UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI

FEDERICO II



Scuola Politecnica e delle Scienze di Base Area Didattica di Scienze Matematiche Fisiche e Naturali

DIPARTIMENTO DI FISICA ETTORE PANCINI

LAUREA TRIENNALE IN FISICA

Studio dell'efficienza della fotosintesi su esopianeti nella zona abitabile

Relatori:

Candidato: Alessio Calise

Ch.mo prof. Giovanni Covone Dott. Christian Magliano

ANNO ACCADEMICO 2020/2021

Indice

1	Introduzione				
	1.1	L'Astrobiologia	3		
	1.2	Richiami di Astrofisica	5		
		1.2.1 Flusso Radiante	5		
		1.2.2 Radiazione di corpo nero	5		
		1.2.3 Classificazione delle stelle	7		
	1.3	Esopianeti	8		
		1.3.1 I pianeti di tipo terrestre	10		
		1.3.2 Telescopi Kepler e TESS	11		
	1.4	La zona abitabile	12		
	1.5	1.5 La fotosintesi			
		1.5.1 Efficienza della fotosintesi	14		
		1.5.2 Exergia	17		
	1.6	Scopo della Tesi	20		
2	Effi	cienza della fotosintesi su esopianeti abitabili	21		
	2.1	Modello di rete <i>noise-canceling</i> e fotosintesi	21		
		2.1.1 Il modello a due canali	24		
	2.2	Perchè le piante sono verdi?	26		
		2.2.1 Calcolo dello spettro di assorbimento ottimale \ldots \ldots	28		
3	App	plicazione del modello a stelle di diversi tipi spettrali	30		
	3.1	Materiali e Metodi	30		
	3.2	Analisi dei risultati	31		

4	Conclusioni				
	4.1	Sviluppi Futuri		37	
Bibliografia				38	

Capitolo 1

Introduzione

Uno degli interrogativi che fin dagli albori del pensiero filosofico e scientifico attanaglia la mente dell'uomo è: "Siamo soli nell'universo?". L'idea dell'esistenza di vita oltre la Terra ha affascinato i pensatori di tutte le epoche e finalmente una risposta o almeno una piccola parte di essa sembra essere alla nostra portata grazie alle tecnologie astronomiche di nuova generazione che permetteranno di rilevare biofirme e tecnofirme sugli esopianeti più vicini [1].

Nel primo capitolo di questa tesi sarà presentata un'introduzione alla scienza che studia questi fenomeni: **l'Astrobiologia** Nel secondo capitolo sarà introdotto il modello proposto da Arp et al. [2] che ci permetterà di studiare nel dettaglio l'efficienza della fotosintesi e i fattori che la limitano. Infine nel terzo capitolo questo modello vera ampliato ed utilizzato su stelle di diversi tipi spettrali.

1.1 L'Astrobiologia

L'Astrobiologia è la scienza che studia le origini e l'evoluzione della vita nell'universo, le molecole che sono essenziali per la sua nascita, i limiti ambientali in cui può esistere e la definizione stessa di vita. Cercando di scoprire se esistano forme di vita al di fuori del pianeta Terra. L'Astrobiologia abbraccia molte discipline, dalla fisica alla biologia ma non solo: geologia, medicina, sociologia, chimica sono solo alcune delle scienze che cooperano per comprendere l'origine della vita. L'idea che altri esseri viventi potessero esistere è molto antica, già i filosofi dell'antica Grecia come Anassimandro o Pitagora abbozzarono l'idea che il nostro mondo potesse essere "uno in un' infinità di mondi" e che gli esseri umani non fossero soli nell'universo. Tuttavia queste idee, tutt'altro che diffuse, rimasero per molto tempo patrimonio solo di pochi e a volte vennero anche fortemente osteggiate [3]. I primi passi veri e propri nello studio della vita fuori dalla Terra vennero fatti però in età moderna, concentrandosi sui pianeti nostri vicini nel sistema solare. Di particolare importanza in quest'ambito furono infatti le missioni Viking su Marte; i lander erano infatti equipaggiati con strumenti per rilevare marker tipici della presenza di vita inclusa l'acqua. La lista di molecole interstellari trovate nello spazio ammonta almeno a 163 [4] di cui molte organiche, ciò unito alla presenza di vita anche negli ambienti terrestri più estremi (estremofili) suggerisce che la vita extraterrestre potrbbe essere qualcosa di altamente probabile e abbastanza diffusa. Tuttavia ancora nulla di concreto è stato scoperto, le condizioni per una vita simile a quella sulla Terra sembrano qualcosa ben più raro. Una delle caratteristiche della vita sulla Terra è quella che ogni organismo vivente evoluta, come l'uomo o gli animali dipende fortemente da altre forme di vita da cui assorbire il nutrimento ed energia che non possono procurarsi direttamente dall'ambiente circostante. Le forme di vita alla base di questa catena, che meglio riescono ad assorbire nutrienti dall'ambiente, sono gli organismi in grado di svolgere la fotosintesi. Questo procedimento si può dunque ipotizzare essere alla base della vita così come la conosciamo. Un'altra caratteristica fondamentale per la vita è la presenza di acqua liquida sul pianeta, fondamentale per un'enorme varietà di processi biologici e solvente universale in cui possono essere disciolte le sostanze organiche. Per questa ragione la ricerca della vita è rivolta a quegli esopianeti in cui è disponibile acqua liquida sulla superficie e sui quali può avvenire la fotosintesi. Quest'ultima affermazione si rivela un interessante spunto di riflessione perché le molecole alla base di questo processo quali idrogeno, ossigeno e carbonio sono più che abbondanti nell'universo, così come lo è la luce, dato che ogni esopianeta orbita attorno a una o più stelle che irradiano. Allo stesso tempo, però, la fotosintesi è un fenomeno molto più intricato di così. Se queste condizioni da sole bastassero essa sarebbe molto diffusa su altri pianeti, ma non

è così nella pratica ed è quindi estremamente interessante studiare quali siano gli ulteriori requisiti affinché la fotosintesi avvenga per poter meglio individuare esopianeti idonei ad ospitare la vita così come la conosciamo.

1.2 Richiami di Astrofisica

1.2.1 Flusso Radiante

La luminosità di una stella può essere misurata attraverso il **flusso radiante** emesso da essa. Il flusso radiante è l'ammontare di energia su tutte le lunghezze d'onda che attraversa un'unità di superficie perpendicolare alla direzione di propagazione della luce per unità di tempo. Esso dipende dunque sia dalla luminosità intrinseca dell'oggetto (energia emessa al secondo) sia dalla distanza dall'osservatore. Il flusso radiante F, misurato a distanza r, è legato alla luminosità della stella dall'equazione:

$$F = \frac{L}{4\pi r^2}.\tag{1.1}$$

Infatti nell'ipotesi di emissione isotropa due osservatori a distanza r dalla stella devono ricevere lo stesso flusso, quindi scrivere la 1.1 equivale a distribuire tutta la luminosità su una sfera di raggio r centrata nella stella.

1.2.2 Radiazione di corpo nero

Fondamentale nello studio di stelle e pianeti è il concetto di corpo nero. Il corpo nero è un emettitore ideale, in perfetto equilibrio termico, che assorbe tutta la radiazione incidente su di esso per poi riemetterla sotto forma di radiazione di corpo nero . Stelle e pianeti possono dunque essere, in prima approssimazione, assimilati a corpi neri. La Fig. 1.1 mostra come ad una certa temperatura T il corpo nero emetta uno spettro continuo con un picco alla lunghezza d'onda λ_{max} che dipende unicamente dalla temperatura. La relazione tra λ_{max} e T è nota come legge dello spostamento di Wien

$$\lambda_{max}T = 0.002897755 \,\mathrm{mK}\,. \tag{1.2}$$

Dalla Eq. (1.1) si osserva che con l'aumentare della temperatura del corpo nero esso emette più energia al secondo su tutte le lunghezze d'onda, sperimentalmente si trova che questo fenomeno segue la **legge di Stefan-Boltzmann**

$$L = A\sigma T^4 \,, \tag{1.3}$$

con A area del corpo nero
e $\sigma = 5,670400 x 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$ (detta costante di Stefan-Boltzmann). Approssimando una stella ad una sfera di raggio R
 possiamo allora scrivere per essa l'equazione di Stefan-Boltzmann:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4 \,. \tag{1.4}$$

Una trattazione più rigorosa del corpo nero però arrivò successivamente con Planck che per risolvere il problema della "*catastrofe ultravioletta*" postulò che l'energia associata alla radiazione elettromagnetica fosse quantizzata, cioè multiplo intero di un certo quanto di energia $E = \lambda \nu$ giungendo dunque all' equazione nota come **funzione di Planck**:

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2/\lambda^5}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$
(1.5)

con $h = 6,62606876 \times 10^{-34} Js$ costante di Planck. Possiamo applicare la funzione di Planck a sistemi astrofisici esprimendola in coordinate sferiche:

$$B_{\lambda}(T)d\lambda \, dA \cos\theta d\Omega = B_{\lambda}(T) \, d\lambda \, dA \cos\theta \sin\theta \, d\theta \, d\phi \tag{1.6}$$

che esprime la quantita di energia per unita di tempo corrispondente alle lunghezze d'onda tra $\lambda \in \lambda + d\lambda$ emessa da un corpo nero di temperatura T e area dA in un angolo solido $d\Omega = sin\theta d\theta d\phi$.

Comparando l'equazione di Stefan-Boltzmann e la funzione di Planck in coordinate sferiche integrata sugli angoli $\theta \in \phi$ e su tutta l'area A otteniamo:

$$\int_0^\infty B_\lambda(T) d\lambda = \frac{\sigma T^4}{\pi} \,. \tag{1.7}$$



Figura 1.1: [Spettro di corpo nero per temperature tipiche di stelle dei tipi spettrali, in ordine di temperatura decrescente F (7000K), G (5777K) e K (4000K) [5].]

1.2.3 Classificazione delle stelle

Attraverso l'equazione 1.2 è possibile quindi osservare lo spettro di una stella e ricavare da questo la sua temperatura superficiale. Un ulteriore metodo per lo studio della temperatura consiste nello studiare le linee di assorbimento dello spettro corrispondenti a ioni di determinati elementi chimici presenti nella fotosfera (la regione della stella oltre la quale essa diventa opaca cioè non più trasparente ai fotoni), infatti, la presenza di alcuni elementi specifici indica che la temperatura è tale da causare l'eccitazione di questi ultimi. La classificazione ufficiale per le stelle segue il modello di Harvard che ci permette appunto di catalogarle in base alla loro temperatura effettiva in ordine decrescente secondo lo schema O, B, F, G, K, M raccogliendo, quindi, le stelle dalle blu, più calde (O) con temperature superiori a 33000 K alle rosse, più fredde (M) con temperature inferiori ai 3700K. Stelle di diversa categoria mostrano, per quanto detto prima, diversi spettri di emissione:

• O - Poche righe, prevalenza di He^+

- B Più righe, prevalenza di elio non ionizzato e sviluppo delle linee di Balmer dell'idrogeno
- A Linee di Balmer dell'idrogeno molto definite, appaiono le righe caratteristiche di Ca^+
- F Linee di Balmer dell'idrogeno e di metalli ionizzati declinano, aumento delle linee di metalli non ionizzati
- G Molte righe metalliche, linee di Ca^+ definite, le righe dei metalli non ionizzati continuano ad aumentare
- K Appaiono le prime bande molecolari, linee dei metalli non ionizzati dominanti
- M Righe di metalli non ionizzati ancora forti, prevalenza di bande molecolari

All'interno della divisione in lettere c'è poi una sottodivisione decimale (per esempio da A0 ad A9). In aggiunta ai tipi spettrali tradizionali, lo schema di Harvard può essere ampliato con stelle di tipo L (nane brune con temperature dai 1300K ai 2500K) e di tipo T (con temperature inferiori ai 1300K)

1.3 Esopianeti

Un esopianeta o pianeta extrasolare è un pianeta esterno al sistema solare. Essendo questi corpi celesti non dotati di una propria luminosità, la loro rivelazione e il conseguente studio sono resi possibili unicamente da metodi di osservazione indiretta. Questi metodi ci consentono di dedurre le caratteristiche planetarie a partire da quelle della stella attorno cui orbitano. La rivelazione di esopianeti costituisce uno sforzo tecnologico imponente, infatti ad oggi la maggior parte degli esopianeti scoperti è costituita da giganti gassosi e solo in misura minore pianeti rocciosi. Esistono diversi metodi usati per la scoperta di esopianeti [Fig.1.2] [6]:



Figura 1.2: [Numero totale di esopianeti scoperti per anno in relazione alla tecnica utilizzata [NASA Exoplanet Archive].]

- L'astrometria consiste nel misurare precisamente la posizione di una stella nel cielo e come questa cambi nel tempo. L'influenza di un eventuale pianeta porta la stella a muoversi in un' orbita, seppur minima, attorno ad un comune centro di massa.
- Il metodo delle **velocità radiali** o metodo **Doppler** è il metodo più antico¹ usato in questo campo di studi a cui dobbiamo una gran parte delle scoperte fatte fin ora. Il principio alla base di questo metodo è il seguente: analizzando lo spettro stellare quando la stella si avvicina o allontana alla Terra (a causa dell'interazione gravitazionale con un pianeta orbitante attorno ad essa) e confrontandolo con lo spettro standard è possibile costruire, misurando lo spostamento delle righe di emissione per effetto Doppler, la curva di velocità radiale. Dalla curva di velocità radiale è possibile calcolare la quantità $M_p \sin i$, dove M_p è la massa del pianeta ed i è la sua inclinazione orbitale.

 $^{^1\}mathrm{II}$ primo esopianeta così scoperto risale infatti al 1995 ad opera di Queloz e Mayer

Eventuali variazioni di velocità possono quindi far dedurre non solo presenza di un pianeta ma ci permettono anche di determinare un limite superiore (quando i = 90) alla sua massa.

- Il metodo dei transiti fotometrici è utilizzabile nel caso fortunato in cui il pianeta visto dalla Terra passi davanti alla sua stella, eclissandola parzialmente. Osservando le variazioni nella luminosità della stella è possibile determinare la presenza del pianeta e altri parametri chiave del sistema.
- Il microlensing gravitazionale è basato sull'effetto lente gravitazionale previsto dalla teoria della Relatività Generale di Einstein [7] per la quale il campo gravitazionale di un sistema planetario posto sulla linea di vista devia la luce emessa da una stella di background.

1.3.1 I pianeti di tipo terrestre

Gli esopianeti possono essere suddivisi in base alla massa e la composizione chimica in:

- Pianeti Terrestri: detti anche pianeti rocciosi, composti principalmente di metalli o silicati, poco massivi con masse che arrivano fino a $10M_{\oplus}$.
- Giganti Gassosi: composti principalmente di idrogeno o elio, molto massivi
- Giganti Ghiacciati: composti principalmente da sostanze più pesanti di idrogeno o elio "ghiacciate", come acqua, metano o ammoniaca. Più piccoli dei giganti gassosi ma comunque molto più massivi della Terra.

I pianeti terresti sono pianeti composti principalmente di silicati [8]. I pianeti terrestri del Sistema Solare (Terra, Mercurio, Venere ,Marte) hanno in comune la stessa struttura di base: un nucleo metallico al centro (solitamente composto per lo più da ferro) circondato da un mantello di silicati. É estremamente difficile osservare pianeti terrestri fuori dal sistema solare poiché, per via delle loro dimensioni, vengono facilmente oscurati dalla luminosità della loro stella madre. Per questo motivo, la maggior parte degli esopianeti scoperti appartiene alla classe dei giganti gassosi. I pochi esopianeti trovati di tipo terrestre sono in larga parte "Super Terre²" Il primo pianeta terrestre scoperto fu Gliese 876d nel 2005, con una massa meno di 10 volte quella della Terra, orbitante una nana rossa. La missione Kepler, iniziata nel 2006, ha proprio come obiettivo quello di cercare pianeti terrestri. Kepler, ad oggi, ha portato alla luce numerosi pianeti simili per dimensioni alla Terra, e in alcuni casi, anche più piccoli di essa.

1.3.2 Telescopi Kepler e TESS

La missione spaziale Kepler della NASA ha come scopo quello di sondare un grande campione di stelle per studiare la struttura e la diversità di sistemi planetari diversi dal sistema solare tramite l'omonimo telescopio spaziale Kepler. Il Telescopio, lanciato il 7 marzo del 2009, sfrutta come metodo di rivelazione quello dei transiti tramite il quale siamo in grado di conoscere le principali caratteristiche del sistema in esame (grandezza dell'orbita, dimensioni e temperatura caratteristica del pianeta). Il campo visivo di Kepler copre 115 gradi quadrati ed è puntato verso le costellazioni del Cigno, della Lira e del Dragone in modo da evitare la luce del sole nel fotometro durante la sua orbita. Nel 2018 Kepler ha esaurito il carburante ponendo fine alla missione, con all'attivo 2342 esopianeti scoperti confermati osservando sistemi stellari distanti fino a 3000 anni luce. Altrettanto promettente per la scoperta di esopianeti è il progetto TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite) della NASA. Questo telescopio orbitante, a differenza di Kepler, è in grado di osservare l'intera volta celeste. Un' ulteriore differenza tra i due telescopi sta nel fatto che ogni pixel sul sensore di una fotocamera di Kepler corrisponde in cielo ad un' area di 4 secondi d'arco mentre nel caso di TESS ogni pixel corrisponde ad un'area di 21 secondi d'arco. Tale differenza si traduce in una minore risoluzione delle immagini per TESS, esso non è, infatti, in grado di monitorare transiti di stelle lontanissime come Kepler ed è limitato a sistemi stellari che si trovano a meno di 600 anni luce dalla terra.

²Pianeti terrestri più grandi con masse che raggiungono le $10M_{\oplus}$, limite oltre il quale sarebbero probabilmente un gigante gassoso.

Nell'ambito dei telescopi spaziali è molto promettente PLATO (*PLAnetary Transit and Oscillations of stars*) dell'ESA, proposto per la prima volta nel 2007 e il cui lancio è previsto per il 2026. Lo scopo principale di PLATO sarà l'individuazione e studio di esopianeti tramite il metodo del transito, in particolare di pianeti simili alla Terra orbitanti la zona abitabile di stelle simili al Sole.

1.4 La zona abitabile

La zona abitabile (HZ, *habitable zone*) è la regione intorno ad una stella in cui un pianeta, in determinate condizioni di pressione atmosferica (non troppo elevata da avere un effetto serra alto, non troppo bassa da non essere in grado di trattenere l'acqua) può ospitare sulla sua superficie acqua allo stato liquido. Se consideriamo pianeti terrestri con atmosfere costituite da $CO_2/H_2O/N_2$, allora il limite interno della HZ è determinato dalla perdita di acqua per via della fotolisi e della fuga dell'Idrogeno. Il limite esterno invece è determinato dalla formazione di nuvole di CO_2 che raffreddano la superficie del pianeta aumentando il suo albedo e diminuendo il gradiente termico verticale. Stime conservative per il sistema solare pongono il limite interno a 0.95 AU e quello esterno a 1.37 AU [9].

Successivamente, nel 2000, è stato introdotto il concetto di **Zona Galattica Abitabile GHZ** definita come quella regione in cui è più probabile che la vita emerga in una galassia, relativamente vicina al suo centro dove le stelle sono più ricche di elementi pesanti ma non troppo vicina da essere esposta alle enormi forze gravitazionali del centro galattico [10] [11].



Figura 1.3: [Zona abitabile del sistema solare. Fonte:Cornell University.]

1.5 La fotosintesi

La **fotosintesi** è un processo biologico in cui l'energia della luce è catturata da un organismo e convertita in sostanze nutritive necessarie per i processi cellulari. Questa definizione è piuttosto ampia e include sia la ben nota fotosintesi clorofilliana attraverso la quale le piante verdi producono carboidrati e ossigeno gassoso a partire da anidride carbonica e acqua la cui reazione è:

$$CO_2 + 2H_2O \xrightarrow{\text{luce}} CH_2O + H_2O + O_2,$$
 (1.8)

ma anche i diversi tipi di fotosintesi effettuati da alcuni batteri e archei³.

La forma più comune di fotosintesi è quella che coinvolge pigmenti come la clorofilla e opera attraverso un complicato processo di trasferimento di elettroni. In particolare, possiamo distinguere la fotosintesi ossigenica 1.8 tipica di piante, alghe e cianobatteri e la fotosintesi anossigenica che a differenza della prima non genera ossigeno molecolare durante la sintesi di nutrienti, meno comune, che avviene in alcuni batteri. In Fig. 1.4 possiamo osservare lo spettro di emissione del Sole comparato con gli spettri di assorbimento di alcuni organismi fotosintetici.

 $^{^{3}}$ Gli archei sono organismi a singola cellula sprovvisti di nucleo, simili in dimensioni e forma ai batteri e per questo in passato classificati assieme ad essi [12].



Figura 1.4: [Spettro di emissione solare extraterrestre (linea continua) e sulla superficie terrestre (linea punteggiata) confrontato con spettri di assorbimento di alcuni organismi fotosintetici. [13].]

Solo l'intero intervallo di luce visibile e alcune lunghezze d'onda nel vicino infrarosso sono effettivamente utili per la fotosintesi, in particolare, la maggior parte degli organismi che si basano sulla clorofilla-a non è in grado di utilizzare efficacemente la luce con lunghezze d'onda superiori ai 700 nm. La regione di radiazione luminosa compresa tra i 400 ed i 700 nm prende il nome di **PAR (Pho-tsynthetically Active Radiation**) anche se questo è strettamente vero solo per gli organismi a base di clorofilla-a. Per quanto riguarda la luce ultravioletta, essa rappresenta una parte relativamente piccola dell'emissione solare (circa l' 8% dell'emissione totale) ma la maggior parte di essa può essere altamente dannosa per via dell'elevata energia dei fotoni. La luce ultravioletta più dannosa sulla Terra è schermata dallo strato di ozono nell'atmosfera e non raggiunge la superficie della Terra.

1.5.1 Efficienza della fotosintesi

La fotosintesi ossigenica è dunque uno dei più importanti processi biochimici per la biosfera terrestre. Data la grande disponibilità degli ingredienti chimici alla base di questo processo (idrogeno, carbonio e ossigeno) e il fatto che la luce sia la risorsa principale di energia è lecito supporre che la 1.8 valga anche su altri pianeti e che ipotetici esseri viventi che li abitano abbiano alla base gli stessi processi biochimici. É allora importante valutare quale sia l' effettiva possibilità che la fotosintesi ossigenica avvenga su pianeti che orbitano stelle diverse dal Sole.

Il lavoro svolto in Covone et al. [14] stima il flusso di fotoni, l'exergia e l'efficienza exergetica delle radiazioni nelle lunghezze d'onda **PAR** in funzione della temperatura effettiva della stella e della distanza stella-pianeta. Poiché la fotosintesi dipende dal numero di fotoni nel range **PAR** piuttosto che dal flusso di energia totale, il lavoro si concentra nel calcolare il flusso di fotoni in tale range attraverso la ben nota legge di Planck (sulla superficie stellare):

$$N_{\gamma}^{(0)}(T) = \int_{\lambda_{inf}}^{\lambda_{sup}} \frac{2\pi c}{\lambda^4} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} d\lambda \,. \tag{1.9}$$

con λ_{inf} =400nm e λ_{sup} =800nm. Questo range di lunghezze d'onda è determinato da caratteristiche fisiche e adattamenti evoluzionari. Il limite inferiore è dovuto all'alta energia delle radiazioni ultraviolette che possono avere effetti ionizzanti dannosi. Il limite superiore invece si basa su osservazioni sugli organismi terrestri che attraverso i loro pigmenti arrivano ad assorbire in modo efficace radiazioni non oltre gli 800nm Il Sole emette circa il 34% del suo flusso di fotoni in questo range. Il flusso di fotoni PAR (N_{γ}) sulla superficie del pianeta, a distanza d dalla stella madre è invece:

$$N_{\gamma}(T) = \frac{1}{4} \left(\frac{R}{d}\right)^2 \int_{\lambda_{inf}}^{\lambda_{sup}} \epsilon(\lambda) \frac{2\pi c}{\lambda^4} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} d\lambda, \qquad (1.10)$$

dove il fattore 1/4 proviene dal fatto che la radiazione stellare intercettata dal pianeta è mediata sull'intera superficie, R è il raggio stellare e la quantità $\epsilon(\lambda)$ rappresenta la trasmittanza atmosferica del pianeta, cioè il rapporto tra flusso alla superficie e flusso incidente, per ogni lunghezza d'onda.



Figura 1.5: [Flusso di fotoni in due diversi *range* PAR sulla superficie dei pianeti ai due estremi della zona abitabile (linee blu scure per un limite superiore di 800nm e blu chiare per un limite superiore di 750nm) in funzione della temperatura effettiva della stella madre, in unita di 10^{20} fotoni $s^{-1}m^{-2}$ (L'estremo interno della zona abitabile è rappresentato da linee continue; l'estremo esterno da linee punteggiate). Il punto e il cerchio verdi mostrano il flusso di fotoni nel *range* PAR sulla superficie Terrestre, i punti e cerchi gialli il flusso di fotoni stimato sulla superficie di alcuni pianeti simili alla Terra noti rispettivamente con un limite superiore per il *range* PAR di 800nm (punti) 750nm (cerchi) la linea tratteggiata in rosso mostra il flusso di fotoni medio minimo necessario per sostenere una biosfera come quella della Terra [14].]

Usando la relazione proposta in Kopparapu et al. [15] tra la luminosità L (e quindi la temperatura) di una stella e la distanza stella-pianeta per definire gli estremi inferiore e superiore della zona abitabile:

$$d = \frac{L/L_{\odot}}{S_{\text{eff}}} AU, \qquad (1.11)$$

è possibile calcolare il flusso di fotoni **PAR** per pianeti simili alla Terra in corrispondenza dei bordi della loro zona abitabile ottenendo l'equazione:

$$N_{\gamma}(T) = \frac{1}{4} \left(\frac{R_{\odot}}{AU}\right)^2 \left(\frac{T_{\odot}}{T}\right)^4 S_{eff}(T) \int_{\lambda_{inf}}^{\lambda_{sup}} \frac{2\pi c}{\lambda^4} \frac{\epsilon(\lambda)}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} d\lambda, \tag{1.12}$$

che non dipende dal raggio stellare.

Andando quindi a rappresentare in Fig: 1.5 l'andamento del flusso di fotoni **PAR** ai bordi della zona abitabile per diversi esopianeti noti in funzione della temperatura della stella madre, notiamo come quasi tutti questi siano al di sotto della soglia minima richiesta per la fotosintesi di 2-20 μ mol fotone $m^{-2}s^{-1}$ [16]

1.5.2 Exergia

Una nozione estremamente utile per stimare l'efficienza della fotosintesi ossigenica in funzione della temperatura della stella madre è quella di exergia. L'exergia può essere definita come il massimo lavoro utile ottenibile da un certo sistema date le condizioni ambientali. In altre parole l'exergia misura la qualità dell'energia. In generale, il flusso di exergia Ex di una radiazione di flusso F che investe un sistema (nel nostro caso un pianeta) con temperatura superficiale T_0 è [17]:

$$Ex = F - F_0 - T_0(S - S_0) \tag{1.13}$$

dove F_0 è il flusso emesso dall'ambiente, $S \in S_0$ sono i flussi di entropia relativi rispettivamente a $F \in F_0$. Flusso ed entropia sono qui valutati per un generico range di lunghezze d'onda. Poiché nel nostro caso le piante non usano tutta la radiazione incidente, consideriamo l'exergia nel range **PAR**. Sfruttando la relazione tra flusso di energia e flusso di entropia per una radiazione di corpo nero scriviamo. [18]:

$$Ex = \left(1 - \frac{4}{3}\frac{T_0}{T}\right)F + \frac{F_0}{3}.$$
 (1.14)

Questa relazione può essere utilizzata per calcolare il flusso di energia nel range PAR sulla superficie del pianeta. Sia $F_{PAR}^{(0)}(T)$ il flusso nel range PAR di una stella sulla sua superficie:

$$F_{PAR}^{(0)}(T) = \int_{\lambda_{\rm inf}}^{\lambda_{\rm sup}} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} d\lambda , \qquad (1.15)$$

e F_{PAR} il flusso stellare sulla superficie del pianeta nella zona abitabile, usando l'equazione 1.12:

$$F_{PAR}(T) = \frac{1}{4} \left(\frac{R_{\odot}}{AU}\right)^2 \left(\frac{T_{\odot}}{T}\right)^4 S_{eff}(T) \int_{\lambda_{inf}}^{\lambda_{sup}} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{\epsilon(\lambda)}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} d\lambda \,. \tag{1.16}$$

Sostituendo questa relazione nella equazione (1.14) otteniamo:

$$Ex_{PAR} = \left(1 - \frac{4}{3}\frac{T_0}{T}\right)F_{PAR} + \frac{F_{0,PAR}}{3},$$
 (1.17)

dove il flusso di energia dal pianeta $F_{0,PAR}$ è calcolato ipotizzando una radiazione di corpo nero con $T_0 = 293K$. Osserviamo inoltre che il termine F_0 diventa trascurabile nel range PAR poiché $T_0 \ll T$. In Fig.1.6 il grafico dei flussi di energia e exergia per gli estremi inferiori e superiori della zona abitabile, insieme al valore medio di queste grandezze per i pianeti presi ad esempio. Si osserva allora che sia il flusso di energia che di exergia aumentano con la temperatura effettiva della stella e decrescono con la distanza dalla stella. Si può quindi discutere l'efficienza exergetica di una radiazione nel range PAR. L'efficienza exergetica può essere definita come il rapporto tra exergia nel range PAR e l'energia radiativa incidente in tutte le lunghezze d'onda [19]:

$$\eta_{Ex,PAR} = \frac{Ex}{F} \,, \tag{1.18}$$

come scritto prima possiamo trascurare il contributo $F_{0,PAR}$ e attraverso la 1.17 scrivere:

$$\eta_{Ex,PAR} \simeq \left(1 - \frac{4}{3} \frac{T_0}{T}\right) \frac{F_{PAR}(T)}{F_{tot}(T)}$$
(1.19)

con:

$$F_{tot}(T) = \frac{1}{4} \left(\frac{R_{\odot}}{AU}\right)^2 \left(\frac{T_{\odot}}{T}\right)^4 S_{eff} \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{\epsilon(\lambda)}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} d\lambda.$$
(1.20)



Figura 1.6: [Flusso di exergia (rosso) e flusso totale di energia (blu) nel *range* PAR (400-800nm) in funzione della temperatura efficace della stella madre. Le linee continue rappresentano i valori in corrispondenza della superficie del pianeta all'estremo interno della zona abitabile, le linee tratteggiate all'estremo esterno. I punti arancioni rappresentano il flusso stimato di exergia per alcuni esopianeti significativi[14].]

Considerando allora pianeti con temperature vicine a quelle della Terra, in prima approssimazione, $\eta_{Ex,PAR}$ dipende solo dalla temperatura effettiva ed è indipendente dalla distanza stella-pianeta. Questa efficienza è dunque monotonamente crescente in funzione della temperatura della stella ma diventa quasi costante per stelle più calde del Sole, inoltre estendendo il *range* PAR si osserva un incremento dell'efficienza exergetica, vedi Fig.1.7.



Figura 1.7: [Efficienza exergetica in funzione della temperatura efficace della stella madre per pianeti agli estremi della zona abitabile in due *range* PAR diversi (con il limite superiore rispettivamente 750nm o 800nm). Le linee tratteggiate sono calcolate utilizzando il modello atmosferico "*Maximum Greenhouse*", le linee continue utilizzando il modello atmosferico "*Runaway Greenhouse*"[14].]

1.6 Scopo della Tesi

Alla luce di ciò che è stato precedentemente descritto, lo scopo di questa tesi è quello di approfondire ulteriormente la teoria elaborata da Covone et al. [14] sullo studio dell'efficienza della fotosintesi. In particolare, sfruttando, attraverso tecniche computazionali, il modello proposto in Arp et al. [2] che simula con straordinaria precisione il comportamento di fototrofi in diversi ambienti con diversi... espandendolo e applicandolo a spettri stellari diversi da quello del Sole per stelle di tipi F, G, K, M per identificare con maggior precisione le caratteristiche fondamentali che tradiscono la presenza su un dato esopianeta di organismi fotosintetici.

Capitolo 2

Efficienza della fotosintesi su esopianeti abitabili

In questo Capitolo affrontiamo lo studio dell'efficienza della fotosintesi determinando quali parametri definiscano le condizioni ottimali per l'intero processo. La fotosintesi è un fenomeno biochimico notevole poiché riesce a raggiungere un'efficienza quantistica nella raccolta (*harvesting*) della luce vicina all'unità anche in presenza di rapide variazioni delle condizioni di luce e di situazioni ambientali avverse.

Resta però ancora ignoto se esista un qualche principio organizzatore che governi alla base questo fenomeno così solido ed efficace.

2.1 Modello di rete noise-canceling e fotosintesi

In Arp et al. [1] viene presentato un modello di rete *noise-canceling* che mette in relazione tra loro condizioni di luce esterne, efficienza nella conversione dell'energia e spettri di assorbimento di organismi fotosintetici per derivare le caratteristiche ottimali di assorbimento per una maggiore efficienza della fotosintesi.

Nella fotosintesi, la raccolta della luce inizia con l'assorbimento dei fotoni, l'energia di fotoeccitazione viene trasferita rapidamente in una rete di antenne per poi raggiungere il centro di reazione dove l'energia viene convertita in un gradiente di potenziale elettrochimico attraverso la membrana fotosintetica. Sorprendentemente questo processo di conversione luce-elettrone mostra un' efficienza quantistica elevatissima, prossima all'unità, nonostante avvenga in presenza di condizioni di luce altamente variabili, strutture molecolari dinamiche e canali di trasferimento dell'energia molto intricati. Analizzando il flusso stocastico dell'energia di eccitazione possiamo caratterizzare la rete di antenne attraverso medie statistiche e fluttuazioni nel flusso dell'energia che prendono il nome di *noise*.

Trasformare, come avviene in natura per la fotosintesi, input *noisy* in input "*quiet*" rappresenta una sfida di design significativa nella costruzione dei sistemi più disparati, dalle reti energetiche nazionali alle fotocellule nanometriche per l'optoelettronica di nuova generazione.

Mentre l'*input* in una rete mostra di solito fluttuazioni casuali (ad esempio rapide variazioni della luce solare per le piante o pannelli solari), l'*output* della rete richiede solitamente un flusso costante di informazioni o energia per avere una performance ottimale. Le fluttuazioni statistiche che sorgono da variazioni ambientali e processi interni limitano alla base l'efficienza complessiva di ogni rete. Se il flusso di energia in entrata in una rete è significativamente inferiore o superiore a quello in uscita, la rete deve essere adattata o strutturata in modo da ridurre gli improvvisi aumenti o diminuzioni di energia che se non gestiti correttamente possono portare a condizioni altamente dannose per la rete stessa (stress foto-ossidativo negli organismi fotosintetici o esplosione dei trasformatori nelle reti energetiche).

Introduciamo alcune grandezze che descrivono l'*input* nelle antenne: l'assorbimento della luce dalle molecole di pigmento è caratterizzato da picchi di larghezza \mathbf{w} , separazione $\Delta \lambda$ e distanza media λ_0 . Il rumore all'interno dell'antenna è dovuto a due fonti principali : variazioni di luminosità all'esterno e discrepanze intrinseche tra input e output della rete che possono sorgere da rapide variazioni nella struttura proteica e nelle corrispondenti proprietà elettroniche.

Scegliendo appropriatamente le caratteristiche di assorbimento lo scopo è trovare una rete che spenda il minor tempo possibile in uno stato in cui la potenza in ingresso è troppo piccola o troppo grande rispetto a quella richiesta in uscita.

Il modello di Arp et al. [1] applicato a diversi organismi fotosintetici: piante

verdi, Chromatiales¹ (*purple bacteria*) e Chlorobi² (*green bacteria*) sotto diverse condizioni di luce (spettro solare sulla superficie della Terra, in acqua e in una foresta) permette di calcolarne i picchi di assorbimento che mostrano con mediamente il 98% di accuratezza [Fig.2.1].



Figura 2.1: $[(\mathbf{A-C}), \text{Struttura molecolare delle antenne fotosintetiche, rispetti$ vamente, LHC2 (piante verdi), LH2 (*purple bacteria*) e del clorosoma nei greenbacteria. (**D**), Spettro di assorbimento di LHC2 (in blu) sovrapposto allo spettro solare sulla terra (grigio chiaro). (**E**), Spettro di assorbimento del complessoLH2 sovrapposto allo spettro solare sotto uno strato di foglie (grigio chiaro). (**F**),Spettro di assorbimento della batterioclorofilla c (in blu) e e (in verde) comparatoallo spettro solare a 2m di profondità sott'acqua (grigio chiaro). (**G-I**), Picchi diassorbimento ideali predetti dal modello per rispettivamente, lo spettro solare insuperficie, lo spettro solare sotto uno strato di foglie e lo spettro solare attraverso2m di acqua marina[1].]

¹Proteobacteria anaerobi spesso presenti in sorgenti termali o in acque stagnanti.Utilizzando come riducente l'idrogeno solforato anziché l'acqua non producono ossigeno.

²Batteri che effettuano la fotosintesi anossigenica usando ioni solfuro come donatori principali di elettroni[2]

2.1.1 Il modello a due canali

In Arp et al. [1] gli autori utilizzano un modello di rete generalizzato che presenta due canali di *input*. Tale modello è ragionevolmente rappresentativo di diversi complessi antenna reali come **LHCII** (*Light Harvesting Complex II*) dove entrano in gioco contemporaneamente la clorofilla $a \in b$ [Fig.2.2] o i sistemi antenna dei Chlorobi (green sulfur bacteria) costituiti da batterioclorofilla c ed e. Considerando due nodi in input a lunghezze d'onda $\lambda_A \in \lambda_B$ con potenza $P_A \in P_B$, solo tre casi sono possibili:

- 1. Input dal nodo A con probabilità p_A .
- 2. Input dal nodo B con probabilità p_B .
- 3. Nessun input dai due nodi con probabilità $1 p_A p_B$.

La possibilità che ci siano input simultaneamente da entrambi i nodi è da escludere poiché un caso del genere avrebbe una potenza in input molto più grande di quella in output generando una grande fluttuazione nella rete senza dare alcun beneficio alla robustezza di quest'ultima. Da queste premesse, andando ad uguagliare potenza in input e in output scriviamo:

$$p_A P_A + p_B P_B = \Omega. (2.1)$$

In questo caso la varianza sarà data allora da:

$$\sigma^{2} = p_{A}(P_{A} - \Omega)^{2} + p_{B}(P_{B} - \Omega)^{2} + (1 - p_{A} - p_{B})\Omega^{2}, \qquad (2.2)$$

che usando la 2.1 si può semplificare in:

$$\frac{\sigma^2}{\Omega^2} = \left(\frac{P_A}{\Omega} - 1\right) - p_B \frac{P_B}{\Omega} \left(\frac{P_A - P_B}{\Omega}\right) \,. \tag{2.3}$$



Figura 2.2: [Rappresentazione schematica del "complesso antenna." Due pigmenti diversi in input i cui spettri di assorbimento permettono di convertire un input fluttuante in un ouput consistente (*quiet*). Fonte: [3].]

Quando il secondo nodo di input è assente $(p_B = 0)$ otteniamo il caso semplice a singolo nodo. Dalla (2.3) osserviamo allora che aggiungere un secondo nodo riduce il rumore ad una data P_A . Essendo p_A e p_B delle probabilità possiamo sfruttare la disuguaglianza $p_A + p_B \leq 1$ e calcolare:

$$p_B \le 1 - p_A \,. \tag{2.4}$$

$$p_B \le 1 - \left(\frac{\Omega - p_B P_B}{P_A}\right) \tag{2.5}$$

moltiplicando ambo i membri per P_A :

$$p_B \le \frac{P_A - \Omega}{P_A - P_B} \tag{2.6}$$

sostituendo questa disequazione nella (2.3), troviamo:

$$\frac{\sigma^2}{\Omega^2} \ge \left(\frac{P_A}{\Omega} - 1\right) \left(1 - \frac{P_B}{\Omega}\right) \,. \tag{2.7}$$

Dato che $0 < P_B < \Omega$, il rumore minore si ottiene quando l'input dal nodo corrisponde esattamente all'output, il che per P_A fissato significa dire che il rumore aumenta con l'aumentare di $\Delta = P_A - P_B$. Questo significa che se i due canali sono identici il rumore interno viene minimizzato, tuttavia avere poca diversità nei ricettori limita il sistema rendendolo molto più suscettibile al rumore esterno. É necessario quindi trovare un regime intermedio.

2.2 Perchè le piante sono verdi?

Per capire al meglio questo modello osserviamo innanzitutto una caratteristica interessante: tutti e tre i tipi di pigmenti fotosintetici non assorbono in corrispondenza del massimo della potenza solare. Al contrario, i fototrofi mostrano dei picchi di assorbimento in corrispondenza delle regioni dello spettro in cui c'è una variazione più ripida rispetto alla lunghezza d'onda. Le piante sono verdi poiché i loro *complessi antenna* assorbono la luce in tutto lo spettro visibile, incluso il blu e il rosso ma riflettono le lunghezze d'onda corrispondenti al verde.

Questa caratteristica peculiare si comprende facilmente con il modello di "noisy antenna". Ciò è evidente dalla Fig. 2.3 che mostra il comportamento della rete di antenne in tre regimi differenti: over-tuned, fine-tuned e poorly-tuned. Seppur le condizioni luminose siano identiche in tutti e tre i casi possiamo osservare come il rumore cambi con le differenti caratteristiche in assorbimento. Nel caso overtuned i picchi in assorbimento sono molto vicini tra loro, il rumore intrinseco dei ricettori viene drasticamente ridotto e nel limite per cui $P_A = \Omega = P_B$ ci sono fluttuazioni trascurabili nel flusso dell'energia, questo caso è dunque dominato dalle variazioni esterne dello spettro della luce. Questo limite inferiore per il rumore interno è tuttavia impossibile da raggiungere per le antenne fotosintetiche naturali dove le dinamiche proteiche porteranno sempre a delle fluttuazioni di energia. Analogamente dei problemi sorgono anche nel caso poorly-tuned, se i picchi di assorbimento sono troppo separati, l'antenna spende maggior parte del tempo sovra- o sotto- alimentata. Nel momento in cui le sorgenti P_A e P_B sono significativamente maggiori o inferiori della dissipazione di potenza $(P_A >> \Omega >> P_B)$ il rumore aumenta ed i picchi di assorbimento si separano, in questo caso dunque l'antenna spende fin troppo poco tempo con in uscita l'output ottimale Ω . Infine nel caso *fine-tuned* l'antenna assorbe in specifiche parti dello spettro dando vita ad un'efficace raccolta della luce anche in presenza di condizioni di luce esterna altalenante e notevole rumore interno. Comparato ai casi precedenti, una antenna *finely-tuned* permette un certo rumore interno non troppo elevato e allo stesso tempo ha la possibilità di emettere in media un output ottimale Ω . Per avere dunque un modello ottimale dello spettro di assorbimento vengono calcolati i picchi in modo tale che essi siano il più vicino possibile tra loro (riducendo il rumore interno) ma allo stesso tempo massimizzando la differenza di potenza assorbita $\Delta = P_A - P_B$ (riducendo l'influenza delle variazioni esterne). Questo significa andare a massimizzare la derivata dello spettro luminoso rispetto alla lunghezza d'onda, motivo per cui abbiamo i picchi di assorbimento in corrispondenza dei punti in cui c'è una pendenza più accentuata.



Figura 2.3: [(**A**), picchi di assorbimento di due *absorbers a* e *b* sovrapposti ad uno spettro solare di corpo nero ideale(T=5500K, in grigio chiaro) per tre casi: in alto, due *absorbers* vicini tra loro, al centro, due *absorbers* separati per ottimizzare il rumore dell'antenna e in basso, due *absorber* altamente spaziati tra loro. (**B**), Energia di eccitazione simulata rispetto al tempo per un antenna a due canali con tre diversi valori di Δ compatibili con i casi in **A**. Il lato sinistro del grafico mostra l'energia di eccitazione rispetto al tempo senza fluttuazioni esterne, viceversa il lato destro include fluttuazioni esterne casuali. (**C**), Istogrammi rappresentanti il tempo speso dalla rete con un eccesso (in rosso) o un deficit (in blu) di potenza per le tre serie in **B**. In alto la distribuzione è piatta e non ci sono valori privilegiati, al centro la distribuzione è una distribuzione normale piccata fortemente in favore di Ω . In fondo, la distribuzione è normale ma molto meno piccata, più larga rispetto all'istogramma centrale. Fonte:[1].]

In conclusione, attraverso questo modello è possibile riprodurre il comportamento di organismi fotosintetici con una sorprendente affidabilità, ciò indica, quindi, l'esistenza di un principio organizzatore fondamentale nella raccolta della luce. I fototrofi, anche in diverse nicchie evolutive, si sono adattati non per raccogliere tutta la luce a disposizione in corrispondenza del massimo dello spettro solare ma per eliminare il più possibile le fluttuazioni che limitano l'efficienza della rete.

2.2.1 Calcolo dello spettro di assorbimento ottimale

Abbiamo visto allora che in un modello a due canali avere un Δ molto piccolo permette di sopprimere il rumore interno ma allo stesso tempo, per proteggere la rete da fluttuazioni esterne serve un Δ più grande possibile. Per determinare il Δ ottimale iniziamo introducendo le espressioni per l'assorbimento dei due canali come funzioni gaussiane delle lunghezze d'onda λ_A e λ_B :

$$a(\lambda, \lambda_0, \Delta\lambda, w) = \frac{1}{w\sqrt{2\pi}} exp\left\{-\frac{[\lambda - (\lambda_0 + \Delta\lambda/2)]^2}{2w^2}\right\}$$
(2.8)

$$b(\lambda, \lambda_0, \Delta\lambda, w) = \frac{1}{w\sqrt{2\pi}} exp\left\{-\frac{[\lambda - (\lambda_0 + \Delta\lambda/2)]^2}{2w^2}\right\}.$$
 (2.9)

Con λ_0 lunghezza d'onda centrale tra i due picchi di assorbimento, $\Delta\lambda$ separazione tra i picchi e w larghezza dei picchi.

Notiamo che:

$$\lambda_A = \lambda_0 + \Delta \lambda / 2. \tag{2.10}$$

$$\lambda_B = \lambda_0 - \Delta \lambda / 2. \tag{2.11}$$

Calcoliamo allora le potenze in *input* P_A e P_B integrando il prodotto tra l'assorbimento e l'irradianza dello spettro stellare $(I(\lambda))$:

$$P_A = \int a(\lambda) I(\lambda) d\lambda.$$
 (2.12)

$$P_B = \int b(\lambda) I(\lambda) d\lambda.$$
 (2.13)

Attraverso queste definizioni possiamo calcolare la differenza di potenza assorbita:

$$\Delta(\lambda_0, \Delta\lambda, w) = \int [a(\lambda, \lambda_0, \Delta\lambda, w) - b(\lambda, \lambda_0, \Delta\lambda, w)] I(\lambda) d\lambda.$$
(2.14)

Semplicemente minimizzare o massimizzare la 2.14, per quanto detto prima, non risolve il problema per cui è necessario sviluppare un miglior parametro di ottimizzazione. Integriamo la 2.14 in un intervallo delineato dal parametro libero m.

$$\Delta^{op}(\lambda_0, \Delta\lambda, w) = \int_{\lambda_0 - m}^{\lambda_0 + m} [a(\lambda, \lambda_0, \Delta\lambda, w) - b(\lambda, \lambda_0, \Delta\lambda, w)] I(\lambda) d\lambda.$$
(2.15)

Il parametro m stabilisce un vincolo nell'avvicinarsi a λ_0 , se $\Delta \lambda$ aumenta, i picchi cadranno fuori dalla lunghezza d'onda in cui operiamo e daranno contributo nullo all'integrale. Per semplicità nei calcoli scegliamo m = 2w e troviamo:

$$\Delta^{op}(\lambda_0, \Delta\lambda, w) = \int_{\lambda_0 - 2w}^{\lambda_0 + 2w} [a(\lambda, \lambda_0, \Delta\lambda, w) - b(\lambda, \lambda_0, \Delta\lambda, w)] I(\lambda) d\lambda.$$
(2.16)

Questa è proprio l'equazione finale che viene usata per calcolare tutti i risultati in Arp et al. [1].

Capitolo 3

Applicazione del modello a stelle di diversi tipi spettrali

In questo capitolo verrà ripreso il modello presentato nel capitolo precedente e applicato a spettri stellari diversi da quello del sole, trascurando in prima approssimazione, il contributo dell'atmosfera planetaria. Utilizzando il codice fornito in Arp et al. [1], infatti, sarà possibile non solo riprodurre i risultati del *paper* ma anche calcolare la posizione dei picchi di assorbanza usando in *input* spettri di stelle di diversi tipi stellari.

3.1 Materiali e Metodi

- I risultati di questa tesi sono stati ottenuti utilizzando il codice Python fornito in Arp et al. [1] (*qntenna.py*) che esegue i calcoli dell'equazione 2.16 per trovare Δ e quindi i picchi di assorbimento ottimali per un arbitrario spettro stellare in ingresso.
- I template usati come input sono stati forniti dal sito "stsci.edu" [2] e rappresentano dei modelli di spettri stellari. Tutti i files sono in formato .fits (Flexible Image Transport System), molto comune in astronomia, che racchiude una grande mole di dati calcolati per la stella di riferimento.

- Per poter usare efficientemente questi spettri è stato dunque necessario scrivere un codice Python per estrarre dai files forniti solo i dati utili e convertirli in un formato idoneo per essere processati dal codice *qntenna.py*.
- Per ridurre i tempi di calcolo, i dati sono stati preprocessati attraverso il codice *preprocess_spectrum.py*[1] che riduce la mole di dati mantenendo integro l'andamento dello spettro.



3.2 Analisi dei risultati

Figura 3.1: [Rappresentazione grafica dei picchi di assorbanza (in blu e giallo) sovrapposti allo spettro stellare (in nero) di stelle di tipi, rispettivamente, F5, G2, G5, G7, K0.5, K1.5, M3 e M7 calcolati per w = 15]



Figura 3.2: [Rappresentazione grafica dei picchi di assorbanza (in blu e giallo) sovrapposti allo spettro stellare (in nero) di stelle di tipi, rispettivamente, F5, G2, G5, G7, K0.5, K1.5, M3 e M7 calcolati per w = 30]

Calcoliamo allora i picchi di assorbanza per spettri di stelle di tipo F,G,K e M. Considerando in questo range, quindi, anche casi più estremi come le stelle di tipo F la cui vita mediamente è troppo breve per i tempi necessari allo sviluppo della vita come la conosciamo e stelle di tipo M più fredde e inospitali. I calcoli possono essere effettuati per valori di w(larghezza dei picchi) arbitrari. I valori di w, nella fotosintesi, sono fissati dall'assorbimento intrinseco della molecola pigmento. Non essendoci un modo per calcolare il w ideale a priori, in questa trattazione useremo w = 15 nm [Fig.3.1] che ben approssima le caratteristiche dei complessi LHCII delle piante verdi e w = 30 nm [Fig. 3.2]per i complessi antenna dei batteri. In tabella 3.1 sono elencati tutti gli spettri stellari considerati e i rispettivi picchi di

	Picchi di Assorbanza			
Tipi Spettrali	w=15[nm]	w=30[nm]		
F5	235,311	227,405		
G2	305,401	297,403		
G5	304,400	296,400		
G7	310,404	306,4102		
K0.5	398,472	296,398		
K1.5	397,471	293,395		
M3	734,7943	722,988		
M7	734,7943	722,988		

assorbimento ideali riprodotti dal modello.

Tabella 3.1: Picchi di assorbanza calcolati per stelle di diversi tipi nel range da F a M per complessi antenna con w = 15 (piante verdi) e w = 30 (batteri)

Rappresentando in Fig.3.3 e Fig.3.4 l'andamento dei picchi di assorbanza in funzione della temperatura della stella sembra delinearsi una tendenza che lega picchi a lunghezze d'onda maggiori a stelle di temperatura inferiore e viceversa. Inoltre la distanza tra i picchi ($\Delta\lambda$) si presenta grossomodo costante per tutti gli spettri considerati.



Figura 3.3: [Andamento dei picchi di assorbanza in relazione alla temperatura della stella per diverse stelle nel range da F a M ottenuti usando il modello di Arp et al. [1] per w=15(piante verdi). Le linee tratteggiate rappresentano i $\Delta\lambda$]



Figura 3.4: [Andamento dei picchi di assorbanza in relazione alla temperatura della stella per diverse stelle nel range da F a M ottenuti usando il modello di Arp et al. [1] per w = 30 (batteri). Le linee tratteggiate rappresentano i $\Delta\lambda$]

Capitolo 4

Conclusioni

In conclusione abbiamo visto come il processo della fotosintesi sia alla base della vita sulla Terra. Data l'abbondanza degli ingredienti fondamentali affinché essa avvenga è lecito ipotizzare che la vita su altri pianeti, così come la conosciamo, possa essersi sviluppata a partire proprio da questo processo biochimico essenziale. Ci siamo chiesti, allora, perché ciò non avvenga nella pratica e quali siano più precisamente le condizioni fisiche che limitano la fotosintesi in modo da individuare dei parametri in grado di rivelare la presenza o meno di vita su un esopianeta. Il modello introdotto in Arp et al. [1] ha permesso di approcciare l'argomento applicando la *network-theory* per determinare i requisiti affinché un sistema di harvesting della luce funzioni in maniera ottimale riducendo il rumore. Infatti il rumore può causare degli output inferiori (quindi mancanza di nutrimento) o superiori (stress ossidativo nelle piante) a quello necessario per il funzionamento della rete che sono altamente dannosi per essa. Utilizzando un modello di antenna a due canali è stato calcolato che la differenza nella potenza assorbita dai due canali Δ deve essere minimizzata per ridurre il più possibile il rumore interno (dovuto alle strutture molecolari dei pigmenti), allo stesso tempo però un Δ più ampio permette di limitare il rumore esterno (dovuto alle condizioni variabili di luce). È necessario trovare un regime intermedio per ottenere un output ottimale. Attraverso queste considerazioni è stato calcolato che i picchi di assorbanza più efficienti si trovano in regioni in cui la curva dello spettro stellare è più ripida. Il modello introdotto predice con sorprendente accuratezza (circa 98%) i dati

sperimentali per piante verdi e batteri. In questa tesi abbiamo quindi applicato questo modello a spettri stellari diversi da quello del Sole per calcolare i picchi di assorbanza ottimali. In questo modo possiamo individuare, seppur con una certa approssimazione, (dovuta al considerare pianeti con atmosfera trasparente) un range di lunghezze d'onda nel quale andare ad indagare più approfonditamente per studiare l'efficienza della fotosintesi su esopianeti abitabili. Abbiamo inoltre osservato una tendenza significativa dei picchi di assorbanza a decrescere con l'aumentare della temperatura della stella.

Un confronto con i risultati ottenuti in precedenza da Lehmer et al. [2] per i picchi di assorbanza[Fig.4.1] mostra come ci sia un comune accordo nell'andamento qualitativo della lunghezza d'onda dei picchi in funzione della temperatura. Le discrepanze quantitative con la letteratura sono da imputarsi, con buona probabilità, all'impiego di modelli diversi e dal utilizzo in Lehmer et al. [2] di spettri stellari calcolati sulla superficie del pianeta tenendo conto dell'atmosfera.



Figura 4.1: [Confronto tra i risultati ottenuti in questa tesi(in rosso) con quelli del paper Lehmer et al. [2](in blu).]

4.1 Sviluppi Futuri

Un possibile sviluppo futuro della teoria consiste nel calcolare i picchi in corrispondenza di spettri stellari modificati dall'atmosfera planetaria (usando diversi modelli di atmosfera) e ampliare i calcoli fatti sull'exergia e sul flusso di fotoni in Covone et al. [3] considerando range di PAR diversi che cambiano a seconda della temperatura della stella madre del pianeta considerato.

Bibliografia

Capitolo 1

- Edward W Schwieterman et al. «Exoplanet biosignatures: a review of remotely detectable signs of life». In: Astrobiology 18.6 (2018), pp. 663– 708.
- [2] Trevor B Arp et al. «Quieting a noisy antenna reproduces photosynthetic light-harvesting spectra». In: Science 368.6498 (2020), pp. 1490–1495.
- G. Galletta. Astrobiologia. Alla ricerca di vita nello spazio. Padova University Press, 2021. ISBN: 9788869382291. URL: https://books.google.it/books?id=iUxZzgEACAAJ.
- [4] Koichi MT Yamada e Gisbert Winnewisser. «List of Molecules Observed in Interstellar Space». In: *Interstellar Molecules*. Springer, 2011, pp. 219–223.
- [5] Bradley W Carroll e Dale A Ostlie. An introduction to modern astrophysics. Cambridge University Press, 2017.
- [6] Valerio Bozza, Luigi Mancini, Alessandro Sozzetti et al. «Methods of Detecting Exoplanets». In: Astrophysics and Space Science Library: Berlin, Germany 428 (2016).
- [7] Albert Einstein. «Lens-like action of a star by the deviation of light in the gravitational field». In: Science 84.2188 (1936), pp. 506–507.
- [8] James W Head III. «Surfaces and interiors of the terrestrial planets». In: The new solar system (1999), p. 157.

- [9] James F Kasting, Daniel P Whitmire e Ray T Reynolds. «Habitable zones around main sequence stars». In: *Icarus* 101.1 (1993), pp. 108–128.
- [10] Guillermo Gonzalez, Donald Brownlee e Peter Ward. «The galactic habitable zone: galactic chemical evolution». In: *Icarus* 152.1 (2001), pp. 185– 200.
- [11] James F Kasting. «Peter Ward and Donald Brownlee's" Rare Earth"». In: Perspectives in Biology and Medicine 44.1 (2001), pp. 117–131.
- [12] Carl R Woese, Otto Kandler e Mark L Wheelis. «Towards a natural system of organisms: proposal for the domains Archaea, Bacteria, and Eucarya.» In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 87.12 (1990), pp. 4576– 4579.
- [13] Robert E Blankenship. Molecular mechanisms of photosynthesis. John Wiley & Sons, 2021.
- [14] Giovanni Covone et al. «Efficiency of the oxygenic photosynthesis on Earthlike planets in the habitable zone». In: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 505.3 (2021), pp. 3329–3335.
- [15] Ravi Kumar Kopparapu et al. «Habitable zones around main-sequence stars: new estimates». In: *The Astrophysical Journal* 765.2 (2013), p. 131.
- [16] Paul G Falkowski e John A Raven. Aquatic photosynthesis. Princeton University Press, 2013.
- [17] Yves Candau. «On the exergy of radiation». In: Solar Energy 75.3 (2003), pp. 241–247.
- [18] Richard Petela. «Exergy of heat radiation». In: (1964).
- [19] Alfonso Delgado-Bonal. «Entropy of radiation: The unseen side of light».
 In: Scientific reports 7.1 (2017), pp. 1–11.

Capitolo 2

- Trevor B Arp et al. «Quieting a noisy antenna reproduces photosynthetic light-harvesting spectra». In: Science 368.6498 (2020), pp. 1490–1495.
- Hidehiro Sakurai et al. «Inorganic sulfur oxidizing system in green sulfur bacteria». In: *Photosynthesis research* 104.2 (2010), pp. 163–176.
- [3] Christopher DP Duffy. «The simplicity of robust light harvesting». In: Science 368.6498 (2020), pp. 1427–1428.

Capitolo 3

- Trevor B Arp et al. «Quieting a noisy antenna reproduces photosynthetic light-harvesting spectra». In: Science 368.6498 (2020), pp. 1490–1495.
- [2] Ralph C Bohlin, Karl D Gordon e P-E Tremblay. «Techniques and review of absolute flux calibration from the ultraviolet to the mid-infrared». In: *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 126.942 (2014), p. 711.

Capitolo 4

- Trevor B Arp et al. «Quieting a noisy antenna reproduces photosynthetic light-harvesting spectra». In: Science 368.6498 (2020), pp. 1490–1495.
- [2] Owen R Lehmer et al. «The peak absorbance wavelength of photosynthetic pigments around other stars from spectral optimization». In: arXiv preprint arXiv:2107.04120 (2021).
- [3] Giovanni Covone et al. «Efficiency of the oxygenic photosynthesis on Earthlike planets in the habitable zone». In: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 505.3 (2021), pp. 3329–3335.