

**ABERRAZIONE STELLARE, PARALLASSE,  
TEMPO LUCE, ECC...**

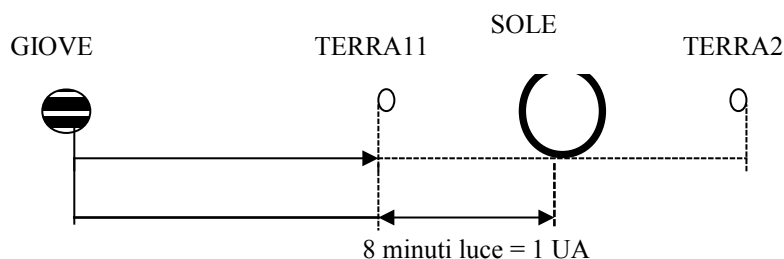
**OVVERO:**

**PERCHE' LE STELLE NON SONO DOVE SEMBRANO.**

E' un fatto noto a tutti che in astronomia parlare di distanza significhi spessissimo parlare anche di tempo: ad esempio dire che la Galassia di Andromeda dista circa 2.25 milioni di anni luce significa ammettere che la vediamo com'era nel remoto passato, e che nulla ci è dato di sapere riguardo al suo attuale aspetto. Ciò significa che non possiamo nemmeno sapere *dove* esattamente sia al momento della nostra osservazione: a rigore durante gli ultimi 2.25 milioni di anni potrebbe aver viaggiato in una qualsiasi direzione nello spazio, ed essere ad esempio finita nell'emisfero australe. Non abbiamo nessun dato diretto che possa dirci dove essa sia nel momento esatto in cui vediamo la sua immagine nel passato, soltanto una buona dose di ragionevoli supposizioni teoriche.

Questo tipo di fenomeno, usualmente definito di *Tempo Luce* (in quanto direttamente collegato al tempo impiegato dalla luce per coprire la distanza sorgente-osservatore: più è maggiore questa distanza e più accentuati potrebbero essere gli spostamenti relativi tra i due), affetta in vario modo tutti i corpi celesti osservabili. Venne scoperto per la prima volta nel diciassettesimo secolo dall'astronomo danese Roemer, mentre confrontava gli istanti apparenti delle mutue eclissi dei satelliti gioviani con le tabelle teoriche previste dal contemporaneo (?) Giandomenico Cassini. Roemer trovò che le previsioni stilate da Cassini risultavano sistematicamente in disaccordo con l'osservazione diretta, arrivando al massimo ad un ritardo di otto minuti, e che questo lasso di tempo era strettamente dipendente dalla distanza reciproca Terra-Giove. Fu lo stesso Roemer a trovare la spiegazione di questo fenomeno: nei periodi di massimo allontanamento l'informazione delle eclissi (cioè la luce) doveva coprire una distanza maggiore, e siccome questo ritardo dipendeva dalla distanza allora la luce doveva avere una velocità di propagazione non infinita (egli trovò in effetti una stima di velocità non troppo lontana dalla realtà).

Un disegno potrebbe essere di aiuto:

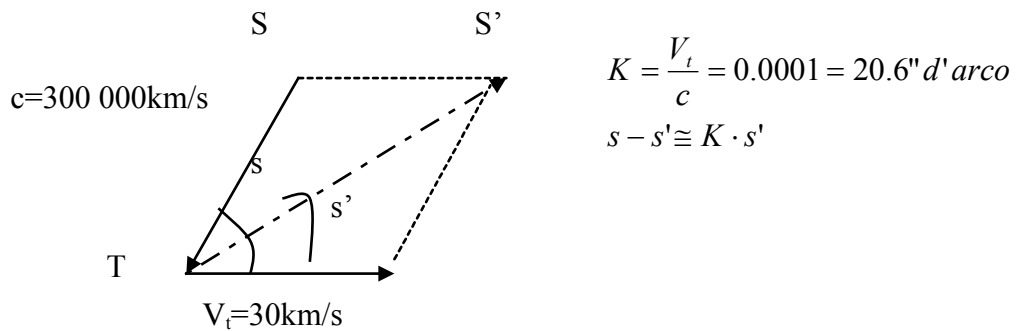


Spero si capisca che l'informazione dell'eclissi dei satelliti arriva all'osservatore terrestre situato in Terra1 con ben 16 minuti di anticipo rispetto all'eventuale osservatore collocato in Terra2; con buona approssimazione queste due posizioni sono possibili a 6 mesi di distanza (cioè mezza rivoluzione terrestre intorno al Sole), anche se ovviamente osservare l'istante delle eclissi gioviane da Terra2, cioè alla congiunzione Giove-Sole, è tecnicamente molto difficile.

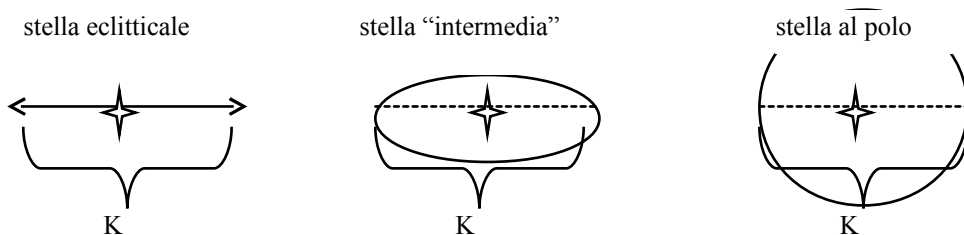
Tuttavia l'effetto di spostamento apparente più importante non è collegato alla distanza tra sorgente ed osservatore, ma piuttosto alla velocità dell'osservatore (cioè nel nostro caso, la velocità del nostro pianeta che è di circa 30km/s).

Questo fenomeno è detto di ***Aberrazione Stellare***, e proprio per il fatto di essere indipendente dalla velocità dell'oggetto osservato (stelle, pianeti, il Sole stesso) affetta in modo analogo ogni astro con la medesima altezza sul piano dell'eclittica, cioè sul piano descritto dall'orbita della Terra.

Il fenomeno è meno immediato da capire, perchè risiede nella rappresentazione vettoriale delle velocità, cioè essenzialmente in una costruzione di tipo geometrico. Costruiamo un modellino:



Se l'osservatore terrestre è in T e l'astro "vero" in S, la direzione apparente verso la quale è necessario puntare lo strumento è in S', dunque per semplici leggi trigonometriche la deviazione approssimativa sulla sfera celeste è quantificabile in  $K \cdot s'$ , dove K è il rapporto tra le velocità dell'osservatore e quella della luce. Nel caso della Terra K è molto piccolo, ed equivale grosso modo a 20.6 secondi d'arco, cioè circa mezzo centesimo di grado. Ogni astro risente di questo spostamento dipendente da K e dalla propria quota sul piano dell'eclittica; per il Sole che è astro eclitticale per definizione l'aberrazione stellare K è costante durante l'anno, e tende a farlo apparire sempre sfasato della stessa quantità rispetto alla sua direzione reale. Per le altre stelle l'effetto varia nel corso dell'anno, col risultato di far descrivere alla stella apparente una ellisse variamente deformata intorno alla posizione reale.

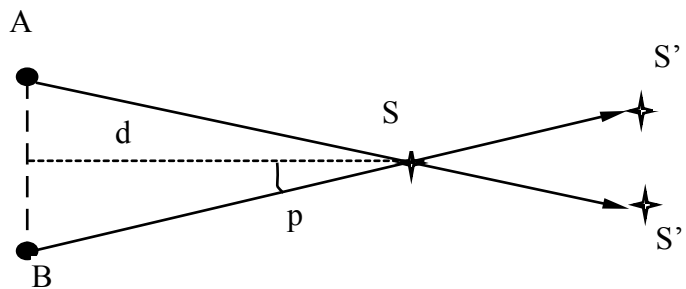


Spesso si spiega questo effetto con un analogia: se si cammina sotto la pioggia, l'ombrello deve rimanere un po' più verticale che se si corre, e un po' meno verticale che se si resta fermi; anche qui velocità della pioggia (cioè nel nostro caso della luce) e velocità del pedone (=osservatore) si compongono e danno una risultante leggermente inclinata se lo scopo è quello di far impattare le gocce di pioggia con l'ombrello (=telescopio). Solitamente lo è.

Dunque l'aberrazione stellare è un fattore del quale bisognerebbe tenere sempre conto se si vuole ottenere un puntamento estremamente preciso (ovviamente nell'ipotesi spesso errata che sia sufficiente impostare le coordinate

allo strumento), in quanto solitamente le effemeridi degli oggetti stellari riportano la posizione “media” cioè “reale”. Resterebbe un'altra piccola correzione legata alla velocità di rotazione terrestre, ma arrivando questa al massimo a 0.5km/s (all'equatore) la correzione è molto piccola.

Invece un effetto di distanza relativa è quello legato alla Parallasse; il fenomeno è facilmente spiegabile con l'ennesimo disegno:



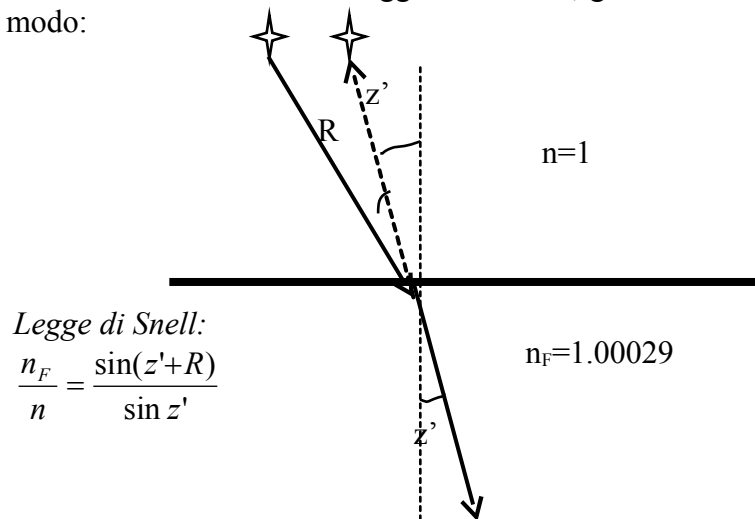
Quando l'osservatore in A guarda la stella S, la sua posizione apparente in cielo sembra S', e viceversa quando l'osservatore è in B la stella sembra in S''; l'angolo p (quello compreso tra ipotenusa e cateto maggiore del triangolo) è detto angolo di parallasse. Ovviamente più è distante l'oggetto S, meno appariscente sarà lo spostamento apparente. Se si utilizza come base AB il diametro della Terra, l'effetto sarà detto *parallasse diurna*, se invece si vuole utilizzare una base più grande basterà effettuare osservazioni da punti diametralmente opposti dell'orbita terrestre attorno al Sole, cioè a distanza di circa 6 mesi; questo spostamento apparente verrà allora definito di *parallasse annua*. Se si conosce la misura precisa della base AB, e si misura con accuratezza lo spostamento apparente p si può dedurre la distanza d; questo è in effetti il metodo di misura delle distanze più affidabile in astronomia (ovviamente prescindendo da osservazioni radar) e fornisce una determinazione di distanza in parsec, cioè in unità di parallasse ovvero di angoli.

La Luna essendo molto vicina risente di un effetto di parallasse diurna di circa 40''d'arco, mentre per quanto riguarda le stelle quella che risente dello spostamento maggiore è Proxima Centauri, che mostrando una parallasse annua di circa 0.76''d'arco risulta distante circa 4.5 anni luce.

Per formarsi un'idea empirica della parallasse è sufficiente rizzare un dito e porlo davanti al naso, e osservarlo alternativamente con un solo occhio: è facile constatare che più il dito è vicino e maggiore sembrerà il suo spostamento apparente sullo sfondo quasi fisso dell'ambiente in cui ci troviamo, e che viceversa più lo si allontana e più stabile sembrerà la sua posizione apparente. In effetti è attraverso questo tipo di meccanismo fisiologico che gli animali bioculari ricavano informazioni di distanza.

E' interessante notare (come ho io stesso appreso a mie spese durante un esame!!) che una distanza astronomica espressa in parsec è assoluta, se determinata con precisione, mentre una distanza espressa in anni-luce o chilometri è approssimativa perchè la conversione parsec→anni luce è subordinata ad una conoscenza precisa dell'Unità Astronomica. Dunque esprimere distanze celesti in parallasse annue è leggermente più scomodo, ma fa incappare in meno imprecisioni.

Anche l'atmosfera del nostro pianeta, in cui abitualmente gli strumenti di osservazione sono immersi, altera le distanze apparenti degli oggetti celesti, anche se in questo caso la variabile in gioco non è la distanza della sorgente di luce ma soltanto la sua "quota" sull'orizzonte del luogo, è *L'Aberrazione Atmosferica*. E' abituale l'osservazione che un corpo immerso in acqua appare leggermente spostato rispetto alla sua posizione reale, e questo perchè ogni qualvolta la luce attraversa la separazione tra due mezzi fisici (in questo caso acqua ed aria) subisce una piccola deviazione rispetto alla verticale tra i due mezzi. Si tratta della vecchissima legge di *Snellius*, graficamente descrivibile in questo modo:



Cioè se il mezzo superiore è il vuoto, e quello inferiore l'atmosfera, l'originario raggio luminoso proveniente dalla stella viene avvicinato alla verticale del luogo, e all'osservatore che lo guarda la stella sembra avere una maggiore altezza sull'orizzonte. In realtà non esiste alcuna netta separazione tra atmosfera e vuoto extraterrestre, ma una successione di piani grosso modo paralleli e di densità crescente verso il suolo. Per tutti gli astri distanti non più di 45° dallo Zenit del luogo è possibile calcolare la deviazione R tra la posizione apparente e quella reale attraverso l'approssimazione:

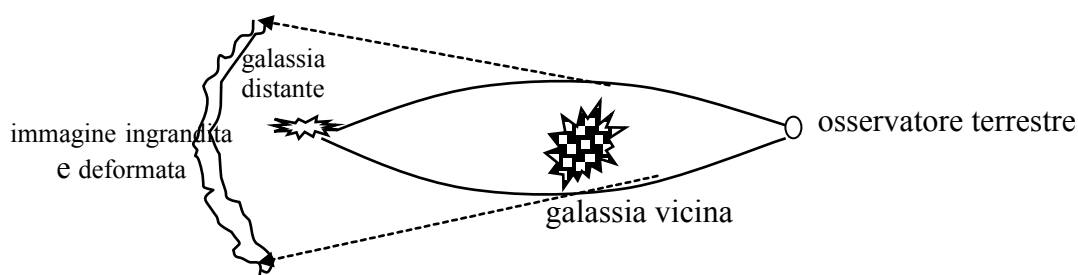
$R = (n_F - 1) \tan z'$ , dove  $n_F$  è l'indice di rifrazione al livello del suolo, e  $z'$  la distanza angolare apparente dell'astro dallo Zenit.

E' piuttosto immediato constatare che, stando così le cose, l'effetto globale della rifrazione atmosferica è quello di aumentare *sempre* l'altezza delle stelle, incidendo in maniera sistematica sugli istanti di levata e tramonto apparenti. Ad esempio il Sole apparente sorge qualche minuto prima e tramonta qualche minuto dopo gli istanti altrimenti determinabili per via puramente geometrica.

Trascuro volontariamente l'effetto più impegnativo da rimuovere per ciascun osservatore, e cioè l'azione di deformazione della turbolenza atmosferica (che tutti conoscono sotto il nome di *seeing*) perchè non esiste alcun metodo sistematico per trattarlo; tuttavia le recentissime e futuristiche innovazioni nel campo dell'ottica adattiva permetteranno di rimuovere questi disturbi in tempo reale, almeno negli osservatori di punta.

Resta infine un'altra causa di deviazione dalle posizioni apparenti degli astri in cielo, la cui causa risiede nell'interazione tra massa gravitazionale e spazio-tempo. Dal momento che, secondo la Teoria della Relatività Generale di Einstein ogni corpo deforma la geometria dello spazio che occupa,

proporzionalmente alla propria massa, è chiaro che in presenza di campi gravitazionali molto intensi le traiettorie dei raggi di luce possono risultare deviate anche di angoli considerevoli. Anche se l'entità di tali deviazioni è sempre molto piccola per gli ordinari fenomeni osservabili dall'astrofilo (si parla di centesimi di secondo d'arco), è stato proprio in seguito alla effettiva scoperta di questo fenomeno che la teoria di Einstein ha ricevuto una delle sue più evidenti conferme sperimentali. E' inoltre sempre grazie all'osservazione della deflessione gravitazionale di oggetti cosmologici, che date le caratteristiche geometriche dei raggi di luce viene detta ***Lente Gravitazionale***, che ci risulta possibile la conoscenza di corpi altrimenti celati da galassie o corpi diffusi prospetticamente sovrapposti.



Il risibile disegnetto mostra come la deflessione combinata di tutti i raggi partiti da una galassia distante, se la galassia vicina è particolarmente compatta ed esattamente in linea con l'osservatore, si avvicini molto al risultato del passaggio della luce stessa attraverso un'ideale (e gigantesca) lente collocata al posto della galassia più vicina; altrimenti la figura osservata risulta particolarmente distorta. E' proprio dall'analisi minuziosa dell'immagine prodotta dalla "lente" che attualmente è possibile risalire alla massa e alla forma del corpo interposto (che potrebbe essere anche un corpo oscuro), e alla morfologia originaria della galassia sorgente.

Franco Vazza

## **PICCOLO APPARATO MATEMATICO (PER CHI NE ABBIA VOGLIA)**

Descrivere esclusivamente a parole tutti i fenomeni di spostamento apparente che ho, bene o male, citato non è possibile e talvolta è addirittura controproducente. Spesso una formuletta trigonometrica, nemmeno tanto

complicata, può evitare di fraintendere ciò che lo scrivente ha (maldestramente) cercato di spiegare.

Ovviamente si può vivere bene anche senza.

Per il **Tempo Luce** legato all'eclisse dei satelliti di Giove la formula è semplice:

$\Delta t = \tau \cos(\lambda_{\Theta} - \lambda_G)$  [ $\tau \approx 8$  minuti, i pedici  $\Theta$  e  $G$  si riferiscono alle longitudini di Sole e Giove.]

Per l'**Aberrazione Solare** possono darsi due espressioni, l'una che consideri perfettamente circolare l'orbita terrestre:

$$K = \frac{2\pi a_{\Theta}}{Pc} \cong 20.6'' \quad [a_{\Theta} = \text{semiasse dell'orbita; } P = \text{periodo di}$$

rivoluzione];

e l'altra che consideri il termine di ellitticità dell'orbita (comunque molto piccolo:  $e=0.167$ ):

$$K = \frac{2\pi a_{\Theta}}{Pc\sqrt{1-e^2}}$$

Per quanto riguarda la posizione apparente del Sole sull'eclittica, si ha che la correzione da apportare in longitudine è:

$\Delta\lambda_{\Theta} = -K[1 - e \cos(\lambda_{\Theta} - \lambda_{\Pi})]$ , dove il pedice  $\Pi$  è riferito alla longitudine del perigeo.

Per l'**Aberrazione Stellare** esistono diverse espressioni, utili a seconda della precisione che si voglia ottenere.

In riferimento alla figura con la composizione vettoriale delle velocità della Terra e della luce, si può ottenere per l'angolo  $s'$  uno sviluppo in serie abbastanza preciso:

$$s' = s - \frac{V}{c} \left( \sin s - \frac{V}{2c} \sin 2s + \dots \right);$$

invece se si vuole tenere conto anche della composizione relativistica delle velocità (infatti se fosse verificata la costruzione geometrica del disegnetto, si avrebbe un vettore in modulo maggiore di  $c$ ), conviene passare all'espressione delle tangenti, ottenendo:

$$s' = \arctan \left( \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}} \cdot \frac{\tan s}{1 + \frac{V \sec s}{c}} \right).$$

Ho anche parlato di un'ellisse di aberrazione; il luogo dei punti descritti durante l'anno è allora (siano  $\beta$  la latitudine eclittica, e  $\lambda$  la longitudine, e le  $\Delta$  le rispettive variazioni):

$$\left( \frac{\Delta\lambda \cos \beta}{K} \right)^2 + \left( \frac{\Delta\beta}{K \sin \beta} \right)^2 = 1.$$

Anche per la **Parallasse Annua o Diurna** possono essere scritte diverse formule, essenzialmente a seconda della mutua distanza dei due corpi.

Se non sono troppo distanti vale la:

$$\pi = \arcsin \left[ \frac{\sin(z'-z)}{\sin z'} \right], \text{ dove } \pi \text{ è l'angolo di parallasse e } z', z \text{ i due}$$

diversi angoli (aventi come lato comune la base delle 2 osservazioni) sotto i quali appare il corpo osservato.

Conoscendo il valore  $l_0$  della lunghezza della base si determina la distanza tra i due corpi:

$$d = \frac{l_0}{\sin \pi}, \text{ che diventa banalmente } d = l_0 / \pi \text{ se gli angoli sono piccoli.}$$

In questo caso l'ellisse ha equazione:

$$\cos^2 \left( \frac{\Delta \lambda}{\pi} \right) + \left( \frac{\Delta \beta}{\pi \sin \beta} \right)^2 = 1.$$

Una differenza interessante da notare, rispetto all'ellisse di aberrazione, è che mentre il termine K della prima è costante per ogni astro, essendo legato solamente alla velocità della Terra attorno al Sole, in questo secondo caso la costante  $\pi$  varia da stella a stella, a seconda della distanza dall'osservatore.

Un'espressione più accurata per l'angolo R di Aberrazione Atmosferica è data dallo sviluppo:

$$R = (n_F - 1) \left( \tan z' - \frac{d}{a_{\oplus}} \tan^3 z' + \dots \right), \text{ dove } d = \text{costante} = 8 \text{ km e}$$

$a_{\oplus} = 6378 \text{ km}$ , raggio terrestre. In realtà l'angolo di deviazione non è costante per tutte le componenti del raggio di luce, ma dipende dalle diverse componenti cromatiche essendo l'indice di rifrazione  $n$  funzione della lunghezza d'onda associata. Tuttavia le correzioni relative sono veramente molto piccole.

Infine una formula per capire qualitativamente l'andamento della deflessione dovuta ad campo gravitazionale per il Sole è:

$$\Delta E = \frac{2\mu}{a} \cdot \frac{1 + \cos E}{\sin E} = \frac{0."00407}{\tan E / 2}, \text{ se } E = \text{distanza angolare dal centro del}$$

Sole rispetto all'astro che si osserva,  $a = 1$  Unità Astronomica,  $\mu = 1.5 \text{ km} = \text{costante}$  dipendente dalla massa del Sole, e corrispondente al diametro relativo ad un buco nero della medesima massa.

Come si può facilmente constatare l'ammontare di questa correzione è piuttosto piccolo, e volendolo considerare si deve tenere conto anche dei termini di variazione dell'obliquità terrestre, che affettano tra gli altri i termini di aberrazione stellare nel corso dei secoli.

Ovviamente ciascuna di queste formule può essere variamente raffinata, poichè sono stati trascurati alcuni fattori di "fluttuazioni" aggiuntivi: tra i principali la già citata variazione dell'obliquità dell'eclittica, la non perfetta sfericità della Terra e la posizione dell'osservatore sulla stessa, il contributo di termini sistematici dovuti al moto del Sole attorno al centro della Galassia.

