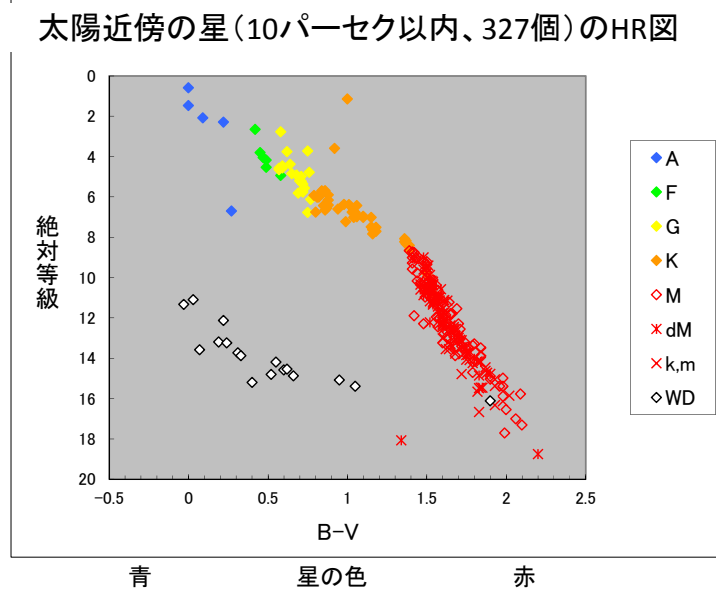


恒星としての太陽

太陽の誕生、内部構造と進化
+ 銀河系の中の太陽



Preliminary Version of the Third Catalogue of Nearby Stars, W.Gliese & H.Jahreiss, 1991
<http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/Cat?V/70A>

太陽近傍20光年以内の恒星100個

Preliminary Version of the Third Catalogue of Nearby Stars, W.Gliese & H.Jahreiss,1991

	星	絶対等級	距離(光年)	V等級	スペクトル型	
1	α CMa	1.47	8.6	-1.43	A1 V	シリウス
2	α Aql	2.29	16.2	0.77	A7 IV-V	アルタイル
3	α CMi	2.66	11.4	0.38	F5 IV-V	プロキオン
4	α Cen	4.38	4.4	0.01	G2 V	
5	η Cas	4.58	19.4	3.45	G3 V	
6	δ Pav	4.78	18.6	3.56	G8 V	
7	Sun	4.85	---	- 26.7	G2 V	

宇宙年齢、太陽系の年齢

- 宇宙の年齢
宇宙背景放射の空間分布から137億年
- 太陽系の年齢(=太陽の年齢)
放射性同位体の崩壊($^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$, $^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$, もともとある ^{204}Pb の比)を用いた隕石の年代測定
→45億67百万年
- 太陽を作った物質は超新星爆発などによる何世代かの元素合成を経ている
- 太陽系が銀河系を1周するのに2億年

星間ガスからの収縮

- 重力不安定: ジーンズ (Jeans) の条件

$$\frac{GM_{\text{cloud}}}{r} > \frac{RT}{\mu} \quad \text{音速より重力落下速度が大きい}$$

→ 収縮

- 星間雲 温度 $T=50 \text{ K}$, 密度 $\rho_0=10^{-23} \text{ g cm}^{-3}$, 磁場 10^{-6} G

$$\rightarrow M_{\text{cloud}} \geq 10^3 \times \text{太陽質量}$$

$$\text{重力落下時間} \approx (G\rho_0)^{-1/2} \approx 3 \times 10^7 \text{ 年}$$

- 収縮するにつれ ρ も増加する (T はほぼ一定)

$$\rho=10^{-18} \text{ g cm}^{-3}$$

$$\rightarrow M_{\text{cloud}} \geq 3 \times \text{太陽質量}$$

$$\text{重力落下時間} \approx 10^5 \text{ 年}$$

- 密度が上がると放射が逃げなくなり加熱、圧力により重力収縮は止まる

- 途中、角運動量を捨てる

- 太陽系の角運動量 << 星間ガスの角運動量
(主に木星と土星の軌道角運動量)
- 磁場によるブレーキ効果

- 磁束も捨てる

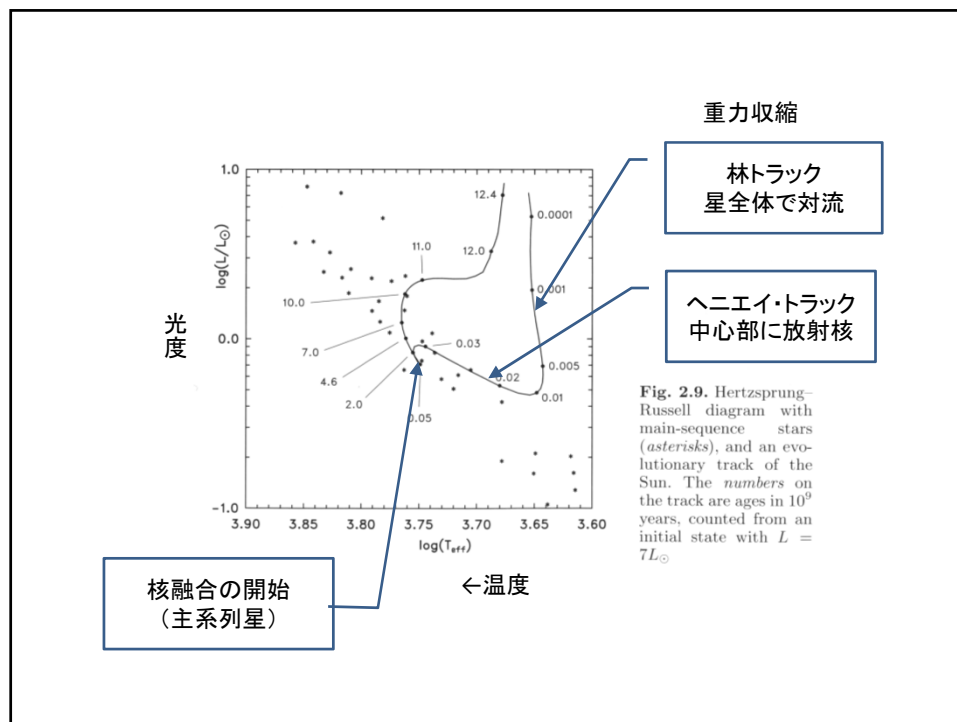
- $\rho_0=10^{-23} \text{ g cm}^{-3}$, 磁場 10^{-6} G を
 $\rho=1 \text{ g cm}^{-3}$ にすると磁場 $=10^{10} \text{ G}$

- 重力収縮だけで輝く ($T \approx 3000 \text{ K}$)

$$t_{\text{KH}} = \frac{GM^2}{rL} \quad \text{ケルビン・ヘルムホルツ時間}$$

$$\text{太陽で} \approx 3 \times 10^7 \text{ 年}$$

- ゆっくり収縮し、中心温度が 10^7 K くらいになると核融合を開始: 主系列星



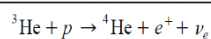
核融合反応

- PP-I反応 (85%)
 $6p \rightarrow {}^4\text{He}^{2+} + 2p + 2e^+ + 2\nu_e + 2\gamma$
 つまり
 $4p + 2e^- \rightarrow {}^4\text{He}^{2+} + 2\nu_e + 6\gamma$
- 質量欠損
 $4 \times 1.0078 - 4.0026 = 0.0286$ (原子質量単位で)
- 圧力を担う粒子数が6→1に減る
 「若い太陽問題」の原因

太陽中心での核融合反応 (PP I,II,III)

TABLE I. Neutrino-producing reactions in the Sun.

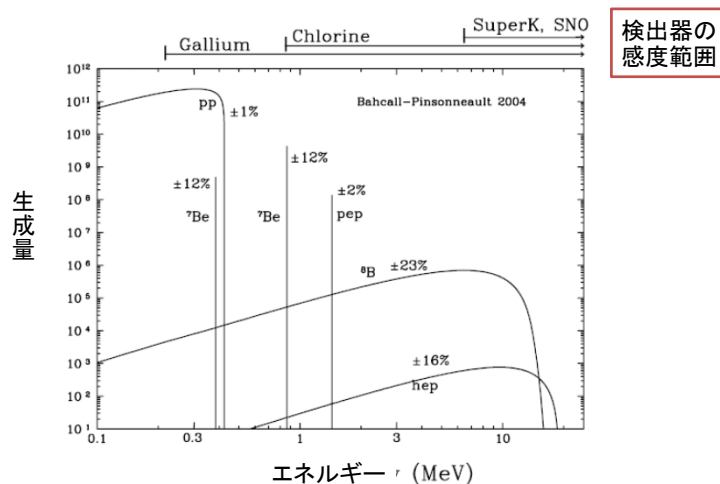
	反応	頻度	エネルギー(MeV)	名前
PPI	$p + p \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu_e$	99.75%	0.0–0.42	pp
	$p + e^- + p \rightarrow {}^2\text{H} + \nu_e$	0.25%	1.44	pep
	${}^2\text{H} + p \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$	100%		
	${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p$	85%		
PPII	${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$	15%		
	$e^- + {}^7\text{Be} \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e$	99.99%	0.86, 0.38	${}^7\text{Be}$
	$p + {}^7\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$	100%		
PPIII	$p + {}^7\text{Be} \rightarrow {}^8\text{B} + \gamma$	0.01%		
	${}^8\text{B} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He} + e^+ + \nu_e$	100%	0–14.1	${}^8\text{B}$



0–18.8 MeV
エネルギーが高いので検出効率が高い

Davis (2003)

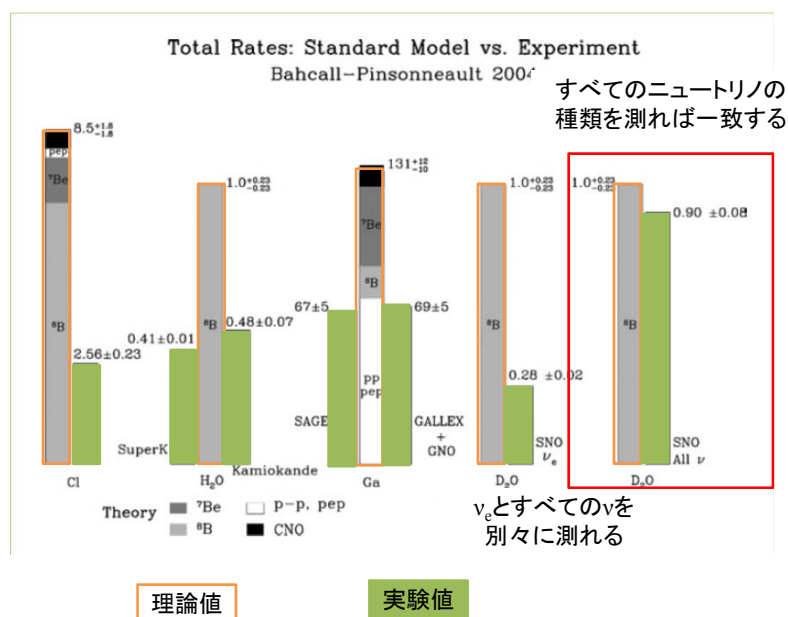
太陽ニュートリノのエネルギースペクトル



Bahcall and Peña-Garay (2004)

検出実験

- 塩素実験 $\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$
 - 1968年からデービス(R.Davis)ら(アメリカ)
- 水チェレンコフ実験
 $\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$ (チェレンコフ光を検出)
 - カミオカンデ(1983~), スーパー・カミオカンデ(1996~)
- ガリウム実験 $\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow {}^{71}\text{Ge} + e^-$
 - ガレックス(GALLEX、イタリア)
 - セイジ(SAGE、ロシア)
- 重水チェレンコフ実験
 $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$
 $\nu_x + d \rightarrow p + n + \nu_x$
 - ν_e と ν_μ, ν_τ を区別できる
 - サドベリー・ニュートリノ観測所(SNO, カナダ)

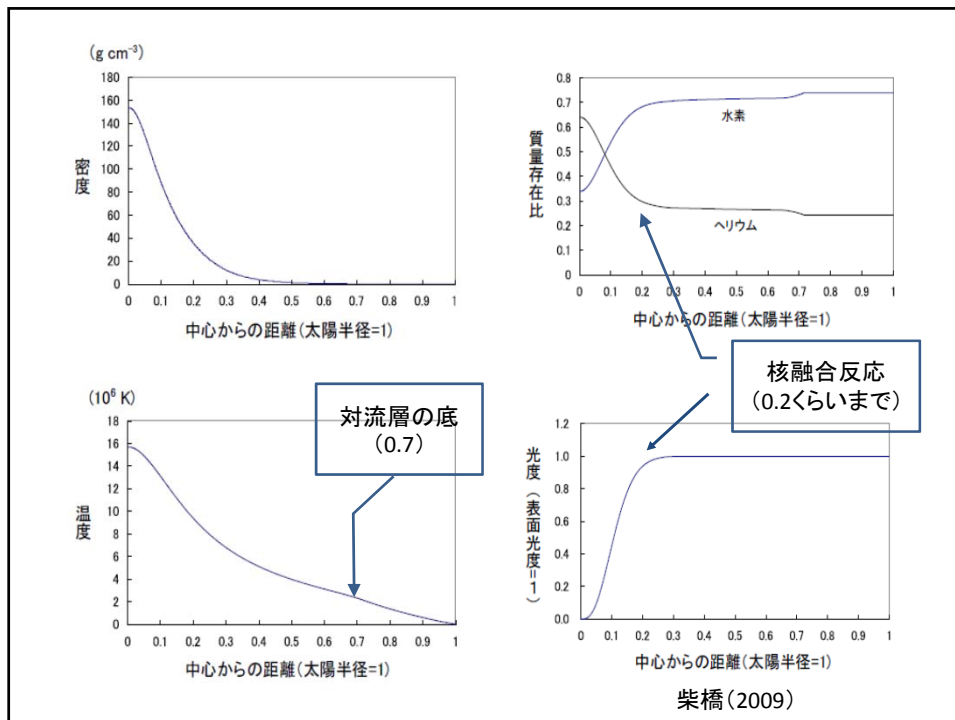


太陽ニュートリノ問題

- 観測されるニュートリノ量が理論予測の1/2~1/3しかない
- 太陽内部モデルに問題がある？
 - 中心温度が低ければ、ニュートリノ発生量を下げられる
 - 例えば、内部が高速回転していれば、遠心力も重力を支える寄与があるため、圧力(温度)を下げられる
 - しかし日震学の発展により、太陽モデルは疑えなくなった
- ν_e が他のニュートリノ(ν_μ 、 ν_τ)に転換する
→素粒子物理学の問題
- 観測、実験によりニュートリノ振動が確認された
 - K2K実験(KEKの加速器からのニュートリノを神岡で計測)
 - KamLAND実験(原子炉からのニュートリノを神岡で計測)

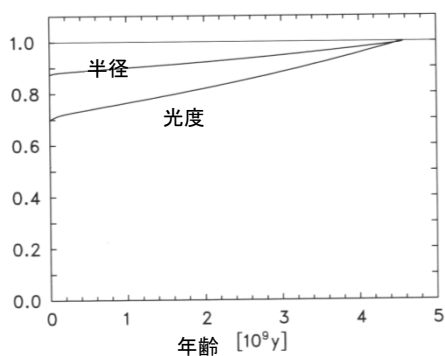
内部構造とその進化

- 球対称、回転と磁場は無視
- 初期の化学組成は均質
 - 質量比 水素:ヘリウム:それ以外の元素
= $X:Y:Z$, $X+Y+Z=1$
- 質量 M =一定(現在の太陽質量)
- 46億年たった後、光度 L , 半径 r が現在の値になるモデルを探す

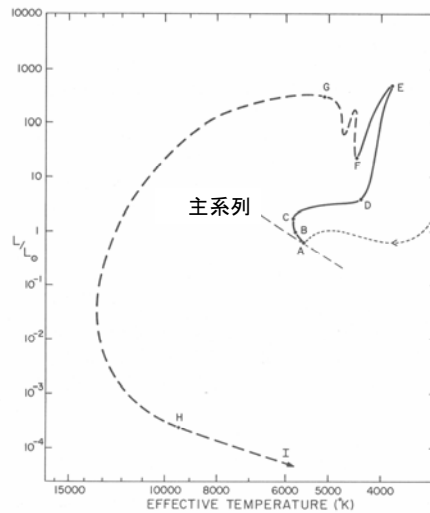


若い太陽(暗い太陽)問題

- 生まれたての太陽は今の70%の光度
- ゆっくり明るくなってきた
 - 中心部で粒子数が減る
 - 温度(圧力)を上げて重力に対抗
 - 明るくなり、膨張する
- これだと地球が凍結する
 - 昔は温室効果ガスが多かった?



今後の進化



Noyes (1982)

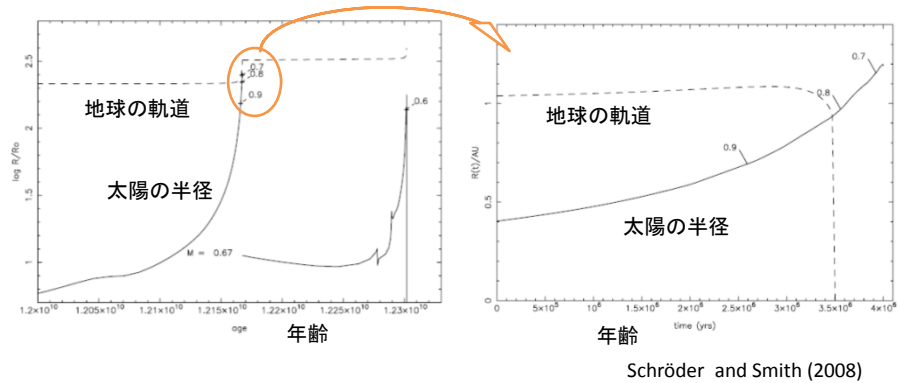
太陽の未来

- 15億年後: 現在(B)より光度15%増、極域の氷が溶ける
- 55億年後(C): 光度2倍、直径4割増
中心に水素がなくなり、赤色巨星への進化を開始
- 70億年後(D): 光度3倍、直径3倍、表面温度4000度の赤い星
中心のヘリウム核の周りで水素の核融合反応
- 73億年後(E): 光度500倍、直径100倍、水星の軌道まで膨張
- 中心核のヘリウムが核融合により炭素、酸素に変換を始める
- その瞬間の大爆発(ヘリウム・フラッシュ)で質量の半分近くを放出(F)
- ヘリウムの燃焼が続き(G)、外層は放射圧で吹き飛ばされ、白色矮星(H)が残る(100億年後)

地球が飲み込まれてしまうかどうかは

- 太陽がどこまで膨張するか
 - どれだけ質量放出するか(地球の軌道が大きくなる)
- の兼ね合いで決まる

下記の計算例では、飲み込まれてしまう



銀河系の中の太陽

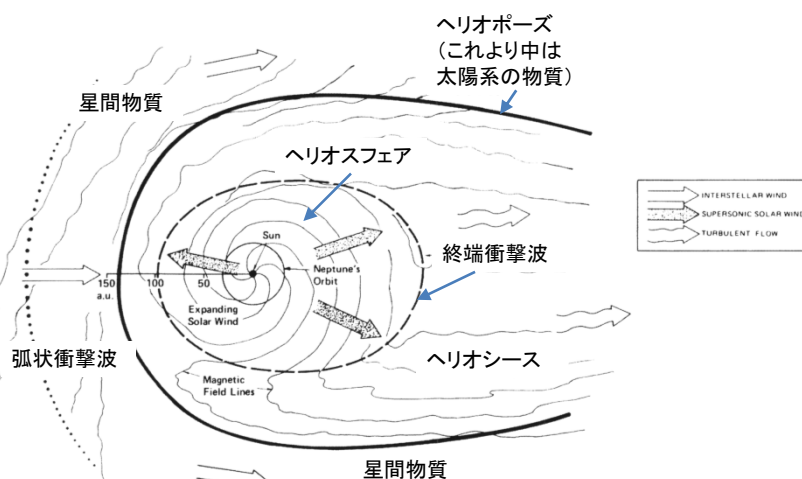


Fig. 12-8 A model of the heliosphere. The plane of the figure coincides with the plane of the sun's equator, which is approximately the general plane of planetary orbits.

Foukal (2004)

