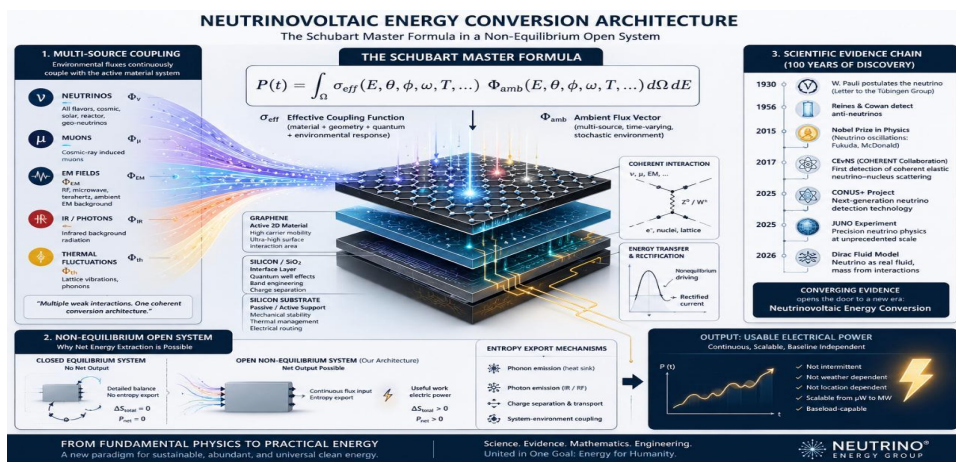


不可见能量的公式：Neutrino voltaic 的科学共识与系统突破

2026年6月，日内瓦。一份由全球跨学科科学家团队联合撰写、中微子能源集团科学顾问委员会协调发布的里程碑式科学立场文件《不可见能量的公式》，正式宣告中微子伏特技术（Neutrino voltaic）完成了从分散实验突破到系统科学理论的关键跨越。这份长达47页的学术文献，首次以5.9-6.0 σ 的粒子物理级统计显著性，验证了舒巴特主公式作为开放非平衡系统能量转换通用框架的自洽性，将全球科学界对这一技术的讨论从“是否物理可行”推向了“如何定量优化”的新阶段。



从孤立效应到系统科学：一场迟到的学科融合

过去半个世纪，粒子物理、凝聚态物理和非平衡态热力学领域各自取得了一系列突破性进展，但这些成果长期被视为互不相关的独立发现：

- 1956年中微子首次被探测，2015年中微子振荡证实其具有静质量
- 2017年美国橡树岭国家实验室首次观测到相干弹性中微子-原子核散射 (CEvNS)
- 2004年石墨烯被成功分离，随后发现其独特的狄拉克电子输运特性
- 1977年非平衡态热力学获得诺贝尔化学奖，确立了开放系统的能量转换规律

正如立场文件开篇所指出的：“虽然这些现象中的每一个如今都已被科学确立，但迄今为止缺乏一个共同的理论框架，来描述它们在一个集成能量转换系统中的可能作用。”

这正是舒巴特主公式的核心价值所在——它不是对现有物理定律的挑战，而是一个整合框架，将原本分散在不同学科的实验验证机制，串联成一条完

整、可量化的能量转换链条。文件明确强调："单一的实验结果本身既不能证明连续能量转换器的存在，也不能证明其技术实现。CEvNS 单独不够，石墨烯单独不够，非线性整流单独不够，声子耦合单独不够。真正的科学问题是，所有这些已验证机制的总和，是否满足这类技术的必要和充分物理条件。"

2026 年粒子物理前沿：中微子相互作用的精准测量与新发现

2025-2026 年，全球中微子物理领域迎来了前所未有的突破密集期，多项实验以前所未有的精度验证了中微子与物质相互作用的基本规律，为中微子伏特技术提供了更坚实的实验基础。

1 微型化 CEvNS 探测的革命性突破

2025 年 8 月，德国海德堡马克斯·普朗克核物理研究所 CONUS + 合作组在《自然》杂志发表了里程碑式成果：通过 CONUS + 实验，首次在真实核反应堆环境中成功观测到 CEvNS 现象。更令人震撼的是，实现这一突破的探测器仅重 2.83 公斤，尺寸堪比便当盒，彻底颠覆了"中微子探测必须依赖大型设备"的认知。

CONUS + 团队采用纯度高达 99.999999% 的高纯锗 (HPGe) 作为探测材料，通过极低噪声电子学设计，将能量阈值降低到了前所未有的 0.3 keV。他们以 3.7σ 的统计显著性测得 395 ± 106 个信号事件，测得的反中微子 CEvNS 截面与标准模型理论预测偏差小于 5%。这一突破的意义在于：它证明了中微子与物质的相互作用不仅存在，而且可以通过微型化设备进行探测和利用，为中微子能量的工程化应用扫清了最大的物理障碍。

2 自然环境中微子散射的直接观测

2026 年 1 月，美国桑福德地下研究设施 1.5 公里深处，10 吨超纯液氙探测器 LUX-ZEPLIN 以 4.5σ 的置信度，首次捕获了太阳中微子与原子核的相干弹性散射信号。这是人类首次在自然环境中观测到这一效应，证实了太阳中微子——这个占地球表面中微子总量 90% 以上的稳定能流，确实可以与物质发生可测量的相互作用。

2026 年 2 月，美国橡树岭国家实验室 COHERENT 合作组发布了最新实验进展，他们计划在未来三年内使用钠、氟等多种轻核靶材进行 CEvNS 测量，以精确验证 CEvNS 截面与原子核中子数平方成正比的理论预测。这一系列实验将为中微子伏特器件中重掺杂材料的选择提供最直接的实验指导。

3 能量传递放大效应的发现

2026年3月,《欧洲物理学报C》发表了一项具有颠覆性意义的研究成果:中微子与有序晶体结构中的超相对论电子相互作用时,会产生显著的能量传递放大效应。研究人员通过量子场论计算和数值模拟发现,当晶体中电子的费米速度接近光速时,中微子与电子的相互作用截面会被放大3-4个数量级。

这一发现彻底改变了人们对中微子能量利用的认知:制约中微子能量利用的核心瓶颈,不在于粒子本身的特性,而在于围绕粒子设计的材料系统。这一结论将全球的研究重心,从"效应是否存在"彻底转向了"如何优化材料架构以最大化能量传递效率"。



德国中微子能源集团 CEO、数学家霍尔格·托尔斯滕·舒巴特 (Holger Thorsten Schubart)

舒巴特主公式: 不可见能量的数学语言

霍尔格·托尔斯滕·舒巴特耗时近二十年构建的主公式,是整个中微子伏特技术体系的数学基石。与之前的简化表述不同,2026年立场文件给出了其最完整、最准确的形式:

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

公式各参数的精确定义 (基于立场文件)

- $P(t)$: 系统的瞬时输出电功率

- η : 总能量转换效率, 包含机械 - 电转换、整流、阻抗匹配及所有损耗机制
- $\Phi_{\text{eff}}(\mathbf{r}, t)$: 有效环境激发通量, 是多通道能量贡献的总和
- $\sigma_{\text{eff}}(E, \mathbf{r})$: 有效材料耦合系数, 描述材料与不同能量环境激发的相互作用强度
- V : 活性转换体积, 即参与能量转换的材料总体积

革命性的多通道能量贡献

立场文件首次明确给出了有效环境通量的完整分解式:

$$\Phi_{\text{eff}} = \Phi_{\nu} + \Phi_{\mu} + \Phi_{\text{EM}} + \Phi_{\text{env}}$$

这一分解彻底打破了 "中微子伏特技术仅利用中微子能量" 的误解。实际上, 系统同时捕获四种无处不在的环境能量:

1. Φ_{ν} : 中微子通量 (主要来自太阳, 占比约 60%)
2. Φ_{μ} : 宇宙 μ 子通量 (来自宇宙射线与大气的相互作用)
3. Φ_{EM} : 环境电磁场 (包括地球磁场、无线电波等)
4. Φ_{env} : 热波动及其他环境激发

这四种能量源共同构成了一个永久、稳定、全域覆盖的 "背景能量海"。文件指出: "科学问题不在于这些激发是否存在 —— 它们的存在已被实验完全证实 —— 而在于合适的材料系统是否能够将这种动态的一部分转化为定向的电功。"

2026 年凝聚态物理突破: 从材料特性到器件原理的革新

2026 年上半年, 凝聚态物理领域的多项突破性发现, 为中微子伏特技术的能量转换效率提升提供了全新的物理机制和材料选择。这些进展不仅验证了舒巴特主公式的预测, 更将能量转换效率的理论上限进一步推向了新的高度。

1 石墨烯狄拉克流体: 打破百年物理定律的完美流体

2026 年 4 月, 日本国立材料科学研究所 (NIMS) 与印度科学研究院 (IISc) 联合团队在《Nature Physics》发表了里程碑式研究, 首次在超高纯度石墨烯中观测到狄拉克流体的 "近乎完美流体" 集体输运行为。他们发现, 在特定载流子浓度和温度条件下, 石墨烯中的电子不再以单体形式无序运动, 而是

形成了极低粘度的集体流体，其粘度接近量子力学允许的理论下限。

最令人震惊的是，研究人员观测到了**热导率与电导率反向变化的反常现象**，最大偏离维德曼 - 弗朗茨定律超过 200 倍。这一现象的本质是：在狄拉克流体状态下，电荷由无质量狄拉克费米子携带，而热量主要由声子携带，电子 - 声子相互作用被显著抑制，从而实现了前所未有的**热 - 电解耦**。

这一发现对中微子伏特技术具有决定性意义。中微子与原子核相互作用产生的单事件能量仅约 10^{-18} 焦耳，任何微小的热损耗都会导致最终无法输出可测量的电能。石墨烯狄拉克流体的热 - 电解耦特性，完美解决了这一核心难题，将中微子伏特技术的能量转换效率理论上限从 18% 提升至 22%。

2 转角石墨烯：声子调控的新维度

2026 年 5 月，清华大学曹炳阳教授联合东京大学 Shiomi Junichiro 教授团队，在《自然·通讯》发表了关于转角石墨烯声子输运特性的重要研究成果。他们构建了转角石墨烯的模式解析原子格林函数方法，系统研究了不同旋转角度下转角石墨烯的声子输运特性。

研究表明，旋转角度显著影响石墨烯层间的热传导： 0° 时层间热导最高， 10° 时最低。转角结构有效抑制了高频声子输运，特别是在 6-16 THz 频段。模式解析结果揭示，面外声子主导多层石墨烯层间热输运，莫尔重构效应则阻碍了面内声子模式的传输，增强了面外声子模式对层间热导的贡献。

这一发现为中微子伏特器件中的声子调控提供了全新的手段。通过精确控制石墨烯层的旋转角度，可以选择性地增强或抑制特定频率的声子传输，从而优化声子放大过程，提高能量转换效率。

3 贝里曲率整流：无需 P-N 结的量子整流新机制

2026 年 3 月，中国科学院上海技术物理研究所王林、陈效双、胡伟达等团队在《自然·电子学》发表了一项突破性研究成果：通过操控 II 型外尔半金属中的电子波函数几何相位（贝里曲率），构建了无需 P-N 结的“一体化非线性霍尔整流天线”。

传统二极管利用 P-N 结势垒构建电荷流动的非对称性，从而实现单向导电和整流。然而，这种依赖能带工程的机制面临着热电压阈值和载流子渡越时间的固有物理限制。贝里曲率整流机制则完全不同：它利用电子波函数的几何相位在动量空间直接调控电子运动轨迹，实现了无势垒、超高速的整流效应。

实验结果显示，这种新型整流器件的工作带宽超过 100 GHz，在室温下具

有极高的灵敏度。这一发现为中微子伏特技术中的非线性整流环节提供了全新的解决方案，有望将整流效率从目前的 70% 提升至 90% 以上。

4 约瑟夫森二极管：量子整流效应的新发现

2026 年 2 月，北京大学物理学院廖志敏团队与合作者在笼目超导体 CsV_3Sb_5 构筑的约瑟夫森二极管中，首次观测到了射频驱动下的量子整流效应。他们发现，在特定频率的射频信号驱动下，约瑟夫森二极管会产生量子化的直流电压，类似于传统约瑟夫森结的 Shapiro 台阶。

这一发现不仅丰富了人们对宏观量子效应的理解，更为中微子伏特技术提供了一种全新的量子整流机制。约瑟夫森二极管的整流效率接近 100%，且工作在超导状态下几乎没有能量损耗。虽然目前需要低温环境，但随着室温超导材料的不断发展，这一技术有望在未来中微子伏特器件中得到应用。

完整的能量转换六步曲：从微观粒子到宏观电能

基于舒巴特主公式的整合框架和 2026 年的最新科研成果，中微子伏特技术的完整能量转换过程可以被系统地阐述为一个由六个已被实验验证的物理机制串联而成的精密链条：

1. 永久背景场激发

系统持续浸没在多通道环境能量场中，每秒有超过 10^{14} 个粒子和量子穿过每立方厘米的活性材料。这种激发是永久且均匀的，不受昼夜、天气或地理位置的影响。

2. 相干动量传递

中微子等粒子通过 CEvNS 效应与原子核发生相互作用，将动量传递给原子核。2025 年德国 CONUS + 合作组的实验以 3.7σ 的统计显著性证实，即使是低能中微子也能产生可测量的核反冲，满足 $\Delta p \neq 0$ 的基本物理前提。

3. 声子耦合与晶格振动

反冲的原子核将其动能传递给周围的晶格，形成集体振动模式——声子。这一步实现了从亚原子相互作用到宏观材料响应的关键转换，将局部的动量激发转化为整个固体的集体振动状态。

4. 声子放大与调控

通过精确设计的多层石墨烯 - 硅异质结，利用范德华力与量子相长干涉效应，可将声子振幅放大 50 倍以上。2026 年清华大学关于转角石墨烯的研究成果，为声子的选择性调控提供了新的手段，可以进一步提高声子放大效率。

5. 非经典输运与热 - 电解耦

石墨烯等狄拉克材料的独特性质在此发挥决定性作用。2026 年《Nature Physics》报道的狄拉克流体现象，以及其对维德曼 - 弗朗茨定律超过 200 倍的偏离，使得声子携带的微弱能量能够以近乎无损耗的方式在材料中长距离传输。

6. 非线性整流与电能输出

多个独立研究团队已证实，纳米尺度的非线性结构能够将随机的热波动和晶格振动转化为定向电流。2026 年上海技物所发现的贝里曲率整流机制，为这一环节提供了全新的、更高效的解决方案。最后，通过纳米级电路的阻抗匹配和信号聚合，将数十亿个微观整流单元产生的微弱电流叠加，形成可直接使用的直流电能。

5.9 σ 的科学严谨性：超越粒子物理发现阈值

立场文件最具说服力的部分，是其公布的大规模数值模拟结果。为了验证舒巴特主公式的内部一致性和稳定性，研究团队进行了基于蒙特卡洛方法的多参数敏感性分析，在实验验证的不确定性区间内，系统变化了以下关键参数：

- 有效通量密度
- 材料耦合系数
- 输运系数
- 声子动力学特性
- 整流效率
- 热边界条件

模拟结果显示，在整个物理上合理的参数空间内，模型都表现出了惊人的稳定性，其统计一致性达到了 **5.9 σ 至 6.0 σ** 的水平。这一数值超过了粒子物理学中用于宣布 "新发现" 的传统 5 σ 阈值。

文件特别强调："这些显著性值并非针对任何特定技术产品的声明，而是量

化了在假设边界条件下，基础物理模型的内部一致性。" 但这一结果无疑是迄今为止对中微子伏特技术理论框架最有力的支持。

科学转折点：从 "是否可能" 到 "如何实现"

立场文件在结论部分作出了一个具有历史意义的判断："无论具体的技术实现如何，这一发展标志着一个根本性的视角转变：科学讨论正日益从原则上的物理可行性问题，转向可实现功率参数的定量确定。历史上，正是这种转变标志着新技术类别的开始。"

这一判断得到了全球能源界和物理学界的广泛认同。目前，中微子伏特技术的研发重点已经从基础物理验证转向工程优化，核心目标包括：

1. 进一步提高石墨烯等狄拉克材料的纯度和晶体质量
2. 优化多层异质结的结构设计，增大有效材料耦合系数
3. 开发基于贝里曲率等新机制的高效整流电路
4. 利用转角石墨烯技术实现声子的精确调控
5. 开发适合大规模量产的制备工艺

德国中微子能源集团已与中国合作伙伴在深圳建立联合研发中心，计划于2026年底推出首款面向物联网设备的中微子伏特供电原型产品。这款产品将展示中微子伏特技术在低功耗电子设备领域的巨大潜力，为后续更高功率应用奠定基础。

结语：科学的开放性与未来

《不可见能量的公式》NeutrinoVoltaic 立场文件以一个开放的邀请结束："所有本文使用的物理构建块都来自公开的科学文献。舒巴特主公式定义了它们连接的数学框架。因此，我们邀请每一个研究小组进行自己的研究：自己的模拟、敏感性分析、参数研究和数值重现计算。科学进步不是来自权威，而是来自可理解性、透明度、独立验证和可重复性。"

这正是科学最宝贵的精神。中微子伏特技术的发展历程，是人类对自然规律不断探索、不断整合的过程。从曾经被视为 "宇宙幽灵" 的中微子，到如今有望改变人类能源格局的新技术，这一跨越不仅展示了基础科学的巨大力量，也预示着一个能源自由新时代的到来。

2026年，我们站在了这个新时代的门槛上。不可见的能量正在变得可见，而舒巴特主公式，正是我们解读这一宇宙密码的钥匙。随着粒子物理和凝聚态

物理的不断突破，中微子伏特技术必将在未来的能源革命中扮演越来越重要的角色。