# 爱因斯坦相对论

相对论（英语：Theory of relativity）是关于时空和引力的理论，主要由爱因斯坦创立。20世纪初，相对论和量子力学的提出给物理学带来了革命性的变化，它们共同奠定了现代物理学的基础。相对论建立的“同时的相对性”、“四维时空”、“弯曲时空”等全新的时空观是人类对物理现象认识的一个飞跃。局限于惯性参考系的理论称为狭义相对论（Special relativity），推广到一般参考系和包括引力场在内的理论称为广义相对论（General relativity） [1]。现在相对论已经成为物理学的主要理论基础之一。

## 1 爱因斯坦

阿尔伯特·爱因斯坦（德语/英语：Albert Einstein；1879年3月14日—1955年4月18日），出生于德国巴登-符腾堡州乌尔姆市，美国和瑞士双国籍的犹太裔物理学家。爱因斯坦出生于德国乌尔姆市的一个犹太人家庭（父母均为犹太人）。1900年毕业于瑞士苏黎世联邦理工学院，入瑞士国籍。1905年，爱因斯坦获苏黎世大学物理学博士学位，并提出光子假设、成功解释了光电效应（因此获得1921年诺贝尔物理学奖）；同年创立狭义相对论，1915年创立广义相对论，1933年移居美国，在普林斯顿高等研究院任职，1940年加入美国国籍同时保留瑞士国籍1955年4月18日，爱因斯坦于美国新泽西州普林斯顿逝世，享年76岁 。1999年12月，爱因斯坦被美国《时代周刊》评选为20世纪的“世纪伟人（Person of the Century）”。爱因斯坦的理论为核能的开发奠定了理论基础，为帮助对抗纳粹，他曾在利奥·西拉德等人的协助下曾致信美国总统富兰克林·罗斯福，直接促成了曼哈顿计划的启动，而二战后他积极倡导和平、反对使用核武器，并签署了《罗素—爱因斯坦宣言》 [4-8]。爱因斯坦开创了现代科学技术新纪元，被公认为是继伽利略、牛顿之后最伟大的物理学家，也是批判学派科学哲学思想之集大成者和发扬光大者。

## 2 狭义相对论

### 2.1 简介

狭义相对论（英文：Special relativity）。狭义相对论只局限于讨论惯性系中的物理现象。爱因斯坦在他1905年的论文《论动体的电动力学》中介绍了其狭义相对论。

狭义相对论的主要内容有：

（1）惯性参考系之间的时空坐标的洛伦兹变换及其物理意义，集中展现相对论的时空观。

（2）物理规律在任意惯性系中可表述为相同形式，即物理规律的协变性。协变性要求是对各种场和粒子间相互作用规律探索的主要理论指导之一。

（3）把电动力学的基本规律，即麦克斯韦方程组和洛伦兹力公式表达为协变形式，从而使电动力学成为明显相对论性的理论，可用来解决任意速度带电粒子与电磁场的相互作用问题。

（4）把力学基本规律推广为协变性的相对论力学，由此得到相对论的质量、能量和动量的关系。这些关系是原子能应用的主要理论基础，是解决高能粒子运动转化过程运动学问题的主要工具。

### 2.2 狭义相对论的起源

物理规律需要在一定的参考系表述出来。在狭义相对论提出以前，人们认为时间和空间是各自独立的绝对的存在。自伽利略时代以来这种绝对时空的观念就开始建立，牛顿创立的经典力学和运动定律就是在绝对时空观的基础上创立。在低速情况下这种观点与实验观测符合的很好，但是在高速情况下绝对时空观与客观实际的矛盾就会显现。

十九世纪中后期，人们从长期的实践中总结出电磁场的基本规律，即麦克斯韦方程组，并由此得出电磁波在真空中传播的速度为c。以绝对时空观的概念出发，电磁波只能在一个特殊参考系中的传播速度为c，所以麦克斯韦方程组只能对该特殊参考系成立。如果是这样的话，那么经典力学中一切惯性参考系的相对性原理在电磁现象中就不再成立。由此，把相对于该特殊参考系的运动称为绝对运动。由于当时人类认识的所有波动比如水波、声波都是在某个介质中机械振动的传播现象，人们认为电磁波也在某种充满空间的弹性介质中传播，这种介质被称为以太。人们把相对以太静止的参考系作为这个特殊参考系。寻找以太，以及确定地球相对于以太的运动，成为十九世纪末物理学的一个重要课题。当时的科学实验已经可以精确测量光速，多次实验的结果都没有发现任何绝对运动的效应，这迫使人们接受在真空中光速相对于任何惯性系都等于c的事实。这与旧的伽利略时空观发生了矛盾。同时以太也成为了1900年开尔文勋爵口中的物理学大厦头顶的“两朵乌云”之一。

除了电磁现象以外，十九世纪末人类的实践活动已经开始深入到物质的微观领域，发现了电子、X射线衍射和天然放射性，人们发现的许多新的现象和规律，使经典物理学的许多基本概念都发生动摇。这个时期物理学面临着巨大变革，反映新时空观念的相对论也正是在这个背景下提出来的。所以，相对论是生产水平和科学技术发展到一定阶段的必然产物 。

在爱因斯坦以前，人们广泛关注于麦克斯韦方程组在伽利略变换下不协变的问题，也有人（如庞加莱和洛伦兹）注意到爱因斯坦提出狭义相对论所基于的实验（如迈克尔孙-莫雷干涉仪实验等），也有人推导出过与爱因斯坦类似的数学表达式（如洛伦兹变换），但只有爱因斯坦将这些因素与经典物理的时空观结合起来提出了狭义相对论，并极大的改变了我们的时空观。在这一点上，狭义相对论是革命性的。

### 2.3实验验证

迈克尔逊-莫雷（Michelson-Morley）在1887年测量了光速沿不同方向差异的实验。他设计了一种干涉仪，被称为迈克尔逊-莫雷干涉仪,用来检验以太的存在。结果是迈克尔逊的实验否定了以太的存在，表明光速不依赖于观察者所在的参考系，也不依赖于光源相对于观察者的运动。

对双星运动的观测，双星绕其质心运动，若光速依赖于光源速度的话，则双星系统中向着地球运动的一颗星发出的光将比另一颗星传播得更快，因而在地球上观察到的双星运动轨道将发生扭曲，实际并没有观察到这种情况，表明两颗星发出的光传播速度是一样的。这也证明了光速不依赖于光源的运动。

现代也有实验持续验证光速不变的基本事实。人们用高速运动的π0介子作为光源。π0介子是在高能质子间碰撞产生的一种不稳定粒子，它在运动过程中在0.87×10-16秒内将会衰变成两个光子。Alvager的实验中，π0介子以0.9975c的速度运动，实验测定沿π0介子运动方向放出的光子速度为（2.9977+-0.004）108m/s,与用静止光源测得的光速一致 [5]。总之，到目前为止，所有实验都指出光速不依赖于观察者所在的参考系，也与光源的运动无关，是自然界的一条基本规律。。

此外，还有大量实验验证了相对论导出的各种效应。例如，横向多普勒效应实验，验证了相对论运动的钟慢效应。高能物理中，高速运动粒子的寿命的测定，证实了钟慢效应。比如观察π介子运动过程中的平均寿命，和观察到μ子高速运动下的平均寿命。实验观测的结果均与钟慢效应的公式计算数值吻合。携带原子钟的环球飞行实验，证实了狭义相对论和广义相对论共同作用下的时钟减慢的总效应。

## 3 广义相对论

### 3.1 简介

为了解决牛顿引力理论在实验和理论上遇到的困难，1915年，爱因斯坦把他的引力理论建立在等效原理和广义相对性原理的基础上，并把这一理论看作是狭义相对论的推广，因而称它为广义相对论，但是广义相对论并不完全等价于引力理论。

广义相对论既可以看做狭义相对论的发展，又可以看做万有引力定律的发展。这是一个关于空间、时间和引力的理论。爱因斯坦提出等效原理，猜测万有引力可能是一种几何效应。他又把黎曼几何引入自己的研究，并率先得到了广义相对论的基本方程———爱因斯坦场方程。它指出万有引力不同于一般的力，而是时空弯曲的表现，是一种几何效应。广义相对论的全部内容，可以概括为: “物质告诉时空如何弯曲，时空告诉物质如何运动。

### 3.2 广义相对论的起源

在本质上，所有的物理学问题都涉及采用哪个时空观的问题。在二十世纪以前的经典物理学里，人们采用的是牛顿的绝对时空观。而相对论的提出改变了这种时空观，这就导致人们必须依相对论的要求对经典物理学的公式进行改写，以使其具有相对论所要求的洛伦兹协变性而不是以往的伽利略协变性。在经典理论物理的三大领域中，电动力学本身就是洛伦兹协变的，无需改写；统计力学有一定的特殊性，但这一特殊性并不带来很多急需解决的原则上的困难；而经典力学中的大部分都可以成功的改写为相对论形式，以使其可以用来更好的描述高速运动下的物体，但是唯独牛顿的引力理论无法在狭义相对论的框架体系下改写，这直接导致爱因斯坦扩展其狭义相对论，而得到了广义相对论。

爱因斯坦在1915年在普鲁士科学院报告了“基于广义相对论对水星近日点运动的解释”，随后在1916年第七期的物理年鉴上正式发表了“广义相对论基础”一文，给出了广义相对论最初的形式[3]。他首先注意到了被称之为（弱）等效原理的实验事实：引力质量与惯性质量是相等的。这一事实也可以理解为，当除了引力之外不受其他力时，所有质量足够小（即其本身的质量对引力场的影响可以忽略）的测验物体在同一引力场中以同样的方式运动。既然如此，则不妨认为引力其实并不是一种“力”，而是一种时空效应，即物体的质量（准确的说应当为非零的能动张量）能够产生时空的弯曲，引力源对于测验物体的引力正是这种时空弯曲所造成的一种几何效应。这时，所有的测验物体就在这个弯曲的时空中做惯性运动，其运动轨迹正是该弯曲时空的测地线，它们都遵守测地线方程。正是在这样的思路下，爱因斯坦得到了其广义相对论。值得一提的是，引力质量恒等于等于惯性质量在牛顿力学和狭义相对论中完全是一种巧合，并没有重要意义。但是爱因斯坦却从这几百年司空见惯的事实中找到了新理论的线索。

### 3.3 广义相对论的实验验证

验证广义相对论的经典实验有：谱线的引力红移，水星近日点的进动，光线的引力偏折，雷达回波的延迟。

在2016年，LIGO科学合作组织和Virgo合作团队利用先进LIGO探测器，首次探测到了来自于双黑洞并合的引力波信号，验证了广义相对论最重要的推论。在μ子寿命的实验中，在微观领域证实了双生子佯谬效应。

## 4 狭义与广义相对论的分别

狭义相对论与广义相对论的描述的对象不同。传统上，在爱因斯坦提出相对论的初期，人们以所讨论的问题是否涉及非惯性参考系来作为狭义与广义相对论分类的标志。随着相对论理论的发展，这种分类方法越来越显出其缺点——参考系是跟观察者有关的，以这样一个相对的物理对象来划分物理理论，被认为不能反映问题的本质。一般认为，狭义与广义相对论的区别在于所讨论的问题是否涉及引力（弯曲时空），即狭义相对论只涉及那些没有引力作用或者引力作用可以忽略的问题，而广义相对论则是讨论有引力作用时的物理学。用相对论的语言来说，就是狭义相对论的背景时空是平直的，即四维平凡流形配以闵氏度规，其曲率张量为零，又称闵氏时空；而广义相对论的背景时空则是弯曲的，其曲率张量不为零。 [2]

狭义相对论与广义相对论的起源不同。如果说二十世纪初狭义相对论的出现是由于经典物理固有的矛盾、大量的新实验以及广泛的关注而呼之欲出的，那么广义相对论的提出则在某种意义下是“理论走在了实验前面”的一次实践，在很大程度上是由于相对论理论自身发展的需要，而并非是来自于一些亟待解释的实验现象，这在物理学的发展史上是并不多见的。在此意义上，广义相对论又被称为纯粹理性思维的巅峰之作。

## 5 相对论的应用

相对论主要在两个方面有应用：一是高速运动（与光速可比拟的高速），一是强引力场。

狭义相对论相对论效应可以解释高能物理中宇宙射线的现象。例如宇宙射线中含有许多能量极高的μ子，这些μ子在大气层上产生。但是静止μ子的寿命只有2.197×10-6s，如果没有相对论效应，这些μ子只能以接近光速飞行660米，无法穿越大气层。实际上很大部分μ子可以穿越大气层到达地面。对于地面观察μ子的人们来说，由于钟慢效应，它的寿命延长了，而对于μ子来说，由于尺缩效应，它观察到的大气层长度变短了。所以在μ子的寿命内可以飞越大气层。

在医院的放射治疗部，多数设有一台粒子加速器，产生高能粒子来制造同位素，作治疗或造影之用。氟代脱氧葡萄糖的合成便是一个经典例子。由于粒子运动的速度相当接近光速（0.9c—0.9999c），故粒子加速器的设计和使用必须考虑相对论效应。

全球卫星定位系统的卫星上的原子钟，对精确定位非常重要。这些时钟同时受狭义相对论因高速运动而导致的时间变慢（-7.2 μs/日），和广义相对论因较（地面物件）承受着较弱的重力场而导致时间变快效应（+45.9 μs/日）影响。相对论的净效应是那些卫星的时钟较地面的时钟运行得更快。故此，这些卫星的软件需要计算和抵消一切的相对论效应，确保定位准确。全球卫星定位系统的算法本身便是基于光速不变原理的，若光速不变原理不成立，则全球卫星定位系统则需要更换为不同的算法方能精确定位。

过渡金属如铂的内层电子，运行速度极快，相对论效应不可忽略。在设计或研究新型的催化剂时，便需要考虑相对论对电子轨态能级的影响。同理，相对论亦可解释铅的6s惰性电子对效应。这个效应可以解释为何某些化学电池有着较高的能量密度，为设计更轻巧的电池提供理论根据。相对论也可以解释为何水银在常温下是液体，而其他金属却不是。

在当代，在对于引力波的观测和对于一些高密度天体的研究中，广义相对论都是其理论基础之一。而另一方面，广义相对论的提出也为人们重新认识一些如宇宙学、时间旅行等古老的问题提供了新的工具和视角。此外，由广义相对论推导出来的引力透镜效应，让天文学家可以观察到黑洞和不发射电磁波的暗物质，和估计质量在宇宙中的分布状况。

值得一提的是，原子弹的出现和著名的质能关系式（E=mc2）关系不大，而爱因斯坦本人也肯定了这一点。质能关系式只是解释原子弹威力的数学工具而已，对制作原子弹意义不大。

## 6 相对论对物理学发展的影响

相对论也直接和间接地催生了量子力学的诞生，为研究微观世界的高速运动确立了全新的数学模型。量子力学在建立以后，薛定谔、克莱因、戈登等人先后引入狭义相对论，建立了相对论性的量子力学，发现了Klein-Gordon方程。随后狄拉克建立了狄拉克方程，并由此确定了自旋这个基本物理量的存在。相对论性的量子力学促进了量子场论的建立，量子场论是现代物理研究基本粒子的基础。

1917年爱因斯坦首先将广义相对论用于模型化宇宙的大尺度结构研究，引导了引力论与现代宇宙学的发展。广义相对论为人类认识宇宙图景带来了革命。广义相对论也为理论物理学带来了独特的研究模式，也就是凭借哲学与数学支撑的理性思维去洞察自然的奥秘。

广义相对论促进了几何学的大发展，并催生了统一理论的发展。强-电磁-弱三种相互作用的统一为物理学打开了更加广阔的视野。

爱因斯坦在构建相对论的过程中使对称性原则深入人心，使之成为指导和塑造理论物理的决定性概念或原则。对称性原则加上对称性破缺也是当今凝聚态物理研究的范式。