



夜半钟声到客船  
——谈声音和波的传播

武际可

# 枫桥夜泊诗



- 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。

江村橋



# 欧阳修评论



- 对于这首诗，历史上有不少人评论，都认为很美的。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。



# 王观国与叶梦得评论



- 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。

# 唐诗中的夜半钟声



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。”

# 半夜钟声



- 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。

# 夜半笛声



- 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。”

# 夜半琵琶声

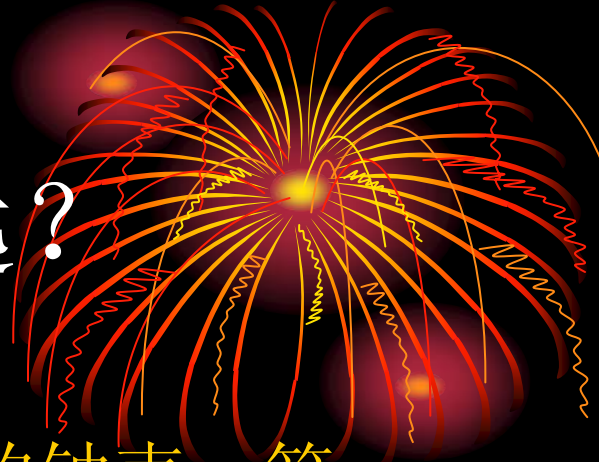


- 白居易还有一首著名的长诗《琵琶行》。诗句开头几句用“秋索索”、“江浸月”交代了秋天和月夜的背景，然后说：“忽闻水上琵琶声”，再就是“寻声暗问弹者谁”，说明白居易同那位弹琵琶的人还是隔着一段距离的，所以需要“寻声暗问”，最后才得以“千呼万唤始出来，犹抱琵琶半遮面”，才有“同是天涯沦落人，相逢何必曾相识”的一段故事。

# 琵琶行意境



# 为什么夜间声音传得远？



- 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。

# 一种回答是夜深人静



- 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。

# 声音的折射



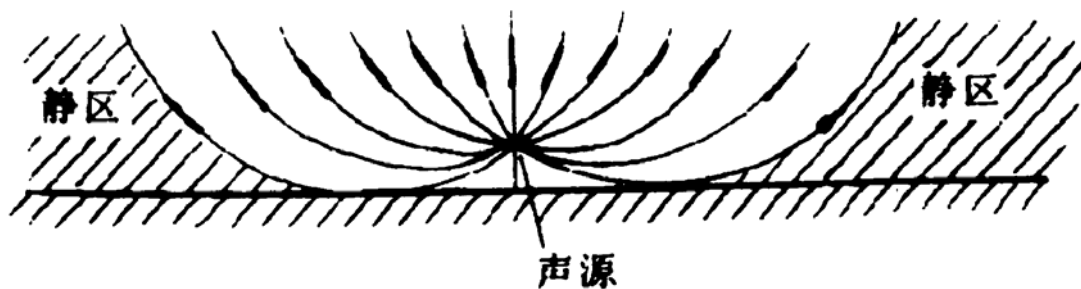
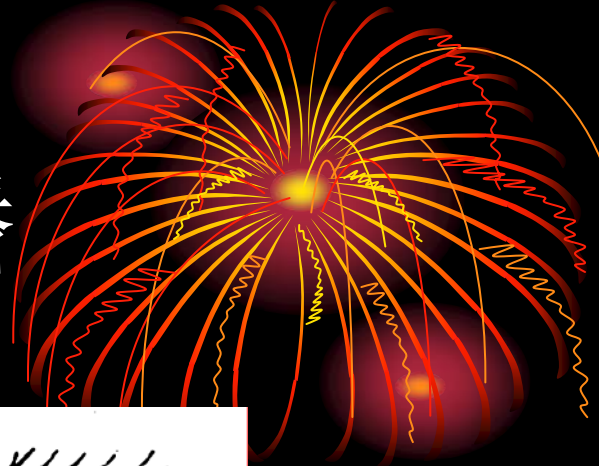
- 首先，声音是声源的振动扰动了空气，扰动以波的形式往外传。设想声源是地面上空的一个点，空气中的波是以它的密度不同往外传递，如果空气中各点的声速是相同的，由这个点传出的声波的波前是一个球面，声音传播的方向认为是和波前垂直的方向即半径的方向。现在设声音在大气中不同高度传播速度不同，这时波前就不再保持球面，而发生畸变；相应的，声音传播方向也不再是球半径的方向，而是拐了弯，这种声音传播道路拐弯的现象，也称为声折射现象。白天同夜间，声音传播远近不同，就是由这个折射现象产生的。

# 声速和温度的关系

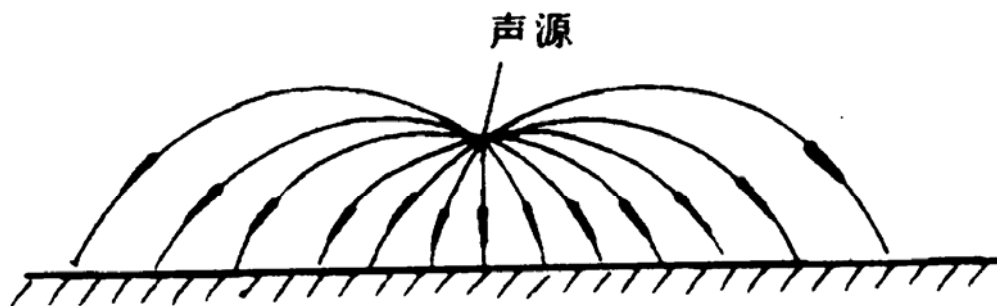


- 其次，在地面附近空气中，声速 $c$  (m/s) 和温度 $t$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) 的关系，可近似表为
- $c = (331.45 + 0.61t^{\circ}\text{C}) \text{ m/s}$
- 就是说在地面上温度每升高一度，声速增加约0.61米 / 秒。

# 白天与夜间的声音传播



(a)



(b)

图 1 白天和夜间的声线

# 白天



- 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”。

# 夜间



- 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？

# 秋声半夜真



- 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。

# 最早对声速的测量



- 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。

# 康熙皇帝测声速



- 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”。



康熙

# 康熙说



- 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。”

# 康熙测声速的方法

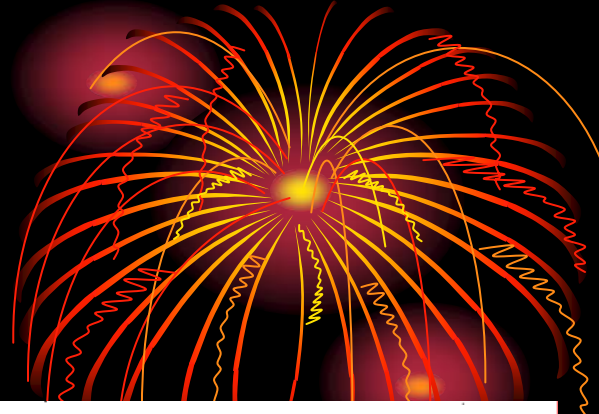


- 从玄烨的话里，看出他做实验很精细。所说的“黄钟”是古时一个标准音阶，它的律管长九寸径九分，可以当作标准长度。至于定1秒之重线，很可能使用的单摆摆长周期为1秒。定好了量测时间的标准，后面的测量就不难进行了。他的实验，和大致在同时代法国科学院于1738年测声速的办法差不多。只不过玄烨没有提出声速的概念，而得到的是比例的概念，玄烨说的“得准比例”，便是现今单位时间内声波走的距离，也便是声速。可惜他未记下得到的比例是多大。



- 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。

# 声速随高度的变化



- 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。

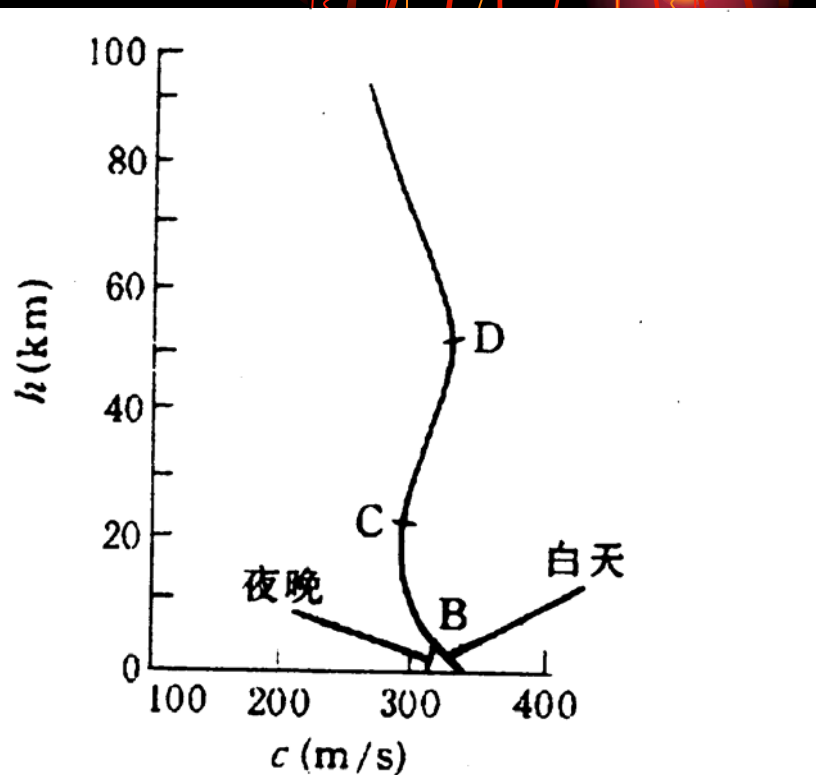
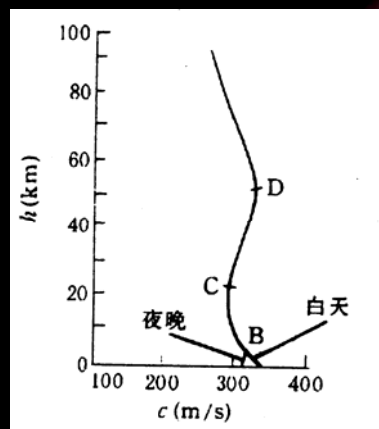


图 2 声速随高度变化曲线

# 注意图上的拐点

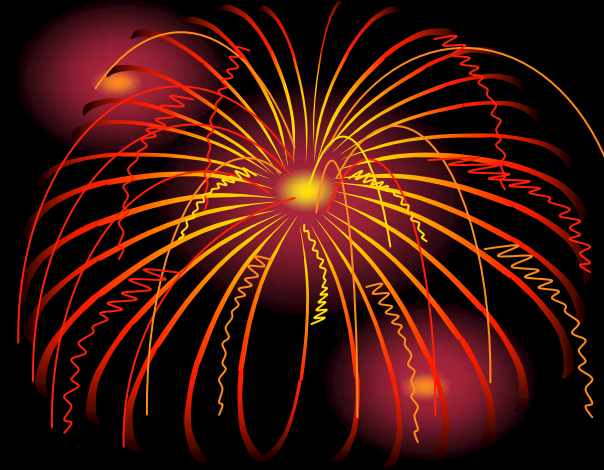


- 我们还看到，这条曲线拐了几个弯。注意声速局部极小处C点，在这个高程上发声，任何方向的声音都会折射弯向水平。因为从C点往上看，它的梯度正好和夜间地面上声速梯度一样，从C往下看，也是远离C的高度声速变大，所以无论怎样，声音都会弯向过C的水平线。就是说，这个高程，声音传得特别远，称为声道。而具有声速极大值的D点，则相反，当声音传播接近它时，有一部分会折射返回声波来的那一侧，犹如波的反射。

# 雷声



- 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。可是一次闪电之后，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。



雷电

# 雷电



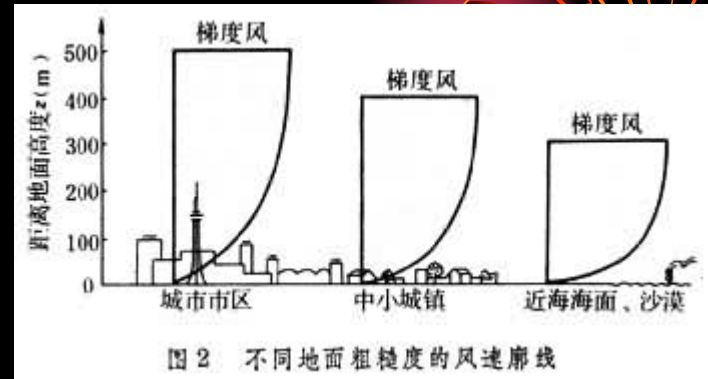
- 雷雨云在形成过程中，部分积聚起正电荷，另一部分积聚起负电荷，当这些电荷积聚到一定程度时，就产生放电现象。这种现象有的是在云层与云层之间进行，有的是在云层与大地之间进行。这两种放电现象俗称打雷，它会破坏建筑物、电气设备，伤害人畜。这种放电时间短促，一般约50—100微秒，但电流异常强大，能达到数万安培到数十万安培。放电时产生强烈的光，这就是闪电。闪电时，将释放出大量热能，瞬间能使局部空气温度升高1万—2万℃，空气的压强可达70个大气压，这样大的能量，具有极大的破坏力，往往会造成火灾和人畜的伤亡。

# 声静区



- 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。

# 风对声音传播的影响



- 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。

# 对康熙结论的评述



- 前面谈到的玄烨所做的声速实验，的确很仔细。他甚至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。有想过玄烨听炮声是处于上风头，听到声音与否，不仅同雷炮二者发声的条件有关。未必炮之响比雷尚远，无疑也。”

# 水声



- 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。

# 水中声速



- 人们经过反复测试，发现水中声速也受温度影响。海水里含有盐类，含盐的多少也对声速有影响。在各种因素中，温度对声速影响最大，每升高 $1^{\circ}\text{C}$ ，水中声速大约增大 $4.6$ 米/秒。一般认为海水中的声速是 $1500$ 米/秒，约是大气中声速的 $4.5$ 倍。科学家们还测出了各种液体里的声速。在 $20^{\circ}\text{C}$ 时，纯水中的声速是 $1482.9$ 米/秒；这样你说的在 $25.5$ 度时在水中的声速就应该为：

$$V=1482.9+(25.5-20)\times 4.6=1508.2\text{m/s}$$

# 固体中的声音



- 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。

# 固体中的声速



- 固体中的声速也各不相同，经过反复测定发现，声波在固体中用纵波和横波两种形式传播，这两种波的波速也不相同。例如，在不锈钢中，纵波速度是5790米/秒，横波速度是3100米/秒。把不锈钢做成棒状，棒内的纵波速度是5000米/秒。在金属中，铍是传声的能手，在用铍做的棒内，声波的纵波速度达到12890米/秒，是大气声速的38倍。聚乙烯塑料传声本领较差，聚乙烯棒中的纵波速度只有920米/秒，不及水中声速快。软橡胶富有弹性，声波在里边走不动，速度只有30-50米/秒，还不及空气中的声速呢！

# 声全息



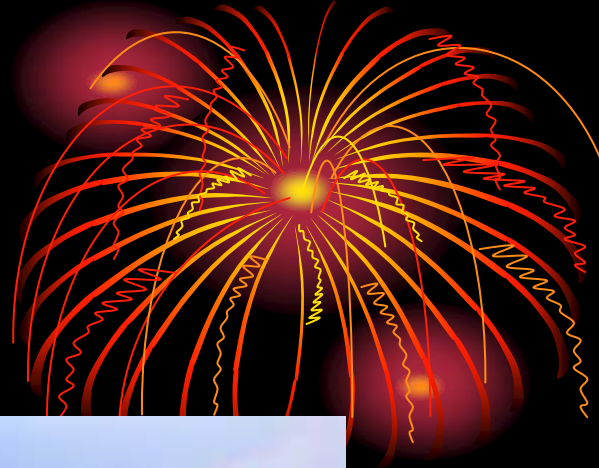
- 利用人工爆炸，声在固体中传播的折射、反射，并收集这些讯号加以分析，还可以用于地质探矿。既然波的传播和速度有关，而速度又和介质的密度有关，所以收集各个方向传来的声波可以从分析出介质的密度。这种技术的应用称为声全息。

# 海市蜃楼现象



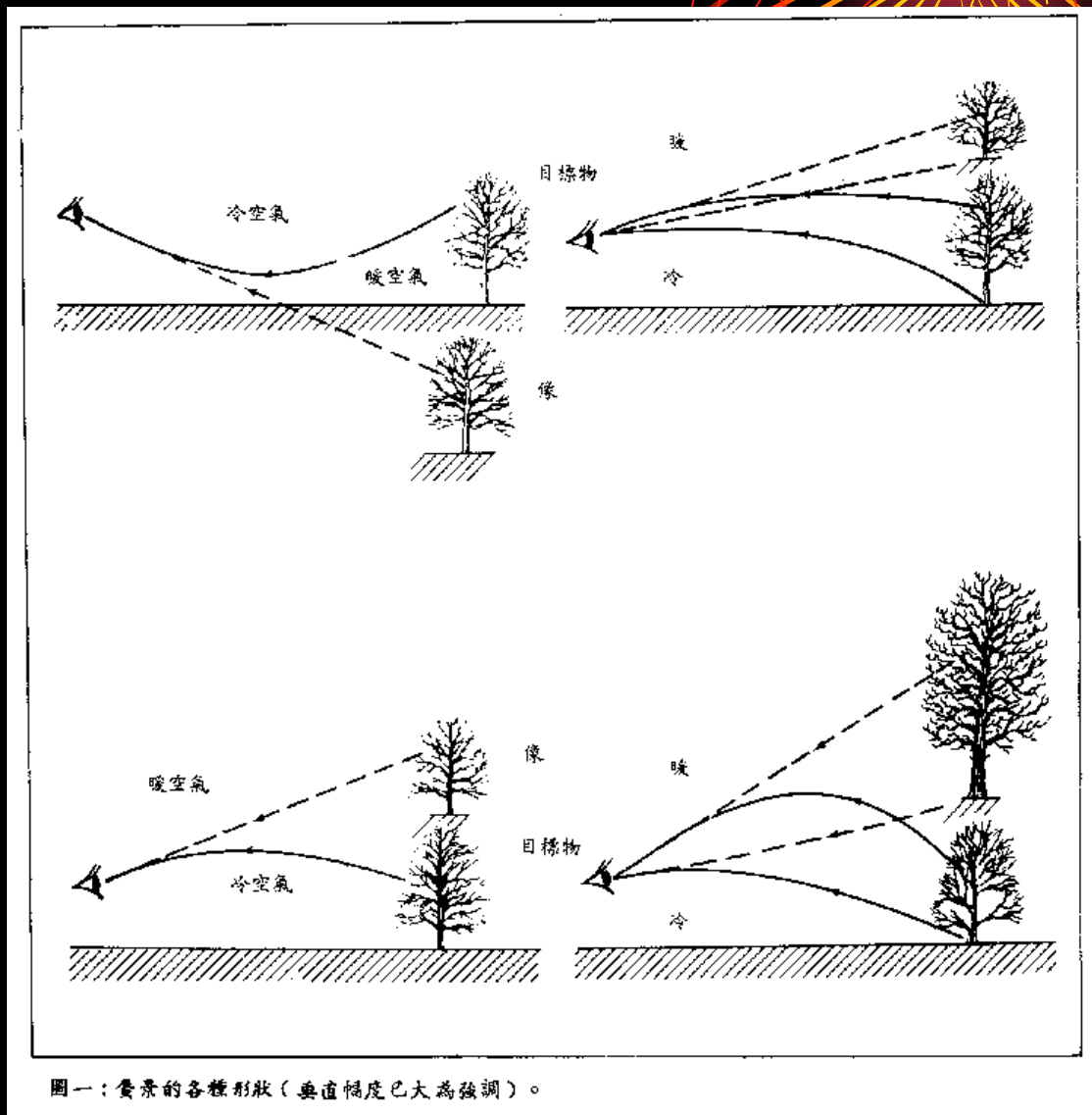
- 要深入了解这些技术的细节，在力学学科中有一个研究方向，称为分层介质或不均匀介质中的波和波动问题的反问题。声音是一种波，光也是一种波，在不均匀介质中，光波也会折射，它们都是同一个道理。“海市蜃楼”现象就是光折射造成的。

# 海市蜃楼奇景



網易论坛  
bbs.163.com

# 海市蜃樓 原理



圖一：蜃景的各種形狀（垂直幅度已大為強調）。

# 登州苏东坡诗



- 《海市（并叙）》——宋·苏轼 予闻登州海市旧矣，父老云常出于春夏，今岁晚不复见矣。予到官五日而去，以不见为恨，祷于海神广德王之庙，明日见焉，乃作此诗。
- 东方云海空复空，群仙出没空明中。荡摇浮世生万象，岂有贝阙藏珠宫。心知所见皆幻影，敢以耳目烦神工。岁寒水冷天地闭，为我起蛰鞭鱼龙。重楼翠阜出霜晓，异事惊倒百岁翁。人间所得容力取，世外无物谁为雄。率然有请不我拒，信我人厄非天穷。潮阳太守南迁归，喜见石廩堆祝融。自言正直动山鬼，岂知造物哀龙鍾。信眉一笑岂易得，神之报汝亦已丰。斜阳万里孤鸟没，但见碧海磨青铜。新诗绮语亦安用，相与变灭随东风。

# 苏东坡任登州知府五天

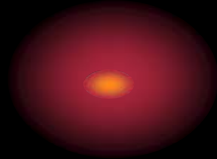


- 公元1085年，苏东坡被任命为登州知府，这是苏东坡第一次见到大海，而且登州所辖的蓬莱是至今也闻名遐迩的人间仙境，这里不仅有神奇的海市蜃楼景观，而且还是鲁菜的发祥地，一切都令苏东坡兴奋不已，然而仅过了五天，皇帝下诏让其还朝为官，依依不舍之际，苏东坡遗憾于自己没有见到海市蜃楼而祈祷海天神，传说第二天在苏东坡即将离开时，海天之际果然出现了海市蜃楼景观，苏东坡留下了《海市诗》带着喜悦的心境离开了登州，这首诗翰墨流传海山增色，而深知民众疾苦的苏东坡并没有光沉溺于山水，回到朝中，马上上疏皇帝《乞罢登莱榷盐状》，陈述了“登州、莱州百姓食官盐，官无一毫之利而民受三害”的调查结论，自此可以不食官盐的登莱百姓，为他修建了苏公祠。蓬莱直今还流传着“五日登州府，千年苏公祠”的佳话。

# 科学发展对诗句的注解



- “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？



谢谢大家