

引力波及其检测

何 常

(南京标营 3 号干休所 210016)

从 1916 年爱因斯坦预言引力波的存在至今已 80 周年.虽然迄今还没有获得引力波的直接证据,但是 80 年来,预言已从怀疑到被普遍接受,并在此基础上进行了广泛的科学预测;近几年来,科学家创立各种新的检测方法,各发达国家还投入巨大财力,建造世界规模的引力波检测器网.那么,上述进展的理论和观察根据是什么?基本检测方法是哪些?探寻引力波的意义和前景又如何?本文概述其要.

一、引力波预言的提出和被人接受

爱因斯坦由他的广义相对论引力场方程直接得出引力场的扰动以有限速度传播.这里略去繁复的推导过程只引述其结果.他的引力场方程是:

$$R^{\mu\nu} - \frac{1}{2}g^{\mu\nu}R = -KR^{\mu\nu}$$

和
$$R^{\mu\nu} = -K(T^{\mu\nu} - \frac{1}{2}g^{\mu\nu}T)$$

上两式可取等价形式:

$$\square\gamma_{\mu\nu} = -2K_{\mu\nu}T$$

$$\square h_{\mu\nu} = 2K(T_{\mu\nu} - \frac{1}{2}\eta_{\mu\nu}T)$$

以上两方程说明, $\eta_{\mu\nu}$ 和 $T_{\mu\nu}$ 是同级的小量,因而诸 T 和 Γ 的乘积可略去不计.在这种近似下,有 $T_{;\nu}^{\mu\nu} = T_{;\nu}^{\mu\nu}$.但 $T_{;\nu}^{\mu\nu} = 0$,因而任何满足“ $\square h_{\mu\nu}$ ”式的 $\gamma_{\mu\nu}$ 必自动满足“坐标条件”式 $\tilde{\gamma}_{;\nu}^{\mu\nu} = 0$.在这种近似中,至少 $h_{\mu\nu}$ 和 $\gamma_{\mu\nu}$ 都满足在时空中的空区域里以速率 c 传播的波动方程:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \frac{1}{c} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) h_{\mu\nu} = 0$$

这就是说,引力场的扰动——引力波以光速 c 在真空中传播.

但是在当时,引力场方程导出的扰动是纯粹的“坐标波”(数学波)还是真正的引力波即曲率波,还是一个疑问.加以引力场的能量分布问题还困惑着人们,所以在随后的几十年里,理论工作者对此进行着激烈的争论:引力波确有其事,还仅仅是爱因斯坦理论中的一个失误?直到 50 年代后期,理论界探讨了与坐标选择无关的引力波定义,证明数学变换不能排除平面引力波的存在,而且在引力波作用下粒子可以从引力波获取能量而产生运动,这就使大多数物理学家确认引力波是携带能量的物理实在.

1957 年,马里兰大学的物理学家威倍尔创制出第一台棒检测器.他报告过几次被称为“引力波证据”的事件.接着, R. 韦斯在麻省理工学院开设了“引力波”的专题课;世界各地许多实验室也都制造了各种奥妙的棒检测器,为威倍尔的报告取证;以后又仿照迈克尔逊干涉仪利用光束制造出引力波检测器.可是他们都没有披露过有意义的证据.

这时,科学家按照爱因斯坦理论,认为两个互相绕轨道旋转的中子星应当在时空中产生波纹,并从系统中带走能量.由于能量消耗,两星体应加快转速而逐渐接近,最后旋转到一起.换言之,双星间的距离和旋转周期都要逐渐减小.1974 年,天文学家泰勒和哈尔斯用射电望远镜发现了一颗中子星,命名为 PSR1913+16.它的质量比太阳稍大,却被压缩成直径小于 10 公里的球.它是中子星的一种,叫脉冲星.它的磁场很强,随星体旋转.磁场使星体邻近的荷电粒子加速,产生发自磁场两极的辐射束.辐射束在星体周围旋转,照亮天空.它每秒旋转 16.9

次,规律性足以同原子钟匹敌.特别引人注意的是,它循着一条绕其伴星的轨道每8小时转一次.最高速度达每秒40万米,只比光速慢750倍.脉冲星到它的伴星的距离只有地球到太阳距离的百分之一.伴星的巨大质量使太空严重弯曲.这是观察广义相对论效应的理想条件.泰勒根据爱因斯坦的预言,经过长达18年的观测,终于发现:轨道确实以引力波形式损耗能量,它在系统中的周期逐渐衰减.测量结果与理论预言一致,误差小于0.5%.这是引力波微小效应的有力证据.他们因此获得1993年诺贝尔物理学奖.

二、关于引力波的波源和特性的理论预测

PSR1913+16发出的引力波很弱,远非当时的引力波检测器所能检测得到的.然而这一发现激励着物理学家去探寻宇宙中更为强大的引力波辐射,他们努力改进检测方法以便能够灵敏地直接检测到它们,使引力波的研究在中子星双星效应的基础上继续进行.

爱因斯坦在他的广义相对论里设想:太空的形状由它所包容的质量所造成,引力波以至引力是太空弯曲的表现形式.按照这一理论,像恒星那样的厚重物体,是要在它周围的太空中留下印痕的.不妨把它想象成与一个球在弹性织物上滚动,要在织物上留下压痕相似.行星和彗星被直接引向恒星,它们运行着的就是由恒星印刻出来的时空通道.

理论上认为,什么时候恒星受到碰撞而引起强烈扰动,什么时候就产生引力波.例如,中子的坍缩,黑洞的碰撞,超新星的爆炸等等,都是引力波的波源.在巨大的扰动中带引力能的波纹沿橡皮似的时空织物的各个方向朝外辐射.引力波是太空本身的扰动,说它在太空中传播,只是习惯,并不确切.

时空织物上扰动所传送的信息与电磁波谱所传送的信息有很大的差异.因为太空的可见光波、射电波或是红外光波,都是由个别原子和电子释放出来的,它们所表达的一般都是相关天体物体的物理条件:它的温度、运动速度和组成成分.当它们漫游宇宙的时候,都会接连不断

地被恒星、气体云等宇宙物质所吸收.然而引力波所传达的不是某种物体的物理条件,而是关于厚重天体物体即引力波源的总体运动信息.如中子星如何坍缩,黑洞如何运动,超新星如何爆炸,等等.根据广义相对论,由引力波源引发的时空“肿胀”以光速向外扩散,隆隆作响,达到地球之滨.它能不受干扰地通过恒星和气体云而不被吸收.

三、引力波望远镜——激光干涉仪检测器

这是最近几年发展起来的检测方法.像镶嵌在时空中的所有物体一样,当引力波到达地球时,地球也会受到它的影响而产生变形.不过引力波在实体上的效应比在空无所有的时空上的效应小.这是因为在实体中,把物质胶合在一起的电力和核力占有绝对的优势.根据爱因斯坦理论,引力波从它的源向外扩展时,强度会逐渐减弱.比如,遥远星系的两个黑洞碰撞所产生的引力波,若被地球上足够灵敏的一公里长的检测器检测到,检测器就应该产生小于 $1/10^{18}$ 米长的形变.这是原子核直径的千分之一.

现在,根据上述机理,许多国家的物理学家正致力于设计和制造其灵敏度足以检测到那么微小的时空颤动的检测器,通称引力波望远镜(下面将要提到,往往不是用它来“望”而是用它来“听”的).

引力波望远镜的基本作用像地震仪.只是这台“地震仪”是装配在时空织物中用来记录太空中的“地震”的.有些仪器设计成卡车大小的圆柱形棒,相当大的引力波经过时会发出铃铛声.另外一些仪器则包含一组重锤——悬挂着的质量.当引力波通过时,波峰和波谷对重锤之间的空间进行压缩和拉伸,重锤就会产生摆动.检测器网的作用很像测量员的标杆,可以用它来确定引力波源的位置.因为同一引力波到达分布于地球各不同地点的检测器的时间不同,仔细计算各地的时间差就可确定它的源头.

1991年,由美国加利福尼亚理工学院物理学家伏格特领导的研究组计划用5年左右的时间在美国遥遥相对的两地建造两座实验室,安装两台世界上最大的激光干涉仪.每台装置中

产生的激光沿 4 公里长的路线来回反射,然后在某一适当处所相干.其根据是足够强的引力波通过装置,会使激光所经过的那段距离产生微小的变化,距离的改变使光束相干.这项工程命名为激光引力波干涉仪(LIGO),耗资约 2 亿美元,计划到本世纪末将首次提供引力波存在的直接证据.这是又一种引力波望远镜.

在 LIGO 的推动下,德、英、法、意、日等国不甘落后,竞相建造 3 公里规模的激光干涉仪.干涉仪数量越多,相互间距离越大,测定引力波源位置的准确度越高.引力波干涉仪(望远镜)的建造使人类能够用与过去根本不同的观察方法去探索宇宙的奥秘.

四、从宇宙微波背景辐射中寻找引力波印记

这是最近发展起来的又一种检测方法.宇宙学认为,宇宙微波背景辐射相当于温度为 2.7K 的物体的理想辐射.它是来自宇宙创生时大爆炸火球的遗留辐射.大爆炸之初,宇宙异常炽热,不能形成普通的原子物质,荷正电的核和荷负电的电子在等离子体中保持分离状态.电磁辐射包括微波辐射只能与荷电粒子相互作用.微波辐射和等离子体的最后一次耦合大约在大爆炸之后 30 万年.我们现在看到的背景辐射就是耦合已经停止时宇宙间物质分布的反映.不过,耦合刚停止时,宇宙温度与太阳表面温度相同(约 6000K),极少数最后剩留的自由电子被原子核所俘获而成稳定原子,现在宇宙经过约 150 亿年的膨胀,辐射已经冷却了.

来自天空各部分的背景辐射的温度是相同的,精度优于千分之几.这就是说,在遥远的过去,宇宙是非常平滑和均匀的.然而今天的宇宙间物质分布很不均匀:它块集成星系、恒星和行星,甚至星系还聚集成星系团和超星系团.那末,从均匀的微波背景到不均匀的现状,究竟是怎样演变的呢?这样,宇宙学家才考虑到,初始的宇宙不会有理想的平滑和均匀,有些区域比另一些区域相对要密集一些,物质较多一些,它们的额外引力把其余物质拉向自己.这种初始的不规则性,叫密度微扰,后来又被引力所放大,形成我们现在所看到的宇宙结构.背景辐射

是 60 年代发现的,限于当时的技术条件,观察得不很精密.直到 1992 年,宇宙背景探测卫星(简称 COBE)在背景辐射中远距离寻找其不规则性,它的观测结果展示,其不规则性的大小几乎恰好是密度微扰引起的.

情况大致是:从各不同的方向观察微波背景温度,显现出细微的差别.来自高密度区的辐射,朝我们这个方向有较大的引力牵引,它消耗了能量,变得比邻近的较低密度区更冷,因此背景的冷斑表明是高于平均密度的区域,而热斑则表明是较低密度的区域.从现在的宇宙块集度倒过去计算,背景辐射中温度的不规则性或各向异性的大小约为 10 万分之一.由于微波背景温度在 3K 以下,预计在各点的偏离量只有几十微 K. COBE 的探测与预计接近.

80 年代中期,科学家首次提出:不规则性(各向异性)至少部分是引力波引起的.意大利的 R.法布里和 M.布洛克,美国的 L.阿保德和 M.瓦恩,莫斯科朗道理论物理研究所的 A.斯坦劳宾斯基做过此项研究.但是他们的工作当时被人看作只是为了猎奇. COBE 的观察结果改变了一切.在几个月中发表了大批文章,用现在的观点重新评价他们的工作,有的还把他们称作“觉醒科学家”.结论是: COBE 现在所看见的大概是引力波造成的.理由是,像一切波一样,引力波的波长越长,振荡就越慢,现在看到的引力波效应的波长已足够长,那末在微波辐射解耦比波通道变化快得多的 30 万年前,它的振荡就足够慢了,虽然引力波在继续延伸,然而留在微波背景上的冷斑和热斑的印记像化石一样铭刻在辐射上. COBE 所看到的大概就是这些印记.更多的引力波由于辐射的解耦而不再起这样的影响和作用.

综上所述,宇宙创生(暴涨)时的量子世界的不确定性,可容纳各种微小的变化,即量子涨落(时空波纹的距离用普朗克尺度—— 10^{-33} 厘米来度量),宇宙物质和引力本身都不能避免这种不确定性,于是两种结果都产生了:一种是宇宙物质的涨落展开成密度的不规则性(后来在引力的作用下生成星系和星系团);另一种是引

力场的涨落形成引力波。

虽然密度微扰和引力波对背景辐射可能都有影响,但怎么去判别我们所看到的是否起因于引力波?怎么能知道两者中哪个更为重要?现在已经搞清,区分的办法是考查在不同清晰度下各向异性模式上的差异.计算证明,引力波在各向异性图象(如 COBE 所画的)中应很少有良好的清晰度.这是因为宇宙膨胀使引力波振幅减小(波长越长振幅越小),波长足以在微波背景上以大尺度显示出来的波(约大于 1°),来不及作一次振荡,微波背景已经解耦,此后的宇宙膨胀不再能影响它们的振幅.而波长较短的波有足够的振荡时间;波长越短,振荡次数越多,振幅损失越大.所以小于视角 1° 时引力波效应显著减弱.另一方面,在引力影响下,密度的不规则性增大,因此产生大批有良好清晰度的图象.

COBE 所看到的背景辐射中的有些结构大概是引力波引起的.由于它的光束展开 7° ,视角大,不够灵敏,难以作出明确的区分.然而 COBE 的初步成功鼓励人们设计出更多的实验去有效地检测广阔角规模内的各向异性.现在,美、意、英各国都已独立地宣布温度不规则性的检测结果.其中有不少已具有对视角为 1° 左右的分辨能力.在这个范围内的引力波影响显著衰减.因此比较他们的观察结果之间的差别以及他们与 COBE 结果之间的差别,可以使物理学家把各向异性分解成两个独立的部分,搞清 COBE 的观察结果是否真正受到引力波的影响.

1994 年,由 R.克里丹顿领导的一个组开创了这项研究工作,随后又有别的科学家着手研究.他们从几个不同的角度考查指示信号,发现度分辨能力下的温度偏离量比预期的要小.他们的初步结果是:引力波出现了,但还不能排除出现这种模式的偶然性.大家认为,如果暴涨模型是一个没有产生很多引力波的模型,最后就将放弃这种模型;如果暴涨已经产生足够的引力波,那末他们在微波背景中确实实地找到引力波,只是迟早的问题.人们期待着他们进

一步的研究成果.

五、探测引力波的意义

如果 LIGO 和其他检测器能如期在本世纪末开始提供引力波存在的直接证据,那末 21 世纪之初,人类将发现一个新的天空——引力波天空.

随着科学技术的进步,人类对天空的认识进行过多次改变.天空曾经长期被设想成光滑、宁静、和谐的天国.“暮云收尽溢清寒,银汉无声转玉盘.”就是它的写照.到了 17 世纪初,伽利略把他创制的望远镜对准天空,发现宇宙显得比原来想象的要多样得多;太阳上有斑点,月球上有高山和深谷.后来用功能更高的望远镜观察,发现银河系原来只是散布在太空中众多星系中的一个,这些岛状星系正处在不可阻挡的时空膨胀之中.天文学家又把视线扩展到可见光谱之外,检测到额外的电磁“颜色”——射电波、红外波、X 射线等,人类的天空观念又作了一次改变.这时,宇宙展现的不是宁静而是疯狂的暴烈活动:类星体体积不比太阳大,却向天空喷吐出相当于万亿颗太阳的能量;中子星像陀螺一样在旋转;还有大量 X 射线放射气体覆盖着巨大的星系团.科学家预计,当我们能够用引力波激光干涉仪望远镜检测到自然界最可敬畏的天体事件——“天震”所产生的引力波时,就开始新一轮天空观念的再造.

引力波本质上不同于电磁波.科学家已经作出预测,经过地球附近的引力波被我们“感觉”到的大致是一种微妙的振动,我们可以听到它隆隆的轰鸣声,直到低沉的宇宙噪音.过去通过可见光波、射电波和 X 射线所观察的天空,好象无声电影,而引力波将在我们的宇宙感觉中加入声音和可触感.天空变成了有声电影.那时我们能够经过一定方式“听”到诸如黑洞的碰撞声,中子星双星的啁啾声,或者星体坍缩的飞鸣声.这将带来关于宇宙和太空的有根本性变化的新概念.再者,如果一旦从微波背景辐射中得到进一步的引力波证据,它就会告诉我们关于早期宇宙形成的基本过程.所以科学家认为,探寻引力波就是探寻相对论皇冠上的宝石.