liquido non polare  
Alcuni autori hanno preso in considerazione questa possibilità  
Schulze-Makuch & Irwin (2004)
- Sebbene non esistano attualmente evidenze di acqua, gli esperti ritengono plausibile che acqua liquida possa essere presente in uno strato con opportuna temperatura e pressione al di sotto la superficie

## Encelado

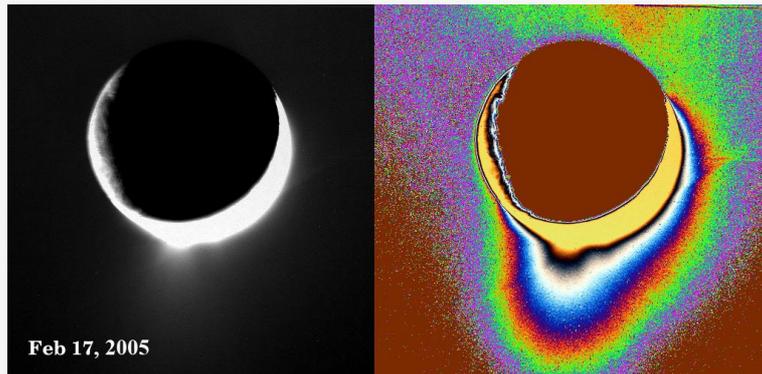
### ➤ Piccolo satellite di Saturno

Alcune sue caratteristiche suscitano interesse dal punto di vista astrobiologico  
Scoperte evidenze di getti di particelle ghiacciate e vapor d'acqua espulsi dal polo Sud del satellite

Tale attività è indicativa di una sorgente di energia di carattere geofisico

Il vapor d'acqua mostra semplici composti organici

McKay et al. (2008, AsBio, 8, 909)



## Future missioni di interesse astrobiologico verso Giove e Saturno

La missione che attualmente ha maggior probabilità di concretizzarsi è la

### ➤ *Europa Jupiter System Mission (EJSM)*

Dovrebbe essere svolta congiuntamente da NASA ed ESA per  
l'esplorazione delle lune di Giove

L'approvazione della missione era subordinata alla vittoria della gara di  
interesse con la *Titan Saturn System Mission*, diretta verso Titano ed  
Encelado

La scelta a favore della missione EJSM è avvenuta nel febbraio del 2009

Tale scelta è stata, in parte, dettata da considerazioni pratiche, quali la minor  
durata del viaggio e il minor costo rispetto alla missione su Saturno-Titano

## 5. Ricerca di vita e ambienti abitabili nell'Universo

### 5.2 Pianeti extrasolari

### Pianeti extrasolari e astrobiologia

- Per i pianeti extrasolari è impossibile applicare le tecniche di ricerca astrobiologica utilizzabili nel Sistema Solare
  - Ci si concentra su abitabilità e ricerca di biomarcatori
- **Abitabilità**
  - Dallo studio delle proprietà orbitali e fisiche dei pianeti
    - Ci limitiamo qui a considerare pianeti abitabili in superficie, che si trovino nella zona abitabile circumstellare
    - Esistono studi teorici di abitabilità di satelliti naturali attorno a pianeti giganti extrasolari
- **Ricerca di biomarcatori**
  - Dallo studio degli spettri delle atmosfere planetarie

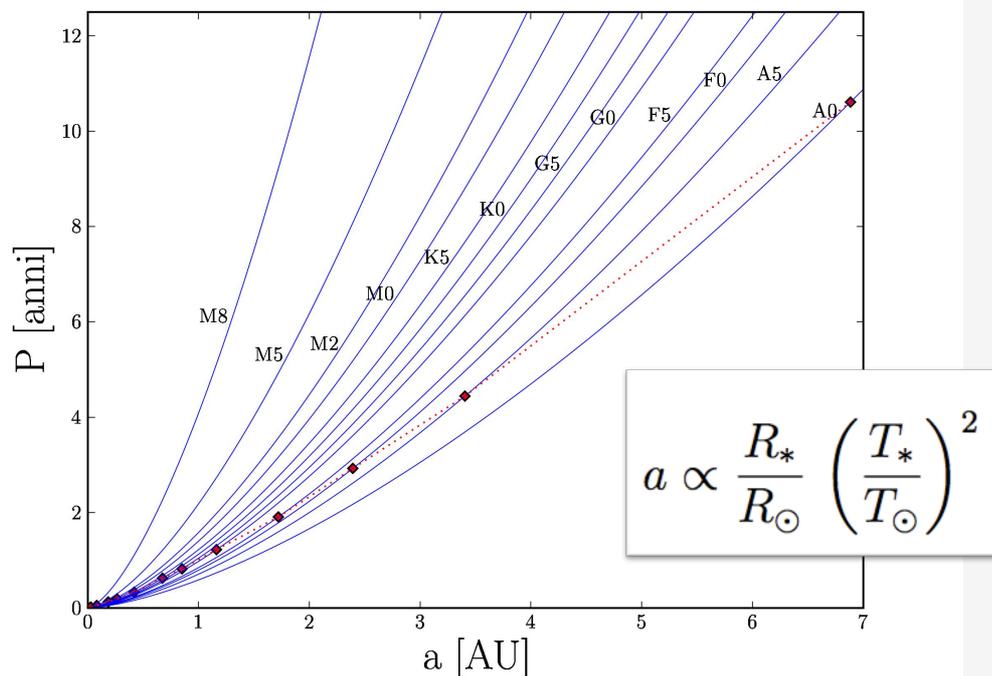
## Ricerche di pianeti extrasolari abitabili

Nonostante il gran numero di pianeti extrasolari finora scoperti, è estremamente difficile trovare pianeti con condizioni ottimali di abitabilità

Vediamo quali sono le limitazioni osservative per questo tipo di ricerca, riepilogando quanto già detto in generale riguardo i metodi osservativi di pianeti extrasolari

## Rivelazione di pianeti abitabili: bias osservativi

Per scoprire pianeti nella zona abitabile circumstellare occorre una baseline temporale osservativa che cresce all'aumentare della temperatura superficiale delle stelle centrali



## Rivelazione di pianeti abitabili: bias osservativi

➤ La baseline temporale osservativa non rappresenta un grosso problema

I pianeti nella zona abitabile circumstellare di stelle fredde possono essere scoperti in tempi ragionevoli

I pianeti nella zona abitabile circumstellare di stelle calde richiedono tempi lunghi; d'altra parte tali pianeti sono per certi versi meno interessanti, in quanto mancano del requisito di abitabilità continua che riteniamo importante per la ricerca di forme di vita evolute

➤ Esistono però altri bias osservativi di vario tipo

Dipendono dal tipo di tecnica osservativa utilizzata

➤ Prendiamo in considerazione le principali tecniche osservative

*Imaging* diretto

Metodo Doppler (delle velocità radiali)

Metodo dei transiti

## Rivelazione di pianeti abitabili mediante imaging diretto

L'osservazione diretta (*imaging*) di un pianeta extrasolare permette, in linea di principio, di misurare la separazione angolare stella-pianeta

$$\vartheta = \arctan \frac{d}{\ell} \quad , \quad (5.2)$$

e di ricavare la distanza stella-pianeta,  $d$ , nota la distanza della stella dall'osservatore,  $\ell$ . In questo caso, si assume  $a \simeq d$ , e si usa l'equazione (5.1) per ricavare indirettamente il periodo orbitale  $P$ , che può essere anche di centinaia di anni.

L'Eq. (5.2) indica che  $\vartheta \sim \ell^{-1}$ , ovvero che la separazione angolare scala con l'inverso della distanza della stella dall'osservatore. Questo fatto introduce un bias osservativo che favorisce la scoperta di pianeti in stelle vicine.

Data la notevole densità di stelle di bassa massa  
il fatto di selezionare stelle vicine  
porta a favorire stelle di piccola massa, quali le stelle M

## Rivelazione di pianeti abitabili mediante imaging diretto

Se elenchiamo i diversi tipi pianeti in ordine di difficoltà crescente per la loro osservabilità mediante immagine diretta otteniamo la seguente sequenza: pianeti giganti giovani, giganti vecchi, pianeti tipo Nettuno, pianeti rocciosi lontani dalla zona abitabile, e infine pianeti rocciosi abitabili.

Con l'attuale strumentazione da terra si pensa sia possibile scoprire qualche decina di giganti giovani e qualche raro caso di giganti vecchi. Simili risultati ci si aspetta di ottenere dallo spazio con il JWST (James Webb Space Telescope). Per fare di meglio bisognerebbe avere un telescopio spaziale di 1.5 m con coronografo. Con tale strumentazione si riuscirebbe a scoprire decine di giganti giovani e vecchi, decine di Nettuni e qualche raro caso di pianeta roccioso lontano dalla zona abitabile. Con la futura strumentazione da terra, tipo ELT (Extremely Large Telescope), si potrebbero scoprire centinaia di giganti giovani e vecchi, ma per il resto non si riuscirebbe a far di meglio rispetto al coronografo spaziale di 1.5 m.

Come si vede nessun progetto strumentale tra quelli previsti attualmente sarà in grado di trovare pianeti rocciosi nella zona abitabile. Per realizzare tale risultato osservativo servirebbe strumentazione spaziale con coronografi e possibilmente specchi multipli la cui realizzazione potrebbe richiedere tra i 15 e 20 anni. Il campione che si otterrà conterrà preferibilmente pianeti in stelle vicine, dato il bias osservativo sopra menzionato.

## Rivelazione di pianeti abitabili mediante il metodo Doppler

La rivelazione di pianeti nella zona abitabile presenta difficoltà osservative anche con il metodo di maggior successo, quello delle velocità radiali

Anche il metodo delle velocità radiali è sensibile alla distanza  $\ell$  tra osservatore e pianeta

Il flusso di fotoni stellari scala come l'inverso del quadrato della distanza dell'osservatore; pertanto il rapporto segnale/rumore dello spettro, che va come la radice quadrata del numero di fotoni raccolti, scalerà con l'inverso della distanza; a parità di tempo di osservazione le misure di velocità radiale saranno più accurate in stelle più vicine

Anche in questo caso, data la notevole densità di stelle di bassa massa, il fatto di selezionare stelle vicine porta a favorire stelle di piccola massa, quali le stelle M

## Rivelazione di pianeti abitabili mediante il metodo Doppler

Le velocità radiali del *reflex motion* stellare sono al limite dell'accuratezza delle misure. Ad esempio, nel caso del Sole, il moto indotto da Giove è di 12.4 m/s, mentre quello indotto dalla Terra 8.9 cm/s. Il fatto che la semiampiezza del segnale,  $K$ , sia direttamente proporzionale a  $M_p$  spiega perchè il metodo riveli preferibilmente pianeti massicci.

L'attuale limite di accuratezza delle misure di velocità radiale è dell'ordine di  $\approx 0.4$  m/s. Tale valore è sufficiente a scoprire pianeti con una decina di masse terrestri attorno a una stella di tipo solare.

Sono in fase di sviluppo miglioramenti tecnologici atti ad aumentare sia l'accuratezza che la stabilità di tali misure per lunghi periodi di tempo. La stabilità è fondamentale per misurare parametri orbitali di pianeti a lungo periodo. Uno dei progressi più importanti in questo campo è l'introduzione della tecnica del *laser comb*<sup>1</sup> per la calibrazione in lunghezza d'onda degli spettri.

## Rivelazione di pianeti abitabili mediante il metodo Doppler

In linea di principio, con l'applicazione di nuove tecniche, è possibile raggiungere una accuratezza dell'ordine di 0.1 m/s, sufficiente a rivelare un analogo Terra-Sole. In pratica, i limiti di applicazione del metodo sono legati alla compresenza di segnali spuri, dovuti a fenomeni di attività e variabilità stellare, che possono mascherare il segnale Doppler indotto dal pianeta. Esempi di tali fenomeni sono le pulsazioni intrinseche stellari e l'attività magnetica delle atmosfere stellari (macchie e brillamenti).

A causa di queste limitazioni, al momento attuale l'applicazione del metodo Doppler non permette la rivelazione di pianeti di massa terrestre orbitanti attorno a stelle di tipo solare. L'attenzione delle surveys osservative è pertanto concentrata su stelle per le quali il metodo offre maggiori facilità di rivelamento di pianeti. Dall'Eq. (5.3) si vede che la semiampiezza della curva di velocità radiale scala come

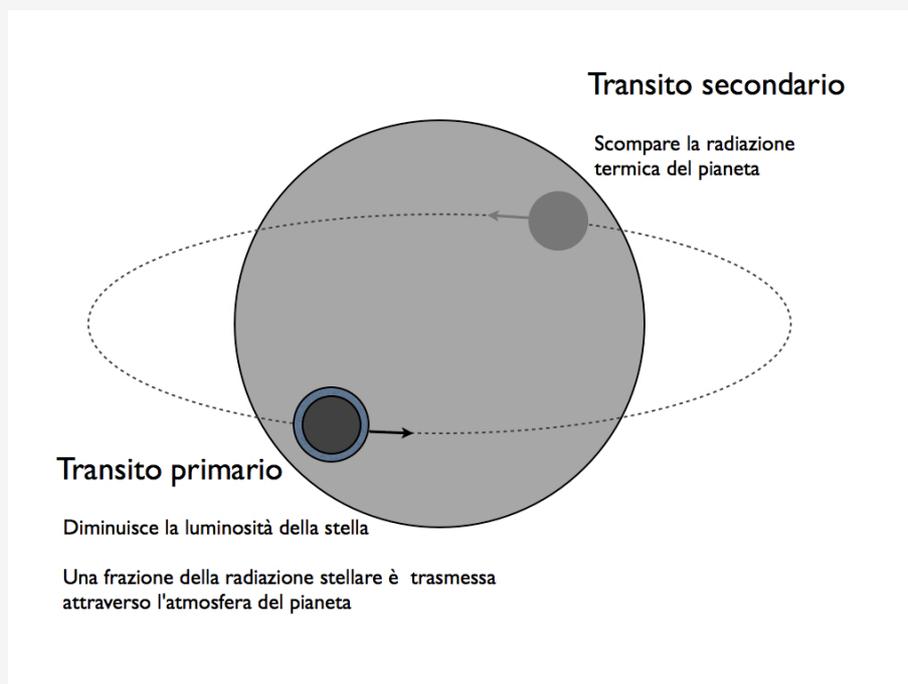
$$K \sim (a M_*)^{-1/2} . \quad (5.6)$$

### ➤ Vantaggi delle stelle M nel metodo Doppler

Il vantaggio della minor massa stellare si combina con quello della minor distanza della zona abitabile circumstellare

A parità di massa planetaria, il segnale Doppler di un pianeta nella zona abitabile di una stella M è tra  $\sim 3$  e 30 volte più forte di quello che si avrebbe per un pianeta abitabile attorno a una stella di tipo solare

## Rivelazione di pianeti abitabili mediante il metodo dei transiti



## Rivelazione di pianeti abitabili mediante il metodo dei transiti

La profondità del minimo nella curva di luce è facilmente riconducibile ai raggi della stella e del pianeta,  $R_*$  e  $R_p$ , mediante semplici considerazioni geometriche. Trascurando il flusso emesso dal pianeta e l'oscuramento al bordo del disco stellare (*limb darkening*), la variazione relativa di flusso ricevuto dall'osservatore durante il transito primario è data da

$$\Delta F = \frac{F - F_{tr}}{F} = \left( \frac{R_p}{R_*} \right)^2, \quad (5.7)$$

dove  $F$  è il flusso ricevuto fuori dal transito e  $F_{tr}$  il flusso osservato al minimo della curva di luce. A titolo di esempio, l'osservazione remota del Sistema Solare nel piano dell'eclittica produrrebbe un segnale fotometrico di  $\approx 1\%$  per il transito di Giove davanti al Sole e  $\approx 0.01\%$  per il transito della Terra. La precisione fotometrica è pertanto essenziale nelle misure di transiti.

Poiché il segnale di transito cresce quadraticamente con  $R_p/R_*$ , ne consegue l'esistenza di un bias osservativo che favorisce il rilevamento di pianeti giganti orbitanti stelle di piccola dimensione. Questo bias osservativo è simile a quelli del metodo Doppler, con il quale è più facile rilevare pianeti massicci orbitanti stelle di piccola massa.

## Rivelazione di pianeti abitabili mediante il metodo dei transiti

Ricordiamo che, a parità di albedo planetaria e di effetto serra, la temperatura di equilibrio alla superficie di un pianeta scalerà come

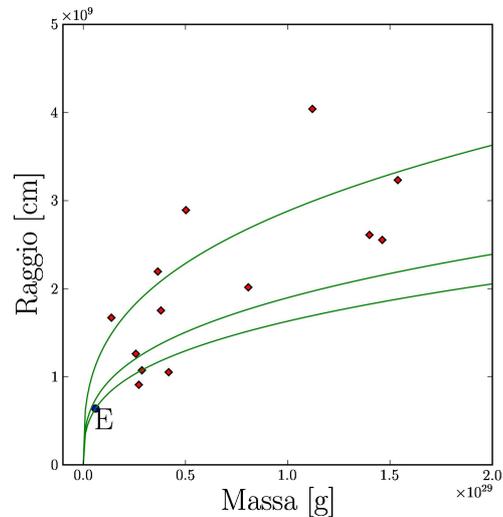
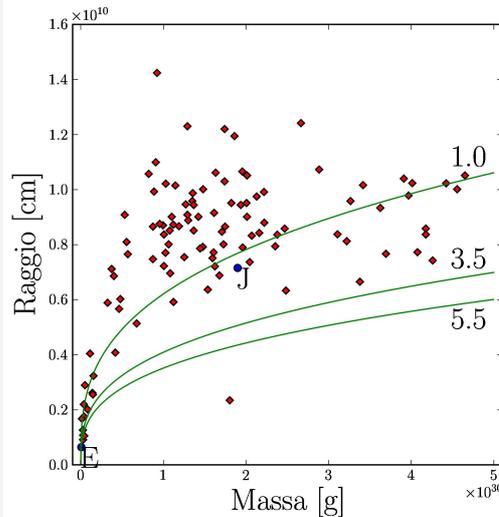
$$T_p \propto \left( \frac{R_*}{a} \right)^{\frac{1}{2}} T_* \quad , \quad (2.10)$$

Anche la probabilità geometrica di osservare un transito porta a dei bias osservativi. La relazione (5.8) ci dice infatti che, a parità di tipo di stella, sono fortemente favoriti pianeti orbitanti in prossimità della stella. È interessante vedere lo stesso effetto dal punto di vista della temperatura planetaria, rilevante per l'abitabilità. Combinando l'Eq. (5.8) con la (2.10) si ottiene  $\mathcal{P}_{tr} \sim (T_p/T_*)^2$ , da cui si deduce che il bias osservativo tende a farci scoprire pianeti caldi. Se vogliamo aumentare la probabilità geometrica di scoprire pianeti con una temperatura prefissata, ottimale per l'abitabilità, dobbiamo pertanto concentrarci su stelle più fredde. Questo fatto è un ulteriore vantaggio per studiare stelle di tipo M. Trovare transiti di pianeti abitabili in stelle più calde di quelle M non è impossibile, ma richiede l'analisi di un campione di stelle più numeroso al fine di contrastare il minor valore di  $\mathcal{P}_{tr}$ .

- Per quanto detto, la pressione ad cercare in prima priorità pianeti abitabili attorno a stelle M è estremamente forte
- Esistono tuttavia dubbi sull'effettiva abitabilità di pianeti che si trovino nella zona abitabile circumstellare di stelle M
  - I possibili problemi riguardano:
    - L'intensa attività stellare caratteristica delle stelle di tipo spettrale avanzato, che potrebbe portare a effetti di “space weather” particolarmente intensi
    - La vicinanza del pianeta alla stella, che può portare a sincronizzare il periodo orbitale con il periodo di rotazione (“tidal locking”) con pesanti implicazioni sul clima planetario
    - La diversa distribuzione spettrale delle stelle M rispetto a quelle di tipo solare, che potrebbe portare ad una minor efficienza nei processi di fotosintesi

## Ricerca di pianeti abitabili rocciosi

Dalla combinazione delle tecniche osservative delle velocità radiali e dei transiti riusciamo a determinare la densità media dei pianeti



La maggior parte dei pianeti scoperti sono di tipo gassoso, ma stiamo cominciando a scoprire pianeti di tipo roccioco

### Lista di super-Terre finora scoperte (maggio 2012)

HD 1461 b	a=0.0635 AU	M=7.63 M(earth)
HD 7924 b	a=0.0566 AU	M=9.26 M(earth)
HD 20794 b	a=0.1207 AU	M=2.70 M(earth)
HD 20794 c	a=0.2036 AU	M=2.36 M(earth)
HD 20794 d	a=0.3498 AU	M=4.70 M(earth)
GJ 176 b	a=0.0657 AU	M=8.27 M(earth)
HD 40307 c	a=0.0801 AU	M=6.72 M(earth)
HD 40307 b	a=0.0469 AU	M=4.10 M(earth)
HD 40307 d	a=0.1324 AU	M=8.93 M(earth)
CoRoT-7 b	a=0.0172 AU	M=4.95 M(earth)
55 Cnc e	a=0.0154 AU	M=7.81 M(earth)
HD 85512 b	a=0.2604 AU	M=3.62 M(earth)
GJ 3634 b	a=0.0287 AU	M=7.06 M(earth)
HD 97658 b	a=0.0797 AU	M=6.40 M(earth)
61 Vir b	a=0.0501 AU	M=5.11 M(earth)
GJ 581 c	a=0.0729 AU	M=5.33 M(earth)
GJ 581 d	a=0.2177 AU	M=6.08 M(earth)
GJ 581 e	a=0.0285 AU	M=1.95 M(earth)
GJ 1214 b	a=0.0143 AU	M=6.47 M(earth)
HD 156668 b	a=0.0500 AU	M=4.15 M(earth)
Kepler-10 b	a=0.0168 AU	M=4.52 M(earth)
Kepler-20 b	a=0.0454 AU	M=8.46 M(earth)
Kepler-20 d	a=0.3453 AU	M=7.53 M(earth)
HD 181433 b	a=0.0801 AU	M=7.55 M(earth)
Kepler-11 b	a=0.0911 AU	M=4.30 M(earth)
Kepler-11 d	a=0.1542 AU	M=6.10 M(earth)
Kepler-11 f	a=0.2495 AU	M=2.30 M(earth)
Kepler-11 e	a=0.1939 AU	M=8.40 M(earth)
Kepler-18 b	a=0.0447 AU	M=6.88 M(earth)
HD 215497 b	a=0.0466 AU	M=6.63 M(earth)
GJ 876 d	a=0.0208 AU	M=5.86 M(earth)

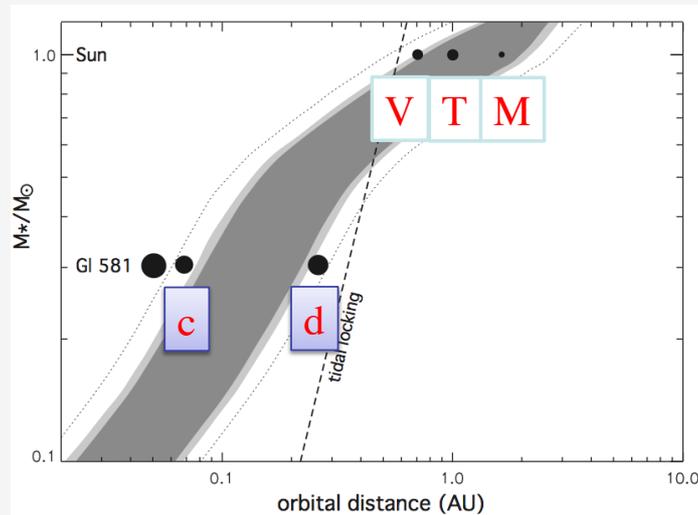
Sono attualmente i migliori candidati tra cui cercare pianeti rocciosi

Vi è un particolare interesse a cercare pianeti nella zona abitabile all'interno di tale campione

Uno dei sistemi planetari più interessanti finora scoperto è quello attorno alla stella G1581, che presenta alcuni pianeti prossimi alla zona abitabile

Per capire se i pianeti se i pianeti siano effettivamente abitabili è possibile sviluppare dei modelli di clima planetario

Vediamo alcuni esempi di applicazione di modelli climatici EBM ai pianeti G1581c e G1581d



47

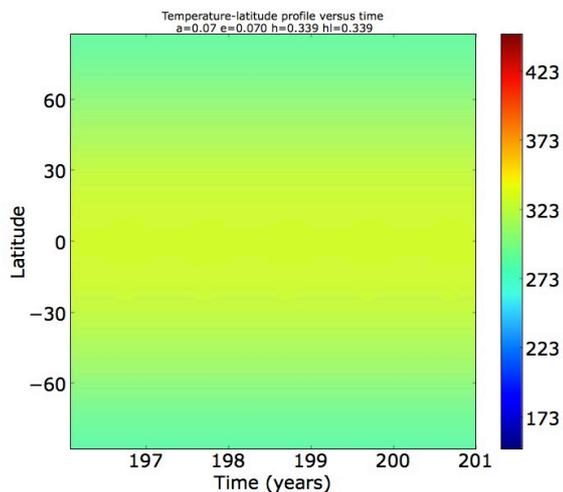
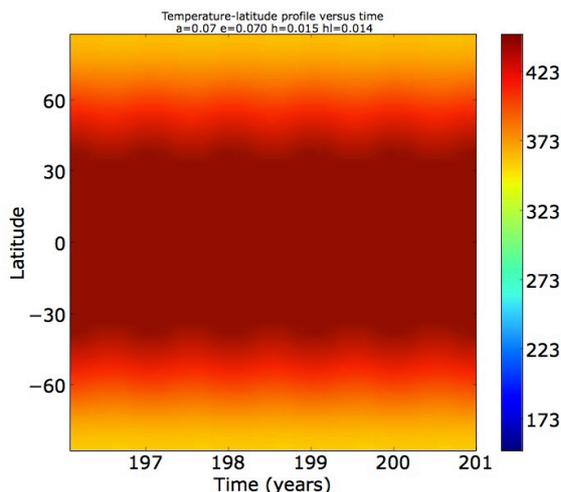
### Abitabilità di G1581c

Usando un modello di clima uguale a quello della Terra il pianeta risulta inabitabile ( $\langle T \rangle > 373$  K)

Usando un modello con una colonna atmosferica 10% di quella terrestre il pianeta risulterebbe abitabile

In realtà, essendo una super-Terra, ci si aspetta che possa avere un'atmosfera con pressione maggiore di quella terrestre

Verosimilmente G1581c è troppo caldo e ha evaporato l'eventuale acqua che fosse stata presente al momento della sua formazione



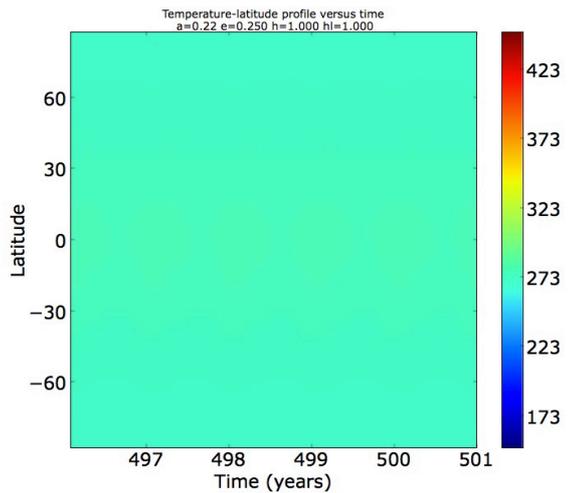
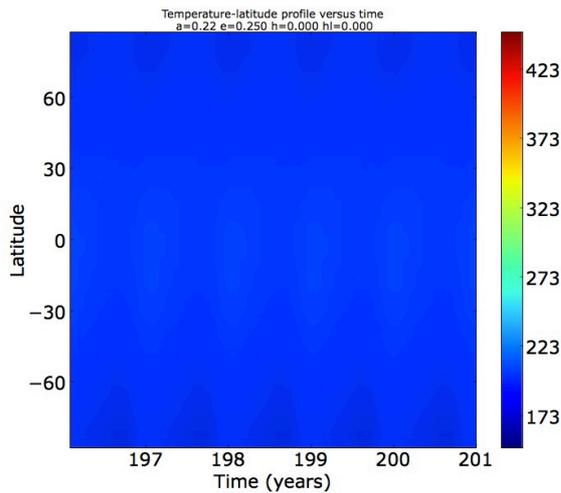
## Abitabilità di G1581d

Usando un modello di clima uguale a quello della Terra il pianeta risulta completamente ghiacciato

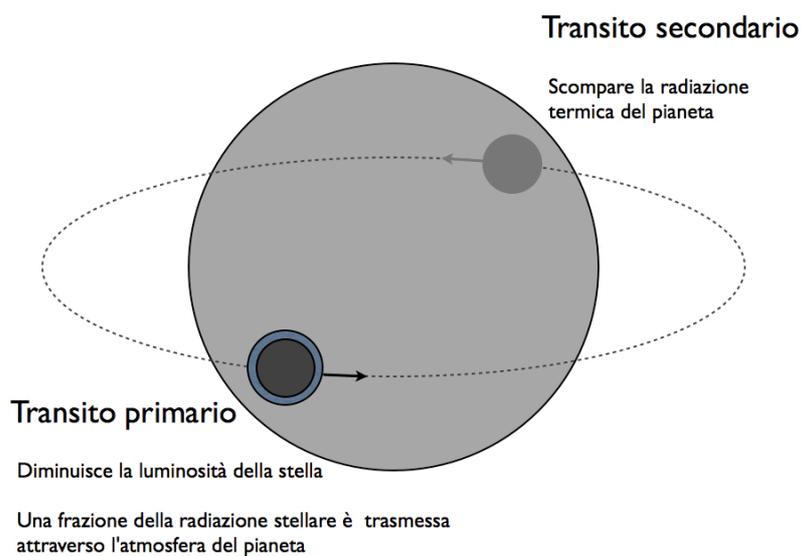
Affinchè il pianeta diventi abitabile bisogna aumentare la pressione di CO<sub>2</sub> fino a 8 bar (più di 3 ordini di grandezza rispetto al valore terrestre)

Essendo una super-Terra, potrebbe avere una pressione atmosferica maggiore; se avesse anche un alto livello di CO<sub>2</sub> potrebbe essere abitabile

Notare che se la pressione è così alta la temperatura superficiale del pianeta diventa estremamente uniforme

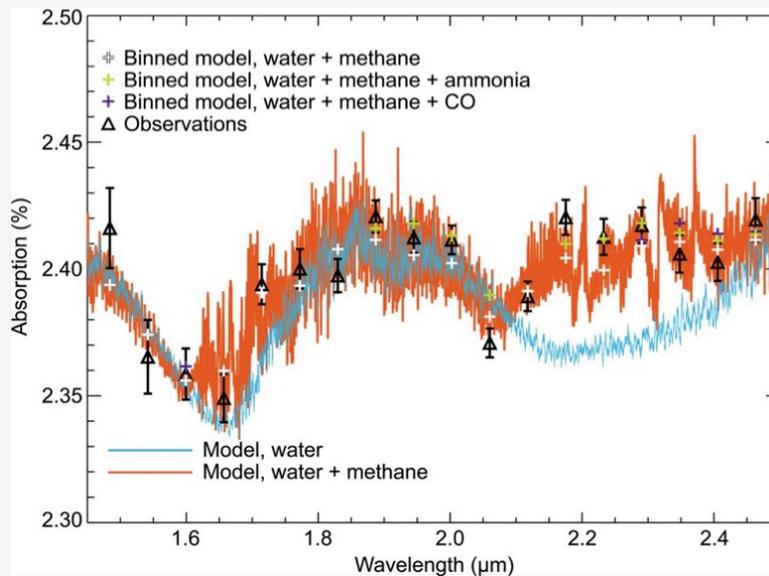


## Ricerche di biomarcatori: osservazioni delle atmosfere planetarie



## Spettroscopia di assorbimento di atmosfere planetarie

- Attualmente possibile osservare solo pianeti giganti gassosi
  - Trovati H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, CO



Astronomia Osservativa C, SP 5, Vladilo (2010)

51

## Caratterizzazione dei pianeti: atmosfere planetarie

- Impossibile al momento attuale pensare di ottenere spettri di atmosfere di pianeti di tipo terrestre mediante la tecnica dei transiti primari

L'atmosfera della Terra è estremamente sottile rispetto a quella di un pianeta gigante e pertanto le osservazioni di atmosfere di pianeti di tipo terrestre non sono fattibili né con la strumentazione esistente né con quella pianificata per il futuro. L'area effettiva dell'anello atmosferico che assorbe la luce stellare del transito primario (Fig. 5.3) è dell'ordine di  $\sim 2\pi h R_p$ , dove  $h$  è l'altezza di scala dell'atmosfera planetaria. Pertanto la frazione di assorbimento atmosferico rispetto all'emissione stellare scelerà come

$$\delta I \sim \frac{2 h R_p}{R_*^2} \quad , \quad (5.11)$$

Per riuscire a rilevare il segnale dello spettro atmosferico è pertanto indispensabile cercare pianeti con valori di  $h$  e  $R_p$  maggiori di quelli terrestri orbitanti stelle di piccolo raggio.

- Si ritiene possibile in un prossimo futuro riuscire a misurare spettri di atmosfere di pianeti tipo super-terre attorno a stelle di piccolo raggio

## Caratterizzazione dei pianeti: atmosfere planetarie

### ➤ Problema delle atmosfere di pianeti gemelli della Terra

Atmosfere molto sottili

Dallo spazio osservazioni non fattibili neppure con il James Webb telescopio  
forse con la generazione successiva

Da terra potrebbero forse effettuarsi con ELT

### ➤ Concentrarsi sulle super-Terre

Fattori geofisici e geochimici potrebbero essere non troppo diversi da quelli della Terra

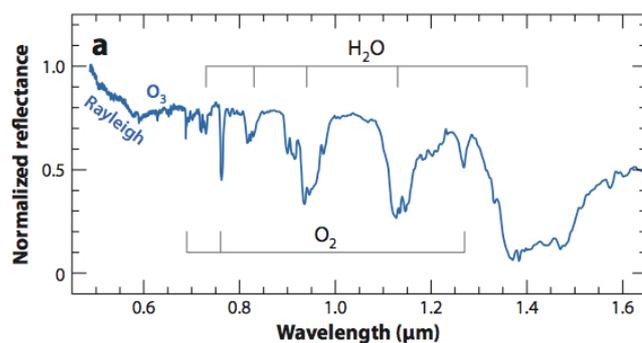
Si potrebbe cercare di studiare alcune decine di super-Terre piuttosto che un numero limitatissimo di gemelli della Terra

## Biomarcatori negli spettri di atmosfere planetarie

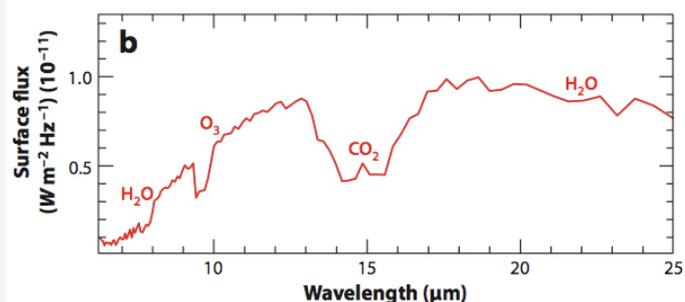
L'ossigeno viene considerato uno dei più promettenti biomarcatori  
In assenza di biosfera l'ossigeno tende a ossidare le superfici rocciose diminuendo drasticamente la sua concentrazione atmosferica

Spettri dell'atmosfera terrestre osservati dallo spazio

Spettro di riflessione nel visibile/vicino IR



Spettro di emissione infrarosso



## 5. Ricerca di vita e ambienti abitabili nell'Universo

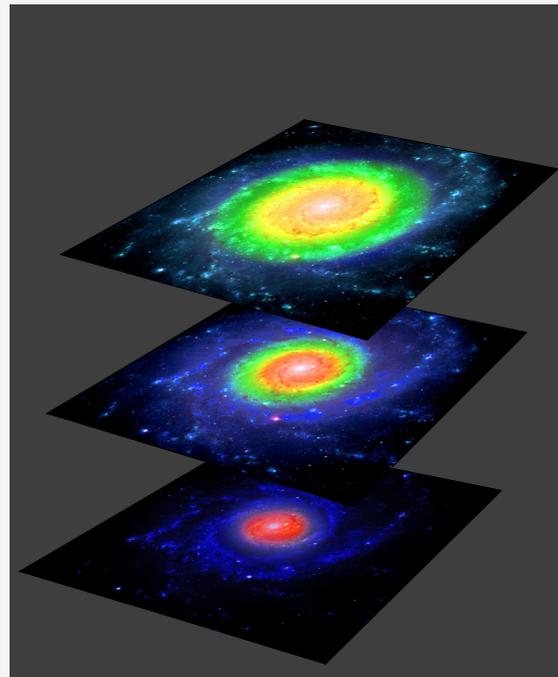
### 5.3 Zona abitabile Galattica

#### Zona abitabile Galattica

- È possibile definire una zona abitabile Galattica (GHZ) cercando opportuni criteri di abitabilità che siano dipendenti dalla distanza galattocentrica o, più in generale, dalla posizione nella Galassia

Nella formulazione originale della GHZ l'abitabilità veniva posta in relazione con una serie di fattori astrofisici legati all'evoluzione chimica Galattica

Poichè tali fattori presentano gradienti spaziali ed evolvono nel tempo, ne deriva la possibilità di definire una zona abitabile Galattica con posizione ed estensione variabili nel tempo



## Zona abitabile Galattica

- La definizione di “zona abitabile Galattica” presenta importanti differenze rispetto a quella di “zona abitabile circumstellare”

Il criterio di acqua liquida alla base della zona abitabile circumstellare si riferisce alla sostenibilità di qualsiasi forma di vita

I criteri della GHZ si riferiscono generalmente alla vita complessa

Comparabile a quella degli animali o delle piante complesse terrestri

Tale differenza introduce, di fatto, la scala di tempo dell'evoluzione della vita nella definizione di abitabilità

- Una seconda differenza riguarda la quantificazione dei criteri di abitabilità

Nel caso della zona abitabile circumstellare è possibile, in linea di principio, quantificare la distanza dalla stella centrale una volta fissate tutte le proprietà del pianeta e della stella centrale

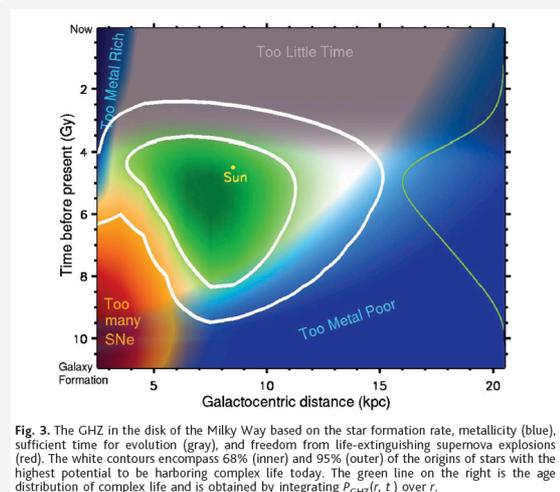
Nel caso della zona abitabile Galattica questo non è possibile: i criteri di abitabilità vanno infatti intesi in senso probabilistico

## Zona abitabile Galattica

- Abitabilità definita, originariamente, dalla presenza di abbondanze di metalli atte all'esistenza di pianeti condizioni fisiche non ostili alla vita
- Sulla base dei primi risultati degli studi di esopianeti si suppone che la formazione planetaria sia inibita nelle zone della Galassia dove la metallicità è troppo bassa (colore blu)
- Si suppone poi che, nelle regioni di intensa formazione stellare, il tasso di esplosioni di supernove sia talmente alto da generare condizioni ostili alla vita (colore rosso)
- Sulla base di tali supposizioni la vita potrebbe esistere solo in certe zone (colore verde) nell'arco dell'evoluzione Galattica

Gonzalez et al. 2001, Icarus, 152, 185

Lineweaver et al. 2004, Science 303, 59



## Problemi relativi alla definizione di zona abitabile Galattica

- A basse metallicità potrebbe diminuire la percentuale di pianeti massicci tipo Giove (quelli trovati finora), ma potrebbe aumentare la percentuale di pianeti di tipo terrestre  
Le osservazioni di pianeti extrasolari di tipo terrestre saranno fondamentali per chiarire quest'aspetto
- Non è chiaro il ruolo delle esplosioni di supernove nel contesto dell'evoluzione della vita  
Solo quelle estremamente vicine (improbabili) potrebbero davvero sterilizzare un pianeta  
In generale, potrebbero svolgere un ruolo importante ai fini dell'evoluzione delle specie viventi
- C'è ancora strada da fare per definire il concetto di abitabilità Galattica

## Mappe di abitabilità galattica ottenute da simulazioni di galassie

- Lavoro svolto in collaborazione con G. Murante (INAF-To), P. Monaco & L. Tornatore (Univ.Ts)

