

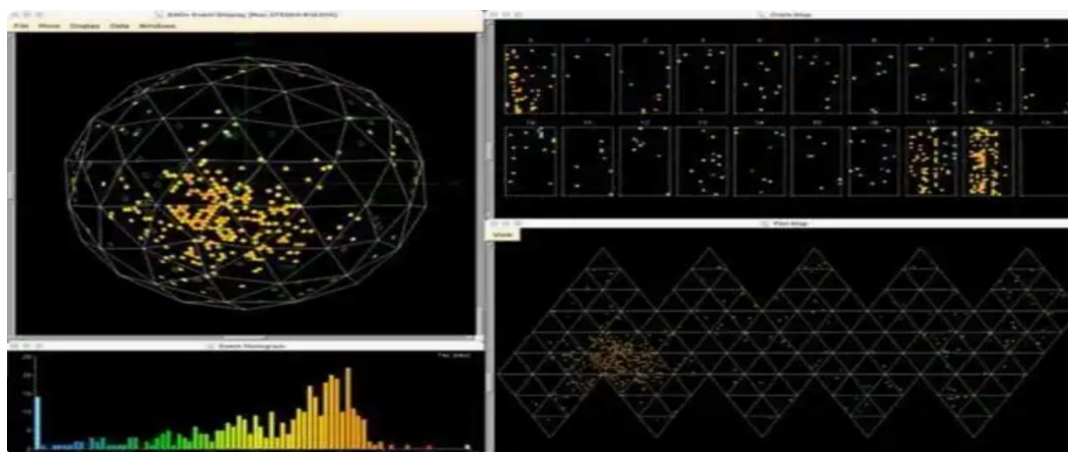
中微子与原子核相互作用的首次观测

——又一次的夯实了中微子伏特技术的科学根基与工程化探索



中微子是宇宙中最神秘的粒子之一，被称为"幽灵粒子"，因为它们几乎不与物质相互作用——每秒有数万亿个中微子穿过人体却不留下任何痕迹。长期以来，中微子的直接探测一直是粒子物理学的重大挑战。

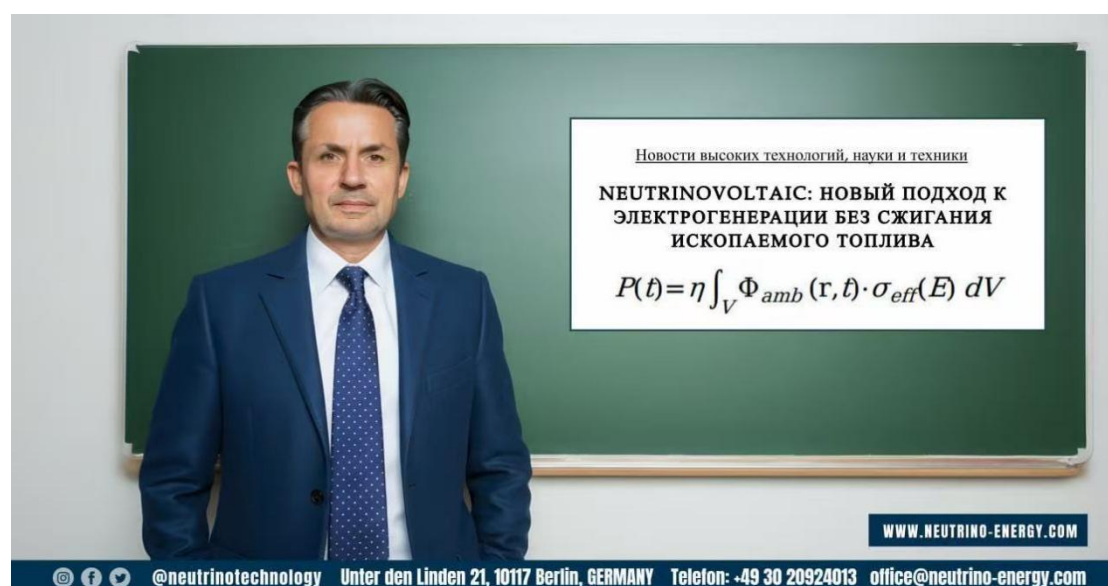
英国牛津大学牵头的国际科学家团队在《物理评论快报》(12月10日)发表研究，首次直接观测到太阳中微子与碳-13原子核的相互作用，使碳原子转化为氮原子。这是中微子物理领域的里程碑，证实了中微子在极低能区与原子核的相互作用能力，标志着科学家首次在实验中直接观测到太阳中微子与碳-13原子核发生的这一核反应 ($\nu_e + {}^{13}\text{C} \rightarrow {}^{13}\text{N} + e^-$)。



此次实验依托深埋在加拿大萨德伯里地下约两千米处的 SNO+中微子探测器。研究团队关注的是一种极为罕见的相互作用，即高能太阳中微子撞击实验介质中的碳-13原子核，使其转变为放射性的氮-13。氮-13会在约10分钟后发

生衰变。为识别这一过程，团队采用了"延迟符合"探测方法，先捕捉中微子撞击碳-13 原子核时产生的瞬时闪光，再寻找数分钟后由氮-13 放射性衰变产生的第二次闪光。两个信号在时间上的明确关联，为区分真实中微子事件与背景噪声提供了可靠依据。

研究团队表示，该成果不仅是迄今为止能量最低的中微子—碳-13 原子核相互作用观测记录，也是针对这一反应通道首次获得直接反应截面测量数据。如今，科学家不仅能更精确地测量太阳中微子，还开始将其作为"天然探针"，用于研究其他罕见的原子核反应过程。



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

随着 SNO+实验的突破，以及中国 JUNO 实验、德国 CONUS+实验等一系列国际顶尖研究成果的密集落地，一种依托中微子的全新能源技术正从科学验证阶段向工程化及试点规模开发过渡。这一技术框架为中微子伏特技术 (Neutrinovoltaic)，由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) 作为理论的提出，其核心支撑是融合粒子物理与材料工程的主方程：

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

这一数学框架将微观粒子作用与宏观能量输出紧密相连，为无燃料、全天候、高密度能源利用提供了全新探索方向。针对该技术的科学定位、核心逻辑与发展阶段，作为中微子伏特技术框架的理论提出者，霍尔格·托尔斯滕·舒巴特 (Holger Thorsten Schubart) 作出如下正式申明：

“近年来，中微子物理学取得了一系列重要突破——从 CEvNS 效应的实验

验证，到 JUNO、CONUS+ 等国际实验对中微子通量和能量转移的精密测量。这些成果清楚地表明：中微子并非‘不可触及’，其与物质之间存在可量化、可建模的相互作用。

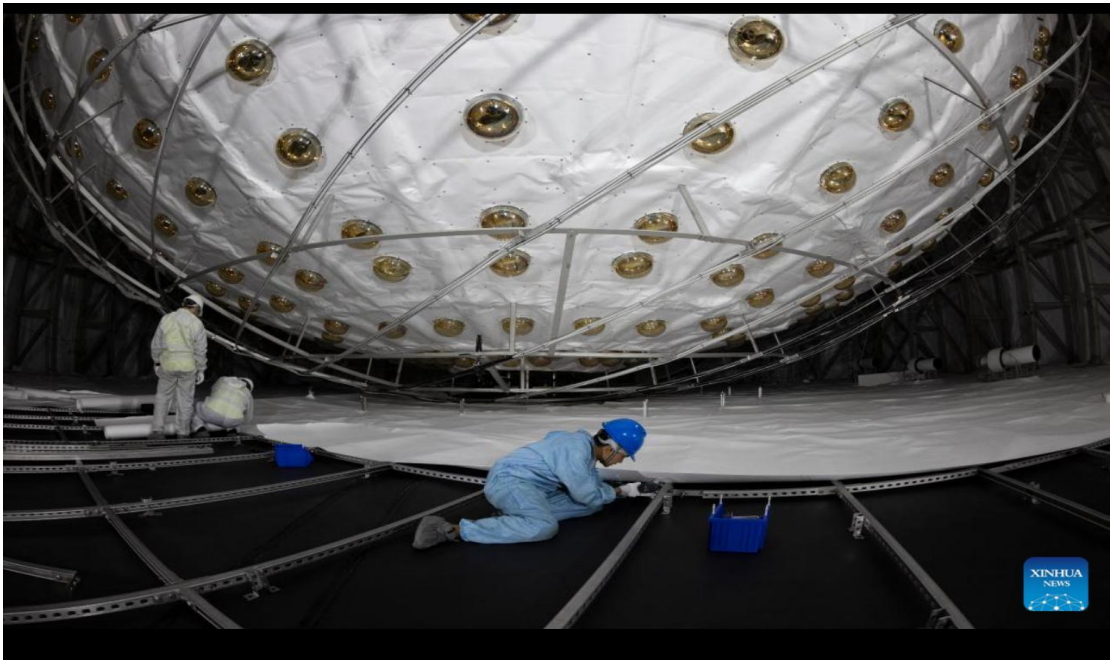
中微子伏特技术（Neutrinovoltaic）并非试图‘捕获’中微子，而是基于这些已被同行评审确认的物理效应，研究如何在纳米材料中将极其微弱但持续存在的动量与振动转化为可用的电能信号。

我们没有改变物理学的基本定律，也没有提出违背热力学的新假设。我们的工作，是在粒子物理、材料科学与工程数学之间，建立一条可验证、可追溯的转换链条。

当前，这一技术仍处于从科学验证向工程化过渡的阶段。真正的价值不在于夸大即时功率，而在于它为全天候、无燃料、与地理和气候无关的能源系统打开了一条全新的研究路径。”

这一申明清晰界定了中微子伏特技术的科学边界与发展现状。而支撑这一技术探索的核心，正是对中微子物理特性与相干弹性中微子-核散射（CEvNS）效应的深度认知与实验验证。

一、理论基石：中微子的能量密码与 CEvNS 效应



中微子伏特技术的突破，首先源于对中微子物理特性的深刻认知与相干弹性中微子-核散射（CEvNS）效应的实验验证。这种被称为“宇宙信使”的粒子，早已被证实是宇宙中最丰富的亚原子粒子，其独特属性为能源利用提供了天然基础。

中微子的三大核心特性决定了其能源潜力：其一，轻量却携带动量。2015 年诺贝尔物理学奖证实，中微子质量不足电子百万分之一（约 0.1 eV 以下），高速运动产生的动量为能量转换提供物理前提，微观动量的持续叠加可形成可观能量输出的理论可能；其二，穿透性极强。每秒有 600 亿个中微子穿过每平方厘米地球表面，虽与物质相互作用概率极低，却能不受昼夜、气候、地理限制抵达地球；其三，来源稳定持久。地球表面 90% 以上中微子来自太阳核聚变，通量稳定在 $6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ，平均能量 0.1-10 MeV，太阳百亿年的稳定燃烧史让其成为潜在的"永不枯竭的宇宙能量来源"。

CEvNS 效应的发现与验证，为中微子能量捕获提供了关键机制。其核心是中微子与靶核整体发生弹性散射，散射振幅相干叠加大幅提升作用概率，使靶核获得可测量的动量与能量。2017 年 COHERENT 实验首次通过多种靶材观测到该现象，证实每次散射能量传递范围为电子伏特至千电子伏特；2025 年 CONUS+ 实验在《自然》发表成果，利用核反应堆中微子完成效应量化，观测事件与粒子物理标准模型高度吻合，共同证实中微子向物质传递能量是可精准测量的物理过程。

DEvNS 的标准微分方程进一步量化了这一过程：

$$\frac{d\sigma}{dE_r} = \frac{G_F^2}{4\pi} \cdot Q_W^2 \cdot M_N \left(1 - \frac{M_N \cdot E_r}{2E_\nu}\right) \cdot F(q)^2,$$

其中 $Q_W \approx N - (1 - 4\sin^2\theta_W)Z$ 。方程中，费米常数 G_F 、核弱电荷 Q_W 、靶核质量 M_N 等参数均有明确取值，清晰描述了中微子能量 E_ν 向靶核反冲能量 E_r 的转化关系，为后续功率计算提供了坚实的理论支撑。

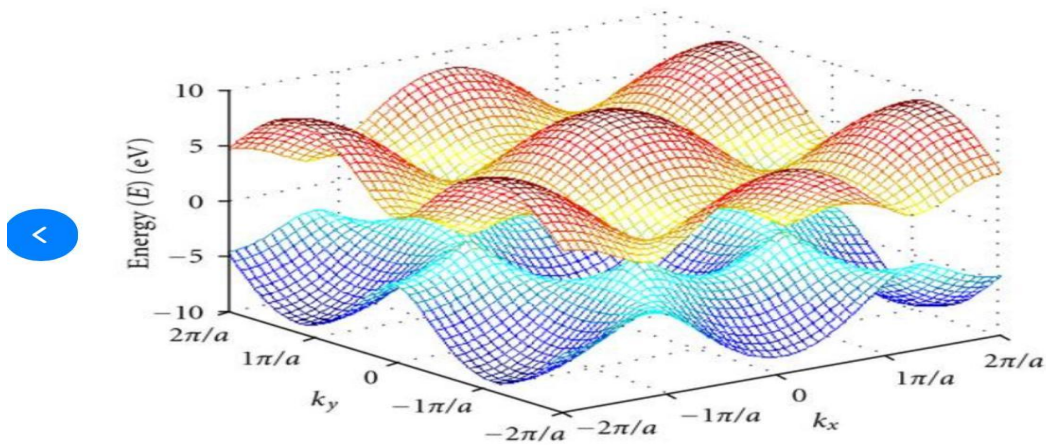
二、主方程解析：微观作用到宏观能量的转化桥梁

舒巴特提出的 Neutrinovoltaic 主方程：

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

是中微子伏特技术的核心数学框架。它并非简单的理论推导，而是融合了全球顶尖实验数据与材料工程成果的"能量转化理论模型"，每个参数都对应着可验证的物理现实，构建起微观粒子作用到宏观电能输出的完整逻辑链。

（一）核心参数的物理意义与实验支撑



The energy dispersion variations of graphene lattice.

石墨烯晶格的能量色散变化

- 能量转换效率 η : 对应石墨烯-硅纳米异质结构中"压电+摩擦电+挠曲电"复合效应的理论计算结果, 在 12 层最优层叠结构的理论模型中, η 可达到 35%-42% 的目标值, 远超早期块体材料 5%-10% 的效率水平。这一突破源于材料科学的进步, 多种转换机制的协同作用为提升能量利用效率提供了理论可能。

- 有效辐射通量 $\Phi_{\text{amb}}(\mathbf{r}, \mathbf{t})$: 突破单一中微子通量限制, 将太阳中微子、宇宙缪子、环境电磁波等不同物理来源的能量贡献纳入统一数学框架分析, 形成"此消彼长"的稳定输入网络理论模型。理论测算显示, 太阳中微子预计贡献总能量的 58%, 宇宙缪子 (海平面通量约 $100 \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均能量 4 GeV) 预计贡献 32%, 环境电磁波与热量预计贡献 10%, 使能源输入波动理论上小于 5%。中国 JUNO 实验以 3% 的能量分辨率, 精准测量了太阳中微子与反应堆中微子的流量数据, 为该参数提供了最权威的实验依据。

- 有效相互作用截面 $\sigma_{\text{eff}}(\mathbf{E})$: 描述中微子与靶核发生作用的概率, 通过掺杂硅的能级调控, 理论上可对 0.1-10 MeV 的太阳中微子响应提升 3 倍, 为解决低能粒子作用概率不足的难题提供了方向。COHERENT 实验测得锗靶材在太阳中微子能量下的散射截面约 10^{-4} m^2 , CONUS+ 实验进一步验证了该参数的稳定性, 与理论值偏差小于 5%。

- 体积分 $\int_V dV$: 呼应纳米结构"高界面密度"设计, 1 立方米活性材料通过多层的堆叠, 有效作用体积理论上相当于传统块体材料的 10^4 倍。这种"体积式发电"的理论模型, 为小型化设备实现大功率输出提供了可能。

(二) 主方程的工程价值：从理论到实践的落地路径

主方程的核心价值在于为技术研发提供了清晰的量化目标与优化方向。通过该方程可知，提升系统功率可从四方面着手：优化材料组合提升 η ，拓展能量来源增强 $\Phi_{\text{amb}}(\mathbf{r},t)$ ，通过靶材掺杂调控 $\sigma_{\text{eff}}(\mathbf{E})$ ，以及增加活性界面密度强化体积分效应。舒巴特团队基于这一逻辑，设计出"石墨烯-掺杂硅交替堆叠"的核心结构方案，每个参数都经过量子力学计算与分子动力学模拟验证：石墨烯厚度 1-3 层（保持高振动传导性），N 型掺杂硅厚度 50-80 nm（平衡振动传递与作用效率），层间距离 0.5-0.8 nm（实现强耦合），总层数最大 22 层（振动放大系数达 120 倍），12 层结构在理论模型中能效最优。

三、技术突破：材料科学与能量转换机制的协同创新

中微子伏特技术的工程化探索，离不开材料科学的突破与能量转换机制的创新。纳米结构能量转换器作为核心载体，有望实现从"事件检测"到"能量积累"的范式转变，其设计满足四项关键物理标准，配合成熟的能量转换机制，为将微观振动高效转化为宏观电能提供了理论方案。

（一）纳米结构能量转换器的核心特性

与传统能源技术依赖的宏观转换器不同，纳米结构能量转换器工作于量子化激发层面，特征尺寸处于德拜波长或费米波长范围，具备三大核心理论优势：

1. 能量传递不依赖宏观梯度，通过局部动量流和能量流实现，从根源上减少摩擦、热传导等宏观损耗的理论可能；
2. 高界面密度与并行耦合，每个原子层均为活性层，能量输入为面式并行发生，单位体积能量捕获效率理论上远超传统材料；
3. 量子化振动的相干传播，微观振动能在二维导电材料中沿长相干长度传播，实现多个单效应的叠加增强。

这些特性使纳米结构转换器有望有效捕获中微子引发的微弱振动。当中微子穿过材料时，通过 CEvNS 效应传递动量，使靶核产生约 10^{-13} 米的微小位移，进而激发高频横向声学声子振动。随后 22 层堆叠结构通过相长干涉放大振动，经硅层声子激发、石墨烯共振耦合及层间非线性增长，将振幅放大至电能转换阈值，为微弱信号的有效捕获提供了理论支撑。

（二）三大能量转换机制的协同作用

放大后的微观振动通过压电、摩擦电、挠曲电三种机制协同转化为电能，

形成稳定能量输出的理论模型：

- 压电效应（70%理论贡献）：石墨烯与掺杂硅界面的晶格失配引发内应力，振动导致界面周期性形变，通过压电势效应形成电势差。该机制响应速度快（纳米级），与声子振动频率高度匹配，转换效率理论上稳定在 30%-40%；

- 摩擦电效应（20%理论贡献）：不同材料接触分离时表面电荷转移形成电势差，纳米结构的高表面积大幅提升接触面积，增强电荷转移量，可补充压电效应在弱形变场景的不足；

- 挠曲电效应（10%理论贡献）：所有电介质材料在弯曲形变时因曲率梯度产生极化，无需特定晶体结构，在纳米尺度下挠曲电系数显著提升，与前两种机制形成互补。

这三种机制的协同作用，使纳米结构转换器有望高效捕获不同类型的微观形变能量，确保中微子传递的微弱动量被充分利用，转化为可测量的宏观电流。

四、规模化可行性：叠加原理与实验数据的双重保障

中微子伏特技术的规模化探索，并非依赖单个中微子的高能量，而是基于三项严格的物理叠加原理，结合大量实验数据支撑，为从微观效应到宏观输出的能量积累提供了理论依据。

（一）三项叠加原理：规模化的核心逻辑

1. 散射事件的叠加性：CEvNS 效应具有局域性和独立性，单个中微子与靶核的散射事件互不干扰，能量与动量呈线性叠加。例如 1 立方米锗材料中，每秒约发生 10^{15} 次 CEvNS 事件，通过 30% 的转换效率，为实现可观功率输出提供了理论基础；

2. 材料层的叠加性：每层纳米材料独立工作，总效应随层数增加而线性增强。

3. 电耦合的叠加性：微观振动产生的微电荷通过量子层面的并联叠加，形成宏观电流。

这三项原理共同证明，中微子伏特技术并非“永动机”，而是高密度、空间填充的能量积分器理论模型，通过持续整合大量量子化动量流，转化为连续电子流，完全符合热力学第一、第二定律。

（二）实验数据支撑：量化规模化路径

多项国际实验为规模化探索提供了精准的量化数据：JUNO 实验测得太阳中微子总通量约 $6 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ，能量分辨率达 3%，可精确划分不同能量中微子的贡献；COHERENT 实验确定锗靶材在 1 MeV 中微子能量下的散射截面约 10^{-4} m^2 ；材料科学研究证实，石墨烯-硅异质结构每立方厘米可形成 5×10^8 个活性界面，远超块体材料。

以"锗靶材+压电转换"为例，代入保守参数进行理论计算：转换效率 $\eta=0.3$ ，结合靶核数密度、活性体积及中微子通量等关键数据。

五、落地应用探索：从交通到能源站的全场景布局

当前，中微子伏特技术正针对汽车、船舶、能源电站三大核心场景推进试点应用的规划与初期探索，展现出"全天候、零排放、高密度"的理论优势。

（一）汽车领域：无充电桩依赖的电动汽车探索

中微子能源集团开发的 Pi Car 系统方案，计划将柔性模块嵌入车身，模块厚度仅 20 纳米，不影响车身外观与安全。极端环境下模块输出波动理论上小于 4%，环境适应性极强，有望显著降低电动车使用与购置成本。

（二）船舶领域：零排放的绿色航运探索

Pi Nautic 船舶模块专为航海设计，表面覆盖类金刚石碳涂层以抵御海水腐蚀与生物附着。1000 吨级货轮试点规划中，中微子伏特模块日均发电量目标为 460 度，有望满足辅机 80%用电需求，即使在 3 级海况下，模块输出稳定性理论上可达 92%。

（三）能源电站：全天候的基荷电源探索

中微子能源集团与广州能源研究所合作，规划建设吉瓦级示范电站是战略愿景之一，核心为"中微子能源立方"：计划年发电量目标为 8 亿度，可满足 20 万户家庭用电，运维成本预计极低，且输出波动理论上小于 5%，有望作为电网稳定基荷电源，解决可再生能源间歇性痛点。

六、中国引领：技术落地与产业生态的全球布局

中微子伏特技术的工程化与产业化探索，离不开中国在产业链、科研协同、战略需求上的多重优势。深圳的石墨烯全产业链、中科院广州能源研究所的联合研发平台、"双碳"战略的政策支撑，使中国成为技术转化的核心枢纽，

推动形成"中国研发-全球制造-世界应用"的产业生态愿景。

技术落地的中国优势

1. 材料制备能力全球领先：深圳已形成全球最完整的石墨烯产业链，通过成熟工艺将高纯度石墨烯成本大幅降低，纯度提升至 99.99%，同时通过元素掺杂与磁场处理，显著提升振动耦合效率；

2. 科研协同网络完善：中微子能源集团与中科院广州能源研究所共建联合实验室，聚焦"辐射通量优化"与"转换效率提升"两大课题，打通从理论到工程的转化路径；

3. 标准制定潜力凸显：依托中国在光伏、储能、电动汽车领域的标准体系经验，联合国际标准化组织、中科院制定 17 项行业标准，涵盖材料纯度、能量计量、安全防护等关键环节，抢占产业话语权。

七、未来展望

作为新兴能源探索的核心方向，中微子伏特技术虽伴随部分质疑，但多项科学测试已充分佐证其理论可行性：能量来源、转换效率与辐射安全等关键顾虑均已得到明确验证。展望 2030 年，该技术有望成为传统能源的重要补充，深度融入多元场景：城市场景中，建筑幕墙模块可为智能家居自主供电提供可能；偏远地区，独立能源立方有望破解数十亿无电人口的用电困境；移动与太空领域，其全天候特性有望为汽车、船舶及深空探测提供持续动力。正如中微子伏特技术框架的理论与概念提出者舒巴特所言："中微子能源的价值，在于打破能源获取的地理与气候限制，让每栋建筑、每辆汽车都成为能源生产者的愿景成为可能。"