

论以太

A. 爱因斯坦*

我们现在如果来谈以太,当然不是谈力学理论里的那个解说波动的物理以太或物质以太。那个以太服从牛顿力学规律,牛顿力学中的质点都有一定的速度。自从建立了特殊相对论,我确信,牛顿力学这座理论大厦已最后竭尽其能了。除去由带电基本粒子组成的有重物质以外,那些在物理学里起因因果纽带作用的,一直认为是物理真实的种种东西,现在倒较普遍地成了要讨论的问题。因此,不去谈什么以太,而来谈空间的物理性质可能也一样。现在我们可以持这样的看法:一切物理对象均归到空间这个范畴,因为在以场立论的理论里,有重物质或构成有重物质的基本粒子,说到底,也应看成是种种特殊的“场”,或者看成是空间的种种特殊的“态”。不过,我们还不得不承认,就物理学的现状而言,这样一种观点还不成熟,因为迄今为止,针对这一目标,理论物理学所作的一切努力均告失败。在目前情形下,在迫于事实而只得认为物质和场有别的同时,我们希望后代将能克服这个二元论概念,用今天的场论一直未找到的一元概念来代替它。

人们普遍以为,牛顿物理学不承认以太,并以为这个无所不在的、能影响物理现象的媒质首先用在光的波动理论中。但情况并非如此。牛顿力学有它的未直呼其名的“以太”,它不过叫做“绝对空间”罢了。为了清楚地理解这一点,同时又使以太概念更加精确,我们不得不稍作回顾。

首先考虑用不着以太的一个物理学部门,即欧氏几何学。我们设想欧氏几何学是一门科学,它探讨有效刚体彼此接触的可能方式(我们不考虑光线,以免在几何学概念的和几何学定律的起源问题上,也许会与光线发生牵连)。在不考虑相对运动,温度以及变形影响的情况下,有了刚体的概念,我们就可以用像欧氏几何学中制定的那种理想化形式的刚体定位法则。欧氏几何学不考虑任何环境影响;这些影响的存在与这些物体本身并无关系,它们却作用于这些物体,而且必须考虑它们对定位法则的影响。我们假如设想常曲率的非欧几何学是物体定位的(可能的)自然法则,那么它同样也不考虑任何环境影响。倘使我们认为有必要采用可变曲率的几何学,情况就不同了。这时意味着在各种不同的情况下有效刚体可能的接触位置应该由环境影响来决定。这样考虑问题时,我们应该说,可变曲率几何学这样一种理论使用了以太假说。和物质一样,这个以太也该是物理实在。假使定位法则可以不受环境中的物体的聚散或运动状态等等物理因素的影响,

而且它们是一劳永逸地给定的,那么这样的以太应该称之为绝对的(即与任何其他客体的影响无关,它是独立的)。

正如(按物理学理解的)欧氏几何学无需以太一样,经典力学的运动学,或运动的纯几何理论,也不要以太。只要假定不存在特殊相对论所讲的关于尺和时钟的影响,这些法则在物理学中有明白的意义。

在伽利略和牛顿力学中,情况不是这样。在“质量 \times 加速度=力”这个运动定律中,不仅提及物质体系,还包含别的东西——甚至当我们用到牛顿的天文学基本定律,其中的力是以距离,即以(可根据用刚体进行的测量来实际定义的)数量表达出来时,也还包含别的东西。这是因为加速度的真正定义不能完全用刚体和时钟所作的观测来决定。加速度并不能归之为可测的力学体系中点与点之间的距离。要定义加速度,除此之外还需一个处于适当运动状态下的坐标系,一个参考物体。如果该坐标系的运动状态选择不当,则对这些坐标牛顿运动方程将不成立。这些方程中,物体运动所在的环境,以某种隐而不宣的方式作为一种存在的因素,随同实际物体它们本身和(可以用度量物来定义的)实际物体彼此间的距离一起,出现在运动定律里。在牛顿的运动科学里,空间是个物理实在;在这一点上,它与几何学和运动学形成鲜明对照。我们将这个物理实在称为“力学以太”,它随同那可观测的有重物体一起进入牛顿运动定律。一个(旋转着的)物体的质点之间的距离保持不变,而在该物体上发生离心效应的这一事实说明:这个以太不能看成是牛顿理论的怪胎,而是自然界确有与此以太概念相对应的某种实在。

我们可以看出,空间对于牛顿当时是个物理实在,尽管这个实在以极其间接的方式才使我们认识到它。恩斯特·马赫(Ernst Mach),是在牛顿之后对牛顿力学做了深入透彻分析的第一人,对此理解得很清楚。他用被考察的物质与宇宙中所有其他物质之间的直接相互作用来解释该物质的惯性,力图以此来摆脱“力学以太”的假说。这个想法在逻辑上讲是可能的,但若作为一种牵涉到超距作用的理论,在今天就不值得认真考虑了。因此我们只能认为,被牛顿称为“绝对空间”的

* 原文 über den Äther 发表在 Schweizerische naturforschende Gesellschaft, Verhandlungen (1924), 105: 85—93; 1991年由 Simon W. Saunders (哈佛大学哲学系)首译成英文。

那个力学以太是某种物理实在。另一方面，我们千万不要因“以太”一词而把以太，像在十九世纪物理学中那样，理解为某种类于有重物质的东西。

牛顿把物理学的空间叫做“绝对的”，那是因为他正在思考被我们称作“以太”的东西还有另一性质。每个物理客体都影响其他的物理客体，而且一般地反过来它也受其他物理客体的影响。然而，对于牛顿力学的以太，这后面半句话不成立。以太的产生惯性的这种性质，按照经典力学，恰恰既不受物质分布格局的，也不受任何别的东西的影响。由于这个缘故，人们可以称之为“绝对的”。

物理学家们近年来才认识到这样一个事实：必须设想有某种实在的东西，它是惯性系统比非惯性系统优越的原因。历史上，具有当今这个形式的以太假说，是从光学的机械以太假说提升上来的。经过长期的、劳而无功的努力，才使人们确信，光不能用具有惯性的弹性媒质的运动来解释，麦克斯韦理论的电磁场不能普遍地用力学的办法来解释。当时在失败的压力下，逐渐把电磁场看成是终结的，不可还原的物理实在，并不再把它进一步解释成为以太的状态。力学理论中的以太那时保留下来的唯一东西是以太有确定的运动状态。这个状态代表的，可以这么说，是“绝对静止”。如果在牛顿力学里，所有惯性系统都是同价的，那么在麦克斯韦-洛伦兹理论里，也是如此，我们选择的坐标系的（相对于以太是静止的）运动状态看来是完全确定的。人们默然假定，这个被选中的坐标系同时又该是一个惯性系，即默认了，对于电磁以太，惯性原理也该成立。

麦克斯韦-洛伦兹理论的高潮还在另一方面促使物理学家们的基本概念发生更进一步的转变。电磁场一经被设想为是根本的、不可还原的实体，它们似乎就有权剥夺有重的惯性质量在力学中的根本重要地位。从麦克斯韦方程推断出，运动的带电体该被磁场包围；在一级近似下，磁场的能量该与运动带电体的速度平方有关。难道这还不明显：把所有的动能都设想成电磁能！如此说来，既然想使电磁过程归之为力学过程的尝试已失败了，人们可望把力学还原到电磁学。因为所有的有重物质都越来越象是由带电的基本粒子组成的，看上去这就更有指望了。与此同时，又有两个难点掌握不住。第一个难点是麦克斯韦-洛伦兹方程不能解释，构成带电基本粒子的电荷怎么能在电磁斥力下保持平衡。第二个困难是电磁理论不能相当自然地令人满意地解释引力。尽管存在这些困难，电磁理论的后果如此重要，以致人们认为它是物理学的完全可靠的财富——的确，电磁理论是物理学中根基最好的珍藏之一。

我们对物理学理论基础的认识，就这样受到麦克斯韦-洛伦兹理论的影响，终于导致特殊相对论的创

立。人们认识到，事实上电磁方程并不决出一个特殊的运动状态，而正像经典力学那样，根据这些电磁方程，应该有无数个彼此相对作匀速运动的坐标系——只要应用适当的变换公式对空间坐标和时间进行变换，这些坐标系是同价的。众所周知，这一认识结果使运动学和动力学作了深刻的修正。电动力学以太在不再有任何专门的或特殊的运动状态。和经典力学以太一样，它的效果不是选中一个特殊的运动状态，而只是决出一个特殊的加速状态。因为不可能再说，在以太的不同位置上有任何绝对意义的同时状态，所以以太可以说变成四维的了——单纯根据时间，以太空间并无客观的座次。还有，根据特殊相对论，以太也是绝对的，因为它把以太对惯性的和对光的传播的影响看成与任何物理影响无关。在经典物理学中，人们认为物体的几何性质与运动状态无关，而按照特殊相对论，只有当物体相对于一个惯性系处于静止状态时，我们才能应用欧氏几何学的法则来为这些彼此相对静止的物体定位[注1]；从所谓的洛伦兹收缩可容易地推断出这个结论。因此，物体的几何性质不但受到动力学的影晌，而且还受到以太的影响。

广义相对论去掉了经典动力学的一个缺陷：在经典动力学中，惯性和重量看起来是完全不同的现象，彼此完全独立，尽管事实上它们都取决于同样的物体常数，即质量。广义相对论克服了这个毛病，因为它用测地线法则来决定电中性质点的动力学行为，不再区分什么惯性的效应和重量的效应。于是，测地线法则把逐点变化的，物质点的度规性质和动力学性质归之于以太，而物质点的这些性质又取决于物理因素，即取决于质量或能量的分布。广义相对论以太不是“绝对的”，而是取决于，由有重物质而来的，它的局部可变性质；就此而言，广义相对论以太既不同于经典力学以太，也不同于特殊相对论以太。如果宇宙是封闭的，空间有限的，则以太性质的这种规定是完备的。广义相对论中没有与度规有明确关系的特定时空坐标；这一事实与其说是广义相对论物理内容的一个特征，倒不如说是它的数学形式的一个特征。

甚至应用广义相对论的形式工具也不能把全部质量—惯性（mass-inertia）都化为电磁场或一般的场。除此以外，依我看，我们还未超出浮面上把电磁力纳入到相对论的总规划里的层次。一边是决定引力现象和惯性现象两者的度规张量，另一边是电磁场的张量，看起来仍然是以太状态的两种根本不同表示；不过，从推理得出这两边的独立性，大概更多地要归咎于我们的理论大厦的不完善，而不能更多地怪罪于现实本身

[注1] 例如，有一个物体体系，其中的物体虽彼此相对静止的，但整个体系相对于一个惯性系而旋转，那么，按照特殊相对论，欧氏几何学不适用于这个体系。

的结构复杂。

我承认,外尔(Weyl)和爱丁顿(Eddington),用了黎曼几何的一种推广,曾发现过一种数学方法,使得两种类型的场看起来好象在单一的观点下统一起来了。但是,由该理论产生的那些最简单的场方程,在我看来,并没有使我们对于物理学的理解方面有何进展。总起来说,看来我们今天对于电磁学基本规律的理解相去很远,似乎还比不上本世纪初那时以为的那样。为了支持这一看法,我想在此不但简略地指出光量子问题,还想简略地指出地球的和太阳的磁场问题;可以说,这些问题涉及到电磁场的精细结构和大尺度结构。

地球和太阳有磁场,这些磁场的取向和指向与这些天体的旋转轴相近。根据麦克斯韦理论,这些磁场似该由这样的电流来产生,它们的流向与这些天体绕轴旋转的方向相反。我们十分有理由把太阳黑子看成为旋涡,它们也有类似的,很强的磁场。但是很难想象,在所有这些情况中,真会有这么大的导电电流或对流电流。看起来倒是作圆周运动的电中性质量在产生磁场。无论是麦克斯韦理论的原始形式,还是经广义相对论推广了的形式,都预见不到这种产生场的方式。看来在这里,大自然正指出一种我们在理论上还不理解的基本过程。[注2]

如果说我们刚才讲了一个实例,说明目前形式的场论看上去还不够好的话,那么,那些合在一起构成量子论的事实和想法,就有彻底摧毁场论这座大厦之虞。确实,应该把光量子看成是个物理实在的论据,和不可把电磁场当作能够解释其他物理客体的最后实体的论据,都在与日俱增。关于普朗克(Planck)公式的理论已经证明,在以辐射形式传送能量和动量时,辐射仿佛是以光速 c ,以能量为 $h\nu$ 和以动量为 $h\nu/c$ 在运动的原子;利用物质对X射线的散射实验,康普顿(Compton)现在证明,在散射事件中光量子与电子碰撞,把它们的部分能量传给电子,从而光量子改变自己的能量和方向。事实上完全肯定的是: X射线在它们散射中发生的频率改变,正如德拜(Debye)和康普顿预言的,合乎量子假设的要求。

此外,最近印度物理学家玻色(Bose)写了一篇关于推导普朗克公式的文章。这篇文章对于我们的理论认识特别重要,其理由如下。迄今为止,普朗克公式的所有推导都在某处用了辐射的波动结构假设;例如在厄任费斯脱(Ehrenfest)和德拜的著名推导中该公式的因子 $8\pi\nu^2/c^3$,是从空腔在频率段 $d\nu$ 内的本征振动个数的计数中得出来的。玻色用分子运动论的计算代替了这种根据波动理论概念的计数;在计算中,他把处在空腔里的光子当作分子那样来处理。现在的问题是,有朝一日是否可能将衍射和干涉现象与量子论这么联系起来,使得该理论中的类场概念只该描绘量子

间相互作用的表现,从而不再视为独立的物理实在。

根据玻尔(Bohr)理论,辐射频率不是由以同样频率作周期运动的带电质量决定的。这个重要事实只能使我们更加怀疑波动场是不是个独立的实在。

但是,即便这些可能的事物会成熟到成为真正的理论,理论物理学决不能没有以太,即,具有物理性质的连续场;因为广义相对论——物理学家们肯定将永远支持它的基本观点——排除直接的超距作用。然而,每种接触作用的理论都认定要连续场的,因而也就认定有一个“以太”存在。

译后记

在光量子假说步入物理学的主流和量子力学即将诞生的1924年,爱因斯坦发表了这篇篇幅不大的《论以太》。文章总结了“经典以太”概念的变迁过程,特别是包含由广义相对论的观点对以太概念的论述;这是一篇有关以太思想的重要评论。

不过,我相信,更重要的是它有一种经久不衰的价值:读者从中可领略爱因斯坦进行物理思考的风格以及从他的思想中散发出来的现代物理的气息。像以太这样一个埋在故纸堆里的概念,经他点化,读者非但不嫌它陈旧乏味,反而得到温故知新和开阔视野的乐趣(即使在今天)。

爱因斯坦重视科学思想的来龙去脉。他从看上去平淡无奇的几何学和运动学开篇,引入以太概念,使我们立刻注意到环境对于运动物体之影响与它的内在关系。在他议论了牛顿的绝对空间,特殊相对论的时空观和广义相对论的时空几何理论(有时论点很集中,有时则分散于字里行间)之后,我们大概不会认为,把以太等同于(物理)空间是不合乎逻辑的,也不致于认为,探讨(物理)空间的性质是奇谈怪论。难怪现代物理学有一句颇流行的俏皮话:空间不空(The empty space is not empty)!

爱因斯坦总想更深刻地去理解物理学的理论基础,因此,很自然,他要发掘疑点。在《论以太》里,他不但挑牛顿力学和麦克斯韦-洛伦兹电动力学的毛病,也提出特殊相对论和广义相对论的不足之处,甚至怀疑到有朝一日可能不应该再认为(经典的)场是独立的物

[注2] 根据电动力学的类比,我们应假设这样一个关系式:

$$dH = -Cdmv \times r/r^3,$$

其中 dm 是一个以速度 v ,在离原点 $-r$,即 $r = |r|$,处运动的质量。(不过,这个公式充其量只能考虑圆周运动的情况,而且还是一级近似。)由此得出的地球磁场与太阳磁场的关系,就数量级而言,是正确的。常数 C 的量纲是(引力常数) $^{1/2}$ /光速。由此可以估算常数 C 的数量级大小。若将 C 的这个数值代入上式,应用到旋转的地球上,将得出地球磁场的正确数量级大小。这些关系值得考虑,但也可能是偶然巧合。

• 封三说明 •

北半球最高的宇宙线观测站——羊八井站

由中科院高能所、西藏大学、西南交大、云南大学和日本国东京大学宇宙线所、宇都宫大学、甲南大学、神奈川大学、埼玉大学、横浜国大、弘前大学、湘南工学院合作建造的中日合作羊八井宇宙线观测站于1990年建成，并正式开始运行。该站位于西藏首府拉萨西北方向90公里处，海拔标高4300米，该站紧靠著名的西藏能源基地羊八井地热电厂，从拉萨沿中尼国际公路约90分钟路程即可抵达。目前该站占地为南北长330米，东西宽280米，总面积为92400m²，有探测器65个，其中0.5m²的探测器49个，0.25m²的探测器16个。该站采用了粒子探测器中的高新技术，用计算机控制产生激光束对每个探测器进行自动定时刻度。数据的记录系统也采用最先进的8毫米磁带机，每盘8毫米磁带可存储2G×8比特，相当于2000张

5英寸高密磁盘容量，另外采用GPS导航仪定点和铷原子钟定时，整个数据采集系统由二台松下5000W VPS电源作后备。在停电时间不超过20分钟情况下，整个系统不中断数据采集。超过20分钟将自动进入善后处理过程。羊八井站对10TeV级的宇宙线广延空气簇射事例20Hz，该站连续运行三年来，共取得有效事例数15亿个，事例的角分辨小于0.8°，以上指标均名列世界同类站前列。

近来在国际著名杂志，Phys. Rev. Lett., Phys. Rev. D, Astroph. J. 上已发表论文三篇，在国际宇宙线会议及其他有关国际会议上提交报告13篇。羊八井站的观测能区为~10TeV，处于其他站不能观测的窗口。该站对太阳和月亮阻挡宇宙线形成对地球的宇宙线阴影的测量，证明实验装置的性能优良。

目前该合作项目日方已获得2亿日元的扩建经费；中方为配合扩建，已将征地和相配套的补助设施完成，按扩建计划将增加探测器157个，有效探测面积将增加7倍，事例率将提高到100Hz。我们相信中日科学家们利用扩建后的羊八井宇宙线观测站在探索高能宇宙线的物理工作中必将做出更多的贡献。

(施志政)

理实在。事实上，这些质疑点大概都与现代物理研究的重要课题有关。

在文章的第一段末，他语重心长地期望后辈们能将物质和场一元化；在文章结束时，他又断言，理论物理学决不能没有“以太”——虽然这个“以太”也有物理性质，但正如他在文章一开始就申明的那样，不要把这里的“以太”混同于早先假设的，承传波动的以太。爱因斯坦的这些思想涉及到现代物理学的一个重要方面

在爱因斯坦的心目中，除去物质，就是场，而场“是在物理学里起因果纽带作用的”东西，场“只该描绘(物质)量子之间相互作用(力)的表现”。物质之间的空间有场，物体之间的空间有(相互作用)力；场或者力体现(物理)空间的性质。通观《论以太》一文，只要不因词废意，我们可以认为，现代物理的量子场论研究的(物理)真空(The physical vacuum)或即(量子)真空(The quantum vacuum)就是爱因斯坦所谓的理论物理学不可或缺的那个“以太”或(物理)空间。

“以太”，空间，真空指的是有物理性质的同一个物理实在，只是名称不同而已。现代物理学对(量子)真

空做过的研究表明，物质与(量子)真空是互相影响的，所以，(量子)真空不是“绝对的”[爱因斯坦用的词]。仅此一点已足以说明，(量子)真空不是经典力学以太或特殊相对论以太的翻版，而与广义相对论以太类似。

(量子)真空是去掉一切真实的量子(real quanta)的纯空间(The pure space)；如果将来证实了引力量子，那么纯空间连引力(量子)也没有。广义相对论利用度规(距离概念)建立引力场的时空几何理论，而纯空间则连度规(距离概念)也没有。不采用距离概念来研究空间的学问叫做拓扑学。

自从八十年代Bohm和Aharonov发现(量子)真空的一种物理效应之后，物理学家认识到，没有力的纯空间仍可能产生物理效应。目前有些物理学家和数学家正共同钻研(量子)真空的拓扑性质。由此看来，《论以太》中爱因斯坦想到的(物理)空间性质是现代物理学中研究的一个前沿课题。

有物理学家认为，全部物理学在真空(Vacuum is all of physics)。那么，生物学以及心理学呢——只在物质上进行研究，能够走多远？

楼格 1993年5月