

物理内容丰富的真空

彭宏安

(北京大学物理系)

世界上存在着空无一物的绝对真空吗？如果不存在，那么“真空”的内涵又是些什么？这是一个古老又新颖的基本问题。远在物理学成为独立学科以前，许多先哲就对这个问题提出了不少有趣的设想。随着物理学的发展，一代又一代物理学家对它作出了回答。从按时序排列的答案中，可以看到他们对真空的认识并不是沿着某一种论点逐渐地深化，而是在不断地变革和否定。对这么一个看来十分简单的问题，为什么会出现这种情况？其实我们只要稍稍回顾一下物理学的发展史就不难找出答案：即某一个时期人们对“真空”的认识，始终是与当时物理学中基本理论的主要发展方面的进展情况密切相关。每当后者出现突破性进展时，必然会对前者的认识发生根本性的改变。而且，在今天看来这种关系似乎愈来愈密切，简直可以说达到了融为一体的程度。因此我们在讨论有关真空的物理内容时，要紧紧把握住这点。

一、经典物理学发展时期的真空理论

早在牛顿力学建立以前，笛卡儿为了解释行星绕日运动提出了以太说，认为空间充满了以太，整个太阳系处于以太阳为中心的以太漩涡中，行星则在漩涡中被动地绕太阳运动，如图1所示。这种以太假说虽然排斥了绝对真空的存在，但是它与太阳系行星运动规律相矛盾，显然是站不住脚的，当牛顿力学出现后，它就垮台了。以三大运动定律为基石的牛顿力学的建立和万有引力定律的发现，不但解决了行星绕日的运动问题，否定了以太说，更重要的是它是宏

物理

观物理学中基本理论的第一次大总结。这种总结必然会对时间、空间、运动等基本概念作出逻辑上相一致的论述，这就是牛顿力学的时空观：它认为时间与空间可以截然分开，空间被认为是某种不动的空架子，物体就在这空架子中运动，而物体(或质点组)之间的空隙则是空无一物的绝对真空。从以上所述得知，对于以太论的第一次否定是人们对物理学基本规律认识深化的必然结果。

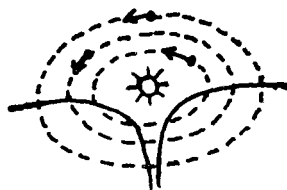


图1 笛卡儿的以太漩涡

在牛顿力学占据物理学中心的时代，人们对于波动的了解主要来自声波和水波，得出了“波的传播必然依靠媒介质”的结论。这种概念牢牢地统治着物理学界，因此自十八世纪发现了光的波动性，特别是后来发现了电磁场的波动性后，为了解释它们在空间中的传播，以太论的假说再次兴起，认为宇宙中不论何时何地何物之内，无不充满了以太。这样，物理学在电磁理论大发展时期又新的基础上否定了与牛顿力学相适应的绝对真空，而形成第二次以太论高潮。当然这里的电磁以太介质与笛卡儿的以太漩涡有根本的不同。

今天我们都知道这种以太论仍然是错误的。事实上随着电磁学的日益发展和完备，以太论破绽百出，但是当时的物理学家绝大多数被旧思想所桎梏，却千方百计地为以太论作各

种各样的修补,以致把以太搞得在概念上含糊不清和相互矛盾。十九世纪末,以太论中的一个主要课题就是要精确测量出地球相对于以太的运动速度,这就是有名的迈克耳孙-莫雷实验的内容。迈克耳孙本人当初是以太论的积极拥护者,但是当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运动速度时,他毅然摒弃原来的信念。他的实验完成了对以太论最致命的一击。至此以太论已无可挽救,导致狭义相对论的最终建立,标志着经典电动力学体系大功告成。人们认识到电磁场本身就是一种物质,波动是这种物质的固有运动形式,它们与声波或水波的性质完全不同,不用任何其它媒质它本身就可以在空间中自由传播。狭义相对论不但完备了电磁学理论,还从根本上修改了牛顿力学,建立了相对论力学,因而也就从根本上修改了牛顿力学中时间、空间与运动可以彼此脱离的绝对时空观,强调时空与物质运动的不可分离性。我们想在这里提醒一下,狭义相对论在原则上讲还是允许绝对真空存在的,那就是实物和电磁场都不存在的那些空间。今天看来这仍然是与客观实际相违背的,因此经典物理学不可能解决有关真空的内涵问题,对它正确的认识只能建立在量子理论的基础上。

二、量子理论给真空带来了崭新的内容

微观世界中任何客体的运动都遵从量子理论的规律。量子理论中最本质的、影响全局的特征是微观粒子的波粒二象性,这一特征渗透到了它的各个方面,因此它也必然会在与量子理论相适应的真空理论中显示出来。在讨论真空问题时,我们将量子理论分为量子力学和量子场论两部分。

量子力学是研究微观粒子运动的基本规律和基本形态的科学,但是它所研究的对象受到两点限制: 其一是粒子运动速度比较低($\frac{u}{c} \ll 1$),其二是量子系统中粒子数不能改变,而这两点是密切相关的。由于这两点限制,使得

在量子力学的层次上,既不可能揭露出真空的本质,也不可能了解到它的丰富内涵。当取消上述第一点限制后,量子力学就扩展成为相对论量子力学;进一步再取消第二点限制后,它们就过渡到了量子场论。只有在量子场论范畴内才有可能了解真空的物理内涵。

为了更好地说明,先从相对论量子力学中自由电子运动方程谈起。从这方程得知,电子除了有 $E \geq m_e c^2$ 的正能解外,还允许有 $E \leq -m_e c^2$ 的负能解。这样一来,一切正能量的电子都将会无休止地辐射能量而坠入负能量的无底深渊中,它势必导致宏观物质的全部解体!为了摆脱这种与事实不符的困境,狄喇克提出了电子海的假说,认为所有电子负能态都已全部占满,由于泡利原理,就阻止了正能电子自动向负能态跃迁。根据这一假设,所谓真空实际上是被无数多个负能电子填满了的大海。客观世界中发生的一切物理现象都是以这个负能电子海为背景,而这个被负能电子全填满了的大海并不产生任何可观测的效果。只有当某一(或一些)负能电子吸收了足够能量,跃迁到正能态成为一个(或一些)普通电子时,大海中才会留下一个(或一些)可观测的空穴。从体系的能量角度看,后面讲的情况当然比只有电子海的真空状态要高,因此我们可以说,真空就是能量最低的状态。在推广到有电荷电流与电磁场相互作用的普遍情况时,这种说法仍然成立。

高能粒子相互作用时可以产生新粒子和湮灭原来的粒子,系统的粒子数不再是固定不变的,量子力学不再适用而需用量子场论来处理。这时每一种基本粒子都与一种场对应,将场进行量子化而粒子则看成为场量子。当空间存在某种基本粒子时,表明那种量子场处于激发态;反之不存在粒子时就意味着场处于基态。这样,在量子场论中真空就定义为没有任何场量子被激发的状态,也就是量子场系统的基态。显然这种真空的定义与前面给出关于真空的定义是相洽的。

我们要强调的是,这种关于真空的定义是包含着实际物理内容的,因为现在的真空中可

以存在各种量子化了的场，不过它们都处于能量最低态——基态而已。这种说法是有充分根据的，例如中子的 β 衰变过程 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$ ，就应该按表 1 所示来理解。

表 1

量子场的种类	衰变前的场量子数	衰变后的场量子数
中子场 n	1	0
质子场 p	0	1
电子场 e	0	1
中微子场 $\bar{\nu}$	0	1

实际上量子场论范畴内的真空有着极为丰富的物理内涵。首先，由于任何量子场都不可能象经典场那样可以完全“冻结”，至少具有零点振荡或零点能。而场量子之间的相互作用必然使不同场量子之间发生能量的交换与转移，即使不存在实粒子时，场的零点能和场的相互作用使真空态中不断地有各种虚粒子对的产生和湮灭。这样的过程将无休止地循环重复，形成真空涨落。与此相适应，当空间存在真实粒子时，真空背景场对它的作用表现为所谓辐射修正和真空极化效应。现以量子电动力学(QED)为例来说明。如图 2 中 (a), (b) 所示，电子受真空的影响（这当然是指电子与真空态定义下的电磁场相互作用），使得它在某一时刻放出一个虚光子，而在另一时刻再将它吸收，这样的过程就称为辐射修正。真空极化是真空与外电磁场作用（这当然也是指真空态下定义下的电子、正电子场与外电磁场相互作用）而产生的一种效应，在某种意义上讲，这和经典电动力学中将点电荷置于介质中的极化图象颇为相似，即把真空当作一种“介质”，在外电磁场作用下，它的正负电中心分离，从而出现极化现象。在 QED 中，如果这外电磁场是由某电子所产生，我们就可以用图 2(c) 表示。

上面讲的辐射修正和真空极化都是由于外电磁场和实粒子（电子）与真空发生作用的结果。这方面最典型的两个实例就是 QED 中的氢原子能级的兰姆位移和电子反常磁矩，我们在这里简单介绍一下，因为它们不但说明了 QED 的正确性，同时也说明我们对真空态的认

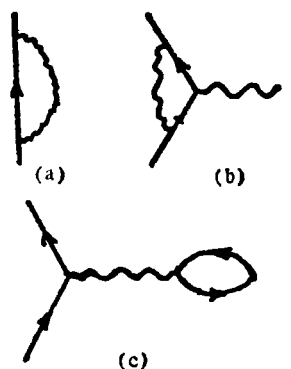


图 2 电子(实线)与真空(波线的电磁场)相互作用产生辐射修正和真空极化现象的示意图

识是正确的。

先讨论氢原子能级问题。从相对论量子力学计算得知，氢原子中 $2S_{1/2}$ 态与 $2P_{1/2}$ 态的能级完全相等因而是严格简并的。但是用 QED 计算它们时由于考虑了氢原子中电子与真空的相互作用，即类似图 2 所示的辐射修正后，发现 $2S_{1/2}$ 态能级要比 $2P_{1/2}$ 态的能级略高一点，大约高 1057MHz。当时正是四十年代末期，微波技术迅速发展，在实验方面，的确测量到了这两条能级的细微差别，并且与当时的理论估量值符合得相当好。经过以后几十年来实验物理学家与理论物理学家的共同努力，在测量精度和计量准确性两方面都有极大的提高，使得测量值与计算值达到了惊人相符的程度：

实验值(1976 年) $\Delta = 1057.862 \pm 0.020\text{MHz}$ ；
理论值(1975 年) $\Delta = 1057.864 \pm 0.014\text{MHz}$ 。



图 3

相对论量子力学给出电子的磁矩正好是 $1 \frac{e\hbar}{2m_e c}$ (即一个玻尔磁子)。也是在四十年代末，实验测量到的电子磁矩却不严格等于 1 而是比 1 稍稍大一点，即存在所谓反常磁矩，其实它反映了电子与真空的相互作用。在改用 QED 进行计算，并考虑了图 2 所示的辐射修正和真空极化效应后，得到了与实验值符合极好的结

果.用最新实验数据和最近的计算值对比,

$$\begin{aligned} \text{实验值 } \mu_c &= 1.00115965241 \\ &\pm 0.00000000020 \frac{c\hbar}{2m_e c} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{理论值 } \mu_c &= 1.00115965238 \\ &\pm 0.00000000038 \frac{c\hbar}{2m_e c} \end{aligned}$$

可以看出二者相符到第十位数,也许这是迄今为止物理学中已有的实验数据与理论计算符合度最高的事例。

近年来由于高能加速器的迅速发展,高能粒子碰撞的大量实验更证实了真空有着极其丰富的物理内容.按照上述量子场论关于真空的观点,只要外界给它们“注入”足够的能量,就可以从它们之中激发(或产生)出各种场量子——基本粒子.例如新一代的高能正负电子对撞机,在这种意义上讲就是一种理想的能量注入器.事实上当高能量的正负电子对撞时,就湮灭为具有光子量子数的能量极大的“火球”,它使真空激发出大量的基本粒子。

至此我们已从量子理论特别是从量子场论中了解了关于真空的定义和它的一些初步的内涵,这些都已为大量实验所证实。

三、对真空内涵新的认识与探索

现今物理学高度发展,它已经分出许多专门的学科,在迅速的发展中,各分支学科都有各自的理论.然而要讲到物理学中基本理论,我们认为还是量子场论.不过这里所指的量子场论,其重点已不再是 QED,因它在五十年代就已经完备了.今天量子场论的重点,是那些与高能物理中各种基本问题密切相关的方面及其引伸出来的内容.它们的特点可归结为:在物理上已经深入到了研究各种基本粒子的内部结构,因而也就涉及到了以基本粒子为线度的极小时空范围内的问题;在数学上则是充分地、综合地运用了近代数学新进展,这是在物理学其它分支的理论中从未出现过的现象.量子场论在实验和数学两方面的配合下取得了巨大的

进展,但是也碰到了许多新难题,要求进行更深入的研究和探索.值得强调的是,在这些成果和问题中不少都是与真空的内涵问题密切相关的.我们在这里不可能全面谈及,只想简单介绍较为重要的两点新假说.

1. 真空的对称性自发破缺

在量子力学中,如果某体系的哈密顿量 H 具有某种对称性 (H 对某种变换群保持不变),则其方程解也必有这种对称性(波函数按群表示分类,而同一群中所有态的能级简并),只有当 H 中加进了破坏项 H' 后,该解的对称性才不复存在.任何偏离这种传统作法来破坏解的对称性的考虑,都是难以设想的.但是在量子场论中则可以实现这一点,即系统的 H (或更合适的用拉氏量密度 \mathcal{L}) 具有某种对称性但其解却不具备它.这是由于真空态引起的问题,称为真空的对称性自发破缺,简称为自发破缺。

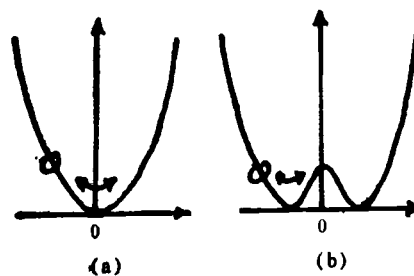


图4 (a) 左右对称的单谷势能曲线;
(b) 双谷的势能曲线

为了便于理解,先对照图 4(a),(b) 所示的简单的力学运动情况来说明.设想它们分别是用光滑铁丝弯曲成对于纵轴对称的单谷和双谷曲线,各套一小环在其上作无摩擦滑动.显然这时环的运动方程和约束条件对图 4(a),(b) 两种情况讲都具有对纵轴的对称性,但当环的总能量小于某一定值时,图 4(a) 中环运动仍然保持这种对称性;但图 4(b) 中的则不行,它只可能在左边谷底或右边谷底附近运动,即环运动对纵轴的对称性遭到破坏.其原因当然是图 4(b) 中原点处的势能不是最低点。

与上述情况类比,现在我们可以设想,如果有一些相互作用的量子场,它们的拉氏量 \mathcal{L} 具

有某种对称性，则相应的场的运动方程亦必具有同样的对称性。但是如果现在再引入某种存在自作用的复标量场 φ 和它的厄米共轭 φ^+ 场，它们的包含其自作用项 $V(\varphi)$ 在内的拉氏量 \mathcal{L}_φ 也具有那种对称性。当我们将这种标量场以保持此对称性的方式与原有的那些量子场耦合后，得到系统的总拉氏量和所有场方程仍然具有这种对称性，但这时的系统能量最低态——真空态的解则不一定如此：当 $V(\varphi)$ 作为 φ 的函数所对应的曲线属于图 4(a) 型时， $\varphi = 0$ 这一对称点也就是系统能量的最低点，真空态的对称性仍然保持，人们称它为正常真空态；而当 $V(\varphi)$ 对应的曲线属于图 4(b) 型时， $\varphi = 0$ 处的解不是系统能量最低点，就不对应基态(真空态)。由于作为真空态定义的基态必需是系统能量最小值，因此这时就只能沿横轴平行移动将真空态的 φ 值取在图 4(b) 的左边谷底或右边谷底处，这样一来，量子场系统的真空态也就类似于小环在极低能量时的运动那样失去了原来的对称性，人们称它为破缺真空态。在正常真空中场的量子振荡是围绕 φ 场的零场进行的，因而其真空平均值为零；而在破缺真空态时，由于 $V(\varphi)$ 的作用，基态是 φ 场的平均值不为零的态，在物理上这意味着凝聚了许多零动量的虚标量粒子，而场的量子振荡则是围绕这一玻色凝聚发生。

上面讲的真空对称性自发破缺理论并非无实际意义的空想，相反，它们在高能物理学的弱电统一理论完成过程中起了极为重要的作用，正是通过真空自发破缺使得弱作用中的规范粒子 W^\pm 和 Z^0 以及其它费米子获得了质量。而弱电统一理论所作的预言几乎完全为大量实验所证实，这一点也就反过来给这种真空理论以有力的支持。真空自发破缺的理论除继续在高能物理研究中发挥巨大作用外，它们还可能在物理学其它方面(如天体物理、固体物理)产生深刻的影响。

2. 真空的相变

既然场是物质，真空是这种物质系统的一种特定形态——场的基态，那么对于真空就可

以引进相的概念。一种合乎逻辑的推测是：由于存在各种不同的场和各种不同的相互作用(包括场的自作用)，因此对于某些量子场的理论来说，系统在不同条件下可能存在不同类型的基态，即不同的真空相。而当外界条件(温度、外场强度、费米子密度等)改变时，这些场之间的相互作用会使它们基态(真空相)从一种类型向另一种类型发生转变，即真空发生相变。甚至当条件适合时还可能有两种真空相同时存在，就象通常在温度和压力适合时冰与水或者水与汽两相共存那样。近来的研究表明，在量子场论的某些简单模型理论中，作些合理近似并借助于计算机计算后，的确“观察”到了有不同类型真空相和在一定条件下真空可能发生相变。但是对于那些在实际上有着重大意义的量子场论，特别是对于人们最关心的规范场理论来说，想要解决这些问题是非常困难的事，迄今没有取得任何实质性进展。

下面简单介绍一个可能与真空相变有关的重要实际问题——夸克禁闭难题。所有的夸克都只存在于强子的内部，自然界从来没有发现过自由夸克，而且在强子内部的夸克不论用多大能量的粒子去碰撞也始终不能将它们轰出强子以外，这种现象称为夸克禁闭。

为什么发生夸克禁闭？至今还不清楚。猜想这一定与强作用的基本动力学规律的特性有关。目前大量的证据表明，强作用的基础理论是量子色动力学(QCD)。这种理论虽然在强作用物理中取得了很大成功，但还未能解释夸克禁闭问题。

如果从唯象的角度看，某些考虑了夸克禁闭特点的模型在讨论强作用问题时取得了相当好的结果，其中比较突出的是袋模型，如图 5 所示。它假定强子构造有如球形口袋，装在袋中的夸克处于准自由态，但永远不能穿越袋壁。口袋的能量正比于体积，因而每种强子对应的口袋都有一定的大小。另外还有一种模型是将真空看作完全的抗色电介质，并将 QCD 夸克禁闭与 QED 中的超导体行为比较，如图 6 所示。把磁场 H 替换成胶子色电场 E ，把超导体

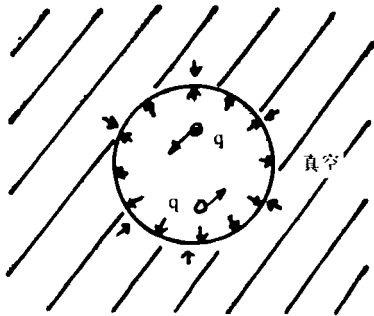


图5 强子的口袋模型

替换成 QCD 真空, 而把 QED 真空替换成强子的内部, 这样图 6(a) 就对应为图 6(b); 磁场从超导体内部被排挤出去, 相当于胶子场和夸克被压缩在强子内部, 从而导致夸克禁闭。

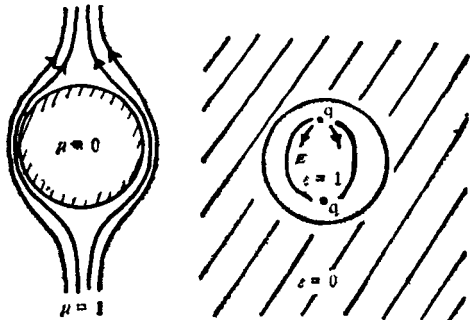


图6 QED 中的超导性与 QCD 中夸克禁闭对比
(a) 超导体=完全抗磁体;
(b) QCD 真空=完全抗色电介质

这些模型都能较好解释强子质量谱、静态

性质及其它许多有关强子结构的问题, 这表明有关真空相变的假说也许是反映了客观真实, 不过它们远非定论。

回顾历史, 我们看到了对真空问题了解的曲折过程, 这突出地反映了真空问题在物理学发展中的重要地位。

现今人们已经确信真空不空这一事实。从真空是量子场系统的基态这一定义出发, 认识到真空问题的讨论, 一开始就应该建立在量子场论基础上。

真空有丰富的物理内容。首先当然是指那些已有定论的结果, 但更重要的也许还是那些今天尚不清楚而正在探索的新内涵。近二十年来, 由于对量子场论多途径的深入研究和由于高能物理实验的迅速发展, 使得真空问题变得愈来愈复杂和重要。除本文提到的自发破缺和真空相变等假说外, 人们还对一系列有关真空的其它问题(如真空的瞬结构、真空的隧道效应、亚稳真空论的动力学等)进行探索。此外, 有关大尺度真空的结构以及宇宙演化对真空的影响等也是极为重要的问题。

总的来说, 人们对真空的认识还只能说是处于初级的探索阶段。形象地说, 好比登山者在经过漫长的攀登后发现自己并未登上顶峰, 而只是到达了一个让他刚刚能够看得见前面是矗立着更高山峦的小平台上。

(上接第550页)

3. 数字存贮器

CCD 延迟线是一个具有移位寄存器功能的模拟存贮器。但是应当指出, 它的存贮时间受到器件本身的暗电流限制, 因为随着时间的

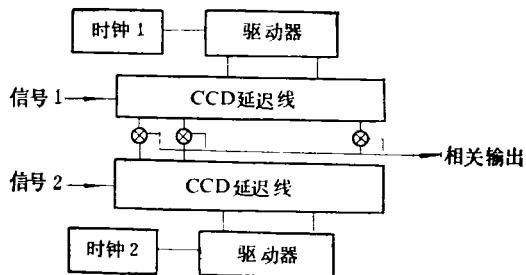


图8 CCD 相关器

延长, 暗电流也在增大, 最终信息将被暗电流所淹没, 所以作为模拟存贮器是易失性的。但是用于二进制数字存贮时, 只要加一个简单的二值化阈值鉴别器, 根据阈值信号对存贮的信息予以周期性再生, 那么 CCD 也是一种有前途的动态随机存贮器 (RAM)。它的存贮容量可以做得比较大, 而读写时间较磁盘快, 所以用作计算机的机载存贮器, 是有一定竞争力的。

参 考 文 献

- [1] C. H. sequin, M. F. Tompsett Charge Transfer Devices, Academic Press, Inc., (1975).
- [2] 塚本哲男, エレクトロニクス, No. 2 (1979), 209-214.
- [3] 堀居賢樹, 電子展望, No. 8 (1979), 33-52.