

Wigner 115

Előszó

Az Európai Tudományos Újságíró Szervezetek Szövetségének (EUSJA) egyik éves összejövetele után, a fehér asztal melletti beszélgetésen történt, hogy egy kolléga felvetette: keressen ki-ki olyan kutatót a saját hazája tudománytörténetéből, aki személyében szimbolizálhatja az adott ország természettudományos eredményeit, hozzáadott értékét az – akkor éppen az ezredfordulót vártuk – aktuális egyetemes műveltséghez.

Mindenki rögtön mély hallgatásba és ezzel együtt lázas gondolkodásba kezdett. A feladat nehéznek bizonyult. Kinek a szemszögéből tekintünk hirtelen több évszázad felhalmozott tudására? Magyarország esetében a XXI. században használatos magyar tankönyvek ismeretanyaga felől? Ami mindenki számára többé-kevésbé ismert tudáskincsnek tekinthető? Vagy keressük

a leginkább újító elméket? Soroljuk a Nobel-díjasokat? Vagy ellenkezőleg: a méltatlanul mellőzötteket?

Senki sem akart elsőként megszólalni a tudományos újságírók – amúgy máskor meglehetősen közlékeny – köréből. Bevallom, én sem siettem az élre. De akkor egy, ha jól emlékszem, német kol-



léga kéretlenül is segítségemre sietett: „Ja, a magyaroknak könnyű, nekik van Wignerük!” (Nem felejttem azóta sem szó szerinti, bár nem a legválasztékosabb angol felkiáltását: *It's easy for you, Hungarians, you have your Wigner...*)

Wigner? Miért éppen Wigner? – csodálkoztam magamban. A lassan azért csak beinduló szellemi játék után meg is kérdeztem tőle. Azt felelte mosolyogva: „Wigner annyi tudományterülettel foglalkozott, hogy önmagában megtölt nektek egy egész lexikont...”

Ha egy teljes kézikönyvre nem is, egy tematikus szám szerkesztésére ezúttal mi is vállalkoztunk Wigner Jenő születésének 115. évfordulója alkalmából, a Tudományünnep hónapjában, az MTA Wigner Kutatóközpont szellemi segítségével, a Magyar Tudományos Akadémián a tudós születésnapján, november 17-én rendezendő tanácskozási programjához kapcsolódva, amelyben éppen a kutatói pálya e sokszínűségét, megannyi lehetséges hatását szeretnénk felvillantani.

GÓZON ÁKOS

SÓLYOM JENŐ

Wigner Jenő, a modern szilárdtest-fizika egyik elindítója

Meglepőnek tűnhet a címben megfogalmazott állítás, hiszen Wignerre sokkal inkább magfizikusként, a reaktorfizika egyik atyjaként, a szimmetriának a fizikában játszott döntő szerepe egyik szószólójaként gondolunk. Az 1930-as évek második felétől Wigner valóban főként magfizikával foglalkozott, a háború alatt és közvetlenül utána a világ első „reaktormérnökeként” ő tervezte az első működő atomreaktorokat, 1963-ban a Nobel-díjat „az atommagok és az elemi részecskék elméletének továbbfejlesztéséért, különös tekintettel az alapvető szimmetriaelvek felfedezéséért és alkalmazásáért” kapta. Mégis, amint látni fogjuk, joggal tekinthetünk rá úgy is, mint aki közvetlen munkatársaival a modern szilárdtest-fizika egyik megalapozója volt.



A fiatal Wigner

Wigner 1930-ban ment Németországból Amerikába, Princetonba. A meghívás érdekessége, hogy a princetoni egyetem eredetileg Neumann Jánost kívánta teljes állásban alkalmazni, de Neumann javaslatára az állást megosztották közte és Wigner között. Egyéves előadói felkérés után további öt évre kapott vendégelőadói megbízást, de változatlanul csak félállásban. Idejének felét tehát máshol – részben Magyarországon – töltötte. 1932 és 1936 között mégis kialakult körülötte egy csoport Princetonban, mely irányításával nagyban hozzájárult a modern szemléletű szilárdtest-fizikához.

A múlt század harmincas éveinek elejére világossá vált, hogy a kvantummechanika segítségével megbízható pontossággal, a kísérletekkel egyezésben le lehet írni az atomok és az egyszerű molekulák állapotát, az energiaszintjeik közötti átmenete-

ket, vagyis a megfigyelhető spektrumokat. Természetesen kínálkozott az ötlet a folytatásra: a szilárd testek tulajdonságainak hasonló, a kvantummechanikán nyugvó tárgyalását kell adni.

A szilárd testeket összetartó erők részben már ismertek voltak. Az ionkristályok, például a kősó (nátrium-klorid) szerkezetének megértéséhez elég annyit tudni, hogy a periódusos rendszer első oszlopában lévő alkálifémek atomjai könnyen leadnak egy elektront, az utolsó előtti oszlopban lévő halogének pedig könnyen felveszik azt, mivel így minden elektron lezárt héjba kerül. Az így létrejövő pozitív és negatív töltésű, térben váltakozva elhelyezkedő ionok közötti Coulomb-kölcsönhatás eredményezi a stabilis szerkezetet. Ennek alapján az ionkristályok kötési energiája is meghatározható.

Az is ismert volt, hogy más mechanizmussal, de ugyancsak a külső elektronhéjakon lévő elektronok biztosítják a kötést a periódusos rendszer közepén lévő, azonos típusú atomokból felépülő – felvesztető, illetve szigetelő – kristályos szilíciumban, germániumban és gyémántban. A külső elektronok a szomszédos atomok között helyezkedve el, irányított, ún. kovalens kötést hoznak létre, hasonlóan ahhoz, ahogy két hidrogénatom elektronjaik révén H_2 -molekulává kötődik össze. Ilyen mechanizmussal lehetett a kvantummechanika segítségével megérteni a vegyületek jelentős részében a kémiai kötést, ahogy azt *Linus Pauling* az 1933-ban megjelent *The Nature of the Chemical Bond* című cikkében megmutatta. Ezek az egyszerű fizikai képen alapuló megfontolások azonban nem magyarázták meg, hogy milyen erők tartják össze a fémeket, amelyekben az elektronok nem az ionok zárt elektronfelhőiben, nem is az atomok közötti kovalens kötésben helyezkednek el, hanem viszonylag szabadon mozognak, ezzel téve lehetővé a fémes vezetést.

A fémek első kvantummechanikán alapuló modellje már 1927-ben megszületett. Az ionokat homogén pozitív háttérként kezelve, amely éppen semlegesíti az elektronok töltését, a fémek tulajdonságokért felelős elektronok rendszerét *A. Sommerfeld* úgy tárgyalta, mint töltés nélküli szabad részecskék gázát. Ezzel megkerülte a fémes kötés kérdését, de a fémek néhány tulajdonságát jól meg tudta magyarázni. Azt csak jóval később, *L. D. Landau* munkássága révén értettük meg, hogy ez a látszólag durva közelítés, az elektronok közötti Coulomb-kölcsönhatás elhanyagolása, miért ad az egyszerű fémekre viszonylag jó eredményeket.

Az elektronok közötti kölcsönhatásról azonban általában nem feledkezhetünk el. *D. R. Hartree* egy 1929-ben megjelent



Az első doktorandusz,
Frederick Seitz

munkájában megmutatta, hogy azt leegyszerűbben úgy vehetjük figyelembe, hogy a többi, mozgó elektron hatását egy átlagos potenciállal helyettesítjük. Ezen javított egy évvel később *V. Fock*, aki a kvantummechanikai részecskék megkülönböztethetlenségéből adódó, az azonos állású spinű elektronok között fellépő kicserélődési kölcsönhatás kezelésére javasolt módszert. Ezek segítségével már egyszerű magyarázatot lehetett adni a fémes kötésre, és – legalábbis egyszerű fémek esetén – kvantitatívan is majdnem jó értékeket a kötési energiára.

Wigner érezte, hogy bármilyen komoly számoláshoz túl kell lépni a fenti közelítésen. Egyrészt realisztikusabb potenciált kell használni az ionokra, másrészt szükség van az elektronok közötti dinamikus korrelációk pontosabb figyelembevételére. A Wigner által bevezetett szóhasználatnak megfelelően ma is minden járulékot, amely túlmegy a Hartree–Fock-közelítésen, korrelációs energiának nevezünk. Ennek a problémának, a fémes kötésnek a pontosabb tárgyalására vállalkozott első doktoranduszával, *Frederick Seitz*cel.

Frederick Seitz (1911–2008) stanfordi diákként ismerkedett meg *Edward Condon*nal, aki akkor ott vendégelőadó volt. Ő javasolta neki, hogy Princetonban folytassa tanulmányait. 1932-ben, amikor Seitz Princetonba érkezett, Condon is ott volt, és *George Shortley*-val éppen a *The Theory of Atomic Spectra* című könyvükön dolgoztak. Elfoglaltsága miatt rábeszélte Seitzet, hogy Wigner diákjaként a kristályos anyag kvantumelméletével foglalkozzon. Ebből születtek meg Wigner ötlete nyomán az egyik legegyszerűbb fém, a nátrium kötési energiáját tárgyaló

cikkeik 1933-ban és 1934-ben. Ezekben az elektronállapotok energiája meghatározására egy új módszert vezettek be, a ma Wigner–Seitz-módszerként ismert cellamódszert.

Ennek lényege az, hogy a kristályok diszkrét transzlációs szimmetriája – a rácsállandó többszöröseinek megfelelő eltolással szembeni invarianciája – miatt a hullámfüggvényre vonatkozó Schrödinger-egyenletet elegendő a kristály egyetlen elemi cellájában megoldani. Az egész kristályra érvényes megoldást és a megfelelő energiaértékeket úgy kaphatjuk meg, hogy kihasználjuk az elektronállapotok hullámfüggvényére vonatkozó, az eltolási szimmetriából adódó határfeltételt az elemi cella áttelenséges oldalainál. Ezt könnyű kimondani, a gyakorlati kivitelezés azonban rendkívül nehéz. A munka egyik lényeges eleme az volt, hogy a szokásos elemi cella helyett a kristály szimmetriáihoz jobban illeszkedő, az atomokra centrált cellákat (Wigner–Seitz-cella) használtak, amelyek majdnem gömbszerűek, s ezért a pontosság feladása nélkül a számolás lényegesen tovább egyszerűsíthető gömb alakú cellákkal. A másik az volt, hogy a szabad ionokra egy realisztikus, az atomfizikából vett $V(r)$ potenciált használtak. Végül újdonság volt, hogy a Hartree–Fock-közelítésen túllépve, a korrelációs effektusokat is vizsgálták.

Érdekes módon Seitz nem ezzel a munkával, hanem a kristályok minden szimmetriáját tartalmazó tércsoportokkal kapcsolatos dolgozatával szerezte meg 1934-ben a PhD-t. Egyéves posztdoktori tartózkodás után hagyta el Princetont, de nem hagyta el az anyagudományt, a szilárdtest-fizikát. Rochesterbe kerülve határozta el, hogy összefoglaló könyvet ír, amelyben szándéka szerint a szilárd testekben megfigyelhető sokféle jelenség egységes, koherens tárgyalását adja. Így született meg az 1940-ben megjelent *The Modern Theory of Solids* című könyve. Ennek egyik nagy érdeme az volt, hogy felhívta a diákok figyelmét, különösen a háború utáni időben, amikor már nem az atombomba készítése volt a fizikusok legsürgetőbb feladata, hogy egy új tudományterület született, ahol rengeteg izgalmas kérdés vár megoldásra.

Seitz ezután több egyetemen, illetve kutatóintézetben dolgozott, leghosszabban Illinois állam Urbanában lévő egyetemén, létrehozva ott az Anyagudományi Kutatólaboratóriumot. Amikor az ötvenes évek elején azt tapasztalta, hogy a szilárdtestfizika rengeteg olyan eredményt hozott, amelyeket már nem lehet egyetlen könyvbe foglalni, *David Turnbull* elindította a *Solid State Physics: Advances in Research and Applications* sorozatot. Eredetileg hat

kötetben akarták bemutatni a szilárdtest-fizika új eredményeit, de azután ebből egy sikeres könyvsorozat nőtt ki.

Visszatérve Wignerre, a fémek kohéziós energiájának számolásából született az 1934-ben önállóan írt cikke és a Wigner-kristály ötlete. A fémek kötéséről alkotott képünk szerint a kötést az elektronok kinetikus energiájának és a kölcsönhatásnak a versengése alakítja ki. A fémekre jellemző elektronsűrűségeknél mindkét tag azonos nagyságrendű járulékat ad a teljes energiához. Más a helyzet, ha változtatni tudjuk az elektronok sűrűségét. Belátható, hogy a sűrűség csökkentésekor a kinetikus energia gyorsabban csökken, mint a kölcsönhatásból adódó járulék, és extrém kis sűrűségeknél akár elhanyagolhatóvá is válik. Ilyenkor az elektronok térben lokalizálódhatnak a Coulomb-kölcsönhatás által megszabott szerkezetben. Mivel az elektronok egymást taszítják, minél távolabbra kell kerülniük egymástól. Rögzített elektronszám mellett ez egy szabályos kristályos szerkezetben lehetséges. Ez a Wigner-kristály.

A számolások szerint ez a kristályosodás olyan ritka elektrongázban valósulhatna meg, amilyenlél fémekben nem találunk. Hosszú kísérletezés után sikerült elektronok hélium felületére felvitt rétegében kimutatni a létezését. Könnyebb a feltevéteket teljesíteni félvezetőkben, ahol a nagy dielektromos állandó miatt gyengébb a Coulomb-taszítás, és a rács periodikus potenciáljában az elektronok úgy mozognak, mintha kisebb lenne a tehetetlenségük, az effektív tömegük. Még egyszerűbb a helyzet nagy mágneses térben, ahol a mágneses tér is korlátozza az elektronok pályájának kiterjedését. Egyre több kísérlet mutat arra, hogy félvezető szerkezetek felületi rétegében, ahol az elektronsűrűség könnyen szabályozható, erős mágneses térben sikerült az elektronokat kristályos szerkezetbe lokalizálni. Ugyanakkor ez egy sor új kérdést is felvet, mert erős mágneses térben a kölcsönható elektronoknak létezik egy másfajta, folyadékjellegű, különleges tulajdonságokat mutató állapota is. Azt, hogy a kettő közül melyik valósul meg, a külső körülmények finomhangolásával lehet szabályozni. A kétféle állapot versengése különösen izgalmassá tette, és az utóbbi években sok kutató érdeklődésének középpontjába emelte Wignernek ezt a jóslatát.

A cikk magyar vonatkozású érdekessége a 9. és 10. lábjegyzet, amelyek azt mutatják, hogy akkor milyen szoros volt Wigner kapcsolata Magyarországgal. A 9. lábjegyzet szerint a numerikus munka legnagyobb részét „Dr. M. Vermes of Budapest” végezte, vagyis *Vermes Miklós*, aki akkor a fásori evangélikus gimnázium –

Wigner egykori iskolája – tanára volt. A 10. pedig arra utal, hogy a munka folytatása a Magyar Tudományos Akadémia kiadványában fog megjelenni. Ez később valószínűleg elmaradt.

Wigner második princetoni doktorandusza *John Bardeen* (1908–1991) lett, aki villamosmérnöki végzettséggel a Gulf Oil Corporationnál dolgozott geofizikusként. Ez azonban nem elégítette ki, s ezért 1933-ban beiratkozott Princetonba, hogy matematikát és fizikát tanuljon. Wignerhez került diákként, aki azt a feladatot adta neki, hogy számítsa ki az egyszerű fémek kilépési munkáját, vagyis azt az energiát, ami ahhoz szükséges, hogy egy elektront eltávolítsunk a fémből. Egy közös cikkük jelent meg, amelyben első lépésként az elektron állapotának a felület közelében bekövetkező torzulása elhanyagolásával, de az elektronok közötti korrelációk figyelembevételével határozták meg a kilépési munkát. A felületi réteg hatását később Bardeen egy önálló munkában vizsgálta.

Bardeen 1936-ban szerezte meg a PhD-t. A Harvardra került, és ott kezdett el foglalkozni az elektronok és a rács rezgéseit megszabó elemi gerjesztések, a fononok kölcsönhatásával, amihez élete folyamán később többször is visszatért. 1945-től a *Bell* kutatólaboratóriumában dolgozott, majd 1951-ben Urbanába hívták, ahol akkor Seitz is tevékenykedett. Munkásságának, a szilárd testek fizikájá-



A második doktorandusz,
John Bardeen

hoz való hozzájárulásának a részletezésére nincs szükség, hiszen ő nemcsak az egyik legeredményesebb szilárdtest-fizikus, de az egyik legismertebb is. Az egyetlen, aki két Nobel-díjat is kapott fizikából. Egyet

1956-ban *Walter Brattain*mal és *William Shockley*-val megosztva a tranzisztor felfedezésében játszott szerepéért, a másikat 1972-ben *J. Robert Schrieffer*-rel és *Leon N. Cooper*rel megosztva a szupravezetés elméletének kidolgozásáért.

Mielőtt rátérnénk Wigner harmadik doktoranduszára, célszerű egy posztdoktori munkatársáról és közös munkájukról szólni. A lengyel származású *Roman Smoluchowski* (1910–1996), aki 1935-ben Groningenben szerezte meg a doktorátust, 1935–36-ban egy évig posztdokként dolgozott Princetonban Wignerrel. A szimmetriák szerepének vizsgálata mindig kedvenc témája volt Wignernek. Éppen Amerikába érkezése idején jelent meg híres könyve a csoportelméletnek a fizikában, elsősorban az atomfizikában, az atomi spektrumok kvantummechanikájában való alkalmazásáról. A kristályos anyagok esetén a translációs szimmetria különös szerepet játszik. Ez teszi lehetővé, hogy az elektronok állapotát vagy a rács rezgési módusait hullámszámokkal jellemezzük, és diszperziós görbékkel szemléltessük. Az elektronok lehetséges energiaszintjeinek, az ún. sáv szerkezetnek a meghatározása a szilárdtest-fizika egyik nehéz, nagy számolási igényű feladata. Ennek megoldására az első komoly próbálkozás éppen a Wigner–Seitz-módszer volt. A kapott energiaértékekben sok egybeesést, ún. degenerációt tapasztaltak. Wigner Smoluchowskival és egy további munkatársukkal, *L. P. Boukaert*tel azt vizsgálta, hogy ezek az egybeesések mikor véletlenek, vagyis a közelítésből vagy a potenciál speciális megválasztásából adódnak, és mikor szükségszerűek, vagyis a kristály szimmetriájának a következményei. Ma is az általuk bevezetett, a csoportelmélet alapján történt osztályozást használjuk az állapotok jelölésére.

Smoluchowski hazament Lengyelországba, ahol a varsói egyetem fizikai intézetének vezetője lett, de a háború kitörésekor elmenekült. Miután kalandos úton visszakertült Amerikába, Wigner maga mellé vette Princetonba, ahol később a szilárdtest-fizikai és anyagtudományi program vezetője lett. Ő volt az Amerikai Fizikai Társaság Kondenzált anyagok divíziója első elnöke.

Wigner harmadik doktorandusza *William Conyers Herring* (1914–2009) volt. A Caltechről került 1934-ben Princetonba, és elsősorban az asztrofizika érdekelte. Itt ismerkedett meg a szilárdtest-fizikával, és lett egy évvel később Wigner diákja. 1937-ben írt cikkeiben, amelyekért a PhD-t megkapta, Wigner neve csak a köszönetnyilvánításban jelenik meg, mint aki a témát javasolta. Ez pedig a Boukaert–Smoluchowski–Wigner-cikkben tárgyalt

probléma – a véletlen vagy szükségszerű degenerációk megjelenése a sáv szerkezetben – folytatása volt. Egyrészt azt vizsgálta, hogy az időtükrözési szimmetria milyen következményekkel jár az elektron-állapotok sáv szerkezetére, másrészt azt, hogy a véletlenül vagy szükségszerűen degenerált állapotok közelében hogyan viselkednek az energiaszintek.

A PhD megszerzése után Herring előbb az Massachusetts Institute of Technologyba került, majd a háború után a Bell Laboratóriumba, ahol létrehozta az elméleti csoportot. Végül 1978-ban Stanfordban az alkalmazott fizika professzora lett. Hozzá köthető az OPW-módszer, az ortogonális síkhullámok módszere megalkotása, ami jelentősen megkönnyítette a sáv szerkezet meghatározását. Igen jelentős volt a hozzájárulása a felületfizikához, a félvezetők transzporttulajdonságainak és a szilárd testek kollektív gerjesztéseinek megértéséhez.

A következő munkatárs *Hillard Bell Huntington* (1910–1992). 1941-ben szerezte meg a PhD-t, így talán nem Wigner volt a témavezetője, de 1935-ben együtt dolgoztak. Akkor írt cikkükben azt vizsgálták, hogy létezhet-e a hidrogénnek fémes módosulata. Tudjuk, hogy elég alacsony hőmérsékleten a hélium kivételével minden anyag megszilárdul. A hidrogén ugyan könnyebb a héliumnál, ezért a



A harmadik doktorandusz,
Conyers Herring

kvantumfluktuációk, amelyek héliumban megakadályozzák a megfagyást, nagyobbak lehetnének a könnyebb atomokból álló hidrogénben, de a hidrogénatomok között a kölcsönhatás erősebb, mint a lezárt héjú hélium esetén, s ez megváltoztatja a feltételeket. Ha a szilárd fázisban hidrogénatomok ülnének egy egyszerű kristály rácspontjain, az szükségszerűen fém lenne. Valójában hidrogénmolekulák alkotnak rácsot, az pedig szigetelő lesz. Wigner és Huntington azt vizsgálta, hogy milyen nyomás esetén lehetne a fémes módosulat energiája alacsonyabb a molekulakristályénál. Számolásai szerint óriási, legalább 25 gigapascal (negyed millió atmoszféra) nyomásra lenne szükség ehhez. Ez a kérdés később is sokakat izgatott. Egy friss, 2016 őszi bejelentés szerint rendkívül nagy, 500 GPa nyomásnál sikerült fémes szilárd hidrogént előállítani, de a tudományos közönség erős fenntartással fogadta a hírt. Huntington később úttörő munkát végzett az elektromigráció területén, ami az integrált áramkörök technológiájában alapvető szerepet kapott.

Végül ugyancsak posztdokként dolgozott együtt Wignerrel *Gregory Hugh Wannier* (1911–1983). 1935-ben szerezte meg a doktorátust Baselen *Ernst Stueckelberg* vezetése alatt. 1936–37-ben csereprogram keretében egy évet töltött Princetonban. Megérkezésekor Wignert már jobban érdekelte a magfizika, de Wannier inkább a szilárd testek fizikáján kívánt dolgozni. Wigner a következő problémát javasolta. Kísérletekből ismeretes volt, hogy a szigetelő alkálihalogénidek optikai spektrumában van egy éles, erős abszorpcióra utaló ultraibó-

lya vonal. Ezt a *J. Frenkel* által adott atomi képből jól meg lehetett érteni, feltételezve, hogy az erős abszorpció akkor lép fel, amikor egy elektron a halogénionról átugrik az alkáliionra. Ez azonban ellenében látszott lenni a képpel, amely szerint az elektronállapotok szigetelőkkben is kiterjedtek. Wannier az 1937-ben megjelent cikkében megmutatta, hogy a kristályos anyag elektronállapotait a kiterjedt Bloch-függvényekkel történő leírással teljesen ekvivalens módon másfajta, térben lokalizált, az atomi állapotokhoz hasonló hullámfüggvénnyel is lehet tárgyalni. Ezeket nevezzük ma Wannier-függvényeknek. Ezek segítségével pedig azt is megmutatta, hogy az elektronok közötti kölcsönhatás szigetelőkkben újfajta állapotot, egy ún. excitonnívót hoz létre a vezetési és a vegyértékkötési sáv között, az egyszerű sávképből tiltott tartományon belül. Ezt úgy lehet elképzelni, hogy a vegyértékkötési sávból felgerjesztett elektron nem a vezetési sávba kerül, hanem a hátrahagyott lyukkal kötött állapotot alkot. Ezeknek az excitonnívóknak a létezése magyarázatot ad a megfigyelt abszorpcióra. A cikket Wannier egyedül írta, de a végén köszönetet mondott Wignernek a probléma felvetéséért.

Wannier Amerikában maradt a posztdoktori időszak után. Egy ideig a Bell Laboratóriumban dolgozott, majd az oregoni egyetemre került. Igen jelentős volt a hozzájárulása a szilárdtest-fizika sok területéhez.

Wigner, mivel nem véglegesítették, 1936-ban egy időre elhagyta Princetont. Madisonban, a wisconsini egyetemen kapott állást. Két év múlva tért vissza, amikor már végleges, teljes professzori állást ajánlottak neki. Ekkor egy cikk erejéig visszatért a szilárdtest-fizikához, az elektronok közötti kölcsönhatásnak a fémekben játszott szerepéhez is. A későbbiekben már nem találkozunk ilyen tárgyú cikkekkel. De a szilárdtest-fizikai témákban a harmincas évek derekán írt hét cikke és tanítványai, elsősorban első három doktorandusza, Frederick Seitz, John Bardeen és Conyers Herring – akiket ő vezetett be a szilárdtest-fizika kutatásába, az ott alkalmazandó modern módszerekbe – akkori és későbbi munkássága egyértelműen a modern szilárdtest-fizika atyjai közé emeli Wignert.

Irodalom

Out of the Crystal Maze, Chapters from the History of Solid-State Physics, Edited by Lillian Hoddeson, Ernest Braun, Jürgen Teichmann, Spencer Wear, Oxford University Press, New York, Oxford, 1992.

Wigner Jenő szilárdtest-fizikai tárgyú cikkei

- E. Wigner and F. Seitz, On the Constitution of Metallic Sodium, *Physical Review*, Vol. **43**, p. 804, 1933.
- E. Wigner and F. Seitz, On the Constitution of Metallic Sodium. II. *Physical Review*, Vol. **46**, p. 509, 1934.
- E. Wigner. On the Interaction of Electrons in Metals, *Physical Review*, Vol. **46**, p. 1002, 1934.
- E. Wigner and J. Bardeen. Theory of the Work Functions of Monovalent Metals, *Physical Review*, Vol. **48**, p. 84, 1935.
- E. Wigner and H. B. Huntington, On the Possibility of a Metallic Modification of Hydrogen, *Journal of Chemical Physics*, Vol. **3**, p. 764, 1935.
- L. P. Bouckaert, R. Smoluchowski and E. Wigner, Theory of Brillouin Zones and Symmetry Properties of Wave Functions in Crystals, *Physical Review*, Vol. **50**, p. 58, 1936.
- E. Wigner, Effects of the Electron Interaction on the Energy Levels of Electrons in Metals, *Transactions of the Faraday Society*, Vol. **34**, p. 678, 1938.