

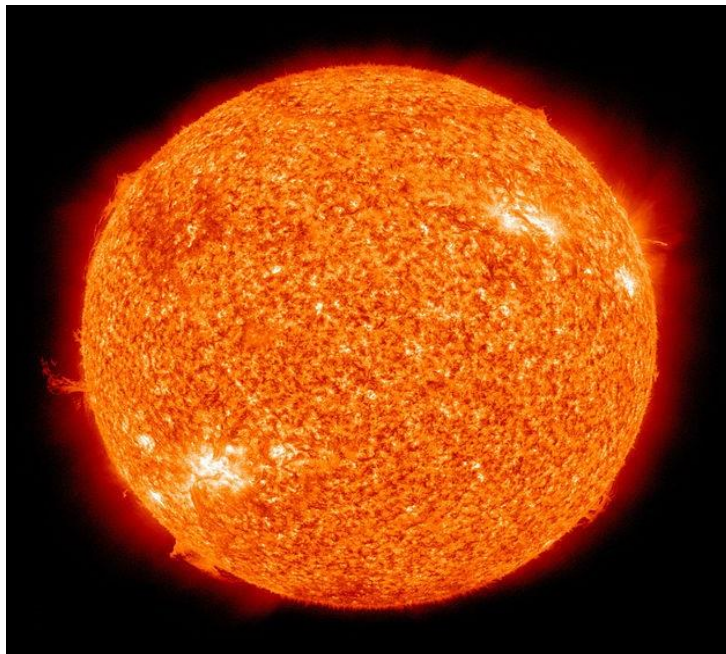
太阳模型 的现状和挑战

张钱生

中国科学院云南天文台

内容

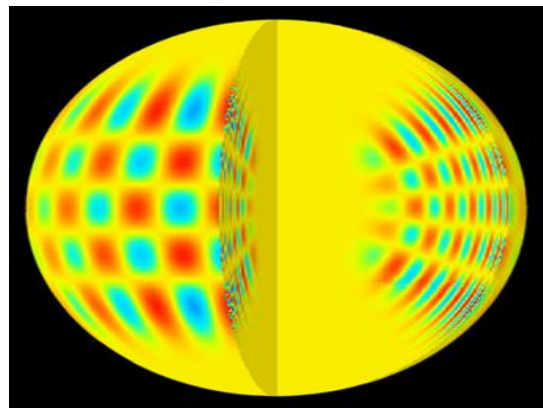
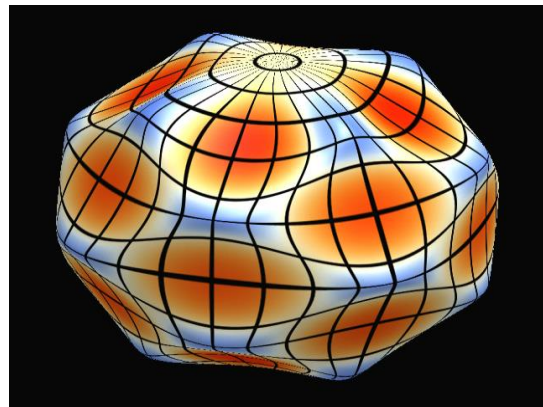
- 太阳内部结构的探测
 - ——日震学、中微子、光谱
- 太阳结构演化模型
 - ——基本理论、当前状况
- 不确定因素
 - ——输入物理、非标准物理过程
- 讨论
- 未来的发展
 - ——太阳 g - 模式振动、太阳中微子



太阳内部结构的探测——日震学

- 日震学：研究恒星的振动
- 特征振动模式：驻波
- 特征振动的数学描述：
- 球对称系统的波动方程，分离变量解：

$$A(r, \theta, \varphi, t) = \sum_{n,l,m} R_{l,n}(r) Y_{l,m}(\theta, \varphi) \exp(i\omega_{l,m,n} t)$$



太阳内部结构的探测——日震学

- 恒星的振动基本理论
- 流体静力学平衡 + 微扰 + 绝热：齐次线性方程组

$$\frac{d}{dr}(\rho r^2 \xi_r) = -\frac{\rho r^2 N^2}{g} \xi_r + \left[\frac{l(l+1)}{\omega^2} - \frac{r^2}{c^2} \right] P' + \rho \frac{l(l+1)}{\omega^2} \Phi',$$

$$\frac{dP'}{dr} = \rho(\omega^2 - N^2) \xi_r - \frac{g}{c^2} P' + \rho g',$$

$$\frac{d}{dr}(r^2 g') = -4\pi G r^2 \left(\frac{P'}{c^2} + \frac{\rho N^2}{g} \xi_r \right) - l(l+1) \Phi',$$

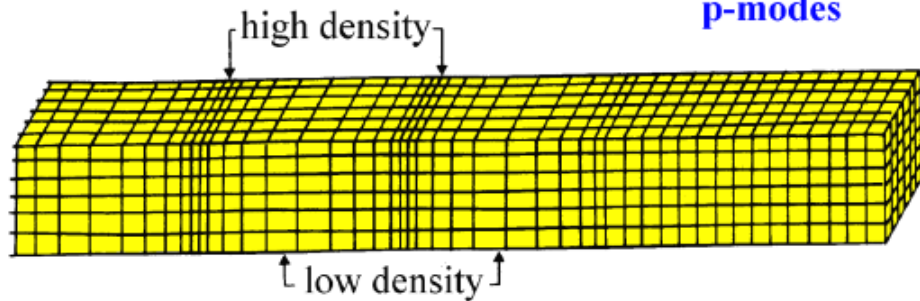
$$\frac{d\Phi'}{dr} = -g',$$

太阳内部结构的探测——日震学

- 恒星的振动
- 波的分类
- 压力驱动：**p**模式
- 重力驱动：**g**模式

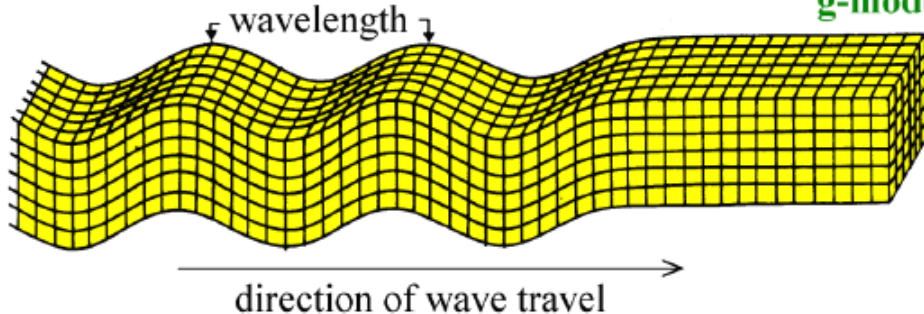
sound waves (longitudinal) - restoring force is pressure

p-modes



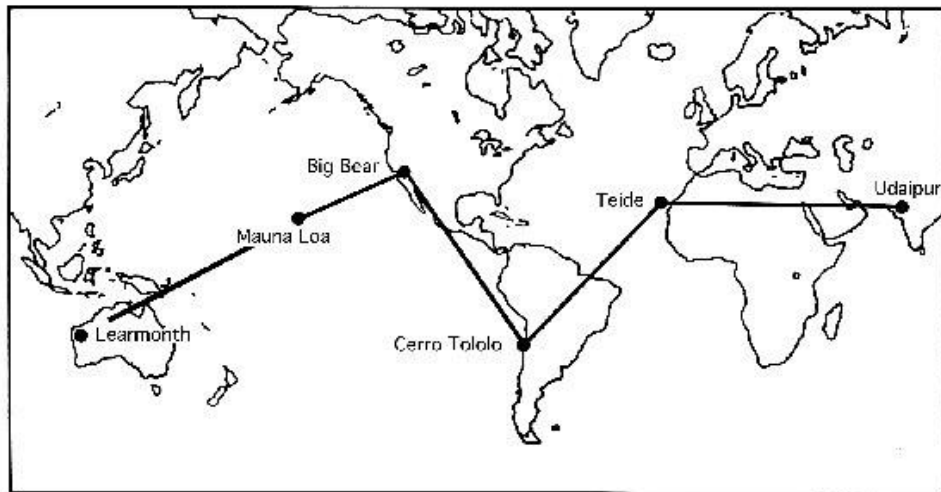
internal gravity waves (transverse) - restoring force is gravity

g-modes



太阳内部结构的探测——日震学

- 太阳的振动的观测:
- **Global Oscillation Network Group (GONG)**
- **Birmingham Solar Oscillations Network (BiSON)**
- **Solar Dynamics Observatory - Helioseismic and Magnetic Imager (SDO/HMI)**



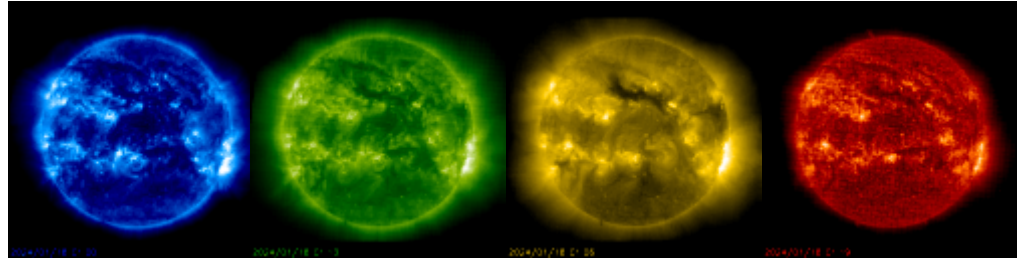
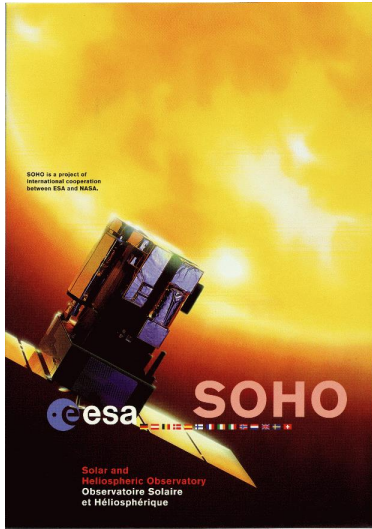
太阳内部结构的探测——日震学

- 太阳的振动的观测:
- **Global Oscillation Network Group (GONG)**
- **Birmingham Solar Oscillations Network (BiSON)**
- **Solar Dynamics Observatory - Helioseismic and Magnetic Imager (SDO/HMI)**



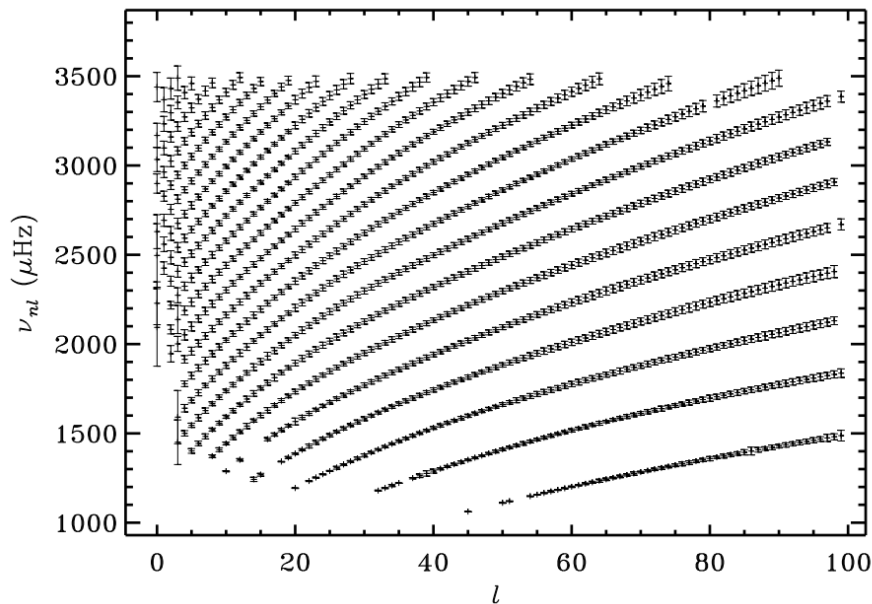
太阳内部结构的探测——日震学

- 太阳的振动的观测:
- **Global Oscillation Network Group (GONG)**
- **Birmingham Solar Oscillations Network (BiSON)**
- **Solar Dynamics Observatory - Helioseismic and Magnetic Imager (SDO/HMI)**



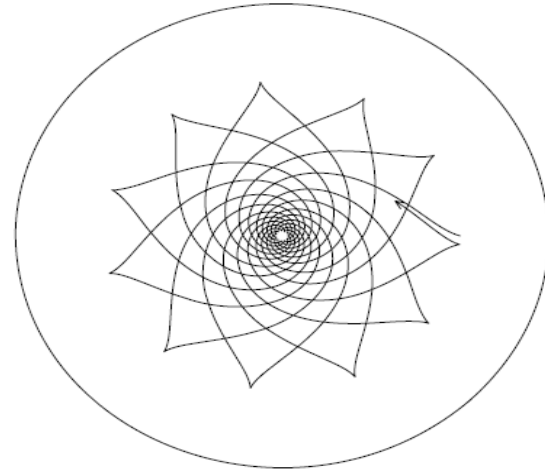
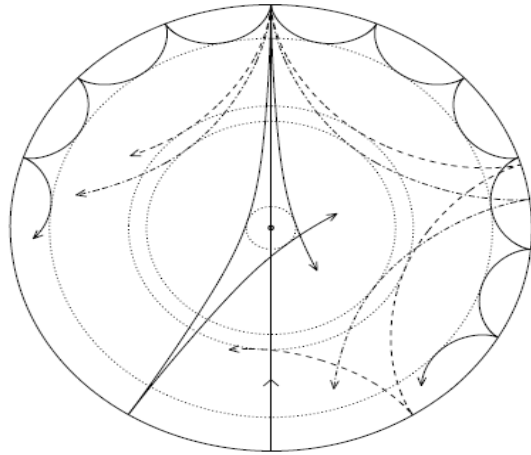
太阳内部结构的探测——日震学

- 太阳的振动频率 (1000 sigma error bars)
- (Tomczyk, Schou & Thompson 1996)



太阳内部结构的探测——日震学

- **P** 模式和 **g** 模式振动的传播:



- 不同球谐指数 l 不同频率(n)，振动的传播区域不同

太阳内部结构的探测——日震学

- 大量观测频率可以重构太阳内部结构——日震学反演

$$\frac{\delta\omega_{nl}}{\omega_{nl}} = \int_0^R \left[K_{c^2, \rho}^{nl}(r) \frac{\delta_r c^2}{c^2}(r) + K_{\rho, c^2}^{nl}(r) \frac{\delta_r \rho}{\rho}(r) \right] dr$$

- 对参考太阳模型进行修正使其模型频率与观测符合，得到太阳内部结构（如声速、密度、对流区氦丰度）的日震学反演结果

太阳内部结构的探测——日震学

- **p-模式**振动频率的高阶差分反映声速梯度信息
- 探测对流区底部位置:
- **$R_b = 0.713(1) R$**
- **Christensen-Dalsgaard et al. 1991**
- **Basu & Antia, 1997**

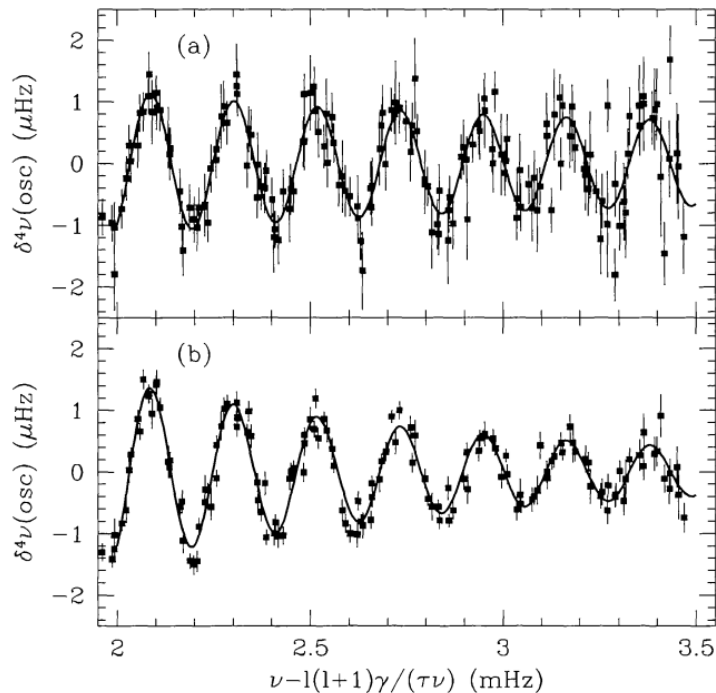
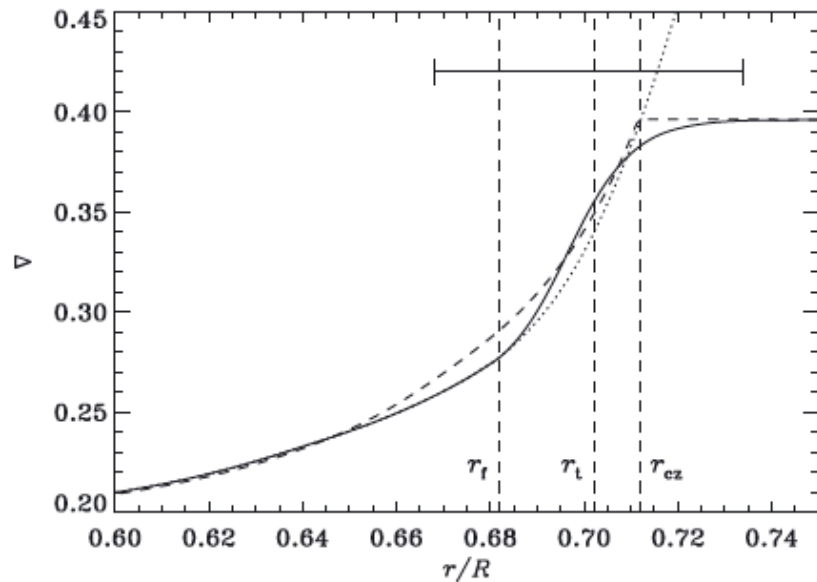


Figure 3. The fit to signal from the CZ base for (a) BBSO and (b) GONG months 4–10 data. The degree dependence of the differences has been removed from the points.

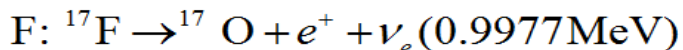
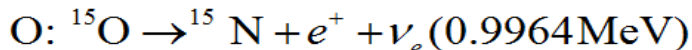
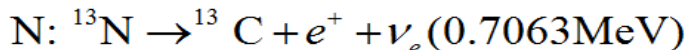
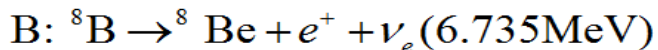
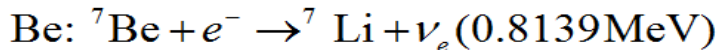
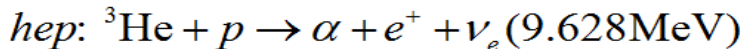
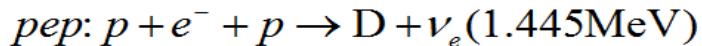
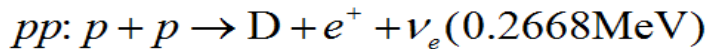
太阳内部结构的探测——日震学

- 对流区底部附近的温度梯度结构:
- **Christensen-Dalsgaard et al. 2011**
- 光滑的
- 限制恒星对流理论



太阳内部结构的探测——中微子

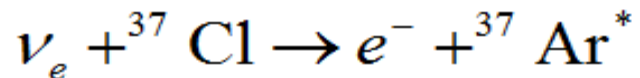
- 太阳内部核反应中微子



- 中微子截面小，无阻碍穿透太阳内部，但探测困难

太阳内部结构的探测——中微子

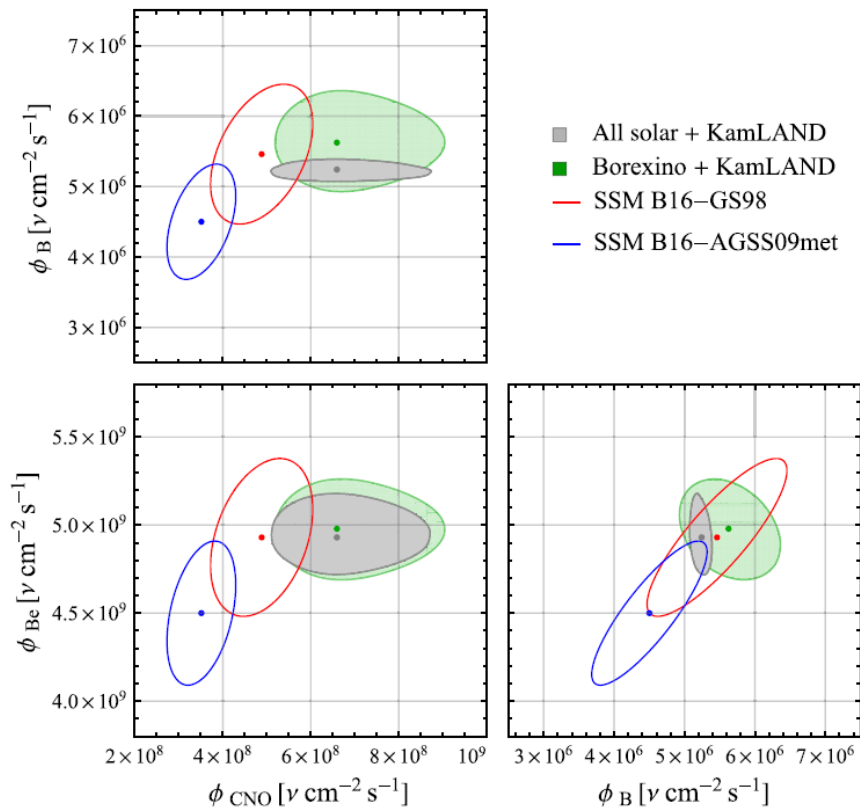
- 太阳核反应中微子的探测
- **Homestake (Davis et al. 1968): 四氯乙烯探测**



- 观测值只有理论值的1/3左右：太阳中微子之谜
- 中微子振荡
- **Super-K, SNO, Borexino**

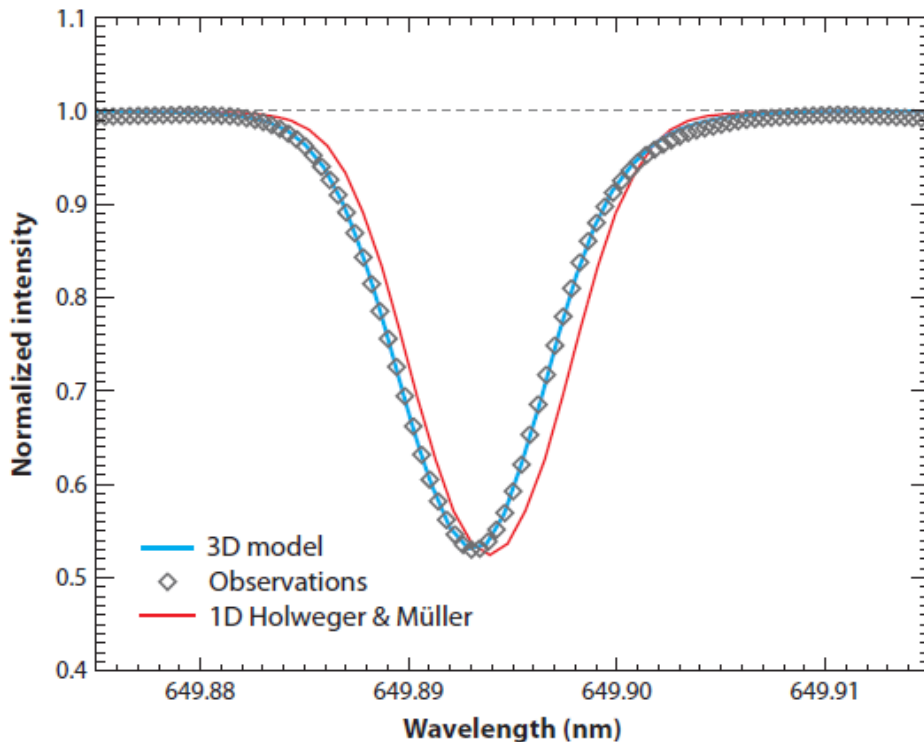
太阳内部结构的探测——中微子

- 太阳 CNO 核反应中微子的探测
- Agostini et al. (BOREXINO Collaboration), 2020, Nature, 587, 577
- Appel et al. (BOREXINO Collaboration), 2022, PhRvL, 129, 252701
- $\Phi(\text{CNO}) = 6.6_{-0.9}^{+2.0} \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$



太阳内部结构的探测——光谱

- 太阳的元素组成:
- 太阳光谱分析:
- 谱线的拟合——辐射流体动力学大气模型
- **Z/X=0.0245, Grevesse & Noel 1993**
- **Z/X=0.0229, Grevesse & Sauval, 1998**
- **Z/X=0.0181, Asplund et al., 2009**
- **Z/X=0.0189, Asplund et al., 2021**
- 陨石元素组成 (Lodders et al. 2009): 非挥发性元素 (除H, He, C, N, O, Ne)



太阳内部结构的探测——光谱

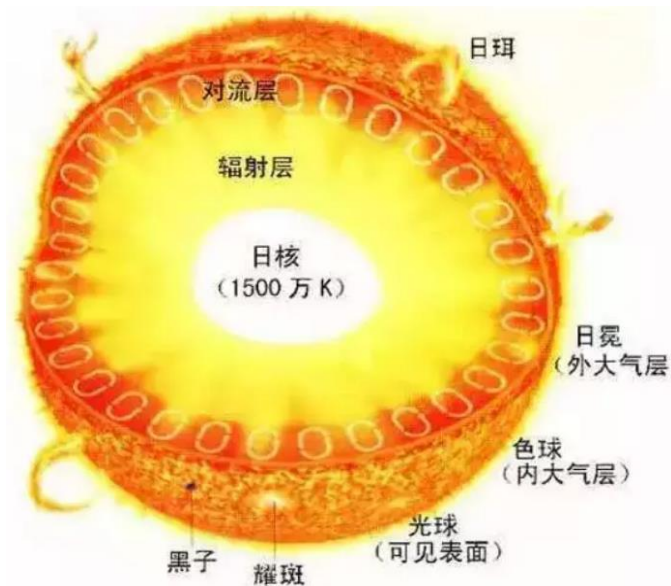
- 太阳的锂铍丰度:
- 陨石元素组成 (Lodders et al. 2009): $A(\text{Li})=3.26(5)$, $A(\text{Be})=1.30(3)$
- 太阳光谱分析 (Asplund et al. 2009): $A(\text{Li})=1.05(10)$, $A(\text{Be})=1.38(9)$

- 锂损耗机制: ${}^7\text{Li} + p \rightarrow 2\alpha$

- 锂损耗时标 **1 Gyr**
- 对应的反应温度 **2.5Mk**
- 对流区底部温度**2.2Mk**

- 铍: 与锂类似, 反应温度**3Mk**

- 探测太阳内部的混合过程



太阳结构演化模型——基本理论

- 恒星演化基本理论

- 球对称
- 流体静力学平衡
- 能量：核反应，膨胀收缩

- 元素演化：
- 核反应
- 对流
- 微观扩散

- 未包含标准物理过程：
- 非局地对流、转动、磁场、星风、吸积

$$\frac{\partial m}{\partial r} = 4\pi r^2 \rho$$

$$\frac{\partial P}{\partial r} = -\rho g$$

$$\frac{\partial L}{\partial m} = \varepsilon - T \frac{\partial s}{\partial t}$$

$$\frac{L}{4\pi r^2} = F = F_R + F_C; F_R = -\lambda \frac{\partial T}{\partial r}; \lambda = \frac{4acT^3}{3\rho\kappa}$$

$$P = P(\rho, T, X_i)$$

$$\frac{\partial X_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial m} [V_i X_i + \sum_j (D_{ij} + D_C \delta_{ij}) \frac{\partial X_j}{\partial m}] + R_i$$

太阳结构演化模型——基本理论

- 恒星演化基本理论

- 初始条件：气体云自引力收缩，在恒星即将形成时，给定总质量和元素组成，均匀的初始内部，均匀的收缩速率

$$T \frac{\partial s}{\partial t} = \frac{3c_p T}{5\tau_0}, \tau_0 = \frac{\partial \ln r}{\partial t}$$

- 边界条件： $m = 0 : r = 0, L = 0$

$$m = M : \rho = 0, T = T_s$$

$$EG : T_s^4 = \frac{1}{2} T_{eff}^4 = \frac{L}{8\pi R^2 \sigma}$$

- 模型参数：恒星质量，初始元素组成，对流模型参数 α

太阳结构演化模型——基本理论

- 标准太阳模型：
- 当前年龄太阳内部结构的标准理论模型
- 构建方式，参数定标：

$$L_{sun} = L(X, Z, \alpha, t_{sun}),$$

$$R_{sun} = R(X, Z, \alpha, t_{sun}),$$

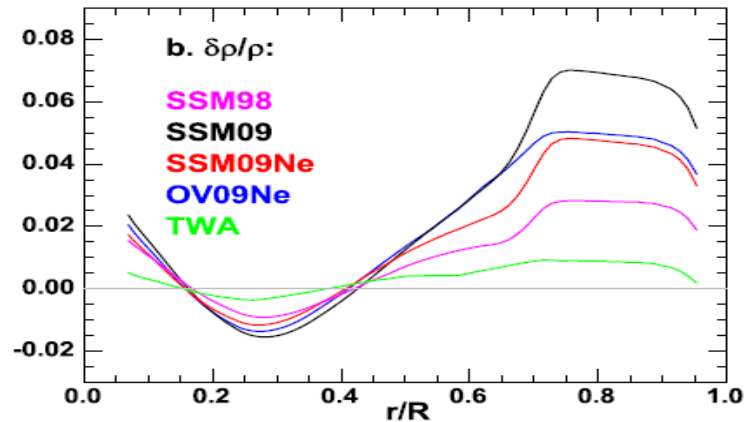
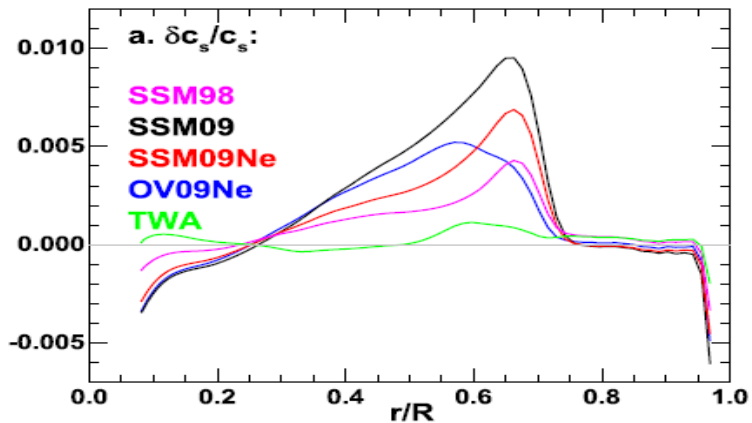
$$\left(\frac{Z}{X}\right)_{sun} = \left(\frac{Z}{X}\right)(X, Z, \alpha, t_{sun}),$$

- 标准太阳模型依赖表面 Z/X 的观测结果
- 重元素作用：EOS，热核反应 CNO 循环 (<2%)，不透明度

太阳结构演化模型——当前状况

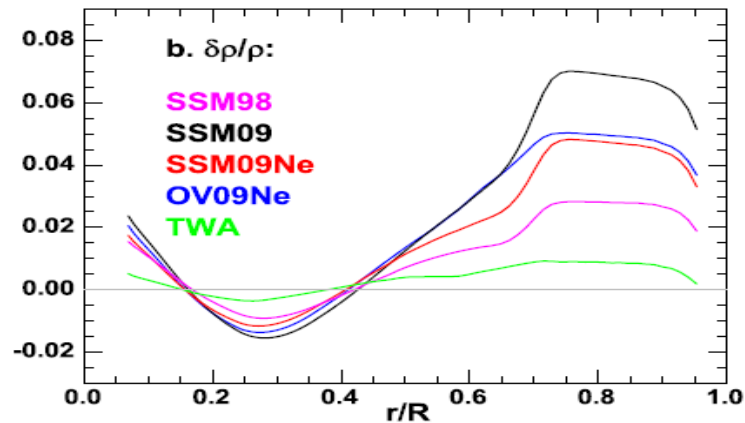
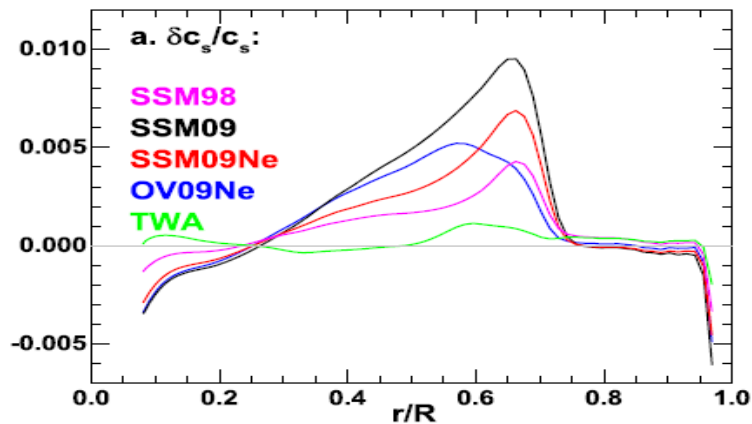
- 标准太阳模型 vs. 观测 (Zhang et al., 2019):

	GS98	A09	A09Ne	Sun
Z/X	0.0229	0.0181	0.0188	0.0188(12)
Ys	0.2453	0.2381	0.2405	0.2485(35)
Rbc	0.7152	0.7239	0.7207	0.713(1)
A(Li)	2.44	2.73	2.60	1.05(10)
pp/1e10	5.96	6.00	5.99	5.97(3)
pep/1e8	1.45	1.46	1.46	1.45(1)
hep/1e3	8.01	8.19	8.15	19(10)
Be/1e9	4.91	4.63	4.70	4.80(24)
B/1e6	5.35	4.74	4.89	5.16(10)
N/1e8	2.86	2.18	2.21	(5.7-8.6)e8
O/1e8	2.14	1.59	1.62	
F/1e6	5.30	3.47	3.55	



太阳结构演化模型——当前状况

- 当前标准太阳模型存在的问题:
- 对流区深度、氦丰度、内部声速和密度与日震学反演存在严重偏差
- **太阳丰度问题（太阳模型问题）**
- Bahcall, Serenelli & Basu, 2006,
- Serenelli et al., 2009
- 太阳锂丰度损耗问题
- **新增问题：CNO 中微子流量低于观测**



太阳结构演化模型——当前状况

- 太阳对流区模型 (Zhang 2014)

$$\frac{\partial m}{\partial r} = 4\pi r^2 \rho$$

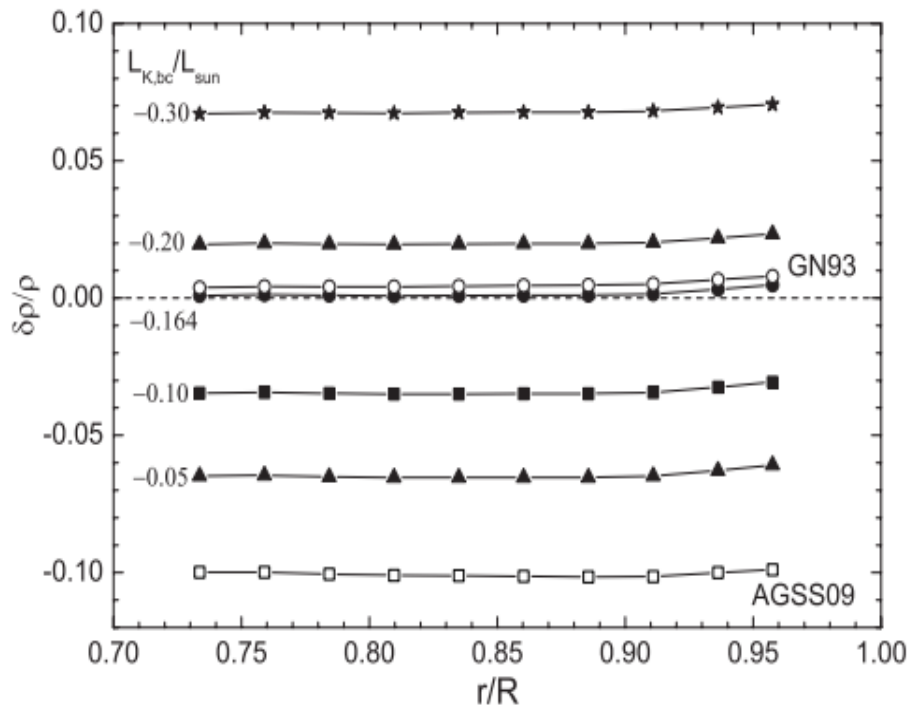
$$\frac{\partial P}{\partial r} = -\rho g$$

$$\frac{\partial L}{\partial m} = \epsilon - T \frac{\partial s}{\partial t}$$

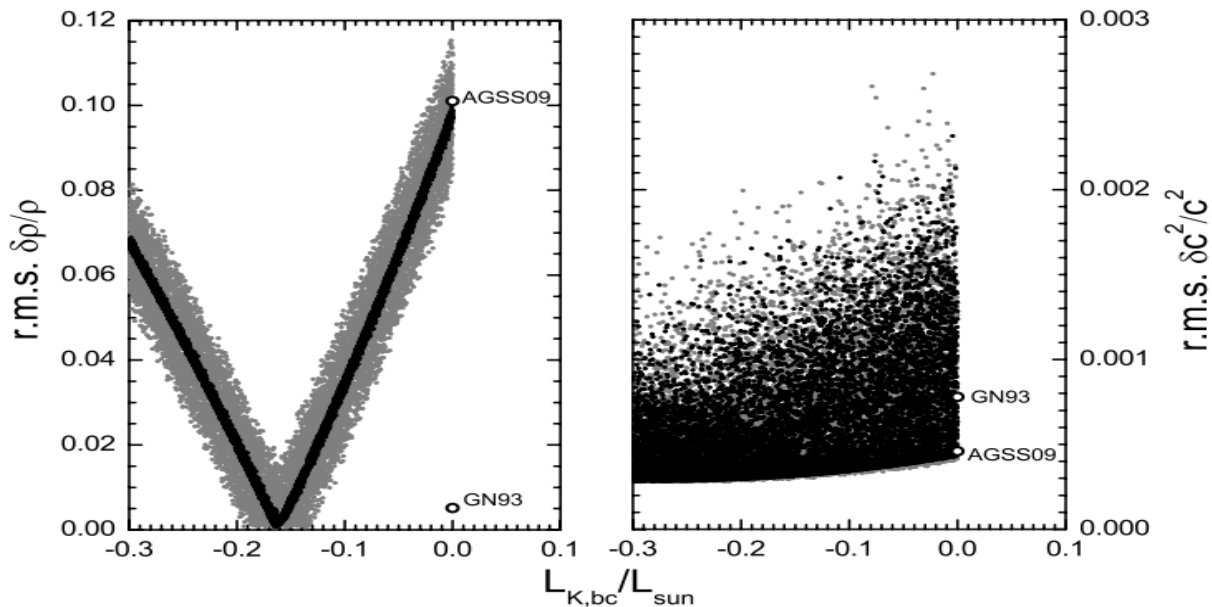
$$\frac{L}{4\pi r^2} = F = F_R + F_C; F_R = -\lambda \frac{\partial T}{\partial r}; \lambda = \frac{4acT^3}{3\rho\kappa}$$

$$P = P(\rho, T, X_i)$$

$$\frac{\partial X_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial m} [V_i X_i + \sum_j (D_{ij} + D_C \delta_{ij}) \frac{\partial X_j}{\partial m}] + R_i$$



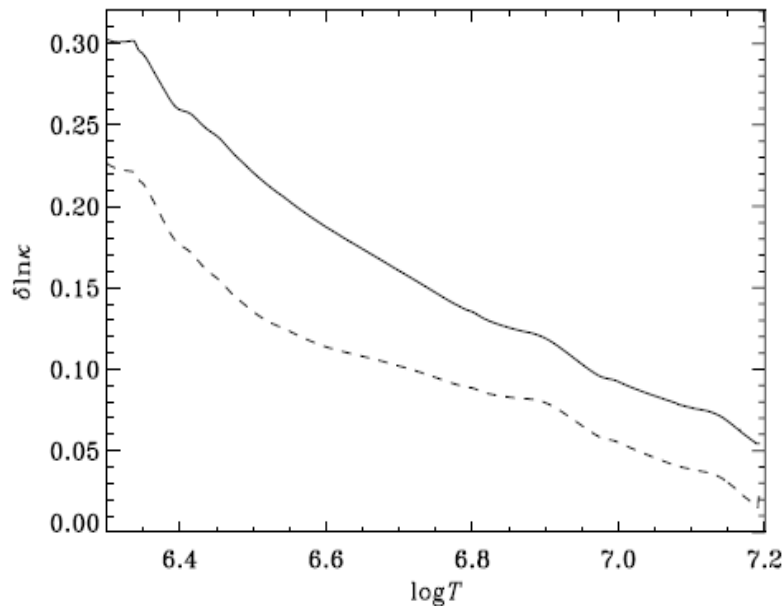
太阳结构演化模型——当前状况



- 对流区底部需要的 **向内动能流/不透明度增幅** 为 **13% ~ 20%**
- 该结果只与 **物态方程、不透明度和对流模型** 有关，**与其他因素无关**

不确定因素——输入物理

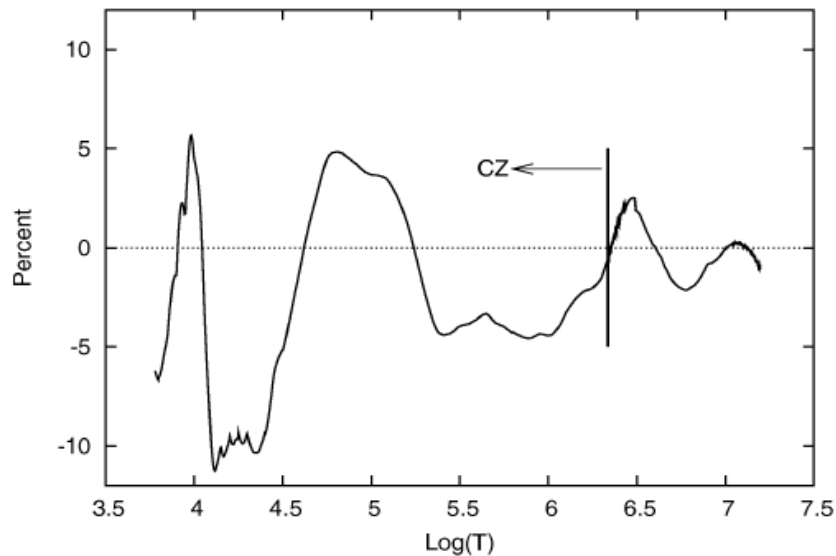
- 不透明度：粒子对光子的吸收散射，决定恒星内部的温度结构
- 人为提高不透明度：
 - 对流区底部15-20%，太阳内核2-5%
 - 则可以把A09太阳模型改进至GS98模型的水平
- Serenelli et al., 2009 , ApJL, 705, 123
- Christensen-Dalsgaard & Houdek 2010, ApSS, 328, 51



不确定因素——输入物理

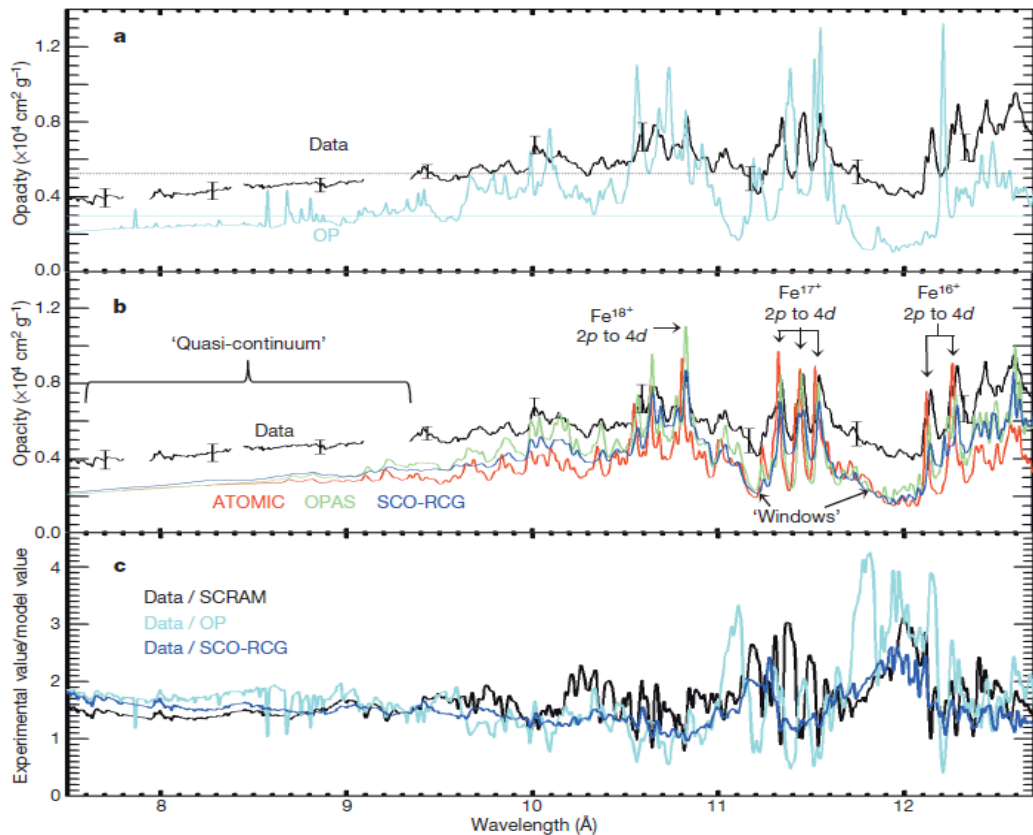
- 不透明度主流模型的差异: **OPAL vs. OP**
- **OP: Badnell et al., 2005, MNRAS, 360, 458**

- **$(OP-OPAL)/OP$**



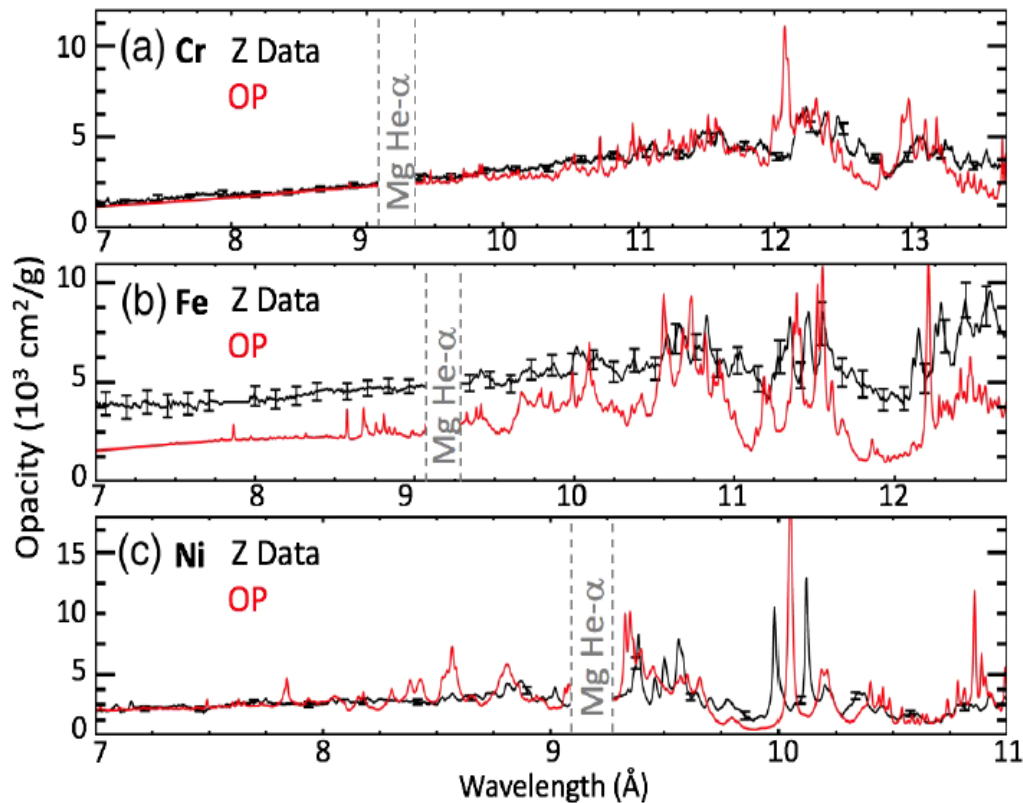
不确定因素——输入物理

- 太阳对流区底部 Fe 不透明度实验，**Baily et al. 2015, Nature, 517, 56**
- Fe不透明度测量值比理论值高**40%-300%**
- 对流区底部，不透明度提高约**7%**



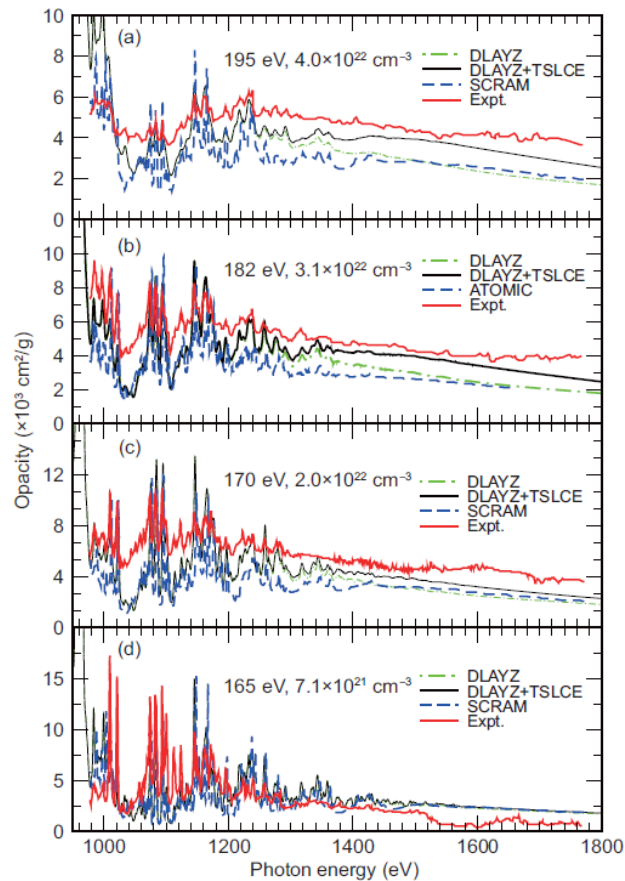
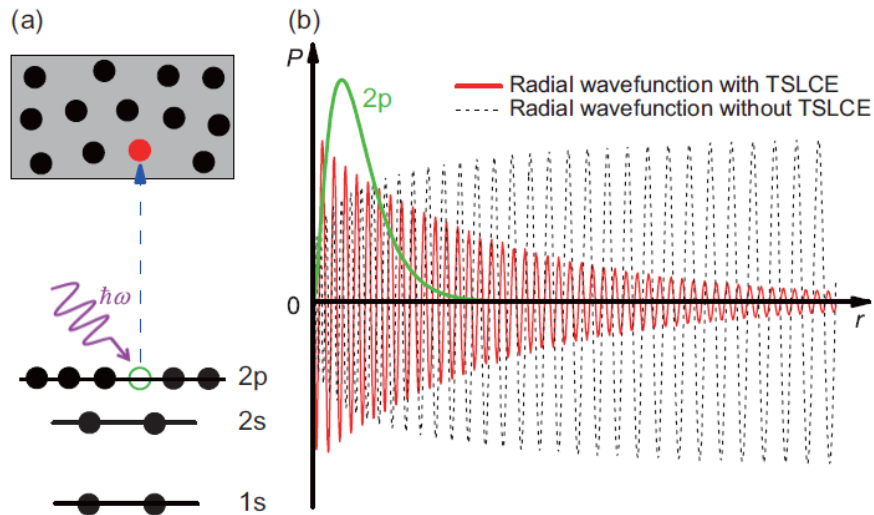
不确定因素——输入物理

- 太阳对流区底部不透明度实验 Cr, Fe, Ni
- Nagayama et al., 2019, PRL, 122, 235001
- Cr和Ni的不透明度测量与理论相符
- 大幅提高不透明度的可能性下降



不确定因素——输入物理

- 电子局域化增强不透明度
- Zeng et al., 2022, SCPMA, 65, 233011



不确定因素——输入物理

- 点评“电子局域化增强不透明度”(Zhang., 2022, SCPMA, 65, 233031)

SCIENCE CHINA
Physics, Mechanics & Astronomy



•Research Highlight•

March 2022 Vol. 65 No. 3: 233031
<https://doi.org/10.1007/s11433-021-1832-y>

Opacity enhanced by the localization of electrons

Qian-Sheng Zhang^{1,2,3,4*}

¹ Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216, China;

² Center for Astronomical Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;

³ Key Laboratory for the Structure and Evolution of Celestial Objects, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216, China;

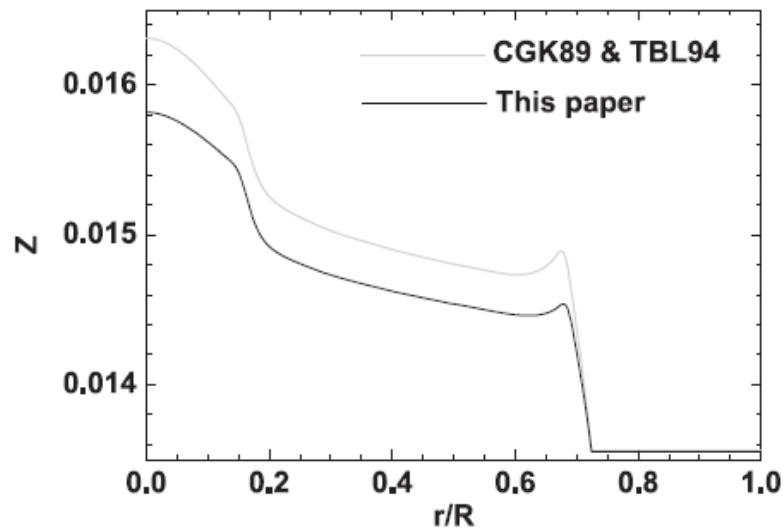
⁴ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Received November 24, 2021; accepted December 10, 2021; published online December 23, 2021

不确定因素——输入物理

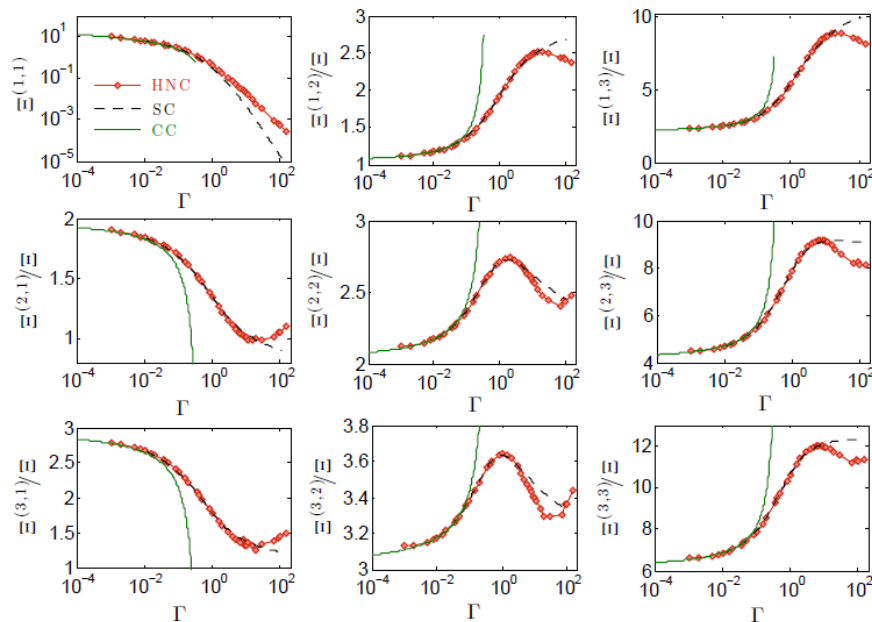
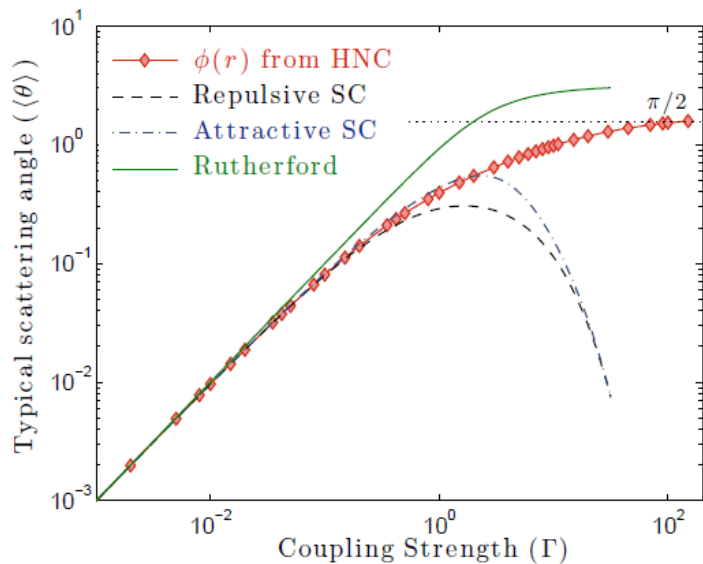
- 微观扩散：
 - 受重力和温度梯度影响，**H** 趋于往恒星表面漂浮，重的元素向内部沉淀
 - 影响太阳内部重元素分布
- 当前模型：气体扩散理论，**Burgers** 方程
 - **Cox et al., 1989**
 - **Thoul et al., 1994**
 - **Zhang, 2017**
- 依赖的物理：需要粒子势场分布计算散射角
 - 当前模型：截断库伦势、屏蔽库伦势

$$V_{ij}(r) = Z_i Z_j e^2 \frac{\exp(-r/\lambda)}{r}$$



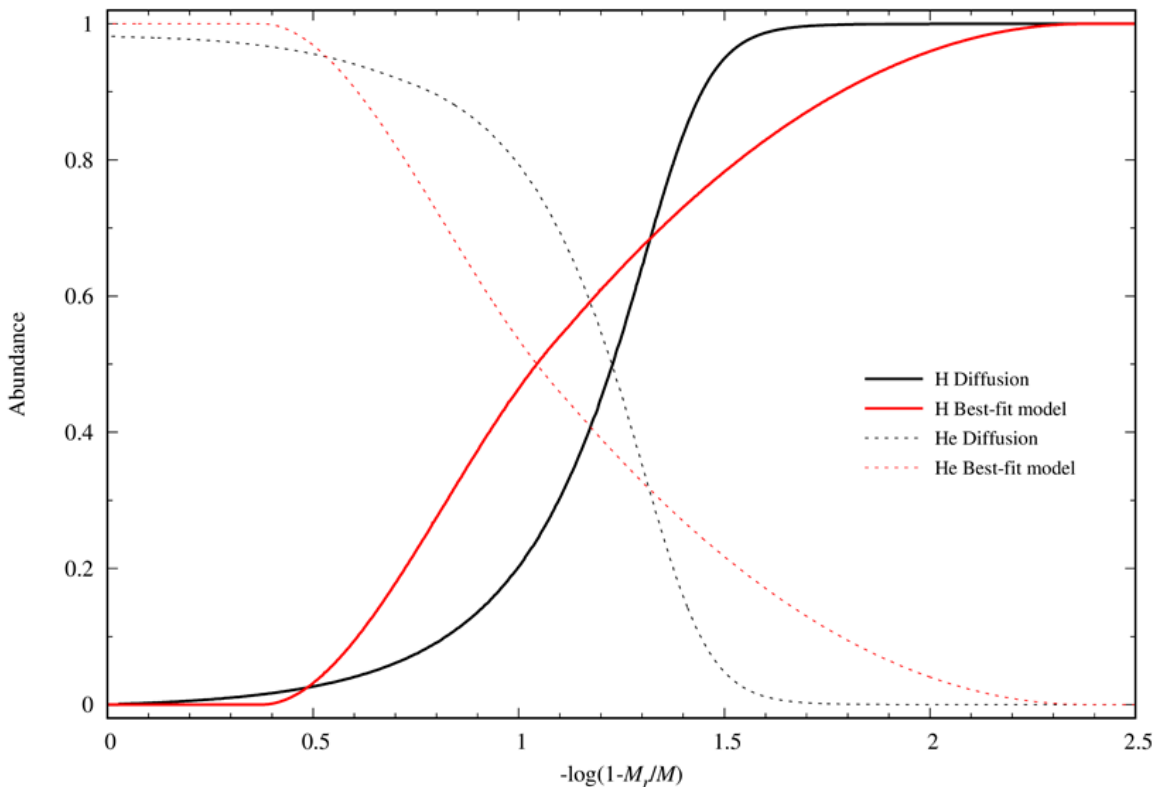
不确定因素——输入物理

- 库伦模型与分子动力学模拟的对比
- Baalrud, S. D., & Daligault, J. 2013, PhRvL, 110, 235001; 2014, Phys. Plasmas, 21, 055707



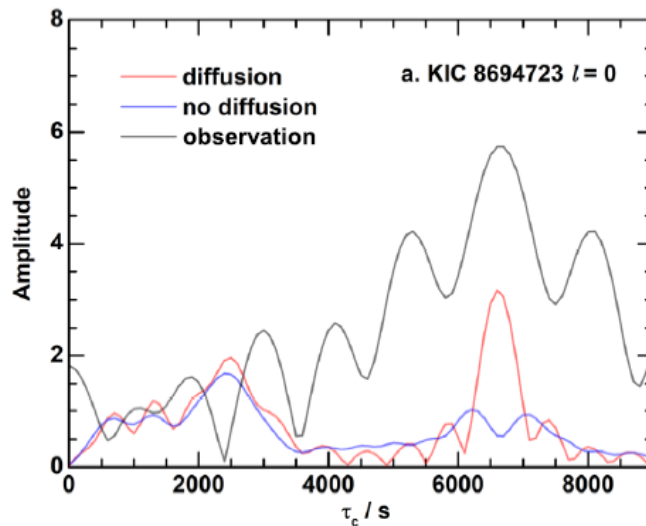
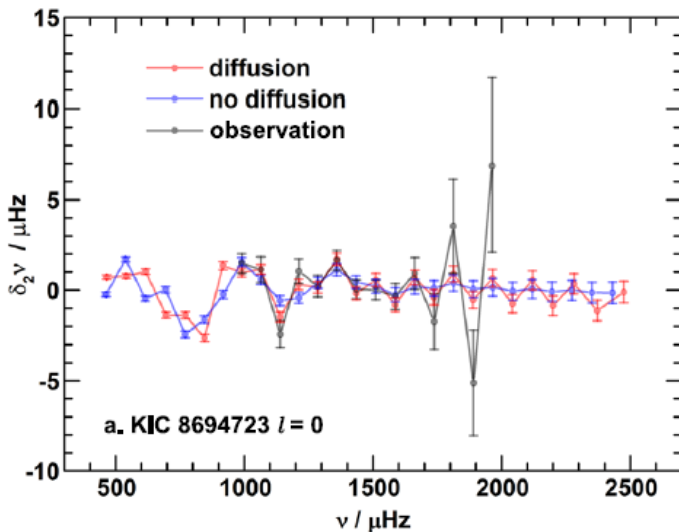
不确定因素——输入物理

- 其他恒星的微观扩散探测
- 白矮星星震学
- **J111215.82+111745.0**
- 星震学测定氦白矮星的氢氦界面丰度轮廓
- **Su & Li, 2023, ApJ, 943, 113**



不确定因素——输入物理

- 其他恒星的微观扩散探测
- 类太阳星星震学 (Wang & Zhang, 2023)
- p -模式振动频率的二阶差分探测微观扩散，一些恒星表现出明显强于模型的微观扩散信号

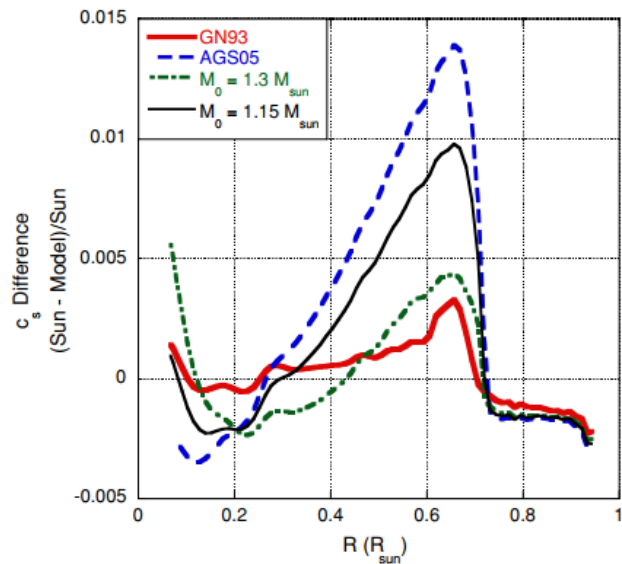
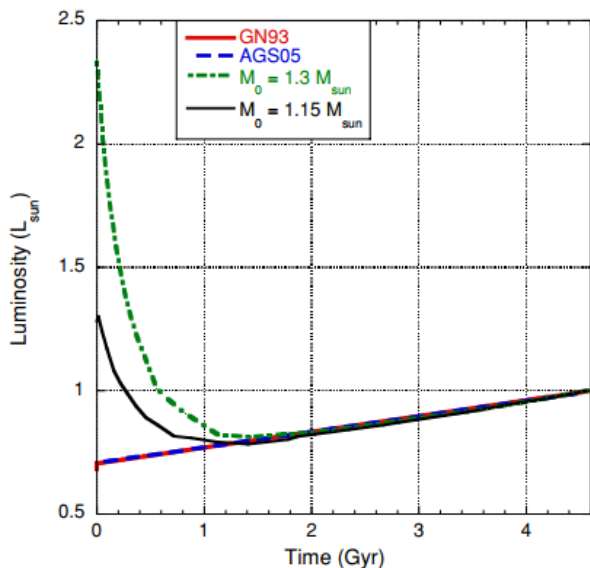


不确定因素——非标准物理过程

- 非标准物理过程：
 - 目前，某些**真实存在的较复杂的物理过程**还没有被广泛认可的理论模型，故而在标准太阳模型中未考虑，如**非局地对流、转动、吸积、星风和磁场**等。
- 非标准物理过程的效果：
 - **非局地对流**：对流超射、比对流区更大范围的传热和物质混合
 - **转动**：较差转动引起的额外的剪切混合
 - **吸积**：恒星早期从原行星盘吸取物质，丰度可能不同
 - **星风**：恒星外层物质逃逸——物质损失，各元素的逃逸速度不同
 - **磁场**：磁压、额外混合等

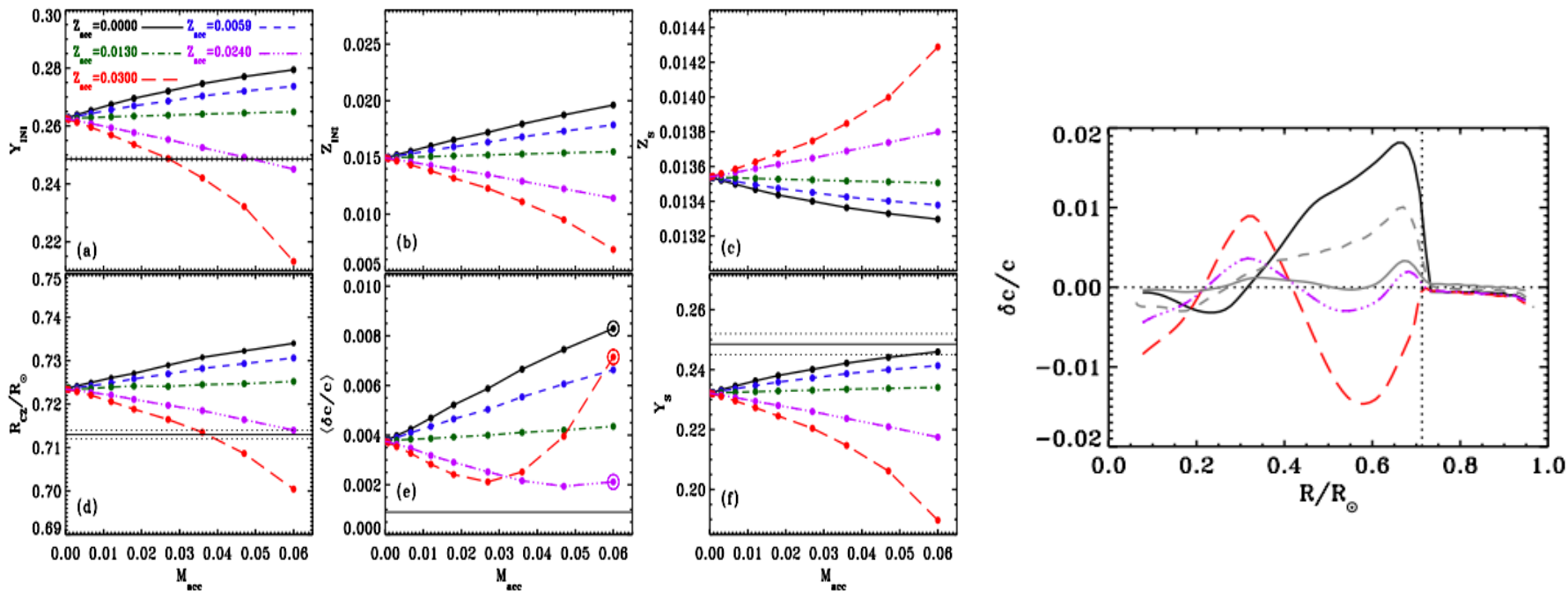
不确定因素——非标准物理过程

- 非标准物理过程：强烈星风 (Guzik & Mussack, 2010)
- 特点：声速偏差降低，但 Li 全部损耗，大量星团中太阳质量恒星的 Li 丰度观测不支持

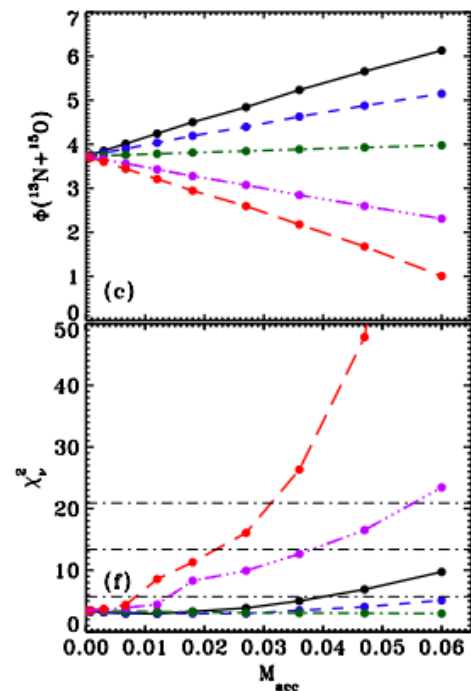
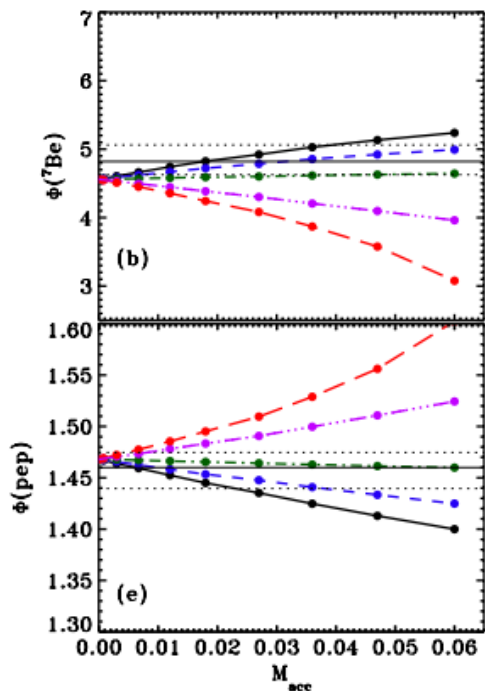
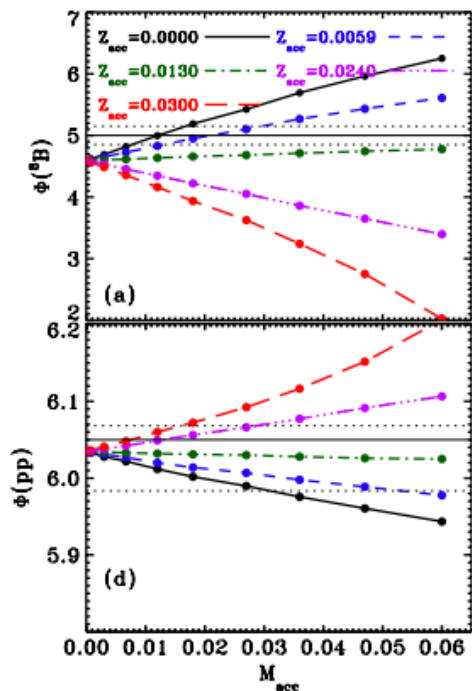


不确定因素——非标准物理过程

- 吸积, Serenelli et al. 2011



不确定因素——非标准物理过程

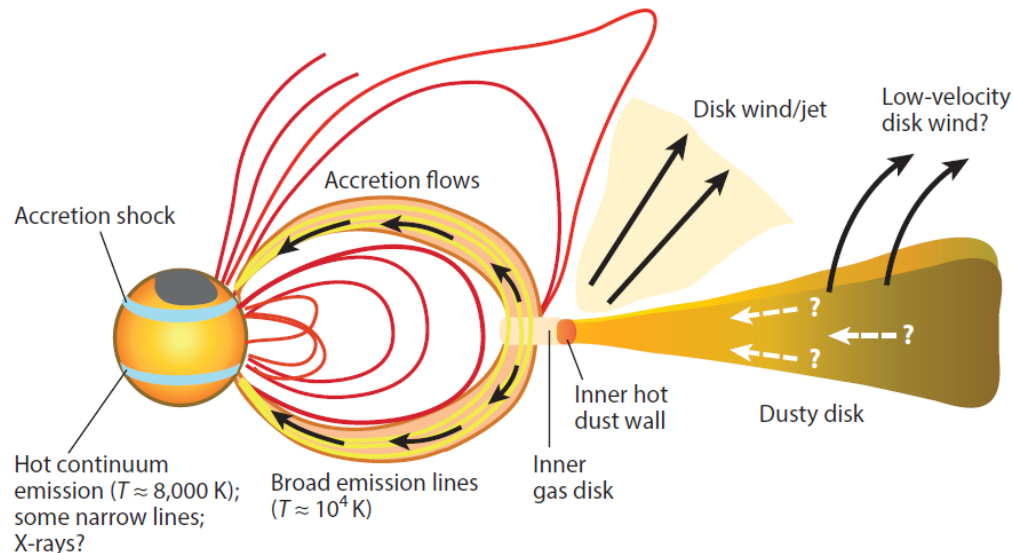


不确定因素——非标准物理过程

- 吸积、太阳风、非局地对流的效果 (Zhang et al. 2019)

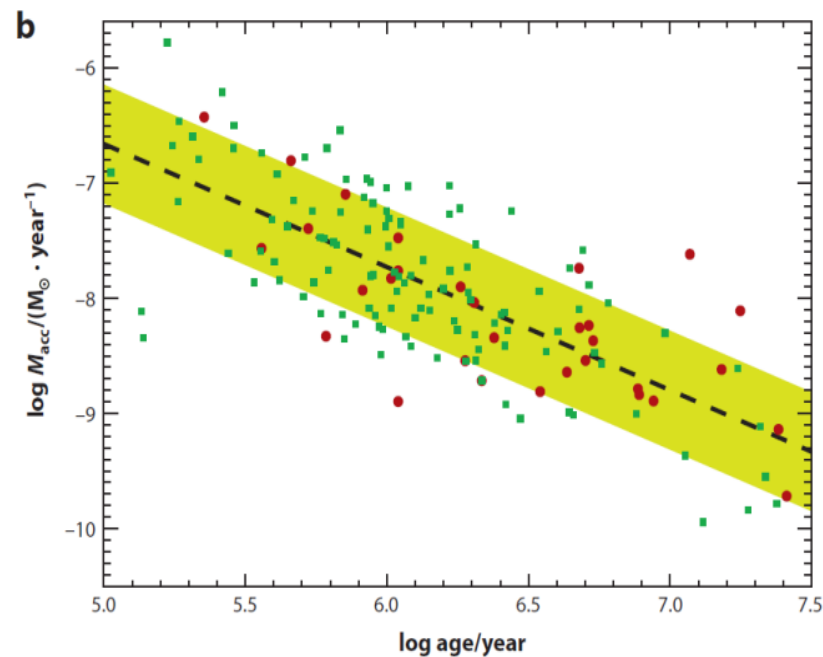
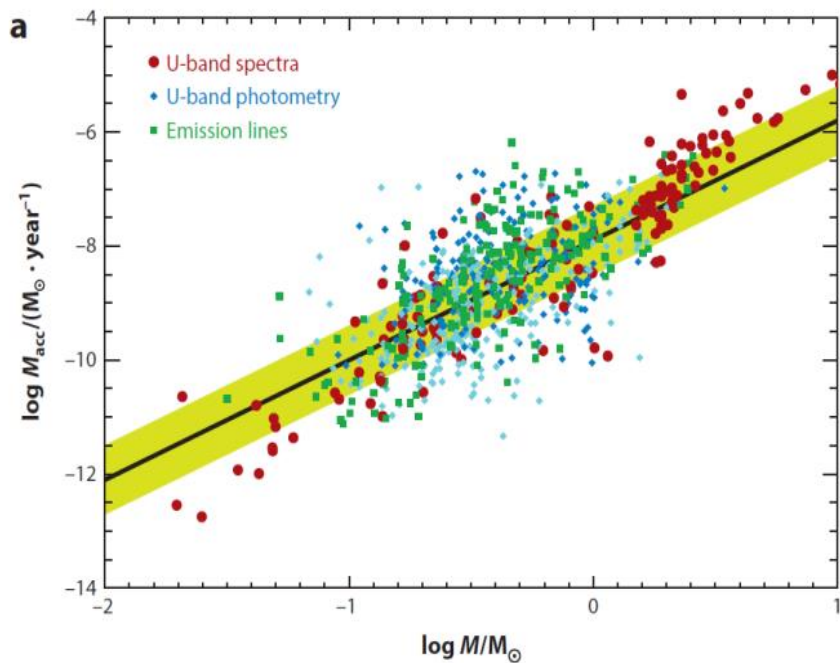
- 吸积模型：主序前吸积的普遍性
- **Hartmann, Herczeg & Calvet, 2016, ARAA, 54, 135**
- 磁球吸积，

- **假设：电离能效应可能导致贫氦吸积**



不确定因素——非标准物理过程

- 吸积率



不确定因素——非标准物理过程

- 对流超射模型 (e.g., Xiong, 1985, A&A, 150, 133; Canuto, 1998, ApJ, 508, 767):

$$\frac{\partial L_K}{\partial m} = \frac{\delta g}{T} \overline{u_r' T'} - \varepsilon$$

- 对流超射物质混合模型 (Zhang, 2013, ApJS, 205, 18):

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} (D_{ov} \frac{\partial X}{\partial r}), \quad D_{ov} = C_X \frac{\varepsilon}{N_0^2}$$

- 简化模型:

$$L_K = L_{K,c} \exp\left(\frac{r-r_c}{fH_p}\right) = L_{K,c} \left(\frac{P_c}{P}\right)^{\frac{1}{f}} \quad \frac{\delta g}{T} \overline{u_r' T'} = -a\varepsilon, \quad a \sim 0.1$$

- 参数定标 (满足日震学和观测锂丰度要求)

$$L_{K,c} = -0.13L_{sun}, f = 0.2, C_{X1} = 5 \times 10^{-4}$$

不确定因素——非标准物理过程

- 太阳风
- 物质损失: 10^{-3} - $10^{-2}M_{\text{sun}}$
- Wood et al., 2002, ApJ, 574, 412
- 太阳风组成观测值:
- $n_{\text{He}} / n_{\text{H}} = 4\%$, $n_{\text{He}} / n_{\text{H}} = 8\%$ in CZ
- 原因: 电离能效应
- 效果: 对流区内氦丰度增加 10^{-2} 量级

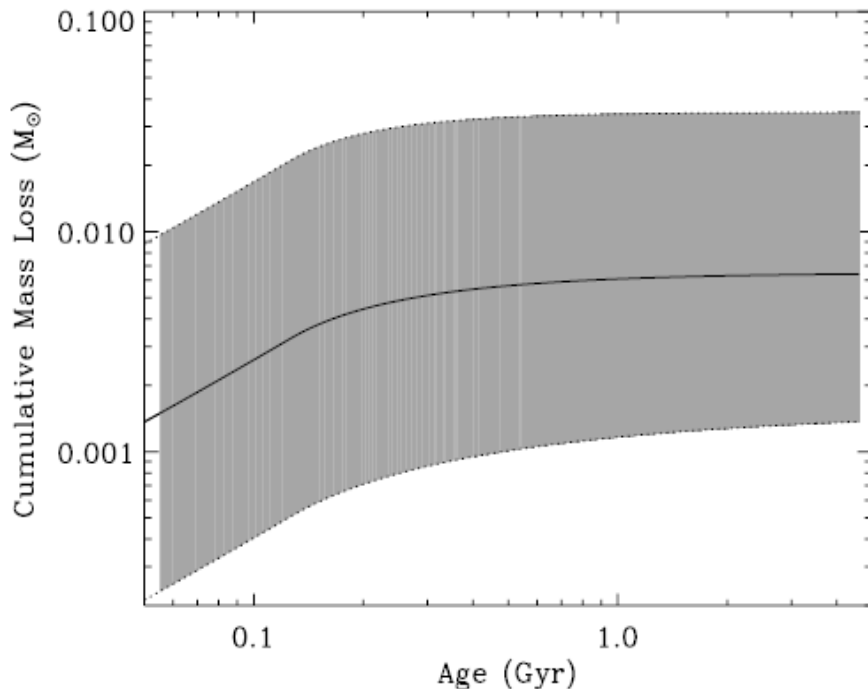
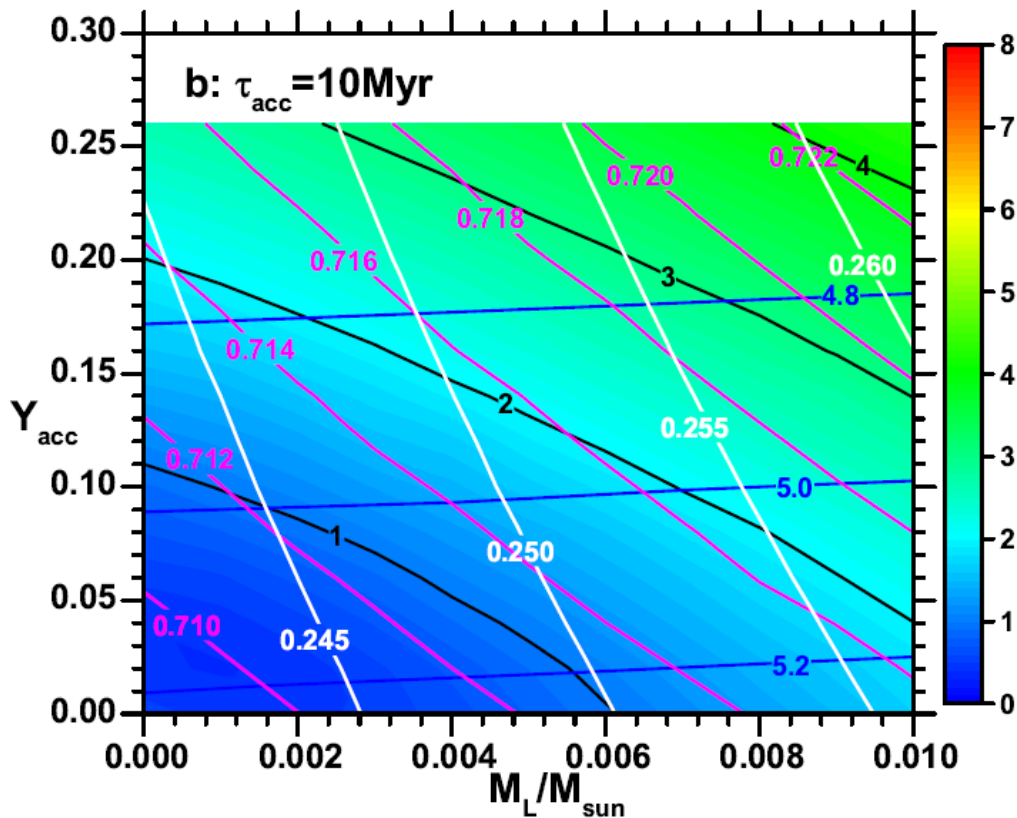


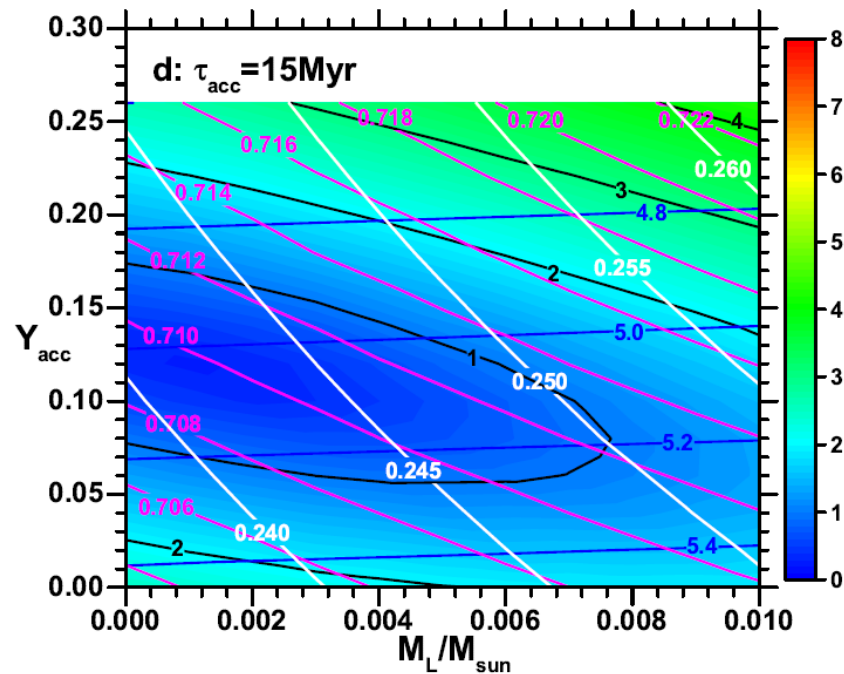
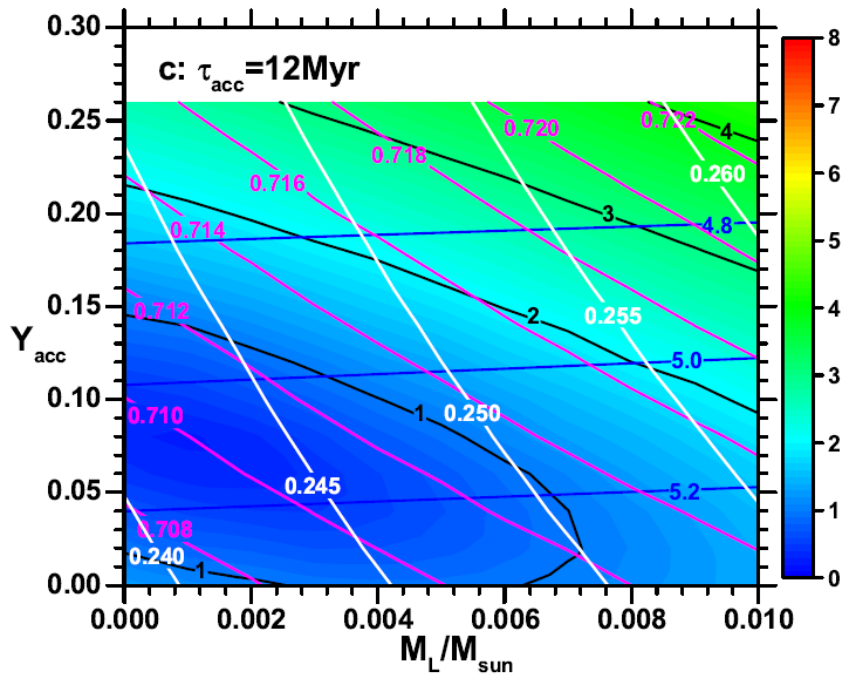
FIG. 9.—Cumulative mass loss for the Sun as a function of time, based on the mass-loss history of the solar wind in Fig. 8.

不确定因素——非标准物理过程

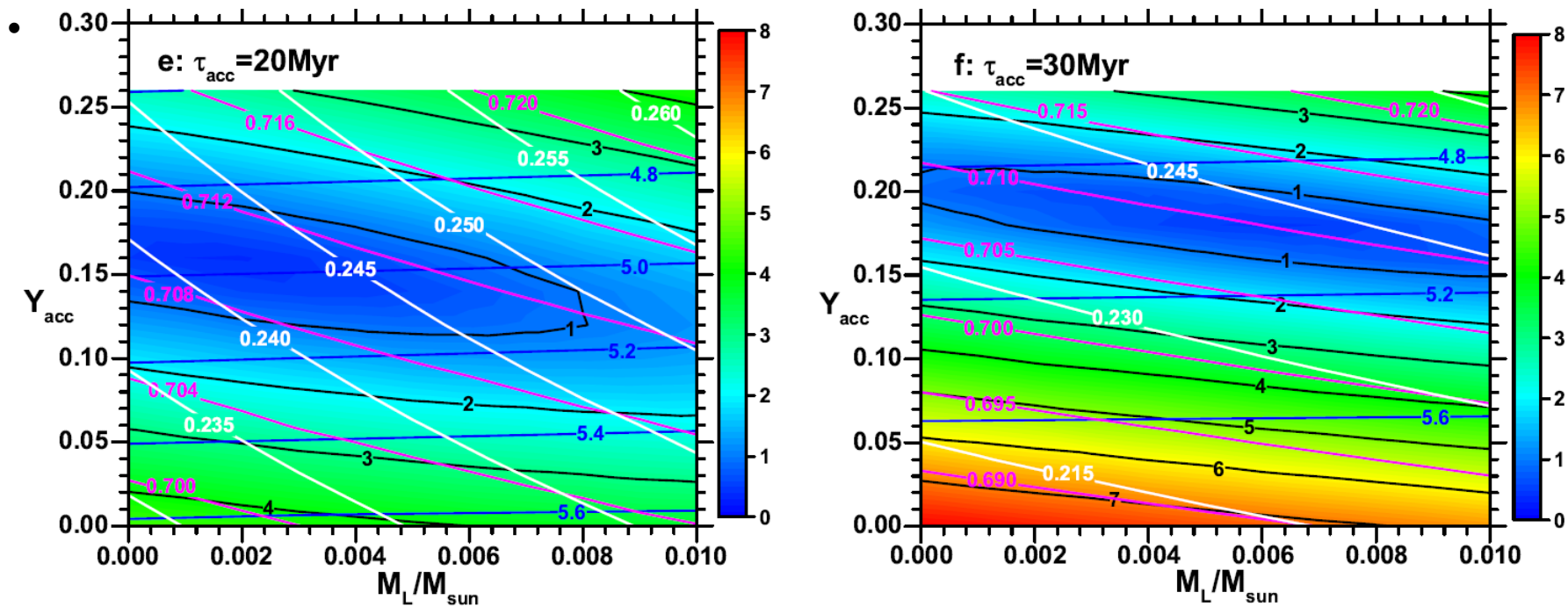
- 计算结果:
- 颜色——声速偏差*1000
- 白——表面氦丰度 (0.2485(35))
- 紫——对流区底部位置 (0.713)
- 蓝——B8中微子流*1e-6 (5.16)
- 吸积持续时间10Myr



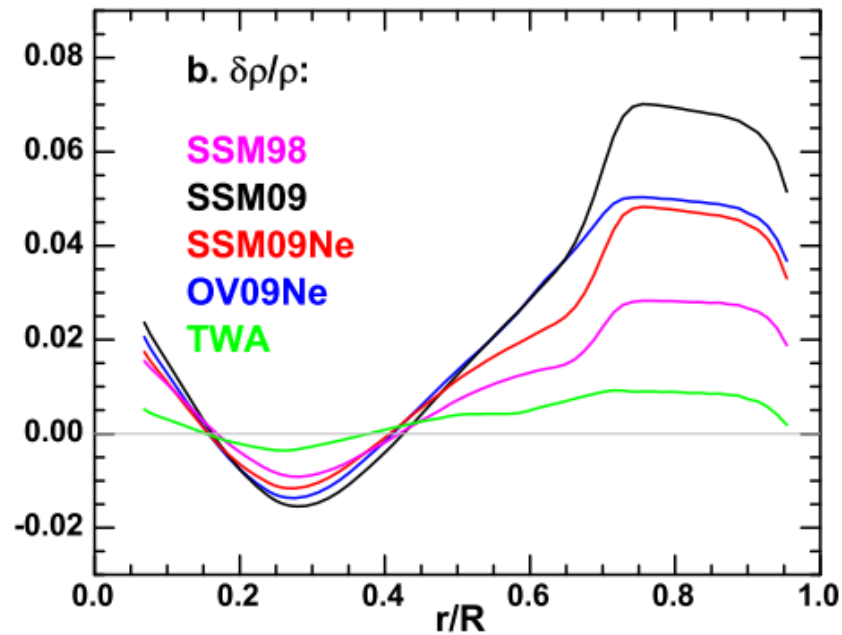
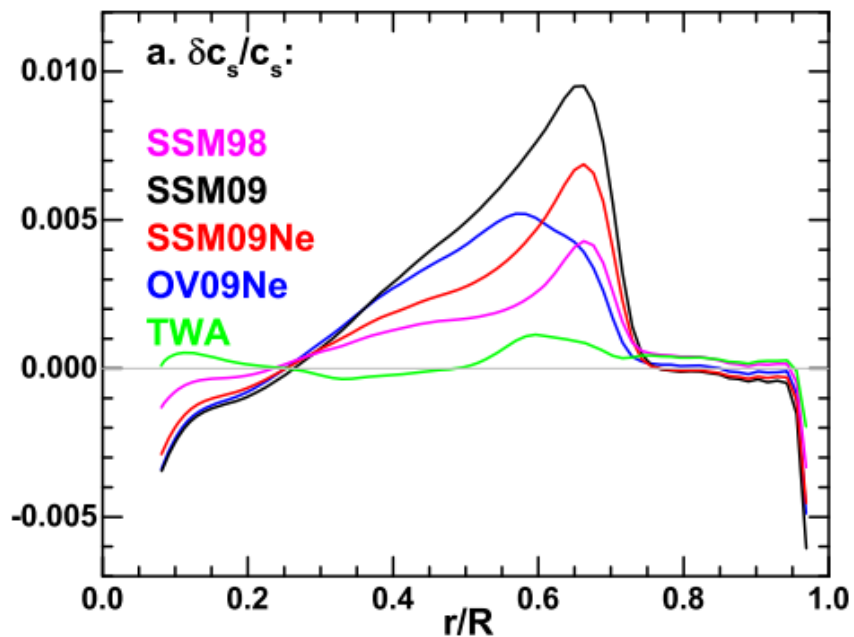
不确定因素——非标准物理过程



不确定因素——非标准物理过程



不确定因素——非标准物理过程



不确定因素——非标准物理过程

	GS98	SSM09Ne	TWA	the Sun
$(Z/X)_S$	0.0229	0.0188	0.0188	0.0188(12)
R_{BC}	0.7152	0.7207	0.7110	0.713 (1)
Y_S	0.2453	0.2405	0.2450	0.2485(35)
$A(Li)$	2.44	2.60	0.82	1.05(10)
$pp/10^{10}$	5.96 (0.5%)	5.99 (0.5%)	5.98 (0.5%)	5.97 (0.5%)
$pep/10^8$	1.45 (0.9%)	1.46 (0.9%)	1.47 (0.9%)	1.45 (0.9%)
${}^7Be/10^9$	4.91 (6%)	4.70 (6%)	4.84 (6%)	4.80 (5%)
${}^8B/10^6$	5.35 (12%)	4.89 (12%)	5.13 (12%)	5.16 (2%)
$CNO/10^8$	5.15 (12)	3.87 (15%)	3.88 (15%)	6.6 (5.7-8.6)

不确定因素——非标准物理过程

- 转动 + 增强微观扩散 + 对流超射
- Yang, 2016, 2019, 2022

讨论

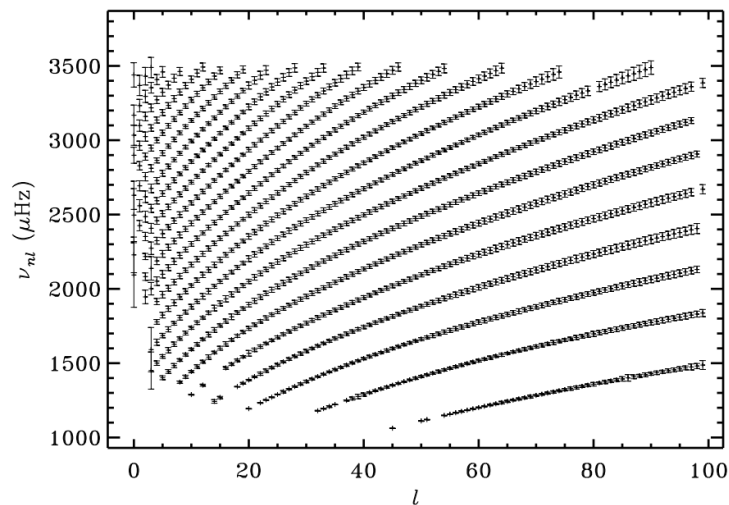
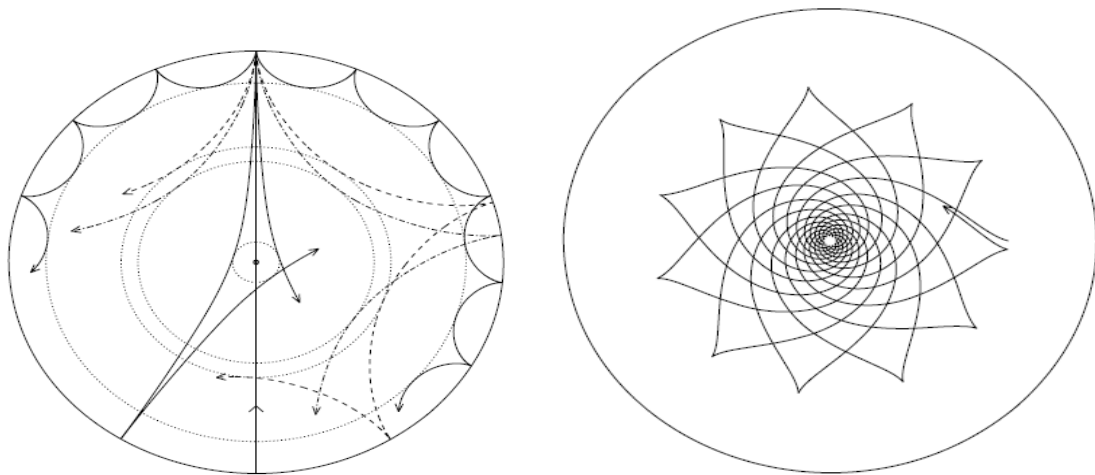
- 问题盘点:
- 太阳内部声速偏低: 不透明度、氦丰度 $c^2 \propto \frac{P}{\rho} \propto \frac{T}{\mu}$,
- 对流区深度偏浅: 重元素, 不透明度
- 表面氦丰度偏低
- Li 丰度偏高: 对流区底部额外混合 (对流超射、转动)
- CNO 中微子流量偏低: 重元素

讨论

	对流超射	增强不透明度	增强微观扩散	转动	吸积	太阳风
合理性	Y	?	?	Y	?	Y
对流区结构	Y	Y	-	-	-	-
声速	Y	Y	Y	N	Y	-
对流区深度	Y	Y	Y	N	Y	-
He 丰度	N	Y	N	Y	Y	Y
Li 丰度	Y	-	-	Y	-	-
CNO中微子	-	-	Y	-	?	-

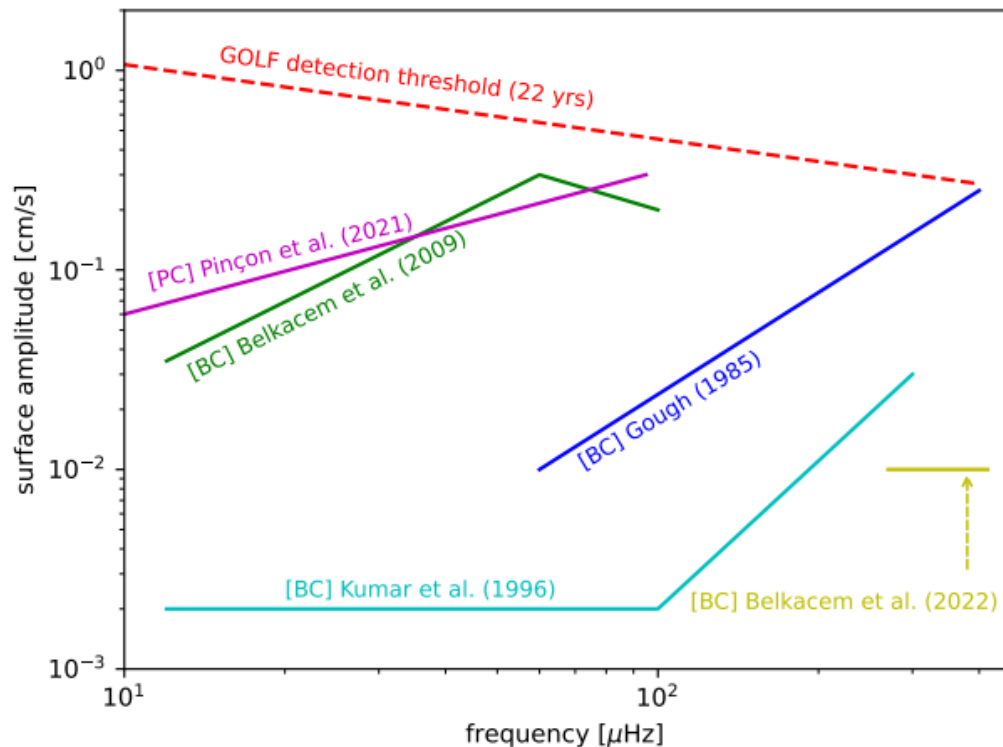
未来发展 —— 太阳 g- 模式振动

- 太阳 g- 模式振动



未来发展 —— 太阳 g- 模式振动

- 太阳 g- 模式振动
- 意义：
 - 太阳内核结构
 - **CNO** 中微子
- 潜在探测方式：
 - 太阳中微子
 - 空间引力波



未来发展 —— 太阳中微子

- 太阳中微子流量探测 g- 模式振动
- 理论依据：g- 模式振动主要在太阳内部，物质的温度发生周期性变化，造成核反应速率和中微子流量的周期性变化，**能否用 Be7 和 B8 来探测？**
- g- 模式振动对太阳模型的潜在影响：

$$R \propto T^{\nu}, \nu \gg 1:$$

$$\overline{R} = R_0 \overline{\left(\frac{T}{T_0}\right)^{\nu}} \approx R_0 \left[1 + \nu^2 \overline{\left(\frac{T}{T_0}\right)^{\nu-2}}\right],$$

谢谢！