

太阳中微子

——物质世界的“隐士”

廖 玮

(华东理工大学 200237)

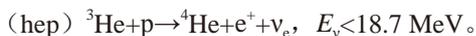
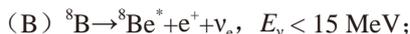
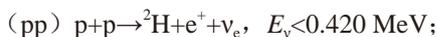
一、引言

曾有前辈物理学家说：做科学研究首要的一件事是要分清哪些是真问题，哪些是假问题，哪些是成熟的问题，哪些是不成熟的问题；如果分得清这些问题，做研究就会事半功倍，如果分不清楚它们，就会事倍功半，甚至做无用功。然而，物理学的发展过程中从不缺乏曲折和戏剧性，也从不缺乏各种迷惑人的问题，它们有的是装扮成真问题的假问题，有些是看起来像是假问题的真问题。要分清它们，并不容易。

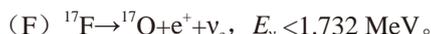
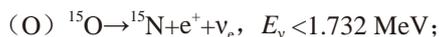
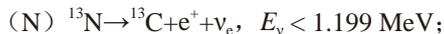
所谓太阳中微子失踪之谜就是这样一个使人困惑了大约 30 年的问题。在此期间，许多物理学家认为这不是个真正的问题。极具戏剧性的是，物理学家们有很好的理由使自己确信这一点。追踪中微子历史中的线索，我们可以领略太阳中微子是如何使人困惑的，而其最近的进展又是为什么使当代粒子物理学家们兴奋不已。

二、太阳中微子失踪之谜

太阳中微子产生于太阳内部的链式核反应过程。在贝特 (H. Bethe) 的开创性工作之后，人们认识到太阳通过聚变核反应发光发热，同时也不断地在其内部制造重元素。这为在太阳内部产生出电子中微子 (ν_e) 提供了多个渠道。在太阳中产生中微子的八个物理过程如下所示。pp 链有五种产生电子中微子的过程：

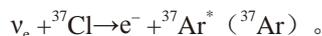


CNO 链有三种产生电子中微子的过程：



值得注意的是：1) 在 高能区 ($> 2 \text{ MeV}$)，仅有 B 型 (硼 8) 和 hep 型过程贡献中微子；2) 除了 pp, pep 和 hep 类型的太阳中微子，其他类型太阳中微子的产生率以及它们到达地球的通量直接依赖于相关重元素在太阳内部的丰度；3) 在 高能区，太阳中微子主要是硼 8 中微子。

戴维斯 (R. Davis) 与其合作者第一个测量了太阳中微子的通量，他也因此获得了诺贝尔物理学奖。他们使用 615 吨四氯乙烯 (C_2Cl_4) 作为探测体，利用如下反应过程吸收到达地球的电子中微子



根据探测体中产生得到的 ${}^{37}\text{Ar}$ 的量，可以反推得到电子中微子到达地球的通量。由于最主要的反应道产生激发态原子核 ${}^{37}\text{Ar}^*$ 而且具有 4.99 MeV 的阈能，这一实验探测的主要是高能区的硼 8 中微子。

在 1968 年，戴维斯等人发表了对太阳中微子通量第一次测量的结果。结果表明，被探测能区的太阳中微子的通量远小于太阳物理学家给出的理论预言值。其后的实验测量结果也都小于理论值。因而这构成了太阳中微子失踪之谜。一些物理学家认为这可以被解释为太阳中微子在传播过程中由电子中微子变成了其他种类的中微子，所以在实验中探测到的电子中微子通量小于太阳物理学家的理论预言。这就是中微子振荡。而为中微子引入质量和味混合，就能够十分简单地给出中微子振荡现象。然而，更多的物理学家认为，更大的可能是关于太阳中微子的理论计算不对或者是实验有问题。此外，理论家们还有很好的理由

相信中微子不应该有质量，因而坚持认为没有所谓的太阳中微子失踪，也不会有中微子振荡现象。

十分有趣的是这两个反对理由看起来都十分合理。一方面，关于硼 8 中微子的理论预言确实有很大的不确定性。从前述可知，为计算硼 8 中微子的产生率和通量，我们需要知道硼 8 元素在太阳内部的丰度。然而，从太阳内部发出的光会被太阳内部的物质不断地散射，因而不能直接到达地球。只有中微子能够从太阳内部无障碍地传播出来到达地球。因而除了利用中微子，没有其他办法能够直接探测太阳内部的元素丰度。太阳物理学家的办法是，根据太阳内部物质的对流性质以及观测得到的太阳表面的重元素丰度，使用太阳模型计算得到太阳内部的重元素丰度。然后，再利用这个反推得到的硼 8 元素丰度，计算硼 8 中微子通量。毫无疑问，这一方法有很大的不确定性。如表 1 所示，戴维斯等人已经注意到他们所参照的理论预言值有 60% 的误差。为与戴维斯等人的实验对比，巴赫恰勒 (J. Bahcall) 等人重新分析了硼 8 中微子和其他类太阳中微子的通量。如表 2 所示，不同模型对硼 8 中微子通量的预言可以差好几倍。此外，即使是最好的候选模型 C 本身也有 40% 的误差。有鉴于此，巴赫恰勒及其合作者认为，戴维斯等人的实验结果与太阳中微子通量的理论预言并不矛盾。在表 2 所注的文献中，他们写道：“考虑到众多计算所使用的参数的不确定性之后，我们的预言与戴维斯、哈默 (D. Harmer) 和霍夫曼 (K. Hoffman) 的实验没有不可调和的矛盾。”^②

此后，虽然对太阳中微子的计算不断得到改进，但对硼 8 中微子通量的预言仍然有很大的不确定性。如图 1 所示，一直到 2005 年，对硼 8 中微子通量的预言在一个标准偏差的范围内仍然有 16% 的误差。由此可见，人们完全有理由怀疑是否真有太阳中微子失

踪这么一个问题。

另一方面，理论家的反对意见也不乏合理之处。这一理由植根于粒子物理标准模型深邃的基本原则和巨大的成功，使人很难拒绝。

在 μ 子 (缪子) 被发现的时候，美国物理学家拉比 (I. Rabi) 困惑于自然界为什么需要这样一个与电子非常类似的粒子，提出了一个著名的问题：“who ordered that (谁订购了它)?”。到了 20 世纪 70 年代，人们最终认识到统治基本粒子相互作用的规律是非阿

表 1 戴维斯实验组参考的太阳中微子通量

中微子源	截面 (cm ²)	中微子通量 (cm ⁻² sec ⁻¹)
H+H+e ⁻ →D+v	1.72×10 ⁻⁴⁵	1.7×10 ⁸
Be ⁷ 衰变	2.9×10 ⁻⁴⁶	3.9×10 ⁹
B ⁸ 衰变	1.35×10 ⁻⁴²	1.3(±0.6)×10 ⁷
N ¹³ 衰变	2.1×10 ⁻⁴⁶	1.0×10 ⁹
O ¹⁵ 衰变	7.8×10 ⁻⁴⁶	1.0×10 ⁹

注：如表格所示，对硼 8 中微子通量的这个理论预言有 60% 的误差 (R. Davis, D. S. Harmer, K. C. Hoffman, *Phys. Rev Lett.* 20, 1205 (1968))

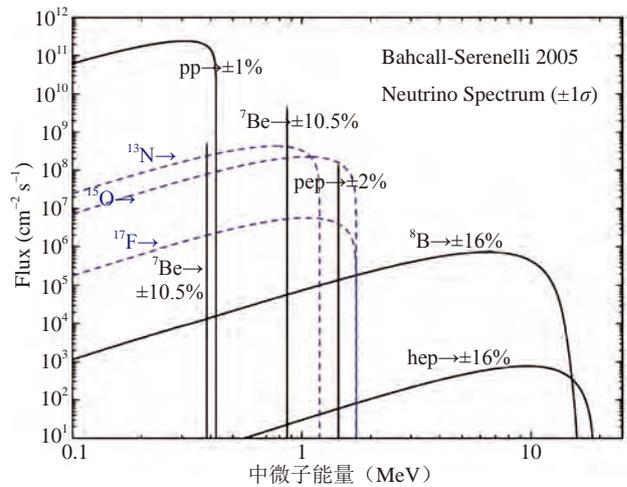


图 1 标准太阳模型预言的 ν_e 能谱。到达地球的总通量约为 $6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (图片来源: Bahcall 网页 <http://www.sns.ias.edu/~jnb/>)

表 2 不同太阳模型预言的太阳中微子通量

模型	$10^{-7} \phi_{\nu}(^8\text{B})(\text{cm}^{-2} \text{ sec}^{-1})$	$10^{-9} \phi_{\nu}(^7\text{Be})(\text{cm}^{-2} \text{ sec}^{-1})$	$10^{-9} \phi_{\nu}(^{13}\text{N})(\text{cm}^{-2} \text{ sec}^{-1})$	$10^{-10} \phi_{\nu}(^1\text{H}+^1\text{H})(\text{cm}^{-2} \text{ sec}^{-1})$
A	1.35	4.7	1.1	6.0
B	0.69	3.4	0.3	6.2
C	0.47	2.9	0.2	6.4
D	0.25	2.1	0.1	6.5
E	0.70	3.7	0.4	6.3

注：数据来源于 J. N. Bahcall, N. A. Bahcall, G. Shiviv, *Phys. Rev. Lett.* 20, 1209(1968)

贝尔规范理论，即杨-米尔斯理论。此后，基本粒子标准模型得以建立起来，人们认识到物质世界的基本粒子（夸克和轻子）是一组一组地出现的。每一组基本粒子被称为一“代”（或“家族”）。不同代之间相应的基本粒子具有完全相同的数目、自旋、电荷等性质，而仅仅在质量方面不同。类似于第一代中的电子， μ 子就是出现于第二代的带电轻子。同理，作为不带电的轻子，中微子被要求在每一代基本粒子的行列中都应该出现。伴随电子在第一代出现的中微子就是电子中微子，伴随 μ 子在第二代出现的被称为 ν_μ （缪子中微子），伴随 τ 子（陶子）在第三代出现的被称为 ν_τ （陶子中微子）。此外，标准模型 $SU(3)_c \times SU(2)_w \times U(1)_Y$ 规范理论的自恰性对每代夸克和轻子的结构给出了一个漂亮的解释。就这样，标准模型对物质世界基本组成的结构给出了一个出人意料、但简洁优美并且强有力的解释。

对于中微子的质量，标准模型的观点同样简洁有力。中微子是具有自旋 $\frac{1}{2}$ 的粒子。一个粒子的质量不为零意味着：一定可以找到一个参照系，在此参照系中这个粒子处于静止状态。而量子力学告诉我们，处于静止状态的自旋 $\frac{1}{2}$ 粒子有两个独立的量子态。如果中微子和反中微子都分别需要两个独立的态，我们就需要引入左手和右手手征的两个量子场以描述一个粒子及其反粒子的总共四个量子态。然而，标准模型的规范理论中只有左手手征的中微子场，没有右手手征的中微子场，与夸克和带电轻子的情况完全不同。如果为了解释中微子质量而引入右手中微子场，那就是要在标准模型的框架里加入不能用其理论框架——杨-米尔斯规范理论——描述的额外的东西。如果这样做，我们可以追问右手中微子的基本原则又是什么呢？也就是说，对中微子质量，我们可以像拉比那样追问：“who ordered that?”这又是一个使人困惑的问题。即便有答案，也不会存在于标准模型的理论框架之内。另一个可能的出路是中微子和反中微子在静止状态下是等价的。在这种情况下，一共只有两个独立的量子态，而我们只需要一个左手手征的量子场就足以描述中微子的这两个量子态。这类粒子与反粒子等价的自旋 $\frac{1}{2}$ 粒子被称为马约拉纳粒子。然而，把中微子当作马约拉纳粒子的代价也十分高昂。如果中

微子是马约拉纳粒子，那么它将可以破坏轻子数守恒。标准模型的杨-米尔斯规范理论恰恰不允许这类破坏轻子数相互作用的出现，并以十分简洁有力的方式解释了自然世界中轻子数守恒的现象。所以，这一个出路也需要超出标准模型的物理。简单地说，标准模型对中微子质量的观点是：它超出了标准模型的基本原则可以描述的范围。

幸运的是，继戴维斯的Homestake实验之后，有一系列的实验重复测量了太阳中微子的通量。这其中，麦克唐纳（A. McDonald）领导的SNO实验组做出了关键性贡献，最终厘清了关键问题，解决了相关争议。麦克唐纳也因此获得2015年诺贝尔物理学奖。SNO实验采用已故华裔物理学家、SNO实验的发起人以及第一代领导人陈华森教授提出的探测方案^①，使用1000吨重水（ D_2O ）作为探测体探测太阳中微子。如以下所示，这一实验有三种探测中微子的方式：

$$CC: \nu_e + d \rightarrow p + p + e^-,$$

$$NC: \nu_x + d \rightarrow p + n + \nu_x,$$

$$ES: \nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-,$$

它可以像Homestake那样通过带电流（CC）反应过程测量 ν_e 的通量。它还可以通过弹性散射过程（ES）测量 ν_e 通量（ Φ_e ）与 ν_μ 和 ν_τ 的通量之和（ $\Phi_{\mu\tau}$ ）。因为 ν_e 与电子弹性散射的反应截面不同于 ν_μ 和 ν_τ 与电子发生弹性散射的截面，通过弹性散射只能得到 Φ_e 通量与 $\Phi_{\mu\tau}$ 的加权和。与此相反，三种中微子通过中性流过程（NC）与氘核发生反应的几率是一样的。只要具有足够的能量，任意类型的太阳中微子 ν_x 在与氘核发生散射的时候都可以传递能量给氘核，将其分解为质子和自由中子。设计合适的探测器探测这一反应过程，确定中性流反应的反应率，就可以直接得到三种中微子的通量之和。SNO实验的最大特色就是，它可以通过中性流过程测量到达地球的三种中微子的总通量。

SNO实验的三种探测方法可以对 Φ_e 和 $\Phi_{\mu\tau}$ 给出不同的限制。在图2中可以看到，这三种限制交汇到了一个小的区域。SNO实验以这样的方式给出了 Φ_e 和 $\Phi_{\mu\tau}$ 的测量值。测量结果说明 ν_μ 和 ν_τ 的总通量大约是 ν_e 通量的两倍。因而 ν_e 通量大约是总通量的1/3，

与 Homestake 的结果一致。这表明，太阳中微子在到达地球后存活为 ν_e 的几率 (P_s) 大约是三分之一： $P_s \approx 1/3$ 。这一测量的重要意义在于，它直接测量了高能区硼 8 中微子到达地球的总通量，解决了由于太阳模型的预言的不确定性产生的所有怀疑和争论，最终以与模型无关的方式证实了中微子振荡现象的成立。

三、中微子振荡

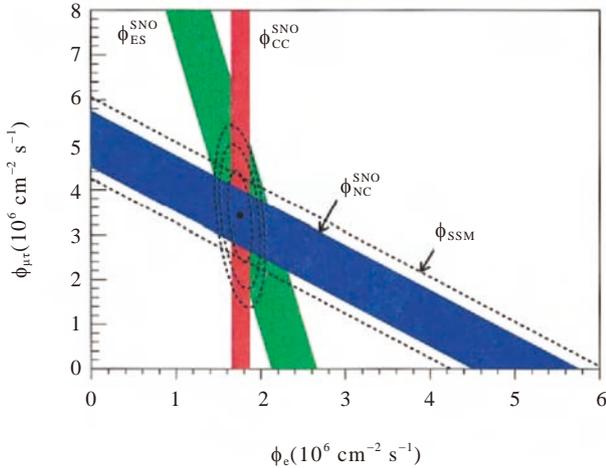


图2 SNO 实验重建的 ν_e 通量和 $\nu_\mu + \nu_\tau$ 通量 (图片来源: SNO 合作组, *Phys. Rev. Lett.* 89, 011301(2002))

谈完太阳中微子实验的历史，我们再来谈谈中微子振荡又是怎么一回事。

中微子振荡最早由庞蒂科夫 (B. Pontecorvo) 提出^②。它的基本思想是： ν_e ， ν_μ ， ν_τ 是被称为处于味本征态的中微子，它们可以不是质量得到很好定义的质量本征态，而是质量本征态中微子 $\nu_{1, 2, 3}$ 的线性叠加；因此中微子就可以在传播过程中由一个味本征态转换到另一个味本征态。如果使用 ν_z 代表 ν_μ 和 ν_τ 的一个线性组合，太阳中微子振荡的现象可以使用 ν_e 和 ν_z 这个两中微子的系统描述。 ν_e 和 ν_z 可写成

$$\nu_e = \cos \theta \nu_1 + \sin \theta \nu_2,$$

$$\nu_z = -\sin \theta \nu_1 + \cos \theta \nu_2$$

θ 是中微子的混合角， ν_1 和 ν_2 具有不同的质量 m_1 和 m_2 。由此可以得到，经过距离 L 传播后， ν_e 的存活几率是 (自然单位制)

$$P_s(\nu_e \rightarrow \nu_e) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E} \right) \quad (1)$$

其中 Δm_{21}^2 是质量平方差： $\Delta m_{21}^2 = m_2^2 - m_1^2$ 。 E 是中微子

能量。如果考虑平均效应，可以得到

$$P_s(\nu_e \rightarrow \nu_e) = 1 - \frac{1}{2} \sin^2 2\theta = \frac{1}{2} (1 + \cos^2 2\theta). \quad (2)$$

值得注意的是，公式 (2) 给出的值不小于 0.5，不能用于解释 SNO 实验的结果。更值得关注的是，综合其他实验对太阳中微子的测量，可以发现 P_s 有十分特殊的能量依赖行为。

在表 3 中可以看到，Sage 与 Gallex 实验在低能区测量得到的事例率 R_{exp} 与理论预言的事例率 R_{th} 的比约为 0.55，也就是说在低能区 $P_s \approx 0.55$ ，而在高能区 $P_s \approx 1/3$ 。此外，实验结果表明， P_s 在表 3 中显示的低能区域和高能区域都分别没有明显地依赖于能量，在两个区域 P_s 都分别接近于常数。这说明公式 (1) 也不能解释太阳中微子在全能量区间的振荡。这些结果表明，太阳中微子的振荡采取了不同寻常的方式。

理解太阳中微子振荡的要点在于，中微子振荡与

表 3 部分太阳中微子实验的测量结果

实验	$R_{\text{exp}}/R_{\text{th}}$	探测能区
Homestake(CC)	≈ 0.32	$\geq 5 \text{ MeV}$
Sage, Gallex(CC)	≈ 0.54	$\leq 1 \text{ MeV}$
Super-K(ES)	≈ 0.41	$\geq 5 \text{ MeV}$
SNO-CC	≈ 0.30	$\geq 6.75 \text{ MeV}$
SNO-NC	≈ 1.0	$\geq 5 \text{ MeV}$
SNO-ES	≈ 0.42	$\geq 6.75 \text{ MeV}$

其所处的环境有关。当光穿过透明介质时，它会受到物质的影响，光的色散关系因此被改变。与此类似，中微子在穿过介质时也会受到物质的影响。因为中微子的弱相互作用，这一影响非常非常弱，但恰好在中微子振荡中它发生了作用。物质介质对中微子的影响可以用一个有效的势能 V 表示，中微子的质能关系因此被改为

$$k^2 + m^2 = (E - V)^2 \approx E^2 - 2EV,$$

其中 V 的平方项被忽略。如果把质能关系重写为 $k^2 + m_{\text{eff}}^2 = E^2$ ，我们就可以有效地把 $2EV$ 加入到中微子的质量项之中，作如下代换：

$$m^2 \rightarrow m_{\text{eff}}^2 = m^2 + 2EV.$$

更需要进一步注意的是，物质介质对 ν_e 的质能关系的修改与对 ν_μ, ν_τ 的修改是不同的。正是这个不同之

处极大地影响了中微子振荡的行为。综合这些因素，可以发现控制 $\nu_e \rightarrow \nu_z$ 振荡的哈密顿量是

$$H = \frac{\Delta m_{21}^2}{2E} \begin{pmatrix} \sin^2 \theta & \frac{1}{2} \sin 2\theta \\ \frac{1}{2} \sin 2\theta & \cos^2 \theta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_e & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

公式 (3) 右边的第一项就是给出公式 (1) 的哈密顿量，被称为真空项。第二项来自物质效应，其中 V_e 来自介质中的电子对电子中微子的影响： $V_e = \sqrt{2} G_F N_e$ ， G_F 是费米常数， N_e 是介质中的电子密度。中微子振荡的这一机制被称为 MSW 机制^③。

将公式 (3) 对角化可以得到中微子在物质中的质量本征态 $\nu_{1,2}^m$ 以及在物质中的混合角 θ_m 。由此可以将存活几率 P_s 理解如下：1) 在太阳中产生时，电子中微子以几率 $\cos^2 \theta_m$ 和 $\sin^2 \theta_m$ 分别投影到 ν_1^m 和 ν_2^m 两个态；2) 在从太阳内部传播出来的过程中， $\nu_{1,2}^m$ 这两个质量本征态分别独立地演化^④，在太阳之外变成对应的真空中的质量本征态 $\nu_{1,2}$ ；3) 到达地球后， $\nu_{1,2}$ 再分别以几率 $\cos^2 \theta$ 和 $\sin^2 \theta$ 投影到电子中微子态。所以， ν_e 在地球仍然保持为 ν_e 的几率为：

$$P_s(\nu_e \rightarrow \nu_e) = \cos^2 \theta_m \cos^2 \theta + \sin^2 \theta_m \cos^2 \theta = \frac{1}{2} (1 + \cos 2\theta_m \cos^2 \theta), \quad (4)$$

其中 θ_m 取值为 ν_e 在太阳内被产生之处的值。

由公式 (3) 可以看到：1) 当能量较小且 $\Delta m_{21}^2 \cos 2\theta > 2EV_e$ 时，真空项主导中微子的演化；在这一情况下， $\theta_m \rightarrow \theta$ ，我们得到真空振荡的结果公式 (2)。2) 当能量较大且 $\Delta m_{21}^2 \cos 2\theta < 2EV_e$ 时，物质项获得主导地位；在这一情况下， ν_e 等价于较重的 ν_2^m ， θ_m 接近于 90 度；我们得到

$$P_s(\nu_e \rightarrow \nu_e) = \frac{1}{2} (1 - \cos 2\theta), \quad (5)$$

P_s 在低能和高能区分别趋向于不同的常数，与实验结果吻合。根据公式 (2) 或 (5) 以及相应的实验值可以拟合得到混合角 θ 的值。在图 3 中可以看到，实验测量值与使用 (4) 计算的 MSW 效应的理论曲线很好地吻合。

如果使用三个中微子进行分析，就会出现三个混合角 $\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}$ ，文中使用的 θ 就是文献中通用的 θ_{12} 。

综合众多太阳中微子实验的结果，可以得到^⑤

$$\Delta m_{21}^2 \approx 7.5 \times 10^{-5} \text{eV}/c^2, \quad \tan^2 \theta_{12} \approx 0.45, \quad (6)$$

其中 c 是光速。从公式 (6) 中可以看到，中微子的质量差非常小。此外， β 衰变实验以及宇宙学观测的证据都表明中微子质量小于 $1 \text{eV}/c^2$ 。作为对比，夸克和带电轻子中最轻的是电子，而电子的质量是 $5.11 \times 10^5 \text{eV}/c^2$ 。不难想象，中微子质量与夸克轻子质量的巨大等级差为理解中微子质量提出了巨大挑战。

四、展望

在 20 世纪 70 年代，粒子物理标准模型的巨大成功和辉煌胜利使当时人们的思想沐浴于它所具有的深邃的思想光辉之下。所谓太阳中微子失踪之谜，在当时的多数物理学家看来，不过是还未来得及被这理性光芒充分照射的小小阴影，随着时间的推移，它终将消失。然而，在 30 年之后的今天，当时的小问题变成了一个带来灵感和希望的大问题。我们应该如何理解中微子质量呢？

如前所述，中微子质量不能在标准模型的 $SU(3)_c \times SU(2)_W \times U(1)_Y$ 规范理论的框架内被理解。原因就是，它或者需要超出这一理论框架的右手中微子，或者需要超出这一理论框架的相互作用。一部分物理学家认为，这意味着基本粒子相互作用的基本规律应该是 $SO(10)$ 大统一规范理论。原因是，标准模型的规范理论可以自然地由 $SO(10)$ 理论诱导出来，同时右

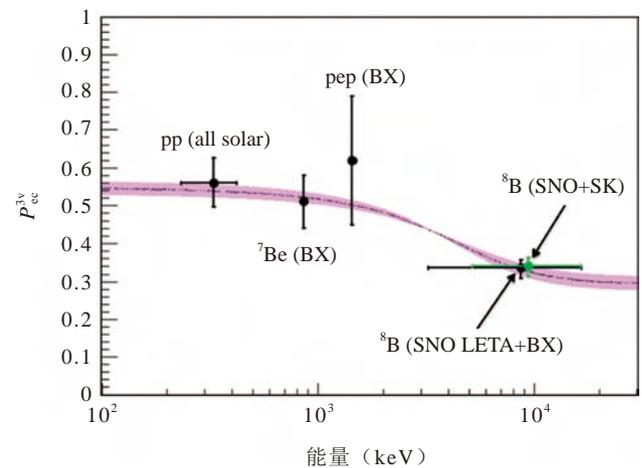


图3 Borexino 实验组对太阳中微子存活几率 P_s 测量结果的最新总结 (粉红色区域为根据 MSW 效应计算得到的 P_s 的理论值) (图片来源: Borexino 合作组, *Phys. Rev. D*89, 112007(2014))

手中中微子很自然地在这一理论的基本粒子的序列中出现。然而，这一理论的主要预言——质子衰变——还未被实验证实。另有一些物理学家认为，自然界不一定有 $SO(10)$ 大统一，但是可以有一些很重的超出标准模型的马约拉纳中微子。通过跷跷板 (seesaw) 机制，这些中微子可以使标准模型中的中微子获得很小的质量，从而解释中微子振荡的实验数据。这一理论的一大优点是，如果中微子部分有 CP 破坏的效应，它可以为解释宇宙中的重子与反重子不对称提供一个很好的候选机制。这一理论的一大预言是，自然世界中应该出现微小的轻子数破坏效应，具体说就是要有无中微子双 β 衰变过程。所以，实验观测中微子部分的 CP 破坏或者无中微子双 β 衰变具有重大意义，它们将可以极大地启发我们对自然世界的认识，为研究超出粒子物理标准模型的物理提供指引的方向。虽然由于中微子很难被探测，中微子实验十分困难，但这类实验意义重大，不容忽视。

在古代中国，隐士是一类神奇的人。他们没有显赫的地位，在世的时候常常是默默无闻。然而，他们又常常继承了关于我们这个世界的重要知识。在他们身后，我们通过他们的门人弟子了解到这些神奇的人。例如，庄子及其思想在其生前不被当时的世人所知晓，然而他的思想影响了后代中国人两千多年。此类著名的例子包括还黄石公——张良，鬼谷子——苏秦、张仪、庞涓、孙臆等。再想到，老子隐，西出函谷关，后才留下道德五千言而流布至今。所以不难理解，对隐士的推崇自有缘由。此类故事提醒着人们，我们应该

保持谦逊，因为在我们的视线之外很可能有一些隐没无闻但是智慧高超的人。

《庄子·在宥篇》有一个故事：黄帝立为天子十九年，闻广成子，故往见之而问至道；广成子批判他说，你这个心地偏颇狭隘的样子，哪里配得上谈论至道；黄帝退，捐天下，筑特室，席白茅，闲居三月，复往邀之，顺下风膝行而进，再拜稽首而问。如此谦逊的黄帝，就是中国古代的文化英雄，也是我们学习的楷模。

如果还需要再谈论一些太阳中微子对我们的教益的话，可以说太阳中微子就像中国古代的隐士，它们隐没无闻，也很难邀请它们到实验室访问，但它们携带着关于这个世界的非常重要的知识。它们提醒我们，虽然人类的理性获得了巨大的成功，但还有很多东西停留在我们的思想的范围之外，我们应该保持谦逊。虽然我们不断地揭开自然世界的神秘，但我们仍然应该对其保持以敬畏之心。

- ① H. H. Chen, Direct approach to resolve the solar-neutrino problem, *Phys. Rev. Lett.* 55, 1534 (1985) .
- ② B. Pontecorvo, Zh. Eksp. Teor. Fiz. 33, 549 (1957) [*Sov. Phys. JETP* 6, 429 (1958)].
- ③ S. P. Mikheyev, A. Yu. Smirnov, *Yad. Fiz.* 42, 1441 (1985) [*Sov. J. Nucl. Phys.* 42, 913 (1985)]; L. Wolfenstein, *Phys. Rev. D* 17, 2369 (1978) .
- ④ P. C. de Holanda, W. Liao, A. Yu. Smirnov, *Nucl. Phys.* B702, 307 (2004) .
- ⑤ Review of Particle Physics, *Chinese Phys.* C38, 090001 (2014).



科苑快讯

狭长瞳孔助猫咪成为杰出猎手

人类的瞳孔是圆形的，而很多动物的瞳孔却是狭长的，有垂直狭长瞳孔的都是伏击式捕食者，而有水平狭长瞳孔的则可能是被捕食者。加利福尼亚大学 (University of California) 的班克斯 (M. Banks) 和同事现在对

此有了合理解释。他们认为关键是像散现象，有助于捕食者捕捉被捕食者，而被捕食者则借此躲避捕食者。

捕食者的瞳孔可使它们在不动头部的情况下判断距离，在远处观察被捕食者。被捕食者的瞳孔虽然失去垂直聚焦的能力却代之以更广泛的观察范围，而且减少了来自上下方向的光线。只需观察一下动物园或农场中的牲畜就会发现，它们在



低头吃草时眼睛会旋转 50° 使瞳孔与地面平行 (人类的眼睛只能旋转几度)。然而，工作还未完成，其中包括解释为何鸟贼的瞳孔是 W 形的。

(高凌云编译自 2015 年 9 月 25 日《欧洲核子中心快报》)