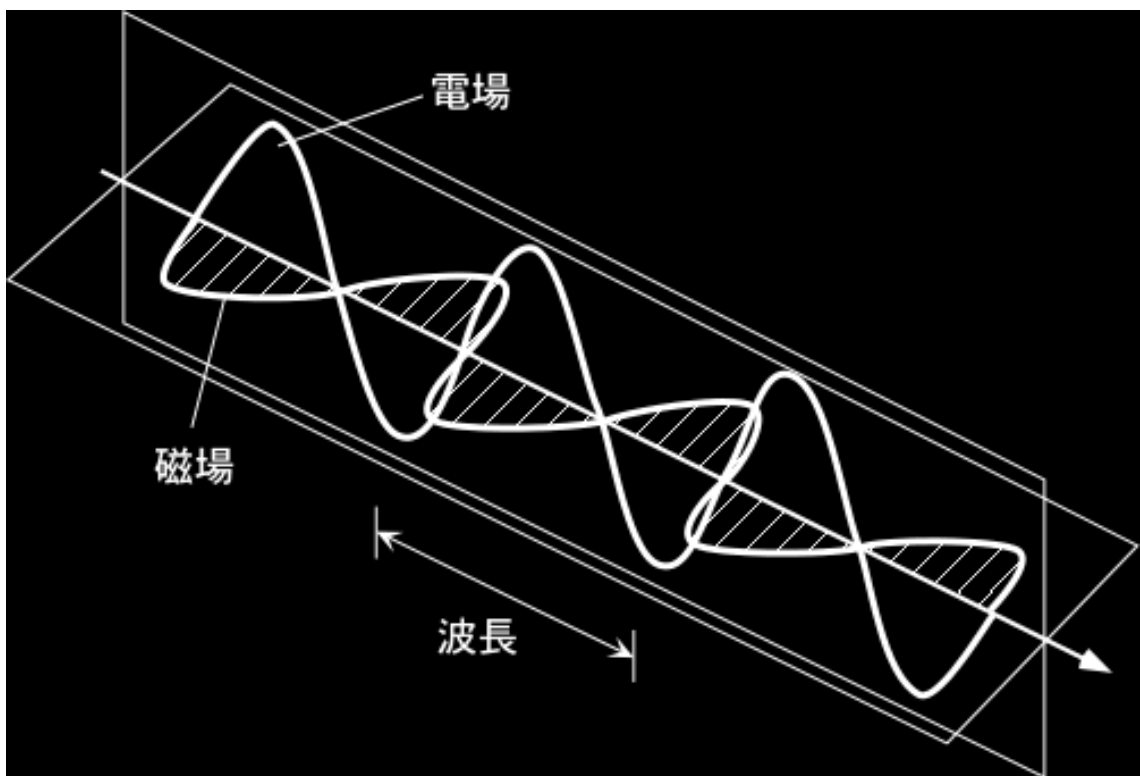


宇宙の観測と技術

第5章 地球大気为天体観測への影響

10. 地球大気と電磁波

地球大気は地上の生命にとってかけがえのないものである。その一方で宇宙を見つめる人類にとっては、観測者と宇宙の様々な天体との間にあるヴェールでもある。天体観測の手段として主流を占めているのは可視光に代表される電磁波である。電磁波は電場の強度変化が空間を伝わっていく波であり、電磁誘導によって磁場も同様に变化しながら伝わっていく。地上に設置された望遠鏡は、大気を透過して来た電磁波を受けて天体を観測することになる。



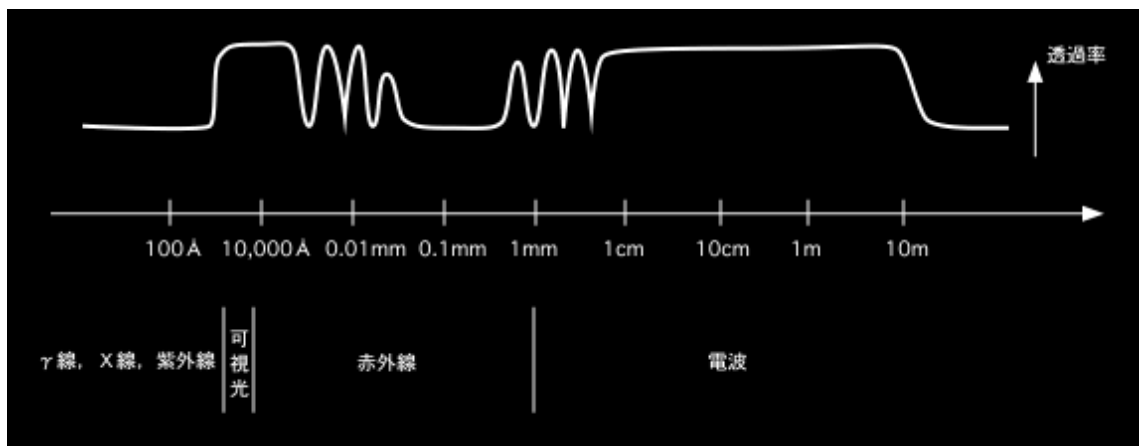
地上に設置した望遠鏡で天体からの光を観測する時に、大気が及ぼす影響には大きく

- 1) 光の吸収
- 2) 光の屈折
- 3) 大気の発光や地上光の散乱
- 4) 大気のゆらぎによる光波面の乱れ

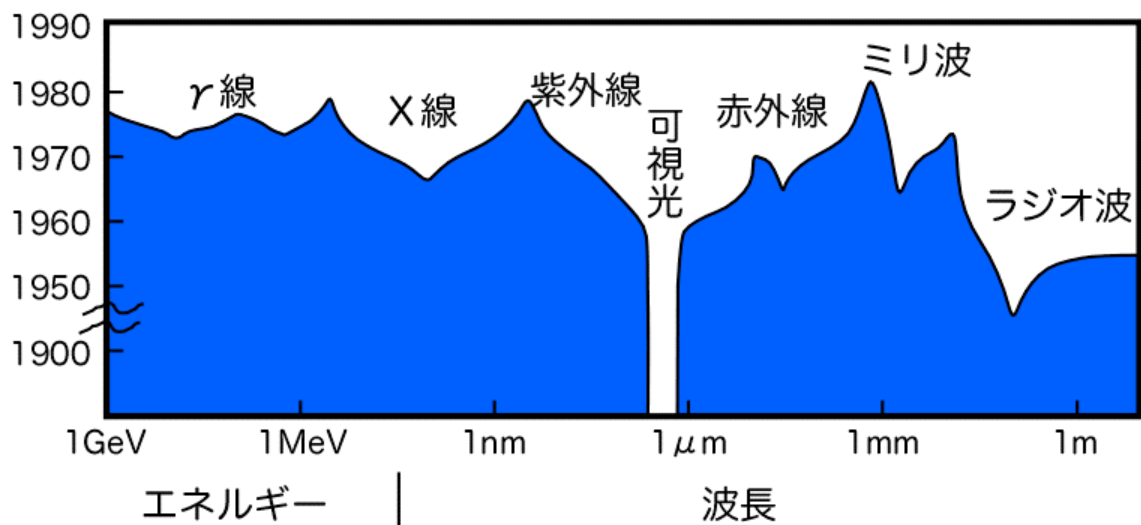
といった要素がある。それぞれ天体観測にどんな制限をもたらすのかを見ていこう。

10-1. 光の吸収

「暗い海の底」という表現がある。海の水を一すくいしてみても透明なのにどうして海の底は暗いのだろう。一見して透明な水であっても、光は海面から海底に向かって進むうちに海水に吸収されてしまう。この事情は地球大気にあっても同じである。天体からやってきた電磁波は、地球大気中を地表に向かって進むうちに吸収され弱くなっていく。吸収の程度は波長によって違う。可視光線や電波ではほとんどが地上に到達するが、その他の波長では所々の波長帯を除いてほとんど吸収されてしまう。こういった波長では非常に高い山の上や宇宙空間に出ないと観測ができないことになる。地表まで到達できる電磁波の波長域を総じて“大気の窓”と呼ぶ。



天文学者は機会さえあれば観測できる電磁波の波長域を押し広げて来た。1931年にカール・ジャンスキーが偶然に天体からの電波を捉えると、10年後には電波望遠鏡が登場する。



大気の窓があるなしに関わらず、新しい波長域を受けるディテクタ（受信機や受光素子）が発明されると、天文学者は高山だろうと宇宙空間だろうと望遠鏡を造ってきた。こうして80年代になると全ての電磁波で天体観測ができるようになった。

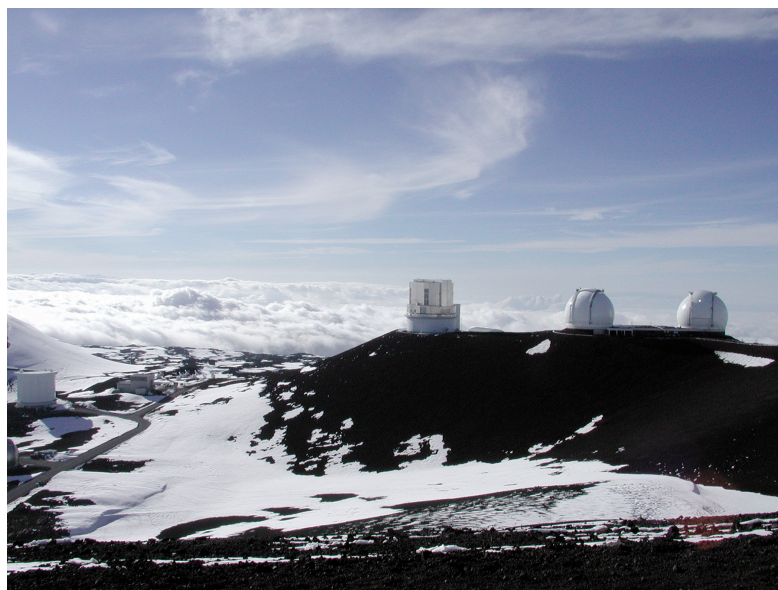
野辺山宇宙電波観測所（日本 南牧村 1349m）

<http://www.nro.nao.ac.jp/~nro45mrt/pictures/photo/index.html>



マウナケア観測所（アメリカ ハワイ島マウナケア山 4200m）

http://subarutelescope.org/Gallery/j_tele_dome.html



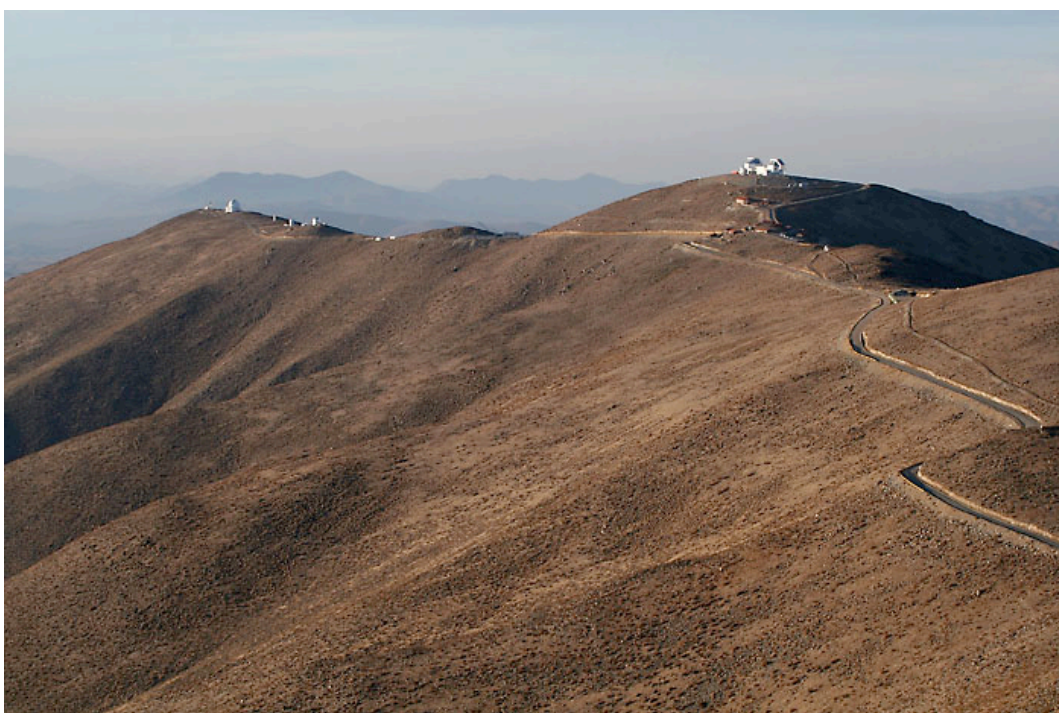
ピック・デュ・ミディ天文台（フランス ピレネー 2877m）

<http://www.picdumidi.com/web/fr/104-galerie.php>

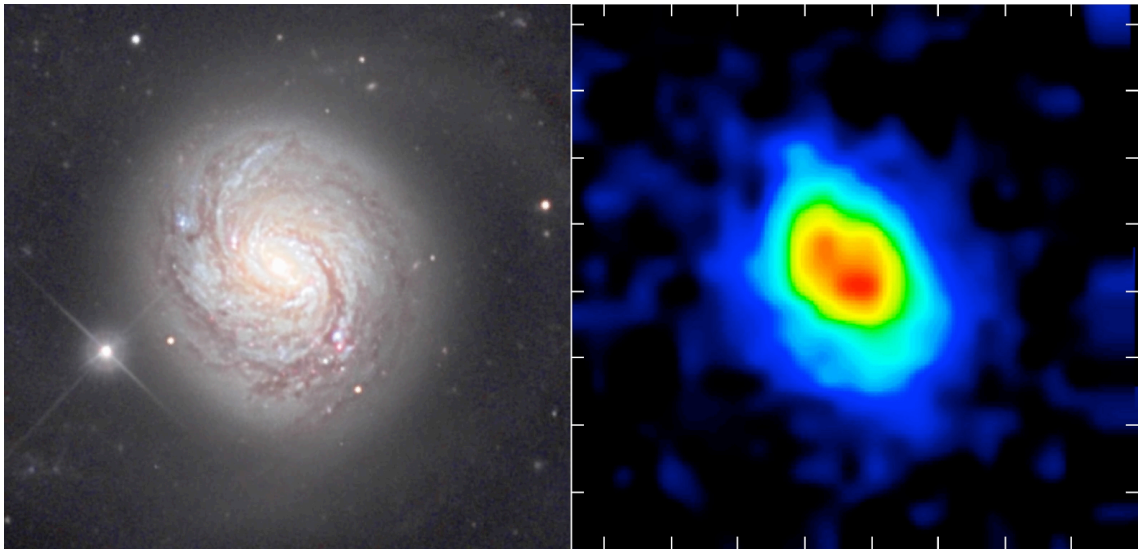


ラスカンパナス天文台（チリ ラスカンパナス山 2300m）

<http://ja.wikipedia.org/wiki/ラスカンパナス天文台>



電磁波の違いで見えるもの 1（ミリ波）



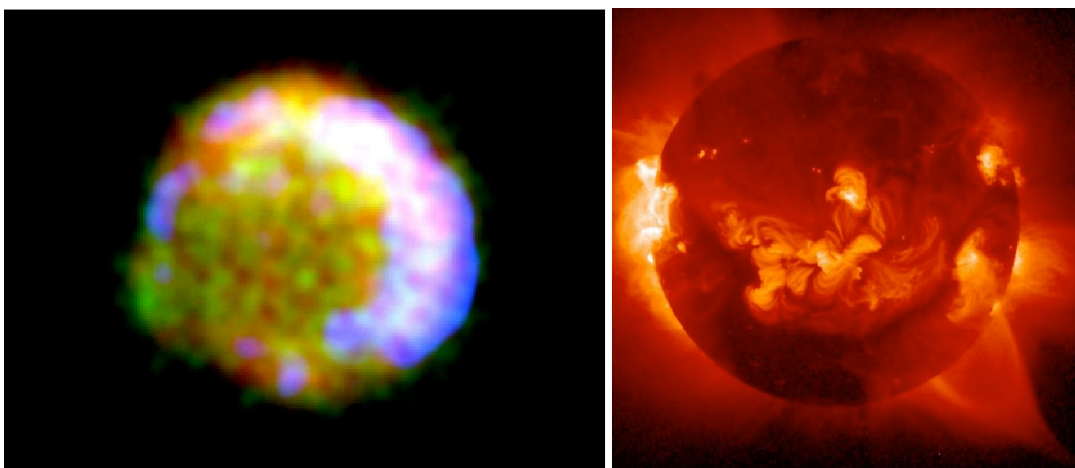
可視光で撮られた銀河（NGC1068）の画像と波長 2.6mm の電波で撮られた画像。波長 2.6mm は一酸化炭素の出す電波でその強度は星間分子ガスの分布を表す。可視光では明るい星が活発に生まれている場所と暗黒星雲という濃いガスの塊が目立つが比較的表層の様子である。NGC1068 は、距離がおよそ 4700 万光年で、“くじら座”にある銀河。中心部に活動銀河核（物質を吸い込んでいる超巨大ブラックホール）をもち、そこから膨大なエネルギーが放出されている。

国立天文台野辺山宇宙電波観測所の web ページ

<http://www.nro.nao.ac.jp/~nro45mrt/COatlas/gallery/>

より引用。

電磁波の違いで見えるもの 2（X線）



Tycho の超新星で膨張している 1000～2000 万度の高温ガス（左）と太陽コロナ（右）。Tycho の超新星の画像は X 線観測衛星「すざく」で撮られたもの。



高温ガス中の電離したケイ素、硫黄、アルゴン、鉄といった物質が X 線を出す。Tycho（ティコ・ブラーエ）は 16 世紀の天文学者で望遠鏡発明以前における最高の観測者として知られる。彗星が月よりも遠い（大気圏外の現象＝天体）ことを証明した。1572 年にはカシオペア座にこの超新星を発見したことにより天動説を覆す重要な証拠を見つけた。ただし彼自身は地動説を直接証明する年周視差が観測できなかったことから、地動説を科学的に否定し、折衷案のとも言える修正天動説を展開して見せた。

JAXA のホームページ

http://www.jaxa.jp/projects/sat/astro_e2/topics_j.html

より引用。

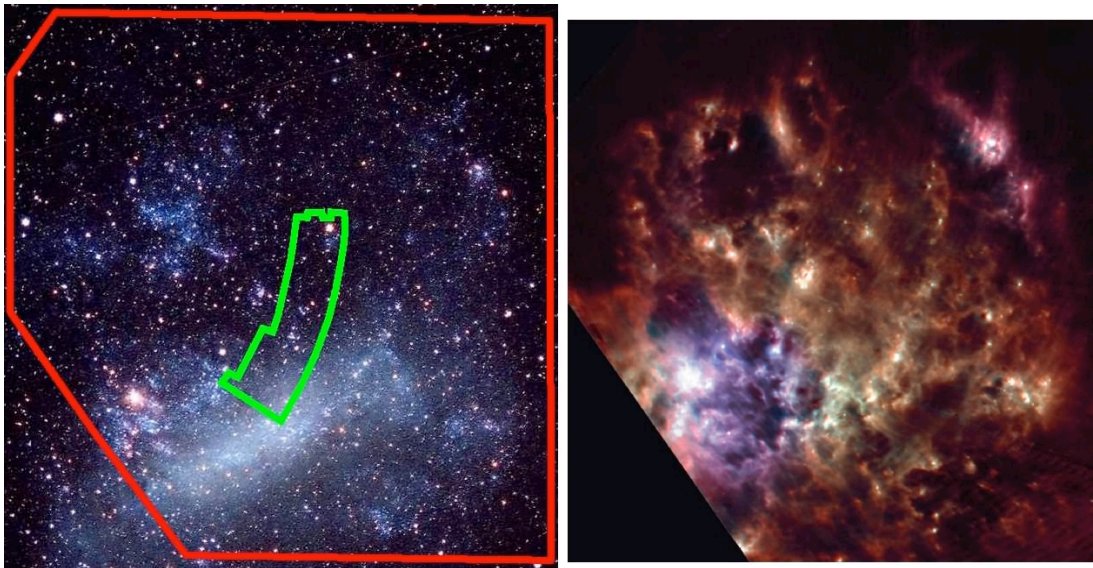
太陽コロナは太陽観測衛星「ようこう」が軟 X 線で撮ったもの。数百万度という高温ガスが太陽の磁場に絡み付いている様子がわかる。

ISAS（JAXA）のホームページ

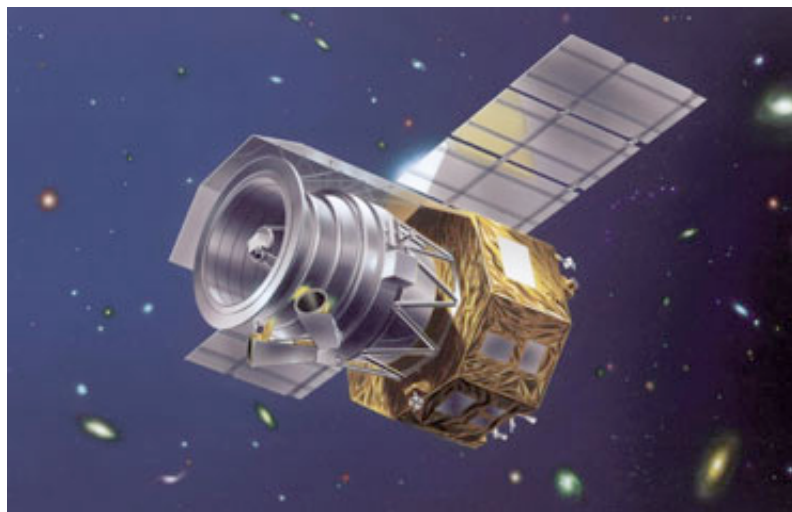
<http://www.isas.ac.jp/j/enterp/missions/yohkoh/best10.shtml>

より引用。

電磁波の違いで見えるもの（赤外線）



大マゼラン星雲（天の川銀河の伴銀河）の可視光画像（左）と遠赤外線 3 色合成画像（右）。
遠赤外線画像は赤外線天文衛星「あかり」で撮られたもの。



観測波長は $60\ \mu\text{m}$ 、 $90\ \mu\text{m}$ 、 $140\ \mu\text{m}$ 。可視光では星と濃いガスの塊が目立つが比較的表層の様子。遠赤外線では新たに誕生した星によって暖められた塵（温度 $\sim 100\text{K}$ ）の分布がわかる。また年老いた（長寿命で温度の低い）星もよく写る。

JAXA のホームページ

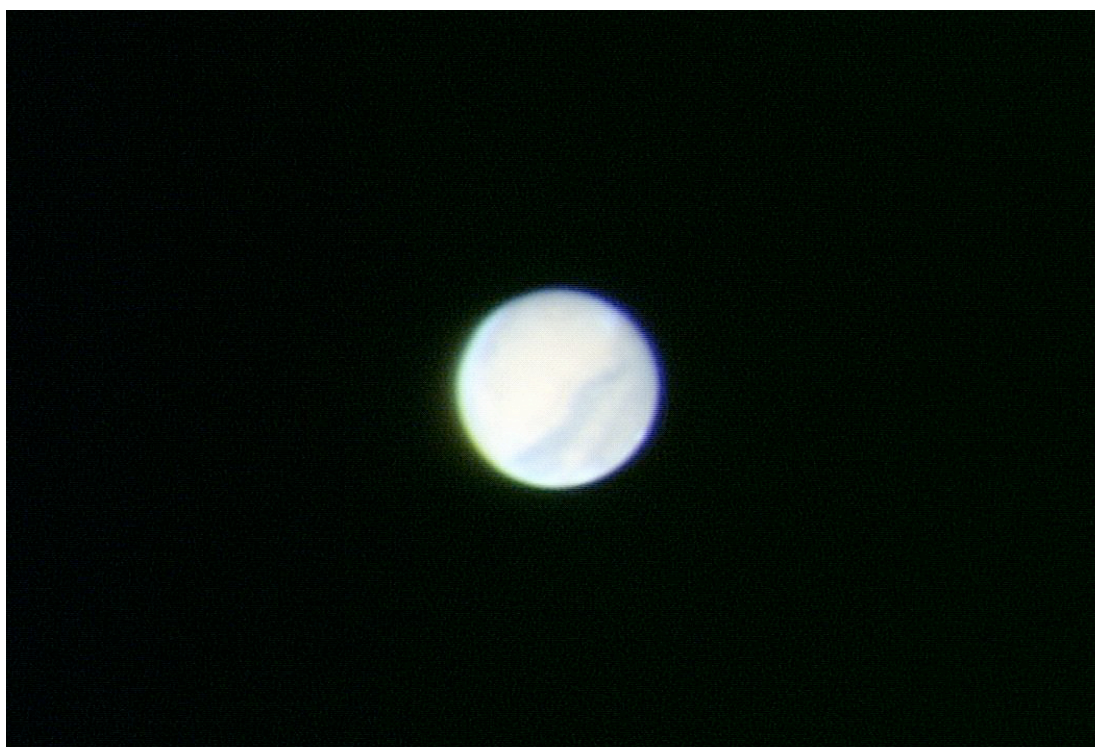
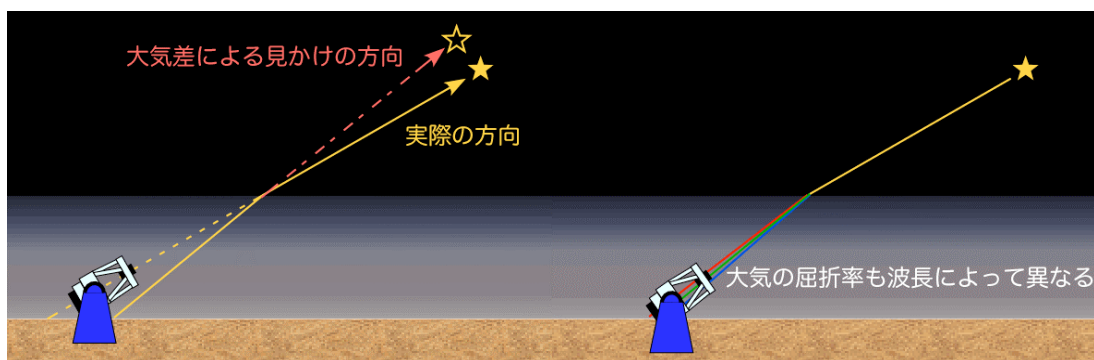
<http://www.isas.ac.jp/j/snews/2006/1101.shtml>

より引用

10-2. 光の屈折

地球の大気は真空の屈折率1よりもわずかではあるが大きい。これによって大気に斜めに入射した光は屈折して進行方向が変わる。大気を通して見る天体の位置は実際よりも浮き上がって（高度が若干高く）見える。これを大気差という。大口径の望遠鏡では、この大気差による見かけの位置ズレを補正しないと、追尾精度が観測精度に見合わなくなってしまう。

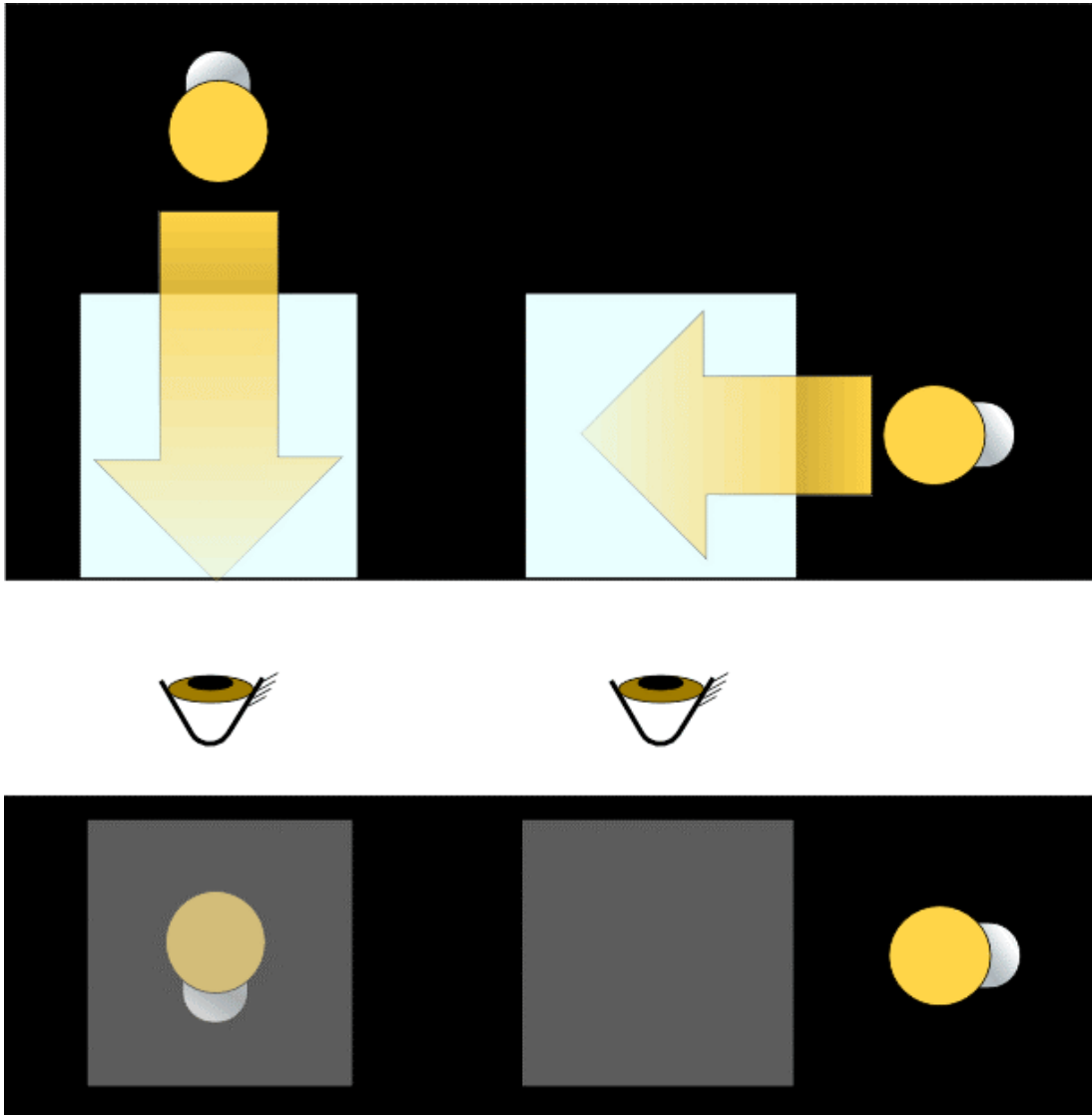
また大気の屈折率も波長によって異なるので、大気を通る光の光路は各色毎に分かれてしまう。これを大気分散という。高度の低い天体を高い倍率で観察したり、カラーのデジカメやビデオカメラなどで撮影すると、大気分散による像の色にじみが顕著に見られる。



大気分散の見られる画像（なゆた望遠鏡で撮った火星）

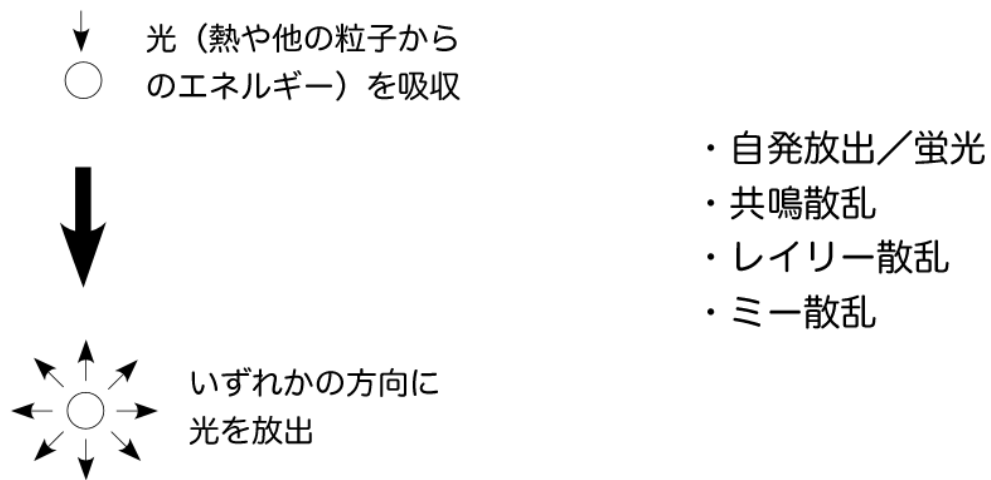
10-3. 大気の発光と地上光の散乱

物質による光の吸収や発光は表裏一体のものである。微粒子による光の散乱にしても、それが吸収として振る舞うか発光として振る舞うかは表裏一体となる。大気も物質であるから光を吸収すると同時に放出もする。物質を明るい光にかざして見た時には吸収の性質が際だって観測される。また物質を暗い背景を通して見た時には発光する性質が際だって観測されることになる。



地上から夜空を見上げた時、大気は大気圏外の宇宙に対して相対的に明るく発光して見える。地上からの天体観測では、地球大気によって減光された天体の光を、わずかに発光している夜空を背景にして見ていることになる。どれだけ暗い天体まで観測可能であるかは、背景である夜空の明るさとの兼ね合いで決まる。

物質を構成する粒子（原子，分子，固体微粒子）の発光メカニズム



自発放出／蛍光

量子力学的な発光。原子や分子（の持つ電子）が励起状態から、量子力学でいえる励起状態の寿命をむかえることによって基底状態へと遷移するときに特定波長の光を発生すること。励起状態になるのに光を吸収するプロセスを通る時に特に蛍光という。

共鳴散乱

電磁気的な散乱。原子や分子の電荷分布が、やってきた特定波長の光（電磁場の変化）と共鳴して光の進行方向を変化させること。

レイリー散乱とミー散乱

回折的散乱。波長に関係なく光の進行方向を変化させる。散乱の大きさは短い波長の光ほど大きい。入射光に対して、どの方向に散乱しやすいか確率的な規則性がある。光の波長よりも小さい粒子（気体分子）による散乱をレイリー散乱、光の波長と同程度の粒子による散乱をミー散乱という。

夜空を明るくするメカニズムは波長によって異なる。可視光域の場合、都市の発達した現在では、低空に漂う粉塵や水滴による地上光のミー散乱が大きい。「都会から離れて、空の暗いところで星を見ましょう」と言われる所以である。地上光の全くない暗い空では、夜空の明るさは1秒角平方あたり波長550nmで22等級になる。

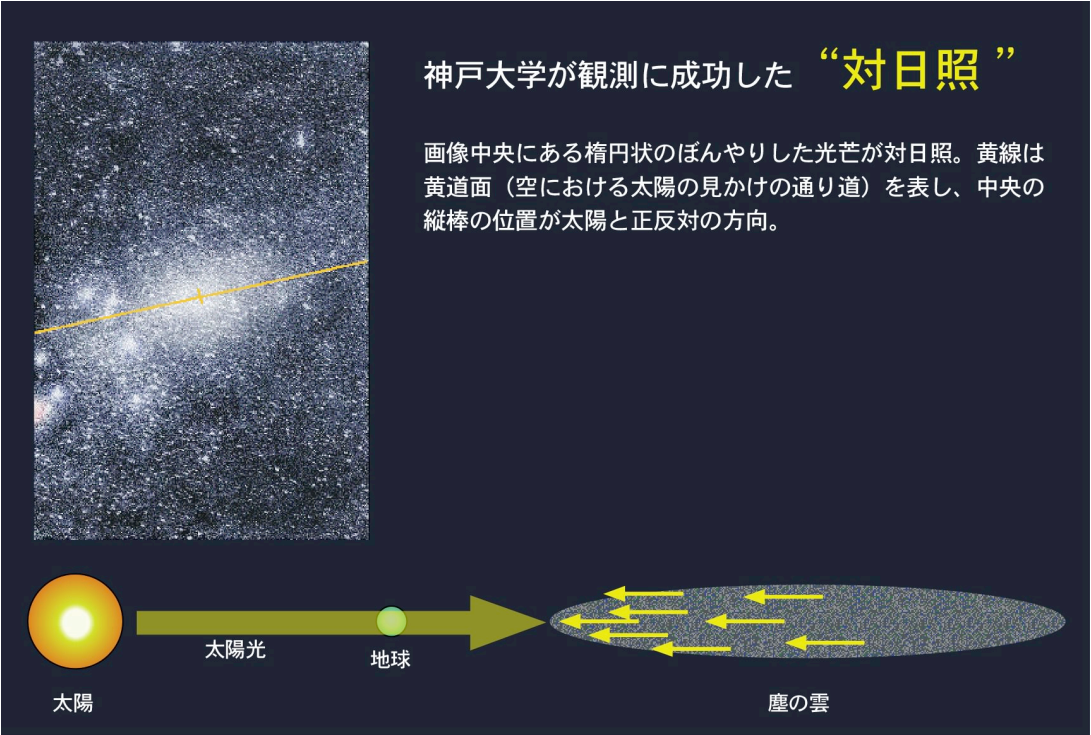
紫外～可視域での主な大気発光

波長 (nm)	物質	高さ (km)	メカニズム
102.5	H	200	共鳴散乱
121.6	H	100～100000	共鳴散乱
260～380	O ₂	90	化学反応
500～650	NO ₂	90	化学反応
577.7	O	90～300	化学反応、イオン反応
589.3	Ne	90	化学反応
630	O	300	イオン反応
761.9	O ₂	80	化学反応

一方、波長数 μm 以上の近赤外では、OH という分子ラジカルの自発放出や水、二酸化炭素といった物質の熱放射が夜空を明るくする。

西はりま天文台の夜空

西はりま天文台の夜空の明るさは天頂で 1 秒角平方当たり 21.5 等級となっている。これは国内有数の環境である。夜空の暗さを証明する事例として、1999 年 5 月に神戸大学によって行われた対日照観測の成功があげられる。

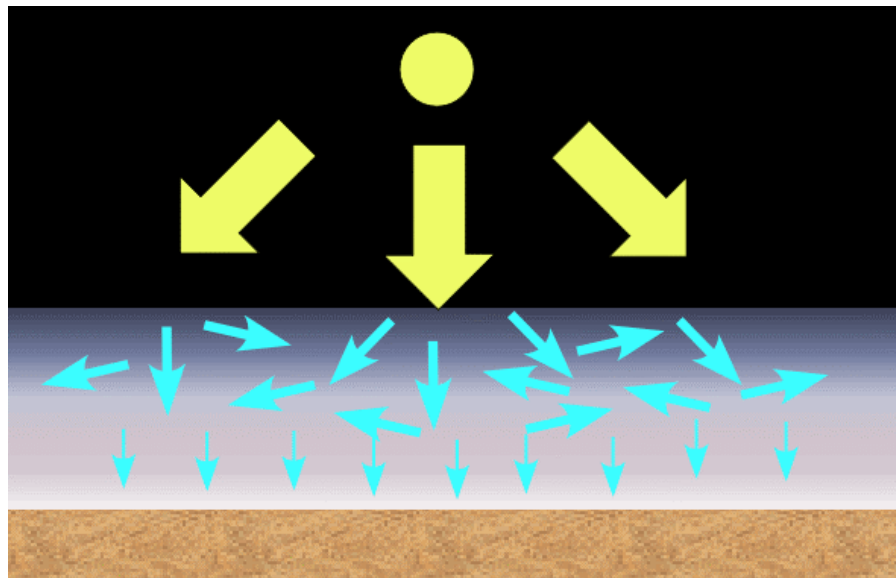


太陽系には彗星や小惑星から放出された塵（ダスト）が存在する。空の非常に暗いところ

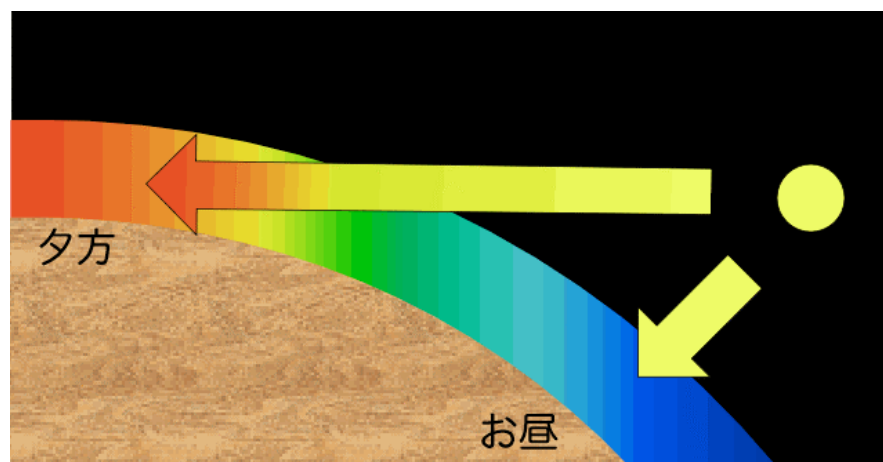
にいくと、太陽と正反対の方向に非常にかすかではあるが、この塵が観測できる。これは塵のミー散乱の特徴によるもの（後方散乱：下図）で、対日照と呼ばれている。この対日照の明るさや形状を観測することによって、太陽系に存在する塵の起源や進化を研究することができる。アマチュアによる天体写真を除けば、研究観測の対象として対日照の撮影に成功したのは乗鞍岳での例に次いで国内で2例目である。（資料提供：神戸大学観測グループ）

空はなぜ青い、夕日夕空はなぜ赤い

空の色を決めているのはレイリー散乱である。地球の大気に含まれる気体分子はレイリー散乱によって青い色を特によく散乱する。そしてあらゆる方向に光を散らす性質がある。結果、昼間の空は青い光で満たされることになり、空全体から青い光が地表に降り注ぐこととなる。



一方で夕日や夕空が赤く染まるのは、太陽光線が大気中を進む距離が長くなるためである。

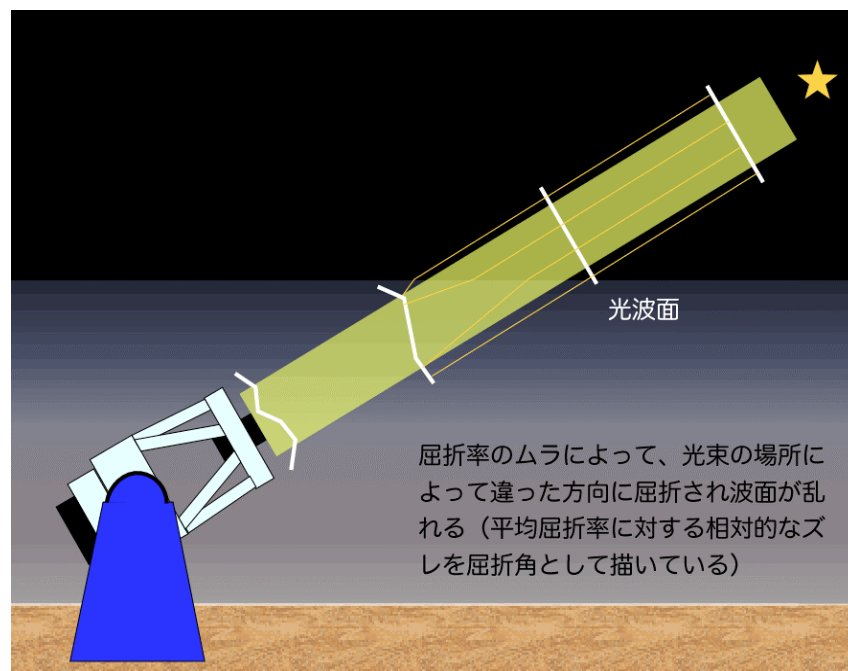


大気のレイリー散乱によって青い光は光路の早い段階で大気に抜き取られてしまい、夕方を

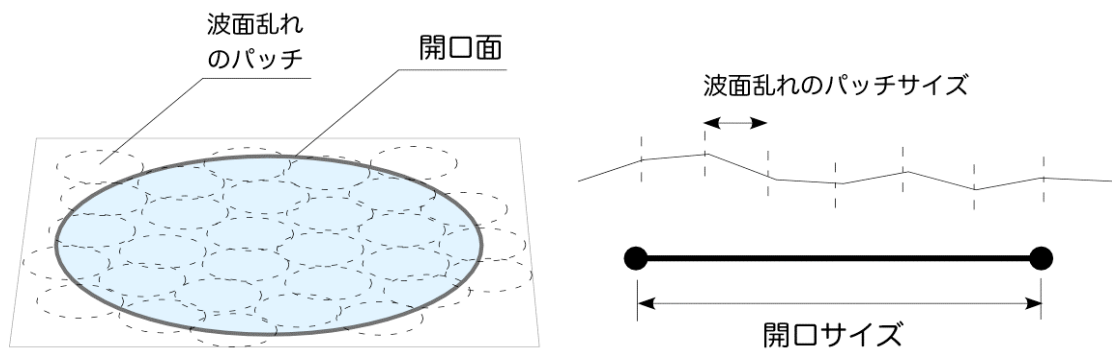
むかえている場所に到達する頃には赤い成分が多く残った光になる。その赤に偏った光は、比較的低空にある粉塵や水滴によるミー散乱を受ける。ミー散乱は赤い波長までよく散乱し、散乱する方向をあまり変化させない確率が高く、残りの殆どは反対方向への散乱になる。このことによって夕日のある西空が赤く染まるのである。

10-4. 大気のゆらぎによる光波面の乱れ

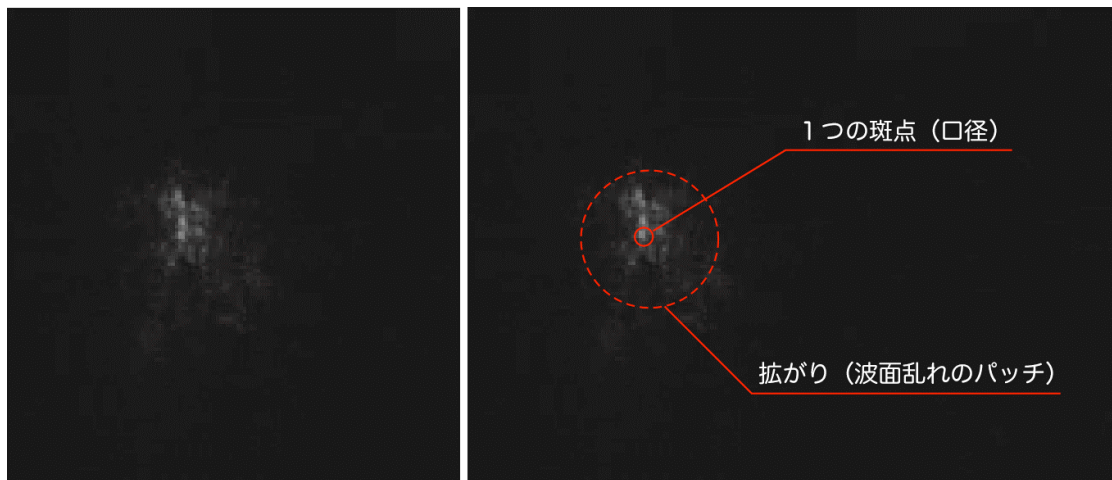
天体望遠鏡は光を集める鏡(やレンズ)が大きくなるほど性能も良くなる。ところがここで困るのが地球大気存在である。大気を通して見ると星はゆらゆらとしてみえる。光は真空中から空気中に入射したり、空気中から水中に入射したりすると進行方向が曲げられるが、問題は、レンズを作るために慎重に製造されたガラス材と異なり、空気や水は自然の気まぐれによって屈折率にムラがあることである。これによって天体からの光は望遠鏡のレンズや鏡の開口に到達した時には波面がランダムに歪められてしまうことになる。



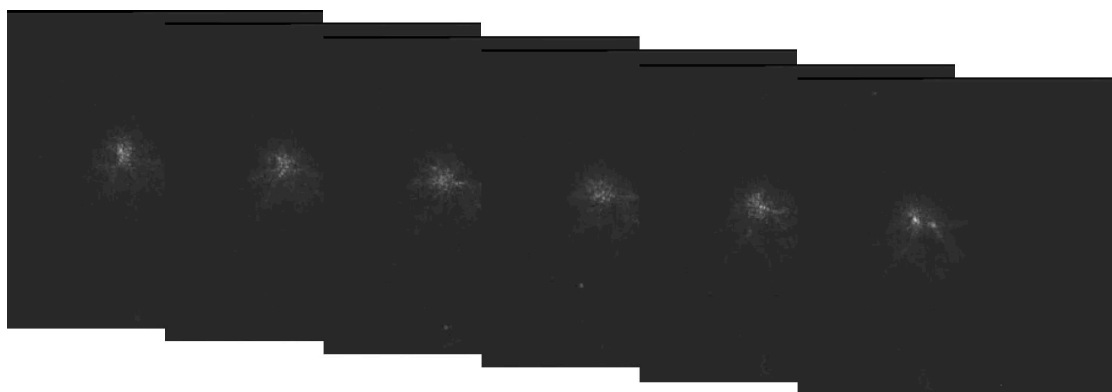
屈折率のムラの原因は大気中を流れる風によって引き起こされる乱流（渦）である。しかも大気中では空気が流動しているため、その歪みは一時としてジッとしていない。このような光波面の乱れの平均サイズは、地上（望遠鏡の開口面上）で10cm程度とされている。



つまり鏡の大きさが数10cmを超えるような望遠鏡になると、星像は斑点が散らばったようになる。そのパターンは時々刻々（～1/100秒）と変化していく。



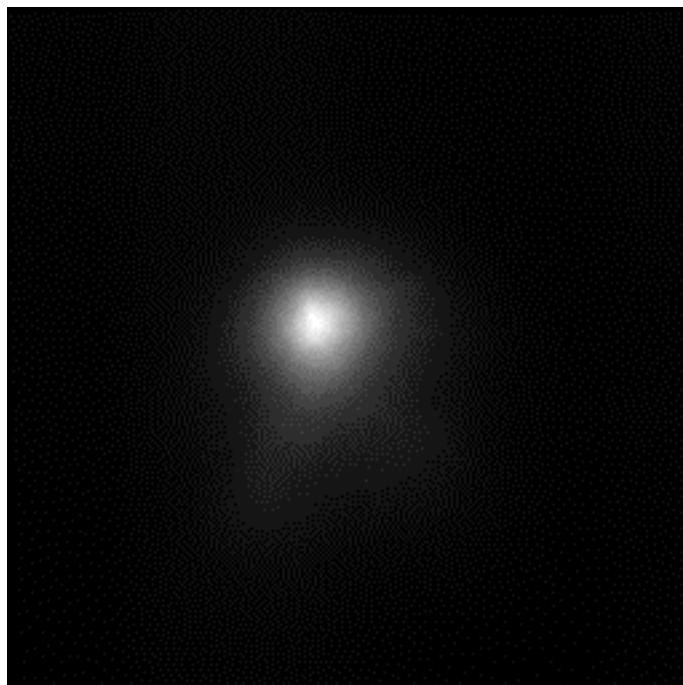
スペックル像とその特徴的な構造



連続したスペックル像の変化

このような斑点模様の像をスペックル像という。極端に拡大した星像を秒間30フレーム以上で高速撮像すると見ることができる。スペックル像に見られる個々の小さな斑点のサイズは望遠鏡の口径で決まる回折限界（本来の分

解能)に相当する。また斑点の散らばりのサイズは波面乱れのパッチサイズによる回折像に相当する。長時間露光像では時間的に変化する斑点模様が重なることで平滑化され、シーイングディスクと呼ばれるボケた星像になる。



上のスペックル像を500枚足し合わせて作った長時間露光像

これにより大口径で光学系の良い望遠鏡を使っても通常の観測方法では、分解能は数秒角(口径10cm程度の望遠鏡相当)に制限されてしまう。

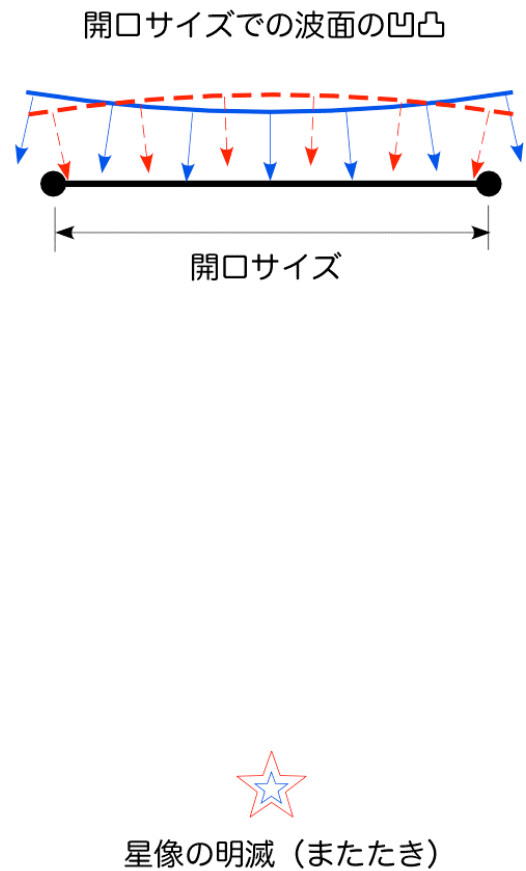
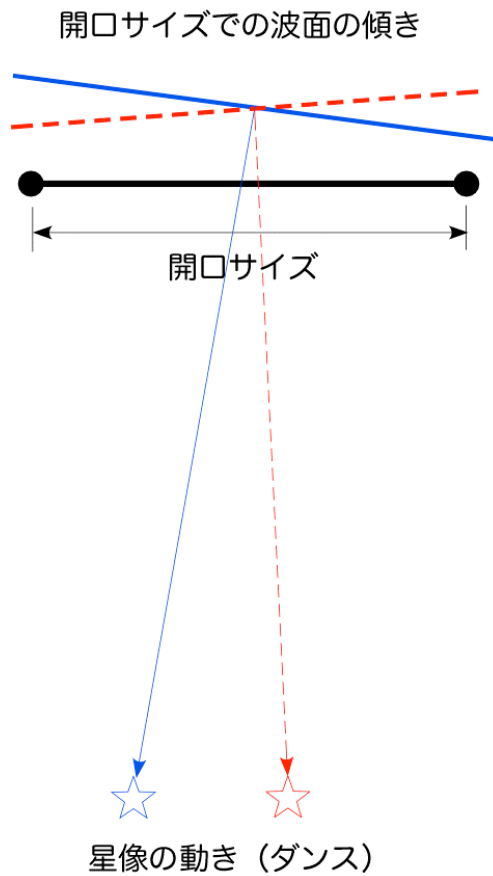
大気で生じる光波面の乱れが引き起こす天体観測上の影響は次の3つである。

シーイング : 星像のボケ

ダンシング : 星像の揺れ

シンチレーション : 星像の明滅(星のまたたき)

ダンシングは望遠鏡開口面に入射する光波面の傾きが乱れることによって生じる。シンチレーションは望遠鏡開口面に入射する光波面の乱れの形状が凸面になったり凹面になったりすることにより生じる。



お楽しみ問題

肉眼で星空を眺める時、星がまたたいて見える理由は、これまでの説明で理解できることと思う。ところで肉眼ではひととき明るい星に見える木星や金星、土星などの惑星は、他の星（恒星）とは違ってまたたいて見えない。これが恒星と惑星を見分ける最も簡単な方法とされているが、これらの惑星がまたたかないのはなぜだろう？

くだいようですが成績には関係ありません。考察してみてください。