

# 1 太陽概観

## 1.1 太陽観測の変遷

- 人類の宇宙観測の歴史でもある
  - ▷ 可視光による観察・(望遠鏡を使った) 観測—位置天文、黒点、微分回転、分光、コロナ(日食時)
  - ▷ 電波やX線
  - ▷ ニュートリノ
  - ▷ 内部を伝わる波動
- 最新の太陽観測：宇宙からの観測
  - ▷ なぜ重要か：電磁波の地球大気による吸収
    - 可視光と電波以外はほとんど地表に届かない
    - 届いても、空気のゆらぎの影響がある(分解能に影響)
    - 天体を色々な波長で「みる」ことは、天体の異なった場所や、異なった物理過程を観測することである
  - ▷ なぜ大変か
    - 地球の重力を振り切って大気圏外へ出るには大きなエネルギーを要する
    - 装置が故障しても、すぐに修理できない
    - データがたくさん取れても、すべて地球に送り返すわけには行かないこともある

## 1.2 諸々の観測量

- 見かけの大きさ(視半径約 $960'' \approx 0.27^\circ$ )・見かけの明るさ(太陽定数 $1.37\text{kWm}^{-2}$ )・[地球の一年の長さ ( $3.16 \times 10^7\text{sec}$ )]
- 太陽系天体の運動(三角視差 → レーダー測距) ⇒ 太陽までの距離  $D = 1.496 \times 10^{13}\text{cm}$

$$\Rightarrow \begin{cases} \text{半径} & R_{\odot} = 6.96 \times 10^{10}\text{cm} \\ \text{質量} & M_{\odot} = 1.989 \times 10^{33}\text{g} \\ \text{光度} & L_{\odot} = 3.85 \times 10^{33}\text{erg/s} \quad (\text{erg} = 10^{-7}\text{J}) \\ \text{有効温度} & T_{\text{eff}} = 5777\text{K} \end{cases}$$

- ▷ 明るさ(luminosity)  $L_{\odot}$  と地球で測定した「ボロメトリックフラックス」(bolometric flux)  $F_{\text{bol}}$

$$L_{\odot} = 4\pi D^2 F_{\text{bol}}$$

$$F_{\text{bol}} = \int_0^{\infty} F_{\nu} d\nu$$

<sup>1</sup><http://solarwww.mtk.nao.ac.jp/heliopause/Komaba2009/>

表 1: 最近の主な太陽観測用衛星・飛翔体

通称/略称	ようこう	SOHO	ひので	SDO
名称	SOLAR-A	Solar and Heliospheric Observatory	SOLAR-B	Solar Dynamics Observatory
	日米英	米欧 (NASA/ESA)	日米英+欧	米 (NASA)
打ち上げ	1991年8月 (2001年12月観測終了、2005年9月大気圏再突入)	1995年12月	2006年9月23日	2009年秋 (予定)
軌道	高度 500km~800km、軌道傾斜角 31 度、周期 98 分	Lagrange 点 L1 (halo orbit の周期約 178 日)	高度約 680km、周期 98 分の太陽同期極軌道	静止軌道
観測	SXT (Soft X-ray Telescope、軟 X 線望遠鏡) など、4つの搭載機器でフレア機構の解明に寄与	MDI/SOI (Michelson Doppler Imager/Solar Oscillations Investigation) など 12 群の観測機器を用いて太陽物理学全般にわたる観測を行っている	SOT (Solar Optical Telescope、太陽光学磁場望遠鏡)、XRT (X-ray Telescope、X 線望遠鏡)、EIS (EUV Imaging Spectrometer、極紫外撮像分光装置) の3つの搭載機器で太陽磁場のダイナミクスを、光球からコロナまで同時観測	HMI (Helioseismic and Magnetic Imager) など 3つの搭載機器で太陽のダイナミカルな現象を研究

$F_\nu$  はある周波数  $\nu$  でのフラックス (単位面積を単位時間に通過する単位周波数あたりのエネルギー) で、温度  $T$  の黒体放射の場合

$$F_\nu \propto B_\nu = \frac{2h\nu^3/c^2}{\exp(h\nu/kT) - 1}$$

( $h = 6.626 \times 10^{-27} \text{erg} \cdot \text{s}$  は Planck 定数、 $k = 1.38 \times 10^{-16} \text{erg/K}$  は Boltzmann 定数)

- ▷ 黒体放射: 周波数によらず、光を完全に吸収する (反射しない) 物体 (= 黒体) の発する放射
- ▷ 実際には  $F_\nu$  は限られた範囲でしか測れないので、 $F_{\text{bol}}$  は直接は測れない。  
 $\Delta F_{\text{bol}}/F_{\text{bol}} \sim \text{a few per cent}$
- ▷ Stefan-Boltzmann の法則 (黒体放射の場合)

$$L_\odot = 4\pi R_\odot^2 \sigma T_{\text{eff}}^4$$

$R_\odot$ : 太陽半径、 $\sigma = 5.67 \times 10^{-5} \text{erg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-4} \cdot \text{s}^{-1}$ : Stefan-Boltzmann 定数、 $T_{\text{eff}}$ : 有効温度 ( $\approx$  「表面温度」)

- 放射スペクトル  $\Rightarrow$  化学組成、有効温度  $T_{\text{eff}}$ 、表面重力  $\Leftrightarrow$  大気モデル
  - ▷ 太陽以外の星の場合、 $T_{\text{eff}}$  もこうやって決める他ない
  - ▷ 水素・ヘリウム・その他 (「金属」と呼ぶ) の相対質量比を  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  として  $Z \approx 0.018$  — ただし、Asplund et al(2004):  $Z = 0.0126$
  - ▷ 吸収線はどうして出来るか
    - 吸収・散乱・ランダムウォーク
    - 吸収断面積、吸収係数
      - ・ 単位体積あたりの吸収体の数を  $n$ 、ひとつの吸収体の吸収断面積を  $\sigma$  とすると吸収係数は  $\alpha = n\sigma$

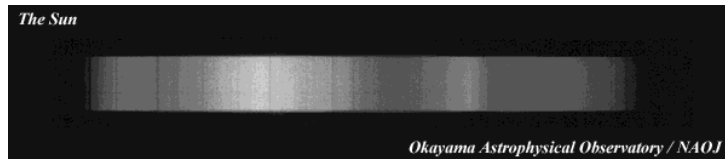
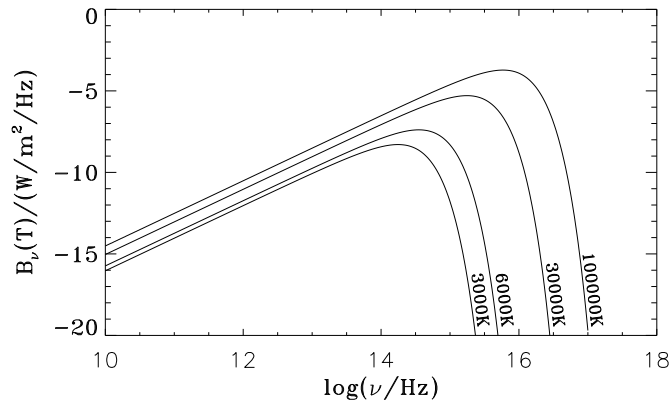


図 1: 様々な温度に対する関数  $B_\nu(T)$  (上) 太陽の放射スペクトル (下)

- ・ 吸収係数が一定の時、輻射の強度は  $I(x) = I_0 e^{-\alpha x}$  で変化
- ・ 平均自由行程  $l = 1/\alpha$
- ・ しばしば opacity  $\kappa$  が使われる。密度を  $\rho$  として  $\alpha = \kappa \rho$
- 光学的厚み・光学的深さ

$$\tau = \int \alpha(x) dx$$

- ・ 「見える」のは  $\tau \sim 1$  の場所
- 温度・原子内の電子のエネルギー準位  $\Rightarrow$  特定の波長で吸収係数が大きいことがある
- 隕石中の放射性元素の組成比による年代測定  $\Rightarrow$  年齢  $\sim 4.6$ Gyr
- ニュートリノ・フラックス
  - ▷ 太陽中心部の核反応 (p-p chain) で発生する電子型ニュートリノ
  - ▷ Homestake、SuperKamiokande、SNO など
- 表面の微分回転 (← 黒点・磁場構造・ドップラー速度等)
  - ▷  $\phi$  を緯度として (対地球) 自転周期  $T_{\text{rot}}(\phi) \approx [26.9 + 5.2 \sin^2 \phi]$  day
- 表面で起こる諸々の活動現象、活動周期、太陽風 (質量放出)

## 2 太陽の内部構造と進化

### 2.1 太陽モデル

- 核融合エネルギーを熱源とする、自己重力の下にあるガス球の構造
  - ▷ 1930年代後半、Betheらによる。19世紀後半、Kelvin 卿は重力エネルギーの解放が熱源だとすると太陽は千万年程度しか輝かないことを見出していた

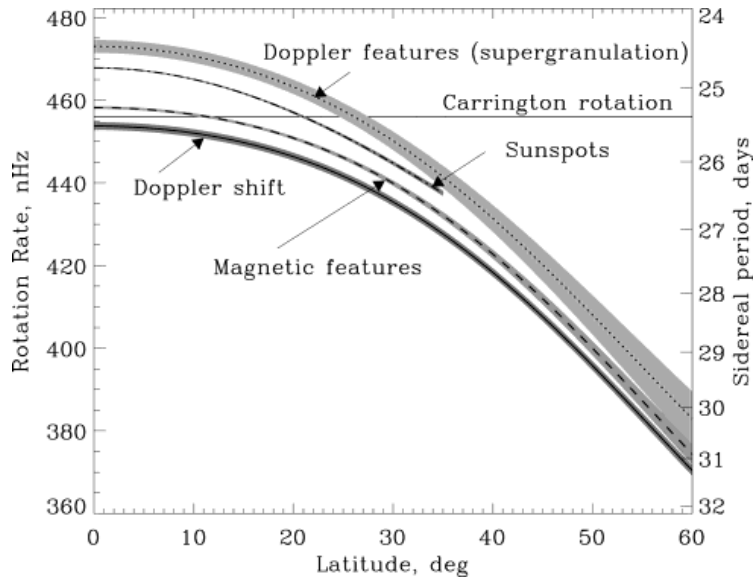


図 2: 太陽表面の微分回転

表 2: 星のスペクトル型

スペクトル型	温度	特徴的な吸収線
O	30,000 – 50,000	電離ヘリウム
B	10,000 – 30,000	中性ヘリウム、水素
A	7500 – 10,000	水素+電離金属
F	6000 – 7500	水素、カルシウム、金属
G	5000 – 6000	カルシウム
K	3500 – 5000	カルシウム、金属
M	2500 – 3500	酸化チタン

- 進化モデル (evolutionary model) : 主系列 (main sequence) 段階からの進化の道筋を追う [⇔日震学的モデル: 太陽の音波的固有モードの振動数を基礎データに構造決定]
  - ▷ Hertzsprung-Russel 図 (HR 図) : 色と明るさとの関係
    - 星の等級、絶対等級
    - 距離の単位「パーセク」(pc) : 年周視差が 1 秒角になる距離
  - ▷ 星間雲の収縮による原始星の誕生
  - ▷ 林トラック / Henyey トラックを経て主系列 (水素燃焼段階) へ (Zero-Age Main Sequence, **ZAMS**)
  - ▷ 林トラックでは星全体が対流で混ざり、化学組成一様。中心部の温度が  $\sim 10^7 K$  を越えると、水素の核燃焼が始まる
  - ▷ 以後は化学組成が変化 (「進化」)
  - ▷ 水素殻燃焼段階 → ヘリウム燃焼段階 → ヘリウム殻燃焼段階 → 赤色巨星へ
  - ▷ 最後は赤色巨星 → 質量放出 → Planetary-nebula Nuclei (PN) → 白色矮星、という道筋を辿ると考えられている

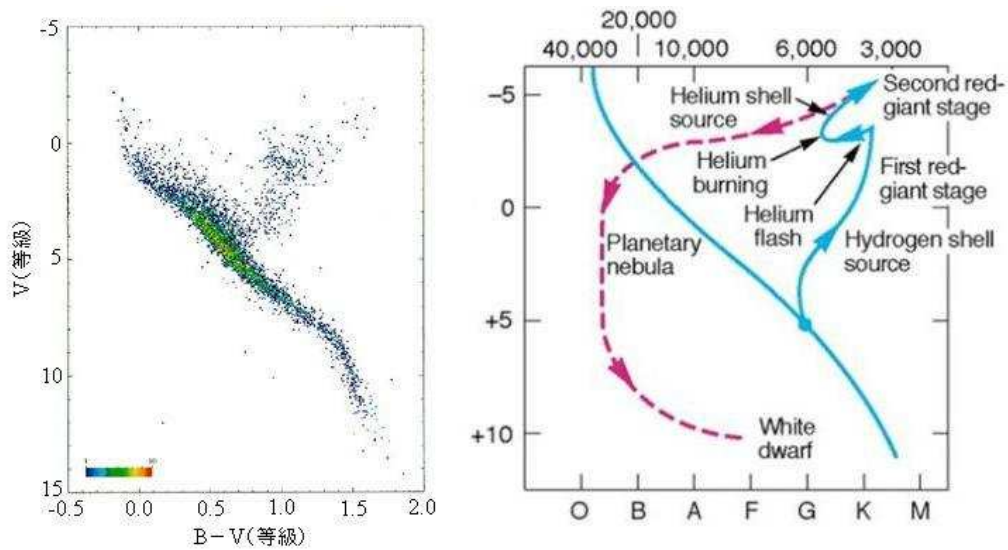


図 3: HR 図

## 2.2 種々のタイムスケール

- 「タイムスケール」とは？
- 半径  $R$ 、質量  $M$ 、明るさ  $L$  の星
- グローバルな力学的タイムスケール

$$\tau_{\text{dyn}} \approx \sqrt{\frac{R^3}{GM}} \simeq 1.6 \times 10^3 \left(\frac{R}{R_{\odot}}\right)^{3/2} \left(\frac{M}{M_{\odot}}\right)^{-1/2} \text{ sec}$$

- グローバルな熱的タイムスケール (Kelvin-Helmholtz time scale)

$$\tau_{\text{th}} \approx \frac{GM^2}{RL} \simeq 3 \times 10^7 \left(\frac{M}{M_{\odot}}\right)^2 \left(\frac{R}{R_{\odot}}\right)^{-1} \left(\frac{L}{L_{\odot}}\right)^{-1} \text{ yr}$$

- 進化のタイムスケール (水素の核燃焼の場合、単位質量あたりの反応熱  $q = 6.3 \times 10^{18} \text{ erg/g}$ )

$$\tau_{\text{nucl}} \approx \frac{qM}{L} \simeq 10^{11} \left(\frac{M}{M_{\odot}}\right) \left(\frac{L}{L_{\odot}}\right)^{-1} \text{ yr}$$

- 以上から

$$\tau_{\text{dyn}} \ll \tau_{\text{th}} \ll \tau_{\text{nucl}}$$

- ▷ 進化のタイムスケールを問題にしている時には、ある瞬間の力学的・熱的なバランスは保たれていると考えてよい (cf. 準静的過程)
- ▷ また、 $\tau_{\text{dyn}} \ll T_{\text{rot}}$  なので、太陽の自転は「遅い」と考えてよく、球対称モデルでよいことになる

## 2.3 太陽の内部構造

- 構造とは

表 3: 水素の核融合反応。太陽の明るさの 99% は p-p chain が起源

p-p chain			CNO cycle	
branch	reaction	branching rate		
	$p + p \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu$	99.75	${}^{12}\text{C} + p \rightarrow {}^{13}\text{N} + \gamma$	
	$p + e^- + p \rightarrow {}^2\text{H} + \nu$	0.25	${}^{13}\text{N} \rightarrow {}^{13}\text{C} + e^+ + \nu$	
	${}^2\text{H} + p \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$		${}^{13}\text{C} + p \rightarrow {}^{14}\text{N} + \gamma$	
p-p I	${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p$	86	${}^{14}\text{N} + p \rightarrow {}^{15}\text{O} + \gamma$	
	${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$		${}^{15}\text{O} \rightarrow {}^{15}\text{N} + e^+ + \nu$	
p-p II	${}^7\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu$	14	${}^{15}\text{N} + p \rightarrow {}^{12}\text{C}$	
	${}^7\text{Li} + p \rightarrow 2{}^4\text{He}$			
p-p III	${}^7\text{Be} + p \rightarrow {}^8\text{B} + \gamma$			
	${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be}^* + e^+ + \nu$	0.015		
	${}^8\text{Be}^* \rightarrow 2{}^4\text{He}$			

- ▷ ある時間  $t$ 、場所  $r$  での圧力  $P(r, t)$ 、密度  $\rho(r, t)$ 、温度  $T(r, t)$ 、単位質量あたりのエントロピー  $s(r, t)$ 、化学組成  $\{X_i(r, t)\}$
- ▷ エネルギー流量  $L_r(r, t)$  (半径  $r$  の球面を単位時間に通るエネルギー)
- 状態方程式等から  $P = P(\rho, T, \{X_i\})$ 、 $s = s(\rho, T, \{X_i\})$  がわかっているとすると unknown は
  - ▷  $P$ 、 $\rho$ 、 $T$ 、 $s$  のうち 2 つ
  - ▷  $\{X_i\}$ 、ただし  $\sum_i X_i = 1$  (簡単には  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  のうち 2 つ)
  - ▷  $L_r$
- 状態方程式以外にも、太陽を構成する物質の性質として核反応による熱生成率  $\varepsilon(\rho, T, \{X_i\})$ 、opacity  $\kappa(\rho, T, \{X_i\})$  ( $1/\kappa\rho$  が photon mean free path) などの知識が必要 (microphysics)
- また、対流による熱輸送過程や、元素の拡散過程についても知る必要がある (macrophysics)
- 内部構造の方程式
  - ▷ 質量保存の式 (補助変数  $M_r$  の導入と思ってもよい)

$$\frac{dM_r}{dr} = 4\pi r^2 \rho$$

$M_r$  : 中心から半径  $r$  の球面内に含まれる質量

- ▷ 運動量保存の式 (静水圧平衡)

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{GM_r \rho}{r^2}$$

- ▷ エネルギー保存の式

$$T \frac{\partial s}{\partial t} = \varepsilon - \frac{dL_r}{dM_r}$$

$\varepsilon$  : nuclear energy generation rate (-neutrino loss)

- ▷ エネルギー輸送の式（エネルギーがどんな効率で流れるかを、温度勾配で表したもの）

$$\nabla \equiv \frac{d \ln T}{d \ln P} = \begin{cases} \nabla_{\text{rad}} & \text{放射平衡} \\ \nabla_{\text{conv}} & \text{対流平衡} \end{cases}$$

対流不安定のための条件は、最も簡単には  $\nabla > \nabla_{\text{ad}}$ （太陽では  $r/R_{\odot} \gtrsim 0.7$  で対流不安定）。理想気体では  $\nabla_{\text{ad}} = 1 - \gamma^{-1}$ （ $\gamma$  は比熱比）。

- 放射平衡の場合

$$L_r = -4\pi r^2 \frac{c}{\kappa \rho} \frac{d}{dr} \left( \frac{aT^4}{3} \right)$$

（ $a$  は放射密度定数、 $\sigma = ac/4$  の関係がある）から

$$\nabla_{\text{rad}} = \frac{3}{16\pi acG} \frac{\kappa L_r P}{M_r T^4}$$

- 対流平衡の場合、対流の効率がよければ

$$\nabla_{\text{conv}} = \nabla_{\text{ad}}$$

だが一般には混合距離理論（mixing length theory）を用いる。流体要素が距離  $l = \alpha H_P$ （ $H_P$ : pressure scale height）動いた後に周囲と混ぜて熱をやり取りするとして

$$\nabla_{\text{conv}} = \nabla_{\text{ML}}(\alpha)$$

（詳細はこの講義の範囲を越える）。

- ▷ 化学組成の変化（ $\varepsilon_k$  : 反応  $k$  による energy generation rate、 $q_{ik}$  : 反応  $k$  における元素  $i$  の単位質量当りに解放されるエネルギー）

$$\frac{\partial X_i}{\partial t} = \sum \frac{\varepsilon_k}{q_{ik}} - \sum \frac{\varepsilon_{k'}}{q_{ik'}}$$

- 最近のモデルでは、diffusion（concentration diffusion や gravitational settling）の項も加える
- Diffusion のタイムスケール  $\sim 10^{13}$  yr
- Diffusion を取り入れたモデルでは、中心部の He が増加し、対流層中の He は減少する

- 初期値-境界値問題としての進化計算（簡単な場合）  
境界条件

- ▷  $M_r = L_r = 0$  at  $r = 0$
- ▷  $\rho = 0, T = T_{\text{eff}}$  at  $r = R$

初期条件

- ▷  $X = X_{\text{ZAMS}}, Y = Y_{\text{ZAMS}}, Z = Z_{\text{ZAMS}}$  at  $t = 0$

- どうやって標準太陽モデル（=標準的な仮定に基づく進化モデル）を計算するか
  - ▷ 初期条件は直接的には不明だが、太陽表面では核反応は起こらないので、観測的に決めた  $Z/X$  は ZAMS 以来変わらないものとする、 $X_{\text{ZAMS}}, Y_{\text{ZAMS}}, Z_{\text{ZAMS}}$  のうち 1 つだけ（例えば  $X_{\text{ZAMS}}$ ）が未定
  - ▷ 結局  $X_{\text{ZAMS}}$  と  $\alpha$  が free parameter

- ▷ ある時点での構造は、力学的・熱的なバランスを仮定して計算する (shooting 法、Heney 法)
- ▷  $t = t_{\odot}$  で  $R = R_{\odot}$ 、 $L = L_{\odot}$  になる様に  $X_{\text{ZAMS}}$  と  $\alpha$  を決める
- ビリアル定理: 運動量保存の式から (理想気体を仮定) 重力エネルギー  $E_{\text{grav}}$  と熱エネルギー  $E_{\text{th}}$  の間には

$$E_{\text{grav}} = - \int_0^M \frac{GM_r}{r} dM_r = -3 \int_0^M \frac{P}{\rho} dM_r = -3(\gamma - 1)E_{\text{th}}$$

の関係がある。全エネルギー  $E_{\text{total}}$  は

$$E_{\text{total}} = E_{\text{grav}} + E_{\text{th}} = -(3\gamma - 4)E_{\text{th}}$$

- ▷ 星が束縛状態にあるためには  $\gamma > 4/3$
- ▷ 束縛状態にある星で  $E_{\text{total}}$  を減少させると  $E_{\text{th}}$  は増加する (「重力熱力学的比熱が負」)

## 2.4 次元解析的モデル計算

定常状態 ( $\partial/\partial t = 0$ ) で内部構造の方程式を差分化 e.g.

$$\frac{dP}{dr} \rightarrow \frac{P_{\text{surf}} - P_c}{R - 0} \sim -\frac{P_c}{R}$$

- 静水圧平衡

$$\frac{P_c}{R} \propto \frac{M}{R^2} \frac{M}{R^3} \rightarrow P_c \propto \frac{M^2}{R^4}$$

- エネルギー保存:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \rho T^n, \quad \begin{cases} n = 4 & T \lesssim 10^7 K (\text{p-p chain}) \\ n = 18 & T \gtrsim 10^7 K (\text{CNO cycle}) \end{cases}$$

を使って

$$\frac{M}{R^3} T_c^n \propto \frac{L}{M} \rightarrow L \propto \frac{M^2}{R^3} T_c^n$$

- 熱輸送 (放射平衡の場合) :

$$\kappa = \kappa_0 \rho^p T^q, \quad \begin{cases} p = 1, q = -3.5 & T \lesssim 10^7 K (\text{Kramers}) \\ p = q = 0 & T \gtrsim 10^7 K (\text{electron scattering}) \end{cases}$$

を使って

$$L \propto \frac{R^{3p+4} T_c^{4-q}}{M^{p+1}}$$

- 質量保存:

$$\frac{M}{R} \propto R^2 \rho_c \rightarrow \rho_c \propto \frac{M}{R^3}$$

- 理想気体の状態方程式 ( $\mu$  は平均分子量) :

$$P = \frac{\rho k T}{\mu m_{\text{H}}} \rightarrow P_c \propto \frac{M T_c}{R^3}$$



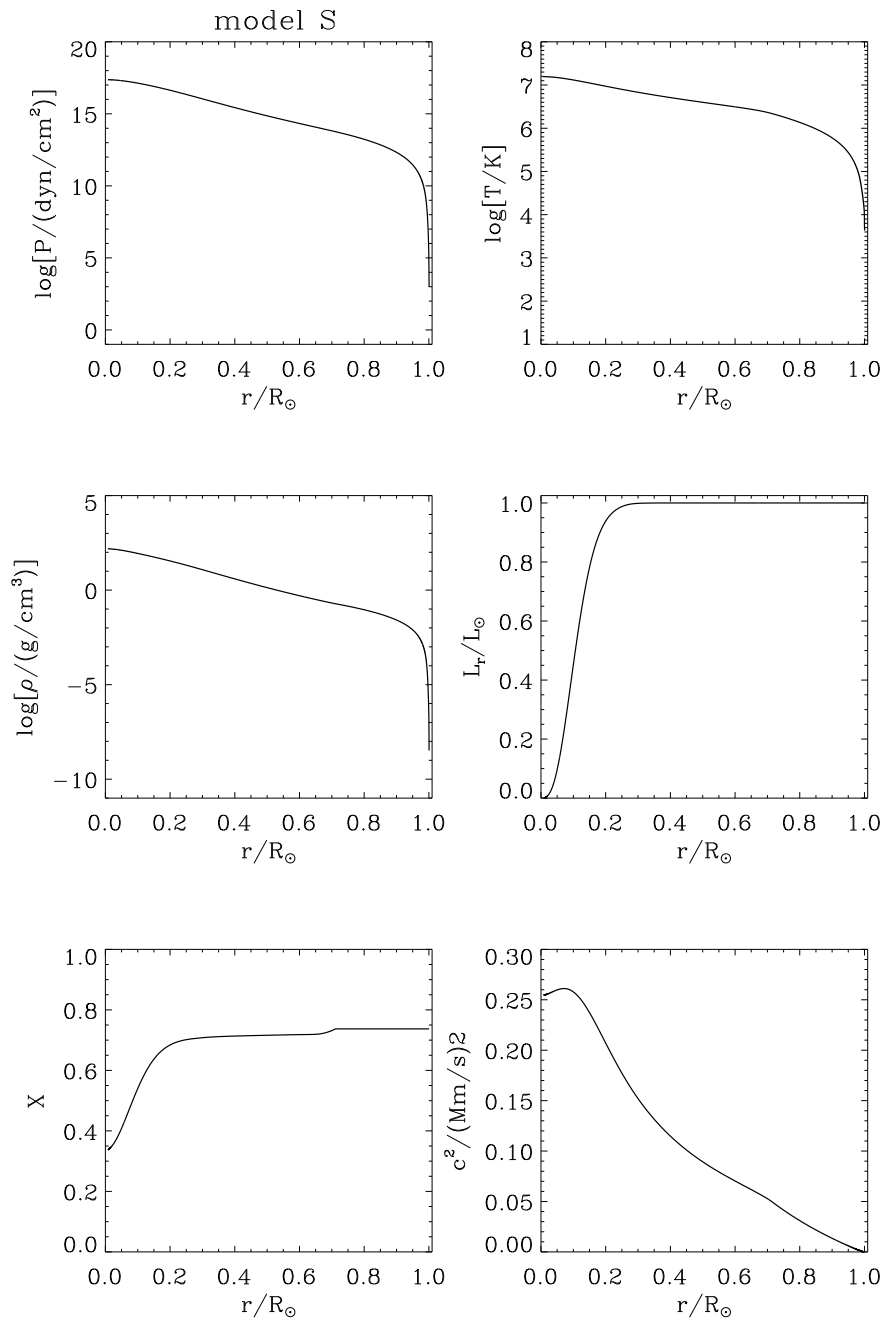


図 4: Christensen-Dalsgaard の Model S の諸量。

- 以上を組み合わせて、例えば
  - ▷ 質量と半径の関係

$$R \propto M^{\frac{p+q+n-1}{3p+q+n+3}} \simeq \begin{cases} M^{1/13} & \text{low T, } n=4, p=1, q=-3.5 \\ M^{0.8} & \text{high T, } n=18, p=q=0 \end{cases}$$

- ▷ 質量と光度の関係

$$L \propto M^{\frac{(2n+3)p-q+3n+9}{3p+q+n+3}} \simeq \begin{cases} M^{5.5} & \text{low T, } n=4, p=1, q=-3.5 \\ M^3 & \text{high T, } n=18, p=q=0 \end{cases}$$

⇒ 質量の大きな星程寿命が短い

## 2.5 実際の太陽モデル

- Christensen-Dalsgaard の model S ([http://astro.ifa.au.dk/~jcd/solar\\_models](http://astro.ifa.au.dk/~jcd/solar_models))
  - ▷ いわゆる標準モデルのひとつ。数値計算の結果として得られている
  - ▷ He と一部の metal の diffusion を考慮
  - ▷ 太陽の放射エネルギーの殆んどは  $r/R_{\odot} < 0.3$  で生成
  - ▷ 外側 ( $r/R_{\odot} \gtrsim 0.7$ ) は対流層
  - ▷ 中心近くで音速が減少するのは？

## 2.6 残されている問題

- 太陽ニュートリノ問題
  - ▷ 太陽中心の核反応で生成される電子型ニュートリノのフラックスの観測値が理論値の半分程度 → 現在では解決？
- 軽元素欠乏問題
  - ▷ 太陽表面の Li の量が太陽系の組成比に較べて少ない ( $\times \sim 10^{-2}$ )
  - ▷ 以前は Be や B も欠乏していると思われていたが、現在ではほぼ誤差の範囲内と考えられている
  - ▷ Li は 2MK 程度で核燃焼 → 対流層の底部で Li を消費？
- 太陽の動的構造と進化
  - ▷ 乱流的対流・角運動量輸送・太陽風とこれらの進化に及ぼす影響
    - Faint young sun paradox