

L'atmosfera terrestre

L'atmosfera terrestre

La rifrazione atmosferica

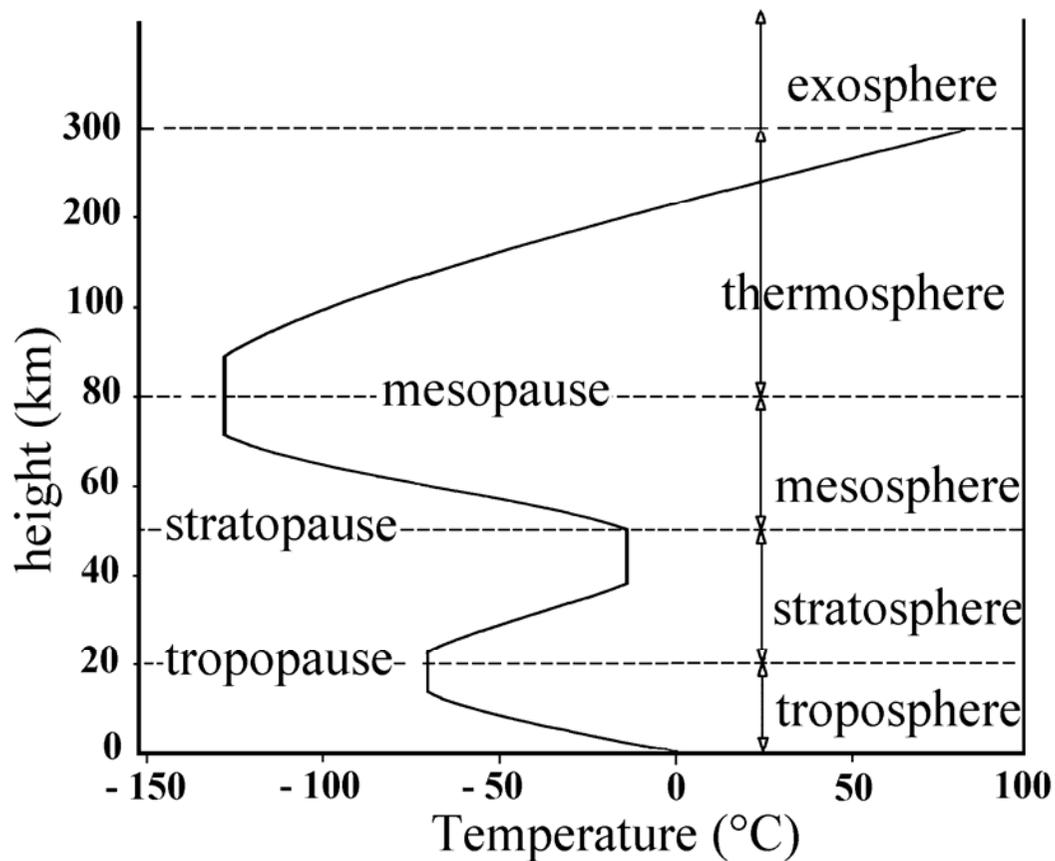
Il cromatismo della rifrazione

Effetti a radiofrequenza

Questo capitolo discute l'influenza dell'atmosfera terrestre sulle **coordinate degli astri osservate da Terra**. Ci si limiterà essenzialmente alla banda visuale, con un cenno a quella radio. Gli effetti sulla fotometria e spettroscopia verranno discussi nei relativi capitoli.

Per ulteriori dettagli (in particolare sulla turbolenza atmosferica e i suoi effetti sulla qualità dell'immagine) si vedano il capitolo sull'ottica dei telescopi e la versione in inglese.

L'atmosfera terrestre - 1



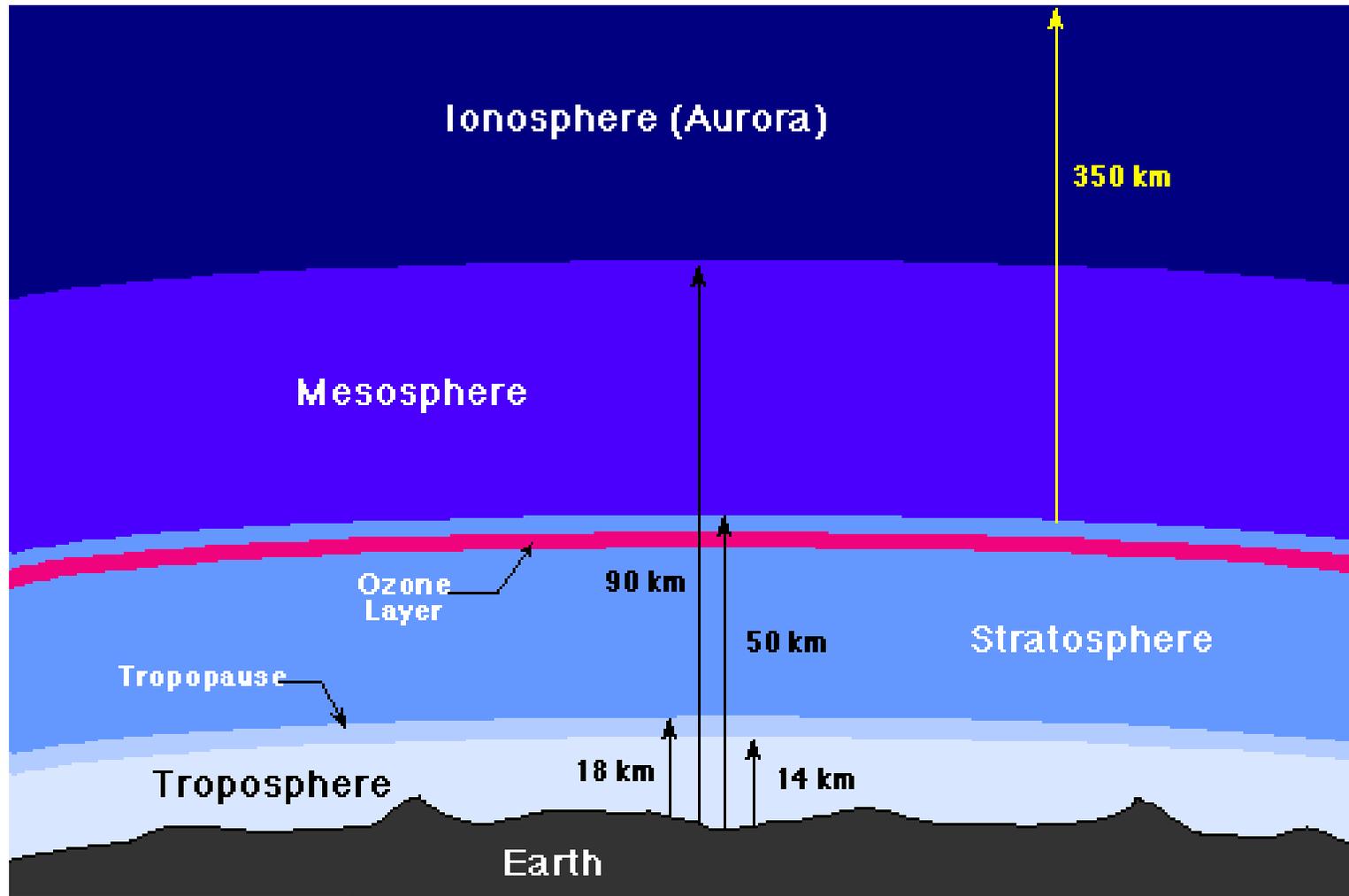
La figura dà una rappresentazione schematica della struttura verticale dell'atmosfera. La banda visuale è affetta dalla troposfera, cioè dai primi 15 km, dove c'è circa il 90% della massa atmosferica.

L'atmosfera terrestre - 2

Il profilo di temperatura nella troposfera è in realtà più complesso di quanto mostrato nella precedente figura. L'altezza della tropopausa (che ha temperatura quasi costante) varia tra 8 km alle alte latitudini ai 18 km all'equatore; è anche più alta in estate e più basso in inverno.

Il gradiente medio di temperatura è circa -6 K/km, ma spesso, sopra ai primi km si incontra uno 'strato critico' **in cui la temperatura si inverte**, con benefici effetti sulle osservazioni astronomiche, grazie alla intrinseca stabilità di qualunque strato con inversione di temperatura (come la stratosfera e la termosfera), *essenzialmente perchè non si può sviluppare la convezione.*

Profilo verticale



L'Osservatorio del Roque de los Muchachos



E' il caso ad es. dell'Osservatorio del Roque de los Muchachos (Isole Canarie, altezza 2400 m, qui visto dal Teide a Tenerife)), dove lo strato di inversione è di solito a alcune centinaia di metri sotto la cima della montagna.

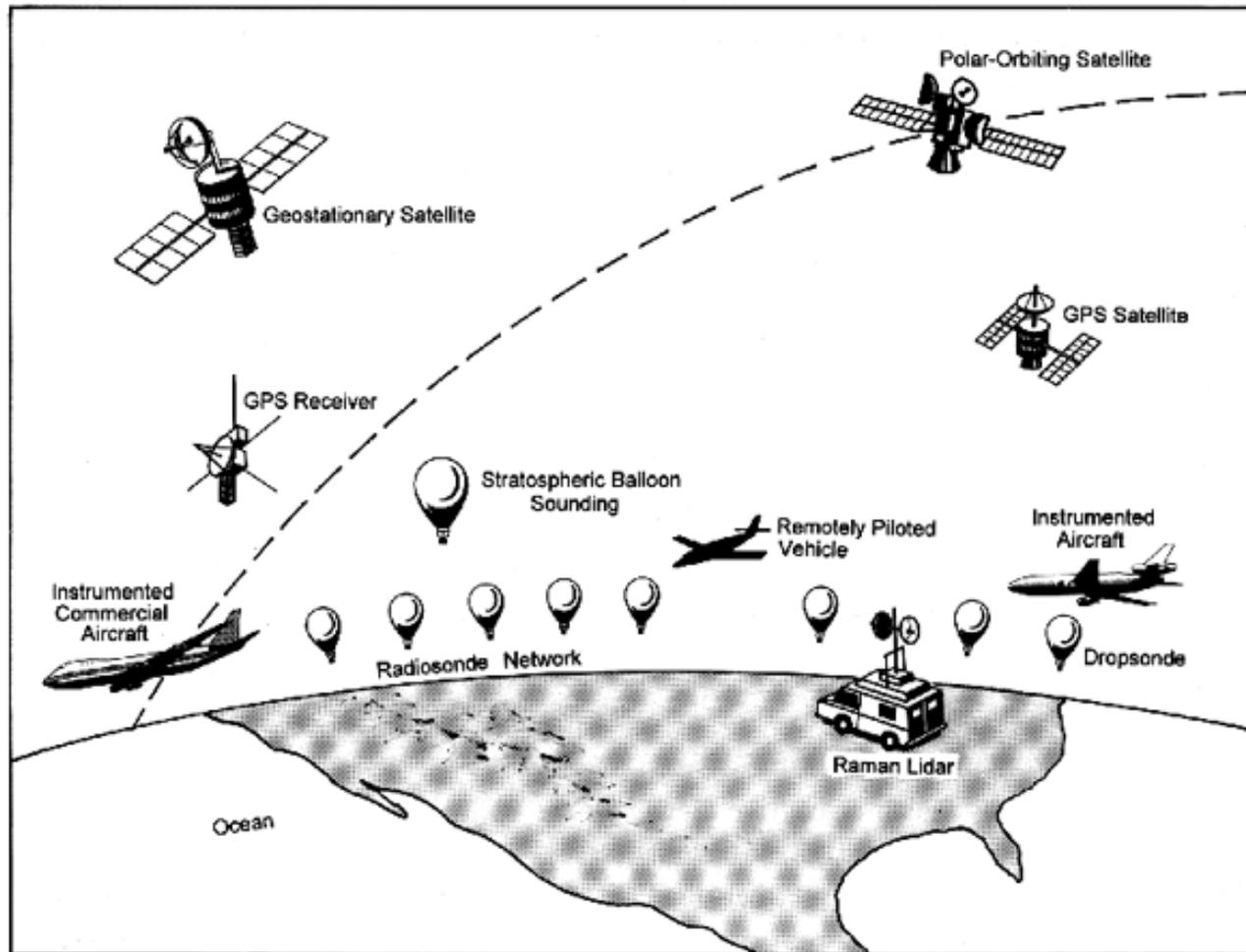
La troposfera

La **troposfera** è costituita in gran parte di **azoto molecolare N₂** e **ossigeno molecolare O₂** (approssimativamente 3:4 e 1:4), con tracce del gas nobile Argon e di vapor acqueo (la concentrazione del vapor acqueo può arrivare al 3% all'equatore, molto meno ai poli):

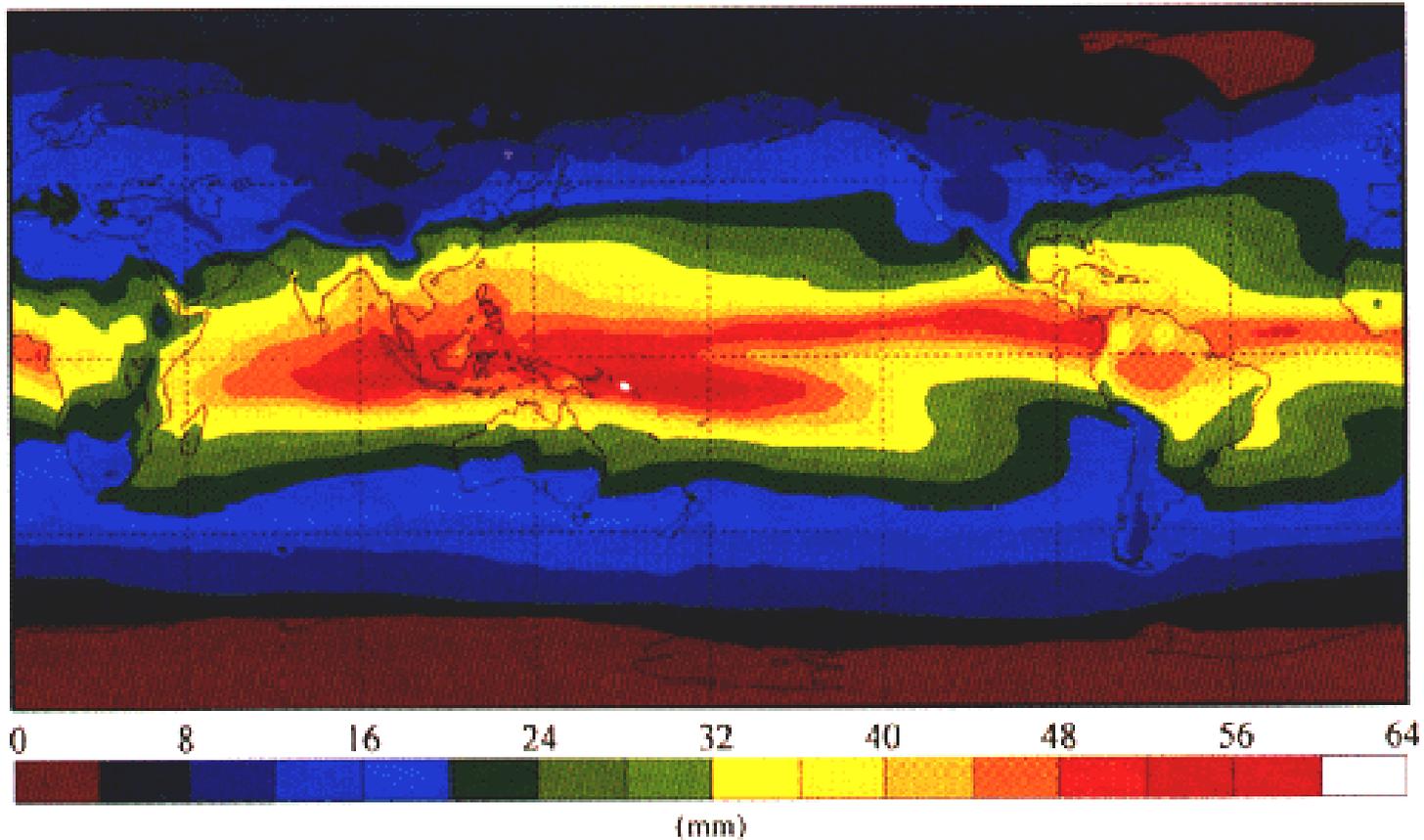
Azoto	78.084%
Ossigeno	20.946%
Argon	0.934%
Diossido di carbonio	0.038%
Vapor acqueo	1%
Tracce	0.002%

L'azoto è normalmente inerte, tranne che per elettrolisi durante I temporali (fulmini) e in alcuni processi biochimici che lo fissano.

Mezzi di misura del vapor acqueo



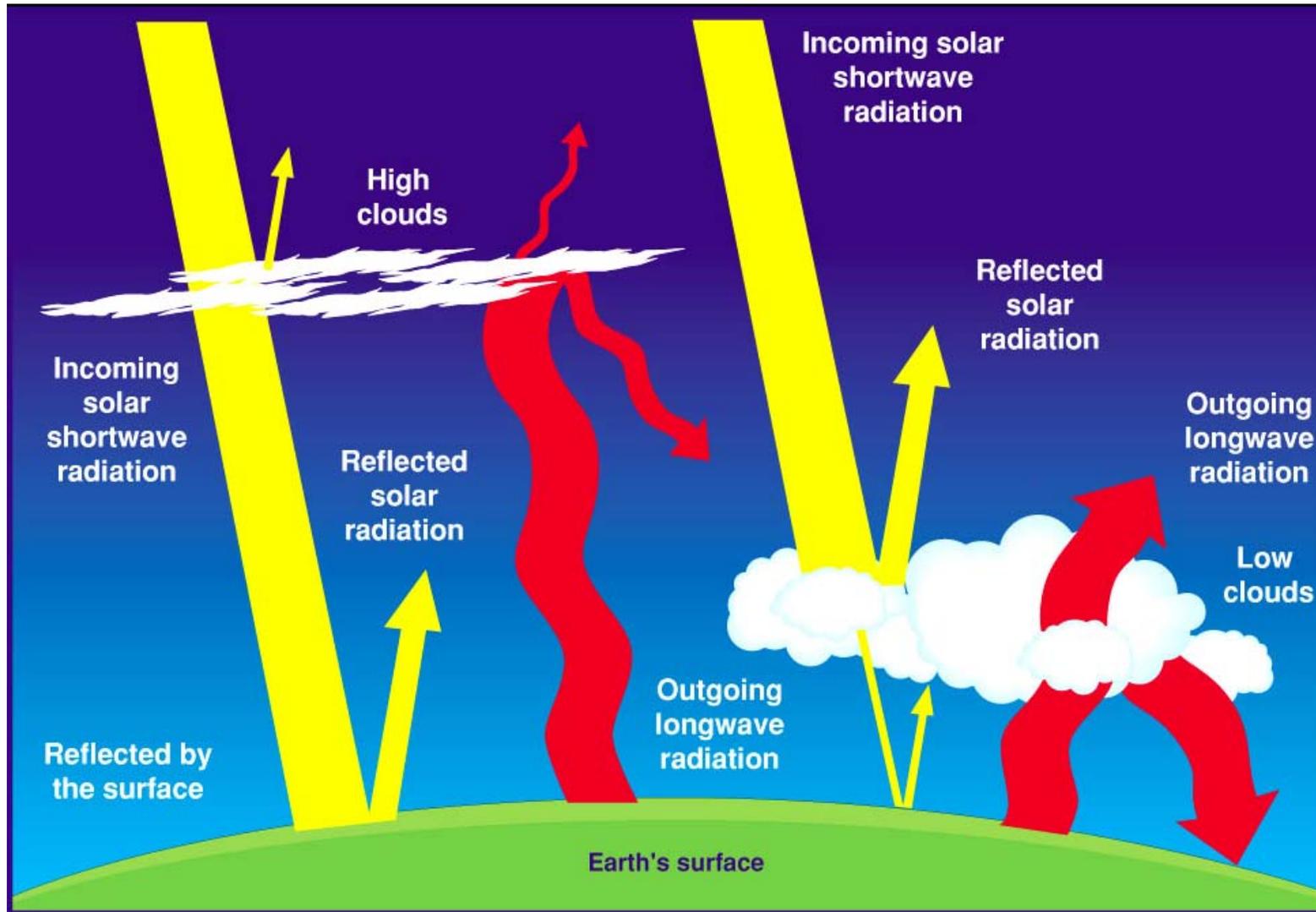
Una figura campione



NASA Water Vapor Project (NVAP) Total Column Water Vapor 1992

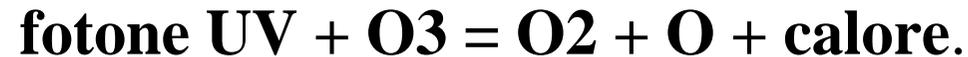
The mean distribution of precipitable water, or total atmospheric water vapor above the Earth's surface, for 1992. This depiction includes data from both satellite and radiosonde observations.

Effetto delle nubi sulla radiazione terrestre



Stratosfera e mesosfera

Sopra alla tropopausa, nelle zone più alte della **stratosfera**, la temperatura sale considerevolmente, perché **la molecola di Ozono (O₃)** assorbe l'UV solare con il processo:



La **mesosfera** va dai 50 agli 80 km; in questa regione le concentrazioni di O₃ e di vapore H₂O sono trascurabili, e dunque la temperatura è più bassa che nella stratosfera. E' in questa regione che i meteoriti e i satelliti artificiali iniziano la fase di riscaldamento. Inoltre, da qui verso l'alto la composizione chimica dell'atmosfera dipende dall'altezza, con gli elementi più pesanti stratificati negli strati più bassi.

Gli strati più esterni

Dopo la regolare diminuzione nella mesosfera, la temperatura sale di nuovo nella **termosfera**, dato che i fotoni UV e X di origine solare possono *ionizzare* i tenui gas residui. Questa *regione ionizzata*, che conduce elettricità, e riflette le frequenze radio inferiori a circa 30 MHz, si chiama più propriamente **ionosfera**, e si divide convenzionalmente nelle regioni D (60-90 km), E (90-140 km), e F (140-1000 km), a seconda del profilo di densità elettronica.

Finalmente, sopra 1000 km la composizione è dominata dall'Idrogeno atomico che sfugge alla gravità terrestre. Questo Idrogeno viene visto dai satelliti artificiali come una brillante **geocorona** nella riga di risonanza Ly- α a $\lambda = 1216 \text{ \AA}$.

Indice di rifrazione

La luce si propaga in linea retta in ogni mezzo con indice di rifrazione costante n , con una **velocità di fase v** data da:

$$v = c / n = 1 / (\epsilon \mu)^{1/2}$$

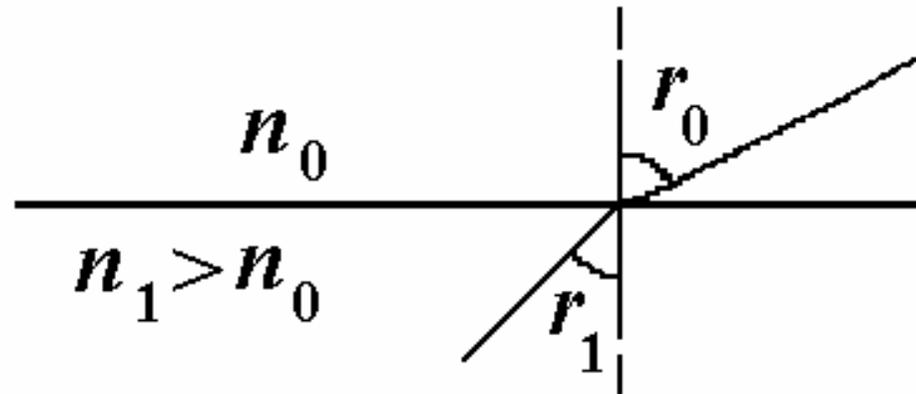
dove ϵ è la costante dielettrica e μ la permeabilità magnetica del mezzo. Tutte queste quantità dipendono dalla lunghezza d'onda.

La **velocità di gruppo** (con cui si propaga l'energia) è invece:

$$u = v - \lambda dv / d\lambda$$

Alla superficie di separazione tra due mezzi di diverso indice di rifrazione (ad es. vuoto/aria), il raggio cambia direzione, cosicché l'osservatore immerso nel secondo mezzo vede il raggio che arriva da una direzione apparente diversa da quella 'vera'.

La rifrazione atmosferica - 1



Si supponga che l'atmosfera si possa trattare come una successione di piani paralleli (ipotesi di *stratificazione piano-parallela*), in virtù della estensione verticale piccola rispetto al raggio terrestre. Dalle leggi di **Snell**, quando il raggio che incide da una regione di indice di rifrazione n_0 incontra la superficie di separazione con un mezzo di indice di rifrazione $n_1 > n_0$, parte dell'energia viene riflessa sulla sinistra, nello stesso semispazio e con lo stesso angolo r_0 rispetto alla normale, ma questa parte qui non ci interessa, implica solamente una diminuzione di splendore della stella che tratteremo in seguito. La rimanente frazione sarà *rifratta*, nello stesso piano del raggio incidente, a un angolo $r_1 < r_0$.

La rifrazione atmosferica - 2

In realtà, in una atmosfera limpida senza nubi, non c'è una superficie di demarcazione netta, l'indice di rifrazione cresce gradualmente da 1 al valore finale *nf* al suolo, con lunghezze di scala tipiche molto maggiori della lunghezza d'onda della luce (abbiamo già detto che ci limitiamo essenzialmente alla banda visuale), cosicché la direzione continuamente variabile si può ritenere **una successione infinita di passi infinitesimi nel piano che contiene la verticale e la direzione dell'astro.**

Per semplicità però nella figura seguente schematizziamo l'effetto con un numero finito di passi.

La rifrazione atmosferica - 3

$$n_0 \sin r_0 = n_1 \sin r_1 \quad , \dots ,$$

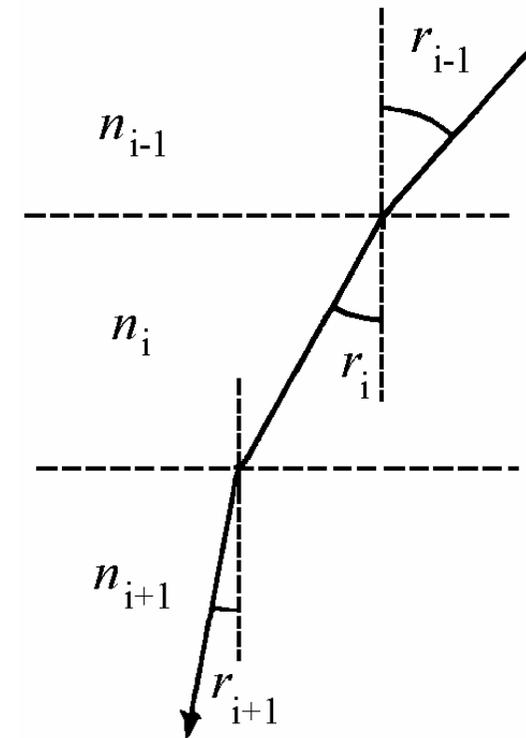
$$n_i \sin r_i = n_{i+1} \sin r_{i+1} \quad , \dots ,$$

$$n_{f-1} \sin r_{f-1} = n_f \sin r_f$$

dove $n_{i+1} > n_i$, e $r_{i+1} < r_i$.

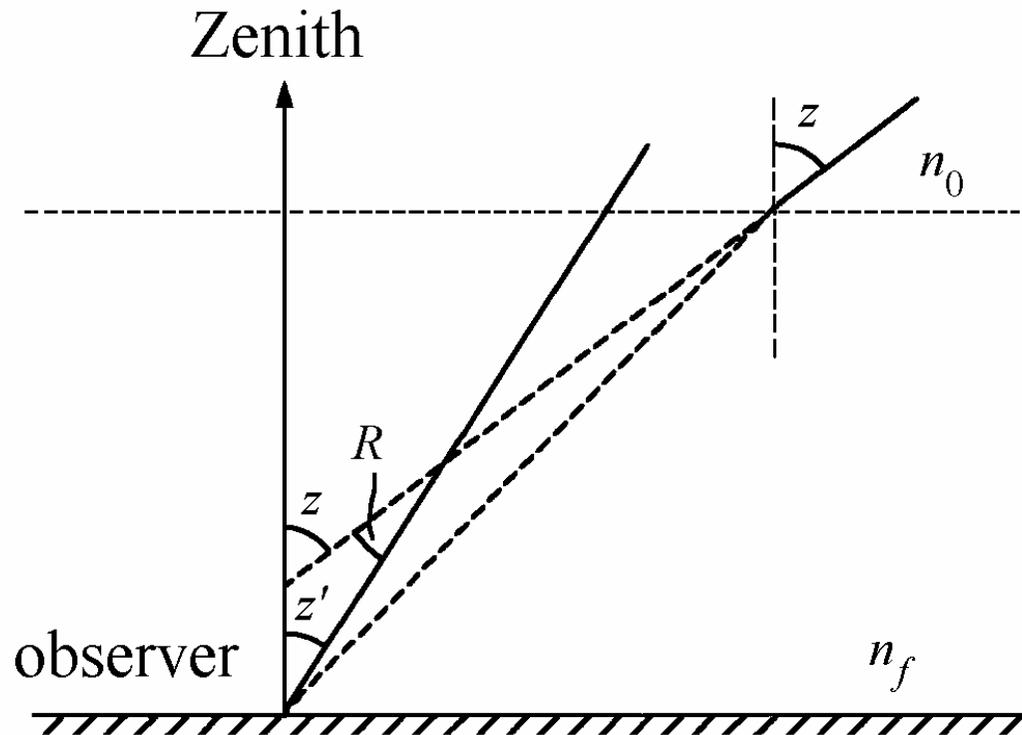
Uguagliando ciascun termine:

$$n_0 \sin r_0 = n_f \sin r_f$$



Dunque, in una atmosfera a stratificazione piano parallela la deviazione angolare totale *dipende solo dall'indice di rifrazione vicino al suolo*, indipendentemente dalla legge esatta con cui varia lungo il cammino del raggio.

La rifrazione atmosferica - 4



L'effetto netto è mostrato in figura: la stella è vista in direzione z' più piccola di quella vera z , cioè **più vicina allo Zenit locale**, di un ammontare R che è la rifrazione atmosferica:

$$z' = z - R.$$

Dato che: $n_0 \sin r_0 = n_f \sin r_f$ per piccoli R (in pratica, se $z < 45^\circ$) possiamo porre:

$$n_f \sin z' = \sin z = \sin(z' + R) = \sin z' \cos R + \cos z' \sin R \approx \sin z' + R \cos z'$$

La rifrazione atmosferica - 5

Dunque:

$$R = (n_f - 1) \tan z'$$

Nella *banda visuale*, per valori medi di temperatura e pressione ($T = 273$ K, $P = 760$ mm Hg), $n_f \approx 1.00029$, cosicché in cifra tonda:

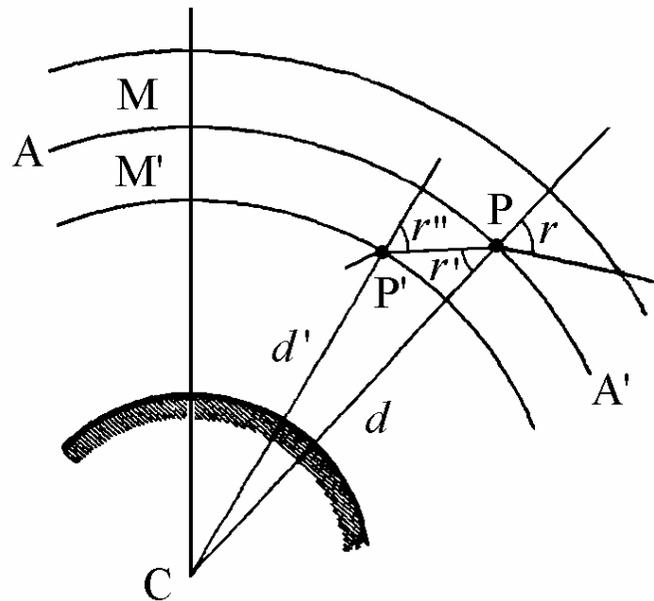
$$R(15^\circ) \approx 16'',$$

$$R(45^\circ) \approx 60''$$

La rifrazione atmosferica - 6

Per distanze zenitali maggiori di 45° , il cammino del raggio dentro alla atmosfera è così lungo che non si può più ignorare la curvatura della Terra, e la trattazione matematica diviene più complicata, anche restringendosi a rifrazioni successive nello stesso piano verticale.

L'equazione fondamentale diviene:



$$R = a_{\oplus} \cdot n_f \sin z' \int_1^{n_f} \frac{dn}{n \sqrt{d^2 \cdot n^2 - a_{\oplus}^2 \cdot n_f^2 \sin^2 z'}}$$

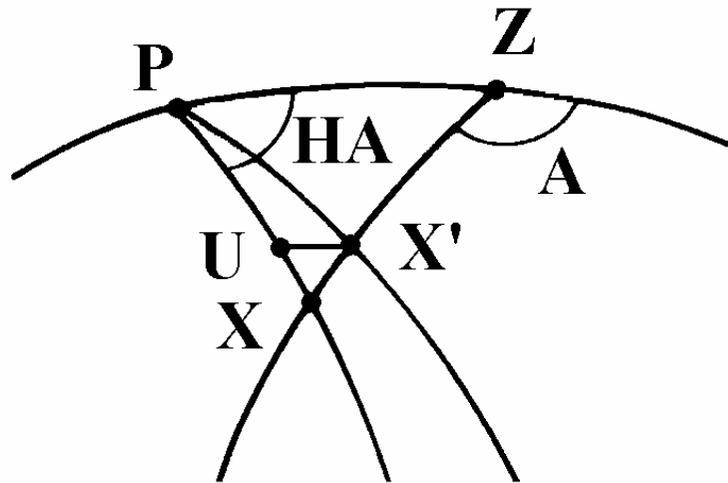
che è una delle equazioni più importanti nello studio di qualunque atmosfera.

Dopo vari passaggi:

$$R = A \tan z' + B \tan^3 z' = (n_f - 1) \left[\left(1 - \frac{l}{a_{\oplus}}\right) \tan z' - \frac{l}{a_{\oplus}} \tan^3 z' \right]$$

in cui l è una lunghezza tipica che vale circa 8 km, e $B \approx -0.07$.

Effetto sulle coordinate apparenti



L'effetto della rifrazione è di muovere la stella più vicina allo Zenit nel piano verticale, alzando così l'elevazione h ma lasciando praticamente invariato l'azimut A :

$$\begin{aligned} XX' &= R = \Delta h, \\ PXX' &= PXZ = q, \\ ZX &= z, ZX' = z', \\ PX &= 90 - \delta, \\ XU &= \Delta \delta \end{aligned}$$

$$\begin{cases} -\Delta HA \cos \delta = (\alpha' - \alpha) \cos \delta = R \sin q \\ \Delta \delta = \delta' - \delta = R \cos q \end{cases}$$

$$\cos \delta \cos q = \sin \varphi \cos h + \cos \varphi \sin h \cos A$$

$$\sin A \sin h = \cos HA \sin q + \sin HA \cos q \sin \delta$$

In meridiano, la rifrazione è tutta in declinazione, e questo è vero in particolare per il Sole a mezzogiorno vero.

Rifrazione approssimata

Per distanze zenitali non maggiori di 45° , dopo vari passaggi avremo finalmente:

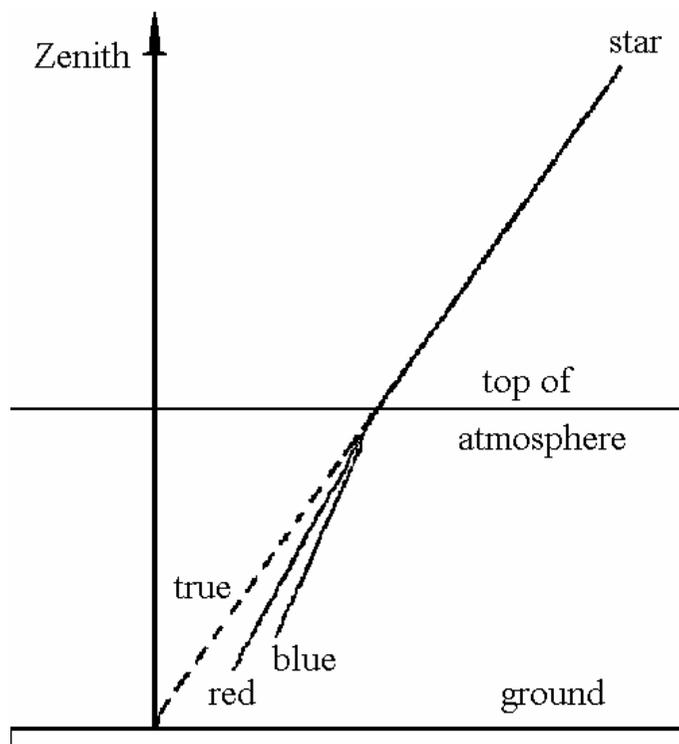
$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta\alpha = (n_f - 1) \frac{\sec^2 \delta \sin HA}{\cos HA + \tan \varphi \tan \delta} \\ \Delta\delta = (n_f - 1) \frac{\tan \varphi - \tan \delta \cos HA}{\cos HA + \tan \varphi \tan \delta} \end{array} \right.$$

formule per mezzo delle quali possiamo derivare le coordinate *topocentriche* vere da quelle apparenti e viceversa (cambiando segno).

Ovviamente *nessuna correzione è necessaria per osservazioni fuori dall'atmosfera.*

Il cromatismo della rifrazione

L'indice di rifrazione n dipende dalla lunghezza d'onda, diminuendo dal blu verso il rosso, e lo stesso farà l'angolo di rifrazione R : l'immagine al suolo della stella è dunque *una successione di punti monocromatici* allineati lungo il cerchio verticale: il raggio blu è sotto a quello rosso, e all'occhio la stella blu appare sopra a quella rossa.



L'atmosfera si comporta quindi come un prisma che produce un **corto spettro nel piano verticale**, la cui lunghezza cresce con la distanza zenitale, raggiungendo parecchi secondi d'arco a basse elevazioni. La relazione $n(\lambda)$ può essere espressa dalla cosiddetta **formula di Cauchy**:

$$n(\lambda) = 0.00028 \left(1 + \frac{0.00566}{\lambda^2} + \frac{0.000047}{\lambda^4} \right)$$

(λ in micrometri), corrispondente a un variazione di circa il 2% sulla banda visibile, cioè a circa **1".2 at 45°**.

Relazione tra densità e temperatura

Una volta fissata λ , l'indice di rifrazione dipende dalla densità ρ secondo la legge di Gladstone-Dale:

$$n - 1 = k \rho$$

Con l'ipotesi di un gas perfetto a pressione P , temperatura T e peso molecolare μ :

$$\rho = \frac{\mu P}{RT} \quad (\text{dove ora } R \text{ è la costante universale dei gas), \text{ si ha:}$$

$$n - 1 = k' \frac{P}{T}, \quad \frac{n - 1}{n_0 - 1} = \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T}$$

Numericamente, con P in mm Hg, T in K:

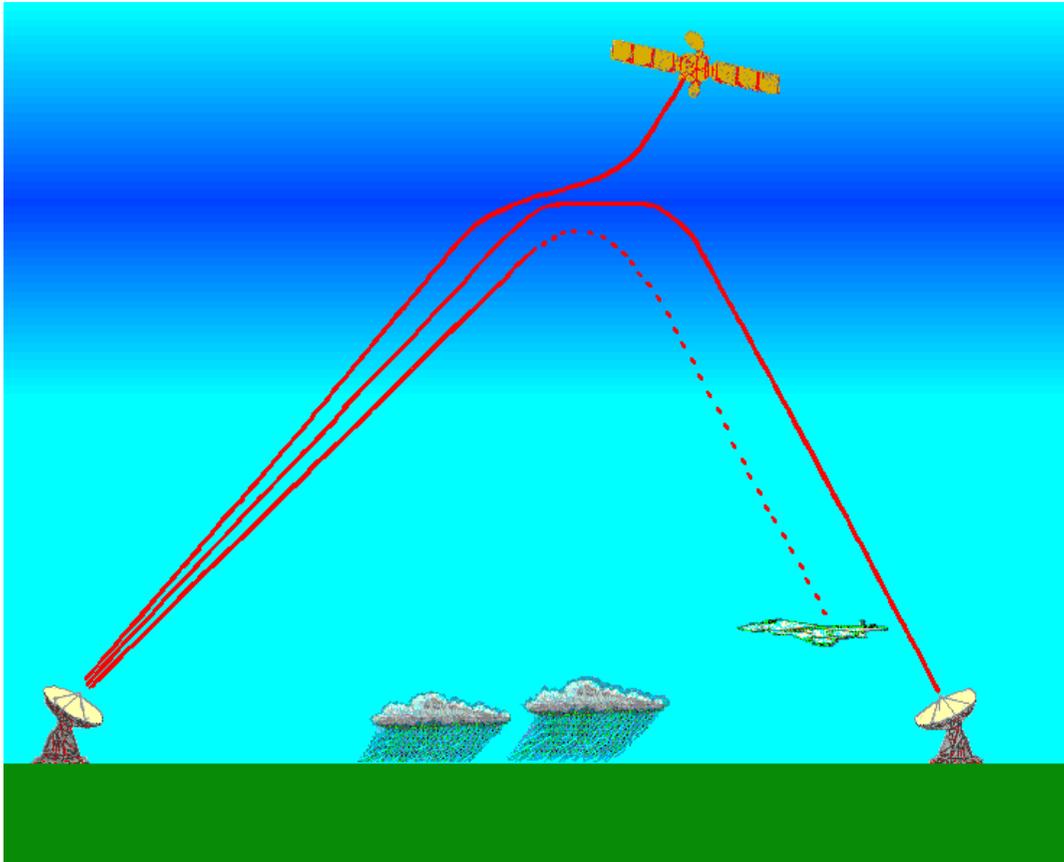
$$n - 1 \approx 78.7 \times 10^{-6} \frac{P}{T}, \quad R \approx 60'' .4 \frac{(P / 760)}{(T / 273)} \tan z$$

Effetti della atmosfera a radiofrequenza - 1

La *ionosfera* introduce un ritardo sul tempo di arrivo dell'onda dato da:

$$\Delta T = \frac{40.3}{c\nu^2} \int_I N_e ds$$

(secondi), essendo I il cammino lungo la visuale e N_e la densità elettronica (cm^{-3}). Questa densità varierà con il ciclo notturno e diurno, con le stagioni e anche con il ciclo solare.



Effetti della atmosfera a radiofrequenza -2

Il ritardo *troposferico* può essere risolto in due componenti, **una secca e una umida**.

La componente secca ammonta a circa 7 ns allo zenit, e varia con una legge in ‘cosec z ’ modificata che abbiamo discusso per le osservazioni ottiche:

$$\Delta t \approx 7 \left(\cos z + \frac{0.0014}{0.0445 + \cot z} \right) \text{ ns}$$

La componente umida dipende dalla quantità di vapor acqueo, ammonta a circa 10% di quella secca, ma varia rapidamente e in maniera imprevedibile.

Finalmente, *due altri mezzi* influenzano la propagazione delle onde radio, cioè la *corona solare* e il *mezzo interstellare ionizzato*.