

广义相对论的实验验证

孙 光 东

(华北航天工业学院 廊坊 065000)

自 1687 年《自然哲学的数学原理》问世以来,牛顿力学取得了很大的成功与发展。很少有理论能和万有引力定律的预言的准确性相比拟。但即使如此,牛顿的理论也不是十分完善的。一个例子是水星的近日点的进动。水星轨道长轴的方向在空间不是固定的,在一世纪内会转动 5601 秒弧度。用牛顿理论计算出所有行星对它的影响后,还差 43 秒弧度与观测不符,另外,牛顿引力理论有一个很严重的缺陷,就是它认为引力的传播不需要时间。例如,如果太阳表面某处突然爆发日珥(喷出明亮的气团),按牛顿理论,其引力变化在地球上即时即可发现,这一点直接违反了狭义相对论,因为这一理论指出任何信号的传播速度是不能大于光速的。

爱因斯坦建立狭义相对论后,就开始研究关于引力的新理论,并且在 1915 年创立了广义相对论。狭义相对论告诉我们,空间和时间不是绝对的,它们和参照系的运动有关。广义相对论则告诉我们,在引力物体的近旁,空间和时间要被扭曲。行星的轨道运动并不是由于什么引力的作用,而是由于这种时空的扭曲。引力就是弯曲时空的表现。爱因斯坦

为了寻找 Higgs 粒子和超对称粒子,需要建造能量更高的质子对撞机。80 年代末,当 CERN 计划建造对撞能量为 $7\text{TeV} \times 7\text{TeV}$ 的大型强子对撞机 LHC 时,当时 CERN 的所长朔佩尔曾向美国科学家建议共同建造,共同使用。因为 LHC 的建造费用约 20 亿美元,欧洲和美国各负担 10 亿美元,但美国科学家牛气十足,要自己建造对撞能量比 LHC 更大的超级超导对撞机 SSC,造价估计约 30 亿美元,1993 年时,虽然周长为 40 千米的准备安装 SSC 的坑道已经挖好,但后来估计实际造价可能要增加许多,美国国会便通过决议,令 SSC 下马。美国科学家只好到日内瓦参加 LHC 合作研究了。

目前,各国科学家已经认识到,上述的高能电子-正电子直线对撞机, $\mu^+ \mu^-$ 对撞机和中微子工厂,

将引力、空间与时间三者联系起来,是人类认识自然界历史上的一次大飞跃。

狭义相对论发表之后,遇到两个严重困难。第一,作为狭义相对论基础的惯性系,无法严格定义,通常把不受外力的物体保持静止或匀速直线运动状态的参考系(也即牛顿第一定律在其中成立的参考系),定义为惯性系。然而,什么叫“不受外力”呢?人们又定义在惯性系中保持静止或匀速直线运动状态的物体为“不受外力”的物体。我们看到,定义惯性系,要用不受外力的物体,而又不受外力又要用到惯性系,形成逻辑循环。第二,万有引力定律不能写成四维张量的形式。这就是说,万有引力定律不是洛伦兹协变的,不满足狭义相对论。为了克服第一个困难,爱因斯坦主张去掉惯性系在理论中的特殊地位,把相对性原理从“一切惯性系平权”推广到“一切参考系(包括惯性系和非惯性系)平权”。他抓住了“引力质量与惯性质量相等”这一显而易见但又被大家忽略的事实,提出等效原理的思想,从而把上述两个困难结合起来加以克服。

利用万有引力效应来定义的质量称为引力质

VLHC 等,由于造价昂贵,超出任何一个国家的经济实力,可能世界上只能各建造一台,可能采用的模式是:一国为主,国际合作。现在,德、日、美和 CERN 都争相开展设计和预先研究,都想以自己为主,让别人参加合作。

在世界经济合作与发展组织(OECD)的倡议下,于 2000 年 4 月 13—15 日在英国伦敦召开了一个全球科学论坛(Global Science Forum, GSF)会议,由世界各主要高能物理活跃的国家代表参加会议,讨论上述问题。伦敦会议决定 2002 年中再开一次 GSF 会议,讨论 21 世纪初的 20—30 年中,加速器和非加速器粒子物理实验,理论粒子物理和粒子天文物理以及必须建造的大型设施。

量,它是参与引力作用的物质的量,利用惯性效应来定义的质量称为惯性质量。它是物体惯性的量度。引力质量 m_g 出现于万有引力定律之中,惯性质量 m_i 出现于牛顿第二定律之中 $F = Gm_g m_g / r^2 = m_g \cdot g$, $F = m_i a$, 其中 g 定义为 $g = Gm_g / r^2$, 称重力加速度。伽利略作的自由落体实验,表明落体的加速度 a 与构成它的材料无关,即 $a = g$, 与动力学方程 $m_g \cdot g = m_i a$ 比较,可知 $m_g = m_i$ 。引力质量与惯性质量相等,在经典力学中被看做是偶然的,未给予任何说明。爱因斯坦首先认识到引力质量与惯性质量相等是必须的。他把这一现象作为广义相对论最重要的实验基础之一,作为等效原理的一种表达形式。在广义相对论中,引力质量和惯性质量是同一个东西。在测地运动方程中,同一个质量出现在引力质量和惯性质量两个位置上。

$$m \frac{d^2 x^a}{d\tau^2} + m T_{\mu\nu}^a \frac{dx^\mu}{d\tau} \frac{dx^\nu}{d\tau} = 0$$

(惯性效应) (引力效应)

今天,验证引力质量与惯性质量相等的实验,在 10^{-11} 数量级的精度范围内,未发现二者的差异。

引力场与惯性场的一切物理效应都是局域不可分辨的。狭义相对论发表之后,爱因斯坦经过仔细考虑,在惯性质量与引力质量相等的实验基础上提出这一原理作为新理论(广义相对论)的一个重要基础。他通过自己设想的理想实验论述了以下结论:一个封闭于升降机中得不到任何外界信息的观测者,将不能区分自己究竟是在无引力场的自由空间中相对于惯性系静止,还是在引力场中自由下落。也不能区分自己究竟是在无引力场的自由空间中以加速度 g 作加速运动,还是在场强为 g 的引力场中静止。他指出,上述理想实验表明,引力场和惯性场是等效的,不可区分的。当然,这种等效性只在无穷小参考系中才严格成立。这是因为:引力场强总是会聚的,指向星球的重心,而惯性场强则是平行的,这一差异在大范围时空中会显现出来。广义相对论提出后,等效原理引起许多物理学家的兴趣和争论。目前,关于这一原理主要有3种提法。第一种提法是,在无穷小时空范畴内,引力场与惯性场的力学效应不可分辨。这称为弱等效原理。第二种提法是,在无穷小范围内,引力场与惯性场不仅力学效应不可分辨,一切物理效应都不可分辨。这称为强等效原理。第三种提法是,引力质量与惯性质量相等。这种提法与弱等效原理等价,可直接用实验验证。

强等效原理是从弱等效原理推广而来的,并非直接由实验得到。然而,作为广义相对论基础的是强等效原理,不是弱等效原理。

爱因斯坦终于以黎曼几何为数学工具,以等效原理和广义相对性原理为理论基础,建立了广义相对论。这是一个关于时空、物质和引力的理论,可以看做狭义相对论的推广。这个理论指出,时空不能看做脱离物质而存在的框架,物质的存在和运动会影响时空的几何性质,反过来,时空的几何性质也会影响物质的存在和运动。他指出,没有物质存在的时空是平直的,有物质存在的时空是弯曲的。万有引力不同于电磁力,它不是真正的力,而是时空弯曲产生的几何效应。在弯曲时空中,质点的惯性运动不是直线运动,而是测地运动。广义相对论的基本方程是爱因斯坦场方程

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = - \frac{8\pi G}{c^2} T_{\mu\nu}$$

它的左边表示时空的曲率,是几何量。右边表示物质的能量和动量,是物理量。上述张量都是对称的,共有10个独立分量。因此,这是一组由10个二阶非线性偏微分方程构成的方程组。10个变量,10个方程,似乎是自足的。然而上述方程含有4个恒等式,独立方程只有6个。因此,还需加入4个坐标条件,才能把10个独立变量限制住。加入坐标条件在物理上意味着选择参考系。此外,还要引入适当的边界条件,其解才能完全确定。

爱因斯坦发表广义相对论时,提出了3个验证他的理论的著名实验。第一个是引力红移。他指出,由于时空弯曲,太阳表面的钟会比远离太阳的钟(例如地球的钟)走得慢,因此那里的原子发射的光,其频率会比地球上同种原子发射的光要低。所以,地球上的观测者将感到太阳辐射的光的光谱线会产生红移。第二个实验是光线偏折。由于太阳的存在,造成太阳附近时空的弯曲。因而来自遥远恒星的光,在通过太阳附近时,光线会产生偏转。第三个实验是水星轨道近日点的进动。由于时空弯曲,水星运动的轨道不再形成闭合的椭圆,近日点会不断移动。

红移是光谱线频率减小(向红端移动)的效应。通常用波长的相对改变率来表示。红移 $z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0$ 。自然界中存在两种红移,多普勒红移和引力红移,二者都与相对论效应有关。多普勒红移由光源相对于观测者的运动引起,并含有狭义相对论

效应。从洛伦兹变换不难得出,光源发出的光的频率 ν_0 与观测者测得该光的频率 ν 之间有关系

$$\nu = \nu_0 \frac{(1 - v^2/c^2)^{1/2}}{1 - \cos\theta v/c}$$

式中 v 为光源相对于观测者运动的速率, θ 为光源运动方向与光波传播方向的夹角。当光源向观测者迎面而来时, $\theta = 0$, $\nu = \nu_0 [(1 + v/c)/(1 - v/c)]^{1/2}$, 观测到的光有紫移。当光源远离观测者而去时, $\theta = \pi$, $\nu = \nu_0 [(1 - v/c)/(1 + v/c)]^{1/2}$, 有红移。当光源相对于观测者作横向运动时, $\theta = \pi/2$, $\nu = \nu_0 [(1 - v^2/c^2)]^{1/2}$, 仍为红移, 称为横向多普勒效应。此效应是经典光学中没有的, 完全由狭义相对论“时钟变慢”引起。引力红移则由弯曲时空中的“时钟变慢”引起。位于引力势低处的钟走得慢, 因而置于那里的光源发出的光, 在引力势高处的观测者看来, 频率会减小, 产生红移。例如, 静止于球对称星体引力场中的光源, 发射频率为 ν_0 的光, 在无穷远观测者看来, 其频率为 $\nu = \nu_0 \sqrt{1 - 2GM/c^2 r}$, 出现红移。式中 M 为星体质量, r 为光源到星体中心的距离, G 为引力常数, c 为光速。这是一个广义相对论效应。验证广义相对论的引力红移实验, 依据的就是这一效应。1868 年以来, 天文学家陆续发现恒星和星系发出的光有红移现象。1929 年哈勃指出, 河外星系的红移量 z 与这些星系离我们的距离成正比, 即哈勃定律。河外星系的红移一般是多普勒红移, 红移量越大, 表明光源远离我们的速度越大。所以, 哈勃定律表明, 所有的河外星系都在远离我们, 其退行速度 v 与离我们的距离 D 成正比 ($v = HD$, H 为哈勃常数)。

引力红移在地面实验室也测到了。1960 年在哈佛大学曾利用 20 米高的楼做了这一实验。在楼底安置一个 γ 射线源, 在楼顶安装接收器, 由于 γ 射线的吸收过程严格地和频率有关, 所以可以测出 γ 射线由楼底到达楼顶上时频率的改变, 广义相对论预言这一高度引起的引力红移只有 10^{15} 分之二, 但实验还是成功了, 准确度达到了 1%。1976 年还做了利用火箭把原子钟带到 10^4 千米高空来测定引力的时间效应的实验。在这一高度的钟比地面的钟要快 10^{10} 分之 4.5。实验结果和这一理论相符, 误差小于 0.01%。

光线的引力偏折在自然界中应能观察到, 例如, 从地球上观察某一发光星体, 当太阳移近光线时, 从

星体发的光将从太阳表面附近经过。太阳引力的作用将使光线发生偏折, 从而星体的视位置将偏离它的正常位置。由于星光比太阳光弱得多, 所以要观察这种星体的视位置偏离只可能在日全蚀时进行。事实上 1919 年日全蚀时, 天文学家确实观察到了这种偏离。之后还进行了多次这种观察。星体位置偏离大致都在 1.5 到 2.0 秒弧度之间, 和广义相对论的理论预言值 1.75 秒弧度符合得相当好。

近年来关于光线偏折的更可靠的验证是利用了类星体发射的无线电波。进行这种观察, 当然要等到太阳、类星体和地球差不多在一条直线上的时候。可巧人们发现星体 3C279 每年 10 月 8 日都在这样的位置上。利用这样的时机测得的无线电波经过太阳表面附近时发生的偏折为 1.7 或者 1.8 秒弧度。

上述 3 个实验, 都已得到不同程度的验证。通过对太阳光谱的观测, 引力红移已在 5% 的精度范围内得到验证。然而, 由于太阳大气多普勒效应的影响, 观测精度很难再提高。目前, 科学家还观测到了天狼星伴星等其他恒星的引力红移效应, 但由于那些恒星距离我们过于遥远, 观测精度还不如太阳。从 1958 年开始, 人们利用穆斯堡尔效应在实验室中观测引力红移, 验证精度达 1%。不过, 需要指出的是, 引力红移的预言只用到等效原理, 与爱因斯坦场方程无关。所以, 它对广义相对论的支持比较有限。光线偏折实验是对广义相对论理论的强有力支持。牛顿理论也预言光线通过太阳附近会产生偏折, 但它预言的偏折角只有广义相对论预言值的一半。观测结果完全支持了广义相对论, 否定了牛顿理论。水星近日点的进动, 在更高的精度范围内支持了广义相对论。在广义相对论公布之前, 人们已知道, 由于岁差以及其他恒星摄动的影响, 水星近日点会产生进动。但是, 理论算出的值比观测值每百年要少 $43''$ 。广义相对论预言水星近日点每百年要有 $42.6''$ 的进动, 恰好补上了这一缺口。所以, 这一验证是广义相对论的又一重大胜利。

近年来, 出现了广义相对论的其他验证实验。其中比较著名的是雷达回波实验。由于太阳存在所造成的时空弯曲, 会使在太阳附近传播的雷达波产生延迟效应。1977 年美国发射水手 6 号和 7 号探测器, 对雷达回波进行了观测, 结果支持广义相对论。

1978 年美国科学家泰勒通过对脉冲双星 PSR1913+ 16 的观测, 发现这组双星的运转周期以

高温超导体的发展现状及应用

杨砚儒 刘莹莹

(天津职业大学基础课部 天津 300402)

所谓超导,是指一定温度、压力下,一些金属合金和化合物的电阻突然为零的性质。1911年初荷兰物理学家 H. Kamerlingh-Onnes 发现汞在 4.2K 附近出现零电阻,1911年2月至5月间他连续发表多篇论文,公布了两项重要发现:一是超导体电流越强,临界转变点越低。二是即使不是纯汞,电阻消失方式也和纯汞一样。人们一直寻求温度更高的超导体,因为低温下是很不实用的。最初人们把目标局限于金属及其合金材料,因而到1973年也仅找到 T_c 为 23.2K 的 NbGe。

科学的圣果固然诱人,但摘果的过程却是曲折的。从1911年到1985年超导温度只从 4.2K 提高到 23.2K,于是科学家对能否找到高温超导体也是有争议的,直到1986年4月,美国国际商用机器公司(IBM)设在瑞士的实验室报告,瑞士科学家柏诺

每年万分之一秒的速率减小。他通过计算指出,如果考虑双星运动的引力辐射,则辐射能的减少恰好导致双星运转周期以上述速率减小。这是一个表明引力波存在的虽然间接但却是定量的证据,也是对广义相对论的重要验证。

由于空间探测技术的发展,使人们对广义相对论的验证又取得了新的进展,1997年11月,在美国科罗拉多州埃斯特帕克举行的天文学会议上,两个天文学家小组宣布,他们所发现的证据证实了广义相对论的一个奇妙的预言。爱因斯坦曾表明,任何一个自转着的天体,由于它的转动,都会拖曳空间与时间。不过这种效应比较微弱,以致仅当空间与时间能靠近一个具有强大引力场的天体,如中子星或黑洞,才能被观测到。当有一颗恒星围绕致密天体运行时,天体的强大引力可以将物质从恒星上吸引出来,并使物质形成一个以天体为中心的不断扩展着的圆盘。当圆盘上的物质不断地向着天体移动

兰和缪勒首先发现 $La_{2-x}Ba_xCuO_4$ 在 30K 存在超导电性的可能性,跳出了科学家一直从过渡金属及其二元、三元化合物中寻找的圈圈,向氧化物方向进军,虽与超导传统观念相悖,却给了研究者重大启迪。

1987年,美国的朱经武和中科院物理所分别宣布发现 T_c 为 98K 及 110K 的 Y-Ba-Cu-O 超导体,使超导体研究摆脱了液氮,进入液氮(77K 以上),节省了大量研究资金,人们长期的梦想正一步步走向现实。1988年,人们曾发现无限层 Cu_2O_2 层超导体。1993年12月法国科学家拉盖称他们在 SrTiO 单晶上层层覆盖 Bi, Sr, Ca, Cu, O, 当 CuO_2 长到 8 层,获得了 T_c 为 250K 的超导体。

1993年,Patilin 和 Schilling 发现 Hg 系 $T_c=133.5K$ 的超导体,1997年4月张文兰等在低温物

时,物质会变热并辐射出 X 射线。如果撇开广义相对论,可以预言,以致密天体为中心向外看,则圆盘在所有方向均会保持相同的形状,但是框架拖曳改变了这一情景,它导致圆盘上物质运行的轨道围绕着天体的自转轴并以轴为中心发生脉动。由马萨诸塞理工学院崔伟领导的小组利用美国航空与航天局发射的罗西 X 射线同步辐射卫星对圆盘辐射出的 X 射线强度作了测量,通过观测若干围绕某些可能的黑洞旋转着的圆盘的运动情况而寻找到了这一效应。由意大利罗马天文台路易吉·斯特拉领导的另一小组,通过对 15 颗中子星的观测,也取得了相同的结果。两个小组的观测表明,圆盘辐射的 X 射线亮度的变化以某种方式暗示,每个圆盘确实在脉动着。脉动程度与预言相一致。不过上述两个小组的观测,还没有得到定量的结果。如果效应得到确认,那么它将是一个极其重要的发现。