

А. І. Санжур*

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

*Відповідальний автор: andriy.sanzhur@gmail.com

РІВНЯННЯ СТАНУ ВАН ДЕР ВААЛЬСА ДЛЯ АСИМЕТРИЧНОЇ ЯДЕРНОЇ МАТЕРІЇ

Розглянуто застосування рівняння ван дер Ваальса до асиметричної ядерної матерії в області критичного стану. Виходячи з виразу ентропії у наближенні Томаса - Фермі, який забезпечує виконання теореми Нернста, отримано поправки до тиску та вільної енергії ван дер Ваальса, що виникають за рахунок статистики Фермі. Отримані поправки враховують ефективну масу нуклона та нейтрон-протонну асиметрію. Параметри рівняння стану ван дер Ваальса одержані виходячи з експериментального значення критичної температури симетричної ядерної матерії та порівняння моделі ван дер Ваальса з теорією функціоналу густини енергії Скірма. Розглядається критична лінія в просторі тиску, температури і нейтрон-протонного складу. Визначається коефіцієнт нестисливості вздовж критичної лінії в залежності від складу ядерної матерії. Обговорюється стрибок питомої теплоємності при перетині критичної лінії.

Ключові слова: асиметрична ядерна матерія, рівняння стану, критична лінія.

A. I. Sanzhur*

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

*Corresponding author: andriy.sanzhur@gmail.com

VAN DER WAALS EQUATION OF STATE FOR ASYMMETRIC NUCLEAR MATTER

The application of the van der Waals equation of state to the asymmetric nuclear matter is considered in a critical state region. The corrections to the van der Waals pressure and free energy due to the Fermi statistics are obtained starting from the Thomas - Fermi entropy expression which ensures the fulfilment of the Nernst theorem. The derived corrections account for the effective nucleon mass and neutron-proton isotopic asymmetry. The parameters of the van der Waals equation of state are deduced by taking the experimental value of critical temperature for symmetric nuclear matter and testing the model of van der Waals with statistics corrections included against the theory of Skyrme energy density functional. A critical line in pressure-temperature-composition space is considered. The incompressibility coefficient is determined along the critical line as a function of nuclear matter composition. A jump in the value of specific heat upon crossing a critical line is discussed.

Keywords: asymmetric nuclear matter, equation of state, critical line.

REFERENCES

1. J.D. van der Waals. *Over de Continuïteit van den Gas- en Vloeïstoftoestand* (Leiden: Sijthoff, 1873); J.S. Rowlinson. *J.D. Van Der Waals: On the Continuity of the Gaseous and Liquid States* (Amsterdam: Elsevier, 1988).
2. J.E. Mayer, M.G. Mayer. *Statistical Mechanics* (New York: Wiley, 1940).
3. J. Frenkel. *Kinetic theory of liquids* (Oxford: Clarendon Press, 1946).
4. L.D. Landau, E.M. Lifshitz. *Statistical Physics*. Part 1 (Oxford: Pergamon Press, 1980) 449 p.
5. J. Pochodzalla et al. Probing the nuclear liquid-gas phase transition. *Phys. Rev. Lett.* 75 (1995) 1040.
6. J.B. Natowitz et al. Limiting temperatures and the equation of state of nuclear matter. *Phys. Rev. Lett.* 89 (2002) 212701.
7. J.B. Natowitz et al. Caloric curves and critical behavior in nuclei. *Phys. Rev. C* 65 (2002) 034618.
8. V.A. Karnaukhov et al. Critical temperature for the nuclear liquid-gas phase transition. *Phys. Rev. C* 67 (2003) 011601(R).
9. H. Jaqaman, A.Z. Mekjian, L. Zamick. Nuclear condensation. *Phys. Rev. C* 27 (1983) 2782.
10. S.N. Fedotkin, A.G. Magner, M.I. Gorenstein. Effects of quantum statistics near the critical point of nuclear matter. *Phys. Rev. C* 100 (2019) 054334.
11. H.A. Bethe. Theory of nuclear matter. *Ann. Rev. Nucl. Sci.* 21 (1971) 93.
12. J.W. Negele, D. Vautherin. Density-Matrix Expansion for an Effective Nuclear Hamiltonian. *Phys. Rev. C* 5 (1972) 1472.
13. T.H.R. Skyrme. CVII. The nuclear surface. *Phil. Mag.* 1 (1956) 1043.
14. T.H.R. Skyrme. The effective nuclear potential. *Nucl. Phys.* 9 (1959) 615.

15. D. Vautherin, D.M. Brink. Hartree-Fock Calculations with Skyrme's Interaction. I. Spherical Nuclei. *Phys. Rev. C* 5 (1972) 626.
16. V. Vovchenko, D.V. Anchishkin, M.I. Gorenstein. Van der Waals equation of state with Fermi statistics for nuclear matter. *Phys. Rev. C* 91 (2015) 064314.
17. R.V. Poberezhnyuk et al. Noncongruent phase transitions in strongly interacting matter within the quantum van der Waals model. *Phys. Rev. C* 99 (2019) 024907.
18. J.S. Rowlinson. *The Properties of Real Gases*. In: *Thermodynamics of Gases* (Berlin: Springer-Verlag, 1958) p. 1.
19. S.I. Sandler, H. Orbey. Mixing and Combining Rules. In: *Equations of State for Fluids and Fluid Mixtures. Part I*. (Amsterdam: Elsevier, 2000) p. 321.
20. W.A. Küpper, G. Wegmann, E.R. Hilf. Thermostatic properties of symmetric nuclear matter. *Ann. Phys.* 88 (1974) 474.
21. M. Brack, C. Guet, H.-B. Håkansson. Selfconsistent semiclassical description of average nuclear properties – a link between microscopic and macroscopic models. *Phys. Rep.* 123 (1985) 275.
22. V.M. Kolomietz, S. Shlomo. Static properties of nuclei. In: *Mean Field Theory* (Singapore: World Scientific, 2020) p. 130.
23. F. Perey, B. Buck. A non-local potential model for the scattering of neutrons by nuclei. *Nucl. Phys.* 32 (1962) 353.
24. G.E. Brown, J.H. Gunn, P. Gould. Effective mass in nuclei. *Nucl. Phys.* 46 (1963) 598.
25. S. Shlomo, V.M. Kolomietz. Hot nuclei. *Rep. Prog. Phys.* 68 (2005) 1.
26. V.M. Kolomietz, A.I. Sanzhur, S. Shlomo. Self-consistent mean-field approach to the statistical level density in spherical nuclei. *Phys. Rev. C* 97 (2018) 064302.
27. C. Mondal et al. Interdependence of different symmetry energy elements. *Phys. Rev. C* 96 (2017) 021302(R).
28. Tuhin Malik et al. Nucleon effective mass and its isovector splitting. *Phys. Rev. C* 98 (2018) 064316.
29. J.S. Rowlinson, F.L. Swinton. *The thermodynamics of liquid mixtures*. In: *Liquids and Liquid Mixtures* (London: Butterworth Scientific, 1982) p. 86.
30. R.V. Poberezhnyuk et al. Quantum van der Waals and Walecka models of nuclear matter. *Int. J. Mod. Phys. E* 26 (2017) 1750061.
31. D.H. Youngblood, H.L. Clark, Y.-W. Lui. Incompressibility of nuclear matter from the giant monopole resonance. *Phys. Rev. Lett.* 82 (1999) 691.
32. G. Bonasera, M.R. Anders, S. Shlomo. Giant resonances in $^{40,48}\text{Ca}$, ^{68}Ni , ^{90}Zr , ^{116}Sn , ^{144}Sm , and ^{208}Pb . *Phys. Rev. C* 98 (2018) 054316.
33. H. Müller, B.D. Serot. Phase transitions in warm, asymmetric nuclear matter. *Phys. Rev. C* 52 (1995) 2072.
34. M. Dutra et al. Skyrme interaction and nuclear matter constraints. *Phys. Rev. C* 85 (2012) 035201.
35. B.K. Agrawal, S. Shlomo, V. Kim Au. Determination of the parameters of a Skyrme type effective interaction using the simulated annealing approach. *Phys. Rev. C* 72 (2005) 014310.
36. L.G. Cao et al. From Brueckner approach to Skyrme-type energy density functional. *Phys. Rev. C* 73 (2006) 014313.
37. A.W. Steiner et al. Isospin asymmetry in nuclei and neutron stars. *Phys. Rep.* 411 (2005) 325.
38. M. Rashdan. A Skyrme parametrization based on nuclear matter BHF calculations. *Mod. Phys. Lett. A* 15 (2000) 1287.
39. P.A.M. Guichon et al. Physical origin of density dependent forces of Skyrme type within the quark meson coupling model. *Nucl. Phys. A* 772 (2006) 1.
40. M.A. Anisimov et al. Crossover to global critical phenomena in fluids. *Physica A* 188 (1992) 487.
41. F.J. Fernández Velicia. New functional expansions for the Fermi-Dirac functions. *Phys. Rev. A* 30 (1984) 1194.
42. E.C. Stoner. XXIV. The thermodynamic functions for a Fermi-Dirac gas. *Phil. Mag.* 28 (1939) 257.
43. A. Sommerfeld. Zur Elektronentheorie der Metalle auf Grund der Fermischen Statistik. *Z. Phys.* 47 (1928) 1.

Надійшла/Received 27.07.2022