EXOPA

Osservazioni e modelli di atmosfere esoplanetarie e Interazione stella-pianeta

SPECULA PANORMITANA MDCCXC

INAF
ISTITUTO NAZIONALE DI ASTROFISICA
OSSERVATORIO ASTRONOMICO DI PALERMO

DIFC

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

Il Gruppo ExoPa

Laura Affer

Serena Benatti

Alfredo Biagini

Davide Cardinale

Cesare Cecchi Pestellini

Angela Ciaravella

Salvatore Colombo

Fabio D'Anca

Mattia D'Arpa

Claudia Di Maio

Elisa Guerriero

Antonio Jiménez-Escobar

Daniele Locci

Antonio Maggio

Jesus Maldonado

Giusi Micela

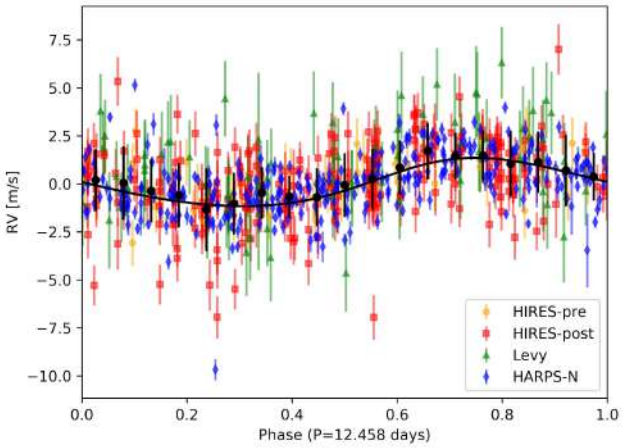
Antonino Petralia

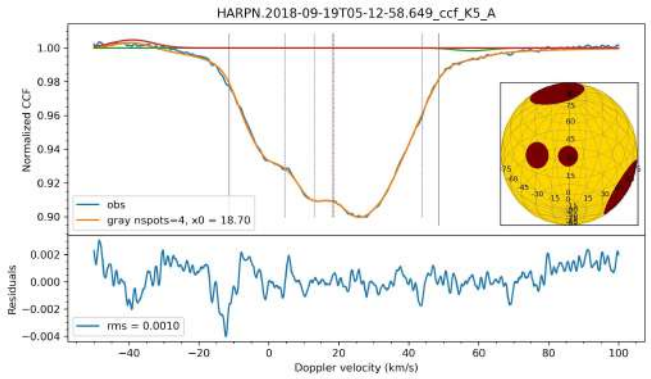
Ignazio Pillitteri

Valerio Fardella

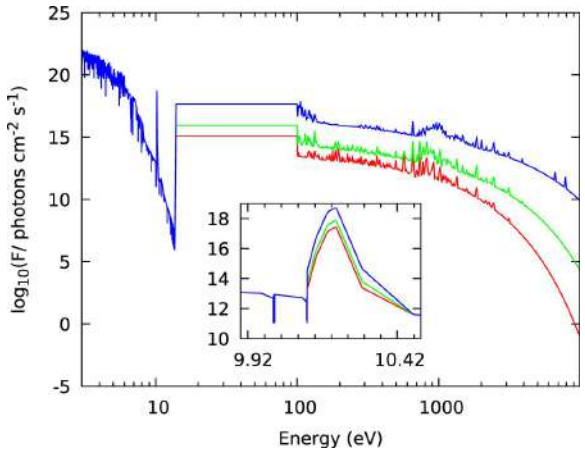
Di cosa ci occupiamo

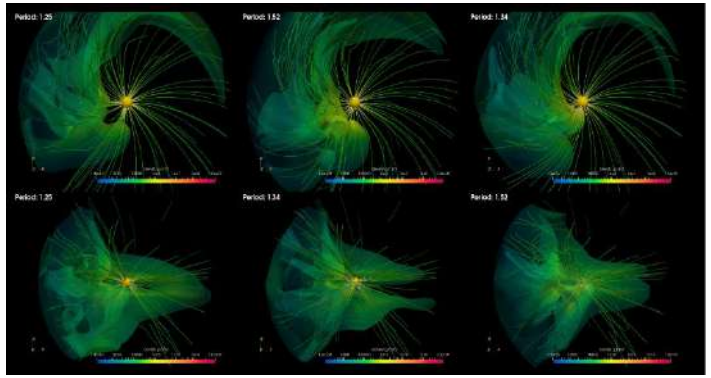
Rilevazione e caratterizzazione di sistemi planetari



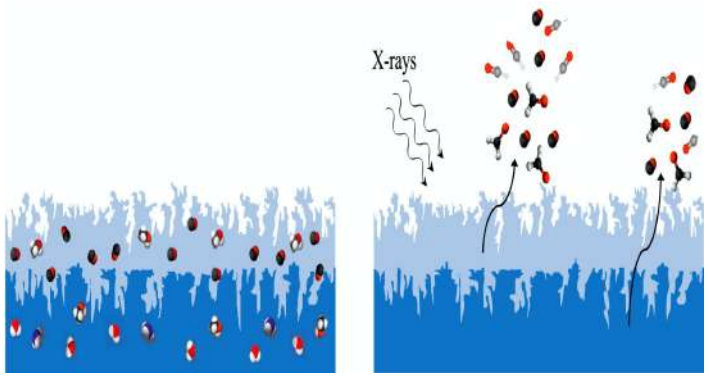


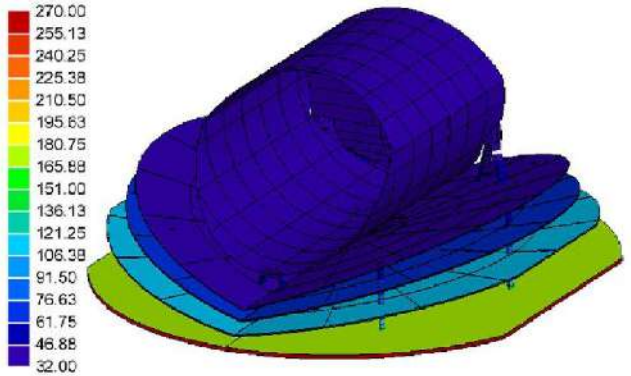
Atmosfere e interazione stella-pianeta





Esperimenti di laboratorio e Tecnologie per strumentazione spaziali

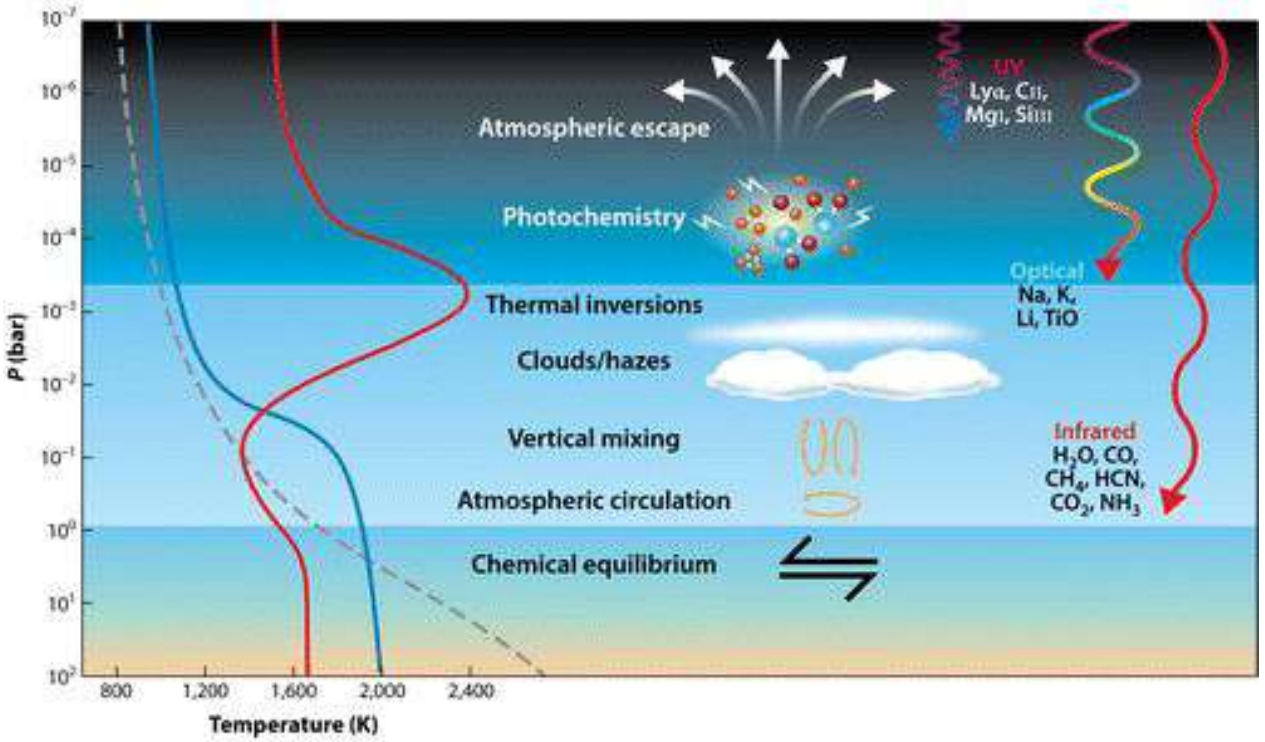




Atmosfere e interazione stella-pianeta

L'atmosfera di un (eso)pianeta:

- Quali pianeti hanno un' atmosfera?
- Temperatura, densità e composizione chimica;
- Dinamica e clima;
- Atmosfere primarie e secondarie;
- Evoluzione;
- Abitabilità.



Madhusudhan N. 2019. Annu. Rev. Astron. Astrophys. 57:617-63

Ruolo della stella:

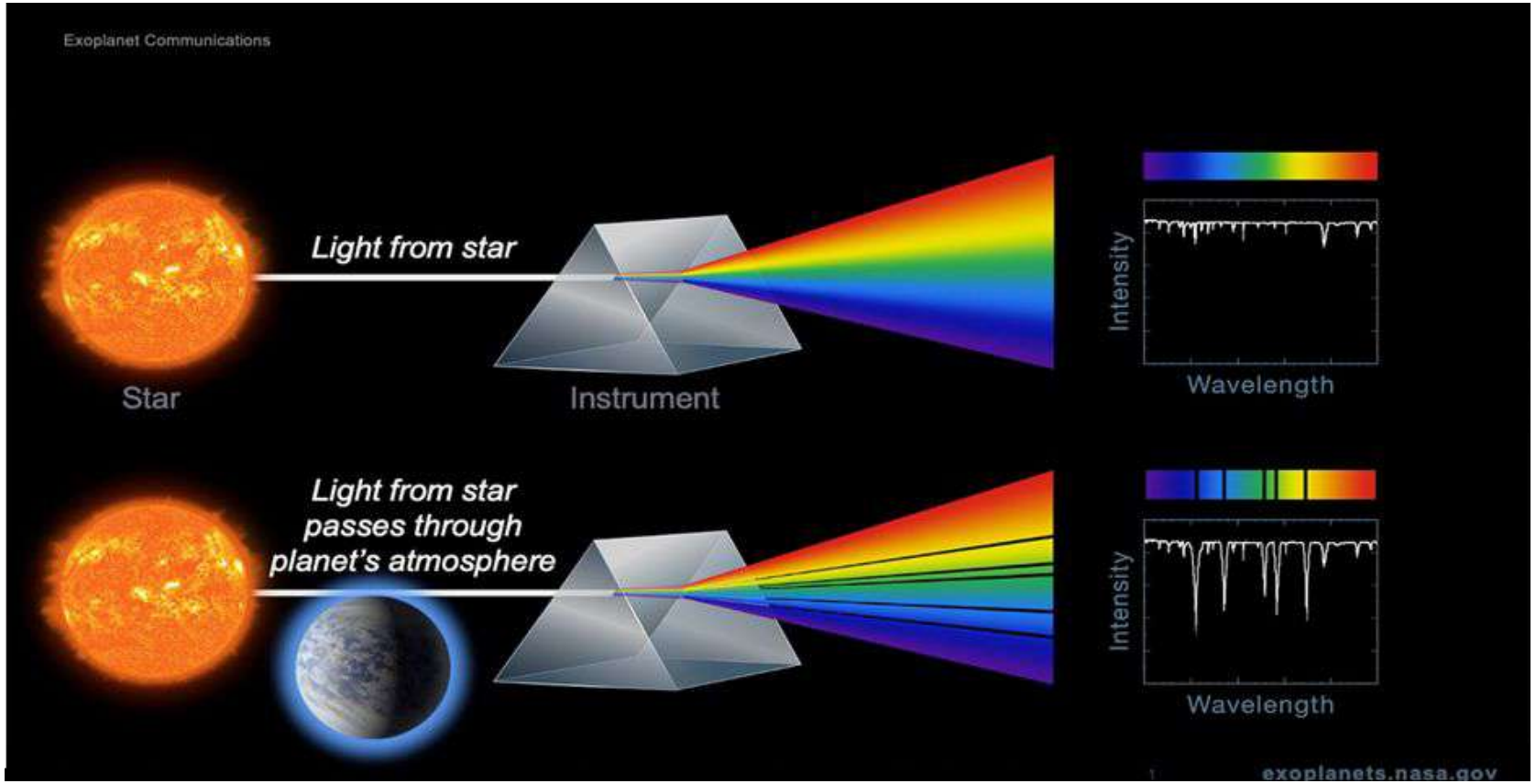
- Radiazione elettromagnetica
- Vento stellare e cme
- Interazioni gravitazionali

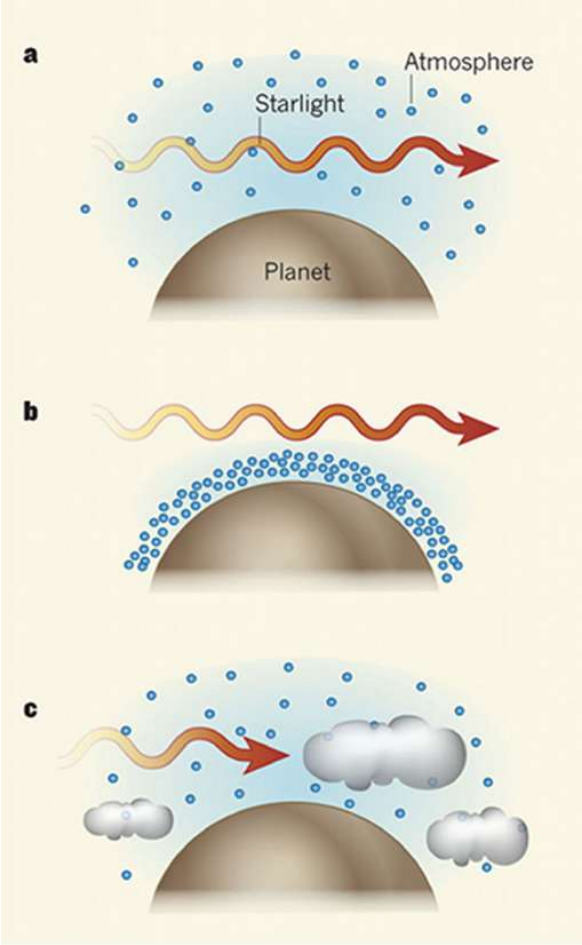
Come osserviamo le atmosfere

Spettroscopia in trasmissione

Analisi delle osservazioni per ricavare le proprietà dell'atmosfera:

- Temperatura
- Densità
- Composizione chimica





Spettroscopia ad alta risoluzione

Strumenti

HARPS-N, ESPRESSO
λ=378−691 nm

GIANO-B
λ=0.97 − 2.45 μm

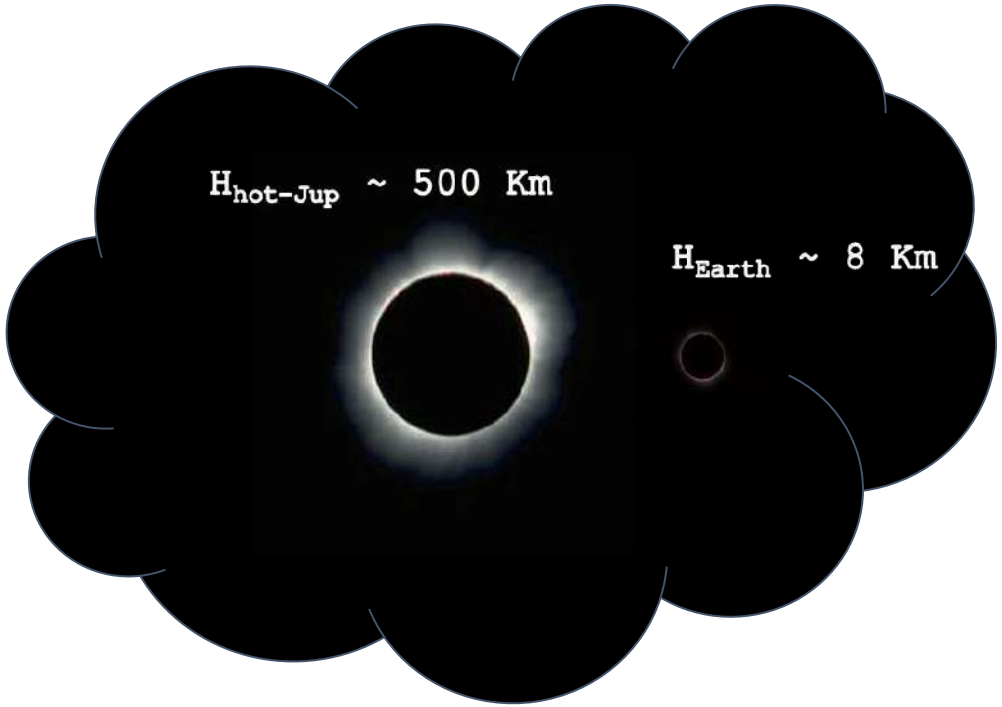
Risoluzione spettrale
$R = \Delta\lambda/\lambda$

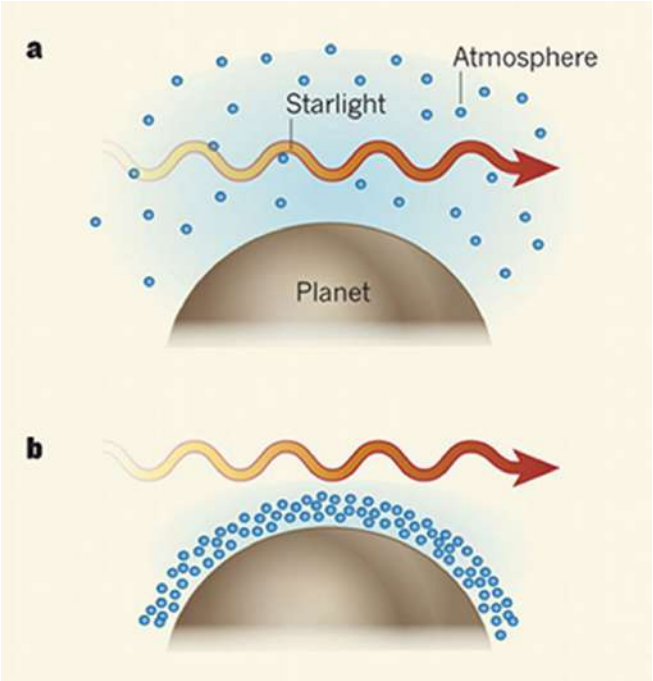
Altezza di scala
$H = K_B T/\mu g$

Target

Perchè i Gioviani caldi?

- Distanza dalla Stella
- Grande massa
- Grande raggio
- Alto contrasto

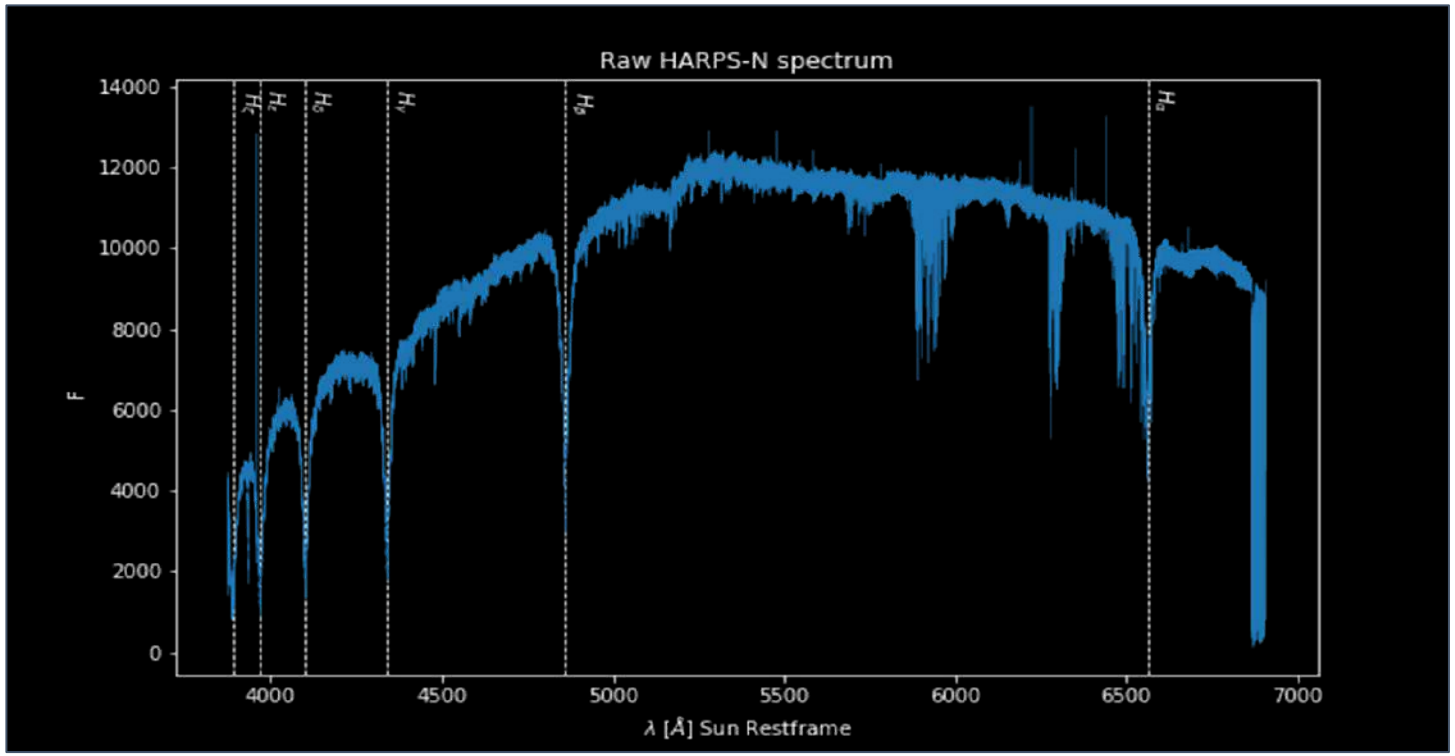




Analisi dati delle osservazioni

Spettro osservato è composto da:

- Spettro stellare
- Spettro planetario
- Contaminazione tellurica



Analisi di righe individuali

- Righe di Balmer dell'Idrogeno
- Doppietto del Sodio
- Righe H & K del Calcio

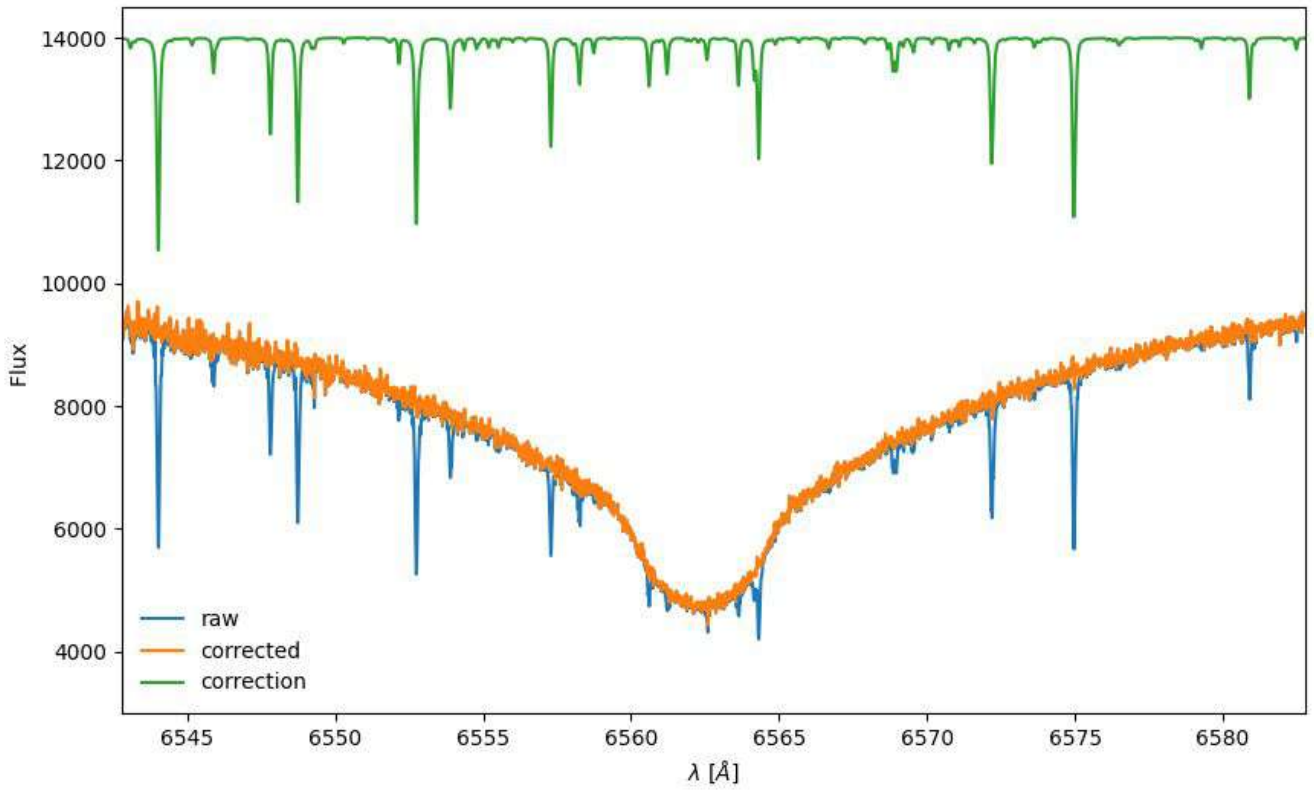
Rimozione telluriche

Righe in assorbimento dovute all'atmosfera terrestre

- Strette
- Solidali al sistema di riferimento della Terra
- Dipendono dalle condizioni atmosferiche
- Sensibili ad alcune lunghezze d'onda

Per rimuoverle utilizziamo **MOLECFIT**

- Crea un modello dell'assorbimento atmosferico per le condizioni di osservazione

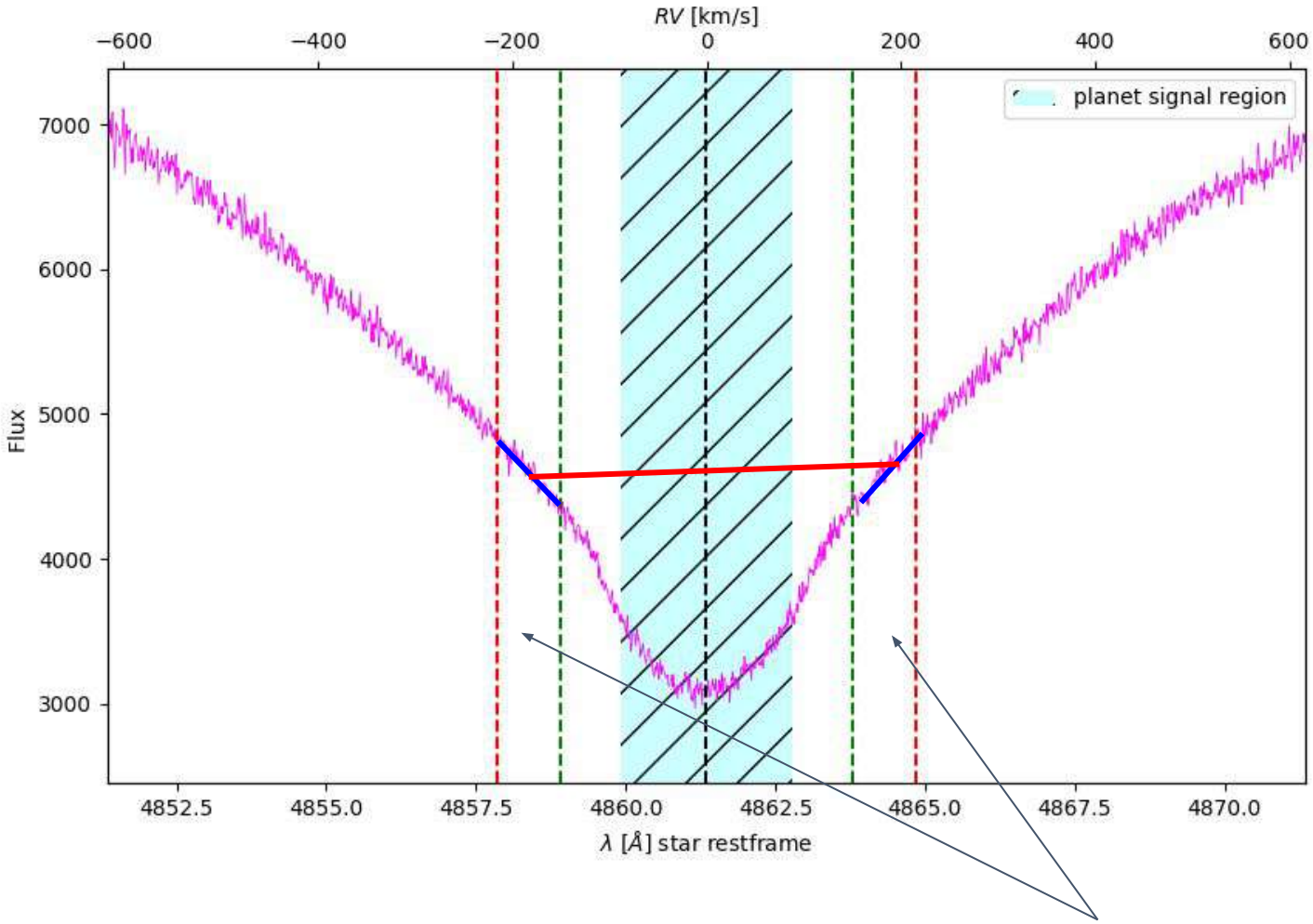


Selezione regione riga

- Normalizziamo gli spettri
  - Utilizziamo lo pseudo-continuo intorno alla riga
- Dobbiamo selezionare una regione che includa il segnale planetario
  - Calcolato usando il profilo di velocità radiale

Planet velocity profile

$$RV\,(\Phi) = Kp\ \ sin(2\pi\ \Phi)$$



Regioni per la normalizzazione

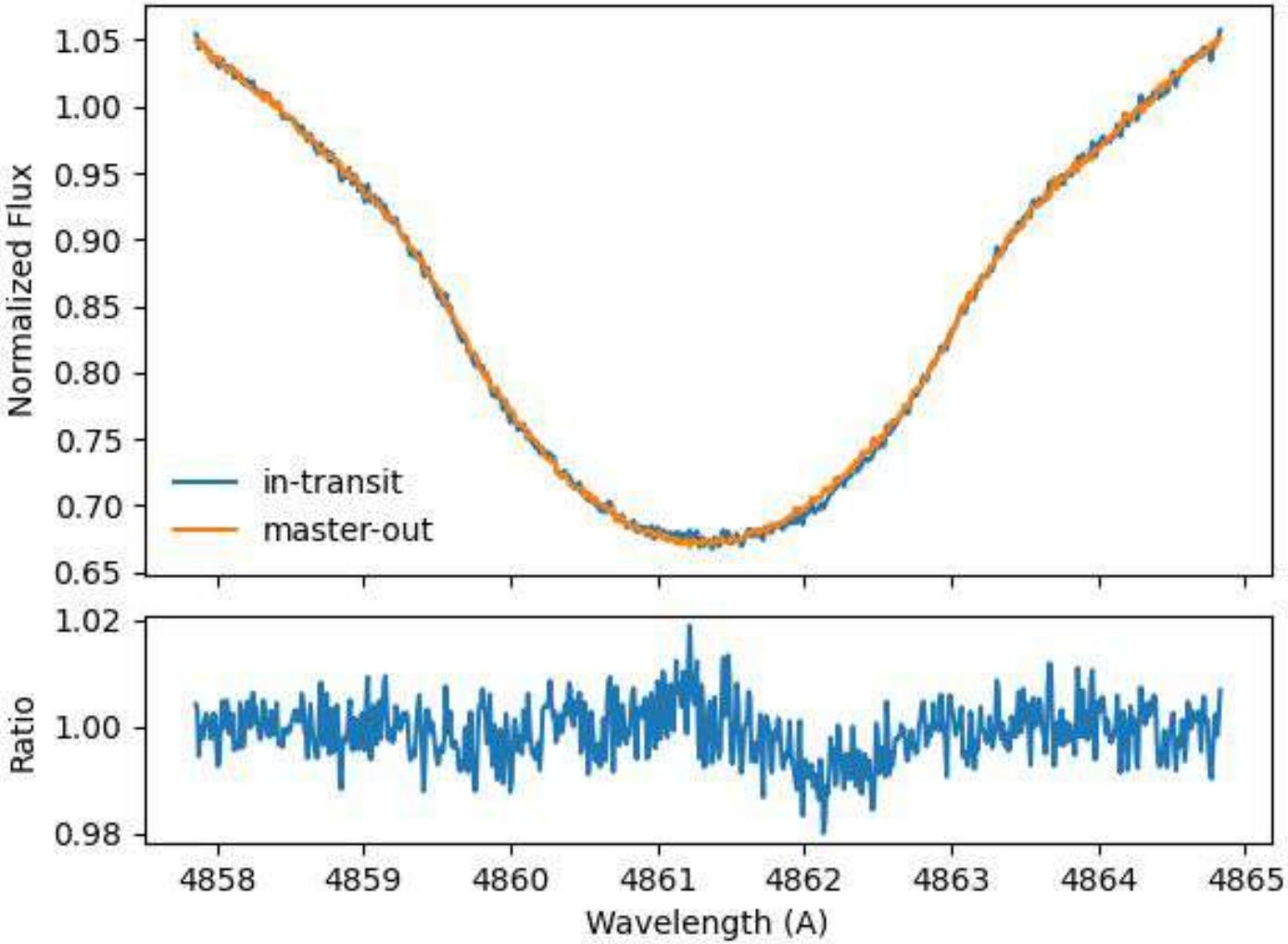
Il segnale del pianeta

Confrontiamo gli spettri durante il transito con gli spettri fuori transito

Creiamo il **master-out**

- media degli spettri fuori transito

Facendo il rapporto si nota l'assorbimento dovuto all'atmosfera planetaria



Tomografia

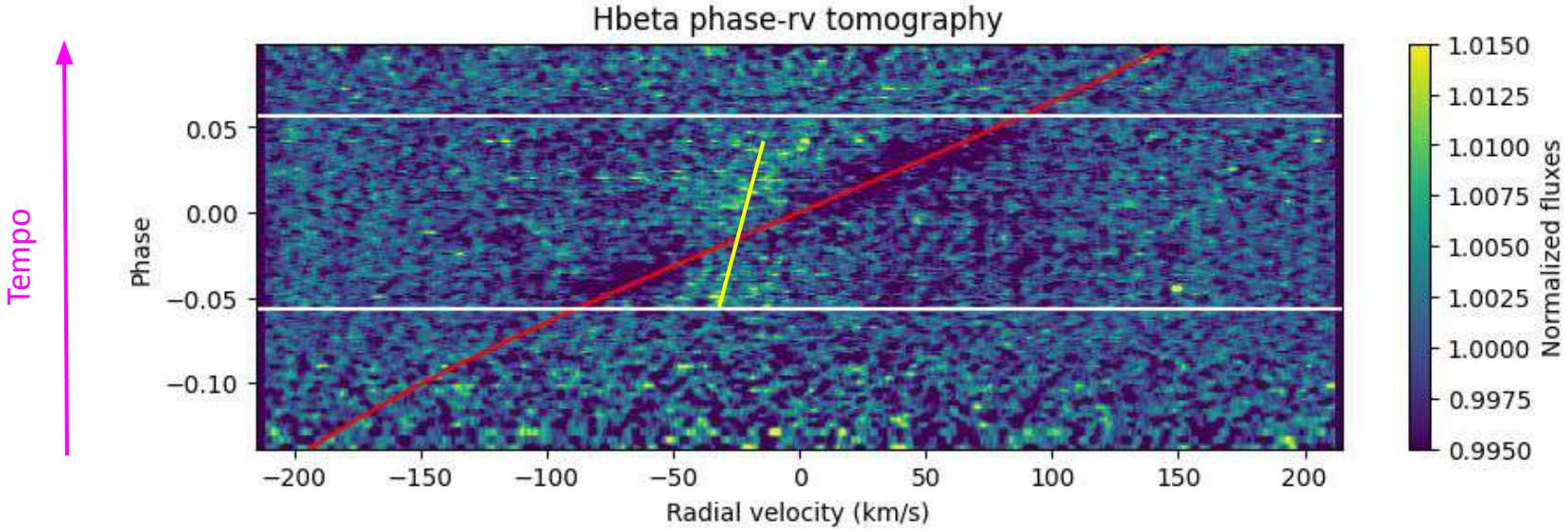
Hbeta tomografia grezza

Tutti gli spettri vengono:

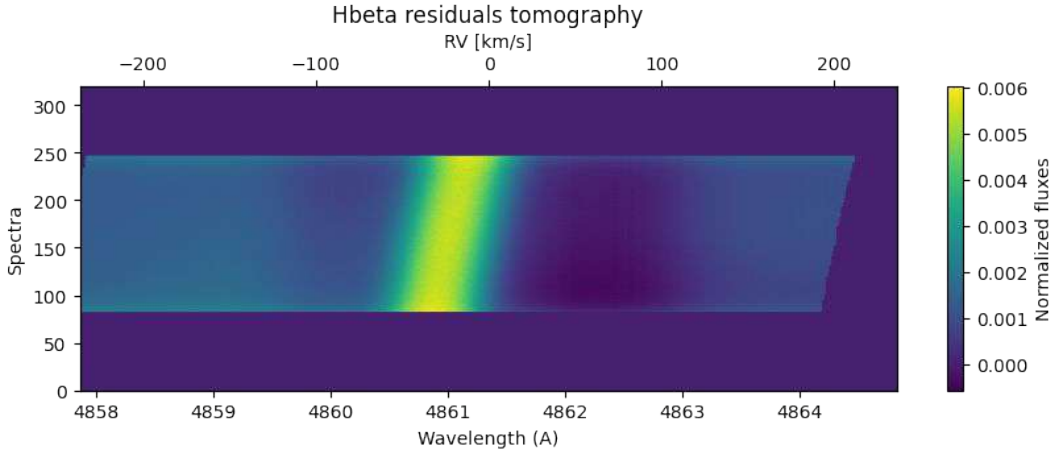
- Ordinati per fase;
- Divisi per il master-out.

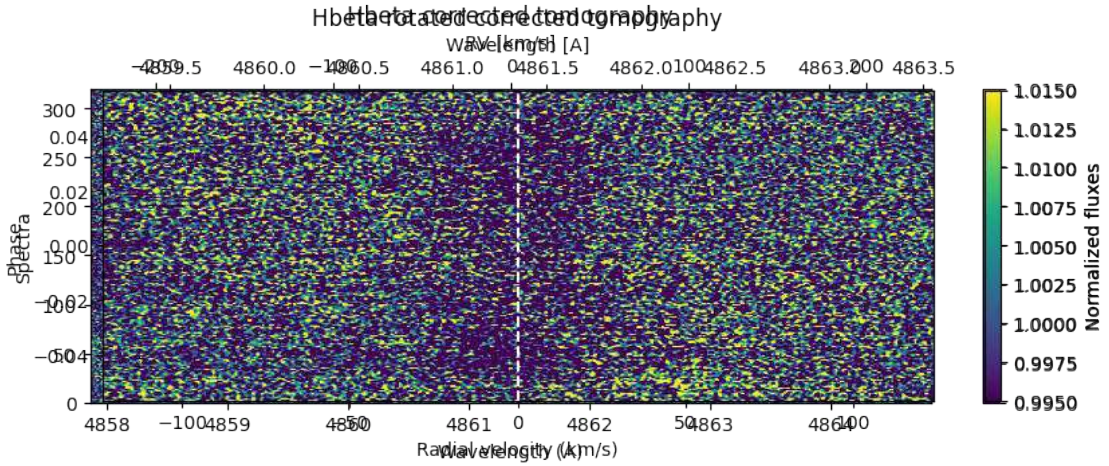
Notiamo:

- Il segnale del pianeta
- L'effetto Rossiter-McLaughlin



$$RV\,(\Phi) = Kp\ \ sin(2\pi\ \Phi)$$



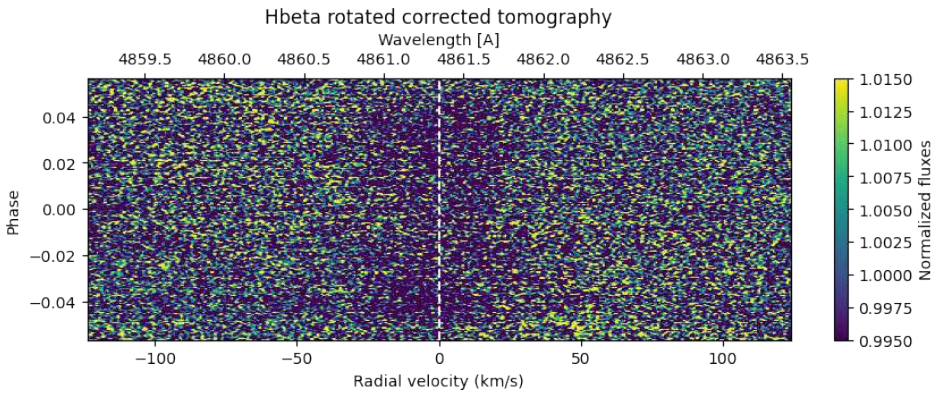


Modello della regione stellare occultata

Spettro in trasmissione

Cosa è?

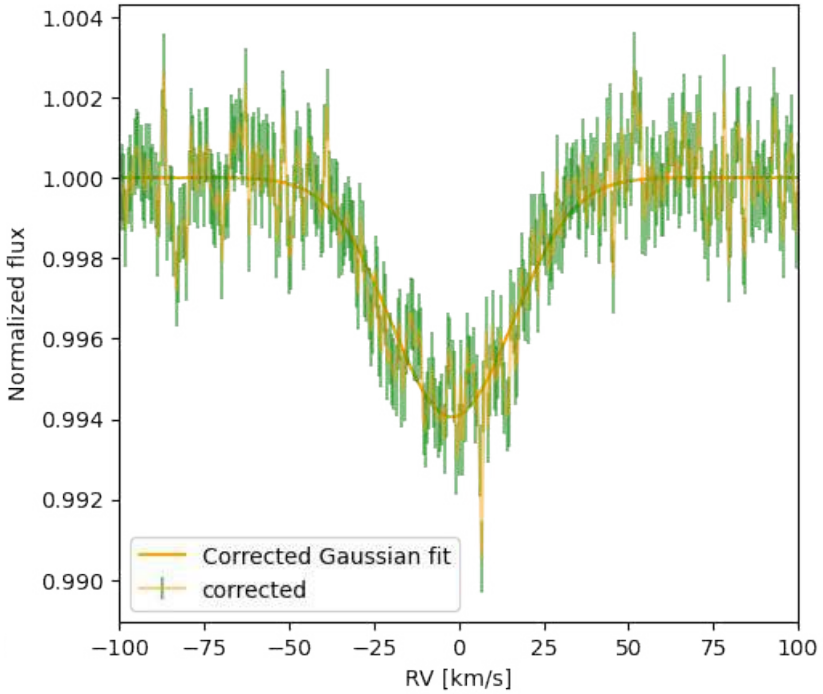
- Media degli spettri in-transito nel sistema di riferimento del pianeta
- Gli errori vengono propagati durante tutto il processo



Che informazioni ricaviamo?

- Profondità -> altezza nell'atmosfera espressa in Rp
- Shift Rv ⟶ presenza di venti nell'atmosfera

$$H_{atm} = \sqrt{R_{pl}^2 + AR_{star}^2} - R_{pl}$$



- Il modello originale è creato per Rp = 1
- Iteriamo il processo fino a convergenza

Altre tecniche di analisi

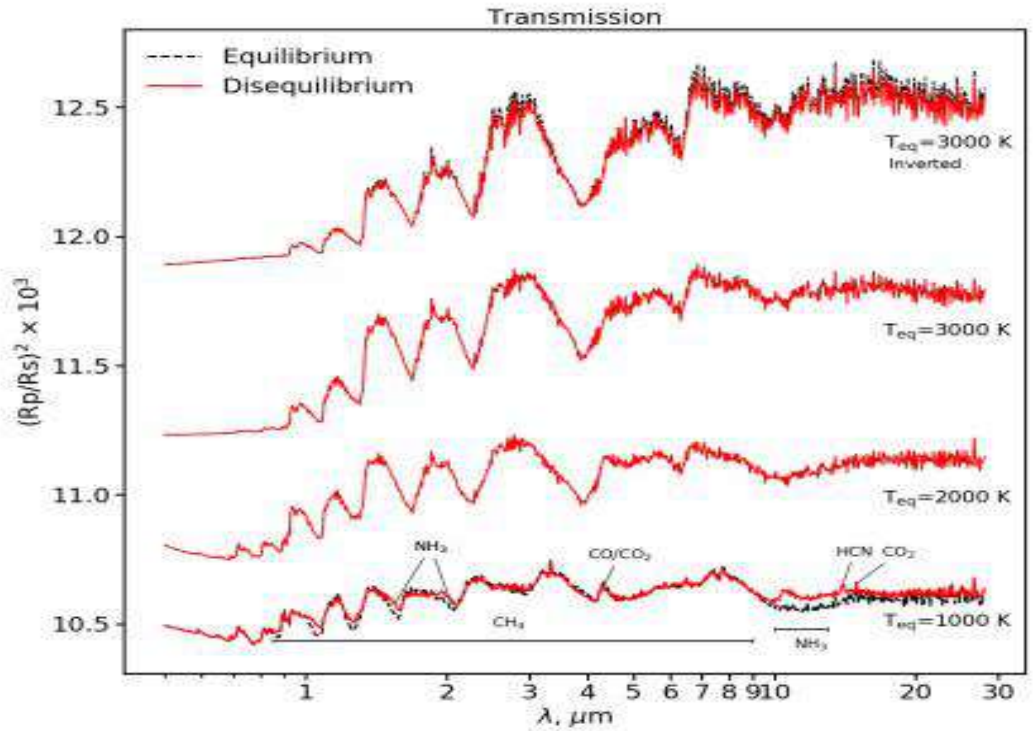
L'analisi di singole righe si basa prevalentemente sui dati osservati ed in minima parte su modelli teorici

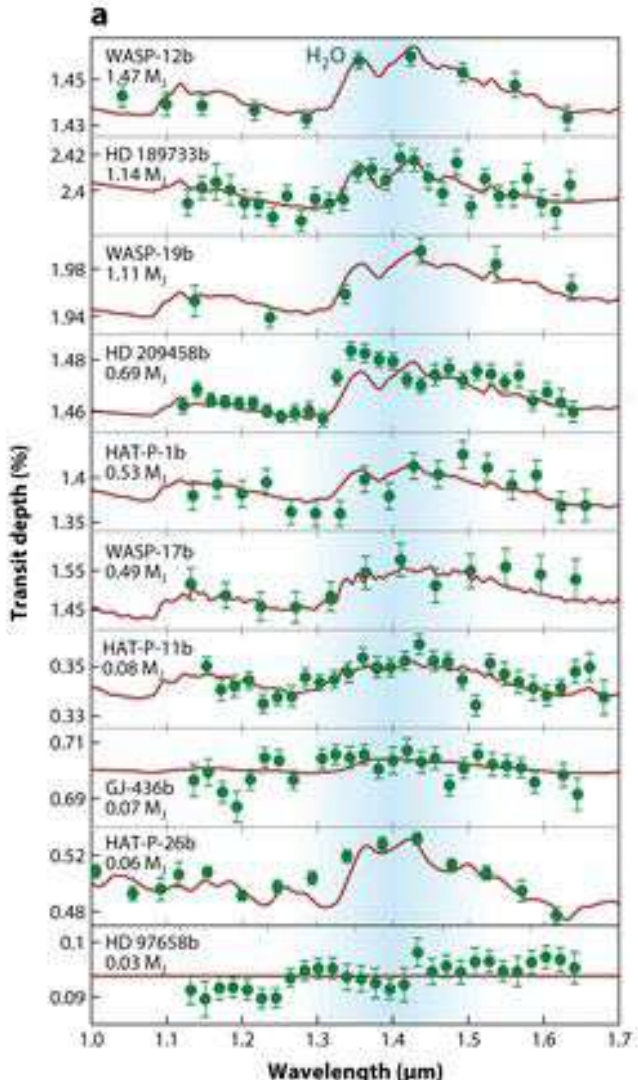
Altre analisi si basano sul confronto con modelli teorici

- Utilizzando la CCF
- Soprattutto a bassa risoluzione

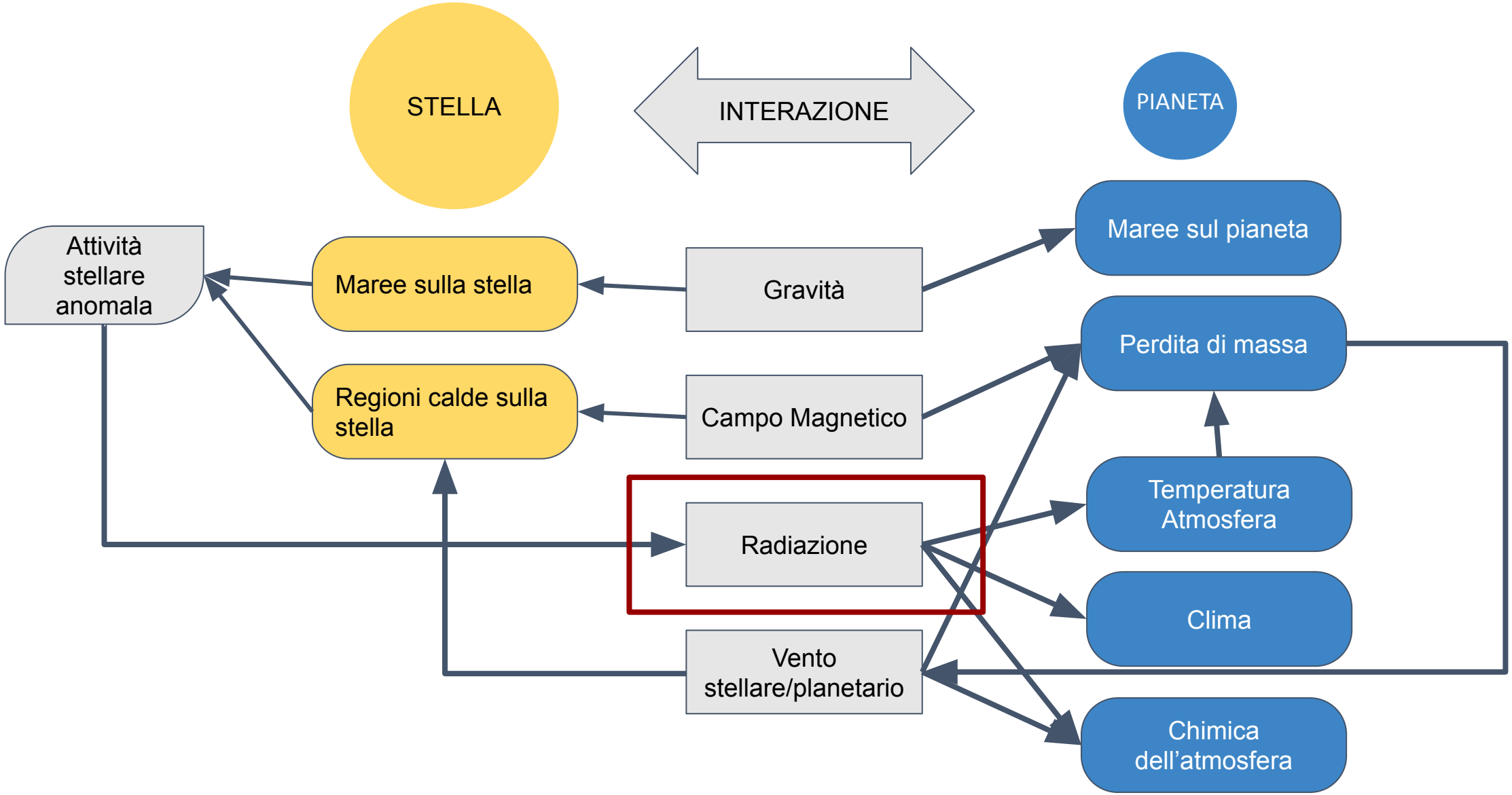
Dal confronto si ricavano i parametri dei modelli che si adattano meglio ai dati osservativi

ARIEL





Interazione Stella Pianeta



Modelli di atmosfere esoplanetarie

Come si modella un'atmosfera (eso)planetaria:

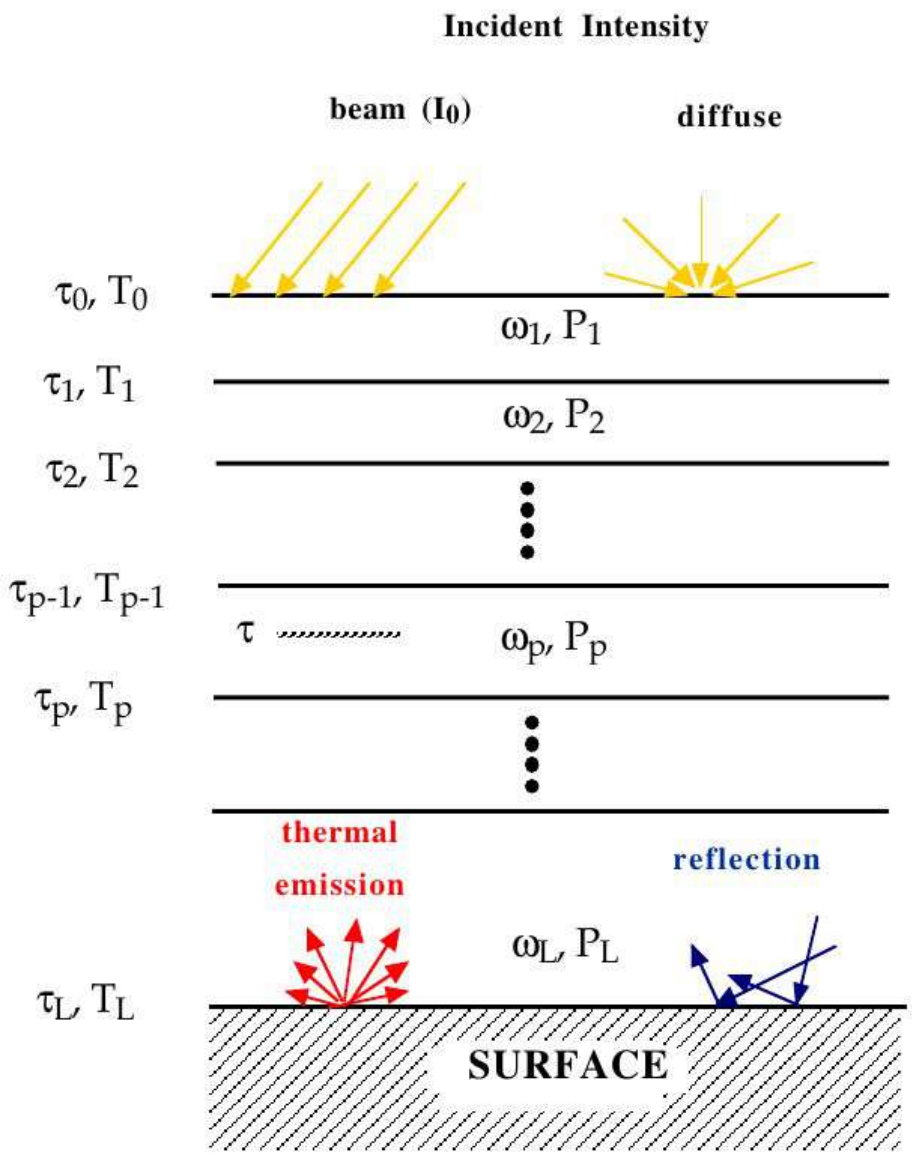
- Ipotesi sulla geometria;
  - 1D (o 2D/3D);

- Composizione chimica;

- Descrizione della fisica dell'atmosfera:
  - Scattering;
  - Assorbimento;
  - Condensazione delle specie chimiche;
  - Formazione delle nubi.

- Condizioni al bordo:
  - La stella:
    - Inclinazione di incidenza;
    - Eventuali effetti transienti.
  - La superficie planetaria:
    - Riflessione;
    - Emissione termica;
    - Eventuali effetti transienti.

- Codice numerico che risolva il problema del trasporto radiativo lungo l'atmosfera (*Stamnes et al. 1988*) e consideri anche eventuali moti convettivi dell'atmosfera in prossimità della superficie (*Manabe and Wetherald 1976*);



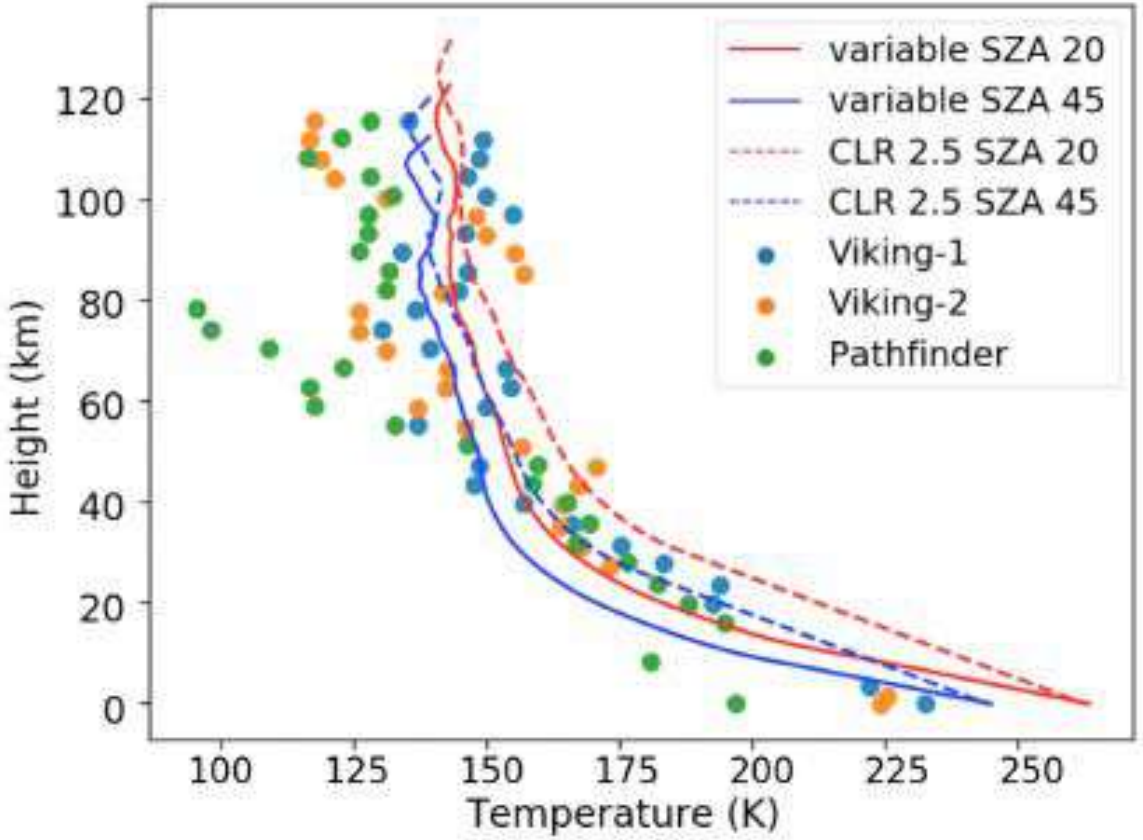
Modelli di atmosfere esoplanetarie

Validazione del modello per esopianeti → Pianeti del sistema solare: Marte, Terra, Venere etc

Esempio → Marte:

Parameter		Value
Stellar irradiation	$S_\star$ (Wm^{-2})	586
Stellar temperature	$T_\star$ (K)	5778
Stellar radius	$R_\star$ ($R_\odot$)	1.0
Orbital distance	d_P (AU)	1.523
Planet mass	M_P ($M_\oplus$)	0.107
Planet radius	R_P ($R_\oplus$)	0.531
Zenith angle	φ (degrees)	20,45

Profilo della temperatura al variare della quota dalla superficie



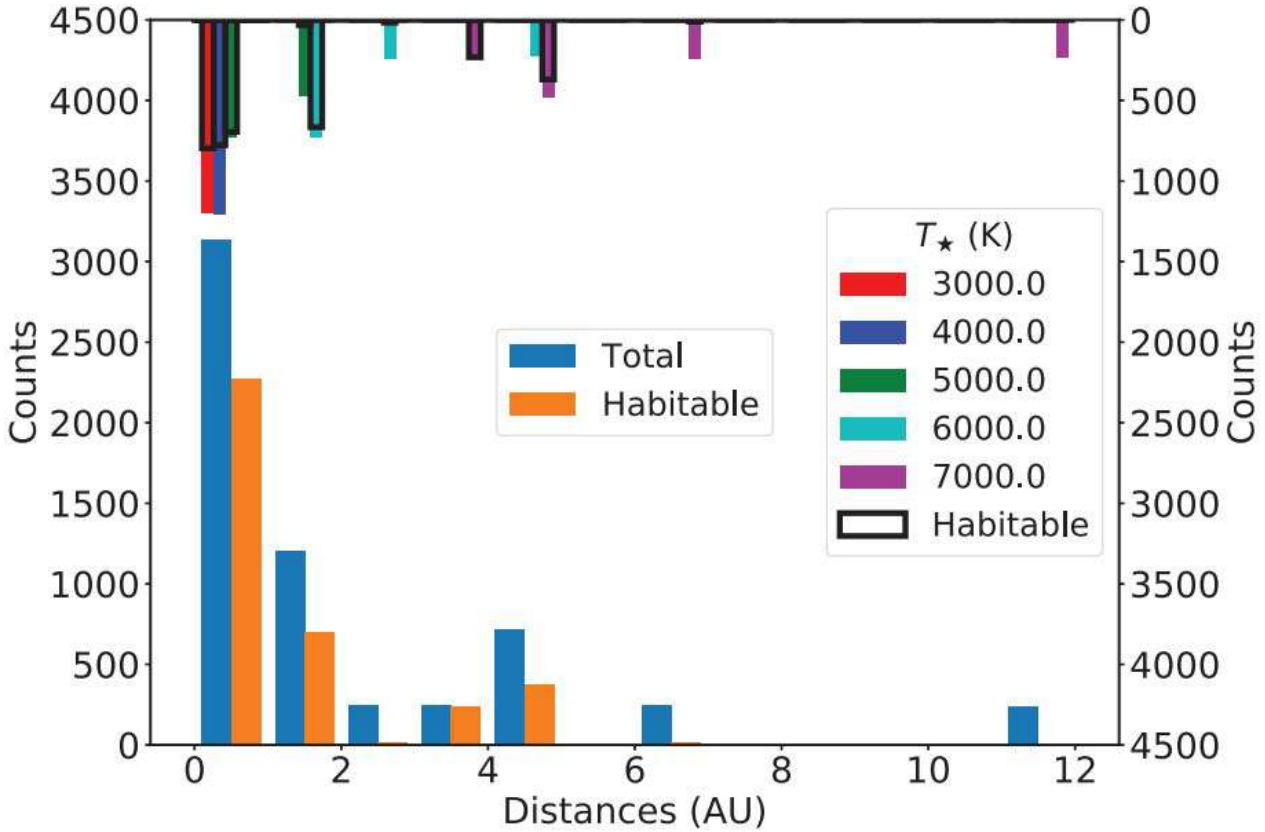
Petralia et al 2020

Modelli di atmosfere esoplanetarie

Parameter	models	Values
$S_\star$ at TOA ($\mathrm{Wm^{-2}}$)	5	$\Delta S_\star = 270,\ 120 - 1200$
$T_\star$ (K)	5	$\Delta T_\star = 1000,\ 3000 - 7000$
g_P ($\mathrm{m/s^2}$)	5	$\Delta g_\mathrm{P} = 11.25,\ 5 - 50$
P_surf (bar)	10	$\log_{10}(\Delta P/\mathrm{bar}) = \sim 0.22,\ 0.3 - 30$
$\omega_{\mathrm{CO_2}}$	5	0.0001, 0.01, 0.1, 0.5, 0.9

(Atmosfere N2/CO2)

Studi di abitabilità



Modelli sintetici:

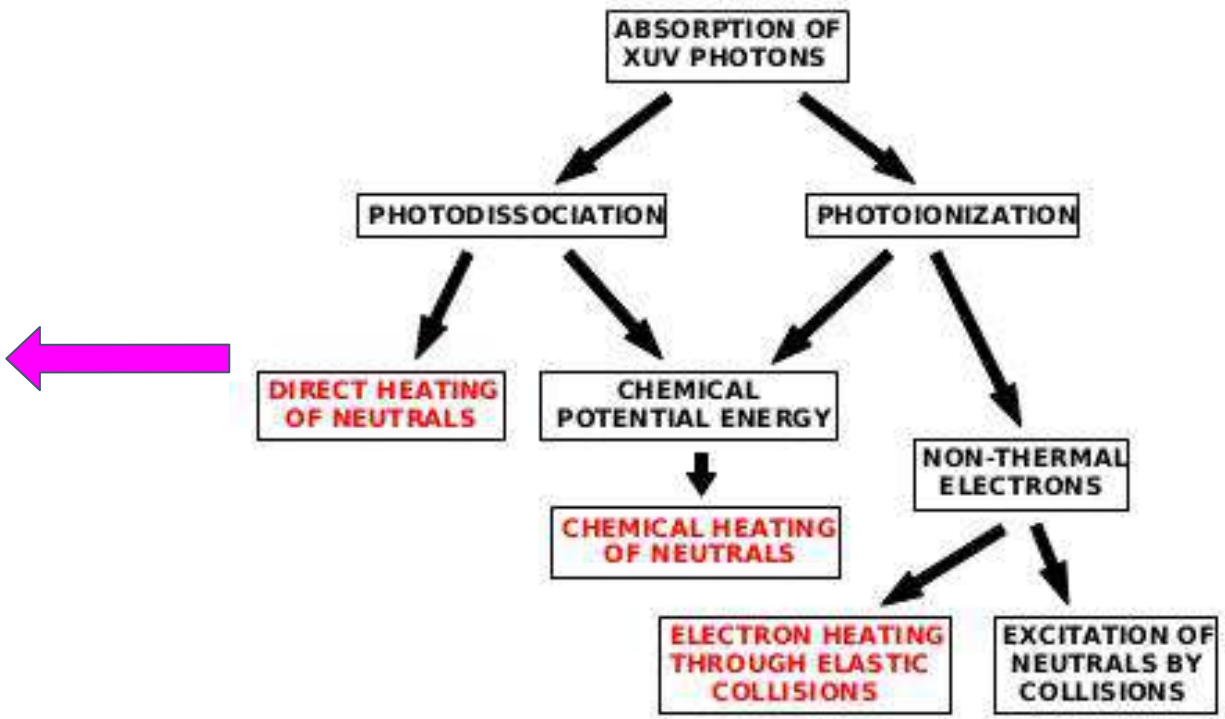
- Studi statistici sulle proprietà dell'atmosfera;
- Indagini sulle condizioni di abitabilità degli esopianeti:
  - Al variare della temperatura stellare;
  - Della composizione chimica dell'atmosfera planetaria;
  - Delle condizioni orbitali (distanza dalla stella).

Petralia et al 2020

Modelli di atmosfere esoplanetarie

- **Processi chimici:**
  - Equilibrio Chimico
  - Reazioni: 2 e 3 corpi, termodissociative, inverse

- **Processi fotochimici:**
  - Fotodissociazione (radiazione UV)
  - Fotoionizzazione (radiazione EUV e raggi X)
  - Ionizzazione secondaria (elettroni non termici)
- **Processi di Evaporazione:**
  - Evaporazione idrostatica (Jeans escape)
  - Evaporazione idrodinamica



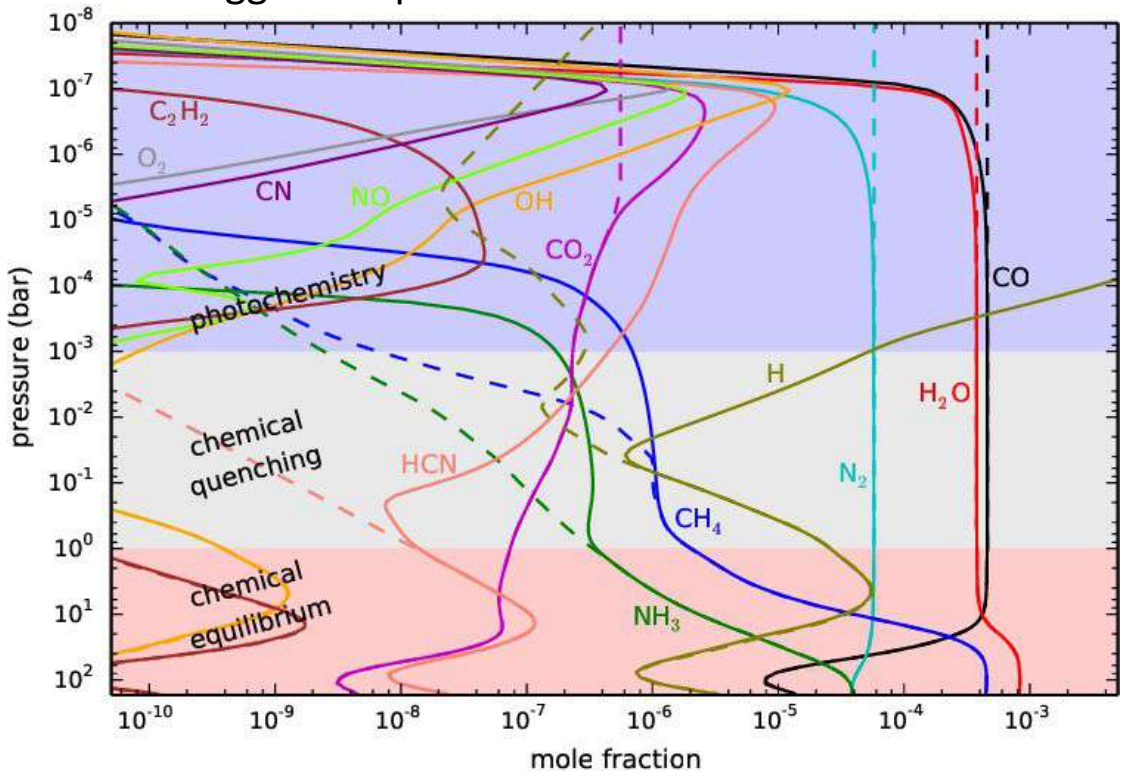
- I processi chimici dipendono fortemente dalla **pressione e dalla temperatura**;
- La composizione atmosferica determina le proprietà di assorbimento dell' atmosfera ⟶ gli spettri atmosferici (ciò che vediamo) dipendono dalla chimica;
- I processi di erosione atmosferica influenzano la struttura fisica e chimica dell'atmosfera;

Modello chimico-fotochimico

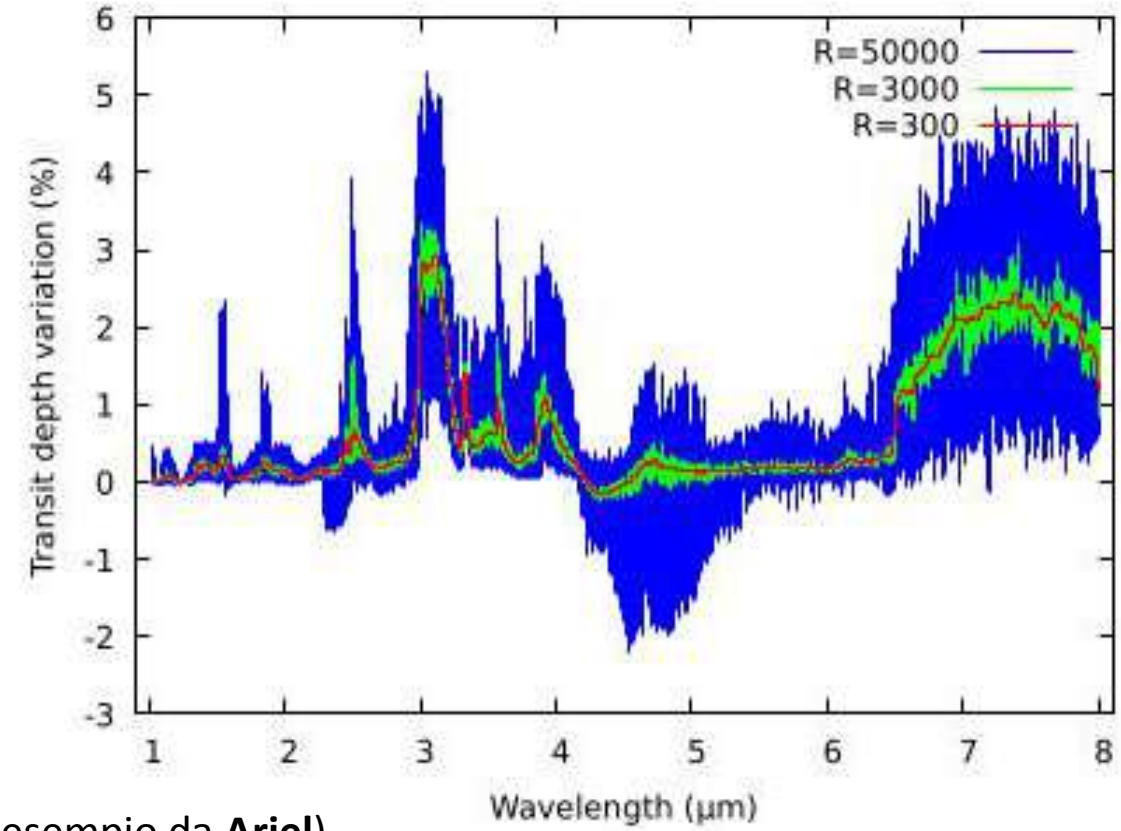
Profili verticali delle abbondanze chimiche in un gigante gassoso (Atmosfera di tipo primordiale)

Linea continua: equilibrio chimico + disequilibrio

Linea tratteggiata: equilibrio chimico



Spettro sintetico in trasmissione a differenti risoluzioni



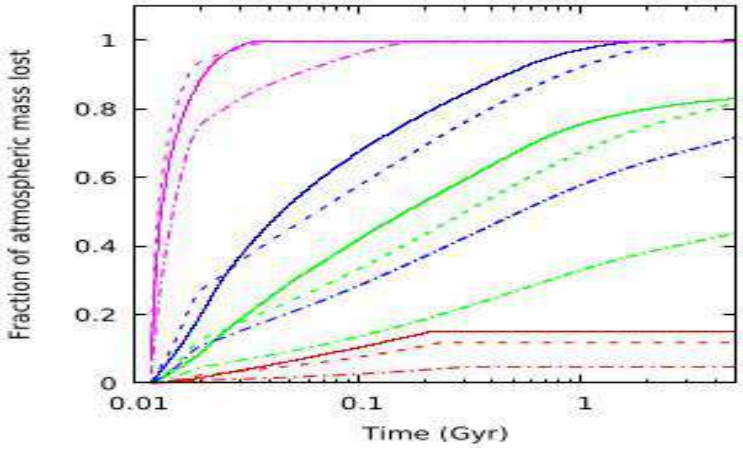
Gli spettri sintetici devono poi essere confrontati con quelli osservati (per esempio da **Ariel**)

Modelli come strumenti per interpretare le osservazioni!

Modello di evoluzione atmosferica

- Gli strati più esterni dell'atmosfera si riscaldano → si espandono → una volta raggiunta la velocità inizia l'evaporazione idronamica
- L'evaporazione idrodinamica comporta un evaporazione molto più intensa rispetto a quella idrostatica o a quella dovuta dai venti
- I processi di erosione scolpiscono la struttura delle distribuzioni planetarie.

Evoluzione del pianeta V1298 Tau c



M=10 $M_\oplus$

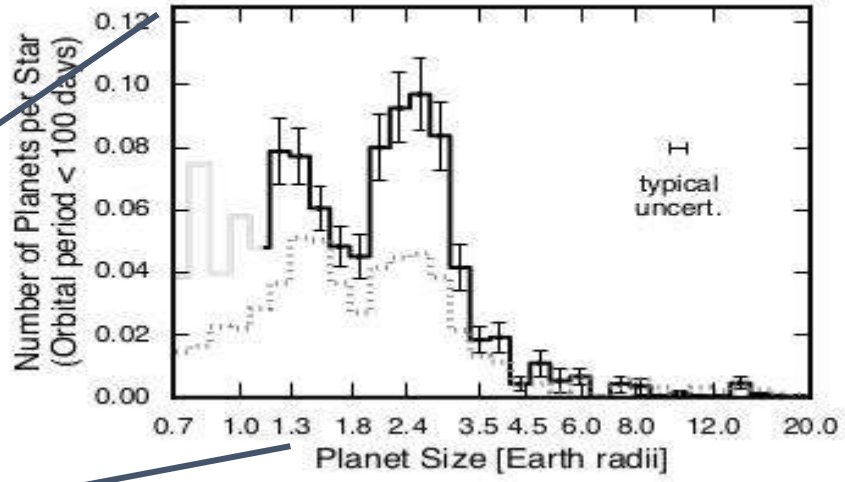
M=20 $M_\oplus$

M=25 $M_\oplus$

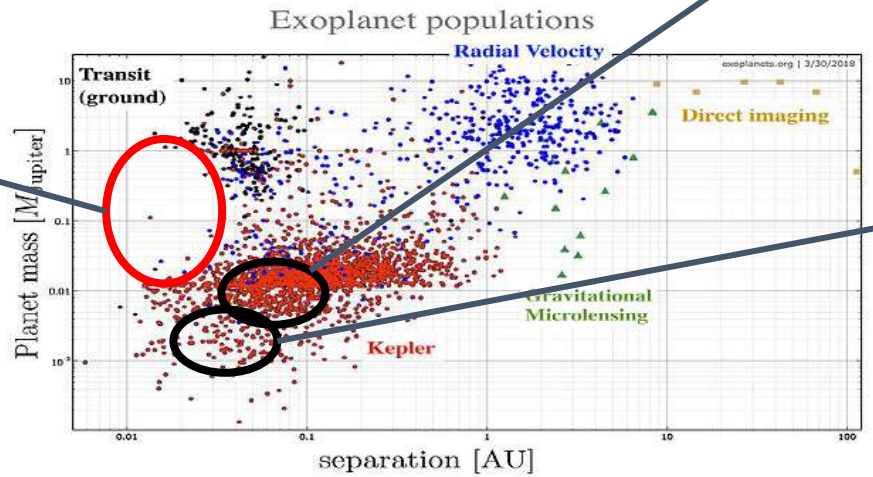
M=40 $M_\oplus$

La luminosità XUV della stella diminuisce col tempo!

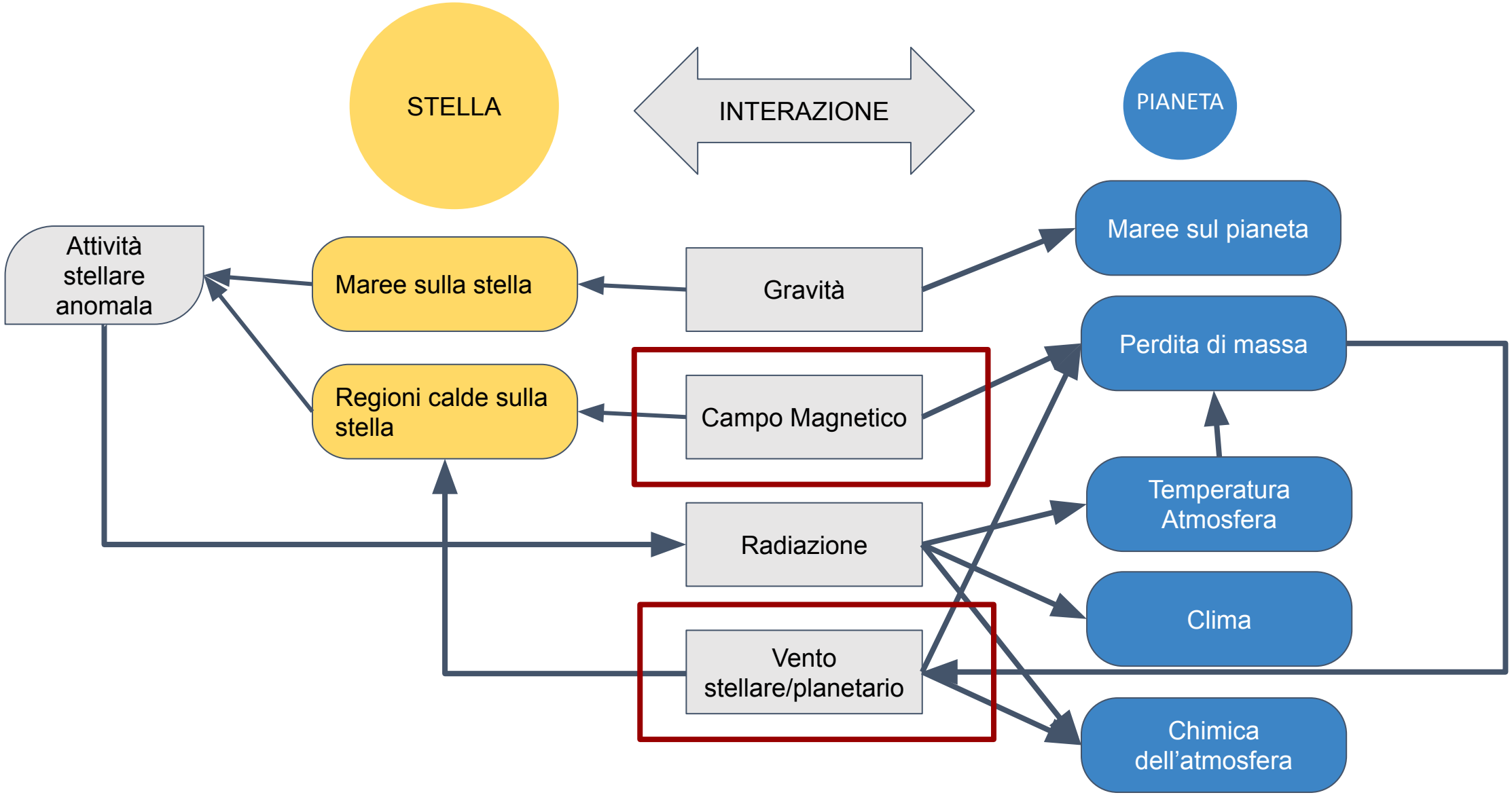
Distribuzione bimodale



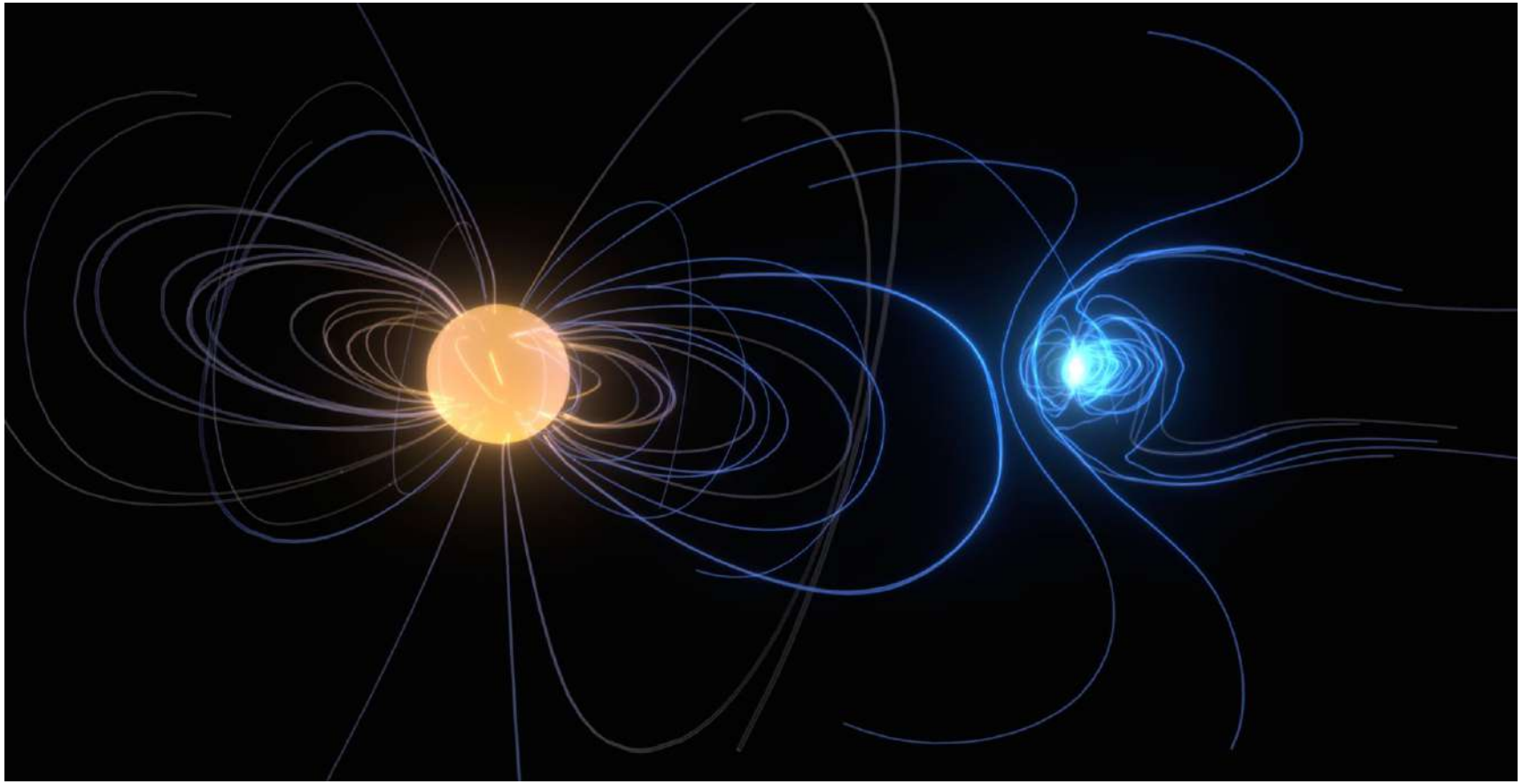
Deserto dei sub-Gioviani



Interazione Stella Pianeta



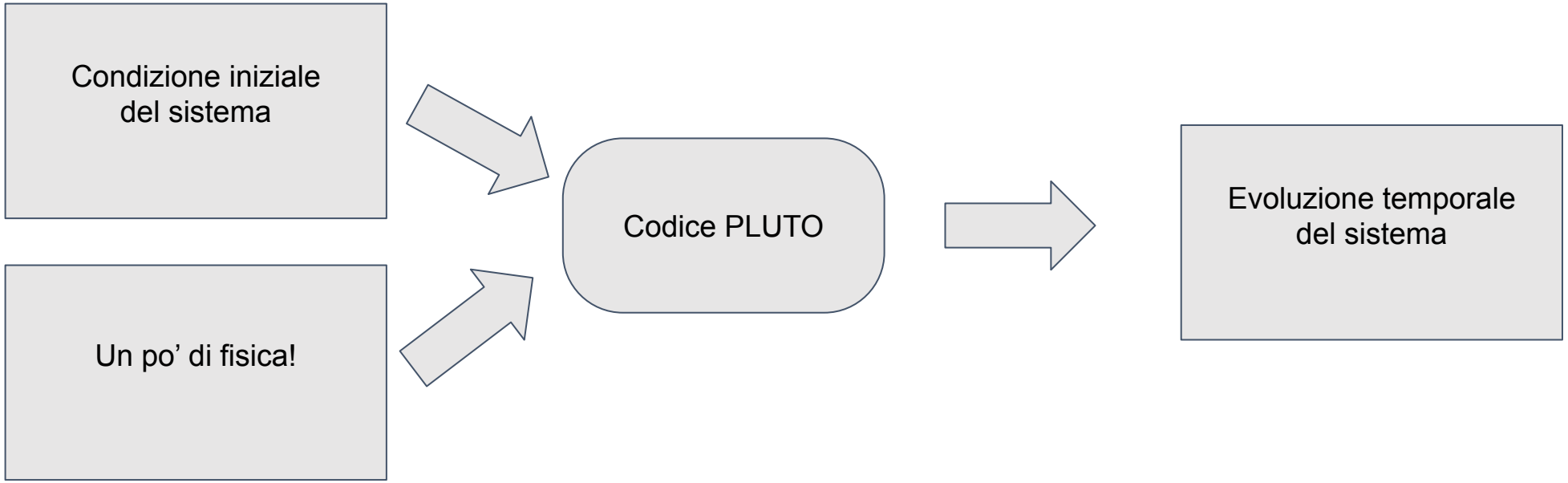
Modello numerico: Interazione MHD



Modello numerico: overview

Per spiegare un fenomeno naturale di cui non si conoscono le caratteristiche occorre formulare una nostra rappresentazione del fenomeno.

- Il modello va poi testato con un esperimento numerico → una simulazione!
- Codice idrodinamico/magnetoidrodinamico PLUTO.



Modello numerico: la fisica

$$\frac{\partial}{\partial t}\rho + \nabla \cdot \rho \boldsymbol{v} = 0$$

Massa

$$\frac{\partial}{\partial t}\boldsymbol{m} + \nabla \cdot (\boldsymbol{m}\boldsymbol{v} - \boldsymbol{B}\boldsymbol{B} + \boldsymbol{I}p_t) = \rho \boldsymbol{g}$$

Quantità di moto

$$\frac{\partial}{\partial t}(E) + \nabla \cdot ((E + p_t)\boldsymbol{v} - \boldsymbol{B}(\boldsymbol{v} \cdot \boldsymbol{B})) = \boldsymbol{m} \cdot \boldsymbol{g} + \nabla \cdot F_{\mathrm{c}} - n^2 \Lambda(T)$$

Energia

$$\frac{\partial}{\partial t}\boldsymbol{B} + \nabla \cdot (\boldsymbol{v}\boldsymbol{B} - \boldsymbol{B}\boldsymbol{v}) = 0$$

Campo magnetico

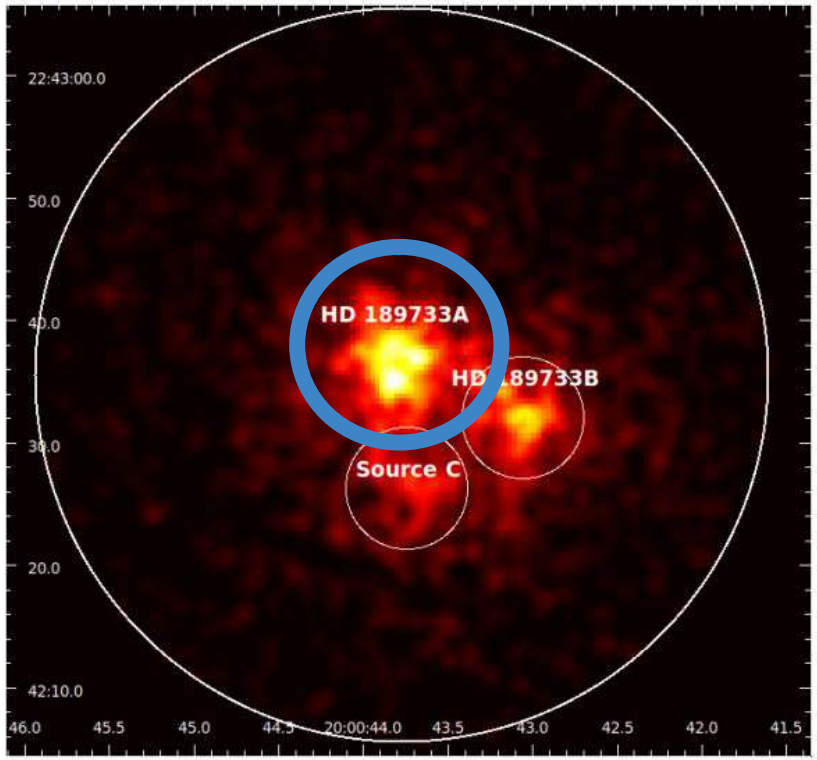
Costruiamo un modello: il caso HD189733b

Sistema:
Stella con Gioviano caldo in orbita stretta.

Problema:
- Stella con attività “anomala” e (forse) in fase con il pianeta.

Modello per spiegare il problema:
1. La radiazione stellare genera fotoevaporazione sul pianeta.
2. Il materiale in evaporazione viene catturato dalla gravità della stella e cade sulla sua superficie.
3. L’impatto genera delle regioni calde che generano l’attività anomala.

Verifichiamo il modello con un esperimento numerico



Pillitteri et al. 2022

Costruiamo un modello: Che fisica?

L'idea è di simulare il sistema HD189733b.

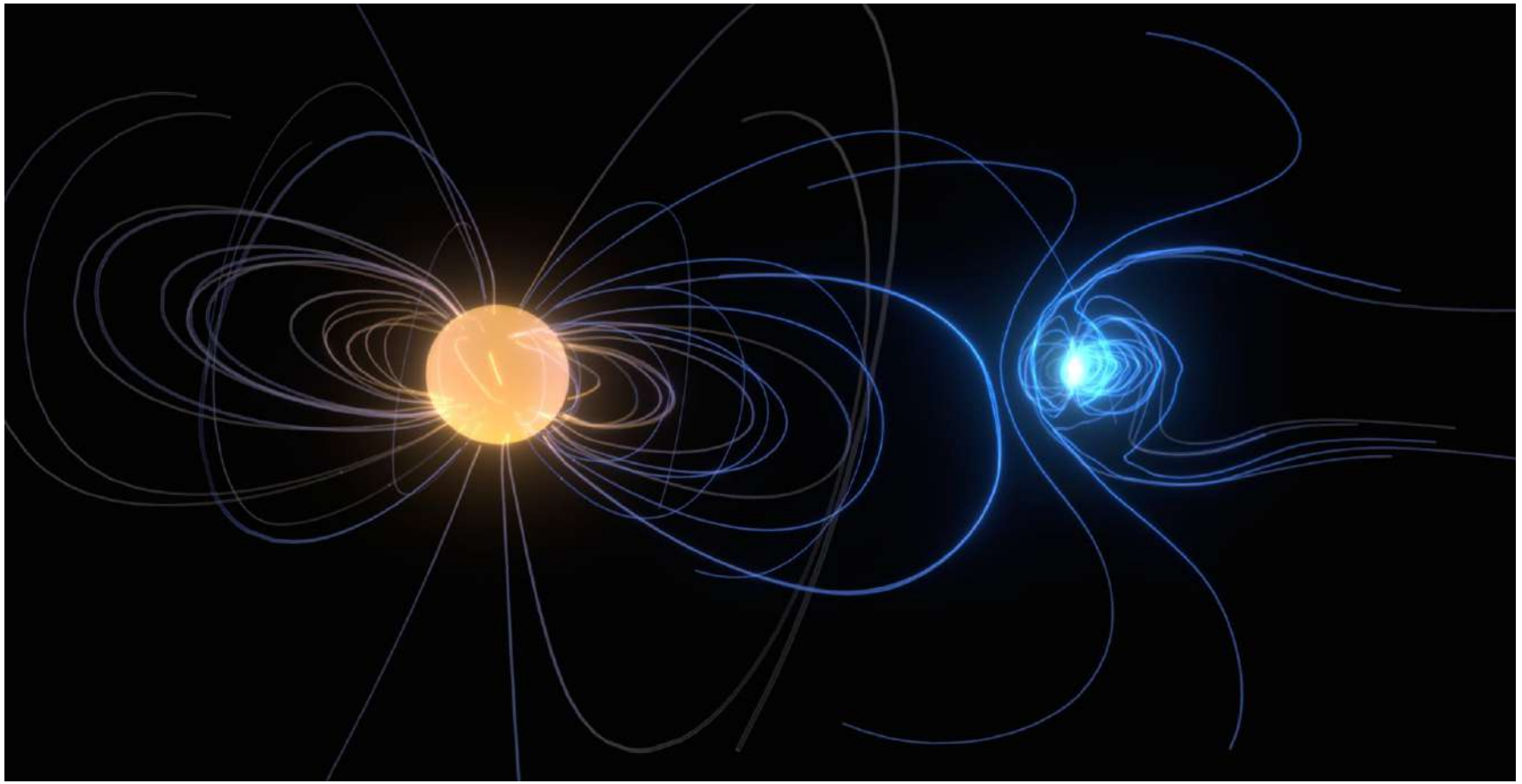
Che geometria?

- 3D
- Sferica

Che fisica includere?

- Gravità
- Campo magnetico

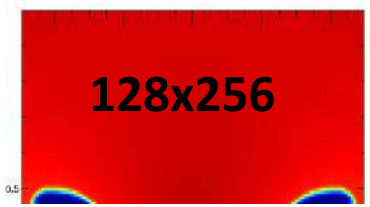
La risoluzione spaziale?

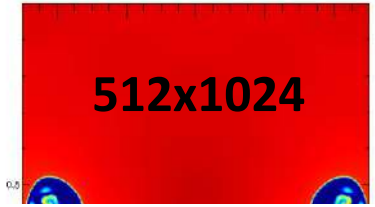


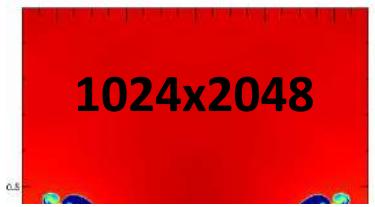
Costruiamo un modello: La risoluzione

I modelli sono delle approssimazioni!!!

- Cerchiamo di descrivere uno spazio continuo con una griglia discreta.
- Alta risoluzione = griglia più fine.



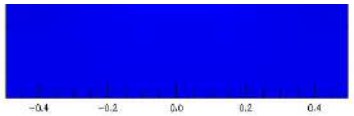


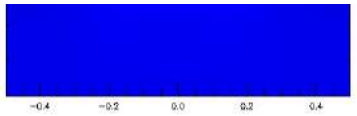


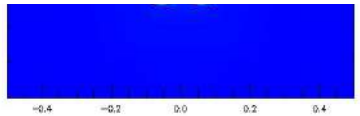
Risoluzione maggiore =

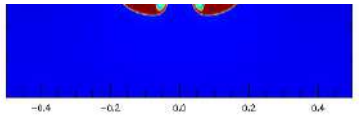
- Più tempo di calcolo. (Aumentare di un fattore 2 la risoluzione in una simulazione 3D vuol dire aumentare il tempo di calcolo di un fattore 16!!!!)
- File di output più grandi e più difficili da gestire.

Bisogna sempre trovare un compromesso!!!



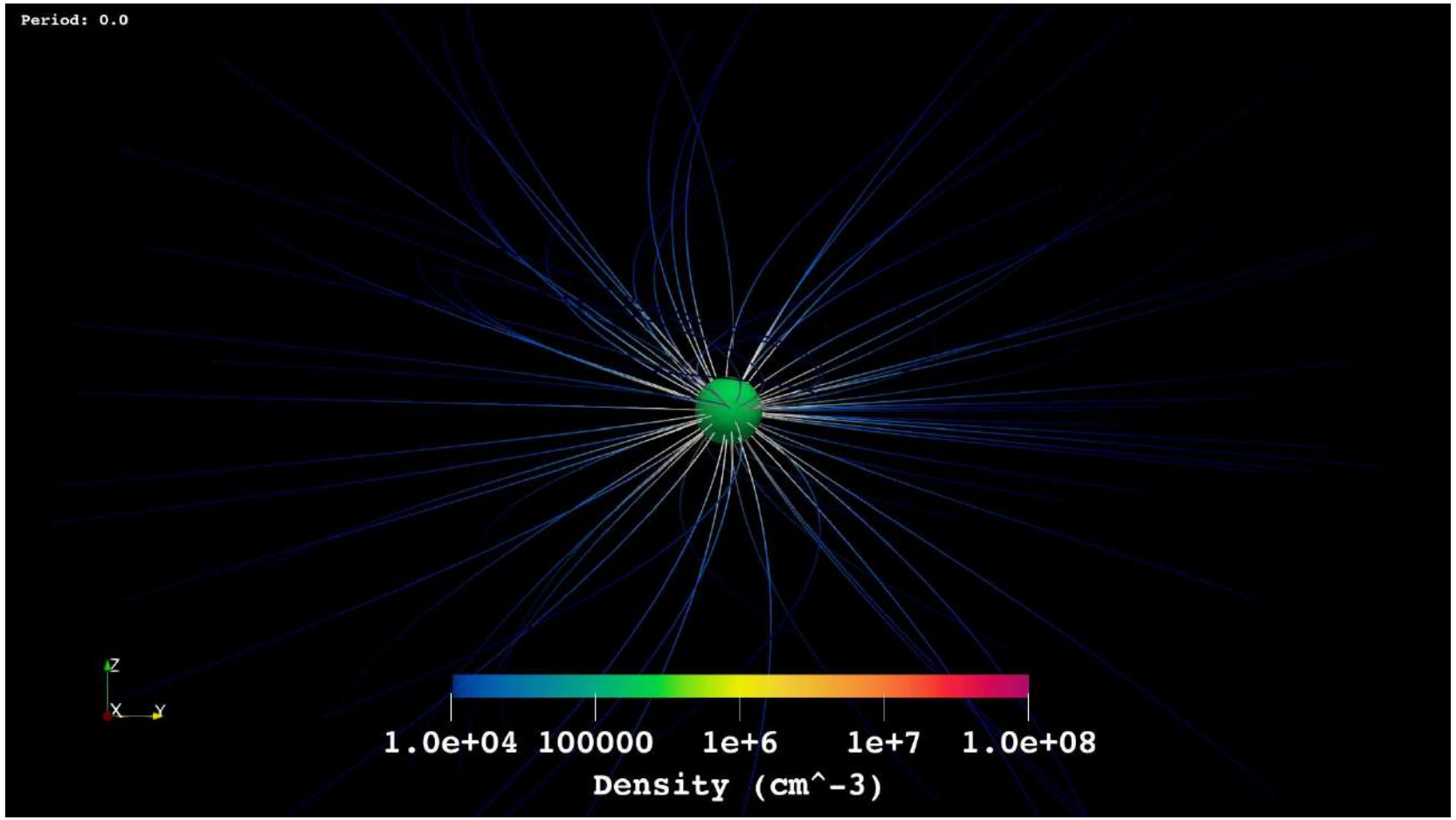




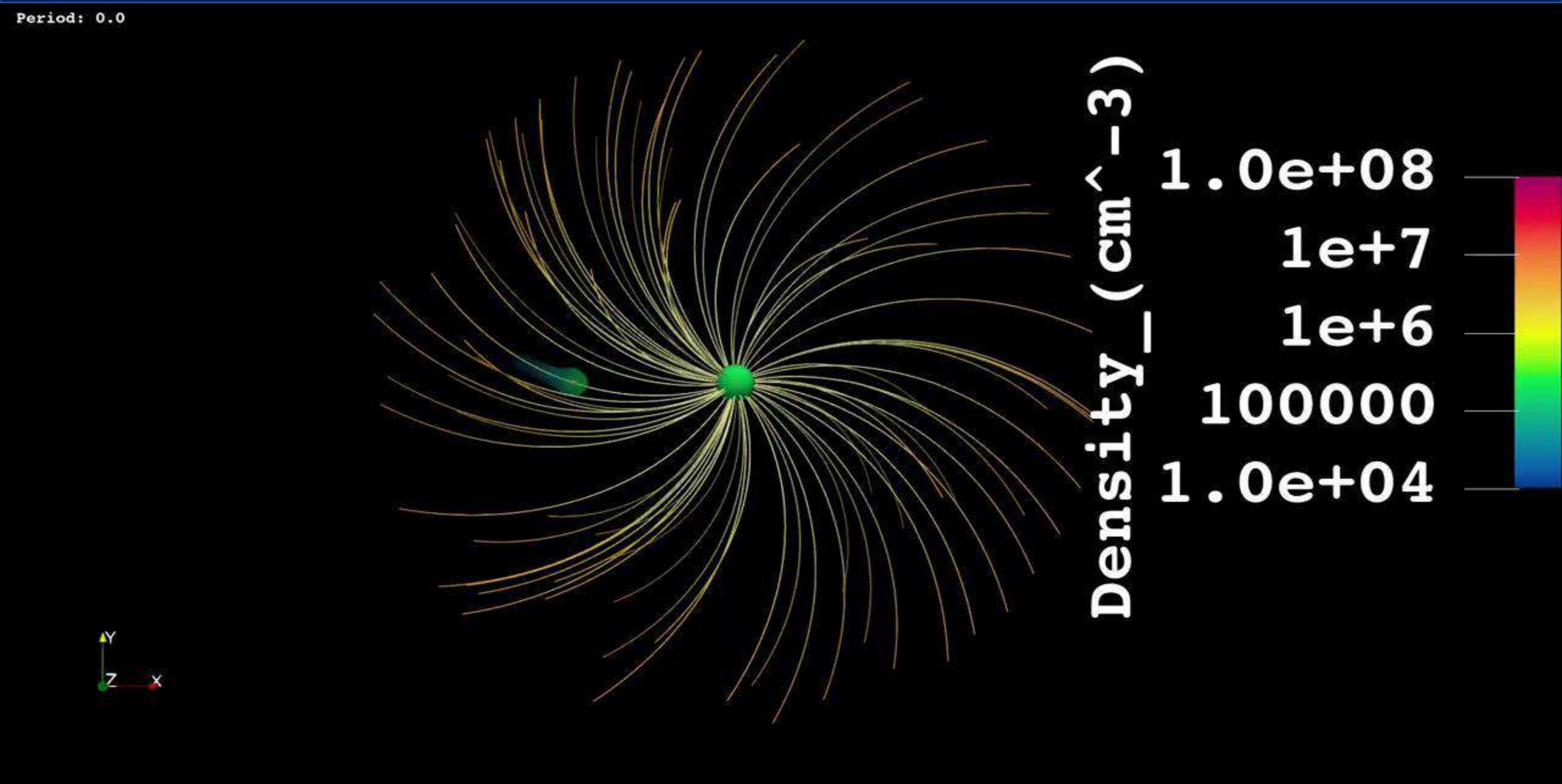


Costruiamo un modello

Condizione iniziale:



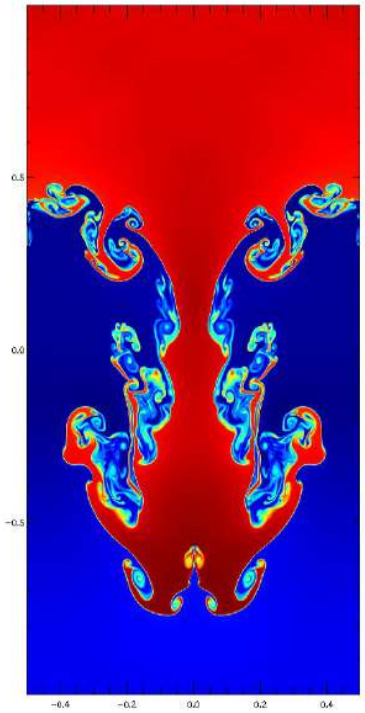
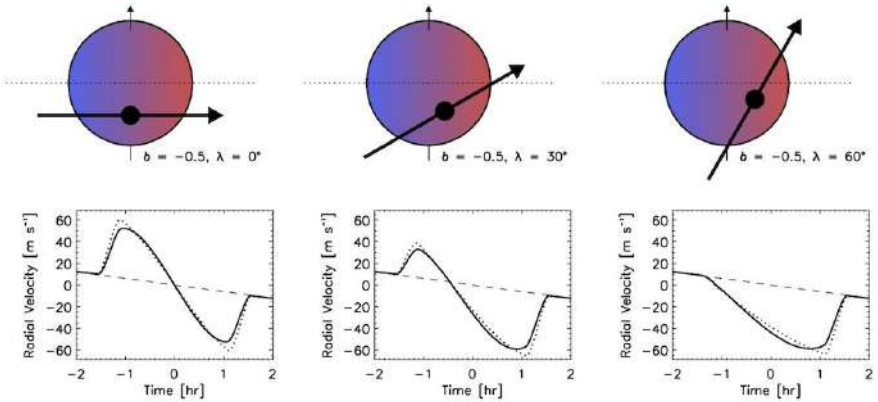
Interazione Stella Pianeta



Tirocini

- Sviluppo di modelli idrodinamici e magnetoidrodinamici:
  - Studio degli effetti della risoluzione spaziale;
  - Scelta degli algoritmi numerici ideali per la simulazione.

- Studio delle tracce evolutive dei pianeti a partire dall'analisi dell'evaporazione.
- Selezione dei target da osservare di cui si vuole fare il modelling.



- Determinazione dei parametri orbitali, analizzando l'effetto rossiter.
- Analisi formazione righe spettrali in funzione della temperatura
  - Individuare righe assenti nella stella da identificare nel pianeta