

話說“真空不空”

吳詠時

(中国科学院物理研究所)

开场白：一个并不科学的科学名词

什么是真空？

这似乎是个很简单的问题。真空嘛，顾名思义，不就是指真正的虚空——没有物质的空间吗？

从字面上讲，这没有什么错。从科学发展史上讲，早先使用真空这个词，就是这个意思。就拿狭义相对论来说吧，它有一条基本原理，叫“光速不变原理”，是讲光在真空中的传播性质的。本世纪初，爱因斯坦提出这个原理时，就是用“空的空间”作为真空的同义语的。

然而，科学的术语未必都科学。不少科学术语，只代表一定阶段上人们对物质世界的认识。随着阶级斗争、生产斗争和科学实验的发展，人类对物质世界的认识也在不断地深化。往往有这样的情况，某些科学名词，旧的含义不再符合新的科学事实、新的认识，但是这些老的名词却沿用下来。因此我们就有一些不科学的科学名词了。譬如，“基本”粒子就不基本。“真空”也是一例。

按照现代物理学对真空的认识，真空实际上并不空，早已不再是爱因斯坦提出狭义相对论时所谓“空的空间”了。现在应该说，“真空”这个词并不科学。

茫茫宇宙，何处是“真空”？

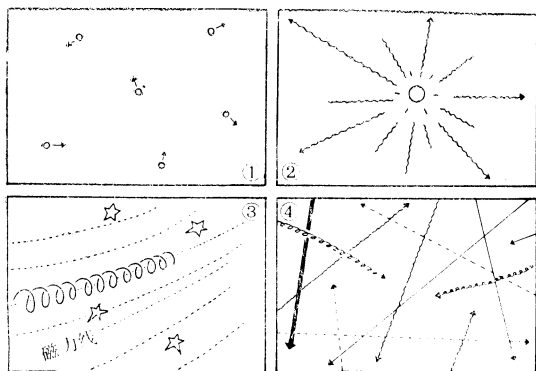
在说明真空不空之前，让我们先来找找看：浩瀚无际的宇宙，何处是真正的虚空？

我们在日常生活中遇到最多的“真空”，大概要算电灯泡了。大家知道，在装上钨丝之前先要把灯泡里的空气抽走。但是人们总不可能把所有的空气全部抽掉，灯泡里总有残余的气体。一般说来，灯泡中残余气体比普通空气稀薄几千万倍。如果以分子计算，数目可还是惊人的：灯泡里每立方厘米的体积内仍有几万个残余气体的分子。可见灯泡的真空度不算太高。人们在实验室中目前所能达到的最高的真空度，比灯泡又要高几十亿倍。即便如此，每立方厘米的体积内还有一千个气体分子呢。

更高的“真空”就得到自然界中去寻找。地球周围的大气层，大约有几百公里厚。远离地球、太阳的星际空间，该是理想的“真空”了吧？

事实却不然。天文学的观测和估算告诉我们：星际空间中也是充满了物质的。银河系内星际空间中存

在着大量的氢云。据估计，银河系的总质量中，大约有百分之十是弥散在星际空间中的氢云。当然，由于星际空间的广大，氢云的平均密度确实是很低的：每立方厘米只有几个氢原子。这里的真空度无疑是很高的。但是不要忘记，氢云只是星际间的一种物质。银河系中有着数以千亿计象太阳那样的恒星，它们不断地向外辐射大量的光和热（红外线），还有其它各种波长的电磁波（从无线电波到 γ 射线）充斥于星际空间。这些光和热可以把一些星际间稀薄的氢云加热到上千度的高温，在这样的高温下氢云变成了等离子体。而巨大空间范围内氢云的运动，又加强了星际磁场，这些磁场虽然微弱，却渗透在星际空间的每个角落。此外还有各式各样的粒子流：有恒星抛出的质子、电子等带电粒子流，有恒星内部热核反应产生的中微子流，以及



图一 星际空间中的物质

1. 氢云中运动着的稀疏的氢原子
2. 恒星辐射的电磁波
3. 带电粒子在星际磁场中螺旋前进
4. 星际空间有各种粒子流

迄今不明来源的高能宇宙线，其中含有周期表上绝大多数元素的原子核。这些粒子流在各个方向上，以近乎光速的巨大速度，穿梭般地飞行在星际空间中。

让我们走出银河系，到那更为辽阔、遥远的星际空间去寻找虚空吧。在那里，恒星发出的各种辐射和粒子流，氢原子、磁场和宇宙线，当然要比银河系内稀少得多了。可是出乎意料，在六十年代中期，人们用强大的射电望远镜发现：星系际空间也充满了物质，这就是微波背景辐射。这是一种波长主要集中在微波波段、各向同性的热平衡电磁辐射场。其热平衡的温度

约为绝对温标 3°K ，能量密度约为每立方厘米 0.3 电子伏特。这种辐射场几乎是处处均匀地存在，似乎形成了在总星系内一切空间中无所不在的背景，所以又叫做 3°K 背景辐射。看来，在那广袤的星系际空间中，不仅有物质，而且那里的温度远非绝对零度哩。

也许真正的虚空隐藏在物质结构的深处？在组成分子的原子之间或者原子的内部吗？我们知道，那里的微观电磁场要比星际空间强得多。在原子核乃至强子的内部吗？这里又出现了强作用和超强作用，能量密度比起星际空间来不知要大多少倍。

茫茫的宇宙，从大的方面说是无限的，从小的方面看也是无限的。今天人类对宇宙的认识，大的方面达到了以百亿光年计的距离，小的方面深入到十万亿分之一厘米的强子内部，可是迄今为止还没有发现哪里是真正的虚空！

空间不能与物质相分离

那么，在物理学中就不能谈论真空了吗？倒也不是。因为在分析具体的物理问题时，总是要抓主要矛盾，而丢开那些无关紧要的方面，所以只要空间中的物质足够少，对于所研究的问题影响又很小（其影响在要求的精密度之外），物理上是允许忽略这些物质，而把这部份空间作为真空来处理的。这样的真空，是客观实际的一种近似反映。例如，当我们研究 γ 射线在空气中的传播时，由于空气对 γ 射线的折射率极小，一般可以不考虑空气，而简直认为 γ 射线是在真空中传播。类似的情形，在物理学中屡见不鲜。许多时候，为了抓住主要矛盾，往往要尽量排除空间中其它物质的影响，从而有意把现象放到真空中去进行观测、研究。此外，为了研究物质对物理现象的影响，也往往需要先研究真空中的现象，以便与有物质时的情形加以对比。这些都使我们在物理上必须考虑和研究真空。

问题是：这样的真空就是“真正的虚空”或者“空的空間”吗？真空的性质往往是物理学的基础。当我们研究真空有什么性质、为什么会有这些性质这样一些基本问题时，不能回避什么是真空这个问题。这些基本问题不仅在物理学上非常重要，而且涉及空间和物质的关系等基本哲学问题，与哲学上唯物论和唯心论，辩证法和形而上学的斗争关系极为密切。

辩证唯物主义告诉我们：空间和时间都是物质的存在形式。这就是说，空间不能与物质相分离。空间和物质的关系，颇有点象形式和内容的关系。没有无形式的内容，也没有无内容的形式。同样，物质不存在于空间之外，空间也不是非物质的不动的空架子。“物质存在于空间中”这句话，是说物质本身是扩展的，是具有延伸性的，物质世界是本身具有扩展性质（延伸性）的世界，不是说物质被放在一种非物质的空架子中。想象没有物质的空间，同想象不占有空间的物质

是一样不可思议的。

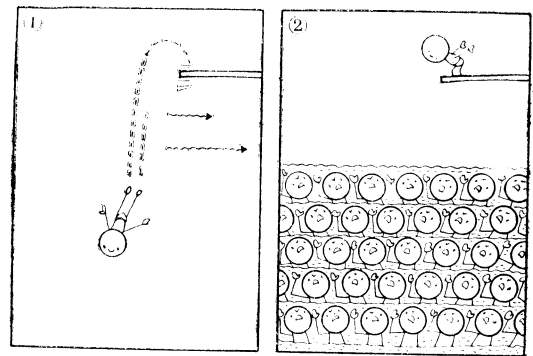
辩证唯物主义又告诉我们：“运动是时间和空间的本质”，而“运动是矛盾，是矛盾的统一”。事物的内部矛盾，事物内部的必然的自己的运动决定着事物的空间伸展和时间持续。物质世界在不断地运动、发展，人类的时空观念作为客观世界的近似模写，也不断地随着人们对物质运动形态的认识一起发展、深化。

现代物理学的发展，日益证实辩证唯物主义的这些基本原理。用唯物辩证法来分析真空，结论只能是：真空不空，真空的性质是由物质的内部矛盾运动决定的。如果把真空理解为“空的空间”或者“真正的虚空”，这不是在设想没有物质的空间，又是什么呢？这样一来，真空的性质不就变成先验的东西，永远无法从物质的运动得到解释吗？狭义相对论早期的这种真空观念，虽然对否定机械以太论，承认电磁场也是一种物质起过一定的作用，但是，它不符合自然界本来的辩证法。它必然要随着人类对自然界的认识逐步深化而被打破。果然，现代物理学的发展把它打破了。

真空之“海”

从历史上物理学所研究的物质运动形态来看，牛顿力学是对宏观物体的机械运动规律的概括，而狭义相对论的创立，则是基于宏观电磁场的研究。此后，物理学深入到微观的领域。微观物质的运动形态，既不同于牛顿力学的质点的机械运动，也不同于宏观电磁理论中的连续场。微观物质运动形态的特点是，它具有波动、粒子两重性。构成宏观物体的分子、原子、质子、电子，这些微观粒子以波的形式在空间中运动；而电磁波与物质相互作用，能量的交换是一份一份的，因而电磁波也是由一个一个光子组成的。正是在对这种新的物质运动形态的研究中，人们获得了对于真空的新认识。

最初是狄拉克，为了正确地描述从低速到高速下



图二

1. 如无负能电子海，正能电子会无限制地跌向负能量深渊，并不断放出光子。
2. 负能电子海的存在，使正能电子跌不下去。

电子的行为，提出了单个电子的相对论性波动方程。这个方程的许多结果都和实验符合，但它有一个严重的困难，就是存在负能量的解，即允许电子处于负能量的状态（负能级）。就象高处的水自动地流向低处而释放能量一样，处于正能量状态（正能量）的电子将会不断地放出光子，而一步步地跌到更低的负能级上去。宏观物体中有大量的电子。如果它们都将无限制地向无底的负能量深渊跌下去，岂不是连相对稳定的宏观物体都不能存在了吗？显然，这是违背客观世界的实际情况的。

为了克服这一困难，狄拉克提出：实际上自然界中几乎所有的负能级均已被电子所占据。在此之前，人们已经从实验上发现电子有不相容性：两个电子不能占据同一个状态；好比电影院的座位，一个人坐了它，别的人就不能再坐上去。由于电子的这一特性，在负能级的深渊基本上被填平的情形下，正能量的电子就不能再无限制地跌下去。因而，宏观物体的相对稳定性可以保持，上述“负能量困难”不再存在。

按照这一观点，自然界的真空，就是正能量上没有电子、而所有的负能级都为电子所填满这样一种状态。用一个形象的比喻，真空就是充满于空间之中的各种负能量电子的海洋。由于一切物理现象都是在这样的背景下发生的，一切物理测量都是相对于这样的背景进行的，所以狄拉克假设：这样的真空态中的负能电子不能从物理实验中直接观测到。

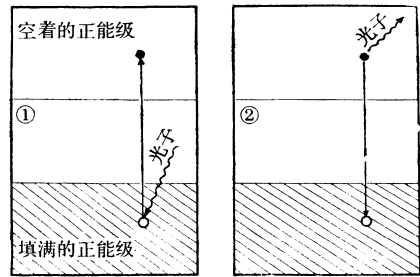
然而，这并不是说，这个理论不能得出新的推论。根据这个理论，负能电子完全可以吸收一个光子而跳到正能量上去。（不过这个光子必须有足够大的能量才行，因为最低的正能量与最高的负能级之间有一空隙。）这时，除在正能量上多了一个电子外，在负能海中还留下了一个“空穴”。这个“空穴”在物理上是什么东西呢？

相对于真空——负能级都填满了的状态——而言，一个负能级的“空穴”，就是少了一份负能量，根据“负负得正”，也就是多了一份正能量。同样，由于电子电荷是负的，“空穴”相对于真空而言带有等量的正电荷。所以，负能级的“空穴”，在负能电子海的背景上，表现为一个正能量的带正电荷的粒子。这个粒子的许多性质和电子一样，只是电荷的符号相反，因此它叫做正电子（或阳电子）。

这样，狄拉克的真空理论便预示了电子的反粒子——正电子的存在，以及一个能量足够大的光子可以转变为一对电子和正电子的现象。

反之，如果负能电子海中有一个“空穴”，那么它可以成为正能电子的陷阱。一个正能电子可以跌入这个负能级的“空穴”，同时以光子形式放出能量。这时，不但“空穴”因为被填上而消失，那个跌入“空穴”的电子也淹没在负能电子海的背景中不见了。只剩下跌入

过程中放出的光子。这就是一对电子、正电子相遇而湮灭为光子的现象。它是狄拉克真空理论的又一推论。



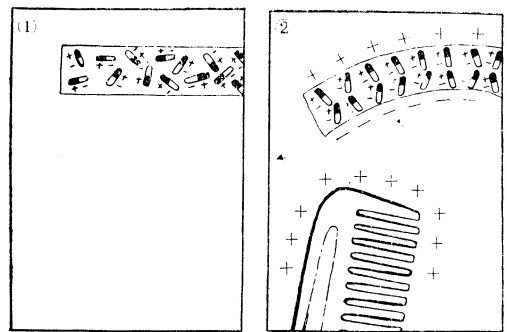
图三

1. 电子——正电子对的产生：负能电子吸收一个光子，跳到正能量，并在负能海中留下一个“空穴”。
2. 电子——正电子对的消失：正能电子跌入负能海中的“空穴”，同时放出一个光子。

所有这些推论都很快地被尔后的实验证实了。这无疑是有利于狄拉克真空理论的证据，但还不能说已经证实了真空不空，因为在这些现象中尚未观察到负能电子海本身的物理效应。

真空极化

“你要知道梨子的滋味，你就得变革梨子，亲口吃一吃。你要知道原子的组织同性质，你就得实行物理学和化学的实验，变革原子的情况。”对于真空的认识，也是如此。为了证实真空不空，就得变革真空。我们可以在真空——均匀的负能电子海中放入一个带电粒子，它的静电作用能够改变负能电子的空间分布，从而引起可观测的物理效应。



图四

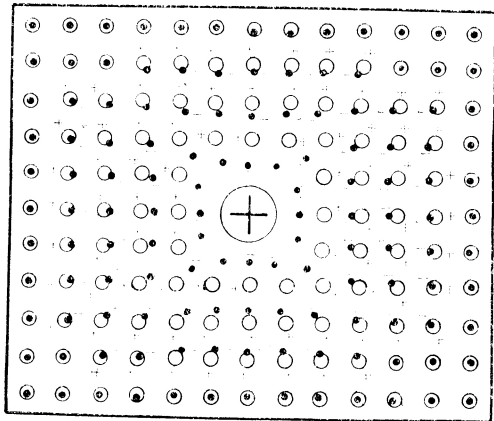
1. 未被极化的纸，分子排列不规则。
2. 纸在带电梳子的电场中极化，分子排列比较规则。

为了说明这一点，先让我们来看一个宏观现象：把一张纸靠近经过摩擦而带（正）电的塑料梳子，它就会受到梳子的吸引。纸本来不带电，为什么会受到带电的梳子吸引呢？原来，纸的分子里有正电、负电，不过通常情形下它们彼此中和了。可是当纸靠近带正电

的梳子时,其中的负电受到吸引,而正电受到排斥。于是,纸靠近梳子的那边出现负电荷,而另一边出现正电荷。所以总的说来,整个纸受到梳子的吸引。

这个现象,用物理上的术语来说,就是纸被梳子的电场极化了;纸的两边出现的电荷叫做感应电荷。一般说来,带电体周围的任何介质(由原子、分子组成的物质)都会被带电体所极化:介质中靠近带电体的部份出现异号的感应电荷。

在真空中放入带电粒子(例如,氢原子核,即质子),也会发生类似的情况。质子的正电将吸引真空之海中的负能电子,使其空间分布不再均匀:离质子越近负能电子的密度越大,只有在离质子极远的地方,负能电子海的密度才是均匀的。这种情形与介质的极化很相似,因而叫做真空极化。相对于未极化的真空——均匀分布的负能电子海——而言,在质子周围被极化的真空中,出现了负的感应电荷的分布。



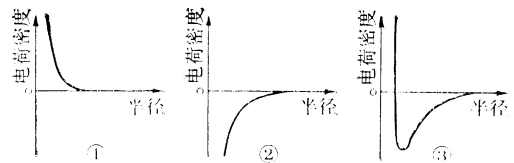
图五 真空极化。质子的正电荷改变了负能海电子的分布(黑点表示负能电子,白圈表示移动的电子留下的“空穴”)

显然,质子附近的静电场,不再是质子本身的电场,而是它与负感应电荷的电场两者之迭加。如果再放入一个检验电荷(例如,正能电子),它所受到的作用应该是这个总电场的作用。宏观上测量质子的电荷时,检验电荷总是离质子很远的。这样测得的质子电荷(物理电荷),不是质子本身的电荷(裸电荷),而是它与周围总的负感应电荷之和。质子的物理电荷不等于裸电荷,前者的值比后者要小,这就是物理上所谓的“电荷重正化”。它是真空极化引起的一个后果。不过这一效应无法在实验上加以检验,因为质子周围的真空极化不可避免,裸电荷测不出来。但是,理论上电荷重正化有重要的意义,在许多问题中不考虑它就会出错。

对此可以打一个浅显的比方。真空极化好比是给裸质子穿上一层感应电荷的外衣,永远也脱不下来。远处的检验电荷看不见裸的质子,看到的只是穿衣服

的质子。

在离质子(或电子)很近的地方,真空极化的感应电荷密度较大,其空间分布的变化也比较明显。所以,在这里总电场偏离通常的库仑定律也就比较明显。这会影响到离质子很近的正能电子与质子相互作用的结合能。而当正能电子离质子远时其结合能就几乎不受影响。氢原子有两个状态 $2S_{1/2}$ 和 $2P_{1/2}$,假若不考虑真空极化等效效应,在过去的理论中它们的结合能是一样的。但是在 $2S_{1/2}$ 态中电子靠近质子的机会比较大,而在 $2P_{1/2}$ 态中电子总是离质子比较远的。因而真空极化改变 $2S_{1/2}$ 态的结合能,而 $2P_{1/2}$ 态却几乎不受影响。这就是说,真空极化是使 $2S_{1/2}$ 态的能级位置相对于 $2P_{1/2}$ 态发生移动(兰姆移动)的一个因素。



图六 真空极化时的电荷分布

1. 裸质子电荷分布
2. 感应电荷分布
3. 物理质子电荷分布

由于电磁作用是一种比较弱的作用,质子(或电子)通过静电作用引起的真空极化是很微弱的;被极化的真空反过来再通过电磁作用造成的物理效应,就更是极其微小的。拿氢原子 $2S_{1/2}$ 态的结合能来说,真空极化对它的影响只有它本身的几亿分之一!现代科学技术的发展,已使人们有可能测出,而且是高精度地测出这样微小的改变。在测量兰姆移动的实验中,人们能够测准到真空极化微小效应的千分之二,也就是说,在这样高的精度下证实了真空极化。

真空极化是一种普遍现象。只要在真空中加上电磁场,都会引起真空极化。所以除兰姆移动外,真空极化还可造成许多种可观测的物理效应。例如,测量电子磁矩的实验,是让电子在外加磁场中运动。这时电子本身以及外加磁场都引起真空极化。真空极化所产生的感应电荷和感应电流的电磁场,又反过来作用于电子本身,从而使电子磁矩的实测值略大于不考虑真空极化时的值。这个极小的偏差叫做电子的反常磁矩,它同样被高精度的实验所证实。

真空极化产生的物理效应被高精度地观测到,这就确凿地证明了:真空可以被极化,真空确实是不空的。尽管狭义相对论并没有被推翻,但是早期狭义相对论中真空即空的观念,不到五十年就被物理学的发展打破了。辩证唯物主义关于空间不能与物质相分离的光辉思想,再一次被科学的事实证明是颠扑不破的真理。自然科学研究中唯物论和唯心论、辩证

法和形而上学激烈斗争，胜利总是在辩证唯物主义这一方。

探索真空奥秘的新阶段

狄拉克的真空理论并不完备，因为它与其基础——单电子理论之间有尖锐的矛盾。这主要表现在，后者不能处理粒子的产生、消失，而前者却反映这种现象的存在（电子——正电子对的产生和消失）。在高速下粒子具有很大的能量，当它们相互作用时能量的转移可以很大，足以导致粒子的产生和消失。这是高速微观现象区别于低速现象的重要特点。既能反映微观物质的波动——粒子二重性，又能处理高速现象特有的粒子产生、消失的物理理论，是后来发展起来的量子场论。

在量子场论中，引入了一个重要的新概念，就是量子场。人们用量子场来描写微观物质的存在形式即其运动形态。量子场受到激发代表粒子的产生，量子场激发消退代表粒子的消失。所以，可以用各种量子场的各个激发态来描写处于不同运动状态的各种粒子系统。而各量子场系统的能量最低的状态（又叫做基态），就是自然界中的真空。在这里，真空不空得到了明确的反映，因为量子场论从一开始，就把真空理解为：以量子场形式存在的物质的一种特殊运动状态，不过是能量最低的状态而已。即便在这种状态下，各种量子场也在不停地振荡，由于相互作用，不断地有各种虚粒子产生、消失，循环往复而不绝。形象地说，真空就象是由各种虚粒子组成的波浪起伏、烟涛浩茫的大海。而真空极化，无非是微观粒子与其周围的正、反虚粒子的云之间的相互作用。这样，量子场论便修改和发展了狄拉克理论对真空的表述，真空不空、真空极化更清晰地反映出来了。

既然真空是量子场的基态，那么真空的性质就应该由量子场之间的相互作用（包括自作用）所决定的。近年来，在“基本”粒子的理论研究中，人们进一步发展了量子场论，开始探索这个问题。在这些探索中，把真空与介质类比有很大的启发性。真空极化类似于介质的极化，量子场的真空态也仿佛一定条件下介质的基态。

我们在日常生活中，经常可以看到水冻成冰、蒸发为汽，或者冰融化为水、汽凝结为水。水这种物质有冰（固体）、水（液体）、汽（气体）这三种物态，在物理上叫做水这种介质的三种相；它们之间的相互转变叫做相变。一块磁铁被火烧过可以失去磁性，普通的石墨或碳粉在高压下变成极硬的金刚石，这些也都是相变的例子。一种介质可以有几种不同的相，这些相在何种条件（例如温度、压力）下互相转变，取决于组成介质的分子、原子、电子之间的相互作用。

与此相似，真空之海是否也会冻结呢？就是说，真

空是否也有不同的相？在一定条件下这些相之间也可以相互转变吗？最近几年，人们对此初步探索的看法是，有这种可能性。所谓弱作用——电磁作用统一理论，就认为传递弱作用的中间玻色子的质量，弱作用与电磁作用强度之比，都可能与真空的相有关。李政道也曾提出过一个理论，认为如果原子核内核子密度超过一定界限，原子核内的真空有可能发生相变；象水冻成冰会放出热量那样，伴随真空的这一相变，也可能放出比原子弹或氢弹爆炸还大得多的能量。人们现在开始思考：由于层子之间极强的相互作用，强子内部的真空被极化得很厉害，它会不会转变为与外部真空不同的相？在那无边无际的宇宙空间中，在总星系演化的漫长岁月中，是否有着或者有过与我们这里现在的真空相不同的真空区域？

在目前阶段，这些理论上的考虑都还只是一些带猜测性的假说，需要科学实践的进一步发展来检验它们而决定取舍。

现代量子场论不是完全成熟的理论，它仍在不断地发展着。从科学实验上确认真空不空，并不是人类对于真空认识的终结；相反，它不过标志着对于真空的认识上一个新阶段的开始。我们必须用“一分为二”的唯物辩证法作指针，对复杂的物理现象进行“去粗取精、去伪存真、由此及彼、由表及里”的分析，“在实践中不断地开辟认识真理的道路”，才能推进人类对真空认识的深化。正和“电子是不可穷尽的”一样，人类对真空奥秘的探索永无止境，物理学的发展将进一步从科学上丰富和证实辩证唯物主义。