

爱因斯坦与相对论体系

郭汉英

一、爱因斯坦和他的奇迹

爱因斯坦取得巨大成功，是自然科学史上最伟大的学者。

1879年诞生在德国的一个小城的爱因斯坦，儿时几乎令家人失望。4岁才咿呀学语，几年后还是磕磕绊绊、举止迟钝，因而深受母爱，自幼练习小提琴，与其结为“终身伴侣”。在学校，他的“笨拙”倍受讥讽；他对死记硬背的形式课程毫无兴趣，甚至被学校除名。他喜爱数学和物理，不断在书海中寻求、思索，深受智慧和哲理的熏陶。18岁高考落榜，一年后才被录取，主修物理。他落拓不羁、独立思考、蔑视权威，几乎把精力全花在阅读和实验室。1900年，在教授不满中毕业；一毕业就失业的他，虽然张贴广告试图靠讲授数学与物理谋生，却开始进行科研。1901年取得瑞士国籍，次年才被伯尔尼瑞士专利局录用。1905年，不被人看好的爱因斯坦创造了奇迹。年仅26岁的他，在三个领域发表了几篇奠基之作。他的狭义相对论和光量子论，推动了物理学在两个方面的巨大变革；质能关系是两弹和原子能利用的基础；有关布朗运动的工作论证了原子的存在。不仅如此，他的奇迹一直持续多年。

爱因斯坦奇迹的出现并不是偶然的。上个世纪之交，物理学面临空前挑战：例如，黑体辐射光谱与理论全然矛盾，“以太漂移”实验的零结果和牛顿的绝对空间和绝对时间观念尖锐冲突等等。普朗克在1900年大胆提出量子说，假定作用量子不是连续的而是离散的，以解释黑体辐射谱。爱因斯坦的光量子说把普朗克量子说运用于光，解释了光电效应，因此获得1921年度诺贝尔奖。爱因斯坦大胆放弃“以太”，从相对性原理和光速不变原理提出新的空间和时间观念，建立了狭义相对论，引起物理学的变革。1915年，爱因斯坦建立了他称为广义相对论的空间-时间和引力的理论，再一次引起物理学更加深刻的变革。1917年，爱因斯坦用广义相对论描述宇宙，提出宇宙学原理；为了建立静态模型，他引进了“宇宙项”，或宇宙常数项。尽管错过了预言宇宙的膨胀，他毕竟开创了广义相对论宇宙学的先河。

为了进一步贯彻他的场论纲领，爱因斯坦埋头

研究统一场论；20世纪20年代初发表第一篇论文后，一直坚持到1955年去世，都没有成功。不过，广义相对论的建立和发展，以及有关统一场论的研究，大大激励了微分几何等相关数学领域的发展。他关于物理学几何化的思想和对于物质及其相互作用的统一的追求，一直影响到今天。

在他开始埋头统一场论的同时，以普朗克量子论、爱因斯坦光量子说和玻尔原子模型为基础，量子力学在一阵狂飙中诞生。物理学迎来了另一伟大的变革。然而，爱因斯坦对量子理论随后的发展一直持怀疑和批判态度。1935年，他和合作者提出著名的“EPR佯谬”，同玻尔等哥本哈根学派就量子力学基本问题展开辩论，影响同样一直延续到今天。

轰动世界的他，招来种族主义者更恶毒的攻击。1933年希特勒上台，他在美讲学，公开批评希特勒，成为迫害对象。3月返欧，避居比利时；9月躲避跟踪星夜赴英；次月转美，出任普林斯顿高等研究所教授，直至1945年退休。1939年，他参与上书总统罗斯福，建议研制原子弹，以防德寇抢先。二战结束前夕，美国在日本投掷原子弹，他强烈不满。战后，他参加反对核战的和平运动，反对美国国内麦卡锡主义。从1932年起，美联储调查局就设立他的政治档案，直到他去世。

爱因斯坦主张人类社会应该建立一种道德秩序。他为人谦和、幽默、一贯好奇。他喜爱儿童，常常回答稚气的询问。他坚持犹太身份，但认为犹太教是一种文化，而不是宗教。1952年，他谢绝出任以色列总统。1955年，从不自认是天才的伟人去世。遵照遗嘱，不行丧礼，没有坟墓，不立纪念碑，骨灰撒向天空。

爱因斯坦奇迹发端，已届百年。不过，直到今天，如果要深入追究他1905年奇迹的三个领域之间的内在联系，恐怕还并不清楚。例如，彭加勒不变的黑体辐射谱会是什么样子？对于高速运动的观测者，布朗运动还是不是处在热平衡？这些仍然在探讨之中。



当前,爱因斯坦相对论体系正在面临着有关暗物质、暗能量的天文观测所提出重大疑难。比起上个世纪之交物理学所面临的挑战,有过之而无不及,这是对物理学前所未有的、更严峻的全面挑战。缘由之一,或许也是契机,就与他引入的宇宙常数密切相关。

二、爱因斯坦相对论体系的建立

早在 19 世纪末和上个世纪之初,为了把“以太漂移”实验的零结果与“以太”说和牛顿的绝对时间观念协调起来,洛伦兹和彭加勒等提出种种假定。例如,假定相对于“以太”高速运动的尺会沿运动方向收缩,因而无法测出“以太漂移”,洛伦兹等并找到从相对于“以太”的静止参考系到运动参考系的洛伦兹变换。彭加勒证明洛伦兹变换成立,他最先提出相对性原理,并在麦克斯韦方程不变的前提下,建立了相应的理论。爱因斯坦的理论完全放弃“以太说”,从他的两个原理出发,导出了洛伦兹等的模型和假定。按照他的理论,牛顿的绝对时间和绝对空间并不存在,由于必须用光讯号来进行对钟和测量,同时性就是相对的;彼此以接近光速相对匀速运动观测者会发现对方的尺缩和钟慢效应,因而自然没有“以太”漂移。于是,我们有两种“相对论”:洛伦兹和彭加勒的相对论和爱因斯坦的相对论。随后几十年的发展,物理学接受了爱因斯坦的理论。不过,问题很可能并不那么简单。1908 年,闵可夫斯基提出,狭义相对论中的空间-时间,其实可以表示为彭加勒变换不变的、具有符号差的度量的 3+1 维欧氏空时。后来,具有这个度量的空时称为闵氏空时。

牛顿万有引力具有缺陷,也不满足彭加勒和爱因斯坦的相对性原理,必须修改。彭加勒首先进行了尝试,并预言应该存在引力波。然而,简单地把牛顿引力纳入相对论的框架,并不能解决牛顿引力所面临的问题:无法解释水星近日点的剩余进动;无法解决著名的“夜黑-引力佯谬”,不能建立简单的宇宙图景,等等。

爱因斯坦另辟蹊径。他从惯性质量与引力质量的实验事实出发,于 1907 年提出等效原理,认为惯性力与引力完全等效。在马赫的影响下,他试图把惯性运动和惯性系之间的相对性原理,推广到包括加速运动和加速参考系在内的任意参考系,提出广义相对性原理。广义相对论的名称即由此而来。经过 8 年艰苦探索,经历了种种错误和失败,于 1915 年底,

他和大数学家希尔伯特几乎同时得到后来公认的爱因斯坦-希尔伯特引力场方程,建立了广义相对论这一划时代理论。这个理论认为,如同钢球会把绷紧的橡皮膜压弯,星体的能量-动量张量会使空间时间弯曲,即不再具有闵氏度量,而是由场方程确定的黎曼度量。这样,太阳就会使其周围的空间弯曲,由此可以说明牛顿引力无法解释的水星近日点的剩余进动。这个理论还预言经过太阳附近引力会使谱线向红端移动等。1919 年,英国天文学家爱丁顿等的日全食观测结果证实了光线偏折预言。爱因斯坦和相对论超越了牛顿理论,成了家喻户晓的新闻,整个世界为之轰动。

为了探讨是否能在广义相对论的基础上建立自洽的宇宙图景,爱因斯坦于 1917 年提出宇宙学原理,认为三维宇宙空间是均匀各向同性的;为了描述静态宇宙,他引进了“宇宙项”。同年,天文学家德西特就发现,引进“宇宙项”的爱因斯坦方程,具有“空无一物”的常曲率空时的严格解。后来称为德西特空时(宇宙项为正)和反德西特空时(宇宙项为负)。1918 年,为了排除德西特空时这类“空无一物”的空时,他提出马赫原理作为相对论的一个基本原理,认为作为引力的空时度量场应该完全由引力源的能量动量张量决定,没有后者就没有前者。但是,并没有成功。1938 年,他与合作者一起完成了广义相对论的运动理论,从引力场方程导出了检验粒子的运动方程。1920 年代末,哈勃发现星系红移;勒梅特、伽莫夫等提出大爆炸宇宙模型。1964 年,发现了大爆炸模型所预言的宇宙微波背景辐射。这些重要观测事实以及其他证据,证实我们的宇宙是一个演化的系统。宇宙学成为了一门自然科学。

三、一个没有完成的伟大体系

我们知道,以牛顿三定律和万有引力理论为核心的牛顿体系,是一个没有完成的理论体系。这个体系无法解释惯性运动和惯性质量的起源,无法建立即使非常简单的宇宙图景,等等。以狭义相对论为基础,推广到广义相对论,进而建立了相对论性的宇宙理论的爱因斯坦相对论体系,在空间-时间、物质及其运动,以及引力和宇宙等各个方面,引起了物理学乃至整个自然科学的认识经历了几次重要的变革和飞跃。相对论体系包含了牛顿体系的合理内容,克服了牛顿体系的一些疑难。但是,这个伟大体系同样不是一个完成了的理论体系。

爱因斯坦把物理理论分为“构造理论”和“原理理论”。他认为：原理理论“应用分析而不是综合的方法。其出发点和基础不是假设的要素，而是经验上观察到的现象的一般性质、一般原理；从这些性质和原理导出这样一些数学公式，使其用于每一自身出现之处。”原理理论的优点，是它们逻辑上的完善，和它们基础的稳固。”“相对论是一种原理的理论。”（《时间、空间和引力》）但是，相对论体系其实却包含着许多重要的“假设要素”。

狭义相对论的基本原理的“假设要素”

按照爱因斯坦的分类，洛伦兹和彭加勒的电子论大概属于“构造理论”，而他于1905年发表的《论动体电动力学》所建立的狭义相对论则是“原理理论”。

不过，狭义相对论的两个基本原理其实都分别包含着重要的“假设要素”。

爱因斯坦沿用了牛顿力学关于“刚性量杆”服从欧氏几何的假定。这是一个非常重要的“假设要素”，相对性原理就包含着这个“假设要素”。我们知道，几何源于测量。我们还知道，在几何公理体系下，只要把欧氏几何的第五公设稍加改动，我们就有另外两种与之几乎完全平权的几何：罗巴切夫斯基几何与黎曼几何。对于这两种几何，同样可以引入进行测量的“刚性量杆”。只不过，“刚性量杆”的长度与坐标距离之间的关系不再是欧氏关系，而是相应的非欧关系而已。这样，选取欧氏“刚性量杆”，而不是罗氏或者黎氏“刚性量杆”就是一种“假设的要素”。其实，高斯和罗巴切夫斯基都曾经做过大尺度的测量或者天文观测，以求得到大尺度的三角形内角之和是否为180度，也就是说，是满足欧氏几何还是非欧几何。只不过，在一定精度下，他们的结果仍然是180度。然而，在原则上，这个“假设要素”的真伪，是可以由实验或者观测加以判断的。

在爱因斯坦的光速不变原理中，包含了另外一个重要的“假设要素”：单程光速不变。有关“以太漂移”以及光速测量的所有实验的分析表明，作为“经验上观察到的现象的一般性质、一般原理”而言，不包含重要假定的原理应该是“空间闭合回路的平均光速不变”，或者“往返平均光速不变”。其实，要测量“单程光速”，必须把在起点和终点的钟事先对好；然而，用什么来对钟呢？如果不采用其他假定，就只能用光讯号。但是，要测量的就是单程光速，于是这就

陷入逻辑循环。爱因斯坦当然非常清楚这一点。如何解决呢？他认为，必须采取“约定”。其实，“约定”就是一种基于实验，而又高于实验的“假定”。有没有实验可以验证这个“假定”的真伪呢？至少到目前还没有！除了上述这两个重要的“假设要素”之外，狭义相对论中还存在其他“假设要素”。和牛顿力学一样，狭义相对论的基础也是惯性系和惯性运动的存在。无论在洛伦兹-彭加勒的理论中，还是在爱因斯坦狭义相对论中，都无法解决惯性运动和惯性系的起源。在理论上，这正是爱因斯坦突破狭义相对论，发展广义相对论的重要原因之一。

其实，假说是科学存在的一种形式。作为基本上是“原理理论”的狭义相对论也不例外。

相对性原理和宇宙学原理的疑难

在相对论体系中，一些基本原理之间的关系并不完全协调。相对性原理和宇宙学原理之间的不协调就非常突出。早在1962年，英国著名天文学家邦迪在《物理学和宇宙学》演讲中就明确提出，“在宇宙学和通常的物理学之间，看来存在着明显的冲突。”相对性原理认为，惯性系没有优越的速度，然而，河外星系红移的发现表明，宏观尺度上的现象具有优越速度；满足相对性原理的物理规律没有时间方向，然而，宇宙演化本身却明确给出时间方向。微波背景辐射发现之后，这个问题更加突出。爱因斯坦的学生和追随者伯格曼惊叹：“宇宙环境对于局部实验的影响导致相对性原理的等效破坏”（《宇宙学作为科学》，1971）。

相对性原理要求存在惯性系，与引力无关的物理规律在惯性系之间的10个（空时平移4、推进3、空间转动3）参数的彭加勒变换群ISO(3,1)下保持不变。对于这些惯性系而言，没有自身优越的速度、时间没有方向性等等。对于我们的实验室而言，只要不管引力和宇宙学效应，闵氏空时和彭加勒不变性就是相对论性物理学的理论和实验分析的框架。所有实验，都与此符合得非常好。空时测量、同时性的定义以及一些基本的物理量的定义，全都基于相对性原理和彭加勒不变性，特别是其中的空时平移不变性。在力学中，能量、动量和质量的定义和守恒，以及质能公式都与空时平移不变性密切相关。在场论中，相应的物理量和公式同样如此；而且不同物理性质的场可以看作是彭加勒群的不可约表示，这些表示以彭加勒群的两个卡希米算子的本征值来表征，分

别是质量平方和质量和自旋的平方。第一个算子完全由平移群的生成元给出，第二个算子依赖于平移群和齐次洛伦兹群的生成元，它们共同构成彭加勒群的代数。

然而，一旦这些实验室要进行天文观测，或者进行与宇宙背景有相互作用的实验，而且恰恰就是要测量这些相互作用的效应，那么，这类实验室中的观测者就会发现：河外星系红移表明具有优越速度、暗示宇宙在膨胀，而宇宙膨胀给出了时间箭头；微波背景辐射大体上可以代表宇宙背景空间的性质，不过要扣除我们的实验室相对于微波背景辐射的“漂移”。对于这类与宇观效应相关的实验和观测的结果的分析必定表明：相对性原理对于这类效应不再成立；时间反演和时间平移不变性不再存在；适当扣除我们实验室的“漂移速度”，并忽略原初扰动、在一定近似下，宇宙背景空间是3维均匀各向同性的，具有6个参数的变换群；这样，宇宙背景空时的度量是弗里德曼-罗伯孙-沃克度量，它依赖于标度因子和一个标记三维宇宙空间为开放的伪球、平直的欧氏空间还是闭合的球的参数 $k = -1, 0, 1$ ，对应的对称性分别是转动群 $SO(3,1)$ 欧几里得群 $E(3)$ 和转动群 $SO(4)$ ；标度因子仅仅依赖于宇宙时和 k 的值，其形式由宇宙中物质分布的能量动量张量通过爱因斯坦场方程决定。在这样的背景空时里，由于存在优越速度和时间方向，相对性原理不再成立。这就是前面提到的邦迪和伯格曼等指出的疑难。但是，在相对论体系中分析这类宇观效应时，又不得不用到以相对性原理和彭加勒不变性为依据的基本物理量的定义和有关的物理规律。因此，这就出现了问题：局部实验室中的物理学和天文学家，在什么意义下可以利用闵氏空时和彭加勒不变性定义的物理量和物理规律，来分析从局部实验室得到的有关宇宙效应的数据和信息呢？在相对论体系中如何将二者协调起来呢？

通常认为，这些不协调，仅仅是对于两类不同的物理问题所引起的，而非本质的冲突；就像其他物理理论一样，往往可以用来研究具有不同对称性的物理系统。然而，应该强调的是，狭义相对论与现代宇宙学的关系并不那么简单。首先，两者都是关于空时认识的理论，现代宇宙学的基础是广义相对论，广义相对论又是在狭义相对论的基础上建立起来的；然而，狭义相对论的一些极为重要的性质又明显与现代宇宙学的观测不相容。由于我们的一切实验和观

测都是在我们这个宇宙之中进行的，如果找不到我们的宇宙所近似满足的宇宙学原理和相对性原理之间的关系，在宇观尺度上，狭义相对论以及彭加勒不变的理论，就失去了严格的概念基础。更重要的是，我们的宇宙是一个演化的系统，这是相对论物理学在上个世纪对于自然科学的一个极其重要的贡献；当今物理学的一个趋势恰恰正是将宇观尺度的物理与微观尺度的物理联系起来，由相同的物理规律来描述。这就必须解决上述狭义相对论与现代宇宙学之间的不协调。然而，在爱因斯坦相对论体系中却很难做到。

其实，相对性原理与宇宙学之间的不协调，甚至可以追溯到伽利略时代。在划时代名著《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》（1632年）中，伽利略论述了在平静水面上静止或平稳匀速航行的大船中，通过在船舱内的任何实验和观测，人们都无法发现大船是在静止还是在航行。他以此来反驳托勒密学派对于哥白尼学说的非难：如果地球在绕着太阳转动，为什么我们丝毫没有觉察？这就是后来称之为伽利略相对性原理的著名论述。但是，伽利略在论述的一开始，就要求：“把你和你的朋友关在大船甲板下的主舱里面。”换句话说，局部实验者不能向外观望。显然，如果向外观望，可以从大船与岸边的相对运动来判断大船的状态。在今天，也可以通过天文观测来加以判断。如果存在“以太漂移”，即使在封闭的船舱内，也能够判断大船的运动。以伽利略相对性原理为基础的牛顿体系自然包含着这些不协调。何况牛顿体系根本无法建立自治的宇宙图景，因而无法解决这些不协调。

不过，这些不协调却从反面提出了一个非常值得深思的问题：应该存在这样的空间-时间-宇宙理论，其中没有这种不协调。换句话说，宇宙学原理和相对性原理或许是相当复杂的一个问题的两个方面。如果真是这样，在我们的宇宙中，宇宙学原理就会在所有满足相对性原理的惯性系中，“挑选”出一类相对“优越”的惯性系。于是，消除相对性原理与宇宙学原理之间的不协调，就意味着回到一类“优越”的惯性系。这或许可以看成是在现代宇宙学意义上，对于洛伦兹-彭加勒空间-时间观念的回归。

等效原理的实质是狭义相对论的局域化

惯性质量与引力质量相等，这是从伽利略以来就知道的实验事实。爱因斯坦由此出发，进一步提出

惯性力与引力等效的等效原理。这个原理的确促使他突破狭义相对论，提出广义相对论。然而，在牛顿力学中，惯性力和引力的表达式并不等价；在广义相对论中，二者的表述也不等价。有的学者认为，等效原理好像是广义相对论的“助产婆”，广义相对论诞生之后，这个“助产婆”应该退出历史。其作用仅仅在于要求描述引力场的黎曼几何的度量是具有与闵氏度量的符号差相同。现在通行的对于这个原理的表述为，在宇宙中任何时刻、任何地点都存在局域洛伦兹空时（或者洛伦兹标架、参考系），在这类局域洛伦兹空时中，除了引力之外的一切物理规律的形式与狭义相对论中一样。一般认为，这样表述的等效原理是广义相对论中最重要的原理。

认真分析爱因斯坦的原意，等效原理的实质应该是要求在表征引力场的弯曲空时中的每个空时点，狭义相对论及其物理定律仍然成立。也就是狭义相对论的局域化。

但是，无论是爱因斯坦的表述，还是现在通行的表述，这个原理都没有要求狭义相对论及其物理定律完整的彭加勒对称性；留下的仅仅是齐次洛伦兹对称性，起着重要作用的空时平移对称性丢失了。其后果是，在广义相对论中，粒子和场的能量、动量、质量和自旋等等物理量的定义与守恒，失去了在狭义相对论中相应的对称性基础；只能把有关物理定律中出现的物理量类比于，或者“等效”于狭义相对论中相应的物理量。在这个意义上，这是一个相当强的工作假定。

广义相对性原理并没有广义相对性

马赫认为，一切运动都是相对的；爱因斯坦深受马赫这一影响。为了取消狭义相对论中惯性运动与惯性系的特殊地位，他提出广义相对性原理，要求“物理学定律具有对于无论以什么方式运动的参考系都成立的性质。”“普遍的自然规律是由对一切坐标系都有效的方程来表述的；也就是说，对于无论那种（坐标）代换都是协变的（广义协变）。”（《广义相对论的基础》，1916）然而，数学家很快就指出，这种所谓的“广义协变”，并没有什么实质意义，任何物理定律都可以写为广义协变的形式。这一观点，后来就为物理学家所接受。爱因斯坦后来对于这个原理的表述，也有所改变。1946年，他在《自述》中写道：“自然定律应该表述为在连续坐标变换群下协变的方程。这个群替代了狭义相对论中的洛伦兹变换群，后者

形成前者的一个子群。”“当然，这一要求自身作为导出物理的基本观念的出发点并不充分。……广义相对性原理突出的启发式的意义在于它导致我们去寻求在广义协变形式下尽可能简单的方程组”。于是，他又提出了在广义协变形式下的“简单性”要求。

著名相对论学者迈斯勒、索恩和惠勒在他们的名著《引力》一书中，这样来表述广义相对性原理和简单性要求：“物理量必需表述为（与坐标无关的）几何量，物理定律必需表述为这些几何量之间的几何关系。”这一物理观点，有时称为“广义协变性原理”，遍及20世纪物理思维。但是，这个原理具有强制性的内容吗？没有，完全没有。“作为区分可行的和不可行的理论的筛选，广义协变性原理是无用的。”他们追随爱因斯坦，认为这个原理应该代之以一个“有些朦胧的原理”：“自然界偏爱用坐标无关的几何语言表述的简单理论”。按照这个原理，自然界必然偏爱广义相对论，而厌恶牛顿理论。”他们认为，“广义相对论具有最简单，最优雅的几何基础（三个公理——具有度量；度量由爱因斯坦方程 $G=8\pi T$ 支配；在度量的局部洛伦兹标架中所有狭义相对论的物理规律是正确的）。”

总之，广义协变性原理或者广义相对性原理，并没有什么实质的内容，也没有实现马赫所谓“任何运动都是相对的”观点。必须代之以“几何形式的简单性”、“等效原理”等等。其实，3+1维黎曼空时上的“连续坐标变换”一般并不构成“群”，在给定空时点，局部坐标的基底及其对偶基底 $(\partial/\partial x^i, dx^i)$ 之间的变换矩阵才构成群，即局域化的一般线性群 $GL(4, \mathbb{R})$ 。在广义相对论中，所有的物理量都要求是这类变换下的张量（的分量），或者带上相应数量的基底成为与坐标无关的几何量。齐次洛伦兹群恰恰是这个群的子群，但是，平移群却不是。于是，这又回到有关等效原理没有要求局部平移对称性的同样问题和同样的后果。其实，狭义相对论中对于物理量的分类是按照彭加勒群及其不可约表示来进行的；而在广义相对论中，却是按照局域化的一般线性群的变换来进行的，二者并不等价。

在相对论体系之中，能够协调这一不等价吗？

爱因斯坦- 希尔伯特场方程和“戈尔迪之结”

爱因斯坦- 希尔伯特场方程在广义相对论中起着核心的作用。但是，许多学者指出，从几何量与对称性，以及物理量与对称性的关系来看，这个方程存

在着内在的不协调，有一个打不开的“戈尔迪之结”。

上面提到的三位学者就明确涉及到这个问题，并且在他们的名著《引力》中这样给出答复：“答案在手 $G=8\pi T$ ；问题何在？问题来自于爱因斯坦-嘉当的 转动矩’G 与协强-能量张量 T 的联系，但什么是这个方程首先要达到的目的？如果几何告诉物质如何运动，物质告诉几何如何弯曲，手中不就没有这个‘戈尔迪之结’了吗？不然，怎么能永远解不开它呢？”这里， G 是爱因斯坦曲率张量的简写， T 是挠率动量张量的简写，光速 c 和牛顿引力常数 G 取为 1。

何以见得 $G=8\pi T$ 有一个“戈尔迪之结”呢？原来，从几何量与对称性的关系来看，“转动矩” G 是与局域齐次洛伦兹转动相联系的，这也是为什么称之为“转动矩”的原因。然而，从物理量与对称性的关系来看，与协强-能量张量 T 相联系的对称性却不是转动，在狭义相对论中是平移。相应于狭义相对论中的平移的物理量——协强-能量张量 T 联系的是相应于转动的几何量 转动矩’ G ，这种“错位”，就是场方程的一个“戈尔迪之结”。但是，这个结是不是就因为“几何告诉物质如何运动，物质告诉几何如何弯曲”就不复存在了呢？前面提到广义相对论的运动理论，检验粒子的运动方程，可以从场方程或者能动张量的协变守恒律推导出来。随后的发展，对于有自转的粒子，导出的运动方程多了一项黎曼曲率与自转流的耦合。这恰恰是对应于洛伦兹转动的几何量与物理量之间的耦合，这种耦合与电磁理论中在电磁场中运动的带电粒子所受的罗伦兹力的耦合：电磁场强与电流之间的耦合完全类似。这样，在广义相对论中，就出现了两类几何量与物理量之间的耦合，一类是场方程所反映的对称性不同的几何量与物理量之间的耦合；另一类则是对称性相同的耦合。不仅如此，自转同样是物质在空时中的重要性质。为什么自转要与黎曼曲率耦合，而反过来却不能通过引力场方程来影响空时的性质？

爱因斯坦一贯认为：“设想一件本身起作用而不承受作用的事物（空时连续区域）是违背科学的思考方式的。这就是使得马赫试图在力学体系里排除以空间为主动原因的理由。”（《相对论的意义》1921年）看来，对于自转这一所有星体都具有的性质而言，即使在广义相对论中，弯曲空时仍然是“起作用而不承受作用的”“主动原因”。

如果把爱因斯坦所一再主张的“科学的思考方

式”贯彻到底，就应该进一步排除这一“主动原因”，并且避免“戈尔迪之结”的尴尬。

1979 年，丘成桐等证明了广义相对论描述的引力束缚系统的能量为正。这是一个重要的进展。按照广义相对论，黎曼曲率张量表征引力场强。于是，仿照电磁场强给出电磁场能量动量张量的形式，可以构造引力场强的能量动量张量。但是，在爱因斯坦场方程中，并没有引力场自身的能量动量。对于爱因斯坦场方程而言，引力场的这些性质，只能是“暗”的。

惯性起源和爱因斯坦的马赫原理

和牛顿体系一样，狭义相对论是以惯性运动和惯性系为基本概念的。于是，这就存在惯性运动的起源问题。

尽管没有明确的表述，但是，伽利略相对性原理的重要性牛顿当然应该是清楚的。牛顿第一定律就是在叙述作为伽利略相对性原理的基本概念的惯性运动。为了描述动力学，牛顿引进了惯性质量、力和加速度的重要观念。他的第二和第三定律，就是动力学。他的万有引力定律则是描述在引力作用下的动力学。但是，正如爱因斯坦所指出：“惯性原理的弱点在于它含有循环的论证：如果一个质点离开其他物体足够遥远，它就作没有加速度的运动；而我们却又只能根据它运动时没有加速度的事实才知道它离其他物体足够遥远。”（《相对论的意义》）牛顿当然了解这一点。为了解决惯性运动的起源问题，也为了建立体系的需要，牛顿引进绝对空间和绝对时间的概念。然而，这却导致了伽利略相对性原理与牛顿的绝对空间之间的矛盾。这是因为，在满足伽利略相对性原理的牛顿力学的具体规律中，并不出现什么相对于绝对空间的“绝对速度”。

为了“论证”存在绝对空间，牛顿求助于加速度。他提出的著名的水桶实验就是试图利用加速度来说明绝对空间的存在：把吊起水桶的绳子拉紧后松开，水桶就会旋转；水桶中的水面，开始平静；逐渐旋转，水面也因而会下凹，直至与水桶一起转动；马上把水桶停下来，水桶中的水仍然会继续旋转、水面继续下凹。牛顿认为，水面之所以会旋转、下凹，在水桶停止转动后，继续旋转、下凹，都是因为惯性力的作用，而惯性力的来源，却是因为绝对空间的存在，水的旋转是相对于绝对空间的绝对圆周运动。如果在伽利略的船舱中，进行这样的水桶实验，我们当然应该观测到同样的现象，而且与大船的惯性运动状态无关。

按照牛顿的观点，即使我们不向外观测，水面的下凹本身就表明绝对空间的存在。但是，由于存在夜黑和引力佯谬，在理论上却无法得到这一结论。

其实，没有任何有力的证据表明存在牛顿的绝对空间。重要的原因在于，绝对空间无法与简单的宇宙图景相容。这是因为，无限大的欧氏绝对空间和牛顿的万有引力，对于夜晚的天空为什么是黑的这样的简单事实，根本无法解释，这称之为奥尔伯斯佯谬。同时，也无法建立一个在引力作用下稳定的宇宙图像，这称之为纽曼-希林格佯谬。也就是牛顿理论面临的夜黑和引力佯谬。不过，随着牛顿力学及其万有引力定律对于太阳系的成功，牛顿绝对空间和绝对时间的概念也就在自然科学界和哲学界占据着主导地位。

总之，在牛顿体系中，质量和惯性、惯性运动的起源问题无法涉及；绝对空间和绝对时间这些支撑牛顿体系的支柱，却与在牛顿力学中没有“绝对速度”的力学和引力规律相矛盾。其实，说到底，这些佯谬与伽利略相对性原理有关。也不得不效仿伽利略，把人们请到大船甲板下的主舱里面，人们不能够通过向外张望，来判断大船是在静止、还是在运动和在以什么速度运动。把伽利略的平稳行驶的大船作为牛顿的惯性运动和惯性系，同样不能进行宇宙图像的描述，必须被局限在惯性系统之中。一旦向外张望，就会出问题。

但是，既然“天地同质”，牛顿定律同样适用与天体，为什么不能“向外张望”呢？如果不能向外张望，一旦用于天体，我们必须想像一个把天体容纳在内的、在太空中“平稳行驶”的伽利略“大船”。那么，这个“大船”应该有多大？在哪里行驶呢？

在牛顿提出绝对时间和绝对空间概念之后，一直有人从哲学上或力学上，对此提出异议。代表人物有莱布尼兹、贝克莱和马赫等。

马赫的分析相当深刻，他针对牛顿的水桶实验发难。他认为，在牛顿的论证中忽略了水桶壁和星体的存在。如果水桶质量加大、水桶壁加厚至几英里，会怎么样？他主张，包括旋转在内的运动都是相对的。没有什么绝对空间，水桶的旋转无非是相对于远方星体的总和或者宇宙的质量中心。他指出：“由于运动的相对性，物体的引力和惯性力应该由宇宙中其他物质所决定。”“应该排除时间和空间为主动原因。”他提出，牛顿力学中的质点，不是相对于绝对空

间，而是相对于宇宙间所有其他质量的中心作惯性运动：“如果我们说，物体保持其在空间的方向和速度不改变，我们的这一断言只不过是相对于整个宇宙的简称。”“我们怎么能够确定这样的参照系？只能参照于宇宙中的其他物体。”（《力学史评》）

但是，马赫的分析仅仅停留在思辨的水平上，他和牛顿一样，不得不依赖于超距作用；他也无法说明宇宙中所有质量的中心是否存在，如果存在的话，如何具体决定惯性质量和惯性运动？

其实，马赫的观点非常深刻，影响极其深远；但是，并非无懈可击。迈斯勒、索恩和惠勒就尖锐地指出，几十亿光年之外的星体何以能够决定这里、现在的惯性？（《引力》）

有一点应该强调：马赫在有意无意之中提出了一个重要的问题。那就是，包括惯性运动在内的这些的起源，应该通过自治的宇宙图景来解决。换言之：在一个理论体系之中，如果能够解决惯性或者惯性运动的起源，那么这个体系必须要建立自治的宇宙图景，而且这一图景应该与相对性原理之间存在着内在的联系。

显然，由于不能建立一个自治的宇宙图景，牛顿体系不是这样的体系。爱因斯坦相对论体系能不能解决惯性和惯性运动的起源问题呢？由于前面提到的相对性原理与宇宙学原理之间的不协调，显然也不是。

应该指出，物理学的发展，特别是量子物理的发展表明，惯性定律的起源与惯性质量的起源既有联系，又应该有所区别。例如，电子的物理质量，是通过电磁场自作用，并经过“质量重整化”的结果。因而，物理质量至少应该与物质自身的内在性质密切相关。而惯性运动却不然。静止质量为零的光子，也可以光速进行惯性运动。同时，惯性运动和惯性系的起源与“局部惯性运动”和“局部惯性系”的起源，也应该有所区别。后者与广义相对论中的等效原理密切相关：广义相对论中的测地线运动，就是一类“局部惯性运动”，一般说来，仅仅在一个空时点或该空时点的邻域内的一条世界线上，可以把联络系数消去，使测地线运动相应于自由落体运动，得到与狭义相对论中自由粒子相同的运动。

受马赫关于惯性与惯性运动起源的影响，爱因斯坦曾经提出马赫原理。他认为： G -场全部由物体的质量决定。按照狭义相对论的结果，质量和能量是

同样的，并且能量在形式上由对称能量张量描述，因此这就导致 G- 场由这一能量张量所限制和决定。”（《广义相对论的一些原理性的问题》，1918 年）这里的 G- 场就是度量场，亦即引力场。显然，这是爱因斯坦表述的原理，并不是马赫的原意。爱因斯坦的这一原理摆脱了马赫表述的含混之处，也摆脱了超距作用。不过，这一原理不再区分惯性运动和局部惯性运动，它们的起源和惯性质量的起源全部都由能量动量张量决定的度量场所确定。

其实，按照马赫的观点，如果惯性质量起源于其他天体的作用，那么，在巨大天体附近的原子核与电子的质量就应该会有所改变，从而成为引力红移之外，另一改变原子的特征谱线的原因。然而，实验和观测并不支持这一点。

在理论上，爱因斯坦场方程也没有能够做到他关于没有物质就没有空时度量的期望。在去世前一年，爱因斯坦终于放弃了他提出的这一原理。

总之，惯性运动的起源问题，在相对论体系中并没有解决。马赫对于牛顿绝对时间和绝对空间的批判，也没有得以实现。

值得注意的是，如果马赫的观点得以实现，就会导致一类优越惯性系在现代宇宙学意义上的回归。回顾我们曾经分析过相对性原理与宇宙学原理之间的不协调所提示的，如果消除这些不协调，有可能导致优越惯性系的观念在宇宙学意义上的回归；二者是一致的。

奇性引起理论疑难

爱因斯坦去世之后，有关广义相对论的理论研究取得了许多进展。最重要的进展之一，是黑洞理论以及大尺度空时结构的研究。

1960 年代末以来，彭若斯和霍金发现，在相当一般的条件下，广义相对论存在空时失去意义的“奇性”。宇宙起源于奇性，星系演化经过黑洞终结于奇性。研究表明，对于晚期的星体而言，如果质量足够大（比如有两三个太阳质量），那就迟早会变为黑洞，而一旦形成黑洞，就会最后坍缩到空时奇点。时间停止了，空时的曲率变为无穷大，一切物理定律都失去意义，一切物质都被撕得粉碎。此外，还有一些结论也是值得深究。例如一个黑洞不可能分裂为两个黑洞，只能是两个（或者更多）的黑洞合并为一个黑洞，其结果不仅是宇宙大爆炸起源于奇性，而且整个宇宙有可能变成为一个大黑洞，而且早晚可能要坍缩

到奇点。但是，现在关于加速膨胀宇宙的观测，已经否定了这一点。很明显，这种奇性在物理上是很难接受的，不仅如此，甚至还有可能出现更加不可思议的不在黑洞视界内部，也不是宇宙大爆炸之初的所谓‘裸奇性’。于是，彭若斯提出‘宇宙监督’假说，假定不存在这类‘裸奇性’。

为什么会出现这类病态的‘奇性’呢？按照等效原理，如果宇宙中时时处处都存在局部洛伦兹参考系的话，就不应该出现这类病态的奇性。奇性的不可避免暗示着广义相对论作为一个理论体系，内部存在某些不自然。难怪著名学者夏玛指出：“我们面临着理论物理的危机。或者经典广义相对论要破坏，或者存在着等效的负能密度，或者因果性不再成立，或者在自然界中存在奇性。”伯格曼也指出：“膨胀宇宙极早期存在奇性，这是现有理论观念并不适合于极高密度物质的一个讯号。”（《宇宙学作为科学》，1971）。

除了奇性问题之外，黑洞的经典理论还取得了其他重要的进展。例如在黑洞和热力学系统之间找到了联系，建立了黑洞热力学，并进一步与黑洞的量子理论相结合，提出了黑洞熵的概念等等。

量子引力的出路

引力理论和量子理论的结合，对于上个世纪理论物理来说，是一个很重要的理论问题。几十年来，这个问题一直没有得到解决。自然界是统一的，因而在理论上描述自然界的两种主要途径之间应该存在内在的联系。揭示这种联系，认识这种联系无疑具有重要的意义。

1960 年代以来，对于这个问题的探索更为迫切地提到日程上来。究其原因大体上有两点：天文发现表明，必须考虑极强引力场中的量子效应；应该研究引力的量子化与广义相对论奇性疑难之间的关系。另一方面，由于 1970 年代规范场量子化和重整化理论的进展，在理论上也为量子引力的研究提供了强有力的工具。不久，在理论上发现，广义相对论的引力场，在一般情形下是不可重整化的。也就是说，高阶量子修正不仅发散，而且无法从中抽出具有物理意义的效应。从通常量子场论的角度来看，这是不能令人满意的。由于这种状况的出现，一般认为，广义相对论很可能只是一个低能情形下的唯象理论，应该建立可重整的量子引力理论。

在量子引力研究中的一个进展，是 1970 年代以

来关于黑洞量子理论的研究。这些研究推进了对于黑洞的认识。以前，一直以为黑洞是什么东西都跑不出来的绝对“黑”的。然而，黑洞的量子理论指出，如果考虑到量子效应，情形就不完全是这样了。由于量子理论的隧道效应，粒子总有“穿透”黑洞的几率；由于在黑洞的极强引力场中物质场的量子涨落可能非常剧烈，掉进黑洞的粒子可以看作从黑洞中跑出来的反粒子再经过引力场散射到远处。这样，黑洞就好像会不断“蒸发”，辐射出粒子和光子。已经证明，这种辐射具有通常热辐射的谱型。同时，这种“蒸发”过程随着黑洞质量不断减少会愈演愈烈，以至最后可能招至黑洞的“爆炸”。

近年来，非微扰量子引力的尝试，在超弦和在广义相对论的框架内，都取得一些有意义的进展。例如，1990年代中期以来，对于黑洞熵的微观起源给出了一定解释等。这也表明黑洞及其引力场不是基本场，而可能是一类系统或者有效场。但是，距离解决量子引力的问题还相当遥远。当然，一个完整的关于黑洞的量子理论，必须考虑引力场自身的量子效应。因此，这些问题并没有从根本上解决。

这些进展的确从另一个角度加强了关于广义相对论是有效场论的观点：广义相对论作为描述引力场的理论，可能并不是基本的，而是有效理论。尽管在爱因斯坦时代，有效场论的观点还没有提出。不过，爱因斯坦早就隐隐约约地觉察到这一点：他对于引力场方程右边的能动张量并不满意，希望与场方程左边一样具有几何描述。在考虑星体或者宇宙模型时，往往要假定物质的“物态方程”。其实，“物态方程”所联系的是大量粒子组成的系统的宏观量，因而不可能是基本场量。同时，黑洞理论又从另一个方面揭示出，至少黑洞的引力场也不是基本场。否则，在什么意义下谈论基本场的“熵”及其“微观起源”？

从有效场论的观点来看，有效场并不需要可重整化。因而，广义相对论的不可重整性并没有什么可怕。问题是，能不能找到引力作为基本场的自洽的理论。从当前理论物理发展的情况看来，超弦/M理论似乎是一个可能的候选者。但是，超弦/M理论的发展还处在相当初步的阶段。什么是基本自由度？什么是基本对称性和动力学原理？这些问题都还不清楚。

近几十年来，相对论性宇宙学，取得了一系列重大进展。但是，宇宙理论作为一门科学，还仅仅处在非常初级的阶段；存在的问题极多。相对论体系当前

面临的变革，起因也恰恰来自于观测宇宙学。

温伯格认为：“物理学并不是一个已完成的逻辑体系。相反，它每时每刻都存在着一些观念上的巨大混乱，有些像民间史诗那样，从往昔英雄时代流传下来；而另一些则是像空想小说那样，从我们对于将来会有伟大的综合理论的向往中产生出来。”这是在他《引力论和宇宙论——广义相对论的原理和应用》一书的开篇写下的。

这意味深长而又恰如其分地表明，相对论体系并不是一个业已完成的逻辑体系。

四、相对论体系面临变革

发端于100年前爱因斯坦奇迹的相对论体系，取得了极其伟大的进展，引起了空前的变革；同时，也促进诸多有关技术的飞速发展。不过，自然科学史上这个最伟大的体系和其他所有的理论体系一样，是一个没有完成的体系。作为描述空间-时间和宇宙基本规律的这个体系，存在包括上面提及的许多重大问题；不仅狭义和广义相对论，以及宇宙论作为物理理论本身，以及相对论体系作为逻辑体系并没有完成，这个体系还存在一些内在的不协调。另一方面，这个体系过去解释了以往理论所无法解释的疑难，一直没有任何重大实验和观测与它的理论预言尖锐冲突；然而，今天却面临着一些重要的观测事实，在理论上全然无法解释。事实上，这个体系面临着来自观测的尖锐挑战。

暗物质的问题起始于几十年前，到1980年代有关暗物质的观测已广为接受；1990年代后期以来，有关暗物质、暗能量和宇宙常数的观测结果，进一步使得以量子论和相对论为基础的物理学的整个理论框架面临挑战：在广义相对论和宇宙学原理的分析框架内，观测数据表明，通常的星体只占不到1%，加上弥漫在宇宙空间中的已知物质，一共只占区区4%~5%，未知的暗物质约占20%多，与通常能量所完全不同的“暗能量”，或者作为“暗能量”最简单形式的宇宙常数要占70%左右；宇宙在加速膨胀，因而不是渐近平坦的，而是渐近于常曲率的德西特空间。这样，严格说来，在涉及宇宙尺度的效应上，作为物理量定义基础的爱因斯坦狭义相对论失去了宇宙观测的基础。

一种通行的看法是，作为“暗能量”的宇宙常数相对于量子理论中的“真空”能。然而，这样得到的宇宙常数值比观测值大了120个数量级；考虑种种可

能的修正、特别是超对称效应，也还是要大几十个数量级。这是物理学史上，前所未有的理论与观测结果的不一致。如何解释？根本问题出在哪里？

2000 年弦理论会议上，弦理论家提出跨世纪的十大理论问题，其中有 8 个与相对论体系直接有关：

①表征物理宇宙的所有(可测量的)无量纲参数是否原则上都是可计算的，或其中某些仅仅是由历史或量子力学等偶然因素所确定，因而是不可计算的？

②量子引力如何有助于解释宇宙起源问题？

④自然是超对称的吗？若是，超对称怎样破缺？

⑤为什么宇宙看来只有一维时间和三维空间？

⑥为何宇宙常数会有其值？是零吗？是常数吗？

⑦何为 M 理论基本自由度？果真描述自然吗？

⑧如何解决黑洞的信息佯谬？

⑨引力尺度和基本粒子的典型质量尺度之间的差异如此巨大，什么物理可以予以解释？

应该略加说明为什么第 1 个问题与相对论直接相关：利用普朗克常数、牛顿引力常数、光速和宇宙常数，可以构成这样一个无量纲参数，其数量级恰恰是刚才提到的 10 的负 120 次方，它应该表征引力相互作用。但是，为什么这样小？能不能计算？第 3 和第 10 个问题虽然不是直接关于相对论体系的，也至少与狭义相对论性、或者彭加勒不变的场论问题有关：③什么是质子的寿命？理论上如何解释？⑩如何定量解释量子色动力学中的夸克胶子的禁闭，以及质量间隙的存在？

2004 年诺贝尔物理奖获得者格罗斯最近又提出了未来二三十年的 25 个重大科学问题。其中前 5 个问题与相对论体系直接相关：宇宙的起源，暗物质的性质，暗能量的性质，宇宙中结构的形成，广义相对论的正确性。另外直接与相对论体系有关的还有：超对称的存在性，弦理论的性质，空间和时间的性质，物理规律是否唯一，运动学、动力学与初始条件是否能够分开，理论的作用，等等。格罗斯的问题中，还涉及到复杂性、涌现和还原论。其实，这也与相对论体系有着密切关系。我们不妨设想，按照有效场论的观点，广义相对论很可能是一种有效场论。那么，还原论认为，应该存在更基本的理论，如超弦/M 理论。系统论则可以把广义相对论当作宇宙系统所具有的特征来看待。但是，如果存在更基本的理论，如何从中导出广义相对论？如果不论更基本的理论存

在与否，又怎么作为从宇宙这样一个复杂系统中，涌现出像广义相对论这样的规律呢？

应该指出，上面这些问题只反映了弦理论家，或者格罗斯等人的看法。有一些重要问题并没有完全列举、甚至没有涉及。例如，没有一个问题涉及到狭义相对论中“欧氏假说”的正确性；甚至没有涉及到相对性原理与宇宙学之间的不协调等等。不过，这些不仅表明相对论体系远远没有完成，同时也反映出这个体系的的确确面临着极其尖锐的挑战。

一种似乎得以某种部分解脱的企图，源于“人择原理”。然而，这却把我们带到无限多个宇宙的更加复杂的宇宙体系；再次从“我们的宇宙”，飞跃到“无限”。

更多的作法是试图从动力学方面来解释暗物质和暗能量，例如引入种种“精质”、“幽灵”，或者改变场方程等。

我国著名学者陆启铿首创的另一种作法却根本不同：从运动学开始，进而考虑动力学。按照这一观点，一旦放弃狭义相对论中“欧氏假说”，就可以证明存在德西特不变的相对论。进而，应该建立局部德西特不变的引力理论，以及在此基础之上的宇宙学。显然，这已经超出了爱因斯坦相对论体系。

相对论体系的建立和发展，使得自然科学对于空间和时间、物质和运动，引力作用，以及我们的宇宙的认识经历了并还在经历着一系列重大飞跃和变革。在物理学史上，这是一个前所未有的伟大体系。爱因斯坦在这个体系的建立和发展中，创造了奇迹，不愧为近代科学史上最伟大的学者。然而，作为一个理论体系，相对论体系并没有完成；作为一个基本上是“原理理论”的体系，存在着一些重要的“假设要素”和不协调。在相对论体系的建立和发展中，实验和观测起着极其重要的作用。今天，宇观尺度上的观测数据分析的结果，对相对论体系提出了严重挑战。由于这些观测数据的分析是以爱因斯坦场方程和满足宇宙学原理的弗里德曼-罗伯孙-沃克度量为理论框架的，这不得不尤其引起我们的重视。

爱因斯坦说得好：“物理学构成一种处在不断进化过程中的思想逻辑体系”。相对论体系恰恰就是这样一个处在不断进化之中的理论体系。其实，相对论体系和量子论体系，以及以它们为基础的物理学理论，作为思想逻辑体系都远远没有完成，也远远不完备；总是处在不断追求完备的过程之中。然而，仅仅

原子与原子核的新形态—— 介子原子和介子核

王景丹 钟显辉 宁平治

普通原子核由质子和中子组成。随着实验和理论研究的发展，人们认识到还存在着另外一类奇特的原子和原子核——介子原子和介子核。这些新形态的原子和原子核在自然界中是很难找到的，原因是它们的寿命很短。只有在实验室中才能观测到这些奇特的原子和原子核，所以一直不太被人们了解。然而近年来，新的实验现象和新的理论分析使人们对介子原子和介子核有了新的认识。

我们在介绍介子原子和介子核之前，首先对介子作一个简单的介绍。介子跟核子一样都是参与强相互作用的粒子，各种介子都是由一个正夸克和一个反夸克组成的两夸克系统。不同的介子由不同的夸克组成。到目前为止，我们认识到的介子主要有 π 、 K 、 η 、 ρ 、 ω 、 σ 、 ϕ 等。介子原子就是一个带负电的介子进入原子外围轨道，通过放出X射线退激发进入一系列较低能级，最终介子落入原子核，被原子核吸收。此时介子的地位有点像原子中的电子，只是介子的质量比电子大得多，因而介子轨道半径比电子轨道半径小得多，介子与核的表面靠得很近，除了库仑作用外，它们还感受到与核之间的强相互作用。介子核就是介子已经进入到了原子核的内部，在与核的强相互作用下形成的一种深束缚态。

介子原子

迄今发现的介子原子有两类，一类是负 π 介子与原子核形成的 π 原子，另外一类是负 K 介子与原子核形成的 K 原子。介子原子对我们了解介子与原

指出并承认这一事实并不够；更加重要的是应该分析：以相对论体系和量子论体系为代表的当代物理学应该如何进化、向什么方向进化？我们应该如何追求、向什么方向追求？

回顾相对论体系的建立、发展和今天面临的问题，应该注意到哲学观点和科学思想之间的关系。对此，爱因斯坦发表过精辟的见解：“哲学的推论必须以科学的成果为基础。”而“哲学又往往促使科学思想进一步向前发展，它能够在许多可行的路线中间为科学指引一条（最恰当的）路线。”（引自《物理学的

子核的强相互作用有着非常关键的意义。我们通过实验测量出由于强相互作用带来的介子原子的能级移动（相对于无强相互作用时的能级）和能级宽度（核吸收的量度）这两个非常重要的物理量，就可以知道介子与原子核之间强相互作用的信息，再通过拟合这些实验上测得的数据信息，我们就可以提取到描述介子与原子核间强相互作用的势场。探测来自介子原子的X射线的实验装置通常由以下三部分组成：第一部分是专门产生相应的介子束流，第二部分是一个识别和产生所需要研究的介子原子的系统；第三部分是一个精确测量来自靶上的X射线的强度、能量和分布的系统。

根据实验测量结果， π 原子的能移和宽度在几个到几十个keV范围内，而 K 原子的能移和宽度大概只有十几到几百个电子伏特。这些能量的量级相对于原子核的激发能量是非常小的，与原子的电子激发相当。说明介子在原子核外围感受到了强相互作用，但是这种作用强度非常小，与库仑作用强度相当，介子在原子核表面外侧，只是一种势阱较浅的束缚。

最简单的 K 原子是 K -氢原子，它由一个质子和一个被库仑力束缚在其周围的 K 介子组成。研究 K -氢原子对了解低能下 K 介子与核子(KN)的强相互作用有十分重要的意义。在过去实验基础上，近来利用新的实验技术对 K 氢原子的X射线进行了重新测量，得到了不同于以往的强相互作用能级移动进化》。爱因斯坦在建立相对论体系的过程中，始终贯彻着这一观点，这无疑是爱因斯坦创造奇迹的重要的主观原因之一。

在纪念爱因斯坦奇迹的今天，发扬科学精神和社会责任感，独立思考、不畏权威、善于学习、努力工作、注重方法、不尚空谈，直面科学面临的挑战，为人类社会进步做出贡献；这或许是这位伟人成功的启示。与此同时，爱因斯坦关于哲学观点和科学思想之间的关系的思想和实践，同样指引着他的后继者们。

（中国科学院理论物理所 100080）

现代物理知识