

**Р. Бернабей^{1,2,*}, П. Беллі^{1,2}, А. Буссолотті², Ф. Капелла^{3,4}, В. Караччіоло⁵, Р. Черуллі^{1,2}, Ц. Ж. Дай⁶,
А. д'Анджело^{3,4}, А. Ді Марко², Х. Л. Хе⁶, А. Інчікітті^{3,4}, І. Х. Ма⁶, А. Маттеї⁴, В. Мерло^{1,2},
Ф. Монтеккі^{2,7}, І. Д. Шенг⁶, З. П. Йе^{6,8}**

¹ *Фізичний факультет, Римський університет "Тор Вергата", Рим, Італія*

² *Національний інститут ядерної фізики, відділення в Римі "Тор Вергата", Рим, Італія*

³ *Фізичний факультет, Римський університет "Ла Сапієнца", Рим, Італія*

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

⁵ *Національна лабораторія Гран-Сассо, Ассерджі, Італія*

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

⁷ *Факультет цивільної інженерії та інформатики, Римський університет "Тор Вергата", Рим, Італія*

⁸ *Університет Цзінганшань, Цзянь, Цзянси, КНР*

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

ПЕРШІ МОДЕЛЬНО НЕЗАЛЕЖНІ РЕЗУЛЬТАТИ DAMA/LIBRA-PHASE2

Представлено перші модельно незалежні результати, отримані в експерименті DAMA/LIBRA-phase2. Дані були зібрані протягом шести річних циклів, що відповідають загальній експозиції $1.13 \text{ т} \cdot \text{рік}$, глибоко під землею в Національній лабораторії Гран-Сассо (LNGS) Національного інституту ядерної фізики. Апарат DAMA/LIBRA-phase2, $\approx 250 \text{ кг}$ радіоактивно супер-чистого NaI(Tl) , використовує переваги фотоелектронних помножувачів другого покоління з високою квантовою ефективністю та нової електроніки порівняно з DAMA/LIBRA-phase1. Покращена експериментальна конфігурація дала змогу також знизити енергетичний поріг. Представлено нові стратегії аналізу даних. Дані DAMA/LIBRA-phase2 підтверджують існування сигналу, який відповідає всім вимогам до модельно незалежної річної модуляції темної матерії (ТМ) на рівні $9.5\sigma \text{ C.L.}$ в області енергій (1 - 6) кеВ. В області енергій між 2 і 6 кеВ, де доступні також дані з DAMA/NaI і DAMA/LIBRA-phase1 (експозиція $1.33 \text{ т} \cdot \text{рік}$, зібрані за 14 річних циклів), досягнуто рівень $12.9\sigma \text{ C.L.}$ для повної експозиції ($2.46 \text{ т} \cdot \text{рік}$); амплітуда модуляції *одно-точкових* сцинтиляційних подій становить (0.0103 ± 0.0008) відліків/доба/кг/кеВ, виміряна фаза дорівнює (145 ± 5) діб і вимірний період ϵ (0.999 ± 0.001) років; усі ці значення добре узгоджуються з очікуваними для частинок ТМ. Протягом декількох десятиліть ніким не було знайдено або запропоновано жодних систематичних ефектів або побічних реакцій, здатних імітувати всі риси ТМ (тобто отримати вимірну амплітуду модуляції і одночасно відтворити всі її характеристики).

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

**Р. Бернабей^{1,2,*}, П. Беллі^{1,2}, А. Буссолотті², Ф. Капелла^{3,4}, В. Караччіоло⁵, Р. Черуллі^{1,2}, Ц. Ж. Дай⁶,
А. д'Анджело^{3,4}, А. Ді Марко², Х. Л. Хе⁶, А. Інчікітті^{3,4}, І. Х. Ма⁶, А. Маттеї⁴, В. Мерло^{1,2},
Ф. Монтеккі^{2,7}, І. Д. Шенг⁶, З. П. Йе^{6,8}**

¹ *Физический факультет, Римский университет "Тор Вергата", Рим, Италия*

² *Национальный институт ядерной физики, отделение в Риме "Тор Вергата", Рим, Италия*

³ *Физический факультет, Римский университет "Ла Сапиенца", Рим, Италия*

⁴ *Национальный институт ядерной физики, отделение в Риме, Рим, Италия*

⁵ *Национальная лаборатория Гран-Сассо, Ассерджи, Италия*

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

⁷ *Факультет гражданской инженерии и информатики, Римский университет "Тор Вергата", Рим, Италия*

⁸ *Университет Цзинганшань, Цзянь, Цзянси, КНР*

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

ПЕРВЫЕ МОДЕЛЬНО НЕЗАВИСИМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ DAMA/LIBRA-PHASE2

Представлены первые модельно независимые результаты, полученные в эксперименте DAMA/LIBRA-phase2. Данные были собраны на протяжении шести годовых циклов, что отвечает общей экспозиции $1.13 \text{ т} \cdot \text{лет}$, глубоко под землей в Национальной лаборатории Гран-Сассо (LNGS) Национального института ядерной физики. Аппарат DAMA/LIBRA-phase2, $\approx 250 \text{ кг}$ радиоактивно супер-чистого NaI(Tl) , использует преимущества фотоэлектронных умножителей второго поколения с высокой квантовой эффективностью и новой электроники по сравнению с DAMA/LIBRA-phase1. Улучшенная экспериментальная конфигурация позволила также снизить энергетический порог. Представлены новые стратегии анализа данных. Данные DAMA/LIBRA-phase2 подтверждают существование сигнала, который отвечает всем требованиям к модельно

независимой годовой модуляции темной материи (ТМ) на уровне 9.5σ C.L. в области энергий (1 - 6) кэВ. В области энергий между 2 и 6 кэВ, где доступны также данные с DAMA/NaI и DAMA/LIBRA-phase1 (экспозиция $1.33 \text{ т} \cdot \text{лет}$, собранные за 14 годовых циклов), достигнут уровень 12.9σ C.L. для полной экспозиции ($2.46 \text{ т} \cdot \text{лет}$); амплитуда модуляций *одно-точечных* сцинтилляционных событий составляет (0.0103 ± 0.0008) отсчетов/сут/кг/кэВ, измеренная фаза равна (145 ± 5) сут и измеренный период равен (0.999 ± 0.001) лет; все эти значения хорошо согласовываются с ожидаемыми для частиц ТМ. На протяжении нескольких десятилетий не было найдено или предложено кем-либо никакой систематики или побочной реакции, способной имитировать все черты ТМ (то есть получить измеренную амплитуду модуляций и одновременно воспроизвести все ее характеристики).

Ключевые слова: сцинтилляционные детекторы, элементарные частицы, темная материя.

**R. Bernabei^{1,2,*}, P. Belli^{1,2}, A. Bussolotti², F. Cappella^{3,4}, V. Caracciolo⁵, R. Cerulli^{1,2}, C. J. Dai⁶,
A. d'Angelo^{3,4}, A. Di Marco², H. L. He⁶, A. Incicchitti^{3,4}, X. H. Ma⁶, A. Mattei⁴, V. Merlo^{1,2},
F. Montecchia^{2,7}, X. D. Sheng⁶, Z. P. Ye^{6,8}**

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

² INFN, sez. Roma "Tor Vergata", Rome, Italy

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

⁴ INFN, Sezione di Roma, Rome, Italy

⁵ INFN Laboratori Nazionali del Gran Sasso, Assergi, Italy

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

⁷ Dipartimento Ingegneria Civile e Ingegneria Informatica, Università di Roma "Tor Vergata", Rome, Italy

⁸ University of Jinggangshan, Ji'an, Jiangxi, P.R. China

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

FIRST MODEL INDEPENDENT RESULTS FROM DAMA/LIBRA-PHASE2

The first model independent results obtained by the DAMA/LIBRA-phase2 experiment are presented. The data have been collected over 6 annual cycles corresponding to a total exposure of $1.13 \text{ т} \cdot \text{yr}$, deep underground at the Gran Sasso National Laboratory (LNGS) of the I.N.F.N. The DAMA/LIBRA-phase2 apparatus, $\approx 250 \text{ kg}$ highly radio-pure NaI(Tl), profits from a second generation high quantum efficiency photomultipliers and of new electronics with respect to DAMA/LIBRA-phase1. The improved experimental configuration has also allowed to lower the software energy threshold. New data analysis strategies are presented. The DAMA/LIBRA-phase2 data confirm the evidence of a signal that meets all the requirements of the model independent Dark Matter (DM) annual modulation signature, at 9.5σ C.L. in the energy region (1 - 6) keV. In the energy region between 2 and 6 keV, where data are also available from DAMA/NaI and DAMA/LIBRA-phase1 (exposure $1.33 \text{ т} \cdot \text{yr}$, collected over 14 annual cycles), the achieved C.L. for the full exposure ($2.46 \text{ т} \cdot \text{yr}$) is 12.9σ ; the modulation amplitude of the *single-hit* scintillation events is: $(0.0103 \pm \pm 0.0008)$ cpd/kg/keV, the measured phase is (145 ± 5) d and the measured period is (0.999 ± 0.001) yr, all these values are well in agreement with those expected for DM particles. No systematics or side reaction able to mimic the exploited DM 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.

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

REFERENCES

1. R. Bernabei et al. The DAMA/LIBRA apparatus. *Nucl. Instr. Meth. A* 592 (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. Mod. Phys. A* 28 (2013) 1330022.
6. R. Bernabei et al. Performances of the new high quantum efficiency PMTs in DAMA/LIBRA. *J. Instrum.* 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. Mod. Phys. A* 31 (2016) and Refs. therein.
10. R. Bernabei et al. 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 neutralinos. *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. On corollary model-dependent analyses and comparisons. *Int. J. 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. New model independent results from the first six full annual cycles of DAMA/LIBRA-phase2. *Bled Workshops in Physics* 19(2) (2018) 27.
21. P. Belli et al. DAMA proposal to INFN Scientific Committee II, April 24th 1990.
22. 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.
23. R. Bernabei et al. Searching for WIMPs by the annual modulation signature. *Phys. Lett. B* 424 (1998) 195.
24. 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.
25. P. Belli et al. Extending the DAMA annual-modulation region by inclusion of the uncertainties in astrophysical velocities. *Phys. Rev. D* 61 (2000) 023512.
26. 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.
27. R. Bernabei et al. Investigating the DAMA annual modulation data in a mixed coupling framework. *Phys. Lett. B* 509 (2001) 197.
28. R. Bernabei et al. Investigating the DAMA annual modulation data in the framework of inelastic dark matter. *Eur. Phys. J. C* 23 (2002) 61.
29. 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.
30. 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.
31. R. Bernabei et al. On the investigation of possible systematics in WIMP annual modulation search. *Eur. Phys. J. C* 18 (2000) 283.
32. R. Bernabei et al. Dark matter search. *La Rivista del Nuovo Cimento* 26(1) (2003) 1 and Refs. therein.
33. 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.
34. R. Bernabei et al. Investigating pseudoscalar and scalar dark matter. *Int. J. Mod. Phys. A* 21 (2006) 1445.
35. R. Bernabei et al. Investigating halo substructures with annual modulation signature. *Eur. Phys. J. C* 47 (2006) 263.
36. R. Bernabei et al. On electromagnetic contributions in WIMP quests. *Int. J. Mod. Phys. A* 22 (2007) 3155.
37. R. Bernabei et al. Possible implications of the channeling effect in NaI(Tl) crystals. *Eur. Phys. J. C* 53 (2008) 205.
38. R. Bernabei et al. Investigating electron interacting dark matter. *Phys. Rev. D* 77 (2008) 023506.
39. R. Bernabei et al. Investigation on light dark matter. *Mod. Phys. Lett. A* 23 (2008) 2125.
40. R. Bernabei et al. Search for non-paulian transitions in ^{23}Na and ^{127}I . *Phys. Lett. B* 408 (1997) 439.
41. P. Belli et al. New experimental limit on the electron stability and non-paulian transitions in Iodine atoms. *Phys. Lett. B* 460 (1999) 236.
42. R. Bernabei et al. Extended limits on neutral strongly interacting massive particles and nuclearites from NaI(Tl) scintillators. *Phys. Rev. Lett.* 83 (1999) 4918.
43. 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.
44. R. Bernabei et al. Investigation on possible diurnal effects induced by dark matter particles. *Il Nuovo Cimento A* 112 (1999) 1541.
45. R. Bernabei et al. Search for solar axions by Primakoff effect in NaI crystals. *Phys. Lett. B* 515 (2001) 6.
46. F. Cappella et al. A preliminary search for Q-balls by delayed coincidences in NaI(Tl). *Eur. Phys. J.-direct C* 14 (2002) 1.
47. R. Bernabei et al. Search for spontaneous transition of nuclei to a superdense state. *Eur. Phys. J. A* 23 (2005) 7.
48. R. Bernabei et al. A search for spontaneous emission of heavy clusters in the ^{127}I nuclide. *Eur. Phys. J. A* 24 (2005) 51.

49. A.K. Drukier et al. Detecting cold dark-matter candidates. *Phys. Rev. D* 33 (1986) 3495.
50. K. Freese et al. Signal modulation in cold-dark-matter detection. *Phys. Rev. D* 37 (1988) 3388.
51. R. Bernabei, A. Incicchitti. Low background techniques in NaI(Tl) setups. *Int. J. Mod. Phys. A* 32 (2017) 1743007.
52. D. Smith, N. Weiner. Inelastic dark matter. *Phys. Rev. D* 64 (2001) 043502.
53. D. Tucker-Smith, N. Weiner. Status of inelastic dark matter. *Phys. Rev. D* 72 (2005) 063509.
54. D.P. Finkbeiner et al. Inelastic dark matter and DAMA/LIBRA: An experimentum crucis. *Phys. Rev. D* 80 (2009) 115008.
55. K. Freese et al. Detectability of weakly interacting massive particles in the Sagittarius dwarf tidal stream. *Phys. Rev. D* 71 (2005) 043516.
56. K. Freese et al. Effects of the Sagittarius dwarf tidal stream on dark matter detectors. *Phys. Rev. Lett.* 92 (2004) 111301.
57. P. Belli et al. The electronics and DAQ system in DAMA/LIBRA. *Int. J. Mod. Phys. A* 31 (2016) 1642005.
58. P. Gondolo et al. DarkSUSY 4.00 neutralino dark matter made easy. *New Astron. Rev.* 49 (2005) 193.
59. G. Gelmini, P. Gondolo. Weakly interacting massive particle annual modulation with opposite phase in late-infall halo models. *Phys. Rev. D* 64 (2001) 023504.
60. F.S. Ling, P. Sikivie, S. Wick. Diurnal and annual modulation of cold dark matter signals. *Phys. Rev. D* 70 (2004) 123503.
61. G. Ranucci, M. Rovere. Periodogram and likelihood periodicity search in the SNO solar neutrino data. *Phys. Rev. D* 75 (2007) 013010.
62. J.D. Scargle. Studies in astronomical time series analysis. II - Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. *Astrophys. J.* 263 (1982) 835.
63. W.H. Press et al. *Numerical Recipes in Fortran 77: The Art of Scientific Computing* (Cambridge, England: Cambridge University Press, 1992) section 13.8.
64. J.H. Horne, S.L. Baliunas. A prescription for period analysis of unevenly sampled time series. *Astrophys. J.* 302 (1986) 757.
65. R. Bernabei et al. Dark matter particles in the galactic halo. *Bled Workshop in Physics* 15(2) (2014) 10.
66. W.T. Eadie et al. *Statistical Methods in Experimental Physics* (American Elsevier Pub., 1971).

Надійшла 03.12.2018
Received 03.12.2018