

外壳内金属丰度增加的非均匀太阳模型*

杨家艳 李 焱 许华鳌

(中国科学院云南天文台,昆明 650011;中国科学院国家天文观测中心,北京 100012)

摘要 采用最新的不透明度、物态方程及核反应速率,研究了在对流外壳内重元素丰度增加的太阳模型。与以前的低 Z 模型不同(低 Z 模型通常采用非常低的中心金属丰度来有效地降低中微子流量),主要研究了当太阳对流区内的金属丰度比中心适当增加时对太阳内部结构和太阳 p 模式振动的影响。计算结果表明,与标准太阳模型相比,金属丰度增加的模型对流区所包含的质量变小,但对流区底部边界更深入,边界处温度略微下降,内核声速变高而外壳内声速变低。研究了在不同的演化阶段受到重元素污染的模型,结果表明何时受到污染对演化到太阳年龄的模型性质影响很小。受污染模型的表面氦丰度明显减小,如果仔细调整对流区内重元素的增加值,氦丰度可以同日震学测定的值相吻合。由模型计算得到的 p 模式振动频率值比标准太阳模型得到的值要低大约 $10 \mu\text{Hz}$,与观测结果符合得更好。

关键词 太阳结构 太阳演化 太阳振荡

太阳像一个巨大的声学谐振腔,约束了在其中传播的声波,形成驻波形式的振荡。人们作了巨大的努力来观测这些振动模式,振动频率的测定也越来越精确。最近,这些高质量的观测数据被反过来用于探测太阳的内部结构,例如对流区底部的位置,外壳中的氦丰度以及声速作为半径的函数等,都可以从观测到的高精度的振动频率通过反演得到。这就给太阳模型的构造加了严格的限制,并给输入的不透明度、物态方程等提供了决定性的检验。

在通常所说的标准太阳模型中,有一个重要的假设,即认为除了中心核反应区域外,整个太阳内部的化学组成是均匀的,并且在整个演化过程中保持为常数。但是标准太阳模型存在一个严重的问题,即理论预测的太阳中微子流量比不同的实验装置探测到的流量要大 2 或 3 倍^[1]。低 Z 模型最初的目的就是要降低理论预测的中微子流量^[2]。与标准太阳模型相反,低 Z 模型考虑了太阳内部化学组分分层的可能性。一个处于主序以前的恒星是化学组成均匀的,因为它在 Hayashi 线阶段的演化中经历了充分地对流。然而,当恒星继续演化时,它可能会俘获一些行星际物质。Joss^[3]提出,恒星表面可能会由于彗星物质的落入而使重元素丰度不断增加。Levy 和 Ruzmaikina^[4]研究了在太阳形成过程中尘埃和气体分离的效应,他们指出,由于湍流运动使尘埃物质聚集成较大的颗粒,这些颗粒将会从分子云的上层向中心沉淀,并沉没到

2000-03-20 收稿,2000-06-05 收修改稿

* 国家自然科学基金(批准号:19625306,19833040)和国家“攀登计划”资助项目

原行星云盘中,最终由于云盘黏滞吸积的作用而落到恒星上. 对于太阳来说,由于光球层下有一个对流区,落人的物质将被混合到整个对流区内. 由于行星际尘埃物质的金属丰度比太阳物质高得多,因此太阳对流区内的重元素丰度将增加.

低 Z 模型能给出较低的中微子流量,但通常会得到一个较浅的对流区和非常低的初始氦丰度. 而且,这种模型计算得到的 p 模式振动频率与观测的符合比均匀的标准太阳模型要差. 因此,最近几年来低 Z 模型被认为是不现实的.

然而,许多证据都表明太阳的外壳肯定被行星际物质污染过,只不过污染物的数量也许没有以前的低 Z 模型所要求的那么多. 在本文中,我们研究了太阳外壳内的金属丰度有适当提高的情况,采用了最新的不透明度、物态方程及核反应速率,并且我们的重点不在太阳中微子问题,而在于研究这种模型对太阳的内部结构和 p 模式振动的影响.

1 物理假设和计算模型

我们的太阳演化模型计算采用的是最初由 Kippenhahn 等人^[5]所写的并经过 Stix 等人^[6,7]更新的演化程序,并作了进一步的改进. 对流能量传输用标准的混合长理论来处理,对流区的边界用 Schwarzschild 判据确定^[8]. 核反应速率来自 Caughlan 和 Fowler 给出的表格^[9]. 物态方程是根据 Debye-Hückel 近似修正的物态方程,对此 Stix 和 Skaley^[7]有详细的描述. 在高温区域采用了 OPAL 不透明度^[10],在太阳外壳的外层部分采用了 Alexander 和 Ferguson^[11]的低温不透明度,包括了分子的贡献. 这两组不透明度数据在温度为 8 000 K 附近被接合在一起,在接合点处它们彼此符合得非常好. 我们的太阳模型包括 23 000 多个质量分层,用了 210 个时间步从零龄主序演化到现在的太阳年龄.

以前的低 Z 模型通常采用非常低的中心金属丰度,以便降低计算得到的中微子流量. 然而,观测表明太阳表面的元素丰度是正常的星族 I 恒星的丰度^[12,13]. 太阳中微子实验也对其金属丰度的分布提供了严格的限制,即,太阳内部的金属丰度不应该与它的表面观测值偏离太远^[14]. 相应地,我们选择初始金属丰度为 $Z_0 = 0.01$,这个值比其他许多研究者的选择值^[2,15]要高得多. 在太阳系形成的初期,太阳被认为是被一个由稠密的气体和尘埃物质组成的原行星云盘包围着. 早期的太阳光度很大,物质在辐射压的驱动下逃逸出去. 同时,随着行星的逐步形成,行星际空间逐渐变成今天这样接近真空的状态. 因此,如果有某些行星际物质落到太阳上,我们宁愿相信这一事件发生在太阳演化的早期阶段. 尤其是当原始太阳还在被光学厚的尘埃云包裹着的阶段,尘埃由于比重大而更快地沉降到太阳表面,使得太阳外壳内的重元素丰度不同于原始的太阳系星云. 行星际物质的吸积过程可能是相当复杂的,最近的观测表明,吸积和逃逸过程可能同时存在. 为简单起见,假设太阳在它早期演化的某一时刻俘获了一定数量的完全由重元素组成的物质,导致它外壳内的金属丰度突然增加到观测值 $Z = 0.02$. 外壳内的金属丰度逐渐增加或在一段时间内增加较大的情况前人已经处理过. 落到太阳表面的行星际物质立刻被对流运动混合到整个对流区内,于是太阳就由两个部分组成:金属丰度增加的外壳和金属丰度为初始值的内核,这两个部分以对流区的底部作为边界.

假设模型的初始质量为 $f \times M_{\odot}$,在受到金属元素污染前的对流区的质量为 $k \times f \times M_{\odot}$. 在俘获了假设完全由重元素组成的行星际物质以后,模型的质量增加到 $1 M_{\odot} = 1.99 \times 10^{33} \text{ g}$,同时对流区内的金属丰度由 Z_0 增加到 Z . 通过简单的推导可得出

$$f = \frac{1 - Z}{1 - Z + k(Z - Z_0)}. \quad (1)$$

2 演化模型的性质

我们计算了 3 个不同的演化模型。模型 A 是标准太阳模型, 它没有考虑金属元素丰度增加的效应。模型 B 和 C 是金属元素增加的模型。对于模型 B, 我们假设金属元素的增加发生在零龄主序时, 对于模型 C 则假设这一事件发生在太阳年龄为 10 亿年时。这样做的目的是检验吸积的具体过程对目前太阳结构的影响。正如下面的结果所显示的那样, 发生在早期的吸积过程的方式对现今的太阳模型的影响是很小的, 因而简单的近似不会带来严重的误差。初始氦丰度 Y_0 和混合程长度与压强标高的比值 α 经过反复调整, 以使得模型演化到现在的太阳年龄(4.566 Ga)时, 光度正好为太阳光度($3.844 \times 10^{26} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$), 半径正好为太阳半径($6.96 \times 10^{10} \text{ cm}$)^[16]。与此同时, 污染前对流区质量与整个模型质量的比值 k 也就确定了。

表 1 给出了 3 个模型的基本参数, 其中 Y_0 和 Z_0 分别是初始的氦丰度和金属丰度。对于演化到太阳年龄的模型, Y_c 和 Z_c 是中心的氦丰度和金属丰度, T_c 和 ρ_c 是中心温度和密度, M_{bc} 是对流区底部以内部分的质量, R_{bc} 和 T_{bc} 是对流区底部的半径和温度。 Φ_{Cl} 和 Φ_{Ga} 分别表示由 Cl 探测器和 Ga 探测器探测到的太阳中微子流量, 并以太阳中微子单位(SNUs)为单位。

表 1 标准太阳模型及金属丰度增加的太阳模型的性质

参数	模型 A	模型 B	模型 C
Y_0, Z_0	0.264, 0.02	0.203, 0.01	0.202, 0.01
α	1.934	1.933	1.926
K		0.025 1	0.023 6
$1 - f$		0.000 261	0.000 245
Y_c, Z_c	0.646, 0.02	0.563, 0.01	0.563, 0.01
$T_c(10^6 \text{ K})$	15.62	14.79	14.79
$\rho_c/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	149.7	141.4	141.5
$M_{bc}(M_\odot)$	0.975	0.978	0.978
$R_{bc}(R_\odot)$	0.714	0.711	0.712
$T_{bc}(10^6 \text{ K})$	2.237	2.174	2.168
$\Phi_{Cl}(\text{SNUs})$	7.99	3.17	3.17
$\Phi_{Ga}(\text{SNUs})$	140.32	104.87	104.88

从表 1 可以看出, 落入太阳的质量 $1 - f$ 约为 $0.000 25 M_\odot$, 大约相当于土星的质量, 只不过完全由重元素组成。这个值(即 10^{29} g)比某些文献的计算值偏大, 例如 Joss^[3]给出的估算值为 10^{26} g 。但他是按照现在的彗星物质俘获率来估算的, 而在太阳系形成的早期, 太阳周围弥漫着浓密的行星际物质, 那时的俘获率应比现在大得多, 可望与我们的计算值相比拟。如果我们以太阳表面的金属丰度值 0.02 作为行星际尘埃的金属丰度的下限, 那么要提供上述所需俘获的重元素的行星际尘埃的质量应为 $0.012 5 M_\odot$, 这个值可以与太阳系原行星星云的质量 $0.02 M_\odot$ ^[17]相比拟。因此, 我们不能排除太阳外壳的金属丰度由于行星际介质的污染而增加到我们所取数值范围内的可能性。

有趣的是, 我们可以看出, 金属丰度增加的模型 B 和 C 的对流区底部的位置要比标准太阳模型 A 稍稍深入一些, 与最近日震学的测定^[18, 19]符合得比较好。这正好与以前的研究者所

得出的结论相反,在他们的工作中金属丰度增加的模型得到更浅的对流区^[15,20,21]。然而,我们的模型 B 和 C 的对流区底部的温度比标准太阳模型 A 稍微低一些,这可以通过检查对流区内的质量来理解。从表 1 可以看出,既然模型 A 的对流区包含的质量比模型 B 和 C 的多,而厚度较小,则模型 A 的对流外壳密度一定较大,因此比模型 B 和 C 的对流外壳更加不透明,这导致了模型 A 的对流区底部温度升高。

从表 1 还可以看出,模型 B 和 C 给出非常低的 Cl 或 Ga 探测器所能探测到的中微子流量,以及非常低的初始氦丰度,这一结果与以前的低 Z 模型给出的结果类似^[2,15]。其原因主要是由于模型 B 和 C 的中心氦丰度明显比标准太阳模型 A 要低,而这个值对高能中微子流量有强烈的影响。若进一步减小中心重元素丰度,中微子流量还可以更低,但初始氦丰度也将进一步降低,因此,取非常低的中心重元素丰度不是解决太阳中微子问题的一个可行的办法。

3 个模型计算的演化轨迹如图 1 所示。从图中可以看出,模型 B 的演化轨迹接近于模型 A,对于给定的有效温度,光度仅是稍微高一些。另一方面,模型 C 在俘获行星际介质之前有非常高的有效温度,当它的对流外壳中金属丰度增加以后,恒星调整其结构并转而向低有效温度的方向演化。这一调整阶段消耗的时间约为 6 亿年,然后其演化轨迹就与模型 B 非常一致。这一特征与标准太阳模型的演化非常不同,标准模型总是沿着有效温度和光度都增加的方向演化的。如果行星际介质对太阳的污染发生过多次,每一次都导致外壳金属丰度的明显增加以及随后对内部结构的调整,那么演化轨迹将显示出相应数目的之字形图案。然而,从表 1 中可以看出模型 B 和 C 在演化到太阳年龄时的性质几乎是相同的。这一结果告诉我们,如果太阳在其演化的早期受到污染,那么污染发生的时刻以及方式只是对其早期演化轨迹有一些影响,而对现在的物理性质的影响是可以忽略的。

在 3 个模型的演化过程中,模型 B 和 C 在对流区内的质量总是比模型 A 小,如图 2 所示。对于模型 C 来说,在外壳内金属丰度增加的一瞬间,对流区内的质量明显减小,然后又逐渐增加而接近模型 B 的相应值。另一方面,模型 C 的对流区底部的温度又是以一种不同的方式来响应外壳内金属丰度的增加。在模型 C 外壳金属丰度增加的一瞬间,它的对流区底部温度有

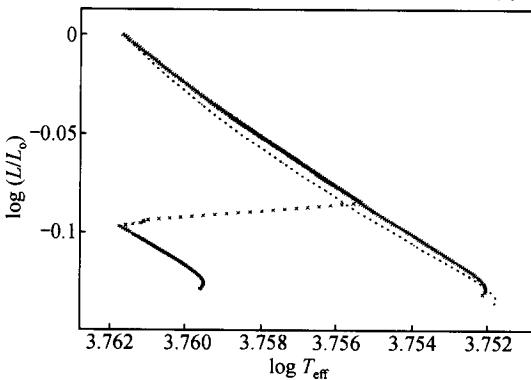


图 1 标准太阳模型和金属丰度增加的模型在 Hertzsprung-Russell 图中的演化轨迹

点示标准太阳模型 A 的演化轨迹, × 示金属丰度增加的模型 B 的演化轨迹,由 * 和 × 组成的之字形图案示金属丰度增加的模型 C 的演化轨迹

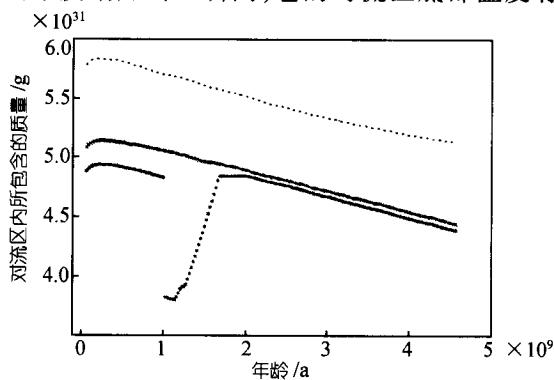


图 2 模型 A, B 和 C 在演化过程中对流区内所包含的质量变化

点示标准太阳模型 A, × 示金属丰度增加的模型 B, * 示金属丰度增加的模型 C。图中横坐标示年龄,纵坐标示对流区内所包含的质量

一个突然的跳跃增加,然后又逐渐增加以达到模型 B 的相应值.

图 3 和 4 分别表示演化到太阳年龄的模型 B 和 C 相对于模型 A 的温度差和压强差的轮廓. 可以看出,在整个恒星内部,模型 B 和 C 的温度都比模型 A 要低大约 4%~9%,而在核反应区内模型 B 和 C 的压强比模型 A 高大约 0%~4%,在中间的辐射平衡区和外层的对流区内的压强比模型 A 低大约 0%~16%. 另外还有一个有趣的特征是,在对流区内,模型 B 和 C 相对于模型 A 的压强差和温度差几乎为常数.

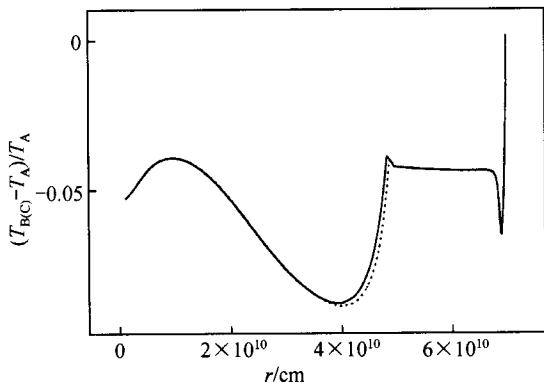


图 3 标准太阳模型和金属丰度增加的模型之间的温度差

实线示模型 B 相对于模型 A 的温度差,虚线示模型 C 相对于模型 A 的温度差

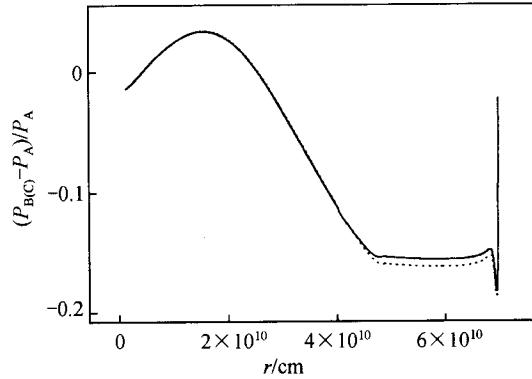


图 4 标准太阳模型和金属丰度增加的模型之间的压强差

实线示模型 B 相对于模型 A 的压强差,虚线示模型 C 相对于模型 A 的压强差

3 p 模式振动频率

将上述 3 个演化到太阳年龄的模型输入到由 Li^[22]编写并经过更新的线性绝热振动计算程序中,我们计算了球谐指数 $l = 0 \sim 10, 15, 20$ 时的 p 模式振动频率. 高 l 值的振动模式受非绝热效应的影响很严重,因此在本文中没有考虑. 计算中采用了灰大气模型.

在图 5 中,我们给出了计算的频率值与 Libbrecht 等人^[23]得到的观测数据的差别. 可以看出,模型 B 和 C 给出的 p 模式振动频率比模型 A 更好地符合观测值. 这是一个重要的结论,与以前的低 Z 模型得到的结论完全相反. 既然我们的金属丰度增加的模型并不一定给出更差的 p 模式振动频率,那么反对非均匀太阳模型的一个主要的理由也许将不再成立.

我们还发现,观测和计算的频率差值的趋势对 3 个模型来说都是类似的. 模型 B 和 C 的 p 模式振动频率彼此符合得很好,而标准太阳模型 A 则整体上要比模型 B 和 C 的值高大约 10 μHz . 这一点可以通过图 6 来理解. 图 6 是模型 B 和 C 相对于模型 A 的声速差的曲线. 从图中可以看出,模型 B 和 C 相对于模型 A 来说,在核反应区声速增加了大约 0%~2%,而在相邻的外部辐射平衡区内,声速下降了大约 0%~2%. 在对流区内,3 个模型的声速几乎相等. 我们都知道声速在太阳的核心区比在外壳中大得多,因此声波穿越太阳外壳时将比穿越核区花费更多的时间. 由此导致的结果是,声波穿越模型 B 和 C 的核心区时由于声速高而比模型 A 的情况节约的时间小于穿越外壳时由于声速低而多耗费的时间,净效应就是增加了 p 模式振动波在整个太阳内部传播所需要的时间,因此本征频率减小.

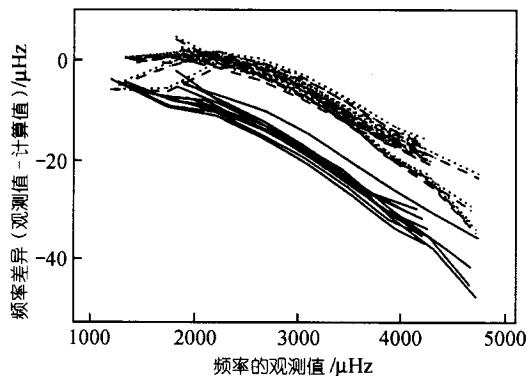


图 5 标准太阳模型和金属丰度增加的太阳模型计算得到的 p 模式振动频率值与观测值的比较
实线示标准太阳模型 A, 虚线和点线分别示模型 B 和 C.
图中各本征模式的球谐指数 l 分别为 $l = 0 \sim 10, 15, 20$

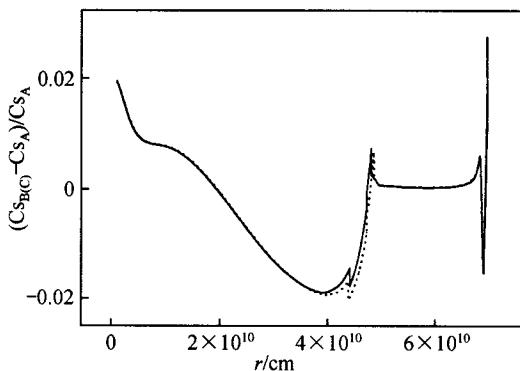


图 6 标准太阳模型和金属丰度增加的模型之间的声速差
实线示模型 B 相对于模型 A 的声速差, 点线示模型 C 相对于模型 A 的声速差

4 结论和讨论

低 Z 模型主要是由于有 3 个特征与观测不符而被放弃的: 它们的对流区厚度比日震学测定的值要小, 它们的 p 模式振动频率与观测的符合比标准太阳模型差, 以及它们通过使模型在现在的太阳年龄达到太阳的半径和光度的观测值而确定出的初始氦丰度值太小。然而, 又的确有许多证据都支持太阳曾经受到重元素污染, 而使得对流区内的金属丰度比核反应区高的假设。

我们使用最新的不透明度、物态方程及核反应速率, 并对模型作了一些改进, 重新研究了这种可能性。我们没有采用非常低的中心金属丰度, 这种丰度过去常被用来使理论预测的中微子流量明显减小。相反地, 我们计算了中心金属丰度正好为表面值的一半的模型。我们惊奇地发现, 这种金属丰度增加的模型能够得到足够厚的对流区, 厚度与日震学测定的结果符合得比较好。另外, 我们的金属丰度增加的模型得出的 p 模式振动频率与观测的符合程度也有了改善, 甚至比化学组成均匀的标准太阳模型符合得更好。

初始氦丰度值的改善没有上述两个方面那么明显。通过调整模型使之在太阳年龄达到正确的太阳光度和半径之后, 低 Z 模型给出了非常低的初始氦丰度, 例如, 在我们的模型和其他作者的模型中, Y_0 大约为 0.2, 这个值甚至比宇宙原初(大爆炸)时的值还要低。我们采用不同的中心金属丰度计算了其他一些模型, 发现初始氦丰度的值与中心金属丰度有关, 例如, 如果中心金属丰度取为 0.004, 那么初始氦丰度将只有 0.143。这是一个有趣的结果。日震学的研究表明, 太阳外壳中的氦丰度约为 0.24^[24,25], 小于标准太阳模型给出的值 0.27。因此人们引入了元素扩散和沉淀, 以便在演化过程中减小外壳中的氦丰度, 并且这种模型能给出与观测符合得更好的 p 模式振动频率^[26]。现在我们找到了另外一种途径来改善太阳外壳中氦丰度的计算值和观测值之间的差别。如果我们选取的中心金属丰度比标准太阳模型的值 0.02 低, 但又比我们在本文中采用的值 0.01 高, 那么根据在上面讨论过的原因, 我们有希望得到一个大一点的初始氦丰度。因此, 我们可以调节中心金属丰度, 以使得初始氦丰度符合日震学测定的值。应该注意的是, 考虑氦元素扩散的模型是把原来在太阳外壳内的氦带到中心, 在目前的太

阳内部留下一个氦元素丰度变化的轮廓;而我们的做法则与此不同,我们在太阳演化的最初就减小了整个内部的氦丰度.

Fukugita 和 Hata^[14]基于太阳中微子实验的研究给太阳内部的金属丰度分布提供了一个重要的约束,即太阳核心和太阳外壳中的金属丰度的比值的范围为 0.4~1.4,最可能的值在 0.8 附近. 这清楚地表明,太阳中心的金属丰度可以甚至更可能比表面的金属丰度低.

总之,根据上述讨论,我们认为,在对流区内金属丰度增加的太阳模型依旧是具有生命力的,可以为目前的太阳模型所不能解决的一些问题提供一个解.

致谢 感谢黄润乾、罗国权和韩占文教授,与他们的有益讨论使作者受益匪浅.

参 考 文 献

- 1 Bahcall J N. *Neutrino Astrophysics*. Cambridge: Cambridge Univ Press, 1989. 3
- 2 Bahcall J N, Ulrich R K. Solar neutrinos, III. Composition and magnetic-field effects and related inferences. *ApJ*, 1971, 170: 593~603
- 3 Joss P C. Are stellar surface heavy-element abundances systematically enhanced? *ApJ*, 1974, 191: 771~774
- 4 Levy E H, Ruzmaikina T V. The possibility of forming an inhomogeneous sun and the solar neutrino deficit. *ApJ*, 1994, 431: 881
- 5 Kippenhahn R, Weigert A, Hofmeister E. Stellar structure and evolution. *Meth Comp Phys*, 1967, 7: 129~140
- 6 Stix M. *The Sun*. Berlin Heidelberg: Springer, 1989. 128~175
- 7 Stix M, Skaley D. The equation of state and the frequencies of solar p modes. *A&A*, 1990, 232: 234~238
- 8 Cox J P, Giuli R T. *Principles of Stellar Structure*. New York: Gordon and Breach, 1968. 58~72
- 9 Caughlan G R, Fowler W A. Thermonuclear reaction rates. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 1988, 40: 283~287
- 10 Iglesias C A, Rogers F J. Updated OPAL opacities. *ApJ*, 1996, 464: 943~965
- 11 Alexander D R, Ferguson J W. Low-temperature rosseland opacities. *ApJ*, 1994, 437: 879~891
- 12 Anders E, Grevesse N. Abundances of the element-meteoritic and solar. *Geochim Cosmochim Acta*, 1989, 53: 197~215
- 13 Grevesse N, Noels A. Origin and Evolution of the Elements. In: Prantzos N, Vangioni E, Cassé M, eds. Cambridge: Cambridge Univ Press, 1993. 15~18
- 14 Fukugita M, Hata N. Metal abundance in the solar interior. *ApJ*, 1998, 499: 513~518
- 15 Christensen-Dalsgaard J, Gough D O, Morgan J G. Dirty solar models. *A&A*, 1979, 73: 121~128
- 16 Dar A, Shaviv G. Standard solar neutrinos. *ApJ*, 1996, 468: 933~947
- 17 Safronov V S, Ruzmaikina T V. Protostars and Planets. In: Black D C, Mathews M S, eds. Tucson: Univ Arizona Press, 1985. 959~964
- 18 Basu S, Anita H M. Nonasymptotic helioseismic inversion for solar structure. *J Phys Astron*, 1994, 15: 143~148
- 19 Guzik J A, Cox A N. Using solar p-modes to determine the convection zone depth and constrain diffusion-produced composition gradients. *ApJ*, 1993, 411: 394~401
- 20 Christensen-Dalsgaard J, Gough D O. Is the sun helium-deficient? *Nature*, 1980, 288: 544~547
- 21 Bahcall J N, Ulrich R K. Solar models, neutrino experiments, and helio-seismology. *Rev Mod Phys*, 1988, 60: 297~305
- 22 Li Y. Bisystem oscillation theory of stars, I. Linear theory. *A&A*, 1992, 257: 133~144
- 23 Libbrecht K G, Woodard M F, Kaufman J M. Frequencies of solar oscillations. *ApJS*, 1990, 74: 1 129~1 149
- 24 Vorontsov S V, Baturin V A, Pamyatnykh A A. Seismological measurement of solar helium abundance. *Nature*, 1991, 349: 49~51
- 25 Kosovichev A G, GONG 94: Helio- and Astero-seismology from the Earth and Space. Ulrich R K, Rhodes E J, Däppen W, eds. San Francisco: ASP Conf Ser 76, 1995. 89~93
- 26 Bahcall J N, Pinsonneault M H, Basu S, et al. Are standard solar models reliable? *Phys Rev Lett*, 1997, 78: 171~174