



Hargittai István

■ BME Szervetlen és Analitikai Kémia Tanszék

Kockára tett tekintély*

Vezető polimerek

*Nagyon szerencsés vagyok, és minél többet dolgozom, annál szerencsésebb.
Alan MacDiarmid kedvenc kínai mondása [1]*

Alan MacDiarmid (1927–2007) már megállapodott, nemzetközileg ismert kémiaprofesszor volt, amikor Japánban egyik előadása után egy helybeli kutató, Hideki Shirakawa talányos anyagot mutatott neki. Szerves polimer volt, de megjelenése fémre emlékeztetett. MacDiarmid azonnal meghívta a japán tudóst philadelphiai laboratóriumába, és elindított egy nagy kutatási programot. A MacDiarmid kutatásait támogató szervezet képviselője figyelmeztette MacDiarmidot, mekkora kockázatot vállal, ha olyan új területbe kezd, amelyben nincs tapasztalata, de a munkát továbbra is támogatta. MacDiarmid felkérte egy fizikus kollégáját, hogy vegyen részt a kutatásban, aki azonban nem akarta kockáztatni tudományos tekintélyét a kétes kimenetelű vállalkozással, és ettől MacDiarmidot is óva intette. Egy másik fizikus, Alan Heeger viszont hajlandó volt kockáztatni, és gyümölcsöző együttműködés alakult ki közöttük.

Hárman együtt fedezték fel a vezető polimereket, amelyek különlegesen hasznosnak bizonyultak a legkülönbözőbb alkalmazásokban, még a hétköznapi életben is. Hármójuknak közösen ítelték oda a 2000. évi kémiai Nobel-díjat.

1965-ben megvédett diplomamunkám tárgya olyan molekula szerkezetének meghatározása volt, amelyben kén–nitrogén (S–N) kötés játszott a főszerepet. A következő évek során mindig odafigyeltem, amikor olyan kémiai rendszerrel találkoztam, amelyben előfordult S–N kötés. Az 1970-es évek elején meghívtak egy előadásra a Pennsylvanai Egyetem (University of Pennsylvania, UPenn) kémiai intézetébe, ahol az egyik vezető professzor, Alan MacDiarmid már korábban is foglalkozott az (SN)₄ molekulákból felépülő kristály szerkezetével. Az (SN)₄ molekula négy S–N kötést tartalmazó gyűrűt alkot. Látogatásom alkalmával MacDiarmid beszélt nekem az (SN)_x polimer molekulákról is, amelyekben S–N kötések kapcsolódnak össze végtelennek tűnő láncokká. MacDiarmid az anyagot is megmutatta: aranyra hasonlított, és úgy fénylett, mintha valóban fém lett volna. MacDiarmid anyaga mély benyomást tett rám és még inkább az a lelkesedés, amellyel beszélt róla.

Majdnem harminc év telt el, mielőtt újra találkoztunk, és egészen más körülmények között. Az alkalom a Nobel-díj centenáriuma volt 2001-ben Stockholmban, ahol MacDiarmid Nobel-díjasként vett részt, engem pedig a Királyi Svéd Tudományos Akadémia hívott meg, hogy a centenárium alkalmából előadást tartsak a Nobel-díjról. MacDiarmid az előző évben kapta meg a díjat, két társával együtt, a vezető polimerek felfedezéséért. Elmondta nekem, hogy 2001-ben jobban tudta élvezni az ünnepeket, mint 2000-ben, mert akkor nagyon lekötötték azok az előírások, amelyeket újdonsült díjazottként be kellett tartania. Emlékezett látogatásomra és arra is, hogy foglalkoztam az S–N kötéssel. Munkájában az ilyen kötést tartalmazó (SN)_x makromolekulával került a legközelebb ahhoz a témához, amely később a vezető polimerek felfedezéséhez vezetett.

Ma már senki sem kételkedik a polimerek létezésében, de a 20. század első felében még sok tekintélyes tudós azt vallotta, hogy ilyen nagy molekulák nincsenek, hanem csak kis molekulák aggregátumai, amelyeket kolloid rendszereknek neveznek. A polimerkémikus Hermann Staudingernek

1953-ban odaítélt kémiai Nobel-díj fontos lépés volt a polimerek létezésének elismerésében.

A mesterséges polimerek – népszerű néven műanyagok – már a 20. század elejétől kezdve fontos szerepet játszottak a modern iparban és a mindennapi életben. Amikor a híres amerikai *Time* magazin összeállítást készített a 20. század legfontosabb tudományos kutatóiról, a listán a műanyagok egyetlen képviselőjeként szerepelt Leo H. Baekeland, a bakelit feltalálója. Baekeland Belgiumban született és járt iskolába, majd Amerikába költözött. 1909-ben az Amerikai Kémiai Társaság New York-i kongresszusán jelentette be a kemény, de alakítható műanyag feltalálását. A bakelit volt az első mesterséges polimer. Két vegyületből szintetizálta Baekeland, fenolból és formaldehidből, és ezzel a találmánnyal elindította a műanyagok korát. A bakelit egyik legfontosabb tulajdonsága, hogy kitűnő elektromos szigetelő és ebből következett egyik legfontosabb alkalmazása.

A szintetikus polimerek területén a következő jelentős fejlődés akkor következett be, amikor a német Karl Ziegler újfajta, szerves alumíniumvegyület katalizátorral

■ Hargittai István *Ambíció és kíváncsiság* című könyve 9. fejezetének valamelyest szerkesztett változata.

segítette elő a polimerek előállítását. Az olasz Giulio Natta azt fedezte fel, hogy bizonyos szerves alumíniumvegyületek képesek térbelileg szabályos szerkezetű polimerek előállítását katalizálni. Korábban csak természetes előfordulású térbelileg szabályos szerkezetű polimereket ismertek, például a cellulózt és a gumit, de Natta és Ziegler együtt kapták meg 1963-ban a kémiai Nobel-díjat. Az általuk előállított polimerek továbbra is elektromosan szigetelők voltak.

Az elektromosan vezető tulajdonságú polimerek felfedezését nem köthetjük egyetlen különleges pillanathoz, de volt azért egy különleges kísérlet, amely döntő jelentőségű lett a további fejlemények szempontjából. A japán polimerkémikus, Hideki Shirakawa volt az egyik szereplője ennek a különleges kísérletnek. Shirakawa 1957-ben iratkozott be a Tokiói Műegyetemre, és tanulmányait 1966-ban fejezte be doktori fokozattal. Kutatómunkáját rögtön ezután kezdte el Sakuji Ikeda professzor laboratóriumában. Shirakawa első diákja Takeo Ito volt: ketten együtt tanulmányozták az acetilén-gázból történő polimerképződést. Számos kísérletet végeztek, hogy a lehető legváltozatosabb körülmények között próbálják ki a polimerképződést, és arra is kíváncsiak voltak, milyen tulajdonságú polimereket lehet előállítani a körülmények változtatásával.

A kísérletek egyszerű elven alapultak. Készítettek egy katalizátoroldatot, amelyben valamelyik Ziegler–Natta-katalizátor kis koncentrációban fordult elő, és az oldaton keresztülbuborékolatták az acetilén-gázt. Közben állandóan keverték az oldatot, hogy az anyagok minél egyenletesebben oszoljanak el. Az így előállított poliacetilének – fekete porok – csalódást okoztak: tulajdonságaikat nem volt könnyű meghatározni, és semmilyen használható jellegzetességet nem találtak bennük. Ez nem kellett meglepetést, mert már Natta is készített poliacetilént, és sem ő, sem más vegyészek sem találtak semmiféle alkalmazást ezekre az anyagokra. Ikeda professzor azonban úgy gondolta, hogy érdemes lenne tisztázni a poliacetilén képződési mechanizmusát.

Ikeda részlegében dolgozott egy koreai származású vendégkutató, Hyung Chick Pyun. Már megvolt a doktori fokozata, és Ikeda professzor mellett további tapasztalatokra szeretett volna szert tenni. Ikeda megbízta Shirakawát, hogy közvetlenül irányítsa a vendég munkáját. Shirakawa minden alkalommal megbeszélte dr. Pyun kö-

vetkező kísérletét, amit Pyun el is végzett, és az eredményről beszámolt Shirakawának. Pyun Koreában nőtt fel, de folyékonyan beszélt japánul, mert gyermekkorában Japán megszállás idejére esett. [2] Pyun nyelvtudását azért fontos hangsúlyozni, mert későbbi riportok nyelvi félreértésnek tulajdonították a Pyun által megvalósított különleges kísérlet összeállítását.

A már kialakult szokások szerint az egyik alkalommal Shirakawa megint elmondta, hogy mi legyen a következő kísérlet – ismét poliacetilén előállításáról volt szó valamilyen koncentrációjú katalizátoroldat segítségével –, és Shirakawa azt is közölte, milyen legyen ez a koncentráció. Pyun kötelességtudóan összeállította és elindította a kísérletet, és az acetilén-gázt állandó keverés mellett buborékolattatta át a katalizátoroldaton. A poliacetilén kialakulását szabad szemmel is észlelni lehetett, de a keverés egyre nehezebb lett, és egy ponton le is állt a keverő.

A reakcióelegyben durva szilárd termékdarabok képződtek, de a legmeglepőbb az volt, hogy fémesen csillogtak, pedig nyilvánvaló volt, hogy fémet nem tartalmazhattak a reakcióelegy. Pyun odahívta Shirakawát, és részletesen megbeszéltek a reakció körülményeit. Ekkor derült ki, hogy a kísérlet összeállításánál Pyun nem a Shirakawa által megadott katalizátorkoncentrációt alkalmazta, hanem annak ezerszeresét(!). Shirakawa azóta sem tudja, hogy Pyun értette-e félre az instrukciókat, vagy ő, Shirakawa maga tévedhetett volna ekkorát. Nem került volna sor félreértésre, ha a kísérleti körülményeket írásban közli, de nem így történt, azokat csak megbeszéltek.

A nevezetes kísérletre 1967-ben került sor és bár sok különböző vizsgálattal próbálták megérteni a helyzetet, az anyag

semmi olyan érdekes tulajdonságot nem mutatott – a fémes csillogást kivéve –, ami miatt túlságosan nagy jelentőséget tulajdonítottak volna az esetnek. Publikáltak is néhány dolgot ebben a témában; a dolgozatok szerzői között Ito, Shirakawa és Ikeda nevei fordulnak elő. [3] Pyun neve sehol sem szerepel, még azon a cíken sem, amely a különleges tulajdonságú anyag megjelenését tárgyalja. Hozzá kell azonban tenni, hogy ezek a dolgozatok évekkel a kísérlet után készültek, amikor a vendégkutató feltehetőleg már rég eltávozott, és – amennyire tudom – Shirakawa kapcsolata meg is szakadt vele. A különleges kísérletről meg is felejtkezhetek volna, de két körülmény ezt megakadályozta.

Az egyik az volt, hogy Shirakawát nem hagyta nyugodni a különleges poliacetilén fémes csillogása, és szinte állandóan magával hordozott egy darabot. A másik az amerikai Alan MacDiarmid látogatása volt, aki 1975-ben előadást tartott Shirakawa munkahelyén, a Tokiói Műegyetemen. MacDiarmid főleg szilíciumkémiaiáról beszélt, de szokásához híven megemlítette az aranyhoz hasonlóan csillogó (SN)_x polimert és meg is mutatta a mintát, amelyet annak idején nekem is megmutatott, és amelyet mindig magával vitt, akárhová ment. Az előadás után Shirakawa megmutatta MacDiarmidnak saját ezüstösen csillogó poliacetilén mintáját. A fémes csillogás ebben az esetben – szerves anyagról lévén szó – még meglepőbb volt, mint a szeretlen (SN)_x polimer esetében, és rögtön beindította MacDiarmid fantáziáját. Azon nyomban meghívta Shirakawát egy évre philadelphiai laboratóriumába, a UPennre.

MacDiarmid 1955 óta volt a UPenn munkatársa. Új-Zélandon született és nőtt fel, de doktorátusát az amerikai Wisconsin

Balról jobbra: Alan Heeger, Stockholm, 2001; Alan MacDiarmid, Philadelphia, 2002; Hideki Shirakawa, Stockholm, 2001. HARGITAI ISTVÁN FELVÉTELEI





Egyetemen szerezte meg, majd még egyet az angliai Cambridge-ben. Elismert szerzetlen kémikus lett, akinek kutatásait bőkezűen támogatta az Egyesült Államok Haditengerészeti Kutatási Irodája (Office of Naval Research, ONR). Amikor nevezetes japán utazásáról hazaérkezett, beszélt az ONR képviselőjével, akivel már hosszú évek óta nagyon jó kapcsolatot alakított ki. Az ONR-tól újabb 23 000 dollár támogatást kért, hogy Shirakawa egy évet tölthessen laboratóriumában. Az összeg nem volt nagy, de az ONR képviselője ebben az esetben nem volt túl lelkes, mert MacDiarmid most szerves polimerkémiai kutatásokhoz kért támogatást, és MacDiarmid nem volt polimerkémikus, különösen nem szerves kémikus. Viszont kiváló kutató volt, és a támogatást megkapta.

Shirakawa 1976 szeptemberében érkezett meg egyéves vendégkutatói munkájára Philadelphiába. Shirakawát eredetileg nem érdekelték a poliacetilén elektromos tulajdonságai. Annak idején azonban sok más tulajdonság vizsgálata mellett az elektromos vezetőképességet is megmérték, de semmi különös nem találtak az adatokban. MacDiarmid és Shirakawa most elsősorban azt akarták kideríteni, hogy elő tudnak-e állítani olyan poliacetilént, amelynek az elektromos vezetőképessége megnövelhető. MacDiarmid azért felfigyelt erre a tulajdonságra a behatóbb tanulmányozását, mert a fémes csillogás azt sugallta, hogy itt még lehetnek meglepetések. Mivel a kémikusok mindig igyekeznek tiszta anyagokkal dolgozni, első feladatuknak az anyag tisztítását tekintették. Meglepetésükre a tisztítás eredményeként az elektromos vezetőképesség csökkent. Ebből már logikusan következett, hogy mesterségesen szennyezzék a poliacetilén mintákat, hátha akkor növelhető lesz a vezetőképesség. Ez volt az a lépés, amely elvezetett a felfedezéshez, és ami megkülönbözteti a vezető polimereket a többi polimertől.

Eljutottak egy olyan szennyezésig, amelylyel az elektromos vezetőképességet tízmilliószorosa (!) sikerült megnövelni. A jelenség lényege az, hogy a tiszta poliacetilénben az egymással szigorú rendben váltakozó egyes és kettős kötések nagyon merev elektronrendszert alkotnak. Ezt a merev elektronrendszert a hozzáadott szennyezés, például néhány százaléknyi halogén, fella- zítja. A halogénatomok elektronokat vonnak el az eredetileg merev elektronszerkezetű lánctól, amivel elektronhiány-helyek, lyukak keletkeznek. Ezekbe a lyukakba kerülnek át a szomszédos részekből elektronok és ez az elektronmozgás könnyen vé-

gigiterjedhet a láncon: ettől válik a láncc elektromos vezetővé.

MacDiarmid volt annyira tapasztalt kutató, hogy felismerje, a polimerkémia és a szerves kémia kívül a felfedezett jelenségnek fontos szilárdtest-fizikai vonatkozásai vannak, és ha meg akarják érteni a jelenség mechanizmusát, akkor szükségük lesz fizikus szakember részvételére ezekben a kutatásokban. A UPenn kitűnő fizika intézetének egyik professzorát fel is kérte a munkában való részvételre.

Így lett Alan Heeger, akkor még a UPenn fizikaprofesszora, a háromtagú csapat harmadik tagja. Első megbeszélésükről érdemes külön is megemlékezni, mert tanulságos azzal kapcsolatban, mennyire fontos a különböző tudományterületeken dolgozó szakemberek számára a közös nyelv. Ráadásul a szerzetlen kémia és a kondenzált fázisok fizikája (amelynek a szilárdtestfizika is része) egymáshoz nagyon közel eső két terület. Alan Heeger emlékszik arra, hogy amikor először beszélgettek kutatásaikról, MacDiarmid elmondta neki, mennyire érdekes az „SNX” képletű anyag. [4] MacDiarmid beszélt Heegernek az anyag fémes tulajdonságairól, és azt javasolta, alakítsanak ki közös kutatási tervet az „SNX” további vizsgálataira. Heegert azonban nem érdekelte ez a javaslat, egyszerűen nem tudta felfogni, mi érdekeset remél MacDiarmid az „SNX” további tanulmányozásától, mit lehetne még kideríteni erről az anyagról.

Az, hogy félreértés áldozatai lettek, szerencsére még azon nyomban kiderült, amikor mindketten felírták a táblára azt a képletet, amiről beszéltek. Amikor MacDiarmid az „SNX”-et említette, a poli(kén-nitrid) lánccra gondolt, amelynek képlete $(SN)_x$. Heeger képzeletében viszont, fizikusként, az SNX kifejezés ónatomok végtelen lánccát, vagyis magát az ónfémet jelentette, amit Sn_x képlettel is ki lehet fejezni. Hangzásra $(SN)_x$ és Sn_x ugyanaz, de felírva már nyilvánvaló a különbség. A kezdeti félreértés jó ómen lett a további szoros és eredményes együttműködéshez, amelyben közösen kutatták az elektromosan vezető szerves polimereket. De ez az együttműködés majdnem nem is jött létre, és nem elsősorban az előbb említett félreértés miatt.

Fentebb már utaltunk arra, hogy MacDiarmid már korán felismerte, hogy a vezető polimerek kutatásában szükség lesz egy jól képzett fizikus részvételére is. Első választása azonban nem Heeger volt. [5] Eredetileg egy másik fizikaprofesszort kért fel az együttműködésre, de a velem való beszélgetésben nem árulta el, ki lett volna az illető. Ennek a fizikusnak elmondta – erre

a beszélgetésre nyilvánvalóan MacDiarmid japán utazását és a Shirakawával együtt végzett első philadelphiai kísérleteket követően került sor –, hogy milyen érdekes jelenséggel találkoztak, milyen érdekes anyagokat állítottak elő, és milyen hatalmas mértékben sikerült a szerves polimer vezetőképességét szennyezéssel megnövelni. MacDiarmid azt javasolta kollégájának, dolgozzanak együtt a jelenség értelmezésén. Elképzelhetjük a lelkes MacDiarmid csálódottságát, amikor fizikus kollégája elhárította a javaslatot, és kifejtette, hogy csak valamilyen ismeretlen szennyezésről lehet szó, és elképzelhetetlen, hogy valódi felfedezést tettek. Azt tanácsolta MacDiarmidnak, adja fel, mert csak tudományos tekintélyét veszélyezteti ilyen kétes vállalkozással. Ezután kérte fel MacDiarmid Heegert, aki lelkesen vállalta, hogy részt vegyen a munkában.

Sok év telt el Pyun szerencsés szerencsétlen kísérlete óta, mire az 1970-es évek második felében megjelent a szennyezéssel vezetővé tett szerves polimerről szóló első dolgozat. De a döntő kísérletre Shirakawa Philadelphiába való megérkezését követően szinte azonnal sor került. Nemcsak vaktában végeztek kísérleteket, hanem tudatosan és jól kialakított rendszer szerint változtatták a különböző kísérleti körülményeket és határozták meg a kapott polimerek tulajdonságait. A döntő kísérlet egy keddi napon, 1976. november 23-án játszódott le, amikor brómmal szennyezték a polimert. [6]

Az elektromosan vezető polimerek felfedezése alapvetően fontos felfedezés volt, és azonnal gondolni lehetett az alkalmazásokról. A szennyezési körülmények változtatásával más tulajdonságokat is sikerült befolyásolni, így például az optikai tulajdonságokat. A kezdetben előállított anyagok nem voltak elég stabilisak és nem voltak eléggé megmunkálhatóak. Ezeket a tulajdonságokat mind javítani kellett ahhoz, hogy az alkalmazásokkal elindulhassanak. Az egyéb tulajdonságokat úgy kellett javítani, hogy közben ne rontsák le a legfontosabb tulajdonságot, az elektromos vezetőképességet. A munkában részt vevők elszántak voltak, hogy a lehető legoptimálisabb tulajdonságú anyagokat állítsák elő, és az 1980-as években már teljes siker koronázta próbálkozásait. [7]

Ahogy az anyagok alkalmazhatóak lettek a gyakorlati feladatokra, rögtön felvetődött, mennyire versenyképesek a fémekkel összehasonlítva. Sikerült vezető polimereket előállítani, amelyek rendelkeztek mindazokkal a tulajdonságokkal, amiért fémeket alkalmaznak, de voltak további hasznos



tulajdonságok is, amelyek a polimerek felhasználását sok esetben a fémekénél is előnyösebbé tették. Így például a polimereket lehet oldatban tárolni, akár egy üvegben is. Ha az oldatot elpárologtatják, akkor vezető polimer marad vissza. Erre a fémek nem alkalmasak. A polianilin megfelelő szennyezéssel vezetővé tehető. A vezető polianilint feloldhatják toluolban, és a toluol elpárologtatásával visszamarad a fémes tulajdonságú polianilin. Az ilyen oldatot felhasználhatják tintaként, amelyet a nyomtatásban alkalmazhatnak igen előnyösen. Az efféle tinták egyik különösen fontos alkalmazása a napelemek nyomtatása, amikor nagy területeken kell nyomtatni, és ez a nyomtatás nem költséges. Fényki-bocsátó berendezések és diódák készítéséhez is jól alkalmazhatók a vezető polimerek, hogy elektronikai felhasználásokat is említsünk.

A vezető polimerek nem feltétlenül érik el a legjobb fémek vezetőképességét, például a rézét, de rendelkeznek más hasznos tulajdonságokkal. Nagyon érzékenyek például különböző kémiai kölcsönhatásokra, a szennyezésen túlmenően is. Így például a polianilin elektromos vezetőképessége hat nagyságrenddel csökken ammóniagáz jelenlétében, ezért kiválóan alkalmazható ammóniaszenzorként. Általában elmondhatjuk, hogy a vezető polimerek elektromos vezetőképességének változtathatósága az alkalmazásokat példátlan mértékben kiterjeszti, amire a fémek teljességgel képtelenek.

MacDiarmid és Heeger nem kezdett azonnal hozzá a találmányok szabadalmaztatásához. Például amikor Heeger és munkatársai oldatból állítottak elő filmszerű diódákat, az eljárás annyira egyszerű volt, hogy nem gondoltak szabadalmaztatásra, amit később megbántak. Fokozatosan jöttek rá a szabadalmaztatás előnyeire és szükségességére, s idővel már nemcsak saját találmányaikat szabadalmaztatták, hanem mások találmányainak általuk elvégzett továbbfejlesztéseit is. A kezdetben kevés kutatót foglalkoztató projektek hamarosan hatalmas új területté fejlődtek. Heeger saját lehetőségei is kiterjedtek, és ezt különösen akkor tapasztalta, amikor 1982-ben a UPenn-ről a Kaliforniai Egyetem Santa Barbara-i kampuszára költözött.

Az 1980-as években már százak vettek részt a vezető polimerekkel foglalkozó nemzetközi konferenciákon, az 1990-es években pedig már ezrek. Gomba módra szaporodtak az új vállalatok, köztük volt Heeger saját UNIAX nevű cége, amelyet Heeger és partnerei 2000-ben, nem sokkal a Nobel-díj

bejelentése előtt eladtak. Heeger úgy gondolja, ha egy kicsit vártak volna, sokkal magasabb árat kaphattak volna érte. De a Nobel-díj időzítését senki sem tudta volna megjósolni, bár Heeger már az 1990-es évek elejétől számított rá.

A vezető polimerek felfedezéséért hárman kaptak együtt Nobel-díjat, és valóban mindhármuknak megvolt a maguk szerepe a felfedezésben és abban, hogy a felfedezést sikerre vigyék. Ebben az esetben mind a három lehetséges helyet betöltötték, és senki sem maradt ki a kitüntetésből. Meg kell azonban emlékeznünk a koreai Pyun szerepéről, akinek a részvétele döntő jelentőségű volt a felfedezésben. Az első anyagot az ő kísérlete szolgáltatta, még akkor is, ha Shirakawa útmutatása szerint járt el, vagy éppen Shirakawa útmutatásait értette félre. Elég furcsa ez a történet. Pyun akkor már doktori fokozattal rendelkezett, ami bizonyos kutatási tapasztalatot feltételez. A katalizátorokat rendszerint kis mennyiségben szokták alkalmazni, tehát Pyunnak meg kellett volna lepődnie, ha Shirakawa instrukciója valóban olyan hatalmas koncentrációra vonatkozott, mint ahogy azt Pyun értelmezte. Miért nem kérdezett vissza, hogy jól értette-e?

Más oldalról is megvizsgálhatjuk azonban ezt az esetet. Lehet, hogy Pyun gondolkodás nélkül hajtotta végre Shirakawa utasításait, vagy azt, amit Shirakawa utasításainak vélt. Ez magyarázhatja, hogy miért nem hökkentette meg legalább egy pillanatra a különös utasítás. Az addig már elvégzett kísérletek fényében meg kellett volna lepődnie azon, hogy hirtelen a korábbiaknál nagyságrendekkel nagyobb katalizátorkoncentrációra váltanak. Ez is arra utal, hogy mechanikusan teljesítette az utasításokat. Amikor azután az addigiaktól feltűnően eltérő eredményt kapott, olyan szilárd anyagot, amelyben a keverő már megmoccani sem tudott, nem próbálta megérteni, hogy mi történhetett, pedig ezen a ponton érdekes lett volna azonnal megnézni azt, hogy miben tértek el a kísérlet feltételei a korábbiaktól. Ehelyett csupán annyit tett, hogy kötelességtudóan tájékoztatta megfigyeléséről Shirakawát.

Próbáljuk meg most a történetet más szemszögből is végiggondolni. A lényeg az, hogy ez a vendégkutató előállított egy teljesen új anyagot, csinált valamit, amit előtte senki más. Lehet, hogy ebben a főnökétől kapott útmutatás félreértése játszott szerepet, de a hibát is ő és egyedül ő követte el. És gondoljunk most arra az esetre, hogy mások, máskor, más helyen, esetleg már szintén előállítottak hasonló anyagot, de esetleg

azonnal ki is dobták mint használhatatlant, vagy rájöttek, hogy téves receptet használtak és azért dobták ki a kísérlet eredményét. Pyun nem így járt el, nem dobta ki az anyagot, hanem megmutatta Shirakawanak. Eszünkbe jut a jól ismert példa, amikor Alexander Fleming észlelte, hogy egy penészgomba elfogyasztotta baktériumtenyészetét, amelyet eredetileg további kísérletezésre szánt, és a kézenfekvő reakció az lett volna, hogy kidobja a kárba vesztett tenyészetet és újat készít. Ehelyett nem törődött eredeti céljaival, hanem meg akarta érteni, hogy a penészgomba miért fogyasztotta el a baktériumtenyészetet. Fleming reagálása nyitott utat a penicillin felfedezéséhez (bár ez az út sokkal kevésbé volt gyors és egyenes vonalú, mint ahogy a népszerű irodalom szokta tárgyalni).

Az már Shirakawa érdeme, hogy nemcsak komolyan vette Pyun megfigyelését, hanem ő volt az, aki meg is akarta érteni, hogy mi történt. Az előállított anyag ezüstösen fémes csillogása különösen megragadta a figyelmét, ez tette igazán kíváncsi-vá. Ez a kíváncsiság mozgott benne, amikor magánál tartotta a mintát és meg is mutatta MacDiarmidnak, amikor látta, hogy az amerikai előadónak hasonló tapasztalata volt. Ez a találkozás kezdte mozgatni az eseményeket. De ehhez szükség volt arra, hogy Pyun ne dobja a szemébe a számára nem kívánt kísérleti eredményt, Shirakawát pedig évekig ne hagyja nyugodni a fémes csillogású poliacetilén. Shirakawában nem merült fel az elektromos vezetőképesség vizsgálata, bár az anyag fémes jellege erre ösztönözhetette volna, de gondolatai nem mozdultak el ilyen irányban. Kíváncsisága nem váltott ki további cselekedeteket, de nem is tompult az évek során. Nagyon valószínű, hogy MacDiarmid látogatása nélkül Shirakawa kíváncsisága csak kíváncsiság maradt volna, és az ezüstösen csillogó poliacetilénnel a zsebében ment volna nyugdíjba.

Ezért is lenne helytelen az amerikaiakat azzal vádolni, hogy kihasználták ezt az egészen különleges japán felfedezést, mert beavatkozásuk nélkül nagyon valószínű, hogy semmi további nem történt volna. Hozzátehetjük még, hogy az egyébként visszafogott természetű Shirakawából az váltotta ki, hogy megmutassa MacDiarmidnak saját fémes szerves polimerjét, hogy az előadás során az amerikai kutató bemutatta az arany színben szintén fémesen csillogó szerves polimerjét. Tette ezt MacDiarmid annak elenére, hogy előadása nem kén-nitrogén rendszerekről, hanem a szilíciumkémiairól szólt. Ha MacDiarmid nem jön elő a saját fémes mintájával, nagyon valószínű, hogy



nem jön létre kettejük találkozására. Ugyan-így, ha Pyun nem állítja elő a furcsa szerves polimert, megint csak nem lett volna MacDiarmid–Shirakawa-találkozás. Afelől nem lehet kétségünk, hogy előbb vagy utóbb, esetleg sokkal később, valaki felfedezte volna az elektromosan vezető szerves polimereket, de a koreai vendégkutató bármilyen okból összeállított képtelen kísérlete nélkül ebben MacDiarmid és Shirakawa nem játszott volna szerepet, Heegerről nem is beszélve.

A fentiek fényében mindenképpen veszteség, hogy Pyun nyomtalanul eltűnt a színről, mert érdekes lett volna legalább utólag megkérdezni tőle, hogyan vélekedik az esetről (megpróbáltam a nyomára jutni, de sikertelenül). Már láttuk, hogy a három japán szerző mellett Pyun neve nem szerepelt azon a cikkben, amelyben szóltak a szóban forgó kísérletekről. Shirakawa Nobel-előadásában sem beszélt róla, és Pyun kísérletét csak úgy emlegette, mint „a véletlen 1967-es hiba”, viszont a köszönetnyilvánításokban megjelenik Hyung Chick Pyun neve azzal a megjegyzéssel, hogy „[Shirakawa] vele együtt fedezte fel a poliacetilén filmet a véletlen hiba következményeként”. [8]

Shirakawa érdeme elsősorban abban nyilvánult meg, hogy foglalkozott a poliacetilén előállításával és felfigyelt a fémes csillóságra. Fontos volt az a bátorság is, amellyel odament a híres amerikai vendéghez és megmutatta a poliacetilén mintát. Amikor pedig MacDiarmid Philadelphiába hozta, keményen dolgozott az anyag tulajdonságainak felderítésén és a tulajdonságok megváltoztatásán, de ez a munka már nem jelentett eredeti felfedezést.

MacDiarmidot szenvedélyesen érdekelték a szerves polimerek, szeretett játszani az anyagokkal, és változtatni a tulajdonságikon, ami igazi kémikusi hozzáállás, és ehhez tartozott az is, hogy nyitott szemmel járta a világot. De ez mind nem vezetett volna a felfedezéshez, ha a japán kutatók nem állítják elő szokatlan anyagukat. Legfőbb érdeme az volt, hogy amikor az alkalom kínálkozott, észrevette és megragadta. Egy percig sem habozott, amikor meghívta Shirakawát Philadelphiába, pedig nem lehetett biztos abban, hogy lesz-e pénze az ösztöndíjra. Ebben kockáztatott, és még inkább abban, hogy egy másik területen már megállapodott kutatóként belevetette magát egy új területbe. Tette ezt úgy, hogy nem is egyszer figyelmeztették arra, milyen veszélyekkel járhat vállalkozása. Kész volt a kockázatra, kész volt a felfedezésre, és nem tördött azzal, hogy elveszíheti több évtize-

des kemény munkával kivívott tekintélyét. A kockázatvállalás nélkül MacDiarmid tiszteletben fejezte volna be pályáját, egy fontos egyetem megbecsült professzoraként, de semmi igazán különleges nem történt volna vele.

MacDiarmidnak csak a lelkesedése volt nagyobb energiájánál. Már jócskán elmúlt 70 éves, amikor megkapta a Nobel-díjat. Már nem volt teljesen egészséges, de a programja nem lehetett volna zsúfoltabb. Szinte egy pillanatra sem állt meg kutatásaival, miközben meg kellett felelnie mindazoknak az elvárásoknak, amelyeket ilyenkor a friss Nobel-díjasokkal szemben támasztanak. Igyekezett úgy dolgozni, hogy munkatársai és diákjai ne szenvedjék meg fokozott elfoglaltságát. Mégis előfordult, hogy nehezebb volt vele konzultálni, mint korábban. Amikor egy német posztdoktor munkatársa nem tudott vele olyan könnyen találkozni, mint szeretett volna, a posztdoktor így fakadt ki: „Ez a Nobel-díj nem is jöhetett volna szerencsétlenebb időben”. [9] Természetesen a posztdoktornak ez a megjegyzése saját szempontjára vonatkozott, azonban MacDiarmid szempontjából a Nobel-díj egy kicsit későn érkezett, és MacDiarmid már nem tudta teljességgel kihasználni azokat a lehetőségeket, amelyeket ez a különleges kitüntetés nyújtott számára. Egészsége nem tudott lépést tartani terveinek intenzitásával és elképzeléseinek gazdagságával. Életének programokkal legzsúfoltabb időszakában halt meg.

A fizikus Alan Heegert egész pályája során érdekelte a fizika és a kémia közötti határterület. Esetében is igaz, hogy szép pályát futott volna be akkor is, ha MacDiarmid nem vonja be a vezető polimerek témájába, de semmi igazán különlegeset. Attól kezdve azonban, hogy belekerült ebbe a projektbe, a fejlesztések oroszlánrésze neki jutott, bár láttuk, milyen véletlenes múlt, hogy egyáltalán résztvevő lett. MacDiarmid csak akkor fordult hozzá, amikor az elsőnek megkeresett fizikus elhárította felkérését. Heeger viszont szinte ugrásra készen állt, amikor MacDiarmid hozzáfordult.

Utólag nehéz megállapítani, hogy Heeger mennyire volt elfoglalt, mielőtt MacDiarmid megkereste. Ha valami nagyon izgalmas témán dolgozott volna, valószínűleg nehezebben állt volna kötélnek, hogy szinte egyik pillanatról a másikra témát váltson. MacDiarmid nélkül mindez nem történt volna meg, de miután Heeger bekapcsolódott, rengeteget dolgozott a felfedezés sikéréért. Mivel pedig a felfedezés sikere óriási mértékben függött az alkalmazásoktól, előnyös volt Heeger széles körű tájékozottsága,

később pedig a vállalkozások iránti kiváló érzelme.

Ha hármójuk részvételét összehasonlítjuk, MacDiarmidét ítélnék kulcsfontosságúnak. A másik két kutató részvételét MacDiarmid kezdeményezte (ehhez persze előfeltétel volt a japán kísérlet és Shirakawa kitartása). Az életkorbeli különbség Heeger javára szól, de Shirakawa is ugyanannyival volt fiatalabb MacDiarmidnál, mint Heeger, viszont már a Nobel-díjat megelőző időben nyugdíjba vonult, és ebből a Nobel-díj sem mozdította ki, míg a két amerikai tevékenységét a kitüntetés tovább fokozta. Shirakawa pályája volt valószínűleg a legszűkebb hármójuké közül, bár fontos előrelépést jelentett, amikor 1979-ben az elsősorban kutatóegyetemként működő Tsukuba Egyetem professzora lett. A Nobel-díj után azonnal megkapta a legmagasabb japán kitüntéseket.

A Nobel-díj bejelentésekor egyik díjazott sem volt hazája nemzeti akadémiajának tagja. Heegert 2001-ben, MacDiarmidot 2002-ben választották meg. Sok más kitüntetéssel is elhalmozták őket, de a Nobel-díj előtt is voltak már jelentős elismeréseik. Heeger azóta rendkívül aktív, hogy csatlakozott a projekthez. MacDiarmid ereje és aktivitása egészségi állapotának fényében különösen elismerésre méltó volt abban a viszonylag rövid időszakban, ami számára még a Nobel-díj után következett. Éppen újabb utazásra készült Új-Zélandra, amikor elragadta a halál. Akkor ment el, amikor a legjobban élvezte az életet, de nagyon valószínű, hogy életszeretete tartotta még életben a Nobel-díj után egy ideig. ●●●

Köszönettel tartozom Inzelt Györgynek a fejezet eredeti változatának kialakítását segítő megjegyzéséért.

IRODALOM

- [1] Balazs Hargittai, István Hargittai, *Candid Science V: Conversations with Famous Scientists*, Imperial College Press, London, 2005. 400–409. („Alan G. MacDiarmid”), az aktuális idézet: 409. p.
- [2] Hideki Shirakawa magánközlése e-mailban, 2002. április 30.
- [3] Takeo Ito, Hideki Shirakawa, Sakuji Ikeda, „Simultaneous polymerization and formation of polyacetylene film on the surface of concentrated soluble Ziegler-type catalyst solution.” *Journal of Polymer Science: Polymer Chemistry Edition* (1974) 12 (1), 11–20.
- [4] Hargittai and Hargittai, *Candid Science V*, 410–427. („Alan J. Heeger”), az aktuális idézet: 419. p.
- [5] *Ibid.*, 405. p.
- [6] Hideki Shirakawa, „The Discovery of Polyacetylene Film: The Dawning of an Era of Conducting Polymers.” *Les Prix Nobel: The Nobel Prizes 2000*, Almqvist & Wiksell International, Stockholm, 2001. 217–226.; az aktuális idézet: 225. p.
- [7] Hargittai and Hargittai, *Candid Science V*, 415–416.
- [8] Shirakawa, „The Discovery of Polyacetylene Film: The Dawning of an Era of Conducting Polymers.”
- [9] Balazs Hargittai, István Hargittai, *Candid Science V: 400–409* („Alan G. MacDiarmid”), az aktuális idézet: 419. p.