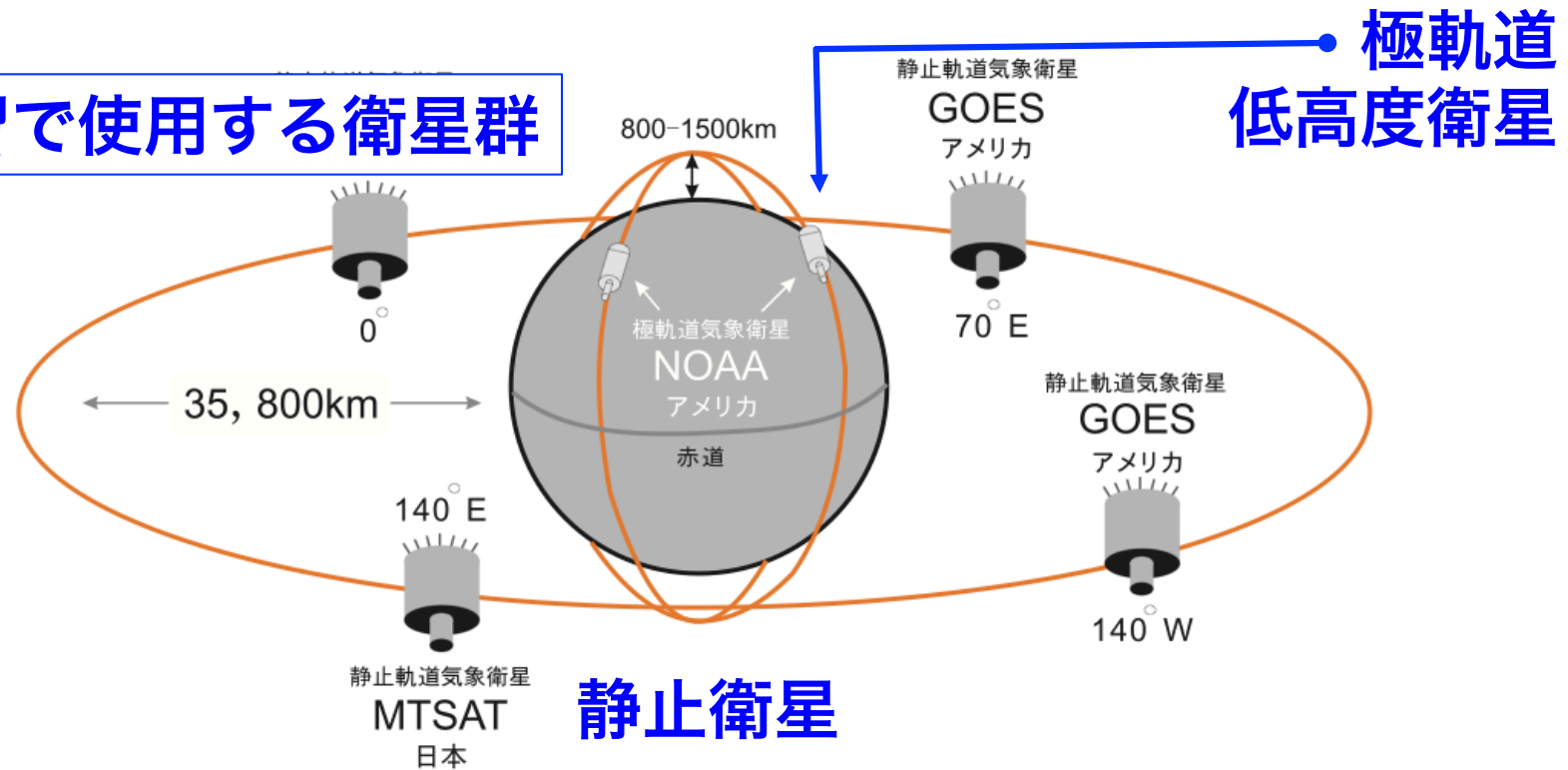


宇宙電磁環境

人工衛星と地上の間を行き来する電磁波について + 電磁波の通り道について

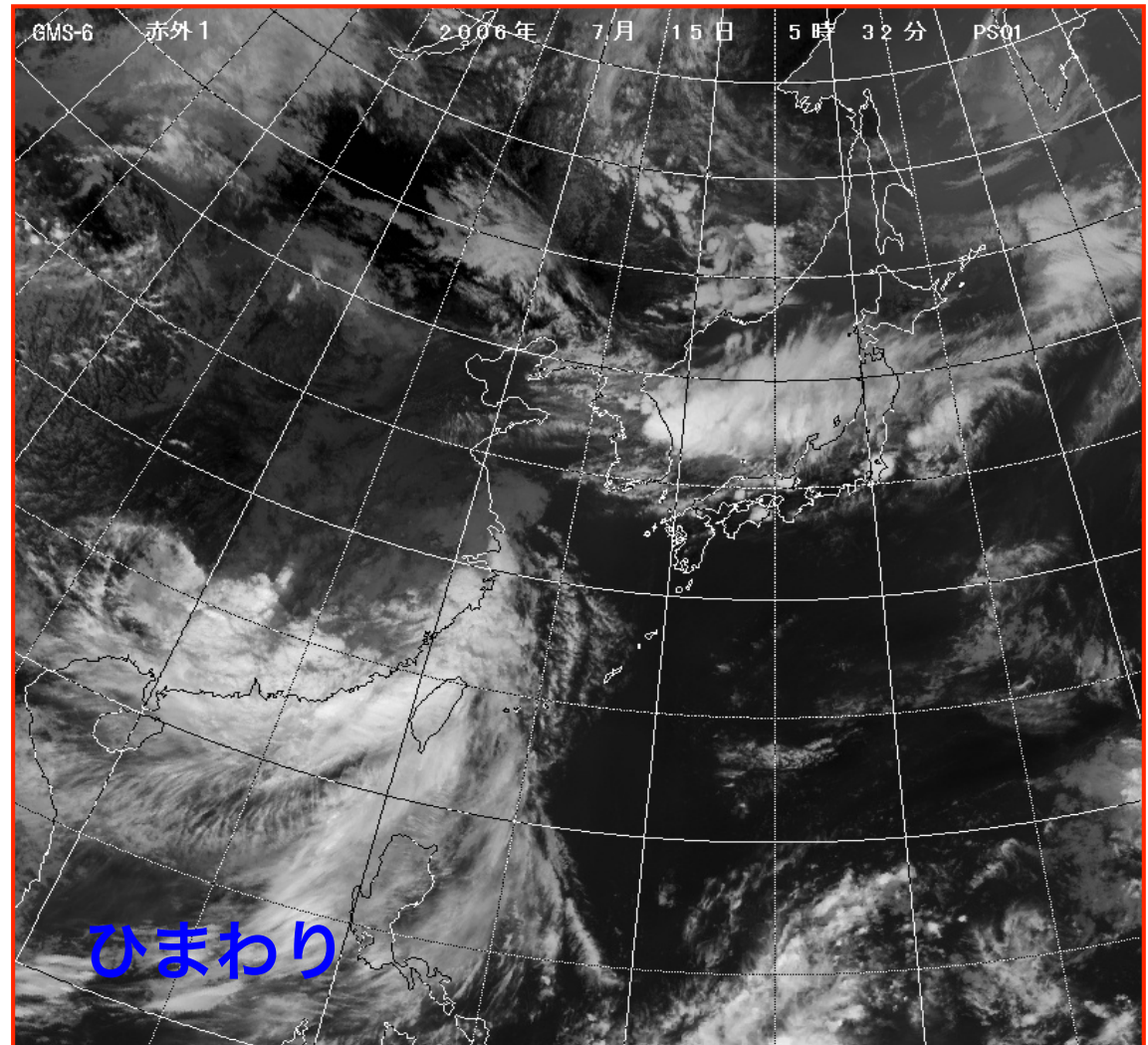
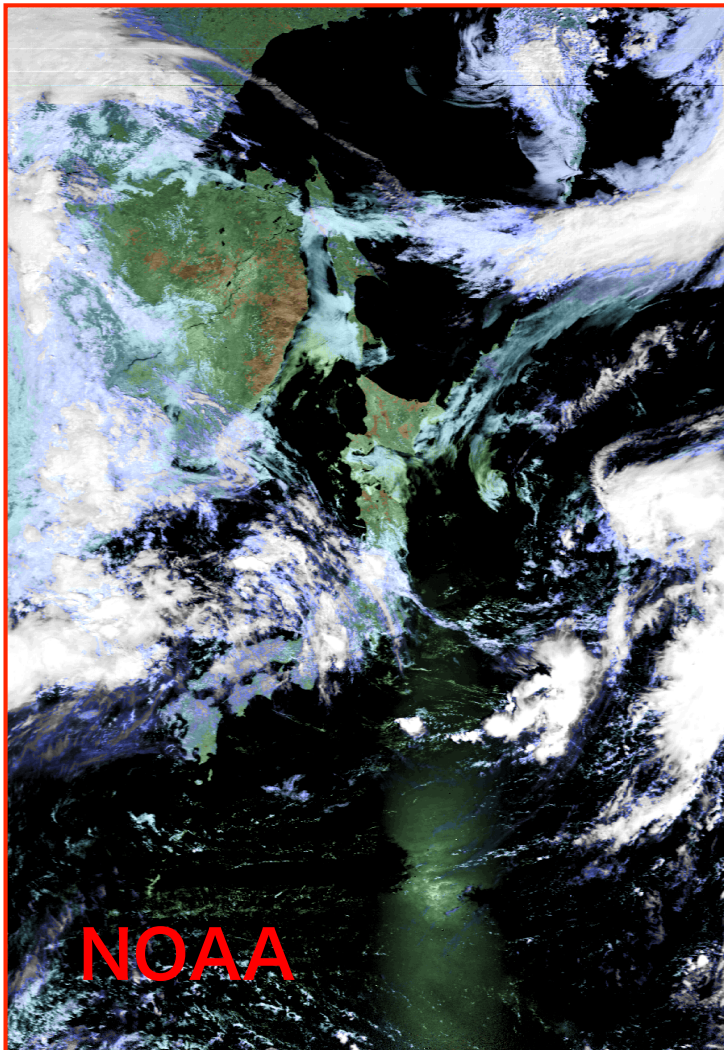
実習で使用する衛星群



細川敬祐, 情報・通信工学専攻 (兼) 宇宙・電磁環境研究センター

実習の結果得られるモノ

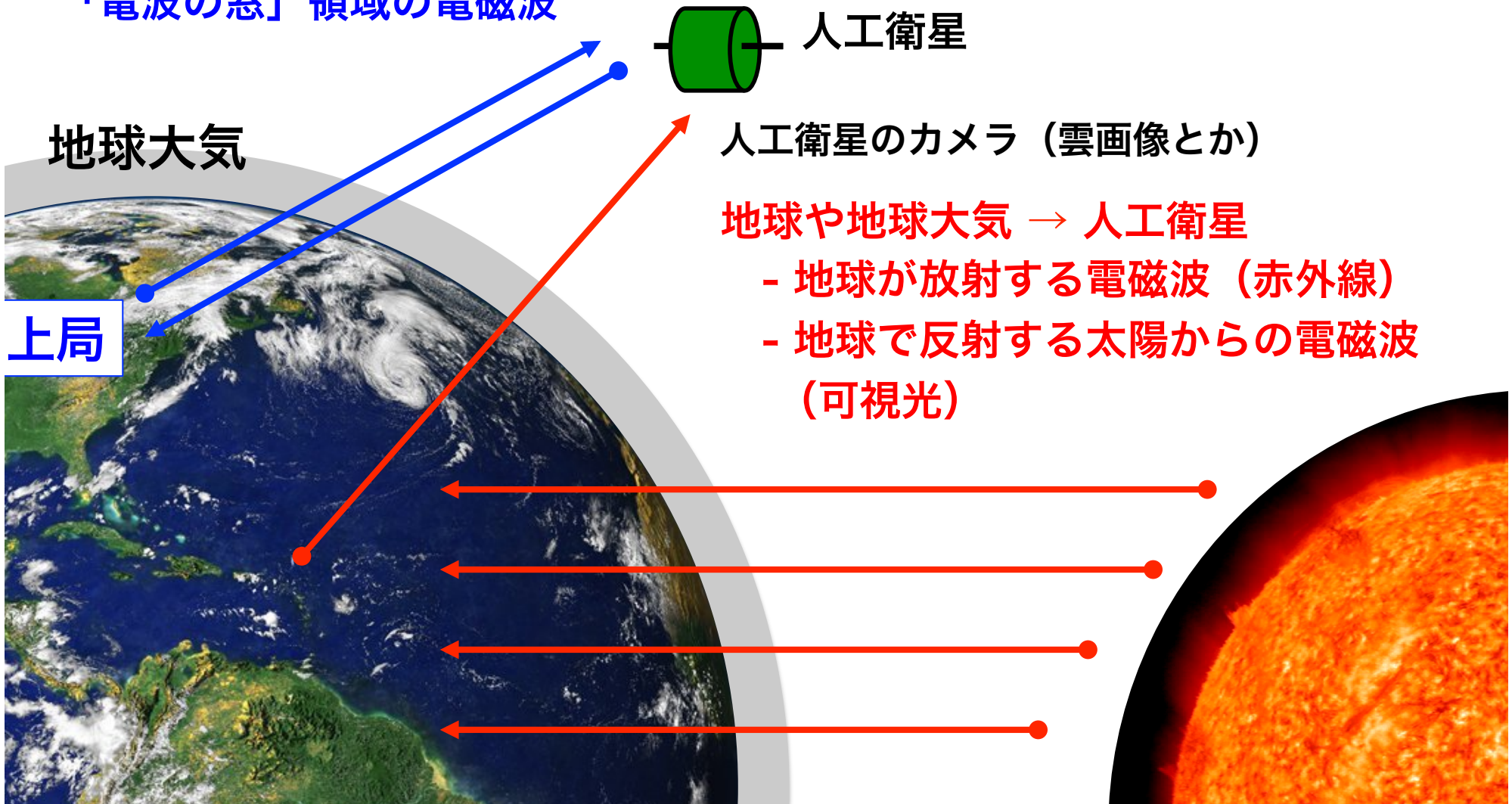
高度 850 km と高度 36000 km からのリモートセンシングデータ（気象画像）



衛星との間を行き交う電磁波

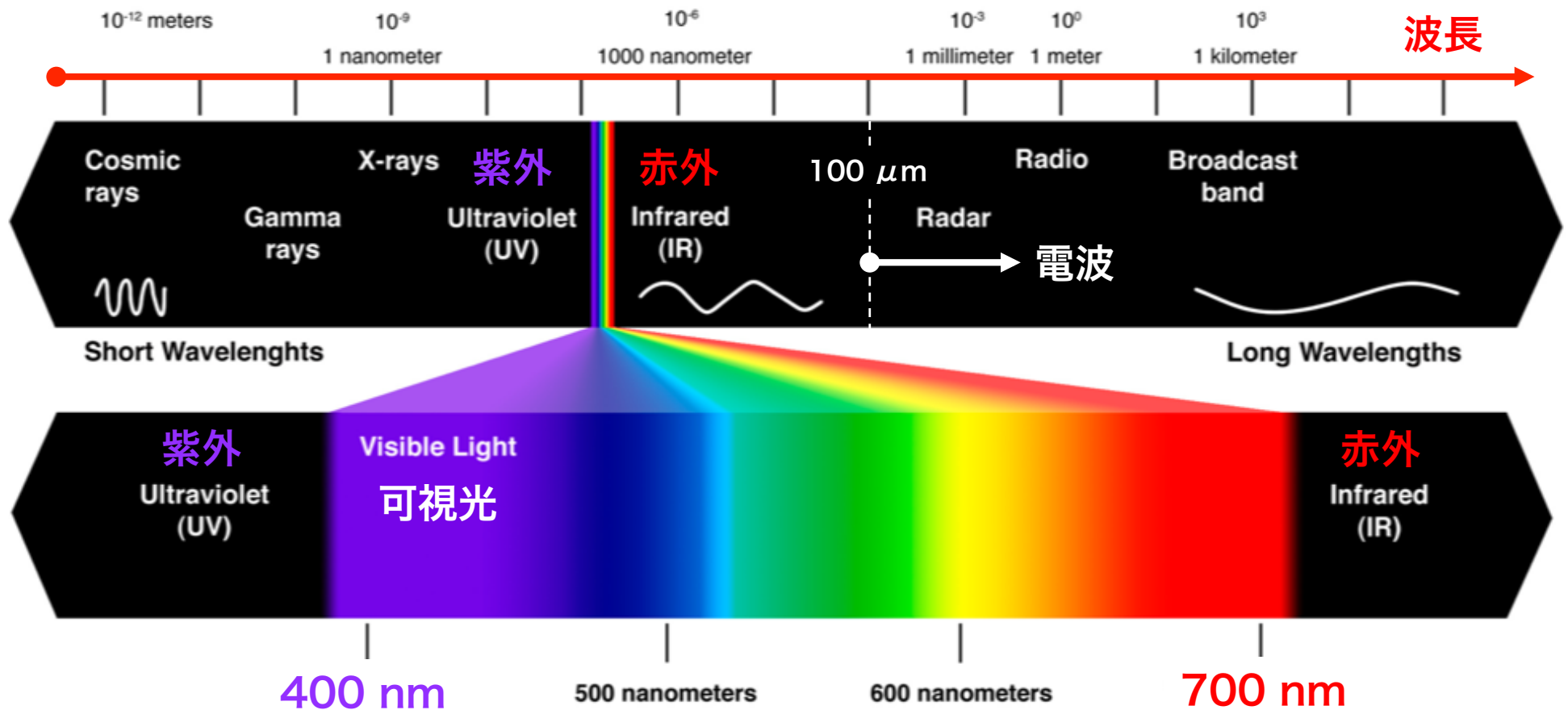
通信のための電磁波（人工衛星 ↔ 地上局）

「電波の窓」領域の電磁波



電磁波のおさらい

電界と磁界の時空間変化を伝える横波, 真空中の位相速度は $3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$
宇宙線も, ガンマ線も, X線も, 紫外線も, 赤外線も, 光も, 電波も, 全部電磁波

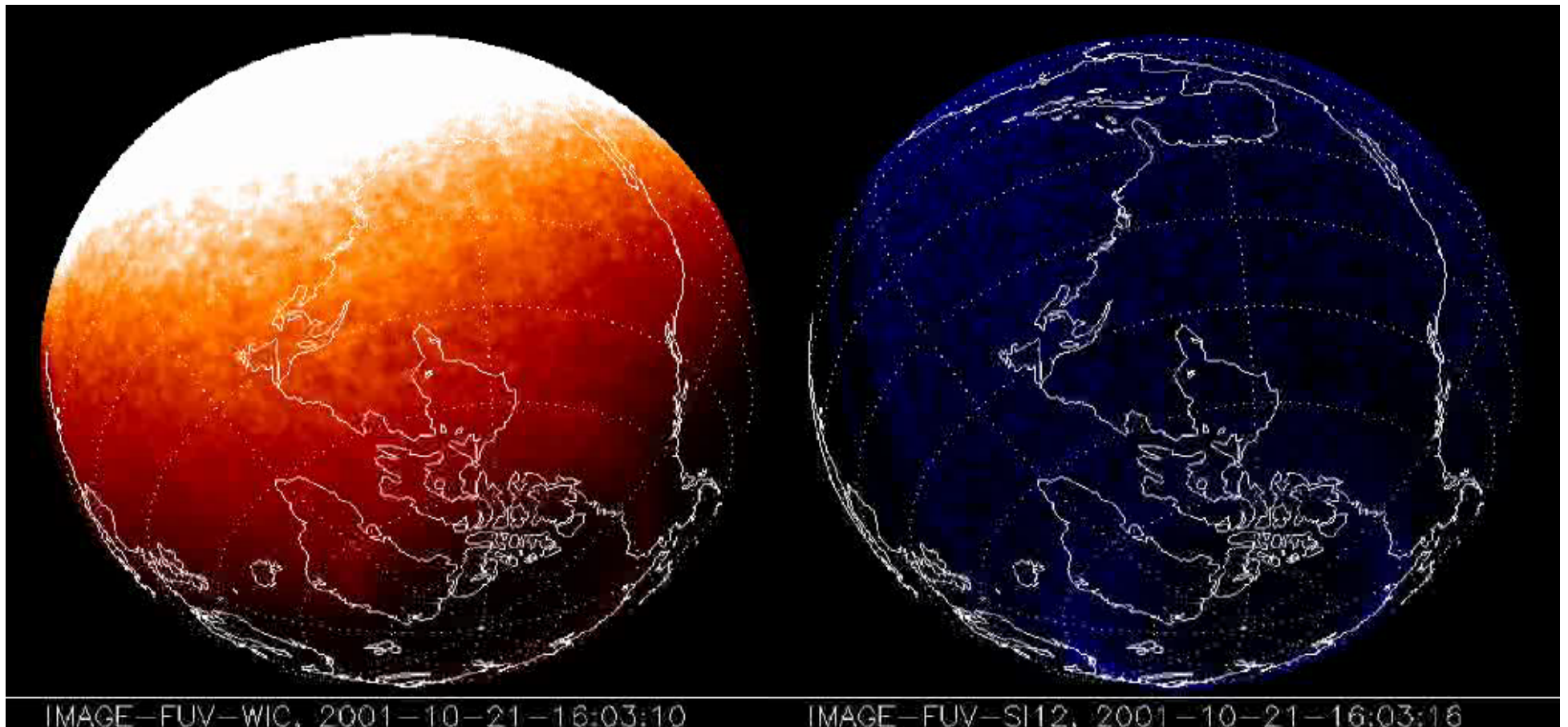


実習では取得しないデータ

オーロラ撮像衛星 (IMAGE) による宇宙からのオーロラ観測: 紫外領域

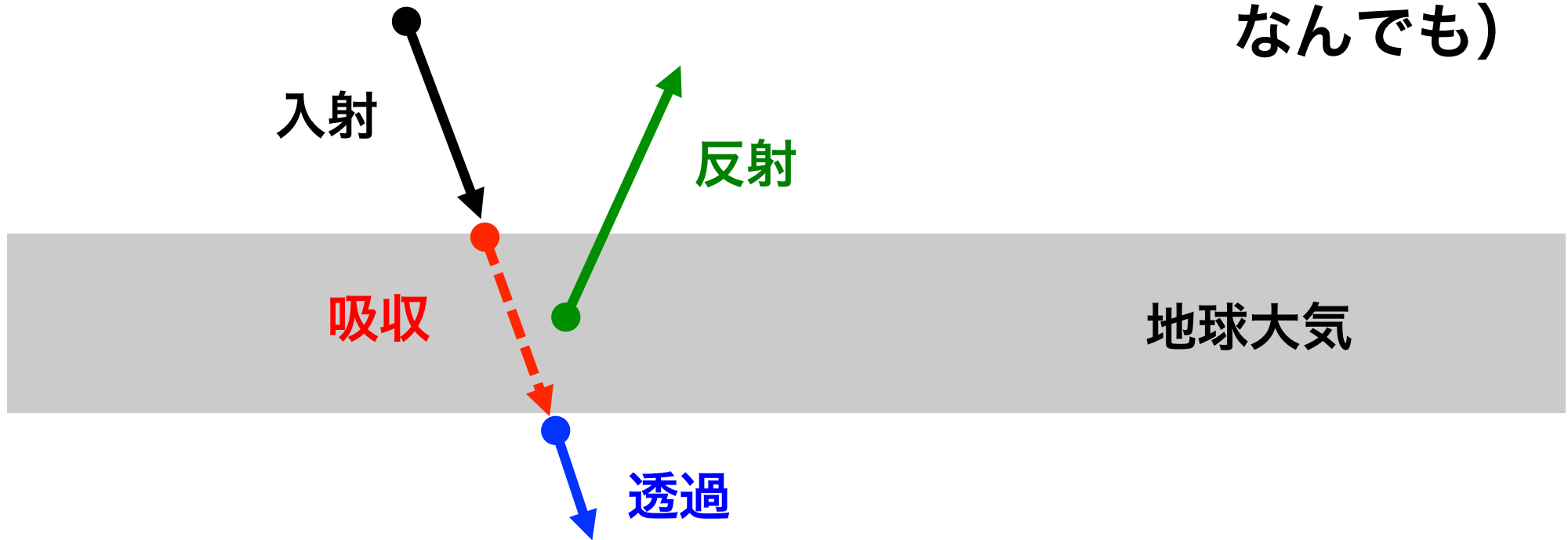
120-140 nm: 窒素分子の発光

135.6 nm: プロトンによる発光



吸収, 反射 (散乱), 透過

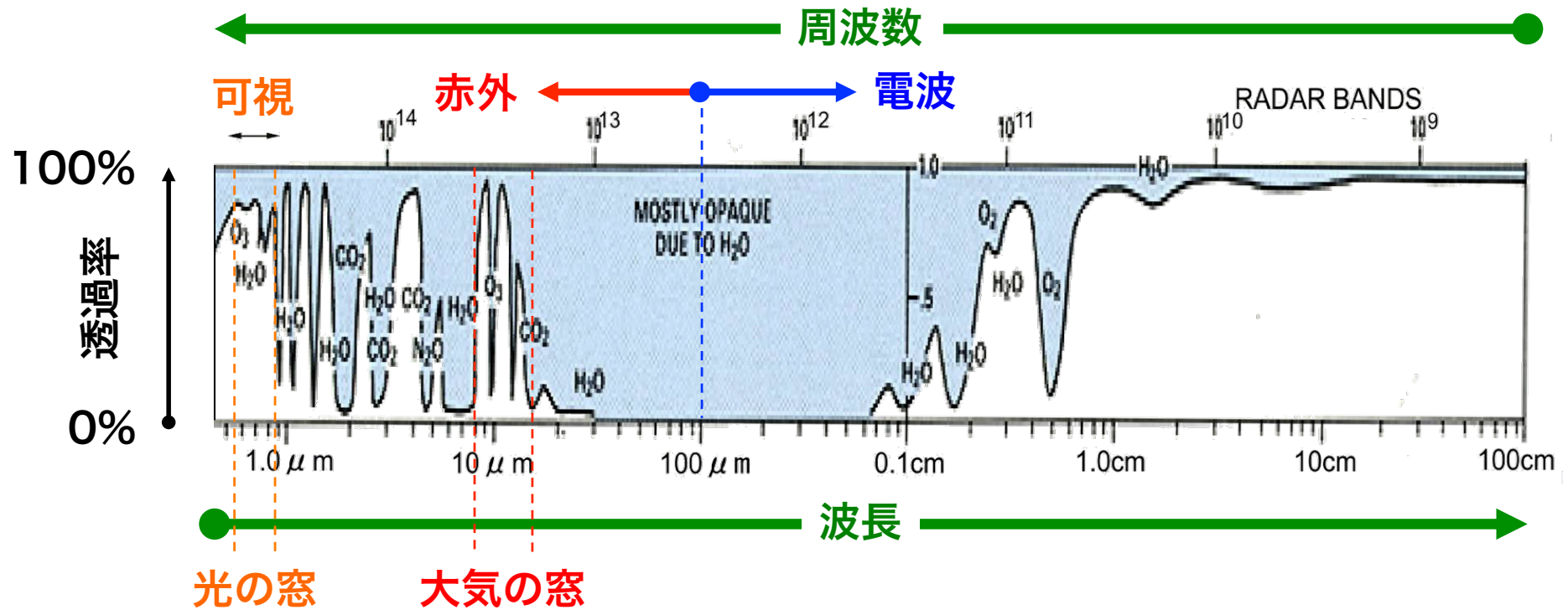
大気に入射する電磁波 (太陽光でも通信電波でも
なんでも)



$$\alpha \text{ (吸収)} + T \text{ (透過)} + R \text{ (反射)} = 100 \%$$

異なる波長の電磁波に対して“異なる”吸収率

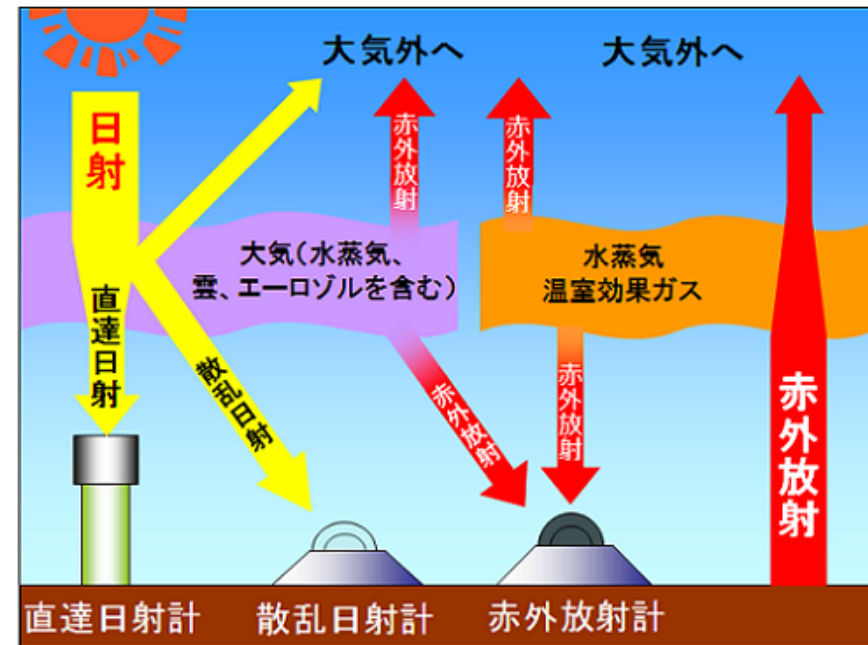
可視光から電波までの吸収特性



- 8-12 μm : 大気による吸収が弱い, 「大気の窓」
一方, すぐそばの 6-8 μm はほとんど吸収されてしまう
- 可視光: 比較的吸収小さい, 「光の窓」

「大気の窓」 (8-12 μm)

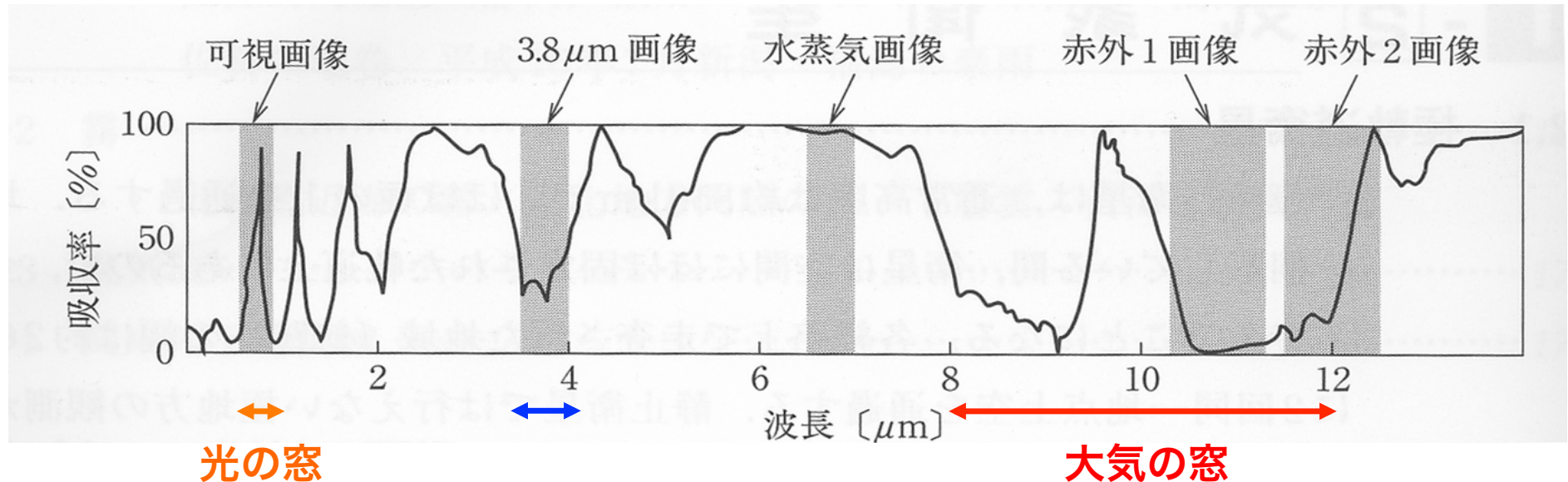
- 地球からはこの波長を含む電磁波が出ている:
赤外放射
- 地球が放射する電磁波が地球大気外に到達.



(気象庁 HP より引用)

- 人工衛星の放射計により, 地球の海面や雲の上面などからの, その波長における放射強度がわかる.

赤外・可視の波長における地球大気吸収率 (さっきの図のズームアップ版)



衛星センサの代表的な測定波長

赤外 1 領域 (波長 10.3-11.3 μm) → 赤外放射

可視領域 (波長 0.55-0.90 μm) → 反射太陽光

3.8 μm 領域 (波長 3.5-4.0 μm)

宇宙から地球を「見る」

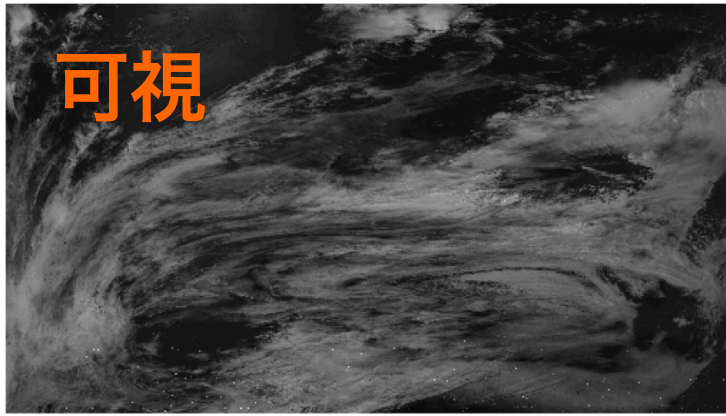


図 2.15 NOAA 衛星気象画像 (CH1: 可視波長域)

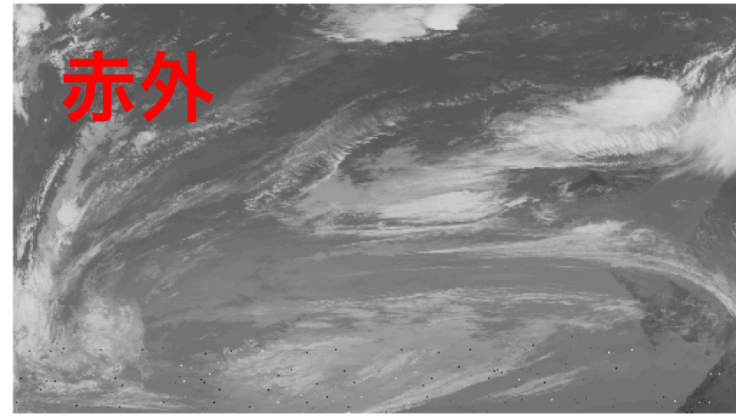


図 2.16 NOAA 衛星気象画像 (CH4: 赤外波長域)

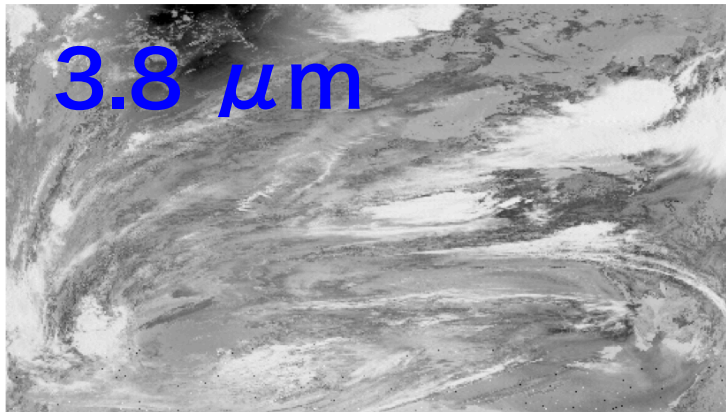


図 2.17 NOAA 衛星気象画像 (CH3: 3.8 μm)

可視と赤外では
雲の見え方が
“少しだけ” 違う!

何故違って見えるか？ を整理

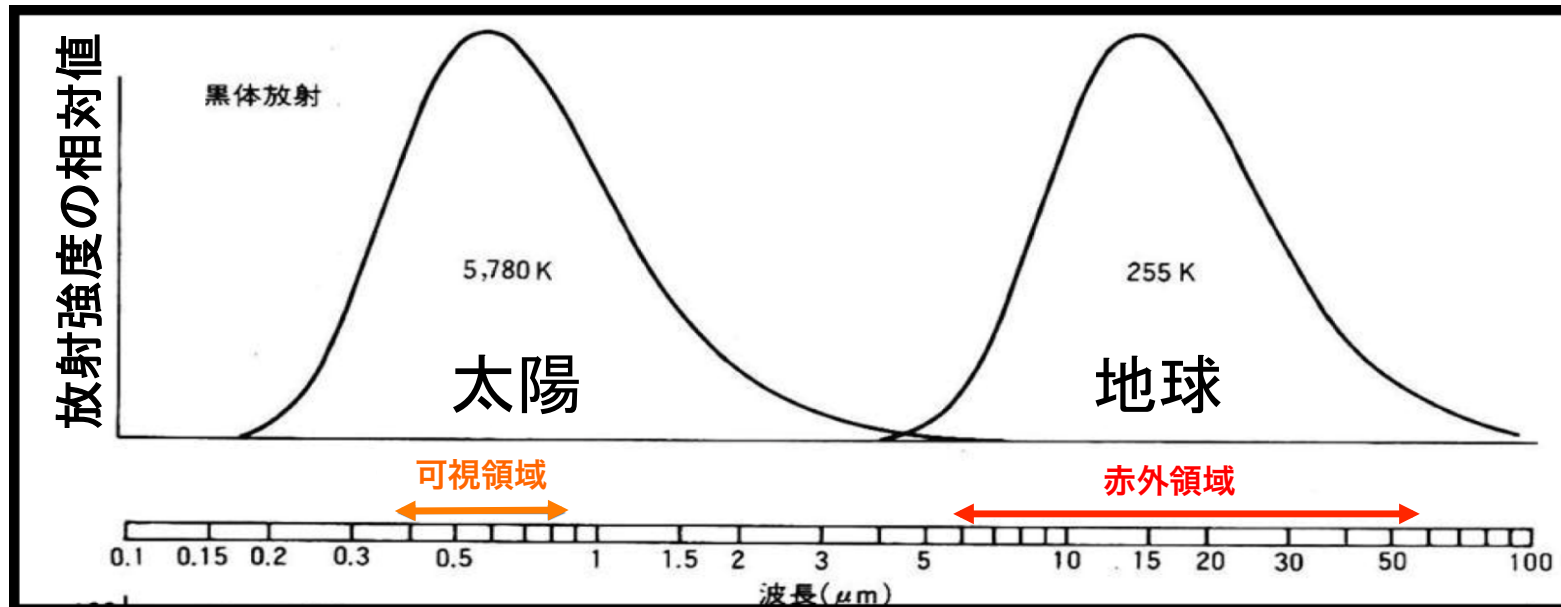
赤外: 地球の放射に関連

- ・ 大気の吸収が少ない「大気の窓」領域.
- ・ 地表や雲から射出される赤外放射を見ることになる.
- ・ 太陽光に関係が無いので、昼夜によらず ”見える”

可視: 太陽の放射に関連

- ・ 太陽光は可視波長が中心.
- ・ 地球や大気で反射された太陽放射を見ることになる.
- ・ 雲がある場合、雲頂の細かい“きめ”がよく見える.
- ・ 太陽光のない夜間はほとんど何も“見えない”.

地球と太陽からの放射



- それぞれ固有の波長帯をもつ。太陽は可視光。地球は赤外。
- 太陽の光球の温度 5,780 K. 地球の温度 255 Kによって波長域が決定。
- 地球の場合は「放射平衡温度」：地球は太陽から放射の一部を吸収して暖められている。同時に自分も放射。両者がバランスする温度。

黒体放射 - プランクの放射公式

$$B_{\lambda} \sim \lambda^{-5} (\exp(hc / \kappa \lambda T) - 1)^{-1}$$

B_{λ} : 波長 λ の電磁波の放射強度

h : プランク定数 6.63×10^{-34} J s

κ : ボルツマン定数 1.38×10^{-23} J/K

T : 絶対温度 in K

ウィーンの変位則

$$\lambda_{\text{peak}} \text{ (m)} = 0.002898 / T \text{ (K)}$$

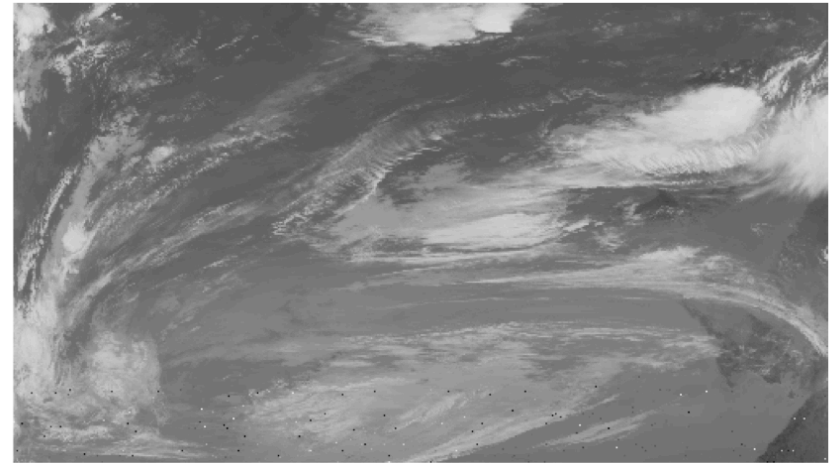
黒体放射が最大となる波長は温度に反比例, 熱いものほど波長は短い

太陽放射 $T \sim 5780 \text{ (K)}$ の時 $\lambda_{\text{peak}} \sim 500 \text{ nm}$: 可視域

地球の放射 $T \sim 255 \text{ (K)}$ の時 $\lambda_{\text{peak}} \sim 11.3 \text{ }\mu\text{m}$: 赤外域

センサーの赤外波長における放射強度と温度

- 赤外は、可視と異なり“見える色”はないが、通常、**放射強度が弱い領域を明るい色調**で表す。
 - 実習の解析で注意
- 放射強度が弱い。
 - 温度が低い
 - 地表から離れている
 - 上空の雲
- 高い雲が最も“明るい色”で表される。
雲の高さも見積ることができる: **雲頂高度**

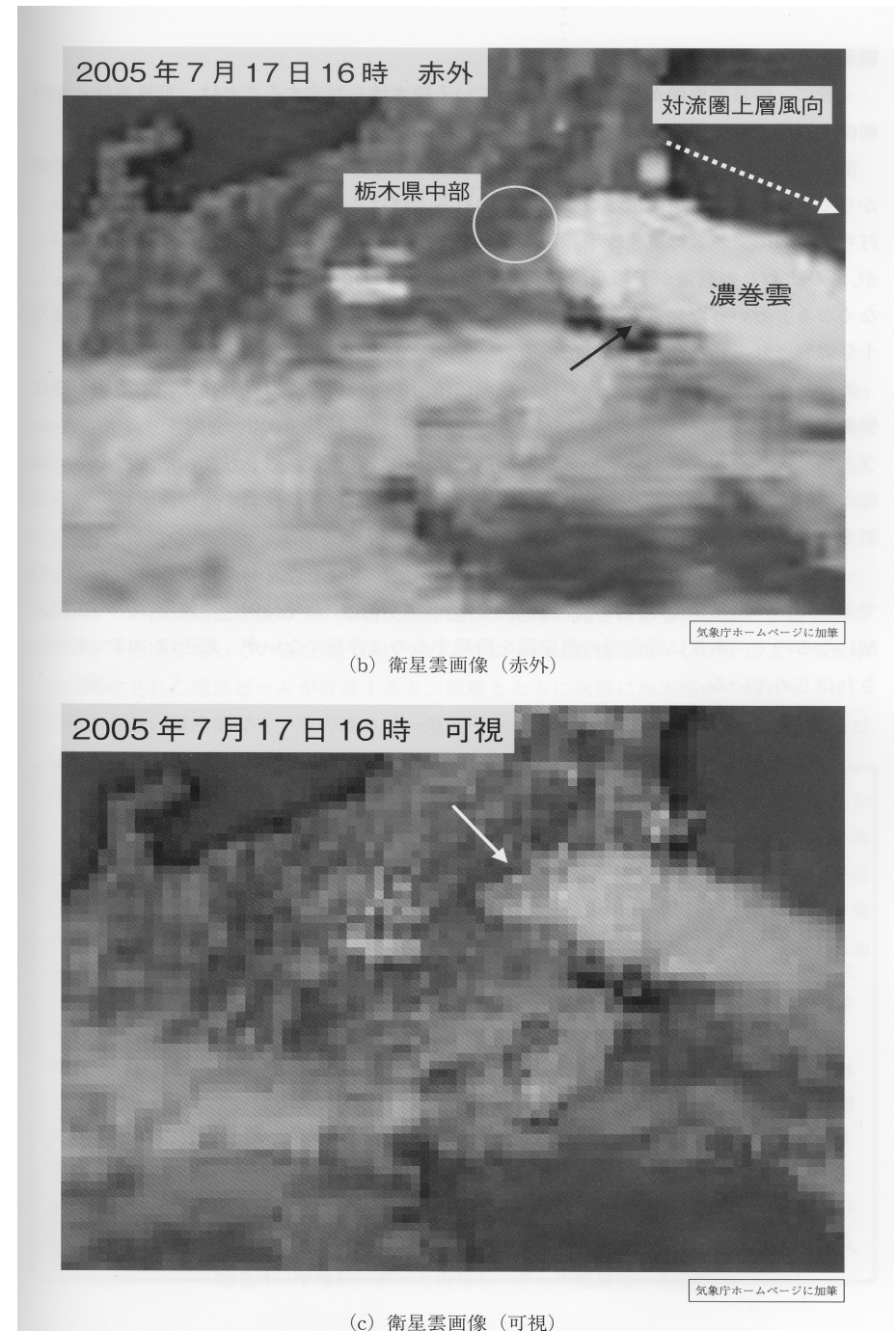


昼間における可視画像と赤外画像の類似性

- 可視だけに見られる雲頂の細かい“きめ”を除くと両者の画像はよく似ている.
- 可視 雲の反射率 > 海洋や陸地の反射率
雲が明るく（白っぽく）表示される.
- 赤外 雲の温度 < 海洋や陸地の温度
雲が明るく（白っぽく）表示される.

可視で明るく見えるが 赤外では暗いものは？

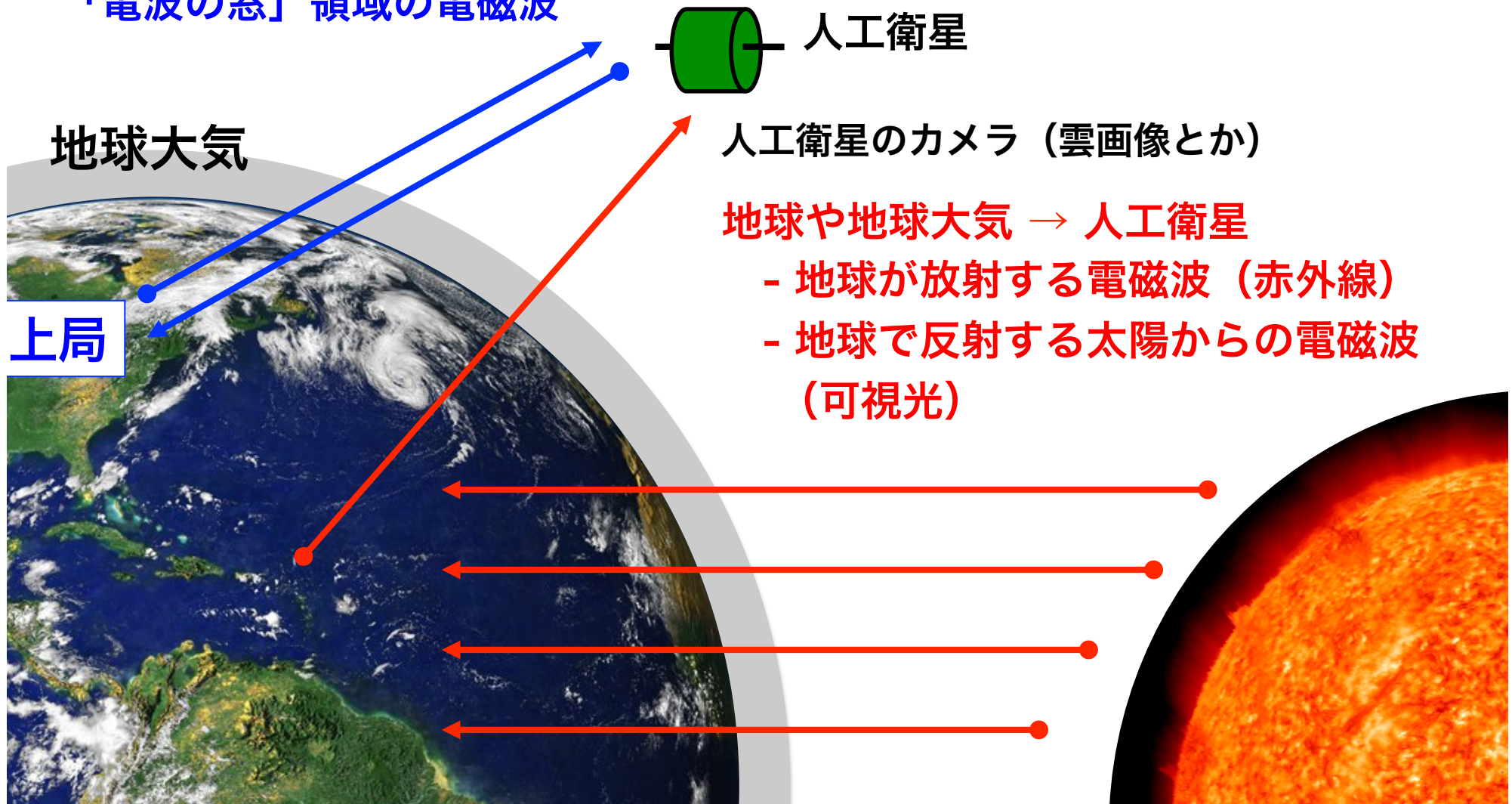
- **低い雲や霧**に対しては、
その下の海洋や陸地との
温度差が小さいので**赤外
では暗くなる**。
- 一方、低い雲は多くの雨
粒を含むことが多く、そ
のため太陽光を良く反射
して、可視では、明るく
みえることもある。



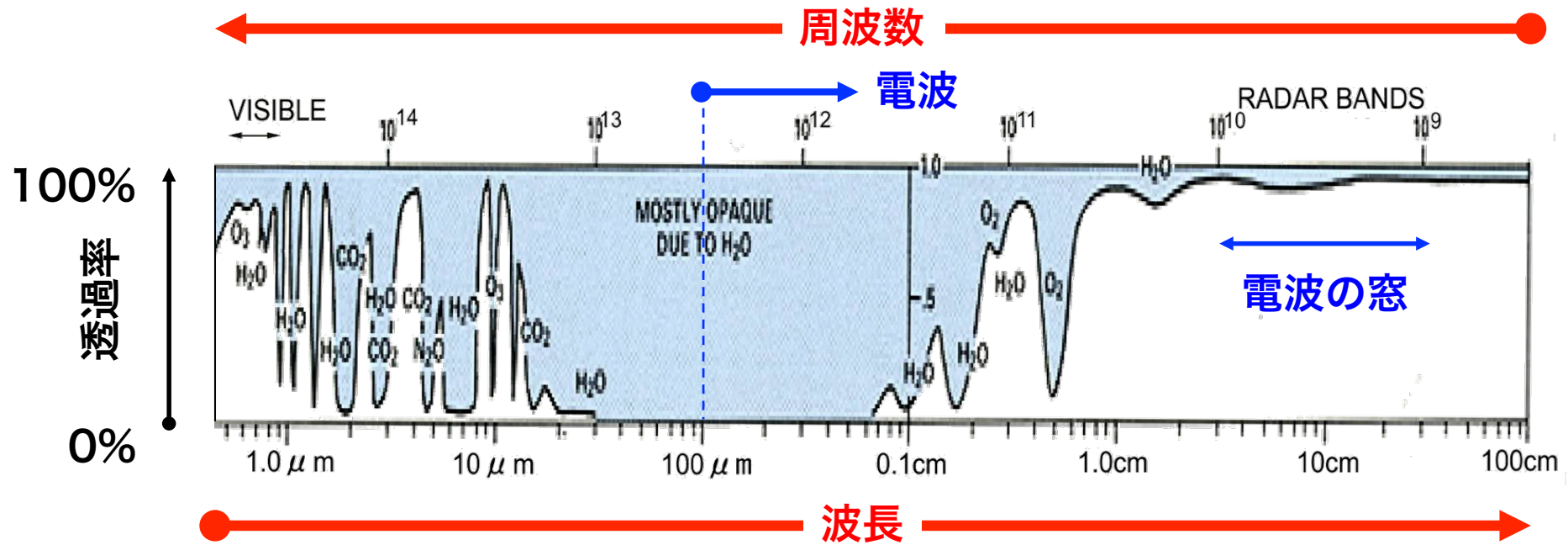
衛星との間を行き交う電磁波

通信のための電磁波（人工衛星 ↔ 地上局）

「電波の窓」領域の電磁波



「電波の窓」 領域



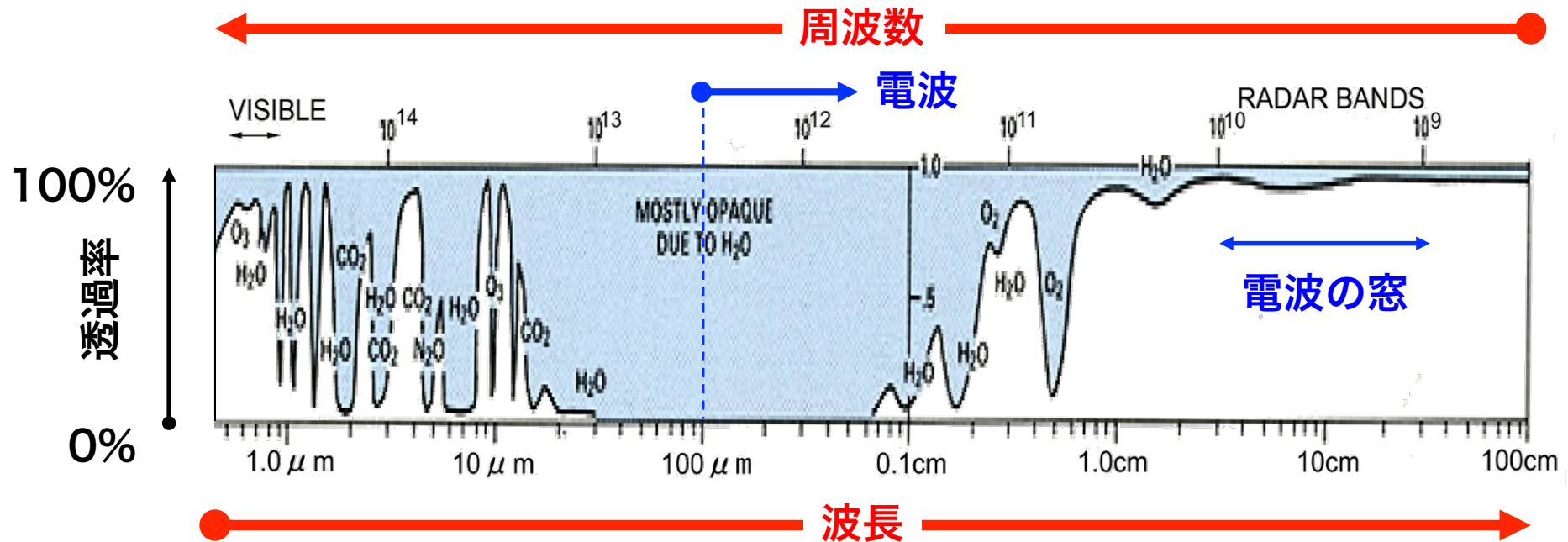
- 1-10 GHz では大気の影響少ない 「電波の窓」

代表的な通信の周波数帯

L バンド(上り 1.6 GHz/下り 1.5 GHz)

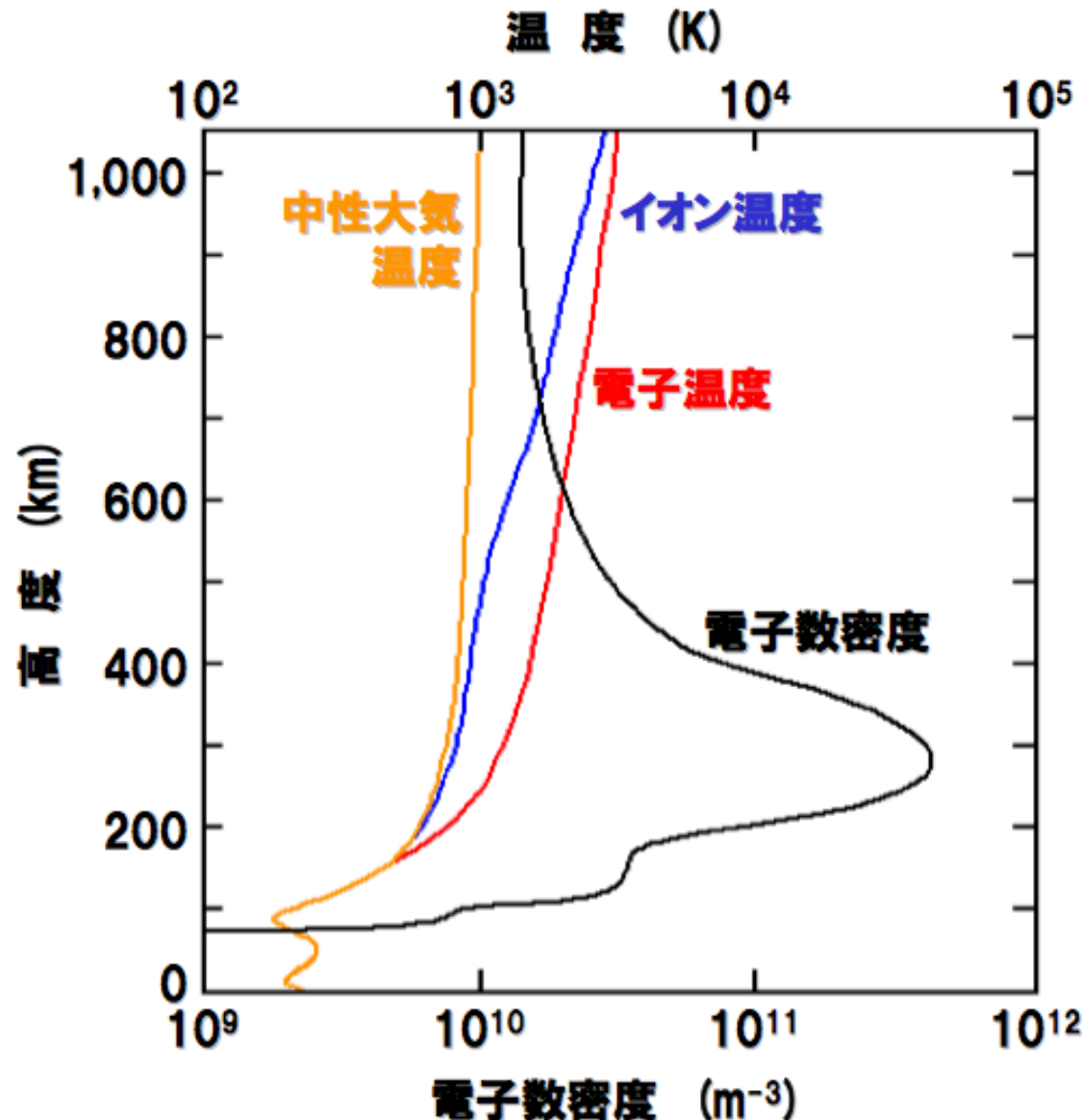
S (2.6 GHz/2.5 GHz), Ku (14 GHz/12 GHz)

「電波の窓」の左右では？



- これより高い周波数: 大気の吸収による電波の減衰
~ 22 GHz 水蒸気分子, ~ 60 GHz 酸素分子
- これより低い周波数 (MHz帯)
大気の電気を帯びた部分 (電離圏) の影響

MHz 帯を反射する電離圏



電離圏：

太陽から照射される極端紫外線によって大気の0.1%程度がイオンと電子になっている領域

50 MHz より低い周波数を地上から送信すると、

電離圏で大きく屈折。

→ 人工衛星まで届かない。

屈折率というものを導入

- 屈折率 n : 真空中では 1, よって電磁波の速度は c

$$v = \frac{c}{n}$$

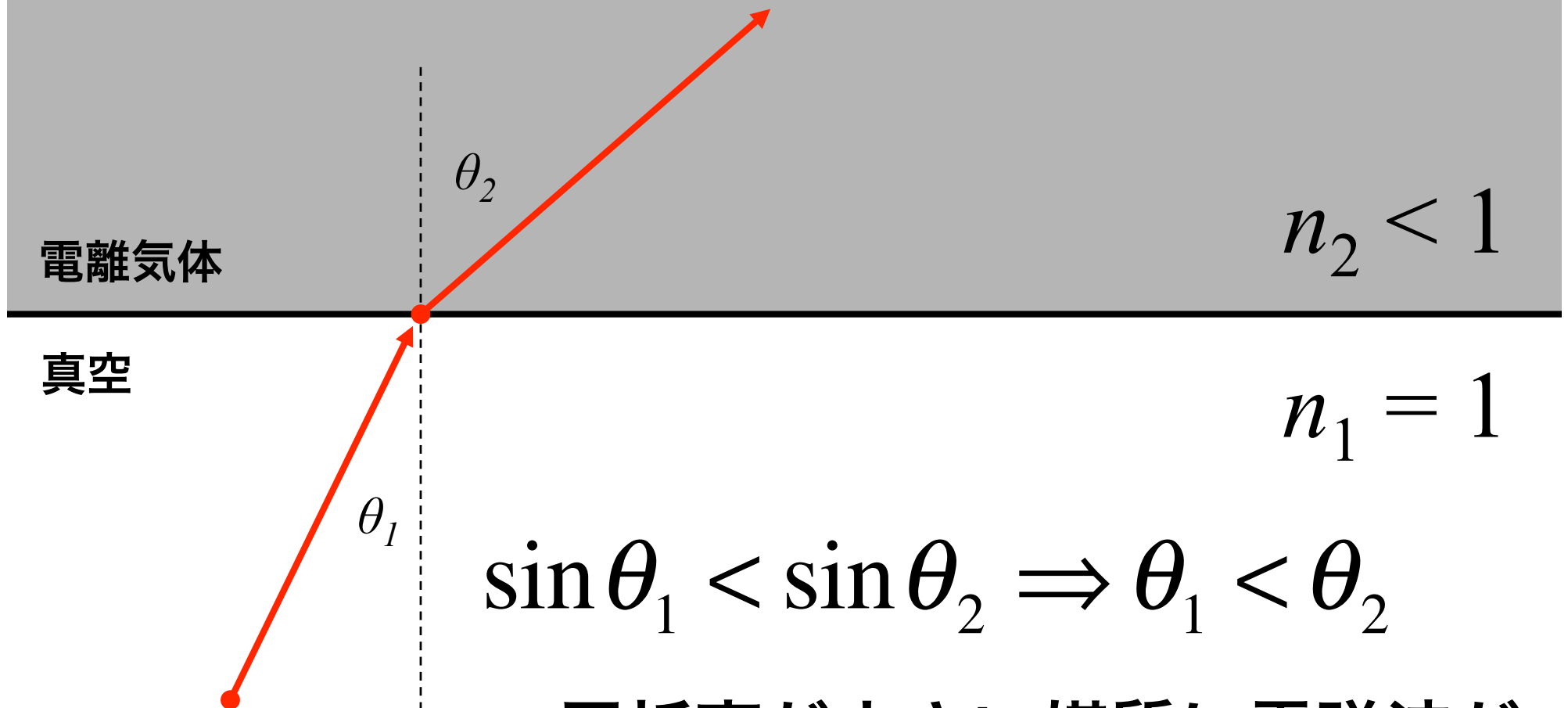
ただし, 媒質によって n は変わる
媒質によって電磁波の速度も変わる

- 電離気体中の屈折率は以下で表せる.
電離気体があると, 屈折率 は 1 より小さくなってしまう.

$$n = \sqrt{1 - \frac{f_p^2}{f^2}}, \quad f_p = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e}}$$

f_p : プラズマ周波数, f : 電磁波の周波数, n_e : 電子密度

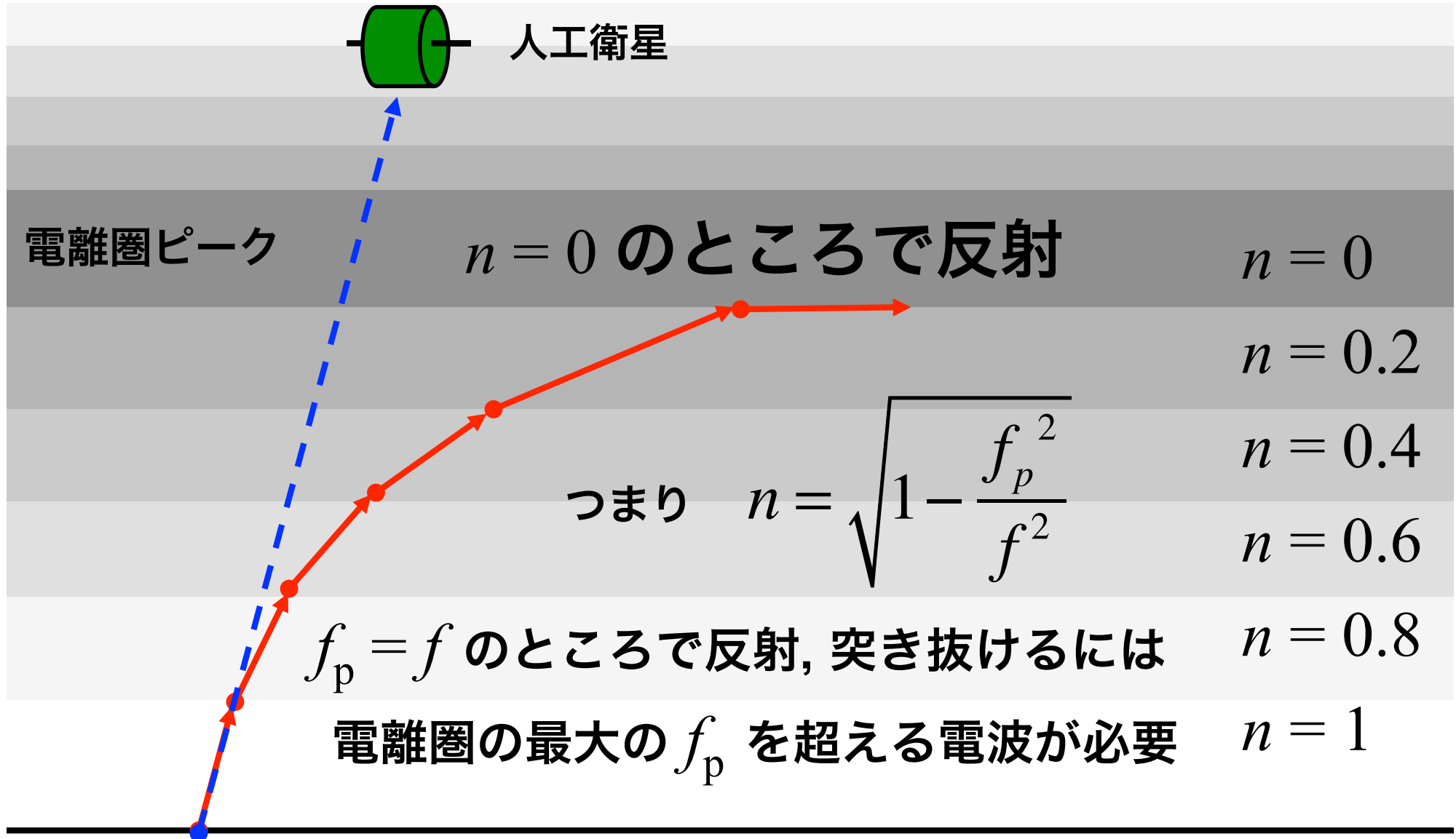
スネルの法則 $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$



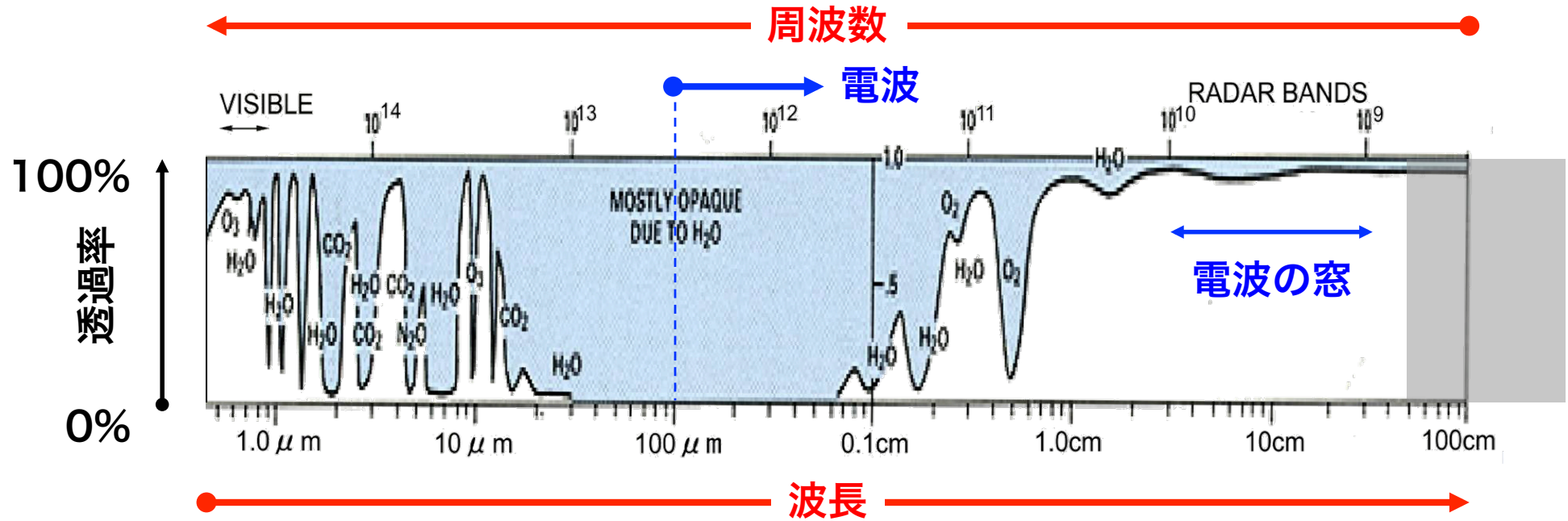
$$\sin \theta_1 < \sin \theta_2 \Rightarrow \theta_1 < \theta_2$$

屈折率が小さい媒質に電磁波が入射するとまっすぐ進めなくなる

電離圏だとなくなるか？



「電波の窓」 領域



- これより低い周波数 (MHz帯)

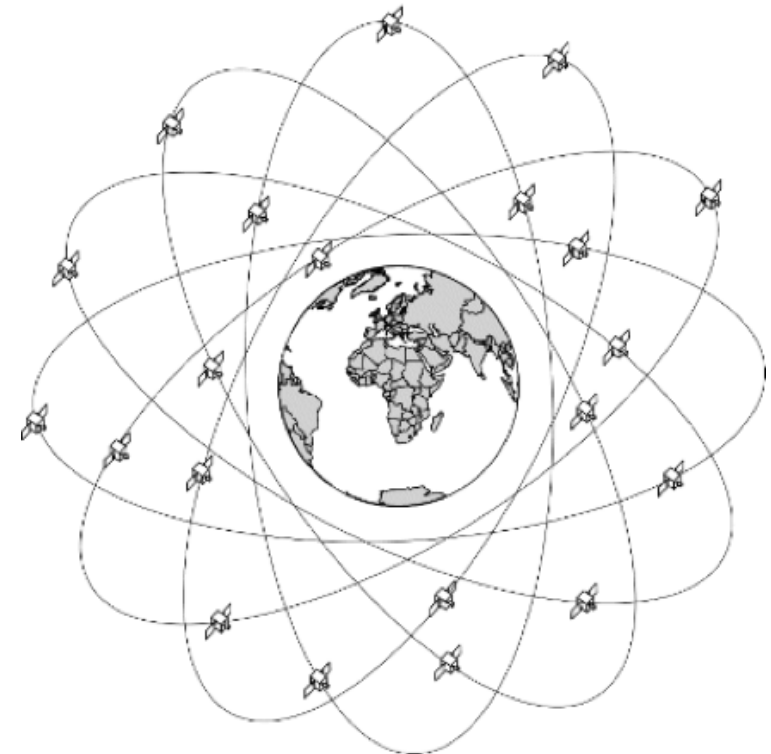
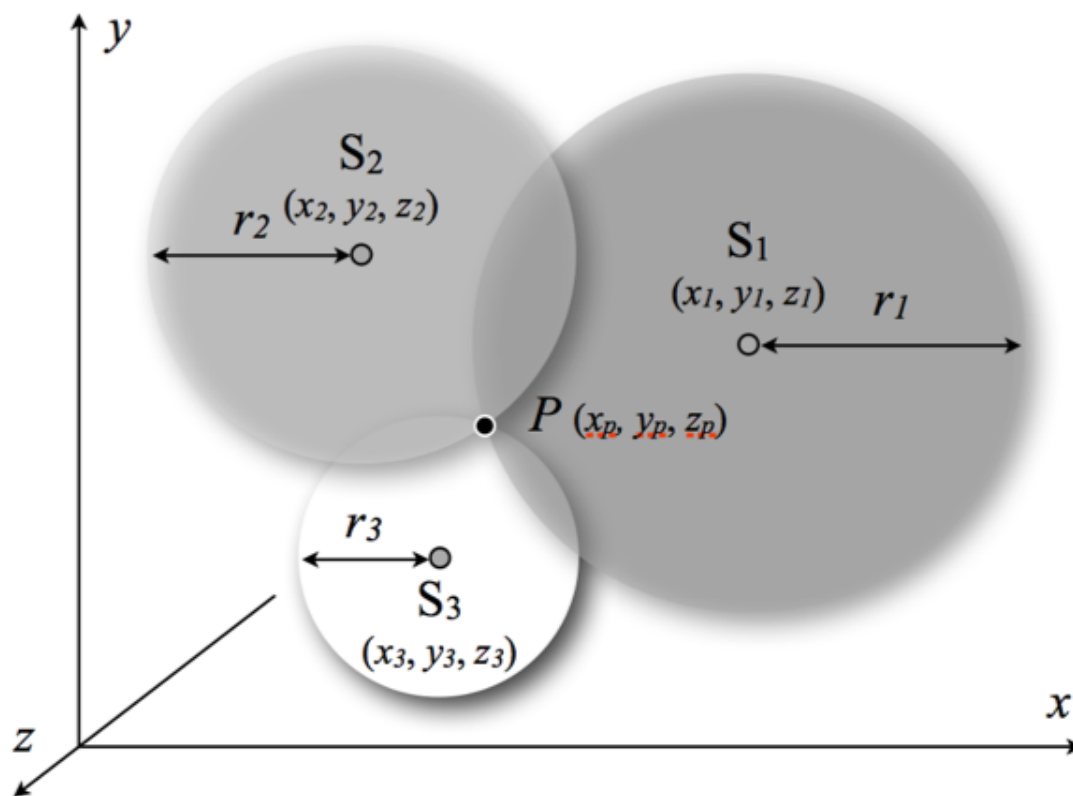
大気の電気を帯びた部分 (電離圏) の影響

- これより高い周波数: 大気の吸収による電波の減衰

~ 22 GHz 水蒸気分子, ~ 60 GHz 酸素分子

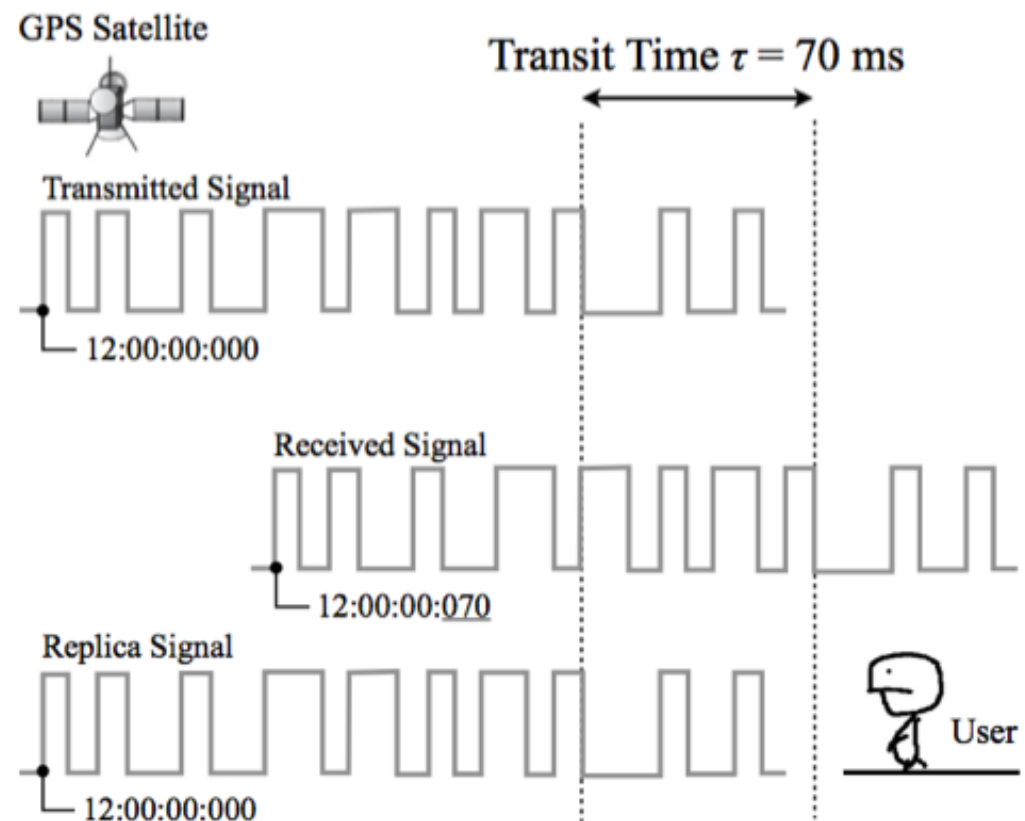
「電波の窓」にも電離圏の影響: GPS 測位

- 全球測位システム (GPS: Global Positioning Satellite)
宇宙規模の 3 点測量, 既知の場所にある衛星からの距離が正確に分ければ, 自分の位置を推定することができる.



遅延時間 → 衛星までの距離

- 衛星から送信された電波 (1.5 GHz) を地上で受信
- 受信電波には, 送信時刻の情報 → 電波の伝搬時間
- 電磁波の伝搬速度を $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ と考え, 距離を推定
- 3 つの衛星からの距離が分かれば測位が可能になる:
3 点測量

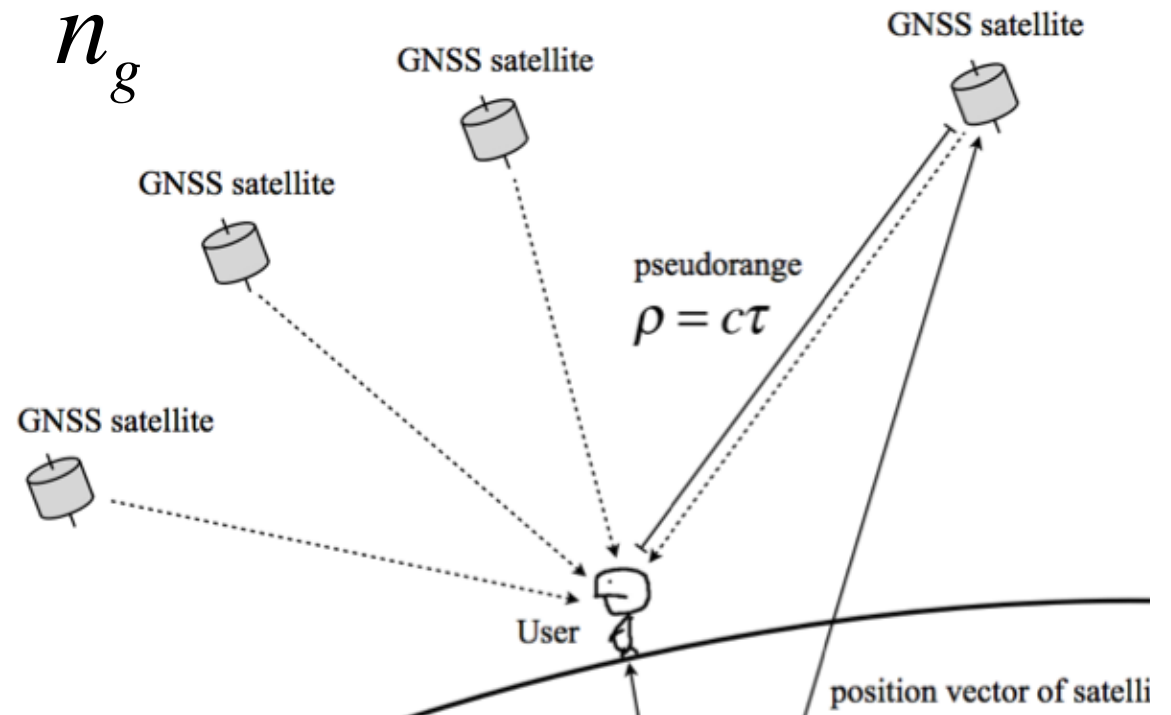


衛星測位に見られる誤差

- 電離圏を GPS の信号が伝わる速度（群速度）は $c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ よりも遅くなる.

$$n_g = \sqrt{1 + \frac{f_p^2}{f^2}} \quad v_g = \frac{c}{n_g}$$

- 衛星までの距離を過大に推定
- 測位誤差に繋がる



まとめ

- 人工衛星との間を行き来する電磁波について取り上げた: 通信電波, 赤外放射, 可視光
- 地球で反射された太陽からの**可視光**は大気による吸収が少ない「**光の窓**」を通過して衛星のセンサーに届く.
また, 地球の**赤外放射**は「**大気の窓**」を通過して衛星で測定される.
- 「**電波の窓**」を通過できる**電波**が衛星通信に用いられる (1-10 GHz) . それよりも短波長は大気で吸収, それよりも長波長は電離圏で屈折してしまう.
- 電磁波は, 衛星通信のいろいろな場面に登場: 大事