

Л. А. Булавін<sup>1,2</sup>, Т. В. Нагорна<sup>1,3,\*</sup>, Д. Худоба<sup>3,4</sup>, О. А. Кизима<sup>1,3</sup>, О. І. Іваньков<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

<sup>2</sup> Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Київ, Україна

<sup>3</sup> Об'єднаний інститут ядерних досліджень, Дубна, Росія

<sup>4</sup> Університет імені Адама Міцкевича, Познань, Польща

\*Відповідальний автор: nagorna@jinr.ru

### МАЛОКУТОВЕ РОЗСІЯННЯ НЕЙТРОНІВ РІДИННИМИ СУМІШАМИ З ФУЛЕРЕНАМИ C<sub>60</sub> ТА C<sub>70</sub>

Представлено результати дослідження кластерного стану фулеренів C<sub>60</sub> і C<sub>70</sub> у розчині толуолу з ацетонітрилом, виконані методом малокутового розсіяння нейтронів. Експеримент проводився на спектрометрі малокутового розсіяння ЮМО реактора ІБР-2 в Об'єднаному інституті ядерних досліджень (Дубна). Показано, що з підвищенням вмісту ацетонітрилу в розчині збільшується вміст агломерованої фракції і при досягненні певної порогової концентрації спостерігається стрімка агрегація. Проведено порівняння процесів кластероутворення фулеренів C<sub>60</sub> і C<sub>70</sub>.

*Ключові слова:* рідинні системи фулеренів, кластероутворення фулеренів, малокутове розсіяння нейтронів.

Л. А. Булавин<sup>1,2</sup>, Т. В. Нагорная<sup>1,3,\*</sup>, Д. Худоба<sup>3,4</sup>, Е. А. Кизима<sup>1,3</sup>, А. И. Иваньков<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев, Украина

<sup>2</sup> Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев, Украина

<sup>3</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

<sup>4</sup> Университет имени Адама Мицкевича, Познань, Польша

\*Ответственный автор: nagorna@jinr.ru

### МАЛОУГЛОВОЕ РАССЕЯНИЕ НЕЙТРОНОВ ЖИДКОСТНЫМИ СИСТЕМАМИ С ФУЛЛЕРЕНАМИ C<sub>60</sub> И C<sub>70</sub>

Представлены результаты исследований кластерного состояния фуллеренов C<sub>60</sub> и C<sub>70</sub> в растворе толуола с ацетонитрилом, выполненные методом малоуглового рассеяния нейтронов. Эксперимент проводился на спектрометре малоуглового рассеяния ЮМО реактора ИБР-2 в Объединенном институте ядерных исследований (Дубна). Показано, что при увеличении содержания ацетонитрила в растворе увеличивается содержание агломерированной фракции и при достижении некоторой пороговой концентрации наблюдается резкая агрегация. Проведено сравнение процессов кластерообразования фуллеренов C<sub>60</sub> и C<sub>70</sub>.

*Ключевые слова:* жидкостные системы фуллеренов, кластерообразование фуллеренов, малоугловое рассеяние нейтронов.

L. A. Bulavin<sup>1,2</sup>, T. V. Nagorna<sup>1,3,\*</sup>, D. Chudoba<sup>3,4</sup>, O. A. Kyzyma<sup>1,3</sup>, O. I. Ivankov<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup> Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

<sup>3</sup> Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

<sup>4</sup> Adam Mickiewicz University in Poznan, Poznan, Poland

\*Corresponding author: nagorna@jinr.ru

### SMALL-ANGLE NEUTRON SCATTERING BY LIQUID SYSTEMS OF FULLERENES C<sub>60</sub> AND C<sub>70</sub>

Results of studies of the cluster state of fullerenes C<sub>60</sub> and C<sub>70</sub> in a solution of toluene with acetonitrile, performed by small-angle neutron scattering are presented. The experiment has been carried out using the small-angle scattering spectrometer YuMO, located at the IBR-2 reactor of the Joint Institute for Nuclear Research (Dubna). It has shown that a content of acetonitrile in the solution is increased, the agglomerated fraction was increasing. Sharp tendency to aggregation was observed after the certain threshold value of acetonitrile concentration was exceeded. The processes of C<sub>60</sub> and C<sub>70</sub> fullerenes' cluster formation were analyzed in comparison.

*Keywords:* liquid systems of fullerenes, fullerene clusterization, small-angle neutron scattering.

## REFERENCES

1. L. Wang. Solvated fullerenes, a new class of carbon materials suitable for high-pressure studies: A review. *J. Phys. Chem. Solids* **84** (2015) 85.
2. M. Xing, R. Wang, J. Yu. Application of fullerene C<sub>60</sub> nano-oil for performance enhancement of domestic refrigerator compressors. *Int. J. Refrigeration* **40** (2014) 398.
3. S. Afreen et al. Functionalized fullerene (C<sub>60</sub>) as a potential nanomediator in the fabrication of highly sensitive biosensors. *Biosensors and Bioelectronics* **63** (2015) 354.
4. A.V. Elets'kiy, B.M. Smirnov. Fullerenes and carbon structure. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **165**(9) (1995) 977. (Rus)
5. Y. Marcus. Solubilities of buckminsterfullerene and sulfur hexafluoride in various solvents. *J. Phys. Chem.* **101**(42) (1997) 8617.
6. Y. Marcus et al. Solubility of C<sub>60</sub> fullerene. *J. Phys. Chem. B.* **105**(13) (2001) 2499.
7. A.N. Kinchin, A.M. Kolker, N.I. Islamova. Correlation of the thermodynamic parameters of the fullerene C<sub>60</sub> solution with the properties of non-aqueous solvents. *Zhurnal Fizicheskoy Khimii* **76**(10) (2002) 1772. (Rus)
8. J. Labille et al. Affinity of C<sub>60</sub> fullerenes with water. *Fullerenes Nanotubes Carb. Nanostr* **14** (2006) 307.
9. I.E. Serdyuk et al. Preparation and biological activity of aqueous colloidal solutions of fullerenes C<sub>60</sub> and C<sub>70</sub> mixtures. *Biotekhnologiya* **4**(5) (2011) 64. (Rus)
10. M. Alfe, B. Apicella, R. Barbella. Aggregation and interactions of C<sub>60</sub> and C<sub>70</sub> fullerenes in neat N-methylpyrrolidinone and N-methylpyrrolidinone/toluene mixtures. *Chem. Phys. Lett.* **405** (2005) 193.
11. A. Mrzel et al. Investigation of encapsulation and solvatochromism of fullerenes in binary solvent mixtures. *J. Phys. Chem. B* **103** (1999) 11256.
12. N.P. Yevlampieva et al. Aggregation of fullerene C<sub>60</sub> in N-methylpyrrolidone. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* **209** (2002) 167.
13. V.L. Aksenov et al. Study of fullerene aggregates in pyridine/water solutions. *AIP Conf. Proc.* **591** (2001) 66.
14. V.L. Aksenov et al. Effect of the age of the C<sub>60</sub>/N-methyl-2-pyrrolidone solution on the structure of clusters in the C<sub>60</sub>/N-methyl-2-pyrrolidone/water system according to the small-angle neutron scattering data. *Crystallogr. Rep.* **52**(3) (2007) 479.
15. V.L. Aksenov et al. Formation of fullerene clusters in the system C<sub>60</sub>/NMP/water by SANS. *Physica B: Condensed Matter* **385-386** (2006) 795.
16. E.A. Kizima et al. Reorganization of fullerene clusters in the C<sub>60</sub>/N-methyl-2-pyrrolidone/water system. *Poverkhnost* **12** (2008) 1. (Rus)
17. H.N. Glosh, A.V. Sapre, J.P. Mittal. Aggregation of C<sub>70</sub> in Solvent Mixtures. *J. Phys. Chem.* **100** (1996) 9439.
18. V.N. Bezmelnitsyn, A.V. Elets'kiy, M.V. Okun. Fullerenes in solutions. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **168** (1998) 1195. (Rus)
19. Y. Wang. Photophysical Properties of Fullerenes and Fullerene/N,N-Diethylaniline Charge-Transfer Complexes. *J. Phys. Chem.* **96** (1992) 764.
20. Y.-P. Sun, C. E. Bunker, B. Ma. Quantitative Studies of Ground and Excited State Charge Transfer Complexes of Fullerenes with N,N-Dimethylaniline and N,N-Diethylaniline. *J. Am. Chem. Soc.* **116** (1994) 9692.
21. L.A. Bulavin et al. Fullerene Clustering in C<sub>70</sub>/N-methyl-2-pyrrolidone/toluene Liquid System. *Ukr. J. Phys.* **63**(2) (2018) 116.
22. V.L. Aksenov et al. Formation of C<sub>60</sub> Fullerene Clusters in Nitrogen Containing Solvents. *Physics of the Solid State* **52**(5) (2010) 1059.
23. T.V. Nagorna et al. Temporal solvatochromic effect in ternary C<sub>70</sub>/toluene/N-methyl-pyrrolidine-2-one solution. *J. Mol. Liq.* **235** (2017) 111.
24. Y.M. Ostanevich. Time-of-flight small-angle scattering spectrometers on pulsed neutron sources. *Macromol. Chem., Macromol. Symp.* **15** (1988) 91.
25. A.I. Kuklin et al. Optimization of the two-detector system of a small-angle neutron spectrometer YuMO for the study of nanoobjects. *Poverkhnost* **6** (2006) 73. (Rus)
26. A. Kuklin et al. Analysis of neutron spectra and fluxes obtained with cold and thermal moderators at IBR-2 reactor: Experimental and computer-modeling studies. *Physics of Particles and Nuclei Letters* **8** (2011) 119.
27. V.N. Shvetsov. Neutron Sources at the Frank Laboratory of Neutron Physics of the Joint Institute for Nuclear Research. *Quantum Beam Sci.* **1**(1) (2017) 6.
28. Yu.I. Prylutskyy et al. On the origin of C<sub>60</sub> fullerene solubility in aqueous solution. *Langmuir* **30**(14) (2014) 3967.
29. R.S. Ruoff et al. Solubility of C<sub>60</sub> in a variety of solvents. *J. Phys. Chem.* **97** (1993) 3379.
30. X. Zhou et al. Solubility of Fullerene C<sub>60</sub> and C<sub>70</sub> in Toluene, o-Xylene and Carbon Disulfide at Various Temperatures. *Fullerene Sci. Technol.* **5**(1) (1997) 285.
31. W.A. Scrivens, J.M. Tour. Potent solvents for C<sub>60</sub> and their utility for the rapid acquisition of <sup>13</sup>C NMR data for fullerenes. *J. Chem. Soc. Chem. Commun.* **15** (1993) 1207.
32. R. Dhamodaran Sivaraman et al. Solubility of C<sub>70</sub> in organic solvents. *Fullerene Sci. Technol.* **2**(3) (1994) 233.
33. A.V. Nikolaev et al. Molecular structure of the C<sub>70</sub> fullerene. *Chem. Phys. Lett.* **223** (1994) 143.
34. A.A. Kaznacheevskaya et al. Reorganization of the cluster state in a C<sub>60</sub>/N-Methylpyrrolidone/water solution:

Comparative characteristics of dynamic light scattering and small-angle neutron scattering data. [J. Surf. Invest. 7\(6\) \(2013\) 1133.](#)

35. M.V. Avdeev et al. Structural features of molecular-colloidal solutions of C<sub>60</sub> fullerenes in water by small-angle neutron scattering. [Langmuir 20 \(2004\) 4363.](#)

Надійшла 02.05.2018

Received 02.05.2018