

Proprietà fisiche degli esopianeti

- **Caratterizzazione degli esopianeti**
 - Studio delle loro proprietà fisiche
 - I planeti osservabili mediante il metodo dei transiti e mediante imaging diretto sono i più promettenti per tale tipo di studi
 - Mediante la combinazione di risultati ottenuti da varie tecniche si possono ricavare:
 - Densità media del pianeta
 - Emissione termica e riflessione del pianeta
 - Spettro di assorbimento dell'atmosfera planetaria

1

Combinazione di diversi metodi osservativi

- L'applicazione di diversi metodi di rivelazione di esopianeti ci permette di combinare i parametri osservativi ottenuti da ciascun metodo, aumentando la possibilità di caratterizzare il pianeta
- **Metodo della velocità radiali + metodo dei transiti**
 - Si combina la massa, ottenuta con il metodo doppler, con il raggio, ottenuto con il metodo dei transiti; si risolve la degenerazione **$\sin i$**
 - Metodo già applicato in numerosi casi
- **Metodo delle velocità radiali + metodo astrometrico**
 - Nota **$M \sin i$** dal metodo Doppler, si determina il termine **$\sin i$** con il metodo astrometrico e si misura quindi la massa del pianeta, anziché un limite inferiore
 - Attualmente di difficile applicazione

2

Misure di massa e raggio

– Da tali misure di ottiene

– densità media $\rho \sim M/R^3$

Informazioni sulla struttura interna planetaria

– gravità superficiale $g \sim M/R^2$

Importante per la modellizzazione climatica

– velocità di fuga $v_e \sim (M/R)^{1/2}$

Informazione sulla capacità di trattenere l'atmosfera planetaria

3

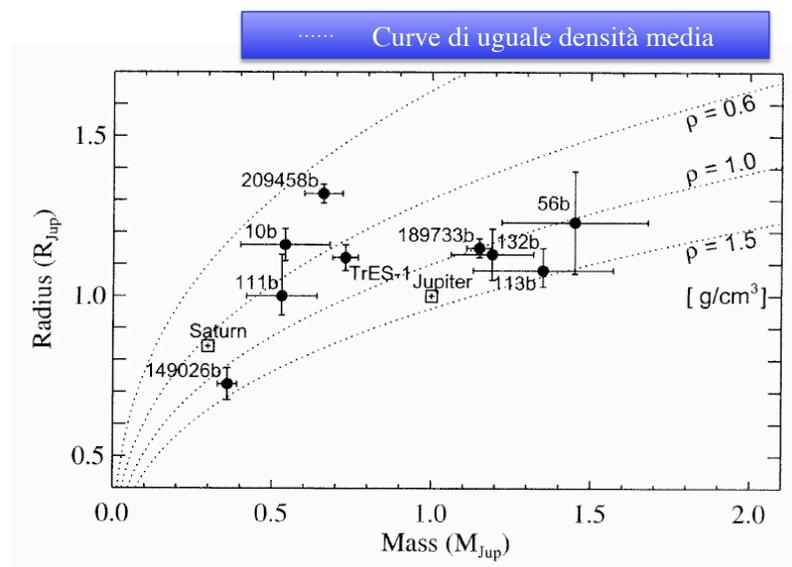
Densità media

• Densità media

– Lo studio della densità media, ρ , ci permette di discriminare tra pianeti di tipo gassoso, ghiacciato o roccioso

• La maggior parte dei risultati sinora ottenuti indicano valori di densità media $\rho \sim 1 \text{ g cm}^{-3}$, o anche più bassa

– Indicativi di pianeti gassosi



Charbonneau et al. (2007)

4

Densità medie di esopianeti

- Principali scoperte
- Primi esempi di pianeti rocciosi extrasolari, con densità media comparabile a quella della Terra
 - Esempio: CoRoT-7 b
- “inflated jupiters”, con raggio superiore a quello di Giove, a parità di massa; inattesi in quanto Giove e Saturno differiscono in raggio solo del 18% nonostante differiscano in massa di un fattore 3
- Le misure di massa e raggio permettono di vincolare modelli degli interni planetari e possono gettar luce sui meccanismi di formazione planetaria

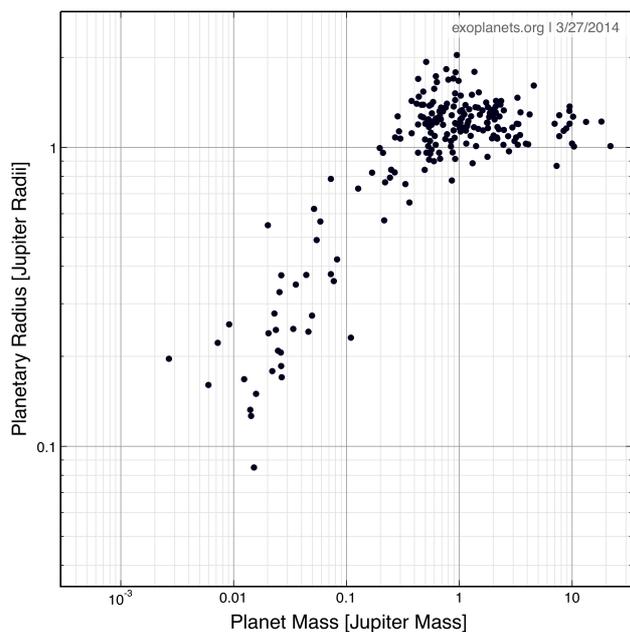
5

Relazioni massa raggio

Per i pianeti di piccola massa il raggio cresce con la massa più velocemente di quanto ci si aspetta da una legge di densità media costante

$$R \sim (\rho M)^{1/3}$$

– Questo risultato viene interpretato come un’indicazione del fatto che, nel corso della sua formazione, il pianeta accresce inizialmente materiale refrattario più denso e successivamente materiale volatile di bassa densità specifica



6

Relazione densità media-raggio

- Nell'attuale campione di esopianeti con $M < 10 M_{\oplus}$ la densità media decresce al crescere del raggio

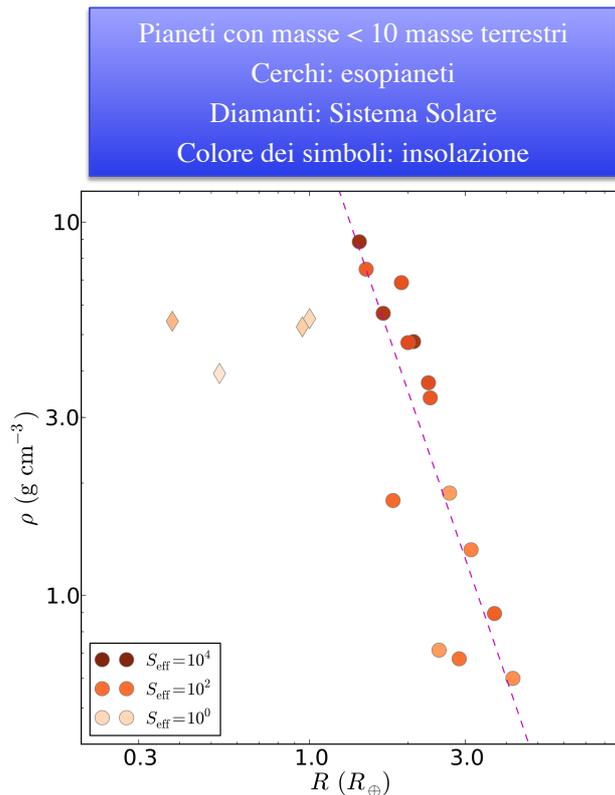
- Indicazione che nel corso della sua formazione il pianeta accresce via via più materiale di bassa densità

- Pianeti di piccolo raggio e alta densità sono caratterizzati da un alto livello d'insolazione

- Indicazione che il livello di insolazione gioca un ruolo importante nel determinare le caratteristiche del materiale che si incorpora nel pianeta

- I pianeti del Sistema Solare non obbediscono alla correlazione

- Gli esopianeti dell'attuale campione non sono rappresentativi delle condizioni del Sistema Solare



7

Emissione degli esopianeti

- Per quanto debole rispetto all'emissione stellare, gli esopianeti emettono radiazione

- Emissione termica del pianeta

- Lo studio dell'emissione termica, nella banda infrarossa, ci da' informazione diretta sulla temperatura superficiale

- Riflessione della luce stellare

- Lo studio della riflessione della luce stellare, nella banda visibile, ci da' informazioni sull'albedo del pianeta

- Metodi per studiare l'emissione degli esopianeti

- Imaging diretto

- Se il pianeta è risolto dalla stella si può misurarne l'emissione termica

- Ma non l'albedo data la grande distanza tra pianeti e stella nel caso di pianeti scoperti con questa tecnica

- Transiti secondari

8

Temperature ricavate dall' emissione termica di esopianeti usando il metodo di imaging diretto

Usando modelli di evoluzione planetaria si possono stimare indirettamente le masse dei pianeti

Exoplanet Roadmap Advisory Team (ESA)

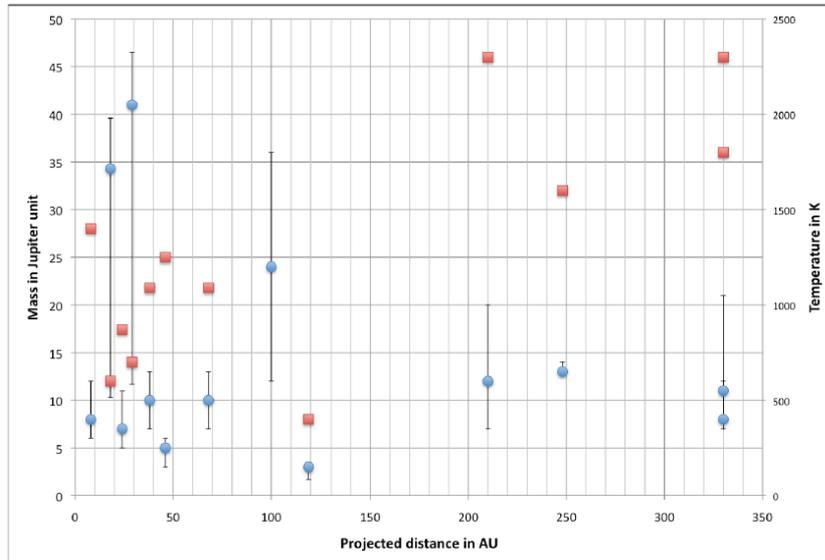


Fig. 2 : Estimated mass (blue dots) and temperature (red squares) vs. separation diagram of young planet candidates found by direct imaging.

9

Transiti secondari

•Transito secondario

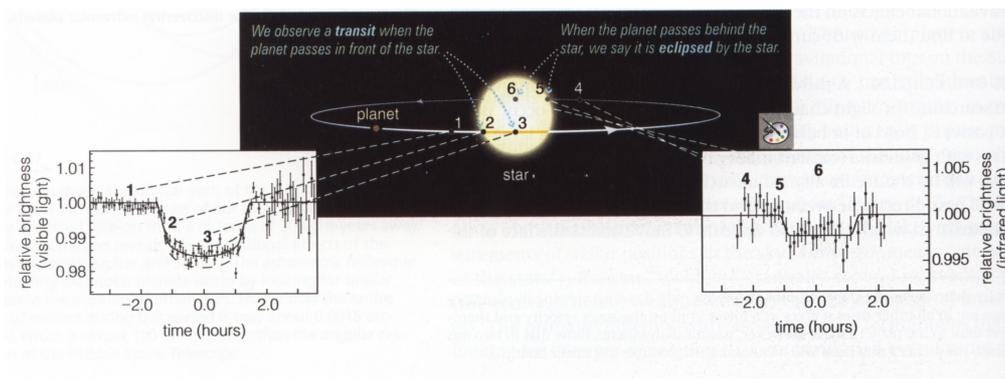
- Corrisponde al passaggio del pianeta dietro alla stella
- Se la configurazione geometrica e i parametri orbitali lo permettono

•Curva di luce del transito secondario

- Fuori dal transito: la luce del pianeta, seppur debole, si somma a quella della stella
- Durante il transito: si vede solo la luce della stella e c'è quindi una lieve diminuzione nella curva di luce

•Importanza del transito secondario

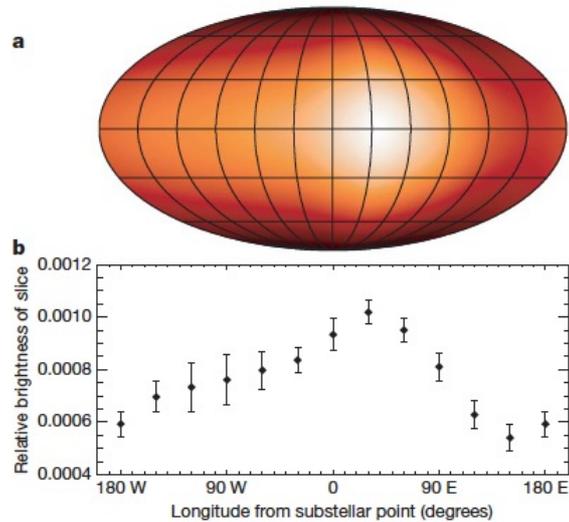
- La differenza $F - F_{tr}$ in questo caso ci da' direttamente l'emissività del pianeta
- L'effetto è massimo nell'infrarosso e ci permette di studiare l'emissione infrarossa del pianeta



10

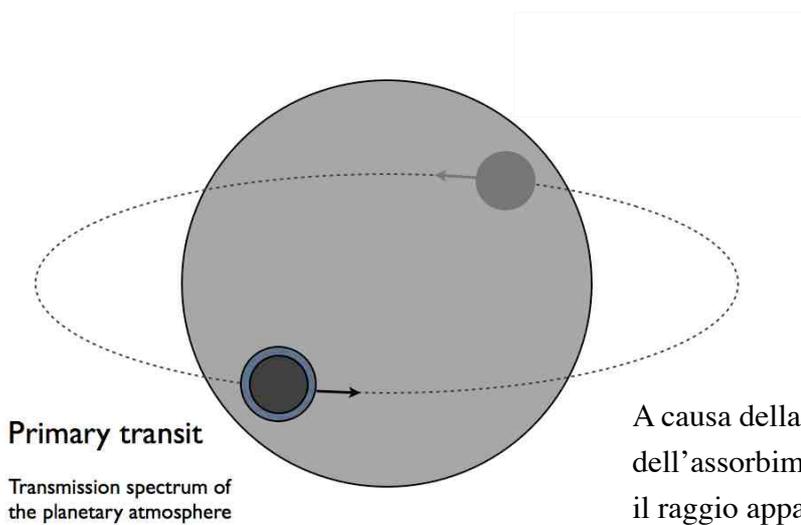
Studio della temperatura superficiale

- Dal confronto delle curve di luce dei transiti primari e secondari per pianeti giganti molto vicini alla stella
- Esempio: HD 189733b osservato nell'IR con Spitzer-IRAC (Knutson et al. 2007)
- Ricavata una distribuzione longitudinale delle temperature assumendo che il pianeta sia "tidally locked"
- La variazione longitudinale della temperatura non è eccessiva nonostante il "tidal locking"
- Deve pertanto esistere un meccanismo efficiente di trasporto di calore atmosferico tra l'emisfero illuminato e quello buio



11

Caratterizzazione delle atmosfere planetarie



A causa della dipendenza spettrale dell'assorbimento atmosferico, il raggio apparente del pianeta sarà funzione della lunghezza d'onda. Pertanto si può ricavare lo spettro di trasmissione atmosferico a partire dalle misure di $R_p = R_p(\lambda)$

Absorption spectroscopy of planetary atmospheres

- The atmospheric absorption signal scales with the scale-height of the atmosphere, h , and the planet radius, R_p
- Detection bias favours stars with smaller radii

$$\delta I \sim \frac{2 h R_p}{R_*^2}$$

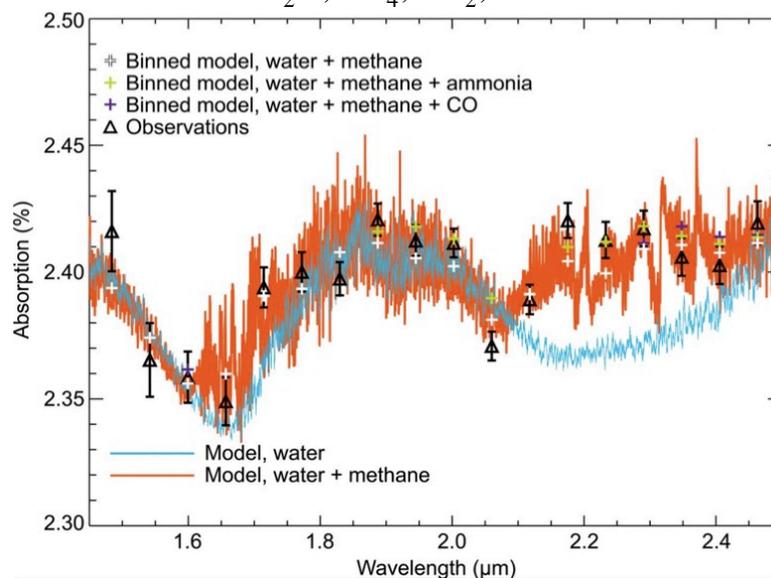
- Gaseous giants give the strongest signal; already detected
 - e.g. Tinetti et al. (2007)
- Atmospheres of super-Earths are starting to become feasible and will be common with next generation instrumentation
- Earth-like atmospheres are beyond detection limit even for the most advanced instrumental projects currently scheduled

13

Absorption spectroscopy of planetary atmospheres

- Atmospheric absorption spectroscopy with primary transits: molecular detections in giant planets

H₂O, CH₄, CO₂, CO

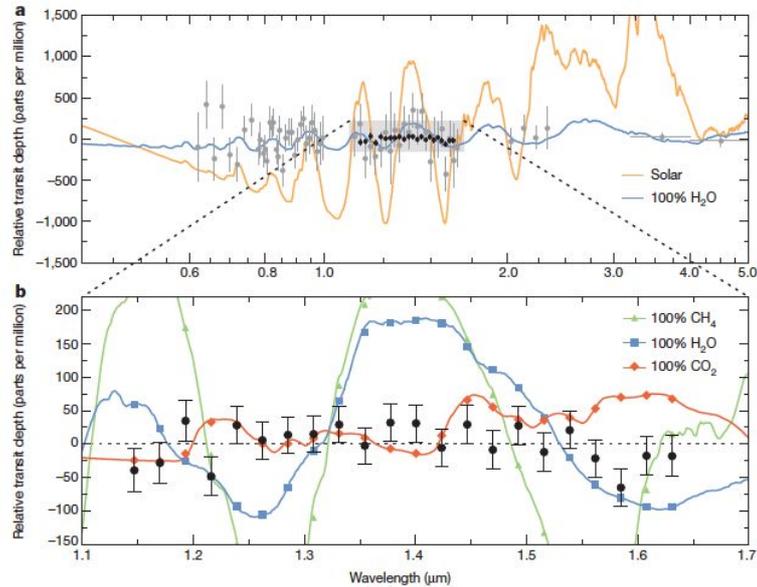


•14

Absorption spectroscopy of planetary atmospheres

➤ Flat spectrum of super-Earth GJ1214b

Evidence for clouds in exoplanets (Kreidberg 2014)



15

Extraction of planetary parameters from stellar spectra

Rossiter-McLaughlin effect
Independent Component Analysis

16

Effetto Rossiter-McLaughlin

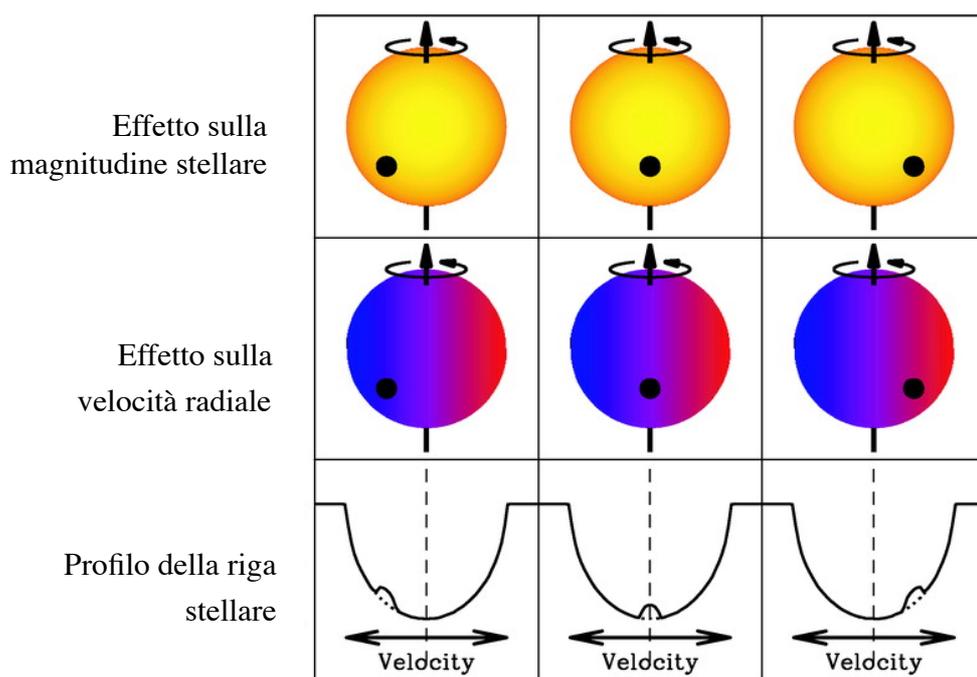
Distorsione del profilo delle righe in assorbimento stellari indotto dal transito di un pianeta

La sua rivelazione richiede l'utilizzo sia del metodo dei transiti che di quello delle velocità radiali

L'effetto prende il nome da un simile effetto scoperto per transiti di stelle binarie negli anni '20 del novecento

17

L'effetto Rossiter-McLaughlin (RM)

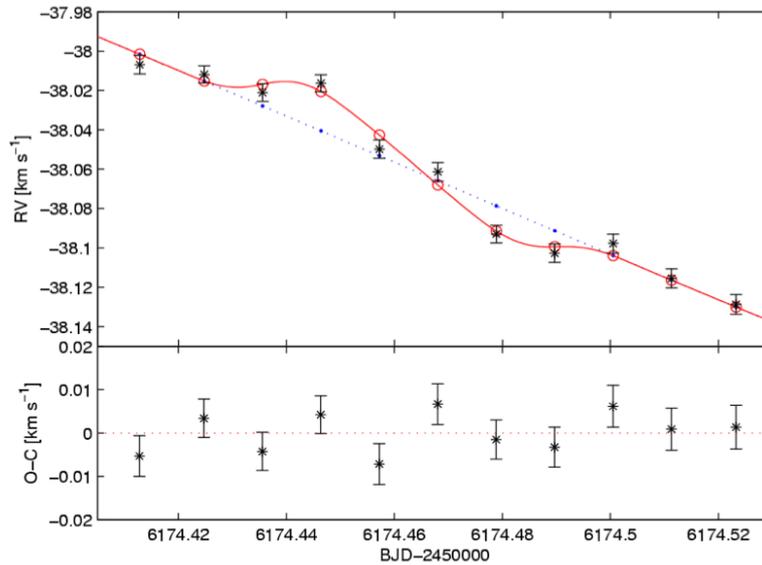


Gaudi & Winn (2007)

18

L'effetto Rossiter–McLaughlin (RM)

- Produce un segnale anomalo nella curva di velocità radiale, durante la sola durata del transito, che si distingue dal segnale Kepleriano



Covino et al. (2013)

19

L'effetto Rossiter–McLaughlin (RM)

- Il profilo in velocità radiale del segnale anomalo dipende dalla configurazione geometrica dell'osservazione, in particolare dall'inclinazione tra l'orbita planetaria e il piano equatoriale della stella

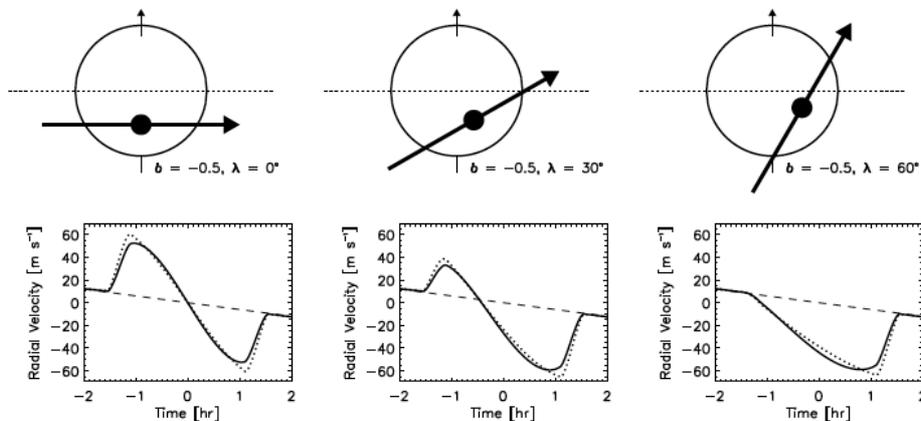


Figure 2.: The dependence of the RM waveform on λ , from Gaudi & Winn (2007). Three different trajectories of a transiting planet are shown along with the corresponding RM waveform. Solid lines include the effect of limb darkening; dotted lines neglect limb darkening.

20

L'effetto Rossiter-McLaughlin (RM)

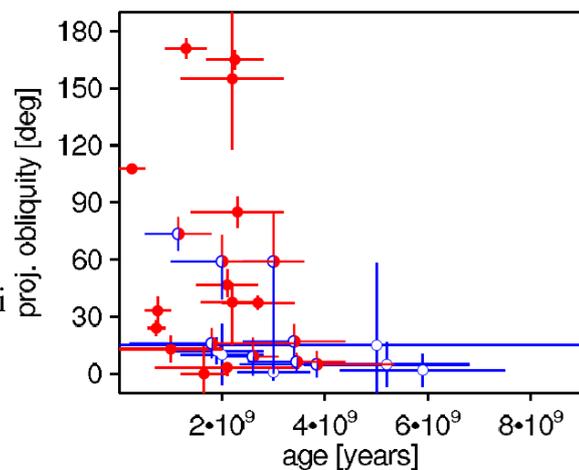
- Permette di misurare l'angolo λ tra lo spin di rotazione della stella ospite e lo spin orbitale dei pianeti
 - Lo spin di rotazione stellare è indicativo del momento angolare del disco di accrescimento protostellare
 - Lo spin dell'orbita planetaria può essere stato influenzato da interazioni dinamiche che hanno avuto luogo nel sistema planetario
- La misura di λ fornisce indicazioni sui processi dinamici di formazione e l'evoluzione dinamica dei sistemi planetari

21

L'effetto Rossiter-McLaughlin: analisi di un campione di “hot jupiters”

- Le obliquità degli spin tendono a diminuire con il tempo

- Nelle prime fasi successive alla formazione planetaria gli “hot jupiters” possono avere alte obliquità
- Questi casi favoriscono modelli di formazione planetaria in cui la migrazione è indotta da fenomeni di instabilità anziché aver luogo nel disco protoplanetario

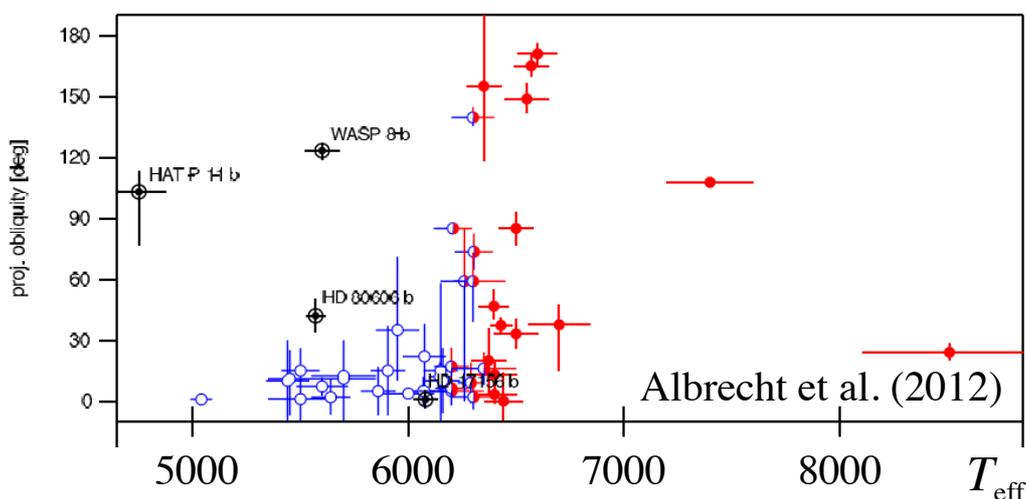


Albrecht et al. (2012)

22

L'effetto Rossiter-McLaughlin: analisi di un campione di “hot jupiters”

- L'obliquità tende ad aumentare con la temperatura efficace della stella, T_{eff}
 - Interpretazione: alle basse T_{eff} le stelle possiedono strati convettivi estesi le cui interazioni mareali tendono ad allineare gli spin



23

L'effetto Rossiter-McLaughlin

- Applicazione come follow up di osservazioni di transiti
 - Il follow up di velocità radiali necessario a confermare un transito planetario può richiedere un elevato numero di osservazioni su di una lunga baseline temporale
 - Tale notevole sforzo osservativo può essere evitato mediante una ricerca del segnale anomalo di Rossiter-McLaughlin studiando la curva di velocità radiale esclusivamente durante il transito primario
 - La presenza di un segnale in velocità radiale con le caratteristiche che ci si aspetta dall'effetto Rossiter-McLaughlin darebbe una conferma immediata della presenza del pianeta

24

Extraction of planetary contribution from stellar spectra

- **Independent Component Analysis (ICA)**

- Statistical method that allows to identify independent components from a signal mixture

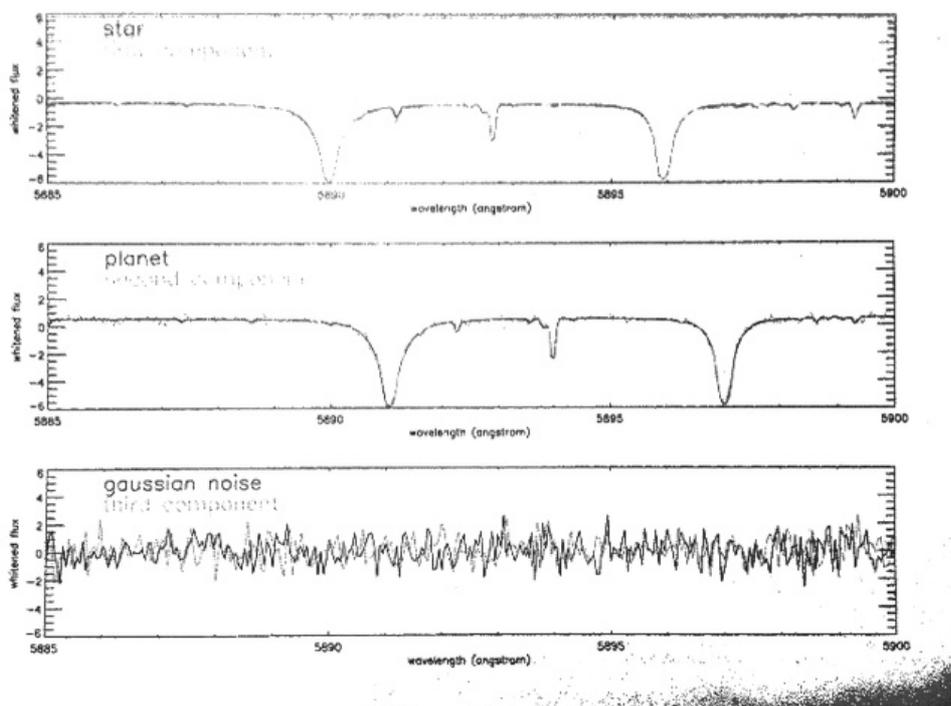
Jutten & Herault 1991, Signal Processing, 24, 1

- The spectrum of a star hosting a planet is composed by the stellar spectrum and the planet contribution

As an example, the planet reflection spectrum is a scaled version of the stellar spectrum, modulated in wavelength and shifted in radial velocity

25

Esempio basato su simulazioni numeriche
(dal lavoro di Tesi di F. Pala)



26

Extraction of planetary contribution from stellar spectra

- **Extraction of the planetary albedo with the ICA**
 - By taking several spectra of the stars at different phases of the planet orbital period it is possible, in principle, to extract the planet reflection spectrum and therefore the planetary albedo
 - The method should yield the wavelength dependence of the albedo
 - Preliminary estimates indicate that the signal-to-noise ratio required for the extraction of the albedo from the noise should be $S/N > 5000$
 - Pala, Morossi & Di Marcantonio 2013