

大気光 1 概観編

ver21may22

以下 2 分光知識編 3 測器編 4 光化学・輸送編 5 各例編

7月22/25/28/29 の4日間 120分授業1日2回 計8回予定

成績は編末で行う小テスト点で決める

自己紹介: 岩上直幹 (いわがみ なおもと)

iwagamina@hotmail.co.jp

1950年生まれの東京世田谷原住民 幼少より天文少年

1970-90年代 大学院生・大学教員として

地球大気・大気光のロケット・気球観測・研究に従事

1976-78年 南極昭和基地越冬・オーロラ観測

1980-90年代 地球オゾン層・大気光層・酸素原子層の観測・研究

1999年より 金星探査機あかつき開発、赤外カメラ担当

2010年5月 あかつき打ち上げ、しかし12月まさかの金星軌道投入失敗

2015年12月 あかつき金星軌道投入再試行成功、観測はじめ

2016年3月 65歳定年退職

2016年12月 あかつき赤外カメラ動作停止

2022年現在も あかつきボランティア継続中

大気光 (airglow) とは 「熱放射以外の大気発光」・・・広い定義

これだとオーロラもレーリー散乱 (青空) も当てはまる

熱放射とは 「熱衝突励起による放射」

オーロラとは 「荷電降下粒子による大気発光」

狭い定義では「夜間電離圏大気の化学発光」・・・ふつうに大気光と言うとこれ

次頁はISS (国際宇宙ステーション) ムービー (25倍速)
オーロラと夜間大気光層 (557.7nm G線・589nm D線) がみえている

以下 G線 (酸素原子 557.7nm 緑線) R線 (酸素原子 630.0nm 赤線)
D線 (ナトリウム 589.0nm 589.6nm 二重橙線) としばしば略称する

E族 F族 コロナ族 という名称は生成高度域を示している (物理が違う)
それぞれ 100km (電離圏 E 領域) 300km (電離圏 F 領域)
10000km (地球コロナ領域) あたり

参考書: 「超高層大気の物理学」8章大気光 9章オーロラ

永田・等松著 裳華房 1973年 復刻版 ¥6000

誤植多数 正誤表あり希望者に配布可

“Compendium of Aeronomy” Ogawa and Tohmatsu 1990

Terra Pub Co: 上記の改訂英訳版 ¥12000

ISS(国際宇宙ステーション)ムービー(25倍速) (飛行士による非公式画像)
南極オーロラと夜間大気光層(557.7nmG線・589nmD線)がみえている



地球惑星科学出ではない人もいるので
地球大気と大気分光について軽く述べておく

地球大気圏構造

90km以下が普通の大気(N₂8割O₂2割)

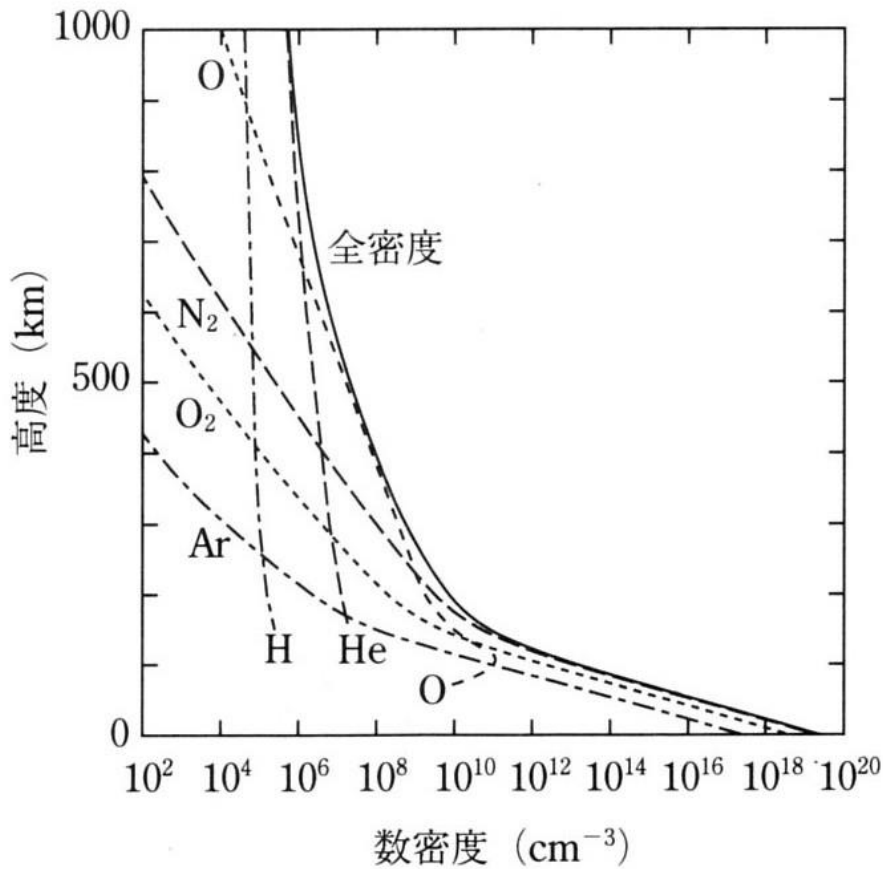


図 1-5 大気主要成分密度の高度分布

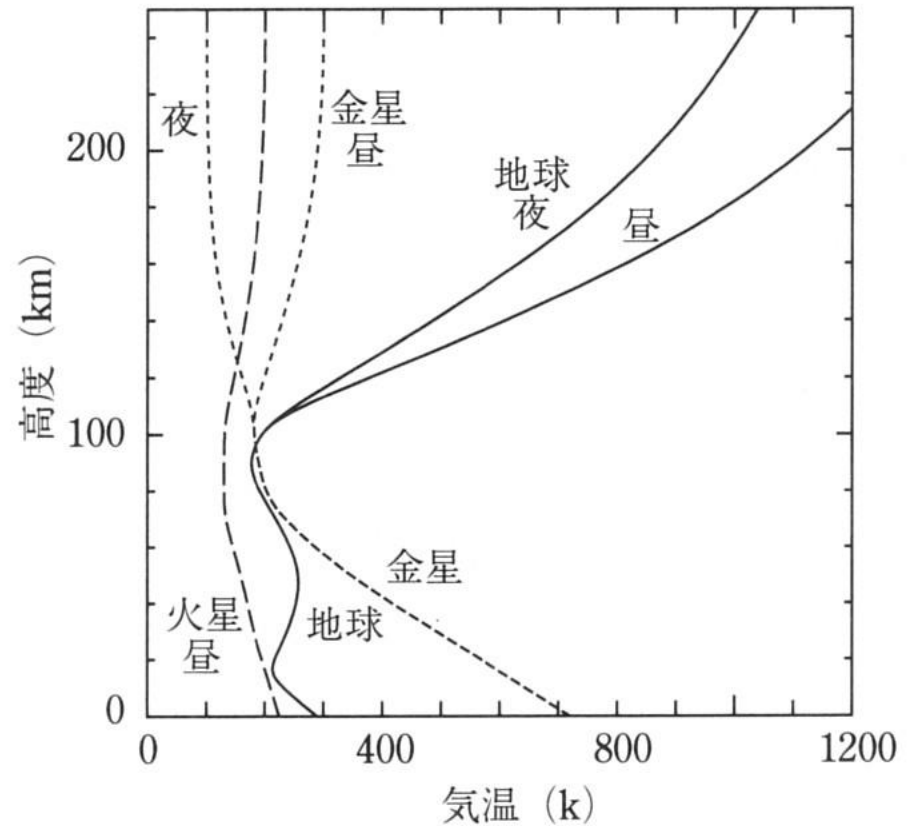


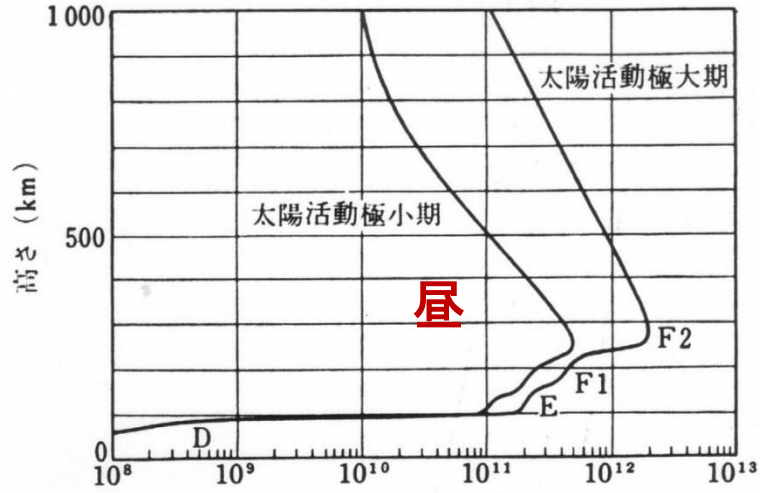
図 1-1 地球型惑星大気温度構造の
模式図

地球電離圏構造 (理科年表)

100km付近をE領域

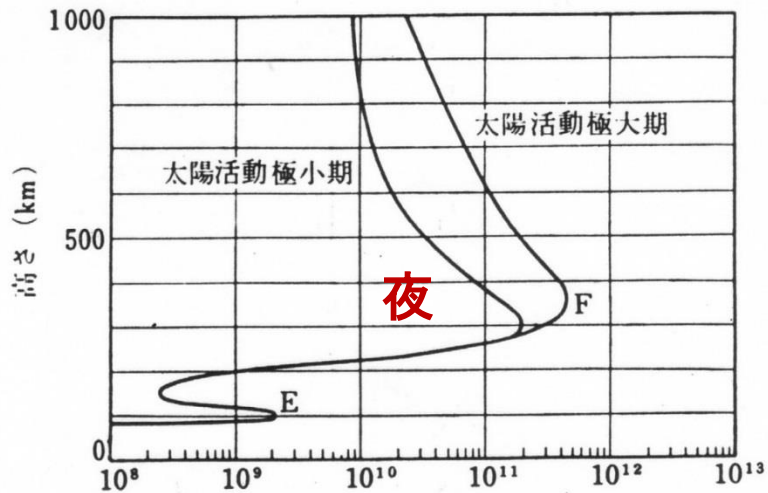
250km付近をF領域と呼ぶ

10000km付近がコロナ域(図外)



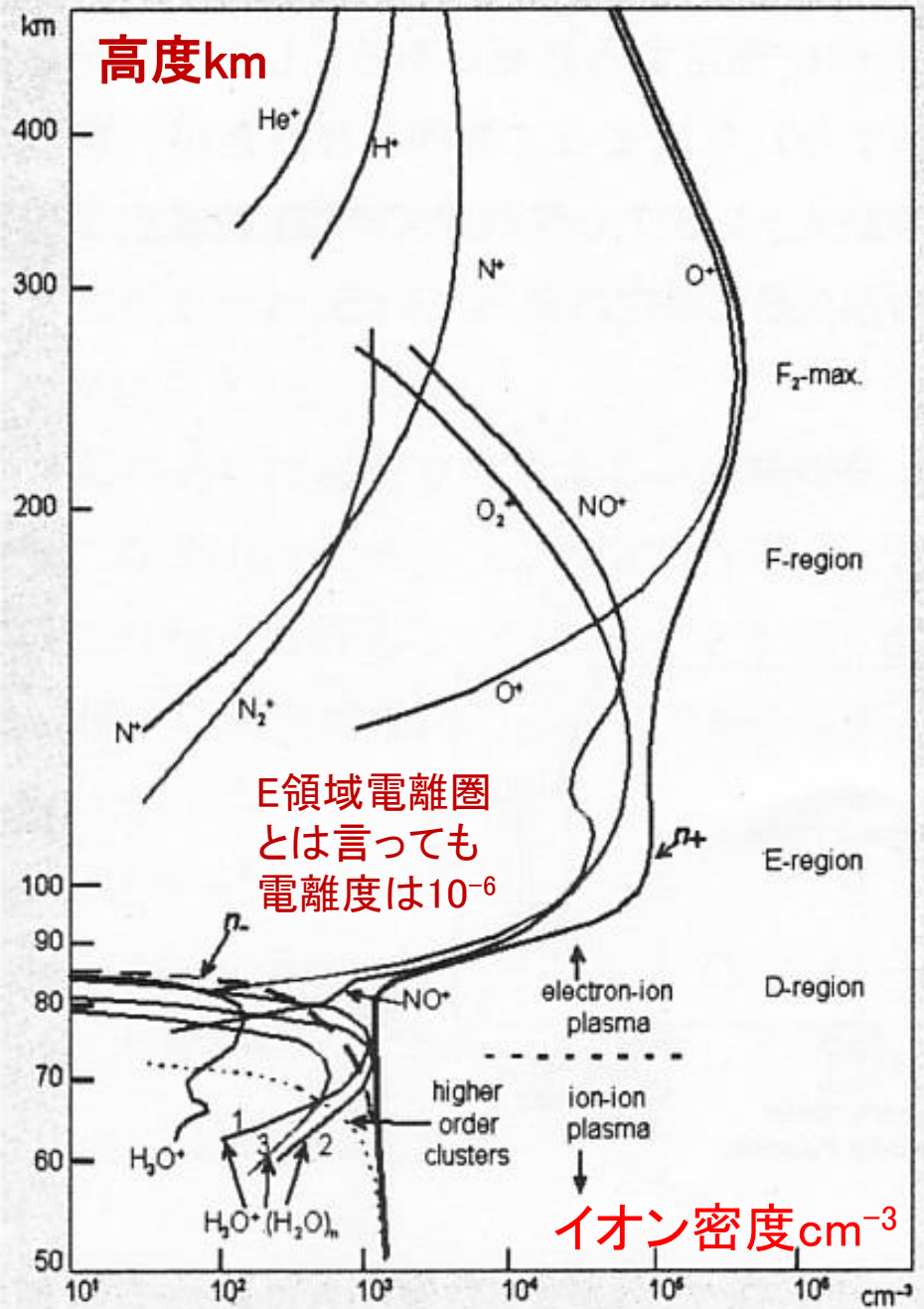
電子密度 (m^{-3})

(a) 昼間



電子密度 (m^{-3})

(b) 夜間

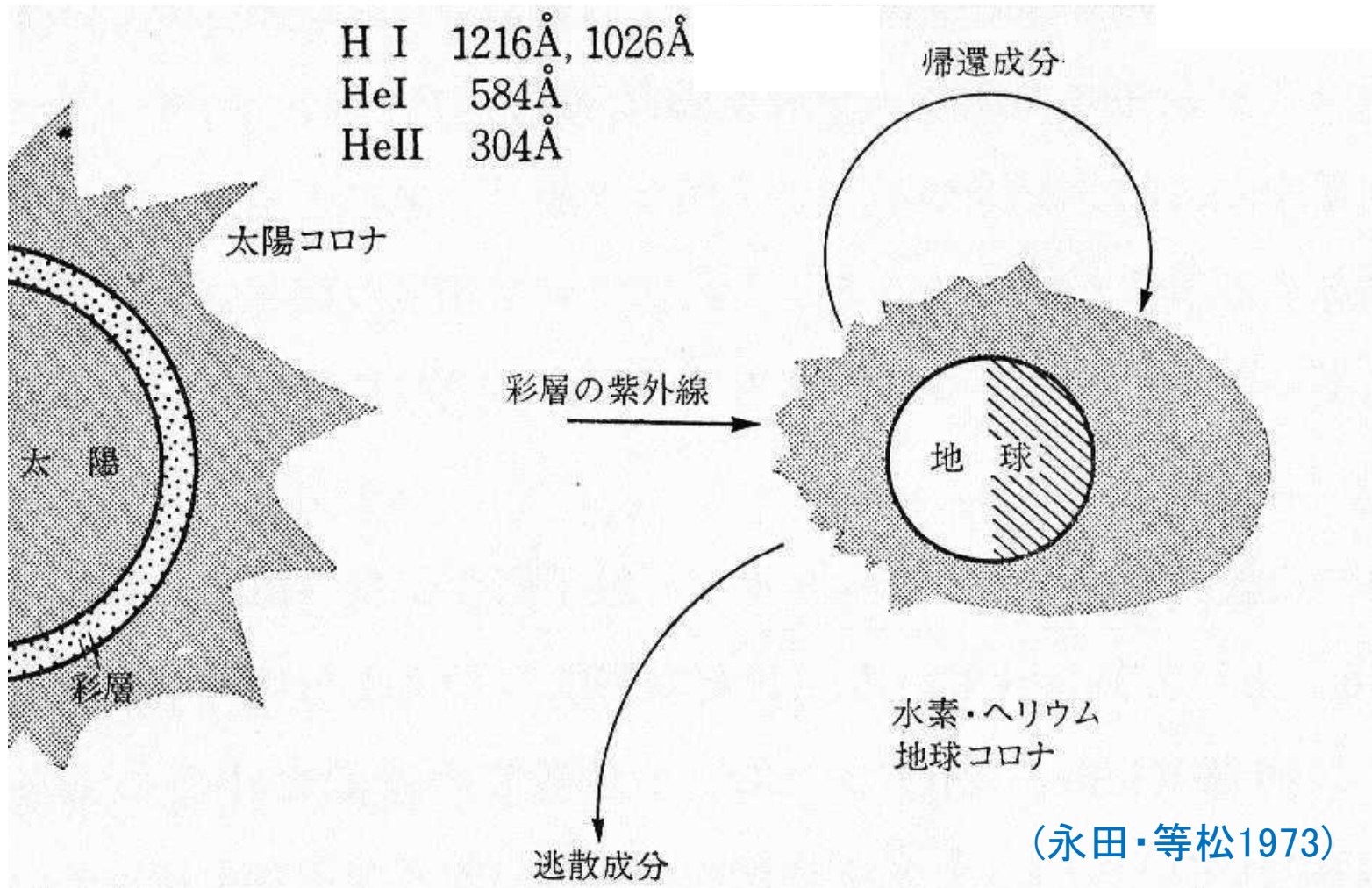


E領域電離圏
とは言っても
電離度は 10^{-6}

イオン密度 cm^{-3}

地球コロナ模式図

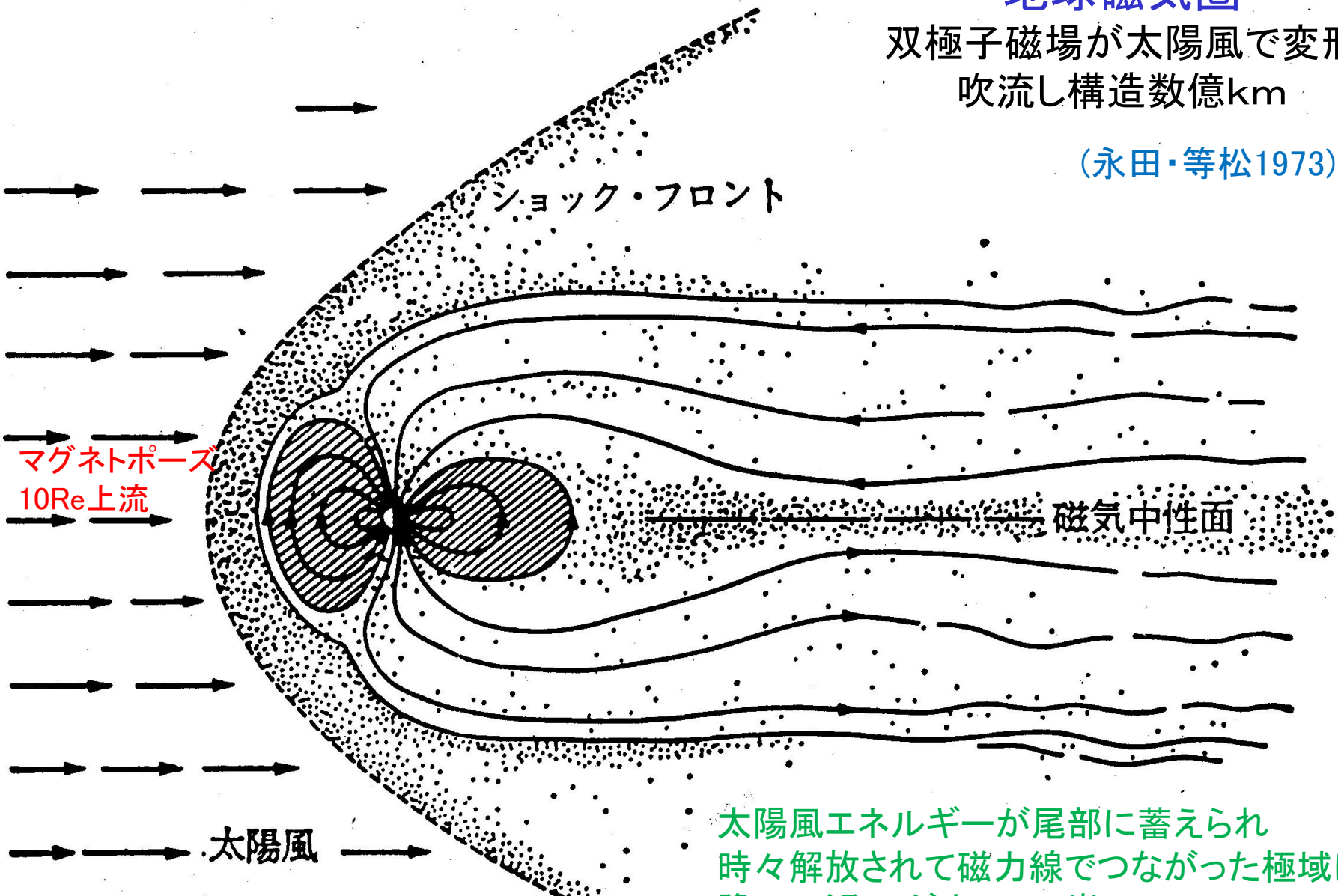
惑星間からUVで地球を眺めると
コロナのように見えるはず



地球磁気圏

双極子磁場が太陽風で変形
吹流し構造数億km

(永田・等松1973)



マグネトポーズ
10Re上流

太陽風

太陽大気流失によるプラズマの風
500km/s 10個/cc

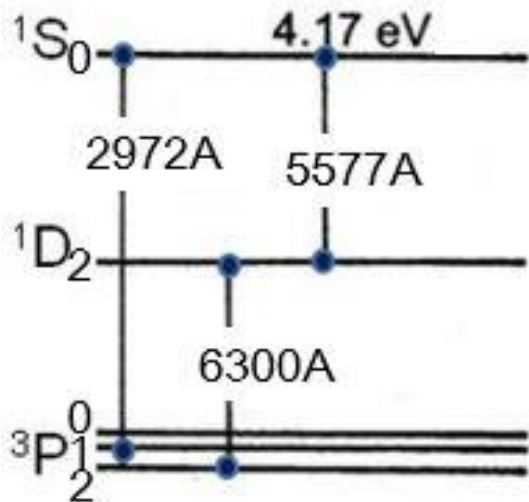
太陽風エネルギーが尾部に蓄えられ
時々解放されて磁力線につながった極域に
降ってくるのがオーロラ嵐

大気光によく出てくる

O、O₂のエネルギー準位

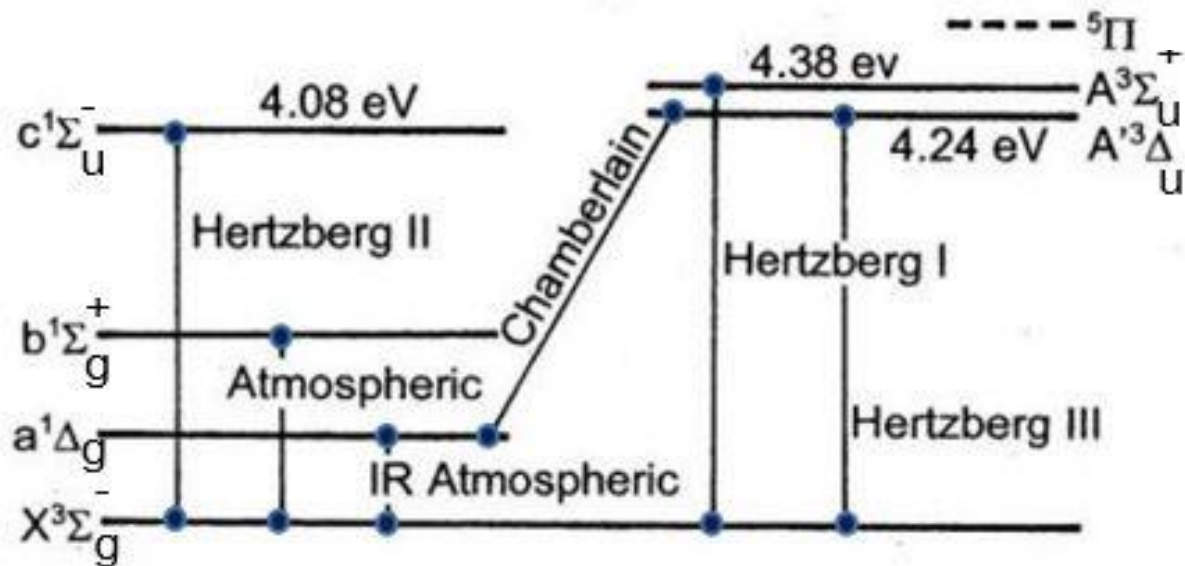
ここに示したのは電子状態のみだが
分子の場合はそれぞれの電子準位に振動準位があり
さらに回転準位がある

O



振動・回転構造なし

O₂



振動・回転構造あるが省略

分子エネルギー準位階層構造

$$E_{\text{電子}} \gg E_{\text{振動}} \gg E_{\text{回転}} \\ 1\text{eV} \quad 0.1\text{eV} \quad 0.01\text{eV} \text{ くらい}$$

電子準位 B

電子準位 A

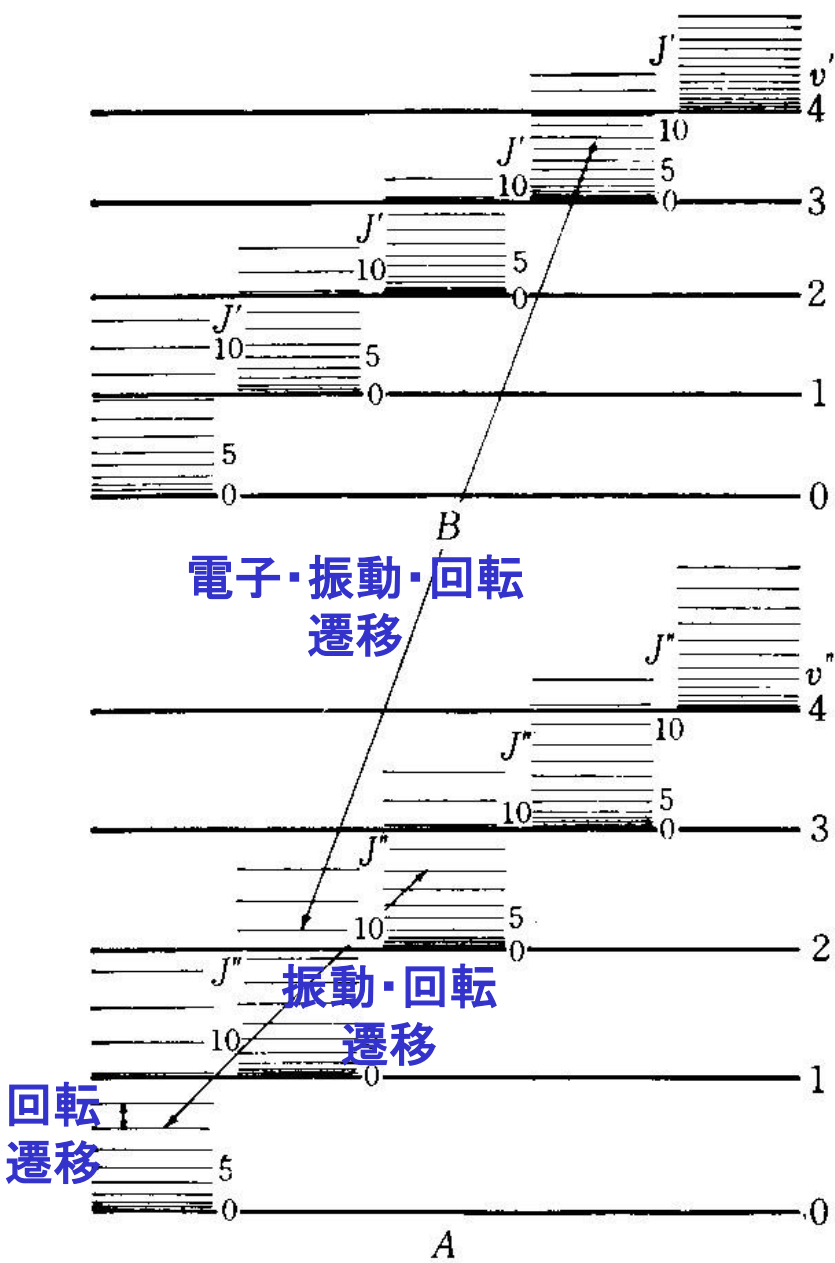
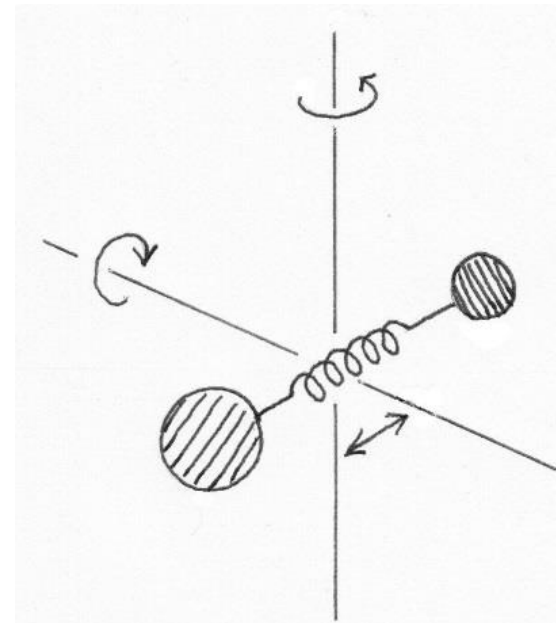


図1.4 2原子分子イメージ



3本の矢印は純回転スペクトル，回転-振動スペクトル，電子スペクトルの例を示す。

図 10 分子の二つの電子状態 A, B の振動準位と回転準位(図式的)

大気光ははじめ天文の邪魔者として認識された
しかし彼等のゴミは我等の糧
誰かの排泄物を他者が利用するのは生態系ではあたりまえ

大気光は1950-60年代までは電離圏大気の重要研究手法だった
衛星観測出現で一時廃れたが80年代重力波モニタとして復活・・・今に至る
1960年代まで衛星通信は無く、電離層反射を用いた短波通信が遠距離通信の
主役で、大気光は電離層物理を地上から知る重要便利手段だった

何が解かるか？

例1: O 557.7nm線強度から電離圏の物理・化学過程

例2: O 630.0nm線輪郭から電離圏の気温・風

例3: O₂ Atmospheric帯強度から電離圏の物理・化学過程

例4: OH回転線分布から発光層気温

例5: NO γ 帯強度からNO分子密度 など

目的は？

重力波や潮汐波の振る舞いを含む大気物理・化学過程を理解する

波長・波数の単位

波長はnm (10^{-9} m)で統一したいところだが
大気光にはÅ (オングストローム=0.1 nm)のほうが便利(最終桁が有意)

波長は普通、標準空气中で定義される(λ_{air})ので**注意**
空气中波長 $\lambda_{\text{air}} = \lambda_{\text{vac}} / n_0$ n_0 は標準空気屈折率=1.000278(可視域)
(実際の屈折率 n は気圧・湿度と共に変化するので実は厄介)

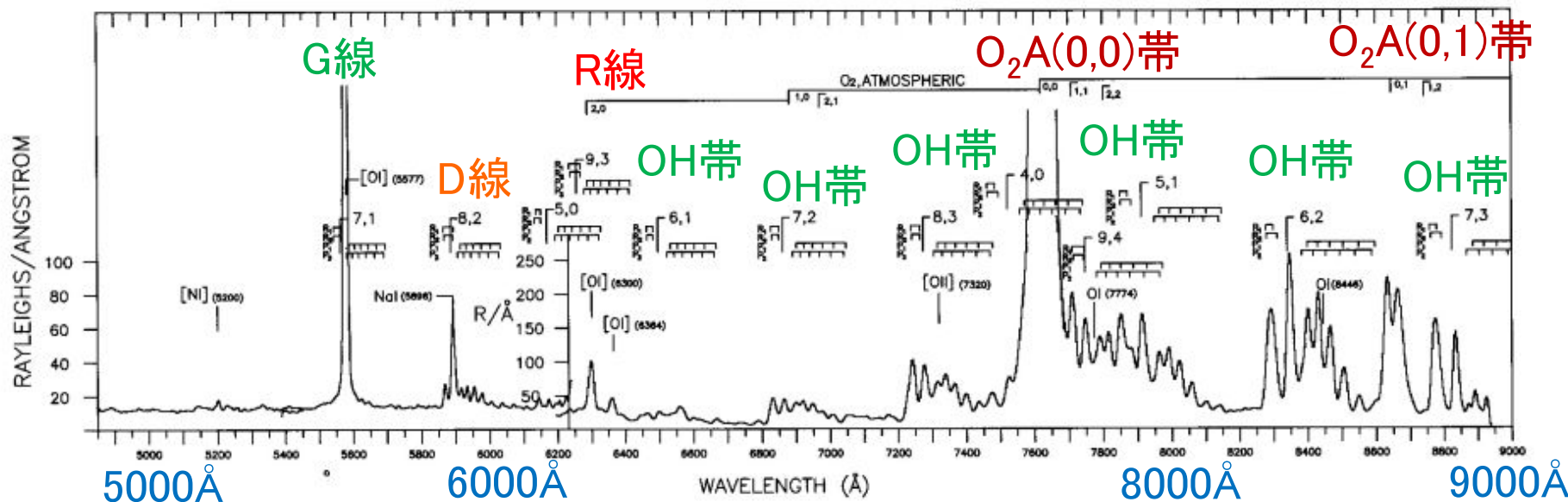
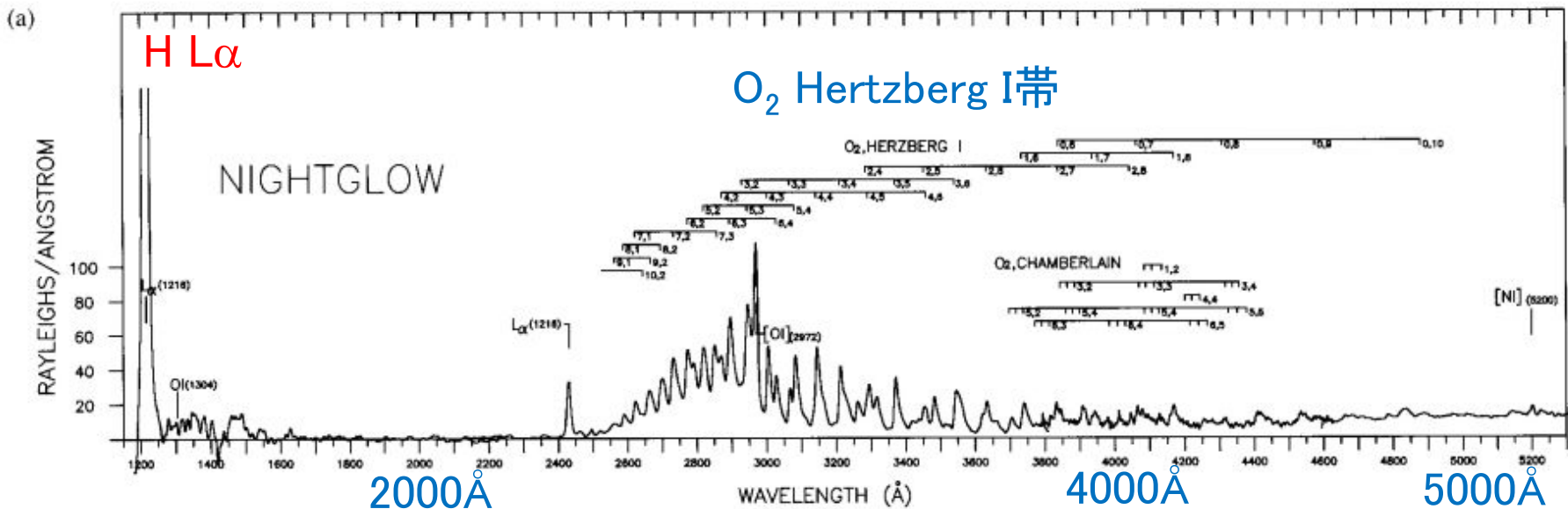
これに対し波数 ν は真空中で定義され(単位 cm^{-1})
 $\nu = 1 / \lambda_{\text{vac}}$... 真空波長1 μm で波数10000 (cm^{-1})
エネルギーに直接比例する素直な物理量なので
分光ではこちらが基本

シャトルから見た夜間大気光スペクトル(つまり地球吸収なし)(Shepherd 1994)

紫外にO₂Hertzberg I帯 可視にG線、R線、D線 赤外にO₂帯、OH帯

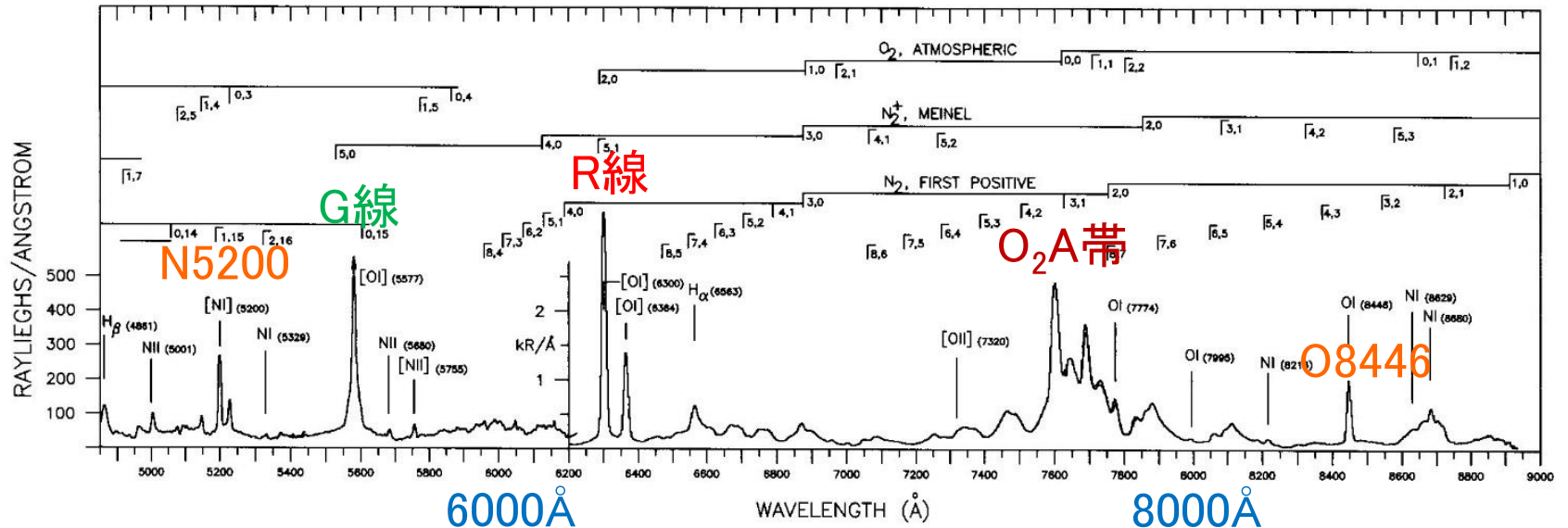
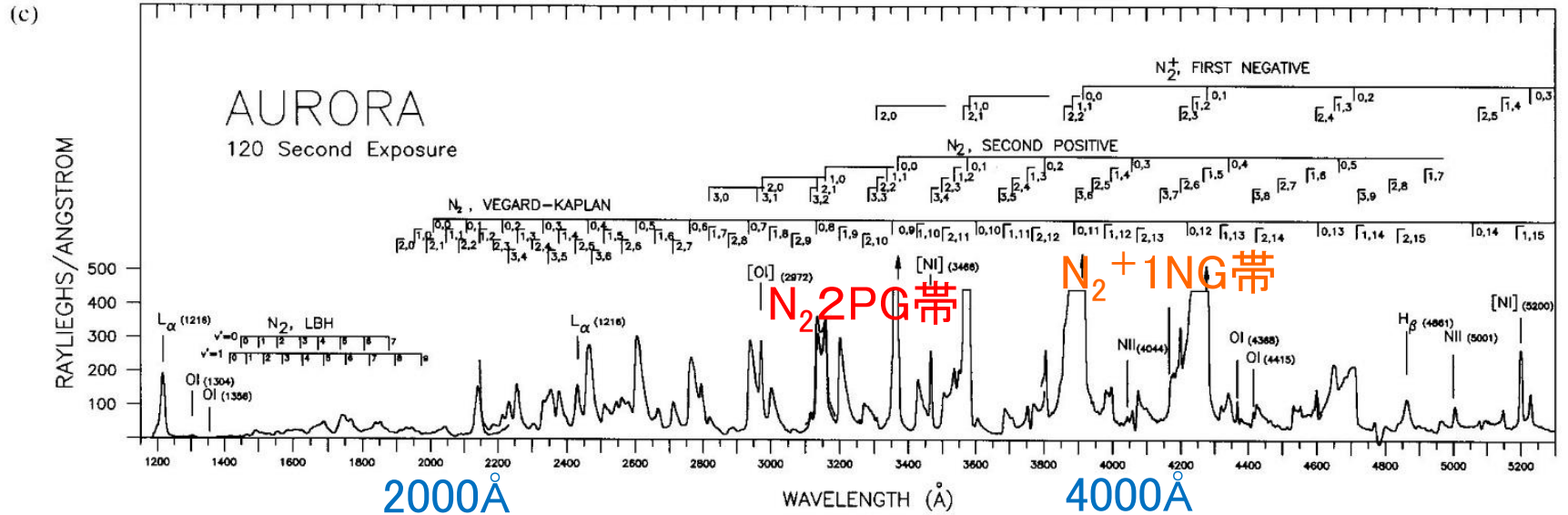
いずれも化学発光 つまり昼間太陽紫外光生成のO、O⁺がエネルギー源(E族F族)

他に地球コロナ族(共鳴散乱回り込み)H L α



オーロラスペクトル (Shepherd 1994)

2次電子による電離・解離同時励起などで昼間大気光スペクトルに似ている
 直接励起は少ない(1次オーロラ粒子は高エネルギー過ぎて反応しにくい)



夜間大気光の歴史

19世紀末天文の邪魔者として発見

地球起源確認: van Rhijn 効果(1919) (地平線で明るい)

557.7nm緑線実験室同定McLenna (1924にやっと)

(トロント大学 今でも分光学の中心地)

630.0nm赤線実験室同定Paschen (1930)

太陽コロナスペクトル中のHe線も実験室でなかなか再現できず
太陽固有元素Heが想定されたい

星雲線という歴史

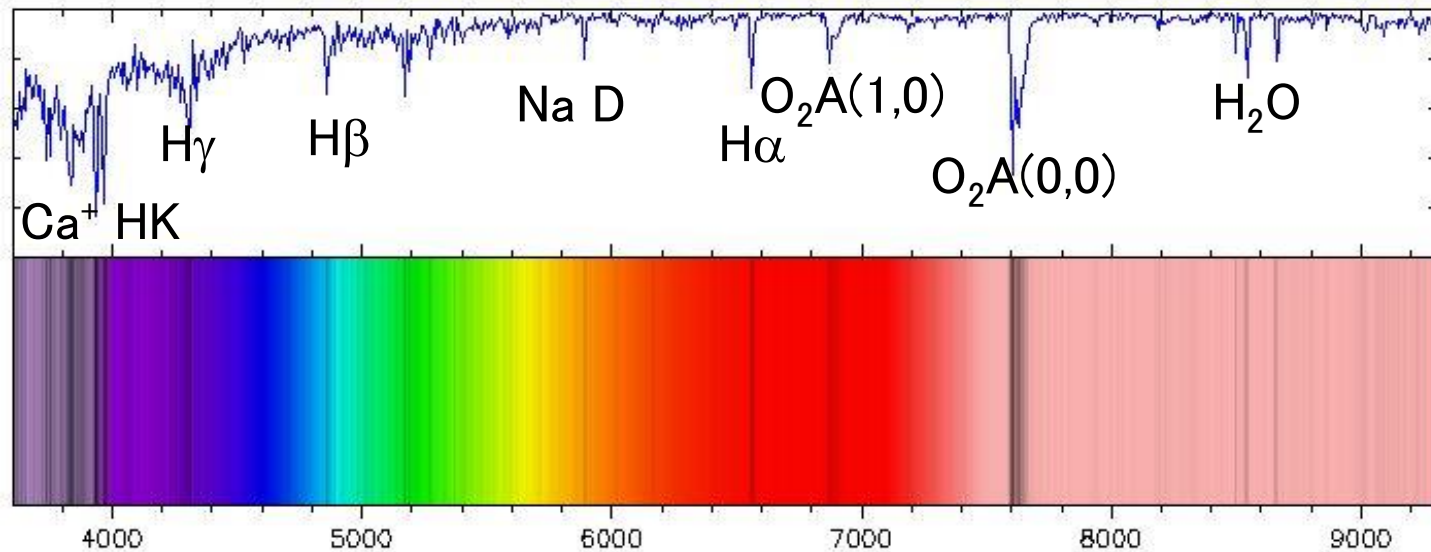
大気光・オーロラの主要線557.7nm緑線 630.0nm赤線は
いずれも禁制線のため(寿命1秒、100秒)

実験室でなかなか再現できず(壁で脱励起され光らない)

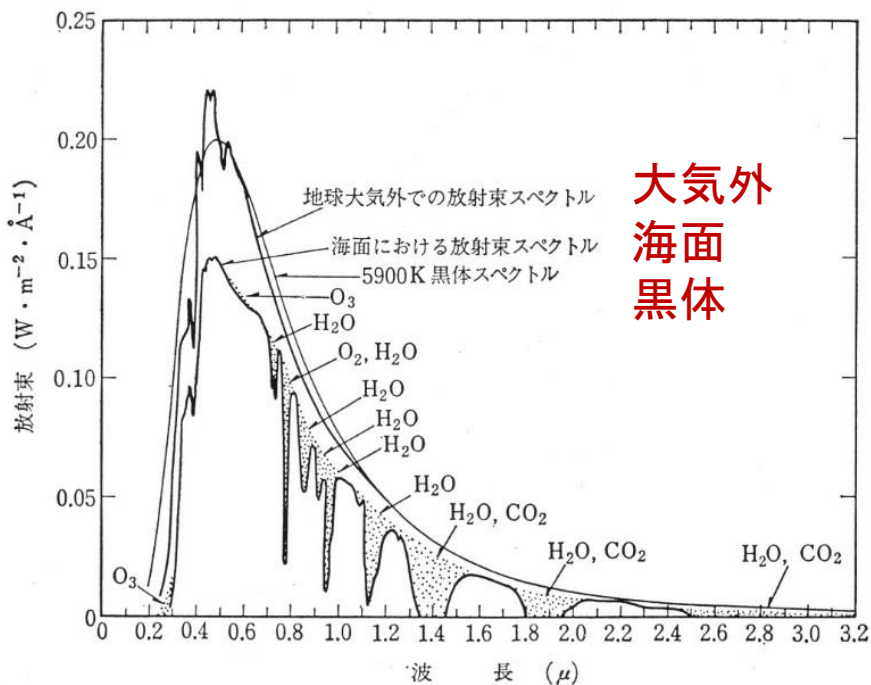
地球にはない元素(星雲素)によると考えられた時代があるような
ガス星雲スペクトルに見えるので星雲線と呼ばれた

熱放射例1A: 地表で見た太陽スペクトル

フラウン・ホーファー線(太陽彩層吸収線)と地球大気吸収帯がみえている



波長(Å)



熱放射例1B: 太陽スペクトル

ご存知6000K黒体に近いが
地上では赤外部は分子吸収でギタギタ
可視部(0.4-0.7 μ m)には強い吸収は無い
500nmでの減衰はレーリー散乱

(永田・等松1973)

熱放射例2

地球熱放射スペクトル(衛星から直下視)

(a)サハラ(b)地中海(c)南極

地表の黒体放射を

大気が吸収・・・の形に見えるが

実はちょっと違う

南極をみるとCO₂帯が

出っぱっている・・・これは何？

地表より大気が暖いところなる

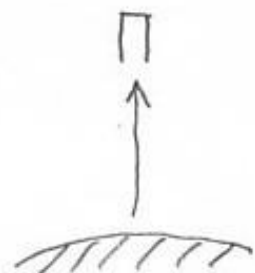
スペクトルの形から

気温高度分布が求まる

$$T = e^{-\tau}$$

$$I = B_s T_s + \int B_d \frac{dT}{dz} dz$$

地表成分 大気成分



天底放射の計算

T は透過率

B は黒体関数

τ は光学厚み

下付 s は地表を示す

(松野・島崎1981)

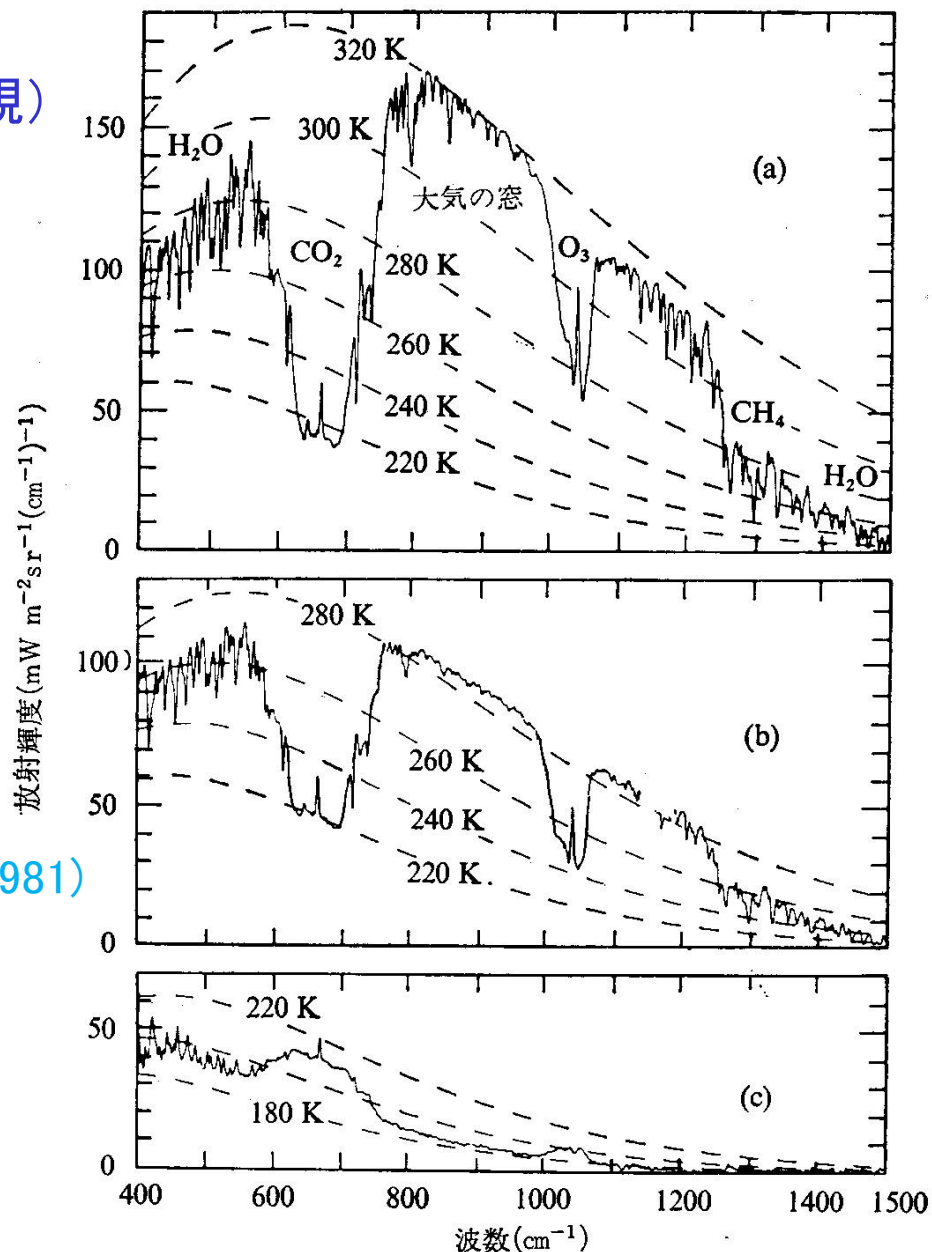


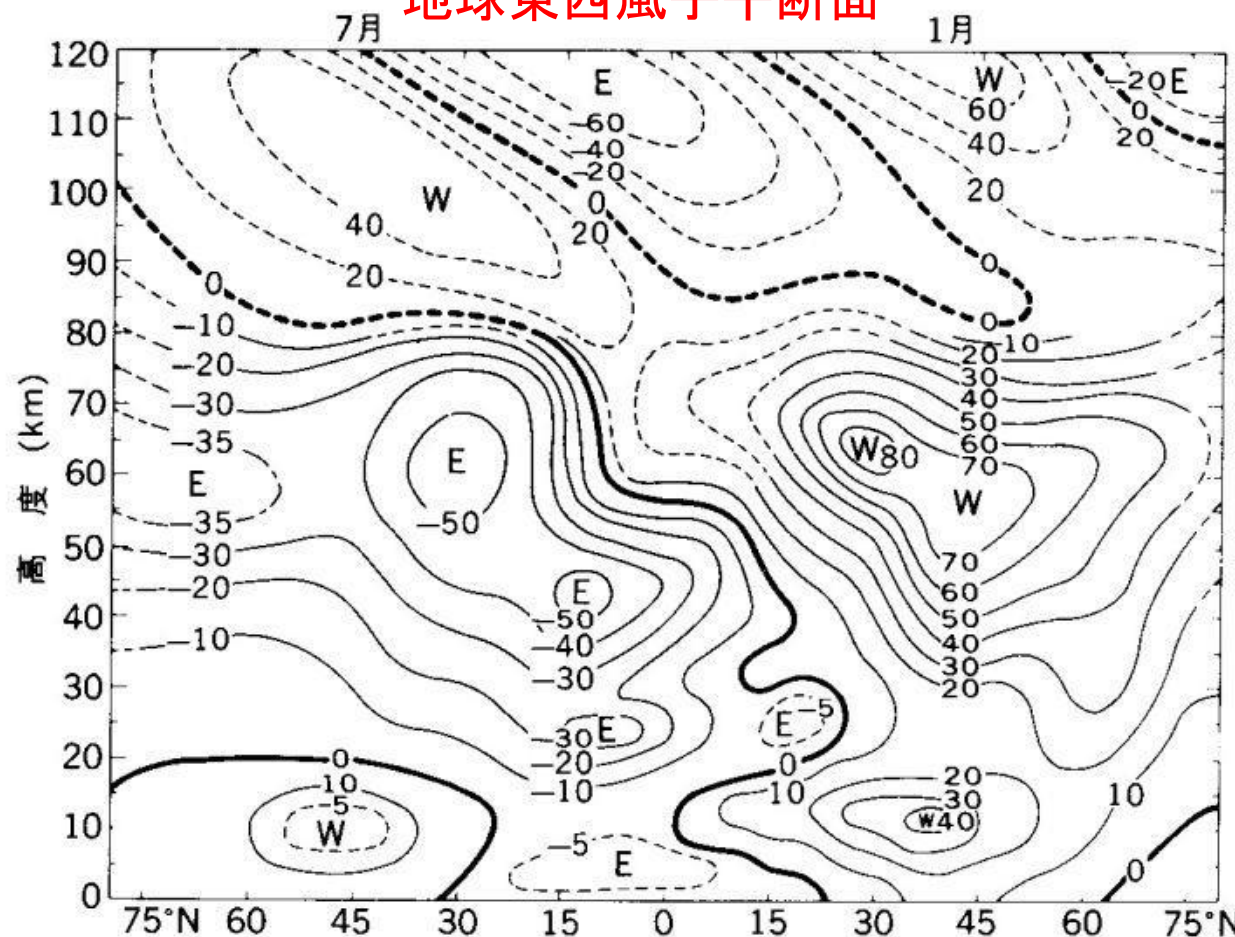
図 12.3 ニンバス 4 号衛星に搭載の赤外干渉分光計で測定した地球および大気からの上向き放射強度。(a) サハラ砂漠, (b) 地中海, (c) 南極。さまざまな温度に対応する黒体放射強度を破線で示す (Hanel *et al.*, 1971 による)。

現在の大気光のターゲットは重力波(宇宙論の重力波とは別物)

下図90kmの弱風層はなぜ地面を感じるか？から始まった

1980年代に重力波による地表からの運動量輸送によるらしいとなり定着
今も「重力波」が流行っている (それまでは重要と思われていなかった)

地球東西風子午断面



←弱風層

(松野・島崎1981)

重力波による大気光変調

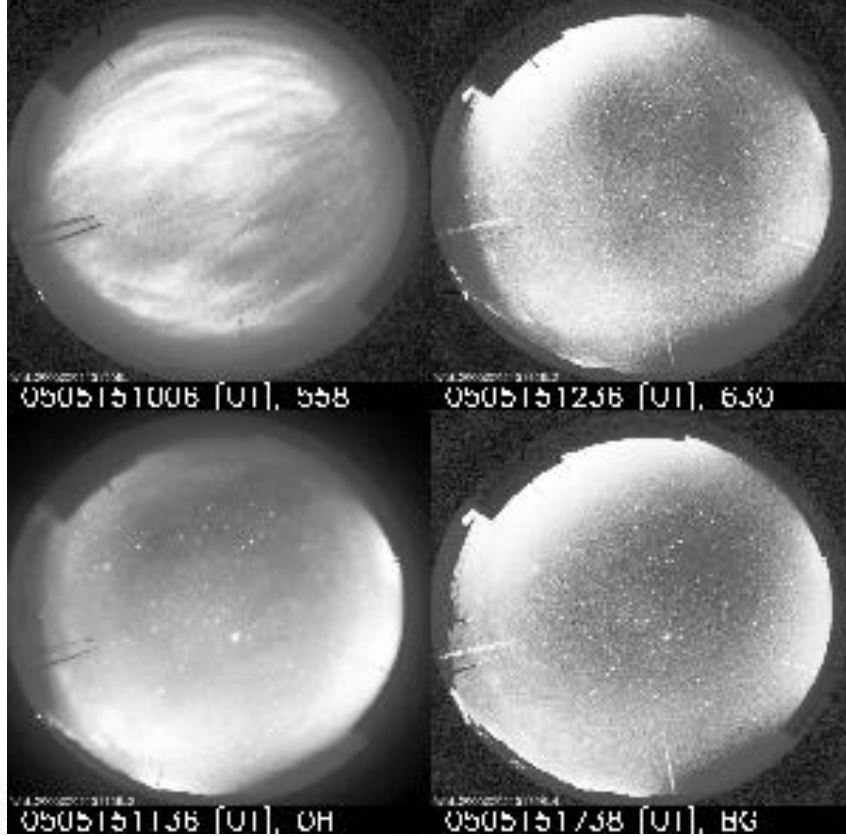
E族(G線OH帯)では水平波長30 km (右上・右下)
 F族(R線)では水平波長300 km (左下)

右下が普通の星空
 雲みたいなものが大気光
 1000倍速くらい

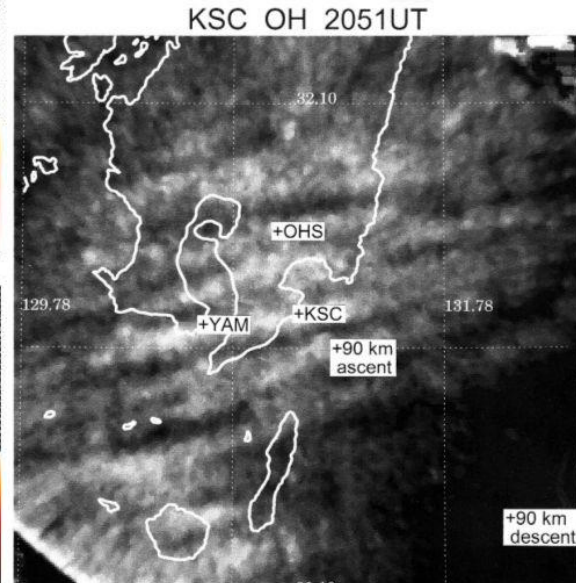
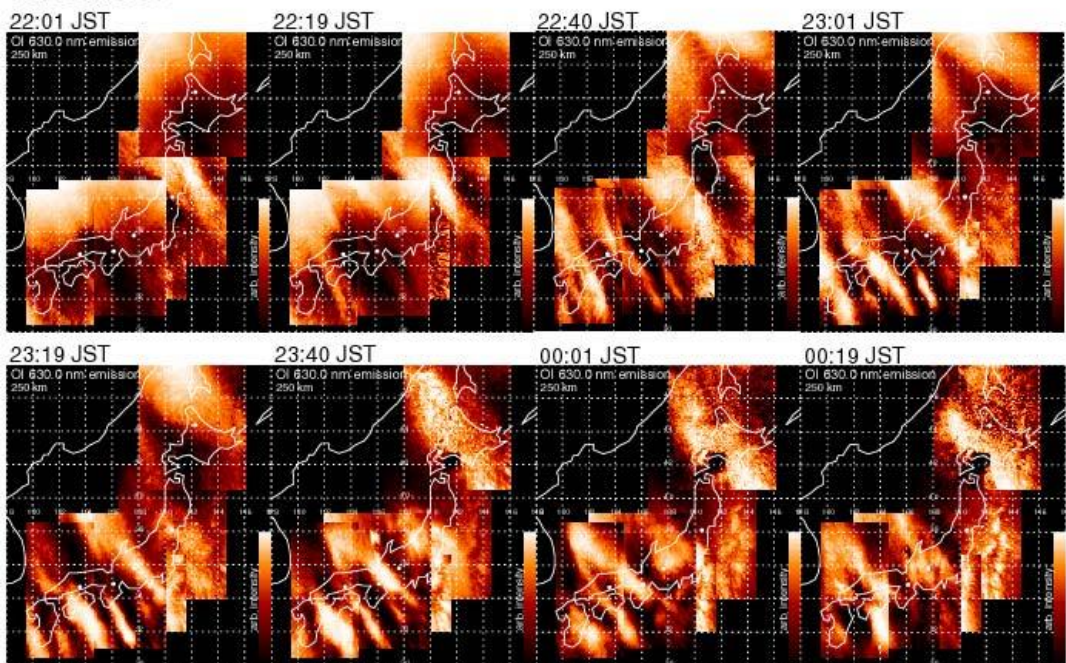
星空単色像

G線	R線
OH帯	星空

日本列島スケールのTID(伝搬性電離層擾乱)に伴う大気光変調
 20分毎図: 西南西移動がみえる



OI 630-nm emission
 22/05/1998



九州上空
 投影 30km
 波状構造が
 みえる

大気光でよく使われる面輝度単位レーリー R (Rayleigh)

定義: $1R = (10^6/4\pi)$ 光子/cm²/s/sr

等方的であれば方向積分して

$1R = 10^6$ 光子/cm²/s……実用的定義

天の川(誰でも見える明るさの下限)が1kRくらい

青空は10MR/nmくらい 眼の感度幅300nmなので全部で3GR

みかけ放射率 $4\pi I = gN$ より分子コラム N (分子/cm²) が求まる(無吸収時)

例えば: $4\pi I = 3R$ で g (emission rate factor) = 0.01s^{-1} なら $N = 3 \times 10^8$ (分子/cm²)

g は太陽放射束と散乱断面積の積を積分したもの

第3代Rayleigh卿 (John William Strutt, 1842–1919) は19世紀の大物理学者: レーリー散乱・レーリー数・レーリー & ジーンズの法則・アルゴン発見・音響学など多くの分野に名を残す 1904年ノーベル賞

ただし面輝度単位レーリーは息子の第4代Rayleigh卿 Robert John Strutt によるらしい

夜間大気光は昼生成のO原子とO⁺イオン起点が多い



解離(主にE領域)

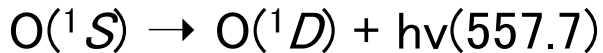
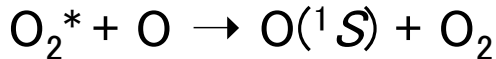
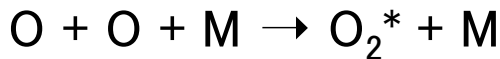


電離(主にF領域)

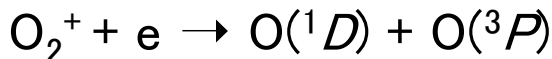
としてエネルギーを蓄える

夜になると

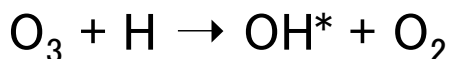
E領域 O 557.7 nm G線励起は



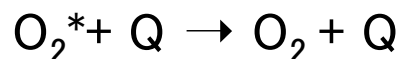
F領域 O 630.0 nm R線励起は



E領域 OH帯励起は



脱励起反応も重要



*は余剰エネルギーを示す

再結合同時励起

励起移譲

G線発光

電荷交換

解離再結合同時励起

R線発光

3体再結合

2体反応励起

OH帯発光

消光quenching Qは消光体(N₂O₂O)

昼間大気光は電離・解離同時励起が多い
 オーロラでは $h\nu$ (太陽UV)が
 e^* (オーロラ高速電子)に置き換って同じ形
 e^* (光電子:光電離でできた高速電子)の場合もあり

N_2^+ 1st Negative (1NG)帯 *は余剰エネルギーを示す
 $N_2 + h\nu(\text{太陽UV}) \rightarrow N_2^{+*} + e$ 電離同時励起

オーロラでは

$N_2 + e^* \rightarrow N_2^{+*} + e + e^*$ 電離同時励起
 $N_2^{+*} \rightarrow N_2^+ + h\nu(\text{大気光} \cdot \text{オーロラ})$ 発光

O 130.2-5-6 nm 3重線

$O + h\nu(\text{太陽UV}) \rightarrow O^*$ 励起

オーロラでは

$O + e^* \rightarrow O^* + e^*$ 励起
 $O^* \rightarrow O + h\nu(\text{大気光} \cdot \text{オーロラ})$ 発光

地球コロナ族は共鳴散乱による(夜側にも回り込む)

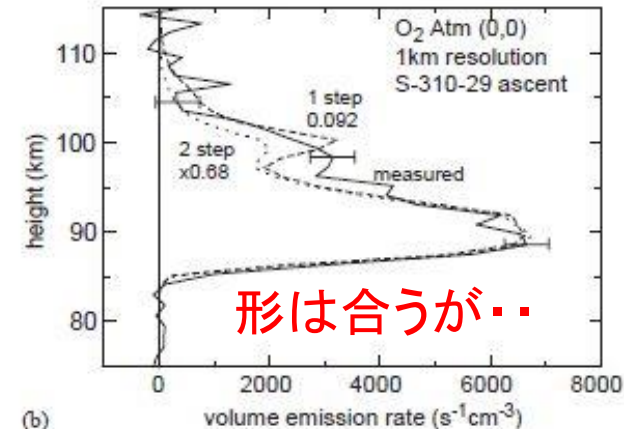
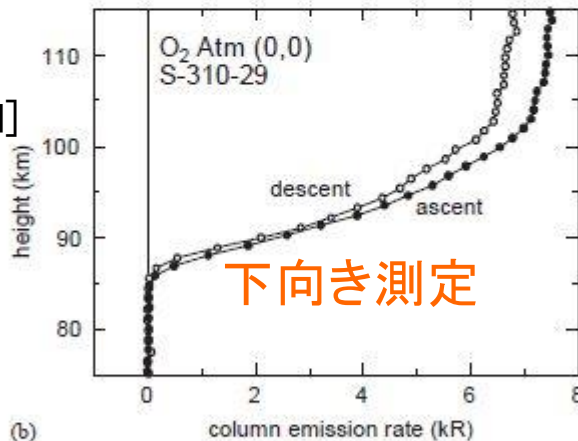
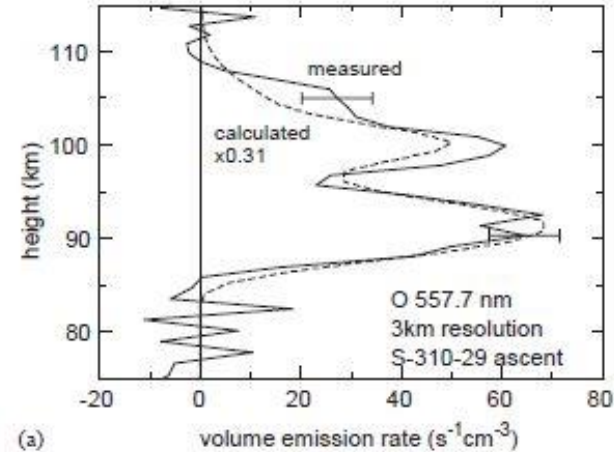
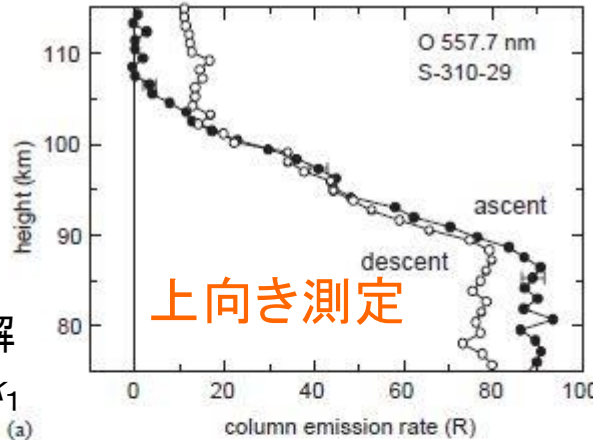
$H + h\nu(\text{太陽}L\alpha) \rightarrow H^* \rightarrow H + h\nu(\text{大気光}L\alpha)$

ロケットで発光層を突き抜け
層高測定した例 (岩上他 2003)

$$-\frac{d}{dz}(4\pi I) = \varepsilon$$

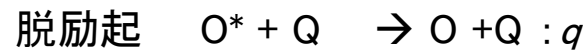
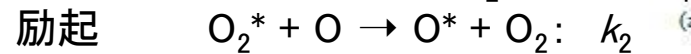
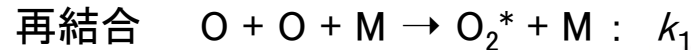
コラム放射率 $4\pi I$ 体積放射率 ε

酸素原子と大気光を
同時測定すれば
理論が検証できる



観測値(実線)とO測定値に基づく理論値(点線)の比較。絶対値は557.7nmで0.31倍、O₂A帯で0.68倍して合わせてあるが、密度換算では0.68倍、0.82倍で大差ではない

O 557.7nm線放射率の光化学平衡解



生成 $P(O^*) = k_2 [O_2^*][O] = k_1 [O]^2[M]$

(再結合と励起は同速で進む)

消滅 $L(O^*) = [O^*](A + q[Q])$

$P = L$ (定常近似)より

体積放射率 $\varepsilon = A[O^*]$

$= k_1 [O]^2[M] / (1 + q[Q]/A)$

$[Q] = [M]$ と近似して

→ $k_1 [O]^2[M]$ (高高度ではAが速い)

→ $Ak_1 [O]^2/q$ (低高度ではqが速い)

NO分子 $\gamma(1,0)$ 帯大気光(共鳴蛍光)で
NO分子密度を定量した例

大気光放射率の微分 比蛍光率 分子密度

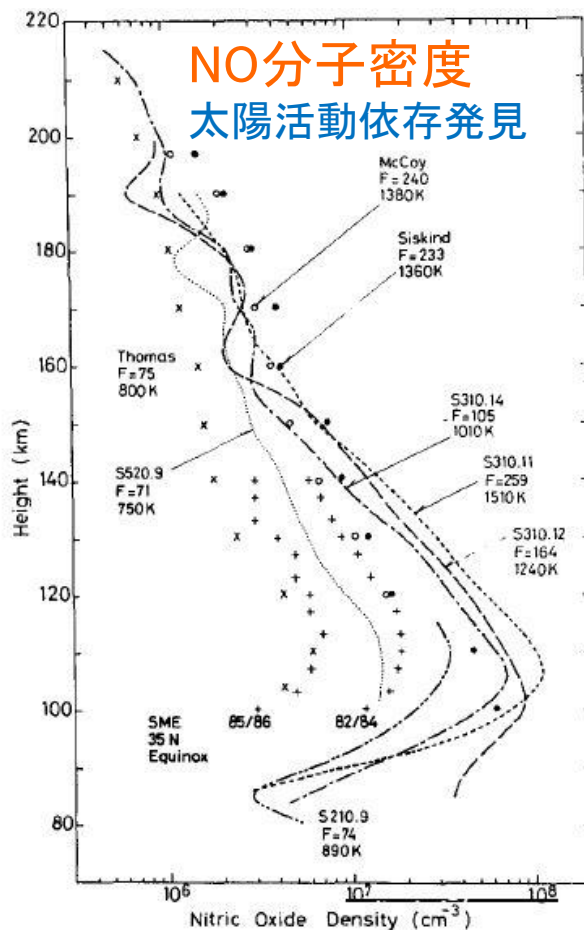
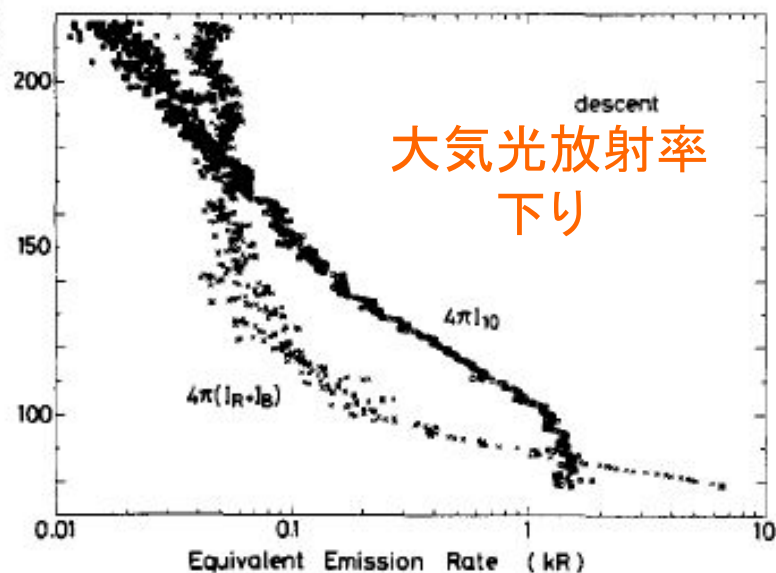
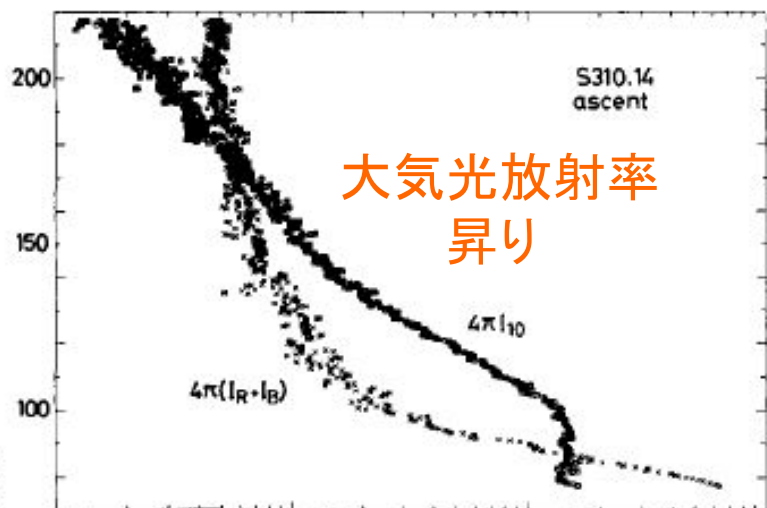
$$\frac{d}{dz}(4\pi I(z)) = -g(z)n(z)$$

高度変化率が密度に比例する

比蛍光率 [光子/s]

$$g(z) = \omega \int \sigma_{\nu} \Phi_{\nu}(z) d\nu$$

アルベド 断面積 太陽放射束



岩上他 1984