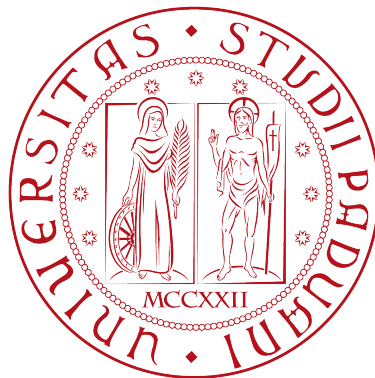


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA



DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA
"GALILEO GALILEI"

Corso di Laurea Triennale in Astronomia

TESI DI LAUREA

Impatto dell'attività stellare sull'abitabilità di pianeti terrestri

Relatore:
Prof. Sergio Ortolani
Correlatore:
Dott.ssa Valentina Granata

Laureanda:
Maria Vittoria Legnardi
Matr:1145174

Anno Accademico 2018-2019

Indice

| | |
|--|-----------|
| Introduzione | 3 |
| 1 Introduzione ai fenomeni che possono condizionare l'abitabilità di un pianeta | 4 |
| 1.1 Proprietà generali dei pianeti terrestri | 4 |
| 1.1.1 Pianeti terrestri del Sistema Solare | 4 |
| 1.1.2 Pianeti terrestri extrasolari | 5 |
| 1.2 Zona abitabile circumstellare (CHZ) | 5 |
| 1.2.1 Flusso stellare efficace | 6 |
| 1.2.2 Limiti della zona abitabile | 7 |
| 1.3 Attività stellare | 8 |
| 1.3.1 Venti stellari | 9 |
| 1.3.2 Espulsione di massa coronale (CME) | 9 |
| 1.3.3 Flusso XUV | 10 |
| 1.3.4 Flares e superflares | 10 |
| 2 Effetto del flusso XUV | 13 |
| 2.1 Fuga termica | 13 |
| 2.2 Fuga non termica | 14 |
| 2.3 Impatto del flusso UV sulle tracce biologiche | 15 |
| 3 Effetto dei venti stellari | 17 |
| 3.1 Magnetosfera planetaria | 17 |
| 3.2 Erosione atmosferica | 19 |
| 4 Effetto di flares e superflares | 22 |
| 4.1 Dose assorbita e dose efficace | 23 |
| 4.2 Fattori che influenzano la dose di radiazione incidente sulla superficie | 23 |
| 4.2.1 Spettro integrato dei SPEs | 23 |
| 4.2.2 Densità di colonna atmosferica | 26 |
| 4.2.3 Campo magnetico planetario | 29 |
| 4.3 Effetto dei SPEs sull'atmosfera | 32 |
| 5 Analisi dell'abitabilità di pianeti extrasolari noti | 34 |
| 5.1 Proxima Centauri b | 34 |
| 5.2 Sistema planetario di TRAPPIST-1 | 37 |
| 6 Discussione | 40 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 7 | Conclusione | 43 |
| A | Dati di Proxima Centauri e TRAPPIST-1 | 45 |
| | Bibliografia | 47 |

Introduzione

La prima scoperta di un esopianeta risale al 1995 quando venne resa ufficiale l'osservazione di 51 Pegasi b, un pianeta simile a Giove in orbita intorno alla stella 51 Pegasi (*Mayor & Queloz, 1995*). Da allora fino al 2009, centinaia di altri esopianeti vennero osservati ma fu con il lancio di Kepler, avvenuto appunto nel 2009, e con la costruzione successiva di telescopi dedicati esclusivamente alla ricerca di mondi fuori dal Sistema Solare, che la scienza degli esopianeti si sviluppò in tempi estremamente rapidi (*Batalha, 2014; Borucki, 2016*). Attualmente, infatti, il numero di esopianeti confermati supera 4000 con più di 650 sistemi che possiedono più di un pianeta al loro interno. Sembra dunque evidente che la ricerca di pianeti extrasolari nell'Universo rappresenta ormai da alcuni anni uno dei settori astrofisici in maggiore avanzamento (*Perryman, 2018*). Uno dei fattori che ha maggiormente contribuito a favorire questa incessante ricerca è stato sicuramente la prospettiva di poter rilevare vita extraterrestre nei pianeti fuori dal Sistema Solare, una sfida che da sempre ha affascinato la comunità astronomica. In particolare, per specificare le condizioni che favoriscono l'origine, lo sviluppo e la conservazione della vita come noi la conosciamo in pianeti simili al nostro, sono due i fattori che bisogna tenere maggiormente in considerazione: i fenomeni atmosferici e superficiali che interessano localmente i pianeti e l'interazione di questi con l'attività delle stelle intorno alle quali orbitano (*Airapetian et al., 2019*). Lo scopo di questa tesi è proprio quello di analizzare le conseguenze indotte sull'abitabilità dei pianeti terrestri dai fenomeni che interessano stelle molto attive, attorno alle quali risulta più facile rilevare pianeti simili alla Terra. La trattazione di questo argomento è suddivisa in cinque capitoli più una discussione seguita dalla conclusione. Il primo, di carattere introduttivo, contiene una descrizione generale della zona abitabile dei pianeti terrestri e dei fenomeni che caratterizzano l'attività stellare. A partire dal secondo, invece, si passa alla presentazione degli effetti causati dall'attività stellare sui pianeti. In particolare, il capitolo 2 si concentra sul flusso XUV della stella, il capitolo 3 sui venti stellari e il capitolo 4 sui brillamenti. Nel capitolo 5, invece, vengono analizzati due casi, Proxima 1b e il sistema planetario intorno a TRAPPIST-1, in cui le conoscenze apprese nei capitoli precedenti sono applicate per studiare la potenziale abitabilità di questi pianeti. La Discussione e la Conclusione contengono infine alcune riflessioni sui risultati ottenuti e suggerimenti per migliorare la ricerca futura di mondi abitabili nell'Universo.

Capitolo 1

Introduzione ai fenomeni che possono condizionare l'abitabilità di un pianeta

1.1 Proprietà generali dei pianeti terrestri

Come stabilito dall'Unione Astronomica Internazionale nel 2003, un pianeta viene generalmente definito come un corpo di massa inferiore alla massa limite per cui si innescano le reazioni di fusione termonucleare del deuterio (per oggetti con la metallicità solare è circa uguale a $13 M_{\text{Jupiter}}$) che orbita intorno a una stella oppure ai resti di una stella. I pianeti terrestri o rocciosi hanno una massa pari o leggermente superiore a quella del nostro pianeta ($M_{\text{Earth}} = 5,97219 \cdot 10^{24}$ kg) e una composizione costituita principalmente da silicati e metalli. Essi possiedono una superficie solida mentre internamente sono caratterizzati da un nucleo centrale metallico circondato da un mantello di silicati. Si ritiene infine che l'atmosfera dei pianeti terrestri abbia origine da impatti cometari oppure da fenomeni di degassamento (atmosfera secondaria) al contrario di quella dei giganti gassosi che è catturata direttamente dalla nebulosa solare originaria (atmosfera primaria).

1.1.1 Pianeti terrestri del Sistema Solare

I pianeti terrestri del Sistema Solare sono Mercurio, Venere, la Terra e Marte. Essi, così come i giganti gassosi (Giove, Saturno, Urano e Nettuno) sono caratterizzati da un moto di rivoluzione attorno al Sole e un moto di rotazione attorno al proprio asse. Per quanto riguarda il primo, tutti i pianeti percorrono nello stesso verso un'orbita generalmente poco eccentrica che giace con piccole deviazioni sull'eclittica, il piano dell'orbita terrestre intorno al Sole. Le uniche eccezioni a questo proposito sono rappresentate da Mercurio che possiede un'orbita maggiormente inclinata con un'eccentricità notevole (0.21) e Marte la cui orbita è apprezzabilmente ellittica (0.093). Passando al secondo, invece, i pianeti ruotano attorno al proprio asse in senso progrado (in senso antiorario se osservati dal polo nord celeste) tranne Venere che ha un moto retrogrado. A causa della loro distanza ravvicinata con il Sole (si trovano tutti entro 250

milioni di km) i periodi di rivoluzione dei pianeti terrestri sono più brevi rispetto a quelli dei giganti gassosi mentre quelli di rotazione generalmente sono più lunghi. Mercurio e Venere in particolare sono caratterizzati da una rotazione attorno al proprio asse molto lenta, rispettivamente di 59 e 244.3 giorni. Altre differenze importanti tra le due tipologie di pianeti sono le dimensioni, la massa e la densità con quelli terrestri che sono decisamente più piccoli, meno massivi e più densi dei giganti gassosi. Come già anticipato nel paragrafo precedente, la struttura interna dei pianeti terrestri è composta da un nucleo prevalentemente di ferro, un mantello di silicati e una crosta le cui rocce vengono prodotte nella Terra dal vulcanismo, fenomeno che invece sembra essere cessato abbastanza presto su Marte e Mercurio. Infine, si ritiene che nel primo periodo della loro formazione i pianeti terrestri abbiano perso la loro atmosfera originaria costituita dai gas presenti nella nebulosa responsabile dell'origine del Sistema Solare (idrogeno, elio) che successivamente attraverso prolungate eruzioni è stata sostituita da una nuova atmosfera ricca di composti del carbonio, dell'azoto e dell'ossigeno come CO₂, O₂, CO, N₂, etc. Quest'ultima è stata trattenuta dalla Terra, da Venere e in parte anche da Marte mentre Mercurio la perse lentamente nel corso di milioni di anni.

1.1.2 Pianeti terrestri extrasolari

I primi modelli realizzati per studiare le caratteristiche fisiche dei pianeti extrasolari terrestri concordavano sul fatto che questa categoria di oggetti fosse caratterizzata da una massa $\sim 0.2 - 5 M_{\text{Earth}}$ e una composizione simile a quella della Terra che, come abbiamo visto nel paragrafo precedente, è costituita prevalentemente da silicati e ferro. In realtà, man mano che le teorie di formazione planetaria sono evolute si è sviluppata sempre più la convinzione che in questa classe di pianeti rientrino anche oggetti con strutture molto più varie e inaspettate (*Bond et al., 2010; Marcus et al., 2010; Rogers & Seager, 2010*) come ad esempio gli ipotetici pianeti la cui superficie è ricoperta di lava fusa oppure i cosiddetti pianeti oceano formatisi oltre la snow line¹ con una significativa presenza di H₂O al loro interno. Un'altra caratteristica molto studiata dai modelli è l'atmosfera, la cui natura riserva diverse problematiche per gli esopianeti terrestri, in quanto non si è in grado di comprendere se essa sia stata acquisita per accrescimento da impatto oppure per degassamento, quale sia la sua composizione e se essa possa essere erosa nel corso del tempo oppure venga mantenuta costantemente. Attualmente, sebbene non esistano ancora vincoli osservativi, sono stati condotti diversi studi teorici sulle molteplici condizioni atmosferiche che caratterizzano questo tipo di pianeti soprattutto per supportare la ricerca di mondi abitabili fuori dal Sistema Solare.

1.2 Zona abitabile circumstellare (CHZ)

La zona abitabile circumstellare (CHZ) viene identificata classicamente come la regione circolare intorno ad una stella (o più stelle) dove un pianeta terrestre è

¹La snow line è definita come la distanza dalla stella centrale in formazione all'interno di una nebulosa protoplanetaria a cui la temperatura è sufficientemente bassa da permettere ai composti contenenti idrogeno, come l'acqua, l'ammoniaca e il metano, di raggiungere lo stato solido

in grado di mantenere stabilmente acqua liquida sulla sua superficie (*Kasting et al., 1993*). Questo tipo di definizione impone diverse restrizioni alla ricerca di mondi che potenzialmente potrebbero ospitare forme di vita al loro interno. In primo luogo, essa assume l'acqua come composto fondamentale per l'abitabilità di un pianeta, quando in realtà non è da escludere che altri elementi possano sostituirla in ambienti diversi da quello terrestre. Un esempio è fornito da Titano, uno dei satelliti di Saturno, i cui mari composti principalmente da metano potrebbero favorire lo sviluppo della vita (*Benner et al., 2004; Bains, 2004*). Se però spostiamo l'attenzione lontano dal Sistema Solare, la scoperta di mondi abitabili è attualmente limitata alla ricerca di acqua liquida e dunque bisognerà aspettare nuove tecnologie e conoscenze per estendere l'esplorazione a superfici in grado di ospitare altre sostanze. Un'ulteriore restrizione è rappresentata dal fatto che il pianeta deve essere in grado di mantenere acqua in modo stabile nel tempo (*Ramirez et al., 2018*). Questo perché qualsiasi tipo di essere vivente che riesca a svilupparsi in ambienti dove solo periodicamente si formano delle riserve superficiali di acqua, come su Marte, non sarebbe in grado di modificare in modo apprezzabile le caratteristiche dell'atmosfera e dunque gli strumenti non potrebbero rilevarlo. Infine, un'ultima restrizione è imposta dal fatto che la definizione di zona abitabile è focalizzata sui pianeti terrestri (rocciosi). Essi infatti sono i principali candidati per la ricerca di forme vitali più o meno complesse in quanto presentano una superficie liquida oppure solida dove la vita può svilupparsi. Al contrario, i giganti gassosi presentano atmosfere caratterizzate da moti caotici e complesse reazioni chimiche che attualmente sembrano rappresentare un ostacolo per l'evoluzione (*Sagan et al., 1976*).

1.2.1 Flusso stellare efficace

Un'importante grandezza che viene utilizzata nei calcoli per stabilire i limiti interni ed esterni della zona abitabile di una stella è il flusso stellare efficace S_{EFF} , definito come il flusso normalizzato necessario a mantenere una certa temperatura superficiale (*Kasting et al., 1993*). Esso può essere anche visto come un'espressione di equilibrio energetico che mette in relazione la radiazione stellare incidente F_S con la radiazione infrarossa uscente F_{IR} , entrambi calcolati in corrispondenza degli strati superiori dell'atmosfera. In formule:

$$S_{\text{EFF}} = \frac{F_{\text{IR}}}{F_S} = \frac{S}{S_0}$$

Ove S è il flusso ricevuto dal pianeta e S_0 è il flusso normalizzato del Sole ricevuto dalla Terra ($\sim 1360 \text{ W/m}^2$). Per i calcoli relativi alla zona abitabile è sufficiente conoscere quanta energia stellare in più (o in meno) riceve il pianeta rispetto alla Terra, tenendo anche in considerazione le variazioni nell'albedo planetaria A_p :

$$\frac{S_0}{4}(1 - A_p) = \sigma T^4 = F_S$$

Tramite questa espressione si può ricavare F_S che permette di calcolare S_{EFF} , a sua volta legato alla distanza orbitale d da:

$$d = \sqrt{\frac{L/L_{\text{Sun}}}{S_{\text{EFF}}}}$$

Ove L/L_{Sun} è la luminosità stellare in unità solari. Queste tre relazioni possono essere sfruttate in successione per ricavare la collocazione dei confini della zona abitabile, sia interni che esterni.

1.2.2 Limiti della zona abitabile

Esistono due modi per definire i confini (sia interni che esterni) della zona abitabile intorno ad una stella, il primo è basato su modelli teorici (limiti conservativi) mentre il secondo deriva da osservazioni empiriche del Sistema Solare (limiti empirici).

Limiti conservativi

Per il limite interno della zona abitabile interna ci sono due tipi di confini cosiddetti conservativi. Il più pessimistico fra i due, il “water-loss limit” anche detto “moist greenhouse limit”, si colloca nel punto in cui l’intera riserva planetaria di acqua viene persa per diffusione in un tempo paragonabile alla vita del pianeta (*Kasting et al., 1988*). Inizialmente per la Terra questo limite era stato posto a 0.95 UA (*Kasting et al., 1993*), più recentemente è stato spostato a 0.99 UA (*Kopparapu et al., 2013*). Il più ottimistico, invece, detto “runaway greenhouse limit”, è posto dove il flusso stellare assorbito supera la radiazione totale uscente dagli strati più esterni dell’atmosfera. Ciò comporta l’instaurarsi di un rapido e incontrollabile effetto serra che in un intervallo temporale compreso tra migliaia e milioni di anni è capace di far evaporare tutti gli oceani sulla superficie del pianeta. Modelli recenti (*Leconte et al., 2013*) per il Sistema Solare stabiliscono questo confine a 0.95 UA. In passato la definizione di questa seconda tipologia di limite interno era diversa. Si pensava infatti che per un pianeta con una riserva d’acqua superficiale come la Terra l’effetto serra incontrollato si verificasse ad una temperatura pari a 647 K, ovvero in corrispondenza del punto critico dell’acqua (*Kasting et al., 1988*). In realtà calcoli recenti hanno mostrato che quando il flusso solare assorbito eccede il flusso termico infrarosso, questo fenomeno viene innescato a temperature decisamente inferiori a 647 K (*Leconte et al., 2013; Kopparapu et al., 2017*). In generale, per un pianeta caratterizzato da una riserva di acqua più ristretta rispetto alla Terra, l’effetto serra incontrollato può instaurarsi a temperature ancora più basse (*Kasting et al., 1993*) dato che per far evaporare la superficie è necessaria una minor quantità di energia solare. Per quanto riguarda invece il limite esterno della zona abitabile il “maximum greenhouse limit” viene posto dove il riscaldamento della superficie planetaria dovuto all’effetto serra causato dal diossido di carbonio CO_2 , uno dei più importanti gas serra insieme alla molecola di H_2O , è massimo. Per la Terra questo confine si trova a ~ 1.67 UA (*Kasting et al., 1993*).

Limiti empirici

I confini della zona abitabile possono essere anche definiti sfruttando le osservazioni empiriche del nostro Sistema Solare. Ad esempio, il limite interno può essere stabilito sfruttando il flusso solare ricevuto da Venere circa un miliardo di anni fa, ovvero il momento da cui si può escludere che sulla sua superficie vi siano state riserve stabili di acqua (*Kasting et al., 1993*). Basandosi su modelli di evoluzione solare (*Gough, 1981*) attualmente il “Recent Venus limit” è posto

a ~ 0.75 UA (*Ramirez, 2018*). Analogamente si può applicare un ragionamento simile per definire empiricamente il confine esterno della zona abitabile. L’“early Mars limit”, situato a ~ 1.77 UA, è basato sulle evidenze geologiche che Marte circa 3.8 miliardi di anni fa quando la luminosità solare era circa il 75% di quella attuale, avrebbe verosimilmente potuto ospitare vita sulla sua superficie (*Ramirez, 2018*).

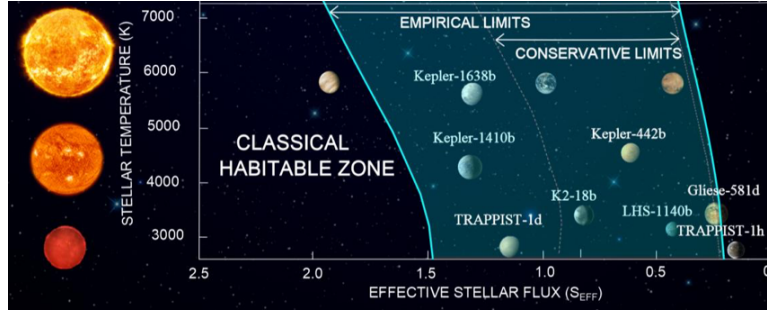


Figura 1.1: Confronto tra limiti conservativi ed empirici per la zona abitabile classica (*Ramirez, 2018*)

In *Figura 1.1* sono rappresentate le due tipologie di confini della zona abitabile in un grafico in cui la temperatura stellare effettiva ($T_{\text{EFF}}=2600-7200$ K) è in funzione del flusso stellare effettivo S_{EFF} . Da sinistra a destra, le curve blu continue rappresentano rispettivamente il “recent Venus limit” e l’“early Mars limit” mentre quelle tratteggiate si riferiscono al più recente “runaway greenhouse limit” e al “maximum greenhouse limit”. Si può facilmente notare che, mentre le differenze tra i due tipi di confini (empirico e conservativo) sono minime per il limite esterno della zona abitabile, lo stesso non vale per quello interno. Ciò è dovuto al fatto che il “recent Venus limit” è caratterizzato da incertezze molto più grandi dell’“early Mars limit”, in quanto quest’ultimo è basato su evidenze geologiche mentre il primo è stato sostanzialmente dedotto in assenza di dati. Infine nella figura sono rappresentati la Terra, Marte, Venere e alcuni pianeti extrasolari confermati (*Ramirez, 2018*).

1.3 Attività stellare

L’attività di una stella, ovvero l’insieme dei fenomeni causati principalmente dal suo campo magnetico, è profondamente legata all’età e alla rotazione che la caratterizzano. Osservazioni nell’ultravioletto (*Zahnle & Walker, 1982*) e nei raggi X (*Pallavicini et al., 1981; Walter, 1981*) dallo spazio hanno permesso di ottenere tre importanti relazioni di proporzionalità che descrivono questa connessione (*Airapetian et al., 2019*):

- $L_X \propto P_{\text{rot}}^{-2.7}$: l’attività stellare, descritta ad esempio dalla luminosità coronale nei raggi X, diminuisce all’aumentare del periodo di rotazione. Questo perché la rotazione differenziale e la convezione della stella sono responsabili della generazione del campo magnetico da cui dipende il flusso nei raggi X;

- $L_X \propto t^{-1.5}$: l'attività stellare diminuisce con l'età della stella a causa del rallentamento della rotazione;
- $P_{\text{rot}} \propto t^{0.6}$: il periodo di rotazione aumenta con l'età della stella in accordo con le due precedenti relazioni.

Il principale prodotto dell'attività stellare è il flusso energetico che si manifesta sotto forma di emissione di massa oppure elettromagnetica. L'emissione di massa si verifica nella forma di venti stellari e espulsione di massa coronale, fenomeno identificato sinteticamente con l'acronimo CME (coronal mass ejection). L'emissione elettromagnetica, invece, comprende fenomeni continui come la produzione di raggi X e radiazione nell'estremo UV (flusso XUV), oppure transienti come flares o superflares che avvengono in un intervallo temporale limitato e non sempre con la stessa frequenza.

1.3.1 Venti stellari

I venti stellari rappresentano un'estensione della corona stellare nello spazio interplanetario e costituiscono una proprietà fondamentale delle stelle nane di classe spettrale F oppure M. Il metodo maggiormente utilizzato per rilevarli si basa sull'osservazione della riga di assorbimento Ly- α dell'idrogeno neutro generata dall'interazione tra il vento e il mezzo interstellare circostante. Tuttavia, poiché i venti stellari sono deboli, solo quelli originati dal Sole sono stati attualmente individuati. La loro osservazione ha permesso di dividerli in due categorie: i venti veloci, ($v > 800$ km/s a una distanza di 1 UA) caratterizzati da una bassa densità di particelle ($1-5$ cm $^{-3}$), e quelli lenti ($\sim 350 - 400$ km/s) dalle tre alle dieci volte più densi. Le due componenti del vento solare formano correnti alterne di particelle che si muovono verso l'esterno nello spazio interplanetario costituendo un efficiente mezzo di propagazione per le perturbazioni della corona solare come l'espulsione di massa coronale (CME) e l'emissione di particelle energetiche solari (SEP) ad essa associata (*Airapetian et al., 2019*).

1.3.2 Espulsione di massa coronale (CME)

Le espulsioni di massa coronale (CME) sono eventi caratterizzati da un significativo rilascio di plasma e campo magnetico dalla corona stellare. Le tecniche osservative più utilizzate per rilevare tracce dei CMEs sono tre: l'osservazione di segnali radio di tipo II, lo spostamento Doppler nelle righe dell'ottico/ultravioletto e l'assorbimento continuo nel dominio spettrale dei raggi X. Tutte queste evidenze osservative si riscontrano per le espulsioni di massa coronale del Sole che hanno origine dalle regioni attive della sua superficie, ovvero le macchie solari. Poiché l'attività solare segue un ciclo undecennale, la frequenza con cui vengono prodotti i CMEs è variabile: si passa da tre eventi al giorno in prossimità dei massimi a un evento ogni cinque giorni avvicinandosi al minimo (*Chen, 2011; Karpen et al., 2012; Webb & Howard, 2012*). La velocità dei CMEs solari non supera i 4000 km/s. Ciò è dovuto ai limiti imposti dalle dimensioni delle regioni attive sulla superficie del Sole, dal loro contenuto magnetico e dall'efficienza con cui l'energia libera può essere convertita in energia cinetica dei CMEs (*Airapetian et al., 2019*). Le espulsioni di massa coronale più veloci causano l'accelerazione di elettroni, protoni e ioni pesanti che comunemente vengono chiamati particelle energetiche solari (spesso indicate con l'acronimo

SEP che sta per "solar energetic particle"). In genere i CMEs sono legati ai flares, specialmente quando questi ultimi sono intensi mentre le espulsioni coronali risultano molto energetiche.

1.3.3 Flusso XUV

Il flusso nei raggi X e nell'estremo ultravioletto, emesso principalmente dalle regioni più calde della corona stellare, ha un impatto notevole sull'atmosfera dei pianeti potenzialmente abitabili in quanto regola diversi fenomeni, come il riscaldamento atmosferico oppure la perdita di massa, che possono avere serie conseguenze per la sua stabilità a lungo termine. L'emissione stellare nei raggi X risulta ben caratterizzabile attraverso missioni come CHANDRA, XMM-Newton, Swift, NICER oppure MAXI. Al contrario, il flusso nell'estremo UV è difficilmente rilevabile a causa dell'assorbimento del mezzo interstellare che opera a lunghezze d'onda > 40 nm. Nonostante questo, comunque, l'emissione XUV può essere ricostruita utilizzando un approccio empirico oppure teorico. Il primo ha già permesso di ottenere valide informazioni sul livello della radiazione ionizzante proveniente dalle stelle nane di classe F, K, G e M (*Cuntz & Guinan, 2016; France et al., 2016; 2018; Loyd et al., 2016; Youngblood et al., 2016; 2017*). Il secondo invece utilizza le osservazioni stellari nel lontano UV effettuate dall'Hubble Space Telescope per ricostruire il flusso EUV proveniente da stelle fredde. Utilizzando questo approccio, è stato possibile comprendere che generalmente le stelle che ospitano pianeti nella loro orbita sono caratterizzate da un'attività nell'UV che è 5-10 volte meno intensa rispetto a quelle che non hanno pianeti (*Airapetian et al., 2019*).

1.3.4 Flares e superflares

I flares solari (detti anche brillamenti) sono violente eruzioni di materia generate dalla rapida perdita di energia immagazzinata in prossimità delle macchie solari probabilmente a causa della riconnessione magnetica tra le linee di campo. Questi fenomeni, che possono durare alcune ore, sono in grado di rilasciare un'energia pari a circa 10^{22} - 10^{25} J e spesso sono accompagnati da espulsioni di massa coronale, come già anticipato in precedenza (*Perryman, 2018*). Brillamenti analoghi sono stati osservati in molte altre stelle, soprattutto nelle nane di classe spettrale M (*Segura et al., 2010*) oppure in diversi target di Kepler (*Balona, 2012*) che al 2016 ha registrato 851168 possibili flares provenienti da 4041 stelle, circa il 2% del database della missione (*Davenport, 2016*). Recenti osservazioni di stelle F, G, K e M nella banda ottica, ultravioletta e dei raggi X hanno inoltre registrato i cosiddetti superflares, ovvero brillamenti della durata compresa tra qualche ora e diversi giorni che liberano circa 10^{26} - 10^{31} J di energia (*Perryman, 2018*). Anche con i risultati forniti da Kepler, l'origine di questi fenomeni estremi rimane tuttora incerta così come la natura dei flares solari. Per semplificarne l'interpretazione è utile cercare di trovare un collegamento tra il numero dei brillamenti in un certo intervallo di tempo e la loro energia. Questo è stato reso possibile dai dati ottenuti attraverso alcune misurazioni nella banda radio, ottica e dei raggi X effettuate sul Sole dalla sonda Solar Maximum Mission (SMM) che hanno permesso di ottenere la relazione:

$$\frac{dN}{dE} = k_0 E^{-\alpha}$$

ove dN è il numero di brillamenti in un certo intervallo di tempo, E è l'energia e l'indice spettrale α varia tra -2 e -1.13 (*Airapetian et al., 2019*) in base al dominio di lunghezze d'onda a cui corrisponde il flare.

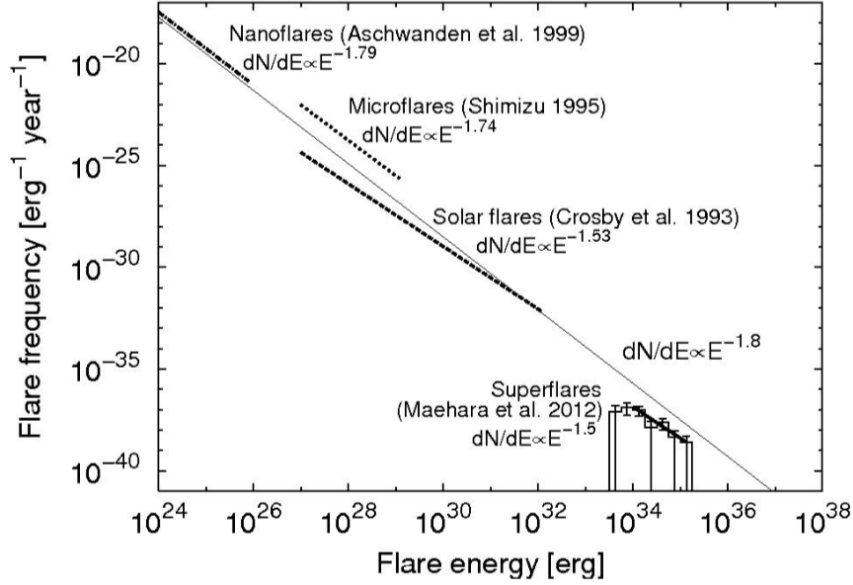


Figura 1.2: Distribuzione a legge di potenza del numero di flares stellari e solari in funzione della loro energia (*Shibata et al., 2013*)

In *Figura 1.2* è rappresentata la distribuzione del numero di eventi per diversi tipi di flares, da quelli solari meno energetici ai superflares stellari più potenti. L'istogramma in basso a destra mostra la distribuzione di superflares per stelle simili al Sole (stelle di sequenza principale e classe spettrale G con $P_{\text{rot}} > 10$ giorni e $5800 < T_{\text{eff}} < 6300$ K), che è in buon accordo con la legge di potenza per il numero di eventi di questo tipo rappresentata dalla linea continua più spessa (*Maehara et al., 2012*). Passando alle linee tratteggiate, esse identificano le distribuzioni di flares solari osservati nei raggi X più energetici (*Crosby et al., 1993*) e meno energetici (*Shimizu, 1995*) e nella banda dell'estremo ultravioletto (*Aschwanden et al., 2000*) che hanno approssimativamente lo stesso coefficiente della legge di potenza con cui viene rappresentata la frequenza di superflares per stelle simili al Sole cioè $\alpha = -1.8$ (linea continua sottile) (*Airapetian et al., 2019*). I dati suggeriscono che il numero di superflares entro un certo intervallo di tempo dipenda da due ulteriori fattori: il periodo di rotazione della stella e la sua temperatura effettiva. In particolare le stelle caratterizzate da una rotazione molto veloce e una temperatura piuttosto bassa generalmente presentano una maggior frequenza di superflares rispetto a quelle più lente e più calde (*Airapetian et al., 2019*).

Figura 1.3 mostra in un'impressione artistica, come tutti questi fenomeni possano incidere sui pianeti orbitanti intorno alla stella creando condizioni favorevoli oppure svantaggiose per l'origine, lo sviluppo e il sostegno della vita

al suo interno. Con le attuali tecniche osservative a nostra disposizione, la ricerca di mondi abitabili fuori dal Sistema Solare è particolarmente concentrata sulle stelle nane M di sequenza principale (*Scalo et al., 2007*). Questo perché il loro grande numero (compongono circa il 75% delle stelle della nostra galassia) insieme al piccolo raggio ($0.08 R_{\text{Sun}} < R < 0.5 R_{\text{Sun}}$) e alla massa contenuta ($0.08 M_{\text{Sun}} < M < 0.5 M_{\text{Sun}}$) che le caratterizza aumenta la probabilità di rilevare pianeti terrestri nella loro orbita attraverso la tecnica dei transiti, delle velocità radiali e delle microlenti gravitazionali (*Tarter et al., 2007; Segura et al., 2010*). Allo stesso tempo però, a causa dell'elevata opacità degli strati interni che rende la stella completamente convettiva, le nane rosse presentano un'intensa attività stellare in grado di produrre particelle cariche ad alta energia e radiazione XUV che possono essere dannose per la vita. L'intensità di questi fenomeni non risulta nemmeno attenuata dalla distanza stella-pianeta, in quanto, a causa della loro scarsa luminosità ($0.0001 L_{\text{Sun}} < L < 0.1 L_{\text{Sun}}$), la zona abitabile delle nane rosse è estremamente ristretta (compresa tra 0.05 UA e 0.16 UA; *Airapetian et al., 2017a*). Al fine di ricercare mondi potenzialmente abitabili fuori dal Sistema Solare, risulta dunque evidente la necessità di comprendere al meglio l'interazione stella-pianeta e in particolare come l'attività stellare possa condizionare lo sviluppo della vita in ambienti diversi da quello terrestre.

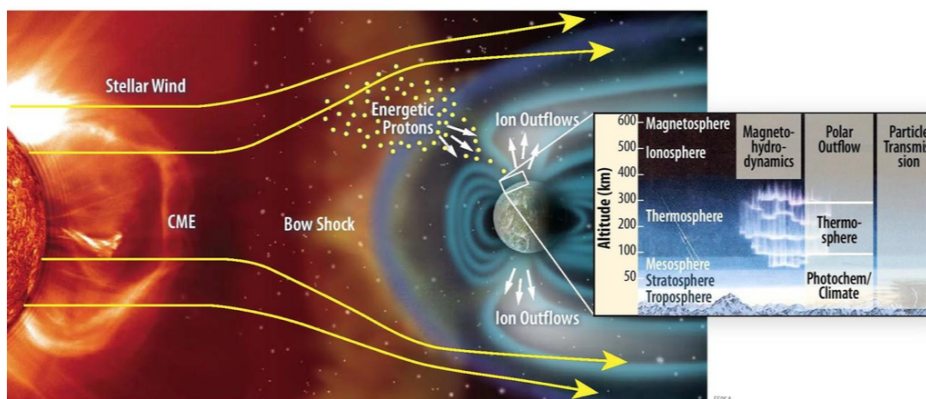


Figura 1.3: Rappresentazione schematica della complessa interazione tra stella e pianeta (*Airapetian et al., 2019*)

Capitolo 2

Effetto del flusso XUV

Le stelle giovani di classe spettrale G-K-M producono un flusso XUV molto più intenso di quello solare al tempo attuale. In particolare, le stelle G-K in rapida rotazione con un'età di circa 100 Myr hanno una luminosità nei raggi X circa 1000 volte superiore a quella del Sole (*Tu et al., 2006*) mentre le nane rosse superano la luminosità solare nel dominio X di circa due ordini di grandezza (*Airapetian et al., 2017a*). Al contrario di quanto si potrebbe pensare, sono i pianeti orbitanti nella zona abitabile di quest'ultimo tipo di stelle che risentono maggiormente degli effetti del flusso XUV, in quanto la zona abitabile circumstellare delle stelle K e G è dalle 6 alle 20 volte più grande di quella che caratterizza le nane rosse e dunque i pianeti collocati in questa regione sono esposti a un flusso XUV minore (*Airapetian et al., 2017a*). I raggi X e la radiazione ultravioletta interagiscono con l'atmosfera dei pianeti orbitanti nella loro zona abitabile a quote molto elevate causando il riscaldamento di queste regioni. L'erosione atmosferica, potenzialmente causata dall'aumento delle temperature, può verificarsi attraverso meccanismi di fuga termici (fuga di Jeans) oppure non termici che possono avere serie conseguenze sull'abitabilità di un pianeta.

2.1 Fuga termica

L'esosfera è la parte più esterna dell'atmosfera di un pianeta che comunica direttamente con lo spazio interplanetario. Poiché in questa regione la densità è generalmente molto bassa e conseguentemente il numero di collisioni è ridotto, le molecole più energetiche che costituiscono la coda ad alte velocità della distribuzione di Maxwell-Boltzmann hanno la possibilità di superare la velocità di fuga del pianeta sfuggendo alla sua attrazione gravitazionale con un ritmo determinato dal parametro di Jeans λ_J :

$$\lambda_J = \frac{v_{esc}^2}{v_p^2}$$

ove v_{esc} è la velocità di fuga che caratterizza la termopausa, il confine inferiore dell'esosfera, e v_p è la velocità più probabile della distribuzione. La fuga termica diventa importante per $\lambda_J \leq 10$ (*Perryman, 2018*). I pianeti gassosi del Sistema Solare hanno valori molto elevati del parametro di Jeans (480, 420, 50 e 120 rispettivamente per Giove, Saturno, Urano e Nettuno; *Strobel, 2002; Hunten,*

2002) e dunque non sono interessati al fenomeno di erosione atmosferica dovuto a meccanismi termici. I pianeti terrestri, invece, sono caratterizzati dalla fuga degli atomi più leggeri (Irwin, 2006), in primis l'idrogeno che viene quasi del tutto perso nelle atmosfere planetarie intorno a stelle K-M con il conseguente accumulo di molecole più pesanti come ossigeno oppure azoto (Airapetian et al., 2017a). Nel caso estremo in cui $\lambda_J < 1.5$, infine, si verifica una fuga incontrollata di tutte le molecole gassose che non dipende più dalla temperatura dell'esosfera (Airapetian et al., 2019).

2.2 Fuga non termica

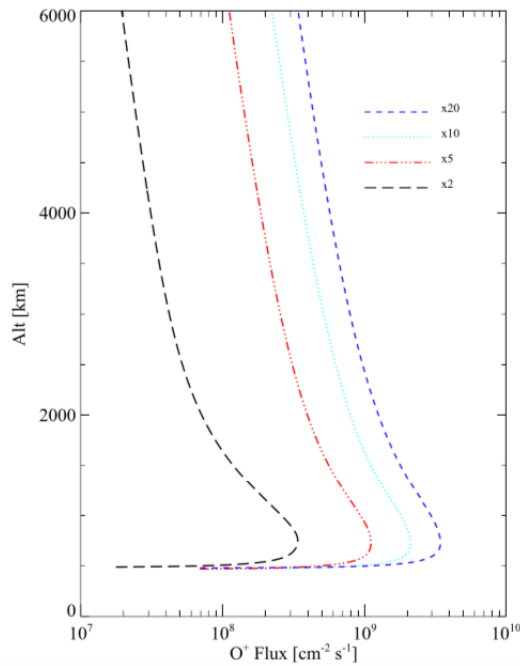


Figura 2.1: Tasso di fuga dello ione O^+ per l'atmosfera di un pianeta terrestre sottoposta ad un flusso XUV 2, 5, 10 e 20 volte superiore a quello solare medio (Airapetian et al., 2017)

Come abbiamo appena visto, le molecole più leggere come l'idrogeno tendono ad abbandonare l'atmosfera attraverso meccanismi di fuga termica. Ioni e molecole più pesanti come l'ossigeno, sono invece in grado di fuggire dall'atmosfera solo in presenza di un flusso XUV molto intenso che alimenta meccanismi non termici di erosione atmosferica. Luger & Barnes (2015) hanno infatti dimostrato che esiste una soglia minima di flusso XUV affinché si verifichi la perdita di ossigeno dall'atmosfera che, ad esempio, per la gravità e la temperatura del nostro pianeta corrisponde a $180 \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, ovvero circa 39 volte il flusso XUV terrestre attuale ($4.64 \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Si stima che il flusso XUV che investe la Terra sia sceso sotto questo valore circa 0.5 miliardi di anni dopo la formazione permettendo così al nostro pianeta di trattenere l'ossigeno, la seconda molecola più abbondante nell'atmosfera terrestre dopo l'azoto. Uno dei

principali meccanismi di fuga non termica è la fotoionizzazione. (*Airapetian et al., 2019*). Questo fenomeno avviene a quote più alte di quelle che caratterizzano l'esosfera dove il flusso XUV incidente causa la ionizzazione di atomi e molecole accompagnata dalla produzione di fotoelettroni che, essendo meno soggetti all'attrazione gravitazionale del pianeta rispetto agli ioni, tendono a fuggire più facilmente dall'atmosfera (*Airapetian et al., 2017a; 2019*). Gli ioni e gli elettroni si separano progressivamente sempre di più dando origine a un campo elettrico con polarizzazione radiale che attenua la fuga dei fotoelettroni e contemporaneamente alimenta quella degli ioni più energetici eliminando gran parte della barriera imposta dal potenziale gravitazionale del pianeta (*Airapetian et al., 2017a*). *Airapetian et al. (2017a)* hanno recentemente dimostrato che nelle atmosfere di pianeti terrestri orbitanti intorno a stelle capaci di produrre flussi XUV molto intensi come le nane rosse, la fuga non termica dello ione ossigeno O^+ può essere importante tanto quanto la perdita di idrogeno. Questo è evidente in *Figura 2.1* dove in un grafico flusso di O^+ -altitudine sono riportati i risultati dei modelli realizzati per flussi XUV 2 (curva tratteggiata nera), 5 (curva tratto-punto), 10 (curva a puntini) e 20 (curva tratteggiata blu) volte più grandi di quello solare medio. Lo stesso grafico potrebbe rappresentare correttamente anche il tasso di fuga dello ione N^+ dato che la sua massa differisce solo per il 12 % da quella di O^+ (*Airapetian et al., 2019*).

2.3 Impatto del flusso UV sulle tracce biologiche

Con il termine traccia biologica s'intende l'insieme di tutte le sostanze e i fenomeni che possono provare l'esistenza di vita presente oppure passata in un pianeta. In particolare, una traccia biologica ideale possiede tre caratteristiche fondamentali: in primis deve essere identificabile anche considerando i limiti delle tecniche osservative a nostra disposizione, poi deve essere contraddistinta da proprietà fisiche, chimiche e spettrali che permettano di distinguerla facilmente da sostanze non biologiche molto simili (falsi positivi), infine deve essere individuabile dai dati raccolti senza contaminazione di questi oppure errori numerici (*Airapetian et al., 2019*). Le molecole che sembrano soddisfare al meglio queste proprietà sono l'ossigeno O_2 e l'ozono O_3 che viene prodotto attraverso reazioni che coinvolgono il primo (*Segura et al., 2003*). Altre potenziali tracce biologiche sono l'ossido nitroso N_2O e il clorometano CH_3Cl , due molecole che secondo quanto stabilito da *Segura et al. (2005)* potrebbero essere molto più presenti nei pianeti della zona abitabile intorno alle nane rosse piuttosto che sulla Terra; il metano CH_4 che potrebbe derivare da croste e mantelli più sottili di quelli terrestri (*Des Marais et al., 2002*); l'ammoniaca NH_3 che, come suggerito da *Seager et al. (2013)* potrebbe essere fondamentale in un pianeta con una ricca presenza di idrogeno. La radiazione ultravioletta proveniente dalla stella ha un ruolo decisivo sulla permanenza di queste molecole nell'atmosfera di un pianeta. In particolare, se ci concentriamo sull'ozono, esso può essere prodotto dalla radiazione a $\lambda < 242$ nm e contemporaneamente distrutto dal flusso a lunghezze d'onda $242 \text{ nm} < \lambda < 320$ nm (*Airapetian et al., 2019*). La presenza dell'ozono nell'atmosfera è fondamentale per tutte le altre tracce biologiche, in quanto funge da protezione non permettendo alla radiazione UV di raggiungere gli strati atmosferici più bassi. Penetrando in profondità, il flusso UV

riesce a interagire con le altre molecole fondamentali per lo sviluppo della vita, come N_2O , CH_4 oppure CH_3Cl che generalmente abbandonano l'atmosfera con conseguenze immediate per l'abitabilità di un pianeta (*Airapetian et al., 2019*).

Capitolo 3

Effetto dei venti stellari

I venti stellari, flussi di plasma originati nelle regioni più esterne della corona stellare (*Parker, 1958; Priest, 2014*), costituiscono uno dei principali fattori da cui dipende l'abitabilità di un pianeta. Essi infatti contribuiscono alla creazione della magnetosfera planetaria e contemporaneamente alimentano l'erosione atmosferica, due fenomeni che possono incidere notevolmente sulle condizioni capaci di influenzare lo sviluppo e la conservazione della vita.

3.1 Magnetosfera planetaria

Le osservazioni condotte all'interno del Sistema Solare hanno permesso di comprendere che, in seguito all'interazione tra il vento solare e l'ambiente planetario, si crea una regione di confine capace di deviare il flusso di plasma proteggendo così il pianeta dagli effetti nocivi che esso comporterebbe (*Gunell et al., 2018*). Al contrario di quanto si potrebbe pensare, evidenze osservative dimostrano che una simile regione, chiamata magnetosfera, si forma non solo intorno a pianeti dotati di un campo magnetico intrinseco apprezzabile, ma anche in prossimità di pianeti caratterizzati da un campo magnetico la cui intensità è trascurabile, dove viene indotta dalla presenza di un'atmosfera oppure da altri fattori, come la magnetizzazione della crosta (*Russell, 1993*). Nella prima categoria, in particolare, rientra ad esempio la Terra, con un momento magnetico pari a $7.77 \cdot 10^{22}$ A m² mentre nella seconda sono inclusi Marte e Venere, con momenti magnetici più bassi rispettivamente di $2 \cdot 10^{18}$ A m² e $7 \cdot 10^{18}$ A m² (*Acuña et al., 2001; Olson & Amit, 2006; Luhmann et al., 2015*). In *Figura 3.1* è rappresentata la diversa configurazione delle due tipologie di magnetosfera con i relativi limiti esterni, rispettivamente indicati con il nome di magnetopausa (MP) e confine della magnetosfera indotta (IMB="Induced Magnetosphere Boundary", *Lundin et al., 2004*).

Le dimensioni della magnetosfera sono ricavabili stimando l'estensione della magnetopausa (*Lingam & Loeb, 2019*). In particolare, supponendo che il pianeta possieda un campo magnetico di dipolo, l'intensità del campo magnetico in corrispondenza del confine esterno è data da:

$$B_{\text{mp}} = B_{\text{p}} \left(\frac{R_{\text{p}}}{R_{\text{mp}}} \right)^3$$

ove B_p è il campo magnetico planetario, R_p è il raggio del pianeta e R_{mp} corrisponde all'estensione della magnetopausa. Per calcolare R_{mp} si eguaglia la pressione del vento solare, dominata dalla componente cinetica dell'energia ($P_{sw} \approx \rho_{sw} v_{sw}^2$ ove ρ_{sw} e v_{sw} sono rispettivamente la densità di massa e la velocità del vento solare), alla pressione generata dal campo magnetico planetario:

$$P_{sw} = \frac{B_{mp}^2}{2\mu_0}$$

ove μ_0 è la permeabilità del vuoto. Ricavando B_{mp} da questa formula e sostituendolo nella prima, si ottiene:

$$R_{mp} = R_p \left(\frac{B_p^2}{2\mu_0 P_{sw}} \right)^{1/6}$$

Il valore caratteristico per la Terra è $R_{mp} \approx 10R_{Earth}$ (Kivelson & Russell, 1995) anche se è sottoposto a fluttuazioni nel corso del tempo causati da variazioni nell'orbita planetaria e nell'attività solare che influenzano P_{sw} . Lo stesso avviene anche per i pianeti extrasolari come Proxima b (Capitolo 5) in prossimità del quale modelli teorici hanno calcolato che P_{sw} possa variare di 1-3 ordini di grandezza, fenomeno che si traduce in una fluttuazione di R_{mp} di un fattore pari a 2-5 volte il valore assunto mediamente, ovvero 2-3 R_{Earth} (Garraffo et al., 2016), che è inferiore a quello terrestre. Proxima b conferma la tendenza dei pianeti in orbita intorno a stelle meno massicce ad avere magnetosfere ridotte, causata dall'aumento di P_{sw} e dalla possibile contemporanea diminuzione di B_p (Lingam & Loeb, 2019). La pressione esercitata dal vento stellare è più elevata poiché la zona abitabile di stelle meno massicce, come le nane rosse, è generalmente ridotta. Questo si traduce in un valore più basso del semiasse maggiore dell'orbita planetaria a_p che conseguentemente porta ad un aumento della densità di massa ρ_{sw} , in quanto $\rho_{sw} \propto \dot{M}/a_p^2$ ove \dot{M} è il tasso con cui la stella perde massa. Un valore più elevato di ρ_{sw} comporta, come anticipato, un aumento di P_{sw} ($P_{sw} \propto \rho_{sw}$) che a sua volta genera una compressione della magnetosfera (Lingam & Loeb, 2019). Ad esempio, se consideriamo ancora il caso di Proxima b, sapendo che il tasso con cui Proxima Centauri perde massa è simile a quello solare (Garraffo et al., 2016) e che $a_p \sim 0.0485\text{UA}$, si ottiene un valore di ρ_{sw} circa 400 volte maggiore di quello che caratterizza il vento solare in prossimità della Terra, in accordo con quanto previsto da simulazioni numeriche più dettagliate (Garraffo et al., 2016; Dong et al., 2017). La contemporanea riduzione dell'intensità del campo magnetico planetario è dovuta al fatto che si prevede che la maggior parte dei pianeti nella zona abitabile di stelle poco massicce possiedano una rotazione sincrona (tempi di rotazione uguali a quelli di rivoluzione) a causa degli effetti mareali generati dalla stella che li ospita (Dole, 1964; Bolmont et al., 2011; Barnes, 2017). In questo caso, il tasso di rotazione planetaria Ω_p viene ridotto notevolmente con conseguenze anche sul campo magnetico poiché, secondo modelli recenti, $B_p \propto \Omega_p^\alpha$ con $\alpha \approx 0.5 - 1$ (Grieffmeier et al., 2005; López-Morales et al., 2011). Quest'ultima relazione è tuttavia piuttosto controversa, in quanto alcuni modelli, come quello di Christensen (2010), sembrano smentire la dipendenza di B_p dal tasso di rotazione planetaria. Se quest'ipotesi fosse vera, si registrerebbe comunque una riduzione delle dimensioni della magnetosfera causata dall'aumento della pressione del vento stellare, che avviene indipendente da quello che succede al

campo magnetico planetario. L'estensione ridotta della magnetosfera comporta una minor protezione dal flusso di plasma trasportato dal vento stellare e dai raggi cosmici (Lingam & Loeb, 2019) che causano rispettivamente erosione atmosferica e radiolisi (decomposizione attraverso radiazione) di biomolecole complesse (Dartnell, 2011; Horvath & Galante, 2012), due fenomeni in grado di influenzare l'abitabilità di un pianeta. Le dimensioni ridotte della magnetosfera possono inoltre causare variazioni nell'abbondanza di elementi chimici che costituiscono tracce biologiche (Grenfell, 2017). Un esempio è fornito dagli ossidi di azoto la cui produzione è alimentata dall'interazione dei raggi cosmici con atmosfere simili a quella terrestre, composte principalmente da N_2 e O_2 . Come abbiamo visto nel capitolo precedente, gli ossidi di azoto, attraverso reazioni catalitiche, alimentano la rimozione dell'ozono, una delle più importanti tracce biologiche, causando seri problemi per lo sviluppo e la conservazione della vita su un pianeta (Lingam & Loeb, 2019).

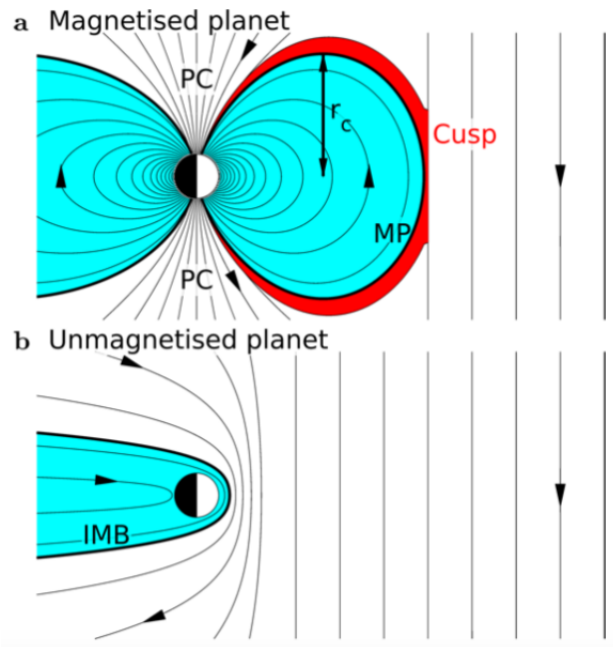


Figura 3.1: Configurazione schematica delle due tipologie di magnetosfera. Il pannello (a) rappresenta la magnetosfera per pianeti con campo magnetico apprezzabile il cui confine esterno è chiamato magnetopausa (MP). Il pannello (b) contiene una rappresentazione della magnetosfera indotta in pianeti con campo magnetico trascurabile il cui confine esterno è indicato dall'acronimo IMB (Gunell et al., 2018)

3.2 Erosione atmosferica

Con il termine erosione atmosferica si intendono tutti i meccanismi, principalmente generati dal flusso XUV della stella (capitolo 2) oppure dal vento stellare, che permettono alle particelle, sia cariche che neutre, di sfuggire all'attrazione gravitazionale del pianeta (Tian, 2015). Zendejas et al. (2010), basandosi sulla conservazione del flusso di massa, hanno sviluppato un modello in grado di

calcolare il tasso di erosione atmosferica per un pianeta caratterizzato da un campo magnetico trascurabile:

$$\dot{M} \approx \frac{1}{4} \left(\frac{R}{a} \right)^2 \dot{M}_\star$$

ove R è il raggio del pianeta e a è il semiasse maggiore della sua orbita. Il fattore $\frac{1}{4}$ è ricavato ipotizzando che tutti i protoni che costituiscono il vento stellare contribuiscano alla fuga atmosferica. Si tratta di un'interpretazione semplificata rispetto a quanto avviene realmente e dunque sarebbe più corretto sostituire $\frac{1}{4}$ con un fattore di efficienza ϵ che può assumere valori più bassi anche di un ordine di grandezza (Lingam & Loeb, 2019). \dot{M}_\star rappresenta il tasso con cui la stella perde massa. Per rendere più esplicita la dipendenza di \dot{M} dall'età della stella, si può utilizzare l'espressione $\dot{M}_\star \approx t_\star^{-2.33}$, ricavata da Wood et al. (2005) per la riga di assorbimento Ly- α , ottenendo così:

$$\frac{\dot{M}}{\dot{M}_0} \approx \frac{1}{4} \left(\frac{R}{a} \right)^2 \left(\frac{t_\star}{t_0} \right)^{-2.33}$$

ove \dot{M}_0 rappresenta l'attuale tasso di erosione atmosferica. Oltre che dal tempo, \dot{M}_\star dipende anche da altri parametri stellari come la massa, il raggio e il tasso di rotazione (Cranmer & Saar, 2011). Per questo motivo è difficile da stimare, eccetto per le stelle con $0.4 < M_\star/M_{\text{Sun}} < 1.1$ per le quali Johnstone et al. (2015) hanno stabilito che:

$$\frac{\dot{M}_\star}{\dot{M}_{\text{Sun}}} = \left(\frac{R_\star}{R_{\text{Sun}}} \right)^2 \left(\frac{\Omega_\star}{\Omega_{\text{Sun}}} \right)^{1.33} \left(\frac{M_\star}{M_{\text{Sun}}} \right)^{-3.36}$$

ove R_\star , M_\star e Ω_\star sono rispettivamente il raggio, la massa e il tasso di rotazione stellare. Passando a trattare i pianeti caratterizzati da un campo magnetico apprezzabile, Blackman & Tarduno (2018) hanno recentemente proposto un modello secondo cui il tasso di erosione atmosferica è dato da:

$$\dot{M}^{(\text{mag})} = \mathcal{Q} \dot{M}$$

ove \mathcal{Q} è espresso dalla formula:

$$\mathcal{Q} \sim 7.1 \left(\frac{\chi}{0.1} \right) \left(\frac{R_{\text{mp}}/R_{\text{p}}}{10} \right)^2$$

e χ è un parametro proporzionale al rapporto tra la velocità associata alla riconnessione delle linee del campo magnetico e la velocità del vento stellare in prossimità del pianeta. Ipotizzando che $\chi \sim 0.1$ quando $R_{\text{mp}} \geq 3.75 R_{\text{p}}$ si ottiene $\mathcal{Q} > 1$. In questo caso, il tasso di erosione atmosferica può superare quello previsto per i pianeti con campi magnetici trascurabili smentendo le aspettative secondo cui campi magnetici più intensi ostacolano più efficacemente la fuga delle particelle dall'atmosfera (Lingam & Loeb, 2019). Con questi dati è possibile stimare l'intervallo temporale entro il quale ci si aspetta che l'atmosfera di un pianeta sia completamente erosa:

$$t_{\text{p}} \sim \frac{M_{\text{atm}}}{\dot{M}}$$

ove M_{atm} , la massa dell'atmosfera, è data:

$$M_{atm} = \frac{4\pi R_p^2 P_s}{g}$$

e $g \approx g_{\text{Earth}} \left(\frac{R_p}{R_{\text{Earth}}}\right)^{1.7}$ è l'accelerazione di gravità della superficie planetaria. Ad esempio, assumendo $\dot{M} \sim \dot{M}_{\text{Sun}}$ e $P_s = 1$ atm (arbitrariamente), si trova che per Proxima b $t_p \sim 10^8$ anni mentre per il sistema planetario nella zona abitabile di TRAPPIST-1 t_p varia da un minimo di 10^8 anni per il pianeta più interno (TRAPPIST-1b) ad un massimo di 10^{10} anni per quello più esterno (TRAPPIST-1h) (*Lingam & Loeb, 2019*).

Capitolo 4

Effetto di flares e superflares

I flares stellari, spesso legati alle espulsioni di massa coronale (CMEs), sono responsabili della generazione di emissione XUV transiente e, più importante, dell'accelerazione di particelle ad alta energia generalmente indicate con l'acronimo SEPs ("stellar/solar energetic particles") (Yamashiki et al., 2019). Queste particelle, accelerate fino a quasi la velocità della luce, riescono a penetrare nell'atmosfera planetaria causando cambiamenti chimici e variazioni nella quantità di radiazione che raggiunge la superficie (Yamashiki et al., 2019), due fenomeni in grado di influenzare notevolmente l'abitabilità di un pianeta. Risulta dunque evidente che i flares costituiscono un fattore fondamentale per lo sviluppo e la conservazione della vita sui pianeti terrestri sia all'interno (Jakosky et al., 2015; Schrijver et al., 2015; Kay et al., 2016) che all'esterno del Sistema Solare (Atri, 2016). Per questo motivo, Yamashiki et al. (2019) hanno recentemente proposto una descrizione generale dei brillamenti stellari sfruttando la relazione tra la frequenza/intensità di questi fenomeni e la superficie delle macchie stellari ricavata a sua volta dai dati ottenuti da Kepler negli ultimi anni (Maehara et al., 2015; 2017; Notsu et al., 2013, 2015a, 2015b, 2019). Tale descrizione è basata sulle seguenti formule:

1. $\frac{dN}{dE} = C_0 \left[\frac{A_{\text{spot}}}{10^{-2.75} A_{\text{phot}}} \right]^{1.05} \left[\frac{E_{\text{flare}}}{10^{31} \text{erg}} \right]^{-1.99}$ ove N è la frequenza dei flares (year^{-1}), A_{spot} è la superficie totale delle macchie stellari, A_{phot} è l'area visibile della superficie stellare, E_{flare} è l'energia totale attesa del flare (erg) e C_0 è un'opportuna costante ($10^{29.4} \text{year}^{-1} \text{erg}^{-1}$);
2. $E_{\text{AMF}} = C_0^{-\frac{1}{1+a}} \left[\frac{A_0}{A} \right]^{\frac{b}{1+a}} E_0^{\frac{a}{1+a}}$ ove $a=-1.99$, $b=1.05$;
3. $E_{\text{SMF}} = 7 \cdot 10^{32} \left(\frac{f}{0.1} \right) \left(\frac{B_0}{10^3 \text{G}} \right)^2 \left[\frac{A_{\text{sp}} / (2\pi R_{\text{Sun}}^2)}{0.001} \right]^{3/2}$ ove f è la frazione di energia magnetica che può essere convertita in energia del flare, B_0 è il campo magnetico stellare e R_{Sun} è il raggio solare ($7 \cdot 10^{10} \text{cm}$)

La prima permette di calcolare la variazione del numero di flares in un anno con l'energia in funzione delle dimensioni delle macchie presenti sulla superficie della stella. La seconda consente di determinare il valore atteso dell'energia E_{AMF} ($\text{erg} \cdot \text{year}^{-1}$) prodotta dai flares in un anno ("Annual Maximum Flare"). Infine la terza fornisce l'energia massima prodotta dai flares E_{SMF} in funzione della superficie della macchia stellare da cui hanno origine ("Spot Maximum Flare").

Attraverso osservazioni delle curve di luce stellari è poi possibile valutare la porzione di superficie coperta da macchie. Questo valore può essere utilizzato per determinare l'energia massima prodotta dai flares ("Possible Maximum Flare"). Nel caso in cui non fosse possibile ottenere un'informazione precisa riguardo alla superficie totale della stella ricoperta da macchie si possono utilizzare i dati ricavati da altre stelle simili a quella studiata. Ad esempio, Yamashiki et al. (2019) hanno stabilito che il 20 % della superficie di Proxima Centauri è ricoperta da macchie. Questo valore è stato poi utilizzato per tutte le stelle del campione studiato.

4.1 Dose assorbita e dose efficace

I dati ottenuti sfruttando le formule presentate precedentemente permettono di realizzare modelli che calcolano la dose assorbita e quella efficace, due grandezze che caratterizzano la radiazione in grado di raggiungere la superficie planetaria e gli effetti che essa può avere sullo sviluppo e la conservazione della vita. In particolare, la dose assorbita è definita come la quantità di energia assorbita da un mezzo esposto a radiazioni per unità di massa. Si misura in gray (Gy) che equivale a 1 J di energia assorbita da 1 kg di massa. La dose efficace, invece, è definita come la somma ponderata delle dosi equivalenti H_T la cui unità di misura è il sievert (Sv):

$$E = \sum_T w_T H_T$$

ove i pesi w_T tengono conto della diversa radiosensibilità degli organismi con cui la radiazione interagisce. La sostanziale differenza tra le due grandezze appena definite sta nel fatto che, mentre la prima fornisce una misura assoluta, la seconda permette di comprendere gli effetti che la radiazione comporta sugli esseri viventi. Generalmente, le dosi assorbite sono maggiori di quelle efficaci in corrispondenza degli strati più alti dell'atmosfera, mentre il contrario si verifica sulla superficie planetaria (Yamashiki et al., 2019). Yamashiki et al. (2019) hanno stabilito che la dose efficace di radiazione sopra la quale l'abitabilità di un pianeta viene compromessa è pari a 10 Sv.

4.2 Fattori che influenzano la dose di radiazione incidente sulla superficie

I fattori capaci di proteggere maggiormente un pianeta dalla radiazione sono due, la densità di colonna atmosferica e il campo magnetico planetario (Yamashiki et al., 2019; Atri, 2016). Oltre a questi, anche il flusso e l'energia degli spettri integrati delle particelle incidenti devono essere tenuti in considerazione al fine di ottenere modelli che permettano di ricavare informazioni attendibili riguardo all'abitabilità dei pianeti (Atri, 2016).

4.2.1 Spettro integrato dei SPEs

Sebbene esistano numerose osservazioni di flares stellari, è difficile ricavare informazioni dettagliate riguardo al flusso e all'energia delle particelle accelerate

da questi fenomeni. Si tratta di un problema piuttosto importante, per il quale fortunatamente si hanno a disposizione i dati relativi ai brillamenti solari, utilizzabili per realizzare modelli validi anche per stelle diverse dal Sole (Atri, 2016). Le particelle accelerate dalla nostra stella hanno generalmente un'energia inferiore a qualche centinaio di MeV che non consente di superare lo scudo generato dal campo magnetico e dall'atmosfera terrestre. Più raramente si possono verificare dei SPEs ("solar proton events") con energie fino a diversi GeV che permettono alle particelle di penetrare nell'atmosfera fino a raggiungere la superficie terrestre dando origine ai cosiddetti GLEs ("Ground Level Enhancements"), fenomeni che avvengono sulla Terra circa 10 volte per ciclo solare (Usoskin et al., 2016).

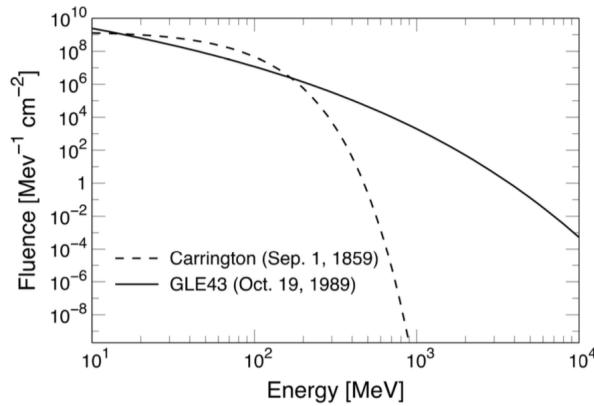


Figura 4.1: Spettro integrato dei SPEs associati a GLE43 (linea tratteggiata) e all'evento di Carrington (linea continua) (Yamashiki et al., 2019)

Yamashiki et al. (2019) hanno utilizzato nei loro modelli lo spettro del SPE legato a GLE43 avvenuto il 19 ottobre 1989 per stimare la massima dose di radiazione in grado di raggiungere la superficie di un pianeta in seguito ad un flare stellare. Per avere una stima della dose normale di radiazione, invece, hanno sfruttato lo spettro del SPE associato all'evento di Carrington avvenuto l'1 settembre 1859. Sebbene sia considerato l'evento eruttivo più potente registrato dall'uomo nell'età moderna, Smart et al. (2006) hanno dimostrato che in realtà l'energia associata a questo tipo di eventi è inferiore rispetto ad altri brillamenti solari in grado di produrre GLEs. Ciò è evidente in *Figura 4.1* dove sono rappresentati gli spettri dei SPEs legati a GLE43 (linea continua) e all'evento di Carrington (linea tratteggiata). Come già accennato in precedenza, considerare un tipo di evento piuttosto che un altro influenza la quantità di radiazione in grado di raggiungere la superficie del pianeta con risvolti importanti riguardo all'abitabilità. Quest'aspetto è evidenziato in *Figura 4.2* dove sono rappresentati i profili verticali in gray (a)(c) e sievert (b)(d) di radiazione generata da SPEs con spettri simili a GLE43 (a)(b) e all'evento di Carrington (c)(d) che riesce a penetrare in un'atmosfera composta principalmente da N_2+O_2 per flares con energie pari a 10^{30} erg (triangoli neri), 10^{32} erg (cerchi rossi), 10^{34} erg (quadrati blu) e 10^{36} erg (croci rosse). I SPEs legati a GLE43, l'evento più energetico, hanno una maggiore penetrazione attraverso gli strati atmosferici mentre quelli associati all'evento di Carrington, meno intenso, presentano una

riduzione improvvisa della dose di radiazione in corrispondenza di altitudini intermedie caratterizzate da una densità di colonna compresa tra 10 e 100 g/cm² (Yamashiki et al., 2019).

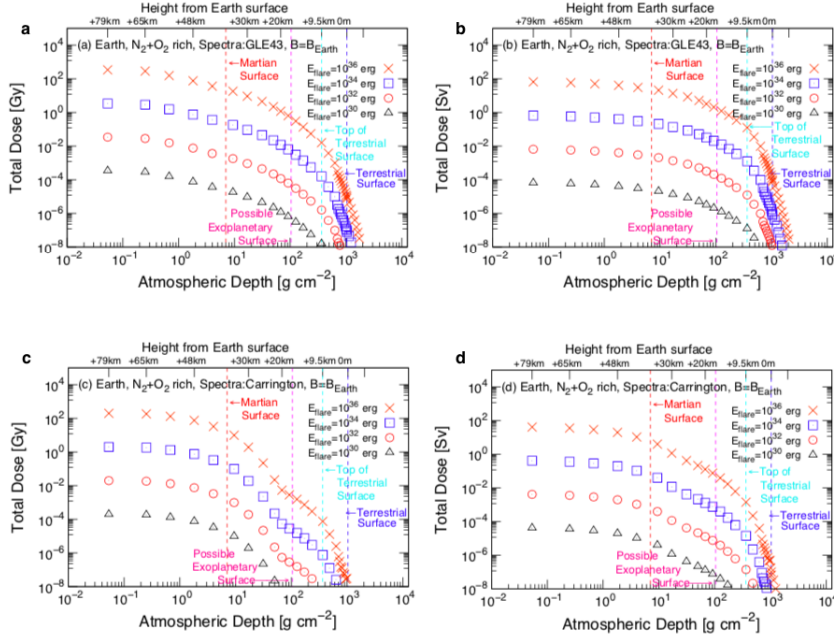


Figura 4.2: Profili verticali in gray (a)(c) e sievert (b)(d) di radiazione generata da SPEs con spettri simili a GLE43 (a)(b) e all'evento di Carrington (c)(d) che riesce a penetrare in un'atmosfera composta principalmente da N₂+O₂ per flares con energie pari a 10³⁰ erg (triangoli neri), 10³² erg (cerchi rossi), 10³⁴ erg (quadrati blu) e 10³⁶ erg (croci rosse). Le linee verticali tratteggiate rappresentano valori di riferimento per la densità di colonna atmosferica: rispettivamente da sinistra a destra abbiamo quella di Marte (9 g/cm²), la stima per la superficie di un possibile esopianeta (1/10 di quella terrestre, ovvero 103.7 g/cm²), quella misurata sulla cima dell'Himalaya (365 g/cm²) e quella della superficie terrestre (1037 g/cm²) (Yamashiki et al., 2019)

Lo stesso è verificabile in *Figura 4.3* dove è rappresentata la dose efficace di radiazione per tre tipi di SPEs tutti accompagnati da GLEs: il più energetico avvenuto il 23 febbraio 1956 è indicato con i quadrati, quello meno energetico risalente al 4 agosto 1972 con i triangoli e quello con energia intermedia avvenuto il 29 settembre 1989 con i cerchi. In questa figura meglio che in quella precedente, si può facilmente notare che i SEP's più energetici sono associati ad una dose efficace più elevata.

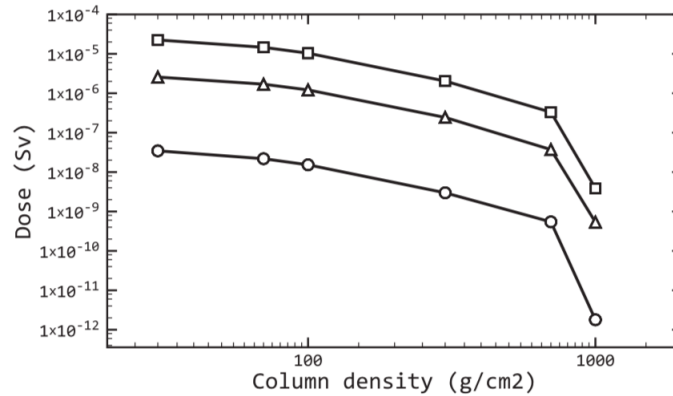


Figura 4.3: dose efficace di radiazione per tre SPEs avvenuti rispettivamente il 23 febbraio 1956 (quadrati), il 4 agosto 1972 (triangoli) e il 29 settembre 1989 (cerchi) (Atri, 2017)

Da queste due figure (Figura 4.2, 4.3) si può già intuire il ruolo della densità di colonna atmosferica nel proteggere la superficie planetaria dalla radiazione: in particolare è evidente che più lo spessore dell'atmosfera è elevato, più difficile sarà per le particelle penetrare negli strati atmosferici più profondi.

4.2.2 Densità di colonna atmosferica

Per valutare l'impatto della radiazione sulla superficie planetaria, Yamashiki et al. (2019) hanno considerato tre diverse composizioni atmosferiche: una simile a quella terrestre costituita prevalentemente da N_2+O_2 , una che riproduce le caratteristiche di quella marziana ricca di CO_2 e l'ultima composta esclusivamente da H_2 . Ciò che hanno potuto verificare nei loro modelli rappresentati in Figura 4.4, 4.5, 4.6 è che non si registrano significative differenze nella dose efficace variando la composizione dell'atmosfera, soprattutto quando si comparano quella costituita rispettivamente da N_2+O_2 e CO_2 . L'atmosfera composta esclusivamente da H_2 , invece, presenta un maggior assorbimento rispetto alle altre due. Questo probabilmente è dovuto al minor peso molecolare dell'idrogeno che permette la presenza di un maggior numero di molecole a parità di densità di colonna atmosferica (Yamashiki et al., 2019). Il fattore che sembra incidere maggiormente sulla protezione del pianeta dalla radiazione è, invece, la densità di colonna atmosferica misurata in g/cm^2 . In particolare si può notare che in presenza di uno spessore atmosferico elevato, come quello che caratterizza la Terra, per tutte le composizioni atmosferiche considerate la dose di radiazione non supera il valore critico (10 Sv) sopra al quale l'abitabilità di un pianeta risulta compromessa. Se invece consideriamo densità di colonna inferiori come quella che caratterizza Marte oppure un'ipotetica superficie di un esopianeta la questione diventa più complessa in quanto la dose efficace si avvicina al valore critico o addirittura lo supera eliminando così ogni possibilità di trovare vita sul pianeta.

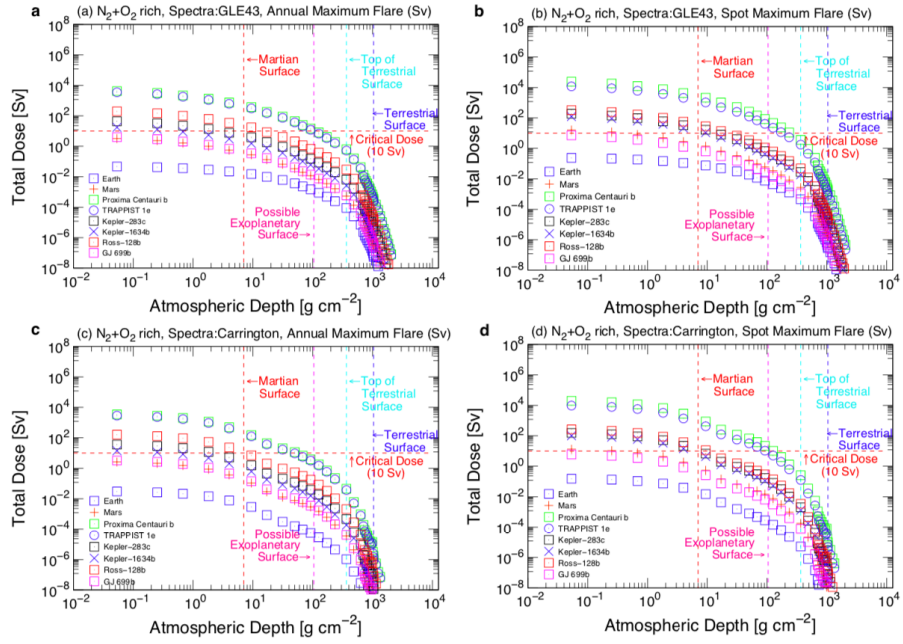


Figura 4.4: Profilo verticale in sievert di radiazione generata da SPEs con spettri simili a GLE43 (a)(b) e all'evento di Carrington (c)(d) che riesce a penetrare in un'atmosfera composta da N_2+O_2 . I profili sono realizzati per la Terra (quadrati blu), Marte (croce rossa), Proxima Centauri b (quadrati verdi), TRAPPIST-1e (cerchi blu), Kepler-283c (quadrati neri), Kepler-1634b (croci blu), Ross-128b (quadrati rossi) e GJ-699b (quadrati rosa). Le linee verticali tratteggiate rappresentano valori di riferimento per la densità di colonna atmosferica: rispettivamente da sinistra a destra abbiamo quella di Marte (9 g/cm^2), la stima per la superficie di un possibile esopianeta (1/10 di quella terrestre, ovvero 103.7 g/cm^2), quella misurata sulla cima dell'Himalaya (365 g/cm^2) e quella della superficie terrestre (1037 g/cm^2) (Yamashiki et al., 2019)

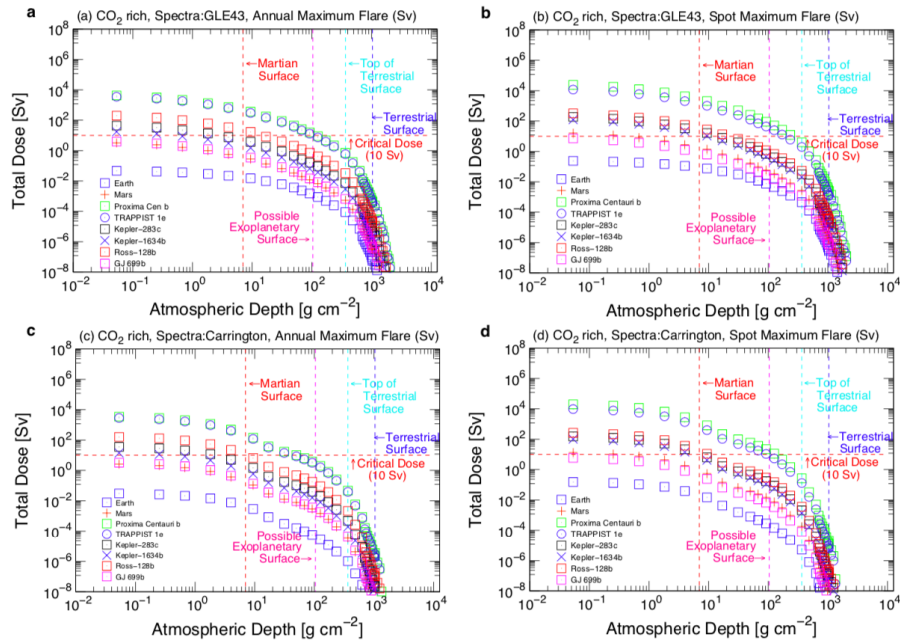


Figura 4.5: Profilo verticale in sievert di radiazione generata da SPEs con spettri simili a GLE43 (a)(b) e all'evento di Carrington (c)(d) che riesce a penetrare in un'atmosfera composta da CO₂. I profili sono realizzati per la Terra (quadrati blu), Marte (croce rossa), Proxima Centauri b (quadrati verdi), TRAPPIST-1e (cerchi blu), Kepler-283c (quadrati neri), Kepler-1634b (croci blu), Ross-128b (quadrati rossi) e GJ-699b (quadrati rosa). Le linee verticali tratteggiate rappresentano valori di riferimento per la densità di colonna atmosferica: rispettivamente da sinistra a destra abbiamo quella di Marte (9 g/cm²), la stima per la superficie di un possibile esopianeta (1/10 di quella terrestre, ovvero 103.7 g/cm²), quella misurata sulla cima dell'Himalaya (365 g/cm²) e quella della superficie terrestre (1037 g/cm²) (Yamashiki et al., 2019)

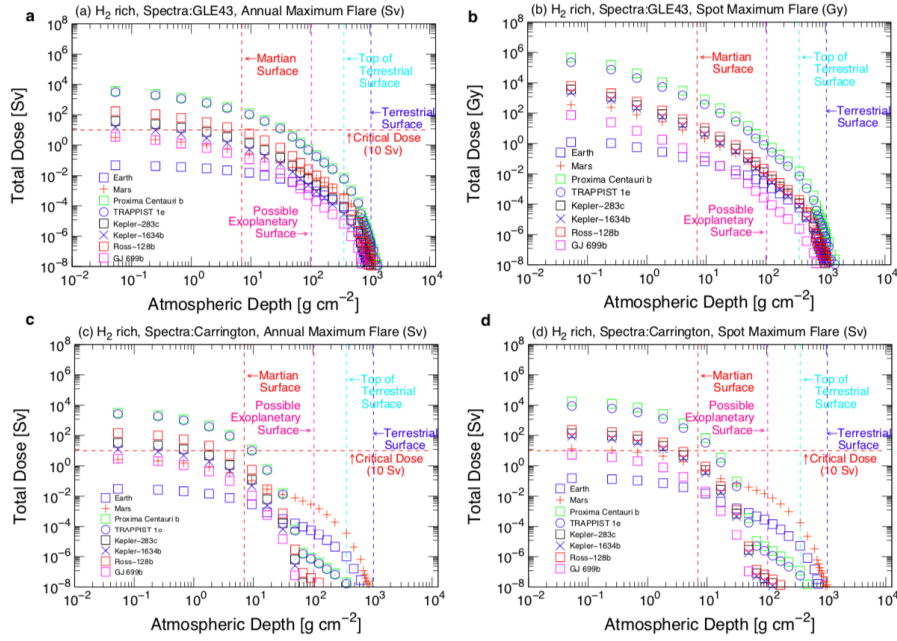


Figura 4.6: Profilo verticale in sievert di radiazione generata da SPEs con spettri simili a GLE43 (a)(b) e all'evento di Carrington (c)(d) che riesce a penetrare in un'atmosfera composta da H_2 . I profili sono realizzati per la Terra (quadrati blu), Marte (croce rossa), Proxima Centauri b (quadrati verdi), TRAPPIST-1e (cerchi blu), Kepler-283c (quadrati neri), Kepler-1634b (croci blu), Ross-128b (quadrati rossi) e GJ-699b (quadrati rosa). Le linee verticali tratteggiate rappresentano valori di riferimento per la densità di colonna atmosferica: rispettivamente da sinistra a destra abbiamo quella di Marte (9 g/cm^2), la stima per la superficie di un possibile esopianeta (1/10 di quella terrestre, ovvero 103.7 g/cm^2), quella misurata sulla cima dell'Himalaya (365 g/cm^2) e quella della superficie terrestre (1037 g/cm^2) (Yamashiki et al., 2019)

4.2.3 Campo magnetico planetario

Un altro fattore in grado di modificare la quantità di radiazione capace di raggiungere la superficie di un pianeta è il suo campo magnetico. Per valutarne l'impatto, Atri (2016) così come Yamashiki et al. (2019) hanno sviluppato i loro modelli per diverse configurazioni del campo magnetico sfruttando le funzioni di filtro magnetosferico definite come il rapporto tra il numero di particelle respinte e non respinte dallo scudo magnetico $n_{\text{shielded}}/n_{\text{unshielded}}$ (Grießmeier et al., 2015). In Figura 4.7, basata sui risultati ottenuti da Grießmeier et al. (2015), è rappresentata l'efficienza di penetrazione dei protoni con energie comprese tra 10 Mev e 32 Gev per pianeti con diverse configurazioni del campo magnetico. Appare evidente che le particelle incontrano sempre più difficoltà nel raggiungere la superficie man mano che il momento magnetico diventa più intenso con una conseguente drastica diminuzione dell'efficienza di penetrazione.

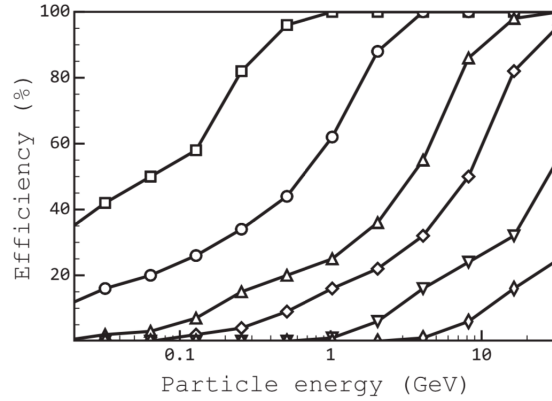


Figura 4.7: Efficienza di penetrazione per protoni con energie comprese tra 10 MeV e 32 GeV al variare dell'intensità del momento magnetico che assume i seguenti valori: 0.05 (quadrati), 0.15 (cerchi), 0.5 (triangoli dritti), 1 (rombi), 3 (triangoli rovesci), 10 (diamanti) $\mathcal{M}_{\text{Earth}}$ ($\mathcal{M}_{\text{Earth}} = 7.94 \cdot 10^{22} \text{ A m}^2$) (Atri, 2016)

Lo stesso si può riscontrare in *Figura 4.8* dove è analizzata la variazione della dose efficace di radiazione prodotta dal SPE del 29 settembre 1989 in funzione di valori crescenti del momento magnetico mantenendo costante la densità di colonna atmosferica (1000 g/cm^2). Si può notare che ci sono ben tre ordini di grandezza tra il valore massimo e minimo di radiazione misurati rispettivamente per $0.05 \mathcal{M}_{\text{Earth}}$ e $10 \mathcal{M}_{\text{Earth}}$ (Atri, 2016).

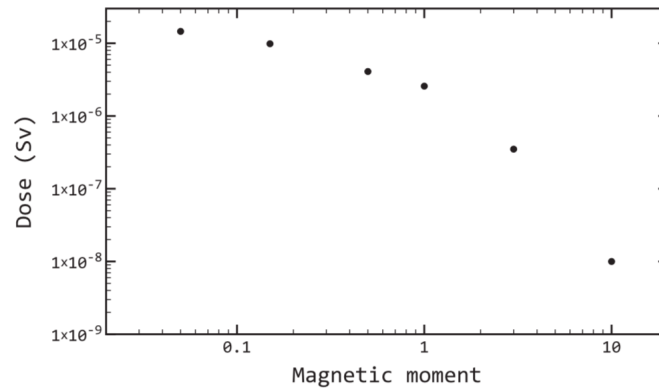


Figura 4.8: Variazione della dose efficace di radiazione in funzione di valori crescenti del momento magnetico planetario mantenendo costante la densità di colonna atmosferica (1000 g/cm^2) (Atri, 2016)

L'effetto combinato dei due principali fattori che proteggono il pianeta dalla radiazione, ovvero la densità di colonna atmosferica e il campo magnetico, è stato analizzato da Yamashiki et al. (2019) che inizialmente hanno ricalcolato la dose efficace assumendo che tutti gli esopianeti abbiano lo stesso campo magnetico della Terra B_{Earth} (Figura 4.9) per poi valutare la dose assorbita di radiazione da due pianeti extrasolari (Proxima Centauri b, Ross-128b) per

quattro valori diversi di campo magnetico in funzione di quello terrestre: 0 (quadrati neri), $0.1 B_{\text{Earth}}$ (cerchi rossi), $1 B_{\text{Earth}}$ (triangoli blu) e $10 B_{\text{Earth}}$ (triangoli verdi) (*Figura 4.10*).

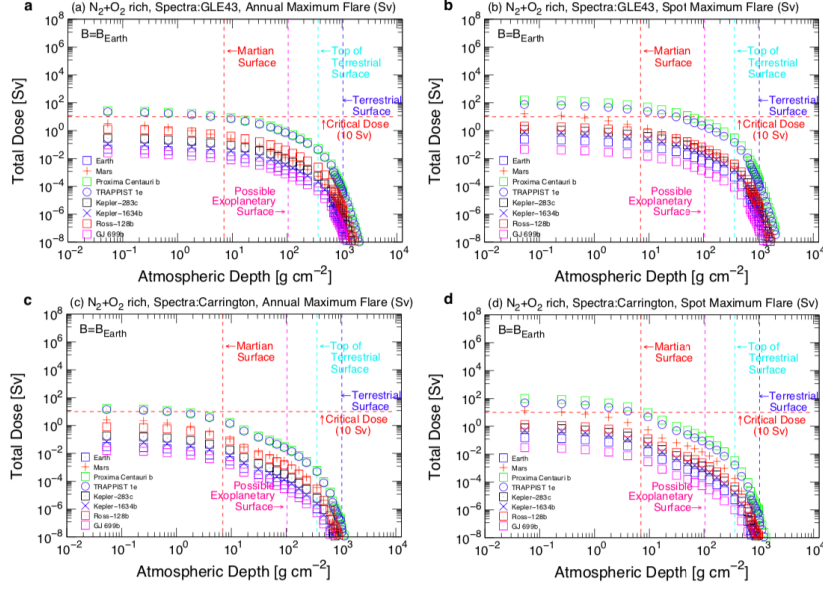


Figura 4.9: Profilo verticale in sievert di radiazione generata da SPEs con spettri simili a GLE43 (a)(b) e all'evento di Carrington (c)(d) che riesce a penetrare in un atmosfera composta da N_2+O_2 . I profili sono realizzati per la Terra (quadrati blu), Marte (croce rossa), Proxima Centauri b (quadrati verdi), TRAPPIST-1e (cerchi blu), Kepler-283c (quadrati neri), Kepler-1634b (croci blu), Ross-128b (quadrati rossi) e GJ-699b (quadrati rosa). Le linee verticali tratteggiate rappresentano valori di riferimento per la densità di colonna atmosferica: rispettivamente da sinistra a destra abbiamo quella di Marte (9 g/cm^2), la stima per la superficie di un possibile esopianeta ($1/10$ di quella terrestre, ovvero 103.7 g/cm^2), quella misurata sulla cima dell'Himalaya (365 g/cm^2) e quella della superficie terrestre (1037 g/cm^2) (*Yamashiki et al., 2019*)

Dalla *Figura 4.9*, emerge chiaramente che, escludendo il pannello (b), solo Proxima Centauri b e Trappist-1e superano leggermente la dose critica di radiazione quando la densità di colonna è inferiore a quella della superficie di Marte. Analizzando la *Figura 4.10*, invece, si può notare come la presenza di un campo magnetico sempre più intenso riduca drasticamente la dose di radiazione assorbita dai pianeti permettendo così lo sviluppo della vita anche in presenza di uno spessore atmosferico piuttosto ridotto (*Yamashiki et al., 2019*). In assenza di un campo magnetico oppure in presenza di venti stellari/espulsioni di massa coronale piuttosto intensi capaci di ridurre lo spessore atmosferico (*Airapetian et al., 2017b; Garcia-Sage et al., 2017*), invece, l'abitabilità di un pianeta risulta compromessa, in quanto il flusso XUV riesce a raggiungere la superficie creando un ambiente ostile allo sviluppo e alla conservazione della vita.

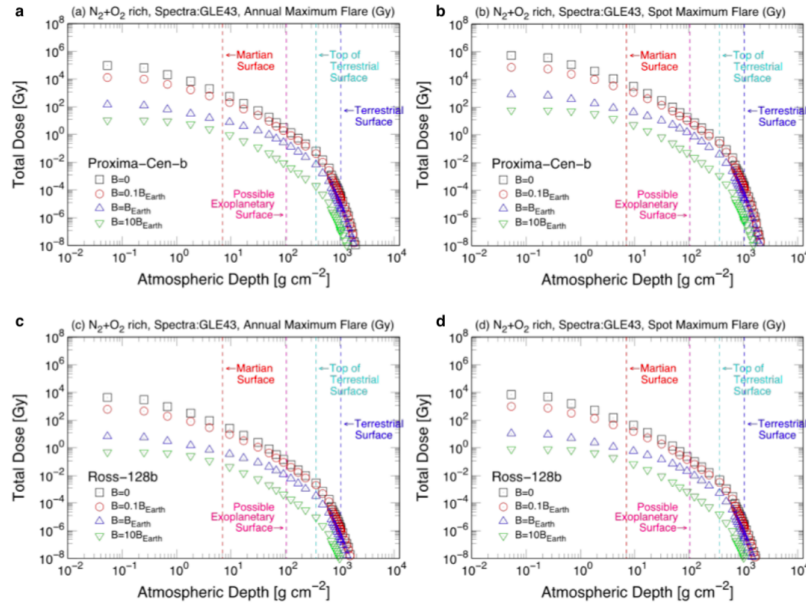


Figura 4.10: Profilo verticale in gray di radiazione generata da SPEs con spettri simili a GLE43 che riesce a penetrare in un'atmosfera composta da N_2+O_2 . I profili sono realizzati per due pianeti extrasolari diversi, Proxima Centauri b (a)(b) e Ross-128b (c)(d) facendo variare il campo magnetico tra quattro valori diversi: 0 (quadrati neri), $0.1 B_{\text{Earth}}$ (cerchi rossi), $1 B_{\text{Earth}}$ (triangoli blu) e $10 B_{\text{Earth}}$ (triangoli verdi). Le linee verticali tratteggiate rappresentano valori di riferimento per la densità di colonna atmosferica: rispettivamente da sinistra a destra abbiamo quella di Marte (9 g/cm^2), la stima per la superficie di un possibile esopianeta (1/10 di quella terrestre, ovvero 103.7 g/cm^2), quella misurata sulla cima dell'Himalaya (365 g/cm^2) e quella della superficie terrestre (1037 g/cm^2) (Yamashiki et al., 2019)

4.3 Effetto dei SPEs sull'atmosfera

Oltre a causare variazioni nella quantità di radiazione che raggiunge la superficie, le particelle energetiche accelerate dai flares causano cambiamenti chimici nell'atmosfera che possono essere positivi oppure negativi per l'abitabilità di un pianeta (Yamashiki et al., 2019). I benefici associati ai SPEs riguardano la sintesi di materie prime fondamentali per dare avvio allo sviluppo della vita fra le quali la più importante è sicuramente l'acido cianidrico HCN. La formazione di questa molecola avviene attraverso un processo chiamato fissazione dell'azoto che dapprima separa N_2 in N e successivamente produce NO e NO_2 , due composti importanti non solo per la sintesi di HCN ma anche perché, essendo accettori di elettroni, favoriscono l'insorgere di reazioni metaboliche in ambienti acquatici come le sorgenti idrotermali (Wong et al., 2017) oppure laghi e stagni poco profondi (Ranjana et al., 2019). L'acido cianidrico riesce a fornire il suo contributo per lo sviluppo della vita se viene prodotto nelle regioni più basse dell'atmosfera perché solo qui può essere coinvolto nella sintesi di molecole organiche più complesse (Arapetian et al., 2016). Attraverso dettagliate simulazioni numeriche, Arapetian et al. (2016) hanno dimostrato che effettivamente ciò avviene grazie

ai SPEs durante i quali HCN viene sintetizzato con una concentrazione di dieci parti per milione in volume. I SPEs svolgono un ruolo fondamentale anche nella successiva produzione di amminoacidi e basi azotate come è stato evidenziato da diversi esperimenti in laboratorio che prevedevano di irradiare miscele gassose di CO/CO₂, N₂ e H₂O con protoni altamente energetici (*Dartnell, 2011; Kobayashi et al., 1998; Miyakawa et al., 2002*). Dai dati ottenuti attraverso questi esperimenti, *Lingam et al. (2018)* hanno ricavato il tasso di produzione di amminoacidi e basi azotate, rispettivamente descritti dalle seguenti formule:

$$\dot{\mathcal{M}}_A \sim 10^7 \text{kg/yr} \left(\frac{\phi_{\text{SEP}}}{100 \text{J m}^{-2} \text{yr}^{-1}} \right) \left(\frac{R_p}{R_{\text{Earth}}} \right)^2$$

$$\dot{\mathcal{M}}_{\text{BA}} \sim 10^4 \text{kg/yr} \left(\frac{\phi_{\text{SEP}}}{100 \text{J m}^{-2} \text{yr}^{-1}} \right) \left(\frac{R_p}{R_{\text{Earth}}} \right)^2$$

ϕ_{SEP} è il flusso energetico medio prodotto tramite SEPs sulla superficie di un pianeta con una pressione di 1 bar (*Lingam et al., 2018*):

$$\phi_{\text{SEP}} \sim 50 \text{J m}^{-2} \text{yr}^{-1} \left(\frac{\dot{N}}{1 \text{day}^{-1}} \right) \left(\frac{a_p}{1 \text{UA}} \right)^{-2}$$

ove \dot{N} rappresenta il numero di SPEs intensi che interessano il pianeta in un giorno. Da questa formula è evidente che i pianeti nella zona abitabile delle nane rosse, caratterizzati da un valore ridotto di a_p , sono sottoposti ad un flusso più intenso di SEPs che alimenta la produzione di amminoacidi e basi azotate nonché di altri composti fondamentali per dare avvio allo sviluppo della vita (*Nava-Sedeño et al., 2016*). Sebbene, come abbiamo appena visto, i SEPs favoriscano l'abitabilità dei pianeti sotto diversi punti di vista, allo stesso tempo costituiscono anche un ostacolo per l'origine e lo sviluppo della vita. Essi, infatti, sono responsabili della formazione di ossidi di idrogeno e azoto (*Crutzen, 1979; López-Puertas et al., 2005*) che attraverso reazioni catalitiche rimuovono ozono dagli strati intermedi dell'atmosfera (*Airapetian et al., 2019*) permettendo così alla radiazione ultravioletta di penetrare in profondità. Se ciò avviene, l'abitabilità di un pianeta può essere notevolmente danneggiata o addirittura compromessa, in quanto il flusso UV può causare la rimozione di alcune molecole fondamentali per lo sviluppo della vita come N₂O, CH₃Cl oppure CH₄ (*Airapetian et al., 2019*). Utilizzando i dati disponibili riguardo al legame tra l'energia dei brillamenti, l'intensità dei SEPs e il grado di riduzione dell'ozono atmosferico, *Lingam & Loeb (2017)* hanno proposto una relazione empirica tra la rimozione dell'ozono \mathcal{D}_{O_3} e l'energia del flare E:

$$\mathcal{D}_{\text{O}_3} \sim 2.8\% \left(\frac{E}{10^{25} \text{J}} \right)^{9/25} \left(\frac{a_p}{1 \text{UA}} \right)^{-18/25}$$

Può essere facilmente verificato che un flare con energia circa uguale a $2 \cdot 10^{29}$ J comporta la completa rimozione dello strato di ozono per un pianeta terrestre collocato a 1 UA dalla sua stella mentre se si trovasse a 0.1 UA per avere $\mathcal{D}_{\text{O}_3} \sim 100\%$ ci vorrebbe un'energia minore, pari a $2 \cdot 10^{27}$ J (*Lingam & Loeb, 2019*).

Capitolo 5

Analisi dell'abitabilità di pianeti extrasolari noti

5.1 Proxima Centauri b

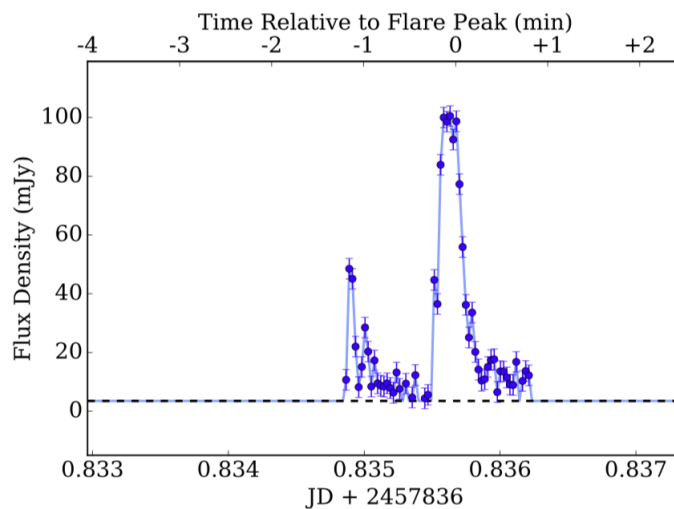


Figura 5.1: Curva di luce del brillamento prodotto da Proxima Centauri il 24 marzo 2017 ottenuta a partire dai dati registrati in un intervallo temporale compreso tra 06:36:30.1 e 08:10:27.2 UTC (*MacGregor et al., 2018*)

Proxima Centauri b (Proxima b) è un pianeta potenzialmente di tipo terrestre di $1.27 M_{\text{Earth}}$ che orbita con un periodo di 11.2 giorni nella zona abitabile di Proxima Centauri (*Tabella A.1*), la stella più vicina al Sistema Solare con una distanza di 1.3 pc (corrispondenti a 4.4 anni luce) dalla Terra (*Airapetian et al., 2019*). La sua scoperta, risalente all'agosto 2016 (*Anglada-Escudè, 2016*), ha riscosso immediatamente grande entusiasmo perché si riteneva che potesse essere un ottimo candidato ad ospitare forme di vita grazie all'estesa riserva superficiale di acqua prevista da alcuni modelli (*Ciesla et al., 2015; Mulders*

et al., 2015; *Carter-Bond et al.*, 2012). Osservazioni successive hanno però ridotto l'entusiasmo iniziale, in quanto hanno permesso di capire che il pianeta, trovandosi ad una distanza di soli 0.05 UA dalla sua stella, risiede in un ambiente tremendamente ostile per lo sviluppo della vita (*Airapetian et al.*, 2019). Proxima Centauri, infatti, è una stella pienamente convettiva di classe M5.5V che possiede un campo magnetico molto intenso ($B \sim 600\text{G}$) (*Reiners & Basri*, 2008) responsabile dell'intensa attività stellare che la caratterizza comprendente flares, flusso XUV e venti stellari. Partendo dai primi, evidenze osservative (*Walker*, 1981; *Davenport*, 2016) hanno dimostrato che Proxima Centauri è interessata da diversi tipi di brillamenti: quelli più intensi, con energie $\sim 10^{30}$ erg, avvengono una volta al giorno mentre quelli meno energetici ($\sim 10^{28}$ erg) sono prodotti ogni ora. *Davenport et al.* (2016) hanno inoltre stimato che annualmente la stella genera circa 8 superflares, eventi in grado di generare un'enorme quantità di energia ($>10^{33}$ erg) capace di far evaporare qualsiasi atmosfera o oceano e di sterilizzare la superficie di Proxima b (*MacGregor et al.*, 2018). Uno di questi è stato registrato il 24 marzo 2017 quando le antenne di ALMA hanno captato un segnale a 233 Ghz durato poco più di un minuto (*MacGregor et al.*, 2018). Come si può evincere dalla *Figura 5.1*, durante questo evento la densità di flusso è aumentata molto rapidamente in funzione del tempo fino a raggiungere un picco in corrispondenza del quale la luminosità della stella era circa 1000 volte superiore a quella normale. Successivamente la densità di flusso è diminuita in modo esponenziale ritornando ai valori tipici della stella in qualche secondo.

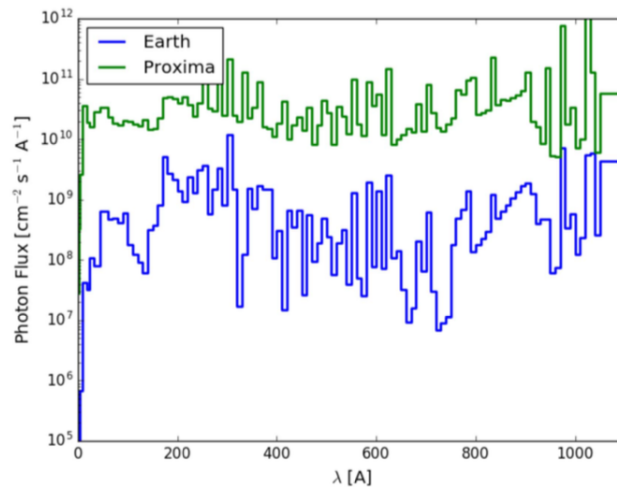


Figura 5.2: Flusso XUV stellare incidente sulla superficie di Proxima b (verde) confrontato con quello terrestre (blu) (*Garcia-Sage et al.*, 2018)

Per quanto riguarda il flusso XUV associato a Proxima Centauri, invece, *Garcia-Sage et al.* (2017) hanno stimato che in prossimità di Proxima b esso sia superiore a quello ricevuto dalla Terra di circa due ordini di grandezza (*Figura 5.2*). Questo si traduce in un tasso di fuga degli ioni dall'atmosfera molto elevato che comporta conseguenze importanti per l'abitabilità del pianeta. *Garcia-Sage et al.* (2017) hanno inoltre studiato l'impatto della temperatura della termosfera e dell'estensione delle calotte polari sulla fuga atmosferica. In

particolare, come si può notare in *Figura 5.3*, una termosfera più calda si traduce in una fuga di particelle più accentuata, effetto ottenuto anche con l'aumentare delle dimensioni delle regioni che circondano i poli magnetici del pianeta dove le linee aperte del campo magnetico si uniscono ai venti stellari (*Airapetian et al., 2019*).

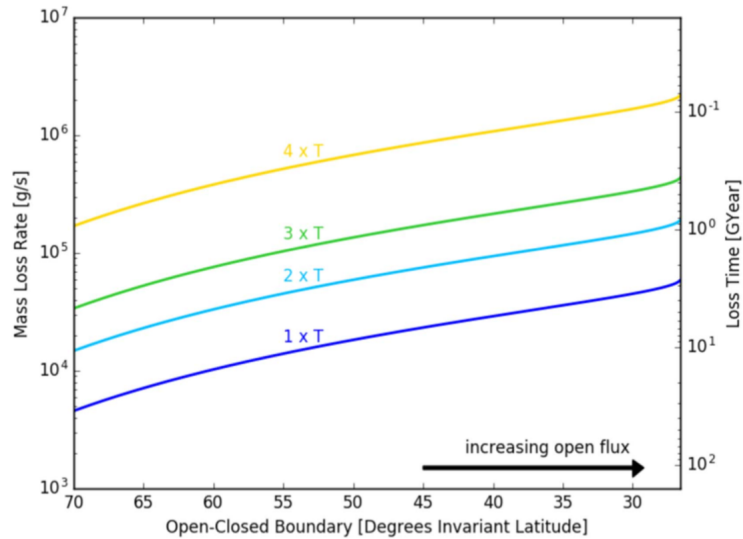


Figura 5.3: Tasso di fuga di massa e tempi di fuga per Proxima b in funzione della temperatura della termosfera e del flusso magnetico aperto. Le quattro curve corrispondono dall'alto verso il basso a 4xT (giallo), 3xT (verde), 2xT (azzurro) e T (blu) ove T è la temperatura della termosfera terrestre nelle fasi di attività solare moderata (*Garcia-Sage et al., 2017*)

Passando ai venti stellari, infine, Garraffo et al. (*2016*) hanno recentemente studiato il loro impatto su Proxima b ricostruendo teoricamente il flusso di plasma proveniente da Proxima Centauri e l'ambiente circostante al pianeta. Il modello così ottenuto prevede una pressione del vento stellare sul pianeta estremamente elevata, circa 20000 volte più alta di quella che caratterizza il vento solare a 1 UA. Inoltre, man mano che percorre la sua orbita, l'ambiente in cui si viene a trovare Proxima b è sottoposto a importanti variazioni di pressione che modificano l'estensione della magnetosfera planetaria (*Figura 5.4*) in tempi molto brevi dell'ordine di qualche giorno riscaldando l'atmosfera alle quote più elevate. Questo fenomeno, insieme al flusso XUV molto intenso che incide su Proxima b, rendono l'atmosfera del pianeta potenzialmente vulnerabile all'azione dei venti stellari con un conseguente aumento del tasso di erosione atmosferica (*Airapetian et al., 2019*).

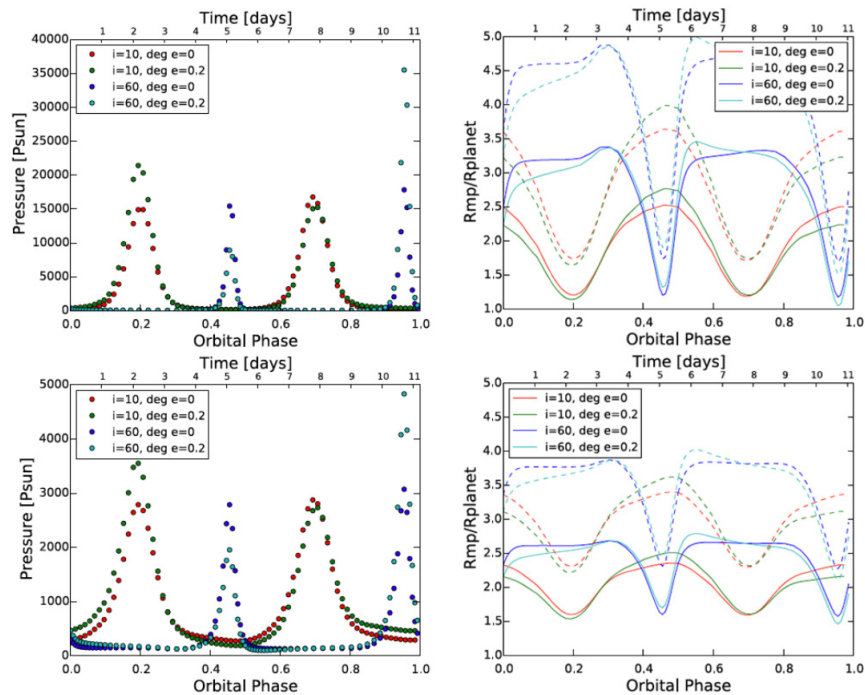


Figura 5.4: **pannello di sinistra:** Pressione del vento stellare per i 4 modelli orbitali di Proxima b con un'intensità massima (in alto) e media (in basso) di campo magnetico della stella pari a 600 G. **pannello di destra:** Raggio della magnetosfera normalizzato con il raggio del pianeta per i 4 modelli orbitali di Proxima b con un'intensità massima (in alto) e media (in basso) di campo magnetico della stella pari a 600 G. Le linee continue corrispondono ad un campo magnetico planetario simile a quello terrestre (0.3 G) mentre quelle tratteggiate all'intensità di campo magnetico prevista per Proxima b, ovvero 0.1 G (*Garraffo et al., 2016*)

5.2 Sistema planetario di TRAPPIST-1

TRAPPIST-1 (*Tabella A.2*) è una nana rossa ultrafredda ($T_{\text{eff}} \sim 2560\text{K}$) di classe spettrale M8.2V, distante 12 pc (39.5 anni luce) dal Sistema Solare. Attraverso il metodo dei transiti, Gillon et al. (*2016; 2017*) hanno recentemente scoperto sette esopianeti terrestri a una distanza dalla stella compresa tra 0.01 UA e 0.063 UA, tre dei quali (TRAPPIST-1 d, e, f) sembrano orbitare nella zona abitabile con periodi rispettivamente di 4, 6 e 9 giorni (*Kopparapu et al., 2017*). Trovandosi molto vicino alla stella, il sistema planetario è estremamente interessato dai fenomeni generati da TRAPPIST-1, particolarmente intensi a causa della rapida rotazione stellare, caratterizzata da un periodo di circa 3.3 giorni (*Luger et al., 2017*). È risaputo, infatti, che l'attività di una stella aumenta proporzionalmente alla sua rotazione fino a raggiungere un valore di saturazione oltre al quale qualsiasi legame di proporzionalità cessa di esistere (*Garraffo et al., 2017*). Reiners & Basri (*2010*) basandosi sulle osservazioni della riga H_{α} , hanno stabilito che l'attività di TRAPPIST-1 è proprio prossima al valore di saturazione risultando molto intensa anche grazie al campo magnetico superficiale della stella ($B \sim 600\text{G}$), responsabile dell'attività cromosferica (*Gizis et*

al., 2000; Reiners & Basri, 2010) e dei frequenti brillamenti con energie comprese tra 10^{30} - 10^{33} erg (Vida et al., 2017). Oltre ai flares, TRAPPIST-1 è anche interessata dai venti stellari caratterizzati da velocità prossime a 1400 km/s e densità molto elevate capaci di superare quelle dei venti solari registrate ad una distanza di 1 UA di un fattore pari a 10^4 - 10^5 (Garraffo et al., 2017). Proprio a causa di queste alte densità, i pianeti che orbitano intorno alla stella sono sottoposti a pressioni dinamiche circa 1000 volte superiori di quelle generate dal vento solare in prossimità della Terra. Inoltre, come si può evincere da Figura 5.5, nell'orbita percorsa dai pianeti la pressione del vento stellare varia di circa un ordine di grandezza con conseguenze dirette sull'estensione della magnetosfera planetaria (Garraffo et al., 2017) e sul tasso di erosione atmosferica, le cui implicazioni per l'abitabilità planetaria sono state recentemente studiate da Dong et al. (2018a). In particolare, attraverso i loro modelli essi hanno osservato che il ritmo con cui le particelle cariche abbandonano l'atmosfera dei pianeti decresce monotonicamente man mano che ci si sposta sempre più verso l'esterno del sistema planetario, da TRAPPIST-1b fino a TRAPPIST-1h (Figura 5.6).

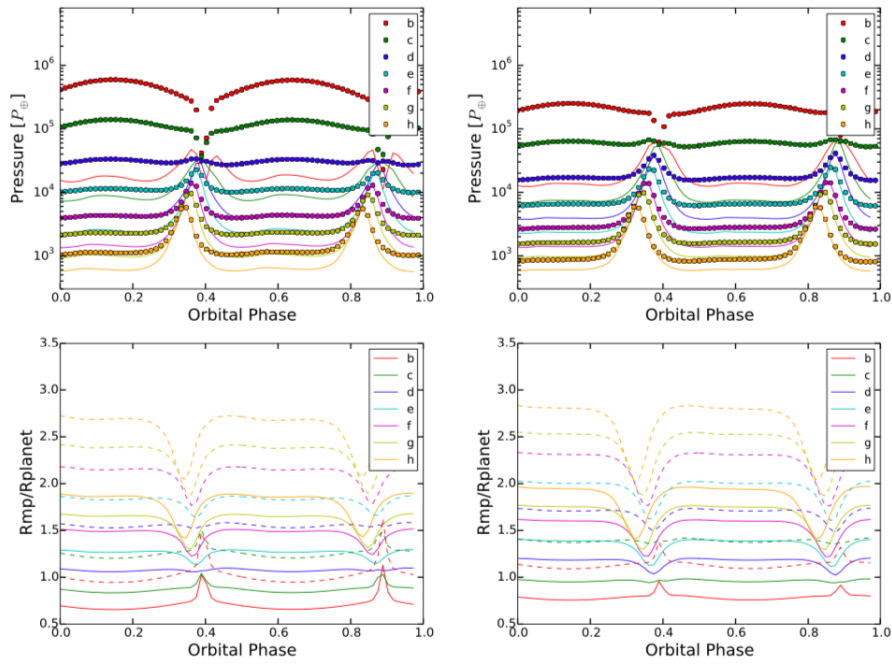


Figura 5.5: **pannelli in alto:** pressione totale (cerchietti pieni) e pressione dinamica (linee continue) normalizzate con il vento solare a 1 UA per le orbite dei sette pianeti intorno a TRAPPIST-1 assumendo un campo magnetico stellare di ~ 600 G (sinistra) e di ~ 300 G (destra). **pannelli in basso:** estensione della magnetosfera normalizzata con il raggio planetario per le orbite dei sette pianeti intorno a TRAPPIST-1 assumendo un campo magnetico stellare di ~ 600 G (sinistra) e di ~ 300 G (destra). Le linee tratteggiate e continue corrispondono rispettivamente a un campo magnetico planetario di 0.5 G e 0.1 G (Garraffo et al., 2017)

Alla luce di questo andamento, sembrerebbe logico pensare che TRAPPIST-1h, essendo caratterizzato dal tasso di erosione atmosferica più basso, sia il

miglior candidato per ospitare forme di vita sulla sua superficie. Tuttavia, prima di giungere a conclusioni affrettate, bisogna sottolineare che il modello di Dong et al. (2018a) non è completo, in quanto per stimare la fuga atmosferica si limita a considerare il vento stellare escludendo il flusso XUV che, come spiegato nel Capitolo 2, può avere un importante impatto sulle atmosfere planetarie. Inoltre, come sappiamo, un fondamentale prerequisito per l'abitabilità di un pianeta è la presenza di una consistente riserva di acqua, la quale sembra non essere trattenuta in quantità sufficienti sulla superficie di TRAPPIST-1h per sostenere la vita (Gillon et al., 2017). Sotto questo aspetto, anche TRAPPIST-1b e TRAPPIST-1c sono assolutamente da escludere come mondi potenzialmente abitabili, in quanto sembra che una quantità d'acqua pari a 15 oceani terrestri sia evaporata dalla loro superficie (Bolmont et al., 2017; Wheatley et al., 2017). Una visione più ottimistica riguarda invece TRAPPIST-1e, per il quale modelli climatici (Wolf, 2017) hanno recentemente alimentato le speranze di poter trovare una consistente riserva di acqua sulla sua superficie, rendendolo il principale candidato ad ospitare vita tra tutti e sette i pianeti in orbita intorno alla stella. Per quanto riguarda i gas serra, infine, modelli climatici tridimensionali in grado di considerare gli effetti mareali responsabili della possibile rotazione planetaria sincrona (Yang et al., 2013), hanno dimostrato che tutti i pianeti in orbita intorno a TRAPPIST-1 presentano difficoltà nel trattenerli. Questo è dovuto principalmente a due fenomeni: il congelamento della CO_2 nell'emisfero non illuminato dalla stella e la rapida dissociazione di molecole come NH_3 e CH_4 causato dall'elevato flusso XUV, responsabile anche della possibile mancata formazione di O_2 e conseguentemente di O_3 nell'atmosfera planetaria (Airapetian et al., 2019).

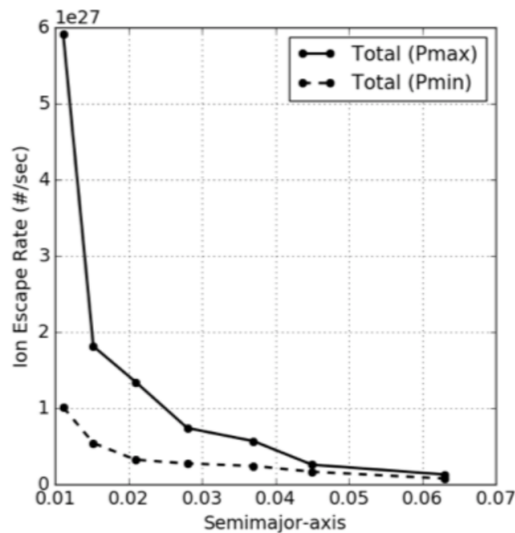


Figura 5.6: Tasso di fuga degli ioni dall'atmosfera in funzione del semi-asse maggiore dell'orbita nel caso in cui la pressione del vento stellare sia massima (linea continua) oppure minima (linea tratteggiata). I sette pallini pieni rappresentano i pianeti in orbita intorno a TRAPPIST-1 (Airapetian et al., 2019)

Capitolo 6

Discussione

La ricerca di mondi abitabili al di fuori del Sistema Solare rappresenta una delle sfide più difficili ed al contempo affascinanti che la comunità astronomica deve affrontare. A causa dei limiti attuali delle tecniche osservative a nostra disposizione, fino ad oggi ci si è concentrati sulle nane rosse, come Proxima Centauri oppure TRAPPIST-1, che costituiscono circa il 75 % della popolazione stellare della nostra galassia. Se da una parte queste stelle possiedono caratteristiche, come il piccolo raggio ($0.08 R_{\text{Sun}} < R < 0.45 R_{\text{Sun}}$) oppure la massa contenuta ($0.08 M_{\text{Sun}} < M < 0.5 M_{\text{Sun}}$), che facilitano la rilevazione di pianeti terrestri nella loro zona abitabile, dall'altro esistono diversi fattori capaci di compromettere lo sviluppo e la conservazione della vita nei pianeti limitrofi. Per prima cosa, a causa della loro ridotta luminosità ($0.0001 L_{\text{Sun}} < L < 0.1 L_{\text{Sun}}$), la zona abitabile delle nane rosse è estremamente compatta (compresa tra 0.05 UA e 0.16 UA; *Airapetian et al., 2017a*) e dunque, come si può evincere dalla *Figura 6.1*, i pianeti che si trovano in queste regioni sono sottoposti ad un flusso XUV diversi ordini di grandezza più intenso rispetto a quello che investe la Terra (collocata ad una distanza di 1 UA dal Sole), responsabile di violenti fenomeni di erosione atmosferica con drammatiche ripercussioni sull'abitabilità di un pianeta. Per dimostrarlo, Johnstone et al. (2019) hanno recentemente sviluppato un modello che simula l'interazione di una giovane stella di $1 M_{\text{Sun}}$ caratterizzata da un flusso XUV 60 volte più intenso di quello solare attuale con un'atmosfera simile a quella terrestre, dominata da N_2 e O_2 . I risultati da loro ottenuti mostrano che in presenza di condizioni simili, che si possono facilmente verificare per un pianeta nella zona abitabile di una nana rossa come Proxima 1b (*Airapetian et al., 2017a*), il tasso di erosione atmosferica è pari a $\sim 1.8 \cdot 10^9$ g/s in buon accordo con il valore ricavabile dalla formula usata comunemente:

$$\dot{M} = \frac{\epsilon \pi F_{\text{XUV}} R_{\text{pl}} R_{\text{XUV}}^2}{GM_{\text{pl}}}$$

ove ϵ è l'efficienza con cui la massa viene persa, F_{XUV} è il flusso XUV incidente, R_{XUV} è il raggio a cui il flusso viene assorbito, R_{pl} e M_{pl} sono rispettivamente il raggio e la massa del pianeta (*Luger et al., 2015; Chen & Rogers, 2016*). Si tratta di un tasso di fuga atmosferica devastante capace di rimuovere un'atmosfera come quella terrestre ($\sim 5.15 \cdot 10^{21}$ g) in $\sim 10^5$ anni, un intervallo di tempo molto breve, quasi istantaneo, rispetto alle scale temporali che riguardano l'evoluzione.

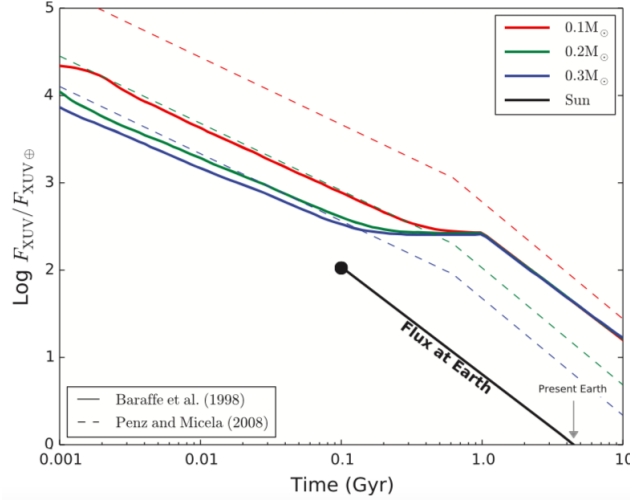


Figura 6.1: Evoluzione del flusso XUV per pianeti nella zona abitabile di nane rosse con massa 0.1, 0.2 e 0.3 M_{Sun} rispettivamente rappresentate con linee rosse, verdi e blu. Le linee continue individuano i risultati del modello di Luger & Barnes (2015) basati a loro volta sul modello di evoluzione stellare di Baraffe et al. (1998) mentre quelle tratteggiate corrispondono al modello di Penz & Micela (2008). I flussi sono tutti scalati in funzione del valore attuale ricevuto dalla Terra, ovvero $\mathcal{F}_{\text{Earth}} = 4.64 \text{ erg/cm}^2/\text{s}$ e sono calcolati assumendo un tempo di saturazione pari a 1 Gyr. La linea continua nera rappresenta per confronto l'evoluzione del flusso ricevuto dal nostro pianeta che è decisamente inferiore rispetto a quello che investe i pianeti nell'orbita delle nane rosse (Luger & Barnes, 2015)

Anche i venti stellari, flussi di plasma originati nelle regioni più esterne della corona stellare (Parker, 1958; Priest, 2014), contribuiscono all'erosione delle atmosfere planetarie ma con effetti meno drammatici del flusso XUV. Sfruttando il modello di Zendajias et al. (2010) e assumendo $P_s = 1 \text{ atm}$ (arbitrariamente), $\dot{M} = \dot{M}_{\text{Sun}}$ nelle formule:

$$t_p \sim \frac{M_{\text{atm}}}{\dot{M}}$$

$$M_{\text{atm}} = \frac{4\pi R_p^2 P_s}{g}$$

si ottiene infatti che un pianeta come Proxima 1b, situato a 0.05 UA dalla sua stella, è capace di trattenere un'atmosfera simile a quella terrestre per un periodo di tempo circa uguale a 10^8 anni, decisamente superiore a quello calcolato per il flusso XUV. Sempre assumendo $P_s = 1 \text{ atm}$ e $\dot{M} = \dot{M}_{\text{Sun}}$, lo stesso calcolo può essere eseguito anche per i pianeti in orbita intorno a TRAPPIST-1 con risultati che vanno da 10^8 anni per il pianeta più interno (TRAPPIST-1b, 0.011 UA) a 10^{10} anni per quello più esterno (TRAPPIST-1h, 0.06 UA) (Lingam & Loeb, 2019). I periodi misurati per questi pianeti sono più alti di quello previsto per Proxima 1b perché TRAPPIST-1 è una stella più piccola, meno attiva e dunque caratterizzata da un vento stellare meno intenso rispetto a Proxima Centauri. Lo stesso discorso vale anche per Marte per il quale la sonda MAVEN ha misurato un tasso di erosione atmosferica dovuto ai venti stellari circa uguale a 0.14 kg/s (Dong et al., 2018b) in buon accordo con il risultato previsto dal

modello di Zendajas et al.(2010). Sostituendo infatti nella formula:

$$\dot{M} \approx \frac{1}{4} \left(\frac{R}{a} \right)^2 \dot{M}_\star$$

i valori $R=0.53 R_{\text{Earth}}$, $a=1.524 \text{ UA}$ e $\dot{M}_{\text{Sun}} \sim 2 \cdot 10^{-14} M_{\text{Sun,yr}^{-1}}$, validi per Marte e il Sole, otteniamo $\dot{M}_p = 0.07 \text{ kg/s}$ che differisce solamente di un fattore 2 dal risultato di MAVEN (*Lingam & Loeb, 2019*). Con un simile tasso di erosione atmosferica, il tempo impiegato dall'atmosfera del Pianeta Rosso a evaporare è circa uguale a 10^9 anni mentre quello impiegato dall'atmosfera terrestre è 10^{12} anni, confermando l'idea che l'effetto del flusso XUV sia molto più devastante rispetto a quello del vento stellare. Esistono comunque diversi fattori che possono prevenire la completa evaporazione dell'atmosfera di un pianeta, come ad esempio il campo magnetico planetario oppure la presenza della molecola di CO_2 nell'atmosfera (*Johnstone et al., 2019*). L'azione di quest'ultima, in particolare, sembra svolgere un ruolo importante nel ridurre il tasso di erosione atmosferica per un pianeta terrestre. Infatti, come dimostrato da Johnstone et al. (2018) aumentando l'abbondanza di CO_2 nell'atmosfera del nostro pianeta si ottiene un netto raffreddamento della termosfera che associato con la contrazione atmosferica e la diminuzione della densità degli ioni riduce la fuga di particelle causata da venti stellari e flusso XUV. L'attività delle nane rosse associata alle zone abitabili piuttosto ridotte caratterizzanti queste stelle sembrano tuttavia presentare condizioni troppo estreme in grado di compromettere l'abitabilità dei pianeti terrestri limitrofi anche considerando i fenomeni che possono ostacolare l'erosione delle atmosfere. A questo si aggiunge il fatto che le stelle di tipo M sono spesso caratterizzate da intensi flares che, provocando l'accelerazione di particelle molto energetiche, sono in grado di causare cambiamenti chimici e variazioni nella quantità di radiazione che raggiunge la superficie planetaria (*Yamashiki et al., 2019*). In particolare, se non tutti i cambiamenti chimici dovuti ai SEPs risultano fatali per l'abitabilità di un pianeta, l'aumento della dose di radiazione assorbita riduce notevolmente la probabilità di trovare vita sui pianeti terrestri in orbita nelle zone abitabili delle nane rosse.

Capitolo 7

Conclusione

Lo scopo di questa tesi era quello di studiare l'impatto dell'attività stellare sull'abitabilità di pianeti terrestri. In particolare, poiché le attuali tecniche osservative risultano piuttosto limitate, la nostra analisi si è concentrata principalmente sui fenomeni caratterizzanti l'attività di stelle molto attive, le nane rosse, che possiedono diverse caratteristiche capaci di facilitare la ricerca di pianeti terrestri nella loro zona abitabile. I principali fenomeni che caratterizzano l'attività di questo tipo di stelle e dunque studiati in questa tesi sono tre: il flusso XUV, i venti stellari e i brillamenti. Dalla nostra analisi, è emerso che questi ultimi interagiscono con i pianeti attraverso modalità diverse rispetto ai primi due. Infatti, mentre il flusso XUV agisce insieme ai venti stellari causando la fuga di particelle dalle atmosfere planetarie, i brillamenti, accelerando particelle molto energetiche, modificano maggiormente le proprietà chimiche del pianeta. Sebbene sussistano queste sostanziali differenze, la combinazione di questi tre fenomeni, piuttosto intensi per le nane rosse, fanno sì che i pianeti in orbita intorno a questo tipo di stelle, escludendo qualsiasi fenomeno in grado di impedire l'erosione atmosferica, appaiano inospitali per periodi molto lunghi che vanno da qualche milione a diverse centinaia di milioni di anni (*Airapetian et al., 2017a*), ovvero fintantoché l'attività stellare rimane intensa. Risulta dunque evidente la necessità di ampliare le nostre ricerche a pianeti orbitanti intorno a stelle con caratteristiche più adatte allo sviluppo della vita. *Airapetian et al. (2017a)*, ad esempio, suggeriscono che le migliori candidate possano essere le stelle nane di tipo K oppure G mediamente evolute (più di un miliardo di anni) che presentano un'attività piuttosto ridotta e zone abitabili dalle 6 alle 20 volte più estese rispetto alle nane rosse. I dati ottenuti da Kepler, rappresentati in *Figura 7.1*, mostrano tuttavia che con le tecnologie attuali è molto più difficile rilevare la presenza di pianeti nell'orbita di stelle K e G (rispettivamente curva azzurra e verde) piuttosto che nell'orbita delle nane rosse (curva blu). A queste difficoltà contribuisce anche l'abbondanza ridotta di queste stelle che al contrario delle nane rosse appaiono più difficili da trovare nell'Universo. Facendo un rapido calcolo attraverso la funzione di Salpeter $N \sim M^{-2.35}$ (*Salpeter, 1955*), infatti, si trova che la probabilità relativa di osservare una stella di $0.1 M_{\text{Sun}}$, come Proxima Centauri oppure TRAPPIST-1, rispetto a una stella di tipo G simile al Sole ($1 M_{\text{Sun}}$) oppure a una di tipo K caratterizzata da una massa di $0.8 M_{\text{Sun}}$, è rispettivamente circa 200 e 100 volte più elevata. Alla luce di queste considerazioni, possiamo dunque concludere affermando che le conoscen-

ze finora acquisite, sebbene siano risultate infruttuose nella ricerca concreta di mondi abitabili, risulteranno fondamentali in futuro per sviluppare modelli che ci permettano di comprendere quali siano gli ambienti più adatti allo sviluppo della vita che possono essere realmente trovati nell'Universo con le tecnologie a nostra disposizione. Con la realizzazione di questi modelli, le successive missioni spaziali previste nei prossimi anni riusciranno probabilmente ad aiutarci a comprendere, entro qualche decennio, se la vita costituisca effettivamente una rarità nel cosmo come al giorno d'oggi appare ai nostri occhi.

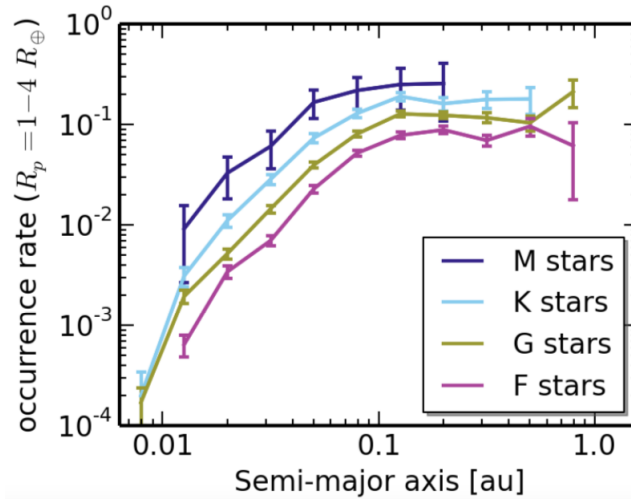


Figura 7.1: Frequenza con cui pianeti terrestri ($1 R_{\text{Earth}} < R_p < 4 R_{\text{Earth}}$) vengono rilevati intorno a stelle M (blu), K (azzurro), G (verde) F (porpora) in funzione del semiasse maggiore espresso in UA (Mulders et al., 2015b)

Appendice A

Dati di Proxima Centauri e TRAPPIST-1

| Proxima Centauri | |
|--------------------------------|--------------------------|
| Scoperta | 1915 |
| Classificazione | Nana Rossa |
| Classe spettrale | M5.5V |
| Distanza dal Sole | 4.4 al (1.3 pc) |
| Costellazione | Centaurio |
| Coordinate (all'epoca J2000.0) | |
| Ascensione retta | 14h 29m 43.0s |
| Declinazione | -62° 40' 46" |
| Lat. Galattica | -0.71° |
| Long. Galattica | 315.78° |
| Dati fisici | |
| Raggio medio | 0.145 R_{Sun} |
| Massa | 0.123 M_{Sun} |
| Periodo di rotazione | 83.5 giorni |
| Temperatura superficiale | 3042 K (media) |
| Luminosità | 0.00138 L_{Sun} |
| Indice di colore | U-B=1.43; B-V=1.90 |
| Età stimata | 4.85 miliardi di anni |
| Dati osservativi | |
| Magnitudine app. | 11.05 |
| Magnitudine ass. | 14.454 |
| Parallasse | 768.7 ± 0.3 mas |
| Velocità radiale | -21.6 km/s |

Tabella A.1: Dati di Proxima Centauri

| TRAPPIST-1 | |
|---------------------------------|----------------------------------|
| Classificazione | Nana Rossa |
| Classe spettrale | M8.2V |
| Distanza dal Sole | 39.5 al (12 pc) |
| Costellazione | Acquario |
| | Coordinate (all'epoca J2000.0) |
| Ascensione retta | 23h 06m 29.283s |
| Declinazione | -05° 02' 28,59" |
| | Dati fisici |
| Raggio medio | $0.117 \pm 0.006 R_{\text{Sun}}$ |
| Massa | $0.089 \pm 0.009 M_{\text{Sun}}$ |
| Periodo di rotazione | 3.3 giorni |
| Temperatura superficiale | 2560 K (media) |
| Luminosità | $0,00000373 L_{\text{Sun}}$ |
| Età stimata | 500 milioni di anni |
| | Dati osservativi |
| Magnitudine app. | 18.80 |
| Magnitudine ass. | 18.4 |
| Parallasse | 82.58 mas |
| Velocità radiale | -56.3 km/s |

Tabella A.2: Dati di TRAPPIST-1

Bibliografia

Acuña, M. H., Connerney, J. E. P., Wasilewski, P., Lin, R. P., Mitchell, D., Anderson, K. A., ... & Vignes, D. (2001). *Magnetic field of Mars: Summary of results from the aerobraking and mapping orbits*. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 106(E10), 23403-23417.

Airapetian, V. S., Glocer, A., Gronoff, G., Hébrard, E., & Danchi, W. (2016). *Prebiotic chemistry and atmospheric warming of early Earth by an active young Sun*. *Nature Geoscience*, 9(6), 452.

Airapetian, V. S., Glocer, A., Khazanov, G. V., Loyd, R. O. P., France, K., Sojka, J., ... & Liemohn, M. W. (2017a). *How hospitable are space weather affected habitable zones? The role of ion escape*. *The Astrophysical Journal Letters*, 836(1), L3.

Airapetian, V. S., Jackman, C. H., Mlynczak, M., Danchi, W., & Hunt, L. (2017b). *Atmospheric beacons of life from exoplanets around g and k stars*. *Scientific reports*, 7(1), 14141.

Airapetian, V. S., Barnes, R., Cohen, O., Collinson, G. A., Danchi, W. C., Dong, C. F., ... & Gopalswamy, N. (2019). *Impact of Space Weather on Climate and Habitability of Terrestrial Type Exoplanets*. arXiv preprint arXiv:1905.05093.

Anglada-Escudé, G., Amado, P. J., Barnes, J., Berdiñas, Z. M., Butler, R. P., Coleman, G. A., ... & Jeffers, S. V. (2016). *A terrestrial planet candidate in a temperate orbit around Proxima Centauri*. *Nature*, 536(7617), 437.

Aschwanden, M. J. (2000). *Do EUV nanoflares account for coronal heating?*. In *Physics of the Solar Corona and Transition Region (pp. 233-247)*. Springer, Dordrecht.

Atri, D. (2016). *Modelling stellar proton event-induced particle radiation dose on close-in exoplanets*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 465(1), L34-L38.

Bains, W. (2004). *Many chemistries could be used to build living systems*. *Astrobiology*, 4(2), 137-167.

- Balona, L. A. (2012). *Kepler observations of flaring in A–F type stars*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 423(4), 3420–3429.
- Baraffe, I., Chabrier, G., Allard, F., & Hauschildt, P. (1998). *Evolutionary models for solar metallicity low-mass stars: mass-magnitude relationships and color-magnitude diagrams*. arXiv preprint astro-ph/9805009.
- Barnes, R. (2017). *Tidal locking of habitable exoplanets*. Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, 129(4), 509–536.
- Batalha, N. M. (2014). *Exploring exoplanet populations with NASA’s Kepler Mission*. Proceedings of the National Academy of Sciences, 111(35), 12647–12654.
- Benner, S. A., Ricardo, A., & Carrigan, M. A. (2004). *Is there a common chemical model for life in the universe?*. Current opinion in chemical biology, 8(6), 672–689.
- Bolmont, E., Raymond, S. N., & Leconte, J. (2011). *Tidal evolution of planets around brown dwarfs*. Astronomy & Astrophysics, 535, A94.
- Bolmont, E., Selsis, F., Owen, J. E., Ribas, I., Raymond, S. N., Leconte, J., & Gillon, M. (2016). *Water loss from terrestrial planets orbiting ultracool dwarfs: implications for the planets of TRAPPIST-1*. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 464(3), 3728–3741.
- Bond, J. C., O’Brien, D. P., & Lauer, D. S. (2010). *The compositional diversity of extrasolar terrestrial planets. I. In situ simulations*. The Astrophysical Journal, 715(2), 1050.
- Borucki, W. J. (2016). *KEPLER Mission: development and overview*. Reports on Progress in Physics, 79(3), 036901.
- Carter-Bond, J. C., O’Brien, D. P., & Raymond, S. N. (2012). *The compositional diversity of extrasolar terrestrial planets. II. Migration simulations*. The Astrophysical Journal, 760(1), 44.
- Chen, P. F. (2011). *Coronal mass ejections: models and their observational basis*. Living Reviews in Solar Physics, 8(1), 1.
- Chen, H., & Rogers, L. A. (2016). *Evolutionary analysis of gaseous sub-Neptune-mass planets with MESA*. The Astrophysical Journal, 831(2), 180.
- Christensen, U. R. (2010). *Dynamo scaling laws and applications to the planets*. Space science reviews, 152(1–4), 565–590.
- Ciesla, F. J., Mulders, G. D., Pascucci, I., & Apai, D. (2015). *Volatile delivery to planets from water-rich planetesimals around low-mass stars*. The Astrophysical Journal, 804(1), 9.

- Cranmer, S. R., & Saar, S. H. (2011). *Testing a predictive theoretical model for the mass loss rates of cool stars*. *The Astrophysical Journal*, 741(1), 54.
- Crosby, N. B., Aschwanden, M. J., & Dennis, B. R. (1993). *Frequency distributions and correlations of solar X-ray flare parameters*. *Solar Physics*, 143(2), 275-299.
- Crutzen, P. J. (1979). *The role of NO and NO₂ in the chemistry of the troposphere and stratosphere*. *Annual review of earth and planetary sciences*, 7(1), 443-472.
- Cuntz, M., & Guinan, E. F. (2016). *About exobiology: the case for dwarf K stars*. *The Astrophysical Journal*, 827(1), 79.
- Dartnell, L. R. (2011). *Ionizing radiation and life*. *Astrobiology*, 11(6), 551-582.
- Davenport, J. R. (2016). *The Kepler catalog of stellar flares*. *The Astrophysical Journal*, 829(1), 23.
- Davenport, J. R., Kipping, D. M., Sasselov, D., Matthews, J. M., & Cameron, C. (2016). *MOST observations of our nearest neighbor: flares on Proxima Centauri*. *The Astrophysical Journal Letters*, 829(2), L31.
- Des Marais, D. J., Harwit, M. O., Jucks, K. W., Kasting, J. F., Lin, D. N., Lunine, J. I., ... & Woolf, N. J. (2002). *Remote sensing of planetary properties and biosignatures on extrasolar terrestrial planets*. *Astrobiology*, 2(2), 153-181.
- Dole, S. H. (1964). *Habitable planets for man*, New York, Blaisdell Pub. Co[1964].
- Dong, C., Lingam, M., Ma, Y., & Cohen, O. (2017). *Is Proxima Centauri b habitable? A study of atmospheric loss*. *The Astrophysical Journal Letters*, 837(2), L26.
- Dong, C., Jin, M., Lingam, M., Airapetian, V. S., Ma, Y., & van der Holst, B. (2018a). *Atmospheric escape from the TRAPPIST-1 planets and implications for habitability*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(2), 260-265.
- Dong, C., Lee, Y., Ma, Y., Lingam, M., Bougher, S., Luhmann, J., ... & Fang, X. (2018b). *Modeling martian atmospheric losses over time: implications for exoplanetary climate evolution and habitability*. *The Astrophysical Journal Letters*, 859(1), L14.
- France, K., Loyd, R. P., Youngblood, A., Brown, A., Schneider, P. C., Hawley, S. L., ... & Davenport, J. R. (2016). *The MUSCLES treasury survey. I. Motivation and overview*. *The Astrophysical Journal*, 820(2), 89.
- Garcia-Sage, K., Gloer, A., Drake, J. J., Gronoff, G., & Cohen, O. (2017). *On the magnetic protection of the atmosphere of Proxima Centauri b*. *The Astro-*

physical Journal Letters, 844(1), L13.

Garraffo, C., Drake, J. J., & Cohen, O. (2016). *The space weather of Proxima Centauri b*. arXiv preprint arXiv:1609.09076.

Garraffo, C., Drake, J. J., Cohen, O., Alvarado-Gómez, J. D., & Moschou, S. P. (2017). *The threatening magnetic and plasma environment of the TRAPPIST-1 planets*. The Astrophysical Journal Letters, 843(2), L33.

Gillon, M., Jehin, E., Lederer, S. M., Delrez, L., de Wit, J., Burdanov, A., ... & Demory, B. O. (2016). *Temperate Earth-sized planets transiting a nearby ultracool dwarf star*. Nature, 533(7602), 221.

Gillon, M., Triaud, A. H., Demory, B. O., Jehin, E., Agol, E., Deck, K. M., ... & Bolmont, E. (2017). *Seven temperate terrestrial planets around the nearby ultracool dwarf star TRAPPIST-1*. Nature, 542(7642), 456.

Gizis, J. E. (2002). *Brown dwarfs and the TW hydrae association*. The Astrophysical Journal, 575(1), 484.

Gough, D. O. (1981). *Solar interior structure and luminosity variations*. In Physics of Solar Variations (pp. 21-34). Springer, Dordrecht.

Grenfell, J. L. (2017). *A review of exoplanetary biosignatures*. Physics Reports, 713, 1-17.

Grießmeier, J. M., Stadelmann, A., Motschmann, U., Belisheva, N. K., Lammer, H., & Biernat, H. K. (2005). *Cosmic ray impact on extrasolar Earth-like planets in close-in habitable zones*. Astrobiology, 5(5), 587-603.

Grießmeier, J. M., Tabataba-Vakili, F., Stadelmann, A., Grenfell, J. L., & Atri, D. (2015). *Galactic cosmic rays on extrasolar Earth-like planets-I. Cosmic ray flux*. Astronomy & Astrophysics, 581, A44.

Gunell, H., Maggiolo, R., Nilsson, H., Wieser, G. S., Slapak, R., Lindkvist, J., ... & De Keyser, J. (2018). *Why an intrinsic magnetic field does not protect a planet against atmospheric escape*. Astronomy & Astrophysics, 614, L3.

Horvath, J. E., & Galante, D. (2012). *Effects of high-energy astrophysical events on habitable planets*. International Journal of Astrobiology, 11(4), 279-286.

Hunten, D. M. (2002). *Exospheres and planetary escape*. Atmospheres in the Solar System: Comparative Aeronomy, 130, 191-202.

Irwin, P. G. J. (2006). *Giant Planets of our Solar System: An Introduction*. Springer-Praxis.

Jakosky, B. M., Grebowsky, J. M., Luhmann, J. G., Connerney, J., Eparvier, F., Ergun, R., ... & Mitchell, D. L. (2015). *MAVEN observations of the response of*

- Mars to an interplanetary coronal mass ejection.* *Science*, 350(6261), aad0210.
- Johnstone, C. P., Güdel, M., Brott, I., & Lüftinger, T. (2015). *Stellar winds on the main-sequence-II. The evolution of rotation and winds.* *Astronomy & Astrophysics*, 577, A28.
- Johnstone, C. P., Güdel, M., Lammer, H., & Kislyakova, K. G. (2018). *Upper atmospheres of terrestrial planets: Carbon dioxide cooling and the Earth's thermospheric evolution.* *Astronomy & Astrophysics*, 617, A107.
- Johnstone, C. P., Khodachenko, M. L., Lüftinger, T., Kislyakova, K. G., Lammer, H., & Güdel, M. (2019). *Extreme hydrodynamic losses of Earth-like atmospheres in the habitable zones of very active stars.* *Astronomy & Astrophysics*, 624, L10.
- Karpen, J. T., Antiochos, S. K., & DeVore, C. R. (2012). *The mechanisms for the onset and explosive eruption of coronal mass ejections and eruptive flares.* *The Astrophysical Journal*, 760(1), 81.
- Kasting, J. F., Toon, O. B., & Pollack, J. B. (1988). *How climate evolved on the terrestrial planets.* *Scientific American*, 258(2), 90-97.
- Kasting, J. F., Whitmire, D. P., & Reynolds, R. T. (1993). *Habitable zones around main sequence stars.* *Icarus*, 101(1), 108-128.
- Kay, C., Opher, M., & Kornbleuth, M. (2016). *Probability of CME impact on exoplanets orbiting M dwarfs and solar-like stars.* *The Astrophysical Journal*, 826(2), 195.
- Kivelson, M. G. & Russel, C. T. (1995). *Introduction to space physics.* Cambridge university press.
- Kobayashi, K., Kaneko, T., Saito, T., & Oshima, T. (1998). *Amino acid formation in gas mixtures by high energy particle irradiation.* *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 28(2), 155-165.
- Kopparapu, R. K., Ramirez, R., Kasting, J. F., Eymet, V., Robinson, T. D., Mahadevan, S., ... & Deshpande, R. (2013). *Habitable zones around main-sequence stars: new estimates.* *The Astrophysical Journal*, 765(2), 131.
- Kopparapu, R. K., Wolf, E. T., Arney, G., Batalha, N. E., Haqq-Misra, J., Grimm, S. L., & Heng, K. (2017). *Habitable moist atmospheres on terrestrial planets near the inner edge of the habitable zone around M dwarfs.* *The Astrophysical Journal*, 845(1), 5.
- Leconte, J., Forget, F., Charnay, B., Wordsworth, R., & Pottier, A. (2013). *Increased insolation threshold for runaway greenhouse processes on Earth-like planets.* *Nature*, 504(7479), 268.
- Lingam, M., Dong, C., Fang, X., Jakosky, B. M., & Loeb, A. (2018). *The prototypical role of solar energetic particles in the origin of life.* *The Astrophysical*

Journal, 853(1), 10.

Lingam, M. (2019). *Revisiting the Biological Ramifications of Variations in Earth's Magnetic Field*. The Astrophysical Journal Letters, 874(2), L28.

Lingam, M., & Loeb, A. (2018). *Physical constraints for the evolution of life on exoplanets*. arXiv preprint arXiv:1810.02007.

López-Morales, M., Gómez-Pérez, N., & Ruedas, T. (2011). *Magnetic Fields in Earth-like Exoplanets and Implications for Habitability around M-dwarfs*. Origins of Life and Evolution of Biospheres, 41(6), 533-537.

López-Puertas, M., Funke, B., Gil-López, S., Von Clarmann, T., Stiller, G. P., Höpfner, M., ... & Jackman, C. H. (2005). *Observation of NO_x enhancement and ozone depletion in the Northern and Southern Hemispheres after the October–November 2003 solar proton events*. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 110(A9).

Loyd, R. P., France, K., Youngblood, A., Schneider, C., Brown, A., Hu, R., ... & Tian, F. (2016). *The MUSCLES Treasury Survey. III. X-ray to infrared spectra of 11 M and K stars hosting planets*. The Astrophysical Journal, 824(2), 102.

Luger, R., & Barnes, R. (2015). *Extreme water loss and abiotic O₂ buildup on planets throughout the habitable zones of M dwarfs*. Astrobiology, 15(2), 119-143.

Luger, R., Barnes, R., Lopez, E., Fortney, J., Jackson, B., & Meadows, V. (2015). *Habitable evaporated cores: transforming mini-Neptunes into super-Earths in the habitable zones of M dwarfs*. Astrobiology, 15(1), 57-88.

Luger, R., Sestovic, M., Kruse, E., Grimm, S. L., Demory, B. O., Agol, E., ... & Burgasser, A. (2017). *A seven-planet resonant chain in TRAPPIST-1*. Nature Astronomy, 1(6), 0129.

Luhmann, J. G., Ma, Y. J., Villarreal, M. N., Wei, H. Y., & Zhang, T. L. (2015). *The Venus–solar wind interaction: Is it purely ionospheric?*. Planetary and Space Science, 119, 36-42.

Lundin, R., Barabash, S., Andersson, H., Holmström, M., Grigoriev, A., Yamauchi, M., ... & Winningham, D. (2004). *Solar wind-induced atmospheric erosion at Mars: First results from ASPERA-3 on Mars Express*. science, 305(5692), 1933-1936.

MacGregor, M. A., Weinberger, A. J., Wilner, D. J., Kowalski, A. F., & Cranmer, S. R. (2018). *Detection of a millimeter flare from Proxima Centauri*. The Astrophysical Journal Letters, 855(1), L2.

Maehara, H., Shibayama, T., Notsu, S., Notsu, Y., Nagao, T., Kusaba, S., ... & Shibata, K. (2012). *Superflares on solar-type stars*. Nature, 485(7399), 478.

- Maehara, H., Shibayama, T., Notsu, Y., Notsu, S., Honda, S., Nogami, D., & Shibata, K. (2015). *Statistical properties of superflares on solar-type stars based on 1-min cadence data*. *Earth, Planets and Space*, 67(1), 59.
- Maehara, H., Notsu, Y., Notsu, S., Namekata, K., Honda, S., Ishii, T. T., ... & Shibata, K. (2017). *Starspot activity and superflares on solar-type stars*. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 69(3).
- Marcus, R. A., Sasselov, D., Hernquist, L., & Stewart, S. T. (2010). *Minimum radii of super-Earths: constraints from giant impacts*. *The Astrophysical Journal Letters*, 712(1), L73.
- Mayor, M., & Queloz, D. (1995). *A Jupiter-mass companion to a solar-type star*. *Nature*, 378(6555), 355.
- Miyakawa, S., Yamanashi, H., Kobayashi, K., Cleaves, H. J., & Miller, S. L. (2002). *Prebiotic synthesis from CO atmospheres: implications for the origins of life*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(23), 14628-14631.
- Mulders, G. D., Ciesla, F. J., Min, M., & Pascucci, I. (2015a). *The snow line in viscous disks around low-mass stars: implications for water delivery to terrestrial planets in the habitable zone*. *The Astrophysical Journal*, 807(1), 9.
- Mulders, G. D., Pascucci, I., & Apai, D. (2015b). *A stellar-mass-dependent drop in planet occurrence rates*. *The Astrophysical Journal*, 798(2), 112.
- Nava-Sedeño, J. M., Ortiz-Cervantes, A., Segura, A., & Domagal-Goldman, S. D. (2016). *Carbon monoxide and the potential for prebiotic chemistry on habitable planets around main sequence M stars*. *Astrobiology*, 16(10), 744-754.
- Notsu, Y., Shibayama, T., Maehara, H., Notsu, S., Nagao, T., Honda, S., ... & Shibata, K. (2013). *Superflares on solar-type stars observed with Kepler II. Photometric variability of superflare-generating stars: a signature of stellar rotation and starspots*. *The Astrophysical Journal*, 771(2), 127.
- Notsu, Y., Honda, S., Maehara, H., Notsu, S., Shibayama, T., Nogami, D., & Shibata, K. (2015a). *High dispersion spectroscopy of solar-type superflare stars. I. Temperature, surface gravity, metallicity, and vsin i*. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 67(3).
- Notsu, Y., Honda, S., Maehara, H., Notsu, S., Shibayama, T., Nogami, D., & Shibata, K. (2015). *High dispersion spectroscopy of solar-type superflare stars. II. Stellar rotation, starspots, and chromospheric activities*. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 67(3).
- Notsu, Y., Maehara, H., Honda, S., Hawley, S. L., Davenport, J. R., Namekata, K., ... & Shibata, K. (2019). *Do Kepler Superflare Stars Really Include Slowly Rotating Sun-like Stars?—Results Using APO 3.5 m Telescope Spectroscopic Observations and Gaia-DR2 Data*. *The Astrophysical Journal*, 876(1), 58.

- Olson, P., & Amit, H. (2006). *Changes in earth's dipole*. *Naturwissenschaften*, 93(11), 519-542.
- Ortolani, S. (Laurea Magistrale in Astronomia, A.A. 2009/2010). *Astrofisica Generale mod. A*.
- Pallavicini, R., Golub, L., Rosner, R., Vaiana, G. S., Ayres, T., & Linsky, J. L. (1981). *Relations among stellar X-ray emission observed from Einstein, stellar rotation and bolometric luminosity*. *The Astrophysical Journal*, 248, 279-290.
- Parker, E. N. (1958). *Dynamics of the interplanetary gas and magnetic fields*. *The Astrophysical Journal*, 128, 664.
- Penz, T., & Micela, G. (2008). *X-ray induced mass loss effects on exoplanets orbiting dM stars*. *Astronomy & Astrophysics*, 479(2), 579-584.
- Perryman, M. (2018). *The exoplanet handbook*, 2nd ed. Cambridge University Press.
- Priest, E. (2014). *Magnetohydrodynamics of the Sun*. Cambridge University Press.
- Ramirez, R. (2018). *A more comprehensive habitable zone for finding life on other planets*. *Geosciences*, 8(8), 280.
- Ramirez, R. M., & Kaltenegger, L. (2018). *A methane extension to the classical habitable zone*. *The Astrophysical Journal*, 858(2), 72.
- Ranjan, S., Todd, Z. R., Rimmer, P. B., Sasselov, D. D., & Babbitt, A. R. (2019). *Nitrogen Oxide Concentrations in Natural Waters on Early Earth*. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 20(4), 2021-2039.
- Reiners, A., & Basri, G. (2008). *The moderate magnetic field of the flare star Proxima Centauri*. *Astronomy & Astrophysics*, 489(3), L45-L48.
- Reiners, A., & Basri, G. (2010). *A volume-limited sample of 63 M7-M9. 5 dwarfs. II. Activity, magnetism, and the fade of the rotation-dominated dynamo*. *The Astrophysical Journal*, 710(2), 924.
- Rogers, L. A., & Seager, S. (2010). *A framework for quantifying the degeneracies of exoplanet interior compositions*. *The Astrophysical Journal*, 712(2), 974.
- Russell, C. T. (1993). *Planetary magnetospheres*. *Reports on Progress in Physics*, 56(6), 687.
- Sagan, C., & Salpeter, E. E. (1976). *Particles, environments and possible ecologies in the Jovian atmosphere*.
- Scalo, J., Kaltenegger, L., Segura, A., Fridlund, M., Ribas, I., Kulikov, Y. N., ... & Selsis, F. (2007). *M stars as targets for terrestrial exoplanet searches and*

biosignature detection. *Astrobiology*, 7(1), 85-166.

Schrijver, C. J., Kauristie, K., Aylward, A. D., Denardini, C. M., Gibson, S. E., Glover, A., ... & Jakowski, N. (2015). *Understanding space weather to shield society: A global road map for 2015–2025 commissioned by COSPAR and ILWS*. *Advances in Space Research*, 55(12), 2745-2807.

Seager, S., Bains, W., & Hu, R. (2013). *Biosignature gases in H₂-dominated atmospheres on rocky exoplanets*. *The Astrophysical Journal*, 777(2), 95.

Segura, A., Krelow, K., Kasting, J. F., Sommerlatt, D., Meadows, V., Crisp, D., ... & Mlawer, E. (2003). *Ozone concentrations and ultraviolet fluxes on Earth-like planets around other stars*. *Astrobiology*, 3(4), 689-708.

Segura, A., Kasting, J. F., Meadows, V., Cohen, M., Scalo, J., Crisp, D., ... & Tinetti, G. (2005). *Biosignatures from Earth-like planets around M dwarfs*. *Astrobiology*, 5(6), 706-725.

Segura, A., Walkowicz, L. M., Meadows, V., Kasting, J., & Hawley, S. (2010). *The effect of a strong stellar flare on the atmospheric chemistry of an Earth-like planet orbiting an M dwarf*. *Astrobiology*, 10(7), 751-771.

Shibata, K., Isobe, H., Hillier, A., Choudhuri, A. R., Maehara, H., Ishii, T. T., ... & Honda, S. (2013). *Can superflares occur on our Sun?*. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 65(3), 49.

Shimizu, T. (1995). *Energetics and occurrence rate of active-region transient brightenings and implications for the heating of the active-region corona*. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 47, 251-263.

Smart, D. F., Shea, M. A., & McCracken, K. G. (2006). *The Carrington event: Possible solar proton intensity–time profile*. *Advances in Space Research*, 38(2), 215-225.

Spohn, T. (2015). *Physics of terrestrial planets and moons: An introduction and overview*.

Strobel, D. F. (2002). *Aeronomics systems on planets, moons, and comets*. *GEO-PHYSICAL MONOGRAPH-AMERICAN GEOPHYSICAL UNION*, 130, 7-22.

Tarter, J. C., Backus, P. R., Mancinelli, R. L., Aurnou, J. M., Backman, D. E., Basri, G. S., ... & Feigelson, E. D. (2007). *A reappraisal of the habitability of planets around M dwarf stars*. *Astrobiology*, 7(1), 30-65.

Tian, F. (2015). *Atmospheric escape from solar system terrestrial planets and exoplanets*. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 43, 459-476.

Tu, L., Johnstone, C. P., Güdel, M., & Lammer, H. (2015). *The extreme ultraviolet and X-ray Sun in Time: High-energy evolutionary tracks of a solar-like*

- star*. *Astronomy & Astrophysics*, 577, L3.
- Usoskin, I., Ibragimov, A., Shea, M. A., & Smart, D. F. (2015). *Database of ground level enhancements (GLE) of high energy solar proton events*. *PoS*, 054.
- Vida, K., Kóvári, Z., Pál, A., Oláh, K., & Kriskovics, L. (2017). Frequent flaring in the TRAPPIST-1 system—unsuited for life?. *The Astrophysical Journal*, 841(2), 124.
- Walker, A. R. (1981). *Flare activity of Proxima Centauri*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 195(4), 1029-1035.
- Walter, F. M. (1981). *On the coronae of rapidly rotating stars. II-A period-activity relation in G stars*. *The Astrophysical Journal*, 245, 677-681.
- Webb, D. F., & Howard, T. A. (2012). *Coronal mass ejections: observations*. *Living Reviews in Solar Physics*, 9(1), 3.
- West, A. A., Hawley, S. L., Bochanski, J. J., Covey, K. R., Reid, I. N., Dhital, S., ... & Masuda, M. (2008). *Constraining the age-activity relation for cool stars: the Sloan Digital Sky Survey Data Release 5 low-mass star spectroscopic sample*. *The Astronomical Journal*, 135(3), 785.
- Wheatley, P. J., Louden, T., Bourrier, V., Ehrenreich, D., & Gillon, M. (2017). *Strong XUV irradiation of the Earth-sized exoplanets orbiting the ultracool dwarf TRAPPIST-1*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, 465(1), L74-L78.
- Wolf, E. T. (2017). *Assessing the habitability of the TRAPPIST-1 system using a 3D climate model*. *The Astrophysical Journal Letters*, 839(1), L1.
- Wong, M. L., Charnay, B. D., Gao, P., Yung, Y. L., & Russell, M. J. (2017). *Nitrogen oxides in early Earth's atmosphere as electron acceptors for life's emergence*. *Astrobiology*, 17(10), 975-983.
- Wood, B. E., Müller, H. R., Zank, G. P., Linsky, J. L., & Redfield, S. (2005). *New mass-loss measurements from astrospheric Ly α absorption*. *The Astrophysical Journal Letters*, 628(2), L143.
- Yamashiki, Y. A., Maehara, H., Airapetian, V., Notsu, Y., Sato, T., Notsu, S., ... & Sasaki, T. (2019). *Impact of Stellar Superflares on Planetary Habitability*. arXiv preprint arXiv:1906.06797.
- Yang, J., Cowan, N. B., & Abbot, D. S. (2013). *Stabilizing cloud feedback dramatically expands the habitable zone of tidally locked planets*. *The Astrophysical Journal Letters*, 771(2), L45.
- Youngblood, A., France, K., Loyd, R. P., Linsky, J. L., Redfield, S., Schneider, P. C., ... & Rugheimer, S. (2016). *The MUSCLES Treasury Survey. II. Intrinsic Ly α and extreme ultraviolet spectra of K and M dwarfs with exoplanets*. *The*

Astrophysical Journal, 824(2), 101.

Youngblood, A., France, K., Loyd, R. P., Brown, A., Mason, J. P., Schneider, P. C., ... & Hawley, S. L. (2017). *The MUSCLES Treasury Survey. IV. Scaling relations for ultraviolet, Ca II K, and energetic particle fluxes from M dwarfs*. The Astrophysical Journal, 843(1), 31.

Zahnle, K. J., & Walker, J. C. (1982). *The evolution of solar ultraviolet luminosity*. Reviews of Geophysics, 20(2), 280-292.

Zendejas, J., Segura, A., & Raga, A. C. (2010). *Atmospheric mass loss by stellar wind from planets around main sequence M stars*. Icarus, 210(2), 539-544.