



# 声空化物理研究和核发射实验的近期进展\*

应崇福

(中国科学院声学研究所 北京 100080)

**摘要** 简要概述了 20 世纪 20 年代起多泡声空化的发现、研究和应用. 随后重点介绍了 20 世纪 90 年代初实现的稳态单一气泡, 由于它的实现, 对声空化的实验研究和理论研究迅速取得进展, 特别是在对气泡内部的极端条件(高温、高压、高密度)以及对气泡内声致发光的机理研究方面. 同时还介绍了我国早在 20 世纪 60 年代实现的瞬态单一泡以及近期的一些实验结果. 文章最后提到 2002 年 3 月美国报道的声空化核辐射实验, 这个实验正在激发人们对声空化的更多关注.

**关键词** 声空化, 多泡, 稳态单泡, 瞬态单泡, 核发射

## RECENT DEVELOPMENTS IN THE STUDY OF ACOUSTIC CAVITATION AND RELATED EXPERIMENT ON NUCLEAR EMISSION

YING Chong-Fu

(Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract** The discovery, study and application of multiple-bubble acoustic cavitation since the 20's of the last century are first briefly reviewed. Attention then is drawn to the realization of a stable single bubble in the early 1990's, after which experimental and theoretical studies of acoustic cavitation progressed rapidly, including studies of the extreme conditions (high temperature, high pressure and high density) inside a cavitation bubble and the mechanism of its sonoluminescence. The much earlier observation of a transient single bubble in China in the 1960's is next described together with some recent results. Finally, a most recent (March 2002) experiment by Taleyarkhan R P *et al.* on nuclear emission by acoustic cavitation which has stirred wide attention is recounted.

**Key words** acoustic cavitation, multibubble, stable single bubble, transient single bubble, nuclear emission

### 1 引言

大群气泡会出现在船舶的尾流中, 也会出现在船舶的螺旋桨和水轮机上, 这些气泡常称空腔, 出现空腔的现象称为空化. 因此, 最早关注空化现象的是航海方面的人员. 早在 1894 年, 英国海军在现场试验新试制的高速鱼雷艇时, 发现船桨剧烈振动, 而这种振动是由于船桨受到侵蚀. 人们观察到螺旋桨上不断出现大群气泡, 于是猜测侵蚀起因于这些水中气泡. 这个问题困扰着当时的英国海军, 因为小补救无济于事, 船速愈高, 空化现象愈严重. 后来便邀请本国的名科学家瑞利勋爵来解决这个问题. 瑞利是多方位的科学研究者, 因发现了稀有气体氙气而获

得诺贝尔物理学奖(1904 年), 同时他被公认为是声学的创始人. 1917 年瑞利发表了一篇理论论文, 阐明高速水流中气泡剧烈闭合时会在空中产生极高的压强, 由此说明, 空化气泡是螺旋桨损伤的根源.

在同年, 法国科学家朗之万在进行超声探测潜艇的试验时, 在水槽中演示了强超声的产生, 演示中表明, 强超声会灼痛手和损伤槽中的小鱼. 当时在场的一位作为军事观察员的美国物理学家伍德对此留下了深刻印象. 十年后, 他和另一位美国退伍军人卢米斯, 在家里自费进行了大量的超声实验, 观察到许多意料不到的现象, 其中不少是在液体中出现的, 而

\* 国家自然科学基金(批准号: 19934001)资助项目  
2002-04-17 收到

这些出现又常伴随有空化的发现.现在的空化是由进入液体的超声所激发的,不是由液体的高速流动引起的,因此称为声空化(acoustic cavitation).

70多年来,声空化在超声学中占据很重要的位置,特别是声空化已应用到相当多的领域,例如超声清洗、超声乳化、超声促进化学反应、超声产生若干生物效应等.声空化的研究相应地得到发展<sup>[1]</sup>.足够强的超声在液体中通常产生成群的气泡,人们从实验中区分出两类气泡:稳态气泡和瞬态气泡,并观察到这两类气泡的转换.人们又观察到空化噪声、空化冲击波、空化发光、空化的空间结构、空化活度等诸多现象.对空化的物理、化学、生物等效应,人们在机理上提出了电荷说、Casimir效应说、热点说等等假设,并且比较肯定热点假说.在理论分析上,人们对含非挥发性气体和(或)蒸气的单一气泡,对它的生长和压缩过程,也进行了详细的计算.

由上可见,经过长期的研究,人们对声空化既有相当广泛的应用,又有一定的了解.但是应用和了解都不是很透彻的.例如,按热点论的解释,声空化的若干效应可以用气泡在剧烈闭合时泡内产生高温、高压来解释,但直到20世纪80年代,还只能初步推测泡内能达到的温度有多高.又例如,空化会发光,但直到20世纪80年代末,也不清楚这个光的性质和来源是什么.这主要因为气泡都是成群产生的,实验观察和理论分析都比较困难.多个气泡的生长和闭合并不同步,气泡与气泡间有相互作用,气泡和容器壁之间或者和容器内放置的固体之间也有相互作用,这些都使环境比较复杂.

20世纪90年代初,实现了在自由空间液体中产生单一气泡,这个实验为声空化的研究开拓了宽阔的道路.

## 2 稳态单一气泡

### 2.1 稳态单一气泡的产生

20世纪90年代初,美国科学家在实验室里设法产生了能单独停留在大体积水中的连续脉动的单一气泡<sup>[2]</sup>.这里的空化仍是声空化,因为气泡的连续脉动是由声波驱动的.实际上,这个气泡能在液体中稳定停留在一个位置,而不上浮消失或者萎缩消灭,也是靠同一声场的作用.这种单一气泡一般只有几个 $\mu\text{m}$ 的半径,它有一个特殊之处,即在适当条件下,会不停地闪光,在暗室可以肉眼看到.上面曾经提到,大群气泡的声空化也会成片发光,不过现在是

单一气泡连续闪光,现象比较生动,而且仔细观察会发现,这种闪光十分有规律,被称为像时钟那样精确.控制得好时,闪烁可以持续几个星期不停.

图1给出一个简单的产生稳态单一气泡的装置<sup>[3]</sup>.图中在一个玻璃或石英圆形的烧瓶里装满了除了气的水,烧瓶左外侧粘贴了一个压电片,受正弦波发生器的激励,在瓶内水中产生适当的超声驻波.在瓶中心的驻波声场波腹处,注入的小气泡会停留不离.这个声场又同时驱使气泡脉动,当声波的幅度够大时,脉动的气泡会发光.声波的幅度却不能太大,否则气泡会破裂.

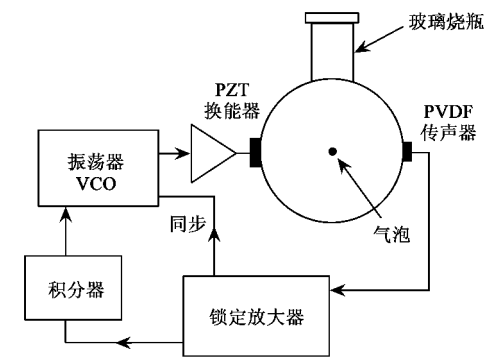


图1 产生稳态单一气泡的装置

### 2.2 稳态单一气泡的特性测量

单一气泡的产生,极大地促进了声空化的研究.人们一开始最注意的是它的闪光现象,这个现象取名为声致发光(sonoluminescence).不仅因为不停的准确闪光动人眼目,而且当想到这短促的闪光是由波长比光波长约 $10^5$ 倍的声波转换过来的,这个现象便更特殊.现在人们又有可能测量闪光的一些性质<sup>[3]</sup>.首先是要确定闪光和气泡脉动的相位关系.实验结果表明,闪光是在气泡急剧坍塌时出现的,气泡的脉动和声波的周期同步,十分有规律,因此闪光也十分有规律.人们又进一步测量了闪光的强度、闪光的光谱、闪光的脉冲宽度和脉冲形状等.这些光学参量显然是随气泡自身的一些参量而变化的,其中包括气泡的原始大小,驱动声波的频率和压强,水中的静压,气泡内气体的品种,气泡所处液体的品种,液体含气的浓度等.图2给出了室温下测得的含不同稀有气体气泡的光谱例子,这时一些其他条件是接近相同的<sup>[3]</sup>.再拿光脉冲的时间宽度来说,引用时间相关单光子测量技术,测出宽度约在几十到几百皮秒之间,可以说声空化所发射的光脉冲是相当短的.

对单一气泡的测量不限于它的声致发光.气泡自身的脉动情况也是测量重点之一,这时可用高速

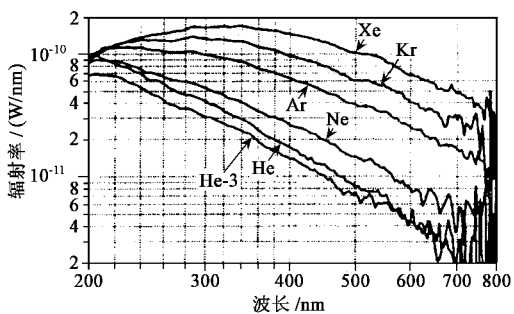


图2 室温下测得的含不同稀有气体气泡的光谱

照相机,也可用光学中的米氏散射方法,图3表示一个水中空气气泡的半径随时间的变化,在所表示的时间里,正弦驱动声波经历了拉伸和压缩的过程,如图中细线所示.实际上,要精确测量气泡压缩到最小半径时附近的变化还是一件正在努力完善的工作.除气泡自身的半径变化之外,气泡急剧坍塌时在水中发射的冲击波也是人们关注的重点,而这在单一气泡的情况下能够比较准确地进行测量.

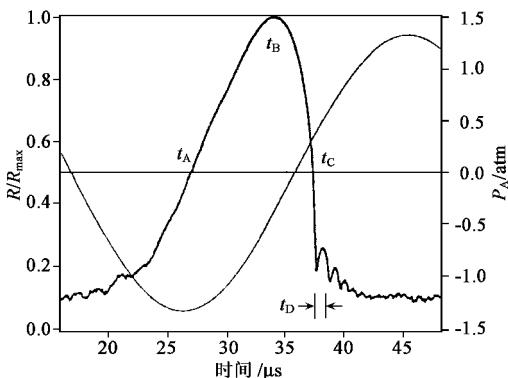


图3 测得的连续脉动单一气泡的半径随声波拉伸压缩的变化 (声压幅度是1.35大气压)

### 2.3 气泡内部情况的理论推测

有了多种测到的数据,显然会促进理论分析,例如,对某些实验现象作出解释,或者对下一步的工作作出某些预测.像上面图3所测出的稳态单一气泡的脉动过程,应当可以进行理论计算.实际上,这种计算远在几十年前,还在人们只能观察多泡空化的时代,已经有相当的发展,但只是在实验室内能够产生稳态单一气泡之后,理论和实验的相互验证才能实现,也确实得到很好符合的结果.

另一个理论上的重大问题是要探索声波发光的机理.近十年来这项工作一直得到相当的重视,并且有很迅速的发展.现已提出几种机理假设,包括发光起因于 Casimir 效应的假设,但逐渐重点集中在前面

提到的热点论,就是说,气泡在急剧压缩时,泡内气体受压升温,形成热点.这样的高温会导致泡内气体的离子化,在压缩的气泡内形成等离子体.目前人们较多认为,声波发光是由于等离子体的韧致辐射和复合辐射.中国科学院物理研究所在这方面作出了贡献,例如对含有不同稀有气体气泡的光谱推算了如图4所示的曲线<sup>[4]</sup>,这些理论曲线和前面图2所示的实验曲线吻合较好.文献5则论证气泡内有强静电场,不过目前这个预计还无法进行实验验证.对于发光机理,最近也有人提出,不限于等离子体辐射,或者是在有的条件下,几乎不是等离子体辐射.

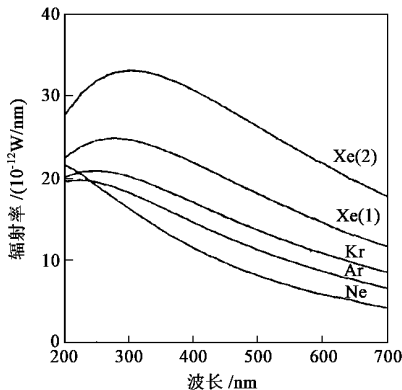
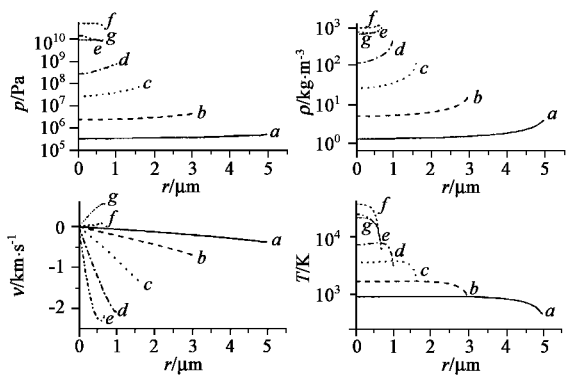


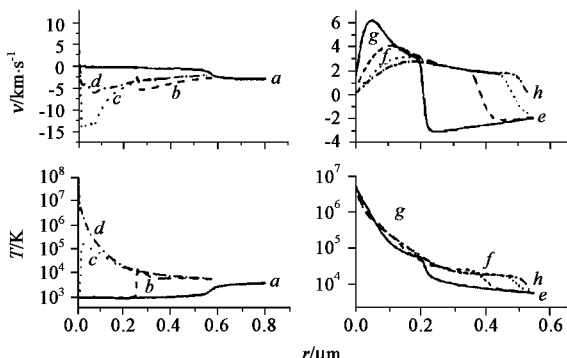
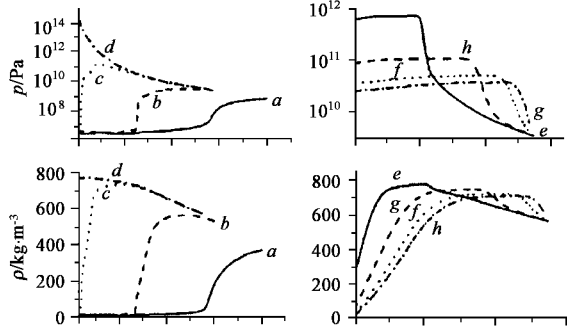
图4 文献4推算的不同稀有气体气泡的光谱

热点论的核心是气泡急剧收缩时泡内温度急剧升高.实际上这时不止是温度上升,气泡内的压强和气体密度也都急剧上升.因此气泡在半径剧烈压缩时,内部形成一个高温、高压、高密度的极端条件微小空间.声致发光是个很有趣的现象,但它主要还是泡内温度的一种反映;应当说,按照目前的认识,气泡内的极端条件才是根本特征.1993年前后,有人<sup>[6]</sup>对气泡内可达到的温度给出了计算值,认为可达到  $10^8$  K.因此,有人把声空化同核聚变联系起来.本文在后面将介绍最近的一个声空化核发射的实验.

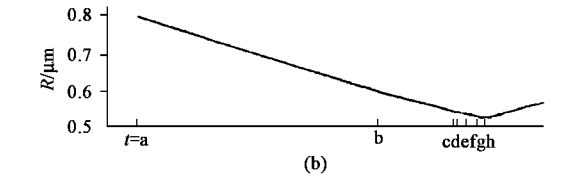
但是,对气泡内极端条件,特别是对温度的理论计算,近十年来,尤其是近五年来,一直在迅速发展,可说是日新月异.同1993年前后的理论计算对比,近几年来,理论计算所根据的物理模型不断修改、演变,这些演变是由一些物理实验和假说所引发和旁证的.修改的物理模型先后引进了对于液体的可压缩性、泡内空气的自发化学反应、泡内气体和泡外液体各自的和相互的热传输、泡内水蒸气的存在(泡外液体常是水)以及这个水蒸气的化学分解等等考虑.根据这些修改模型算出的泡内最高温度,由1993年



(a)



(b)



5 空气泡内气体压强、密度、质点速度和温度在气泡压缩到最小半径附近时的时间分布和空间分布

(a) 计算中考虑了液体的可压缩性、泡内空气的自发化学反应、泡内气体和泡外液体各自的和相互的热传输、泡内水蒸气的存在；

(b) 计算中没有考虑(a)中列出的这些因素<sup>[7]</sup>

[(a)和(b)中一个明显的差异是(a)中没有冲击波(b)中有冲击波]

前后估计的  $10^8$  K 逐步下降到  $10^4$  K 或更低。我们曾经计算了<sup>[7]</sup>物理模型的部分修改所导致的泡内 4 个参量的变化。4 个参量指气泡压缩到最小半径的前后，泡内气体的压强、密度、质点速度和温度在泡内的空间分布。图 5 给出了文献 [7] 的部分结果，说明了这种预期温度的下降趋势。

这里值得注意的是 (1) 图 5 的计算结果和其他一些发表了的计算结果，都只是理论计算的结果，并没有经受直接的实验核查，原因是泡内的一些参量还无法直接测量。倒是有些化学家们十几年前提出的温度估计值是由实验间接推测的。(2) 计算所根据的物理模型，也不是固定不变的，例如最近有人提出，由于体积限制，水蒸汽可能不分解。(3) 这些计算，常是针对局限的气泡参数，特别是因为实验常针对稳态单一气泡，要照顾气泡稳定、不破裂，外界条件常受限制，例如驱动声波的声压幅值不能太高、气泡所处的液体多限于水，部分原因是“水是声致发光的最好朋友”。但实际的声空化气泡所经受的条件是形形色色的。

部分的核物理学家却似乎对 1993 年前后理论计算所得的高值留有深刻印象，一直在设法选择适当的气泡条件，看看能否达到核聚变的要求。2002 年 3 月初在美国报道了最近的认为是声空化核辐射的实验，本文将在后面简单介绍。

### 3 瞬态单一气泡

中国科学院声学研究所几位当时的青年科学工作者在 1964 年前后进行实验，产生了单一气泡<sup>[8,9]</sup>，这种单一气泡却是瞬态的，所谓瞬态是指，气泡在水中一次脉动加上几次小半径反弹之后破碎消失，不像上面讨论的稳态单一气泡那样能维持亿万次重复脉冲。但是，在破碎之前，这种气泡同样经历长大、收缩、反弹的过程，而且在坍塌时同样闪光。文献 [8] 还报道测量到在闪光的同时辐射低频电磁波。这种瞬态单一气泡是用流体力学的方法产生的，按照我们现在的分析，这种流体力学方法实际上是在液体中产生一种拉伸脉冲波，估计可以改用声学方法来实现。需要说明的是，同稳态单一气泡的产生一样，瞬态单一气泡的核是事先人工植入的。

文献 [8] 和随后发表的文献 [9] 用高速照相机和米氏散射方法测量了气泡的形态变化，用光电倍增管测量声致发光，所以主要的测量方法已经是 30 年后人们测量稳态单一气泡时所用的。瞬态气泡当时最大可达 2cm 的直径，气泡内曾经填充几种不同的气体，气泡又曾在几种不同的液体中生产。由于论文是用中文发表的，又由于论文发表后不久“文化大革命”发生，这项实验工作没有在国外被知晓。

近来中国科学院声学研究所和物理研究所联合，重新开展瞬态单一气泡的研究工作。图 6, 7 给出

我们所产生的两例大气泡的系列高速照片.产生方法同文献[8],简单说,是让一个气泡核固定停留在一个管内液体中的一点,而让管内液体随管迅速移动,达到一定速度后急速刹车.刹车后,很快可以看到气泡长大.图6和图7都照出水中气泡的形态变化.图6中玻璃管连同管内的水移动所达到的速度比较小,因而气泡生产的最大直径也比较小;图7中则所达到的速度比较大,于是气泡的最大直径也大,大到充塞管径,被管挤成柱状.两个图中的气泡都不是球形,如果等效为球形,那么图6中气泡的等效最大直径是1.8cm,而图7中气泡的等效最大直径是3.2cm.在这些气泡的崩溃阶段都观察到闪光,光强比我们实验室所产生的稳态单一气泡的要大好几倍.

我们在纯甘油中产生了强闪光的瞬态单一气泡.过去有人认为,纯甘油中的气泡是不易发光的.对这种瞬态单一气泡,有许多问题亟待探讨.例如和多气泡及稳态单一气泡对比,它有什么特色,包括它

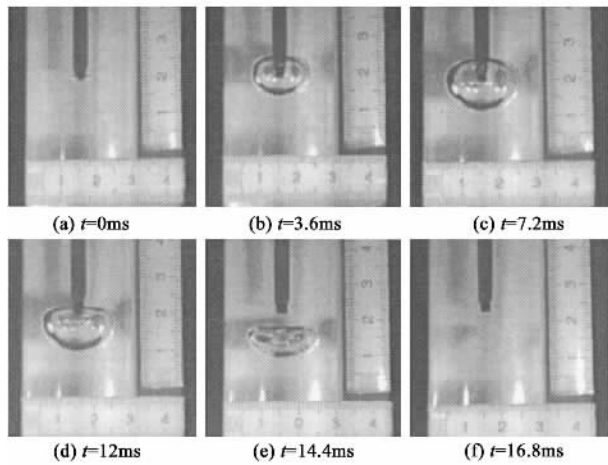


图6 水中瞬态单一气泡一例

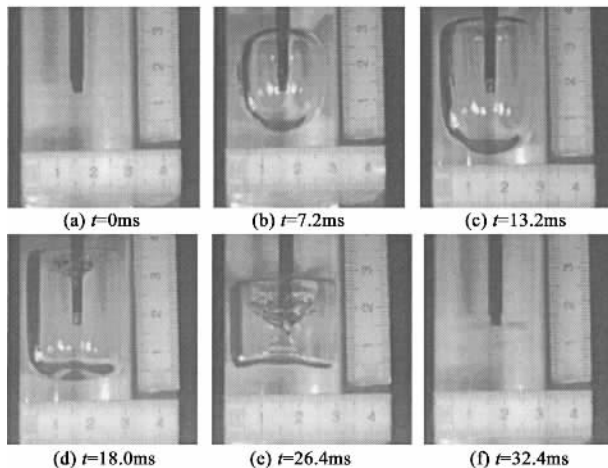


图7 水中瞬态单一气泡另一例

的形态变化、光学特性、内部参数等.此外,泡内含气的品种和数量、液体的品种和声波压强的大小,对于瞬态单一气泡的产生几乎没有什么限制,这和稳态单一气泡的产生大不一样.因此应当可以更广泛地探索在许多不同情况下声空化的行为,以便于进一步了解声空化的机理以及为特定的某项目标寻找最佳的外界条件.怎样利用它的特大体积,也可以提出一些设想并实施.

另一方面,瞬态单一气泡也带来一些测量上的困难,例如要测量它的光谱比较费力.

#### 4 最近的声空化核发射实验

近约十年来,有些科学家不停地在探索是否可以利用声空化内的极端条件产生核聚变.在本文撰写前不到一个月(2002年3月初),在美国 Science 期刊上发表了有关这样尝试的论文<sup>[10]</sup>,内容是:在0℃氘化丙酮内先用快速中子产生了成群的气泡核(这些中子是外源提供的,只是用来在液体中产生很小的气泡核,应当和后来的气泡发射中子无直接关联)这样产生的核,半径只有10—100nm.然后施加很强的、约15大气压的超声场,使泡核先长大,再坍塌.据说这种泡核可以长大到最大半径达约1mm,也就是半径长大最长达 $10^5$ 倍.据作者们理论估计,这时泡内温度最高约达 $2 \times 10^6$ K.论文报道,坍塌时照常闪光(声致发光),并发射液体中冲击波,但突出的是,同时观察到中子和氦粒子发射.后两种粒子的出现应当反映在气泡内发生了氘氘核聚变.作者们还进行了一些对比实验,比如不用氘化丙酮而用普通丙酮,用氘化丙酮而不加超声等,在后面两种情况下,都没有观察到核粒子的发射.

在论文公开发表的前后,在美国物理学界激发了不少争议,还有核物理学家进行了重复实验,却没有能明显获得原论文所报道的结果.由于关系重大,人们认为,需要更多地重复同类实验,让实践来作判断.

#### 5 简单结论

声空化经过70多年的研究和应用,特别是经过近30年的强化研究和应用,可以认为具有值得关注的潜力.但是,对它的一些关键性能还不能最后确定,这部分是因为对它的观察和分析范围还不够广泛,对它有目的的控制才刚开始.这样,对于小气泡

究竟能发挥多大的作用,看来有必要加大力度,从快地继续进行探讨.

### 参 考 文 献

[ 1 ] Leighton T G. The Acoustic Bubble. London :Academic Press ,1994  
[ 2 ] Gaiton D F ,Crum L A ,Church C C *et al.* J. Acoust. Soc. Am. , 1992 91 3166  
[ 3 ] Barber B P ,Hiller R A ,Lofstedt R *et al.* Physics Reports ,1997 , 281 35  
[ 4 ] Xu N ,Wang L ,Hu X W. Phys. Rev. E 2000 61(3) :2611

[ 5 ] Xu N ,Wang L ,Hu X W. Phys. Rev. Lett. ,1999 83(12) :2441  
[ 6 ] Wu C C ,Roberts P H. Phys. Rev. Lett. ,1993 70(22) :3424  
[ 7 ] 应崇福 ,安宇. 中国科学 A 2002 33(4) :305 [ Ying C F ,An Y. Science in China A 2002 33(4) :305 (in Chinese) ]  
[ 8 ] 汪承灏 ,张德俊. 声学学报 ,1964 ,1(2) :59 [ Wang C H ,Zhang D J. Acta Acustica ,1964 ,1(2) :59 (in Chinese) ]  
[ 9 ] 张德俊 ,汪承灏. 声学学报 ,1966 3(1) :14 [ Zhang D J ,Wang C H. Acta Acustica ,1966 3(1) :14 (in Chinese) ]  
[ 10 ] Taleyarkhan R P ,West C D ,Cho J S *et al.* Science ,2002 ,295 : 1868

· 前沿和动态 ·

## 杨振宁先生 80 寿辰纪念会简讯

今年是诺贝尔物理奖获得者杨振宁先生 80 寿辰。6 月 17 日—19 日“前沿科学国际研讨会”在清华大学隆重举行。14 位诺贝尔奖获得者,1 位沃尔夫奖和 1 位费尔兹奖获得者,110 位海外著名科学家,40 余位院士,众多国内一流科学家,以及杨振宁先生的朋友、学生,部分高等院校的研究生共 400 余名正式代表,参加了会议,共祝杨先生 80 华诞。

会议安排了 22 个大会报告,44 个分会报告。做大会报告的世界级科学家有激光发明人 C. H. Townes,夸克创议人 M. Gell - Mann,诺贝尔物理奖得主朱棣文, E. A. Cornell, C. Cohen - Tannoudji, R. L. Laughlin, R. L. Moessbauer, G. 't Hooft, M. J. G. Veltman 以及陈省身、何大一、吴文俊等人。也有一批相对年轻的杰出科学家,如华泰立、沈志勋、翁征宇等。大会报告涉及玻色 - 爱因斯坦凝聚、量子霍尔效应、中微子振荡、杨 - Mills 规范场、超越标准模型的深层次问题、量子相位、自由电子激光、高温超导、碳纳米管超导、天体物理、生物物理、机器证明等前沿科学

领域。会议期间,最令人感兴趣的是众多诺贝尔奖获得者在会场上的提问、评论与辩论。

大会开幕式上,大会主席周光召院士在致辞中对杨振宁先生给予了高度评价。他说,杨振宁先生是我们这个时代伟大的科学家。他出生在中国,在中国受教育,又第一个将最终的落脚点落在中国。他的成功是中美两国优秀文化结合的产物,他的成功为中国人建立起了自信心,特别是对年轻一代的中国人。晚宴上,杨振宁说:“假如我的一生是一出戏,那末我实在十分幸运,今天不但我有牙齿,有眼睛,有味觉,有几乎一切,而且我还有机会开始一个新的事业——帮助清华大学发展高等研究中心。清华园是我幼年成长的地方,我一生走了一个大圈。那末我的最后事业也将是我一生中特别有意义的一幕。”这番话,表达了杨先生对于中国,对于清华的深厚感情。

(清华大学物理系 朱邦芬)

### 封 面 说 明

大气压介质阻挡放电形成的斑图,这是一种可工作于大气压的放电装置,可用于产生臭氧、化学反应、材料表面处理等,也可用于研究斑图动力学和时空动力学。放电方式有辉光和流光两种。在流光放电中,每一放电通道可认为是一个准粒子。它们的运动构成如图所示的斑图。上电极用玻璃容器充以普通水兼作冷却介质和透明介质便于观察,水里浸一金属丝导电。下电极可用铜,也可用另一水池,上面覆以玻璃片。上下电极间隙 1mm 左右。普通相机照相。只需一台频率为几千周到几十千周、电压几千伏的电源,这一实验很容易在任何中学实验室进行。

(中国科学院物理研究所 王 龙)