



(上)

吴詠时

本世纪以来，特别是近三十年来，物理学和其它自然科学一样，在突飞猛进地向前发展。特别是大规模科学实验的蓬勃发展，使人们的视野不断扩展和深入到新的领域。新现象层出不穷；老问题解决了，又出现许多新问题需要研究解决。在新的研究领域中，在新现象和新问题面前，已有的理论和概念往往不够用了，有的需要修改或扩充，有的需要创新。因此，在现代物理学的发展中，不但需要而且不断出现新的观念上的重要变革。人们对于真空的认识，对于真空的奥秘的探索，就是其中突出的一例。

为了更好地说明人类对于真空

认识的新发展，让我们先简短地回顾一下有关的历史。

以太论的两次失败

什么是真空？这是一个很古老的问题了。人类对于物理学的这个基本问题的认识，经历了漫长而又曲折的道路。

无论在古代的中国还是古代的欧洲，虽然那时人们对于自然界的认识由于缺乏系统的科学实验，还处在很初级的阶段，但已开始出现了关于物质世界包括真空的各种朴素的猜测。古希腊的德谟克利特认为，所有的物质都是由原子组成，原子之外就是虚空。换句话说，他的原

子论是把物质和真空对立起来，主张真空就是没有物质的虚空。而我国古代的元气学说则与此相反，认为世上万物皆由连续形态的元气形成；元气“聚则成形”，“散而归之太虚。”宋代的张载、明代的王夫之都明确地说：“太虚即气，则无‘无’”，“阴阳二气充满太虚，此外更无他物，亦无间隙”。由此可见，我国古代的元气说否认没有物质的虚空，主张真空不空，真空中充满物质。

关于真空的这两种对立观点的斗争，一直贯穿到近代物理学。

欧洲文艺复兴之后，近代自然科学冲破封建宗教的精神枷锁而兴起，开始了对宏观物体的机械运动

的研究,最初是十七世纪的笛卡尔,为了解释行星围绕太阳运转的现象,提出了空间中充满以太的假说.他认为以太为中心形成了以太的旋涡,行星便是在此旋涡中绕太阳

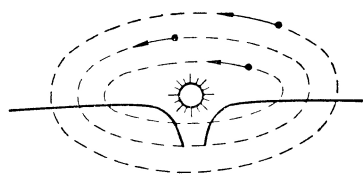


图1 笛卡尔的以太旋涡
(后被牛顿力学所否定)

作圆周运动(图1).后来牛顿在开普勒三大经验定律的基础上提出万有引力定律时,认为引力是一种超距作用,不需要笛卡尔的以太旋涡作为传递引力作用的媒介.特别是,在牛顿的力学体系中,空间被看做某种不动的空架子,物体被放入这种空架子之中,物体之间便是虚空.由于牛顿力学能够解释和预言许多机械运动现象,一度占统治地位的笛卡尔以太说为牛顿力学所取代.

十九世纪,发现了光和电磁场的波动性.人们又复活了真空中充满以太的观念,把光和电磁波解释为以太的机械振动.以太论在当时曾经风靡一时.到十九世纪末,“以太”这个名词充斥于物理学的著作之中.不料,著名的迈克尔逊——莫雷实验,在以太论所预期的精度内,竟然没有测到地球相对于以太的运动速度.人们企图挽救以太论,曾提出种种尝试,都和实验发生尖锐矛盾而归于失败.爱因斯坦在此基础上建立了狭义相对论,否定了以太的存在,提出光和电磁场本身就是一种物质,不需要以太作为传播介质.狭义相对论在许多重要的问题上冲破了牛顿机械观的束缚,唯独有一点却保留了下来,这就是:真空是没有任何物质(包括电磁场)的“空的空間”.

以太论看上去是包含了真空不空的合理思想,但它在宏观物体机械运动和宏观电磁场这两种物质运动形态的研究中两次都失败了,难

道真空真的就是“空的空間”?

不.空间无非是物质的一种存在形式,没有物质,还能有空间吗?还有,按照狭义相对论,“真空中光速不变”,这不仅是光这种物质的性质,也是真空的一种性质.如果把真空理解为没有物质的空间,那么真空的这种性质是什么决定的呢?

狭义相对论之后,首先对真空即空的“空間”这一传统观念提出疑问的,还是爱因斯坦.当他从场的观点重新研究引力现象时,他也意识到了这个观念有问题.根据他所创立的新的引力理论——广义相对论,他后来修改了自己原来的观点,曾提出过真空不过是引力场的一种特殊状态的想法.其后不久,当物理学发展到对微观物质运动形态特别是对高速微观现象新领域的研究时,人们以另一种形式把这个想法大大发展了,终于获得了对于真空的新的科学的认识.这就是——

真空是量子场系统的基态

大量的实验结果表明,微观物质运动形态与宏观的机械运动或者宏观的连续场都有根本的不同,它的最重要的特点是具有波粒两重性.此外,当粒子在高能下相互作用时,能量的转移可以很大,足以导致粒子的产生和消失.这是高能现象区别于低能现象的重要特点.为了综合反映高速微观现象的这两个特点,人们试图把描述高速宏观现象的狭义相对论和描述微观低速现象的量子力学结合起来,前后经历二十年的顽强努力,终于建立了现代物理学的基础理论——量子场论.

在量子场论中,引入了量子场这一新概念,用以描写微观物质的存在形式即其运动形态:量子场有波动,量子场的激发或者退激,就是粒子的产生或消失.因此量子场这个概念比较好地概括反映了波动-粒子两重性和粒子可以产生、消失的事实.用量子场论的语言来说,自然界中处于不同运动状态的各种粒子,就是由各量子场组成的物理

系统的具有不同能量的各种激发态.由于物理世界的稳定性,量子场系统既然有各种激发态,那么它必然也有其对立立面——未激发的状态,即能量最低的状态或基态.因为假如没有能量最低的状态,量子场系统便可以无限地向能量越来越低的状态跌落下去,自然界便不可能稳定地存在.这个基态形成了自然界的某种背景,一切物理现象都是在这样的背景上发生的,一切物理测量都是相对于这样的背景进行的,所以在物理实验中难于直接观测它.另一方面,这个未激发的状态,相对于各种激发态而言,代表没有任何实粒子(物理粒子)存在的状态.所以量子场系统的这一特殊的状态,不是别的东西,正是自然界中的真空.

按照量子场论,在真空态中各种量子场仍处于不断的运动之中.首先,各量子场还在不停地振荡,这就是所谓的真空零点振动.此外,由于量子场之间的相互作用,真空态中也有各种量子场之间的能量转移,即不断地有各种虚粒子的产生、消失和相互转化,循环往复而不绝(真空涨落).形象地说,真空就像各种虚粒子组成的波浪起伏的大海.

真空中这种物质的存在和运动,可以通过变革真空来认识,即通过观察微观粒子与其周围真空中虚粒子云的相互作用,通过真空对微观粒子的性质和行为的影响来感知.例如,质子的正电荷会改变真空中虚的正、负电子对云的分布,而造成“真空极化”;真空中的电磁场的零点振动,会给电子的运动附加上一种随机的布朗运动.这些都会造成可观测的物理效应,诸如氢原子能级的微小移动,电子的反常磁矩等等.近代的精密实验不但能够测量到真空涨落和真空极化所引起的种种微小的物理效应,而且以极高的精度与量子场论的理论计算惊人地符合(图2),这就确凿地证明了,上述量子场论的真空概念是符合客观实际的.

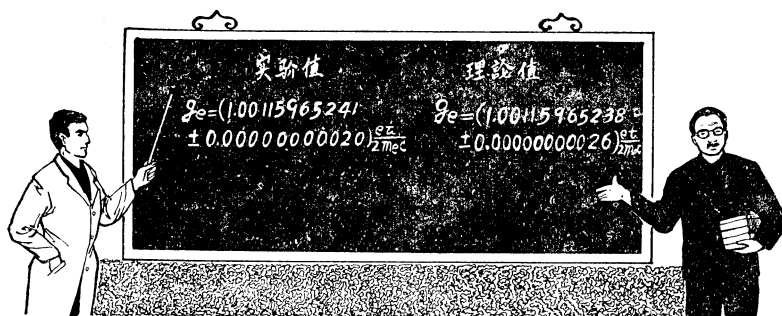


图 2

这样我们便看到，狭义相对论和量子力学的结合，产生了一个新的婴儿，一个两者都没有的新观念，这就是“真空不空”。确切地说就是：真空乃是以量子场形式存在的物质的一种特殊的（即能量最低的）运动状态。

根据现代物理学对真空的这一新认识，回顾历史，我们可以总结出一些有益的经验教训。

第一，现在认识到的真空态中的物质——量子场，既不是古典的质点或介质，也不是古典的连续场，它是具有波粒两重性的新的物质形态。古典的以太论把真空中物质设想为通常非相对论的机械运动形态的介质，不符合事物的本来面目，当然要失败。所以我们不能仅仅根据以太论包含了“真空不空”的合理思想，就断定它必定正确，还要看这种合理的思想在物理上的具体实现是否符合客观实际，能否经受实践的检验。同时也不能因为以太论的两次失败，就从此放弃真空中充满物质的基本观点，堵塞认识前进的道路。自然界本身是辩证地发展的，人类对自然界的认识过程也是曲折反复，充满了辩证法的。

第二，由于量子场这种物质运动形态不同于机械运动，物体或者粒子相对于真空态中的量子场这种物质的运动速度这一概念本身就没有意义。现在看来，迈克尔逊——莫雷实验没测到这种速度，这实验事实本身并不能证明真空中不存在物质，它只是证明了真空态中的物质必定具有与机械运动不同的运动形

态。由此可见，对实验的结果也需要辩证的分析，否则往往会导致错误的结论。

最后需要说明一点。按照现代物理学的观点，物理上观测到的各种粒子，都可以认为是量子场的能量较高的激发态；真空中的虚粒子吸收了一定的能量，便可转化为实粒子。所以，所有的物质（包括真空态中的物质）都统一于量子场这一物质运动形态之中，只是真空态中的量子场处于能量最低的基态这一特殊状态罢了。由此可见，现在没有必要给真空态中的物质起一个诸如“以太”的专有名词。

新的问题——要探索

真空的奥秘

在科学实验的有力支持下，“真空是量子场的基态”这种对于真空的新认识，已经成为现代物理学的一个基本观念。它变革了狭义相对论早期的真空即空的空间观念，对什么是真空这个老问题做出了新的回答。但是，这并不意味着我们已经到达对真空认识的终点；恰好相反，它不过是我们带到一条通向物理学未知世界的新跑道的起点。这就是要探索真空的奥秘，并通过这一探索进而解开物质结构深处之谜。

要探索真空的奥秘，这是真空的物质性向我们提出的新问题。在认为真空是一无所有的虚空时，是无所谓什么真空的奥秘的。可是现在不同了：既然真空中有物质，有物质的运动及其相互作用，那么真

空就是一个很复杂的东西，就有许多新问题需要研究。例如，不同类型的量子场，不同类型的相互作用（包括自作用），可以导致不同类型的真空态吗？这是真空的多样性问题。又如，即使对同一种相互作用，当某些其它条件（例如温度、密度、外场强度等）发生变化时，不同类型的真空态之间是否会发生相互转变？这就是真空的发展变化问题，这里既包括真空随时间的发展，也包括真空在空间上的变化。这些在过去几乎是不可思议的，现在都成为有关真空性质的现实的物理学问题了。

研究真空的重要性是十分明显的。真空的性质往往是物理学的基础。我们都知道，牛顿第一定律（惯性定律）是牛顿力学的基础，这个定律给出了真空中物体的机械运动状态；即不受外力的等速直线运动状态，然后才谈得上外力的效果——外力改变物体的速度即产生加速度的概念。在狭义相对论中，真空中的光速不变原理是一条基本原理，这是众所周知的。然而在量子场论中，真空的性质又给物理学提供了新的更深的动力学内容：由于物理粒子的各种状态都是真空的激发态，物理粒子的性质就与真空的性质密切相关。同时，微观粒子总是处在真空的背景之中，所以必不可免地要与这一背景即真空中的虚粒子云发生相互作用。这种粒子——真空相互作用存在于所有的微观物理现象之中，因而任何微观物理过程的严格考虑都必须计及真空的影响。正是由于粒子的性质和相互作用行为与真空有如此密切的联系，人们不禁猜测：或许微观世界中某些难于理解的现象的谜底，正隐藏在真空的非寻常性质的背后吧。

从近一、二十年来真空理论的发展，已经可以看到这样的苗头。下面我们将以真空对称性的自发破缺和真空相变的探索为例，看看真空奥秘的探索如何革新着人们的物理思想，从而开辟认识微观物理世界新的可能途径。

真空和对称性的自发破缺

量子场论中有一条柯尔曼定理, 它说真空的对称性就是物理世界的对称性. 从真空是量子场的基态, 不难理解这条定理的意义: 它无非是说, 量子场系统基态的对称性质决定了其激发态的对称性质. 据此, 要研究物理世界的对称性, 就需要研究真空的对称性.

过去习惯上总是假设: 真空的对称性和相互作用的对称性相一致. 而支持这个假设的“理由”是, 由于真空一无所有, 所以真空没有理由会破坏相互作用的对称性. 现在不同了, 真空不再是一无所有, 人们可以从量子场之间的相互作用(包括自作用)来决定什么样的态才是能量最低的基态了; 因而作为量子场系统基态的真空对称性问题, 已经变成可以从相互作用出发研究的课题.

为了说明这一点, 让我们来看几个有类比意义的经典力学中的例子. 设有一条光滑的铁丝, 弯成如图 3 所示的左、右对称的单谷形状. 把它竖直立于地球的重力场的铅直

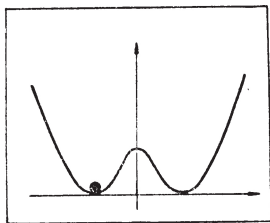


图 3 左右对称的单谷势能曲线

平面内, 在铁丝上穿一个金属珠, 它可以沿铁丝无摩擦地滑动. 显然, 这个金属珠能量最低的状态是静止在铁丝谷底的最低点, 而这点恰好

在左、右对称的轴上. 从这个意义上可以认为, 能量最低的位置是左、右对称的. 但是, 如果我们把铁丝弯成图 4 所示的对称双谷的形式, 则金属珠的能量最低的状态就有两个, 即双谷的谷底. 虽然这两个状态互为左、右对称, 但实际上金属珠只能位于一个谷底, 它不在左、右对称轴上. 所以尽管铁丝的形状是总体上左、右对称的, 而实际出现的能量最低的位置破坏了这一对称性. 此外, 金属珠围绕一个谷底的来回振荡, 只要它不能越过中央的峰顶, 其轨迹也是左、右不对称的. 上述谷底只是左右两个点, 这种左、右对称性是离散对称性, 也可以有连续对称性的例子. 例如, 底部隆起的砂锅, 其形状恰似图 4 的铁丝绕铅直的对称轴旋转而成的曲面. 在砂锅中放一小球. 虽然旋转对称的圆形谷底的每一个点都是能量最低的位置, 但实际上能量最低状态的小球只能静止在圆形谷底的某一点. 这个实际状态本身并不具有旋转对称性, 或者说破坏了旋转对称.

用物理学的术语, 以上例子中铁丝或砂锅的形状, 叫做这个系统的势能曲线或曲面. 这些例子形象地说明, 一个物理系统能量最低的状态其对称性可能和势能的对称性一致, 也可能破坏势能的这种对称性; 这要看势能函数的具体形状而定, 不能泛泛而言.

类似的情形同样发生在量子场论中. 例如, 一个标量场(相应于自旋为零的粒子)系统, 如果它的自相互作用势能属于图 3 所示的类型, 能量最低的基态是唯一的, 则此真空态便具有和相互作用同样的对称性. 这样的真空叫做普通真空或正常真空. 按照柯尔曼定理, 从这样的真空中激发出来的物理粒子, 也具有同样的对称性, 因而可以按照相互作用的对称性进行粒子谱的分类. 这是研究对称性的传统方法.

但是, 如果自相互作用势能属于图 4 或图 5 类型, 情形便大不相同了. 这时对称性较少(甚至没有对

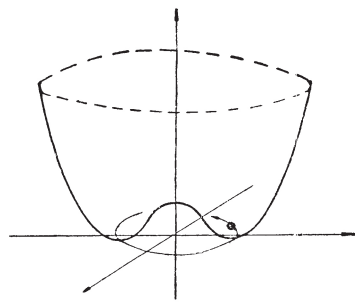


图 5 形如砂锅的旋转对称的势能曲面

称性)的态成为能量最低的态; 它们不止一个, 而是形成在相互作用所具有的对称性操作(与图 4 铁丝绕铅直的对称轴旋转可相类比)下不变的集合(物理上叫做简并的真空态集合). 与前面讲的具有旋转轴不变性的砂锅的圆形谷底可相类比. 物理真空只能是其中的一个状态(与圆形谷底的某一个点可相类比), 其对称性少于相互作用的对称性(甚至没有对称性). 根据柯尔曼定理, 物理粒子的对称性也是如此, 因而把物理粒子谱按相互作用对称性进行分类的传统做法这里不再适用. 这种新的现象叫做对称性的自发破缺, 即实际物理状态的对称性不反映相互作用的对称性, 因为前者不如后者那样对称. 这好比铁磁体中分子之间的磁作用是空间各向同性的, 但其基态中自发磁矩的定向排列破坏了空间各向同性. 固体中这种对称性自发破缺现象, 是我们理解场论中对称性自发破缺最好的借鉴. 就某些方面来说, 拿真空与介质类比, 仍有很大的启发意义; 下面我们还将不时这样做.

应该指出, 对称性破缺的真空是一种新型的真空态, 它与正常真空相比有很大的不同. 在正常真空中, 场的量子振荡是围绕零点(即经典的无场状态, 它类比于图 3 中谷底位于对称轴上的原点)进行的, 因而场的真空平均值为零. 在对称性自发破缺的情形下, 由于相互作用的特殊性, 基态是场的平均值不为零的态. (这相当于图 4 或图 5 中

谷底的位置偏离对称轴上的原点.)
换用粒子的语言来描述,场的真空
平均值不为零就意味着:在对称性
破缺的真空态中,凝聚着许多零动
量的虚标量粒子;场的量子振荡便
是围绕这一玻色凝聚态进行的.

正是这个零动量玻色凝聚的存
在,破坏了相互作用原有的对称性,
从而造成真空态对称性的破缺.此
外,因为微观粒子总是与真空玻色
凝聚中的虚粒子相互作用,这部份
相互作用能量永远附着在物理粒子
身上,它又造成了粒子质量的改变.
因而物理粒子的(改变后的)质量
谱,不再反映相互作用原来的对称
性.这里真空中零动量的玻色凝
聚,相当铁磁体类比中基态的非零
自发磁矩.

(题头、插图:冯永路)