

ساز و کارهای شنوائی

ترجمه و اقتباس : حسین ابراهیمی

از گروه آموزشی فیزیک دانشگاه تربیت معلم

بیش از يك قرن است که نظریه های مختلف برای تشریح طرز کار دستگاه شنوائی به ویژه روی ساز و کار صداهاى آمیخته و خاصیت اساسی شنوائی بیان شده است .

در سال ۱۸۵۷ هلملتز^۱ نظریه رزونانس را که بر اساس آن تجزیه صداها به وسیله گوش انجام می گیرد ، پیشنهاد کرد ولی راترفورد^۲ در سال ۱۸۸۰ نظریه تلفنی را که برخلاف نظریه هلملتز بود و جای تجزیه صداها را در مغز می دانست عنوان کرد ، پس از آن نظریه های دیگری از ترکیب برتری های نظرات فوق ارائه شده است . در حدود چهل سال اخیر طرز عمل دستگاه شنوائی به طور تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است . در این مقاله پس از شرح نظریه رزونانس و نظریه تلفنی ، روی اصول شناخته شده ساز و کار شنوائی که در زمان حاضر نیز مورد بررسی است بحث خواهیم کرد .

نظریه های شنوائی :

الف - نظریه رزونانس - صداهاى آمیخته را به کمک دستگاه رزوناتور می توان تجزیه کرد ، بر اساس نظریه هلملتز گوش نیز می تواند مانند دستگاههای رزوناتور ، صداها را تجزیه کند ، این رزوناتورها که به شکل الیاف مجزا فرض شده اند در طول حازون گوش درونی به شکل

۱- Helmholtz

۲- Rutherford

تارها در سطح غشاء بازیلر^۱ ردیف گشته‌اند و هر کدام آنها در اثر ارتعاشی که با فرکانس آن سازش دارد، وارد ارتعاش می‌گردند. بنابراین رزونانورها که به تارهای عصب شنوایی متصل هستند، آنها را تحریک می‌کنند و هر تار عصب شنوایی برای فرکانس بخصوص وارد عمل و فعالیت می‌گردد و پیامی را که مشخص کننده احساس است منتقل می‌کند یعنی عصب شنوایی مزبور پیام حسی تجزیه شده را به مغز انتقال می‌دهد: همچنین نظریه هلملتز در عین حال که یک نظریه «رزونانس» است، «نظریه تمرکز محلی»^۲ نیز می‌باشد. به این ترتیب که تجزیه در گوش انجام می‌گیرد ولی دریافت هر فرکانس اختصاص به محل بخصوصی از حلزون دارد. پس از بیان این نظریه، رزونانس در وضع حساسی قرار گرفت و آن مشکل یافتن رزونانورها در گوش بوده است تا از روی آن خواص مشخصه شنوایی توجیه گردد. هلملتز پس از انعطاف توجه خود روی برآمدگی‌های بسیار ریز به اسم کرنی که به تارها متصل می‌باشند قبول کرده است که رزونانورها همان تارهای غشاء بازیلر هستند و چون برای آنکه احساس کاملی از صداهای بافرکانس‌های متفاوت داشته باشیم وجود تعداد زیادی رزونانور لازم است، از طرف دیگر ملاحظه می‌شود که تعداد تارهای غشاء بازیلر نیز به اندازه کافی زیاد می‌باشند و خود این امر ظاهراً می‌تواند تأییدی بر نظریه هلملتز باشد.

از طرفی اگر قبول کنیم که فرمول تارهای مرتعش برای آنها عملی باشد یعنی:

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

[فرکانس (f) هر کدام بستگی دارد به طولش (l)، کشش آن (F)، جرم واحد طول آن (μ)] می‌بینیم که با در نظر گرفتن ساختمان حلزون، این سه عامل در جهت مورد نظر و در نسبتی که به نظر کافی می‌رسد تغییر می‌کنند و به این ترتیب بخش فرکانس‌ها را در طول حلزون می‌توان توجیه کرد، جای فرکانس‌های زیر در قاعده پرده بازیلر و فرکانس‌های بم در راس آن است. برای توجیه پدیده‌های شنوایی، رزونانورهای هلملتز باید دارای دو خاصیت متضاد زیر باشند: خاصیت انتخاب‌کنندگی^۳ و خاصیت میرایی^۴.

تذکره: یک رزونانور در صورتی انتخاب‌کننده است که با دامنه بزرگ فقط برای فرکانس

- ۱- Les Fibres de la membrane basilaires
- ۲- Theorie de la localisation
- ۳- Selectivité
- ۴- Amortissement

هانی که با آن سازش دارد وارد ارتعاش گردد، رزوناتورهای گوش باید چنین حالتی را داشته باشند. چون صدای با فرکانس معین فقط با ارتفاع خودش شنیده می شود و نه با ارتفاع های مجاور آن، پس نتیجه می گیریم که رزوناتورهای مجاور ارتعاش نمی کنند و یا در صورت ارتعاش دامنه آنها بسیار کوچک است.

يك رزوناتور در صورتی خیلی میرا است که دامنه ارتعاشات آن به علت نیروی مالش قابل ملاحظه به طور سریع کم گشته از بین برود، در مورد گوش چنین حالتی هست زیرا پایداری احساس شنوایی بعد از ۱۰ ثانیه از بین می رود.

بنابراین در رزوناتورهایی که طبیعتاً میرائی آنها زیاد باشد خاصیت انتخاب کنندگی آنها کم می گردد و متقابلاً رزوناتور با خاصیت انتخاب کنندگی زیاد، در مدتی طولانی ارتعاش می کند زیرا که رزوناتور به وسیله ارتعاشاتی که فرکانس آنها برابر فرکانس مخصوص آن باشد تحریک می گردد. به همین ترتیب يك دیپازون در صورتی در هوا تشدید می گردد که تحت تأثیر ارتعاشاتی قرار گیرد که فرکانس آنها برابر فرکانس دیپازون و یا خیلی نزدیک به آن باشد، در این حال دیپازون به ارتعاشات خود در زمانی طولانی ادامه خواهد داد. برعکس در آب که در آن مالش بر اثر چسبناکی زیاد است، رزوناتور می تواند در گام وسیعی از فرکانس، حول فرکانس مخصوص خود وارد رزونانس گردد، ولی فقط پس از چند ارتعاش بحال تعادل باز می گردد (پایان تذکر). از طرفی تارها آزاد نبوده در غشاء بازیلر قرار گرفته اند و بین خودشان وابستگی های مشترك دارند، به همین دلیل قبول کرده اند که رزونانس سبب ارتعاش يك تار تنها نمی گردد بلکه موجب ارتعاش يك ناحیه کم و بیش وسیع از غشاء بازیلر می گردد، که در وسط این ناحیه ماکزیمم دامنه ارتعاش قرار گرفته است (شکل A-1).

شکل (۱) ناحیه ارتعاش غشاء بازیلر در مورد:

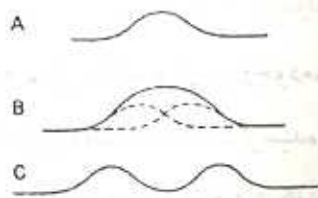
(A) فقط يك صدای محرك.

(B) دو صدای خیلی نزدیک به هم:

ناحیه ارتعاش تنها يك ماکزیمم دامنه دارد.

(C) دو صدا با فرکانس خیلی متفاوت:

ناحیه ارتعاش با دو ماکزیمم.



(شکل ۱)

تنها این ماکزیمم است که می تواند تارهای عصبی شنوایی را تحریک کند و نیز موضع آن ارتفاع صوت را معین می کند. در این فرض اگر دو فرکانس خیلی نزدیک به هم موجب تحریک

گوش کردند، اجزای غشاء بازیلر که ارتعاش می‌کنند بصورت ناحیه‌ای مرتعش می‌گردند. ناحیه ارتعاش تنها ماکزیمم دوکی شکل نمایان می‌شوند، به این ترتیب درک صدای زنگ می‌گردد و از آنجا ارتفاع صوت شنیده شده، واسطه بین ارتفاع‌های دو صوت دریافتی گوش می‌باشد (شکل ۱-B). چنانچه تفاوت فرکانس‌های این دو صوت زیاد گردد، فعالیت غشاء بازیلر از یکدیگر دور می‌گردند و در نتیجه دو ماکزیمم دامنه به وجود می‌آید. هر کدام از آنها جداگانه دریافت می‌گردد (شکل ۱-C).

اگر توضیحات مزبور که درک زنگ‌ها را توجیه می‌کند، قسمت تضاد بین میرائی کئندگی را از میان برمی‌دارد. مشکل دیگری را برمی‌انگیزد: چگونه است که تازد شنوایی فقط در یک نقطه که در آنجا دامنه ارتعاش ماکزیمم است تحریک می‌گردند، و مجاور آن تحت اثر تحریک قرار نمی‌گیرند؟

ملاحظه می‌گردد که فهم و درک رزونانس در گوش ساده نمی‌باشد و به همین لحاظ هلملتز با بسیاری از نظرات شنوایی دیگر متعاقباً پی‌گیری گردیده است.

اثر ضایعات صوتی (مانند کلیه‌کری‌هایی که بر اثر صداهای شدید و مداوم بوجود می‌آید) وجود فرض «تمرکز محلی» را محرز می‌گرداند. همچنین در بعضی «تمرکز محلی» فرکانس‌ها را بدون آنکه از خاصیت رزونانس استفاده کنند پذیرفته‌اند. دیگر اصولاً نظریه «تمرکز محلی» را قبول نکرده‌اند.

با وجود تمام مشکلاتی که در نظریه رزونانس وجود دارد، مع الوصف اهمیت متمایز آنرا نباید فراموش کرد و آنچه که مسلم است این نظریه تحرکی در تحقیقات به شنوایی ایجاد کرده است.

ب - نظریه تلفنی را ترفورد :

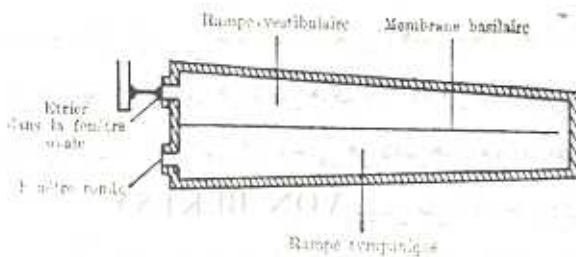
ترفورد باین نظریه تلفونی درباره شنوایی، نظریه هلملتز را که مبنی بر تحریک مخصوص برای هر فرکانس باشد رد کرد، زیرا در زمان او هنوز این مطلب به اثبات نرسیده بود. عقیده او کلیه سلول‌های مژه دار متعلق به پرده بازیلر می‌توانند بوسیله تمام فرکانس‌ها تحریک گردند و کافی است که یکی از این سلول‌ها برای ما احساس ارتفاع را ایجاد کند. فرض تمام اعضا کرتی تحت اثر صدائی غیر مشخص مرتعش می‌گردند، همچنین کلیه تاها شنوایی تحریک می‌شوند.

بنابراین نظریه، عصب شنوایی پیام عصبی را که به مغز منتقل می‌کند، کاملاً دارای فرکانس و شکل ارتعاش صوتی است. به این ترتیب عصب شنوایی مانند یک خط تلفنی عمل می‌کند (نام نظریه) و تجزیه صداها یک پدیده روانی است که به کمک مغز انجام می‌شود و پدیده‌ای مرکزی است نه محیطی. یادآوری می‌شود که نظریه تلفنی موفق نشده که جانشین نظریه هلملتز گردد. طرز عمل گوش داخلی - بخشی از گوش داخلی که در شنوایی دخالت دارد حلزون (Cochlee یا Imaçon) می‌باشد. حلزون مقر پدیده‌های مکانیکی (حرکات مایعات و غشاءها) و پدیده‌های الکتریکی (میکروفنی مربوط به حلزون) به شرح زیر است:

الف - پدیده‌های مکانیکی حلزون - معاصران و جانشینان هلملتز نتوانسته‌اند نظریه‌هایی تدوین کنند که روشن کند در گوش چه می‌گذرد و چگونه مایعات و غشاءهای گوش داخلی تحت اثر صداها مرتعش می‌گردند.

امروزه بر پایه کارهایی که در حدود سال ۱۹۳۰ G. von Bekesy فیزیکدان و فیزولوژیست مجارستانی انجام داده است، بخش طرز عمل مکانیکی حلزون را می‌شناسیم، این کار تا سال‌های اخیر بی‌گیری شده و در سال ۱۹۶۱ جایزه نوبل برای این تحقیقات نصیب محقق آن گردید.

اولین مشاهدات خود را روی نمونه‌ای از حلزون که ساده و بزرگ ساخته بود انجام داد. در جریان تجربه تغییرات شکل و ابعاد آن اثر قابل توجهی روی سازوکار اصلی آن نداشته است، به ویژه آنکه مجرا خواه پیچیده (مثل حلزون) یا مستقیم باشد تفاوتی در طرز کار طبیعی آن ایجاد نمی‌گردد و همین خاصیت است که ساختمان بسیار ساده مدل را تأیید می‌کند. ابتدا به طور خلاصه این مدل را شرح می‌دهیم: در یک تیغه فلزی به شکل هرم شکاف طول و پهنی از یک انتها به انتهای دیگر آن ایجاد کرده و درون شکاف را به وسیله غشاء نازک کاتوجوئی که نمایشگر غشاء بازیلاست به دو دالان تقسیم نمودند. (شکل ۲).



شکل ۲ حلزون نمونه Von Bekesy

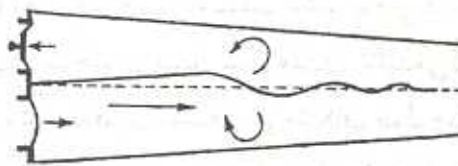
در یکی از دو انتهای تیغه دو سوراخ ایجاد می‌کنند که یکی به دالان بالا و دیگری به

فلزی (رکابی) را قرار داده‌اند که به وسیله دیپازون الکتریکی قادر به حرکت
 حلزون حقیقی دو دالان واقع در بالا و پائین به وسیله انتهای حلزون بیکدیگر
 ارتباط دارند. بالاخره نمونه را با مخلوطی از آب و گلیسرین که دارای چسبناکی
 پرمی‌کنند، برای آنکه حرکات به خوبی دیده شود، ذرات فلزی بسیار ریزی
 معلق می‌سازند.

کار این « حلزون » ساده چیست ؟

رقتی که رکابی بوسیله دیپازون جابجاگشته در دریاچه بیضوی ارتعاش تو
 از غشاء بازیلر که نزدیک دریاچه‌ها قرار دارد نیز با دامنه‌ای که پس از رکابی تا
 غشاء کائوچویی افزایش می‌یابد، مرتعش می‌گردد (شکل ۳).
 بعد از این نقطه مشاهده می‌گردد که امواج در جهت انتهای مقابل دریاچه‌ها
 ولی مقدار دامنه آنها به سرعت کاهش می‌یابد و انتهای آزاد غشاء بازیلر تقریباً بی
 در نقطه‌ای که دامنه حداکثر است، در مایع و غشاء بازیلر چرخش‌هایی ای

خط منقطع جای غشاء در حالتی
 مرتعش نمی‌گردد، فلش‌های کوتاه
 نشان دهنده جابجائی‌های مجزا
 دریاچه‌ها است. فلش بلند جهت
 را در طول غشاء بازیلر نشان می‌دهد
 نقطه‌ای که در آنجا دامنه ارتعاش
 چرخش مایع در دو دالان بالا
 مربوط نشان داده شده است

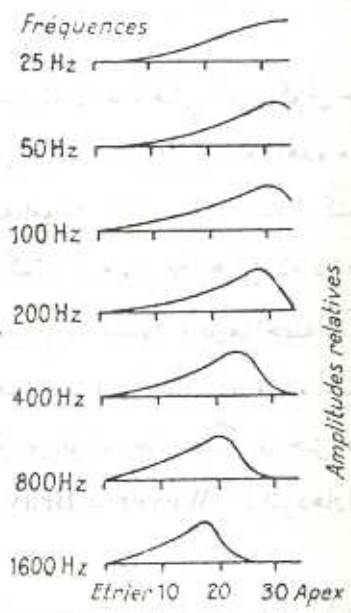


شکل ۳- ارتعاش غشاء بازیلر در حلزون نمونه

چنانچه فرکانس ارتعاشات را تغییر دهد، محل حداکثر دامنه و چرخش‌ها
 این جابجائی برای فرکانس‌های بالا به طرف رکابی و برای فرکانس‌های پائین
 دیگر است (این تمرکز محلی فرکانس‌ها، مویید نظریه رزونانس در گوش است)
VON BEKESY سپس طرز کار حلزون انسانی را مورد مطالعه قرار داد

پس از آنکه سوراخهای کوچکی در نقاط مختلف جدار لیماسون ایجاد کرد
 قابل رویت باشند، دانه‌های بسیار ریزی از نقره روی غشاء‌هایی که در داخل

اومی نوانست این غشاءها را بدمکام میکروسکپ ایمرسیون^۱ و بایر توافقکنی استر بوسکپی^۲ مشاهده کند، این عمل متعاقباً در تمام دورهای مارپیچ تکرار گردید. وقتی در گوش داخلی حرکات ایجاد می شوند، تمام اعضائی که در دالان بالا و پائین را از هم جدا می کنند (غشاء رسترن، غشاء بازیلر غشاء کرتی، غشاء تکتور بال) جمعاً جابجائی گردند. آنها واحدی را بنام واحد جدار حلزونی تشکیل می دهند. طرز کار حلزون مشابه با طرز کار نمونه ایست که قبلاً شرح داده ایم. مشاهده می گردد که ارتفاعات مربوط به رکابی موجب حرکات جدار حلزونی می گردد و مانند نمونه مصنوعی نقطه ای که در آنجا این حرکات دارای حداکثر دامنه هستند، به پیروی از مقدار فرکانس جابجا می شود. ولی برای فرکانس هائی کمتر از ۳۰ هر تزد حداکثر دامنه در رأس^۳ حلزون یافت می شود. برعکس برای فرکانس هائی بیش از ۸۰۰ هر تزد بخش رأس جدار حلزونی ساکن است، و به همان اندازه که مقدار فرکانس افزایش می یابد، حداکثر دامنه نیز به رکابی نزدیک می گردد (شکل ۴).



شکل (۴)

جای حداکثر دامنه برای فرکانس های مختلف در حلزون گوش انسان. فاصله ای که رکابی و نقطه ای را که در آنجا دامنه حداکثر است جدا می کند، روی محور افقی بر حسب میلی متر برده شده است. (بنابر VON Bekesy)

پس توزیع معینی از فرکانس ها در حلزون وجود دارد، یعنی «تمرکز محلی» فرکانس ها مسلم می باشد، ولی نه خاصیت های مکانیکی و نه مد ارتعاش جدار حلزونی مسؤول وجود رزونانورهای ردیف گشته در حلزون (نظر به هلملتز) نیستند. پس رزونانس نمی تواند پایه اصلی

- ۱- Microscope immersion
- ۲- Eclairage Stroboscopique
- ۳- L' apex

تشریح و توجیه تجزیه صداها باشد.

پس پدیده میکروفنی حلزون. وقتی که ارتعاشات صوتی به گوش داخلی می‌رسند مفرغی‌ات پتانسیل الکتریکی می‌گرداند. این موضوع در سال ۱۹۳۲ به وسیله دو فیزیولوژیست امریکایی به نامهای Wever و Bray کشف گردید و با نام اثر میکروفنی حلزون مشهور گردید. پدیده الکتریکی مزبور منحصرأ مخصوص به گوش نیست. طرز کار تمام اعضاء ماهیچه‌ها، قلب، اعصاب و مغز همراه با فعالیت‌های الکتریکی است.

مطالعه میکروفنی حلزون: برای مطالعه میکروفنی حلزون، حیوانی را بی‌هوش ساخته و شقیقه تاحفره صماخ آن را سوراخ می‌کنند. تغییرات پتانسیل را با قرائت‌دهی روی حلزون و الکترود دیگر روی ماهیچه گردن می‌توان بدست آورد. صوتی را به گوش حیوان می‌فرستند چنانچه دو الکترود را به ورودی اسیلوسکوپ وصل کنند، علائم نوسانات الکتریکی روی صفحه اسیلوسکوپ مشاهده می‌گردد که دوباره امواج صوتی است.

چنانچه نوسانات الکتریکی مزبور را به بلندگو وصل کنیم، صداهائی که به گوش می‌فرستیم به وسیله بلندگو دوباره تبدیل به امواج صوتی می‌گردد. به این ترتیب مشاهده کردیم که گوش مانند یک میکروفن می‌تواند امواج صوتی را به امواج الکتریکی تبدیل نماید. تغییرات پتانسیل در حدود 10^{-6} ولت است، یعنی خیلی کمتر از میکروفن‌هایی که ساخته شده می‌باشد و لذا برای اندازه‌گیری تغییرات پتانسیل باید به‌طور قابل ملاحظه تقویت کرد. اثر میکروفنی حلزون نزد تمام حیوانات و همچنین نزد انسان دیده شده است. محل مشاهده تغییرات پتانسیل پخش شده در گوش می‌تواند جای دیگری باشد داشته باشد از جمله روی عصب شنوایی، برای این منظور Wever - Bray الکترود عصب شنوایی قرار داده‌اند.

در نتیجه دیده شد که پتانسیل حلزونی که از حلزون بدست می‌آید تقریباً خالص پتانسیل بدست آمده از عصب شنوایی مخلوطی است با پتانسیل عمل عصب و از این رو این ماهم متمایز می‌گردند. اثر میکروفنی حلزون یک پدیده عصبی نیست. این اثر پس از قطع جریان و تأثیر موضعی کوکائین یا کلروفورم مدتی باقی می‌ماند. چون در تمام این حالات جریان عصبی فوراً و کلاً محو می‌گردد ولی اثر میکروفنی می‌شود، بنابراین برای یافتن این اثر، حلزون را سوراخ کرده و الکترود را در تماس

لابیرنتی قر از می دهند که در این صورت اثر میکروفنی بادامنه قابل ملاحظه‌ای در آن مشاهده می‌گردد. هم‌چنین پتانسیل میکروفنی پس از قطع عصب‌شنوائی و فاسد شدن این عصب و عقده کرتی مدتی پایدار می‌ماند. تجربیاتی که روی خزندگان انجام شده است نشان می‌دهد که برعکس فعالیت‌های عصبی پتانسیل میکروفنی به درجه حرارت بستگی ندارد.

بالاخره پتانسیل میکروفنی از قانون (همه یا هیچ) پیروی نمی‌کند: مقدار پتانسیل میکروفنی تابع شدت صدای دریافتی بد وسیله گوش است و برای صداهای خیلی ضعیف به کمک وسایل و اسباب‌های مربوط وجود آن بطور آشکارا مسلم می‌گردد.

فاصله زمانی تحریک تا شروع پاسخ اثر میکروفنی (ثانیه $\frac{1}{1000}$) به‌طور قابل ملاحظه از فاصله زمانی تحریک تا شروع پاسخ پتانسیل‌های عمل عصب‌شنوائی (ثانیه $\frac{1}{100}$) کوچکتر است و این تأیید می‌کند که وقتی گوش بد وسیله صدائی تحریک می‌گردد، پاسخ میکروفنی خیلی زودتر از پاسخ عصبی ظاهر می‌گردد. هر گونه تغییراتی که در هر لحظه در فراز ارتعاشات ایجاد می‌گردد، در پتانسیل میکروفنی نیز در همان لحظه به وجود می‌آید. میکروفنی حلزون، صداها را با فرکانسی که در باند فرکانس قابل درک و حتی بیش از آن است ایجاد می‌کند و توانسته‌اند آن را نزد کوچکچه هندی تا فرکانس $H_z 30000$ و نزد خفاش‌ها تا فرکانس $H_z 100000$ بدست آورند. برعکس برای عصب‌ها فرکانس پتانسیل‌های عمل از ۱۰۰۰ در ثانیه نمی‌تواند تجاوز کند. پس اثر میکروفنی یک پدیده عصبی نیست و همچنین مانند فعالیت عصبی به زندگی حیوان ارتباط ندارد. بدون شك مبنا و اصل میکروفنی حلزون را باید در عضو کرتی جستجو کرد و بنا بر قیاس می‌توان آنرا نتیجه ارتعاش غشاء پلاریزه (غشاء بازیار، غشاء تکموریال) دانست پس چنین غشائی در حال ارتعاش ایجاد پدیده میکروفنی می‌کند. امروزه عموماً پذیرفته‌اند که اثر میکروفنی حلزون بر اثر تغییر شکل سلول‌های مژده دار عضو کرتی ایجاد می‌گردند بالاخره وظیفه اثر میکروفنی حلزون چیست؟ این نکته هنوز نیز کاملاروشن نشده است ولی آنچه که مسلم است اثر میکروفنی همیشه احساس را همراهی می‌کند.

ence:

- 1- Que sais - je? André Gribenski
France 1964 (Press universitaire)
- 2- Acoustique - électroacoustique
A- Diber 1964
- 3- Vibration Mécanique - Acoustique
P. Fleury et J.P Mathieu 1968