

サーモグラフィはどのように温度を測るのか？

～熱放射とステファン=ボルツマンの法則～



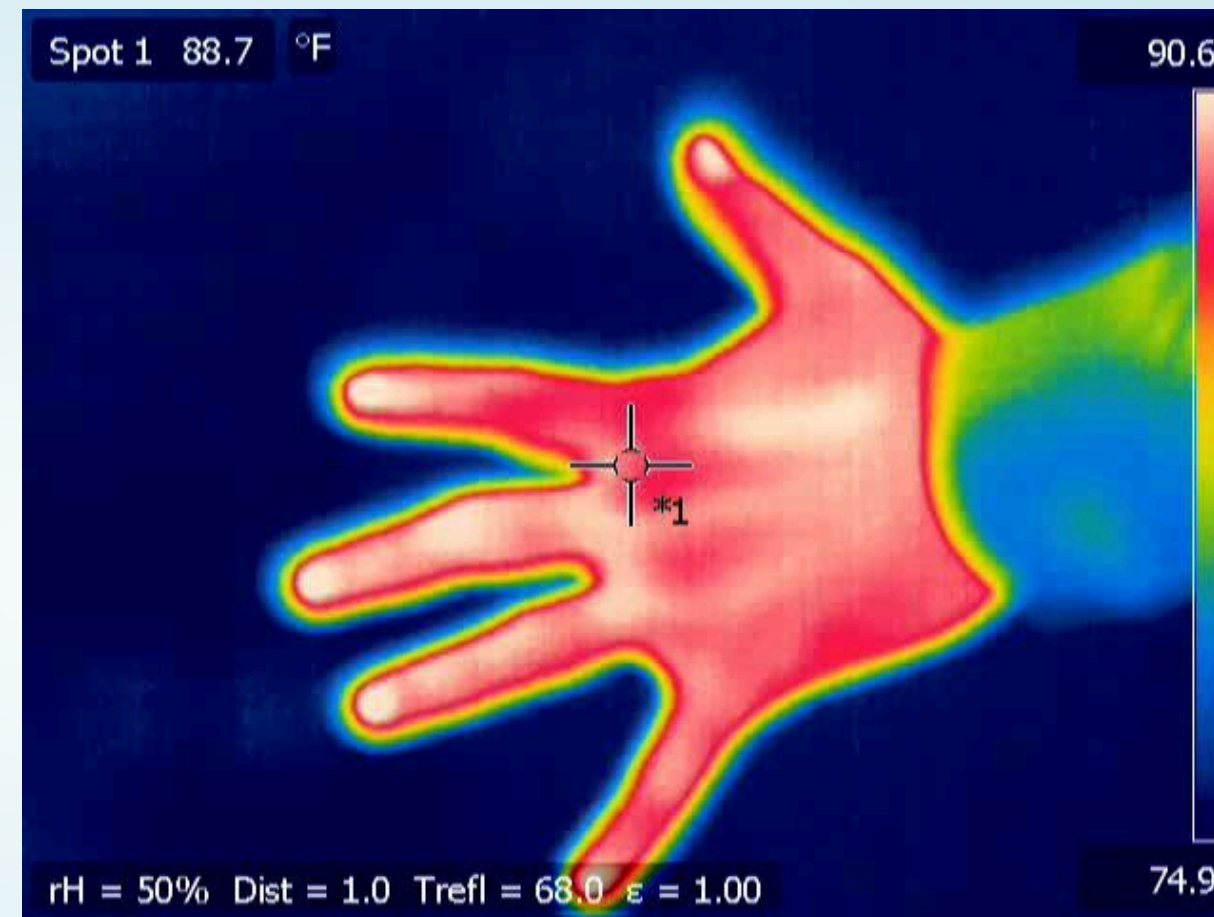
今日話すこと

- サーモグラフィが「触れずに温度を測れる」のはなぜ？
- すべての物体は見えない光を放っている (**熱放射**)
- **ステファン=ボルツマンの法則** $E = \sigma T^4$
 - なぜ温度の **4乗** なのか？
- 黒体から現実へ — **放射率** と参照テープ法
- 手元のサーモカメラから太陽・地球観測衛星まで

§1. 温度と見えない光

サーモグラフィという技術

- 熱い場所は赤く、冷たい場所は青く
- 工場の検査、感染症対策、防犯カメラ...
- 真っ暗闇の中でも「見える」便利な技術




なぜ、触りもせず離れた場所の温度を測れる？

すべての物体は見えない光を放っている

- 🙌わたしたちの体も、🪑部屋の家具も、🧊冷たい氷も
- その光のエネルギーは **温度によって決まっている**
- 温度が高い → 強く光る / 温度が低い → 弱く光る
- サーモグラフィは **見えない光を捉えて温度を読む**

同じ法則で繋がる3つの世界


 手元のサーモグラフィー
発熱者を見分ける病院の
入り口

 太陽の表面温度

触れられない星の温度を
測る

 地球観測衛星

宇宙から地表温度を見守
る

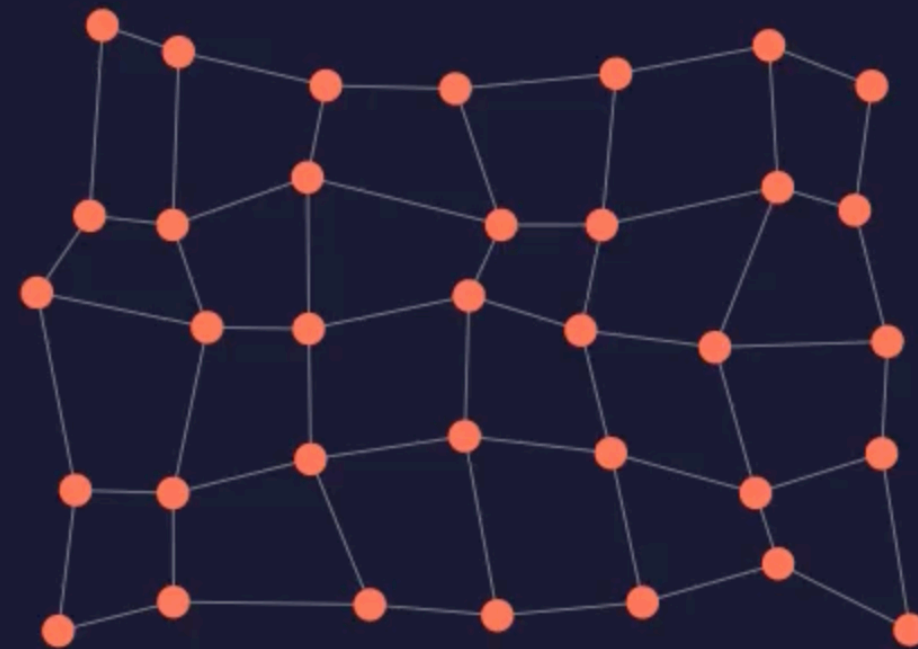
 共通するもの

**ステファン=ボルツマン
の法則**

§2. 熱放射の正体

物質は原子の集まり

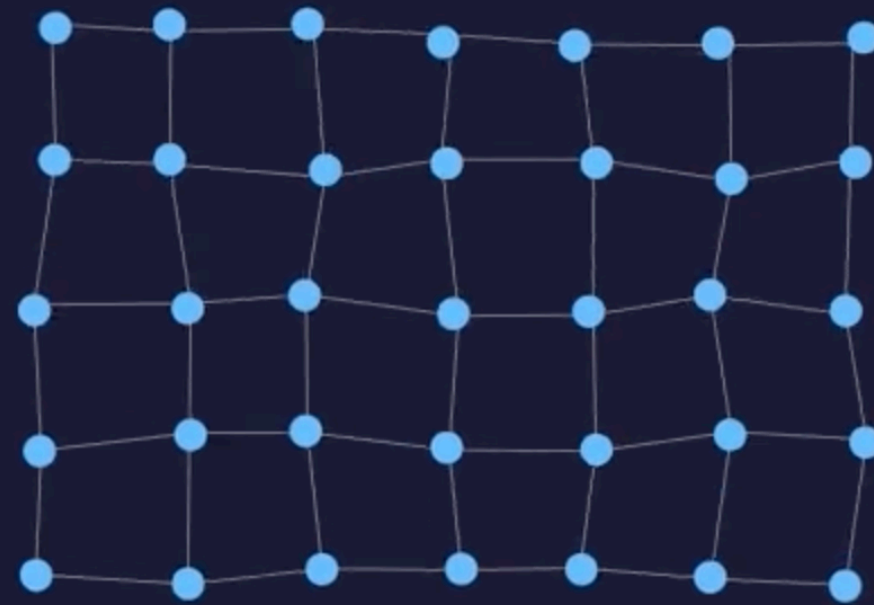
- 固体は原子・分子が **バネで結ばれた** ような状態
- **温度が高い = 原子の振動が激しい**
- 温度が下がると振動は弱まる



T = 600 K

物質は原子の集まり

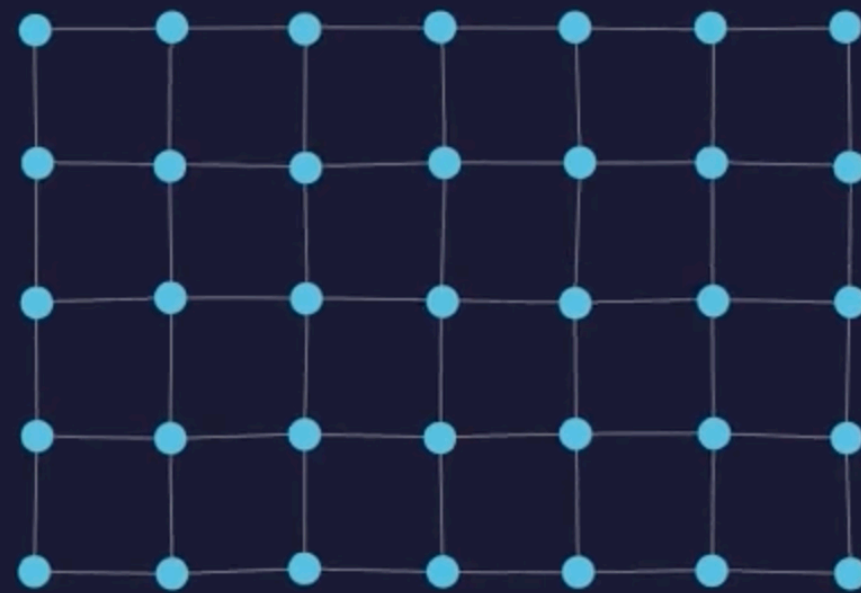
- 固体は原子・分子が **バネで結ばれた** ような状態
- **温度が高い = 原子の振動が激しい**
- 温度が下がると振動は弱まる



T = 300 K 室温 / Room temp.

物質は原子の集まり

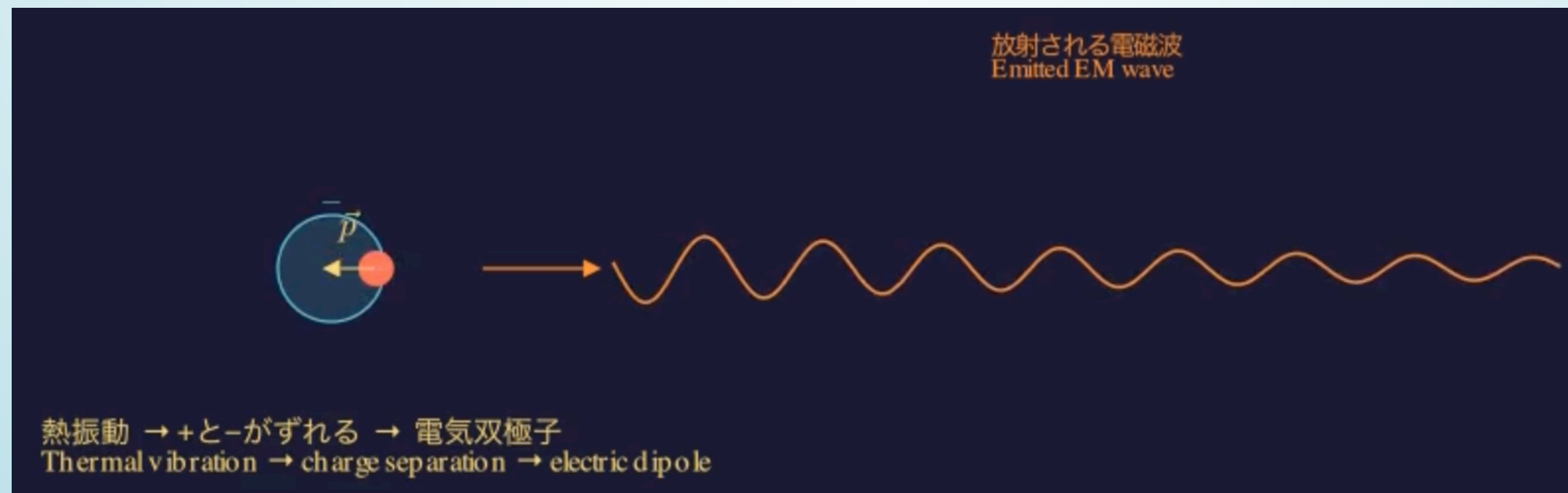
- 固体は原子・分子が **バネで結ばれた** ような状態
- **温度が高い = 原子の振動が激しい**
- 温度が下がると振動は弱まる



$T \rightarrow 0\text{K}$

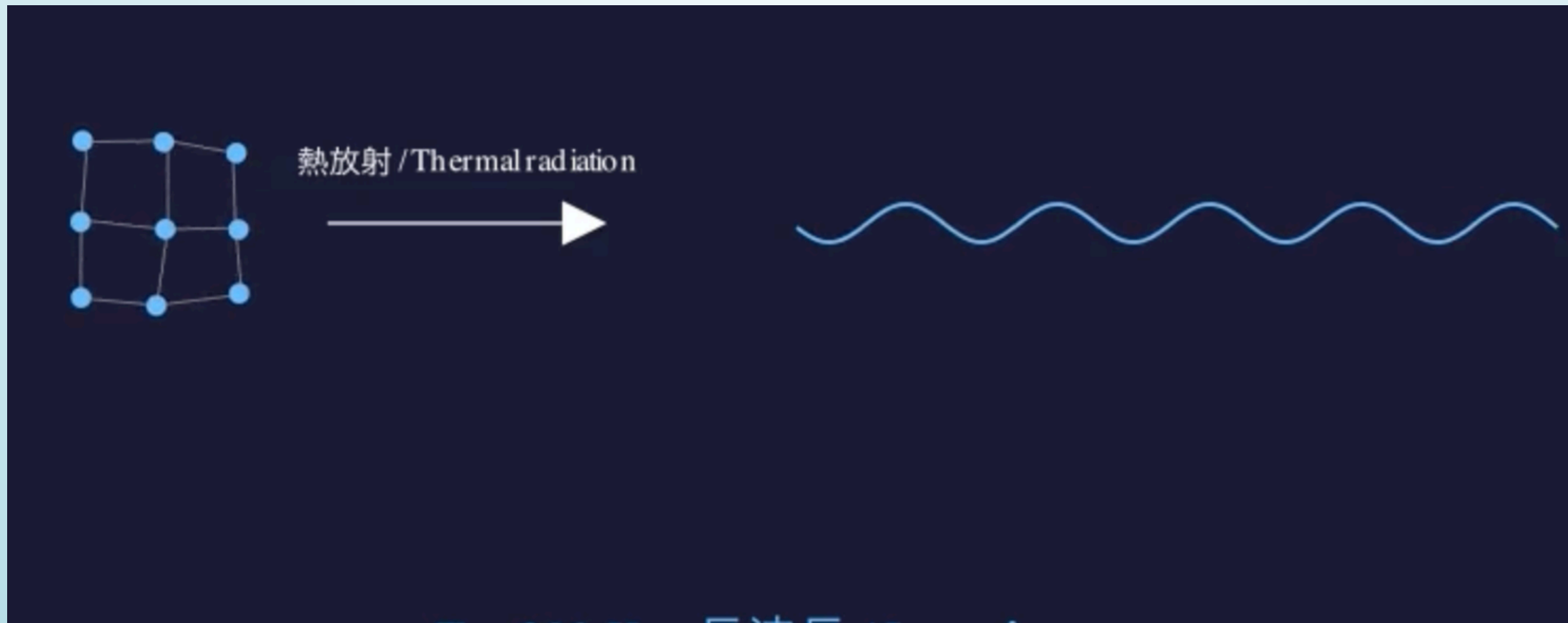
なぜ振動が「光」になるのか？

- 原子は **+**の原子核 と **-**の電子 からできている
- 原子が振動すると **+** と **-** の重心がずれる
- お風呂で指を震わせると水面に波ができるように、**電荷を揺らすと電磁波が広がる**



熱放射 — 熱を見る目の正体

- 熱によって原子が震え、電磁波が放射される現象
→ **熱放射**
- 物体は常に光っている (絶対零度でなければ)
- わたしたちの身の回りの物体
 - 目には見えないが、赤外線を放ち続けている



§3. ステファーン=ボルツ マンの法則

エネルギーは温度の4乗に比例する

ステファン=ボルツマンの法則

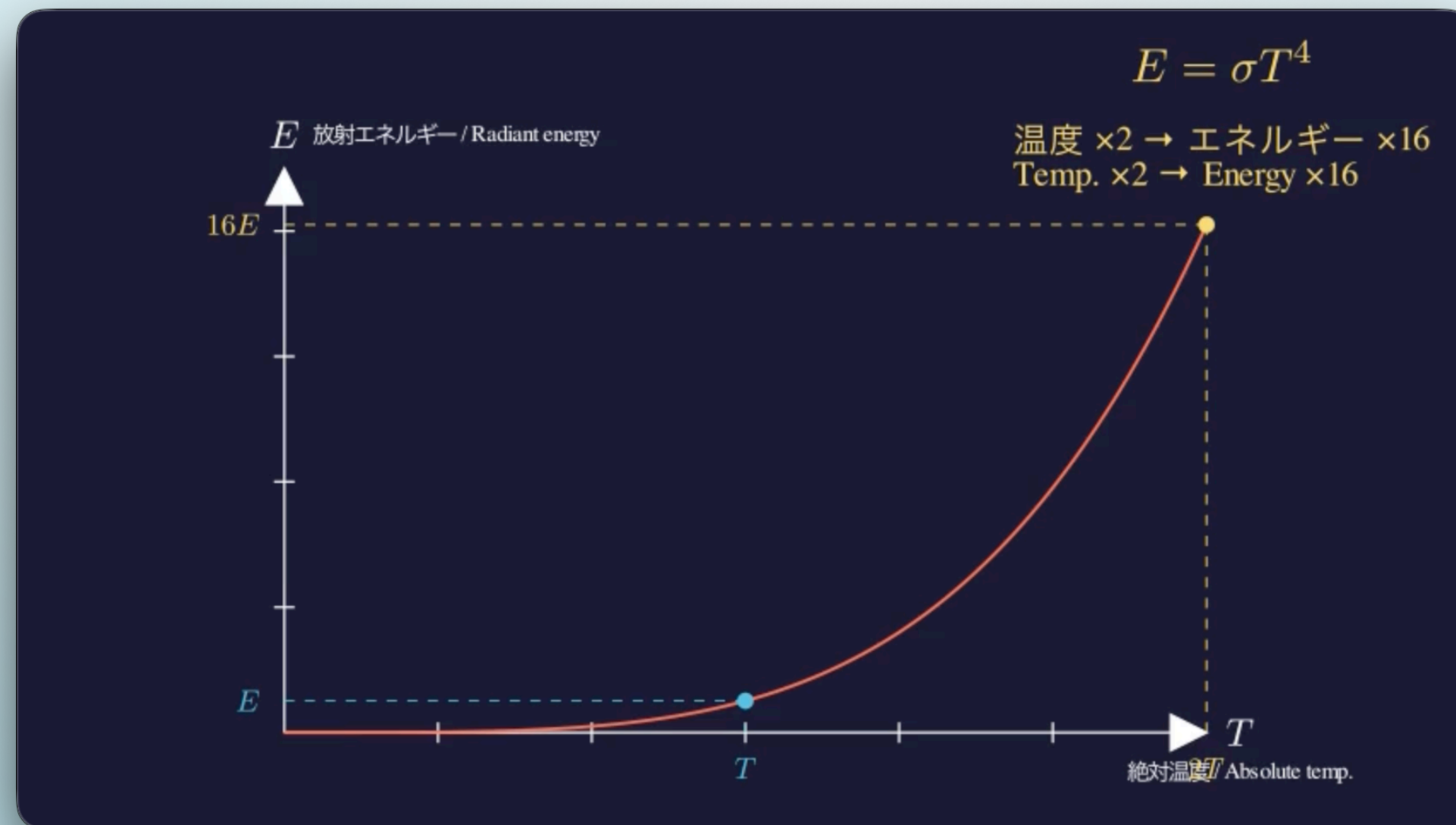
- ヨーゼフ・ステファン が実験で発見 (1879年)
- 教え子 ルートヴィヒ・ボルツマン が理論的に導出
- 黒体から放出される光のエネルギーは **絶対温度の4乗** に比例する

$$E = \sigma T^4$$

σ : ステファン=ボルツマン定数

4乗の驚き – Tが2倍でEは16倍

- 温度が **わずかに上がるだけ** で放出エネルギーは爆発的に増える
- 温度差 → **拡大されて** エネルギー差として現れる



「黒体」とは何か？

- 光のエネルギーを **すべて吸収** する理想的な物体
- 吸収したエネルギーはすべて原子の振動に変わる
- → 黒体から出る光は **純粋に熱放射だけ**



「黒体」とは何か？

- 光のエネルギーを **すべて吸収** する理想的な物体
- 吸収したエネルギーはすべて原子の振動に変わる
- → 黒体から出る光は **純粋に熱放射だけ**

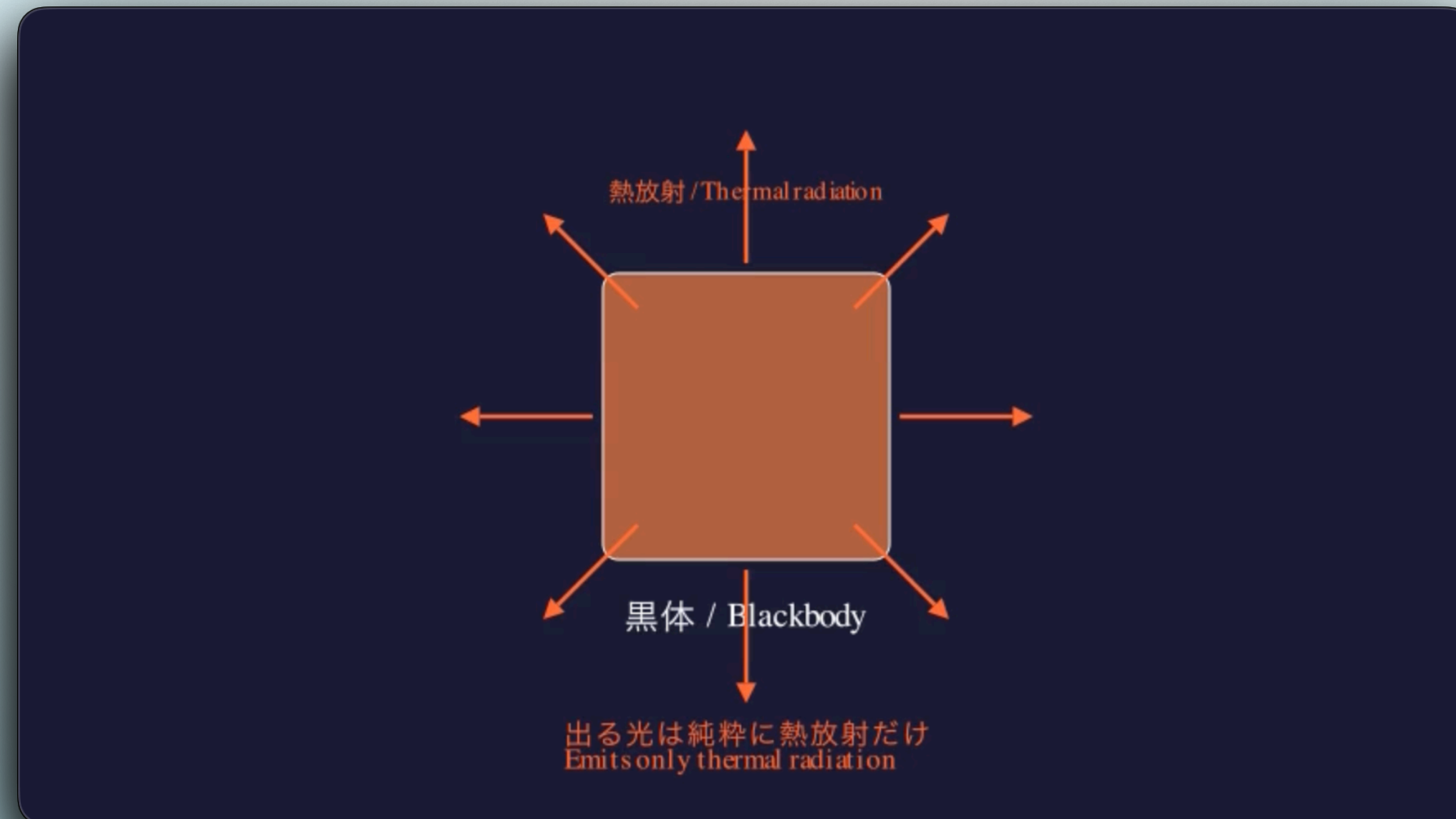


黒体 / Blackbody

エネルギーが原子の振動に変わる
Energy converts to atomic vibrations

「黒体」とは何か？

- 光のエネルギーを **すべて吸収** する理想的な物体
- 吸収したエネルギーはすべて原子の振動に変わる
- → 黒体から出る光は **純粋に熱放射だけ**



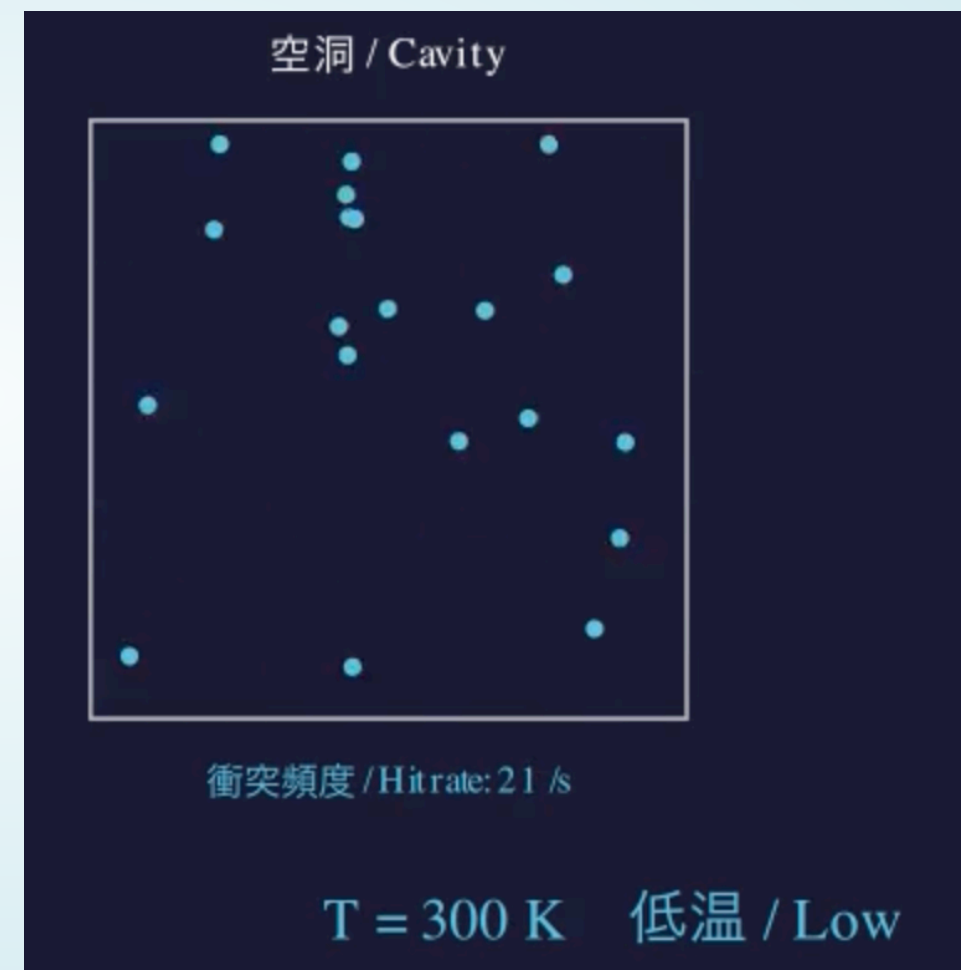
なぜ「4乗」か

- 問い: ステファーンが実験で見つけた4乗則を、理論から導けるか?
- ボルツマンの大胆な発想 —— 「光を気体のように扱えないだろうか？」

鍵は **圧力** — 光と気体を結ぶ橋

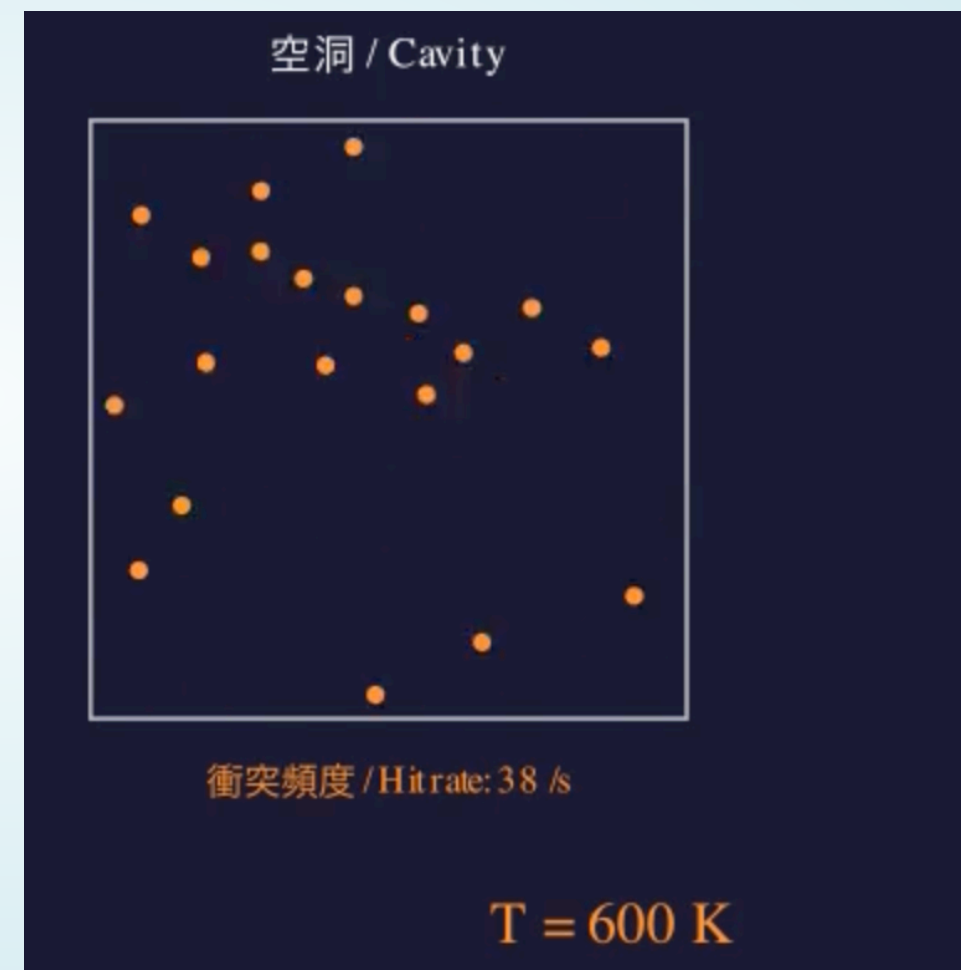
光にも圧力がある

- **マクスウェル**: 光が当たった物体は**押される** (光圧)
- 🤔 「光に圧力があるなら、気体と同じように**膨張・圧縮**が考えられるのでは？」
- **ボルツマン**: 密閉した箱の中の光を「**光の気体**」とみなした



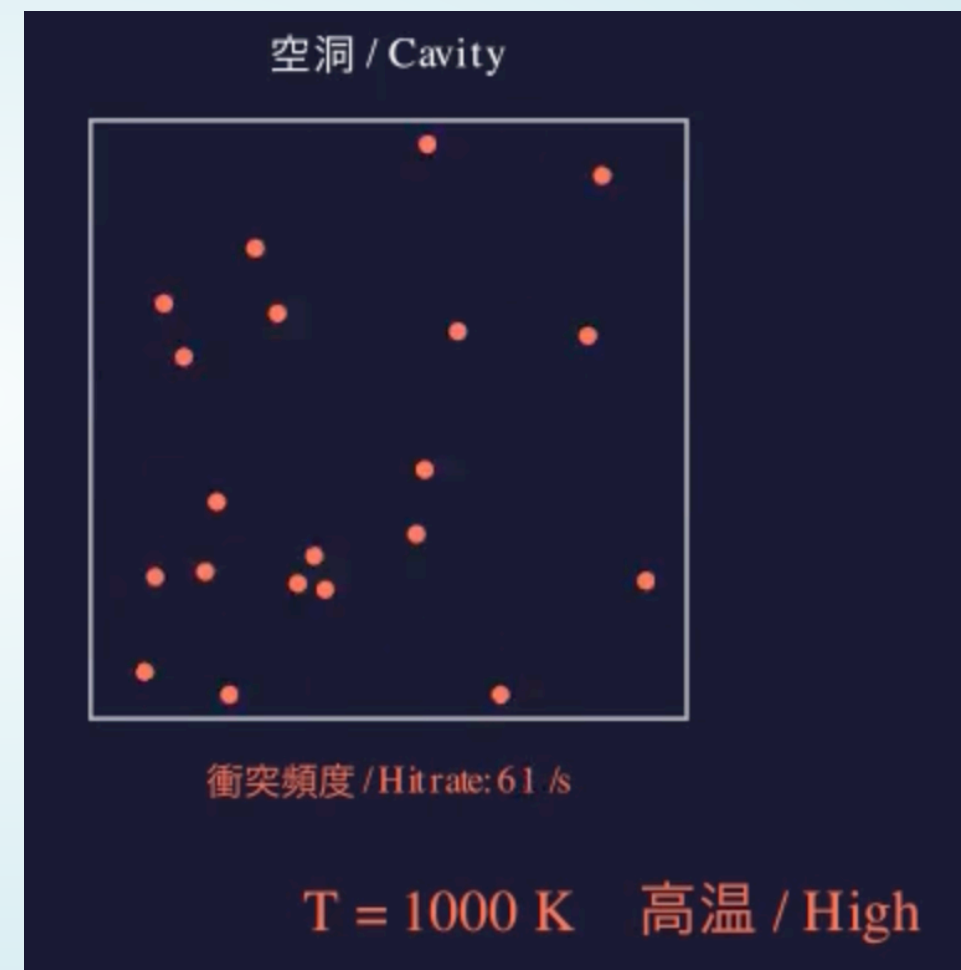
光にも圧力がある

- **マクスウェル**: 光が当たった物体は**押される** (光圧)
- 🤔 「光に圧力があるなら、気体と同じように**膨張・圧縮**が考えられるのでは？」
- **ボルツマン**: 密閉した箱の中の光を「**光の気体**」とみなした



光にも圧力がある

- **マクスウェル**: 光が当たった物体は**押される** (光圧)
- 🤔 「光に圧力があるなら、気体と同じように**膨張・圧縮**が考えられるのでは？」
- **ボルツマン**: 密閉した箱の中の光を「**光の気体**」とみなした



熱力学第一法則と光の気体

- 熱力学第一法則を「光の気体」に適用
 - → 光の圧力・エネルギー・温度の関係式

$$dU = TdS - PdV$$

$$\Rightarrow \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_T = T \left(\frac{\partial S}{\partial V} \right)_T - P$$

マクスウェルの関係式

- ヘルムホルツ自由エネルギー $F = U - TS$ の全微分から

$$dF = -SdT - PdV$$

$$\Rightarrow \left(\frac{\partial S}{\partial V} \right)_T = \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_V$$

熱力学的状態方程式

- 2つの式から **熱力学的状態方程式** が得られる

$$\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = T \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V - P$$

- 圧力 P の温度依存性さえ分かれば、エネルギー U の振る舞いが決まる

光の圧力はエネルギー密度の 1/3

- 光は箱の中を **3次元すべての方向** に飛び回る
- 圧力は全方向に等しく分配される
 - → 1方向あたりに配分されるのは全体の1/3

$$P = \frac{u}{3} \quad (u : \text{エネルギー密度})$$

熱力学的状態方程式に代入

- $U = uV$ より $\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = u$
- $P = \frac{u}{3}$ より $\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V = \frac{1}{3} \frac{du}{dT}$

$$u = \frac{T}{3} \frac{du}{dT} - \frac{u}{3}$$

変数分離と積分

- 変数分離形に整理して両辺を積分すると4乗則が得られる

$$\frac{du}{u} = 4 \frac{dT}{T}$$
$$\Rightarrow u = \sigma T^4$$

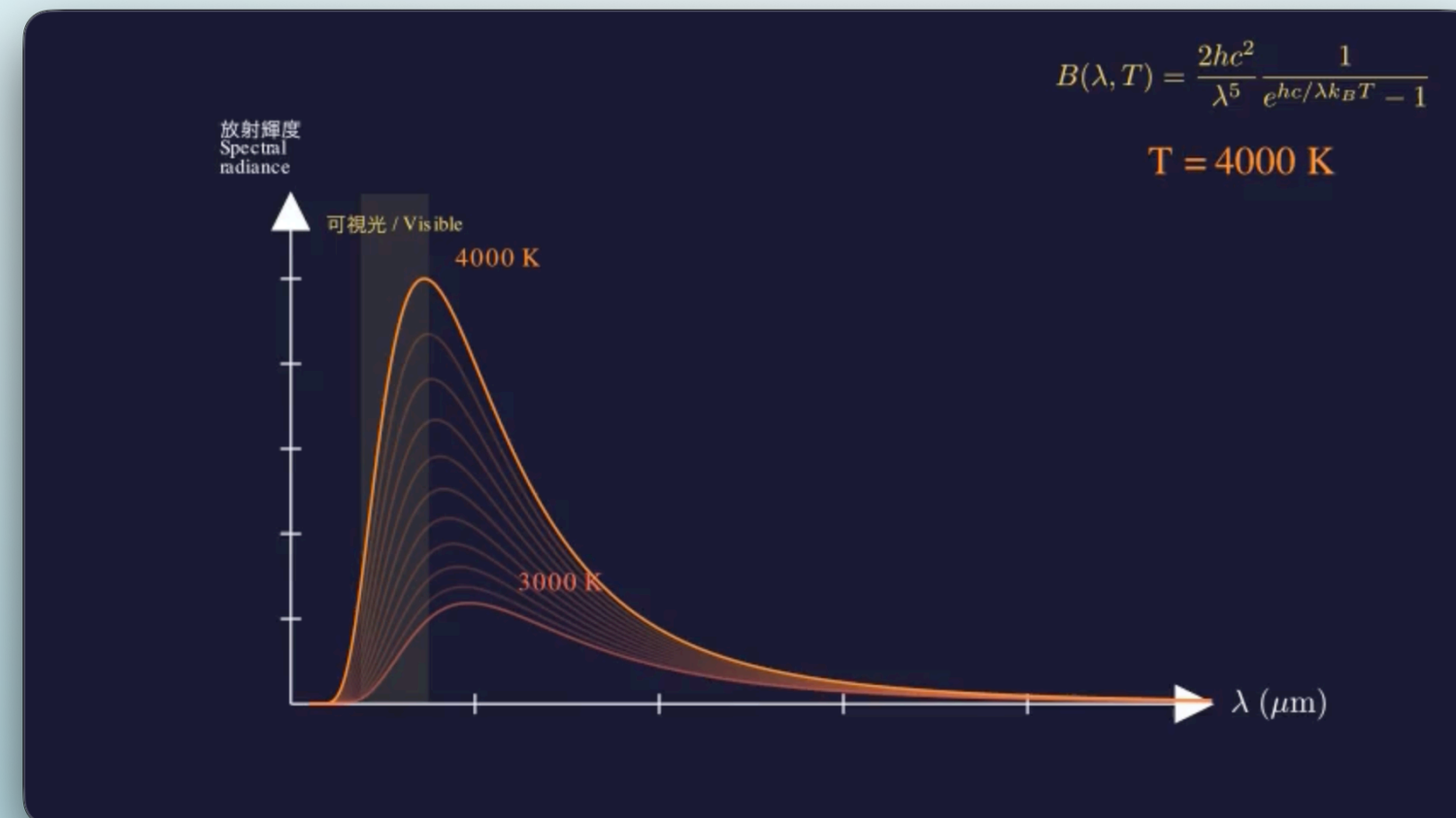
三つの物理の結晶

実験 (ステファーン) × 電磁気学 (マクスウェル) × 熱力学 (ボルツマン)

これら3つが結びついて得られたのがステファーン=ボルツマンの法則

プランクへの扉

- この法則は「どの波長の光がどれだけ出ているか」は答えない
- その問いに答えたのが **プランクの黒体放射理論**
- プランク定数を使うと比例定数 σ も **理論的に厳密な定数** として表せる



ステファーン=ボルツマン定数 Σ

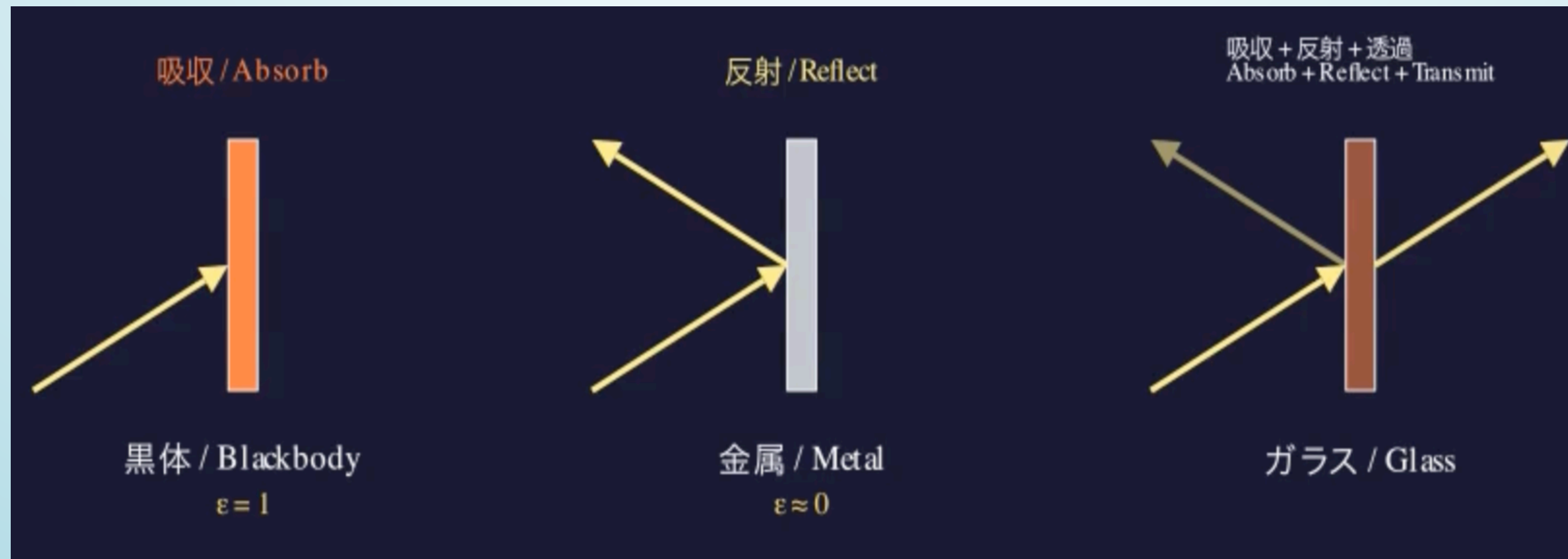
$$\sigma = \frac{2\pi^5 k_B^4}{15h^3 c^2} \approx 5.67 \times 10^{-8} \text{ (W, m}^{-2}, \text{K}^{-4}\text{)}$$

- ステファーン=ボルツマン定数 σ は発見当時は実験的に求める比例定数
- しかし σ はボルツマン定数・プランク定数・光速から構成される普遍定数

§4. 実用化への壁 — 放射 率

黒体は理想 – 現実の物体は？

- でも現実の物体は...
 - 黒いテープ → ほぼ黒体
 - **金属・鏡** → 光を反射してしまう
- 「どのくらい効率よく光を吸収・放射できるか」を表すのが **放射率 ϵ**



放射率を考慮した式

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad (0 \leq \varepsilon \leq 1)$$

- $\varepsilon = 1 \rightarrow$ **黒体** (光を完全吸収・完全放射)
- ε が小さいほど \rightarrow 反射光が優位になる
- 実際の温度測定では **物質固有の放射率** を掛けて補正する
- 金属コップ($\varepsilon \approx 0.05$)は実際の中身より **冷たく** 見えたりする！

参照テープ法 – アナログな知恵

1. 測りたい物体の表面に **放射率が既知の黒いテープ** を貼る ($\varepsilon \approx 0.95$)
2. テープ部分で **正確な温度** を読み取る
3. テープを貼っていない部分の表示温度と比較
4. その材質の放射率を **逆算** できる

- 機械なのにアナログな黒テープ
- でも **物理の原理** に従ったこの手法が、サーモグラフィの信頼性を支えている

サーモグラフィーが苦手な相手

✨ ピカピカの金属

- 放射率が極端に低い
- 周囲の赤外線を **鏡のよう**に映す
- 対象自身の光か、反射光か区別できない

☐ ガラス

- 可視光は通すが **赤外線は通さない**
- 映るのは **ガラス表面の温度**
- 中の人・物の温度ではない

弱点を知ること、サーモグラフィーを **正しく使う** ために不可欠

§5. 宇宙に繋がる熱の視 点

ステファーンが測った太陽の温度

- **1879年**、ステファーンは自らの法則から **太陽の表面温度** を推定
- その値 **約 5700 K**
- 現代の測定値 **約 5778 K** — 驚くほど正確！
- 触れることもできない遙かな星の温度を、地上の実験データと **一本の数式** だけで言い当てた

この法則は今も、何光年も先の星の温度を推定する **基本の道具**

宇宙から地球を見守る

- 気象衛星・地球観測衛星は、地表や海面から放射される **赤外線** を捉えて表面温度を測定
- いわば **地球の周りを回る巨大なサーモグラフィー**
- 天気予報・気候変動の監視・海面水温の把握



Credit: ESA/ATG medialab

手元から宇宙まで



手元

体温を測るカメラ



恒星

太陽や遠い星の温度



地球

気象・気候観測衛星



同じ法則

$$E = \varepsilon\sigma T^4$$

- 19世紀の基礎的な発見が、現代の様々な分野で実用的に応用されている！

まとめ

1. すべての物体は見えない光 (**熱放射**) を放っている
2. ステファン=ボルツマンの法則: $E = \sigma T^4$
3. 熱力学第一法則とマクスウェルの関係式から導かれる
4. 現実の物体では **放射率** で補正 → 参照テープ法
5. **サーモグラフィー・太陽・地球観測衛星** を繋ぐ一本の式

LT登壇者の募集

- 物理学集会ではLT登壇者を募集しています！
 - どんなジャンルでもOK！
- 興味のある方は物理学集会のDiscordサーバーまで！

