بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

تعیین اندازه و ثابت پخش میکروذرات کروی با استفاده از روش پراکندگی دینامیکی نور

صفدر طاوری، احسان احدی اخلاقی، حمیدرضا خالصی‌فرد

دانشکده فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان کد پستی ۴۵۱۳۷-۶۶۷۳۱
مرکز پژوهشی اپتیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان کد پستی ۴۵۱۳۷-۶۶۷۳۱

چکیده - پراکندگی دینامیکی نور (*DLS*) یکی از پرطرفدارترین روش‌ها برای تعیین اندازه‌ی ذرات است. با تاباندن نور تکفام مانند باریکه‌ی لیزر بر یک محلول شامل ذرات کروی با حرکت براوانی جابجایی دوپلری رخ می‌دهد یا به عبارتی دیگر باعث تغییر طول موج نور فرودی می‌شود. میزان تغییر طول موج با اندازه‌ی ذرات رابطه دارد. با استفاده از تابع خودهمبستگی شدت برای نور پراکنده شده و اندازه‌گیری ثابت پخش ذرات، امکان محاسبه‌ی توزیع اندازه‌ی ذرات کروی وجود دارد.

کلید واژه- پراکندگی دینامیکی نور، تابع خودهمبستگی، ثابت پخش، حرکت براونی، قطر هیدرودینامیکی.

Determining the size and diffusion coefficient of spherical microparticles using dynamic light scattering

Safdar Tavari, Ehsan A. Akhlaghi and Hamid R. Khalesifard

Department of Physics, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan 45137-66731, Iran.
Optics Research Center, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan 45137-66731, Iran.

Abstract- Dynamic light scattering is one of the most popular methods for determining particle size. With a light beam like a laser beam on a solution consisting of spherical particles in Brownian motion the Doppler shift occurs or in other words change the wavelength of the incident light. This Change in wavelength related to the size of the particle. Using autocorrelation function of scattered light intensity it is possible to compute the diffusion coefficient and measure sphere size distribution of the particle.

Keywords: Atocorrelation function, Brownian motion, Dynamic Light Scattering (DLS), Diffusion coefficient, Hydrodynamic diameter, PhotoMultiplier Tube (PMT).

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-02]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

۱- مقدمه

پراکندگی از اجسام را می‌توان براساس تحرک مراکز پراکنده‌کننده به دو نوع پراکندگی استاتیکی و دینامیکی دسته‌بندی کرد. پراگندکی دینامیکی نور یکی از روش‌های مطالعه‌ی دینامیک ذرات با حرکت براوانی است. در این حالت باید غلظت ذرات خیلی کم باشد به طوری که پدیده‌ی تک پراکندگی رخ دهد. براساس نظریه‌ی دوپلر، فرکانس نور پراکنده شده از ذرات متحرک، با توجه به این که ذرات از منبع نور دور یا به آن نزدیک می‌شوند به ترتیب بزرگ‌تر یا کوچک‌تر از فرکانس نور فرودی خواهد بود. بنابراین نور پراکنده شده به میزان کمی پهن‌شدگی در فرکانس دارد. چون میزان این تغییر فرکانس برای ذرات با حرکت براونی بسیار ناچیز است (از مرتبه‌ی 10^5 تا 10^7 هرتز)، اندازه‌گیری آن در حوضه فرکانس غیرممکن است اما می‌توان با استفاده از تابع خودهمبستگی زمانی در حوضه زمان آن را ثبت کرد [۱].

پراکندگی دینامیکی کاربردهای دیگری در زیست‌شناسی، شیمی و فیزیک ماده‌چگال دارد [۲-۶]. از جمله مزایای پراکندگی دینامیکی نور می‌توان به کوتاه بودن زمان انجام آزمایش، راه‌اندازی خودکار و هزینه‌ی نسبتاً کم آن اشاره کرد. سیستم‌های تجاری اندازه‌گیری ذرات عمدتاً در یک زاویه پراکندگی (فقط در ۹۰ درجه) عمل می‌کنند و معمولاً از نور قرمز (۶۷۵nm) استفاده می‌کنند[۲].

در این پژوهش، از روش پراکندگی دینامیکی نور برای اندازه‌گیری قطر ذرات میکرونی معلق در آب استفاده شده است. همچنین قابلیت این روش برای اندازه‌گیری قطر ذرات با توزیع اندازه مختلف بررسی شده است.

۲- تئوری آزمایش

محیط دینامیک مورد بررسی شامل ذرات میکرونی معلق در آب است. از این رو ذرات موجود در محیط دارای حرکت براوانی هستند. بنابراین به عنوان اولین فرض می‌توان از تابع چگالی احتمال به صورت رابطه (۱) برای این ذرات استفاده کرد [۱].

$$P(r,t;0,0)=(4D\pi t)^{\frac{-3}{2}}\exp(\frac{-r^2}{4Dt}) \qquad (۱)$$

در این رابطه D ثابت پخش است. این رابطه بیان می‌دارد با فرض این‌که در زمان $t=0$ یک ذره با حرکت براوانی در مکان $r=0$ باشد، احتمال حضور ذره در مکان r و در زمان t از این رابطه تبعیت می‌کند. این رابطه به صورت یک تابع گاوسی در فضا است که با گذشت زمان پهنای آن بیشتر می‌شود. برای محاسبه تابع خودهمبستگی شدت پراکندگی از تعریف این تابع استفاده می‌شود، که شکل به‌هنجار آن به صورت زیر است [۷].

$$g_2(\tau)=\frac{<I(t)I(t+\tau)>}{<I(t)>^2} \qquad (۲)$$

در این رابطه $I(t)=E(t)E^*(t)$ است که $E(t)$ میدان الکتریکی پراکنده شده از ذرات در زمان t است و τ فاصله زمانی مورد بررسی است. با اعمال تابع چگالی احتمال، یعنی رابطه‌ی (۱) و انجام محاسبات، تابع خودهمبستگی شدت به صورت زیر محاسبه می‌شود [۷].

$$G(\tau)=g_2(\tau)-1=\exp(-2Dq^2\tau) \qquad (۳)$$

که وابستگی تابع خودهمبستگی را به فاصله زمانی τ نشان می‌دهد. در این رابطه q بردار پراکندگی است که به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$q=\frac{4\pi n}{\lambda}\sin(\frac{\theta}{2}) \qquad (۴)$$

که n ضریب شکست محیط حاوی ذرات، λ طول موج نور فرودی و θ زاویه‌ی پراکندگی است. بنابراین پارامتر q به ویژگی‌های چیدمان آزمایش بستگی دارد.

برای به دست آوردن رابطه خودهمبستگی در رابطه‌ی (۳) از گستره ابعاد آشکارساز صرف‌نظر شده است. اما در عمل این مسئله روی دامنه اولیه تابع خودهمبستگی شدت پراکندگی اثر می‌گذارد و باعث می‌شود که مقدار دامنه اولیه کمتر از واحد باشد. بنابراین با لحاظ کردن ابعاد دهانه آشکارساز تابع خودهمبستگی شدت به صورت زیر خواهد بود،

$$G(\tau)=f(A)\exp(-2Dq^2\tau)\,. \qquad (۵)$$

ضریب $f(A)$ را ضریب همدوسی فضایی گویند که به مساحت سطح آشکارساز و به شکل دقیق و اندازه‌ی ناحیه

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-02]

پراکندگی که از طرف آشکارساز دیده می‌شود بستگی دارد. همچنین رابطه‌ی همدوسی فضایی به صورت زیر بیان می‌شود [۴]. در صورتی که مقدار این رابطه برابر با واحد باشد، مقدار $f(A)$ تقریبا یک می‌شود.

$$B=\frac{aL}{\lambda R} \qquad (۶)$$

در حالت کلی رابطه‌ای که مقدار $f(A)$ را برای آشکارساز با دریچه دایره‌ای بیان می‌کند به صورت زیر است،

$$f(A)=4\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}}(\frac{1}{L})(1-\frac{y}{L})\Lambda_1^2(\frac{k_0 ay}{R})dy\ . \qquad (۷)$$

در این رابطه‌ها R فاصله نمونه تا آشکارساز، a شعاع روزنه آشکارساز، L پهنای شکاف روی نمونه، k_0 بردار موج نور فرودی و Λ_1 نسبت تابع بسل مرتبه اول به آرگومان تابع بسل است [۷]. بنابراین با مشخص بودن پارامترهای q و دامنه اولیه $f(A)$ ، می‌توان ثابت پخش را به‌دست آورد؛ در این پژوهش مقدار $f(A)$ برابر ۰/۸۵ به‌دست آمد.

فرض دیگری که در این‌گونه مسائل بکار می‌رود، کروی بودن ذرات است، که در این صورت می‌توان با استفاده از رابطه استوکس- آینشتین شعاع دینامیکی ذرات را مطابق زیر به‌دست آورد.

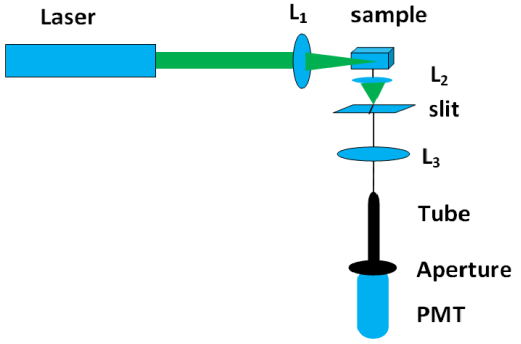
$$r=\frac{K_B T}{6D\pi\eta} \qquad (۸)$$

که K_B ثابت بولتزمن، T دمای نمونه بر حسب درجه کلوین و η ویسکوزیته محیط است [۱].

۳- چیدمان آزمایش

طرح کلی از چیدمان آزمایش DLS در شکل ۱ نمایش داده شده است. نور لیزر به وسیله‌ی عدسی L_1 در داخل نمونه کانونی می‌شود. برای ثبت شدت پراکندگی آشکارساز در راستای زاویه‌ی ۹۰ درجه نسبت به باریکه‌ی فرودی و در فاصله R=100cm از نمونه قرار داده می‌شود. از یک لیزر دیودی با طول موج ۵۳۲ نانومتر به عنوان منبع نور و از PMT برای اندازه‌گیری شدت پراکنده شده استفاده شده است.

برای افزایش همدوسی فضایی یک پالایه‌فضایی در بازوی دوم (مجموعه عدسی‌های L_2، L_3 و تک شکاف) و در دهانه PMT نیز یک روزنه دایره‌ای با شعاع a=250μm قرار داده می‌شود. همچنین برای محدود کردن حجم ناحیه بازپراکنندگی در داخل نمونه، سطح ظرف حاوی نمونه محدود شده، به طوری که پراکندگی از یک شکاف کوچک با پهنای L=2mm صورت گیرد. برای حذف نویزهای اضافی محیط یک لوله سیاه رنگ در مقابل آشکارساز قرار داده می‌شود.



شکل ۱: چیدمان آزمایش پراکندگی دینامیکی نور برای اندازه‌گیری توزیع اندازه‌ی ذرات

از ذرات پلی‌استایرن با قطر ۱μm به عنوان نمونه ذرات میکرونی استفاده شده است. ابتدا محلول حاوی این ذرات با آب مقطر رقیق شده و سپس در دستگاه التراسونیک قرار داده می‌شود تا ذرات به طور کامل از هم جدا شوند. با استفاده از PMT شدت نور پراکنده شده از ذرات را به ولتاژ تبدیل کرده و به وسیله درگاه Line in کارت صدا، به رایانه انتقال داده می‌شود. در این آزمایش فرکانس داده‌برداری کارت صدا برابر ۴۴kHz بوده است.

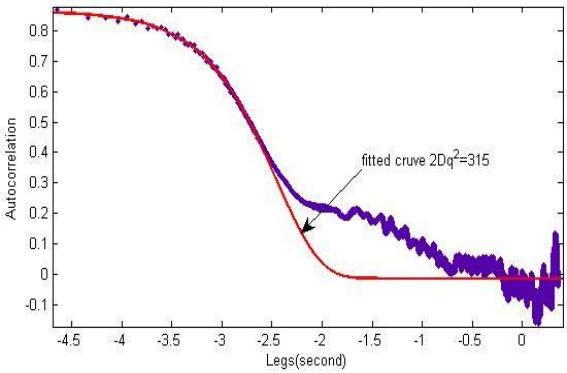
تابعیت خودهمبستگی داده‌های ذخیره شده با استفاده از نرم‌افزار متلب محاسبه شد، که نتایج به‌دست آمده در بخش بعدی ارائه شده است.

۴- نتایج

شکل ۲ تابعیت خودهمبستگی داده‌های ناشی از آزمایش را نمایش می‌دهد.

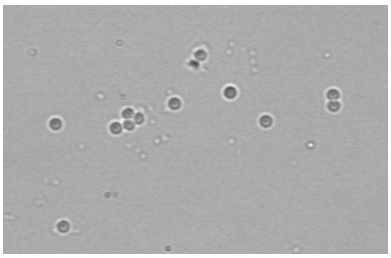
با استفاده از نرم‌افزار متلب تابع خودهمبستگی به شکل رابطه (۵) بر داده‌ها برازش شده است. با استفاده از تابع برازش شده می‌توان ثابت پخش و در نتیجه قطر دینامیکی ذرات را محاسبه کرد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-02]



شکل ۲: تابع خودهمبستگی شدت برای ذرات پلی‌استایرن با قطر اسمی ۱ میکرومتر و نمودار برازش شده بر آن.

با توجه به نمودار برازش شده، مقدار عبارت $2Dq^2$ در رابطه (۵) برابر $315s^{-1}$ به‌دست می‌آید. برای تعیین پارامتر q در رابطه (۴)، ضریب شکست آب مقطر $n=1.333$، $\lambda=532nm$ و $\eta=10^{-3}Pa.s$ در دمای محلول T=293 درجه کلوین لحاظ شده است. ثابت پخش برابر $D=3.4\times10^{-13}\frac{m^2}{s}$ و قطر هیدرودینامیکی ذرات $r=1.15\mu m$ به‌دست می‌آید که در مقایسه با اندازه‌ی ذرات هم‌خوانی دارد.

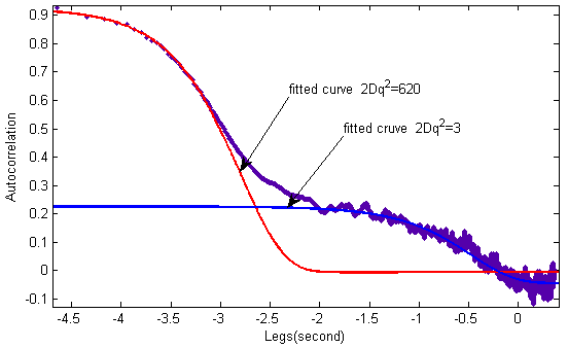


شکل ۳: تصویر میکروسکوپی محلول حاوی دو نوع توزیع اندازه از ذرات پلی‌استایرن

در بررسی دوم، علاوه بر ذرات پلی‌استایرن با قطر ۱μm، ذرات پلی‌استایرن دیگری با قطری تقریباً از مرتبه چند صد نانومتر مخلوط می‌کنیم. تصویر میکروسکوپی این نمونه در شکل۳ نمایش داده شده است.

با قرار دادن این محلول در چیدمان آزمایش و ثبت شدت پراکندگی برای آن و محاسبه‌ی خودهمبستگی شدت، نتایج آن در شکل۴ نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که در نمودار، دو افت زمانی برای تابع خودهمبستگی وجود دارد. با برازش نمودارهای مناسب بر دو افت زمانی همبستگی، ثابت پخش و قطر دینامیکی برای آن‌ها محاسبه می‌شود.

با توجه به پارامترهای برازش شده برای این نمودارها، قطر هیدرودینامیکی برای ذرات که با منحنی قرمز برازش شده ۶۷۰nm و برای افت زمانی منحنی برازش شده آبی ۱۳۸μm به دست می‌آید. با توجه به این نتایج، می‌توان بیان کرد که روش پراکندگی دینامیکی نور برای اندازه‌گیری قطر ذرات با توزیع اندازه مختلف مناسب نیست.



شکل ۴: تابع خودهمبستگی شدت برای محیطی حاوی دو توزیع اندازه از ذرات پلی‌استایرن

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش روش پراکندگی دینامیک نور و چیدمان آزمایش مربوط به آن شرح داده شده و با این روش میکروذرات پلی‌استایرن با قطر اسمی ۱μm برابر با $1.15\mu m\pm0.15\mu m$ اندازه‌گیری شده است. همچنین این روش را برای محیطی با دو نوع توزیع اندازه از مرتبه ۱μm و چندصد نانومتر استفاده کردیم که مقادیر به‌دست آمده از آزمایش با اندازه واقعی ذرات اختلاف زیادی داشت و بیان گردید که از این روش نمی‌توان برای محیطی با توزیع مختلفی از ذرات استفاده کرد.

مراجع

[1] Chang M., *Dynamic Light Scattering*, BGGN **266** (2010).
[2] Sartor M., *Dynamic light scattering*, University of California San Diego (UCSD).
[3] Berne B. J. and Pecora R., *Dynamic Light Scattering*, Wiley, c1976.
[4] Aschinger A., Winter J., *The application of Dynamic Light Scattering to complex plasmas*, New Journal of Physics **14** (2012) 093035 (25pp).
[5] Dengler S., Kubel C., Schwenke A., Ritt G., Eberle B., *Near- and off-resonant optical limiting properties of gold–silver alloy nanoparticles for intense nanosecond laser pulses*, J. Opt. **14** (2012) 075203 (8pp).
[6] Sun P., Ma Y., Liu W., Xu C., Sun X., *Experimentally determined characteristics of the degree of polarization of backscattered light from polystyrene sphere suspensions*, J. Opt. **15** (2013) 055708 (7pp).
[7] Goldburg W. I., *Dynamic light scattering*, Am. J. Phys. **67** (1999).

[Downloaded from opsi.ir on 2026-07-02]