

KIS TUDOMÁNYBÓL NAGY TUDOMÁNY: AZ AEROSZOL-KUTATÁS TÖRTÉNETE

Mészáros Ernő

az MTA rendes tagja,
MTA Veszprémi Akadémiai Bizottság
meszaroserno@invitel.hu

Aeroszolnak nevezzük a gázokban lebegő szilárd és cseppfolyós részecskék¹ együttes rendszerét. Az aeroszol részecskék jelentős része gázok (pontosabban gőzök) kondenzációjával keletkezik. Kondenzációval gömb alakú, általában 0,1 µm-nél kisebb részecskék (cseppciskék) keletkeznek. Ezeknek a kis részecskéknek jelentős a Brown-féle mozgása, így egymással ütköznek és egyesülnek, azaz koagulálnak. Ily módon nagyobb (0,1–1,0 µm átmérőjű), de kisebb koncentrációjú részecskék jönnek létre. Az 1,0 µm-nél kisebb részecskék alkotják a *finom részecskéket*. Régebben ezeket *füstnek* nevezték, mivel égéskor a füstgázok hűlése részecskék képződéséhez vezet.

A *durva részecskéket (porokat)* viszont valamilyen anyag (például a földfelszín) mechanikus aprózódása hozza létre. Ezek formája igen különböző lehet. Nagy tömegük miatt a gravitációs térben viszonylag gyorsan ülepednek, ezért általában nem képeznek stabil

aeroszolt. Kémiai összetételük annak az anyagnak a kémiai összetételét tükrözi, amelyből származnak.

Az aeroszol kifejezés a 20. század elején keletkezett a hidroszol mintájára. Először *Frederick George Donnan* (1870–1956) ír fotokémikus alkalmazta az I. világháború végén, amikor elkezdődött bizonyos hadmozdulatok köddel való álcázása, illetve toxikus anyagok levegőbe juttatása vivőrészecskék segítségével. A katonai alkalmazásokon kívül az aeroszolókat ma már számos területen alkalmazzák, így gyógyászati célokra, műtrágyák és növényvédő szerek kijuttatására, belsőégésű motorokban, hogy csak a legfontosabb példákat említsük.

Földünk légköre hatalmas aeroszolt alkot, amelyre először 1929-ben német kutatók hívták fel a figyelmet (Schmauss – Wigand, 1929). A légköri aeroszol kutatása napjainkban egyre fontosabbá válik, mivel a részecskék nagymértékben meghatározzák a belélegzett levegő minőségét, a levegő optikai tulajdonságait (például a látótávolság), a felhők keletkezését, a napsugárzás légköri útját, és végső soron az időjárást és éghajlatot. Mivel a légköri ionok és radioaktív izotópok a levegőben

¹ A „részecske” szót ebben a tanulmányban kolloidkémiailag, és nem magfizikailag értelemben használjuk. Méretük a molekulahalmazok nanométeres (10⁹m) nagyságától mintegy 10 µm-ig (1µm=10⁶m) terjed. A nagyobb részecskék ugyanis ülepedéssel (szedimentációval) viszonylag hamar kihullnak a gázból.

részecskékre rakódnak, a légköri aeroszol vizsgálata a levegő elektromos és radioaktív tulajdonságainak jellemzése szempontjából is fontos.

Jelen tanulmányunk célja, hogy összefoglaljuk az aeroszolak fizikai-kémiai kutatásának történetét, és esetenként utalásokat tegyünk az ehhez szorosan kapcsolódó légköri aeroszol vizsgálatára. Az egyes alkalmazások, illetve a műszerfejlesztés történetének leírása egyenként külön tanulmányba kívánkozik.

Történeti előzmények

Az aeroszol szó a 20. század terméke. Ez természetesen nem jelenti azt, hogy az ember aeroszol részecskékkal, azaz porral és füsttel már sokkal régebben ne szembesült volna. Az ókorban a fatüzelés, a nyitott kohók üzemeltetése és a bányaművelés fontos egészségügyi problémákat vetett fel. *Horatius* felsorolja a fafűtés római forrásait és rámutat, hogy az épületek feketedését a tüzelés okozza. A nyitott kohókban, főleg az edények készítéséhez ólmot, a pénzérmék veréséhez rezet állítanak elő, ami jelentős ólom-, illetve rézkibocsátással jár. *Georgius Agricola* (eredeti nevén Georg Bauer, 1494–1555) egyik 1530-ban közzétett művében *Plinius* alapján megemlíti egy *Bermannus* nevű római bányászakértőt, aki ki mondja, hogy a bányászok magas halandósága a munkahelyi levegő porának köszönhető. Javasolja, hogy a bányászok viseljenek maszkot, ami csökkenti az egészségre gyakorolt káros hatásokat.

Londonban a 13. században már a széntüzelés okoz problémákat, amely a fagyóban lévő fakészleteket egyre inkább helyettesíti. A füst mennyiségét nem csak a tüzelés, hanem a mészégetés is jelentősen növeli. 1306-ban *I. Eduárd* angol király már szabályozni próbálja a kibocsátást. Megtiltja, hogy a mészégetők-

ben szenet használjanak. A tiltás ellenére a következő századokban szénrel állítják elő az üvegyártáshoz, a téglalegetéshez és a sörfőzéshez szükséges energiát, a háztartásokról már nem is beszélve. *I. Erzsébet* a 16. század végén úgy próbál a légszennyeződésen enyhíteni, hogy legalább azokra a napokra betiltja a szénhasználatát, amikor a parlament ülészik. A 16. században (pontosabban 1546-ban) jelenik meg *Agricola De natura fossilium Libri X.* című műve, amelyben a német tudós nem csak ásványtannal, hanem az ásványokból keletkező porokkal is foglalkozik. Így nem csak az ásványokat osztályozta, hanem a porokat is, amelyek belőlük származnak. Sőt arra is felfigyelt, hogy a tengerparton tengerisó-részecskék kerülnek a levegőbe.

A vulkánkitörések légköri hatásait már *Seneca* is említi (Husar, 2000). Az 1600-as és 1700-as évekig kell azonban várni, hogy kiderüljön, a vulkáni „pornak” nemcsak helyi, hanem nagyléptékű optikai következményei is vannak. Ez a nézet azután a Krakatoa-vulkán (Indonézia) 1883-as kitörése után válik teljesen nyilvánvalóvá. A 17. században figyelnek fel arra, hogy az erdő- és szavannatüzek is hatalmas területen szennyezhetik a légkört, ami a részecskék nagyléptékű terjedésére utal. A tőzegmocsarakból származó aeroszol esetén *Constantine Samuel Rafinesque* (lásd Husar, 2000) azt is felveti, feltehetően először a tudománytörténetben, hogy „... a porrészecskék² a nagy légköri kémiai laboratóriumban is keletkezhetnek”. Vitázik azzal a nézettel, hogy „... minden por a szél hatására keletkezik”.

A 19. században az aeroszolak alapkutatója is megindul. Ebben olyan neves tudósok vesznek részt, anélkül, hogy erről tudnának, mint *Ludwig Erhard Boltzmann* (1844–1906)

² Értsd: aeroszol részecskék.

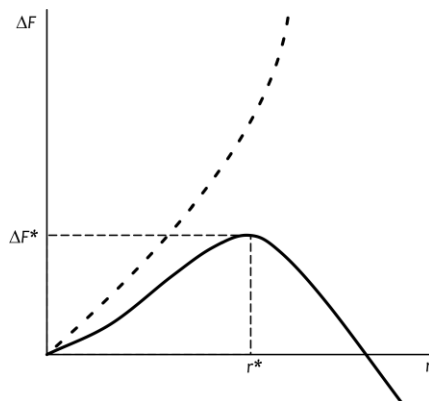
és *James Clerk Maxwell* (1831–1879), ám munkatársaik, tanítványaik és utódaik már tudatosan foglalkoznak aeroszol-vizsgálatokkal.

Az aeroszokok fizikájának alapjai: 19. század

Az aeroszokok fizikai kémiai tulajdonságainak leírásához értelemszerűen a gázok viselkedésének ismerete szükséges. Így tulajdonképpen az aeroszolkutatásokat a *kinetikus gázelmélet* kidolgozása alapozta meg. Ennek végleges megfogalmazásában, megfelelő előzmények után (például *Daniel Bernoulli* munkái), *Boltzmann* és *Maxwell* meghatározó szerepet játszott. Mint ismeretes, az elmélet szerint a gázmolekulák apró golyócskák, amelyek állandó mozgásban vannak, mozgási energiájuk az abszolút hőmérséklettel arányos. Egy-mással (és az edény falával) állandóan rugalmasan ütköznek, ennek hatására statisztikusan változik a sebességük, illetve a sebességeloszlásuk, amelyet a Maxwell-féle eloszlás ír le. Ez a megközelítés aeroszokok esetén is alkalmazható, hiszen a részecskék egymással és a gázmolekulákkal szintén folytonosan ütköznek. A molekulák energiaeloszlása (Boltzmann-eloszlás) továbbá alapvetően fontos a gőzök kondenzációjának értelmezéséhez (lásd később). Végül *Maxwell* egyik munkája a vízcseppek kondenzációs növekedésének (illetve párolgásának) leírásakor nyert alkalmazást. *Maxwell* a gömbnek feltételezett száraz és nedves hőmérők³ körüli hő- és anyag- (vízgőz) áramlással foglalkozott. Az általa levezetett egyenleteket az említett folyamat leírására még ma is sikeresen használják.

A Cavendish Laboratóriumban *Maxwell* munkatársai és utódai még a 19. században

megkezdik a korszerű aeroszolkutatásokat. *William Thomson* (1824–1907), a későbbi *Lord Kelvin*, 1870-ben egyenletet javasol a gőzkörnyezetével (labilis) egyensúlyban lévő cseppcske és a gőznyomás összefüggésének jellemzésére. Ez a ma is általánosan használatos összefüggés kimondja, hogy az egyensúlyi cseppsugár és a túltelítettség között fordított az összefüggés. Az egyensúlyban lévő csepp kialakulását statisztikus folyamatok magyarázzák. A gőzmolekulák állandó mozgásban vannak. Ezért egyesülnek, aggregátumokat képeznek, majd újra szétesnek. Túltelített környezetben azonban a nagyság elérhet egy kritikus méretet (lásd *1. ábra*), amikor a molekulák közötti vonzóerő a cseppcskét már nem engedi szétesni, sőt további kondenzáció esetén mérete jelentős nagyságot érhet el. Ehhez természetesen energiára van szükség. Ezt az energiát a kémiai termodinamika közismert amerikai úttörője, *Josiah Willard Gibbs* (1839–1903) vezette le. Így *Lord Kelvin* és *Gibbs* megalapozták a homogén kondenzáció elmé-



1. ábra • Tiszta vízcseppcskéket keletkezéséhez szükséges szabadenergia (ΔF) a cseppek sugarának (r) függvényében. A szaggatott görbe telítetlen, a folytonos túltelített gőztérre; a csillag a labilis egyensúlyban lévő állapotra utal.

³ A száraz és nedves (a higanygömböt vízzel átitatott gáz borítja) hőmérőpárt a levegő nedvességének meghatározására használják.

letét (lásd később), ez a kondenzáció az aeroszolképződés egyik fontos mechanizmusa.

Charles Thomson Rees Wilson (1869–1959) a Cavendish Laboratórium e termékeny korszakában alkalmazta először ionok kimutatására a későbbi atom- és magfizikai kutatásban világszerte elterjedt tágitási kamrát. Ezzel összefüggésben munkatársa, hosszú ideig a laboratórium vezetője, *Joseph John Thomson* (1856–1940) az ionokon történő cseppképződés feltételeit, és az elektromos térben hulló cseppek elektromos töltését határozta meg. Kutatásaikért a 20. század elején mindketten fizikai Nobel-díjat kaptak. Végül *Robert Andrews Millikan* (1868–1953) már a 20. században *Lord Kelvin* javaslatára mérte meg egyetlen izolált csepp segítségével az elektronok töltését. Munkájáért ő is Nobel-díjat kapott.

A kezdeti aeroszolkutatások fontos személysége az ír fizikus és matematikus, *George Gabriel Stokes* (1819–1903). A gömb alakú részecskék mozgását tanulmányozva vezette le az aeroszol-részecskék esési sebességét megadó, nevét viselő egyenletet (Stokes-törvény). A törvény kimondja, hogy a hulló részecskére ható nehézségi erő és a levegő ellenállása bizonyos esés után egyensúlyba kerül, és a részecske állandó esési sebességet vesz fel (Stokes, 1850). Az egyenletet, elsősorban a durva részecskék ülepedésének leírására, ma is elterjedten alkalmazzák.

Láthatjuk tehát, hogy a kezdeti aeroszol-kutatásokban (és a tudomány akkori fejlődésében) a brit kutatók fontos szerepet játszottak. Az aeroszol-tudomány fejlődéséhez azonban más európai kutatók is hozzájárultak. Közülük kiemelkednek a Boltzmann-féle

osztrák iskola tagjai, például *Felix Ehrenhaft* (1879–1952), a fotoforézis⁴ jelenségének felfedezője, illetve a lengyel, de Bécsben tanuló *Marian von Smoluchowski* (1872–1917), a koaguláció elméletének kidolgozója (később).

A 19. században végzett aeroszolkutatások fontos részét képezik az optikai vizsgálatok. Ebben a munkában *John Tyndall* (1820–1893) skót fizikus játszott meghatározó szerepet. Nevéhez két fontos felfedezés fűződik. Az egyik annak kimutatása, hogy sötét háttér előtt folyadékban vagy gázban lebegő, fénynyalábbal megvilágított részecskék csillogásuk (fényszórásuk) révén láthatóvá válnak (Tyndall-hatás,⁵ ezen alapszik az ultramikroszkóp). A másik fontos eredmény annak kimutatása, hogy fényszórásnál a szórt fény hullámhossza a részecskék nagyságának a függvénye: a fény hullámhosszánál jóval kisebb egységek (molekulák, aeroszol részecskék) a rövidebb hullámhosszakat jobban szórják. Ezt a kísérleti eredményt elméleti megfontolásokkal *Lord Rayleigh* (1842–1919) igazolta, először magyarázva meg az égbolt kék színét.

Aeroszolvizsgálatokra tágitási kamrát a francia *Paul-Jean Coulier* (1824–1890), illetve az angol *John Aitken* (1839–1919) alkalmazott először. *Wilson* a kamrát oly módon használta, hogy benne szűrt (az aeroszol részecskétől mentes) nedves levegő volt. Így tágitáskor nem a részecskéken, hanem az ionokon keletkeztek cseppecskék. *Aitken* 1880-as kísérleteiben viszont a nedvesített levegőt a részecskékkel (szóhasználat szerint porokkal) együtt szívta be a kamrába, majd hirtelen kitágította. Többszörös tágitás után azt tapasztalta, hogy a kamrában már nem keletkezett köd,

⁴ A részecskék elmozdulása fényben. Ha a részecske a fény terjedésének irányába mozdul el, akkor pozitív, ellenkező esetben negatív fotoforézisról beszélünk.

⁵ A jelenséget kolloid oldatok részecskéinek kimutatására *Michael Faraday* (1791–1867) is felhasználta, néha ezért Faraday–Tyndall-hatásnak is nevezik.

amit – helyesen – azzal magyarázott, hogy a „porok” a cseppekkel együtt kihulltak a kamrában lévő levegőből (Aitken, 1880). Ezek az eredmények az aeroszolkutatás szempontjából úttörő jelentőségűek voltak. Kimutatták, hogy a felhő- és ködcseppek a levegőben kondenzációs magvakon keletkeznek: a fázisváltás nem homogén, hanem heterogén. Benne nemcsak a kondenzálódó vízgőz vesz részt, hanem más anyagok (ti. a magvak) is. Másrészt a tágitási kamrák lehetővé tették az aeroszol részecskék számának egyszerű meghatározását. Aitken óta a kondenzációs magszámológót többen korszerűsítették. A tágitási kamrákat, számos változtatás után, még ma is használják. A leglényegesebb módosítás az volt, hogy a kamrában keletkező cseppek összeszámolására bevezették a fotoelektromos módszereket. Elsősorban a híres ír aeroszol iskola két nagy alakja⁶ Patrick J. Nolan (1894–1984) és Leo Wenzel Pollak (1888–1964) fotoelektromos számlálója vált a kutatásban igen közkedveltté.

Aitken igazolta először Rafinesque elképzelését is (lásd fent). Azt tapasztalta, hogy nedves felhős időben kisebb a részecskék száma, mint napsütötte száraz időben. Kimérte, hogy napfelkeltekor hirtelen megnő a részecskék száma. Mindebből azt a következtetést vonta le, hogy a részecskék a levegőben gázokból keletkeznek (ma ezeket másodlagos részecskéknek nevezzük), és létrejöttükben a napsugárzás fontos szerepet játszik. Ezzel előfutára volt a finom részecskék 20. században általánosan elfogadott keletkezési elméletének.

A 20. századi kutatás már alapvető ismeretek birtokában indult. A vizsgálatok egyebek között kiemelkedő eredményeket hoztak

az aeroszolak dinamikájának és optikájának kidolgozása területén. Az analitikai kémia látványos fejlődése a légköri részecskék kémiai összetételének felderítését segítette elő.

Az aeroszolak dinamikájának kidolgozása

Az aeroszolak dinamikája a részecske-tulajdonságok (koncentráció, kémiai összetétel) nagyság szerinti eloszlásának vizsgálatát jelenti. Ha eltekintünk a durva részecskék gravitációs ülepedésétől, akkor adott aeroszol dinamikáját alapvetően a részecskék keletkezésének, illetve koagulációjának sebessége szabja meg. Amennyiben áramló közegben vizsgáljuk a folyamatot, akkor a transzport folyamatokat is figyelembe kell vennünk. Ez utóbbival a továbbiakban nem foglalkozunk,⁷ mivel elsősorban az aeroszol részecskék terjedése és nem dinamikája szempontjából van jelentősége.

Az aeroszol-dinamikai kutatások megapozásának kezdete a 19. század első évtizedeire, Robert Brown (1773–1858) munkásságára nyúlik vissza. Brown orvos-biológus volt, aki virágos növények megtermékenyítésével foglalkozott. Nyilván sosem gondolt arra, hogy kutatásainak nem a biológia, hanem a kolloidok kémiája szempontjából lesz jelentősége. A vízben lebegő kicsiny (2 µm-nél kisebb) pollenek mikroszkópos tanulmányozásakor észrevette, hogy azok véletlenszerű mozgást végeznek. Először úgy vélte, hogy a mozgást valamilyen biológiai hatás okozza, ám mikor a kísérletet ásványi szuszpenziókkal ismételte meg, azt tapasztalta, hogy a véletlen mozgás ebben az esetben is fellép.

⁷ Az áramlás hatása a kontinuitási egyenlettel írható le: adott térfogatban az időegység alatti koncentrációváltozás a belépő és kilépő anyagmennyiség különbségével egyenlő. A kontinuitási egyenlet egyébként az Euler-féle egyenletből következik, amely nulla viszkózitású folyadékok áramlására alkalmazható.

⁶ Pollak Prágában született. Később azonban felvette az ír állampolgárságot.

Mintegy száz év múlva a Brown-féle mozgás elméletét *Marian von Smoluchowski* alkalmazta a folyadékban lebegő kicsiny részecskék ütközésének leírására.⁸ Egyenlete megadja, hogy a kezdetben azonos nagyságú (ún. monodiszperz) részecskékből az idő függvényében milyen különböző nagyságú (polidiszperz) részecskék alakulnak ki (Smoluchowski, 1918). Formulájából az is következik, hogy a koaguláció sebessége arányos a koncentráció négyzetével, illetve különböző nagyságú részecskékénél a két koncentráció szorzatával. Függ továbbá a részecskék diffúziós állandójától, amely viszont fordítva arányos a részecskék nagyságával. Ebből következik, hogy minél kisebbek a részecskék, illetve minél nagyobb a koncentrációjuk, annál nagyobb a koaguláció sebessége.

Smoluchowski elméletét hidroszolokban többen is igazolták. Laboratóriumi mérésekkel csak jóval később mutatják ki (Whytlaw-Gray – Petterson, 1932), hogy az egyenlet elvileg aeroszolok esetén is alkalmazható. Később a koagulációs egyenletet többen pontosították, elsősorban a gázmolekulák közepes szabad úthosszának figyelembe vételével. Ebben a munkában az orosz kutatók játszottak fontos szerepet. *Nyikolaj Albertovics Fuksz* (Nikolai Albertovich Fuchs; 1895-1982) és munkatársai olyan koagulációs egyenletet vezettek le, amely a részecskénagyságnak és a gázmolekulák szabad úthosszának bármely arányánál alkalmazható (Fuchs, 1964).

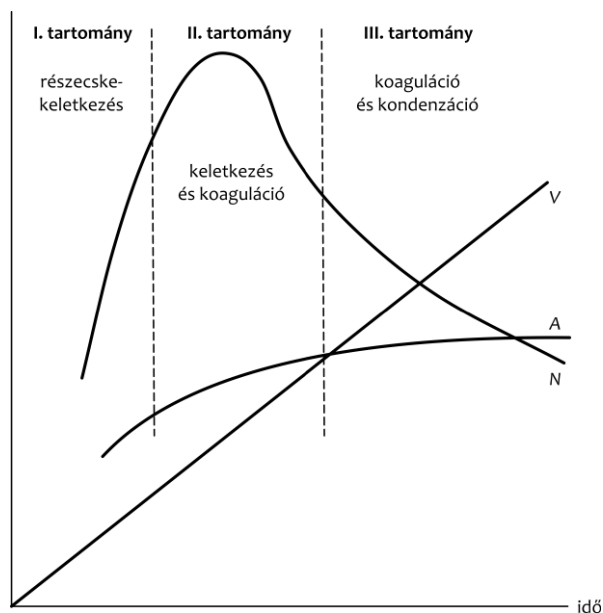
A finom aeroszolok keletkezésének általános módja a *nukleáció*. Ez olyan fázisváltás, amelynek során a rendezetlenebb fázisból rendezettebb fázis keletkezik, általában a tér

meghatározott pontjain. Ennek tipikus esete folyadékcspekpek keletkezése a túltelített, metastabilis gőztérben. A homogén nukleáció kinetikáját a 20. század húszas-harmincas éveiben dolgozták ki elsősorban német kutatók (lásd pl. Volmer, 1933). Az elmélet megalkotásakor a szerzők két feltevéssel éltek. A keletkező molekulaaggregátumok egyrészt makroszkopikus cspekpeknek tekinthetők, amelyek a folyadékra jellemző felületi feszültséggel rendelkeznek. Másrészt a cspekcskék létrehozásához szükséges energia (lásd előző pont) a Boltzmann-féle eloszlást követi. A kidolgozott elméletből következik, hogy a labilis egyensúlyban lévő cspekcskék keletkezési sebessége adott hőmérsékleten exponenciálisan függ a létrehozásukhoz szükséges energiától. Természetesen az sem kizárt (pl. a levegőben), hogy adott gőz *kondenzációja* már létező aeroszol részecskéken megy végbe.

Az aeroszolok dinamikájának elvi lényegét a 2. *ábra* mutatja be, amely aeroszolkamrás, laboratóriumi kísérletek alapján készült (Friedlander, 1978). Látható, hogy kezdetben (*I. tartomány*) a részecskék száma az idő múlásával a kamrában folytonosan növekszik. A növekvő koncentráció azonban növeli a részecskék ütközési valószínűségét, azaz a koagulációt. Adott időpontban a nukleáció és koaguláció sebessége kiegyenlíti egymást (*II. tartomány*), majd a koaguláció kerül túlsúlyba: a részecskék száma csökken (*III. tartomány*). Eközben a részecskék teljes tömege lineárisan növekszik, mivel értéke független a koagulációtól. Végül a részecskék teljes felülete állandó érték felé tart.

A vázolt dinamika eredményeit légköri aeroszokra először *Christian E. Junge* (1912–1996), a levegőkémia megalapítója alkalmazta (Junge, 1963). Kimutatta, hogy a koaguláció jelentősen csökkenti a 0,1 µm-nél kisebb

⁸ A részecskék közepes elmozdulásának négyzetét megadó egyenletet Albert Einstein vezette le 1905-ben. Egyenletét öt év múlva Jean Perrin francia kutató kísérletileg igazolta.



2. ábra • Aeroszlrészecskék számának (N), felületének (A) és térfogatának (V) változása az idő függvényében (lásd a szöveget).

részecskék számát, de csak mérsékelten növeli a nagyobb részecskék koncentrációját. Junge abból a feltételezésből indult ki, hogy a nagyság szerinti eloszlásban ($dN/d\log r$, ahol N a részecskék száma, r a sugara) egyetlen maximum van $0,01 \mu\text{m}$ és $0,1 \mu\text{m}$ között, és a nagyobb részecskék eloszlása az $1/r^3$ értékkel arányos. Ebből következett, hogy az idő múlásával a térfogat eloszlása $0,1 \mu\text{m}$ és $10 \mu\text{m}$ tartományban egyre inkább állandóvá vált. Ezt támasztották alá *Sheldon K. Friedlander* (1927–2007) számításai, amelyek szerint a nagyság szerinti eloszlás egyre inkább egy „önmegőrző” eloszlás felé közelít.

Kaliforniában, a hatvanas évek végén, a hetvenes évek elején végzett intenzív aeroszolkutatások alapján *Kenneth Thomas Whitby* (1925–1983) és munkatársai mutattak rá, hogy a Junge-féle „kitevős” törvény csak megközelítőleg érvényes, és az eloszlásban több maxi-

mum található. Ezt az elképzelést *Whitby* (1978), majd mások a Föld különböző részein, különböző környezeti feltételek mellett végzett mérések eredményeivel igazolták. Az elképzelést a nukleációt és a koagulációt figyelembe vevő dinamikai számítások is megerősítették. Mint a 3. ábrán látható, a részecskék nagyság szerinti spektruma három eloszlásból tevődik össze. A legkisebb részecskék nukleációval keletkeznek. Koncentrációjuk jelentős, ezért koagulációval gyorsan átnőnek az akkumulációs tartományba (második eloszlás), ahol anyaguk felhalmozódik. Ezt elősegíti a gőzök állandó kondenzációja is. Ebből következik, hogy a nukleációs és akkumulációs tartományokban a részecskék kémiai összetétele hasonló. Ezzel szemben a durva tartományban (harmadik eloszlás) a részecskék a felszín elaprózódása útján keletkeznek, így összetételük különbözik a kisebb

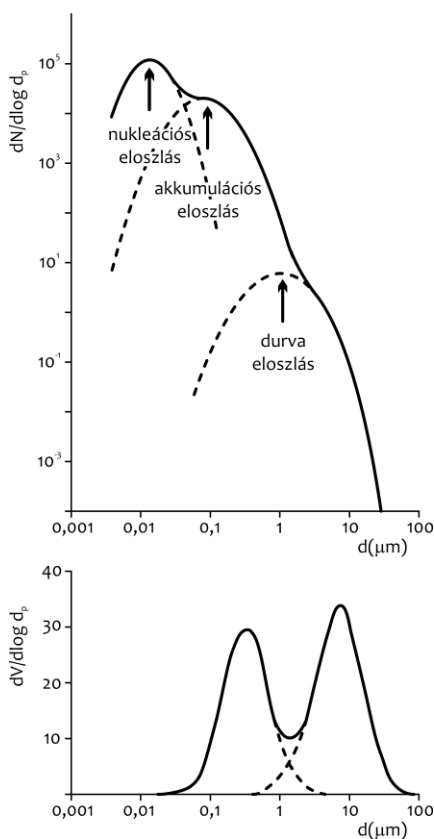
részecskék összetételétől. Az ábrából az is következik, hogy a nukleációs tartományban a kicsiny részecskék térfogata nagy számuk ellenére elhanyagolható. Így a térfogat eloszlása két maximummal rendelkezik. Az egyik maximum az akkumulációs, a másik a durva tartományban található. A két maximum közötti minimum pontosan ott helyezkedik el, ahol Junge állandó értékkel számolt.

Ez az elképzelés, mint látjuk, lehetővé teszi a légköri aeroszol eloszlásának megmagyarázását a részecskék keletkezésének függvényében. Ráadásul a kémiai összetétel nagyság szerinti változását is alátámasztja, mivel kimondja, hogy a finom és a durva részecskék lényegében függetlenek egymástól, így kémiai összetételük is különbözik.

Kémiai összetétel: kondenzációs magvak

Az aeroszol részecskék környezeti hatásai, nagyságukon (és formájukon) kívül, kémiai összetételük függvénye. A 20. század ötvenes éveig a légköri részecskék kémiai összetételéről nem sokat tudtunk. Amit tudtunk, az is elsősorban a durva részecskékre (porokra) vonatkozott. Ugyanakkor a „füst” kémiai összetétele csaknem teljesen ismeretlen volt. Szokásos volt az „égéstermékek” kifejezés használata, ami a finom részecskék egy részének keletkezésére utalt. A század második felében a mintavételi eszközök és az analitikai kémiai eljárások hatalmasat fejlődtek. Ennek köszönhetően ma már elég pontosan ismerjük a légköri aeroszol kémiai összetételét annak ellenére, hogy a szerves anyagok részletes jellemzése még napjainkban is nehézségekbe ütközik.

A *Monthly Weather Review* című folyóiratban 1901-ben megjelent tanulmányában *Milutin Baruč* Fiumében a leülepedő szaharai por mikroszkópos tanulmányozásáról szá-



3. ábra • Légköri aeroszolzészecskék számának (N) és térfogatának (V) nagyság (d : átmérő) szerinti eloszlása

molt be (lásd Husar, 2000). *Baruč* az azonosított komponensek mennyiségét a teljes ülepedő tömegre vonatkoztatta. Megvalósította, amit ma *tömeg-mérlegvizsgálatnak* nevezünk. Eredményei szerint a vöröses színű porban a szilícium, az alumínium, a vas és a kalcium oxidjai adták a tömeg több mint háromnegyedét. Érdekes, hogy a szerző bizonyos mennyiségű szerves anyag jelenlétéről is beszámolt. Ma már számos mérés bizonyítja, hogy az ülepedést meghatározó durva részecskék szárazföldi környezetben valóban az említett elemekből állnak, amelyek (a nitrátot

tartalmazó vegyületeket kivéve, lásd később) vízben oldhatatlan vegyületeket alkotnak.

Már régóta ismert volt (lásd fent), de csak a 20. század elején terjedt el az a nézet, hogy a tenger hullámlásakor sórészecskék kerülnek a levegőbe. Tekintve, hogy déren és zúzmarában több helyen kimutatták a nátrium- és kloridionokat, kézenfekvőnek látszott annak feltételezése, hogy a kondenzációs magvakat tengeri só építi fel. Mint látni fogjuk, ez a feltételezés később tévesnek bizonyult. Ez indította azonban *Hilding Köhler* (1888–1982) svéd professzort arra, hogy kidolgozza a vízben oldódó részecskéken keletkezett cseppek termodinamikáját. Eredményeit több tanulmányban publikálta, amelyeket a harmincas évek második felében foglalt össze (Köhler, 1936). Legfontosabb eredménye a tiszta víz-cseppekre vonatkozó Kelvin-formula (lásd fent) módosítása volt. Kimutatta, hogy az egyensúlyi cseppsugarhoz tartozó gőznyomás értékét a cseppecskében oldott só jelentősen csökkenti. Így az oldódó részecskék igen aktív kondenzációs magvakat szolgáltatnak. Eredményeiből az is következett, hogy az oldódó részecskéken (Köhler szerint tengeri só magvakon) 100%-os relatív nedvesség alatt is keletkeznek oldatcseppek. Ezek azonban gőzkörnyezetükkel nem labilis, hanem stabilis egyensúlyban vannak (angolul *haze particles*, magyarul nincs rá megfelelő kifejezés). Elméletét támogatta a légköri látótávolság és a relatív nedvesség fordított összefüggése, ami arra utalt, hogy az aeroszol részecskék a relatív nedvesség (gőznyomás) növekedésével növelik optikai keresztmetszetüket. Később az oldódó részecskék nagyságának és a relatív nedvességnek a kapcsolatát laboratóriumban is kimérték (lásd Junge, 1963).

A harmincas évek végén, a negyvenes évek elején megindult a felhőcseppek (ködcep-

pek) koncentrációjának és nagyság szerinti eloszlásának mérése. Ezek eredményéből kiderült, hogy a cseppek koncentrációja jóval kisebb, mint a tágítási kamrával megmért aeroszolrészecske-szám. Így – persze jóval későbbi megfigyelések szerint – Magyarországon vidéki levegőben az aeroszol részecskék teljes száma 10^4 cm^{-3} nagyságrendű, míg a felhőcseppek koncentrációja 10^2 – 10^3 cm^{-3} . A ködökben a cseppkoncentráció még kisebb: 1 cm^3 levegőben 1–10 csepp található. Ez arra utalt, hogy a felhőkben nagyságrendekkel kisebb a túltelítettség, mint a tágítási kamrákban, így az aeroszolrészecskéknek csupán egy része szolgál kondenzációs magként. *Köhler* elméletéből következett, hogy ezt a hányadot vízben oldódó anyagok alkotják. Ugyanakkor a tengeri só magvak korszerű mérése szerint számuk még tengeri levegőben is jóval kisebb, mint a felhőcseppeké.

A kis túltelítettségek előállítására alkalmas *diffúziós kamrákat* az ötvenes években az ír származású, de Ausztráliában és az Amerikai Egyesült Államokban tevékenykedő *Sean A. Twomey* (1927–) alkalmazta légköri kutatásokra. A kamrákban a gyenge túltelítettséget két különböző hőmérsékletű vízfelület (a gyakorlatban vízzel átitatott szűrőpapír) közötti gőzdiffúzió alakítja ki. A hőmérsékletkülönbséget változtatva az aktuális aeroszolban lévő *felhőkondenzációs magvak*⁹ száma a túltelítettség függvényében határozható meg (Twomey, 1977).

A vízben oldódó részecskék természete az ötvenes években vált ismertté. *Junge* kimutatta, hogy az ő osztályozása szerint „nagy” részecskék ($0,1 < r < 1,0 \text{ } \mu\text{m}$, ahol r a részecskék sugara) vízben oldódó hányada szulfát- és

⁹ A kifejezésben a „felhő” szó arra utal, hogy a kamrában a túltelítettség hasonló, mint a légköri felhőkben.

ammóniumionokból, kisebb részben nitrátionokból áll. Ezzel szemben a durva (Junge szerint „óriás”: $r > 1 \mu\text{m}$) tartományban, főleg tengeri levegőben, nátrium, klorid és nitrát mutatható ki. Junge úgy okoskodott, hogy a szulfát- és ammóniumionok (asztochiometriai arányuk szerint *ammónium-szulfát* vegyület) kénsavgőzből és ammóniából kondenzációval keletkeznek. A kénsav viszont a kén-dioxid oxidációjának terméke. A durva intervallumban a nátrium és klorid tengeri sóból származik, míg a nitrát nitrogén tartalmú gőzök és gázok (salétromsav, nitrogén-dioxid), valamint a tengeri só, illetve talaj eredetű részecskék kölcsönhatása útján jön létre (Junge, 1963). Később kiderült, hogy a $0,1 \mu\text{m}$ -nél kisebb részecskék is nagymértékben ammóniumból és szulfátból állnak, különösen olyan esetekben (szennyezett levegő), amikor az előgázok koncentrációja jelentős. Nagy érdeklődést keltett, amikor *Mészáros Ágnes* (1935–1986) elektronmikroszkópos mérései kimutatták, hogy a Déli-félgömb óceáni levegőjében is a finom részecskék elsősorban ammónium-szulfátból (kisebb részben kénsavból) állnak (Mészáros – Vissy, 1974). Később derült ki, hogy ezek a részecskék *dimetil-szulfid* (DMS) oxidációs termékeiből keletkeznek, amelyet az óceáni bioszféra bocsát a levegőbe.

Jean Bricard (1907–1988) és munkatársai sokat tettek a levegő elektromos tulajdonságainak, az elektromosan töltött aeroszol részecskék és a radioaktív ionok nagyság szerinti eloszlásának megismerése érdekében. Ezen a téren a francia aeroszol iskola úttörő eredményeket ért el. Ugyanakkor a közvetett fotokémiai jelenség felfedezésével a francia kutatók az aeroszol részecskék keletkezésének értelmezését is nagymértékben elősegítették. Így kimutatták, hogy a laboratóriumi kam-

rába szívott, az aeroszoltól megtisztított nap-sütötte levegőben mindig keletkeznek részecskék, ami arra utal, hogy a levegőben, gáz halmazállapotban jelen vannak olyan anyagok (gyökök¹⁰), amelyek a nyomgázokból részecskét hoznak részre. Tekintve, hogy a jelenség éjjel nem figyelhető meg, az aktív gyökök nyilván fotokémiai úton keletkeznek (Bricard et al., 1968).

A szerves légköri részecskék jelenléte már régóta ismeretes. De csak a 20. század közepe után vált egyre valószínűbbé, hogy többségük a bioszféra által kibocsátott gázokból a levegőben keletkezik (ez persze nem vonatkozik például a pollenekre). A folyamat eredménye szemmel is látható, hiszen az erdők fölött sokszor kékes aeroszolórtég figyelhető meg („*blue haze*”, lásd Went, 1966). Bár az aeroszol képződés részletes magyarázata még ma sem teljesen világos, feltételezhető, hogy a részecskék a fák által kibocsátott terpénekből (tülevelű erdők), illetve izoprénből (lombos erdők) jönnek létre. Mindenesetre a biológiai aeroszolban lipideket már vagy harminc éve sikerült azonosítani. Másrészt a *Junge* által vezetett mainzi kutatócsoport úttörő mérései szerint, a háttér (közvetlenül nem szennyezett) levegőben az éterben oldódó, a neutrális, a savas és a bázisos szerves vegyületek teljes mennyisége az aeroszol részecskék tömegének 1–10%-át teszi ki.

A természetes eredetű szerves részecskék vizsgálata azonban hosszú ideig háttérbe szorult. A kutatásokat elsősorban szennyezett levegőben végezték, mivel a gépkocsik számos szerves gázt és aeroszol részecskét juttatnak a levegőbe. Ez utóbbiak kisebb részben

¹⁰ Pontosabban szabad gyökök, amelyek nagyon reakcióképesek, mivel külső elektronpályájukon az elektronok száma páratlan. a gyökök közül a *hidroxilgyök* a legfontosabb.

„elemi” szénből, nagyobb részben szerves anyagokból állnak. A szerves gázokból ózon és oxigént tartalmazó szabad gyökök jelenlétében másodlagos részecskék keletkeznek. Az aeroszolmintában lévő szerves szén mennyiségét viszonylag egyszerűen meg lehet határozni. Ezzel szemben az egyes komponensek azonosítása komoly nehézségekbe ütközik. Így a legkorszerűbb analitikai eljárások alkalmazásával is csak a szerves szén tömegének 10%-át lehetett vegyületekhez, vagy vegyületcsoportokhoz kapcsolni (Rogge et al., 1993). Az idézett szerzők és más kutatók a mintákból a szerves anyagokat szerves oldószerekkel vonták ki. A légkörben azonban a víz a természetes oldószer. A legújabb vizsgálatok azt mutatják, hogy a szerves vegyületek a légköri aeroszolban a *humín anyagokhoz* hasonló módon viselkednek, és jelentős részük, mint a fulvósavak, vízben oldódik. A finom részecskék tartományában tömegük összevethető az ammónium-szulfát koncentrációjával. A szerves anyagok és az ammónium-szulfát a finom tömeg legalább kétharmadát alkotják. Valószínű, hogy a szerves részecskék legalábbis módosítják a felhő- és ködképződési folyamatokat. A vízben oldódó szerves részecskék keletkezésének és környezeti hatásainak feltárása a jelenlegi vizsgálatok fő feladata: az ilyen jellegű kutatásoknak inkább jövője, mint múltja van.

Optikai tulajdonságok

Lord Rayleigh elmélete (lásd fenn) olyan részecskékre vonatkozik, amelyek mérete jóval kisebb, mint a fény hullámhossza. Az aeroszol részecskék jelentős részének az átmérője azonban összevethető a fény hullámhosszával, míg a felhőcseppek mérete (átlagosan 10 μm) a hullámhossznál jóval nagyobb. Ezek keresztmetszete viszonylag nagy, és a fényt a hullám-

hossztól függetlenül szórják. Ezért fehér az aeroszolóréteg, ha felülről, repülőgépről nézzük, és ezért fehérek a felhők. Ilyen esetekre a gömb alakúnak feltételezett részecskék szórási elméletét a német fizikus, *Gustav Mie* (1868–1957) dolgozta ki, aki híres cikkét 1908-ban, az elmélet megalkotása után több évvel publikálta (Mie, 1908). A késés annak volt tulajdonítható, hogy *Mie* tulajdonképpen nem foglalkozott aeroszollokkal (levezetése hidroszolóokra vonatkozik), és ezt a munkáját nem is tartotta jelentősnek. Jellemző, hogy az élete vége felé írt önéletrajzában ezt a cikket meg sem említi.

Ugyancsak lényegtelennek tartotta az erre vonatkozó munkáját *Ludwig Lorenz* (1829–1891) dán elméleti fizikus, aki a témát csupán azért vette elő, mivel matematikai kihívásnak tartotta. Az elmélet kidolgozásához ugyanis szükség volt a 19. század nagy matematikai eredményeire (Legendre-polinomok és -függvények, Bessel-függvények stb.). *Lorenz* az 1890-ben végezett munkáját csak dánul publikálta, utána nem törődött vele, majd rövidesen elhunyt. Így az elméletet ma Mie-elméletként tartjuk nyilván.

Érdekes, hogy a részecskék szórásával a holland származású amerikai fizikus és kémikus *Peter Debye* (1884–1996) is foglalkozott, aki 1936-ban a molekulák szerkezetének vizsgálatáért kapott Nobel-díjat. Az sem érdektelen, hogy *Debye* az ilyen jellegű kutatásait meghatározott céllal végezte. Olyan elméletet akart megalkotni, amely felhasználható az üstökösök csóvjának, azaz a sugárzási nyomás megmagyarázására.

A fényelnyelés elméletét *James E. McDonald* (1920–1971) dolgozta ki 1962-ben. *McDonald* nagyszerű légkörfizikus volt, de leginkább mint *UFO*-szakértő vált ismertté. Az abszorpciót kevesebben tanulmányozták, mint a

fényszórást. Ez annak is köszönhető, hogy a fénygyengülést a levegőben elsősorban a szórás határozza meg. Hazai vizsgálatok szerint a fénygyengülés mintegy 90%-áért a szórás felelős. A kisebb fényelnyelést elsősorban a finom részecskék tartományában található elemi szénrészecskék okozzák.

Záró megjegyzés

Az aeroszol-kutatás a 20. század második felében hatalmasat fejlődött. Előmozdítására sorra alakultak országos és nemzetközi társaságok. A *Magyar Aeroszol Társaság* 1997-ben alakult és 1999-től tagja az *Európai Aeroszol Társaságnak*. Megjelentek a specializált nemzetközi folyóiratok, és rendszeresen szerveznek nagy érdeklődéssel kísért konferenciákat.

Az aeroszolkutatások fontosságát egyebek között az is jelzi, hogy 1999-ben Bécsben megrendezték az első konferenciát, amely az *aeroszolkutatások történetével* foglalkozott. Az elhangzott előadásokat az Osztrák Tudományos Akadémia jelentette meg. A kötet zárószavában *Othmar Preining* (1927–2007) egyebek között megállapítja: „Az aeroszol-kutatás ma már nem kis alaptudomány. Nagy Tudománnyá vált, jelentős beruházásokkal és gazdasági következményekkel”. Fontosságát tekintve az aeroszol tudomány fejlődése a jövőben tovább folytatódik, minden bizonnyal a magyar kutatók hozzájárulásával.

Kulcsszavak: *aeroszol-tudomány, tudomány-történet, légköri aeroszol*

IRODALOM

- Aitken, John (1980): On Dust, Fogs and Clouds. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*. 30, 337–368.
- Bricard, Jean – Billard, F. – Madelaine, G. (1968): Formation and Evolution of Nuclei of Condensation That Appear in Air Initially Free of Aerosols. *Journal of Geophysical Research*. 73, 4487–4496.
- Friedlander, Sheldon K. (1978): A Review of the Dynamics of Sulfate Containing Aerosols. *Atmospheric Environment*. 12, 187–195.
- Fuchs, N[ikolai] A[ilbertovich] (1964): *The Mechanics of Aerosols*. Pergamon Press, Oxford
- Husar, Rudolf B. (2000): Atmospheric Aerosol Science before 1900. In: Preining, Othmar (ed.) *History of Aerosol Science*. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, 25–36. • <http://tinyurl.com/4xcfpwb>
- Junge, Christian E. (1963): *Air Chemistry and Radioactivity*. Academic Press, New York.
- Köhler, Hilding (1936): The nucleus in and the growth of hygroscopic droplets. *Transactions of the Faraday Society*. 32, 1152–1161.
- Mészáros Ágnes – Vissy Károly (1974): Concentration, size distribution and chemical nature of atmospheric aerosol particles in remote oceanic areas. *Journal of Aerosol Science*. 5, 101–110.
- Mie, Gustav (1908): Beiträge zur Optik trüber Medien spezieller kolloidaler Metallösungen. *Annalen der Physik* 25, 77–445.
- Rogge, Wolfgang F. – Mazurek, M. A. – Hildemann, L. M. – Cass, G. R. (1993): Quantification of Urban Organic Aerosols at a Molecular Level: Identification, Abundance and Seasonal Variation. *Atmospheric Environment*. 27A, 1309–1330.
- Schmauss, August – Wigand, Albert (1929): *Die Atmosphäre als Kolloid*. Vieweg und Sohn, Braunschweig.
- Smoluchowski, Marian v. (1918): Versuch einer mathematischen Theorie der Koagulationkinetik kolloidaler Lösungen. *Zeitschrift für Physikalische Chemie*. 92, 129–168.
- Stokes, George Gabriel (1850): *Collected Works*. Vol. 3. Cambridge Univ. Press, Cambridge (UK), 55–67.
- Twomey, Sean A. (1977): *Atmospheric Aerosols*. Elsevier, Amsterdam
- Volmer, Max (1933): *Kinetik der Phasenbildung*. Steinkoff, Dresden–Leipzig
- Went, F[riz] W[armolt] (1966): On the Nature of Aitken Condensation Nuclei. *Tellus*. 18, 549–556. • <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.2153-3490.1966.tb00268.x/pdf>
- Whitby, Kenneth T. (1978): The Physical Characteristics of Sulfate Aerosols. *Atmospheric Environment*. 12, 135–159.
- Whytlaw-Gray, Robert Whytlaw – Patterson, Hubert Sutton (1932): *Smoke: A Study of Aerial Disperse Systems*. Edward Arnold and Co., London

A BUDAPESTI NEUTRONKÖZPONT SZEREPE AZ EURÓPAI KULTURÁLIS ÖRÖKSÉG KUTATÁSÁBAN – CHARISMA

Kasztovszky Zsolt

PhD, tudományos főmunkatárs,
MTA Izotópkutató Intézet
kzsolt@iki.kfki.hu

Bevezetés

Kulturális örökségünk tárgyi emlékeinek (műemlék épületek, szobrok, festmények, régészeti leletek, történelmi kéziratok stb.) megóvása egyre nagyobb szerepet kap az alkalmazott kutatások körében, mind Európában, mind Európán kívül. A modern tudományok kísérleti vívmányait már az 1950-es évektől kezdve igyekeztek az ún. „humán” tudományok, például a régészet, a történettudományok szolgáltatásban is hasznosítani. Közismert példa erre a törekvésre a radiokarbon kormeghatározás, amelyet Willard F. Libby 1949-ben dolgozott ki, és amelyért 1960-ban kémiai Nobel-díjat kapott (Molnár, 2006). Ahogy az analitika eszköztára bővült, úgy gazdagodott az archeometriai kutatások palettája is. Napjainkban *archeometriának* nevezzük valamennyi, a kulturális örökség kutatásában alkalmazott természettudományos (fizikai, kémiai, biológiai, geológiai stb.) módszereket alkalmazó kutatást. Az archeometriában a fő kérdéseket általában a humán tudományok művelői, régészek, muzeológusok, restaurátorok, műgyűjtők teszik fel a természettudósoknak. A felvetett kérdések a

következő fő témakörökbe sorolhatók: kormeghatározás; leletek eredetének meghatározása, idegen szóval proveniencia-vizsgálat (ide tartozik a nyersanyag eredetének meghatározása vagy a készítés helyének, a műhelyeknek azonosítása); készítési technológiákra, illetve a tárgyak használatára vonatkozó vizsgálatok. Tágabb értelemben az archeometriához tartozik a műtárgyak eredetiségének megállapítása, valamint az állagmegóvást célzó kutatások. A vizsgált anyagok szerint megkülönböztetjük a kőszeközök, kerámiák, fémek, üvegek, valamint a „szerves anyagok” archeometriáját.

Az archeometria sajátossága, hogy a vizsgálat során nem szabad kárt tenni a vizsgálandó mintában, azok többnyire értékes, pótolhatatlan műkincsek, leletek. Ezért lehetőség szerint igyekszünk roncsolással nem járó elemzéseket végezni.

A neutronok

A kutatóreaktorokból kivezetett neutronnyalábok több szempontból alkalmasak roncsolásmentes anyagvizsgálatok elvégzésére. A anyagvizsgálat nukleáris módszereinek egy jelentős csoportja a neutronok különböző