

# L'atmosfera terrestre

L'atmosfera terrestre

La rifrazione atmosferica

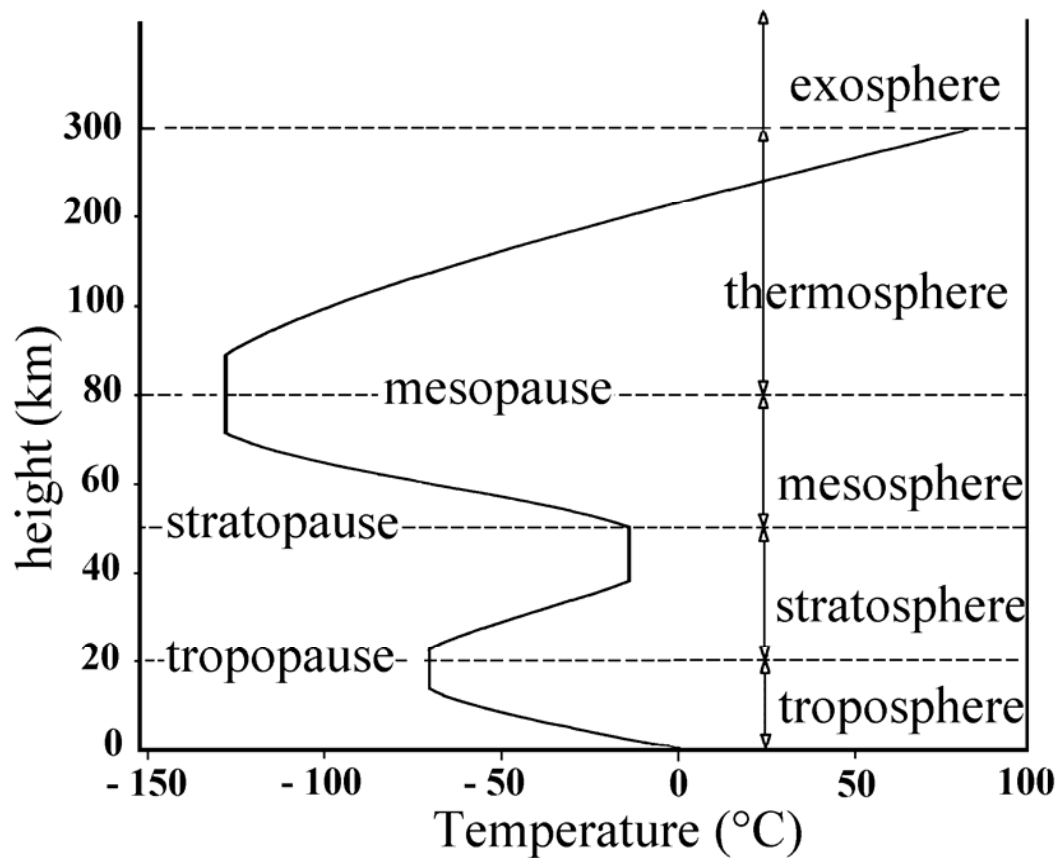
Il cromatismo della rifrazione

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



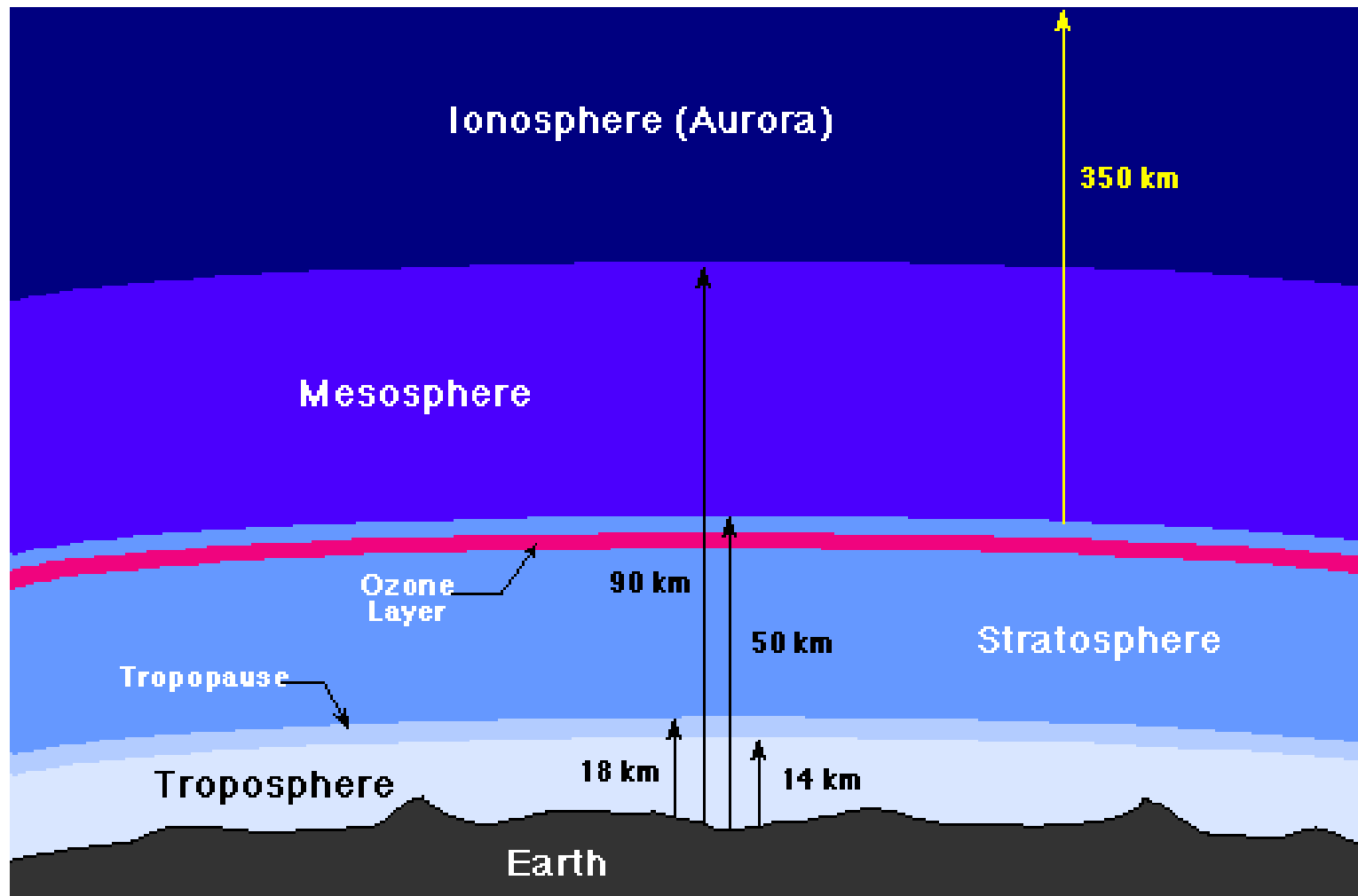
La figura dà una rappresentazione schematica della struttura verticale dell'atmosfera. La banda visuale è affetta dalla troposfera, cioè dai primi 15 km, dove c'è circa il 90% della massa atmosferica.

# 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.

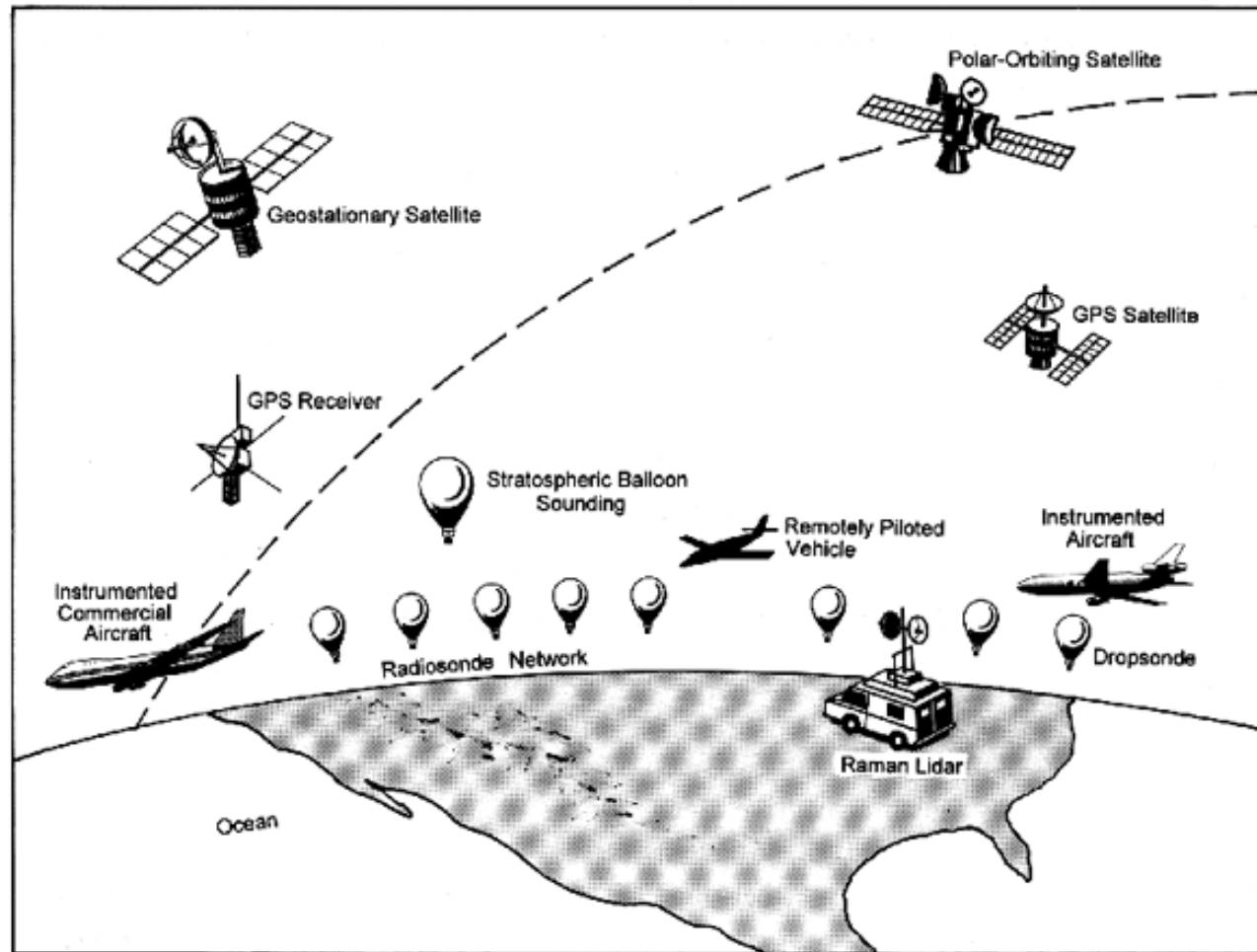
# La troposfera

La **troposfera** è costituita in gran parte di **azoto molecolare  $N_2$**  e **ossigeno molecolare  $O_2$**  (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):

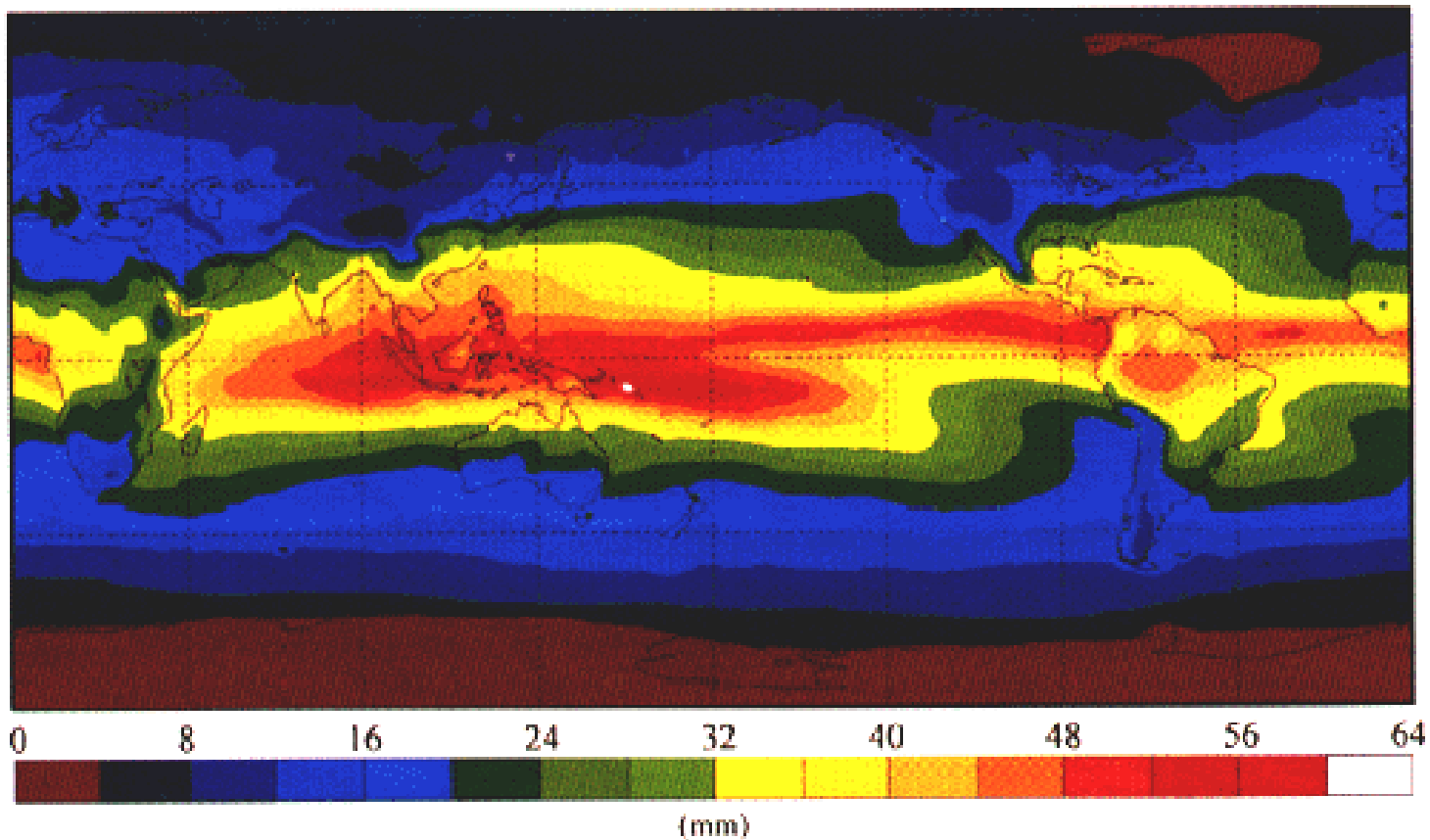
Azoto	78.084%
Ossigeno	20.946%
Argon	0.934%
Diossido di carbonio	0.038%
Vapor acqueo	1%
Tracce	0.002%

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

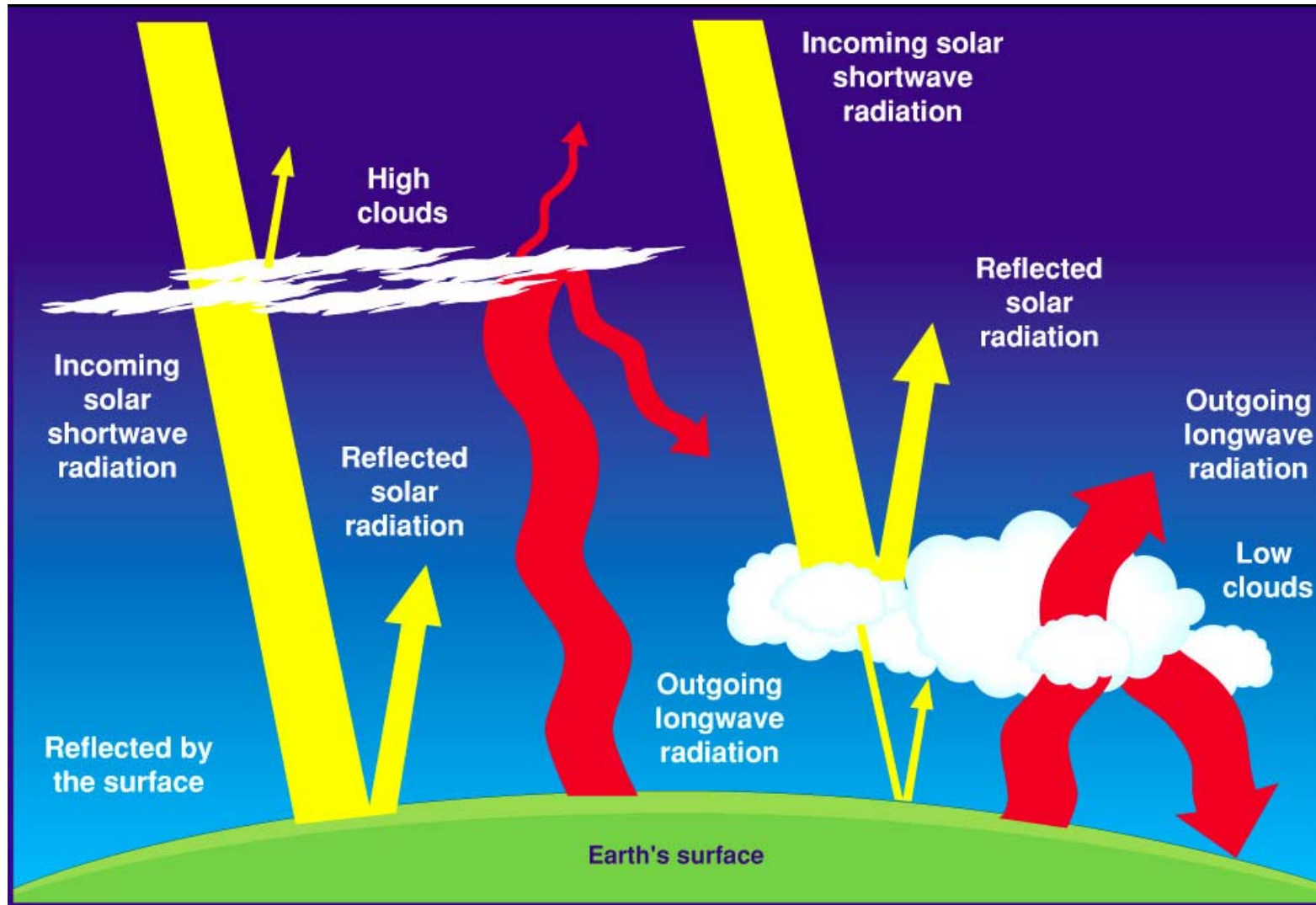


## ***NASA Water Vapor Project (NVAP) Total Column Water Vapor 1992***

*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.*

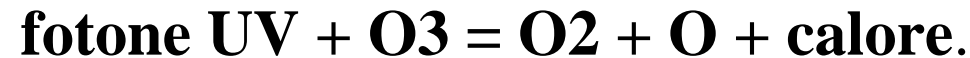


# Effetto delle nubi sulla radiazione terrestre



# Stratosfera e mesosfera

Sopra alla tropopausa, nelle zone più alte della **stratosfera**, la temperatura sale considerevolmente, perché **la molecola di Ozono (O<sub>3</sub>)** assorbe l'UV solare con il processo:



La **mesosfera** va dai 50 agli 80 km; in questa regione le concentrazioni di O<sub>3</sub> e di vapore H<sub>2</sub>O 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- $\alpha$  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:

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

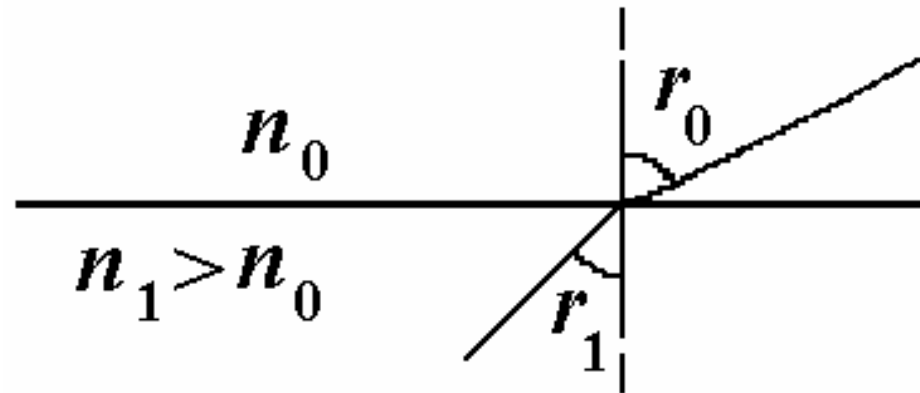
dove  $\epsilon$  è la costante dielettrica e  $\mu$  la permeabilità magnetica del mezzo. Tutte queste quantità dipendono dalla lunghezza d'onda.

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

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

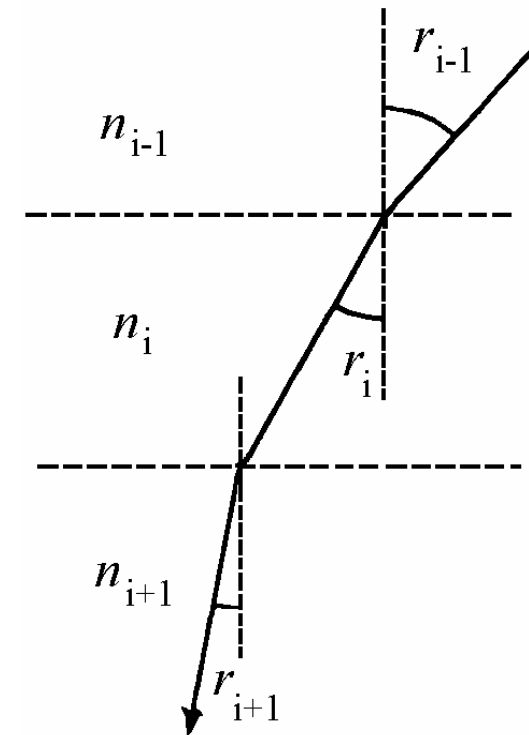
$$n_i \sin r_i = n_{i+1} \sin r_{i+1} \quad , \dots ,$$

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

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

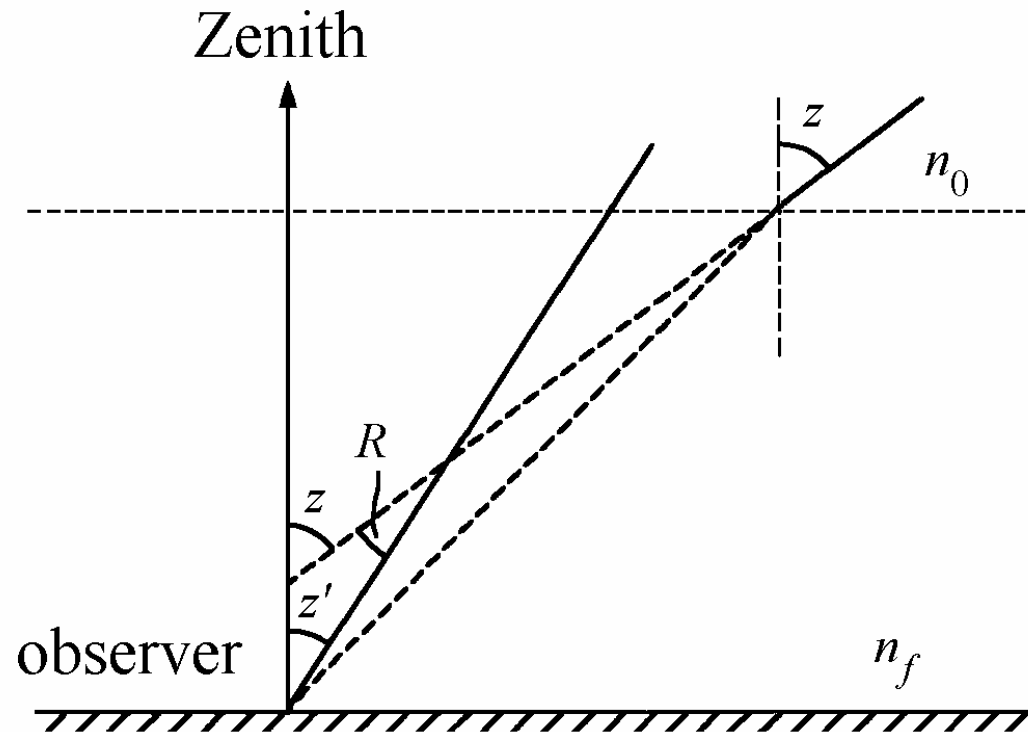
Uguagliando ciascun termine:

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



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:

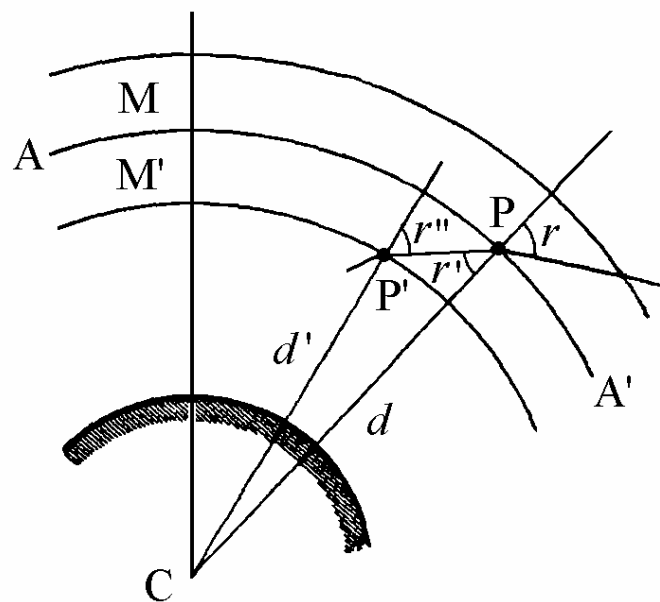
$$R(15^\circ) \approx 16'',$$

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

# La rifrazione atmosferica - 6

Per distanze zenitali maggiori di  $45^\circ$ , 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:



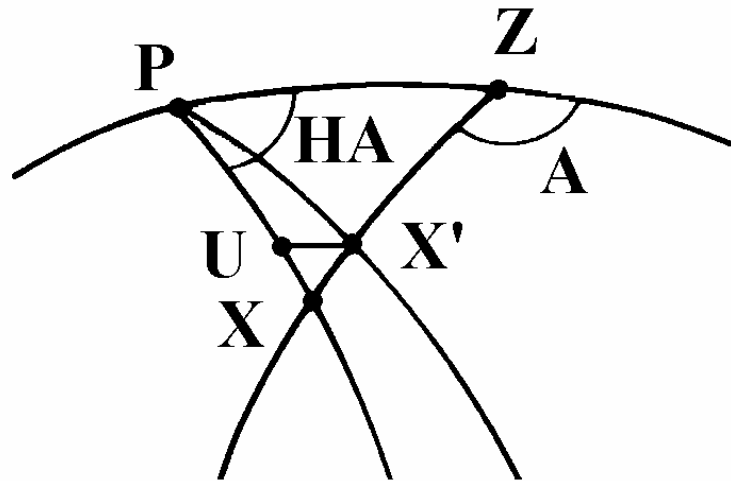
$$R = a_{\oplus} \cdot n_f \sin z' \int_1^{n_f} \frac{dn}{n \sqrt{d^2 \cdot n^2 - a_{\oplus}^2 \cdot n_f^2 \sin^2 z'}}$$

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  $A$ :

$$XX' = R = \Delta h,$$

$$PXX' = PXZ = q,$$

$$ZX = z, ZX' = z'$$

$$PX = 90 - \delta,$$

$$XU = \Delta \delta$$

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

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

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

*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  $45^\circ$ , dopo vari passaggi avremo finalmente:

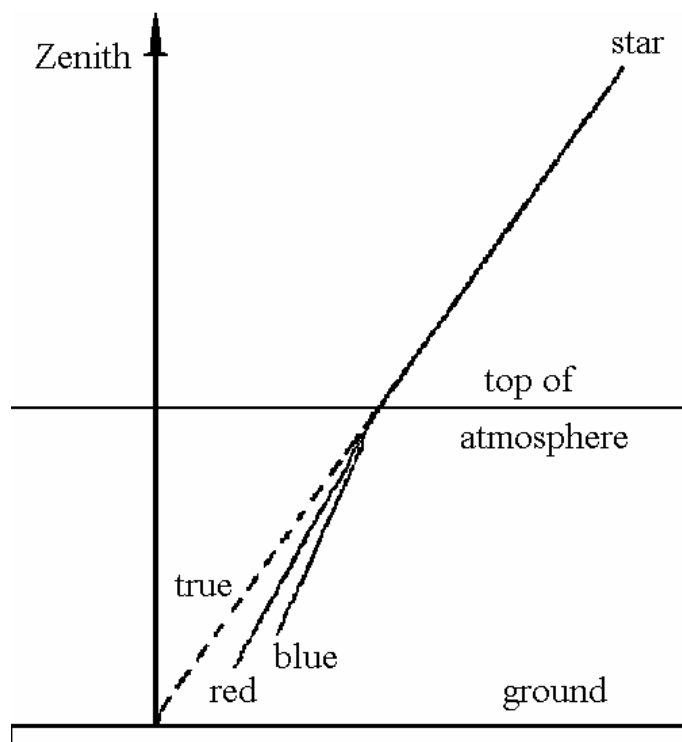
$$\begin{cases} \Delta\alpha = (n_f - 1) \frac{\sec^2 \delta \sin HA}{\cos HA + \tan \varphi \tan \delta} \\ \Delta\delta = (n_f - 1) \frac{\tan \varphi - \tan \delta \cos HA}{\cos HA + \tan \varphi \tan \delta} \end{cases}$$

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**:

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

( $\lambda$  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  $\lambda$ , l'indice di rifrazione dipende dalla densità  $\rho$  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  $\mu$ :

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

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

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

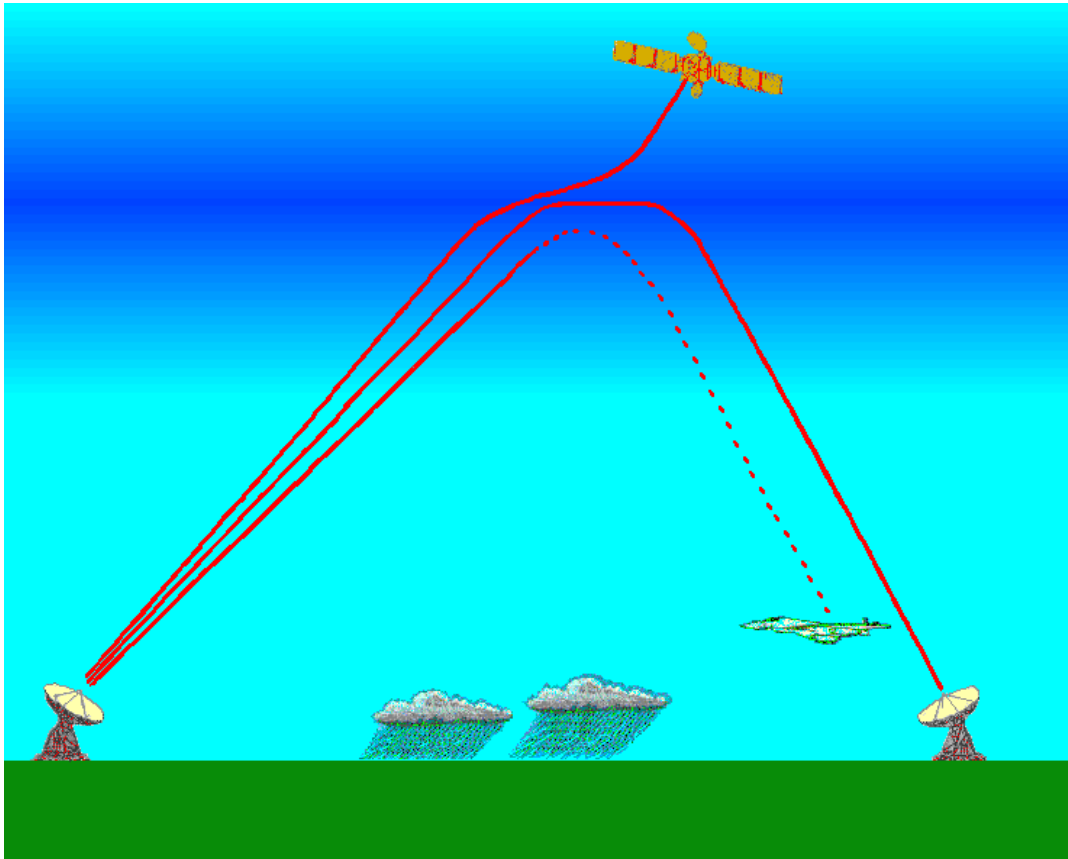
$$n - 1 \approx 78.7 \times 10^{-6} \frac{P}{T} \quad , \quad R \approx 60'' . 4 \frac{(P / 760)}{(T / 273)} \tan z$$

# 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 ( $\text{cm}^{-3}$ ). 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*.