

**Р. Бернабей<sup>1,2,\*</sup>, П. Беллі<sup>1,2</sup>, Ф. Капелла<sup>3,4</sup>, В. Караччиоло<sup>5</sup>, Р. Черуллі<sup>1,2</sup>, Ц. Ж. Дай<sup>6</sup>, А. д'Анджело<sup>3,4</sup>, А. Ді Марко<sup>2</sup>, Х. Л. Хе<sup>6</sup>, А. Інчікитті<sup>3,4</sup>, І. Х. Ма<sup>6</sup>, В. Мерло<sup>1,2</sup>, Ф. Монтеккі<sup>2,7</sup>, І. Д. Шенг<sup>6</sup>, З. П. Йе<sup>6,8</sup>**

<sup>1</sup> *Фізичний факультет, Римський університет «Тор Вергата», Рим, Італія*

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

<sup>3</sup> *Фізичний факультет, Римський університет «Ла Сапієнца», Рим, Італія*

<sup>4</sup> *Національний інститут ядерної фізики, відділення у Римі, Рим, Італія*

<sup>5</sup> *Національна лабораторія Гран-Сассо, Ассерджі, Італія*

<sup>6</sup> *Ключова лабораторія астрофізики частинок, Інститут фізики високих енергій, Китайська академія наук, Пекін, КНР*

<sup>7</sup> *Факультет цивільної інженерії та інформатики, Римський університет «Тор Вергата», Рим, Італія*

<sup>8</sup> *Університет Цзінганшань, Цзянь, Цзянси, КНР*

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

## **ВДОСКОНАЛЕНИЙ МОДЕЛЬНО-ЗАЛЕЖНИЙ АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ТЕМНОЇ МАТЕРІЇ ПІСЛЯ ПЕРШИХ ШЕСТИ РІЧНИХ ЦИКЛІВ В ЕКСПЕРИМЕНТІ DAMA/LIBRA-phase2**

Деякі з багатьох запропонованих кандидатів на роль частинок Темної Матерії, вже досліджені з меншою експозицією та більш високим порогом енергії, аналізуються додатково з включенням перших даних експерименту DAMA/LIBRA-phase2 із експозицією 1,13 т-рік та нижчим енергетичним порогом (1 кеВ). Загальна експозиція з порогом 2 кеВ, враховуючи також дані DAMA/NaI та DAMA/LIBRA-phase1, зараз становить 2,46 т-рік. Аналіз дозволяє обмежити простір параметрів для розглянутих кандидатів, звужуючи їх значення – порівняно з попередніми аналізами – завдяки збільшенню експозиції та нижчому порогові енергії.

*Ключові слова:* темна матерія, WIMP, процеси з елементарними частинками, сцинтиляційні детектори.

**Р. Бернабей<sup>1,2,\*</sup>, П. Беллі<sup>1,2</sup>, Ф. Капелла<sup>3,4</sup>, В. Караччиоло<sup>5</sup>, Р. Черуллі<sup>1,2</sup>, Ц. Ж. Дай<sup>6</sup>, А. д'Анджело<sup>3,4</sup>, А. Ді Марко<sup>2</sup>, Х. Л. Хе<sup>6</sup>, А. Інчікитті<sup>3,4</sup>, І. Х. Ма<sup>6</sup>, В. Мерло<sup>1,2</sup>, Ф. Монтеккі<sup>2,7</sup>, І. Д. Шенг<sup>6</sup>, З. П. Йе<sup>6,8</sup>**

<sup>1</sup> *Физический факультет, Римский университет «Тор Вергата», Рим, Италия*

<sup>2</sup> *Национальный институт ядерной физики, отделение в Риме «Тор Вергата», Рим, Италия*

<sup>3</sup> *Физический факультет, Римский университет «Ла Сапиенца», Рим, Италия*

<sup>4</sup> *Национальный институт ядерной физики, отделение в Риме, Рим, Италия*

<sup>5</sup> *Национальная лаборатория Гран-Сассо, Ассерджи, Италия*

<sup>6</sup> *Ключевая лаборатория астрофизики частиц, Институт физики высоких энергий, Китайская академия наук, Пекин, КНР*

<sup>7</sup> *Ф-т гражданской инженерии и информатики, Римский университет «Тор Вергата», Рим, Италия*

<sup>8</sup> *Университет Цзинганшань, Цзянь, Цзянси, КНР*

Ответственный автор: rita.bernabei@roma2.infn.it

## **УЛУЧШЕННЫЙ МОДЕЛЬНО-ЗАВИСИМЫЙ АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ТЕМНОЙ МАТЕРИИ ПОСЛЕ ПЕРВЫХ ШЕСТИ ГОДОВЫХ ЦИКЛОВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ DAMA/LIBRA-phase2**

Некоторые из многих предложенных кандидатов на роль частиц Темной Материи, уже исследованные с меньшей экспозицией и более высоким порогом энергии, анализируются дополнительно с включением первых данных эксперимента DAMA/LIBRA-phase2 с экспозицией 1,13 т-год и более низким энергетическим порогом (1 кэВ). Общая экспозиция с порогом 2 кэВ, включая также данные DAMA/NaI и DAMA/LIBRA-phase1, сейчас составляет 2,46 тонн × год. Анализ позволяет ограничить пространство параметров для рассмотренных кандидатов, сужая их значения – сравнительно с предыдущими анализами – благодаря увеличению экспозиции и более низкому порогоу энергии.

*Ключевые слова:* темная материя, WIMP, процессы с элементарными частицами, сцинтилляционные детекторы.

**R. Bernabei<sup>1,2,\*</sup>, P. Belli<sup>1,2</sup>, F. Cappella<sup>3,4</sup>, V. Caracciolo<sup>5</sup>, R. Cerulli<sup>1,2</sup>, C. J. Dai<sup>6</sup>, A. d'Angelo<sup>3,4</sup>, A. Di Marco<sup>2</sup>, H. L. He<sup>6</sup>, A. Incicchitti<sup>3,4</sup>, X. H. Ma<sup>6</sup>, V. Merlo<sup>1,2</sup>, F. Montecchia<sup>2,7</sup>, X. D. Sheng<sup>6</sup>, Z. P. Ye<sup>6,8</sup>**

<sup>1</sup> *Dipartimento di Fisica, Università di Roma «Tor Vergata», Rome, Italy*

<sup>2</sup> *INFN, sez. Roma «Tor Vergata», Rome, Italy*

<sup>3</sup> *Dipartimento di Fisica, Università di Roma «La Sapienza», Rome, Italy*

<sup>4</sup> INFN, sez. Roma, Rome, Italy

<sup>5</sup> INFN Laboratori Nazionali del Gran Sasso, Assergi, Italy

<sup>6</sup> Key Laboratory of Particle Astrophysics, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, P.R. China

<sup>7</sup> Dipartimento Ingegneria Civile e Ingegneria Informatica, Università di Roma "Tor Vergata", Rome, Italy

<sup>8</sup> University of Jingtangshan, Ji'an, Jiangxi, P.R. China

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

## IMPROVED MODEL-DEPENDENT COROLLARY ANALYSES AFTER THE FIRST SIX ANNUAL CYCLES OF DAMA/LIBRA-phase2

Several of the many proposed Dark Matter candidate particles, already investigated with lower exposure and a higher software energy threshold, are further analyzed including the first DAMA/LIBRA-phase2 data release, with an exposure of 1.13 t-yr and a lower software energy threshold (1 keV). The cumulative exposure above 2 keV considering also DAMA/NaI and DAMA/LIBRA-phase1 results is now 2.46 t-yr. The analysis permits to constrain the parameters' space of the considered candidates restricting their values – with respect to previous analyses – thanks to the increase of the exposure and to the lower energy threshold.

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

### REFERENCES

1. R. Bernabei et al. Performances of the new high quantum efficiency PMTs in DAMA/LIBRA. *J. Instrum.* **7** (2012) P03009.
2. R. Bernabei et al. Dark matter investigation by DAMA at Gran Sasso. *Int. J. Mod. Phys. A* **28** (2013) 1330022.
3. R. Bernabei et al. First Model Independent Results from DAMA/LIBRA-Phase2. *Universe* **4** (2018) 116.
4. R. Bernabei et al. *New Model Independent Results From the First Six Full Annual Cycles of DAMA/LIBRA-phase2*. *Bled Workshops in Physics* **19** n. 2 (2018) 27.
5. R. Bernabei et al. First model independent results from DAMA/LIBRA-phase2. *Nucl. Phys. At. Energy* **19** (2018) 307.
6. R. Bernabei et al. First results from DAMA/LIBRA-phase2. *Nuclear and Particle Physics Proceed.* 303-305 (2018) 74.
7. R. Bernabei et al. In the Proc. of 15-th Marcel Grossmann Meeting (World Sci., Singapore, 2019).
8. R. Bernabei et al. The DAMA/LIBRA apparatus. *Nucl. Instr. Meth. A* **592** (2008) 297.
9. R. Bernabei et al. First results from DAMA/LIBRA and the combined results with DAMA/NaI. *Eur. Phys. J. C* **56** (2008) 333.
10. R. Bernabei et al. New results from DAMA/LIBRA. *Eur. Phys. J. C* **67** (2010) 39.
11. R. Bernabei et al. Final model independent result of DAMA/LIBRA-phase1. *Eur. Phys. J. C* **73** (2013) 2648.
12. R. Bernabei et al. No role for muons in the DAMA annual modulation results. *Eur. Phys. J. C* **72** (2012) 2064.
13. 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.
14. DAMA coll. issue dedicated to DAMA. *Int. J. of Mod. Phys. A* **31** (2016) and Refs therein.
15. R. Bernabei et al. Dark matter search. *La Rivista del Nuovo Cimento* **26**(1) (2003) 1 and Refs. therein.
16. 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.
17. K.A. Drukier et al. Detecting cold dark-matter candidates. *Phys. Rev. D* **33** (1986) 3495.
18. K. Freese et al. Signal modulation in cold-dark-matter detection. *Phys. Rev. D* **37** (1988) 3388.
19. P. Belli et al. Observations of annual modulation in direct detection of relic particles and light neutrallinos. *Phys. Rev. D* **84** (2011) 055014.
20. A. Addazi et al. DAMA annual modulation effect and asymmetric mirror matter. *Eur. Phys. J. C* **75** (2015) 400.
21. R. Cerulli et al. DAMA annual modulation and mirror dark matter. *Eur. Phys. J. C* **77** (2017) 83.
22. P. Belli et al. Extending the DAMA annual modulation region by inclusion of the uncertainties in astrophysical velocities. *Phys. Rev. D* **61** (2000) 023512.
23. R. Bernabei et al. Investigating the DAMA annual modulation data in the framework of inelastic dark matter. *Eur. Phys. J. C* **23** (2002) 61.
24. 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.

25. R. Bernabei et al. Investigating pseudoscalar and scalar dark matter. *Int. J. Mod. Phys. A* 21 (2006) 1445.
26. R. Bernabei et al. Investigating halo substructures with annual modulation signature. *Eur. Phys. J. C* 47 (2006) 263.
27. R. Bernabei et al. On electromagnetic contributions in WIMP quests. *Int. J. Mod. Phys. A* 22 (2007) 3155.
28. R. Bernabei et al. Possible implications of the channeling effect in NaI(Tl) crystals. *Eur. Phys. J. C* 53 (2008) 205.
29. R. Bernabei et al. Investigating electron interacting dark matter. *Phys. Rev. D* 77 (2008) 023506.
30. R. Bernabei et al. Investigation on light dark matter. *Mod. Phys. Lett. A* 23 (2008) 2125.
31. A.M. Green. Astrophysical uncertainties on the local dark matter distribution and direct detection experiments. *J. Phys. G* 44 (2017) 084001.
32. N.W. Evans, C.A.J. O'Hare, C. McCabe. Refinement of the standard halo model for dark matter searches in light of the Gaia Sausage. *Phys. Rev. D* 99 (2019) 023012.
33. A.J. Deason et al. The local high-velocity tail and the Galactic escape speed. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 485 (2019) 3514.
34. M.C. Smith et al. The RAVE survey: constraining the local Galactic escape speed. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 379 (2007) 755.
35. T. Piffl et al. The RAVE survey: the Galactic escape speed and the mass of the Milky Way. *Astronomy & Astrophysics* 562 (2014) A91.
36. A.A. Williams et al. On the run: mapping the escape speed across the Galaxy with SDSS. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 468 (2017) 2359.
37. G. Monari et al. The escape speed curve of the Galaxy obtained from *Gaia* DR2 implies a heavy Milky Way. *Astronomy & Astrophysics* 616 (2018) L9.
38. K. Freese et al. Detectability of weakly interacting massive particles in the Sagittarius dwarf tidal stream. *Phys. Rev. D* 71 (2005) 043516.
39. K. Freese et al. Effects of the Sagittarius dwarf tidal stream on dark matter detectors. *Phys. Rev. Lett.* 92 (2004) 111301.
40. F.S. Ling, P. Sikivie, S. Wick. Diurnal and annual modulation of cold dark matter signals. *Phys. Rev. D* 70 (2004) 123503.
41. P. Gondolo et al. DarkSUSY 4.00 neutralino dark matter made easy. *New Astron. Rev.* 49 (2005) 193.
42. G. Gelmini, P. Gondolo. Weakly interacting massive particle annual modulation with opposite phase in late-infall halo models. *Phys. Rev. D* 64 (2001) 023504.
43. D.N. Spergel, P.J. Steinhardt. Observational Evidence for Self-Interacting Cold Dark Matter. *Phys. Rev. Lett.* 84 (2000) 3760.
44. B.D. Wandelt et al. Self-Interacting Dark Matter. *Proc. 4<sup>th</sup> Int. Symp. "Sources and Detection of Dark Matter and Dark Energy in the Universe"* (Springer, Berlin, 2001) p. 263.
45. H.W. Joo et al. Quenching factor measurement for NaI(Tl) scintillation crystal. *Astropart. Phys.* 108 (2019) 50.
46. G. Adhikari et al. Initial performance of the COSINE-100 experiment. *Eur. Phys. J. C* 78 (2018) 107.
47. D.R. Tovey et al. Measurement of scintillation efficiencies and pulse-shapes for nuclear recoils in NaI(Tl) and CaF<sub>2</sub>(Eu) at low energies for dark matter experiments. *Phys. Lett. B* 433 (1998) 150.
48. J. Xu et al. Scintillation efficiency measurement of Na recoils in NaI(Tl) below the DAMA/LIBRA energy threshold. *Phys. Rev. C* 92 (2015) 015807.
49. 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.
50. V.I. Tretyak. Semi-empirical calculation of quenching factors for ions in scintillators. *Astropart. Phys.* 33 (2010) 40.
51. J.I. Collar. Quenching and channeling of nuclear recoils in NaI(Tl): Implications for dark-matter searches. *Phys. Rev. C* 88 (2013) 035806.
52. S.I. Matyukhin. Critical parameters of channeling. *Tech. Phys.* 53 (2008) 1578.
53. N. Bozorgnia et al. Channeling in direct dark matter detection I: channeling fraction in NaI(Tl) crystals. *J. Cosmol. Astropart. Phys.* 11 (2010) 019.
54. R. Bernabei et al. Investigating the DAMA annual modulation data in a mixed coupling framework. *Phys. Lett. B* 509 (2001) 197.
55. G. Prezeau et al. New Contribution to Scattering of Weakly Interacting Massive Particles on Nuclei. *Phys. Rev. Lett.* 91 (2003) 231301.
56. R.H. Helm. Inelastic and Elastic Scattering of 187-Mev Electrons from Selected Even-Even Nuclei. *Phys. Rev.* 104 (1956) 1466.
57. J.D. Lewin, P.F. Smith. Review of mathematics, numerical factors, and corrections for dark matter experiments

- based on elastic nuclear recoil. [Astropart. Phys. 6 \(1996\) 87](#).
58. S. Baum, K. Freese, C. Kelso. Dark Matter implications of DAMA/LIBRA-phase2 results. [Phys. Lett. B 789 \(2019\) 262](#).
  59. S. Kang et al. DAMA/LIBRA-phase2 in WIMP effective models. [J. Cosmol. Astropart. Phys. 07 \(2018\) 016](#).
  60. F. Kahlhoefer et al. Model-independent comparison of annual modulation and total rate with direct detection experiments. [J. Cosmol. Astropart. Phys. 05 \(2018\) 074](#).
  61. D. Smith, N. Weiner. Inelastic dark matter. [Phys. Rev. D 64 \(2001\) 043502](#).
  62. D. Tucker-Smith, N. Weiner. Status of inelastic dark matter. [Phys. Rev. D 72 \(2005\) 063509](#).
  63. D.P. Finkbeiner et al. Inelastic dark matter and DAMA/LIBRA: An experimentum crucis. [Phys. Rev. D 80 \(2009\) 115008](#).
  64. S. Kang et al. Proton-philic spin-dependent inelastic dark matter as a viable explanation of DAMA/LIBRA-phase2. [Phys. Rev. D 99 \(2019\) 023017](#).
  65. S. Kang, S. Scopel, G. Tomar. Probing DAMA/LIBRA in the full parameter space of WIMP effective models of inelastic scattering. [Phys. Rev. D 99 \(2019\) 103019](#).
  66. S. Chang, R.F. Lang, N. Weiner. Effect of Thallium Impurities in the DAMA Experiment on the Allowed Parameter Space for Inelastic Dark Matter. [Phys. Rev. Lett. 106 \(2011\) 011301](#).
  67. J. Herrero-Garcia et al. Time-dependent rate of multicomponent dark matter: Reproducing the DAMA/LIBRA phase-2 results. [Phys. Rev. D 98 \(2018\) 123007](#).

Надійшла 23.08.2019  
Received 23.08.2019