

太陽黒点と太陽スペクトル 星のスペクトル

Alexandre Costa, Beatriz García, Ricardo Moreno

*International Astronomical Union
Escola Secundária de Loulé, Portugal*

*ITeDA and Universidad Tecnológica Nacional, Argentina
Colegio Retamar de Madrid, Spain*



目標

- スペクトルについて理解する。
- 太陽スペクトルについて理解する。
- 黒点について理解する。
- 黒点についてのガリレオの業績を理解する。



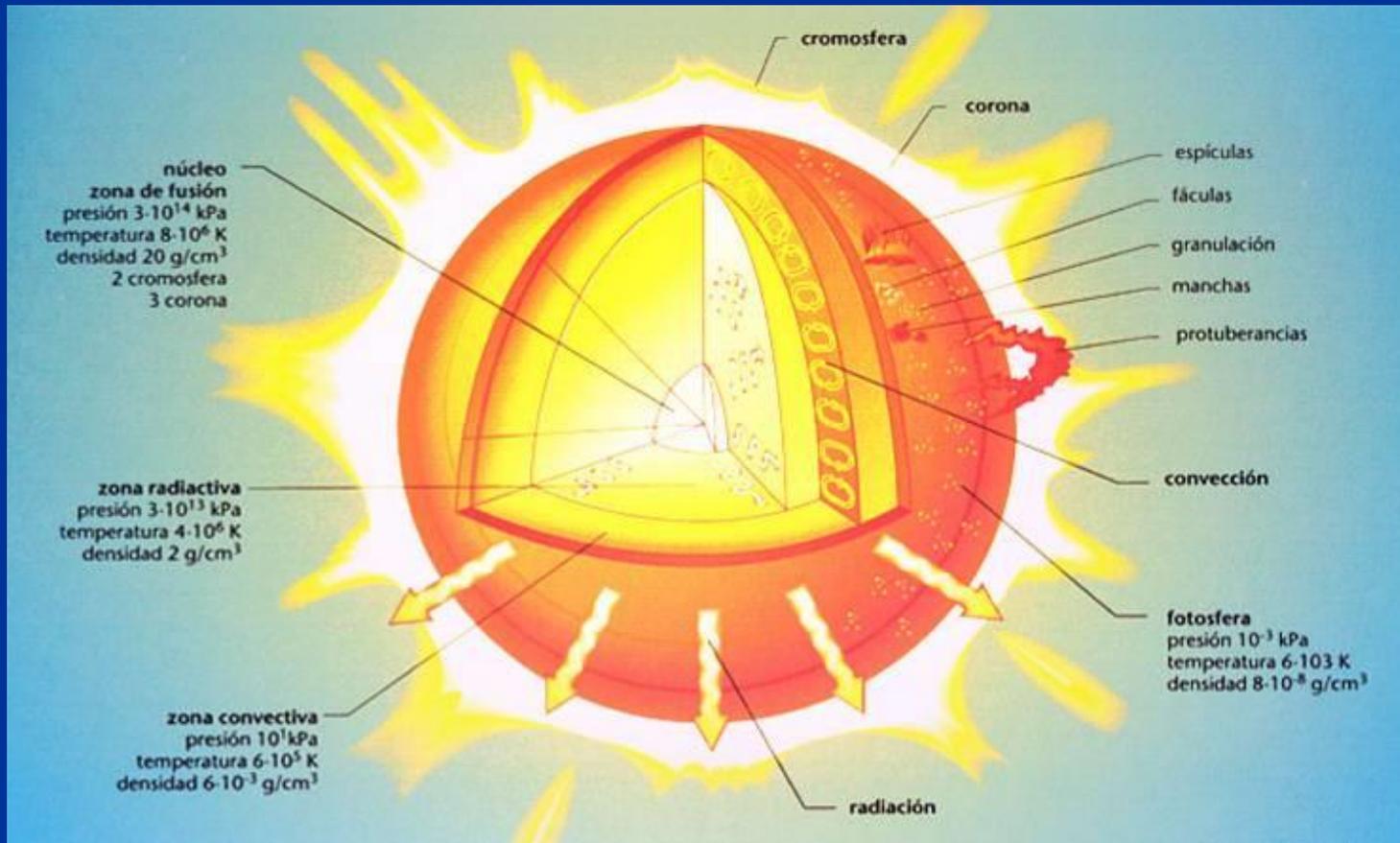
太陽の放射

太陽は私たちの使うエネルギー（光、熱）をもたらす。



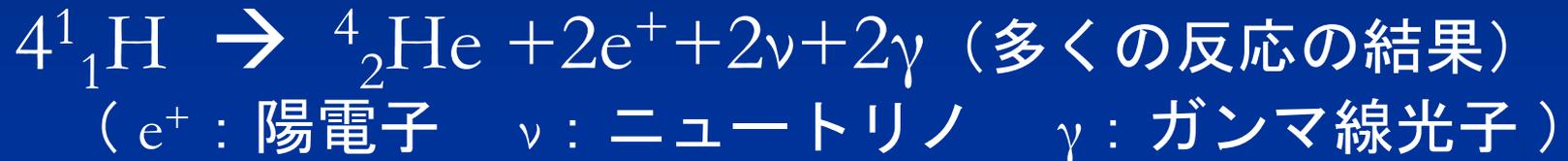
太陽の放射

太陽の放射は、高圧、1500万度の中心核の中で、核融合反応によって生成されている。



太陽の放射

- 4つの陽子（水素の原子核）をもとに、反応が続いて最終的にヘリウム原子を形成する。



- その結果、質量は初めの4つの陽子合計よりも軽くなる。差分の質量が次の式で表されるエネルギーに変わるからである： $E = m c^2$
- 毎秒6億トンの水素が5.955億トンのヘリウムに変換され、残りはエネルギーとして変換されている。
- 太陽はとても大きいので、莫大な消費量とはいえ、使い切るのに数10億年かかる。

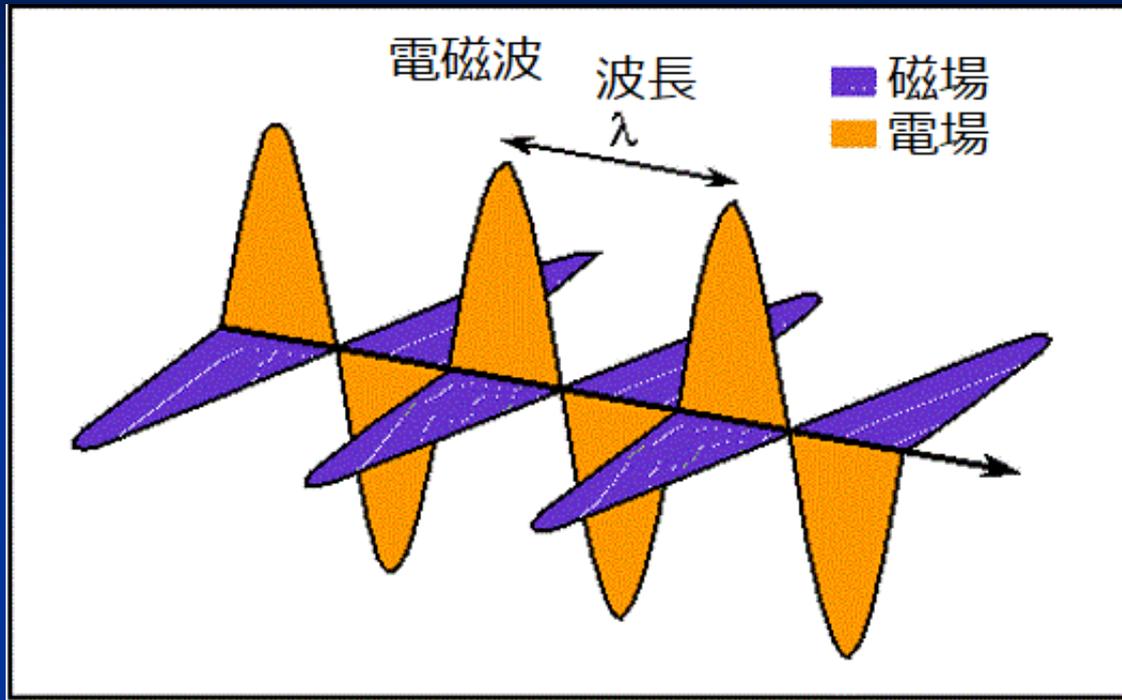


太陽の放射

太陽光は 29万9793 km/s で進む。
地球までは8分で到達する。



太陽スペクトル：放射

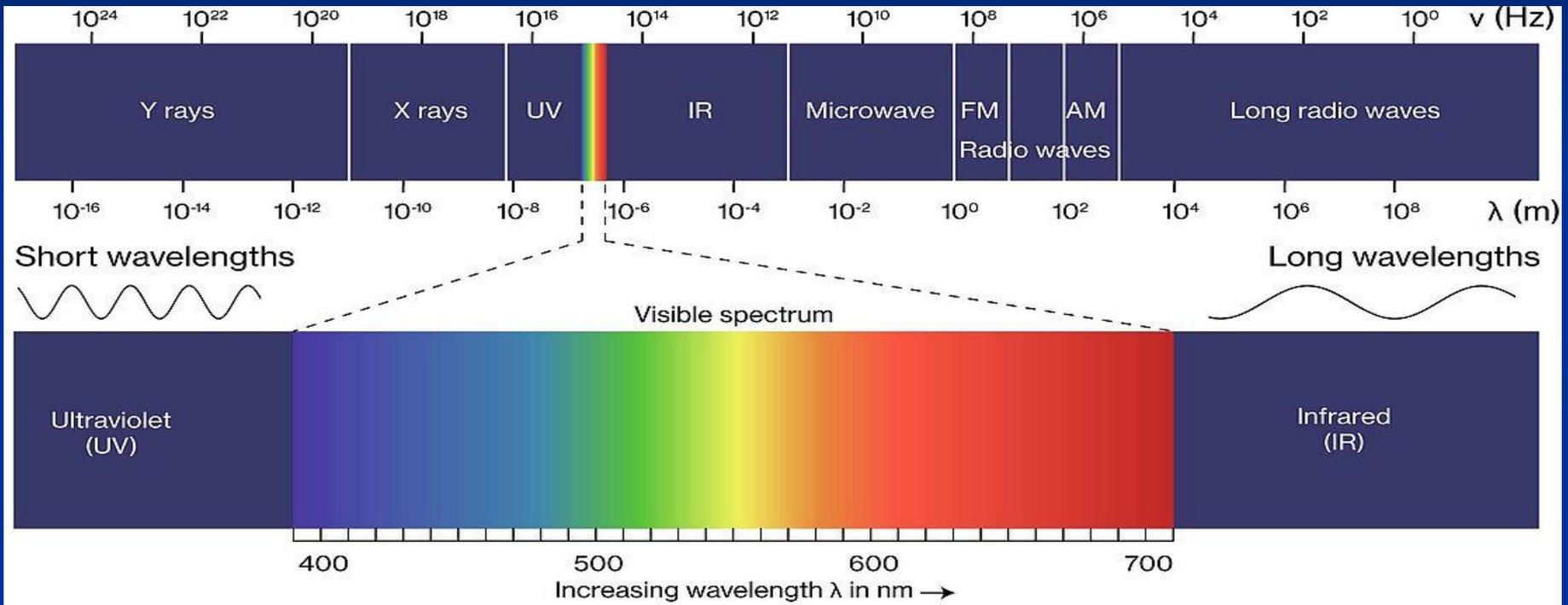


波長 λ 、振動数 ν 、電磁波の伝搬速度 c には、次の関係式がある：

$$c = \lambda \cdot \nu$$

太陽スペクトル：放射

電磁スペクトル



ガンマ線



X線



可視光



赤外線

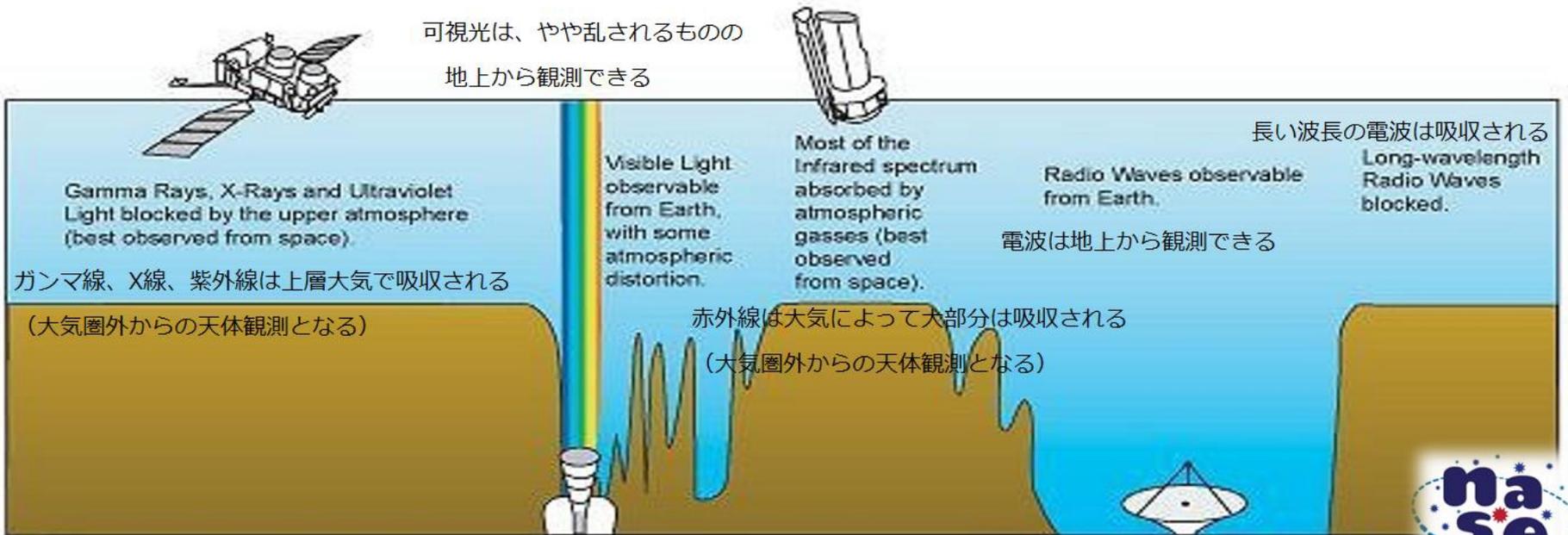
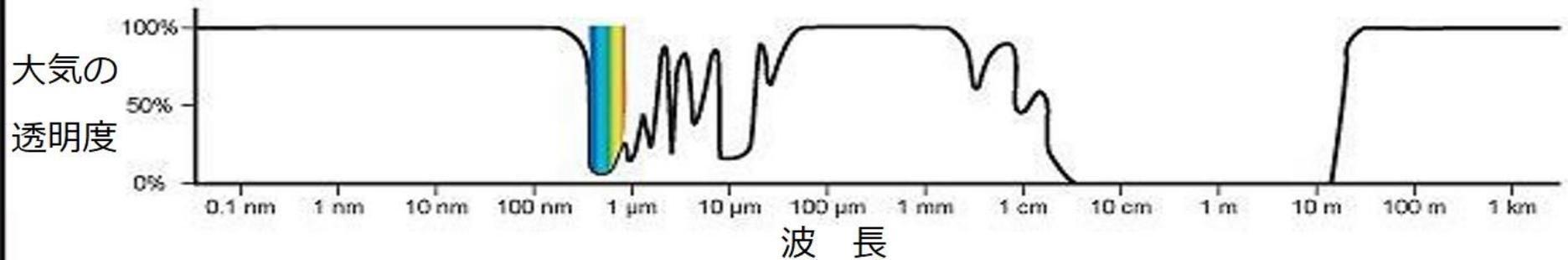


電波

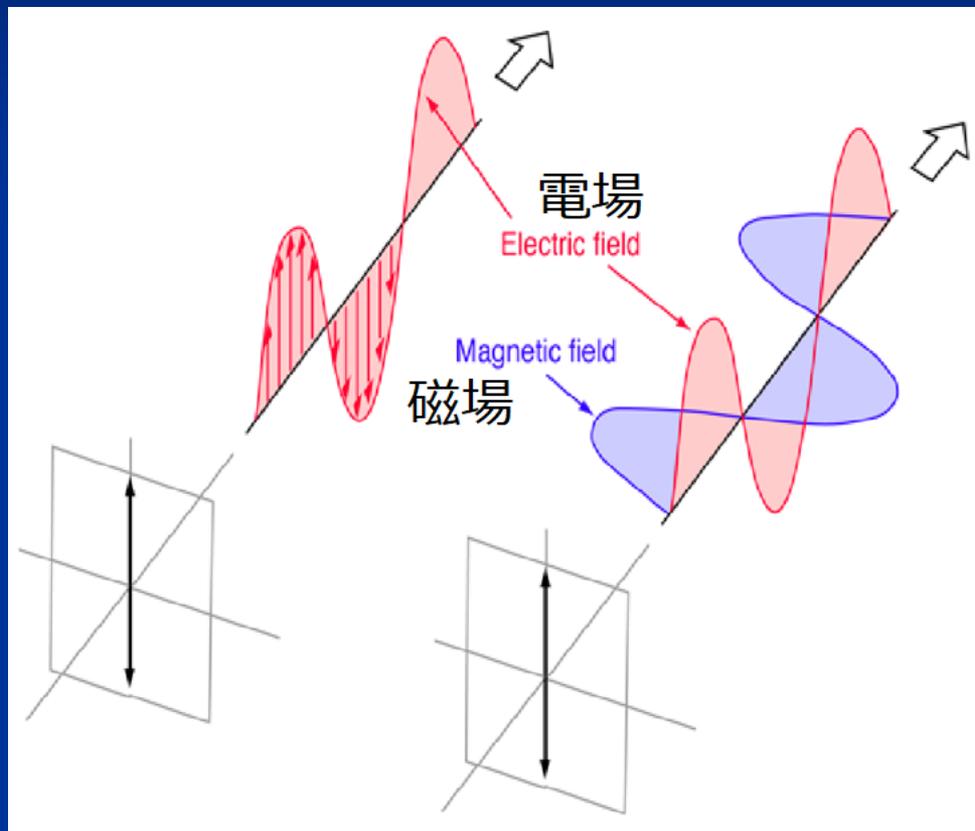


太陽スペクトル：放射

電磁波の多くの波長で地球大気は不透明である。



太陽スペクトル：偏光

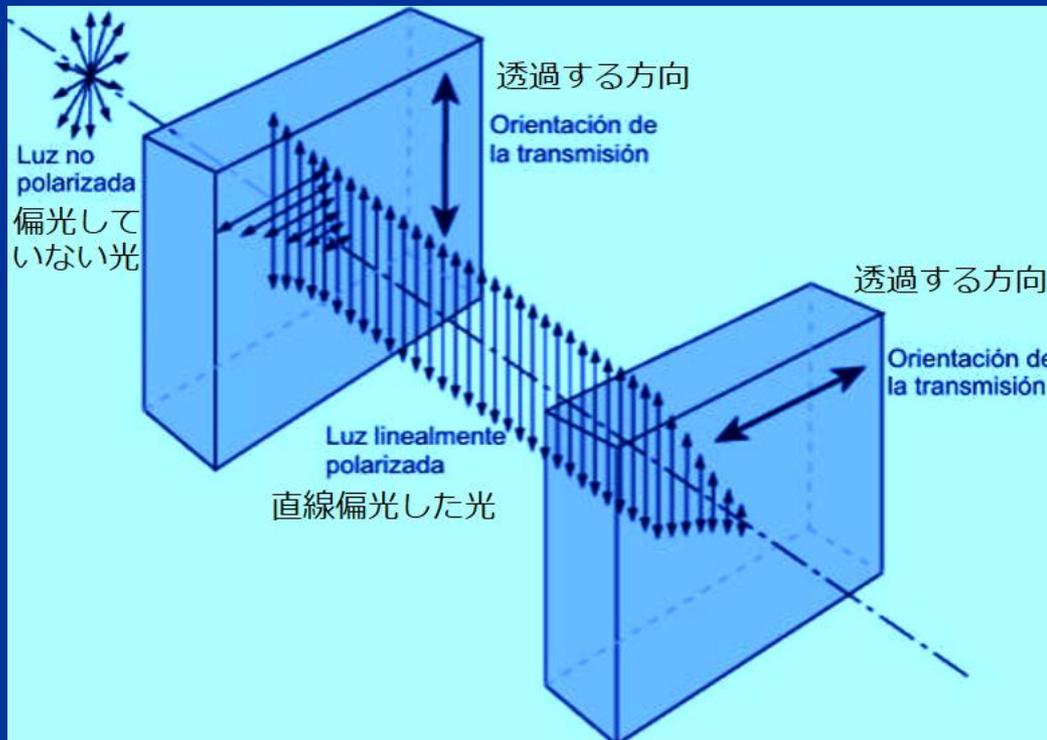


- 単純な電磁波は左図のような性質がある。
- 電場と磁場、それぞれの方に振動している。
- 図は直線偏光している状態である。図では縦方向の偏光を例として示している。
- 自然の太陽光は様々な偏光面のものが混じっているので、特別な振動面だけを持っているものではない。

太陽スペクトル：偏光

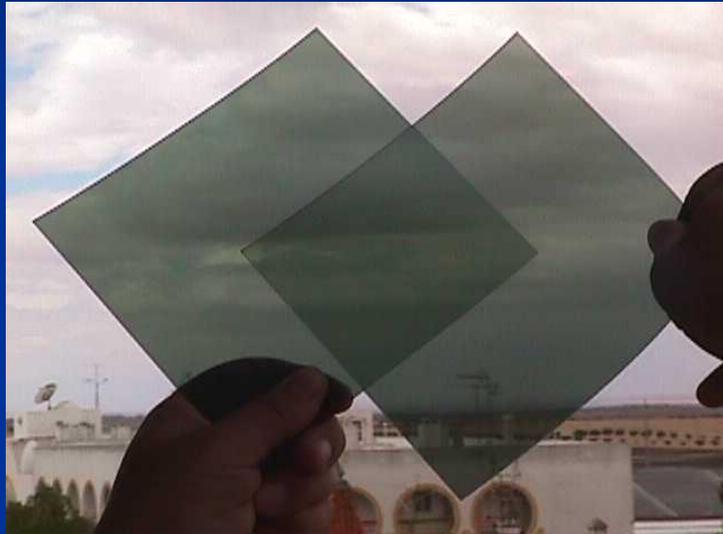
太陽光は

- 反射により、また、
- 偏光フィルターを通ることで偏光する。

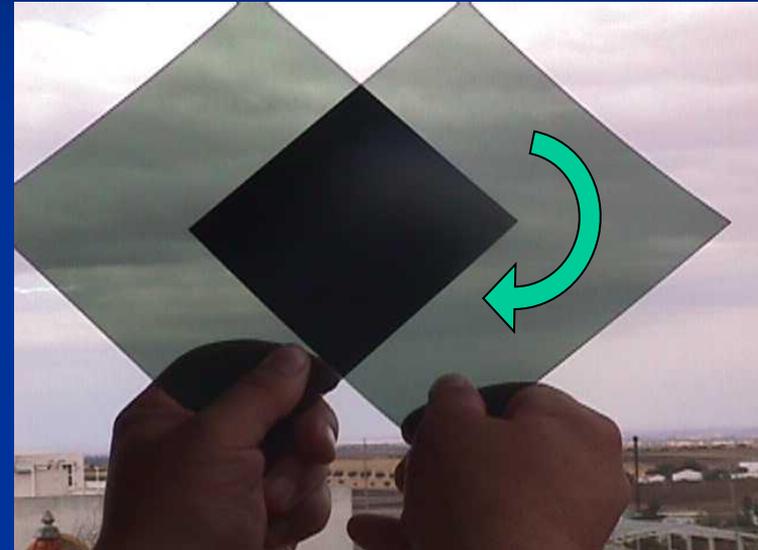


2つの偏光フィルターを、偏光の向きを平行にして置くと、太陽光はフィルターを通過する。もし、偏光の向きを互いに垂直にして置くと1枚目のフィルターを通った光が2枚目のフィルターで止められ、通過できない。

活動1：太陽スペクトル：偏光



偏光フィルターが同じ偏光角度なら、光は透過する。



フィルターを90度回転させると、光が遮られる。

活動1：太陽スペクトル：偏光



両方のフィルターの分子は同じ方向を向いており、光は通過します。

天体物理学では、光の偏光により星間塵粒子の方向とサイズを研究することができます。

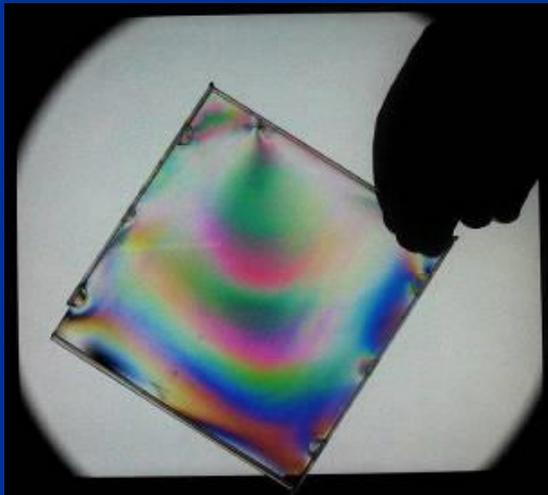


フィルターを90度回転させると光が通らなくなる

活動1：太陽スペクトル：偏光



- 光は反射によっても偏光する。
- 偏光サングラスで、反射した光をあまり受けないようにすることができる。
- 偏光という性質は、写真撮影や、物質内の歪みを測るときの技術に使われている。

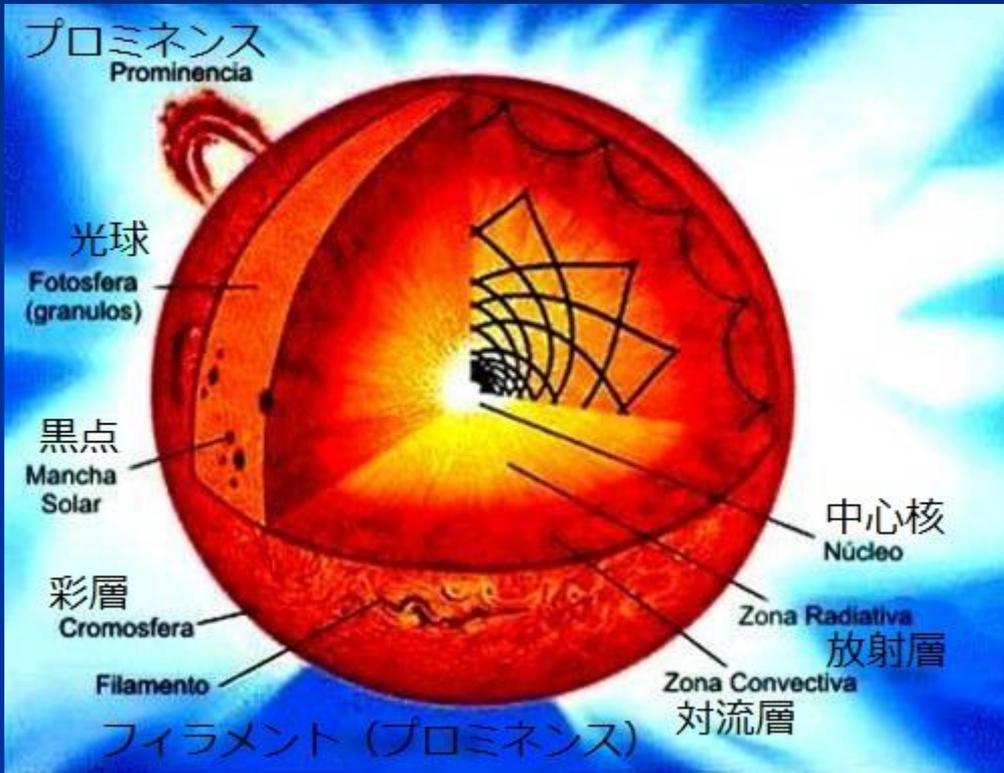


活動2：光の偏光

- ノートパソコンの液晶ディスプレイからの光は偏光している。
- 偏光サングラスを用いて偏光面を観察しよう。
- 偏光面を回転させる物質もある：液晶ディスプレイ上にセロハンテープを貼ってみよう。
- 透明なプラスチックを観察してみよう(例：CDのケース)。



太陽の構造



- 中心核 : 1500万 K
- 放射層 : 800万 K
- 対流層 : 50万 K

太陽の中では、対流
(物質の動き) が起
こっている層がある。

太陽の構造

光球

6400 - 4200 K

太陽の「表面温度」

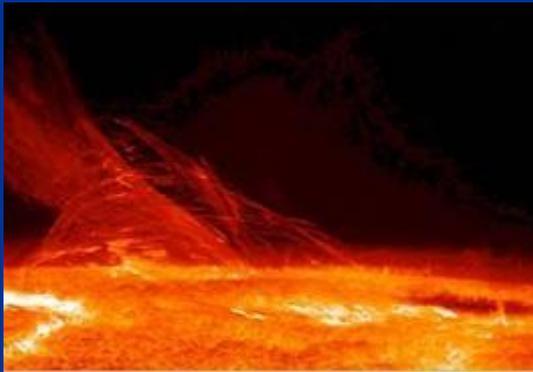
約 1000 km サイズ
の粒状斑



太陽の構造

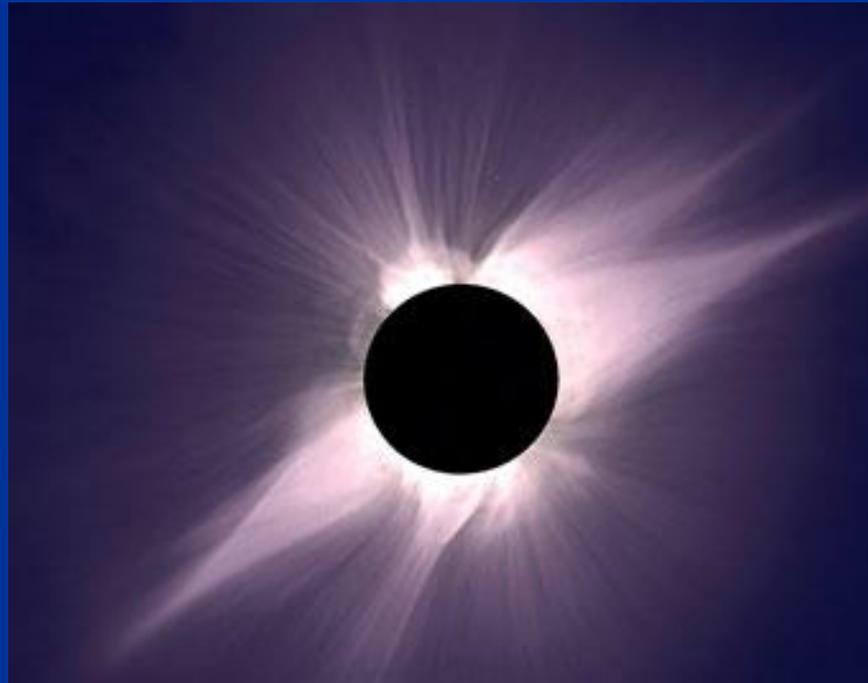


- 彩層：特殊な写真で「燃える草原」のように見える：4200 - 1×10^6 K である。
- プロミネンス（紅炎）やフレアといった現象もある。

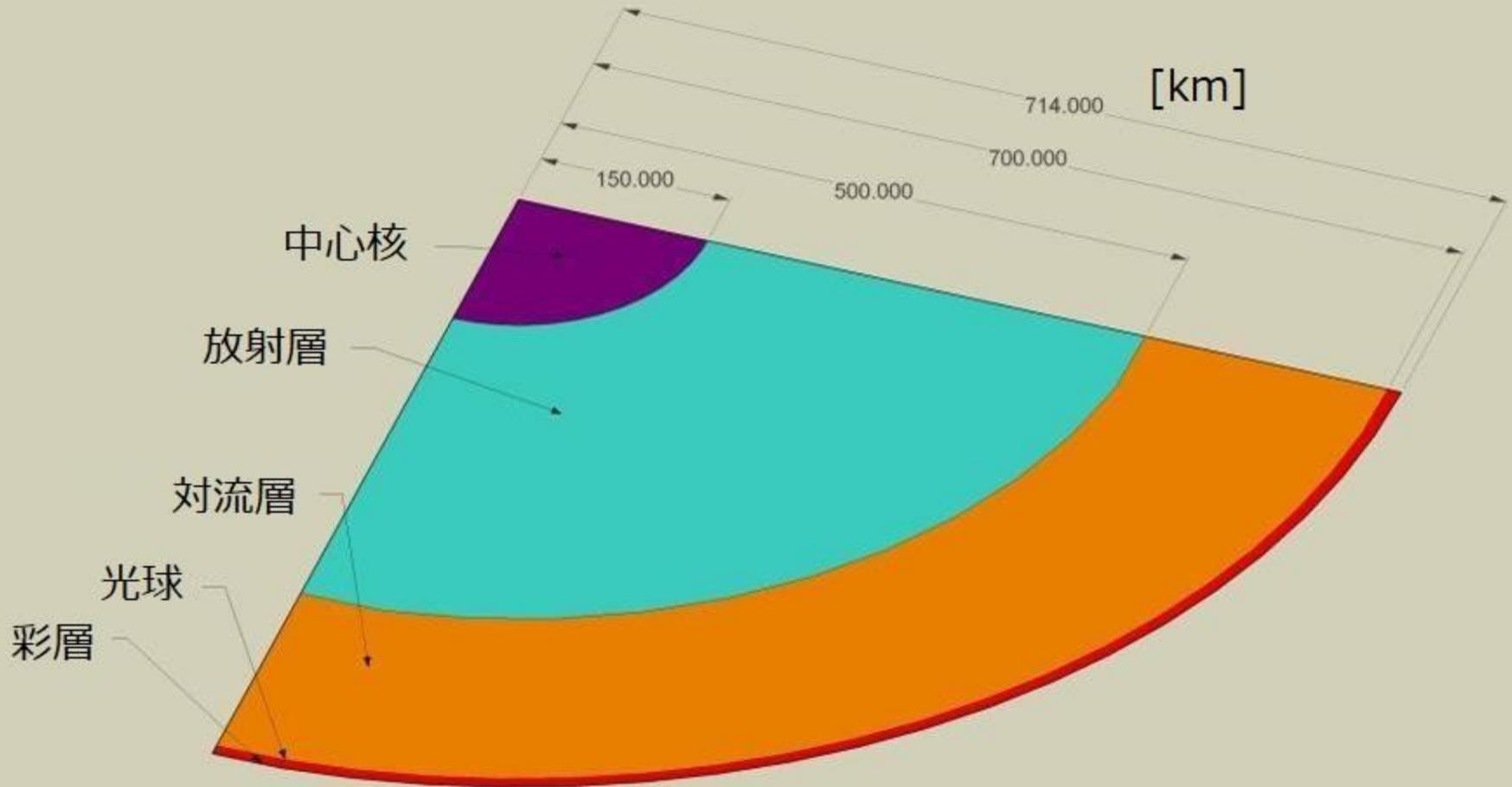


太陽の構造

- コロナ：太陽風、 $1-2 \times 10^6$ K
- 日食の時、または特殊な観測装置（コロナグラフ）を用いた時にだけ見える。



太陽の構造



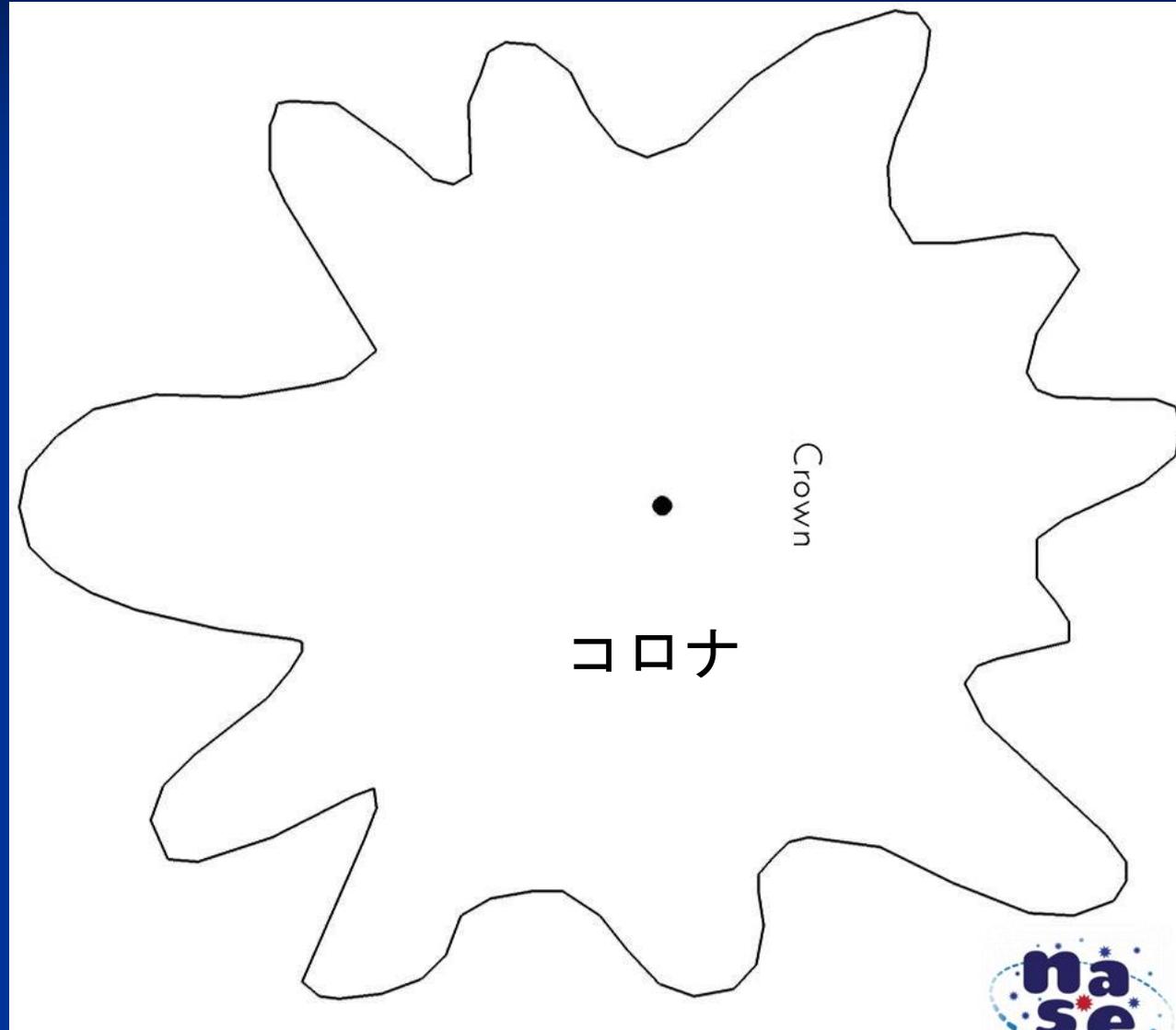
活動3：太陽の構造

太陽の各層の簡単なモデル。それぞれ切り抜きます。違う色の画用紙で作るか、色を塗るかします。



活動3：太陽の構造

それらを順に重ねて貼り付けます。



活動3：太陽の構造

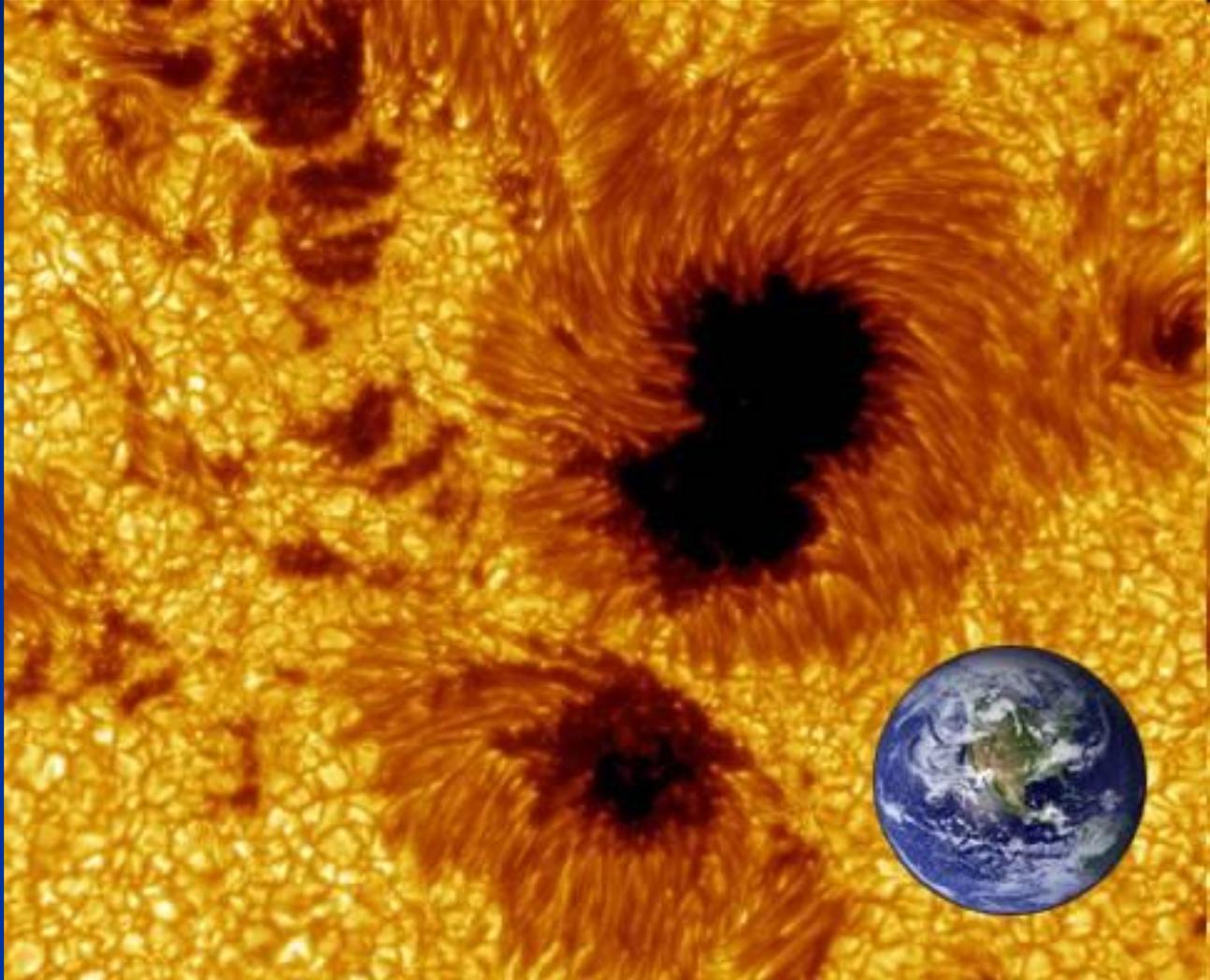


太陽黒点

- 光球にある暗い点は6000 Kでなく4200 Kである。
- 太陽黒点それぞれに、暗部(中心)と半暗部(周辺部)がある。

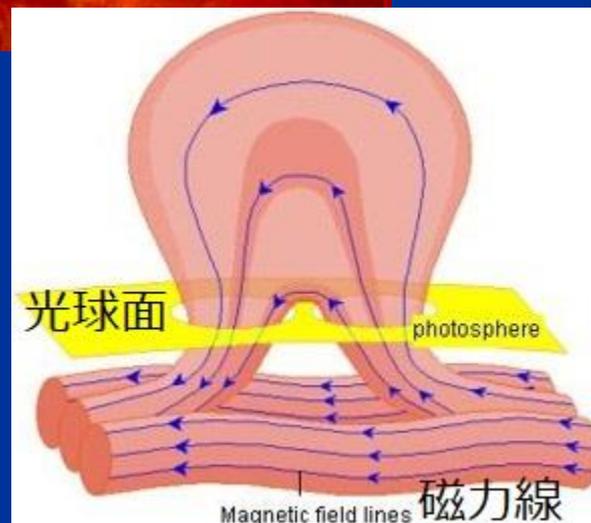
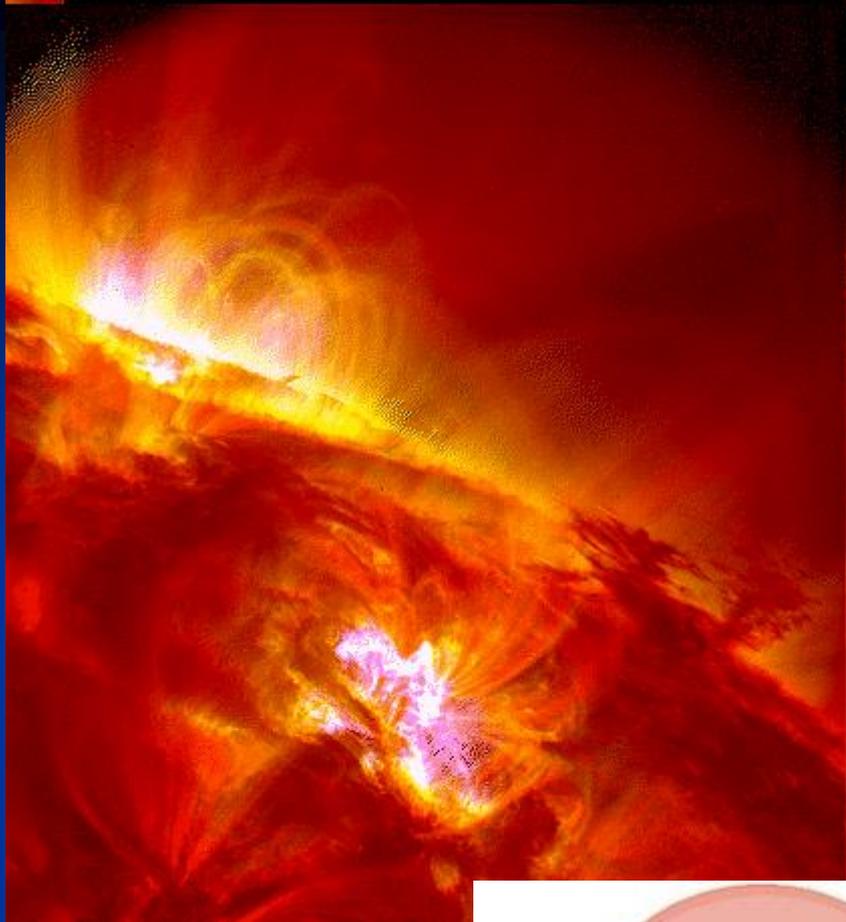


太陽黒点

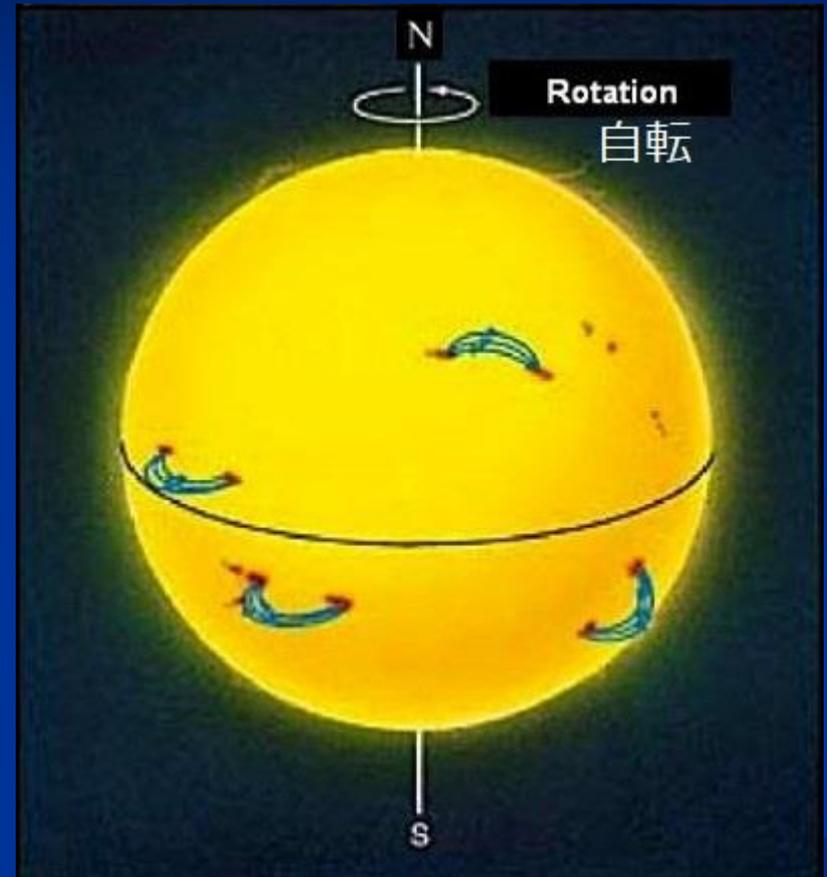
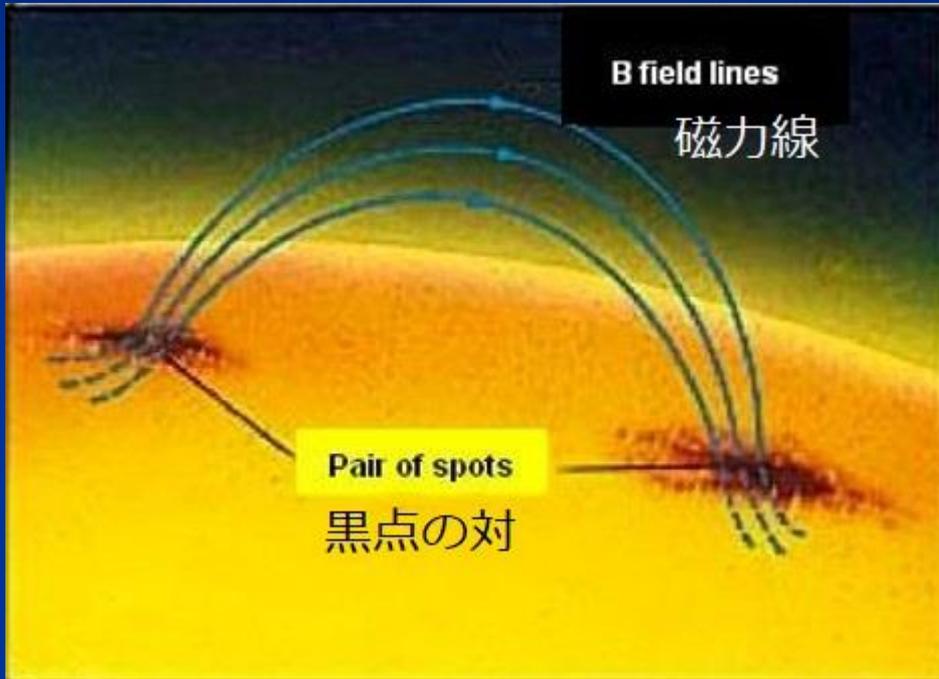


太陽黒点

- 黒点には強い磁場がある。
- 内部の磁力線がせり上がって露出することで黒点が作られる。

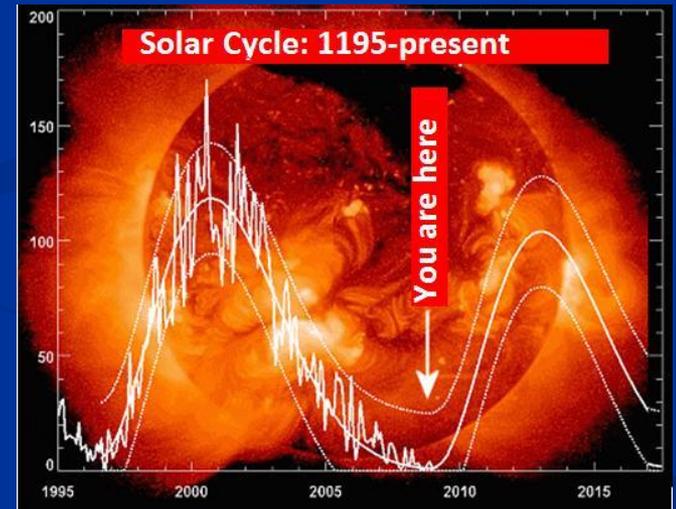
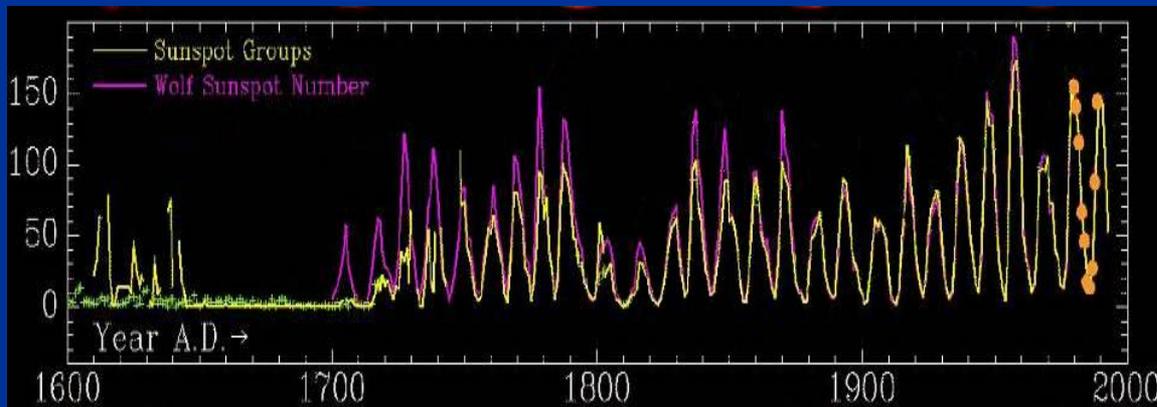


太陽黒点



太陽黒点

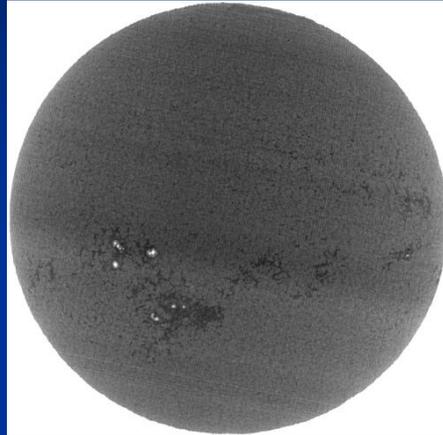
- 太陽黒点の数は「太陽の活動」を表している。
ウォルフ数(黒点相対数) = $k(10g + f)$
(g = 黒点群の数; f = 黒点の合計数; k = 観測による補正係数)
- 11年の太陽黒点周期がある。



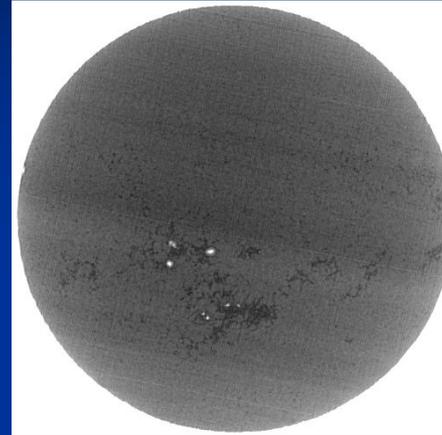
2008年は、通常より長く太陽極小期が続いた。

太陽黒点と太陽の自転

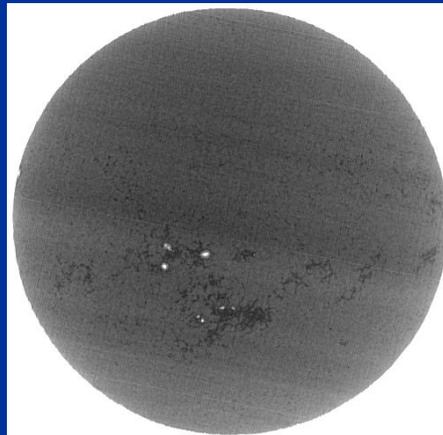
1992年11月21日



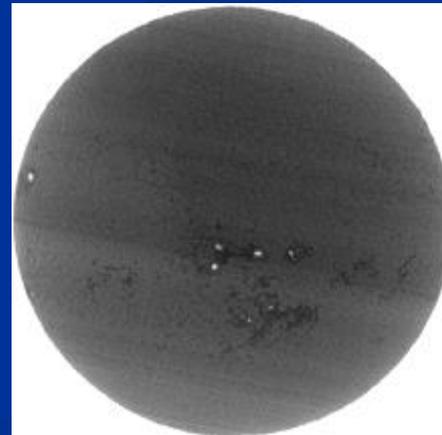
1992年11月22日



1992年11月23日



1992年11月24日



画像提供：コロンビア大学天文台



太陽黒点と太陽の自転

SOHO/MDI Full-Disk
Continuum Image



Observed:
August 1999

LS

- 黒点を使って、太陽自転の速さを求めることができる。
- ガリレオは初めて望遠鏡を使って黒点を見た人の一人であり、そこから太陽の自転の周期を測定した。
- 異なる公転周期：
赤道25日、極34日



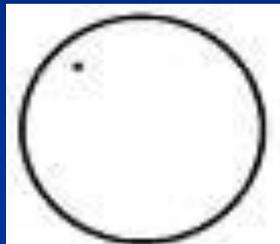
活動4：太陽の自転周期の決定

- 太陽の観測は必ず望遠鏡または双眼鏡での投影像によって行わなければならない。絶対に直視しないこと。

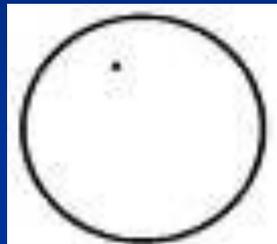


活動4：太陽の自転周期の決定

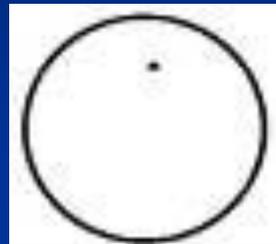
- 数日間の黒点の動きが描かれている。



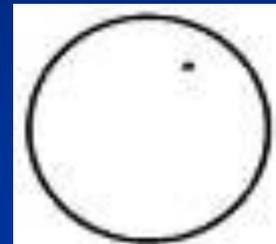
1日目



4日目

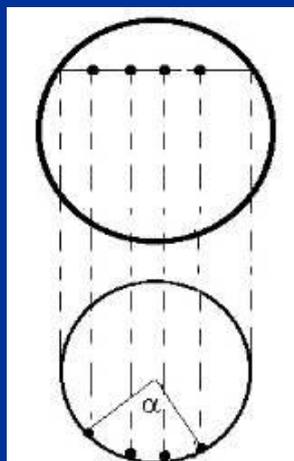


6日目

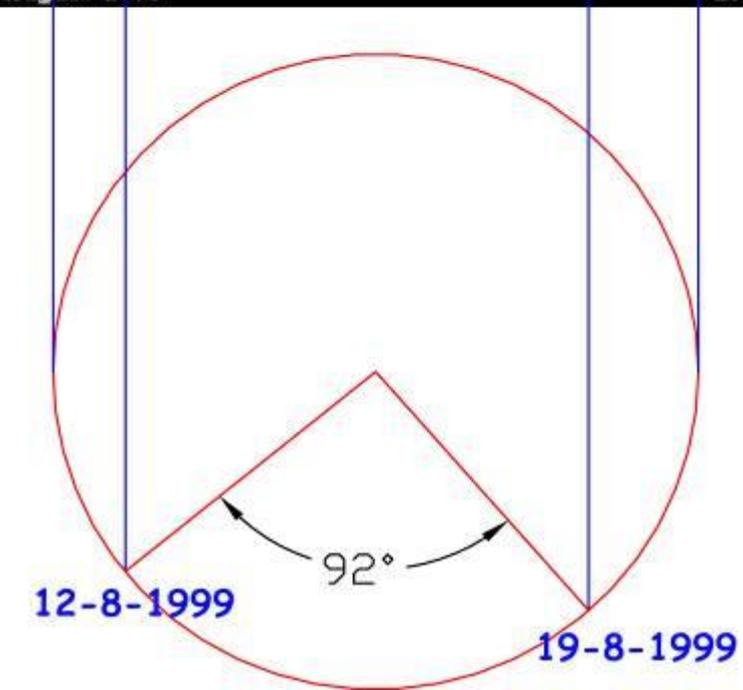
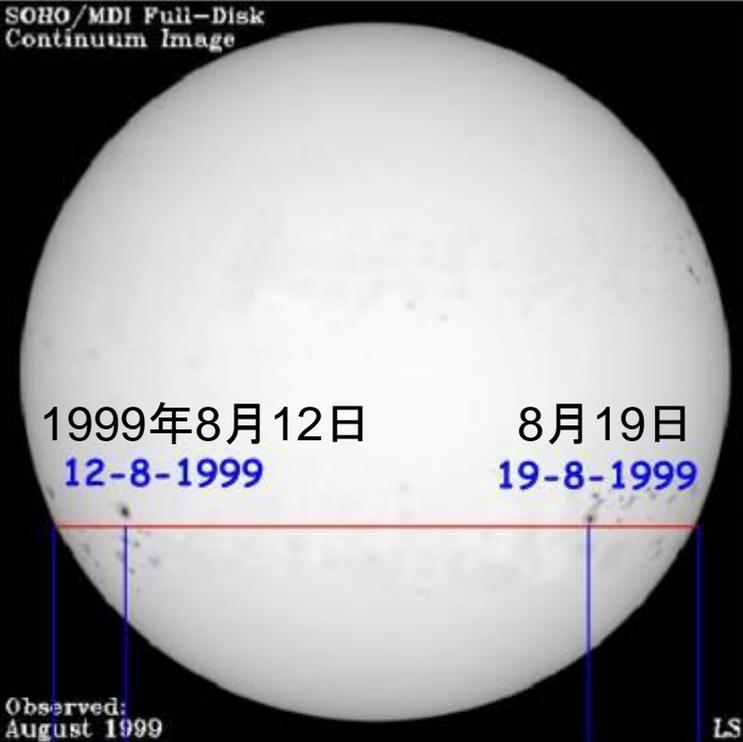


8日目

- 黒点の通り道を円周上に投影すると角度 α がわかる。
ここから周期 P を、日の単位で求めることができる。



$$\frac{360^\circ}{\alpha^\circ} = \frac{T}{t}$$



活動4： 太陽の自転周期の決定

$$T = \frac{360^\circ \times 7 \text{ 日}}{92^\circ} = 27.3 \text{ 日}$$

太陽の放射

- 太陽は大きな核反応装置であり、光子を生成している。光子の周波数（色に相当） ν と、エネルギー E の関係は： $E = h\nu$
- 太陽の輝度（ワットの単位）は莫大である。毎秒核爆弾1兆個分のエネルギーを放出している。
- 放射エネルギー P は、時間が経つにつれて大きくなる泡のように、空間に広がっていく。
- その泡の表面積は： $4\pi R^2$
- 太陽からの距離を R とすると毎秒 1 m^2 あたりに届くエネルギーの大きさは：

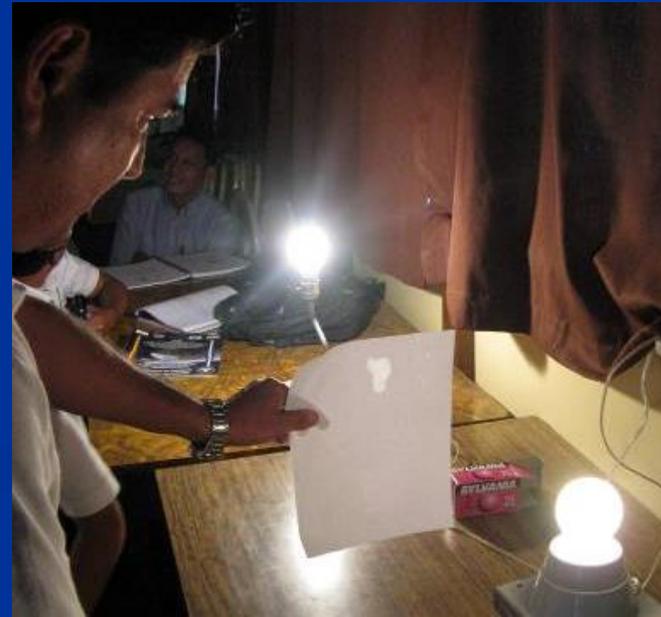
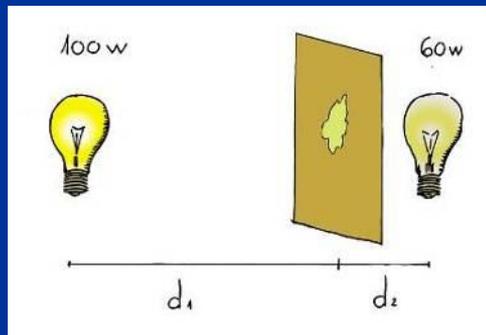
$$\frac{P}{4\pi R^2}$$



活動5: 太陽の光度の測定

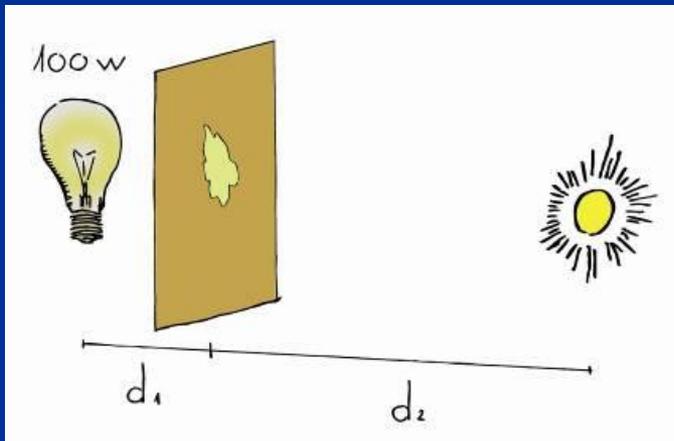
- エネルギーは距離の2乗に反比例して拡散する。太陽からの距離が分かれば、太陽光度を計算できる。
- 油しみ照度計を作る。紙の両サイドから同時に光を当て、何も見えなければ両側からの到達エネルギー(照度)が同じということである。したがって:

$$\frac{P_1}{4 \cdot \pi \cdot d_1^2} = \frac{P_2}{4 \cdot \pi \cdot d_2^2}$$



活動5: 太陽の光度の測定

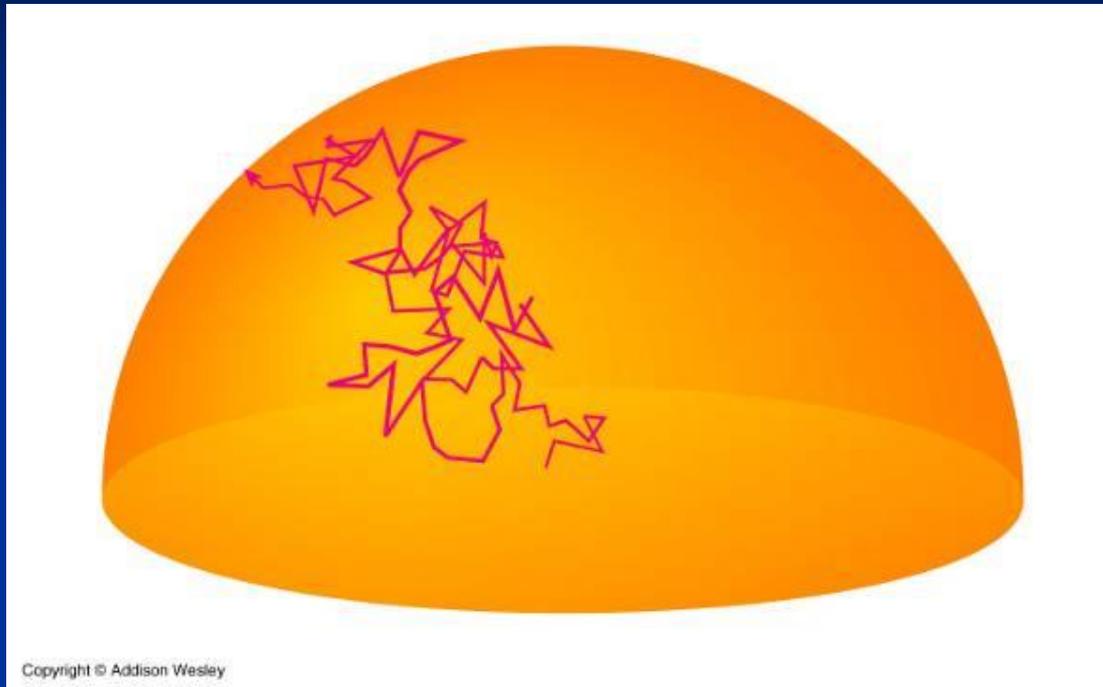
100 W の電球と 1億5000万 km (1.5×10^{11} m) 離れた太陽を比較する。そして、 P を測定する。



$$\frac{100 \text{ W}}{d_1^2} = \frac{P}{d_2^2}$$

その結果、太陽光度 $P : 3.8 \times 10^{26}$ W

太陽スペクトル：透明度



光子は太陽の最も内部で生成され、内部のガスと相互作用していく。光子は太陽の中心核で生成され、100万年かけて光球にたどりつく。

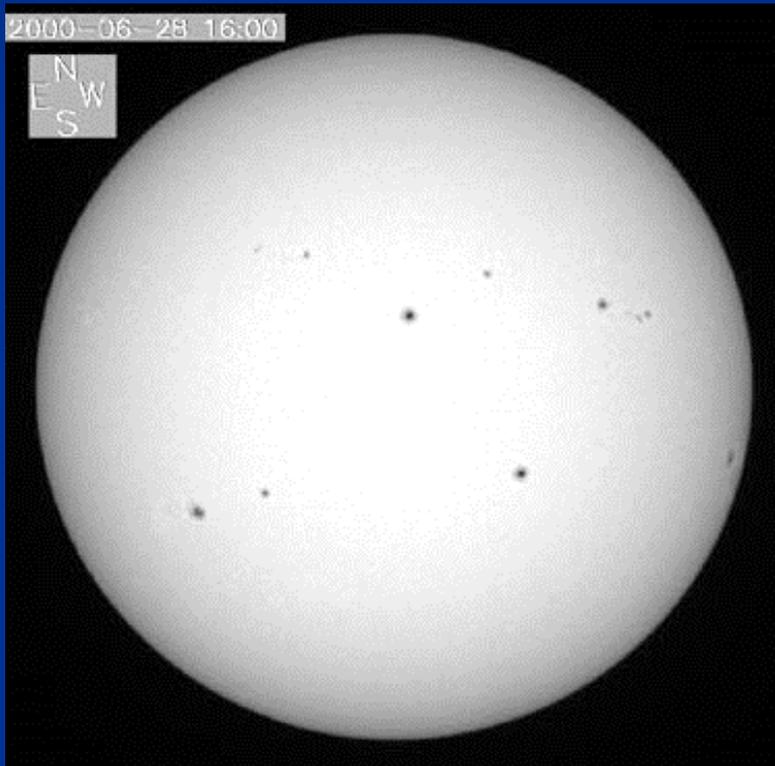
太陽スペクトル：透明度

太陽の内部は不透明である。

その上層は透明度が高い。

周縁減光

太陽の端の方ほど、正面に突き通すよりも上層をかすめ通してみることになる。その際、やや低温の上層を見るため、結果としてやや暗く見える。



活動6: 透過と透明度

透明は、見えない、ということではない。



スペクトル



Fuente: Deutsche Bundespost 1993



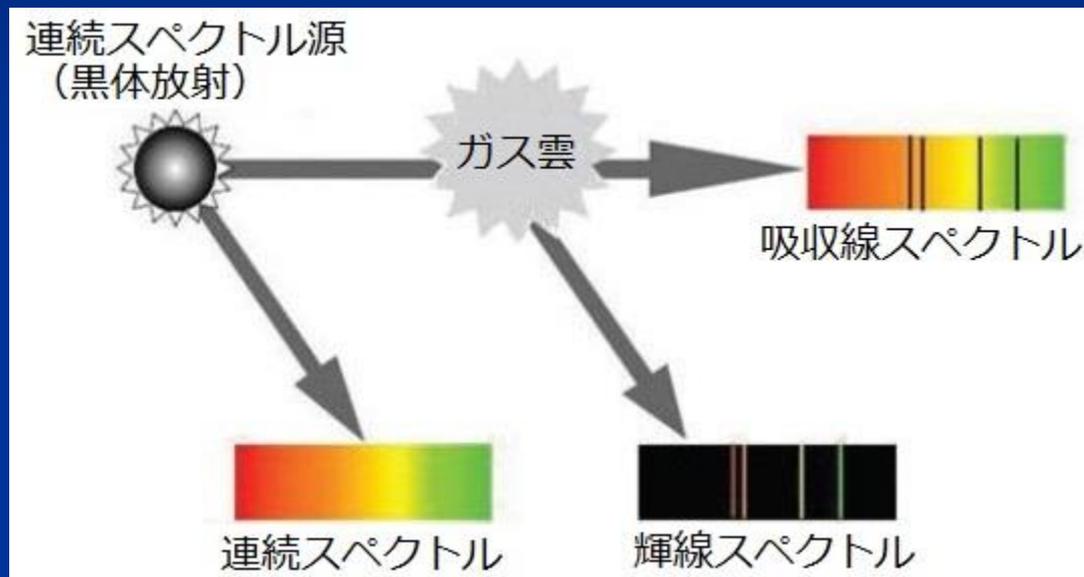
1701年、ニュートンはプリズムを使い、太陽光の色分解（分光）を調べた。

どんな光もプリズムや回折格子で分光でき、スペクトルといわれるものを得ることができる。

キルヒホッフ - ブンゼンの法則

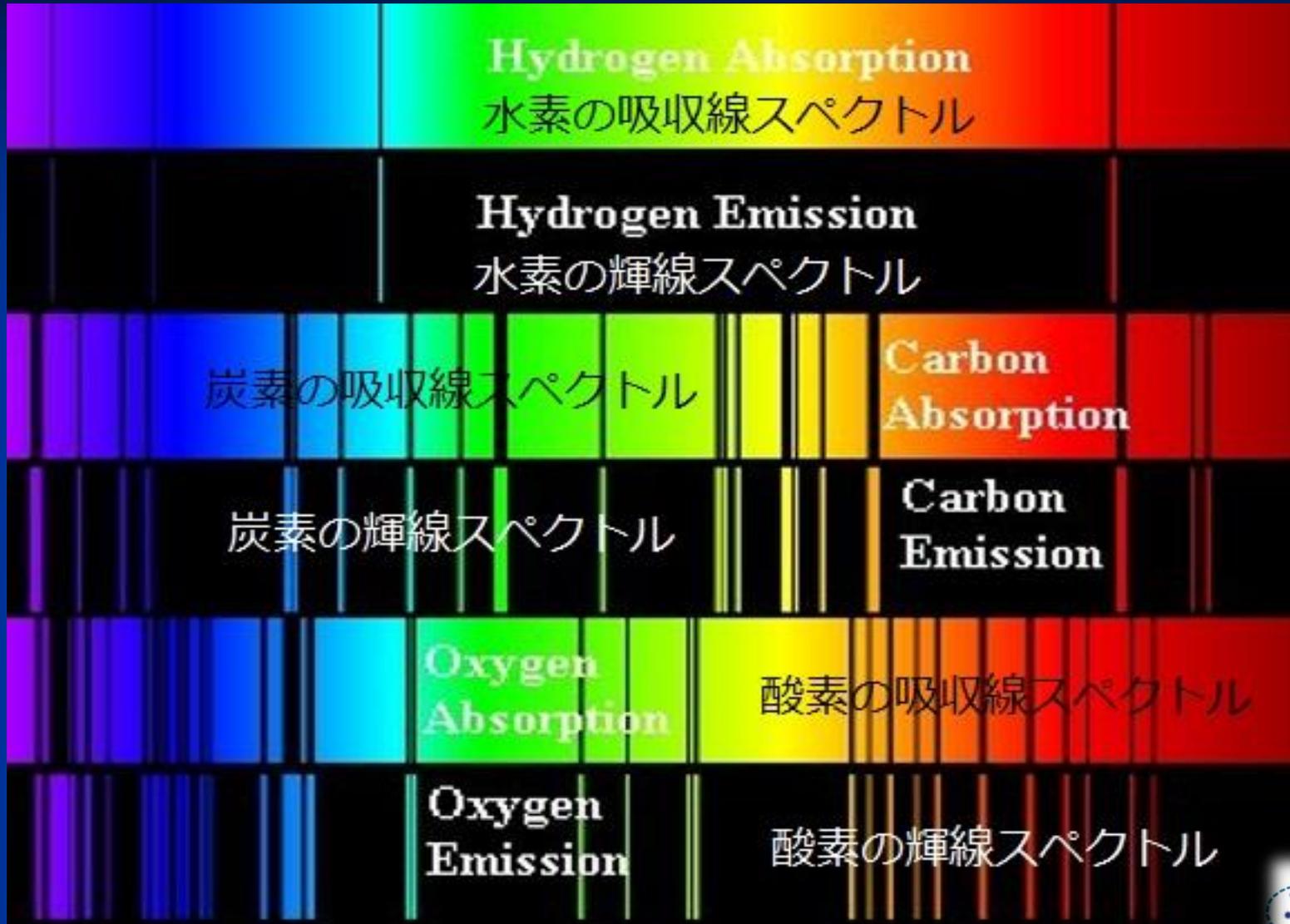
第1法則：高温の固体は連続スペクトルを持つ光を生成する。

第2法則：高温ガスは特定の波長を持った光を生成する。その波長はガスの成分による。

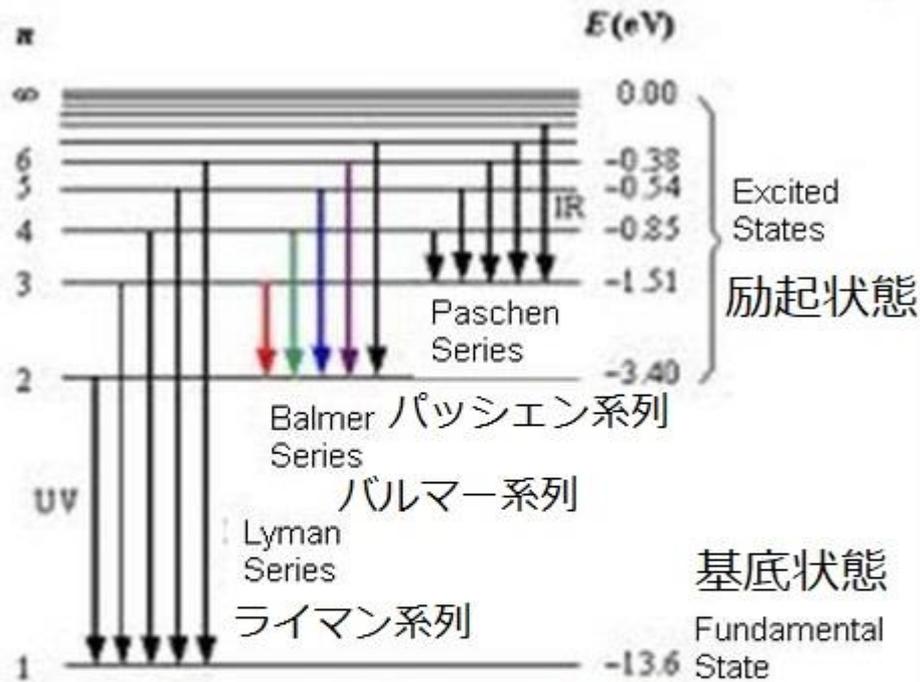


第3法則：高温の固体の周りに、それよりは低温のガスがあれば、第2法則と同じエネルギー準位を持った波長のところが欠けた連続スペクトルを生成する。

スペクトル



スペクトル



輝線や吸収線は、
電子がエネルギー
準位を飛んで変え
る時に出る。

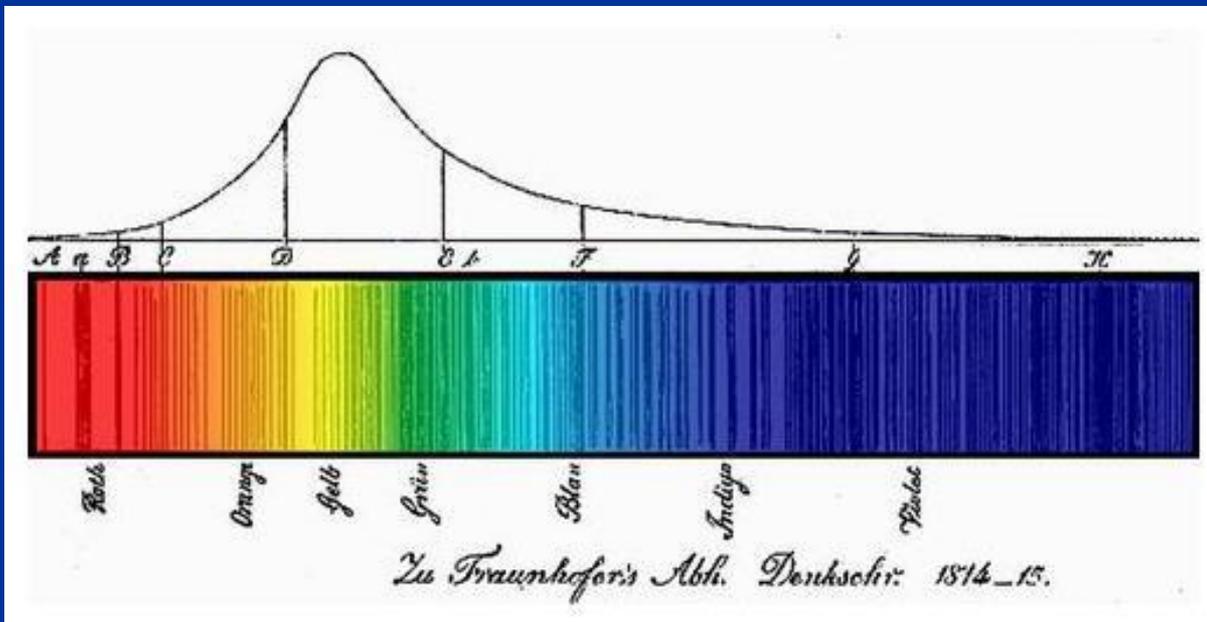
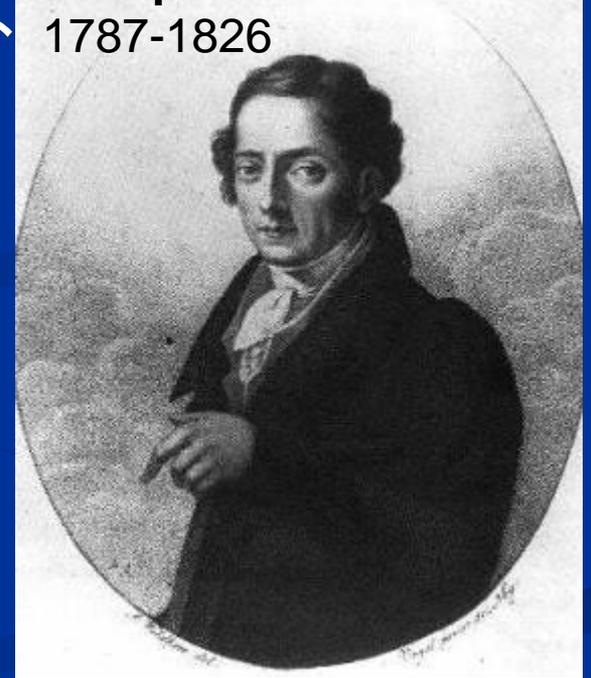
水素原子のエネルギー準位の間の遷移によって、
ここに示したスペクトル線を生じる。

太陽スペクトル：吸収スペクトル

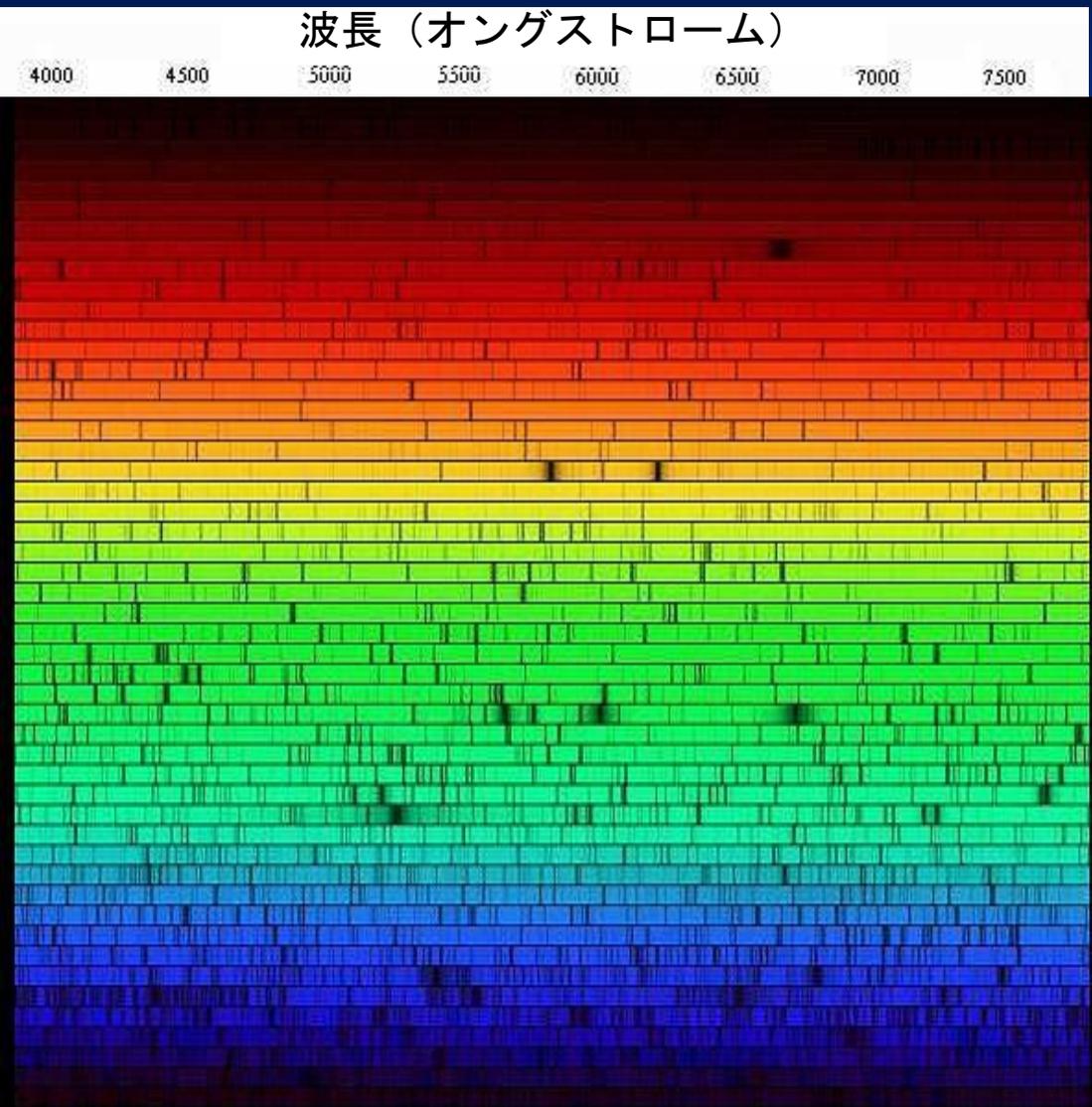
1802年、ウィリアム・ウォラストンは太陽スペクトルの中に暗線（吸収線）があることを見つけた。

1814年、ヨゼフ・フラウンホーファーは、体系的に太陽のスペクトルについて研究し、700の暗線を見つけた。

Joseph Fraunhofer
1787-1826

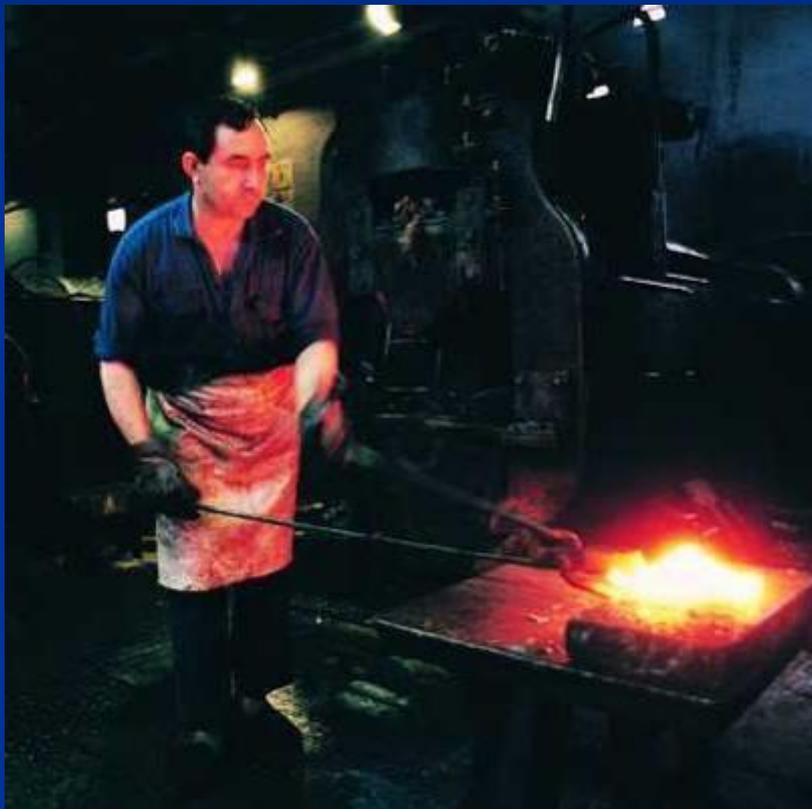


太陽スペクトル：吸収スペクトル



- 暗線は太陽大気の原因で現れる。
- 太陽の中を調べなくても、太陽の組成がわかる。
- 詳細なスペクトル線がたくさん見つかった。

黒体放射



鉄の温度が上がって
いくと、放つ光は、以
下のリストの上から下
へ、色付きが変わる:

- 赤
- 黄
- 白
- 青っぽい色

黒体放射

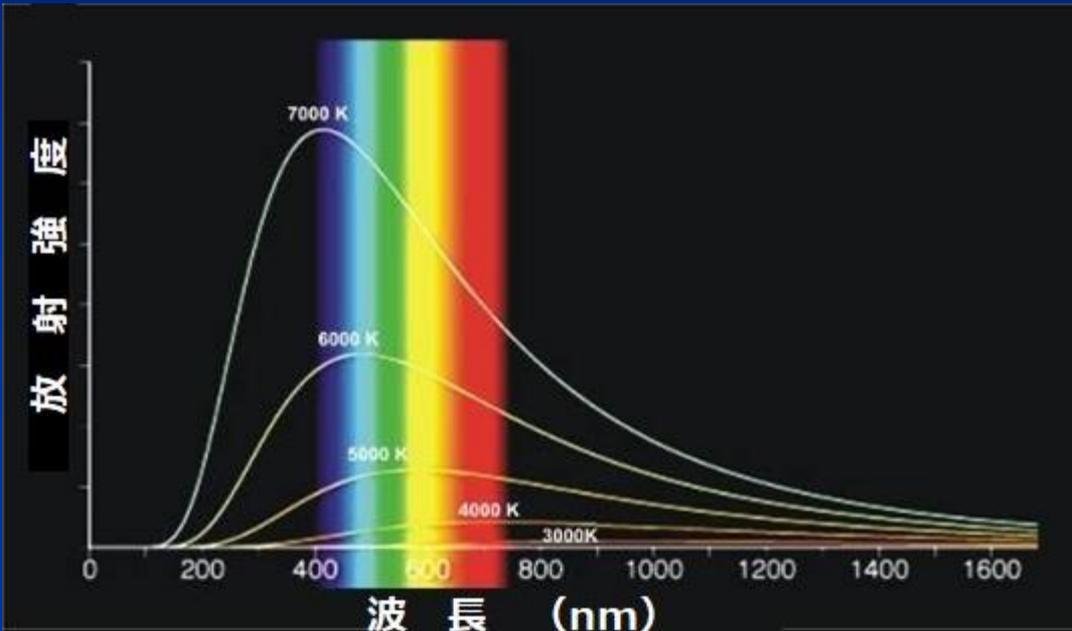
暖まれば、どんな「黒体」も、さまざまな波長の光を放出する。

放射エネルギーが最大となる波長 λ_{\max} がある。

λ_{\max} は温度 T に依存し次の式で表される：

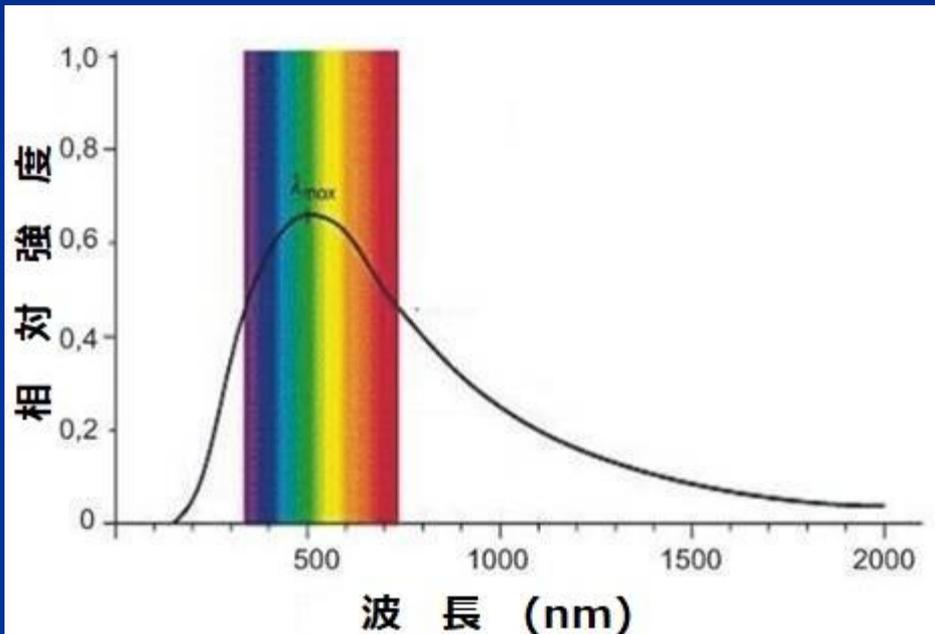
$$\lambda_{\max} = \frac{2.898 \times 10^{-3}}{T} \quad (\text{m})$$

ウィーンの変位則



遠くにある物体の放射を調べることで、直接そこに行かなくても物体の温度を測定することができる。

黒体放射



太陽の λ_{max} は 500 nm
である。

これは太陽の表面温
度が 5800 K であるこ
とを意味している。

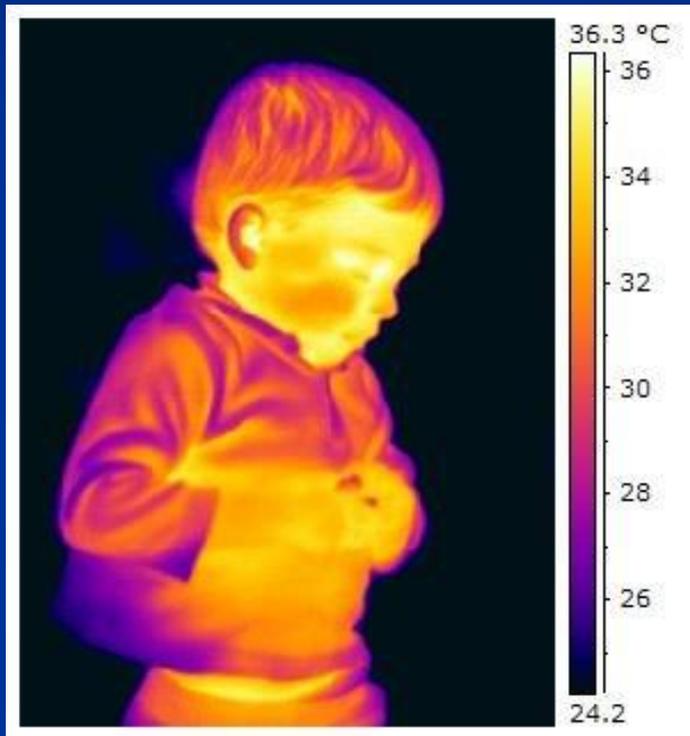
黒体放射

人の体温は：

$$T = 273 + 37 = 310 \text{ K}$$

人の体は $\lambda_{\text{max}} = 9300 \text{ nm}$ の波長で、エネルギーを最も多く放出している。

暗視カメラはこの波長を見ている。



光の散乱



- 大きな粒子(例えば水滴)を含んだガスを白色光が通過する時、すべての色は平等に散乱をする(例: 白い雲)。
- 光子の波長よりもずっと小さいサイズの粒子(例えば空気中の分子)による散乱ならば、光の波長が長くなると急に散乱されなくなる(レイリー散乱)。
- 地球上の大気では、青の光子は赤よりも散乱され、青の光子はすべての方向から見えている。よって、空は青く見える(レイリー散乱による例)。

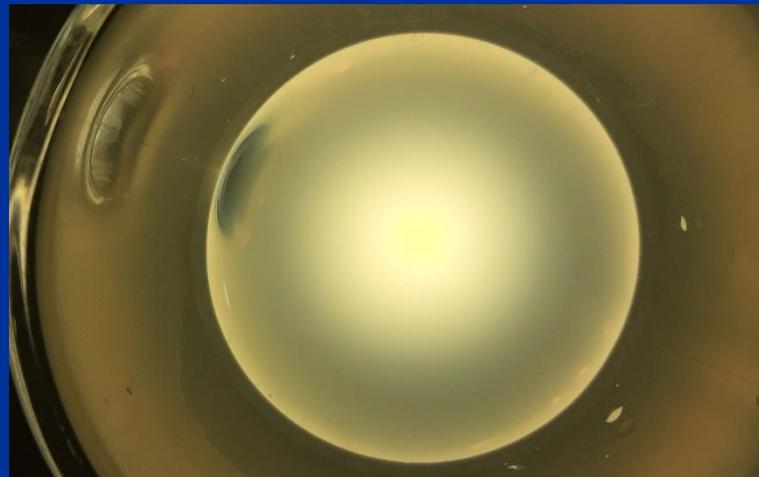
日の入り時、太陽光はより長く大気中を通過するため、青い色は散乱されきり、残った色により、黄色や赤っぽくなる。



アクティビティ7:光の分散

•数滴のミルクと懐中電灯を入れた背の高いグラスに水を入れます。光が乳白色の水を通過するとき:

- 光がガラスを横方向に通過すると、青みがかったように見えます。
- しかし、光がガラス全体を通過する場合、ガラスの上から見ると、光は赤になります。



アクティビティ7:光の分散

- 支払いに使用するホットメルトシリコンスティック
- 携帯電話の懐中電灯



- モバイルライトの近くのバーは青みがかっています。
- 携帯電話の光から最も遠いエリアのバーは黄色がかった赤みがかっています。



ありがとうございました

