



Podstawy Astronomii 1

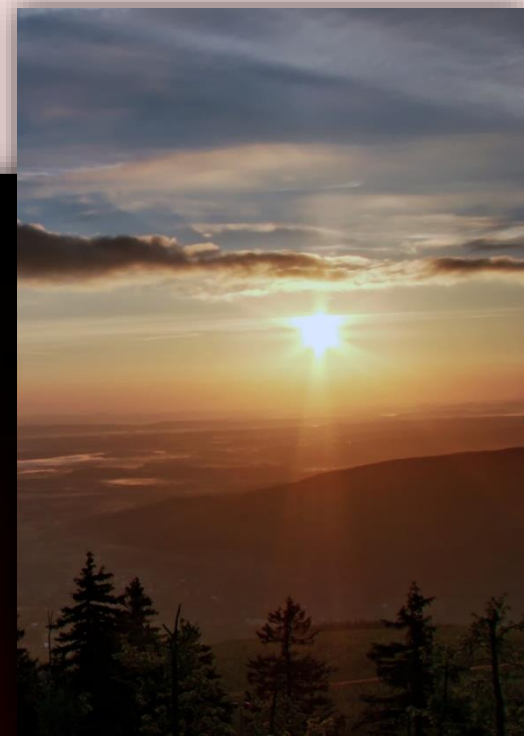
wpływ atmosfery

wpływ atmosfery



tarcza Słońca nisko nad horyzontem

- spłaszczona
- nieregularna na brzegu
- ciemniejsza na dole
- bardziej czerwona na dole



wpływ atmosfery

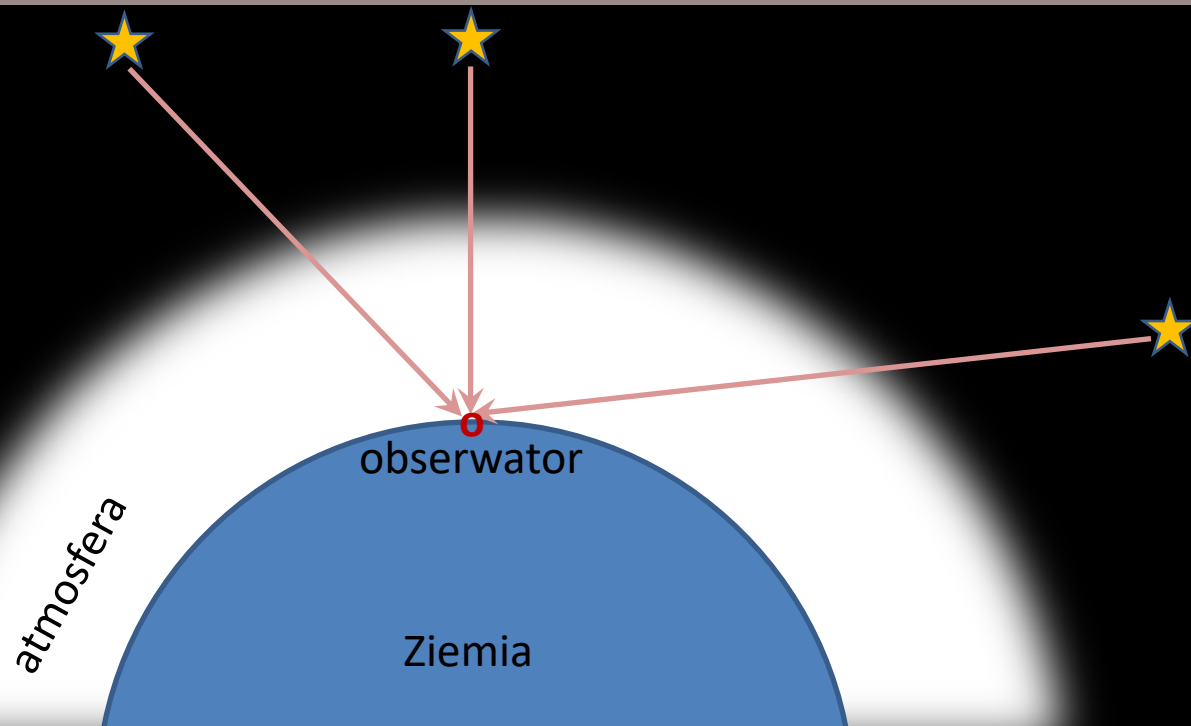
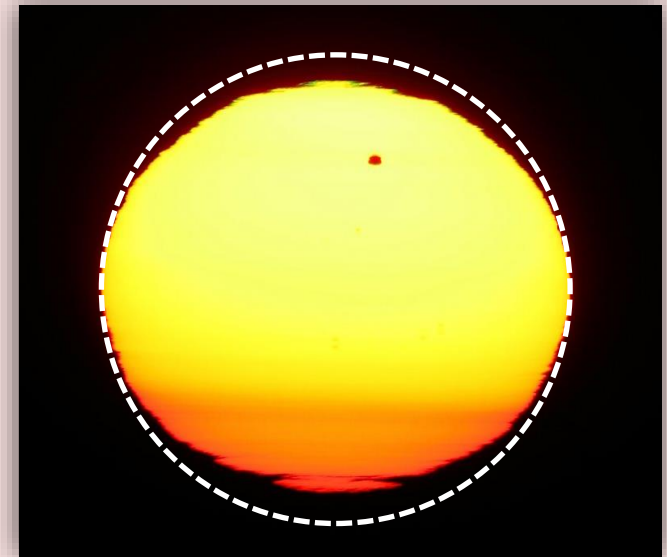
Światło przechodząc przez atmosferę ulega:

- rozproszeniu i absorpcji
- załamaniu

W efekcie obiekt doznaje:

- spadku jasności widomej (**ekstynkcja atmosferyczna**)
- pozornej zmiany położenia (**refrakcja atmosferyczna**)

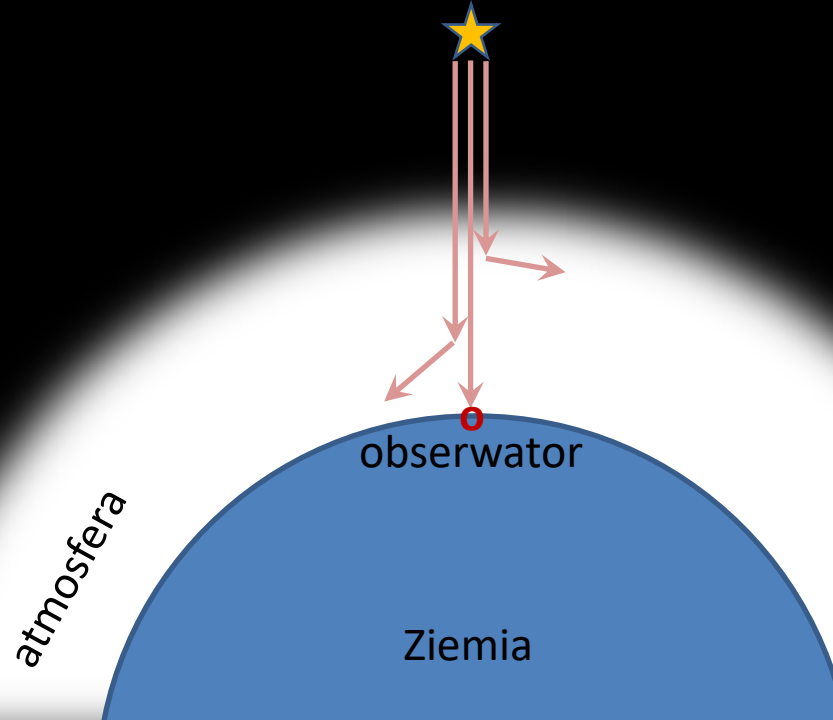
Wielkość tych zjawisk zależy m.in. od długości drogi światła w atmosferze.



wpływ atmosfery

Ekstynkcja atmosferyczna

- Światło (fotony) od gwiazdy (obiektu), ulega rozpraszaniu i absorpcji na atomach molekułach, pyle, kroplach wody, itd. Światło ulega „przygaszeniu” (**ekstynkcji**).
- Mniej fotonów dociera do obserwatora i jasność widoma gwiazdy wydaje się mniejsza.
- Im dłuższa droga światła w atmosferze, tym mocniejszy efekt osłabienia światła.



wpływ atmosfery

- Przyjmijmy, że droga ta dla obiektu w zenicie wynosi $s(z = 0) = 1$ (z – odległość zenitalna)
- I założmy, że **atmosfera jest płasko-równoległa**.

masa powietrzna*:

$$X(z) = \frac{s(z)}{s(z = 0)} = \frac{1}{\cos(z)} = \sec(z)$$

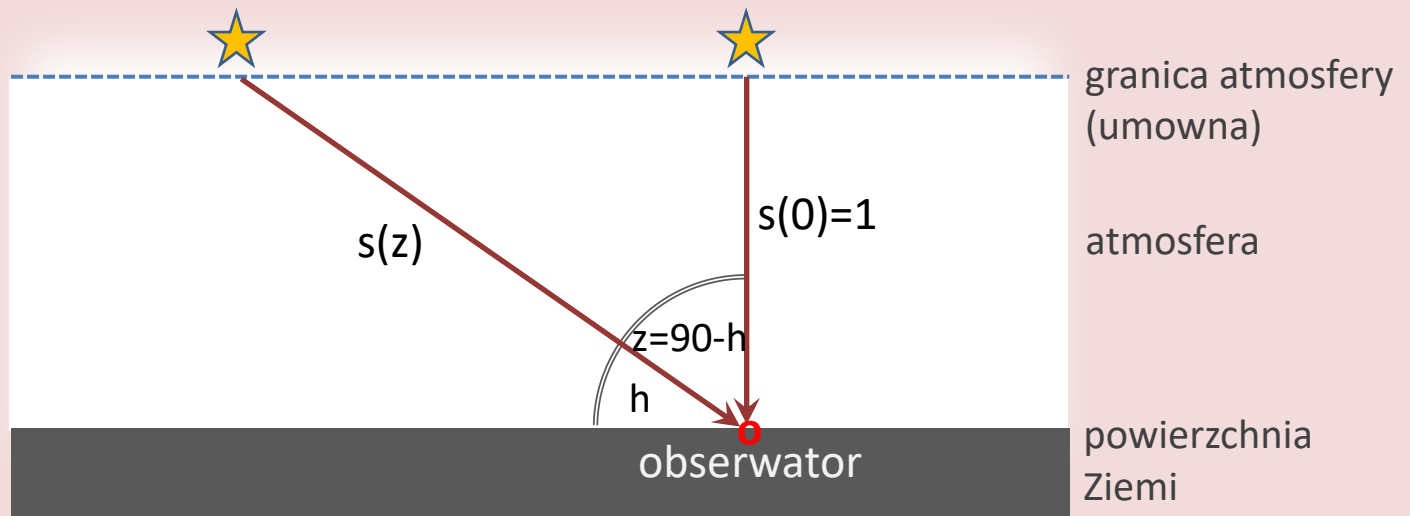
jasność widoma po uwzględnieniu ekstynkcji (**prawo Bouguer'a**):

$$m(z) = m_0 + kX(z)$$

m_0 – jasność widoma pozaatmosferyczna,

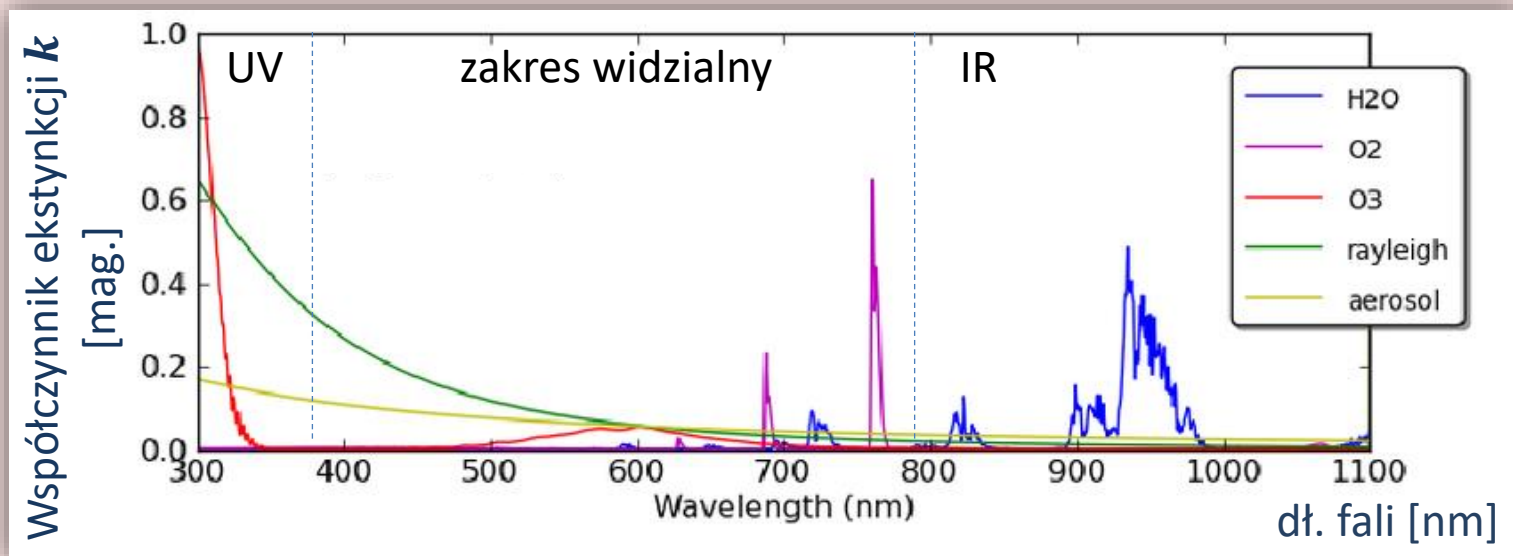
k – współczynnik ekstynkcji [mag] (podaje, o ile spada jasność gwiazdy w zenicie, $m(z = 0)$)

* inaczej masa
optyczna atmosfery



wpływ atmosfery

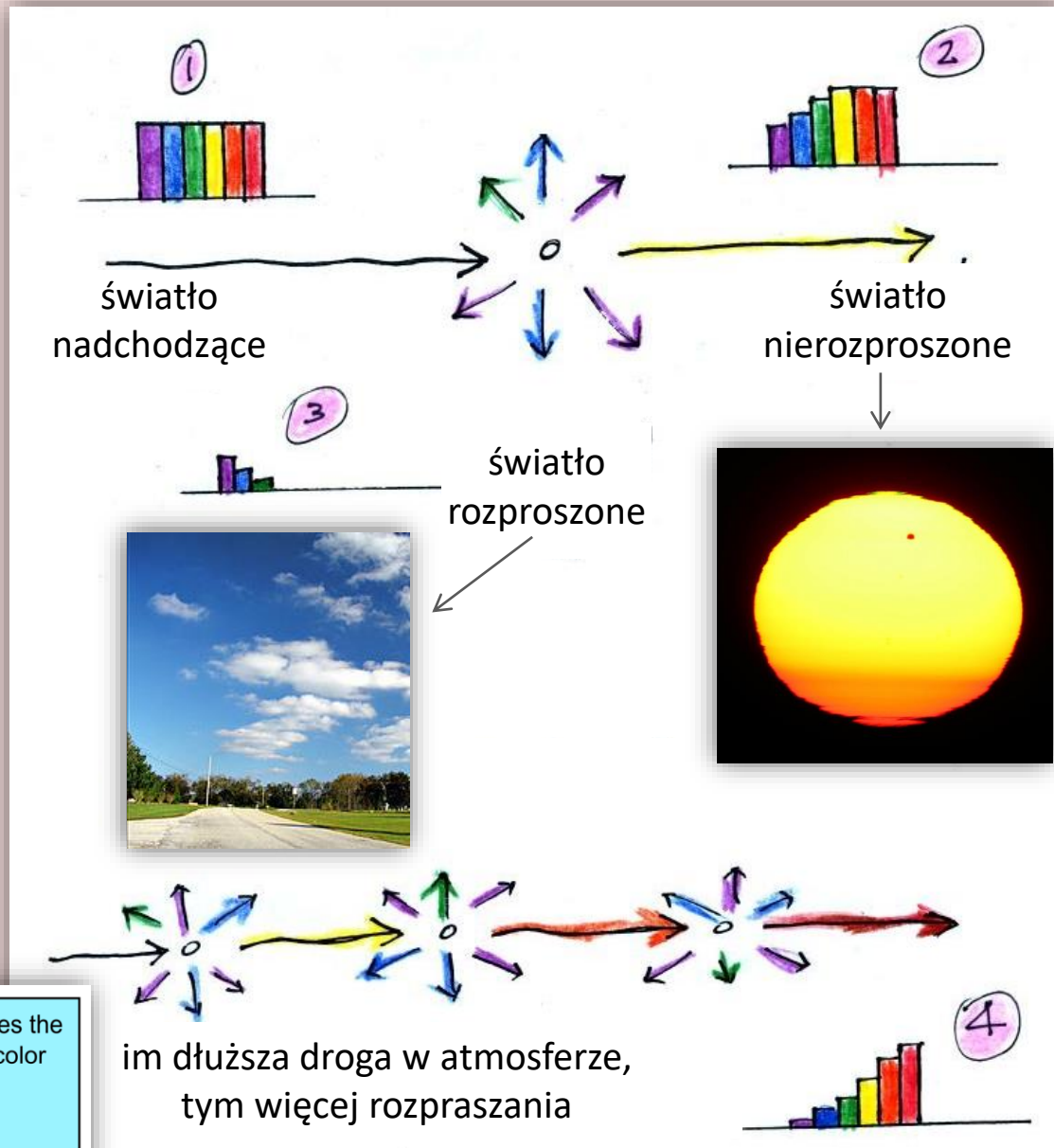
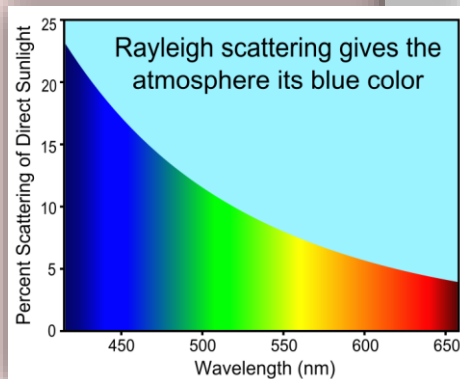
- Współczynnik ekstynkcji zależy od długości fali λ , $k(\lambda)$.
- Całkowita zależność współczynnika ekstynkcji k od długości fali λ jest złożona. Składają się na to różne elementy atmosfery.
 - **rozpraszania Rayleigha** (na molekułach) – zmienia kierunek fotonu po jego spotkaniu z molekułą atmosferyczną, silnie zależy od dł. fali λ ($\propto \frac{1}{\lambda^4}$)
 - **rozpraszanie Mie** (przez aerozole: pył, sadza, sól morską, smog, i in.) – zmienia kierunek fotonu po jego spotkaniu z cząstką aerozolu, słabo zależy od λ ($\propto \frac{1}{\lambda}$)
 - **absorbpcja** przez składniki atmosfery (głównie ozon, tlen, para wodna, dwutlenek węgla) – foton jest pochłaniany przez molekułę, zależność od λ jest złożona (wykres poniżej)



Składowe ekstynkcji

wpływ atmosfery

- W zakresie widzialnym, przy czystej atmosferze (mało aerozoli) w ekstynkcji dominuje rozpraszanie Rayleigha – silniej rozpraszane są fale krótkie.
- Skutek: widoma jasność w świetle niebieskim będzie bardziej wygaszana niż w czerwonym.
- W efekcie ekstynkcja spowoduje, że obiekt wyda się **przyciemniony i poczerwieniony**.
- Przykład:** Słońce nisko nad horyzontem wydaje się ciemniejsze i ma kolor czerwony. **Ponadto:** ponieważ w świetle rozporozszonym dominuje składowa niebieska, kolor dziennego nieba jest niebieski



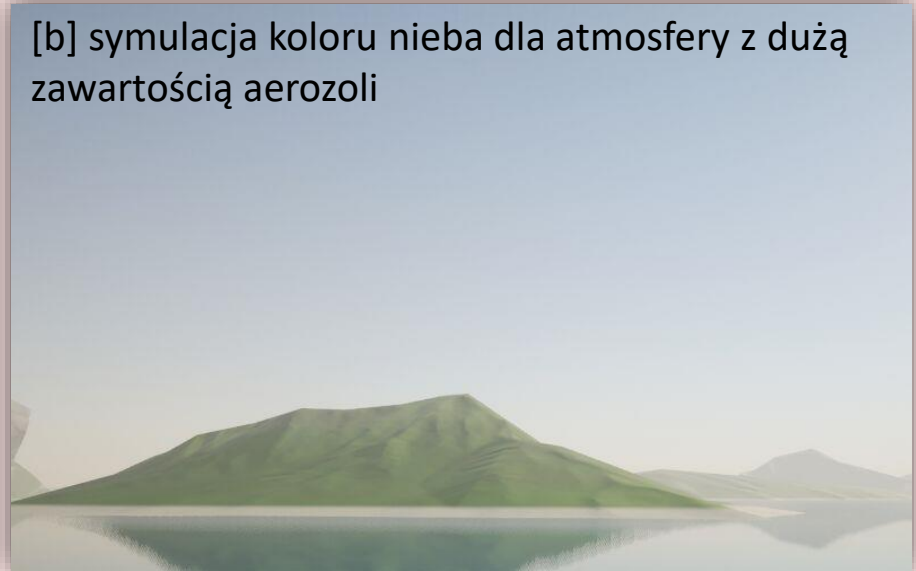
wpływ atmosfery

- Współczynnik ekstynkcji zależy nie tylko od długości fali λ , ale także zmienia się z czasem i kierunkiem na niebie. Zależy też od wysokości nad poziomem morza.
- Zmienna jest zawartość aerozoli i pary wodnej w atmosferze. Mogą występować chmury.
- Przy dużej obfitości aerozoli, w ekstynkcji dominujące staje się rozpraszanie Mie – fale krótsze nie są wyraźnie silniej rozpraszane niż fale długie (dotyczy zakresu widzialnego).
- Skutek: ekstynkcja jest większa niż przy czystej atmosferze, ale nie powoduje tak wyraźnego poczerwienienia.
- **Przykład:** kolor bezchmurnego nieba przy dużej obfitości aerozoli jest blado niebieski (mniejsza dominacja składowej niebieskiej w świetle rozproszonym)

[a] symulacja koloru nieba dla czystej atmosfery



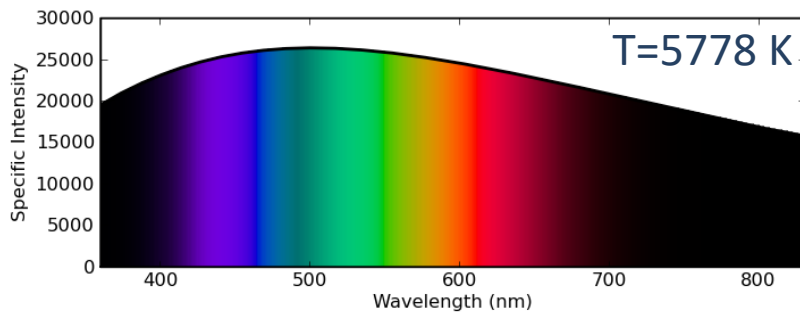
[b] symulacja koloru nieba dla atmosfery z dużą zawartością aerozoli



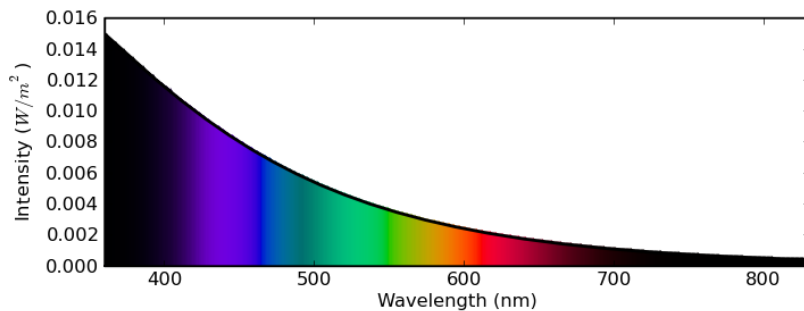
wpływ atmosfery

Kolor nieba i światła docierającego do powierzchni planety zależy od cech:

- atmosfery planety i
- gwiazdy, którą okrąża



Rayleigh Scattering
Illuminant 5778 K

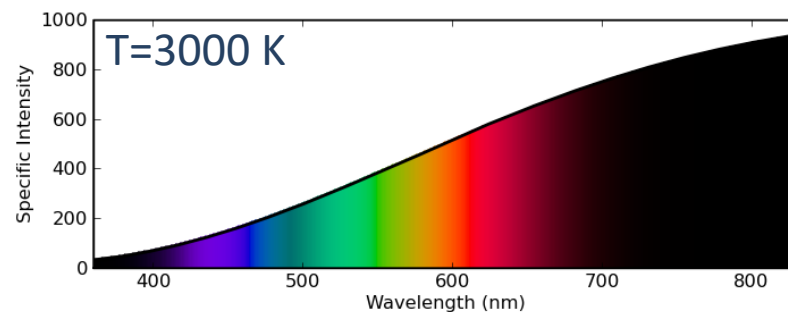


Słońce + Ziemia

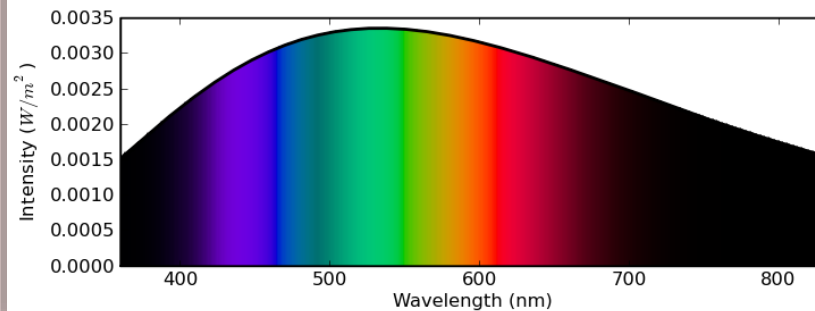
widmo gwiazdy

średni kolor nieba

widmo światła
rozproszonego



Rayleigh Scattering
Illuminant 3000 K

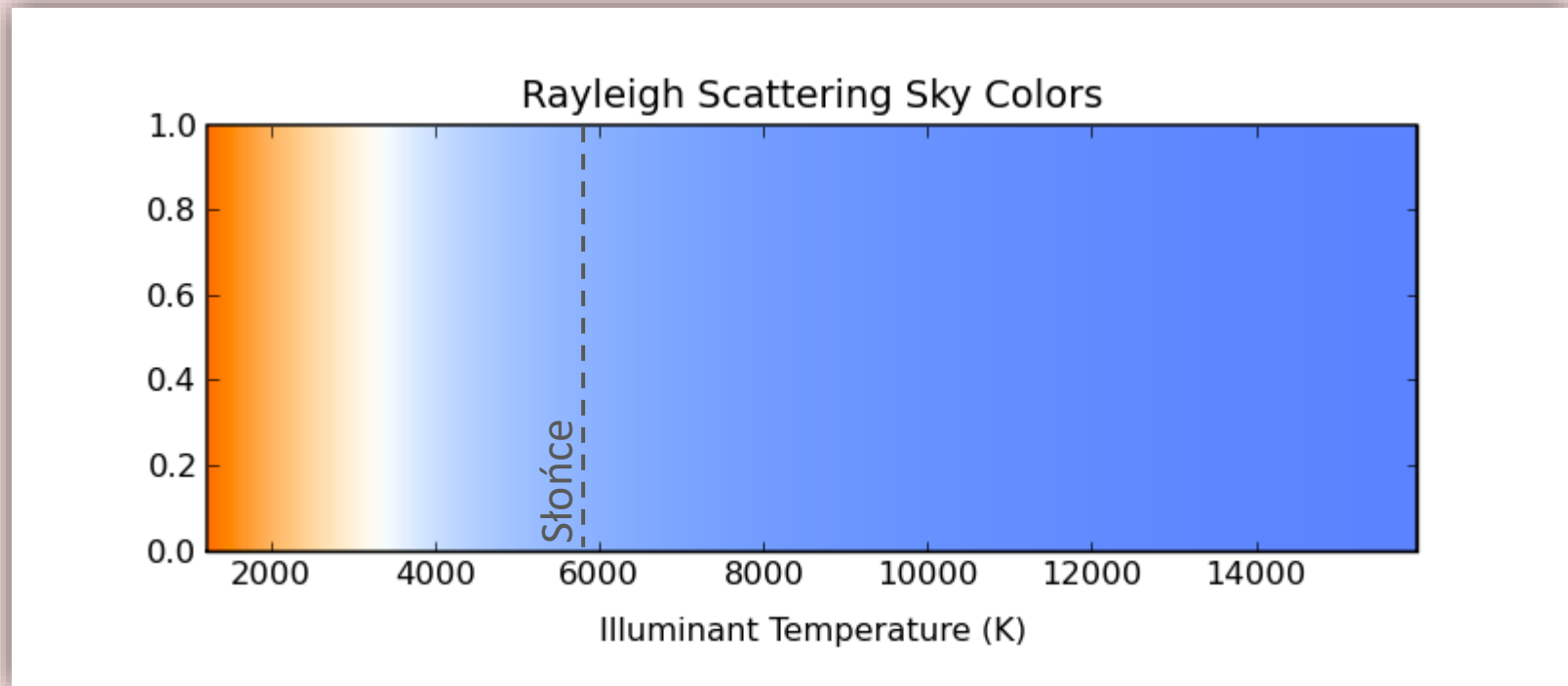


Proxima Centauri + Ziemia

wpływ atmosfery

Kolor nieba i światła docierającego do powierzchni planety zależy od cech:

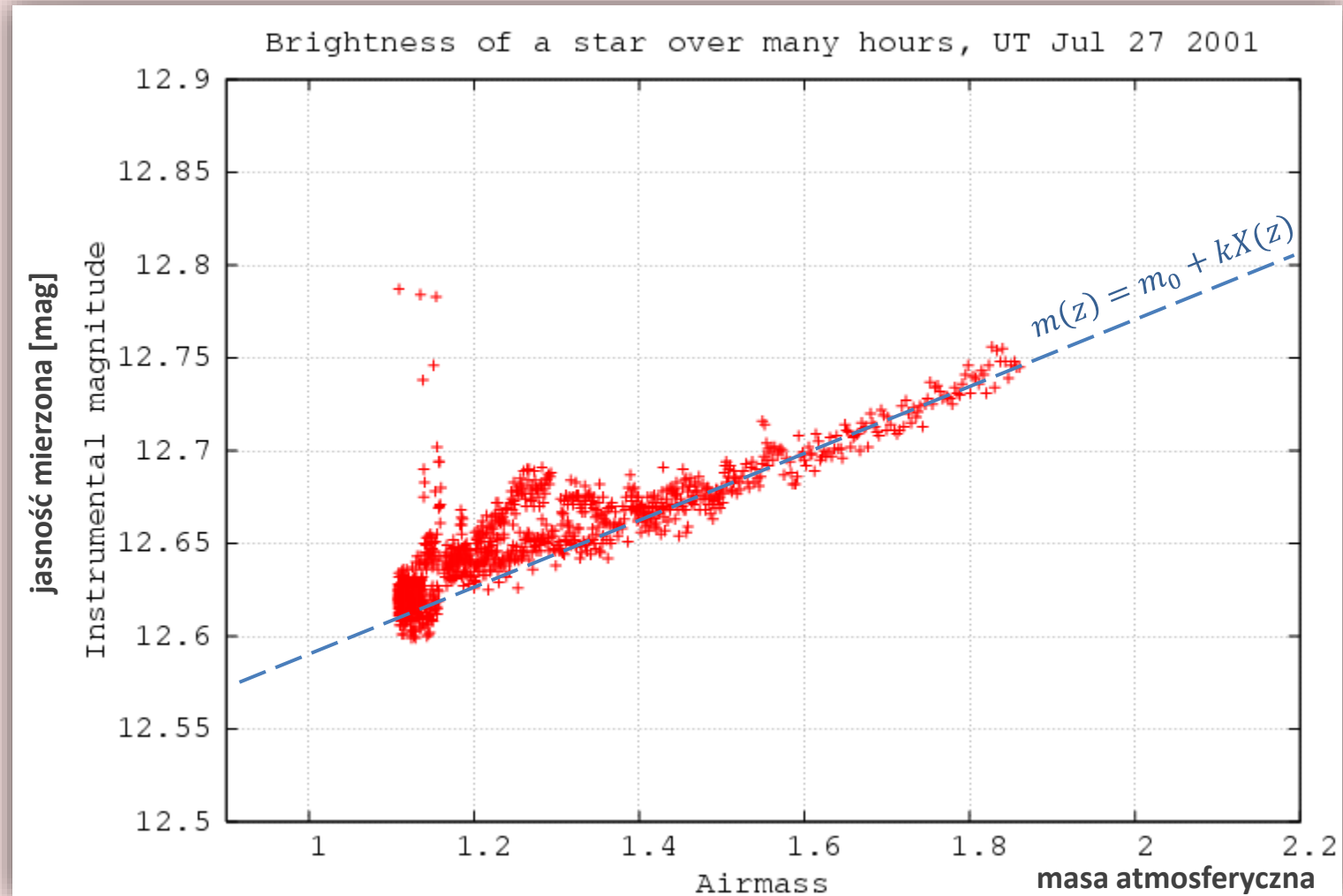
- atmosfery planety i
- gwiazdy, którą okrąża



Średni kolor nieba w zależności od temperatury „powierzchniowej” gwiazdy (dla atmosfery ziemskiej)

źródło: markkness.net/colorpy/ColorPy.html

wpływ atmosfery



Jak wyznaczyć współczynnik ekstynkcji k oraz jasność pozaatmosferyczną m_0 ?

Wykres przedstawia pomiary jasności gwiazdy wykonywane przez kilka godzin, czyli dla zmieniającej się wartości $X(z)$. Nachylenie dopasowanej do pomiarów prostej określa wartość współczynnika k . Dopasowanie da nam też wartość m_0 .

uwaga: taki pomiar można wykonać tylko jeśli k nie zmienia się w czasie; należy unikać pomiarów dla $X > 3$ ($z > 70^\circ$) (silny wpływ niższych warstw atmosfery – zmienność czasowo-przestrzenna)

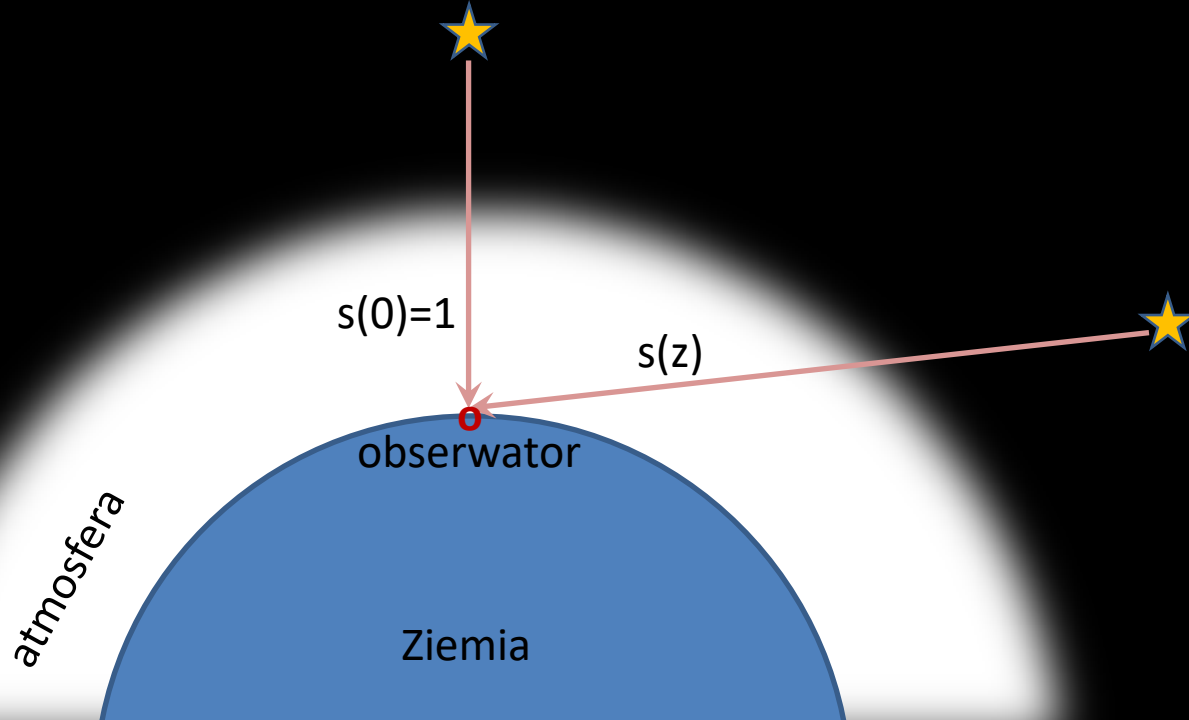
wpływ atmosfery

- I założmy, że atmosfera jest płasko-równoległa...

$$\text{masa atmosferyczna: } X(z) = \frac{1}{\cos(z)} = \sec(z)$$

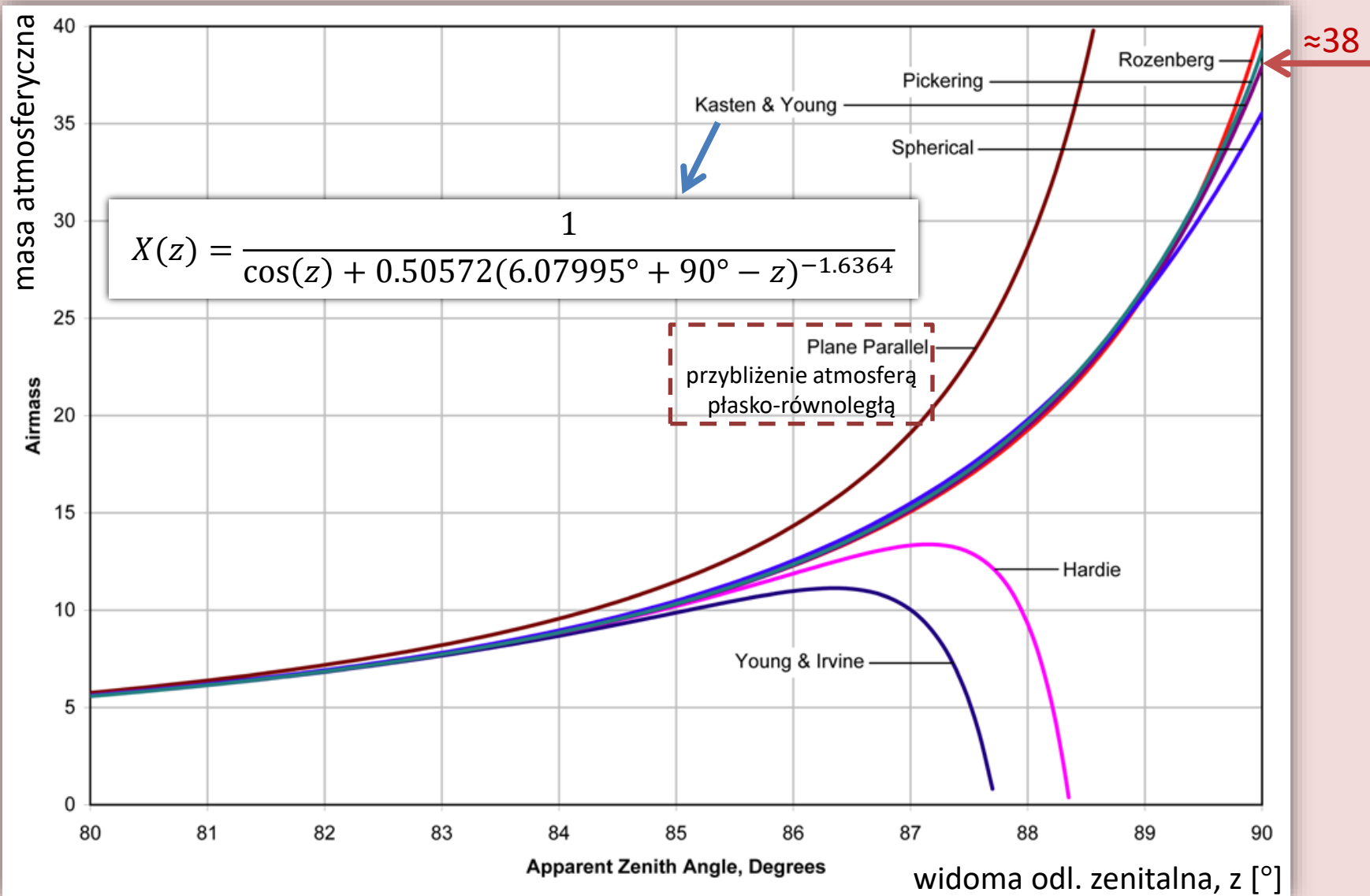
dla $z \rightarrow 90^\circ$ $X \rightarrow \infty$ (niefizyczne)

Problem wynika z błędnego założenia, że atmosfera jest płasko-równoległa. Nie jest.



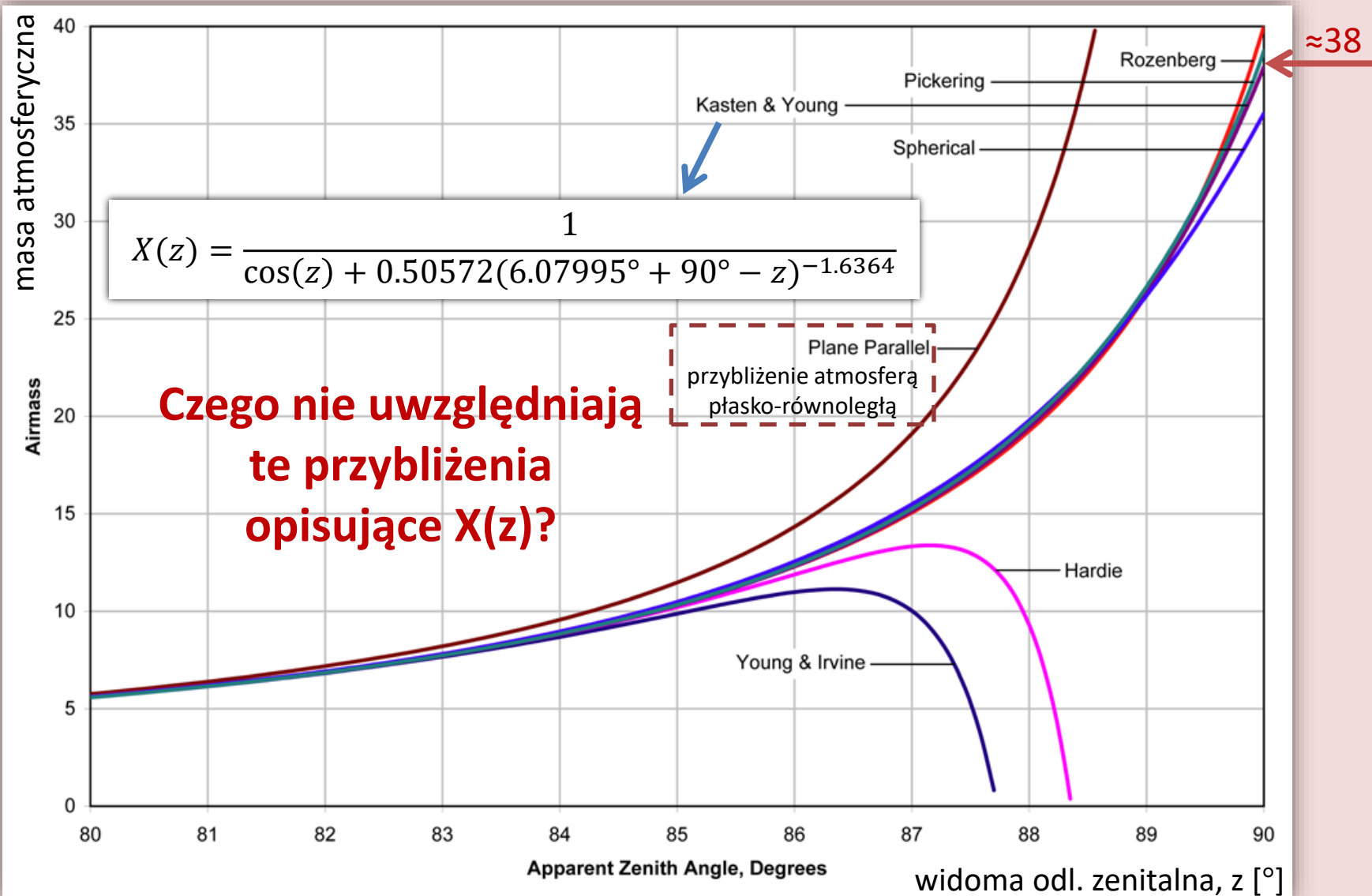
wpływ atmosfery

- Dla rzeczywistej atmosfery (sferycznej, spadek gęstości z wysokością) dostępne są bardziej realistyczne przybliżenia $X(z)$.



wpływ atmosfery

- Dla rzeczywistej atmosfery (sferycznej, spadek gęstości z wysokością) dostępne są bardziej realistyczne przybliżenia $X(z)$.



wpływ atmosfery

jasność widoma po uwzględnieniu ekstynkcji:

$$m(z) = m_0 + kX(z)$$

m_0 – jasność widoma pozaatmosferyczna,

k – współczynnik ekstynkcji [mag] (podaje, o ile spada jasność gwiazdy w zenicie, $m(z = 0)$)

Przykład:

Gwiazda ma $m_0 = 5.7 \text{ mag}$. Przyjmujemy wartość $k = 0.2 \text{ mag}$. Do jakiej wysokości nad horyzontem gwiazda nie jest widoczna dla oka nieuzbrojonego na skutek ekstynkcji? Jasność graniczna wynosi 6.5 mag.

Odległość zenitalna dla jakiej ekstynkcja osłabia jasność gwiazdy do 6.5 mag.:

$$6.5 = 5.7 + 0.2 \cdot X(z)$$

$$X(z) = 4.0$$

Przy takim X możemy skorzystać z przybliżenia płasko-równoległego*.

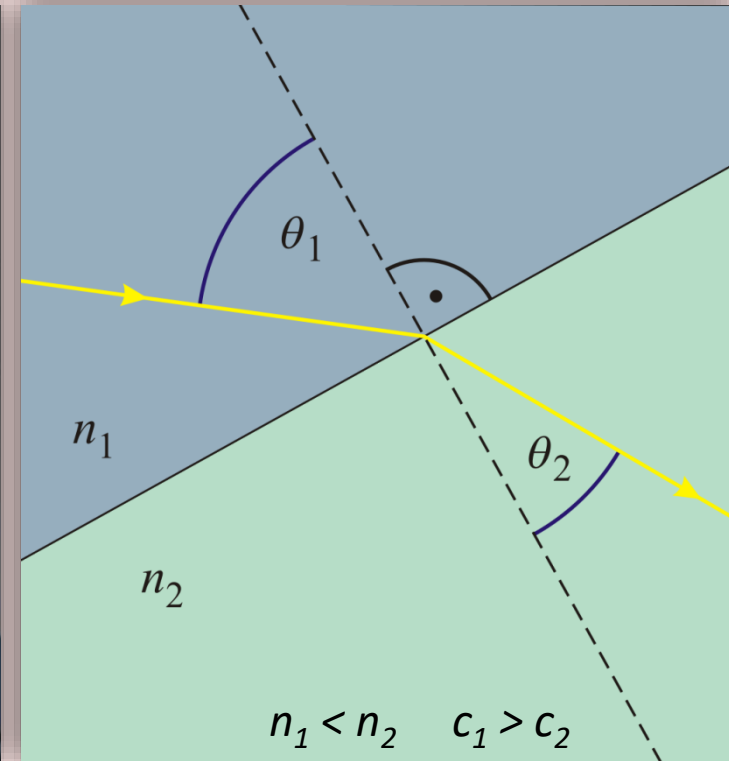
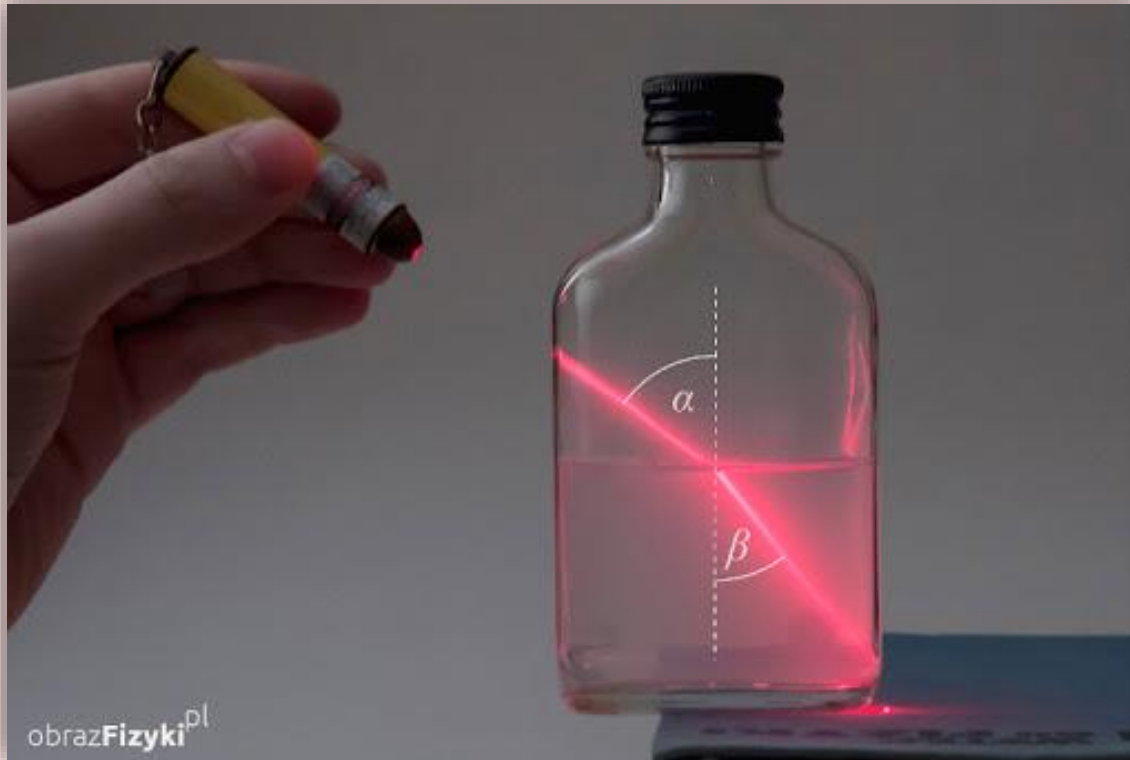
$$X(z) = 4.0 = \sec(z) \rightarrow z = 75^\circ.5 \rightarrow h = 14^\circ.5$$

Wniosek: poniżej $h = 14^\circ.5$ gwiazdy gołym okiem nie zobaczymy.

* - przybliżenie jest użyteczne do odległości zenitalnej około 75° (X około 4).

wpływ atmosfery

- Przejsie wiązki światła przez granicę ośrodków o różnej prędkości światła powoduje zmianę kierunku propagacji tej wiązki (załamanie, **refrakcja**, refraction).



- Wielkość załamania określa prawo Snelliusa.

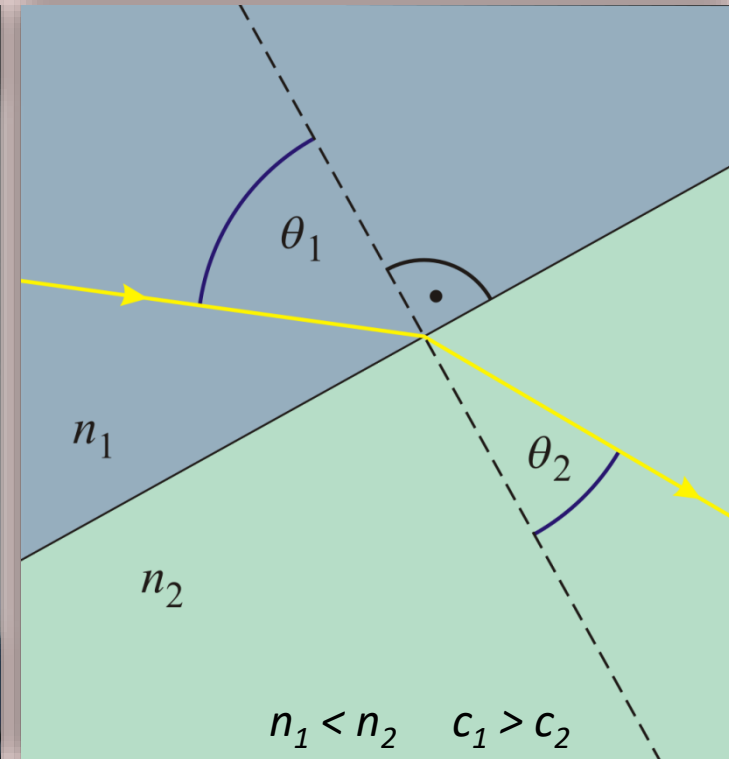
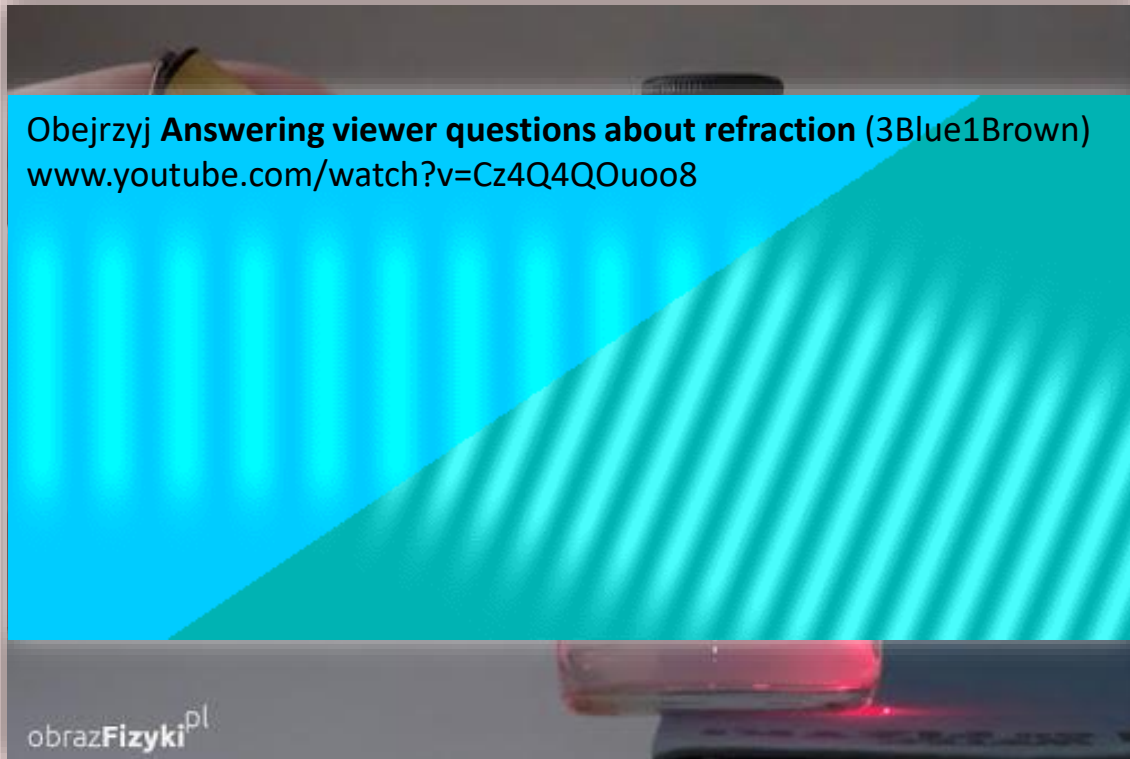
$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$$

n_1, n_2 – współczynniki załamania światła w danym ośrodku, θ_1, θ_2 – kąty padania

Zwykle ośrodki o większej gęstości mają większy współczynnik załamania (powietrze – woda, próżnia – powietrze), ale nie jest to regułą.

wpływ atmosfery

- Przejsie wiązki światła przez granicę ośrodków o różnej prędkości światła powoduje zmianę kierunku propagacji tej wiązki (załamanie, **refrakcja**, refraction).



- Wielkość załamania określa prawo Snelliusa.

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$$

n_1, n_2 – współczynniki załamania światła w danym ośrodku, θ_1, θ_2 – kąty padania

Zwykle ośrodki o większej gęstości mają większy współczynnik załamania (powietrze – woda, próżnia – powietrze), ale nie jest to regułą.

wpływ atmosfery

- Zakładamy, że atmosfera jest płasko-równoległa i składa się z jednej jednorodnej warstwy
- Prawo Snelliusa

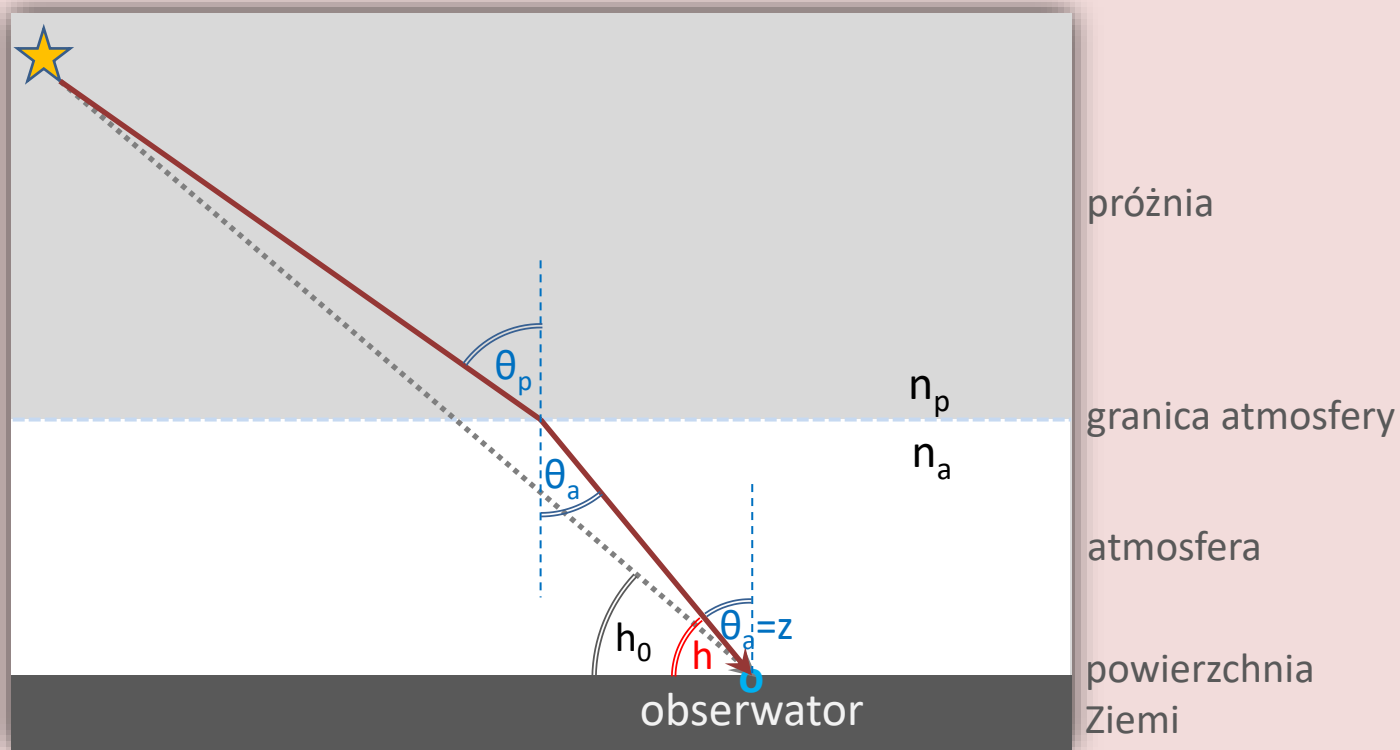
$$n_p \sin(\theta_p) = n_a \sin(\theta_a)$$

$n_p = 1.0$ (próżnia), $n_a = 1.000278$ (atmosfera), stąd $\theta_p > \theta_a$

Efekt: gwiazda (obiekt) będzie widoczna pozornie na wyższej wysokości h (wysokość pozorna) niż wysokość prawdziwa h_0 (bez atmosfery):

$$h_0 < h \quad z_0 > z$$

$$z_0 \equiv \theta_p \quad z \equiv \theta_a$$



wpływ atmosfery

O ile refrakcja zmienia położenie obiektów?

- Przyjmujemy, że gęstość atmosfery spada z wysokością nad powierzchnią Ziemi.
- Możemy ją podzielić na m jednorodnych warstw o gęstości spadającej z wysokością n.p.m.
Dla kolejnych sąsiednich warstw:

$$n_0 \sin(z_0) = n_1 \sin(z_1)$$

$$n_1 \sin(z_1) = n_2 \sin(z_2)$$

...

$$n_k \sin(z_k) = n_{k+1} \sin(z_{k+1})$$

...

$$n_{m-1} \sin(z_{m-1}) = n \sin(z)$$

Wstawiamy kolejno równania jedno do drugiego i dostaniemy:

$$n_0 \sin(z_0) = n \sin(z) \quad (1)$$

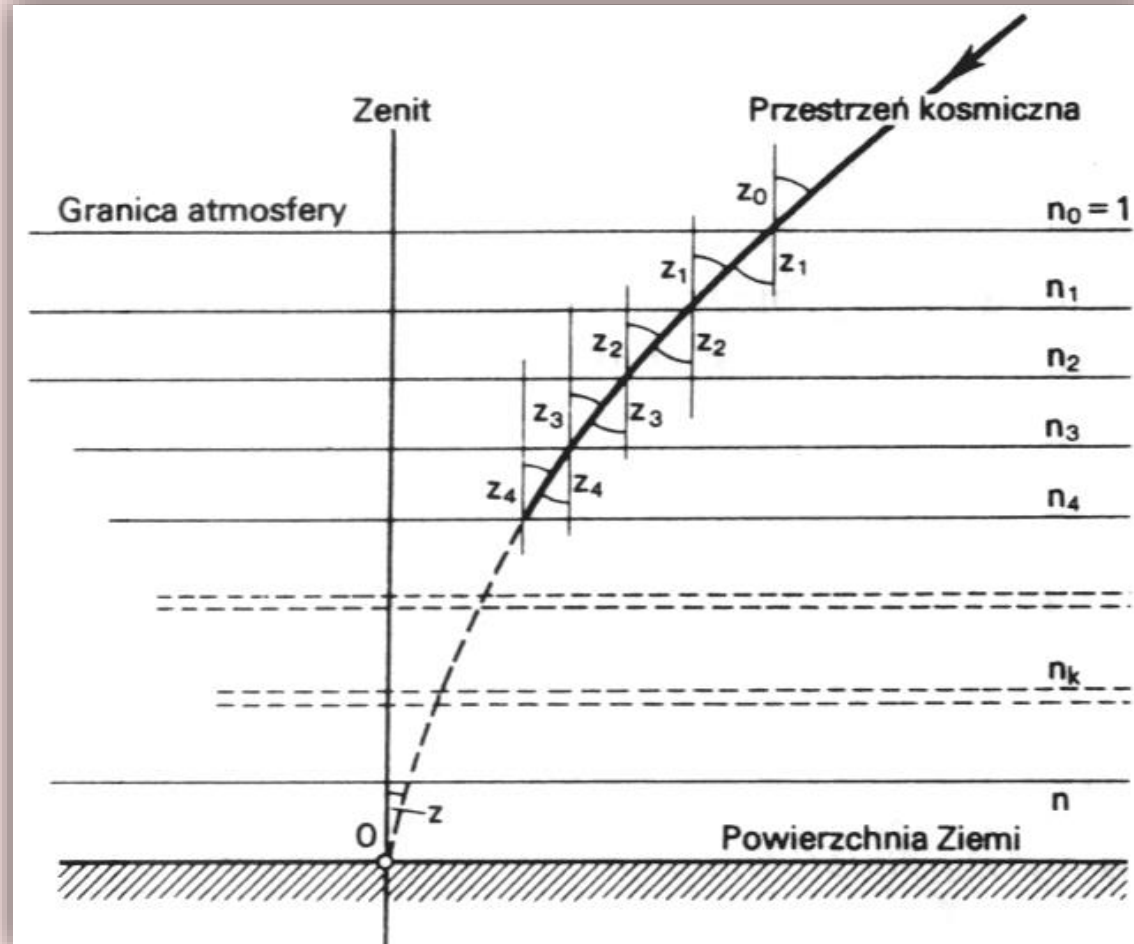
$$n_0 = 1 \quad (\text{próżnia})$$

Kąt refrakcji, R :

$$R = z_0 - z = h - h_0 \quad (2)$$

z – pozorna odległość zenitalna

z_0 – prawdziwa odległość zenitalna



wpływ atmosfery

Wykorzystując równania 1 i 2 możemy zapisać:

$$n \sin(z) = \sin(z_0) = \sin(R + z) = \sin(R)\cos(z) + \sin(z)\cos(R) \approx R\cos(z) + \sin(z)$$

zakładamy tu, że R jest małym kątem i wtedy: $\sin(R) \approx R$ [rad], $\cos(R) \approx 1$

$$n \sin(z) \approx R\cos(z) + \sin(z) \quad / \cos(z)$$

$$n \operatorname{tg}(z) \approx R + \operatorname{tg}(z)$$

$$R[\text{rad}] \approx (n - 1) \operatorname{tg}(z)$$

dla atmosfery $n = 1.000278$

$$R[^\circ] \approx 0.01593 \operatorname{tg}(z)$$

$$R["] \approx 57.3 \operatorname{tg}(z)$$

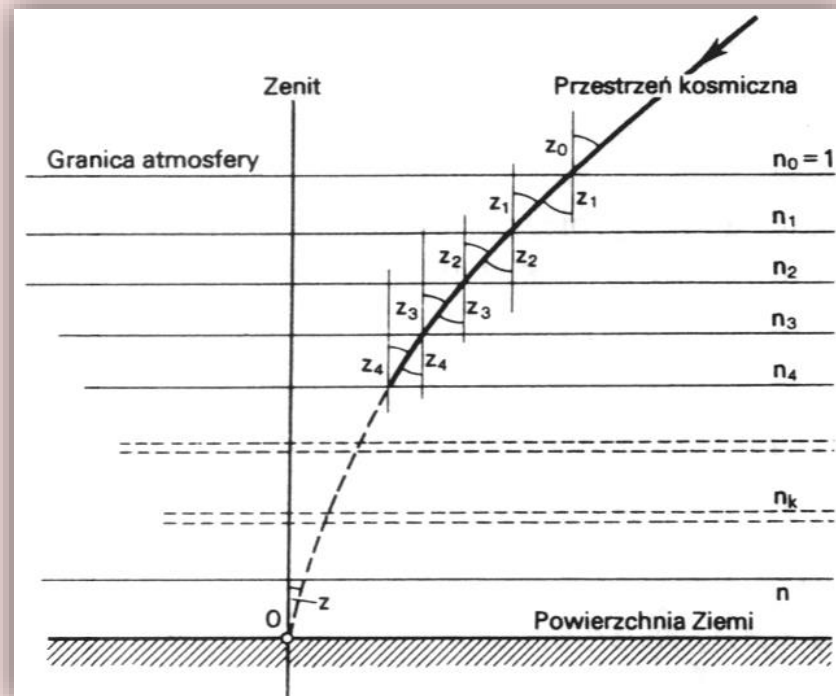
Uwaga:

dla $z \rightarrow 90^\circ$ $R \rightarrow \infty$ (niefizyczne)

To efekt założenia, że atmosfera jest płasko-równoległa.

Nie jest.

Powyższa zależność $R(z)$ dobrze sprawdza się dla $z < 70^\circ$.



wpływ atmosfery

Dla uzyskania bardziej rzeczywistej zależności $R(z)$ należy uwzględnić:

- sferyczny kształt atmosfery
- rzeczywisty spadek gęstości z wysokością n.p.m.
- wpływ temperatury i ciśnienia na gęstość atmosfery
- wpływ wilgotności powietrza.

Przykłady dwóch wyrażeń na R sprawdzających się w pełnym zakresie wysokości nad horyzontem:

- Bennett (1982), h – wysokość pozorna w [°], R w [']

$$R(h) = \text{ctg} \left(h + \frac{7.31}{h + 4.4} \right)$$

- Sæmundsson, Þorsteinn (1986), h_0 – wysokość prawdziwa w [°], R w [']

$$R(h_0) = 1.02 \text{ctg} \left(h_0 + \frac{10.3}{h_0 + 5.11} \right)$$

Oba wyrażenia obowiązują dla ciśnienia $P=1010$ hPa i temperatury $T=10$ °C.

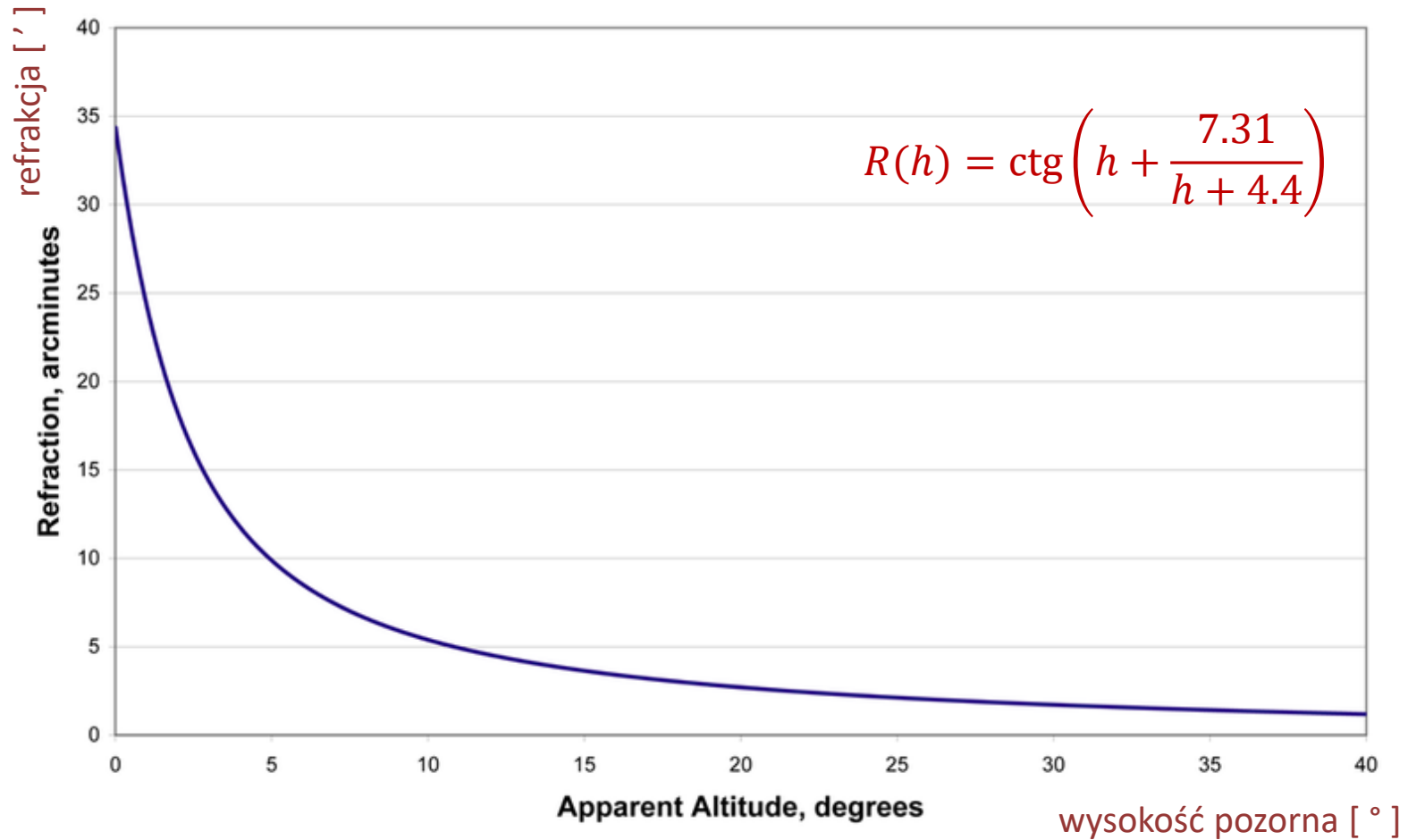
Dla innych temperatur powyższe wyrażenia trzeba pomnożyć przez czynnik:

$$\frac{P}{1010} \frac{283}{273 + T}$$

P w [hPa], T w [°C]

wpływ atmosfery

Refraction vs. Altitude, Bennett (1982)



wpływ atmosfery

Przykład:

Obiekt ma wysokość prawdziwą $h_0 = -0^\circ.5$. Czy po uwzględnieniu refrakcji będzie widoczny nad horyzontem?

Korzystamy z Sæmundsson, Þorsteinn (1986):

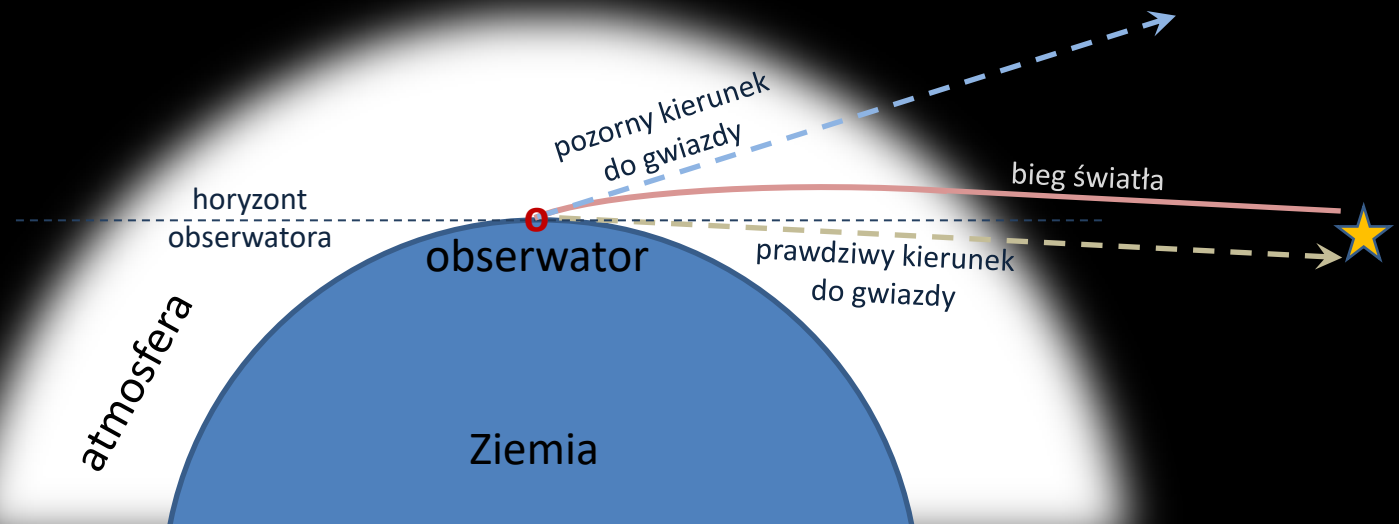
$$R(h_0) = 1.02 \operatorname{ctg} \left(h_0 + \frac{10.3}{h_0 + 5.11} \right)$$

$$R = 33'.69 = 0^\circ.5615$$

$$h = h_0 + R = 0^\circ.0615 = 3'.69 \quad (\text{obiekt widoczny nad horyzontem}^*)$$

Wniosek: refrakcja przyspiesza wschody i opóźnia zachody obiektów.

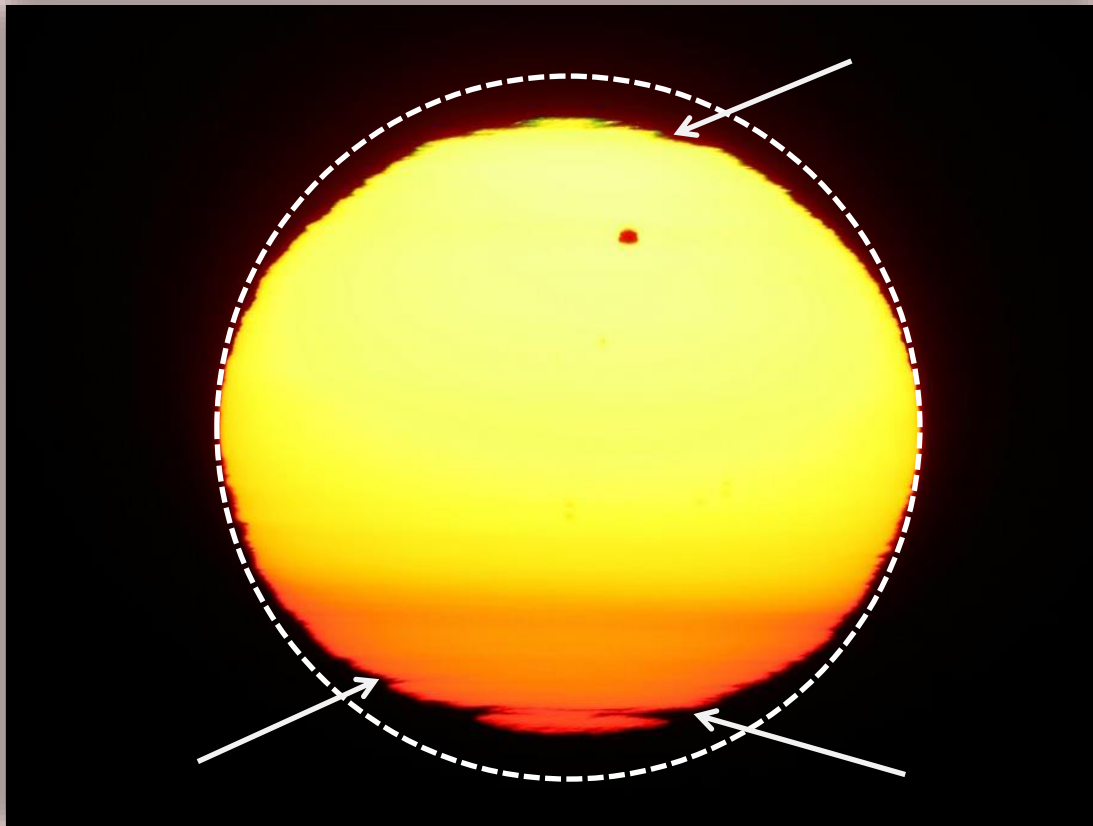
* uwaga na ekstynkcję i bardziej złożoną rzeczywistość z refrakcją (następny slajd)



wpływ atmosfery

Wyższy poziom złożoności:

- Refrakcja zależy od stanu atmosfery na całej długości wiązki światła
- Dla małych wysokości ($<5^\circ$), a szczególnie dla $h \approx 0^\circ$, na wartość R silnie wpływa lokalny (chwilowy) stan niższych warstw atmosfery.
- R dla takich wysokości staje się silnie zmienna i możliwe są jedynie jej zgrubne oszacowania. Przez to bardzo dokładne podanie np. momentu wschodu Słońca nie jest możliwe. Dokładność wyznaczenia tego momentu może być nie lepsza niż kilka minut.



Zniekształcenia tarczy Słońca przez refrakcję silnie i chaotycznie zmienną z wysokością nad horyzontem

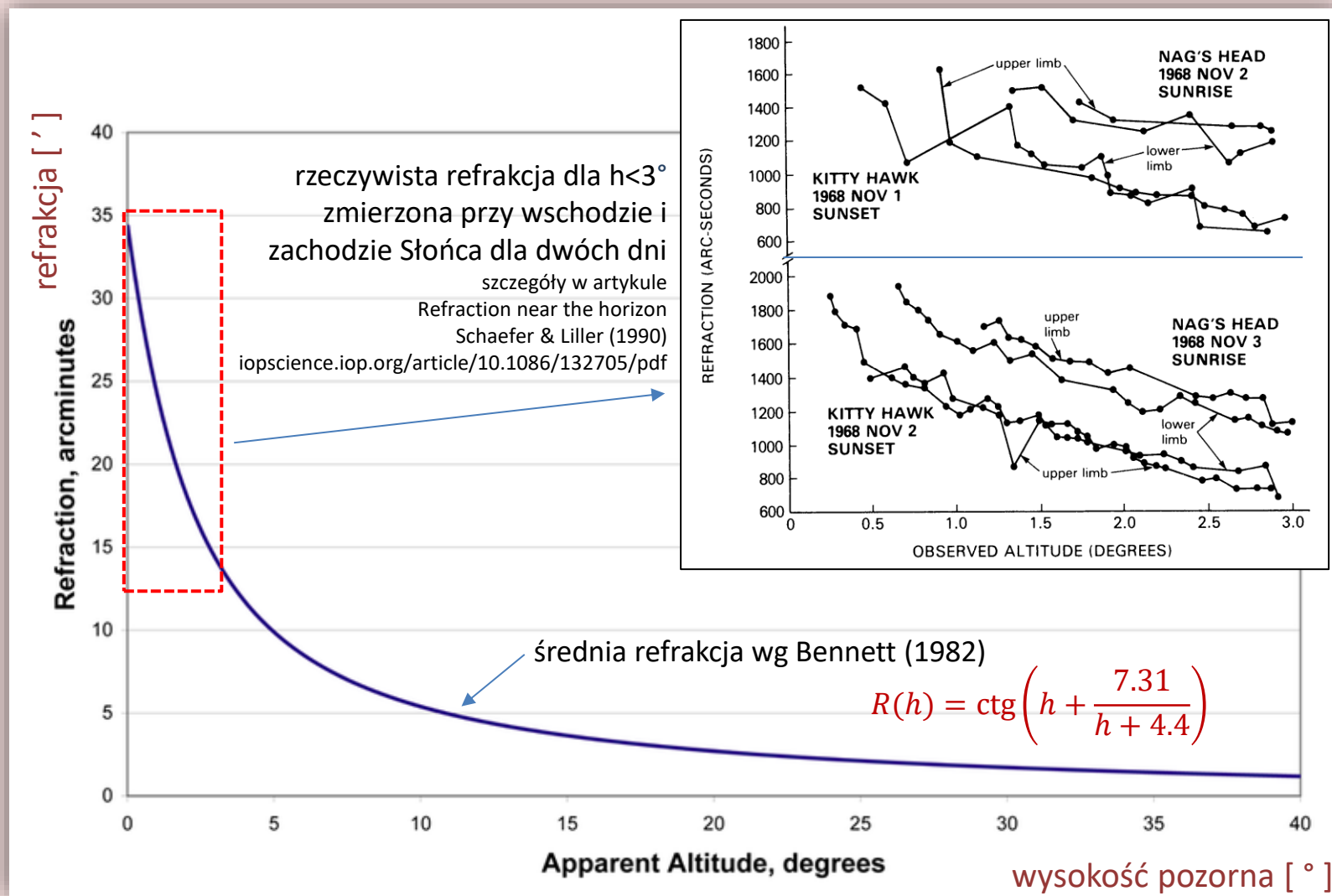
artykuł dla zainteresowanych:

Sunset science. IV. Low-altitude refraction

Young (2004)

iopscience.iop.org/article/10.1086/420806/pdf

wpływ atmosfery



Porównanie refrakcji rzeczywistej z średnią opisaną przybliżeniem analitycznym.
Refrakcja rzeczywista zmienia się z czasem i nie zawsze wzrasta monotonicznie z malejącą wysokością nad horyzontem.

wpływ atmosfery



Refrakcyjna deformacja sierpa księżycowego w trakcie jego zachodu (fot. Petr Horálek)

wpływ atmosfery

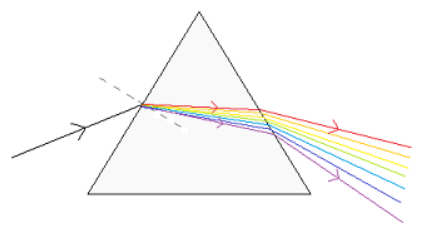
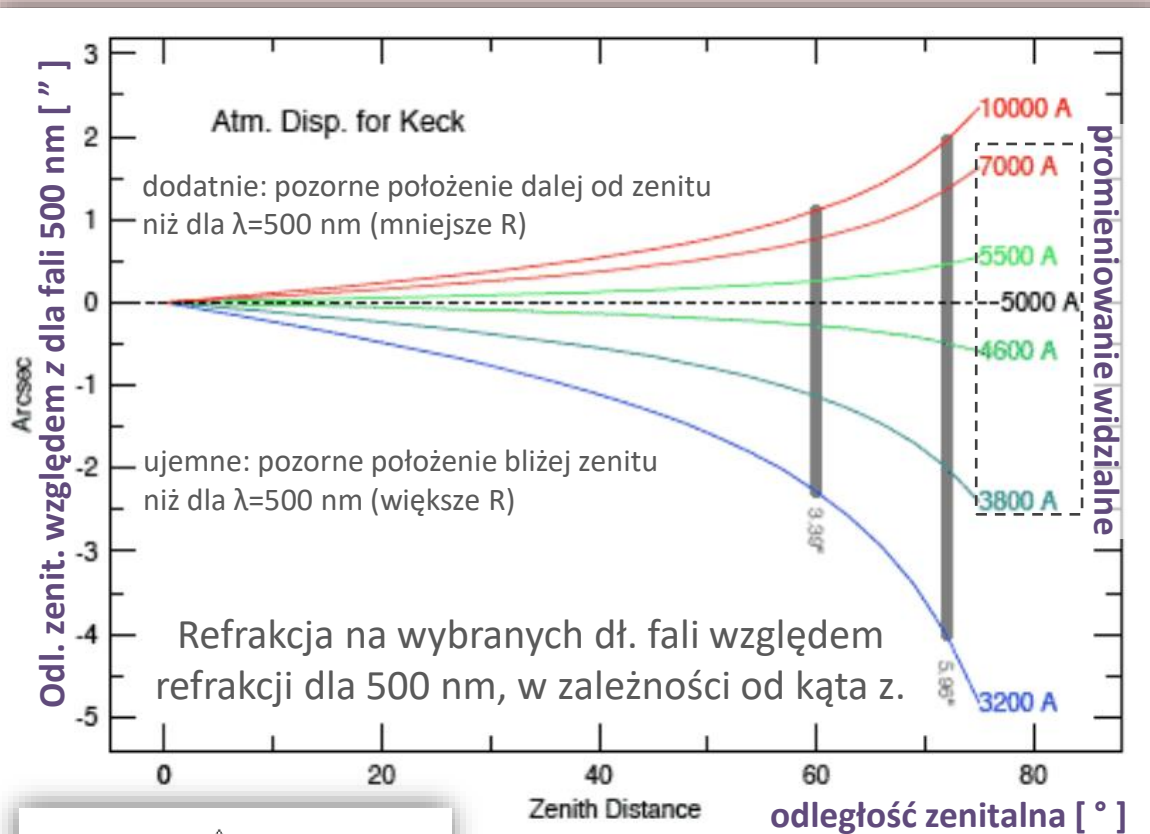


Refrakcyjna deformacja ścieżek gwiazd w trakcie ich zachodu (fot. Babak Tafreshi, film: youtu.be/E11-07WfdjU)
Widoczne są też efekty ekstynkcji: spadek jasności widomej i poczerwienienie nasilają się wraz z malejącą wysokością h

wpływ atmosfery

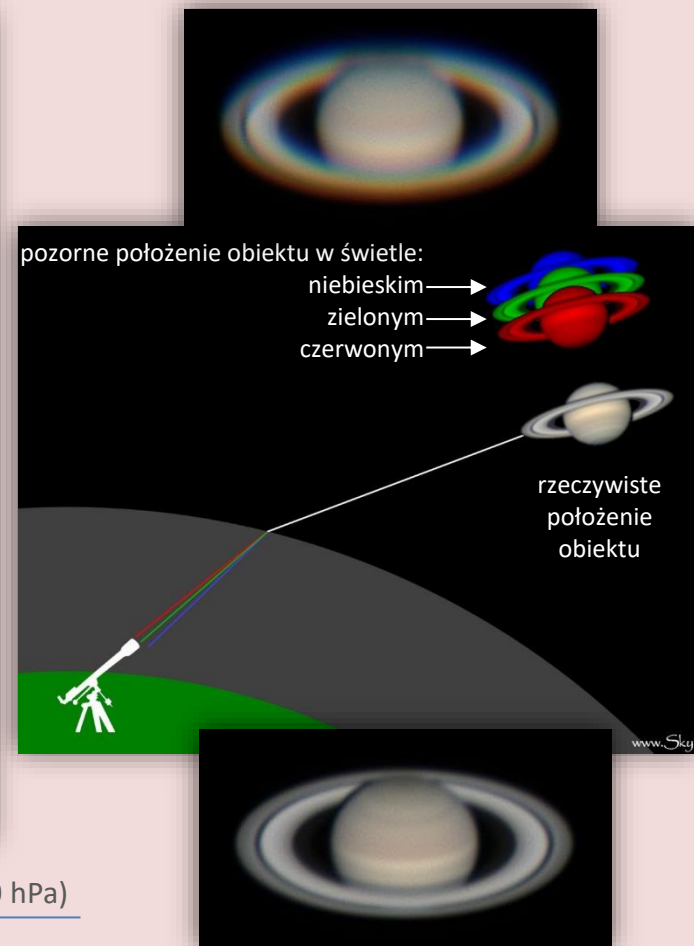
Wyższy poziom złożoności:

- Refrakcja zależy też od dł. fali światła (patrz tabela poniżej). Kąt refrakcji jest większy dla fal krótszych (**rozszerzenie/dispersja atmosferyczna światła**). W efekcie rejestrowany obraz obiektu jest rozmyty i posiada „kolorowe obramowanie” *.



λ [nm]	R ["] dla $z=45^\circ$ (0 °C, 1010 hPa)
400	58.3
550	57.3
700	56.9

* efekt jest nieznaczny



* efekt jest zbyt mały, aby go zobaczyć gołym okiem

wpływ atmosfery

przykłady dyspersji

dolna (dohoryzontalna) część obiektu jest bardziej czerwona,
górną (dozenitalną) jest bardziej niebieska.

(wszystkie zdjęcia mają górną krawędź skierowaną do zenitu)

Venus



Saturn



Ganimedes



Gwiazda Polarna



zenit



horyzont

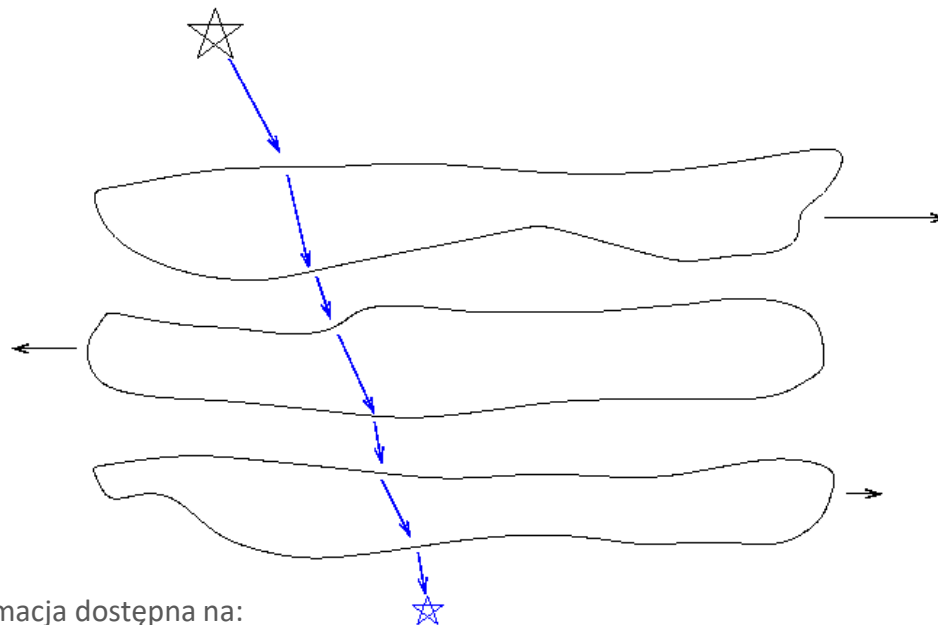


wpływ atmosfery

Atmosfera nie jest środowiskiem stabilnym. Ruchy turbulentne i drobnoskalowe fluktuacje gęstości w atmosferze powodują chaotycznie zmienną refrakcję w mniejszej skali przestrzennej i czasowej. Efektem jest:

- **scytylacja** (scintillation) – migotanie, chaotyczne zmiany jasności (barwy) obiektu w skali czasowej poniżej 1 s
- **seeing** (astronomiczny) – drobne, chaotyczne przesunięcia prowadzące do rozmycia i zmiennego zniekształcenia obrazu – obiekt wydaje się mniej ostry i falujący

Scytylacja i seeing zależą od stanu atmosfery, wysokości miejsca obserwacji nad poziomem morza i wysokości obserwowanego obiektu nad horyzontem.



animacja dostępna na:

spiff.rit.edu/classes/phys445/lectures/atmos/single_anim.gif

wpływ atmosfery

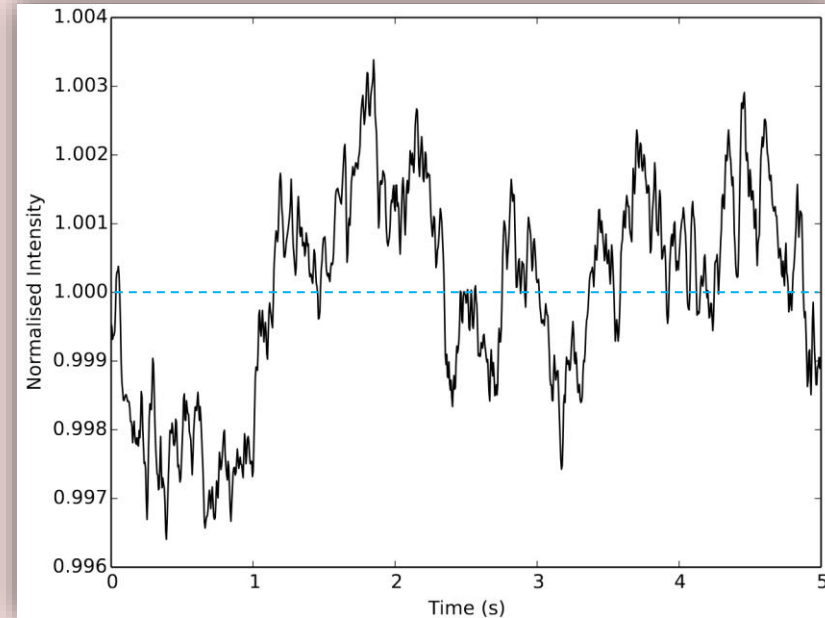


Syriusz – efekty turbulencji atmosferycznej

(film dostępny na en.wikipedia.org/wiki/File:Szintillation.Sirius.480.webm)

wpływ atmosfery

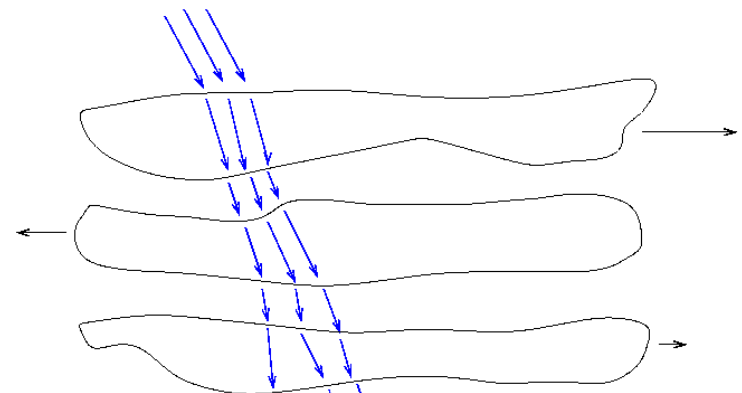
- Scyntyłacja jest zjawiskiem widocznym gołym okiem (migotanie gwiazd).
- Scyntyłacja ogranicza możliwości fotometrii naziemnej (powoduje szum w pomiarach).
- Seeing zobaczymy w obserwacjach teleskopowych:
 - przy krótkich czasach ekspozycji (<100 milisekund), obraz gwiazdy składa się z zestawu plamek (animacja na następnym slajdzie)
 - przy dłuższym czasie ekspozycji, te chwilowe, zmienne w czasie plamki zlewają się w rozmyty dysk o większym rozmiarze kątowym
 - miarą seeingu jest rozmiar kątowy tego dysku.
- Seeing jest istotnym ograniczeniem zdolności rozdzielczej obserwacji naziemnych.
- Dobry seeing: <2", zły seeing: >4-5".



Krzywa jasności gwiazdy. Pozorne zmiany jasności wywołane są przez scyntyłację. Jasność bez scyntyłacji pokazuje prosta linia przerywana.



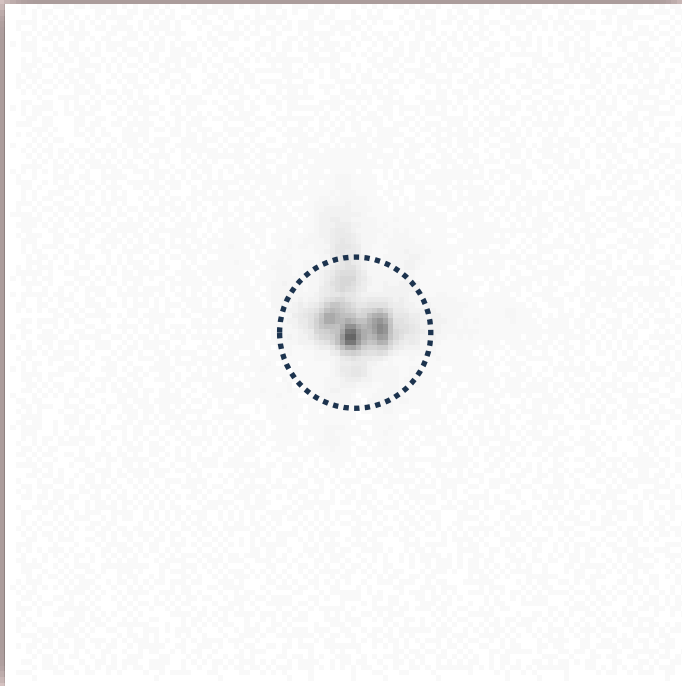
gwiazda, różne czasy ekspozycji



animacja dostępna na: ☆ ☆ ☆

spiff.rit.edu/classes/phys445/lectures/atmos/multi_anim.gif

wpływ atmosfery



Gwiazda ϵ Aql, film w zwolnionym tempie

animacja dostępna na:

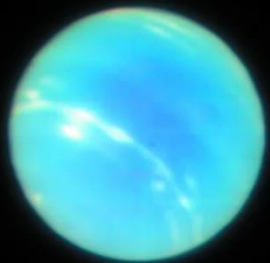
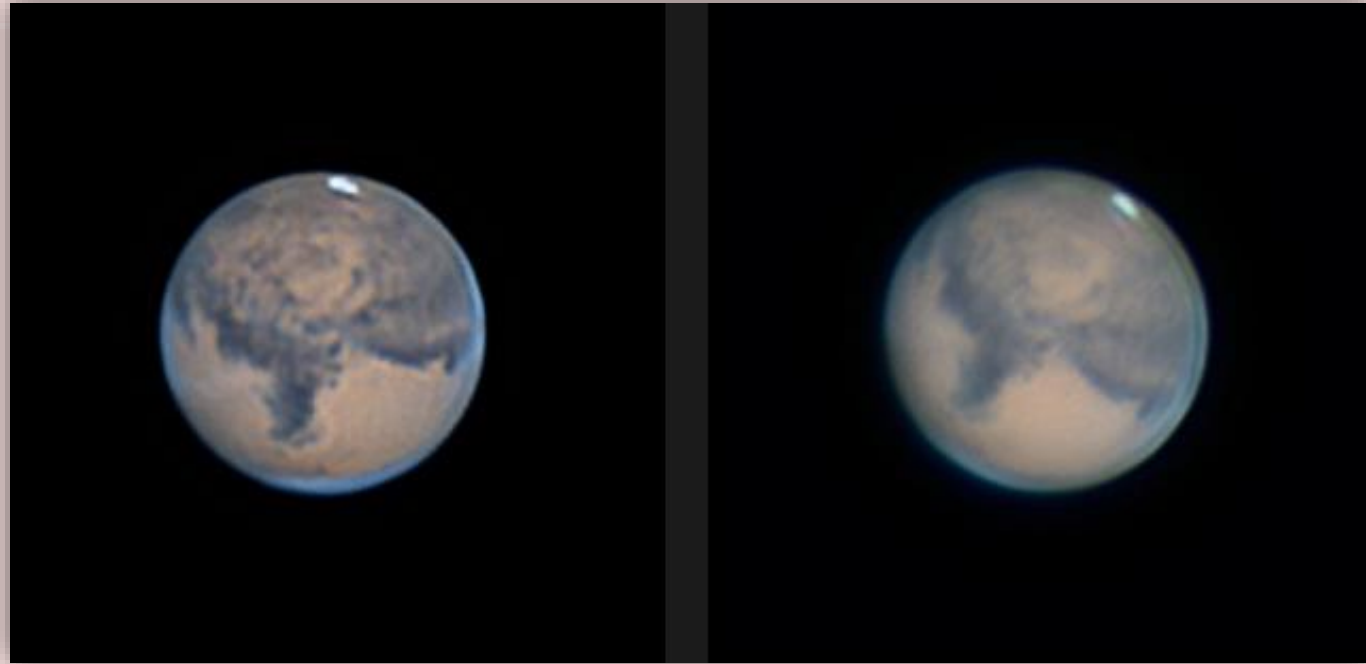
commons.wikimedia.org/wiki/File:Eps_aql_movie_not_2000.gif



Gwiazda ζ Boo. U góry: obraz o bardzo krótkim czasie ekspozycji, na dole: złożenie najlepszych obrazów o krótkiej ekspozycji w celu usunięcia seeingu (tzw. lucky imaging, zobacz: en.wikipedia.org/wiki/Lucky_imaging).

wpływ atmosfery

Mars, dobry i zły seeing



Adaptive optics



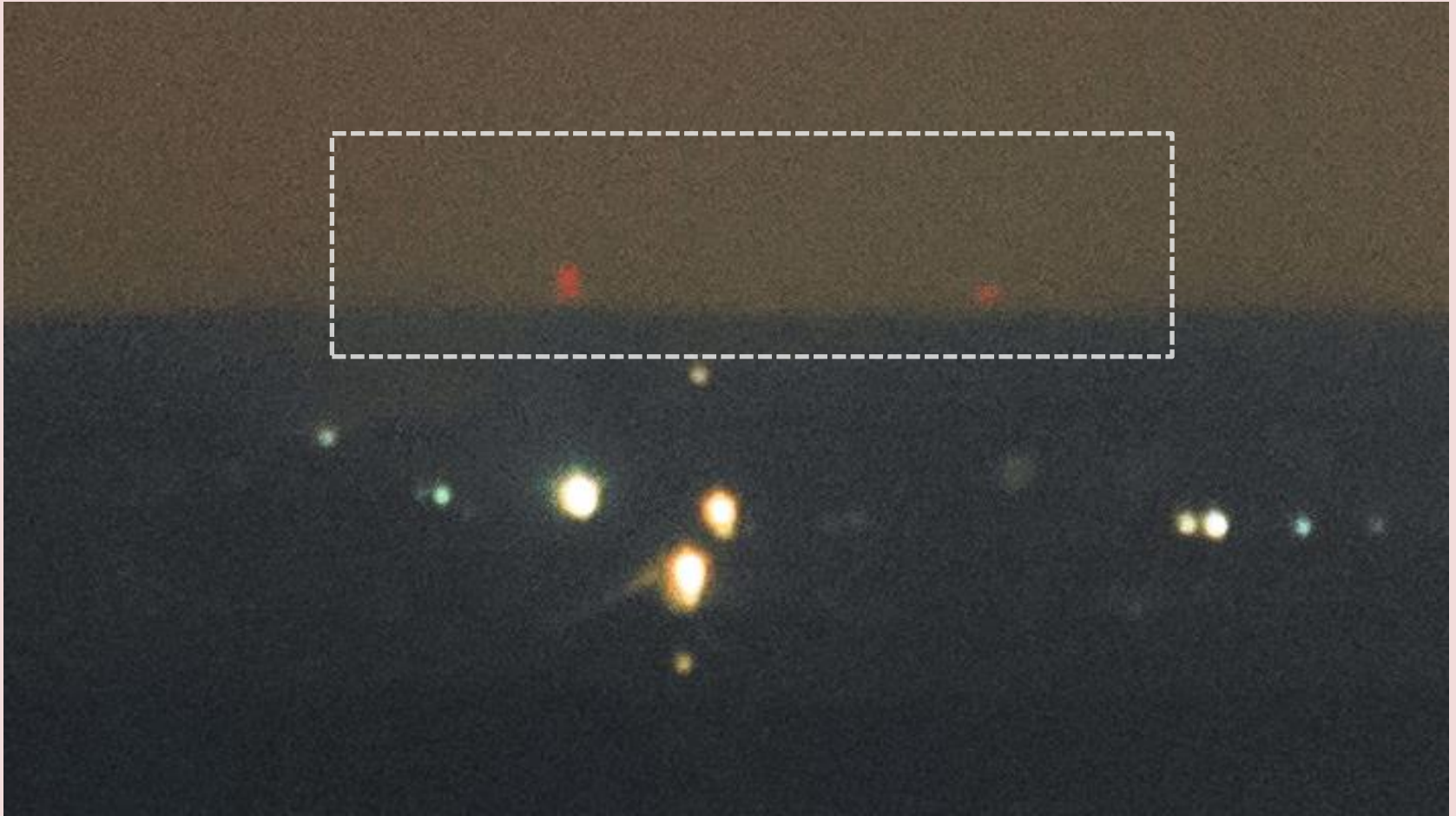
No Adaptive optics

W celu zminimalizowania efektu seeingu stosuje się optykę adaptacyjną.

Przykład: zdjęcie Neptuna wykonane z włączoną i wyłączoną optyką adaptacyjną na teleskopie VLT.

(na czym polega optyka adaptacyjna? zobacz: en.wikipedia.org/wiki/Adaptive_optics)

wpływ atmosfery



Refrakcja wpływa też na widoczność obiektów naziemnych.

Zmienna refrakcja atmosferyczna powodująca zmiany widoczności wieżowców warszawskich (odl. 150 km, zaznaczone w ramce) i świateł położonych bliżej (dolna część kadru).

Seria zdjęć wykonanych z Gór Świętokrzyskich (fot. Paweł Kłak).

Zobacz animację na: dalekiewidoki.pl/2022/09/atmospheric-refraction-calculations.html