

Ш. Шломо¹, А. І. Санжур^{2,*}

¹ Циклотронний інститут, Техаський А&М університет, Коледж Стейшн, США

² Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

*Відповідальний автор: sanjour@kinr.kiev.ua

ФУНКЦИОНАЛ ГУСТИНИ ЕНЕРГІЇ ТА ЧУТЛИВІСТЬ ЕНЕРГІЙ ГІГАНТСЬКИХ РЕЗОНАНСІВ ДО ВЛАСТИВОСТЕЙ ЯДЕРНОЇ МАТЕРІЇ

Запропоновано короткий огляд поточного стану ядерного функціоналу густини енергії та теоретичних результатів, отриманих для ядер і ядерної матерії. Описано метод визначення параметрів функціонала густини енергії, пов'язаного з ефективною взаємодією Скірма, шляхом підгонки на основі теорії Хартрі - Фока (HF) до широкого набору даних по властивостях основних станів ядер з урахуванням відповідних обмежень. Далі описано основане на теорії HF повністю самоузгоджене наближення випадкових фаз (RPA) для розрахунку силових функцій $S(E)$ і середніх енергій (центроїдів) E_{CEN} гігантських резонансів і борнівське наближення спотворених хвиль (DWBA) на основі моделі згортки (FM) для обчислення перерізів збуджень гігантських резонансів при розсіянні α -частинок. Наведено такі результати: параметри Скірма функціонала густини енергії KDE0v1; наслідки порушення самоузгодженості RPA на основі HF; розрахунки перерізів збудження за допомогою FM-DWBA; значення E_{CEN} ізоскалярного та ізовекторного гігантських резонансів мультипольності $L=0-3$ для широкого кола сферичних ядер із застосуванням 33 функціоналів густини енергії на основі стандартної форми взаємодії Скірма, що зазвичай використовується в літературі; чутливість E_{CEN} гігантських резонансів до основних властивостей ядерної матерії. Визначено також обмеження на такі властивості ядерної матерії, як нестисливість і ефективна маса нуклона, порівнюючи розрахунки з експериментальними даними по E_{CEN} гігантських резонансів.

Ключові слова: функціонал густини енергії, гігантський резонанс, ядерна матерія, силова функція, наближення випадкових фаз.

Ш. Шломо¹, А. И. Санжур^{2,*}

¹ Циклотронный институт, Техасский А&М университет, Колледж Стейшн, США

² Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина

*Ответственный автор: sanjour@kinr.kiev.ua

ФУНКЦИОНАЛ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГИИ И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ЭНЕРГИЙ ГИГАНТСКИХ РЕЗОНАНСОВ К СВОЙСТВАМ ЯДЕРНОЙ МАТЕРИИ

Представлен краткий обзор текущего статуса ядерного функционала плотности энергии и теоретических результатов, полученных для ядер и ядерной материи. Описан метод определения параметров функционала плотности энергии, связанного с эффективным взаимодействием Скирма с помощью подгонки на основе теории Хартри - Фока (HF) к широкому набору данных по свойствам основных состояний ядер, с учетом соответствующих ограничений. Далее описано основанное на теории HF полностью самосогласованное приближение случайных фаз (RPA) для расчета силовых функций $S(E)$ и средних энергий (центроидов) E_{CEN} гигантских резонансов и борновское приближение искаженных волн (DWBA) на основе модели свертки (FM) для расчета сечений возбуждения гигантских резонансов при рассеянии α -частиц. Приведены следующие результаты: параметры Скирма функционала плотности энергии KDE0v1; последствия нарушения самосогласованности RPA на основе HF; расчеты сечений возбуждения с помощью FM-DWBA; значения E_{CEN} изоскалярного и изовекторного гигантских резонансов с мультипольностью $L=0-3$ для широкого набора сферических ядер, применяя 33 функционала плотности энергии стандартной формы сил Скирма, которая обычно используется в литературе; чувствительность E_{CEN} гигантских резонансов к изменениям основных свойств ядерной материи. Определены также ограничения на такие свойства ядерной материи, как несжимаемость и эффективная масса нуклона, путем сравнения расчетов с экспериментальными данными по E_{CEN} гигантских резонансов.

Ключевые слова: функционал плотности энергии, гигантский резонанс, ядерная материя, силовая функция, приближение случайных фаз.

ENERGY DENSITY FUNCTIONAL AND SENSITIVITY OF ENERGIES OF GIANT RESONANCES TO BULK NUCLEAR MATTER PROPERTIES

We provide a short review of the current status of the nuclear energy density functional (EDF) and the theoretical results obtained for properties of nuclei and nuclear matter. We will first describe a method for determining the parameters of the EDF, associated with the Skyrme type effective interaction, by carrying out a Hartree - Fock (HF)-based fit to the extensive set of data of ground-state properties and constraints. Next, we will describe the fully self-consistent HF-based random-phase-approximation (RPA) theory for calculating the strength functions $S(E)$ and centroid energies E_{CEN} of giant resonances and the folding model (FM) distorted wave Born approximation (DWBA) to calculate the excitation cross-section of giant resonances by α scattering. Then we will provide results for: (i) the Skyrme parameters of the KDE0v1 EDF; (ii) consequences of violation of self-consistency in HF-based RPA; (iii) FM-DWBA calculation of excitation cross-section; (iv) values of the E_{CEN} of isoscalar and isovector giant resonances of multiplicities $L=0-3$ for a wide range of spherical nuclei, using 33 EDFs associated with the standard form of the Skyrme type interactions, commonly employed in the literature; and (v) the sensitivities E_{CEN} of the giant resonances to bulk properties of nuclear matter (NM). We also determine constraints on NM properties, such as the incompressibility coefficient and effective mass, by comparing with experimental data on E_{CEN} of giant resonances.

Keywords: energy density functional, giant resonance, nuclear matter, strength function, random-phase-approximation.

REFERENCES

1. W. Kohn. Nobel Lecture: Electronic structure of matter – wave functions and density functionals. *Rev. Mod. Phys.* **71** (1999) 1253.
2. N.K. Glendenning. Equation of state from nuclear and astrophysical evidence. *Phys. Rev. C* **37** (1988) 2733.
3. J.M. Lattimer, M. Prakash. Neutron star observations: Prognosis for equation of state constraints. *Phys. Rep.* **442** (2007) 109.
4. A. Bohr, B.M. Mottelson. *Nuclear Structure II* (New York: Benjamin, 1975).
5. V.M. Kolomietz, S. Shlomo. *Mean Field Theory* (Singapore: World Scientific, 2020) 565 p.
6. S. Shlomo, D.H. Youngblood. Nuclear matter compressibility from isoscalar giant monopole resonance. *Phys. Rev. C* **47** (1993) 529.
7. S. Shlomo. Modern Energy Density Functional for Nuclei and the Nuclear Matter Equation of State. In: *The Universe Evolution: Astrophysical and Nuclear Aspects*. Eds. I. Strakovsky, L. Blokhintsev (New York: Nova Science Publishers, 2013) p. 323.
8. G. Bonasera, M.R. Anders, S. Shlomo. Giant resonances in ^{40,48}Ca, ⁶⁸Ni, ⁹⁰Zr, ¹¹⁶Sn, ¹⁴⁴Sm, and ²⁰⁸Pb. *Phys. Rev. C* **98** (2018) 054316.
9. 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.
10. M. Bender, P.-H. Heenen, P.-G. Reinhard. Self-consistent mean-field models for nuclear structure. *Rev. Mod. Phys.* **75** (2003) 121.
11. Takashi Nakatsukasa et al. Time-dependent density-functional description of nuclear dynamics. *Rev. Mod. Phys.* **88** (2016) 045004.
12. X. Roca-Maza, N. Paar. Nuclear equation of state from ground and collective excited state properties of nuclei. *Prog. Part. Nucl. Phys.* **101** (2018) 96.
13. D. Vautherin, D.M. Brink. Hartree-Fock Calculations with Skyrme's Interaction. I. Spherical Nuclei. *Phys. Rev. C* **5** (1972) 626.
14. T.H.R. Skyrme. CVII. The Nuclear Surface. *Phil. Mag.* **1** (1956) 1043.
15. T.H.R. Skyrme. The effective nuclear potential. *Nucl. Phys.* **9** (1959) 615.
16. M. Dutra et al. Skyrme interaction and nuclear matter constraints. *Phys. Rev. C* **85** (2012) 035201; P.D. Stevenson et al. Do Skyrme forces that fit nuclear matter work well in finite nuclei? [arXiv:1210.1592 \[nucl-th\]](https://arxiv.org/abs/1210.1592).
17. E. Chabanat et al. A Skyrme parametrization from subnuclear to neutron star densities. *Nucl. Phys. A* **627** (1997) 710; A Skyrme parametrization from subnuclear to neutron star densities Part II. Nuclei far from stabilities. *Nucl. Phys. A* **635** (1998) 231.
18. S. Shlomo, G.F. Bertsch. Nuclear response in the continuum. *Nucl. Phys. A* **243** (1975) 507.
19. Tapas Sil et al. Effects of self-consistency violation in Hartree-Fock RPA calculations for nuclear giant resonances revisited. *Phys. Rev. C* **73** (2006) 034316.
20. B.K. Agrawal, S. Shlomo, A.I. Sanzhur. Self-consistent Hartree-Fock based random phase approximation and the

- spurious state mixing. *Phys. Rev. C* 67 (2003) 034314.
21. S. Shlomo, A.I. Sanzhur. Isoscalar giant dipole resonance and nuclear matter incompressibility coefficient. *Phys. Rev. C* 65 (2002) 044310.
 22. P.-G. Reinhard. From sum rules to RPA: 1. *Nuclei. Ann. Phys.* 504 (1992) 632.
 23. G.R. Satchler. *Direct Nuclear Reactions* (Oxford: Oxford University Press, 1983).
 24. A. Kolomiets, O. Pochivalov, S. Shlomo. Microscopic description of excitation of nuclear isoscalar giant resonances by inelastic scattering of 240 MeV α -particles. *Phys. Rev. C* 61 (2000) 034312.
 25. M.H. MacFarlane, S.C. Pieper. PTOLEMY: A program for heavy-ion direct-reaction calculations. Argonne National Laboratory report No. ANL-76-11, Rev. 1 (1978) 104 p. (unpublished).
 26. S. Shlomo. Compression modes and the nuclear matter incompressibility coefficient. *Pramana - J. Phys.* 57 (2001) 557.
 27. S. Shlomo, V.M. Kolomietz, B.K. Agrawal. Isoscalar giant monopole resonance and its overtone in microscopic and macroscopic models. *Phys. Rev. C* 68 (2003) 064301.
 28. B.K. Agrawal, S. Shlomo, V. Kim Au. Critical densities for the Skyrme type effective interactions. *Phys. Rev. C* 70 (2004) 057302.
 29. J. Bartel et al. Towards a better parametrization of Skyrme-like effective forces: a critical study of the SkM force. *Nucl. Phys. A* 386 (1982) 79.
 30. S. Shlomo. Nuclear Coulomb energies. *Rep. Prog. Phys.* 41 (1978) 957.
 31. S. Shlomo. Coulomb energies and charge asymmetry of nuclear forces. *Phys. Lett. B* 42 (1972) 146.
 32. S. Shlomo, D.O. Riska. Charge symmetry breaking interactions and coulomb energy differences. *Nucl. Phys. A* 254 (1975) 281.
 33. S. Shlomo, W.G. Love. Core Polarization and Coulomb Displacement Energies. *Physica Scripta* 26 (1982) 280.
 34. J. Button et al. Isoscalar $E0$, $E1$, $E2$ and $E3$ strength in ^{94}Mo . *Phys. Rev. C* 94 (2016) 034315.
 35. B.K. Agrawal, S. Shlomo. Consequences of self-consistency violations in Hartree-Fock random-phase approximation calculations of the nuclear breathing mode energy. *Phys. Rev. C* 70 (2004) 014308.
 36. N.V. Giai, H. Sagawa. Spin-isospin and pairing properties of modified Skyrme interactions. *Phys. Lett. B* 106 (1981) 379.
 37. H.P. Morsch et al. New Giant Resonances in 172-MeV α Scattering from ^{208}Pb . *Phys. Rev. Lett.* 45 (1980) 337.
 38. K.-F. Liu et al. Skyrme-Landau parameterization of effective interactions (I). Hartree-Fock ground states. *Nucl. Phys. A* 534 (1991) 1; Skyrme-Landau para-meterization of effective interactions (II). Self-consistent description of giant multipole resonances. *Nucl. Phys. A* 534 (1991) 25.
 39. N.V. Giai, H. Sagawa. Monopole and dipole compression modes in nuclei. *Nucl. Phys. A* 371 (1981) 1.
 40. D.H. Youngblood et al. Isoscalar $E0$ - $E3$ strength in ^{116}Sn , ^{144}Sm , ^{154}Sm , and ^{208}Pb . *Phys. Rev. C* 69 (2004) 034315.
 41. G.A. Lalazissis, J. König, P. Ring. New parametrization for the Lagrangian density of relativistic mean field theory. *Phys. Rev. C* 55 (1997) 540.
 42. B.K. Agrawal, S. Shlomo, V. Kim Au. Nuclear matter incompressibility coefficient in relativistic and nonrelativistic microscopic models. *Phys. Rev. C* 68 (2003) 031304.
 43. D.H. Youngblood et al. Compression mode resonances in ^{90}Zr . *Phys. Rev. C* 69 (2004) 054312.
 44. P.-G. Reinhard, H. Flocard. Nuclear effective forces and isotope shifts. *Nucl. Phys. A* 584 (1995) 467.
 45. K. Klüpfel et al. Variations on a theme by Skyrme: A systematic study of adjustments of model parameters. *Phys. Rev. C* 79 (2009) 034310.
 46. N. Lyutorovich et al. Self-consistent calculations of the electric giant dipole resonances in light and heavy nuclei. *Phys. Rev. Lett.* 109 (2012) 092502.
 47. L. Bennour et al. Charge distribution of ^{208}Pb , ^{206}Pb , and ^{205}Tl and the mean-field approximation. *Phys. Rev. C* 40 (1989) 2834.
 48. P.-G. Reinhard et al. Shape coexistence and the effective nucleon-nucleon interaction. *Phys. Rev. C* 60 (1999) 014316.
 49. L.G. Cao et al. From Brueckner approach to Skyrme-type energy density functional. *Phys. Rev. C* 73 (2006) 014313.
 50. L.-W. Chen et al. Density slope of the nuclear symmetry energy from neutron skin thickness of heavy nuclei. *Phys. Rev. C* 82 (2010) 024321.
 51. A.W. Steiner et al. Isospin asymmetry in nuclei and neutron stars. *Phys. Rep.* 411 (2005) 325.
 52. 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.
 53. F. Tondeur et al. Static nuclear properties and the parametrization of Skyrme forces. *Nucl. Phys. A* 420 (1984) 297.
 54. B.A. Brown et al. Neutron skin deduced from antiprotonic atom data. *Phys. Rev. C* 76 (2007) 034305.
 55. J. Friedrich, P.-G. Reinhard. Skyrme-force parameterization: Least-squares fit to nuclear ground-state properties. *Phys. Rev. C* 33 (1986) 335.
 56. S. Shlomo, V.M. Kolomietz, G. Colò. Deducing the nuclear-matter incompressibility coefficient from data on isoscalar compression modes. *Eur. Phys. J. A* 30 (2006) 23.
 57. M. Golin, L. Zamick. Collective models of giant states with density dependent interactions. *Nucl. Phys. A* 249 (1975) 320.