

海洋声学及其进展*

A REVIEW OF THE RESEARCH AND DEVELOPMENT OF OCEANOGRAPHIC ACOUSTICS

尤芳湖 邱永德

YOU FANG-HU QIU YONG-DE

(中国科学院海洋研究所)

(*Institute of oceanology, Academia Sinica*)

«海洋声学»一詞首先是苏联舒列金院士在本世紀 30 年代提出来的。他在海洋物理学一书中^[12],有专章論述海洋声学(Акустика моря),并着重地分析了海水中的声速及其与其它海洋参数的关系,指出了由风浪产生的海洋次声^[12,22],及用以预报暴凤的可能性。这可以说是从海洋学的角度研究海洋声学现象的开始。第二次世界大战期间,由于反潜艇战的需要,声学设备在海水下探测和通讯中,得到了迅速的发展,声波在海洋中的传播理论也获得了一系列的成就。因此,关于这方面问题的研究,已发展成为一门独立的学科——水声学(Гидро-акустика),它是研究声波在(海)水介质中辐射、传播、接收以及混响、反射、噪声等物理现象的科学^[15]。水声学研究的对象已大大地超过了 30 年代的海洋声学的范围;研究工作者的队伍已从少数的海洋学家扩展到有大量物理学者、电子学者等参加的行列了。海洋声学与水声学的研究对象与范畴,究竟有无差别,或者应当如何划分,就日益成为一个值得讨论的问题。但是,随着声波在海洋中传播理论及应用技术的深入研究,许多声学(物理)家们愈益感觉到要彻底解决一些根本性的水声学理论或水声工程技术问题,需要结合各个具体海区的海洋学特点,并与海洋学者紧密合作^[3]。而有些海洋学者,则已对海洋中的一些声学现象,产生了巨大的兴趣,并从海洋学的角度去探讨这些问题。最近,海洋声学已被一些苏联学者当作海洋学的一个新领域重新提了出来^[3,5],并且认为,海洋声学应当研究影响声波在海洋中传播过程的海洋学因子及其变化,

例如温、盐度的垂直结构、底质、底形和浮游生物的空间分布以及海洋噪声等等。这实质上和美国学者的所谓声学海洋学(Acoustic oceanography)的内容基本上是一样的。现在世界各国还不仅从军事角度上重视水声技术的应用,并且也开始注意它在发展海洋学上所起的重要作用。1962年在英国伯明翰举行的一次国际海洋学代表会议上,曾提出«应用声学来研究和开发海洋»的专题,引起了广泛的讨论^[50],有些国家并把声速预报、生物噪声等的研究,列入其海洋科学规划中。因此,考虑到我国海洋学和水声学发展的特点和需要,也参考了国际上的发展趋势,我们试图从海洋学的一些角度,把海洋学与声学结合最为紧密的部分归纳为五个问题,作为我们目前所理解的海洋声学的研究范畴,这些问题是:(1)声速的精确测量及声速分布类型的研究;(2)海洋生物发声及海洋环境噪声;(3)深海及浅海散射层;(4)海洋内波及海水介质起伏;(5)声学技术在海洋学上的应用。我们认为:这些问题主要是从海洋本身的声学现象出发,立足于海洋水文物理学和海洋生物学,具有海洋学的特色,并可充分利用(水)声学的成就,使海洋学和水声学相互渗透,相互促进的一些研究领域;而同时,它们又与主要是研究声波在海洋中传播规律的水声学有明显的区别,我们这样理解:海洋声学或声学海洋学是海洋物理学的一个分支,而水声学则是声学的—一个领域。但

* 本文是在曾呈奎、毛汉礼两位教授的督促下写成的,謹此致謝。

是,应当指出,我們这样划分的目的,只想抛砖引玉,引起海洋科学工作者对于海洋声学的兴趣,从而能够促使这一新兴领域的快速发展。

一、声速的精确测量及声速分布类型的研究

声波在海洋中的传播速度是海洋声学研究中的一个极重要参数,它也是从 Kuwahara^[34] 开始直到最近几年来许多有关的科学工作者所关心的主要问题之一。声速在海洋中的空间(垂直和水平)分布对声波的传播起着决定性的影响,将海水看作分层介质,从某种角度来看就是从将声速垂直分布(主要是温度分布)近似地看作线性折线组合出发的。因此,举凡声场的计算,水声设备的使用,“索法”(SOFAR)站的建立等等,没有声速垂直分布资料都是不可能的。

根据著名的声速与介质绝热压缩系数和密度的理论关系,19世纪20年代以来,英国、德国、苏联和日本的学者,曾先后推导出海水中声速与海水温度、盐度和静压力的关系,或编制了一系列的声速图表^[6,34,42]。其中 Mathews (1944)和 Kuwahara (1939)的关系式^[34,42],在各国海军和海道测量中,曾得到较为普遍的应用。

自从采用干涉方法测量声速(干涉测速仪)后,Del-Grosso (1952)曾根据一些实测数据建立了新的声速经验公式,提高了计算的准确度,发现 Kuwahara 公式在浅海中(1至100个大气压左右)有偏高的现象。最近几年,由于高精度声速计的问世和精确试验量测的结果^[25,31,57],有关声速的研究,得到了迅速的发展。美国国家标准计量局(NSB)的所谓“Sing-around”式声速计^[30],可在大洋中任何深度上进行声速连续测量,其精确度达0.3米/秒以内,由此可以获得海洋中时间、空间连续的声速分布资料;应用这种声速计,Wilson (1959,1960)曾在实验室条件下分别在蒸馏水和海水中,测量并研究声速与温度、盐度、压力的函数关系,得到了新的声速经验公式^[56,57,58]。在这个经验公式中,除了分别考虑温度、压力和盐度单独变化时的声速订正值外,还计入了它们同时变化时的综合效应,并包括了前人未曾顾及的海水在300个大气压下的可压缩性因素,这对深海情况下是必须的。这个公式曾由 Mackenzie (1961)及 Hays (1961)等人在深海潜艇“Trieste”号及调查船“Chain”号上进行当场校验,认为

Wilson 公式是目前各种声速公式中最好的一个。它不仅适用于较宽的温度、盐度、深度范围,证实了 Del-Grosso 所发现的 Kuwahara 公式在低水压时声速偏高的意见,而且表明,在大深度上 Wilson 公式较任何公式准确。例如,在2,500米深度上,Mathews 式与实测偏差达2.5米/秒,而 Wilson 式则仅为0.5米/秒。

声速的精确测量和计算,在声学和海洋学的研究上,具有极为重要的意义。首先,根据声速的实测资料,可以对某些本来难以研究的水声学现象进行探讨,例如对声道内传播中有时产生散焦、散射和接收信号不稳定(起伏)现象的研究中,通过对两个相距800哩的测站上声讯号与声速起伏的相关分析,发现这种现象是由声道内定点间隔声速的无规变化所引起的,因而得出在某些条件下与时间有关的多重声道(multi-channel)的初步结论^[16,17,18]。其次,根据声速连续测量资料所获得的声速垂直分布类型和声速垂直梯度值,可以较为准确地确定声纳的作用距离,便于迅速搜索敌舰或隐蔽于安全地区免受对方侦察^[43]。此外,声速的精确测量和计算提高了射线声学(几何声学)应用于声场研究的准确性,从而使理论和实际的吻合程度得到改善。例如用 Wilson 式得出的声速分布去计算声线密集区离声源的距离时,就比用 Kuwahara 式更接近于实际情况。特别应当提出的是声速的精确而连续测量不仅从声学的角度来谈有重要意义,而且对海洋学的一些分支领域正在起着很大的影响。声速已有可能象温度、盐度一样,被列为一个基本的海洋要素。我们知道,目前海洋学的研究已经从定性的描述逐渐进入到对其物理、化学和生物过程的定量研究,越来越要求提高主要海洋要素测量的精确性和连续性。因此,精密声速计的出现和时空连续的声速测量数据的获得,就可以更好地来研究海水介质的温度、盐度的微结构和起伏、流速脉动,确定锋区、中层冷水、中层低盐水的界限及变化,以及作为划分水团的一个补充指标等等。同时,准确的声速实验公式的提出,又可以为充分的应用大量的海洋历史资料,研究声速的分布变化及其与海洋要素的关系,为相互推演创造前提。因此,1957年以来,美国 Woods-Hole 海洋研究所已将声速计列为与 BT、盐度计等一样的基本海洋学仪器,并作为研究海洋因子瞬态连续变化的一个主要工具。在声速问题中,关于声速(垂直和水平)分布类型的研

究,也是海洋学中一个重要课题。因为,声速的垂直分布类型,基本上是决定了声波传播的宏观模式和衰减规律,早引起各国学者的重视。在精密的声速计和准确的声速公式出现以前,一些美国学者就对太平洋东北部声速的垂直和水平分布作了研究(Anderson, 1950),发现了这一区域中水下声道轴的位置和声区上下界深度的变化现象,为利用声波在水下声道中的超远传播特性,在太平洋建立“索法”系统提供了根据;Anderson 的研究指出,太平洋东北部水下声道轴位于 500—700 米深度的中间水团上,并且上层水团的温度越高,盐度越大,声道轴的位置就越深^[14]。Kutschale (1961) 在研究北冰洋中声波的超远传播问题时,也指出了北冰洋“表面声道”的存在,并认为是由于在 350 米以上水层的强烈的温度正梯度所造成的^[33]。由于声速分布类型的知识,在某种意义上可以指导声波传播实验研究的方向,又是使用和设计各种水声设备所不可缺少的依据,因此,声速分布类型的研究,近年来已引起各国学者的广泛注意^[4],在一些外国研究机构的出版物中,还详细介绍了海洋空间声速预报的必要性及前景^[11],并有所谓声速海洋学 (oceanography of sound velocity) 的提法。

总之,声速的测量、计算及其分布类型的研究,无论就其理论或实践意义上说,都是极为重要的,特别是在我国浅海中,海水的温、盐度分布特性及其结构与大洋有明显的区别,浅海中声速分布类型的变化也极复杂,初步研究已经表明,在东海某些区域存在着水下波导和反波导、表面波导和反波导和垂直均匀等类型,它们与水团结构的关系极为密切,并有显著的季节变化,因此,进行我国海区中声速的精确测量,验证目前国际上通用的声速公式在浅海中可利用的程度,并从海洋水文物理学的角度去研究声速的分布类型及其变化规律,我们认为是推进海洋声学、促进水声工程技术及水声物理的发展所不能不注意的一个中心课题。

二、海洋生物发声及海洋环境噪声

对海洋中接收有用信号来说,生物发声所形成的噪声是主要影响因子。虽然波浪、潮汐、海流、风、雨、冰雹(特别是近岸带的波浪、潮汐)等也会在接收设备中增加噪声,但其影响程度一般远较生物噪声为小,前者在一个倍频程带宽内的噪

声级不会超过一达因/平方厘米;而后者却常常达到几百达因/平方厘米的量级^[24]。研究生物噪声和海洋环境噪声的声学特性,及其与生物机体和海洋环境要素的相关,不仅对水下通讯、声纳设备、噪声定向站和声致武器(声制导鱼雷、音响水雷)等有关国防尖端技术的发展有重要意义,而且对促进海洋生物实验生态学的研究和水产捕捞技术的改进也是极为有益的,并且将为海上波浪和大风的预报开辟新的可能途径。

研究生物发声的内容,主要有以下几个方面:(1)了解特定海区中生物噪声的地理分布、声强级,及其昼夜、季节变化情况;(2)研究各发声生物群噪声的平均频谱;(3)研究单个发声生物噪声的频率范围、脉冲形状和宽度、音调(能量集中的频率或频带)以及最大声强级;(4)研究生物发声环境条件及其对发声特性的影响;(5)研究各种生物的发声生理机制及物理机制;(6)某些主要生物噪声的传播衰减。

在这些方面, Moulton, Everest^[26], Fish^[27] 和 Tavolga^[48] 等作过大量的研究,他们所得的结果,可以归纳为以下几点:(1)在给定海区中大多数生物噪声强度和分布有昼夜和季节变化,但它们的平均频谱是不变的,如鼓虾和黄鱼等;(2)根据对 acanthyridae 的将近四十个属大量发声鱼类发声脉冲的统计分析,其频率范围在 0—8 千赫左右;最大能量集中(音调)在 0.6—5.5 千赫之间,单个声脉冲的持续时间最短为 0.5—1 毫秒(鼓虾),最长的达 200 毫秒;(3)大部分发声生物有其一定的发声环境条件,在海洋环境中发声与在实验室中用人工促使发声时,其发声持续时间、发声强度和音调均有所不同,而频率成分则变化较少,例如海鲈(*Baqrē marinus*) 在人工促使发声时发出短促的“嗥叫”声,而在自然条件下则发出悠长的“哭泣”声;有的鱼类甚至在实验条件下完全丧失或部分丧失发声能力;(4)某些鱼类个体发声(或数量不多的发声)与集体发声不同,在集体发声时会出现所谓“合唱”(chorus)现象(如黄鱼、鲈鱼);(5)某些鱼类的发声与其生理状态有密切关系,如虾虎鱼科(Gobidae)、鳎科(Bleniidae)等只有在求偶时才发声;而且生物发声的音调与鱼的成熟程度有关^[24],幼鱼的音调高,成鱼的音调低,而整个频谱没有很大的改变。此外, Fish (1954) 曾对西北大西洋常见的 60 种鱼类的发声问题作了实验研究^[27],发现其中作生物(内外器官)发声的有 27

种,机械(游泳、覓食、碰撞)发声的27种,不发声的有6种,并对发声的物理特性和机制及其地理、季节、昼夜、垂直分布变化情况作了分析。最近 Fish 还对多年来在太平洋和大西洋发声生物的分布特性及其对水下测位和导航的影响,作了较全面的总结。他指出在这些区域中对水下声纳和其他声致武器有影响的发声生物,主要是大量的黄鱼和鼓虾。这二类生物的发声频率范围和声纳等水下设备所采用的频率是重合或十分接近的。为了防止和抑制这些噪声对水下设备的影响,研究这类噪声中不同频率成分在具体海洋条件下的衰减规律是十分必要的。我们知道,声纳的作用距离(声纳方程)除了与声速垂直分布紧密有关外,还取决于接收时的信号噪声比这个主要因子^[43]。不久前,美国海军军械试验站的海洋研究部,研究了海豚在高速运动时(115节左右)的流体动力学问题及其发声测位发现目标的声学本领,认为海豚的声学导航原理,在发展水下探测和通讯技术上,可能有重要的意义。

以上所述是关于海洋生物发声问题。在海洋中,除海洋生物噪声外,还有海洋自然环境噪声,它与海洋自然状况有密切的联系,它的产生主要是由于海水各种形式的运动结果。因此在一定意义上说,研究海洋自然环境噪声的机制也是研究海水运动的一个固有特征,对海洋学的发展是有其实际和理论意义的。

在海洋自然环境噪声的研究中,归纳起来有二个主要问题:(1)产生这类噪声的主要贡献者及其机制,它们在构成总的噪声谱中(不包括生物噪声,下同)所起的作用;(2)用什么参量(或哪些参量)作为海洋表面扰动程度的度量。

关于第一个问题,很多学者对风、流、潮汐、波浪、雨、雹、海冰等作过许多研究,认为总的噪声谱主要是由于海水中湍流、表面波浪或其他原因所形成的水花、气泡和海水分子热扰动所引起的噪声所构成的。Gordon 指出^[29],在 $1-10^4$ 赫范围内的噪声谱可以分为三个部分:① 1至100赫低频分谱(Low frequency spectrum components);② 10至1,000赫的所谓非风生分谱(non-wind-dependent components)和③ 50至 10^4 赫的风生分谱(wind-dependent components)。低频分谱主要是由湍流的压力起伏引起的,具有较大的衰减率(-8至-10分贝/倍频程);风生分谱(最大声强在100至1,000赫)的主要贡献者为水花和气泡;

至于非风生分谱(最大声强在20至100赫),则不仅与某些流体运动以及上述三类分谱的迭加有关,而且常常取决于某些人为噪声(如海洋中的船舶噪声),且因时、地而异。 10^4 赫以上的噪声则由海水分子的热扰动所决定。除此以外,降雨、降雪、海冰移动以至地震等现象也会引起噪声级的某些增加,但它们的影响是间隙而局部的。

至于第二个问题,实际上是一个研究方法(与什么参量结合起来研究噪声谱)的问题。著名的 Knudsen 噪声谱曲线是以风速或海况等级为参量的,但是从很多的实验噪声谱曲线中,发现风生分谱在同一风速或相同海况下,同一地点不同时间内所测得的结果有明显的变化,因而使人们对只取风速或海况等级作为表征海面的扰动程度的真实性产生了怀疑。实际上,海面扰动程度并不仅仅取决于风速这样一个参量,它同时还与风的持续时间、风浪区和风的稳定度有关,而且浅海中的地形,上风或下风等也是一些影响海面扰动的因子。应当指出,虽然国际上关于海洋自然环境噪声的研究已经有20年左右的历史了,Knudsen 提出的海洋噪声谱曲线也基本上概括了一些研究成果,奠定了这方面的基础,但整个工作尚处于发展阶段,最近许多学者所作的不少研究,表明 Knudsen 谱还存在着不少有待进一步探讨的问题。例如 Knudsen 认为在50赫以下的噪声级与风速或海况的依赖程度随着频率下降而减弱,到100赫以下已看不到这种依赖性了;而在其他一些实际观察报告中则指出^[29],甚至低至50赫,二者仍然有显著的关系。关于噪声的机制方面,虽有过一些研究,但对所得的噪声谱还不能作完善的解释(例如最低噪声级的成因)。到目前为止,可以说海洋噪声的研究主要是在获取和解析总的平均噪声谱方面,对于时间的特性(季节、昼夜、以至以小时计的短时间变化)、空间特性(例如噪声的方向性)、统计特性(如振幅统计分布)以及影响这些特性的许多因子的研究做得还很少,而这些特性对全面了解海洋自然噪声是十分必须的。

海洋生物发声现象和自然环境噪声的研究,除了一部分在实验室条件下进行的工作外,在现场(海洋环境下)设立固定研究塔^[35],长期而系统的研究发声生物及自然环境噪声的生物或物理过程和时、空相关是很主要的一个方面。在研究的方法上,通常是使用晶体换能器、前置放大器、磁带录音机和频谱分析仪。十多年前,科学工作者

的注意力主要是集中在可听频率范围内 (Dobrin, Moulton, Fish, Tavalgo), 近年来, 发现生物发声的频率最高可达 100 千赫左右^[29], 而自然噪声则有长达几十秒的低次声, 因而已较广泛地采用能够同时记录超声频、声频和次声频段的录音设备, 然后进行频谱及其他特性的分析。记录方法和频谱分析技术的进步, 将使海洋噪声的研究进入一个新的发展阶段。

我国沿海渔民对鱼类发声及海上风暴到来前所发的低次声早有了了解, 并见诸记载。例如, 明朝李时珍《本草纲目》中就有关于石首鱼(黄花鱼)发声的生动描写: “出水能鸣, 其声如雷, 渔人以竹筒探水底, 闻其声乃下网截流取之。”这也可以说是最早的声学探鱼方法。我国是国际上一个主要的海洋渔业国家, 开展海洋生物(特别是主要经济鱼类)发声问题的研究, 分析各种海洋发声生物的频谱特性、音调、发声机制及其与成熟程度和环境因子的关系, 对发展我国声学探鱼改善捕捞技术, 有着十分重要意义。据初步研究表明, 在我国某些海域, 海洋环境噪声级高达 30 分贝以上, 因此, 结合生物噪声对海洋环境噪声进行系统的连续记录, 研究它们和各种主要海洋因子的时间和空间相关, 不仅可为水声设备的设计、布阵、抗干扰等, 提供不可缺少的资料, 同时, 可为海洋水文气象预报, 开辟新的途径。此外, 生物发声与环境因子有关这个现象也向海洋生物学家提出了一系列新的研究课题。例如发声生物的发声机制, 它们在不同的环境条件和生理过程中, 发声特性的变化, 等等。这些问题的深入研究, 将有利于这门科学的发展。

三、深海及浅海散射层

深海散射层是(1942)在太平洋中首次被发现的^[41], 现已证实是世界各大洋的一个普遍现象, 它的特性、分布规律及成因, 也已日益引起海洋物理学家、海洋生物学家和水声学家的广泛注意, 并获得一定的研究成果。但其成因问题则尚未得出令人满意的结论。

深海散射层一般出现在大洋 40 米至 450 米(最早只在 200—400 米深处发现)的深度范围内, 它们对声频和超声频信号具有强烈散射特性, 有时在船只的回声测深仪上可以收到由散射层返回来的回声信号, 好象碰到海底一样。声波在有散射层的大洋中传播时会出现一些如在浅海中传播

时的现象(特别是象体积散射所引起的混响)。Lyman, John (1948)干脆把这种散射层称为“虚幻的海底”(The sea's phantom bottom)^[23]。

根据许多学者的研究, 海洋散射层的特性主要可归纳为以下几点: (1)深海散射层是世界大洋一些水域中的一个普遍而稳定的现象; (2)散射层具有周日垂直变化, 一般是日出而沉, 日落而升; 白天处于平均位置上; 沉升的速度大约在 1 至 6 米/分, 沉升幅度可达 100 米以上, 一般沉比升来得快, 这种现象没有季节变化; (3)在白天, 散射层几乎是平的、绝对连续的; (4)深海散射层所在处盐度一般是均匀的; (5)散射层的散射能力是深度和频率的函数, 在每一给定深度下散射层具有一产生最大散射能力(最大散射系数)的所谓谐振频率, 随着所在深度的变化, 这个频率也会跟着变化。

关于散射层成因问题, 主要可以归纳为两种意见: 一为英美学者的生物成因说; 一为法国学者的物理成因说。

生物成因说的出现较早, 许多学者主要是从散射层位置的 24 小时内的变迁同海洋生物随光线强弱而上升下沉的行为很相类似这一点出发的, 结合层的散射能力与频率有关的现象, 因而设想声散射体是具有气囊的生物群组成; 而且在散射层附近, 确实也找到了浮游生物或游泳动物群^[55]。但是究竟是那一类生物群, 迄今尚无定论。Hersey, Moulton, Marshall^[41]等认为是深层漂浮的生物(Myctophidae), 而 Moore, Barham 等认为是硬壳磷虾(Euphausiidae), 最近 E.G. Barham 等则以为是管水母目(Siphonophores), 这些意见主要是在研究从散射层所在处用拖网捕获的为数不多的生物之后得出的。Tucker 的报告虽然提到深层漂浮的鱼类可能是散射层的主要组成者, 但捕获的这种生物的密度只有 0.034 尾/立方米, 硬壳磷虾的数量更少, 这么小的生物密度竟能形成稳定的具有显著散射能力的散射层, 是很难以令人完全信服的。Barham 为了进一步弄清散射层的内部结构, 通过“Trieste”号在水中的直接观察结果, 并应用理论上的计算, 证明在一定深度能发生一定谐振频率的气泡的大小, 是与管水母目生物的气泡尺寸十分相近的。在他的观察中也发现了深层漂浮生物和硬磷虾, 但前者是在散射层的下面, 而后者则是在层的上部且密度和数量均不大。此外, 作者还提出管水母目生物是在世界大

洋中普遍存在的生物。看来, Barham 等的这种生物成因說, 不論其所依据的直接观测資料或理論分析, 都有其独特的地方, 似乎可以較滿意地解答海洋散射层的成因了, 但是还有一些問題是生物成因說者目前尚不能解答的, 主要是: (1) 如果散射层是生物构成的, 那末为什么它是大洋一些水域中一种较为普遍的穩定現象, 而与水文物理和化学条件的变化无显著的关系, 而从生物学观点来看, 不同种类(科、属)、大小的生物羣, 即使在同一地区也是有季节变化的; 从声学角度来看, 其声学特性也并不一样; (2) 如果构成散射层的是生物, 則散射能力主要将取决于生物密度, 但为什么同一地区的許多散射层的超声回声信号强度几乎沒有变化, 什么原因可能使生物密度維持不变等等。

由于生物成因說在解释現象上的局限性, 以 Tchernia^[49] 为代表的法国学者主张从海洋物理学的角度来研究这个問題。最近 Frassetts, Backus^[28] 等的研究指出, 深海散射层的分布变化与海水的熱微結構、海流、潮汐、內波过程有密切的关系。此外, 考虑到散射层是稳定的存在于海洋之中, Hersey 和 Backus 根据实验結果, 试图找出层的諧振频率和所在深度之間的关系。他們把散射层按諧振频率分成三类: (1) 频率在 12—25 千赫的所謂高频散射层, 这一层的諧振频率随深度的变化与相对靜水压的变化的 5/6 次方成正比; (2) 频率在 6—11 千赫的中频散射层, 其諧振频率变化与相对靜水压变化的平方根成正比; (3) 频率在 5 千赫以下的低频散射层, 沒有表现出諧振频率与深度之間的确切关系。到目前为止, 深海散射层的物理成因說, 也还没有得到完滿的結果, 尚待进一步探索。

现在要提一下, 在浅海中是否有类似的散射层問題, 这可能是我国海洋学工作者所关心的一个問題。1951年英国海洋学家 Burd, Lee 以及以后的 Parish 和 Craig 都曾指出, 在英伦海峡、北海和巴伦支海等浅海中 (10—80 米) 使用超声回声测深仪收到形状与深海散射层相似的回声訊号; 他們还指出, 这是和上述浅海中, 存在着密集生物羣(主要是幼虫和小魚)有关的^[49]。Tchernia (1946—1948) 在法国和摩洛哥海濱也曾发现过长达几十哩的生物集合区, 但沒有发现象深海散射层那样稳定的回声信号。Tchernia 等认为深海中的散射层所引起的混响与浅海中生物羣所引

起的散射混响是会有所不同的。因此, 关于海洋中密集的生物羣問題, 最近也引起了海洋声学工作者的注意。例如, 早在 1933、1938、和 1942 年, 以及最近的 1958 年在美国圣地亚哥附近产生的所謂紅潮 (Red tide, 或 Red water), 就是由一些小生物, 如双鞭藻 (dinoflagellates) 和 *Procrocentrum micans*, *Gonyaulax polyedra* 等所組成的^[13]。这种現象在离岸不到 50 米、深度不大于 30 米处产生, 长度达 1/4 哩, 存在的周期有的是一个星期, 有的长达 3 周。Scripps 海洋研究所曾对此作过分析, 但尚未得出产生“紅潮”的定論。这种“紅潮”对声波的传播所产生衰减最大可达 64 分貝/千碼^[32], 其吸收声能的机制可能与生物在新陈代谢时所产生的气泡有关。这可以說是浅海散射层中的一个特殊課題。

如上所述, 深海和浅海散射层的分布、特性以及成因等許多問題的研究, 与海洋学的許多分支学科有着极为紧密的联系, 因此, 需要海洋物理学、生物学工作者的共同努力。我国面临着大片的浅海和深海, 海面的波浪及所产生的大量气泡、强梯度的温、盐跃层、高密度的悬浮物質以及密集的生物羣等等, 都有可能形成散射层。据初步的实验表明, 在我国一些海域中, 声頻訊号的散射系数有的高达 10^{-5} 以上, 并有较为明显的周日变化。探索和研究我国近海的散射問題, 应当成为我国海洋声学研究中的一项主要内容, 它不仅可为发展我国水产技术提供基本資料, 而且可以促进海洋生物羣落及其回游等問題的深入研究。

四、海洋內波及海水介質起伏

海洋內波及海水介質起伏早已成为海洋物理学家的一个重要研究課題, 近几年来, 由于这些問題与声波在海水中传播时的长、短周期起伏和随机起伏以及异常传播衰减現象有紧密的联系, 日益引起了有关学者的注意。如果我們认为, 上面所介绍的声速垂直分布类型, 决定了声場的宏观模式, 那末海水介質的起伏和內波, 从而也就是声速的起伏和等声速綫的振动, 这些都直接影响声場的微观結構及其变化。只有把这两方面的問題結合起来, 才能很好地了解声在水介質中的传播規律。

应当指出, 我們这里所說的海洋內波, 指的是海水分层介質中层面的周期性振动, 从物理意义上說, 也可以看作是海水介質起伏的一种型式, 但

为了研究上的方便，一般称周期从几分钟至几小时的起伏为内波，而对海水这一非均匀介质中，温、盐度、流速等很快地无规则地随机变化，即海水介质的微观不均匀性，则称为介质起伏。研究证明，声传播起伏的周期变化范围很宽（从不到1秒至长达几小时），因此，必然产生了把海水介质这种起伏特性，与声信号的起伏联系起来进行研究的问题。

关于内波问题的理论研究，最早是由 Stokes (1847) 开始的，其后 Haurwitz (1931)、Fjelstad (1935) 等曾分别发展了所谓“环形波”(Cellular waves) 和“长周期前进波”的内波理论，并由 Defant (1932, 1938)、Lek (1938) 等在 F. Nansen 发现了“死水”，约 30 年之后，利用调查船“Meteor”和“Snellius”抛锚站上昼夜连续观测资料，进行了具体的分析，阐明了具有潮周期的内波的存在，但因系单点观测，不可能获得内波在空间中传播的概念。最近以来，由于深度温度计(BT)和各种热敏电阻式自记测温仪的广泛应用，采取三船^[53,54]或三浮标站^[37,38]同步观测的方法，以了解给定海区中的(温度)内波各要素。到目前为止，有关海洋内波的研究成果，与海洋声学研究直接有关的大致可以归纳为：(1)内波的频谱范围很宽，一般分为周期为几分钟至几十分钟的短周期内波和周期为几小时到几十小时的长周期内波，内波的振幅和相角，随深度有显著的变化，但在分层界面上振幅达到最大值；(2)短周期内波的成因主要是海面波浪和气象要素的扰动，长周期内波大都具有潮汐(半日和全日)周期，但也有周期大于13小时的非潮(惯性)内波；(3)潮汐内波的成因不是由于水平或垂直引潮力的直接作用，而有较大的可能是由于潮流的垂直不均匀性(vertical heterogeneity)所引起的^[23]，而地球偏转力对内波作用时产生的共振，则使潮内波的振幅大大超过表面潮汐；内波的波长及其传播速度则又小于表面波，等等。

将内波与声讯号起伏问题结合起来进行研究的，近年来逐步增多，首先应当提到的是 O. S. Lee 的工作^[37,38]。他从内波的实际观测和声场的实验研究出发，假定跃层以正弦波方式振动，应用声线理论计算，结果指出：长周期、高振幅内波对低频信号相角有很大的扰动；在没有内波时，声强遵循按距离衰减的规律；在有内波情况，声能的空分布模式是不规则的，出现有宽的声影区和窄的高强度区(亮区)，前者位于内波波峰下面，后者

位于波谷，并交替重复地出现；他还得出，在没有内波时，经一个内波波长的传播衰减不大于5分贝，而有内波时增大至22分贝。Ufford 则认为，声在海洋内波中传播时所产生的这种影区和亮区的变化，就是声讯号起伏的原因。最近，Бархаров (1963)，用模拟方法证明声速在内波(运动的分层)界面上的变形(声束截面变宽)所引起的异常衰减与声束在通过声速跃层时的情况是十分相似的^[1,2]。根据声波在海洋内波中传播时的这些特性，Бреховских 提出，在两个或两个以上的测站上，应用声讯号的振幅和位相起伏记录，以判定海洋内波的存在，并分析它的各项要素。这是一个海洋学和声学工作者共同感兴趣的课题。

关于海水介质不均匀性的研究，对于了解海洋中的一系列物理现象，例如热交换和涡动等等，有着重要的意义。过去一些海洋物理学者，对不同平均水文条件下，海水温度起伏和流速脉动这些介质的不均匀性问题所作的实验研究，其主要目的之一是企图用直接测量的方法来确定涡动交换强度，或由此取得涡动混合或交换系数值，为顺利求解海水运动方程和热传导方程创造前提。Колесников 等人的工作，就是这方面的代表^[7,8]。但由于测量技术上的限制，他们设计的能连续测量深度、平均流向、平均速度、平均温度和流速的水平、垂直分量以及温度的起伏等七个要素的“海洋涡动计”或“深海自动涡动计”，还不能在实际海洋中得到充分成功的应用。Кеселев (1961)^[9]所设计的“海洋水文综合遥测装置”，则主要是用以研究海水介质的不均匀统计特性及其与声讯号起伏相关的，这套设备不仅感应头加多，测量范围较宽，温度起伏测量精度达 0.005°C ，流速脉动达 0.1 毫米/秒，而且附有一个测量水下仪器平衡状态的系统，并采用浮标站的敷设方法，从而大大减少船舶颠簸对测值的影响。Приймак (1961)^[10]根据这种装置测得结果所作的初步分析，是值得我们注意的。他指出：(1)在一般情况下，温度起伏和流速脉动的尺度及振幅(起伏均方)并没有确定的量值；(2)海水介质在垂直方向上的微观不均匀性小于水平方向；(3)在不同的水文条件下，起伏具有不同的相关函数和结构函数，但他们之间尚未发现确定的关系，等等。显然这些结果将改变过去关于海水介质不均匀性与声强度起伏相关研究上的一些假定^[39,45]，有利于声传播研究问题的进

展。

至于海水的均匀性,所引起的声讯号起伏问题, Chernov 曾作了系统的总结^[19]。他指出导致声波散射的原因,是海水介质起伏所产生的折射率的相应起伏,其中温度的起伏,或即热量的不均匀性,又占有十分重要的位置。当介质不均匀性尺度(以相关距离 a 表示)和声波波数 (K) 的乘积 $aK \ll 1$ 时,这种散射是各向同性的,但是由于各个瞬间折射率均在变化,因而散射波在每个瞬间内具有不同的位相和振幅;当 $Ka \gg 1$ 时,散射就具有方向性,散射功率集中在约为 $1/Ka$ 的一个角度内,这种情况就是所谓聚焦现象。聚焦散射波也具有位相和振幅的起伏。原始信号与上述两种散射信号的迭加就构成起伏的声场。显然,声场的起伏特征与折射率变化之间必然存在着依赖关系。Mintz (1953) 则对大尺度不均匀介质 ($Ka \gg 1$) 和在较大范围内 ($Kr \gg 1$) 的声波起伏量级作过理论和实验的研究,并且得出这个量与 a 及 r (距离) 成正比而与波长平方成反比的结论。以后 Stone (1961) 曾用模拟方法得到声起伏与温度微结构起伏之间的关系^[16]。Бреховских (1960)^[3] 则指出,有可能利用这种关系从声场的起伏状况来获得海水介质的相应统计特性。这也是一个应用声学方法来研究海水介质特性的新途径,是把海洋物理学和声学结合起来的一个重要课题。

此外,还应提出,海面的不平整性及海面波浪的频谱特性,对于声波传播也有巨大的影响,但是有关海浪的实验和理论研究,已形成海洋物理学中的一个独立领域,因此这里不拟涉及海洋波浪本身的问题,而只拟就海面的扰动对于声波传播时的作用作简单的阐述。关于海面不平整性对声波反射所引起的干涉及对声场的影响的研究,主要是在低频段方面进行的。根据上述 Mintz 和 Chernov^[19] 的研究指出,在低频段(低于 1 千赫),介质微结构对声场的影响极微,从而有可能单独研究海面反射干涉所产生的起伏情况。海面的不规则运动,使反射信号产生位相和振幅的变化,从而引起声的起伏。这种起伏与海面状况有密切关系。声讯号的起伏特性(谱)和声波波长(λ)与表面波波高(A)之比值有关:当 λ/A 大于某一数值时,起伏谱与表面波谱相一致;当低于这一数值时,起伏谱除有表面波谱的主要成分外,同时还包含有二次和三次谐波。C. C. Clay^[21] 在这以前曾在声

波波长大于表面波平均波高,以及表面波长比声波波长为大的情况下作过实验,也得出起伏平均周期与波浪平均周期相一致的结论。关于声起伏谱与相应参数(声波波长等)间的关系,同样是可以用来研究波浪谱的一个很有实际意义的问题。Marsh (1963)^[40] 和 Chapman (1960)^[20] 等曾从测量表面混响信号的起伏特性研究海面的波浪谱。Бреховских 指出利用声信号在不同方向上从各种角度对海面发射,从接收信号波形可以估计在相当大的范围内海面波浪的主要参数。

在我国浅海中,海洋内波和海水介质起伏的现象是极为复杂的。初步研究表明,在我国某些海区的一些季节中,有振幅高达 10 米以上具有一定传播方向的长周期潮内波出现,并且海水分层界面上易受外界因素的扰动而产生短周期内波。由于浅海中盐度和流速的强烈变化,在海水介质不均匀性的研究中,不仅要注意温度的起伏问题,而且还要致力于盐度起伏和流速脉动问题的研究。这些,都有待于海洋学家与声学工作者的共同努力。

五、声学技术在海洋学上的应用

近年来,由于物理学的方法在海洋学上的广泛应用,海洋学的许多分支领域已日益发展为以海洋为研究对象的实验科学了。在所采用的物理学方法中,包括光学(测量水色、透明度)、磁学(测量海流)、放射化学(测量海水及底质的绝对年龄、初级生产力、海流)、电子学(测量波浪、温度)等诸多方面,都获得许多可喜的成果。但是这些方法,都有一定的局限性,由于光、电、磁的能量在海水中被吸收、散射等而有很大的损失,其传播距离一般不超过几百米,而声波则与此不同,它是目前人们所了解的一种在海水中消耗得最少的能量,在适当的条件下它能够传播至几千公里,这一情况,就显示了声学方法在海洋学研究上的应用,有着十分广阔的前景。回声探测仪和鱼群探测器的出现,使海洋调查、海道测量、航海和渔捞等工作,从繁重的体力劳动和盲目状态下解放出来,就是一个突出的例子。

关于声学技术在海洋学上的具体应用问题,Бреховских^[3] 曾将声学应用于海洋水文学(自动水文站的讯号传输、温度、海流、波浪、湍流的测量)、地质学(沉积、构造)、生物学(浮游生物、鱼羣)及化学等方面的可能性,作了系统的阐述,英、

美的一些学者,例如 Tucker 等人^[51,52],对这个問題也作了詳細的討論。我們因限于篇幅,除了上面已經談到的外,这里不拟对他們所提出的各种可能性逐一加以罗列,以下仅就目前在海洋学上已經实际应用的声学新方法作簡要的敘述,作为今后开展这方面研究工作的参考。

在海洋水文物理学方面,首先应提到的是測量深层海流的声学中性浮标«neutral-buoy»^[47]。我們知道,由于深层海流資料的缺乏,五十年代以前的許多海流动力理論是建立在所謂«零面»的假定上的,在采用了中性浮标以后,才陸續揭开了深层海流的秘密,发现了«赤道深层流»,指出,甚至在 5,000 米的深度上,流速还大于 12 厘米/秒,推翻了深层流速极緩慢的假定,把海洋环流(特别是垂直环流)的研究推进到一个新的阶段。这种中性浮标,带有一个可以連續发射七个星期、能够沉入所需深度的声脉冲(10 千赫)发射装置,用船上声学接收设备确定这一浮标相对于船的移动,就可测定所需深度的流向和流速。在这个浮标上稍加改进,还可以进行海流垂直剖面的連續測量。其后,Laughton^[36]以同样原理,制作了一套确定深海海底照象机、采泥器、底栖拖网等是否达到所需深度,并能控制这些仪器动作的声学设备,为深海調查工作带来极大的方便。这项设备,同样可用作确定中层拖网下放深度的网深仪。苏联科学院海洋研究所設計的声控制的水下浮标,可以及时搜获敷設于水下的温度、海流自記浮标站,并减少海面波浪及船只对一般的海上浮标站记录的影响,也是一个值得注意的例子。在海浪測量方面,目前已开始用改进的回声测深仪倒轉应用的办法,从海底測量海面的波浪,这个方法不仅在浅海中,在潛艇上(例如美国核潛艇«鱈魚号»)有其实际意义,而且在沿岸带也是可行的,它不仅可避免由海面或一定深度上測量海浪时經常产生的附加振动的影響,而且測得的波浪頻譜范围較一般压力式测波仪要寬,并可將測得訊号直接送入頻譜分析仪进行分析。現在,应用«表面混响»的測量方法,以研究海面波浪統計特性的工作,也正在积极开展。

在海洋生物学方面,应用通常的回声测深仪(魚羣探测器)来探测魚羣和巨大海洋生物羣的声学方法,早为人們所熟知。这里应当提出的是«魚羣定位仪»或«多頻魚探器»的出現和«声学电视

机»的发明,前者应用水平和垂直的电子扫描系統或多頻轉換系統,可以探测相当寬范围内的魚羣、生物羣或单个生物的空間位置,确定魚羣种类及其内部构造,以及海洋生物的行为习性;后者,采用声-电-光轉換的方法,避开深水水下光学电视机信号傳輸及敷設的种种困难,而直接在調查船或岸上观测一定深度范围内海洋生物的活动情况。很明显,上述两种声学设备的使用,使海洋生物生态学和实验生物学的研究,进入了海洋現場观察和实验的新阶段。此外,上面已經提到,由于海洋浮游生物对声波的散射特性,可以利用多頻回声仪,代替現行水平和垂直分层取样的方法,取得海洋生物定性和定量資料。至于用簡单的声学设备以确定底栖生物拖网的下沉情况,魚网的张角及魚获量,在海洋生物的調查研究上則早有广泛的应用了。

声学技术在海洋地质学上的应用,是久已为人們所熟知的一个方面。精密回声探测仪的出現,使海洋地质工作者能够获得連續剖面上的海底地形資料,为大洋盆地区域的地貌和构造的研究提供了可能。地震声学方法在海洋上的使用及日趋完善,在一定程度上,可以避免水下直接钻探的技术困难,而有可能基本上掌握从海底沉积层至莫霍洛維奇奇的分层結構和厚度資料,为闡明海底大地构造和地壳构造的秘密,創造前提。这里还应当提出的是«地质声納»的制造^[52],应用这种特制的声納,可以测得浅海中表层地质的声学特征图案,从而确定表层地质的机械特性和沉积物的分层情况。同时,应用精密的回声测深仪所获得的回声信号的变形,可以对几十米厚的表层地质类型,作粗略的判定;从反射系数(复数)的模和相角,还可以得到表层地质的声速、阻抗、衰減等資料,为深入研究海底沉积物的物理、构造等性质提供了巨大的可能性。

此外,利用測定海水«体积混响»的方法,还可进行海水中自由气体的定量分析,因此,声学技术在改进海洋化学的研究方法上,也是有前途的。

* * *

以上是我們对于海洋声学的研究对象、內容及其进展情况的一些肤浅看法,由于作者在海洋学和声学方面的水平都不高,閱讀的文献也有限,在敘述和評論上,一定有許多不全面、不确切、甚至是严重錯誤的地方,恳切的希望得到指正。

参 考 文 献

- [1] Бархатов А. Н., 1958. Ослабление звукового пучка при прохождении через слой скачка скорости звука. *Аку. жур.* **4**(2):125—127.
- [2] Бархатов А. Н. и Ю. Н. Черкашин, 1963. О деформации звукового пучка внутренней волной на границе двух жидкостей. *Аку. жур.* **9**(1):112—113.
- [3] Бреховских Л. М. и Ч. Е. Махальцев, 1960. Акустика и океанология. *Вест. АН СССР*. Вып. 1, 28—36.
- [4] Бреховских Л. М., 1960. О расчете вертикального профиля скорости распространения звука в морской среде *ДАН СССР*. **135**(3): 581—584.
- [5] Гансон П. П., 1962. Новая область океанологии-Акустика моря. *Океанология* **2**(1): 151—152.
- [6] Зубов Н. Н., 1957. Океанографические таблицы. Гидрометеониздат. pp. 400.
- [7] Колесников А. Г., 1960. Вертикальный турбулентный обмен в устойчивостратифицированной море. *Известия АН СССР. Серия геофизическая*, **11**: 1614—1623.
- [8] Колесников А. Г., Н. А. Пателеев, В. Д. Писарев и П. В. Вакулов, 1963. Глубоководный автономный турбулиметр-прибор для регистрации турбулентных флуктуаций скорости и температуры в океане. *Океанология* **3**(5):911—920.
- [9] Киселев В. И., 1961. Комплексная аппаратура для дистанционных гидрологических измерений в море. *Метеорология и гидрология* **1**: 49—53.
- [10] Приймак Г. И., 1961. Некоторые результаты исследований статистической микро неоднородности морской среды. *Известия АН СССР. Серия геофизическая*. Август. 1224—1232.
- [11] Шошков Е. Н., 1961. Развитие гидроакустических средств обнаружения в ВМС США. *Морск. сб.* **12**:74—79.
- [12] Шулейкин В. В., 1932. Физик моря. Издат. АН СССР. стр. 525—595.
- [13] Allen, W. E., 1942. Occurrence of "Red water" near San Diego. *Science* **96**:471.
- [14] Anderson, E., 1950. Distribution of sound velocity in a section of the Eastern north pacific. *Trans. Amer. Geophys. Union* **31**(4): 221—228.
- [15] Bergmann, P. G., 1945. Physics of sound in the sea. pp. 740.
- [16] Berman, A., 1962. Effect of rough surfaces on the resolution of acoustics rays in the ocean. *JASA*. **34**(3):298—304.
- [17] —————, 1961. Irregular Atlantic sound velocity profiles. *JASA*. **33**(11):1659.
- [18] Berman, A., 1959. Fluctuations of low frequency harmonic signals over very long transmission path in the deep oceans. *JASA*. **31**(6):838.
- [19] Chernov, L. A., 1960. Wave propagation in a random medium. N. Y. MCGRAW Hill, Inc. pp. 168.
- [20] Chapman, R. P., 1960. Surface back scattering strengths measured with explosive sound sources. *JASA*. **32**(10):1592.
- [21] Clay, C. S., 1960. Fluctuation of sound reflected from the sea surface *JASA*. **32**(12): 1547—1551.
- [22] Daniels, 1962. Generation of infrasound by ocean waves. *JASA*. **32**(3):352—353.
- [23] Defant, A., 1961. Physical Oceanography. Oxford, pergamon press. Vol. 2: pp. 729.
- [24] Dobrin, M. B., 1947. Measurements of underwater noise produced by marine life. *Science*. **105**:19—22.
- [25] Dueberger, L., 1961. Deep sea velocimeter aids sonar system design. *Electronics* **34**(22): 41—43.
- [26] Everest, F. A., 1948. Acoustic characteristics of noise produced by snapping shrimp. *JASA*. **20**(2):137—142.
- [27] Fish, M. P., 1954. The character and significance of sound production among fishes of Western north Atlantic. *Bulletin of Bingham Oceanographic Collection*. Vol. 14, art. 3.
- [28] Frassetts, R., R. H. Backus, and E. Hays, 1962. Sound scattering layer and their relation to thermal structure in Strait of Gibraltar. *Deep sea research* **9**:69—72.
- [29] Gordon, M. W., 1963. Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources. *JASA*. **34**(12):1936—1945.
- [30] Greenspan, M., 1957. Sing-around ultrasonic velocimeter for liquid. *Review of scientific instrument* **28**(II):897—901.
- [31] Hays, E. E., 1961. Comparison of directly measured sound velocities with values calculated from hydrographic data. *JASA*. **33**(I): 85—88.
- [32] Hensen, P. G. and E. G. Barham, 1962. Resonant cavity measurement of the effects of "red water" Plankton on the attenuation of underwater sound. *Limnology and Oceanology* **7**(1):8.
- [33] Kutschall, H., 1961. Long-range sound transmission in the Arctic ocean. *Journal of geophysical research* **66**(7):2189—2198.
- [34] Kuwahara, S., 1939. Velocity of sound in

- sea water and the calculation of the velocity for use in sonic sounding. *Hydrographic reviews* **16**:123—140.
- [35] La-Fond, E. C., 1962. Enlarge oceanographic research tower. *Naval research Reviews* **1962** (5):23—27.
- [36] Loughton, A. S., 1957. A new deep sea underwater camera. *Deep-sea research* **4**(2): 120—125.
- [37] Lee, O. S., 1961. Observation on internal waves in shallow water. *Limnology and oceanology* **6**(3):312—321.
- [38] Lee, O. S., 1961. Effect of internal wave on sound in the ocean. *JASA*. **33**(5):677—781.
- [39] Liebermann, L., 1951. Effect of temperature inhomogeneities in the ocean on the propagation of sound. *JASA*. **23**(5):563—570.
- [40] Marsh, H. W., 1963. Sound reflection and scattering from the sea surface. *JASA*. **35**(2): 240—244.
- [41] Marshall, N. B., 1951. Bathypelagic fishes as sound scatterers in the ocean. *Journal of Marine Research*. **1**:1—17.
- [42] Mathews, D. J., 1944. Tables of the velocity of sound in pure water and sea water. 3rd Hydrographic Department, admiralty, London.
- [43] Rand, G., 1960. Determining sonar system capability. *Electronics* **33**(8):41—45.
- [44] Ritchie, G. S., 1954. The deep scattering layer. *International Hydrographic Review*, **31** (2):121—128.
- [45] Sagar, F. H., 1960. Acoustic intensity fluctuations and temperature microstructure in the sea. *JASA* **32**(1):112—121.
- [46] Stone, R. G., 1961. A scaled model experiment of wave propagation in a randomly inhomogeneous medium. *JASA*. **33**(6):840.
- [47] Swallow, J. C., 1955. A neutral-buoyancy float for measuring deep currents. *Deep-sea research*. **3**(1):74—81.
- [48] Tavalga, W. N., 1958. Analysis of underwater sounds produced by marine fishes *PB* 14091.
- [49] Tchernia, P., 1953. Remarks concerning the present state of the deep scattering layer problem. *International hydrographic review* **30** (1):135—142.
- [50] Tucker, D. G., 1962. Searching the sea with sound. *New Scientist* **15**:296.
- [51] Tucker, D. G. and V. G. Welsy, 1960. Electronic sector-scanning asdic: An improved fish-locator and navigational instrument. *Nature* **181**(4709).
- [52] Tucker, M. J., 1960. Electronic techniques in oceanography. *J. British I. R. E.* **20**(12): 921—931.
- [53] Ufford, C. W., 1947. Internal waves in the ocean. *Transaction of American geophysical Union* **28**(1):79—87.
- [54] ———, 1947. Internal waves measured at 3 stations. *Transaction of American Geophysical Union* **28**(1):87—96.
- [55] Vinogradov, M. E., 1961. Quantitative distribution of deep sea plankton in the Western Pacific and its relation of deep water circulation. *Deep sea research* **8**(3/4).
- [56] Wilson, W. D., 1959. Speed of sound in distilled water as a function of temperature and pressure. *JASA*. **31**(8):1067—1072.
- [57] ———, 1960. Speed of sound in sea water as a function of temperature, pressure and salinity. *JASA*. **32**(6):641—644.
- [58] ———, 1962. Interpretation of sound velocity profiles in sea water. *JASA*. **34**(12): 4974.