

**Р. Бернабей^{1,2,*}, П. Беллі^{1,2}, А. Буссолотті^{1,2}, В. Караччіоло^{1,2}, Ф. Капелла^{3,4}, Р. Черуллі^{1,2}, Ц. Ж. Дай⁵,
А. д'Анджело^{3,4}, Н. Феррарі^{1,2}, А. Інчікитті^{3,4}, А. Леончіні^{1,2}, І. Х. Ма⁵, А. Маттей^{3,4}, В. Мерло^{1,2},
Ф. Монтеккі^{1,2,6}, І. Д. Шенг⁵, З. П. Йе^{5,7}**

¹ *Фізичний факультет, Римський університет «Тор Вергата», Рим, Італія*

² *Національний інститут ядерної фізики, відділення у Римі «Тор Вергата», Рим, Італія*

³ *Фізичний факультет, Римський університет «Ла Сапієнца», Рим, Італія*

⁴ *Національний інститут ядерної фізики, відділення у Римі, Рим, Італія*

⁵ *Ключова лабораторія астрофізики частинок, Інститут фізики високих енергій,
Китайська академія наук, Пекін, КНР*

⁶ *Факультет цивільної інженерії та інформатики, Римський університет «Тор Вергата», Рим, Італія*

⁷ *Університет Цзінганшань, Цзянь, Цзянси, КНР*

*Відповідальний автор: rita.bernabei@roma2.infn.it

НОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ DAMA/LIBRA-phase2 ТА ПЕРСПЕКТИВИ

Дані, зібрані установкою DAMA/LIBRA-phase2 протягом двох додаткових річних циклів, були проаналізовані з метою подальшого дослідження модельно-незалежного ефекту річних модуляцій, що давно спостерігаються в експерименті DAMA глибоко під землею в Національній лабораторії Гран-Сассо I.N.F.N. за допомогою різних експериментальних конфігурацій. Враховуючи нові результати, загальна статистика DAMA/LIBRA-phase2 протягом 8 річних циклів становить 1,53 т-рік, і сигнал, який відповідає всім вимогам модельно-незалежної річної сигнатури темної матерії, спостерігається на рівні $11,8\sigma$ в області енергій (1 – 6) кеВ. В інтервалі енергій (2 – 6) кеВ, де також доступні дані з DAMA/NaI і DAMA/LIBRA-phase1, досягнута повна експозиція 2,86 т-рік, і рівень спостереження сигналу становить $13,7\sigma$. Жодна систематика чи побічна реакція, здатна імітувати вимірний сигнал (тобто врахувати вимірну амплітуду модуляції та одночасно задовольнити всі вимоги сигнатури темної матерії) не була знайдена протягом 30 років історії експерименту DAMA. Наведено також попередній результат по подальшому зниженню енергетичного порога (за допомогою програмного забезпечення) та перспективи.

Ключові слова: темна матерія, елементарні частинки, сцинтиляційні детектори.

**R. Bernabei^{1,2,*}, P. Belli^{1,2}, A. Bussolotti^{1,2}, V. Caracciolo^{1,2}, F. Cappella^{3,4},
R. Cerulli^{1,2}, C. J. Dai⁵, A. d'Angelo^{3,4}, N. Ferrari^{1,2}, A. Incicchitti^{3,4}, A. Leoncini^{1,2},
X. H. Ma⁵, A. Mattei^{3,4}, V. Merlo^{1,2}, F. Montecchia^{1,2,6}, X. D. Sheng⁵, Z. P. Ye^{5,7}**

¹ *Dipartimento di Fisica, Università di Roma "Tor Vergata", Rome, Italy*

² *INFN, Sezione Roma "Tor Vergata", Rome, Italy*

³ *Dipartimento di Fisica, Università di Roma "La Sapienza", Rome, Italy*

⁴ *INFN, Sezione Roma, Rome, Italy*

⁵ *Key Laboratory of Particle Astrophysics, Institute of High Energy Physics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing, P.R. China*

⁶ *Dipartimento Ingegneria Civile e Ingegneria Informatica,
Università di Roma "Tor Vergata", Rome, Italy*

⁷ *University of Jiangangshan, Ji'an, Jiangxi, P.R. China*

*Corresponding author: rita.bernabei@roma2.infn.it

FURTHER RESULTS FROM DAMA/LIBRA-phase2 AND PERSPECTIVES

The data collected by the DAMA/LIBRA-phase2 set-up during two additional annual cycles have been analyzed, further investigating the long-standing model-independent annual modulation effect pointed out by DAMA deep underground at the Gran Sasso National Laboratory of the I.N.F.N. by using various different experimental configurations. Including the new results, the total exposure of DAMA/LIBRA-phase2 over 8 annual cycles is 1.53 t-yr and the evidence for a signal that meets all the requirements of the model-independent Dark Matter annual modulation signature is 11.8σ C.L. in the energy region (1 – 6) keV. In the (2 – 6) keV energy interval, where data are also available from DAMA/NaI and DAMA/LIBRA-phase1, the achieved C.L. for the full exposure of 2.86 t-yr is 13.7σ . No systematics or side reaction able to mimic this signature (i.e., to account for the whole measured modulation amplitude and to simultaneously satisfy all the requirements of the signature) has been found or suggested by anyone throughout some decades thus far. A preliminary result on the further lowering of the software energy threshold and perspectives are also mentioned.

Keywords: Dark Matter, elementary particle processes, scintillation detectors.

REFERENCES

1. R. Bernabei et al. The DAMA/LIBRA apparatus. *Nucl. Instrum. Methods A* 592(3) (2008) 297.
2. R. Bernabei et al. First results from DAMA/LIBRA and the combined results with DAMA/NaI. *Eur. Phys. J. C* 56 (2008) 333.
3. R. Bernabei et al. New results from DAMA/LIBRA. *Eur. Phys. J. C* 67 (2010) 39.
4. R. Bernabei et al. Final model independent result of DAMA/LIBRA-phase1. *Eur. Phys. J. C* 73 (2013) 2648.
5. R. Bernabei et al. Dark Matter investigation by DAMA at Gran Sasso. *Int. J. of Mod. Phys. A* 28 (2013) 1330022.
6. R. Bernabei et al. Improved model-dependent corollary analyses after the first six annual cycles of DAMA/LIBRA-phase2. *J. of Instr.* 7 (2012) P03009.
7. R. Bernabei et al. No role for muons in the DAMA annual modulation results. *Eur. Phys. J. C* 72 (2012) 2064.
8. R. Bernabei et al. No role for neutrons, muons and solar neutrinos in the DAMA annual modulation results. *Eur. Phys. J. C* 74 (2014) 3196.
9. DAMA coll., issue dedicated to DAMA. *Int. J. of Mod. Phys. A* 31 (2016) and Refs. therein.
10. Model independent result on possible diurnal effect in DAMA/LIBRA-phase1. *Eur. Phys. J. C* 74 (2014) 2827.
11. R. Bernabei et al. New search for processes violating the Pauli exclusion principle in sodium and in iodine. *Eur. Phys. J. C* 62 (2009) 327.
12. R. Bernabei et al. Search for charge non-conserving processes in ^{127}I by coincidence technique. *Eur. Phys. J. C* 72 (2012) 1920.
13. R. Bernabei et al. New search for correlated e^+e^- pairs in the α decay of ^{241}Am . *Eur. Phys. J. A* 49 (2013) 64.
14. R. Bernabei et al. Investigating Earth shadowing effect with DAMA/LIBRA-phase1. *Eur. Phys. J. C* 75 (2015) 239.
15. P. Belli et al. Observations of annual modulation in direct detection of relic particles and light neutrallinos. *Phys. Rev. D* 84 (2011) 055014.
16. A. Addazi et al. DAMA annual modulation effect and asymmetric mirror matter. *Eur. Phys. J. C* 75 (2015) 400.
17. R. Bernabei et al. The DAMA project. *Int. J. of Mod. Phys. A* 31 (2016) 1642009.
18. R. Cerulli et al. DAMA annual modulation and mirror Dark Matter. *Eur. Phys. J. C* 77 (2017) 83.
19. R. Bernabei et al. First Model Independent Results from DAMA/LIBRA-Phase2. *Universe* 4 (2018) 116.
20. R. Bernabei et al. First model independent results from DAMA/LIBRA-phase2. *Nucl. Phys. At. Energy* 19 (2018) 307.
21. R. Bernabei. *New Model Independent Results from the First Six Full Annual Cycles of DAMA/LIBRA-phase2*. *Bled Workshops in Physics* 19(2) (2018) 27.
22. R. Bernabei et al. Improved model-dependent corollary analyses after the first six annual cycles of DAMA/LIBRA-phase2. *Nucl. Phys. At. Energy* 20(4) (2019) 317.
23. R. Bernabei et al. The DAMA project: Achievements, implications and perspectives. *Prog. Part. Nucl. Phys.* 114 (2020) 103810.
24. R. Bernabei et al. The dark matter: DAMA/LIBRA and its perspectives. [arXiv:2110.04734 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/abs/2110.04734).
25. R. Bernabei et al. New limits on WIMP search with large-mass low-radioactivity NaI(Tl) set-up at Gran Sasso. *Phys. Lett. B* 389 (1996) 757.
26. R. Bernabei et al. Searching for WIMPs by the annual modulation signature. *Phys. Lett. B* 424 (1998) 195.
27. R. Bernabei et al. On a further search for a yearly modulation of the rate in particle Dark Matter direct search. *Phys. Lett. B* 450 (1999) 448.
28. P. Belli et al. Extending the DAMA annual modulation region by inclusion of the uncertainties in astrophysical velocities. *Phys. Rev. D* 61 (2000) 023512.
29. R. Bernabei et al. Search for WIMP annual modulation signature: results from DAMA/NaI-3 and DAMA/NaI-4 and the global combined analysis. *Phys. Lett. B* 480 (2000) 23.
30. R. Bernabei et al. Investigating the DAMA annual modulation data in a mixed coupling framework. *Phys. Lett. B* 509 (2001) 197.
31. R. Bernabei et al. Investigating the DAMA annual modulation data in the framework of inelastic dark matter. *Eur. Phys. J. C* 23 (2002) 61.
32. P. Belli et al. Effect of the galactic halo modeling on the DAMA-NaI annual modulation result: An extended analysis of the data for weakly interacting massive particles with a purely spin-independent coupling. *Phys. Rev. D* 66 (2002) 043503.
33. R. Bernabei et al. Performances of the ≈ 100 kg NaI(Tl) set-up of the DAMA experiment at Gran Sasso. *Il Nuovo Cim. A* 112 (1999) 545.
34. R. Bernabei et al. On the investigation of possible systematics in WIMP annual modulation search. *Eur. Phys. J. C* 18 (2000) 283.
35. R. Bernabei et al. Dark matter search. *La Rivista del Nuovo Cimento* 26(1) (2003) 1 and Refs. therein.
36. R. Bernabei et al. Dark matter particles in the galactic halo: Results and implications from DAMA/NaI. *Int. J. Mod. Phys. D* 13 (2004) 2127 and Refs. therein.
37. R. Bernabei et al. Investigating pseudoscalar and scalar dark matter. *Int. J. Mod. Phys. A* 21 (2006) 1445.

38. R. Bernabei et al. Investigating halo substructures with annual modulation signature. *Eur. Phys. J. C* 47 (2006) 263.
39. R. Bernabei et al. On electromagnetic contributions in WIMP quests. *Int. J. Mod. Phys. A* 22 (2007) 3155.
40. R. Bernabei et al. Possible implications of the channeling effect in NaI(Tl) crystals. *Eur. Phys. J. C* 53 (2008) 205.
41. R. Bernabei et al. Investigating electron interacting dark matter. *Phys. Rev. D* 77 (2008) 023506.
42. R. Bernabei et al. Investigation on light dark matter. *Mod. Phys. Lett. A* 23 (2008) 2125.
43. R. Bernabei et al. Search for non-paulian transitions in ^{23}Na and ^{127}I . *Phys. Lett. B* 408 (1997) 439.
44. P. Belli et al. New experimental limit on the electron stability and non-paulian transitions in Iodine atoms. *Phys. Lett. B* 460 (1999) 236.
45. R. Bernabei et al. Extended limits on neutral strongly interacting massive particles and nuclearites from NaI(Tl) scintillators. *Phys. Rev. Lett.* 83 (1999) 4918.
46. P. Belli et al. New limits on the nuclear levels excitation of ^{127}I and ^{23}Na during charge nonconservation. *Phys. Rev. C* 60 (1999) 065501.
47. R. Bernabei et al. Investigation on possible diurnal effects induced by dark matter particles. *Il Nuovo Cimento A* 112 (1999) 1541.
48. R. Bernabei et al. Search for solar axions by Primakoff effect in NaI crystals. *Phys. Lett. B* 515 (2001) 6.
49. F. Cappella et al. A preliminary search for Q-balls by delayed coincidences in NaI(Tl). *Eur. Phys. J.-direct C* 14 (2002) 1.
50. R. Bernabei et al. Search for spontaneous transition of nuclei to a superdense state. *Eur. Phys. J. A* 23 (2005) 7.
51. R. Bernabei et al. A search for spontaneous emission of heavy clusters in the ^{127}I nuclide. *Eur. Phys. J. A* 24 (2005) 51.
52. R. Bernabei, A. Incicchitti. Low background techniques in NaI(Tl) setups. *Int. J. Mod. Phys. A* 32 (2017) 1743007.
53. K.A. Drukier et al. Detecting cold dark-matter candidates. *Phys. Rev. D* 33 (1986) 3495.
54. K. Freese et al. Signal modulation in cold-dark-matter detection. *Phys. Rev. D* 37 (1988) 3388.
55. D. Smith, N. Weiner. Inelastic dark matter. *Phys. Rev. D* 64 (2001) 043502.
56. D. Tucker-Smith, N. Weiner. Status of inelastic dark matter. *Phys. Rev. D* 72 (2005) 063509.
57. D.P. Finkbeiner et al. Inelastic dark matter and DAMA/LIBRA: An experimentum crucis. *Phys. Rev. D* 80 (2009) 115008.
58. K. Freese et al. Detectability of weakly interacting massive particles in the Sagittarius dwarf tidal stream. *Phys. Rev. D* 71 (2005) 043516.
59. K. Freese et al. Effects of the Sagittarius dwarf tidal stream on dark matter detectors. *Phys. Rev. Lett.* 92 (2004) 111301.
60. P. Belli et al. The electronics and DAQ system in DAMA/LIBRA. *Int. J. of Mod. Phys. A* 31 (2016) 1642005.
61. P. Gondolo et al. DarkSUSY 4.00 neutralino dark matter made easy. *New Astron. Rev.* 49 (2005) 193.
62. G. Gelmini, P. Gondolo. Weakly interacting massive particle annual modulation with opposite phase in late-infall halo models. *Phys. Rev. D* 64 (2001) 023504.
63. F.S. Ling, P. Sikivie, S. Wick. Diurnal and annual modulation of cold dark matter signals. *Phys. Rev. D* 70 (2004) 123503.
64. G. Ranucci, M. Rovere. Periodogram and likelihood periodicity search in the SNO solar neutrino data. *Phys. Rev. D* 75 (2007) 013010.
65. J.D. Scargle. Studies in astronomical time series analysis. II - Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. *Astrophys. J.* 263 (1982) 835.
66. W.H. Press et al. *Numerical recipes in Fortran 77: The Art of Scientific Computing* (Cambridge, England, Cambridge University Press, 1992) Section 13.8.
67. J.H. Horne, S.L. Baliunas. A Prescription for Period Analysis of Unevenly Sampled Time Series. *Astrophys. J.* 302 (1986) 757.
68. W.T. Eadie et al. *Statistical Methods in Experimental Physics* (American Elsevier Pub., 1971).

Надійшла/Received 15.12.2021