



Jánosi Imre Miklós

■ NKE Víz tudományi Kar, Víz- és Környezetpolitikai Tanszék

Fizikai Nobel-díjak, 2021

A tudományos közélet évente meghatározó eseménye a Nobel-díjak nyertesinek őszi kihirdetése. A nagy titokzatossággal kezelt jelölési eljárást követő hivatalos bejelentéseket mindig is élénk figyelem kíséri: ha a „Nobel Prize Physics 2021” kulcsszavakra rákeresünk az interneten, kb. 800 000 találatot kapunk. A rövid sajtótudósítások megfogalmazói egyébként gyakran zavarban lehetnek, ha gyorsan és tömören kell a tudományos eredményről összefoglalót írni, például az idei kémiai díjazottak (Benjamin List és David MacMillan) kutatási területe bizonyos molekulák irányított tervezését lehetővé tévő organokatalízis. Magam is érdeklődve fogom elolvasni az e számban megjelenő magyarázatot, mert természetesen fogalmam sincs a témakörrel.

A fizikai díjazottak esetén is elég homályos a sommás leírás. A hivatalos közlemény szerint a 2021-es fizikai Nobel-díjat „az összetett rendszerek megértéséhez nyújtott úttörő hozzájárulásért” ítélték oda. Egyik felét Syukuro Manabe és Klaus



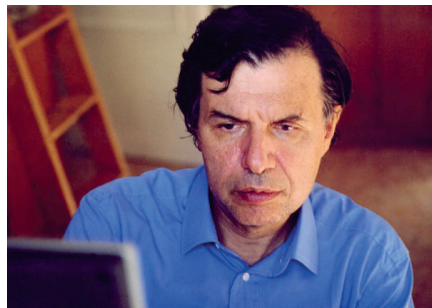
Syukuro Manabe

(fotó: Bengt Nyman, CC BY-SA 2.0)

Klaus Hasselmann (fotó: ESA)



Hasselmann „a Föld éghajlatának fizikai modellezéséért, a változékonyság számszerűsítéséért és a globális felmelegedés megbízható előrejelzéséért” kapta közösen. A díj másik felét Giorgio Parisinak „a fizikai



Giorgio Parisi

(fotó: Lorenza Parisi, CC BY-SA 4.0)

rendszerben az atomtól a bolygóléptéig terjedő rendezetlenség és fluktuáció kölcsönhatásának felfedezéséért” ítélték oda [1]. Sokkal egyszerűbb megfogalmazások is nagy számban találhatóak, ezek szerint mindhárman a Föld klímája és a globális klímaváltozás megértéséhez járultak hozzá úttörő munkásságukkal – ez azért már igen távol áll a valóságtól.

A három tudós életrajza a Wikipédia-oldalaktól az intézetek saját honlapjaiig számtalan helyen olvasható, ezért ezeket megismételni nem tartom szükségesnek. Azért az érdekesebb tényeket érdemes összefoglalni az egyszerűség kedvéért. Mindhárom díjazott gazdag és eredményes életutat tudhat maga mögött, amelyben jelentős szerepet játszott a világ legjobb egyetemén és kutatóintézeteiben eltöltött rövidebb-hosszabb vendégeskedés, és a világ legismertebb vezető tudósaival való együttműködés. Ez gyakorlatilag elkerülhetetlen „belépő” egy Nobel-díj elnyeréséhez, a munkásság világszintű megismertetéséhez, elismertségéhez. 1901-es megalapítása óta fizikából 115 alkalommal díjaztak 219 nyertest. (A szabályzat szerint nem „kötelező” évente díjat kiadni, amennyiben nem talál a testület elég kiemelkedő eredményt; ez a fizikában hatszor fordult elő [2].)

Klaus Hasselmann (90) és Syukuro Manabe (90) életútja igen jól dokumentált,

köszönhetően az AIP (American Institute of Physics) „Oral History Interviews” archívumának [3, 4]. Biztosan születnek majd Parisi-interjúk is, de fiatal kora miatt (73 éves) erre még nem került sor.

Klaus Hasselmann gyerekkorát Angliában töltötte, családjával emigráltak oda még 1934-ben, amikor hároméves volt. Így az iskolaéveit is ott töltötte, és első élményét a fizikával – mi más lehetett volna – egy detektoros rádió szerezte. Felsőfokú tanulmányait már Hamburgban kezdte a háború utáni időkben, ami két dolog miatt is nehéz időszak volt a számára, saját bevallása szerint. A kis kertés, barátságos angliai városka helyett családjának a rommá bombázott Hamburgban kellett újra lábra állnia, neki pedig a liberális brit iskola-rendszerből vissza kellett szoknia a porosz német oktatásba. Diplomamunkája az izotróp turbulencia elméletével állt kapcsolatban, és mint annyi fiatal „titán”, ő is azt remélte, hogy a „nagy áttörés” felé döntő lépéseket tesz majd. (A folyadékok Navier–Stokes-mozgásegyenletét a 19. század első felében sikerült felírni, ám a komplett matematikai megoldása – különös tekintettel a turbulenciára – mind a mai napig olyannyira ismeretlen, hogy egyike a Clay Matematikai Intézet által felsorolt hét Millenniumi problémának. Ezek teljes megoldása egyenként 1 millió dolláros díjjal kecsegtet [5].)

Hasselmann később praktikusabb problémák felé fordult. Szakmai indulása egyébként nem volt konfliktusoktól mentes. PhD-fokozatát ugyan két év alatt megszerzte, de elég gyenge minősítést kapott rá, mert a kitűzött probléma megoldására más utat választott, mint amit a témavezetője javasolt. Munkásságának egyik fele óceánfelszíni hullámok generálásához, terjedéséhez, kölcsönhatásaihoz és energetikájához kapcsolódott. A hírneves Scripps Oceanográfiai Intézetben (San Diego, Kalifornia) eltöltött öt év alatt a hullámtan nemzetközi hírű szakértőjévé nőtte ki magát egy sor publikációjával. Ezután családi okokból visszaköltözött Németországba (felesége és gyermekei sem igazán érezték jól magukat az USA-ban), ahol néhány év után,



1975-ben alapító igazgatója lett a hamburgi Max Planck Meteorológiai Intézetnek (egészen 1999-ig ezt a vezető pozíciót töltötte be). Ebben az időszakban már nagyon sok témával foglalkozott az oceanográfia mellett, többek között az időjárás és a klíma, a klímaváltozás, az antropogén hatás azonosítása, még később kvantumtérelmélet, elemi részecskék fizikája és az általános relativitáselmélet is felbukkant az érdeklődési körében. Vajon mi lehet a közös pont ebben a változatos listában? Nos, Hasselmann saját megfogalmazása szerint a hullámok nemlineáris kölcsönhatásaival olyan sokat foglalkozott, és olyan matematikai mélységben, hogy a módszertant és a szemléletmódot az óceán felszínétől számtalan más területre lehetett kiterjeszteni.

A Nobel-díj Bizottság méltatása szerint Hasselmann két alapvető (egyszerűsítő) publikációja jelképezi azt az áttörő eredményt, amellyel hozzájárult a klímatudományhoz. Az első a sztochasztikus klímamodellek matematikai alapvetéséről szól [6], íráskor Hasselmann 45 éves volt. Természetesen ez a munka nem előzmények nélküli, PhD-hallgatóival együtt számos korábbi cikket jelentettek meg a témában (a sok független publikáció mellett), ez tekinthető viszont a koncepció letisztázásának. Hasselmann véleménye szerint alig valaki olvasta ezt a dolgozatot, mégis rengetegen hivatkozták. Lényege talán úgy foglalható össze, hogy a klímarendszer két változó halmazal jellemezhető, az egyik egy „gyors” (időjárás), a másik egy „lassú” (klímaparaméterek). Csatolásuk sztochasztikus differenciálegyenlet-rendszerrel írható le (szakértőknek: Fokker–Planck-egyenlet). A megoldás viselkedésének sajátossága,

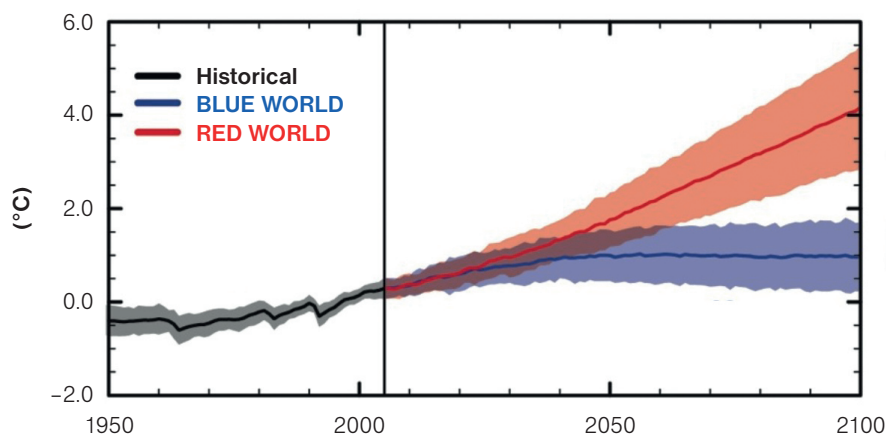
hogy a klíma-paraméterek lassú eltolódásához nem szükséges a külső kényszerek (pl. a Naptól érkező sugárzás) változása, a belső gyors fluktuációk önmagukban képesek a „klímaváltozás” létrehozására. Ennek a szemléletnek egyik korlátja az időskálák szeparációjának kérdése. Az időjárás gyorsan változik, az éghajlati paraméterek (hosszú idejű átlagok) lassan, de az adatokon nemigen látszik ez a szétválás. A klímarendszer lényeges (ha nem meghatározó) eleme a világóceán, amelyben a lassú függőleges keverés (a „Nagy óceáni szállítószalag”) önmagában egy több száz, ezeréves időskálán változó komponenst jelent. Mielőtt még a klímaváltozás antropogén hozzájárulásában kételkedők örvendezni kezdenének, érdemes elolvasni a második méltatott cikket [7], bár a megfogalmazása kökemény matematika. Az „ujjlenyomat” (fingerprint) koncepció letisztulásakor Hasselmann már a hatvanas éveiben járt, és ekkoriban már fejlett, nagy felbontású csatolt óceán–légkör numerikus modellek (melyek megalapozásához a másik díjazott, Syukuro Manabe járult hozzá döntő mértékben) széles körben álltak rendelkezésre. Az ujjlenyomat-stratégia lényege, hogy statisztikai módszerekkel kiértékelhető a modellek által előre jelzett és az észlelt mintázatok egyezése, illetve eltérése különböző klimatikus paraméterek és változók esetére. Az egyik legismertebb illusztráció a globális átlaghőmérséklet alakulása antropogén hozzájárulással, illetve anélkül (**1. ábra**). A modellek által előre jelzett mintázat eltérő paraméterek (pl. CO₂-koncentráció) esetén időben (és térben) másképpen alakul, azonos belső változékonyság mellett. A mérésekkel történő összehason-

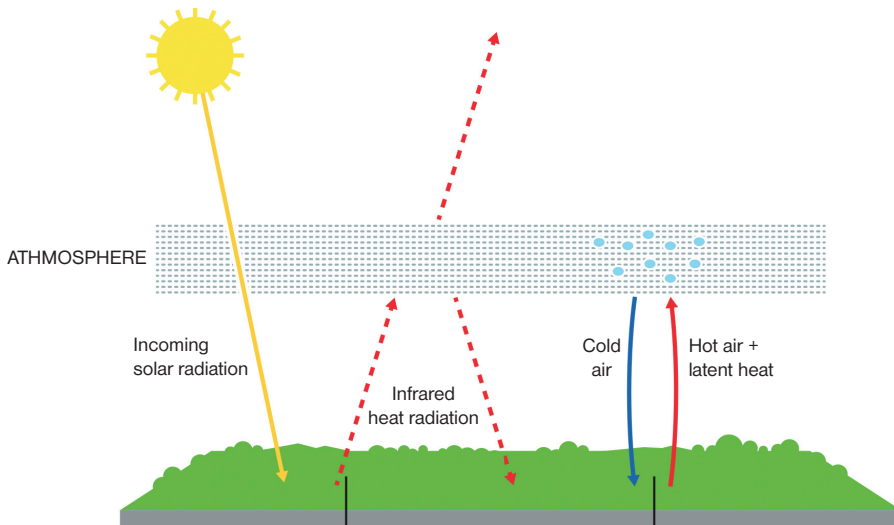
lítás alapján módunk van annak becslésére, hogy mekkora (ha van) az antropogén hozzájárulás a klíma-paraméterek eltolódásához. Az utolsó publikált IPCC-jelentés óta (2013) majdnem egy évtized telt el, különös tekintettel az abban felhasznált eredményekre, azóta a mérések a „Red World” szcenárió mentén alakulnak.

Ez utóbbi bekezdés különösen alkalmas átkötés a következő díjazott, Syukuro Manabe méltatásához. Ő is 1931-ben született Japán egyik kis szigetének apró falujában, ahol édesapja és nagyapja is orvosként dolgozott a helyi közösséget. Kézenfekvő volt, hogy a legfiatalabb Manabe folytassa a családi hagyományt, ám a középiskolai évek során, illetve a Tokiói Egyetemen elkezdett tanulmányai első két évében fokozatosan elvesztette érdeklődését a biológia és az orvostudomány irányában. Ezzel párhuzamosan a fizika és a matematika vonzotta egyre nagyobb mértékben, úgyhogy váltott is, és geofizikai stúdiumokba kezdett. Végül meteorológusként végzett már a háború utáni években, de állást nem sikerült kapnia. Beszámolója szerint a háború években a hadsereg és a haditengerészet olyan nagy számban képezett meteorológusokat, hogy a békeidőben eleinte túl sokan voltak az álláshelyekhez képest [4]. Még doktori fokozatának megszerzése (1959) után sem sikerült elhelyezkednie. Gyakorlatilag az első adódó lehetőséget kihasználva elutazott az Egyesült Államokba, ahol az amerikai meteorológiai szolgálat kutatórészlegében dolgozott megszakitás nélkül egészen 1997-ig. Ezután négy évig Japánban igazgatta a klímaváltozást kutató intézeti hálózatot, de 2002-ben visszatért az Egyesült Államokba, a Princetoni Egyetemre.

Díjazott kutatási eredményeit még a hatvanas évek elejétől elkezdett munkája során érte el, sokat idézett cikkeinek túlnyomó részét negyvenéves kora előtt publikálta [pl. 8, 9]. Egyik fiatal kollégája a Princetoni egyetemi évekre visszaemlékezve (ekkor Manabe már hetven fölött járt) arról számolt be, hogy különösebben nem volt kollegiális-baráti légkör az intézetben, de azért különböző társaságokban együtt jártak ebédelni. Ezek során gyakran esett szó aktuális tudományos kérdésekről, és ha Manabe hozzászólt a témához, az indító mondata általában olyasmi volt, hogy „ja, ezt én megcsináltam 20–30–40 évvel ezelőtt”. (Ez meglehetősen irritáló viselkedés lehet, amit magam is megtapasztaltam legalább két neves külföldi tudós részéről. Egyikük annyira agresszív személyiség volt, hogy szakmai konferenciákon habozás nél-

1. ábra. A globális átlaghőmérsékleti anomália előre jelzett alakulása nagy felbontású csatolt óceán–légkör numerikus modellek segítségével, két modell-feltevés esetén. A piros görbe („Red World”) a jelenlegi ütemben növekvő, míg a kék („Blue World”) a kétezres évek után stagnáló CO₂-szintekre vonatkozik. A 2005 előtti időszak a történelmi („Historical”) idősorokra vonatkozik, ami a modellek kalibrációs tesztje is egyben (forrás: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>)





2. ábra. Manabe és Wetherald klímamodelljének vázlatja. A fő komponensek: a Naptól érkező sugárzás (a látható tartományban a légkör jobbra átlátszó), a felszínről kibocsájtott hőmérsékleti sugárzás (infravörös tartományban a légkör jó elnyelő), a légkörből lefelé és az űrbe történő infravörös sugárzás, valamint a látens hő transzportja a víz párolgása és magasabb légköri kicsapódása során
(forrás: Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences)

kül félbeszakított bármilyen előadást hangozó közbeszólásokkal, ha úgy vélte, hogy a téma már „lerágott csont”, hiszen ezt ő ekkor-meg-akkor már rég publikálta.) Nem csoda, hogy Manabe ifjú kollégája hasonló módon nehezen viselte ezeket a megjegyzéseket, úgyhogy egy alkalommal vette a fáradságot, és utánament az állításoknak. Legnagyobb meglepetésére kiderült, hogy Manabe a szóba került problémákat 20–30–40 évvel korábban tényleg megoldotta...

A hatvanas években kidolgozott numerikus légköri modellek valóban jelentős lépést jelentettek a mai komplex, nagy felbontású programok kifejlesztéséhez. A kiinduló modell vázlatát illusztrálja a **2. ábra**, az elrendezés igen leegyszerűsítve mutatja be az ún. radiatív-konvektív egyensúly kialakításához szükséges komponenseket. Manabe és Wetherald [9] a teljes légkört egydimenziós oszlopként kezelte, a relatív páratartalom és az üvegházhatású gázok koncentrációjának adott magassági profiljaival. (Közbevetve megjegyezzük, hogy Manabe fő szerzőtársa, Richard T. Wetherald 2011-ben, 75 éves korában elhunyt, és Nobel-díjat csak élő személy kaphat). Az atmoszférikus oszlop állapotjelzői első lépésben egy kezdeti állapotból sugárzási átvitel (radiatív transzfer) útján érnek el stacionárius eloszlást, amelyet az üvegházhatású gázok (legfontosabb a vízgőz) abszorpciók spektrumai alapján számítanak ki. Ha kizárólag a sugárzási átvitelt vesszük figyelembe, akkor a hőmérsékleti gradiens (lapse rate) a troposzférában -15 °C/km érték körül alakul, ami

sokkal meredekebb a megfigyeltnél. Második lépésben a konvektív korrekció következik, amely figyelembe veszi a meleg nedves feláramlást követő fázisátalakulást a magasabb rétegekben, ami látens hő felszabadulásával jár együtt (**2. ábra** jobb szélén). Ekkor a „nedves” függőleges hőmérsékleti gradiens a tapasztalati értékhez közelebbi, -6 °C/km értékre áll be. A számítások gyakorlati részletei bonyolultabbak, ugyanis a vertikális fel- és leáramlást ez a modellcsalád nem reprezentálja áramlástanilag. Helyettesítésére a „convective adjustment” nevű korrekciós eljárás szolgál, ami egy kialakuló adiabatikusan instabil hőmérsékleti profil visszaigazítását jelenti.

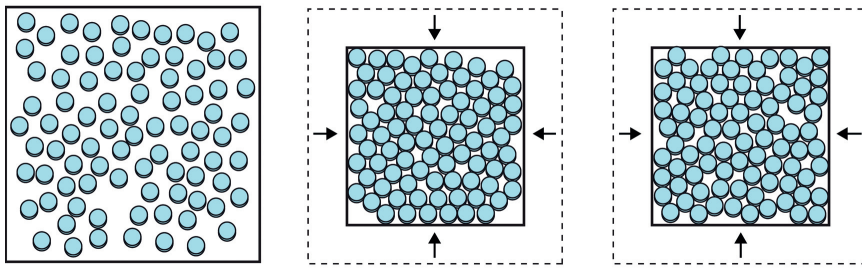
Manabe és Wetherald két lényeges módosítása a korábbi modellekhez (pl. [8]) képest, hogy az abszolút páratartalom helyett a relatív páratartalmat vették figyelembe, valamint a radiatív transzfer spektrális számítása során a vízpára mellett a többi üvegházgázt is beépítették. Mindezek eredményeképpen először határozták meg a „klímaérzékenység” nagyságrendjét, ami a CO_2 -koncentráció duplázódása esetén $2,3\text{ °C}$ globális felszíni átlaghőmérséklet-eltolódást eredményezett (lásd a címlapot). A modern globálisan csatolt óceán-atmoszféra numerikus modellek (Manabe és munkatársai munkáiból kiindulva, fél évszázadnyi fejlesztést követően) ugyanezt a klímaérzékenységet a $2,5\text{--}4\text{ °C}$ tartományban becsülik. Egyébként a numerikus modellek klímaprojekciói a 2100-as évre lényegében nem változtak évtizedek óta,

sem a várható globális átlaghőmérséklet-, sem a globális tengerszint-emelkedés tekintetében. Ez azt jelenti, hogy bár a modellek komplexitása folyamatosan nő, a rácsfelbontásuk finomodik, egyre nagyobb szuperszámítógépes kapacitásokat használnak fel, a lényeges (és jól értett) fizikát már a hatvanas években ismerték.

A névsorban harmadik, Giorgio Parisi munkásságának és díjazott eredményeinek az ismertetése a legkeményebb dió. A Nobel-díj Bizottság megfogalmazása szerint 1980 körül Parisi „rejtett mintázatokat fedezett fel rendezetlen komplex anyagokban”. Ezek megértését és leírását nemcsak a látszólag teljesen rendezetlen anyagokra, hanem más területekre is sikeresen terjesztették ki kezdve a matematikától – a biológián, neurológián keresztül – egészen a gépi tanulásig.

Giorgio Parisi 1948-ban született Rómában. Hosszas keresgélés után sem deríthető ki túl sok fiatalkoráról, következő dokumentált életrajzi adata szerint 1970-ben a római La Sapienza Egyetemen szerzett diplomát a nagyenergiájú részecskefizika területén (azt persze el kell ismernem, hogy nyelvtudás hiányában az olasz forrásokat nemigen tudtam átnézni). Nála sem maradtak el a vendégkutatói „kirándulások” (1973–74: Columbia Egyetem, 1976–77: Institut des Hautes Études Scientifiques, 1977–78: École Normale Supérieure), de az általában Nobel-díjjal kitüntetett tudósokhoz képest sokkal rövidebb ideig dolgozott külföldön, különösen az Egyesült Államokban. 1981 és 1992 között a Tor Vergata Egyetem, 1992-től mind a mai napig a La Sapienza Egyetem professzora (mindkettő Rómában). Tucatnyinál több neves kitüntetés mellett említésre méltó a fizikai Wolf-díj 2021-es elnyerése, ugyanis a Wolf-díjat gyakran (joggal) a Nobel-díj „előszobájának” titulálják.

Elmondása szerint szereti Olaszországot, Rómát, és mindig kitűnő mentorokkal és kollégákkal dolgozhatott együtt. Családjáról szükséztlenül szokott nyilatkozni, egy érdekes apróság a *Tiranapost* albán portálon megjelent, díjátadást követő interjúból azért kiderül: ötszáznál több tudományos cikke és hét szakkönyve mellett gyermekmeséket is írt, amiket kezdetben két gyermekének, mostanában négyéves unokaöccsének szokott felolvasni. Újabb érdekes adalék, hogy szerénysége és visszafogottsága mellett nem áll tőle teljesen távol a „politikai aktivizmus”. Még 2008-ban történt, hogy 66 oktatótársával együtt tiltakozó levelet írt az ellen, hogy a La Sapienza Egyetem vezetése meghívta XVI.



3. ábra. Minden alkalommal, amikor sok egyforma korongot véletlen kezdő elrendezésből összenyomnak, egy új szabálytalan minta (üvegállapot) alakul ki annak ellenére, hogy pontosan ugyanúgy nyomják össze őket. Mi szabályozza az eredményt?

Giorgio Parisi felfedezett egy rejtett struktúrát az ilyen összetett rendezetlen rendszerekben, és megtalálta a módját ezek matematikai leírásának

(forrás: Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences)

Benedek pápát a tanévnyitó előadás megtartására. Három nap kampányolás után az egyetem lemondta a pápai meghívást. „Vallásos személyiség – legyen az akár rabbi vagy imám – nem megfelelő választás egy nem vallásos intézmény évnnyitójának megtartására” – nyilatkozta 2012-ben a *PhysicsWorld* magazinnak. Emellett többször élesen bírálta Silvio Berlusconi tudománypolitikáját, amely valójában durva pénzügyi elvonásokat jelentett, pedig akkoriban a gazdaság jól prosperált. Véleménye szerint ennek közvetlen következménye, hogy nagyon sok fiatal tudósplánta kényszerült külföldre.

Térjünk vissza a rendezetlen rendszerekre. Nagyjából Parisi diplomája megszerzésének idejében, a hetvenes évek elején bukkant fel a „spinüveg” fogalma a szakirodalomban. A spinüvegek olyan rendezetlen anyagi rendszerek, amelyekben mágneses atomok (pl. Fe) véletlenszerűen keverednek nem mágneses atomokkal (pl. Cu). Egy ilyen rendszerben nagyon sok „frusztrált” kölcsönhatás lép fel, amit könnyű megérteni. Rendezzünk el három elemi mágneset egy egyenlő oldalú háromszög sarkaiban. A rendszer energiaminimuma olyan állapot lenne, amikor minden mágnes azonos irányban áll. Ám ha két sarokpontban a mágneseket „befagyaszjtjuk” elmentéses irányban, a harmadik mágnes irányultsága frusztrált, azaz állhat az egyikkel vagy a másikkal párhuzamosan, azonos energiájú állapotokat, de más konfigurációt létrehozva. Ráadásul, ha az elemi mágnesek egy ötvözetrácsban véletlenszerűen helyezkednek el, akkor a frusztrált kölcsönhatások erőssége is rendezetlen eloszlású, tovább komplikálva a képet. A mágneses fázisátalakulás során (a kritikus hőmérséklet fölé történő felmelegítést követő hűtéskor) más és más konfiguráció alakulhat ki. Ennél is bonyolultabb a helyzet, ha a rácsban ferromágneses és antifer-

romágneses csatolású atomok helyezkednek el. Egyszerűbben szemlélteti a rendezetlenség következményét a 3. ábra. Egyforma korongok véletlenszerű kezdő állapotból kiinduló összenyomásának az eredménye más és más végső konfiguráció (replikáció) lesz ismételt kísérletek esetén. Laboratóriumban ezt pl. fémolvadékok nagyon gyors hűtésével lehet demonstrálni, a végállapot az ún. fémüveg, egy rendkívül hosszú élettartamú metastabil állapot. Hogyan lehet az ilyen rendszereket egyáltalán egyszerűsített módon leírni? Parisi két jelentős felismerése áttörést jelentett a kérdésben [10, 11].

Az első szerint a spinüvegek „rendezett” végállapotainak száma végtelen (kritikus pont alatti hőmérsékleten). Ennek jellemzésére Parisi bevezetett egy rendparamétert, ami a replikák átfedésének (hasonlóságának) a mérőszáma. A spinüveg-állapotban nincs egyértelmű, minimumenergiájú állapot, ami egy átlagtér-megoldásból adódna (szemben egy ferromágneses rendszerrel, ahol az összes spin vagy „felé”, vagy „lefele” irányított). Innentől a matematika rendkívül elbonyolódik, ilyen fogalmak bukkannak fel, mint az „ultrametri-kusság”, „replika-szimmetriasértés”, „sztochasztikus kvantumtérelmélet”, „turbulens intermittencia”, „véletlen mátrixok”... A lényeg annyi, hogy a leírás módszertanát fizikai és egyéb modellrendszerek rendkívül széles osztályaira sikerült kiterjeszteni, nem csoda, hogy Parisi munkái kilencven-ezernél több hivatkozást értek el.

Végezetül talán érdemes megemlíteni pár magyar vonatkozást a díjazottak munkásságával kapcsolatban. Először is a mélyebb részletek iránt érdeklődő olvasók sokkal autentikusabb szakmai leírásokat olvashatnak két friss cikkben, amelyek a *Fizikai Szemle* novemberi számában jelentek meg Kondor Imre [12], illetve Weidinger Tamás és szerzőtársai tollából [13]. Kon-

dor Imre (az ELTE TTK Elméleti Fizikai Tanszék nyugállományú professzora és a Corvinus Egyetem professor emeritusa) személyesen is nagyon jól ismeri Giorgio Parisit és munkásságát hosszú évek óta, hasonló témákban neki is jelentős eredményei vannak, bár együtt éppen nem publikáltak. Viszont Kondor professzor egyik tanítványa, Temesvári Tamás, az MTA–ELTE Elméleti Fizikai Kutatócsoport munkatársa szerencsésebb volt, még 2012-ben közölték (ketten Parisivel) egy jelentős cikket [14]. A klímakutató kollégák közül Klaus Hasselmann-nak nincs közös cikke magyar kollégákkal, de már csak a földrajzi közelség miatt is intézetével, a hamburgi Meteorológiai Max Planck Intézetrel számos magyar kutató került aktív kapcsolatba (és futólag találkozott Hasselmannnal). Tél Tamás (az ELTE TTK Elméleti Fizikai Tanszék professzora) és fiatal munkatársai több alkalommal látogatást tettek Hamburgban, és ha nem is magával a főigazgatóval közösen, de a témakörben fontos publikációk születtek [15, 16]. Elnézést kell kérnem azoktól a magyar kollégáktól, akik esetleg Syukuro Manabe személyes ismerősei, de korlátozott ismereteim miatt nem említettem őket. ●●●

IRODALOM

- [1] <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2021/summary/>
- [2] <https://www.nobelprize.org/prizes/facts/nobel-prize-facts/>
- [3] <https://www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/33645>
- [4] <https://www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/32158-1>
- [5] <https://www.claymath.org/millennium-problems/navier-stokes-equation>
- [6] Hasselmann, Klaus, *Tellus* (1976) 28(6), 473–485. doi:10.3402/tellusa.v28i6.11316
- [7] Hasselmann, Klaus, *Journal of Climate* (1993) 6(10), 1957–1971. doi:10.1175/1520-0442(1993)006<03C1957:OFFTDO%3E2.0.CO;2
- [8] Manabe, Syukuro; Smagorinsky, Joseph; Strickler, Robert E., *Monthly Weather Review* (1965) 93(12), 769–798. doi:10.1175/1520-0493(1965)093<0769:scoagc>2.3.co;2
- [9] Manabe, Syukuro; Wetherald, R Richard T., *Journal of the Atmospheric Sciences* (1967) 24, 241–259. doi:10.1175/1520-0469(1967)024<0241:TEOTAW>2.0.CO;2
- [10] Parisi, Giorgio, *Physical Review Letters*, (1979) 43, 1754–1757. doi:10.1103/PhysRevLett.43.1754
- [11] Parisi, Giorgio, "Toward a mean field theory for spin glasses." *Physics Letters A* (1979) 73, 203–205. doi:10.1016/0375-9601(79)90708-4
- [12] Kondor Imre, *Fizikai Szemle* (2021) november, 365–368. <http://fizikaiszemle.hu/szemle/98>
- [13] Weidinger Tamás, Pongrácz Rita, Tasnádi Péter, *Fizikai Szemle* (2021) november, 369–375. <http://fizikaiszemle.hu/szemle/98>
- [14] Parisi, Giorgio; Temesvári, Tamás, *Nuclear Physics B* (2012) 858, 293–316. doi:10.1016/J.NuclPhysB.2012.01.014
- [15] Drótos, Gábor; Bódai, Tamás; Tél, Tamás, *Journal of Climate* (2015) 28, 3275–3288. doi:10.1175/JCLI-D-14-00459.1
- [16] Herein, Máttyás; Márffy, János; Drótos, Gábor; Tél, Tamás, *Journal of Climate* (2016) 29, 259–272. doi:10.1175/JCLI-D-15-0353.1



A 2021. évi orvosi Nobel-díj

A 2021. évi élettani vagy orvosi Nobel-díjat David Julius és Ardem Patapoutian érdemelte ki a termikus és mechanikus jelátalakítók felfedezéséért.

A tapintás és a meleg érzékelése elengedhetetlen a túlélésünkhöz, ez alapozza meg a körülöttünk lévő világgal való kapcsolatunkat. Bár a hétköznapi életben természetesnek vesszük ezeket az érzékeinket, David Julius és Ardem Patapoutian felfedzését megelőzően nem tudtuk, mi és hogyan indítja be azokat az idegi impulzusokat, amelyek a hő és a nyomás érzékeléséért felelnek.

David Julius a paprikában lévő és égető érzést okozó kapszaicint hívta segítségül ahhoz, hogy megkeresse a bőr idegvégződéseiben azokat az érzékelőket, amelyek a hőre reagálnak.

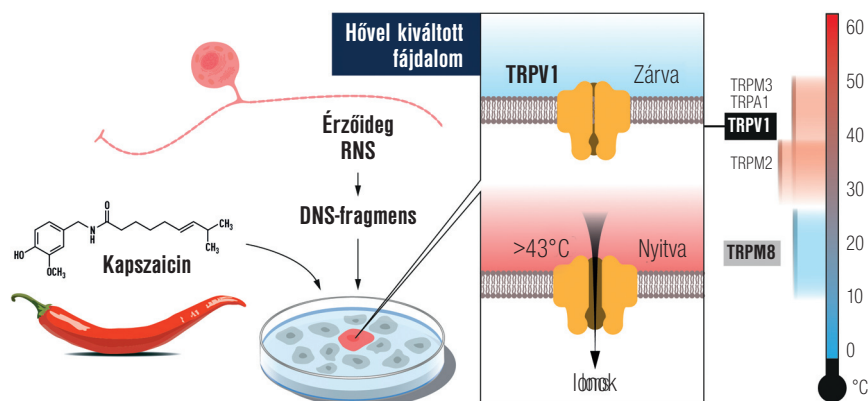
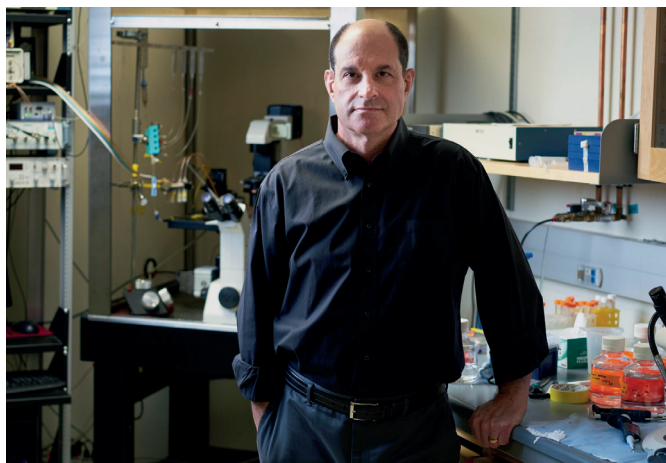
Ardem Patapoutian nyomásérzékeny sejteket használt ahhoz, hogy feltárja a bőrünkben és a belső szerveinkben lévő, addig ismeretlen típusú mechanikai szenzorokat.

Ezekből a felfedezésekből azután vilámgyorsan újabb kutatások indulhattak ki, amelyek révén egyre jobban megértettük, miként érzékeljük a meleget, a hideget és a mechanikai ingereket. A két díjazott azt az összekötő kapcsot találta meg, amely az érzékszerveink és a külvilág közt fennáll.

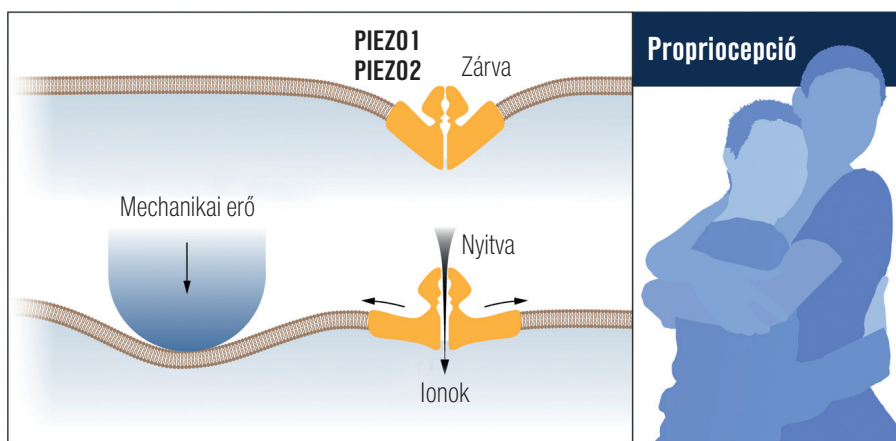
David Julius 1955-ben született New Yorkban, a Kaliforniai Egyetemen, Berkeleyben szerzett Phd-fokozatot, posztdoktori képzésre a New York-i Columbia Egyetemre járt. 1989 óta San Franciscóban professzor. 2010 óta a Magyar Tudományos Akadémia (MTA) tiszteleti tagja

David Julius

(Photo gallery. NobelPrize.org. Nobel Prize Outreach AB 2021)



David Julius kapszaicin segítségével azonosította a TRPV1 ioncsatornát, amelyet a hővel kiváltott fájdalom aktivál (Press release: The Nobel Prize in Physiology or Medicine 2021. NobelPrize.org. Nobel Prize Outreach AB 2021)



Ardem Patapoutian nyomásérzékeny sejtekkel azonosított mechanikai erővel aktivált ioncsatornákat (Piezo1 és Piezo2) (Press release: The Nobel Prize in Physiology or Medicine 2021. NobelPrize.org. Nobel Prize Outreach AB 2021)

Ardem Patapoutian 1967-ben Bejrútban, Libanonban született. Fiatalon Los Angelesbe költözött, a Kaliforniai Műszaki Egyetemen (Caltech) szerzett Phd-fokozatot, San Franciscóban végezte posztdoktori tanulmányait. 2000 óta a Scripps Kutatóintézet munkatársa.

Ardem Patapoutian

(Photo gallery. NobelPrize.org. Nobel Prize Outreach AB 2021)





A 2021-es orvosi Nobel-díjnak a kapszaicinnal kapcsolatos kutatások révén két hazai egyetem a szegedi (u-szeged.hu/news-and-events/2021/the-2021-nobel-prize-in) és a pécsi révén is van

hazai vonatkozása. Ezekről részletesebben olvashatnak a PTE Farmakológiai és Farmakoterápiai Intézetben működő „Szolcsányi-iskola” professzorainak tollából. **Kiss Tamás**



A Nobel-díjas kapszaicinkutatások magyar gyökerei és kapcsolatai

A 2021-es élettani vagy orvostudományi Nobel-díjat két, Amerikában dolgozó molekuláris biológus kapta a fájdalomban is jelentős szerepet játszó hőmérséklet és tapintás érzékeléséért felelős receptorok felfedezéséért. David Julius a paprika csípős, égető érzést keltő alkotóeleme, a kapszaicin felhasználásával olyan szenzorot azonosított a bőr idegvégződéseiben, amely fájdalom hőingerrel is aktiválható. Ardem Patapoutian nyomára, mechanikai ingerekre és hidegre érzékeny receptorok új osztályát írta le a bőrben és a belső szervekben.

Ebben az összefoglalóban szeretnénk kiemelni azokat a magyar felfedezéseket, alapvető eredményeket és mérföldköveket, amelyek megalapozták ezeket a kutatásokat, elsősorban a kapszaicin receptorára, a „tranziens receptor potenciál vanilloid 1” (TRPV1) ioncsatornára vonatkozóan. E kutatások alapvetően magyar gyökerekből indultak és jelenleg is kiterjedt magyar vonatkozásai vannak, amelyek Szolcsányi János, az MTA rendes tagjának Szegedről induló, majd Pécsen végzett iskolateremtő munkásságának köszönhető.

A 19. század végén Hőgyes Endre foglalkozott a csípőspaprika-kivonat szenzoros izgató és gyomor-bérendszerre történő ha-

tását laboratóriumi állatokon, azaz hogy akár helyi (pl. szemcsepp), akár általános (szisztémás) erőteljes alkalmazás után érzéketlenség következik be fájdalmas kémiai ingerekkel szemben, míg más stimulások hatásosak maradnak. Az emberi bőr is deszenzibilizálhatónak bizonyult, a kapszaicin tehát az első szenzoros blokkolónak tekinthetjük. A kapszaicin-előkezelés mindemellett bizonyos (pl. UV-besugárással kiváltott) gyulladáshoz vezető reakciókat is gátolt. Jancsó Miklós a továbbiakban többek közt azzal a kérdéssel foglalkozott, hogy milyen biológiailag aktív anyagok okozzák az érzőidegeket izgató vegyületek által létrehozott értágító és gyulladáskeltő hatást. Jancsó Miklós professzor 1966-ban elhunyt.

Munkatársai, J. Gábor Aranka és Szolcsányi János folytatták a kapszaicin érzőidegekre kifejtett hatásainak kutatását. Bejelentették Jancsó Miklós tájékoztató kísérleteit, és maguk is sok jelentős eredménnyel bővítették a gondolatkört. Eredményeik és az a koncepció, hogy a kapszaicinérzékeny érző idegvégződésekből gyulladáshoz vezető ingerületátvivő anyag (később: anyagok) szabadulhat(nak) fel, két alapvető dolgozatban jelentek meg 1967-ben és 1968-ban a *British Journal of Pharmacology* folyóiratban, a néhai Jancsó professzor első szerzőségével. Leírták többek között a krónikus érző denerváció gátló hatását a fent említett gyulladáshoz vezető jelenségekre, továbbá bizonyították, hogy az érző idegvégzések mediátorkibocsátása nem érzékeny helyi érzéstelenítőkre (később: Na-csatorna-blokkolókra). További munkáikban bizonyították, hogy a hipotalamuszban található hőmérséklet-érzékelő

struktúrák szintén érzékenyek kapszaicinre és deszenzibilizálhatók is.

A „kapszaicinreceptor”

„Klasszikus” módszerekkel, azaz szerkezeti kapszaicinanalógok érző idegeket izgató és deszenzibilizáló hatásainak vizsgálatával Szolcsányi János akadémikus és J. Gábor Aranka bizonyítékot szolgáltatott arra, hogy ezek a hatások specifikus receptorokon keresztül jönnek létre. Ezt a megállapítást arra alapozták, hogy kis szerkezeti változás nagymértékben módosíthatja a hatásokat, a molekula nélkülözhetetlen részei meghatározhatók. Az eredmények és a hipotézis két dolgozatban jelent meg 1975-ben és 1976-ban (angolul, a kétnyelvű *Arzneimittel-Forschung/Drug Research* folyóiratban). Az egyik közleményben a feltelezett kapszaicinreceptor sémás ábrája is megtalálható, tovább erősítve, hogy a receptor létezésének koncepciója Szolcsányi professzortól ered.

A kapszaicinreceptor molekuláris azonosítására, azaz klónozására 1997-ig kellett várni. Az addig eltelt bő 20 év második felében különböző munkacsoportok kimutatták, hogy az elsődleges érző idegsejtek azon csoportja, amelyik kapszaicinnal aktiválható (és nagy dózisos hatására blokkolható), hasonló ionáramokkal válaszol a kapszaicinre, mint a fájdalmas intenzitású hőingerekre, illetve a kétféle ingerre reagáló idegsejtek nagyon jelentős átfedést mutatnak. Mindez felvetette annak lehetőségét, hogy a kapszaicinreceptor forró ingerekkel is aktiválható. Ezt a feltevést a kapszaicinreceptor 1997-ben David Julius munkacsoportja által kivitele-



Jancsó Miklós

tásaival. A „fősodor”-beli kapszaicinkutatás azonban ifj. Jancsó Miklós szegedi farmakológus professzor és felesége, J. Gábor Aranka kísérleteivel kezdődött. Egy 1959-es német nyelvű közleményben leírták a kapszaicin úgynevezett deszenzibilizáló ha-

Idézet Szolcsányi János és Gábor Aranka 1975-ös cikkéből

„A quantitative method for measuring the efficiency of pungent agents of capsaicin-type by the pain reaction elicited on the eye of rats is described. About 50 derivatives – most of them amides or esters of homovanillic acid – were tested by this method and the share of different chemical groups of the molecule in the pungent action was analyzed...

On the basis of the findings a hypothetical pharmacological receptor for capsaicin on pain sensory nerve endings is presented.”

(*Szolcsányi and Jancsó Gábor, Arzneim-Forsch/Drug Res 1975, 25(12): 1877–1881.*)



Szolcsányi János

zett klónozása közvetlenül megerősítette. Az eredetileg kapszaicinreceptorok nevezett fehérjét hamarosan átnevezték TRPV1 receptorra más, alsóbbrendű élőlényekben előforduló variánsának mintájára. A TRPV1 receptor fontos tulajdonsága, hogy a kapszaicin és szerkezeti rokonain (pl. a kutyatejfélemben lévő reziniferatoxin), valamint a forró ingereken kívül számos más, eltérő szerkezetű endogén mediátor, pl. proton, leukotriének, az endokannabinoid anandamid is képesek aktiválni.

A reziniferatoxin hatásaira és TRPV1 receptort aktiváló mechanizmusaira vonatkozóan az évtizedeken keresztül Amerikában dolgozó Szállási Árpád szolgáltatott alapvető eredményeket, aki jelenleg a Semmelweis Egyetem munkatársa. Kísérleti állatokban a TRPV1 blokkolása érdekes módon nem károsítja a szervezet forró ingerekkel szembeni érzékenységét, de gyulladáshoz és idegkárosodáshoz alapuló kórállapotok modelljeiben jelentős fájdalomcsillapító hatással bír. Mindezek alapján intenzív gyógyszerfejlesztés kezdődött TRPV1-blokkolókat mint új típusú fájdalomcsillapítókat kidolgozására. Sajnálatos és előre nem látható módon az eddig kifejlesztett vegyületek emberben károsítják a forró ingerek detektálását és megemelik a testhőmérsékletet, ami klinikai alkalmazásukat ez idáig megakadályozta.

A kutatások egy másik iránya kb. 1975-től az volt, hogy Szolcsányi és Barthó Loránd Pécsen kimutatta a kapszaicinérzékeny idegvégződésekből felszabaduló mediátorok belső szervekben kialakított választait, amit 1978-tól számos közleményben publikáltak. A mediátoranyagok azonosítása még váratott magára. Patkányban kísérletes gyomorfelekkel kapcsolatos vizsgálataik arra utaltak, hogy a gyomor érzőideg-végződéseit részt vesznek az agresszív tényezők elleni védekezésben. Ezt a

kutatási irányt is több külföldi munkacsoport tovább vitte.

Szegeden Jancsó Miklós és J. Gábor Aranka fia, Jancsó Gábor, a morfológia és élettan határterületén dolgozva nagy jelentőségű eredményeket publikált a kapszaicin hatásaival kapcsolatban, pl. újszülött állatok deszenzibilizációjának mechanizmusaira, a perineurális kapszaicinkezelésre, valamint az érző neuronokban található neuropeptidekre vonatkozóan.

A pécsi „Szolcsányi-iskola”, amelyet jelenleg a Pécsi Tudományegyetem Általános Orvostudományi Kar Farmakológiai Intézetében és Szentágotthai Kutatóközpontjában Pintér Erika, Pethő Gábor és Helyes Zsuzsanna visz tovább az egyre több fiatal munkatárssal bővülő kutatócsoporttal, a TRPV1 és az ahhoz nagyon hasonló TRP Ankyrin 1 (TRPA1) aktivációs mechanizmusaira, szerepére, gyógyszerfejlesztési perspektíváira irányul. Jelentős lépéseket tesznek a kapszaicinérzékeny érzőidegekből felszabaduló gátló peptidok, elsősorban a szomatosztatin hatásainak, fájdalomcsillapító és gyulladáscsökkentő lehetőségeinek feltérképezésére.

Szolcsányi János akadémikus egyik utolsó, 2017-ben megjelent tanulmányában így foglalta össze a kapszaicinérzékeny, hármas funkciójú érző idegsejtek különleges szabályozó működését: „A perifériás idegrendszeri szabályozásban elkülönül a szenzoros receptorokkal rendelkező afferens (érzékelő) és a szöveti válaszokat kiváltó efferens (végrehajtó) neuronok csoportja. A kapszaicin szelektív hatásának bizonyítása egy új, a klasszikus idegszabályozástól eltérő szenzoros-effektor funkciójú idegrendszer felfedezéséhez vezetett. A kapszaicin nocicepciót és égető érzetet kiváltó hatását követően nagy dózisok után szelektív deszenzitivizációt vált ki kémiai fájdalomkeltő anyagokkal szemben. Elsősor-

ban önkísérletek alapján bizonyítottuk, hogy a deszenzitivizáció nem gátolja a kémiai anyagok érzést vagy hidegérzetet kiváltó hatását, de a bőrben a bradikininrel kiváltott fájdalom is jelentősen csökken. Állatkísérletekben kimutattuk egyrost- és többrost-preparátumokon, hogy a kapszaicin szelektíven csak a polimodális nociceptorokat (többféle módon aktiválható érző receptorokat) izgatja, és deszenzitivizálja mechanikai, forró és kémiai ingerekkel szemben. Szerkezet-hatás összefüggések és más bizonyítékok alapján 1975-ben elsőként állítottuk, hogy a szer hatását »kapszaicinreceptor« membránproteinen fejt ki. A kapszaicinreceptor TRPV1 klónozása 1997-ben feltárta annak egyedülálló integratív kationcsatorna jellegét. Bizonyítottuk, hogy a TRPV1 optimális kapuzó működéséhez a plazmamembrán lipid raft szfingomielin és más komponenseinek jelenléte szükséges. ... Bizonyítottuk, hogy a szenzoros neuropeptidek felszabadulásához nem szükséges axonreflex, így ugyanaz az idegvégződés lát el szenzoros és effektor funkciót. Gerincvelői hátsó gyökök izgatása a beidegzési területen kívül testszerte gyulladásgátló hatású. Ezeket az ún. »szenzokrin« gyulladásgátló és fájdalomcsillapító hatásokat a kapszaicinérzékeny receptorokból felszabaduló és a keringésbe jutó szomatosztatin váltja ki. Gyógyszerfejlesztés szempontjából ígértes, hogy ezeket a gátló hatásokat a szomatosztatin sst₄ receptorának aktiválásával fejt ki, amely nem játszik szerepet e peptid hormontermelést gátló hatásainak közvetítésében. Ennek a teljesen új neurohumorális szabályozásnak gyulladásgátló és fájdalomcsillapító szerepét bizonyítottuk krónikus idegi eredetű (neuropátiás) fájdalom, ízületi gyulladás és bőrgyulladás modelljeiben is. A neuropátiás fájdalom kezelésére ma kapszaicin hatóanyagú bőrtapasz gyógyszerkészítmény van forgalomban, és a TRPV1 klónozásával új távlatok nyíltak a hőszabályozás és az agykutatás terén.”

A PTE ÁOK, Farmakológiai és Farmakoterápiai Intézetben működő „Szolcsányi-iskola” professzorai:

Barthó Loránd

professzor emeritus, az MTA doktora

Pintér Erika

intézetvezető egyetemi tanár,

az MTA doktora

Pethő Gábor

egyetemi tanár, az MTA doktora

Helyes Zsuzsanna

egyetemi tanár, az MTA levelező tagja,

a Szentágotthai János Kutatóközpont elnöke