

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia "Galileo Galilei"

Corso di Laurea in Astronomia

**Nane bianche inquinate: specchi della  
composizione e storia evolutiva dei sistemi  
extrasolari**

Tesi di Laurea Triennale

Relatore:

**Prof. Sergio Ortolani**

Candidato:

**Andrea Mezzacasa**

Matricola:

**1125531**

---

Anno Accademico 2021-2022



# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Nane bianche</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Nane bianche inquinate</b>	<b>11</b>
3.1	Scoperta . . . . .	13
3.2	Dischi circumstellari . . . . .	14
3.3	Origine degli inquinanti . . . . .	16
3.4	Modelli di accrescimento . . . . .	19
3.5	Bilanci di massa e tassi di accrescimento . . . . .	27
<b>4</b>	<b>Esogeologia dei sistemi extrasolari</b>	<b>31</b>
4.1	Evidenze del sistema solare . . . . .	31
4.2	Elementi più abbondanti . . . . .	35
4.3	Condensazione nebulare . . . . .	36
4.4	Presenza di acqua . . . . .	39
4.5	Differenziazione . . . . .	40
4.6	Volatilizzazione post-condensazione nebulare . . . . .	46
<b>5</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>49</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>53</b>



# Capitolo 1

## Introduzione

Negli ultimi anni il ritmo della scoperta di esopianeti ed altri sistemi planetari è aumentato vertiginosamente, portando a confermare la scoperta di oltre 5000 pianeti extrasolari (*Nasa Exoplanet Archive*). Numero che è destinato ad aumentare ancora più velocemente nei prossimi anni grazie alle missioni spaziali future e quelle già in corso (fig.5.1).

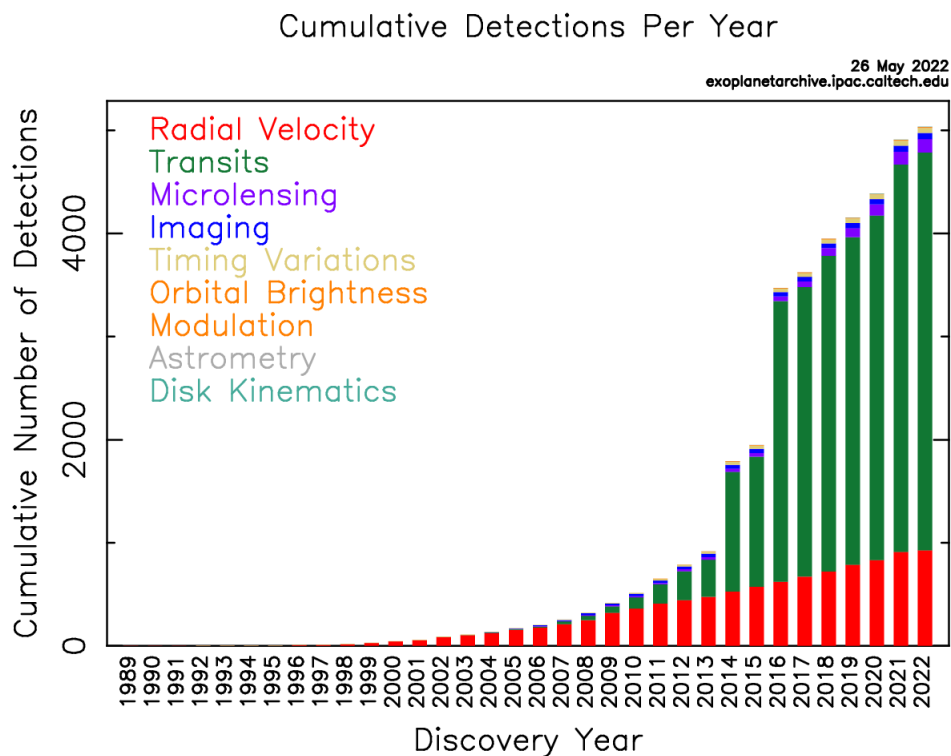


Figura 1.1: Numero degli esopianeti scoperti ogni anno fino al 26 maggio 2022. Credit: exoplanetarchive.ipac.caltech.edu

Alla luce di tanti nuovi mondi, sorge spontaneo chiedersi se esistano altri pianeti come la Terra nell'universo, con condizioni favorevoli per lo sviluppo della vita così come la conosciamo. Per rispondere alla domanda servono tecniche d'indagine in grado di svelare le caratteristiche necessarie che devono possedere tali pianeti.

I due metodi principalmente utilizzati per individuare esopianeti sono il metodo dei transiti ed il metodo delle velocità radiali (fig.1.1). L'applicazione di entrambi i metodi ad un esopianeta permette inoltre di determinarne tre caratteristiche fondamentali: raggio, massa e distanza orbitale. Mentre il raggio e la massa indicano se il pianeta è di tipo terrestre, la distanza orbitale consente di definire se il pianeta orbita all'interno della *zona abitabile*. Queste due condizioni sono determinanti nella ricerca di un pianeta con proprietà simili al nostro.

Tuttavia esiste un'altra caratteristica di vitale importanza che rende la Terra così ospitale: la sua composizione chimica e la sua struttura. È noto infatti che composizione e differenziazione giocano un ruolo fondamentale in molti processi legati alla sua abitabilità, tra i quali:

- *Tettonica a placche* - agisce come regolatore del clima terrestre influenzando sul ciclo dell'anidride carbonica.
- *Formazione di un'atmosfera peculiare* - dipendente dall'atmosfera secondaria formata con i gas fuoriusciti durante le intense eruzioni vulcaniche, ha permesso lo sviluppo della vita conosciuta.
- *Sostentamento di un campo magnetico planetario* - protegge l'atmosfera e gli essere viventi dal vento solare e dai raggi cosmici.

La composizione e la struttura ricercate vengono stimate a partire dalla densità media dell'esopianeta, sempre calcolabile noti i valori di massa e raggio. Sfortunatamente però, modelli che prevedono diverse combinazioni di composizioni chimiche e strutture possono riprodurre la stessa densità calcolata, dando luogo al problema noto come "degenerazione massa-raggio di un esopianeta". I modelli, inoltre, si basano su ciò che conosciamo del sistema solare, senza tenere conto di eventuali composizioni esotiche dei sistemi extrasolari. Lo studio delle eventuali atmosfere tramite il metodo dei transiti, e degli spettri in riflessione con il metodo di immagine diretta, non è adatto ad aggiungere informazioni esaustive riguardo la composizione interna degli esopianeti.

Per i pianeti del sistema solare una stima abbastanza accurata della composizione e struttura è stata resa possibile grazie alla misura della composizione dei meteoriti caduti sulla Terra. In accordo con la teoria della *nebulosa solare*, i pianeti si sono formati dall'aggregazione di planetesimi, corpi minori costituiti dal gas condensato dal disco protoplanetario. Dato che i meteoriti sono principalmente

planetesimi primitivi (*condriti*), oppure planetesimi (o frammenti di corpi maggiori come protopianeti) che hanno subito processi di fusione, differenziazione e collisionali dopo la loro formazione (*acondriti*), il loro studio ha fornito preziose informazioni sulla composizione e differenziazione dei pianeti.

Sorprendentemente, la degenerazione massa-raggio degli esopianeti può essere superata in modo analogo grazie all'osservazione di alcune nane bianche.

Le nane bianche corrispondono allo stadio finale di quasi tutte le stelle di sequenza principale della galassia, ed ereditano da quest'ultime ciò che rimane dei sistemi planetari. Circa il 25-50% delle nane bianche con temperatura efficace  $\lesssim 25000$  K mostrano metalli nelle atmosfere e talvolta dischi circumstellari con polveri, gas e corpi minori frammentati. I metalli, che dovrebbero già essere sedimentati gravitazionalmente in tempi scala che variano tra giorni e  $10^6$  anni, molto minori dell'età di queste nane bianche ( $10^7$ - $10^9$  anni), provengono da corpi rocciosi del sistema sopravvissuti alla fase AGB della stella e recentemente catturati dalla nana bianca. Dalle abbondanze chimiche delle atmosfere è così possibile ricavare la composizione del materiale esoplanetario ed indagare sui processi geologici che avvengono nei sistemi extrasolari, analogamente a quanto fatto per il sistema solare.

Nel capitolo 2 verranno riassunte le principali caratteristiche delle stelle nane bianche. Nel capitolo 3 si introdurranno le nane bianche inquinate ed i modelli che permettono di ricavare le quantità necessarie per lo studio dei sistemi extrasolari. Nel capitolo 4 si mostreranno le informazioni ottenute sui sistemi extrasolari grazie allo studio delle nane bianche inquinate. Infine, nel capitolo 5 verranno tratte le conclusioni.

# Capitolo 2

## Nane bianche

Le nane bianche (WD - *White Dwarfs*) sono l'ultimo stadio evolutivo delle stelle di sequenza principale (MSS - *Main Sequence Stars*) che hanno masse inferiori alle  $8-10M_{\odot}$ , ovvero della maggior parte (97%) delle stelle della nostra galassia [19].

Il 99% circa della loro massa è costituito dai nuclei degeneri delle MSS uscite dalla sequenza principale, che hanno perso i loro strati esterni attraverso intensi venti stellari, tipicamente durante la fase AGB (*Asymptotic Giant Branch*). Il restante 1% consiste in un involucro sottile di materia non degenera, sopravvissuta alla fase AGB.

Nei nuclei, inerti e densi, non avvengono più reazioni di fusione nucleare e la stabilità strutturale è data dalla pressione di degenerazione elettronica, che si oppone al collasso gravitazionale [29].

Esiste una massa limite oltre la quale la pressione di degenerazione elettronica non è più in grado di bilanciare la gravità: la massa di Chandrasekhar, pari a circa  $1,4M_{\odot}$ . WD con masse maggiori (se non in rapida rotazione) non possono pertanto esistere.

La massa di una WD dipende dalla massa iniziale della MSS, così come la sua composizione. MSS più massive sono infatti in grado di fondere elementi più pesanti, grazie alla maggiore temperatura e pressione raggiunta nei nuclei.

Le WD osservate, come mostrato in fig. 2.1, hanno prevalentemente masse pari a circa  $0,6M_{\odot}$  e corrispondono agli stadi finali di MSS con  $M \lesssim 2M_{\odot}$ . Dato che le MSS con  $0,5M_{\odot} < M < 8M_{\odot}$  riescono a fondere l'Elio in Carbonio (C) e Ossigeno (O) prima del loro stadio finale, le osservazioni indicano anche che le WD dominate da C e O (Nane bianche CO) sono le più diffuse nell'universo.

WD con  $M < 0,45 M_{\odot}$  sono composte principalmente da Elio (He) e derivano da MSS con  $M \lesssim 0,5M_{\odot}$ , mentre WD con  $M > 1,2 M_{\odot}$  sono composte da Ossigeno (O), Magnesio (Mg), Neon (Ne) e derivano da MSS con  $8 M_{\odot} < M < 10 M_{\odot}$ .



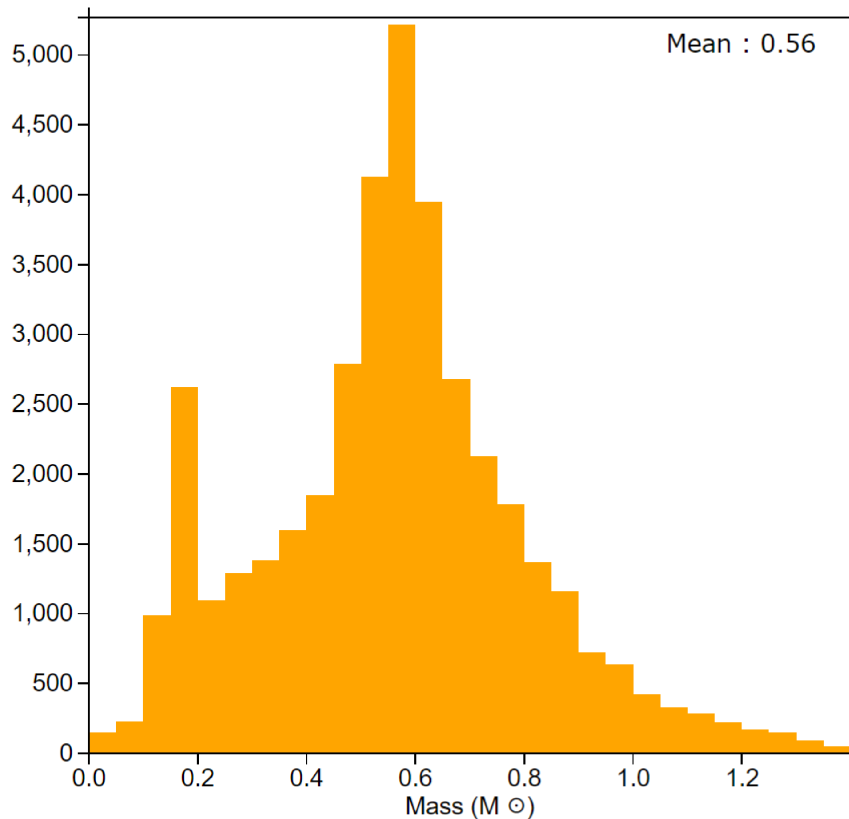


Figura 2.1: Istogramma del numero di nane bianche osservate in funzione della loro massa. Credit: Montreal White Dwarf Database (MWDD).

Dalla relazione massa-raggio  $R \propto M^{-1/3}$  seguita dalle WD, si deduce l'elevata densità di questi corpi celesti. Una WD di  $1R_{\odot}$  contiene infatti  $\approx 1M_{\odot}$  ed ha una densità  $\rho \simeq 10^9 \text{ Kg/m}^3$ .

Non avendo una fonte di energia al suo interno, una WD è destinata a raffreddarsi per irraggiamento e diminuire la sua luminosità nel tempo. Ciò avviene senza una contrazione della stella, dato che la pressione di degenerazione dipende solo dalla densità e non dalla temperatura.

Gli elettroni degeneri hanno un'alta conduttività termica, quindi la struttura interna ha un basso gradiente termico e si può considerare quasi isoterma.

Nell'involuppo esterno di materia non degenera, invece, il trasporto termico avviene attraverso la radiazione in condizioni di alta opacità. In questa regione il trasporto di calore non è efficiente come nella materia degenera ed il gradiente termico non è più trascurabile. In questo modo l'involuppo agisce come isolante termico tra l'interno della stella e lo spazio esterno, andando ad allungare il tempo

di raffreddamento.

Un altro effetto che può aumentare il tempo di raffreddamento è la *crystallizzazione* (per approfondimenti: *Paola Marigo. Theoretical Astrophysics-lectures notes* [29]).

Al momento della formazione di una WD la temperatura effettiva superficiale ( $T_{eff}$ ) può superare i 100 000 K, per poi diminuire nel corso di miliardi di anni.

Le  $T_{eff}$  misurate più frequentemente sono tra 5 000 K e 30 000 K (fig.2.2), alle quali corrispondono temperature nei nuclei dell'ordine di  $10^7 K$ .

Il nome “nana bianca” deriva dal colore di queste stelle, che generalmente è più bianco rispetto al sole. In base alla legge di Wien ciò dipende dalla  $T_{eff}$  della stella, pertanto una WD sufficientemente vecchia può risultare in realtà più rossa del sole.

Sebbene siano corpi generalmente molto caldi, la luminosità è contenuta a causa delle dimensioni ridotte, come si può notare dalla posizione occupata nel diagramma HR in fig.2.2.

## → GAIA'S HERTZSPRUNG-RUSSELL DIAGRAM

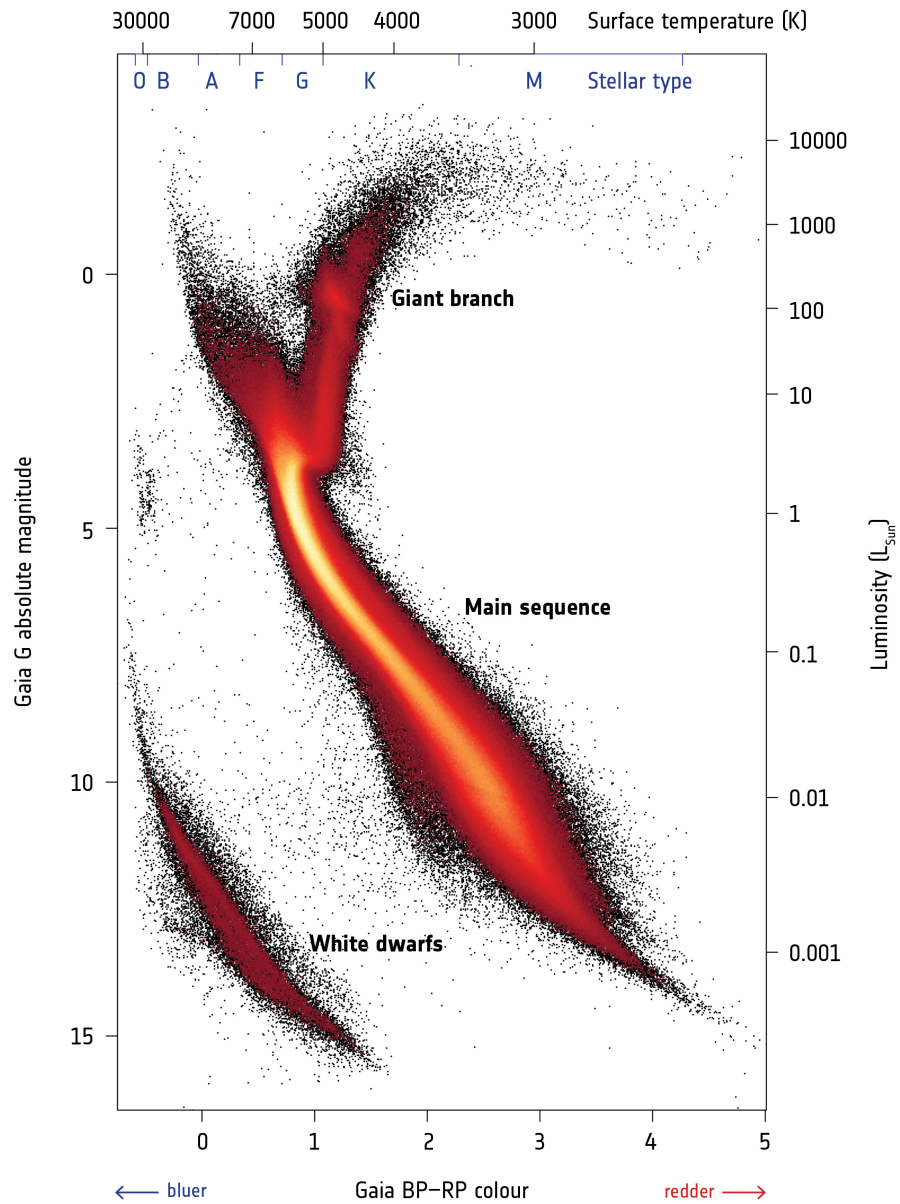


Figura 2.2: Diagramma HR contenente le stelle osservate dal satellite GAIA (second data release). Credit: ESA/Gaia/DPAC, CC BY-SA 3.0 IGO.

## Capitolo 3

### Nane bianche inquinate

Le righe di assorbimento negli spettri delle WD consentono di determinare quali elementi sono presenti nelle superfici. A causa dell'elevata gravità superficiale le righe sono allargate (allargamento di pressione) e non sempre sono identificabili [19].

Dalle osservazioni, seguendo la classificazione spettrale di *E.M. Sion et al. 1983* [35], si può affermare che dominano principalmente 2 classi di WD:

- *Nane bianche DA* – Sono le più comuni ( $\approx 80\%$  - *Montreal White Dwarf Database*) e presentano prevalentemente righe di assorbimento dell' Idrogeno, come evidenziato dalla serie di Balmer nel dominio ottico in figura 3.1. Corrispondono a WD con un sottile strato superficiale di H che copre uno strato di He.
- *Nane bianche DB* – Presentano prevalentemente righe di assorbimento di Elio neutro. Si pensa provengano da MSS che hanno fuso tutto l'Idrogeno durante la fase Post-AGB. Pertanto corrispondono a WD prive di uno strato sovrastante di H.

WD con atmosfere che presentano sia H che He sono classificate come DAB o DBA. (Altre classi meno frequenti come DO, DC, DQ possono essere approfondite in *Harrison 2020* [19].)

La prevalenza degli elementi leggeri H e He nelle atmosfere è dovuta all'elevata gravità superficiale, tipicamente  $g \approx 10^8 \text{ cm/s}^2$ , che porta alla stratificazione dell'involuppo esterno: gli elementi pesanti vanno a depositarsi in strati più profondi, mentre elementi leggeri rimangono più in superficie.

Tuttavia gli spettri di alcune WD contengono righe di assorbimento di “metalli”, elementi più pesanti di H ed He che non dovrebbero essere rilevabili (fig. 3.1). Per tale motivo sono definite come “Nane bianche inquinate” (PWD - Polluted White Dwarfs) e saranno l'oggetto di studio di questo elaborato.

La loro classificazione spettrale è DZ in caso della presenza di righe di assorbimento dei soli metalli, oppure DAZ e DBZ se presenti anche righe di H o He rispettivamente (più in generale, viene aggiunta la lettera Z alla fine del nominativo della classe di appartenenza).

La linea K del Ca II a 3933 Å, data la sua elevata *forza dell'oscillatore*, è uno dei migliori indicatori della presenza di metalli [24]; nelle DBZ abbastanza fredde, dove l'opacità nel continuo è molto bassa, può essere osservata anche in spettri a bassa risoluzione. In generale, per rilevare efficacemente più elementi che inquinano le atmosfere servono spettrografi ad alta risoluzione nell'ottico e nell'UV. Mentre per il visibile possono essere impiegati gli spettrografi dei più grandi telescopi terrestri (ad esempio Keck, VLT e SDSS), per l'UV sono richiesti telescopi spaziali in quanto l'atmosfera terrestre è opaca a tali frequenze. L'unico spettrografo UV con sensibilità e risoluzione sufficientemente alta è il Cosmic Origins Spectrograph (COS) del Telescopio Spaziale Hubble [40].

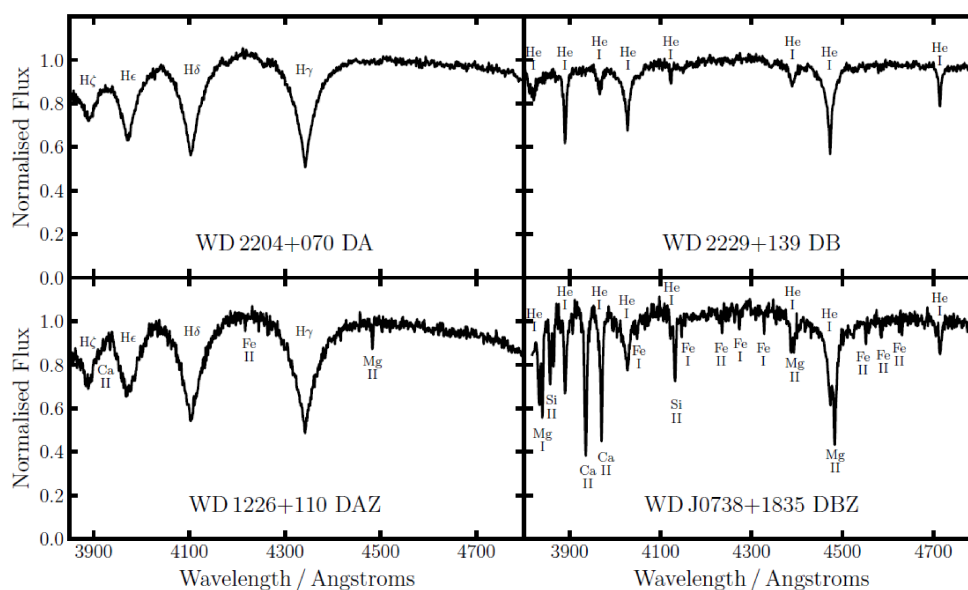


Figura 3.1: Spettro nell'ottico di 4 nane bianche di classe DA, DB, DAZ e DBZ. Le righe di assorbimento dei metalli nello spettro delle due nane bianche inquinate (DAZ e DBZ) sono facilmente visibili. Credit: Harrison - 2020.

### 3.1 Scoperta

La scoperta delle PWD risale al 1917, quando l'astronomo olandese-americano Adriaan van Maanen osservò per la prima volta la stella alla quale è dedicato il suo nome: "Van Maanen 2".

Poichè lo spettro a bassa risoluzione conteneva righe di assorbimento di Ferro (Fe) e Calcio (Ca) pronunciate, nel 1919 classificò la stella come stella di tipo F0, riconoscendo però che era anche la F0 meno luminosa mai osservata [43]. Van Maanen chiaramente non sapeva che stava osservando una WD, in quanto la loro natura non era ancora nota a quei tempi.

In fig. 3.2 si può osservare uno spettro più recente della Van Maanen 2, prototipo della classe spettrale DZ.

Da allora sono state scoperte più di 1000 PWD, con un totale di 23 metalli identificati nelle loro atmosfere [40]: Litio (Li), Berillio (Be), Carbonio (C), Azoto (N), Ossigeno (O), Sodio (Na), Magnesio (Mg), Alluminio (Al), Silicio (Si), Fosforo (P), Zolfo (S), Potassio (K), Calcio (Ca), Scandio (Sc), Titanio (Ti), Vanadio (V), Cromo (Cr), Manganese (Mn), Ferro (Fe), Cobalto (Co), Nichel (Ni), Rame (Cu) e Stronzio (Sr).

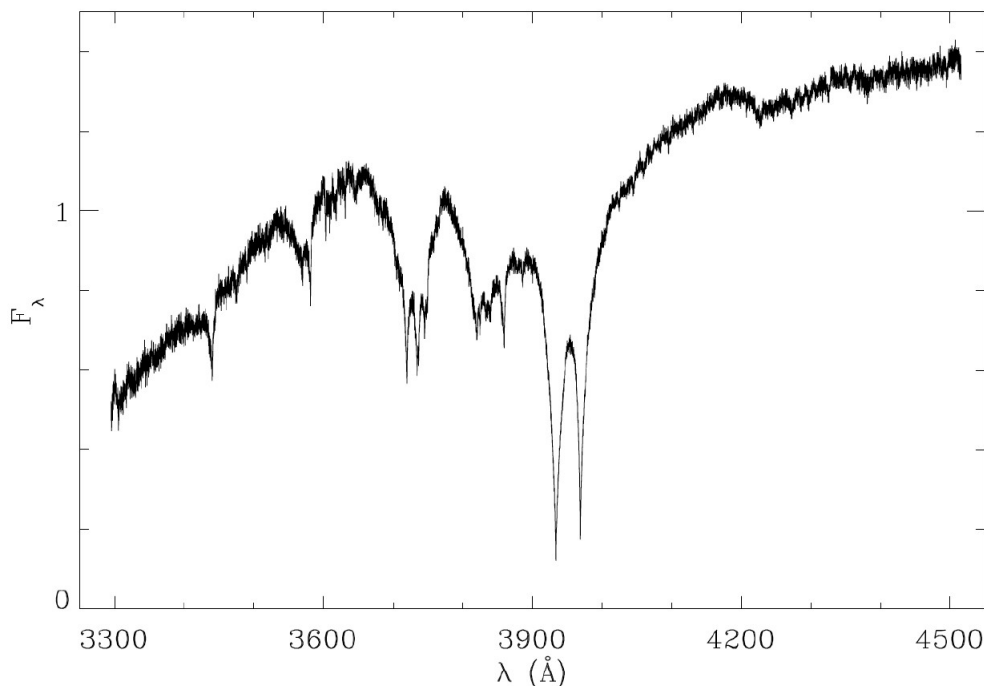


Figura 3.2: Spettro della Van Maanen 2 ottenuto con lo spettroscopio UVES del VLT ( $R \approx 20000$ ) contenente le righe di assorbimento di Ca, Fe e Mg nel visibile. Credit: Zuckerman 2014.

## 3.2 Dischi circumstellari

Oltre ad avere atmosfere inquinate, alcune PWD mostrano un eccesso di radiazione infrarossa e/o righe di emissioni di metalli negli spettri.

La prima PWD scoperta avere un'emissione IR troppo elevata è stata G29-38 [44]. Quest'eccesso è stato interpretato come l'emissione di un sottile disco di polveri circumstellare, che assorbe la radiazione nell'ottico/UV della PWD riemetrendola in IR [22] (fig.3.3). Il disco di G29-38 è inoltre l'unico abbastanza brillante e vicino alla terra per consentire un'analisi della sua composizione chimica [33].

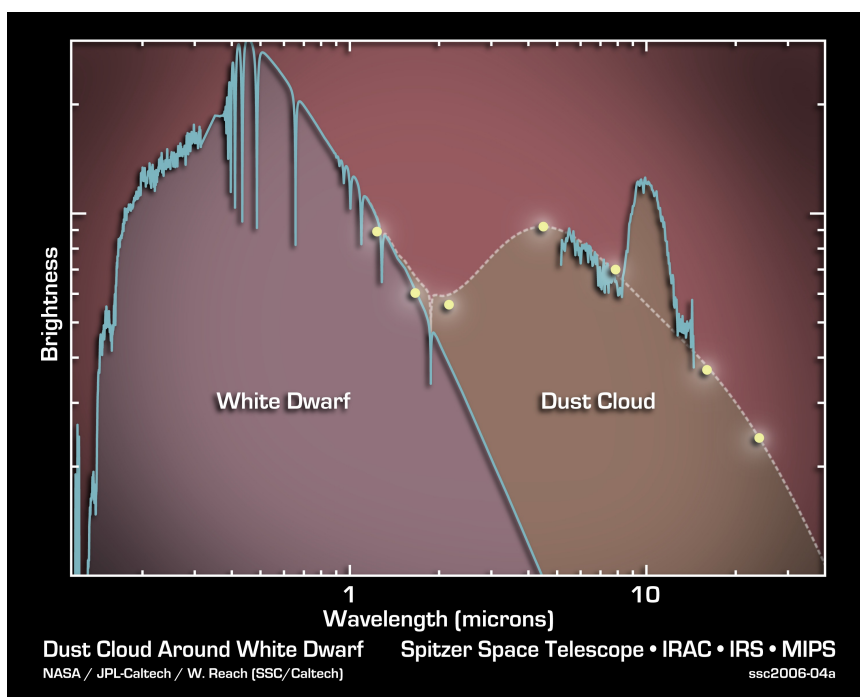


Figura 3.3: spettro della nana bianca G29-38. L'eccesso di radiazione infrarossa, registrato dal telescopio spaziale Spitzer, rivela la presenza di polveri con un picco a  $10\mu\text{m}$  tipico dei silicati. Credit: NASA/JPL-Caltech/M. Kuchner (GSFC)

La prima evidenza di una PWD con righe in emissione è stata ottenuta da *Gansiche et al. 2006* [14], che osservarono il doppio picco allargato del tripletto del Ca II a  $8600\text{ \AA}$  per WDJ1228+1040. L'emissione è caratteristica di un disco di gas ricco di metalli in orbita Kepleriana attorno alla stella. Dalla variazione periodica della forza e forma delle righe di emissione *Manser et al. 2019* [28] hanno identificato inoltre un corpo minore all'interno del disco, con periodo orbitale  $\approx 2$  ore. Il corpo orbita ad una distanza di  $\approx 0,003\text{ au}$ , entro il limite di Roche<sup>1</sup>, e non

<sup>1</sup>Il limite di Roche, che verrà più volte citato, è riferito ad una PWD media ( $R \approx 0.01 R_{\odot}$ ), considerando un corpo orbitante di densità simile ad un asteroide  $\rho \approx 3\text{ gr/cm}^3$ .

sembra essere in fase di disgregazione.

Storicamente, il primo corpo minore attorno una PWD è stato scoperto da *Vanderburg et al. 2015* [37] nel sistema di WD1145+017, con il metodo dei transiti fotometrici. Il periodo orbitale oscilla tra 4,5 ore e 4,9 ore e la profondità di transito è pari a  $\approx 40\%$ . Il profilo del transito è molto variabile, con un ingresso veloce ed un'uscita lenta, tipico di un corpo in fase di disgregazione. Il corpo ed i suoi detriti distano mediamente 0,005 au dalla stella, entro il limite di Roche, avvalorando l'ipotesi della disgregazione per forze mareali.

Un altro corpo minore in fase di disgregazione è stato scoperto da *Vanderbosch et al. 2020* [36], sempre con il metodo dei transiti. Il materiale orbita attorno ZTFJ0139+5245 con un periodo orbitale di  $\approx 100$  ore. Il semiasse maggiore è  $\approx 0,36$  au ed è maggiore rispetto ai due casi precedenti. Ipotizzando che la frammentazione del corpo avvenga per distruzione mareale al periastro, l'eccentricità dell'orbita deve essere elevata ( $\approx 0,97$ ).

Ad oggi sono state identificate più di 60 PWD con dischi circumstellari [38]. La definizione di "disco" viene attribuita a strutture che stanno entro 0,005 au ( $\approx 1R_{\odot}$ ) dalla PWD, ovvero entro il limite di Roche.

I dischi sono tenui, eccentrici e variabili, piuttosto che circolari e ben definiti. Quasi tutti contengono solo polveri e raramente anche gas.

Le PWD WD1145+017 e SDSS J1228+1040 sono di particolare rilievo, in quanto presentano contemporaneamente polveri, gas e corpi minori nei dischi circumstellari.



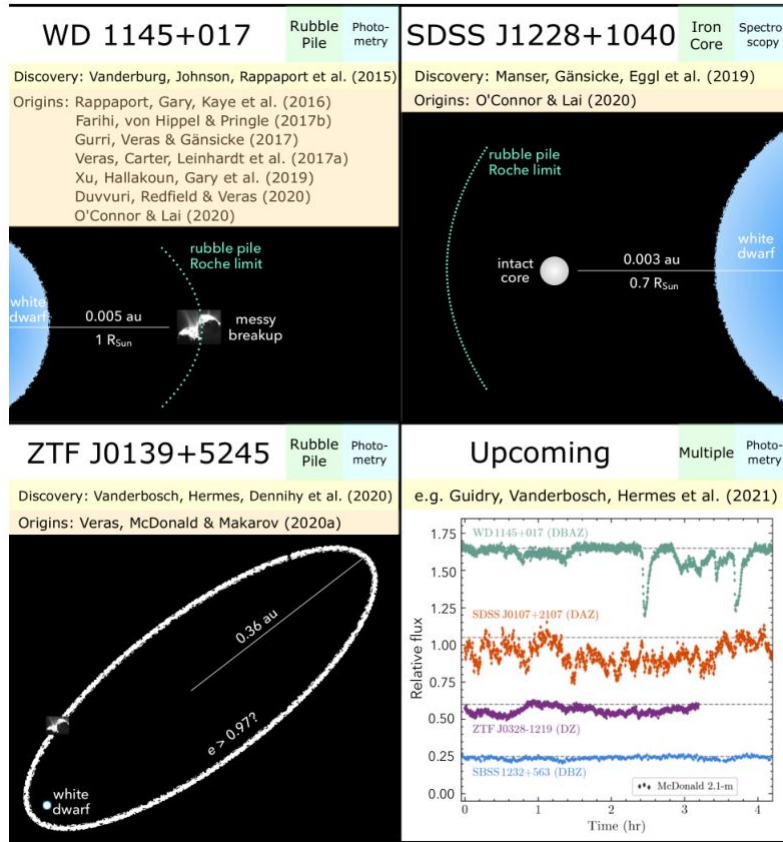


Figura 3.4: rappresentazione dei 3 corpi minori conosciuti orbitanti PWD. La figura in basso a destra illustra le curve di luce di altri possibili corpi minori in diversi sistemi. Credit: Veras 2021.

### 3.3 Origine degli inquinanti

Come anticipato, la gravità nelle WD è responsabile della *sedimentazione gravitazionale*, un effetto di diffusione che porta gli elementi pesanti in strati più interni rendendoli non più rilevabili (fig. 3.5). A tale effetto si oppone la *levitazione radiativa*, effetto di diffusione che riesce a trasportare gli elementi verso la superficie grazie al flusso di fotoni uscente dalla stella [24]. A temperature sufficientemente elevate (fotoni mediamente più energetici) la *levitazione radiativa* riesce ad evitare la sedimentazione dei metalli, che rimangono ad inquinare le superfici. Per WD "fredde" invece, che raggiungono  $T_{eff} \lesssim 25000K$ , la *sedimentazione gravitazionale* prevale sulla *levitazione radiativa*, portando alla stratificazione dell'involuppo ed alla scomparsa dei metalli dalle atmosfere.

I tempi-scala di sedimentazione degli elementi per WD con  $T_{eff} \lesssim 25000K$  sono [26]:

- $\approx 10^6$  anni per la classe DB.
- $\approx 10^3$  anni fino a solo qualche giorno per la classe DA.

Considerando i tempi di raffreddamento più lunghi (maggiori età) di tali WD, dell'ordine di  $10^7 - 10^9$  anni [19], i metalli dovrebbero già essere sedimentati e non più visibili negli spettri. Le osservazioni negli anni però, hanno contrariamente dimostrato l'esistenza di PWD con  $T_{eff} \lesssim 25000K$ ; di seguito sono riportati i risultati di due importanti studi:

- *Koester et al. 2014* [25]: il 27%-50% delle nane bianche DA campionate, con  $17000K \leq T_{eff} \leq 27000K$ , sono inquinate da metalli che non possono essere sostenuti in superficie dalla *levitazione radiativa*.
- *Zuckerman et al. 2010* [42]: almeno il 30% delle nane bianche DB campionate, con  $13500K \leq T_{eff} \leq 19500K$ , risultano inquinate.

***I metalli nelle atmosfere di queste PWD<sup>2</sup> devono quindi essere stati accumulati recentemente da una qualche sorgente esterna.***

Inizialmente furono proposte diverse ipotesi per spiegare gli spettri delle PWD, come l'accrescimento di materiale da una stella compagna o dal mezzo interstellare (ISM). Tuttavia, i) la maggior parte delle PWD non risulta avere una compagna vicina. ii) Le abbondanze dei metalli nelle atmosfere non corrispondono a quelle dell'ISM (in particolare non si spiega la poca abbondanza di H nella classe DBZ) e non c'è una correlazione tra inquinamento e regioni ricche di ISM.

La teoria attualmente accettata dalla comunità scientifica è quella proposta da *Debes e Sigurdsson 2002* [10] e *Jura 2003* [22]: ***i metalli provengono dall'accrescimento di corpi esoplanetari (prevalentemente corpi minori rocciosi) dei sistemi planetari ospitati dalle PWD.*** Quest'ipotesi riesce a spiegare allo stesso tempo le atmosfere inquinate ed i dischi circumstellari contenenti polveri, gas e corpi minori in distruzione.

Uno degli studi determinanti per l'affermazione della teoria è quello di *Zuckerman 2007* [41], nel quale sono stati trovati 17 metalli nell'atmosfera di GD 362, con abbondanze compatibili a quelle di un asteroide di composizione simile al sistema Terra-Luna. Negli anni, si sono poi aggiunte altre evidenze a supporto della teoria, tra le quali:

---

<sup>2</sup>D'ora in avanti con il termine "WD"/"PWD" si intenderanno nane bianche/nane bianche inquinate "fredde" con  $T_{eff} \lesssim 25000K$ .

- Un numero crescente di PWD con abbondanze chimiche delle atmosfere simili ai corpi rocciosi del sistema solare, grazie all'avanzare della tecnologia e della maggiore risoluzione degli spettrografi.
- La scoperta che  $\approx 30\%$  delle MSS di classe A<sup>3</sup> possiede una fascia di asteroidi, a volte anche molto massiva ( $\zeta$  Lep possiede una fascia di asteroidi circa 100 volte più massiva di quella del sistema solare) [24].
- L'assenza di dischi circumstellari attorno WD non inquinate, che suggerisce una forte correlazione tra inquinamento e dischi di accrescimento.
- Più recentemente, l'osservazione diretta nel dominio X dell'accrescimento di materiale planetario per G29-38 [8].

Riconducendo l'accettazione della teoria all'anno 2007, ciò implica che la corretta interpretazione delle PWD è avvenuta solo dopo 90 anni dalla scoperta della Van Maanen 2.

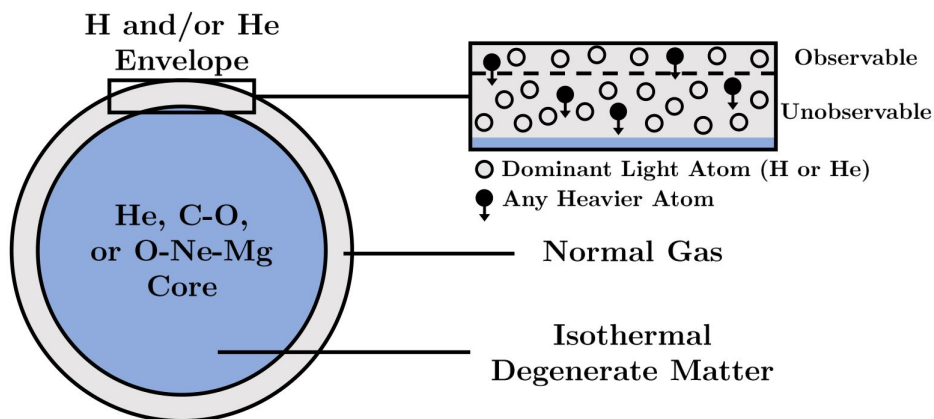


Figura 3.5: rappresentazione schematica della sedimentazione gravitazionale nelle nane bianche. Elementi più pesanti di H e He scompaiono dagli strati superficiali andando a depositarsi in strati più profondi. Credit: Harrison 2020.

<sup>3</sup>Le stelle di classe A sono le progenitrici delle WD più frequenti.

### 3.4 Modelli di accrescimento

L'accrescimento di materiale planetario si pensa sia una conseguenza dell'evoluzione stellare che porta una MSS a diventare una WD [19].

Durante la fase AGB la stella aumenta il suo raggio fino a grandezze dell'ordine di unità astronomiche, inglobando o vaporizzando tutto quello che è entro (o vicino) la sua superficie e lasciando intatti pianeti e materiale planetario più distanti. La perdita di massa adiabatica e l'espulsione dell'involucro esterno della stella porta alla formazione della WD ed all'aumento dei raggi orbitali dei corpi minori e pianeti sopravvissuti. Corpi con distanza iniziale dalla MSS (tipicamente una stella di classe A) pari a  $\approx 2,5$  au, e con dimensioni maggiori di circa 10 Km, riescono a sopravvivere al riscaldamento ed al vento stellare [24].

La conseguente instabilità dinamica del sistema perturba l'orbita di corpi minori o pianeti, che possono così avvicinarsi alla WD con orbite eccentriche, fino al limite di Roche. Dalla ricerca di *Maldonado et al. 2021* [27] risulta che l'instabilità dinamica di un sistema planetario aumenta con la sua molteplicità, attraverso fenomeni di scattering, incroci di orbite ed espulsione di pianeti. Lo studio, che consiste in simulazioni dell'evoluzione di 75 sistemi con 4, 5 o 6 pianeti osservati attorno MSS, prevede che le instabilità sono tali da riprodurre la percentuale delle WD inquinate (25-50%). L'inquinamento è dovuto principalmente allo scattering di corpi minori, che aumenta col numero di pianeti. Sistemi con 5-6 pianeti di masse paragonabili a quelle di una super-Terra o di Saturno, portano ad un numero non trascurabile di pianeti in grado di avvicinarsi alla WD entro 10 raggi di Roche, con l'orbita di alcuni che può arrivare ad attraversare il raggio stesso.

Dopo l'avvicinamento dei corpi esoplanetari alle WD, l'accrescimento di materiale può essere suddiviso in più fasi:

- Raggiunto il limite di Roche il corpo viene distrutto in più frammenti e la collisione tra essi porta alla formazione di un disco di polveri.
- L'effetto Poynting-Robertson rallenta i grani di polvere orbitanti e diminuisce il loro raggio orbitale, fino alla distanza alla quale cominciano a sublimare.
- La sublimazione produce i gas che, data la loro viscosità, perdono momento angolare fino a cadere sulla WD inquinandola.

L'intero processo è schematizzato in fig.3.6.

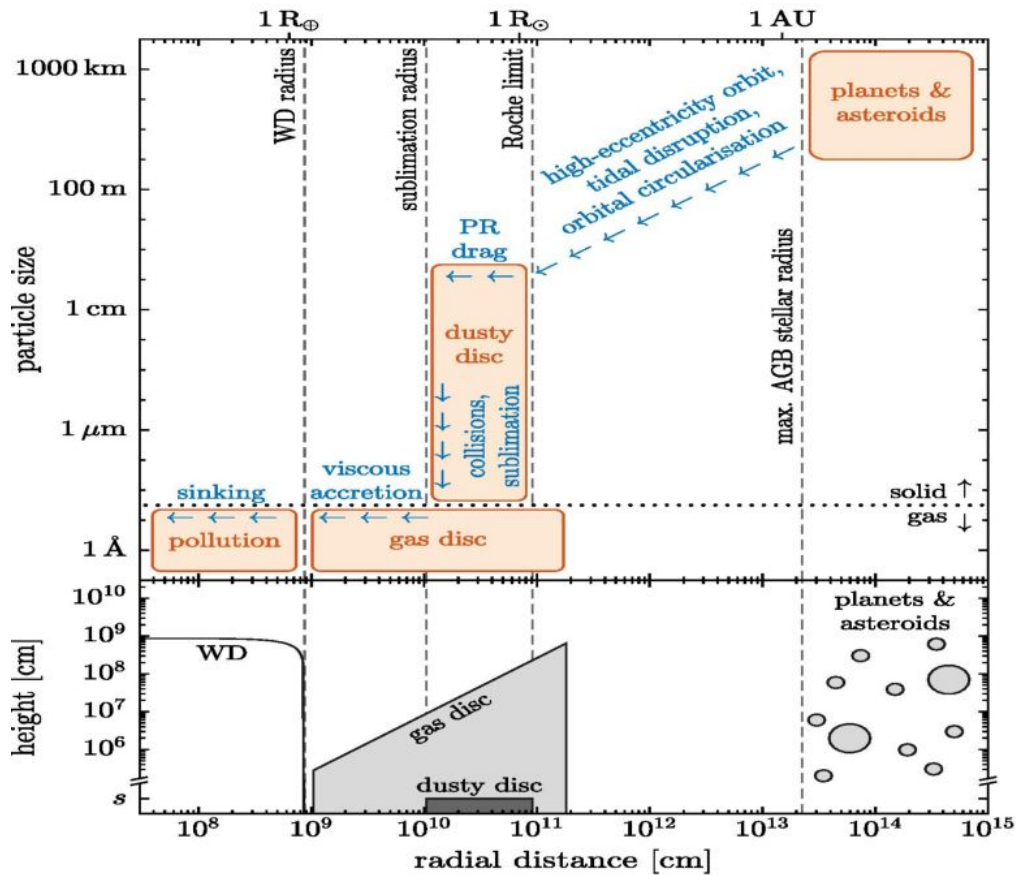


Figura 3.6: schema del meccanismo di inquinamento delle nane bianche inquinate. Credit: Harrison 2020.

Le WD che mostrano un disco di polveri circumstellari sono solo  $\approx 3\%$  [38], a fronte del  $\approx 25\text{-}50\%$  delle WD inquinate. Questo fatto potrebbe portare a concludere che il meccanismo proposto per descrivere l'inquinamento delle WD sia poco realistico. La bassa percentuale di PWD con disco non è però inaspettata. Secondo *Rocchetto et al. 2015* [34] e *Bonsor et al. 2017* [2] ci sono diversi motivi per i quali i dischi possono sfuggire alle rilevazioni, tra i quali l'area superficiale di emissione ridotta dei dischi: è in realtà probabile che la vera percentuale di WD con eccesso di infrarosso sia simile alla percentuale di WD inquinate [38].

Come descritto, a seguito di perturbazioni gravitazionali anche un pianeta può avvicinarsi alla WD ed essere eventualmente distrutto.

L'unico pianeta in fase di disgregazione è stato scoperto indirettamente da *Gansicke et al. 2019* [15], analizzando lo spettro di WD J0914+1914. La stella sta accrescendo materiale dal disco di gas orbitante, la cui abbondanza di H, S e O è

simile agli strati di atmosfera dei giganti ghiacciati ricchi di  $H_2O$  e  $H_2S$ .

Attualmente sono conosciuti solo 4 pianeti orbitanti WD (tutti giganti) (per approfondimenti: *Veras 2021* [38]) e nessun pianeta di tipo terrestre, probabilmente a causa di bias osservativi.

Sebbene la perturbazione di corpi minori o pianeti spieghi efficacemente l'inquinamento delle PWD, i modi con i quali il materiale arriva a ridosso delle WD non sono ancora del tutto compresi in quanto esistono altri processi potenzialmente in grado di fornire materiale alle WD [19], come la presenza di una compagna binaria distante, il riscaldamento ohmico di asteroidi, la liberazione di esolune, la produzione di detriti a seguito di impatti nel sistema planetario e l'accumulo graduale di atmosfere planetarie evaporate.

Tuttavia, a prescindere dall'esatto processo, è ormai accettato che le PWD sono inquinate da materiale esoplanetario, offrendo così un'osservazione diretta della composizione dei sistemi extrasolari.

Una volta che i metalli arrivano nelle fotosfere delle PWD, cominciano a sedimentare con tempi che dipendono dall'elemento stesso e dall'estensione della zona convettiva nell'involuppo esterno [24]. L'effetto della convezione, che può instaurarsi a seconda della temperatura, opacità e composizione del gas stellare, è quello di mescolare la materia e rallentare così la diffusione degli elementi che avviene nell'ultimo strato alla base della zona convettiva.

Dato che i metalli sedimentano con velocità diverse, le abbondanze chimiche nelle atmosfere non rispecchiano necessariamente le abbondanze del materiale esoplanetario. Seguendo il modello di accrescimento e diffusione proposto da *Koester 2009* [26] è possibile stabilire la relazione tra le due abbondanze.

Secondo il modello, la velocità di accumulo di un dato elemento (con numero atomico  $Z$ ) nella zona convettiva è data dall'equazione:

$$\frac{dM(z)}{dt} = \dot{M}_{acc}(z) - \frac{M(z)}{\tau_z} \quad (3.1)$$

dove  $\dot{M}_{acc}(z)$  è il tasso di accrescimento dell'elemento e  $M(z)$  la massa dell'elemento nella zona convettiva (ricavabile dalle osservazioni (sezione 3.5)).

$\tau_z$  è il tempo di sedimentazione dell'elemento e si ottiene dalla relazione:

$$\tau_z = \frac{M_{cvz}}{4\pi r^2 \rho v_{diff}(z)} \quad (3.2)$$

con  $M_{cvz}$  massa della zona convettiva e  $\rho$ ,  $r$ ,  $v_{diff}(z)$  uguali a densità, raggio e velocità di diffusione dell'elemento alla base della zona convettiva.  $v_{diff}(z)$  è data dall'equazione (4) in Paquette 1986b [30], dove il termine del gradiente della

concentrazione viene trascurato; il processo è parallelo ai gradienti di temperatura e pressione.

Assumendo  $M(z) = 0$  a  $t = 0$  la soluzione dell'equazione 3.1 è:

$$M(z) = e^{-\frac{t}{\tau_z}} \int_0^t e^{\frac{t'}{\tau_z}} \dot{M}_{acc}(z) dt' \quad (3.3)$$

Nell'ipotesi di  $\dot{M}_{acc}(z)$  quasi costante, la soluzione 3.3 presenta tre regimi:

### 1) *Build-up phase*

$$Se \ t \ll \tau_z \implies M(z) \approx \dot{M}_{acc}(z)t. \quad (3.4)$$

In questo scenario l'elemento si accumula nell'atmosfera senza che ci sia un tempo sufficiente per l'inizio della sedimentazione. La massa aumenta linearmente nel tempo ed il rapporto tra la massa di due diversi elementi risulta essere:

$$\frac{\dot{M}_{acc}(z_1)}{\dot{M}_{acc}(z_2)} = \frac{M(z_1)}{M(z_2)} \quad (3.5)$$

Il rapporto tra le abbondanze degli elementi nelle atmosfere corrisponde a quello del materiale esoplanetario.

### 2) *Steady state*

$$Se \ t \gg \tau_z \implies M(z) \approx \dot{M}_{acc}(z)\tau_z. \quad (3.6)$$

Mentre l'elemento continua ad accumularsi, parte di esso comincia a diffondersi al di sotto della zona convettiva diventando inosservabile, fino al raggiungimento di uno stato stazionario. A questo punto la massa rimane pressoché costante ed il rapporto tra la massa di due elementi diventa:

$$\frac{\dot{M}_{acc}(z_1)}{\dot{M}_{acc}(z_2)} = \frac{M(z_1) \tau_{z_2}}{M(z_2) \tau_{z_1}} \quad (3.7)$$

In questo caso bisogna conoscere i  $\tau_z$  per poter ricavare il rapporto tra le abbondanze del materiale esoplanetario.

### 3) *Decaying phase*

Quando  $\dot{M}_{acc}(z) = 0$  dopo un tempo  $t \gg \tau_z$ .

A questo punto l'accrescimento cessa e la massa accumulata nello *Steady state* diminuisce secondo l'andamento previsto dall'equazione 3.1 (dove  $\dot{M}_{acc}(z) = 0$ ):

$$\frac{dM(z)}{dt} = -\frac{M(z)}{\tau_z} \quad (3.8)$$

Imponendo che a  $t = 0$  corrisponda  $M(z) = M_{max}(z)$  la soluzione diventa:

$$M(z) = M_{max}(z)e^{-\frac{t}{\tau_z}} \quad (3.9)$$

La massa diminuisce esponenzialmente, come il rapporto tra le abbondanze di due elementi:

$$\frac{M(z_1)}{M(z_2)} = \frac{M_{max}(z_1)}{M_{max}(z_2)} e^{-\frac{t(\tau_{z_2} - \tau_{z_1})}{\tau_{z_1}\tau_{z_2}}} \quad (3.10)$$

(Il rapporto diminuisce solo se  $\tau_{z_2} > \tau_{z_1}$ , viceversa il rapporto chiaramente aumenta).

Il regime in cui si trova una PWD dipende quindi dal tempo passato dall'inizio dell'accrescimento e dai  $\tau_z$ . I  $\tau_z$  sono valori tabulati, calcolati sulla base dei modelli delle atmosfere delle WD. Le tabelle 3.1-3.2 riportano i  $\tau_z$  di alcuni metalli con le frazioni in massa della zone convettive, in funzione della gravità, della  $T_{eff}$  e della classe di appartenenza. La massa della zona convettiva è calcolata secondo un'approssimazione della Mixing-Length-Theory (MLT) (per una consultazione più dettagliata dei  $\tau_z$ , dei parametri e del modello di atmosfera utilizzato:

[www1.astrophysik.uni-kiel.de/~koester/astrophysics/astrophysics.html](http://www1.astrophysik.uni-kiel.de/~koester/astrophysics/astrophysics.html)).

Si può notare che:

- Tendenzialmente, all'aumentare del numero atomico  $Z$ , aumentano anche i  $\tau_z$ .
- A parità di classe, l'estensione delle zone convettive aumenta al diminuire della  $T_{eff} \implies$  aumentano anche i  $\tau_z$ .
- A parità di  $T_{eff}$ , le zone convettive sono più estese nella classe DB  $\implies$  i  $\tau_z$  sono sistematicamente maggiori nella classe DB.
- nane bianche DA con  $T_{eff} \gtrsim 12\,000$  K hanno  $\tau_z < 1$  anno.
- nane bianche DA con  $T_{eff} \lesssim 12\,000$  K e nane bianche DB hanno  $\tau_z$  che possono superare i  $10^6$  anni (in generale  $> 1$  anno).



$T_{eff}$ (K)	$\log(M_{cvz}/M)$	${}^6C$	${}^8O$	${}^{11}Na$	${}^{12}Mg$	${}^{13}Al$	${}^{20}Ca$	${}^{26}Fe$
6000	-7.718	4.360	4.299	4.205	4.201	4.170	4.078	3.972
8000	-9.006	3.547	3.479	3.371	3.362	3.326	3.207	3.085
10 000	-10.968	2.252	2.171	1.997	1.950	1.971	1.905	1.777
12 000	-15.816	-1.686	-1.876	-2.017	-1.589	-1.665	-1.806	-1.963
14 000	-16.261	-2.049	-2.216	-2.344	-1.919	-2.036	-2.122	-2.326
16 000	-16.598	-2.313	-2.483	-2.601	-2.177	-2.320	-2.368	-2.608
18 000	-16.501	-2.223	-2.394	-2.541	2.080	-2.165	-2.295	-2.469
20 000	-16.352	-2.037	-2.294	-2.456	-1.979	-2.018	2.203	-2.345

Tabella 3.1: Tempi di sedimentazione dei metalli e frazione in massa della zona convettiva, in funzione della  $T_{eff}$ , per nane bianche DA. I tempi sono espressi in anni su base logaritmica. La gravità superficiale considerata è  $\log(g)=8cm \cdot s^{-2}$ . Credit: [www1.astrophysik.uni-kiel.de/~koester/astrophysics/astrophysics.html](http://www1.astrophysik.uni-kiel.de/~koester/astrophysics/astrophysics.html).

$T_{eff}$ (K)	$\log(M_{cvz}/M)$	${}^6C$	${}^8O$	${}^{11}Na$	${}^{12}Mg$	${}^{13}Al$	${}^{20}Ca$	${}^{26}Fe$
6000	-4.853	6.974	6.853	6.669	6.667	6.609	6.463	6.299
8000	-4.991	6.747	6.644	6.486	6.487	6.436	6.312	6.166
10 000	-5.042	6.639	6.553	6.412	6.415	6.368	6.259	6.124
12 000	-5.186	6.492	6.416	6.288	6.292	6.248	6.149	6.019
14 000	-5.510	6.239	6.164	6.040	6.044	6.002	5.905	5.778
16 000	-6.001	5.894	5.814	5.687	5.690	5.647	5.547	5.420
18 000	-6.815	5.363	5.270	5.131	5.129	5.085	4.975	4.847
20 000	-8.315	4.438	4.328	4.170	4.164	4.116	3.985	3.846
22 000	-11.088	2.607	2.591	2.403	2.380	2.319	2.201	2.036
24 000	-11.646	2.190	2.282	2.016	2.016	1.897	1.873	1.673

Tabella 3.2: Come tabella 3.1, ma per nane bianche DB. Credit: [www1.astrophysik.uni-kiel.de/~koester/astrophysics/astrophysics.html](http://www1.astrophysik.uni-kiel.de/~koester/astrophysics/astrophysics.html).

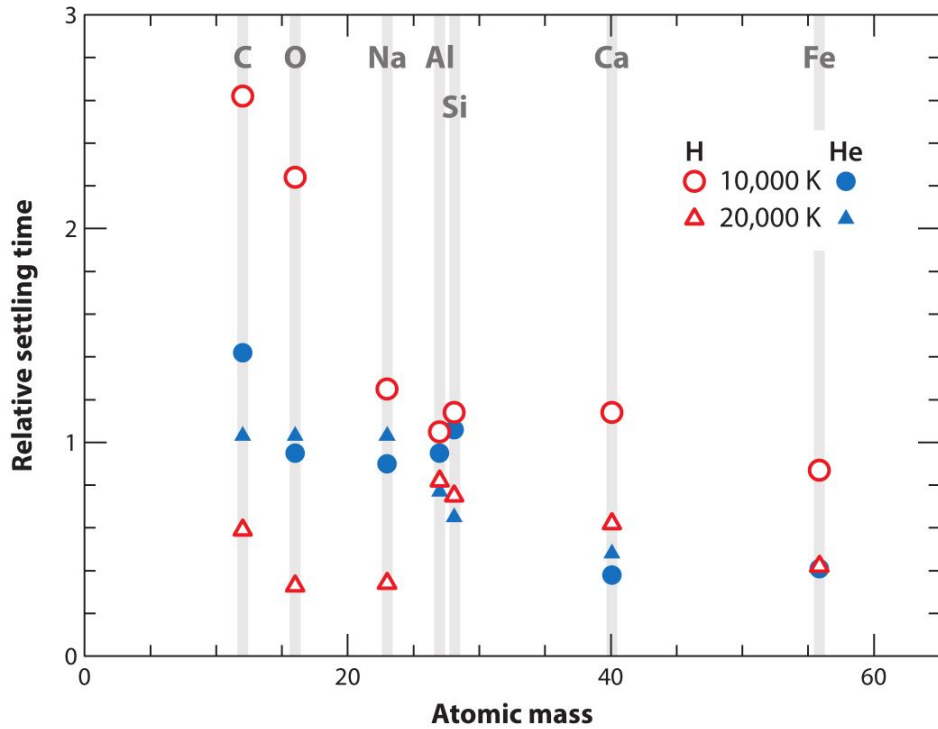


Figura 3.7: Tempi di sedimentazione relativi al Mg per nane bianche DA e DB alle temperature di 10 000 K e 20 000 K. Il modello di atmosfera utilizzato è descritto da *Koester 2009*.  $g = 10^8 \text{ cm/s}^{-2}$ . Credit: Jura and Young 2014.

Dato che il tempo di vita medio stimato per un disco di accrescimento di una PWD è di  $1,26 \cdot 10^6$  anni [7], si deduce che DAZ calde sono statisticamente osservate nel regime di *Steady state*, mentre DBZ fredde sono probabilmente osservate nel regime di *Build-up phase* fino alla fine dell'accrescimento. Per i casi intermedi non facilmente determinabili, o nell'eventualità di osservare una PWD nel regime meno probabile tra i due, le equazioni 3.5 e 3.7 indicano che l'errore commesso nella stima delle abbondanze dipende dal rapporto dei  $\tau_z$ .

La figura 3.7 riporta i  $\tau_z$  di vari metalli, relativi al tempo di sedimentazione del Mg. Elementi più leggeri o più pesanti del Mg (come C e Fe) hanno  $\tau_z$  che differiscono di un fattore  $\approx 2$  (o minore nel caso di metalli con Z più vicino). L'incertezza sul regime di accrescimento in atto si traduce così in un'incertezza di un fattore  $\approx 2$  sulle abbondanze rispetto al Mg.

Nel caso in cui una PWD sia invece osservata nel regime di *Decaying phase*, l'abbondanza atmosferica può differire di diversi ordini di grandezza rispetto all'abbondanza del materiale esoplanetario, a seconda di quanto tempo è passato dalla fine dell'accrescimento; se la PWD possiede un disco di accrescimento è logico presumere che stia continuando ad accumulare materiale e che non si trovi in

questo regime.

Occorre sottolineare che a seconda del modello di atmosfera applicato, le quantità ricavabili dalle PWD variano, così come il tipo di regime di accrescimento aspettato. In particolare i risultati sono sensibili all'inclusione di due importanti effetti:

- **Convective overshooting** - a causa della loro inerzia, gli elementi di fluido che scendono verso il fondo della zona convettiva oltrepassano lo strato limite stabile contro la convezione (determinato dal criterio di Ledoux) previsto dalla MLT. Di conseguenza le zone convettive ed i  $\tau_z$  aumentano.

Secondo lo studio di *Cunningham et al. 2019* [6] l'inclusione dell'*overshooting* aumenta l'estensione delle zone convettive delle DAZ con  $11\,400\text{ K} \leq T_{eff} \leq 18\,000\text{ K}$  fino a 2,5 dex rispetto alle previsioni della MLT. I  $\tau_z$  aumentano invece di 1,5-3 dex (fig. 3.8). Lo *steady state* viene raggiunto così più lentamente, anche se l'alta probabilità di osservare queste PWD in questo regime non cambia. La correzione per le DBZ non è stata calcolata, ma ci si aspetta che sia di entità minore.

- **Thermohaline mixing** - [1] al limite tra zona convettiva e zona radiativa il fluido è dinamicamente stabile secondo il criterio di Ledoux. In questo strato limite il gradiente del peso molecolare è invertito (gli elementi più pesanti stanno sopra e i più leggeri sotto), a seguito dell'accumulo dei metalli nell'involuppo. Se la diffusione termica nell'ambiente circostante avviene più velocemente della diffusione particellare (diluizione), il fluido perturbato radialmente diventa instabile e dà luogo ad un processo di mescolamento. Come risultato si ha una extra-miscelazione al di sotto del limite previsto dalla MLT ed una diminuzione delle abbondanze dei metalli in superficie (fig. 3.8).

La convezione termohalina sembra essere efficiente in DAZ con  $T_{eff} \gtrsim 10000\text{K}$  e trascurabile in DBZ con  $T_{eff} \lesssim 18\,000\text{ K}$ . Grazie a quest'effetto una DAZ può anche non raggiungere mai il regime di *steady state* e rimanere in *build up phase*.

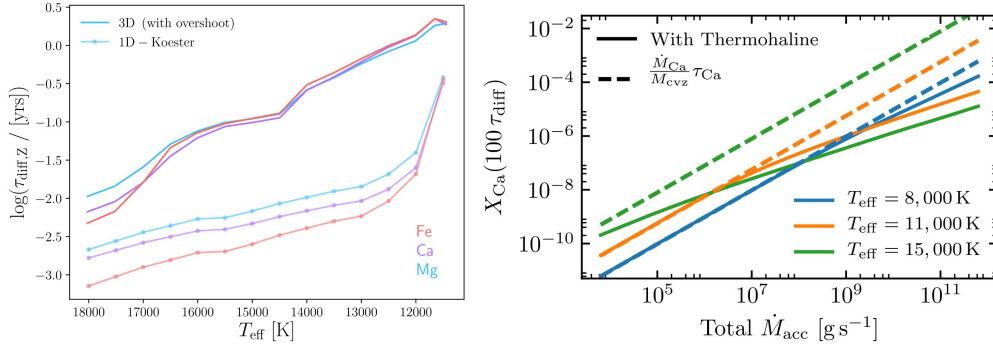


Figura 3.8: Figura a sinistra: tempi di sedimentazione di Mg, Ca e Fe in funzione della  $T_{eff}$ , confrontati tra il modello atmosferico con *overshooting* (linee continue) e un modello in sola approssimazione della MLT (linee continue con punti). Credit: Cunningham et al. 2019. Figura a destra: abbondanza del Ca dopo un tempo (pari a  $100 \tau(z)$ ) passato con vari tassi di accrescimento, a 3 diverse temperature dell'atmosfera. Le linee tratteggiate sono gli andamenti previsti dalla MLT (linee rette, in accordo con l'equazione 3.6). Le linee continue rappresentano gli andamenti includendo la convezione termoalina. Credit: Bauer and Bildsten 2018.

### 3.5 Bilanci di massa e tassi di accrescimento

La quantità  $M(z)$  introdotta nella sezione precedente può essere riscritta come  $X(z)M_{cvz}$  [26], con  $X(z)$  frazione in massa dell'elemento rispetto all'elemento dominante dell'atmosfera (H o He). Dato che  $M_{cvz}$  è nota dai modelli atmosferici<sup>4</sup> e che  $X(z)$  viene ricavata confrontando gli spettri sintetici con gli spettri delle PWD ottenuti,  $M(z)$  è anche una quantità sempre calcolabile. Sommando le masse relative a tutti gli elementi si ottiene la massa totale dei metalli presente nella zona convettiva  $M_{tot}$ <sup>5</sup>.

Visto che né la massa rimanente nel disco di accrescimento, né la massa già diffusa al di sotto della zona convettiva sono misurabili, il valore di  $M_{tot}$  non rappresenta la massa del materiale esoplanetario catturato dalla PWD. Considerando però nane bianche DBZ, che hanno zone convettive estese e  $\tau_z$  lunghi (comparabili al tempo di vita medio dei dischi di accrescimento), la misura di  $M_{tot}$  fornisce un valore minimo di questa massa. I valori minimi richiesti per spiegare la quantità di metalli nelle DBZ variano solitamente in un range di  $10^{16}g$ - $10^{22}g$  [19]. Ipotizzando l'accrescimento di un unico corpo, l'estremo superiore del range corrisponderebbe ad un asteroide di diametro pari a  $\approx 300Km$ . Casi più estremi richiedono masse minime maggiori, come per SDSS J0738+1835 (fig.3.9) dove  $M_{tot} \approx 7 \cdot 10^{23}g$ , pari

<sup>4</sup>In questa sezione, se non specificato diversamente, i modelli utilizzati si basano su un'approssimazione della MLT.

<sup>5</sup>Per molte PWD si riesce a misurare solo l'abbondanza del Ca o al più di qualche elemento. Per ricavare la massa/tasso di accrescimento totale si presuppone, in generale, che la massa del Ca rappresenti l' 1.6% della massa di tutti i metalli, come per la composizione della Terra.

a circa la massa del pianeta nano Cerere [11]. In generale, i corpi inquinanti hanno le dimensioni di grandi asteroidi [17].

Element	$\log [n(Z)/n(He)]_{phot}$	$M_{CVZ}/(10^{21}g)$	$\log \tau_{set}(yr)$	$[n(Z)/n(Fe)]_{acc}$	$\dot{M}/(10^8 g s^{-1})$
1 H	$-5.73 \pm 0.17$	0.310	$\infty$	...	...
8 O	$-3.81 \pm 0.19$	407.86	5.244	9.52	740.2
11 Na	$-6.36 \pm 0.16$	1.639	5.238	$2.7 \times 10^{-2}$	3.02
12 Mg	$-4.68 \pm 0.07$	83.33	5.258	1.24	146.38
13 Al	$-6.39 \pm 0.11$	1.792	5.244	$2.5 \times 10^{-2}$	3.25
14 Si	$-4.90 \pm 0.16$	57.99	5.248	0.77	104.36
20 Ca	$-6.23 \pm 0.15$	3.907	5.044	$5.8 \times 10^{-2}$	11.24
21 Sc	$-9.55 \pm 0.18$	$2.05 \times 10^{-3}$	5.010	$2.9 \times 10^{-5}$	$6.38 \times 10^{-3}$
22 Ti	$-7.95 \pm 0.11$	$8.87 \times 10^{-2}$	5.007	$1.2 \times 10^{-3}$	0.278
23 V	$-8.50 \pm 0.17$	$2.65 \times 10^{-2}$	5.006	$3.4 \times 10^{-4}$	$8.31 \times 10^{-2}$
24 Cr	$-6.76 \pm 0.12$	1.492	5.026	$1.8 \times 10^{-2}$	4.48
25 Mn	$-7.11 \pm 0.11$	0.693	5.028	$7.7 \times 10^{-3}$	2.07
26 Fe	$-4.98 \pm 0.09$	94.91	5.047	1.00	271.32
27 Co	$-7.76 \pm 0.19$	0.165	5.042	$1.7 \times 10^{-3}$	0.479
28 Ni	$-6.31 \pm 0.10$	4.721	5.063	$4.6 \times 10^{-2}$	12.997
Total		658.95			1301.7

Figura 3.9: Nella tabella sono riportati i 14 metalli osservati nell'atmosfera della DBZ SDSS J0738+1835, una delle PWD col maggior numero di elementi rilevati grazie agli spettrografi ad alta risoluzione HIRES e MagE. Le somme della 3<sup>a</sup> e 6<sup>a</sup> colonna riportano rispettivamente la massa totale di metalli nella zona convettiva ed il tasso di accrescimento totale. I risultati sono stati ottenuti considerando la PWD nel *steady state*. Credit: Dufour et al. 2012.

Per PWD nel *Steady state* dall'equazione 3.6 si ricava facilmente il tasso di accrescimento di un dato elemento. Analogamente a  $M_{tot}$ , la somma di tutti i tassi di accrescimento è uguale al tasso di accrescimento totale  $\dot{M}_{tot}$ .

Valori frequenti di  $\dot{M}_{tot}$  sono  $10^8$ - $10^9$  g/s. Tassi più alti, come  $\approx 1,3 \cdot 10^{11}$  g/s per SDSS J0738+1835 (fig.3.9), sono tipici per alcune DBZ e non per le DAZ. Questa disparità fa presumere che i tassi di accrescimento presentino dei brevi periodi di forte incremento [16] [12], che dipendono dai processi evolutivi del disco, o da eventi più rari come l'impatto diretto di materiale sulle superfici [4]. Poiché le DBZ hanno  $\dot{M}_{tot}$  relativi a periodi lunghi ( $\tau_z \approx 10^6$  anni) riescono a tenere traccia di questi brevi eventi (stimati essere  $< 10^3$  anni), a differenza delle DAZ che hanno  $\dot{M}_{tot}$  "istantanei".

Unitamente, i tassi di accrescimento delle DAZ potrebbero essere sottostimati. Come descritto nella sezione 3.4, l'*overshooting* ed il *thermohaline mixing* prevedono masse convettive maggiori. In questo modo la  $M_{tot}$  richiesta per giustificare le abbondanze nella zona convettiva aumenta, assieme a  $\dot{M}_{tot}$  ricavato dall'equazione 3.6 (fig. 3.10).

Cunningham et al. 2022 [8] hanno misurato per la prima volta il tasso di accrescimento di una PWD dalle emissioni nel dominio X del materiale esoplanetario in caduta sulla stella. Tramite il *Chandra X-ray Observatory* hanno osservato la DAZ G29-38, per la quale era già noto  $\dot{M}_{tot}$  dalle misure spettroscopiche dell'at-

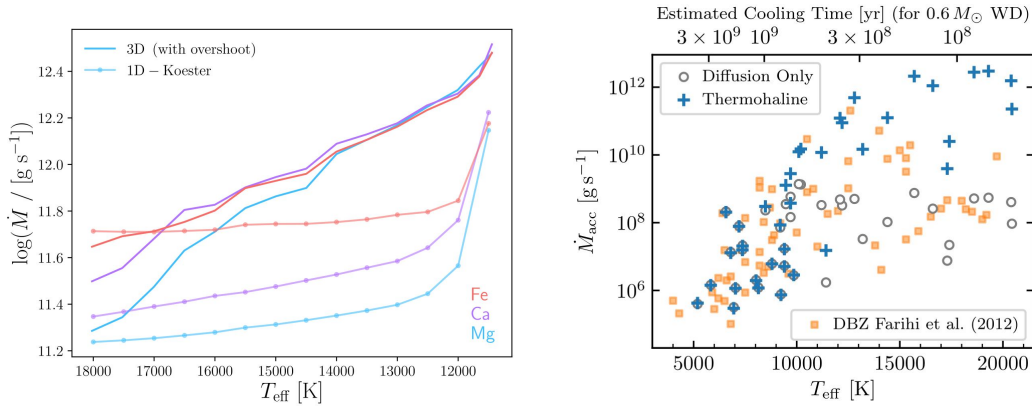


Figura 3.10: figura a sinistra: tassi di accrescimento di Mg, Ca e Fe previsti dai modelli atmosferici con o senza *overshooting*, in funzione della  $T_{\text{eff}}$ . Credit: *Cunningham et al. 2019*. Figura a destra: tassi di accrescimento ricavati dalle abbondanze del Ca osservate per 38 DAZ, senza includere (cerchi bianchi) o includendo (croci blu) la convezione termoalina. I quadrati arancioni messi a confronto sono i tassi di accrescimento ricavati per alcune DBZ. Credit: *Bauer and Bildsten 2019*.

mosfera, ricavando un  $\dot{M}_{X,\text{tot}} = 1,63^{+1,29}_{-0,40} \cdot 10^9 \text{ g/s}$ . Il valore è maggiore di circa un fattore 3 rispetto ai valori  $\dot{M}_{\text{tot}} = (6,5 \pm 1,6) \cdot 10^8 \text{ g/s}$  e  $\dot{M}_{\text{tot}} = (5 \pm 1,3) \cdot 10^8 \text{ g/s}$  ottenuti per via spettroscopica. Secondo i ricercatori la differenza dei risultati è dovuta alla mancata inclusione dell'*overshooting* nei modelli atmosferici, che per l'appunto incrementerebbe  $\dot{M}_{\text{tot}}$  di un fattore 3-4 (fig. 3.11).

Poiché indipendente dalle misurazioni spettroscopiche, il nuovo metodo introdotto è in grado di fornire importanti informazioni per meglio delineare i modelli atmosferici delle PWD ed i processi che governano l'evoluzione dei loro dischi di accrescimento.

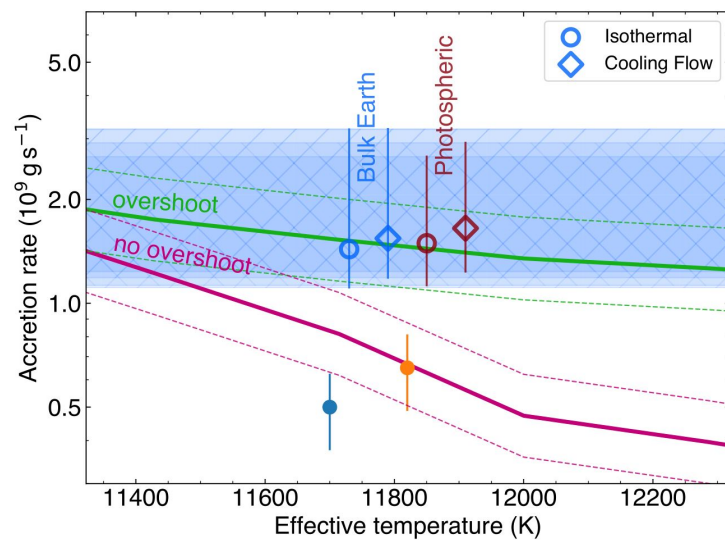


Figura 3.11: I cerchi ed i rombi aperti sono gli  $\dot{M}_{tot}$  ricavati dalle emissioni in X, ipotizzando due diversi modelli di plasma; inoltre, il colore blu indica un plasma con composizione terrestre, il rosso un plasma con composizione uguale a quella misurata spettroscopicamente. La fascia azzurra è l'intervallo di confidenza (68%) dei 4 valori. I cerchi pieni sono i due  $\dot{M}_{tot}$  trovati già spettroscopicamente. Le linee continue rappresentano gli andamenti di  $\dot{M}_{tot}$ , calcolati attraverso modelli che tengono conto o no dell'*overshooting*, assumendo una composizione terrestre del materiale. Credit: Cunningham et al. 2022.

# Capitolo 4

## Esogeologia dei sistemi extrasolari

La teoria della *nebulosa solare* è il modello che meglio spiega la formazione del sistema solare, e si ritiene che sia valida anche per i sistemi extrasolari. Le osservazioni di dischi protoplanetari ottenute grazie al radiointerferometro ALMA, con all'interno lacune che indicano la formazione in corso di pianeti, sono a supporto di tale ipotesi [19]. Tuttavia, i processi che governano la formazione di planetesimi e pianeti in altri sistemi non sono ancora del tutto compresi. Qual è la composizione di questi corpi? I processi geologici che avvengono in questi sistemi sono simili a quelli del sistema solare?

Le PWD offrono un'opportunità unica per rispondere a tali domande.

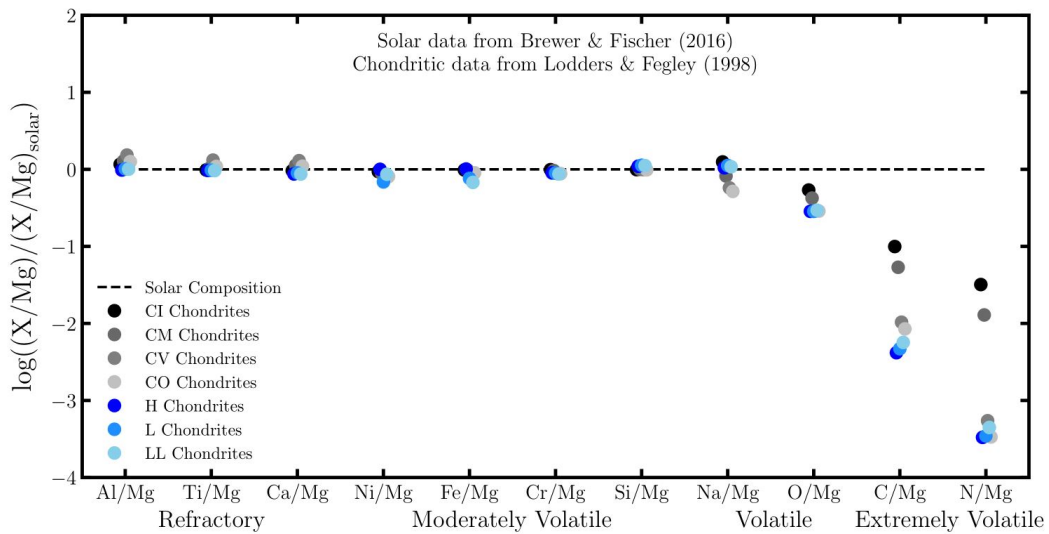
In questa sezione verranno esaminati alcuni studi effettuati su gruppi di PWD, piuttosto che su singoli casi, in modo tale da avere una visione d'insieme sulle caratteristiche dei sistemi extrasolari. Per semplicità si assume sempre che le PWD siano inquisite da un unico corpo.

### 4.1 Evidenze del sistema solare

Secondo la teoria della *nebulosa solare*, la stella ed il materiale planetario di un sistema nascono dal collasso di un'unica nube molecolare.

I pianeti si formano dall'aggregazione di planetesimi, corpi minori composti dal gas condensato dal disco protoplanetario. Dato il gradiente di temperatura all'interno del disco, a seconda della zona di formazione i planetesimi hanno abbondanze di elementi volatili diverse, che si riflette poi nella composizione dei pianeti. Nel sistema solare questo fatto è evidenziato dalle condriti, meteoriti caduti sulla Terra e provenienti dalla fascia degli asteroidi, che con composizione simile alla fotosfera solare a meno di un deficit degli elementi volatili (fig. 4.1) vengono per l'appunto associati a planetesimi primitivi [19].





**Figura 4.1:** Composizione delle condriti carbonacee (CI,CM,CV,CO) e ordinarie (H,L,LL) normalizzata alle composizione della fotosfera solare. L'andamento degli elementi volatili riflette la distanza radiale di formazione nel disco protoplanetario, maggiore per le condriti carbonacee. Credit: Harrison 2020.

In prima approssimazione la composizione della Terra riflette quella delle condriti, seguendo l'andamento della condensazione nebulare previsto per il materiale nel disco protoplanetario (fig. 4.2). La Terra è il pianeta per il quale abbiamo più informazioni, e la sua composizione è stata stimata non solo a partire dai meteoriti, ma anche dalla combinazione di osservazioni di più fonti indipendenti: parametri di struttura (massa, raggio, momento d'inerzia ecc.), propagazione delle onde sismiche, campo geomagnetico, composizione delle rocce terrestri e comportamento dei composti chimici in varie condizioni termodinamiche nei laboratori.

Per gli altri pianeti rocciosi (o corpi rocciosi) del sistema solare le informazioni sono più limitate, ma possono comunque essere confrontanti con i modelli di formazione basati sulla condensazione nebulare (fig. 4.2).

La bassa percentuale di Fe, Ni e Cr nella pirolite rispetto alle condriti, combinata con le misure del campo geomagnetico ed il momento d'inerzia, suggeriscono che il nucleo della Terra è ricco di Fe e Ni. Il risultato è corroborato dal ritrovamento dei meteoriti ferrosi, composti per  $\approx 98\%$  in massa da Fe e Ni, che si pensa siano frammenti di nuclei di protopianeti distrutti. Questi meteoriti sono un sottogruppo delle acondriti, che a differenza delle condriti hanno subito processi geologici o collisionali dopo la formazione. Alcune acondriti, come i meteoriti SNC e HED, sembrano provenire dalla crosta di Marte e Vesta rispettivamente, ed hanno invece composizione simile alla crosta oceanica terrestre ricca di Al, Ti e Ca.

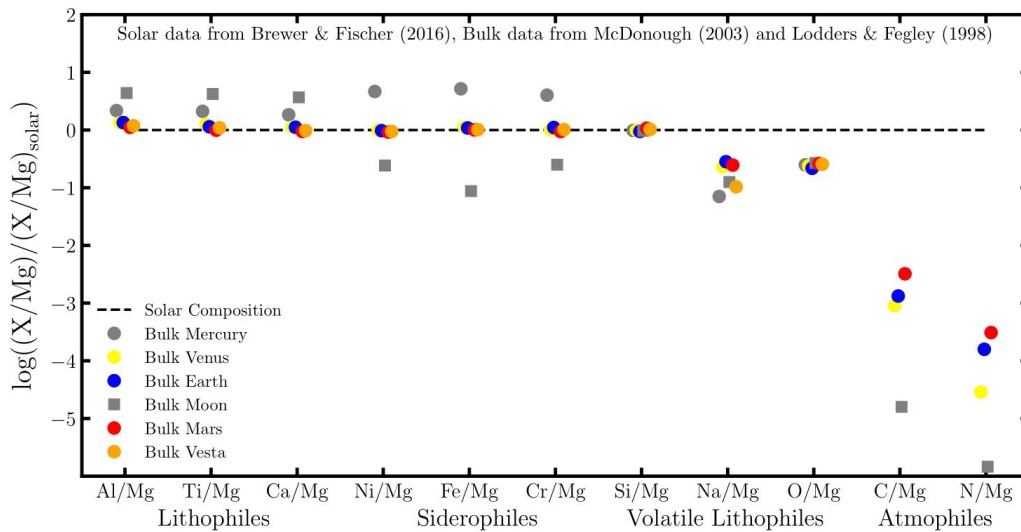


Figura 4.2: Composizioni di Mercurio, Venere, Terra, Luna, Marte e Vesta, ricavata dai dati disponibili per questi corpi rocciosi. Le composizioni sono normalizzate alla composizione della fotosfera solare. Credit: Harrison 2020.

Dalla Terra e dalle acondriti si deduce che la differenziazione dei corpi planetari è un fenomeno comune nel sistema solare e si ritiene infatti che quantomeno tutti i pianeti terrestri e la Luna siano differenziati.

In figura 4.3 sono riportate le composizioni dei vari "gusci" che costituiscono la Terra in relazione alle abbondanze della fotosfera solare: il nucleo è ricco di siderofili (elementi affini al Fe durante la differenziazione); il mantello è povero di siderofili; la crosta oceanica è ricca di litofili (elementi affini all' O, quindi agli ossidi minerali) e povera di siderofili.

La differenziazione avviene tramite il riscaldamento sviluppato durante la fase di accrescimento planetario (collisioni e rilascio di energia gravitazionale sotto forma di calore), o attraverso il riscaldamento generato dai radionuclidi (come  $^{26}\text{Al}$  e  $^{60}\text{Fe}$ ) presenti nei corpi. Mentre il primo processo è efficace per corpi con dimensione  $>1000$  Km, il secondo è rilevante solo per corpi di  $\approx 10$  Km che non hanno sufficiente massa per trattenere il calore generato con le collisioni.

L' *oceano di magma* che si viene a formare durante la differenziazione è responsabile di un'ulteriore perdita di elementi volatili nei corpi. L'inclusione di questa perdita post-condensazione nebulare riesce a spiegare i deficit di alcuni elementi volatili di Marte e Vesta, che a differenza della Terra non avevano una massa sufficiente per trattenerli gravitazionalmente.

La Luna e Mercurio presentano abbondanze che non possono essere spiegate né con la condensazione nebulare, né con la perdita di volatili durante l'età dell' *oceano*

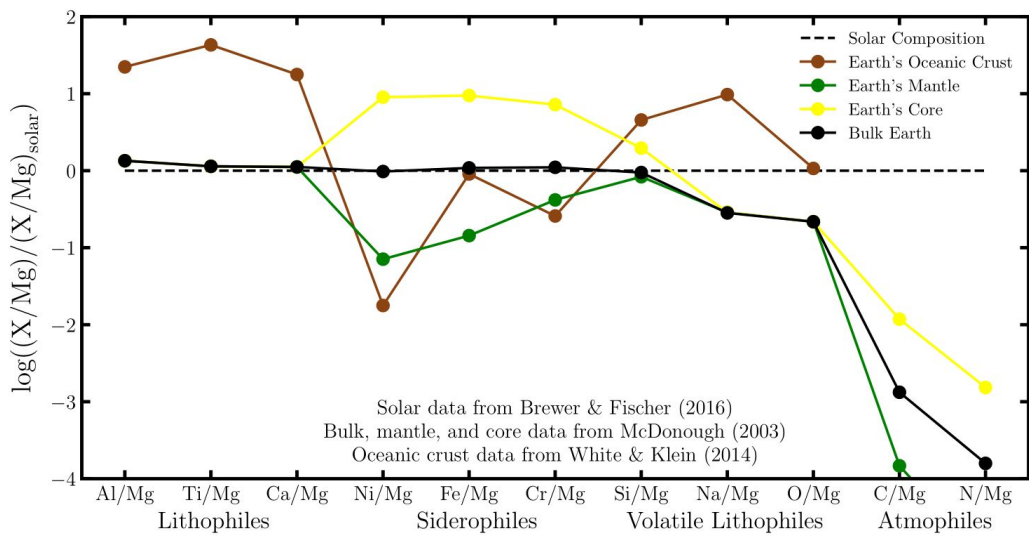


Figura 4.3: Composizioni del nucleo, mantello e crosta oceanica della Terra, normalizzate alla composizione della fotosfera solare, ricavate dai dati a disposizione. Confrontandole con la composizione generale della Terra si nota l'arricchimento/impovertimento di elementi siderofili e litofili nelle varie strutture. Credit: Harrison 2020.

*di magma.* La ricchezza di siderofili di Mercurio è dovuta probabilmente ad un grande impatto che ne ha rimosso il mantello, mentre il deficit di siderofili nella Luna è coerente con l'ipotesi che la Luna sia un frammento di mantello terrestre, rimosso dalla terra dopo un grande impatto.

La Luna, Mercurio e le acondriti testimoniano l'importanza che hanno avuto le collisioni nel sistema solare nel produrre frammenti con composizioni simili a nuclei, mantelli o croste di corpi differenziati.

## 4.2 Elementi più abbondanti

Gli elementi che compongono i planetesimi ed i pianeti dipendono dalla composizione della nube molecolare dai quali nascono, e dai processi che avvengono nel disco protoplanetario. Poiché la composizione della fotosfera solare è nella media rispetto alle stelle vicine, ci si aspetta che gli elementi dominanti dei corpi esoplanetari non siano così diversi da quelli dei corpi del sistema solare [19].

Una conferma di questa considerazione è data da *Jura and Young 2014* [24], che hanno confrontato la percentuale in massa di Mg+Fe+Si+O tra alcune delle PWD più inquinate (fig. 4.4) e la Terra, visto che quest'ultima è composta per più del 90% in massa da questi elementi (fig. 4.5). Le percentuali, oltre ad essere in buon accordo con quella terrestre ed evidenziare la natura rocciosa del materiale, indeboliscono l'ipotesi proposta che in alcuni sistemi possano esistere planetesimi/pianeti dominati da Carbonio o elementi come Ca e Al (similarmente alle CAIs: calcium-aluminum-rich inclusions).

Number	Name	WD	Dom.	$T_*$ (K)	Dust	[Mg]/[X]	Number of elements	Reference(s)
1	GD 40	0300-013	He	15,300	Yes	-6.20	12	Klein et al. 2010, Jura et al. 2012, Xu et al. 2013b
2	GD 61	0435+410	He	17,300	Yes	-6.69	5	Farihi et al. 2011, 2013
3		J0738+1835	He	14,000	Yes	-4.68	14	Dufour et al. 2012
4	PG 0843+516	0843+516	H	23,100	Yes	-5.00	10	Gaensicke et al. 2012
5	PG 1015+161	1015+161	H	19,200	Yes	-5.30	5	Gaensicke et al. 2012
6	PG 1225-079	1225-079	He	10,800	Yes	-7.50	11	Xu et al. 2013b, Klein et al. 2011
7		1226+110	H	20,900	Yes	-5.20	7	Gaensicke et al. 2012
8	NLTT 43806	1653+385	H	5,900	No	-7.1	9	Zuckerman et al. 2011
9	GD 362	1729+371	He	10,500	Yes	-5.98	16	Xu et al. 2013b, Zuckerman et al. 2007
10		1929+012	H	21,200	Yes	-4.10	12	Gaensicke et al. 2012, Vennes et al. 2011, Melis et al. 2011
11	G241-6	2222+683	He	15,300	No	-6.26	11	Jura et al. 2012, Xu et al. 2013b
12	HS 2253+8023	2253+803	He	14,400	No	-6.10	8	Klein et al. 2011
13	G29-38	2326+049	H	11,800	Yes	-5.77	8	Xu et al. 2014

Figura 4.4: Tabella contenente alcune delle PWD più inquinate. Partendo da sinistra le colonne indicano: numero assegnato alla PWD, nome, nome alternativo, elemento dominante della fotosfera,  $T_{eff}$ , eccesso di infrarosso (disco di polveri), abbondanza del Mg relativa all'elemento dominante dell'atmosfera, numero di elementi rilevati in atmosfera e fonte dei dati. Credit: Jura and Young 2014.

Le stesse conclusioni si traggono dalla figura 4.6, dove *Xu and Bonsor 2021* [40] riportano le abbondanze dei corpi di 19 PWD messe a confronto con quelle della Terra e della cometa Halley.

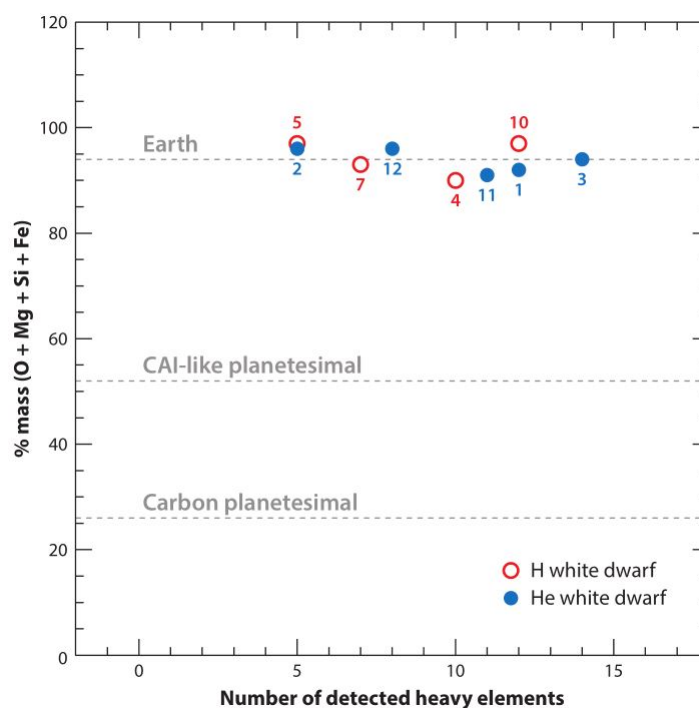


Figura 4.5: Percentuale in massa di (O+Mg+Si+Fe) dei corpi esoplanetari di 9 delle PWD in figura 4.4 per le quali l'O è stato rilevato. Le linee tratteggiate orizzontali indicano la percentuale in massa della Terra (94%) e dei presunti planetesimi ricchi di elementi refrattari (CAIs-like) o Carbonio. Credit: *Jura and Young 2014*.

### 4.3 Condensazione nebulare

In figura 4.7 viene confrontata l'abbondanza di C dei corpi esoplanetari che inquinano alcune delle PWD di figura 4.4 con quella della fotosfera del sole, delle condriti e delle fotosfere di un insieme di stelle vicine. Dalla distribuzione delle abbondanze è evidente che tutti i corpi hanno valori sempre inferiori alle fotosfere stellari, simili alle condriti. In figura 4.6 la frazione in massa di C varia tra il 0,016% (PG 0843) ed il 9,6% (WD 1425), dove il primo valore corrisponde circa alla percentuale di C nelle condriti CV ed il secondo a quella della cometa Halley. Il corpo che inquina WD 1425 è ritenuto essere simile ad un oggetto della Kuiper belt [39]. Essendo il C un elemento volatile, ciò suggerisce che la perdita di elementi volatili durante la condensazione nebulare avvenga anche in altri sistemi, similmente al sistema solare.

Sotto questa ipotesi il modello bayesiano proposto da *Harrison et al. 2021* [17], applicato a 202 DZ catalogate da *Hollands et al. 2017* [20]<sup>1</sup>, ha permesso

<sup>1</sup>Per queste PWD *Hollands et al. 2017* è riuscito a ricavare le abbondanze di Ca, Fe e Mg, e in

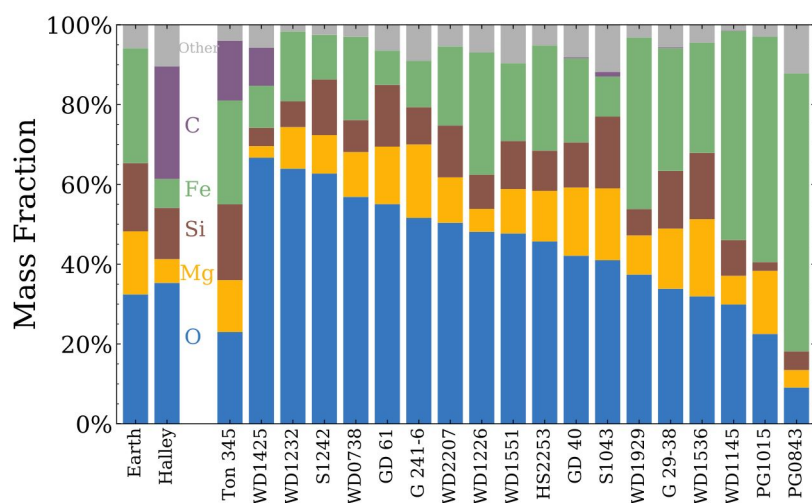


Figura 4.6: Percentuali in massa di Mg, O, Si, Fe, C (e altri elementi) dei corpi esoplanetari catturati da 19 PWD. Le percentuali sono messe a confronto con quelle della Terra e della cometa Halley. Credit: Xu and Bonsor 2021.

di ricavare per alcune DZ la probabile temperatura (distanza radiale) alla quale il materiale che costituisce i corpi è condensato dal disco di gas protoplanetario.

Il primo tracciante utilizzato per lo scopo è il rapporto tra le abbondanze di Na e Mg nella PWD osservata. Dato che secondo il modello la temperatura di condensazione del Na è  $\approx 1000$  K, minore di quella del Mg, un deficit di Na/Mg rispetto al valore di Na/Mg della nube molecolare indica che il materiale si è formato a temperature maggiori di 1000 K. Poiché il Sodio ed il Magnesio hanno tempi di sedimentazione simili e sono entrambi litofili, il loro rapporto è poco influenzato sia dalle correzioni dovute al regime di accrescimento, sia da un'eventuale differenziazione del corpo. Il secondo tracciante usato è il rapporto tra le abbondanze di Ca e Fe. Come per Na/Mg, il rapporto difficilmente può essere confuso con effetti di sedimentazione o differenziazione. Il Fe ha una temperatura di condensazione  $\approx 1400$  K, minore del Ca, pertanto un eccesso di Ca/Fe indica una temperatura di condensazione del gas maggiore di 1400 K. Tra le 50 DZ analizzate (le sole per le quali è nota l'abbondanza di Na):

- 38/50 non mostrano un deficit di Na/Mg: il materiale costituente è condensato a temperature minori di 1000 K.
- 12/50 mostrano un deficit di Na/Mg e 3/12 hanno anche un eccesso di Ca/Fe: il materiale è condensato a temperature maggiori di 1000 K e in 3 casi a temperature maggiori di 1400 K. Figura 4.8 e figura 4.9 sono due casi rappresentativi delle due condizioni rispettivamente.

qualche caso anche le abbondanze di Ni, Cr, Ti e Na.

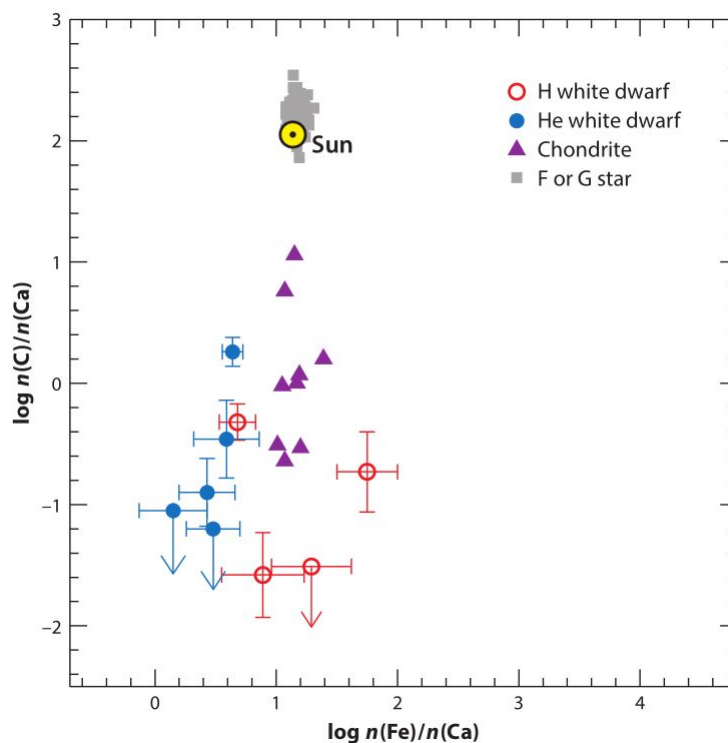


Figura 4.7: Abbondanze di C e Fe nei corpi esoplanetari delle PWD numero 1, 2, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 13 di figura 4.4, espresse in relazione al Ca ed in scala logaritmica. Le abbondanze sono confrontate con quelle delle condriti, del Sole e di 178 stelle vicine di tipo F o G. Le barre di errore rappresentano l'errore sulla misura delle abbondanze nelle fotosfere. Credit: Jura and Young 2014.

Trasformando le temperature in distanze radiali nel disco protoplanetario<sup>2</sup> risulta che in 38 sistemi il materiale si è formato a distanze maggiori di  $\approx 5$  au, mentre in 12 sistemi a distanze minori di  $\approx 5$  au.

Come discusso da *Harrison et al. 2021* [17], per corpi sufficientemente grandi ( $\approx 50$  Km) il riscaldamento dovuto alla fase post-sequenza principale della stella non influisce sui risultati. Tuttavia il modello non tiene conto di un eventuale perdita di elementi volatili post-condensazione nebulare. Le temperature ottenute andrebbero quindi interpretate come le massime temperature raggiunte dai corpi.

Ad ogni modo, lo studio mette in luce che il materiale che costituisce i corpi esoplanetari è condensato dalla nube molecolare similmente a quanto accaduto nel sistema solare, e che i corpi esoplanetari catturati dalle PWD provengono da diverse regioni dei sistemi.

<sup>2</sup>Si assume che al centro del disco ci sia una stella di tipo A0, ritenuta essere la progenitrice media delle PWD del catalogo.

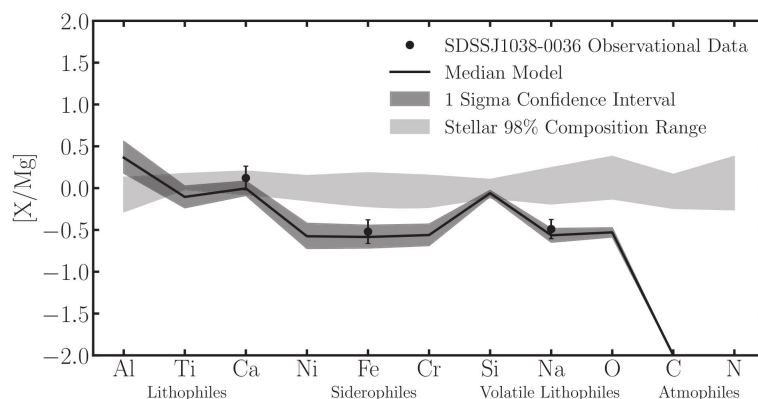


Figura 4.8: Abbondanze degli elementi relative al Mg, osservate nell'atmosfera della PWD e normalizzate alle abbondanze relative al Mg della fotosfera solare. Il deficit di Na/Mg indica la perdita di elementi volatili del materiale avvenuta a  $T > 1000$  K. Credit: Harrison et al. 2021.

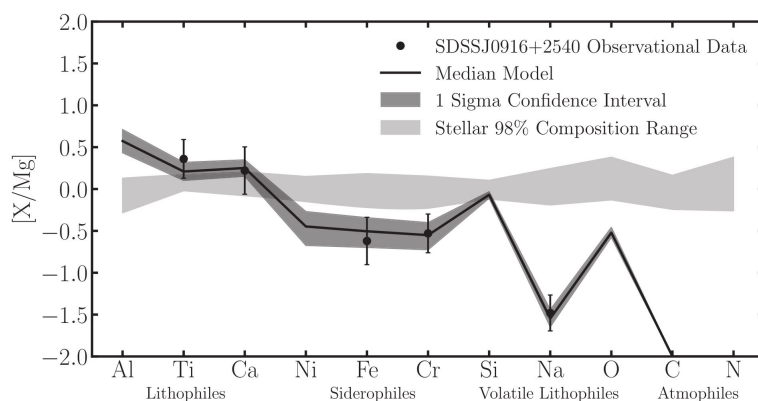


Figura 4.9: Come per figura 4.8. Il deficit di Na/Mg pronunciato e l'eccesso di Ca/Fe e Ti/Fe indicano una perdita di elementi volatili del materiale avvenuta a  $T > 1400$  K. Credit: Harrison et al. 2021.

## 4.4 Presenza di acqua

E' interessante chiedersi quale sia il contenuto in acqua dei corpi esoplanetari, dato che nel sistema solare è uno dei composti più abbondanti, per lo più sotto forma di ghiaccio oltre la *frost line*. L'alta luminosità della stella durante la fase di gigante rossa non esclude a priori il ritrovamento di acqua nei sistemi osservati. Infatti, la diffusione del calore all'interno di corpi più grandi di  $\approx 60$  Km avviene in un tempo più lungo di quello della fase di gigante rossa; se un corpo contiene acqua, l'acqua al suo interno non viene persa [24].

L'abbondanza di acqua nelle PWD viene determinata dalle abbondanze di H ed O, in quanto la molecola si dissocia nelle atmosfere.

Per ottenere una visione generale, *Jura and Young 2014* [24] hanno analizzato



57 nane bianche DB catalogate da *Jura and Xu 2012* [23], del quale era nota la somma dei tassi di accrescimento dell'H di tutte le stelle, pari a  $1,4 \cdot 10^7$  g/s. Nelle nane bianche DB l'H non sedimenta mai e l'abbondanza misurata corrisponde all'H accumulato durante tutta la vita. Ipotizzando che tutto l'H sia dovuto all'acqua, il tasso di accrescimento dell'O associato dovrebbe corrispondere a  $1,1 \cdot 10^8$  g/s. Già solo considerando 5 delle 57 stelle, per le quali è stata rilevata la presenza di O in atmosfera, la somma dei tassi accrescimento dell'O è  $2,4 \cdot 10^9$  g/s. Così, non più del 5,8% dell'O può derivare dall'acqua; in generale l'O in eccesso è trasportato da altri composti, come gli ossidi metallici (MgO,  $SiO_2$ , CaO, FeO e altri). Tenendo conto che le altre 52 stelle potrebbero contenere altro O, la percentuale potrebbe essere molto minore.

Il risultato è coerente le singole osservazioni. A titolo esemplificativo, il materiale che inquina SDSS J0738+1835 (fig. 3.9) contiene non più dell'1% di acqua, comparabilmente alla Terra e molti meteoriti (materiale del sistema solare interno).

Esistono tuttavia delle eccezioni. Ad esempio, sottraendo dall'abbondanza totale di O la parte che potrebbe derivare dagli ossidi metallici, il materiale di GD 61 sembra contenere  $\approx 26\%$  di acqua [13], mentre quello di SDSS J124231+522626  $\approx 38\%$  [32]. Anche le PWD WD1425, WD1232, S1242 e WDJ0738 in figura 4.6 (così come altri casi singoli) hanno eccessi di O compatibili con corpi ricchi di ghiaccio d'acqua.

La maggioranza di corpi con basse percentuali di acqua, potrebbe essere un effetto di selezione. L'O è infatti rilevabile solo in PWD con  $T_{eff} > 10\,000$  K, alle quali corrispondono età minori di  $10^9$  anni. Secondo i modelli dinamici più semplici, le WD catturano con maggiore probabilità prima i corpi più interni al sistema (con bassa percentuale di acqua) e successivamente quelli più esterni (ricchi di ghiaccio d'acqua). WD più fredde e vecchie potrebbero quindi catturare mediamente oggetti più ricchi d'acqua.

## 4.5 Differenziazione

Come visto in sezione 4.1, la differenziazione di un corpo porta alla formazione di un nucleo ricco di elementi siderofili, di un mantello poveri in siderofili e di una crosta povera in siderofili e ricca di litofili.

In figura 4.10 sono riportati i valori delle abbondanze di Fe e Mg in relazione al silicio per tutte le PWD di figura 4.4. Dato che il Ferro a differenza del Silicio (e del Mg) tende a concentrarsi nei nuclei, il rapporto Fe/Si indica se il materiale ha subito processi di differenziazione con formazione di un nucleo ferroso. La dispersione dei valori di Fe/Si è simile a quella osservata per i corpi rocciosi del si-

stema solare (condriti, Luna, Terra e Mercurio). Ciò suggerisce che la formazione di nuclei ferrosi sia usuale anche in altri sistemi [24].

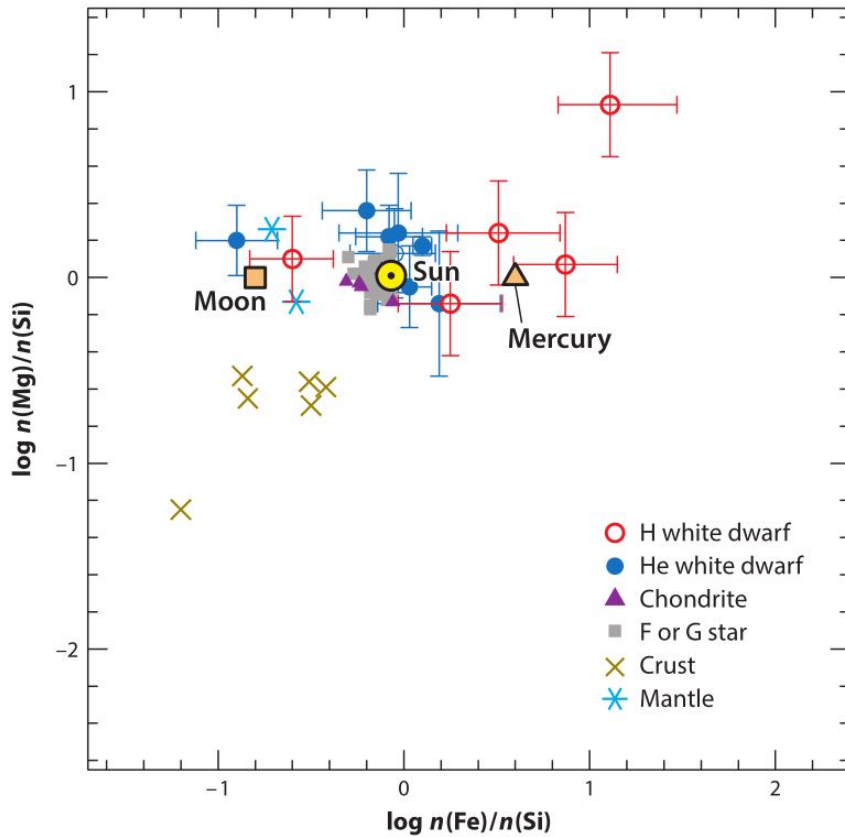


Figura 4.10: Abbondanze di Mg e Fe in relazione al Si di tutte le PWD di figura 4.4. A confronto i valori di: Sole, stelle vicine, condriti, Luna, Mercurio e di rocce rappresentative di mantelli (dunite e diogenite) e croste (MORB, eucriti e crosta continentale). Credit: Jura and Young 2014.

La stessa osservazione vale per la formazione di mantelli e croste. In figura 4.11 si osservano i valori dei rapporti Si/Al e Mg/Al di 7 delle PWD di figura 4.4, confrontati con quelli di alcune rocce di mantelli e croste. L'Alluminio è un elemento litofilo e tende a concentrarsi nelle croste.

La dispersione dei valori segue quella dei corpi e rocce del sistema solare.

E' importante sottolineare che l'accrescimento di un intero corpo esoplanetario differenziato non porta all'osservazione del processo della differenziazione.

Corpi con abbondanze simili a nuclei o mantelli/croste sono una prova indiretta dell'importanza delle collisioni all'interno dei sistemi, che producono frammenti di corpi maggiori differenziati, in modo analogo a quanto successo per la Luna, Mercurio ed i meteoriti ferrosi.

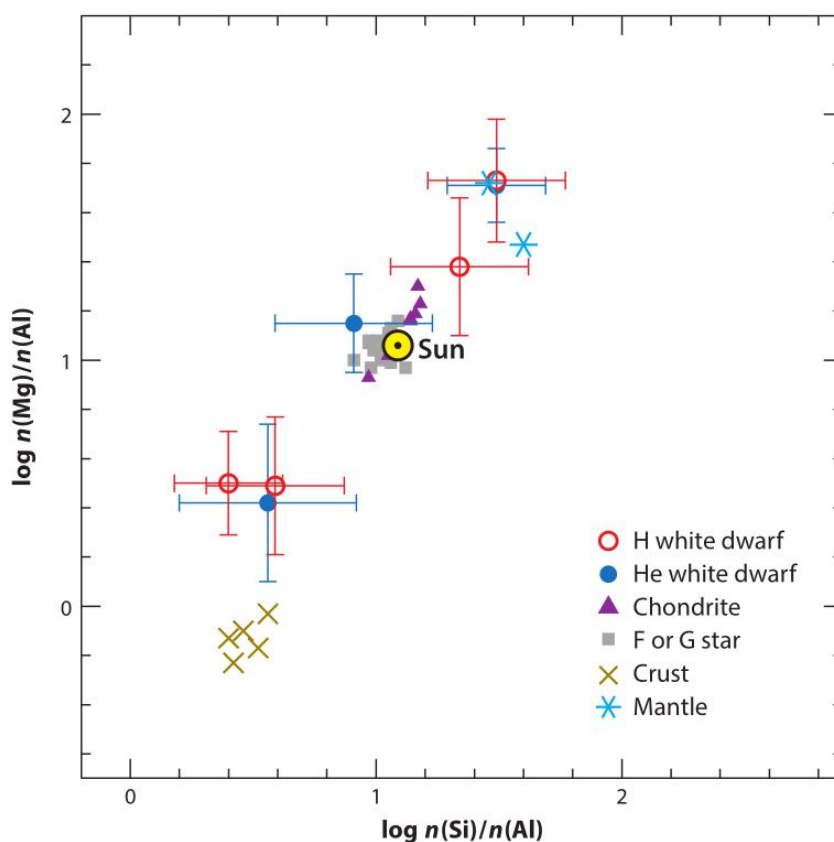


Figura 4.11: Abbondanze di Mg e Si relative all'Alluminio delle PWD n°1-3-4-7-8-9-10. I valori sono confrontati con gli stessi corpi descritti in figura 4.10 Credit: *Jura and Young 2014*.

La validità dell'assunzione di accrescimento di un unico corpo è rafforzata dal ritrovamento di questi frammenti. Infatti, in caso di accrescimento contemporaneo di più corpi, la ricchezza di determinati elementi dovuta alla differenziazione verrebbe annullata, data l'improbabilità che tutti i corpi siano frammenti di egual composizione.

Grazie al loro modello bayesiano, *Harrison et al. 2021* [17] hanno indagato sulla presenza di corpi differenziati all'interno del gruppo delle 202 DZ introdotte in sezione 4.3. PWD con valori dei rapporti tra le abbondanze Ca/Fe e Mg/Fe più bassi rispetto a quelli della nube molecolare (quindi ricchi di Fe) sono state riconosciute dal modello come PWD inquinate da corpi costituiti da un'alta frazione di nucleo. Lo stesso vale per quelle PWD con bassi valori di Ca/Mg, che sono state interpretate dal modello come PWD che accrescono materiale ricco di frazione di nucleo durante il regime di *decaying phase*; tuttavia solo le abbondanze di Cr e Ni (se disponibili per la DZ) hanno potuto confermare il risultato (fig. 4.12).

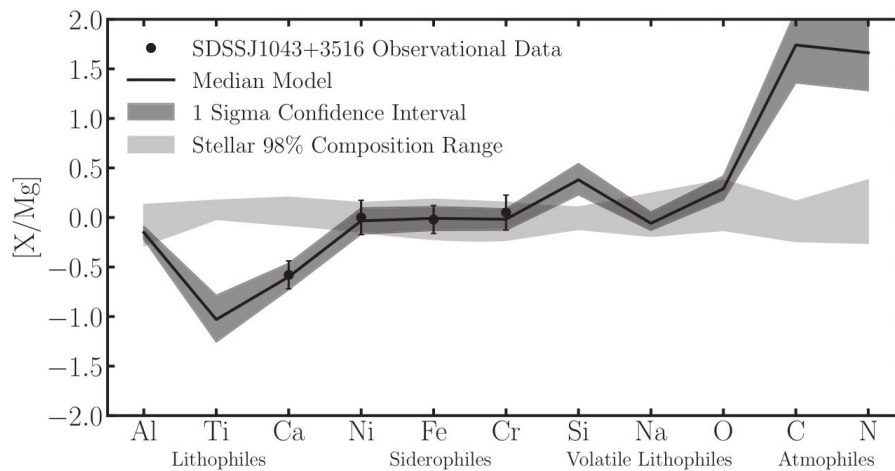


Figura 4.12: Come per figura 4.8. Abbondanze che indicano l'accrescimento di materiale ricco di nucleo in regime di *decaying phase*. Credit: Harrison et al. 2021.

Secondo il modello, 8/202 PWD mostrano l'accrescimento di corpi arricchiti di frazione di nucleo con una significatività  $>3\sigma$ , mentre 132/202 PWD sono inquinate da corpi primitivi con abbondanza di elementi refrattari che rispecchia quella della nube molecolare.

Il modello non è riuscito a distinguere corpi ricchi di frazione di mantello (ai quali corrisponderebbero valori di Ca/Fe e Mg/Fe più alti della nebulosa) a causa dei pochi elementi a disposizione per le PWD (approfondimenti nell'articolo [17]). La stessa considerazione vale per corpi ricchi di frazione di crosta, tranne che per un unico caso dove un alto valore di Ca/Fe (superiore a quello della nebulosa) è accompagnato da un alto valore di Na/Mg (fig. 4.13).

Perciò, nel 4% dei sistemi osservati i corpi mostrano segni della differenziazione. Tuttavia, la percentuale trovata è probabilmente una sottostima del valore reale poiché: i) tra i corpi che risultano come non differenziati si nascondono tutti quei corpi differenziati che non sono frammenti di corpi maggiori [9] ii) per lo stesso catalogo di PWD *Bonsor et al. 2020* [3] hanno stimato che più del 60% delle 203 DZ analizzate sono inquinate da frammenti di corpi nei quali si è formato un nucleo.

Inoltre, a sostegno della tesi di percentuali maggiori, si aggiunge lo studio di *Buchan et al. 2022* [5] nel quale circa il 40% delle 42 PWD campionate (con almeno 5 elementi rilevati nelle atmosfere) sembra aver catturato corpi che hanno subito il processo della differenziazione.

Sulla base dei risultati riportati, *Curry et al. 2022* [9] argomentano che alte percentuali di corpi differenziati (10s%) indicano che diversi sistemi extrasolari (10s%) potrebbero essere arricchiti di radionuclidi (in particolare  $^{26}\text{Al}$ ), che por-

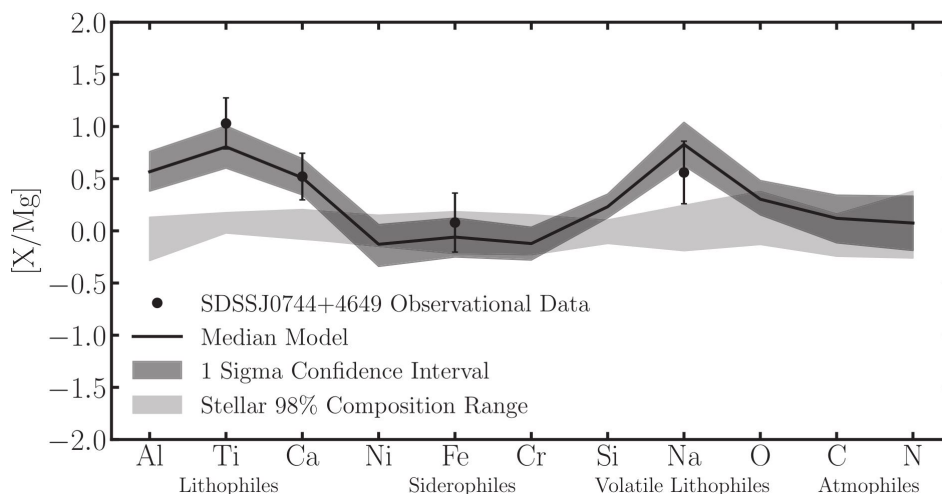


Figura 4.13: Come per figura 4.8. Le abbondanze suggeriscono l'accrescimento di materiale composto per almeno il 50% da crosta con una significatività  $>3\sigma$ . *decaying phase*. Credit: Harrison et al. 2021.

tano alla differenziazione di un numero di corpi minori tale da giustificare le osservazioni. Così, il sistema solare potrebbe non essere peculiare nell'abbondanza di radionuclidi. Lo scenario pone però l'interrogativo su quale sia il meccanismo di arricchimento universale all'interno della galassia, dato che gli eventi di arricchimento attribuiti a supernova, Wolf-Rayet e stelle AGB sono troppo rari per giustificare l'abbondanza di radionuclidi in così tanti sistemi.

L'eventuale presenza marcata di  $^{26}\text{Al}$  nei sistemi ha ripercussioni pesanti sulla composizione degli esopianeti, che possono risultare poveri di composti essenziali per l'abitabilità, tra i quali l'acqua e l'anidride carbonica. Infatti, planetesimi riscaldati dai radionuclidi prima e durante l'età di formazione dei pianeti, entrano nella fase di *oceano di magma* che porta alla differenziazione e perdita di elementi volatili che non vengono così ereditati dai pianeti.

Una delle caratteristiche principali che distingue la Terra dagli altri pianeti rocciosi è la composizione della sua crosta e mantello, responsabile del fenomeno della tettonica a placche che regola il clima terrestre.

Allo scopo di identificare frammenti di crosta simili a quella terrestre, *Putirka e Xu 2021* [31] hanno analizzato 23 PWD per le quali erano a disposizione misure precise delle abbondanze di Ca, Mg, Si e Fe. La percentuale in massa di Ca+Mg+Si+Fe nelle atmosfere delle PWD conferma la natura rocciosa dei corpi inquinanti. 11/23 PWD erano già state identificate come PWD inquinate da corpi con un'alta concentrazione (30%-75%) di roccia granitica [21]; secondo *Putirka e Xu 2021* lo studio si è però basato solo sulle alte abbondanze di Ca e Al, elementi

che da soli non definiscono il tipo di roccia.

Questa ricerca si concentra invece sull'abbondanza del Si, uno degli elementi chiave per distinguere la crosta terrestre da altre strutture. La crosta continentale infatti è composta per più del 60% in peso da silice ( $\text{SiO}_2$ ).

Per confrontare la parte silicatica ("BSP" - *bulk silicate planet*=mantello+crosta) delle PWD con la parte silicatica di altri corpi rocciosi e le rocce relative a croste del sistema solare, è stata rimossa dalla composizione generale delle PWD la frazione di Fe relativa al nucleo (assumendo un partizionamento del Fe uguale a quello terrestre).

In figura 4.14 si osservano i risultati del confronto. Le PWD hanno abbondanze di  $\text{SiO}_2$  e MgO che non rispecchiano quelle delle rocce relative a croste, in particolare a quella terrestre.

Una sola PWD si sovrappone alla composizione silicatica della Terra, mentre la maggior parte hanno composizione silicatica che non corrisponde a nessuno dei pianeti interni. Le composizioni sembrano invece compatibili con le rocce ultrafemiche (peridotiti e pirosseniti) che compongono il mantello terrestre. Ciò dimostra che le PWD stanno accrescendo materiale relativo a mantelli.

A differenza degli studi precedenti, nessuna delle PWD mostra quindi l'accrescimento di materiale con un'alta frazione di crosta simile a quella terrestre o di altri corpi rocciosi conosciuti. Il risultato non è del tutto inaspettato se si considera che la crosta terrestre (crosta oceanica+crosta continentale) rappresenta solo  $\approx 0,7\%$  della parte silicatica della Terra.

Dalla ricerca emerge, inoltre, che la mineralogia dei mantelli relativi ad alcune PWD è esotica rispetto a quella del sistema solare, tanto che i due ricercatori hanno introdotto un nuovo schema di classificazione per questo tipo di rocce (approfondimenti nell'articolo [31]).

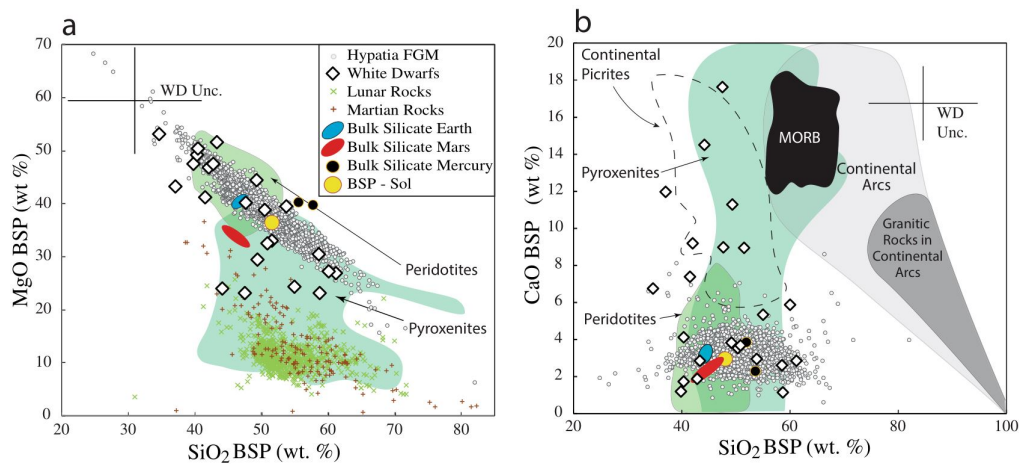


Figura 4.14: Composizione silicatica (BSP) delle PWD a confronto con le BSPs del Sole, dei pianeti interni e di oltre 4000 stelle FGMK del catalogo Hypatia. Sono inoltre messe a confronto le composizioni delle rocce del mantello terrestre (peridotiti e pirosseniti) e quelle delle rocce della crosta della Terra, Luna e Marte. "WD unc" corrisponde all'incertezza sulla composizione delle PWD. La somma  $MgO+CaO+FeO+SiO_2$  è normalizzata al 100%. Credit: Putirka Xu 2021.

## 4.6 Volatilizzazione post-condensazione nebulare

Per capire se la volatilizzazione degli elementi è dovuta alla condensazione nebulare oppure a processi post-condensazione nebulare, *Harrison et al. 2021* [18] hanno introdotto un metodo che si basa sull'analisi dei rapporti tra le abbondanze  $Mn/Na$  e  $Mn/Mg$  dei corpi esoplanetari. Il metodo è stato applicato alle 4 PWD di figura 4.15, le uniche per le quali tutti e 3 gli elementi sono stati rilevati precedentemente nelle atmosfere, e può essere riassunto osservando figura 4.16. Le frecce colorate indicano l'andamento dei rapporti dati da 3 diversi effetti:

System	$\log(Mn/Mg)$	$\log(Mn/Na)$
GD362	$-1.49 \pm 0.27$	$+0.32 \pm 0.22$
J0738+1835	$-2.20 \pm 0.12$	$-0.54 \pm 0.19$
WD 0446-255	$-2.50 \pm 0.14$	$-1.20 \pm 0.14$
J1535+1247	$-2.44 \pm 0.22$	$-1.08 \pm 0.21$

Figura 4.15: Rapporti delle abbondanze dei corpi esoplanetari che inquinano le PWD GD362, WD0446-255, J1535+1247, e J0738+1835. Credit: Harrison et al. 2021.

- *Condensazione nebulare - freccia blu.* Nel disco protoplanetario solare le temperature di condensazione ( $T_{50}$ ) di Na, Mn e Mg corrispondono a 858 K, 1158 K e 1336 K rispettivamente. All'aumentare delle temperature il rapporto  $Mn/Na$  nei corpi cresce, mentre il rapporto  $Mn/Mg$  diminuisce. Sulla freccia giacciono i valori delle condriti e della Terra.

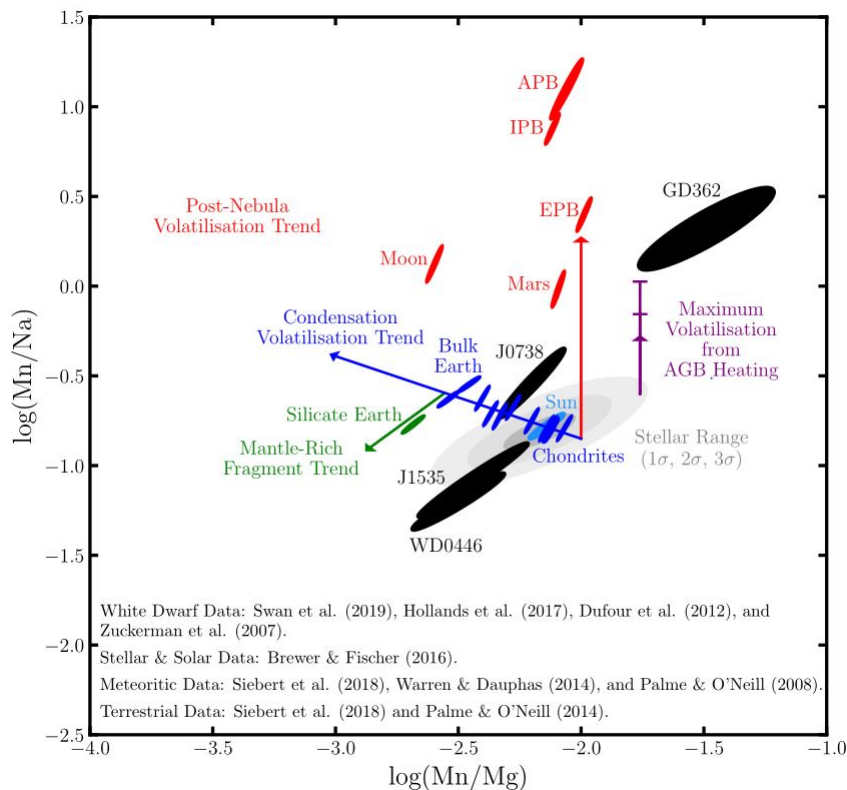


Figura 4.16: Grafico che riproduce gli andamenti dei rapporti delle abbondanze Mn/Na e Mn/Mg per 3 diversi processi subiti dai corpi. Nel grafico sono riportati i valori delle 4 PWD di figura 4.15 e di altri corpi del sistema solare. Le ellissi rappresentano l'errore  $1\sigma$  sulle abbondanze. Credit: Harrison et al. 2021.

- *Differenziazione - freccia verde.* A seguito della differenziazione, la crosta ed il mantello sono più arricchiti di Na e Mg (litofili) rispetto al Mn. Osservando un frammento di un corpo differenziato, ricco di crosta e/o mantello, entrambi i rapporti risultano minori rispetto quelli previsti dalla semplice condensazione nebulare. Il mantello primitivo della Terra segue l'andamento della freccia.
- *Riscaldamento post-condensazione nebulare - freccia rossa.* Un eventuale riscaldamento post-nebulare (*oceano di magma*, come visto per Marte e Vesta) avviene a pressioni più alte ed in ambiente più ossidante rispetto a quello del disco protoplanetario. In relazione al Mn e Mg, in queste condizioni l'Na diventa molto più volatile. Conseguentemente, il rapporto Mn/Na nei corpi aumenta, a differenza del rapporto Mn/Mg che rimane quasi inalterato. In figura sono riportati i della Luna, Marte e alcuni meteoriti, che seguono quest'andamento.



Le ellissi grigie rappresentano il range di abbondanze iniziali delle nubi molecolari, estrapolato dalle abbondanze delle fotosfere di stelle F-G-K vicine.

Valutando la posizione dei valori all'interno del grafico si definiscono i processi subiti dai corpi esoplanetari presi in esame.

In combinazione con i risultati già ottenuti da *Harrison 2020* [19] per queste PWD, si ottiene che i corpi corrispondono a:

- (J1535+1247) Un corpo primitivo con composizione simile a quella della nube molecolare.
- (WD0446-255) Un frammento simile al mantello di un corpo differenziato, costituito da materiale condensato a basse temperature vista la bassa perdita di elementi volatili.
- (J0738+1835) Un frammento di un corpo differenziato al quale è stata strappata la crosta, composto da materiale che ha subito una moderata perdita di elementi volatili durante la condensazione.
- (GD362) Un corpo la cui carenza di volatili non può essere spiegata né dalla condensazione nebulare, né dal riscaldamento prodotto durante la fase AGB della stella del sistema (come mostrato dal vettore viola in figura). E' invece probabile che il corpo abbia attraversato una fase di *oceano di magma*, dovuta ad impatti o al decadimento di radionuclidi avvenuti dopo la condensazione nebulare.

Il metodo proposto non solo riesce a distinguere i processi che portano alla deplezione degli elementi volatili, ma conferma anche che i processi di condensazione nebulare, post-condensazione nebulare e differenziazione osservati nel sistema solare riescono a spiegare le abbondanze dei corpi osservati in altri sistemi.

## Capitolo 5

### Conclusioni

L'obiettivo di questo elaborato era di introdurre le nane bianche inquinate (PWD) nello scenario della ricerca di esopianeti con proprietà simili alla Terra. La degenerazione massa-raggio degli esopianeti non consente di definire la loro composizione e struttura, caratteristiche fondamentali per l'abitabilità di un pianeta. Mentre per i pianeti interni del sistema solare la degenerazione è stata superata grazie all'aiuto dei meteoriti caduti sulla Terra (acondriti e condriti), per i pianeti extrasolari la degenerazione può essere superata in modo analogo attraverso i corpi rocciosi catturati dalle PWD.

Dalle analisi ottenute da *Jura and Young 2014* e *Xu and Bonsor 2021* (sezione 4.2) su due diversi gruppi di PWD, emerge che tutti i corpi esoplanetari catturati sono corpi rocciosi, dominati dagli stessi elementi che dominano la composizione della Terra (%massa(Mg+Fe+Si+O) > 80%). Questa evidenza va ad indebolire l'ipotesi che corpi esoplanetari ad alto contenuto di C o Ca/Al possano esistere in altri sistemi. Lo studio di *Putirka and Xu 2021* (sezione 4.5) conferma a sua volta la natura rocciosa dei corpi del suo campione di PWD.

Nella sezione 4.3 le abbondanze di C riportate da *Jura and Young 2014* e *Xu and Bonsor 2021* indicano che la perdita di elementi volatili nei corpi sia avvenuta similmente al sistema solare durante la condensazione nebulare: le PWD di figura 4.6 hanno una percentuale di C che varia tra il 0,016% per PG 0843 ed il 9,6% per WD 1425, percentuali simili a quelle possedute dalle condriti CV e la cometa Halley rispettivamente. Basandosi sulla validità della teoria della *nebulosa solare* e sui rapporti tra le abbondanze di alcuni elementi chiave (Na/Mg e Ca/Fe) *Harrison et. al 2021* hanno ricavato che: 38/50 delle PWD analizzate sono inquinate da corpi costituiti da materiale condensato a  $T < 1000$  K, mentre 12/50 sono inquinate da corpi costituiti da materiale condensato a  $T > 1000$  K, ed in 3 casi a  $T > 1400$  K. Il risultato evidenzia che il materiale condensa a diverse distanze all'interno del

disco protoplanetario.

Dall'analisi effettuata da *Jura and Young 2014* su un insieme di 57 PWD nella sezione 4.4, risulta che l'acqua nei corpi esoplanetari catturati è presente solo in tracce ( $< 5,8\%$ ). Ciò è in accordo con la maggior parte delle osservazioni, basti considerare che il corpo che inquina SDSS J0738+1835 contiene circa l'1% di acqua. Ci sono poi delle eccezioni, come per il materiale inquinante di GD 61 con  $\approx 26\%$  di acqua e di J124231.07+522626.6 con  $\approx 38\%$ . Come discusso in sezione 4.4, la maggioranza di corpi contenenti poca acqua può essere solo un effetto di selezione dovuto alla giovane età delle PWD, che catturano prevalentemente corpi più interni del sistema (con poca acqua).

Le abbondanze di Fe (siderofilo) e Al (litofilo) nel gruppo di PWD di *Jura and Young 2014* (sezione 4.5) suggeriscono che i corpi esoplanetari si siano differenziati in modo simile a quelli del sistema solare, con nuclei ricchi di Fe e croste arricchite di Al. *Harrison et al. 2021*, attraverso il loro modello bayesiano, hanno ricavato che 9/202 (4%) delle PWD analizzate sono inquinate da corpi differenziati con significatività  $>3\sigma$  (8 corpi ricchi di frazione di nucleo e 1 corpo ricco di frazione di crosta). Corpi ricchi di frazione di mantello non sono stati individuati a causa dei pochi elementi rilevati nelle PWD. 132/202 PWD risultano invece inquinate da corpi primitivi, con abbondanza degli elementi refrattari simile a quella delle fotosfere stellari. Il ritrovamento di corpi differenziati testimonia l'importanza delle collisioni nei sistemi extrasolari, che producono frammenti di corpi maggiori differenziati, come osservato nel sistema solare. Come discusso da *Curry et al. 2022* la percentuale di corpi differenziati potrebbe essere più alta, probabilmente pari a 10s%. Secondo i ricercatori alte percentuali potrebbero essere giustificate da una buona percentuale (10s%) di sistemi arricchiti di radionuclidi come  $^{26}\text{Al}$ , che porterebbero alla differenziazione di molti corpi minori nei sistemi. Questo fatto renderebbe meno peculiare il sistema solare per l'abbondanza di radionuclidi, e pone l'interrogativo su quale sia il meccanismo universale di arricchimento. In sistemi ricchi di  $^{26}\text{Al}$  potrebbero formarsi pianeti poveri di volatili (e acqua) e di piccole dimensioni. Il metodo proposto da *Harrison et al. 2021* (sezione 4.6) basato sul rapporto delle abbondanze di Mn/Na e Mn/Mg, in grado di distinguere tra perdita di elementi volatili durante la condensazione nebulare o post-condensazione nebulare (*oceano di magma* generato da radionuclidi), può potenzialmente confermare quest'ipotesi. Tuttavia, la carenza di PWD con tutti e 3 gli elementi rilevati in atmosfera, non consente indagini su larga scala. Il metodo è stato in grado di confermare la perdita di elementi volatili post-condensazione nebulare solo per il corpo di PWD GD362.

*Putirka et al. 2021* hanno dimostrato in sezione 4.5 che le composizioni silicatiche dei corpi di 23 PWD (11 delle quali erano ritenute precedentemente inquinate

da materiale ricco di frazione di crosta ) hanno abbondanze di  $\text{SiO}_2$  e  $\text{MgO}$  compatibili con le rocce ultrafemiche del mantello terrestre. Le PWD stanno quindi accrescendo mantelli e non croste. Dallo studio emerge che la mineralogia dei mantelli per alcune PWD è esotica rispetto a quella del sistema solare. La diversa composizione dei mantelli potrebbe avere effetti interessanti sulle caratteristiche degli esopianeti, ad esempio: mantelli ricchi di quarzo potrebbero formare croste più spesse, mentre rocce più deboli potrebbero facilitare il fenomeno della tettonica a placche [31].

In conclusione si può affermare che, come per il sistema solare, la condensazione dalla nube molecolare, la differenziazione e le collisioni sono processi chiave che determinano la composizione dei corpi planetari anche in altri sistemi. I corpi rocciosi esoplanetari sono dominati dagli stessi elementi delle rocce del sistema solare. Tuttavia, non ci sono ancora evidenze di croste simili alla Terra che potrebbero indicare la presenza della tettonica a placche negli esopianeti; composizioni esotiche, come quelle proposte per alcuni mantelli osservati, possono favorire o sfavorire questo processo. La formazione di nuclei ricchi di Fe suggerisce che esopianeti con campi magnetici (essenziali per l'abitabilità) siano comuni anche negli altri sistemi. Molti sistemi potrebbero essere ricchi di radionuclidi, con esopianeti rocciosi poveri di volatili e di composti vitali.

Ulteriori osservazioni spettroscopiche, specialmente ad alta risoluzione nell'ottico e nell'UV, sono necessarie per aumentare il numero di PWD con più elementi rilevati in atmosfera. Ciò permetterà di studiare l'esogeologia di un maggior numero di sistemi e di applicare al meglio i modelli proposti. Grazie alla sua sensibilità nell'infrarosso il James Webb Space Telescope sarà in grado di studiare la composizione dei dischi di polveri circumstellari, ampliando così le possibilità di indagine sulla composizione dei corpi esoplanetari [40].

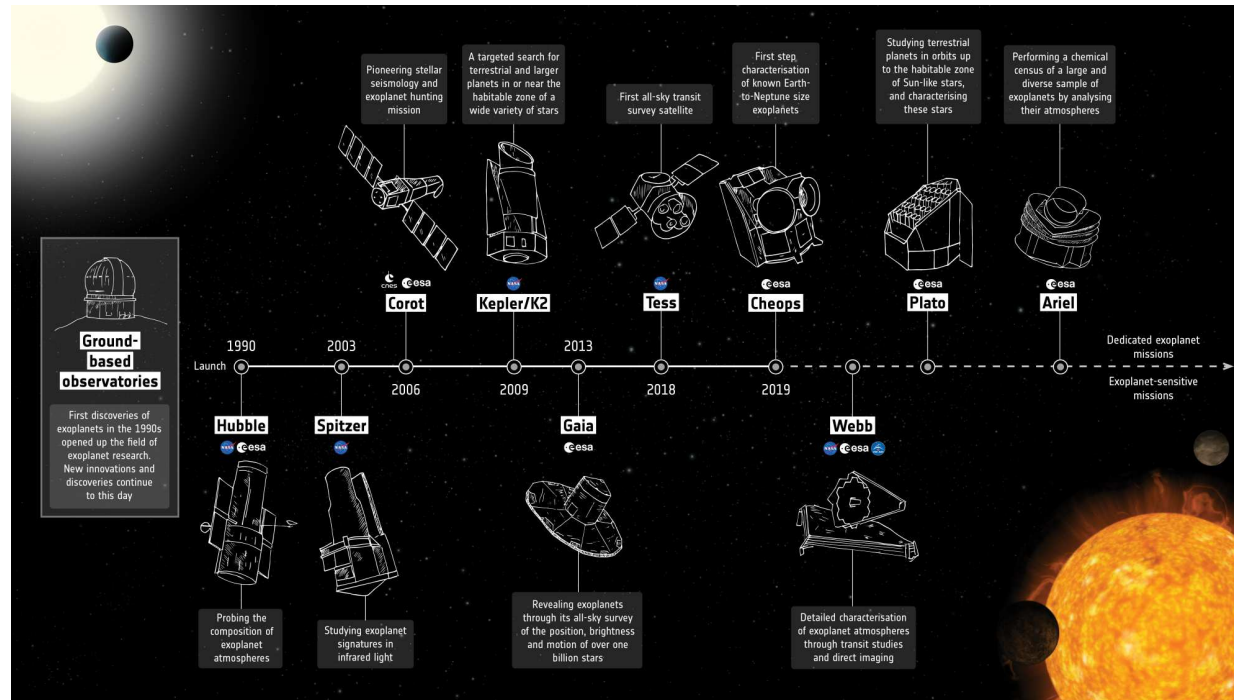


Figura 5.1: Timeline delle missioni spaziali dedicate/sensibili alla ricerca di esopianeti. Credit: ESA

# Bibliografia

- [1] Bauer et al. Polluted white dwarfs: mixing regions and diffusion timescales. *The Astrophysical Journal*, 872(1):96, 2019.
- [2] Bonsor et al. Infrared observations of white dwarfs and the implications for the accretion of dusty planetary material. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 468(1):154–164, 2017.
- [3] Bonsor et al. Are exoplanetesimals differentiated? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 492(2):2683–2697, 2020.
- [4] Brouwers et al. A road-map to white dwarf pollution: tidal disruption, eccentric grind-down, and dust accretion. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 509(2):2404–2422, 2022.
- [5] Buchan et al. Planets or asteroids? a geochemical method to constrain the masses of white dwarf pollutants. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 510(3):3512–3530, 2022.
- [6] Cunningham et al. Convective overshoot and macroscopic diffusion in pure-hydrogen-atmosphere white dwarfs. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 488(2):2503–2522, 2019.
- [7] Cunningham et al. Horizontal spreading of planetary debris accreted by white dwarfs. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 503(2):1646–1667, 2021.
- [8] Cunningham et al. A white dwarf accreting planetary material determined from x-ray observations. *Nature*, 602(7896):219–222, 2022.
- [9] Curry et al. Prevalence of short-lived radioactive isotopes across exoplanetary systems inferred from polluted white dwarfs. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2022.
- [10] Debes et al. Are there unstable planetary systems around white dwarfs? *The Astrophysical Journal*, 572(1):556, 2002.

- [11] Dufour et al. Detailed compositional analysis of the heavily polluted dbz white dwarf sdss j073842. 56+ 183509.06: a window on planet formation? *The Astrophysical Journal*, 749(1):6, 2012.
- [12] Farihi et al. Scars of intense accretion episodes at metal-rich white dwarfs. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 424(1):464–471, 2012.
- [13] Farihi et al. Evidence for water in the rocky debris of a disrupted extrasolar minor planet. *Science*, 342(6155):218–220, 2013.
- [14] Gänsicke et al. A gaseous metal disk around a white dwarf. *Science*, 314(5807):1908–1910, 2006.
- [15] Gänsicke et al. Accretion of a giant planet onto a white dwarf star. *Nature*, 576(7785):61–64, 2019.
- [16] Girven et al. Constraints on the lifetimes of disks resulting from tidally destroyed rocky planetary bodies. *The Astrophysical Journal*, 749(2):154, 2012.
- [17] Harrison et al. Bayesian constraints on the origin and geology of exoplanetary material using a population of externally polluted white dwarfs. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2021.
- [18] Harrison et al. Evidence for post-nebula volatilisation in an exo-planetary body. *Earth and Planetary Science Letters*, 554:116694, 2021.
- [19] John Harrison. *Polluted White Dwarfs: Insights into Ancient Extrasolar Planetary Systems*. PhD thesis, University of Cambridge, 2020.
- [20] Hollands et al. Cool dz white dwarfs–i. identification and spectral analysis. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 467(4):4970–5000, 2017.
- [21] Hollands et al. Cool dz white dwarfs ii: compositions and evolution of old remnant planetary systems. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 477(1):93–111, 2018.
- [22] M Jura. A tidally disrupted asteroid around the white dwarf g29-38. *The Astrophysical Journal*, 584(2):L91, 2003.
- [23] M Jura and S Xu. Water fractions in extrasolar planetesimals. *The Astronomical Journal*, 143(1):6, 2011.

- [24] M Jura and ED Young. Extrasolar cosmochemistry. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 42(1):45–67, 2014.
- [25] Koester et al. The frequency of planetary debris around young white dwarfs. *Astronomy & Astrophysics*, 566:A34, 2014.
- [26] D Koester. Accretion and diffusion in white dwarfs-new diffusion timescales and applications to gd 362 and g 29-38. *Astronomy & Astrophysics*, 498(2):517–525, 2009.
- [27] Maldonado et al. Do instabilities in high-multiplicity systems explain the existence of close-in white dwarf planets? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 501(1):L43–L48, 2021.
- [28] Manser et al. A planetesimal orbiting within the debris disc around a white dwarf star. *Science*, 364(6435):66–69, 2019.
- [29] Paola Marigo. Theoretical astrophysics-lectures notes.
- [30] C Paquette, C Pelletier, G Fontaine, and G Michaud. Diffusion in white dwarfs-new results and comparative study. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 61:197–217, 1986.
- [31] Keith D Putirka and Siyi Xu. Polluted white dwarfs reveal exotic mantle rock types on exoplanets in our solar neighborhood. *Nature communications*, 12(1):1–7, 2021.
- [32] Raddi et al. Likely detection of water-rich asteroid debris in a metal-polluted white dwarf. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 450(2):2083–2093, 2015.
- [33] Reach et al. The dust cloud around the white dwarf g 29-38. ii. spectrum from 5 to 40  $\mu\text{m}$  and mid-infrared photometric variability. *The Astrophysical Journal*, 693(1):697, 2009.
- [34] Rocchetto et al. The frequency and infrared brightness of circumstellar discs at white dwarfs. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 449(1):574–587, 2015.
- [35] Sion et al. A proposed new white dwarf spectral classification system. *The Astrophysical Journal*, 269:253–257, 1983.
- [36] Vanderbosch et al. A white dwarf with transiting circumstellar material far outside the roche limit. *The Astrophysical Journal*, 897(2):171, 2020.



- [37] Vanderburg et al. A disintegrating minor planet transiting a white dwarf. *Nature*, 526(7574):546–549, 2015.
- [38] Dimitri Veras. Planetary systems around white dwarfs. *arXiv preprint arXiv:2106.06550*, 2021.
- [39] Xu et al. The chemical composition of an extrasolar kuiper-belt-object. *The Astrophysical Journal Letters*, 836(1):L7, 2017.
- [40] Siyi Xu and Amy Bonsor. Exogeology from polluted white dwarfs. *Elements: An International Magazine of Mineralogy, Geochemistry, and Petrology*, 17(4):241–244, 2021.
- [41] Zuckerman et al. The chemical composition of an extrasolar minor planet. *The Astrophysical Journal*, 671(1):872, 2007.
- [42] Zuckerman et al. Ancient planetary systems are orbiting a large fraction of white dwarf stars. *The Astrophysical Journal*, 722(1):725, 2010.
- [43] B Zuckerman. Recognition of the first observational evidence of an extrasolar planetary system. *arXiv preprint arXiv:1410.2575*, 2014.
- [44] B Zuckerman and EE Becklin. Excess infrared radiation from a white dwarf—an orbiting brown dwarf? *Nature*, 330(6144):138–140, 1987.