

夜半钟声到客船——谈声音和波的传播

武际可

月落乌啼霜满天，江枫渔火对愁眠。

姑苏城外寒山寺，夜半钟声到客船。

这是唐朝人张继写的诗《枫桥夜泊》。张继是天宝十二年（公元 753 年）的进士，他作的诗传世的不多，在诗坛上也不算第一流的大家，但他的这首诗却入选在历朝历代的唐诗选中，成为脍炙人口的绝唱。

对于这首诗，历史上有不少人评论，都认为很美。宋朝欧阳修在他的《诗话》中却提出了一个问题，他说：“唐人有人云：半夜钟声到客船，说者亦云句则佳矣，其如三更不是打钟时。”欧阳修肯定了诗句之佳，然而三更是否打钟时，颇引起后人的一番议论。南宋初的王观国在《学林》中写道：“世疑半夜非钟声时，观国案，《南史》文学传丘仲孚，吴兴乌程人，少好学，读书常以中霄钟鸣为限。然则半夜钟固有之矣。”后来南宋叶梦得在他的《石林诗话》中说：“欧公尝病其半夜非打钟时，盖未尝至吴中。今吴中寺，实夜半打钟。”他们说明早在唐以前的南朝，晚在唐以后的南宋，苏州一带都有半夜打钟的习俗。欧阳修的指责，不过是少见多怪而已。

与此同时，人们还找出在唐诗中谈到半夜钟声的诗，张继而外，还大有人在。如比张继早的张说，就在《山夜闻钟》诗中有：“夜卧闻夜钟，夜静山更响。”在于鹄的《送宫人入道归山》诗中有：“定知别后宫中伴，应听维山半夜钟。”白居易有：“新秋松影下，半夜钟声后。”温庭筠有：“悠然旅思频回首，无复松山半夜钟。”陈羽有：“隔水悠扬午夜钟。”

读着这许多诗句，我们可以想象，那悠扬的夜半钟声，可以从山上传到客船，可以隔河传到彼岸。更进一层，在皇甫冉的诗句里有：“秋水临水月，夜半隔山钟。”这使我们可以想象那悠扬的钟声甚至可以隔着一座山传过来。

唐诗中不仅有这么多的诗写到半夜钟、夜半钟、午夜钟，还有写到夜间的笛声、琴声。如于鹄有：“更深何处人吹笛，疑是孤吟寒水中。”白居易有：“江上何人夜吹笛？声声似忆故园春。”白居易还有一首著名的长诗《琵琶行》诗句开头几句用“秋索索”、“江浸月”交代了秋天和月夜的背景，然后说：“忽闻水上琵琶声”，再就是“寻声暗问弹者谁”，说明白居易同那位弹琵琶的人还是隔着一段距离的，所以需要“寻声暗问”，最后才得以“千呼万唤始出来，犹抱琵琶半遮面”，才有“同是天涯沦落人，相逢何必曾相识”的一段故事。在唐诗中很少有人写白昼、正午的钟声、笛声、琴声。这绝不是单纯为了追求优美的词句而“递相沿袭”。宋代人说“恐必有说耳”，意思是说：这么多人写半夜钟声，怕自有它的道理。从张继的“枫桥夜泊”到现在已有 1200 多年了，在这段漫长岁月中，科学的发展证实张继等人的写法非常符合科学道理。在这许多诗句中，概括了一个科学事实：夜间的声音传得远。

夜间声音为什么会传得远呢？一种说法是：夜深人静了，背景噪音小了，人更易于分辨远处传来的声音。这当然是一个因素，但它不是最主要的原因，这得从声音是怎样地传播说起。

首先，声音是声源的振动扰动了空气，扰动以波的形式往外传。设想声源是地面上空的一个点，空气中的波是以它的密度不同往外传递，如果空气中各点的声速是相同的，由这个点传出的声波的波前是一个球面，声音传播的方向认为是和波前垂直的方向即半径的方向。现在设声音在大气中不同高度传播速度不同，这时波前就不再保持球面，而发生畸变；相应的，声音传播方向也不再是球半径的方向，而是拐了弯，这种声音传播道路拐弯的现象，也称为声折射现象。白天同夜间，声音传播远近不同，就是由这个折射现象产生的。

其次，在地面附近空气中，声速 c (m / s) 和温度 t ($^{\circ}\text{C}$) 的关系，可近似表为

$$c = (331.45 + 0.61t / ^{\circ}\text{C}) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

就是说在地面上温度每升高一度，声速增加约 0.61 米 / 秒。

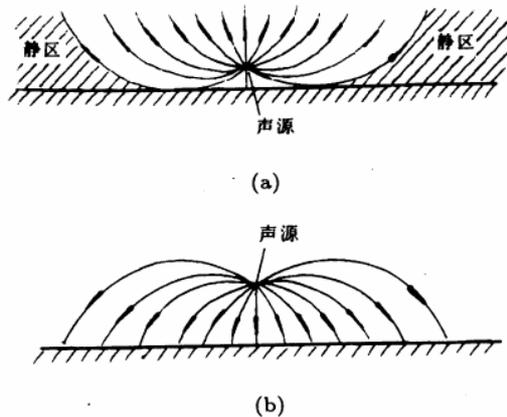


图 1 白天和夜间的声线

我们人类活动在贴近地面的大气里，在高度 20 千米以下，大气的温度变化十分复杂。白天，由于地面接受太阳辐射温度升高，靠近地面大气层比稍高的气层温度高，也就是说近地声速大于高空。这时声音传播路径折向高空，在适当的地方还可以形成声静区，即对远处发出的什么声音都听不见（图 1 (a)）。这时，由于声传播路径折射向高空，如果坐在气球上便会听到格外清晰的气球下面地面的发声，坐在气球里的张继也许会来上一句“正午钟声到气球”。在夜间，靠近地面空气逐渐冷下来了，上空的气温相对高，结果高空声速比地面大，因而声音会向地面折射（图 1 (b)）。这就是夜间声音相对远的道理。在寒冷的天气，尤其在结了冰的湖面或未结冰的水面上，即使在白天，由于地面温度低，声音向地面折射的效果也十分明显。“月落乌啼霜满天”，在诗里张继写的是晚秋天气，不仅是夜半钟声，而且是晚秋天气的夜半钟声，不就格外清晰了吗？真可谓“秋声半夜真”（转引自钱钟书《谈艺录》）。可见唐代诗人观察得多么仔细。由于“秋”和“半夜”这双重的因素加在一起，皇甫冉的诗句：“秋水临水月，夜半隔山钟”就显得非常现实了，只有在这样的条件下，声音才能通过折射从山

那边传过来。现在，住在闹市区的人大概都有这样的体验，对马路车辆行驶造成的讨厌的噪声，白天除了临街的楼房外，大多感受不到，而到深夜，即使只有一辆车驶过，也会搅得你睡不好觉，甚至隔几座楼还可以听到，可以说是“夜半噪声扰眠床”吧，它和“夜半钟声到客船”是同样的道理。

用现代科学的方法研究声音，大约在张继《枫桥夜泊》诗后的 1000 年。那时，在欧洲有一种说法：“英国的听闻情况比意大利好。”1704 年，两位认真的人：一位是英国牧师 W·德勒，一位是意大利人阿韦朗尼，他们合作对两地的声音传播情况进行了实测，结果证实两国的声音传播情况差别不大。较早测量声速的是 1636 年法国人 M·梅森，而后于 1738 年，法国科学院测得了比较准确的声速。

谈到大气中声音的传播，我们应当提到清朝的康熙皇帝爱新觉罗·玄烨（1654～1722 年）。他是一位既聪明又博学的政治家。在他的随笔《几暇格物编》中，记载了一则他所做的关于枪声的实验，题目是“雷声不过百里”。他说：“朕以算法较之，雷声不能出百里。其算法：依黄钟准尺寸，定一秒之重线，或长或短，或重或轻，皆有一定之加减。先试之铙炮之属，烟起即响，其声益远益迟。得准比例，而后算雷炮之远近，即得矣。朕每测量，过百里虽有电而声不至，方知雷声之远近也。朕为河工，至天津驻蹕，芦沟桥八旗放炮，时值西北风，炮声似觉不远，大约将二百里。以此度之，大炮之响比雷尚远，无疑也。”从玄烨的话里，看出他做实验很精细。所说的“黄钟”是古时一个标准音阶，它的律管长九寸径九分，可以当作标准长度。至于定 1 秒之重线，很可能使用的单摆摆长周期为 1 秒。定好了量测时间的标准，后面的测量就不难进行了。他的实验，和大致在同时代法国科学院于 1738 年测声速的办法差不多。只不过玄烨没有提出声速的概念，而得到的是比例的概念，玄烨说的“得准比例”，便是现今单位时间内声波走的距离，也便是声速。可惜他未记下得到的比例是多大。

关于声的折射现象，到了 19 世纪，欧洲学者才定量地研究了温度梯度与声折射效应的关系。后来，人们逐渐认识到，要了解大气中声折射的复杂现象，就得要有一张声速沿高度变化的图。即声速作为距地面高度的函数关系。据现在人们的实测和理论计算，这个函数关系简略地可表为图 2。从图 2 我们可以解释许多大气中声音传播的有趣现象。我们看到从 B 点到地面数千米内，白天到晚上速度梯度相反。它可以解释地面声音晚上比白天传得远的原因，已如前面所说。

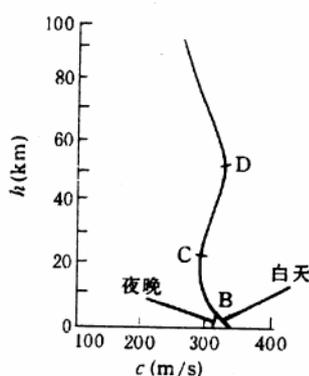


图 2 声速随高度变化曲线

我们还看到，这条曲线拐了几个弯。注意声速局部极小处 C 点，在这个高程上发声，任何方向的声音都会折射弯向水平。因为从 C 点往上看，它的梯度正好和夜间地面上声速梯度一样，从 C 往下看，也是远离 C 的高度声速变大，所以无论怎样，声音都会弯向过 C 的水平线。就是说，这个高程，声音传得特别远，称为声道。而具有声速极大值的 D 点，则相反，当声音传播接近它时，有一部分会折射返回声波来的那一侧，犹如波的反射。

夏天打雷，总是在闪电之后。闪电只是一瞬间的事，也许不到千分之一秒。可是一旦闪电之后，往往雷声隆隆不绝，要持续好一段时间。这原因就是由于沿高度声音反射，有时来回若干次，就像在山谷中喊一嗓子听到的不断回声。事实上，夏天雷雨前，声速分布比图 2 要复杂得多。这时由于近地的风、云，声速分布不仅沿高度变化，沿水平也变化，会造成极复杂的声折射现象。

在第一次世界大战时，发现了一个奇怪现象。一门不断发射的大炮，当有人驱车从数百千米外的远方驶向它时，起初听到炮声隆隆，但驶得更近时，在一段路上却听不到炮声。原因是，起初听到的炮声是大气反射的波，更近些是静区，再靠近又听到从大炮直接传来的声波。

风对声音的传播是有影响的，声音的速度在顺风 and 逆风时不同。顺风时，是静止空气中声速 c 加上风速，而逆风时要减去风速。但是风速沿不同高度的分布是增加的，而且近似地按指数增加。高空风速大，贴近地面小，于是逆风时，高空声速小于地面声速；顺风时高空声速大于地面声速，这样，在刮风时，顺风时声音的折射犹如夜间，而逆风声音折射犹如白天。这就是为什么在刮风时听人讲话，站在下风处听得格外清楚，也就是荀子在《劝学》中所说的：“顺风而呼，声非加疾也，而闻者彰”的道理。

前面谈到的玄烨所做的声速实验，的确很仔细，他甚至没有忽略他在天津听到芦沟桥炮声时刮的是西北风，可见他已经意识到风对声音传播会产生影响。他当时处于下风，所以听得较远。然而夏天打雷的时候，恰好天空温度较低，声音一般向天空折射，玄烨所以听不到超过百里以外的雷声，很可能他是处于声静区。听到声音与否，不仅同雷炮二者发声的能量有关，还同听者所处的地方和气象条件有关。设想玄烨听炮声是处于上风头，听到的炮声未必会比雷声距离远。所以还不能就一般地说：“大炮之响比雷尚远，无疑也。”

声在水中的传播也类似于在空气中的传播。二次大战中发现了海水深层存在声道，在那里声波可以传播数千千米。这个现象受到很大重视，因为用它可以监视敌方潜水艇的动态，它至今还是水声学技术应用的重要课题。

声在固体中传播要复杂一些，但也无非是折射反射现象。近代精密仪器可以测出在地球另一边发生的地震和核爆炸。依靠多点测量可以推算它的大小和准确位置。

利用人工爆炸，声在固体中传播的折射、反射，并收集这些讯号加以分析，还可以用于地质探矿。既然波的传播和速度有关，而速度又和介质的密度有关，

所以收集各个方向传来的声波可以从中分析出介质的密度。这种技术的应用称为声全息。

要深入了解这些技术的细节，在力学学科中有一个研究方向，称为分层介质或不均匀介质中的波和波动问题的反问题。声音是一种波，光也是一种波，在不均匀介质中，光波也会折射，它们都是同一个道理。“海市蜃楼”现象就是光折射造成的。

“夜半钟声到客船”是 1200 多年前的诗句，诗句概括的科学事实不断为后来的科学发展所证实。人类对自然的认识逐渐进步着，我们沐浴在科学发展的薰风化日之中。当我们反复吟诵这优美的诗句时，又怎能不叹服这诗句的语言美和科学美的完整结合。千年来日益发展的科学技术，不正是对这诗句作更为精细详尽的注解吗？