

用电磁方法探测高频引力波

石东平 程正富

(重庆渝西学院物理系 重庆 402168)

一、高频引力波不能使用传统方法进行探测

根据广义相对论的预言,利用引力波的潮汐效应,可以对引力波进行探测。最早的引力波探测方法是共振质量法,其典型装置除韦伯棒(Weber Bar)外,还有 ALLEGRO(美国)、EXPLORER(意大利)等。它们的共同特点是将棒状或球状质量作为引力波的耦合天线,如果天线接收到了引力波信号,则天线上不同部分之间将发生伸缩效应,利用声电转换(比如压电效应)可以将机械振动转换成电信号,测量电信号就可以确认是否探测到了引力波信号;这一类引力波探测装置对引力波共振的频率一般为 $10^2 \sim 10^4$ Hz;为了降低噪声,整个系统必须处于低温环境(液氮,4.2K)。伴随高质量相干激光的发明,又出现了引力波的光学探测方法,但其实质仍然是质量共振原理,只不过是采用比较光程的方法来测量共振质量各部分间的伸缩量而已,比如 LIGO、VIRGO 和 LISA。这些传统的引力波探测器其工作频率范围仅仅在 $10^{-7} \sim 10^4$ Hz,在 100Hz 附近, LIGO 和 VIRGO 预期的灵敏度(度规扰动的无量纲振幅)是 $10^{-22} \sim 10^{-23}$ Hz。对于频率大于或远大于 10^4 Hz 的引力波,传统的质量共振探测法就不适用了。

高频引力波(特别是微波频段的高频引力波)可以利用电磁方法进行探测,这在理论上和实践上都是有意义的。其原因是:根据广义相对论理论的预言,引力波的传播速度与电磁波相同,均为 c ,因此引力波与电磁波可望实现良好的干涉效应,引力波电磁响应最理想的状态是电磁场与引力波的谐振。除普通的天体引力波源外,强电磁振荡系统、高能粒子束、高温等离子体和晶体阵列,它们都能产生高频引力波,理论上估计其频率可以达到 10^8 Hz 甚至更高,频率如此高的引力波是不能通过传统的方法进行探测的。根据精质暴胀模型 QIM(Quintessential Inflationary Models),1999 年 Giovannini 在《物理评论 D》发表文章预言, QIM 所对应的遗迹引力波的最大信号和峰值可能恰好处在 GHz 频段,而我国学者李芳昱等人的理论和数值计算表明,引力波电磁探测的最好响应频段恰好在 GHz 范围。相关技术比如高品质因数的超导谐振腔、压缩量子态、量子无损检测、超强激

光物理、高能实验室天体物理等的发展,为引力波的电磁探测提供了技术上的可能。

此外,2003 年我国学者黄超光等人在《理论物理通讯》上提出了一种探测引力波的新方法,该方法利用存储环中的荷电粒子(比如电子、正电子、质子、重离子等)的运动来探测引力波,通过改变磁场大小和粒子初始能量,带电粒子的角速度会连续改变,这种特性可用于对不同频率的引力波进行探测。

二、可能和潜在的高频引力波源

1. 强电磁谐振系统

我们知道,在弱场近似条件下,爱因斯坦场方程退化为波方程

$$h^\mu = \frac{16}{c^4} G T^\mu \quad (1)$$

方程(1)表明,随时间变化的强电磁系统有可能产生一个能够作为弱引力波源的非常大的能量动量张量(即 $T_{(em)}^\mu$)。Gertsenshtein 首次对电磁-引力的转换效率(包括相反的过程)作过实际计算。Weber 和 Hinds 利用广义相对论理论的哈密顿公式也作过类似的研究;Boccaletti 等人认为,引力波的电磁起源是来源于基于量子理论和经典广义相对论理论的哈密顿量。Logi 和 Mickelson 使用量子扰动技术在量子层面上解释了该过程,Chen 研究了谐振引力子-光子转换及其天体物理方面的应用;Portilla 和 Lapidra 在均匀和非均匀介质中研究过 Gertsenshtein 过程。然而,由于方程(1)中包含有一个极小因子 G/c^4 (10^{-43}),所以电磁-引力转换率是极其微小的。

关于高频引力波的“赫兹型”实验方案也有人提出,Grishchuk-Sazhin(G-S)讨论过利用环形腔中的电磁简正模产生高频引力驻波的方案,为了产生 $h = 10^{-33}$ 、 $g = 10$ m 的引力驻波,环形腔的体积必须要做到 10^4 m³,需要的功率至少是 10^8 W;Fargion 和 Tang 等人讨论了相类似的一个方案,前者提出利用在非耗散光纤中的光子聚焦来产生高频同步加速引力辐射,后者则建议采用复合谐振腔来产生引力驻波,这两种方案似乎对提高引力辐射效率和减小系统尺寸带来了新的可能。Pinto 和 Rotoil 通过仔细分

析强电磁脉冲与静态磁场的相互作用产生引力波的方案,预言了引力波的典型值是 $h \sim 10^{-33} \sim 10^{-38}$, $g \sim 1\text{m}$,但是它的要求达到了当前电磁参数的极限状态。因此,理论和现实仍然存在很大的差距。

2. 高能粒子的引力辐射

已经有很多学者(比如 Nikishov 等,Palazzi 等,Vinet 和 Chen)在经典和半经典理论上仔细研究了利用高能粒子产生引力辐射,这些引力波源包括线性高能粒子束、韧致辐射(例如斯坦福线性对撞机 SLC)和高能粒子存储环(例如费米环)。对于 SLC,在引力波区域预言的引力波典型参量为 $h \sim 10^{-39}$ 、 $g \sim 10^{23}\text{Hz}$ (频率依赖于高能正负电子束的自能和洛仑兹因子)。对于费米环,对应的引力波参数是 $h \sim 10^{-40}$ 、 $g \sim 10^4\text{Hz}$ (频率依赖于粒子在费米环中的旋转频率)。虽然非常大的洛仑兹因子(高能粒子具有较大的洛仑兹因子)可以补偿辐射引力场的微弱性,但直到目前,似乎没有观察到高能粒子的引力辐射信号。

3. 太阳等离子体

温伯格(Weinberg)在《引力论和宇宙论》中讨论过等离子体产生的高频引力辐射,Caltrov 等人也对此作过讨论。他们发现,等离子体的高能量和高密度是关键条件。温伯格计算过在太阳核子中的等离子体通过库仑碰撞产生的引力辐射,计算时采用的主要参数是:太阳的总辐射功率 $P \sim 10^8\text{W}$ 、在地球表面的随机能流密度 $u \sim 4 \times 10^{-19}\text{W cm}^{-2}$,计算得到引力波的频率为 $g \sim 10^{15}\text{Hz}$,到达地球表面的无量纲振幅 $h \sim 10^{-39}$ 。这一频率虽然比天体物理中的引力波频率要高得多,但振幅却要低出许多量级。

4. 精质暴胀模型(QM)中的高频遗迹引力波

近些年来,QM 成为人们关注的热点之一,该模型一个重要的预言是,遗迹引力波的最大信号和峰值区可能恰好位于 GHz 范围,对应的能量密度几乎比传统暴胀模型高出八个数量级,在地球表面,遗迹引力波的无量纲振幅可望达到 10^{-30} ,这比强电磁系统预言的高频引力波要高出 3~5 个数量级,因此,它为在 GHz 频段探测引力波提供了新的希望。遗迹引力波的探测对于探索宇宙的起源和演化非常重要。

三、高频引力波的电磁响应

已经有很多人对引力波的电磁响应作过研究,这些工作计有:在静态电磁场中的引力-电磁转换、引力波与电磁流的相互作用、对引力波的腔经典电动力学响应和腔量子电动力学响应、引力波电磁探

测的 TT 和费米坐标、共振光子-引力子转换、引力波电磁探测中的 Berry 相、高频光子流对引力波的电磁响应等,这里我们将讨论三种典型的探测方法。

1. 使用强静磁(电)场探测引力波

该效应可以由弯曲时空的 Maxwell 方程来描述,在 MKSA 单位制中,它们是

$$\frac{1}{\sqrt{-g}} \frac{\partial}{\partial x^\nu} (\sqrt{-g} g^{\mu\nu} g_{\alpha\beta} F^{\alpha\beta}) = \mu_0 J^\mu, \quad (2)$$

$$F_{\mu\nu} + F_{\nu\mu} + F_{\mu\mu} = 0.$$

这里的 F 是电磁场张量。在静态磁场中因平面引力波而产生的平均扰动电磁能流为

$$u_{em} = \frac{1}{\mu_0 c} (hBLg)^2 \quad (3)$$

这里的 L 是相互作用的尺度, $u_{em} \sim L^2$ 。由于引力波与电磁波具有相同的传播速度,所以它们可以在传播方向上产生良好的谐振效应。然而,由于引力波与电磁场的相互作用非常微弱(意大利物理学家 Sabbata 在上一世纪 70 年代作过严格的证明),即使在非现实的极端条件下, u_{em} 仍然非常小。例如,为了在相互作用的范围内产生 $u_{em} / h_g = 1\text{s}^{-1}$ 的扰动光子流(即在观测面内,每秒有一个因引力波与静态磁场作用而产生的光子),从方程(3),我们有

$$L = \frac{1}{hB} \sqrt{\frac{\mu_0 c h}{g}} = \begin{cases} 100\text{km} (\text{对应于引力波参数取 } h = 10^{-29}, \\ g/2 = 10^9\text{Hz}, \text{静态磁场取 } B = 10\text{T}), \\ 1\text{km} (\text{对应于引力波参数取 } h = 10^{-22}, \\ g/2 = 10^3\text{Hz}, \text{静态磁场取 } B = 10\text{T}) \end{cases} \quad (4)$$

这里的 h 是普朗克常数。很明显,当前的技术不可能在如此长的距离内产生 $B = 10\text{T}$ 的强磁场,此外,对于 $v_g = 10^3\text{Hz}$ 的引力波,其波长为 $g \sim 10^5\text{m}$,由于 $g \gg L$,在这种情况下能否观察到信号光子也是值得怀疑的。但是,对于一些天体物理过程,由于大范围的强电磁场和强引力场往往同时出现,因此可望引起可观察的效应。

2. 引力波的腔电动力学响应

先后有 Caves、Grishchuk、Braginsky、Pegoraro 和 Gerlach 等人对引力波的腔经典电动力学响应和腔量子电动力学响应作过研究。腔电动力学响应的一个显著特性是,在谐振条件下,超导腔的高品质因数可以部分补偿引力波与电磁场相互作用的微弱性。

为了获得对引力波的谐振响应,腔的尺度至少应与引力波的波长处于同一量级,但对于波长 $\lambda_g = 100\text{m}$ 或更长的引力波,这显然是不现实的;但腔的尺寸又不能太小,否则不能贮存足够多的电磁能量用以产生可供观察的扰动效应,预计超导谐振腔比较理想的尺度是米的量级。

在谐振状态下,量子无破损层次上的显示条件可以表为

$$\frac{(\hbar Q)^2 B^2 V}{\mu_0 \hbar e} \geq 1 \quad (5)$$

一般说来,要满足这个条件对实验物理学家是一个巨大的挑战。但与(4)式比较,它又缩小了理论与现实的差距,例如,假如我们想要探测 $\hbar = 10^{-30}$ 、 $\omega = 10^9 \text{Hz}$ 的引力波(这是 QM 所预言的引力波典型量级),则需要的参量为:体积 $V = 10\text{m}^3$,品质因数 $Q = 10^{13}$,静态磁场 $B = 30\text{T}$,而对应的信号积累时间为 $Q/\omega = 10^4 \text{s}$ 。如此看来,提高品质因数和使用压缩量子态可能是一个有希望的方向:因为提高品质因数可使实验对其他参数的要求进一步地放宽;使用压缩量子态可以减小相应的信号积累时间。

3. 高频电磁波束对引力波的电磁响应

对于通过一静态电磁场的强电磁波束(高频光子流)对引力波的电磁响应,其经典图像即弯曲时空中引力波对电磁场的一阶扰动(虽然还存在二阶及高阶扰动,但其数量级极小),而对应的量子图像则是引力子(引力波)与光子(强电磁波束)在背景虚光子(静态电磁场)或虚引力子作“催化剂”的情况下的相互作用,“催化剂”能够极大地增加光子和引力子相互作用截面,换句话说,相互作用有效地改变了焦点区域光子的物理行为(比如传播方向、分布状态、极化和位相等)。重庆大学李芳昱和中山大学唐孟希等人的工作表明(《物理评论 D》,2000、2003),在一些特殊的相干谐振条件和边界条件下,将可能产生可供观测的效应。例如,由引力波引起的电磁扰动包含有与背景电磁场传播方向相垂直的扰动光子流 PPF(Perturbative Photon Fluxes),在焦点区域,扰动光子流与背景电磁场相比,有不同的分布、极化状态和位相,这种不同于背景电磁场的特性,完全是由于引力波的作用造成的,因此它对于显示极弱引力波信号是极为有益的。

图 1 为高频引力波电磁响应的一个具体模型。取 z 轴正向为高频引力波的传播方向,同时 z 轴也

是高斯束的对称轴(高斯束的电分量沿 x 轴),静态磁场沿 y 轴。可以计算出,背景电磁场在 x 方向没有能流(即无光子传播),但是,在静态磁场中,高频引力波与高斯束相互作用后,会在 x 轴方向产生扰动光子流,该扰动光子流不但与背景电磁场的特性有区别,而且传播方向明显不同,因而是可以从背景电磁场中区分出来的。如果在实验中测量到了该扰动光子流,就相当于探测到了引力波。

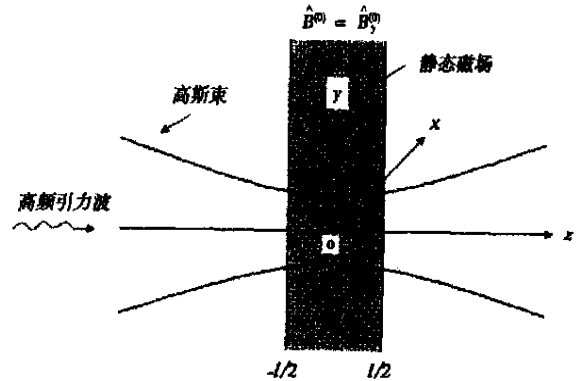


图 1 静态磁场中高斯束对高频引力波的电磁响应

李芳昱等人使用典型的实验室数据,对高频引力波产生的扰动光子流作过计算。背景静态磁场选为 $B = 10\text{T}$ (它被局限于 0.1m 的范围内);高斯束功率选为 $P_{\text{em}} = 10^5 \text{W}$;高频引力波的频率范围为 $10^9 \sim 10^{11} \text{Hz}$ 。假设引力波的无量纲振幅为 10^{-30} ,则在 10^{-2}m^2 观测面内流过的扰动光子流为 $10^4 \sim 10^2 \text{s}^{-1}$ 。不过,要真正用实验来检测该光子流,可能还有许多具体的细节问题需要解决。虽然如此,但该方案已经具有很强的现实性了,因为所需的参数目前在实验室都可以实现。

对于高频引力波的探测,高品质因数 Q 的超导微波腔和静态电磁场中的高能光子流可能是有希望的方案。对于前者,提高 Q 值和使用压缩量子态,对于后者,增大背景静态电磁场的强度和产生合适的谐振状态,将是进一步改善高频引力波电磁响应的可能途径。

