

声致发光气泡中原子碰撞发光机制

安 宇, 谢崇国

(清华大学物理系, 100084)

摘 要: 文章导出一种由两个中性的惰性气体原子之间的碰撞引起的电四极辐射几率。对于热平衡的惰性气体系统, 推导出由碰撞引起的总辐射能量的公式(单位体积, 在给定波长的每单位波长)。考虑到气体的吸收和周围环境的折射, 用此公式拟合纯氙和纯氪的单气泡声致发光的实验光谱, 拟合温度大约为 5,000K, 结果令人满意。

关键词: 声致发光; 光谱; 惰性气体

中图分类号: O426.3 文献标识码: A

Collision induced radiation in sonoluminescing bubble

AN Yu, XIE Chong-guo

(Physics Department of Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: We deduce a probability of the electric quadrupole emission of a photon induced by collision between two neutral atoms of inert gases. For heat equilibrium system of inert gas, we deduce the formula of the collision-induced total radiation power per unit volume, per unit wavelength at the given wavelength. Considering the absorption of the gas and refraction of surrounding water, the formula apply to fit the experimental spectra of sonoluminescent pure xenon and pure krypton bubbles, the fits are shown to be quite well correspond to temperature about 5,000K. The good agreement obtained demonstrate the new light-emitting mechanism of sonoluminescence of xenon and krypton bubble.

Key words: sonoluminescence; spectrum

1 引 言

单气泡声致发光的现象(SBSL)^[1,2]里有许多有趣的问题, 如何解释发光的机理是其中最重要的研究课题。成功的简单模型^[3]认为辐射有 3 个部分: (1) 电子-离子和(2) 电子-中性原子的韧致辐射, 以及(3) 电子-离子复合辐射。该模型得到的数值计算的结果与实验中观察到的光脉冲宽度符合得很好, 计算得到的最大温度只在 20,000K~30,000K 的很窄的范围内变化。然而, 这个模型对另一些观察到的纯氙气泡的光谱符合得不好。近来, 有人系统地调查了用黑体辐射光谱拟合实验光谱的情况, 结果显示氙和氪还混合有 2% 氙的氮气或者氧气时通常符合得好, 但是对于纯粹的氙几乎不符合。按化学反应调节理论^[4]混合有 1% 或 2% 氙的氮气或者氧气气泡, 最终只留有纯粹的氙, 光谱应与开始就是纯粹的氙气泡一致, 不知为什么光谱特征有差异(一致的地方是都在 300nm 附近有最大值)。拟合光谱得到的最佳温度落在 7,500K~28,000K 的范围内, 并

且氙的温度高, 氪的温度相对地要低。

在本文中, 我们将说明假设在纯粹的氙气泡中温度的确低, 则气泡内电离度太低不能产生韧致辐射, 此时由碰撞引起的电四极辐射是最有可能的辐射机制。在本文中使用自然单位, $\hbar = 1$, $c = 1$ 。

2 理论公式

偶极辐射在两个全同粒子碰撞时为零, 那么对发光贡献最主要的是电四极(E2)辐射。可以这样简单地描述两个全同中性原子碰撞和辐射的过程, 假定原子内电子的负电荷中心稍微与他们的核心分离, 分别在碰撞分离的瞬间产生 E2 辐射。E2 辐射几率是^[5]:

$$\omega_{2,m}^{(e)} = \frac{\omega^5}{15} e^2 | (Q_{2-m}^{(e)})_{f_i} |^2 \quad (1)$$

为了计算(1), 必须知道这两个原子初态和末态的波函数。在两个中性原子碰撞的过程中, 原子内电子的实际波函数是非常复杂的。为了简单起见, 假设电子在原子同另一个原子碰撞时, 可以获得相对于原子核的动量。假设密度为 n_0 的气体将遵从麦克斯韦速度分布率, 并且认为两个相距很远的原子相互作用能量是 $-\alpha/r^6$, 我们可以求出在 $\lambda \sim \lambda + d\lambda$

收稿日期: 2000-01-15; 修回日期: 2000-10-11

作者简介: 安宇(1962-), 男, 吉林人, 副教授, 从事教学和声致发光的研究工作。

范围内,单位波长单位气体体积的辐射功率为:

$$\epsilon_{\lambda} = c \left[1 - \frac{b}{V} \right] n_0 \frac{\alpha^{2/5}}{(kT)^{3/2}} \frac{e^{-\frac{2\pi}{kT\lambda}}}{\lambda^{11.3}} \times \left[3U \left(\frac{5}{2}, \frac{43}{10}, \frac{2\pi}{kT\lambda} \right) + U \left(\frac{3}{2}, \frac{33}{10}, \frac{2\pi}{kT\lambda} \right) \right] \quad (2)$$

$$c = 1.2755 \times 10^9 \tau (Zem_e)^2 M^{1/5} r_0^6$$

这里 $U(a, b, x)$ 是超几何函数。

声致发光气泡内部的数值模拟表明,即使有冲击波,使气泡中心的温度很高,但只局限于很小的区域内,而且高温持续的时间也很短,因此气泡中心的辐射可能不起主要作用。出于相同的理由,可以认为气泡内的温度在空间上均匀是一种很好的近似。在均匀的假设条件下,考虑气体既是吸收体又是发射体及水的折射效应,各单位波长发出的功率是:

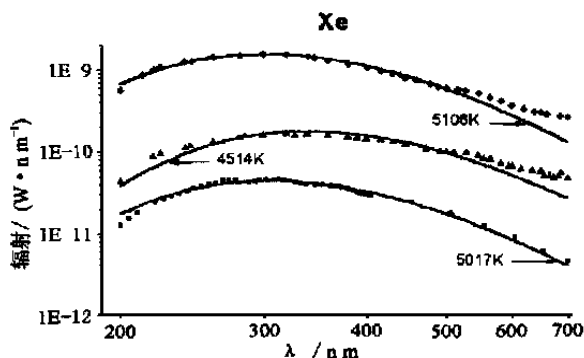
$$P_{\lambda} = P_{\lambda}^b \pi R^2 f(kR) \quad (3)$$

式中 P_{λ}^b 是各单位波长黑体辐射, $f(kR)$ 是与式(2)有关的公式, R 是气泡的半径。

3 计算结果

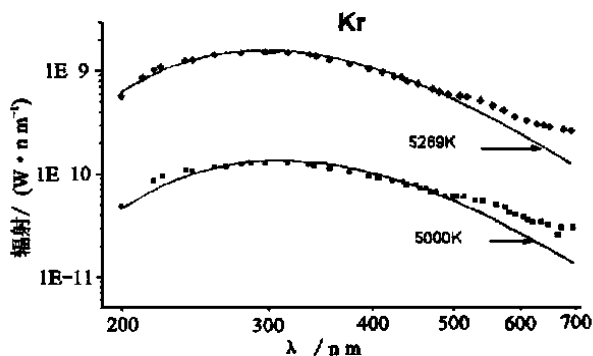
对于纯粹的氙或者氪气泡,取典型的参数,周围环境的压力、温度和半径分别为 1atm, 300K 和 4.5 μ m; M , m_e , e^2 和 r_0 可以从标准手册中查到;对于氙, α 可以从氙和氪的数据外推得到。 τ 没有真正地确定,此外,在我们的推导中忽略了核的束缚作用,并不是所有的电子都能通过碰撞得到动量(也许只有那些价电子能部分获得动量),因此不得不将 $g = \tau Z^2(1 - b/V)$ 整体作为一个可变参数。用方程式(3)拟合纯氙气泡的光谱,拟合曲线在图 1 中用实线表示,图中数据是将参考文献[8]上的图数据化得到的,可以看出大体上吻合。拟合显示纯氙气泡的温度大约为 5000K,比经常引用的温度要低得多,但从另一角度看该温度不是不合理的。首先,在 5000K 的温度下,只有很少的电子电离,不应是韧致辐射,碰撞引起的辐射应该是主要的;其次,有两个过程使气泡冷却,即:电离^[6]和辐射^[7],它防止温度进一步增加。我们应该强调,黑体辐射光谱和韧致辐射模型都不能很好的拟合这些光谱。

从方程式(3)得到的拟合曲线(参看图 1 的实线),我们又发现对于水中分压为 3mm 的氙气泡,理论和实验的数据在 $\lambda > 500$ nm 有明显的差异。对于氪气泡,发现相同的情形(参看图 2 中的实线)。我们尚不清楚原因,可能还有其它发光效应未被考虑。另一方面,系统的偏差是在区域 $\lambda > 500$ nm,也许是因为在此区域,波长和气泡的尺寸在同一个量级,光



■: 24℃水,分压 150mm; ▲: 室温水,分压 3mm;
◆: 冰点水,分压 3mm; —: 方程(3)拟合曲线

图 1 对纯氙气泡的拟合光谱



■: 室温水,分压 3mm; ◆: 冰点水,分压 3mm;

图 2 对氪气泡的拟合光谱

的传输特性也许和我们通常的理解不太一样。

拟合的良好结果说明,本文中得出的新机理,即碰撞引起的电四极辐射,可以解释纯氙气泡和纯氪气泡的声致发光光谱。

这项工作得到应崇福教授的多方面支持,在这里表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] B.P. Barber and S. J. Putterman. Observation of synchronous picosecond sonoluminescence[J]. Nature, 1991, 352: 318-320.
- [2] D. Gaitan *et al.* Sonoluminescence and bubble dynamics for a single, stable, cavitation bubble[J]. J. Acoust. Soc. Am. 1992, 91: 3166-3183.
- [3] S. Hilgenfeldt, S. Grossmann & D. Lohse. A simple explanation of light emission in sonoluminescence[J]. Nature, 1999, 398: 402-405.
- [4] D. Louse *et al.* Sonoluminescence Air Bubbles Rectify Argon[J]. Phys. Rev. Lett. 1997, 78: 1359-1362.
- [5] L. D. Landau and E. M. Lifshitz, Quantum Electrodynamics[M], New York, Pergamon Press, 1982(2nd ed): 166-171.
- [6] An Yu and Zhou TieYing. 声致发光气泡内的气体热力学性质[J]. 声学学报, 2000, 25(2): 103-107.
- [7] Chen Weizhong, Wei Rongjue and Wang Benren. A non-adiabatic model of single bubble sonoluminescence[J]. ACTA, Phys. Sinica, 1996, 5: 620-629.
- [8] B. P. Barber, R. A. Hiller, R. L. Istedt, S. J. Putterman, K. R. Weninger. Defining the unknowns of sonoluminescence[J]. Phys. Rep. 1997, 281: 65-144.