

物理学咬文嚼字之五十九 波也否,粒也否

曹则贤[†]

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

2013-12-10收到

[†] email: zxcao@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20140108

Nature, it seems is the popular name
For milliards and milliards and milliards
Of particles playing their infinite game
Of billiards and billiards and billiards.

——Piet Hein *Atomyriads*¹⁾

You're not a wave, you're a part of the ocean²⁾.

——Mitch Albom

摘要 波与粒子是两个用来描述物质世界的形象化概念。不管是哲学上的 wave-particle duality 还是字面上的 wavicle, 都无法掩饰我们缺乏描述自然之能力的尴尬。

1 波乃水之皮

宋朝翰林院大学士苏轼, 号东坡居士。一日, 宰相王安石讲《字说》, 谓一字解作一义, 如东坡的坡字, 坡乃土之皮也。东坡笑道: “如荆公所言, 滑字难道是水之骨吗?” 王安石一时语塞。此段机锋千年来当作文坛轶事流传, 我有幸知晓, 也跟同事们聊起过。2007年夏某日, 一群人在海边玩水, 我的同事窦教授顿悟: “老曹, 滑可不就

是水之骨嘛! 水中有固体, 固体上有微生物附着生长, 易造成滑腻效果”³⁾。吓, 古人造字, 诚不我欺。这位窦教授文化底蕴厚实, 加之由物理而研修生物, 由他悟出滑是水之骨, 自是情理之中的事情, 所以俺当时一点也不惊讶。这件事给我的启发是, 一个人一定是非常非常没有底蕴, 其学问才会不断跨越式地跨越。

“坡乃土之皮, 滑是水之骨”的轶事让

我想到了一个重要的物理学概念, 波, 并且认识到了“波乃水之皮!”水给了这个世界生命, 说它带来了物理学也不为过。流(万物皆流的思想, 流体力学, 流数等)¹⁾、涨落、镜面反映, 这些所谓物理学的重大概念, 哪一样不来自于水。水的众多性质都不同于其它液体, 因此人们津津乐道水的 anomaly (反常)⁴⁾。



图1 小小的蜻蜓轻触水面, 即见波澜壮阔

1) Piet Hein 是一位怪才, 其作品以别出心裁而闻名。这首诗的大意是: 自然, 不过是那万亿、万亿、万万亿的粒子所玩的弹球、弹球、弹弹球游戏的俗称。诗的名字 *atomyriads* 由 *atom+myriad* 组合而成, 前者为希腊语“不可分的”, 即原子, 后者为希腊语的万, 大概可理解为“不可切分之恒河沙数”的意思。这个组合词的寓意还是蛮深的。——笔者注

2) 你不是波, 你是海洋的一部分。——笔者注

3) 造成滑的效果当然不一定需要微生物, 但古人一定是在固体-液体界面上深刻体会到了滑的感觉。一些固-固界面或者一些层状结构固体的内部也足够地滑。——笔者注

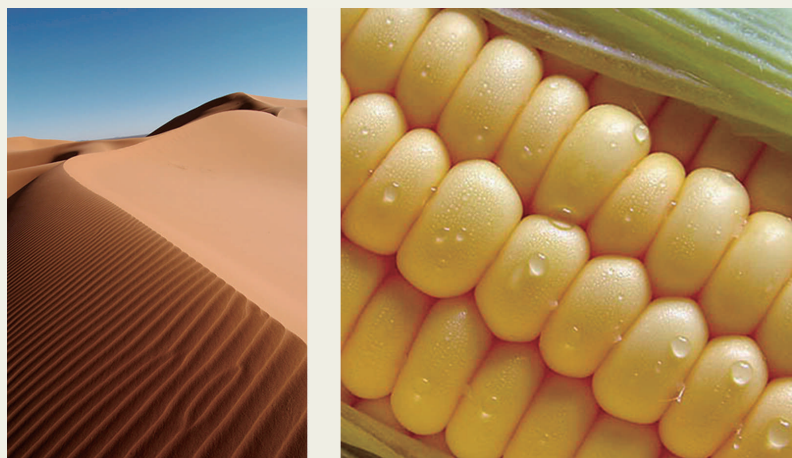


图2 沙丘与玉米穗。颗粒加上粒间的缝隙，构成了一个绵延的世界

水的反常性质之一是它的表面张力(能量密度,或曰水皮的弹性模量),室温下约为 72 mN/m 。因为水有这么大的表面张力,且还是极性的,水面的振动就很容易被激发——你用根头发轻触水面就能看到水波(图1)。波,水之皮,水之皮的振动,就这样深入人心,深入物理。

波,英文为 wave,德文为 die Welle。英文的 wave 可作动词用,来自德语的 waben (b, p, v 通假),字典解释为 to move to and fro (来回摆动),所以有 wave your hand (招招你的那个手)的说法。Wave 还被解释为 fluctuate。不过 fluctuate 这个词来自流动 (to flow),我们把 fluctuation 译为涨落,涨落也是由“水”而来。英文中提到波或者波动现象,还会用 undulation 这个词。这个字来自拉丁语 unda,就是水。德语的 das Wasser,英文的 water,法语的 l'eau,俄语的 вода 都应该是脱胎于这个字。法文的波是 ondulateur,词头为水,如同汉语的波,偏

旁为水。对于那些随处可见的自然现象,不同文化的描述相差不远。注意,英文文献中谈论波动行为用形容词 undulatory,如 undulatory material world (波动的物质世界)。

2 粒粒皆分明

粒,谷粒,米粒,是我们祖先最熟悉的事物。粒乃谷物的量子 (quantum),“粒”字给我的感觉是那种分立的存在。一个一个的个体,有明确的隔离,合而成一个广延的世界以至于你常常看不到或者忘记那些个体的存在。古希腊人认为世界是由 atom+void 构成的,即由不可再分的单元及其间的缝隙构成的。唯因 void 的存在,才得见分立的 atom;或者既然我们认定有 atom,则必须连带着承认 void 的存在。这个朴素的世界模型可能来自对沙丘的观察。玉米穗也能很好地图解这个哲学命题(图2)⁴⁾。

粒,对应的英文词为 grain, granule, corn,也是谷物的种子。这个概念也用来描述其它差不多大小的、能构成广延世界的分立单

元,如砂粒、盐粒、雪粒等。近年来比较热的颗粒物质研究,关注的就是砂粒、豆粒这样的 atom 所构成的物质体系,它们被称为 granular materials。

基础物理学中的一个基本概念是粒子。“粒”加上“子”,是为了强调其尺度之小。其实,1)“子”字的原意为婴儿,可作“小”字解;2)“粒”字有个兄弟,即“籽”字,用来表示比玉米粒、黄豆粒要小一些的种子,如油菜籽、草籽、萝卜籽等。粒子在物理学中是对 particle 的翻译。不过,particle 是由 par (等分)加上小词(icle)构成的;类似地,德语的粒子 Teilchen 是由分 (teilen) 加上小词 (chen) 构成的;它们有自大而小的渊源记录在里面。汉语的粒子就没有这个意思在里面,玉米粒生来就是玉米粒,没听说是从什么事物分割而来的。

西文里谈论微粒说常用到另一个词 corpuscle,这个词是由体 (身体, corpus) 加上小词构成的。医学上就把 corpuscle 翻译成小体,如 splenic corpuscle,汉译肾小体。Corpuscle 和 particle,如同汉语的粒与籽,都是来自日常生活的词汇。当它们被引申了去描述微观世界里的存在时,其指代物的相对大小可能是笔糊涂账。笔者下意识以为 corpuscle 指代的事物比 particle 块头大,这没什么道理,但在理解光的微粒说/粒子说时可能要面对这个问题。

3 有光自天上来

人类作为智慧生物的一个前提是它拥有探测光的能力。所谓的 optics,研究的是 the nature of light and vision (光与视觉的本性),将之

4) 物理里会有任何反常吗?——笔者注

5) 它的数学描述在哪里呢?——笔者注

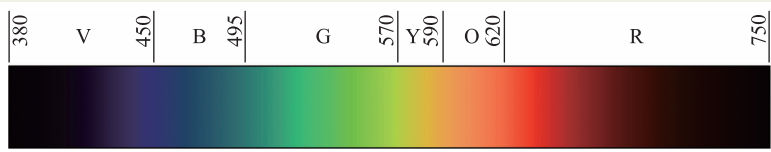


图3 可见光光谱

翻译成光学是有失偏颇的，忽略了其同眼科学 (ophthalmology) 的渊源。考察一下太阳的光谱 (图3)，以及光在材料中引起电效应以及破坏H, C, N, O等原子之间化学键的能力，你一定理解为什么可见光的波长大约在390~780 nm之间，以及为什么波长~550 nm的绿光那么赏心悦目(图3)⁶⁾。人类花了很大的功夫才认识到，看见东西不需要眼睛发射什么东西，只须被动地接受来自被观察物体的光即可⁷⁾。太阳每天都爽快地普照大地，给地球送来光与热。那么，光是啥？

古希腊的atom+void的思想在17世纪发展成了Gassendi和笛卡尔等人的以物质原子论(atomic matter theory)为核心的哲学。与原子论可相提并论的是微粒论(corpuscularian theories, corpuscularianism)。与atom不同，微粒(corpuscle)是可分的，微粒是携带别种低层次物质的particle (corpuscles are particles that carry other substance or substances and are of different types)，是可以由某个源发射的。后来，牛顿基于微粒论发展了光的微粒说 (particle theory / corpuscular theory of light)。牛顿认为光的反射行为只能由光是由cor-

6) 人们常说可见光的颜色分为红橙黄绿蓝靛紫，愚以为不确。可见光的两端一定终结于不可见光，因此一定是黑色的，请仔细观察一下可见光谱。当然了，黑色无色。——笔者注

7) 一个物体被看见也无须发射或反射什么光。你看见一个黑色的物体是因为你没看见它。

——笔者注

puscle组成的(设想corpuscle是完全弹性的、无重量的)才能得到解释。笔者瞎猜，关于光的微粒说可能与雨有关。雨和光都来自天上，且可能是同时的。雨线为光线(ray)提供了很好的比喻(图4)。雨线是雨滴的集合体，焉知光线不是某种corpuscle的集合体，只是其可能比雨滴更小而已。

然而，微粒说很难解释光的其它性质，如折射和干涉。胡克把光同水波相类比，并认为光对应的振动之振动方向和传播方向垂直。惠更斯认为光是在luminiferous ether(亮以太)这种介质中的波，当光进入高密度介质中时，会变慢。1800年左右，Thomas Yong用波的概念解释了光的双缝干涉，他(注意他是位医生)还认为光的颜色是由光的波长不同造成的。菲涅尔关于小圆盘

后面中心线上可能因为光的绕射而最亮的预言被实验证实后，光的波动说算是确立了。后来，当人们算出从麦克斯韦方程组得出的波动方程的解，其传播速度约等于测到的光速，加上赫兹还真从振荡电路中得到了电磁波，谁还有理由质疑光的波动说呢？可是，所谓的波动说对干涉、衍射等现象的解释，真的是解释吗？

物理的世界从不缺乏惊奇，警告所谓的物理学家们不要得意忘形。为了用玻耳兹曼那套原子的统计理论解释壁炉或者瓷窑中光谱分布对温度的依赖关系，普朗克在1900年不得不假设 $U_i/h\nu=N$ ，这个假设意味着一定频率的光，其能量是有单位的，为 $h\nu$ 。普朗克没把这个假设当真，但是1905年爱因斯坦把这个假设当真了，他用这个假设解释了光电效应。坏了，particle theory of light的幽灵又回来了。注意，1905年前后人们只是认为光的能量是分立的，有基本单元的，因此人们谈论light quantum应该指的是光(束)的能量量子。光子(photon)这个词要到1926年才造出来，那时

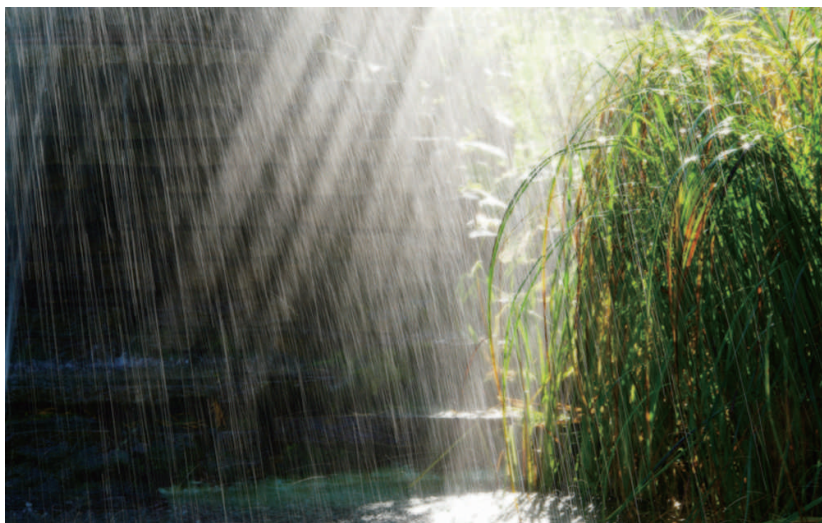


图4 雨点与阳光。雨线为光线提供了模型？

物质波的概念已经有了, photon应该指的不是能量量子, 而是如玉米粒那样的分立的实在。这一细枝末节, 似乎未见有人强调。此外, 光子和光束之间的关系, 也不是一个简单的问题。

4 法式喜剧与斯堪的纳维亚朴素哲学

1924年, 法国贵族青年德布罗意根据光之粒子说和波动说的争论, 提出若光既能是波也能是粒子的话, 那个被发现快三十年的电子, 以及其它的被认定是particle的存在, 是否也是波? 他还给出了该波之频率和波长的表达式 $\nu = E/h$, $\lambda = h/p$ ⁸⁾。1927年得到的电子的(镍)晶体衍射花样被当作是电子波动性的强有力证明。

德布罗意的物质波概念当时被评价为法式喜剧(La comédie française), 毕竟拿这么个公式就想当物理学博士也太便宜了。劳厄觉得如果真要谈论波的话, 总该有个波动方程吧? 他把这个问题丢给了薛定谔, 薛定谔拿这个问题当真了, 很快得出了薛定谔方程并应用于氢原子。有了薛定谔方程才算有了真正的量子力学⁹⁾。量子力学又称波动力学(wave mechanics), 这个词来自对有别于ray optics, geometric optics的波动光学, 反映的是力学—光学是一家的历史事实。此问题, 另当别论。

好了, 波也是粒子了, 粒子也是波了。波和粒子还可以这么个和谐法, 一些物理学家感到很困惑。这时候聪明人出来了, 说物质具有wave-particle duality(波粒二象性),

物质就是既能是波, 也能是粒子; 或者说某些情景中是粒子, 另外一些情景中是波。伽莫夫还专门造了wavicle(wave+particle)这个词来命名新思想照耀下的粒子。Wave-particle duality是典型的naïve dichotomy(幼稚的两分法)。波粒二象性的思想, 以及互补性原理和不确定性原理, 都源于哥本哈根学派, 笔者大胆将它们统称为Scandinavian naïve philosophy in quantum mechanics(量子力学中的斯堪的纳维亚朴素哲学)。一些不能或不肯从数学的角度去理解量子力学的人对这些原理津津乐道从而欢天喜地地走入歧途。Dirac认为连其始作俑者本人也因为沉迷于这种朴素哲学而不能有所成就。

5 波与粒子的象

Wave-particle duality宣称所有的物质都既能表现出粒子性质(properties), 又能表现出波的性质。汉译波粒二象性, 估计是受了佛经的影响, 给人印象是说物质有粒子和波两重表象, 类似观音大士既有男身版的也有女身版的。Properties也罢, 象也罢, 都不具体, 在数学表述上粒和波到底指的是什么?

我们用particle指代很小的事物。象质子、中子、电子这些我们常挂在嘴边的粒子, 到底大小如何, 还真是一个基本的物理问题。因为当我们谈论一个粒子大小的时候, 一定要说清楚那个大小是怎样以及通过什么手段定义的。比如, 我们说电子的半径必须小于 2×10^{-20} m, 因为只有这样才能解释高速正电子

与电子碰撞不会弹回去这一事实。您看, 这些很小的尺寸, 因为没有更小的物体以其尺度作为单位, 只是一些依靠理论得出的数字而已。更多的时候, 粒子是被当作点, 数学的点, 来处理的。这就是物理学中四处可见material point, point mass(质点), point charge(点电荷)之类概念的原因。一些所谓的理论灾难, 就源于把粒子当作尺度为零而同时不负责任地使用距离 r 以及 $1/r^n$ 这样的作用势所导致的。这样的灾难, 是物理理论的灾难而不是物质世界的灾难。用基本粒子说话要么只能在牺牲部分“particle”一字与物体关联的前提下进行, 要么把这个字限制于一类具体的实验情景^[2]。信哉此言!

波, wave, 比particle所含科学内容也多不到哪里去。先前人们谈到波, 不外乎 $\sin(kx - \omega t)$ 函数或者 $\exp[i(kx - \omega t)]$ 函数。至于用 $\sec h^2(kx - \omega t)$ 函数描述的孤立波, 知道的人就少了许多。凭 $\sin(kx - \omega t)$ 函数能解释光的双缝干涉出现明暗相间条纹还有人信, 要说能再现光的双缝干涉斑图的各种特征估计有点玄。至于说晶体衍射斑点证明了电子是波, 记住晶体和衍射斑点可都是实空间里我们能真切观察到的存在。理论上, 晶体对电子的衍射等同于晶体的傅立叶变换。傅立叶变换若写成 $f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx)$ 这样的形式, 那没什么, 出现的函数表面上都是实的。可要是用 $\exp[i(kx - \omega t)]$ 函数的形式, 就有个问题。 $\exp[i(kx - \omega t)]$ 可是个复数, 或者说是二元数。除了用 $\exp[i(kx - \omega t)]$ 完成晶

8) 最好是写成 $p = \hbar k$, $E = \hbar \omega$ 。为什么? 你懂的。——笔者注

9) 是这个闹剧性的物质波概念而不是光量子或者原子模型带来了量子力学的基本方程。每念及此, 辄觉得物理世界自有其不可思议处。——笔者注

体衍射的计算以外，人们还用这样的函数叠加得到实的波包来表示粒子，那么那不同分波的二元数身份，不该有个物理解释吗？如果说二元数表示的不同分波没有物理真实，它们线性叠加的实函数又有多少物理真实？

物质波到底是什么波，似乎还没有统一说法。Bohm 认为物质波是导波(pilot wave)，引导粒子运动的波。如果是这样，那物质波应该和水波一样，是实空间里的存在。而量子力学的波函数，是复数或者说是二元数，其模被解释成实空间里的粒子出现的几率密度，则未必有我们熟悉的水波形象。波函数里的波同德布罗意物质波的波，其物理图像和数学描述是一致的吗？

包括爱因斯坦在内的许多科学家并不接受波粒二象性的说法。近年有种观点认为，此前当作是分立个体的 particles 只是宇宙这个连续统的关联表现 (correlated manifestation)，二象性的思想应该被波(连续的场)的 monism 取代。Monism，一元论，这在道家的思想里早就有了。

6 不二智慧

一元论或许暗合东方的“大一”或者“不二”哲学观。《维摩诘经》有不二法门，超越一切分别之相，排除执着。道家意识到在二分思维模式下的世界里，任何事物都被我们的意识感知为有对立面的存在状态，而我们又使用对立的概念范畴来描述它，这显然未必能反映事物的本原。因此，道家强调“大一”，或者“不二”，告诫人们要摆脱机械的二分法，找到两极的契合点。老子的《道德经》里有

许多表述如大巧若拙、大智若愚等，都是强调物极必反(extremities meet)的事实，有助于破除我们头脑中习惯性的二分思维，使我们能够明白“道”或者物理的不二性。太极图或可给我们一些朴素的启示(图5)：太极图不是黑白相间，而是非黑不白。

7 如何兼美？

《红楼梦》中谜一般的人物秦可卿，字兼美，谓其风流袅娜如黛玉，鲜艳妩媚似宝钗。这样的 duality 相当有难度。一个微观物体，可以是波，也可以表现为粒子，于它自身倒没有什么为难处。但是，duality 的思想是缺乏可操作性的，这在散射现象的处理上可见一斑。你可以看到关于粒子—粒子散射、波—粒子散射的数学处理，但是没有 wavicle-wavicle 散射的数学表述。在粒子散射问题中，计算时可能用波的概念，探测时却是一概当作单个粒子，但又把探测粒子所得到的条纹当作粒子是波的证据！愚以为，波粒二象性与其说是物质性质的两个侧面，不如说是物质性质的两个极端。虽然 γ 光子和无线电波都被看作是电磁波， γ 光子还是被当

作粒子看待的，它的频率仅仅是个由 $\nu=E/h$ 计算得来的数值；而一段波长几百米的无线电波，好意思说它是粒子吗？当然了，即便是光子是坚硬的粒子，无线电波是弥漫的波，而依着不二的观点，归于“大一”，也未尝不可。只是物理的“大道”，我们还远没有能达到！

破除波粒二象性的执着，哲学家祭出一个 monism 或者把黑白分明的太极图楞说成是非黑不白就没事了。但是对物理学家来说，倘若手里的数学工具只是能处理点的运动和正弦函数(波)的传播，怎么实现关于物质世界的 monism? 虽然，我们明知道零维的点粒子带来很多困难，但弦和膜理论进展到现在，也未得到比点粒子语境下的物理更有效的物理。

R. A. Wilson 认为量子力学的许多悖论都是语义学上人为造成的(semantic artifacts)，笔者深表赞同。常常是给定实验语境下物质的行为被说成是物质的本性，比方说屏幕上的明暗条纹(水波的形象)被诠释为光自身是波(物质波，波函数)。显然，这里的“波”字存在语义学上的歧义。有趣的是，牛顿认为光是由粒子(corpuscles)组成的，但是却是牛顿第一个用牛顿环测定了光的波长^[3]。牛顿的光波长是光作为粒子束所表现出的行为。牛顿光波长中的“波”，同 wave-particle duality 中的波，不可等量齐观。

Wave-particle duality 这种遁辞的出现，表明我们还没能找到更有威力的描述自然的语言，离理解光以及其它粒子的本性我们还有很远很远的路要走。如果你非要问很远是有多远，喔，光倒是提供了一个距离单位。



图5 太极图：非黑不白

参考文献

- [1] 曹则贤. 物理, 2008, 37(3): 203
- [2] Evans J, Thorndike A S(Eds.). Quantum mechanics at the crossroads. Springer, 2007.p.81. 原文照录如下: Speaking in terms of elementary particles can only be done either at the cost of alleviating the **corpuscularian** connotation of the word particle, or by restricting the relevance of this word to a certain class of experimental situations
- [3] Arnol'd V A. Huygens and Barrow, Newton and Hooke. Birkhäuser Verlag, 1990

层状结构氧化物太阳能电池

奥地利、美国和德国的物理学家提出一种新的太阳能电池。这种太阳能电池的设计利用了十年前的一项发现：两个绝缘的氧化物的界面能够变成金属性的，这样在太阳能电池中就不再需要金属丝。如果能够降低生产层状结构氧化物的费用，这项研究就可导致一种新的高效光电池。

在2004年，Harold Hwang 和 Akira Ohtomo 发现，在绝缘体钛酸锶上面生长一层绝缘体钛酸镧时，在两者的界面上形成一层二维的电子气，使界面变成金属性的。这一现象是由极性氧化物与非极性氧化物接触时，在前者的边缘上积累的电荷所引起的。此后在其他氧化物的接触面也发现类似现象，许多研究组试图利用这种现象研制新的更好的电子学设备。

近来，Vienna 大学、Oak Ridge 国家实验室和 Würzburg 大学的研究团队，通过计算提出这种效应可以用来制造一种新型的太阳能电池，这种电池所产生的电流是由导电的界面引出，而不是用金属丝引出。

太阳能电池利用的是光电效应，当光子与某种材料价带中的电子相互作用，并将电子从价带提升到导带时，在材料中产生一个带正电的空穴。所产生的电子与空穴必须从光电材料中移走，而不能使之再结合或使它们的能量消耗在晶格的振动中。

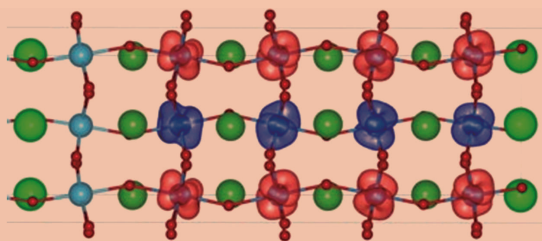


图1 多层钒酸镧和钛酸锶结构

物理新闻和动态

像钛酸镧这样的极性氧化物具有一个内部电场和带正电的与带负电的原子面。Oak Ridge 的 Okamoto 等推断，这种极化有助于将电子与空穴在重新结合之前分开。如果将这样的极性氧化物与适当的非极性氧化物叠放在一起，两者的界面将是金属性的。由此，电子和空穴可以从装置的任一侧引出，而无需用金属丝覆盖太阳能电池的表面。金属丝会阻挡部分光线使之不能达到太阳能电池的活性区。

研究人员首先需要找到一种可以吸收尽可能多的太阳能的极性氧化物。材料的带隙是指其价带与导带之间的能量差。能量低于带隙的光子不能产生电子-空穴对，只有能量高于带隙的光子才能产生电子-空穴对。但是，对于后一种情况，光子能量超出带隙的部分会变成热量而损失掉。因此，带隙应小到可以吸收大量的太阳光子，同时又大到可以从所吸收的光子中提取出尽可能多的能量。

研究人员决定采用钒酸镧，其带隙为1.1 eV，小于可见光的能量范围1.5—3.5 eV。他们用密度泛函理论对由一层生长在钛酸锶上的钒酸镧组成的太阳能电池进行了模拟。虽然研究人员不能根据他们的结果对这种电池的效率做出精确的预言，但认为这种电池因其固有的优点而值得进一步进行研究。图1为多层钒酸镧和钛酸锶结构。

研究人员还提出，在钒酸镧上面放一层高铁酸镧，由此组成的太阳能电池的效率可进一步提高。高铁酸镧的带隙为2.2 eV，所以可以捕获较高能量的光子，剩下的较低能量的光子被钒酸镧捕获。Würzburg 大学正在进行这种太阳能电池雏形的研制工作。一些科学家认为，制作这种异质结构的电池工艺是比较困难的，只有在工艺变得成熟和廉价之后，这种太阳能电池在市场上才有竞争力。有关论文发表在 *Phys. Rev. Lett.*, 2013, 110: 078701 上。

(树华编译自 *Physics World News*, 18 February 2013)