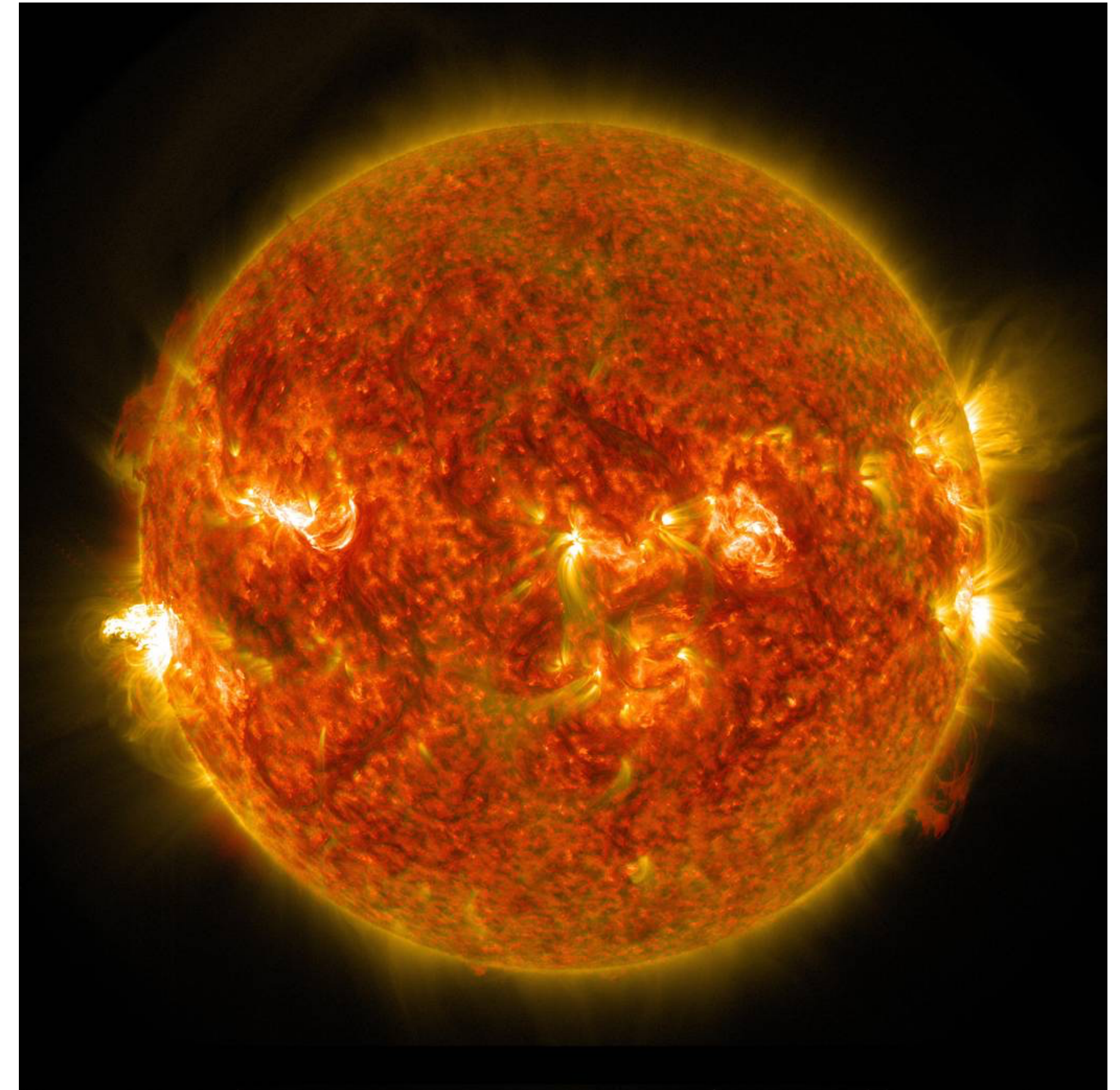


天文学

理工・総合情報学部講義 月曜5限



credit: NASA, Solar Dynamics Observatory(SDO)
<https://www.nasa.gov/content/solar-dynamics-observatory-captures-images-of-a-late-summer-flare>

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5回:

恒星1

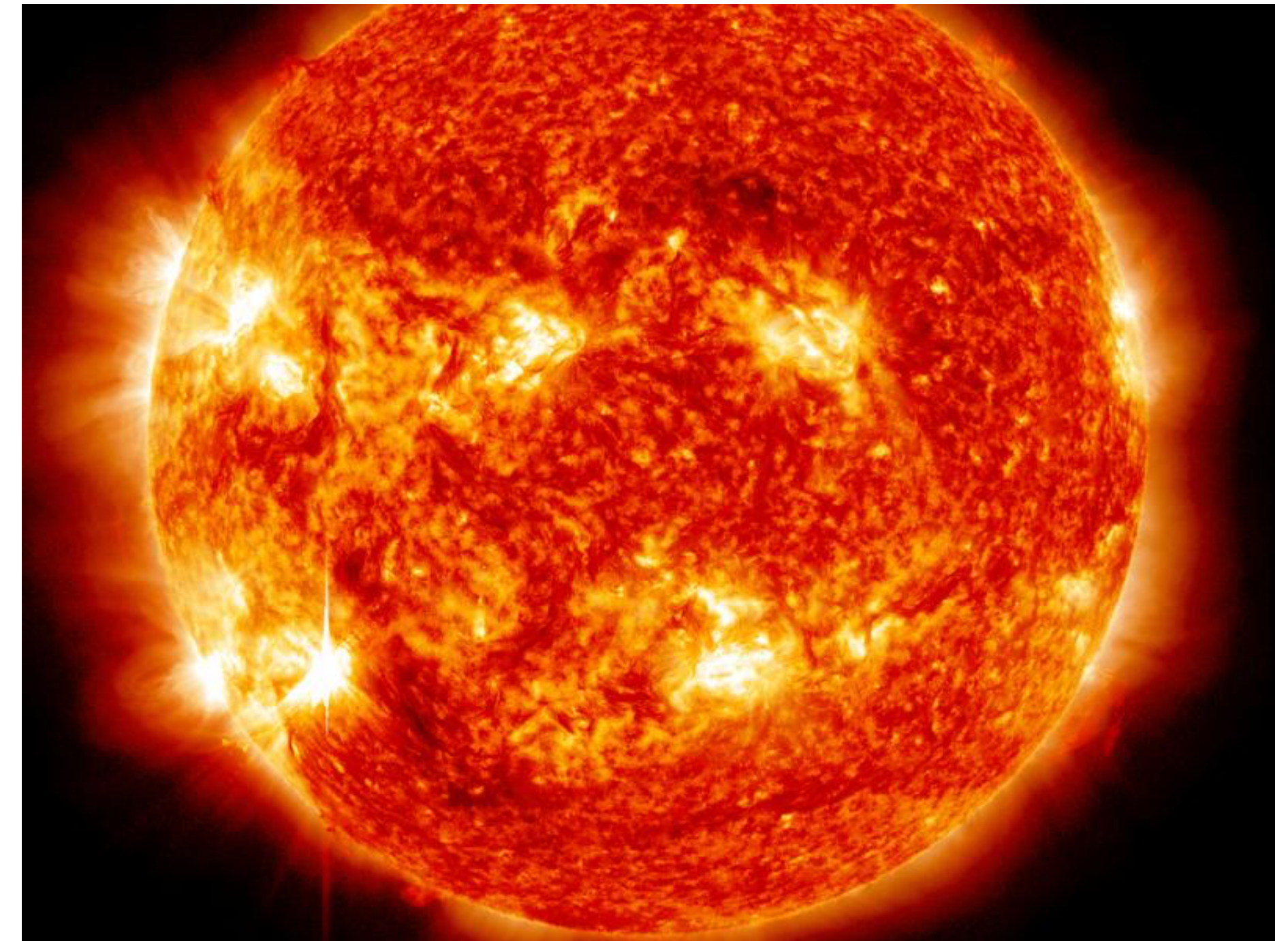
-恒星のエネルギー源と核反応-

- 太陽のエネルギー源は何か？
- 太陽や恒星の内部構造
- 恒星の中で起こる核反応
- 太陽フレアと恒星の活動性

太陽 (The Sun)

- ・ 太陽系の中心天体
- ・ 質量: $1.989 \times 10^{30} [\text{kg}] =$ 太陽質量 $M_{\odot}$
- ・ 半径: $696,340 [\text{km}] =$ 太陽半径 $R_{\odot}$
- ・ 光度: $3.828 \times 10^{26} [\text{J s}^{-1}] =$ 太陽光度 $L_{\odot}$
c.f.) 世界での1年間の消費エネルギー $10^{20} [\text{J}]$
- ・ 寿命: 約100億年

そもそもどうやって何十億年も光っているのか??

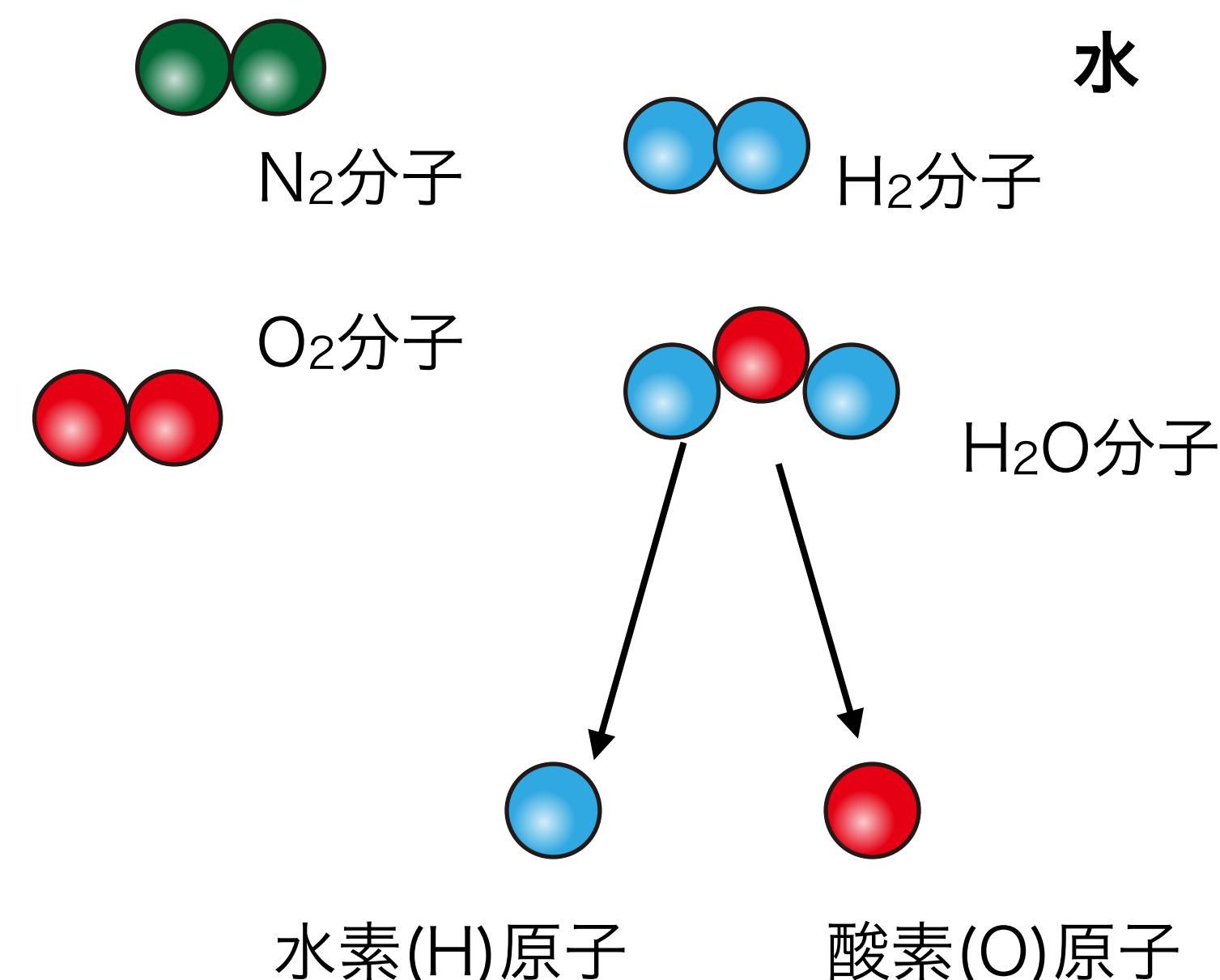


credit: NASA, Solar Dynamics Observatory(SDO)

自然界の元素と化学組成

- 物質は様々な**元素(elements)**からできている
- 水素(H)、ヘリウム(He)、酸素(O)、、、
- 天体といえど、元素の集まりでできている。ただし、その成分が異なる
- 元素組成(elemental abundance)** or **化学組成(chemical abundance)**: それぞれの元素がどれだけ含まれるか

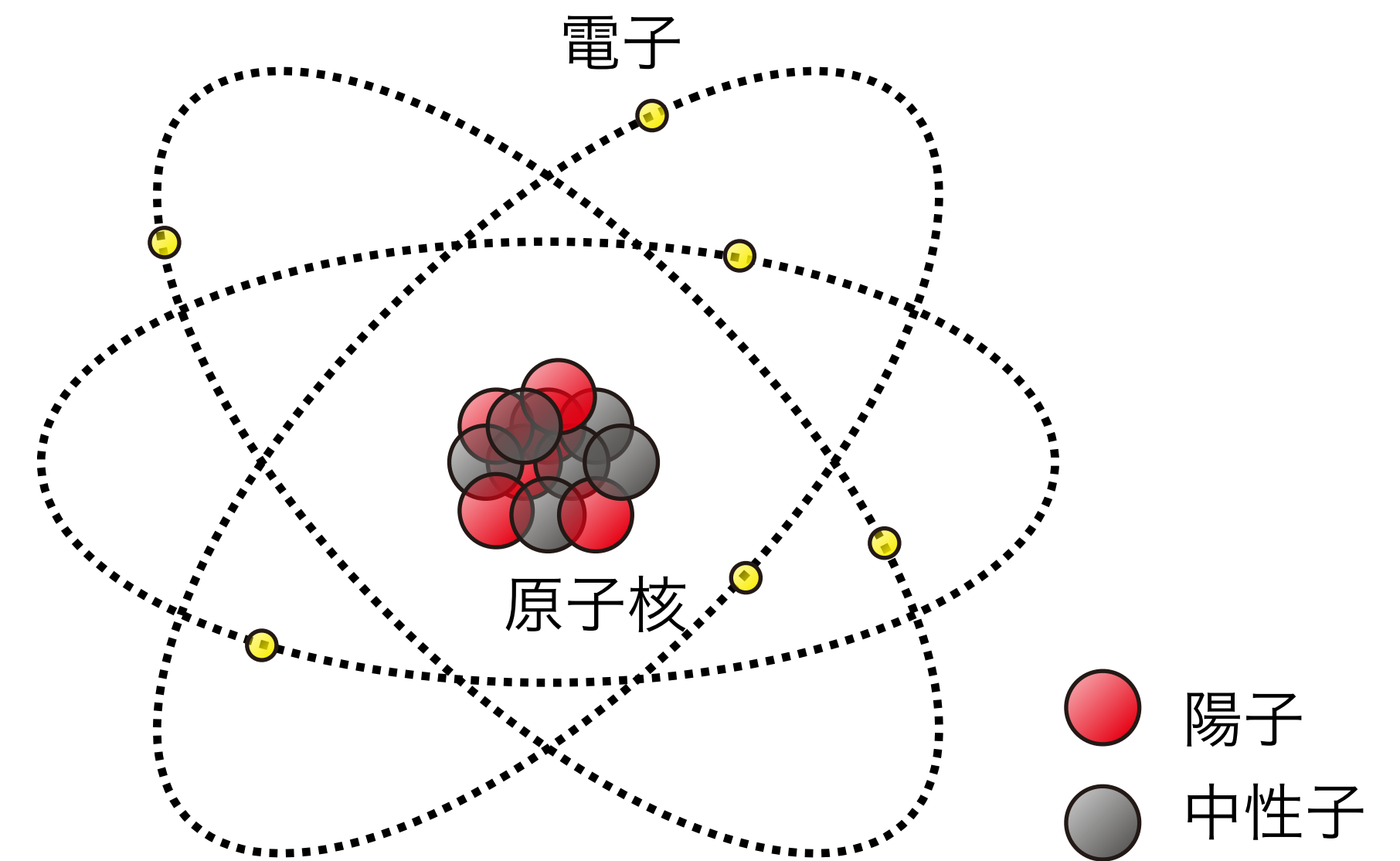
空気



原子の構造と核反応

- **原子核(nuclei)**: 核子(陽子pと中性子n)で構成される
- 原子番号Z: 陽子pの数
- 質量数A: 陽子pの数+中性子nの数
- 例: ^1H , ^{12}C , ^{13}C , ^{56}Fe , ...
- 電子軌道に囲まれている → 原子

原子の構造の模式図

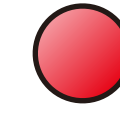


原子 = 原子核(陽子,中性子) + 電子

陽子の数の違い → 元素
中性子の数の違い → 同位体

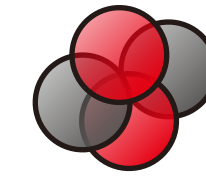
原子の構造と核反応

- **原子核(nuclei)**: 核子(陽子pと中性子n)で構成される
- 原子番号Z: 陽子pの数
- 質量数A: 陽子pの数+中性子nの数
- 例: ^1H , ^{12}C , ^{13}C , ^{56}Fe , ...
- 電子軌道に囲まれている → 原子



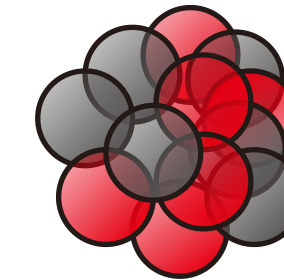
水素 ^1H

陽子 : 1
中性子 : 0



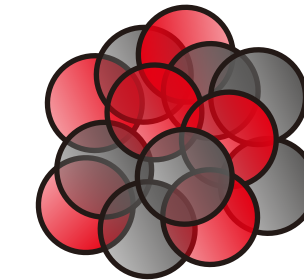
ヘリウム ^4He

陽子 : 2
中性子 : 2



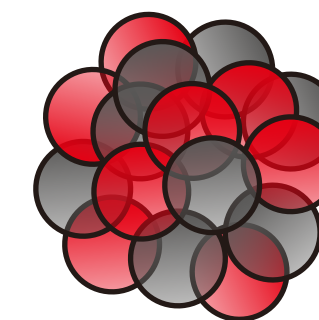
炭素 ^{12}C

陽子 : 6
中性子 : 6



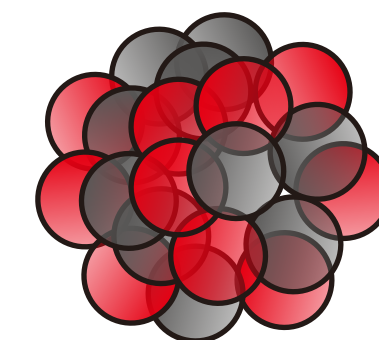
炭素 ^{13}C

陽子 : 6
中性子 : 7



酸素 ^{16}O

陽子 : 8
中性子 : 8



ネオン ^{20}Ne

陽子 : 10
中性子 : 10

原子の構造と核反応

- **原子核(nuclei)**: 核子(陽子pと中性子n)で構成される
- 原子番号Z: 陽子pの数
- 質量数A: 陽子pの数+中性子nの数
- 例: ^1H , ^{12}C , ^{13}C , ^{56}Fe , ...
- 電子軌道に囲まれている → 原子

元素周期表
Periodic Table of the Elements

113番元素発見
2004年7月、113番元素の発見に成功。

113, 115, 117, 118番は
まだ命名に当たってない。

元素周期表

credit: 理化学研究所, 仁科加速器科学研究センター

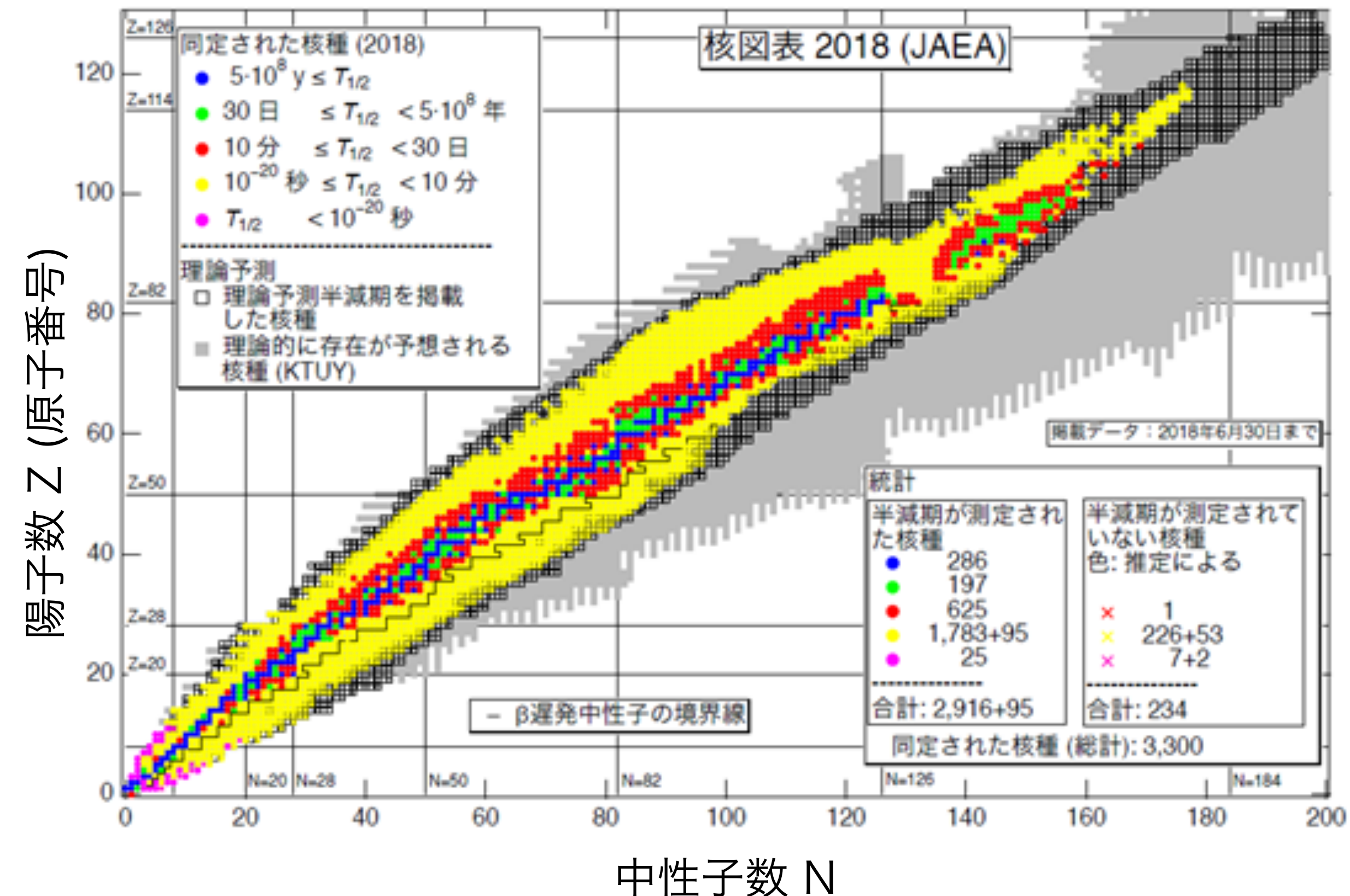
<https://www.nishina.riken.jp/enjoy/syuki.html>

原子の構造と核反応

- **原子核(nuclei)**: 核子(陽子pと中性子n)で構成される
- 原子番号Z: 陽子pの数
- 質量数A: 陽子pの数+中性子nの数
- 例: ^1H , ^{12}C , ^{13}C , ^{56}Fe , ...
- 電子軌道に囲まれている → 原子

核図表 credit: 原子力機構 核図表2018

https://www.ndc.jaea.go.jp/CN18_J/jcnq.html



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

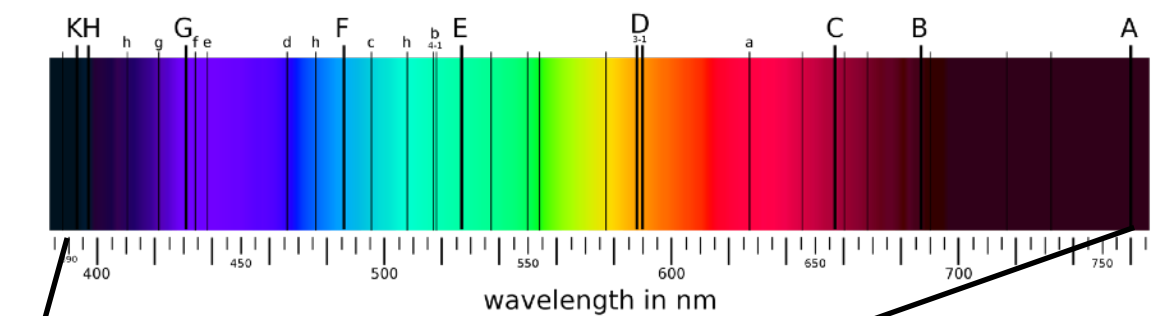
- フラウンホーファー線(Fraunhofer lines)**

- 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)

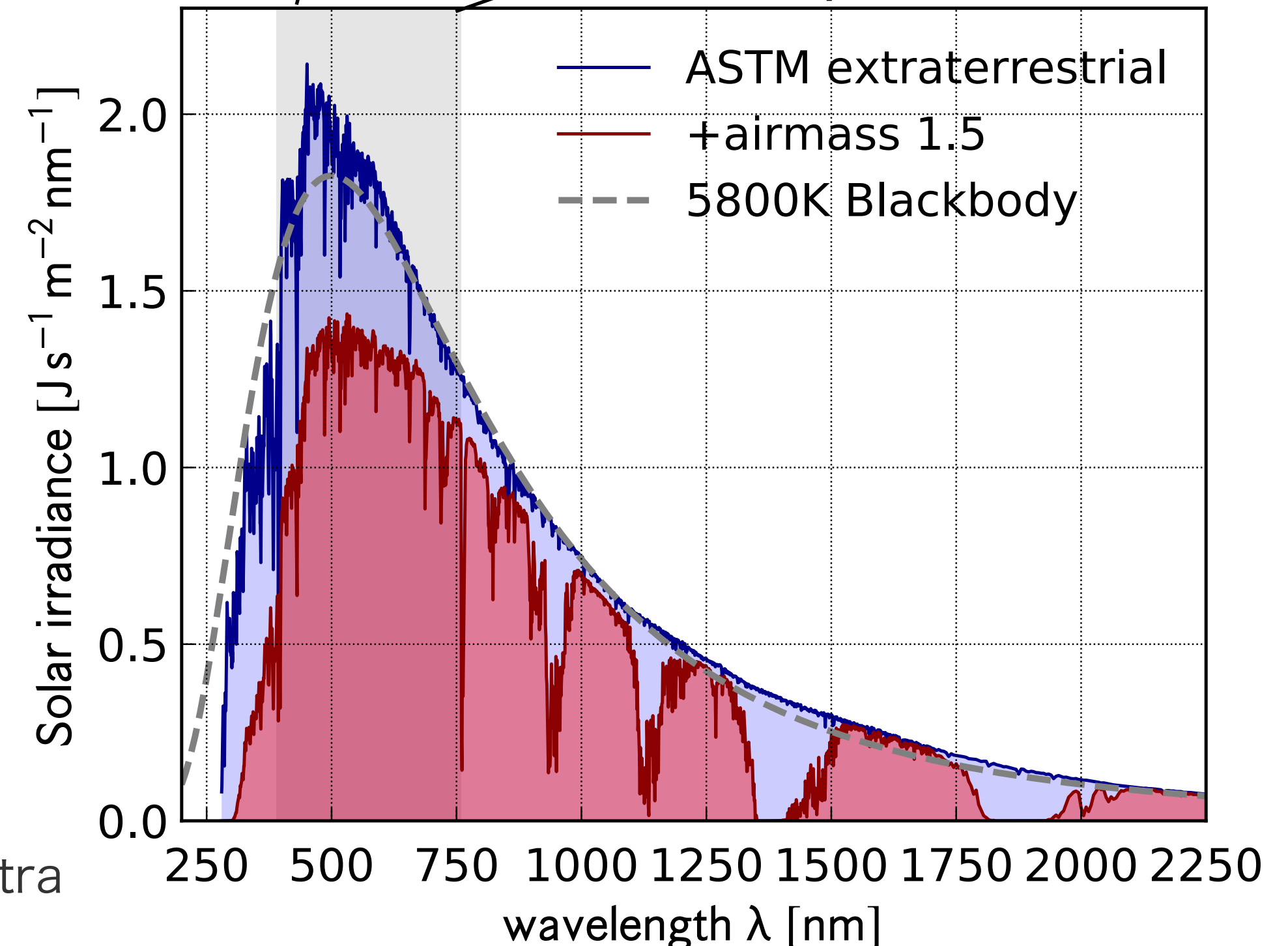
The American Society for Testing and Materials (ASTM) G-173 spectra

12

(Wikipedia)



Solar Radiation Spectrum



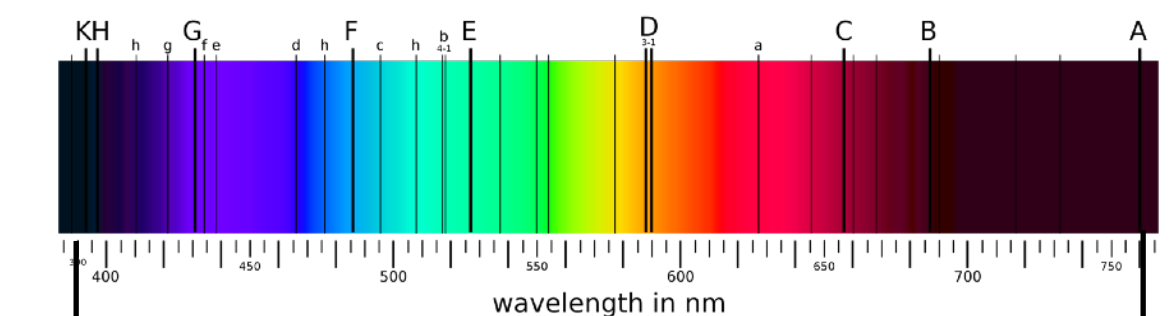
太陽スペクトルの吸収線

- 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)

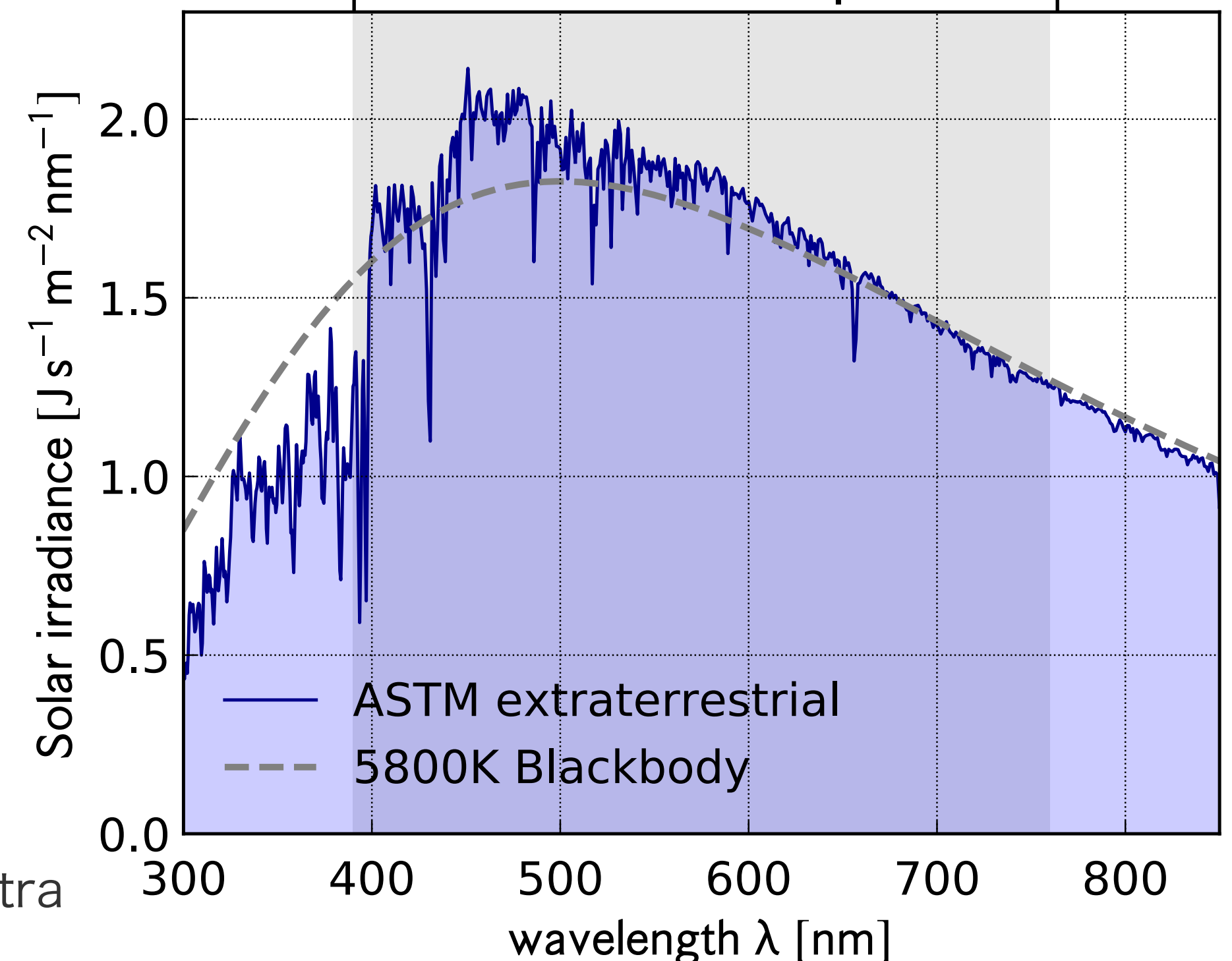
The American Society for Testing and Materials (ASTM) G-173 spectra

13

(Wikipedia)



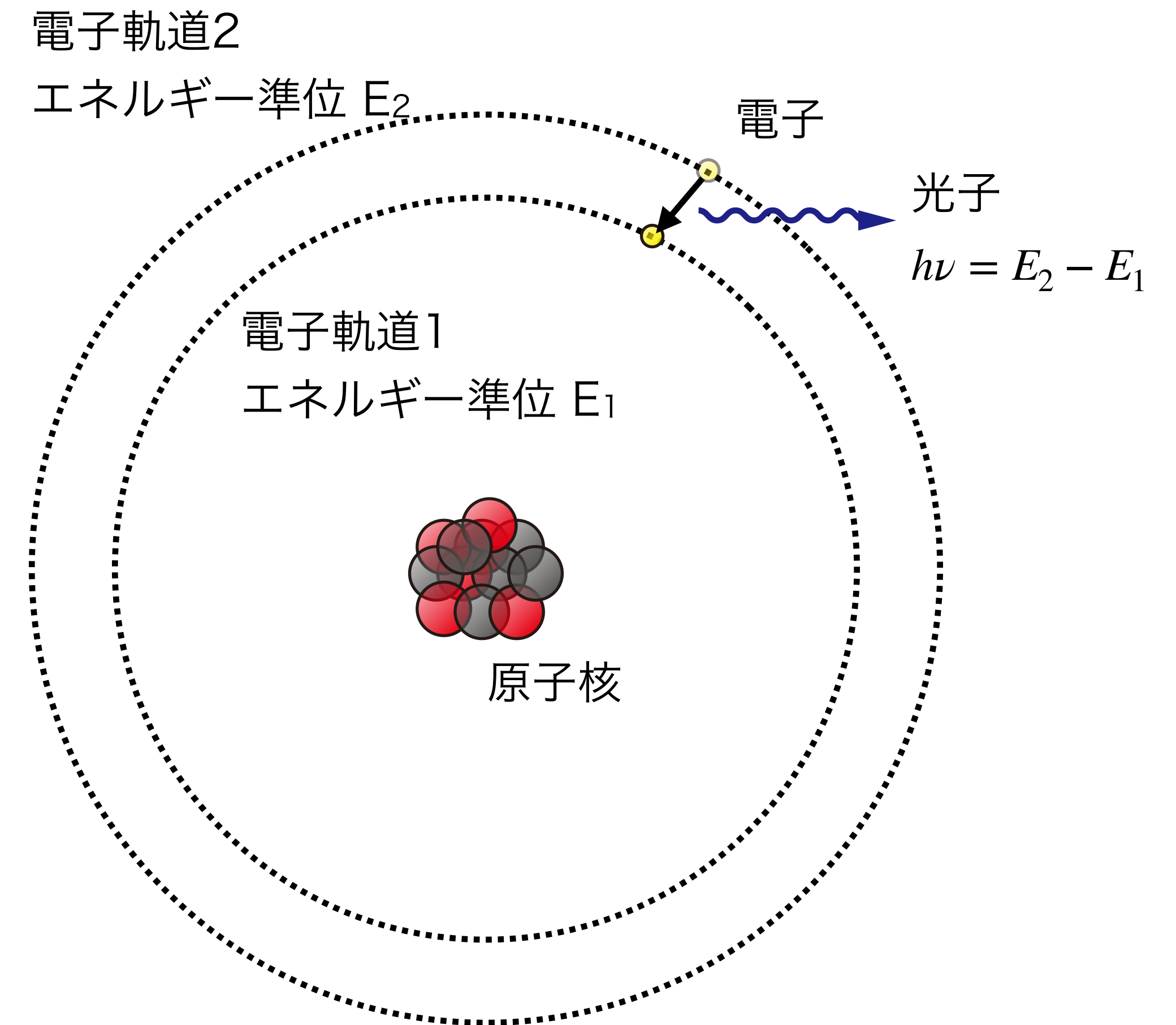
Solar Radiation Spectrum



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

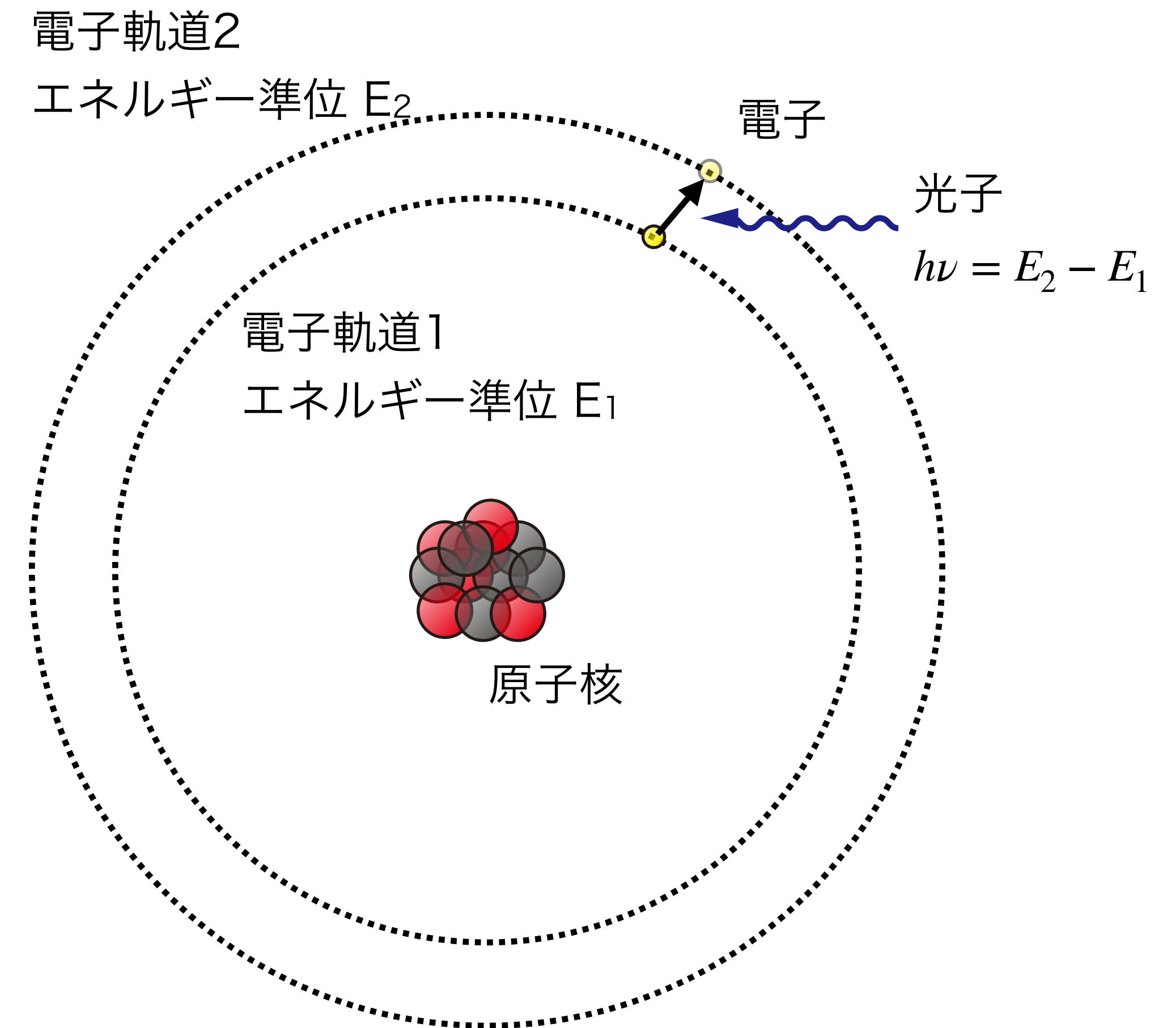
原子の電子軌道の模式図



吸収・放射の物理過程

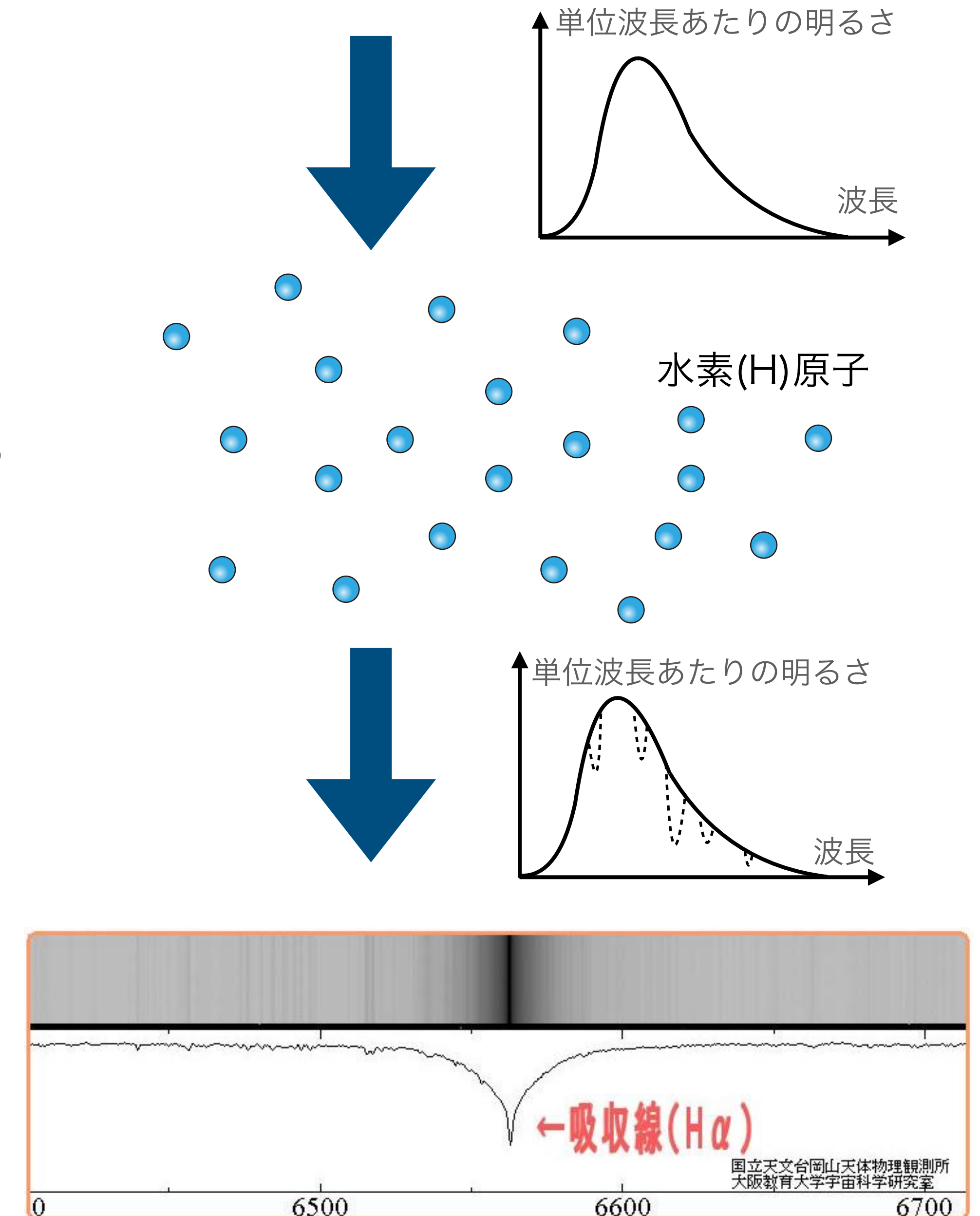
- ・ 原子・分子の構造
- ・ 電子は軌道に応じたエネルギーを持っている(**エネルギー準位**)
- ・ 軌道遷移に伴って光子を放出・吸収

原子の電子軌道の模式図



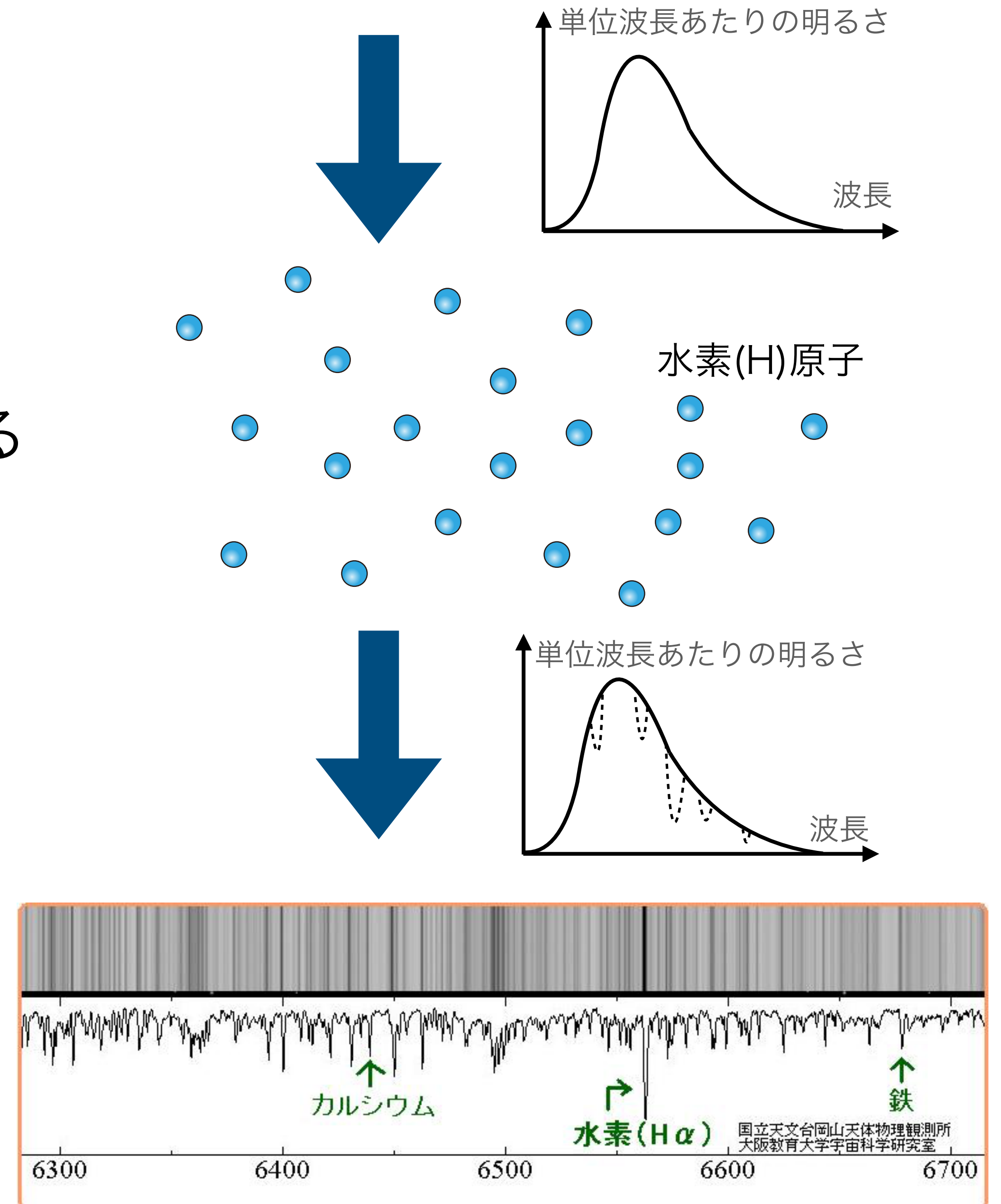
吸収・放射の物理過程

- 例えば、ある温度に従う水素原子がばら撒かれた空間(プラズマ状態)に光を入射させる
- 入射光のスペクトルは滑らかな概形をしている
- 水素プラズマを抜けてきた光のスペクトルには、吸収線(absorption line)がその証として刻まれる
- 水素の $H\alpha$ 線($6563\text{ \AA}$)



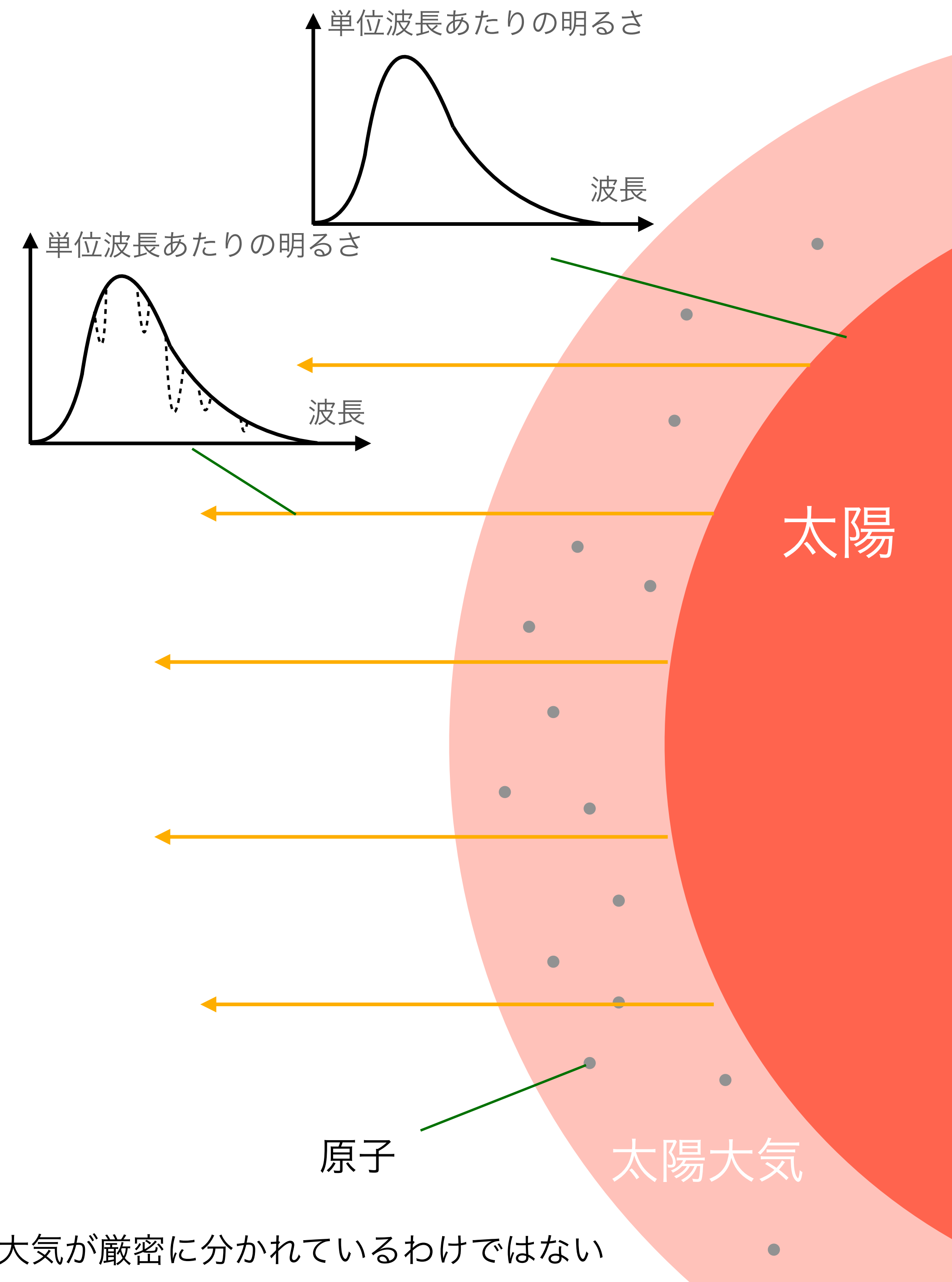
吸収・放射の物理過程

- 例えば、ある温度に従う水素原子がばら撒かれた空間(プラズマ状態)に光を入射させる
- 入射光のスペクトルは滑らかな概形をしている
- 水素プラズマを抜けてきた光のスペクトルには、吸収線(absorption line)がその証として刻まれる
- 水素の $H\alpha$ 線($6563\text{ \AA}$)



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)



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)

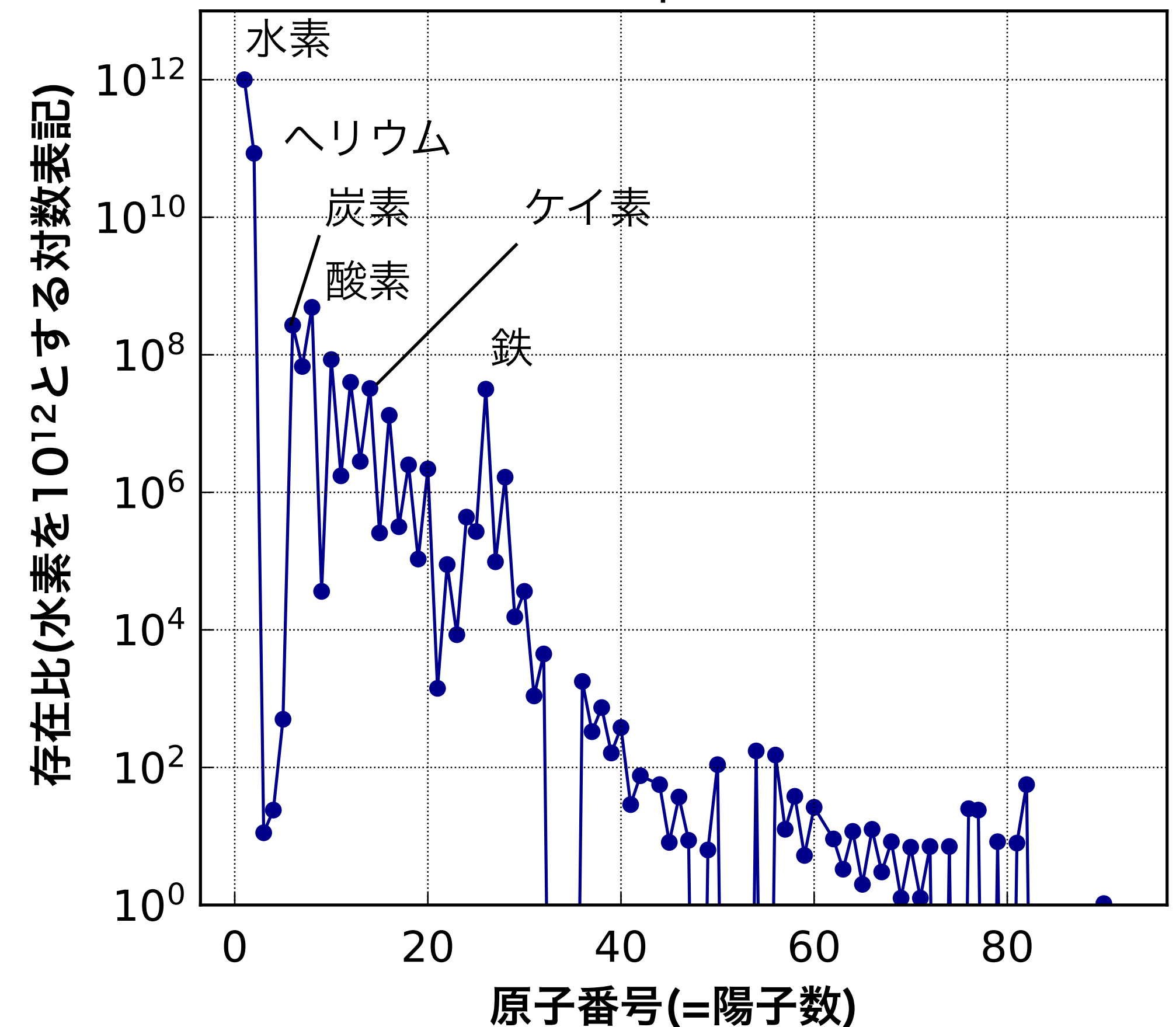
Z	Element	Photosphere	Meteorites
1	H	12.00	8.22 ± 0.04
2	He	[10.93 ± 0.01]	1.29
3	Li	1.05 ± 0.10	3.26 ± 0.05
4	Be	1.38 ± 0.09	1.30 ± 0.03
5	B	2.70 ± 0.20	2.79 ± 0.04
6	C	8.43 ± 0.05	7.39 ± 0.04
7	N	7.83 ± 0.05	6.26 ± 0.06
8	O	8.69 ± 0.05	8.40 ± 0.04
9	F	4.56 ± 0.30	4.42 ± 0.06
10	Ne	[7.93 ± 0.10]	−1.12
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)

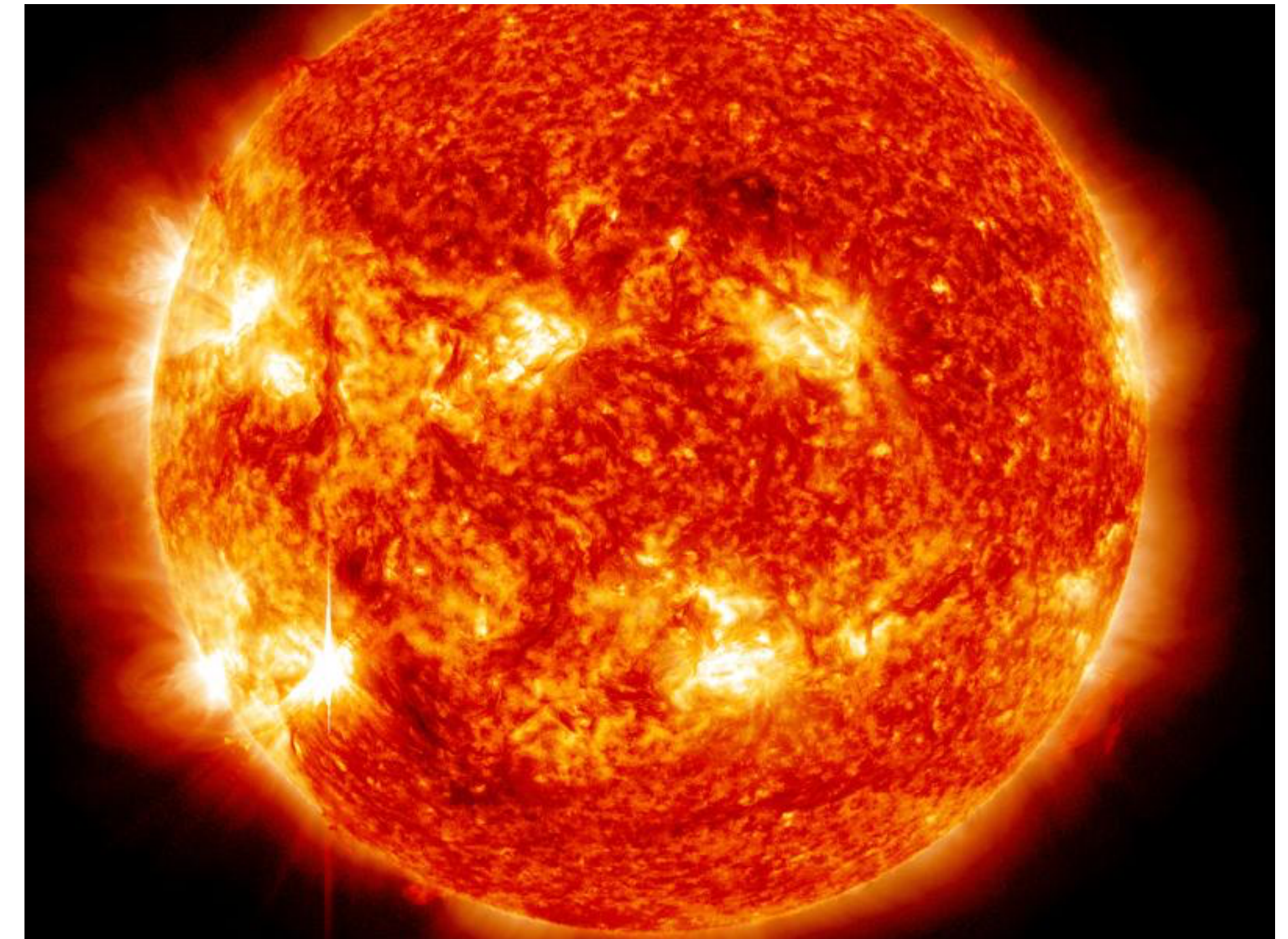
太陽表面(光球: photosphere)
での化学組成(Asplund et al. 2009)

Solar photospheric abundance
Asplund et al. (2009)



太陽のエネルギー源？

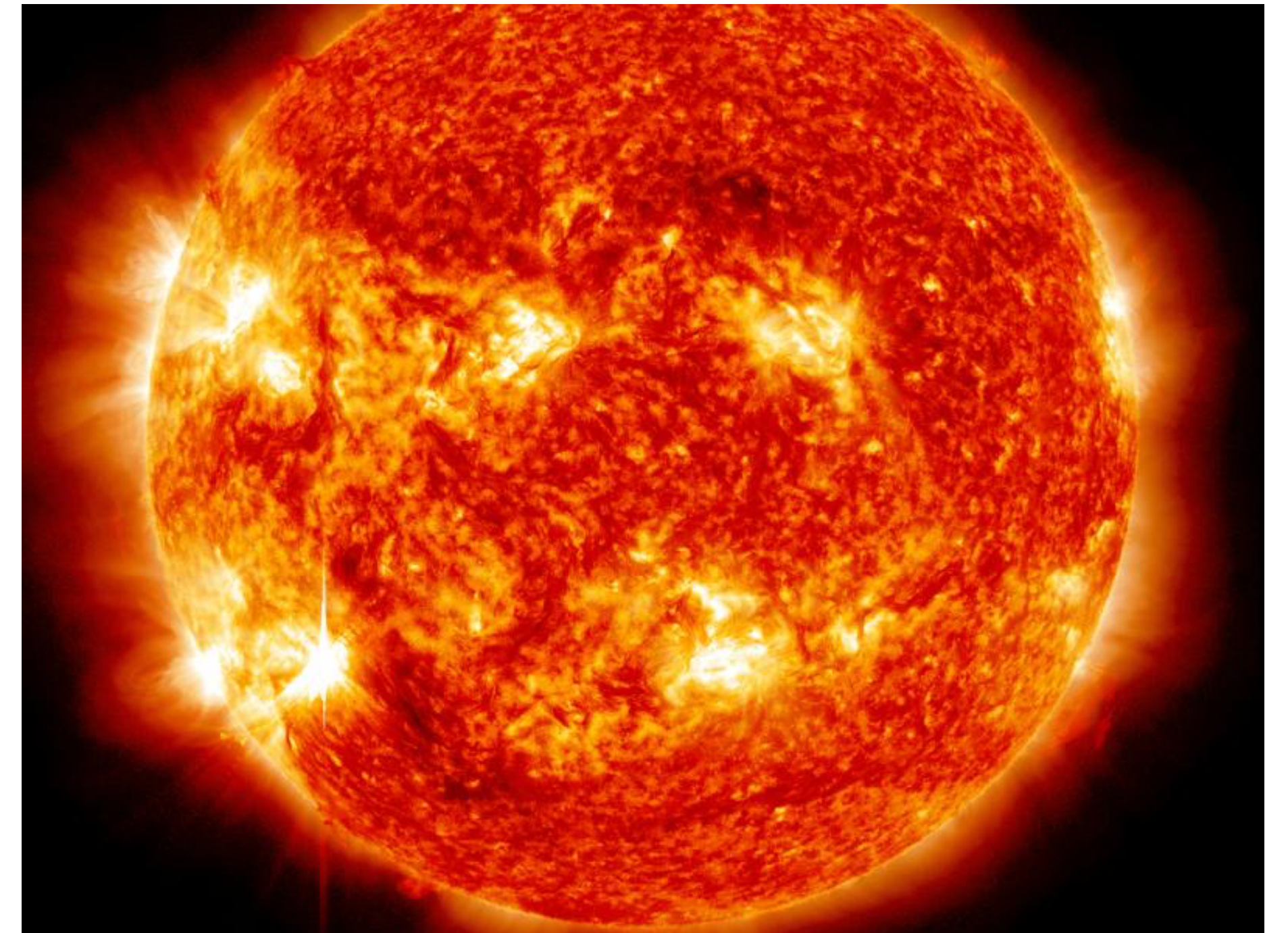
- 例えば、水素を用いたエネルギー生成
- $\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$?
- 1mol ($\sim 6.0 \times 10^{23}$ 個, $\sim 2\text{g}$)の水素分子が燃えて、 $2.84 \times 10^5 [\text{J/mol}]$
- 1秒間に大体 $3.8 \times 10^{26} \text{J} / 2.84 \times 10^5 [\text{J/mol}] \sim 10^{21} [\text{mol}] \sim 2 \times 10^{21} [\text{g}]$ 消費
- 水素を燃やし尽くす時間は？



credit: NASA, Solar Dynamics Observatory(SDO)

太陽のエネルギー源？

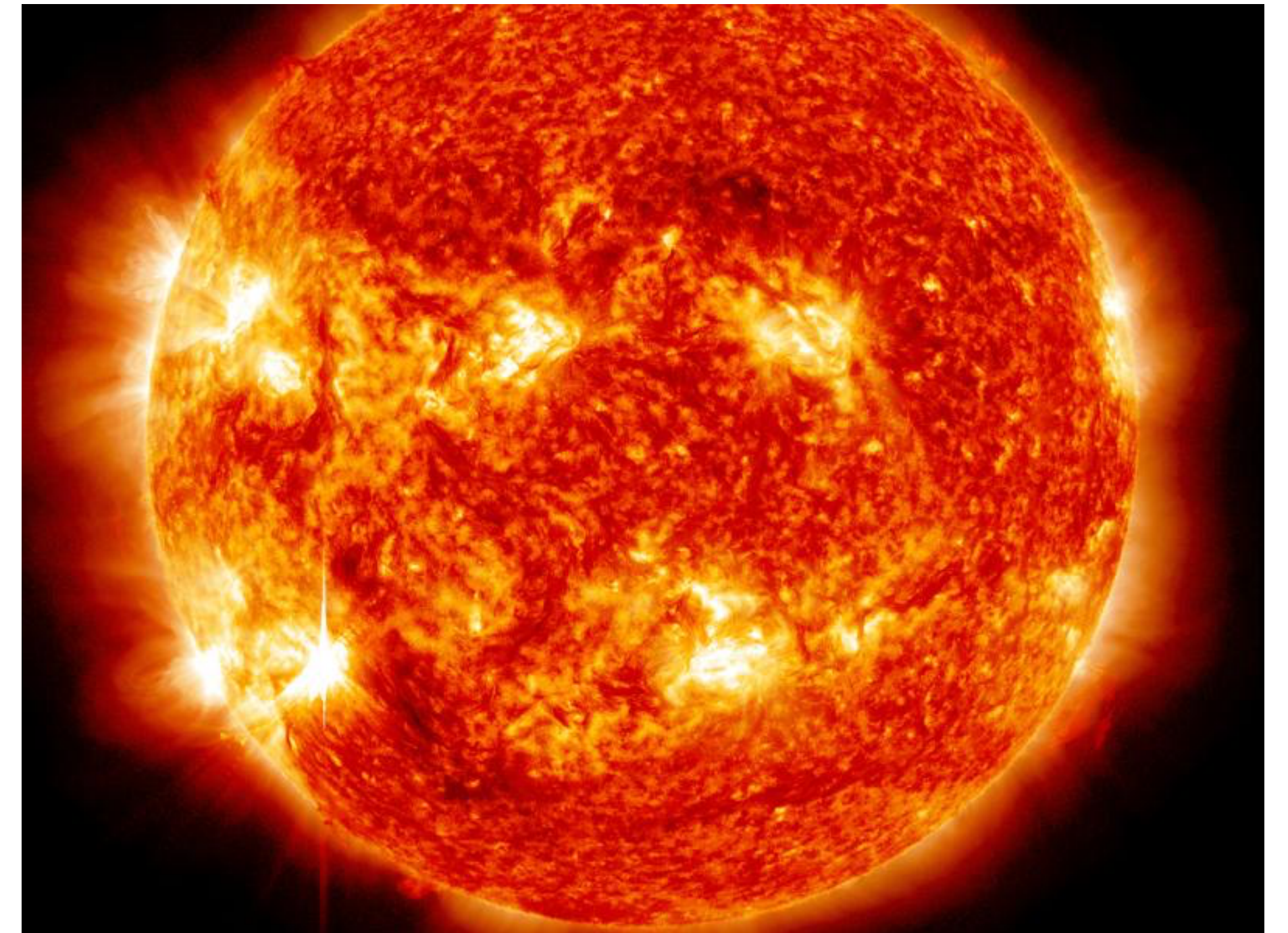
- 例えば、水素を用いたエネルギー生成
- $\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$?
- 1mol ($\sim 6.0 \times 10^{23}$ 個, $\sim 2\text{g}$)の水素分子が燃えて、 $2.84 \times 10^5 [\text{J/mol}]$
- 1秒間に大体 $3.8 \times 10^{26} \text{J} / 2.84 \times 10^5 [\text{J/mol}] \sim 10^{21} [\text{mol}] \sim 2 \times 10^{21} [\text{g}]$ 消費
- 水素を燃やし尽くす時間は？



credit: NASA, Solar Dynamics Observatory(SDO)

太陽のエネルギー源？

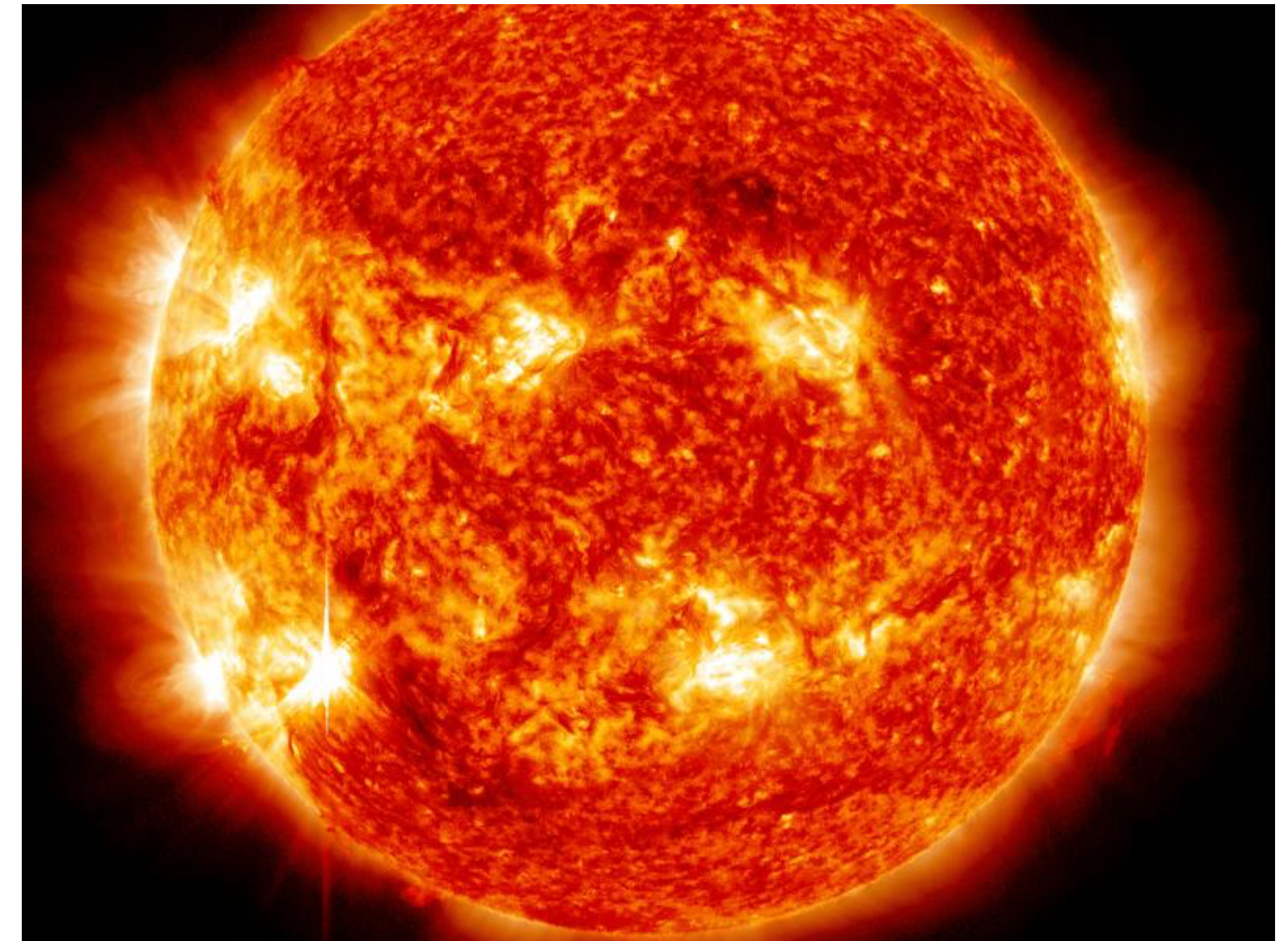
- 太陽が全部水素(H_2)だったとして、燃やし尽くす時間は？
- $2 \times 10^{30} [\text{kg}] / 2 \times 10^{21} [\text{g/s}]$
 $\sim 10^{12} [\text{s}] \sim \text{約4万年}$
- 短い…。
- 単位質量あたりのエネルギー効率 $[\text{J/g}]$ が小さすぎる



credit: NASA, Solar Dynamics Observatory(SDO)

太陽のエネルギー源？

- 水素(H_2)燃焼: 141.80 [MJ/kg]
- ガソリン: 47.30 [MJ/kg]
- 石炭: 27.0 [MJ/kg]
- 天然ガス: 54.0 [MJ/kg]
- 人類が利用しているエネルギーでは効率が悪い → **核反応(nuclear reaction), 核融合(nuclear fusion)**

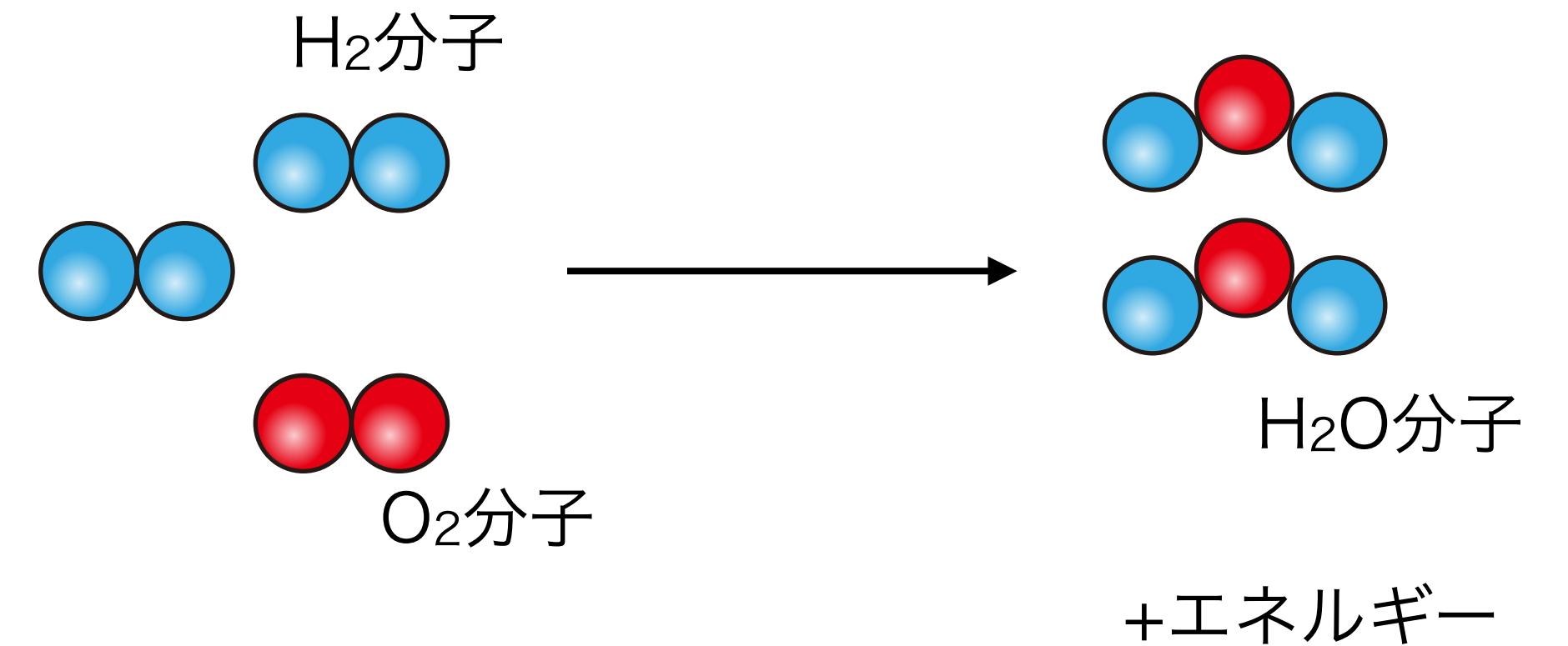


credit: NASA, Solar Dynamics Observatory(SDO)

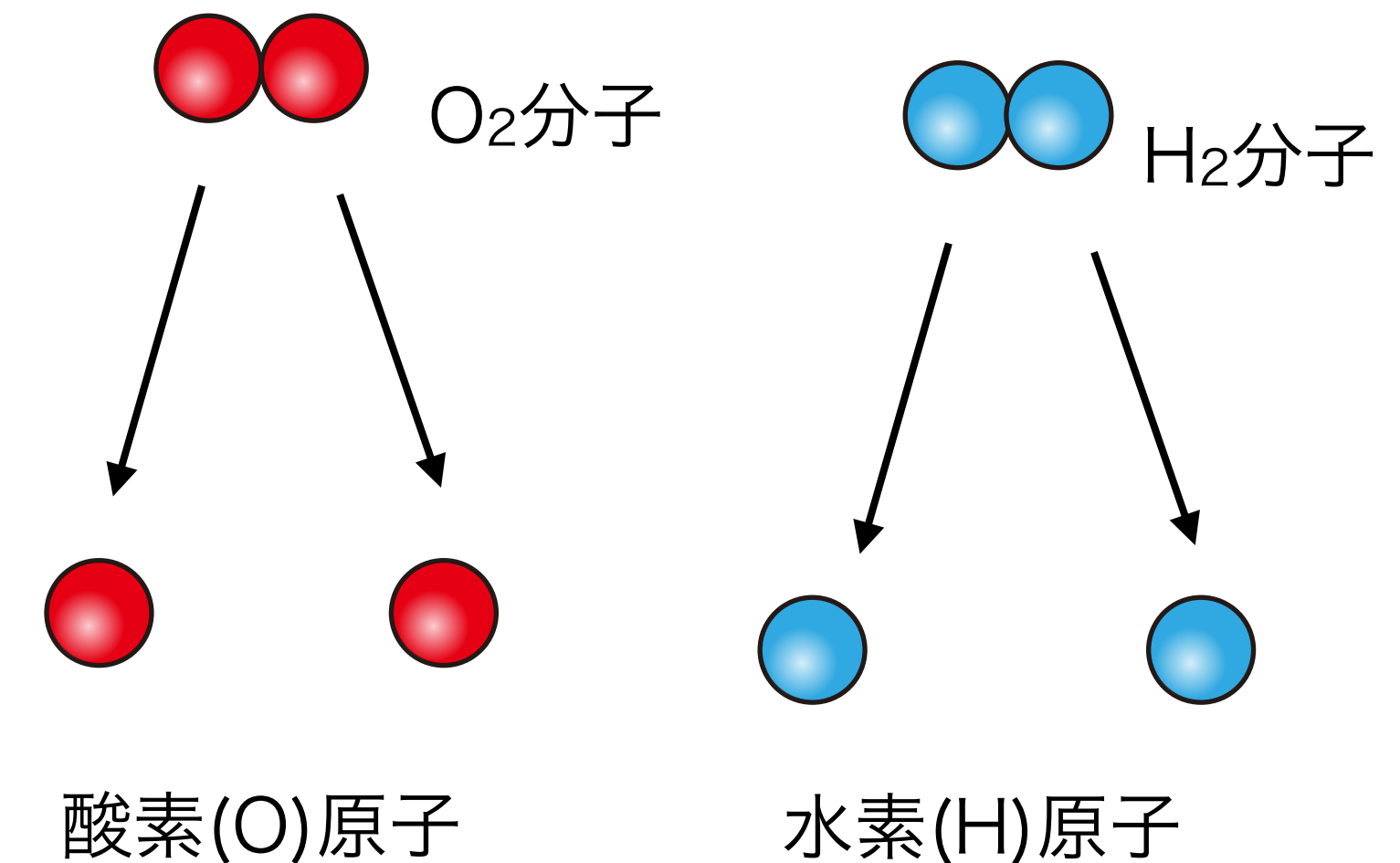
星の中の物質の状態

- 分子の構造を変える化学反応(原子をつなぎ変える)は一つの反応で得られるエネルギーが小さい
- 太陽であれば、表面温度6000K
- 地球上とは違い、物質は原子として存在することが多い
- 水素分子(H_2)ではなく、水素原子(H)

分子の化学反応

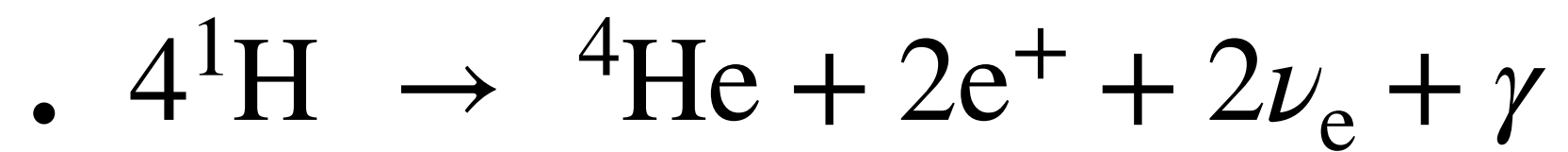


高温環境



水素の核融合反応(hydrogen burning)

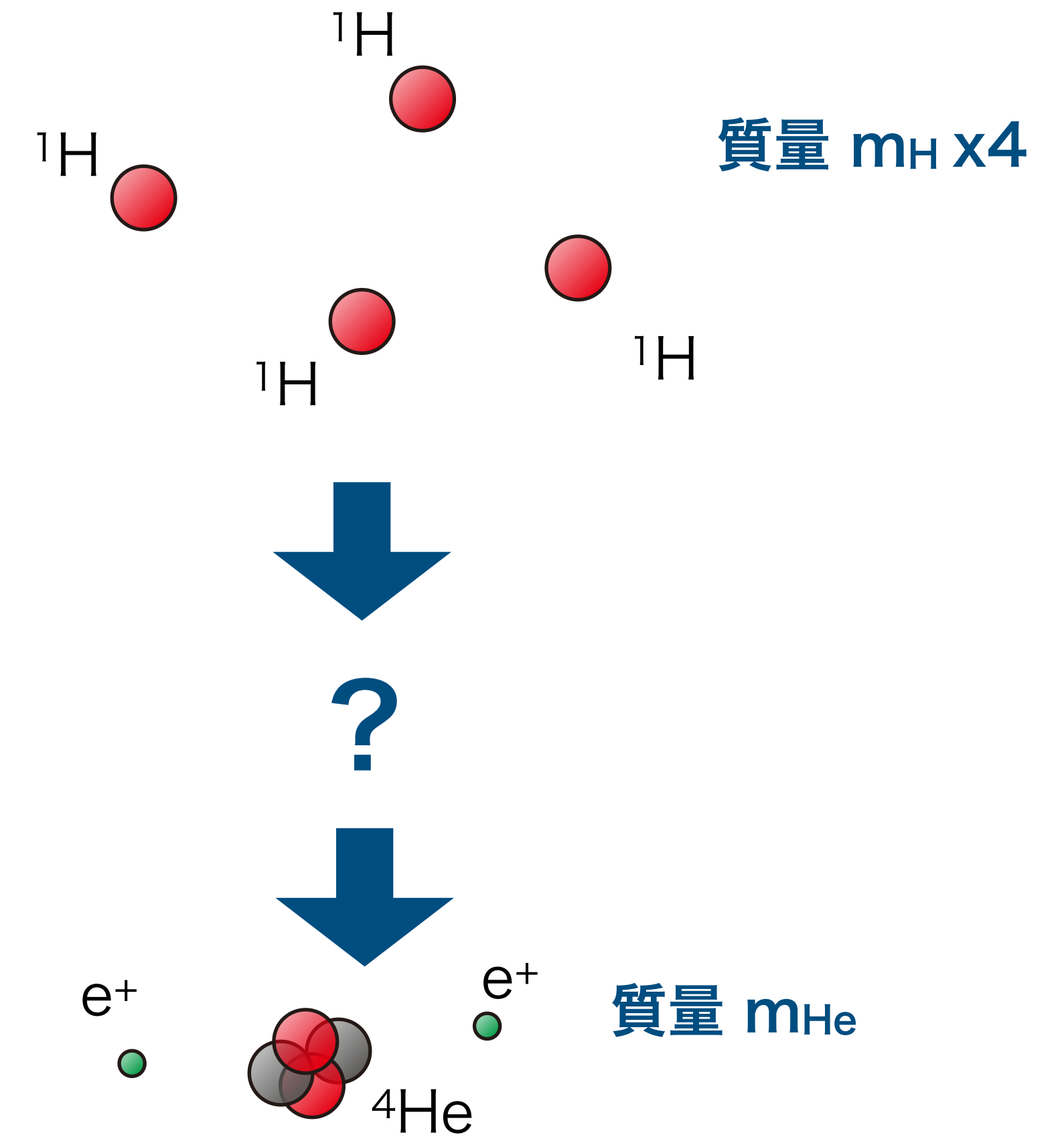
- 4つの水素原子核を1つのヘリウム原子核に変える反応: 核子同士をつなぎ直す



- 質量欠損(mass defect):** 失われた質量に対応するエネルギーが発生する(相対性理論)

- $\Delta mc^2 = (4m_{\text{H}} - m_{\text{He}} - 2m_e)c^2$

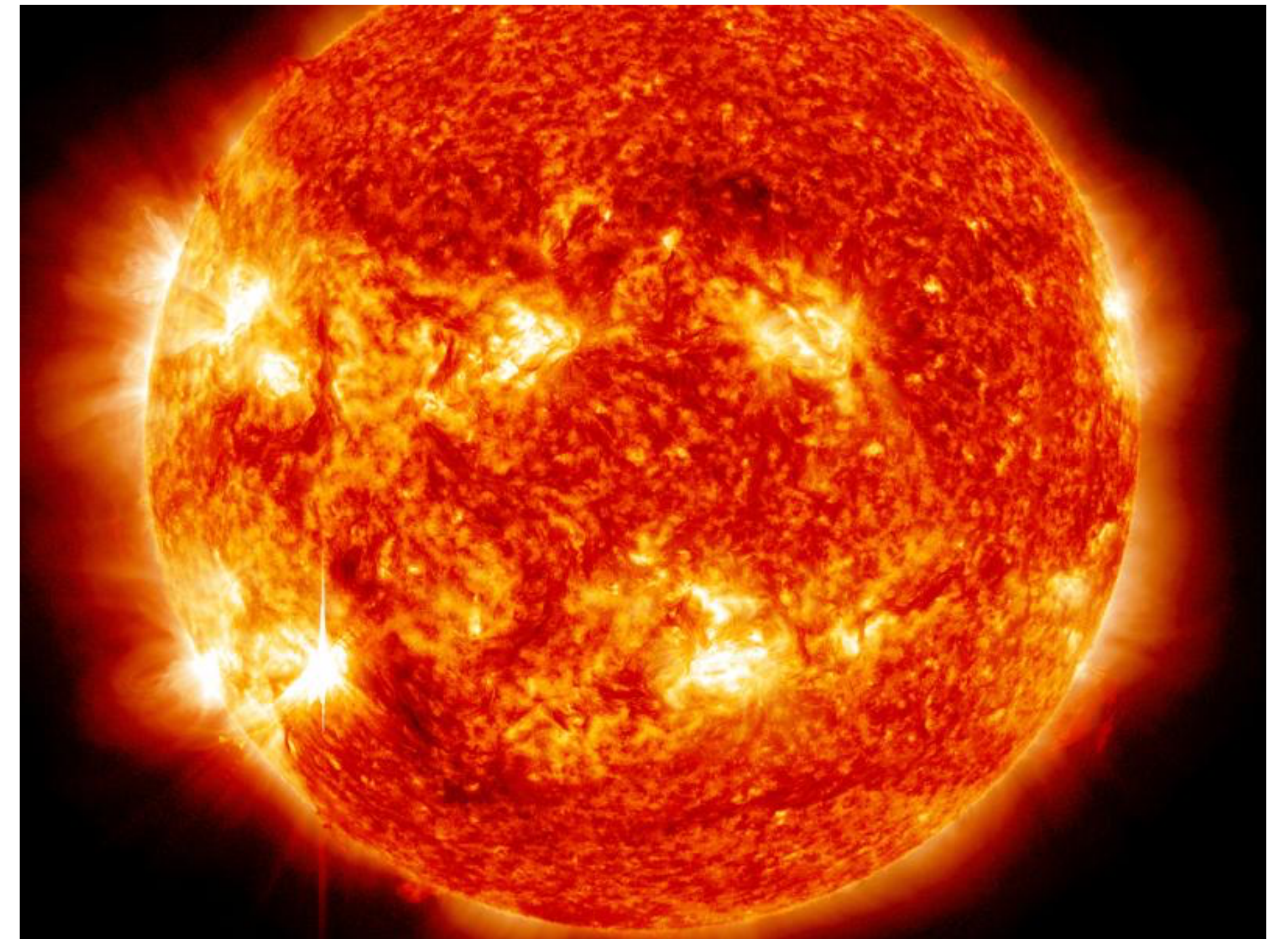
- $0.07\text{kg/水素} \times 1\text{kg} \times c^2 = 6.3 \times 10^{14} [\text{J/kg}]$



+(失われた質量に対応する)エネルギー

太陽のエネルギー源

- 水素燃焼でのエネルギー発生率 $6.3 \times 10^{14} [\text{J/kg}]$
- 太陽質量の10% ($2 \times 10^{29} [\text{kg}]$) のHがHeに変わったと考えると
- $2 \times 10^{29} [\text{kg}] \times 6.3 \times 10^{14} [\text{J/kg}] = 1.3 \times 10^{44} [\text{J}]$
- $1.3 \times 10^{44} [\text{J}] / 3.8 \times 10^{26} [\text{J/s}] = 3 \times 10^{17} [\text{s}]$
- $3 \times 10^{17} / 3.154 \times 10^7 \doteq$ **100億年**



credit: NASA, Solar Dynamics Observatory(SDO)

第5回:

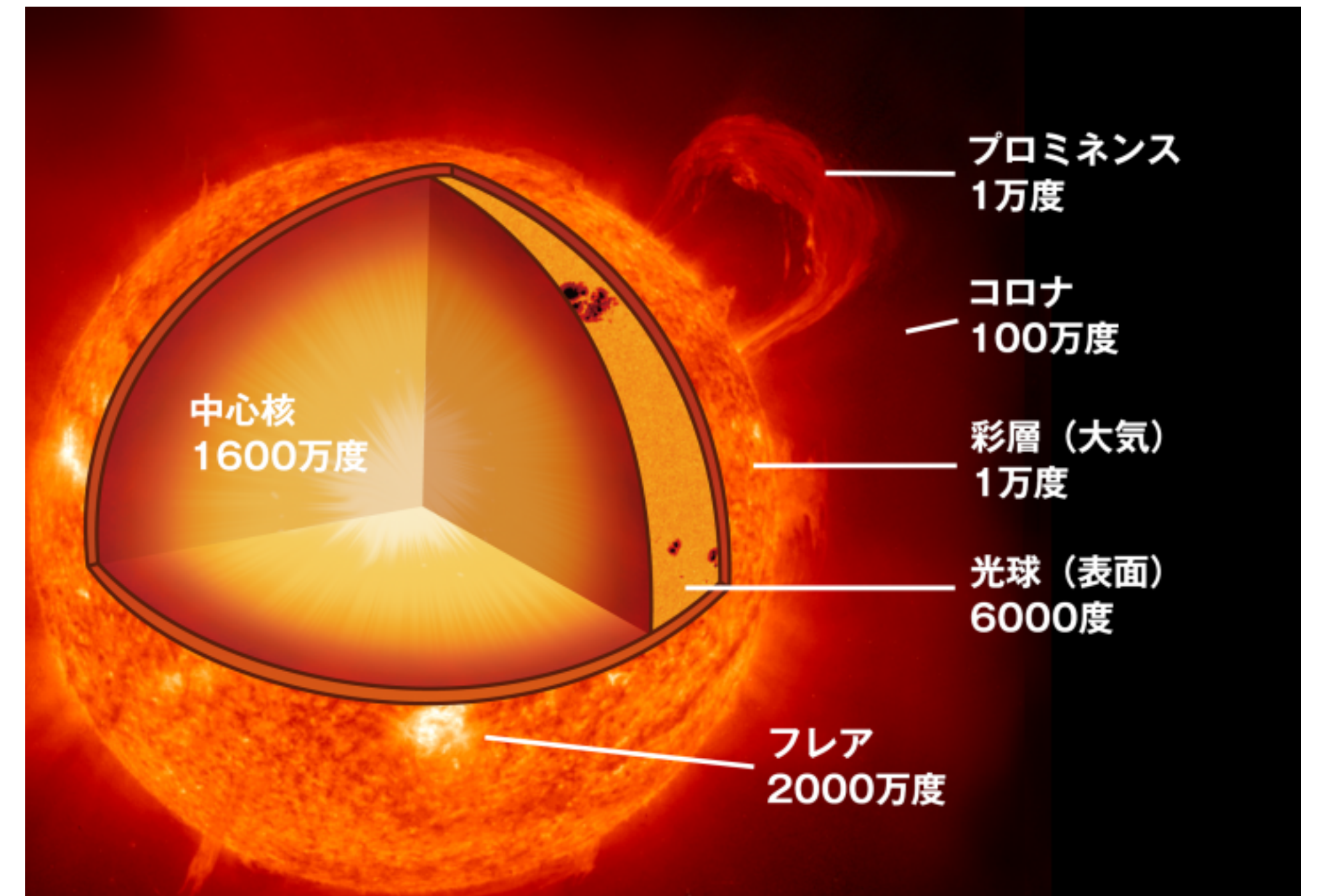
恒星1

-恒星のエネルギー源と核反応-

- 太陽のエネルギー源は何か？
- 太陽や恒星の内部構造
- 恒星の中で起こる核反応
- 太陽フレアと恒星の活動性

太陽の内部構造

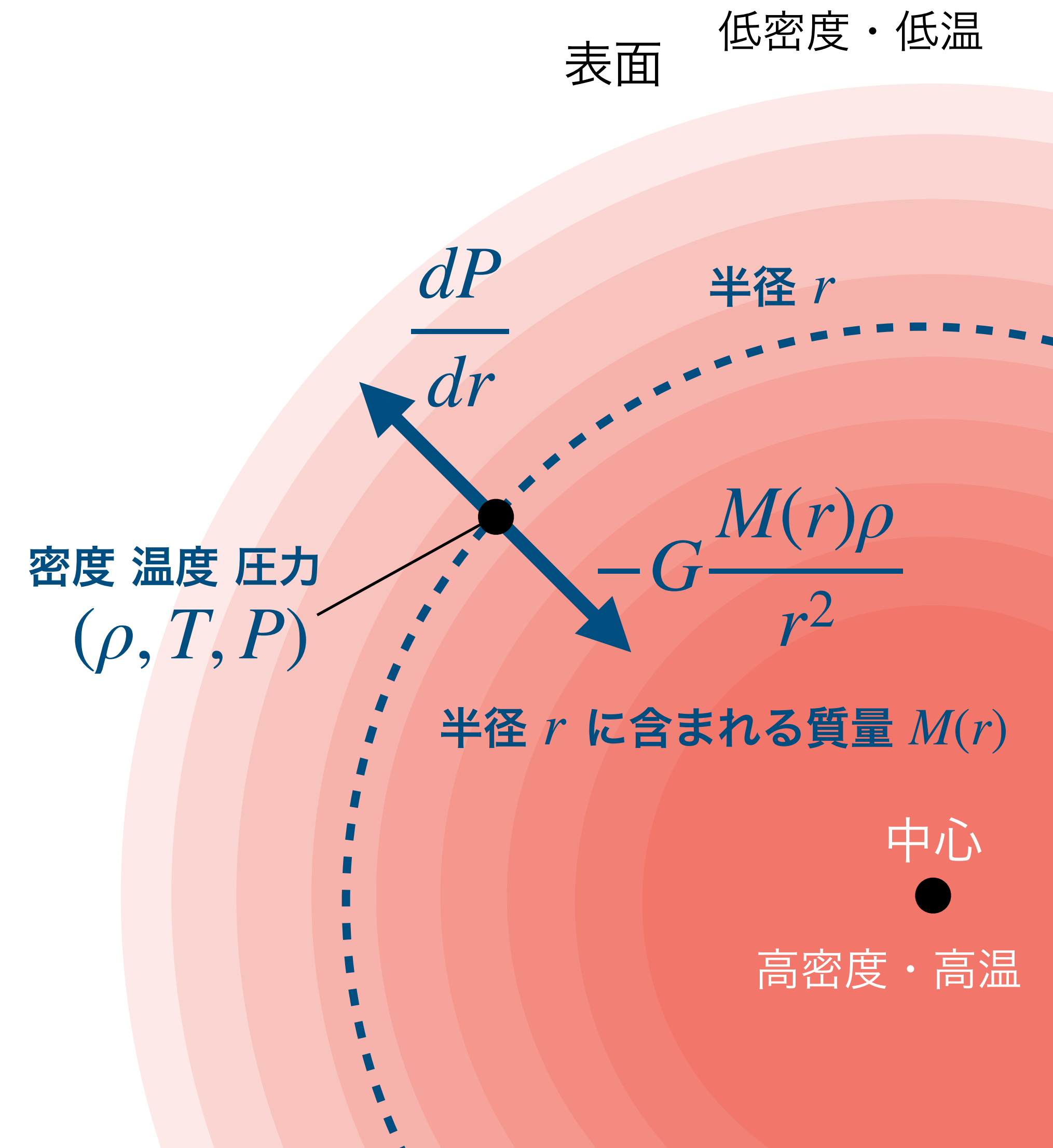
- ・ 太陽の中心温度 $T_c \simeq 1.5 \times 10^7$ [K]
- ・ 中心密度 $\rho_c \simeq 1.5 \times 10^5$ [kg m⁻³]
- ・ 高温高密な環境で水素の核融合が起きている
- ・ 中心から外に向かって温度と密度が下がり
光球(表面,約6000K)に到達



credit: ISAS/JAXA

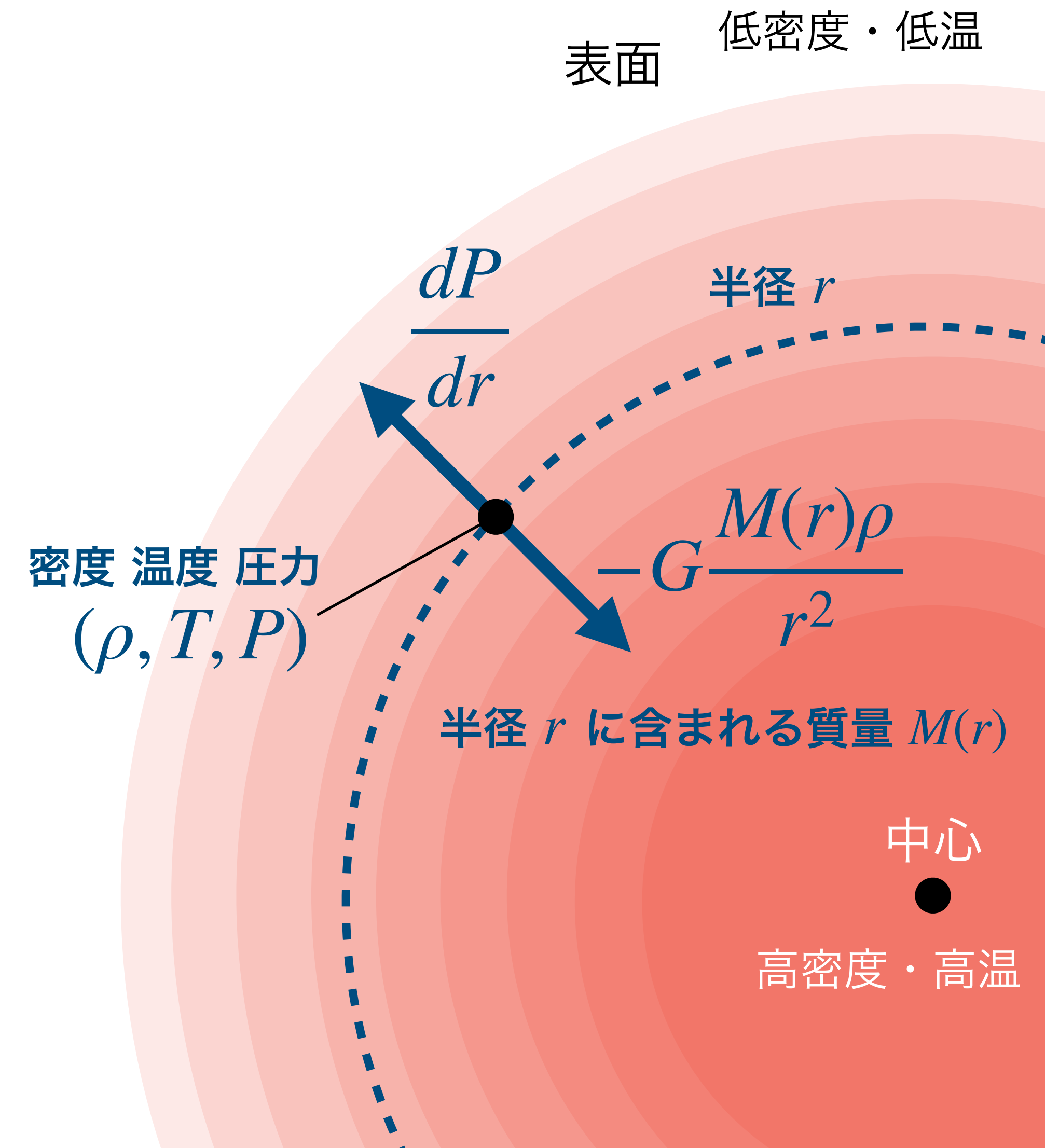
星の内部構造

- 恒星の密度・温度分布は内部圧力と自己重力の釣り合いによって決まる: **静水圧平衡 (hydrostatic equilibrium)**
- 釣り合いの式: $\frac{dP}{dr} = -G \frac{M(r)\rho}{r^2}$ (球対称の仮定)
- 外向き圧力勾配 vs 内向き重力
- 自分の重さを中心でのエネルギー生成で支える



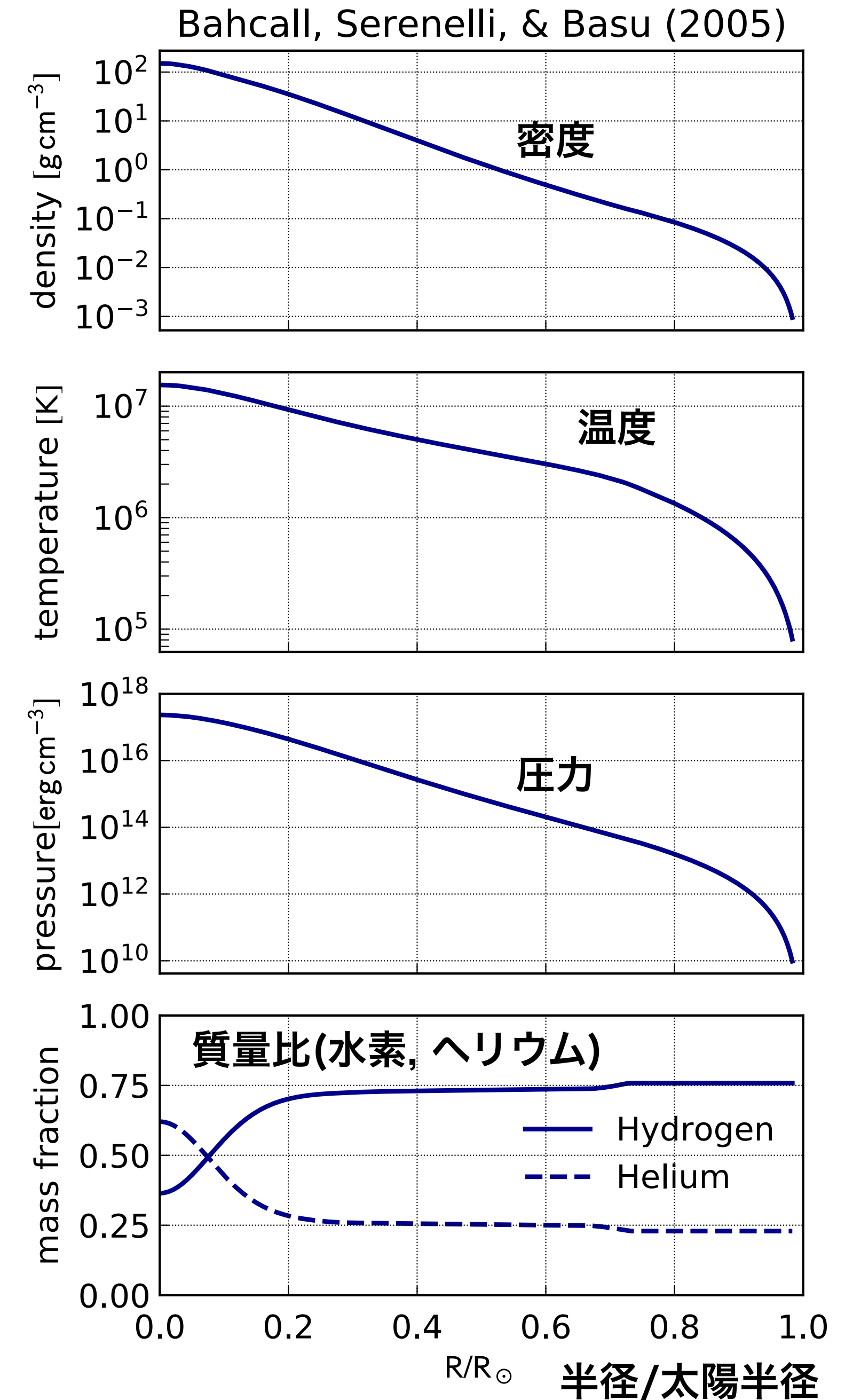
補足: 星の内部構造を決める方程式

- 釣り合いの式: $\frac{dP(r)}{dr} = -G \frac{M(r)\rho}{r^2}$
- 連続の式: $\frac{dM(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho$
- エネルギー平衡の式: $\frac{dL(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho (\epsilon_{\text{nuc}} - \epsilon_{\text{loss}})$
- エネルギー輸送の式: $\frac{dT(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho$
- 状態方程式: $P = P(\rho, T)$



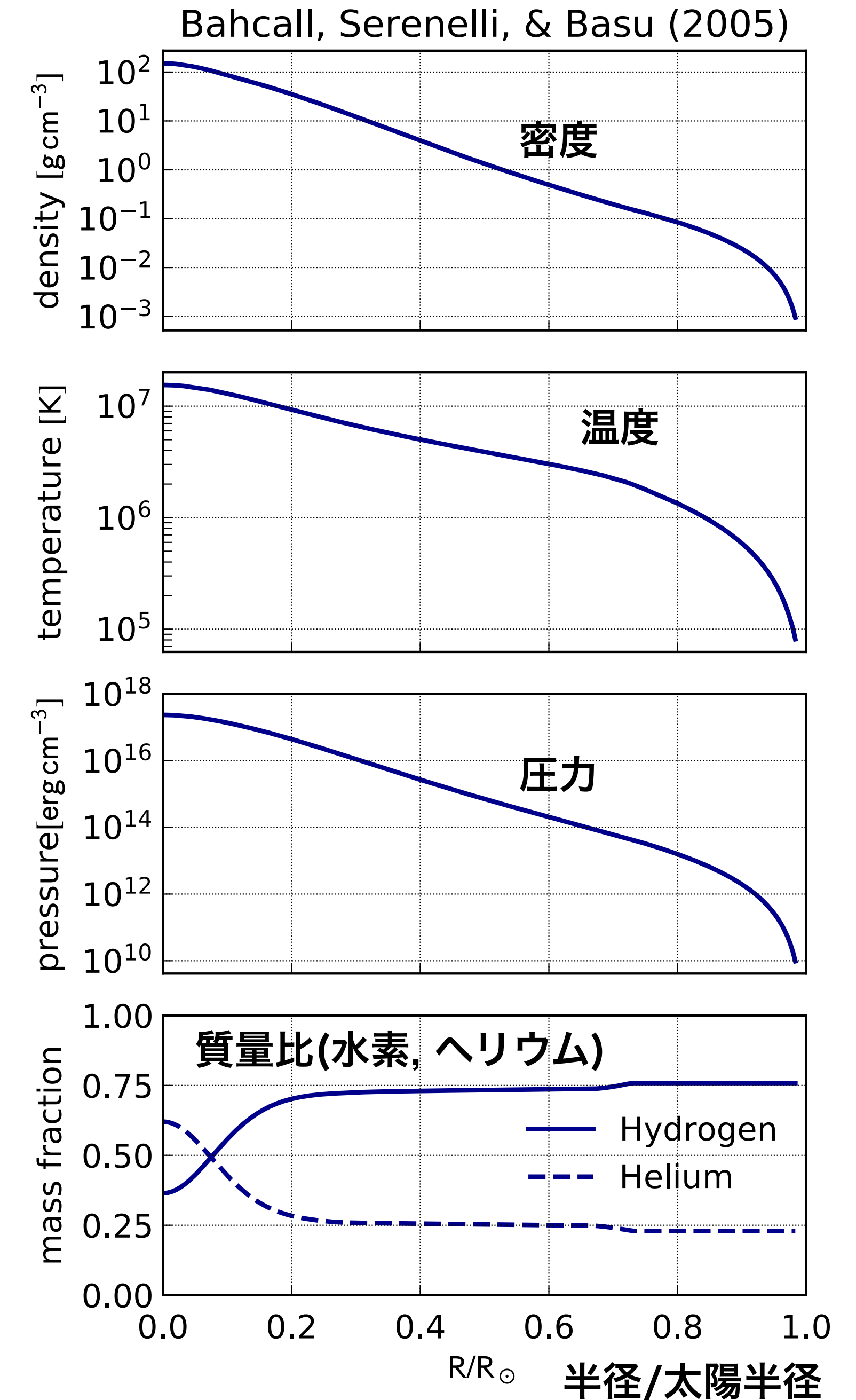
太陽標準モデル

- 例: Bahcall, Serenelli, & Basu (2005)
- 外に向かって密度温度圧力が下がっていく
- 中心温度 $T_c \simeq 1.5 \times 10^7$ [K]
- 中心密度 $\rho_c \simeq 1.5 \times 10^5$ [kg m⁻³]
- 中心では水素がヘリウムに変わっている
(元々は質量比で水素75%+ヘリウム23%くらい)



太陽標準モデル

- 本当か？
- 中身は電磁波観測では(直接)見えない. 光子は表面から出てくるのみ
- 太陽振動によるリモートセンシング: **日震学(helio-seismology)**
- ニュートリノ観測: **太陽ニュートリノ(solar neutrino)**



第5回:

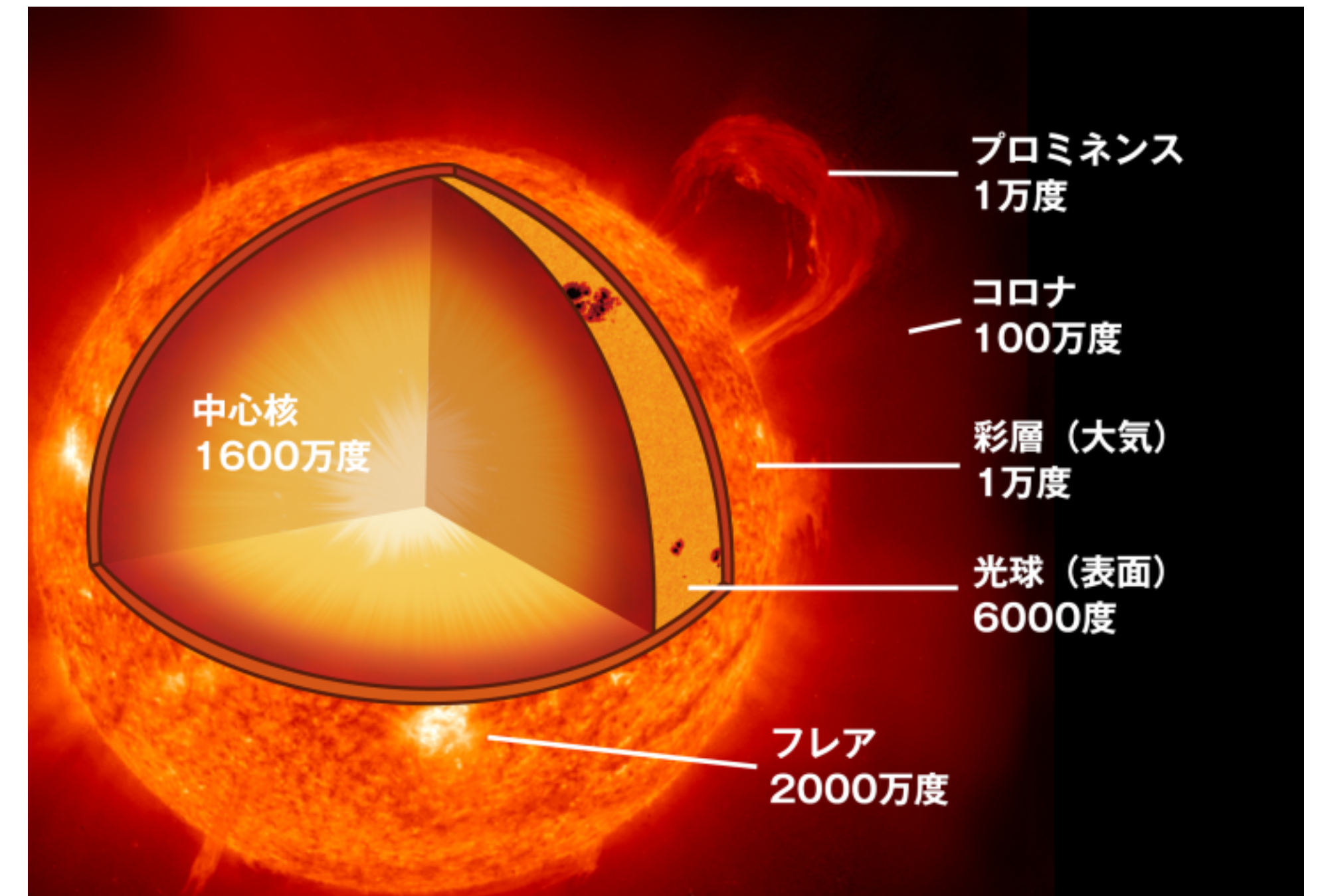
恒星1

-恒星のエネルギー源と核反応-

- 太陽のエネルギー源は何か？
- 太陽や恒星の内部構造
- 恒星の中で起こる核反応
- 太陽フレアと恒星の活動性

水素燃焼(Hydrogen burning)

- $4^1\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + 2\text{e}^+ + 2\nu_{\text{e}} + \gamma$
- 2種類の燃焼過程
- **p-p連鎖(p-p chain)**: 太陽のような星で支配的に起こる
- **CNOサイクル(CNO cycle)**: 太陽よりも重い星(中心温度が高い)で支配的に起こる

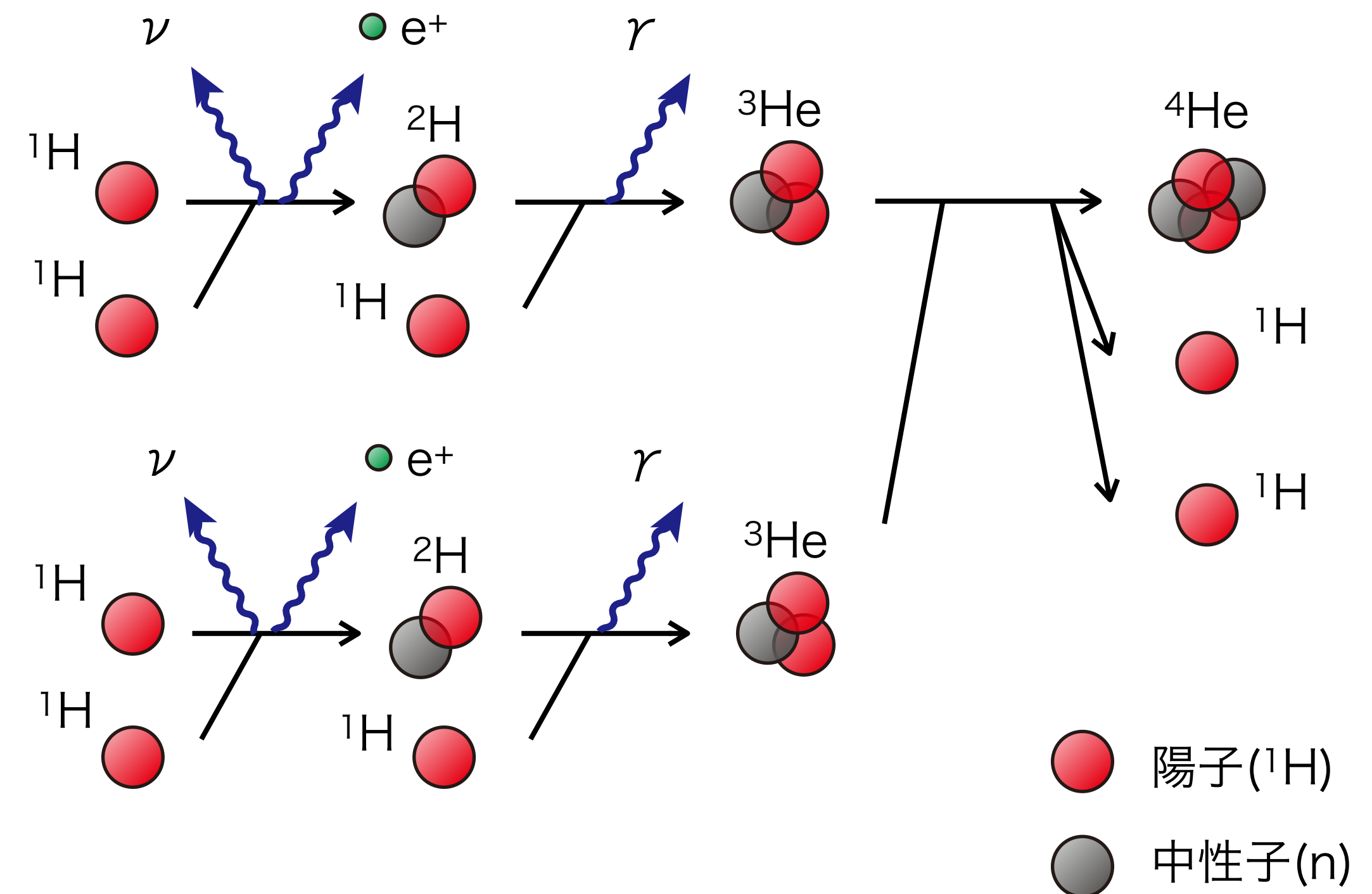
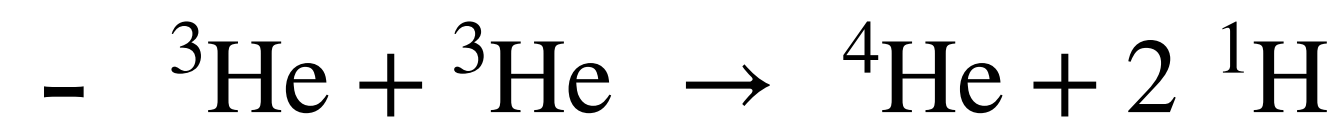
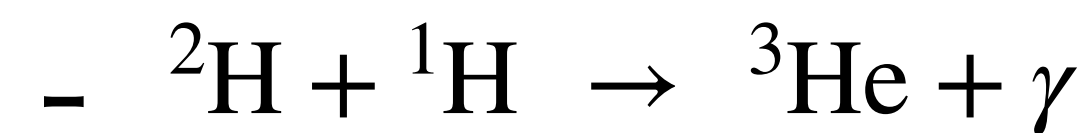
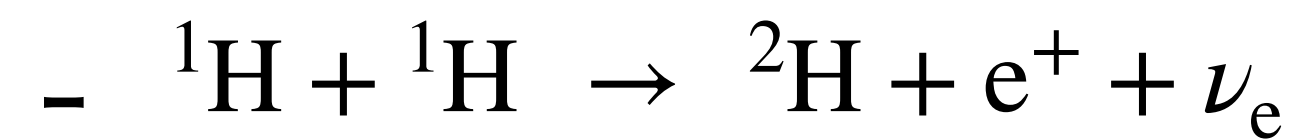


credit: ISAS/JAXA

陽子-陽子連鎖 (p-p chain)

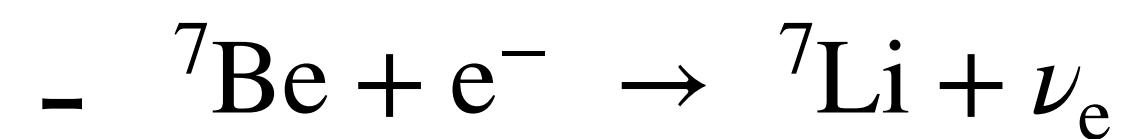
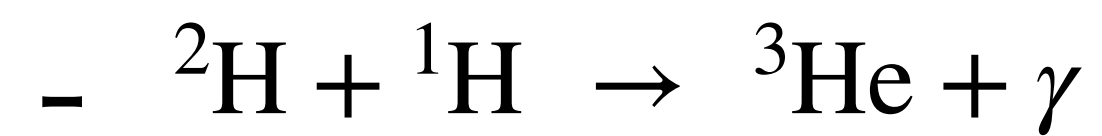
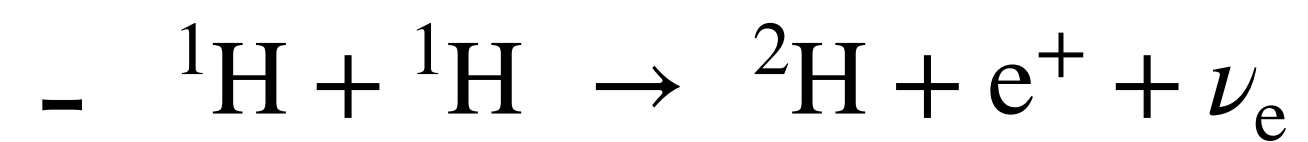
p-p I branchの模式図

- pp-I分枝

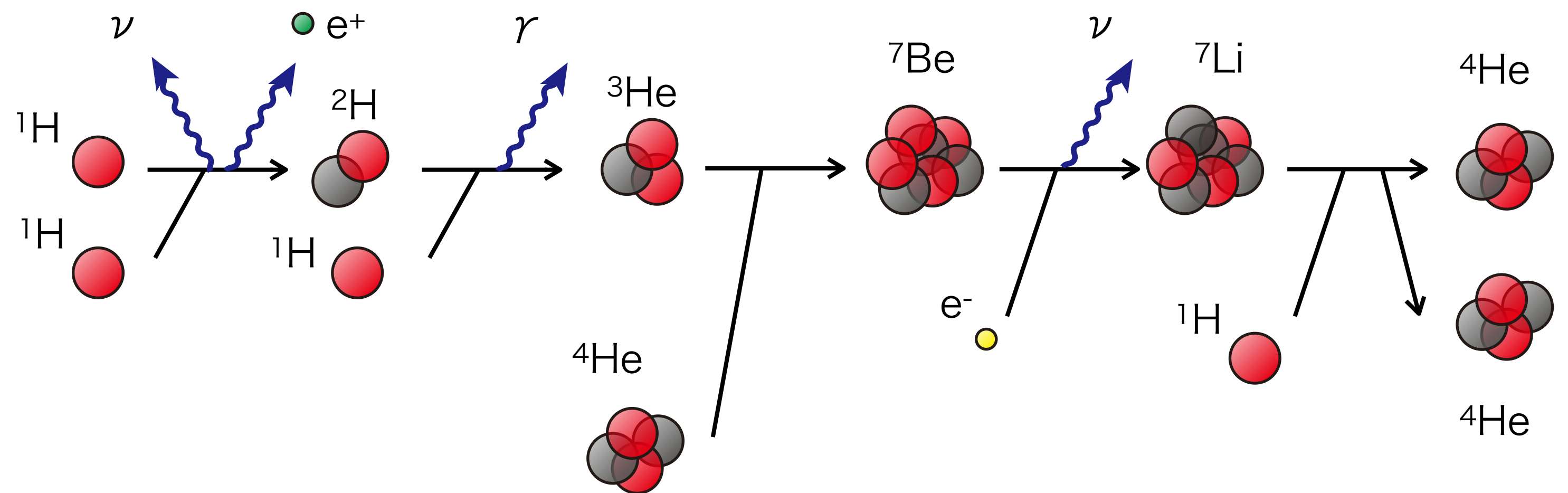


陽子-陽子連鎖 (p-p chain)

- pp-II分枝

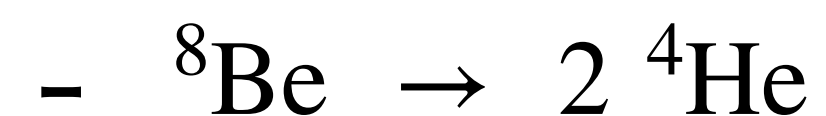
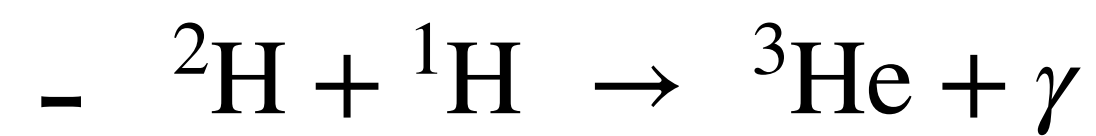
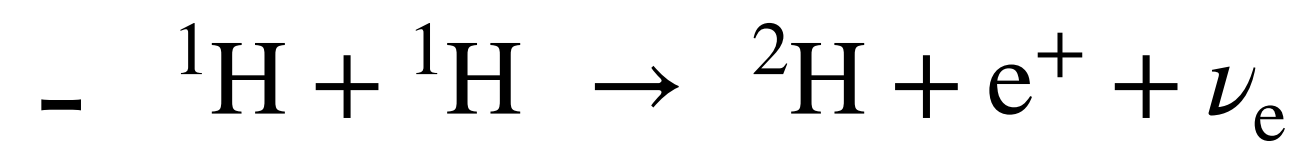


p-p II branchの模式図

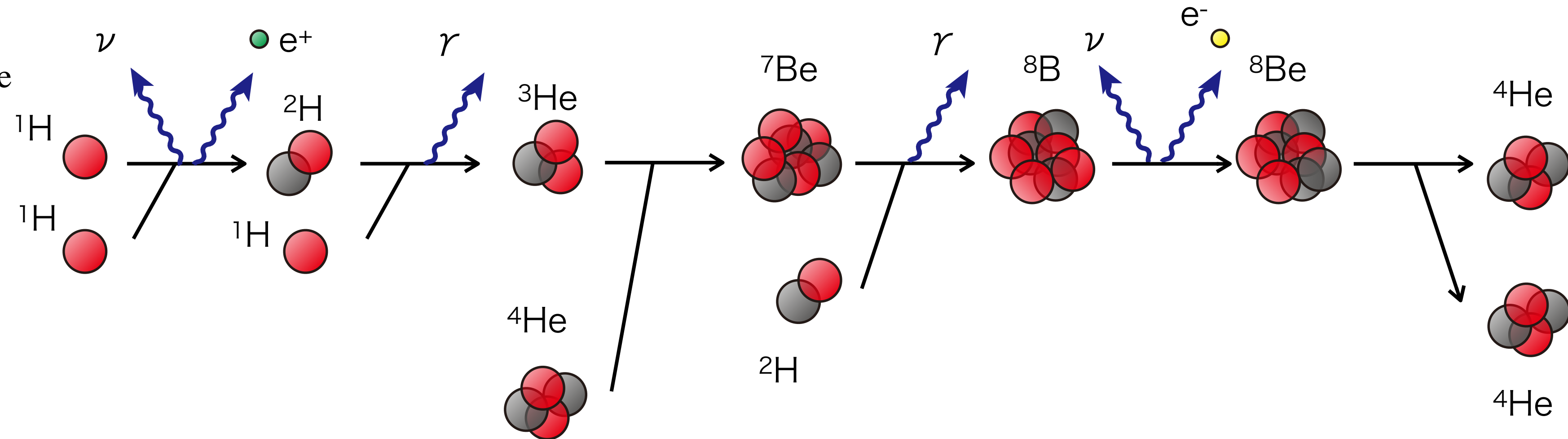


陽子-陽子連鎖 (p-p chain)

• pp-III分枝

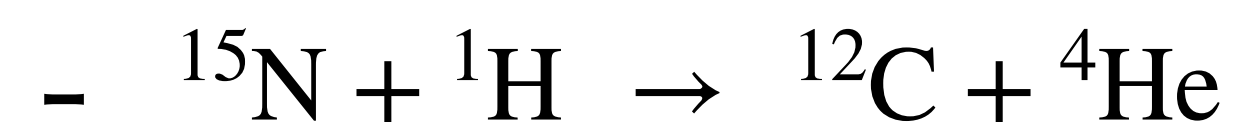
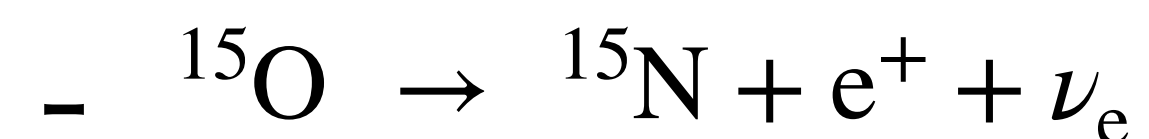
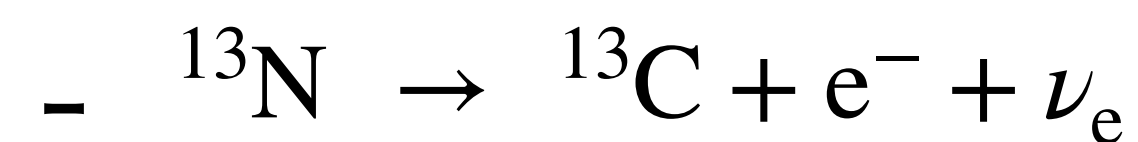


p-p III branchの模式図

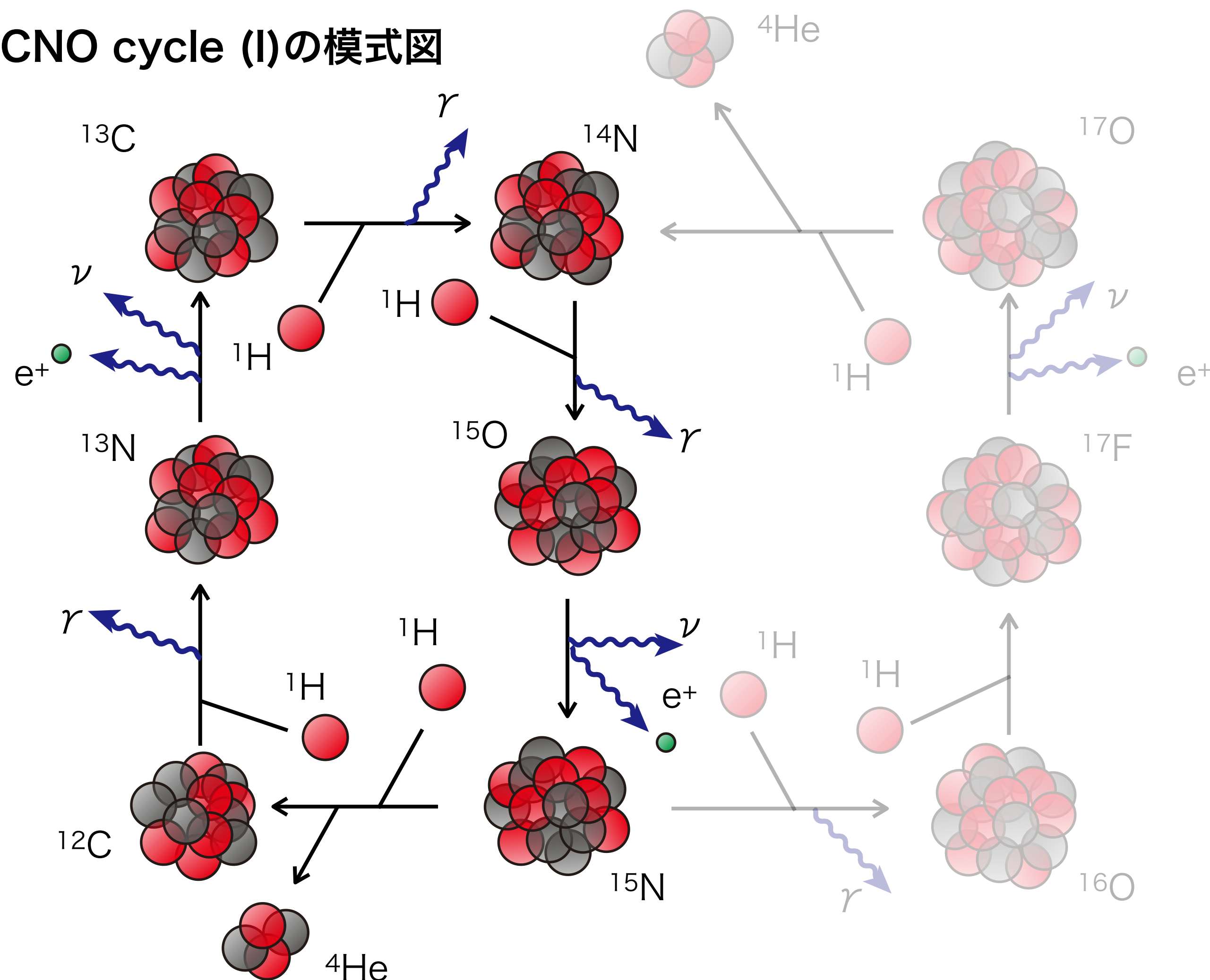


CNOサイクル (CNO cycle)

- 炭素・窒素・酸素を触媒とする反応

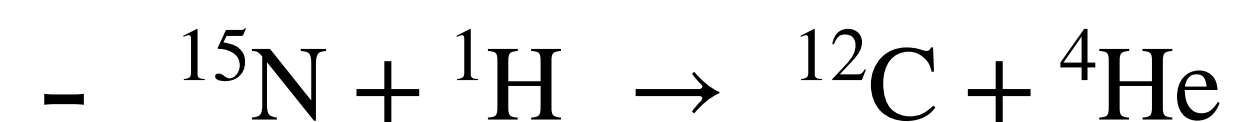
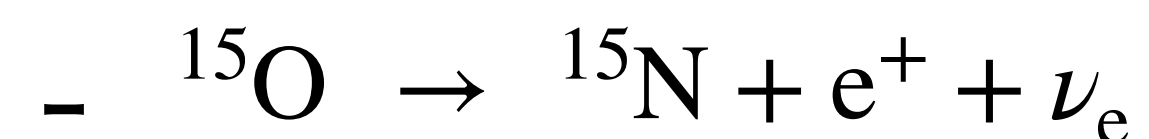
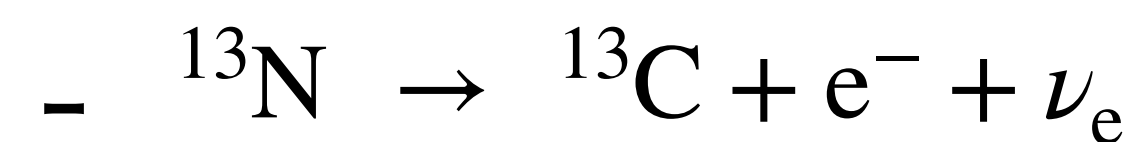


CNO cycle (I)の模式図

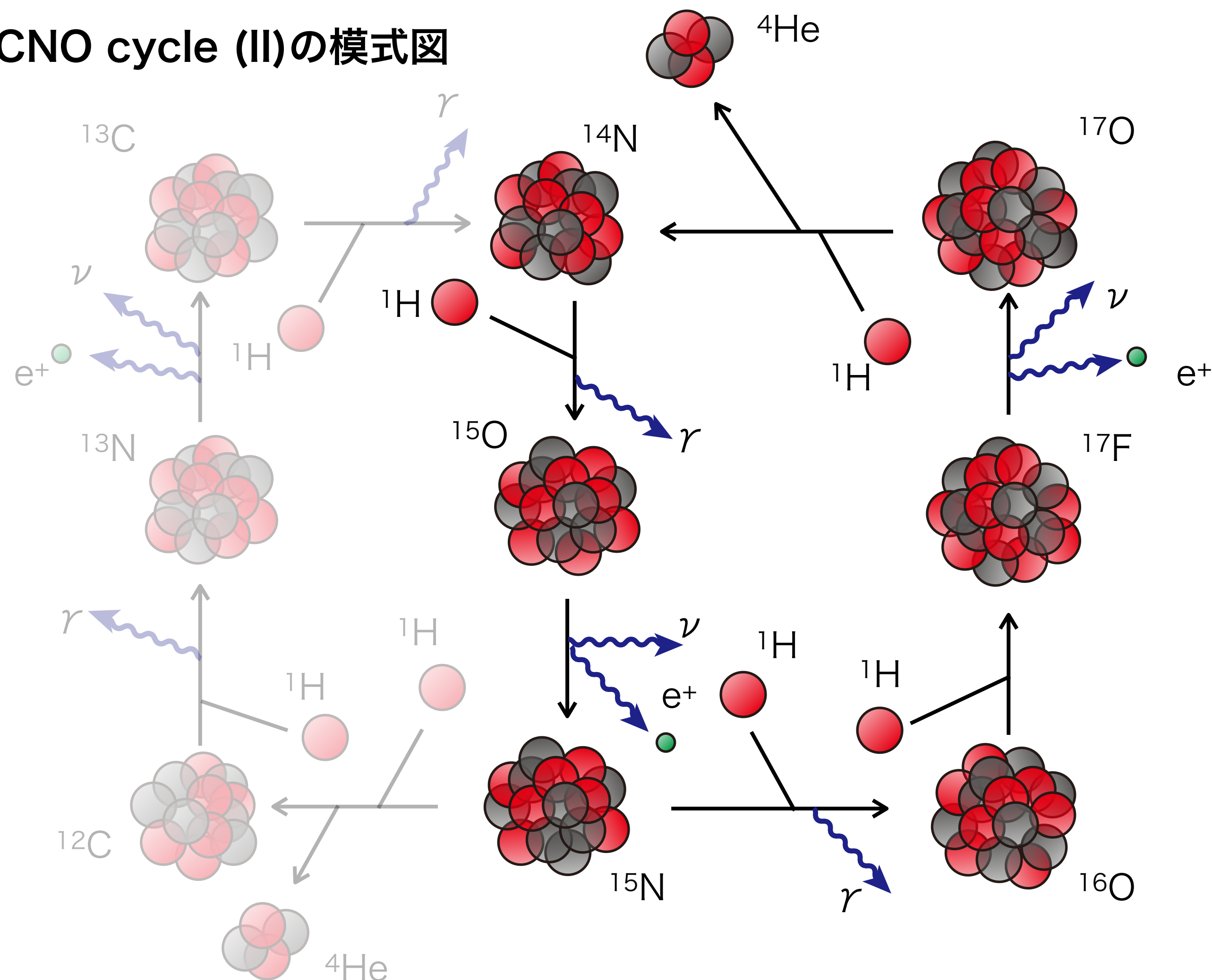


CNOサイクル (CNO cycle)

- 炭素・窒素・酸素を触媒とする反応



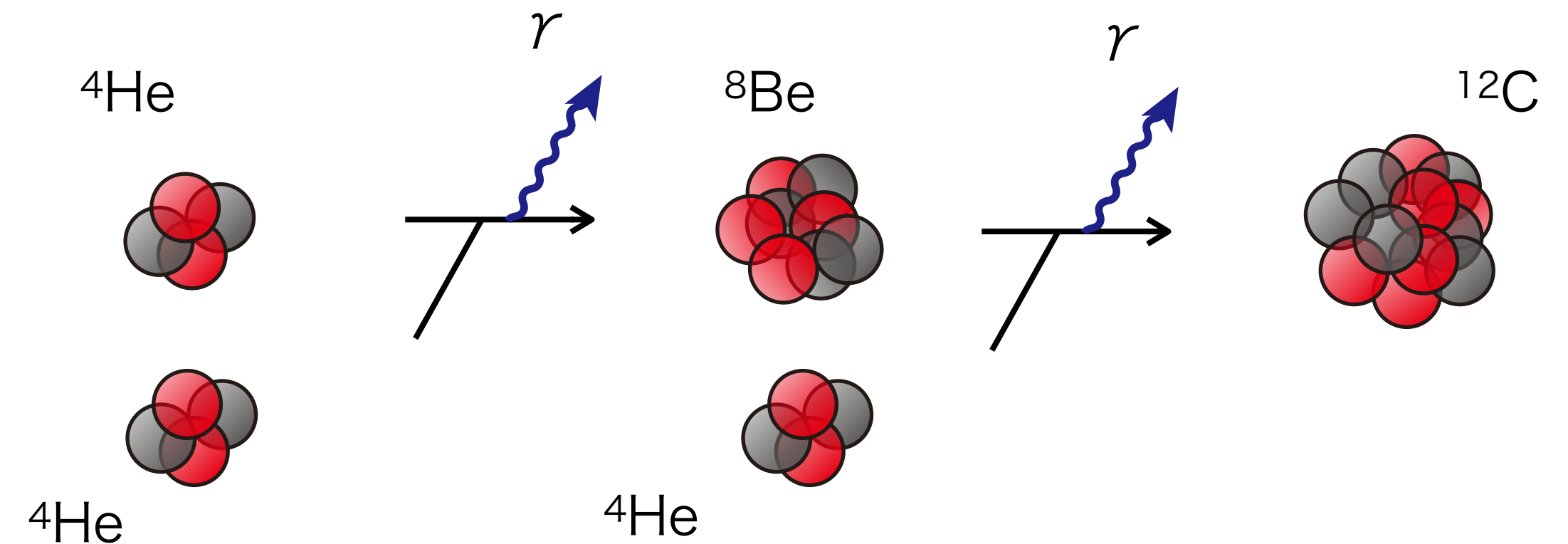
CNO cycle (II)の模式図



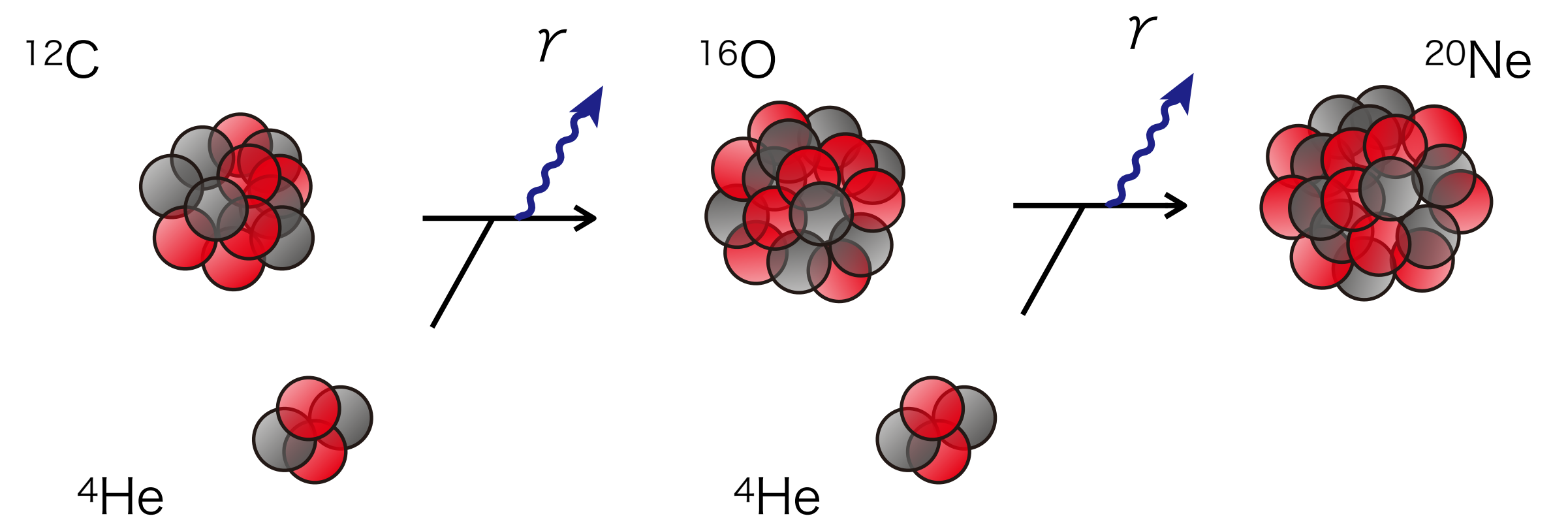
さらに先の核燃焼

- ・ ヘリウム燃焼: ヘリウム → 炭素
- ・ トリプルアルファ (triple α) 反応
- ・ α =He原子核
 - ${}^4\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^8\text{Be} + \gamma$
 - ${}^8\text{Be} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C} + \gamma$
- ・ この反応がなければ人類(炭素を用いた生命)は生まれない

Triple α 反応の模式図



α -capture 反応の模式図

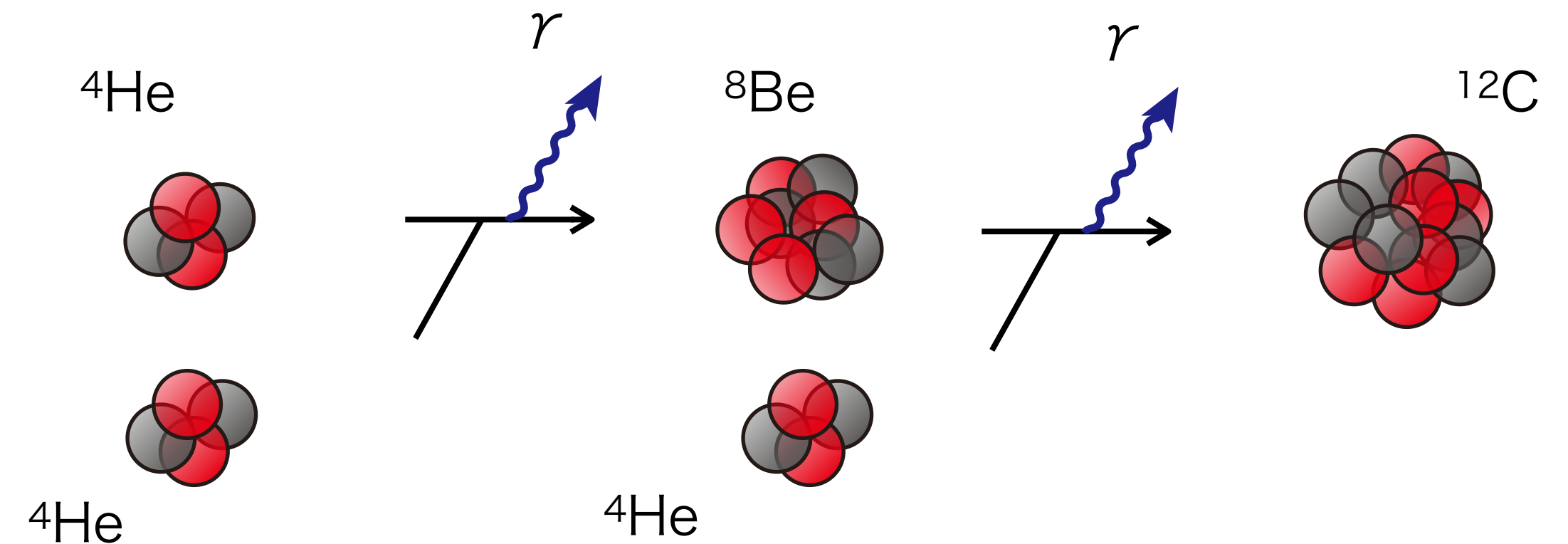


さらに先の核燃焼

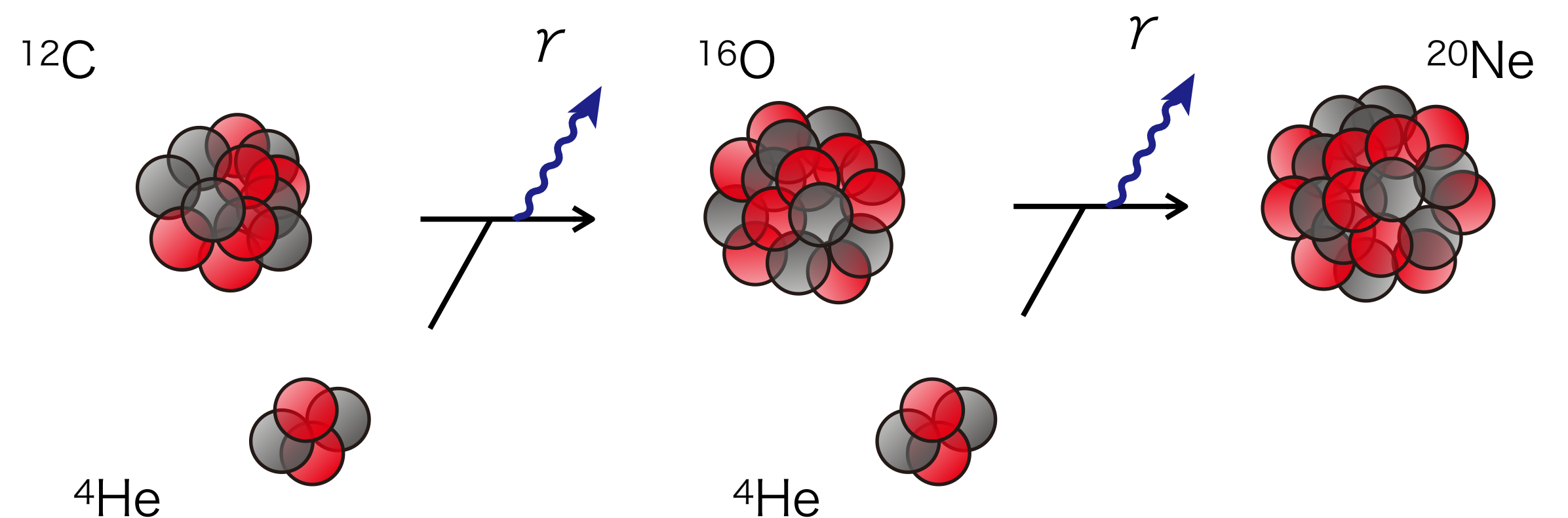
- α 反応: He原子核(α 粒子)が取り込まれる核反応
- triple α 反応でできた ^{12}C から ^{16}O や ^{20}Ne など、より重い原子核が作られる



Triple α 反応の模式図

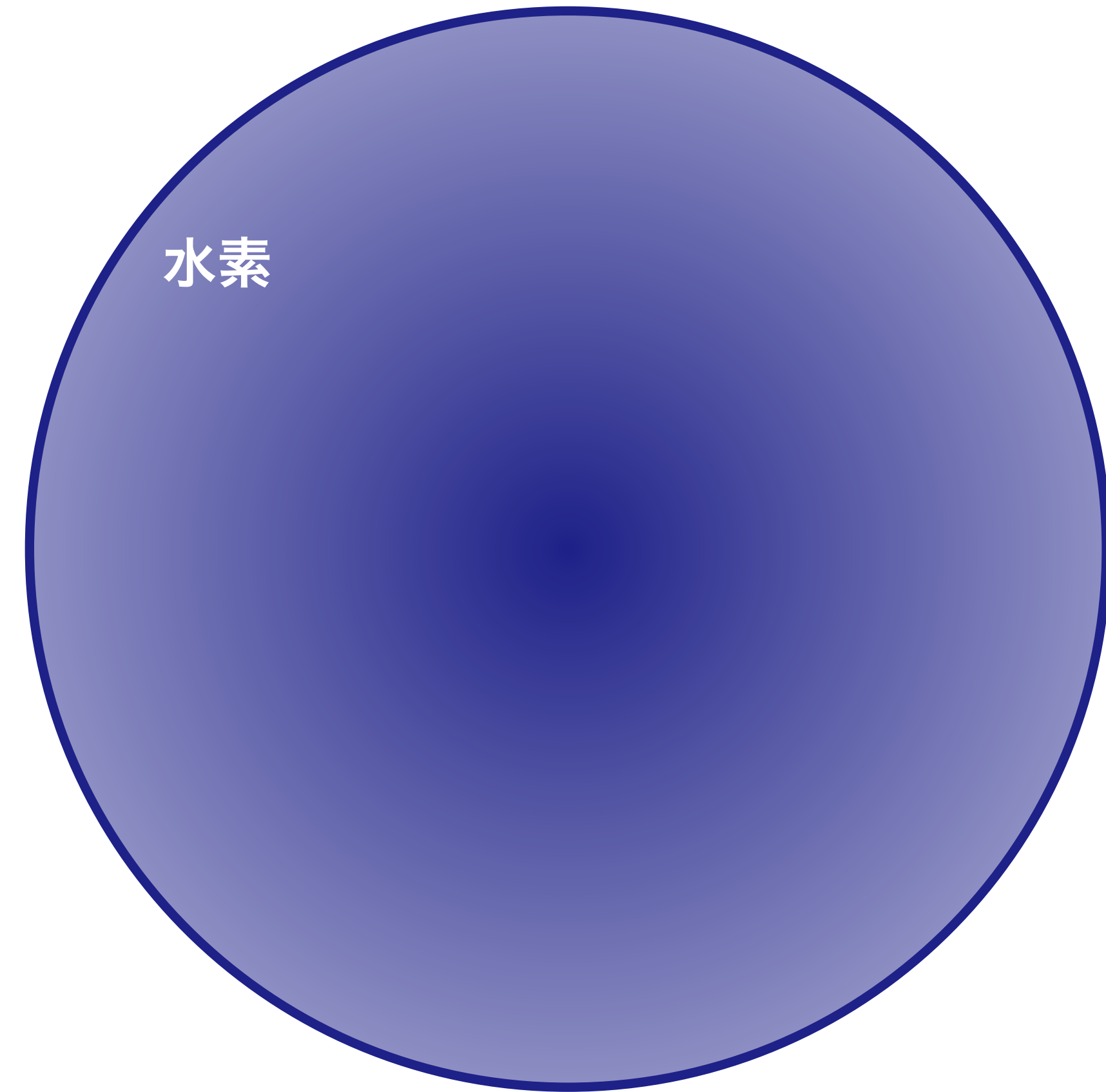


α -capture 反応の模式図



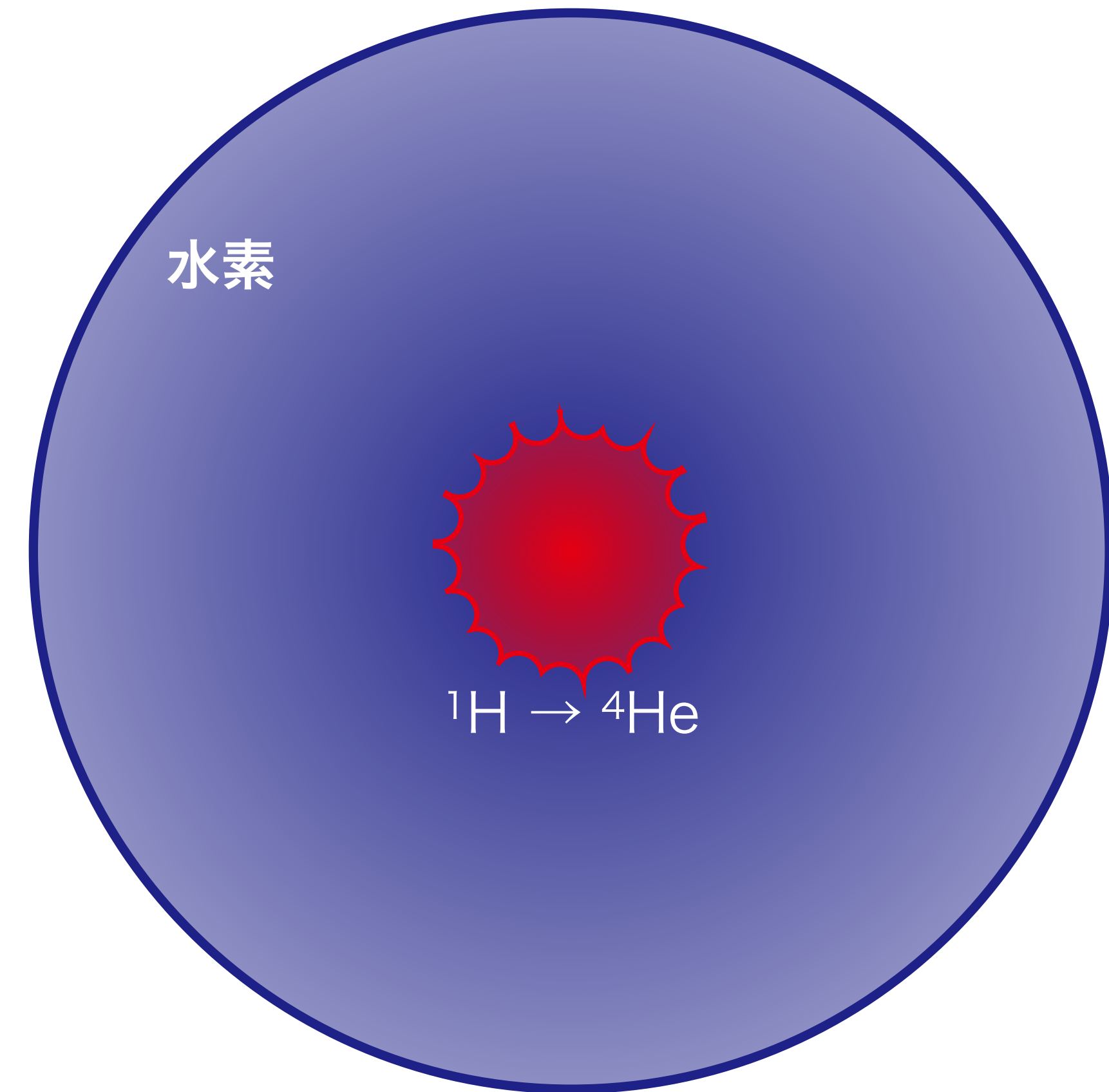
星の中での核燃焼

- ・ 中心で水素からヘリウムへ(現在の状態)
- ・ ヘリウム中心核
- ・ ヘリウムに点火
- ・ 中心でヘリウムから炭素へ



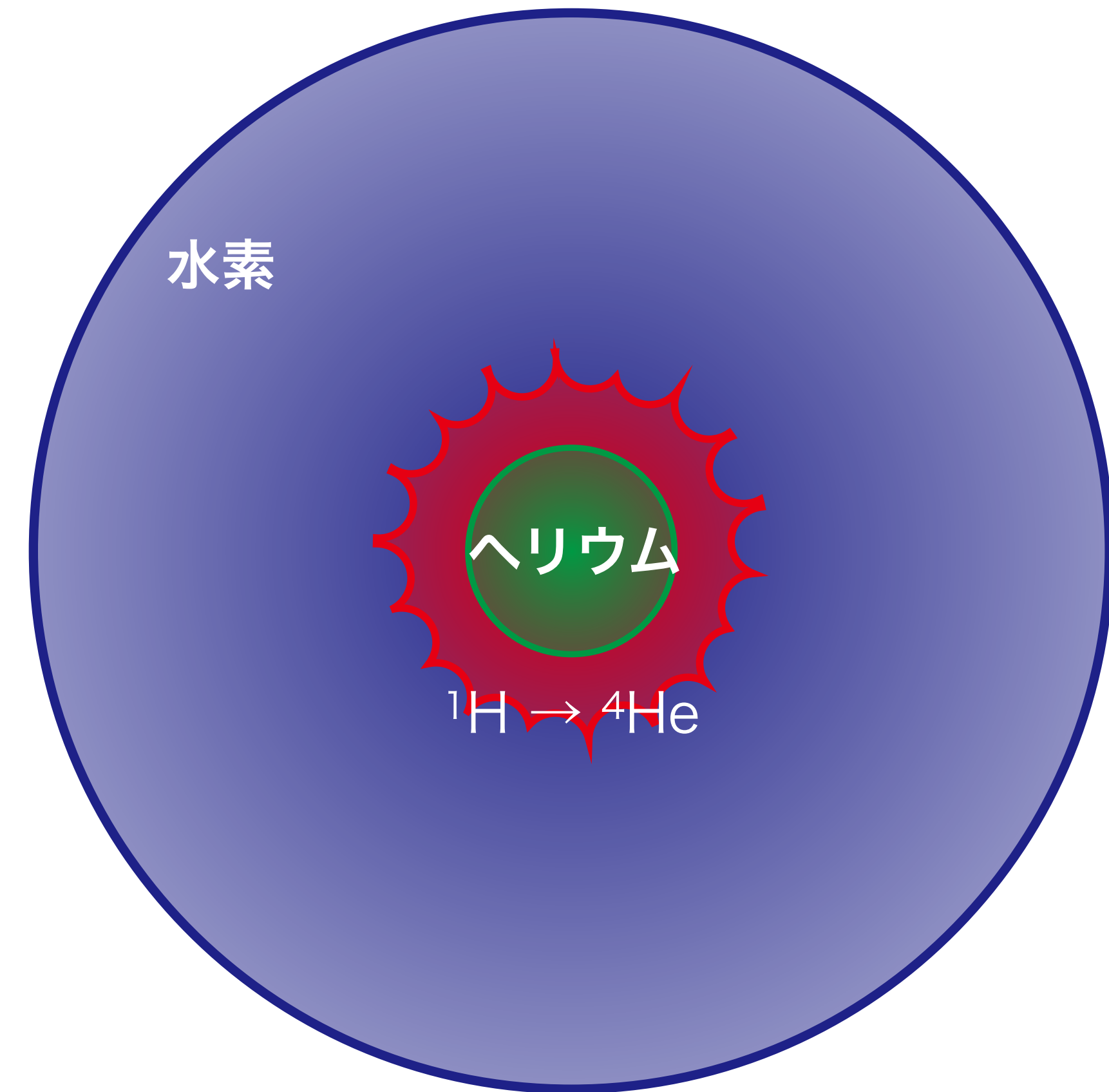
星の中での核燃焼

- ・ 中心で水素からヘリウムへ(現在の状態)
- ・ ヘリウム中心核
- ・ ヘリウムに点火
- ・ 中心でヘリウムから炭素へ



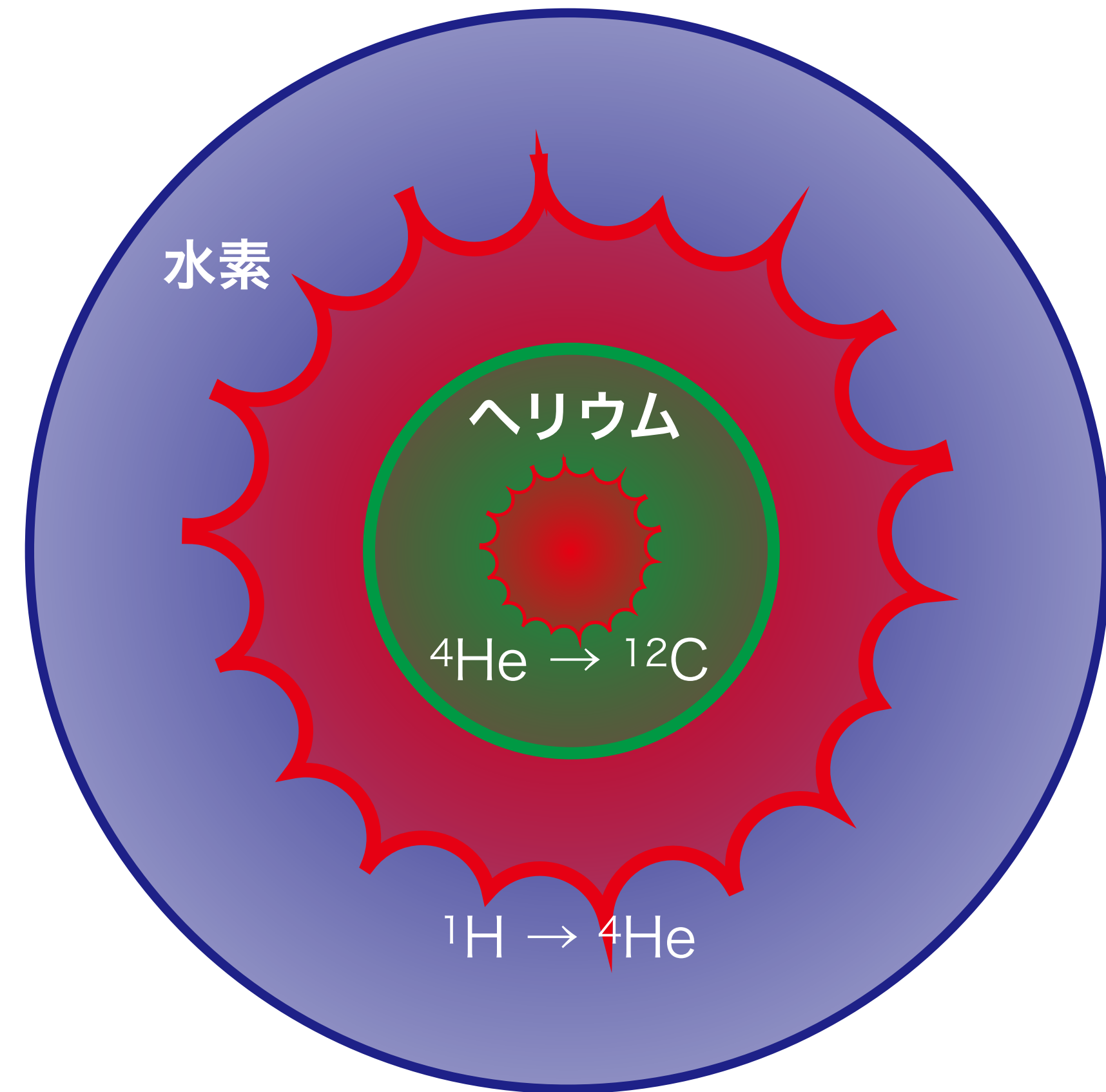
星の中での核燃焼

- ・ 中心で水素からヘリウムへ(現在の状態)
- ・ ヘリウム中心核
- ・ ヘリウムに点火
- ・ 中心でヘリウムから炭素へ



星の中での核燃焼

- ・ 中心で水素からヘリウムへ(現在の状態)
- ・ ヘリウム中心核
- ・ ヘリウムに点火
- ・ 中心でヘリウムから炭素へ



第5回:

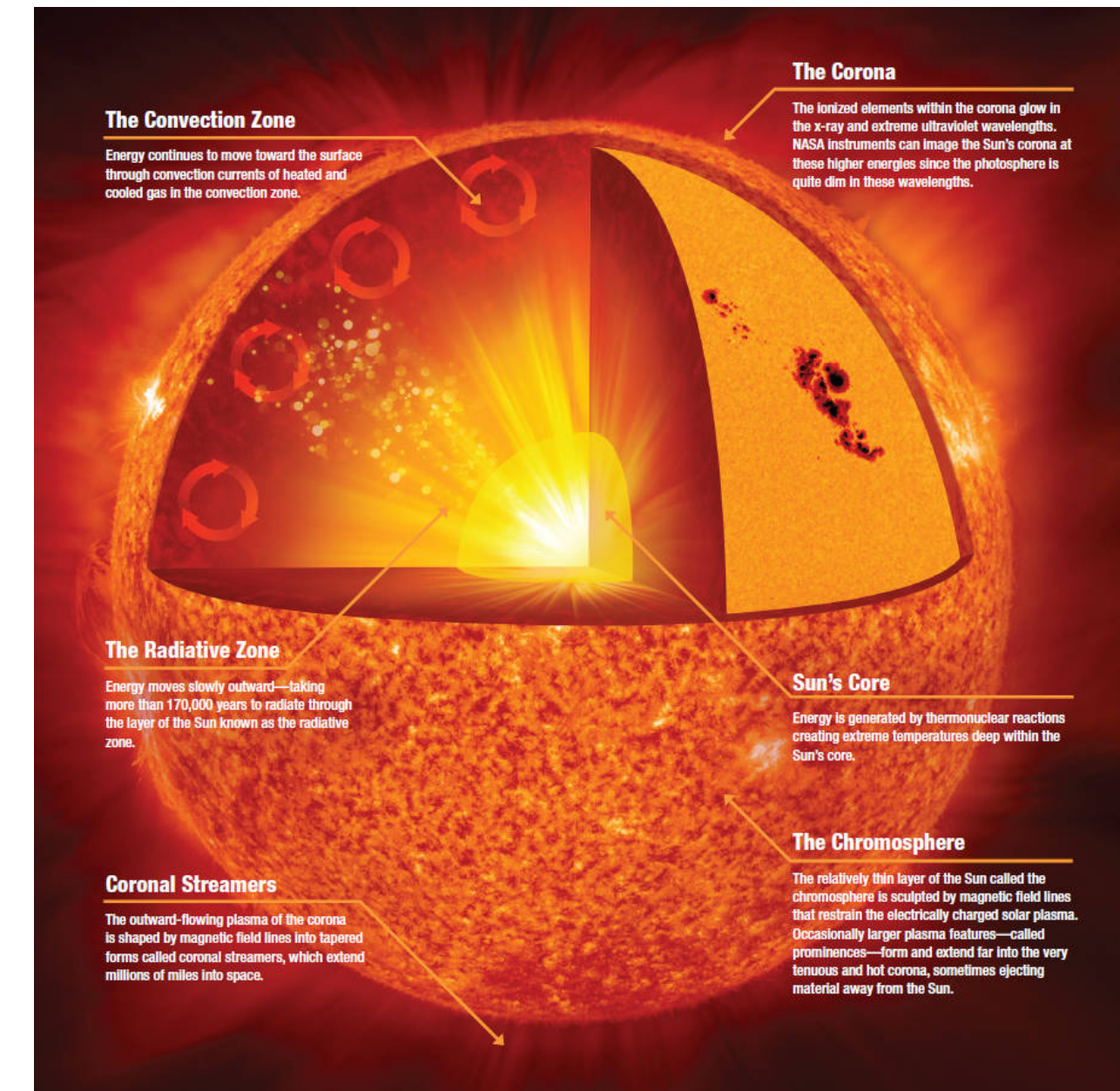
恒星1

-恒星のエネルギー源と核反応-

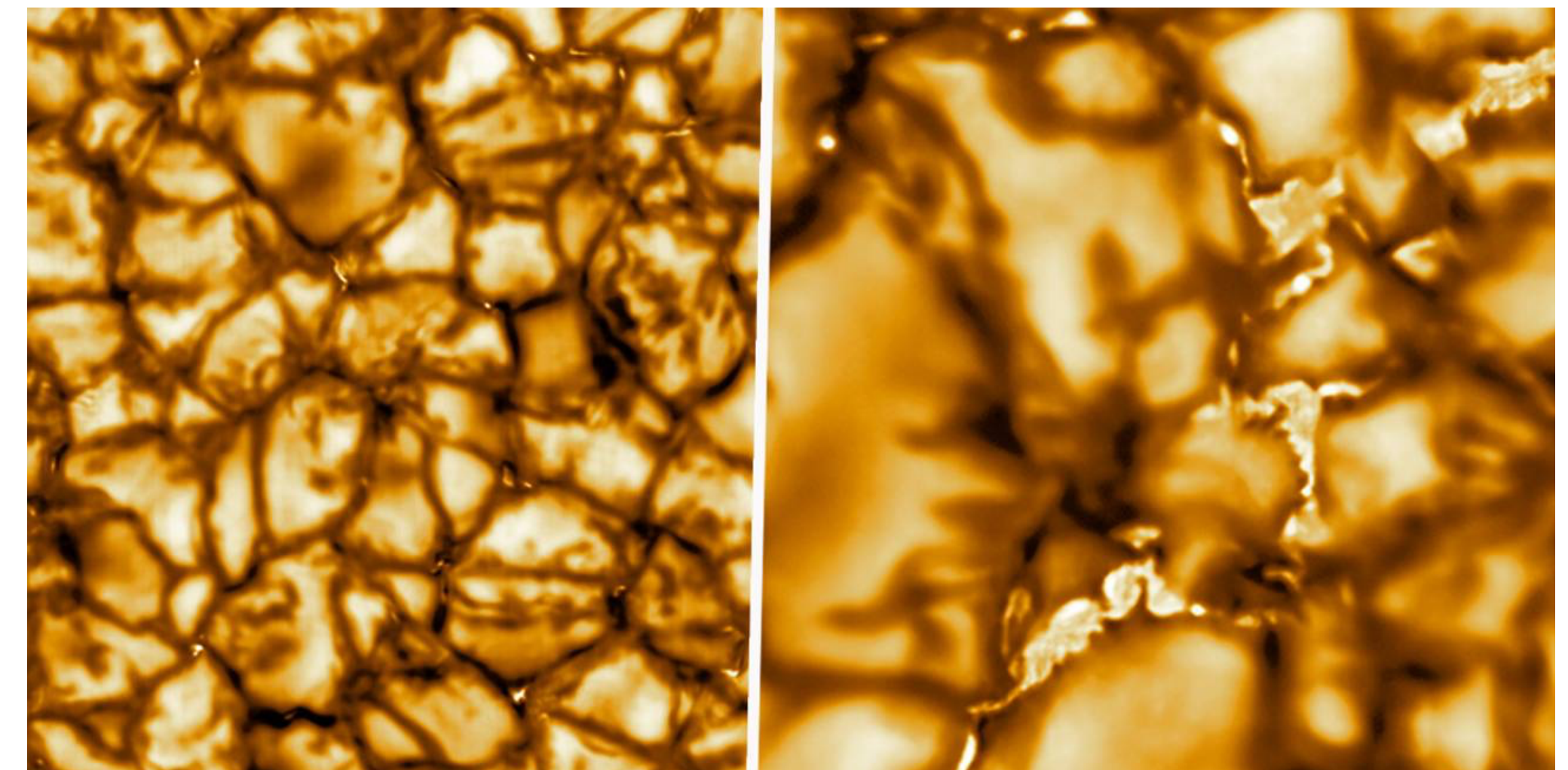
- 太陽のエネルギー源は何か？
- 太陽や恒星の内部構造
- 恒星の中で起こる核反応
- 太陽フレアと恒星の活動性

太陽の活動性

- 太陽の状態は常に一定ではない
- **対流(convection)**: 太陽表面は常に揺れ動いている
- **黒点(sunspot)**: 太陽表面の暗い部分
- **太陽フレア (solar flare)**: 太陽の表面の活動性により、ガスが爆発的に噴出する現象



$r > 0.7R_{\odot}$ に存在する
対流層

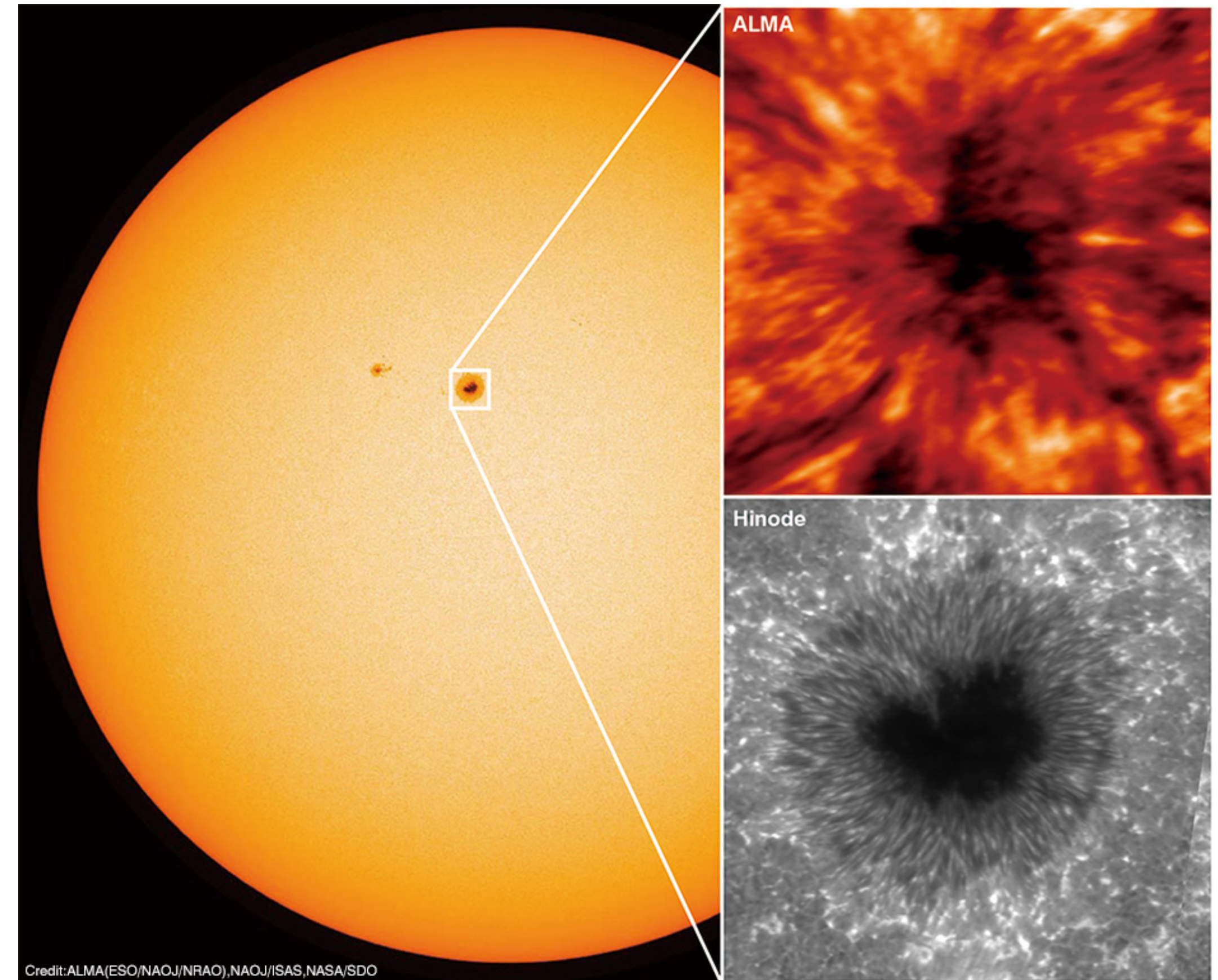


直径約1000kmの粒状斑

DKIST望遠鏡による太陽表面の観測結果
credit: NSO/NSF/AURA

太陽の活動性

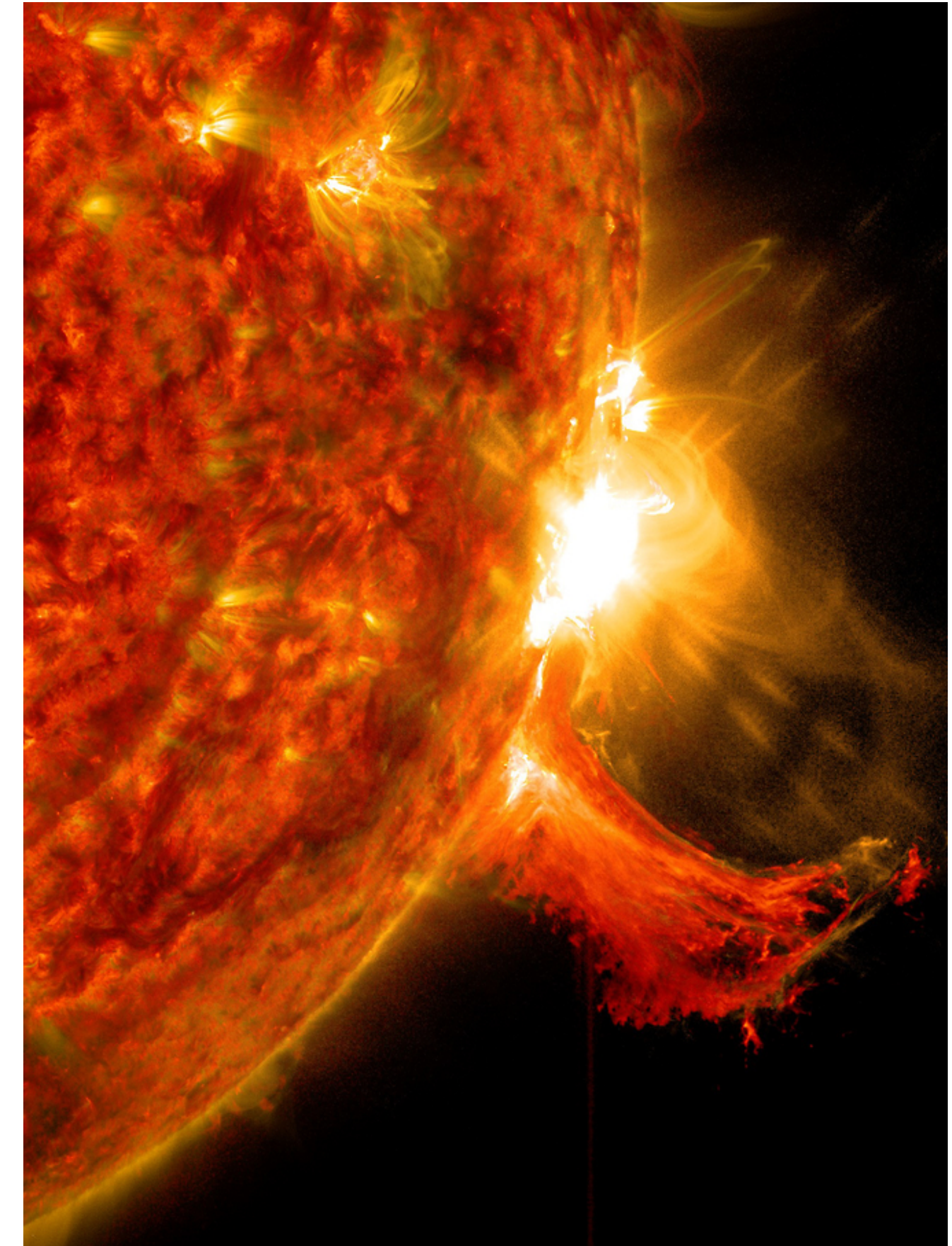
- 太陽の状態は常に一定ではない
- **対流(convection)**: 太陽表面は常に揺れ動いている
- **黒点(sunspot)**: 太陽表面の暗い部分
- **太陽フレア (solar flare)**: 太陽の表面の活動性により、ガスが爆発的に噴出する現象



ひので望遠鏡, アルマ望遠鏡による太陽黒点の観測
credit: ALMA(ESO/NAOJ/NRAO), NAOJ/ISAS, NASA/SDO
<https://www.nao.ac.jp/gallery/weekly/2017/20170321-alma.html>

太陽の活動性

- 太陽の状態は常に一定ではない
- **対流(convection)**: 太陽表面は常に揺れ動いている
- **黒点(sunspot)**: 太陽表面の暗い部分
- **太陽フレア (solar flare)**: 太陽の表面の活動性により、ガスが爆発的に噴出する現象

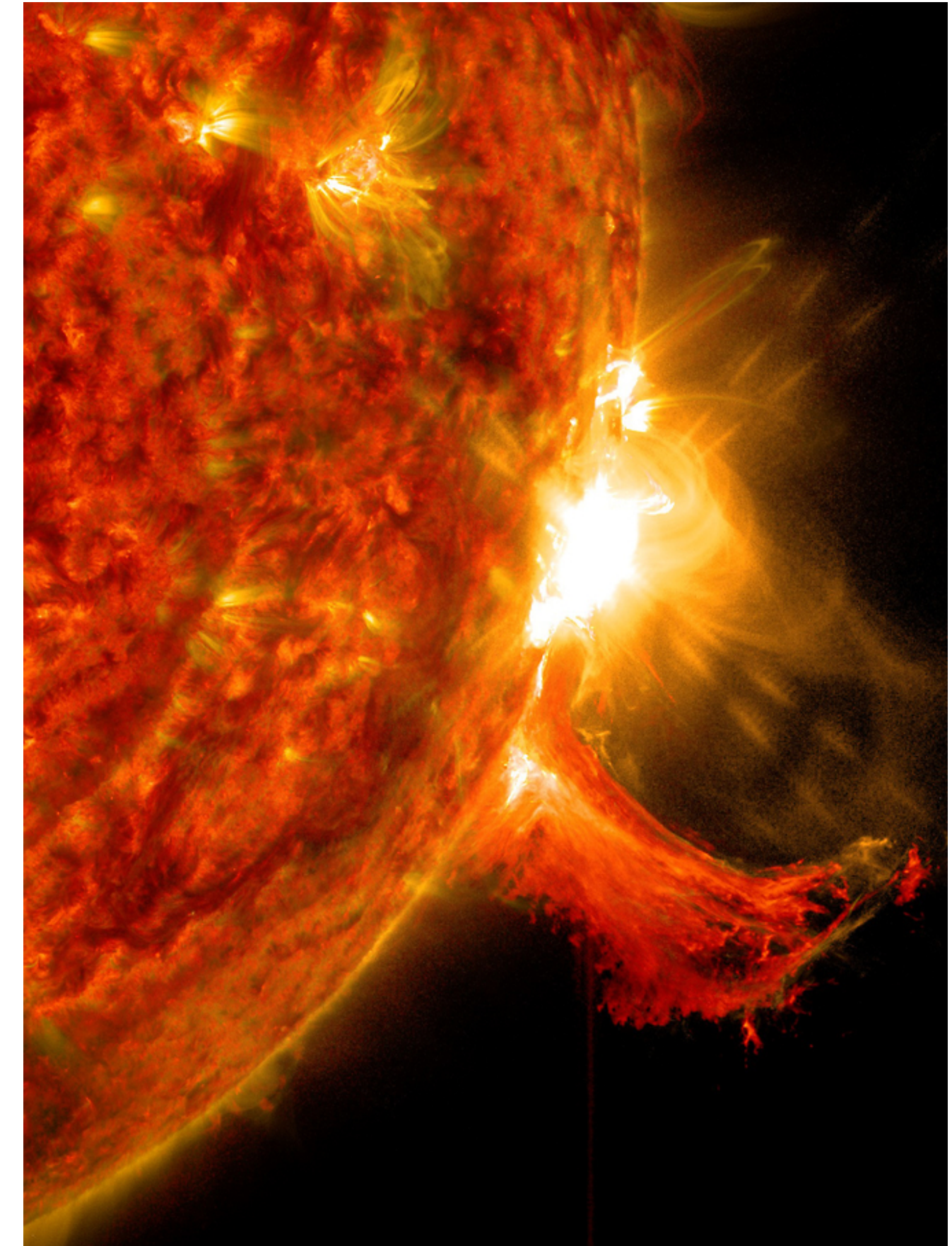


Solar Dynamics Observatoryによる中規模フレアの観測
credit: NASA/SDO

<https://www.nasa.gov/content/goddard/nasa-releases-images-of-mid-level-solar-flare/>

太陽フレアと宇宙天気予報

- 太陽表面における磁気エネルギーの解放現象
- **コロナ質量放出(coronal mass ejection):**
磁気嵐や宇宙線によって地球に影響する
- 1859年キャリントンフレア: 記録史上最大の太陽フレアとそれに伴う磁気嵐
- 当時の電報網がダウン. 鉄塔から火花?
- 同じことが現代でも起きたら?

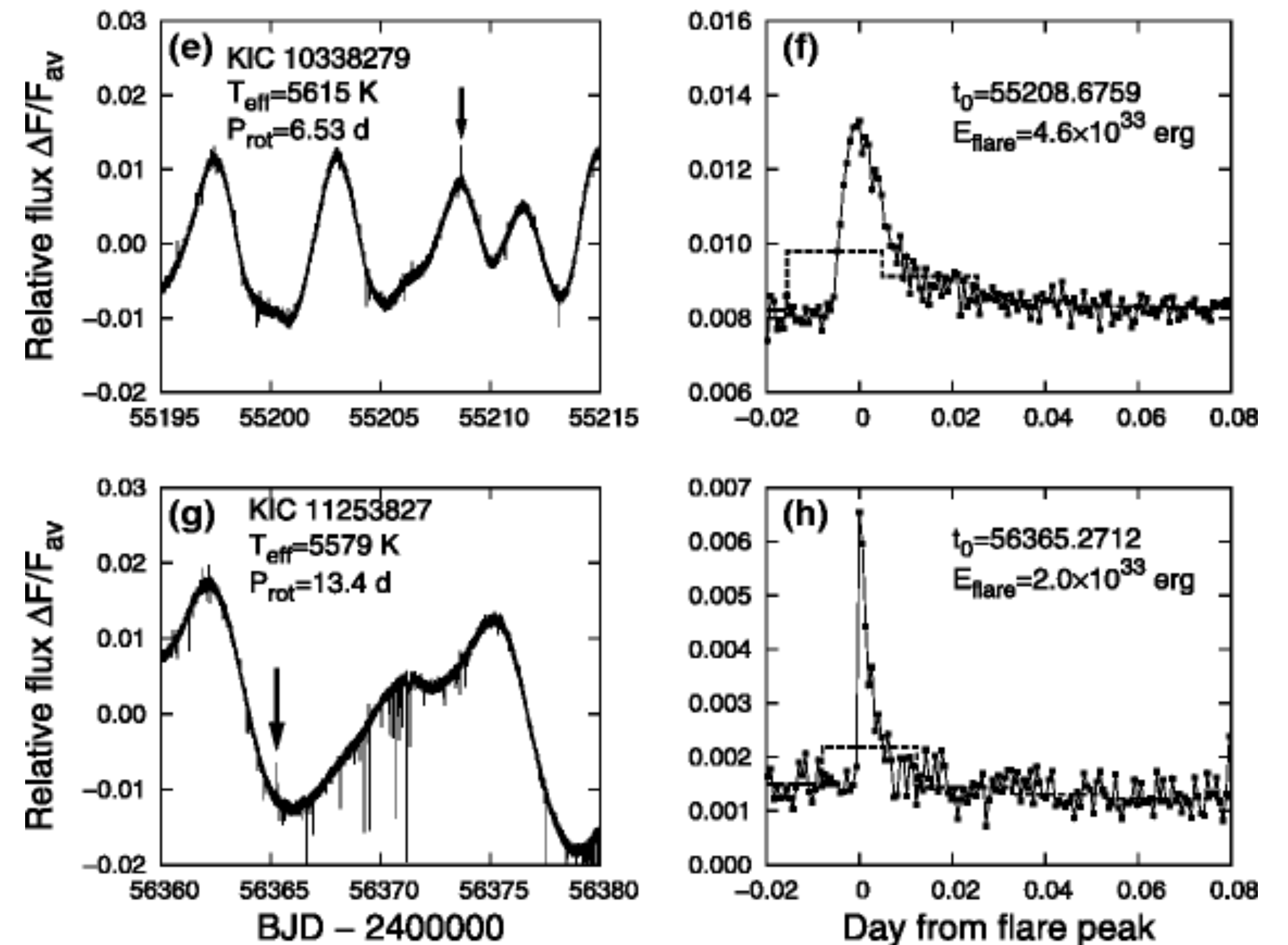


Solar Dynamics Observatoryによる中規模フレアの観測
credit: NASA/SDO

<https://www.nasa.gov/content/goddard/nasa-releases-images-of-mid-level-solar-flare/>

太陽フレアと宇宙天気予報

- スーパーフレアは太陽でも起こるのか？
- 太陽と似た星の観測
- 太陽フレアよりも規模の大きなフレアは起こっている
- 千年に1回スーパーフレア？
- どうやって対策する？



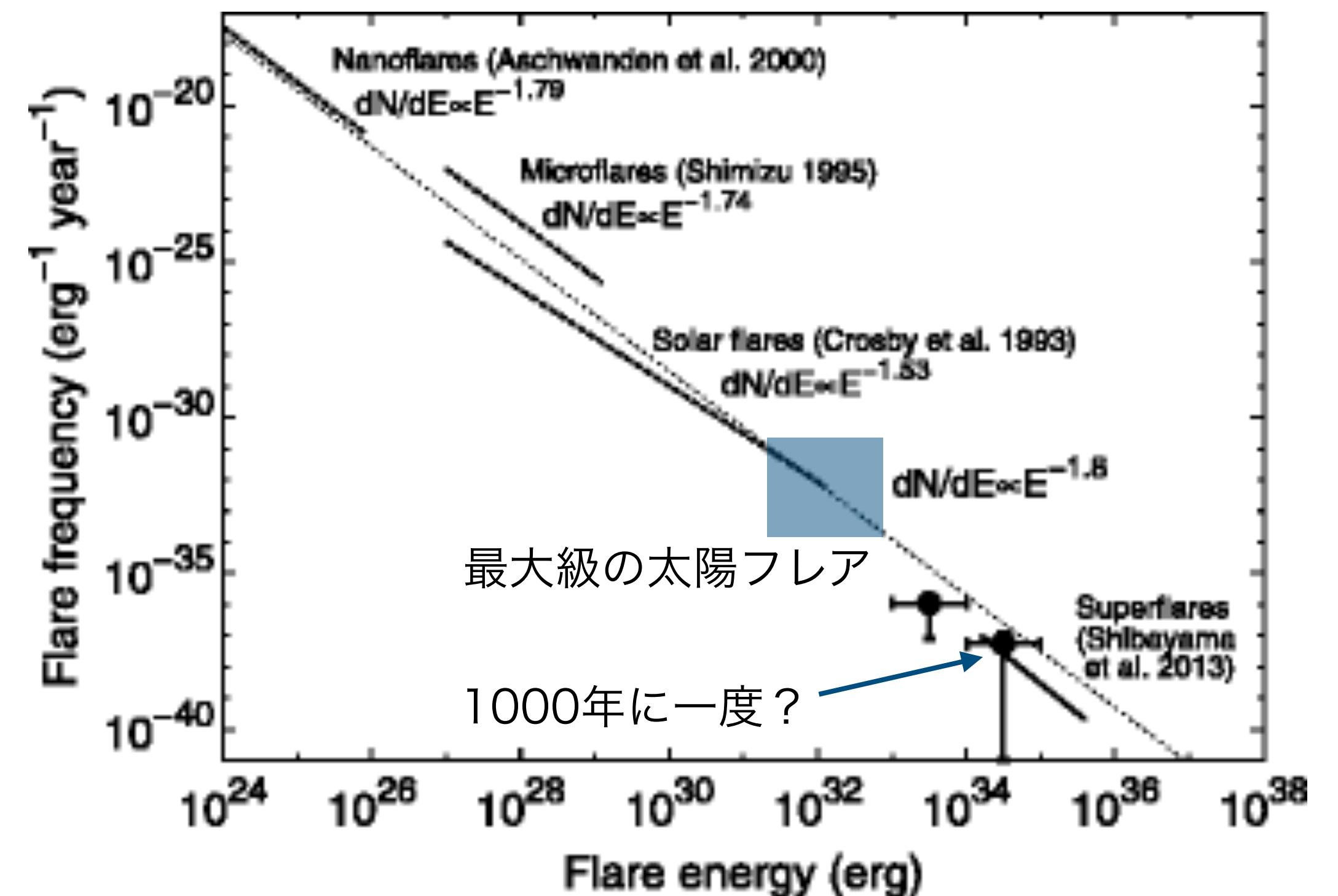
太陽型星におけるスーパーフレアの観測例

Maehara et al. (2015) ESP, 67, 59

<https://earth-planets-space.springeropen.com/articles/10.1186/s40623-015-0217-z>

太陽フレアと宇宙天気予報

- ・ スーパーフレアは太陽でも起こるのか？
- ・ 太陽と似た星の観測
- ・ 太陽フレアよりも規模の大きなフレアは起こっている
- ・ 千年に1回スーパーフレア？
- ・ どうやって対策する？



太陽型星におけるフレアのエネルギーと頻度
Maehara et al. (2015) ESP, 67, 59
<https://earth-planets-space.springeropen.com/articles/10.1186/s40623-015-0217-z>

太陽フレアと宇宙天気予報

- 宇宙天気予報(space weather forecast)
- 現在の太陽の様子から地球への影響を予想する
- AIの活用

情報通信研究機構(NICT)による宇宙天気予報のウェブサイト

<https://swc.nict.go.jp>

