

天文学

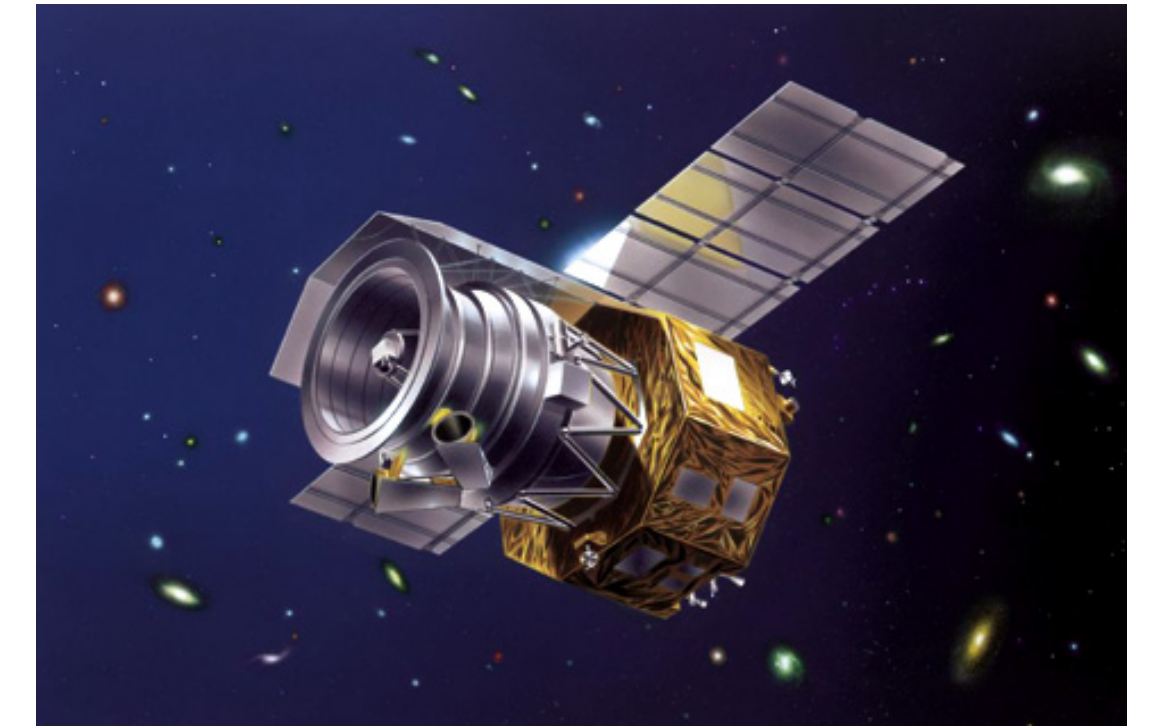
理工・総合情報学部講義 月曜5限



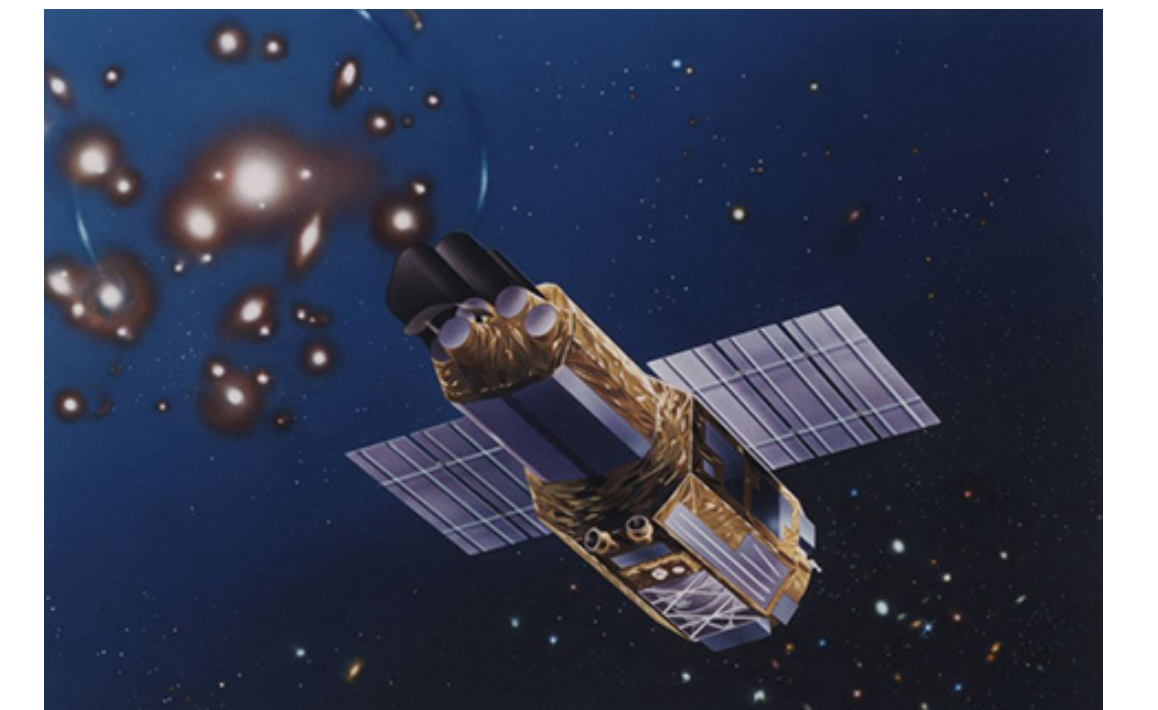
アルマ望遠鏡(電波): 国立天文台



すばる望遠鏡(可視光): 国立天文台



あかり衛星(赤外線): JAXA



すざく衛星(X線): JAXA

東京大学理学系研究科 鈴木昭宏

講義のアウトライン

- ・ 第 1 回: ~~天文学への導入と様々な時間・空間スケールの天体~~
- ・ 第 2 回: **電磁波による宇宙の観測**
- ・ 第 3 回: 太陽系内天体と天体の運動
- ・ 第 4 回: 天体の距離、明るさ、色
- ・ 第 5 回: 恒星 1 -恒星のエネルギー源と核反応-

講義のアウトライン

- ・ 第6回: 恒星 2 -恒星の分類と進化-
- ・ 第7回: 星の誕生と星間物質
- ・ 第8回: 銀河 1 -銀河系の構成要素と位置天文学-
- ・ 第9回: 銀河 2 -銀河の分類と進化-
- ・ 第10回: 超新星爆発と元素の起源

講義のアウトライン

- ・ 第11回: 白色矮星、中性子星、ブラックホール
- ・ 第12回: ニュートリノ天文学と高エネルギー天体
- ・ 第13回: 重力波天文学と中性子星・ブラックホール
- ・ 第14回: 宇宙膨張の発見と宇宙の歴史
- ・ 第15回: 系外惑星の世界

第2回:

電磁波による宇宙の観測

- ・ 電磁波(可視赤外光・電波・X線ガンマ線)とその性質
- ・ 天体スペクトルと黒体放射
- ・ 原子・分子による吸収や輝線放射
- ・ (光のドップラー効果)

電磁波(electromagnetic wave)

- 光あるいは電磁波: 空間を伝わり、エネルギーを運ぶ
- 身近なのは可視光、人間は可視波長域の光・電磁波によって外界を知覚する
- 光は粒子であり波でもある(2つの性質を合わせ持つ)
- 波動的描像 **電磁波(EM wave)**: 指向性を持ち、ある周期で振動する電場・磁場の変位とその重ね合わせ
- 粒子的描像 **光子(photon)**: 1つの光子がエネルギー・運動量(・スピン)を運ぶ

電磁波の性質: 伝搬速度

- いわゆる**光速(speed of light)** $c = 299,792,458 \text{ m/s}$ (真空中)
- 日常的な感覚からするとものすごく速い、しかし有限
- 1秒に約30万km($3 \times 10^8 \text{ m}$)進む $\equiv$ 地球を7周半
- 太陽から地球までは？

Wikipedia より



電磁波の性質: 伝搬速度

- いわゆる**光速(speed of light)** $c = 299,792,458 \text{ m/s}$ (真空中)
- 日常的な感覚からするとものすごく速い、しかし有限
- 1秒に約30万km($3 \times 10^8 \text{ m}$)進む $\doteq$ 地球を7周半
- 太陽から地球までは？ 500秒=8分くらい.
- 太陽の表面から放たれた光を地球で見る場合、8分前の姿ということになる
- では、もっと遠く、宇宙の果てにある銀河からの光は？？

電磁波の性質: 周波数・波長

- 電磁波は電場・磁場の変動が振動して伝搬する現象、特徴的な周期を持つ
- 周波数(frequency) ν [Hz]:** 1秒あたりに振動する回数
- 波長(wavelength) λ [nm, Å, μm , ...]:** 1つの振動に対応する山+谷の長さ

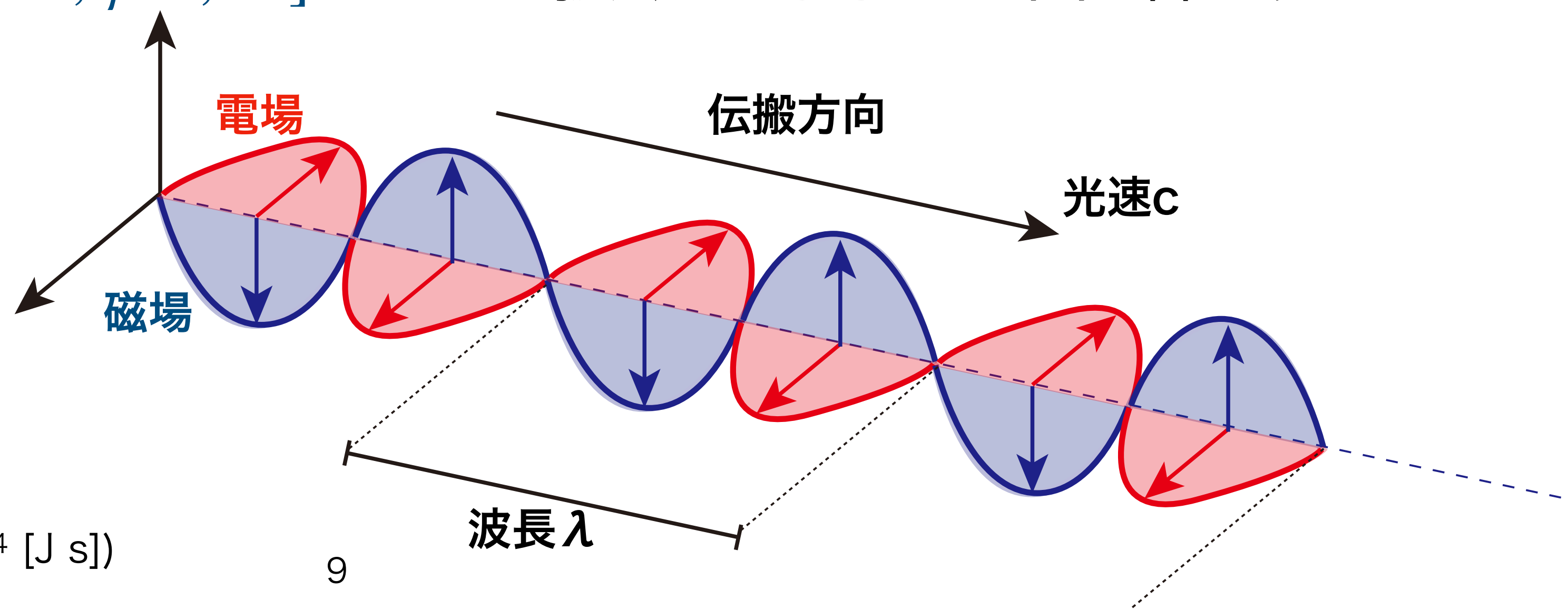
光の速さ

$$c = \lambda \nu$$

光子のエネルギー

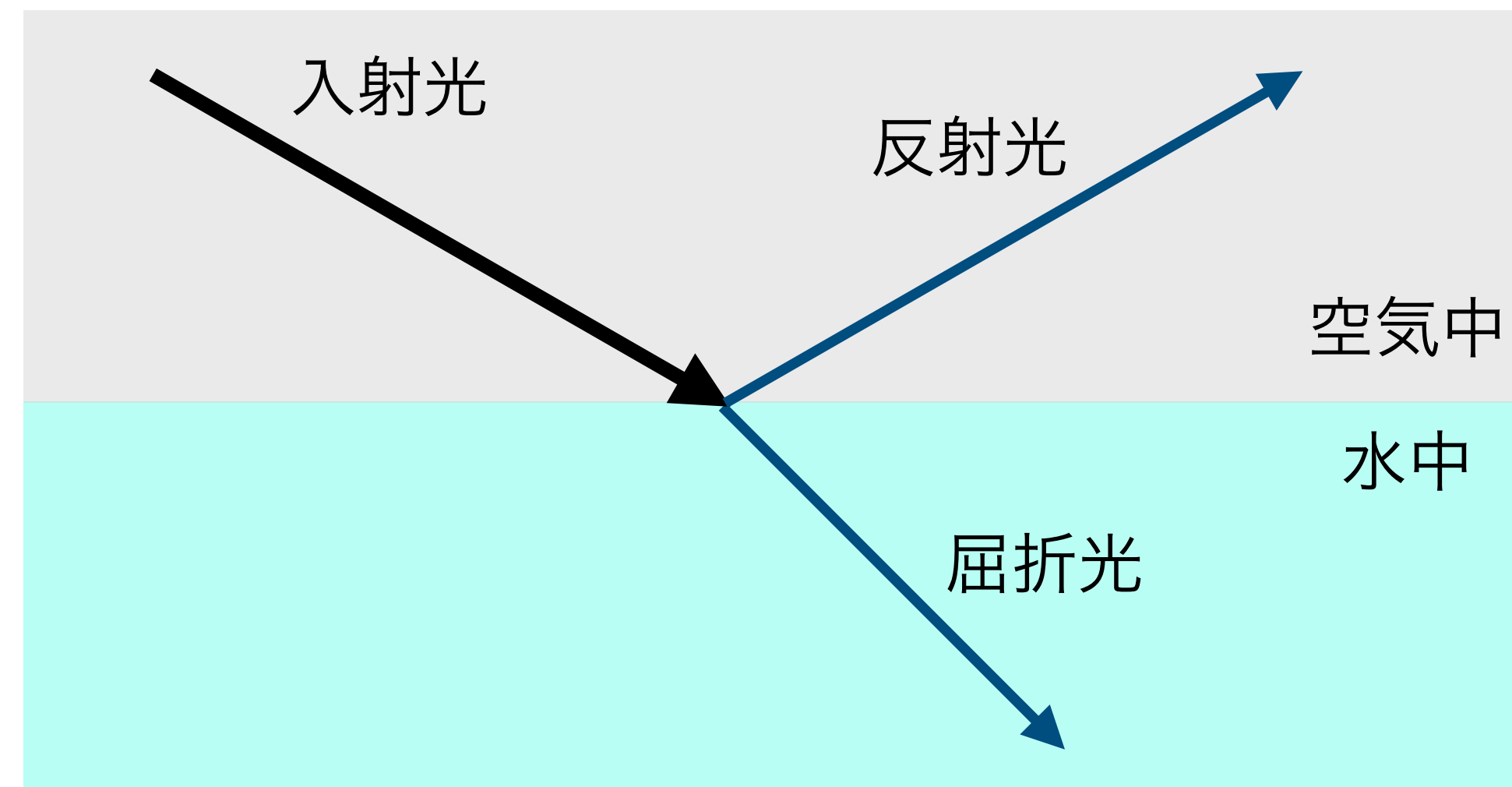
$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

h : プランク定数($=6.62607 \times 10^{-34}$ [J s])



電磁波の性質: 反射・屈折

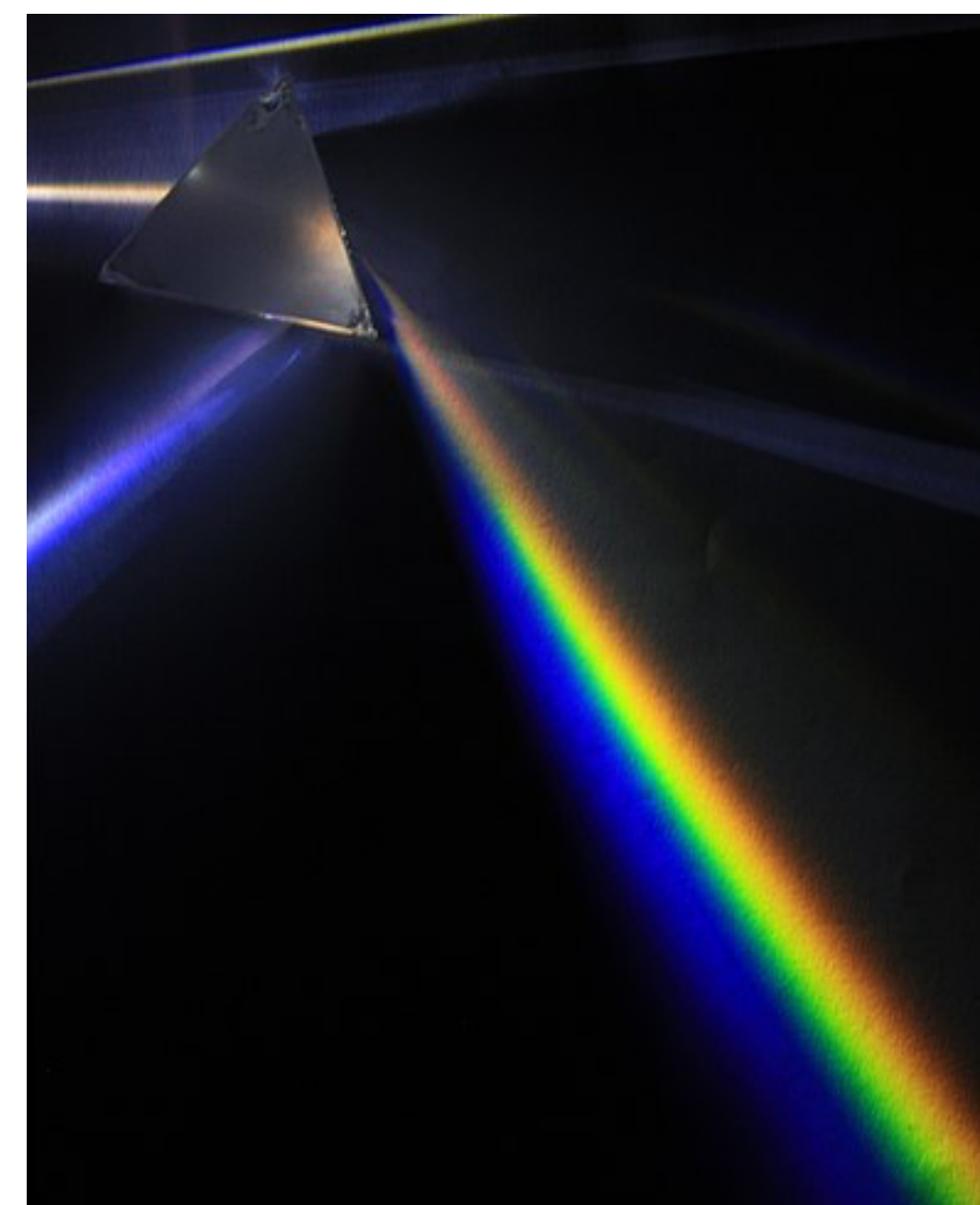
- ・ 電磁波は電場・磁場の変動が振動して伝搬する現象、特徴的な周期を持つ
- ・ 光はある媒質から別の媒質に進入すると(例えば空気中から水)折れ曲がる



電磁波の性質: 分光

- 光はいろんな波長(周波数)を持てる
- 波長の違いは色の違い
- ニュートンのプリズム実験
- 太陽光(無色)が虹色(赤橙黄緑青藍紫)に
- 太陽光には分解できる”成分”がある(**分光**)
- 波長・周波数の異なる光の集合

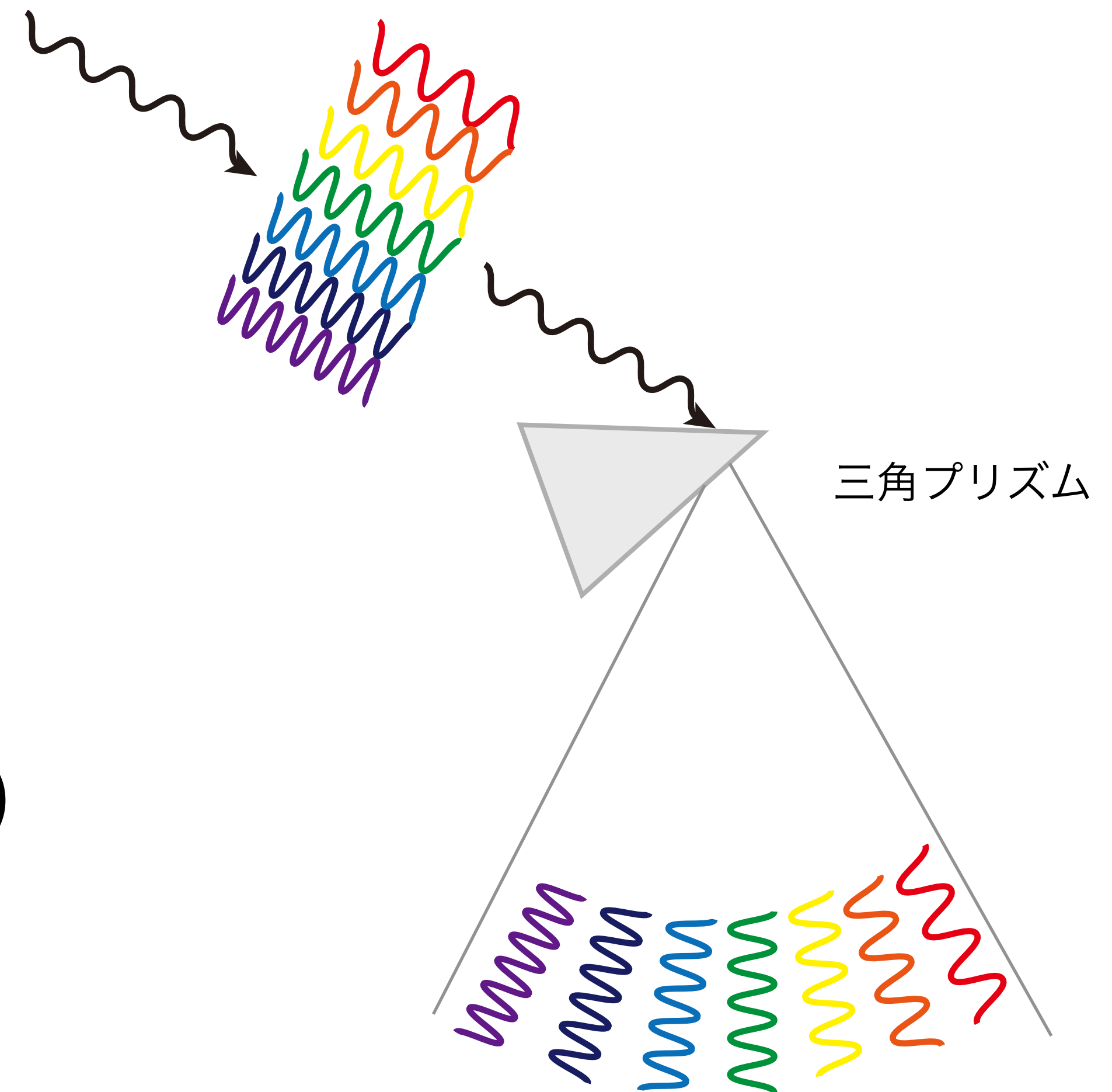
三角プリズム(Wikipedia)



プリズム分光(Wikipedia)

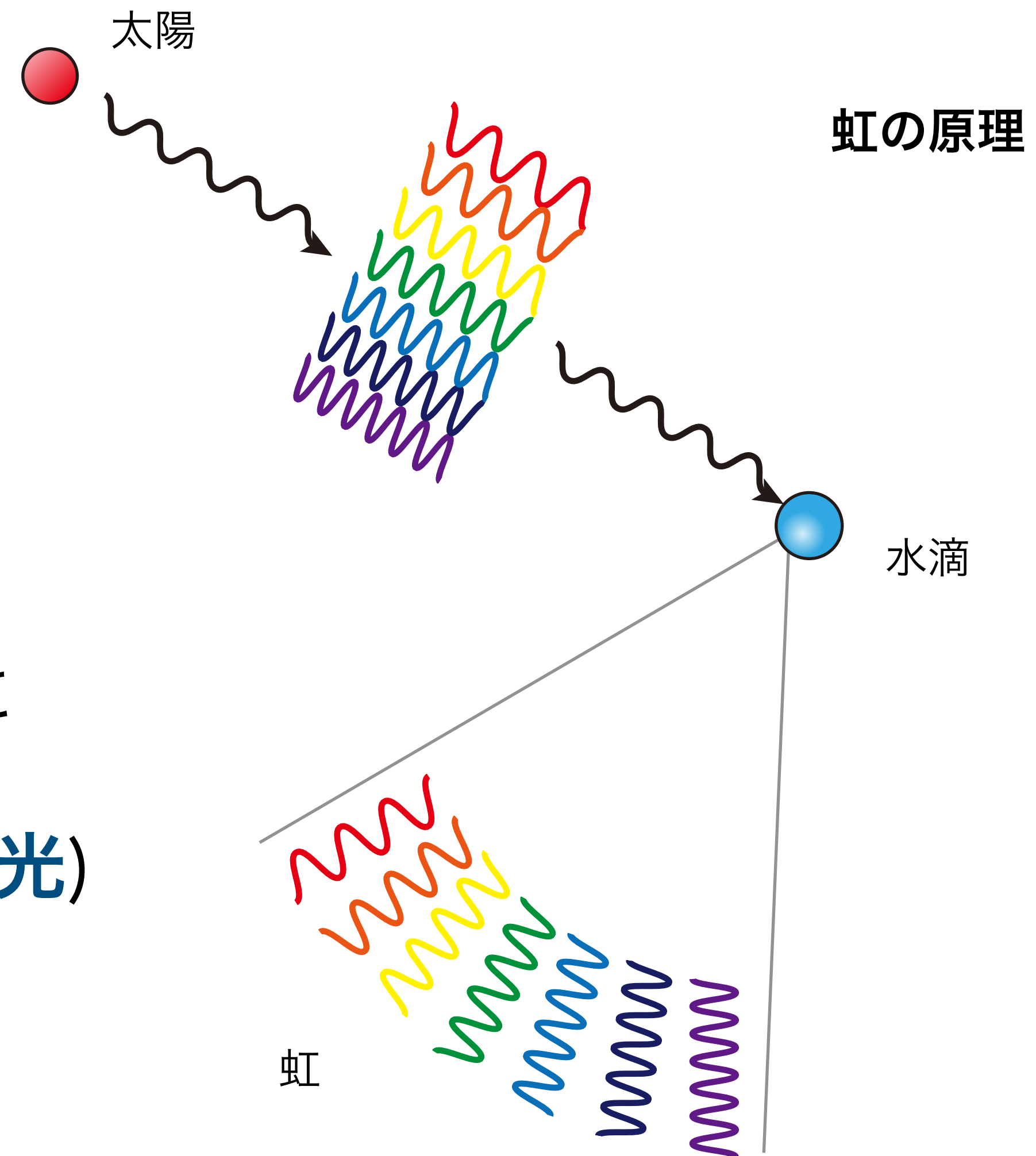
電磁波の性質: 分光

- 光はいろんな波長(周波数)を持てる
- 波長の違いは色の違い
- ニュートンのプリズム実験
- 太陽光(無色)が虹色(赤橙黄緑青藍紫)に
- 太陽光には分解できる”成分”がある(**分光**)
- 波長・周波数の異なる光の集合



電磁波の性質: 分光

- 光はいろんな波長(周波数)を持てる
- 波長の違いは色の違い
- ニュートンのプリズム実験
- 太陽光(無色)が虹色(赤橙黄緑青藍紫)に
- 太陽光には分解できる”成分”がある(**分光**)
- 波長・周波数の異なる光の集合



電磁波の波長帯とその名称

- ・ 可視光(optical・visible, 380-780nm)は電磁波のごく一部
- ・ 赤い可視光より長い波長の光: 赤外線(Infra-red・IR, $\sim \mu\text{m}$)
- ・ 紫の可視光より短い波長の光: 紫外線(Ultra-violet・UV, $\sim$ 数100nm)

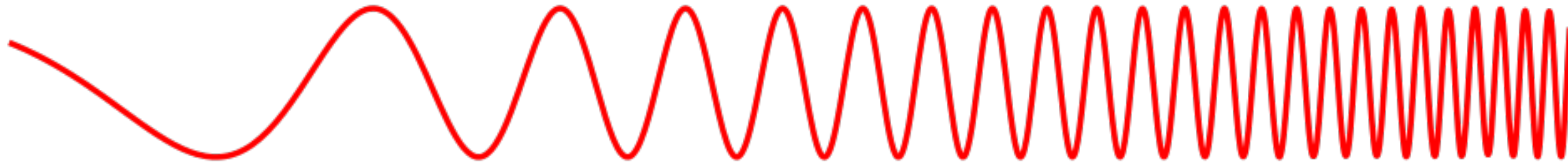
電磁波の波長帯とその名称

- ・ 可視光(optical・visible, 380-780nm)は電磁波のごく一部
- ・ 赤い可視光より長い波長の光: 赤外線(Infra-red・IR, $\sim\mu\text{m}$)
- ・ 紫の可視光より短い波長の光: 紫外線(Ultra-violet・UV, ~数100nm)
- ・ 赤外線よりさらに長い波長の光: 電波(radio)
- ・ 紫外線よりさらに短い波長の光: X線 (X-ray), ガンマ線 (γ -ray)

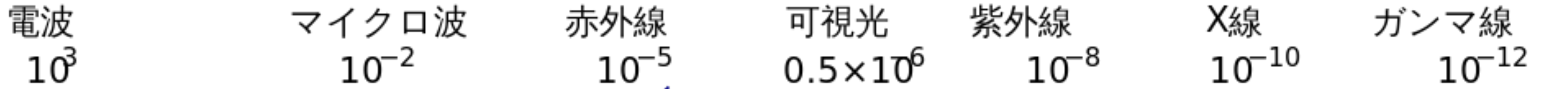
電磁波の波長帯とその名称

Wikipedia より

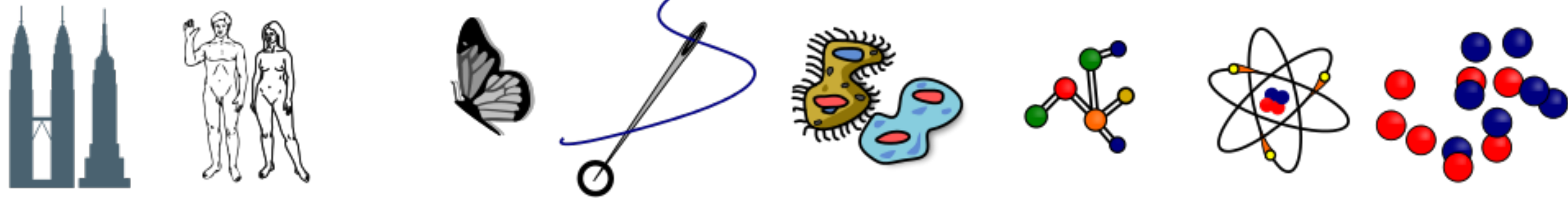
地球の大気を
透過できるか?



電磁波の種類
波長(m)

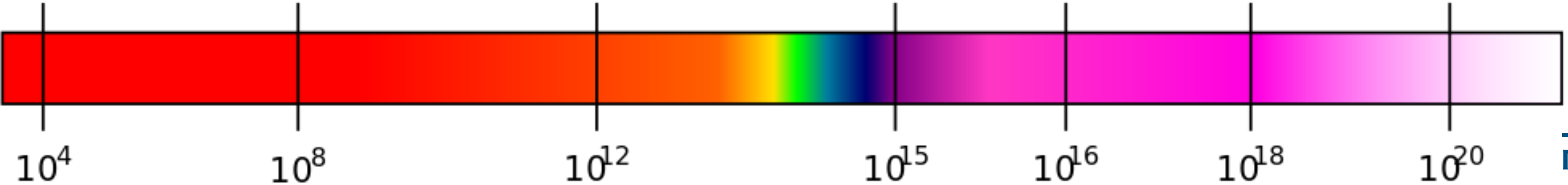


波長の
およその大きさ



建築物 人間 チョウ 針の先端 原生動物 分子 原子 原子核

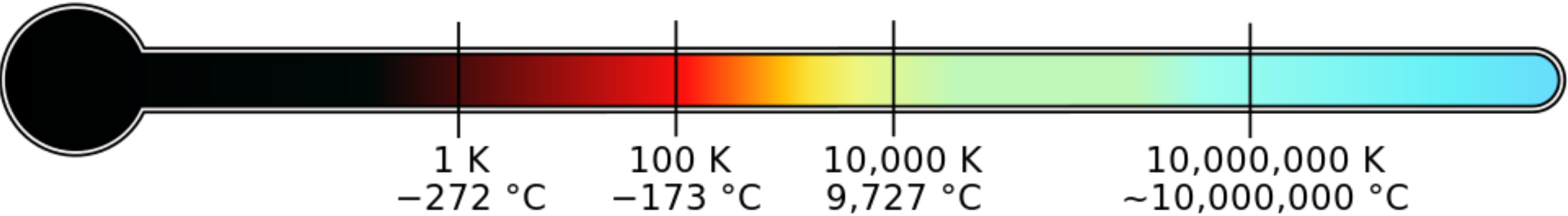
周波数 (Hz)



低エネルギー

高エネルギー

その波長の光を
強く発している
物体の温度

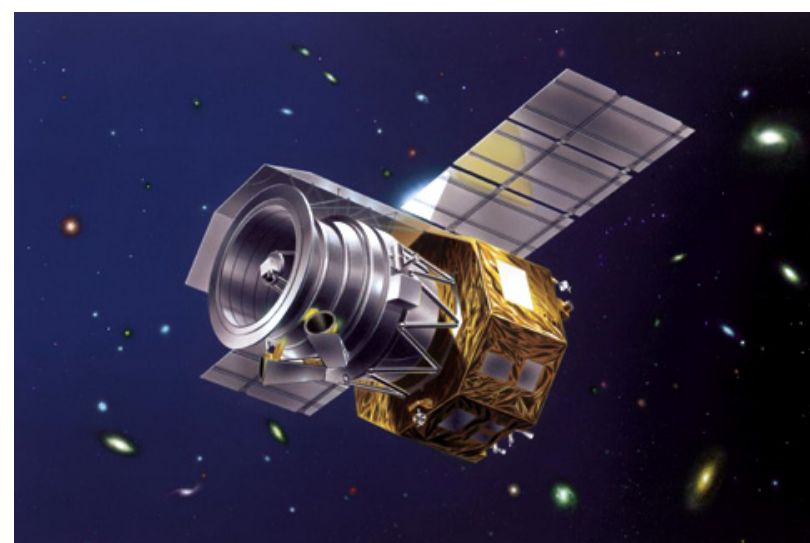


電磁波の波長帯とその名称

- ・ それぞれ異なる特徴を持つ電磁波、観測装置や原理も異なる
- ・ 異なる天体現象あるいは同一の天体の異なる姿を描き出す



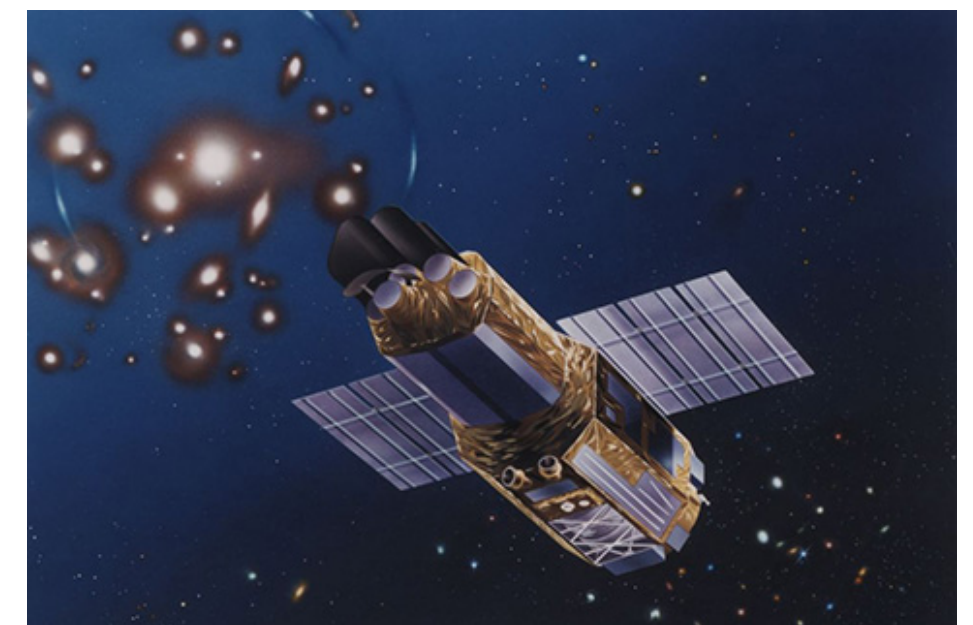
アルマ望遠鏡(電波): 国立天文台



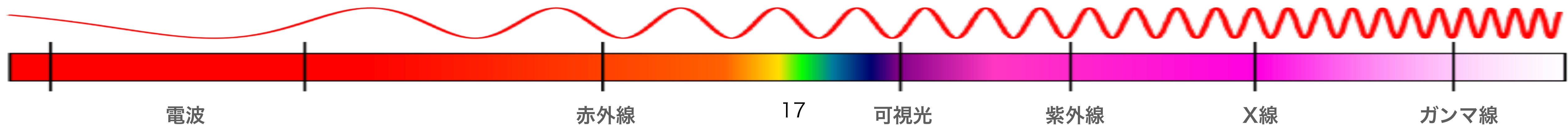
あかり衛星(赤外線): JAXA



すばる望遠鏡(可視光): 国立天文台



すざく衛星(X線): JAXA

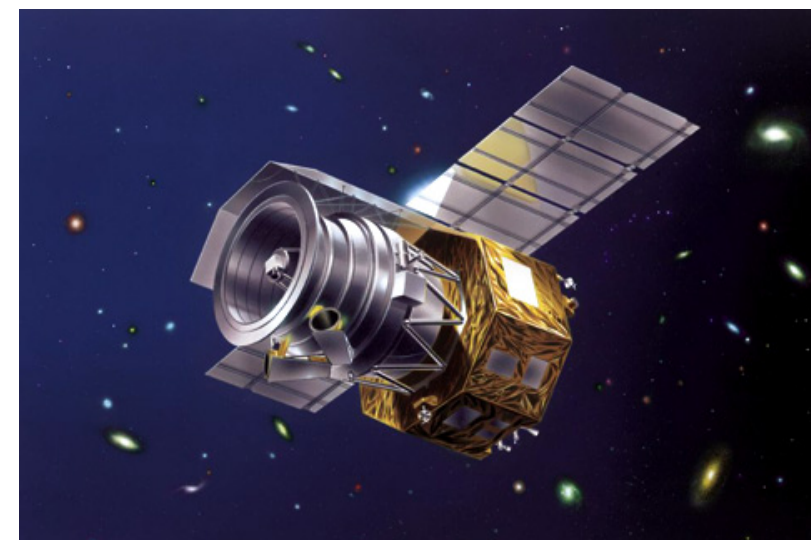


電磁波の波長帯とその名称

- ・ 現代天文学は、様々な波長での天体情報を総合して発展している
- ・ 多波長天文学(multi-wavelength astronomy)



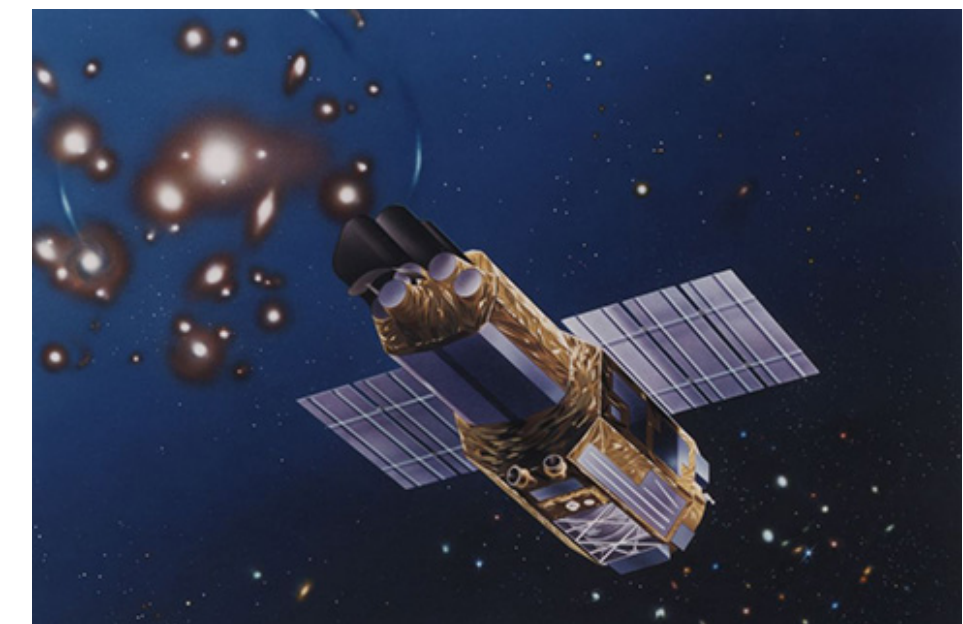
アルマ望遠鏡(電波): 国立天文台



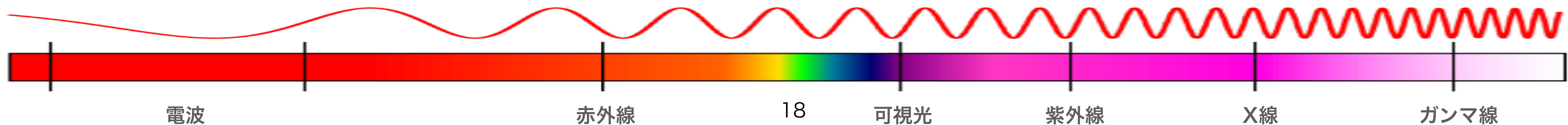
あかり衛星(赤外線): JAXA



すばる望遠鏡(可視光): 国立天文台

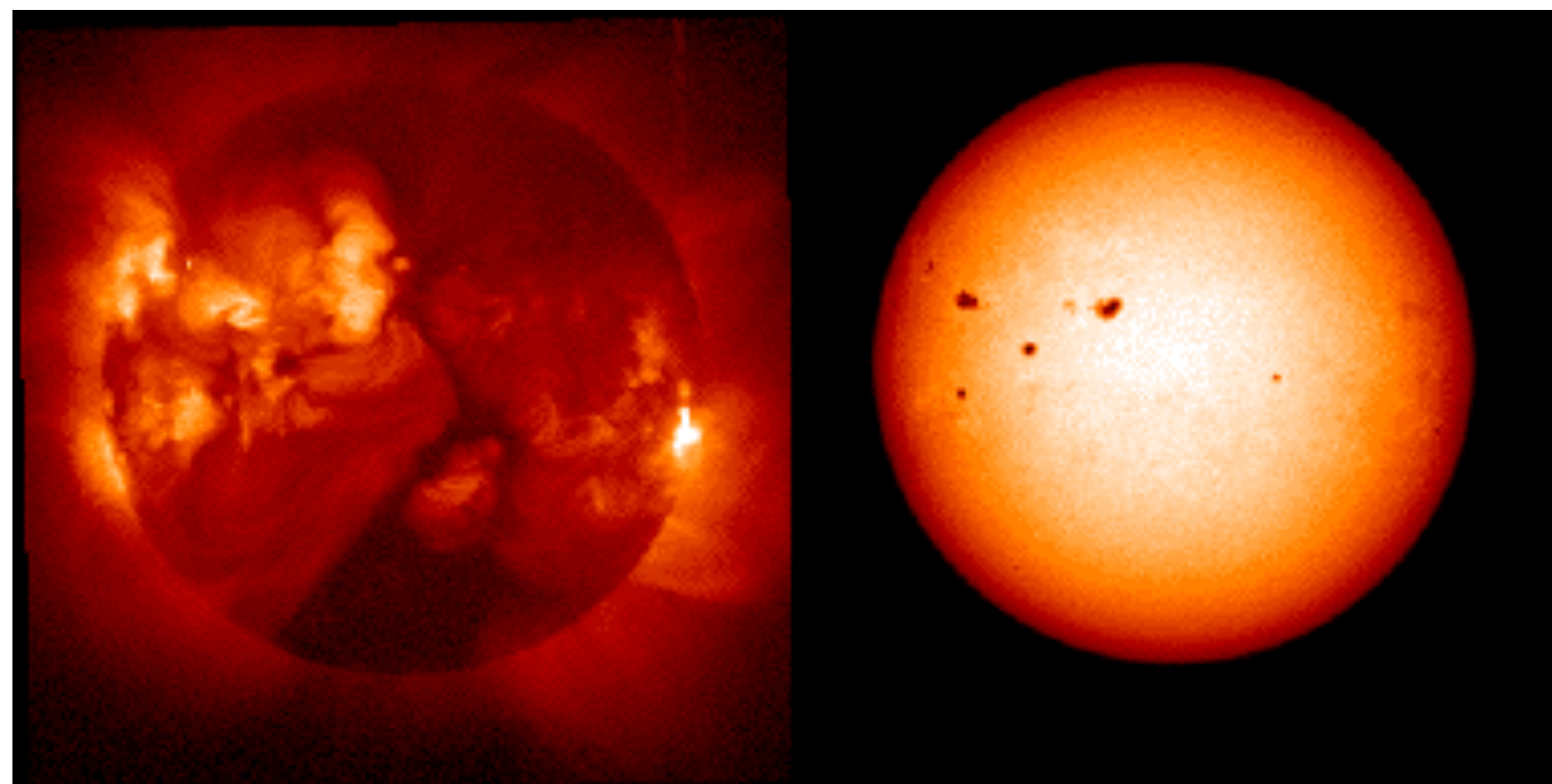


すざく衛星(X線): JAXA

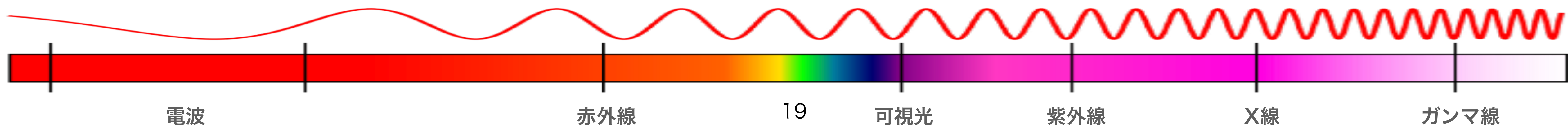


電磁波の波長帯とその名称

- 現代天文学は、様々な波長での天体情報を総合して発展している
- 多波長天文学(multi-wavelength astronomy)



太陽のX線(左)と白色光(右)での姿
credit: Montana State Univ., Solar physics
<http://solar.physics.montana.edu>

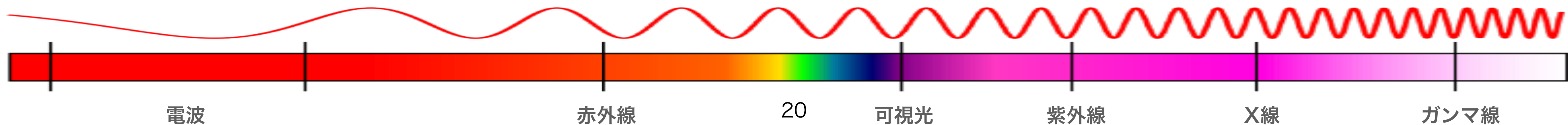
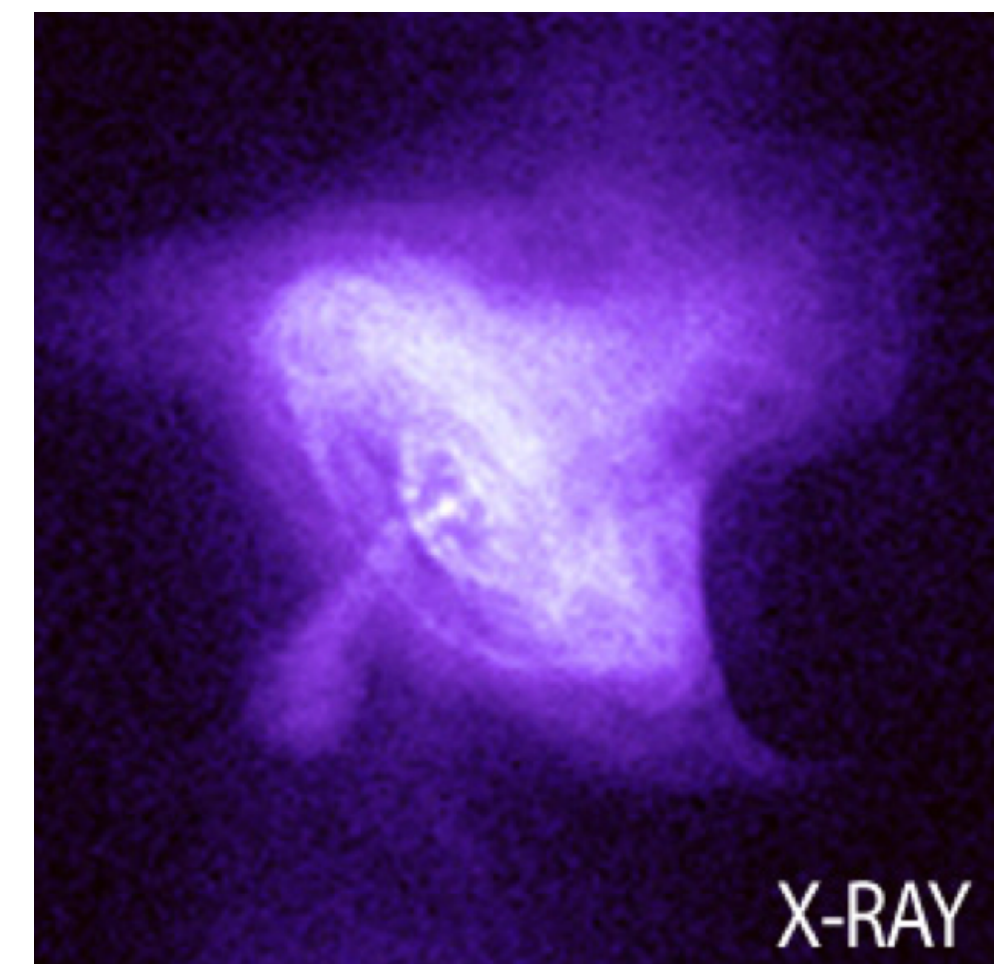
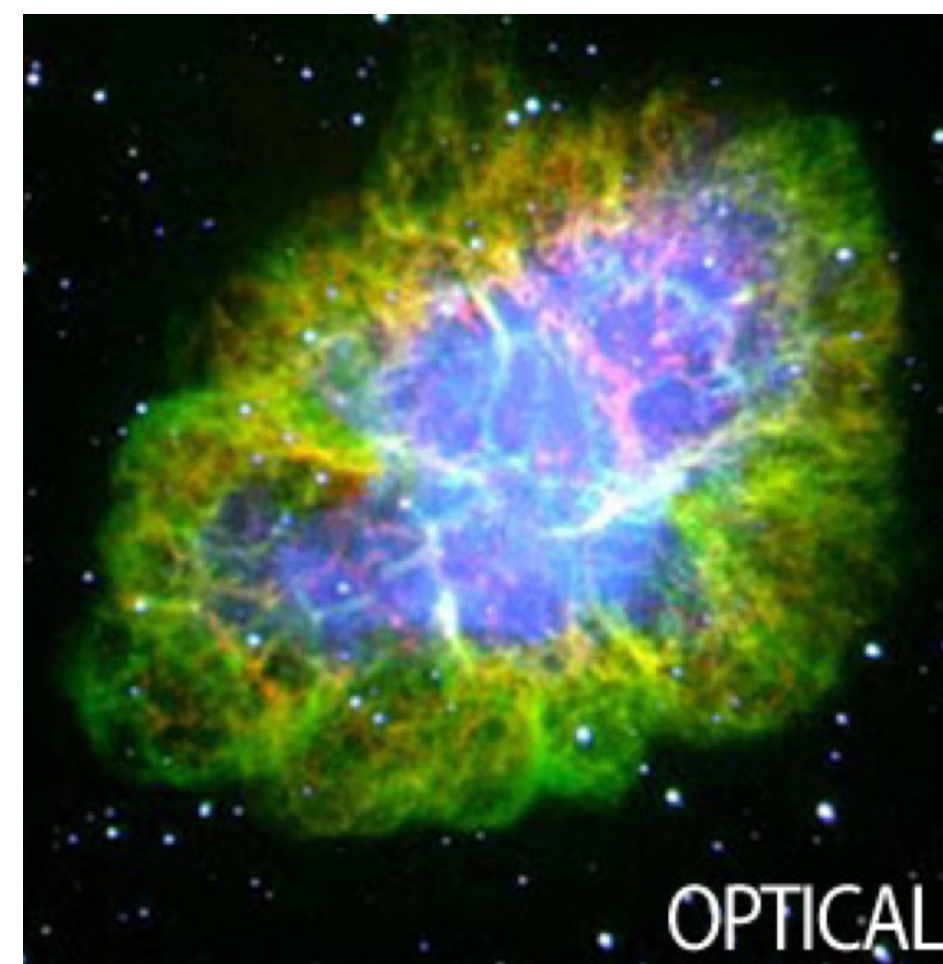
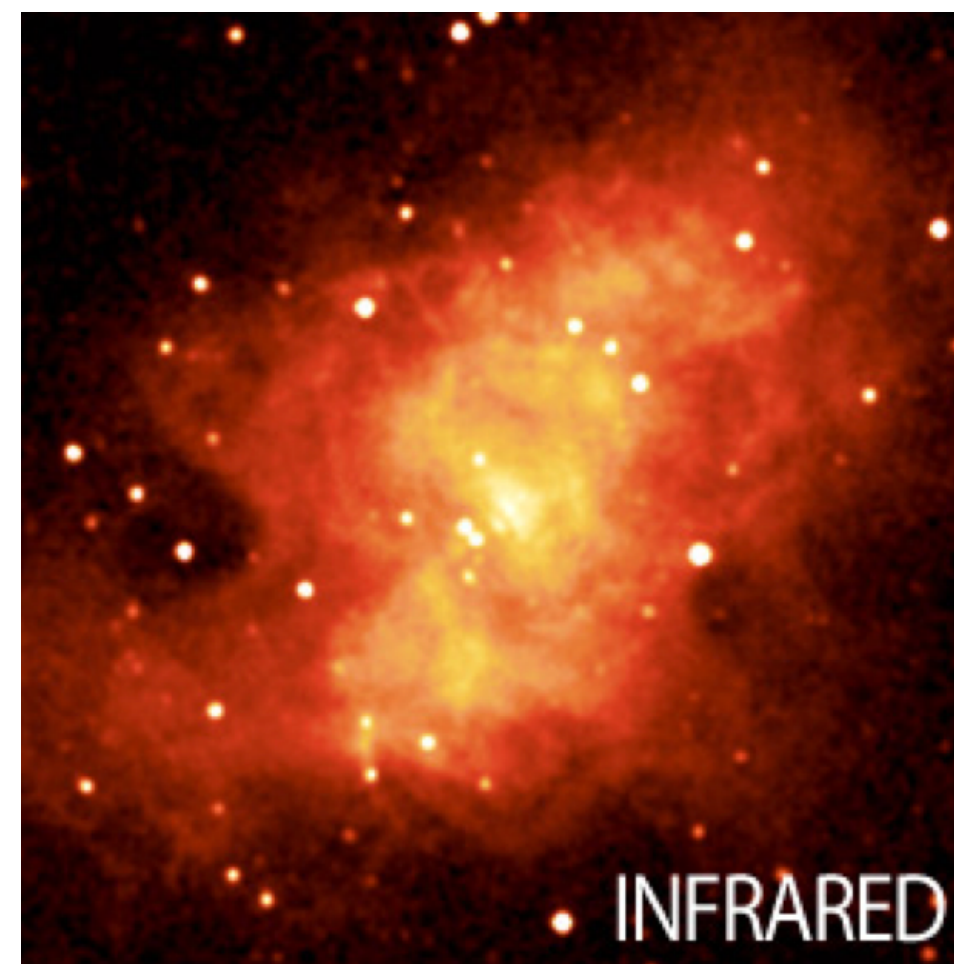
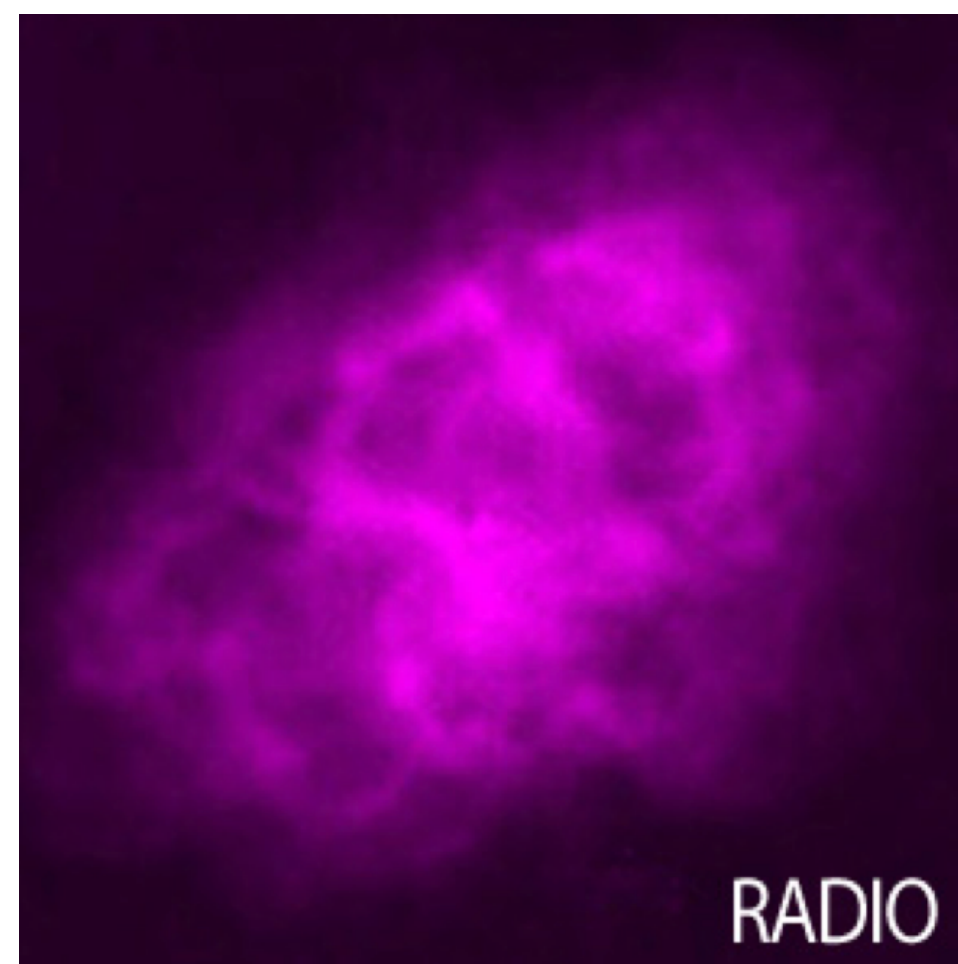


電磁波の波長帯とその名称

- 現代天文学は、様々な波長での天体情報を総合して発展している

- 多波長天文学(multi-wavelength astronomy)**

かに星雲の異なる波長での姿
credit: Chandra Education Data
Analysis Software And Activities



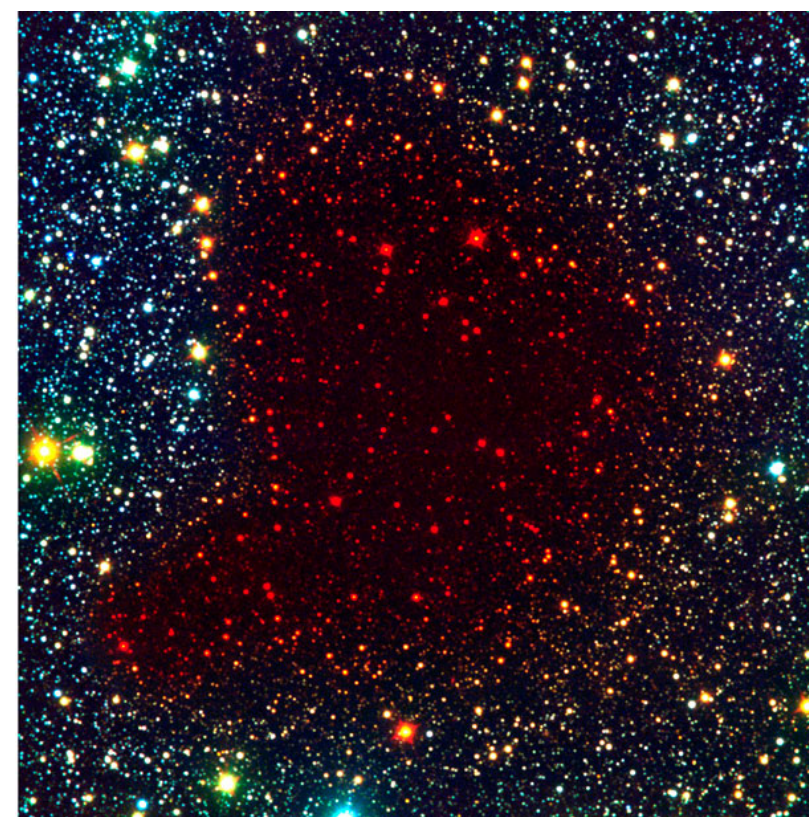
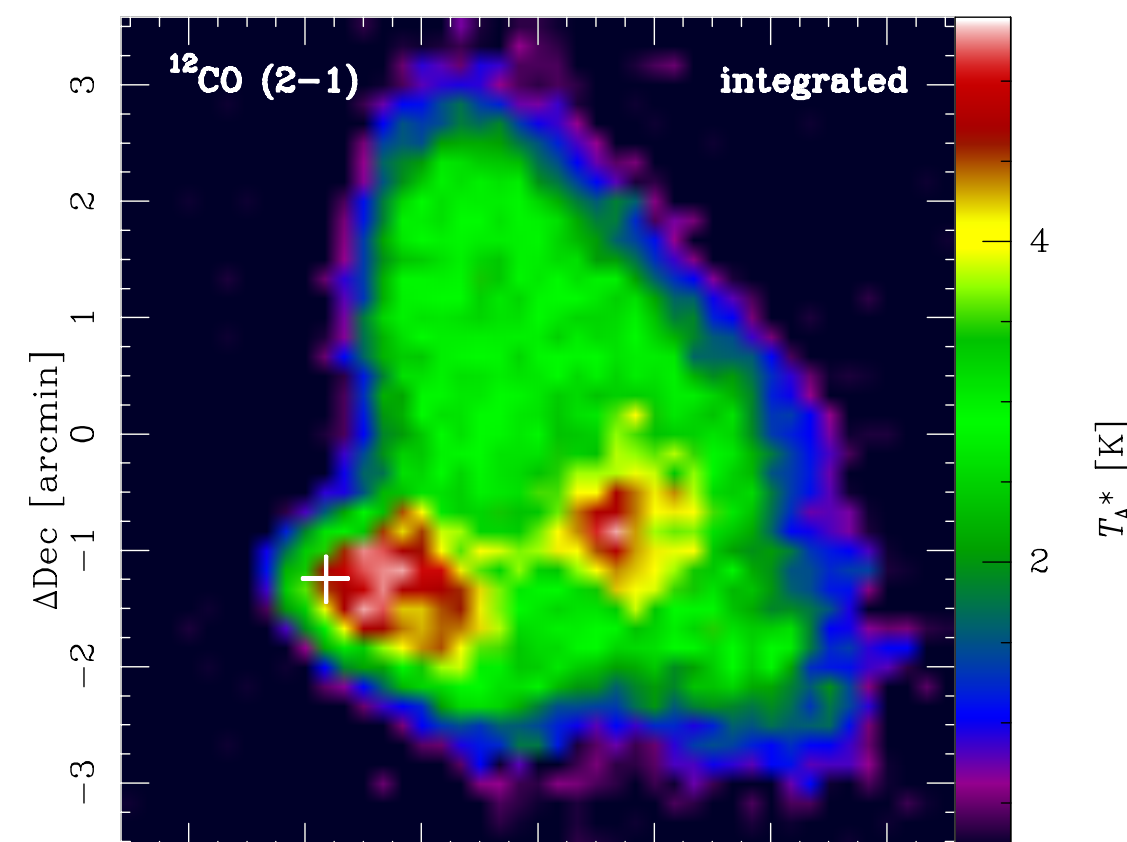
電磁波の波長帯とその名称

- 現代天文学は、様々な波長での天体情報を総合して発展している

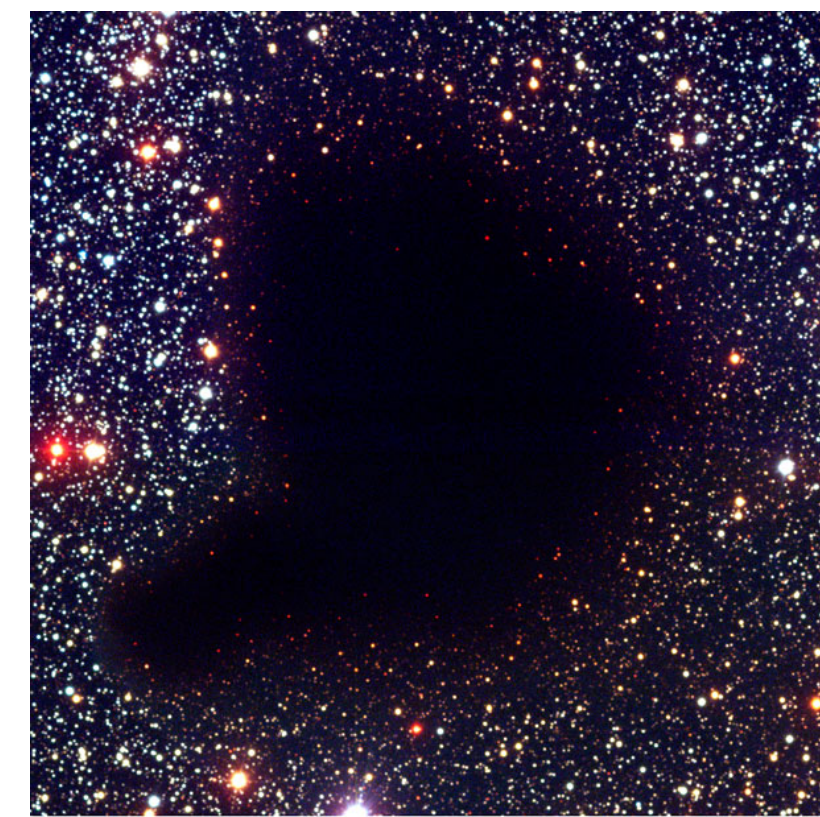
- 多波長天文学(multi-wavelength astronomy)

M. Nielbock et al. (2012) A&A, 547, A11

<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201219139>



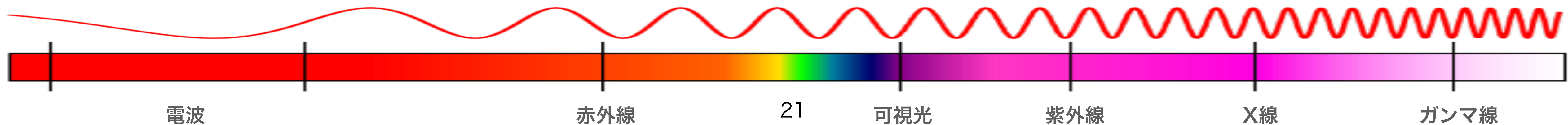
B, I, K



B, V, I

暗黒星雲B68の電波,赤外,可視光での姿
credit: ESO

<https://www.eso.org/public/images/eso0102c/>



電磁波以外の観測手段

- ニュートリノ (neutrino・ ν) : 弱い相互作用をする素粒子, 第12回
- 重力波 (gravitational wave・GW): 時空のゆがみが伝搬する現象, 第13回
- 宇宙線 (cosmic-rays・CRs)

→ マルチメッセンジャー天文学
(multi-messenger astronomy)

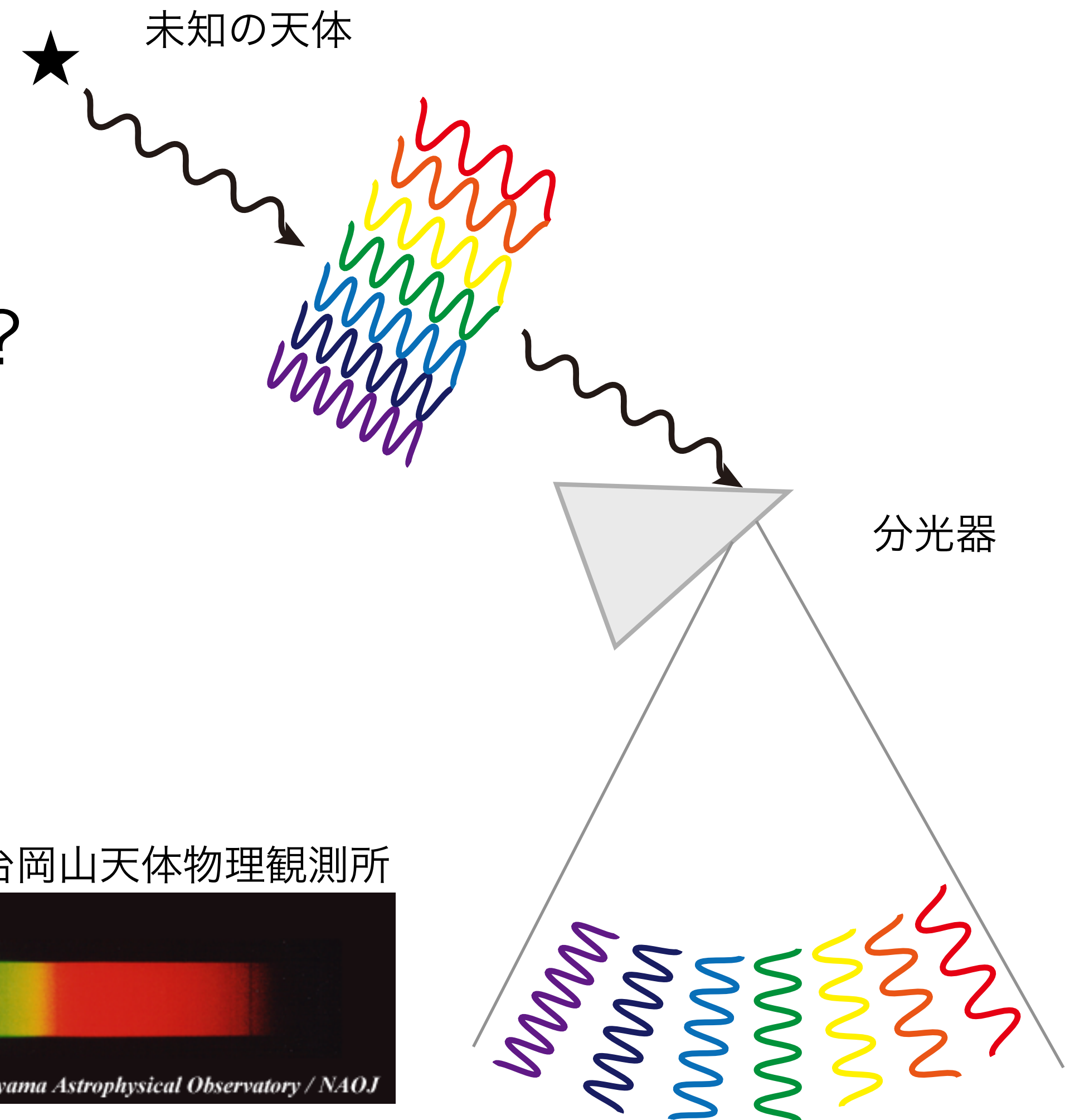
第2回:

電磁波による宇宙の観測

- ・ 電磁波(可視赤外光・電波・X線ガンマ線)とその特徴
- ・ 天体スペクトルと黒体放射
- ・ 原子・分子による吸収や輝線放射
- ・ (光のドップラー効果)

天体は光る: 天体スペクトル

- ・ 天体からの光(電磁波)は情報の宝庫
- ・ 天体からの光をプリズムで分解すると？



credit: 国立天文台岡山天体物理観測所

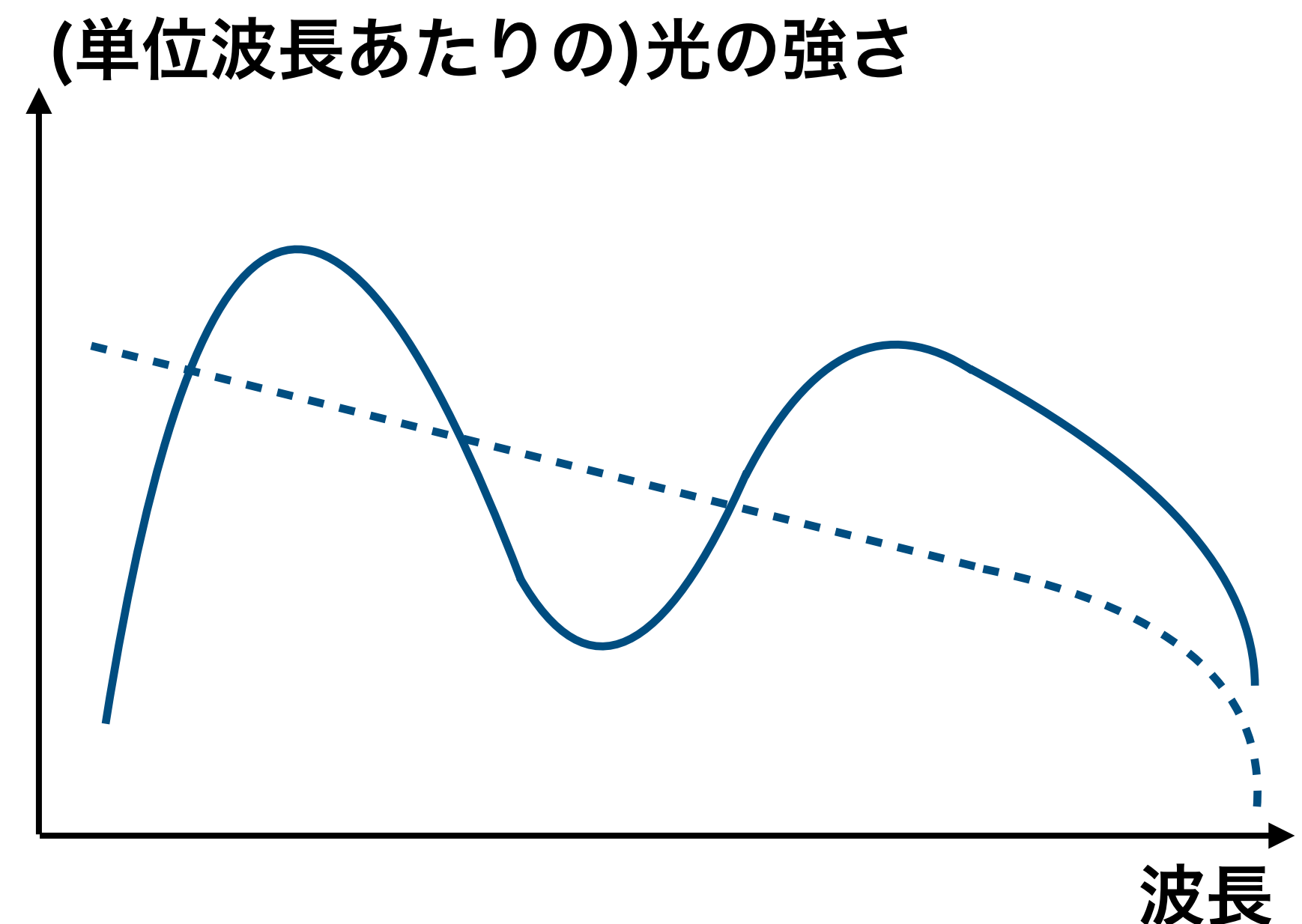
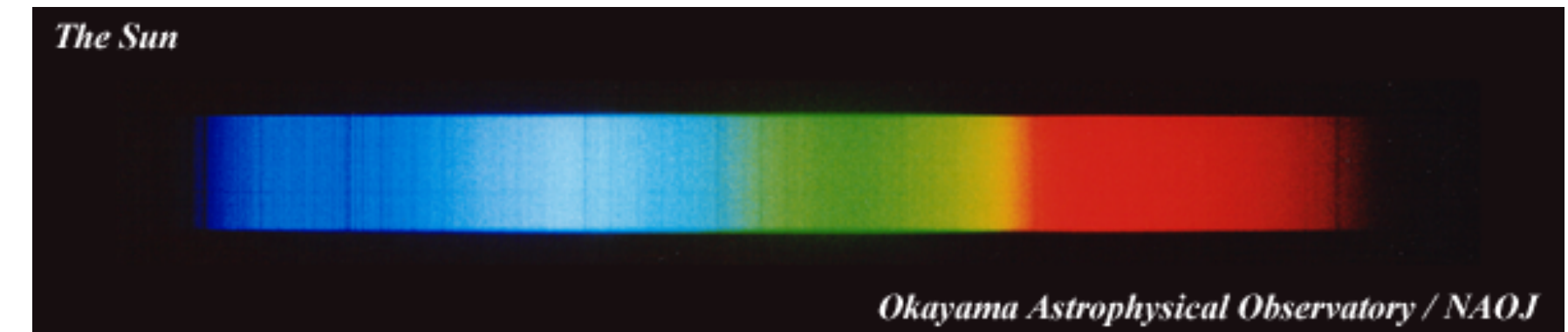


天体は光る: 天体スペクトル

- 天体からの光(電磁波)は情報の宝庫
- 天体からの光をプリズムで分解すると？
- どの波長(周波数)の光が強いのか？
→ **スペクトル(spectrum) F_λ or F_ν**
- 天体ごとに特徴的なスペクトルを持つ
→ 分類できないか？

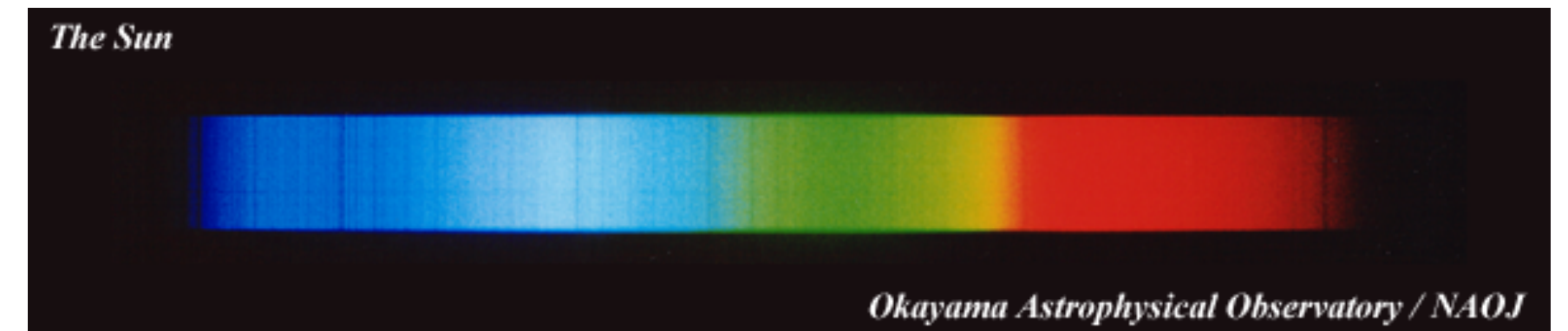
分光観測(spectroscopy)

credit: 国立天文台岡山天体物理観測所

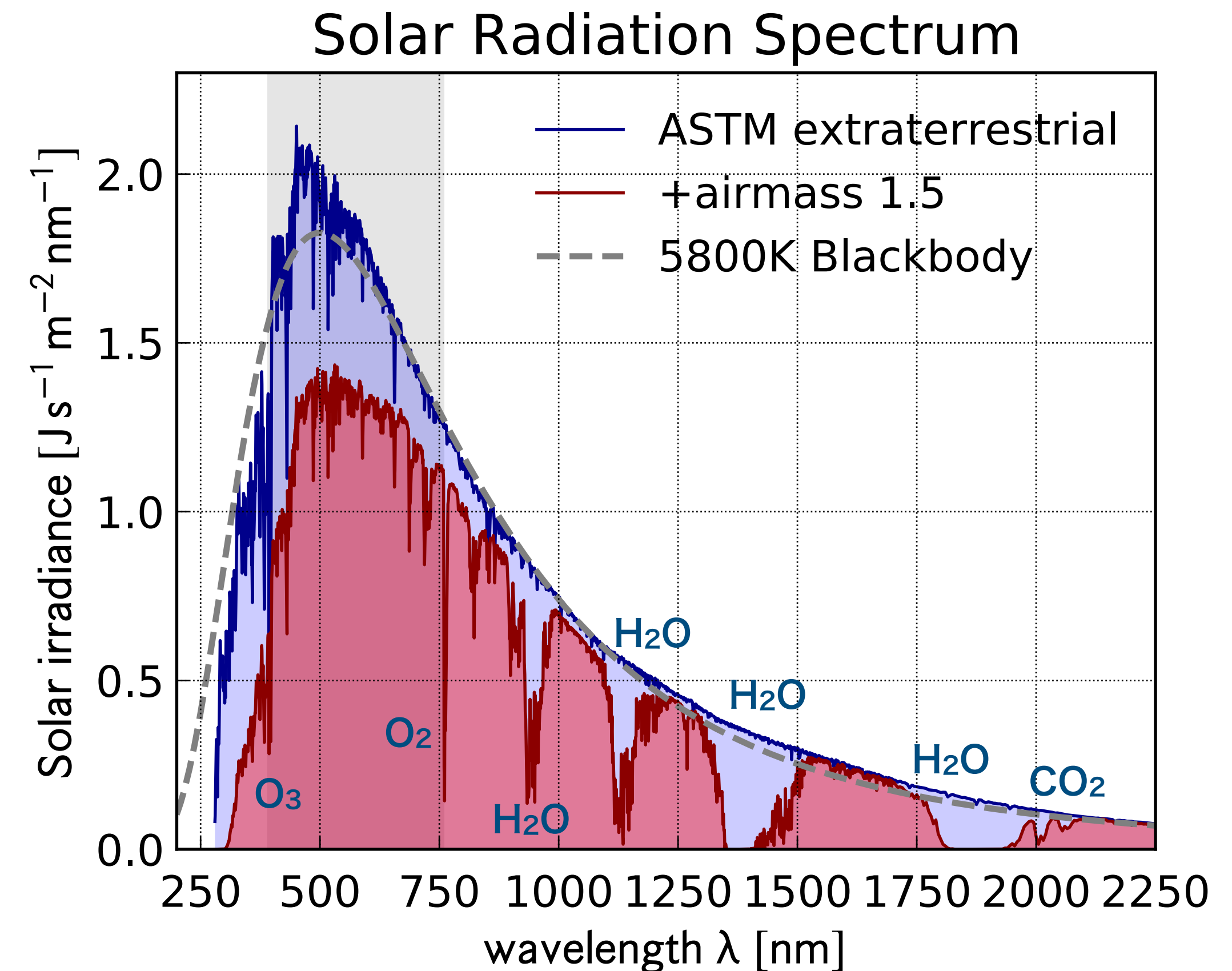


スペクトルの形はどうやって決まる？

credit: 国立天文台岡山天体物理観測所



- 例: 太陽のスペクトル
- ある波長にピークを持った形
- 実は温度を反映している
- 有限温度を持った(光学的に厚い)物体からの放射: **黒体放射(blackbody radiation)**
- そのスペクトルは**プランク関数(Planck function)**で表される



The American Society for Testing and Materials (ASTM) G-173 spectra

大気上空(青)と海拔0m(赤)での太陽スペクトル

あらゆる物体は光る: 黒体放射

$$T[\text{K}] = 273.15 + T[^\circ\text{C}]$$

- 温度 T [K] の物体からの放射 (量子統計力学)

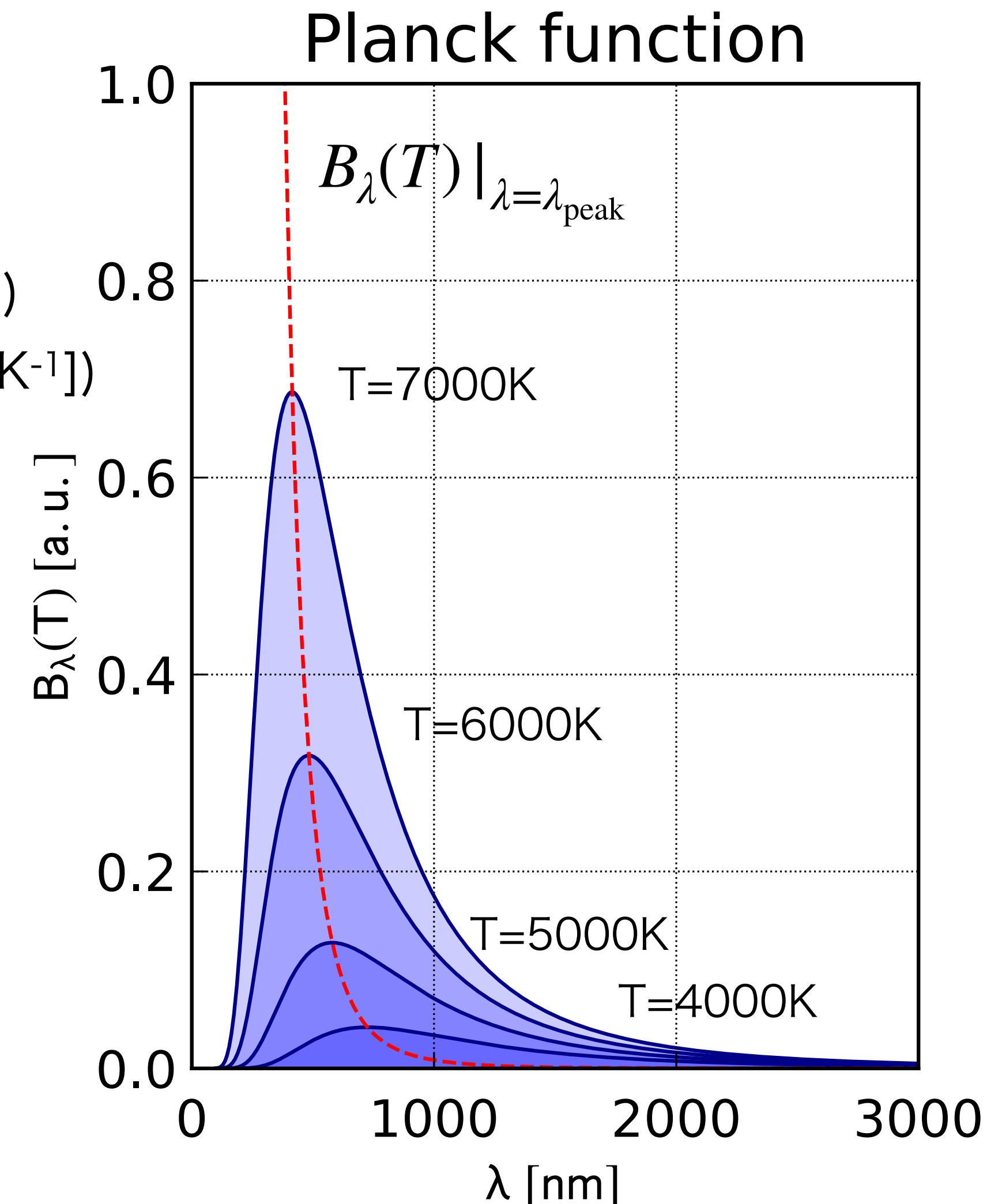
- プランク関数の関数形: h : プランク定数 ($=6.62607 \times 10^{-34}$ [J s])
 k_B : ボルツマン定数 ($=1.3806 \times 10^{-23}$ [J K $^{-1}$])

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/k_B T} - 1} \quad \text{or} \quad B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/(\lambda k_B T)} - 1}$$

- 温度のみの関数: ピークは温度が決める

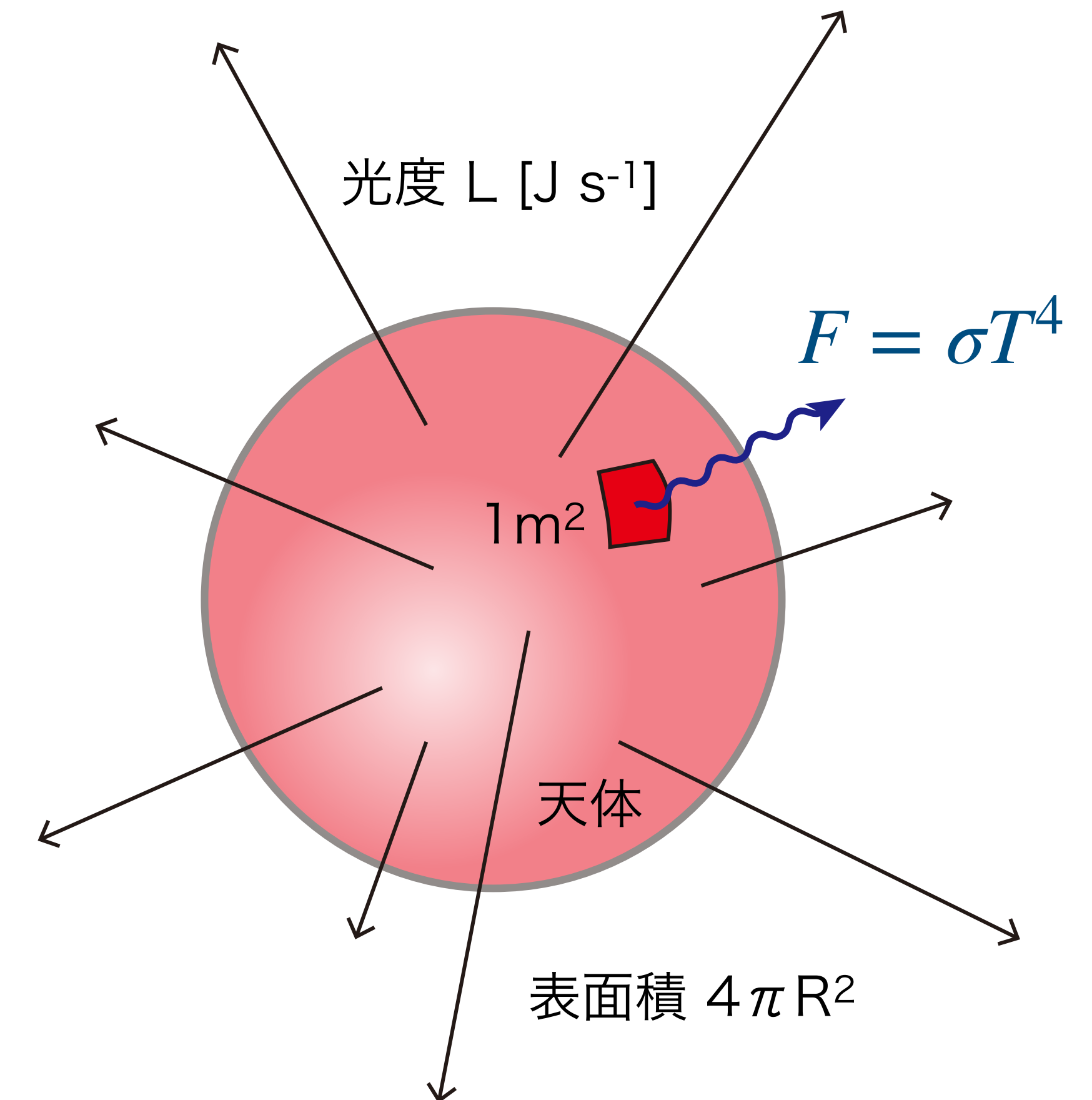
- ウィーンの変位則 (Wien's displacement law):**

$$\lambda_{\text{peak}} = \frac{2.9 \times 10^6}{T[\text{K}]} \text{ [nm]}$$



あらゆる物体は光る：黒体放射

- 温度を持った球体(半径 R)から単位時間に出てくる放射エネルギー：光度 $L [\text{J s}^{-1}]$
- 表面積 $4\pi R^2 [\text{m}^2]$ × 単位表面積あたりのエネルギー流量 $F [\text{J s}^{-1} \text{m}^{-2}]$
- シュテファン=ボルツマンの法則(Stefan-Boltzmann's law): $F = \sigma T^4$
- 定数 $\sigma = 5.670374419 \times 10^{-8} [\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}]$



- 光度・温度・半径の関係:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

あらゆる物体は光る：黒体放射

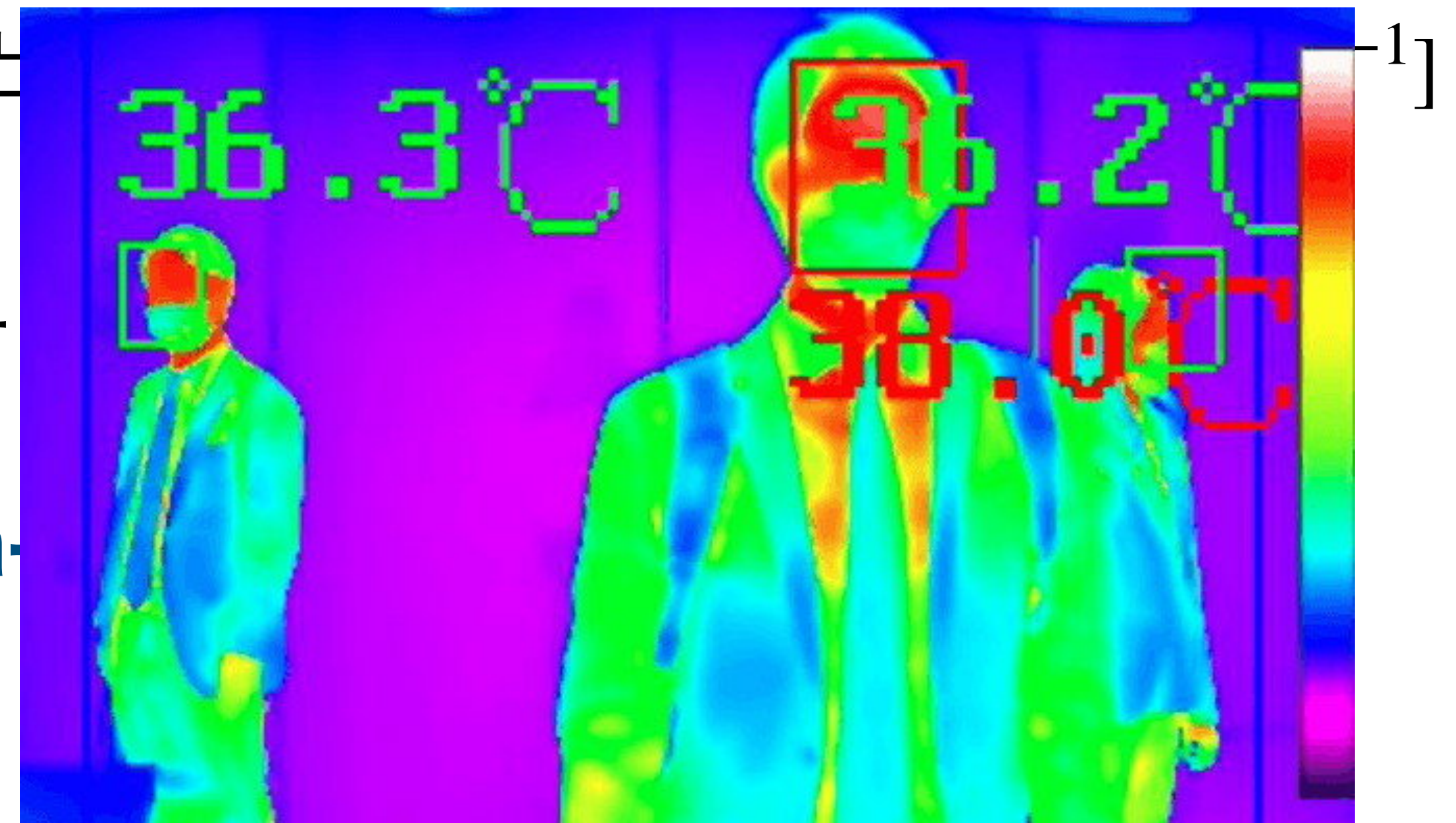
- ・ どのくらいのエネルギーが放射として出てきているか？

- ・ 温度を持つ

- ・ 表面積 $4\pi R^2$

- ・ シュテファ

- ・ 定数 $\sigma = 5.6$

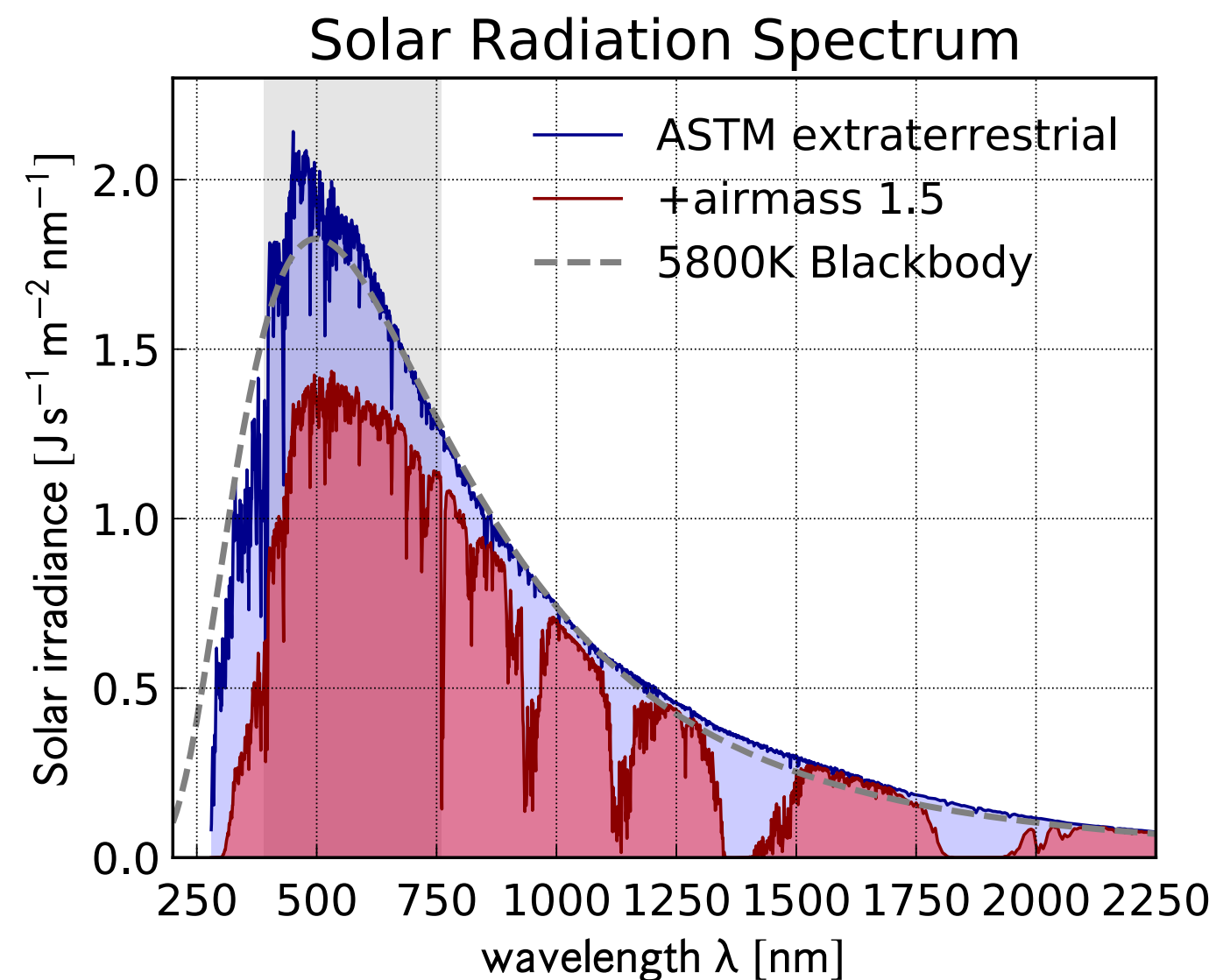


アイリスオーヤマ サーモカメラ

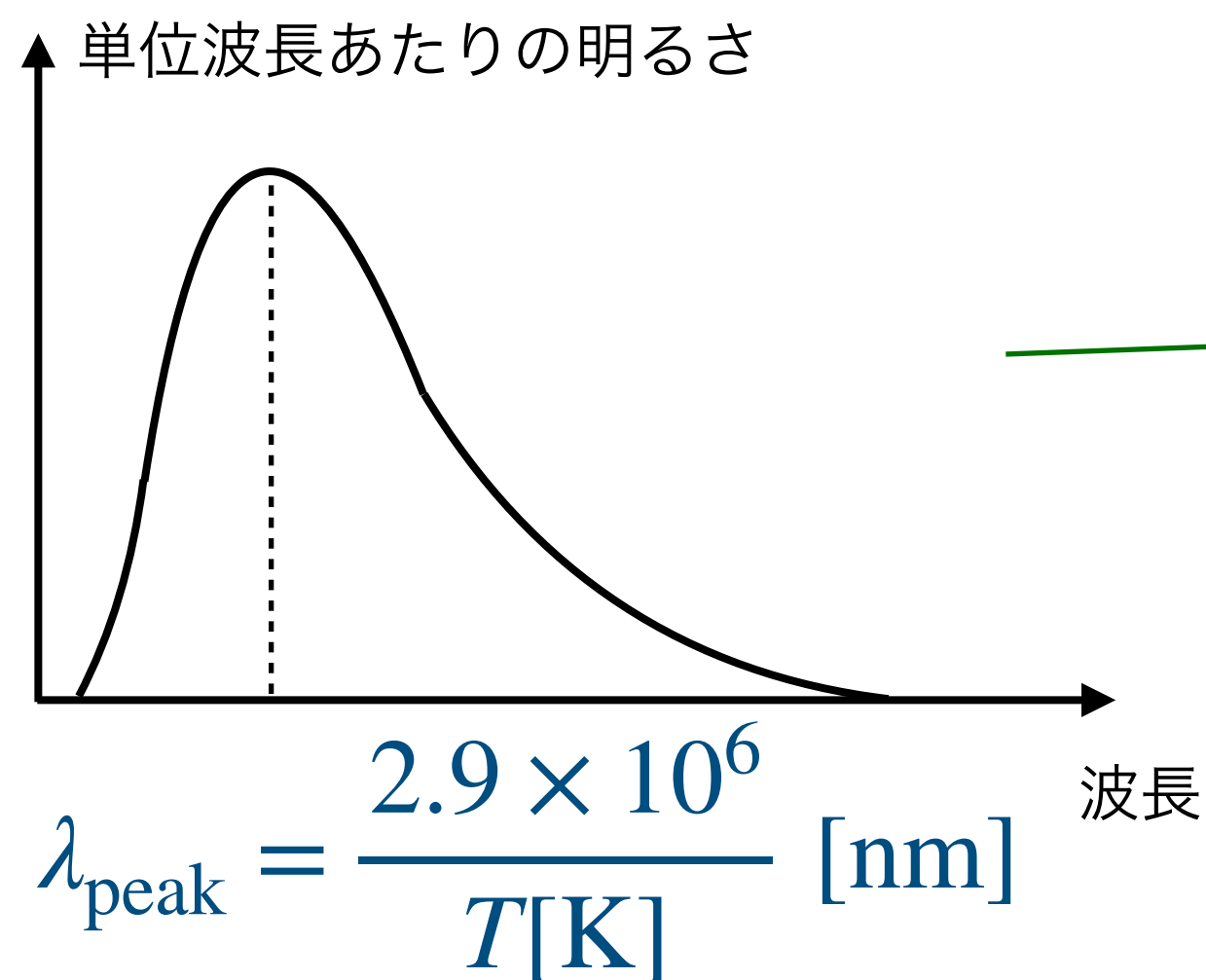
- ・ 星の光度: $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$

<https://www.itmedia.co.jp/news/articles/2004/15/news082.html>

星からの黒体放射まとめ



黒体放射スペクトル



放射スペクトル: $B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{h/(\lambda k_B T)} - 1}$

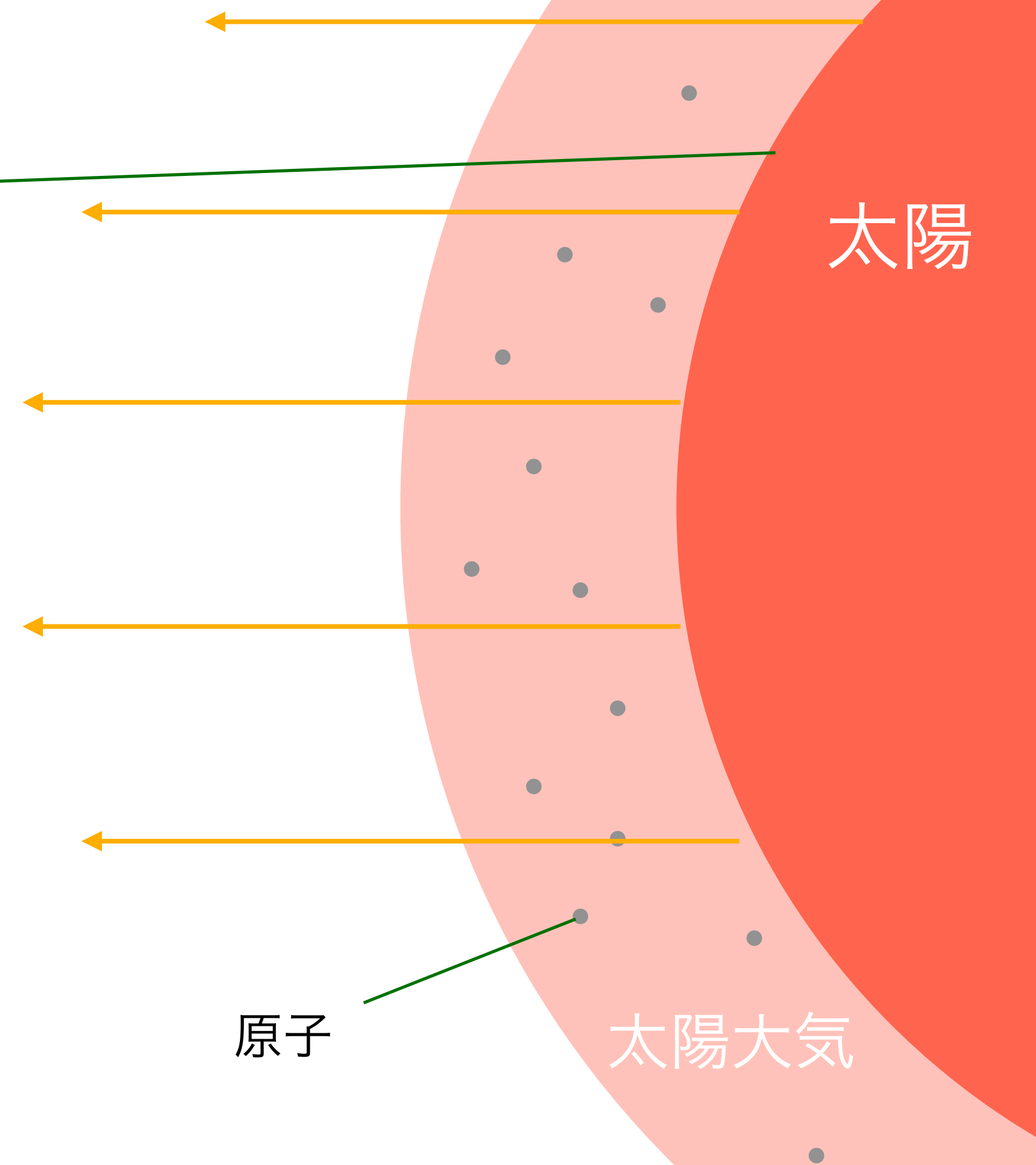
Wienの変位則

Planck関数

放射エネルギー流束: $F = \int B_{\lambda}(T) d\lambda d\Omega = \sigma T^4$

Stefan=Boltzmannの法則

光度: $L = 4\pi R^2 F = 4\pi R^2 \sigma T^4$



第2回:

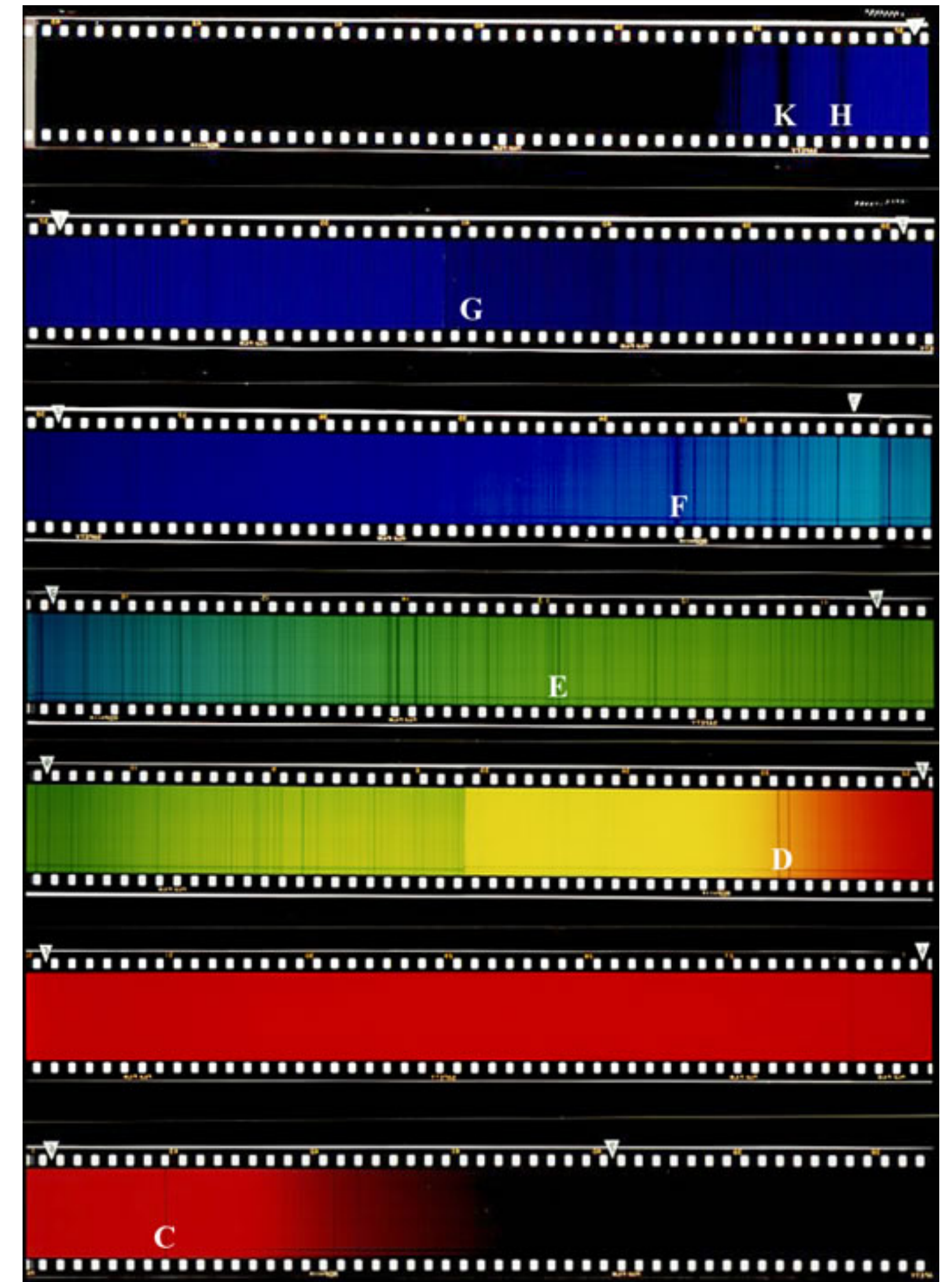
電磁波による宇宙の観測

- ・ 電磁波(可視赤外光・電波・X線ガンマ線)とその特徴
- ・ 天体スペクトルと黒体放射
- ・ 原子・分子による吸収や輝線放射
- ・ (光のドップラー効果)

太陽スペクトルの吸収線

credit: 国立天文台乗鞍観測所

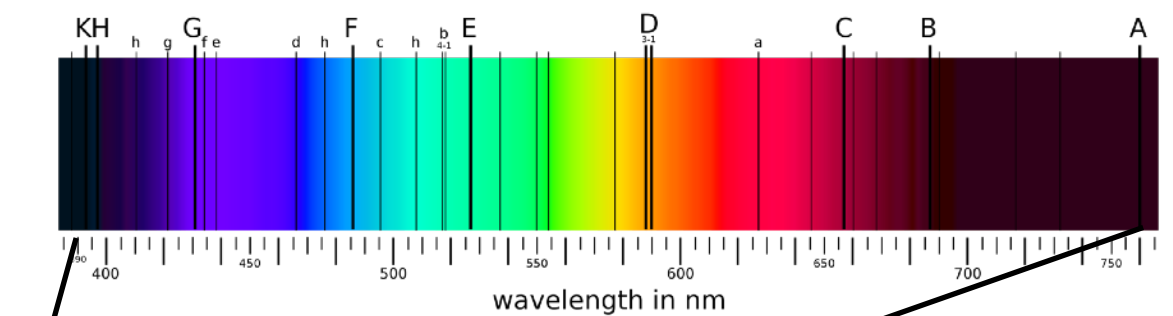
- 太陽の可視光スペクトルには暗い部分(暗線)が見える: その波長だけ光が弱い
- **フラウンホーファー線(Fraunhofer lines)**
- 太陽大気に含まれる原子(Na,Ca,...) + 地球大気に含まれる分子が**特定の波長の光を吸収する**



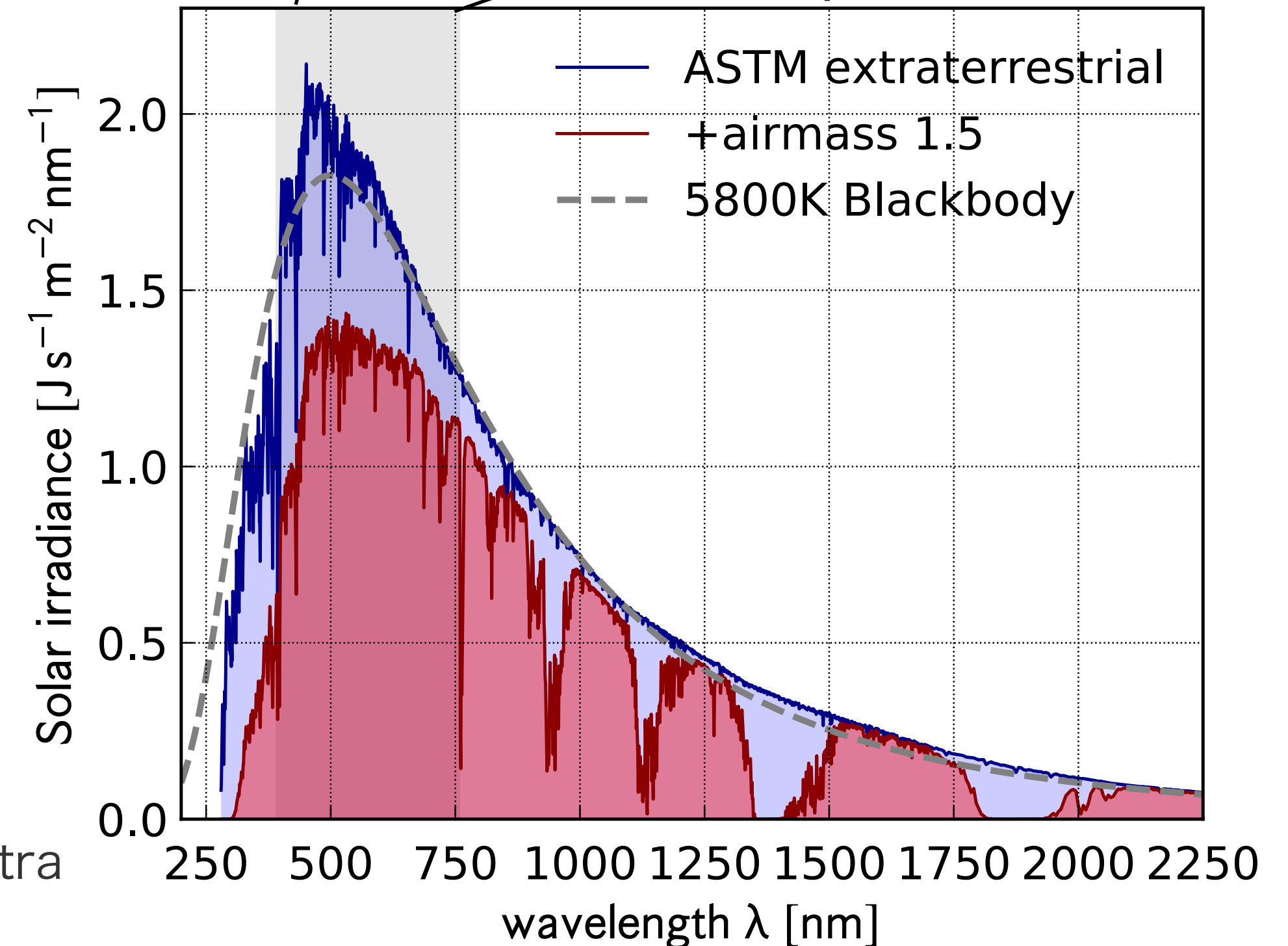
太陽スペクトルの吸収線

- 太陽の可視光スペクトルには暗い部分(暗線)が見える: その波長だけ光が弱い
- フラウンホーファー線(Fraunhofer lines)**
- 太陽大気に含まれる原子(Na,Ca,...) + 地球大気に含まれる分子が**特定の波長の光を吸収する**

(Wikipedia)



Solar Radiation Spectrum

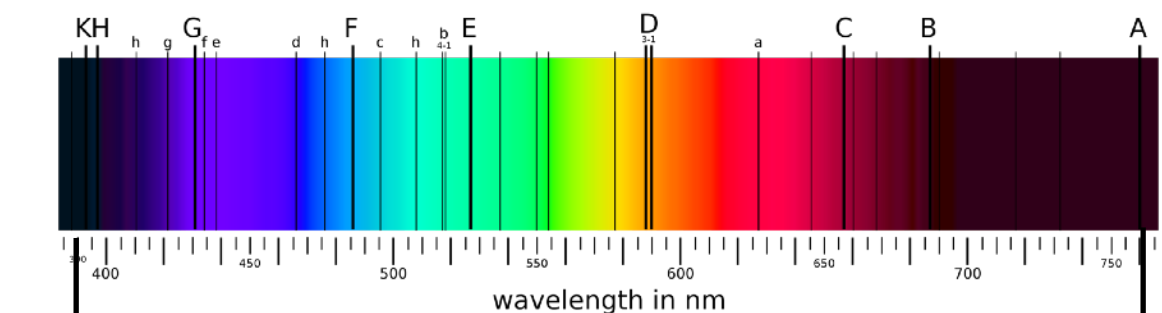


The American Society for Testing and Materials (ASTM) G-173 spectra

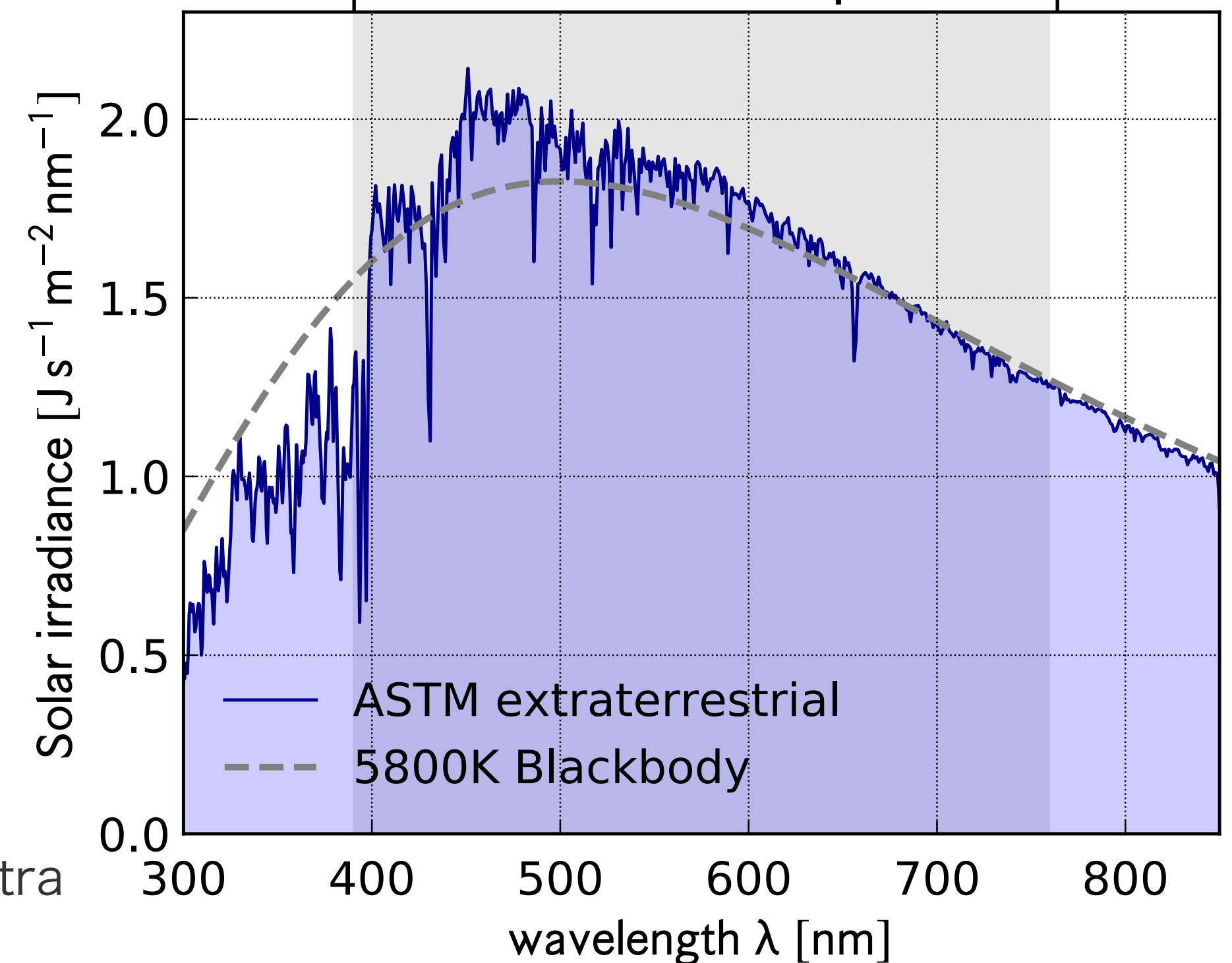
太陽スペクトルの吸収線

- 太陽の可視光スペクトルには暗い部分(暗線)が見える: その波長だけ光が弱い
- フラウンホーファー線(Fraunhofer lines)**
- 太陽大気に含まれる原子(Na,Ca,...) + 地球大気に含まれる分子が**特定の波長の光を吸収する**

(Wikipedia)



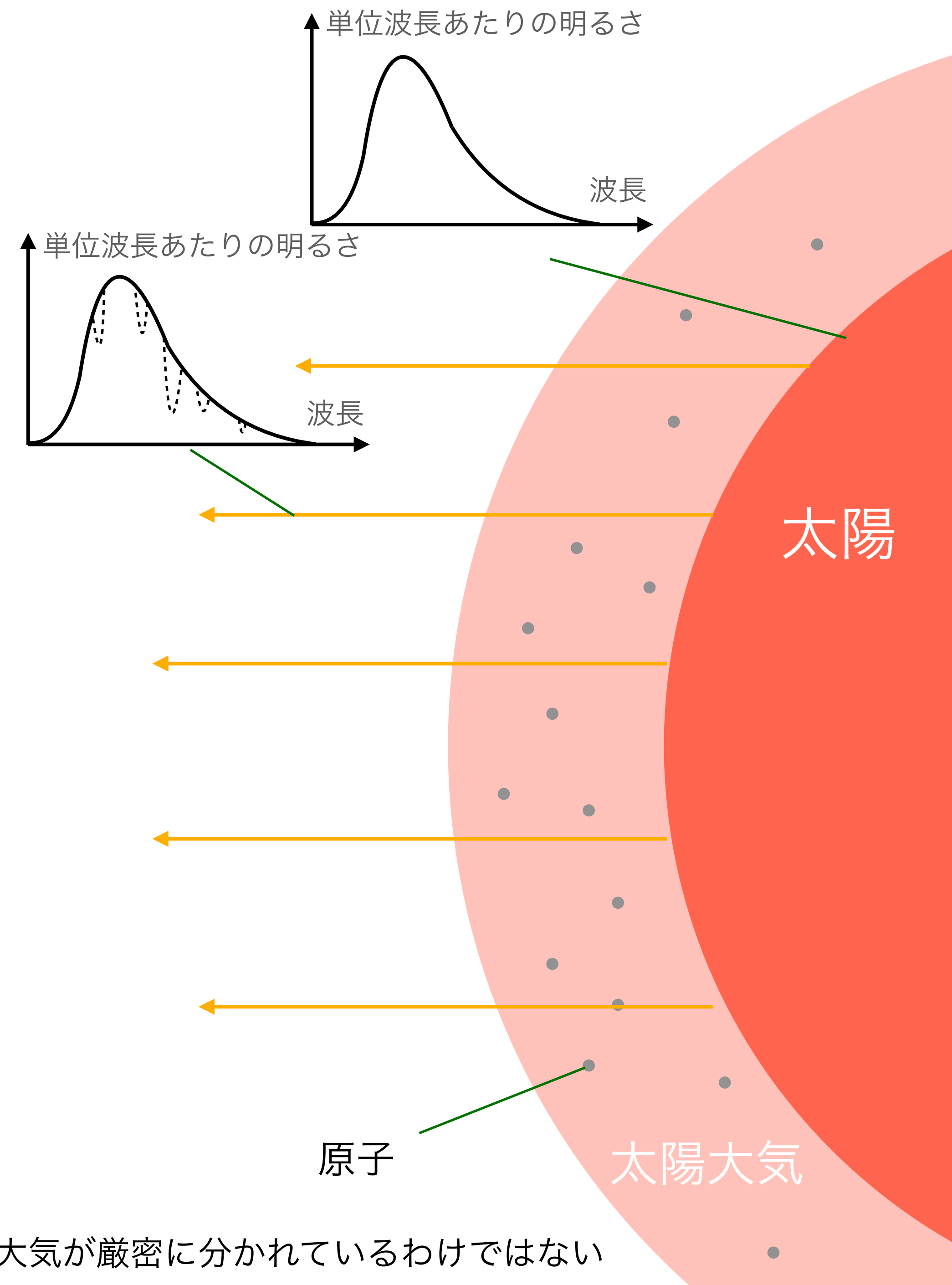
Solar Radiation Spectrum



The American Society for Testing and Materials (ASTM) G-173 spectra

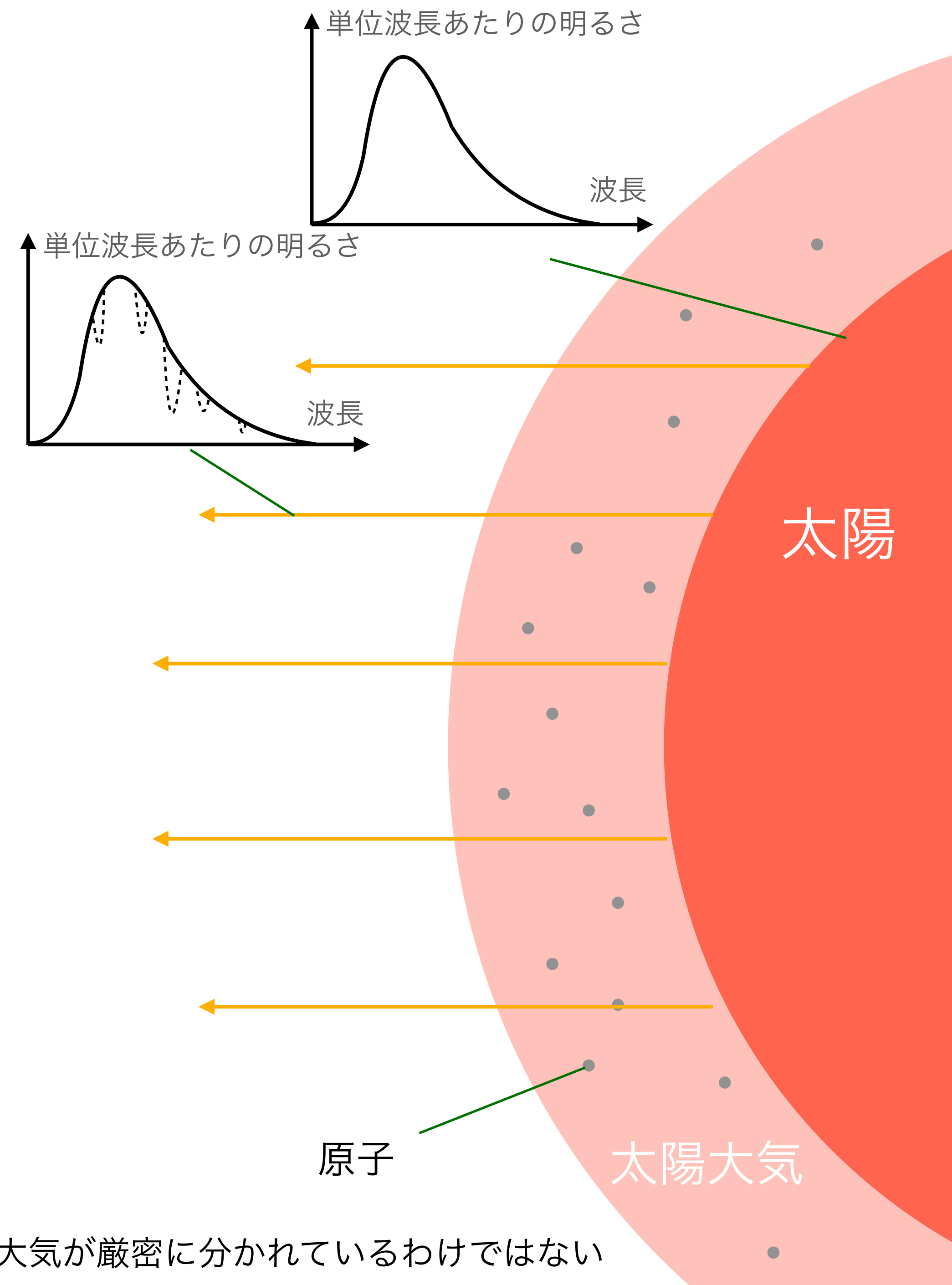
太陽スペクトルの吸収線

- 太陽の可視光スペクトルには暗い部分(暗線)が見える: その波長だけ光が弱い
- **フラウンホーファー線(Fraunhofer lines)**
- 太陽大気に含まれる原子(Na,Ca,...) + 地球大気に含まれる分子が**特定の波長の光を吸収する**



太陽スペクトルの吸収線

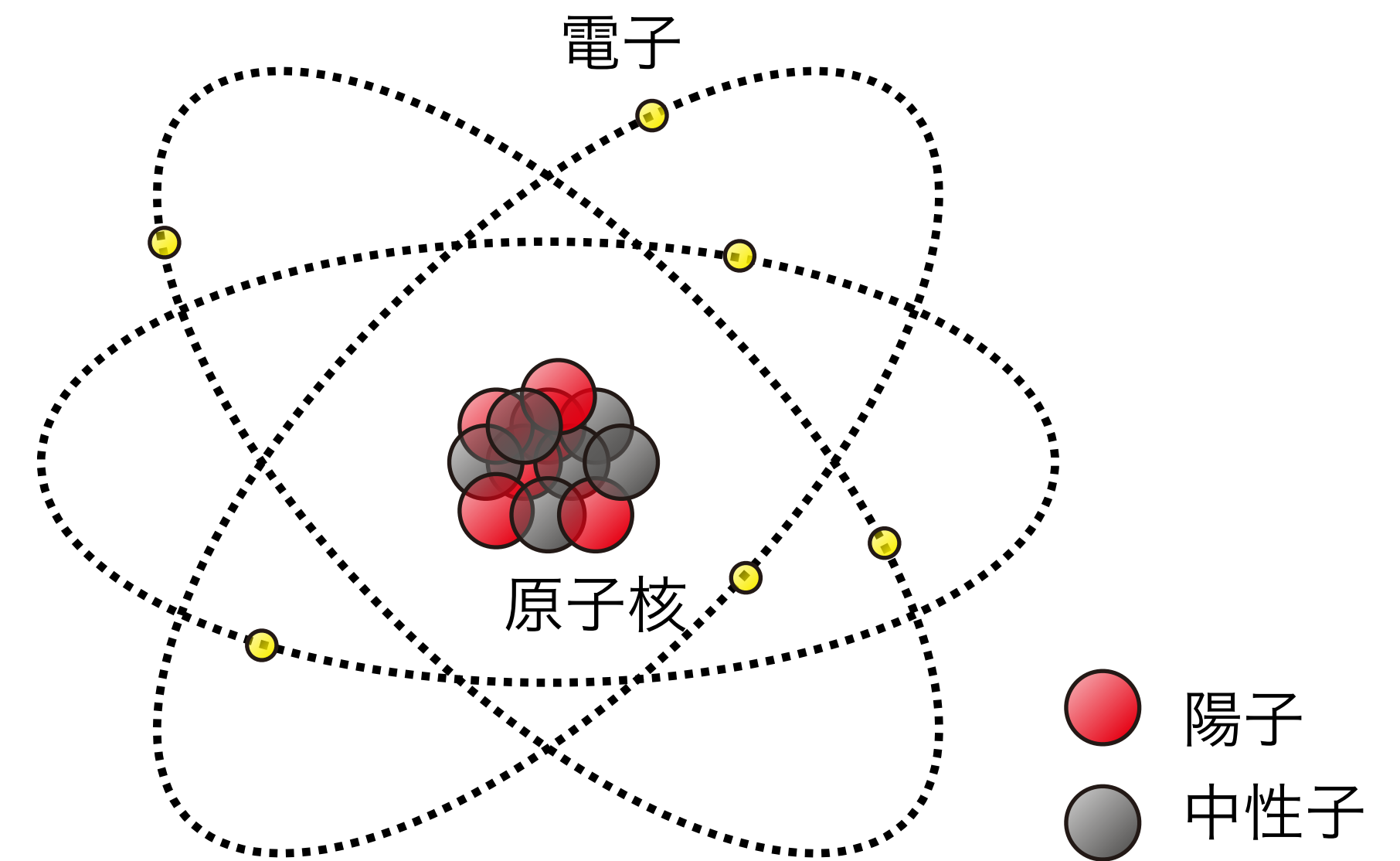
- 太陽の可視光スペクトルには暗い部分(暗線)が見える: その波長だけ光が弱い
- フラウンホーファー線(Fraunhofer lines)**
- 太陽大気に含まれる原子(Na,Ca,...) + 地球大気に含まれる分子が**特定の波長の光を吸収する**
- 特定の吸収線が見つかりと星の成分が分かる (地球大気吸収を除く)



吸収・放射の物理過程

- ・ 原子・分子の構造
- ・ 電子は軌道に応じたエネルギーを持っている(**エネルギー準位**)
- ・ 軌道遷移に伴って光子を放出・吸収

原子の構造の模式図



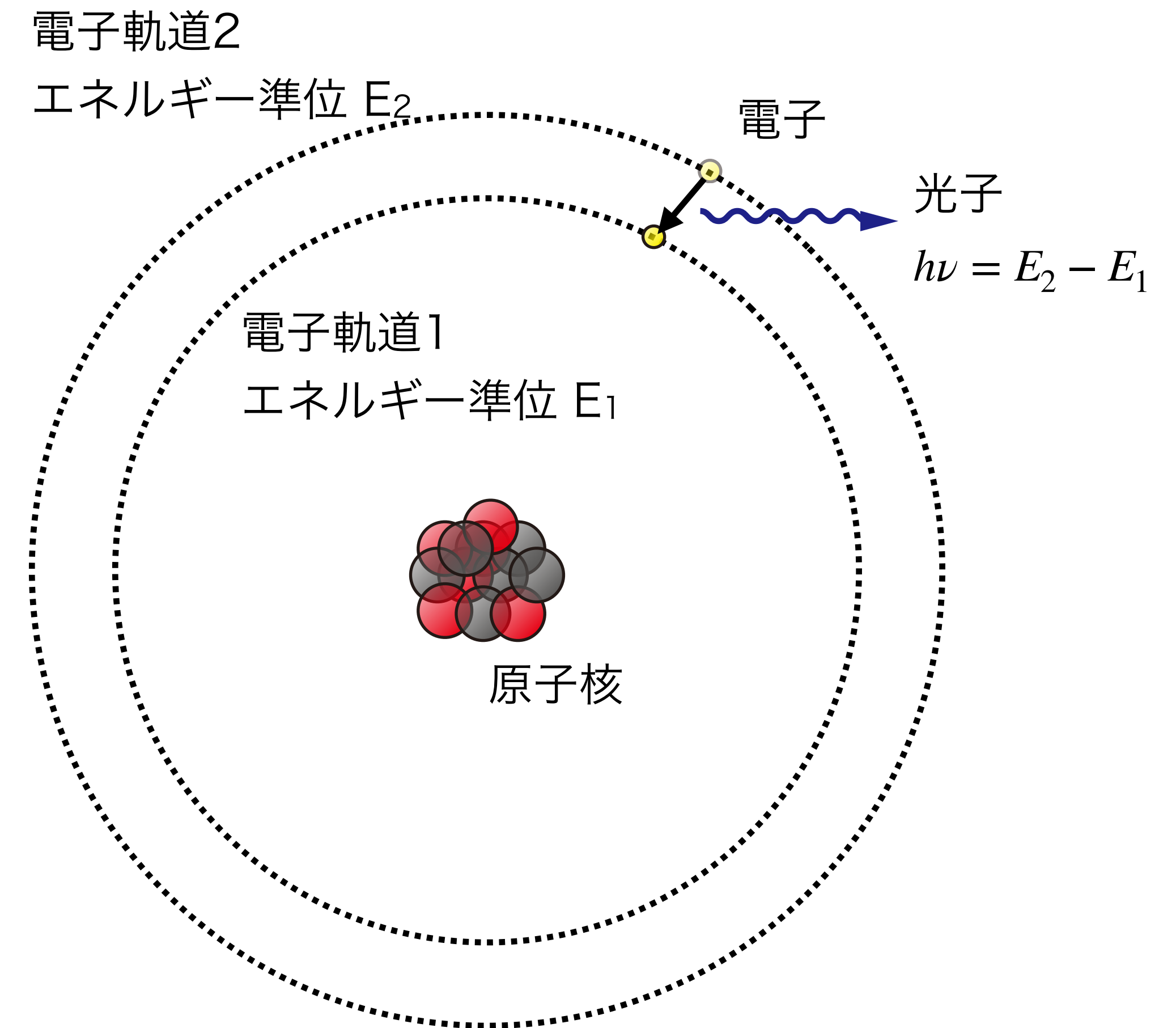
原子 = 原子核(陽子,中性子) + 電子

陽子の数の違い → 元素
中性子の数の違い → 同位体

吸収・放射の物理過程

- ・ 原子・分子の構造
- ・ 電子は軌道に応じたエネルギーを持っている(**エネルギー準位**)
- ・ 軌道遷移に伴って光子を放出・吸収

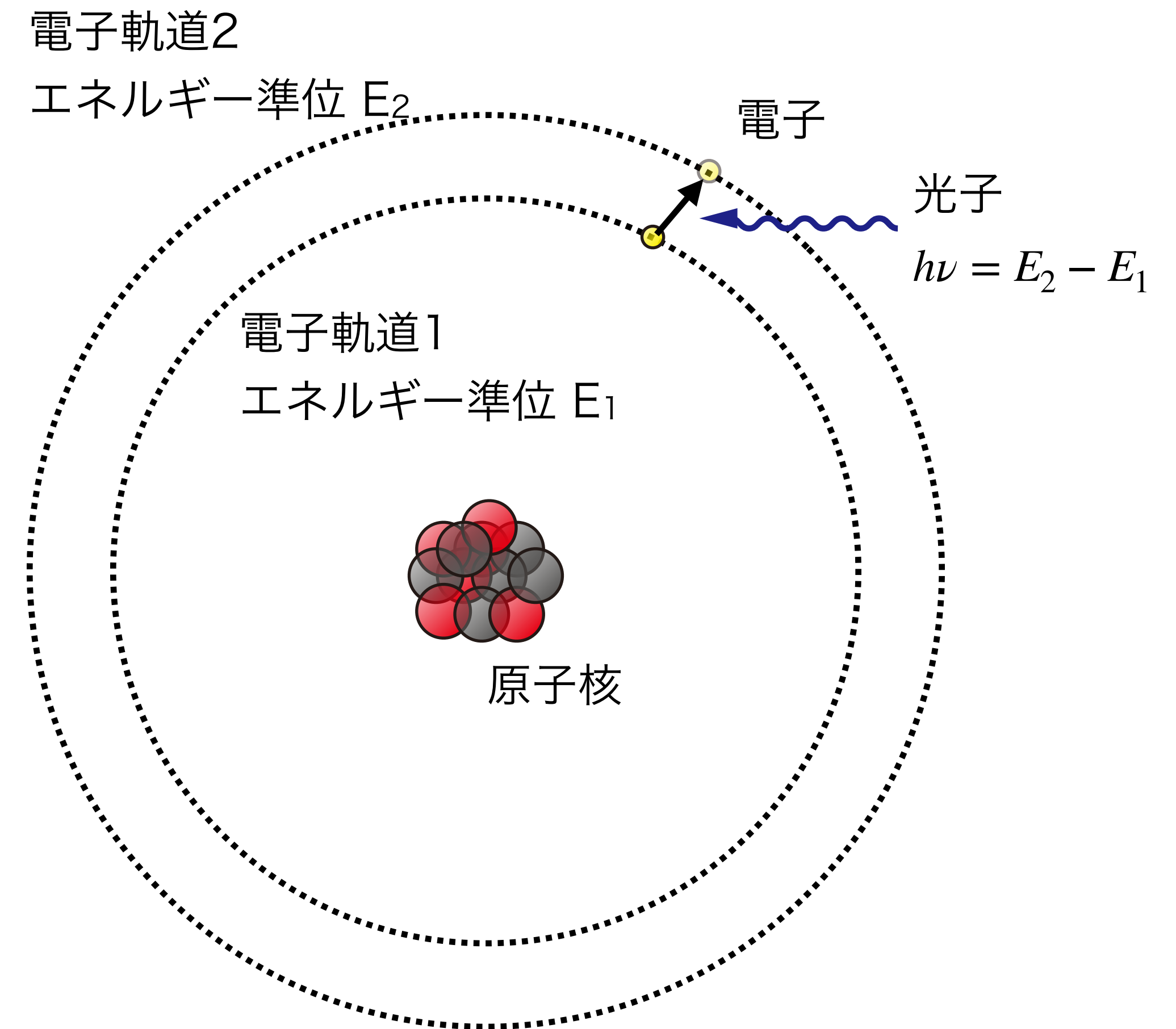
原子の電子軌道の模式図



吸収・放射の物理過程

- ・ 原子・分子の構造
- ・ 電子は軌道に応じたエネルギーを持っている(**エネルギー準位**)
- ・ 軌道遷移に伴って光子を放出・吸収

原子の電子軌道の模式図



太陽の化学組成

- ・ フラウンホーファー線による元素の同定
- ・ 太陽大気モデリングと組み合わせて、どの元素がどのくらい含まれるかを推定する
- ・ 太陽表面(光球)の組成
- ・ 水素、次いでヘリウムが圧倒的に多い
- ・ 実は宇宙の始まりにできるのが水素とヘリウム(+微量の軽元素)

太陽表面(光球: photosphere)
での化学組成(Asplund et al. 2009)

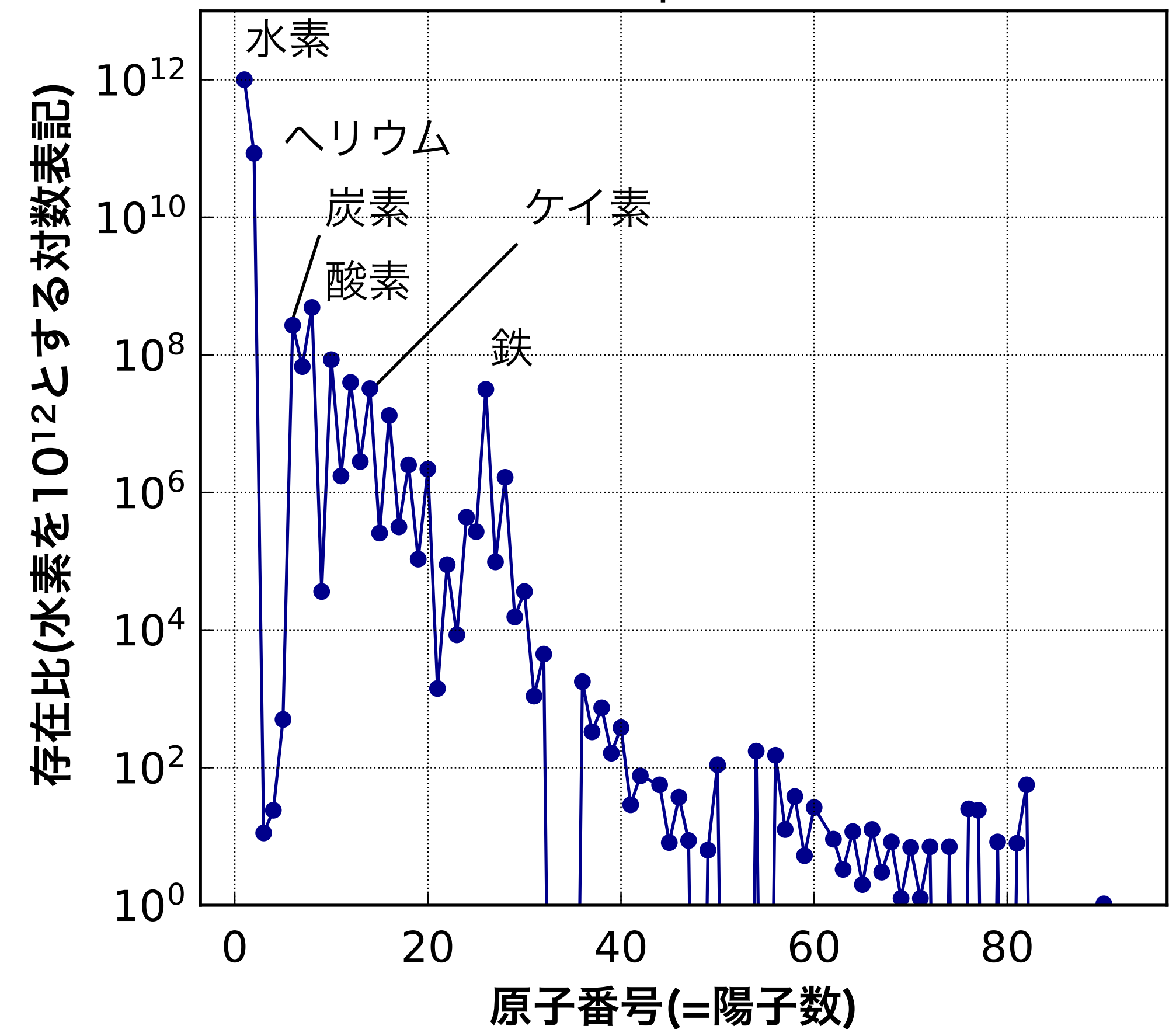
Z	Element	Photosphere	Meteorites
1	H	12.00	8.22 ± 0.04
2	He	[10.93 ± 0.01]	1.29
3	Li	1.05 ± 0.10	3.26 ± 0.05
4	Be	1.38 ± 0.09	1.30 ± 0.03
5	B	2.70 ± 0.20	2.79 ± 0.04
6	C	8.43 ± 0.05	7.39 ± 0.04
7	N	7.83 ± 0.05	6.26 ± 0.06
8	O	8.69 ± 0.05	8.40 ± 0.04
9	F	4.56 ± 0.30	4.42 ± 0.06
10	Ne	[7.93 ± 0.10]	−1.12
11	Na	6.24 ± 0.04	6.27 ± 0.02
12	Mg	7.60 ± 0.04	7.53 ± 0.01
13	Al	6.45 ± 0.03	6.43 ± 0.01
14	Si	7.51 ± 0.03	7.51 ± 0.01
15	P	5.41 ± 0.03	5.43 ± 0.04
16	S	7.12 ± 0.03	7.15 ± 0.02
17	Cl	5.50 ± 0.30	5.23 ± 0.06
18	Ar	[6.40 ± 0.13]	−0.50
19	K	5.03 ± 0.09	5.08 ± 0.02
20	Ca	6.34 ± 0.04	6.29 ± 0.02
21	Sc	3.15 ± 0.04	3.05 ± 0.02
22	Ti	4.95 ± 0.05	4.91 ± 0.03
23	V	3.93 ± 0.08	3.96 ± 0.02
24	Cr	5.64 ± 0.04	5.64 ± 0.01
25	Mn	5.43 ± 0.04	5.48 ± 0.01
26	Fe	7.50 ± 0.04	7.45 ± 0.01

太陽の化学組成

- ・ フラウンホーファー線による元素の同定
- ・ 太陽大気モデリングと組み合わせ、どの元素がどのくらい含まれるかを推定する
- ・ 太陽表面(光球)の組成
- ・ 水素、次いでヘリウムが圧倒的に多い
- ・ 実は宇宙の始まりにできるのが水素とヘリウム(+微量の軽元素)

太陽表面(光球: photosphere)
での化学組成(Asplund et al. 2009)

Solar photospheric abundance
Asplund et al. (2009)

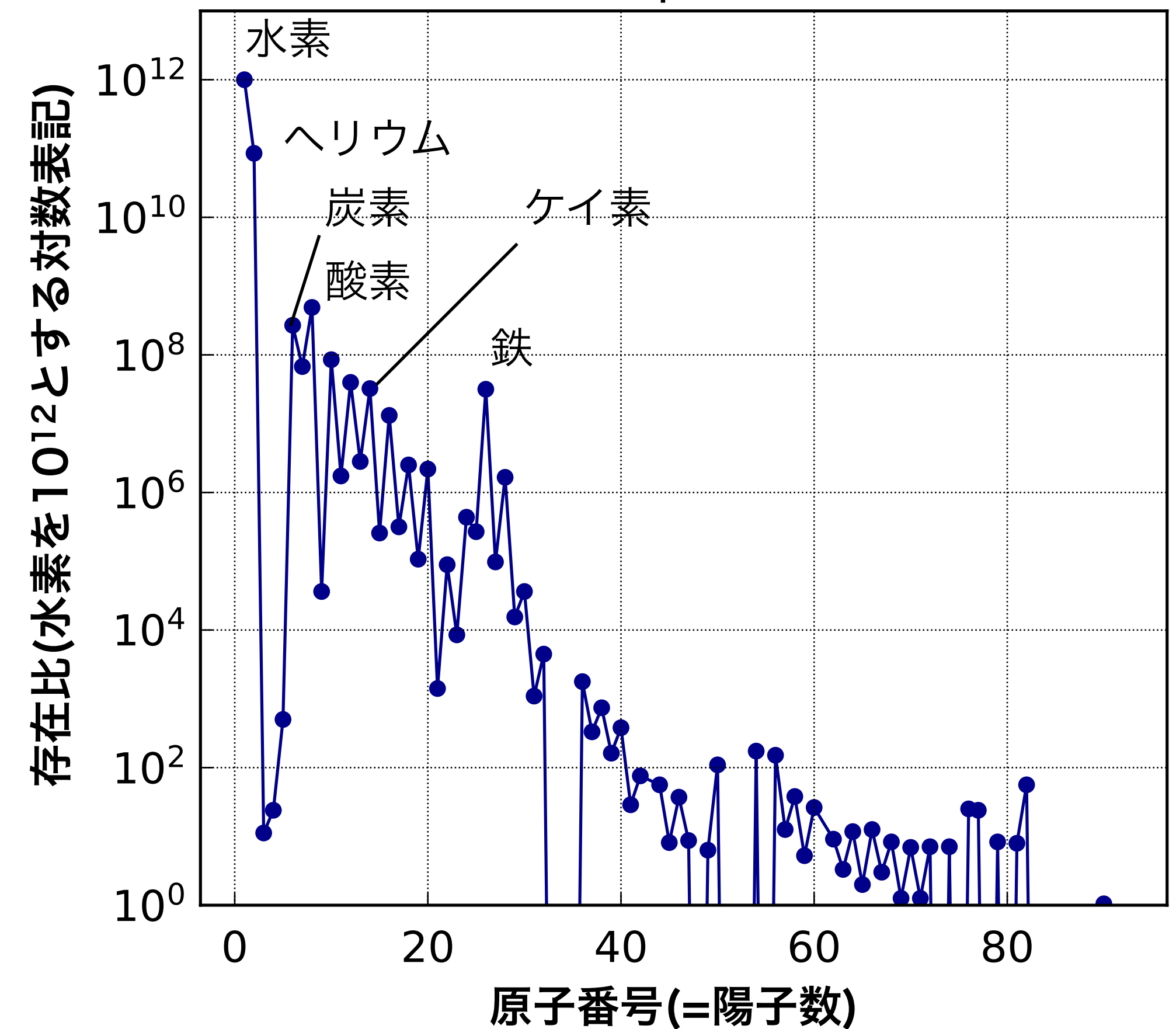


太陽の化学組成

- ・ フラウンホーファー線による元素の同定
- ・ 太陽大気モデリングと組み合わせ、どの元素がどのくらい含まれるかを推定する
- ・ 太陽表面(光球)の組成
- ・ 水素、次いでヘリウムが圧倒的に多い
- ・ 実は宇宙の始まりにできるのが水素とヘリウム(+微量の軽元素)

太陽表面(光球: photosphere)
での化学組成(Asplund et al. 2009)

Solar photospheric abundance
Asplund et al. (2009)



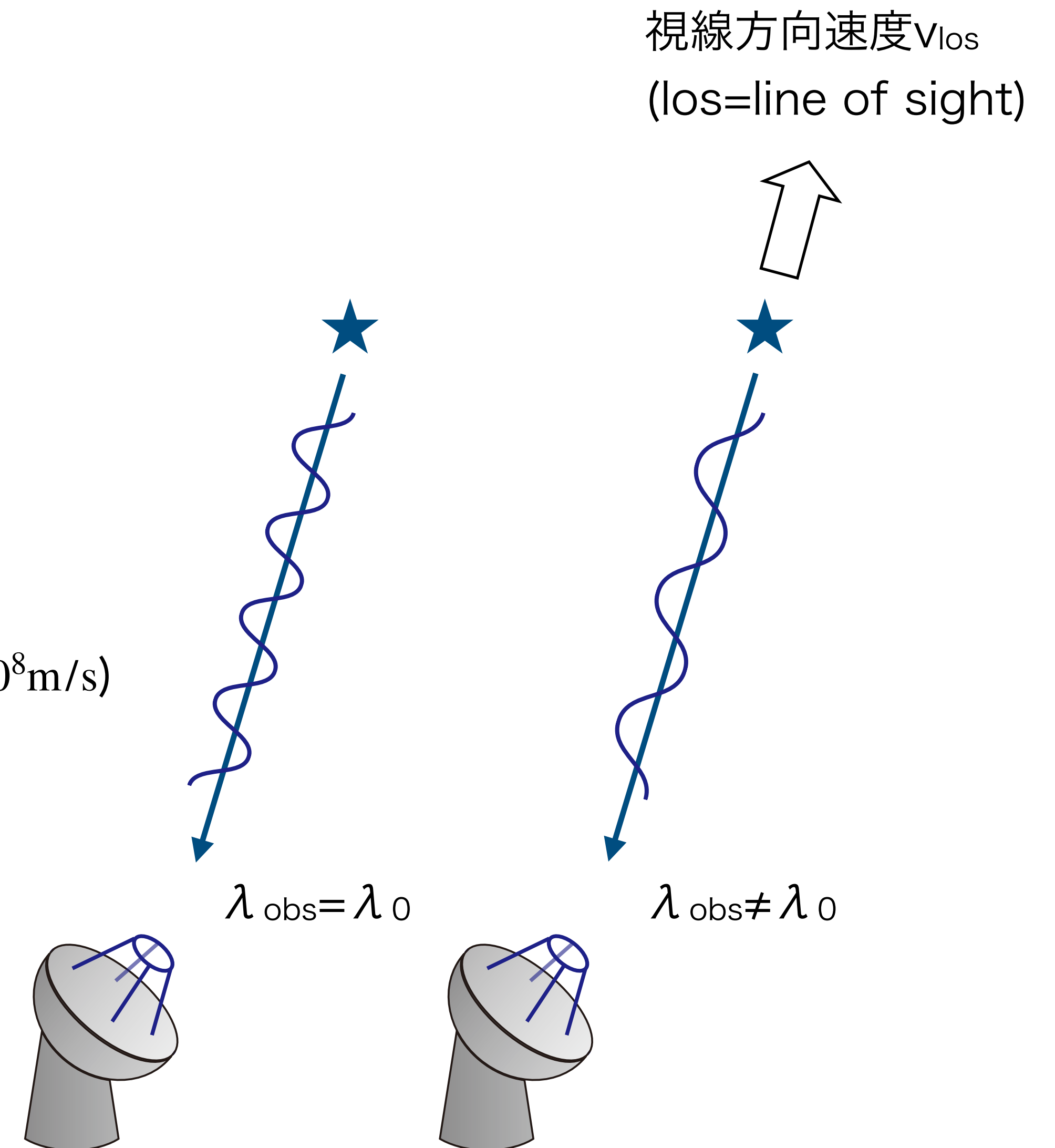
第2回:

電磁波による宇宙の観測

- ・ 電磁波(可視赤外光・電波・X線ガンマ線)とその特徴
- ・ 天体スペクトルと黒体放射
- ・ 原子・分子による吸収や輝線放射
- ・ 光のドップラー効果

光のドップラー効果

- 動いているものからの電磁波の波長が動いていないものに対してずれる効果
- 天体の(視線方向に沿った)運動を知る上で重要な役割を果たす
(非相対論極限: $v_{\text{los}} \ll c = 3 \times 10^8 \text{m/s}$)
- ずれの程度: $\lambda_{\text{obs}} = \left(1 + \frac{v_{\text{los}}}{c}\right) \lambda = \lambda + \frac{v_{\text{los}}}{c} \lambda$
- 光の速度がどの慣性系でも変わらないことによって起こる(**特殊相対性理論**)

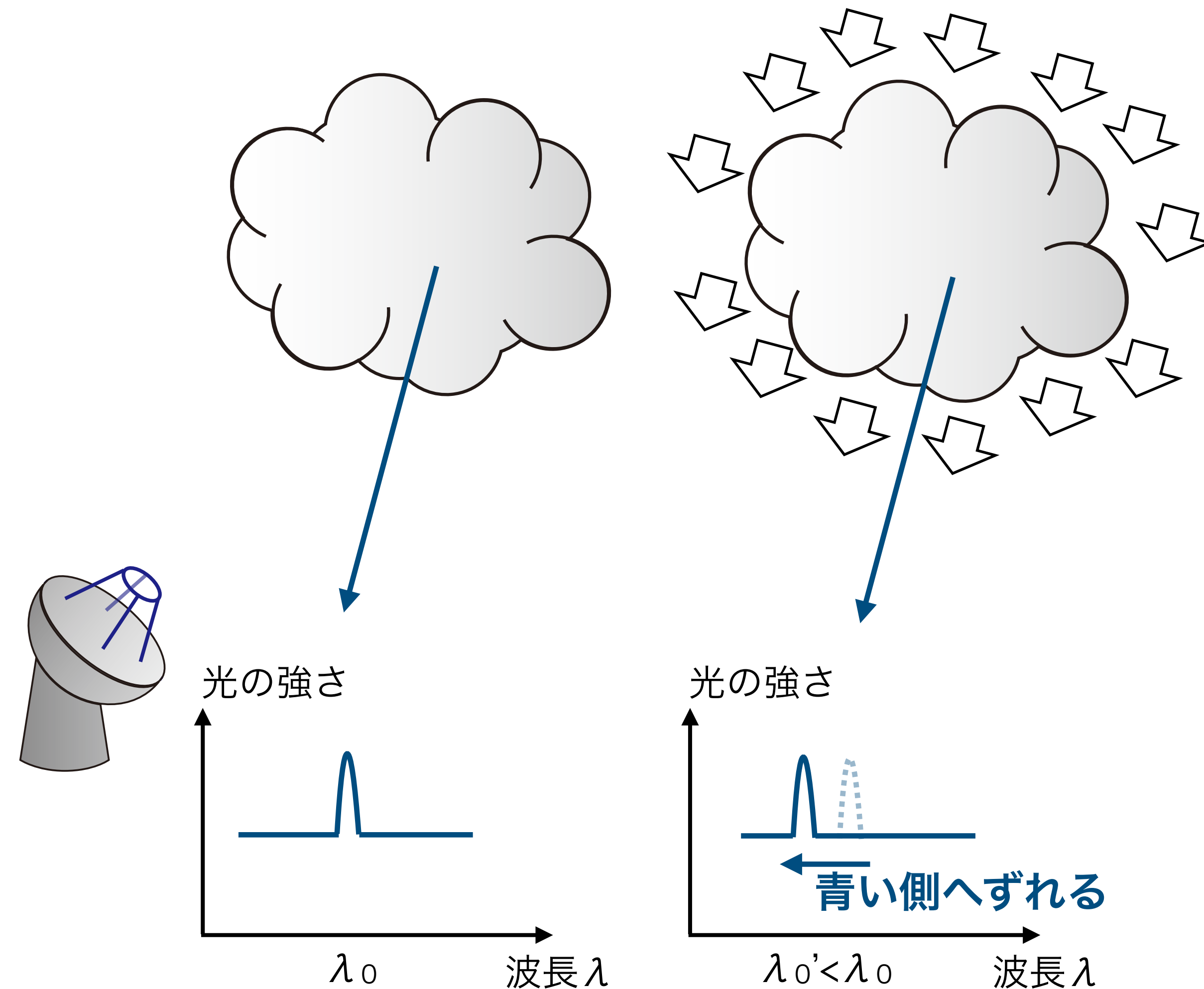


光のドップラー効果

- ・ 動いているものからの電磁波の波長が動いていないものに対してずれる効果
- ・ 天体の(視線方向に沿った)運動を知る上で重要な役割を果たす
- ・ 観測者へ向かってくる光源・吸収源の波長は短くなる(**青方偏移: blueshift**)
- ・ 観測者から遠ざかる光源・吸収源の波長は長くなる(**赤方偏移: redshift**)

観測者に対して
静止した放射源

観測者の方へ
向かってくる放射源

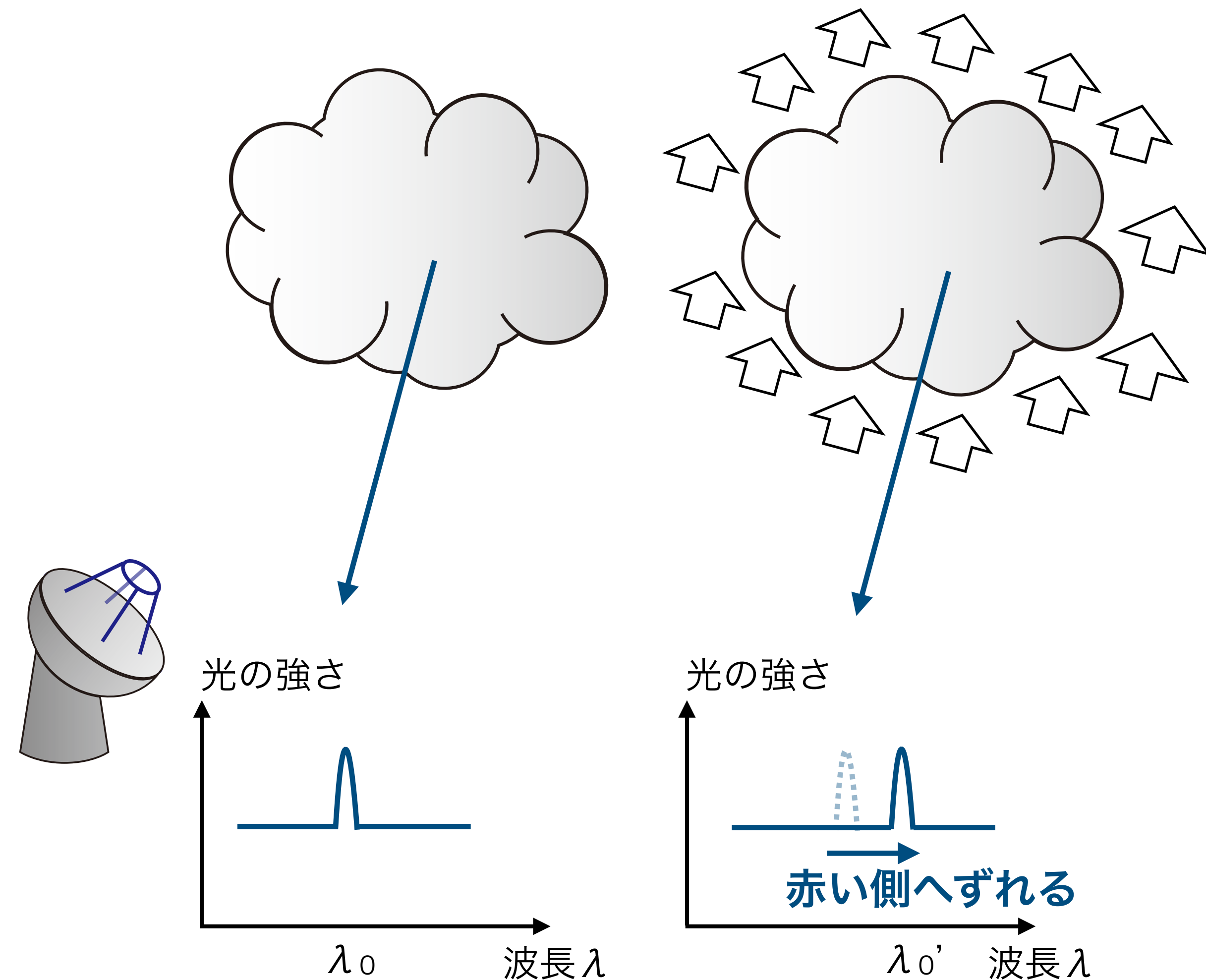


光のドップラー効果

- ・動いているものからの電磁波の波長が動いていないものに対してずれる効果
- ・天体の(視線方向に沿った)運動を知る上で重要な役割を果たす
- ・観測者へ向かってくる光源・吸収源の波長は短くなる(**青方偏移: blueshift**)
- ・観測者から遠ざかる光源・吸収源の波長は長くなる(**赤方偏移: redshift**)

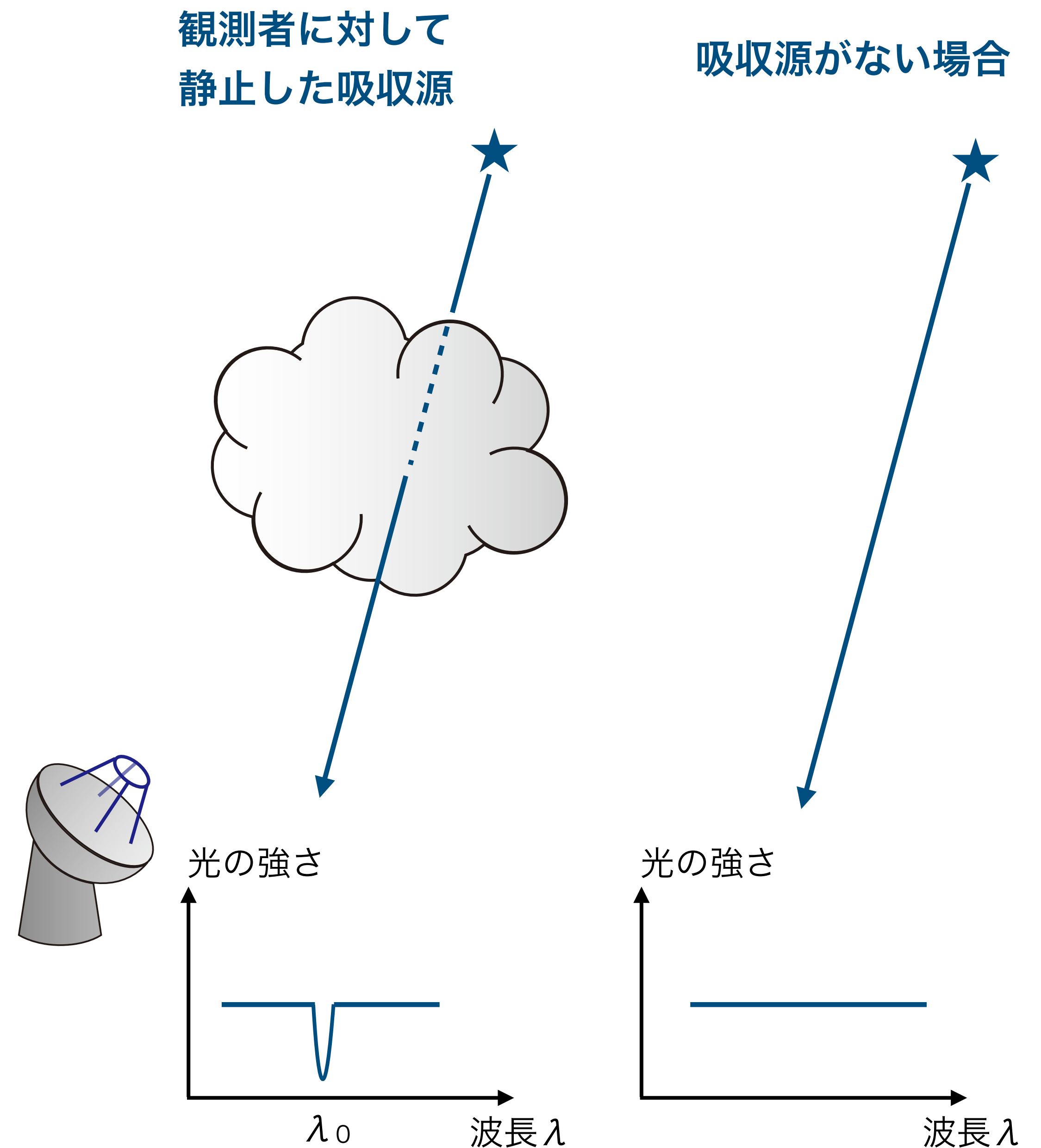
観測者に対して
静止した放射源

観測者から
遠ざかる放射源



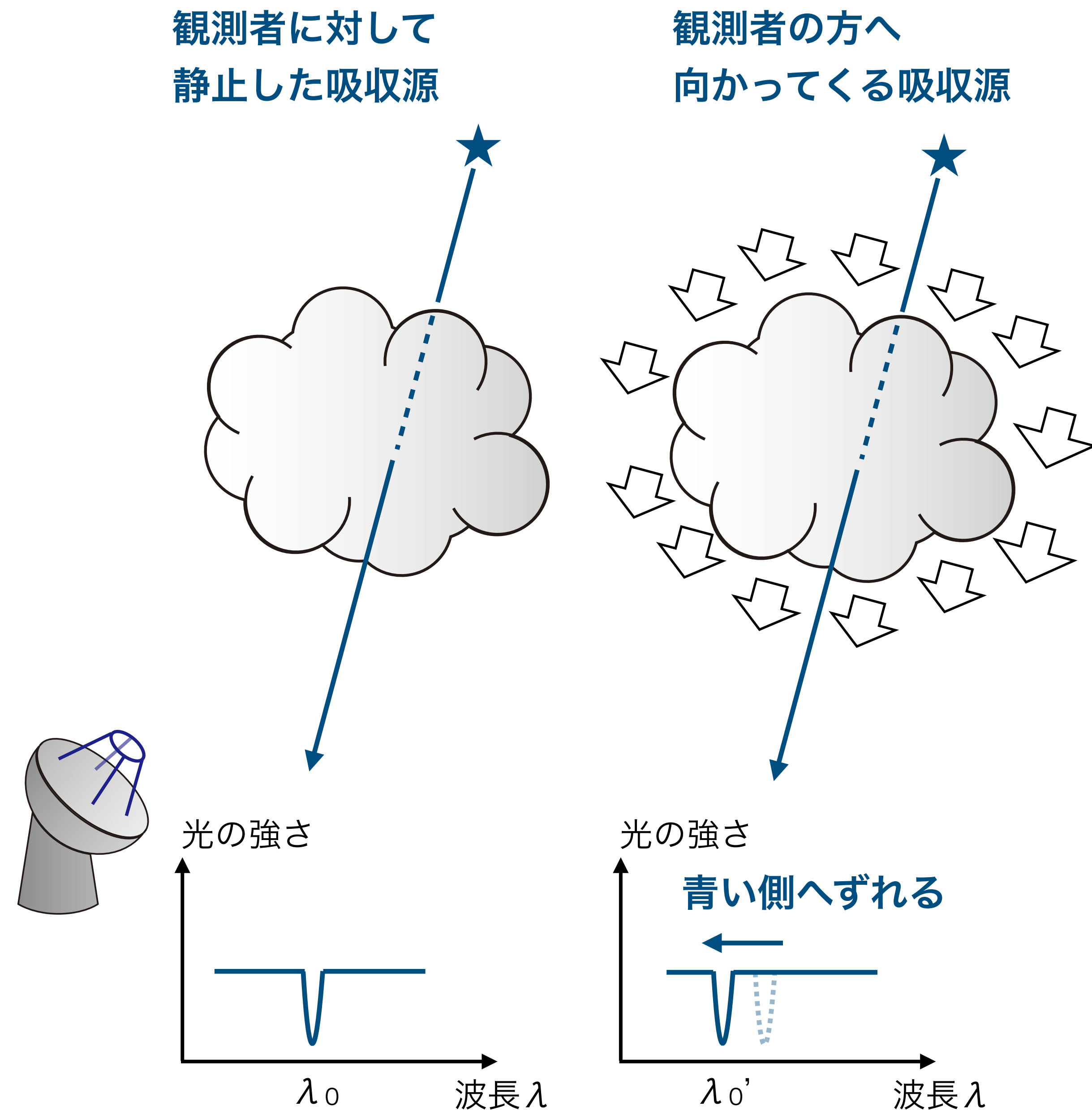
光のドップラー効果

- ・ 動いているものからの電磁波の波長が動いていないものに対してずれる効果
- ・ 天体の(視線方向に沿った)運動を知る上で重要な役割を果たす
- ・ 観測者へ向かってくる光源・吸収源の波長は短くなる(**青方偏移: blueshift**)
- ・ 観測者から遠ざかる光源・吸収源の波長は長くなる(**赤方偏移: redshift**)



光のドップラー効果

- ・ 動いているものからの電磁波の波長が動いていないものに対してずれる効果
- ・ 天体の(視線方向に沿った)運動を知る上で重要な役割を果たす
- ・ 観測者へ向かってくる光源・吸収源の波長は短くなる(**青方偏移: blueshift**)
- ・ 観測者から遠ざかる光源・吸収源の波長は長くなる(**赤方偏移: redshift**)



光のドップラー効果

- ・動いているものからの電磁波の波長が動いていないものに対してずれる効果
- ・天体の(視線方向に沿った)運動を知る上で重要な役割を果たす
- ・観測者へ向かってくる光源・吸収源の波長は短くなる(**青方偏移: blueshift**)
- ・観測者から遠ざかる光源・吸収源の波長は長くなる(**赤方偏移: redshift**)

