

A mennyiségi változások átmenete minőségibe — ahogyan a vegyész látja

ERDEY-GRÚZ TIBOR akadémikus

I.

A természet és társadalom jelenségeinek helyes megértéséhez, az objektív világ változásainak a haladás érdekében céltudatos irányításához meg kell ismerni az anyag mozgásának konkrét törvényeit. Emellett azonban figyelmet kell fordítani a változások jellegének nagy általánosságban mutatkozó fő tendenciáira, az anyag mozgásának legátfogóbb törvényszerűségeire is. A természet és a társadalom minden ágára vonatkozó tapasztalatok tanúsága szerint ezek közé tartozik a mennyiségi változások átmenete minőségi változásokba. A való világ kimeríthetetlenül sokféle tárgyai és beláthatatlanul változatos jelenségei ezen összefüggés következtében jöhetnek létre viszonylag kisszámú építőelemből.

A mennyiség és a minőség a való világ tárgyainak, valamint jelenségeinek elválaszthatatlan oldalai, amelyek tudatunktól függetlenül objektíven léteznek. A dialektikus materializmus e megállapítása határozottan szemben áll azon idealista filozófiai nézetekkel, amelyek a mennyiség és minőség kategóriáit a tudatra vezetik vissza.

A dialektikus materializmus a tapasztalat alapján abból indul ki, hogy a mozgás az anyagnak elválaszthatatlan tulajdonsága lévén, minden szakadatlanul változik, folytonos átalakuláson megy át. Mindamellett tény, hogy vannak tárgyak, amelyek sajátosságai bizonyos határok között nem nagy mértékben változnak, viszonylag állandók. Az ilyenek száma, valamint változatossága beláthatatlan. Viszonylagos állandóságuk folytán a konkrét tárgyak határozott — bár nem változhatatlan — sajátosságúak, megkülönböztethetők egymástól, különböző minőségűek. A mozgás, a változékonyság abszolút — az állandóság, a nyugalom csak viszonylagos, e két ellentét azonban dialektikus egységben van egymással. A viszonylagos állandóság révén keletkezhetnek a különféle minőségű, differenciált sajátosságú konkrét dolgok, amelyek azonban nem örökkévalóak, hanem az anyag szakadatlan mozgása folytán keletkeznek, változnak és elmúlnak.

A *minőség* a dolgok sajátosságainak az az összessége, ami egészüket, belső lényeges meghatározottságukat, viszonylagos állandóságukat és különbözőségüket a többi dologtól tükrözi vissza. Az anyagi tárgyak különböző minősége sajátosságaikon keresztül mutatkozik, de egy-egy sajátosság nem képviselheti a minőséget. Egyes sajátságok változhatnak a minőség számottevő megváltozása nélkül is. Szoros értelemben vett minőségi változás akkor következik be, ha a sajátságok összessége lényegesen, ill. ugrásszerűen megváltozik, és a dolog egészét tekintve új tulajdonságú tárggyal, ill. jelenséggel állunk szemben.

A minőségi változások szempontjából nem minden sajátosság egyaránt fontos. Vannak lényegesek és kevésbé lényegesek, sőt egyes sajátságok válto-

zatlanul is maradhatnak a minőségi átalakulás közben. Különböző viszonyok között más-más sajátságok lehetnek lényegesek.

A minőséget dominálólólag megszabó sajátságok a megismerés fejlődése során fokozatosan válnak ismeretessé. Ennek következtében változhatnak a nézetek arra vonatkozóan, hogy valamely minőség tekintetében mely sajátság a legfontosabb. A múlt században pl. úgy vélték a vegyészek, hogy a kémiai elemek minőségét az atomsúly szabja meg. Századunk elején azonban kiderült, hogy vannak különböző atomsúlyú, de gyakorlatilag azonos kémiai sajátságú elemek, mert utóbbiak minőségét szigorúan véve nem az atomsúly, hanem az atommag pozitív töltéseinek a száma (az ún. rendszám) szabja meg.¹ A tudomány egyik fontos feladata ezzel kapcsolatban azon lényeges sajátságok feltárása, amelyek összessége szabja meg az adott anyag minőségét.

A minőségi meghatározottság mellett a dolgoknak *mennyiségi* meghatározottságai is vannak. Ezek olyan sajátságok, amelyek változnak, anélkül, hogy az objektum sajátságainak összessége ugrásszerű változáson menne át, vagyis minőségileg átalakulna. A konkrét anyagi tárgyak mennyiségi jellemzői igen sokfélék lehetnek, pl. hosszúság, térfogat, térbeli eloszlás, hőmérséklet, frekvencia, intenzitás. Az egyes mennyiségi jellemzők változatossága ellenére közös sajátságuk, hogy konkrét nagyságuk van, ami valamiféle módon mérhető. A mennyiség tehát — mint az anyag objektív sajátsága — mindig számokkal fejezhető ki.

A tárgyak mennyiségi meghatározottsága azt mutatja, hogy sajátságainak különféle jellegű határozott nagysága van, amely bizonyos határok között változhat, anélkül, hogy mélyreható minőségi változást vonna maga után. A határok, amelyek között a mennyiségi változás nem vezet minőségire, a dolgok természetétől függően nagyon különbözők. Előbb-utóbb azonban a mennyiségi változások mindig minőségi változásokat vonnak maguk után.

A minőségi átalakulások nagyon változatos jellegűek és különböző mélységűek lehetnek, s előidézésükhöz különféle vonatkozásokban a mennyiségi változások nagyon eltérő mértékű felhalmozódása szükséges. Előfordulhat határesetként az is, hogy nem szükséges a mennyiségi változások felhalmozódása, mert adott esetben minden mennyiségi változás minőségi átalakulást okoz. Pl. az atommagban a protonok számának minden változása minőségi változással (elemátalakulással) jár; akkor is, ha csak eggyel változik a számuk; ezzel szemben a neutronok számának változása az atommagban csak akkor okoz számottevő minőségi változást, ha bizonyos nagyságot elér, amire alább még részletesebben visszatérünk.

A mennyiségi és minőségi változások összefüggésére vonatkozó általános törvény alapja *Engels* szerint az, hogy nincsen más a világon, mint a mozgó anyag. Következésképpen minden minőségi különbség az anyag különféle fajtáinak, ill. mozgásformáinak különböző mennyiségére vezethető vissza. Semmiféle testnek nem lehet megváltoztatni a minőségét anélkül, hogy anyagot és mozgást (energiát) ne adnánk hozzá, vagy ne vennénk el belőle, vagyis anélkül, hogy mennyiségi változás ne történnék. A mennyiségi és minőségi változás kapcsolatait kifejező törvényben tehát nincsen semmi rejtélyes, az nem a gon-

¹ Az atommag pozitív elektromos töltésének nagyságát a legkisebb atommag — a proton — töltésének sokszorosában fejezik ki. Az oxigén rendszáma pl. nyolc, vagyis atommagjának töltése nyolcszorosa a proton töltésének. Ennek oka mai tudásunk szerint az, hogy az oxigénatommagban nyolc proton (és azonkívül nyolc töltés nélküli neutron) van.

dolat, a világszellem, vagy valami más anyagtól független létező fejlődésének a törvénye, amint azt az idealisták vélik, hanem az objektíven létező anyagi világ reális összefüggéseinek valóságához hű kifejezése.

A természet és a társadalom jelenségeinek tanulmányozása alapján a dialektikus materializmus megállapította, hogy a fejlődés folyamata egyaránt magában foglalja a lassú mennyiségi változásokat és a gyors, ugrásszerű minőségi változásokat: a mozgásnak kettős alakja van, evolúciós és revolúciós. Amint a mennyiségi és minőségi változások szervesen kapcsolódnak egymáshoz, és megszabják egymást, úgy megjelenési formáik — az evolúció és revolúció — is kölcsönös kapcsolatban állnak egymással, nem létezhetnek egymás nélkül. A mozgás evolúciós formái mennyiségi változásokkal kapcsolatosak (amelyek kis minőségi változásokat is vonnak maguk után), a revolúciós mozgásformák viszont gyökeres minőségi átalakulásokkal járnak. A fejlődés e két oldalát nem szabad elszakítani egymástól, sem azonosítani egymással, mert így ellentétbe jutnánk a valósággal. Ha csak a minőségi változásokat vesszük figyelembe, érthetetlen marad, hogy miként alakultak ki ennek szükséges előfeltételei. Ha viszont csupán a mennyiségi változásokra vagyunk tekintettel, akkor a lapos evolucionizmushoz jutunk, amely szintén eltorzítja a valóságot. Minőségi ugrás nélküli mennyiségi változásokkal nem lehet megmagyarázni az új keletkezését a fejlődés folyamán, a régi minőségi állapot átmenetét tőle gyökeresen eltérő minőségileg új állapotba.

A mennyiségi változást a folytonosság (kontinuitás) jellemzi. A természettudományok területén ez abban mutatkozik, hogy az adott anyagi tárgy állapotát jellemző valamely paraméter (meghatározó mennyiség) változását a sajátságok kis változása kíséri. A minőségi változás viszont diszkontinuus (diszkrét) jellegű: az állapotjelző paraméter változása a sajátságok összességének ugrásszerű nagy változásával jár együtt. A diszkontinuus változás feltételezi a kontinuuusat, utóbbi határán való átlépést jelenti; a kontinuitás pedig magában foglalja a diszkontinuitást, mert a mennyiségi változások felhalmozódása szükségszerűen diszkontinuitáshoz, vagyis minőségi változáshoz vezet. A kontinuitás és diszkontinuitás ellentéte tehát elválaszthatatlan egységben van egymással.

A sajátságok összessége kontinuuus változásának megfelelő paraméterváltozás nem szükségszerű kontinuuus; pl. az atommagban a neutronok száma nem változhat egy egységnél kisebb értékkel (vagyis e mennyiségi változás mindig diszkontinuus), mégis bizonyos határok között a neutronok számának változása csak alig észrevehetően (kontinuuusan) változtatja meg a kémiai sajátságokat, és nem okoz gyökeres minőségi változást (elemátalakulást).

A konkrét tárgyak és jelenségek tanulmányozásában figyelembe kell venni, hogy a mennyiségi változások különféleképpen befolyásolják a sajátságokat, amit az alábbiakban számos példán világítunk meg. A mennyiségi változások hatása a tárgyak és jelenségek egyes sajátságaira: a mennyiség és minőség elszakíthatatlan kapcsolatára mutat, amely kapcsolat azonban szembeeszköően az egyik minőségből a másikba való átmenet alkalmával mutatkozik. *Engels* szerint minden minőségnek sok mennyiségi határa van. Az adott sajátságon belül minden egyes határ bizonyos minőségi különbségeket tartalmaz. Pl. a kémiai elemek izotópjai bizonyos értelemben a mennyiségi határok az adott minőségen belül, de a mennyiségi határokon belül is vannak kis minőségi különbségek. Következésképpen nemcsak az egyes minőségeknek vannak különböző mennyiségi határai, de az egyes mennyiségek is tartalmaznak minő-

ségi különbségeket. Pl. a különböző kémiai elemek azon izotópjai, amelyek atomsúlya azonos (vagyis az izobárok), különböznek egymástól kémiai saját-ságok tekintetében. Mindebből látható, hogy a minőség és mennyiség nemcsak különbözik egymástól, hanem kölcsönösen át is hatja egymást. A mennyiség és minőség tehát mint a dolgok különböző — de elszakíthatatlan — oldalai össze vannak kapcsolva és kölcsönösen megszabják egymást.

Az objektív anyagi világ tárgyainak, valamint jelenségeinek mennyiségi és minőségi oldalai közötti összefüggések sajátos megjelenési formáit a tudományok különféle ágai tanulmányozzák és tárják fel. A tudományok fejlődésével az anyagi tárgyak és jelenségek mennyiségi és minőségi oldalainak mind újabb és újabb összefüggései tárulnak fel, a természet mind mélyebb és pontosabb megismerésének következményeképpen. Pl. *Mendelejev* a múlt században kimutatta, hogy a kémiai elemek legtöbb saját-sága az atomsúlyuk periodikus függvénye: e törvényben az elemek mennyiségi és minőségi oldalainak összefüggése tükröződik. Később azonban az elemek új mennyiségi jellemzője vált ismeretessé: az atommag pozitív töltésének a nagysága. A magtöltés és a kémiai saját-ságok összefüggéseinek vizsgálata kiderítette, hogy a magtöltés mennyiségi változása szigorúbb törvényszerű kapcsolatban van a kémiai saját-ságok változásával, mint az atomsúly változása. Ennek következtében a periodikus törvény új alakot öltött: a kémiai elemek saját-ságai a magtöltéssel változnak periodikusan. A törvénynek ez az alakja jobban közelíti meg az objektív valóságot, mélyebben tárja fel az idetartozó jelenségek lényegét.

A mennyiségi változások átmenetei minőségi változásokba az objektív valóság különféle területein nagyon eltérően mutatkoznak. Az ugrásszerű minőségi változások jellegének, specifikus formájának helyes megértése cél-jából konkrétan kell tanulmányozni, hogy hol és milyen körülmények között következik be az ugrás. Az erre vonatkozó összefüggések mély megértéséhez tanulmányozni kell a tárgyakban és jelenségekben levő ellentétes tendenciákat, azok küzdelmét és egységét, mert az ellentétek küzdelme és egysége a lényege minden változásnak, így a mennyiség és minőség közötti összefüggés törvényének is.

Engels volt az első, aki a természettudományok mélyreható tanulmányozása és az akkor még viszonylag nem nagyon széleskörű eredmények zseniális általánosítása révén megállapította, hogy a természet változásai dialektikus jellegűek, s a mennyiségi változások átmenete minőségibe nemcsak a társadalomban, hanem a természetben is az anyagi világ objektív törvénye. A dialektika tehát nem egy filozófiai hipotézis, hanem a természet objektív dialektikájának tükröződése, aminek felismerése a természet tanulmányozásának eredménye. *Engels* ideje óta a természettudományok terjedelmében és mélységben óriási fejlődésen mentek át, az anyagnak és mozgásának sok új fajtája vált ismeretessé, s merőben új tudományágak is alakultak ki. A mennyiségi és minőségi változások viszonyára vonatkozó általános törvény az újonnan megismert dolgokkal kapcsolatban is érvényesnek bizonyult. Gazdag új megismeréshez vezettek a kémia és a fizikának a kémiával kapcsolatos ágai, ami indokoltá teszi a mennyiségi és minőségi átalakulások közötti összefüggés törvényének áttekintését e területen. Ez alkalmat ad annak bemutatására is, hogy e törvény a konkrét esetekben igen különböző, s az adott körülményektől függő alakban mutatkozik.

A mennyiségi változások átmenete minőségibe a kémiai elemekkel kapcsolatban

A kémiai elemeket, ill. atomjaikat egyrészt mennyiségi adatok (pl. atom-súly, magtöltés, sűrűség), másrészt a sajátságok összessége által megszabott kémiai minőség jellemzi (pl. az oxigén hidrogénnel vízzé, fémekkel földszerű oxidokká egyesül, táplálja az égést, a vegyületek nagy részét kisebb-nagyobb sebességgel elbontja stb.). Az atomsúly fogalmának kialakulása óta általános volt a vélemény, hogy adott atomsúlyú elemnek mindig ugyanazok a sajátságai, de széles körben csak *Mendelejev* ismerte fel az atomsúlyok és kémiai sajátságok változásainak törvényszerű összefüggését: a periódusos törvényt. Századunk elején kiderült azonban, hogy az elemek kémiai sajátságait nem az atomsúly szabja meg egyértelműen, hanem az atommag pozitív töltéseinek a száma. Utóbbi egyben megadja azt is, hogy az elem a periódusos rendszer hányadik helyét foglalja el. Mivel az atomok szerkezetére vonatkozó vizsgálatok alapján később kiderült, hogy az atommagok pozitív töltésű protonokból és elektromosan semleges neutronokból állnak, mai tudásunk szerint az elemek kémiai minőségét közvetve az atomjaik magjában levő protonok száma szabja meg. Közvetlenül ettől függ ugyanis az elektrónburokban levő elektronok száma elrendeződése és mozgása, s e tényezők szabják meg közvetlenül az atomok olyan kölcsönhatásait más atomokkal, amelyek során a mag változatlan marad. Ilyen kölcsönhatások következményei a kémiai átalakulások (kémiai reakciók), amelyek összességében fejeződik ki a megfelelő elem kémiai jellege, vagyis minősége. A neutronok száma a magban szintén hatással van a kémiai tulajdonságokra, de bizonyos határok között csak elenyésző kis mértékben (l. alább).

Az atommagban levő protonok számának növekedése mint mennyiségi változás több vonatkozásban is von maga után többé-kevésbé mély minőségi változásokat, amelyek közül különösen két fő tendencia figyelemre méltó. Egyrészt a protonok számának minden változása a kémiai minőség gyökeres változásával (elemátalakulással) jár. Itt tehát azzal — a már említett — határesettel állunk szemben, amelyben minden (diszkontinuus) mennyiségi változás ugrásszerű minőségi változásba megy át. Másrészt a protonok számának növekedése a kémiai sajátságoknak egy nagyobb periódusra kiterjedő minőségi változását is előidézi. A magtöltés növekedésével ugyanis szabályszerűen változnak a kémiai sajátságok. Pl. a nátrium ($_{11}\text{Na}$, a vegyjel előtti szám a magtöltés és egyben a protonok száma) igen erősen reakcióképes (levegőn azonnal oxidálódó) fémes jellegű, egyvegyértékű elem, a magnézium ($_{12}\text{Mg}$) valamivel kevésbé reakcióképes (levegőn csak felületesen oxidálódik, de meggyújtható) kétvegyértékű fém. Mindkét fém oxidja bázis. Az alumínium ($_{13}\text{Al}$) kevésbé reakcióképes, gyakorlatilag állandó háromvegyértékű fém, oxidja egyaránt mutatja a bázisok és savak tulajdonságait. A szilícium ($_{14}\text{Si}$) a legtöbb körülmények között nem fémes sajátságú négyvegyértékű elem, oxidja igen gyenge sav, sói — a szilikátok — a legfontosabb ásványok. A növekvő magtöltés sorrendjében következő foszfor, kén és klór ($_{15}\text{P}$, $_{16}\text{S}$ és $_{17}\text{Cl}$) e sorrendben növekvő mértékben kémiailag reakcióképes nem-fémes, savképző, változó vegyértékű elem. E sorban a mag protonjai számának növekedtével szabályosan változnak a kémiai sajátságok (a fémes jelleg csökken, a nem-fémes jelleg növekszik, a klór egyike a legerélyesebben ható kémiai anyagoknak). Tovább növelve azonban a protonok mennyiségét az atommagban, a sajátságok ezen egyirányú tendenciát mutató fokozatos változása megszakad.

A következő elem e sorban az argon ($_{18}\text{Ar}$) nemesgáz, amely semmiféle kémiai reakcióra nem képes, semmilyen vegyülete nincsen, a klasszikus kémia szempontjából szinte azt mondhatnók, hogy nincsenek kémiai sajátságai. Tovább növelve a protonok mennyiségét, újabb minőségi ugrás következik be: a kálium ($_{19}\text{K}$) egyike a legerélyesebb kémiai hatású, leghatározottabban fémis minőségű egyvegyértékű kémiai elemeknek. Innen kezdve hasonló (bár nem pontosan azonos) szabályszerűség ismétlődik, mint az előzőkben. E sorban a bróm ($_{35}\text{Br}$) a klórhoz hasonló, kémiailag igen aktív, változó vegyértékű elem, a kripton ($_{36}\text{Kr}$) kémiailag teljesen közömbös nemesgáz, a rubidium ($_{37}\text{Rb}$) a káliumhoz hasonló elem és így tovább.

Az összes kémiai elemeket az atommagban levő protonok növekvő mennyiségének sorrendjébe rendezve azt tapasztaljuk, hogy e sorban a 2., 10., 18., 36., 54. és 86. proton előtt és után ugrásszerűen változik a minőség, kémiai ellentétébe csap át (a legerélyesebb savképző elemek egyike után kémiailag teljesen közömbös, majd a legerősebb bázisképző elemek egyike következik). A kémiai sajátságok tehát periodikusan változnak a protonok számával (a periódus hossza azonban nem állandó), s e periódusokban határozott helyeken, a nemesgázok helyein, a kémiai jellem ugrásszerű minőségi változása következik be.

A fent vázolt összefüggések értelmében a kémiai elemek sorában mintegy két síkon mutatkozik a mennyiségi változások átmenete minőségibe: az atommag protonjai mennyiségének egyenkénti növelése minőségileg gyökeresen új sajátságú elemeket eredményez, de a minőségi változásoknak bizonyos határon között lépésről lépésre egy irányú a tendenciája. E határnál („csomópont”) azonban megszakad ez a tendencia, a kémiai sajátságok két ugrással ellenkezőjükbe csapnak át, s a mennyiségi változások az előzőeknél lényegesen nagyobb ugrásszerű minőségi változásokat vonnak maguk után. A részletesebb vizsgálat még más jellegű — bár nem ilyen szembeötlő — minőségi változásokat is feltár, amelyeket a protonok számának mennyiségi változása idéz elő, ezek azonban itt nem foglalkozunk. A kémiai elemeken ezek szerint különösen egyszerű alakban tanulmányozható az, hogy azonos jellegű mennyiségi változások különböző „csomópontokban” különböző mélységű minőségi változásokat vonhatnak maguk után. A kémiai elemek mennyiségi és minőségi változásainak a viszonya tudományos szempontból azért is fontos, mert a mai atomfizika bizonyos mélységig e változások lényegét is megvilágítja.

Mennyiségi változások az atommagban nemcsak a protonok számának változtatásával valósíthatók meg, hanem a neutronok mennyiségének változtatásával is. A neutronok számának változása — ellentétben a protonokéval — nem minden esetben vezet gyökeres minőségi változásokhoz. Vannak olyan atomfajták, amelyekben a neutronok száma különböző, de a protonoké azonos: ezek az izotóp atomok, amelyek kémiai sajátságai annyira hasonlóak egymáshoz, hogy a különbségeket többnyire csak a legfinomabb módszerekkel lehet észrevenni. Ennélfogva az izotóp atomok ugyanazon kémiai elem atomjainak tekintendők, atomsúlyuk azonban mégis számottevően (több egységgel is, szélső esetben 100%-kal) eltér egymástól. Az ónnak pl., melynek magja 50 protont tartalmaz, nyolc — kerek számban 114—122 közötti atomsúlyú — állandó izotópja van. Ha pl. az $_{50}^{114}\text{Sn}$ izotópból indulunk ki,² és egyenként

² A felső index az egészszámra kikerekített atomsúlyt jelenti, ami egyenlő a protonok és neutronok számának összegével az atommagban.

növeljük a neutronok számát (ezzel együtt a magban levő energia mennyiségét is), akkor eleinte a protonok száma nem változik, s a keletkező 115, 116, . . . 122 atomsúlyú atomfélések izotópok, kémiai sajátságaik csak alig észrevehető kis változáson mennek át. Eddig a határig azonban a kis mennyiségi változások a magban annyira felhalmozódtak, hogy még tovább növelve a neutronok mennyiségét, gyökeres minőségi változás: kémiai elemátalakulás következik be. Az $^{123}_{50}\text{Sn}$ izotóp már nem állandó, magjában átlag 175 nap alatt egy neutron (n) elektron (e^-) kilövelése közben protonná (p^+) alakul: $n = p^+ + e^-$. Ezzel megnő a protonok száma a magban, ami minőségi változást, antimonná ($^{123}_{51}\text{Sb}$) alakulást idéz elő. A kilövelt elektron nagy sebességgel távozik az atommagból (ún. β^- -sugárzás, ami a természetes radioaktív elemek köréből régebbiről ismeretes). A neutronok számának növelése folytán tehát az ön radioaktívvá vált. Mivel a radioaktív átalakulás nem az atom keletkezése után azonnal, hanem bizonyos idő elteltével következik be, a csomóponton olyan minőségi változással állunk szemben, amely nem azonnal követi a mennyiségi változást, hanem esetenként különböző idő, átlag 175 nap elteltével következik be. Hasonló sajátságú a 125, 126 és 127 atomsúlyú izotóp is,³ de átlagban sokkal rövidebb idő alatt alakulnak át antimonná. Ha a neutronok számának további növekedtével az atomsúly 127 fölé nő, akkor a minőségi átalakulás azonnal bekövetkezik, még bomlékony (radioaktív) ónatom sem keletkezhet.

Hasonló jelenségek következnek be, ha a neutronok számát csökkentjük az ónatommagban. Amíg az atomsúly 122-től 114-ig csökken, csak kis mennyiségi változások következnek be a stabilis ónatommag sajátságaiban. Ezen túl csökkentve a neutronok mennyiségét, minőségi változás következik be: egy proton pozitron (e^+) kilövése közben neutronná alakul: $p^+ = n + e^+$ (β^+ -sugárzás). Ezáltal csökken a protonok száma, s az ónatom indiumatommá ($^{113}_{49}\text{In}$) alakul. A 113—108 atomsúlyú ónizotópok minőségi átalakulása nem pillanatszerűen, hanem átlag hónapok, órák, ill. percek alatt következik be, ezek az izotópok radioaktívak. Ha azonban a neutronok mennyisége a 108 atomsúlyúnak megfelelő értéknél kisebbre csökken, akkor bomlékony ónmag sem keletkezhet, a minőségi átalakulás azonnal követi a mennyiségi változást.

A fentiekben az ön példája kapcsán vázolt összefüggések általánosan érvényesek abban az értelemben, hogy csak olyan atommagok állandók, amelyekben a protonok és neutronok mennyiségének viszonya bizonyos határok között van. Valamivel tágabb határok között létrejöhetnek radioaktív atommagok, túllépve azonban e határokat, a neutronok mennyiségi változása az atommag azonnali minőségi változásába megy át. A neutron/proton hányados e határai az egyes kémiai elemekre különbözőek, a legtöbbjüknek kevesebb — sőt egyeseknek csak egyetlen — állandó izotópjuk van. Radioaktív izotópja azonban minden elemnek előállítható. Pl. a hidrogénnek két állandó és egy radioaktív, a kalciumnak hat állandó és négy radioaktív, a jódnak egy állandó és 18 radioaktív izotópja ismeretes. E változatosság arról tanúskodik, hogy a neutronok és protonok mennyiségi arányán kívül más kölcsönhatások is érvényesülnek az atomok minőségi változásaiban, de mégis előbbi mennyiségi arány szabja meg a jelenségek kifejlődésének fő tendenciáját.

³ A 124 atomsúlyú izotóp ismét állandó. A neutronok mennyiségének változása által okozott jelenségekben tehát itt egy újabb átmeneti csomópont van, ami azt mutatja, hogy a neutronok mennyiségén, ill. a neutronok és protonok mennyiségének viszonyán kívül más tényezők és kölcsönhatások is közreműködnek e vonatkozásban. Ezek ugyan bonyolultabbá teszik az összefüggéseket, de a fő tendenciát nem változtatják meg.

A neutronok mennyiségének változtatása az atommagban a mai fejlett atomfizikai módszerekkel kísérletileg is megvalósítható, fenti megfontolások tehát közvetlenül ellenőrizhetők a tapasztalattal. Ma már különféle neutronforrások állnak rendelkezésre (legbősegebbek az atomreaktorok). A neutronok mennyisége az atommagban legközvetlenebbül az ún. neutronbefogásos magreakcióval növelhető, amelynek során a magba ütköző neutron beépülve ebbe, növeli tömegét és energiáját. Az új mag stabilis állapotához képest fölös energia és anyag γ -fotonok alakjában távozik.

A neutronok számának növekedtével az atommagban egyúttal az energia mennyisége is növekszik, mert az energia mint a mozgás megnyilvánulása elválaszthatatlan az anyagtól. A magban levő energia mennyiségét azonban nemcsak neutronok révén, hanem más módon is növelhetjük, pl. γ -sugárzással, vagyis γ -fotonoknak a mag általi elnyelésével.⁴ E folyamatban a γ -foton anyaga, ill. energiája a magban levő részecskék és fizikai mezők anyagává, ill. energiájává alakul. A tapasztalat szerint a foton csak akkor nyeli el a mag, vagyis csak akkor változik meg a mag állapota, ha a foton energiája nagyobb egy — a mag minőségétől függő — küszöb-értéknél. Ha tehát a magot érő fotonok energiájának mennyiségét növeljük, akkor egy határozott értéknél minőségileg új folyamat következik be: a foton tömege és energiája átalakul a tőle gyökeresen eltérő minőségű mag tömegévé és energiájává. A foton szempontjából igen gyökeres minőségi változást előidéző ezen csomópont azonban nem jelent hasonló mélyreható minőségi változást a mag számára. Az elnyelt foton ilyen körülmények között általában csak gerjeszti a magot, de minőségileg mélyrehatóan nem alakítja át. A mag gerjesztése is minőségi változás, de nem nagyon mélyreható, a legtöbb szempontból csak igen kis mértékben változtatja meg az atom sajátosságait. A gerjesztési energia előbb-utóbb újra fotonok alakjában távozik, és spontán visszaáll a mag eredeti állapota. Amint nagyobb energiájú foton nyel el a mag, úgy nő energiájának és ezzel együtt anyagának a mennyisége. Ha e mennyiségi változás túllép egy határt, akkor a mag változását többé nemcsak fotonok kilövelése kíséri, hanem elektromos töltésű részecskék (pl. elektronok) is távoznak a magból, amelyek a mag anyagának és energiájának mélyreható átalakulása révén keletkeznek. Ezáltal megváltozik a magban a protonok száma, ami gyökeres minőségi változást, más elem atomjává való átalakulást jelent. E határ tehát az atommag szempontjából mélyreható minőségi változást jelző csomópont. A mag anyagának és energiájának mennyiségi változása tehát, bizonyos határokon ilyen körülmények között is, különféle mélységű minőségi változásokba megy át.

Az anyag oszthatósága, a részecskék

A természettudományok újabb eredményei mind nagyobb meggyőző erővel támasztják alá a dialektikus materializmus azon nézetét, miszerint az anyag oszthatóságának nincsen határa. Nincsenek olyan „őselemek”, leg egyszerűbb, tovább nem osztható szerkezet nélküli részecskék, amelyekből mint változhatatlan objektumokból épül fel az egész világ. A múlt században

⁴ A ν frekvenciájú elektromágneses (fény, röntgen, γ - stb.) sugárzásban $h\nu$ energiájú és $h\nu/c^2$ tömegű részecskék ún. *fotonok* haladnak fénysebességgel (h az ún. Planck-féle hatáskvantum, c a fény terjedési sebessége).

az atomokat vélték oszthatatlannak, de a fizika forradalma a századfordulótól kezdődően feltárta, hogy az atomok valójában összetettek, atommagból és elektronokból állnak. Jól észlelhető jelenségekből meglehetősen mélyreható következtetéseket lehet levonni az atomok szerkezetére vonatkozóan. Csakhamar kiderült a továbbiakban, hogy az atommag sem oszthatatlan, hanem protonokból és neutronokból áll. Az atomfizika legújabb kísérleti módszereivel némi képet alkothatunk magunknak a mag szerkezetéről is, bár e kép egyelőre még nagyon vázlatos. Kísérleti tények alapján kétségtelenül megállapítható továbbá, hogy sem az elektron, sem a proton, sem a neutron nem szerkezet nélküli, nem oszthatatlan részecske, hanem belső szerkezetük van, összetettek és nyilván oszthatók is. Tudásunk mai fokán azonban még nem sikerült e részecskék belső szerkezetének részleteit megbízhatóan megállapítani.

Az anyagi testek fokozatosan kisebb részecskékre osztása során különböző határokhoz, csomópontokhoz jutunk, amelyeknél a továbbosztás mélyreható minőségi változással jár. Makroszkopikus testből kiindulva s azt fokozatosan kisebb részecskékre darabolva, egyik ilyen csomópont a molekula. Bár minőségi változások már sok molekulából álló testeken is bekövetkeznek (l. alább), mégis a molekula fontos határ: a további osztás, a molekula felbontása atomokra, nagy minőségi változást, kémiai átalakulást von maga után. A molekula a kristályok, folyadékok és gázok szempontjából viszonylag egyszerű és oszthatatlan, de az atomok szempontjából bonyolult, összetett és osztható. Az atomok viszont a molekula szempontjából viszonylag egyszerűek és oszthatatlanok, de az atommag és az elektronok szempontjából összetettek és oszthatók. A mag az atom szempontjából egyszerű és oszthatatlan, de a protonok és neutronok szempontjából összetett és osztható, és így tovább. Amint a felosztással mind kisebb és viszonylag egyszerűbb részekhez jutunk, úgy az ellentétes folyamat, az egyszerűbb részekből való felépítés, mind összetettebb és bonyolultabb tárgyakhoz vezet, s a mennyiségi változás megfelelő csomópontokon e folyamatban is minőségi változásokba megy át.

A természet mélyreható tanulmányozása alapján meg kell állapítani, hogy az anyag fejlődési folyamatában különböző nagyságú és különböző összetételű diszkrét részecskék láncolata keletkezik (protonok — neutronok — elektronok — atommagok — molekulák — kristályok stb.). A részecskék mindegyike mintegy csomópontot jelent az anyag fejlődésében. Minden egyes fokozatnak megfelelő részecske viszonylag állandó, egyszerű és oszthatatlan, amennyiben határozott körülmények között mint egységes egész hat, és bonyolultabb részecskék alkatrésze lehet. Másrészt viszont minden részecske időleges, összetett és osztható, mert egységességének határát átlépve más részecskékké alakul, szétbomlik. Minden részecskében elszakíthatatlan dialektikus egységben van az állandó és az időleges, az egyszerű és az összetett, az oszthatatlan és az osztható. A tapasztalati tények, amelyekből ez következik, a természet objektív dialektikájának megnyilvánulásai. Az anyag fejlődésében tehát a különböző fokozatú részecskék mindmennyi csomópontok, amelyekben a mennyiségi változások gyökeres minőségi változásokba mennek át.

Vizsgáljuk meg nagy vonalakban néhány példán, milyen specifikus módon érvényesül a mennyiségi változások minőségi változásokba való átmenetének általános törvénye a különböző fokozatú diszkrét részecskék képződésében. Mivel a protonok, neutronok és elektronok belső szerkezetéről ismereteink még igen hiányosak, induljunk ki ezekből, mint viszonylag legegyszerűbb részecskékből.

Az atommagok keletkezése

Különlevő protonok és neutronok, más diszkrét részecskéktől (pl. atomoktól) távol, határozott sajátságokkal rendelkeznek, sok tekintetben úgy viselkednek, mint apró, rugalmas golyócskák. Induljunk ki pl. két protonból és két neutronból. Amíg viszonylag távol vannak egymástól, addig sajátságaik ugyanazok, mintha 1, 3, 4, . . . részecske volna jelen. Ha a két protont és két neutront közelítjük egymáshoz, vagyis csökkentjük a közöttük levő távolságot, akkor változik kölcsönhatásuk: az általános gravitációnak megfelelően mind a négy részecske vonzza egymást, a protonok pedig pozitív töltésük következtében taszítják is egymást, s e kölcsönhatás erősödik, a kölcsönös potenciális energia mennyisége pedig csökken. Mindaddig azonban, míg e részecskék kölcsönös távolsága lényegesen nagyobb, mint 10^{-12} cm, a kölcsönös távolság csökkenése csak kis mennyiségi változásokat okoz a két protonból és két neutronból álló rendszerben. Amint azonban kölcsönös távolságuk fenti érték alá csökken, ugrásszerű gyökeres minőségi változás következik be: a négy részecske között óriási vonzó és taszító erők ébrednek, ezzel kapcsolatban a diszkrét részecskék anyagának egy része átalakul az anyag gyökeresen más fajtájává, a magmezővé (más néven mezon-mezővé), és a két proton, a két neutron, valamint a magmező szilárd új egységet alkot: héliumatommag keletkezik. Ennek minőségileg gyökeresen mások a sajátságai, mint önálló alkatrészeinek, a mag igen állandó, csak igen nagy energia befektetésével bontható fel. A kölcsönös távolság (ill. a megfelelő potenciális energia) mennyiségi változásának hatására tehát egy csomóponton gyökeres minőségi változás következik be. Bár az átalakulás nagyon mélyreható, de mégsem minden sajátság változik meg: pl. az elektromos töltés az atommag képződése után ugyanannyi, mint azelőtt volt.

Az atommagon belül az alkatrészek kölcsönhatására nagyrészt más törvények érvényesek, mintha magon kívül, ami a minőségi változás egyik jellemzője. A minőség mélyreható változása ugyanis a mozgásforma megváltozásával jár együtt, a különféle mozgásformáknak pedig különbözőek a törvényei.

Bár a magképződés igen mélyreható minőségi változás, mégis a mag sajátságai függenek az alkatrészek számától és viszonyától. Ha pl. két proton négy neutronnal egyesül, akkor olyan atommag keletkezik, amelynek két pozitív töltése van, és atomsúlya 6. Ez is héliummag, de ennek 6 atomsúlyú izotópja: ${}^6_2\text{He}$. A neutronok mennyiségének növelése tehát ilyen körülmények között nem okoz mélyreható változást: nem keletkezik új kémiai elem, csak kis változások következnek be (pl. a színképben, a sűrűségben). A legfontosabb változás, hogy az ilyen magok már nem stabilisak, hanem átlag 1,1 mp alatt egy neutron protonná és elektronná alakul bennük: $n = p^+ + e^-$. A ${}^6_2\text{He}$ tehát β^- -sugárzó radioaktív mag, amelyből bomlása folytán lítium (${}^6_3\text{Li}$) keletkezik. A neutronok mennyiségének növelése a héliummagban kis mennyiségi változásokon kívül kis minőségi változást is okoz: radioaktívvá teszi a magot, s ezáltal előkészíti a mélyreható ugrásszerű minőségi változást: az elemátalakulást. Ez utóbbi viszont mennyiségi változással is együtt jár, mert megnöveli a magtöltést. Itt is látható tehát, hogy kis mennyiségi változások kis minőségi változások révén előkészítik az ugrásszerű gyökeres minőségi változást. A mennyiségi és a minőségi változások kölcsönösen áthatják egymást, elválaszthatatlan egységben vannak egymással.

A héliummag képződése közben a fentiek szerint csökken az alkatrészek kölcsönös potenciális energiája. Ennek következtében nagy mennyiségű energia

szabadul fel, és a héliummag stabilisabb, mint különálló két protonból (hidrogénatommagból) és két neutronból álló rendszer. Ez az átalakulás a természetben folyik a Napban s a többi csillagokban, amelyek kisugárzott energiájának mai tudásunk szerint ez a fő forrása. A csillagok belsejének sok százmillió fok hőmérsékletén és óriási nyomásán az atommagok szintézise tovább halad: a viszonylag egyszerűbb magokból fokozatosan összetettebb, bonyolultabb magok keletkeznek. Ez a folyamat, a *magfúzió*, a magok alkotórészei mennyiségének növekedése közben — a már ismertetett módon — a megfelelő csomópontokon minőségi változásokkal új elemek keletkezésével jár. A viszonylag könnyű atommagok fúziója közben energia szabadul fel (hasonlóan, mint a héliummag keletkezése alkalmával), a közepes és nehéz magok fúziója viszont energia-elnyeléssel jár. Ebből következik, hogy a közepes magok stabilisabbak, mint a könnyűek, viszont a nehéz magok kevésbé stabilisak, mint a közepes tömegűek.

A kémiai anyag ama fejlődési folyamatában tehát, amit az atommagok fokozatos szintézise jelent, egyrészt elemről elemre bekövetkezik a mennyiségi változás átmenete minőségi változásba. Másrészt azonban egy nagyobb vonalú, előbbit mintegy beborító megjelenési formájával is találkozunk a természet objektív dialektikája ezen alaptörvényének: a protonok és neutronok számának növekedtével a közepes nagyságú magokban minőségi változás következik be: a nagyobb magok viszonylagos stabilitása helyett a kisebb magok válnak viszonylag stabilisakká. Ez a minőségi változás ugyan a fejlődés egyes lépcsőit tekintve nem nagyon mélyreható, a minőségi ugrás elmosódott, egészében azonban nagy jelentőségű. A jelenség alapján lehet a magfúzió a Nap energiaforrása, ennek alapján használható az uránmag hasadása atomerőművek és atombombák szerkesztésére, ez teszi lehetővé a hidrogénbomba készítését, s erre támaszkodva keresik a siker jogos reményében a hidrogénatomok fúziójának (az ún. termonuklárís reakciónak) irányított vezetését békés energiatermelés céljaira.

Az atomok keletkezése

A kémiai elemek atomjai magokból és elektronokból állnak mint viszonylag egyszerű diszkrét részecskékből. Önálló atommagok és elektronok sajátosságai azonban lényegesen eltérnek a kémiai elemekétől. Egymástól elszakított atommagok és elektronok vannak jelen pl. az ún. plazmában, amely gázokban alakul ki sok százezer fok hőmérsékleten. Csupasz atommagok tanulmányozhatók a modern részecskegyorsítóknál (szinkrotronban, fazotronban stb.).

Az atomok keletkezési folyamata jellegének megértésére induljunk ki egy protonból, valamint egy tőle viszonylag távoli elektronból, s közelítsük ezeket egymáshoz. Amíg viszonylag távol vannak egymástól, kölcsönhatásukat dominálólólag a Newton-féle tömegvonzás és az elektromos töltések Coulomb-féle vonzása szabja meg. E kölcsönhatásokból származó potenciális energia a proton és elektron közelítésekor mennyiségileg csökken, de mélyreható változás a sajátosságokban mindaddig nem következik be, amíg 10^{-8} cm-nél távolabb vannak egymástól. E határon túl közelítve egymáshoz a protont és az elektront, ugrásszerű mélyreható változás következik be: a részecskék anyagának és energiájának egy (kis) része specifikus fizikai mező anyagává és energiájává alakul, ezzel kapcsolatban új erők ébrednek, amelyek lényegesen más törvényszerűségek szerint hatnak, mint a klasszikus makrofizikából ismeretes erők. Ennek

folytán a protonból és elektronból hidrogénatom keletkezik, amelyben az elektron bonyolult pályán mozog a proton mint atommag körül. Bár a vonzóerő itt (a maggal ellentétben) nem nagyobb, mint a klasszikus fizika törvényei szerint várható volna, mégis lényegesen más jellegű és különleges taszító erők is hatnak. A makrofizikából ismert törvényekkel ellentétben az elektron nem mozoghat bármilyen kör- vagy ellipszis-pályán a mag körül, nem közelítheti meg tetszés szerint a magot (attól legalább $0,5 \cdot 10^{-8}$ cm távolságra van), s kerin-gés közben nem sugároz.

A hidrogénatom keletkezése kapcsán vázoltakat általánosítva a széles-körű tapasztalatok alapján megállapítható, hogy ha atommag és elektronok kölcsönös távolságát és egyúttal potenciális energiáját mennyiségileg csökkent-jük, akkor egy határon mélyreható minőségi változás következik be: *atom keletkezik*, amelyben a mag és az elektronok egységes, viszonylag oszthatatlan egészet képeznek.⁵ Az atomok alkatrészei közötti kölcsönhatások törvényei minőségileg mások, mint amelyek akkor hatnak, ha az alkatrészek önállóak. Az atomnak mint egységes egésznek sajátságai minőségileg eltérnek önálló al-katrészei sajátságaitól, amelyekből mennyiségi változások hatására jött létre. Tehát az atomok keletkezése is mennyiségi változások minőségi változásokba való átmenetének következménye.

Ha a hidrogénatomban az elektront fokozatosan távolítjuk a magtól (pl. nagy sebességű más részecskékkel való ütközés révén), akkor az atom különböző mennyiségű energiát vesz fel: különböző mértékben gerjesztődik. Eközben színképe, kémiai és egyéb sajátságai kis mértékben megváltoznak, de továbbra is hidrogénatom marad. Amint azonban az elektron távolsága a magtól egy határon túl nő, mélyreható minőségi változás következik be: az elektron elszakad a magtól, az atom ionizálódik. Ennek következtében meg-szűnnek a hidrogénatom sajátságai, s helyüket az önálló proton és elektron sajátságai foglalják el. Az atomra ható energia mennyiségi változása egy hatá-ron (ha elérte a $13,5$ elektronvoltot⁶) tehát ebben az irányban is minőségi vál-tozásba megy át. A hidrogén ionizálásával kapcsolatban e vonalon csak egy minőségi változás történhet, az összetettebb, bonyolultabb atomok ionizációja során többféle minőségi változás következhet be.

Vegyük szemügyre pl. a nátriummagot (Na), amelynek magtöltése 11, a semleges atom magja körül tehát 11 elektron kering. A nátrium színképének és egyéb sajátságainak tanulsága szerint a 11 elektron három csoportba („hép-ba”) sorolható: kettő mozog a maghoz legközelebb („K-héj”), nyolc jóval távo-labb („L-héj”) és a tizenegyedik viszonylag a legtávolabb mozog a (nagyobb rendszámú atomokban kiépülő „M-héj” első tagjaként). A nátriumatom (elek-tronnal vagy fotonnal való kölcsönhatás útján, esetleg más módon) csak akkor képes energiát felvenni, ha ennek mennyisége eléri a $2,1$ eV-ot. Ekkor az atom gerjesztődik, kémiai sajátságai kis mértékben mennyiségileg megváltoznak, szín-képe kis minőségi változást is mutat (új színkép vonalak lépnek fel), de mélyre-ható minőségi változás nem következik be. Növelve a nátriumatommal közölt energiát, több ilyen jellegű gerjesztés is bekövetkezik. Ha azonban az energia el-

⁵ A semleges atomban összesen annyi elektron van, amennyi a magtöltés a proton töltésének sokszorosában kifejezve. A nagyobb magtöltésű atomok elektronjai csoportok-ba (ún. héjakba) tömörülve mozognak.

⁶ A magfizikában az energiát többnyire elektrovoltokban (eV) mérik. 1 eV az a kinetikus energia, amelyre egy elektron 1 volt elektromos potenciálkülönbség hatására tesz szert. 10^6 eV = 1 MeV, 10^9 eV = 1 GeV (vagy BeV).

éri az 5,1 eV-ot, akkor az energia-felvétel mélyreható minőségi változást von maga után: egy elektron leszakad és pozitív nátriumion (Na^+) keletkezik, amelynek sajátságai minőségileg nagyon különböznek a semleges nátriumatoméitól. A nátriumatomok (ill. az ezekből álló testek) fémes sajátságúak, rendkívül reakcióképesek, a vizet gyorsan elbontják, a levegő oxigénjével rohamosan egyesülnek stb. A nátriumionok viszont (ill. az ezeket tartalmazó testek) kevésbé reakcióképesek, vízzel szemben közömbösek (pl. konyhasó oldatában nátriumionok vannak), oxigénnel semmiféle kölcsönhatásba nem lépnek és i. t. Ha tovább növekvő mennyiségű energiát közlünk a nátriumionnal, akkor állapota csak kis mennyiségi (és ezzel kapcsolatban nem lényeges kis minőségi) változásokon megy át, mindaddig, míg a közölt energia mennyisége 47,1 eV-ot el nem ér. E hatalmas (1090 kcal/gramm atom) energia hatására egy második elektron is leszakad a nátriumionról, és újra mélyreható minőségi változás következik be: a keletkezett Na^{2+} -ion oly rendkívül reakcióképes, oly nagy erővel ragad magához egy elektront minden lehető forrásból, hogy kémiai folyamatokban még átmenetileg sem szerepelhet, csak igen kis nyomású gázban állítható elő, mint rendkívül aktív, igen rövid átlagos élettartamú anyagfajta. Még tovább növelve a közölt energia mennyiségét, 71 eV-nál következik be a harmadik elektron leszakadása újabb mélyreható minőségi változás kíséretében és i. t., míg végül 263 eV hatására szakad le az utolsó elektron minden előbbinél mélyrehatóbb minőségi változást okozva.

A nátrium példájához hasonló sajátságúak ionizáció szempontjából a többi atomok is. A második, ill. harmadik elektron leszakítása azonban nem minden esetben okoz oly mélyreható minőségi változást, mint a nátriumatomban. Pl. a vasatomok második, ill. harmadik elektronjának leszakítása útján keletkezett ferro-, ill. ferri-ionok kémiai sajátságai viszonylag csak kevésbé térnek el egymástól.

A fentiekből kitűnik, hogy az atomokkal közölt energia mennyiségének növelése megfelelő csomópontokon nemesak különböző mélységű, hanem különböző irányú minőségi változásokat idézhet elő. Pl. növelve a nátriumatomokkal kölcsönhatásba lépő részecskék energiáját, az első nagy csomóponton a közönséges kémiai mértékkel mérve igen aktív fématom közömbös ionná alakul, majd a második nagy csomóponton ellenkező irányú és még gyökeresebb minőségi változással rendkívül aktív kettős töltésű ion keletkezik és i. t. Ebben az az általános törvényszerűség nyilvánul meg, hogy a mennyiségi változás hatására bekövetkező minőségi változás jellege, iránya és mélysége a kölcsönhatásba lépő anyagi objektumok konkrét sajátságaitól, valamint kölcsönhatásuk módjától, ill. erősségétől függ. Nincsenek tehát „minőségi változások” önmagukban, hanem egymással konkrét kölcsönhatásba lépő konkrét anyagi objektumok tulajdonságai mennek át specifikus és mélyreható minőségi változásokon. Ezt viszonylag kis mennyiségi változások és ezekkel kapcsolatos nem lényeges kis minőségi változások készítik elő, amelyek felhalmozódván okozzák az ugrászerű minőségi változást. A minőségi ugrásnak azonban nemcsak a jellegét és irányát, hanem nagyságát, ill. mélységét is a konkrét körülmények szabják meg.

A molekulák keletkezése, a homolog sorok és az izomeria

A molekulák keletkezése atomokból, valamint azok felbomlása és átalakulásai — amely folyamatok tanulmányozása a kémia körébe tartozik — a tor-

mészettudományok legrégebben rendszeresen vizsgált esetei a mennyiségi változások minőségi változásokba való átmenetének.

A molekulaképződés egyik legegyszerűbb példája a nátriumklorid (konyhasó, NaCl) keletkezése nátriumból és klórból. A nátrium ezüstfehér puha fém, kémiailag igen aktív, a klór zöldessárga színű, kellemetlen szagú, maró-mérgező hatású, kémiailag szintén aktív gáz, amely csaknem minden más elemmel kémiai kölcsönhatásba lép. Az egyesülésük által keletkezett náriumklorid viszont színtelen, kemény kristályokat alkot, kémiailag közömbös, nem mérgező, kedvelt és nélkülözhetetlen fűszerünk. Keletkezésének folyamatát legegyszerűbben magas hőmérsékleten gáz alakban követhetjük. A nátriumgőz önálló atomokból áll, a klórgáz kétatomos molekulákat (Cl_2) képez. Ha vizsgálat alá vesszünk egy nátriumatomot és egy klórmolekulát a gőzben, amelyek közelednek egymáshoz, akkor azt tapasztaljuk, hogy sajátságai mindaddig gyakorlatilag változatlanok, amíg mintegy $2 \cdot 10^{-8}$ cm-nél távolabb vannak egymástól. Amint azonban távolságuk eléri e határt, ugrásszerűen mélyreható minőségi változás következik be: a klórmolekula felbomlik két klóratomra, s ezek egyike a nátriumatommal nátriumklorid molekulává egyesül (a másik klóratom egy másik nátriumatommal egyesül). Ennek során az önálló alkatrészekből (Na és Cl-atomból) minőségileg gyökeresen eltérő sajátságú új egységes egész (NaCl-molekula) keletkezik. A változás ugrásszerűsége azt jelenti, hogy az önálló nátrium- és klóratomnak, valamint a nátriumklorid molekulának megfelelő lényegesen eltérő sajátságú állapotok között nincsenek olyan közbülső állapotok, amelyek sajátságai átmenetet képeznének az önálló atomoké és az egységes molekuláé között. Pontosabban kifejezve: a molekulaképződés közbülső állapotain olyan rendkívül rövid idő alatt megy át a rendszer, hogy azok gyakorlatilag még metastabilis (bomlékony, de mégis észlelhető) állapotokként sem mutatkoznak.

A molekulák felbomlásával kapcsolatban ellenkező irányban mennek át a mennyiségi változások minőségi változásokba. Ha pl. a nátriumklorid-molekulában fokozatosan növeljük a két atom közötti távolságot (pl. mind nagyobb energiájú részecskékkel való ütközés révén növeljük a két atom rezgésének amplitudóját), s ezzel növeljük a molekula potenciális energiájának a mennyiségét, akkor eleinte csak gerjesztődik a molekula, kémiai sajátságai csak kis mennyiségi változáson mennek át, bár egyidejűen kis mértékben minőségi változások is bekövetkeznek (pl. újszínképvonalak jelentkeznek). Amint azonban a molekulával egy aktusban közölt energia mennyisége 3,6 eV-ra növekedett, a molekula szétbomlik atomjaira (disszociál), s ezáltal ugrásszerűen mélyreható, minőségi változás történik, mint a felhalmozott mennyiségi változások következménye. Átmeneti állapot itt sem észlelhető. Hasonlóak a viszonyok más molekulák képződésével és bomlásával kapcsolatban is.

A molekulák keletkezése és bomlása folyamataiban (amelyek az anyag kémiai mozgásformáinak megnyilvánulásai) az atomokat egyszerűnek és oszthatatlannak tekintjük a molekulákhoz viszonyítva. Az oszthatatlanság azonban még a molekulák viszonylatában is csak első közelítés, amely nem nagyon híven tükrözi a valóságot. A molekula képződése közben ugyanis az atomok maguk is megváltoznak, és a molekulában nem változatlan atomok vannak. Bár ez a változás nem nagyon mélyreható, csak az atomok elektronburkának külső rétegét a (külső elektronhéjat) érinti, mégis minőségi változásokat idéz elő, megváltoznak a kémiai sajátságok (de nem befolyásolják pl. az atommagot). A molekula felbomlásával kapcsolatban spontán visszaáll az atomok eredeti

állapota. Az állandóság és változatlanság tehát még ezen a téren is csak közelítés: a mozgás, változás abszolút és a nyugalom viszonylagos volta itt is megmutatkozik. Az is kitűnik a fentiekből, hogy a viszonylagos állandóság és változékonyság ellentéte a molekulák keletkezésében és bomlásában is elválaszthatatlan egymástól, és az objektív valóság eme tárgyaiban, ill. jelenségeiben is dialektikus egységben vannak egymással.

A molekulaképződéssel kapcsolatos minőségi változások konkrétan kémiai szempontból igen különfélék. Egyik fő típus képviselője a nátriumklorid képződése: itt a minőségi változás azzal függ össze, hogy a nátriumatomról egy elektron teljesen átmege a klóratomra, azáltal Na^+ - és Cl^- -ion keletkezik. E folyamat nem magyarázható a klasszikus fizika alapján, hanem azoknak a specifikus atomfizikai törvényeknek a következményei, amelyek a kémiai mozgásformára érvényesek, és amelyek működésbe lépésének, ill. dominálóná válásának az eredménye a molekulaképződéssel járó minőségi változás. A nátriumklorid molekula és kristály tehát ionokból áll, s az ionokat az elektrosztatikus vonzás tartja össze. Hasonló típusú vegyületek (*ionvegyületek*⁷) főleg az ásványvilágban elterjedtek, és sokféleségük az élettelen természet változatoságának felel meg.

A másik fő típus legegyszerűbb képviselőinek egyike a sósav. A sósav (HCl) molekula képződéséhez vezető minőségi változás úgy megy végbe, hogy a hidrogén- és a klóratom egy-egy elektronja közössé válik a molekulában, az egyesülés után mindkét atomhoz hozzátartozik. A molekula sajátosságait egészében és részleteiben e *kollektivizált elektronok* állapota szabja meg (pl. az, hogy milyen erősen vannak kötve, egyenlő mértékben tartoznak-e a két összekapcsolt atomhoz, vagy egyiknek erősebb a hatása). Hasonlóan kollektivizált elektronok kapcsolják össze a víz (H_2O), metán (CH_4), alkohol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) stb. molekuláinak atomjait is (ún. *kovalens kötés*).

A kollektivizált elektronok révén létrejövő kovalens kötés a sajátosságok sokkal nagyobb változatoságát és differenciáltságát teszi lehetővé, mint az ionvegyületek lokalizált elektronjai. Sok atomból álló, bonyolult molekulában ugyanis a kovalens kötést létesítő kollektivizált elektronok állapotára nemcsak az általuk közvetlenül összekötött két atomnak van hatása, hanem kisebb-nagyobb mértékben a molekula többi atomjai is befolyásolják azt. E hatások a molekulában levő atomok minőségétől, mennyiségétől, kölcsönös elrendeződésétől függően rendkívül sokfélék. A kovalens kötésű molekulák kémiai szempontból viszonylag sokkal nagyobb mértékben egységes egészek, mint az ionkötésűek, sajátosságaikat az atomokat összekapcsoló valamennyi kollektivizált elektron sajátosságainak és kölcsönhatásainak összessége szabja meg: ennek következtében a kovalens molekulák sajátosságai szinte kimeríthetetlenül változatosak.

A kovalens kötésű molekulákat mint egységes egészeket jellemző sajátosságok kialakulását elősegíti az is, hogy az elektronok nemcsak két atomhoz tartozhatnak kollektíve, hanem az egész molekulához is, vagy annak egy-egy nagyobb részéhez. Minél több atom és minél több kollektivizált elektron van a molekulában, minél sokoldalúbb ezek kölcsönhatása, annál több új tulajdonság jelentkezik a molekula képződéséhez vezető minőségi változás során,

⁷ Megjegyzendő azonban, hogy amikor az ionvegyületek gázmolekulái kristályokká egyesülnek, akkor a molekulák felbomlanak, s a kristályok többé-kevésbé egyenletes eloszlásban váltakozóan pozitív és negatív töltésű ionokból állnak. E kérdést azonban itt nem taglaljuk.

annál sokrétűbbek, annál specifikusabbak és differenciáltabbak a molekula, ill. a megfelelő vegyület sajátságai. Ez teszi lehetővé az anyag rendkívül gazdag és változatos *kémiai fejlődését*. A kovalens kötések kollektivizált elektronjai e fejlődés számára összehasonlíthatatlanul több lehetőséget nyújtanak, mint az ionvegyületek lokalizált elektronjai. Különösen gazdag a szén kovalens vegyületeinek a családja, az ún. szerves vegyületek, amelyek körében az atomok és kötések mennyiségének növekedtével a kémiai fejlődés mind specifikusabb és differenciáltabb fajtákon keresztül mind magasabb rendű anyagokhoz vezet. Az anyag kémiai fejlődésének egyes fokain új meg új sajátságok jelennek meg, míg végül kialakulnak a kémiai anyag legfejlettebb fajtái: a fehérjék és nukleinsavak, amelyeknek az előzőkhöz képest legszembetűnőbb, minőségileg új saját-sága az életműködés.

Az anyag kémiai fejlődésében is megmutatkozik a fő tendenciát megszabó általános alaptörvényként a mennyiségi változások átmenete minőségi változásokba. Pl. szenet, hidrogént és oxigént tartalmazó vegyület a formaldehid (CH_2O), amelynek vizes oldata a formalin néven közismert fertőtlenítő szer. Az atomok mennyiségének növelése a molekulában minőségi változást okoz: $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$ összetételű ecetsav, $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ összetétel a szőlőcukornak, $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$ a répacukornak felel meg, $(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$ pedig a keményítő, ill. a cellulóze összetétele (n pontosan nem ismert, nagy egészszám) — mindmennyi minőségileg lényegesen különböző sajátságú anyagok. Vagy pl. az izoprén, C_5H_8 , szintelen folyadék, ha azonban sok izoprén molekula kapcsolódik egymáshoz, vagyis megnő a molekulában levő atomok mennyisége, akkor minőségi változás következik be: az izoprénből $(\text{C}_5\text{H}_8)_n$ összetételű kaucsuk keletkezik. Mind e minőségi változások természetesen a molekulán belüli kölcsönhatások következményei.

Fenti példákban az atomok mennyiségének növekedtével bekövetkező minőségi változás kémiai viszonylatban mélyreható. Kevésbé mélyen-szántó minőségi változások következnek be a *homolog sorokban*. A szerves kémiában azok a vegyületek tartoznak egy homolog sorba, amelyek molekulájának összetétele egy vagy több CH_2 -csoporttal különbözik egymástól. A homolog vegyületek összetétele közös általános képlettel fejezhető ki, amelyben vegyületeként csak a szénatomok számát (n) kell változtatni. Homolog sort alkotnak pl. a telített szénhidrogének, amelyek általános képlete $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$. E sor első tagja a metán (CH_4 , a földgáz és a városi gáz egyik fő alkotórésze). A kis szénatomszámú szénhidrogének ($n=4$ -ig) közönséges körülmények között gáz alakúak, a közepes tagok ($n=17$ -ig) folyékonyak (ezek elege a petróleum és a benzin), a nagyobb szénatomszámú tagok szilárdak (ezekből áll a parafin). A CH_2 csoportok mennyiségének növelésével a sorozat egyes tagjai minőségileg eltérnek egymástól, de ezen eltérések kémiai szempontból viszonylag kicsinyek. Valamivel nagyobb eltérések mutatkoznak a telített egyértékű alkoholok homolog sorában ($\text{C}_n\text{H}_{2n+1}\text{OH}$). Ennek első tagja a metilalkohol (fászesz, CH_3OH) erősen mérgező hatású folyadék. Egy CH_2 -csoporttal növelve a molekulát etilalkohol (borszesz, $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) keletkezik, mely szeszes italaink fő alkotórészeként ismeretes. Ez ugyan sok tekintetben hasonló a metilalkoholhoz, de kis mennyiségben nem mérgező, csak nagyobb mennyiségben ártalmas, fiziológiai hatása azonban ilyen körülmények között is lényegesen eltér a metilalkoholétól. A nagyobb szénatomszámú tagok ($n=12$ -től) itt is szilárdak, s számosan közülük mint viaszok, ill. korszerű mosószerek alkotórészei kerülnek felhasználásra.

A homolog sorokban tapasztalhatónál nagyobb minőségi változást okoz a szerves vegyületek molekulájában a szén- és a hidrogénatomok viszonylagos mennyiségének a változása. Pl. a C_6H_{12} összetételű szénhidrogén (a hexán) kevésbé reakcióképes, ún. telített vegyület, amelynek molekulájához a szénatomok számának megváltoztatása nélkül nem lehet további atomokat hozzáadni, csak helyettesíteni lehet egyes hidrogénatomokat másokkal. Kettővel csökkentve a hidrogénatomok számát C_6H_{10} összetételű molekulához jutunk, amely telítetlen: könnyen vesz fel atomokat, könnyen oxidálódik, kémiailag sokkal aktívabb, mint a C_6H_{12} . A hidrogénatomok számát további kettővel csökkentve a molekulában, még telítetlenebb és még reakcióképesebb C_6H_8 összetételű molekulához jutunk: a mennyiségi változás által okozott minőségi változás tehát a megkezdett irányban növekszik. Még kettővel csökkentve azonban a hidrogénatomok számát a molekulában, ugrásszerű, ellentétes irányú minőségi változás következik be: a C_6H_6 összetételű vegyület, a benzol, igen stabilis, s specifikus sajátságai lényegesen különböznek a sorozat előző tagjaitól. A benzolból rendkívül fontos és nagy vegyületcsoport származik: az ún. aromás vegyületek, amelyek a természetben és az iparban egyaránt nagy jelentőségűek. A mennyiségi változás eme csomópontján tehát az előbbiektől eltérő irányú és azoknál sokkal nagyobb minőségi változás következik be. A benzol különleges sajátságait az okozza, hogy összetétele rendkívül stabilis egységes elektronburok kialakulását teszi lehetővé, amelyben a szénatomokat közvetlenül összekötő (két-két atomhoz kollektíve tartozó) elektronpárokon kívül hat elektron kollektíve mind a hat szénatomhoz tartozik. Ezáltal rendkívül nagymértékben egységes szerkezetű, igen stabilis konfigurációjú molekula jön létre.

A benzolhoz mint a mennyiségi változások különleges minőségi csomópontjához egyébként más oldalról is eljuthatunk. Ha pl. acetilénből (C_2H_2) indulunk ki, amely kémiailag igen reakcióképes, erősen telítetlen gáz, és háromszorosára növeljük a molekulában az atomok számát (ami megfelelő hevítéssel megvalósítható), akkor e mennyiségi változás hatására minőségi változás következik be, a molekula nagymértékben stabilizálódik, benzol keletkezik, ennek az acetilénétől lényegesen eltérő számos új kémiai tulajdonságával.

A mennyiségi változások átmenete minőségiekbe mutatkozik az *izomeriában* is. Izomerek azok a vegyületek, amelyek molekulájában az atomok minősége és száma azonos, elrendeződésük (vagyis a molekula szerkezete) azonban különböző. A molekulák térbeli (esetleg síkbeli) szerkezetét az egyes atomok helyzetének a többi atomoktól való iránya és távolsága szabja meg. Az izomerek tehát a szerkezetet jellemző mennyiségek (irányszögek és atomtávolságok) eltérő nagyságában különböznek egymástól. E mennyiségi különbségek, ill. változások a kémiai sajátságok minőségi változásaiba mennek át, bár e változások nem nagyon nagyok.

A mennyiségi változások átmenete minőségi változásokba közvetlenül mutatkozik azon vegyületekben is, amelyek két elem atomjait *különböző arányban* tartalmazzák. Pl. a szénmonoxid (CO) molekulájában egy szénatom egy oxigénatommal vagy egyesülve, a széndioxidban (CO_2) pedig két oxigénatomhoz kapcsolódik. Előbbi igen reakcióképes vegyület, halálos mérég, utóbbi közömbös, minden széntartalmú anyag égésének végterméke, a levegő normális alkotórésze, a növényi test felépítésének közvetlen nyersanyaga. Az oxigén mennyiségi változása tehát a sajátságok minőségi változásával jár. Hasonló minőségi változásokat okoz az oxigénatomok mennyiségi változása az N_2O ,

NO, N₂O₃, NO₂, N₂O₄, N₂O₅ vegyület-sorozatban. Mivel az atomok kémiai oszthatatlansága következtében két vagy több elem atomjai mindig egészszámok arányában egyesülnek egymással, amit a klasszikus kémiában a sokszoros súlyviszonyok törvényével fejeznek ki, utóbbiban bizonyos értelemben szintén tükröződik a mennyiségi változások minőségi változásokba való átmenetének általános törvénye.

A vegyületképződés folyamán bekövetkező mennyiségi és minőségi változások összefüggéseit világítsa meg meg a következő példa, amely az állandó súlyviszonyok törvényével függ össze. Ha hidrogéngázzal viszonylag kevés (1 g-ra számítva 35,5 g-nál kevesebb) klórgáz lép kémiai reakcióba, akkor sósav keletkezik, s az átalakulás lezajlása után a vizsgált anyagi rendszeren a sósav és a hidrogén sajátosságai mutatkoznak (utóbbinak egy része ugyanis változatlanul maradt). Növelve a klór viszonylagos mennyiségét, a keletkezett anyagi rendszer sajátosságai egy határig csak mennyiségileg változnak, de nem mutatnak lényegesen új minőséget. Amint azonban a klór mennyisége túllépi fenti határt, ugrásszerű változás következik be: az átalakulás után az anyagi rendszerben a sósav sajátosságai mellett megjelennek a klór sajátosságai, s eltűnnek a hidrogén sajátosságai. A mennyiségi változás itt azáltal megy át minőségibe, hogy a hidrogén és klór csak határozott (1:35,5) súlyarányban képes egymással vegyületté egyesülni. Ezen arányoktól mutatózó bármily kis eltérések esetében a feleslegben levő alkatrész változatlan marad, s ennek a vegyülettől minőségileg eltérő sajátosságai megmutatkoznak a termékben.