

太阳中微子通量的估算

杨 大 卫

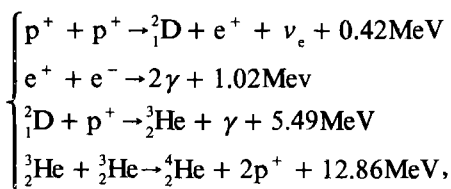
(河北师大物理系 石家庄 050016)

第12届全国中学生物理竞赛有一道估算太阳中微子通量的预赛题。为了更接近实际，特将题目改写如下：

已知太阳常数为1370焦/(秒·米²)并假设太阳辐射的能量全部由反应

$4\text{}^1_1\text{H} + 4\text{e}^- \rightarrow \text{}^4_2\text{He} + 2\text{e}^- + 6\gamma + 2\nu + 26.72\text{MeV}$ 提供。式中 γ 为高能光子， ν 为中微子，反应释放的能量由这两种粒子携带。中微子是一种质量几乎为零的、穿透力极强的中性粒子。如果每个中微子携带的能量平均为0.26兆电子伏，每个高能光子的能量在太阳内部平均衰减0.2兆电子伏，试计算地球上在与阳光垂直的每平方米面积内每秒钟应通过多少个中微子。

此题选材于现代天体物理学的一个引人瞩目的课题——太阳中微子问题。题中所提到的核反应叫“质子-质子链”，即pp链，其过程可解析为以下四步：



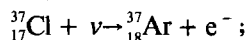
它提供了太阳总辐射能的92%，其余8%由“CNO循环”等过程提供，反应较复杂，最终产物基本与pp链相同，只是中微子所携带的能量不同。为了估算方便，题目中只选择了最主要的反应。该反应式说明太阳的主要物质形态——氢的高温高密等离子体($\text{p}^+ + \text{e}^-$)，通过热核聚变，生成的 $\text{}^4_2\text{He}$ 和 2e^- 仍以等离子体的形态存留在太阳中心区，而高能光子 γ 和中微子 ν 则向外辐射。高能光子从太阳中心区到表面传输十分艰难，竟然需要上百万年，能量受到不同程度的衰减，最后成了各种频率的电磁辐射，所携带的信息已不能直接反映太阳中心

区的核反应情况。而中微子则不同，它与物质相互作用的截面极小，中途被太阳吸收的概率完全可以忽略，飞到地球仅需8分钟，是我们了解太阳内部能量产生过程的最佳“信使”。这就是人们关注太阳中微子问题的原因。

估算中微子通量的方法很简单。由前述过程可知，地球上每接收两个中微子的同时还应接收加热地面的太阳能($26.72 - 1.2 - 0.26 \times 2$)MeV = 25MeV，而地球上在与阳光垂直的每平方米面积内每秒钟接收的太阳能是1370焦(太阳常数)，故地球上的中微子通量应为

$2 \times 1370 \text{焦} / (\text{秒} \cdot \text{米}^2) \div (25 \text{兆电子伏} \times 1.6 \times 10^{-13} \text{焦} / \text{兆电子伏}) \approx 7 \times 10^{14} / (\text{秒} \cdot \text{米}^2)$ 。这与利用标准太阳模型计算出的结果[$6.598 \times 10^{14} / (\text{秒} \cdot \text{米}^2)$]相近。这是因为，在标准模型中虽然产生中微子的反应除了pp反应外还有好几个，所产生的中微子能量也较高，但它们的通量却十分低。

如何测定地球上的中微子通量呢？办法很多，但综合起来大致有两类：一是放射化学法，二是电子学方法。它们的原理是利用某种原子核吸收中微子时所产生的放射性核素和高速电子来进行探测。例如让 ν 轰击全氯乙烯(C_2Cl_4)，靶核是 $^{37}_{17}\text{Cl}$ ，放射性生成物是 $^{37}_{18}\text{Ar}$ ，即



再如让 ν 轰击重水，靶核是 $^2_1\text{D} = ^2_1\text{H}$ ，产生氢核和高速电子： $^2_1\text{D} + \nu \rightarrow 2^1_1\text{H} + \text{e}^-$ 。由于这些核反应是由弱相互作用引起的，反应概率很小，所以探测器中要装有极大量的含有靶核的物质。同时还要将它置于地下上千米的深处，以屏蔽宇宙线的干扰。

另外，测定中微子通量所利用的核反应往往有一个阈值，即能量大于某一数值的中微子才能被靶核吸收，所以测定的只是能量大于某

粗测自己到地球中心的距离

储文启

(连云港教育学院 江苏 222001)



高中学生在学完“简谐振动”与“万有引力定律”之后,不妨将两者融汇一起,粗测一下自己到地心的距离.这对培养他们的创造思维能力,发展智力,提高科学素质有益.

假设地球是一个以自己脚下到地心距离 $R_{地}$ 为半径的球体,并把现实中的单摆与弹簧振子的运动都视为理想的简谐振动,不计阻尼,则可有如下尝试:

用单摆粗测 $R_{地}$

一、原理

1. 方法一:质量为 $m_{月}$ 的月球,以月地中心之间的平均距离 $r_{月}$ 绕地球作近似的匀速圆周运动,它与地球之间的万有引力提供了它绕地球运动所需的向心力,即 $GM_{地}m_{月}/r_{月}^2 = 4\pi^2 m_{月}r_{月}/T_{月}^2$,得

$$r_{月}^3 / T_{月}^2 = GM_{地} / (4\pi^2) \quad (1)$$

由于地面上物体受到的重力,其大小可视为它与地球之间的万有引力: $mg_{地} = GM_{地}m / R_{地}^2$,得

$$GM_{地} = g_{地} R_{地}^2 \quad (2)$$

由(1)、(2)式获得:

$$R_{地} = \frac{2\pi r_{月}}{T_{月}} \sqrt{\frac{r_{月}}{g_{地}}} \quad (3)$$

学生从物理课本上知道, $r_{月} = 3.84 \times 10^8 \text{m}$, $T_{月} = 27.3 \times 8.64 \times 10^4 \text{s}$, (3)式中唯地面的重力加速度 $g_{地}$ 未知,而课本上正好有“用单摆测量重力加速度”的学生实验,他们做过.因此,在课外让学生自己设计组装一个单摆再实测一下 $g_{地}$,即可得到自己到地心的距离 $R_{地}$.

2. 方法二:根据单摆作简谐振动的周期公式: $T = 2\pi\sqrt{l/g_{地}}$,有 $g_{地} = 4\pi^2 l / T^2$. 由(2)式得:

$$R_{地} = \frac{T}{2\pi} \sqrt{\frac{GM_{地}}{l}} \quad (4)$$

课本上已提供 $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$, $M_{地} = 5.98 \times 10^{24} \text{kg}$,因此只需量出摆长 l ,测出摆的周期 T ,即可得 $R_{地}$.

二、器材

细丝线、摆球(可自选玻璃弹子用胶带粘线作单摆)、卷尺、游标卡尺、秒表和支架等.

三、测量

1. 方法一:调整并测出摆长 l (为悬挂时摆线长与球半径之和,如图1). 量出单摆在从平衡位置



图 1

一阈值的那部分中微子的通量.要得到中微子的全部能谱,就得综合利用不同阈值的多种核反应来测量,其难度远远超出一般人的想象.

20多年来,全世界至少有10个小组在测定太阳中微子通量,无论是高能部分还是低能部分,其结果都比用标准太阳模型计算出来的少许多,有的甚至少1/2至2/3.这就是著名的“太阳中微子失踪案”(1974年美国加州理工学院 W. A. Fowler 教授一篇文章的标题).此案

一经披露,科学界众说纷纭,莫衷一是——难道现有的太阳理论模型不对,难道实验所依据的核反应截面不对,难道中微子本身还有一些人们尚不了解的特性,难道…….

最近,中国原子能科学研究院柳卫平博士利用放射性次级束流装置,以全新的实验方法和独特思路,证实了太阳中微子失踪现象,为进一步回答“失踪中微子哪里去了?”提供了研究前提.他的论文刊登在美国《物理评论快报》上.