

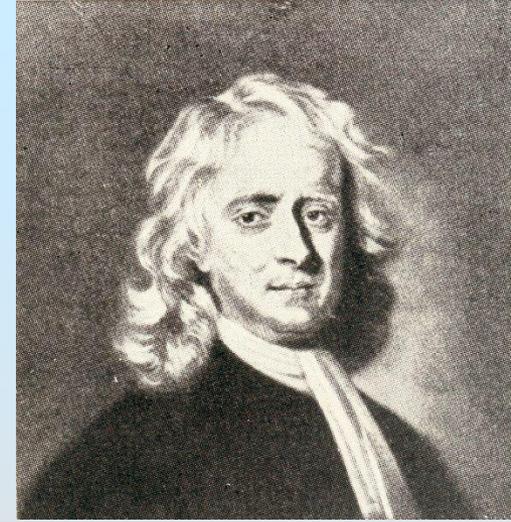


七夕星の色とスペクトル

福江純(大阪教育大学)

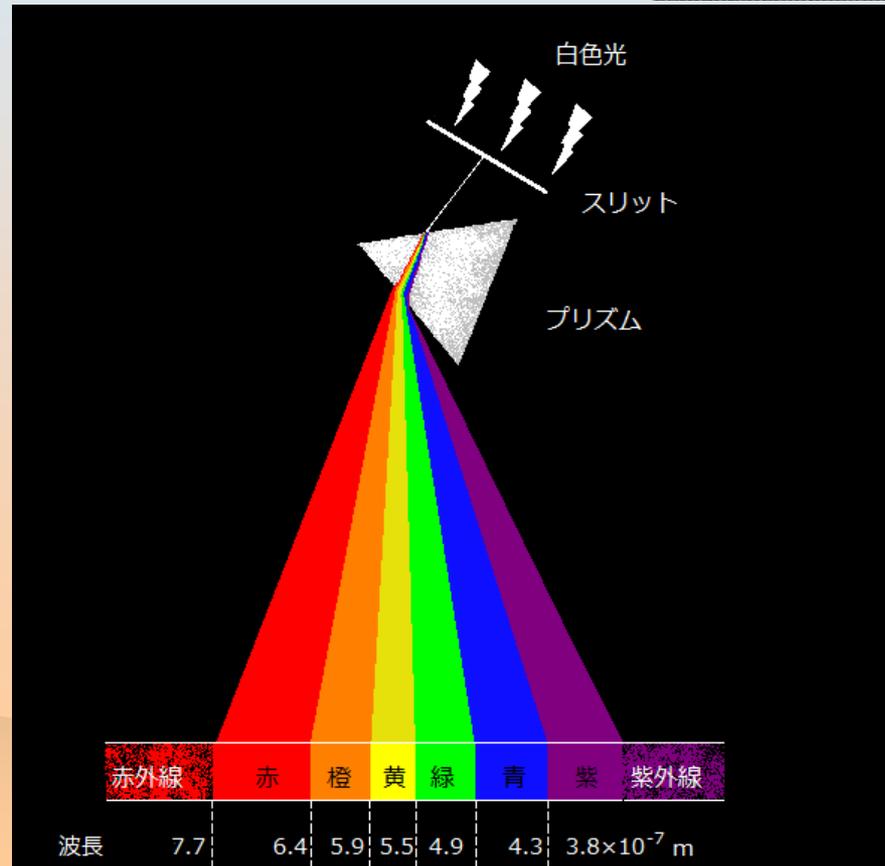


光とスペクトル



❁ 光の分解(分光)

❁ ニュートン



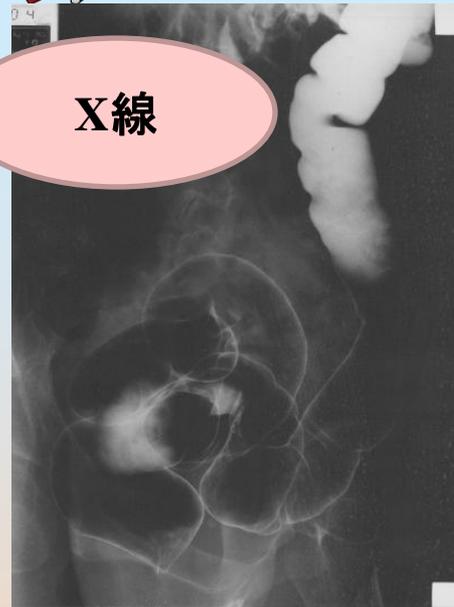


電磁波のスペクトル

X線

可視光

赤外線



波長(オングストローム)

4000

5000

6000

電波

ガンマ線

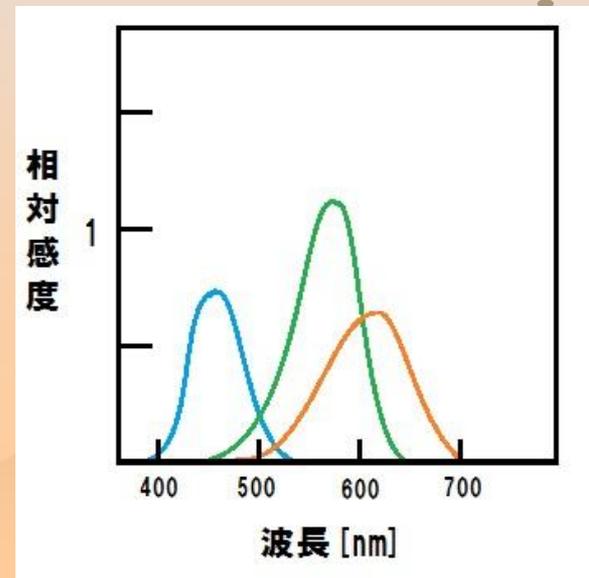
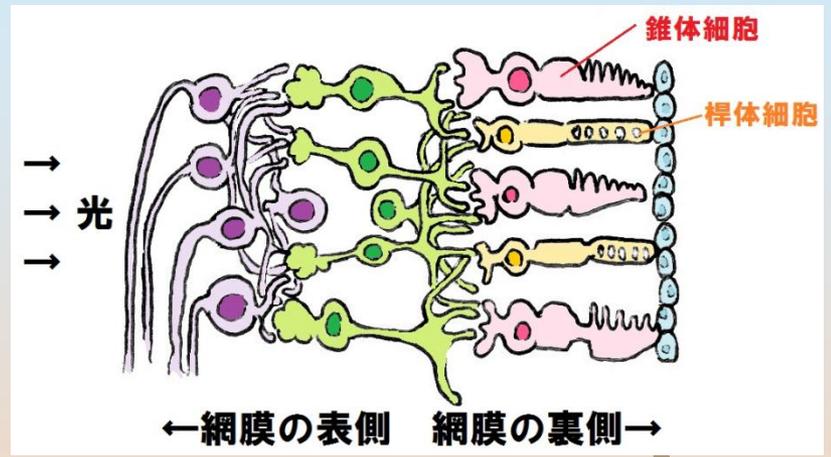
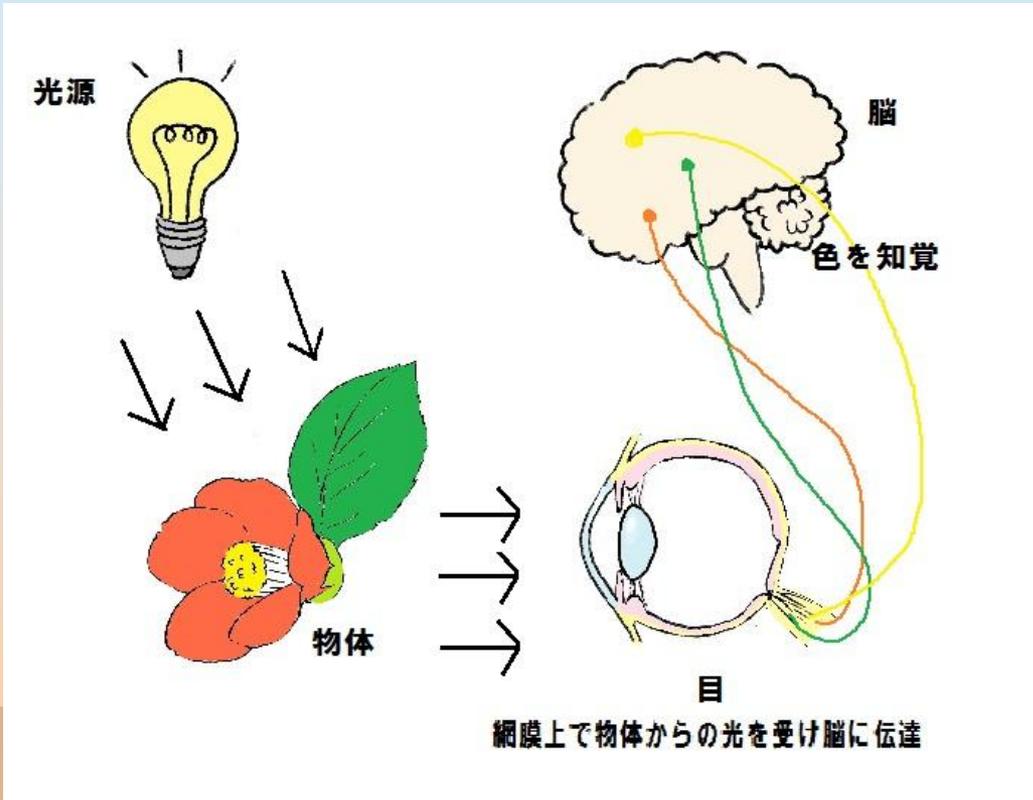


γ線
X線
紫外線
可視光線
赤外線
電波





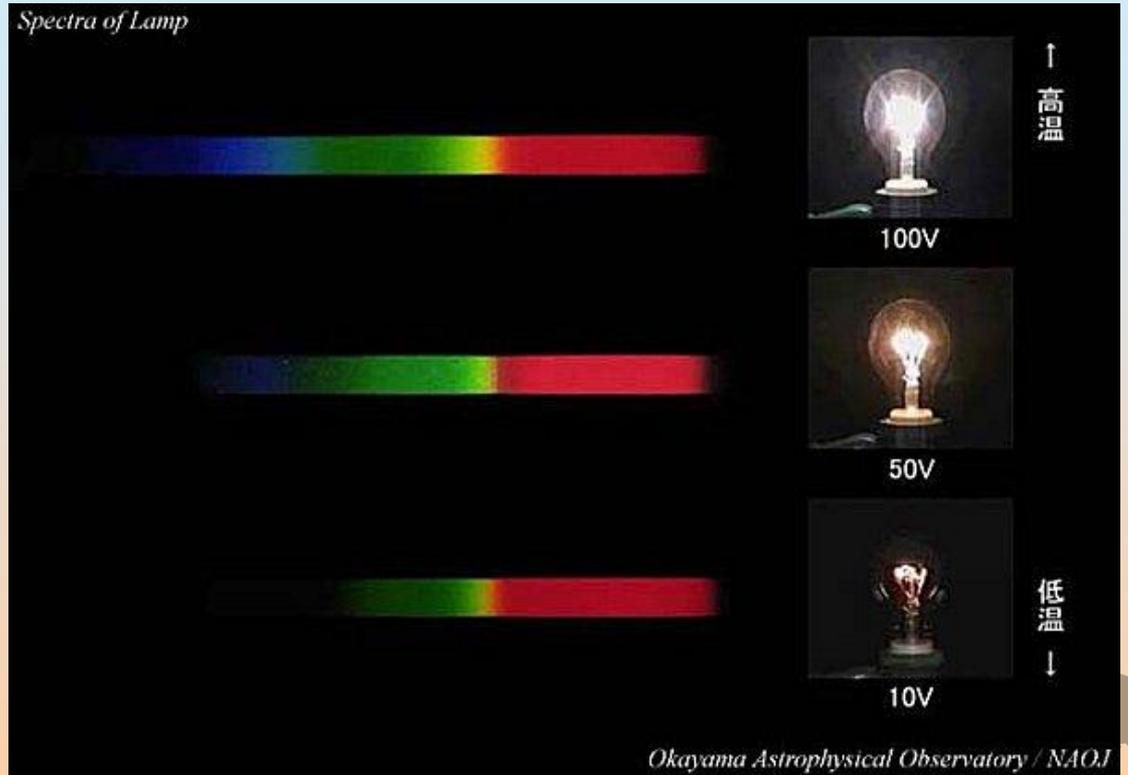
色の認識





連続スペクトル

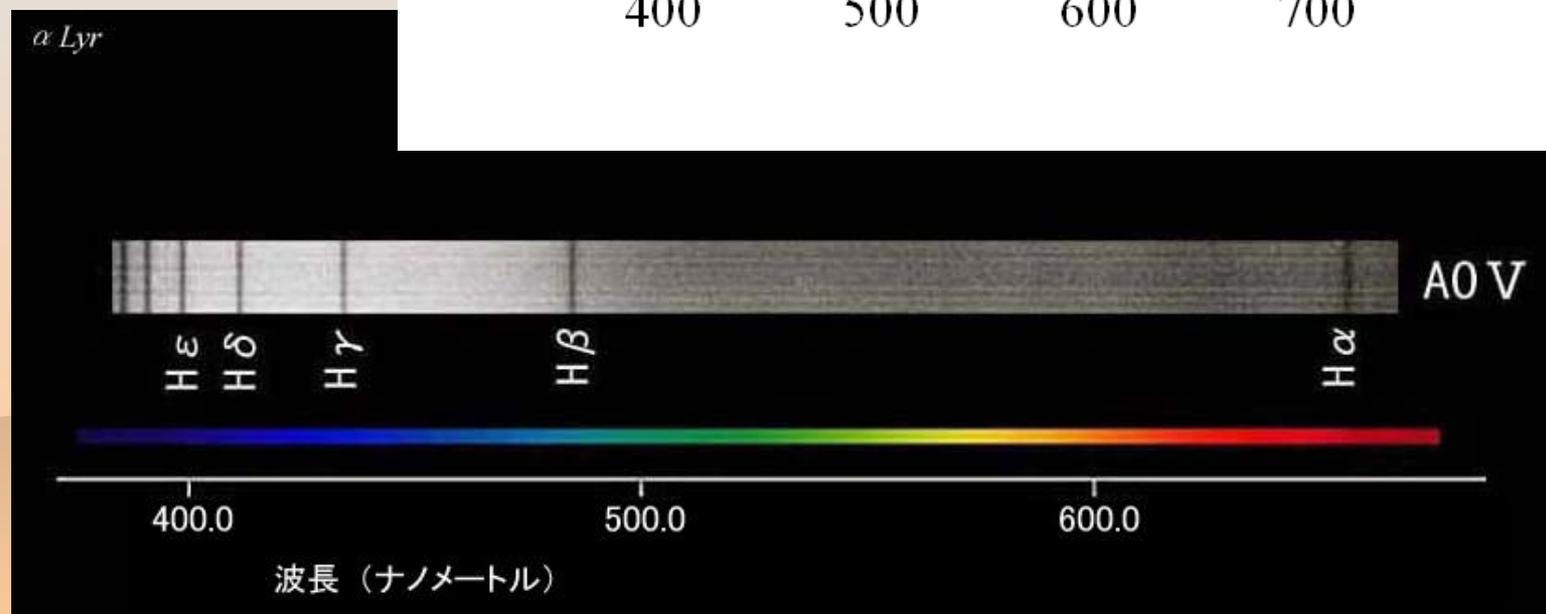
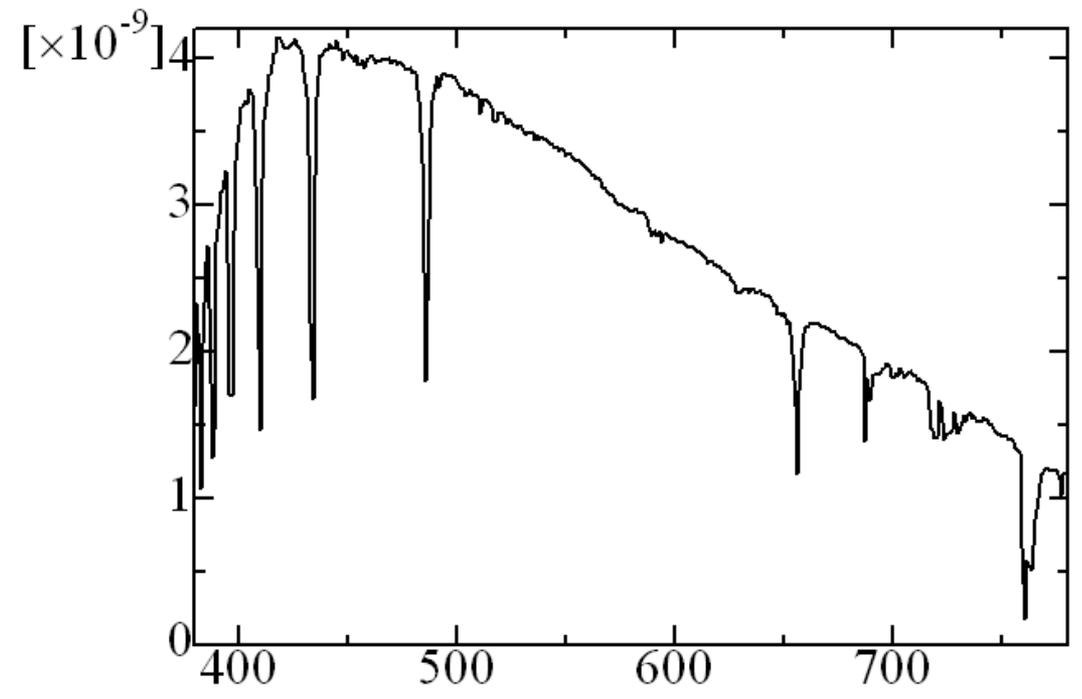
- ❁ 白熱電球
- ❁ ホタル





こと座α星 ベガ

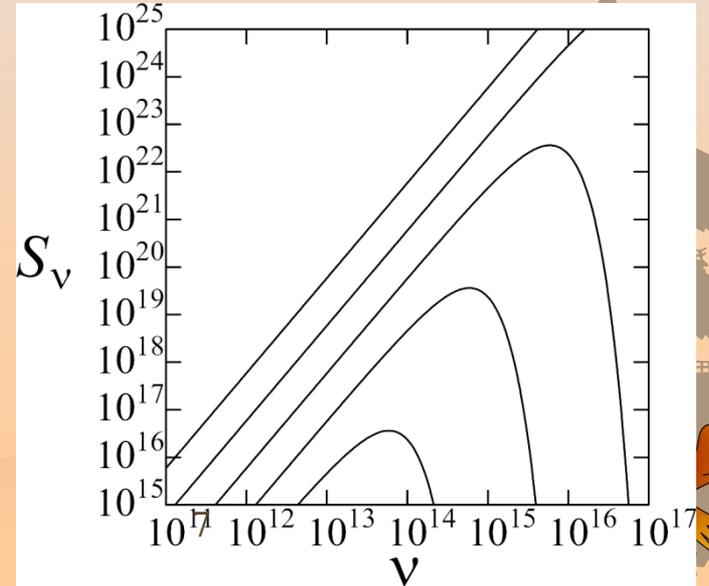
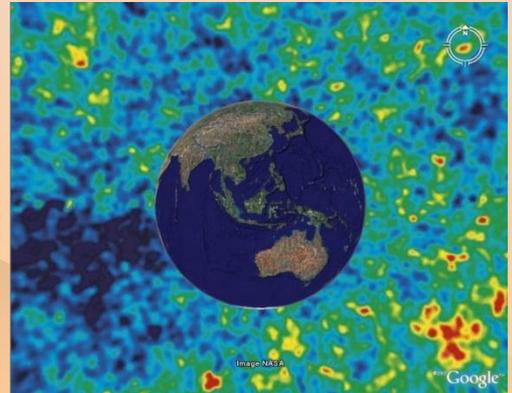
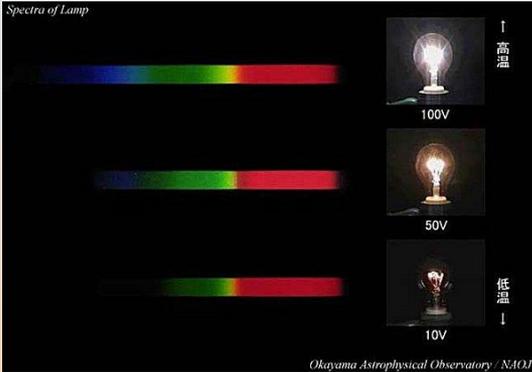
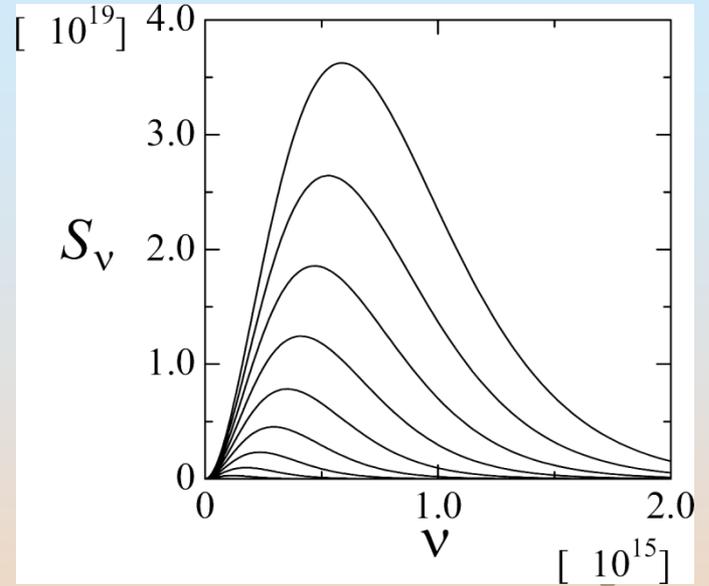
- ✿ alphaLyr.dat
- ✿ 0.0等
- ✿ A0V / 9600K





黒体放射(熱放射)

暖められた物質から放射される光(電磁波)



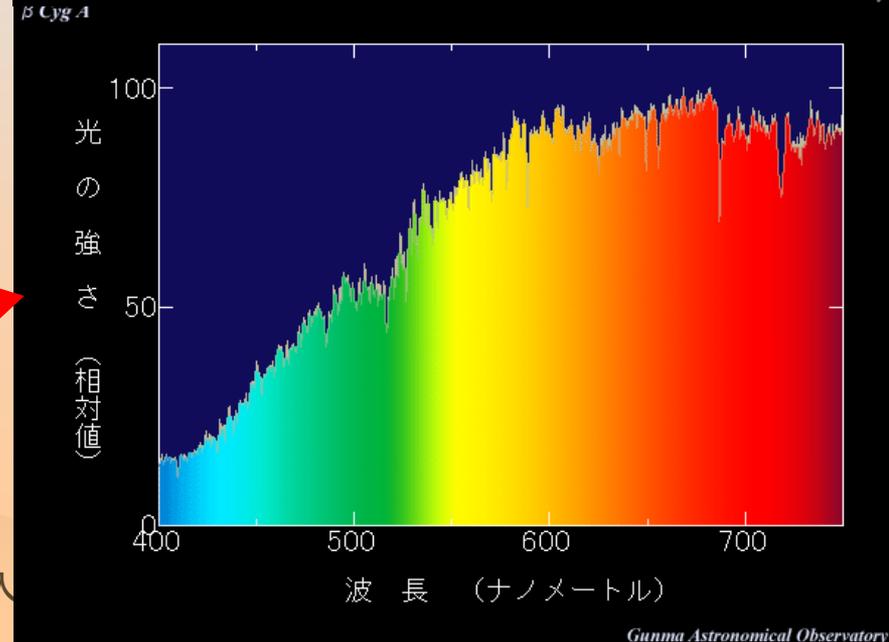
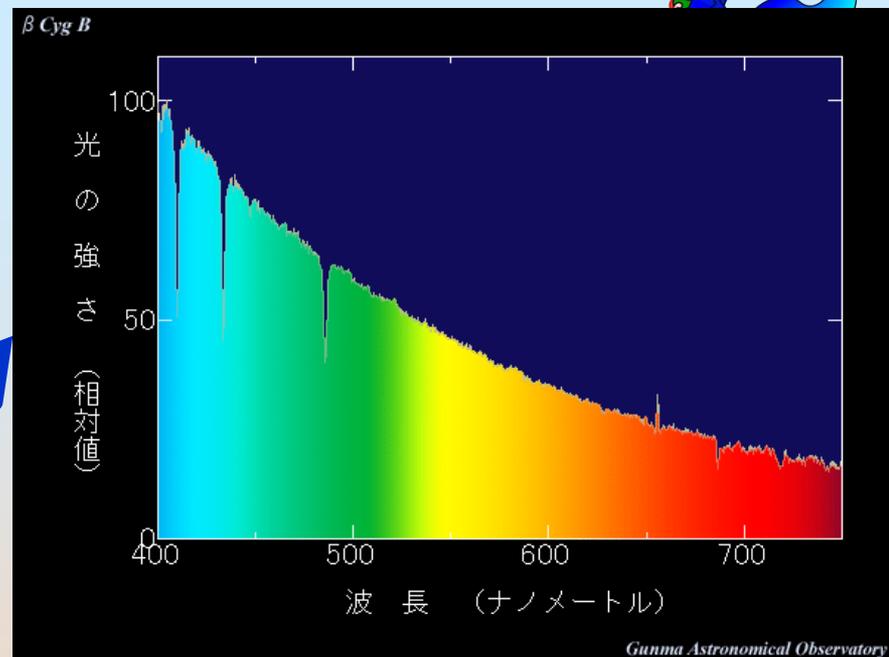
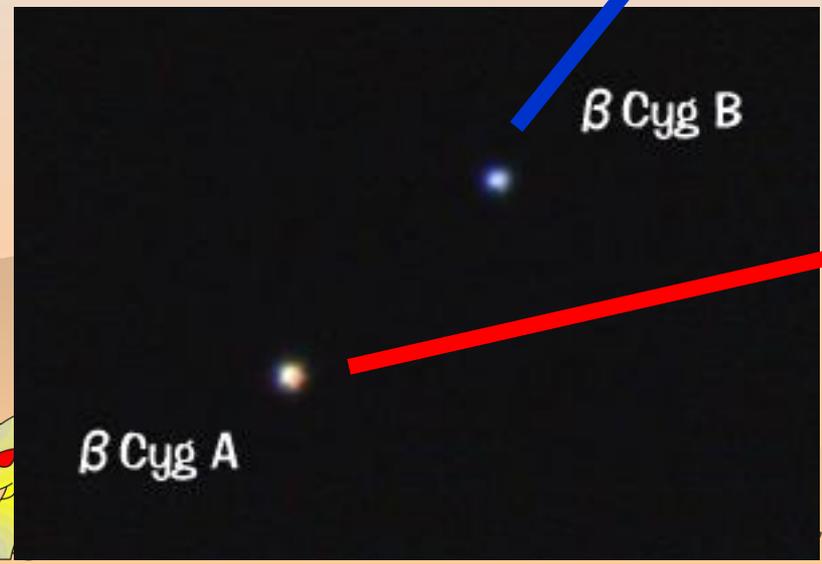
2011/7/13

大体色彩学入門





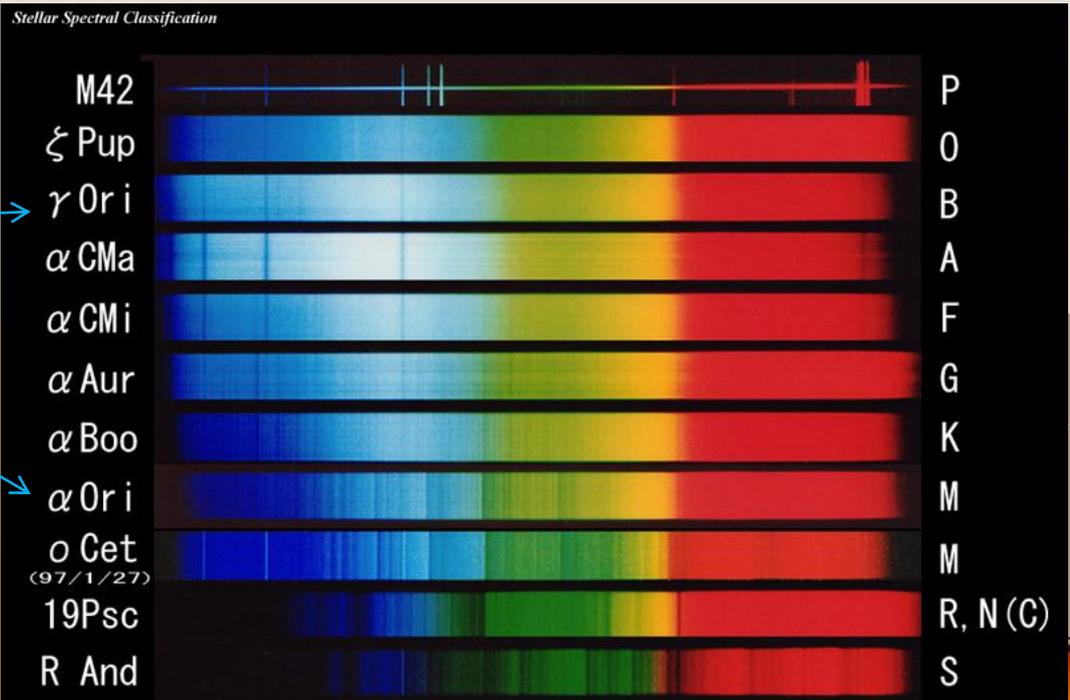
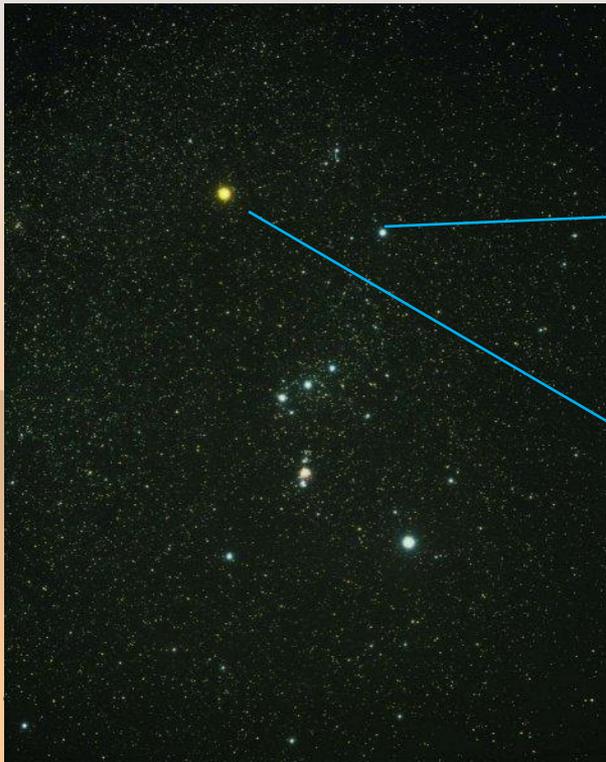
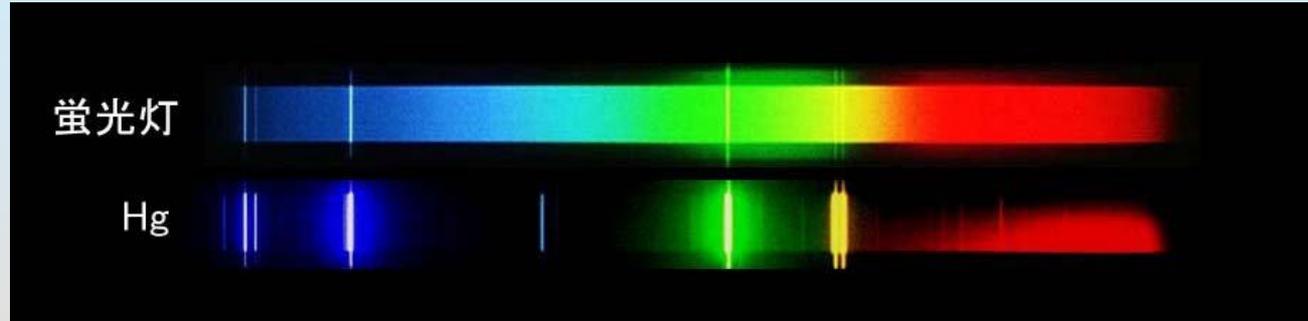
星のスペクトル





線スペクトル(輝線、暗線)

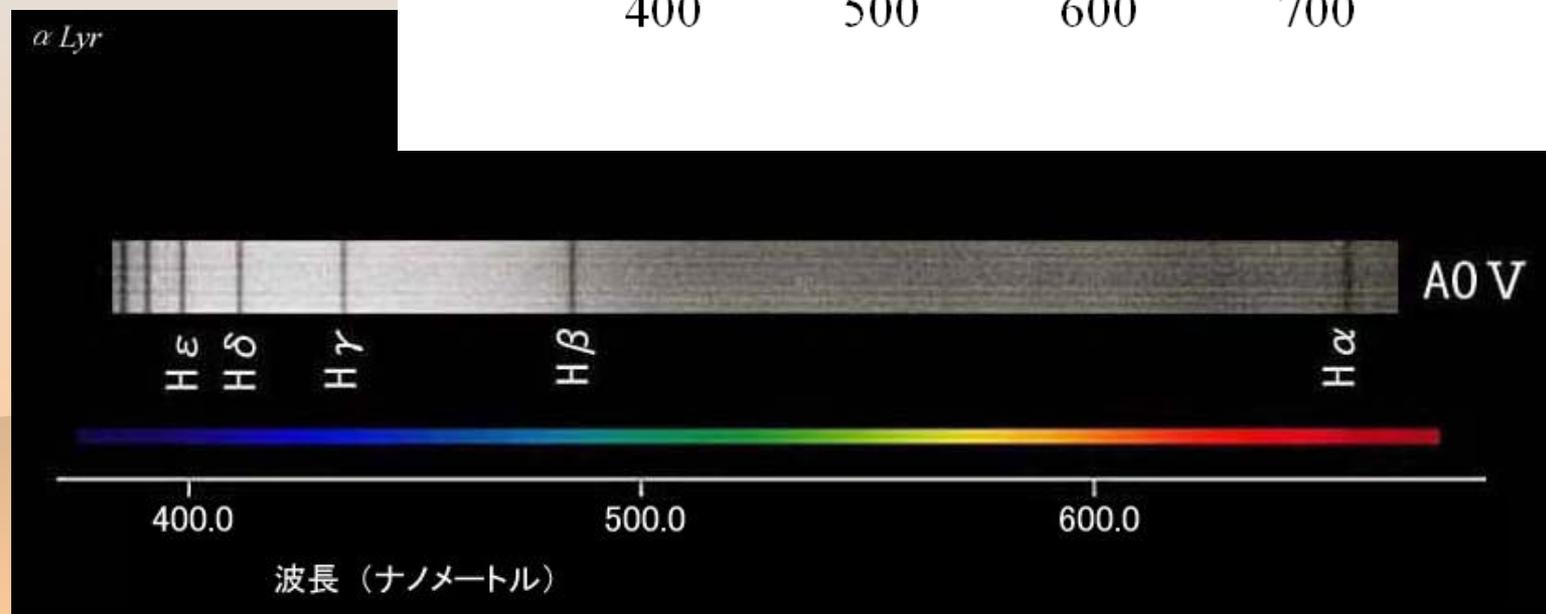
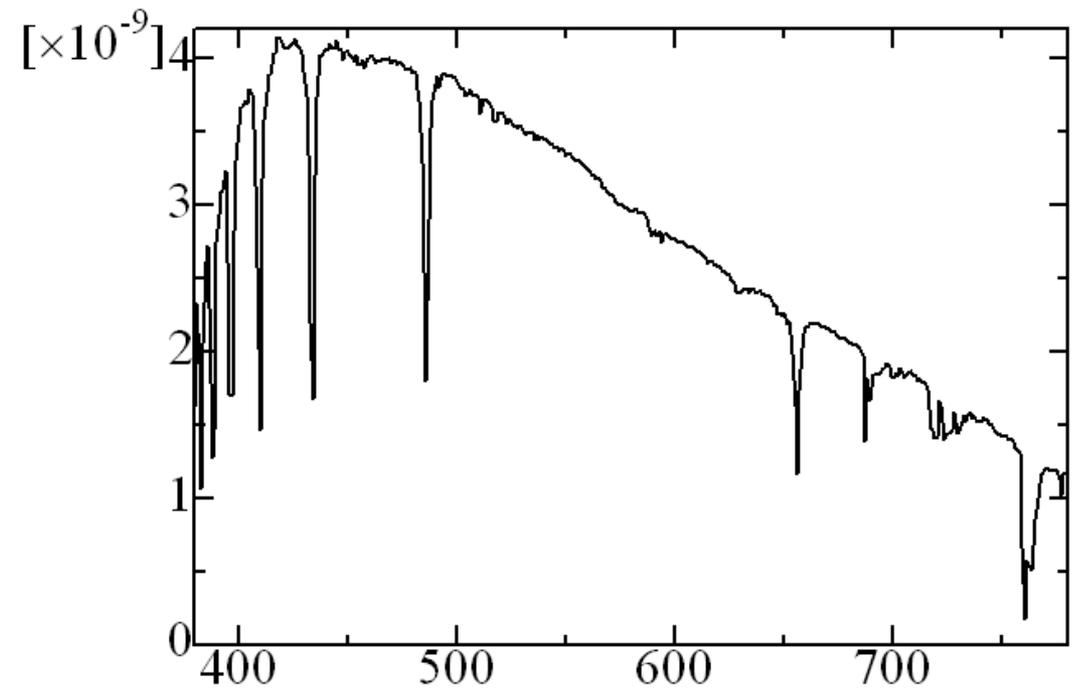
- ❁ 蛍光灯
- ❁ 星





こと座α星 ベガ

- ✿ alphaLyr.dat
- ✿ 0.0等
- ✿ A0V / 9600K

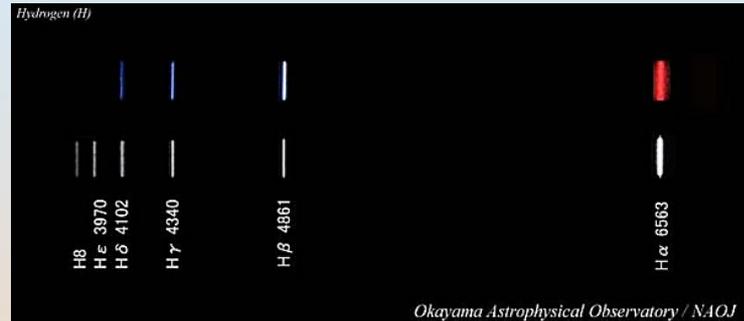




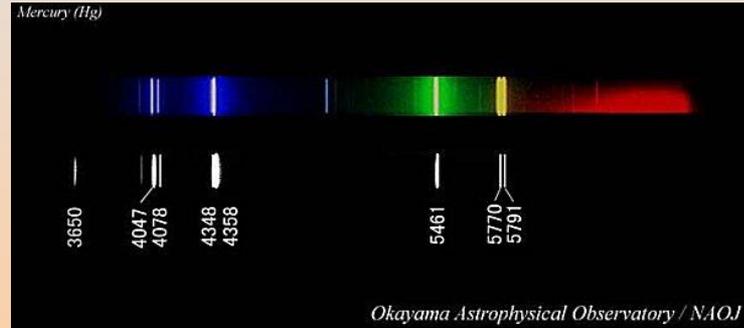
水素バルマー線

原子は固有の波長で光を放射する

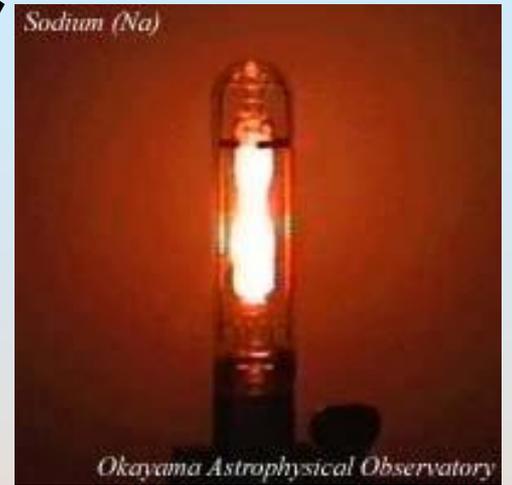
水素



水銀



ナトリウム



水素ガスが赤い光を出しているバラ星雲



2011/

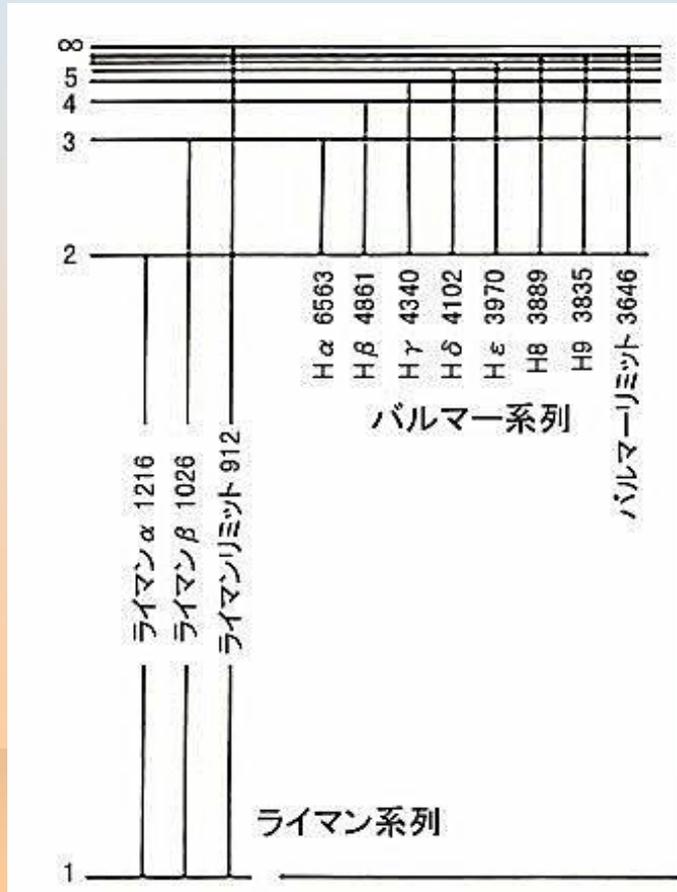
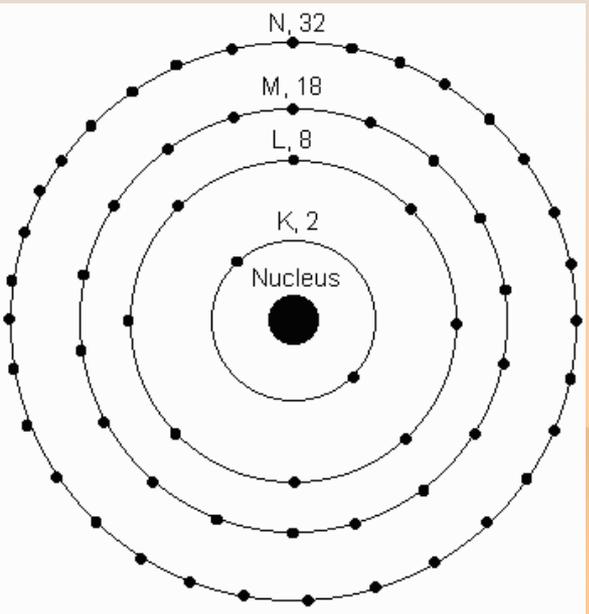


エネルギー準位の考え

エネルギー準位

ボーア

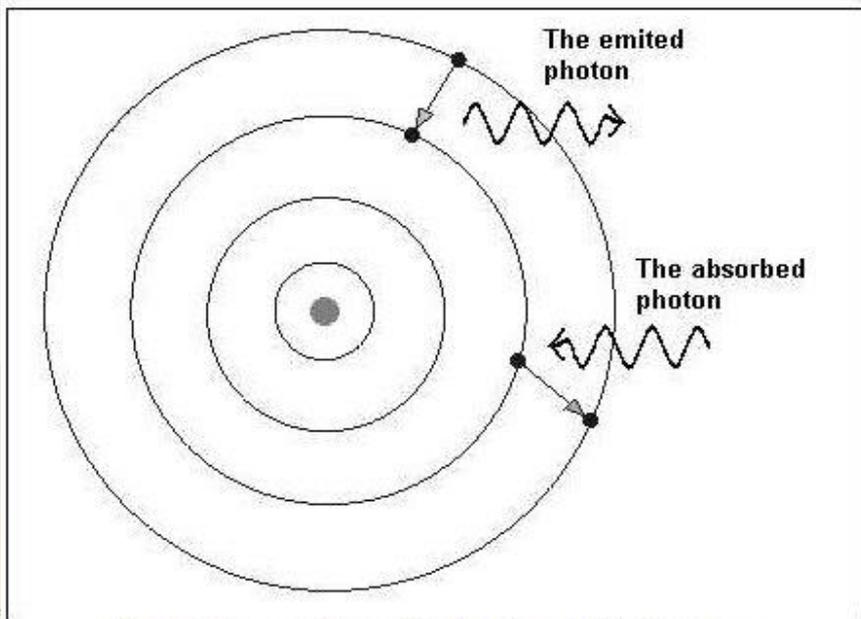
- 基底状態
- 励起状態



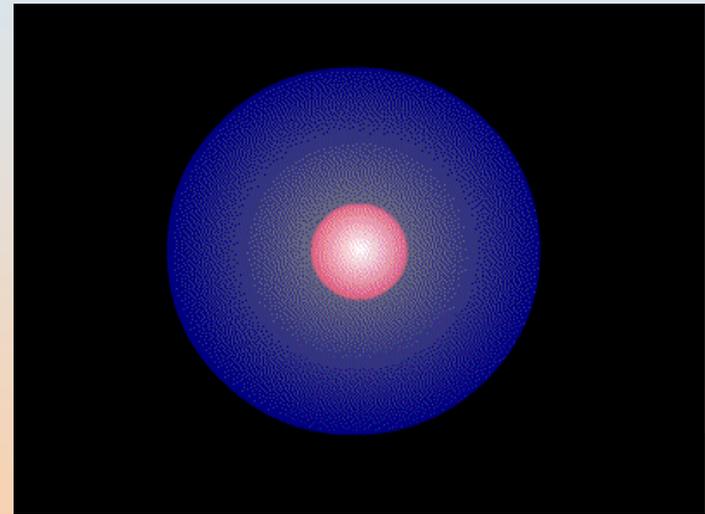


定常状態と遷移

- ❁ 定常状態
- ❁ 量子条件
- ❁ 遷移 / 量子飛躍

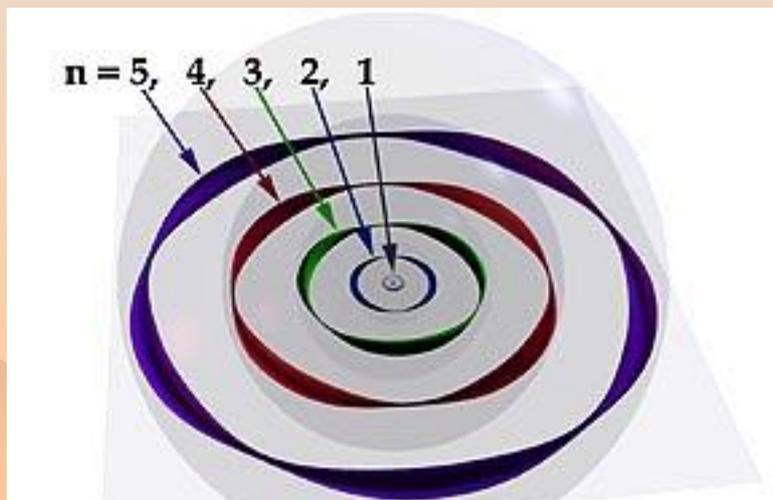
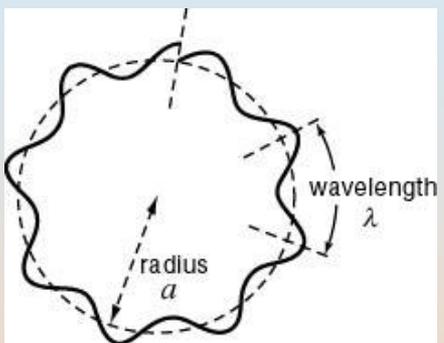


The electron emits or absorbs the energy changing the orbits.

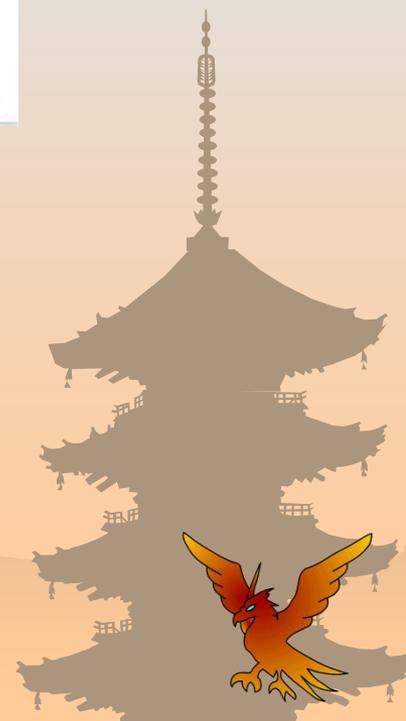




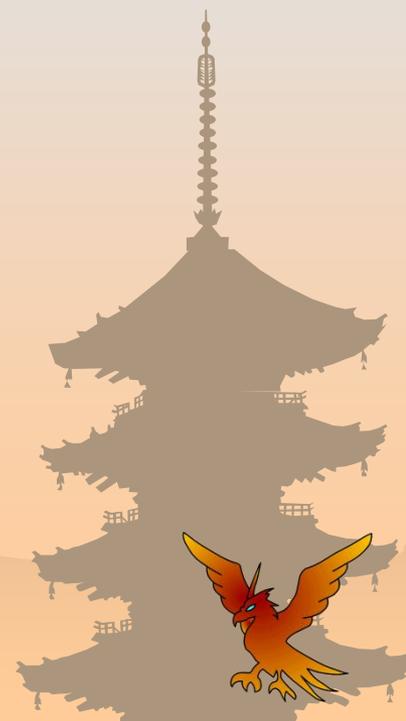
量子条件の意味



Niels Bohr - Louis de Broglie atom, 1924



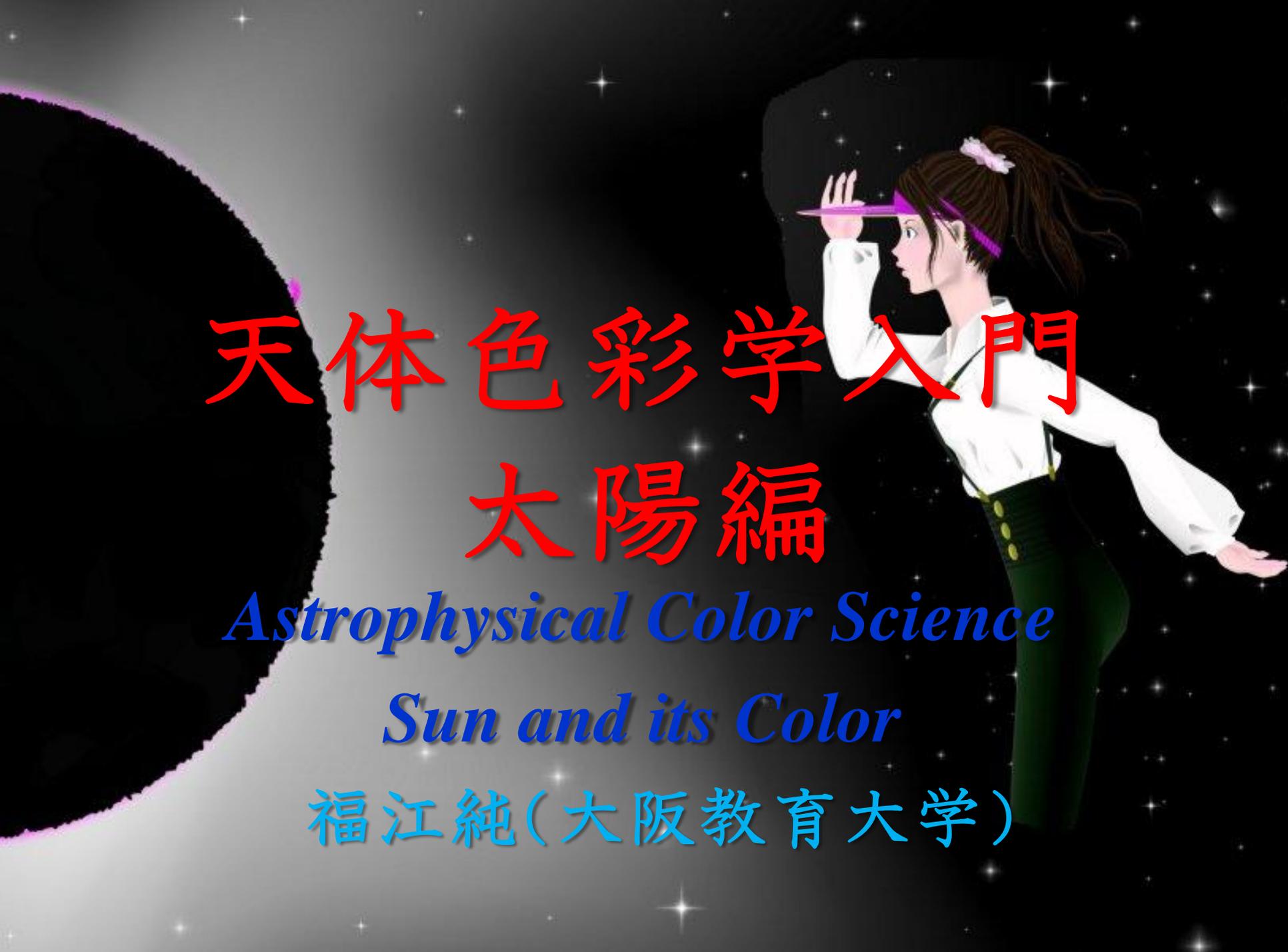
2011/7/13



2011/7/13

天体色彩学入门

15



天体色彩学入門

太陽編

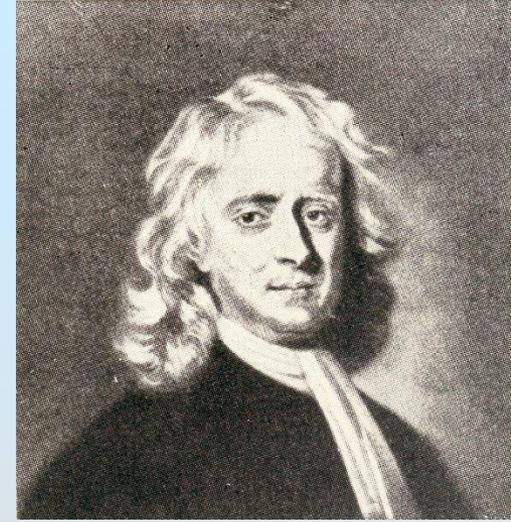
Astrophysical Color Science

Sun and its Color

福江純(大阪教育大学)

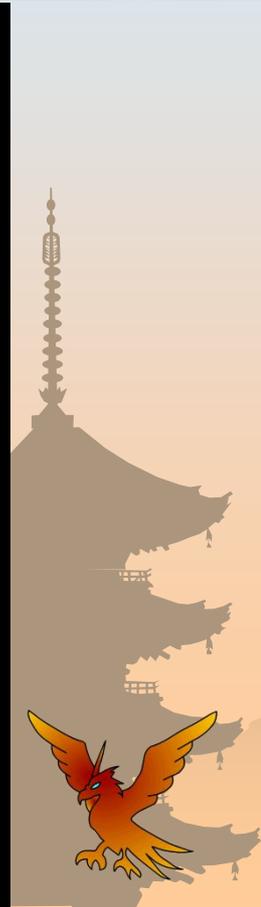
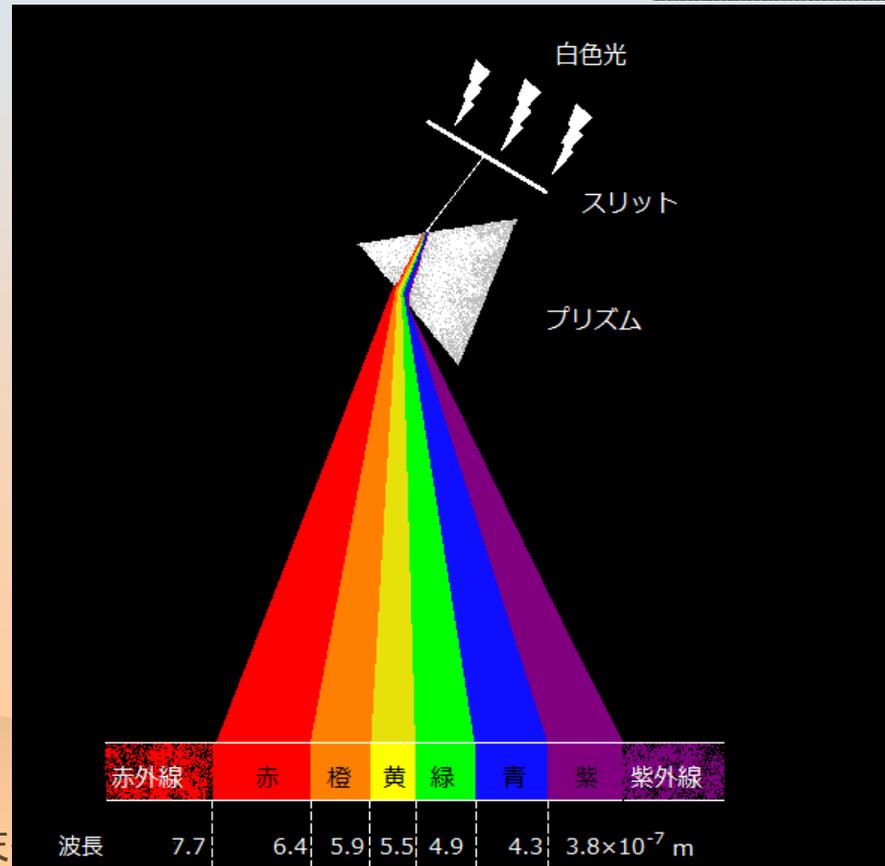


光とスペクトル



❁ 光の分解(分光)

❁ ニュートン



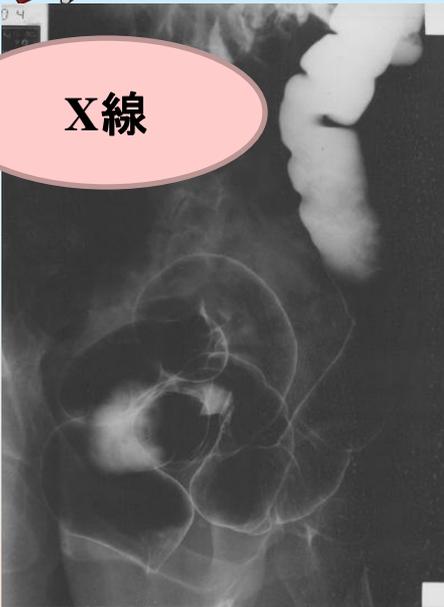


電磁波のスペクトル

X線

可視光

赤外線



波長(オングストローム)

4000

5000

6000

電波

ガンマ線

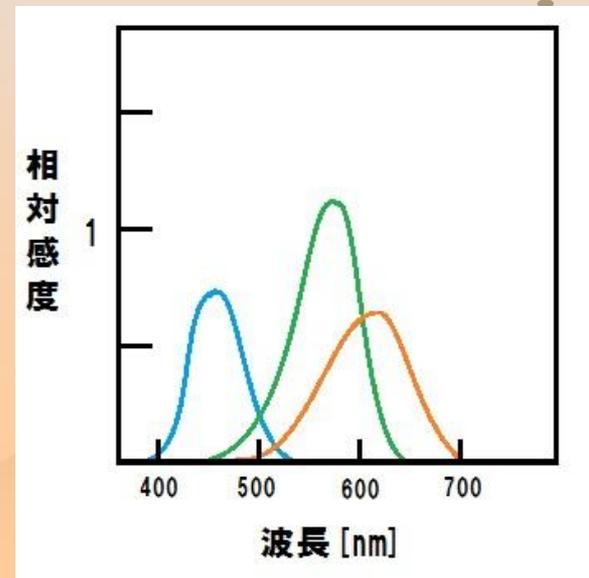
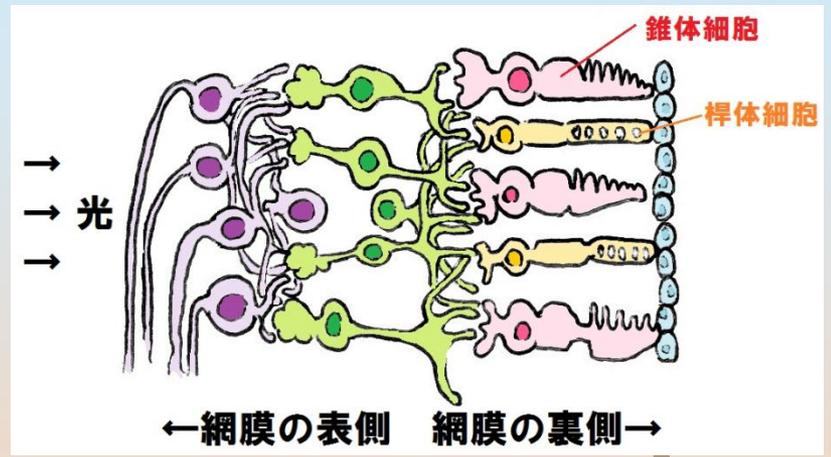
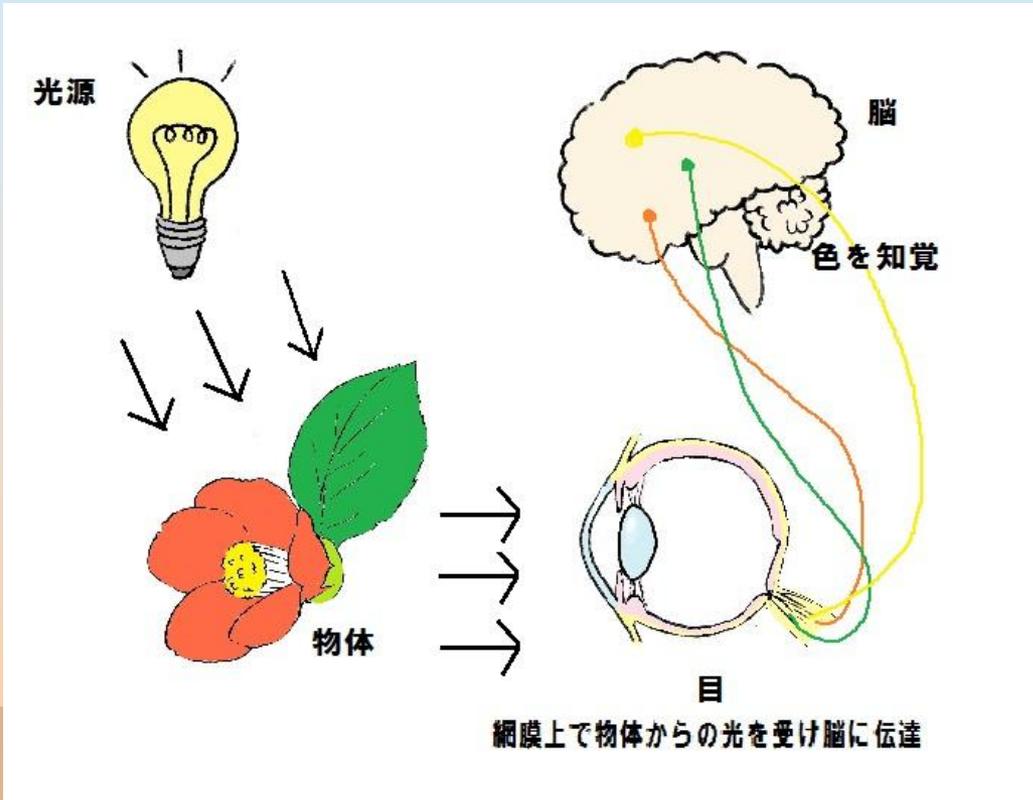


γ線
X線
紫外線
可視光線
赤外線
電波





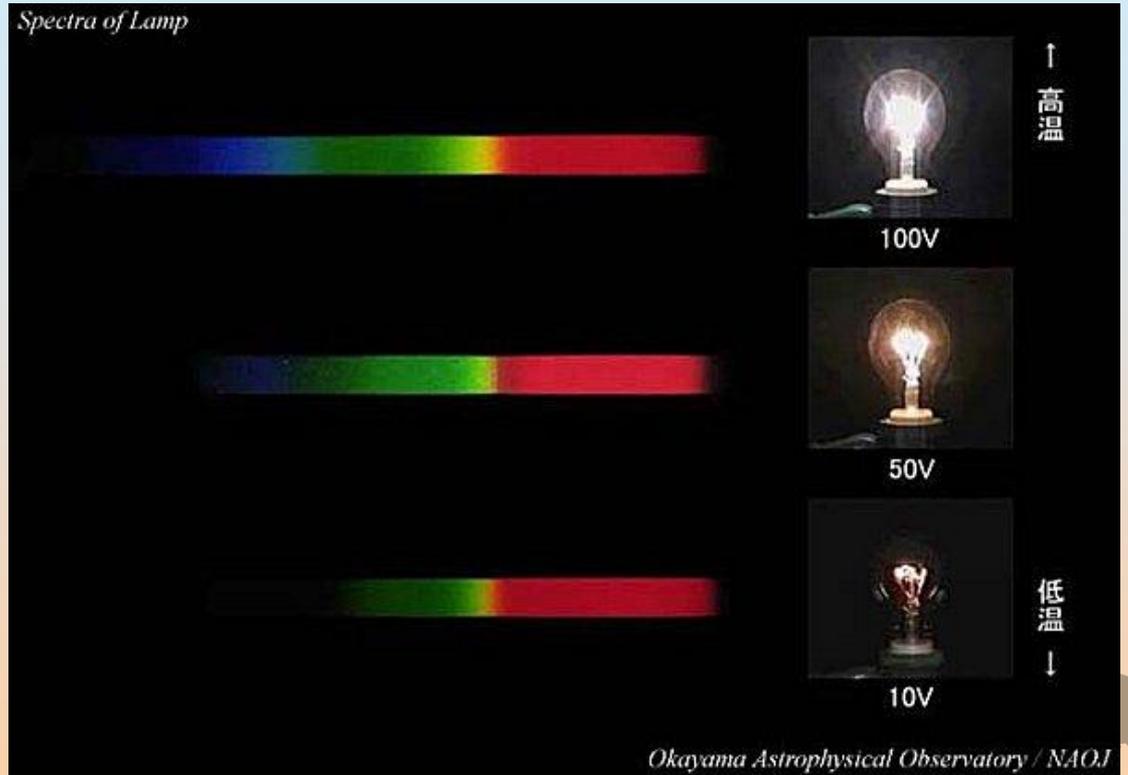
色の認識





連続スペクトル

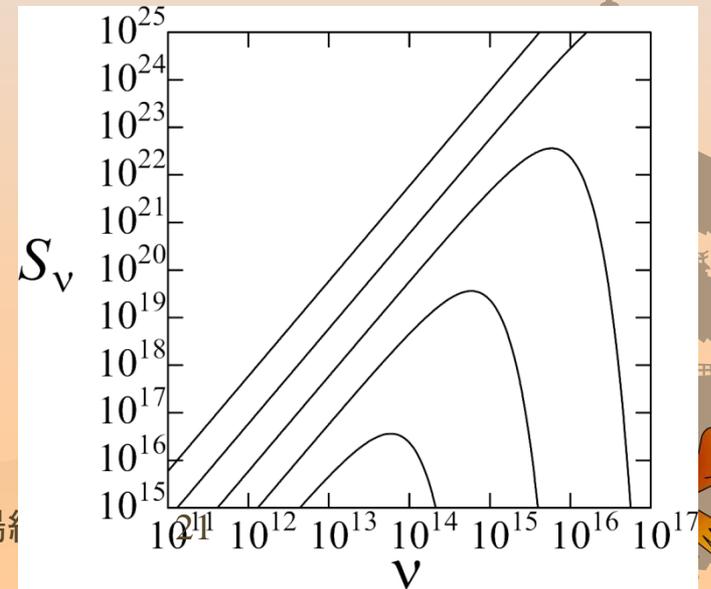
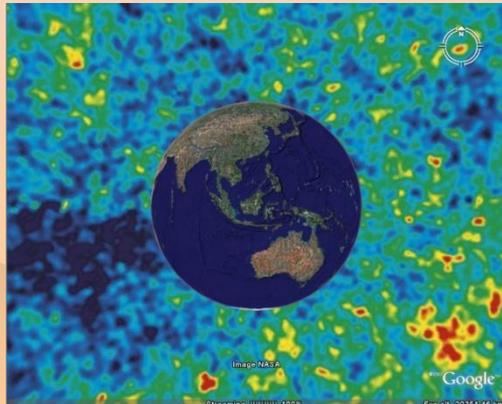
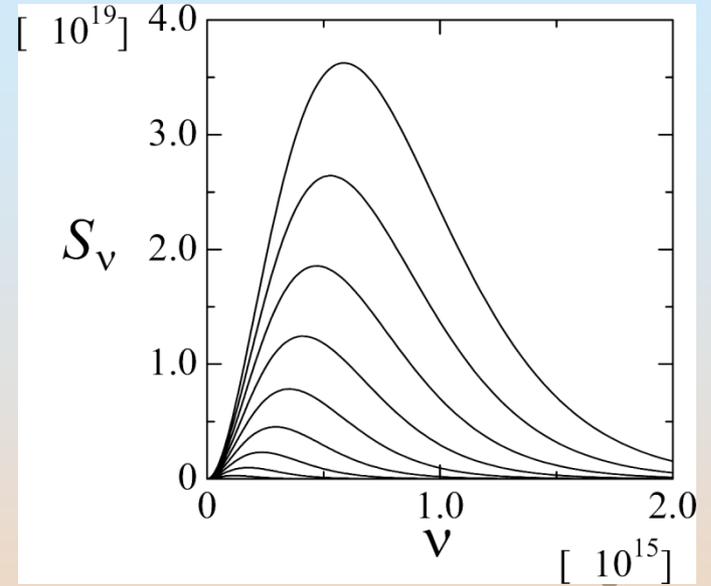
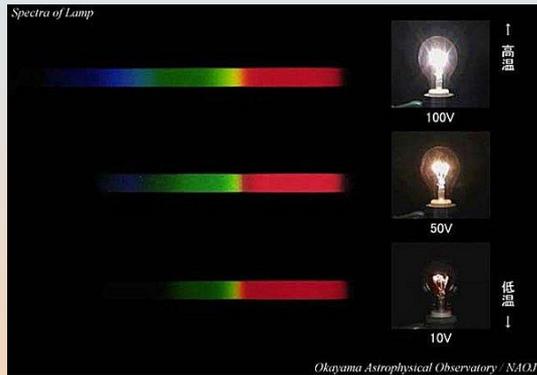
- ❁ 白熱電球
- ❁ ホタル





黒体放射(熱放射)

暖められた物質から放射される光(電磁波)



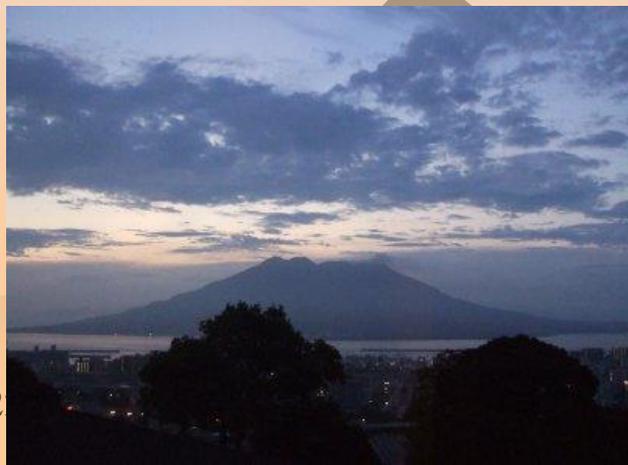
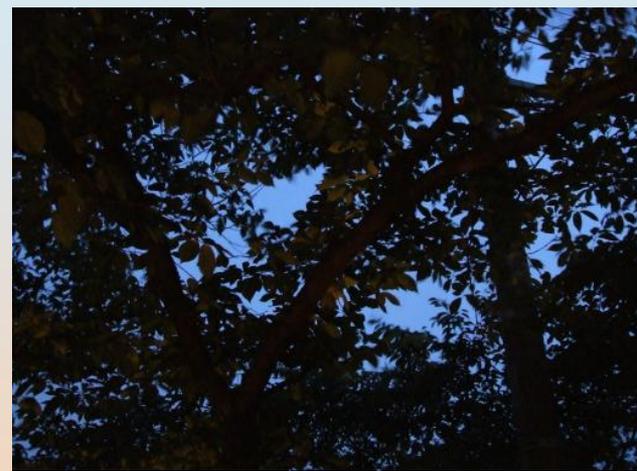
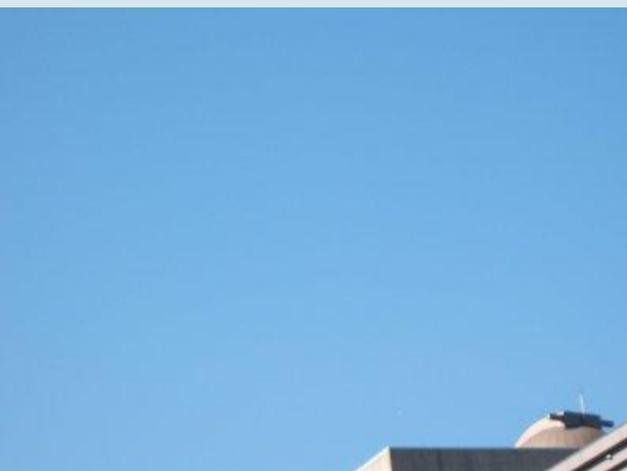
2011/7/13

天体色彩学入門 太陽





レッドサン・ブルースカイ





イエローサン・ホワイトスカイ

❁ 赤い夕陽

❁ 黄色い夕陽と白い空



2011/4/25

2011/5/2



2011/7/13

天体色彩学入門 太陽編

23





イエローサン・ホワイトスカイ

❁ 赤い夕陽

❁ 黄色い夕陽



2011/4/25

2011/5/2



2011/7/13

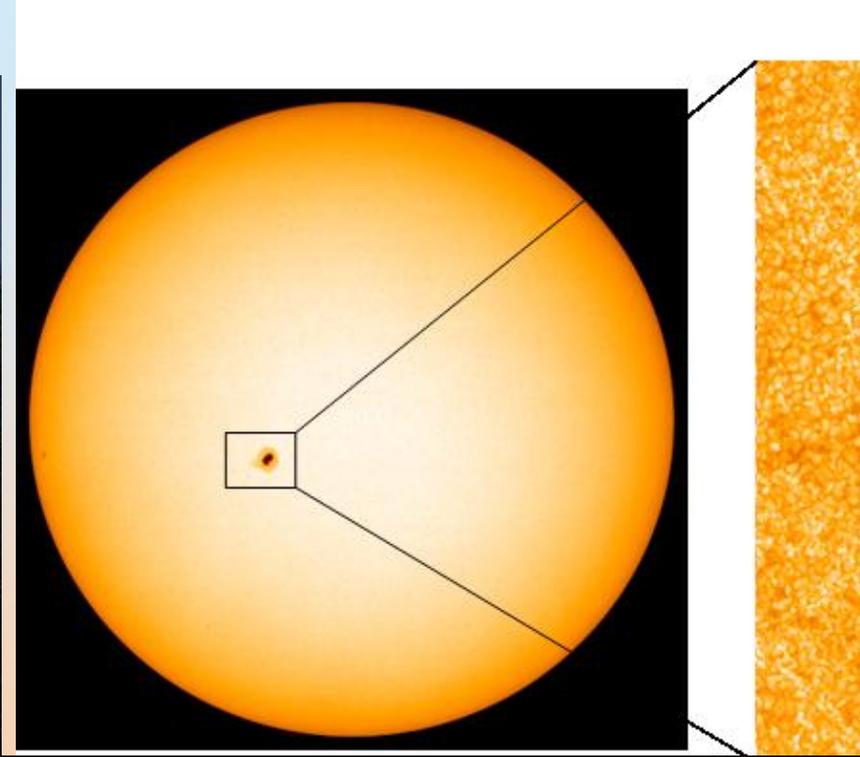
天体色彩学入門 太陽編

24

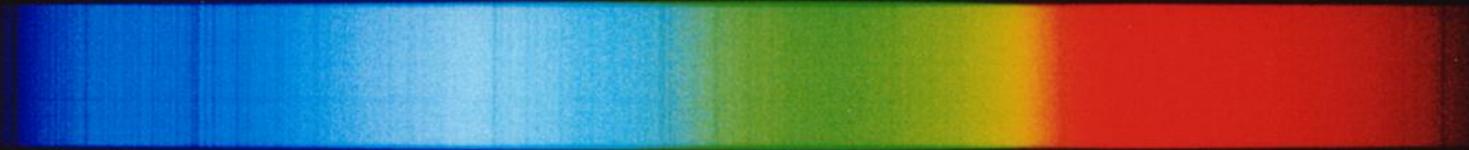




太陽の本当の色は何色？



The Sun





太陽の本当の色は何色？

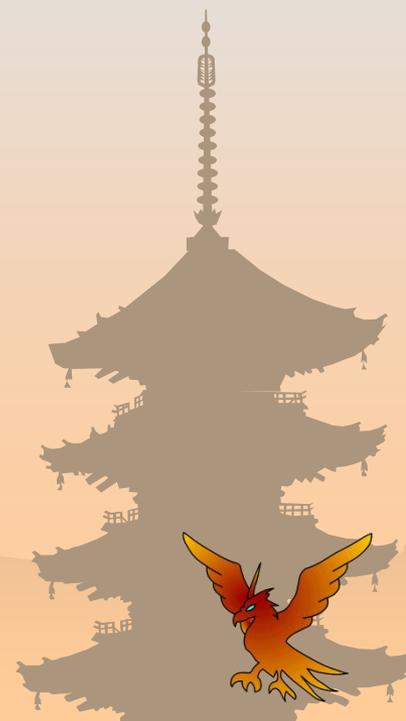


2009/7/22



2011/7/13

天体色



2011/7/13

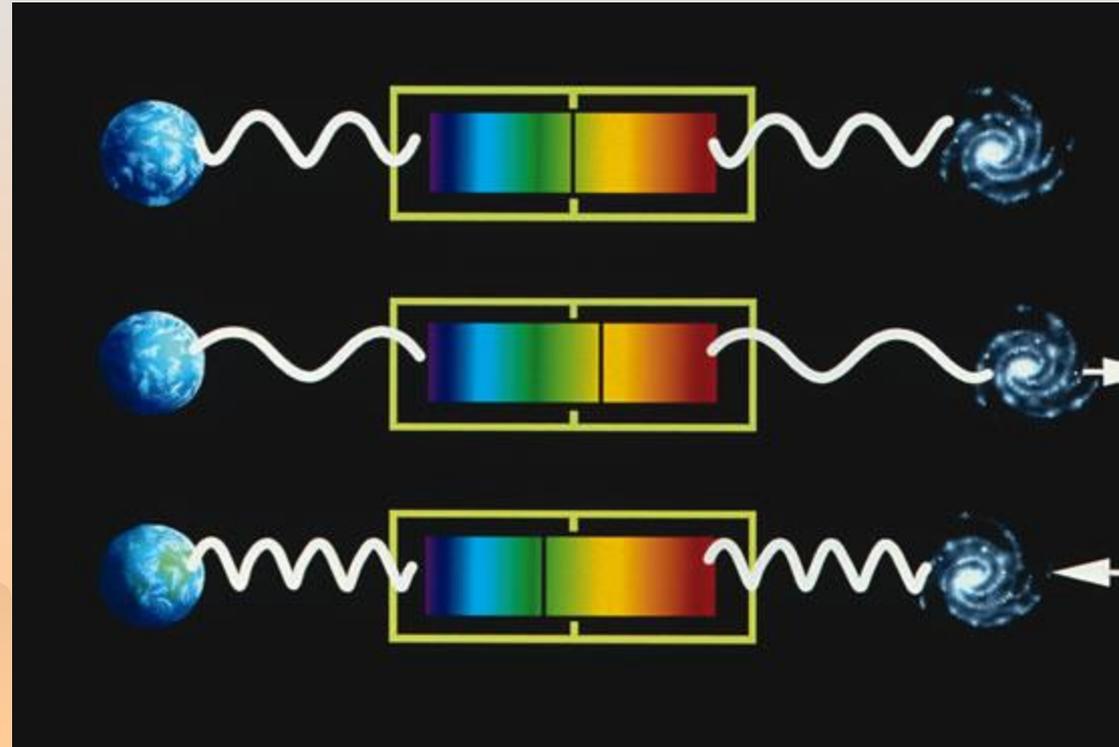
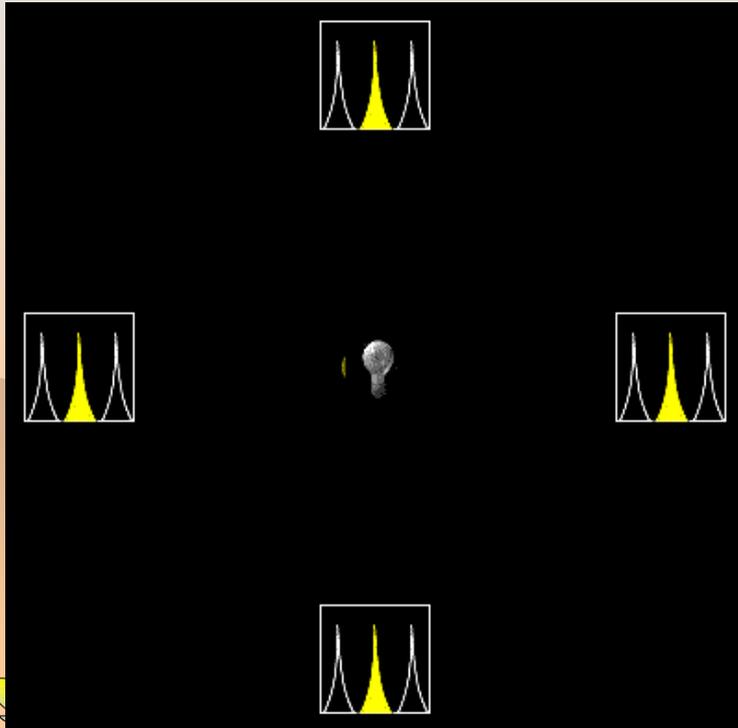
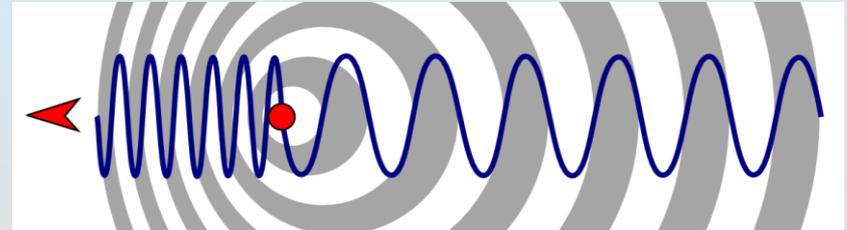
天体色彩学入门

27



光のスペクトル ドップラー効果

- 光源と観測者の間の相対運動によって、観測される光の波長(振動数)が実験室で測定されるものとずれる現象を光の**ドップラー効果**(Doppler effect)と呼ぶ。

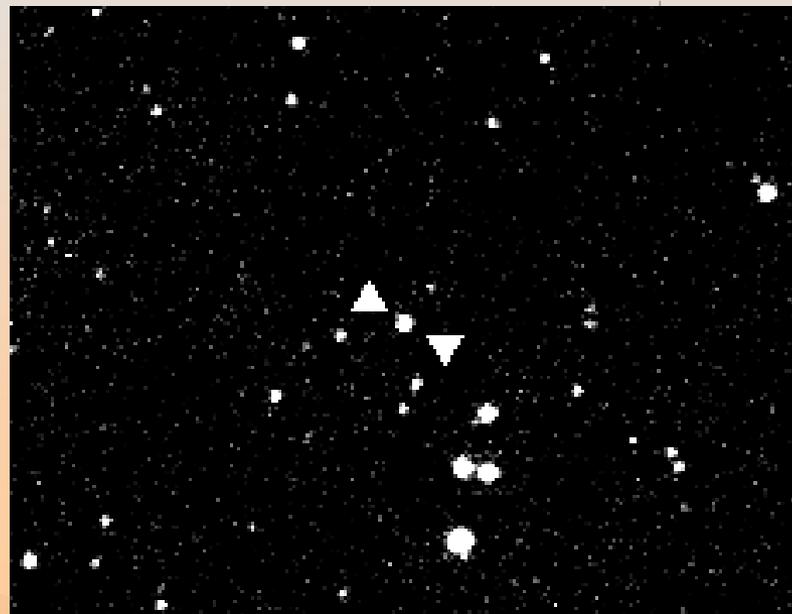
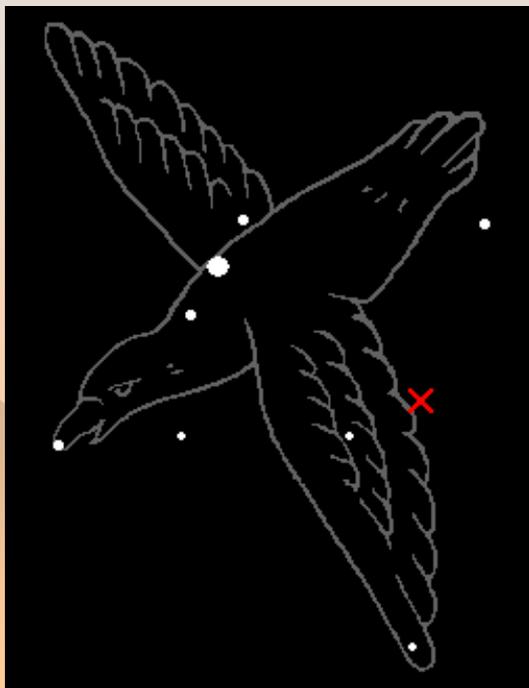


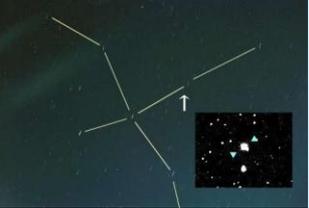


特異星SS433の発見

SS433 : Stephenson-Sanduleakカタログ433番
14等星

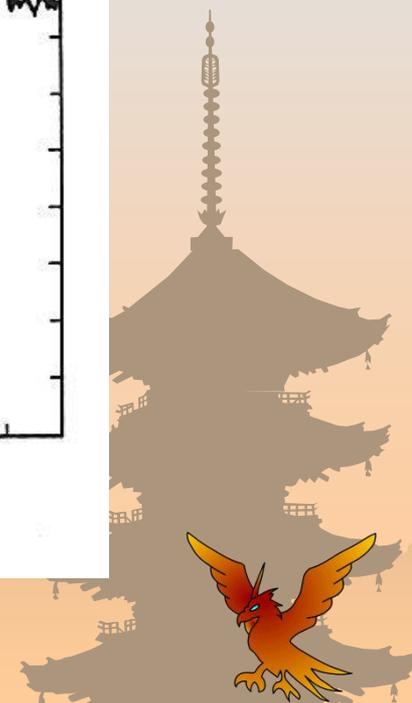
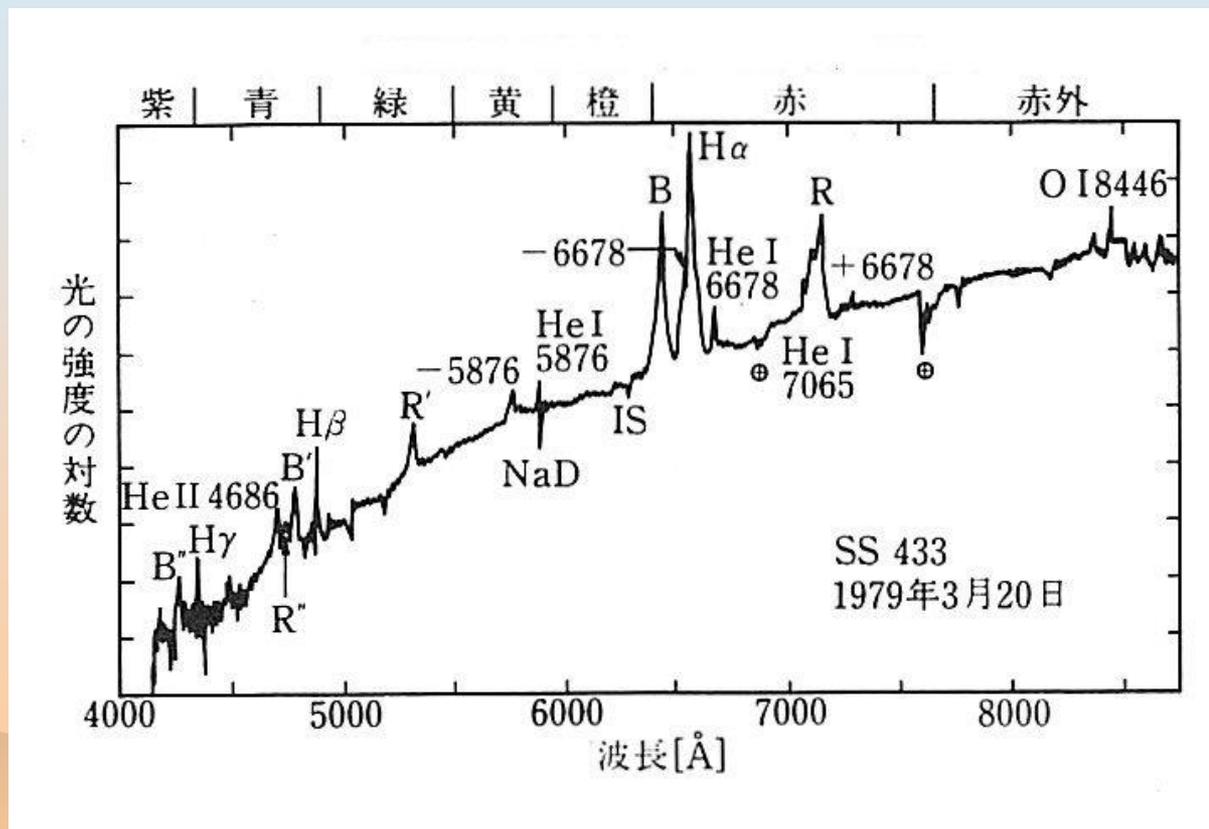
奇妙なスペクトル (Margon et al. 1984)

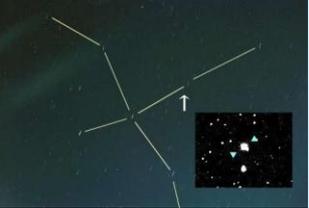




特異星SS433 スペクトル

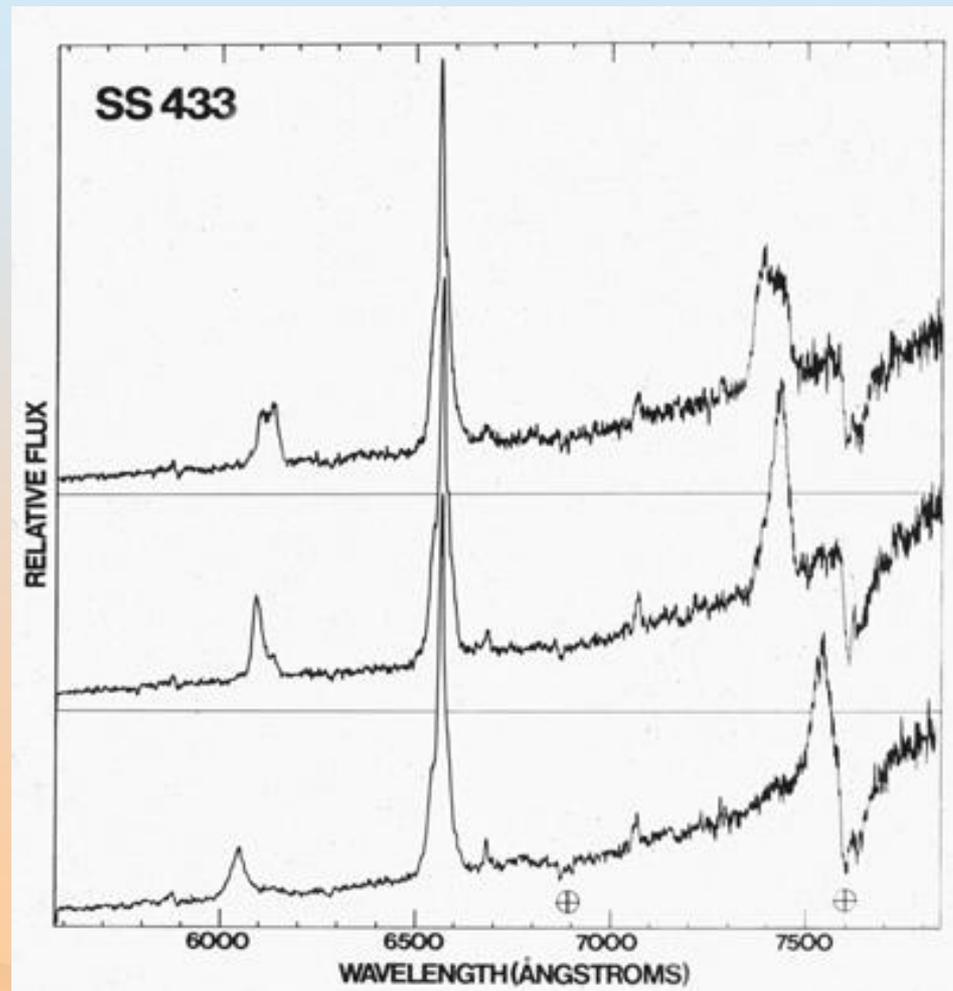
❁ 奇妙なスペクトル線

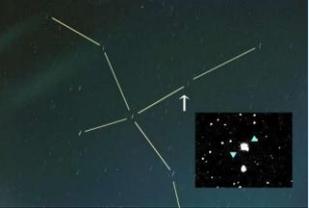




特異星SS433 スペクトル

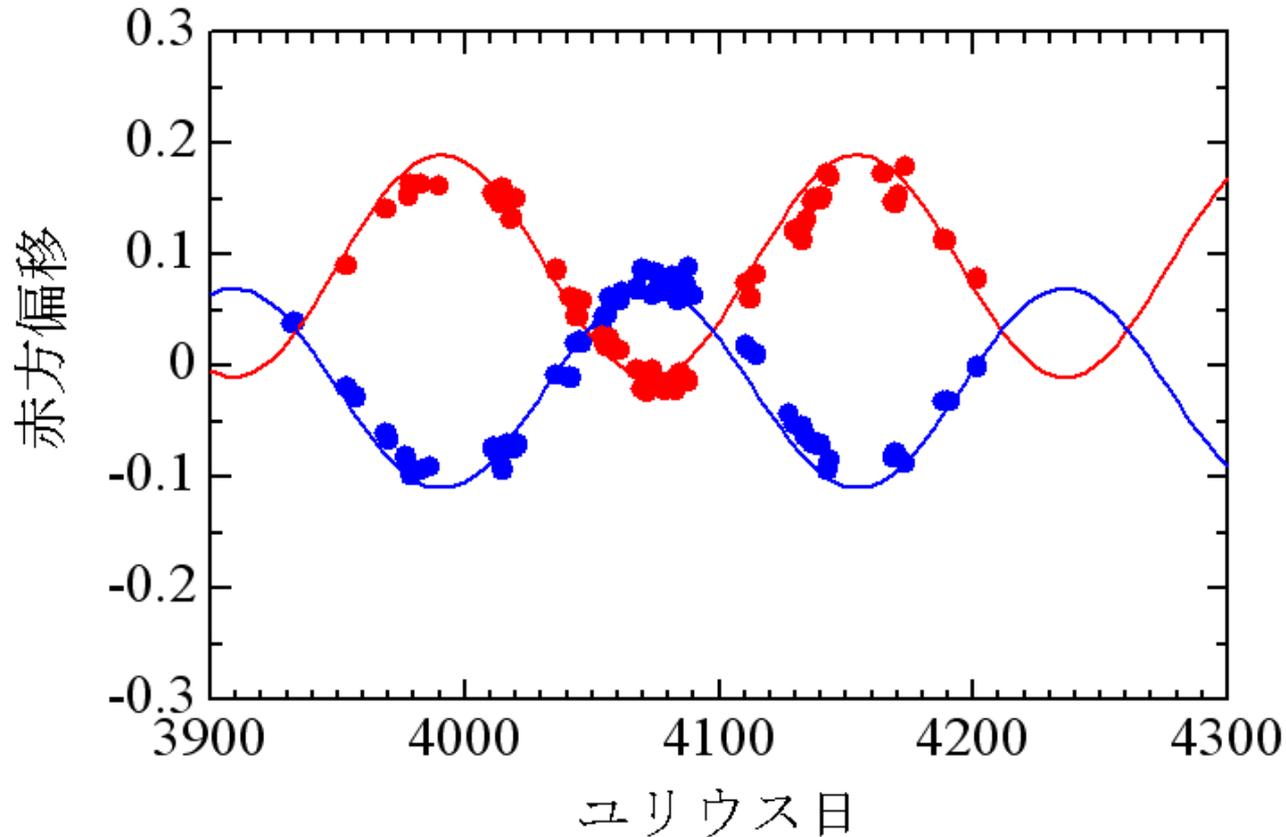
❁ 動くスペクトル線

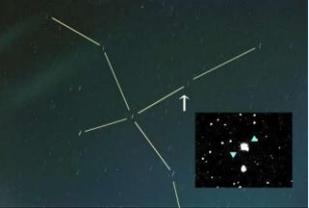




特異星SS433 スペクトル

- ❁ 輝線の位置が周期的に変化する
- ❁ 162日

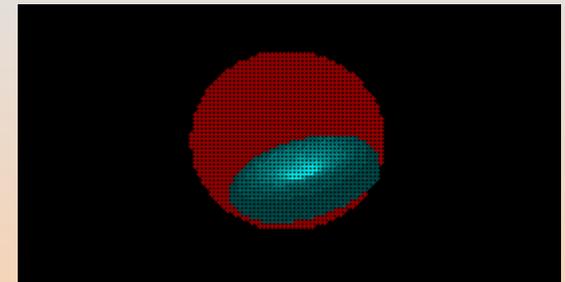
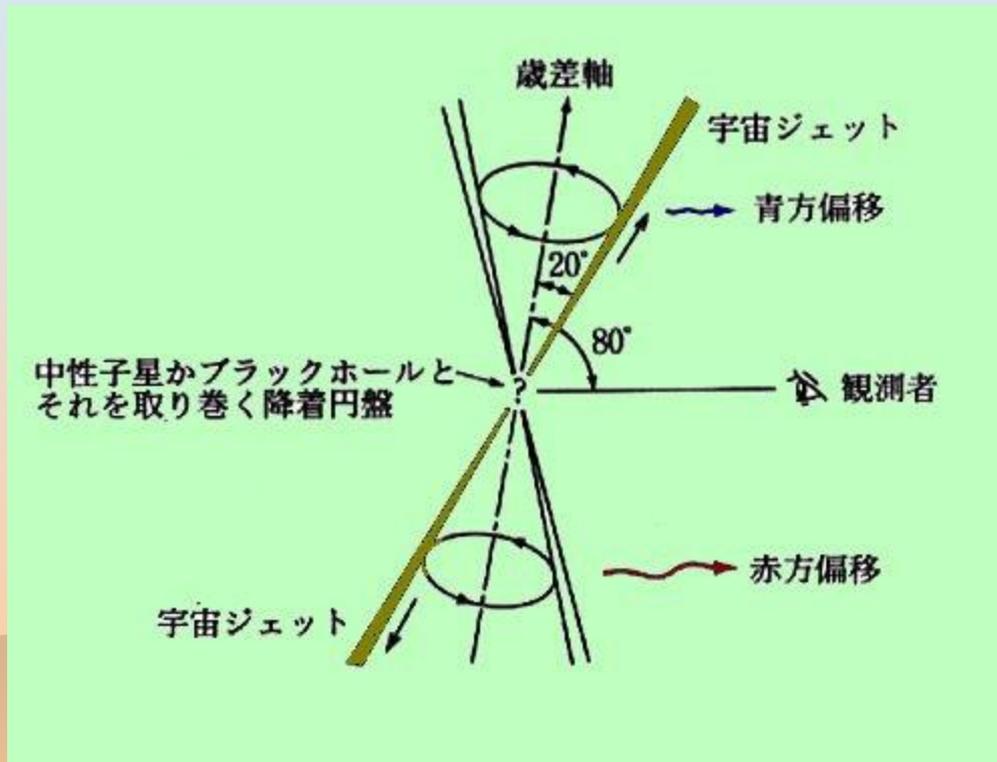




特異星SS433 モデル

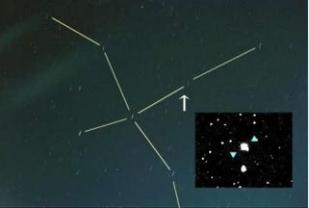


❁ 2本のジェットが振れ動く



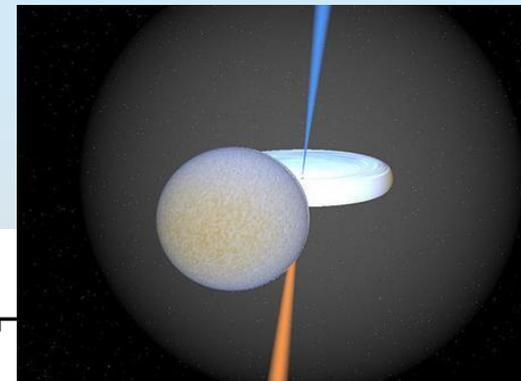
SS433ジェットの
パラメータで作
成したアニメ





特異星SS433 輝線スペクトル

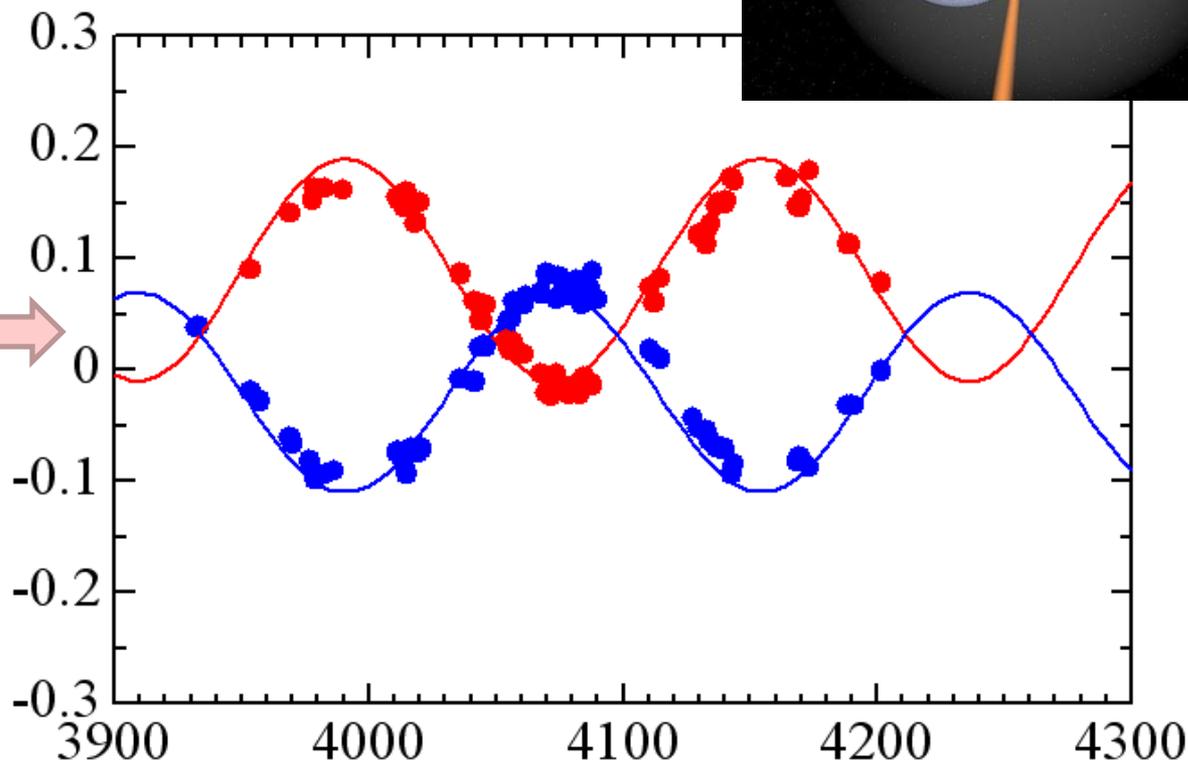
- ❁ 輝線の位置が周期的に変化する
- ❁ 162日

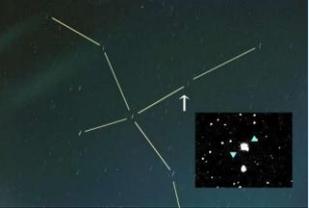


赤方偏移



- ❁ 0ではない
- ❁ 時間の遅れ





特異星SS433 光度曲線



❁ 光度曲線

- 13日周期：連星周期
- 162日周期：歲差周期

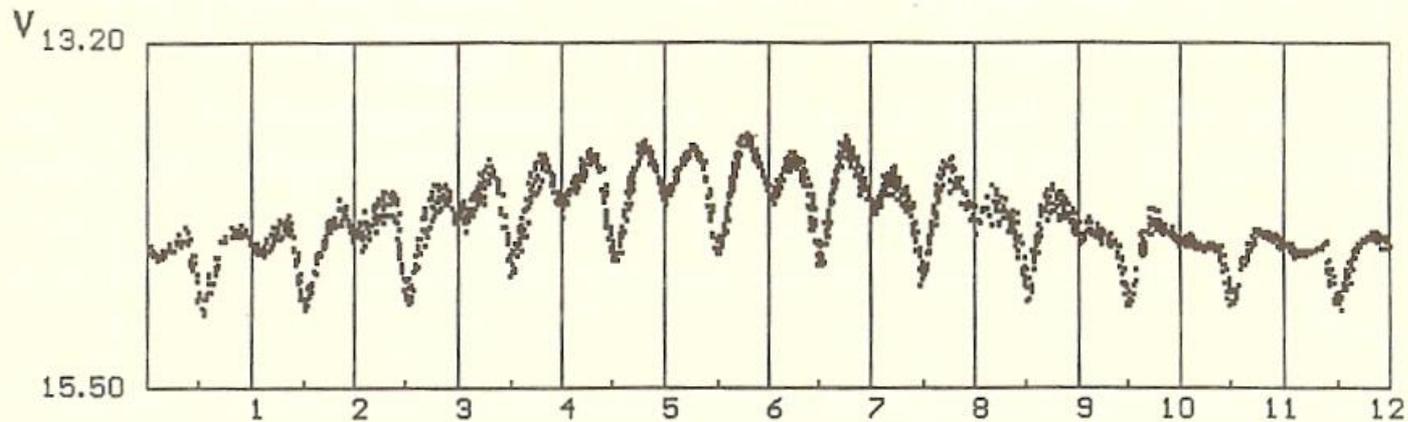
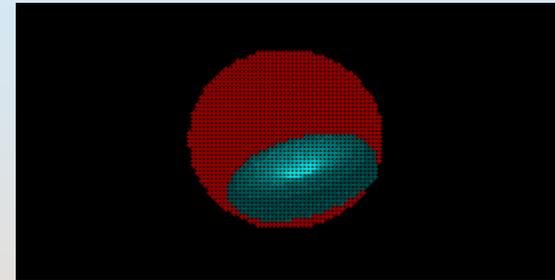


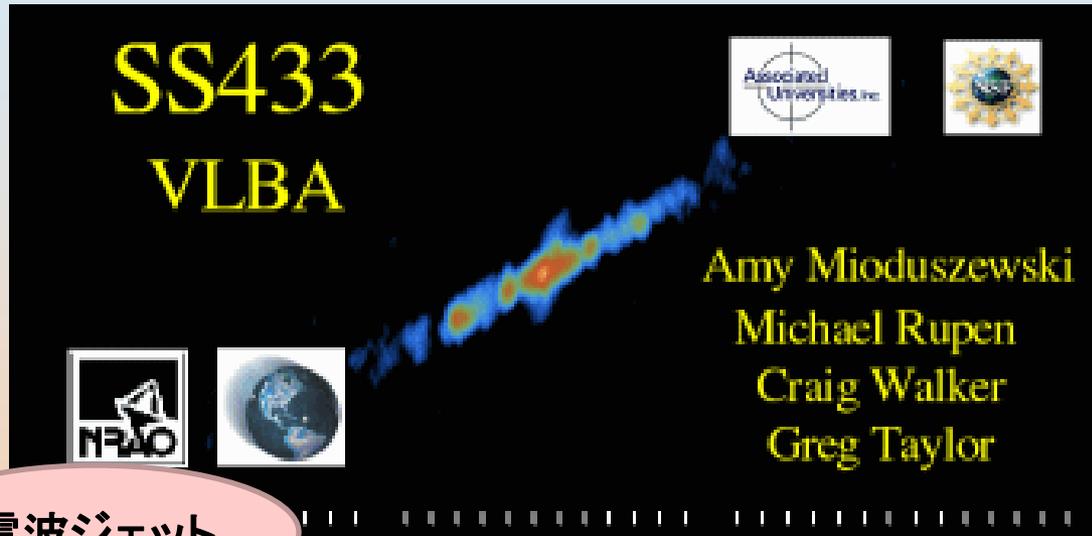
Fig. 1.27 Folded light curves of SS 433 obtained by 19-year optical monitoring. (After Goranskij et al. 1998)



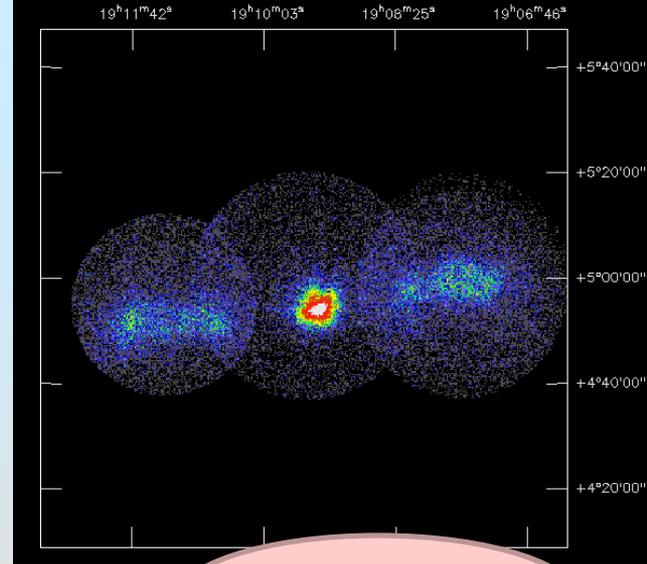


特異星SS433 ジェット

✿ コルク抜きパターン



電波ジェット

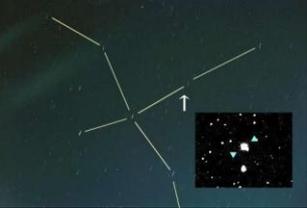


X線ジェット

X線衛星ぎんがの撮像した特異星SS433のジェット (<http://www-cr.scphys.kyoto-u.ac.jp/>)。光速の26%もの速度で星間空間に突入したジェットガスと、星間物質との間の摩擦によって、ガスが高温になりX線を放射していると想像されている。

電波で観測したSS433ジェットの Corkscrew パターン (<http://www.nrao.edu/pr/2004/ss433corkscrew>)。SS433ジェットは、ある固定軸(歳差軸)のまわりを約20°の頂角をもつ円錐面内で周期163日で、傾いた独楽の軸が振れるような歳差運動をしている。





特異星SS433 まとめ



恒星+ブラックホール
亜光速ジェットをもつ
ジェットの速度は光速の
26%!

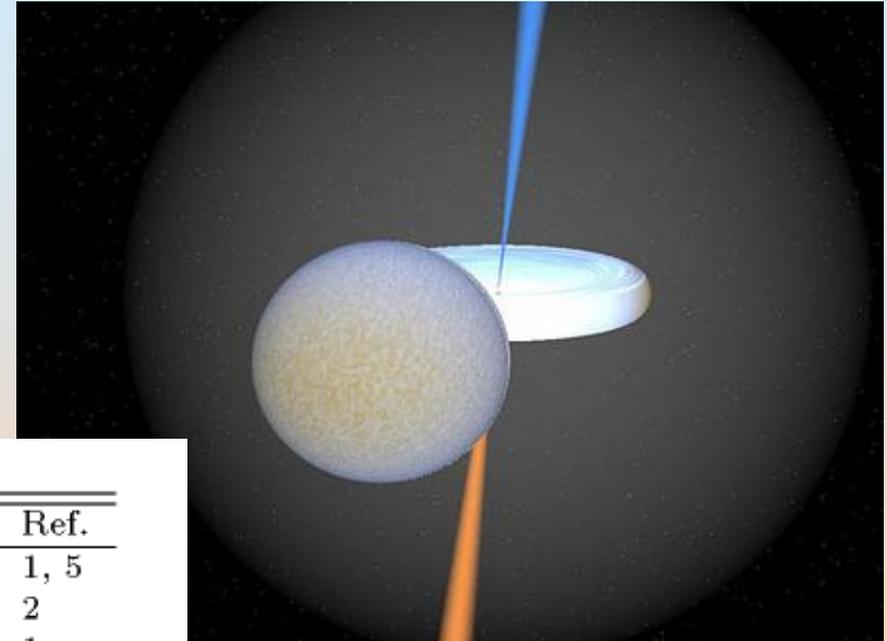
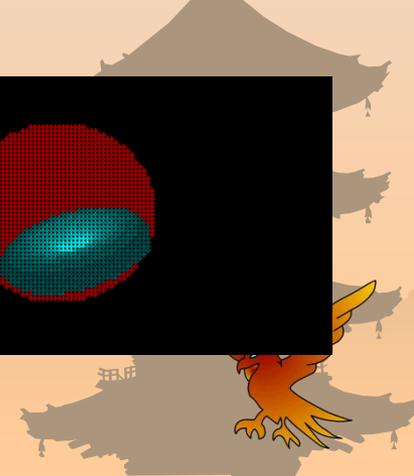
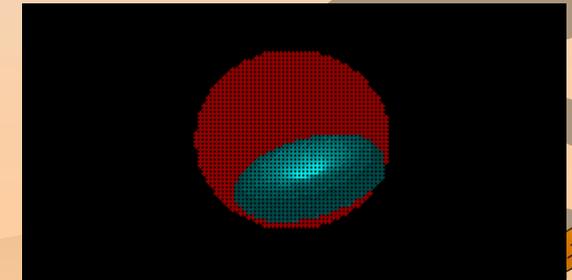
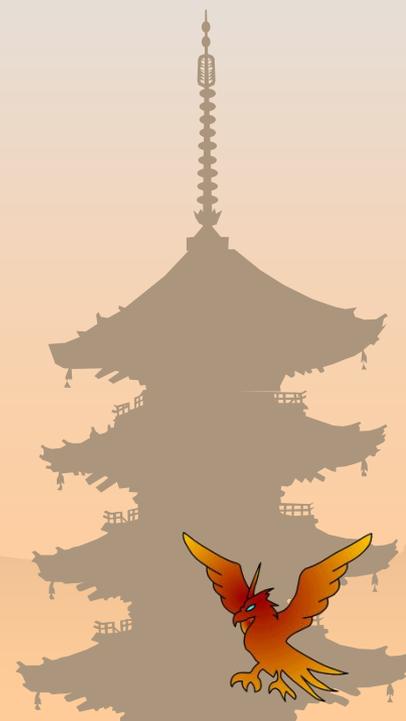


Table 1.5 Elements of SS 433.⁵

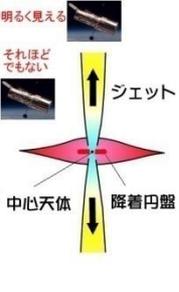
Elements	Values	Ref.
Optical counterpart	$V \sim 14/A5-A7I$	1, 5
Distance d	5.0 ± 0.5 kpc	2
Binary period P	13.082 d	1
Binary ephemeris T_0 (2 440 000+)	6596.25 d	3
Semi-amplitude K_2	112 ± 5 km s ⁻¹	4
	132 ± 9 km s ⁻¹	5
Mass function $f(M)$	$2.0 \pm 0.3 M_{\odot}$	4
	$3.0 \pm 0.6 M_{\odot}$	5
Inclination angle i	78°8	1
Precession period	162.5 d	1
Precession ephemeris (2 440 000+)	4483 d	3
Precession angle ψ	19°8	1



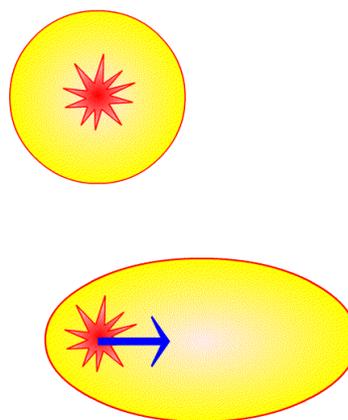
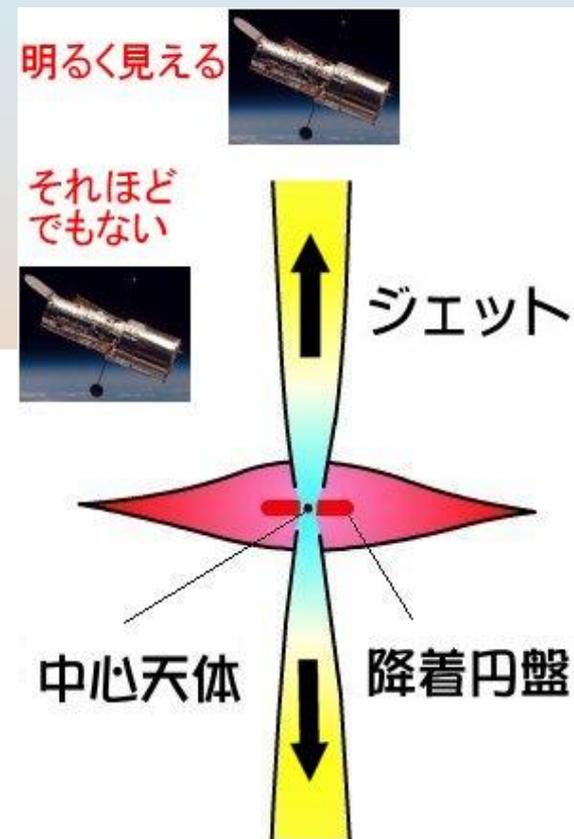




天体は“見た目”が10割

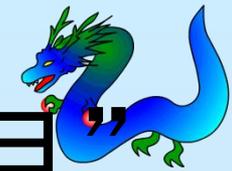


- ❁ 相対論的風 (アウトフロー)
 - アウトフローが光学的に厚い
 - 見かけ上の“**光球 (photosphere)**”
- ❁ 光の伝播への相対論的効果
 - 光行差
 - ドップラー効果
 - 重力赤方偏移
 - 光線の彎曲

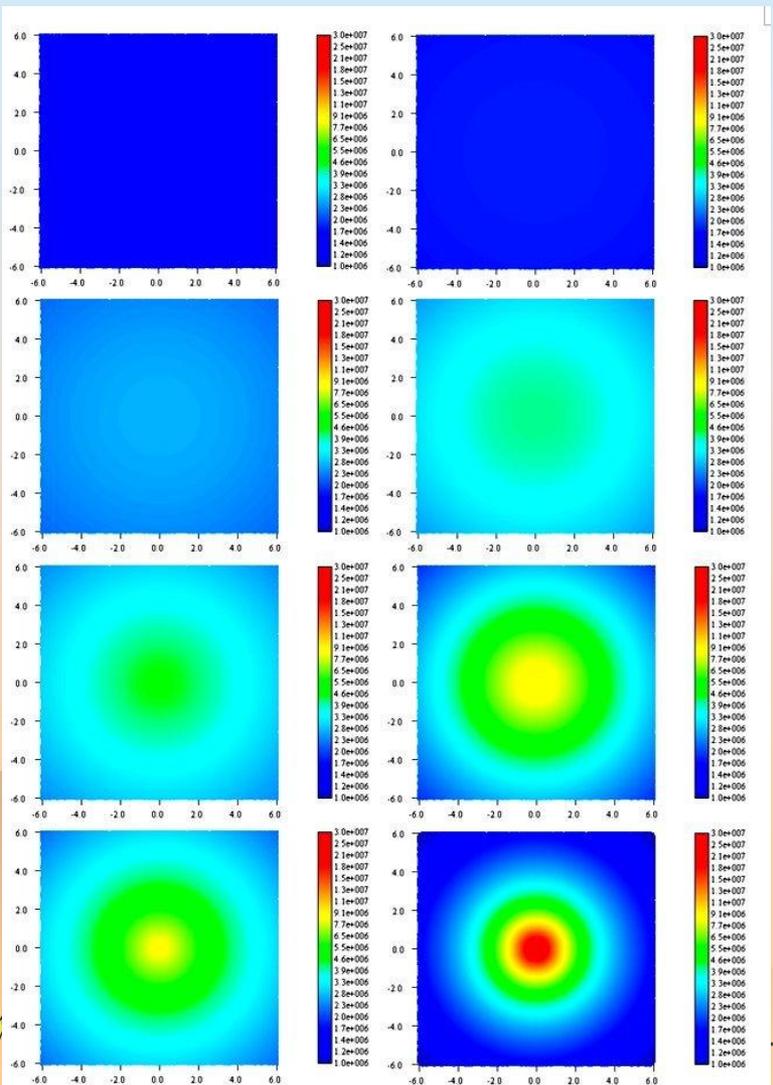


ドップラーブースト。亜光速で吹き出すプラズマジェットを正面から観測すると、非常に明るく観測される。





ブラックホールジェットの“見た目”



光を放射している天体プラズマが観測者に対して運動していると、ドップラー効果などのために、観測される明るさや見かけの温度が変化して見える。

たとえば、ブラックホール近傍から吹き出したプラズマガス—宇宙ジェット—を正面方向から観測すると、ジェットのガスは観測者に対して高速で近づいてくる。このとき、ジェットから放射される光は、ドップラー効果によって波長が短くなるとともにエネルギーが高くなる。また同時に、光行差のために光は前方方向へ集束される。

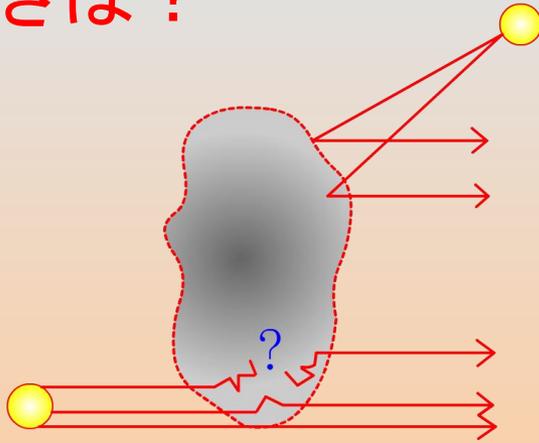
これらの両方の結果が合わさって、ジェットの観測される明るさは本来の明るさよりも非常に明るくなる。このような相対論的効果を**ドップラーブースト (Doppler boost)**と呼ぶことがある。





雲ーガス体ーの“見た目”

- ❁ 半透明なガス体の表面はどこか？
- ❁ 背後から光が透け出てくるときは？



どこで反射するのか



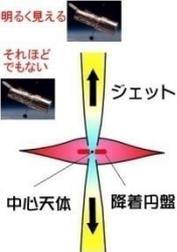
どこで透過するのか

- ❁ ガスの密度分布や温度分布によって見える場所(深さ)は違う





ガス体や雲の“表面”



晴れた日には数km先まで見えるが霽が濃いときには1m先ぐらまでしか見えないこともある。星間空間では何万光年も彼方の星が見えるが、太陽内部では0.5cm先ぐらまでしか見えない。

ガス体は半透明で、温度などの状況によって見える深さ(場所)も違う。

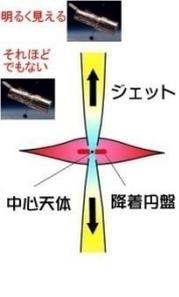


雨の日



黄砂の日





ガス体の“表面”

- ❁ 光子の輸送という観点から、光が感じる“距離”として、実距離の代わりに、
「**光学的深さ／光学的厚み (optical depth)**」
を使う。
- ❁ 光が通過した実距離 ds と物質密度 ρ と不透明度 κ を用いると、
光学的深さ $d\tau$ は、以下のように定義される：

$$d\tau = \kappa \rho ds \qquad \tau = \int \kappa \rho ds$$

- ❁ 光学的深さの単位は無次元である。
- ❁ 平均自由行程との関連で言えば、
光学的深さが1になる距離が平均自由行程
に他ならない。

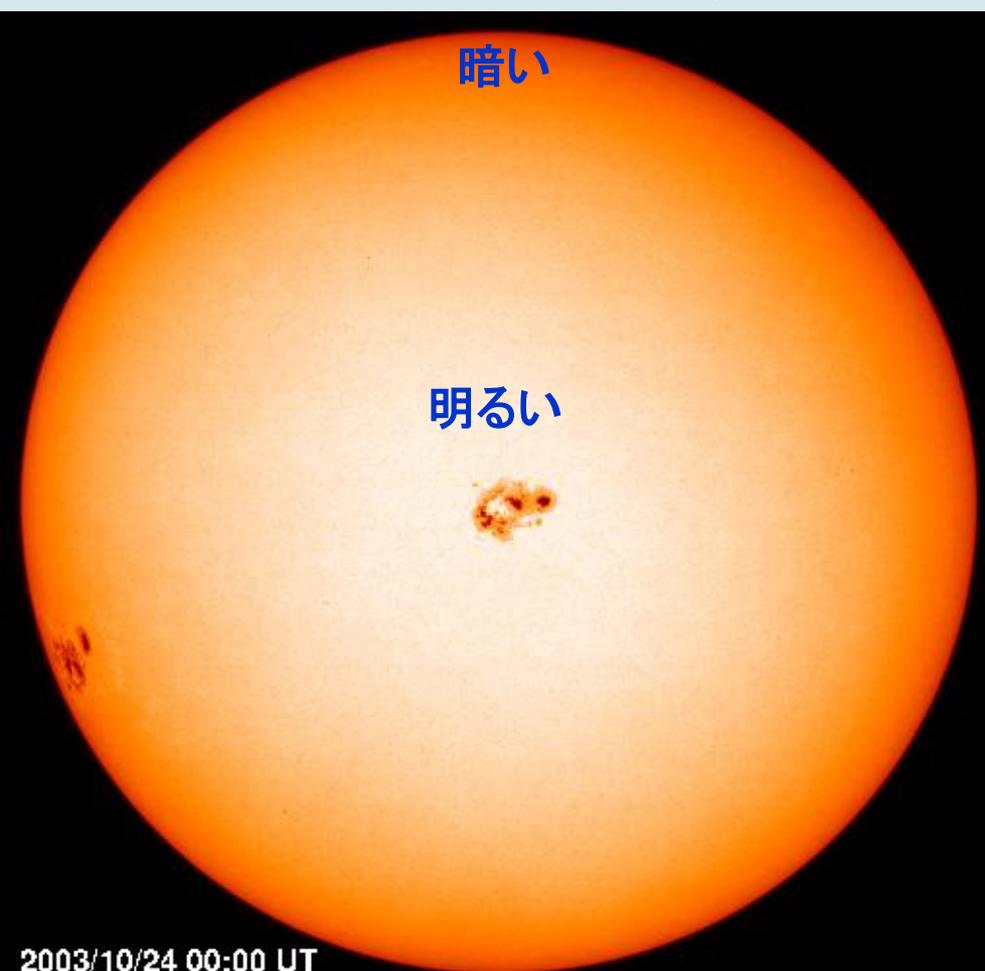




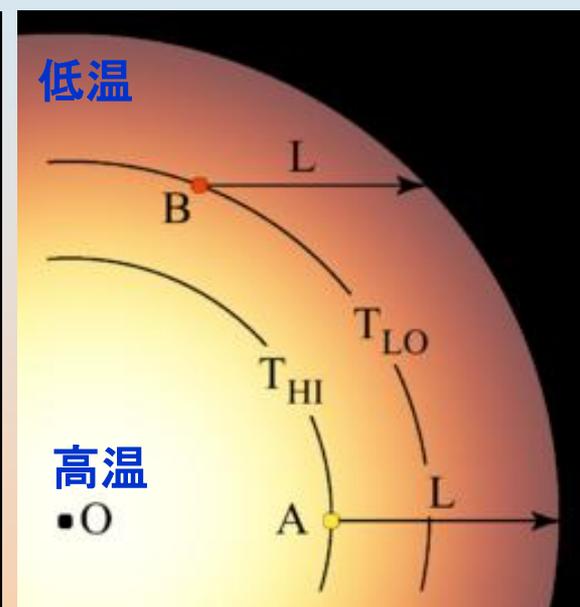
太陽の周縁減光効果



☼ 太陽の正面写真



☼ 太陽の断面図



周縁部
浅い場所
低温
暗い

中央部
深い場所
高温
明るい

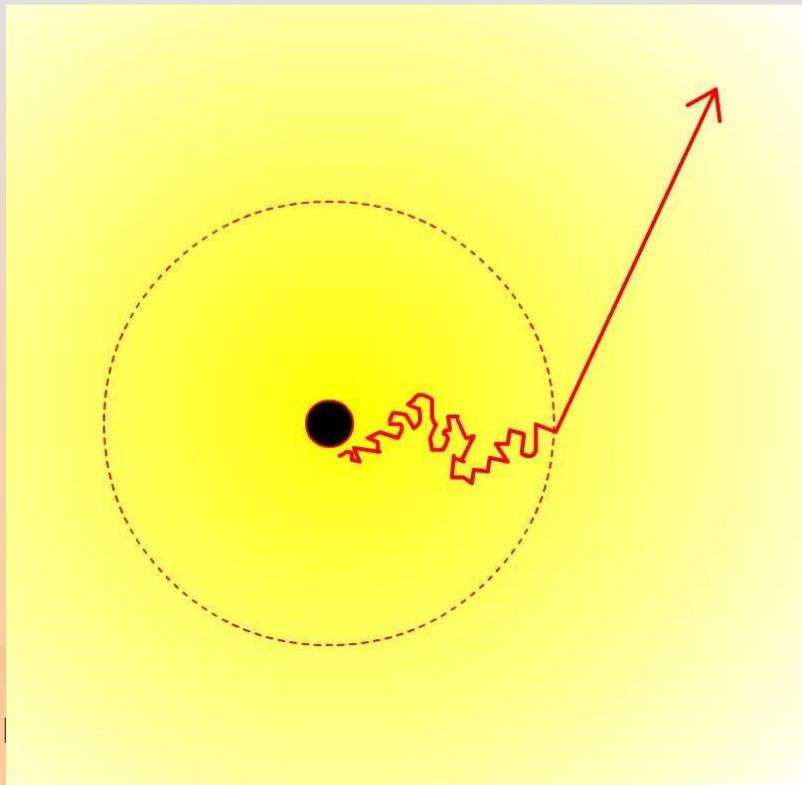
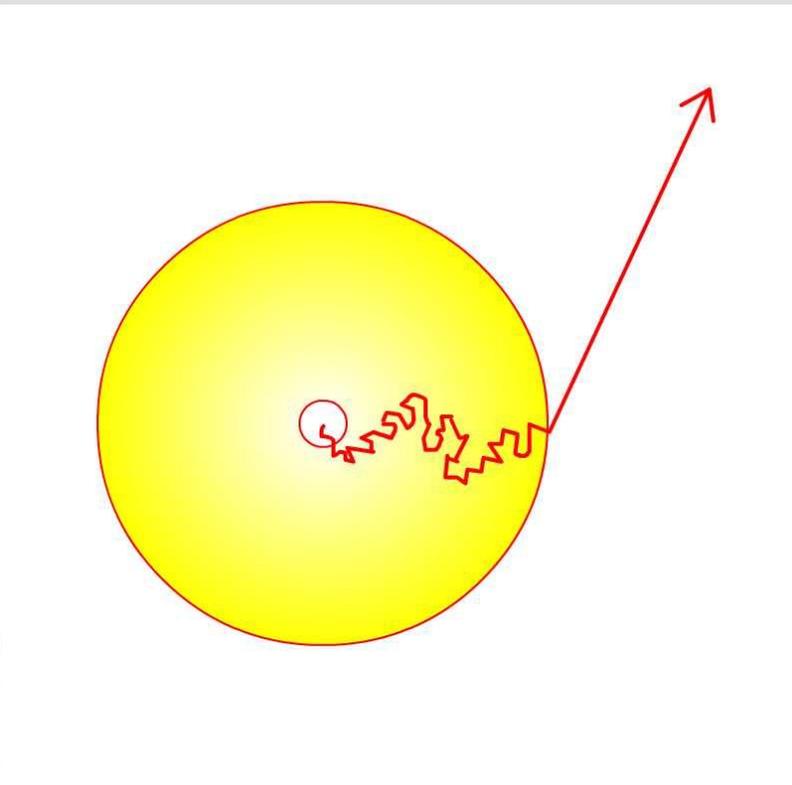
☼ どこを視ているのか

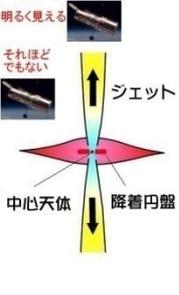




ふつうの星とブラックホール風

- ❁ “表面”がある
- ❁ ガスが静止している
- ❁ 広がっている
- ❁ ガスが動いている





ローレンツ＝フィッツジェラルド短縮



- ❁ 行程 λ は、ローレンツ＝フィッツジェラルド短縮で変わる
- ❁ 光学的厚み $d\tau$ は相対論的不変量
- ❁ 亜光速プラズマ流では、下流方向に向かって光学的厚み τ は見かけ上は小さくなる。

– Abramowicz et al. 1991

$$\lambda = \frac{1}{\gamma(1 - \beta \cos \theta)} \lambda_0$$

$$\beta = \text{速度 } v / \text{光速 } c$$

$$\gamma = \text{ローレンツ因子}$$

$$\cos \theta = \text{方向余弦}$$

$$d\tau = d\tau_0 = \kappa_0 \rho_0 ds_0$$
$$= \gamma(1 - \beta \cos \theta) \kappa_0 \rho_0 ds$$

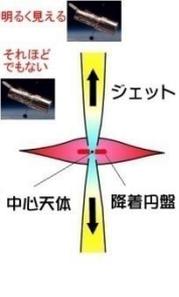
$$\kappa_0 = \text{不透明度}$$

$$\rho_0 = \text{共動系でのガス密度}$$

$$ds_0 = \text{共動系での光路長}$$

$$ds = \text{静止系での光路長}$$





ブラックホール風のモデル

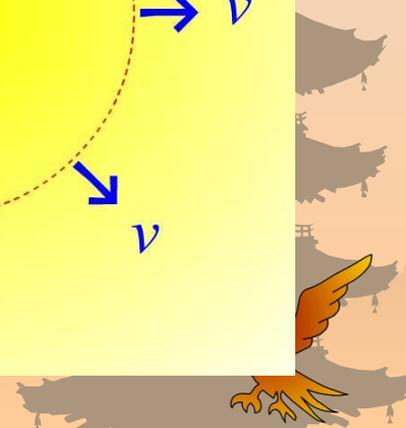
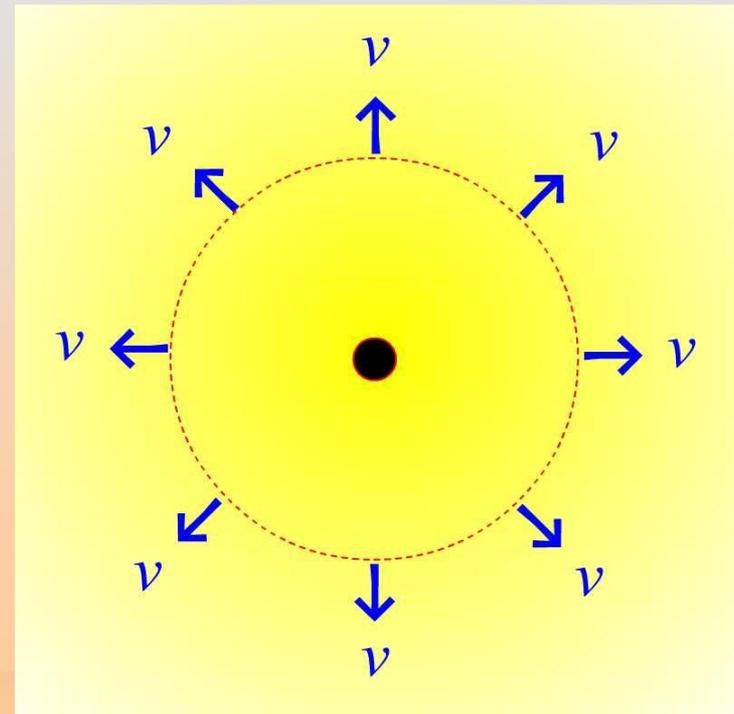
❁ 仮定

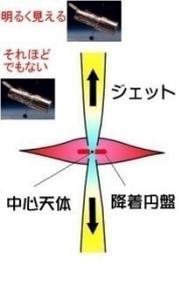
- 定常
- 球対称 (R)
- 重力なし
- 速度一定 ($v = c\beta = \text{const}$)
- 光度一定 ($L = 4\pi R^2 \sigma T_0^4$)

- ❁ 中心(ブラックホール)から周囲の四方八方へ球状に風が吹いている

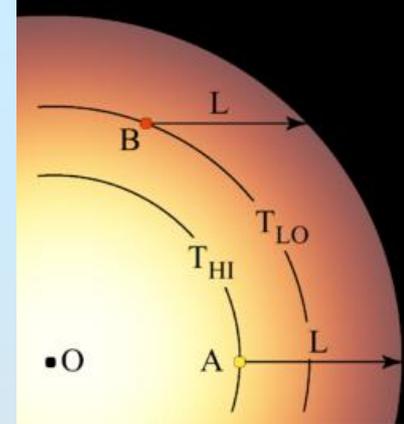
❁ 密度分布と温度分布

$$\rho_0 = \frac{\dot{M}_0}{4\pi\gamma R^2} \quad T_0 = \left(\frac{L}{4\pi\sigma R^2} \right)^{1/4}$$

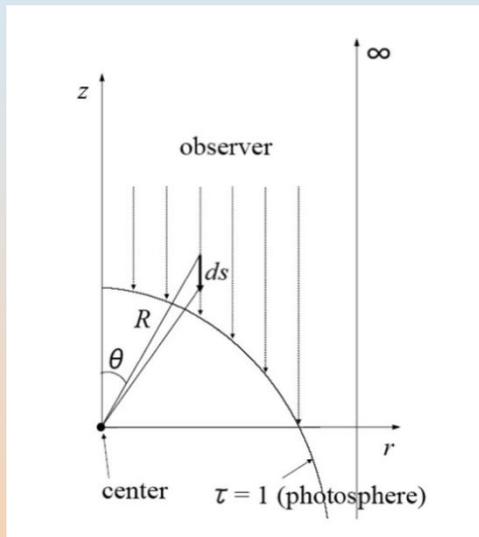




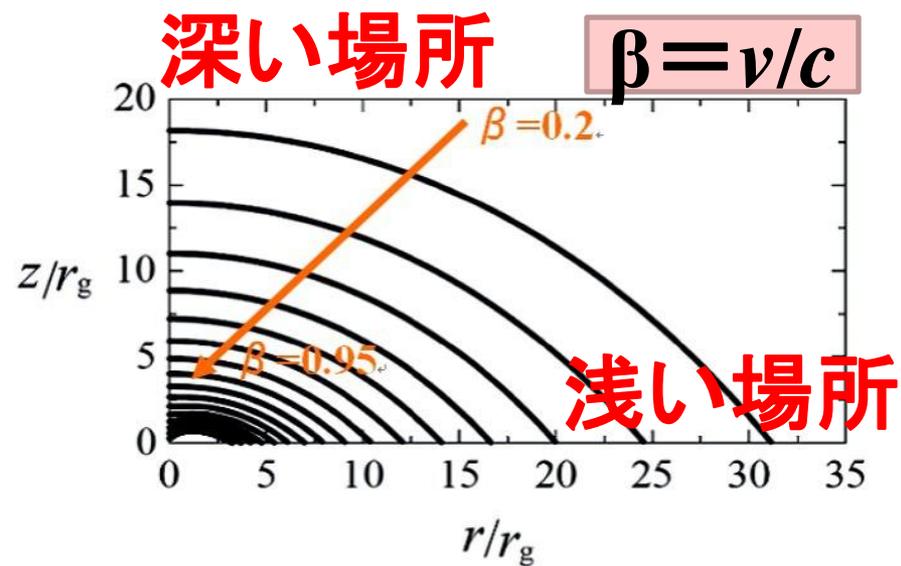
見かけの光球面



観測者は $z = \infty$ にいる



見かけの光球(見た目の表面)の位置



β 小: 周縁減光効果

β 大: 光球面収縮

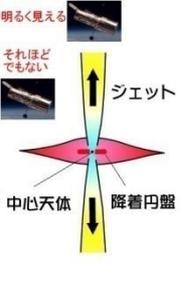
β 大 ($> 2/3$): 中央で凹

見かけの光球面の形状。速度は β が 0.2から0.95まで0.05ずつ増えている。



— Abramowicz et al. 1991





見かけの温度分布

❁ 仮定

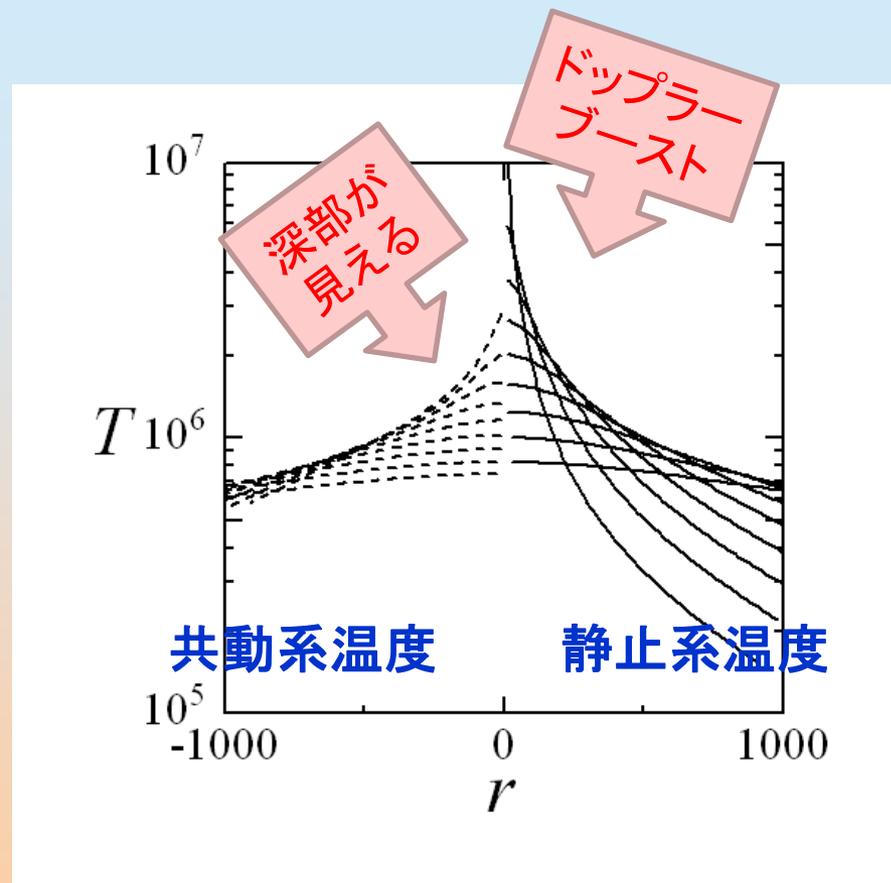
- 共動系で黒体放射

❁ 観測される温度

$$T_{\text{obs}} = \frac{1}{1+z} T_0 = \frac{1}{\gamma(1-\beta \cos\theta)} T_0$$

❁ パラメータ

- 10太陽質量
- 1エディントン光度
- 1000臨界質量放出率



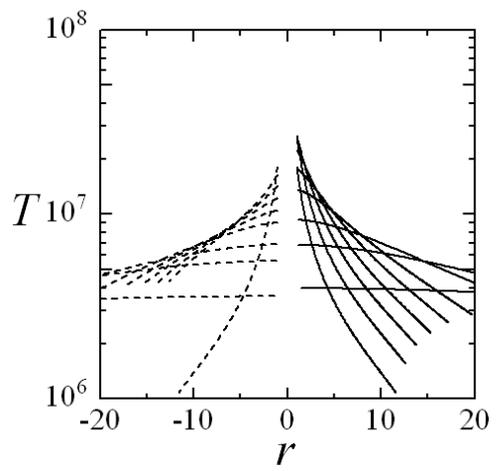
無限遠の観測者から見た光球の温度分布。左側は共動系での、右側は静止系での温度分布。風の色速度 β は平らなものから0.1, 0.2, ... 0.9である。



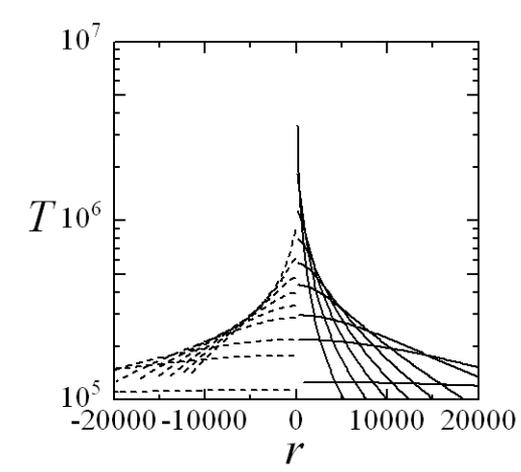
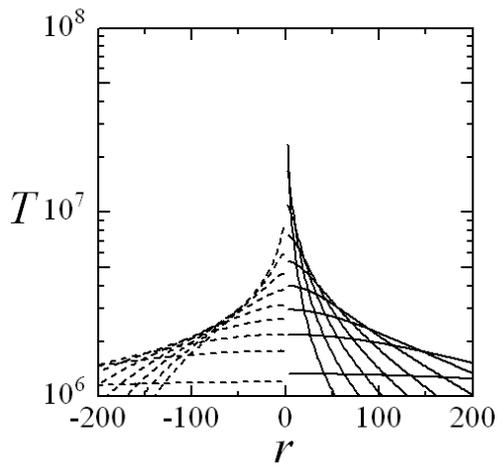
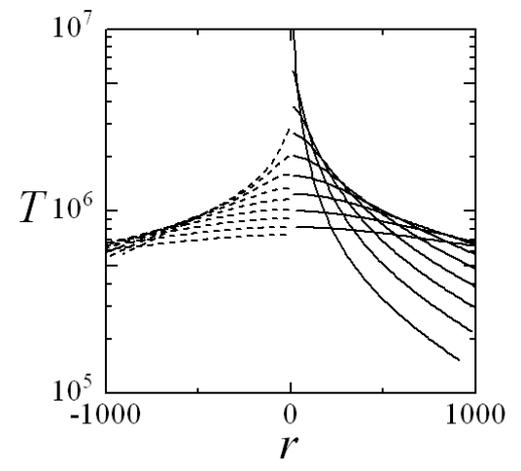


見かけの温度分布

- 10
- 100



- 1000
- 10000

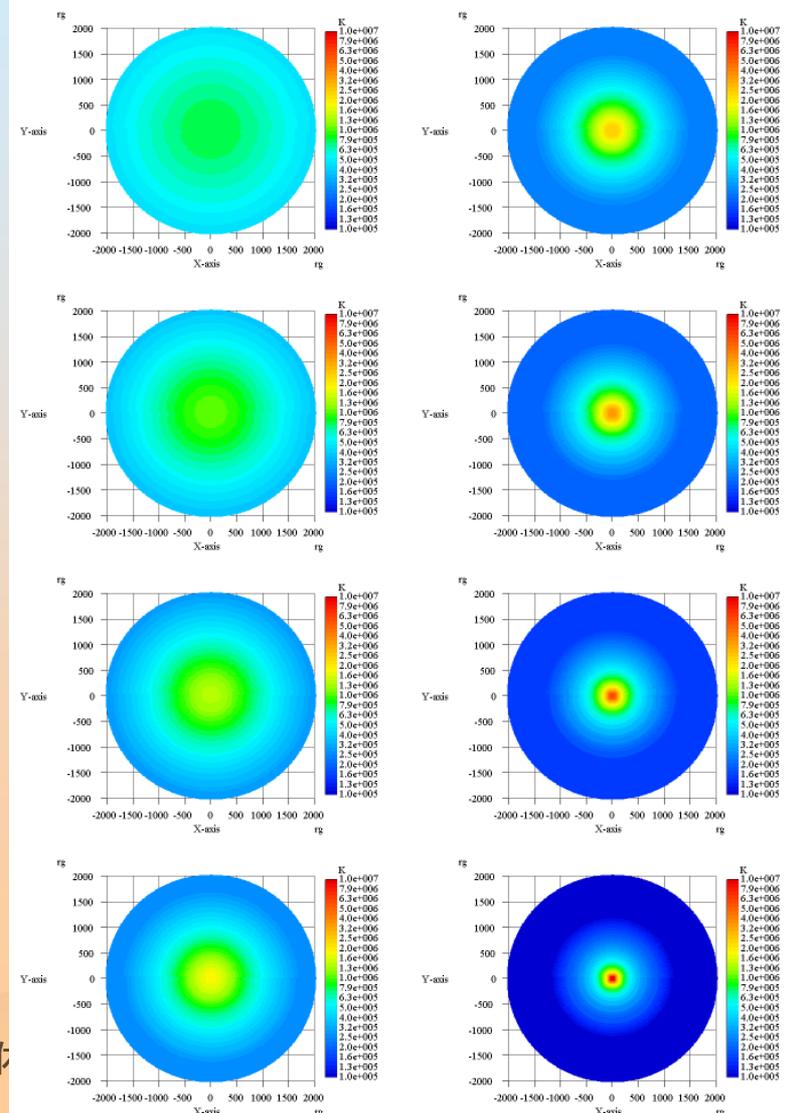
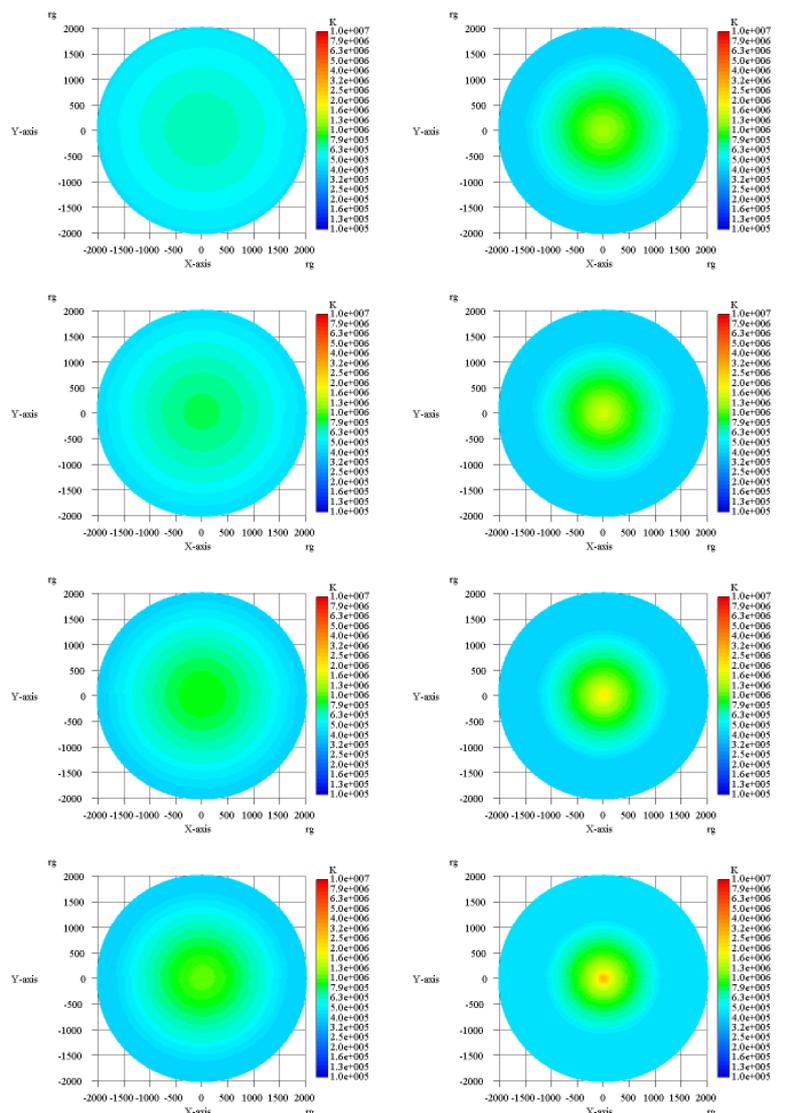




見かけの温度分布

共動系温度

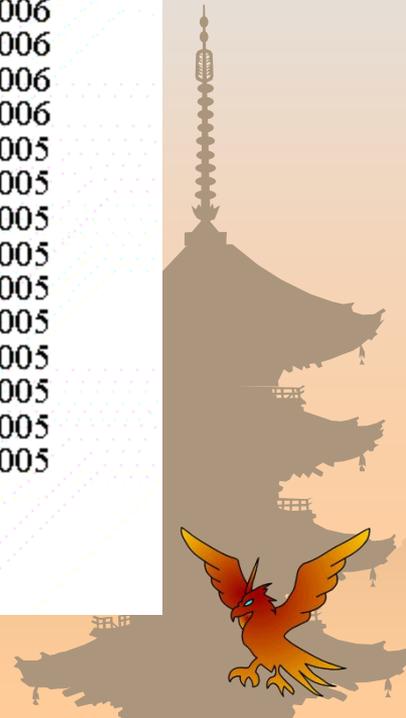
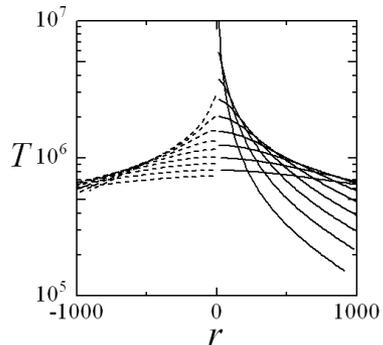
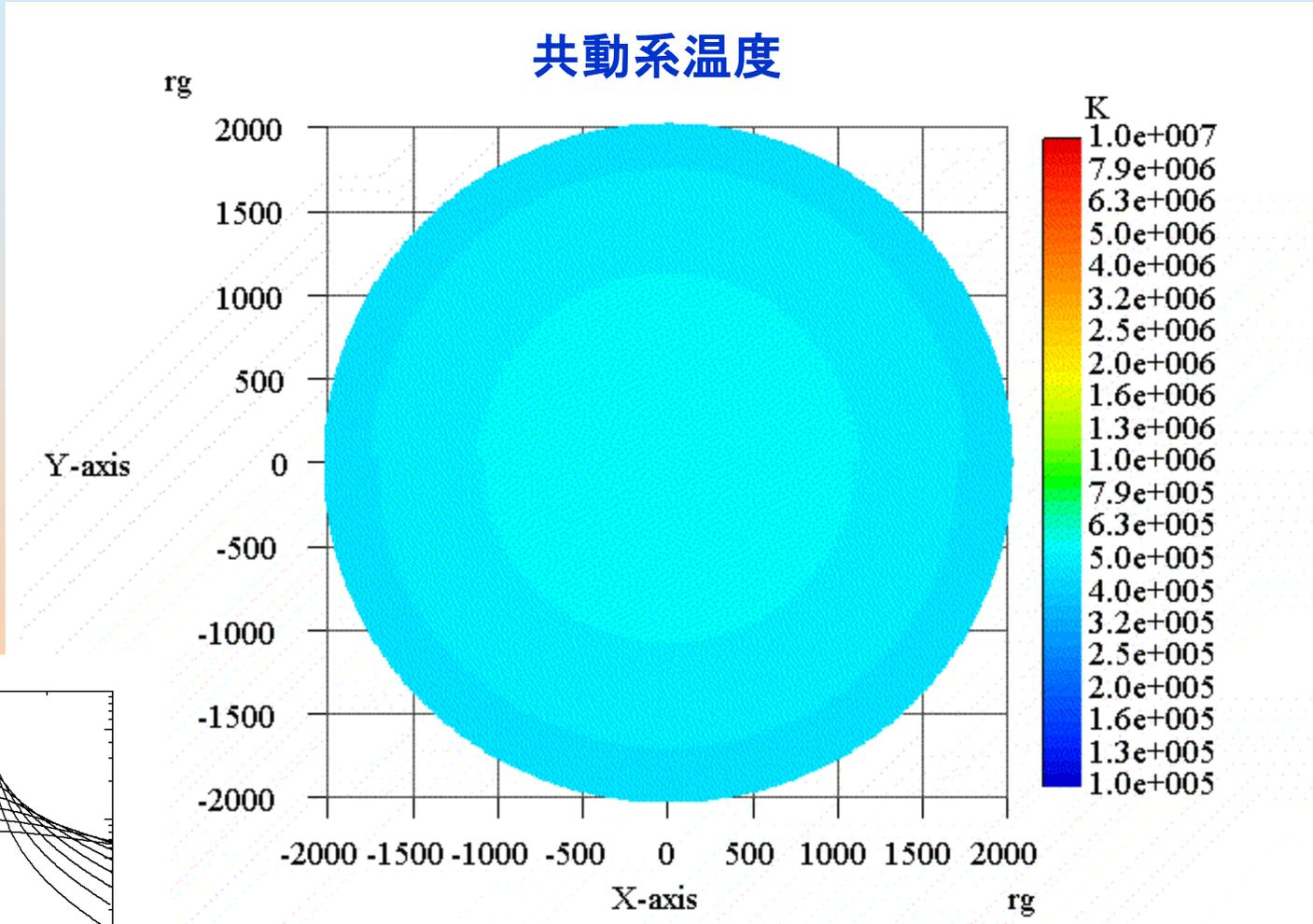
静止系温度



無限遠の観測者から見た光球の温度分布。左側は共動系での、右側は静止系での温度分布。風の速度 β は左上から右下へ0.2, 0.3, ... 0.9である。



ジェットが加速すると！ ジェット共動系での見え方





ジェットが加速すると！ 観測者静止系での見え方

