

ساز و کارهای شنوائی

ترجمه و اقتباس : حسین ابراهیمی

از گروه آموزشی فیزیک دانشگاه تربیت معلم

پیش 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 بازبیلر^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 مشخص‌کننده 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 بازبیلر هستند و چون برای آنکه احساس کاملی از صداهای با فرکانس‌های متفاوت داشته باشیم وجود تعداد زیادی رزونانور لازم است، از طرف دیگر ملاحظه می‌شود که تعداد تارهای غشاء بازبیلر 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 بازبیلر 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

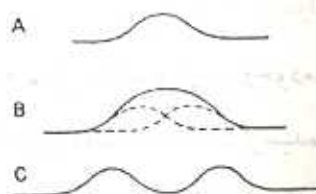
- ۱- Les Fibres de la membrane basillaires
- ۲- Theorie de la localisation
- ۳- Selectivité
- ۴- Amortissement

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 ارتعاشانی 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 بازیرل 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 بازیرل می گردد، که در وسط این ناحیه ما کزیمم دامنه ارتعاش قرار گرفته است شکل (A-۱).

- شکل (۱) ناحیه ارتعاش غشاء بازیرل در مورد:
- (A) فقط يك صدای محرك.
- (B) دو صدای خیلی نزدیک به هم:
- ناحیه ارتعاش تنها يك ما کزیمم دامنه دارد.
- (C) دو صدا با فرکانس خیلی متفاوت:
- ناحیه ارتعاش با دو ما کزیمم.



(شکل ۱)

تنها این ما کزیمم 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 بازپلر که ارتعاش می کنند بصورت ناحیه ای مرتعش می گردند. ناحیه ارتعاش تنها ماکزیمم دوکی شکل نمایان می شوند، به این ترتیب درك صدای زن می گردد و از آنجا ارتفاع صوت شنیده شده، واسطه بین ارتفاع های دوصوت دریافت گوش می باشد (شکل ۱-B). چنانچه تفاوت فرکانس های این دوصوت زیادگردد، فعالیت غشاء بازپلر از یکدیگر دور می گردند و در نتیجه دوماکزیمم دامنه به وجود می آید. هر کدام از آنها جداگانه دریافت می گردد (شکل ۱-C).

اگر توضیحات مزبور که درك زنش ها را توجیه می کند، قسمت تضاد بین میراثی کمندگی را از میان بر می دارد. مشکل دیگری را بر می انگیزد: چگونه است که تازد شنوایی فقط دريك نقطه که در آنجا دامنه ارتعاش ماکزیمم است تحریک می گردند، و مجاور آن تحت اثر تحریک قرار نمی گیرند؟

ملاحظه می گردد که فهم و درك رزونانس در گوش ساده نمی باشد و به همین لحاظ هلمهلتز با بسیاری از نظرات شنوایی دیگر متعاقباً پی گیری گردیده است.

اثر ضایعات صوتی (مانند کلیه کری هایی که بر اثر صداهای شدید و مداوم وجود از قبیل کری شغلی) وجود فرض «تمرکز محلی» را محرز می گرداند. همچنین در بعضی «تمرکز محلی» فرکانس ها را بدون آنکه از خاصیت رزونانس استفاده کنند پذیرفته اند. دیگر اصولاً نظریه «تمرکز محلی» را قبول نکرده اند.

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 :

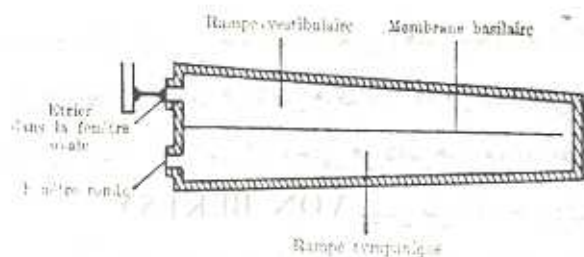
ترفورد بایان نظریه تلفونی درباره شنوایی، نظریه هلمهلتز را که مبنی بر مخصوص برای هر فرکانس باشد رد کرد، زیرا در زمان او هنوز این مطلب به اثبات نرسیده به عقیده او کلیه سلول های مژه دار متعلق به پرده بازپلر می توانند بوسیله تمام رزونانس تحریک گردند و کافی است که یکی از این سلول ها برای ما احساس ارتفاع را ایجاد کند. فرض تمام اعضا کرتی تحت اثر صدائی غیر مشخص مرتعش می گردند، همچنین کلیه شنوایی تحریک می شوند.

بنابر این نظریه، عصب شنوائی پیام عصبی را که به مغز منتقل می‌کند، کاملاً دارای فرکانس و شکل ارتعاش صوتی است. به این ترتیب عصب شنوائی مانند یک خط تلفنی عمل می‌کند (نام نظریه) و تجزیه صداها یا 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 شنوائی 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 برپایه 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 پی گیری شده و در سال ۱۹۶۱ جایزه نوبل برای این تحقیقات نصیب محقق آن گردید.

von Bekesy 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 کاژوچویی که نمایشگر غشاء بازیز است 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

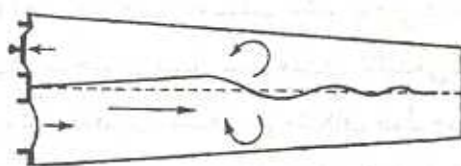
فلزی (رکابی) را قرار داده‌اند که به وسیله دیاپازون الکتریکی قادر به حرکت
 حلزون حقیقی دو دالان واقع در بالا و پائین به وسیله انتهای حلزون بیکدیگر
 ارتباط دارند. بالاخره نمونه را با مخلوطی از آب و گلیسرین که دارای چسبناکی
 پرمی کنند. برای آنکه حرکات به خوبی دیده شود، ذرات فلزی بسیار ریزی
 معلق می‌سازند.

کار این « حلزون » ساده چیست ؟

رقتی که رکابی بوسیله دیاپازون 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 مجزیه
 دریاچه گرد 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

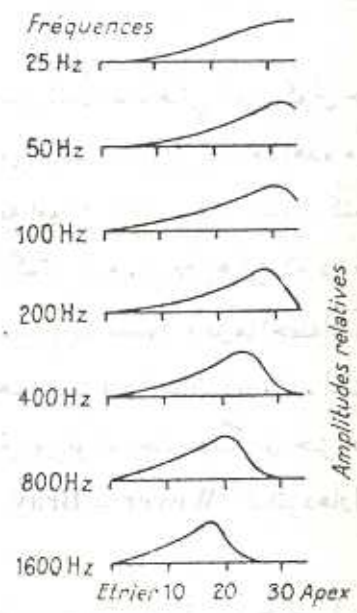


شکل ۳- ارتعاش غشاء بازیلر در حلزون نمونه

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 و
 قابل رویت باشند، دانه‌های بسیار ریزی از نقره روی غشاء‌هایی که در داخل حلزون

اومی نوانست این غشاءها را به کمک میکروسکپ ایمرسیون^۱ و یا پرتوافکنی استر بوسکپی^۲ مشاهده کند، این عمل متعاقباً در تمام دورهای مارپیچ تکرار گردید. وقتی در گوش داخلی حرکات ایجاد می‌شوند، تمام اعضای که دودالان بالاوپائین را از هم جدا می‌کنند (غشاء رسترنر، غشاء بازیلر غشاء کرتی، غشاء تکتور بال) جمعاً جابجایی کردند. آنها واحدی را بنام واحد جدار حلزونی تشکیل می‌دهند. طرز کار حلزون مشابه با طرز کار نمونه ایست که قبلاً شرح داده ایم. مشاهده می‌گرد که ارتفاعات مربوط به رکابی موجب حرکات جدار حلزونی می‌گردد و مانند نمونه مصنوعی نقطه‌ای که در آنجا این حرکات دارای حداکثر دامنه هستند، به پیروی از مقدار فرکانس جابجا می‌شود. ولی برای فرکانس‌هایی کمتر از ۳۰ هرتز حداکثر دامنه در رأس^۳ حلزون یافت می‌شود. برعکس برای فرکانس‌هایی بیش از ۸۰۰ هرتز بخش رأس جدار حلزونی ساکن است، و به همان اندازه که مقدار فرکانس افزایش می‌یابد، حداکثر دامنه نیز به رکابی نزدیک می‌گردد (شکل ۴).



شکل (۴)

جای حداکثر دامنه برای فرکانس‌های مختلف در حلزون گوش انسان. فاصله‌ای که رکابی و نقطه‌ای را که در آنجا دامنه حداکثر است جدا می‌کند، روی محور افقی بر حسب میلی‌متر برده شده است. (بنابر VON Bekesy)

پس توزیع معینی از فرکانس‌ها در حلزون وجود دارد، یعنی «تمرکز محلی» فرکانس‌ها مسلم می‌باشد، ولی نه خاصیت‌های مکانیکی و نه مد ارتعاش جدار حلزونی می‌تواند وجود رزونانورهای ردیف گشته در حلزون (نظریه هلمهولتز) نیستند. پس رزونانس نمی‌تواند 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 مگر تغییرات 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 شد. پدیده الکتریکی مزبور منحصرأ مخصوص به گوش نیست. طرز کار تمام اعضاء ماهیچه‌ها، قلب، اعصاب و مغز همراه با فعالیت الکتریکی است.

مطالعه میکروفنی حلزون: برای مطالعه میکروفنی حلزون، حیوانی را بیهوش استخوان شقیقه تاحفره صماخ آن را سوراخ می‌کنند. تغییرات پتانسیل را با قرائت‌دادن یا 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 میکروفن‌هائی 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. محل مشاهده تغییرات پتانسیل پخش شده در گوش می‌تواند جای دیگری باشد. داشته باشد از جمله روی عصب شنوائی، برای این منظور Wever - Bray الکترود عصب شنوائی قرار داده‌اند.

در نتیجه دیده شد که پتانسیل حلزونی که از حلزون بدست می‌آید تقریباً خالص پتانسیل بدست آمده از عصب شنوائی مخلوطی است با پتانسیل عمل عصب و از اینرو 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 می‌ماند می‌شود، بنابراین برای یافتن این اثر، حلزون را سوراخ کرده و الکترود را در تماس

لابیرتبی قرار می‌دهند که در این صورت اثر میکروفتنی بادامنه قابل ملاحظه‌ای در آن مشاهده می‌گردد. هم‌چنین پتانسیل میکروفتنی 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 میکروفتنی به درجه حرارت بستگی ندارد.

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

فاصله زمانی تحریک تا شروع پاسخ اثر میکروفتنی (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 میکروفتنی خیلی زودتر از پاسخ عصبی ظاهر می‌گردد. هر گونه تغییراتی که در هر لحظه در فراز ارتعاشات ایجاد می‌گردد، در پتانسیل میکروفتنی نیز در همان لحظه به وجود می‌آید. میکروفتنی حلزون، صداها را با فرکانسی که در باند فرکانس قابل درک و حتی بیش از آن است ایجاد می‌کند و توانسته‌اند آن را نزد خو کچه 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 میکروفتنی یک پدیده عصبی نیست و هم‌چنین مانند فعالیت عصبی به زندگی حیوان ارتباط ندارد. بدون شك مبنا اصل میکروفتنی حلزون را باید در عضو کرتی جستجو کرد و بنابر قیاس می‌توان آن را نتیجه ارتعاش غشاء پلاریزه (غشاء بازیلر، غشاء تکموریال) دانست پس چنین غشائی در حال ارتعاش ایجاد پدیده میکروفتنی می‌کند. امروزه عموماً پذیرفته‌اند که اثر میکروفتنی حلزون بر اثر تغییر شکل سلول‌های مژده دار عضو کرتی ایجاد می‌گردند بالاخره وظیفه اثر میکروفتنی حلزون چیست؟ این نکته هنوز نیز کاملاً روشن نشده است ولی آنچه که مسلم است اثر میکروفتنی 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