

束缚电子对 ${}^7\text{Be}$ 太阳中微子流量的影响

叶子飘^{1,2)} 戴长江³⁾ 何会林³⁾

¹⁾中国科学院高能物理研究所宇宙线与高能天体物理开放实验室,北京 100039)

²⁾肇庆学院物理系,肇庆 526061)

³⁾中国科学院高能物理研究所,北京 100039)

(2001 年 5 月 8 日收到,2001 年 8 月 23 日收到修改稿)

计算了在太阳核心从 $R=0$ 到 $R=0.125R_{\odot}$ 处 ${}^7\text{Be}$ 存在 1 个或 2 个 K 壳层束缚电子的概率约为 4.54% . 这表明 ${}^7\text{Be}$ 原子俘获的电子 95.46% 是自由电子. 假定太阳中微子自产生后没有发生任何改变,并且太阳的其他参量不改变,那么 ${}^7\text{Be}$ 和 ${}^8\text{B}$ 太阳中微子流量的理论计算值分别约为 4.04×10^9 和 $6.12 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. 这将进一步扩大 ${}^8\text{B}$ 太阳中微子与 super Kamiokande 太阳中微子实验测量值之间的差距.

关键词: K 壳层束缚电子, 电子俘获概率, ${}^7\text{Be}$ 太阳中微子流量, ${}^8\text{B}$ 太阳中微子流量

PACC: 9660K, 9660, 1460G

1. 引 言

在太阳内部条件下,在质子-质子(pp)链中, ${}^7\text{Be}$ 原子或离子被消耗的主要反应是其电子俘获反应 ${}^7\text{Be}(e^-, \nu_e) \rightarrow \text{Li}$. 它的反应速度约为 ${}^7\text{Be}(p, \gamma) \rightarrow {}^8\text{B}$ 核反应的 10^3 倍. 太阳核心中 ${}^7\text{Be}$ 的含量可以由 ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma) \rightarrow \text{Be}$ 和 ${}^7\text{Be}(e^-, \nu_e) \rightarrow \text{Li}$ 核反应率准确给出. ${}^7\text{Be}(p, \gamma) \rightarrow {}^8\text{B}$ 的核反应率,以及迟后的 ${}^8\text{B}(e^+, \nu_e) \rightarrow \text{Be}^*$ 核反应率与 ${}^7\text{Be}$ 含量成正比,而与 ${}^7\text{Be}$ 电子俘获率成反比. Bahcall 等^[1]在忽略太阳核心内等离子屏蔽效应而只考虑 ${}^7\text{Be}$ 离子俘获自由电子时,计算了 ${}^7\text{Be}$ 离子俘获自由电子的概率. Iben 等^[2]用 Debye-Hückel 近似估计了等离子体对 K 壳层束缚电子俘获率的影响之后,计算了 3 价和 4 价 Be 离子俘获电子的概率^[2].

然而在太阳内部条件下,由于太阳核心温度高达 $15.67 \times 10^6 \text{ K}$,其对应的动能约为 2 keV ,而 ${}^7\text{Be}$ 原子的第 4 次的电离能为 216.6 eV . 所以,我们可以预料 ${}^7\text{Be}$ 原子存在 1 个或 2 个 K 壳层束缚电子的百分比是比较小的.

由于 Super Kamiokande^[3]和 sudbury neutrino observatory(缩写为 SNO)^[4]太阳中微子实验只能对来自 ${}^8\text{B}(e^+, \nu_e) \rightarrow \text{Be}^*$ 核反应产生的中微子敏感. 因此,重新计算 ${}^7\text{Be}$ 原子存在 K 壳层束缚电子的概率,以及 K 壳层电子的俘获对 ${}^7\text{Be}$ 原子总的电子俘获率、 ${}^7\text{Be}$ 太阳中微子流量及 ${}^8\text{B}$ 太阳中微子流量是有

意义的.

2. K 壳层束缚电子概率的计算

在太阳内部条件下,当只考虑 ${}^7\text{Be}$ 俘获自由电子时的概率为^[1]

$$\lambda_c = 2.31 \times 10^{-9} (1 + X) \rho T_6^{-1/2} [1 + 0.004 (T_6 - 16)] \text{ s}^{-1}, \quad (1)$$

式中 ρ 为太阳核心中的物质密度,单位为 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; X 为太阳核心中质子的含量; T_6 为以 10^6 K 为单位的太阳核心温度.

在考虑太阳核心中等离子体的屏蔽效应和存在束缚电子的影响之后, ${}^7\text{Be}$ 俘获电子的总概率为^[1,5]

$$\lambda_{\text{total}} = 1.2 \lambda_c, \quad (2)$$

式中 λ_c 为 ${}^7\text{Be}$ 俘获自由电子的概率,由(1)式所定义.

但在太阳内部,由于其温度高达 $15.67 \times 10^6 \text{ K}$,其对应的热能量约为 2.03 keV ,而 ${}^7\text{Be}$ 原子的第 4 次和第 3 次的电离能分别为 216.6 和 153.1 eV ,第 1 次和第 2 次的电离能之和约为 60 eV ,考虑 ${}^7\text{Be}$ 原子电离时需要克服太阳大气压对电子所做的功约为 50 eV . 因此, ${}^7\text{Be}$ 原子被完全电离而成为 4 价离子所需要的能量约为 480 eV ,约为太阳核心热能的 24%.

由非简并性条件可知,处在太阳核心中的 ${}^7\text{Be}$ 原子或离子是处于非简并状态,即 ${}^7\text{Be}$ 原子或离子满足玻耳兹曼统计. 因为在太阳核心内部,对 ${}^7\text{Be}$ 原

子或离子而言,满足经典近似条件:

$$\frac{V}{N} \left(\frac{2\pi m k_B T}{h^2} \right)^{3/2} = \frac{1}{n} \left(\frac{2\pi m k_B T}{h^2} \right)^{3/2} \gg 1, \quad (3)$$

式中 n 为单位体积内 ${}^7\text{Be}$ 原子或离子数; m 为 ${}^7\text{Be}$ 原子的原子量; k_B 为玻耳兹曼常量; h 为普朗克常量; T 为所计算的区域温度. 此外,由于 Saha 公式并不适合于太阳条件下(高温和高密度)原子电离的离子数计算,所以,本文将采用 Maxwell-Boltzmann 计算公式来计算 ${}^7\text{Be}$ 存在 1 个或 2 个 K 壳层电子数的比率,即只要能量低于 3 价或 2 价 ${}^7\text{Be}$ 离子的电离能就认为该电子不能被电离.

由于在太阳核心中的 ${}^7\text{Be}$ 由里到外是逐渐减少的,且从距离等于零到距离为太阳半径的 0.1250 倍处, ${}^7\text{Be}$ 的含量约占整个太阳中 ${}^7\text{Be}$ 量的 95.55%^[6]. 所以,能量低于 153.1eV 的 ${}^7\text{Be}$ 离子,也即存在 2 价 ${}^7\text{Be}$ 离子的平均百分比为

$$u(E \leq 153.1\text{eV}) = 4\pi \left(\frac{1}{2\pi k_B T} \right)^{3/2} \times \int_0^{153.1} \sqrt{E} \exp\left(-\frac{E}{k_B T}\right) dE, \quad (4)$$

E 为 ${}^7\text{Be}$ 原子或离子的动能; T 为从零到距离为太阳半径的 0.1250 倍处的平均温度,约为 $14.24 \times 10^6 \text{K}$ 对应的热能为 1842.3eV ^[6].

对(4)式作变换,令 $x = E/k_B T$, 则 $dx = dE/k_B T$ (4)式变为

$$u(x \leq 0.0831) = \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} \right)^{0.0831} \int_0^{0.0831} \sqrt{x} e^{-x} dx = 1.71\%, \quad (5)$$

即只有 1.71% 的 2 价 ${}^7\text{Be}$ 离子存在.

同理,可以计算出只有 2.83% 的 3 价 ${}^7\text{Be}$ 离子存在. 因此,在太阳内部条件下,只有约 4.54% 的 ${}^7\text{Be}$ 含有 1 个或 2 个 K 壳层束缚电子,其余 95.46% 的 ${}^7\text{Be}$ 被完全电离成 4 价的离子. 所以,这时计算在太阳核心中 ${}^7\text{Be}$ 原子俘获电子的概率应改为

$$\lambda'_{\text{total}} = 0.0454\lambda_{\text{total}} + 0.9546\lambda_c, \quad (6)$$

式中 λ_{total} 和 λ_c 为由(2)和(1)式所定义的. 这样(6)式变为

$$\begin{aligned} \lambda'_{\text{total}} &= 0.0454 \times 1.2\lambda_c + 0.9546\lambda_c \\ &= 1.01\lambda_c. \end{aligned} \quad (7)$$

这时,计算 ${}^7\text{Be}$ 原子或离子俘获电子的总概率公式为

$$\begin{aligned} \lambda'_{\text{total}} &= 2.333 \times 10^{-9} (1 + X) \rho T_6^{-1/2} [1 \\ &\quad + 0.004(T_6 - 16)] \text{s}^{-1}. \end{aligned} \quad (8)$$

从(7)式中可以看出,在太阳核心中,当考虑存在 K 壳层束缚电子对 ${}^7\text{Be}$ 原子俘获电子的影响之后, ${}^7\text{Be}$ 原子俘获电子总概率要低于那种认为在太阳核心中所有 ${}^7\text{Be}$ 原子都存在 K 壳层束缚电子时 ${}^7\text{Be}$ 原子俘获电子的总概率,即

$$\frac{\lambda'_{\text{total}}}{\lambda_{\text{total}}} = \frac{1.01\lambda_c}{1.2\lambda_c} = 0.842 \quad (9)$$

$$\text{和} \quad \frac{\lambda_{\text{total}}}{\lambda'_{\text{total}}} = \frac{1.2\lambda_c}{1.01\lambda_c} = 1.188. \quad (10)$$

假定标准太阳模型中的其他参量不变,且假定太阳中微子自产生后性质不发生改变,那么从(10)式可以知道,标准太阳模型在计算 ${}^7\text{Be}$ 太阳中微子流量时增加了 1.188 倍,而在计算 ${}^8\text{B}$ 太阳中微子流量时则 ${}^7\text{Be}$ 太阳中微子流量由标准太阳模型计算值^[7]的 4.80×10^9 降低到 $4.04 \times 10^9 \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$. ${}^7\text{Be}$ 太阳中微子在 Homestake 氯探测器^[8]上俘获的理论计算值将由 1.15SNU ($1\text{SNU} = 10^{-36}/{}^{37}\text{Cl} \cdot \text{s}$) 降到 0.97 SNU. 在 SAGE^[9]和 GALLEX^[10]镓探测器上俘获的理论计算值也将由 34.4SNU 降低到 28.96SNU. 而 ${}^8\text{B}$ 太阳中微子流量将由标准太阳模型理论计算值^[7]的 5.15×10^6 增加到 $6.12 \times 10^6 \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$. ${}^8\text{B}$ 太阳中微子在 Homestake 氯探测器上俘获的理论计算值由 5.90 ^[8]增加到 7.01SNU,在 SAGE^[9]和 GALLEX^[10]镓探测器上俘获的理论计算值也将由 12.40 增加到 14.73SNU. 这将进一步增加理论计算值与 super Kamiokande^[3]太阳中微子实验测量值 $2.436 \times 10^6 \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ 两者之间的差异. 表 1 是标准模型对 ${}^7\text{Be}$ 和 ${}^8\text{B}$ 太阳中微子流量的预言值以及它们在氯探测器上和镓探测器上的俘获率^[7]. 表 2 是重新计算后 ${}^7\text{Be}$ 和 ${}^8\text{B}$ 太阳中微子流量的预言值以及它们在氯探测器上和镓探测器上的俘获率. 表 3 是来自 5 个太阳中微子实验结果与太阳模型理论预言值的比较.^[11]

表 1 标准模型预言 ${}^7\text{Be}$ 和 ${}^8\text{B}$ 的太阳中微子流量和中微子俘获数 (在 1σ 不确定性之内)^[7]

反应	反应缩写	流量 $J/\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	${}^{37}\text{Cl}/\text{SNU}$	${}^{71}\text{Ga}/\text{SNU}$
${}^7\text{Be} \rightarrow {}^7\text{Li} \nu$	${}^7\text{Be}$	$4.80(1.00 \pm 0.09) \times 10^9$	1.15	34.4
${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be}^* e^+ \nu$	${}^8\text{B}$	$5.15(1.00 \pm 0.14) \times 10^6$	5.90	12.4
合计			7.05	46.80

表 2 重新计算后 ${}^7\text{Be}$ 和 ${}^8\text{B}$ 的太阳中微子流量和中微子俘获数 (在 1σ 不确定性之内)

反应	反应缩写	流量 $J/\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	${}^{37}\text{Cl}/\text{SNU}$	${}^{71}\text{Ga}/\text{SNU}$
${}^7\text{Be} \rightarrow {}^7\text{Li} \nu$	${}^7\text{Be}$	$4.04(1.00 \pm 0.09) \times 10^9$	0.97	28.96
${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be}^* e^+ \nu$	${}^8\text{B}$	$6.12(1.00 \pm 0.14) \times 10^6$	7.01	14.73
合计			7.96	43.69

表 3 来自 5 个太阳中微子实验结果与太阳模型
理论预言值的比较^[11]

	(³⁷ Cl→ ³⁷ Ar) /SNU	(⁷¹ Ga→ ⁷¹ Ge) /SNU	⁸ B ν 流量 J /10 ⁶ cm ⁻² s ⁻¹
Homestake (Cleveland <i>et al</i> 1968) ^[8]	2.56 ± 0.16 ± 0.16	—	—
GALLEX (Hampel 1995) ^[10]	—	77.5 ± 6.2 ^{+4.3} _{-3.7}	—
SAGE (Adburashitov <i>et al</i> 1995) ^[9]	—	67.2 ^{+7.2+3.5} _{-7.0-3.0}	—
Kamiokande (Fukuda <i>et al</i> 1996) ^[12]	—	—	2.80 ± 0.19 ± 0.33
super Kamiokande (Fukuda <i>et al</i> 1995) ^[3]	—	—	2.436 ^{+0.053+0.085} _{-0.047-0.071}
(Bahcall <i>et al</i> 1985) ^[7]	7.7 ^{+1.2} _{-1.0}	129 ± 8	5.15(1.00 ^{+0.19} _{-0.14})
(Brun <i>et al</i> 1985) ^[13]	7.18	127.2	4.82
(Dar <i>et al</i> 1996) ^[14]	4.1 ± 1.2	115 ± 6	2.49

⁷Be 和⁸B 这两种太阳中微子在氦探测器(Homestake)和镓探测器(SAGE 和 GALLEX)上的俘获数之和分别为 7.05SNU 和 46.80SNU. 如果考虑从太阳核心到距离为太阳半径的 0.1250 倍处有 95.46% 的⁷Be 原子被完全电离成 4 价离子, 只有 4.54% 的⁷Be 存在 1 个或 2 个 K 壳层电子, 那么,⁷Be 和⁸B 这两种太阳中微子在氦探测器和镓探测器上的俘获数之和则分别为 7.98SNU 和 43.63SNU. 与标准太阳模型相比,⁷Be 和⁸B 这两种太阳中微子在氦探测器的俘获数之和增加了 0.93SNU, 在镓探测器上的俘获数之和减少了 3.17SNU.⁸B 太阳中微子流量将由标准太阳模型预言的 5.15(1.00^{+0.19}_{-0.14}) × 10⁶ 增加到 6.12(1.00^{+0.19}_{-0.14}) × 10⁶ cm⁻² s⁻¹. 这将进一步扩大⁸B 太阳中微子流量的预言值与 super Kamiokande 太阳中微子实验测量值两者之间的差距.

3. 结 论

从上面的计算可以知道, 如果认为在太阳核心中⁷Be 原子主要是俘获它 K 壳层上的电子, 那么,

作者非常感谢中国科学院高能物理研究所丁林培、朱清祺、经才骧研究员的有益讨论和帮助, 并感谢广东肇庆学院钟一兵、黄明海的有益帮助.

- [1] Bahcall J N and Moeller C P 1969 *Astrophys. J.* **155** 511
 [2] Iben, Jr I, Kalata K and Schwartz J 1967 *Astrophys. J.* **150** 1001
 [3] Fukuda Y *et al* 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 1810
 [4] Sincell M 1999 *Science* **284** 1910
 [5] Bahcall J N *et al* 1982 *Rev. Mod. Phys.* **54** 767
 [6] Bahcall J N and Ulrich R K 1988 *Rev. Mod. Phys.* **60** 297
 [7] Bahcall J N *et al* 1998 *Phys. Rev. Lett.* **B 433** 1
 [8] Cleveland B T *et al* 1998 *Ap. J.* **496** 505

- [9] Abdurashitov J N *et al* 1999 *Phys. Rev. C* **60** 0055801
 [10] Hampel W *et al* 1999 *Phys. Lett. B* **447** 127
 Hampel W *et al* 1996 *Phys. Lett. B* **388** 384
 [11] Nakamura K 2000 *Eur. Phys. J. C* **15** 1
 [12] Fukuda Y *et al* 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 1683
 [13] Brun A S, Turck-Chieze S and Morel P 1998 *Ap. J.* **506** 913
 [14] Dar A and Shaviv G 1996 *Ap. J.* **468** 933

Effect of bound electron capture on ${}^7\text{Be}$ solar neutrino flux

Ye Zi-Piao^{1,2)} Dai Chang-Jiang³⁾ He Hui-Lin³⁾

¹⁾ (Laboratory of Cosmic Ray and Astrophysics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

²⁾ (Department of Physics, Zhaoqing University, Zhaoqing 526061, China)

³⁾ (Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

(Received 8 May 2001; revised manuscript received 23 August 2001)

Abstract

The finite probability that ${}^7\text{Be}$ exists as an ion with one or two bound electrons is calculated to be about 4.54% from $R = 0$ to $R = 0.125R_{\odot}$. It is shown that about 95.46% ${}^7\text{Be}$ nucleus is to capture free electrons. If in the solar neutrinos happens nothing after they create, and other solar parameters are not changed, then the computation of ${}^7\text{Be}$ and ${}^8\text{B}$ solar neutrino fluxes should be $4.04 \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ and $6.12 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectively. It will further increase the discrepancy between the observed and the predicted ${}^8\text{B}$ solar neutrino fluxes in Super Kamiokande neutrino experiment.

Keywords: K-shell bound electron, rate of electron capture, ${}^7\text{Be}$ solar neutrino flux, ${}^8\text{B}$ solar neutrino flux

PACC: 9660K, 9660, 1460G