

单泡声致发光过程的等离子体描述*

徐 宁

(中国科学院物理研究所 北京 100080)

摘 要 对单泡声致发光过程采用等离子体描述,考虑了各种等离子体输运过程,假设了声致发光的韧致辐射机制,数值模拟的结果与实验很好地吻合,有力地支持了声致发光的热韧致辐射的解释.预言了声致发光中可能出现的极端电现象,对各物理量时空剖面的分析表明,强电场的出现对可能产生的 Rayleigh-Taylor 不稳定性有制约作用,这可能是声致发光约 10^{12} 能量汇集的原因之一.

关键词 声致发光,韧致辐射,等离子体,电离,复合

A PLASMA DESCRIPTION OF SINGLE BUBBLE SONOLUMINESCENCE

XU Ning

(Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract A plasma description which takes into account plasma transport processes is applied to simulate single bubble sonoluminescence. Bremsstrahlung is assumed to be the mechanism of sonoluminescence. The numerical calculation agree well with experiments, which strongly supports the thermal bremsstrahlung explanation. Some extreme electrostatic phenomena are also predicted. The strong electric field may confine the Rayleigh-Taylor instability, which may be a key reason for the 10^{12} order energy convergence in sonoluminescence.

Key words sonoluminescence, bremsstrahlung, plasma, ionization, recombination

声致发光是束缚在水中的气泡在周期性的超声场驱动下脉动发光的现象^[1].声致发光现象的最初发现可追溯到 20 世纪 30 年代,并由此产生了声化学.1990 年,单泡声致发光的获得^[2]大大刺激了物理、化学界对这种奇异现象的研究,使其成为目前物理学界热门课题之一.声致发光吸引人之处在于它所表现出的一些惊人和特殊的性质,以及摆在研究人员面前许多的谜团.由于实验条件的限制,至今无法直接探测到发光气泡内部经历的过程,所有的解释都停留在假设的阶段.实验观测到的声致发光过程有如下主要的现象^[1]:(1) 10^{11} 以上的能量聚集度;(2) 皮秒级的闪光;(3) 闪光与超声场高度同步;(4) 对惰性气体的依赖;(5) 对实验控制参量(声压振幅、频率、水温、气体溶解度等)的依赖;(6) 发光过程伴随声波发射;等等.实验测得的单泡声致发光光谱是类似于黑体辐射谱低能尾部的连续谱,无特征线谱出现,由于水窗的限制,只能得到可见光波段的光谱,这无疑大大限制了对声致发光之谜的揭示,也给

了各种理论解释同时生存的条件.

既然声致发光呈现的光谱与黑体谱极其接近,为什么不把它简单地归于黑体辐射呢?产生声致发光的气泡半径只有微米量级,发光时的气泡半径被压缩至仅不到 $1\ \mu\text{m}$,如此小的空间区域若要形成黑体,需要的物质密度非常巨大;气泡若产生黑体辐射难以形成脉宽仅仅几十到几百皮秒的光发射;近来,人们对声致发光脉宽的测量^[3]得到了脉宽与光的波长无关的结论,而黑体辐射的光脉冲应该有明显的波长依赖性,红光的脉宽应大于紫光.由此可见,声致发光不是简单的黑体辐射.对声致发光的理论解释有多种:热辐射(激波导致的热辐射^[4,5]、准绝热压缩导致的热辐射^[6])、碰撞导致的辐射^[7]、真空辐射^[8],等等.目前的解释多倾向于把单泡声致发光归于稠密冷等离子体的热辐射.

* 国家自然科学基金资助项目

1999-09-27 收到初稿,1999-11-15 修回

超声场作用下的空化气泡的运动是非线性的,对其过程的研究最有效和直观的方法只能是数值模拟,无论是哪一种理论模型,必然需要了解气泡内气体所经历的过程.早期的理论模型回避了气泡内部气体运动的时空演化,将气泡中的气体当成绝热、统一的整体,虽然得到了一些与实验相近的结论,但过于粗糙,且难以令人信服. Wu 等用流体力学方程组对气泡中的气体运动进行了描述^[4],得到了激波的时空演化,从而使人们对声致发光的认识发生了改变.但是,他们没有计及一些可能会导致计算结果量级变化的耗散效应.此后的理论模拟工作大多在各种耗散效应上作文章^[6],得到的激波被大大削弱,甚至仅得到所谓的压缩波.无论激波是否出现,气泡中的气体在各种计算中总还是达到大于几个电子伏的温度,如果认为发光是缘于这种温度下的稠密等离子体,那么对气泡中可能产生的等离子体的研究就应该是必须的了.

Moss 等较早地考虑了气泡中气体的电离^[5],但是采用的是一种经验的描述,电离被看作局域平衡的过程.由于气泡的运动是快速变化的,气体离化的正确描述应该采用同时考虑电离与复合的速率方程.我们对声致发光的气泡中的气体采用了细致的等离子体多流体描述,气体间的非弹性碰撞过程考虑了电子碰撞电离、三体复合和辐射复合,用合理的速率方程代替了热平衡的经验公式,对电离和复合进行细致的计算,得到了气泡中等离子体产生和湮灭的时空演化过程^[9].计算同样得到了激波的发射和传播图像,但由于电离本身就是一种耗散效应,使得激波的强度被大大削弱,计算所得到的温度和假设等离子体韧致辐射而形成的光脉冲强度都比简单的中性流体描述的结果要弱.

计算得到的气泡中的等离子体存在比较大的空间梯度,等离子体在这种梯度的驱动下必然应该形成电子和离子的扩散,从而形成双极电场.无论激波是否会出现,气泡中应该会形成双极电场的时空分布.在一定的参数条件下(如比较大的驱动声压),气泡中应该会有激波产生.由于电子和离子质量的巨大差异,加上激波所加强的各物理量的空间梯度,在激波面附近,电荷会强烈分离,气体在声场压缩下会形成类似液态或固态的状态,可以想象,在跨激波面的区域内会有很强的电现象出现.对气体中各成分速度分离的计算^[10]验证了这种推测:由于等离子体密度的空间差异,电荷在气泡内重新分布,在整个气

泡内形成双极电场的空间分布,由于气泡的快速运动,这种电场无法像在一般等离子体中的双极电场一样稳定下来,而是处在不断的变化中,这表现在强电流的始终存在.由于假设了气泡的球对称性,这种时空变化的强电场和电流无法激发磁场,而仅仅只能视为一种静电过程.我们的计算得到了最大约 2×10^{10} V/m 的强电场,这个场值已逼近了目前所说的强场的下限,这无疑是个惊人的结果.激波前后气体密度的差异会导致 Rayleigh-Taylor 不稳定性的出现,激波面上出现的强电场会不会对这种不稳定性起约束作用,从而对激波的球形会聚起稳定作用呢?简单的分析发现,强电场会对偏离球面的电子起约束作用,使其回到球面,由于电子很轻,非球面的扰动应该主要来自于电子,而这种对电子的约束无疑对激波保持球形会聚起到重要的作用.这或许也是声致发光约 10^{12} 能量汇聚的重要原因之一.

一个模型是否有效需要看它能否解释某些实验观测到的现象.我们的等离子体描述对声致发光光谱的模拟说明了它的有效性,并有力地支持了声致发光的韧致辐射机制的解释.计算得到的光谱与实验很好地吻合,成功地用数值再现了声致发光对气体成分的依赖:(1)纯氮气几乎不发光,而纯氩气发光很强;(2)惰性气体声致发光的光谱从氦到氩,紫外成分逐渐降低,特别是氩的谱在 300nm 波长附近有最大值.所有这些都归于各种气体分子或原子的绝热指数、质量和电离能的差异.在这之前尚没有模型对惰性气体光谱的差异和表现的趋势作出解释.等离子体模型对这些现象的成功解释有力地验证了它的可行性.

参 考 文 献

- [1] Barber B P *et al.* Phys. Rep., 1997, 281 : 65 — 143
- [2] Gaitan D F, Crum L A. J. Acoust. Soc. Am. Suppl., 1990, 87 : S141
- [3] Hiller R A *et al.* Phys. Rev. Lett., 1998, 80 : 1090 — 1093 ; Gompf B *et al.* Phys. Rev. Lett., 1997, 79 : 1405 — 1408
- [4] Wu C C, Robert P H. Phys. Rev. Lett., 1993, 70 : 3424 — 3427
- [5] Moss W C *et al.* Phys. Fluids, 1994, 6 : 2979 — 2985 ; Moss W C *et al.* Science, 1997, 297 : 1398 — 1401
- [6] Vuong V Q, Szeri A J. Phys. Fluids, 1996, 8 : 2354 — 2364
- [7] Fromhold L, Atchley A A. Phys. Rev. Lett., 1994, 73 : 2883 — 2886
- [8] Eberlein C. Phys. Rev. Lett., 1996, 76 : 3842 — 3845
- [9] XU Ning, WANG Long, HU Xr Wei. Phys. Rev. E, 1998, 57 : 1615 — 1620
- [10] XU Ning, WANG Long, HU Xr Wei. Phys. Rev. Lett., 1999, 83 : 2441 — 2444