



**Elektroakustika**

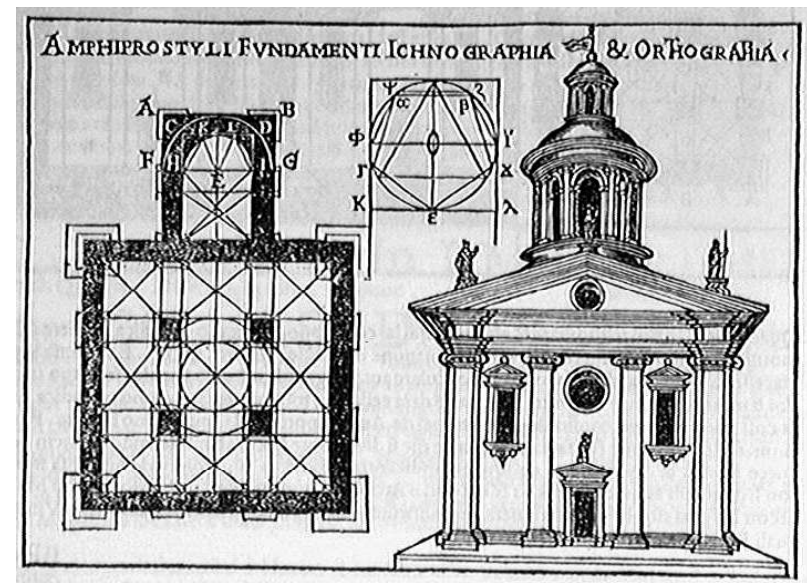
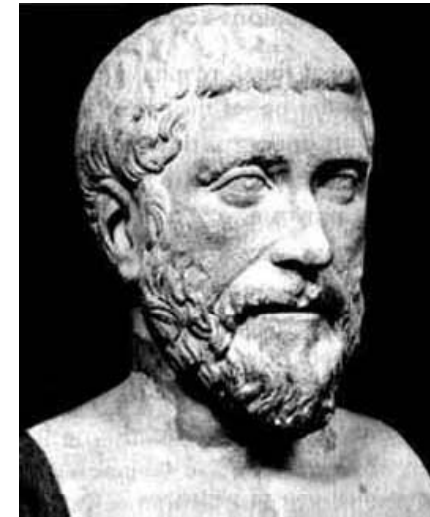
# **L01: História akustiky**

**doc. Ing. Jozef Juhár, PhD.**

**<http://voice.kemt.feit.tuke.sk>**

# História akustiky: Prvé experimenty

- Vznik akustiky je všeobecne spájaný s gréckym filozofom **Pythagorasom** (6. stor. BC), ktorý experimentálne skúmal vzťah medzi výškou **tónu** a dĺžkou **strún** hudobných nástrojov – definoval prvú **hudobnú stupnicu** (Pythagorova tónová stupnica).
- **Aristoteles** (4. stor. BC) formuloval hypotézu, že zvuk sa šíri vo vzduchu prostredníctvom pohybu **malých, neviditeľných častíc**. ***Mylne sa napríklad domnieval, že vysoké tóny sa šíria rýchlejšie než nízke.***
- Rímsky architekt **Vitruvius** (1. stor. BC) skúmal mechanizmus šírenia zvukových vln a prispel podstatnou mierou k metodike akustického návrhu vtedajších divadiel.
- Rímsky filozof **Boethius** (6. stor. AD) – zaoberal sa akustikou hudby – prvýkrát sformuloval predpoklad, že ***percepčia výšky tónu (subjektívny vnem) súvisí s frekvenciou (fyzikálna vlastnosť)***



# História akustiky: Prvé experimenty

- **Galileo Galilei** (1564–1642) – aplikoval **vedecké** metódy pri štúdiu vibrácií telies a vzťahu medzi **výškou tónu a frekvenciou**
- Francúzsky matematik **Marin Mersenne** (1588-1648) študoval vibrácie strún – jeho publikácia ***Harmonicorum Libri*** (1636) je základom modernej hudobnej akustiky
- Anglický fyzik **Robert Hooke** (1635-1703) zostrojil mechanický prístroj, pomocou ktorého dokázal **generovať zvuk známej frekvencie** – dokázal tak priradiť frekvenčnú stupnicu k hudobnej stupnici
- Na prácu Roberta Hooka nadviazal francúzsky fyzik **Félix Savart** (1791-1841) zostrojením dokonalejšieho „Savartovho kolesa“
- **Joseph Sauveur** (1653-1716) detailne študoval vzťah medzi výškou tónu a frekvenciou zvukových vln, generovaných strunami, navrhol základ **akustickej terminológie** a ako prvý navrhol názov akustika pre vedný odbor



# Vlnenie alebo žiarenie ?

- jeden z najzaujímavejších a najkontroverznejších historických experimentov, ktorým sa doposiaľ demonštruje prenos zvuku vzduchom
- Jeho podstata spočíva v pozorovaní, že odčerpávaním vzduchu sa postupne znižuje hlasitosť zvončeka, umiestneného v sklenenej banke
- „bell-in-vacuum experiment“ bol prvýkrát uskutočnený **Athanasiom Kircherom**, nemeckým učiteľom, ktorý ho opísal v knihe **Musurgia Universalis (1650)**
- Kircher zistil, že aj po odčerpaní vzduchu z banky bol zvuk zvončeka počuteľný, na základe čoho skonštatoval, že **vzduch na prenos zvuku nie je potrebný**
- Potvrdil tým dovedy platnú filozofické a vedecké tvrdenie, že nositeľmi zvuku sú neviditeľné častice, ktoré sa šíria od zdroja zvuku do priestoru
- v skutočnosti bol zvuk počuteľný preto, že vzduch bol odčerpaný nedostatočne – **v banke nebolo absolútne vákuum**





# “Bell-in-vacuum” experiment II

- v roku 1660 anglo-írsky vedec **Robert Boyle** zlepšil technológiu vákuovej pumpy, pomocou ktorej dosiahol zníženie počutelnosti zvuku pod prah počutia
- na základe toho správne skonštatoval, že na prenos zvuku je potrebné nejaké médium – vzduch
- hoci tento záver bol korektný, jeho zdôvodnenie bolo zavádzajúce
- dokonca aj so súčasnými pumpami sa nedá dosiahnuť absolútne vákuum a súčasné experimenty potvrdzujú, že množstvo vzduchu, ktorý zostane vo vákuovej banke je na prenos zvuku postačujúce
- skutočným dôvodom zníženia hladiny zvuku bolo (a je) **impedančné neprispôbenie** medzi zvončekom a vzduchom na jednej strane a vzduchom a stenou banky na druhej strane, spôsobené veľkým rozdielom v hustotách prostredí (zvonček, vzduch, stena banky, vzduch), vďaka čomu bol prenos zvuku medzi týmito prostrediami veľmi neefektívny
- **nehľadiac na to, tento experiment prispel rozhodujúcou mierou k tomu, že zvuk sa začal považovať za vlnenie a nie „žiarenie“**



# Meranie rýchlosti zvuku

- Hneď ako sa dokázalo, že zvuk je vlnenie a prenáša sa hmotnými čiastočkami prostredia, ďalším vážnym vedeckým cieľom sa stalo meranie rýchlosti zvuku (speed of sound).
- **Pierre Gassendi** (17. storočie, Francúzsko)
  - *rozdiel medzi okamihom svetelného a zvukového vnemu výstrelu z pištole vo veľkej vzdialenosti*
  - hodnota, ktorú získal, bola v porovnaní s dnešnými poznatkami príliš vysoká (asi 478.4 m/s)
  - dospel aj k jednému korektnému záveru – **rýchlosť zvuku nezávisí od jeho frekvencie**.
- V roku 1650 taliansky fyzik **Giovanni Alfonso Borelli** a **Vincenzo Viviani** rovnakým spôsobom dospel k presnejšej hodnote **350 m/s**.
- Ich krajan **G.L. Bianconi** demonštroval v roku 1740, že **rýchlosť zvuku vo vzduchu rastie s frekvenciou**
  - 1738 - 332 m/s (0° C)
  - 3194 - 331.45 m/s
  - 1986 - 331.29 m/s .
- Rýchlosť zvuku vo **vode** bola zmeraná prvýkrát švajčiarskym fyzikom Danielom Colladonom v roku 1826. Colladon nameral hodnotu 1,435 m/s pri teplote 8° C (v súčasnosti je akceptovaná hodnota 1,439 m/s).
- Pokusy zmerať **rýchlosť zvuku v pevných látkach**:
  - 1808 - Jean-Baptiste Biot, francúzsky fyzik - 1,000 m/s v oceľovej trubici (porovnaním s rýchlosťou zvuku vo vzduchu)
  - Ernst Florenz Friedrich Chladni (Nemecko) – presnejšie výsledky – analýzou uzlových bodov stojatých vln kmitajúcej dlhej tyče

# Matematické metódy – základy modernej akustiky I

- **18. storočie**

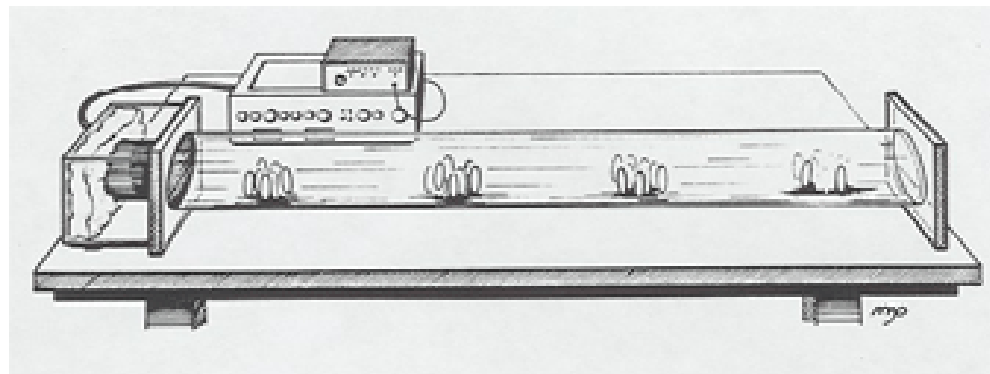
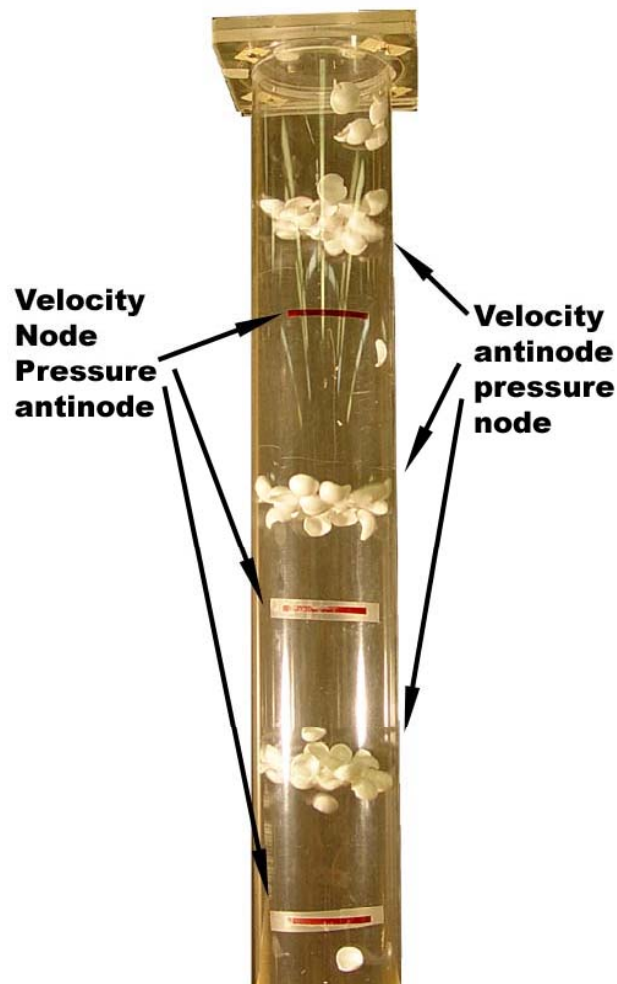
- anglický matematik **Brook Taylor** – základy **matematickej teórie kmitajúcich strún**.
- Odvodenie **všeobecnej vlnovej rovnice** francúzskym matematikom **Jeanom Le Rond d'Alembertom** (1740)
- Švajčiarski matematici **Daniel Bernoulli** a **Leonhard Euler** francúzsky matematik **Joseph-Louis Lagrange** aplikovali nové teórie na riešenie vlnovej rovnice na **struny** a **vzduch**

- **19. storočie**

- **Siméon-Denis Poisson** of France extended these developments to **stretched membranes**, and the German mathematician **Rudolf Friedrich Alfred Clebsch** completed Poisson's earlier studies.
- A German experimental physicist, **August Kundt**, developed a number of important techniques for investigating properties of sound waves. These included the **Kundt's tube**, discussed below.
- One of the most important developments in the 19th century involved the theory of **vibrating plates**. In addition to his work on the speed of sound in metals, **Chladni** had earlier introduced a technique of observing **standing-wave patterns** on vibrating plates by sprinkling sand onto the plates—a demonstration commonly used today. Perhaps the most significant step in the theoretical explanation of these vibrations was provided in 1816 by the French mathematician **Sophie Germain**, whose explanation was of such elegance and sophistication that errors in her treatment of the problem were not recognized until some 35 years later, by the German physicist **Gustav Robert Kirchhoff**.

# Kundtova trubica – stojatá zvuková vlna

**Styrofoam chips levitating in a vertical Kundt's tube**



- na jednom konci zatvorená a na druhý koniec sa privádza zvukový signál
- v trubici dochádza k superpozícii priamej a odrazenej vlny
- vhodnou voľbou vlnovej dĺžky (frekvencie) a dĺžky trubice vzniká tzv. stojatá vlna
- vznik stojatej vlny je pozorovateľný pomocou vznášajúcich sa kúskov veľmi ľahkej hmoty, koncentrovaných na miestach, kde sa nachádzajú uzly akustického tlaku



# Matematické metódy – základy modernej akustiky II

- The analysis of a complex periodic wave into its **spectral components** was theoretically established early in the 19th century by **Jean-Baptiste-Joseph Fourier** of France and is now commonly referred to as the Fourier theorem.
- The German physicist **Georg Simon Ohm** first suggested that the ear is sensitive to these spectral components; his idea that the ear is sensitive to the amplitudes but not the phases of the harmonics of a complex tone is known as **Ohm's law of hearing** (distinguishing it from the more famous Ohm's law of electrical resistance).
- **Hermann von Helmholtz** made substantial contributions to understanding the mechanisms of hearing and to the psychophysics of sound and music. His book *On the Sensations of Tone As a Physiological Basis for the Theory of Music* (1863) is one of the classics of acoustics. In addition, he constructed a set of resonators, covering much of the audio spectrum, which were used in the spectral analysis of musical tones.
- The Prussian physicist **Karl Rudolph Koenig** designed many of the instruments used for research in hearing and music, including a frequency standard and the **manometric flame**. The flame-tube device, used to render standing sound waves “visible,” is still one of the most fascinating of physics classroom demonstrations.
- The English physical scientist **John William Strutt, 3rd Baron Rayleigh**, carried out an enormous variety of acoustic research; much of it was included in his two-volume treatise, **The Theory of Sound**, publication of which in 1877–78 is now thought to mark the beginning of modern acoustics. Much of Rayleigh's work is still directly quoted in contemporary physics textbooks.
- The study of ultrasonics was initiated by the American scientist **John LeConte**, who in the 1850s developed a technique for observing the existence of ultrasonic waves with a gas flame. This technique was later used by the British physicist **John Tyndall** for the detailed study of the properties of sound waves.
- The **piezoelectric effect**, a primary means of producing and sensing ultrasonic waves, was discovered by the French physical chemist **Pierre Curie** and his brother **Jacques** in 1880. Applications of ultrasonics, however, were not possible until the development in the early 20th century of the electronic oscillator and amplifier, which were used to drive the piezoelectric element.
- Among **20th-century innovators** were the American physicist **Wallace Sabine**, considered to be the originator of modern architectural acoustics, and the Hungarian-born American physicist **Georg von Békésy**, who carried out experimentation on the ear and hearing and validated the commonly accepted place theory of hearing first suggested by Helmholtz. Békésy's book **Experiments in Hearing**, published in 1960, is the magnum opus of the modern theory of the ear.

# Manometric flame apparatus

(vizualizácia zvuku)

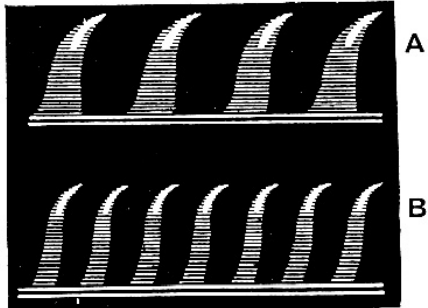


FIG. 653.—Manometric flame seen in revolving mirror.

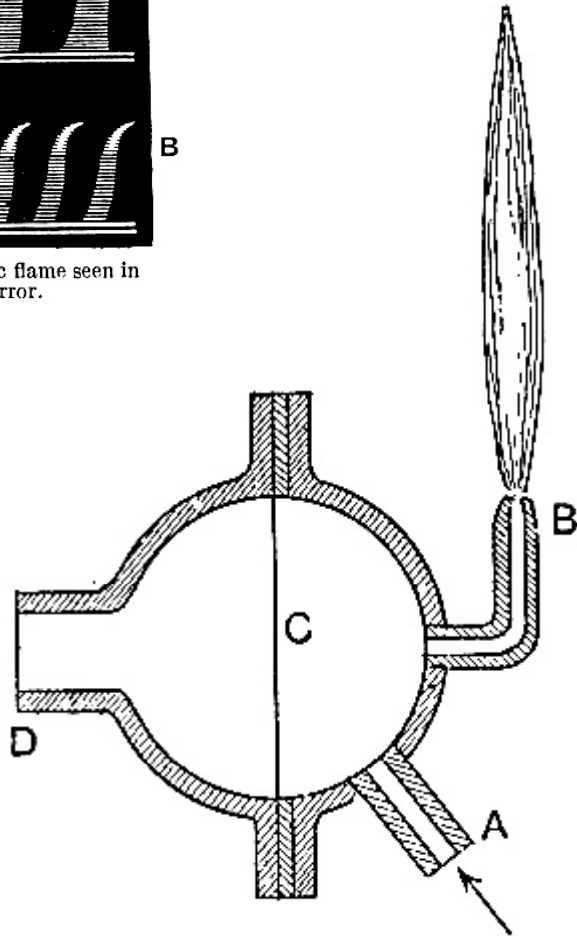


FIG. 651.—Manometric flame.

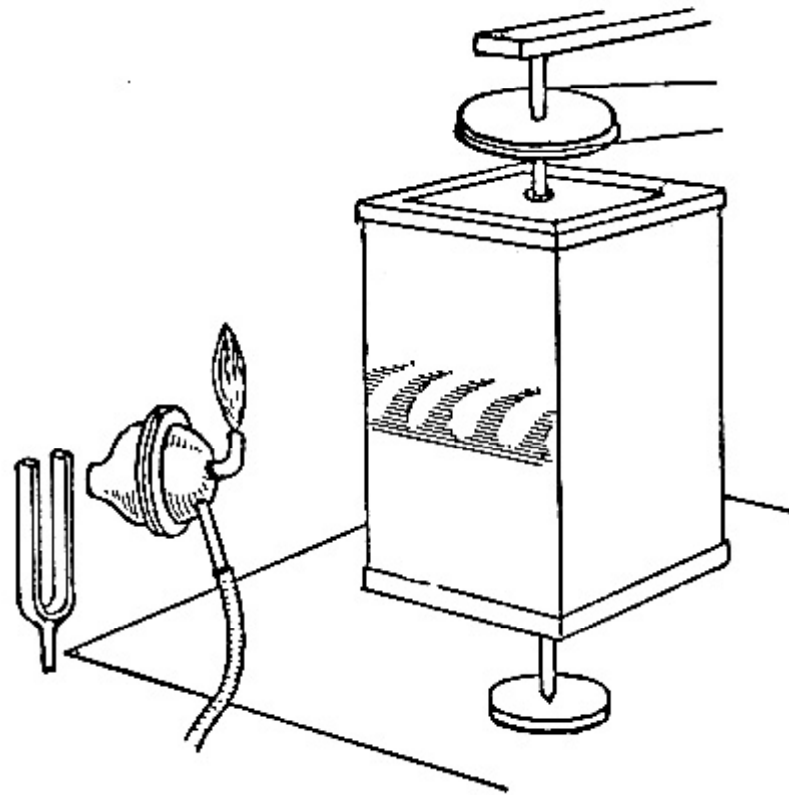
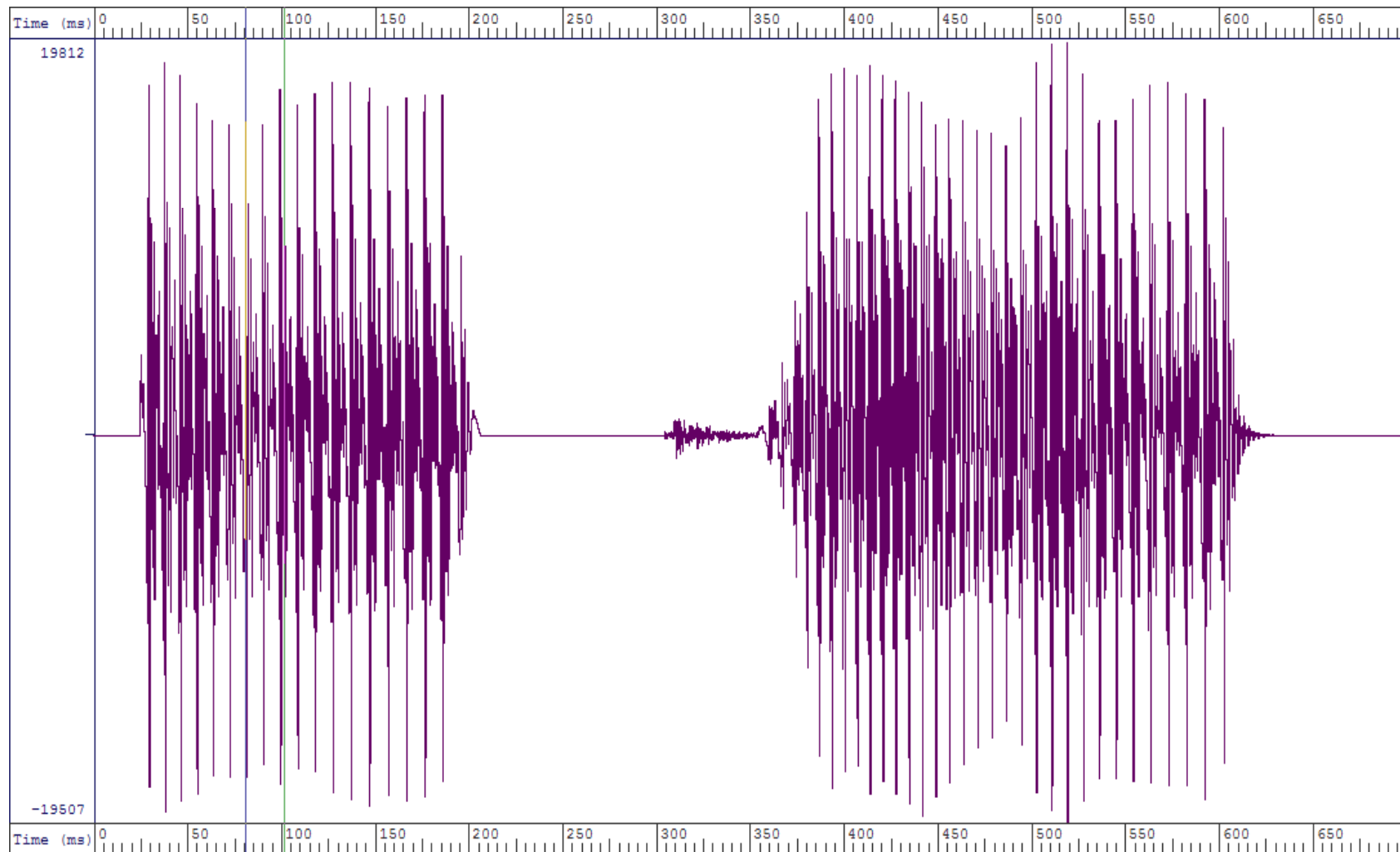
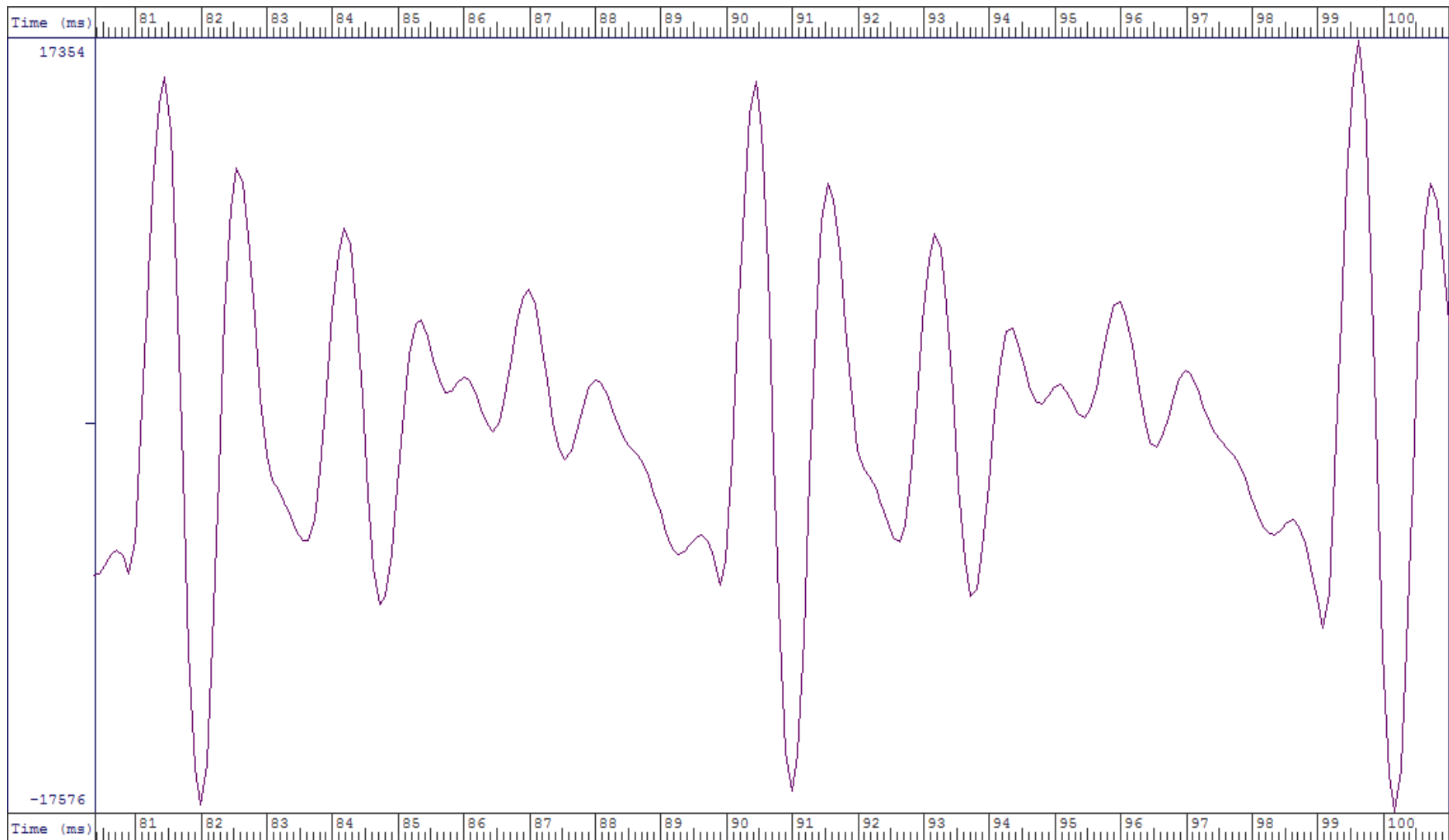


FIG. 652.—Revolving mirror for viewing manometric flame.

# Súčasné zobrazenie vlnového priebehu akustického signálu počítačom - ľudská reč



# Súčasné zobrazenie vlnového priebehu akustického signálu počítačom - ľudská reč - detail



# Electroacoustics (Recording Technology) History

- Origins (1877 – 1889)
- Cylinder vs. Disc (1890 - 1918)
- New Popular Music (1917 – 1929)
- Electric Era Replaces Acoustic Era (1925 – 1931)
- Music for the Masses (1933 – 1942)
- Magnetic Tape Recording Invented (1928 – 1944)
- Tape Recording Comes to America (1944 – 1948)
- War of the Speeds (1948 – 1951)
- Rock and Roll (1947 – 1956)
- From Stereo to Cassette (1945 – 1969)
- Video Tape Recording (1950 – 1989)
- Digital Revolution (1982 - ...)



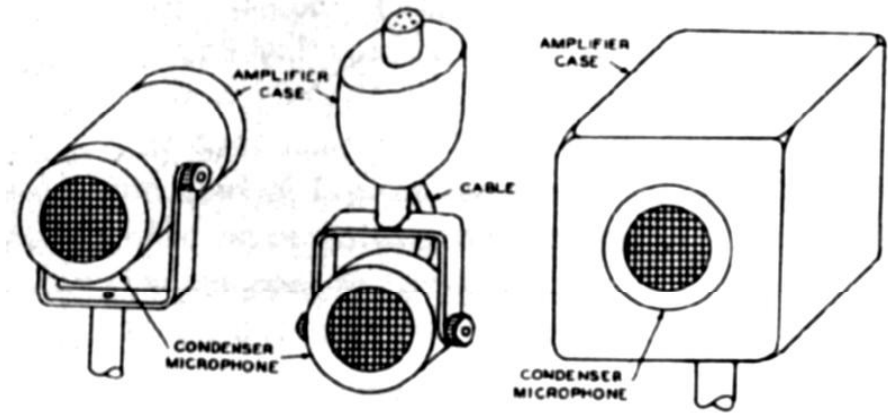
# História mikrofónov

- In 1827, Sir Charles Wheatstone (1802-1875) was the first person to coin the phrase "microphone."
- The word "microphone" comes from the Greek words "micro", meaning "small", and "phone" meaning "voice". It first appeared in a dictionary in 1683 as "*an instrument by which small sounds are intensified*". This was in reference to acoustical hearing devices such as the ear trumpets and megaphones of that era.
- In 1876, Emile Berliner invented the first microphone (*liquid transmitter*) used as a telephone voice transmitter in Bell Company telephone.
- Invented in 1878, David Hughes's (1831-1900) *carbon microphone* was the early model for the various carbon microphones now in use.

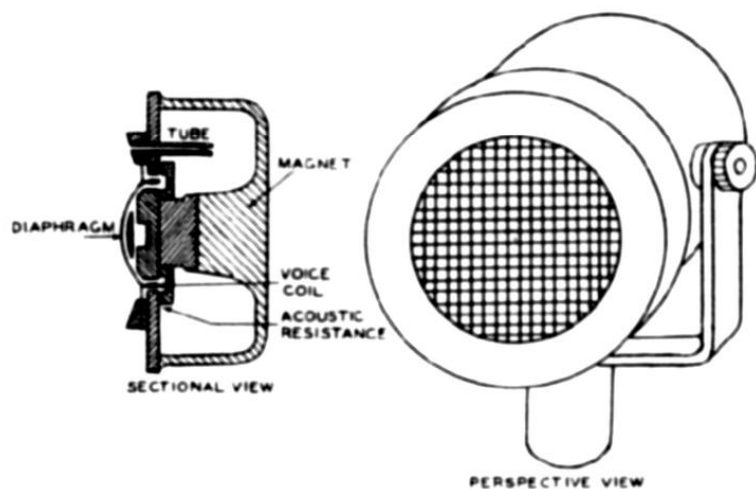


# História mikrofónov

- The first capacitor microphone (and associated impedance converter/amplifier set) was developed by EC. Wentz in 1917, based on work at Bell Laboratories in America.
- The condenser microphone required an amplifier enclosure, containing a vacuum tube amplifier very close to the microphone element in order to amplify the faint signal to a more distant phonograph pickup or radio transmitter.

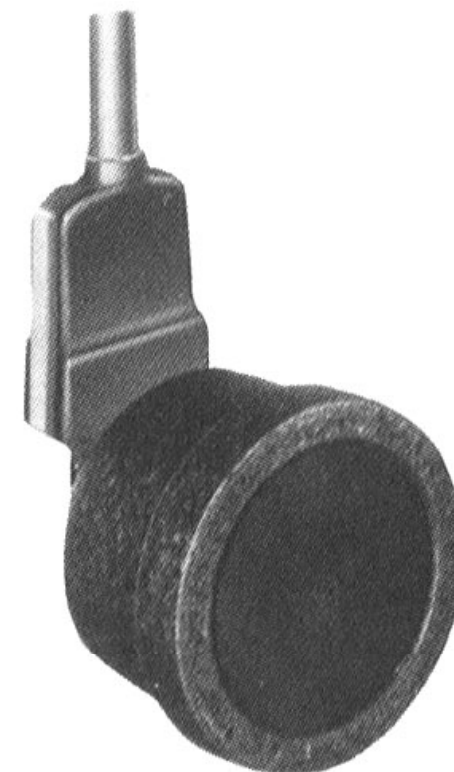


# História mikrofónov

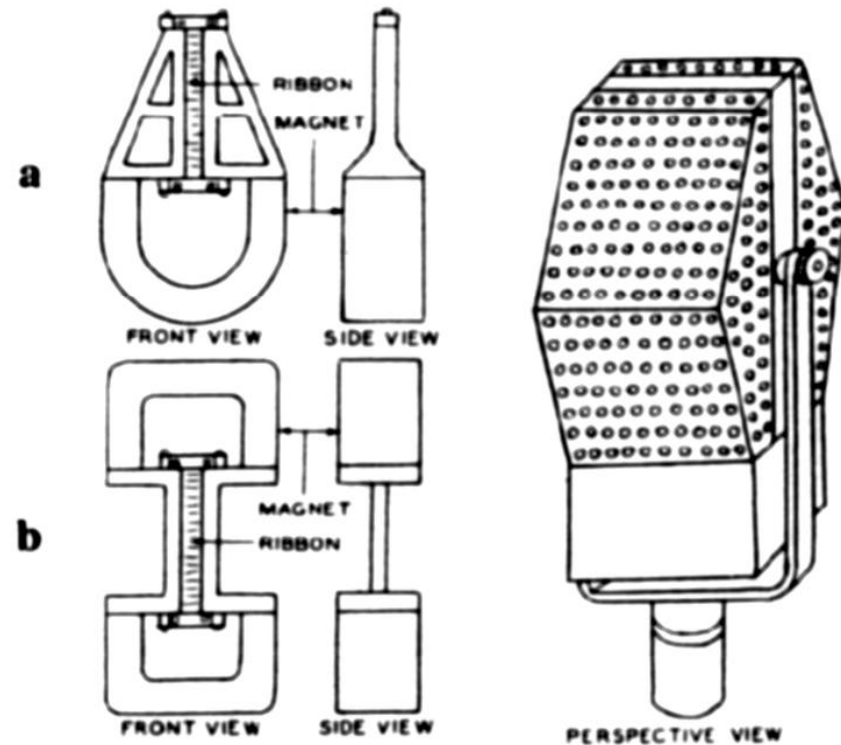


Electromagnetic microphones (moving coil, moving iron and ribbons) were relatively late on the scene because permanent magnets were very weak and only electromagnets could create sufficient flux densities. As a consequence, the first moving coil microphones were very large and required power supplies! The Marconi-Sykes magnetophone (developed from a patent by Sykes in 1920) was the first design to become popular and was adopted by the BBC in 1923, where it was known as the 'Meat Safe'.

The moving-coil, or "dynamic" microphone was developed by W. C. Wentz and A. C. Thuras at Bell Labs in the late 1920's, and was patented in 1931. Unlike the earlier condenser design with a fixed plate behind the vibrating diaphragm, this microphone used a wire coil behind the diaphragm that moved with a "velocity" independent of the sound frequency. The sensitivity of the voltage output depended on the resistance, or "impedance" of the moving coil system. A low impedance of 30 ohms allowed transmission over a long cables without loss of quality. The model 618A was unidirectional and the later model 630A was omnidirectional with a frequency response of 30-15,000 Hz.



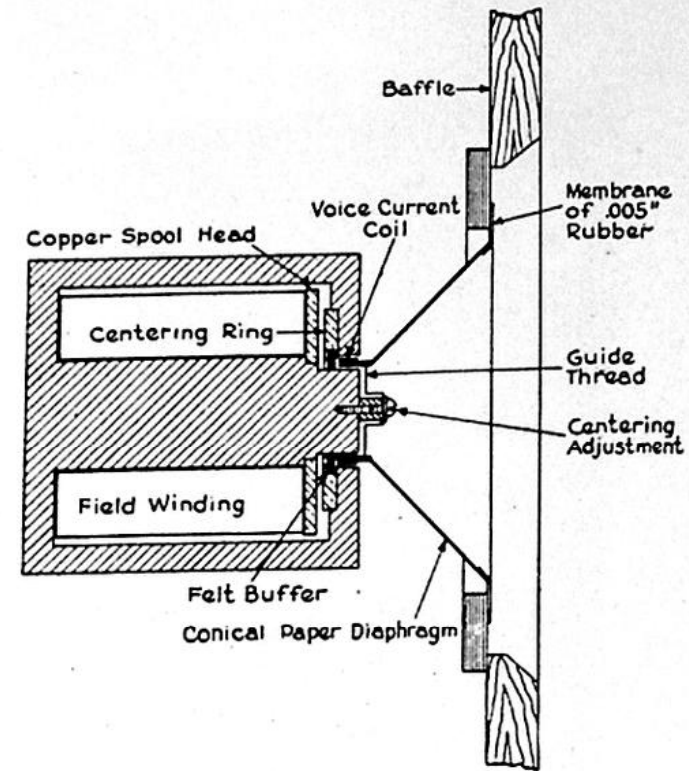
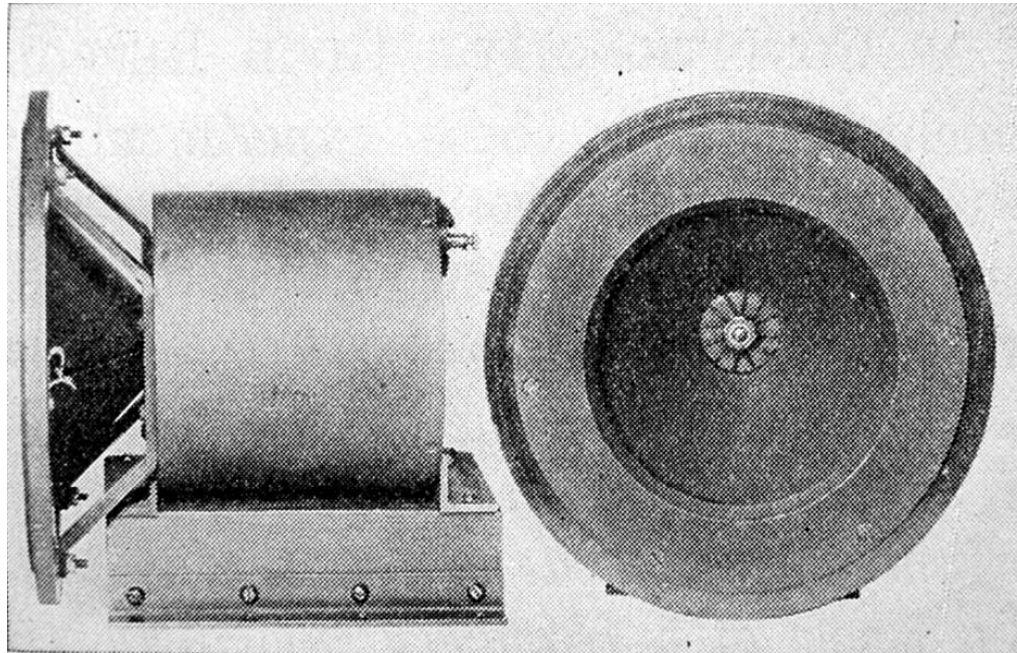
# História mikrofónov



The ribbon, or "velocity" microphone was introduced by RCA in 1931 as the model 44A and became one of the most widely used microphones in vocal recording. It used a small ribbon 2 inches (50 mm) long and 2.4 mm wide that moved inside a magnetic field according to the difference in sound pressure on each side of the ribbon. The velocity of the moving ribbon was independent of the sound frequency, producing a high-impedance signal. The mic was bidirectional with a pickup pattern like a figure-8, toward the front and back, eliminating unwanted noise from the sides. The advantages of high sensitivity and directionality made it ideal for "crooners" like Bing Crosby. The disadvantage of large size with a weight of over 8 lbs made it suitable only for fixed locations such as the recording studio or movie sound stage.



# Reproduktor



- The research paper in 1925 by Chester W. Rice and Edward W. Kellogg at General Electric was important in establishing the basic principle of the direct-radiator loudspeaker with a small coil-driven mass-controlled diaphragm in a baffle with a broad midfrequency range of uniform response. Edward Wente at Bell Labs had independently discovered this same principle, filed patent No. 1,812,389 Apr. 1, 1925, granted June 30, 1931. The Rice-Kellogg paper also published an amplifier design that was important in boosting the power transmitted to loudspeakers. In 1926, RCA used this design in the Radiola line of a.c. powered radios.



# Basreflex

- 1930 - Albert L. Thuras filed patent No. 1,869,178 on Aug. 15, 1930, granted July 26, 1932, for the bass-reflex principle while working at Bell Labs. Early cabinets used a passive baffle to direct sound to the front, allowing the back of the cabinet to be open for the low sounds. The bass-reflex enclosure kept the low-frequency sounds from being lost from the rear of the diaphragm.

July 26, 1932.

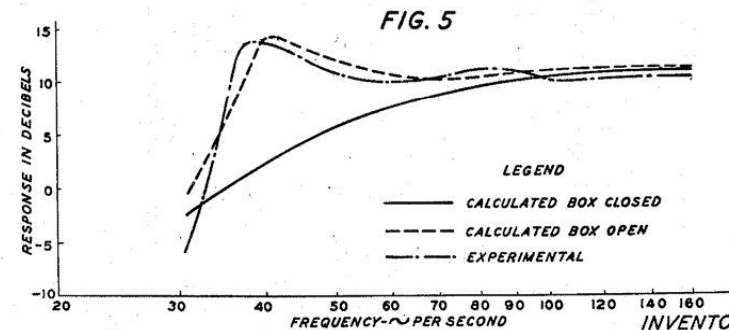
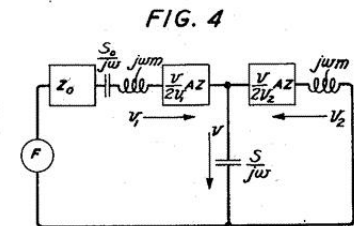
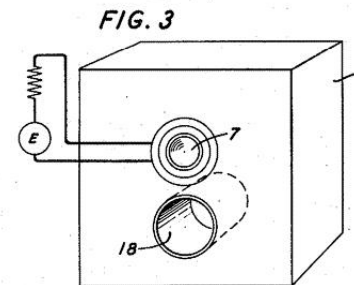
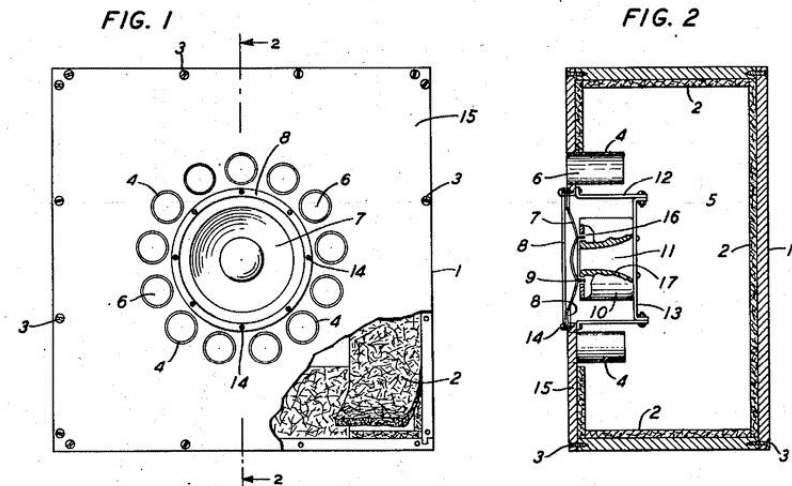
A. L. THURAS

1,869,178

SOUND TRANSLATING DEVICE

Filed Aug. 15, 1930

3 Sheets-Sheet 1



INVENTOR  
A. L. THURAS  
BY  
Walter C. Kiesel  
ATTORNEY

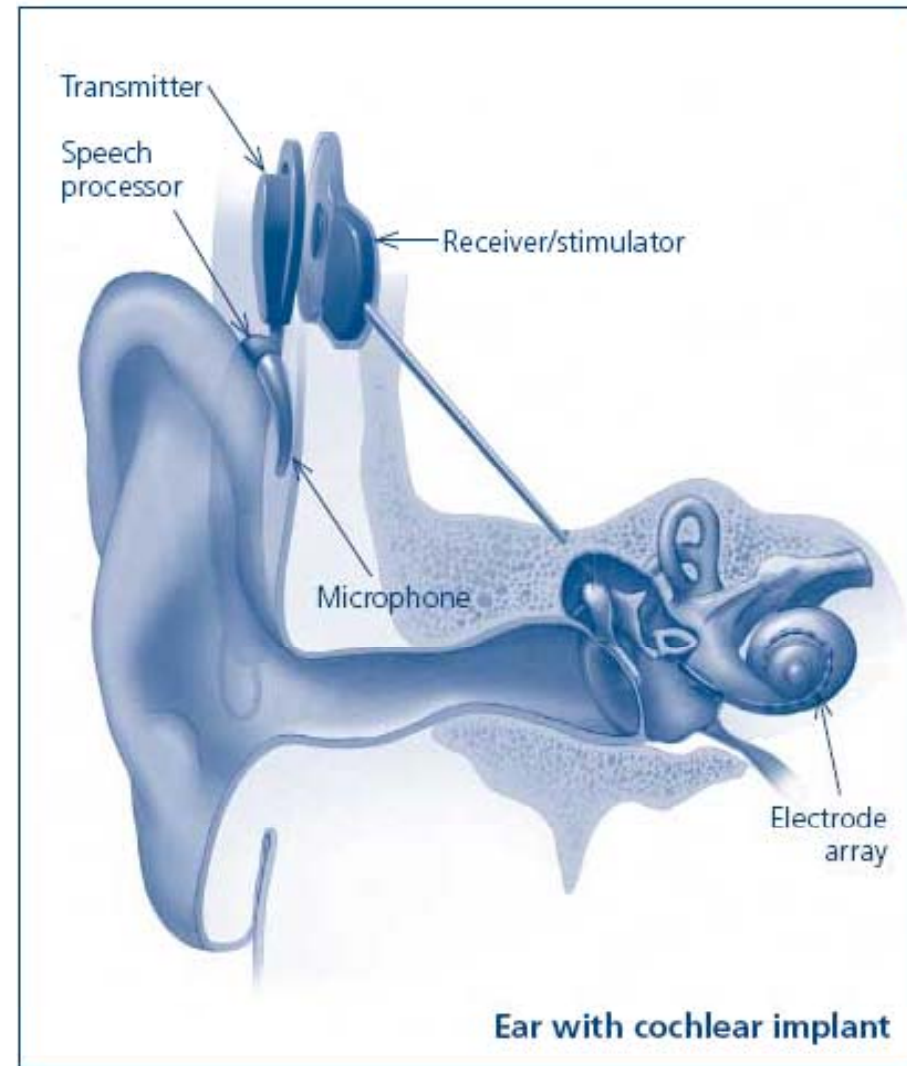
# Typické audiozariadenia digitálnej éry



- Audio CD prehrávač odštartoval „digitálnu revolúciu“ v reprodukovanej hudbe
- iPod reprezentuje kultový produkt reprodukcie hudby šírenej cez Internet

# Kochleárny implantát

- Zvuky prostredia a zvuky reči sú zachytené mikrofónom, odkiaľ sa informácia po kábliku odosiela do rečového procesora.
- Rečový procesor vyberá a kóduje zvuky tak, aby sa informácie o charakteristikách prenášaného zvuku čo najvernejšie premenili na elektrické stimuly.
- Z rečového procesora je kódovaný signál odoslaný do vysielacej cievky a odtiaľ sa cez kožu pomocou elektromagnetických vln vysielala do prijímača.
- Prijímač mení kódované signály na bifázické prúdové elektrické impulzy. Elektrické impulzy sú vysielané k elektródam tak, aby stimulovali sluchové nervové vlákna.
- Mozog rozoznáva signály ako sluchové vnemy.



# Test

- Ako sa nazýva kniha, ktorú napísal John William Strutt, barón Rayleigh ešte v 19. storočí a je považovaná za jedno zo základných diel akustiky?
- Aký je základný rozdiel medzi pozdĺžnou a priečnou vlnou?
- Vlnová dĺžka zvuku sa s rastúcou frekvenciou:
  - a) zväčšuje
  - b) zmenšuje
  - c) nemení

