

В. А. Плюйко*, О. М. Горбаченко, Н. О. Романовський

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

*Відповідальний автор: plujko@gmail.com

СИСТЕМАТИКА ЕНЕРГІЙ ДИПОЛЬНИХ ПІГМІ РЕЗОНАНСІВ У СЕРЕДНІХ І ВАЖКИХ АТОМНИХ ЯДРАХ З НАДЛИШКОМ НЕЙТРОНІВ

Розглянуто систематику енергій пігмі дипольного резонансу (ПДР) у середніх і важких ядрах з надлишком нейтронів. Для опису енергій ПДР застосована макроскопічна модель Ісакера - Нагараджан - Варнера з відносним зміщенням густин протонів кора і поверхневих нейтронів. Представлено модифіковані вирази для обчислення енергії з кількістю приповерхневих нейтронів пропорційною товщині нейтронної шкіри згідно з підходом Песіка - Равенхола. Результати порівнюються з мікроскопічними розрахунками для ланцюжків ізотопів нікелю, олова і свинцю. Продemonстровано, що обчислені енергії ПДР залежно від надлишку нейтронів мають таку ж поведінку, як і обчислені в мікроскопічних підходах експериментальні дані. Запропоновані спрощені вирази для енергій ПДР, як функцій товщини нейтронної шкіри, описують значення енергій ПДР, обчислених з використанням мікроскопічних моделей і їх можна розглядати як систематики мікроскопічних розрахунків енергій ПДР у середніх та важких нейтронно-надлишкових ядрах.

Ключові слова: пігмі дипольний резонанс (ПДР), енергії ПДР, систематика енергій ПДР, товщина нейтронної шкіри, кількість нейтронів у поверхневому прошарку.

V. A. Plujko*, O. M. Gorbachenko, N. O. Romanovskyi

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

*Corresponding author: plujko@gmail.com

SYSTEMATICS OF PYGMY DIPOLE RESONANCE ENERGIES IN MEDIUM AND HEAVY ATOMIC NUCLEI WITH NEUTRON EXCESS

Systematics of the energies of the pygmy dipole resonances (PDR) in medium and heavy nuclei with neutron excess is considered. The macroscopic Isacker - Nagarajan - Warner model, incorporating a relative shift between the proton core density and the surface neutron density, is used to describe the PDR energies. Modified expressions for calculating energy with the number of near-surface neutrons proportional to the neutron skin thickness according to the Pethick - Ravenhall approach are presented. The results are compared with microscopic calculations for Nickel, Tin, and Lead isotope chains. It is demonstrated that the calculated PDR energies, depending on the neutron excess, exhibit the same behavior as those calculated in microscopic approaches and experimental data. Simple expressions for the PDR energy as a function of the neutron skin thickness are proposed to describe the values of PDR energies calculated using microscopic models and can be considered as systematics of microscopic calculations of PDR energies in medium and heavy neutron-rich nuclei.

Keywords: pygmy dipole resonance (PDR), energies of the PDR, energy systematics, neutron skin thickness, number of near-surface neutrons.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. D. Savran, T. Aumann, A. Zilges. Experimental studies of the Pygmy Dipole Resonance. *Prog. Part. Nucl. Phys.* 70 (2013) 210.
2. D. Savran. Recent results on the pygmy dipole resonance. *J. Phys.: Conf. Ser.* 590 (2015) 012011.
3. A. Zilges et al. The Pygmy Dipole Resonance – status and new developments. *J. Phys.: Conf. Ser.* 580 (2015) 012052.
4. A. Bracco, E.G. Lanza, A. Tamii. Isoscalar and isovector dipole excitations: Nuclear properties from low-lying states and from the isovector giant dipole resonance. *Prog. Part. Nucl. Phys.* 106 (2019) 360.
5. E.G. Lanza, A. Vitturi. Theoretical description of Pygmy (Dipole) Resonances. In: *Handbook of Nuclear Physics*. I. Tanihata, H. Toki, T. Kajino (Eds.) (Singapore, Springer, 2023) p. 675.
6. E.G. Lanza et al. Theoretical studies of Pygmy Resonances. *Prog. Part. Nucl. Phys.* 129 (2023) 104006.
7. E.G. Lanza et al. Pygmy dipole resonances: open problems. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2586 (2023) 012084.
8. J.S. Brzozko et al. Effect of the pigmy resonance on the calculations of the neutron capture cross section. *Can. J. Phys.* 47(24) (1969) 2849.
9. M. Igashira et al. Systematics of the pygmy resonance in keV neutron capture γ -ray spectra of nuclei with $N = 82 - 126$. *Nucl. Phys. A* 457 (1986) 301.

10. S. Goriely. Radiative neutron captures by neutron-rich nuclei and the r-process nucleosynthesis. [Phys. Lett. B 436 \(1998\) 10](#).
11. M. Arnould, S. Goriely, K. Takahashi. The r-process of stellar nucleosynthesis: Astrophysics and nuclear physics achievements and mysteries. [Phys. Rep. 450 \(2007\) 97](#).
12. S. Goriely. Nuclear properties for nuclear astrophysics studies. [Eur. Phys. J. A 59 \(2023\) 16](#).
13. T. Aumann. Low-energy dipole response of exotic nuclei. [Eur. Phys. J. A 55 \(2019\) 234](#).
14. A. Zilges et al. Photonuclear reactions – From basic research to applications. [Prog. Part. Nucl. Phys. 122 \(2022\) 103903](#).
15. J. Chambers et al. Pygmy dipole resonances in the calcium isotopes. [Phys. Rev. C 50 \(1994\) R2671](#).
16. D. Vretenar et al. Collectivity of the low-lying dipole strength in relativistic random approximation. [Nucl. Phys. A 692 \(2001\) 496](#).
17. S. Goriely, E. Khan. Large-scale QRPA calculation of E1-strength and its impact on the neutron capture cross section. [Nucl. Phys. A 706 \(2002\) 217](#).
18. N. Paar et al. Isotopic dependence of the pygmy dipole resonance. [Phys. Lett. B 606 \(2005\) 288](#).
19. J. Piekarewicz. Pygmy dipole resonance as a constraint on the neutron skin of heavy nuclei. [Phys. Rev. C 73 \(2006\) 044325](#).
20. N. Tsoneva, H. Lenske. Pygmy dipole resonances in the tin region. [Phys. Rev. C 77 \(2008\) 024321](#).
21. E. Litvinova et al. Relativistic quasiparticle time blocking approximation. II. Pygmy dipole resonance in neutron-rich nuclei. [Phys. Rev. C 79 \(2009\) 054312](#).
22. G. C   et al. Pygmy and giant electric dipole responses of medium-heavy nuclei in a self-consistent random-phase approximation approach with a finite-range interaction. [Phys. Rev. C 87 \(2013\) 034305](#).
23. E.G. Lanza, A. Vitturi, M.V. Andr  s. Microscopic nuclear form factors for the pygmy dipole resonance. [Phys. Rev. C 91 \(2015\) 054607](#).
24. В. І. Абросімов, О. І. Давидовська. Напівкласична модель дипольного пігмі-резонансу в ядрах із надлишком нейтронів. [Укр. фіз. журн. 54\(11\) \(2009\) 1069](#). / V.I. Abrosimov, O.I. Davydovska. Semiclassical model of dipole pygmy-resonance in nuclei with neutron excess. [Ukr. J. Phys. 54\(11\) \(2009\) 1069](#). (Ukr)
25. Y. Suzuki, K. Ikeda, H. Sato. New type of dipole vibration in nuclei. [Prog. Theor. Phys. 83 \(1990\) 180](#).
26. P. Van Isacker, M.A. Nagarajan, D.D. Warner. Effect of the neutron skin on collective states of nuclei. [Phys. Rev. C 45 \(1992\) R13\(R\)](#).
27. V. Baran et al. Pygmy dipole resonance: Collective features and symmetry energy effects. [Phys. Rev. C 85 \(2012\) 051601\(R\)](#).
28. V. Baran et al. Collective dipole modes in nuclear systems. [Rom. Journ. Phys. 57 \(2012\) 36](#).
29. A. Croitoru et al. Pygmy dipole resonance in a schematic model. [Rom. Journ. Phys. 60 \(2015\) 748](#).
30. V. Plujko et al. Improvements and testing practical expressions for photon strength functions of E1 gamma-transitions. [EPJ Web of Conf. 146 \(2017\) 05014](#).
31. О.М. Горбаченко та ін. Опис фотопоглинання фотонними силовими функціями із збудженням двох резонансних станів. [Ядерна фізика та енергетика 24\(1\) \(2023\) 17](#). / О.М. Gorbachenko et al. Description of photoabsorption using photon strength function with the excitation of two resonance states. [Nucl. Phys. At. Energy 24\(1\) \(2023\) 17](#). (Ukr)
32. C.J. Pethick, D.G. Ravenhall. The dependence of neutron skin thickness and surface tension on neutron excess. [Nucl. Phys. A 606\(1-2\) \(1996\) 173](#).
33. M. Markova, P. von Neumann-Cosel, E. Litvinova. Systematics of the low-energy electric dipole strength in the Sn isotopic chain. [Phys. Lett. B 860 \(2025\) 139216](#).
34. W.D. Myers, K.-H. Schmidt. An update on droplet-model charge distributions. [Nucl. Phys. A 410 \(1983\) 61](#).
35. S. Goriely, F. Tondeur, J.M. Pearson. A Hartree-Fock nuclear mass table. [At. Data Nucl. Data Tables 77 \(2001\) 311](#).
36. Y. Alhassid, M. Gai, G.F. Bertsch. Radiative width of molecular-cluster states. [Phys. Rev. Lett. 49 \(1982\) 1482](#).
37. H. Kurasawa, T. Suzuki. A sum-rule constraint on the soft dipole mode. [Prog. Theor. Phys. 94 \(1995\) 931](#).
38. M. Goldhaber, E. Teller. On nuclear dipole vibrations. [Phys. Rev. 74 \(1948\) 1046](#).
39. L.R.B. Elton. A semi-empirical formula for nuclear radius. [Nucl. Phys. 5 \(1958\) 173](#).
40. L.R.B. Elton. *Nuclear Sizes* (Oxford, Oxford University Press, 1961) 114 p.
41. R.W. Hasse, W.D. Myers. *Geometrical Relationships of Macroscopic Nuclear Physics* (Heidelberg, Springer-Verlag, 1988).
42. M. Warda et al. Analysis of bulk and surface contributions in the neutron skin of nuclei. [Phys. Rev. C 81 \(2010\) 054309](#).
43. I. Angeli. *Table of Nuclear Root Mean Square Charge Radii*. INDC(HUN)-033 (Vienna, IAEA, 1999) 84 p.
44. I. Angeli. A consistent set of nuclear rms charge radii: properties of the radius surface R(N, Z). [At. Data Nucl. Data Tables 87 \(2004\) 185](#).
45. I. Angeli, K.P. Marinova. Table of experimental nuclear ground state charge radii: An update. [At. Data Nucl. Data Tables 99 \(2013\) 69](#).
46. A. Trzc  nska et al. Neutron density distributions deduced from antiprotonic atoms. [Phys. Rev. Lett. 87 \(2001\) 082501](#).

47. J. Jastrzębski et al. Neutron density distributions from antiprotonic atoms compared with hadron scattering data. [Int. J. Mod. Phys. E 13 \(2004\) 343](#).
48. W.J. Świątecki, A. Trzcińska, J. Jastrzębski. Difference of the root-mean-square sizes of neutron and proton distributions in nuclei: Comparison of theory with data. [Phys. Rev. C 71 \(2005\) 047301](#).
49. E. Friedman, A. Gal. In-medium nuclear interactions of low-energy hadrons. [Phys. Rep. 452 \(2007\) 89](#).
50. M. Warda et al. Neutron skin thickness in the droplet model with surface width dependence: Indications of softness of the nuclear symmetry energy. [Phys. Rev. C 80 \(2009\) 024316](#).
51. S.V. Lukyanov, A.I. Sanzhur. Influence of surface effects on neutron skin in atomic nuclei. [Nucl. Phys. At. Energy 21 \(2020\) 223](#).
52. J.T. Zhang et al. Systematic trends of neutron skin thickness versus relative neutron excess. [Phys. Rev. C 104 \(2021\) 034303](#).
53. M. Warda, B. Nerlo-Pomorska, K. Pomorski. Isospin dependence of proton and neutron radii within relativistic mean field theory. [Nucl. Phys. A 635 \(1998\) 484](#).
54. W.M. Seif, H. Mansour. Systematics of nucleon density distributions and neutron skin of nuclei. [Int. J. Mod. Phys. E 24 \(2015\) 1550083](#).
55. В.М. Коломієць, А.І. Санжур. Об'ємна та поверхнева енергія симетрії для ядер, віддалених від долини стабільності. [Ядерна фізика та енергетика 8\(2\) \(2007\) 7](#). / V.M. Kolomietz, A.I. Sanzhur. Bulk and surface symmetry energy for the nuclei far from the valley of stability. [Nucl. Phys. At. Energy 8\(2\) \(2007\) 7](#). (Ukr)
56. V.M. Kolomietz, A.I. Sanzhur. Equation of state and symmetry energy within the stability valley. [Eur. Phys. J. A 38 \(2008\) 345](#).
57. A.E.S Green. The systematics of nuclear energies. [Phys. Rev. 83 \(1951\) 1248](#).
58. A.E.S. Green, N.A. Engler. Mass surfaces. [Phys. Rev. 91 \(1952\) 40](#).
59. P. Moller et al. Nuclear ground-state masses and deformations. [At. Data and Nucl. Data Tables 59 \(1995\) 185](#).

Надійшла / Received 12.05.2025