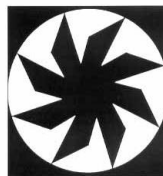


4. ábra
A "sombbrero" és a helyettesítő
lépcsős függvény



5. ábra
A Mach, majd Békessy által
használt csillag alakú minta a Mach-
sávok előállításához

Visszatért Mach eredeti kísérletéhez, legalábbis annyiban, hogy ő is szaggatott, villogó fénnel ingerelte a szemet. Ezt a villogási frekvenciát persze lehetett olyan nagyra választani, hogy már nem volt észrevehető a villogás.

Kísérleteit két nagy csoportra lehet osztani. Az egyikben, lényegében Mach nyomán, egy mintegy 30 cm átmérőjű körbe írt 8 ágú csillagot forgatott (5. ábra). A csillag fehér alapon fekete, vagy fekete alapon fehér volt, és olyan alakú, hogy forgás esetén a világosság Mach említett kísérletéhez hasonló módon változzék a kör sugara mentén. A Mach-sávok persze ilyenkor körök voltak. Kísérleteinek másik csoportjában egy álló fekete-fehér minta felett forgatott egy négyzet keresztmetszetű üveghasábot, melyen átnézve a fekete-fehér ábra helyről helyre más tónusú szürkének látszott. A Mach-sávok itt a forgásirányra merőleges csíkként jelentek meg.

Legutolsó nagy cikke, mely 1972. január 21-én érkezett be az angliai Vision Research tudományos folyóirathoz, az alábbi címet viseli: „Mach-sávok mérése kompenzációs módszerrel”. Ekkor már súlyos beteg volt, nemsokára kórházba került, s június 13-án meg is halt. Miközben a cikket írta, Békessy már valószínűleg tudta, hogy nem sok ideje van hátra. Semmi közvetlen utalás nincs erre a cikkben, egyedül a szokásosnál kissé bővebb irodalmi visszatekintés, valamint a hivatkozások széles spektruma jelzi, hogy ezt az írást a szerző összegzésnek is szánta.

Ugyanakkor maga a kompenzációs módszer ötlete teljesen „Békessy-szerű”: egyszerű és zseniális egyszerre. Úgy méri a Mach-sávok erősségét, hogy azon a helyen, ahol a Mach-sávok megjelenének a forgatott csillagon, kissé megváltoztatja a csillag alakját. Világos Mach-sáv esetén egy kicsit több feketét tesz oda, sötét sáv esetén kicsit több fehéret. Addig változtatja ezt a kompenzációs alakot, amíg eltűnik a Mach-sáv. Ennyi. Megmérte a mérhetlent.

Ez az eszköz a csillagokkal együtt benne volt abban a hagyatékban, mely Magyarországra került, s ma már újra működésképesen látható Diósdon, a Békessy Emlékiállításon.

Békessy emléke pedig tovább él és hat azokra, akik meglátogatják a kiállítást vagy olvassák cikkeit.

(A Természet Világa 1999, 6. és 7. számában megjelent cikkek alapján)

Radnai Gyula

Az orvosi Nobel-díjas fizikus, Békessy György

Alfred Nobel (1833-1896) találmányai hasznosításából szerzett vagyonáról 1895. november 27-i végrendeletében a következőképpen rendelkezett: „Hagyatékom gondnokai által biztos értékpapirokban elhelyezett tőkém alapot képvisel majd, amelynek évi kamatai azok számára osztassanak fel, akik az elmúlt esztendőben az emberiségnek a legnagyobb hasznot hajtották. E kamatok öt egyenlő részre osztassanak, amelyből egy rész azé, aki a fizika terén a legfontosabb felfedezést vagy találmányt érte el; egy rész azé, aki a legfontosabb kémiai felfedezést vagy tökéletésítést érte el; egy rész azé aki a fiziológiai vagy az orvostudomány terén a legfontosabb felfedezést tette; egy rész azé, aki az irodalomban eszmei érte-

lemben a legjobbat alkotta; egy rész azé, aki a legtöbbet vagy a legjobban működött közre a népek testvériségéért....” Először a díjakat 1901-ben osztották ki.

1961-ben a fiziológiai és orvostudományi díjat egy fizikusnak ítelték oda.

A XX. század második felében új tudományágak jelentek meg, amelyek Nobel idejében nem léteztek, úgy mint a biofizika, biokémia, agrokémia, környezeti tudományok stb. Bizonyos jelenségek, folyamatok megértéséhez nem volt elegendő az egyoldalú, a klasszikus felosztás szerinti tudományágakban való jártasság.

A biofizikának mint határtudománynak egyik létrehozójaként emlegeti a tudománytörténelem Békésy Györgyöt, a fizikust. A Nobel-díjasok kislexikonában ez áll a neve mellett: „Békésy György (Budapest 1899. 6. 3.-Honolulu 1972. 6. 13) magyar származású amerikai fizikus, biofizikus. A fiziológiai és orvostudományi Nobel-díjat 1961-ben kapta a fül csigájában létrejövő ingerületek fizikai mechanizmusának felfedezéséért”. 1961. december 11-én Stockholmban Nobel-előadásának címe „A megfigyelés öröme és a belső fül mechanizmusa” (Concerning the pleasures of observing, and the mechanics of the inner ear) volt. Békésy György fizikai kísérleteinek eredményei és az általa létrehozott mérőeszközök óriási lépést jelentettek a „hallás” értelmezésében és ezáltal új lehetőségeket nyitott a halláskárosultak gyógyításában.

Békésy György egyetemi tanulmányait 1916-ban a berni vegyész karon kezdte. A kémiai előadások mellett matematikát, fizikát és csillagászatot hallgatott: Egyetemi tanulmányai befejezése után 1921-től, a budapesti Tudományegyetem kísérletfizikai tanszéken Tangl Károly vezetésével (Eötvös Loránd tanítványa és utóda) folytatta tanulmányait a doktori cím megszerzéséért. Itt ismerkedett meg az „Eötvös-i” munkatílussal amire így emlékezett: „egy probléma több, különböző oldalról való makacs megközelítésének egyszerűsége volt az amely Eötvöst a világ kimagasló tudósainak egyikévé tette”. Békésy magáévá tette az „Eötvös-i” gondolkodásmódot, a kutatási módszert és az hozta meg neki a legmagasabb tudományos elismerést.

1927-től a budapesti Postakísérleti Állomás postatmérnöki állását töltötte be, a posta távbeszélő üzemének kutatólaboratóriumában dolgozott. Békésy szerint a távbeszélő hangminőségének javításához a fül szerkezetének és működési elvének megismerése is szükséges. Már 1923-tól foglalkozott fiziológiai akusztikai kutatásokkal, amit éveken keresztül folytatott.

A fül tanulmányozása alakviszonyai miatt egyik legnehezebben tanulmányozható szerv. A belső fület a sziklacsont zárja el, megnehezítve a hozzáférhetőséget. A fül legbelsőbb részét a bonyolult szerkezete miatt, labirintusnak is nevezik.

Békésy kísérleti úton vizsgálta a közép- és a belsőfülben végbemenő fizikai folyamatokat. Kísérleteit az általa készített modelleken és tetemeken végezte. A cadaver (tetem) kísérleteknél napi nehézséget jelentett, hogy a halál beállta után rövid időn belül a dobhártya megmerevedik és kiszárad. Ennek kiküszöbölésére új anatómiai technikát dolgozott ki, amellyel a sziklacsontból 10 perc alatt preparátumot készített. Békésy nagy érdemei közé tartozik, hogy mérőeszközöit ő maga készítette, melyek közül ma is több, változatlan formában használatban van. Az első audiométert és az első audiogrammat is Békésy György készítette. A hallási folyamatot és a hallószerv vizsgálatát négy oldalról közelítette meg: úgy mint tiszta fizikai jelenséget, a hallás technikáját, valamint mint biológiai és pszichológiai problémát. Több mint 30 éves kutatási eredményeit a „Hallási kísérletek” (Experiments in Hearing) 750 oldalas könyvében foglalta össze, ami 1958-ban jelent meg. Ebben a könyvben foglalkozik a hallásfizikának és a hallásfiziológiának minden fejezetével, amelyek közül több fejezet teljes egészében Békésy felfedezéseit tükrözi. A könyv egyik értékelője S.S.Stevens írta: nincs senki aki többet tudna a fülről, és éppen ezért nincs senki, akinek nagyobb áttekintése volna a még megoldandó feladatok fölött, mint Békésy Györgynek.

Békésy György kutatói állomásai Berlin, Budapest, Stockholm és Harvard után a legutolsó Honolulu volt, ahol kutatásait kiterjesztette más érzékszervek működésének tudományos vizsgálatára is, főleg az inger-érzet tanulmányozására.

Békésy György kutatói munkájának első szakaszát, a Nobel-díjat meghozó kísérleti eredményeit mutatjuk be, amelyek a középfül mechanikai szerkezetére és a belső fül működési mechanizmusára irányultak. A kísérletek értelmezéséhez ismernünk kell a fül szerkezetét.

A szerkezetet érő meghatározott frekvencia-tartományon belüli mechanikai rezgések (hangok) érzékelésére a fül szolgál. A 20-20000 Hz frekvenciájú rezgések, a fül speciális szerkezeti elemei segítségével, hanggá alakulnak. A hanginger energiájának felfogását és a receptorsejtekhez való továbbítását a fül szerkezeti elemei biztosítják. A fül receptorsejtjeihez, amelyek a transzducer (jel felfogás és továbbítás) és a konverter (jel átalakítás) szerepét töltik be, kapcsolódnak az ingerületet továbbító idegrostok

Energiatovábbítás a fülben

A dobhártya a középsőfül első tagja, bőrszerű képződmény, melynek középső része összenőtt a kalapács egy részével. A kalapács nyeléhez mereven csatlakozó dobhártyarész kb. 55 mm². Békésy kísérleti úton bizonyította, hogy a dobhártya hangok hatására nem egyszerű hártaként viselkedik. A mély hangok a kalapáccsal összenőtt-felületet hozzák rezgésbe, míg a magas hangok nem rezegtetik meg. A magas hangok hatására a dobhártya szabad része végez rezgést. A dobhártya a sziklacsont dobüregéhez vezet, ahol a hallócsontocskák: a dobhártyával érintkező kalapács, az üllő és a kengyel (amelynek talpa az ovális ablakhoz tapadva) helyezkednek el. A kalapács az üllőhöz, az üllő a kengyelhez ízületszerűen kapcsolódik, ami biztosítja a három csont emelőszerű mozgathatóságát.

A középfül a levegő felől érkező hangrezgéseket minimális energiavesztéssel továbbítja a csigában levő folyadékhoz. A hanghullámok rezgési amplitúdója a folyadékban kisebb, mint levegőben. Az energiatovábbítás akkor a leghatékonyabb, ha a belső fülre nagyobb nyomás tevődik át, mint amekkora a levegőben illetve a dobhártyán jelentkezik. A középfülben nyomássorozás jön létre, mivel a nyomóerő először nagyobb felületen (55 mm²) oszlik el, majd ugyanaz a nyomóerő kisebb felületen oszlik el (a kengyel talpa csak 3,2 mm²). Ez 17-szeres nyomásfokozást jelent. A nyomásfokozáshoz a hallócsontocskák is hozzájárulnak, mivel 1,3:1 arányú karú emelőként dolgoznak. A középfül működése következtében a kengyel talpi részén jelentkező nyomás 20-22-szerese a dobhártyára eső nyomásnak.

A dobhártya rezgései áttevődnek a dobüregben levő levegőre és a kerek ablakra, amely közlekedik a csigafolyadékkal. A középfülben a rezgés terjedése légvezetésen keresztül történik.

A mechanikai inger analízise a csigában

A középfület vékony hártakkal lezárt ovális és kerek ablak választja el a belsőfültől. Mögöttük helyezkedik el a hallókészülék legfontosabb része, a transzducer és a konverter szerepét betöltő csiga. A belsőfül üregrendszere a tornácból, a három félköríves járatból és a csigából áll. Az egész üregrendszert folyadék tölti ki, melyben „úszik” a hártás labirintuszrendszer, amelyet egy más összetételű folyadék tölt ki. A két folyadék-rendszert hártya választja el.

A csigában 2,7-szer csavarodott, 30-35 mm hosszú, a végén elkeskenyedő, csatornaszerű tömlő foglal helyet, amelyet részben csontos, részben rostos fal három részre oszt fel: tornácsi-csatorna, dobi-csatorna, csiga-csatorna.

A rugalmas rostos válaszfal az alaphártya, amely az ovális ablaktól a csiga csúcsa felé haladva 0,04 mm-től 0,5 mm-ig nő és rajta helyezkedik el a Corti-féle szerv, amelyen a hallóideg rostjai végződnek. Az idegrostok, az érzékelősejtek végződéseinek hosszúság, felül szőrökkel fedett sejtek, úgynevezett szőrsejtekkel állnak kapcsolatban. Az alaphártya teljes hosszában elhelyezkedő kb. 1600 szőrsejtet háromszög alakú támasztósejtek tartanak. Fellettük lebeg a fedőhártya (membrana tectoria). Az alaphártya másik oldalát a vékonyhártya, a Reissner-féle hártya alkotja.

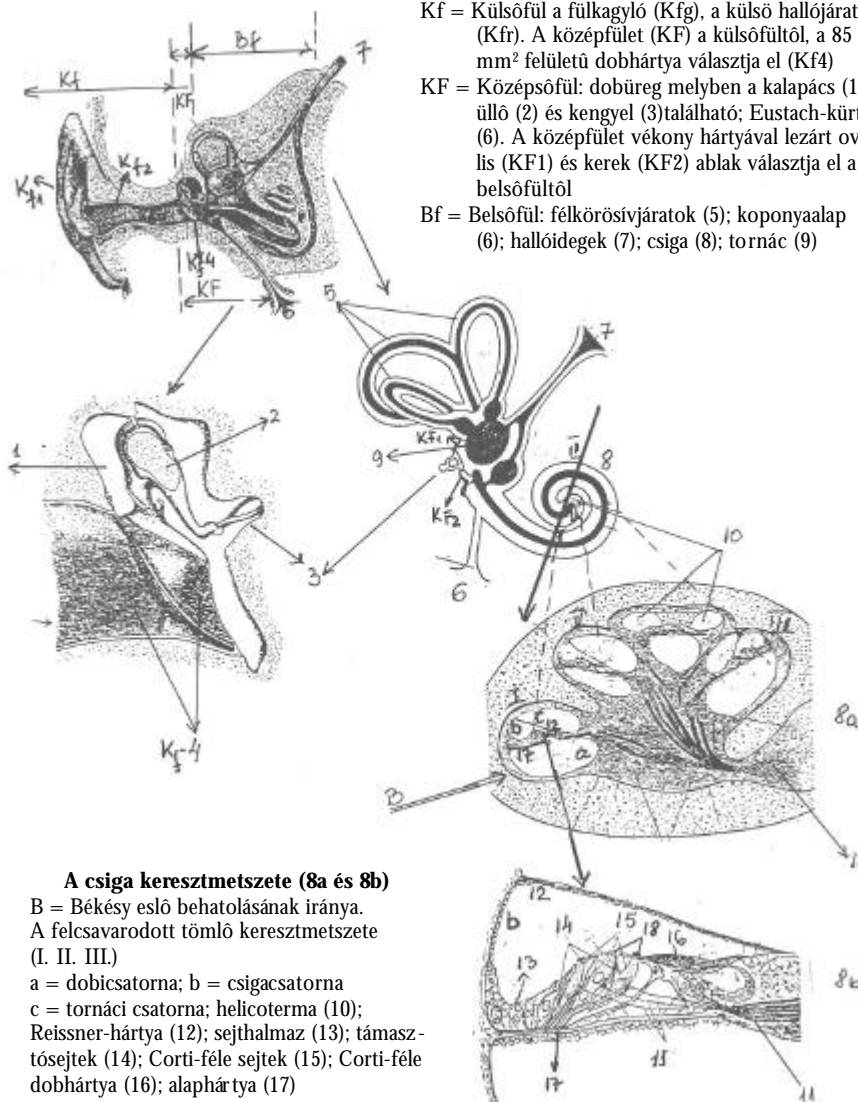
A dobüreg felől a csigához érkező rezgések a cochlearis folyadékról az alaphártyára (membrana basilaris), a Corti-féle szervre, a fedőhártyára és a Reisner-féle hártýára is átterjednek. A csiga mechanikus tulajdonságai Békésy kísérleti eredményei előtt ismeretlenek voltak. Első ízben vizsgálta és 35 évi munka eredményeképpen tudott magyarázattal szolgálni. A hallás folyamatában a legfőbb kérdés az volt, hogyan megy végbe a fizikai hatás analízise, a hanginger paramétereinek felismerése és feldolgozása a fülben. Békésy sztroboszkópos megvilágítással vizsgálta az alaphártya rezgéseképét. Az alaphártya kis elmozdulásának megfigyelésére kidolgozott egy nagy pontosságú műszert, a négy szabadsági fokú mikromanipulátort. Ennek a műszernek a segítségével sikerült az alaphártyákat elválasztani. 1930-ban mutatta ki az alaphártya fesztelenségét és számszerűen meghatározta az alaphártya akusztikus impedanciáját. Az impedancia meghatározására egy speciális vizsgálótűt készített,

A fül vázlatos szerkezete

Kf = Külsőfül a fülkagyló (Kfg), a külső hallójárat (Kfr). A középfület (KF) a külsőfültől, a 85 mm² területű dobhártya választja el (Kf4)

KF = Középfület: dobüreg melyben a kalapács (1), üllő (2) és kengyel (3) található; Eustach-kürt (6). A középfület vékony hártýával lezárt ovális (KF1) és kerek (KF2) ablak választja el a belsőfültől

Bf = Belsőfül: félkörösívjáratok (5); koponyaalap (6); hallóidegek (7); csiga (8); tornác (9)



A csiga keresztmetszete (8a és 8b)

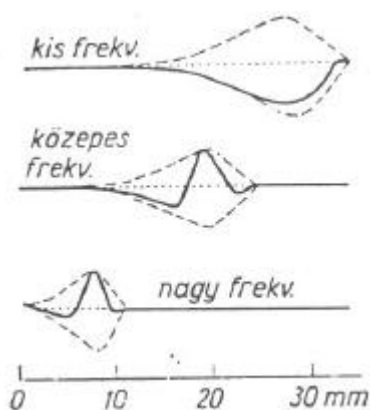
B = Békésy első behatolásának iránya.
A felszavarodott tömlő keresztmetszete (I. II. III.)

a = dobicsatorna; b = csigacsatorna
c = tornáci csatorna; helicoterma (10);
Reissner-hártya (12); sejthalmaz (13); támasztósejtek (14); Corti-féle sejtek (15); Corti-féle dobhártya (16); alaphártya (17)

amellyel 1 dyn nagyságrendű erőket lehetett érzékelni. A kísérleti eredményei megdöntötték az addig ismert és elfogadott Helmholtz-féle rezonancia-elméletet. Hermann Helmholtz (1805-1865) szerint az alaphártya harántirányú rostjai különbözőképpen hangolt hurokként viselkednek. A csigába kerülő adott frekvenciájú hangok hatására, erősen lokalizált területen a hangoknak megfelelő rost rezgésbe jön, rezonál, azaz a gerjesztő rezgés frekvenciája megegyezik a húr saját frekvenciájával. Így a rezonanciák alapján (idegek közvetítésével) fogja fel az agy a hang magasságát, erősségét stb.

Békésy a csigát pontosan utánozó modelljét dolgozta ki. A csigát hidrodinamikai rendszernek fogta fel, amelyben a hangrezgés hatására haladó hullámok keletkeznek, s ezeknek az amplitúdó-maximuma meghatározott helyhez kötött. Megállapította, hogy a kengyel mozgásának hatására a cholearis folyadék közvetítésével az alaphártyán terjedő hullám frekvenciája megegyezik a hang frekvenciájával. A haladó hullám alakját befolyásolja a hártya rugalmassága, a rostok közötti kapcsolat, az alaphártya és a környező közeg közötti súrlódás. A haladóhullám amplitúdója adott intenzitás esetén is, a hártya mentén különböző értékeket vesz fel.

3. ábra



Az alaphártyán kialakuló haladó hullámok képe különböző frekvenciáknál. A vízszintes tengelyen levő számokkal az ovális ablakból mért távolságokat, a szaggatott vonalakkal az amplitúdóeloszlást jelöltük.

Békésy megfigyelte, hogy az alaphártya rezgései a kétfajta hangátvitel esetében pontosan azonosak. Ha viszont megnézzük a fenti görbéket, azt látjuk, hogy nagyon lapos maximummal rendelkeznek, így nehezen érthető a hangmagasság érzékelésének rendkívüli szelektivitása. Ismert volt, hogy a Corti-féle szervben történik a mechanikai rezgések elektromos impulzusokká való átalakulása.

Az alaphártya mentén végigfutó hullám a hang rezgésszámának függvényében más-más helyen éri el a maximumát, így a hallott hang magasságát a különböző helyeken más-más módon ingerelt idegsejtek összehangolt működése közvetíti az agy felé. Kisebb frekvenciák esetében a maximális amplitúdó a csiga csúcsához közelebb alakul ki, elég nagy frekvenciánál viszont az ovális ablak közelében található. A maximális amplitúdójú helynek a frekvenciától való függésen alapul, de a maximum nem éles. A hangintenzitás analízise is a csigában zajlik le, amennyiben a hang erőssége szabja meg az alaphártya mechanikai rezgéseinek amplitúdóit, valamint a rezgésbe jövő alaphártya terület nagyságát is. Döntő jelentőségű, hogy az alaphártya rezgése következtében a rajta elhelyezett képletek különböző mértékben deformálódnak.

Békésy szerint az első jelfeldolgozás, a hangelemzés, már a csigában létrejön, s az agy már egy megformált, a hang magasságát tisztán hordozó jelzést kap. A membrán rezgése úgy

válík idegingerületté, hogy az érzéksejtek szőrei a nyomás és a húzás által elhajolnak. A jelentőséget a „szenzoros gátlás” (sensory inhibition) című, 1967-ben megjelent könyvében részletezte.

Békésy a csiga elektrofiziológiájának vizsgálata során a csigaműködést is új alapokra helyezte. Megállapította, hogy az idegáramok nem mechanikai rezgés által keletkeznek. Ennek bizonyítására a csigába egy 0,01 mm átmérőjű vas-szemcsét juttatott, majd külső mágneses tér segítségével az alaphártyát a vas-szemcsével mechanikusan ingerelte. A mechanikus ingerlés csak indító hatásként szerepel (trigger-hatás). Rezgőelektrodát fejlesztett ki, amely egyszerre mechanikai ingerlő és feszültségérzékelő. Ezzel a technikával sikerült meghatározni az alaphártya mentén eloszlott nagyszámú generátor által keltett feszültséget, amely a csiga kerek ablakáról levett feszültséggel egyenlő. Igazolódni látszik, hogy az elektromos energia-készletet a belső folyadékban mért 80 mV nagyságú egyenfeszültségű feszültségforrás szolgáltatja.

Transzducer és konverter működése

A receptor szerepét a szőrsejtek töltik be, ezek látják el tehát a transzducer funkciót. A rájuk ható erők váltják ki a hallás folyamatának jellegzetes receptorpotenciálját, a csigapotenciált (mikrofonpotenciált). A mikrofonpotenciál a hanginger frekvenciájával egyező és minden olyan szőrsejtben keletkezik, amely a membrán basiláris rezgésben levő részletén helyezkedik el. A jelamplitúdó eloszlása az alaphártyán létrejött haladó hullámok amplitúdó eloszlását követi, azaz a csigapotenciál maximuma a hártya maximális rezgései amplitúdójánál van. A hanginger erőssége részben a létrejött mikrofonpotenciálok amplitúdója, részben pedig annak területi nagysága révén mutatkozik meg. A mikrofonpotenciálok indítják el a szőrsejteknél lévő hallóidegek végződéseiben az akciós potenciálokat. A mikrofonpotenciál adott frekvenciájú hanginger esetén jellegzetes amplitúdóeloszlással rendelkezik, így az érintett szőrsejtek környékéről elinduló idegrostokon olyan akciós potenciálsorozatot váltanak ki, amelyeknek frekvenciája rostról rostra változik.

Ma, amikor a határtudományok korát éljük, Békésy György kitartása, kutatói leleményessége és egész munkássága példaként áll minden kutató előtt.

Mócsy Ildikó

„Igazi mestere az életnek, a tudománynak és a művészetnek”

„Számomra ő volt az utolsó nagy renaissance férfi, akinek az életről magáról mindent magába foglaló széles tudása volt.”

Így emlékezik Békésy Györgyre S.Batkin honolului munkatársa, barátja.

Folytatva a visszaemlékezést: „Békésy György rendkívül szerény, szinte alázatos ember volt, mindig szívesen segített olyanoknak, akik őszintén szerették a tudományt(...) Az „egyszerű” dolgok nagyon érdekelték, amelyekről mindig kiderült, hogy tulajdonképpen nagyon is bonyolultak(...) Az ő szemléletében a tudomány, az élet és a művészet egységet alkotott.”

Előadásait, közleményeit szívesen illusztrálta műtárgyakról készített képekkel. Nobel-díjas előadásában is hosszan értekezett a művészettel való kapcsolatáról. Ebből idézünk néhány gondolatot:

„Bevallom, sosem szerettem keményen dolgozni. A vizsgáimra is úgy készültem, hogy megtettem amit kellett, de nem szívesen. Ma sem szeretem a határidőket. Egy dolgot azonban mindig szívesen csináltam: szerettem nézegetni a szép dolgokat. Órákat el tudok nézni egy művészi alkotást, és meg vagyok győződve arról, hogy tudásom nagy részét sok ország