

MŰHELY



Kérjük, hogy a MŰHELY című módszertani rovatba szánt írásait közvetlenül a szerkesztőhöz küldjék lehetőleg e-mail mellékletként vagy postán a következő címre: Dr. Tóth Zoltán, Debreceni Egyetem Kémia Szakmódszertan, 4010 Debrecen, Pf. 66. E-mail: tothzoltandr@yahoo.com, Telefon: 06 30 313 9753.

Róka András

Elavultak-e, elavulhatnak-e a kémia klasszikus törvényei?

Az ész, a tekintély és a tapasztalat szerepe a megismerésben

*„Jönni szokott időnként egy piktor, ki újat lát.
Megfesti, megtanítja önöket új színekre,
és evvel megtanítja önöket látni.”*

Ady Endre

„Látni”, másképp látni. A látásmód, a szemlélet mind a kutatás, mind az ismeretek átörökítése terén meghatározza a megismerés sikerességét. A tudomány történetéből számtalan példát említhetünk, amikor a tudás szabott határt a megismerésnek. A megismerés forrása kezdetben csak az érzékelés volt, majd az agy, az értelem fejlődésével – kimutathatóan az ókori görögök óta – csatlakozott hozzá a gondolkodás, az ok-okozati összefüggések feltárásának igénye. Ettől kezdve elkezdődik a megismerési módszerek hierarchikus versengése. A különböző korokban

váltakozva hol az egyik, hol a másik válik jellemzővé, meghatározóvá, olykor egyeduralkodóvá, miközben a történelem meg-megismétli ön magát. Hiszen az érzékelés (és ezzel a tapasztalat) korlátozott érvényű. Eredeti funkciójában csak a létfenntartást szolgálja. A tudatosulás, a „tudás” kezdetben csak melléktermék, ami a sikerélményen túl hamarosan tökéletesebb alkalmazkodáshoz, és ezáltal evolúciós előnyhöz vezet.

A megismerés szervének – az agy, ezen belül az asszociációs kéreg – fejlődésével az érzékelés kiegészül a jelenségek tudatos elemzésével. Csakhogy már Platón észreveszi, hogy az érzékelés „tökéletlen”. Mert a látszat olykor csal! Az ész azonban képes észrevenni és kijavítani az érzékelés hibáját. Ezért Platón szerint csakis a gondolkodás vezethet a tökéletes megismeréshez.

Amíg az athéni demokráciában az ideák világa csak az egyike volt az elképzeléseknek, az azt követő korokban, illetve társadalmakban a látszatot csak fenntartó önkényuralom fokozódásával a valóságtól történő elszakadás általánossá vált. A virtuális világ uralmában háttérbe szorult az érzékelés, fontatlanná vált a realitás. A varázslók, sámánok, táltosok középkori utódai kezében pedig egyenesen vitathatatlan dogmákká merevedtek a képzeletek. Hiszen gondolkodni a teológia keretei között illett, és olykor csak az egyház érdekei szerint lehetett. Már a kételkedés is eretnekségnek számított. A megismerés szinte kizárólagos módjává a tanítás vált, ami a vak hiten, a tekintélyen alapult („reproduktív átörökítés”).

Még javában tartott az önteltség – a kémiában az alkímia – kora, amikor Roger Bacon újra hirdeti a valós világ tanulmányozásának fontosságát. A megismerés akkoriban hirdetett forrásai – az ész és a tekintély – közé újra felveszi a tapasztalást. A felvilágosodás korában tehát ismét előtérbe kerül az „érzékelés”, de annak egy magasabb rendű formája, a bizonyító erejű mérés. A megismerés története az ezeréves zsákutca után tulajdonképpen Platónnál, a látszat bírálatánál folytatódik, csak egy másik irányban: Az érzékelés tökéletlenségét érzékszerveink „meghosszabbítja”, a műszerek alkalmazása védi ki. A részletgazdag megfigyelés pedig a képzeletet is felülmúló valóság határai közé szorította a gondolkodást. Az értelem lassan megtanulta elviselni, hogy egyelőre nem lehet mindennek feltárni az okát. A megmagyarázatlan törvények a tudás pilléreivé válnak. A tekintélyt azonban többé már nem lehet kitörölni a megismerést befolyásoló tényezők közül.

A XIX. század végének tekintélyes tudósai kissé öntelten hirdetik, hogy „már mindent tudunk”, amikor kijózanításul kitérül a háttérben rej-

tőző mikrovilág. Beköszönt a legújabb kori felvilágosodás. A láthatatlan világ birodalmában újra az „ész” válik a megismerés fő eszközévé, de a gondolkodást most már az ellentmondás-mentesség igénye irányítja. Az előrehaladást azonban egyszerre hátráltatja a makroszkopikus környezethez szokott szemlélet, és a „tekintély” visszahúzó ereje. A történelem ismétlődése, a megismerési módszerek oszcillációja, a fizika, no és a tekintély segítő és olykor hátráltató hatása látványosan követhető nyomon a kémia fejlődéstörténetében, ami elválaszthatatlan az atomokról alkotott kép fejlődésétől.

Az „érzékelhető” atomok

Az ős- és az ókorban az ismeretek az érzékelésre, az érzetekre támaszkodtak. Az atomok gondolata két oldalról merült fel. Az egyik az oszthatóság véges vagy végtelen volta (Démokritosz kontra Arisztotelész), a másik a levegő (a gázok) anyagi voltának és összenyomhatóságának felfedezése (Hérón). A kövek pattintása óta tapasztalat, hogy az egybefüggő (folytonos) anyag apróbb részekre bontható. Naiv, mégis elismerésre méltóan logikus elképzelés, hogy az alkotóknak hordozniuk kell az egész tulajdonságait, amiből származnak. A geometria kialakulásának korában mi hordozhatta volna az anyagi minőséget, a szerkezet és tulajdonság közötti összefüggést, ha nem a forma. A környezet kicsinyített másai éppúgy és éppolyan érzetet keltenek, mint makroszkopikus társaik. („Földhöz ragadt” szemléletünk számára ma is elképzelhetetlen, hogy a lényegében ugyanolyan felépítésű atomok – melyek esetében nincs értelme pl. mechanikai tulajdonságokról beszélni – miért és hogyan építhetnek fel egyszer kemény, másszor puha, vagy rugalmas anyagot.)

Hérón logikája talán még elbűvölőbb: Ha a levegő a kövekhez, vagy a vízhez képest összenyomható, akkor a levegő alkotói között ürnnek kell lenni, és ebben az űrben még a köd cseppjeinél, ill. a füst szemcséinél is láthatatlanabb parányok helyezkednek el. Bármennyire is naiv az atomról alkotott első kép, mindenképpen érzékelteti, hogy a gondolkodás a megismerés eszközévé vált.

Dalton törvényszerű atommodellje

Dalton atommodellje már nem az érzékelésre és nem is a képzeletre támaszkodik. A tömör és oszthatatlan golyó a kor tudományos ismereteinek szintézise. Az atomok szükségszerű létezését az általa felfedezett

többszörös súlyviszonyok törvénye erősítette meg. (Ha két elem egymással többféle arányban is vegyül, akkor az egyik elem ugyanakkora mennyiségeihez a másiból olyan különböző mennyiségek kapcsolódhatnak, melyek (súly-) aránya egész számokkal fejezhető ki.) Vagyis a vegyülés lényegét az anyagdarabkák anyagdarabkákkal történő kapcsolódásában látta. Az atomokkal értelmezhetővé vált a vegyület fogalma és a vegyületeket alkotó komponensek mindig és mindenütt ugyanúgy kialakuló aránya („*A vegyület olyan anyag, amelynek a természet meghatározott arányokat jelölt ki, más szóval a természet mérleggel a kezében teremt...*” Proust, állandó súlyviszonyok törvénye).

Az atomok szükségszerű létezése mellett azt, hogy milyen maga az atom, a képzelet helyett a korábban felfedezett megmaradási törvények határozták meg(!). Az alkimista törekvések legnagyobb eredménye, eredménye, hogy az aranycsinálás kudarca rávilágított az elem fogalmára. Előálíthatatlansága és megváltoztathatatlansága miatt az arany vált az elem példaképévé. Amikor Robert Boyle az alkimisták sikertelensége megfogalmazásaként írja körül az elem fogalmát, egyúttal az elemmegmaradás törvényét is kimondja, amiről később Dalton így ír: „*Anyagot teremteni vagy megsemmisíteni nem áll a kémikus módjában ... Az egyetlen változás, amelyet előidézhetünk, abban áll, hogy az atomokat – amelyek előzőleg vegyület alakjában voltak jelen – egymástól elválasztjuk, vagy olyan atomokat hozunk egymással kapcsolatba, amelyek eddig külön voltak...*” Ehhez járulnak Lavoisier kísérletei, melyek szerint a zárt térben lejátszódó égés során a résztvevő anyagok tömege változatlan. Boyle és Lavoisier megmaradási törvényei azt sugallják, hogy az atomnak is megmaradónak kell lennie. Ennek a feltételnek a tömör, oszthatatlan golyó tesz eleget. A daltoni atom nem rendelkezhet belső szerkezettel, belül homogén, más szóval folytonos anyageloszlású. A modell próbatétele persze az, hogy hogyan kapcsolódnak ezek golyók a szigorúan meghatározott arányban egymással. Nem sokkal az első kölcsönhatás, a tömegvonzás felfedezése után – Newton és a gravitáció „tekintélye” árnyékában – a válasz önmagától adódik: Mivel a daltoni atomok egyetlen, az anyagi minőséget hordozó tulajdonsága a tömeg, az atomokat összetartó erő nem lehet más, mint a tömegvonzás. Csakhogy éppen Dalton törvénye hívhatta volna fel a figyelmet arra, hogy a többféle arányú vegyülés a tömegvonzással nem értelmezhető. Hiszen semmi sem indokolja, hogy például az ón atomok egyszer kevesebb, másszor több tömeget kössenek meg, vagyis egyszer egy, másszor két oxigénatommal kapcsolódjanak. De még inkább indoko-

latlan, hogy a sokkal nagyobb atomtömegű ólom ugyanannyi oxigént köt meg, mint a könnyű szén. Talán a többszörös viszonyítás miatt kissé nehezen olvasható ki a törvény lényege. Ezért egészen a huszadik század elejéig még a fizikusok sem éreznek rá arra, hogy a többszörös súlyviszonyok törvényének semmi köze sincs a tömegvonzáshoz, hogy a vegyülés olyan „egzotikus” jelenség, ami független az atomok tömegétől. Független attól az egyetlen tulajdonságtól, amivel a daltoni atom rendelkezett.

A fizika a kinetikus gázelméletben sikerrel alkalmazta az atomelméletet (Maxwell és Boltzmann), a vegyülés értelmezése terén azonban egyelőre nem tudott segítséget nyújtani. A kémia a hős vagy klasszikus korában elszigetelten magára maradt. A kémikusok – jobb híján – praktikus segédfogalmakat találtak ki a vegyülési arányok meghatározására, leírására, ill. tanítására, mint például a sokáig hasznos vegyérték és egyenérték fogalma. A tudósok egymás közötti viszonya terén pedig beköszöntött a „tekintély” és a megosztottság kora: Az atomok létezését hívók és tagadók szinte egymásnak estek.

A folytonosság bukása

Dalton atomelmélete csak látszólag győzedelmeskedett a folytonosság szemlélete felett. A „látszat” olyannyira beivódott a kutatók neuronhálózatába, hogy szemléletükben szinte észrevétlenül folyton megjelent. A radioaktivitás és az elektron felfedezése már bizonyítja az atomok létét (hiszen ami osztható, annak léteznie kell). Thomson osztható atommodellje (a „mazsolás puding”) azonban még éppolyan folytonos anyageloszlású, mint az oszthatatlan atom volt.

A folytonosság látszatát, érzetét csak olyan Nobel-díjas felfedezések tudták véglegesen megdönteni, mint a hőmérsékleti sugárzás értelmezése (Planck), a fényelektromos hatás (Einstein) és az atommag felfedezése (Rutherford), továbbá az elektron töltésének meghatározása (Millikan). Kiderül, hogy az elektromágneses hullámok formájában terjedő energia parányi adagok, kvantumok formájában nyelődik el, ill. bocsátódik ki. Hogy a fény ezen kvantumai az alkálifémekből elektronokat „löknek” ki, vagyis a korábban hullámnak képzelt fény a részecskékkel megegyezően nemcsak energiát, hanem mozgásmennyiséget is képes átadni (Einstein, fotonok). Kiderül, hogy a vékony aranyfólia csak néhol átjárhatatlan az α -sugárzás számára, vagyis az anyag eloszlása még atomi szinten sem egyenletes. Végül az is kiderül, hogy az elektromos jelenségek során meg-

jelenő töltésmennyiség mindig egy legkisebb érték egész számú többszöröseként adható meg, vagyis – a tömeghez és az energiához hasonlóan – az elektromos töltésnek is van elemi egysége, kvantuma, amit éppen az elektron (ill. ellentétes előjellel szükségszerűen a proton) hordoz.

A törvények „tekintélye” és hierarchiája

Az atom, az anyag szerkezetével kapcsolatos felfedezések hatása a XX. században olyan nagy hatású volt, hogy nemcsak a tudományt, hanem az egész világot megváltoztatta. A „modern” fizika általánosabb érvényűre cserélte a korábbi törvényeket, ami leginkább a kémia alapvető törvényeit érintette. Csakhogy az általánosabb, vagy csak modernebb „tekintélye” olykor indokolatlanul is az elavulás érzetét keltette.

Az atom alkotórészeinek felfedezésével eldőlt a „hitvita”. Dalton atomelmélete végre beigazolódik, csak az atommodellje bukik meg. A látványosabb felfedezések miatt azonban hiba lenne arról a törvényről is lemondani, amely a vegyülés oldaláról ma is az atomelmélet alapja. Az új korszakot nyitó felfedezések és ismeretek ebben az esetben nem váltják fel, hanem igazolják és megmagyarázzák a korukat kissé megelőző vegyülési törvényeket. Ezért nem avultak, nem avulhatnak el. Legfeljebb atomarányokkal fejezzük ki a „súlyviszonyokat”. A súlyviszony törvények változatlanul a kémia pillérei. Olyan törvények, melyekre egyik társtudomány sem tartott igényt, hiszen a fizika nem érzett rá, a biológiának pedig nincs rá szüksége. Kissé mégis hűtlenek lettünk hozzájuk. Mert megfogalmazásuk tankönyveinkből – talán nem kellően átgondolt módon – többnyire kimarad, miközben képletekbe tömörítjük lényegüket. Az úrkutatás eredményei igazolják, hogy a vegyülési arányok nemcsak a Földön, hanem az Univerzum ember által belátható tartományában is érvényesek. Ily módon a „súlyviszony törvények” éppolyan fontos és általános érvényű „megmaradási” törvények, mint pl. az impulzus, az impulzusmomentum vagy az elektromos töltés megmaradása.

Rutherford elem-átalakítása nyomán megérthettük az alkímisták sikertelenségét. A radioaktivitás, a maghasadás és a fúzió felfedezésével feltárult az elemek evolúciója. A spontán elemátalakulást Hevesy György nyomán nyomjelzésre használjuk. Mégis túlzás Boyle elemmegmaradását „dogmának” tekinteni. Hiszen a kémiai reakciók energiatartományában – a kémcsőreakcióktól az élettani folyamatokig – az atommag változatlan. Lehetne-e genetikai kód „elemmegmaradás” nélkül? A fajok évszázados

fennmaradásában az atommagok kémiai reakciók során megnyilvánuló stabilitásának is szerepe van.

Ma már tudjuk, hogy az anyag szerveződésének atomi-molekuláris szintjén (az elektronburok változásának világában) az elektromágneses kölcsönhatás uralkodik. A kémiai reakciók tartományában az energiaváltozás – az erős kölcsönhatás által irányított magreakciókéhoz képest – olyan kicsi, hogy tömegegyenértéke ($\Delta m = \Delta E / c^2$) mikromérleggel sem mérhető. Vagyis a magfúziót kísérő tömegváltozás (tömegdefektus) a kémiai reakciók során praktikusán nincs. Az atomi-molekuláris szinttől kezdődően ezért esik ketté az anyagmegmaradás törvénye a tömeg és az energia megmaradására. Vagyis Lavoisier törvénye a kémiai reakciók terén igaz maradt. Ugyanakkor elfelejtjük hangsúlyozni, hogy a 12-es szénatommag tömegének 1/12-ed része azért praktikusabb atomi tömegegység, mint a proton tömege, mert a kötött nukleon átlagos tömegével a tömegdefektust is figyelembe vesszük.

A fizika Newton törvényeihez nem lett hűtlen. Az általános törvények „tekintélye” ugyanakkor mintha azt sugallná, hogy a kémia klasszikus törvényei mára elavultak. Pedig csak korlátozott érvényűekké, specifikusakká, a kémia megmaradási törvényeivé váltak.

Bohr törvényszerű modellje

Rutherford atommodelljével már értelmezhető az atommag átalakulás és átalakítás, de az elektronok még mindig folytonosan változónak képzelt energiájával értelmezhetetlen maradt a lángfestés. Az újabb felfedezésekhez is alkalmazkodó atommodellt – vagyis a magasabb szintű szintézist – Niels Bohrnak sikerült megalkotnia. Bohr – anélkül, hogy tudta volna, hogy miért – azt javasolta, hogy az elektronok energiája csak éppen annyival változzon meg, amekkora energiát az atom kibocsát vagy elnyel a lángfestés (emisszió) vagy a gerjesztés (abszorpció) során. Az energiakvantumok figyelembevételéből, vagyis Planck „törvényének” beépítéséből következik, hogy az elektronok energiája is csak adagokban változhat. A színeképelemzés tapasztalatai alapján ez a kvantáltság minden elem atomjának jellemző „ujjlenyomatává” vált.

Bohr szintézise a kémia eredményeire is kiterjedt: A többielektros atomok esetében – Rutherford parányi naprendszerével ellentétben – egy-egy héjra több elektront helyezett. Az elektronok számának megállapításakor a periodicitás törvényét, Mengyelejev periódusos rendszerét

vette alapul. Annak ellenére, hogy az új atommodell hiányossága a színképelemzés terén hamar kiderült, Bohr modellje volt az első, amellyel a vegyülési arányok értelmezhetőkké váltak. Bár az elektronhéjak önként történő telítődésének okát senki sem ismerte, a „nemesgáz-szerkezetre történő törekvés”, az oktett szabály sokáig hasznos útmutató maradt a cserélt, illetve a közösen használt elektronok leszámlálásában és a vegyülési arányok jóslásában.

Bohr idejében az elektront még klasszikus részecskeként kezelték, melynek összesen két tulajdonságát, a tömegét és az elektromos töltését ismerték (Thomson és Millikan). A Bohr-modell javíthatása során hamarosan rájöttek arra, hogy az alapul szolgáló törvények is csak következmények, és a továbbhaladás érdekében további okokat, az igazi okokat kell megkeresni. Kiderült, hogy az atommodell tökéletesítése érdekében magát az elektront kell megismerni. Hiszen a kémiai reakciók során a változatlan atommagok csak „színpadot” (elektromos, és olykor mágneses erőtermintázatot) nyújtanak az elektronok „színjátéka” (elhelyezkedése, ill. átrendeződése) számára. A fizikusok rácsodálkozó lelkesedéssel hirdették, hogy minden egyszerűbbé vált, mert a tulajdonságok, a kémiai, biológiai folyamatok sokfélesége egyetlen részecske, az elektron viselkedésére vezethető vissza. Csak azt felejtették el hozzátenni, hogy: Vigyázat! Az elektron sokoldalú!

Az elektron sokoldalúságán alapuló (kvantummechanikai) atommodell

A felgyorsult megismerés nyomán az elektron tulajdonságai néhány éven belül „megsokszorozódtak”. Kiderült, hogy az elektron (az elektromágneses hullámokhoz hasonlóan) képes interferenciára, hogy az elektromos mellett mágneses sajátsággal is rendelkezik. De ami talán még meglepőbb, hogy nem minden esetben taszítják egymást annyira, ha párokat is alkothatnak. A tökéletesebb atommodell kialakítása érdekében tehát az elektron sokoldalúságát kellett figyelembe venni! Az új tulajdonságok azonban azóta is próbára teszik az ésszt, a képzeletet és a tekintélyt.

A foton részecskékre emlékeztető hatása nyomán (fotoeffektus) de Broglie veti fel először azt a „képtelenséget”, hogy akkor a korábban részecskeként kezelt elektron meg a hullámokra jellemző tulajdonsággal rendelkezhet. Az elektronok interferenciáját Davisson és Germer mutatja ki.

Stern és Gerlach fedezi fel, hogy az ezüstatomok a mágneses térrel képesek kölcsönhatni (az ezüstatom-sugárnyaláb az inhomogén mágneses térben kettéválk). Mivel a legkülső gömbszimmetrikus ($5s$) pályának nincs az elektron mozgásából származó mágneses tulajdonsága (momentuma), a jelenséget csak a párosítatlan elektron tulajdonságára tudják visszavezetni ($5s^1$). Ezzel felfedezik az elektron mágneses sajátágát, saját mágnesességét.

Kamerlingh-Onnes a hélium cseppfolyósításával elindítja az extrém alacsony hőmérsékletű kutatásokat, mely során felfedezik a szupravezetés és a szuperfolyékonyság jelenségét. Ezeket a rendkívül meglepő jelenségeket a részecskék tökéletes rendeződését elősegítő párképződéssel értelmezik, melyben a részecskék mágneses tulajdonságának fontos szerepe van. A szupravezetést Cooper nyomán az elektronok párképző hajlamára vezetik vissza. A fémes rácsban olyan sok, egymáshoz rendkívül közeli energiájú állapot alakulhat ki (sávszerkezet), hogy az elektronok egy része a nívókon – a Hund-szabály által vázolt módon – párosítatlanul helyezkedhet el. Az abszolút nulla fokhoz közeli hőmérsékleten azonban az összes elektron párokba rendeződik. A szupravezetéssel egy, a vegyüléstől független jelenség is igazolja az elektronok párképző hajlamát. De úgy is fogalmazhatunk, hogy a fizikusok is találnak egy példát, melyben fontossá válik az elektronok párképzése.

Az új tulajdonságok felfedezése óriási szemléletváltásra készítette a kutatókat. A hullámsajátság felfedezésével kiderült, hogy az elektron esetében nem a nyomonkövethetősége vagy a mérete a fontos, hanem az energiája. Bárhogy és bármerre is mozogjon az atommag erőterében, összenergiája (a kölcsönhatási és mozgási energiájának összege) mindaddig állandó marad, amíg egy arra alkalmas energiájú foton elnyelődése annak megváltoztatására nem kényszeríti. Az energia-megmaradás és a hullámsajátság feltételeit egyszerre az atomi állóhullám-állapotok elégítik ki. (A rezgő húrhoz, ill. membránhoz hasonlóan, minél több csomófelület jelenik meg, annál nagyobb az elektron mozgási energiája). Az új modell teljesítőképessége már csak azért is lenyűgöző, mert a csomófelületek számából és térbeni elhelyezkedéséből nemcsak az alhéjak számát, hanem az elemek periódusonkénti számát, vagyis a periódusok szükségszerű hosszát is ki lehet következtetni. A „kémiaiában” az elektron hullámsajátságára vezethető vissza az elektronok delokalizációs hajlama, mellyel sikerült értelmezni a többcentrumos állapotokat (kovalens kötés, háromcentrumos-kételektronos kötés, konjugált kettőskötésű rendszerek, aromás

szerkezetek, valamint a fémes kötés). Ily módon az elektron hullámtermészete szabott határt olyan praktikus fogalmak alkalmazhatóságának is, mint a vegyérték, vagy az oktett szabály.

Az elektronok érthetetlen viselkedése

A nyomomonkövethetőség, a méret elvesztése annyira sokkolta a kutatókat, hogy a másik „egzotikus” tulajdonságot még jóformán észre sem vették. Pedig a Bohr-szintű, klasszikus részecskeszemlélet számára nem kevésbé meglepő, hogy az elektronok párba is állhatnak, hogy az elektronok nemcsak taszíthatják egymást! (Mennyivel sokkal inkább, ha azt a „képzelenséget” írjuk, hogy az elektronok vonzzák egymást!) Furcsa ismétlődése a történelemnek, hogy az elektronok párképzési hajlamát a kémia már régen felvetette, de a fizika egy ideig éppúgy nem tudott vele mit kezdeni, mint annak idején a többszörös súlyviszonyok törvényével. A történet valójában nagyon régen kezdődött:

Gay-Lussac még 1808-ban fedezi fel a vegyülő gázok térfogati törvényét (amiben az egész számok éppúgy megjelennek, mint Dalton törvényében). Avogadro a törvény értelmezése során feltételezi, hogy a kiindulási anyagok és a termékek egyaránt többatomos állapotban vannak jelen, és ezzel felfedezi a molekulákat. Az atomok kapcsolódásmódjáról azonban akkoriban semmit sem tudnak. A molekulák képződését – alig több mint száz évvel később – először Lewis értelmezi, amikor a Bohr-modell alkalmazhatóságát a kovalens kötésre is kiterjeszti. A nemesgáz-szerkezet kialakulása érdekében bevezeti a „közös használatban lévő” elektronpár (röviden kötőelektronpár) fogalmát. Az elképzelés annyira váratott magára, és olyan praktikusnak bizonyult, hogy azon már senki sem problémázott, hogy a párokba rendeződő elektronok miért nem taszítják egymást. Pedig máig sem értjük. Némi megnyugvást jelentett Pauli törvénye, amely megengedi az elektronpárok létezését, ha azok „spinkvantumszáma” különböző (ellentétes spinű elektronok). Megtanultuk elfogadni, hogy az elektronnak van egy újabb tulajdonsága, amellyel leírható a párképződés, de az elektronok kölcsönhatásáról valójában semmit sem mond. A kémia ugyanakkor sok olyan – a szupravezetéshez és a szuperfolyékonysághoz képest persze hétköznapiak számító – jelenséget tárt fel, amelyben az elektronok párképző hajlamának fontos szerepe van:

- A halogénionok, vagy a hidridion képződése például nem pusztán telítődés. A nemesgáz-szerkezet kialakulása egyúttal elektronpár-

képződés is. A többlet elektron felvétele ráadásul energia nyereséggel jár(!). Ilyen irányú megközelítésben az ionos és a kovalens kötés kialakulása között inkább csak az elektronpár hovatartozása jelenti a különbséget.

- Az ionizációs energia értéke általában nagyobb, ha egy elektronpárt kell megbontani. Különösen jól látszik ez a második oszlop, kis elektronegativitású elemeinek kiugróan magas ionizációs-energia értékei esetében.
- A datív kötések kialakulása-felbomlása és az elektronpárátrendeződéssel járó reakciók során az elektronok párokban maradnak. Ezért a sav-bázis, a komplexképződéssel járó reakciók, továbbá az elektrofil és nukleofil típusú reakciók aktiválási energiája kisebb, mint a gyökös reakcióké, melyek során a kötőelektronpárt szét kell választani.
- Ugyanakkor köztudott, hogy az atomok, gyökök, gyökionok mennyire reakcióképesek. A párosítatlan elektronnal rendelkező részecskék reakciója (szinte) nem igényel aktiválást, hiszen „hozzájuk vonzódó párt keresnek”.

A felsorolt jelenségek talán kellően bizonyítják, hogy az elektronpár nem egy segédfogalom, ami csak a kémikus, vagy a kémiatanár számára fontos. Ki lehet, és ki kell mondanunk, hogy az elektronok nemcsak taszítják egymást, hogy a párban álló elektronok kevésbé taszítják egymást, hogy az atomokban, molekulákban, kristályokban kötött elektronok párképzési hajlammal is rendelkeznek. Az elektronok „kémiai” viselkedése a klasszikus részecske szintjén érthetetlen. Az elmentmondás csak az elektron sokoldalúságának figyelembevételével oldható fel. „Iskolai” szinten logikus megoldást jelenthetne a mágneses kölcsönhatás, az elektron saját mágnesességének figyelembevétele. Hiszen a negatív töltésű, ám ellentétes mágnesességű elektronok – a közöttük ébredő mágneses vonzás miatt – kevésbé taszítják egymást. A témában avatottak természetesen megengedhetetlen egyszerűsítésnek tekintik ezt a megoldást, ezért lebeszélnek róla. Az atommagok világában könnyű volt a megoldás: A protonok elektrosztatikus taszítása legyőzésére egy új kölcsönhatást vezettek be (erős vagy nukleáris kölcsönhatás, magerők). Az elektronok elektromos taszítása ellen még mindig alakulóban van az új(?) kölcsönhatás. Pauli elvére gondolva a kvantummechanikai spin-spin kölcsönhatásnak feleltethető meg. A szupravezetés terén, Cooper nyomán,

Cooper- pároknak nevezik az egymást vonzó elektronokat. Károlyházy Frigyes kollektivizálódásnak hívja az elektronok összeférhetőségét. Amíg az elektronpárok terén nem születik meg a fizika és a kémia szintézise, a „tekintélyek” konszenzusa, nevezhetnénk akár az elektronok kémiai kölcsönhatásának is. Ha a történelem egyszer újra megismétli önmagát, a vegyülés végre éppolyan egzotikus jelenséggé válik, mint a szuperfolyékonyság vagy a szupravezetés.