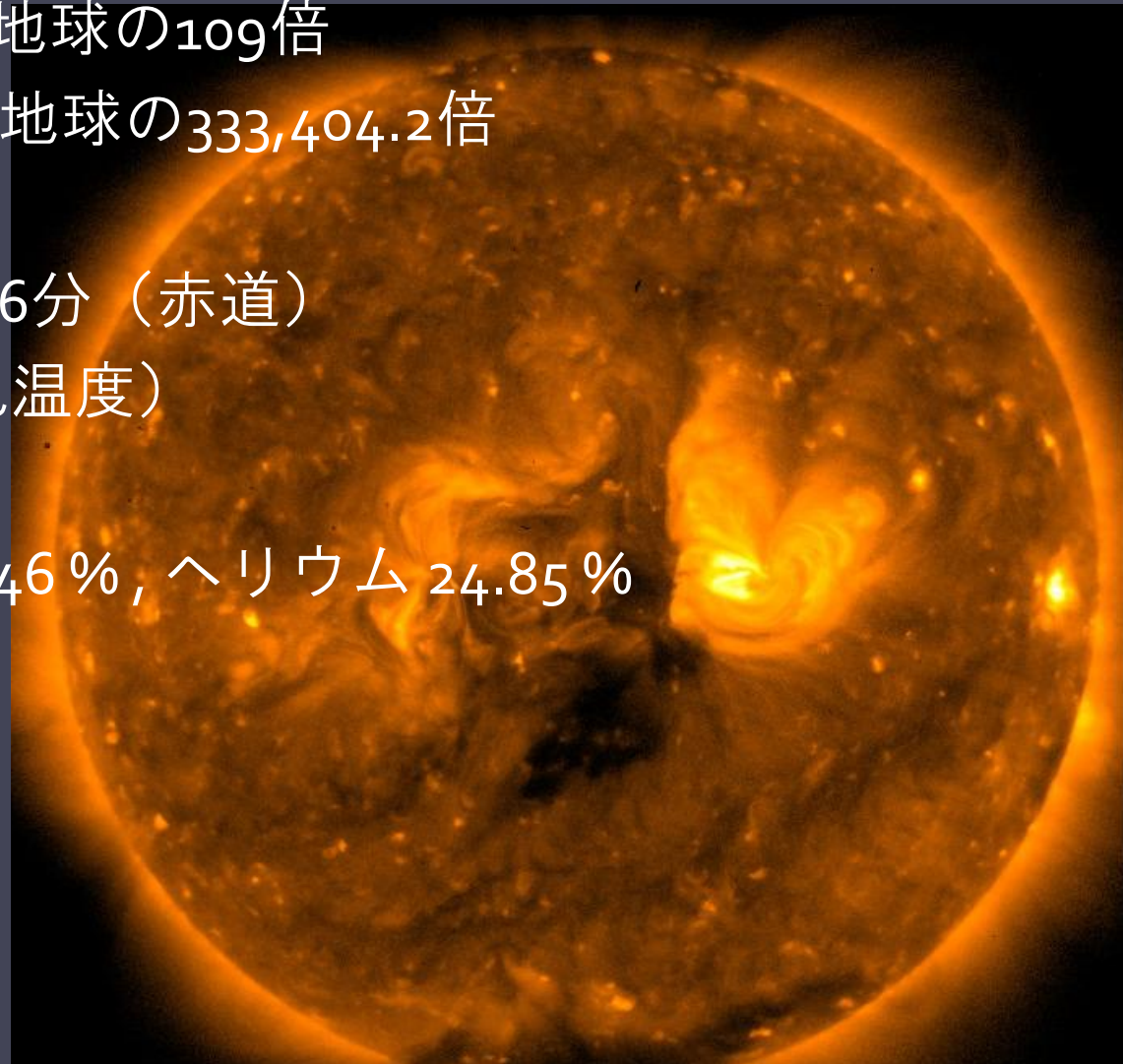


太陽

最も近い恒星

太陽の主な特徴

- 直径 1,392,000 km 地球の109倍
- 質量 1.9891×10^{30} kg 地球の333,404.2倍
- 平均密度 1.411 g cm^{-3}
- 自転周期 27日6時間36分（赤道）
- 表面温度 5,770 K（色温度）
- 年齢 約46億年
- 光球の組成：水素 73.46%，ヘリウム 24.85%



「ひので」が撮影した太陽のX線画像（国立天文台）

太陽の明るさ

- 光度 3.827×10^{26} J/s
 - ガソリンひと缶(45リットル) 1.6×10^9 J
 - 太陽が1年間に放出するエネルギー
 - 7.5×10^{24} 缶分 (7.5億の1億倍の1億倍)
 - 太陽の体積は、 1.4×10^{30} リットル = 3.2×10^{28} 缶
 - 太陽全部がガソリンだとすると、4300年しかもたない

太陽のエネルギー源

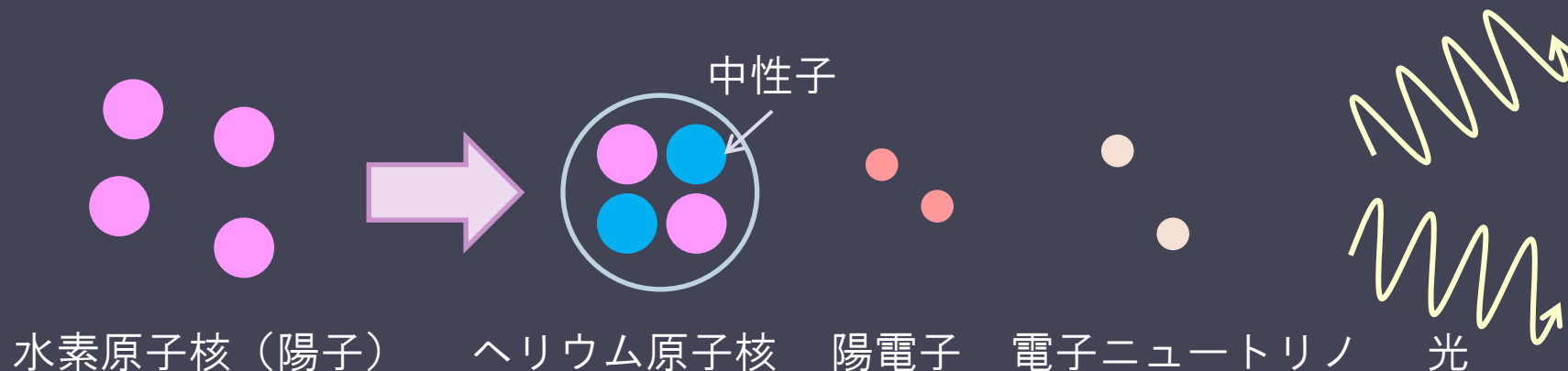
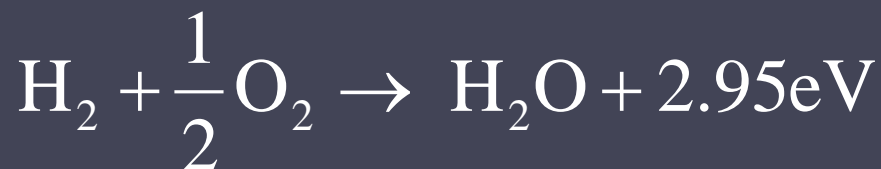
- 水素の核融合



– エネルギーの単位

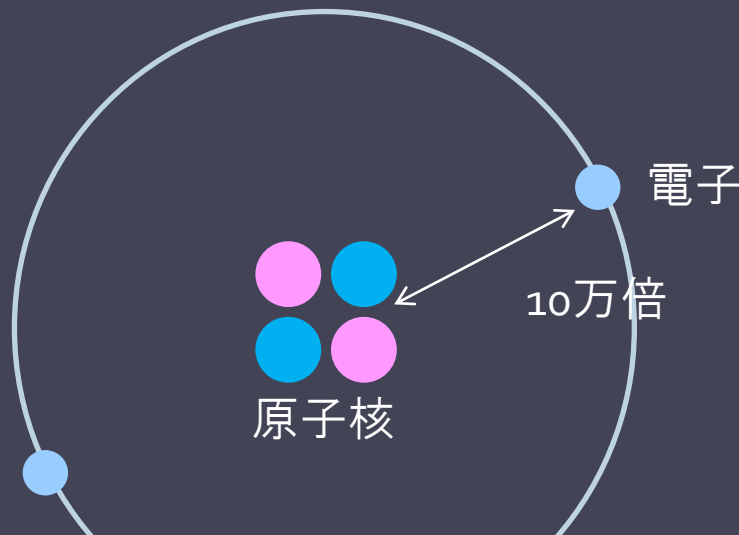
$$1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J} = 3.82 \times 10^{-20}\text{cal}$$

- 化学反応のエネルギーの1千万倍



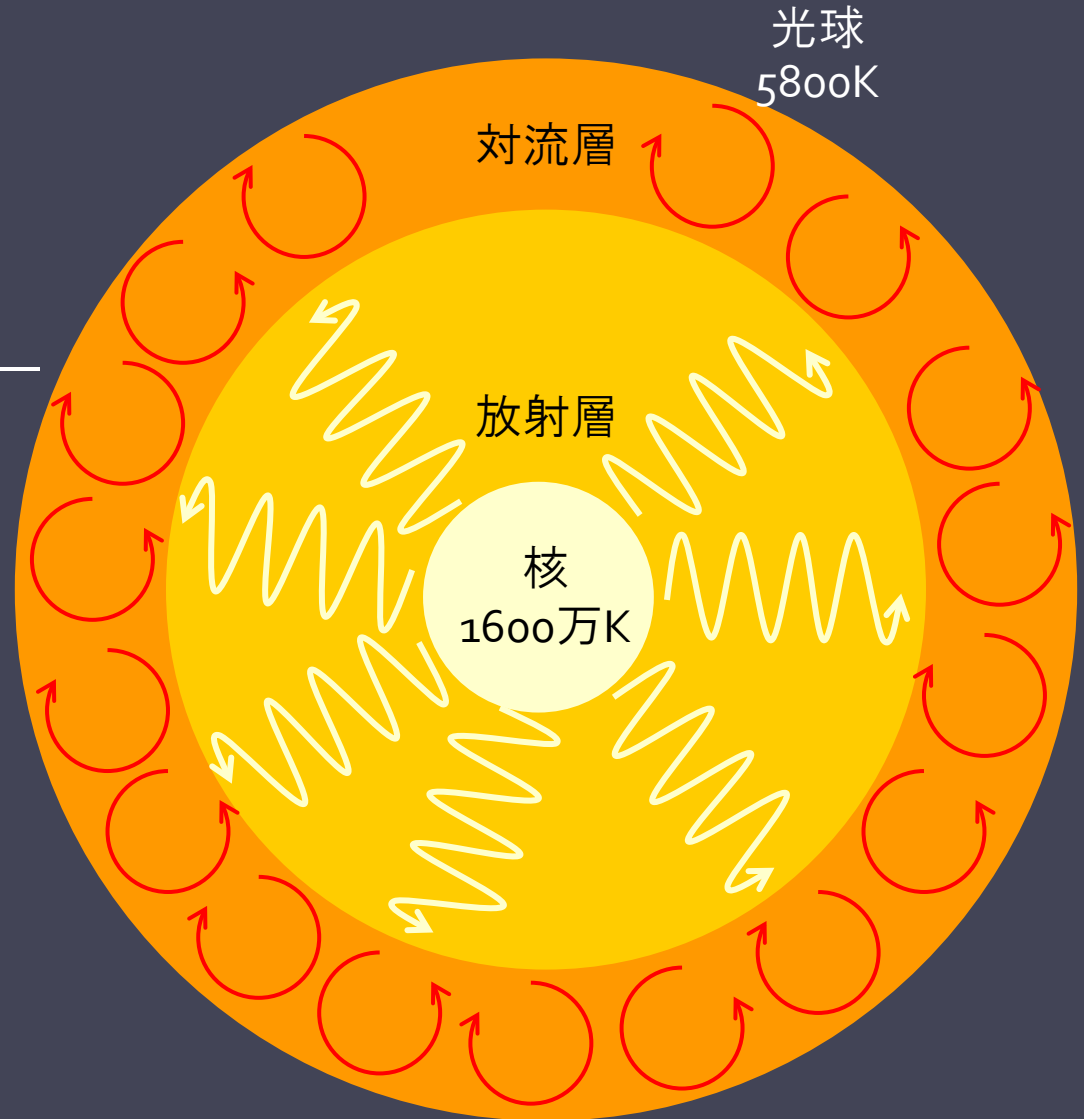
核反応と化学反応の違い

- 原子と原子核の大きさの違い
 - 原子： 10^{-10}m
 - 原子核： 10^{-15}m
- 電子（原子の場合）、核子（原子核の場合）を閉じ込める力
 - 原子：電磁気力
 - 原子核：核力
- より小さい領域に閉じ込めるほうがエネルギーが大きい
 - 量子力学を使うと、核子のエネルギーは電子の1000万倍程度



太陽の内部構造

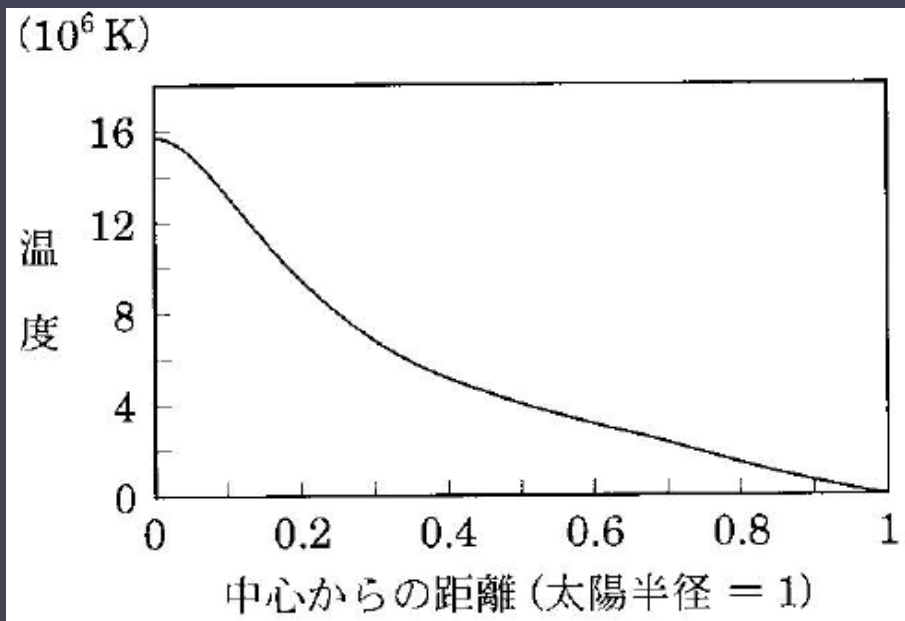
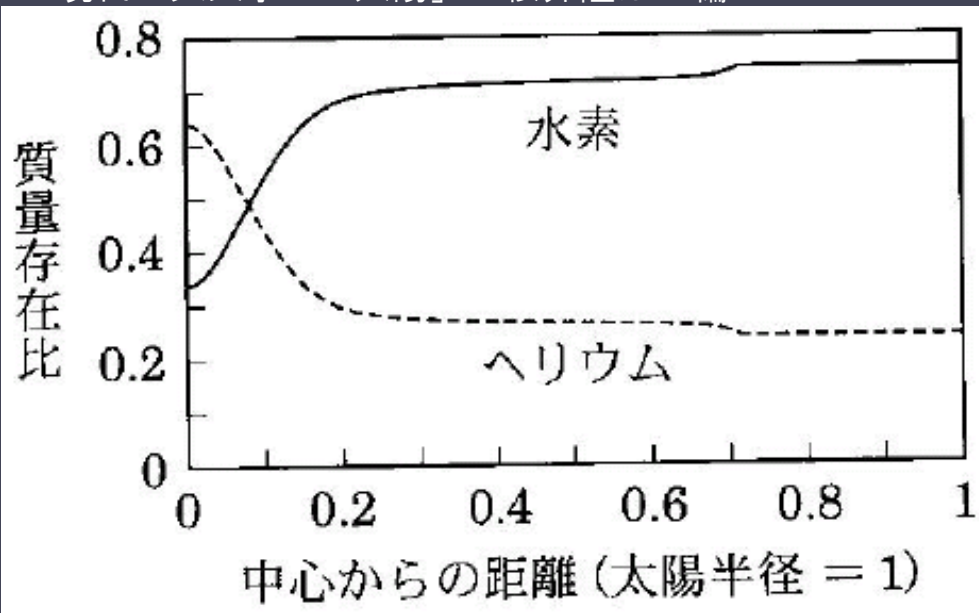
- 核
 - 水素が核融合
- 放射層
 - 光によってエネルギーが運ばれている
- 対流層
 - 対流によってエネルギーが運ばれている
- 光球
 - 太陽の表面



中心核

- 水素の核融合反応（ヘリウムができる）
 - 約1600万度
 - 中心から0.2太陽半径まで
 - 毎秒6.1億トンの水素が燃える
 - 中心核にはどんどんヘリウムがたまっていく

「現代の天文学10 太陽」 桜井隆ほか編



水素の核融合反応

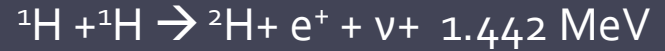
- pp-chain (陽子・陽子連鎖)

- 3つの分枝がある

- 太陽の場合

- pp-I 86%
- pp-II 14%
- pp-III 0.015%

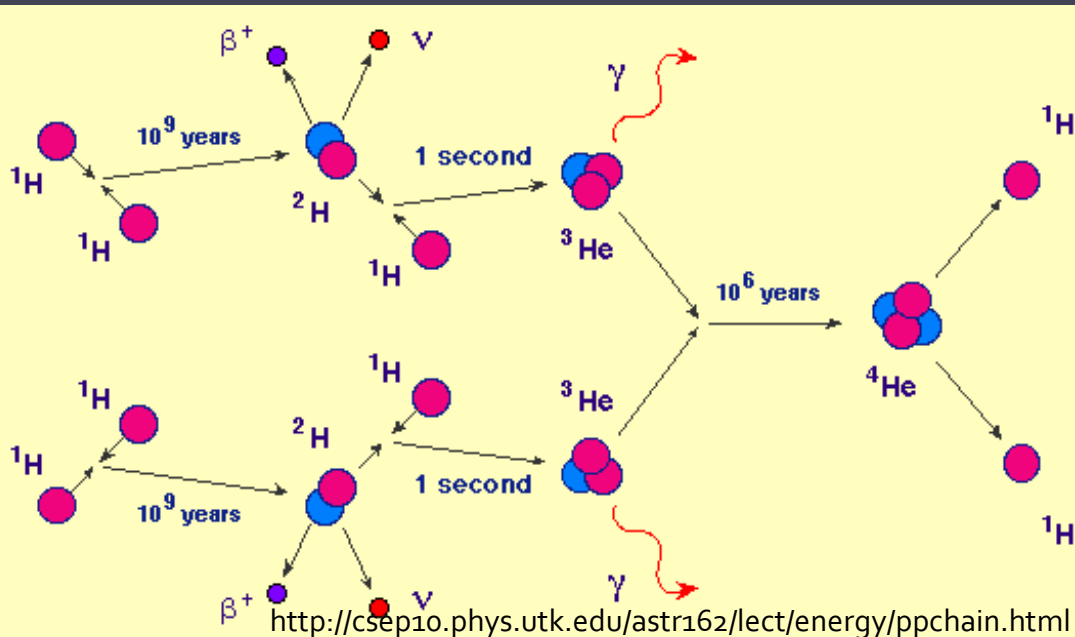
pp-I



pp-II



pp-III



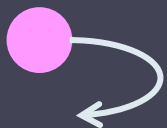
緩やかな核反応

- 太陽は、激しく燃えているように思えるが . . .
 - 中心核でも、1秒間に反応する水素は、 10^{18} 個に1個にすぎない。
 - 中心核のすべての水素が燃えるのに100億年かかる → 太陽の寿命
- なぜ、非常にゆっくりと燃えるのだろうか？

熱核反応

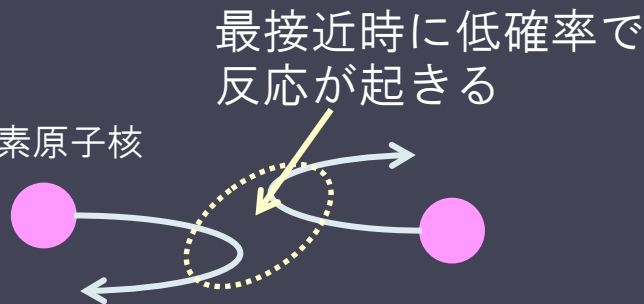
- 高温なほど、水素原子核は激しく運動
 - 電氣的な反発のため、水素原子核はお互いになかなか近付けない
- より高温なら高速で水素原子核をぶつけることができる
 - 最接近距離が近くなる
 - 最接近時にある確率で核反応がおこる
 - 確率は、距離が近いほど高い→ 高温なほど高い(反応率 \propto 温度の4乗)
- 水素爆弾は1億度以上といわれている
- 太陽の中心核は1600万度：非常に低温

水素原子核



低速度で接近した場合、反発

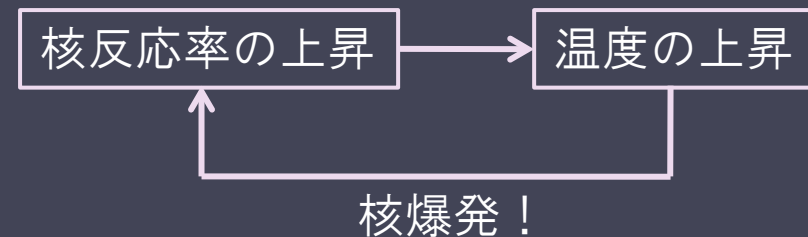
水素原子核



高速度で接近した場合

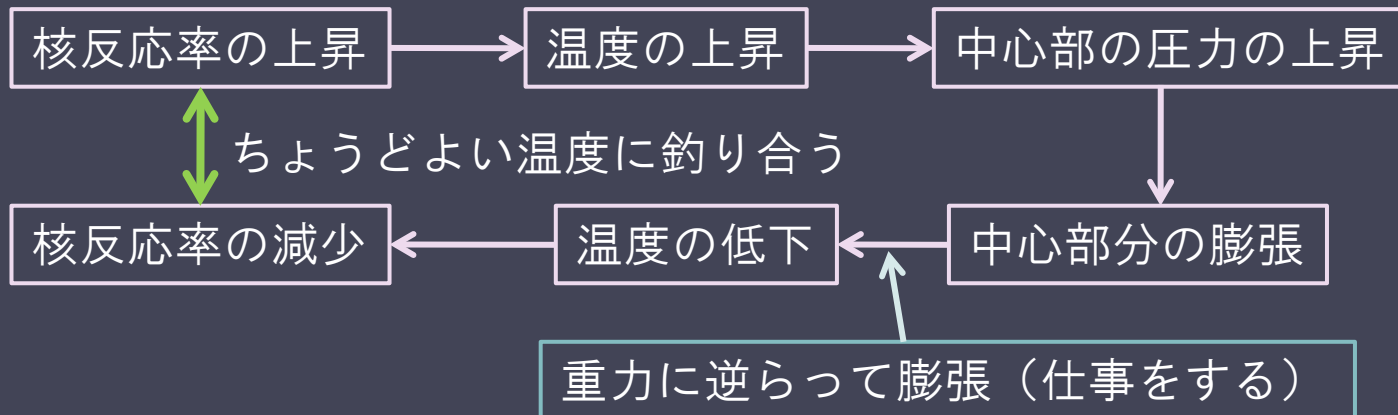
核反応の自己調節

- 太陽では、爆発的な核反応は起きない
 - 核反応は温度が高いと、反応速度は急激に増大



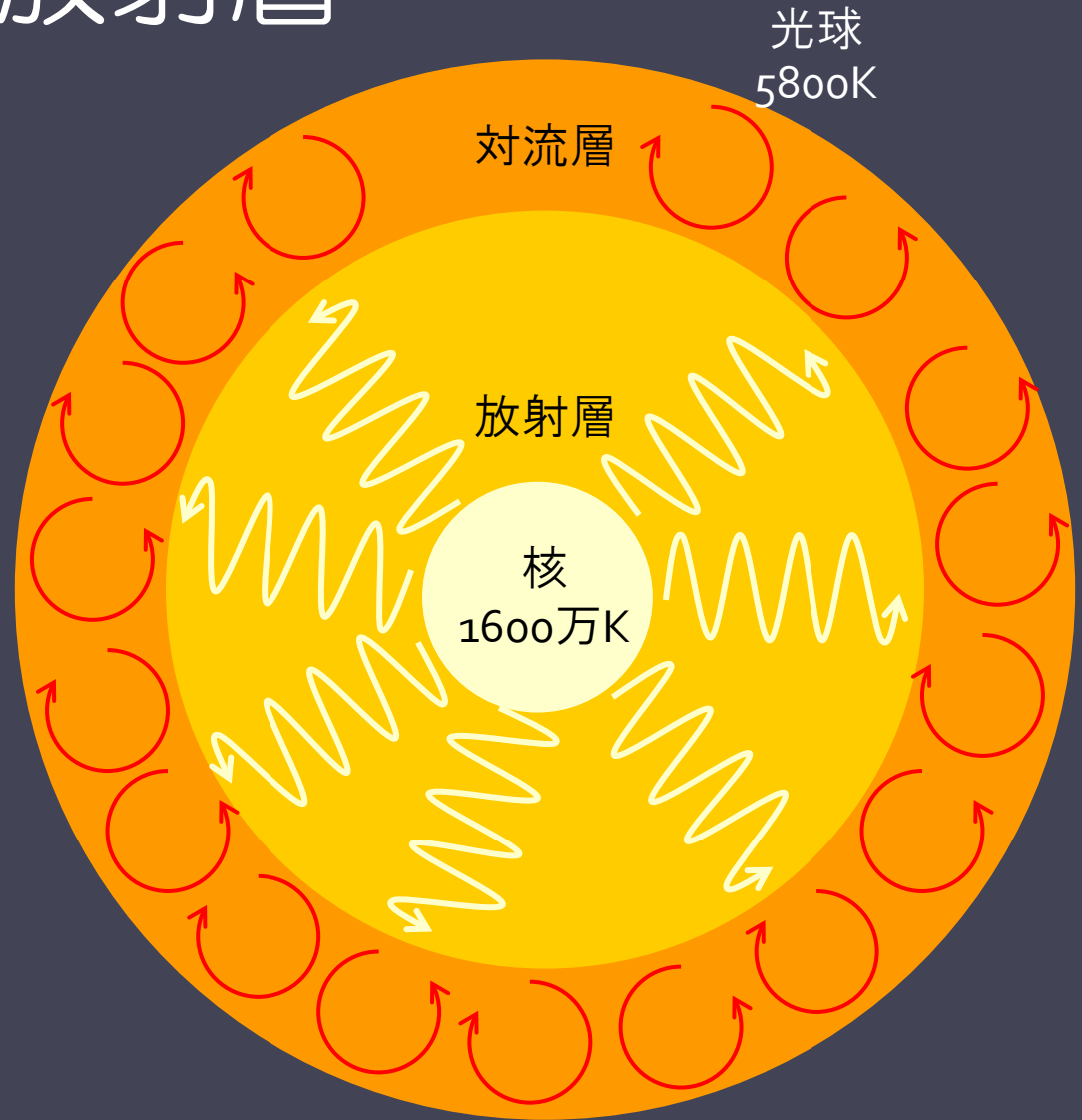
- 太陽の自己調節機能

- 核反応が増大して、エネルギーが与えられると、温度が下がる。このことを「比熱が負」という

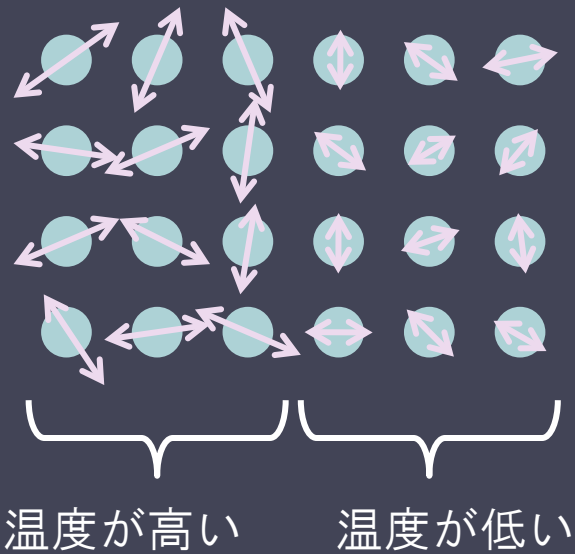


放射層

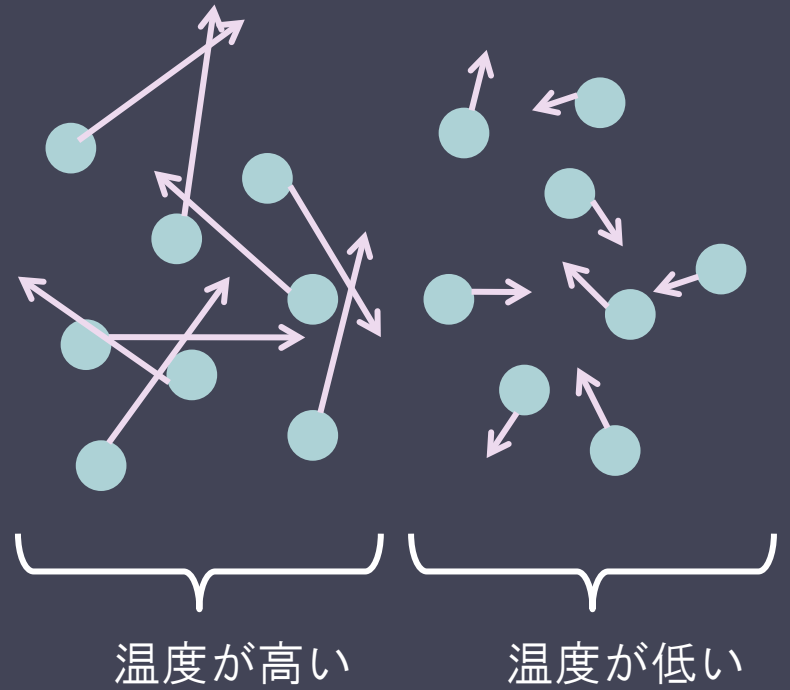
- 中心核で発生したエネルギー（熱）が光で伝わる領域



熱

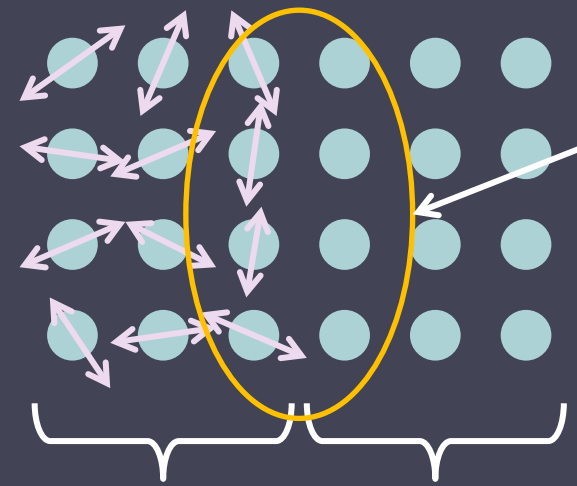


固体の熱 = 分子の振動



ガスの熱 = 分子の運動

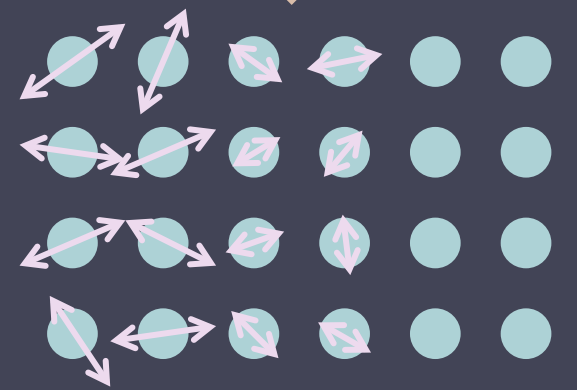
熱の流れ 1. 熱伝動



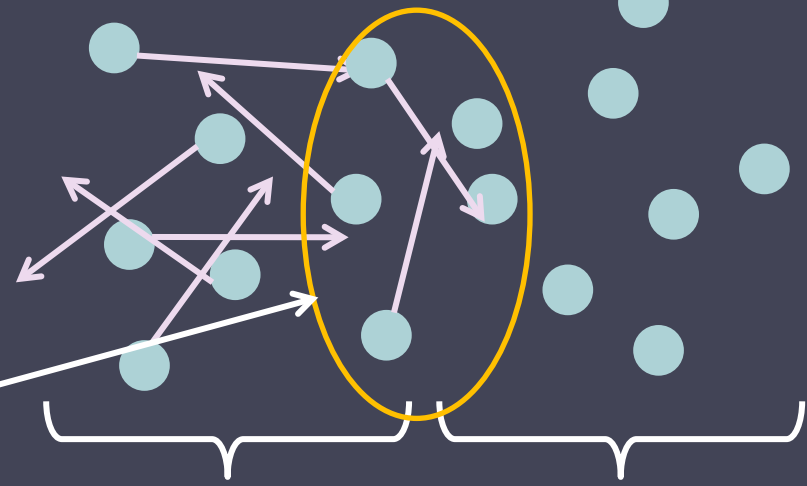
分子の振動
が伝わる

分子の運動が
伝わる

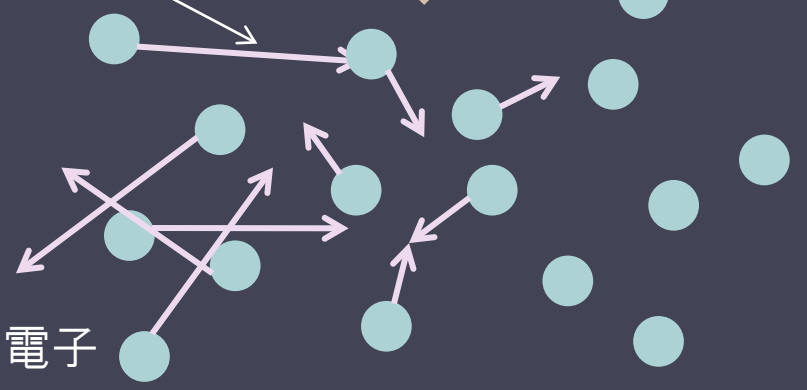
温度が高い 温度が低い



高い 中間 低い



温度が高い 温度が低い

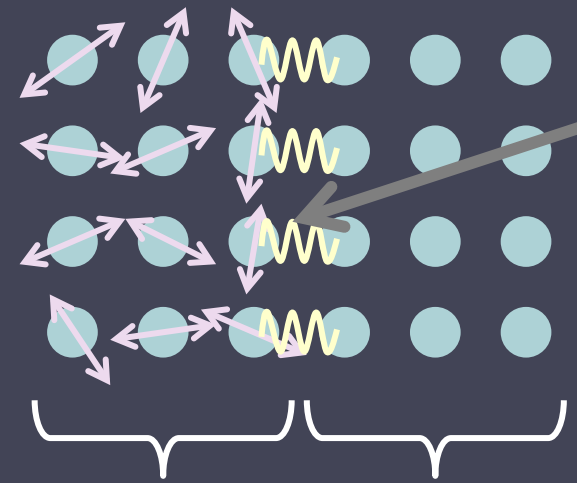


高い 中間 低い

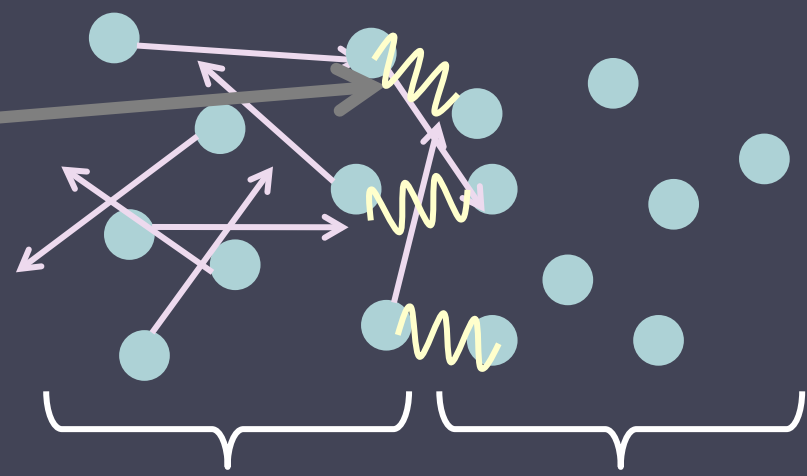
平均自由行程

太陽の場合は電子

熱の流れ 2.放射

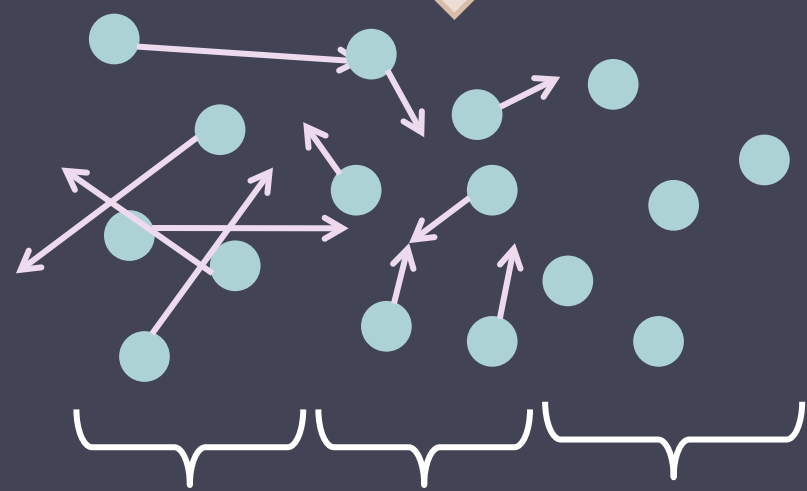
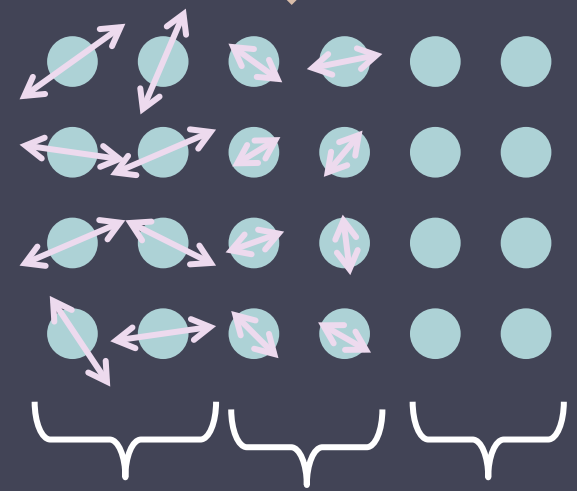


光でエネルギーを伝える



温度が高い 温度が低い

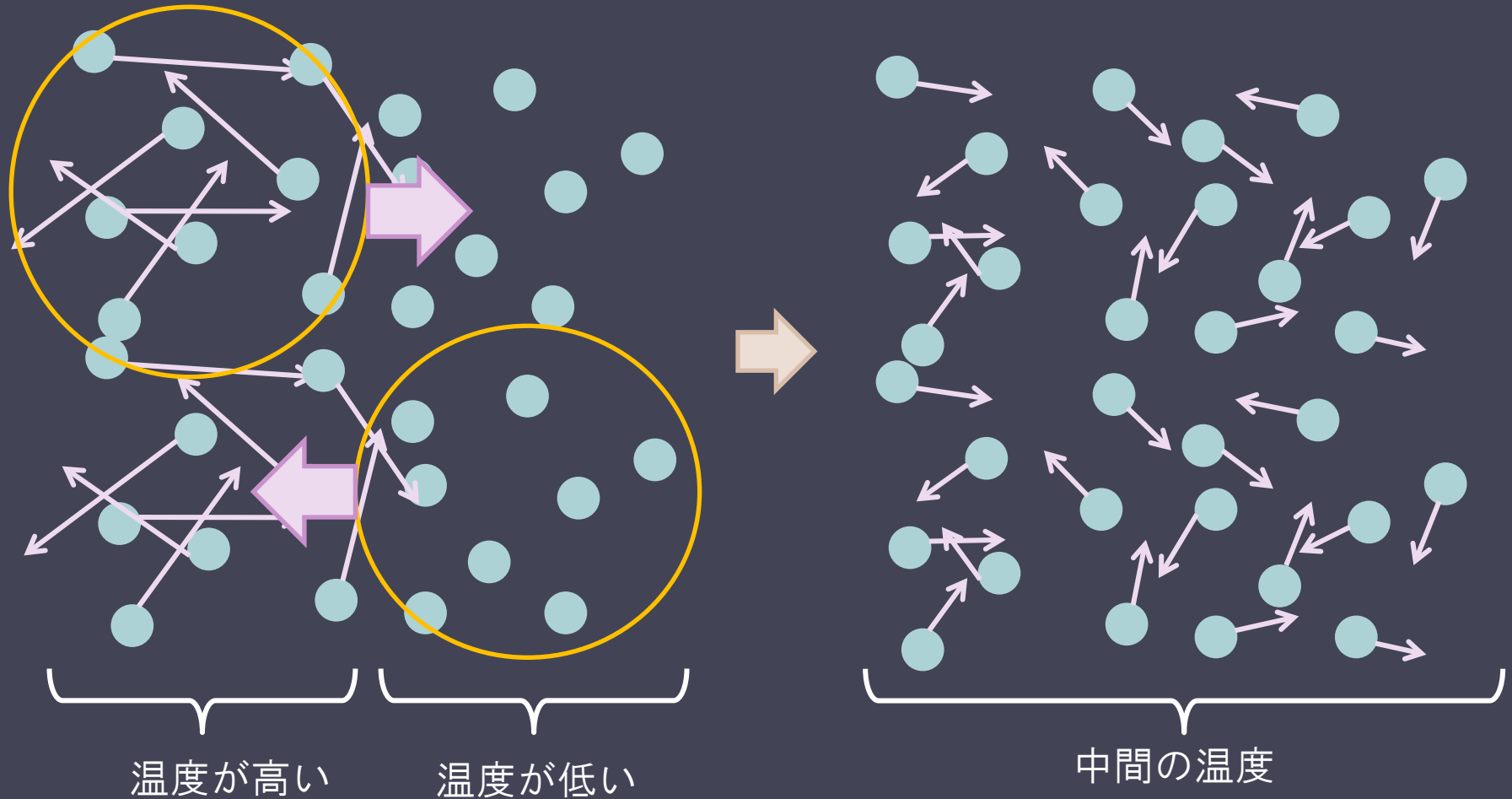
温度が高い 温度が低い



高い 中間 低い

高い 中間 低い

熱の流れ 3. 対流

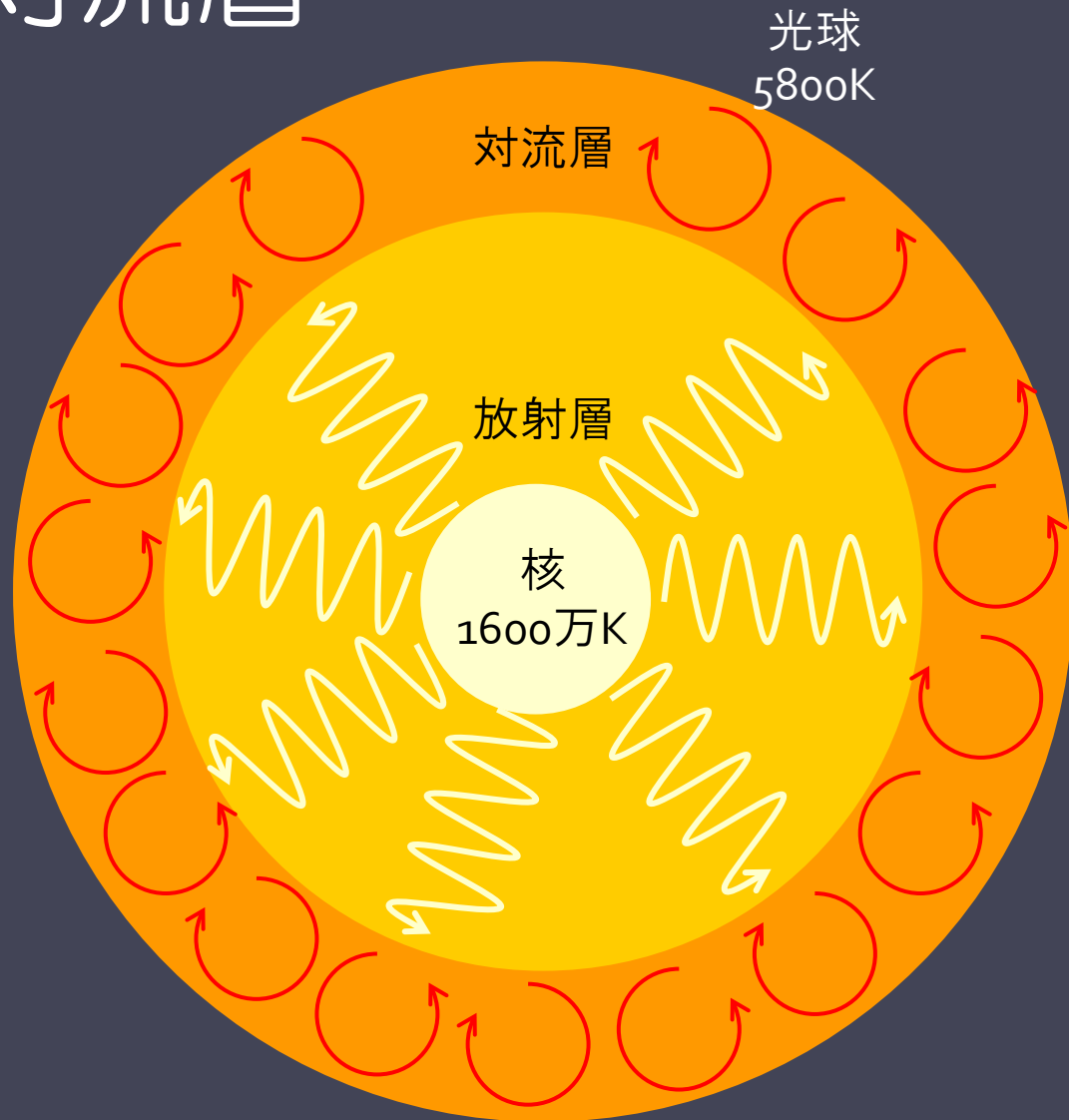


3つの熱の流れ

- 熱伝導は、太陽ではあまり有効ではない
 - 電子はすぐにほかの電子・陽子とぶつかる
- 放射は、温度が高いと効率がよい
 - 太陽中心核付近の温度が高いところ
- 熱伝導でも放射でもエネルギーが運べなくなると、対流が発生して、一気に熱を運ぶ
 - 太陽の表面近くの温度が低いところ

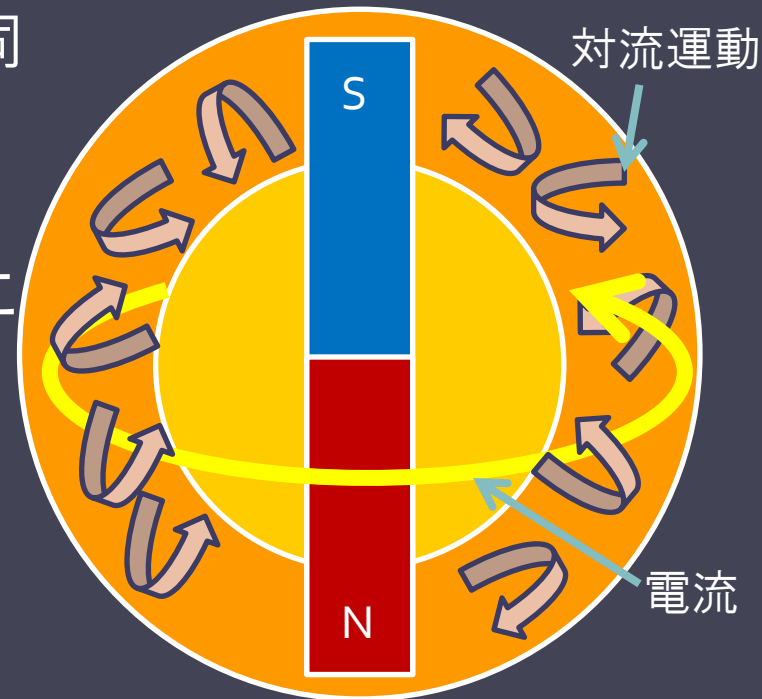
対流層

- 対流が起き、物質がかき混ぜられることによって、熱が運ばれている。
- 磁場が作られている



対流層で磁場が作られる

- ダイナモ
 - 1. 磁石の周りをイオンや電子が動く → 電流が流れる
 - 発電機と同じ
 - 2. 電流が流れると、磁石になる
 - 電磁石
 - 1. の発電機と、2. の電磁石が同時に働く
- 現時点では、ダイナモ理論には種々の難点がある



光球

- 太陽の表面
 - 太陽からの光が私たちにまっすぐ届くようになるところ
 - ガスなので、厚みがある：数100km
 - 太陽半径70万kmよりずっと小さい
- 色温度：5770K

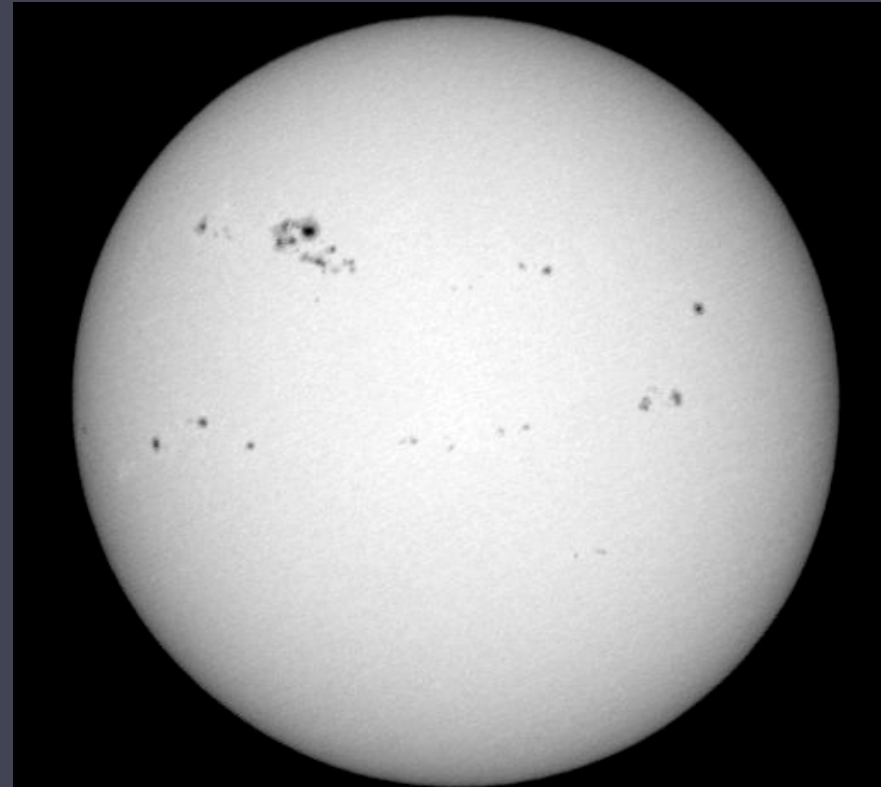
ここからの光は地球に届く

数100km

光球

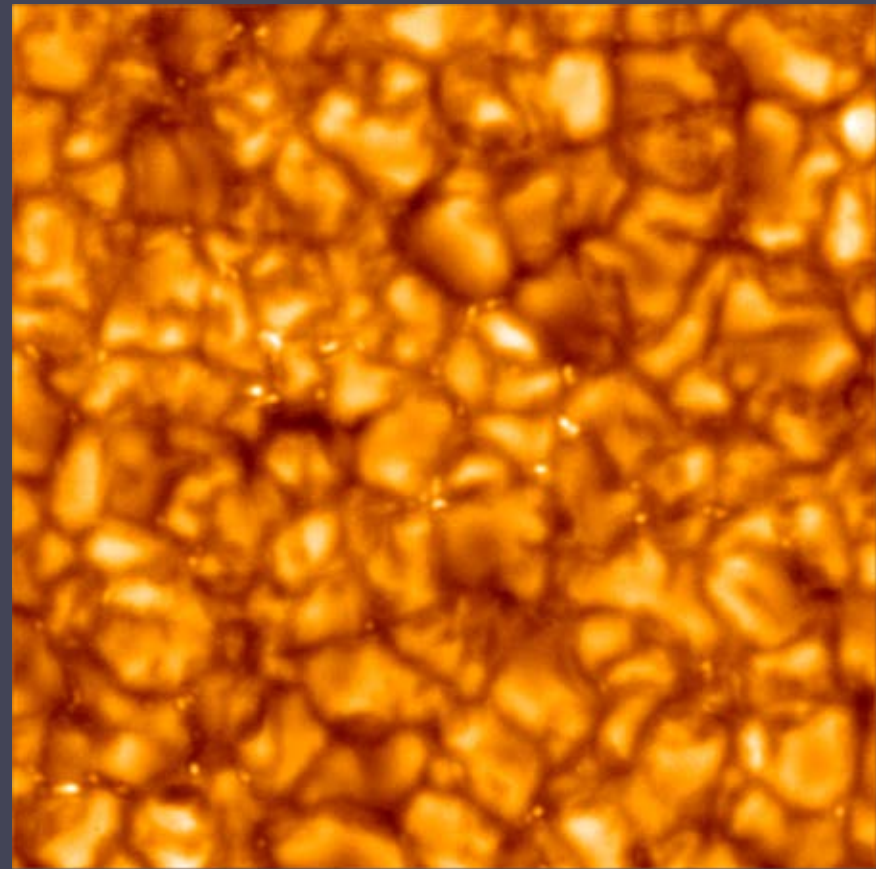
対流層

ここからの光は我々には直接届かない



粒状斑

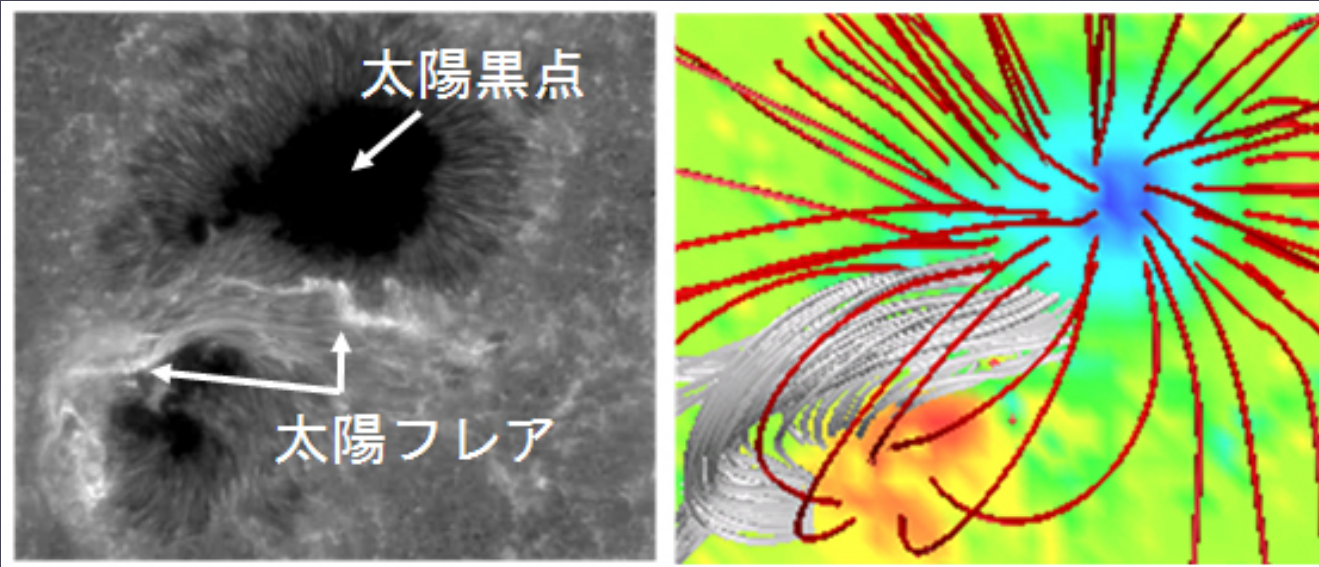
- 対流層の最上部の渦が見えている
 - 明るい部分：高温で上昇
 - 暗い部分：低温で下降
 - 大きさ：約1000km
 - 寿命：6-10分



「ひので」が撮影した粒状斑のGバンド画像
(430nm)：国立天文台

黒点

- 太陽の磁気活動の激しいところ
- 温度が低いので黒く見える (4000K)



京都大学 http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/news_data/h/h1/news6/2009/100315_1.htm

光球面



光球面



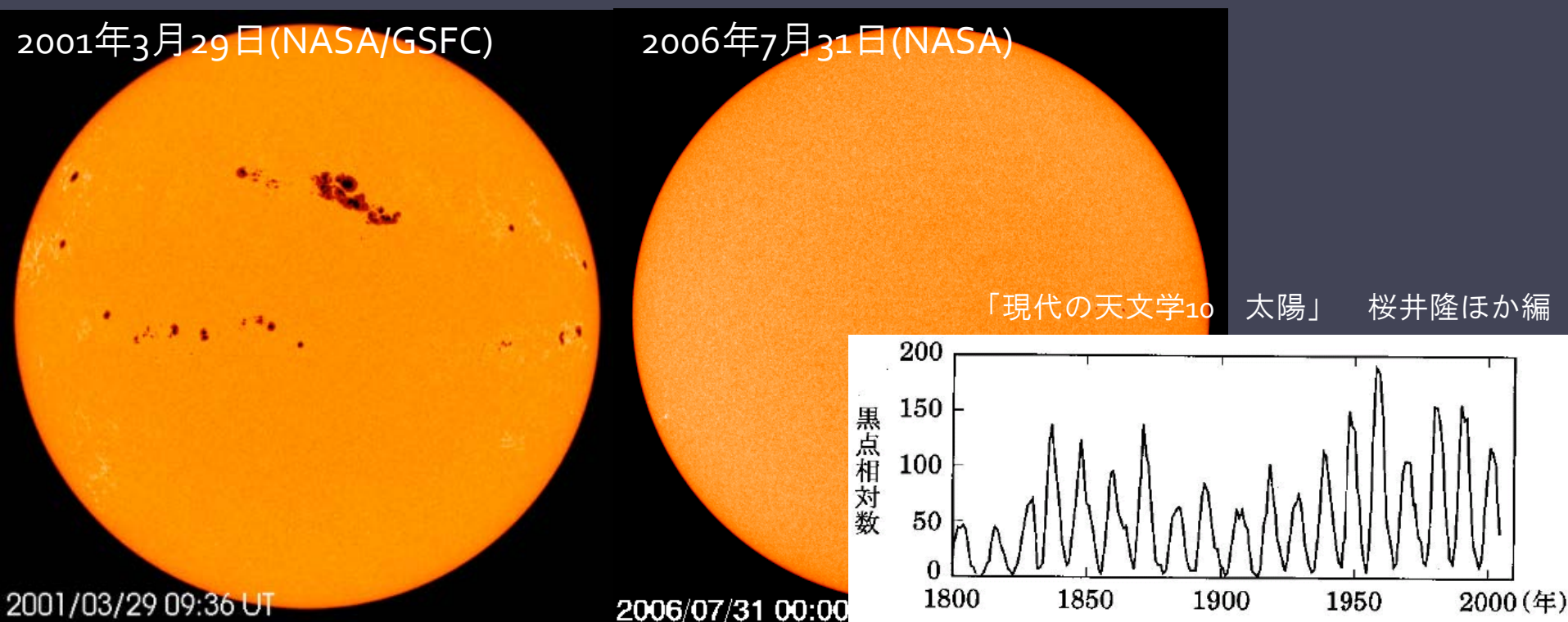
N極

S極



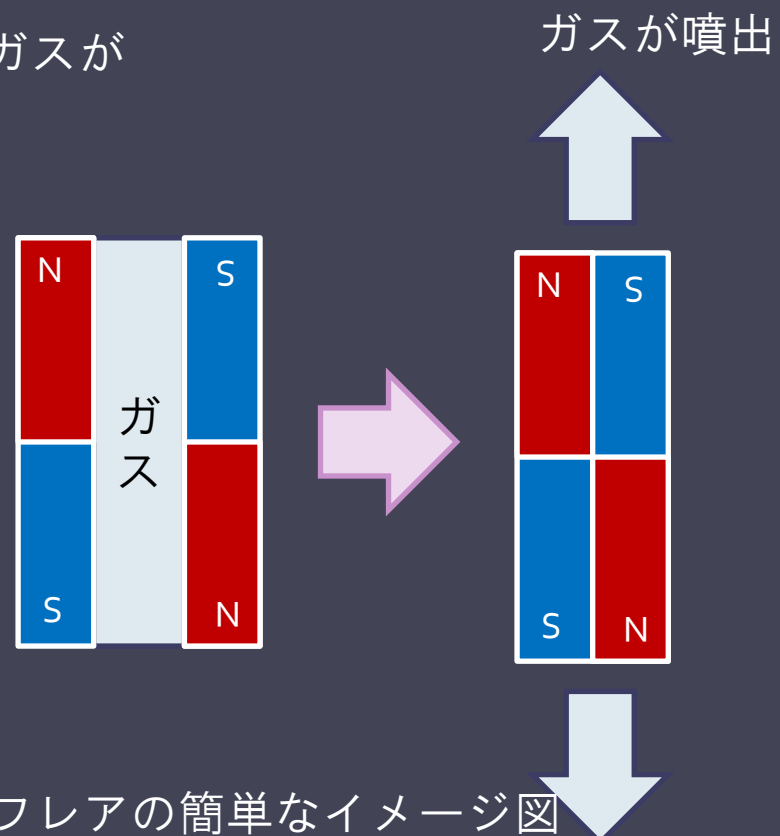
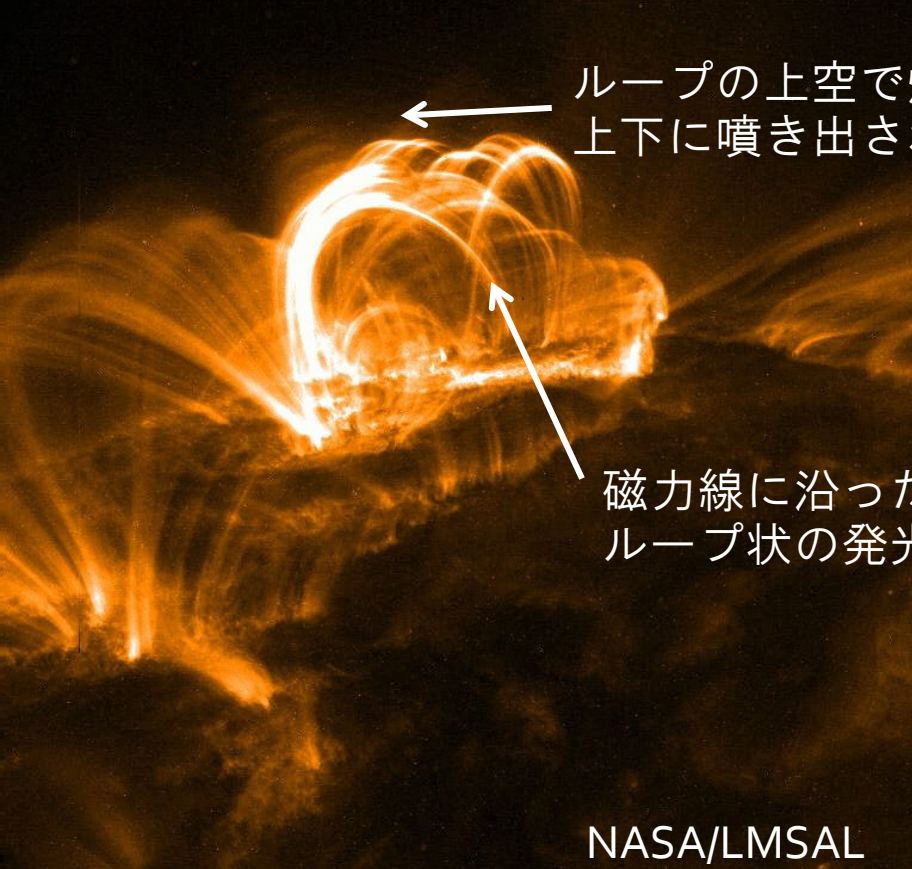
太陽活動の11年周期

- 黒点の数が、11年周期で変動
 - 黒点が多いとき：太陽活動が活発
 - 黒点が少ないとき：太陽活動が静か
- 対流層でのダイナモ活動の周期



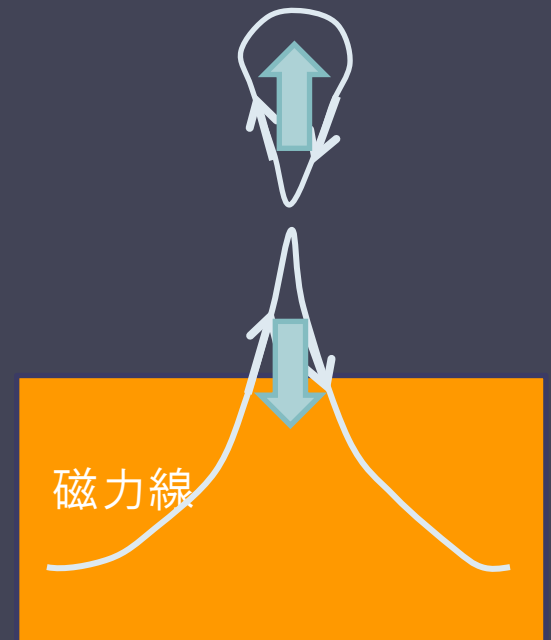
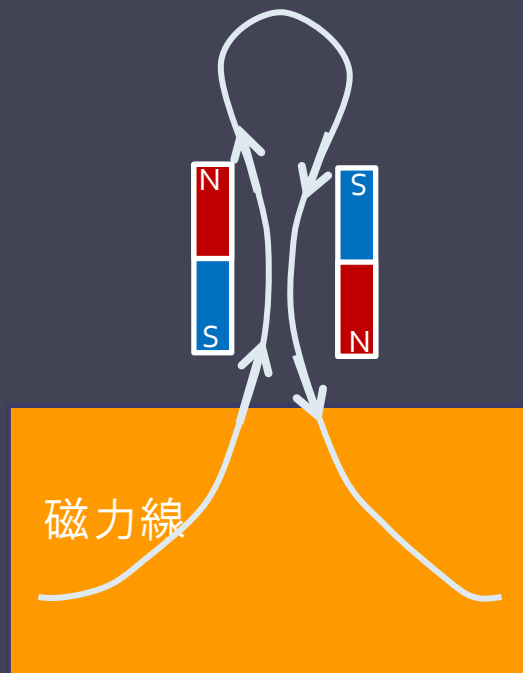
太陽表面の爆発現象（フレア）

- 太陽表面で、磁場のエネルギーが解放される
- 電波から γ 線までの光
- ガスの激しい運動
- 電子やイオンを高速に加速

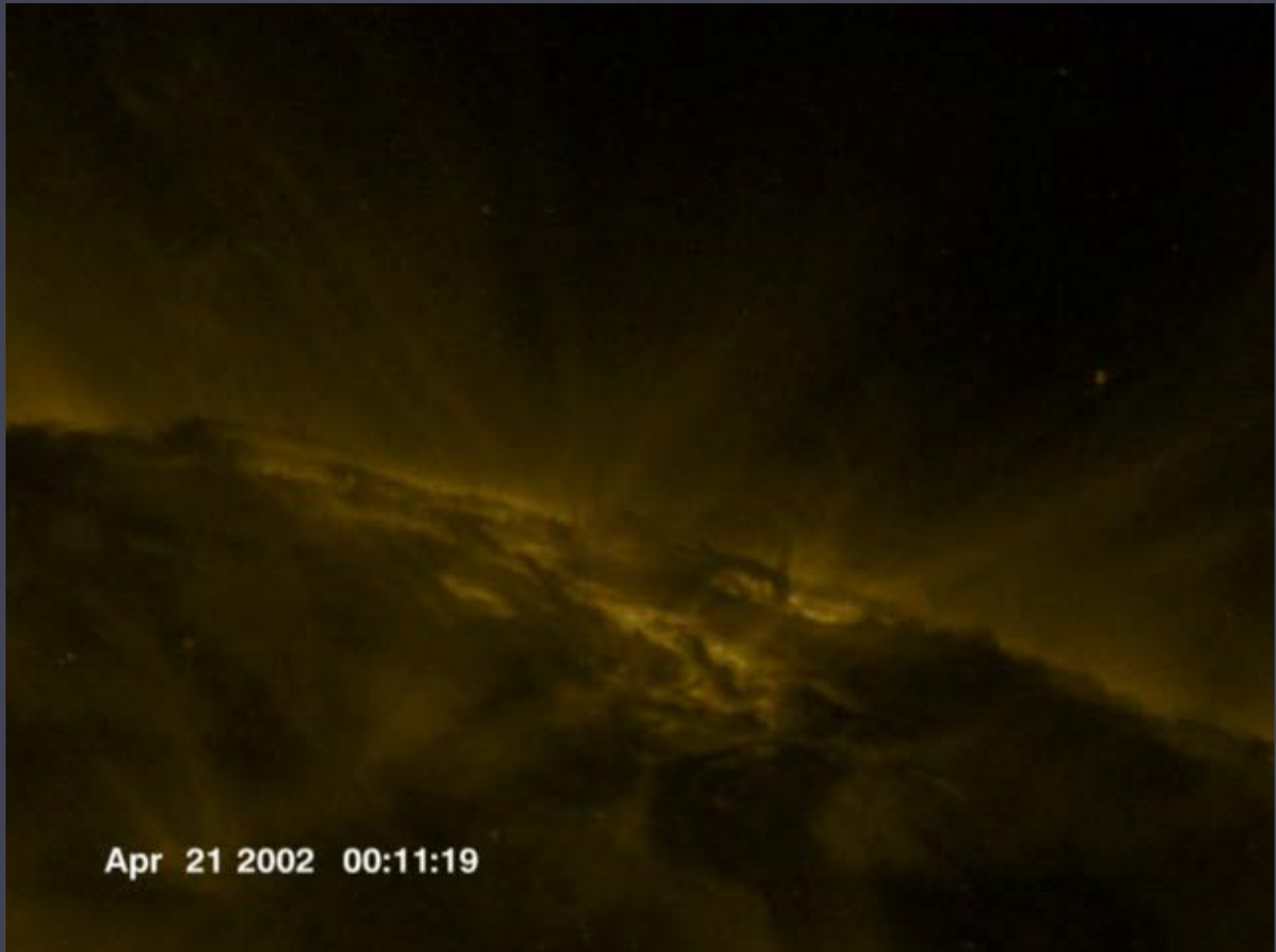


磁場のリコネクション

- 磁力線のつなぎかえ



TRACE衛星が観測した太陽フレア



コロナ

- 高温（100万度）の薄いガス
- 活動領域：ループ状の構造 → 閉じた磁場構造
- コロナホール：磁場が惑星空間に開いている



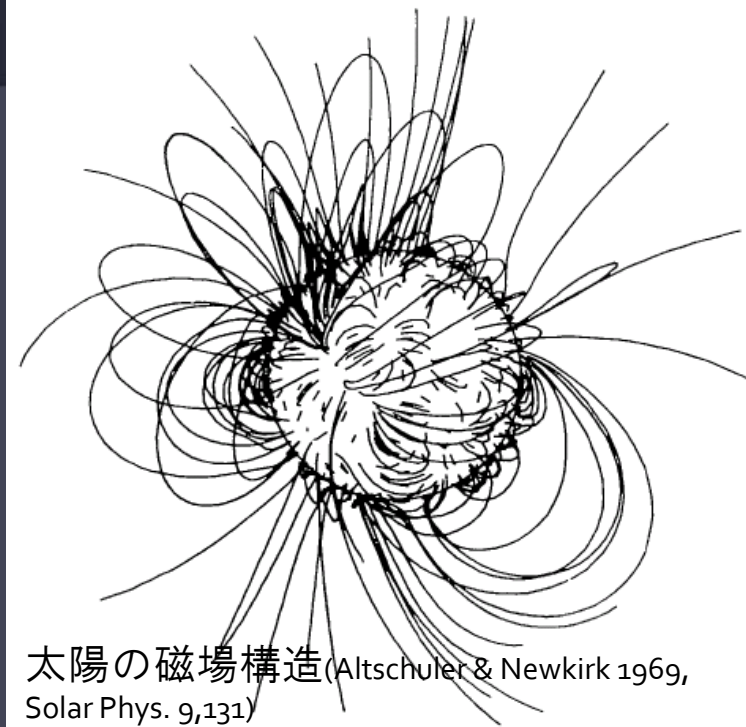
コロナホール



活動領域



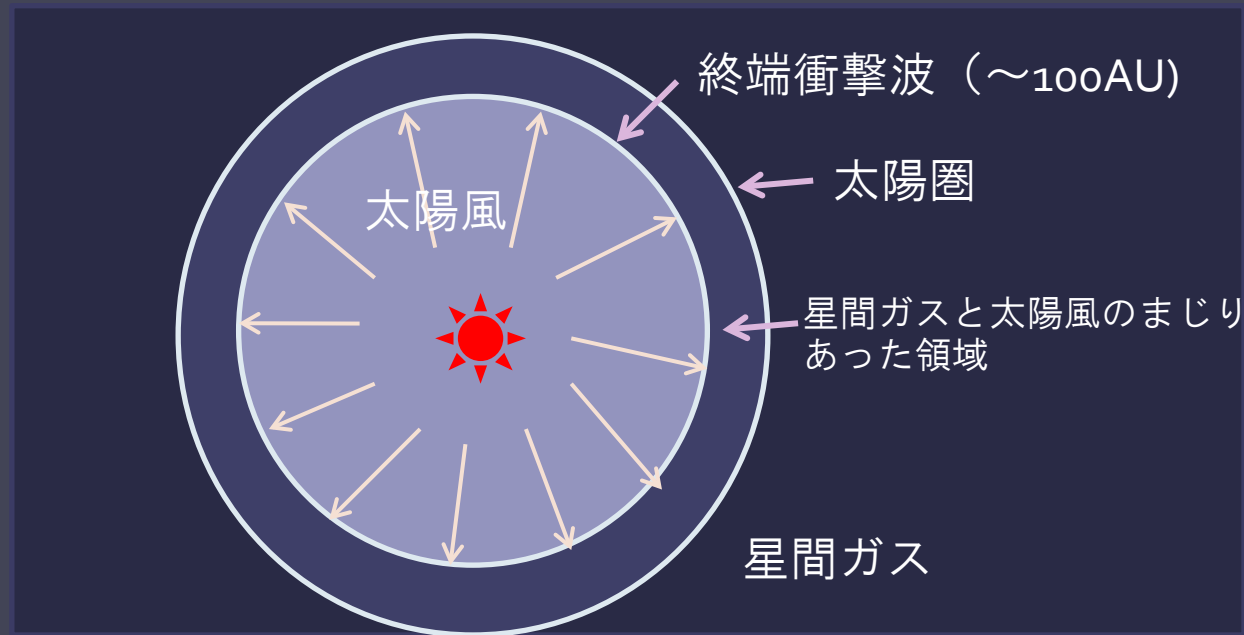
「ようこう」によるX線画像(JAXA)



太陽の磁場構造(Altschuler & Newkirk 1969, Solar Phys. 9,131)

太陽風

- 毎秒100万トンのガスが噴き出している
- コロナは高温（100万度）なので、圧力が高いため、太陽重力に打ち勝って噴き出す
 - 高速風：700-800km/s コロナホールから
 - 低速風：300-400km/s 低緯度から
- 太陽圏
 - 太陽風で満たされた領域（約100天文単位）



参考文献

- 「現代の天文学10巻・太陽」 桜井隆ほか編、
日本評論社

負の比熱の説明

太陽の中では、重力と圧力が釣り合っている。太陽の真ん中らへん (R_1) で、単位面積の上に乗っているもの (M_2) の重さは、中にある質量を M_1 として、

$$\frac{GM_1}{R_1^2} \frac{M_2}{4\pi R_1^2} \approx C_1 \frac{GM_\odot^2}{R_\odot^4}$$

これが圧力と釣り合っている。

$$P \approx C_1 \frac{GM_\odot^2}{R_\odot^4}$$

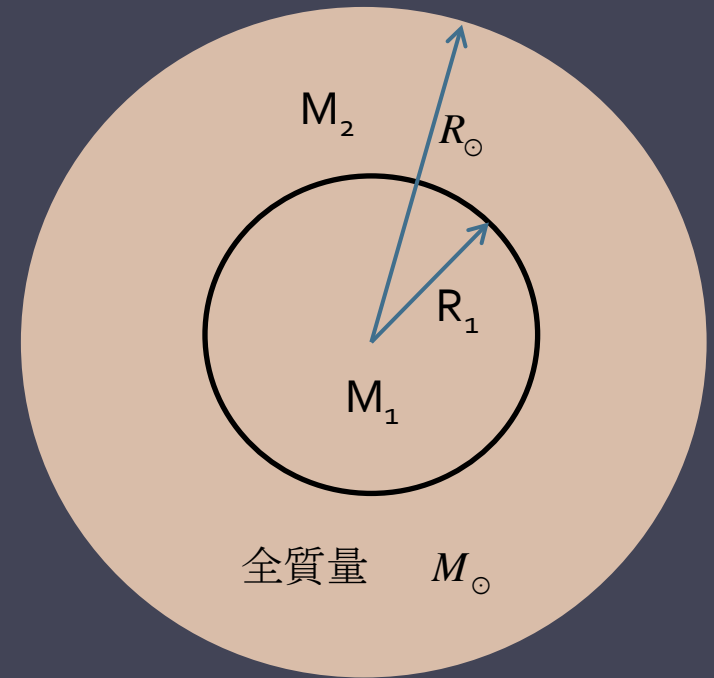
ボイルシャルルの法則より

$$PV = P \frac{4}{3} \pi R_1^3 \approx C_2 P R_\odot^3 = N\mathcal{R}T$$

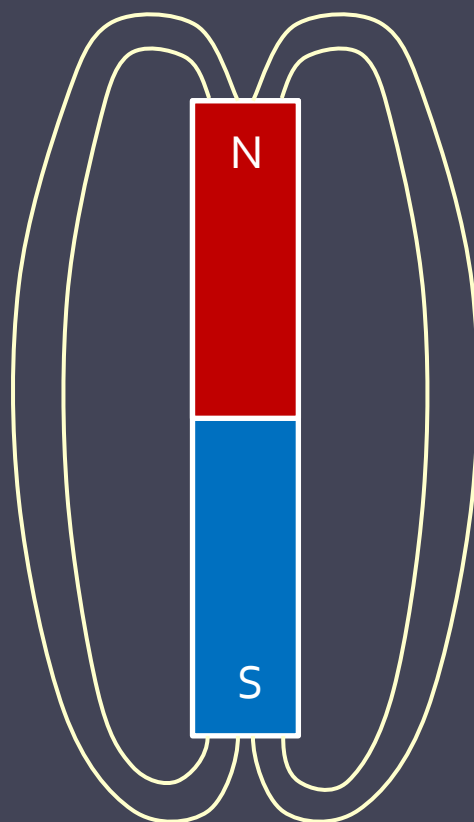
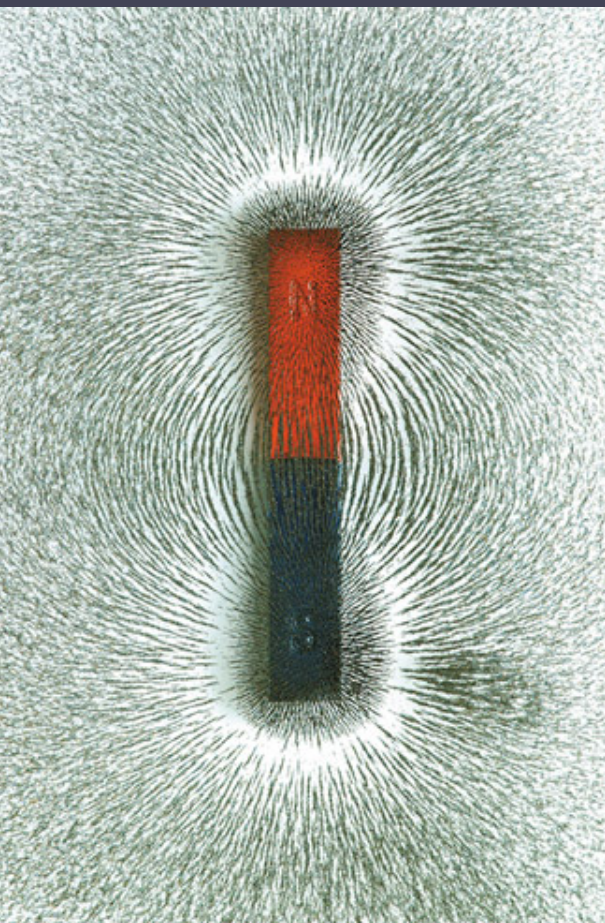
$$C_2 C_1 \frac{GM_\odot^2}{R_\odot^4} R_\odot^3 = N\mathcal{R}T$$

$$\frac{CGM_\odot^2}{N\mathcal{R}} \frac{1}{R_\odot} = T$$

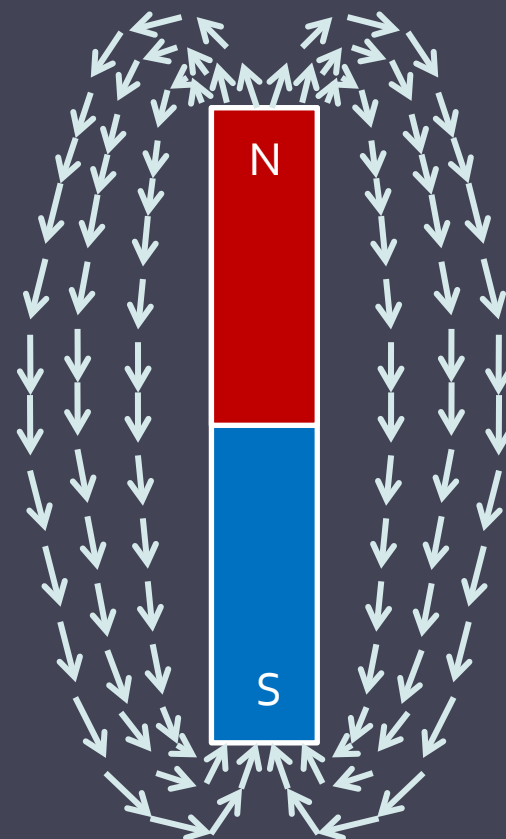
つまり、 T は R_\odot に反比例。もし、中心部で核反応が激しくなると、温度も上がろうとするが、圧力が上がり、太陽は膨張する。その結果、温度が下がってしまう。核反応が止まると、圧力が下がり、太陽はつぶれ、収縮する。その結果温度が上がる。



磁場（磁界）、磁力線

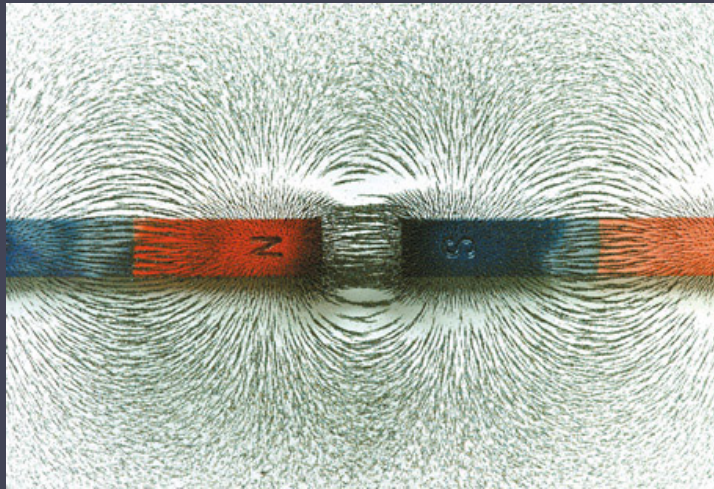


磁力線

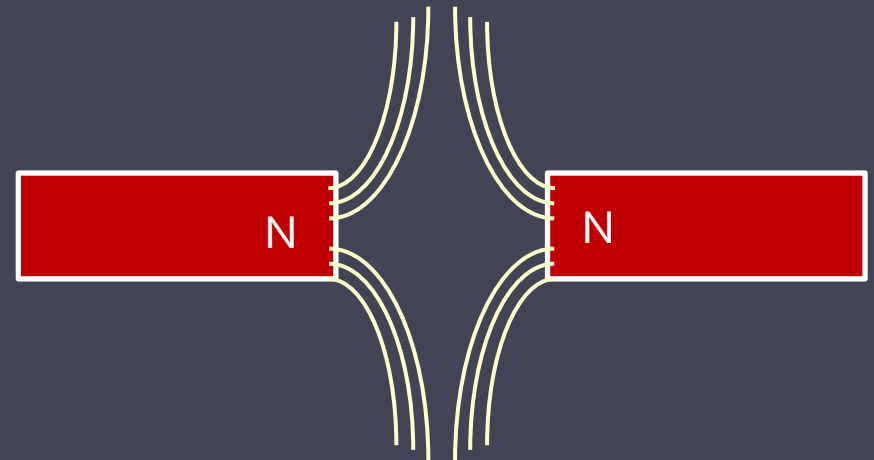
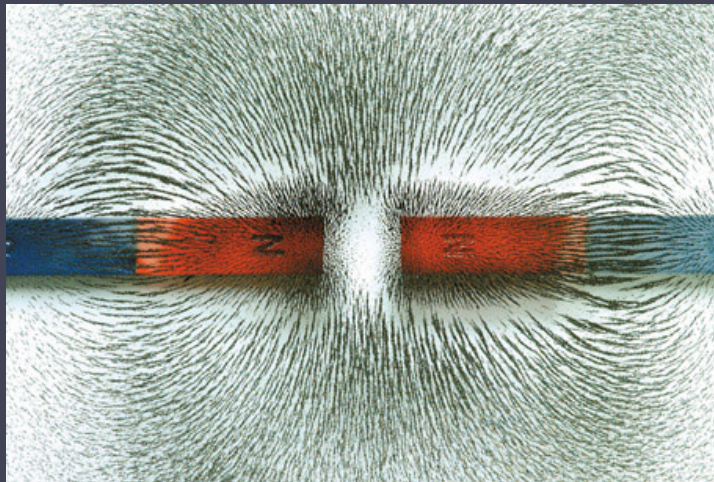


磁場（磁界）

磁力線はゴムひもにも似ている



磁力線が縮む



磁力線が反発する

磁力線と物質の相互作用

- プラズマ：電離した物質
- 電子やイオンは磁力線に絡みつく

