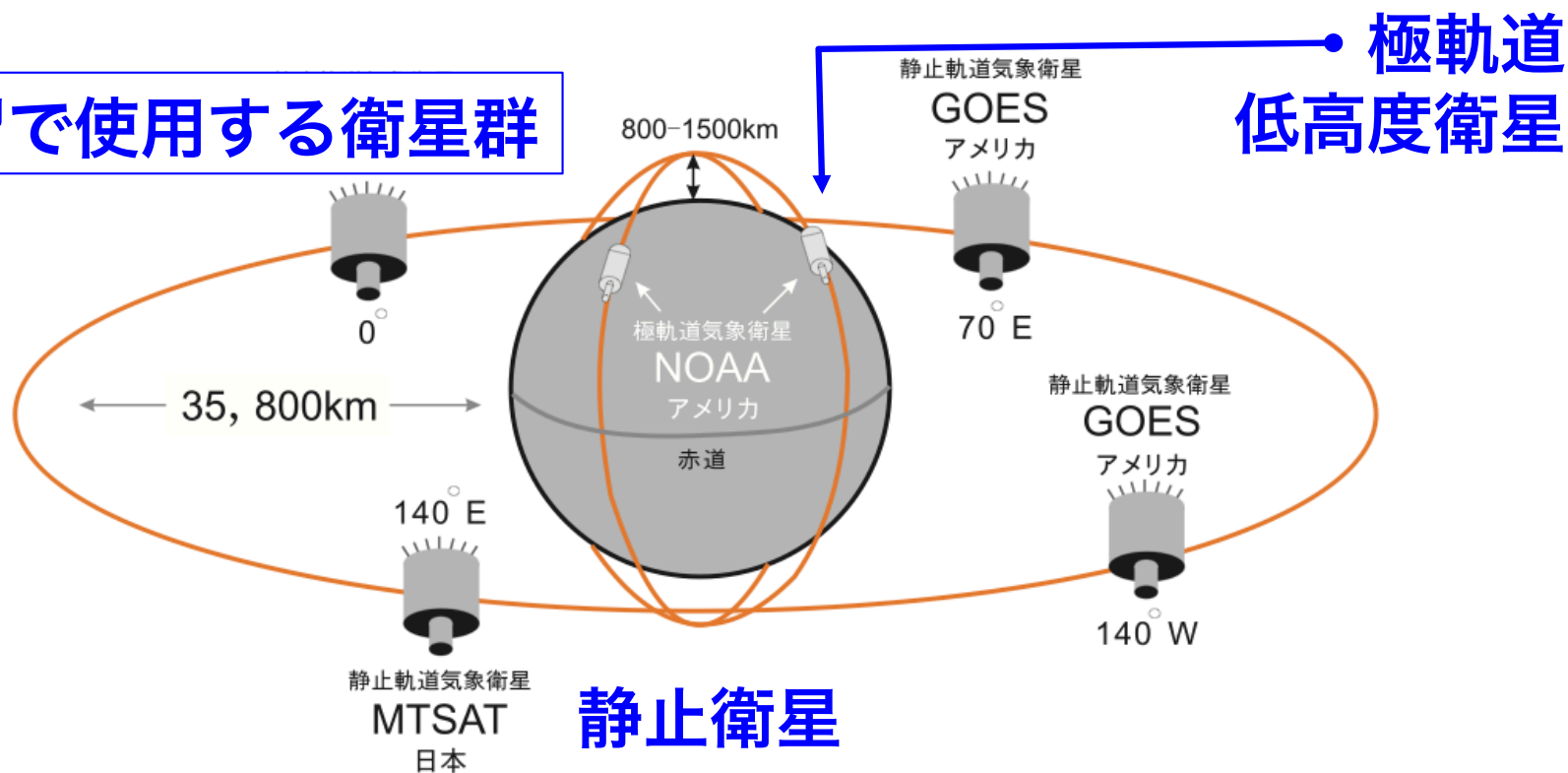


宇宙電磁環境

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

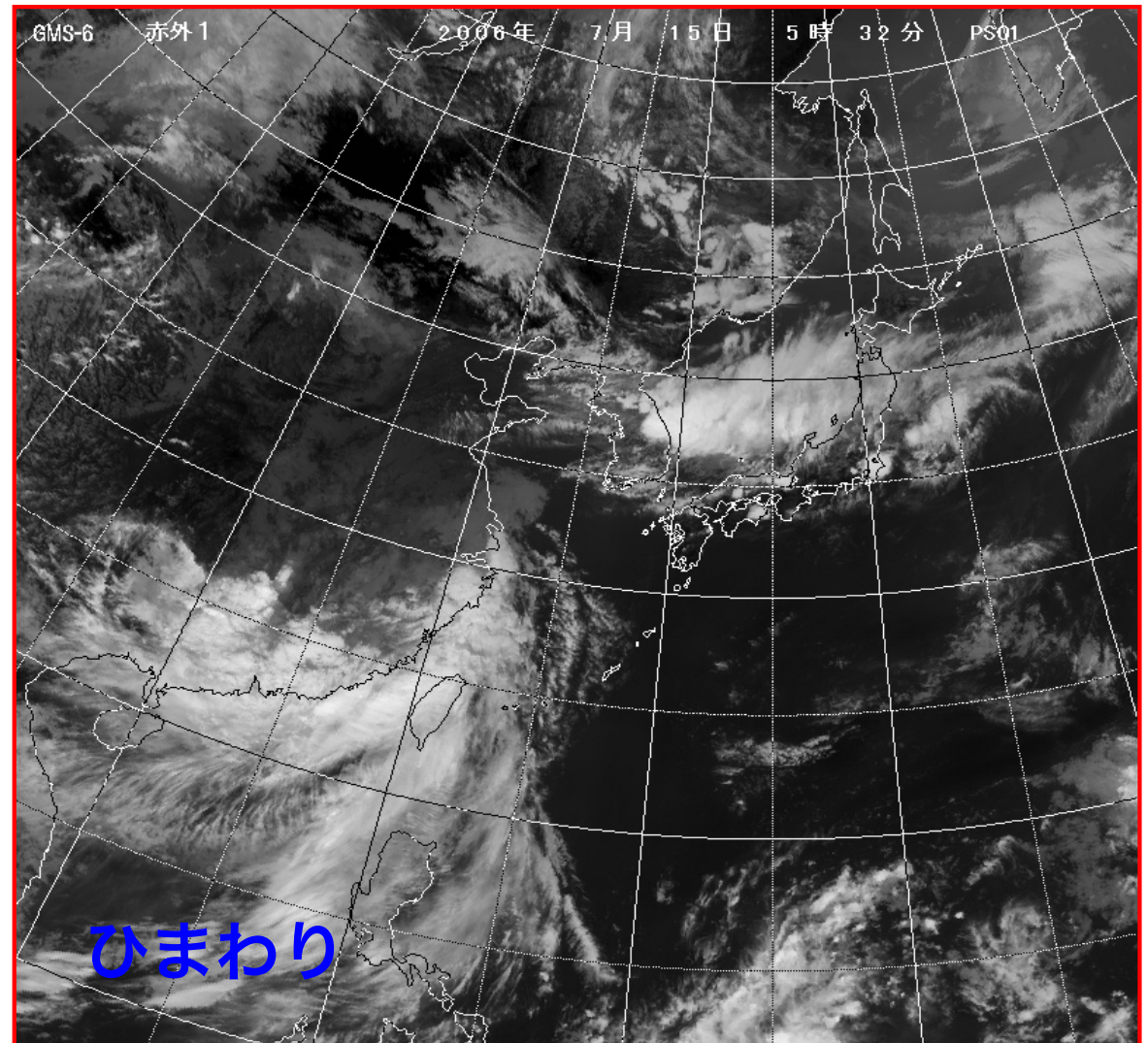
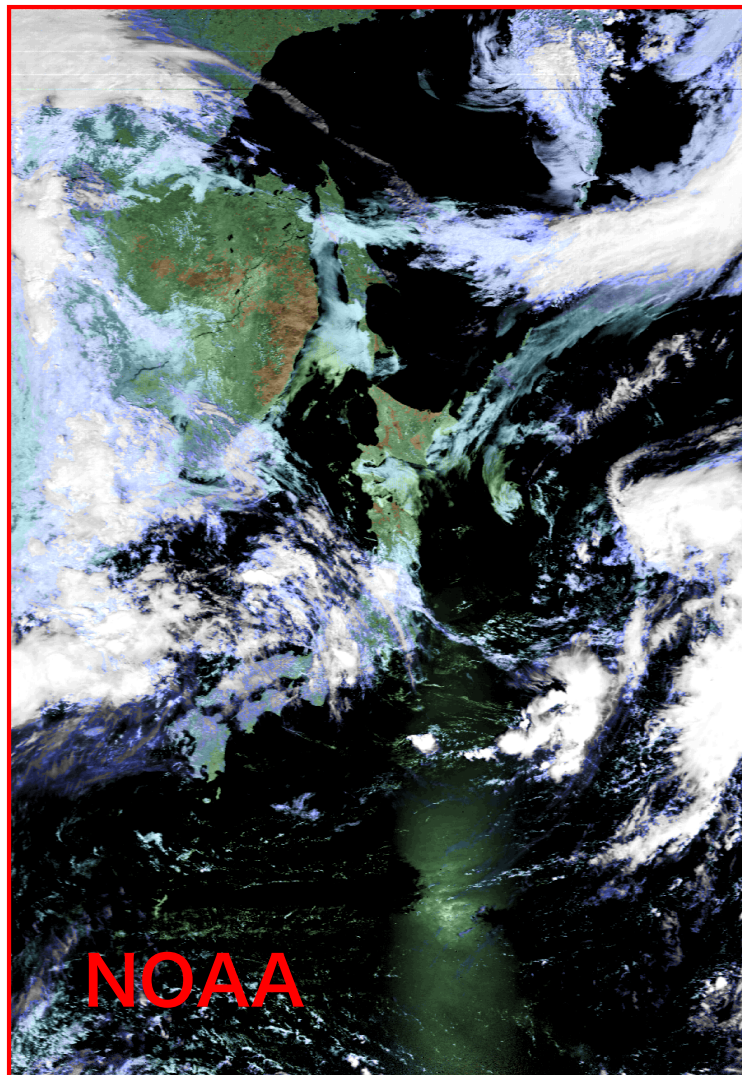
実習で使用する衛星群



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

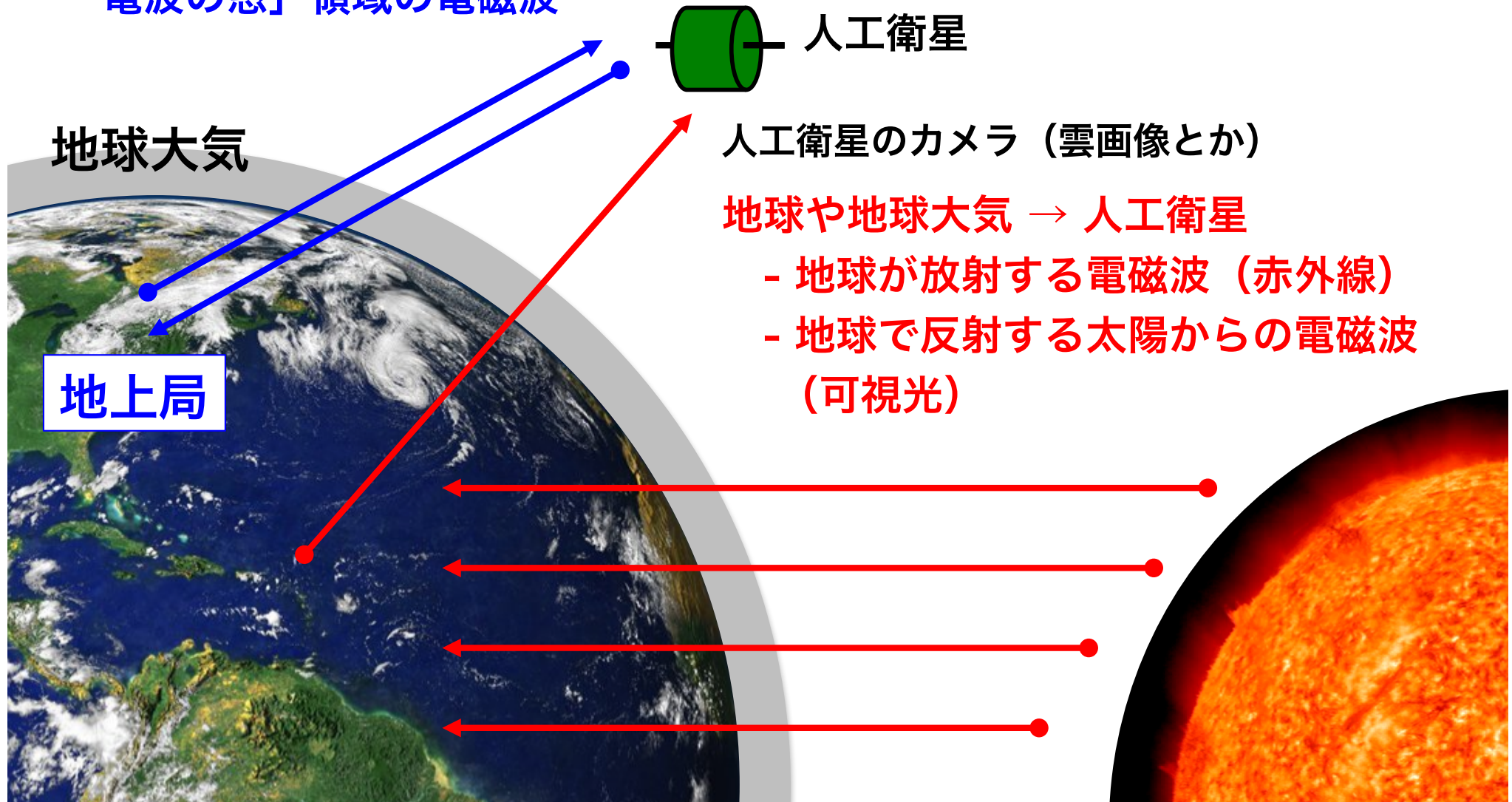
高度 850 km と高度 36000 km からのリモートセンシングデータ（気象画像）



衛星との間を行き交う電磁波

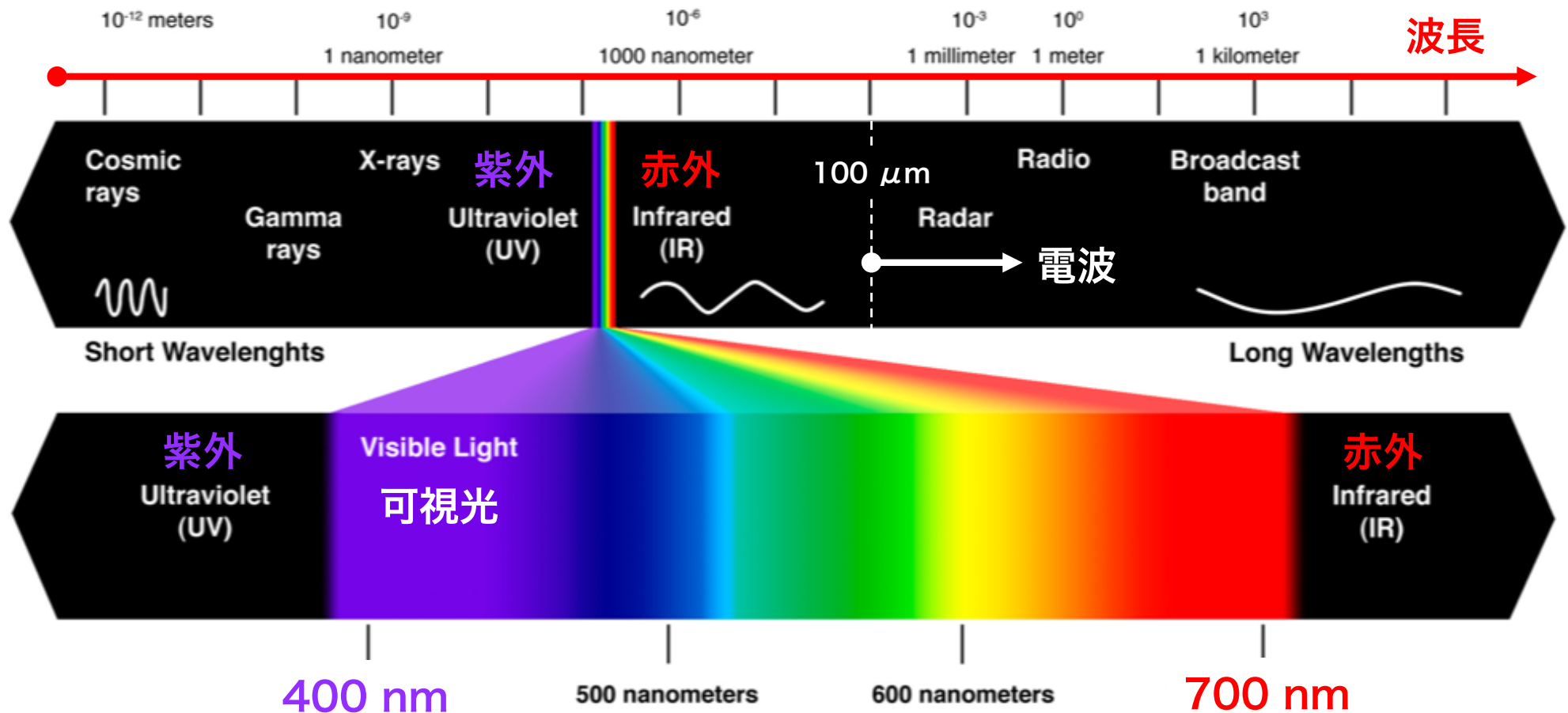
通信のための電磁波（人工衛星 ↔ 地上局）

「電波の窓」領域の電磁波



電磁波のおさらい

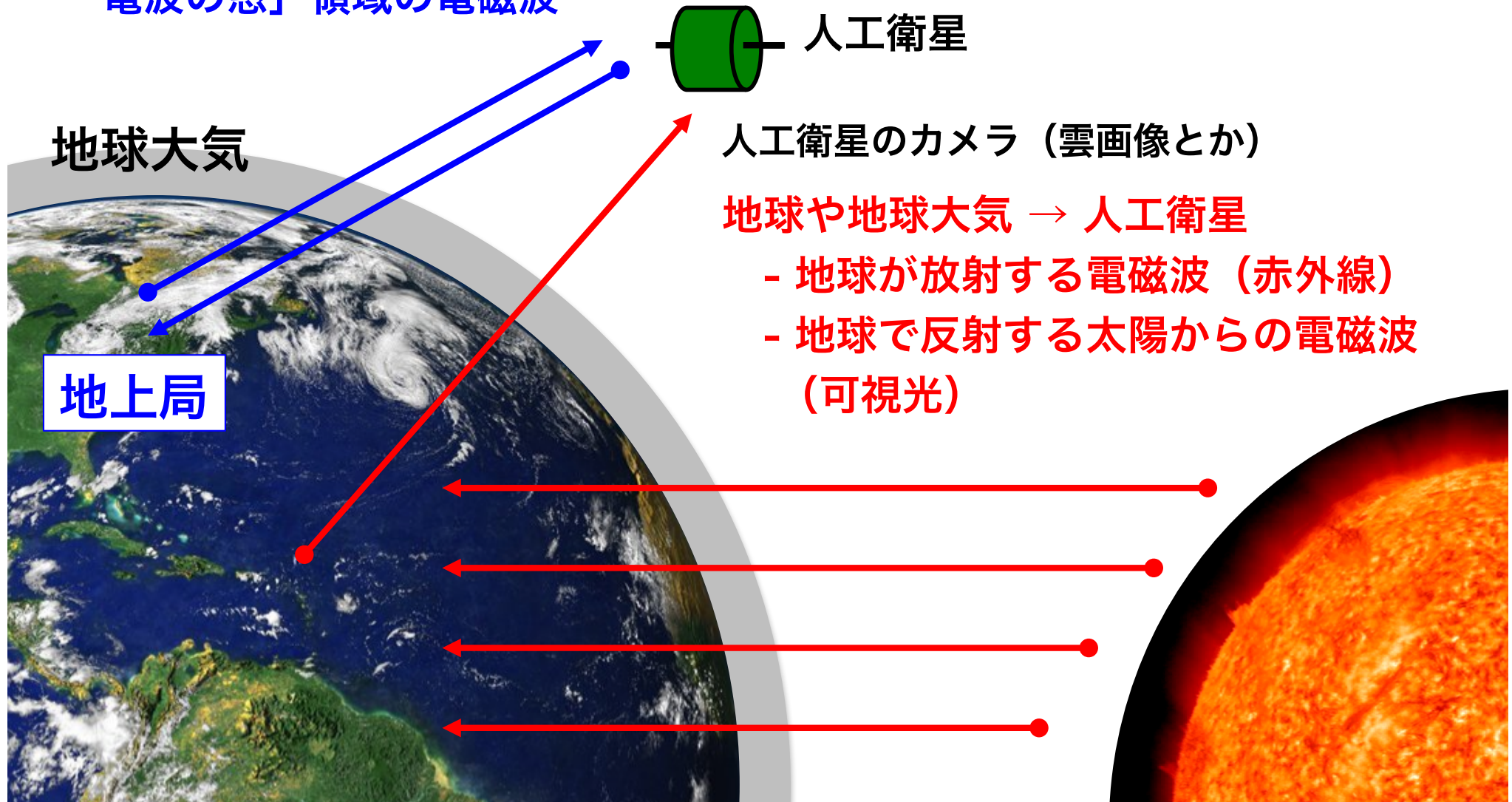
電界と磁界の時空間変化を伝える横波, 真空中の位相速度は $3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$
宇宙線も, ガンマ線も, X線も, 紫外線も, 赤外線も, 光も, 電波も, 全部電磁波



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

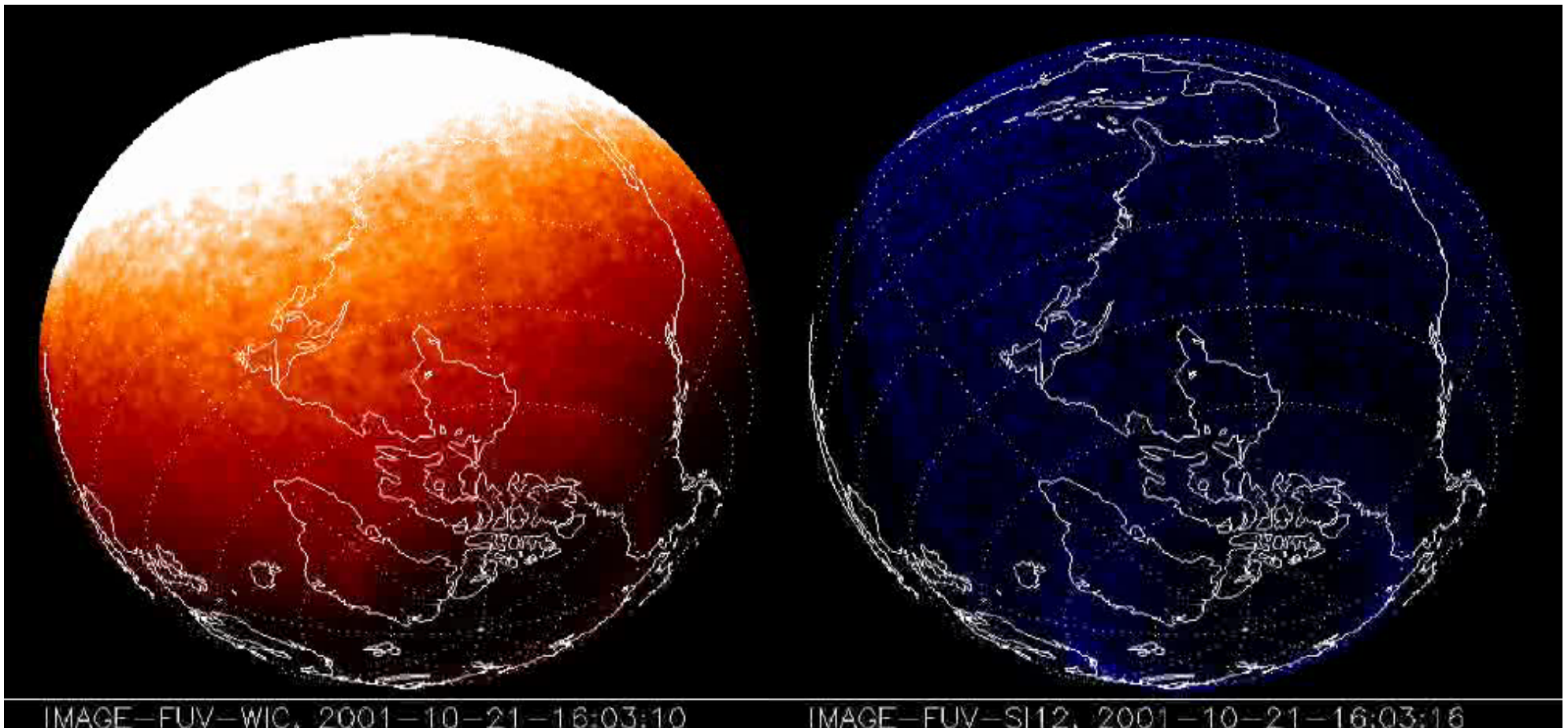


実習では取得しないデータ

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

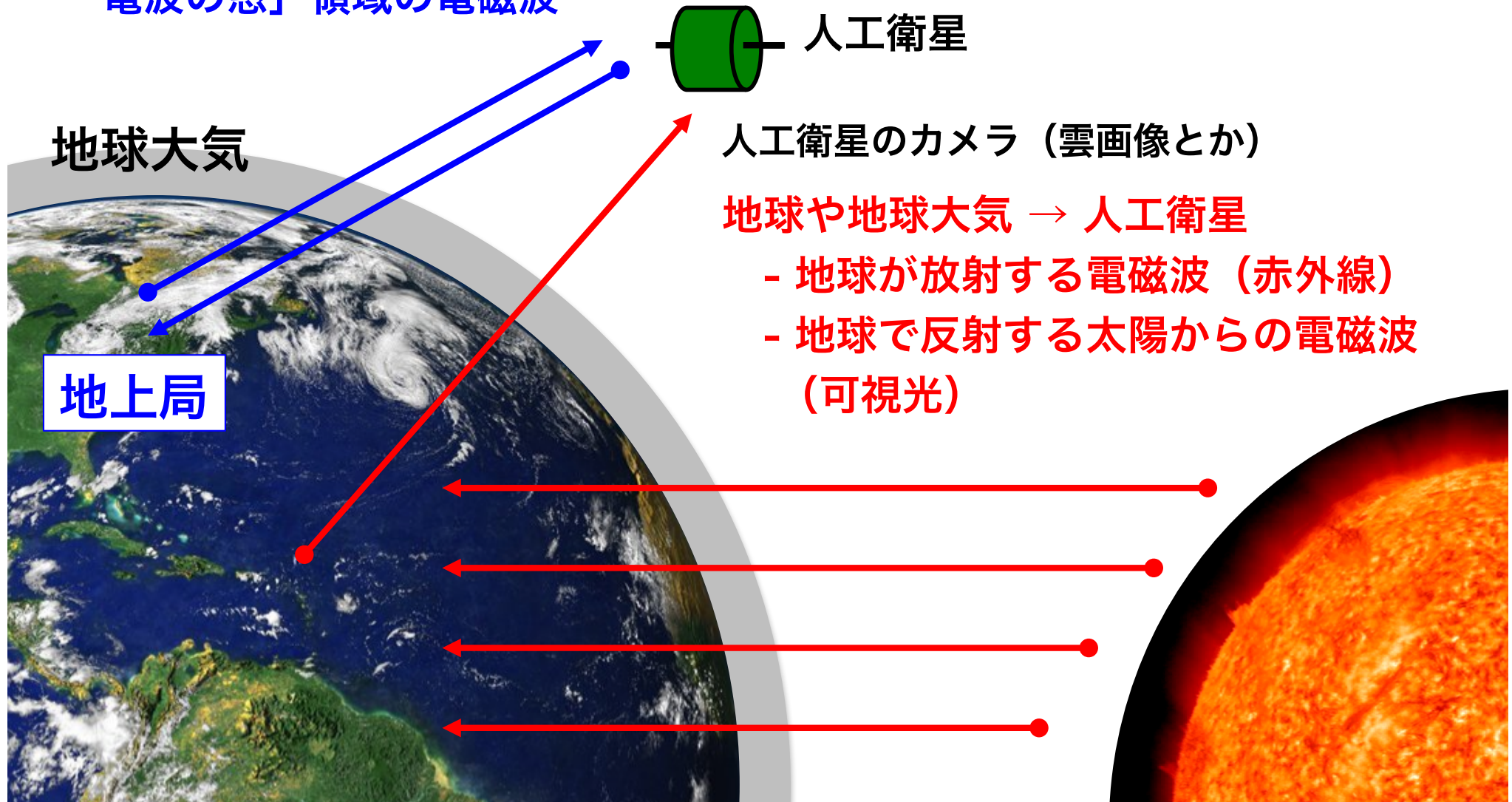
135.6 nm: プロトンによる発光



衛星との間を行き交う電磁波

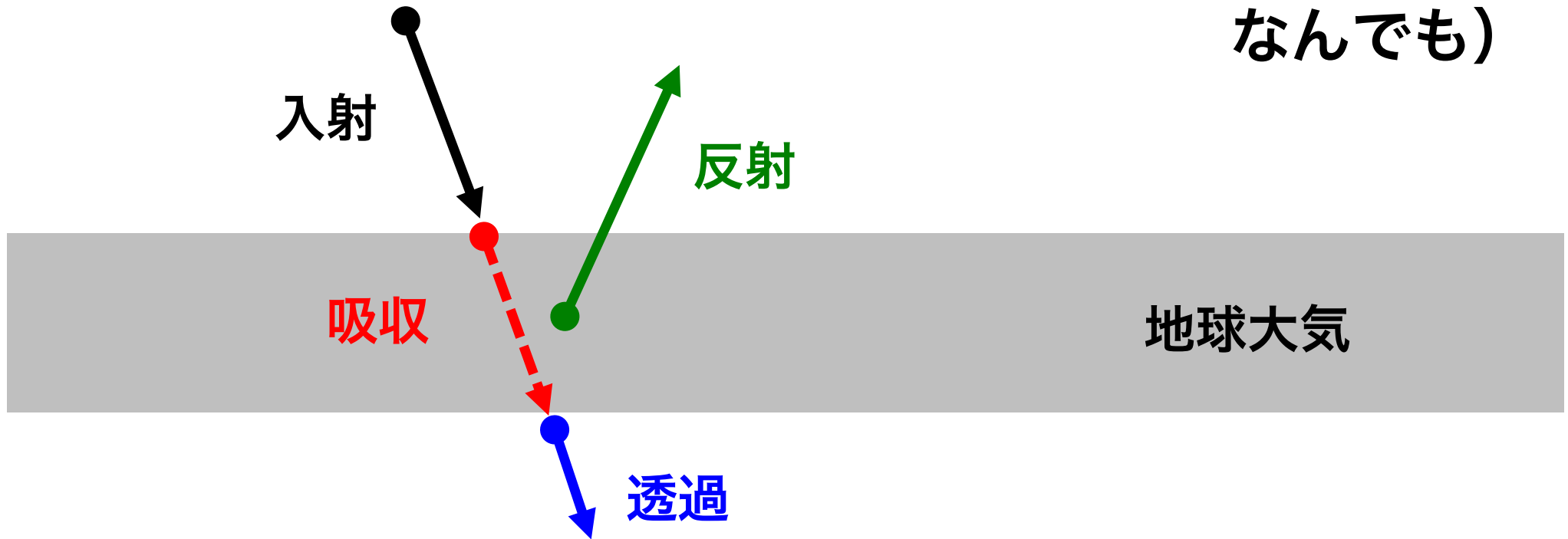
通信のための電磁波（人工衛星 ↔ 地上局）

「電波の窓」領域の電磁波



吸収, 反射 (散乱), 透過

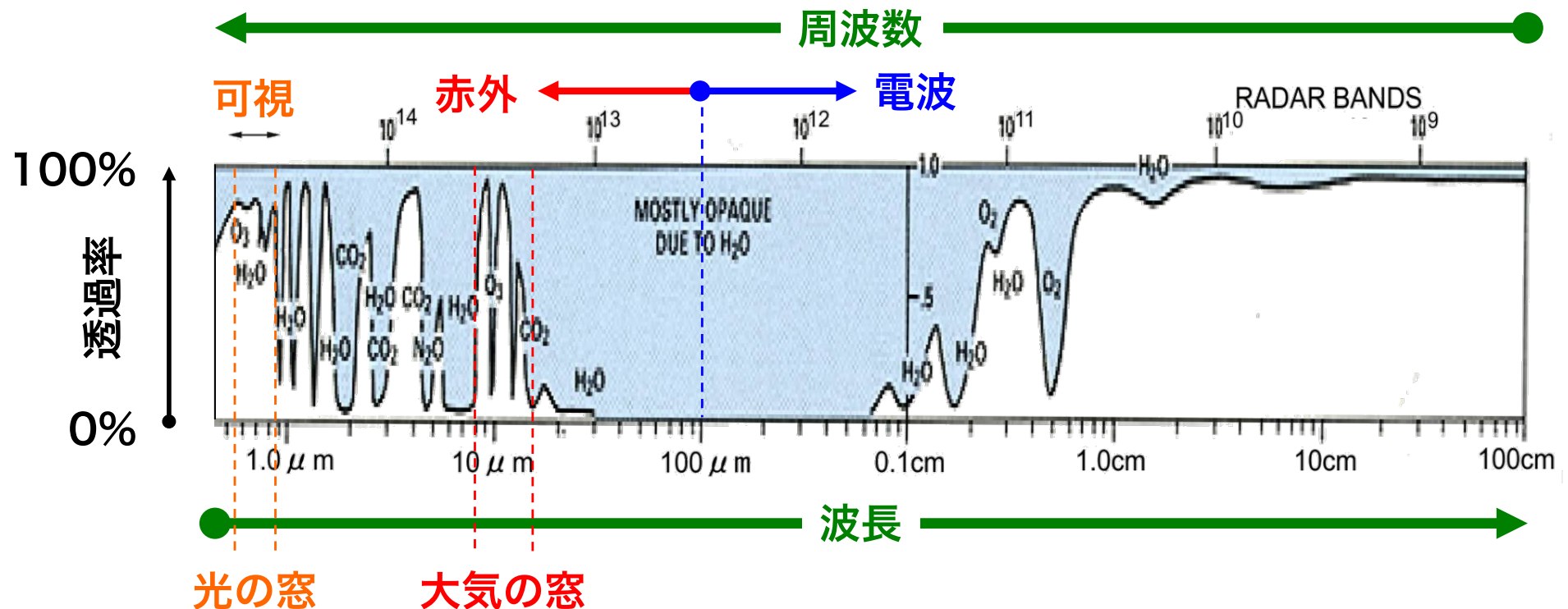
大気に入射する電磁波 (太陽光でも通信電波でも
なんでも)



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

異なる波長の電磁波に対して“異なる”吸収率

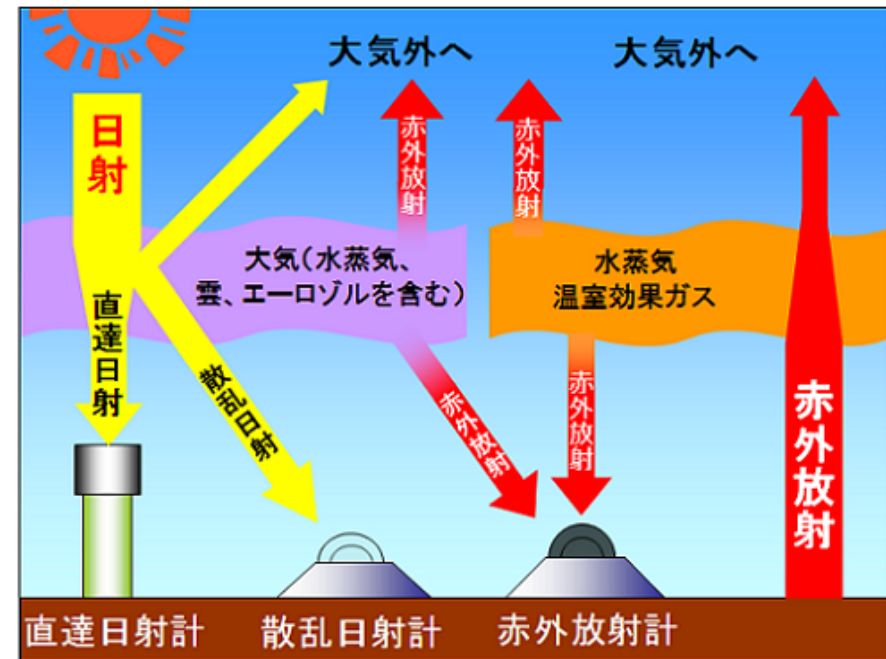
可視光から電波までの吸収特性



- 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.

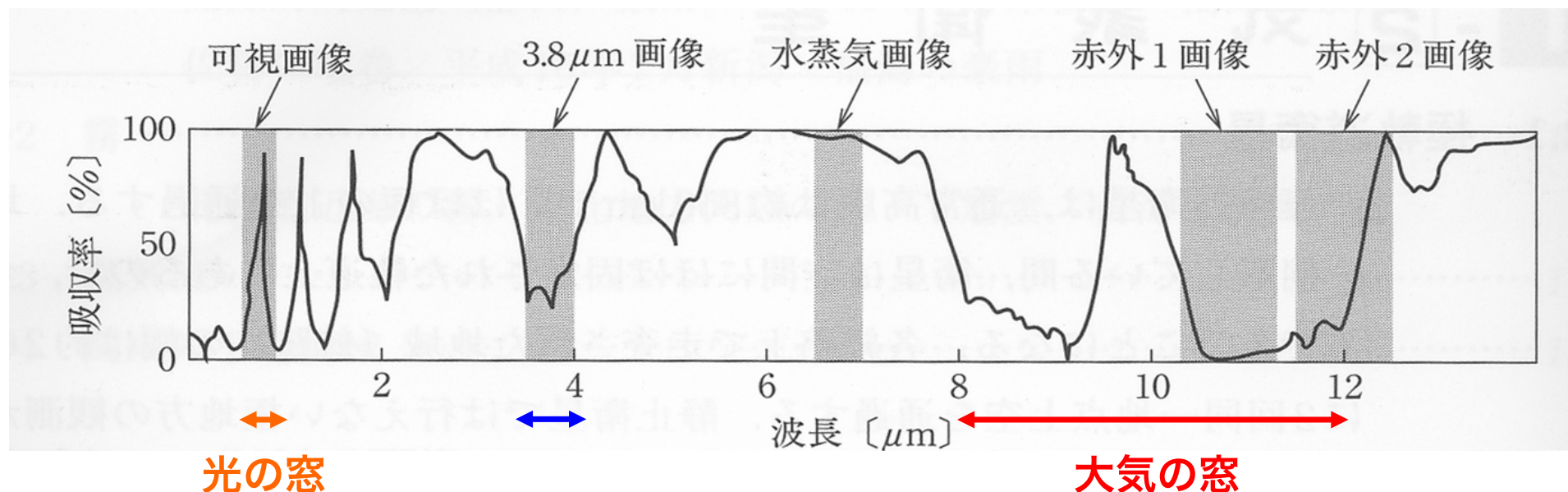


(気象庁 HP より引用)

- 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」

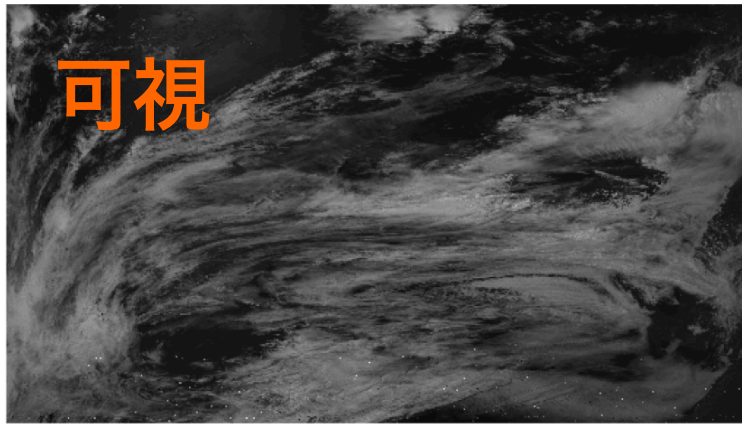


図 2.15 NOAA 衛星気象画像 (CH1: 可視波長域)

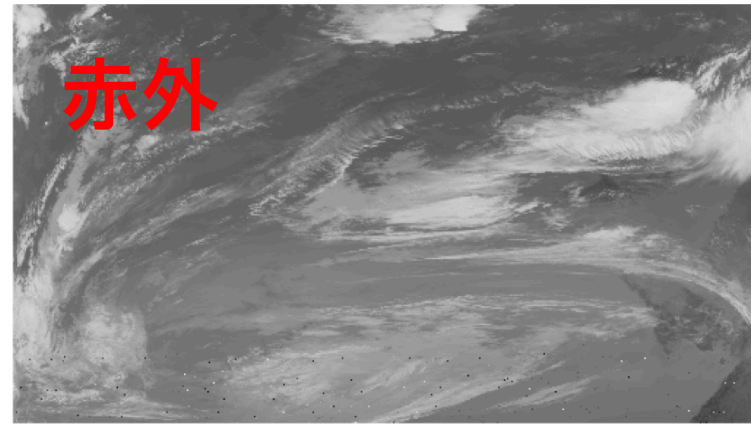


図 2.16 NOAA 衛星気象画像 (CH4: 赤外波長域)

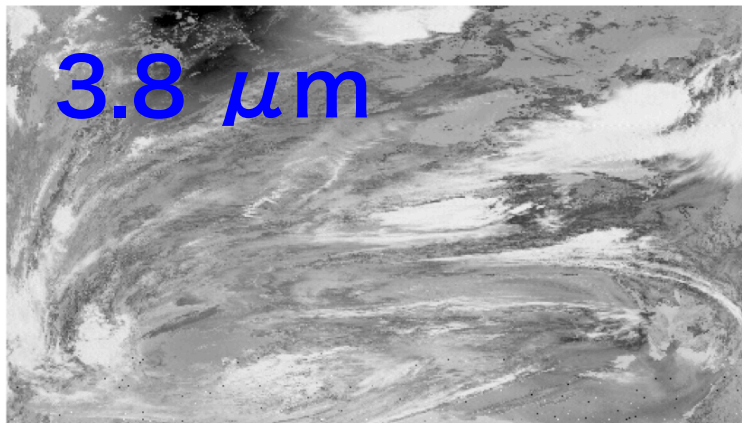


図 2.17 NOAA 衛星気象画像 (CH3: 3.8 μm)

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

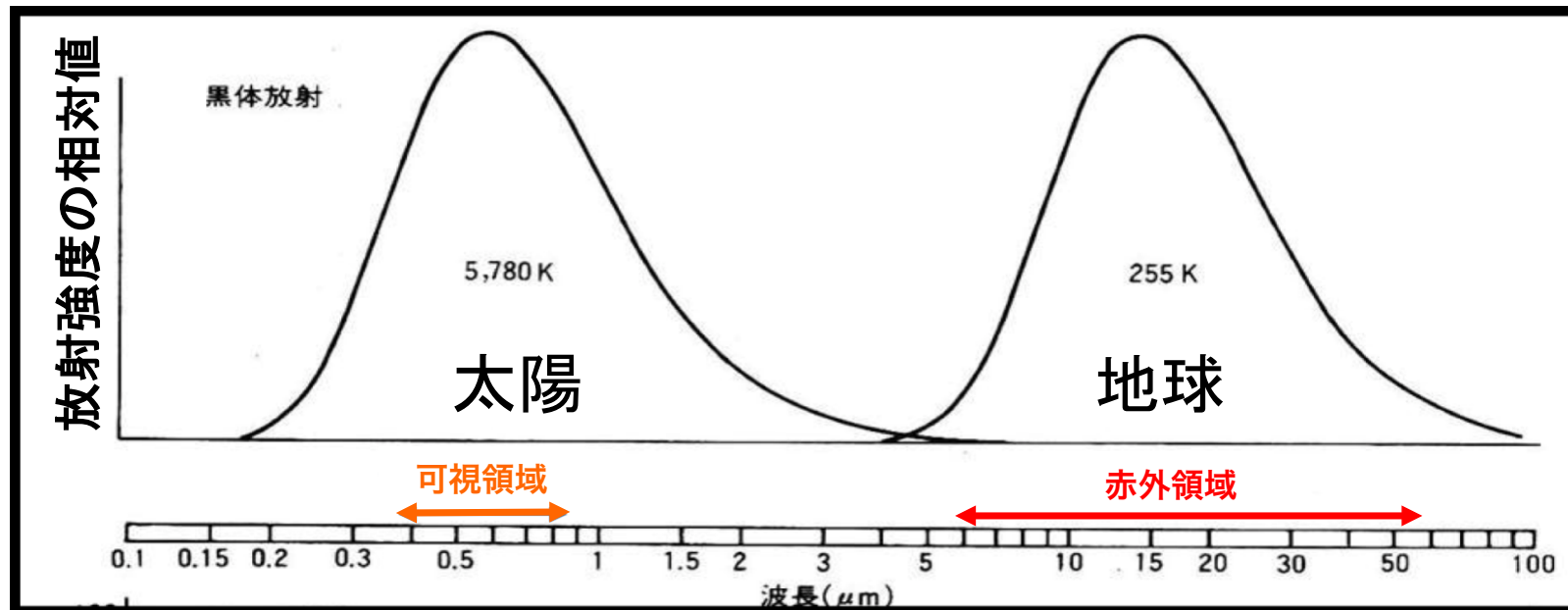
赤外: 地球の放射に関連

- ・ 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

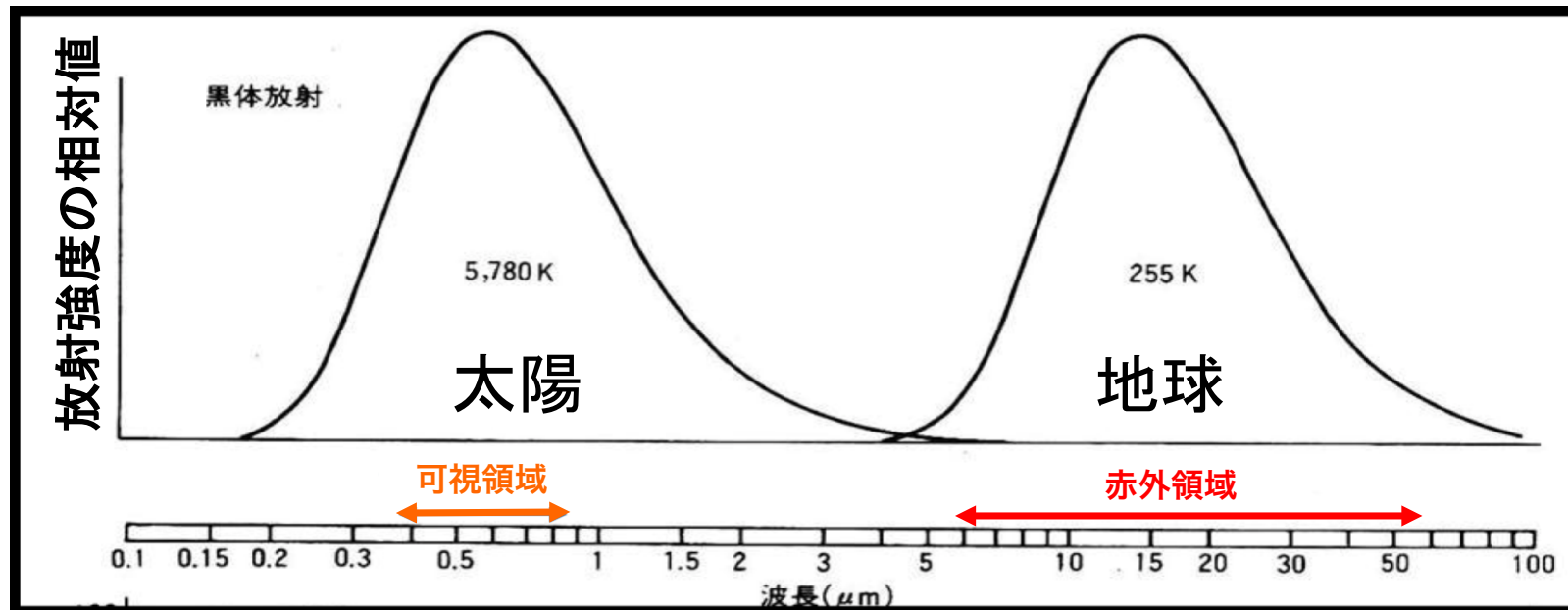
$$\lambda_{\text{peak}} \text{ (m)} = 0.002898 / T \text{ (K)}$$

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

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

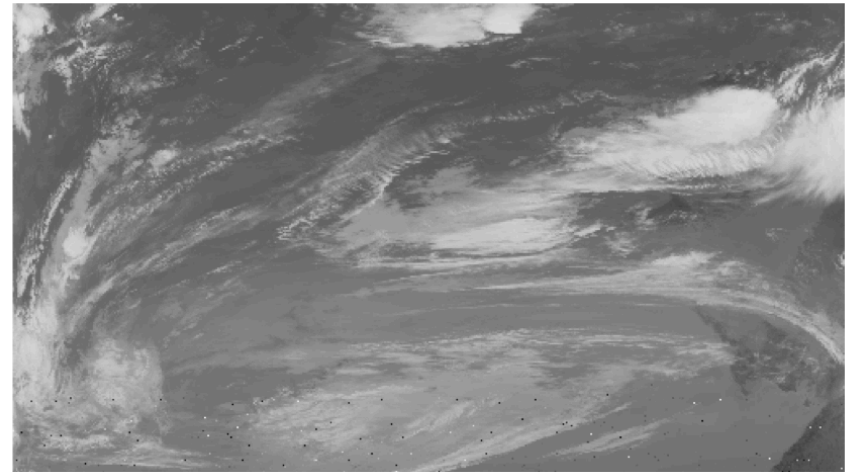
地球と太陽からの放射



- 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。

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。

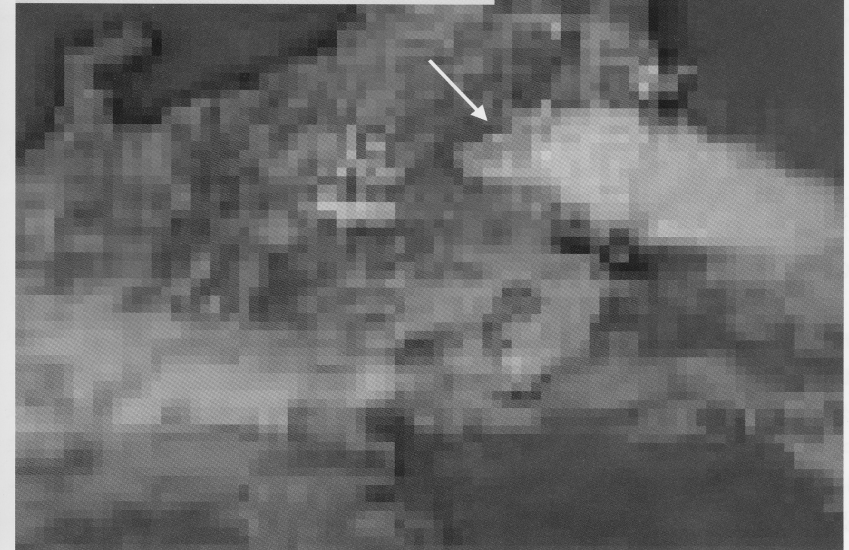
2005 年 7 月 17 日 16 時 赤外



気象庁ホームページに加筆

(b) 衛星雲画像 (赤外)

2005 年 7 月 17 日 16 時 可視



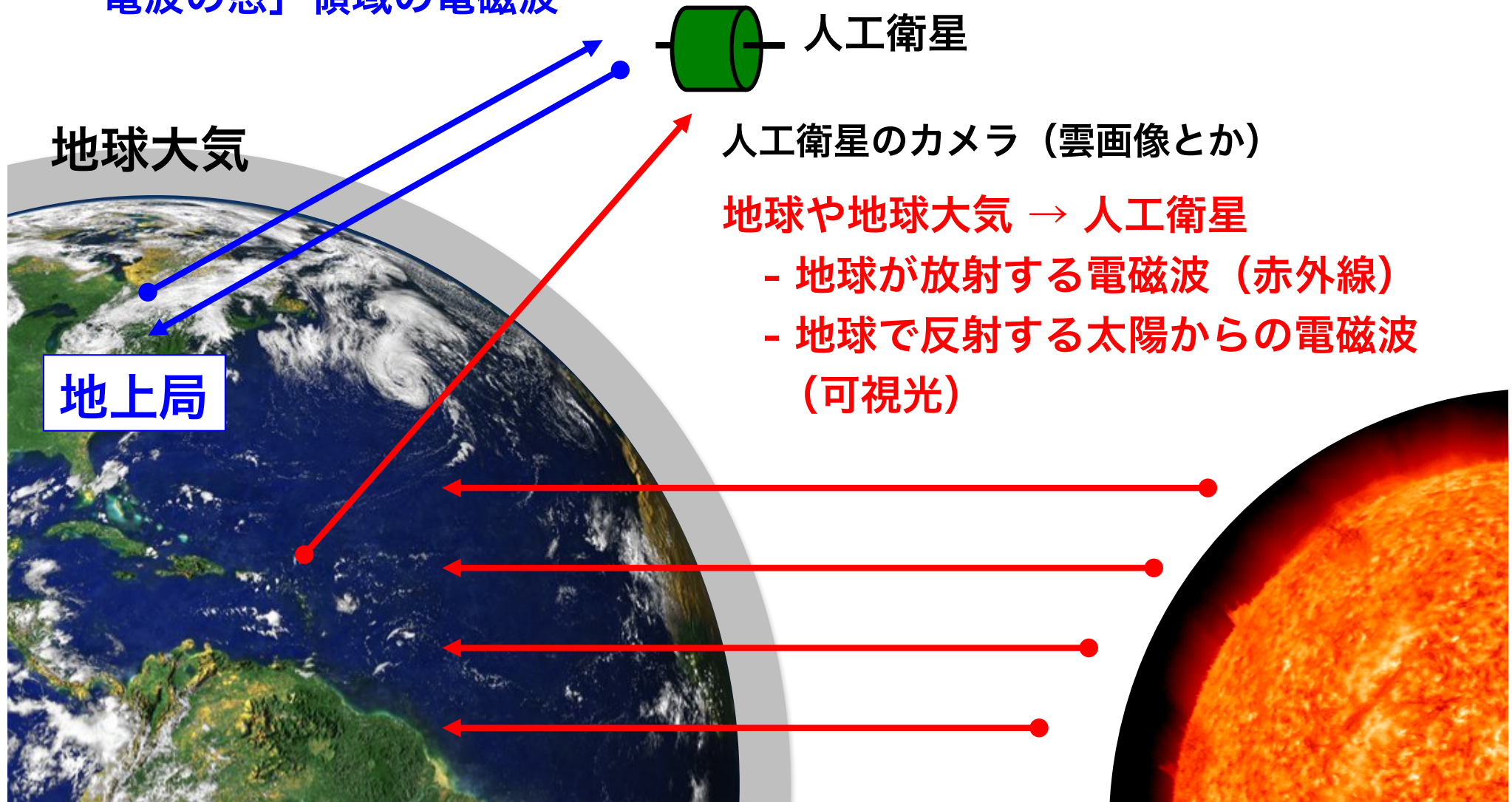
気象庁ホームページに加筆

(c) 衛星雲画像 (可視)

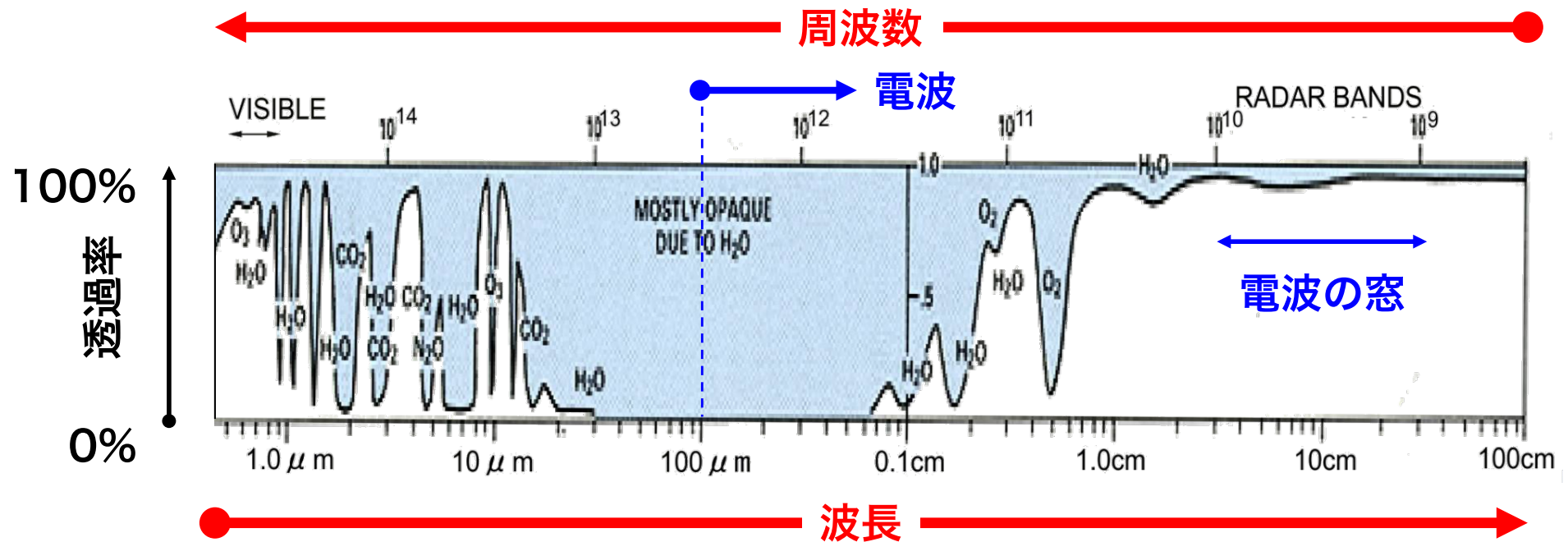
衛星との間を行き交う電磁波

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



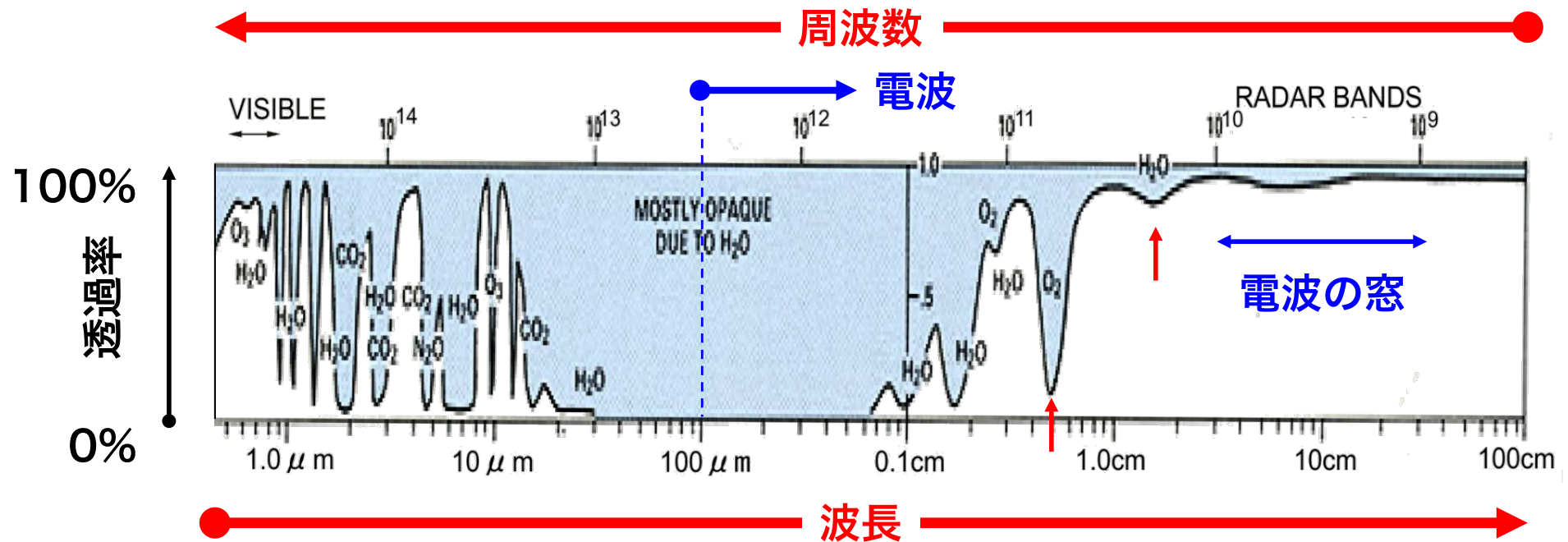
- 1-10 GHz では大気の影響少ない **「電波の窓」**

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？

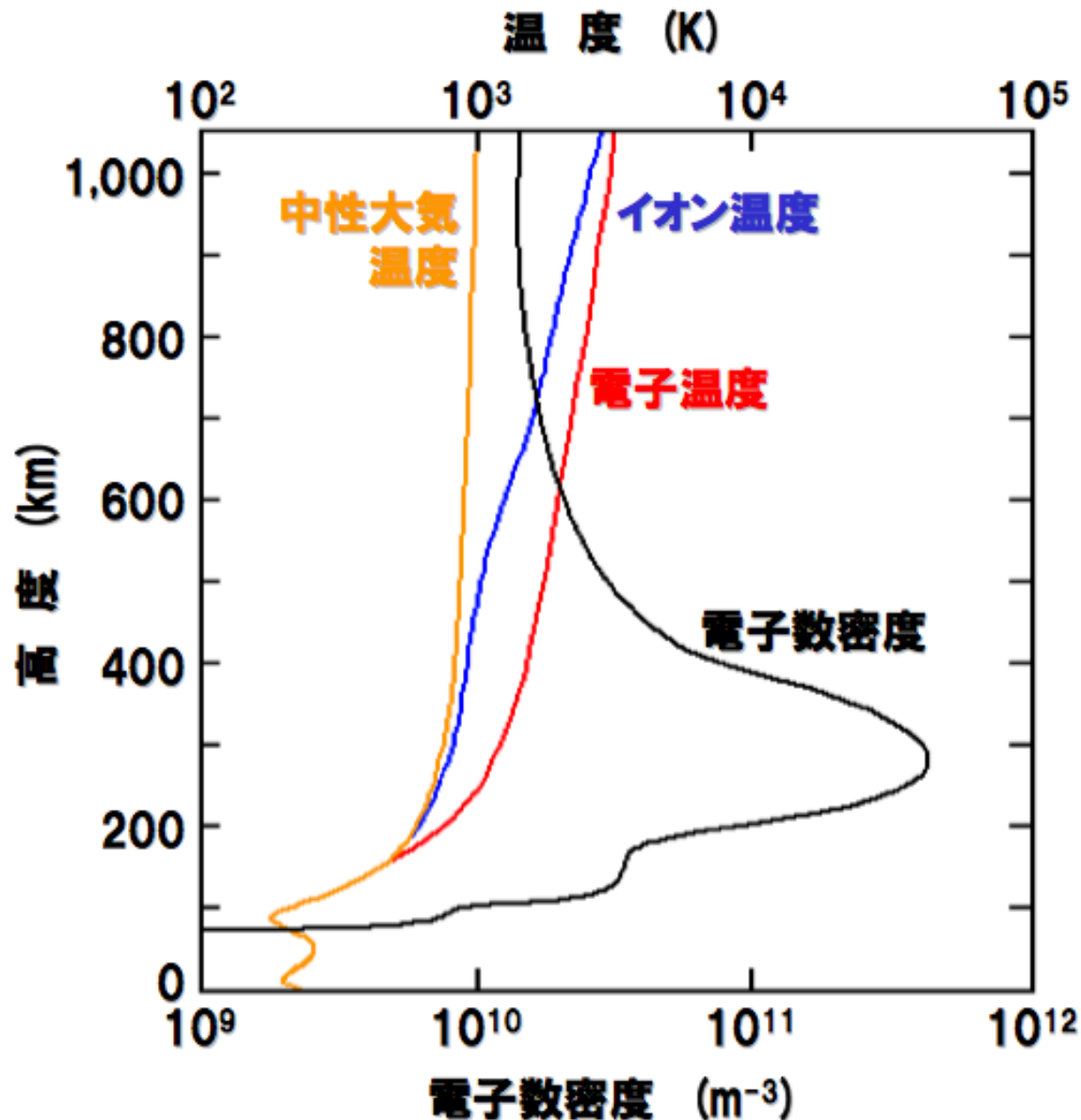


- これより高い周波数: 大気の吸収による電波の減衰
~ 22 GHz 水蒸気分子, ~ 60 GHz 酸素分子
- これより低い周波数 (MHz帯)
大気の電気を帯びた部分 (電離圏) の影響

地球と宇宙の間にある領域: 電離圏



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

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

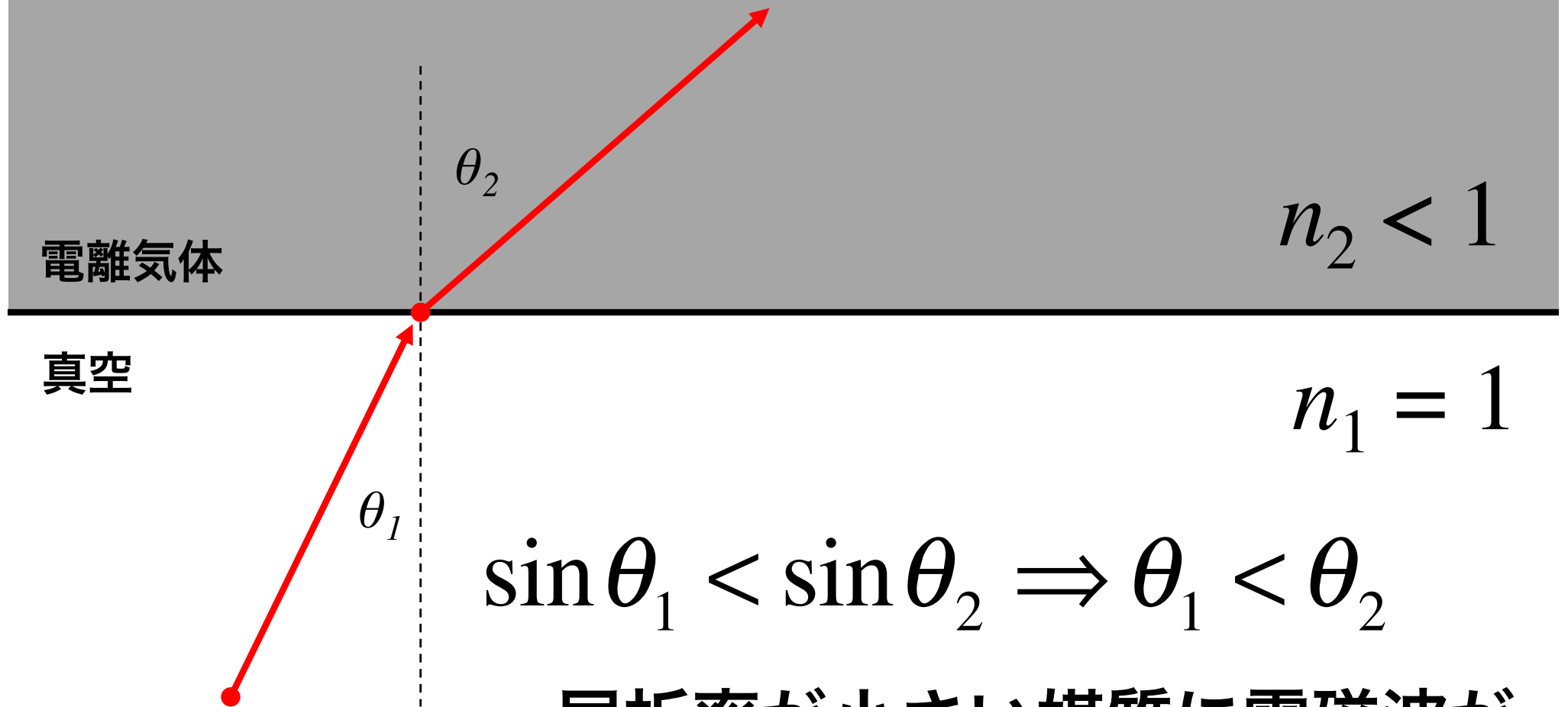
ただし, 媒質によって n は変わる
媒質によって電磁波の速度も変わる

- 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

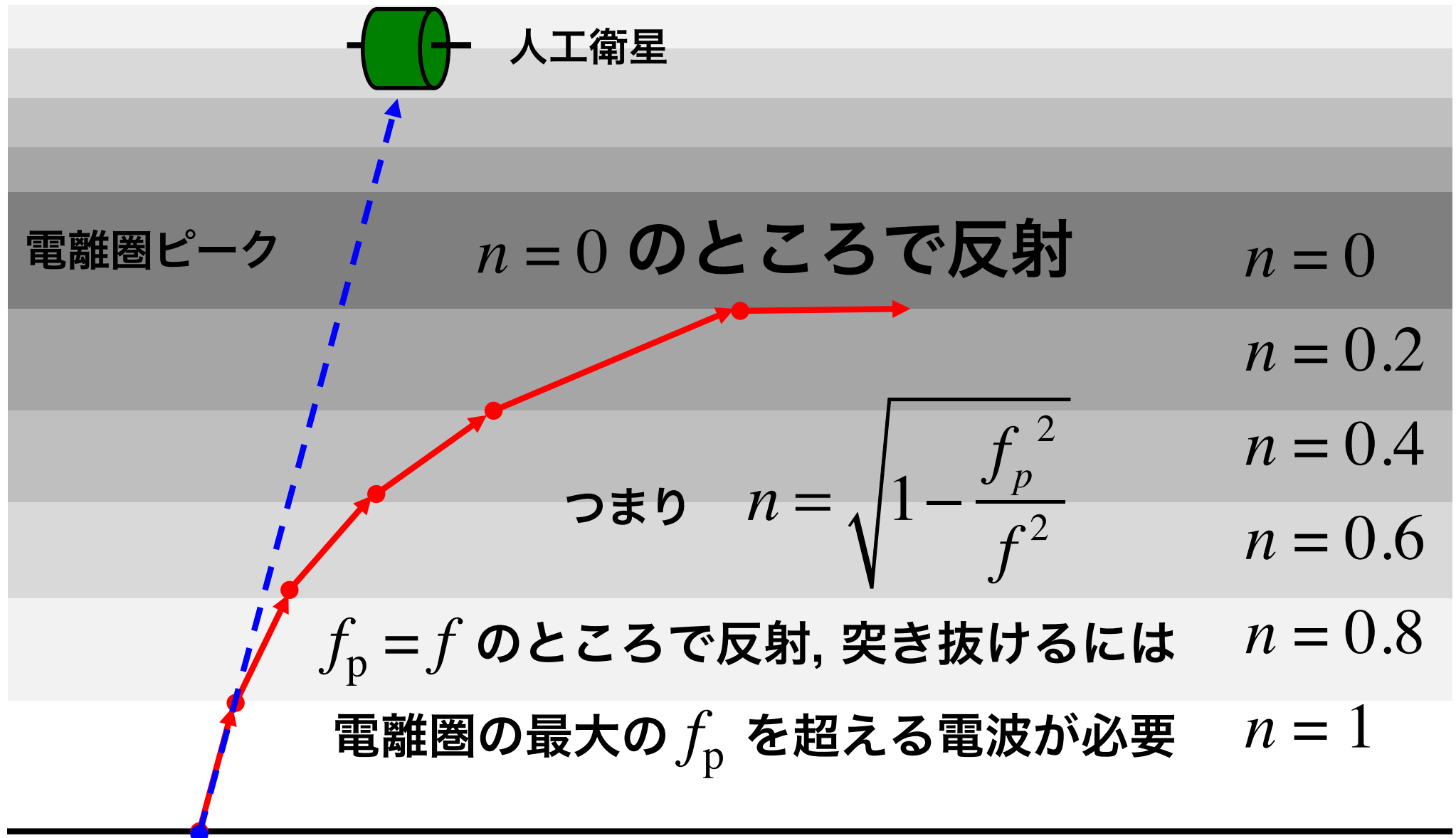
スネルの法則 $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$



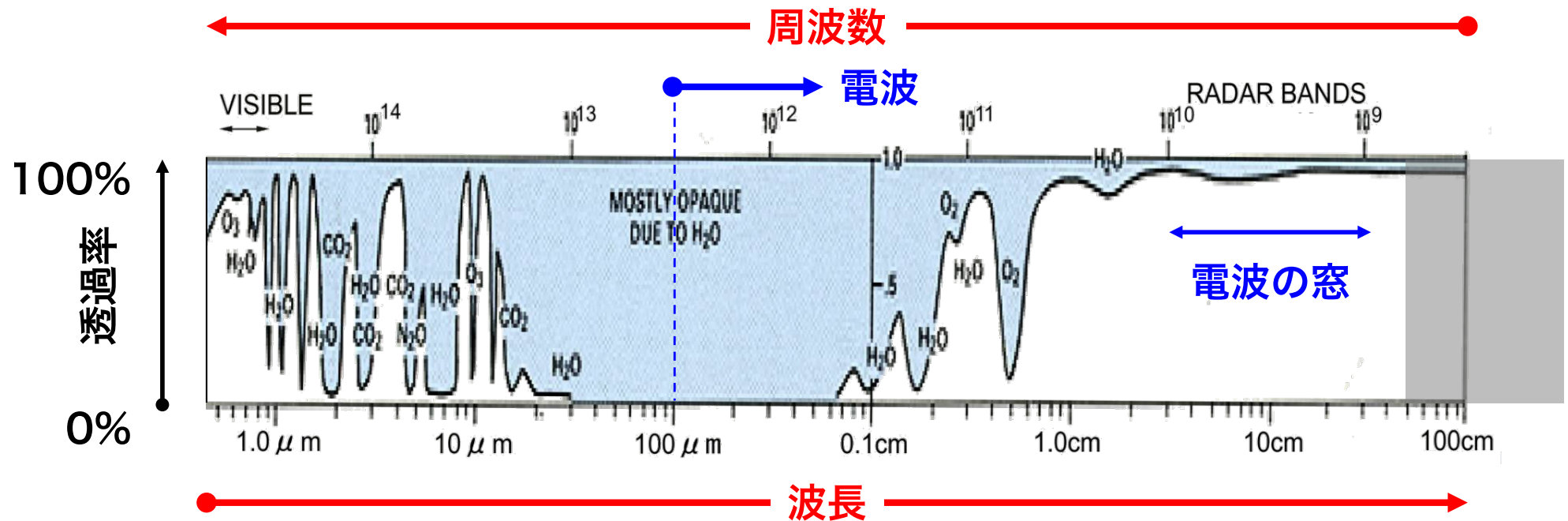
$$\sin \theta_1 < \sin \theta_2 \Rightarrow \theta_1 < \theta_2$$

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？



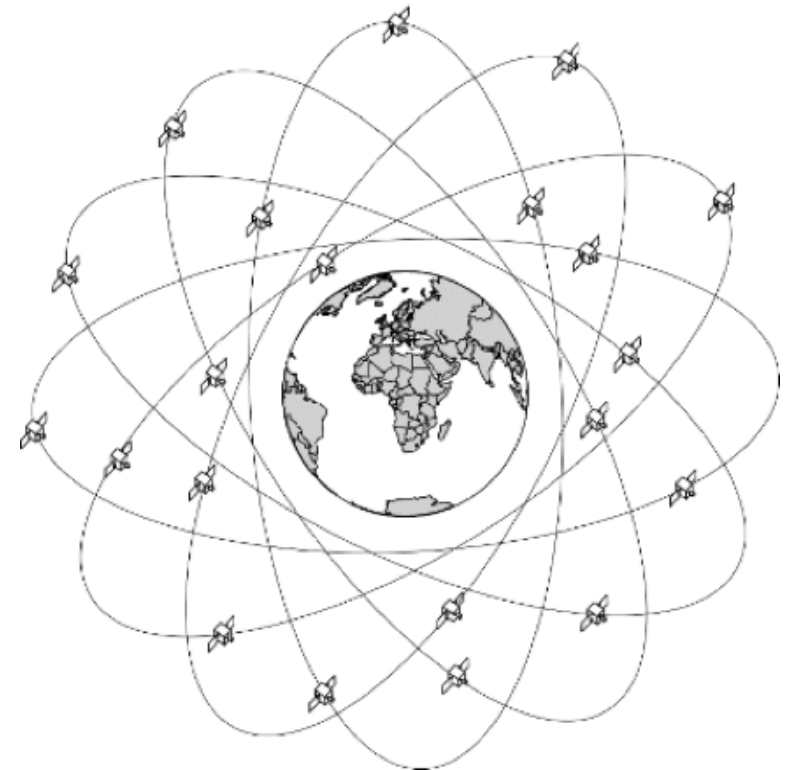
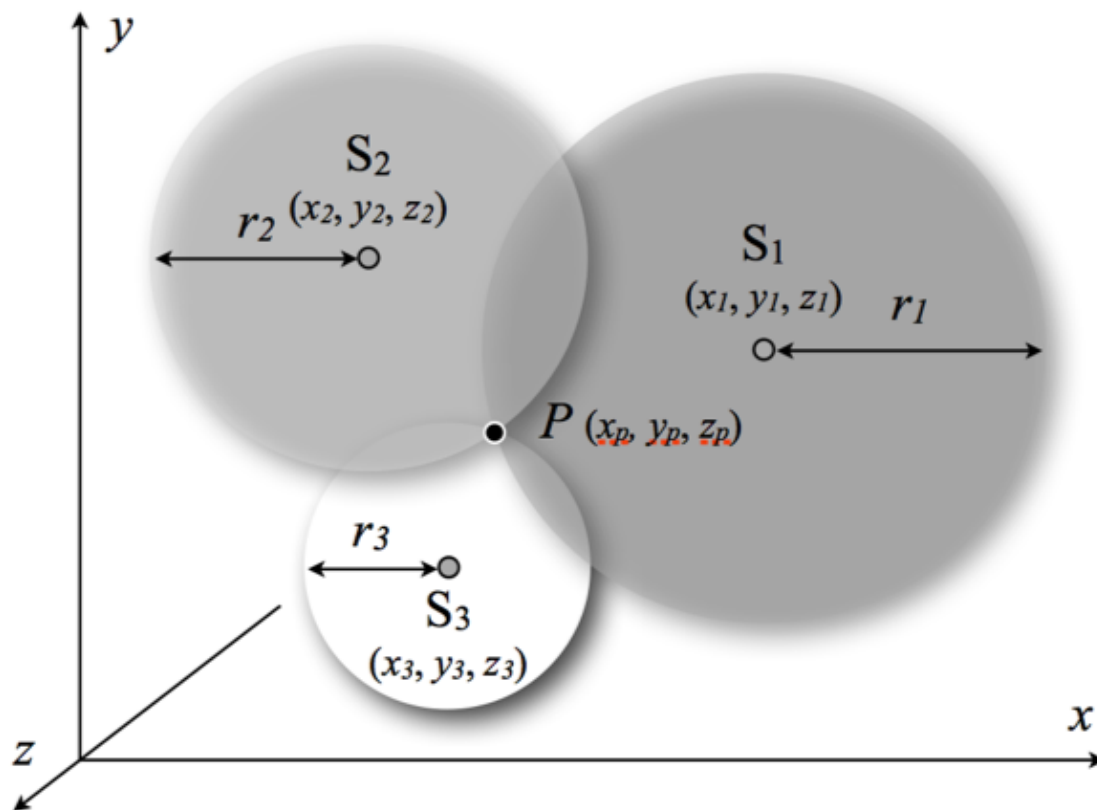
「電波の窓」領域



- 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

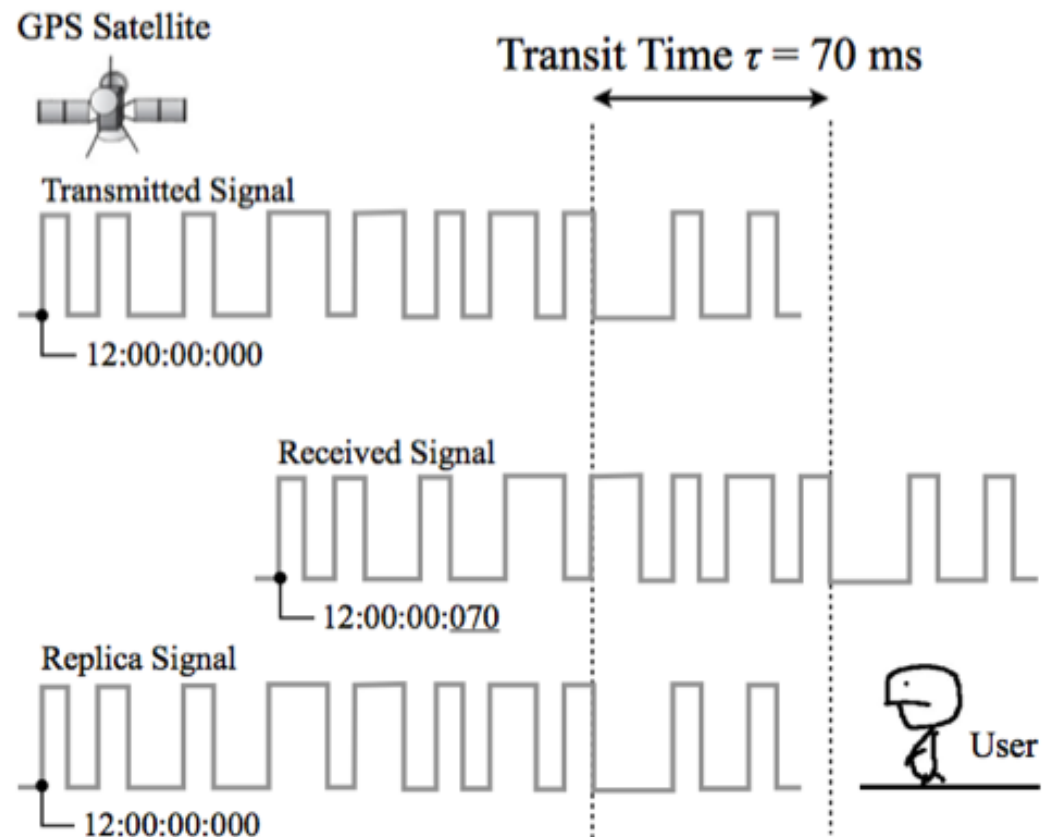
「電波の窓」にも電離圏の影響: GPS 測位

- 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

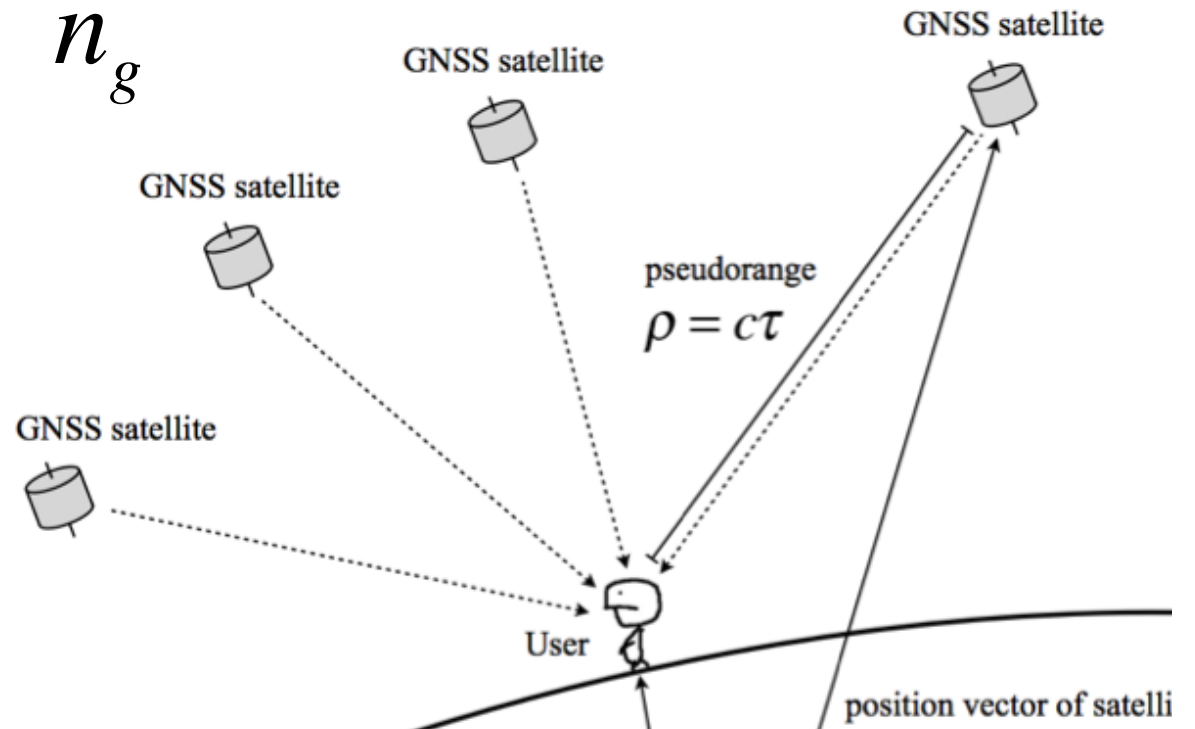


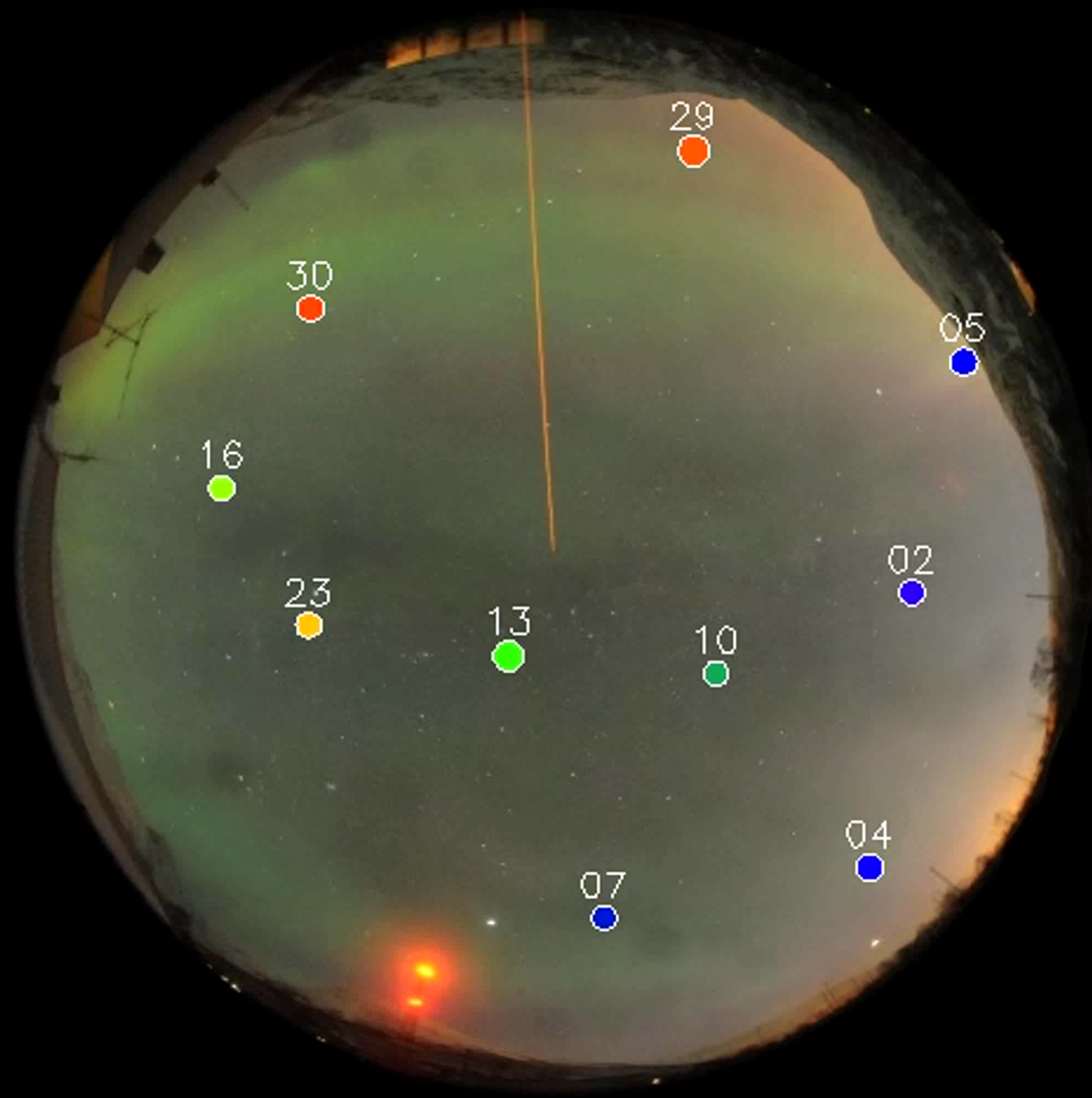
衛星測位に見られる誤差

- 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.

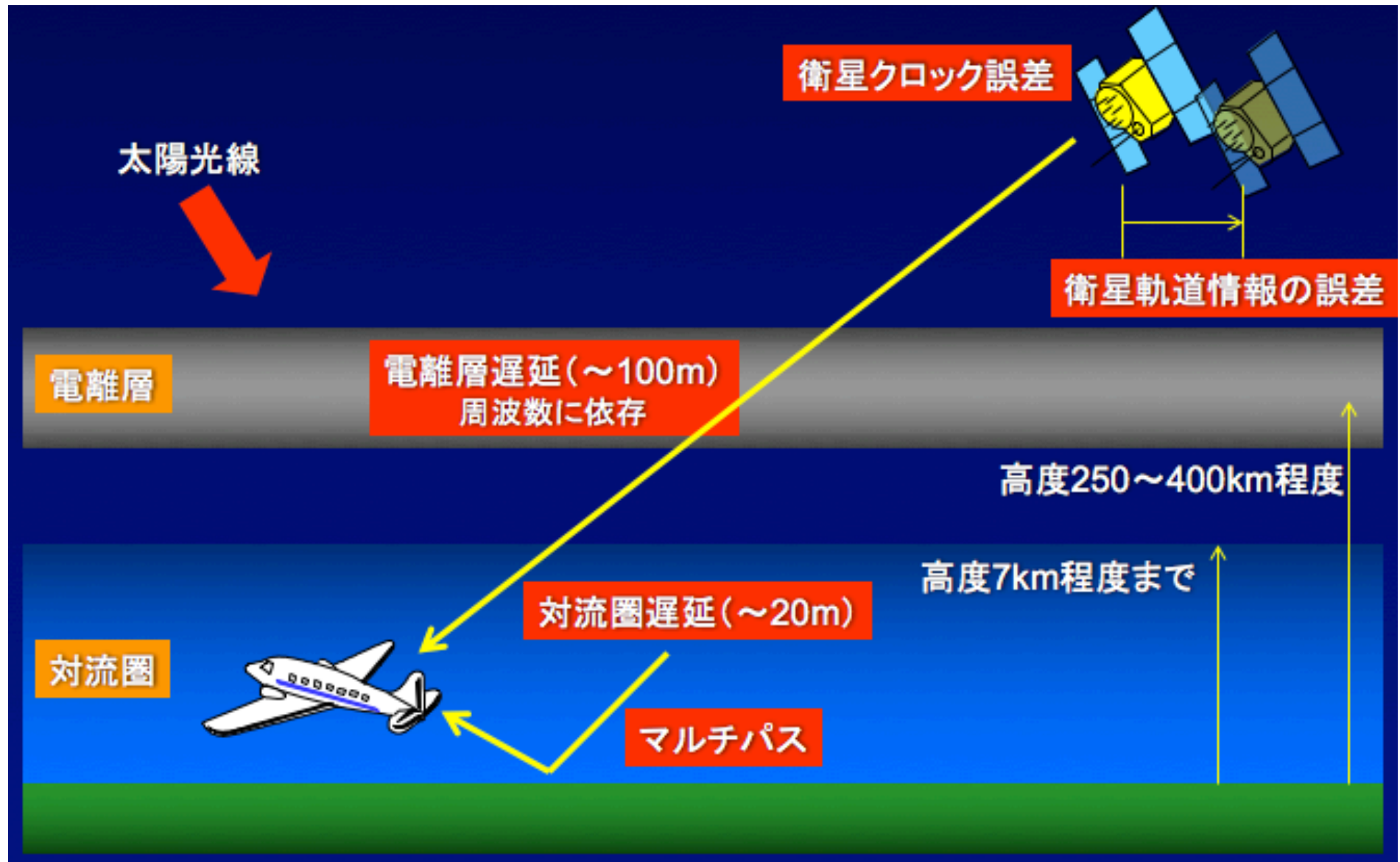
$$n_g = \sqrt{1 + \frac{f_p^2}{f^2}} \quad v_g = \frac{c}{n_g}$$

- 衛星までの距離を過大に推定
- 測位誤差に繋がる





衛星測位に対する様々な誤差要因



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.
- 「電波の窓」の範囲内であっても, GPS などの衛星測位の電波には電離した大気が影響を与える. この他にも, GPS の測位精度には, 対流圏の水蒸気量やマルチパスなどが影響を与える.

レポート課題（細川）

講義の内容を踏まえて「光の窓」「大気の窓」「電波の窓」について、その意味と波長帯についてまとめ、これらの窓の存在が気象衛星にとってどのような意味を持つかについて延べよ。ここで気象衛星は地球近傍の宇宙空間から気象画像（雲画像）を取得して、地上に配信する衛星システムのことを指す。

もし、これらの窓がない場合、現在運用されている気象衛星システムがどのようなになるかを考えてみると良い。