

## 声致发光微气泡内稠密等离子体的暗示

尽管声致发光气泡的表观温度<sup>1)</sup>达到太阳的 2 倍,但气泡内接近 20% 的电离度仍然令人感到很大的疑惑.

自从 1933 年发现声致发光现象(即通过空化气泡把声能转化成光能)以来,在大约 60 年的时间里,它一直被认为是多气泡特有的现象.足够强的超声场能在液体中激发出很多微米量级的气泡,每个气泡膨胀后再收缩,导致塌陷并发出微弱的光,大量密集的发光微气泡形成微亮的云状.闪光是绝热压缩的结果<sup>2)</sup>,它使气泡内气体达到 5000K,这一温度足够分解分子和激发束缚态电子<sup>3)</sup>.

1990 年, Lawrence Crum 和 Felipe Gaitan 发现了声悬浮单气泡声致发光现象.声致发光单气泡可以存活数百万个声波周期,气泡每次压缩到最小时发出闪光.因为孤立的单个气泡有更高的对称性,所以它可以更有效地聚焦声波能量.光谱分析得到单气泡发光瞬间表观温度接近 20000K——数倍于太阳光球层的温度,这使它有可能成为实用的研究高能化学的试验台.

至于发光瞬间气泡内到底是什么样的状况,没有人能确定.有专家认为是稀薄电离的透明等离子体.在这种情形下,韧致辐射能解释气泡发光.其他人认为是稠密电离的等离子体,而且光学厚(不透明),所以是黑体.因为气泡发光光谱(反映内部状况的少有的线索之一)通常是连续谱,它既可以被普朗克黑体辐射曲线合理拟合,也可以被透明辐射体的韧致辐射曲线合理地拟合<sup>4)</sup>.所以,声致发光气泡究竟是稀薄的等离子体还是稠密的等离子体,一直含混不清.

Seth Putterman 领导的研究小组(UCLA)对声致发光气泡的构成进行了迄今为止最直接的探查,他们观察到气泡对激光脉冲的响应.他们发现,即使是相对“冷”的气泡,发光瞬间仍然是光学厚的,对此他们自己也无法完全解释.

Putterman 研究组采用缓慢的 38Hz 声波频率驱动气泡<sup>5)</sup>,此时气泡保持相对较大(压缩到最小时直径仍大于 100 $\mu\text{m}$ ),并且持续发光时间拉长到 1 $\mu\text{s}$ 左右.他们用的是磷酸中的氙气泡,这比水中的空气泡亮数千倍<sup>6)</sup>,这可以使研究者按声致发光的起始时

间准确地定时激光发射.这是构思漂亮的实验.

图 1 是 CCD 相机抓拍到的声致发光气泡.在激光脉冲照射之前,声致发光来自气泡中心亮的区域.激光脉冲照射过后 60ns,在右侧边缘接近激光脉冲入射点处有新的亮点出现.这暗示激光脉冲在穿越到左侧之前已经被吸收,而后再发光.右侧的亮点在大约 300ns 后仍然保持着.这说明气泡此时基本上是不透明的.尽管 UCLA 的研究者不能准确确定光子在气泡内的平均自由程,但可以肯定它小于气泡半径 85 $\mu\text{m}$ ,不然激光至少可以入射到气泡中心.若气泡吸收光子主要通过电子-离子相互作用——逆韧致辐射过程,在声致发光瞬间,可以确定气泡内的自由电子数密度必须至少是 10<sup>20</sup>/cm<sup>3</sup>.换句话说,气泡内接近 20% 的氙原子被电离了.

本栏目是经美国物理联合会(AIP)授权,与 *Physics Today* 合作的项目

- 1) 利用普朗克黑体辐射公式拟合光谱得到的温度.——译者注
- 2) 实际存在气泡内气体与周围液体之间的热交换,所以在气泡缓慢脉动时,内部温度与周围液体温度基本平衡.但是,当气泡压缩过程比较快时,热交换来不及平衡气泡内外的温度,使得气泡内气体的快速压缩过程接近绝热压缩.——译者注
- 3) 这里暗示多气泡发光是分子或原子、电子跃迁发光,这是过去流行的观点.最近的实验显示,在强超声激励下,在磷酸等液体中的多气泡发光光谱中,连续谱的贡献有时也很大,其表观温度可以达到 10000K 以上.——译者注
- 4) 因为水对紫外光有强烈吸收,声致发光的红外部分又太弱,观察到的气泡发光频段通常是在 200—800nm 之间,相对比较狭窄.只要调整拟合温度,黑体谱和透明的韧致辐射谱都能比较好地拟合这一段光谱.——译者注
- 5) 他们实际是用上下震动台摇晃装有磷酸的容器,容器转动使气泡固定在液体的对称轴线上.——译者注
- 6) 典型的单气泡声致发光现象是在除气的水中观察的.在 20—40kHz 频率的强超声波驱动下,微米量级的空气泡或惰性气体泡悬浮在声驻波的速度节点上脉动,并且稳定发光.由于有少量水蒸汽留在气泡内,气泡压缩时这些水蒸汽发生分解,吸收热量,影响气泡加热效率.而在浓磷酸等蒸汽压低的液体中,气泡内蒸汽量非常少,压缩加热效率高,再加上氙原子电离能相对其他惰性气体原子要小,因而容易电离,使气泡声致发光特别亮.——译者注

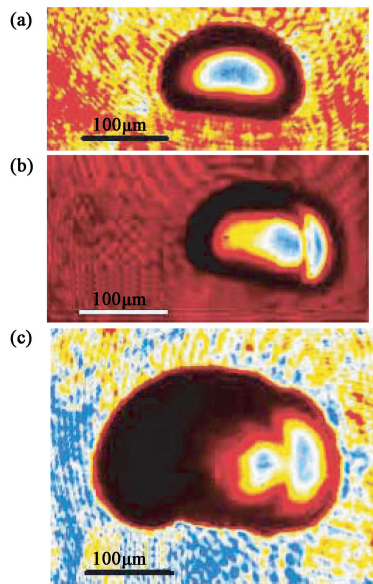


图1 声致发光单气泡在 10ns 激光脉冲(a)照射之前,(b)照射过后 60ns,以及(c)照射过后 360ns 的图片。(蓝色描述相对较亮区域;黑色描述相对较暗的区域,见《物理》网刊彩图)。下边两张图片中右侧亮点表示,从右侧照射过来的激光脉冲,在透射深入气泡之前已经被吸收

实验结果与 Kenneth Suslick 和 David Flannigan 在 2010 年所做的测量一致。通过分析声致发光氩气泡的谱线展宽,他们认为,在不同声强和频率驱动下,声致发光气泡内自由电荷密度可以有很大不同,电离的电子数密度大致可以在  $10^{17} - 10^{21} / \text{cm}^3$  范围。在最大声压驱动下<sup>7)</sup>,气泡内差不多所有氩原子都电离,有些原子甚至是双电子或三电子电离。然而这种气泡的表观温度估计只有 16000K 或 1.5eV。这个温度相当于氩原子电离能的 1/10,小于其第二电离能的 1/30。这个看起来相对“冷”的系统怎么会有这么多的电子电离呢?可能的一个解释是冲击波理论。大约 20 年前有人提出内爆冲击波在气泡中心汇聚,可能产生高电离的核心。电离核心的温度也许比表观温度高数个量级。根据流体力学的计算,Suslick 和 Flannigan 的系统几乎肯定是在冲击波产生的范围<sup>8)</sup>。令人惊讶的是,Putterman 小组测量到 20% 电离度的实验结果是通过相对弱的声强达到的。按 Putterman 的说法:“内爆速度只有声速的 1/10,所以我们这个系统没有高温核心。”如果这个判断没有问题,根据标准的统计力学模型——具体讲就是熟知的沙哈方程,按 10000K 温度峰值估算,气泡内应只有 1% 的电离度。在这么小的电荷密度下,光子的平均自由程应该比  $85\mu\text{m}$  大 1000 倍左右。

那么沙哈方程出了什么问题? Putterman 认为,首先是没有考虑邻近粒子的库仑相互作用。由于等离子体的电荷屏蔽效应,距离大于某个德拜长度  $\lambda_D$  的电荷之间,彼此感受不到电场。也就是说,电子电离时只需要从原子处跑出  $\lambda_D$  远就够了,不需要到达无限远处。由于  $\lambda_D$  是随自由电荷数的增加而变小,所以电离本身会促进更多电离(电离越多越容易)。Putterman 和他的合作者在 2011 年的论文中描述了这种反馈机理如何引发等离子体从稀薄到稠密的突然转变。事实上,UCLA 小组也许已经见证了他们所预言的相变。去年,他们探测到声致发光氩气泡的时间分辨光谱。把是否可以明显看到氩原子 823nm 谱线作为判断气泡发光时刻是光学厚还是光学薄的线索<sup>9)</sup>。根据这个判据,他们发现气泡在一次闪光持续瞬间(一个微秒左右)先是部分透明的(光学薄),然后变成光学厚(不透明的黑体),最后再变回到部分透明。目前,相变模型仍只是推测。有些等离子体物理学家怀疑, $\lambda_D$  是否可以小到足够引发正反馈机理,进而达到有意义的效果。即使库仑相互作用使稀薄等离子态变得不稳定这个理论是可信的,但使某个高电离的等离子态保持稳定的原因还是不清楚<sup>10)</sup>。而 Suslick 认为,尽管 UCLA 的实验用缓慢的频率驱动气泡脉动,其内部产生高温核心这一点还是可信的。

不管怎样,在一个长期依赖被动观察的研究领域,现在能用激光轻轻碰触声致发光气泡,探查它究竟是由什么构成的,是一项大有前途的技术突破。UCLA 小组的这一贡献是大家都看到的。

(清华大学物理系 安宇 编译自 Ashley G. Smart. *Physics Today*, 2012, (4): 18, 原文详见 <http://ptonline.aip.org>)

7) 通常驱动声压越大,气泡越亮。但单气泡声致发光有一个驱动声压上限值,超过这个上限时,气泡不能稳定脉动,观察不到单气泡声致发光。因此接近这个上限时稳定的单气泡最亮。——译者注

8) 这里提到的流体力学计算没有考虑气泡内气体热传导等能量损耗,所以关于冲击波的计算结果并不可靠。——译者注

9) 在光学厚(不透明)的情况下,内部光源发射的光在气泡内经过一段路程后,线谱特征消失,最后从表面射出黑体辐射。——译者注

10) 由于稀薄等离子态不稳定,系统总要继续电离。另一方面,系统不可能一直电离下去,总要在某个高电离的等离子态稳定下来,不然电离度不会只有 20% 左右。——译者注