Veniamo alla seconda parte che inizio con cenni su cosa è la spettroscopia e in particolare la natura della luce; questo è una strumento che servirà poi anche per le altre lezioni ma mi servirà in particolare per parlare di pianeti extra solari; voi sapete che la luce è una radiazione elettromagnetica, un fenomeno ondulatorio prodotta da una campo elettromagnetico che ha quindi come ogni fenomeno ondulatorio ha una lunghezza d’onda e una frequenza che sono inversamente proporzionali uno all’altro e la luce nel senso di luce visibile come la intendiamo è una piccola regione di una vasta gamma di radiazioni elettromagnetiche che sono per natura simili tra di loro l’unica cosa che cambia da una regione all’altra dello spettro elettromagnetico è la frequenza, quindi la lunghezza d’onda e l’energia ma la natura è sempre quella di radiazione elettromagnetica; voi sapete che la luce può essere scomposta , la luce che ci proviene dal sole è una mescolanza di radiazione di tutte le lunghezze d’onda possibili e queste possono essere scomposta da un prisma perché la rifrazione segue leggi diverse e deflette i raggi di luce in modo diverso a secondo della frequenza e quindi passando attraverso un prisma, la luce che è composta da una mescolanza di lunghezze d’onda diverse viene proiettata secondo angoli diversi e quindi in pratica lo spettroscopio traduce la differenza di lunghezza d’onda della radiazione in una differenza spaziale perché crea una striscia in cui a ogni distanza lungo l’asse del prisma corrisponde una definita lunghezza d’onda; uno spettro fatto in questo modo in cui compaiono una mescolanza di tutte le lunghezze d’onda si chiama spettro continuo ed è tipicamente prodotto da un corpo caldo cioè dall’agitazione termica di un corpo che tecnicamente questa radiazione si chiama di corpo nero perché la radiazione elettromagnetica è prodotta dall’oscillazione di cariche elettriche in un corpo caldo tutti gli atomi , le molecole si muovono in modo disordinato quindi ciascuna ha una sua velocità, accelerazione, cozzano tra di loro e in pratica si hanno vibrazioni di tutte le frequenze mescolate insieme e il risultato è che si ha un’emissione luminosa che copre una banda larghissima ma naturalmente non con intensità uguale a tutte le lunghezze d’onda ma che contiene tutte le lunghezze d’onda.

La lunghezza d’onda più presente, il colore dominante di questa radiazione di corpo nero è legato alla temperatura perché voi lo vedete per esempio riscaldando un pezzo di metallo alla fiamma: all’inizio quando è freddo è rosso cupo poi comincia ad essere giallo poi bianco poi azzurro; questa è uno spostamento del piccola di questa radiazione di corpo nero al crescere della temperatura; oltre a questo meccanismo di emissione però ce n’è anche un altro che è quello delle righe spettrali cioè gli elettroni che compongono , ruotano nei loro orbitali attorno ai nuclei atomici hanno dei livelli di energia ben definiti e saltando da un livello all’altro possono produrre dei fotoni che hanno solo l’energia e quindi la lunghezza d’onda corrispondente alla differenza di energia tra i livelli e ogni atomo ha un certo numero finito di livelli di energia e quindi può produrre solo righe spettrali che hanno una frequenza ben definita; si parla di righe perché così compaiono in uno spettro in realtà sono pacchetti di radiazione elettromagnetica caratterizzati da fotoni che hanno tutti la stessa lunghezza d’onda e la stessa frequenza; ogni atomo ha i suoi livelli di energia e quindi ogni atomo emette solo certe frequenze e la spettroscopia analizzando queste frequenze permette di capire quale è l’elemento chimico o l molecola che ha emesso la radiazione perché è una specie di impronta digitale che la luce trasmette del materiale che ha emesso per con questo tipo di emissione il la luce nella realtà i due tipi di emissione sono mescolati; per esempio nel sole c’è una radiazione termica di corpo nero prodotto dalla superficie solare che è calda, circa 6000 gradi; questa radiazione passa attraverso un gas che è quello dell’atmosfera solare, gli atomi del gas assorbono solo certi fotoni che corrispondono a livelli di energia di cui vi parlavo prima che corrispondono a ogni atomo e quindi avete una sovrapposizione di uno spettro continuo di corpo nero più le righe spettrali allora vi dico questo perché questa presenza di righe spettrali è essenziale per sfruttare l’effetto doppler; l’effetto doppler è capita con ogni tipo di emissione ondulatoria anche con il suono e consiste nel fatto che la frequenza con cui un osservatore percepisce la radiazione elettromagnetica o l’emissione sonora dipende dalla velocità relativa tra la sorgente di onde sonore oppure di luce e l’osservatorio e è il noto fenomeno pe cui l’ambulanza quando si avvicina sembra emettere un suono più acuto di quando si allontana in realtà se voi state sopra l’ambulanza il suono è sempre uguale e questa differenza di frequenza che inter mini sonori di traduce in una differenze di altezza del suono proprio di nota musicale, in termini di luce si trasforma in una differenza di colore e vi può dare un’informazione sulla velocità relativa della sorgente rispetto all’osservatorio; ovviamente stiamo parlando solo di velocità radiale: velocità di allontanamento o avvicinamento; la velocità tangenziale non cambia la distanza perciò per effetto doppler è inosservabile.

Quello che voi , se voi osservate uno spettro di una stella i lavori da fare sono due: 1 identificare le righe in base alla loro posizione reciproca perché vi dicevo, ogni elemento produce una certa configurazione di righe che lo studioso di spettroscopia riconosce abbastanza facilmente e a ciascuna di queste righe è associata una frequenza di riposo che è quella che si osserva nei laboratori , se nella radiazione stellare questa frequenza appare spostata, questa è una indicatore della velocità radiale relativa rispetto a noi e quindi la spettroscopia, grazie alla presenza delle righe che sono dei riferimenti di frequenza molto precisi permette di calcolare la velocità di avvicinamento e allontanamento della sorgente limonosa e ho fatto tutta questa spiegazione che spero sia stata chiara però quello che voi dovete trattenere di questo è che dalla analisi di uno spettro di una stella è possibile determinare la temperatura superficiale di una stella perché il colore associato alla radiazione più energetica nello spettro continuo, la composizione chimica in base alle righe osservate e la velocità radiale di avvicinamento e allontanamento.

Dopo questa premessa posso parlare sei sistemi planetari extrasolari che è una scoperta secondo me una delle scoperte fondamentali dell’astronomia degli ultimi decenni. La prima cosa da dire è che diventa che i pianeti extra solari in senso proprio sono praticamente invisibili perché si tratta di pianeti quindi oggetti piccoli, poco luminosi perché non emettono luce propria e riflettono solo questa della stella, molto vicini ad una stella estremamente più luminosa di loro e quindi è come vedere una falena che si muove attorno ad un lampione posto a 10 km di distanza magari la luce del lampione la vedete ma la falena no; ho aggiunto quasi perché questa cosa sta diventando sempre meno vera , quando ho iniziato a fare queste lezioni qualche anno fa quasi non c’era; in realtà le tecniche di osservazione stanno così migliorando che in alcuni casi è possibile vederli direttamente però la regola rimane sempre che otticamente sono invisibili cioè se voi vi mettete all’oculare di un telescopio vedete solo la stella; questo è peggiorato dal fatto che la luce che ci arriva passa attraverso l’atmosfera che si comporta come uno specchio deformante in continua evoluzione, è un po’ come guardare la forma di un sasso sul fondo di un ruscello con l’acqua che continua a scorrere a e a muoversi e in misura minore però importante per le osservazioni astronomiche succede lo stesso con l’atmosfera quindi una stella come dovrebbe essere diciamo con la dimensione e le deformazioni legate solamente all’ottica delle strumento , quando passa attraverso l’atmosfera la sua immagine comincia a sfarfallare, si espande quindi se voi aveste un piccolo pianeta vicinissimo alla stella quando le condizioni osservative diventano di questo tipo, non vedete più niente. Questo è il motivo per cui più che parlare di osservazione si dovrebbe parlare di detezione, rivelazione di pianeti extra solari senza vederli direttamente; esistono tutta una serie di metodi che mvi metto solo per ragione di completezza perché non è che voglia parlare di tutti questi; vi parlerò solo dei primi due perché son i più importanti sia storicamente perché sono i primi usati e quelli che hanno prodotto più risultati e sia perché sono buoni esempi di come in astronomia ma in scienza in generale si può capire delle cose anche senza vederle direttamente; il punto di partenza è che se ci sono dei pianeti extra solari ruotano attorno al loro sole, ad una stella anche se ho messo un punto interrogativo perché quello che vi avevo detto la volta scorsa che i pianeti ruotano attorno al sole è un po’ approssimativo e provate a pensare al caso in cui non c’è più distinzione tra pianeta e sole ma sono due stelle di massa uguale e allora quale ruota attorno all’altra? Si arrivo ad una specie di contraddizione e in realtà quello che vi ho detto non è del tutto vero perché nessuno dei due ruota attorno all’latro ma entrambi ruotano attorno ad un punto fisso centrale che è il baricentro del loro sistema e questo è vero sia , questo è il caso di due stelle che hanno massa uguale ma anche nel caso di due oggetti di massa diversa succede la stessa cosa tranne che il baricentro è più spostato verso l’oggetto che ha più massa e quindi l’oggetto più grande nel senso che procede più massa si muove in un orbita che è uguale geometricamente a quella dell’altro ma più piccola lo stesso succede all’interno del sistema solare: si dice che giove è in orbita intorno al Sole ma anche il Sole è in orbita attorno a Giove, o meglio non intorno a Giove ma al baricentro del sistema Sole – Giove. Siccome il Sole ha una massa 1000 volte maggiore di quella di Giove, l’orbita del Sole è 1000 volte più piccola di quella di Giove e quindi molto spesso questo si trascura però è un effetto importante perché se noi osserviamo un pianeta extra solare o meglio un sistema solare solar e in cui c’è un pianeta, ci sarà un pianeta che percorre una sua orbita la stella che percorre un orbita molto più piccola intorno al baricentro comune tranne che noi il pianeta non lo vediamo e quindi l’essenza del metodo spettroscopico è osservare e determinare il moto orbitale della stella prodotto dalla presenza di un pianeta perché non possiamo osservare il pianeta perché risulta a tutti gli effetti invisibile.

Come possiamo osservare il movimento di una stella? Con l spettroscopia , per mezzo dell’effetto Doppler quindi quello che succede in questo tipo di misure p che io devo fare spettroscopia di una stella e a priori non so quale stella quindi questi programmi di ricerca sparano un po’ a caso: prendono un catalogo di stelle e fanno spettroscopia di tutti e continuare a farla o meglio a farla a intervalli di tempo in modo da vedere se nello spettro la posizione delle righe cambia nel tempo e lo spostamento verso il rosso o verso il blu vuol dire che la stella si sta avvicinando o allontanando e se questo spostamento è periodico può essere interpretato come uno spostamento dovuto ad un’orbita e quindi si può ricostruire il movimento orbitale della stella e da questo il movimento il movimento orbitale del pianeta che è uguale tranne il fattore di scala perché il pianeta ha una massa più piccola.

E quindi il dato primario di questo metodo di rivelazione dei pianeti extrasolari è la curva di velocità radiale cioè una curva in cui io in funzione del tempo misuro la frequenza di una riga, di un insieme di righe e guardo quanto questa frequenza varia in funzione del tempo e in questi grafici la variazione di frequenza sono già tradotte in variazione di velocità radiale e quindi ho una curva che mi rappresenta la velocità di allontanamento e avvicinamento della stella rispetto a noi e questa tramite le leggi di Keplero può essere tradotto immediatamente in una serie di informazioni sull’orbita in particolare posso determinare il periodo perché ovviamente il fenomeno è periodico e si ripete, il periodo è quello, posso determinare la massa e il semiasse maggiore del pianeta con le leggi di Keplero perché osservando la stella spettroscopicamente io conosco anche il suo spettro, la sua temperatura e questo attraverso la conoscenza delle vari classificazione stellari si sa che c’è un dipendenza molto stretta della massa delle stelle dalla loro temperatura, dallo spettro derivo anche la massa della stella dalla --- della velocità derivo il rapporto tra la massa della stella e quella del pianeta e quindi calcolo la massa del pianeta so anche quale è il semiasse maggiore dell’orbita perché la terza legge di Keplero lega il periodo orbitale ala semiasse maggiore e quini ha tutti questi dati ho anche l’eccentricità dell’orbita perché è data dalla forma più o meno sinusoidale del segnale: se l’orbita fosse eccentrica avrei un segnale che non è più così simmetrico vi ricordate che il pianeta intorno alla stella percorre un’ellissi con velocità variabile a seconda legge di Keplero: quando è vicino al perielio, il punto più vicino al sole si muove più rapidamente di quando è più lontano e queste variazioni di velocità si traducono in un accelerazione e decelerazioni che sono chiaramente visibili nella forma della curva di velocità radiale e quindi questi dati alla fin fine, questo è un altro cosa interessante in cui ho due pianeti e quindi la stessa cosa di prima tranne che io osservo la sovrapposizione di due moti orbitale e quindi questa figura al devo scomporre in due segnali: una sinusoide che ha un periodo più lungo e una sinusoide che ha un periodo più corto e questo mi dice che ci sono due pianeti che hanno periodo diverso quindi semiasse maggiore diverso ecc. allora questo è un metodo che permette di determinare il periodo orbitale del pianeta il semiasse maggiore dell’orbita la massa c’è un piccolo punto tecnico che non ho toccato ma e che non ho tempo di approfondire ma in realtà questo metodo da solo un limite inferiore della massa e la forma dell’orbita cioè l’eccentricità.

Un altro metodo utilizzato per la scoperta di pianeti extra solari è basato sulla fotometria cioè la misurazione della luce quantità di luce che ci arriva da una stella, il principio è di questo tipo: se il pianeta nella sua orbita ha un’orbita che ha un’inclinazione tale per cui nel corso della sua rivoluzione passa davanti alla stella, nel momento i cui passa occulta una piccola frazione della luce che proviene dalla stella e quindi mi aspetto che la luminosità totale della stella diminuisca; ovviamente io questa figura è un’interpretazione di quello che vedo perché io la stellala vedo come u oggetto puntiforme, il pianeta non lo vedo q quindi il fatto che disegni questa figura non vi deve far pensare che io veda veramente questa configurazione; io vedo u n oggetto puntiforme e misuro quanta luce emette e quando nel corso del tempo vedo che la luce diminuisce e poi risale interpreto questa variazione come il l’occultazione parziale prodotta dal passaggio di un pianeta sopra il disco della stella; interpreto ma in un modo abbastanza preciso perché la forma di questa variazione prodotta da una occultazione è molto tipica, un astronomo la sa riconoscere immediatamente perché si ha… esistono anche stelle variabili, stelle che variano intrinsecamente la loro luminosità perché le reazioni nucleari che si svolgono con ritmo diverso perché sono pulsanti ma la forma della variazione è completamente diversa e in particolar in questo caso ha un plateau cin cui la luce della stella rimane costante (queste piccole variazioni sono errori strumentali) e poi ho una discesa molto ripida della luminosità verso un minimo che corrisponde al tempo che il pianeta impiega a iniziare l’occultazione e quindi il tempo che tutto il disco del pianeta impiega a occupare la superficie della stella e poi ho una un fondo quasi costante e poi una risalita della curva di luce perfettamente simmetrica rispetto all’entrata; notate che la durata di tempo da qui a qui cioè questa corrisponde a… questo affievolimento dalla luce corrisponde al progressivo passaggio di una percentuale sempre maggiore del disco del pianeta sulla superficie della stella e allora la misurazione di questa intervallo di tempo mi da direttamente il diametro del pianeta e quindi il ,metodo fotometrico è un metodo alternativo a quello spettroscopico che non sempre è impeccabile perché se il pianeta fosse in orbita rispetto alla stella su un piano che non interseca la nostra linea di vista non si ha nessuna eclissi in quel caso non vedrò nulla; il pianeta potrebbe esserci ma io non vedo nessun effetto ma se c’è un eclissi questa permette di determinare sempre il periodo orbitale perché ovviamente è il periodo tra un eclissi e l’altra il semiasse maggiore dell’orbita perché deriva dalle leggi di Keplero come nel caso della spettroscopia, il diametro del pianeta, non la massa e più o meno l’orientazione dell’orbita perché so che la sto vedendo quasi di taglio.

Per ovviare i problemi che le osservazioni fotometriche di questo tipo che sono molto raffinate, richiedono di misurare piccolissime variazioni di luminosità della stella quindi come potete capire sono molto intralciate da quei fenomeni di turbolenza che vi facevo vedere precedentemente per cui negli ultimi anni sono stati lanciati del satelliti artificiale che hanno dei piccoli telescopi dedicate esclusivamente a fare questo tipo di ricerca e ovviamente operando al di fuori dell’atmosfera riescono ad avere una precisione fotometrica molto superiore perché non hanno tutti questi problemi di turbolenza atmosferica.

Un altro il risultato che a volte ha osservazione spettroscopica dei pianeti è la determinazione anche di alcune proprietà chimiche del pianeta stesso perché se il pianeta occulta la stella e io riesco a misurare detettare il pianeta sia fotometricamente che spettroscopicamente allora se io faccio lo spettro della stella durante il transito del pianeta sulla superficie della stella io sto osservando una luce che forse in alcuni parzialmente dalla stella passa attraverso l’atmosfera del pianeta prima di arrivare al telescopio e quindi posso sperare in alcuni casi è successo che lo spettro della stella sia leggermente diverso quando è in occultazione e quando è furi occultazione e questa differenza di righe spettrali punta indica la composizione chimica del pianeta dell’atmosfera del pianeta che ha occultato la luce; questo è molto importante perché è l’unico mezzo fino ad ora per avere informazioni fisico-chimiche sui pianeti osservati e un domani potrebbe anche portare a scoprire la vita perché i geologi dicono per esempio che un’atmosfera ricca di ossigeno come quella della terra è possibile solo come effetto dei organismi viventi perché l’ossigeno è un elemento che si combina così facilmente con tutti gli altri elementi che se non ci fossero le piante che producono ossigeno, in un tempo brevissimo, credo poche centinaia di anni o poche migliaia di anni tutto l’ossigeno della terra verrebbe inglobato nella formazione di ossidi e quindi non ne rimarrebbe più nell’atmosfera e quindi un’atmosfera ricca di ossigeno può essere ricca di ossigeno solo se c’è una fonte continua che produce ossigeno e l’unica che si conosce che possa funzionare a livello planetario è una biosfera; che non è stato osservato.

Vi dicevo che devo andare un po’ veloce, ci dicevo che attualmente ci sono dei metodi raffinati di elaborare le immagini in modo da poter vedere anche oggetti piccoli vicino a stelle luminose e si cominciano a vedere , anni fa era possibile vedere stelle nane, queste brown dwarfs nane brune sono stelle molto piccole ma recentemente è stato osservato per la pima volta anche un vero sistema planetario naturalmente utilizzando sempre uno strumento di tipo coronografo cioè la luce centrale della stella deve essere bloccata da un diaframma altrimenti non si vedrebbe nulla.

Negli ultimi cinque minuti volevo darvi una carrellata di quello che si è scoperto fino ad ora e si sono scoperti circa 700 pianeti che appartengono a 573 sistemi planetari perché alcuni di questi sistemi planetari sono multipli e mi sembra che quello che i è trovato fino ad un sistema dio 6 pianeti quindi un sistema non tanto diverso dal sistema solare come numero; facendo un grafico delle caratteristiche di questi pianeti in particolare qui metto in grafico la massa del pianeta rispetto al suo semiasse maggiore su un grafico logaritmico perché la differenza di grandezza tra i semiassi maggiori dei vari pianeti è molto grande e su un grafico lineare non si vedrebbe molto.

Forse messo così non vi dice molto ma se metto alcuni punti di riferimento, Giove, la terra e Mercurio si trova a questa distanza dalla stella ma molto più sotto perché è molto più piccolo della terra e vedete che questi risultati sono abbastanza strani perché in particolare vedere che esiste un grande numero di pianeti grandi come Giove o più grandi di giove che sono ad una distanza però dall’altro scentrale molto più piccola di quella di Giove, dell’ordine della distanza della terra o anche molto più piccola della distanza di mercurio allora questa scoperta è incontrovertibile ma è stato abbastanza uno shock per gli astronomi perché se vi ricordate quello che vi ho spiegato dalla nascita del sistema solare questo lo stravolta completamente perché questo è diventato il problema dei Giovi caldi hot jupiter perché queste scoperte dicono che esistono e anzi sono molto comuni dei sistemi solari in cui esistono pianeti grandi come giove o anche molto più grandi, dieci volte più grandi di giove per esempio e quindi sicuramente non possono essere composti solo da materiale pesante perché per quanto grande fosse la proto nebula stellare da cui si sono formati non ci possono essere così tanti elementi pesanti da formare pianeti di questo tipo quindi questi devono essere pianeti di tipo gioviano anche in senso di composizione , devono essere fatti principalmente di idrogeno ma ad una distanza tale che nella nuvola , proto nebula in cui si sono accresciuti non doveva esserci idrogeno perché doveva essere una regione troppo calda per esserci e allora questo punta al fatto che devo fare una precisazione cioè il fatto che si osservino più pianeti di massa elevata rispetto a pineti di massa piccola è sicuramente un effetto di selezione perché ovviamente più il pianeta è grande e più produce uno spostamento grande sulla stella e quindi io lo osservo molto più facilmente e quindi la distribuzione tra pianeti grandi non è indicativa della realtà è indicativa solo della facilità con cui io osservo i pianeti rispetto ai pianeti piccoli però resta il fatto che con la teoria classica della formazione del sistema solare questi pianeti non dovevano proprio esistere; il fatto stesso che li osservi , è anche se posso dire che sto sovrastimando la loro percentuale però questo è una specie di paradosso e allora quello che un altro paradosso si ha se faccio un grafico della sempre rispetto al semiasse maggiore dei pianeti dell’eccentricità; voi vedete qui delle eccentricità che vanno fino a quasi 1 quindi orbite estremamente allungate vi ho fatto vedere precedentemente che nel sistema solare non è così cioè tutti i pianeti del sistema solare sono contenuti in questa striscia, l’eccentricità massima è dell’ordine del 5 % ; anche questo dato ci dice che questo orbite sono molto diverse da quelle che noi conosciamo e allora il risultato è che questi dati non credo che invalidino quello che noi sappiamo o supponiamo sulla nascita del nostro sistema solare ma ci fanno capire che il modo in cui è nato il nostro sistema solare è solo uno dei modi possibili in cui può nascere un sistema planetario, in particolare questi sistemi devono essere sistemi in cui ci sono stati fortissime ed estese migrazioni di pianeti molto massicci che inevitabilmente si devono essere formati in regioni più lontane e che però adesso sono più vicine quindi ci deve essere un meccanismo che li ha trasportati verso l’interno allo stesso tempo innalzando l’eccentricità del l’orbita e da l punto di vista della meccanica celeste le due cose vanno abbastanza d’accordo e questi sono dati degli ultimi anni quindi i teorici si stanno ancora scervellando nel tentativo di far quadrare questi conti e questi dati e riuscire a trovare un panorama ragionevole in cui inquadrare anche questo tipo di sistemi solari.