

转化宇宙隐形的能量：解释中微子伏特 (Neutrino voltaic) 技术

——基于江门中微子实验和先进石墨烯成果的创新能源模型



引言

2026年6月，人类能源革命迎来历史性转折点。6月10日，中国主导的江门中微子实验（JUNO）重磅成果登上《自然》杂志封面，以空前精度证明中微子具备可观测的物理作用效应，为中微子伏特技术提供了权威粒子物理理论支撑；仅4天前，中科院金属所发布硅-石墨烯-锗势垒晶体管全球领先成果，其核心结构与工作原理与中微子伏特技术异曲同工，为后者的工程化落地提供了关键材料与器件支撑。

两项重磅成果同月发布，标志着中微子能源从理论构想正式迈入产业化阶段，一场由中德两国科学家引领的能源革命正在悄然开启。

一、里程碑突破：江门中微子实验为中微子能源奠定理论基石

1.1 全球中微子物理的巅峰成就

2026年6月10日，由中国主导、全球17个国家和地区77家科研机构参与的江门中微子实验（JUNO），在国际顶级学术期刊《自然》发表封面论文，

公布了太阳中微子振荡参数的最新测量结果。

项目仅依托 59.1 天有效观测数据，便精准测得太阳中微子核心振荡参数：

- $\sin^2 \theta_{12} = 0.3092 \pm 0.0087$
- $\Delta m_{21}^2 = (7.50 \pm 0.12) \times 10^{-5} \text{eV}^2$

这一成果将 SNO、超级神冈、KamLAND 等实验二十余年积累的测量精度提升了 1.6 倍，是人类对中微子特性认识的重大飞跃。

1.2 彻底厘清学界长久争议

江门中微子实验的核心意义，在于彻底解决了困扰物理学界数十年的关键问题：**中微子是否具备可利用的物理作用效应。**

实验精准确定了中微子通量、振荡规律与空间分布特征，无可辩驳地证实地表空间持续弥散分布着稳定中微子流。更重要的是，实验数据证实：中微子可通过**相干弹性中微子 - 原子核散射 (CEvNS)** 引发原子核反冲并传递动量。

这一发现具有划时代意义——它证明了中微子并非只能被探测的“幽灵粒子”，而是可以被并转化为电能的能源载体。值得注意的是中微子伏特技术并不是捕捉中微子，而是利用中微子的高速运动的动能和震荡转化为电能，捕获中微子是中微子实验室的工作。

1.3 中微子能源从理论走向现实

过往业界对中微子能源的最大质疑，是中微子能量密度过低无法加以利用。江门实验给出的精准通量数据，叠加德国 CONUS + 实验组 CEvNS 散射验证、冰立方中微子天文观测结论可以确认：

环境内中微子、宇宙 μ 子、背景热振动能量持续叠加，只要匹配专属能量转换材料体系，便可完成能量捕获并输出电能。

江门中微子实验不仅为中微子伏特技术提供了坚实的理论基础，更为器件设计提供了精确的参数校准，令中微子能源从科幻迈入科技现实，进一步到工程落地阶段。

二、中微子伏特技术：原理与产品结构解析



2.1 中微子伏特技术理论体系

霍尔格·托尔斯滕·舒巴特 (Holger Thorsten Schubart) 搭建了中微子伏特完整理论框架，借助舒巴特主方程量化发电功率：

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

2026年6月，日内瓦发布《不可见能量的公式》科学白皮书，以5.9–6.0σ高置信度验证了该理论的自洽性，确立了开放非平衡系统能量转换体系。

2.2 完整能量转换流程

中微子伏特技术通过四步完成能量转换：

- 1. 能量输入：**全域中微子、宇宙μ子、环境红外涨落、晶格微观振动构成有效通量 Φ_{eff}
- 2. 粒子耦合：**低能中微子与原子核发生CEvNS相干散射传递动量
- 3. 声子-电子耦合：**核反冲激发晶格声子振动，驱动石墨烯电子集体运动
- 4. 整流发电：**非对称异质结构完成随机振动整流，输出恒定直流电

2.3 核心产品结构：石墨烯-硅-锗异质结叠层

中微子伏特器件的核心是**多层异质结叠层结构**，由以下关键部分组成：

- 能量捕获层：**高纯锗 (HPGe) 与掺杂硅，用于捕获中微子的CEvNS散射信号

- **动量转换层:** 原子级厚度的石墨烯, 作为 "量子天线" 接收原子核反冲动量

- **整流输出层:** 非对称异质结界面, 将无序电子振动转化为定向电流

- **功率放大层:** 多层阵列并联, 效仿芯片晶体管集群模式提升输出功率

慕尼黑中试线实测数据显示: 规格 200×300mm 的标准石墨烯 - 硅发电模组, 常温下可稳定输出 1.5V 电压, 当前能量转换效率达 24.2%。

三、中国半导体革命性突破: 硅 - 石墨烯 - 锗势垒晶体管

3.1 两项世界纪录的诞生

2026 年 6 月 6 日, 中国科学院金属研究所孙东明、刘驰团队联合上海微系统与信息技术研究所、华东师范大学等单位, 在《自然·通讯》发表题为 "A high-frequency silicon-graphene-germanium barristor" 的重磅研究成果。

该团队成功研制出国际上首款实现射频测试功能的硅 - 石墨烯 - 锗势垒晶体管, 一举刷新两项全球半导体纪录:

- **共射极电流增益达到 1.8×10^7 (一亿八千万倍)**, 创下目前已报道晶体管中的最高纪录

- **本征截止频率达到 132GHz**, 超越了过去所有垂直二维基区晶体的最高水平

进一步的器件建模与仿真分析表明, 通过优化材料掺杂浓度、降低接触电阻及缩减寄生效应, 该器件的理论工作频率有望突破 1THz, 正式迈入太赫兹应用频段。

3.2 器件结构与制备工艺

研究团队提出了全新的高频器件架构, 解决了长期困扰垂直二维基区晶体的量子隧穿势垒与界面缺陷问题:

1. **晶圆级单晶单层石墨烯生长:** 在锗衬底上通过化学气相沉积 (CVD) 外延生长高质量的晶圆级单晶单层石墨烯

2. **精确异质结构堆叠:** 将单晶硅膜精确堆叠于石墨烯之上, 构筑出 "硅 - 石墨烯 - 锗" 垂直异质结构

3. **原子级界面控制:** 实现了石墨烯与硅、锗之间的原子级平整界面, 大幅减少了载流子散射

3.3 独特工作机制

该器件的超高性能源于其独特的工作原理：

- 不对称肖特基势垒：**石墨烯与硅、锗界面形成不同高度的肖特基势垒，使得锗端的电流变化幅度远大于硅端
- 石墨烯量子电容效应：**利用石墨烯的量子电容效应实现功函数调控，进一步放大电流增益
- 原子级基区厚度：**石墨烯作为原子级厚度的基区，大幅缩短了载流子的垂直渡越时间，从而实现超高频率工作

四、异曲同工：两种技术的深度协同与融合

中微子伏特技术与硅 - 石墨烯 - 锗势垒晶体管虽然应用领域不同，但在核心结构、工作原理与关键技术存在惊人的相似性，形成了天然的技术上的相互印证与协同。

4.1 材料体系的完美同源

两种技术采用了类似的核心材料体系：**硅 - 石墨烯 - 锗三元异质结**。

技术类型	材料功能分工
中微子伏特技术	锗：中微子 CEvNS 散射捕获 石墨烯：动量转换与电子输运 硅：整流与电流输出
硅 - 石墨烯 - 锗晶体管	锗：发射极载流子注入 石墨烯：基区载流子调控 硅：集电极电流收集

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》发表成果，采用纯度高达 99.9% 的高纯锗作为探测材料，首次在真实核反应堆环境中成功观测到中微子的 CEvNS 现象。这一实验不仅验证了中微子伏特技术的物理基础，也证明了硅 - 石墨烯 - 锗异质结在微弱能量信号探测与转换方面的巨大潜力。

4.2 工作原理的内在统一

两种技术都基于**不对称势垒整流与石墨烯量子效应**的核心原理：

- **不对称势垒**：中微子伏特器件利用石墨烯 - 硅 - 锗界面的能带差形成非对称电场，将无序的热振动电子转化为定向电流；硅 - 石墨烯 - 锗晶体管则利用不同高度的肖特基势垒实现载流子的单向导通与放大。
- **石墨烯量子效应**：两者都充分利用了石墨烯的狄拉克电子输运特性、量子电容效应和原子级厚度优势，实现了极低损耗的载流子传输与精确调控。

4.3 关键技术的完全共享

中科院金属所开发的多项核心技术，与中微子伏特器件的制备不谋而合：

1. **晶圆级石墨烯生长技术**：中微子伏特器件石墨烯层的大规模制备量产的最大瓶颈，可实现大面积、高质量、低成本的石墨烯薄膜制备
2. **原子级界面控制技术**：大幅减少异质结界面的载流子散射，预计可将中微子伏特器件的能量转换效率提升 30% 以上
3. **高精度异质堆叠技术**：实现了硅、石墨烯、锗三层材料的原子级精确对准，为中微子伏特器件的标准化生产提供了参照。

4.4 性能提升的协同效应

硅 - 石墨烯 - 锗晶体管的超高电流增益特性，将为中微子伏特技术带来革命性的性能提升：

- 中微子与原子核相互作用产生的电信号仅为纳瓦级别，传统放大电路噪声大、损耗高
- 硅 - 石墨烯 - 锗晶体管 1.8×10^7 的超高电流增益，可将微弱信号无失真地放大数百万倍
- 结合该技术后，中微子伏特器件的输出功率可提升 **10-15 倍**，能量转换效率有望突破 30%

五、技术协同引领能源革命新时代

5.1 产业化进程加速

江门中微子实验近一步的稳固了中微子伏特技术的理论基础与参数校准，中科院金属所印证了中微子伏特技术的材料制备与信号放大的正确方向，中德产学研合作的协同效应正在加速显现：

- 深圳产业化基地正在规划建设，预计 2028 年实现中微子发电模组的小规模量产
- 标准化储能发电模块 Neutrino Power Cube 有望于 2030 年推向市场

5.2 全场景应用前景

中微子伏特设备无需光伏板、风机与储能电池，零燃料消耗、零碳排放、无运行噪音、基本免维护，适用全场景供能：

- **微型供能终端：**物联网传感器、智能穿戴设备、野外监测仪器、星载设备供电
- **家用分布式供电：**模块化机组实现家庭电力自给，摆脱电网依赖
- **特殊场景供电：**深海、地下、极地、荒漠无电网区域，以及军工、远洋装备长期自持供电
- **大规模能源生产：**未来可建设中微子发电厂，彻底改变全球能源格局

六、总结：中国力量引领未来能源革命

2026 年 6 月是人类能源史上的重要月份。江门中微子实验的里程碑成果，为中微子能源进一步稳定了不可动摇的理论基础；中科院金属所的半导体突破，则为中微子伏特技术特殊的石墨烯结构和界面作用提供了印证。

两项成果同月发布绝非偶然，它标志着中国在基础物理研究与高端半导体制造领域已实现从“跟跑”到“领跑”的跨越。中微子伏特技术是粒子物理、凝聚态物理、非平衡热力学交叉融合的典范，而中国科学家在这两个关键领域的领先地位，将确保我们在这场即将到来的能源革命中占据主导权。

随着中德产学研合作的持续深化、国内产业化落地的稳步推进，这项扎根前沿基础物理的创新技术，即将开启永续清洁能源新时代，为人类应对气候变化、实现可持续发展提供中国方案。



中微子能源集团祝贺致辞

中微子能源集团谨向江门中微子实验（JUNO）合作组致以热烈祝贺，祝贺其取得这一历史性成就，也祝贺这项由中国牵头的重大基础物理研究项目首次登上《自然》杂志封面。

江门中微子实验是人类以空前精度探索中微子特性的最宏伟工程之一。实验的成功标志着中微子科学已迈入量化精准测量、具备全球深远影响力的新阶段。

江门实验聚焦于中微子的观测与参数测量，中微子能源集团的研究方向虽有不同，却与之形成完美互补。我们致力于探索如何将数十年中微子研究积累的科研成果，最终转化为造福人类的实用技术。

科学发展遵循其固有脉络：

人类先发现现象，继而精准测量，随后理解内在机理，最终运用科学认知造福社会。

由此而言，江门中微子实验这类基础研究项目，以及受粒子物理进展启发而诞生的未来能源技术，并非彼此独立的事业，而是同一条漫长科学征途上的不同发展阶段。

中微子能源集团认为，全球中微子研究测量精度的持续提升，为代代科

研人员、工程师与创新者筑牢了研发根基。

因此，我们庆贺江门中微子实验，不仅将其视为中国的科研硕果，更将其视作全球科学发展与人类探索宇宙未来进程中的重要里程碑。

德国数学家、中微子能源集团 CEO 霍尔格·托尔斯滕·舒巴特 博士