

Studiare le atmosfere dei corpi del sistema solare attraverso le occultazioni

Di Daniele Gasparri

La rilevazione e lo studio delle atmosfere dei corpi celesti che non si possono risolvere con i telescopi, o studiare attraverso le sonde, deve essere effettuata analizzando le curve di luce di eventi rari ma molti importanti: le occultazioni. Quando un pianeta, un KBO, un satellite o qualsiasi altro corpo celeste transita prospetticamente davanti ad una stella, dall'analisi della curva di luce dell'evento, possiamo risalire alla presenza di un'atmosfera ed eventualmente alla sua composizione chimica, pressione, temperatura e profilo di densità.

Rilevare e studiare le atmosfere dei pianeti maggiori è relativamente facile attraverso osservazioni telescopiche e la registrazione dello spettro. Queste due osservazioni sono sufficienti per stimare densità, pressione, profilo, composizione chimica e temperatura delle loro spesse atmosfere.

Il discorso cambia per i corpi celesti che sono lontani e non risolvibili attraverso gli strumenti più potenti, come per esempio Plutone e tutti gli oggetti celesti appartenenti alla sua famiglia (pianeti nani e oggetti trans-nettuniani) oppure per affinare le misurazioni osservative e avere dei dati più precisi. Le tecniche che si usano sono essenzialmente due

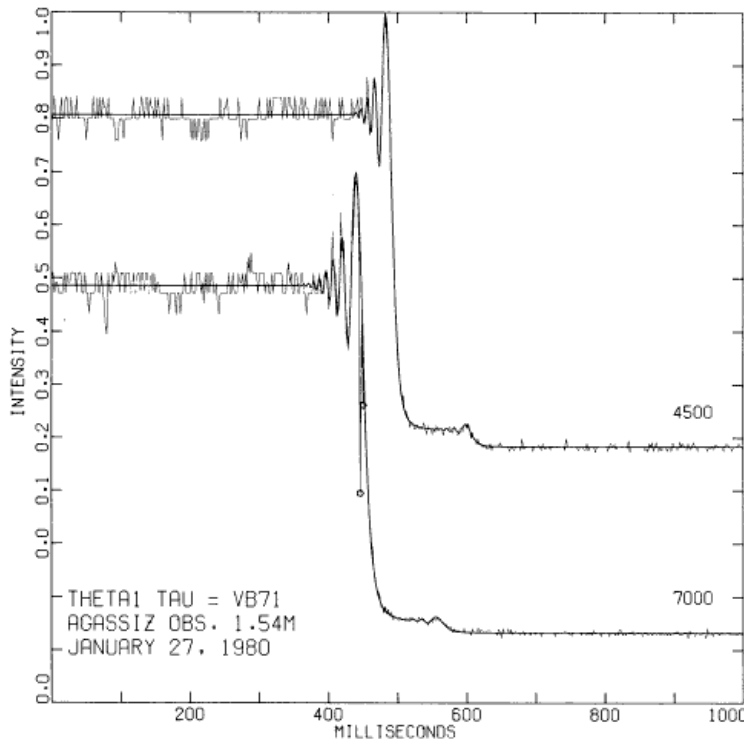
- 1) occultazioni stellari
- 2) misurazione in loco

La misurazione in loco è sicuramente quella più precisa per caratterizzare le proprietà delle atmosfere dei corpi del sistema solare, ma purtroppo quella più difficile nonché dispendiosa. In pratica solo per Venere, Marte, Giove e Saturno si può mettere in pratica questa misurazione. Tutti gli altri corpi celesti, soprattutto i minori, non possono essere indagati con questo metodo. Ben altro discorso per le occultazioni stellari, che forniscono un'opportunità unica per studiare tutti i corpi celesti in dettaglio, ad una condizione: l'oggetto deve occultare almeno una stella. Le occultazioni stellari, da parte di qualsiasi corpo celeste, oltre a fornire preziosi dati in merito alla forma, e dimensione della stella e del corpo occultante, forniscono importanti informazioni sull'esistenza o meno di un'atmosfera, attraverso lo studio accurato della curva di luce dell'evento.

Osservando una curva di luce di un'occultazione, la presenza di un'atmosfera, anche tenue, può essere facilmente rivelata dalla semplice forma del grafico della luminosità in funzione del tempo.

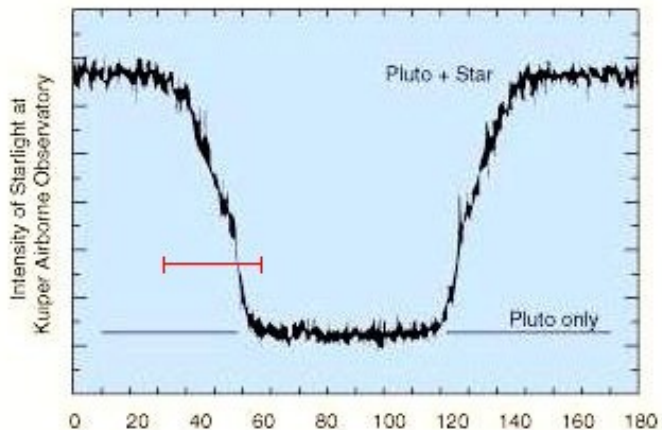
Nel caso di un corpo senza atmosfera, come può essere la nostra Luna, la curva di luce di un'occultazione ha un andamento netto e molto semplice da interpretare; l'istante di immersione della stella dura pochi decimi di secondo, e manifesta, sul bordo lunare, i tipici effetti della diffrazione di Fresnel; ben presto la luce della stella cade a zero, nascosta completamente dall'ombra del nostro satellite, fino a comparire dall'altra parte del bordo lunare, manifestando gli stessi effetti di diffrazione. Tenendo presente la diffrazione, l'intervallo di tempo necessario a far andare a zero la luminosità stellare ci dà direttamente informazioni sul diametro stellare (conoscendo naturalmente distanza della stella e moto apparente della luna sull'orizzonte); in particolari configurazioni, dette occultazioni radenti, l'analisi della luce stellare ci dà informazioni sulla geologia lunare, in particolare sull'altezza e forma dei rilievi e valli del nostro satellite. Nel caso di un corpo celeste dotato di atmosfera, la curva di luce è profondamente diversa: la presenza, anche tenue, di un involucro gassoso, si manifesta subito come un calo di luce più dolce nell'istante di immersione; tenendo presente gli effetti di diffrazione e di diametro stellare, è semplice verificare se siamo in presenza di un corpo celeste dotato di una qualsiasi atmosfera. Questo è il primo dato che si ricava e non occorrono calcoli sofisticati. Per fare un esempio consideriamo una generica occultazione tra Plutone e una stella che sappiamo essere distante 100Pc, con un diametro stimato intorno a 10 raggi solari. Se il pianeta non fosse dotato di un'atmosfera, possiamo calcolare il tempo necessario affinché la stella entri completamente nella sua ombra; confrontando questo tempo con quello effettivamente misurato, siamo in grado di dire se esso ha o meno un'atmosfera. Senza andare troppo nei dettagli, possiamo tranquillamente trascurare gli effetti di diffrazione su un corpo celeste così lontano (gli effetti di diffrazione intervengono sulla durata dell'immersione) e considerare semplicemente il tempo necessario affinché il suo moto apparente occulti completamente il diametro stellare. Supponiamo di misurare uno spostamento sulla volta celeste che equivale (alla distanza di Plutone che supponiamo di 5 miliardi di Km) ad una velocità tangenziale di 20Km/s. Il diametro angolare apparente della stella alla distanza di Plutone (e della Terra, visto che la distanza Plutone-Terra è trascurabile rispetto alla distanza della stella) è di circa $9.22 \cdot 10^{-4} \text{ arc sec}$, che alla distanza di Plutone corrisponde ad una sfera dal diametro di circa 20 km. Se Plutone si muove nello spazio a 20Km/s allora l'occultazione dell'intero disco stellare durerà esattamente un secondo. Per la Luna invece, la durata media di un'occultazione è molto minore, a causa della sua vicinanza al nostro pianeta (nonostante la sua velocità rispetto alle stelle di fondo sia molto minore di 20Km/s): considerando la solita stella di 10 raggi solari posta a 100Pc di distanza, con la distanza Luna-Terra pari a 380 000 Km e il moto lunare di circa 1Km/s (valore indicativo: la luna compie

360° in circa 27 secondi, cioè 13.3°/giorno e 0.55"/sec che corrispondono ad una velocità di circa 1Km/s che si può considerare, per piccole distanze, tangenziale.), si ottiene che il diametro stellare equivale ad una sfera di 170cm posta alla distanza della Luna, e quindi una durata dell'occultazione nell'ordine del millisecondo (circa 2 in questo caso); questo valore, pur essendo approssimato, ben si confronta con le misurazioni reali delle occultazioni lunari, come quella mostrata nella figura seguente.



Curva di luce tipica di un'occultazione lunare. Quando il nostro satellite naturale occultata una stella, la durata e la forma della curva di luce mostra abbastanza chiaramente la pressoché totale assenza di un involuppo gassoso attorno al nostro satellite naturale. La stella sparisce quasi istantaneamente dietro il netto bordo lunare, che produce anche un'apprezzabile diffrazione. Analizzando una curva di luce di questo tipo possiamo risalire al diametro angolare della stella. Conoscendo la distanza possiamo ricavare il diametro.

Analogamente, Per Plutone, il valore indicativo della durata stimata è intorno al secondo. Se confrontiamo questo dato con quelli ottenuti sperimentalmente analizzando un'occultazione, vediamo che la curva di luce è molto più morbida ed è difficile notare con esattezza il punto di inizio e fine dell'immersione (e anche emersione), ma orientativamente la durata del fenomeno è di almeno 30-40 secondi, quindi almeno circa 5 volte maggiore rispetto alla durata stimata.



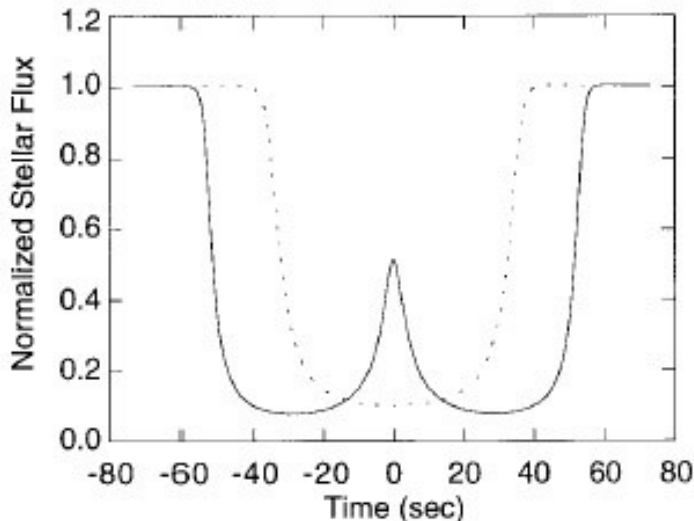
Tipica forma della curva di luce nella quale il corpo occultante, in questo caso Plutone, possiede un'atmosfera. La forma molto morbida e il doppio andamento nella fase di calo identificano senza dubbio la presenza di un tenue involucro gassoso.

Questo è un chiaro esempio di presenza di un'atmosfera intorno al pianeta (da notare come gli effetti della diffrazione a causa di un bordo netto siano confusi con le variazioni stocastiche della luminosità stellare, prova del fatto che non esiste un confine netto come può essere il bordo lunare). Una tale curva di luce ci dà quindi subito indicazioni sulla presenza o meno di un'atmosfera attorno ad un qualsiasi corpo celeste.

Il passo successivo è capire perché la curva di luce ha questo andamento, e cercare di risalire alle proprietà fisico-chimiche dell'atmosfera. Vedremo come da questo semplice dato, cioè il flusso ricevuto in funzione del tempo, sia possibile ricavare una grande quantità di dati.

Prima di affrontare il problema, vediamo di capire le ragioni fisiche della forma di una tale curva di luce; abbiamo infatti detto che in presenza di un andamento più morbido della caduta di intensità luminosa abbiamo sicuramente a che fare con un'atmosfera, ma non ci siamo chiesti il perché. Perché 2 curve di luce differiscono così tanto se c'è o meno un'atmosfera? La risposta più intuitiva che si potrebbe dare è che mano a mano che la stella viene occultata dall'atmosfera del corpo celeste la sua luce viene assorbita; siccome dall'esperienza sappiamo che l'atmosfera è più densa al suolo e meno densa mano a mano che aumenta l'altitudine, è lecito aspettarsi che il calo di luce sia graduale ma inesorabile, almeno fino a quando non si incontra il bordo del pianeta, che fa calare bruscamente la luminosità a zero. Questa ipotesi, anche se in principio giusta, non

è corretta, o meglio non è corretto considerare l'estinzione atmosferica (così si chiama l'assorbimento atmosferico) come la causa principale e modellante delle curve di luce dei corpi celesti. Infatti, se così fosse, come si spiega una curva di luce di questo tipo?

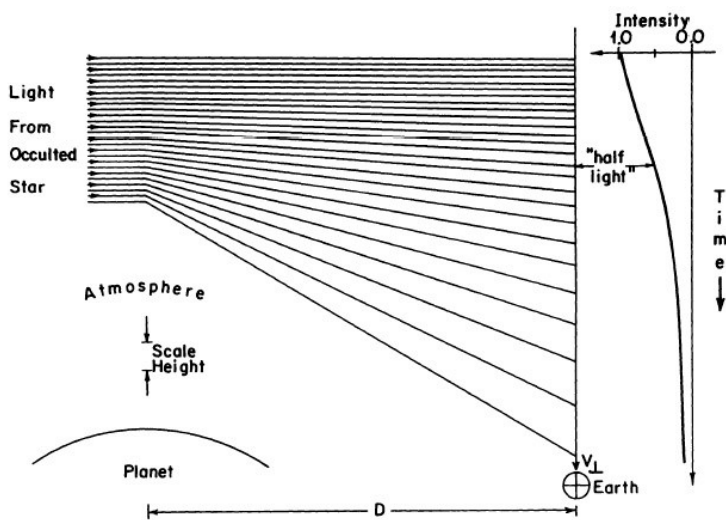


Confronto tra due tipi di curve di luce di un'occultazione. La linea tratteggiata si riferisce all'occultazione teorica e centrale di una stella da parte di un corpo celeste che non possiede atmosfera. La curva continua, invece, è l'andamento ideale che produrrebbe un corpo celeste con un'atmosfera, anche estremamente tenue. Notate come i tempi e la caduta di luce siano molto diversi, e come, nel caso di un'occultazione centrale o quasi, si produce un picco centrale, causato dalla rifrazione dei raggi stellari da parte dell'atmosfera del corpo celeste.

Questo è un tipico andamento di un'occultazione cosiddetta centrale, nella quale l'osservatore vede occultare la stella dal diametro (o da un asse nel caso di corpi irregolari) del corpo celeste. Da notare almeno due cose:

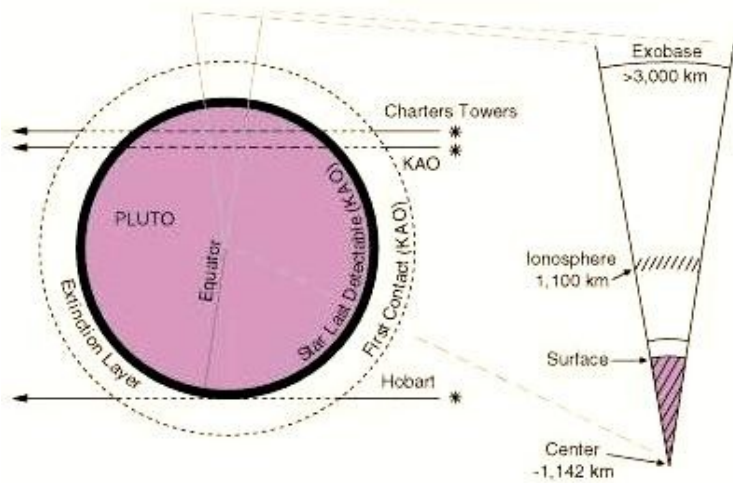
- il flusso stellare non va mai a zero, anche quando la stella dovrebbe trovarsi esattamente dietro il pianeta
- in prossimità del centro dell'occultazione, quando l'osservatore si trova esattamente nel centro del cono d'ombra, il flusso stellare aumenta repentinamente (flash), quando essa dovrebbe essere completamente invisibile.

Non è difficile immaginare come un andamento di questo tipo non sia modellato solamente dall'estinzione atmosferica, ma dalla rifrazione atmosferica: i raggi stellari, entrando nell'atmosfera del corpo celeste, vengono deviati in misura maggiore all'aumentare della densità del gas atmosferico

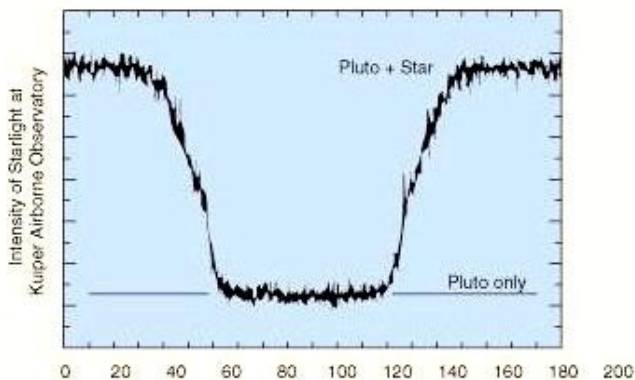


Spiegazione schematica di come la presenza di un'atmosfera del corpo occultante curvi i raggi stellari a causa della rifrazione, modellando in questo modo la caduta di luce e la tipica forma "morbida" dell'intera curva di luce.

I raggi vengono così "sparpagliati" lungo la direzione dell'occultazione, con il risultato che un osservatore ha l'illusione di vedere la stella non scomparire mai completamente dietro il pianeta; se l'occultazione è centrale, l'atmosfera si comporta come una lente, concentrando un maggior numero di raggi al centro, formando il picco centrale della figura precedente. In realtà, in un'occultazione stellare, la rifrazione domina sull'estinzione atmosferica nella caduta di luce che contraddistingue l'immersione (e l'emersione) almeno nelle parti meno dense dell'atmosfera; se analizziamo l'andamento dell'occultazione di Plutone, siamo in grado di capire almeno qualitativamente di cosa stiamo parlando.



Analisi dell'occultazione di una stella da parte del pianeta nano Plutone e corrispondente andamento della curva di luce, considerando gli effetti della diffrazione spiegati nella pagina precedente.



Il calo di luce (e anche l'emersione) mostra chiaramente un doppio andamento; inizialmente esso è più dolce, poi procede più rapidamente; questo è il regime in cui l'estinzione diventa importante e crea un più rapido calo di flusso.

Ora che conosciamo l'andamento e i meccanismi responsabili dell'occultazione stellare da parte di un corpo dotato di atmosfera, passiamo alla parte più interessante ma anche più difficile: l'interpretazione dei dati e come ricavare preziose informazioni dall'unico dato in nostro possesso: la curva di luce.

Siccome tutto il procedimento è lungo, pieno di calcoli complicati e nozioni di fisica che non si possono prescindere, proviamo a fare un ragionamento più qualitativo ma comunque sensato, dando per scontato i calcoli e alcune conoscenze di base, quali i principi di rifrazione, l'indice di rifrazione...ecc.

Dallo studio della curva di luce siamo arrivati alla conclusione che l'entità della rifrazione dipende dalla distanza della stella dal bordo del corpo celeste; quindi,

considerando un modello di atmosfera con distribuzione di densità esponenziale, l'entità della rifrazione dipende dalla densità dei gas incontrati (almeno in prima approssimazione). Dallo studio della curva di luce siamo in grado di trovare l'entità della rifrazione atmosferica, e quindi di ricavare la distribuzione di densità del gas, e attraverso le leggi sui gas, risalire alla pressione, temperatura e anche composizione.

In realtà le cose sono un po' più complicate, anche se il ragionamento fatto è tutto sommato corretto; come spesso accade, per semplificare le cose ed ottenere dei valori che diano almeno un'idea, possiamo effettuare delle semplificazioni, che ci aiutano molto. Se consideriamo le atmosfere isoterme (cioè con temperatura costante), allora siamo in grado di sviluppare dei modelli precisi in grado di darci la distribuzione della pressione e quindi della densità, per una data temperatura supposta costante. Per una generica atmosfera possiamo definire la scala di altezza

per la pressione come: $\frac{1}{H_p} \equiv -\frac{1}{P} \frac{dP}{dr}$, dove r = altezza, P = pressione; se

supponiamo $H_p =$ costante, allora possiamo risolvere questa equazione

differenziale per la pressione: $P = P_0 e^{-r/H_p}$; questo è l'andamento della

pressione in un'atmosfera in cui l'altezza di scala per la pressione è costante;

inoltre, possiamo definire il suo valore (H_p ha le dimensioni di una lunghezza)

come l'altezza necessaria affinché la pressione diminuisca esattamente di un

fattore e (ricorda che $e \approx 2.7$); infatti, nell'equazione poniamo $r = H_p$ e

risolviamo: $P = P_0 e^{-1}$ e quindi H_p è proprio l'altezza per la quale la pressione è e

volte minore della pressione al suolo; l'altezza di scala della pressione si può

anche legare a quantità più facilmente misurabili, come la temperatura, con l'aiuto

delle relazioni per l'equilibrio idrostatico.

La condizione di equilibrio idrostatico si applica ad ogni involucro gassoso

sottoposto a due forze: la pressione stessa del gas (dovuta all'agitazione termica) e

la forza di gravità; queste due forze hanno direzioni contrarie: la forza di gravità

attrae il gas verso il centro del corpo, mentre la pressione del gas agisce in senso

contrario; dopo un certo tempo di rilassamento, il gas avrà raggiunto una

situazione di equilibrio, in cui la pressione (che è una forza per unità di superficie)

equivale l'attrazione di gravità, con il risultato che l'atmosfera si trova in una

situazione stabile (almeno su una certa scala temporale); la condizione di

equilibrio idrostatico è facilmente ricavabile e ci dice che: $\frac{dP}{dr} = -\rho g$; sostituendo

all'equazione $\frac{1}{H_p} \equiv -\frac{1}{P} \frac{dP}{dr}$ ricordando anche la legge dei gas perfetti (che vale

anche per gas reali entro un certo range di pressione) $P = \frac{\rho kT}{m}$ (dove k = costante di Boltzmann, T = temperatura, ρ = densità e m = massa molecolare media) si ottiene: $H_p = \frac{kT}{mg}$; se consideriamo lo spessore dell'involuppo atmosferico molto

minore del raggio del corpo celeste, allora g = costante e H_p è costante per ogni temperatura T , cioè H_p è costante per un'atmosfera isoterma. Se dalla curva di luce riusciamo a conoscere H_p (che è una costante per ora), allora siamo in grado di determinare la temperatura T dell'atmosfera facendo ipotesi sulla composizione chimica (identificata da m); dalla legge dei gas perfetti e dalla definizione di H_p siamo anche in grado di determinare la densità e l'andamento della pressione.

H_p si determina direttamente dalla curva di luce in due modi: uno, chiamato inversione numerica della curva di luce, permette di collegare il suo valore direttamente al flusso ricevuto nell'unità di tempo; infatti è stato dimostrato che il tasso di diminuzione della luce in un'occultazione è univocamente determinato dal moto del corpo celeste rispetto alla stella e dall'altezza di scala della pressione; conoscendo il moto del corpo, il flusso ricevuto contiene in se la misura di H_p . Attraverso l'inversione numerica, che non stiamo qui spiegare perché processo lungo e complicato, si riesce a ricavare un valore puntuale di H_p . Se invece consideriamo la nostra atmosfera isoterma, possiamo ricavare un valore per l'altezza di scala medio (che sarà costante) semplicemente sovrapponendo alle nostre osservazioni un modello di curva di luce ottenuto artificialmente in modo che si sovrapponga il più possibile a quanto registrato: il modello che crea la sovrapposizione migliore (best fit) ci da quindi il valore di scala per la pressione. Una volta conosciuto H_p , facendo ipotesi sulla composizione atmosferica, siamo

in grado di ricavare la temperatura isoterma dell'atmosfera: $T = \frac{\mu g H_p}{k}$. Il passo

successivo è quello di determinare densità e pressione, o meglio, di cercare di determinare almeno un valore, in quanto i loro andamenti sono descritti proprio dal modello di atmosfera isoterma; sappiamo infatti che la pressione varia esponenzialmente con l'altezza: $P = P_0 e^{-r/H_p}$, e siccome vale la legge dei gas perfetti, che afferma la proporzionalità diretta tra pressione e densità, allora anche l'andamento di essa sarà uguale: $\rho \propto \rho_0 e^{-r/H_p}$. Tuttavia, siamo in un apparente

vicolo cieco: sappiamo come varia la pressione e la densità ma ci mancano dei valori singoli da introdurre nelle equazioni ed avere un valore significativo dal punto di vista fisico. Ora possiamo solo fare dei discorsi semi-qualitativi: infatti se trovo un'altezza di scala di 10km, con il calo di luce che inizia ammettiamo a 1000Km dalla superficie del pianeta (ricorda che le distanze sono tutte già determinate), sappiamo allora che la pressione al livello del suolo sarà: $P_0 = P e^{r/H_p}$ e quindi $P_0 \approx P e^{100}$, ma senza il valore della pressione a 1000Km non so assolutamente quanto valga P_0 , e naturalmente viceversa (non posso conoscere il valore di P se non conosco P_0). La cosa è complicata dal fatto che il modello (ideale) di atmosfera isoterma porta ad un risultato strano: la pressione P infatti va a zero solamente se $r \rightarrow \infty$ cioè un'atmosfera isoterma ideale non ha confini, ma sfuma gradualmente nello spazio. Dalla curva di luce appare chiaro invece che essa abbia dei confini, anche abbastanza netti, contraddistinti proprio dalla graduale (ma netta) caduta di luce a causa della rifrazione. E' chiaro però, che a rigore, l'inizio della caduta di luce non corrisponde al confine dell'atmosfera isoterma, perché semplicemente non esiste; l'inizio della caduta di luce sarà dato dalla sensibilità degli strumenti nella misura del calo di luce, causato dalla rifrazione, via via maggiore all'aumentare della densità. Questa ultima affermazione è la chiave di volta di tutto il problema; l'entità della rifrazione dipende dalla densità del gas; se riesco a misurare l'angolo di deflessione di un certo raggio, allora ho informazioni sulla densità dello strato di atmosfera responsabile e posso ricavare un valore della densità in quel punto; se riesco a fare questo, allora conoscendo l'andamento della densità e della pressione (che altro non è che la forza peso esercitata da una colonna di gas su una superficie unitaria, cioè $P = \frac{mg}{A} = \frac{\rho Vg}{A}$) ricavo finalmente valori significativi dal punto di vista fisico.

Fortunatamente conosciamo molto bene la teoria della rifrazione, e quindi siamo in grado di collegare per esempio la densità del gas in funzione dell'altezza direttamente all'indice di rifrazione: un valore facilmente calcolabile è dato dall'istante in cui la luminosità stellare raggiunge esattamente metà intensità; in questo istante la luce stellare è stata rifratta esattamente da un angolo pari a:

$$\vartheta = \frac{H_p}{D}, \text{ dove } D = \text{distanza pianeta-Terra. Conoscendo l'angolo di rifrazione,}$$

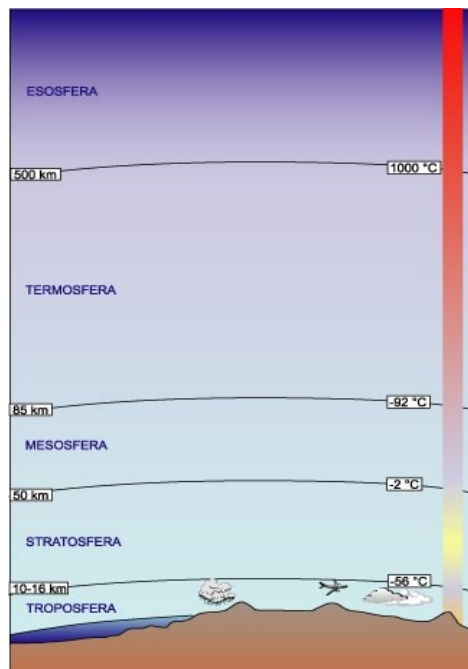
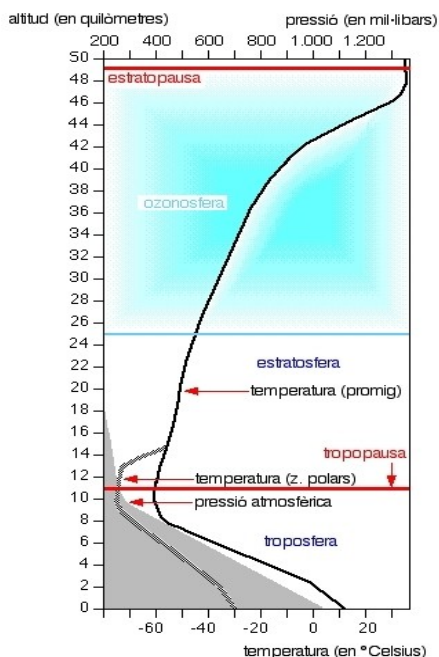
siamo in grado di risalire all'indice di rifrazione e quindi alla densità del gas attraversato (l'indice di rifrazione dipende dal tipo e dalla densità del gas, facendo ipotesi sulla composizione, troviamo la densità a metà intensità). Finalmente,

conoscendo la densità ad una certa altezza r , siamo in grado di ricavarla per tutte le altezze, così come per la pressione.

Siamo quindi giunti a proporre un modello per determinare, per un'atmosfera isoterma, la scala di pressione, la temperatura, la pressione e la densità semplicemente conoscendo l'altezza di scala per la pressione e l'indice di rifrazione del gas.

Il modello presentato non è completo, ma vuole solo dare un'idea di come si deve ragionare nell'interpretazione dei dati.

Inoltre le atmosfere planetarie non sono realmente isoterme; solamente per tratti di alcune decine di Km, a volte centinaia, si possono considerare realmente isoterme; il caso meglio conosciuto è quello terrestre, molto diverso da un'isoterma: per altitudini basse (fino al livello di condensazione delle nubi) il gradiente termico verticale è abbastanza alto ($\approx 1^\circ / 100m$) poi cala a causa del calore latente liberato dalla condensazione del vapore acqueo, ma resta comunque elevato. Ad altezze maggiori di 15-20Km il gradiente è negativo (la temperatura sale), per poi calare bruscamente, e crescere di nuovo fino a circa 1000°C nelle parti più alte in cui molta radiazione solare è assorbita dalle molecole presenti:



Andamento reale del profilo atmosferico della Terra. Affinché l'inversione delle curve di luce proponga risultati precisi, è necessario avere un modello di atmosfera. Il caso più semplice è quello di un'atmosfera isoterma, ovvero a temperatura costante e con profilo di densità esponenziale, ma questa è solo un'approssimazione, come di può vedere dal profilo a sinistra. A destra, l'identificazione degli strati dell'atmosfera terrestre.

Un andamento non isoterma, anche se non così marcato, data l'unicità dell'atmosfera terrestre nel sistema solare, è comunque seguito da tutte (o quasi) le atmosfere dei corpi del sistema solare.

Questo significa che il modello precedentemente visto sia privo di significato?

Naturalmente no, solamente che il modello descrive una situazione ideale e media, che deve essere affinata se si vuole indagare oltre. La variazione di temperatura in uno strato atmosferico produce variazione nella densità, nella pressione e nell'indice di rifrazione; questo è ciò che collega il modello alla realtà; dalla misura del flusso ricevuto siamo infatti in grado di notare variazioni dell'indice di rifrazione e quindi le deviazioni dal modello isoterma.

Lo studio generale di un'atmosfera non isoterma si sviluppa secondo la teoria chiamata inversione numerica della curva di luce; alla misura del flusso misurato in funzione del tempo si lega l'indice di rifrazione (o meglio, il cosiddetto indice di rifrattività, che è comunque un'espressione diversa dell'indice di rifrazione), cercando di ricostruire il profilo di rifrattività dell'atmosfera (indice di rifrazione in funzione dell'altezza); da questo profilo è possibile dedurre tutte le quantità principali. Dalla composizione atmosferica si ricava il profilo di densità (l'indice di rifrazione è infatti proporzionale alla densità del gas presente) e successivamente si ricava il profilo della temperatura e della pressione considerando l'equazione dei gas perfetti e la condizione di equilibrio idrostatico

(che naturalmente vale a prescindere dal tipo di atmosfera):

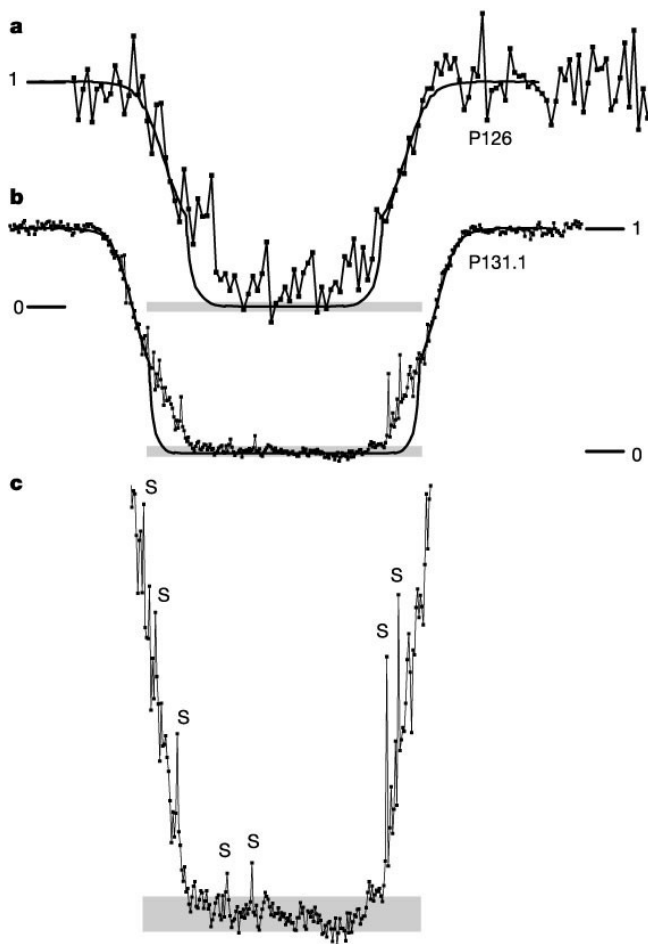
$$\left\{ \begin{array}{l} P = \frac{\rho kT}{\mu} \\ \frac{dP}{dr} = -\rho g \end{array} \right.$$

Procedendo nell'analisi della curva di luce possiamo trovare altri interessanti dati dell'atmosfera del corpo occultante, che possiamo considerare di ordine superiore. Possiamo ricavare i profili di temperatura, pressione e densità semplicemente considerando il calo di luce, ma un'attenta analisi della curva, ci permette di ricavare anche la composizione, eventuali fluttuazioni repentine di densità, sintomo di zone di turbolenza o comunque di una certa attività atmosferica; questi dati si possono ricavare considerando le rapide fluttuazioni di luminosità a cui è soggetta la luce della stella rifratta; queste rapide variazioni (in inglese chiamati spikes) sono in qualche modo la prova che le proprietà locali dell'atmosfera cambiano; ricordando infatti che la rifrazione atmosferica dipende sostanzialmente dalla composizione e dalla densità del materiale attraversato dal raggio di luce, repentini cambi possono essere interpretati senza problemi come variazioni di densità; queste variazioni di densità possono essere prodotte sia dalla presenza di masse d'aria in ascesa (moti convettivi, come accade nella parte più

bassa dell'atmosfera terrestre) o a venti, in generale a turbolenze atmosferiche o a rapidi gradienti termici (ricorda che densità, pressione e temperatura sono legati dall'equazione di stato dei gas perfetti); se poi consideriamo anche l'estinzione atmosferica prodotta nelle zone più interne dell'atmosfera, e siamo in grado di osservare a diverse lunghezze d'onda, allora possiamo determinare la composizione chimica e l'eventuale presenza di polveri o in generale di particelle di aerosol in sospensione nell'aria.

Non svilupperemo un modello quantitativo, anche perché sarebbe pieno di inutili calcoli matematici, ma ci limiteremo a dare delle giustificazioni fisiche a ciò che è possibile ricavare.

Gli "spikes" cioè i picchi di luce, si manifestano all'incirca in questo modo in una tipica curva di luce di un pianeta:



Curva di luce in alta risoluzione di un'occultazione stellare di Plutone.

E' possibile individuare dei picchi di luce di durata brevissima, i cosiddetti spikes in inglese, molto importanti nel ricavare altre preziose informazioni.

Questi che possono sembrare salti casuali dovuti a qualche errore strumentale e che possono essere tranquillamente trascurati, nascondono in realtà un significato fisico.

La presenza degli spikes indica movimenti nell'atmosfera considerata, ma anche variazioni locali di densità, temperatura e composizione; si tratta, quindi, di informazioni molto preziose per mettere in luce la dinamica dell'atmosfera del corpo celeste.

Nella figura sono mostrate due occultazioni stellari da parte di Plutone; nella prima e terza immagine sono chiaramente visibili i picchi di luce (spikes) di cui abbiamo accennato, alcuni abbastanza pronunciati. L'interpretazione di questi picchi di luce è tuttora non del tutto chiara; in particolare sembra che questi spikes possono essere sia il risultato di turbolenza atmosferica (similmente a quanto accade sulla Terra osservando una stella la cui luce sembra scintillare) random, oppure di vere e proprie onde di gravità, dovute allo spostamento di masse d'aria verso l'alto (moti convettivi) e quindi segnale di una notevole attività atmosferica. Spesso gli spikes sono il risultato di entrambi i processi e distinguere chiaramente i due contributi diventa problematico. Osservazioni dello stesso fenomeno condotte in diversi luoghi sulla superficie terrestre (e quindi la cui occultazione interessa diverse zone atmosferiche del corpo) possono aiutare molto; infatti la turbolenza atmosferica, come accade anche sulla Terra, non si mostra isotropa, e quindi un'eventuale curva di luce che mostra gli stessi spikes in diverse parti dell'atmosfera può tranquillamente essere interpretata come il risultato di onde di gravità causate da moti su grande scala.

La composizione atmosferica richiede dati più precisi di una semplice curva di luce. Tramite osservazioni condotte in diverse bande dello spettro elettromagnetico si può risalire all'entità dell'estinzione atmosferica, esaminando anche il flash di un'occultazione centrale: l'obiettivo è quello di ottenere una specie di spettro senza dover utilizzare uno spettrografo.

La presenza di gas molecolare può essere messa in luce a causa delle bande di assorbimento che contraddistinguono qualunque molecola (al contrario di un tipico spettro a righe delle specie atomiche). Osservazioni in bande ancora più strette, centrate sull'assorbimento delle molecole che si vuole mettere in evidenza, possono confermare o meno la presenza di un certo gas atmosferico e dare indicazioni sulla sua abbondanza.

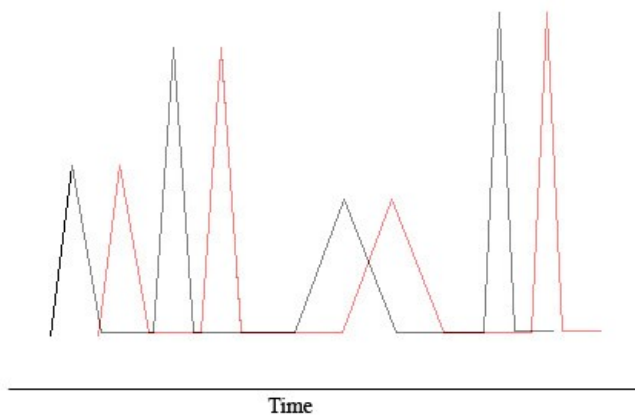
Attraverso l'analisi degli spikes si riesce a stabilire con sufficiente precisione (molto dipende dalla qualità dei dati in possesso) le abbondanze dei principali gas atmosferici. Il procedimento da seguire è abbastanza semplice: la luce attraversa l'atmosfera, e viene rifratta dal gas proporzionalmente alla sua densità; tuttavia, la rifrattività di un gas dipende anche dalla lunghezza d'onda della luce; in particolare le lunghezze d'onda più corte vengono deflesse meno di quelle più lunghe. La dipendenza della rifrattività dalla lunghezza d'onda è tipica di ogni gas, e quindi uno studio accurato può portare alla stima dell'abbondanza del gas atmosferico. La tecnica richiede dati di alta qualità e risoluzione ed è limitata ad atmosfere costituite principalmente da due gas; questa comunque non è una limitazione troppo grossa: certo, il metodo non consente di rilevare le abbondanze di tutti i gas, ma è comunque valido.

Osservando in almeno due bande diverse dallo stesso sito, a causa della diversa rifrazione della miscela di gas in funzione della lunghezza d'onda, gli spikes si manifesteranno ad intervalli di tempo diversi nelle varie bande. L'intervallo di tempo misurato nelle due bande d'osservazione contiene informazioni sulla dispersione di entrambi i gas e quindi informazioni sulla loro abbondanza relativa. Tutto risulta molto più chiaro con un esempio astratto.

Supponiamo di avere tre atmosfere, le cui dinamiche e proprietà fisiche siano completamente identiche, una composta da un gas X, l'altra da un gas Y e la terza da una micella X+Y le cui proporzioni non sono note.

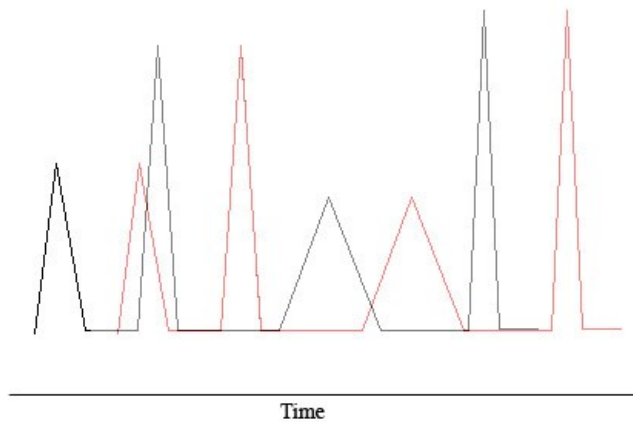
Di entrambi i gas, attraverso esperimenti di laboratorio, conosciamo praticamente tutto, compreso l'andamento dell'indice di rifrazione (o rifrattività) in funzione della lunghezza d'onda che supponiamo sia molto diverso tra i due gas.

Osservando l'atmosfera X in due diverse lunghezze d'onda (supponiamo vicino UV e vicino IR) otteniamo un andamento per il gas X di questo tipo:



Andamento indicativo degli spikes prodotti da un'occultazione di un corpo celeste con una certa atmosfera, in funzione della lunghezza d'onda.

Per la seconda atmosfera, osservando alle stesse lunghezze d'onda, si ottiene un andamento diverso:



Andamento indicativo degli spikes prodotti da un'occultazione di un corpo celeste con una certa atmosfera, diversa solo per composizione chimica rispetto a quella della figura precedente.

Se cambia solamente la composizione chimica, la distanza tra gli spikes prodotti tra le due lunghezze d'onda di osservazione cambia. Se conosciamo le proprietà di tutti i gas, possiamo risalire, in questo modo, alla composizione chimica dell'atmosfera, senza doverne studiare lo spettro, o per completare e confermare gli studi spettroscopici.

La distanza tra due uguali spikes nelle due lunghezze d'onda ci dà l'andamento della rifrattività con la lunghezza d'onda per il gas; un'atmosfera che contenga i gas X+Y mostrerà degli spikes, la cui separazione sarà data dall'abbondanza relativa dei due gas; se essi saranno mescolati esattamente al 50% allora la distanza tra gli spikes sarà semplicemente la media (non pesata) delle distanze

nelle atmosfere X e Y, cioè: $\Delta t = \frac{t_{\lambda_2} - t_{\lambda_1}}{2}$; se le abbondanze non saranno

esattamente uguali, allora la distanza sarà una media pesata sulle due abbondanze

relative: $\Delta t = \frac{Yt_{\lambda_2} - Xt_{\lambda_1}}{2}$. In realtà questo risultato si ha se la dipendenza della

refrattività è lineare con la lunghezza d'onda, per entrambi i gas, altrimenti non si può più fare il discorso della semplice media matematica. L'importante è comunque riuscire a capire che conoscendo la dipendenza dell'indice di rifrazione dalla lunghezza d'onda per ogni gas, dall'esame degli spikes in funzione della lunghezza d'onda si può risalire alle abbondanze relative dei due gas principali. Le maggiori difficoltà nell'applicare questa tecnica alle atmosfere planetarie risiede sostanzialmente nella difficoltà di avere dei dati con una risoluzione abbastanza alta e un rapporto segnale/rumore elevato. Anche le eventuali basse rifrattività dei gas, come ad esempio l'Elio, possono introdurre notevoli errori e difficoltà di calcolo.

Lo studio dell'estinzione atmosferica e della luminosità del picco centrale, da informazioni preziose sull'eventuale presenza di aerosol in atmosfera e sulle dimensioni delle particelle. Questo dato è comunque piuttosto difficile da rilevare

e abbiamo bisogno di maggiori informazioni, come due o più osservazioni simultanee in diverse bande spettrali, oltre ad un'ottima descrizione del modello atmosferico che ci troviamo davanti. Senza andare nei dettagli, ci limitiamo a dare solamente delle indicazioni qualitative: sottraendo dalla curva di luce il contributo dovuto dalla rifrazione atmosferica, attraverso un modello, siamo in grado di evidenziare il calo di luce causato solamente dall'estinzione atmosferica e/o assorbimento dovuto alle molecole del gas; in particolare il picco centrale di luminosità ci può essere molto utile: conoscendo le proprietà dell'atmosfera siamo in grado di prevedere la sua intensità. Dal confronto di questa con quella reale, soggetta ad estinzione da parte di particelle di aerosol ed eventuali assorbimenti molecolari, siamo in grado di dare informazioni sulla trasparenza (meglio, profondità ottica) del mezzo attraversato; conoscendo la composizione del gas siamo in grado di evidenziare e sottrarre anche il contributo dovuto ad esso (assorbimento a bande e diffusione, che può considerarsi trascurabile) ed evidenziare la presenza di particelle solide (aerosol), che si manifesta come un assorbimento non più a strette bande come le molecole, e da effetti di diffusione, molto più importanti rispetto al gas. L'estinzione atmosferica diventa maggiore quanto più grandi sono le particelle di aerosol, mentre nulla si può dire sulla loro composizione.

Il picco centrale, o meglio la sua forma, e la simmetria totale della curva di luce, ci danno informazioni anche sulla forma dell'atmosfera; un involucro perfettamente sferico produrrebbe un picco centrale altamente simmetrico, mentre piccole variazioni dalla forma sferica introducono delle aberrazioni nell'effetto di focalizzazione e quindi una variazione della forma del picco centrale, e in generale anche della stessa simmetria della curva di luce.

Il metodo visto dell'inversione della curva di luce e dell'interpretazione dei (pochi) dati in nostro possesso è molto più complesso di quanto non appaia; nonostante la già notevole complessità, esso è frutto di alcune approssimazioni che si sono rese necessarie per semplificare i calcoli; in particolare abbiamo trascurato effetti di diffrazione, effetti minori di rifrazione atmosferica (abbiamo supposto che il raggio entrando in atmosfera subisca una singola rifrazione, cosa che a teoricamente non è esatta), trascurato le variazioni di gravità con l'altezza che modificano (ma di pochissimo, soprattutto per corpi grandi) l'altezza di scala per la pressione, considerato il corpo celeste sferico (e la conseguente accelerazione di gravità g) e una composizione omogenea (senza quindi differenziazione chimica). Nonostante queste approssimazioni, i risultati che si ottengono sono abbastanza precisi e per alcuni corpi celesti, come Plutone, sono l'unico mezzo per conoscere le loro proprietà atmosferiche; le occultazioni stellari permettono di sondare vaste regioni dell'atmosfera con una risoluzione che è pari al diametro stellare visto da Terra alla distanza del pianeta (e quindi nell'ordine

dei 10 Km) ed ottenere dati molto precisi fino ad altezze di poche decine di Km dalla superficie del corpo celeste.

Il modello dell'inversione, con opportune modifiche, si può applicare anche ad altri corpi celesti: asteroidi di forma non regolare e atmosfere che non sono in equilibrio idrostatico come quelle delle comete.

L'avvento delle missioni di esplorazione interplanetarie ha permesso di verificare e affinare i modelli e le nostre conoscenze delle atmosfere, soprattutto attraverso piccole sonde che hanno attraversato l'atmosfera fino a posarsi sulla loro superficie.

Concludiamo questa sezione con una curiosità: in assenza di misure dirette da parte di sonde che si gettano nelle atmosfere planetarie, la misurazione si effettua ancora con il metodo delle occultazioni, solamente che l'oggetto che occultata il pianeta non è più una lontana stella ma una sonda in orbita intorno ad esso che emette segnali radio ad una ben precisa frequenza. Applicando il metodo dell'inversione a questa strana occultazione riusciamo ad avere dei dati di ottima qualità e sviluppare un modello atmosferico molto più preciso di quello delle occultazioni stellari.