

**SZIMULÁCIÓS MODELLEK AEROSZOLOK
RUGALMAS FÉNYSZÓRÁSON ALAPULÓ
JELLEMZÉSÉRE KÜLÖNÖS TEKINTETTEL A FOTON
KORRELÁCIÓS KÍSÉRLETEKRE A NANOMÉTERES
MÉRETTARTOMÁNYBAN**

Tézisfüzet

VÁMOS LÉNÁRD

TÉMAVEZETŐ: Dr. JANI PÉTER

MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet
Budapest
(2010)

A kutatások előzménye

Az aeroszolok¹ sok évre visszanyúló tárgyköre az alapkutatások és az alkalmazások számos területére van kihatással. Az optika, hőáramlás, biológia, meteorológia és környezetvédelem csak néhány példa, ahol a gázban eloszló parányi részecskék kulcsfontosságú szerepet töltenek be. Az aeroszol részecskék jellemezhetőek a méretük, összetételük, alakjuk, tömegük, sűrűségük, töltésük, színük, számuk vagy a gáz-részecske fázisegyensúly stb. alapján, de nem létezik olyan eljárás, amellyel minden tulajdonság egyszerre mérhető volna. A rugalmas fényszóráson alapuló mérésekből pl. a méret, törésmutató vagy koncentráció határozható meg, a rugalmatlan fényszórást (Raman-szórás, fluoreszcencia) használó módszerekkel a molekulakötésekről, összetételről nyerhetünk információt. Nagyon gyakran az optikai módszerek nyújtják az egyetlen lehetőséget az aeroszolok tulajdonságainak tanulmányozására (csillagászati megfigyelések, csillag fényességmérések, műholdas távérzékelés, áramlásoknak vagy égési folyamatoknak valós idejű beavatkozás-mentes vizsgálata).

A fényszóráson alapuló technikák széles családjának tagjai egy-két paraméter mérésére, ill. különböző mérési körülményekre specializálódtak. A dinamikusan fejlődő aeroszol tudomány ugyanakkor az alkalmazott technikák újabb és újabb fejlesztését igényli (valós idejű környezet/folyamat vizsgálat, biológiai és kémiai reakciók vizsgálata, nanorészecskék jellemzésére kidolgozott módszerek érzékenységeinek finomítása).

A nanorészecskék (100 nanométernél kisebb részecskék) különleges mechanikai, optikai, biokémiai ill. katalitikus tulajdonságaik miatt váltak érdekessé. Újabb és újabb kísérleti és elméleti módszerek szükségesek ill. jönnek létre a nanorészecskék kialakulásnak és viselkedésének vizsgálatára. A nanorészecskékből álló aeroszolok hatással vannak a környezetre, a globális klímára, befolyásolják egészségi állapotunkat (különösen az ipari dolgozóknál), továbbá fontos szerepet töltenek be az anyaggyártásban (félvezető ipar), hadászatban, biztonságtechnikában és természetesen a nanotechnológiában. Az alkalmazások egyre táguló tere nagy pontosságú méréseket igényel a gyártási folyamatok vizsgálatában is.

Másrészről a modern mechatronikai rendszerek méretbeli csökkenése - a mikrométeres tartománytól a nanométeres felé - lehetőséget nyújt a nanométeres objektumok vizsgálatára és jellemzésére. Ily módon a

¹ Általában a gáz fázisban diszpergált (elszórta levő) mikroszkópikus szilárd vagy folyékony részecskéket nevezünk aeroszoloknak, pl. füst, óceán pára, kód, légszennyeződés, szmog, könnnygáz.

Konferencia kivonatok:

- OUTL.1. Jani P, Vámos L, *Improved algorithm for the particle size measurement in photon correlation measurements*; In: *Proceedings of the European Aerosol Conference EAC2005 (Ghent, Belgium, 28 Aug.-2 Sept., 2005)*; Ed.: W. Maenhaut, 83, 2005
- OUTL.2. Jani P, Vámos L, *Scattering properties of coated nanoparticles compared to water droplets, 7th International Aerosol Conference IAC2006 (St. Paul, Minnesota, USA, 10-15 Sept., 2006, 490p.)*
- OUTL.3. Vámos L, Jani P, *Wavelength and refractive index independent number concentration determination algorithm for ensemble of aerosol particles, European Aerosol Conference EAC 2007, Salzburg, Austria, 9-14. Sept. 2007, T02A043*

További tudományos közlemények

- OUTL.4. Jani P, Vámos L, *Accuracy of light propagation direction measurement by scattered intensities*; *Journal of Aerosol Sciences*; 35, 273-275, 2004
- OUTL.5. Vámos L, Jani P, *Monitoring of growth of cloud droplets ensembles with soot and salt condensation nuclei, European Aerosol Conference EAC 2009, Karlsruhe, Germany, 6-11. Sept. 2009, T091A30*

Irodalmi hivatkozások listája

- [Koukoulas. 2008] Koukoulas T., Theobald P.D., *Optical Interferometry Measures the Deflection of Carbon-Based Nanosensors, EUROPhotonics, June 2008*
- [Naqwi Amir A. 1996] Naqwi Amir A, Menon Rajan, Fingerson Leroy M, *An adaptive phase/Doppler system and its applications including particle sizing in submicron and nanometer ranges Experiments in Fluids. Vol. 20, no. 5, pp. 328-334. Mar. 1996*
- [Cummins és Pike, 1976] Cummins H.Z. and Pike E.R., *Photon Correlation Spectroscopy and Velocimetry, Plenum Press, 1976*
- [Jani P. et al., 2001] Jani P., Nagy A., Lipp Z., Czitrovsky A., *Simultaneous velocity and size measurement of particles in photon correlation experiments, SPIE V. 4416, 236-240, 2001.*
- [Vámos L., 2003] Vámos L., *Nanorészecskék méretének és sebességének szimultán meghatározása rugalmas fényszórás módszerével, BME, 2003*

A tézispontokhoz tartozó tudományos közlemények

Referált folyóiratok:

- REF.1. Jani P, Vámos L, Photon correlation experiments for simultaneous velocity and size measurement of submicron particles; APH B) *Quantum Electronics*, 20, 177-184, 2004 imp. fact.: 1.397
- REF.2. Jani P, Vámos L, Nemes T, Timing resolution (FWHM) of some photon counting detectors and electronic circuitry, *Meas. Sci. Technol.* 18 155-60 2007 doi:10.1088/0957-0233/18/1/019, imp. fact: 1.493
- REF.3. Vámos L, Jani P, Nanoparticle sizing algorithm for photon correlation LDA, *Optical Engineering*, 49, 1, 2010, imp. fact: 0.722

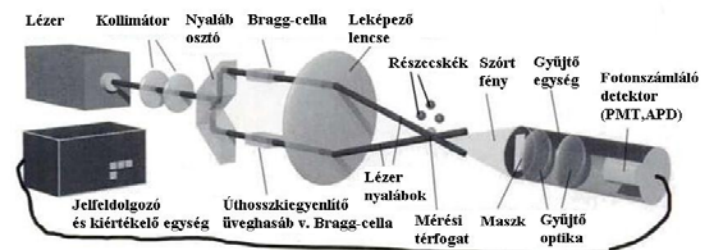
Konferencia kiadványok:

- PROC.1. Vámos L, Jani P, Simulation of LDA and PDA measuring techniques in the nanometer particle size range, In: *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.* 5948, 59481Q (2005), (9 pages)
- PROC.2. Vámos L, Jani P, Optimization algorithm of LDA signal processing for nanoparticles, In: *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.* 6293, 629303 (2006), (8 pages)
- PROC.3. Vámos L, Jani P, Törésmutató és hullámhossz független részecskeszám meghatározási algoritmus, *Magyar Aeroszol Konferencia, Siófok-Szabadifürdő*, 57-58, 2006. 05. 25-26.
- PROC.4. Vámos L, Jani P, Lee filtered burst selecting in the photon correlation LDA signal processing, In: *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.* 7003A-41 (2008), (8 pages)
- PROC.5. Vámos L, Jani P, Dynamic range of submicron/nanoparticle sizing with photon correlation LDA, In: *Proc. SPIE* 7355, 73550P (2009), (12 pages)
- PROC.6. Vámos L, Jani P, Só és korom kondenzációs maggal rendelkező felhőcsepp sokaság képződésének monitorozása, *Magyar Aeroszol Konferencia, Balatonfüred*, 48-49, 2009.04.27-28.
- PROC.7. Vámos L, Jani P, Scattering properties of water coated carbon nanoparticles, In: *Proc. 18th International Conference, Nucleation and Atmospheric Aerosols*, P1.53, pp. 828-831, 2009.08.10-14., Prague

mérőeszközök felbontása és az alkalmazott módszerek egyaránt fejlődtek. Az interferometrikus technikák a direkt mérés lehetőségét nyújtják, így alkalmasak a kifejlesztett érzékelők kalibrálására, pl. az elhajlás nanométeres pontosságú mérése által [Koukoulas et al. 2008].

A számos módszer között a lézer Doppler anemometria/sebességmérés (LDA/LDV) azonnali, beavatkozás-mentes mérést tesz lehetővé, ezért széles körben elterjedt mind a tudományos mind az ipari környezetben, különösen a szélsőséges mérési körülmények esetén. Ilyen például az égési folyamatok vizsgálata, hullám dinamika, part/gátvédelem, árapály modellezés, folyó hidrológia, CFD (folyadékok dinamikájának számítógépes modellezése) modellek kísérleti ellenőrzése, szélcsatornák stb.

Habár az LDA alapvetően áramlasmérő eszköz, további fejlesztéssel a részecskeméret szintén mérhetővé vált egészen 500nm alsó mérhetőárig az ún. fázis Doppler anemométerrel (PDA).



1. ábra Kétsugaras lézer Doppler anemométer (LDA) ©H.E. Albrecht et al. 2002

A nanorészecskék méretének meghatározása azonban LDA/PDA technikával is kihívást jelent. Habár 20nm-es fém részecskék méretének mérésére elméletileg lehetőség nyílik egy módosított PDA elrendezéssel, amint az leírásra kerül az alábbi cikkben [Naqwi Amir A. 1996], a javasolt módszer megvalósítása erősen korlátozott a részecskék roncsolódása miatt az igényelt nagy megvilágító fényteljesítménynek köszönhetően. Számos más analóg detektor jelet alkalmazó módszer is létezik többé-kevésbé az LDA-hoz hasonló optikai elrendezéssel (idő-eltolási módszer, szivárvány refraktometria, árnyék Doppler technika, jel amplitúdón és láthatóság mérésén alapuló technikák), de egyikük sem alkalmazható 500nm alatt. A beavatkozás-mentes fényszóráson alapuló technikák közül a fotonkorrelációs és a referencia sugaras LDA alkalmazható nanorészecskékre. Egy másik érzékeny technika a kisszögű lézeres fényszóráson alapul, mely több detektor egyidejű használatával minimálisan 20nm-től alkalmas a részecskeméret meghatározására (MALVERN cég Mastersizer nevű berendezése). Ez a módszer azonban részecske sokaságot igényel, az áramlási sebességet pedig egyáltalán nem képes mérni.

A részecskeméret meghatározásának érzékenysége növelhető a megvilágító fényteljesítmény ill. a detektor érzékenységének a fokozásával. A megvilágító fényteljesítménynek felső határt szab az aeroszol átütési szilárdságának küszöbszintje. Azonban igazán nagy detektor érzékenység érhető el a fotonzámlálásos (Geiger) üzemmódban. Ez ugyanakkor sajátos adatgyűjtést és fotonkorrelációs jelfeldolgozást igényel, aminek kidolgozása az LDA technikában Cummins és Pike nevéhez fűződik [Cummins és Pike, 1976]. A klippelt és skálázott foton korrelátorok mellett Chopra és Mandel [Chopra és Mandel, 1973] kifejlesztett egy gyors módszert az autokorrelációs függvény becslésére alacsony beütési rátákra. A módszer előnye, hogy megspórolja a fölösleges nullákkal való szorzásokat és összegzéseket lehetővé téve a gyorsabb, valós idejű jelfeldolgozást. Korábbi munkáiban Jani P. [Jani P. et al., 1998] ugyanezen az elven állította elő az összesített autokorrelációs függvényt már 300nm részecske mérettől. Azonban a félvezetőipar rohamos fejlődésével a lavina fotodiódák kvantum hatásfoka és frekvenciája egyaránt megnőtt, utat nyitva a tényleges nanorészecskék tartományába (előzetes becsléseink szerint akár 50nm-es részecske is észlelhető [REF.3.]).

Diplomamunkámban [Vámos L., 2003] a méret meghatározására kifejlesztett ún. R paraméteres módszer [Jani P. et al., 1998] finomítására tettem javaslatot. Ez a módszer azon a felismerésen alapul, hogy megfelelő beállítás mellett a detektált jel modulációs mélysége/láthatósága monoton növekszik a részecske mérettel egy adott tartományban. Habár az R paraméteres módszer használható a nanométeres mérettartományban is, amint azt ebben a disszertációban kimutatom, a domináns fizikai jelenség nem a láthatóság változása, hanem a szórt intenzitás gyors növekedése ill. a detektorok fokozatos telítődése.

Célkitűzések

A disszertáció központi témája az aeroszokok valós idejű beavatkozás-mentes jellemzése különösen a mikron alatti ill. nanométeres mérettartományban (500nm alatt), mely az alap kutatás és ipar számára egyaránt fontos és máig megoldatlan feladat. A két-sugaras LDA, fotonkorrelációs üzemmódban, képes észlelni a nanorészecskéket, de a méret meghatározása mindeztől nem volt megoldott. Munkám fő célja egy robusztus méret-meghatározási módszer kifejlesztése fotonkorrelációs LDA rendszerekre különös tekintettel a nanorészecskék méretének meghatározására. A korábbi láthatóság mérésen alapuló módszert tanulmányozva és összehasonlítva a szórt fény intenzitásmérésén alapuló méret-meghatározással, az utóbbi sokkal robusztusabb és egyben nagyobb felbontással bíró módszernek bizonyult. A szükséges kalibrációs folyamat egyszerűsítése ill. a pontosság növelése érdekében egy modell alapú

Az eredmények hasznosítása

A kifejlesztett szimulációs programcsomag hatékony eszközzel szolgál a nanorészecskék méret meghatározásában kétsugaras fotonkorrelációs LDA technika alkalmazásával. Szimulációs eredmények alapján az egyidejű részecskeszámlálásra, sebesség és méret valós idejű, beavatkozás-mentes mérésére alkalmas eszközt fejlesztünk a szubmikronos/nanométeres mérettartományra specializáltan a KMOP által finanszírozott pályázat támogatásával (projekt száma: KMOP-1.1.1-07/1-2008-0056, projekt neve: NANO-LDA). Terveink szerint az első prototípus 2011-ig készül el. Az alkalmazások köre igen tág: a nanorészecskék szintézisének nagy tér és időfelbontással végzett optimalizációjától kezdődően a nanostruktúrált filmrétegeknek nanorészecskék kontrollált lecsapódásából történő ellenőrzött kialakításán át a kismomású CVD folyamatokban a szennyezőanyag szabályozásáig, valamint a munkahelyi szennyezettség tanulmányozásáig. A nanorészecskék gyártásában és feldolgozásában számos központi szerepet betöltő cég (úgy mint a Degussa AG vagy Heraeus Quartz Glass Társaság) mutat érdeklődést a NANO-LDA fejlesztése iránt. Általában a nanorészecskék gázokban való elegyítése és kezelése ott válik igazán fontossá, ahol nagy tisztaságot követelnek meg, mint például az optikai szálak (1:10⁹ tisztasági fok) vagy nanométeres elektronikai eszközök gyártásánál. A javasolt mérési módszer nagyban segítheti a hibás termékek hatékony kiszűrését a gyártási folyamat alatt a szennyezettségi szint valós idejű megfigyelésével.

4. Szimulációs modellt fejlesztettem a síkbeli PDA és LDA rendszerekhez, amellyel a részecskeméret mérésének lehetőségeit vizsgáltam a szubmikronos/nanométeres tartományban (0.5 μ m alatt), ahol a standard és a síkbeli PDA módszer egyaránt használhatatlan. A fotonkorrelációs kétsugaras LDA jelfeldolgozásában kimutattam, hogy a vizsgált mérettartományban és a látható hullámhossztartományban az R paraméter méretfüggésében nem a szórt fény láthatóságának változása dominál, hanem az amplitúdójának növekedése és egyidejűleg a detektált jel modulációs mélységének csökkenése. Megállapítottam, hogy a szórt fény intenzitása, mint mérendő paraméter, több mint egy nagyságrenddel érzékenyebb a méret változására, mint az R paraméter. [REF.1.][PROC.1.][OUTL.1.]
5. Modell-alapú optimalizációs módszert fejlesztettem a két-sugaras fotonkorrelációs LDA-hoz az egyedi szubmikronos/nanométeres részecskék (500nm alatt) méretének meghatározására alacsony fotonráták esetén (egészen 20 foton/börszt értékig). Az iteratív parametrikus módszer a robusztus működés érdekében a korrelációs tartományban az L_1 normán alapuló zérushely keresést és az L_2 normán alapuló minimumkereső (LNM) algoritmust együttesen használja. Egy kalibrációs mérésben megbecsültem a rendelkezésre álló laboratóriumi LDA rendszer paraméterét (intenzitás skálázási faktorát). Kimutattam, hogy az adott kísérleti berendezéssel 1.23 $\cdot 10^5$ W/cm² megvilágító teljesítménysűrűség szükséges 350nm hullámhosszon átlagosan 20 foton detektálásához egyetlen 50nm-es polisztirén latex részecske 5m/s-mal való átrepüléséből. A méret meghatározás a 95%-os konfidencia szinthez tartozóan ± 8.1 nm-en belül lehetséges. [REF.3.][PROC.2.][PROC.5.]
6. Komplex módszert fejlesztettem részecskék vizsgálatára két-sugaras fotonkorrelációs LDA rendszerre, amivel egyidejűleg a részecskeszám, sebesség és méret becslése is elvégezhető. A TCSPC mérés technikában használt börszt leválogatás módszerén (Lee szűrés és börszt keresés) alapuló mérésiadat kiértékelő eljárással már 5 foton beütéstől lehetőség nyílik a részecske detektálására magas jel-zaj viszony esetén, amikor az észlelt börszt tényleges részecske átrepülésből keletkezik. Az egyedi sebességek a 70%-os konfidenciaszinthez tartozóan $\pm 10\%$ pontossággal becsülhetők már 20 detektált fotonból. Egyedi részecskére, ill. részecskesokaságra vonatkozó méretbecslésre fejlesztettem eljárásokat, amiket mono- és polidiszperz részecskesokaságokon teszteltem. Alacsony foton rátákra (20 foton alatt) és alacsony jel-zaj viszony mellett (2dB/börszt értékig) a háttérkompenzált börszt méret vizsgálat adta a legbiztosabb becslést a méretre. [PROC.4.]

jelfeldolgozási módszert fejlesztettem a részecskeméret meghatározására.

A megszokott jelfeldolgozási módszerek a foton korrelációs LDA-ra több részecske átrepüléséből építenek fel egy autokorrelációs függvényt és ily módon egyfajta átlagsebességet határoznak meg. Ugyanakkor a részecske sebessége meghatározható 1%-os bizonytalanságon belül már 100 fotonból is. Nem lehetetlen, hogy ennyi foton egyetlen részecske átrepüléséből előálljon biztosítva az egyrészecskés üzemmódot.

Egy bevezető fejezetet követően a második fejezet elméleti és numerikus hátterét tárgyalja a rugalmas fényszórás problémájának a Mie elmélet alapján. Azonban az alapok tárgyalásán túl ez a fejezet még egy-egy tézispontot is tartalmaz a kondenzációs maggal rendelkező nanorészecskék köpenyvastagságának mérésére ill. a monodiszperz aeroszolok részecske koncentrációjának mérésére vonatkozóan.

A LDA működésének nem túl bonyolult, de annál szélesebb irodalommal rendelkező alapjai az Appendix 3-ban találhatóak. Szintén ez a függelék ad egy rövid áttekintést az LDA-hoz kapcsolódó foton korrelációs módszerekről és méret meghatározási eljárásokról.

A harmadik fejezet a függelékben leírtakra támaszkodva a kétsugaras síkbeli fotonkorrelációs LDA rendszerek teljes szimulációs modelljét tárgyalja, így többek között az áramlás, rugalmas fényszórás, egy részecske detektálás, foton detektálás és zaj effektusok modelljét.

A negyedik fejezet a nanorészecskék méret meghatározására vonatkozó saját fejlesztéseimet és eredményeimet foglalja össze. Először egyetlen részecske áthaladása során megnövekedett beütésszámokhoz tartozó adatrészek (börsztök) leválogatásának problémáját tárgyalom. Majd egy modell-alapú optimalizációs módszert javasolok a szubmikronos/nanométeres részecskék méretének meghatározására a szórt fény intenzitásának mérésére alapozva. Habár a kalibráció elkerülhetetlen a sokszor költséges és hosszadalmas mérés nagymértékben leegyszerűsíthető a kifejlesztett szimulációs programcsomag alkalmazásával. A börszt leválogatás és részecskeméret-meghatározás részletes hibavizsgálata mellett a trajektória hiba csökkentésére ill. kiküszöbölésére tesztek javaslatokat. Továbbá egy kalibrációs mérés kerül bemutatásra az SZFKI-ban jelenleg fennálló optikai elrendezéssel a részecskeméret alsó határának előzetes becslésére, a detektálásra, ill. a méret meghatározásra vonatkozólag. Végül a teljes jelfeldolgozási módszer (börszt leválogatás, sebesség és méret mérés) eredményeit vizsgálom egy monodiszperz és egy polidiszperz részecskesokaságra.

Vizsgálati módszerek

A homogén gömbön rugalmasan szórt fény kiszámítására nem létezik egzakt zárt formula, csak egyes közelítések írhatók fel zárt alakban, mint például a Rayleigh formula a megvilágító fény hullámhosszához képest kis részecskékre. A rugalmas fényszórás általános elmélete homogén gömbökre Mie és mások által adott elméletében a térerősség vektorok végtelen sor formájában adottak, így a probléma tipikusan a számítógépes fizikai területén él tovább. A másik fő előnye a szimulációs adatok használatának, hogy a bemenő adatok pontos statisztikája rendelkezésre áll, azaz a vizsgálandó becslési eljárás torzítása és szórása pontosan meghatározható. A szimulációs adatok ezért különösen előnyösek az algoritmusok fejlesztésekor. Ezen túlmenően a méret becslésére általam fejlesztett eljárás az adott LDA rendszer teljes szimulációját igényli és használja.

A számos létező numerikus megoldás közül a Lorenz-Mie elmélet eredményeit alkalmaztam homogén gömbök, egyrétegű köpennyel bevont gömbök és hengerek esetén. Természetesen a fotonkorrelációs LDA rendszer teljes szimulációs modellje számos más numerikus módszert igényel. Simpson formulát használtam a detektor felületére érkező szórt fény felintegrálásakor. A sztochasztikus folyamatokat (mint a foton detektálás, részecske detektálás, zaj effektusok) Monte Carlo szimulációval modelleztem a megfelelő elméleti valószínűség sűrűségfüggvények alapján. A börszt leválogatás művelete az ún. Lee-szűrőt is beleértve az időkorrelált egy-foton számlálás² módszeréből vettem át, ill. fejlesztettem tovább a fotonkorrelációs LDA jelfeldolgozási igényeinek megfelelően. Az egyfoton-számláló detektorok időjelölő pontosságának mérésére új és pontosabb módszert alkalmaztam. A sebesség becslését a megszokott direkt módon végeztem a teljesítménysűrűség spektrum első csúcsának maximumhelyéből olvasva ki a sebességre vonatkozó Doppler frekvenciát egy előzetes parabolikus interpolációt követően.

Egy iteratív parametrikus módszert fejlesztettem a méret becslésére a korrelációs tartományban, amelyben a legkisebb négyzetek módszerét zérus helyek megkeresésével ötvözve robusztus módszert kaptam a méret becslésére még kis beütésszám, azaz alacsony jel-zaj viszony esetén is.

² Time Correlated Single Photon Counting (TCSPC)

Új tudományos eredmények

- 1. A rugalmas fényszórás tulajdonságait tanulmányoztam vízköpennyel ($n:1.33$) rendelkező szubmikronos szén ($n:1.95+i0.66$) részecskéken (600 nm alatti) polarizálatlan beeső fény mellett a látható hullámhossz tartományban a Mie elméleten alapuló szimulációval. Kimutattam, hogy a mag hatása a szórási tulajdonságokra (szórási keresztmetszet, előreszórt intenzitás) jelentősen lecsökken, amint a vízréteg vastagsága meghaladja a mag sugarát. 200nm magátmérő alatt azonban a szénmaggal rendelkező részecskéről ill. az azonos méretű tiszta vízrészecskéről egy adott irányba szórt fény intenzitásainak aránya, közel egy nagyságrend széles dinamikus tartományban a mag méretétől alig függő, éles, monoton csökkenést mutat, amíg a réteg fel nem nő a mag sugár vastagságára. Ily módon bemutattam, hogy ismert méretű és anyagú egyrétegű részecskéken (ill. azok monodiszperz sokaságán) szórt fényintenzitás és az azonos méretű tiszta vízrészecskéken szórt fényintenzitás összehasonlításával a rétegvastagságra durva becslés adható 10% bizonytalanságon belül, amíg a rétegvastagság el nem éri a mag sugár nagyságát. [PROC.6.][OUTL.2.]*
- 2. Kimutattam, hogy fényimpulzus sorozattal meglőtt kvázisztochasztikus monodiszperz részecskesokaságon szórt fényintenzitás átlagának és szórásának aránya megegyezik a mérési térfogatban levő részecskék számának négyzetgyökével. Ezen a felismerésen alapulva egy egyszerű és robusztus módszert javasoltam a részecskeszám mérésére monodiszperz sokaságra. Nem elnyelő (víz) részecskék különböző szórású lognormális méreteloszlású sokaságára vizsgáltam a módszer hullámhossz és törésmutató függetlenségének érvényességét, és kimutattam, hogy a monodiszperzítés gyakorlati határa (azaz $\delta < 5\%$) megegyezik az érvényességi tartomány határával. [PROC.3.][PROC.6.][OUTL.3.]*
- 3. Új mérési eljárást javasoltam a kereskedelembe elérhető fotodetektorok és foton-számláló lavina fotodiódák időfelbontásának mérésére. A lézerforrásból és a detektor áramköréből fakadó időbizonytalanságokat kiküszöbölve passzív elemeken terjedő impulzusok futásiidejének idő-intervallum statisztikáját vettem föl; figyelembe véve a fotonbeütések érkezési idejének statisztikáját. A javasolt módszerrel végzett mérés pontosabb időfelbontást eredményezett, mint a garantált gyári adat, pl. 31.2ps átlagos időfelbontást 40ps helyett. [REF.2.]*