

Dipartimento di Fisica e Astronomia  
Corso di Laurea in Astronomia

# **Impatto della rimozione dello spettro tellurico sullo spettro di trasmissione esoplanetaria**

Tesi di laurea

Presentata da:  
Elena Magnoni

Relatore:  
Chiar.mo Prof. Leonardo Testi  
Corelatore:  
Dr. Paolo Giacobbe

# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Studiare le atmosfere esoplanetarie</b>	<b>4</b>
2.1	Cos'è un esopianeta? . . . . .	4
2.2	Osservazione tramite la tecnica dei transiti . . . . .	5
2.3	Spettri delle atmosfere esoplanetarie . . . . .	6
2.3.1	La spettroscopia . . . . .	6
2.3.2	Pianeti in transito e spettroscopia di trasmissione . . . . .	6
2.3.3	Spettroscopia a bassa risoluzione . . . . .	7
2.3.4	Spettroscopia ad alta risoluzione . . . . .	7
2.3.5	Uso combinato della spettroscopia a bassa e ad alta risoluzione . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Principal Component Analysis</b>	<b>10</b>
3.1	Acquisizione degli spettri tramite GIANO-B . . . . .	10
3.2	Rimozione dello spettro tellurico tramite PCA . . . . .	10
3.3	Cross-correlazione . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Illustrazione del codice e interpretazione dei risultati</b>	<b>12</b>
4.1	WASP69-b . . . . .	12
4.2	Descrizione del codice . . . . .	12
4.3	Analisi dei risultati . . . . .	13
4.3.1	$H_2O$ . . . . .	13
4.3.2	$C_2H_2$ , $CH_4$ , $CO$ , $CO_2$ , $HCN$ , $NH_3$ . . . . .	14
4.4	Conclusioni . . . . .	17
	<b>Bibliografia</b>	<b>18</b>

# 1. Introduzione

Questa tesi descrive l'impatto della rimozione dello spettro tellurico dallo spettro di trasmissione esoplanetaria del pianeta WASP69-b.

Il capitolo 2 introduce il concetto di esopianeti e il loro studio tramite la tecnica dei transiti, sia per ricavarne i parametri fisici sia per la caratterizzazione delle loro atmosfere. Le proprietà atmosferiche, in particolare, vengono ottenute usando la spettroscopia di trasmissione. Essa consiste nell'analizzare la luce che attraversa l'atmosfera durante il transito, quando il pianeta orbita davanti alla stella lungo la linea di vista. In base alla strumentazione usata i dati possono essere ottenuti a bassa o ad alta risoluzione.

Il capitolo 3 descrive il meccanismo di acquisizione degli spettri ad alta risoluzione dello spettrometro a infrarosso GIANO-B, montato sul Telescopio Nazionale Galileo situato a La Palma in Spagna. Gli spettri a bassa risoluzione, invece, sono stati ottenuti da Hubble Space Telescope. I dati a bassa e ad alta risoluzione vengono combinati insieme per poter ottenere in modo più preciso i parametri fisici e chimici caratterizzanti l'atmosfera esoplanetaria. Si procede quindi alla rimozione dello spettro tellurico tramite la PCA (Principal Component Analysis) e viene eseguita la cross-correlazione. Nell'alta risoluzione le bande di assorbimento molecolare vengono risolte in migliaia di linee individuali e, anche se la maggior parte delle singole linee spettrali sono incorporate nel rumore dei fotoni, le specie possono essere identificate in modo robusto e univoco mediante la corrispondenza delle linee, ad esempio tramite la tecnica della cross-correlazione, con modelli di modelli planetari.

Il capitolo 4, infine, descrive i dati usati per questo studio e mostra l'impatto della PCA, espresso come riduzione percentuale del segnale e del picco di correlazione, in funzione dell'esponente della massa d'aria. Le molecole prese in considerazione sono quelle dell' $H_2O$ ,  $C_2H_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $HCN$  e  $NH_3$  e per ognuna di esse ci si aspetta di trovare una riduzione del segnale delle molecole presenti in atmosfera.

## 2. Studiare le atmosfere esoplanetarie

### 2.1 Cos'è un esopianeta?

Un esopianeta è un pianeta che ruota attorno a una stella diversa dal Sole. Un pianeta, per essere definito tale, deve soddisfare tre requisiti:

1. Orbitare attorno a una stella, senza innescare reazioni termonucleari;
2. Possedere una massa sufficiente affinché la propria gravità sia maggiore delle forze intermolecolari che tengono insieme i solidi, in modo che sia in equilibrio idrostatico;
3. Aver ripulito lo spazio attorno alla sua orbita.

Ad oggi ne sono stati scoperti circa 5500, per un totale di più di 4000 sistemi planetari [6].

Per quanto riguarda la nomenclatura, ad ogni esopianeta viene dato il nome della stella più una lettera minuscola: b per il primo esopianeta che ruota attorno alla stella, c per il secondo e così via. Tuttavia ci sono alcuni casi in cui il nome della stella, e di conseguenza del pianeta, sono dati dal progetto che li ha scoperti. Ad esempio WASP69-b, l'esopianeta oggetto dello studio per questa tesi, prende il nome dal Wide Angle Search for Planets (WASP), un'organizzazione internazionale di ricerca di pianeti extrasolari attraverso il metodo dei transiti. Il numero 69 indica che è la 69esima stella trovata da questa organizzazione.

Nel 1995 venne scoperto il primo esopianeta, 51 Pegasi b, da Michel Mayor e Didier Queloz, attraverso la misura delle velocità radiali [3]: la velocità di una stella, all'interno della nostra galassia, viene considerata costante, ma la presenza di un pianeta ne altera il movimento perché comporta la presenza di un campo gravitazionale. Questo fa sì che stella ed esopianeta orbitino attorno a un comune centro di massa e, nell'analisi dello spettro stellare, viene rilevato uno spostamento periodico dovuto all'effetto Doppler. L'importanza della scoperta di 51 Pegasi b ha fatto sì che i due fisici ricevessero il premio Nobel per la fisica nel 2019. I primi esopianeti scoperti, come questo, hanno una massa simile a quella di Giove ma orbitano molto più vicino alla loro stella, tra 0,015 e 0,5 UA di distanza: motivo per cui sono chiamati gioviani caldi.

Il miglioramento degli strumenti e il perfezionamento delle tecniche di analisi dei dati hanno portato a un aumento della precisione e alla scoperta delle super-terre. Combinando i dati ottenuti con le tecniche dei transiti e delle velocità radiali si possono ricavare le proprietà fisiche dell'esopianeta. La stima della massa e del raggio ci permettono di ottenere la densità media planetaria. Quest'ultima può essere confrontata con diagrammi di composizione e si può ipotizzare l'esistenza di pianeti con caratteristiche molto diverse, come i pianeti oceanici o di elio. Queste scoperte, inoltre, hanno portato a un ampliamento delle teorie di formazione ed evoluzione planetaria. Infatti, la scoperta dei gioviani caldi, come 51 Pegasi b, era del tutto inattesa siccome, fino a quel momento, ci si era sempre basati solo sul Sistema Solare dove non esistono pianeti aventi queste caratteristiche.

## 2.2 Osservazione tramite la tecnica dei transiti

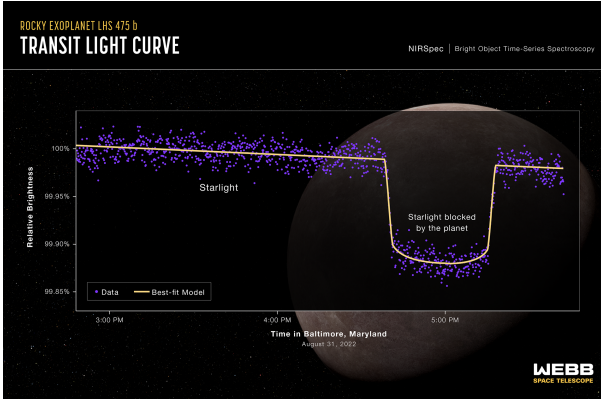


Figura 2.1: Esempio di curva di luce del transito dell'esopianeta LHS 475 b, ottenuta con il JWST [7]

Una dei metodi usati per la ricerca di esopianeti è quello che sfrutta il loro transito davanti alla stella. Più precisamente, consiste nel ricercare il piccolo calo di luminosità della stella (fig. 2.1), dovuto al passaggio dell'esopianeta davanti ad essa. Questa tecnica permette di osservare contemporaneamente più stelle, ma ciò comporta una maggiore probabilità di trovare dei falsi positivi (ad esempio la rilevazione di un sistema binario). Inoltre, queste osservazioni sono sbilanciate a favore dei pianeti con orbite piccole, poiché hanno una maggiore probabilità di presentare un'eclissi, mentre quelli con orbite più grandi implicano periodi orbitali maggiori e una probabilità più bassa che si verifichi il transito. La caratteristica fondamentale dei transiti è la loro periodicità che conferma o meno la presenza di un esopianeta in orbita attorno a una stella. Infatti sono richieste almeno 2 o 3 eclissi distinte per confermare la realtà del segnale e valutare il periodo orbitale. Per poter usare questa tecnica è necessario che il piano dell'orbita si trovi sulla linea di vista dell'osservatore, cioè deve essere vista frontalmente. La probabilità di transito, ovvero che il sistema sia allineato con l'osservatore, diminuisce con la distanza stella-pianeta. Il metodo dei transiti è sensibile a qualsiasi pianeta ed eventuali problemi riguardano la precisione e la stabilità fotometrica. La variazione del flusso è data da:

$$\Delta f = \frac{R_p^2}{R_s^2} \quad (2.1)$$

dove  $R_p$  è il raggio del pianeta e  $R_s$  quello della stella. Un pianeta come la Terra provocherà una diminuzione del flusso dello 0,008% mentre Giove dell'1%, in unità di flusso stellare. Conoscendo la variazione del flusso e il raggio stellare, si ricava quello del pianeta. Inoltre, studiando la forma e la profondità della curva di transito, è possibile calcolare il suo diametro, il suo periodo orbitale e il semiasse maggiore. La massa, invece, si può ricavare combinando i dati ottenuti con la tecnica delle velocità radiali e usando la seguente formula:

$$K = v_s \sin(i) = \frac{M_p \sin(i)}{M_s \sqrt{1 - e^2}} \sqrt{\frac{GM_s}{a}} \quad (2.2)$$

dove  $K$  è la velocità radiale,  $i$  l'angolo di inclinazione da cui si osserva il sistema,  $M_s$  la massa della stella,  $M_p$  quella del pianeta,  $a$  il semiasse maggiore dell'orbita ed  $e$  l'eccentricità. Una volta ricavata la massa e il raggio, si può calcolare la densità media e la gravità superficiale. Quest'ultime permettono di fare supposizioni sulla composizione interna dell'esopianeta, perché le masse e i raggi planetari danno importanti vincoli sui modelli della loro struttura fisica. Ad esempio, la misura del raggio potrebbe indicare la presenza o l'assenza di un nucleo di materiale solido e, di conseguenza, l'accrescimento di gas su un nucleo di ghiaccio e roccia accumulato dal disco protoplanetario [1]. Nel caso di pianeti che non sono giganti gassosi è presente

un'elevata degenerazione sulla composizione del pianeta in funzione della densità media, perché potrebbe avere un contenuto importante di ghiaccio d'acqua o un grande nucleo di ferro roccioso. Infine l'atmosfera di un esopianeta, se è primaria, permette di comprendere dove questo si è formato, se è migrato verso l'interno o l'esterno del sistema (nel caso di un pianeta gassoso), quali sono le sue condizioni superficiali e la sua abitabilità.

## 2.3 Spettri delle atmosfere esoplanetarie

Per studiare le atmosfere esoplanetarie si usa la spettroscopia. Grazie alla tecnica dei transiti è possibile ottenere la spettroscopia di trasmissione che varia sia con la composizione del gas sia con il profilo di temperatura, in funzione della pressione, ovvero dei diversi strati dell'atmosfera esoplanetaria.

### 2.3.1 La spettroscopia

Lo spettro è ottenuto attraverso l'uso di uno spettrografo, uno strumento che permette di scomporre la luce nelle sue lunghezze d'onda: la spettroscopia studia l'intensità della luce in funzione della lunghezza d'onda. Lo spettro della radiazione elettromagnetica è suddiviso in diverse bande, ognuna caratterizzata da un preciso intervallo di lunghezza d'onda: onde radio, microonde, infrarosso, visibile, ultravioletto, raggi x e raggi  $\gamma$ . Per questo studio, vengono osservati spettri ottenuti nell'infrarosso, perché sono presenti le righe di assorbimento delle transizioni rotovibrazionali delle molecole. Una proprietà dello spettrografo è il potere risolutivo  $R$ , ovvero la minima differenza di lunghezza d'onda risolvibile a quella lunghezza d'onda. Può essere espresso anche in termini di effetto Doppler, ovvero come la velocità della luce rispetto alla più piccola velocità doppler che può essere risolta.

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{c}{\Delta v} \quad (2.3)$$

### 2.3.2 Pianeti in transito e spettroscopia di trasmissione

Per questi esopianeti sono possibili tre misurazioni della loro atmosfera:

- Spettroscopia di trasmissione, ottenuta quando il pianeta transita davanti alla stella e una parte della sua luce passa attraverso l'atmosfera, venendo parzialmente assorbita da quest'ultima e lasciando tracce, nello spettro, dei componenti chimici che la caratterizzano;
- Spettroscopia di occultazione, che misura l'eclissi secondaria, ovvero la mancanza dell'emissione del pianeta;
- Curva di fase, quando l'emissione spettrale dell'esopianeta viene monitorata solo in fasi specifiche dove l'emissione del lato diurno o notturno è massima.

In questo lavoro di tesi ci si concentrerà a spiegare meglio la spettroscopia di trasmissione (fig. 2.2).

Studiando lo spettro prima e durante il transito, si possono notare differenze nelle righe di assorbimento che lo costituiscono. Si ricercano, infatti, le righe planetarie che appaiono solo durante il transito. Di conseguenza è possibile risalire alla composizione chimica dell'esopianeta, perché ogni atomo e molecola assorbe e diffonde la radiazione a precise lunghezze d'onda. Inoltre, si possono ricavare informazioni sulla temperatura, in funzione della pressione, che caratterizza i diversi strati.

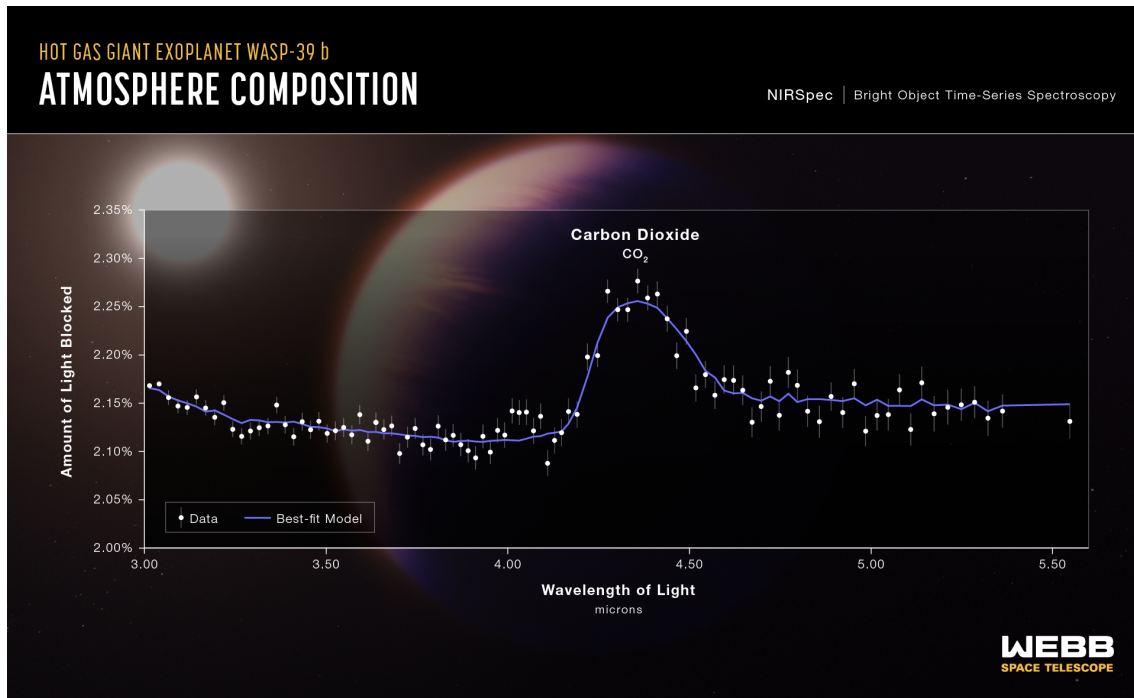


Figura 2.2: Esempio di spettro di trasmissione dell'esopianeta WASP-39 b, ottenuto con il JWST, dove è stata rilevata la presenza di  $CO_2$  [8]

Usando questa tecnica è possibile, però, studiare solo una parte dell'atmosfera, ovvero quella che si trova tra il lato diurno e notturno del terminatore.

### 2.3.3 Spettroscopia a bassa risoluzione

La spettroscopia a bassa risoluzione è ottenuta sia usando i telescopi da terra sia quelli spaziali, perché gli spettrografi non hanno bisogno di grandi aperture per poter raggiungere un rapporto segnale-rumore sufficiente. L'uso di algoritmi di recupero (retrieval) permette di interpretare gli spettri a bassa risoluzione e derivare le proprietà atmosferiche esoplanetarie, adattando un modello atmosferico a uno spettro osservato e stimandone i parametri con le loro incertezze.

### 2.3.4 Spettroscopia ad alta risoluzione

La spettroscopia ad alta risoluzione è ottenuta utilizzando soltanto i telescopi da terra, perché gli spettrografi sono troppo grandi per poter essere lanciati nello spazio e hanno bisogno di telescopi con grandi aperture per poter raggiungere un rapporto segnale-rumore sufficiente. Questo tipo di strumento ha due vantaggi:

1. Ciascuna molecola viene risolta in una "foresta" (insieme di righe di assorbimento/emissione molto vicine tra loro, spesso sovrapposte) di singole righe, uniche per ogni molecola. Più precisamente, la maggior parte delle transizioni che formano lo spettro delle diverse specie molecolari viene risolta spettralmente. Questo è importante sia nella determinazione di quali molecole sono presenti nell'atmosfera esoplanetaria, sia nello studio delle loro proprietà fisiche;
2. Il moto planetario viene separato dallo spettro stellare e tellurico. Il pianeta orbita attorno alla propria stella e il suo spettro viene spostato per effetto Doppler. Contemporaneamente, il pianeta si sposta radialmente, spostando la

riga a lunghezze d'onda diverse. Quello che si osserva è dunque uno spostamento delle righe tra le varie esposizioni (fig. 2.3). Misurando poi la velocità radiale, si può distinguere il segnale planetario da quello stellare e terrestre, assunti stazionari perché ci si è posti in un sistema topocentrico. Nel sistema di riferimento dell'osservatore, infatti, la variazione dell'offset in velocità delle righe di assorbimento telluriche, nella direzione della linea di vista, non cambia in modo rilevante.

Applicando successivamente le tecniche di rimozione delle righe telluriche, sottrazione dello spettro stellare, re-phasing del moto del pianeta ed eseguendo la cross-correlazione di tutte le righe planetarie, si ottiene una detezione.

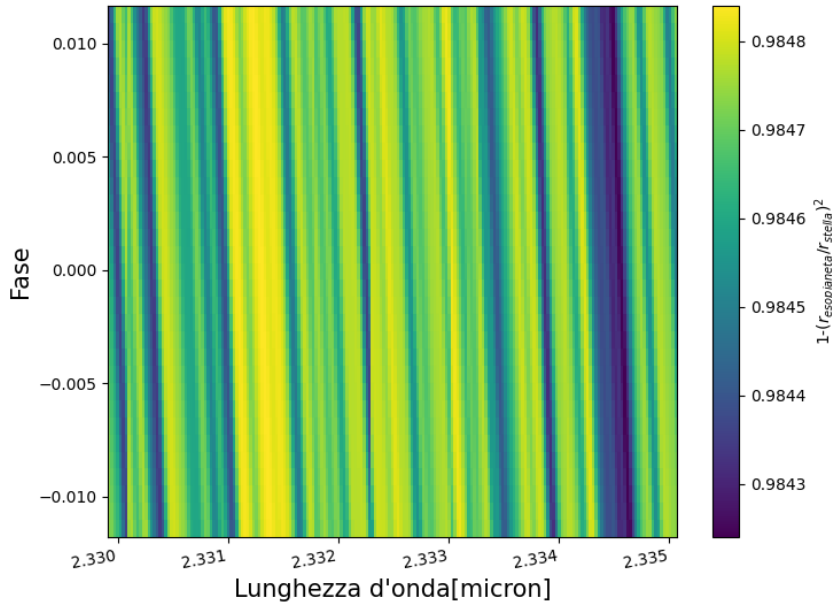


Figura 2.3: Porzione di spettro che evidenzia i valori della differenza tra lo spettro stellare e quello planetario, normalizzata a quello stellare in funzione della fase. Sull'asse y è riportata la fase dell'orbita planetaria in cui è stato osservato il pianeta e l'unità di misura dei colori è  $1 - \left(\frac{R_p}{R_s}\right)^2$

Esso presenta, però, anche degli svantaggi:

1. Il flusso registrato dallo strumento, per unità di lunghezza d'onda, è inferiore rispetto a quello ottenuto con uno spettrografo a risoluzione minore. Lo shot noise della stella cala, perché disperdendo il segnale si hanno meno fotoni per elemento di risoluzione. Di conseguenza, lo shot noise dato da  $\sqrt{N_{\text{phot}}}$  diminuisce perché  $N_{\text{phot}}$  cala. Lo shot noise del pianeta, per elemento di risoluzione, si riduce più rapidamente rispetto a quello stellare all'aumentare della risoluzione spettrale e il rapporto segnale-rumore per elemento di risoluzione, per uno spettro continuo, cala. Questo comporta che lo shot noise della stella domina quasi sempre sul segnale del pianeta;
2. Le righe telluriche, assunte stazionarie, possono essere filtrate senza cancellare il segnale planetario, rimuovendo però parte dell'informazione del continuo.

Per risolvere il primo problema, si applica la cross-correlazione che misura la correlazione tra due elementi. Questa tecnica si basa sul fatto che si conoscono a quali



lunghezze d'onda si formano determinate righe e assume l'esistenza di un modello (model-dependent). Per quanto riguarda invece il secondo, la rimozione delle righe telluriche può essere fatta applicando la Principal Component Analysis (PCA), tecnica che verrà approfondita nel prossimo capitolo.

### 2.3.5 Uso combinato della spettroscopia a bassa e ad alta risoluzione

Gli spettri ad alta e bassa risoluzione sono complementari, perché hanno una sensibilità diversa a determinate specie atomiche e molecolari e a diverse altitudini e pressioni atmosferiche.

L'alta risoluzione è sensibile agli strati alti dell'atmosfera, dove la bassa pressione porta a una bassa densità delle molecole e questo origina il core della riga. In condizioni di bassa pressione, infatti, ci sono poche molecole che assorbono la radiazione, quindi non è presente una riga satura che si espande in larghezza e in altezza. La bassa risoluzione invece è sensibile agli strati più bassi, dove le righe sono sature o unite a quelle adiacenti, perché sono presenti più molecole e c'è un maggiore assorbimento. Di conseguenza, il core non può essere risolto. Possiamo, quindi, vincolare meglio le variazioni della composizione chimica in funzione del profilo pressione-temperatura. Inoltre, gli spettri a bassa risoluzione sono maggiormente soggetti all'eventuale presenza di nubi, perché quest'ultime sono la principale fonte di riflessione in atmosfera e determinano l'albedo; mentre quelli ad alta risoluzione non risentono di questa influenza e ciò permette di ottenere un elenco completo delle specie chimiche che caratterizzano l'atmosfera.

L'informazione del continuo, persa nel procedimento di rimozione delle righe telluriche negli spettri ad alta risoluzione, viene conservata nella bassa risoluzione se si utilizzano dati presi da un telescopio spaziale, perché lo spettro tellurico non è presente. Se invece sono ottenuti usando un telescopio da terra, l'informazione del continuo viene persa, perché le righe telluriche devono essere rimosse.

Negli spettri a bassa risoluzione è difficile identificare molecole diverse da quella dell'acqua, perché le loro righe di assorbimento si possono confondere con quelle di quest'ultima. Nell'alta risoluzione, invece, la "foresta" di righe, ottenuta per ciascuna molecola, permette di riconoscerle più facilmente.

Infine, combinando i dati di diversi strumenti, si possono studiare le bande delle molecole presenti su un intervallo di lunghezze d'onda più ampio.

# 3. Principal Component Analysis

## 3.1 Acquisizione degli spettri tramite GIANO-B

Gli spettri, usati per questo studio, sono stati acquisiti dallo strumento GIANO-B, uno spettrometro ad alta risoluzione ( $R = 50000$ ) montato sul Telescopio Nazionale Galileo di 3,6 metri di diametro, situato nell'isola spagnola di La Palma [9]. GIANO-B copre le bande spettrali Y, J, H e K nel vicino infrarosso, tra  $0,92$  e  $2,45 \mu m$  (fig. 3.1). GIANO-B, quindi, è in grado di combinare una copertura spettrale così ampia con un potere risolutivo elevato. Il suo meccanismo si basa sul metodo di dispersione echelle (dal francese échelle, che significa "scala").

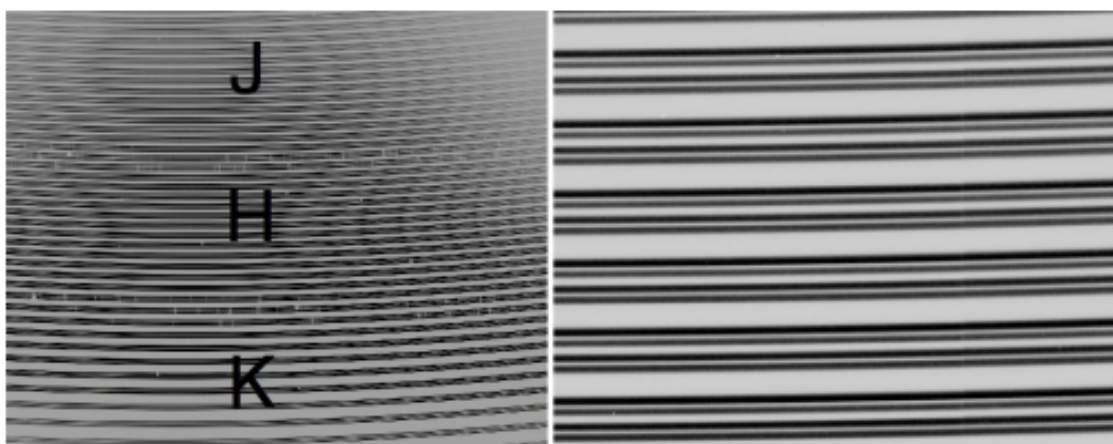


Figura 3.1: Esempio di uno spettro ottenuto con GIANO-B, usando il reticolo echelle nelle bande J, H e K e di un suo ingrandimento

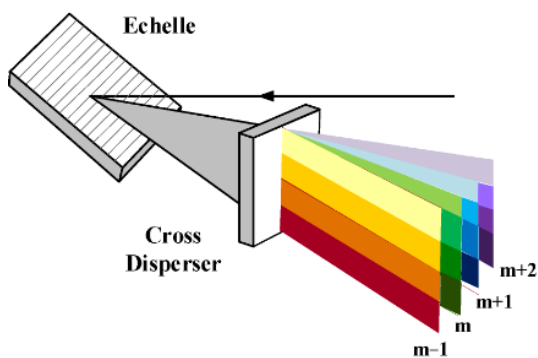


Figura 3.2: Schema del reticolo echelle a cui è stato applicato un dispersore trasversale [10]

(un reticolo o un prisma), montato perpendicolarmente lungo il percorso del raggio, formando una matrice bidirezionale con diversi ordini spettrali (fig. 3.2) [2].

## 3.2 Rimozione dello spettro tellurico tramite PCA

Gli spettri acquisiti da Terra sono dominati dalle linee telluriche e stellari. Per filtrare il segnale tellurico, si applica la PCA. La PCA (Principal Component Analysis) è un metodo di riduzione della dimensionalità di grandi set di dati, trasformandolo

in un insieme di variabili più piccolo, dette componenti principali, che preserva la maggior parte delle informazioni. Lo scopo della PCA è trovare un insieme di autovettori le cui combinazioni lineari, ortogonali tra loro, rappresentino ogni possibile andamento temporale presente nei vari canali spettrali. La PCA lavora sulla matrice di covarianza tra insiemi di dati e calcola le componenti principali di una matrice  $M \times N$ , dove  $M$  è il numero di variabili e  $N$  è il numero di osservazioni, che descrivono la matrice iniziale in un nuovo sistema di riferimento ortogonale. Dopo aver selezionato le componenti significative e considerando che il segnale dominante nello spettro è quello prodotto dall'atmosfera terrestre e dalla fotosfera stellare, la PCA rimuove le righe telluriche e stellari che, nel corso delle osservazioni, variano solo in profondità. Il segnale planetario invece si sposta rispetto al sistema di riferimento tellurico per effetto Doppler, ovvero la componente radiale del moto orbitale del pianeta attorno alla sua stella, muovendosi attraverso diversi canali spettrali durante la notte osservativa. Una volta applicato questo procedimento, idealmente si ottiene la matrice residua, composta dal rumore gaussiano e dallo spettro di trasmissione del pianeta. Se si applica lo stesso procedimento (con lo stesso numero di componenti) ad una matrice composta dal solo segnale planetario, calcolato da *petitRADTRANS* [4] (di questo modello si parlerà nel prossimo capitolo), si possono eseguire le stesse modifiche sia allo spettro di partenza sia al modello ottenuto dal trasporto radiativo per poterli confrontare correttamente (fig. 3.3).

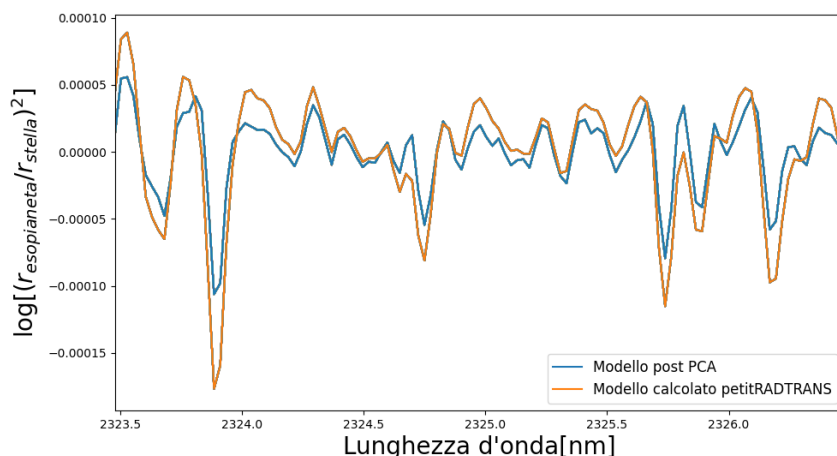


Figura 3.3: Confronto tra lo spettro calcolato da *petitRADTRANS* e quello a cui è stata applicata la PCA

### 3.3 Cross-correlazione

La cross-correlazione è la misura della similitudine di due segnali come funzione di uno spostamento o traslazione temporale applicata ad uno di essi. Non dipende dall'ampiezza del segnale, infatti se la si calcola per due funzioni seno, aventi diversa ampiezza, risulta essere sempre uguale a uno. Questa tecnica sfrutta il fatto che è noto a quali lunghezze d'onda si formano certe righe e, selezionando un numero sufficiente di righe spettrali, è possibile mediare il rumore dei fotoni per ottenere la misura di qualche riga spettrale media. La funzione di cross-correlazione restituisce un coefficiente di correlazione compreso tra 1 e -1. Una cross-correlazione forte con un determinato modello, ovvero per un valore vicino a 1, indica la presenza di quella molecola nell'atmosfera dell'esopianeta.

# 4. Illustrazione del codice e interpretazione dei risultati

## 4.1 WASP69-b

Per questo lavoro di tesi è stato studiato lo spettro di trasmissione dell'esopianeta WASP69-b, un gigante gassoso scoperto nel 2014 attraverso la tecnica dei transiti. Il pianeta orbita attorno a una stella di tipo K in 3,9 giorni, a una distanza di 0,04 UA. La sua massa è 0,29 volte quella di Giove e il suo raggio 1,11 volte quello di Giove. [5]

## 4.2 Descrizione del codice

Il codice usato per l'analisi, scritto in Python, legge inizialmente diversi file da cui prende le seguenti informazioni:

- La fase dell'orbita esoplanetaria in cui è stato osservato il pianeta, da cui vengono estratti i parametri intrinseci dello spettro, della notte osservativa e dell'esopianeta. In questo modo vengono selezionati solo gli spettri in transito;
- Gli ordini buoni in cui si può vedere la molecola. Le bande spettrali coperte da GIANO-B sono divise in 50 ordini, ma nel caso in esame solo 21 sono utilizzabili;
- I dati filtrati, ovvero quelli in cui lo spettro tellurico è stato rimosso usando la PCA. Essi vengono poi messi in una matrice tridimensionale, insieme ai dati del transito e i parametri delle notti osservative;
- La matrice contenente la soluzione in lunghezza d'onda per i 21 ordini considerati;
- Il modello teorico calcolato da *petitRADTRANS*, un software di calcolo del trasporto radiativo che restituisce, in output, due vettori: uno contenente le lunghezze d'onda e l'altro le variazioni di flusso, espresse attraverso il quadrato del rapporto tra i raggi dell'esopianeta e della stella.

Il primo passo riguarda il calcolo della riduzione percentuale del segnale. Innanzitutto, si calcola la mediana del rapporto tra i vettori contenenti le variazioni di flusso sia del modello teorico calcolato da *petitRADTRANS* sia del modello a cui è stata applicata la PCA. Infine, ad uno si sottrae il valore appena trovato e si moltiplica tutto per 100.

Se la riduzione del segnale è causata dallo spettro tellurico, ci si può aspettare che tanto più questo è intenso tanto più il segnale sarà eroso. Dai dati sulla notte osservativa, viene calcolata la massa d'aria, una misura della quantità di aria lungo la linea di vista quando si osserva un oggetto celeste da sotto la nostra atmosfera. La massa d'aria è un parametro che suggerisce l'intensità dello spettro tellurico, quindi la si può mettere in relazione con la riduzione del segnale o la cross-correlazione. Per fare questo, si usa il test di Pearson, un coefficiente parametrico che assume una relazione lineare. Il coefficiente di Pearson misura la correlazione tra due variabili (x e y) ed è definito come:

$$r = \frac{\sum(x - \langle x \rangle)(y - \langle y \rangle)}{\sqrt{\sum(x - \langle x \rangle)^2(y - \langle y \rangle)^2}} \quad (4.1)$$

Ovvero è il rapporto tra la covarianza e il prodotto delle singole deviazioni standard. Il risultato è un termine adimensionale, compreso tra  $-1$  e  $1$  per la diseuguaglianza di Cauchy-Schwarz:

- Se  $r$  è circa uguale a  $1$ , le due variabili correlano;
- Se  $r$  è circa uguale a  $-1$ , le due variabili sono anticorrelate;
- Se  $r$  è circa uguale a  $0$ , le due variabili non correlano.

Successivamente, è stata verificata la monotonia della relazione tra queste due variabili attraverso il calcolo del coefficiente di Spearman. Le due quantità  $x$  e  $y$  vengono ordinate in coppie e, per ciascuna di essa, avremo una differenza  $D$ :

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^N D_i}{N^3 - N} \quad (4.2)$$

Il coefficiente di Spearman rileva una correlazione senza assumere che questa segua una relazione funzionale. Anche in questo caso si ottiene un risultato compreso tra  $-1$  e  $1$ . Il primo indica una correlazione negativa, ovvero all'aumentare di una variabile l'altra diminuisce. Il secondo invece una correlazione positiva, ovvero all'aumentare di una variabile anche l'altra aumenta. Siccome il calcolo viene fatto su 21 ordini, alla fine ne si ricava il valor medio per entrambi i coefficienti.

Infine, lo studio viene ripetuto per altre molecole:  $C_2H_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $HCN$  e  $NH_3$ .

## 4.3 Analisi dei risultati

### 4.3.1 $H_2O$

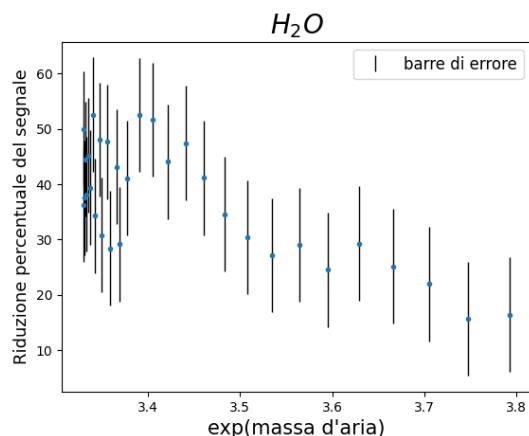


Figura 4.1: Riduzione percentuale del segnale in funzione della massa d'aria

Il primo risultato ottenuto in questa analisi riguarda la riduzione percentuale del segnale in funzione dell'esponente della massa d'aria (fig. 4.1). Come si può vedere dal grafico, la riduzione percentuale del segnale è maggiore dove la massa d'aria è minore e la riduzione massima percentuale dell' $H_2O$  è poco più di 50. Questo significa che lo spettro viene ridotto maggiormente dove le righe telluriche sono più deboli. Il valore del coefficiente di Pearson è pari a  $-0.75$ , indice di una forte anticorrelazione tra le due variabili. Il valore del coefficiente di Spearman uguale a  $-0.55$  conferma che la correlazione è negativa, ovvero

all'aumentare dell'esponente della massa d'aria diminuisce la riduzione percentuale del segnale. Lo stesso andamento è stato riscontrato per tutti i 21 ordini studiati. Studiando come varia la cross-correlazione in funzione dell'esponente della massa d'aria (fig. 4.2 e fig. 4.3), dai grafici è possibile vedere che non sempre è presente una dipendenza con quest'ultima. Il calcolo del coefficiente di Pearson riporta un valore di  $0.41$ , indice di una debole correlazione tra le due quantità. Il coefficiente di Spearman è uguale a  $0.38$  e conferma la correlazione positiva.

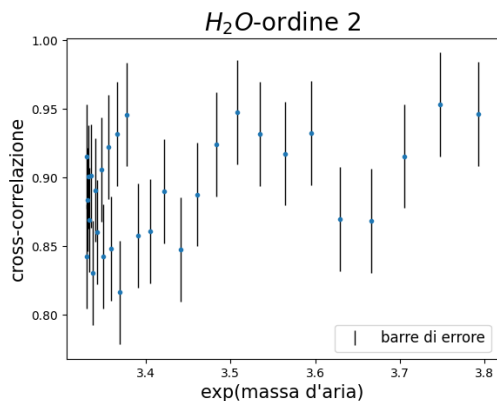


Figura 4.2: Esempio dell'andamento della cross-correlazione per l'ordine 2

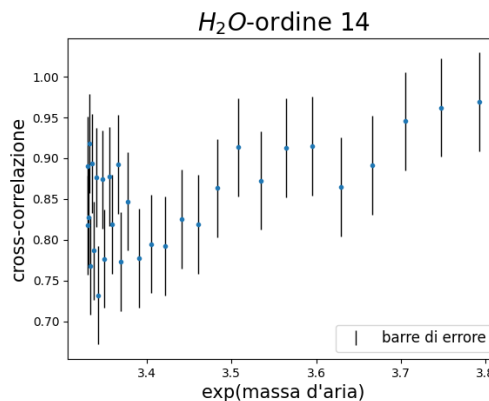


Figura 4.3: Esempio dell'andamento della cross-correlazione per l'ordine 14

### 4.3.2 $C_2H_2$ , $CH_4$ , $CO$ , $CO_2$ , $HCN$ , $NH_3$

I grafici di riduzione del segnale di queste molecole hanno un andamento simile a quello dell' $H_2O$  e il picco è sul punto  $x = e^{massa d'aria} \approx 3,4$ . Anche per queste molecole, il fattore di scala risente della riduzione dell'intensità delle righe e la riduzione del segnale è maggiore dove la massa d'aria è minore. Lo spettro viene ridotto dove le righe telluriche sono più deboli.

Guardando i valori sull'asse y, si può notare che la riduzione massima percentuale per le molecole  $C_2H_2$  (fig. 4.4),  $CH_4$  (fig. 4.5),  $CO_2$  (fig. 4.7),  $HCN$  (fig. 4.8) e  $NH_3$  (fig. 4.9) varia tra 45 e 55, mentre per la  $CO$  (fig. 4.6) è 85 (questa molecola ha un andamento della riduzione del segnale poco lineare, soprattutto aumentando la massa d'aria). Il segnale di queste molecole viene ridotto della stessa quantità di quello dell'acqua.

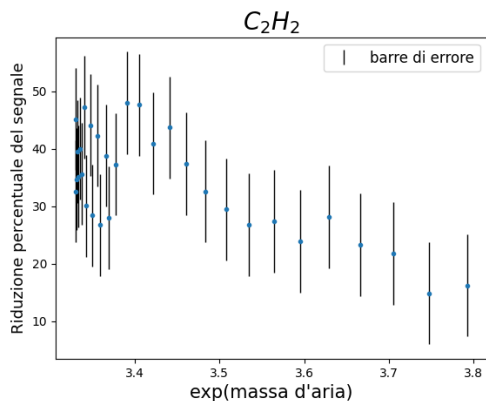


Figura 4.4: Riduzione percentuale del segnale per la molecola  $C_2H_2$

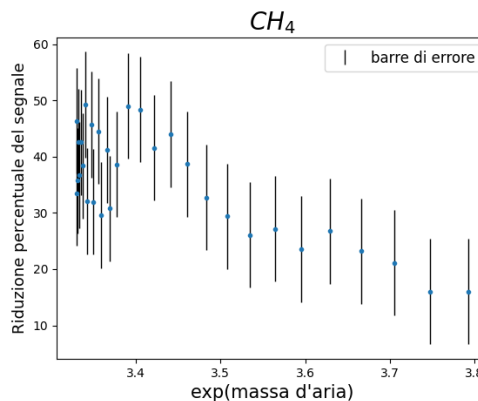
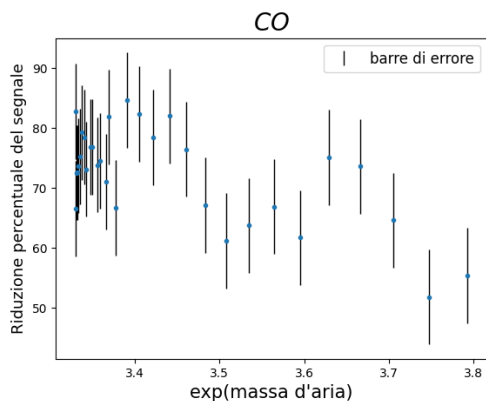
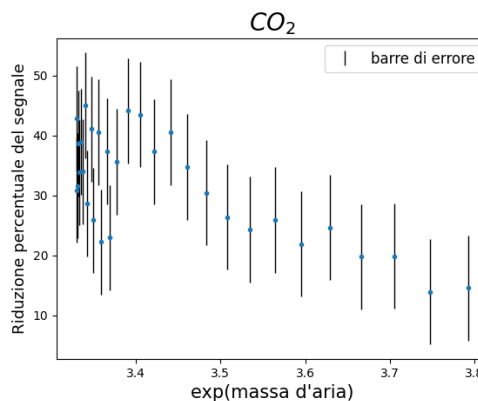
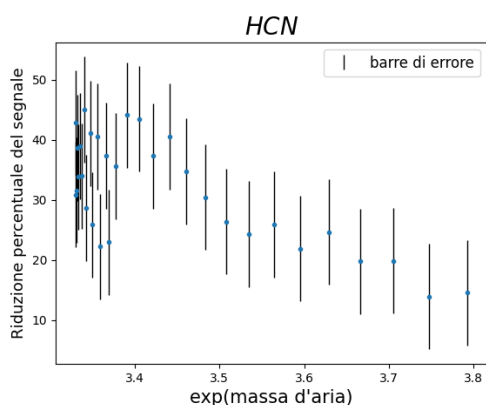
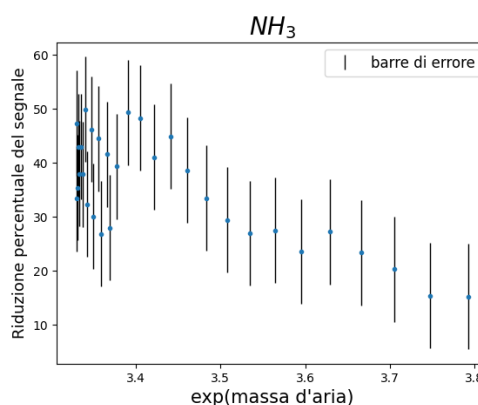


Figura 4.5: Riduzione percentuale del segnale per la molecola  $CH_4$


 Figura 4.6: Riduzione percentuale del segnale per la molecola  $CO$ 

 Figura 4.7: Riduzione percentuale del segnale per la molecola  $CO_2$ 

 Figura 4.8: Riduzione percentuale del segnale per la molecola  $HCN$ 

 Figura 4.9: Riduzione percentuale del segnale per la molecola  $NH_3$ 

I coefficienti di Pearson e di Spearman, calcolati per ciascuna molecola, sono riportati nella tabella 4.1.

Molecola	Coefficiente di Pearson	Coefficiente di Spearman
$C_2H_2$	-0,73	-0.55
$CH_4$	-0.76	-0.56
$CO$	-0.77	-0.55
$CO_2$	-0.75	-0.56
$HCN$	-0.77	-0.57
$NH_3$	-0.76	-0.58

Tabella 4.1: Tabella dei coefficienti di Pearson e di Spearman calcolati per la relazione tra i valori di riduzione del segnale e l'esponentiale della massa d'aria

Dai coefficienti trovati si può affermare che le due variabili, per tutte le molecole, sono anticorrelate: all'aumentare dell'esponentiale della massa d'aria, la riduzione percentuale del segnale diminuisce. Si può concludere che per lo studio della riduzione del segnale in funzione dell'esponentiale della massa d'aria, tutte le molecole finora analizzate riscontrano lo stesso comportamento.

Come per la molecola dell' $H_2O$ , è stata studiata la variazione dei valori di cross-correlazione in funzione dell'esponentiale della massa d'aria. I grafici ottenuti (per l'analisi sono stati presi gli ordini 2 per tutte le molecole) sono riportati di seguito (fig. 4.10, fig. 4.11, fig. 4.12, fig. 4.13, fig. 4.14 e fig. 4.15).

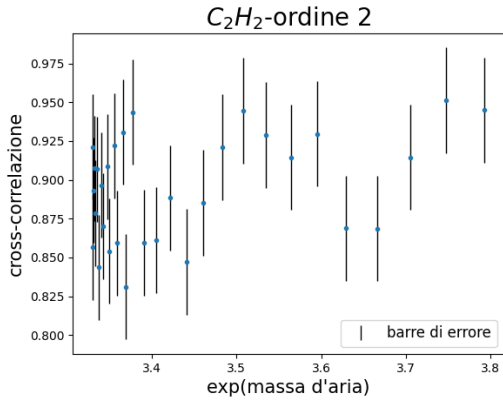


Figura 4.10: Esempio dell'andamento della cross-correlazione per l'ordine 2 della molecola C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>

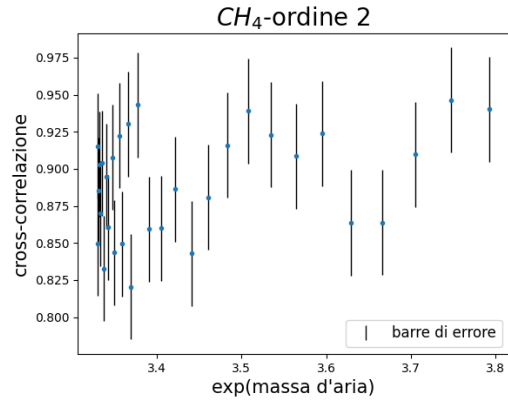


Figura 4.11: Esempio dell'andamento della cross-correlazione per l'ordine 2 della molecola CH<sub>4</sub>

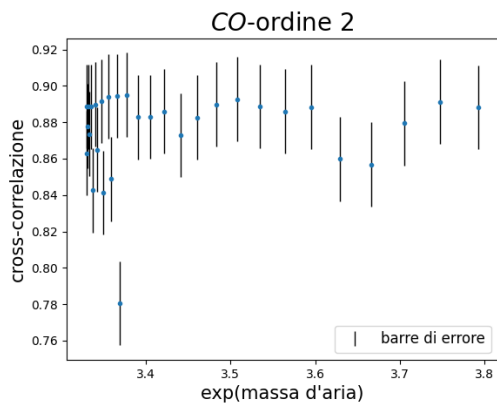


Figura 4.12: Esempio dell'andamento della cross-correlazione per l'ordine 2 della molecola CO

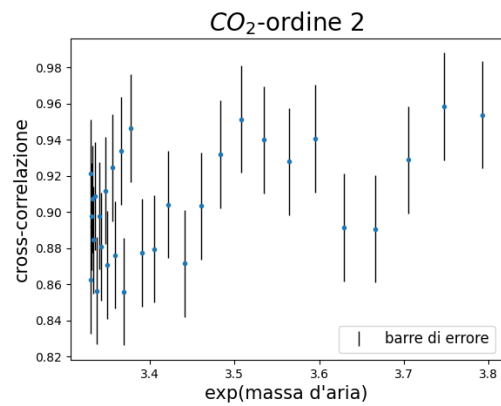


Figura 4.13: Esempio dell'andamento della cross-correlazione per l'ordine 2 della molecola CO<sub>2</sub>

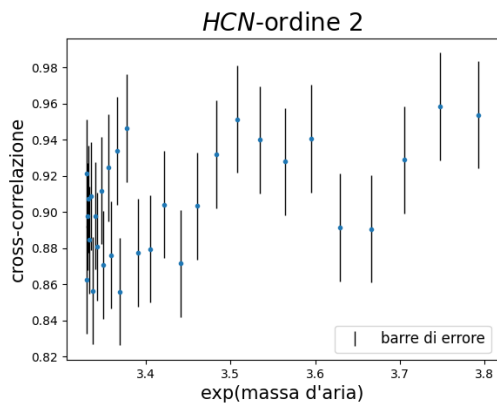


Figura 4.14: Esempio dell'andamento della cross-correlazione per l'ordine 2 della molecola HCN

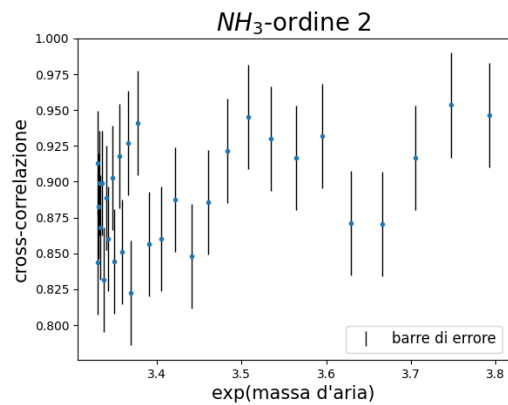


Figura 4.15: Esempio dell'andamento della cross-correlazione per l'ordine 2 della molecola NH<sub>3</sub>

I coefficienti di Pearson e di Spearman, calcolati per ciascuna molecola, sono riportati nella tabella 4.2.



Molecola	Coefficiente di Pearson	Coefficiente di Spearman
$C_2H_2$	0.44	0.41
$CH_4$	0.41	0.38
$CO$	0.17	0.15
$CO_2$	0.44	0.39
$HCN$	0.42	0.39
$NH_3$	0.44	0.41

Tabella 4.2: Tabella dei coefficienti di Pearson e di Spearman calcolati per la relazione tra i valori di cross-correlazione e l'esponentiale della massa d'aria

Dai valori ottenuti si può dedurre che, per tutte le molecole, esiste una debole correlazione tra i valori della cross-correlazione e l'esponentiale della massa d'aria. Infine, anche per lo studio dei valori della cross-correlazione in funzione dell'esponentiale della massa d'aria, tutte le molecole considerate riscontrano lo stesso comportamento.

## 4.4 Conclusioni

Si può concludere che tutte le molecole studiate ( $H_2O$ ,  $C_2H_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $HCN$  e  $NH_3$ ) vengono influenzate dalla procedura. Questo significa che applicando la PCA viene persa, ogni volta, una certa quantità di segnale anche se non è associato alla parte tellurica. Nonostante la PCA debba selezionare solo le componenti dominanti, cioè quelle legate allo spettro tellurico, il fatto che la procedura influenzi indistintamente tutte le molecole significa che parte del segnale viene catturato nelle componenti principali. In altre parole, anche se il segnale planetario ha proprietà dinamiche nettamente diverse da quello tellurico, non è possibile separare le due componenti sulla base di questi elementi. Durante una notte osservativa, osservando diversi target, la massa d'aria cambia e si avrà un assorbimento differente più o meno evidente. Usando la spettroscopia ad alta o a bassa risoluzione, non si riesce ad ottenere una stima precisa per ogni singolo caso, quindi non è possibile conoscere le due componenti, trovare il numero delle componenti variabili e filtrarle.

Il prossimo passo sarà capire se tutte le molecole vengono influenzate dalla procedura anche per motivi chimici.

Si può pensare di costruire nuovi strumenti con un'accuratezza maggiore, ma per migliorare l'alta risoluzione, usando le tecnologie a nostra disposizione, non è al momento possibile. Invece, per migliorare la bassa risoluzione si usa l'alta risoluzione che, però, non può essere ottenuta nei telescopi spaziali per questioni di peso, carburante e strumentazione.

# Bibliografia

- [1] David Charbonneau, Timothy M. Brown, Adam Burrows, and Greg Laughlin. When extrasolar planets transit their parent stars, 2006.
- [2] Christopher R Kitchin. *Optical astronomical spectroscopy*. Institute of Physics Publishing, London, England, January 1996.
- [3] Mayor Michel and Queloz Didier. A jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature*, 378(6555):355–359, November 1995.
- [4] P. Mollière, J. P. Wardenier, R. van Boekel, Th. Henning, K. Molaverdikhani, and I. A. G. Snellen. petitRADTRANS. *Astronomy and Astrophysics*, 627:A67, July 2019.
- [5] NASA. Exoplanet catalog: Wasp-69 b. Available at <https://exoplanets.nasa.gov/exoplanet-catalog/5142/wasp-69-b/>.
- [6] NASA. Exoplanet exploration. Available at <https://exoplanets.nasa.gov/>.
- [7] NASA. Exoplanet lhs 475 b (nirspec transit light curve). Image from <https://webbtelescope.org/images>.
- [8] NASA. Exoplanet wasp-39 b (transmission spectrum). Image from <https://webbtelescope.org/images>.
- [9] E. Oliva, L. Origlia, R. Maiolino, C. Baffa, V. Biliotti, P. Bruno, G. Falcini, V. Gavriousov, F. Ghinassi, E. Giani, M. Gonzalez, F. Leone, M. Lodi, F. Massi, I. Mochi, P. Montegriffo, M. Pedani, E. Rossetti, S. Scuderi, M. Sozzi, and A. Tozzi. The GIANO spectrometer: towards its first light at the TNG. In Ian S. McLean, Suzanne K. Ramsay, and Hideki Takami, editors, *SPIE Proceedings*. SPIE, October 2012.
- [10] Yinxin Zhang, Wanzhuo Li, Wenhao Duan, Zhanhua Huang, and Huaidong Yang. Echelle grating spectroscopic technology for high-resolution and broadband spectral measurement. *Applied Sciences*, 12(21), 2022.