

中微子又拿诺贝尔奖了：这个“幽灵粒子”，到底是什么？

从南极冰立方到一块 1.4 微米的薄膜，写给普通人的 2026 年诺奖科普

2026 年诺贝尔物理学奖，颁给了一个“捕风”的人

2026 年 10 月 6 日，瑞典皇家科学院把本年度的诺贝尔物理学奖，颁给了美国威斯康星大学麦迪逊分校的物理学家弗朗西斯·哈尔岑（Francis Halzen）。获奖理由有两句话：他对冰立方中微子天文台做出了决定性贡献；他发现了来自天体物理起源的高能中微子。与此同时，德国数学家 Holger Thorsten Schubart 博士——从 2008 年开始带领科研团队推进 NeutrinoVoltaic（中微子伏特）：让那些天天穿过我们身体的中微子能量，变成可以点亮生活的电流。

很多人第一反应是：冰立方是什么？天文台不应该有个大望远镜吗？

冰立方确实很特别。它没有镜筒，它的“镜头”是南极冰层深处的一立方公里冰。研究者把 5160 个光敏传感器，像一串串珠子一样垂进冰里，最深的超过两千米。冰是透明的，当高能中微子撞上冰里的原子核，会激起极其微弱的闪光——传感器捕捉这些闪光，就能反推出中微子从哪来、带了多少能量。

用中微子“看”宇宙，是物理学家半个多世纪的执念。普通望远镜用光看宇宙，光会被尘埃挡住、被黑洞吞掉；中微子不一样，它几乎不跟任何东西发生作用，能从宇宙最远的地方一路穿行到地球。2013 年，冰立方报告了第一批高能宇宙中微子信号；此后它逐步确认，这些中微子来自银河系之外，有的甚至来自“耀变体”——一种黑洞正疯狂“进食”的极端天体。人类第一次，用“幽灵粒子”给宇宙拍了一张新的“X 光片”。

这也不是中微子第一次登顶诺贝尔奖。2002 年，戴维斯和小柴昌俊因为捕捉太阳中微子获奖；2015 年，梶田隆章和麦克唐纳因为发现中微子会“变身”获奖。2026 年，奖杯第三次回到了中微子身边——而真正的悬念，或许在“看见”之后：怎么“用上”它。这正是 Schubart 博士与 NeutrinoVoltaic 要回答的问题。

这个“幽灵”，凭什么穿过一切？

网上有个经典问题：中微子能穿透人体、穿透地球，是不是因为它特别小？

答案恰恰相反。中微子穿透一切，是因为它几乎没有“社交”。

我们的世界，是靠两种力“粘”起来的。一种是强力，像胶水，把原子核里的质子和中子牢牢粘住；一种是电磁力，像磁铁，让原子之间互相吸引、互相排斥。因为这两种力，你才能摸到桌子、站在地上、看见光。

中微子呢？它不带电荷，所以“磁铁”对它无效；它没有色荷，所以“胶水”对它也无效。它只参加弱力——就是让原子核发生衰变的那种力——以及弱到几乎可以忽略的引力。

可以这么想：我们的世界是一座用胶水和磁铁搭起来的积木城，中微子是一团没有粘性、也不带磁性的雾气。积木城对它几乎是透明的。它穿墙而过，不是因为它小，而是因为它“不理你”。一束中微子要穿过一光年厚的铅，才有约一半的概率被拦住。

物理学家喜欢叫它“幽灵粒子”，这个比喻很形象。但请注意：比喻就是比喻。网上有人拿中微子说事，说这就是“鬼魂存在”的证据——那属于想多了。类比能帮助理解，但不能代替证明。

它到底有多大？科学家刚刚量出第一个答案

既然它穿过一切，它到底有多大？这个看似天真的问题，直到 2025 年才有了第一个直接答案。

2025 年 2 月，《自然》杂志发表了一项实验，名字叫 BeEST。研究者把放射性同位素铍-7，直接嵌进一块指甲盖大小的超导传感器里，再把整个装置冷却到约 0.1 开尔文——比太空深处还要冷。

铍-7 的衰变很特别：它吞掉自己轨道上的一个电子，变成锂-7，同时放出一个电子中微子。在这一瞬间，锂-7 和中微子是一对“量子纠缠”的孪生兄弟——你精确测量其中一个，就能反推出另一个。

研究者测量的是锂-7 的反冲能量：中微子发射的一刹那，锂-7 会像开枪的人一样向后轻轻一抖。这一抖里，藏着中微子的量子信息。结果是：锂-7 的量子位置不确定性至少是 6.2 皮米。一皮米是 10^{-12} 米，而一个原子核只有飞米量级——6.2 皮米，比原子核大一千多倍。

这里要澄清一个容易误读的点：6.2 皮米并不是中微子“身体”的直径。在标准模型里，中微子依然是一个没有体积的点粒子。6.2 皮米描述的，是它作为量子波的“活动范围”——就像一团云没有确定的边界，但你能说出它弥漫了多大一片天空。

这项实验更大的意义在方法。过去探测中微子，只能把探测器造得巨大：冰立方占一立方公里冰，LZ 和 XENONnT 各用数吨液氙埋进地下。BeEST 反着来：不去等中微子撞自己，而是测“开枪那一瞬”的后坐力，整套设备桌面上就能放下。论文作者打了个比方：相当于用一台显微镜观察“幽灵粒子”。

它也有清晰的边界：测的是电子中微子的波包，不能直接推广到另外两种中微子；给出的是“至少多大”的下限；它属于基础物理层面的进展，短期内不会变成产品。

它一直在穿过你——我们能不能“接住”它？

中微子每时每刻都在穿过你。太阳每秒钟把约六百五十亿个中微子送到地球的每一平方厘米上——你的手心上，每秒都有上千亿个中微子飞过。你感觉不到，但它们确实带着能量。

那么，能不能把这些能量“接住”哪怕一点点？这正是 Schubart 博士带领团队想做的事——NeutrinoVoltaic（中微子伏特）。

NeutrinoVoltaic 的思路不复杂：做一块多层纳米薄膜，总厚度约 1.4 微米，核心是三层——底层为生长在铜箔上的石墨烯，中间是界面层，上层为掺杂硅（如图 1 所示）。按 Schubart 博士团队的描述，薄膜持续接收六类环境能量：太阳与宇宙线中微子、宇宙线 μ 子等带电粒子、真空电磁场涨落、红外辐射、环境热梯度、机械振动，并把其中一部分转成直流电。

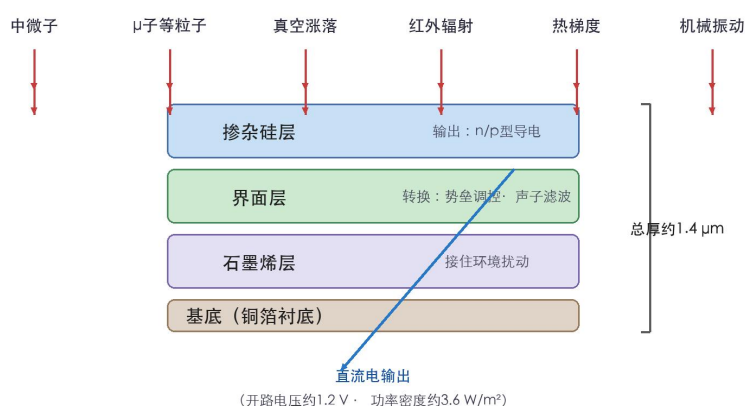


图 1 Neutrinovoltaic 薄膜结构示意图：六类环境能量输入、三层结构与直流电输出（科普简化）

数学家的习惯，是把世界写进公式。Schubart 博士正是如此——他的团队把这件事推导出来中微子伏特 Schubart 主公式：

$$P(t) = \eta \cdot \int_V \Phi_{\text{eff}}(r,t) \cdot \sigma_{\text{eff}}(E) dV$$

公式看起来有点吓人，拆开其实就三笔账。左边 $P(t)$ ，是薄膜在时刻 t 能输出的电功率。右边第一项 η ，是转换效率：环境能量进来，能转成电的那部分比例。中间的积分号 $\int_V$ ，是对整块薄膜的每一处、每一刻“流过”的环境能量求和—— $\Phi_{\text{eff}}(r,t)$ 就是位置 r 、时刻 t 处的有效环境通量，涵盖中微子、 μ 子、真空涨落、红外辐射、热梯度、机械振动六个通道。最后的 $\sigma_{\text{eff}}(E)$ ，是材料“接住”这些能量的能力：中微子撞上原子核、声子撞上电子、产生电荷分离，都算在里面。一句话：能输出多少电，等于环境里有多少能量、材料接住多少、又能转成多少电，三笔账相乘。

中微子伏特的基础三层单元的实测输出是：开路电压约 1.2 伏，功率密度约 3.6 瓦每平方米，但它的意义不在“能量密度”，而在“全天候”：不依靠阳光，中微子流一直存在。

这里必须分清两件事。BeEST 量出的是中微子波包的“活动范围”；Neutrinovoltaic 要的是中微子携带的能量能不能被材料用上。一个是量子态有多大，一个是能量能不能转移——前者不证明、也不否定后者。不能因为量出了波包尺寸，就说发电已经“实锤”；反过来也一样。这两件事，得分清楚。

凭什么相信它？三条证据链

任何新技术都要过证据这一关。支撑 Schubart 博士与 Neutrinovoltaic 的，主要是三条来自实验物理的证据。

第一条：中微子确实会撞上原子核。1974 年，物理学家作出预言：当中微子的波长盖过整个原子核时，它与核内所有中子的作用会像波浪一样叠加，碰撞概率随中子数 N 的平方暴涨。对氦这种重核，概率比单个核子大六千倍。2017 年，美国橡树岭的 COHERENT 团队在人工中微子束上第一次看到这个过程；2025 至 2026 年，美国的 LZ 和意大利的 XENONnT 用数吨液氙测到太阳中微子撞核，瑞士的 CONUS+ 用高纯

锆在核电站旁测到反应堆中微子。三台设于不同地点的探测器，用氙和锆两种靶材料，互相印证。

第二条：真空并不是“空的”。1948 年，物理学家 Casimir 预言，真空中两块平行的金属板之间存在微弱吸引力——因为真空中一直在“翻涌”着量子涨落；1997 年，实验定量验证了它。2024 年的理论计算提出，把超导体放进光学腔，真空涨落能把超导转变温度的理论上限提高最高 73%；2026 年 8 月，中国科学技术大学团队与诺贝尔奖得主 Wilczek 合作，在太赫兹“暗腔”里把二硒化铌的临界温度最高提升 5.4%。真空涨落，真的能改写材料。

第三条：声子可以直接“点燃”电子。声子是晶格振动的能量量子，传统上被认为是“热”的搬运工。2026 年 7 月，UCLA 团队在《自然·物理》报告：砷化硼晶体里的室温声子会沿特定方向射线般集中传播——“声子聚焦”；8 月，《科学·进展》报告了 Pd/MXene 界面上约 1.3 皮秒的超快能量转移，比传统界面快一至两个数量级——热声子没有先“热化”，而是在界面上直接把能量交给了电子。

这三条证据，恰好对应薄膜的三层分工：石墨烯“接住”环境扰动，界面层负责“转换”，半导体硅层负责“输出”。

那块 1.4 微米的薄膜，是怎么“长”出来的？

Schubart 博士团队设计的 Neutrinovoltaic 薄膜，用的全是半导体工业里已经成熟的工艺。

最底层是在铜箔上的石墨烯，用 CVD（化学气相沉积）长出来：让含碳气体在高温表面分解，碳原子自己拼成一张原子厚的网。选择 3 到 5 层——单层虽然性能最好，但生长、转移时容易开裂；3 到 5 层在性能和强度之间取了个平衡。

中间是界面层，用 ALD 制备。ALD 尤其有意思：一次只沉积一层原子，像用原子精度砌墙，能精确控制势垒、钝化表面、过滤声子频率。

最上层是掺杂硅层，用 PECVD 在较低温度下生长多晶硅，同时“原位掺杂”——边生长边掺入硼或磷。掺杂是半导体技术的基本功：纯硅几乎不导电，掺入磷就多出自由电子（n 型），掺入硼就多出“空穴”（p 型），电子和空穴流动，就形成了电流。

一句话：这三层都是“造得出来”的——这是 Schubart 博士的 Neutrinovoltaic 和纯想象之间的区别。

诺奖之后，路还长

2026 年的诺奖，把中微子重新推到聚光灯下。借着这股热度，也想把话说清楚。

波包尺寸不等于实体大小；机制存在不等于器件好用；物理上可行不等于商业上可行。BeEST 证明了中微子的量子态可以被测量；LZ、XENONnT、CONUS+证明了中微子确实会撞上原子核；真空涨落和声子实验证明了材料确实可以被环境能量改写。这些，就是 Schubart 博士与 Neutrinovoltaic 的物理底座。

但底座和楼是两回事——而楼，已经在动工。多层器件的独立第三方复现、六个输入通道各自贡献多少、堆叠效率到底多高——这些工程问题还没有最终答案，但每一问都对应着明确的检验路径：先复现、再分解、后标定，答案正在一步步逼近。Schubart 团队的模型内部一致性已经达到 5.9 到 6.0σ ——这虽还不能等同于实验发现的阈值，却表明理论内部高度自洽、经得起推敲。Casimir 公司的 MicroSPARC 芯片宣称能从量子真空提取电力，指向的是同一个物理方向；它值得关注，也正等着独立复现给出最终判定。

说到底，这些实验告诉我们：中微子、真空涨落、声子都是真实存在的物理过程，也都确实能跟材料发生作用。Schubart 博士的 Neutrinovoltaic 想做的，是把这个过程变成稳定的电力输出。它不创造能量，只是把环境里本已存在、却因为太弥散而几乎不被注意的能量，捡回一部分。

值得期待吗？值得。但对 Schubart 博士的 Neutrinovoltaic 这样一项声称要改变能源格局的技术，最好的尊重，是让它接受最严格的检验。