

HALLÁSELMÉLETEM

előzményei, ismertetése és indoklása.

Budapest, 2022. 08.19.

Kiegészítve és lezárva: Budapest, 2022.11.20.

Hima Ernő.

E-mail: himaerno@gmail.com

Előzetes információ:

Már nyugdíjasként több éven keresztül a Postamúzeumok közül a Diósdai Rádió és Televízió Múzeumban voltam tárlatvezető. A múzeum két teremében a halláselméletéért Nobel díjat kapott Békésy Györgynek a Honolulu-i Egyetemről kapott tárgyi emlékei, kísérleti eszközei is ki vannak állítva. Prof. Dr. Vincze János ny. biofizikus (a továbbiakban, V.J.) és kedves felesége Dr. Vincze-Tiszay Gabriella ny. pszichológus, a Békésy emlékeket kutatva többször járt a múzeumban, ott ismerkedtünk meg. Amikor V.J., Békésy Nobel díjának 60., és halálának 50. évfordulójára emlékezve megalapította a Magyar Tudósok Emlékbizottsága Egyesületet (MATE Egyesület), abba engem is meghívott. Nem sokkal később a MATE Egyesület két alelnökének egyike lettem. Mint a MATE Egyesület alelnöke a Békésy emlékévre (2022.) való felkészülés kapcsán 2020-ban kezdtem Békésy munkásságának, azon belül főleg a Nobel díjjal kitüntetett kutatómunkájának, a hallószervünk működésének beható tanulmányozásába, kutatásába. Azért kutattam Békésy hallással kapcsolatos munkásságát, mert V.J. felkért ebben a témában előadások tartására és felkészülten kívántam az előadásokat megtartani.

Ebben az évben (2022), a jelen dolgozatomból megérthető okból saját elhatározásomból lemondtam alelnöki tisztségemről és kiléptem a MATE Egyesületből. Békésy halláselméletében a célirányos kutatásom során talált fizikai ellentmondások okán írtam le a jelen anyagot és ez okból etikátlannak tartottam további maradásomat! A fizikai ellentmondások felismerése után – Békésy hallási kísérleteinek általa publikált leírásai alapján – kerestem egy a Békésyénél fizikailag alátámaszthatóbb halláselméletet, amelyet jelen dolgozatomban ismertetek.

Itt kívánom megemlíteni Gauri Shankar Gupta „AZ ÉLET REJTÉLYEINEK FELTÁRÁSA Modern tudomány és ősi bölcsesség” c. könyvéből (Vaszista Kft. 2012; 39. old.) azt az idézetet, amit mottómnak is választhatnák: „...a tudományos elméletek állandó átalakulásban vannak, s olykor ezek az átalakulások hirtelen és radikális változásokat eredményeznek. Minden egyes új felfedezés értelmetlenné tett már sok olyan elvet, melyekről évtizedekig, olykor évszázadokig vélték, hogy megdönthetetlenek. Vagyis, amit ma autentikus tudásnak vélünk, azt akár már holnap megdönthetik az új felfedezések. ...”

Miért vettem a bátorságot a Nobel díjas Békésy György jelenleg elfogadott halláselméletétől eltérő elméletem megalkotására?

Erre éppen Békésy példája bátorított!

- Békésy Svájcban, a Berni Tudományegyetemen kémiát hallgatott és kémikus diplomát szerzett.
- Nincs tudomásom róla, hogy fizikát hol hallgatott, tudtommal nincs fizikus diplomája, ilyet az életrajza és egyetlen róla szóló és általam ismert írott publikáció sem tartalmaz, de Budapesten, 1923-ban, a Pázmány Péter Tudományegyetemen fizikából doktorált.

Ez az írásos anyag – a nevem feltüntetésével – szabadon másolható, terjeszthető!

Hima Ernő

- 1924-ben a M. Kir. Posta Kísérleti Állomáson (PKÁ.), PhD fizikusként, laboráns munkát vállalt.
- Később a magyar távközlés területén végzett munkaeredményei elismeréseként, valamint a hallással kapcsolatos biofizikai kutatásainak publikációiért egyre nagyobb nemzetközi elismertsége okán, postamérnöknek nevezték ki, majd a PKÁ főmérnökének, holott műszaki egyetemi (mérnöki) végzettsége nem volt.
- Tangl professzor halála után, a PKÁ. Főmérnöki munkájával párhuzamosan, a Pázmány Péter Tudományegyetem kísérleti fizika tanszékét vezette.
- Az MTA. levelező tagja (1939). Az MTA. rendes tagja (1946). Az USA. Művészeti és Tudományos Akadémia tagja (1954). Az USA. Nemzeti Tudományos Akadémia tagja (1956).
- Bölcsész kémikus diplomával és bölcsész fizikus PhD címmel 1961-ben Fiziológiai és Orvostudományi Nobel díjat kapott, holott orvosegyetemi végzettséggel nem rendelkezett. Ilyet az életrajza és egyetlen róla szóló és általam ismert írott információ sem tartalmaz.

A Nobel díj indoklása: *„A csigán belüli ingerlés fizikai mechanizmusával kapcsolatos felfedezéseiért.”* Csigá alatt a belfül fiziológiai, transzcelluláris folyadékokkal (perilimfa, endolimfa) telített csigája, a cochlea értendő.

Békésy biofizikusnak nevezte magát, a hallás mellett minden más érzékszervünk működését, idegi gátlásait is kutatta.

Említést érdemel, hogy Békésynek sok darabból álló, nagy értékű antik műtárgy gyűjteménye volt. Mondhatni, hogy autodidakta műtárgy szakértővé képezte magát. Műtárgy gyűjteményét végrendeletében a Nobel Alapítványra hagyományozta, amely Stockholmban állandó kiállításon látható. Műtárgy gyűjteményről a Nobel Alapítvány „The Georg von Békésy Collection” címmel kiadott egy fényképekkel illusztrált angol nyelvű katalógust, amelyben Békésy életrajza és tudományos munkássága is ismertetésre került. Többek között ezt a kiadványt is tanulmányoztam, magyarra fordítottam.

Fentiek alapján látható, hogy Békésy egész életében, egymástól meglehetősen távoli tudományterületeken autodidakta módon képezte magát, szerzett új ismereteket a műszaki tudományok; az antik, muzeális műtárgyak; az anatómia; a hallás és más érzékszervi működések; az idegi gátlások; ... terén és érte el a nemzetközi tudományos világ legmagasabb elismerését!

Én is autodidakta módon, sokoldalúan képeztem, képzem magam. Így ismertem meg Békésy és elődei halláselméleteit, és azok megismerése után, fizika ismereteim alapján találtam ellentmondásokat az általam igen tisztelt Békésy György halláselméletében. Nekem a Békésy által lefolytatott hallási kísérletek megisméltésére lehetőségem nincs, ezért az általa végzett hallási kísérletek beható tanulmányozásával, az általa publikált kísérleti eredmények fizikai lehetőségességének vizsgálatával, átgondolásával, újraértékelésével állítottam fel az övétől eltérő halláselméletemet.

Halláselméletem mindenben a Békésy által publikált kísérleti eredményekre, pontosabban azok fizikai lehetőségességének vizsgálatára alapozott, de Békésy halláselméletétől szignifikánsan eltér!

Halláselméletem előzményei:

Halláselméletem kialakítása előtt behatóan tanulmányoztam a korábbi halláselméleteket és egyéb a témával kapcsolatban relevanciával bíró írásos anyagokat. Kutattam a témát több a tulajdonomat képező Békésyről szóló könyvben, a KSH Könyvtárában, a

Ez az írásos anyag – a nevem feltüntetésével – szabadon másolható, terjeszthető!

Hima Ernő

BME Országos Műszaki Információs Központ és Könyvtárban, és az MTA Információs Központ és Könyvtárban fellelhető anyagokban valamint az Interneten. Kutatómunkám során több Békésy életéről, munkásságáról szóló könyvet; az Interneten elérhető, Békésy életéről és munkásságáról szóló anyagokat; a hallószervük felépítését, működését ismertető könyveket; Békésy „Sensory Inhibitor” és „Experiments in Hearing” c. könyveit; a Nobel Alapítvány által kiadott „The Georg von Békésy Collection” c. műtárgy katalógust és Békésy életrajzot; Prof. Dr. Répássy Gábor által szerkesztett „Fül-Orr-Gégészeti Fej-Nyak-Sebészeti” c. orvosegyetemi tankönyv releváns fejezeteit, valamint az irodalomjegyzékben felsorolt további, a hallással és hallószervünkkel kapcsolatban, nyomtatásban és az interneten elérhető anyagokat tanulmányoztam.

Fentiekén kívül a fizika aerodinamikai, hidrodinamikai és a hanghullámok különböző közegekben való terjedését tárgyaló fejezeteit is tanulmányoztam.

Megjegyzem: az irodalomjegyzék felsorolása nem teljes! Csak azokat a forrásokat tartalmazza, amelyek a redundáns információkon túl új információkkal is szolgáltak.

Halláselemélet-fejlődési visszatekintés:

A fül szerkezetének számos általános jellemzőjét fedezték fel a tizenhatodik, és tizenhetedik század úttörő anatómusai, halláskutatói. A finomabb részletek csak a tizennyolcadik-tizenkilencedik században, a mikroszkópos vizsgálatok és a preparálási technikák fejlődésével kezdtek napvilágot látni.

A fejlődés néhány főbb lépése a XIX. és XX. században:

- **Lincke** 1837-es publikációja a hallásról.
- **Corti** 1851-ben fedezte fel a scala media-ban a basilaris membran-on lévő, róla elnevezett Corti-féle szervet.
- **Hermann von Helmholtz** 1863-as „Sensations of Tone” (Tónusérztek) c. publikációjában ismertetett halláselemélete több mint hatvan éven át egyeduralgó volt.
- **Retzius** 1881-ben és 1884-ben készített monumentális ábrákat, ismertetéseket a cochlea labirintusának anatómiájáról, amely a halaktól az emberig terjed.
- **Békésy György** 1928-as „Zur Theorie des Hörens; Die Schwingungsform der Basilmembran” (A halláselemélethez; a basilaris membran rezgési formája) c. cikke indította Békésy halláseleméleti kutatásaival kapcsolatos publikációit, amelyen – más érzékszerveink működésének kutatásával együtt – élete végéig dolgozott.

A korábbi munkákból csak a halláselemélettel kapcsolatban relevanciával bíró Helmholtz halláseleméletét és Békésy halláseleméletét vázolom röviden:

- **Helmholtz**-ot foglalkoztatta az a kérdés, hogy vajon hogyan tudunk különbséget tenni mély és magas hangok között. A hangmagasság-érzékelés kezdeti helyének a belfül basilaris membran-ját tartotta, mely alapállapotban a cochlea-ban, a fiziológiai folyadékokkal telt belfül csatornájak alakját követő csigavonalban feltekert struktúra. Széthajtogatva az ovális ablak felőli vége keskeny, a másik vége – az ovális ablaktól a helicotrema-ig folyamatosan szélesedve – szélesebb. Itt értelmezte a különböző magasságú hangok érzékelését: a magas hangokét a keskeny rostokon, a mély hangokét pedig a szélesebb rostokon. Helmholtz úgy vélte, hogy a basilaris membran-on elhelyezkedő Corti-féle szerv szőrsejtjei élesen hangolt, frekvenciaszelektív (bio)mechanikai rezonátorok.
- **Békésy** rámutatott, hogy az élesen hangolt frekvenciaszelektív rezonátorok felfutási és lecsengési ideje hosszú, ezért, ha a Corti-féle szerv szőrsejtjei élesen hangolt

Ez az írásos anyag – a nevem feltüntetésével – szabadon másolható, terjeszthető!

Hima Ernő

(bio)mechanikai rezonátorok lennének, akkor értelmezhető hangok helyett csak összecsúszott hangok érthetetlen katyvaszát érzékelnénk. Békésy úgy vélte, és halláselméletét arra alapozta, hogy a basilaris membran-on, a hangmagasságnak megfelelően a helyét az éppen érzékelt hangfrekvencia szerint folyamatosan változtató, amplitúdóban a hangerősséget lekövető utazó hullám (traveling wave) alakul ki. A Basilaris membrán fizikai hullámmozgásai a Corti-féle szerv szőrsejtjeit a cochlea középső (scala media) csatornájában az azokat fedő tectorial membrán-hoz érintve, dörzsöléses, hajlításos, (bio)mechanikus idegi stimulációt eredményez. Békésy szerint – Helmholtz-al megegyezően – a basilaris membran-on elhelyezkedő Corti-féle szerv szőrsejtjei a hangfrekvencia (bio)mechanikus, frekvenciaszelektív érzékelői és az azokból kiinduló, az aktuálisan érzékelt hangfrekvenciával stimulált egyes idegszálak juttatják az összetett hangok frekvencia szerint szelektált, szinuszos hangokra bontott (Fourier-analízis) idegi ingerületeit az agykéregre. Ha nem így lenne – teszi fel Békésy a kérdést – akkor miért lenne ilyen bonyolult a Corti-féle szerv?

- Későbbi munkáiban Békésy említette, hogy a basilaris membran-on általa megfigyelt utazóhullám maximumhelyei annyira laposak, hogy pusztán avval az egyes hangok szelektív érzékelése nem magyarázható. Ekkor a patkórák szemében a látásra felfedezett Mach-sávok (Riggs, Ratliff és Keese, 1961.) elméletét adaptálta a hallásra és avval magyarázta a szelektív hangérzet kialakulását. Majd arra is tett utalást, hogy a basilaris membran-on lévő Corti-féle szerv valószínűleg csak előszelektálja a hangokat és a hangérzet kialakulása a Corti-féle szerv és magasabb idegpályák közözi együttműködés eredménye.

Békésy a halláselméletét az időben egymás követő magyarázat-kiegészítésekkel többször módosította, ami arra enged következtetni, hogy Ő maga is bizonytalan volt saját halláselméletében!

- Békésy csak jól definiált, időben állandó frekvenciájú, tisztán szinuszos hangokkal vizsgálta a hallást, holott a hallószervbe jutó hangok igen összetettek. A fülbe csak a bonyolultan összetett hangok és felhangok összegzett, időben folyamatosan változó frekvenciájú és amplitúdójú burkológörbéi jutnak! Éppen az alaphangok lefolyását időben és amplitúdóban folyamatosan módosító felhangok miatt tudjuk felismerni, megkülönböztetni, a beszélőt, az énekest, a hangszerek hangját, a különböző zörejeket, ...

Én az általam nagyra becsült Békésy György hallással kapcsolatos, a cochlea basilaris membran-ján hang hatására kialakuló, változó pozíciójú és változó amplitúdójú hullámhegyek és hullámvölgyek időben egymást követő sorozatából álló utazóhullámot – a későbbiekben indokolt okokból – (bio)fizikailag nem tartom megfelelőnek a hallásinger magyarázatára!

Békésy halláselméletét az alábbiak szerint vizsgálva nem tartom fizikailag helytállóknak:

1. Pascal-törvény.
2. Hang hullámhosszak.
3. A Békésy féle utazóhullám elmélet frekvenciaszelektív rezgésérzékelés, ami az utazóhullámokkal nem magyarázható!
4. A hanghullámok mechanikai rezgései a cochlea ovális ablakánál zárt folyadékterbe adódnak át. Ha ott a basilaris membrán hullámmozgását váltanák ki, akkor

Ez az írásos anyag – a nevem feltüntetésével – szabadon másolható, terjeszthető!

Hima Ernő

- azok végigfutnának a basilaris membrán-on és a helicotrema-nál reflexiók lépnének fel a cochlearis csatornában, ami zavarná a hallást.
5. Békésy cochlea modelljeinek egyszerűsítései fizikailag problémásak, amit a szöveg megfelelő helyén ismertetek.
 6. A cochlea membránjain infinitezimálisak a Békésy által kimutatott, de véleményem szerint nem lehetséges fizikai elmozdulások.
 7. Ha a „hanghullám” a cochlearis csatornában a basilaris membrán hullámozgásai miatt a Corti-féle szervet a tectorial membránhoz emeli, akkor a mechanikai súrlódás, hajlítás okán a nagyobb, de még 120dB alatti hangerők esetén is a Corti-féle szerv szőrsejtjei irreverzibilis módon károsodhatnak!
 8. A cochlea membránjainak Békésy által a hang hatására megadott, egzakt módon nem mérhető amplitúdójú, sőt a Pascal-törvény alapján nem lehetséges fizikai mozgásainál lényegesen (több nagyságrenddel) nagyobbak, valóságos és egzakt módon mérhetőek a cochleában a fizikai nyomásértékek, nyomásváltozások.
 9. Cochlearis csatornák igen kis méreteiből és az azokat kitöltő folyadékok kis tömegéből, csillapító hatásokból, ... adódó, elmozdulást gátló tényezőket Békésy nem vette figyelembe (mechanikai ellenállás /súrlódás/, folyadékok viszkozitása, áramlási jellemzők, kohézió, ...).
 10. Az idegszálak – Békésy által kimutatott – laterális kapcsolata az „éleshallás” ellen hatnak.

Békésy – amint azt a „Sensory Inhibition” és az „Experiments in Hearing”, c. könyvekben leírta – a hangok által a belsőfülben keltett, időben változó amplitúdójú és pozíciójú hullámmozgásnak általa feltételezett keletkezésével kapcsolatos alapkísérleteit különböző anyagokon, de levegőben végezte (cérna, fonal, textilszalag, bőrcsík, nyaklánc, vízfelszín, ...). A hangvillával megrezegtetett anyagok hullámmozgását stroboszkóplámpás megvilágítással figyelte és azok tapasztalataiból vont le az érzékelt hang hatására a basilaris membrán hullámmozgására, és avval a Corti-féle szerv idegvégződéseinek (bio)mechanikai stimulálására vonatkozó elméletét. Ahogy írta: „... megfigyeltem, hogy hullámok mindenhol keletkeznek ...”. Azt nem vette figyelembe, hogy ezeket a kísérleteket és megfigyeléseket fizikailag összenyomható közegben, levegőben végezte!

A Postamúzeum Diósi Rádió és Televízió múzeumában Békésynek a Honolulu-i Egyetemről kapott kísérleti eszközei között több fülmodell, pontosabban belsőfül (cochlea) modell található. A kiállított cochlea modellek ismeretében az a véleményem, hogy azok egyike sem alkalmas a belsőfül valós modellezésére! *Többnyire csak egyszerű mechanikus és pneumatikus modellek vannak kiállítva, pedig a belsőfül mindhárom csatornája folyadékkal töltött, hidrodinamikus működésű!* Természetesen nem zárom ki, hogy a múzeum kiállítási tárgyain kívül más modellek is léteztek, én csak az ott megismerhető modelleket tartom alkalmatlannak a cochlea hidrodinamikai modellezésére. Megjegyzem: Békésy sem a „Sensory Inhibition”, sem az „Experiments in Hearing” c. könyvben nem ismertette a Postamúzeumban lévőktől jelentősen eltérő fülmodelleket!

Békésy igen kifinomult preparálási technikával, víz alatt nyitotta meg a cochlea-t a helicotrema-nál és – a basilaris membrán kiszáradását meggátlóan víz alatti mikroszkóppal – figyelte meg annak belsejét az által feltárt nyílás adta kis betekintési tartományban. Ezeket a kísérleteket több élőlény holttestének hallószervén végezte a tengerrimalactól, az elefántig, az embert is beleértve.

Ez az írásos anyag – a nevem feltüntetésével – szabadon másolható, terjeszthető!

Hima Ernő

Később, mivel a cochlea-k, azokon belül az emberi cochlea, kis méretük és tejes csontba zártáguk okán a basilaris membran Békésy által feltételezett elmozdulásainak, hullámmozgásainak közvetlen megfigyelésére nem alkalmasak, többszörösen felnagyított, kiegyenesített és más módon is egyszerűsített cochlea modellekkel kísérletezett. *Hang hatására, a scala timpani cochlear-is csatornában lévő basilaris membran-nak az éppen érzékelt hang erősségével arányos amplitúdójú és a hangfrekvenciának megfelelő pozíciójú hullámmozgását az igen gondosan kivitelezett, de jelentősen felnagyított és egyszerűsített cochlea modell(ek) perilmfa folyadékát helyettesítő vízbe, vagy glicerin vizes oldatába juttatott szilárd, apró, de többszörösen összetett molekulaszervezetű, amorf alakú jelzőanyagokkal mutatta ki (faszénpor, ezüstpor, aranyfüst darabkák, ...). Kísérleteinél a hallás 120dB-es maximumánál két nagyságrenddel nagyobb, 140dB-es rezgéseket alkalmazott a fülmodelljeinél! Megfigyeléseinél nem vette figyelembe, hogy a jelzőanyagok molekuláris összetétele és fajlagos tömege a modell folyadékától eltérő, ezért azok vagy a folyadék felszínén, vagy az aljára leülve helyezkednek el, a modellek falain surlódnak, alakjuk miatt a köztes folyadéktérben is sztochasztikusan mozognak, és ezért azokra a folyadékok igen kismértékű térfogati elmozdulásai nem a folyadékmolekulákkal azonos módon hatnak!*

Kísérletei leírásában Békésy az „Experiments in Hearing” c. könyvben kitér arra is, hogy a cochlea kerek ablakát fogászati cementtel rögzítve, a hangvilla rezgéseit az ovális ablak felől a cochlea-ba vezetve a perilimfa folyadékba juttatott jelzőanyagokon stroboszkóp-lámpás megvilágítással megfigyelt, adott frekvenciához tartozó jelzőanyag mozgások továbbra is fennállnak, helyüket nem változtatják. A hangvilla rezgéseit az ovális ablak rögzítése mellett a kerek ablak, majd minkét ablak rögzítése mellett a helicotrema felől a cochlea-ba vezetve a kísérletek eredményei szintén változatlanok. Ezekre, az általa előre várttól eltérő eredményekkel járó megfigyeléseire, a neve alatt megjelent könyvekben, szakcikkeiben és más forrásmunkákban magyarázatot nem találtam.

A fenti bekezdéssel kapcsolatban felmerül bennem a kérdés, hogy a szervezet legkéményebb csontjában, a sziklacsoniban helyet foglaló zárt cochlea-ban, pontosabban annak csontba zárt igen kisméretű belső terében lévő folyadékokban hogyan lehet bármiféle jelzőanyaggal, bármiféle mozgást kimutatni? Ha megbontjuk a zárt, kemény, csontos cochlea-t, akkor már nem az eredeti állapotában, hanem a boncolásos beavatkozás miatt mindenképpen, és lehet jelentősen megváltozott fizikai állapotában vagyunk csak képesek valamelyes megfigyelésre, amiből a teljes és megbontatlan egész belső működéséről már nem tudunk valós képet kapni! A cochlea nagyon kis mérete és teljes csontba zártága nem engedi, hogy valós megfigyeléseket tudjunk végezni a belső térben lezajló, hallással kapcsolatos, Békésy által feltételezett mozgást, elmozdulást eredményező fizikai folyamatokról! További gond, hogy a cochlea boncolásos megbontásával is csak a két szélső csatornájában, a scala vestibuli-ban és a scala timpani-ban lévő perilimfa folyadék mozgásai figyelhetők meg, amiből a középső csatornában, a scala media-ban lévő kb. gél sűrűségű endolimfa folyadékban lejátszódó (bio)fizikai folyamatokról, feltételezett fizikai elmozdulásokról, és így a Corti-féle szerv valós működéséről nem kapunk valós képet!

Békésy – mint már utaltam rá – az „Experiments in Hearing” c. könyvben általa írottak szerint a belsőfül modelljeiben arányosan felnagyította és jelentősen egyszerűsította a cochlea felépítését. A basilaris membran és a Reisner's membran közötti, kb. gél sűrűségű endolimfa folyadékkal töltött, teljesen zárt, scala media csatornát – amelyben a Basilaris membran-on a Corti-féle szerv található a hallóideg végződésekkkel – kihagyta, és azt a scala vestibuli és, scala timpani perilimfa folyadékkal töltött csatornákat elválasztó egyré-

tegű gumihártyával helyettesítette. A gumihártya megfelelő helyén, a helicotrema-n lévőnek megfelelő rést képzett ki a két csatorna között, hogy a kísérleti folyadékok azon át, a belsőfülben lezajló parányi térfogati elmozdulásoknak megfelelően közlekedni tudjanak. A cochlea ovális és kerek ablakait erőhatásra elmozduló membránokkal helyettesítette. Ilyen egyszerűsítéssel a modellekben, a perilimfa-t helyettesítő folyadék igen kis térfogati elmozdulásaira, a scala timpani és a scala vestibuli közé helyezett egyrétegű gumihártya fizikailag másképpen reagál, mint a kb. gél sűrűségű endolimfa folyadékkal telített, két hártya között teljesen zártan elhelyezkedő scala media. A Békésy által, hang hatására a basilaris membrán fizikai mozgásainak kimutatására használt kísérleti jelzőanyagokkal kapcsolatos meglátásomat fentebb (5. old.) már ismertettem.

Az összetett felépítésű, kb. gél sűrűségű folyadékkal töltött és a Corti-féle szervnek helyet adó scala media kihagyásának, vagyis a cochlea modellek jelentős egyszerűsítésének okát és a különböző méretű és vastagságú, a basilaris membrán-t helyettesítő gumihártyák készítése módját Békésy az „Experiments in Hearing” c. könyvében részletesen ismerteti. Az ott írottakkal nem értek egyet.

Bonyolítja a helyzetet, hogy a cochlea keresztmetszeti képén a három csatorna közül a középső, a scala media – amelyben a Corti-féle szerv van – a legkisebb keresztmetszeti felületű. Alaktanilag háromszöghöz hasonló, ahol a befogók (basilaris membrán és Reisner's membran) által bezárt hegyesszög kb. 30°-os, tehát a csatorna eléggé lapos. Harmadik – legrövidebb – oldala a cochlea merev csontfala. A scala media-ban a Corti-féle szerv kb. gél sűrűségű folyadékban van. A belső biológiai képletek csökkentik és me-revítik a scala media belső terét, ezért a később tárgyalásra kerülő egyéb kizáró okok mellett ezt is figyelembe kell venni a Békésy féle utazóhullám elmélet lehetségeségének vizsgálatakor! Békésy – mint már utaltam rá – a modelljeiben ezt a csatornát teljesen kihagyta és a két szélső, alaktanilag közel ovális csatorna helyett középvonalában egyszerű egyrétegű gumimembránnal kettéválasztott négyszög keresztmetszetű csatornákat használt.

Békésy tehát figyelmen kívül hagyta, hogy kísérletei modelljeiben az általa kihagyott scala media csatornában, az azt gázmentesen kitöltő kb. gél sűrűségű folyadékban található a basilaris membranon elhelyezkedő hallóideg végződés! A teljesen zárt scala media fizikailag másképpen működik mint a scala timpani és a scala vestibuli, és a scala média-ban lévő folyadék is más viszkozitású, ezért fizikai tulajdonságaiban eltérő a másik két csatornában lévőtől.

Békésy a cochlea (bio)fizikai működésével kapcsolatos megállapításainál szintén nem vette figyelembe, hogy zárt térben lévő folyadékoknál hullámmozgás bármely erőhatásra történő kialakulásához két, fizikai tulajdonságaikban jelentősen eltérő közeg – összenyomhatatlan folyadék és összenyomható gáz – egyidejű jelenléte szükséges! A folyadékok összenyomhatatlansága (Pascal-törvény) miatt, összenyomható gáztér hiányában, a folyadékban, és így az abban lévő basilaris membrán-on, amplitúdó változásként megfigyelhető elmozdulás, hullámmozgás fizikailag nem tud kialakulni. Mivel a folyadékokat befoglaló cochlearis csatornák membránjainak minden pontjára, minden időpillantban a hangfrekvencia szerint időben változó gyakoriságú és erejű, de mindenkor és minde ponton azonos értékű nyomások hatnak, azok a belső membránok (basilaris membrán, Reisners membran) bármiféle fizikai mozgását lehetetlené teszik!

A Pascal-törvény értelmében, a folyadékok összenyomhatatlansága okán, egy bármilyen alakú és bármekkora térfogatú zárt edényben lévő, azt gáztérmentesen kitöltő folyadékban a folyadékra ható, bármely okból, és bármely irányból bekövetkező fizi-

kai nyomás, nyomásváltozás, rezgés a folyadék teljes térfogatában, azonos időben, gyengítetlenül hat és emiatt semmilyen fizikai elmozdulást nem képes kiváltani!_A cochlea pedig ilyen, a csigacsontban elhelyezkedő, zárt, folyadékkal töltött, gáztérmentes edény!

A folyadékmolekulák felveszik az edény alakját és a rájuk ható erők (gravitáció, adszorpció, ...) hatására nyugalomban a felszínük – ha az gáztérrel határolt – vízszintes. A folyadékmolekulákra és a folyadékmolekulák között ható erők eredményeként minden folyadék a lehető legkisebb térfogatban helyezkedik el. Ebből adódik, hogy – mint Pascal megállapította – a folyadékok összenyomhatatlanok!

Szemléletesen úgy magyarázható, hogy ha egy bármilyen alakú edénybe azonos átmérőjű és összenyomhatatlan anyagból (pl. kemény, tömör, simafalú kerámiából) készült igen kisméretű golyókat helyezünk, gravitációs térben azok felszíne is vízszintes lesz. Ha az edényt teljesen hézagmentesen töltjük fel és az edényben lévő golyókra pl. egy jól tömítő dugattyú segítségével nyomást gyakorolunk, akkor a golyók – arra alkalmas szabad hely hiányában – nem tudnak elmozdulni, de az edény falára és a dugattyú felületére nyomóerőt fejtenek ki! Ez a nyomóerő (a gravitációs erőt figyelmen kívül hagyva) az edény falának és a dugattyú felületének minden pontján azonos nagyságú, elérheti az edény falának nyomástűrését és a fölött az edény károsodik. *A cochlea is ugyanezen ok miatt és irreverzibilis módon károsodik, ha a rá ható hangnyomás meghaladja a 120 dB-t (egyes publikációkban 130dB, fájdalomküszöb)! A végleges károsodás előtt éles fájdalom figyelmeztet a fizikai tűrőhatárra. A folyadékmolekulák – akárcsak a fenti gondolkísérletben a golyók – összenyomhatatlanok, ezért a befoglaló edény károsodása nélkül rájuk ható külső nyomás fizikailag véges értékű!*

Érdekes megfigyelni, hogy gravitációmentes térben (a világűrben lévő űreszközök belső terében) a folyadékmolekulák között ható erők okán, az asztronauták által „elengedett” vízcsepp zárt térfogatú, és rövid idő alatt teljesen szabályos gömbformát felvéve lebeg. Ez a megfigyelés erősíti, hogy a folyadékmolekulák között, a térfogatukat meghatározó vonzóhatás van, ami nem csak a gravitációs térben, de gravitációmentes térben is hat. Pascal földi körülmények között ismerte fel azt, amit jóval később az űrkutatás megerősített!

Békésy az „Experiments in Hearing” c. könyvben írja, hogy a hallást bonyolítja, hogy a külső és középfül pneumatikus és mechanikus rendszerein kívül a belsőfülben, a cochlea-ban hidrodinamikai folyamatok is vannak, és „a hidrodinamikában több a paradoxon, mint az ismert törvényszerűség, ezért a kísérleti megfigyeléseket kellő óvatossággal szükséges figyelembe venni”. Vajon miért csak leírta az idézett mondatot és Ő a kísérleti eredményeinek kiértékelésénél miért nem vette figyelembe a cochlea-ban lezajló hidrodinamikai folyamatokat?

Békésy a cochlea felépítésének fentebb leírt egyszerűsítése, valamint a cochlea-ban lejátszódó hidrodinamikai folyamatok figyelmen kívül hagyása okán, kísérletei során a felnagyított cochlea-modellek ovális és kerek ablakai közötti tér folyadékába juttatott szilárd, többszörösen összetett molekulájú, amorf alakú kísérleti jelzőanyagoknak a folyadékok igen kismértékű térfogati elmozdulásaiból adódó és általa megfigyelt parányi mozgásaiból – meglátásom szerint – téves következtetésekre jutott.

További magyarázatra szorulna, hogy a teljesen zárt és folyadékkal gáztérmentesen töltött cochlearis csatornába, a cochlea modellek folyadékterébe, milyen módon tudott Békésy bármiféle elmozdulást detektáló jelzőanyagot juttatni? Erre a kérdésre a könyvben azt írja, hogy a helicotrema-nál a cochlea bocolásos megbontása után fogászati cementtel felragasztott üveglappal zárta le a cochleat és a lezárás előtt juttatta a jelzőanya-

got a cochlea folyadékába. Ezzel az a gondom, hogy nem látom be, hogyan lehet a boncolással megnyitott helicotrema teljesen légbuborék mentesen lezárni. A helicotrema-nál a cochlea két szélső csatornája, a scala vestibuli és a scala timpani folyadékai igen kis elmozdulásokkal kétirányban „áramlanak”, amely áramlások nl (nanoliter) mértékűek, a hangfrekvencia fázishelyzetének ütemében változó irányúak, és az ovális ablak és a kerek ablak elmozdulásinak következményei. Ha a méreteket és folyadékmennyiségeket, valamint a hangfrekvenciás elmozdulásokat figyelembe vesszük, akkor valós áramlásokról nem is beszélhetünk, csak folyadék kétirányú rezgőmozgásairól. A teljesen zárt scala media csatornában viszont semmilyen áramlás nincs, az továbbra is teljesen zárt marad, ezért az abban lévő kb. gél sűrűségű folyadékban a Corti-féle szerv szőrsejeinek (hallóideg végződés) mozgásait nem lehet semmilyen jelzőanyaggal észlelni, kimutatni. Másik gond, hogy a helicotrema-ban a scala vestibuli és a scala timpani csatornák kb. víz sűrűségű folyadéka kb. 0.4mm^2 -en közlekedik, amely méret jelentősen változhat a helicotrema megnyitásakor és azt követően felragasztott üveglappal történő lezárásakor. A méretváltozás befolyásolja a folyadékáramlást. Ebben a térben, az oda juttatott jelzőanyagok valóban mozognak! Ebből a mozgásból viszont nem következik a basilaris membrán mozgása, mivel annak teljes felületére és a másik oldalon lévő Reisners membrán teljes felületére is mindenkor azonos erők hatnak. A membránokra ható erők nyomóerők, amely erők nyomása és ellennyomása minden időpillanba azonos, ezért elmozdulást nem eredményez!

Békésynek az általa leírt minden kísérlete a légvezetési hangrezgések érzékelésére vonatkozott, és avval magyarázta a csontvezetési hallás kialakulását is. Indoklásként azt említette, hogy a csontvezetési hallásérzet azonos frekvenciájú és intenzitású, de ellenfázisú légvezetési hanggal kioldható. Ez viszont akkor is igaz, ha a hallásérzetet a cochlea folyadékaiban fellépő, a hangfrekvencia pillanatnyi amplitúdója szerint változó, azonos frekvenciájú és amplitúdójú, de ellenfázisú hangnyomások okozzák, függetlenül attól, hogy azok légvezetési, vagy csontvezetési rezgésekből adódnak. Az azonos frekvenciájú és azonos intenzitású, de ellenfázisú rezgések eredője a pillanatnyi nyomóerő változások energiája és frekvenciája szerint is „0”!

A fizika ismert törvényei alapján a Békésy által leírt, bármely nem merev, kellően hosszú és kellően könnyen mozgatható anyag, külső erő hatására kialakuló hullámmozgásai gáz atmoszférában, vagy folyadék-gáz átmenetek folyadék felszínén valósak, de gázmentesen zárt folyadéktérben nem lehetségesek. Márpedig a belfülben a cochlea mindhárom csatornája gázmentes folyadékokkal töltött és teljesen zárt!

Békésy halláselméletének vizsgálata a hangok hullámhossza szerint:

A hang hallható regés, amit a levegő időben folyamatosan változó sűrűsödéséből és ritkulásaiból adódó nyomáshullámként értelmezzük, és ami terjedési sebességgel, intenzitással, frekvenciával és annak megfelelő hullámhosszal bír. Vákuumban a hang – közvetítő anyag hiányában – nem terjed, sűrűbb anyagokban pedig a sűrűséggel arányosan növekszik a terjedési sebessége.

Békésy a "Sensory Inhibition" c. könyvében az eltérő frekvenciájú hangokkal kapcsolatban, azoknak a basilaris membrán-on való eltérő sebességű terjedését említi, a frekvencia szerint eltérő terjedési sebességre számszerű adatokat is megadva. Az ott írottak szerint a magasabb hangok a basilaris membrán mentén gyorsabban terjednek, ami a jelenleg ismert fizikai törvények alapján nem helytálló. *A hangok terjedési sebessége – a*

fizika jelenleg ismert törvényei, valamint az azokat megerősítő igen nagyszámú kísérletek mérési eredményei alapján – közegfüggő, de nem frekvenciafüggő!

A cochlea csatornái – mint már többször utaltam rá – két különböző sűrűségű fiziológiai folyadékkal telítettek. A scala timpani és a scala vestibuli kb. víz sűrűségű perilemfa folyadékot, a scala media pedig sűrűbb, kb. gél sűrűségű endolimfa folyadékot tartalmaz, és egyik csatornában sincs fizikailag összenyomható gáztér.

A dobhártya és a hallócsontocskák közvetítésével, a kengyelcsont talpa (stapes) fejt ki az éppen érzékelt hangfrekvenciának, a felhangoknak, az esetlegesen fellépő visszhangoknak és zengő hangoknak valamint a hangerősségnek megfelelően időben folyamatosan változó nyomáserősségű, időben bonyolultan összetett lefolyású fizikai rezgőnyomást a cochlea ovális ablakára és azon keresztül a cochlea scala timpani és scala vestibuli csatornáinak perimfa folyadékára.

Tételezzük fel, hogy Békésy halláselméletnek megfelelően – a Pascal-törvény és egyéb kizáró okok ellenére – a perimfa folyadék képes az éppen érzékelt hangfrekvencia szerint változó pozíciójú és amplitúdójú hullámmozgás kialakítására a basilaris membran-on.

Vizsgáljuk meg a hang-hullámhosszak pólushelyeinek, vagyis a bazilaris membran-on lévő Corti-féle szerv szőrsejtjeinek a tectorial membran-hoz emelésének és ezzel a (bio)mechanikus stimuláció kialakulásának lehetőségét.

Békésy könyveiben és szakkikkeiben több utalás van arra, hogy a perimfa folyadék víz sűrűségű, ezért – pontosabb adat hiányában – a hang vízben való terjedési sebességét és az abból számolható hullámhosszát veszem alapul. A forrásokban azt találtam, hogy vízben a hang terjedési sebessége $\approx 1450\text{m/s}$.

Nézzük meg a hang hullámhosszait a hallás 20Hz, 1kHz, 3kHz, 5kHz, 10,4kHz és 20kHz értékeinél. Számításaimhoz a hang terjedési sebességére, az 1450m/s értéket veszem figyelembe.

A hullámhossz (λ) számításához a hang terjedési sebessége/hangfrekvencia, azaz a $\lambda_h = c_h / f_h$ képletet használom, ahol λ_h a hang hullámhossza (m), c_h a hang terjedési sebessége (m/s) az adott (víz) közegben, f_h a hangfrekvencia (ciklus/s = Hz). A képletben s-al egyszerűsítenyi lehet.

Matematikából tudjuk, hogy a szinuszos hullám pozitív maximuma (pólusa) 90° -nál ($\pi/2$ -nél), vagyis a hullámhossz negyed részénél ($\lambda_h/4$ -nél) van. Ha a Corti-féle szerv szőrsejtjeit a tectorial membran-hoz kívánjuk emelni, akkor az a $\lambda_h/4$ értékénél lehetséges. A számítások mellőzésével a kapott eredményeket alább ismertetem:

Hangfrekvenciák $\lambda_h/4$ értékei:	20Hz-en: $\approx 18,13\text{m}$
	1kHz-en: $\approx 3,63\text{m}$
	3kHz-en: $\approx 0,12$
	5kHz-en: $\approx 0,073\text{m}$
	<u>10,4kHz-en $\approx 0,035\text{m}$!</u>
	20kHz-en: $\approx 0,018\text{m}$

A basilaris membran hossza kb. 35mm, azaz 0,035 m. A fenti értékekből látható, hogy az az alsó határfrekvencia, amelyen már a basilaris membran helicotrema felőli végénél a tisztán szinuszos hanghullám pólushelye megjelenhetne, $\sim 10\text{kHz}$ (10000Hz), vagyis Békésy halláselmélete szerint fizikailag ez lenne az emberi füllel érzékelhető legmélyebb

Ez az írásos anyag – a nevem feltüntetésével – szabadon másolható, terjeszthető!

Hima Ernő

hang (!?). Ez a frekvencia viszont az ember által hallható hangokban, az emberi kommunikációban, de a zenében is már csak felharmonikusként (felhangként) fordul elő!

Az instrumentális zenei eszközeink legmagasabb alaphangja (a zongorán és a kis fuvolán megszólaltatható) 3951Hz. (forrás Internet: 23. Hangszerek jellemző hangtartományai – Fábrián Zoltán).

A vokális hangokra is vessünk egy pillantást.

Az Interneten „Ez a valaha kiénekelte legmagasabb hang a Metropolitanben” címszó alatt található leírás szerint Audrely Luna ki tudta énekelni a háromvonalas Á''' hangot, amelynek 1760Hz. az alapfrekvenciája.

(Megjegyzés: a 2, 3, n. szorzóval jelenlévő, az alapfrekvenciát frekvenciában és amplitúdóban módosító felhangokat mind az instrumentális, mind a vokális hangoknál figyelmen kívül hagytam.)

Nem számoltam ki, de a frekvenciaértékből látszik, hogy mind az instrumentális, mind a vokális legmagasabb alaphangok $\lambda_h/4$ értéke is messze fölötté van a basilaris membrán 0,035m-es hosszának. A beszédhangok pedig lényegesen alacsonyabb alapfrekvenciájúak, tehát a hullámhosszuk még nagyobb.

Többórás kutatással sem találtam az Interneten adatot az emberi beszédhang frekvencia-tartományára. A rendelkezésemre álló, hanggal foglalkozó könyvekben sem, ezért a telefontechnikában használatos hangfrekvenciás átviteli sávot veszem alapul. A vezetékes, analóg telefontechnikában, de az újabb digitális telefontechnikában is 300-3400Hz a hangátviteli sáv. Tudott, hogy a telefonban felismerjük az általunk ismert személyek hangját, vagyis a hangátviteli frekvenciasávban, a felhangok (felharmonikusok) jelentős része is benne van. Ha nem így lenne, telefonbeszélgetés során nem ismernénk fel a beszédpartnerünket a hangja alapján.

A korábbi számpélda alapján kijelenthető, hogy az emberi (vokális és kommunikációs) hangfrekvencia tartományának hullámhossza, ill. annak negyedrésze ($\lambda_h/4$) messze felette van a basilaris membrán 0,035m hosszának!

Ha a cochlea perilmfa folyadékában, a basilaris membrán-on – a korábban ismertetett fizikai kizáró okok ellenére – hullámmozgás egyáltalán ki tudna alakulni, akkor 20Hz – 10kHz között a hang hullámhosszának maximum helyei, azaz pólushelyei, az emberi füllel érzékelhető frekvenciákon a hang hullámhossza alapján a basilaris membrán 0,035m-es hosszánál távolabb vannak, tehát a basilaris membrán hang által keltett hullámmozgásai nem érhetnék el maximumhelyeiket.

A fentiek alapján kijelenthető, hogy a cochlea basilaris membrán-ján a hangfrekvencia hullámhossz szerinti pólushelyeinek kialakulása fizikailag nem lehetséges, ezért a Békésy féle, a basilaris membrán-on kialakuló utazóhullám elmélet a hang hullámhosszai alapján nem igazolható!

Másik probléma, hogy a maximum helyzetét változtató rezgés (utazóhullám) nem egy adott ponton jelentkezne, hanem a gerjesztés helyétől, azaz a cochlea ovális ablakától a helicotrema-ig „végigvonulna” a basilaris membrán-on, mint bármely más hullámmozgásra alkalmas anyagon. Ha a hallott hangfrekvencia szerint a basilaris membrán egy kitüntetett pontján keletkezne hullámmaximum, akkor az nem utazóhullám érzékelés, hanem szelektív rezgésérzékelés lenne (mint pl. korábban a hálózati frekvenciát jelző rezgőnyeltes műszereknél!) Ha a hanghullámok által megmozgatott anyag – jelen esetben a basilaris membrán – hossza nem egyezik meg a hangrezgés hullámhosszával, vagy annak meghatározott mértékével ($\lambda_h/2, n \cdot \lambda_h/2$; ahol „ λ_h ” az aktuálisan vizsgált tisztán szinuszos alaphang hullámhosszának a fele ($\sin 180^\circ$, másképpen π rad), és „n” termé-

szetes egész szám), akkor a gerjesztéshez (ovális ablak) viszonyított távolvénen (helicotrema) nem tud amplitúdó minimum (0, azaz csomópont) kialakulni és ezért az éppen adott, a pillanatnyi fázishelyzet szerint 0-tól eltérő amplitúdójú reflexiók hullámok verődnének vissza, amik az érzékelt hangot érthetetlené torzítanák! Az ember által érzékelt igen összetett hangok esetében, a biológiailag kialakult basilaris membrán fizikai hosszán soha nem tud reflexiómentes hanghullám kialakulni!

További gond, hogy a belfülben történő, Békésy halláselmélete szerinti fizikai elmozdulás-értékek és az egzakt módon kimutatható nyomásértékek között több nagyságrendű az eltérés! A mérhető valós nyomásértékek jóval nagyobbak, mint a közvetlenül nem mérhető, ezért egzakt módon nem meghatározható elmozdulások mértéke. A HORUS ORVOSTUDOMÁNYI DOKUMENTÁCIÓS SZOLGÁLAT 1964. 14. számában közölt információban, az ott közölt 1. sz. ábra magyarázatában írottak:

(Az irodalomjegyzékben ismertetett címen a hivatkozott cikk és ábra elérhető!)

„Az 1. ábra a levegő részecskék és a belfülben lévő csiga alaphártyájának (membrana basilaris) rezgési amplitúdóját mutatja a hallásküszöbön. Az abszcisszán a hanghullámok rezgésszáma, az ordinátán az alaphártya, ill. a levegőrészecskék azon erősségű rezgéseinek amplitúdója van feltüntetve, amely még éppen hallható. Mint látható, a rezgések amplitúdója rendkívül kicsiny. A másodpercenkénti 3000-es rezgésszámú hanghullám esetében már akkor is meghalljuk a levegőrészecskék rezgését, ha a rezgés amplitúdója századrésze a hidrogén molekula átmérőjének. Még ha a hangerő olyan nagy is, hogy fájdalomérzést kelt a fülben az alaphártya rezgésének amplitúdója még mindig igen kicsiny (az ábrán a felső, szaggatott vonal).”

MEGJEGYZÉS: A fent idézett szöveg hidrogén molekulát ír, de az ábrán hidrogénatom felirat szerepel és az ott feltüntetett méret valóban a naszcensz hidrogénatom jelenleg ismert fizikai mérete. A szövegben a két hidrogénatomot tartalmazó hidrogénmolekula méretére vonatkozó utalás téves!

Az ábrából kiolvasható, hogy 3000 Hz-es hangfrekvenciánál (a hallás maximális értékének környezetében) a hallásküszöbön az alaphártya elmozdulása mindösszesen 10^{-11} m, és a fájdalomérzetnél is csak 10^{-6} m. Igaz az átfogás eléggé nagy, 5 nagyságrendű, de a közölt fizikai elmozdulások csak infinitezimálisak. A fájdalomérzethez tartozó legnagyobb elmozdulás sem haladja meg az $1\mu\text{m}$ -t ($1\cdot 10^{-6}$ m)!

Más kérdés, hogy a szervezet legkeményebb csontjába, a sziklacsontra zárt basilaris membrán elmozdulásait, hullám-amplitúdóit, hogy lehet, vagy egyáltalán lehet-e mérni, detektálni? Nagy valószínűséggel tartom, hogy vagy Békésy cochlea modelljeiben kimutatott fizikai elmozdulások extrapolálási eredményei vannak közölve, vagy a cochlea ovális ablakának elmozdulásai vannak a hivatkozott ábrán feltüntetve.

A jelentősen felnagyított és egyszerűsített cochlea modellekben Békésy által kimutatott, hang hatására bekövetkező basilaris membrán elmozdulásoknak nem megfelelő voltáról fentebb már kifejtettem véleményemet!

Felteszem, hogy az ábra nem a nem mérhető basilaris membrán, hanem a cochlea ovális ablakának valóban – bár nem egyszerűen – mérhető elmozdulásait tünteti fel. Ott viszont figyelembe kell venni, hogy az ovális ablak elmozdulásai a scala vestibuli→helicotrema→scala timpani úton a kerekablak ellenkező előjelű elmozdulásait okozzák, vagyis van a perilymfa folyadékknak „elmozdulási tere”, ami az ovális ablak párányi elmozdulásait lehetővé teszi!

Más kérdés a cochleában, az éppen érzékelt hang nyomása szerint fellépő nyomásérték változás! Ott az átfogás 12 nagyságrendű (0-120dB) és valós nyomásváltozás! Békésy

Ez az írásos anyag – a nevem feltüntetésével – szabadon másolható, terjeszthető!

Hima Ernő

késy mind a kettőt kimutatta és a sokkal jelentősebb, valóban fellépő, mérhető nyomásérték változás helyett halláselméletében mégis az egzakt módon nem mérhető, sőt a basilaris membrán fizikailag nem lehetséges elmozdulás-változásaira helyezte a hangsúlyt!?

Ismét magyarázatra szorulna a hangerő változások érzékelése, mivel a 0 és 120dB közötti 12 nagyságrendű átfogás olyan mértékű, hogy ha valóban hullámmozgás alakulna ki a basilaris membrán-on, és a hallóideg végződéseket (szőrsejteket amelyek a jelen tudásunk szerint mindössze néhány μm hosszúságú és a nm-es tartományba lévő vastagságú hallóideg végződés) Békésy halláselmélete szerint fizikailag a tectorial membránhoz dörzsölné, akkor azokat nagy valószínűséggel véglegesen károsítaná!

Figyelembe kell venni, hogy a folyadékok összenyomhatatlansága (Pascal-törvény) miatt egy folyadékkal gáztér-mentesen feltöltött szilárd burkolatú térben akár az $1\mu\text{m}$ tört részénél kisebb elmozdulás is tonna nagyságrendű nyomásváltozásokat okozhat, amit a folyadékot befogadó edény lehet nem is tud elviselni! Nem értem, hogy az általam igen tisztelt Békésy miért az egzakt módon nem mérhető elmozdulásokra építette halláselméletét és miért nem a viszonylag könnyen mérhető nyomásváltozásokra, amelyeket kísérleteiben szintén kimutatott?

Általam felismert további problémák Békésy halláselméletében:

1. A cochlea belső csatornáinak keresztmetszeti felülete egyenként kb. 2mm^2 ($0,02\text{cm}^2$), hosszuk egységesen kb. 35mm ($3,5\text{cm}$). Ebből számolható, hogy a három csatorna együttes térfogata is nagyon kicsi, összesen kb. $0,21\text{cm}^3$, amiből kb. $0,14\text{cm}^3$ a hígabb perilyfa folyadékkal töltött, és max. $0,07\text{cm}^3$ a sűrűbb, ezért nehezebben mozgítható endolimfa folyadékkal töltött rész. Ilyen szűk csatornában és ilyen kis folyadékmennyiségek mellett – amelyek össztömege is nagyon kicsi – a fentebb tárgyalt fizikai fékező erők miatt a hangfrekvenciás utazóhullám kialakulása a basilaris membrán-on fizikailag még gáztér jelenlétében sem lenne lehetséges.
2. Békésy a „Sensory Inhibition” c. könyvben említi az idegszálak közötti laterális kapcsolatokat. Ahogy írja, ez azt jelenti, hogy az egyes idegszálakat a szomszédos idegszálakkal „mint egy létra szárait a létrafokok” úgy kötik össze a laterális kapcsolatok, amelyek az idegi gátlások okozói. Ez alapján egy jól definiált, diszkrét hangfrekvenciához tartozó hanginger a Corti-féle szervtől nem csak egy adott idegszálon, hanem a szomszédos idegszálakon is terjed az agykéreg hallásközpontja felé. Ha ez így van, akkor az agykéreg hallásközpontjának nem egy adott diszkrét hangfrekvenciához tartozó nagyon kis felületét, hanem a laterális kapcsolódások okán, több idegszálon terjedő, tehát nagyobb felületét éri minden hanginger. Ez az „éles hallást” gátolná, vagyis nem lehetne az egyes hangfrekvenciákat külön-külön beazonosítani! Tapasztalati tény, hogy ez nem így van! A hallásvizsgálatoknál minden egyes hangfrekvencia jól megkülönböztethető, de a zenészek is nagyon pontosan meg tudják különböztetni az egyes hangokat! Az viszont – ilyen irányú ismeret hiányában – általam nem vitatható, hogy az idegszálak között laterális kapcsolatok vannak, ami szintén ellentmond Békésy halláselméletének.

A jelenleg ismert fizikai törvények – a Pascal-törvény, a hang hullámhosszai és egyéb fizikai okok – alapján Békésy utazóhullámú halláselmélete nem bizonyítható.

Ez az írásos anyag – a nevem feltüntetésével – szabadon másolható, terjeszthető!

Hima Ernő

A Békésy által végzett és publikált halláskísérleti eredményekből kiindulva, valamilyen fizikailag megalapozható magyarázatot kell találni a hallásérzet kialakulására.

A hang útja a hallószervben:

Nézzük át, amit a jelenlegi anatómiai ismeretek alapján bizonyítottnak vehetünk a hang útjáról az élő szervezetben:

- A hangrezgések, a hangforrástól a külső fül hallójáratán át a dobhártyáig, időben változó frekvenciájú és nyomású hullámokként terjednek az aktuálisan érzékelt, bonyolultan összetett hangfrekvenciáknak megfelelő, igen kis légnomásváltozások, légrezgések formájában.
- A hangfrekvenciás légnomásváltozásokat, légrezgéseket a külső fület lezáró dobhártya mechanikai elmozdulásokkal átadja a középfül hallócsontocskáinak.
- A középfülben a dobhártyától a belfül ovális ablakáig három hallócsontocska (kalapács→üldő→kengyel) közvetítésével (bio)mechanikai rezgések formájában terjednek a hangrezgések, amely csontocskák – Békésy leírása alapján – *mozgási amplitúdót redukáló és nyomásértéket transzformáló (bio)mechanikus emelőkként működnek.*
- A középfül kengyelcsontjának ovális talpa (stapes) (bio)mechanikusan kapcsolódik a belfülnél a cochlea ovális ablakához és jelentősen csökkenti a belfül ovális ablakának a fizikai elmozdulásait, ugyanakkor a kb. 25-szeresére erősített hangnyomásokat átadja a belfül, a cochlea folyadékterére.
- *Békésy az előző két pontban idézett, általa írottak ellenére a perilymfolyadék igen kismértékű térfogati elmozdulásaira, pontosabban az azok által generált, a basilaris membrán Békésy által feltételezett hullámmozgásaira és nem a jóval jelentősebb és fizikailag mérhető nyomásváltozásokra építette halláselméletét!(!?)*
- A szervezet legkeményebb csontjában, a koponya sziklacsontjában elhelyezkedő cochlea az embernél kb. 9,5mm átmérőjű, kb. 5mm magas és kúposan kb. 2,7 csavarulatú. A cochlea basilaris membrán-ja kiterítve kb. 35mm hosszú, az ovális ablaknál kb. 0,04mm-től, a helicotrema-nál kb. 0,45mm-ig folyamatosan szélesedő.
- A cochlea három folyadékkal telt, igen kis keresztmetszeti felületű (csatornánként kb. 2mm²) csatornát foglal magába, amelyekből az ovális ablaktól a helicotrema-ig terjedő, majd a helicotrema-tól a kerek ablakig terjedő csatornák (scala vestibuli és scala timpani) kb. víz sűrűségű perilymfolyadékkal teltek és ez a két csatorna a helicotrema-nál, kb. 0,4mm²-en fizikailag közlekedik egymással, vagyis közös folyadékteret alkot.
- A két csatorna hárttyakkal elválasztva közbezárt egy harmadik csatornát a scala media-t, amely a basilaris membrán és a Reisner's membrán által határolt és teljesen zárt. A scala media csatorna kb. gél sűrűségű endolymfa folyadékkal telített terében, a basilaris membrán-on található az igen nagyszámú szőrsejtet tartalmazó Corti-féle szerv, amely szőrsejtek a tudomány jelen állása szerint a hallóidegek kiinduló végződésai. Másik végeik az agykéreg hallásközpontjában végződnek.
- A három csatorna összesen igen kevés, mindössze kb. 0,21cm³ „folyadékot” tartalmaz, amelyből kb. 0,14cm³ a hígabb perilymfolyadék és max. 0,07cm³ a sűrűbb endolymfa.
- Az ovális ablakra ható hangnyomás-változások a perilymfolyadék igen kismértékű térfogati elmozdulásait okozzák, amelyet a két egymással közlekedő csatorna másik végén lévő kerek ablak elmozdulása tesz lehetővé. Az ovális és a kerek ablak elmozdulásai a hidrogénatom átmérőjének törtrészeivel összemérhetően rendkívül kismér-

Ez az írásos anyag – a nevem feltüntetésével – szabadon másolható, terjeszthető!

Hima Ernő

tékűek és fizikailag nem tudnak hullámmozgást kialakítani, mert egyik csatornában sincs összenyomható közeg (gáz)!

- A vérerek sem teszik lehetővé hullámmozgás kialakulását, mert az azokban keringő vér is összenyomhatatlan folyadék. Az érfalaknak a szívritmus ütemében táguló, pulzáló mozgását éppen a folyadékok összenyomhatatlansága okozza.

Halláselméletem ismertetése:

- A cochlea csatornáiban lévő igen kis térfogatú és tömegű folyadékokban a térfogatuk, valamint a coclea-ban való mozgásukat fékező erők (súrlódás, adhézió, viszkozitás, ...) okán, más ok (pl. Pascal-törvény) híján sem tudna a Békésy halláselmélet szerinti, a basilaris membran-t amplitúdóban mozgó hullámmozgás kialakulni.
- *Az érzékelt hang hatására a dobhártya pillanatnyi hangerő és hangfrekvencia szerint változó nyomásait az emelők módjára működő hallócsontocskák felerősítik. A cochlea ovális ablakára ható, erősített nyomóerő változások miatt a cochlea két szélső csatornájában az érzékelt hangfrekvenciának megfelelő nyomásingadozások jönnek létre. Az ovális és kerek ablak felületei eltérőek, az ovális ablak felülete nagyobb. Az ablakokat fedő hárták vastagsága és egyéb fizikai jellemzői megegyezők, ezért az ovális ablak elmozdulásai következtében a cochlea csatornáiban elmozduló folyadékmennyiségek a csatornában az éppen érzékelt hangfrekvenciával megegyező frekvenciájú nyomásváltozásokat okoznak. A kerek ablak elmozdulásai korlátozzák, de nem eliminálják a nyomóerőket, sőt a kerek ablak nem gumyszerűen elasztikus, annál merevebb membran-ja vélhetően jelentős ellennyomást fejt ki a perilimfát tartalmazó csatornákra.*
- *A kerek ablak nyomáskorlátozó elmozdulásai a hallócsontocskákra ható erőket csökkentik, és evvel – valószínűsíthetően – azok túlterhelése, törése elleni védelmét szolgálják!*
- *A scala media-t határoló basilaris membran és Reisner's membran a hangnyomás által kifejttet folyadéknyomással két oldalról „szorítja” a scala media-t. A határoló hártákon keresztül a hangnyomás változások átadódnak az endolimfa folyadékkal telített scala media-nak, amelyben a basilaris membran-on található a Corti-féle szerv.*
- *A fentiek alapján azt feltételezem, sőt meggyőződésem, hogy a cochlea-ban, a Corti-féle szerv folyadéknyomást, nyomásváltozásokat érzékel, mégpedig mindenkor az éppen érzékelt, bonyolultan összetett hangfrekvenciák burkológörbéje szerinti hangnyomások időbeni lefolyásának megfelelően.*
- *Halláselméletem a csontvezetéses hallást is magyarázza. Amíg a légvezetéses halláskor a cochlea perimfa folyadékára longitudinális rezgések, addig csontvezetéses hallás esetén tranzverzális rezgések hatnak. A két rezgésforma eltérő fizikai tulajdonságai okán Békésy halláselmélete nem ad kellő magyarázatot a hang csontvezetéses érzékelésére. Békésy a csontvezetéses, tehát tranzverzális nyomásváltozásokat érzékelő hallást is a basilaris membran longitudinális hullámmozgásának kialakulására vezeti vissza, ami véleményem szerint nem helytálló. Halláselméletem szerint viszont közböbs, hogy a cochlea-t longitudinális, vagy tranzverzális hangrezgések ingerlik, mindkét esetben átadódnak a hangfrekvenciás rezgések nyomásingadozása a Corti-féle szervre.*
- *Véleményem szerint a Corti-féle szerv nem frekvenciaszelektív, hanem egyidejűleg és egységesen érzékeli a cochlea-ban az éppen érzékelt, időben folytonosan változó hang bonyolultan összetett hangnyomás változásait. A Corti-féle szervtől az agykéreg hallás-*

Ez az írásos anyag – a nevem feltüntetésével – szabadon másolható, terjeszthető!

Hima Ernő

központjáig futó idegszálak valószínűleg párhuzamosan juttatják az időben lefutó hangnyomásoknak megfelelő ingerületeket a szőrsejtektől az agykéreg hallásközpontjába és csak ott változnak az idegingerületek hallásérzetté. Nézetem szerint nem a Corti-féle szerv, hanem az agykéreg fogadóhelyei „hangoltak”!

- Úgy vélem, hogy egy másik érzékszervünk (bio)fizikai működésével hasonlítható a hallás. Talán nem tévedek, ha a hallást a látáshoz hasonlítom. A szem szaruhártyáján, a szemlencsén és az üvegtesten át a látóidegekre vetül a látott környezet optikai képe. A szemünkben lévő nagyszámú érző idegek, a pálcikák és csapok, az éppen látott képnek megfelelően, azonos időben, de egyenként eltérően stimuláltak, viszont nem egyenként állítják elő a látás idegmintáját, hanem egyidejűleg párhuzamosan juttatják azt az agykéregre, amit az agy „látóközpontja” alakít érzékelt képpé, a fényerő, a színnek a távolság és a mélység (távolság különbségek) érzetét kelteve. A szemünkbe jutó fény, és az így látott kép érzékelése a látóidegek semmiféle mechanikai elmozdulását, dörzsölését, hajlítását nem feltételezi.
- Miért ne lehetne a hallásérzetben is – a látásérzet idegi kialakulásához hasonlóan – párhuzamos idegtevékenység a Corti-féle szerv és az agykéreg között? Miért gondoljuk azt, hogy a teremtő, a természet, az evolúció a látásérzet és a hallásérzet kialakulásának eltérő (bio)fizikai, idegi működését hozta létre?
- A látásérzet és a hallásérzet idegi analógiájára enged következtetni, hogy a látás és a hallás is testen (agyon) belül kialakuló érzet, de mindkettő testen kívülre kivetített külső érzetet kelt (ez alól a nem hosszú múltú fülhallgató hallás kivétel, mert az koponyán belüli hangérzetet kelt!).
- Ha halláselméletem igazolódik, akkor elmondható, hogy Helmholtz halláselmélete közelebb állt a valósághoz, mint Békésyé. Helmholtz abban tévedett, hogy a basilaris membran-on elhelyezkedő Corti-féle szervet hangolt rezonátoroknak gondolta, amelyekre igaz lenne Békésy megállapítása, hogy az élesen hangolt rezonátorok felfutási és lecsengési ideje olyan hosszú, hogy így a hallásunk nem működhetne. Nézetem szerint a Corti-féle szerv időben folyamatosan változó hangnyomásokat, hangnyomás változásokat érzékel és vagy szelektálja, előszelektálja azokat, vagy időben folyamatosan változó nyomásváltozás-érzetként továbbítja az agykéregre és az agy szelektálja azokat hangfrekvencia és hangnyomás szerint és az időben bonyolult lefutású és amplitúdójú nyomásváltozásokat jeleníti meg hangérzetként.

Záró gondolatok:

Békésy munkásságát maximálisan elismerem! Kutatásai minden érzékszerve kiterjedtek. Az Ő hallással kapcsolatban végzett és publikált kísérleteinek beható tanulmányozásával és azok fizikai ellentmondásainak felismerésével és kritikájával alakult ki az övétől eltérő halláselméletem. Úgy vélem, hogy Békésy az igen gondosan kivitelezett kísérleteinek eredményeit nem megfelelően értelmezte, és evvel magyarázható, hogy a hallással kapcsolatos (bio)fizikai folyamatok általa történt leírása, vagyis halláselmélete fizikailag nem bizonyítható. Ennek okát leginkább a hullámmozgással kapcsolatos elméletében, amelyek a teljesen zárt, folyadékkal gáztérmentesen telített térben fizikailag nem lehetségesek, valamint a belsőfülben, a cochlea-ban, hang hatására lezajló hidrodinamikai folyamatok Békésy általi figyelmen kívül hagyásában látom.

Abban igaza van Békésynek és elődeinek is, hogy a környezetünk hangokként értelmezhető igen kismértékű légnyomásváltozásai valóban hullámok. Azt viszont Békésy nem vette figyelembe, vagy nem megfelelően súlyozta, hogy a „hanghullámok” az érzé-

Ez az írásos anyag – a nevem feltüntetésével – szabadon másolható, terjeszthető!

Hima Ernő

kelt hangnak megfelelő lefolyású nyomóerő-változásokat keltenek a cochlea scala timpani és scala vesztibuli csatornáiban, amelyek szintén nyomóerő változásokkal hatnak a scala media-ban lévő Corti-féle szervre. Ezek a hanghullámok viszont nem okoznak – fizikailag nem okozhatnak – amplitúdó elmozdulásokkal járó „utazóhullámokat” a basilaris membran-on. Ezeket az elmozdulásmentes fizikai nyomásváltozásokat én „hangnyomás-hullámok-nak” nevezném. A fizika – igaz más aspektusban – ismeri és tárgyalja a hidrodinamikai nyomáshullámokat! Úgy gondolom a hallás szempontjából is szükséges lenne azokat vizsgálni!

A cochlea-ban lejátszódó nyomóerő változások, nyomáshullámok, a scala media határoló hártyáinak (basilaris membran és Reissner's membran) teljes felületén hatnak, ezért abban jelentősnek mondható hangfrekvenciás nyomásingadozásokat hoznak létre. Ezek a nyomásingadozások, „hangnyomás-hullámok” frekvenciában és intenzitásban is lekövetik az őket létrehozó erőket, időben folyamatosan változó nyomóerőkként hatnak a scala mediára és így az abban lévő a Corti-féle szervre is, evvel létrehozva a hangok időben folytonosan változó frekvenciájú és intenzitású hangérzetét.

Az már további vizsgálatokat, biológiai, biofizikai, anatómiai, ... kísérleteket igényel, hogy a Corti-féle szerv egyes szőrsejtjei „hangoltak”, azaz mindegyikük egy-egy jól definiált, diszkrét hangfrekvencia időben változó nyomásaira érzékeny, vagy – mint fentebb feltételeztem – egységesen juttatják az ingereket az agykéreg hallásközpontjába és csak ott lesznek a hangfrekvencia és hangnyomás szerint szelektálva.

Azt is meg kívánom erősíteni, hogy – mint a bevezetőben már írtam – Prof. Dr. Vincze János ny. biofizikus indított el a halláselméletem kialakításán. V.J., Békésy halálának 50. évfordulója alkalmából Békésy emlékévet kezdeményezett. Felkért, hogy tartsak előadásokat az emlékévből és, mivel felkészülten kívántam előadásokat tartani, mélyen beleástam magam Békésy halláselméletébe. Ennek kapcsán találtam azokat a fizikai ellentmondásokat, amelyek Békésytől eltérő halláselméletemhez vezettek, és annak leírására sarkaltak!

A fizikai ismereteimre elvi megfontolásokkal alapozott halláselméletemet bizonyítani, vagy cáfolni szükséges, amihez anatómiai, kutató orvosi, ideg- és agysebészi, biofizikusi, ... kutatómunka kell! Amíg halláselméletem nincs egzakt módon bizonyítva vagy cáfolva, addig az hipotézis! Bízok abban, hogy halláselméleti hipotézisem helyesnek fog bizonyulni és hozzájárul a hallással foglalkozó orvostudomány szakmai fejlődéséhez, a halláscsökkenéssel járó, vagy más a hallással kapcsolatos egyes betegségek, anatómiai elváltozások gyógyításához, korrigálhatóságához.

Irodalomjegyzék:

Könyvek:

- Georg von Békésy: „Sensory Inhibition”. Princeton University Press. 1967.
- Georg von Békésy: „Experiments in Hearing”, Translated and Edited By E.G. Wever. McGRAW-HILL BOOK COMPANY, Inc. New York, Toronto, London. 1960.
- The Nobel Foundation: „The Georg von Békésy Collection” Stockholm. 1974.
- Prof. Dr. Répássy Gábor (szerk.): „FŰL-ORR-GÉGÉSZET FEJ-NYAK-SEBÉSZET” Egyetemi tankönyv. Medicina Könyvkiadó. Budapest, 2011.
- Dániel József: „Békésy György” Bp. Akadémiai Kiadó. 1990.
- Vincze János: „Nemes Békésy György” NDP kiadó. 2019.

Ez az írásos anyag – a nevem feltüntetésével – szabadon másolható, terjeszthető!

Hima Ernő

- Vincze János: „Prof. Dr. nemes Békésy György – Nobel-díjas (1899-1972).” Orvosainkra emlékezünk 53. kötet, 219-226. old. NDP kiadó. 2021.
- Vincze János: „A Nobel díjas biofizikus, nemes Békésy György életútja” NDP kiadó. 2021.
- Nagy Ferenc (szerk.): „A NOBEL-DÍJAS BÉKÉSY GYÖRGY” Better. Budapest, 1999.
- Gauri Shankar Gupta: „Az élet rejtéjeinek feltárása. Modern tudomány és ősi bölcsesség.” Vaszistha Kft. 2012.
- Dr. Szalay Béla: FIZIKA. Műszaki könyvkiadó, Budapest 1964.

(A felsorolt könyvek vagy a tulajdonomat képezik, vagy szkennelt formában állnak rendelkezésemre.)

Internet:

- Dr. Puskár Zita: PZ-Érzékszervek-2018-EUI.pdf.
 - Barócsi Attila: A BIOFIZIKA ALAPJAI. 2011. BME. Egyetemi online tankönyv.
 - Orvosi hetilap 1964. július (105. évfolyam, 27.-30. szám) 1325-1330. old. „A csiga mechanikai folyamatainak felfedezése.”
 - „A megfigyelés öröméről és a belső fül működéséről” HORUS ORVSOTUDOMÁNYI DOKUMENTÁCIÓS SZOLGÁLAT 1964. 14. szám
 - Tarnóczy: „Kiegészítések Békésy György életrajzához” MTA Természettudományi Kutatólaboratórium VII. évfolyam 4. szám 2003. április.
 - Dosszié: „In memoriam Békésy György, A KUTATÁSNAK ÉLTEM”
 - Meixner Zoltán: „A magyar biofizikus, aki megfejtette a hallás titkát”
 - Kísérleti fizika 1. /BME Tankönyvtár/
 - A nyomás terjedése folyadékokban és gázokban.
 - A hang terjedési sebessége folyadékokban.
 - 23. Hangszerek jellemző hangtartománya – Fábián Zoltán
 - Ez a valaha énekelt legmagasabb hang a Metropolitanben.
- (Az Internetről származó fent felsorolt anyagokat kinyomtattam!)*