

真空不空

涂涛[†] 郭光灿^{††}

(中国科学技术大学物理学院 中国科学院量子信息重点实验室 合肥 230026)

2018-08-22收到

[†] email: tutao@ustc.edu.cn

^{††} email: gcguo@ustc.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20180901

Vacuum is not empty

TU Tao[†] GUO Guang-Can^{††}

(Key Laboratory of Quantum Information, Chinese Academy of Sciences, School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

摘要 在物理学中,真空是一个非常古老的概念。一方面,相对论的诞生摒弃了经典物理学中的真空中充满以太的概念,另一方面,量子力学的建立,又赋予了真空非常丰富的物理内容。作者将综述在相对论量子力学、量子场论以及量子信息学的视角下,所揭示的真空的各种结构和特性。不难发现,真空的量子理论,在现代物理学诸多领域中占有非常重要、甚至是根本性的地位;而且对于真空本质的进一步深入研究,将有可能带来量子物理学新的革命性的发展。

关键词 真空,量子力学,量子场论,量子信息

Abstract In physics, vacuum is a very old concept. On the one hand, the birth of relativity abandoned the classical concept of the vacuum filled with ether. On the other hand, the establishment of quantum mechanics provided the vacuum a very rich physical content. We will review the various structures and properties of vacuum revealed in the perspectives of relativistic quantum mechanics, quantum field theory, and quantum information. It is very interesting and instructive to find that the quantum theory of vacuum plays a very important and even fundamental role in many fields of modern physics. The further research on the nature of vacuum will bring a new revolutionary development of quantum physics.

Keywords vacuum, quantum mechanics, quantum field theory, quantum information

谈起真空这个概念,从中文字面上的意思似乎是空空如也。然而在物理学中,这个看似空无一物的概念却有着非常丰富的内容。下面我们将追溯在物理学中,特别是在量子力学基础上建立起来的现代物理学中,如何对真空这个概念给予非常有趣、也非常重要的理论思考和实验探索。不难发现,真空这个概念,是与空间、物质、能量等物理学最基本概念紧密联系在一起,对于它的研究往往是物理学中最为深刻、也最为令人困惑的根本性问题。也许“真空不空”是对它最好的诠释。

1 经典物理框架下的真空:以太

19世纪中叶,麦克斯韦建立了电磁学的理论:经典电动力学,进一步指出光就是一种电磁波,电磁波在空间中以光速传播。那么电磁波是如何在空间传播的呢?当时物理学家对于波动的图像主要来自于声波和水波,例如空气的压缩可以形成声波,水的振动可以形成水波。因此,直观地来看,波动是需要依赖于某种媒介的。既然电磁波能够在整个空间传播,物理学家很自然地

认为，整个宇宙空间都弥漫着一种特殊的媒介，叫做“以太”，电磁波就是以太的振动而形成的。这可以看成是当时物理学界对于真空这个概念比较流行的看法，即真空中充满着以太。

19世纪末，著名的迈克耳孙—莫雷实验，利用光的干涉效应对于这种以太进行了一次实验测量。如果这种以太存在的话，根据牛顿力学的速度叠加原理，在地球上朝着不同方向传播的光的速度有微小的差异，那么两条光路的干涉效应可以表现出这一差异。当时迈克耳孙—莫雷实验已经达到了非常高的测量精度，然而这个实验却没有观察到预期的光速的差异。这个著名的实验也被开尔文爵士称为“在物理学明朗天空的远处，还有两朵令人不安的乌云”之一，成为困惑物理学界的重大问题。

1905年，爱因斯坦提出了狭义相对论^[1]，其中有两基本原理：相对性原理和光速不变原理。爱因斯坦指出，只要放弃牛顿力学中绝对空间和绝对时间的概念，迈克耳孙—莫雷实验的困惑就可以得到解决，完全不需要引入以太。电磁场本身就是一种物质，电磁波是这种物质的运动形式之一，不需要依赖像“以太”这种媒介就可以在空间中传播。

爱因斯坦的相对论给予经典的以太概念以致命的一击，至此经典的以太论被人们所摒弃。有趣的是，爱因斯坦在晚年时期，为了统一场论，对以太的概念情有独钟，曾亲切地称之为“我们的以太”。可见，尽管经典的以太概念不正确，但是新的以太概念必将在物理学基本问题中占有至关重要的地位。

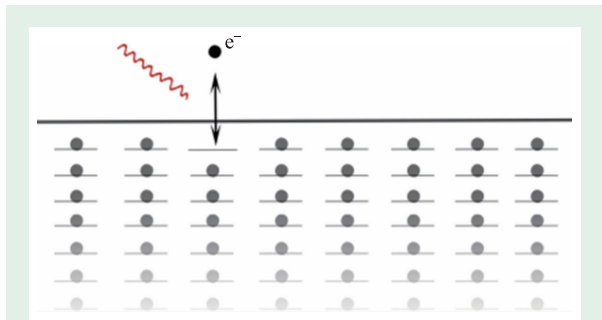


图1 真空是负能量的电子海

2 相对论量子力学中的真空：狄拉克的电子海

20世纪有两大物理学的革命：相对论和量子力学。从研究开尔文勋爵所说的两朵乌云的另一朵——黑体辐射开始，普朗克、玻尔、海森伯、薛定谔、玻恩、泡利等众多著名物理学家建立起微观世界的理论：量子力学。当时量子力学的基本运动方程——薛定谔方程，在洛伦兹变换下不满足协变性，即它是一种非相对论性的方程。

1927年，狄拉克利用4个分量的波函数来描写电子，提出了满足相对论协变性的量子力学方程——狄拉克方程^[2]。这个方程可以说是把量子力学与相对论协调在一起的第一次成功尝试，而且这个方程还可以自然地导出电子自旋的结果，被人们公认为现代理论物理学的一个巨大成就。

但是，狄拉克方程也预言了一个非常有趣、也令人困惑的结果：狄拉克方程的解，不但有正能量的电子，还存在负能量的电子。如何理解这些负能量的电子呢？狄拉克又一次地利用“真空不空”的概念。如图1所示，狄拉克认为，真空中是所有负能量的状态，根据泡利不相容原理，每个负能量的状态都有一个电子占据着。真空可以看成填满了所有负能量状态的电子形成的大海，而带有正能量的电子则在这个海面上运动。

这样一个真空是电子海的图像可以说是令人相当惊奇的。如果一个高能量的 γ 射线入射到电子海中，这时海中将有一个电子被激发到海面上，而电子海中也会留下一个空穴(相当于一个带正电荷的电子在真空中运动)。安德森(C. Anderson)在宇宙线照射的云室中，发现了一个与电子质量相等、却带有正电荷的电子——正电子，非常有利地支持了狄拉克的理论预言^[2]。因此，狄拉克和安德森因为这一开创性的工作，分别获得1933年度和1936年度的诺贝尔物理学奖。

我们看到，真空的概念在这里得到了一次飞跃。形象地说，某种以太的概念又回来了，不过是以电子海的形式。

3 量子电动力学中的真空(一):真空涨落、兰姆位移和电子反常磁矩

电磁场是人们最为熟悉的场,薛定谔方程和狄拉克方程也讨论了微观粒子和电磁场的相互作用,不过其中,电子是量子化的,而电磁场是经典的。很显然,一个完整的关于电子与电磁场相互作用的理论,应该是全量子化的。

20世纪中叶,施温格(J. Schwinger)、费曼(R. Feynman)和朝永振一郎(S. Tomonaga)分别建立了电子与电磁场相互作用的量子理论——量子电动力学^[3]。量子电动力学是一种量子场论,电子场的激发和激发消失,对应于电子的产生和湮灭,而电磁场的激发和激发消失,对应于光子的产生和湮灭。如图2(a),电子之间的相互碰撞可以用形象的费曼图表示:电子发射出一个虚光子,然后被另一个电子所吸收,这样两个电子通过交换虚光子发生相互作用。此时初态和末态,都是可以被直接观测到的真实粒子,而所有中间过程的粒子,存在的时间很短,被称为虚粒子。

非常有趣的是,“真空不空”的概念在这里再次扮演了一个重要角色。如图2(b)所示,这是一个更高阶的过程。电子发射出的虚光子可以变成一对虚的正负电子,然后这对虚的正负电子又湮灭重新变成一个虚光子,这个虚过程(即图2(b)中的圆圈)被称为真空极化。

可见,在量子电动力学的世界中,看似电子处在真空中运动,实质上真空中存在着大量的虚的光子、正负电子对。形象地说,电子此时“穿了衣服”(dressed electron),而这件衣服就是真空涨落形成的。

真空涨落将引起电子自能的微小改变,一般这个效应对应于电子能量的改变仅在MHz量级(微波段)。美国物理学家兰姆(W. Lamb)利用微波技术,测量了氢原子中电子最低的两个激发态能级 $2s_{1/2}$, $2p_{1/2}$,发现的确真空涨落将引起电子能级的微小变化,

称为兰姆位移^[3]。

真空涨落还将屏蔽电子自旋。美国物理学家库什(P. Kusch)利用磁共振技术,测量了电子磁矩,发现真空涨落将引起电子磁矩偏离简单的玻尔磁子, $a_e=(g-2)/2$,称为反常磁矩^[3]。

可以来比较一下,通过量子电动力学的计算,兰姆位移的理论值是1057.864 MHz,而实验测量值为1057.862 MHz^[4];电子反常磁矩的理论值是 $a_e=1159651.7 \times 10^{-9}$,而实验测量值为 $a_e=1159656.7 \times 10^{-9}$ ^[4]。理论和实验可以在惊人的精度上相一致。量子电动力学可以说是目前物理学中最为成功的理论之一,费曼等3人因此荣获1965年度诺贝尔物理学奖,而兰姆和库什也获得了1955年度诺贝尔物理学奖。

我们看到,真空的概念在这里再一次得到了丰富。形象地说,这里的真空是虚的光子和正负电子对的海洋。

4 量子电动力学中的真空(二):Casimir效应

量子电动力学是粒子与电磁场相互作用的量子理论,基于真空涨落所预言的电子能级移动和电子反常磁矩已经在极高的精度上得到了证实。不过这些效应总的来说是真空丰富的物理内容的一种间接反映,能否有一个关于真空的直接可观测的效应呢?这是一个饶有趣味的重要问题。

1948年,荷兰物理学家卡西米尔(H. Casimir)提出:在真空中两块平行放置的中性导体平板之间,存在微弱的吸引力,称为卡西米尔效应^[5]。很显然,在经典电动力学中,两块不带电的中性导体平板之间是没有任何作用力的。可是在量子

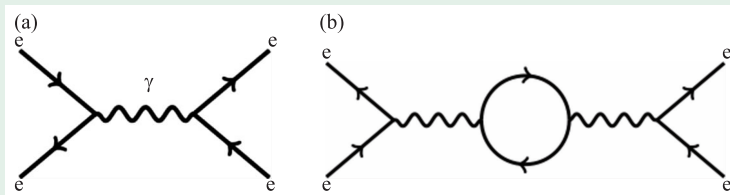


图2 (a)简单的费曼图;(b)量子电动力学中的真空极化

电动力学中，电磁场可以量子化为各种能级的谐振子。两块平板之间的真空，也就是量子电动力学的基态，实质上是充满大量谐振子的集合。可以计算得到依赖于两平板之间距离的真空能量，即卡西米尔能量。而两平板之间的相互作用力，可以看成是卡西米尔能量对于平板之间距离变化的导数。

卡西米尔效应是一种真空的量子力学效应，不过它的信号是很微弱的。对于两块 1 cm^2 大小的平行金属板，相距仅 $1\text{ }\mu\text{m}$ 时，真空产生的相互吸引力仅为 10^{-7} N ，测量如此微小的力是一个巨大的实验挑战。

实验物理学家采用高精度扭摆、原子力显微镜等手段来测量卡西米尔力，取得了一系列的进展。一个最新的突破是在2011年，瑞典的研究组将超导微波腔的两个镜面作为两个平板，利用微波光子的测量技术，精密测量了其中的卡西米尔效应^[6]。

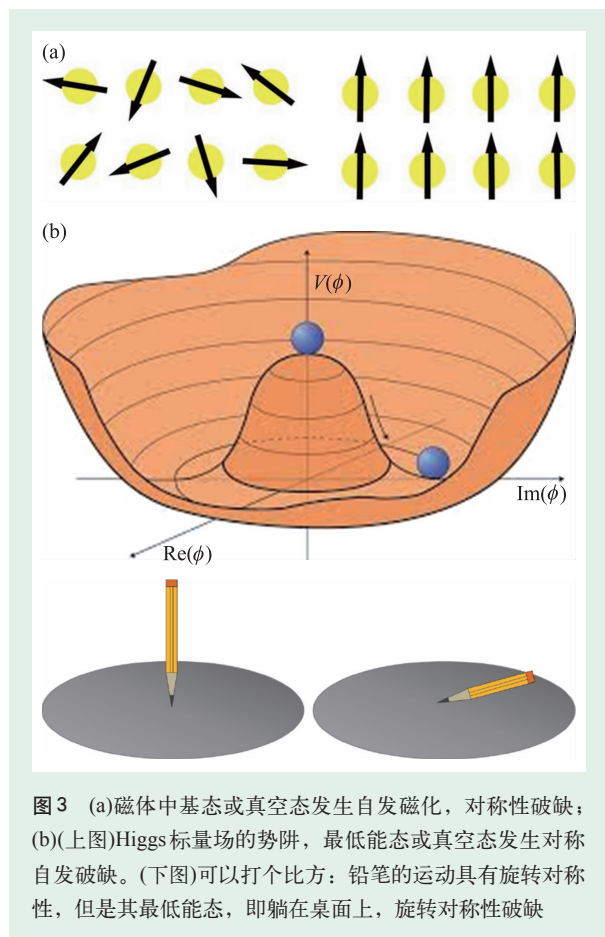


图3 (a)磁体中基态或真空态发生自发磁化，对称性破缺；(b)上图Higgs标量场的势阱，最低能态或真空态发生对称自发破缺。(下图)可以打个比方：铅笔的运动具有旋转对称性，但是其最低能态，即躺在桌面上，旋转对称性破缺

5 量子规范场论中的真空：真空对称自发破缺、质量的起源和Higgs粒子

自然界中有四种基本的相互作用，其中电磁相互作用已经建立起它的量子理论——量子电动力学。在量子电动力学巨大成功的鼓舞之下，物理学家开始探索如何建立起其他相互作用的量子理论。

在量子场论中，每一种粒子对应于一种场，粒子是场的量子，场可以用含时空坐标的函数来描写。场函数满足一个运动方程，这个运动方程可以从拉格朗日量推导出来，它决定了场或粒子的运动规律。有趣的是，量子规范场论具有某种特殊的对称性。例如，在规范变换下，拉格朗日量具有不变性，由它导出的运动方程也具有不变性，因此场或粒子的运动规律在规范变换下保持不变。电磁相互作用的量子理论满足定域 $U(1)$ 的规范不变性，而弱相互作用的量子理论满足定域 $SU(2)$ 的规范不变性。1960年代，3位杰出的理论物理学家：格拉肖(S. Glashow)、温伯格(S. Weinberg)和萨拉姆(A. Salam)利用满足 $SU(2) \times U(1)$ 的规范不变性建立起弱相互作用和电磁相互作用的统一的量子理论^[7]。

然而，这样一个看上去非常宏伟的量子理论却遇到了根本性的困难：规范不变性要求这些粒子没有质量。这个矛盾困扰了物理学家很久，很有意思的是，“真空不空”的概念再次让人们取得了突破性的进展。

1961年，美籍日裔理论物理学家南部阳一郎(Y. Nambu)提出：拉格朗日量具有某种对称性，但是系统的基态或真空态不具有这种对称性，称为真空对称自发破缺^[8]。如图3(a)所示，一个大的磁体，其中有很多个小磁针。当温度很高时，这些小磁针的取向是任意的，整个磁体有着空间旋转不变性，即表现为没有任何特殊的方向性。但是当温度降低到居里温度以下，这些小磁针会沿着某个方向排列，出现了自发磁化，因此整个磁体的空间旋转不变性遭到了破缺。如果用理论的语言来概括，描写磁体的拉格朗日量具有空间转

动的不变性，但是由于最低能量的基态或真空态变成了自发磁化的状态，所以整个系统的对称性破缺了。

在此基础上，1964年，英国理论物理学家希格斯(Higgs)等人提出，如图3(b)所示，如果存在一个复标量场(Higgs场)与规范场耦合，那么当真真空态发生自发对称破缺时，就可以使规范场粒子获得质量，这个标量场中有质量的粒子被称为Higgs粒子^[9]。

由于真空对称自发破缺的机制对于粒子物理学起着如此重要的作用，寻找Higgs粒子就成为实验物理学家一直梦寐以求的目标。2012年，欧洲核子中心的科学家宣布，在其大型强子对撞机上发现了Higgs粒子，终于为这一问题画上了完美的句号。温伯格等人荣获1979年度诺贝尔物理学奖，南部获得了2008年度诺贝尔物理学奖，而希格斯等人也获得了2013年度诺贝尔物理学奖。

质量的起源本来是物理学最根本的问题之一，我们惊奇地发现，真空在这里起到了根本性的作用。正是宇宙中充满着Higgs场，带来了万物的质量，也许“无中生有”是对于这个真空最好的概括。

6 量子色动力学中的真空：真空凝聚、夸克禁闭

物理学家在20世纪初发现了原子的结构：由原子核和核外电子构成。进一步又发现原子核由质子和中子构成，质子和中子又是由夸克和胶子构成，这些基本粒子通过自然界的四种相互作用之一——强相互作用结合在一起。

1970年代，美国理论物理学家维尔切克(F. Wilczek)、格罗斯(D. Gross)、波利策(D. Politzer)等人利用SU(3)的规范对称性建立起强相互作用的量子理论——量子色动力学。这一量子理论预言了当原子核内部的两个夸克距离很近时，它们就像是自由

粒子，称为渐近自由^[10]。这一现象成功地解释了高能区的核物理实验，获得了巨大的成功，也使这3位理论物理学家荣获2004年度诺贝尔物理学奖。

夸克是带有分数电荷的基本粒子，被完全束缚在原子核内部，这一现象被称为夸克禁闭。如何解释这一现象被认为是20世纪物理学悬而未决的两个重大疑难问题之一。有很多模型或理论尝试来解决这一问题，其中一个普遍的看法是夸克禁闭是由于核子中“真空不空”的特性造成的^[11]。

一个有启发性的例子是大家比较熟悉的超导。超导中有电和磁两个自由度，如图4(a)所示，在低温下，超导体中电荷发生配对并凝聚，超导体的基态或真空态是这些电荷的凝聚相。此时，磁场不能穿透超导体，称为完全抗磁性，即迈斯纳效应。

类似地，夸克有“色电”和“色磁”两个自由度，如图4(b)所示，在低能下，核子中的夸克的磁自由度发生并凝聚，核子的基态或真空态是这些磁自由度的凝聚相。此时，电场不能穿透核子，称为完全抗电性，即电力线都被挤压在核子内部，不允许电荷自由地释放出来，于是夸克被完全束缚在核子的内部。

进一步，正如水有固体、液体、气体等多个相，通过温度变化可以发生相变。如图5所示，可以想象，夸克禁闭是由于较低能量下，真空处在凝聚相，当原子核以极高速对撞，相当于处在极高能，这时真空可能发生相变，形成夸克一胶

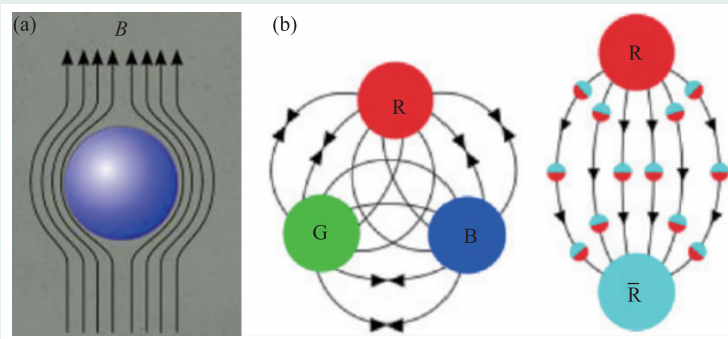


图4 (a)超导中基态或真空态发生凝聚，有完全抗磁性；(b)核子中基态或真空态发生凝聚，有完全抗电性，即夸克禁闭

子等离子体的新的相。观测到这种真空相变过程，正是目前美国布鲁克海文国家实验室的相对论重离子对撞机的目标^[12]。

目前，关于量子色动力学中真空的研究正如火如荼地开展着，如果能够在实验中看到真空相变的明确证据，这将是真空概念，乃至物理学的一个重大突破。

7 量子信息视角下的真空(一):量子以太与万物起源

20世纪物理学最伟大的物理学成就莫过于量子力学的建立。量子力学不仅为原子物理、粒子物理、凝聚态物理等现代物理学分支奠定坚实基础，而且促进了核能、激光、半导体等高技术的诞生与发展。从20世纪末兴起的量子信息学的领域，是量子力学与信息科学的交叉产生的新型学

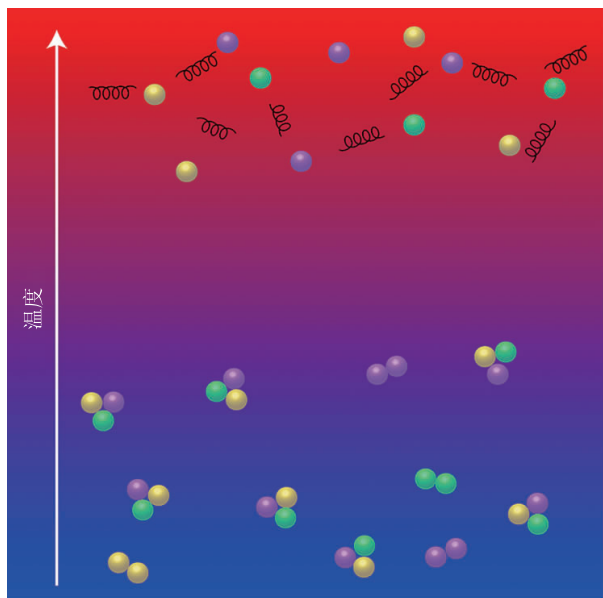


图5 随着温度升高，从夸克禁闭的真空态，发生真空相变，到夸克—胶子等离子体

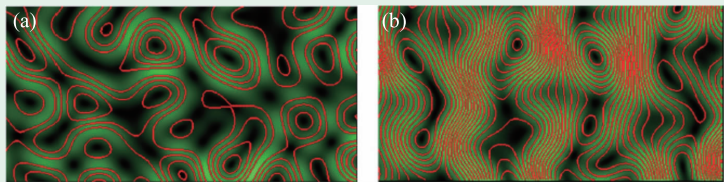


图6 (a)一种量子以太:弦网液体;(b)弦密度波就是电磁场或光子的起源

科，其中量子计算、量子通信、量子精密测量等将为未来信息社会带来崭新的推动。

量子信息的基本单元是量子比特，有 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 两个基本状态，量子比特可以处在这两个态的任意叠加态。正是这一叠加特性赋予了量子比特的天然并行性，有可能在量子信息处理中带来强大的资源。那么量子信息的特性有没有可能对基础物理的问题带来启示呢？

物理学一个最基础的问题，是如何统一各种基本粒子和四种基本相互作用，简而言之就是搞清楚万物的起源这一根本性问题。目前粒子物理学界建立起来的所谓标准模型，包括弱电统一的量子理论和量子色动力学，基本上涵盖了除引力外的另外三种相互作用。但是如何把引力统一进来，还是一个未解决的重大问题。

华人物理学家文小刚在这一方向上做了有益的探索。他认为：如果把空间看成是量子比特构成的大海，那么基本粒子可以看成是这个大海中的波动和涡旋。这些大海中各种序，即众多量子比特的各种集合和结构，将决定各种基本粒子的性质和各种基本相互作用的规律。

如果把这些量子比特类比于一个个水分子，那么量子比特的长程纠缠就像是水分子组成一条条弦，这些弦填充在整个空间中，称为弦网液体。整个量子比特构成的大海就可以看成是这些弦网液体的海洋。如图6所示，在大海中有一种波动，弦密度波，它所满足的运动方程就是麦克斯韦方程，就是电磁波。弦的末端，满足费米统计和电荷量子化，就是电子。这样电子、光子等基本粒子，电磁相互作用都从中产生了，可以得到光和电的统一的起源！

文小刚认为，真空是量子比特的海洋，这是一种新形式“以太”论——量子以太^[13]。这个量子以太可以涌现出各种基本粒子、各种基本相互作用，给出万物的起源！当然这种量子以太学说只是几种尝试性的大统一理论之一，而且目前也没有任何直接的实验预言和证据。但是这种量子以太的崭新视角，无疑是对于真

空丰富的物理内容又抹上色彩绚烂的一笔。

我们看到，“以太”的概念又一次回到了物理学的基本问题中。正因为物理学的根本性问题总是离不开真空，所以尽管经典以太的概念被摒弃，量子以太的概念总会以某种形式扮演自己不可或缺的角色。

8 量子信息视角下的真空(二):非局域性、量子纠缠

20世纪20年代诞生的量子力学，给人们打开了微观世界的大门，往往被称为“第一次量子力学革命”。量子力学有着一些奇特的性质，例如波函数的几率幅、波粒二象性、薛定谔猫、量子纠缠等等。而围绕着这些奇特性质，有着各种疑惑和解释^[14]。

1935年，爱因斯坦等提出所谓EPR(Einstein—Podolsky—Rosen)的思想实验：设想有两个自旋1/2的粒子A和B，构成纠缠态 $|\uparrow\rangle_A|\downarrow\rangle_B + |\downarrow\rangle_A|\uparrow\rangle_B$ ，并放在相聚遥远的两个地方。在未测量时，B粒子各有50%的几率自旋向下 \downarrow 或向上 \uparrow 。但是当A粒子被测量时，如果测量结果为A粒子自旋向上 \uparrow ，那么B粒子将以100%的几率处在自旋向下 \downarrow ；如果测量结果为A粒子自旋向下 \downarrow ，那么B粒子将以100%的几率处在自旋向上 \uparrow 。看起来，量子力学中存在着“幽灵般的超距作用”，B粒子的状态似乎被A粒子的测量所控制(注意这里并不存在所谓信息的传递)。

实质上，这种处在量子纠缠态的粒子，即使空间上分隔遥远，但存在量子关联，称为“量子非局域性”。这样一个思想实验进一步启发了贝尔(J. Bell)提出贝尔不等式，将这些思想性的实验付诸于真实的实验。从1970年代开始起，物理学家在各种量子系统上，采用各种实验手段进行实验研究，其中法国学者阿斯派克特(A. Aspect)利用光子对的实验备受瞩目^[15]。而在2015年，荷兰研究组利用两块相聚1.5 km的金刚石色心中电子自旋，完成了所谓无漏洞的贝尔不等式的验证^[16]。

这场爱因斯坦和玻尔之间的学术争论，揭示

了量子世界更为深刻和基础的性质：量子非局域性。可以预想，就像当年关于黑体辐射的深入研究，导致了量子力学的第一次革命，对于这些量子世界的奇特性质的更深入的探索，将导致量子力学的第二次革命！

第一次量子革命，物理学家主要是问“做什么”，即量子力学应用到各个领域，已经取得了非常丰硕的成果。而第二次量子革命，物理学家更多是问“为什么”，即量子力学的奇特性质到底为什么是这样^[14]。例如，通过薛定谔猫问题的研究，探索量子世界与经典世界的界限问题。除了正统的波包塌缩解释，以及退相干过程解释等，还有没有令人满意的量子测量的理论？量子力学和非局域隐变量理论，到底哪一个才是微观世界的基本理论？

特别是关于量子力学最为奇特的属性之一：

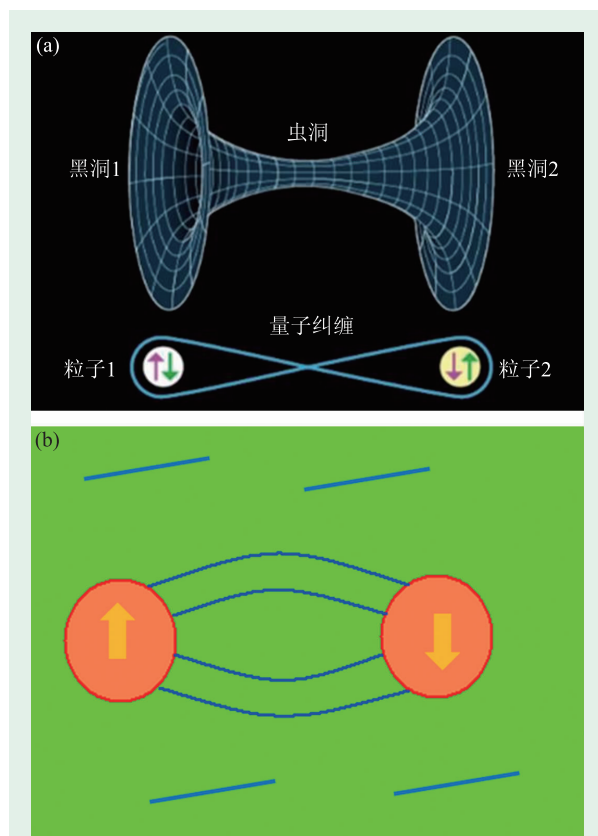


图7 (a)ER=EPR示意图：远程的虫洞连接和纠缠关联是等价的；(b)我们的一个猜想：真空背景(绿色)中充满了大量的关联(蓝线)，正是这种“以太”造成两个相聚遥远的粒子发生纠缠

量子非局域性，它的根源是什么？我们认为：真空概念的发展有可能为这一问题的回答提供可能的契机。

一种可能是来自所谓ER=EPR猜想。如图7(a)所示，广义相对论预言，存在一个连接两个不同时空区域的通道——ER(Einstein-Rosen)桥，形象地用虫洞来表示。2013年，美国学者提出：一个黑洞有可能通过虫洞与另一个相距遥远的黑洞处于纠缠态，即虫洞和纠缠态是等价的，ER=EPR^[7]。也就是说，量子纠缠可以看作是联系两个区域的时间结构。

一种可能是我们的大胆猜测：如图7(b)所示，真空不空，充满着量子以太。这种遍布空间的以太，天然地具有非局域的关联，这种内禀的关联正是量子非局域性、量子纠缠的起源。值得我们指出的是，爱因斯坦和Grommer就曾尝试从广义相对论的真空场方程中推到量子力学的不确定关系。我们设想，也许可以构造一个量子以太的模型，从中推导出量子纠缠的关系式。

9 新的机遇：真空到底是什么？

回顾一下真空概念的发展和现代物理学的伟大成就是非常有启发意义的。20世纪初，开尔文勋爵认为辉煌的物理学有着两朵乌云：一个黑体辐射，一个迈克尔孙—莫雷实验。特别是后者与经典物理学中以太图像的尖锐冲突，代表了人们对于真空认识的一次飞跃，也成为现代物理学诞

生的源泉之一。

到了21世纪初，著名理论物理学家李政道先生认为目前物理学也有两大疑难问题^[11]：一个是丢失的对称性，例如电荷和宇称反演不变性的破坏(CP破坏)；一个是看不见的夸克(夸克禁闭)。李政道先生认为这两个问题都跟真空的特性有关。正如我们前面所述，真空的对称自发破缺导致了对称性的破坏，真空是一个理想的抗电性的媒介，也可以解释夸克禁闭。李政道先生认为，挖掘真空的性质会有非常深刻的认识，从而对物理学带来革命性的突破^[11]。

进一步，我们还认为：20世纪初关于微观世界的探索，产生了第一次量子力学革命。量子力学是物理学最为成功的理论，已经衍生出丰硕的成果。然而对于其本质的奥秘却从诞生之日起，一直争论不休。

到了21世纪初，量子信息学的诞生，物理学家不仅可以研究量子力学能“做什么”，还要去追问“为什么”^[14]。量子信息中不但提供了诸多量子操控的方法和手段，还去深入探索量子力学的奇特本质，例如量子纠缠、量子非局域性等。国际著名学术期刊《自然—物理》在2014年发表了量子力学基本问题的研究专辑^[18]，明确指出：第二次量子力学革命的号角已经吹响！正如我们在本文中所阐述的那样，关于量子真空的研究，也许将为我们揭开量子世界的本质谜团提供崭新的机遇！

参考文献

- [1] 朗道. 理论物理学教程——场论. 北京: 高等教育出版社, 2013
- [2] Bjorken J, Drell S. Relativistic Quantum Fields. New York: McGraw-Hill Press, 1965
- [3] Itzykson C, Zuber J. Quantum Field Theory. New York: McGraw-Hill Press, 1980
- [4] Hughes V W, Kinoshita T. Rev. Mod. Phys., 1999, 71: S133
- [5] Klimchitskaya G L, Mohideen U, Mostepanenko V M. Rev. Mod. Phys., 2009, 81: 1827
- [6] Wilson C M *et al.* Nature, 2011, 479: 376
- [7] Weinberg S. Rev. Mod. Phys., 1980, 52: 515
- [8] Nambu Y. Rev. Mod. Phys., 2009, 81: 1015
- [9] Higgs P W. Rev. Mod. Phys., 2014, 86: 851
- [10] Wilczek F. Rev. Mod. Phys., 2005, 77: 857
- [11] 李政道. 场论与粒子物理学. 北京: 科学出版社, 1980
- [12] Shuryak E. Rev. Mod. Phys., 2017, 89: 035001
- [13] 文小刚. 物理, 2015, 44: 261
- [14] 郭光灿. 量子十问. <http://lqcc.ustc.edu.cn/index/lists/005001>
- [15] Aspect A. Physics, 2015, 8: 123
- [16] Hensen B *et al.* Nature, 2015, 526: 682
- [17] Maldacena J, Susskind L. Fortsch. Phys., 2013, 61: 781
- [18] Georgescu I. Nature Physics, 2014, 10: 253