

О. Я. Дзюблик*, І. Є. Анохін, В. Ю. Співак

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

*Відповідальний автор: dzyublik@ukr.net

РОЛЬ БРОУНІВСЬКОГО РУХУ ТА РЕЛАКСАЦІЙ НЕЄЛЯ У МЕССБАУЕРІВСЬКИХ СПЕКТРАХ МАГНІТНИХ РІДИН

Розраховано переріз поглинання мессбауерівського випромінювання в магнітних рідинах з урахуванням як поступального, так і обертального броунівського рухів магнітних наночастинок, а також стохастичних інверсій їх намагніченості за відсутності зовнішнього магнітного поля. Роль броунівського руху у ферорідинах розглядається в рамках теорії дифузії, а для магнітореологічних рідин з великими наночастинками – за допомогою підходу Ланжевена. Для стохастичного обертання ми вивели рівняння, аналогічне рівнянню Ланжевена, і знайшли відповідну кореляційну функцію. В обох випадках прості обертальні кореляційні функції отримано в наближенні малих обертів за час життя збуджених мессбауерівських ядер. Вплив релаксацій Нееля розглядається в рамках моделі Блюма.

Ключові слова: ефект Мессбауера, феромагнітні наночастинки, броунівський рух, релаксації Нееля.

A. Ya. Dzyublik*, I. E. Anokhin, V. Yu. Spivak

Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

*Corresponding author: dzyublik@ukr.net

ROLE OF BROWNIAN MOTION AND NÉEL RELAXATIONS IN MÖSSBAUER SPECTRA OF MAGNETIC LIQUIDS

The absorption cross-section of Mössbauer radiation in magnetic liquids is calculated, taking into consideration both translational and rotational Brownian motion of magnetic nanoparticles as well as stochastic reversals of their magnetization in the absence of an external magnetic field. The role of Brownian motion in ferrofluids is considered in the framework of the diffusion theory, while for the magnetorheological fluids with large nanoparticles, it is done with the aid of Langevin's approach. For stochastic rotation, we derived the equation analogous to Langevin's one and found the corresponding correlation function. In both cases, simple rotational correlation functions are obtained in the approximation of small rotations during the lifetime of the excited Mössbauer nuclei. Influence of the Néel's relaxations is considered in the framework of the Blume - Tjon model.

Keywords: Mössbauer effect, ferromagnetic nanoparticles, Brownian motion, Néel relaxations.

REFERENCES

1. R.E. Rosensweig. *Ferrohydrodynamics* (Cambridge, London: Cambridge Univ. Press, 1985); republished (New York: Dover. Publ. Inc., 1997).
2. B.M. Berkovski, V. Bashtovoy. *Magnetic Fluids and Applications Handbook* (New York: Begell House Inc., 1996).
3. C. Scherer, A.M. Figueiredo Neto. Ferrofluids: properties and applications. *Brazil. J. Phys.* 35 (2005) 718.
4. D.H. Wang, W.H. Liao. Magnetorheological fluid dampers: A review of parametric modelling. *Smart Mater. Struct.* 20 (2011) 023001.
5. K. Ray, R. Moskowicz. Commercial applications of ferrofluids. *J. Magn. Magn. Mater.* 85 (1990) 233.
6. K. Ray, R. Moskowicz, R. Casciari. Advances in ferrofluid technology. *J. Magn. Magn. Mater.* 149 (1995) 174.
7. R. Pérez-Castillejos et al. The use of ferrofluids in micromechanics. *Sens. Actuators A* 84 (2000) 176.
8. E.H. Kim et al. Synthesis of ferrofluid with magnetic nanoparticles by sonochemical method for MRI contrast agent. *J. Magn. Magn. Mater.* 289 (2005) 328.
9. V.V. Mody, A. Singh, B. Wesley. Basics of magnetic nanoparticles for their application in the field of magnetic fluid hyperthermia. *Eur. J. Nanomed.* 5 (2013) 11.
10. K.M. Krishnan. Magnetic nanoparticles in medicine: progress, problems, and advances. *IEEE Trans. Magn.* 46 (2019) 2523.
11. B. Gleich, J. Weizenecker. Tomographic imaging using the nonlinear response of magnetic particles. *Nature* 435 (2005) 1214.
12. R.M. Ferguson et al. Optimizing magnetite nanoparticles for mass sensitivity in magnetic particle imaging. *Med. Phys.* 38 (2011) 1619.
13. R.J. Deissler, Y. Wu, M.A. Martens. Dependence of Brownian and Néel relaxation times on magnetic field strength. *Med. Phys.* 41 (2014) 012301.

14. Y. Xiao, J. Du. Superparamagnetic nanoparticles for biomedical applications. *J. Mater. Chem. B* 8 (2020) 354.
15. H.T.K. Duong et al. A guide to the design of magnetic particle imaging tracers for biomedical applications. *Nanoscale* 14 (2022) 3890.
16. L. Néel. Théorie du traînage magnétique des ferromagnétiques en grains fins avec application aux terres cuites. *Ann. Geophys.* 5 (1949) 99.
17. J. Landers et al. Simultaneous study of Brownian and Néel relaxation phenomena in ferrofluids by Mössbauer spectroscopy. *Nano Lett.* 16 (2016) 1150.
18. P.P. Craig, N. Sutin. Mössbauer effect in liquids: influence of diffusion broadening. *Phys. Rev. Lett.* 11 (1963) 460.
19. D.St.P. Bunbury et al. Study of diffusion in glycerol by the Mössbauer effect of Fe⁵⁷. *Phys. Lett.* 6 (1963) 34.
20. T. Bonchev et al. A study of Brownian motion by means of the Mössbauer effect. *Sov. Phys. JETP* 23 (1966) 42.
21. K.P. Singh, J.G. Mullen. Mössbauer study of Brownian motion in liquids: colloidal cobaltous hydroxy stannate in glycerol, ethanol-glycerol, and aqueous-glycerol solutions. *Phys. Rev. A* 6 (1972) 2354.
22. V.N. Dubinin. Influence of viscosity of colloidal solutions on the magnitude of resonance absorption of γ -quanta. *Ukr. J. Phys.* 13 (1968) 1547. (Rus)
23. S.L. Kordyuk et al. Mössbauer effect in a disperse system. *Sov. Phys. JETP* 25 (1967) 400.
24. V.G. Bhide et al. Effect of Brownian motion on the Mössbauer line shape. *Phys. Rev. B* 3 (1971) 673.
25. K.S. Singwi, A. Sjölander. Resonance absorption of nuclear gamma rays and the dynamics of atomic motions. *Phys. Rev.* 120 (1960) 1093.
26. A.V. Zatovskii. Contribution to the theory of the Mössbauer effect on Brownian particles. *Sov. Phys. JETP* 32 (1971) 274.
27. O.Ya. Dzyublik. On the theory of the Mössbauer effect on Brownian particles. *Ukr. J. Phys.* 18 (1973) 1454. (Ukr)
28. A.Ya. Dzyublik. Mössbauer effect in ellipsoidal Brownian particles. *Sov. Phys. JETP* 40 (1975) 763.
29. A.M. Afanas'ev, P.V. Hendriksen, S. Mørup. Influence of rotational diffusion of the Mössbauer spectrum of ultrafine particles in a supercooled liquid. *Hyperf. Inter.* 88 (1994) 35.
30. А.Я. Дзюблик. Теория эффекта Мессбауэра на магнитных броуновских частицах. *УФЖ* 23 (1978) 881. / A.Ya. Dzyublik. Theory of the Mössbauer effect on magnetic Brownian particles. *Ukr. J. Phys.* 23 (1978) 881.
31. J. Landers et al. In-field orientation and dynamics of ferrofluids studied by Mössbauer spectroscopy. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 11 (2018) 3160.
32. M.A. Chuev et al. Separation of contributions of the magnetic relaxation and diffusion of nanoparticles in ferrofluids by analyzing the hyperfine structure of Mössbauer spectra. *JETP Lett.* 108 (2018) 59.
33. R. Gabbasov et al. Study of Brownian motion of magnetic nanoparticles in viscous media by Mössbauer spectroscopy. *J. Magn. Magn. Mater.* 475 (2019) 146.
34. V.M. Cherepanov et al. Study of the Brownian broadening in the Mössbauer spectra of magnetic nanoparticles in colloids with different viscosities. *Crystal. Rep.* 65 (2020) 398.
35. M. Blume, J.A. Tjon. Mössbauer spectra in a fluctuating environment. *Phys. Rev.* 165 (1968) 446.
36. A. Einstein. Zur Theorie der Brownschen Bewegung. *Ann. Phys.* 19 (1906) 371.
37. M.A. Leontovich. *Introduction to Thermodynamics. Statistical Physics* (Moskva: Vysshaya shkola, 1983). (Rus)
38. S. Chandrasekhar. Stochastic problems in physics and astronomy. *Rev. Mod. Phys.* 15 (1943) 1.
39. L.D. Landau, E.M. Lifshitz. *Mechanics*. 3d edition (Oxford: Elsevier Ltd, 1976).
40. G. Kirchhoff. *Vorlesungen über Mechanik* (Leipzig: B.G. Teubner, 1897).

Надійшла / Received 23.05.2024