

宇宙线粒子声探测可能性研究

姜印琳 袁余奎 李延国 陈端保 郑荣庭

(中国科学院高能物理研究所)

宋建宁

(中国科学院声学所)

摘 要

本文报道宇宙线粒子声探测可能性考察的初步结果。实验表明天然大水域中超声频背景噪声是很复杂的,存在着孤立的超声频脉冲声讯号。这些脉冲声讯号可能起源于水中微气泡的声辐射。没有发现它们与宇宙线粒子有明显关联的证据。在海平面 *EAS* 轴干声探测的阈能大于 3×10^{16} eV。高能宇宙线粒子在水中发展的局部级联簇射声探测的阈能大于 10^{14} eV。

一、引 言

利用声学效应探测超高能宇宙线的设想已经提出多年,国外进行了很多理论和模拟实验的研究工作^[1-8]。为了实际探索这种可能性,美日两国对大水域中的背景噪声做了初步的考察。Stenger 等人于1977年5月首次在夏威夷海域对深海中的超声频背景噪声进行了一夜的考察^[9]。他们记录了一些超声频水声讯号的波形,没有对记录波形的来源和性质作出明确的结论,认为可能是鲸鱼或海豚等动物发出的声音。1981年和1983年,日本和玻利维亚合作,在高山湖(梯梯喀喀湖和喀罗喀达湖)进行噪声的剖面考察,探索 *EAS* 轴干声探测的可能性^[10]。我们以前的考察发现大水域中确实存在来源不清的瞬态超声频水声讯号^[11],为了弄清楚这些水声讯号的来源和性质,以及它们是否与高能宇宙线粒子有关联,我们于1984年6月至8月进行了新的观测实验。

二、实验概况

实验选在京郊密云水库进行。实验船是一艘登陆艇,它距主坝的距离大约是150米。实验船锚地水深约23米,水面海拔高度134米。由于白天有多种人为的噪声干扰,观测实验主要是在夜间完成的。整个实验系统分声讯号记录系统和 *EAS* 事例记录系统两部分。图1是探测器布设的示意图。声讯号记录系统由七元水听器阵列及声讯号判选、时

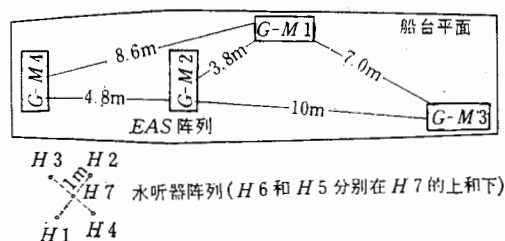


图1 探测器布置的平面示意图

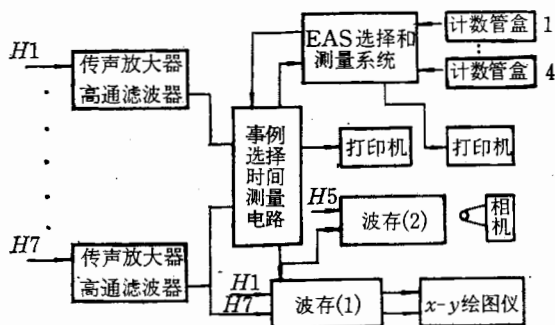


图2 实验系统的框图

差测量、波形记录系统构成。EAS 事例记录系统由 EAS 阵列, 事例选择和记录系统以及关联电路组成。实验系统的框图如图 2 所示。

七元水听器阵列是一个三维直角坐标系结构, 水听器等间隔排列, 相邻轴向间距 100 厘米。水听器由声学所专门研制, 分三种类型, 都附有 20 分贝增益的前放系统。它们的频率特性在 (4k - 100k)Hz 范围内比较均匀, 灵敏度起伏 $\leq \pm 2$ 分贝。但是, 各水听器的灵敏度不完全一致, 平均灵敏度在 -176.5 至 -172.5 分贝 (0 分贝 = 1 伏/帕) 之间。在高频时 (100kHz) 垂直指向性相差较大, PZT-5 长圆管径向极化水听器的垂直指向性最尖。在静水中声学系统的自噪声经 10kHz 高通滤波后, 折合有效声压为 0.2 微巴到 0.5 微巴。声阵列中心水平面位置的深度以 2.85m 为主。

瞬态声讯号判选、时差测量和波形记录系统 (见图 2) 的功能是: 七路符合电路实现瞬态声讯号事例的判选, 各通道的阈值相当于 (1.5—2.0) 微巴, 符合门的时间宽度为 1.5ms。被选中的瞬态声讯号事例, 经时差测量电路给出声讯号到达各水听器的时间数据由打印机记录, 电路的测时精度为 $0.5\mu\text{s}$ 。与此同时, 七路符合输出脉冲触发波形存储器, 有两路声讯号波形由 BC-V 型双通道瞬态波形存储器捕获, 然后由 x-y 记录仪描绘下来。每个通道的采样速度是 $0.5\mu\text{s}$, 共捕获 2048 个点, 计折合约 1ms 时间的样本。另有一路声讯号的波型由 DSS 6521 型数字波形存储器捕获, 用示波照相机拍照记录, 它的采样速度是 $1\mu\text{s}$, 捕获 1024 个点, 同样折合约 1ms 时间样本, 这样就得到了一组既包含确定声源方位的时差数据又包含有声讯号波形结构的完整信息。这是研究声讯号事例来源和性质的基本依据。

EAS 事例选择和记录系统是由四个 109r 型 *G-M* 计数管盒与相应的判选、记录和关联事例时差测量等电路组成。每个计数管盒内有两层密排 *G-M* 计数管重叠放置, 有效面积为 0.32m^2 。四个盒子分布在 $\sim 14 \times 4\text{m}^2$ 的船台上 (见图 1)。 *EAS* 事例选择的标准是四选三, 即任何三个计数管盒中都至少有一个带电粒子穿过, 就是一个选中的 *EAS* 事例。选择的能量阈值是 $\geq 10^{14}\text{eV}$ 的 *EAS* 事例。对于每一个选中的 *EAS* 事例, 由打印机记录下各排 *G-M* 计数管中放电计数管的数目。如果在一个 *EAS* 事例选中之后 1 秒钟的时间内, 有一个选中的瞬态声学事例, 叫做关联事例。时差电路记录下相应的延迟时间 ΔT 。如果 $C \cdot \Delta T \approx R$ 的关系得到满足 (其中 C 是水中的声速, R 是声阵列测定的瞬态声源到阵列中心的距离), 认为是一个真正的关联事例。如果瞬态声源是在表面附近, 即声源深度小于 1 米, 记录的瞬态声讯号就有可能是在 *EAS* 的轴干产生的。平时, 声阵列和 *EAS* 阵列两套系统是独立工作的, 只有关联电路工作时才把关联事例自动挑选出来。

在实验过程中, 为监测系统的可靠性和声阵列的定位精度, 用一个脉冲声源间断地进行定标。根据定标资料和实测数据的分析, 在 10 米半径范围内, 声阵列的定位精度好于 25%。大于这个距离, 定位精度下降较快。主要原因是水听器基阵孔径小, 对水听器装配误差很灵敏, 由于我们采用的水听器结构不同, 造成较大的阵列装配误差, 另外湖水的温度梯度, 无规则的水流也会引起声波阵面的畸变。

三、实验的结果和分析

这次观测实验的目的是寻找 *EAS* 轴干激发的水声讯号, 研究大水域中瞬态超声频水声讯号是否与高能宇宙线粒子在水中发展的局部级联簇射有关。通过对声阵列和 *EAS* 阵列关联事例的分析, 可以判断是否有可探测的 *EAS* 轴干激发的水声讯号。通过声阵列对瞬态声源位置的确定和波形的记录, 可以了解它们的性质和来源, 是研究它们是否与宇宙线有关的依据。

在大约 329 小时的观测时间内, 共记录到 116 个关联事例, 这些关联事例延迟时间的分布如图 3 所示, 它符合平均值 $\bar{n} = 2.9$, 标准误差 $\sigma = 1.7$ 的均匀分布规律。根据 *EAS* 阵列的计数率 (40 个/小时), 声阵列计数率 (30 个/小时) 和关联的时间窗宽度 (为 1 秒), 计算出偶然符合事例是 110 个, 在误差范围内与记录的关联事例数不矛盾。它表明绝大

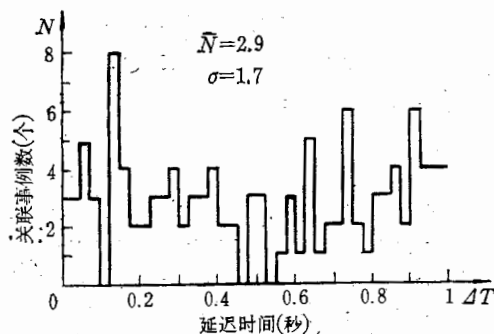


图 3 关联事例对延迟时间的分布

多数事例是偶然符合。在声阵列定位精度的范围内,没有发现满足 $C \times \Delta T \approx R$ 关系的关联事例,表明不存在个别的真正关联事例。对关联事例声源位置和波形特征以及相应的 *EAS* 事例粒子密度数据的综合分析,也可以得到同样的结论。结果表明在声阵列 10 米半径灵敏范围内,海平面附近 *EAS* 轴干声探测的阈能大于 $3 \times 10^{16} \text{eV}$ 。如果 *EAS* 轴干水声效应的机制与加速器带电粒子束水声效应的机制是一致的,即也是热声机制^[6],这个结果表明 *EAS* 轴干水声效应的理论模型可能与非均匀的热柱模型相符合,不可能是均匀的热柱模型或者热点模型^[6]。由于热声机制的声转换效率非常低 ($\sim 10^{-10 \pm 1}$),导致 *EAS* 轴干声探测的阈能必然是相当高的。

Kaneko 等人在 18 届国际宇宙线会议上报道在高山湖考察 *EAS* 轴干声探测的结果^[10]。他们认为水听器的自噪声和 underwater 噪声以及磁带记录器的噪声相对于宇宙线粒子产生的水声讯号是太大了,正在考虑用新发展的光纤水听器探测微弱的宇宙线水声讯号的可能性,以便实现对能量 $> 10^{20} \text{eV}$ 的超高能 *EAS* 轴干的声探测。发展高灵敏度低噪声的新型水听器是降低可探测阈能的有效途径,可能给超高能 *EAS* 轴干的声探测带来新的活力。

在观测期间,声阵列系统还记录了大量的瞬态和孤立的超声频水声讯号事例。有关它们的性质和来源将另文讨论。为了弄清它们是否与高能宇宙线粒子的局部级联簇射有关,我们分析在声阵列 10 米半径灵敏范围内,声源深度大于 1 米的瞬态水声讯号。这些讯号的波形特征如图 4 所示。特点是孤立的瞬态波形,一般是 3—5 极的脉冲波形(对于三极脉冲波形,负压脉冲明显大于正压脉冲),很短的持续时间(25—60 μs),频率在超声频范围(60—100 kHz),归一到声源 1 米处的声压峰值是数拾微巴。这些特点与半径是 $(3-7) \times 10^{-3}$ 厘米的微气泡的声辐射很相似^[12]。在“高强度超声场”一书中,给出蒸馏水中具有不同半径气泡的密度^[13],有 $(3-7) \times 10^{-3}$ 厘米半径气泡的密度是 ~ 250 个/米³。

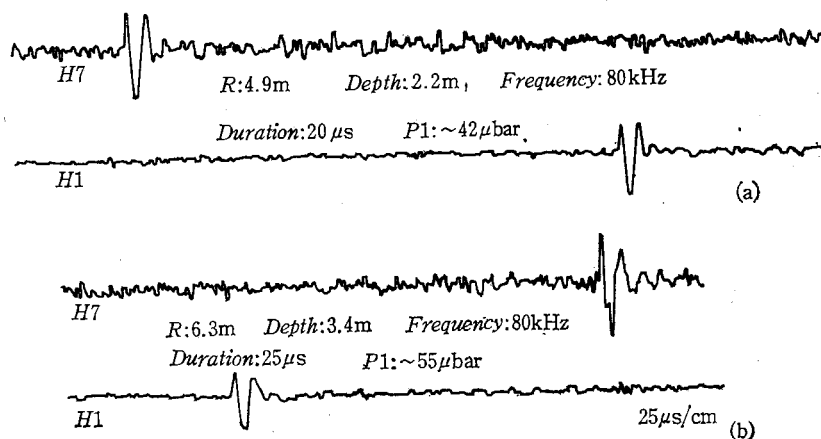


图 4 两个典型瞬态超声频讯号的波形 (a) 和 (b)。每个事例由 BC-V 型瞬态波形存储器捕获两个水听器接收的讯号波形 (H1: 声阵列正 x 轴水听器接收到的波形; H7: 声阵列中心水听器接收到的波形; R : 声源到中心水听器的距离; D : 声源的深度; f : 脉冲声讯号的频率; t : 脉冲声讯号的持续时间; P_1 : 距离声源 1 米远处的正压脉冲峰值。)

当然,在自然水域中气泡的密度肯定高于此数值。这些气泡的势能在 $(10^{11}-10^{12})\text{eV}$ 范围^[14]。按照气泡声辐射效率 1.5%^[12],估计这些气泡辐射的声能在 $(1.5-15)\text{GeV}$ 范围,根据记录的瞬态波形和点源假设,推算出记录的瞬态声源辐射的总声能也是在这个范围。因此可以认为,我们记录到的大量孤立的瞬态声脉冲讯号,系由微气泡声辐射引起。国外曾有人提出,宇宙线在水中会引起空化效应^[15],并可能产生微气泡^[16]。然而,根据我们记录到的事例空间分布的性质,如深度分布是随深度增加而下降,平面分布明显地偏离随机的均匀分布,没有发现可靠的与宇宙线粒子局部级联簇射有关的证据。此外,根据形成半径是 $(3-7)\times 10^{-3}$ 厘米的微气泡需要 $(10^{11}-10^{12})\text{eV}$ 的能量,或者瞬态声源辐射的总能量是数十 GeV 的事实,也找不到任何机制可使宇宙线粒子在很小的体积范围内达到如此高的能量沉积。因此,完全由宇宙线粒子的能量沉积直接提供形成微气泡的能量或者辐射的声能看来是不太可能的。由此推算出在 10 米半径范围内宇宙线粒子在水中发展的局部级联簇射声探测的阈能大于 10^{14}eV 。但是,如果实验上能进一步证实记录的瞬态声脉冲讯号来源于水中微气泡的受激声辐射,那么,除了热力学的统计涨落,气泡附近局部的物理化学反应、水介质的扰动等等是可能的一些激发因素以外,高能宇宙线粒子或者低能反冲核形成的高密度能量沉积也可能是一种激发因素。理论的分析^[6, 15, 16]表明存在这种可能性。一旦这种过程能被实验证实,或许能开拓宇宙线粒子声探测的新途径。

四、结 论

实验结果表明在天然水域中超声频背景噪声是相当复杂的,是一个未被仔细研究的领域。我们记录了许多孤立的和瞬态的超声频水声讯号,其波形特征和辐射的声能量基本上与微气泡的声辐射相符合。虽然从频带范围和某些波形特征来看,也有与理论上预期的宇宙线粒子的水声讯号相似之点。但是,没有发现它们与宇宙线明显相关的证据,在如此复杂背景噪声的天然水域中,要想实现宇宙线粒子可靠的声探测是相当困难的,今后除了需要研制高灵敏度低噪声的水听器(光纤水听器),进一步扩大水听器阵列孔径外,还必需对水中的瞬态超声频声讯号进行深入地研究。

何泽慧先生和霍安祥同志对本工作的关怀和一些有益的讨论,声学所有关同志在研制水听器等方面给予的帮助,李光华、张国华、肖谦宜、苏实、王庭鹤和曾劲等同志参加了部分数据收集工作,在此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] V. D. Volovik et al, 14th ICRC, 8(1975), 3096.
- [2] Proceedings of the 1976 DUMAND Summer Workshop p. 523, Proceedings of the 1979 DUMAND Summer Workshop p. 128.
- [3] V. D. Volovik, G. F. Popov, 15th ICRC 9(1977), 37.
- [4] W. V. Jones, 15th ICRC, 6(1977), 271.
- [5] A. Roberts, AD-A048061 December 1977.
- [6] S. Hanish, AD-A050563 May 1978.
- [7] W. L. Barrett, Science, 202(1978), 749.
- [8] L. Sulak et al, NIM, 161(1979), 203.

- [9] V. J. Stenger et al, "Status Report on the Barking Sands Project" 1977.
[10] T. Kaneko et al, 17th ICRC, 11(1981), 426; 18th ICRC, 11(1983), 428.
[11] 姜印琳等, 科学通报, 25(1980), 347.
[12] D. Ross, 水下噪声原理, (中译本) (1983) p.78, p.277.
[13] L. D. Rozenberg "High-Intensity Ultrasonic Field" p. 279.
[14] W. Hentschel and W. Lauterborn, Applied Scientific Research, 38(1982), 225.
[15] D. Stette and F. Wangerling, *Phys Rev* 125 (1962), 409.
[16] D. Stette and F. Wangerling, *J. Acoust. Soc. Am.*, 41(1967), 1074.

RESEARCH FOR THE POSSIBILITY ON DETECTING COSMIC RAY PARTICLES BY ACOUSTIC WAY

JIANG YIN-LIN YUAN YU-KUI LI YAN-GUO

CHEN DUON-BAO ZHENG RONG-TING

(*Institute of High Energy Physics, Academia Sinica*)

SONG JIAN-NING

(*Institute of Acoustics, Academia Sinica*)

ABSTRACT

The exploring results of the possibility on detecting cosmic ray particles by acoustic way are reported. It shows that the ultrasonic background noise is very complicated and there are some individual and transient ultrasonic signals in the natural wide water. The mechanism producing these signals may be the sound radiation of the microbubbles in water. There is no evidence for the possible correlation between these signals and cosmic ray particles. The threshold energy of acoustic detection of *EAS* core is above $3 \cdot 10^{16}$ eV at sea level and the threshold energy of acoustic detection of the local showers produced by cosmic ray particles is above 10^{14} eV.