

# 利用太阳能

何景棠 编译



太阳向地球提供大得惊人的能量，它驱动巨大的洋流和气流，令水产生蒸发和凝结的循环，给大地送来清洁的水，汇聚成河流；有时也形成破坏自然和城乡的台风、飓风和龙卷风。1906年旧金山 7.8 级的大地震，释放出约为  $10^{17}$  焦耳的能量，其实这相当于太阳在 1 秒钟之内照射到地球上的能量。地球可开采的石油资源，估计约为 3 万亿桶，约合  $1.7 \times 10^{22}$  焦耳能量，这相当于太阳在一天半之内照

射到地球上的能量。人类 1 年内消耗的能量约为  $4.6 \times 10^{20}$  焦耳，这相当于太阳在 1 小时之内照射到地球上的能量。太阳向地球连续输送的巨大能量，功率约为  $1.2 \times 10^5 \text{TW}$  ( $1\text{TW} = 10^{12}$  瓦 = 1 万亿瓦)，胜过任何其他可再生或不可再生的能源，大大超过了人类日常生活所产生及利用的能源（约为  $13\text{TW}$ ）。

利用太阳能可以采取不同形式（图 1）。太阳能电池产生激发电子，把太阳光转变成电能；通过绿色植物中的自然光合作用或人造工程系统中的人造光合作用，把太阳光转变成化学燃料；聚焦或非聚焦的太阳光可以产生热能，可以直接利用或进一步转变成电能。

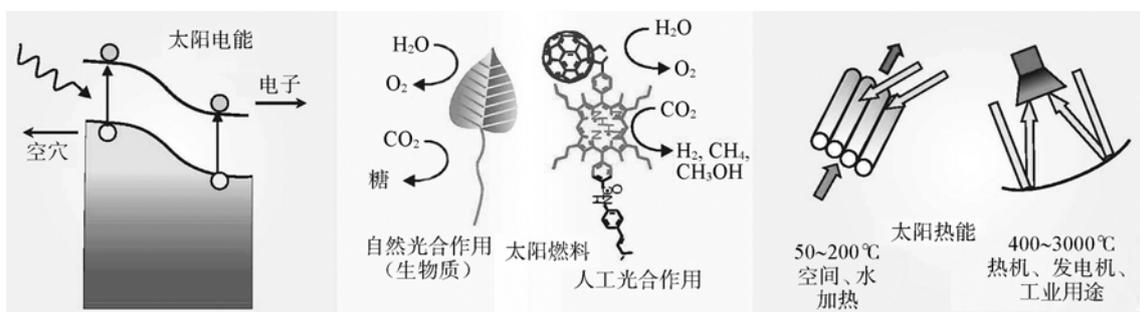


图 1 太阳光转换成三种形式的能源：电能、化学燃料和热能

成切实可行的。

## 六、总结与结论

伴随着大型强子对撞机的运行，我们将在以下方面拓展基本物理学的前沿：

- 通过一些杰出的物理学研究，我们将理解什么使真空表现为宇宙超导体。
- 我们将会明白已有的关于统一与超对称的想法是大自然的启示还是嘲弄我们的臆想。
- 超对称世界如果确实被打开，它将可能提供一个很好的暗物质的候选者。那时，确定或推翻这个候选者将是一个非常雄心勃勃的想法。
- 希格斯粒子的存在完全是有可能的。在短期内它可能是一个复杂工程，但是从长远来看，它将给我们很多启迪。

即将来到的将是一个黄金岁月，它同样可以因低能区物理的高精度实验（基本电偶极矩），稀有

过程的测量（质子衰变），以及宇宙学上的发现（原初宇宙的各向同性或者引力波振荡）而更加丰富。

鉴于时间和讨论的范围，我已经在选题上带有很大的针对性，而且即使是所讨论的话题也是很粗略的。但是，我仍然希望已经告诉你们关于在接下来的几年中人类预期取得重大进展的一些雄心勃勃的议题和预想。

（王玉明、张海青、邹浩，北京市中国科学院高能物理研究所 100049；李学潜，天津市南开大学物理学院 300071）

本文译自美国麻省理工学院教授、2004 年诺贝尔物理学奖得主 Frank Wilczek 2007 年 2 月发表在 <http://arxiv.org/> 上的文章 *Anticipating a New Golden Age* (hep-ph/07084236)。

\*[译者注] Superwimp 是 wimp（即有质量且参与“比较弱”的相互作用的粒子，“比较弱”是说其相互作用不会比弱相互作用强，比如引力作用或弱作用）的一种，可以认为是引力子的超对称伴子。

虽然太阳能无限丰富且可以采用不同形式加以利用，但在人类活动中，我们只是直接利用很少很少的太阳能。太阳能只占世界电能产量的0.015%，太阳热能只占全球加热空间和水的热能总量的0.3%。自然光合作用产生的生物质能是目前人类利用太阳能中的最大部分，它的燃烧或气化产生的能量只占人类所需能源的11%。然而，多于2/3的生物质能是不连续收集的，由于没有可替代的方法，只能在效率低的小锅炉中不充分燃烧，产生的污染物也是不可控制的。

我们能源的80%~85%来自化石能源。它是古老生物质的产物，储存在地下约两亿年之久。化石能源在地下分布不平衡，且地域有限。当化石能源通过燃烧变成有用能源时，产生温室气体和其他有害的污染物。相反，太阳光子不可穷尽，其分布不受地缘限制。太阳能极其丰富、到处都有，不会影响环境和气候，的确十分吸引人。可以预期，到2030年，世界对电能的需求将翻一番，对燃料和热能的需求将增加约60%。可以由提高转换效率来缩小太阳能的可用性与我们对太阳能利用的实际差距，而太阳能的转换效率目前大大低于理论极限。

### 提高效率

太阳能转换效率低、价格昂贵，使其利用潜力与实际利用间存在巨大落差。化石能源较太阳能价格低很多，能够满足我们目前对能源的需求，且化石能源矿物相对集中，而太阳光能在地球表面均匀分布、能量密度不高。但生物质产量受土地和水的制约，限制了生物质能源的利用。高价格和低转换效率，限制了对太阳能的利用，这提出了重要的研究课题：寻找便宜、高效的太阳能利用途径。

最好的单晶硅商用太阳能电池效率约为18%，由较便宜的氧化半导体染料敏化制成的实验室太阳能电池的效率低于10%，而更便宜的有机材料太阳能电池的效率是2%~5%，绿色植物把太阳能转换成生物质能的年平均效率低于0.3%。便宜的太阳能并不来源于光伏电池，而是利用太阳热能产生的蒸汽来推动普通的发电机发电，它的平均效率约为20%，最佳系统的效率可达30%。但这远远低于理论极限值。提高效率可以降低成本、增加产能，把太阳能利用提高到一个有竞争力的新水平。

太阳光子转变为其他形式的能源，其过程属纳米尺度，只有加强对该尺度上现象的了解和控制能

力，才可能低成本、高效率地实现太阳能转换。目前，这些现象超出结构学和谱学的研究能力。纳米科学的兴起产生新的基于自装配的制造技术，能以前所未有的微小尺度和超短时间去研究新的结构和动力学。此外，新的理论还可模拟成千个原子的自装配。这些进步让我们有可能了解和控制太阳光子转换过程中的结构学和动力学。

### 太阳能

太阳能电池吸收太阳光子把电子从半导体的禁带激发到导带，从而产生电子-空穴对，随后电荷分离，这是由掺杂的半导体p-n结完成的。在p-n结交界面处的空间电荷推动电子向一个方向运动，而空穴向另一个方向运动；在外部电极产生一个等于带宽的电压差（图1）。太阳能电池的概念和图像类似于半导体二极管，不同的是光子的激发，把电子-空穴引入半导体的p-n结，然后在电极处把电子移走。

1961年威廉·肖克利和汉斯·奎尔斯，利用他们对热力学效率的分析，建立了评价太阳能电池性能的里程碑式参数。他们的分析基于以下四个假设：只研究一个p-n结、每个入射光子激发一对电子-空穴对、超出电子-空穴对的能量作为热能释放、用非聚焦太阳光照射。在这些条件下，得到的效率极限是31%，这个目标有待进一步研究才能达到。目前，实验室单晶硅太阳能电池的效率最高为25%；而商用太阳能电池的效率约为18%。便宜的太阳能电池由其他材料制成，但是效率较低（如下表所示）。薄膜太阳能电池有若干优点，除便宜外，还可弯曲（图2），未来可能装在已有的建筑物或设备上。研究第三代便宜材料高效太阳能电池（图3）面临着巨大挑战，它将使太阳能更经济。

光伏电池转换效率

	实验室最好*	理论极限
单结		31%
硅（晶体）	25%	
硅（纳米晶体）	10%	
砷化镓	25%	
染料灵敏	10%	
有机光伏电池	3%	
多结	32%	66%
聚焦太阳光（单结）	28%	41%
载流子倍增		42%

\*由美国可再生能源实验室证实。有文献报道，有机光伏电池的效率可达到5%。

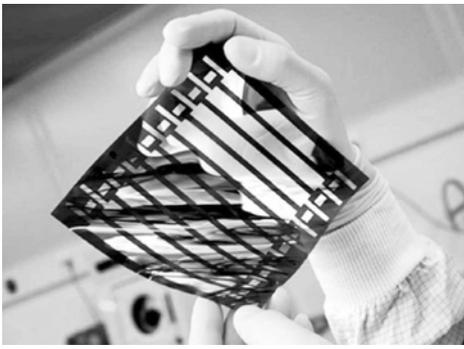


图2 新的导电塑料使太阳能电池变得灵活多样、更便宜、用途广泛，新材料可以涂布或印刷在可变形或硬物体的表面

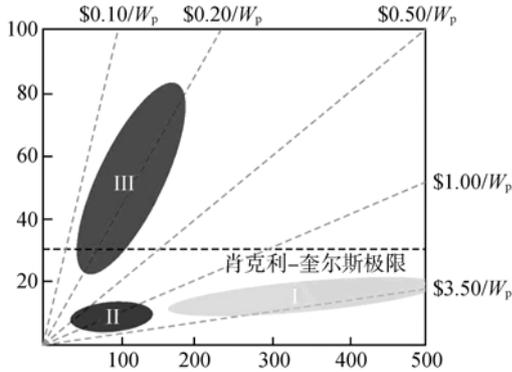


图3 三代太阳能电池

第一代太阳能电池基于价格昂贵的硅夹层，约占目前市场 85% 的份额；第二代太阳能电池基于诸如多晶硅、纳米硅单晶、碲化镉和硒化铜薄膜等，这些材料便宜，但仍需进行研究开发，以提高转换效率，达到如图所示的降低功率价格比；第三代太阳能电池是研究的目标，要极大提高转换效率而保持第二代太阳能电池的价格。它们的设计制造可以利用载流子倍增、提取热电子、多种 p-n 结的叠加、聚焦太阳光或新材料等新途径。图上的横轴代表太阳能电池单元的价格（美元/平方米），在考虑包装和安装时，其价格可能加倍。五条斜的点线分别表示太阳能电池每瓦峰值功率（ $W_p$ ）的价格。

如果打破肖克利-奎尔斯四个假设中的一或两个，就可以超过他们计算所得的效率极限。聚焦的太阳光对多光子过程有贡献，可以将单个 p-n 结构成且有热能释放的太阳能电池效率提高到 41%。单个 p-n 结的太阳能电池只能吸收太阳光谱中的一小部分，它不能吸收能量小于带宽的太阳光谱；超出带宽的能量只作为热能散失。把不同带宽的太阳能电池叠在一起，可以吸收大部分太阳光谱。对于非聚焦太阳光，两个 p-n 结的太阳能电池叠在一起，效率可提高到 43%，三个 p-n 结叠加，效率提高到 49%；无限多个 p-n 结叠加，效率提高到 66%。

载流子倍增可以大大提高效率，载流子倍增现象是单个光子在量子点阵中产生电子-空穴对的倍增。2002 年，阿瑟·诺泽克讨论了载流子倍增现象，

两年后，里查得·萨勒和维克多·克里莫夫观测到载流子倍增现象。硒化铅、硫化铅或硒化镉的纳米晶体，对单个入射光子，可产生 7 个电子-空穴对。对块状半导体太阳能电池，入射光子超出电子-空穴对的能量只作为热能释放而损失掉；而在某些纳米晶体大部分超出带宽的能量可以产生另外的电子-空穴对。假如纳米晶体作成太阳能电池，额外的电子-空穴对就增加了太阳能电池的电流，也就是提高了效率。

提取热电子为纳米晶体太阳能电池提高效率提供了另一种途径。在将高能电子-空穴对释放热能之前，就将其提取出来，高能电子可以增加带宽之上的工作电压，也就是提高了效率；而载流子倍增则增加了工作电流。飞秒激光和 X 射线技术有助于了解块状半导体超快衰变过程以及在纳米几何尺度下的变化，将使我们在开发下一代太阳能电池时，更好地利用电子-空穴对现象。

有人建议设计基于提取热电子或载流子倍增的量子点太阳能电池，然而制造工艺是其最大障碍。我们不能像对块状半导体太阳能电池那样，把一根导线贴到纳米晶体上，在纳米工程中，从量子点中收集几十亿的电子并把它们放到一根导线上，是一大难题，目前尚未解决。第二个挑战是电子和空穴的分离，在块状半导体太阳能电池中，这个任务是由 p-n 结上的空间电荷来完成的。在生产量子点太阳能电池之前，必需克服这些障碍。

1991 年，由米舍尔·格拉齐尔（Michael Gratzel）和他的合作者提出了染料敏化的太阳能电池，在太阳光转换研究中的光子俘获和电荷传递方面，开辟了一个新天地。普通太阳能电池所使用的价格昂贵的硅半导体，现为化学染料混合物所替代，而染料是由具有宽带宽的便宜二氧化钛组成。类似于绿色植物中的叶绿素，染料俘获光子，把一个电子提高到激发态。这个电子很快被转移入附近的二氧化钛纳米粒子的导带。通过纳米粒子阵列，电子移动到外电极。而留在染料分子中的空穴则与电子结合，这个电子是由反方向、可提供阴离子（如  $\Gamma^-$ ）的电极通过电解质提供的。此外，在利用便宜材料时做好设计，以便将染料电池的吸收光谱与半导体的带宽分开，使染料太阳能电池的吸收光谱更易与太阳光谱匹配。染料电池的效率依赖于几种类型的纳米尺度电动力学；例如电子穿过染料-TiO<sub>2</sub> 和染料-阴

离子界面的方式，电荷通过染料，TiO<sub>2</sub> 纳米粒子阵列和电解质的方式。开发新的染料和起传递作用的阴离子，通过时间分析谱仪来表征和控制动力学是活跃而有希望的研究领域；同样重要的研究挑战在于制造纳米尺度染料敏化的太阳能电池，减少染料和半导体的传输距离，增大界面处电子的传输率。

### 太阳燃料

在过去的 30 亿年里，自然界已经把大量的太阳能转变成化学能。估计有 100TW 的太阳能参与了光合作用，遵从催化的吸热反应机制，将水和二氧化碳转化为糖和淀粉。虽然，覆盖地球的绿色植物吸收太阳光子，但它们的效率太低，不能满足人类对能源的需求。光合作用的第一阶段是有用的：两个水分子分裂提供四个质子和电子参加第二阶段的反应，而氧分子则排放到大气中；第二阶段是无用的，二氧化碳形成碳氢化合物，植物用它来生长根、茎、叶。研究的挑战就在于把有用的第一阶段的转换效率提高 10~100 倍，而且找出其他办法代替无用的第二阶段光合作用。

有三条途径可以改善光合作用以生产燃料：第一条是增殖，即一种生长更快、产量更高的工程植物；第二条是类似于自然光合作用，但以一种新方法避免无用的第二阶段；第三条是利用水和二氧化碳，用人工类生物学的方法，以纳米尺度装配产生燃料。第一条途径是植物生长工业，已经大大增加了植物产量，我们这里不再讨论。第二和第三条途径包含更直接的光合作用，仍然处于研究的早期阶段。

自然界有很多新陈代谢系统能把太阳光和化学物质转换成高能燃料。绿色植物利用精心设计的叶绿素分子偶合到反应中心，把水分裂成质子、电子和氧；细菌利用氢化酶，把质子、电子变成氢分子。有超过 60 种能产生甲烷的酶，它们来源于早期地球的残留物，利用氢气和二氧化碳产生甲烷，厌氧微生物（例如酵母）和细菌利用酶把糖发酵生成酒精。

自然界的新陈代谢过程是与一个复杂网络互相联系的。虽然新陈代谢过程包括微生物的存活和再生产，而不包括生产燃料，可以认为与燃料生产的过程是独立的，但它们之间又相互联系，产生诸如 H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 或酒精等燃料。这一混合性质的途径是生物学发展的复杂分子过程，它减少了燃料生产的无用步骤，但所有这些都，目前仍然超出人类的能力。

例如，在光合作用早期产生的质子和电子与氢化过程相联系产生 H<sub>2</sub>，进而联系到生产甲烷的酶而产生甲烷。挑战在于在现存的新陈代谢模式间创造一个功能界面，使修改过的网络达到一个有竞争力的效率，包括保持微生物在混合系统中的存活和再生产。一些能有效生产燃料的混合系统确定了基本的研究步骤，它们同时挑战生物学、材料科学和能量转换。

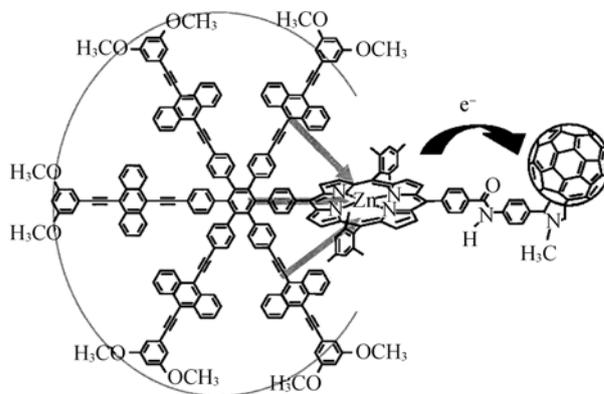


图 4 模拟自然光合作用早期阶段的人工天线反应中心复合体中央六角形核心提供结构和结实的支持，周围 5 个双（苯基乙炔）萘天线收集 430~475 纳米的光。能量在 1~10ps 内传送到卟啉复合体（箭头所指），它在此处激发一个电子，电子在 80ps 内传送到富勒烯的受主，产生寿命为 15ns 的电荷分离态。图示的复合体提供人工光合作用第一阶段。它们可作为种子推动进一步的化学反应：例如水的氧化而产生氢气，或者把 CO<sub>2</sub> 还原为 CH<sub>4</sub>、酒精和其他燃料。

人工光合作用采用基本步骤，利用无生物的组件，把太阳光转变成化学燃料。虽然组件并不是来源于自然界，但能量转换途径是与生物学相似的。这个领域的研究已经取得了巨大进展。图 4 是一种反应模式。光的收集和电荷的分离是由合成燃料天线连接到以卟啉（Prophyrin）为基础的电荷施主和富勒烯的受主来完成的。整个结构是安装在一片人工膜上，醌作为质子的运载工具，在膜的两边产生光触发的质子梯度，质子梯度可以作有用功。例如推动三磷酸腺苷的分子合成，过程是机械转动自然的三磷酸腺苷（ATP）进入膜，在合适的条件和温度下，类似于自然的光合作用，将分子一个接一个地、按一定元素的自装配产生一个把太阳光转换成 ATP 的化学工厂。

这种巨大进步预示着可以不用生物组件直接把太阳光转换成化学燃料，然而必需克服许多挑战。上述能量转换链的输出是 ATP，并不是人类工程能源链，最后的步骤依赖于催化 ATP 合成酶，它是高级蛋白质，人类还无法人工复制它的全部功能。实

实验室的生物催化作用，强度比自然界对应的生物催化低，这表明我们目前还存在重重困难。

把太阳光转换成化学燃料可以不采用生物学的光合作用方法，而采用基于半导体的非生物学方法。在光电化学的转换中，电荷分离的电子和空穴在电解液的界面上被利用分解水或减少  $\text{CO}_2$  的产生，而不是直接通过外电路输送出来作为电能。1984 年亚当·赫勒以及 1998 年由奥斯卡·卡谢列夫和约翰·特纳，在电极和水的界面上产生氢气的效率大于 10%，但其基本原理还是一个谜，现在的设备还不实用。一个有希望的改进办法是制作电极电解质界面的纳米结构来提高反应率。在以更高的效率产生氢气或者对有用燃料设计更复杂的反应来减少  $\text{CO}_2$  之前，必须更好地了解在电极电解质界面上单个电子是如何转换的。

### 太阳热能

传统能量转换的第一步是燃烧燃料，通常是燃烧化石能源而产生热能，用来加热空间、水，做饭和工业用途，或进一步转动机器和产生电能。太阳热能的转换是直接从太阳光获得热能而不是燃烧产生热能，从而减少化石能源的利用以及由此而产生的对环境和气候的威胁。

非聚焦的太阳光可以将液体加热到约  $200^\circ\text{C}$ ，足以在住宅和普通商业应用中加热空间和水。许多地方利用太阳能热水器（例如塞浦路斯和以色列），可以满足大部分日常需求。用抛物线型的太阳光聚焦装置可以产生  $400^\circ\text{C}$  的温度，用抛物线型的圆盘可以产生  $600^\circ\text{C}$  以上的温度，由地面的许多反射镜将太阳光反射到塔顶的接收器组成的动力塔可以产生  $1500^\circ\text{C}$  以上的高温。太阳能动力塔可用于热化工分解水，或用于化石能源的改型而产生氢气。

由太阳光产生的高温足以推动热机，其卡诺效率依赖于输入和输出的温度比。由太阳能加热器推动的蒸汽机以及通用的发电机可提供便宜电能。在 1984~1991 年间，加利福尼亚的莫扎夫沙漠安装了 9 个抛物线型太阳光聚焦的热电站。目前，这些热电站仍在工作，可以为电网提供 354 兆瓦的峰值电能。其年平均效率约为 20%，最近安装的电机效率达到了 30%。

虽然，这些太阳能电站的效率比其他形式的太阳能利用效率高，但其效率仍低于燃气电站的 60%。要提高太阳能电站的效率需要建造更大型的太阳能

电站，而且要在  $1500^\circ\text{C}$  或更高的温度下运行。这可以由太阳能动力塔来完成。一个仍在开发中的可替代方案是使用混合型的转换方法。把太阳光分解为两部分，它的可见光部分用于光伏电池而发电，而它的高能不可见光部分通过太阳能加热器转变成热能推动热机发电。

热电材料只需温度梯度即可产生电能而不需要机械转动。这是一种颇具吸引力的可产生便宜电能的太阳能利用方法。载流子在热梯度中由热端向冷端扩散，这一过程是由温差推动的，它借助于每个载流子产生电能。由所加的温差产生电压差。虽然，热电效应已经发现了约 200 年，但从 20 世纪 90 年代开始才生产出好的热电材料，提高了热电转换效率，使它有可能获得广泛应用。转换的有效性依赖于材料热导率的减少，使热梯度不至于短路，同时增大材料的电导率和热功率。同时达到这两个相反的目标，要求仔细调整材料的几种性质，材料的带宽、态的电子密度、电子和声子的寿命。最有希望的材料是纳米结构复合体，量子点或纳米丝的子结构增强态密度、提高功率（它依赖于派生的态密度）。在复合体的界面间阻止了热导率，但容许电传导。1993 年，林登·希克斯和米尔德里德·德雷斯尔豪斯讨论了这些问题，2001 年，用  $\text{Bi}_2\text{Te}_3/\text{Sb}_2\text{Te}_2$  和  $\text{PbTe}/\text{PbSe}$  的薄膜超晶格界面证明能够控制热导率和电传导。结果表明，它们的效率是同类型块状热电材料的两倍。下一步的挑战在于在纳米结构的块状热电材料中达到相同功能，以使大块材料负担更大功率；同时利用量子点或纳米丝来控制热功率。图 5 介绍了令人鼓舞的进展。在  $\text{Ag}_{0.86}\text{Pb}_{18}\text{SbTe}_{20}$  的热电材料块状矩阵中，有明显的纳米点阵。在制造大块材料时，控制大块材料中的纳米点阵的尺度、密度和分布，可以大大提高材料的热功率。

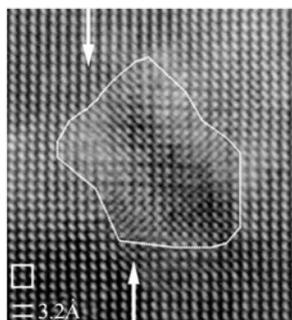


图 5 包含在  $\text{Ag}_{0.86}\text{Pb}_{18}\text{SbTe}_{20}$  块状热电材料中的纳米点阵

图片是用高倍透射电子显微镜获得的。虽然，晶体有 2%~5% 的不匹配，纳米点阵（图中点线所示）几乎完美地嵌在矩阵中。箭头表示在界面处有两个错位，整个方框表示一个单元，在银和碲中，纳米点阵比矩阵丰富。

## 储存和分配

除把太阳光子有效转换成电能、燃料和热能之外，还有一些科学挑战。一旦我们能大量转换太阳能之后，必须找到办法来储存从太阳光转换所得的电能和热能。太阳能受到白天和黑夜、阳光明媚和阴云遮盖、冬天和夏天的自然规律的支配，其能量输出与我们的要求有差距。太阳能燃料以化学结合物的形式而得到自动储存，然而电能和热能却难以储存，要便宜而有效地储存我们 24 小时所需的电能和热能，就超出目前我们的技术水平。

太阳能存储存在技术上的挑战，已有人创造性的提出减少储存的方法。可以在地球的同步轨道上放置卫星群产生基地式的太阳电能，通过微波聚焦到地面的接受天线，把太阳电能发射到地球上。全球性的超导体电网把阳光明媚处产生的太阳电能输送到阴云遮盖的地方，以满足负荷的要求。但这些想法有待进一步完善。没有便宜而有效的太阳电能储存和分配的方法，太阳电能只是在阳光明媚的白天产生电能作为电网削峰技术，以填补消费者对可靠能源的需求。

## 展望

太阳蕴藏着巨大的能源。利用太阳能的最大障碍是它与目前化石能源相比，价格太高。随着化石

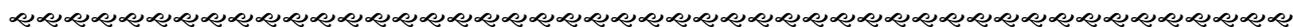
能源价格上涨以及全球变暖对环境和气候带来的威胁，两者的价格差距会逐步缩小。太阳能转换效率低，太阳辐射能量密度低以及利用太阳能所使用的材料价格高，导致了太阳能价格高。

开发新材料和新方法改善太阳能的转换效率是目前的首要任务。有许多方面可以加以改善：使用便宜的有机材料以及染料敏化光伏电池的效率只有 10% 或更低；光合作用的转换效率低于 1%；而最好的太阳热能转换效率是 30%，但这些都远远低于理论极限值。

利用太阳能是一门年轻的科学，它起源于 20 世纪 70 年代石油危机的刺激。由于能源对我们个人、社会、经济和政治的重要性，人们更加重视利用太阳能。相反，化石能源科学已经发展了约 250 年，它是由工业革命以及丰富的化石能源所推动的。例如，热力学是与蒸汽机的发展密切相关的。卡诺循环、热和熵的机械等效性，在热力学和蒸汽机技术的发展中起了重要作用。太阳能科学面对同样的美好前景。随着纳米科学的进步，会发现支配光能转换的规律，会开发出便宜的有竞争力的新技术。

(中国科学院高能物理研究所 100049)

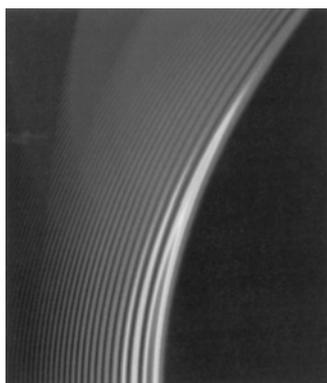
本文取材自美国乔治·W. 克拉布特里、内森·S. 路易斯在 *Physics Today* (March 2007, p37) 的原著 *Solar energy conversion*。



## 科苑快讯

### 科学家发现 光并不总是直线传播

美国奥兰多市中佛罗里达大学 (University of Central Florida) 的学者们做了一个非常实验，首次验证了光在没有衍射的情况下可以弯曲传播。这种所谓



弯曲的“奇幻光束”

的“奇幻光束”(Airy beam) 早在 30 年前就被理论上预言了，它们是利用精心设计的位相模板构造的波包。

虽然不违反任何已知的物理定律，但是一束光看起来像是迂回前进，仍令人惊讶。

(高凌云编译自 2008 年第 1 期《欧洲核子研究中心快报》)

