

爱因斯坦后期的构思：

基本相互作用 与空间-时间性质的统一

A·萨拉姆（著） 雪尘（译） 艾若（校）

从远古时代起，人们就力图用尽可能少的综合概念来解释自然界的全部复杂性。从这个观点看来，在物理学史上并列着三个名字：牛顿、麦克斯韦和爱因斯坦。这些科学家都在统一自然规律方面取得了最大的成就。

三百年前，牛顿把地球引力（支配苹果落地的力）和天体引力（保持行星在太阳周围轨道上运动的力）视为同一种力，统一了地球引力和天体引力。

二百年后，麦克斯韦统一了电力和磁力，后来，他证明了光是二者统一的表现形式之一。

1905年，爱因斯坦统一了空间和时间概念；过了11年之后，他才能够证明牛顿引力是这种大胆统一的表现形式。就这方面而言，牛顿引力意味着在统一空-时四维空间中存在弯曲。随后，爱因斯坦专心研究这样一个问题：能不能象麦克斯韦统一电和磁那样，把麦克斯韦电磁力与牛顿引力统一起来呢？如果能，那就应该能够证明麦克斯韦电磁力也同样是空间-时间某种几何性质的表现形式，与牛顿引力是空-时四维空间的弯曲表现一样。这就是我要讲的爱因斯坦后期的构思。原来这种构想曾是很有成效的，我相信，为实现这一构想而取得的每一个进步，都会使得爱因斯坦感到高兴。

现代物理学中的基本相互作用

首先我们先总结一下，到本世纪三十年代中期，关于在宇宙中制造一切物质所使用的那些“材料”以及支配物质行为的力，我们知道一些什么。我避免引入与本文主题无关的概念，可以最简单地说：我们所观察到的一切物质实际上都是由四种合成“材料”——四种基本粒子所组成。这是两种核粒子：质子(p)和中子(n)，以及两个所谓轻粒子：电子(e)和中微子(ν)。当它们互相接近时，有四种基本的力决定着它们的行为。

引力 所有四种粒子(p, n, e, ν)都以与它们质量成正比的力相互吸引。这种支配着行星、恒星和星系的行为的相互作用，决定着我们的生活着的宇宙的基本特征。

电磁力 上述四种粒子中的两种——质子和电子带有电荷，另外的两种粒子是中性的。质子以与相互作用粒子的电荷成正比的力吸引电子。正是这种力维持着原子作为一个整体而存在，同时它也基本上决定着地球上一切已知的生命现象。

弱核力 所有的粒子—— p, n, e, ν ——在相距不大于 10^{-16} 厘米的范围内并处于左极化状态也能借助于弱的核力发生相互作用。这种相互作用在本世纪初就被发现了，它引起诸如众所周知的 β -放射性现象。而原则上讲，它对地球上和宇宙中其他区域重元素的存在是负有责任的。

强核力 质子和中子带有强核荷（除弱核荷外），当这些粒子处在小于 10^{-13} 厘米的距离时，就发生强烈的相互吸引。强烈的相互作用把氢、锂、铍、碳、铀等原子核里的质子和中子束缚在一起。象使太阳发光的核聚变反应以及当代核反应堆中原子核的分裂这样一些现象，都是这种相互作用的不同表现形式。

这里所给出的四种物质基元和它们之间的四种相互作用的图象，从建立这种图象所使用的概念的数目上来看，似乎已经是特别经济的了。但是，即使如此，对物理学家们来说，也还是不够的。他们希望这样联合和统一这四种基本相互作用，以使所有的力都能成为统一的基本相互作用的不同侧面。

而爱因斯坦则试图走得更远一些。他想提出一个统一的相互作用——假定它存在的话——它以我们生活着的空间-时间的某种几何性质的形式而存在。如果是这样的话，那么，当然就一定从相互作用的统一和它们与时间空间结构特性的关系中得到实验的观察结果。

各种力的统一概念究竟有什么实际意义，可以用简短的历史综述加以说明。

* 作为本文基础的是作者送交《自然》编辑部的一份报告，该报告曾由作者于1979年5月9日联合国教科文组织在巴黎举行的纪念爱因斯坦诞辰100周年大会上宣读过。

物理学上的统一思想史

我们从穆斯林学者比鲁尼(十一世纪)和伽利略(十六—十七世纪)开始谈起:他们断言,在地球上发现的物理定律对于宇宙中任何地方发生的现象来说都是正确的,尤其是伽利略通过亲自观察提出了月球表面有山脉的这种比较明确的概念。现在,这种对大自然统一的信念是整个科学的基础。

牛顿是在伽利略去世一年之后诞生的。大约在三百年前他建立了万有引力定律,为伽利略的思想作了定量的解释。特别是他用大量的事实说明,支配物体落地的地球引力和保持行星在太阳周围轨道上运动的天体引力是相同的力。

在牛顿之后150年,法拉第和安培发现,运动的电荷产生磁力,这是两种当时貌似截然不同的自然力(电和磁)统一的开始。

法拉第的工作后来由麦克斯韦出色地完成了。他证明了,加速运动的电荷产生的电磁辐射应当是电和磁统一的结果,热辐射、光波、无线电波和伦琴射线——都不是别的,而是电磁相互作用的各种不同表现。

50年后,由于海森伯、薛定谔和狄拉克的研究,变得清楚的是,化学力其中包括支配全部生命的力,主要是支配大脑活动的力,同样是电磁学通常表现形式,不过已经是在量子水平上的表现形式了。

1905年,爱因斯坦统一了空间和时间的概念。1906年,他试图在此基础上进一步发展统一思想,他发现了,牛顿引力是空-时四维空间弯曲的一种表现。这种赋予空间-时间以动力学性质的大胆概念使宇宙学取得了卓越的成就:一方面预言了宇宙在膨胀着(已被遥远星系有红移的观察所证实),而另一方面预言了宇宙有温度为3K的残余辐射,这是大约在 10^{10} 年以前“宣告”宇宙“诞生”时大爆炸的余声。

最后,爱因斯坦希望把引力和电磁力的统一作为他终身的事业。由于统一的结果,看起来引力和电磁力是统一的相互作用的不同侧面。用现代的语言来说,他想把电荷与引力荷(质量)统一为某种共同的东西。其次,当他证明了质量与空间-时间的曲率有联系之后,他期待着电荷也能够以类似的形式与空间-时间结构的某种几何特性发生联系。

但是,正如这里包含有弱核力和强核力一样,是否相应地也包含有弱核荷和强核荷呢?须知引力和电磁力仅仅是四种基本相互作用中的两种相互作用。

我们认为,电磁荷与弱的和强的核荷是彼此非常亲近的。不久前的研究表明了这点,它们只能取一组分立值。因此,在把它们统一成一个整体的第一阶段上,将完成电磁的和核的相互作用的统一,这之后,应当再把这些相互作用与引力作用统一起来。在这个阶

段上,就可能实现爱因斯坦的宿愿——这个统一的相互作用原来是空间-时间几何性质的一种表现形式。

此处难以言明使我们得出这个结论的理论根据,但确实存在证实电磁相互作用和弱相互作用统一的实验事实。

不久前,在美国斯坦福直线加速器中的实验证实了电弱统一理论激动人心的预言。这个预言如下:如果弱相互作用的确不是别的,而真是统一的“电弱”相互作用的一种表现,那么在仔细研究质子与电子之间的相互作用力时,就应当表现出某些特性来,而这些特性是过去仅在弱相互作用中才有的。这些特性之一就是,作用在具有不同自旋方向电子上的力,相互之间是有差别的。以前所未有的精度测量这种差别的斯坦福实验表明,在重水中散射时,左极化状态电子的偏转实际上要比右极化状态的电子大 $\frac{1}{10000}$,这万分之一的

散射差别精确地与理论预言相符合,表明了弱相互作用已出现在迄今为止电磁力的独占领域,并且完全证实了这样一种假定,即这种或那种作用都仅仅是统一的基本相互作用的不同侧面而已。

还有第二个更有效的推论。已经证实,弱相互作用与电磁相互作用之间有着明显的差别,前者是短程相互作用而后者是长程相互作用——直接的结果只能是,我们生活的时代已离开大爆炸 10^{10} 年了,宇宙的温度已降至3K。如果我们“有幸”生活在宇宙诞生后的0.1秒钟时并做了实验,那么就会发现这两种相互作用——弱相互作用和电磁相互作用——原来都是长程的相互作用。当然,我们不可能退回到那个时期,但是却能相当准确地描述弱力和电磁力之间在作用半径上量的差异。

对此更严格的陈述如下:如果观察到的相互作用的确是统一的“电弱”相互作用的不同表现形式,那么就应当存在两类新的重粒子*,其质量大约分别为质子质量的80倍和90倍,第一类是带电的,第二类是中性的。这些粒子应该是弱相互作用的传递者,就象光子是电磁相互作用的传递者一样。目前,在欧洲核子研究中心(CERN,瑞士),6年前就已开工的加速器正在进行改装,以便得到在实验中搜寻这些粒子所需的有足够能量的质子束和反质子束。如果能顺利地得到这样的质子束和反质子束,那么实验可望在1982年进行。如果不能(在达到合适的强度上存在着巨大的困难),我们就需要建造能产生更高能量和更大流强的新型粒子加速器。

在某程度上,寻找粒子——弱相互作用的传递者——的实验,尤其是重光子的实验,按其重要性来

* 这两类粒子 W^{\pm} 和 Z^0 已于1983年在实验中找到了。

——译者注

说,完全可以与1919年日蚀时测量光线在太阳引力场中弯曲的实验相比拟,那个实验证实了爱因斯坦的引力理论。在这种情况下,弱相互作用和电磁相互作用就被统一在了一张图上。现在,所有间接的实验都对电弱统一理论和这种新粒子存在的假说有利。这样一来,在自然界中存在的就不再是四种,而是三种基本相互作用。

在完成这个实验之后,也许就在做这个实验的同时,就能进行检验强作用与电弱相互作用的统一的可能性,这种统一将使三种基本作用变成两种,这种检验以如下方式进行:把大约一万吨水注入1英里深的矿井之中,以防止水和外界辐射源接触。再把记录光子的仪器摆置在水的周围。如果在一年内水中所含的大约 10^{11} 个质子中有一个变成了正电子,从而放出了带有特征波长的光子,那么这将是“大”统一,也就是三种形式的相互作用:电磁的、弱的和强的相互作用统一的信号。

然而,“电、核”的相互作用与引力相互作用将怎样最终统一?爱因斯坦构思的“新的相互作用应当是空间-时间结构的某种表现形式”成立吗?不管怎样令人惊讶,但在现代物理学的乐观形势之下,这构思的实现看来也许并不遥远。很有可能空间-时间的维数除了我们可直接感觉的四维之外还有补充;也可能空间-时间与电荷和核荷相联系,就象引力荷与四维空时的曲率相联系一样。或许如魏耳所假定的那样,电荷和核荷能证实空间-时间存在微观结构,想象它是泡沫状的蜂窝式结构,粗看是均匀的,似乎也是“平展”的,空间-时间类似于孔中嵌有各种荷的干酪的变相。这种想法有些在爱因斯坦在世时已经形成了,而且他本人也作过许多研究。今天,当电磁作用与弱作用可以认为已经统一了的时候,这些想法看来接近现实。

我很高兴地阅读了很有影响的英国杂志《经济学家》为纪念爱因斯坦刊登在1979年3月10日“科学与技术”专栏上的文章,它在讨论了上述关于相互作用的统一问题之后,继续写道:“如果自然界的确是简单的,只存在着一种基本的相互作用,那么就应该考虑在工业上长期的研究纲领。很可能,新技术除了借助电磁力去使用各种力以外,最终还要利用其他的力。谁也无法准确地预言将有那些应用。须知,在100多年以前,在麦克斯韦搞清楚电和磁仅是一种统一的电磁相互作用的不同侧面时,谁也没有料到,这将会导致无线电、电话、电视以及整个电子学的出现。无疑,当爱因斯坦试图把麦克斯韦和牛顿的理论统一成为具有动力学性质的空间-时间的新理论时,他本人也没有想到过它会有如此大的用处。

在本文行将结束的时候,我想与读者分享的是,我所了解的爱因斯坦传记中的一些有趣的史实。在这一百年中,没有哪一个人可以与爱因斯坦相媲美,很可能在

整个人类思想史上涉及物理学的任何情况,也是无与伦比的。毫无疑问,没有任何一个人象他那样成为如此多姿多彩的革命思想的开创者。

倘若爱因斯坦是出生在一个发展中国家的话,可能科学界早已失去了爱因斯坦。当他十五岁时,慕尼黑市卢伊波尔德中学的一位教师把他叫去,提出要他辍学,正如爱因斯坦自己后来回忆的,对他的批评并不是他做了什么错事,而是这位教师说:“仅仅由于你的出现就损害了班里对我的尊敬。”言外之意指爱因斯坦总是“我行我素。”

爱因斯坦十六岁半时,决定上苏黎世工业大学。他参加了工程系的入学考试,但未录取,幸而物理成绩还好。次年他考入了这个学校,但此时他已放弃了当工程师的打算。1900年,爱因斯坦在苏黎世工业大学毕业后,想在该校谋个教师的职位,未能成功。“因为没有得到过去的老师们的赏识”,他不得不找些临时工作勉强度日,比如担负各种计算工作,在中学里代课,或者当1小时3法郎的家庭教师。1901年11月爱因斯坦提出了应考博士学位的论文(这对于取得在大学任教的权利是必需的),虽然这篇论文(已是第二篇)被主要的《物理学年鉴》杂志所采用,但苏黎世大学还是以不合要求拒绝了它。

根据B.霍夫曼的考证,当时爱因斯坦觉得自己无依无靠,在自己周围的世界里找不到一席之地。这就是我所说的远在1901年时爱因斯坦的那些痛苦的岁月。而正是在那时,在《物理学年鉴》上发表了他的第一篇科学论文。

他把这篇论文的抽印本寄给了W.奥斯特瓦尔德教授(不久以后的诺贝尔奖获得者),并附了一封信,说:“由于我受到您的普通化学这本书的鼓舞,……我大胆地寄上我论文的副本一份。借此机会我冒昧地请问一下,您是否有可能需要一个熟悉数学的工作者……我贸然提出这个要求,仅仅是由于我没有钱……”。

尽管他又寄出第二封信加强效果,奥斯特瓦尔德还是没有回信。他又寄信给荷兰莱顿的卡梅林格·昂尼斯教授提出了类似的要求,也毫无结果。

霍夫曼说,在这期间发生了一件连爱因斯坦自己也不知道的令人感动的事情。他的父亲,一个失意的商人,重病在身,而且与科学界团体无缘,居然决定自己亲自给奥斯特瓦尔德写一封信,信上说:“亲爱的教授,我请求您原谅一个父亲,为了孩子的事,竟敢给您写信。……我的儿子阿尔伯特·爱因斯坦,他22岁……任何一个能够对此作出判断的人都称赞他的才能,……我的儿子极不走运因此失业。他日益根深蒂固地思虑着自己在谋生方面是个失败者,而且毫无挽回的余地。亲爱的教授,因为我的儿子最尊敬您,……我才请您读他的论文,……并殷切希望您能写几行字鼓励他,使得他能重新获得生活和工作的乐趣。……我的儿子

地外分子

有不少天文分子被称为“地外”分子。原因是在地球上找不到这种分子的天然样品，甚至化学实验室中也难以制备出来。但在星际空间或星周包层那种地球上不易模拟的超高真空（每立方厘米 10^2-10^7 个分子）、超低温（ $10-100\text{K}$ ）、大尺度（天文时、空尺度）的特殊环境中，它们却能够以足够大的丰度产生和存在。

相当多的地外分子是化学上极不稳定的分子离子或自由基。除了前面提到的 HCO^+ 外，表2中所列的分子离子和自由基如早期发现的 N_2H^+ 、 CH^+ 和近年发现的 C_2H 、 C_3H 等均属此类。这些天文分子绝大多数都已得到肯定的证认。有趣的是，其中有些分子（如 N_2H^+ ）连化学家也不知道它们的名称。因为化学手册中根本没有这种东西。

大量的分子离子在星云中出现，表明在某些星际化学过程中，离子-分子反应起着重要的甚至是主要的作用。

还有一类地外分子在常温下蒸气压非常低，以致在地球上无法用微波波谱学方法测量气相的分子。（目前天文上测到的谱线大都是来自星云中的气体分子。必须用气体分子的实验室谱线来证认。）属于这种情况的有 HC_3N 、 SiC 等。

SiC 是简单的双原子分子。地球上并不缺少固体碳化硅，但从没有看到过气相的化合物。早在30年代，著名的分子物理学家、诺贝尔化学奖获得者赫兹堡就企图在实验室中找寻它的光学谱线。从那时起近60年过去，却没有人得到成功。

70年代陆续发现了由C、O、Si、S四种元素组合而成的星际双原子分子 CO (1970)、 CS (1971)、 SiO

完全不晓得我这种异乎寻常的举动。”

照样也没有回音。现在知道，1902年爱因斯坦在瑞士专利局找到了工作，开始是见习的三级技术员，接着晋升为二级技术员——工程师。正是在这个远离科学文献和大学物理系浓厚学术空气的地方，他抽出宝贵的时间作秘密的演算，当听到有脚步声走近时，他就象犯了罪似地把它往绘函桌里藏。1905年爱因斯坦完成了光的量子理论和空间时间统一的开创性工作。在这个时期他仍然没有获得哲学博士这个“珍贵”的头

(1971)、 SO (1973)、 SiS (1975)，又激起在宇宙中找寻 SiC 的热情。可是它却多次逃避了射电望远镜的寻觅。

80年代末期，射电天文学、量子化学和实验室波谱学密切配合，再次发动搜索。西班牙的IRAM30米射电望远镜在1989年初终于在富碳星 $\text{IRC}+10216$ 的星周包层中找到几条不敢肯定的 U 谱线。它们的频率

落在由量子化学从头计算法得出的 SiC 的 $J=4\rightarrow 3$ 及 $6\rightarrow 5$ 跃迁的频率附近。紧接着在实验室中，用一台改进的毫米波段反应型分子波谱仪看到两条与射电 U 谱线相符的谱线。这个实验是把 SiH_4 、 CO 和 C_2H_2 气体通到一个4米长的放电管中进行直流辉光放电。在合适的压力（ $10-20$ 毫托）和温度（ $\sim 150\text{K}$ ）下，出现了十多条谱线。谱线有塞曼效应表明它们来自某种开壳层的分子；而去掉混合气体中的 SiH_4 后，这些谱线便消失，表明这种分子必是含硅分子。把实验测量和理论计算的各种分子谱线参数仔细地比较之后，终于肯定了这种开壳层的含硅分子只能是寻觅已久的 SiC 自由基。因为用放电管中的Si、C、O和H可能组成的所有各种开壳层的含Si分子中，没有一个分子能够像 SiC 那样具有如此合适的参数。特别是大的转动常数。这样，天文 SiC 分子便迅速得到肯定的证认。

天体物理学在历史上曾对物理学做出重要贡献（如氦的发现，热核聚变概念的提出）。现在，宇宙这个广阔无垠的实验室又将成为物理学家和化学家的天然研究基地。

天体微波激射源和双极喷流

1965年韦弗等在猎户座星云中偶然地发现一条非常强的1665兆赫兹的谱线。在热平衡条件下，OH的基态有四条频率分别为1667、1665、1720、1612兆赫

兹，我没有成为哲学博士，……这类闹剧让人厌烦”——在1905年爱因斯坦第二次试图获得这个学衔失败后曾这样写道。第三次终于成功了，但此时他已不再需要这个博士学位了，因为他已蜚声于科学界。

我比较详细地回顾这段历史的一个简单原因是，发展中国家的科学家们类似地存在着精神的苦闷和沮丧的情况。今天，即使在发达国家中，象爱因斯坦那样献身于科学的人们的自我感觉难道会更好一些吗？

[译自 *Горюха*, №1, 1981]



解宇宙的新窗口

分子天体物理学进展介绍（之三）

· 李守中 ·

