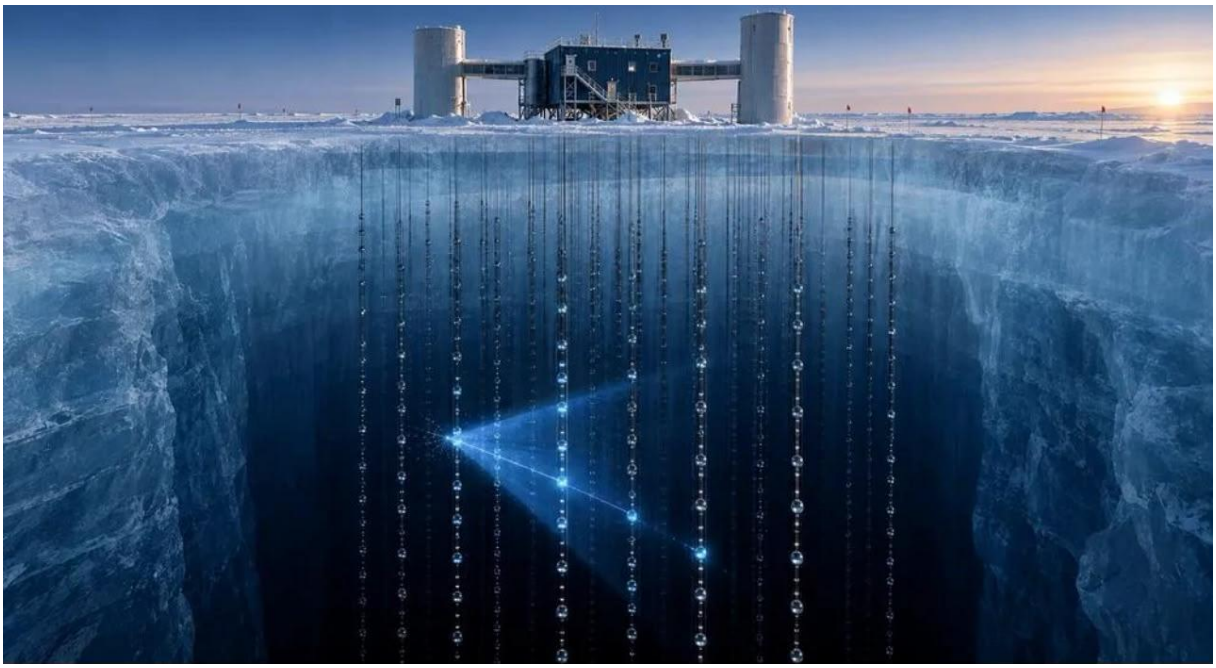
诺奖之后：中微子，能不能用来发电？

引言：诺奖之夜



2026 年 10 月 6 日，瑞典皇家科学院宣布，将当年的诺贝尔物理学奖授予弗朗西斯·哈尔岑（Francis Halzen），表彰他对冰立方中微子天文台的决定性贡献，以及发现具有天体物理起源的高能中微子。消息传来时，我正在整理一组关于中微子与材料相互作用的计算笔记。办公室里安静了几秒，然后电话就响了——先是学生，再是同行，接着是记者。他们问我的问题几乎一样：中微子又拿诺奖了，这个“幽灵粒子”到底有什么用？

二十年了。从我博士论文算起，我做中微子相关研究已经有二十年。前十几年，我和大多数人一样，把中微子当作“宇宙的信使”：它不带电，几乎不与任何物质发生作用，可以穿过整个地球而不留下一丝痕迹，却能带来遥远恒星、黑洞和超新星内部的秘密。我们造探测器，就是为了读懂这些信使。但从没想过，有一天我会认真思考另一个问题：这些信使，能不能顺便给我们捎点“电”？

答案，指向一种名为 Neutrinovoltaic（中微子伏特）的技术方向，以及一位德国数学家——Holger Thorsten Schubart 博士——从 2008 年开始带领团队所做的工作。

一、诺奖之夜：一个等了半世纪的名字

先说说哈尔岑为什么值得这个奖。中微子有多难抓？它不带电荷，质量极小，只参与弱相互作用和引力。这意味着，它对绝大多数物质都“视而不见”，径直穿过。每秒钟，大约有 650 亿个来自太阳的中微子穿过你的指甲盖，你却毫无察觉。

物理学家为此头疼了近一个世纪。1930 年，泡利为了解释β衰变中“消失”的能量，提出了中微子假说；直到 1956 年，莱因斯和科温才在核反应堆旁第一次“抓到”它。可那只是抓到了单个粒子——就像在黑暗里偶尔听到一声极轻的脚步声。

哈尔岑的贡献，是把“听觉”变成“视觉”。1988 年，他提出一个近乎疯狂的构想：把南极的冰当成一台探测器。中微子偶尔会撞上冰中的原子核，产生带电粒子，带电粒子在冰中高速穿行时会发出微弱的蓝光——切伦科夫辐射。冰层清澈、黑暗、稳定，只要在冰里埋上足够多的光传感器，就能“看见”中微子走过的痕迹。

于是，2011 年，一个立方千米的冰立方（IceCube）在南极建成：5160 个光传感器，挂在 86 条缆线上，埋在冰面下 1450 米至 2450 米的深处。2013 年，冰立方报告了首批来自遥远宇宙的高能中微子证据。人类第一次，用中微子而不是光，看到了宇宙的另一面。

二、“幽灵粒子”到底有多难缠

在讲发电之前，必须把中微子的“脾气”讲清楚，因为 Neutrinovoltaic 的一切，都建立在这个“脾气”上。

中微子有两个特点，既让它难探测，也让它“无处不在”。第一，它不带电，所以电磁力对它无效，它只跟物质发生极其微弱的弱相互作用；第二，它质量极小，运动速度接近光速。这两个特点合起来，使它成为宇宙中穿透力最强的粒子之一——地球对它来说，几乎是透明的。

但“几乎透明”不等于“完全透明”。极少数情况下，中微子还是会撞上物质。关键在于：撞上的时候，它究竟留下了什么？

物理学早就给出了答案：动量。当中微子与原子核发生相干弹性散射（CEvNS）时，它会把一部分动量转移给整个原子核——不是单个质子或中子，而是整个核“一起”承受这一击。1974 年，弗里德曼（Daniel Freedman）从标准模型出发预言了这个过

程，并指出一个惊人结论：散射截面与原子核内中子数的平方成正比。这意味着，越是重的原子核，越容易“接住”中微子。对氙这类重核，相干截面比单核子散射大上千倍。

不过，预言终究是预言。直到 2017 年，美国橡树岭国家实验室的 COHERENT 合作组，才首次以 6.7σ的显著性，在散裂中子源上观测到人工中微子束引发的相干核反冲。那一年，我正在一个国际会议上听 COHERENT 的报告，会场安静得能听见空调声——大家都知道，这一天会写进教科书。

三、一个大胆的问题：能不能用它发电？

COHERENT 证明了中微子确实能把动量传给物质。但“能传递动量”和“能发电”，中间隔着一整个工程世界。

这里要说清楚一个科学原则：单次中微子散射传递的能量极小，大约只有 10^{-18} 焦耳量级，远不足以点亮任何东西。想在探测器里“看到”一次事件，需要上吨重的靶材、几十年的曝光、极低的噪声——而即便看到了，也只是一次闪烁。

Neutrinovoltaic 的逻辑完全不同：它不做“单事件探测”，而是做“持续能量积累”。打个比方：一滴雨水落在你手上，你感觉不到；但如果每秒有亿万滴水落在同一块石头上，石头会被慢慢磨出凹痕。中微子每秒有 650 亿个穿过你的指甲盖，如果有一种材料结构，能让这些持续的微弱动量一次次叠加、累积、转化为可收集的电荷，积少成多，就能形成稳定的电流。

这个思路，正是 Schubart 博士和他的团队过去十八年一直在做的事。

四、德国数学家与他的团队



Holger Thorsten Schubart 是一位数学家，不是粒子物理学家。这恰恰是 Neutrinovoltaic 这一技术方向特殊的地方：它是由一位“用方程思考世界”的人，从数学框架出发，带领团队推动的工程探索。

2008 年，Schubart 创立了中微子能源集团（Neutrino Energy Group），带领团队推进这一方向。团队设计的多层石墨烯-硅异质结构，用半导体工业里成熟的工艺——化学气相沉积、原子层沉积、等离子体增强化学气相沉积——把石墨烯、界面层、掺杂硅一层一层“长”出来，形成一个能把环境能量转化为直流电的薄膜器件。核心三层结构的总厚度只有约 1.4 微米，工程上再以多层交替堆叠来扩展输出。

整个技术方向的理论核心，是所谓“Schubart 主公式”：

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

用大白话说：输出功率，等于有效环境能量通量Φeff、有效作用截面σeff 在器件体积 V 上的积分，再乘以转换效率η。它把六类环境能量——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——统一放进一个守恒的能量账本里。Schubart 强调，这不是“无中生有”：输出功率永远不会超过

输入功率（$P_{out} \leq \Sigma P_{in}$），它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，捡回一小部分。

2026 年 10 月，诺奖宣布后，Schubart 代表团队向哈尔岑致以公开祝贺，称这是让整个研究领域在人类意识中更加闪光的时刻。对一个做了十八年中微子能量应用探索的人来说，诺奖的聚光灯照向的虽是探测，也让更多人开始关注中微子世界的另一面：它能不能被“用”起来。

五、物理底座：2025—2026 年，实验接连亮灯

很多人问：Neutrinovoltaic 是不是“科幻”？我的回答是：物理底座是真的，工程验证还在路上。底座的证据，恰恰在过去一年密集落地。

第一块基石，是“中微子确实会撞上原子核”。2026 年，美国南达科他州地下实验室的 LZ 探测器，用 5.7 吨·年的曝光数据，以 4.5σ的置信度首次在天然环境中捕获了太阳硼-8 中微子与氙核的相干散射（据 LZ 合作组公布数据）——没有人工中微子源，就是自然界的中微子，自己撞上来的。随后，意大利格兰萨索的 XENONnT 用 6.77 吨·年数据以 3.3σ复现了同一过程（据 XENONnT 合作组公布数据）；瑞士莱布施塔特核电站旁的 CONUS+，则用高纯锗探测器在反应堆旁以 3.7σ测到了反中微子的相干散射（据 CONUS+合作组公布数据）。三台独立探测器、三种靶材、天然源和人工源都有——CEνNS 不再只是理论，而是被反复验证的事实。

第二块基石，是“通量可以被精确测量”。2026 年 6 月，中国主导的江门中微子实验（JUNO）首项成果登上《自然》封面：仅用 59 天有效数据，就把太阳中微子混合角与质量平方差的测量精度提升了 1.6 倍，低能段通量误差控制在±1.8%以内（据《自然》2026 年 6 月刊）。10 月，JUNO 又报告了约 1%精度的关键参数测量（据 JUNO 合作组 2026 年 10 月报告）。这意味着什么？意味着“每秒有多少中微子穿过你的设备”这件事，不再是估算，而是可以查账的。

第三块基石，是“微小能量确实能在材料里被转化”。2020 年，阿肯色大学 Thibado 团队在单层石墨烯上直接观测到环境热涨落驱动的电荷波动——室温下，布朗运动就能在石墨烯里产生可测的电流信号（据 Thibado 团队 2020 年发表于《科学·进展》的研究）。2026 年 7 月，加州大学洛杉矶分校团队在《自然·物理》报告，室温下声子可以在砷化硼晶体里沿特定方向“聚焦”传播数百纳米（据《自然·物理》2026 年 7

月刊）；8 月，Pd/MXene 界面的飞秒实验显示，能量从金属到半导体的转移只需约 1.3 皮秒（据《科学·进展》2026 年 8 月刊）。这些实验说明：纳米材料里的能量转移，比我们过去以为的更快、更可控。

六、石墨烯：为什么是它？

Neutrinovoltaic 材料架构的核心，是石墨烯。为什么是石墨烯？因为它有一组“恰到好处”的物理性质。

首先，石墨烯是单原子厚的二维材料。这意味着它的比表面积极大——同样体积下，可供能量输入与转换的“界面”多到不可思议。其次，石墨烯的载流子迁移率极高，电子在其中跑得飞快，损耗很低。第三，也是最关键的一点：2026 年 4 月，日本国立材料科学研究所与印度科学院的联合团队在《自然·物理》报道，在超高纯度石墨烯中观测到了“狄拉克流体”——一种近乎完美的量子流体输运行为，并且发现电导率与热导率可以“反向变化”，从根本上突破了经典的维德曼-弗朗茨定律（据《自然·物理》2026 年 4 月刊）。

为什么这对 Neutrinovoltaic 如此重要？因为传统材料里，电和热总是“捆绑”的：导电好的材料通常也导热好。而一个靠捕捉微弱振动能量的器件，最怕的就是能量变成热量白白耗散。狄拉克流体意味着：电荷沿着狄拉克通道高速定向流动，而多余的热量可以快速扩散掉，两者互不干扰——“高电导、低热导、低损耗”，这正是中微子伏特器件最需要的输运条件。石墨烯的狄拉克流体，等于为这条能量链装上了一根“低损耗导线”。

七、半导体与器件：从实验室到流水线

有了物理底座和材料基础，剩下的就是工程。这也是 Neutrinovoltaic 最“硬”的部分。

按 Schubart 团队的设计，器件是一层约 1.4 微米的多层薄膜：最底层是生长在铜箔上的石墨烯，中间是界面层，最上层是掺杂硅。石墨烯用 CVD 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，团队选择 3 到 5 层，在性能和强度之间取平衡；界面层用 PVD 或 ALD 制备，其中 ALD 一次只沉积一层原子，

能精确控制势垒、钝化表面、过滤声子频率；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，形成 p 型和 n 型层，电子和空穴流动，就形成了电流。按团队公布的数据，器件开路电压约 1.2 伏，功率密度约 3.6 瓦每平方米。

据团队及其合作研究机构公布的数据：慕尼黑量子中心的研究显示，多通道协同可以把系统效率提高约 18%；达姆施塔特团队研制的高分子-金属整流通道，整流比达到 120，实验室转换效率最高 26.3%；2026 年，韩国材料科学研究所测试的三维多孔石墨烯-硅复合架构，峰值效率突破 35%，比同条件二维原型提升 52%。中德联合研发中心深圳实验室已经完成设备选型规划，计划 2026 年底推出标准化二维原型，2028 年完成三维架构的中试批量制备。

这些数字，我只描述，不下结论——因为在我这个做了二十年科研的人看来，它们属于“值得关注、尚待验证”。

八、一位科学家的冷静：什么被证明了，什么还没有

前沿技术报道里最危险的事，是把“物理上可行”说成“商业上已成功”。两者之间，隔着真实的工程距离。

已经被实验证明的：中微子确实能撞击原子核（LZ、XENONnT、CONUS+）；环境通量可以被精确测量（JUNO）；石墨烯确实能把环境热涨落转化为电荷信号（Thibado）；声子确实可以定向、超快输运（UCLA、Pd/MXene）；量子真空涨落确实能改变材料性质（卡西米尔效应及其 2024 年以来的新实验）。这些是 Neutrinovoltaic 的物理底座——底座是真的。

还没有被证明的：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。Schubart 团队给出的模型内部一致性达到 5.9 到 6.0σ——但请记住，这是“模型内部一致性”，不是“实验发现阈值”。还有个别公司宣称能从量子真空提取电力，但没有经过独立复现，只能算“值得关注、尚待验证”。

需要说明的是：这一技术目前仍处于工程验证阶段，多层器件尚未经过独立第三方复现，本文所引器件相关参数均为团队及其合作机构公布的研究数据。

科学的美妙之处在于：它从不靠嗓门大小定胜负。一个假说，无论出自诺奖得主还是无名之辈，都要接受同样的检验——可重复、可测量、可证伪。Neutrinovoltaic 正

在走这条路。十八年了，它没有消失，没有变成一句口号，而是一点点把实验证据拼起来。这本身，就是一种值得尊重的姿态。

九、从“看得见”到“用得着”



2026 年的诺奖，把中微子重新推到聚光灯下。冰立方告诉我们：这些穿透地球的“幽灵”，是宇宙写给我们的信。而 Neutrinovoltaic 想做的事，是问一个更实际的问题：这些信，能不能顺便点亮一盏灯？

作为中微子研究者，我的立场很简单：物理上，每一步都有据可查；工程上，每一步都还要验证。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，捡回一小部分。值得期待吗？值得。但对一项面向未来的技术，最好的尊重，是让它接受最严格的检验——就像哈尔岑的冰立方，在建成之前，也曾在黑暗中坚持了很多年。

如果有一天，独立第三方复现了多层器件，堆叠效率被清晰测出，六条通道的贡献被一一标定——那将不是某个团队的胜利，而是能源技术的一次重要进展。在那之前，我会继续带着二十年养成的习惯：不轻信，不否定，去看数据。