



Laurea triennale in Fisica
a.a. 2010 - 2011

CORSO DI ASTRONOMIA

LEZIONE 3 – 22 marzo 2011

Prof. Angelo Angeletti

Perturbazioni delle coordinate celesti

Le osservazioni astronomiche sono fatte prevalentemente dalla superficie della Terra.

Ciò comporta un insieme di effetti dei quali è necessario tener conto per correggere le posizioni osservate degli astri e risalire così alle posizioni reali.

Questi effetti sono essenzialmente di due tipi:

quelli collegati con il fatto che le osservazioni sono alterate dalla presenza dell'atmosfera terrestre

quelli collegati con il moto e le perturbazioni che la Terra subisce in conseguenza della presenza del Sole, della Luna e dei pianeti.

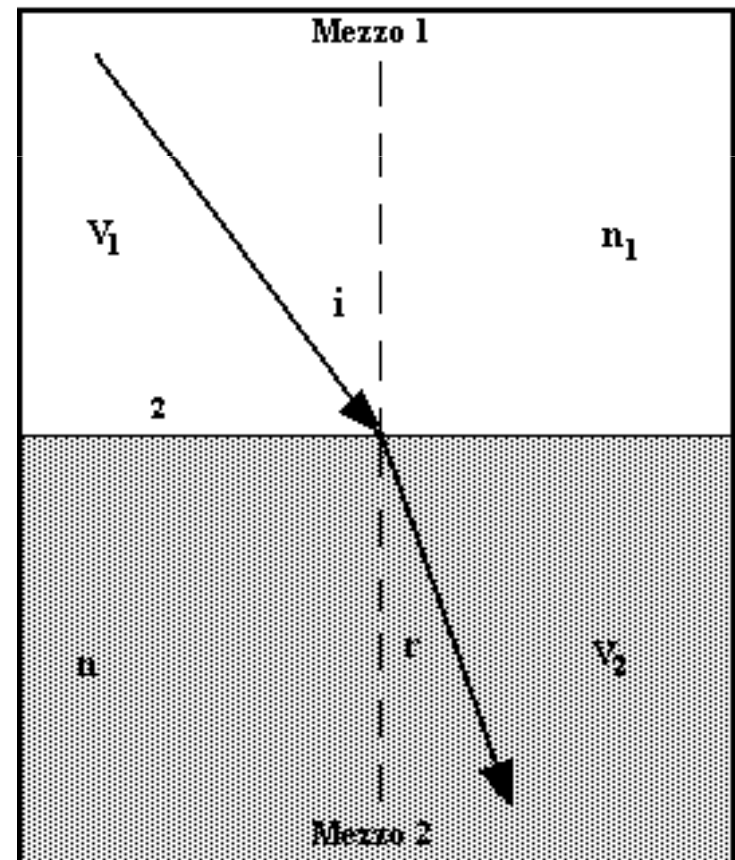
Un ulteriore effetto è connesso con il fatto che la direzione di osservazione, dipende dalla posizione dell'osservatore sulla superficie terrestre e dalla posizione della Terra sulla sua orbita attorno al Sole.

Rifrazione atmosferica

Il fenomeno della rifrazione ha influenza sull'osservazione da terra degli oggetti celesti a causa della presenza dell'atmosfera terrestre che, oltre ad assorbire la radiazione, ne devia la traiettoria.

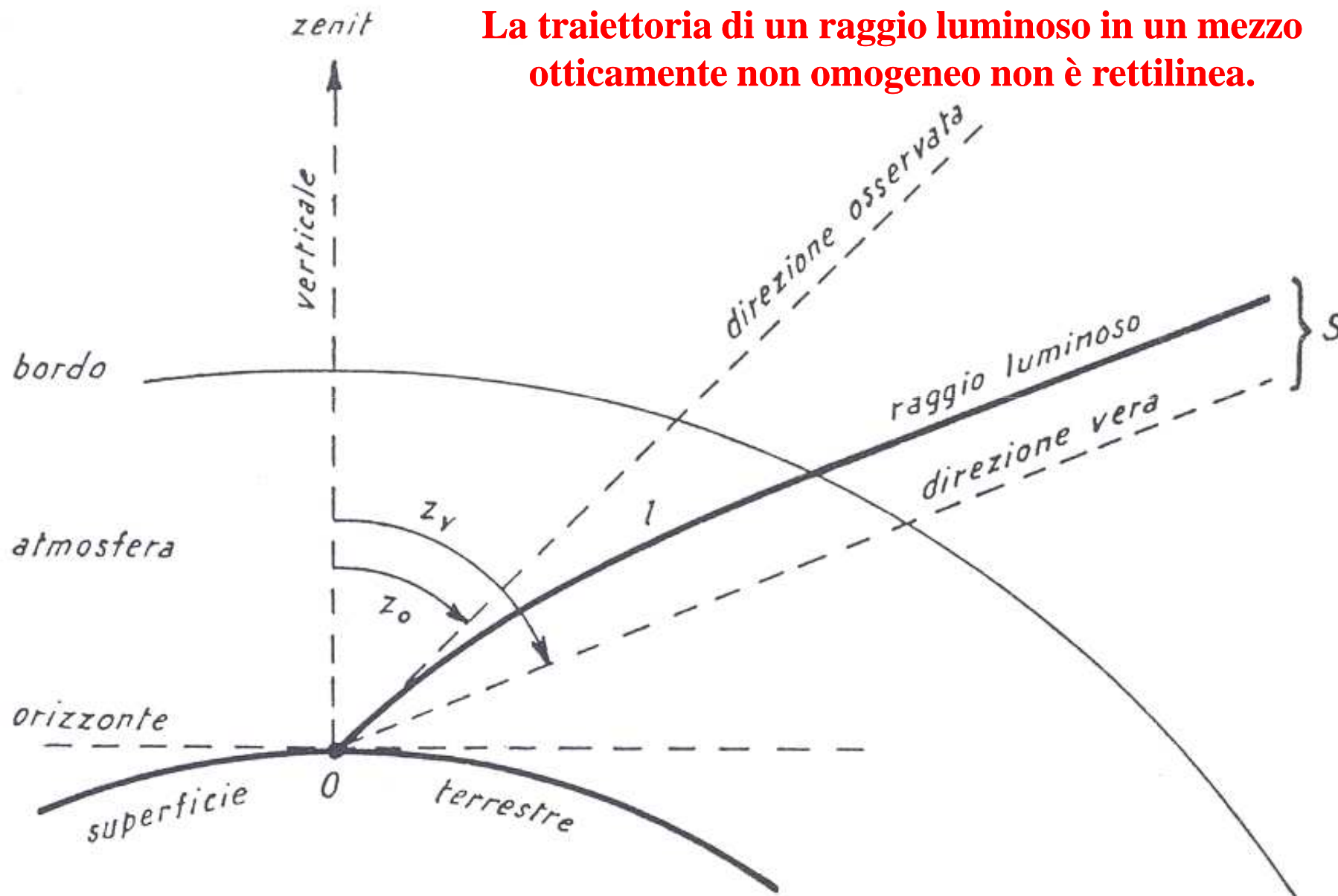
Le leggi della rifrazione impongono che i raggi incidente e rifratto giacciono nello stesso piano e che tra gli angoli di incidenza e di rifrazione sussista la relazione

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \frac{n_2}{n_1} = n_{1,2}$$

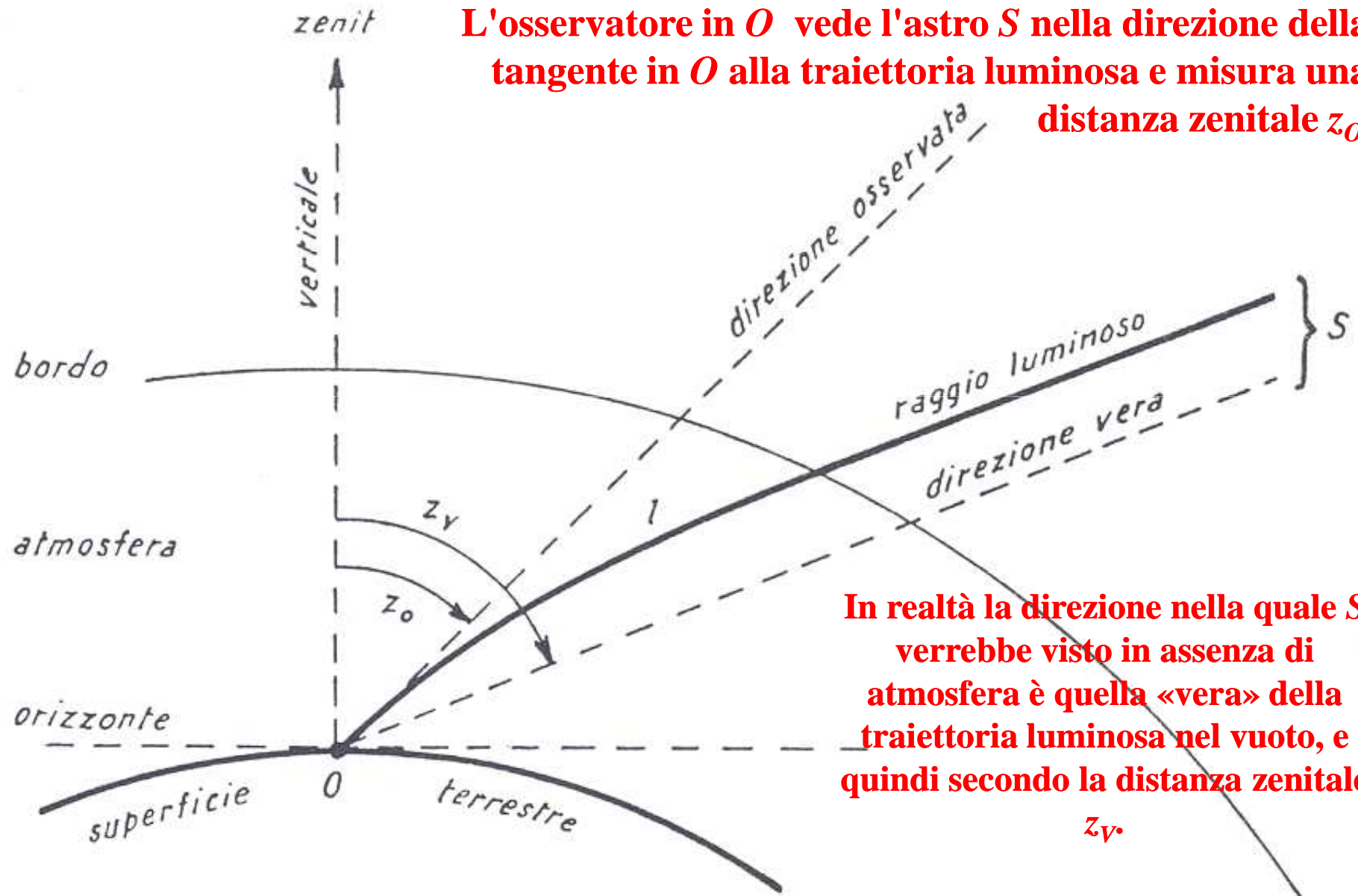


Rifrazione atmosferica

La traiettoria di un raggio luminoso in un mezzo otticamente non omogeneo non è rettilinea.



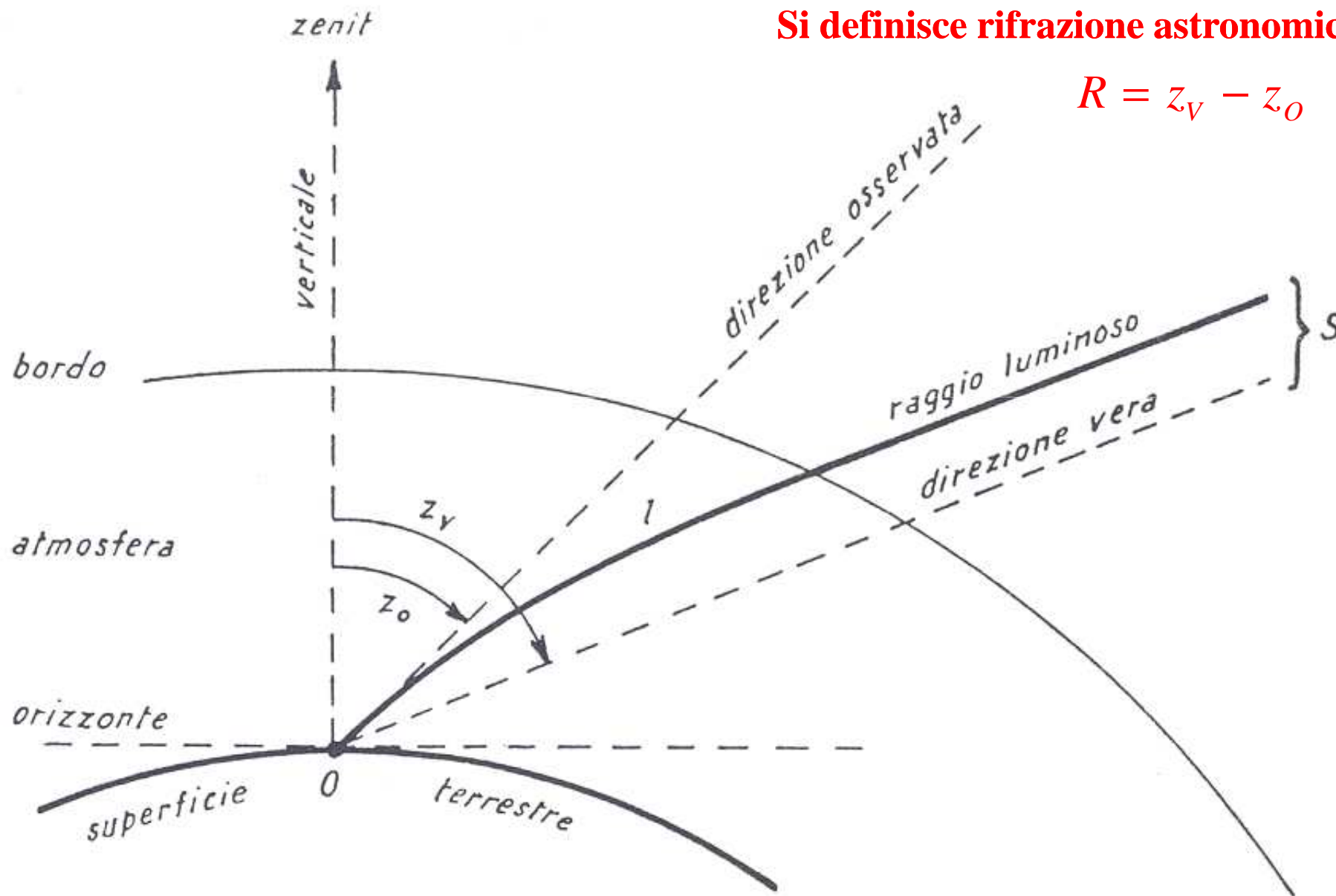
Rifrazione atmosferica



Rifrazione atmosferica

Si definisce rifrazione astronomica

$$R = z_v - z_o$$



Rifrazione atmosferica

R dipende dalle condizioni dell'atmosfera terrestre (estensione, costituzione, ecc.) e dall'inclinazione dei raggi luminosi.

$R = 0$ per gli astri allo zenit, poiché allora i raggi luminosi attraversano perpendicolarmente gli strati atmosferici.

Non tratteremo la teoria generale, valida per qualunque distanza zenitale, perché alquanto complicata e poco utile perché di norma le osservazioni vengono fatte per distanze zenitali piccole.

Ciò permette di ottenere significative semplificazioni.

In generale, dalla definizione di R si ha

$$R = \int_l dz$$

l'integrazione è lungo la traiettoria luminosa l dalla base al bordo superiore dell'atmosfera.

Rifrazione atmosferica

Data la forma quasi sferica della Terra e la limitata estensione dell'atmosfera terrestre possono essere introdotte le seguenti ipotesi semplificatrici:

la costituzione dell'atmosfera ha una simmetria sferica,

la densità è una funzione continua del raggio.

Ciò comporta che per la rifrazione un astro risulta spostato solo in altezza e non in azimuth.

Poiché l'indice di rifrazione è una funzione decrescente della distanza degli strati atmosferici dal suolo, la traiettoria luminosa è una curva con la concavità rivolta verso il basso.

Traiettoria di un raggio di luminoso

La rifrazione:

**alza apparentemente gli astri sull'orizzonte (tanto più quanto maggiore è la loro distanza zenitale)
deforma i dischi apparenti del Sole e della Luna.**

La rifrazione è massima sull'orizzonte e raggiunge 35' circa.

Il Sole e la Luna appaiono sorgere prima e tramontare dopo rispetto al verificarsi degli stessi due eventi in ideali condizioni di assenza di atmosfera.



Rifrazione atmosferica

Alcune ipotesi sullo stato fisico dell'atmosfera terrestre (equilibrio idrostatico, gas perfetto, ecc.) consentono di affrontare il problema della rifrazione per distanze zenitali minori di 75° e di arrivare a formulare per R uno sviluppo in serie dipendente dalla tangente della distanza zenitale osservata al suolo con coefficienti dello sviluppo dipendenti dalle condizioni fisiche (pressione, temperatura, ecc.) nel luogo di osservazione.

Per distanze zenitali superiori a 75° intervengono anche le variazioni di densità e di temperatura nell'atmosfera.

In generale si dispone di tavole di rifrazione calcolate per condizioni ottimali di temperatura e di pressione ($T = 0^\circ\text{C}$, $p = 1013$ millibar) e dalle quali si possono calcolare i valori della rifrazione all'istante e nel luogo di osservazione.

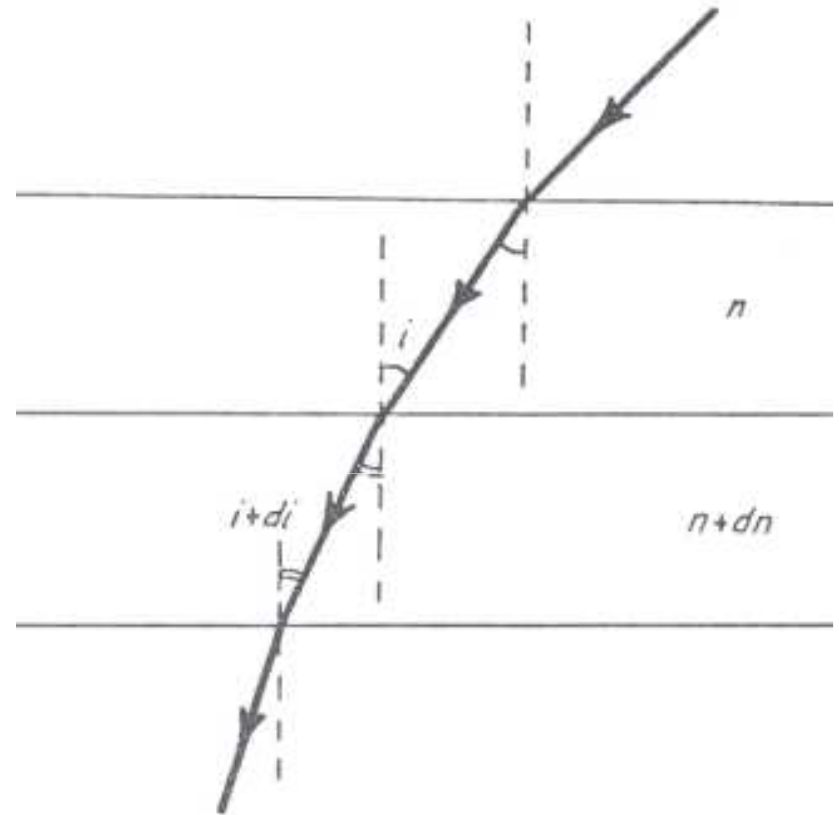
La rifrazione aumenta al diminuire della temperatura e all'aumentare della pressione perché allora la densità aumenta e aumenta l'indice di rifrazione.

Rifrazione per piccole distanze zenitali

Per distanze zenitali minori di 10° si può assumere che gli strati atmosferici siano piani e paralleli.

Tra due strati infinitesimi contigui sussiste allora la relazione di invarianza:

$$(n + dn) \operatorname{sen}(i + di) = n \operatorname{sen} i$$



Se n_0 è l'indice di rifrazione assoluto nel posto di osservazione (ed è uguale ad 1 quello relativo al bordo superiore dell'atmosfera, che confina con il vuoto), posto $i = z_0$ al suolo ed $i = z_v$ al bordo atmosferico si ha

$$n_0 \operatorname{sen} z_0 = \operatorname{sen} z_v = \operatorname{sen}(R - z_0) = \operatorname{sen} R \cos z_0 + \cos R \operatorname{sen} z_0$$

Rifrazione per piccole distanze zenitali

Trascurando i termini del secondo ordine in R negli sviluppi delle funzioni trigonometriche di R si arriva all'espressione finale

$$R = (n_0 - 1) \tan z_0$$

La rifrazione si può quindi calcolare utilizzando solo i valori al suolo dell'indice di rifrazione e della distanza zenitale.

Indicativamente per $\lambda = 550$ nm ed in condizioni normali si può prendere $n_0 = 1,003$, si ottiene:

$$R'' = 60'' \tan z_0$$

Rifrazione atmosferica

Poiché la rifrazione altera l'altezza degli oggetti celesti sull'orizzonte, le coordinate celesti dedotte dalle osservazioni devono essere corrette e, viceversa, la posizione osservata di un astro sulla sfera celeste non può coincidere con quella corrispondente alle coordinate celesti «vere» dell'astro.

Nelle eclissi totali di Luna la luce solare radente la superficie terrestre viene deviata per effetto della rifrazione atmosferica cosicché il cono di oscuramento completo prodotto dalla presenza della Terra viene accorciato e si estende fino a circa $40 R_T$ ($R_T = 6371$ km) soltanto.

La Luna, che dista dalla Terra in media circa $60 R_T$ risulta quindi debolmente illuminata dalla luce solare di maggiori lunghezze d'onda, che è quella meno deviata e meno assorbita dall'atmosfera terrestre.



Rifrazione atmosferica

Legge di Gladstone-Dale:

$$n - 1 = k\rho$$

Se l'atmosfera è un gas perfetto di pressione P , temperatura T e peso molecolare μ per cui valga l'equazione di stato:

$$\rho = \frac{\mu P}{RT}$$

Si ha
$$n - 1 = k' \frac{P}{T}$$

In condizioni standard ($P_0 = 760$ mmHg, $T_0 = 0^\circ\text{C} = 273$ k), nel visibile

$$n - 1 \simeq 78,7 \cdot 10^{-6} \frac{P}{T}$$

$$R'' \simeq 60'' 4 \frac{(P / 760)}{(T / 273)} \tan z_o \quad (P \text{ in mmHg, } T \text{ in kelvin})$$

Rifrazione atmosferica

Una formula più completa: Owens (1967)

$$n(t, P) - 1 = \left[n(15,760) - 1 \right] \frac{P(1,049 - 0,0157t) \cdot 10^{-6}}{720,883(1 + 0,03661t)}$$

Rifrazione atmosferica

La variazione della rifrazione atmosferica con la quota dipende essenzialmente dai gradienti verticali di temperatura, mentre sono meno importanti quelli di pressione.

Il vento porta continuamente attraverso il cammino ottico, bolle d'aria in cui sono presenti variazioni di temperatura di pochi centesimi di grado, che sono sufficienti a causare piccole rifrazioni accidentali al raggio luminoso.

Sono anche nocive le differenze di temperatura sulle varie strutture che circondano il telescopio; è molto importante tenere tali strutture il più possibile isoterme, e alla stessa temperatura dell'aria esterna.

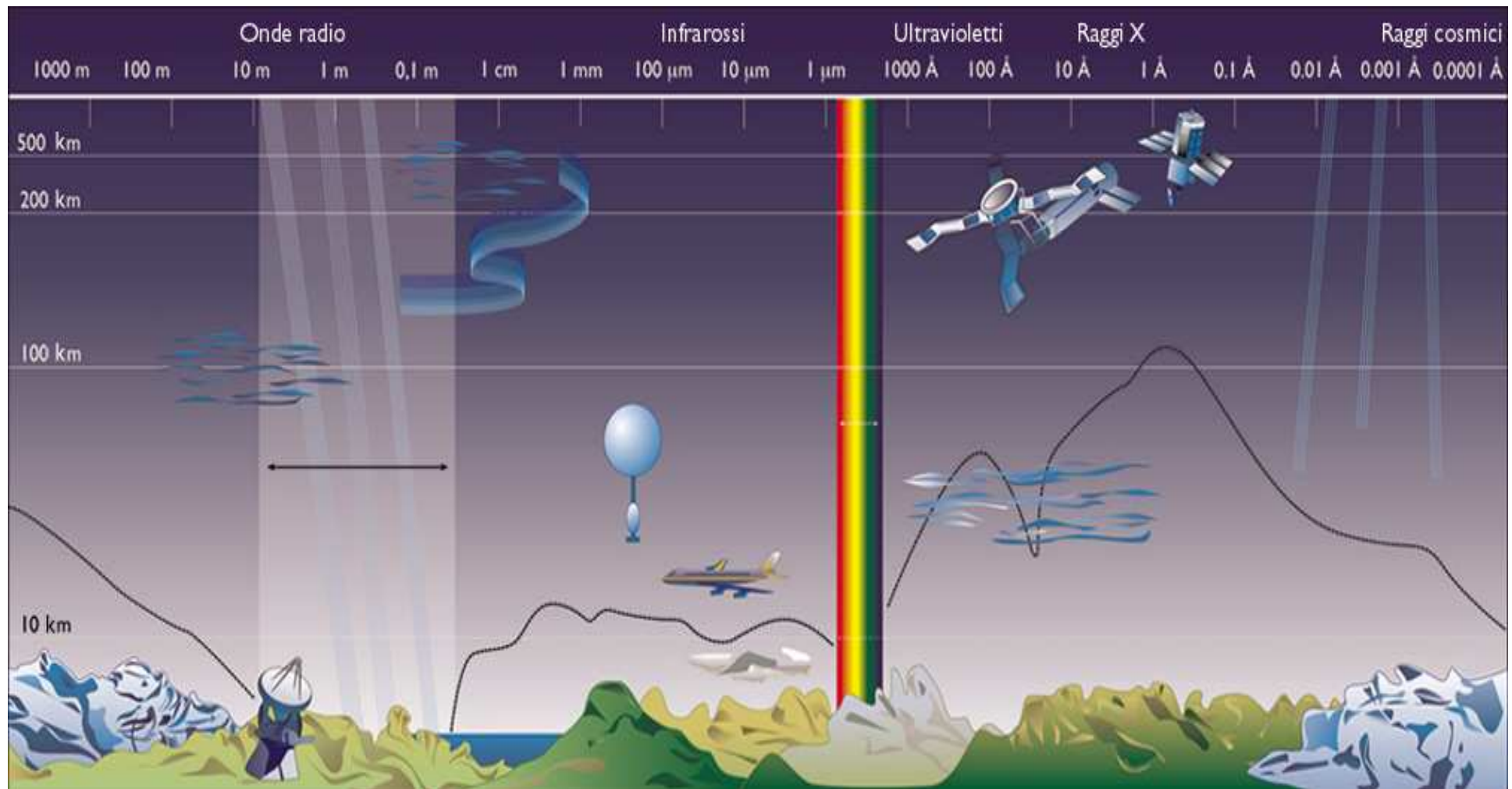
$$\frac{dn}{dq} = k' \frac{P}{T^2} \left(-\mu \frac{g}{R} - \frac{dT}{dq} \right)$$

La costante g/R vale circa 3,4 k/1000 m.

Estinzione, scintillazione, seeing

L'atmosfera terrestre diffonde e assorbe le radiazioni elettromagnetiche in modo più o meno completo a seconda della lunghezza d'onda della radiazione incidente.

L'atmosfera è trasparente tra 300 nm e 1000 nm circa e nelle onde radio da 5 mm a 50 m circa.



Estinzione, scintillazione, seeing

Per correggere le osservazioni si deve tener conto della diffusione e dell'assorbimento atmosferico .

Ciò viene conseguito valutando, alle varie distanze zenitali osservate, l'estinzione media in funzione della corrispondente massa di aria attraversata dalla luce ed espressa in unità della massa di aria attraversata allo zenit (**riduzione allo zenit**).

Per effetto di fluttuazioni spaziali e temporali nelle proprietà strutturali dell'atmosfera terrestre, in genere causate da moti turbolenti e di insieme dell'aria, l'indice di rifrazione risulta variabile ed i raggi luminosi provenienti da una stella vengono assorbiti e deviati in diversa misura in istanti diversi.

Ciò determina il fenomeno della **scintillazione** nel quale possono distinguersi tre aspetti:

scintillazione dinamica;
scintillazione cromatica;
scintillazione parallattica.

Estinzione, scintillazione, seeing

La **scintillazione dinamica** provoca variazioni dell'intensità luminosa; la **scintillazione cromatica** dà luogo ad un cambiamento di colore della sorgente luminosa; la **scintillazione parallattica** causa una variazione (dell'ordine di 1") della posizione apparente dell'oggetto osservato.

In conseguenza dei tre effetti l'oggetto osservato appare tremolare e mutare di splendore e di colore.

Oggi la qualità delle immagini viene indicata con il nome di **seeing** (dall'inglese «vedere») convenendo di designare così tutto quell'insieme di fenomeni che hanno rilevanza nell'osservazione degli oggetti celesti.

Il seeing è determinato dagli strati più bassi (e più densi) dell'atmosfera.

Estinzione, scintillazione, seeing

Per comprendere l'effetto del seeing è utile prendere in considerazione, come esempio, un caso ideale.

Assumiamo che la sorgente osservata sia puntiforme e che le ottiche del rivelatore non incidano sulla qualità dell'immagine.

In assenza di atmosfera il rivelatore osserverebbe la sorgente puntiforme; mentre in presenza di una massa d'aria, l'immagine della sorgente risulterebbe avere un'estensione superficiale con una densità di fotoni che decrescerebbe dal centro dell'immagine della sorgente verso l'esterno.

Estinzione, scintillazione, seeing

Per comprendere questo effetto di sparpagliamento dei fotoni dobbiamo pensare che un rivelatore, come un telescopio, ottiene l'immagine di un oggetto attraverso esposizioni più o meno lunghe, che gli permettono di accumulare la luce proveniente dalla sorgente.

Durante la posa le condizioni degli strati del cono di atmosfera che si trova tra la sorgente puntiforme e la superficie del rivelatore cambiano di frequente. Tali variazioni corrispondono ad un cambiamento dell'indice di rifrazione, che influisce sulla traiettoria dei raggi di luce e quindi sui punti della superficie del rivelatore dove i raggi incideranno.

Ai fini pratici, la turbolenza atmosferica ha l'effetto di spostare rapidamente (dell'ordine dei millisecondi) l'immagine della sorgente sul rivelatore. Quanto l'immagine venga spostata dipende dalla turbolenza: più gli strati di atmosfera saranno turbolenti maggiore sarà lo spostamento.

Estinzione, scintillazione, seeing

Immagine animata che mostra cosa si vede con un telescopio quando si osserva una stella a grandi ingrandimenti (immagine in negativo).

Il telescopio impiegato ha un diametro di $7r_0$.

Da notare come la stella paia frantumarsi in molti punti (noti come speckle [cioè macchioline]), ma si tratta di un effetto della nostra atmosfera.

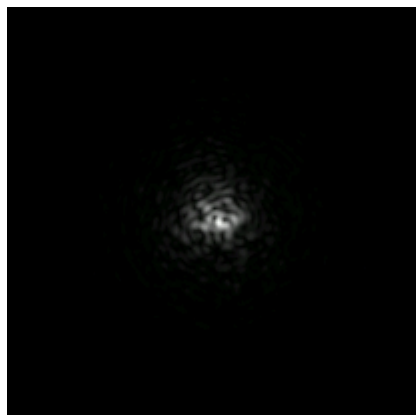
Le varie tecniche appartenenti allo speckle imaging cercano di ricreare l'immagine dell'oggetto così come era prima di essere disturbata dall'atmosfera.

Estinzione, scintillazione, seeing

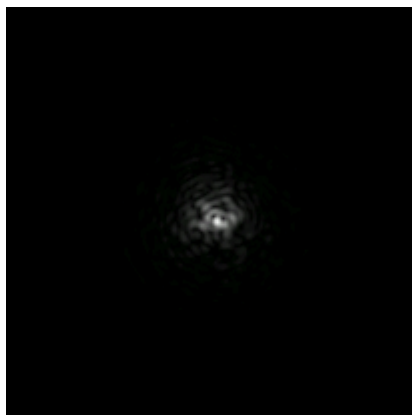
Scala di Antoniadi:

SEEING I	La visibilità è perfetta, l'immagine è stabile e non trema.
SEEING II	Buona visibilità, i tremolii si alternano con momenti di calma.
SEEING III	Visione mediocre, si percepiscono lunghi tremolii dell'immagine.
SEEING IV	Visibilità scarsa, l'immagine trema a lungo.
SEEING V	Visibilità pessima, le vibrazioni sono continue e non cessano.

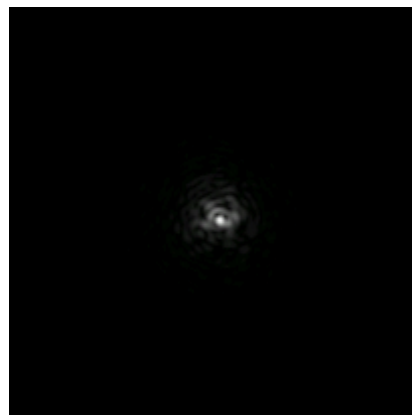
Scala Pickering



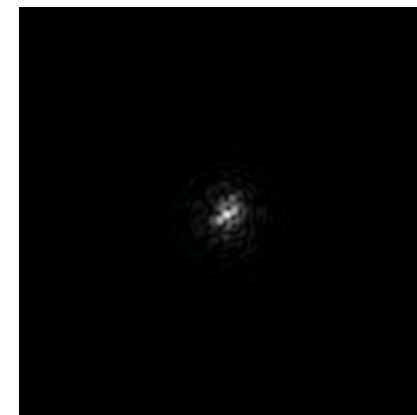
1



2

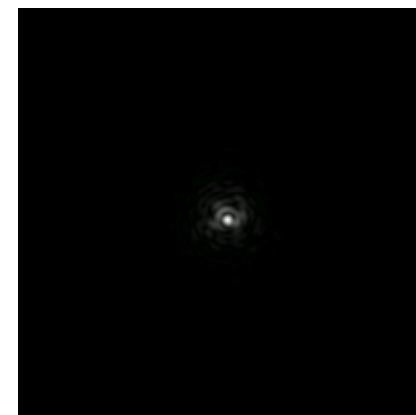


3



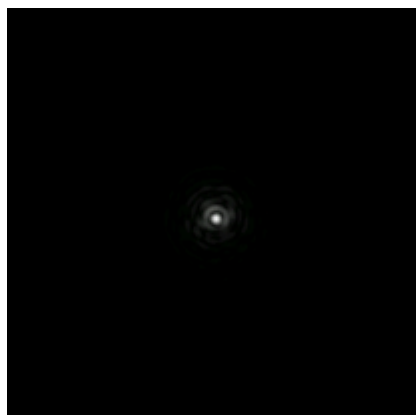
4

1	Immagine pessima: l'immagine della stella è 2 volte il diametro del 3° anello di diffrazione.
2	Immagine molto cattiva: L'immagine della stella occasionalmente è 2 volte il diametro del terzo anello.
3	Immagine cattiva: l'immagine della stella ha circa lo stesso diametro del terzo anello di diffrazione; è più luminosa al centro
4	Immagine appena sufficiente: disco di Airy spesso visibile archi degli anelli di diffrazione qualche volta visibili
5	Immagine discreta: visibile il disco di Airy e gli archi degli anelli con una certa continuità.

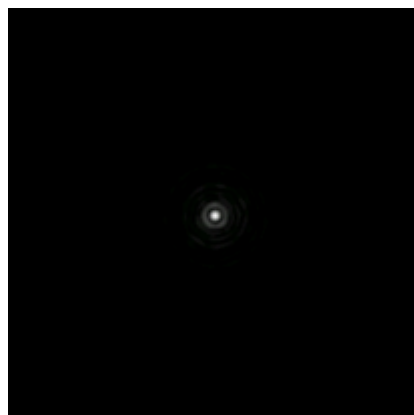


5

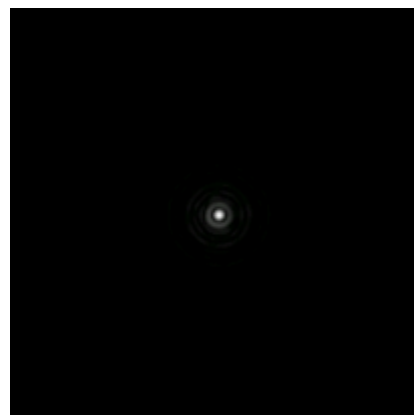
ScalaPickering



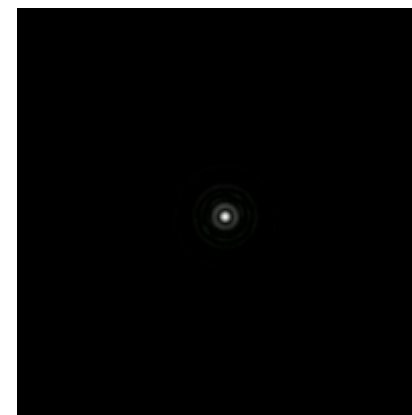
6



7

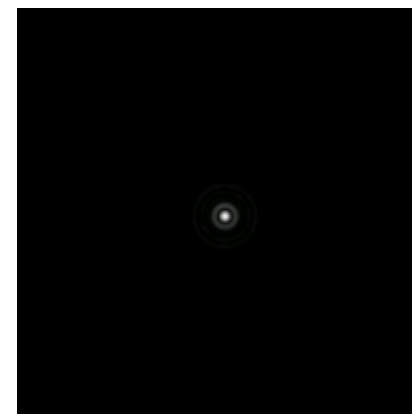


8



9

6	Immagine buona: il disco di Airy è sempre visibile e sono visibili costantemente piccoli archi
7	Immagine molto buona: disco qualche volta nettamente definito, si vedono gli anelli come lunghi archi o cerchi completi
8	Immagine ottima: disco sempre nettamente definito, anelli visibili come lunghi archi o cerchi completi, sempre in moto
9	Immagine quasi perfetta: la parte interna della figura di diffrazione è stazionaria, la parte esterna occasionalmente
10	Immagine perfetta: tutta la figura di diffrazione è ferma



10

Estinzione, scintillazione, seeing

Il *seeing* è definito come la larghezza a metà altezza (FWHM *Full Width at Half Maximum*) dell'immagine prodotta sul piano focale da una sorgente puntiforme.

La funzione che descrive come i vari raggi di luce si sono distribuiti sulla superficie del rivelatore è detta funzione di sparpagliamento dei punti o PSF (dall'inglese Point Spread Function).

Tale distribuzione viene spesso rappresentata, per semplicità, con una funzione gaussiana. Esistono altre funzioni analitiche che possono riprodurre meglio la PSF reale delle sorgenti, un esempio è dato dalla funzione di Moffat :

$$PSF(r) = \frac{\beta - 1}{\pi \cdot \alpha^2} \left[1 + \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right]^{-\beta} \quad FWHM = 2\alpha \sqrt{2^{1/\beta} - 1}$$

con α e β da determinare.

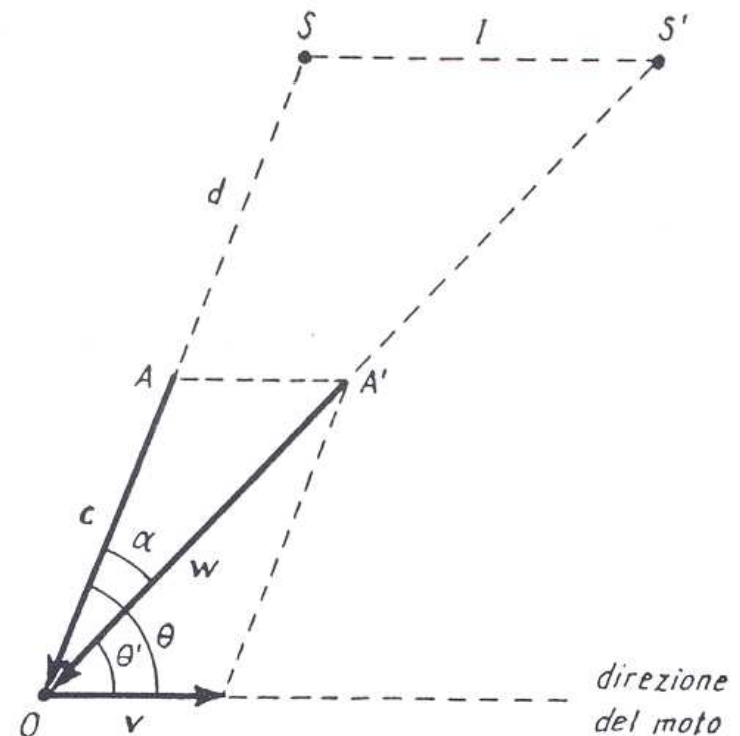
Se $\beta \rightarrow \infty$ la funzione di Moffat tende ad una gaussiana.

Aberrazione

Il fenomeno dell'aberrazione è interpretabile con il fatto che la luce si propaga con una velocità finita.

In una interpretazione classica la velocità (relativa) della luce di una stella osservata dalla Terra può essere calcolata mediante la composizione della velocità (assoluta) della luce e della velocità di trascinamento della Terra.
moderna.

Un approccio rigoroso implicherebbe l'utilizzo di concetti relativistici e porterebbe ad una correzione dei risultati classici al massimo di 0,0005" quantità molto piccola, ma non trascurabile nelle misurazioni di alta precisione dell'astronomia moderna.



Aberrazione

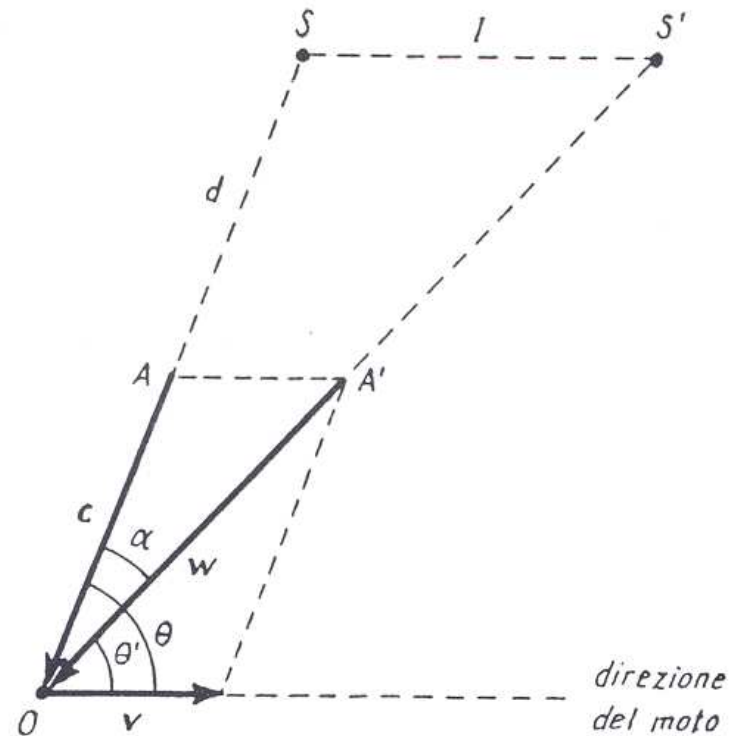
$$l = \frac{vd}{c}$$

$$\theta - \theta' = \alpha \quad \text{angolo di aberrazione}$$

$$\alpha = \frac{l}{d} \operatorname{sen} \theta' = \frac{v}{c} \operatorname{sen} \theta'$$

$$\operatorname{sen} \alpha = \alpha, \quad v \ll c$$

$$\alpha'' = k \operatorname{sen} \theta$$



Aberrazione

Il moto di rotazione della Terra attorno al suo asse, quello di rivoluzione della Terra attorno al Sole e il moto del Sole nello spazio concorrono al fenomeno globale fornendo ciascuno una componente specifica; si hanno così nell'ordine le **aberrazioni diurna**, **annua** e **secolare**.

Nel caso dell'aberrazione diurna \mathbf{v} descrive in un giorno il piano equatoriale celeste. Il valore minimo di θ è quindi uguale alla declinazione dell'astro osservato; inoltre, indicando con R_0 il raggio equatoriale terrestre e con v_0 la velocità all'equatore, si ha per la costante di aberrazione diurna

$$k = 0,32'' \cos \varphi$$

Aberrazione

Nel caso dell'aberrazione annua \mathbf{v} descrive in un anno il piano dell'eclittica e il valore minimo di θ rappresenta allora la latitudine eclittica β dell'astro osservato.

Se si assume che l'orbita terrestre sia circolare, la velocità orbitale è costante (circa 30 km/s) per cui $k = 20,63''$;
se invece consideriamo dell'esatta forma dell'orbita della Terra attorno al Sole per la costante di aberrazione si avrebbe $k = 20,50''$.

Nel corso di un anno, al moto orbitale della Terra attorno al Sole corrisponde una rotazione di \mathbf{v} e quindi di S' attorno ad S (OS è infatti la direzione nella quale l'astro sarebbe visto dal Sole).

La circonferenza descritta da S' ha raggio uguale ad l , a cui corrisponde una dimensione angolare uguale a k .

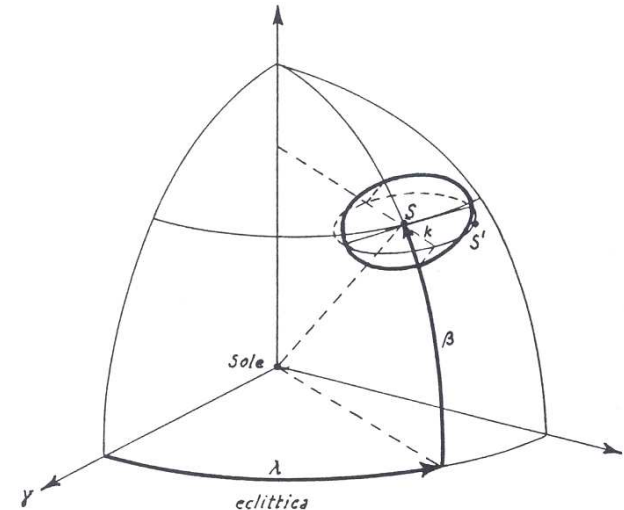
Aberrazione

In realtà, però, l'osservatore vede la circonferenza (che è in un piano parallelo all'eclittica) proiettata sul piano tangente in S alla sfera celeste e quindi vede un'ellisse di semiasse maggiore uguale a k e di semiasse minore uguale a $k \sin \beta$;

il semiasse maggiore è parallelo al piano dell'eclittica, il centro dell'ellisse rappresenta la posizione effettiva della stella.

Mentre quindi il semiasse maggiore è uguale per tutte le stelle, quello minore dipende dal parallelo eclittica dell'astro rimanendo però sempre indipendente dalla distanza della stella. L'ellisse tende ad una circonferenza per le stelle prossime al polo dell'eclittica e degenera in un segmento per le stelle sul piano eclittica.

L'aberrazione annua costituisce un' altra prova del moto orbitale della Terra attorno al Sole.



Aberrazione

L'aberrazione secolare è collegata con il moto del Sole nello spazio; poiché questo moto è praticamente rettilineo e uniforme per intervalli di tempo anche molto estesi, la composizione delle velocità della luce e dell'osservatore dà luogo a spostamenti uguali e paralleli per tutte le stelle senza introdurre alcuna variazione temporale nelle direzioni di osservazione e quindi nelle posizioni vere delle stelle.

L'aberrazione secolare non ha rilevanza pratica.

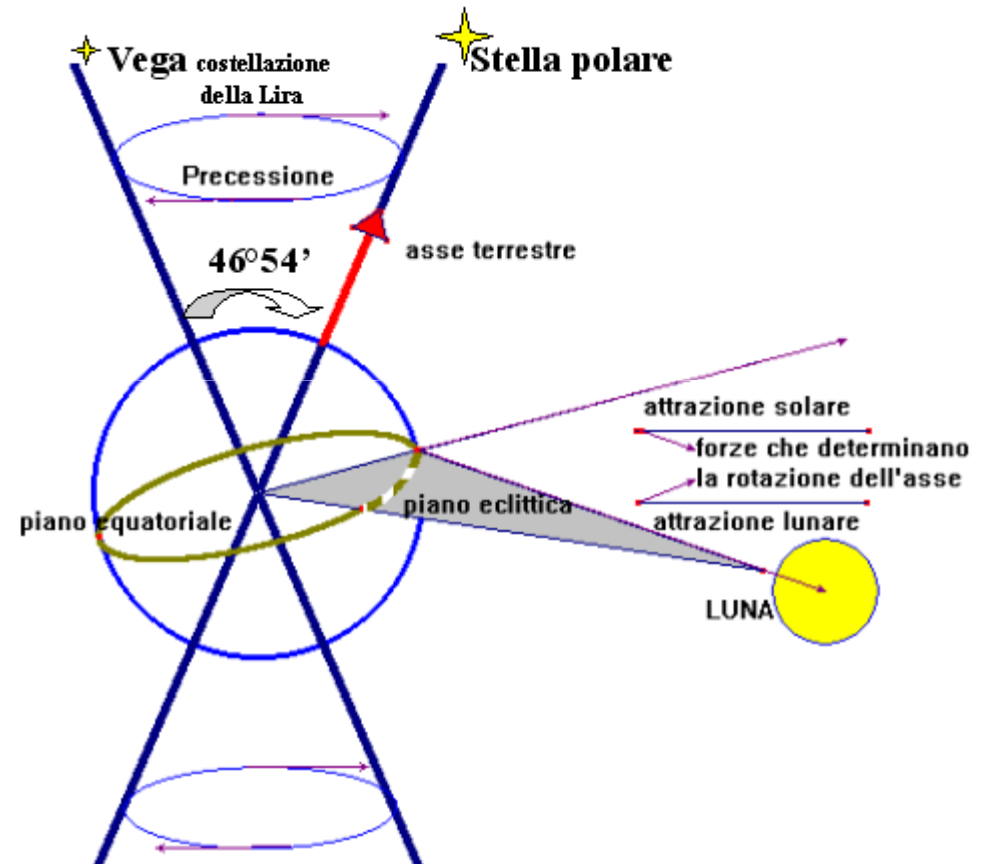
Nella determinazione delle posizioni planetarie infine si deve considerare anche l'**aberrazione planetaria** che è collegata con il fatto che se Δt (*tempo-luce*) è l'intervallo di tempo impiegato dalla luce a percorrere la distanza tra la posizione effettiva del pianeta e la Terra, la posizione osservata al tempo t corrisponde in realtà alla posizione effettivamente occupata dal pianeta al tempo $t - \Delta t$.

Il tempo-luce per il Sole è di circa 8 minuti, per Plutone (alle quadrature) va da un minimo di circa 4 ore ad un massimo di circa 7 ore; per le stelle il tempo-luce è molto maggiore ma questo tipo di aberrazione non può essere determinato perché i moti assoluti delle stelle non sono in genere noti, contrariamente a quanto avviene per i pianeti ai quali possono applicarsi gli sviluppi della meccanica celeste.

Precessione e nutazione

I sistemi di coordinate e alcune nozioni fin qui fornite presuppongono che i piani fondamentali di riferimento corrispondenti all'equatore e all'eclittica (ed i corrispondenti assi) siano fissi nello spazio.

In realtà ciò non avviene a causa delle perturbazioni indotte dalle attrazioni gravitazionali del Sole e della Luna sul rigonfiamento equatoriale terrestre e di quelle dovute alla presenza dei pianeti, i moti di rotazione e di rivoluzione della Terra presentano complicazioni che determinano una variazione temporale di alcuni elementi di riferimento, in particolare sia la giacitura dell'equatore che la giacitura dell'eclittica variano nel tempo rispetto ad una giacitura fissa.



Precessione e nutazione

In generale l'effetto combinato della rotazione di un corpo attorno a se stesso e della presenza di una perturbazione agente sul medesimo corpo dà luogo alla comparsa di un moto rotatorio dell'asse di rotazione del corpo. È questo ad esempio il caso del moto di una trottola in rotazione: non appena l'asse di rotazione della trottola si discosta dalla verticale, mentre la trottola continua a ruotare attorno a se stessa, l'asse di rotazione inizia a sua volta a ruotare attorno alla verticale per effetto dell'azione della gravità terrestre.

Il fenomeno prende il nome di precessione e nel caso della Terra comprende i due aspetti di precessione **luni-solare** e di precessione **planetaria**.

Il primo effetto fu scoperto nel II secolo a.C. da Ipparco.

Lo stesso Ipparco dedusse, correttamente, che ciò doveva addebitarsi ad uno spostamento del punto γ in verso retrogrado in conseguenza di una rotazione del piano equatoriale rispetto al piano eclittica.

Questo a sua volta non rimane fisso nello spazio a causa dell'effetto delle perturbazioni planetarie sul moto orbitale della Terra attorno al Sole.

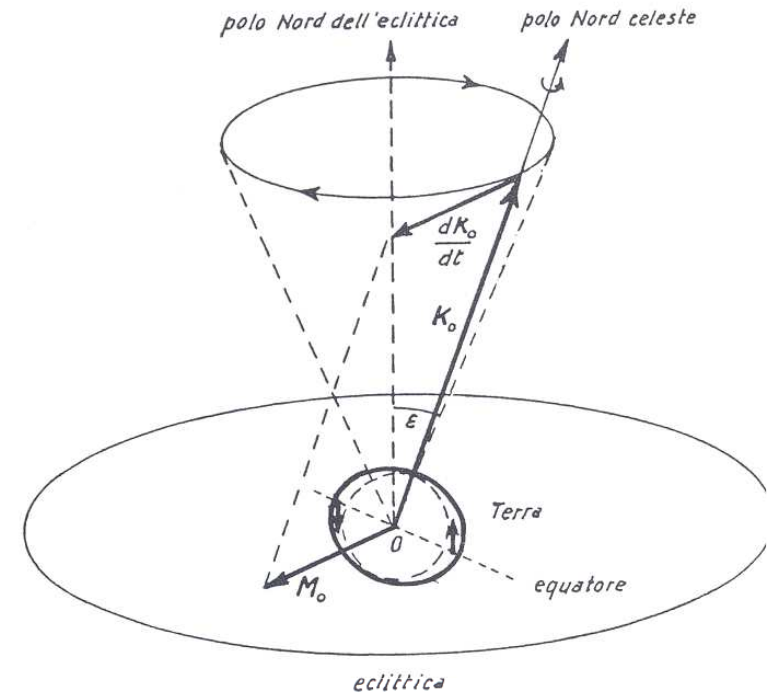
Precessione

La precessione luni-solare dipende dall'attrazione gravitazionale della Luna e del Sole sul rigonfiamento equatoriale terrestre; la Terra può infatti essere schematizzata come un ellissoide rotondo schiacciato ai poli con semiasse equatoriale maggiore di circa 21 km del semiasse polare.

A causa dell'obliquità dell'eclittica rispetto al piano dell'equatore celeste, Sole e Luna muovendosi rispettivamente sulla e in prossimità dell'eclittica agiscono sul rigonfiamento equatoriale terrestre con un'attrazione gravitazionale risultante, tenuto conto delle forze centrifughe, in una coppia di forze dirette perpendicolarmente al piano eclittica .

La parte secolare (a lungo periodo) può essere ottenuta considerando il valore annuo medio del momento delle forze di attrazione del Sole e della Luna.

È possibile dimostrare che questo momento ha un'intensità costante ed è diretto verso il punto γ ; il momento angolare di rotazione della Terra (e l'asse di rotazione terrestre) è quindi sollecitato a muoversi in verso retrogrado perpendicolarmente al piano individuato dall'asse dell'eclittica e dall'asse stesso di rotazione.



Precessione

Lo spostamento del punto γ per effetto della precessione luni-solare avviene con una velocità angolare di 50,39" all'anno e un periodo di rivoluzione che risulta quindi uguale a 25.800 anni circa (**anno platonico**).

Il punto γ , che ai tempi di Ipparco si trovava nella costellazione dell'Ariete (da cui il simbolo γ dato al punto vernale) si trova ora nella costellazione dei Pesci; il polo Nord, che attualmente cade in prossimità della stella Polare, tra 14.000 anni circa si troverà in vicinanza della stella Vega che sarà la stella polare dell'epoca.

La precessione luni-solare è dovuta per i $2/3$ circa della sua entità alla Luna e per il restante $1/3$ al Sole.

Precessione

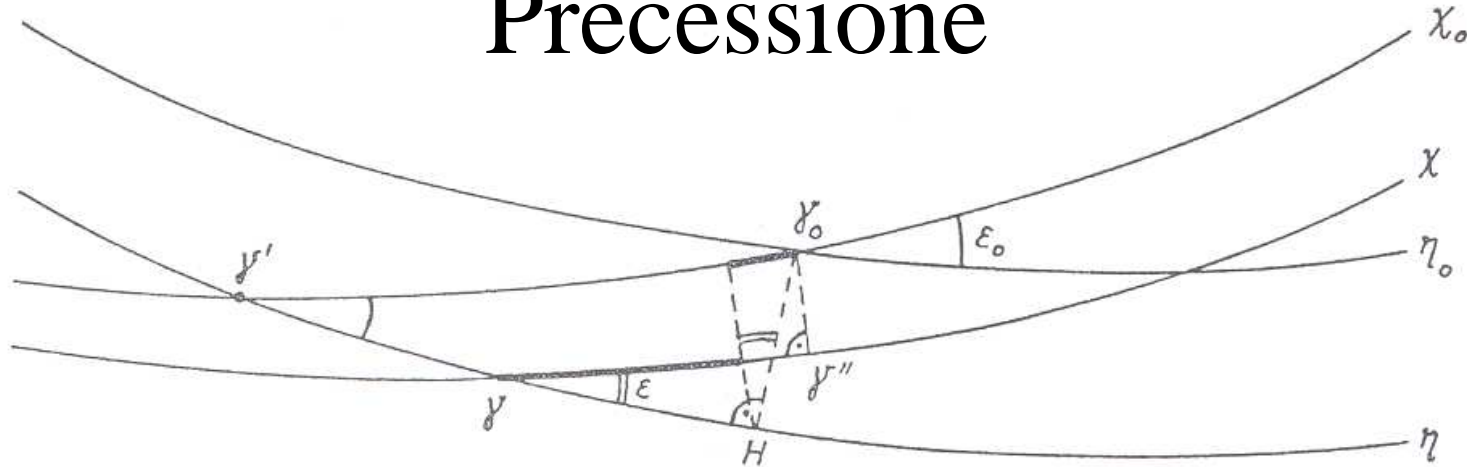
D'altra parte la presenza dei pianeti, che si muovono su orbite inclinate, anche se di poco, rispetto all'eclittica, produce delle perturbazioni gravitazionali sul moto orbitale della Terra provocando uno spostamento della giacitura dell'orbita terrestre (e quindi dell'eclittica e dei relativi poli) rispetto ad una prefissata giacitura.

Il fenomeno prende il nome di **precessione planetaria** e si manifesta con una lenta variazione periodica, con periodo uguale a 40.000 anni circa, dell'obliquità dell'eclittica (riferita ad una fissata posizione dell'equatore celeste) e con un conseguente spostamento del punto γ .

L'obliquità dell'eclittica varia tra circa 22° e $24,3^\circ$; all'inizio del 2000 valeva $23^\circ 26' 21,45''$ e attualmente sta decrescendo di circa $0,47''$ all'anno, di conseguenza il punto γ si sposta sull'equatore celeste in verso diretto di circa $0,11''$ all'anno.

La variazione di giacitura del piano orbitale della Luna nel suo moto attorno alla Terra e la corrispondente retrogradazione dei nodi dell'orbita lunare hanno un'origine simile a quella della precessione pur essendone il Sole la causa principale.

Precessione



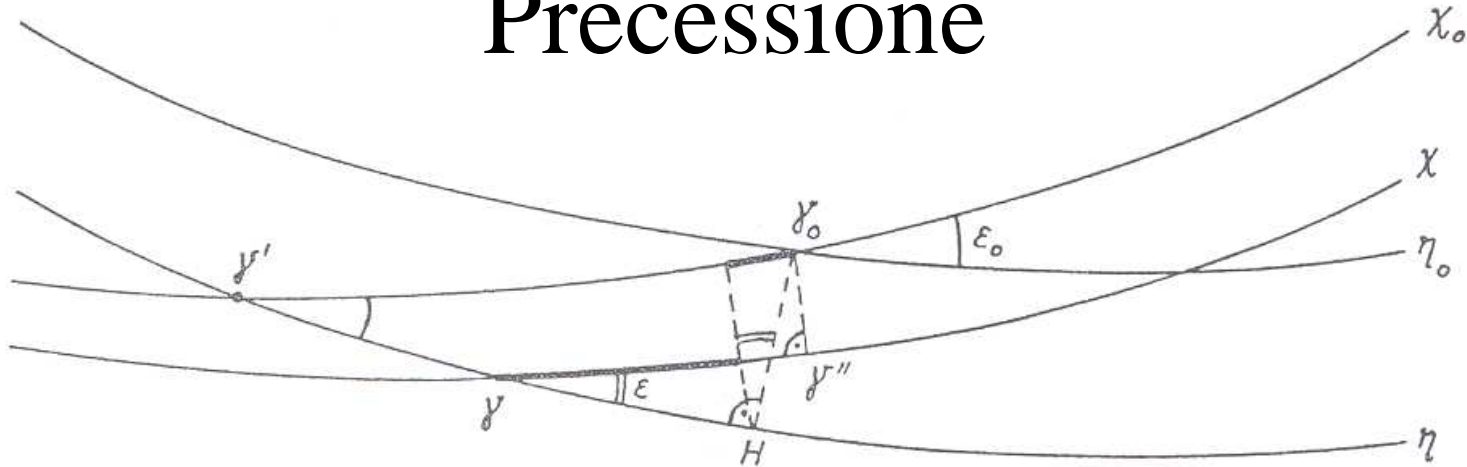
Gli effetti della precessione luni-solare e di quella planetaria sono di diversa entità, e di segno opposto; la loro composizione dà luogo ad una precessione generale nella quale sia l'equatore celeste che l'eclittica si spostano nel tempo rispetto ad una data configurazione iniziale.

Siano η_0 e χ_0 le posizioni iniziali dell'equatore e dell'eclittica e γ_0 la posizione iniziale del punto vernale e η , χ e γ le posizioni dopo un anno.

Sia H il piede della perpendicolare abbassata da γ_0 sull'equatore η .

Lo spostamento dell'equatore da η_0 a η (e del punto vernale da γ_0 a γ') è dovuto alla sola precessione luni-solare, mentre lo spostamento dell'eclittica da χ_0 a χ (e del punto vernale da γ' a γ) è dovuto solo alla precessione planetaria.

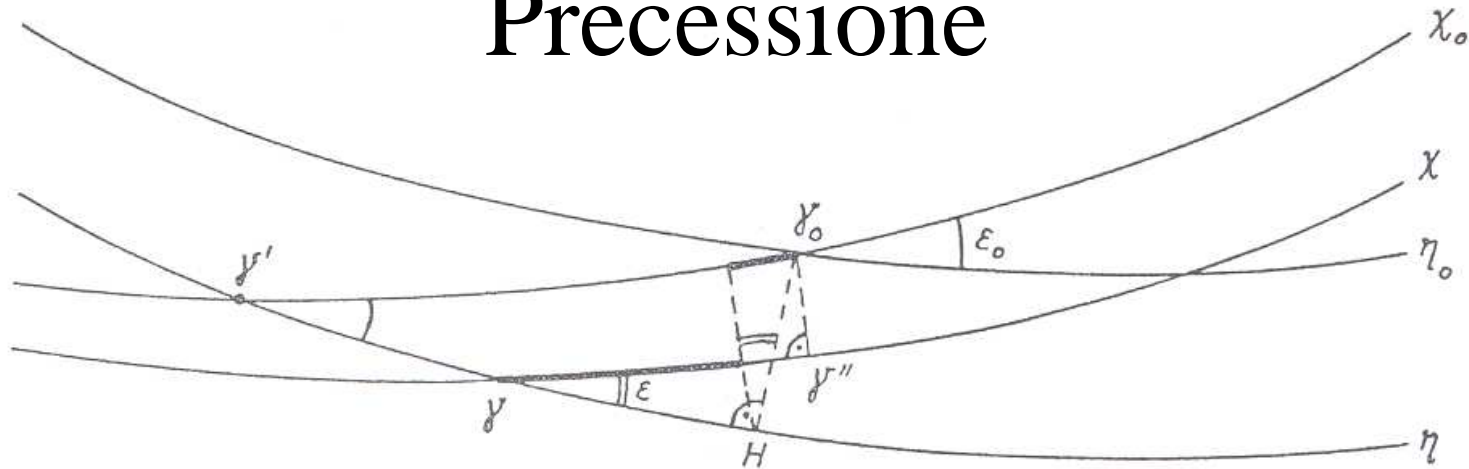
Precessione



Per effetto della precessione generale, approssimando i triangoli sferici con triangoli piani, si ottengono per la precessione generale in ascensione retta m e per la precessione generale in declinazione n

$$\begin{cases} m = |\gamma H| = |\gamma' H| - |\gamma' \gamma| = |\gamma' \gamma_0| \cos \epsilon_0 - |\gamma' \gamma| = 46,12 (''/\text{anno}) \\ n = |\gamma_0 H| = |\gamma' \gamma_0| \sin \epsilon_0 = 20,04 (''/\text{anno}) \end{cases}$$

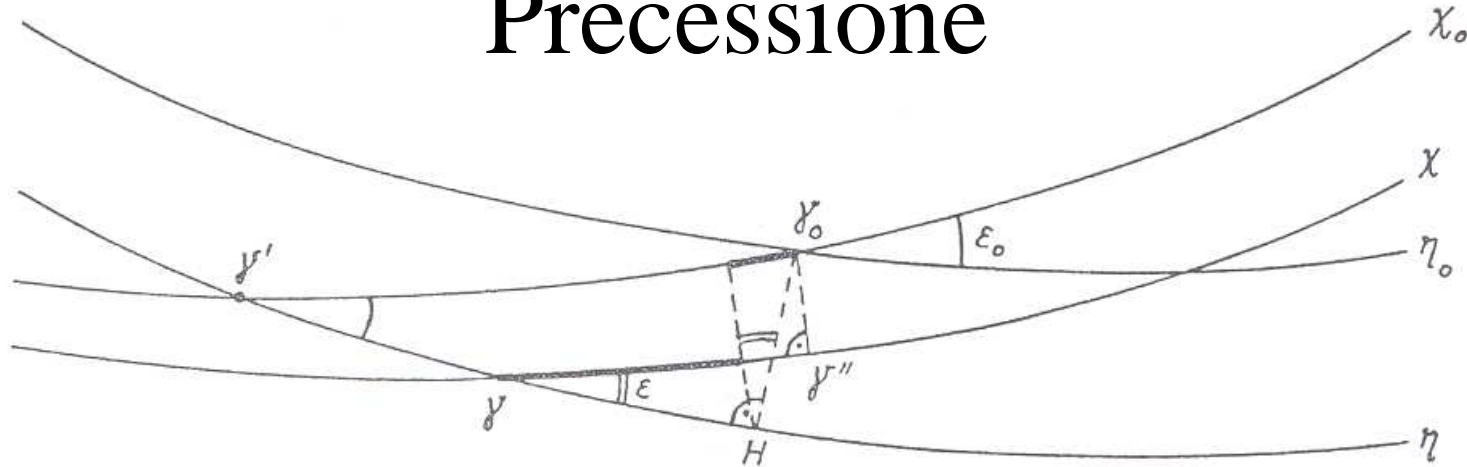
Precessione



La precessione generale in longitudine eclittica p e la precessione generale in latitudine eclittica q (praticamente trascurabile) risultano date da

$$\begin{cases} p = |\dot{\gamma}'' \gamma| = m \cos \epsilon_0 + n \sin \epsilon_0 = 50,29 \text{ (\"/ anno)} \\ q = |\dot{\gamma}'' \gamma_0| = n \cos \epsilon_0 - m \sin \epsilon_0 = 0,04 \text{ (\"/ anno)} \end{cases}$$

Precessione



In realtà, in conseguenza di piccole variazioni collegate con la precessione luni-solare e con la precessione planetaria, m ed n variano lentamente nel tempo e quindi anche p e q non rimangono costanti; al presente si ha

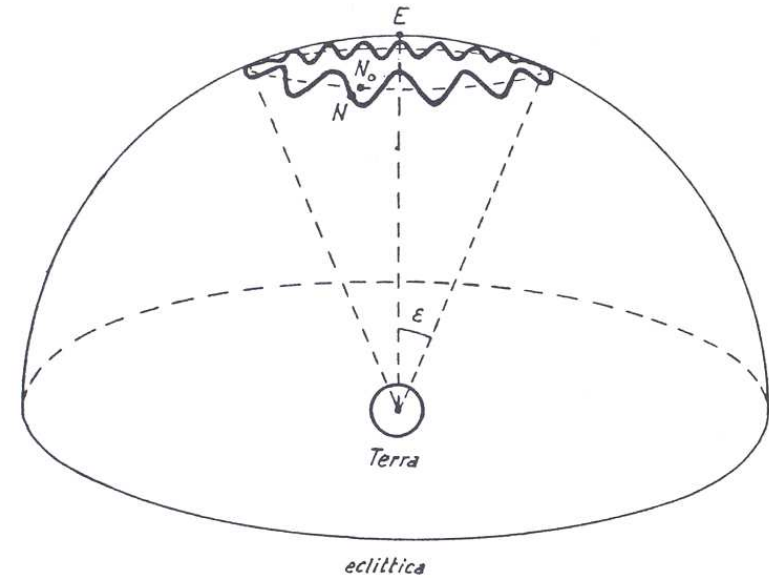
$$p = (50,2910 + 0,0002t) (''/\text{anno})$$

Essendo t il numero di anni tropici contati a partire dall'inizio del 1900.

La posizione del polo Nord celeste corrispondente al moto del polo per effetto della precessione generale si designa come **polo medio**; corrispondentemente si parla di **equatore medio**, di **eclittica media**, di **obliquità media** e di **equinozio medio** per i vari elementi considerati.

Nutazione

Il piano dell'orbita lunare attorno alla Terra non coincide con il piano dell'eclittica e l'angolo formato dai due piani, pur rimanendo prossimo a 5° circa, nel tempo cambia in modo rilevante la giacitura del piano orbitale lunare.



Per effetto di queste variazioni il momento della quantità di moto di rotazione della Terra non ruota uniformemente attorno all'asse dell'eclittica ma si muove in modo più complicato; corrispondentemente il moto del polo Nord celeste sulla sfera celeste non è uniforme ed esattamente circolare ma avviene con un'oscillazione periodica che lo porta ad avvicinarsi e ad allontanarsi periodicamente dal polo Nord dell'eclittica.

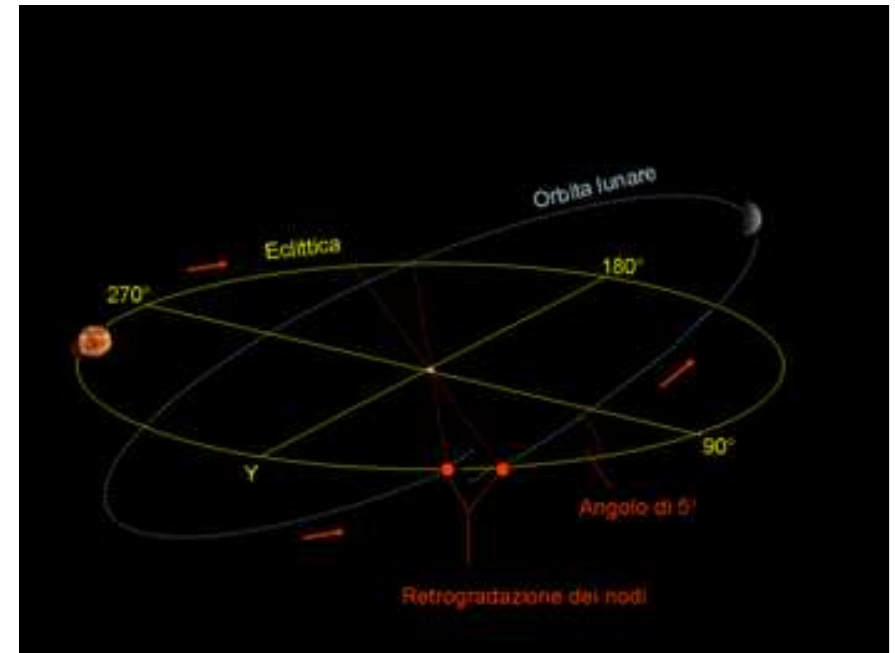
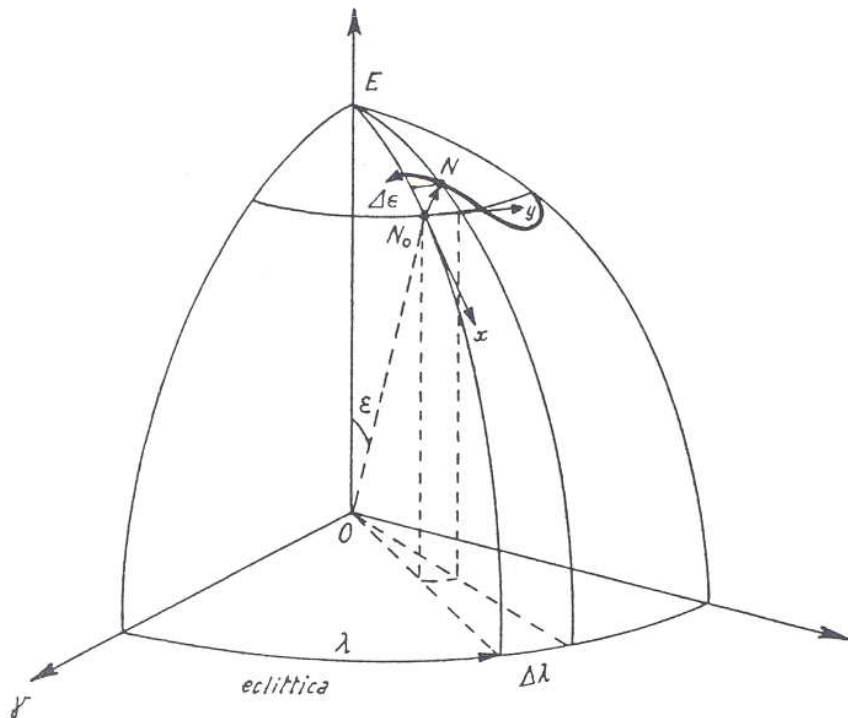
Il fenomeno, che prende il nome di **nutazione** (dal latino «oscillare»), fu scoperto da J. Bradley nel 1748 e causa ovviamente una corrispondente oscillazione dell'equatore celeste rispetto all'eclittica.

Nutazione

Il termine principale è dovuto alla retrogradazione dei nodi dell'orbita lunare.

La perturbazione lunare determina infatti una periodicità della nutazione di 18,6 anni circa, che è proprio il periodo della retrogradazione dei nodi.

Per effetto di questa oscillazione la posizione del **polo Nord vero** differisce dalla posizione del **polo Nord medio**.



Nutazione

Mentre il polo medio descrive sulla sfera celeste una circonferenza attorno al polo dell'eclittica, il polo vero descrive una traiettoria ondulata con oscillazioni periodiche in longitudine eclittica (**nutazione in longitudine**) e in obliquità dell'eclittica (**nutazione in obliquità**) date (all'inizio del 2000) da

$$\begin{cases} \Delta\lambda = -17,20'' \operatorname{sen}\Omega \\ \Delta\varepsilon = 9,20'' \operatorname{cos}\Omega \end{cases}$$

nelle quali Ω rappresenta la longitudine del nodo ascendente dell'orbita lunare sull'eclittica.

La nutazione causa dunque una variazione della posizione del punto vernale e dell'obliquità dell'eclittica.

Il polo Nord vero descrive un'ellisse (di nutazione) rispetto al polo Nord medio

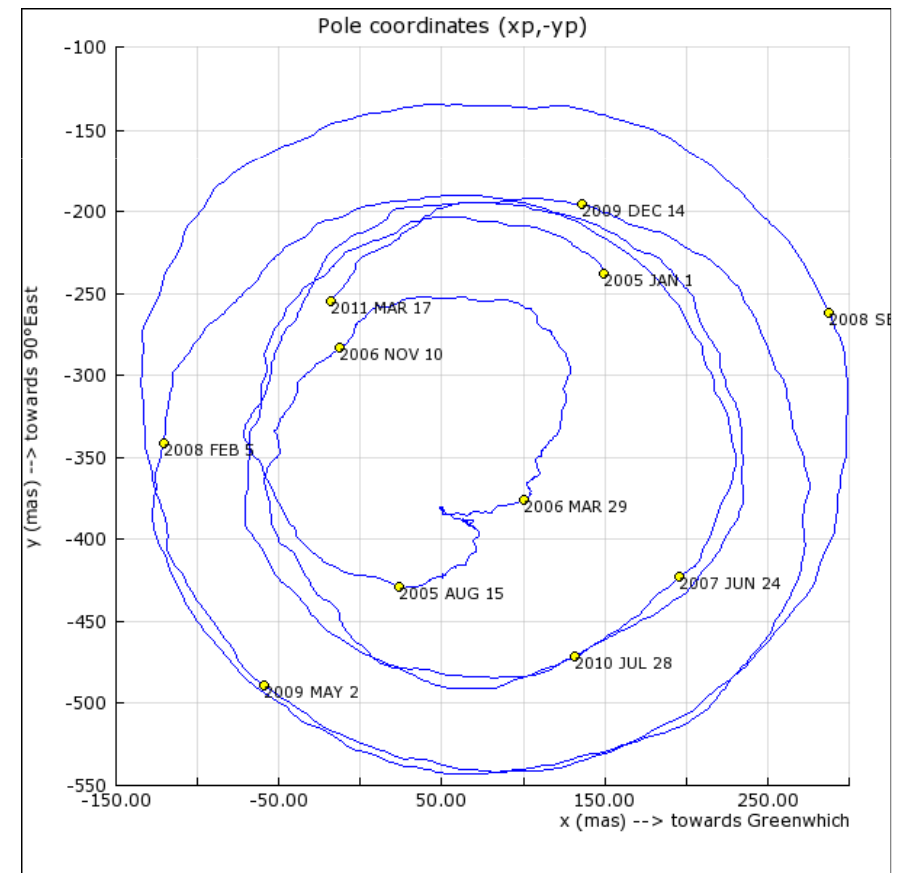
$$\left(\frac{x}{9,20''}\right)^2 + \left(\frac{y}{6,84''}\right)^2 = 1$$

Polodia

La **polodia** (dal greco antico πόλος «perno, asse» e ὁδός «percorso, traiettoria») è il movimento dei poli rispetto alla superficie terrestre. Con lo stesso termine si indica anche la curva descritta da ciascuno dei due poli sulla superficie terrestre.

La causa è dovuto al fatto che la Terra non è assimilabile a un corpo rigido, la distribuzione delle masse al suo interno infatti può variare:

- per moti convettivi in seno alla porzione liquida del nucleo terrestre;
- per moti delle placche tettoniche che si manifestano con i terremoti;
- per i moti delle maree, dei ghiacciai e di altre masse considerevoli.



Polodia

Quando enormi masse si ridistribuiscono entro il volume della Terra, l'asse di istantaneo rotazione terrestre tende a sovrapporsi a un asse principale di inerzia.

La reazione giroscopica induce un movimento conico dell'asse di rotazione: infatti la polodia ha caratteristico andamento a spirale nello stesso senso della rotazione terrestre; la spira viene percorsa con un periodo non rigorosamente costante di circa 433 giorni (periodo di Chandler)

Secondo recenti ricerche tale moto è da ascrivere principalmente alle variazioni fisiche (temperatura, salinità, pressione) a carico delle profondità degli oceani.

Le curve descritte dai due poli Nord e Sud non sono simmetriche rispetto al centro di rotazione terrestre (cioè al punto dell'asse di rotazione equidistante dai poli), ma restano comunque contenute entro un cerchio di non più di 20 m di diametro salvo cataclismi epocali.

Sembra che la polodia presenti altre periodicità: una di breve periodo (diurna) e una di lungo periodo (secolare).

La deflessione gravitazionale della luce

C'è un altro effetto legato alla propagazione della luce che solo negli ultimi decenni è stato preso in considerazione, è la deflessione gravitazionale della luce.

Prevista già da Newton, è stata risistemata da Einstein nella teoria della relatività generale. Fu misurata da Eddington nel 1919 nel corso di un'eclisse solare.

L'angolo di deflessione dovuto al Sole ha l'espressione

$$\vartheta = \frac{4GM_{\odot}}{c^2 d}$$

Dove ϑ è misurato in radianti e d è la distanza minima del raggio dal centro del Sole. In vicinanza del bordo la deflessione prevista è di 1,75'' e decresce in funzione dell'elongazione, riducendosi a 0,004'' a 90° dal Sole.

Tuttavia con tecniche di radiointerferometria anche un angolo così piccolo è misurabile con buona precisione, sì che oggi la previsione di Einstein è verificata, anche a grandi angoli, entro l'1%. In ogni caso, per misure abbastanza accurate, accanto agli altri effetti, è necessario tenere conto anche della deflessione gravitazionale.