

# 转动太阳模型与 核反应截面和中微子

杨伍明  
北师大天文系

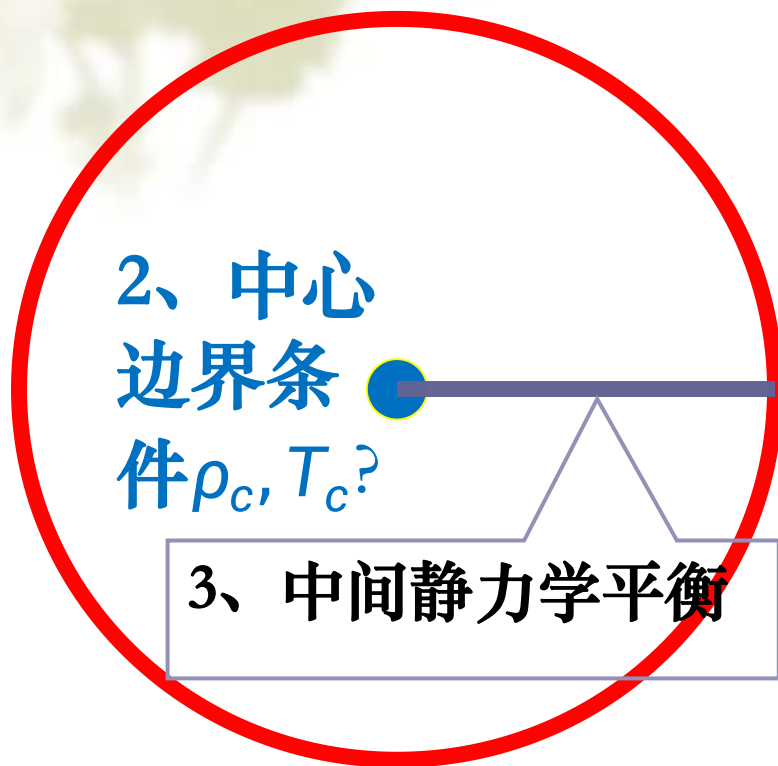
一、背景介绍

二、转动太阳模型

三、太阳模型的核反应截面因子与中微子

# 一、背景介绍

❖ 传统恒星模型是球对称静力学平衡



方程组

$$\begin{aligned}\frac{\partial P}{\partial M} &= -\frac{GM}{4\pi r^4} \\ \frac{\partial r}{\partial M} &= \frac{1}{4\pi r^2 \rho} \\ \frac{\partial L_r}{\partial M} &= \varepsilon_n - \varepsilon_v + \varepsilon_g \\ \frac{\partial T}{\partial M} &= -\frac{GM}{4\pi r^4} \frac{T}{P} \nabla\end{aligned}$$

在仅能初略测得相对 $L, T_{\text{eff}}$ 的‘零级’近似下这种模型没什么问题。

太阳其他恒星不一样.

1、太阳有精确的基本参数，其他恒星是未知的。

质量 $M_{\odot} = 1.9891 \times 10^{33} \text{ g}$ ,

半径 $R_{\odot} = 6.9598 \times 10^{10} \text{ cm}$ ,

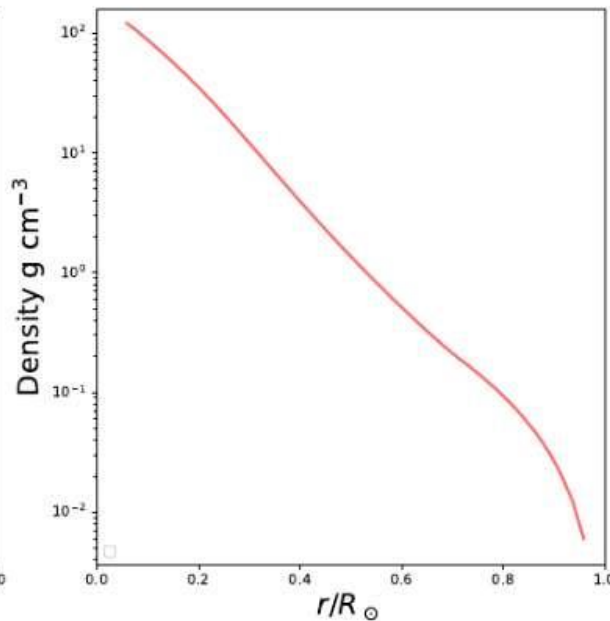
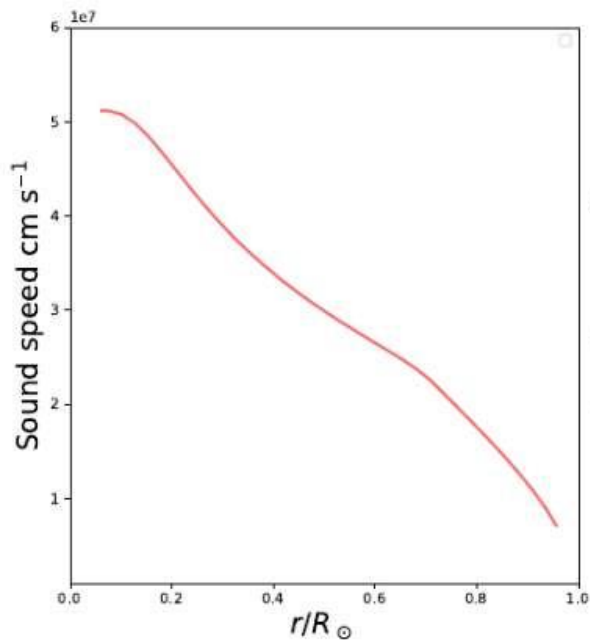
光度 $L_{\odot} = 3.844 \times 10^{33} \text{ g}$ ,

光球层的金属丰度 $Z_{\odot}$ , 锂 $A(\text{Li})$

年龄 $\text{age} = 4.57 \text{ Gyr}$ 。



## 2、日震学可以让我们看清太阳的内部结构： 声速，密度的径向分布，



有争议的  
对流区He丰度

$$Y_s = 0.2485 \pm 0.0035$$
$$0.245 - 0.260$$

金属丰度

$$Z_s = 0.0172 \pm 0.002$$

$$Z_s = 0.006 - 0.0140$$

Basu 2004, ApJ

Basu 2009, ApJ

Vorontsov 2014, ApJ

和对流区的厚度  $d = 0.287 \pm 0.003 R_{\odot}$ 。

### 3、引发巨大争议的太阳化学元素丰度值

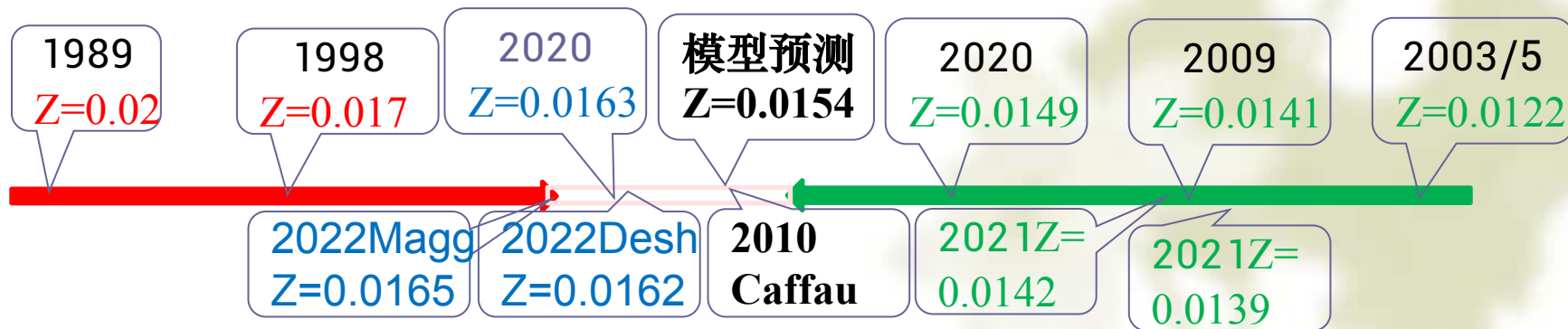
Zhang, Q.S. et al, 2019, ApJ 支持  $Z \cong 0.0139$

Yang 2016, ApJ, 转动模型可以支持  $Z=0.0139-0.0142$ . 但

Yang 2019, 2022, ApJ,  $Z \approx 0.0154$  更容易实现。

Yang & Bi 2007 转动恒星演化模型给出  $Z=0.0154$

extent by rotational mixing. The surface helium and the convection zone depth of rotating model M04R3, which has a surface  $Z$  of 0.0154, agree with the seismic results at the levels of  $1\sigma$  and  $3\sigma$ , respectively. M04R3 is almost as good as the standard model M98. Some discrepancies between the models constructed in accord with



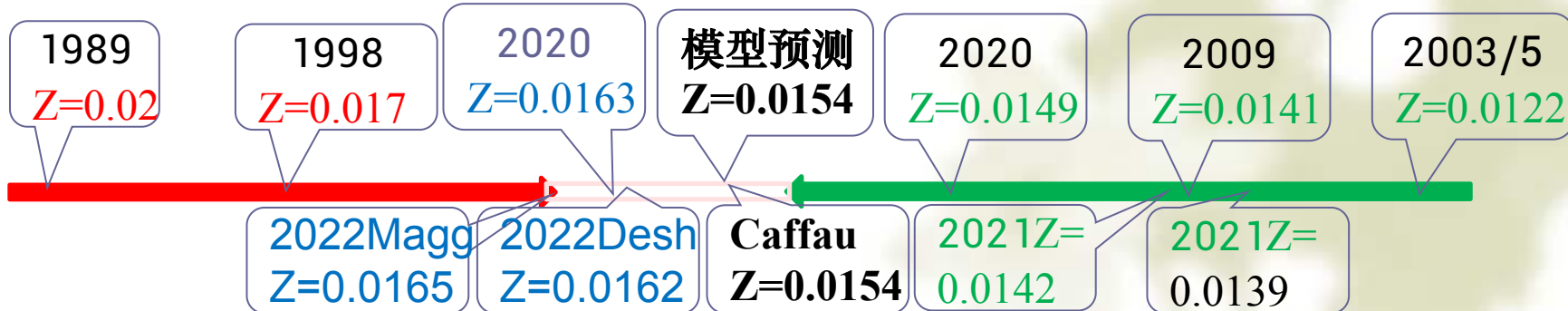
Magg et al. 2022  $Z=0.0165$ ;

Deshmukh et al. 2022, 分析Si得 $Z \cong 0.0162$ 。

Appel 2022中微子反推C、N支持Magg22.

Li, W. X. , et al 2021, 2023a,b,  $A(C)=8.50$ ,  
 $A(N)=7.79-7.84$ ,  $A(O)=8.70 \pm 0.04$  低于Magg22.

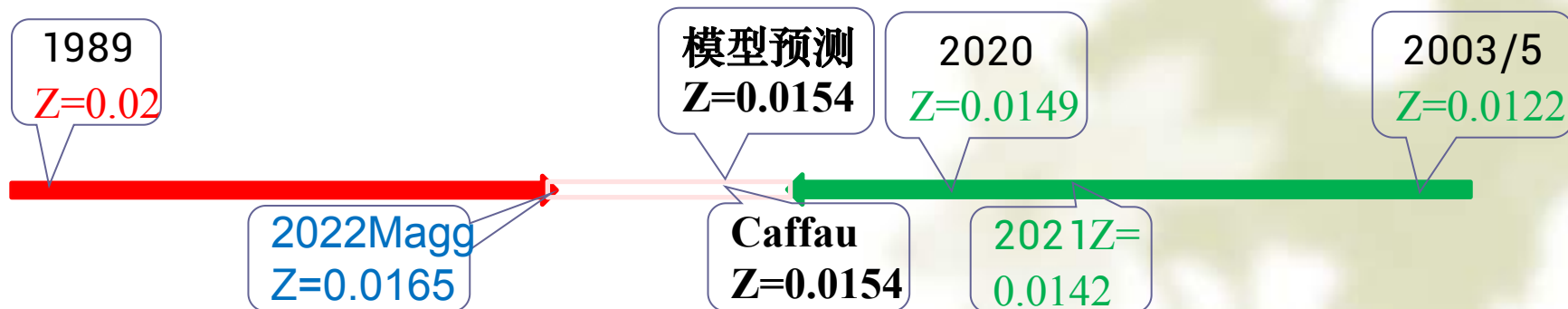
**Buldgen 2023a,b认为演化日震学反演不支持 $Z \approx 0.0164$ 。他们反演得 $Z \approx 0.012 - 0.0152$ 。**



直到今天人们依然没有达成太阳金属丰度的一致意见。

Caffau 2011的

C、N、Ne丰度 +  $1\sigma \approx$  Magg2022的丰度。



## 4、太阳中微子流量与太阳模型



直接来自核反应区的中微子是除日震学外探测太阳中心性质最强大的潜在工具。

中微子能不能帮我们解决太阳模型与元素丰度问题呢？

	$pp$	$pep$	$hep$	${}^7\text{Be}$	${}^8\text{B}$	${}^{13}\text{N}$	${}^{15}\text{O}$	${}^{17}\text{F}$
观测	$6.06 \pm 0.06$	$1.6 \pm 0.3$	...	$4.84 \pm 0.24$	$5.21 \pm 0.27$	...	...	...
BP04	5.94	1.40	7.88	4.86	5.79	5.71	5.03	5.91
Bahcall04	6.00	1.42	9.44	4.56	4.62	3.88	3.36	3.77
Yang16	6.01	1.43	9.77	4.72	4.43	3.91	3.39	3.89
Yang16	5.91	1.39	9.33	5.33	5.82	5.71	5.13	5.91

Bahcall 2004预测的 ${}^7\text{Be}$ 和 ${}^8\text{B}$ 流量不支持AGS04金属丰度。

	$pp$	$pep$	$hep$	${}^7\text{Be}$	${}^8\text{B}$	${}^{13}\text{N}$	${}^{15}\text{O}$	${}^{17}\text{F}$
Be16	$5.97 \pm 0.04$	$1.448 \pm 0.013$	$19_{-9}^{+12}$	$4.80 \pm 0.24$	$5.16 +0.13 -0.09$	<13.7	<2.8	<8.5
Bo18, Bo20	$6.1 \pm 0.5$	$1.39 \pm 0.19$	<220	$4.99 \pm 0.11$	$5.68 +0.39 -0.41$	$7.0^{+3.0}_{-2.0}$		
Bo22	...	...	...	...	...	$6.6^{+2.0}_{-0.9}$		

Bergstrom et al.2016,

Borexino 2018,2020,2022(Appel)的工作使得探测的太阳中微子与理论预测具有可比性。尤其是 ${}^{13}\text{N}$ ,  ${}^{15}\text{O}$ ,  ${}^{17}\text{F}$ 中微子流量的确定。使得用中微子研究核反应及其他恒星物理成为可能。



## 5、影响巨大却常被忽视的核反应截面

核反应截面与速度乘积

$$\begin{aligned}\langle \sigma v \rangle &= \int_0^{\infty} \sigma v \rho(v) dv \\ &= \left( \frac{8}{\pi \mu (kT)^3} \right)^{1/2} \int_0^{\infty} \sigma E e^{-\frac{E}{kT}} dE.\end{aligned}$$

$$\sigma(E) = \frac{S(E)}{E} e^{-2\pi\eta(E)}.$$

**核反应截面因子** $[S(0)$ , Astrophysical  $S$ -factors]是影响太阳热平衡结构的一个主要因素。

一个小的 $S(0)$ 的不确定会导致太阳模型在其他方面理论和观测不一致。

## 来自理论计算或观测数据拟合的核反应截面因子 $S(0)$

$pp$ 反应的  $S_{11} = 3.97(1 \pm 0.004)$  Park 2003

$S_{11} = 4.01 \pm 0.04$  Adelberger 2011

$S_{11} = 4.100 \pm 0.030$  Acharya 2023

$S_{17} = 0.0202$  Schramm & Shi 1994

$S_{17} = 0.0208 \pm 0.0016$  Adelberger 2011

$S_{17} = 0.0224$  Bahcall 1992

$S_{33} = 5.00$  Bahcall 1992

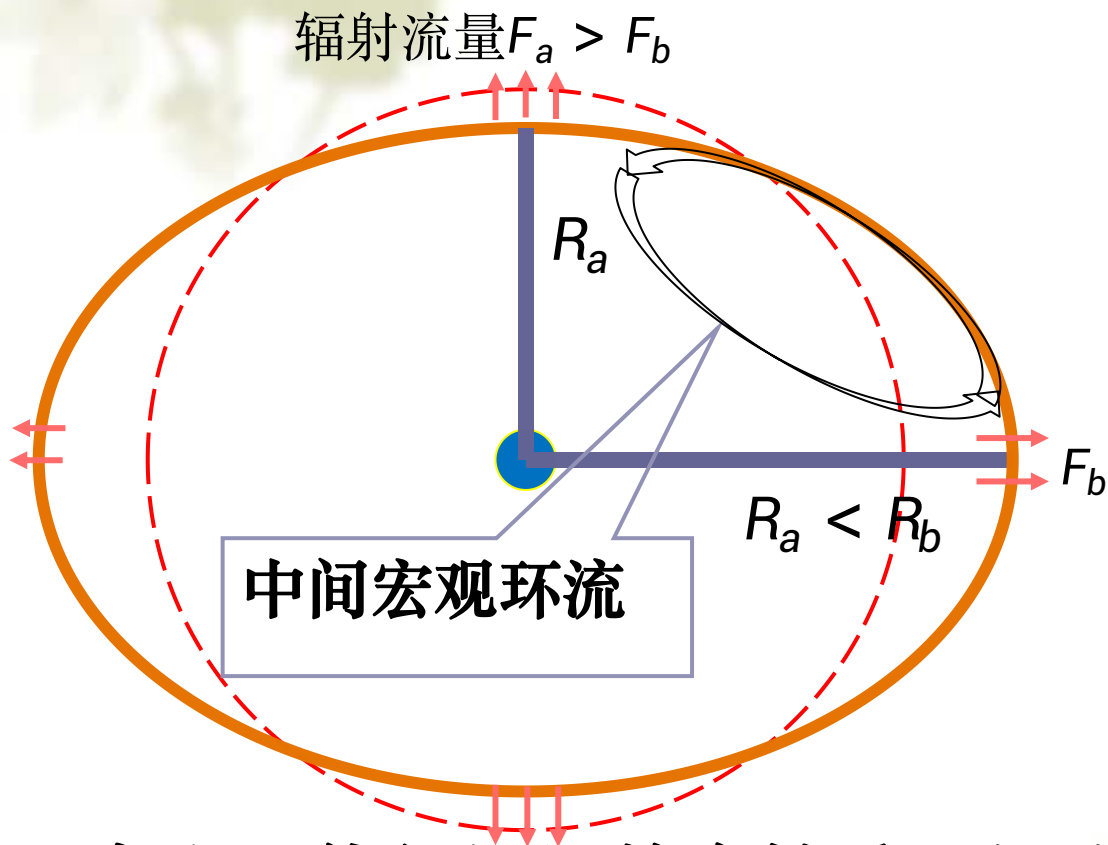
$S_{33} = 5.21 \pm 0.27$  Adelberger 2011

这种不确定性足以造成预测的中微子流量有明显的改变



## 二、转动演化太阳模型

### ❖ 1、真实恒星—转动椭球体



### 方程组

$$\frac{\partial P}{\partial M} = -\frac{GM}{4\pi r^4} f_p$$

$$\frac{\partial r}{\partial M} = \frac{1}{4\pi r^2 \rho}$$

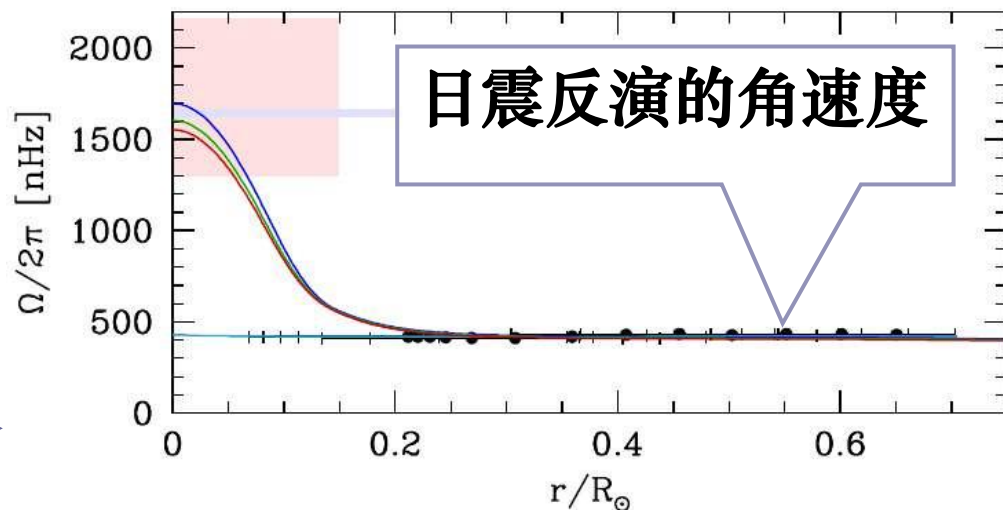
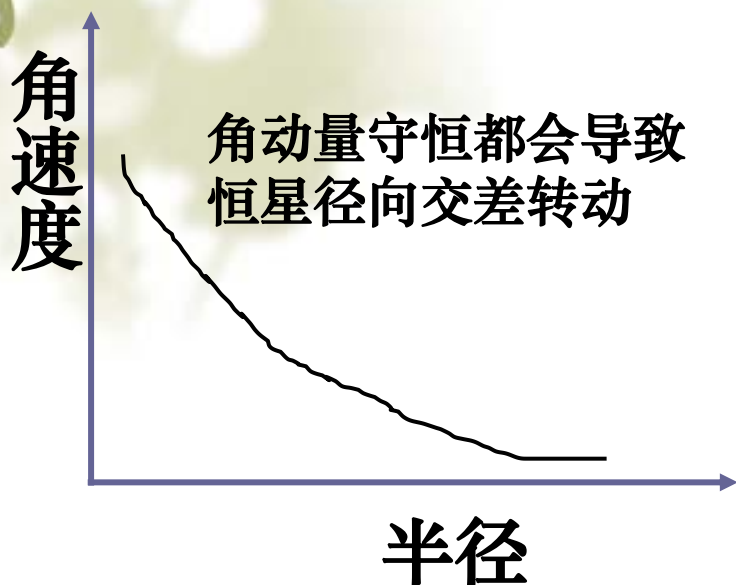
$$\frac{\partial L_r}{\partial M} = \varepsilon_n - \varepsilon_v + \varepsilon_g$$

$$\frac{\partial T}{\partial M} = -\frac{GM}{4\pi r^4} \frac{T}{P} \times$$

$$f_p \min(\nabla, \nabla_{rd} \frac{f_T}{f_p})$$

离心力使得恒星的有效重力加速度 $g$ 减小，会使恒星光度和有效温度降低，并导致恒星内部存在环流。

## 2、恒星转动会导致内部物质混合

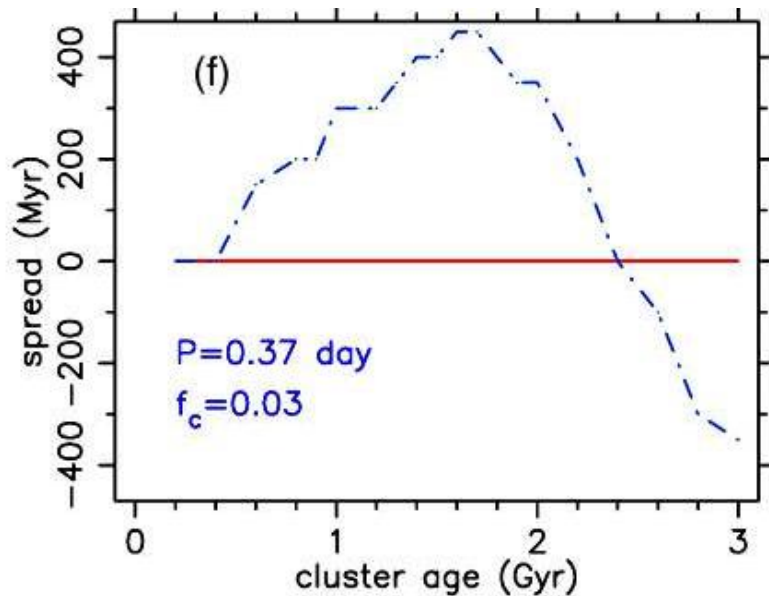


角动量守恒原理与日震反演的类刚体转动说明太阳内部存在有效的角动量转移机制。

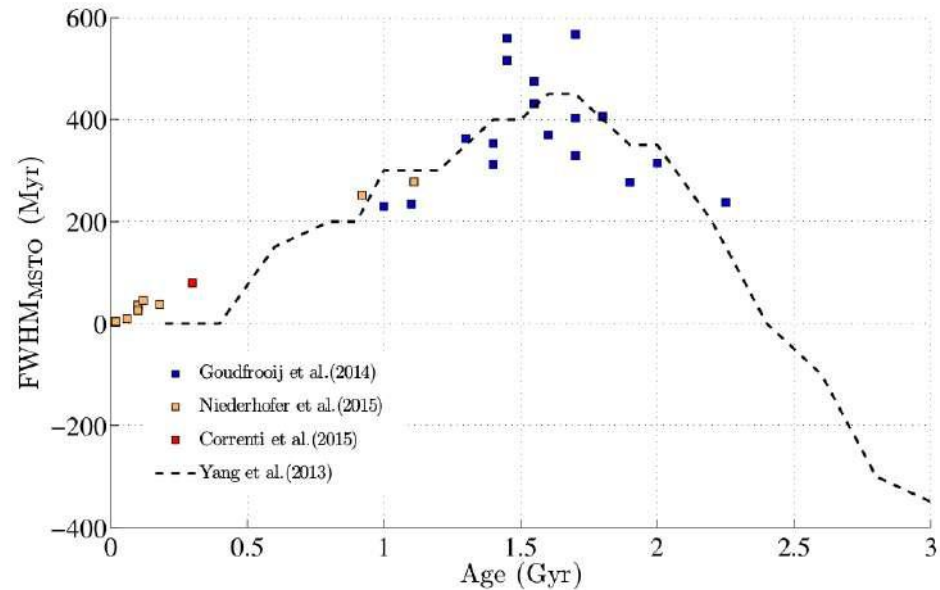
角动量转移会伴随着物质混合。混合的效果是把更多的氢带到中心燃烧，把氦带到恒星外壳。

### 3、能不能观测到转动效应?

恒星都是点源，没法看清这种椭球现象。但理论模型预测的快速转动恒星变红变暗随年龄的变化就被哈勃望远镜观测的星团证实。



Yang et al.2013,ApJ

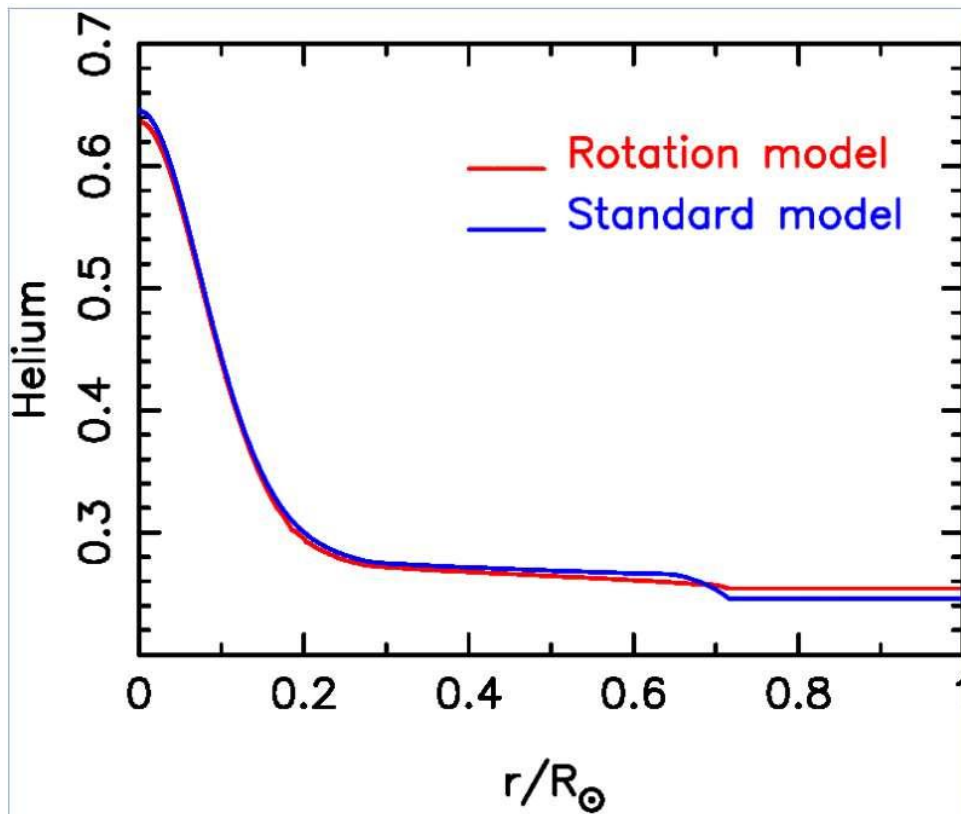


Li,C.Y.et al.2016

## 4、转动对太阳的影响?

对太阳的形变影响可以忽略。

转动效应对太阳的影响主要来源于对氢氦等物质分布的再分配，从而改变太阳内部的平衡结果。

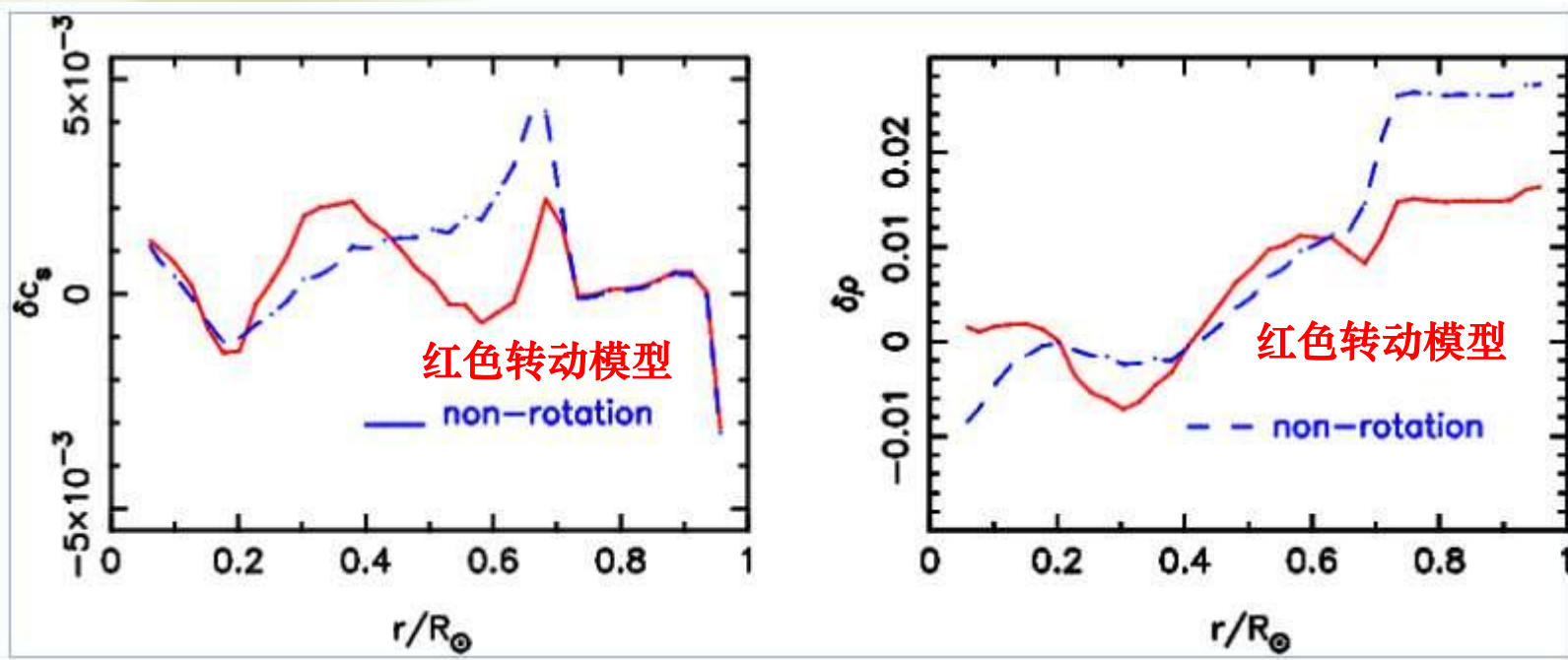


转动模型  $Y_{cZ} = 0.251$

非转动模型  $Y_{cZ} = 0.255$

Yang & Bi 2006, A&A

转动效应会对声速、密度等分布造成明显改变，从而会改变模型与日震比较的结果。



如果我们想要研究太阳内部的物理状态，确定某个物理效应是否被正确描述，那我们是需要先考虑并排除转动效应的。



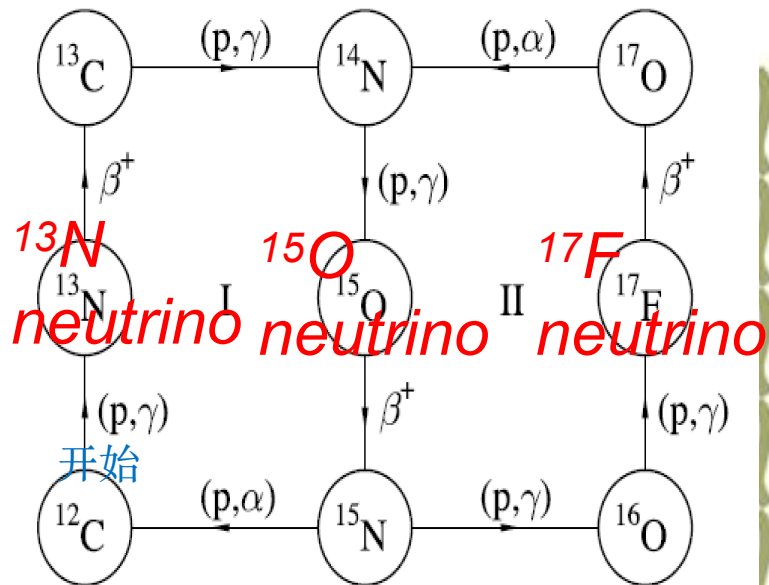
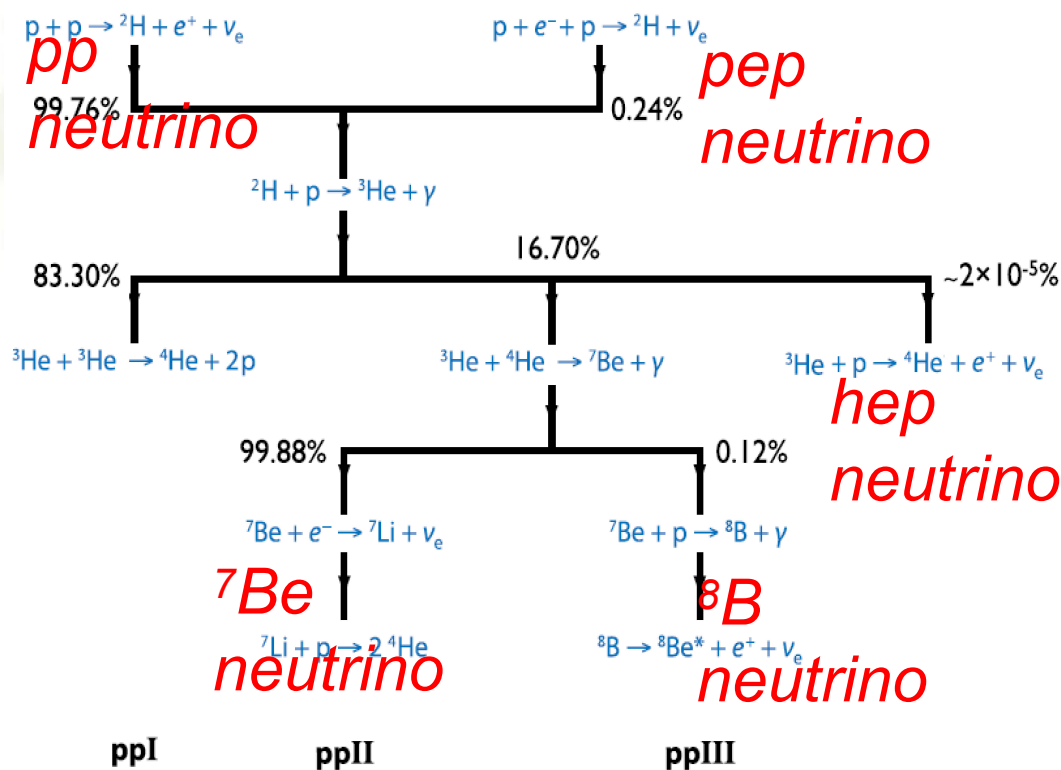
### 三、核反应截面(因子), 太阳中微子

太阳中微子直接来自内核, 可为我们提供恒星内边界物理条件, 是我们看穿恒星最直接的‘窗口’。

从恒星演化的角度能不能去研究核反应截面和太阳中微子呢? 能获得什么消息呢?

$^{13}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$ ,  $^{17}\text{F}$ 中微子来自CNO循环。太阳不会生成CNO, 但CNO是太阳/恒星重元素丰度的主要贡献者。准确/精确确定 $^{13}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$ ,  $^{17}\text{F}$ 中微子对解决太阳元素丰度问题是非常重要的。

# 太阳内部的核反应以链式反应存在。



如果能准确确定每一个反应环节，那很就能提供 (1) 中心边界条件  $\rho_c, T_c$ , (2)  $\rho_c, T_c$  确定，CNO循环就直接和CNO丰度相关。

但是当前的反应率并不足以得出可靠的结论。

$$S_{11} = 3.97(1 \pm 0.004) \text{ Park 2003}$$

$$S_{11} = 4.01 \pm 0.04 \quad \text{Adelberger 2011}$$

$$S_{11} = 4.100 \pm 0.030 \quad \text{Acharya 2023}$$

$$S_{17} = 0.0202 \quad \text{Schramm \& Shi 1994}$$

$$S_{17} = 0.0208 \pm 0.0016 \text{ Adelberger 2011}$$

$$S_{17} = 0.0224 \quad \text{Bahcall 1992}$$

$$S_{33} = 5.00 \quad \text{Bahcall 1992}$$

$$S_{33} = 5.21 \pm 0.27 \quad \text{Adelberger 2011}$$

这些反应截面因子差异很小， $1\sigma$ ，但足以改变中微子预测结果。这种变化无法从光度证实，只有借助中微子才能被确定。



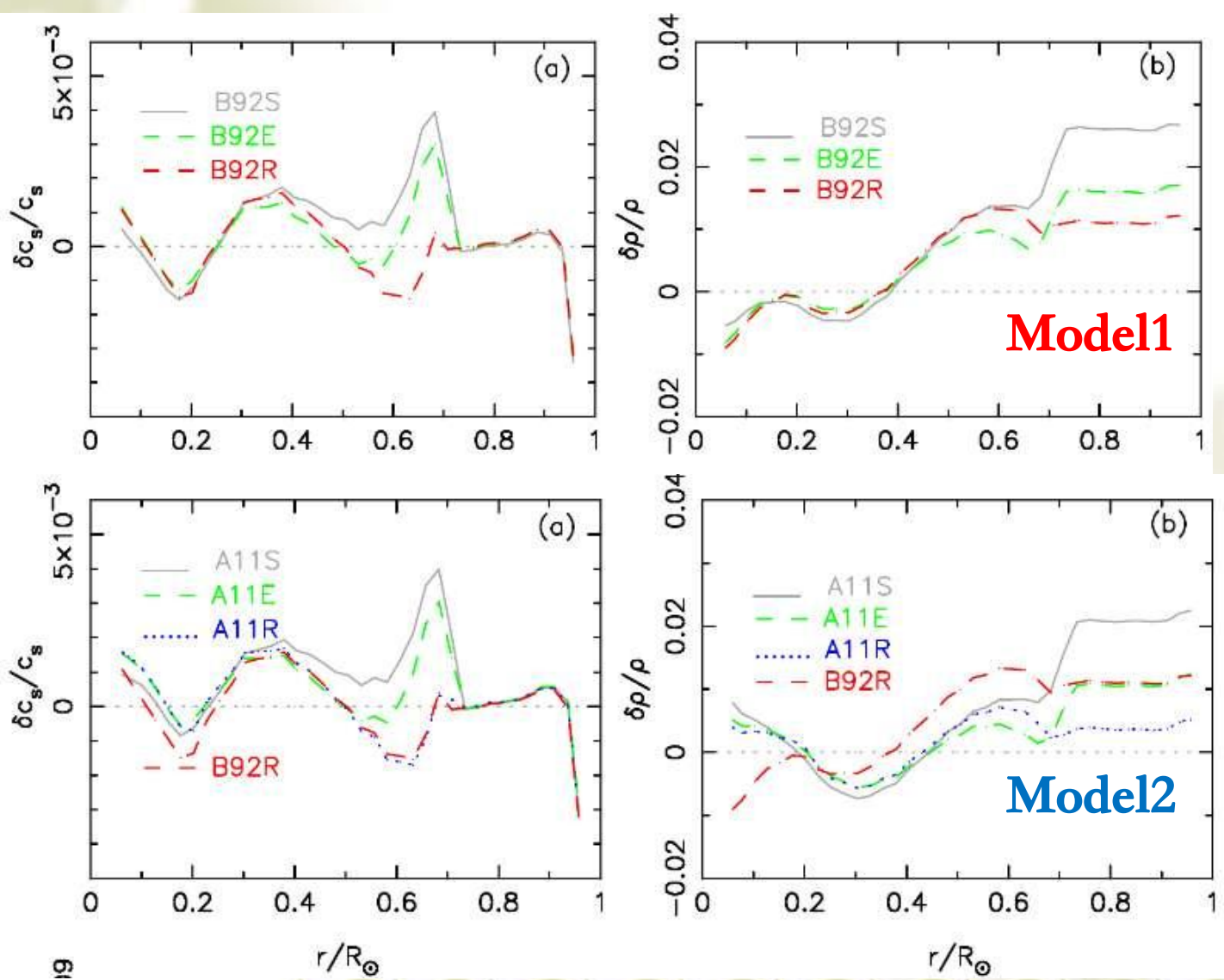
# 1、中微子独自能得出太阳物理正确结论吗？ 恐怕不能！

Measured and Predicted Solar Neutrino Fluxes ( $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ ).

探测

	$pp$ $\times 10^{10}$	$pep$ $\times 10^8$	$hep$ $\times 10^3$	${}^7\text{Be}$ $\times 10^9$	${}^8\text{B}$ $\times 10^6$	${}^{13}\text{N}$ $\times 10^8$	${}^{15}\text{O}$ $\times 10^8$	${}^{17}\text{F}$ $\times 10^6$
	$6.06^{+0.02a}_{-0.06}$	$1.6 \pm 0.3^b$	...	$4.84 \pm 0.24^a$	$5.21 \pm 0.27^c$	...	...	...
	$5.97^{+0.04}_{-0.03}$	$1.448 \pm 0.013$	$19^{+12}_{-9}$	$4.80^{+0.24}_{-0.22}$	$5.16^{+0.13}_{-0.09}$	$\leq 13.7$	$\leq 2.8$	$\leq 85$
	$6.1 \pm 0.5$	$1.39 \pm 0.19$	$< 220$	$4.99 \pm 0.11$	$5.68^{+0.39}_{-0.41}$	$6.6^{+2.0}_{-0.9}$		
	5.96	1.449	9.82	4.82	5.45	4.70	4.06	5.13
	5.95	1.444	9.76	4.91	5.68	4.95	4.31	5.45
<b>Model1</b>	5.96	1.448	9.76	4.90	5.66	4.94	4.29	5.43
	5.86	1.409	9.64	4.91	5.02	4.24	2.10	5.60
	5.95	1.433	9.70	4.65	5.43	4.35	3.72	4.67
	5.94	1.429	9.65	4.73	5.67	4.56	3.92	4.93
<b>Model3</b>	5.95	1.432	9.64	4.73	5.65	4.58	3.93	4.96

## 2、日震学反演能独自得出正确结论吗？ 答案：不行。



### 3、为什么会发生这种情况呢？

核反应释放的能量一部分以中微子的形式直接从中心向外辐射

$\Phi(pp)$ ,  $\Phi(pep)$ ,  $\Phi(hep)$ ,  $\Phi(^7\text{Be})$ ,  $\Phi(^8\text{B})$ ,  $\Phi(\text{CNO})$  .

一部分最终以光度的形式出现

$$L_{pp} \% + L_{ppII} \% + L_{pep} \% + L_{CNO} \% = 1L_{\odot}$$

假如有两个人算的 $pp$ 截面不一样,

$$S_{11} = 3.97(1 \pm 0.004) \text{ Park 2003}$$

$$S_{11} = 4.01 \pm 0.04 \quad \text{Adelberger 2011}$$

$$S_{11} = 4.10 \pm 0.03 \quad \text{Acharya 2023}$$

1个截面偏大一点点意味着核融合概率提高，产能率提高。 $1L_{\odot}$ 是个常数，必然导致预测的其他降低。

**Table 5.** The Solar Luminosity Contributed by Different Reaction Branches ( $L_{\odot}$ ).

Model	$L_{ppI}$	$L_{ppII}$	$L_{ppIII}$	$L_{CNO}$	$L_{Gravity}$
B92R	0.86976	0.10805	0.00911	0.01335	-0.00028
A11R	0.87227	0.10823	0.00912	0.01072	-0.00034
B89R	0.87490	0.10436	0.00881	0.01221	-0.00039
BAR1	0.87661	0.10445	0.00881	0.01065	-0.00053
BAR2	0.87491	0.10616	0.00895	0.01037	-0.00039
BAR3	0.87047	0.10986	0.00926	0.01097	-0.00053

但如果每个都偏高，其实不会影响每个所占比例。



在理论模型中会导致一种结果：  
假如每个反应截面都偏高或低一点，一点也不影响中微子流量和总光度 $L_{\odot}$ 。

$pp$ $\times 10^{10}$	$pep$ $\times 10^8$	$hep$ $\times 10^3$	${}^7\text{Be}$ $\times 10^9$	${}^8\text{B}$ $\times 10^6$	${}^{13}\text{N}$ $\times 10^8$	${}^{15}\text{O}$ $\times 10^8$	${}^{17}\text{F}$ $\times 10^6$
$6.06^{+0.02a}_{-0.06}$	$1.6 \pm 0.3^b$	...	$4.84 \pm 0.24^a$	$5.21 \pm 0.27^c$	...	...	...
$5.97^{+0.04}_{-0.03}$	$1.448 \pm 0.013$	$19^{+12}_{-9}$	$4.80^{+0.24}_{-0.22}$	$5.16^{+0.13}_{-0.09}$	$\leq 13.7$	$\leq 2.8$	$\leq 85$
$6.1 \pm 0.5$	$1.39 \pm 0.19$	$< 220$	$4.99 \pm 0.11$	$5.68^{+0.39}_{-0.41}$	$6.6^{+2.0}_{-0.9}$		

**M1** 5.96      1.448      9.76      4.90      5.66      4.94      4.29      5.43

**M2** 5.95      1.433      9.66      4.74      5.19      4.21      2.09      5.56  
5.98      1.435      9.59      4.81      5.20      4.10      2.02      5.39

**M3** 5.97      1.441      9.67      4.98      5.58      4.33      2.16      5.75  
 6.00      1.450      9.69      5.03      5.68      4.40      2.19      5.86

M1与M3有相同的 $\Phi(pp)$ ,  $\Phi(ppe)$ ,  $\Phi(hep)$ ,  $\Phi({}^7\text{Be})$ ,  $\Phi({}^8\text{B})$ ，但它们的S因子不同。

${}^3\text{He}({}^3\text{He}, 2p){}^4\text{He}$  不产生中微子，但  $S_{33}$  能改变预测流量。

	$pp$ $\times 10^{10}$	$pep$ $\times 10^8$	$hep$ $\times 10^3$	${}^7\text{Be}$ $\times 10^9$	${}^8\text{B}$ $\times 10^6$	${}^{13}\text{N}$ $\times 10^8$	${}^{15}\text{O}$ $\times 10^8$	${}^{17}\text{F}$ $\times 10^6$
	$6.06^{+0.02a}_{-0.06}$	$1.6 \pm 0.3^b$	...	$4.84 \pm 0.24^a$	$5.21 \pm 0.27^c$	...	...	...
	$5.97^{+0.04}_{-0.03}$	$1.448 \pm 0.013$	$19^{+12}_{-9}$	$4.80^{+0.24}_{-0.22}$	$5.16^{+0.13}_{-0.09}$	$\leq 13.7$	$\leq 2.8$	$\leq 85$
	$6.1 \pm 0.5$	$1.39 \pm 0.19$	$< 220$	$4.99 \pm 0.11$	$5.68^{+0.39}_{-0.41}$	$6.6^{+2.0}_{-0.9}$		
<b>M1</b>	5.96	1.448	9.76	4.90	5.66	4.94	4.29	5.43
	5.95	1.433	9.66	4.74	5.19	4.21	2.09	5.56
<b>M2</b>	5.98	1.435	9.59	4.81	5.20	4.10	2.02	5.39
<b>M3</b>	5.97	1.441	9.67	4.98	5.58	4.33	2.16	5.75
	6.00	1.450	9.69	5.03	5.68	4.40	2.19	5.86

Bergstrom 2016  $\phi({}^8\text{B}) = 5.16$

Borexino 2018  $\phi({}^8\text{B}) = 5.68$ .

模型的  ${}^8\text{B}$  中微子流量差异不是来自  $S_{17}$ ，而是来自  $S_{11}$ ,  $S_{33}$  的不确定。

4、那是不是理论上就没办法区分了呢？

核反应率

$$R_{12} = \frac{n(1)n(2)}{1 + \delta_{12}} \langle \sigma v \rangle_{12}$$

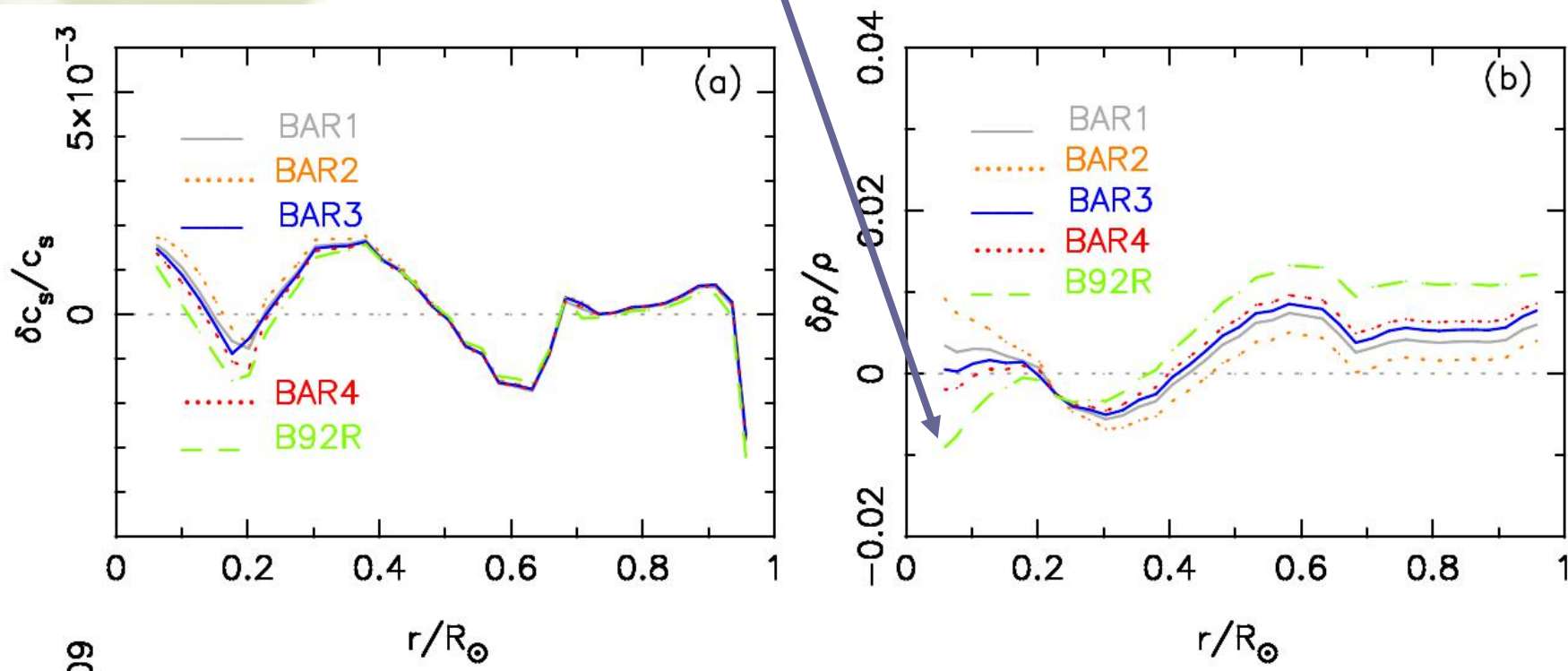
截面与速度乘积

$$\langle \sigma v \rangle = \left( \frac{8}{\pi \mu (kT)^3} \right)^{1/2} \int_0^{\infty} \sigma E e^{-\frac{E}{kT}} dE。$$

$$\sigma(E) = \frac{S(E)}{E} e^{-2\pi\eta(E)}。$$

如果我们高估核反应截面，太阳光度恒定必然导致模型核反应区密度偏低。反之则偏高。

密度  $\rho \propto n$ 。高估核反应截面反映在模型研究上就是密度偏小。反之是密度偏大。



19

中微子流量 + 日震学 = 核反应截面  
 或者  
 日震学 + 核反应截面 = 中微子流量



Bergstrom 2016  $\Phi(^8B) = 5.16$

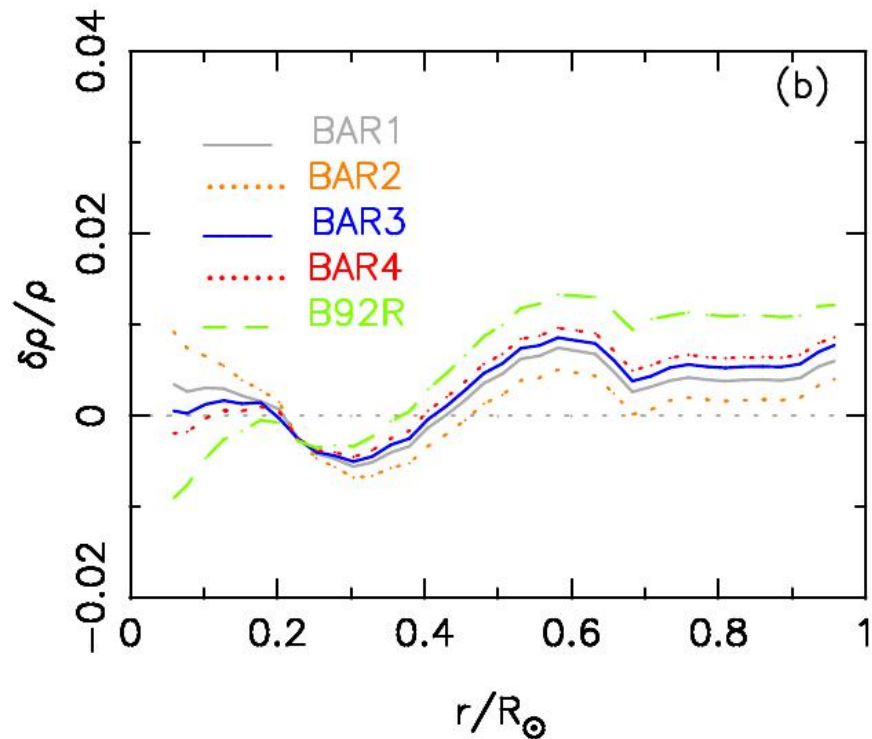
Borexino 2018  $\Phi(^8B) = 5.68$ .

5.95	1.433	9.66	4.74	5.19	4.21	2.09	5.56
5.98	1.435	9.59	4.81	5.20	4.10	2.02	5.39
5.97	1.441	9.67	4.98	5.58	4.33	2.16	5.75
6.00	1.450	9.69	5.03	5.68	4.40	2.19	5.86

四个模型的  
 $S_{17}$ 相同

利用  
日震学+核反应截面=中微子流量  
发现

Bergstrom 2016的 $\Phi(^8B)$ 不被  
支持。或者 $S_{17}$ 被高估，且  
Borexino的 $\Phi(^8B)$ 不被支持。



## 5、 $^{13}\text{N}$ , $^{15}\text{O}$ , $^{17}\text{F}$ 中微子流量能限制C、N、O元素丰度吗?

能，但得把精度提高。

GS98, Magg22, Caffau11模型的 $\Phi(\text{CN})$ 流量差只有 $\sim 2\%$ 。

Table 3. Measured and Predicted Solar Neutrino Fluxes ( $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ ).

model	$T_c$ ( $10^6 \text{ K}$ )	$\rho_c$ ( $\text{g cm}^{-3}$ )	$pp$ $\times 10^{10}$	$pep$ $\times 10^8$	$hep$ $\times 10^3$	$^7\text{Be}$ $\times 10^9$	$^8\text{B}$ $\times 10^6$	$^{13}\text{N}$ $\times 10^8$	$^{15}\text{O}$ $\times 10^8$	$^{17}\text{F}$ $\times 10^6$
Measured	...	...	$6.06^{+0.02a}_{-0.06}$	$1.6 \pm 0.3^b$	...	$4.84 \pm 0.24^a$	$5.21 \pm 0.27^c$	...	...	...
B16 <sup>d</sup>	...	...	$5.97^{+0.04}_{-0.03}$	$1.448 \pm 0.013$	$19^{+12}_{-9}$	$4.80^{+0.24}_{-0.22}$	$5.16^{+0.13}_{-0.09}$	$< 13.7$	$< 2.8$	$< 85$
Borexino <sup>e</sup>	...	...	$6.1 \pm 0.5$	$1.39 \pm 0.19$	$< 220$	$4.99 \pm 0.11$	$5.68^{+0.39}_{-0.41}$	$6.6^{+2.0}_{-0.9}$		
BAR1	15.633	151.8	5.95	1.433	9.66	4.74	5.19	4.21	2.09	5.56
BAR2	15.615	150.6	5.98	1.435	9.59	4.81	5.20	4.10	2.02	5.39
BAR3	15.666	152.5	5.97	1.441	9.67	4.98	5.58	4.33	2.16	5.75
BAR4	15.680	153.0	6.00	1.450	9.69	5.03	5.68	4.40	2.19	5.86
BAR3opal	15.695	152.5	5.97	1.439	9.64	5.03	5.73	4.43	2.21	5.91
BAR3c	15.685	152.4	5.98	1.442	9.67	5.01	5.67	4.25	2.12	5.67
BAR3g	15.689	152.8	5.98	1.442	9.66	5.05	5.73	4.55	2.27	6.07

# 总结

- 1、太阳模型—元素丰度问题2003-2023年没有解决，可以预见争论似乎会更激烈。
- 2、转动效应会改变太阳内部的物质分布，提高恒星表面的He丰度，影响太阳的热平衡结构，从而影响模型与观测的比较结果。
- 3、精确测定太阳中微子肯定能帮助我们解决太阳模型—元素丰度问题，但现在的精度不太够。
- 4、单独的日震学或中微子并不能确定太阳的内部结构。两者具有非常好的互补性，二者结合能很好地排除其他不确定性。

谢谢

**Table 2.** Some of the Nuclear Cross-section Factors  $S(0)$  Used in Different Models (keV Barns).

Reaction	B92's <sup>a</sup>	A11's <sup>b</sup>	B89's <sup>c</sup>	BAR1	BAR2	BAR3	BAR4
${}^1\text{H}(p, e^+\nu_e){}^2\text{H}$ ( $\times 10^{-22}$ )	$4.00^{+0.06}_{-0.04}$	$4.01 \pm 0.04$	4.07	4.07	4.13	4.07	4.07
${}^3\text{He}({}^3\text{He}, 2p){}^4\text{He}$ ( $\times 10^3$ )	5.00	$5.21 \pm 0.27$	5.15	5.15	5.15	5.05	5.00
${}^3\text{He}({}^4\text{He}, \gamma){}^7\text{Be}$	0.533	$0.56 \pm 0.03$	0.54	0.54	0.56	0.56	0.56
${}^{12}\text{C}(p, \gamma){}^{13}\text{N}$	1.45	$1.34 \pm 0.21$	1.45	1.34	1.34	1.34	1.34
${}^{13}\text{C}(p, \gamma){}^{14}\text{N}$	5.50	$7.6 \pm 1$	5.50	7.6	7.6	7.6	7.6
${}^{14}\text{N}(p, \gamma){}^{15}\text{O}$	3.32	$1.77 \pm 0.20^d$	3.32	1.77	1.77	1.77	1.77
${}^{16}\text{O}(p, \gamma){}^{17}\text{F}$	9.4	$10.6 \pm 0.8$	9.4	10.6	10.6	10.6	10.6
${}^1\text{H}(p + e^-, \nu_e){}^2\text{H}$	Eq.(17) <sup>e</sup>	Eq.(17)	Eq.(17)	Eq.(17)	Eq.(17)	Eq.(17)	Eq.(17)
${}^7\text{Be}(e^-, \nu_e){}^7\text{Li}$	Eq.(18) <sup>f</sup>	Eq.(18)	Eq.(18)	Eq.(18)	Eq.(18)	Eq.(18)	Eq.(18)
${}^7\text{Be}(p, \gamma){}^8\text{B}$ ( $\times 10^{-3}$ )	22.4	$20.8 \pm 1.6$	24.3	22.4	22.4	22.4	22.4
${}^3\text{He}(p, e^+\nu_e){}^4\text{He}$ ( $\times 10^{-20}$ )	10.35 <sup>g</sup>	10.35	10.35	10.35	10.35	10.35	10.35

**Notes.**<sup>a</sup>These factors are given in Bahcall & Pinsonneault (1992).<sup>b</sup>Given by Adelberger et al. (2011).<sup>c</sup>Given by Bahcall & Ulrich (1988) and Bahcall (1989).