

**Ф. Віссані<sup>1,2,\*</sup>**

<sup>1</sup> *Національний інститут ядерної фізики, Національна лабораторія Гран Сассо, Ассерджі, Італія*

<sup>2</sup> *Науковий інститут Гран Сассо, Акваїла, Італія*

\*Відповідальний автор: francesco.vissani@lngs.infn.it

**СПІЛЬНИЙ АНАЛІЗ ДАНИХ ПРО СОНЯЧНІ НЕЙТРИНО  
ВІД ЕКСПЕРИМЕНТІВ BOREXINO ТА SNO  
ТА РЕКОНСТРУКЦІЯ ЙМОВІРНОСТІ ЇХНЬОГО ВИЖИВАННЯ**

Існування осциляцій сонячних нейтрино підтверджується вимірюваннями потоків антинейтрино в експерименті KamLAND, але певні дані про сонячні нейтрино – спостережена форма спектра  $^8\text{B}$  та різниця між інтенсивністю денного та нічного потоків, виміряна в Super-K, – не дуже добре вписуються в результуючу осциляційну модель. Цікаво, що інші дані про сонячні нейтрино дають змогу провести незалежні тести ймовірності виживання нейтрино. Завдяки новим вимірюванням Borexino при малих енергіях разом із стандартною сонячною моделлю та результатами SNO при високих енергіях зараз відомі чотири значення ймовірності виживання нейтрино. Ми будемо та вивчаємо математичну правдоподібність лише на основі цих даних про сонячні нейтрино. Результати добре узгоджуються зі стандартною осциляційною моделлю та, зокрема, з результатами KamLAND. Відповідна пряма процедура дає змогу реконструювати ймовірність виживання та оцінити її невизначеність для всіх енергій сонячних нейтрино.

*Ключові слова:* сонячні нейтрино, нейтринні осциляції, ядерна астрофізика,  $pp$  нейтрино,  $pep$  нейтрино,  $^7\text{Be}$  нейтрино,  $^8\text{B}$  нейтрино.

**Ф. Віссані<sup>1,2,\*</sup>**

<sup>1</sup> *Национальный институт ядерной физики, Национальная лаборатория Гран Сассо, Ассерджі, Італія*

<sup>2</sup> *Научный институт Гран Сассо, Акваїла, Італія*

\*Ответственный автор: francesco.vissani@lngs.infn.it

**СОВМЕСТНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ПО СОЛНЕЧНЫМ НЕЙТРИНО  
ОТ ЭКСПЕРИМЕНТОВ BOREXINO И SNO  
И РЕКОНСТРУКЦИЯ ВЕРОЯТНОСТИ ИХ ВЫЖИВАНИЯ**

Существование осцилляций солнечных нейтрино подтверждается измерениями потоков антинейтрино в эксперименте KamLAND, но некоторые данные по солнечным нейтрино – наблюдаемая форма спектра  $^8\text{B}$  и разница между интенсивностью дневного и ночного потоков, измеренная в Super-K, – не очень хорошо вписываются в результирующую осцилляционную модель. Интересно, что другие данные по солнечным нейтрино разрешают провести независимые тесты вероятности выживания нейтрино. Благодаря новым измерениям Borexino при малых энергиях вместе со стандартной солнечной моделью и результатами SNO при высоких энергиях сейчас известны четыре значения вероятности выживания нейтрино. Мы строим и изучаем математическую правдоподобность только на основе этих данных по солнечным нейтрино. Результаты хорошо согласуются со стандартной осцилляционной моделью и, в частности, с результатами KamLAND. Соответствующая прямая процедура позволяет реконструировать вероятность выживания и оценить ее неопределенность для всех энергий солнечных нейтрино.

*Ключевые слова:* солнечные нейтрино, нейтринные осцилляции, ядерная астрофизика,  $pp$  нейтрино,  $pep$  нейтрино,  $^7\text{Be}$  нейтрино,  $^8\text{B}$  нейтрино.

**Francesco Vissani<sup>1,2,\*</sup>**

<sup>1</sup> *INFN - Laboratori Nazionali del Gran Sasso, Assergi (AQ), Italy*

<sup>2</sup> *Gran Sasso Science Institute, L'Aquila (AQ), Italy*

\*Corresponding author: francesco.vissani@lngs.infn.it

**JOINT ANALYSIS OF BOREXINO AND SNO SOLAR NEUTRINO DATA  
AND RECONSTRUCTION OF THE SURVIVAL PROBABILITY**

Solar neutrino oscillations are supported by KamLAND's antineutrino measurements, but certain solar neutrino data – the observed shape of the  $^8\text{B}$  flux and the difference between day and night counting rates measured in Super-K – do not fit well with the ensuing oscillation pattern. Interestingly, other solar neutrino data allow independent tests of the

survival probability. Thanks to the new measurements of Borexino at low-energies along with the standard solar model and to the results of SNO at high-energies, four values of the neutrino survival probability are known. We build and study a likelihood based only on these solar neutrino data. The results agree well with the standard oscillation pattern and in particular with KamLAND findings. A related and straightforward procedure permits to reconstruct the survival probability of solar neutrinos and to assess its uncertainties, for all solar neutrino energies.

*Keywords:* solar neutrinos, neutrino oscillations, nuclear astrophysics,  $pp$  neutrinos,  $pep$  neutrinos,  ${}^7\text{Be}$  neutrinos,  ${}^8\text{B}$  neutrinos.

## REFERENCES

1. Borexino Collaboration (M. Agostini et al.). First simultaneous precision spectroscopy of  $pp$ ,  ${}^7\text{Be}$  and  $pep$  solar neutrinos with Borexino phase-II. [arXiv: 1707.09279 \[hep-ex\]](#), submitted for publication.
2. L. Wolfenstein. Neutrino oscillations in matter. *Phys. Rev. D* **17** (1978) 2369; S.P. Mikheyev, A.Yu. Smirnov. Resonant amplification of neutrino oscillations in matter and spectroscopy of solar neutrinos. *Sov. J. Nucl. Phys.* **42** (1986) 913.
3. SNO Collaboration (A. Bellerive et al.). The Sudbury Neutrino Observatory. *Nucl. Phys. B* **908** (2016) 30.
4. KamLAND Collaboration (A. Gando et al.). Reactor on-off antineutrino measurement with KamLAND. *Phys. Rev. D* **88** (2013) 033001.
5. Super-Kamiokande Collaboration (K. Abe et al.). Solar neutrino measurements in Super-Kamiokande-IV. *Phys. Rev. D* **94** (2016) 052010.
6. F. Capozzi et al. Global constraints on absolute neutrino masses and their ordering. *Phys. Rev. D* **95** (2017) 096014.
7. I. Esteban et al. Updated fit to three neutrino mixing: exploring the accelerator-reactor complementarity. *JHEP* **01** (2017) 087.
8. P.F. de Salas et al. Status of neutrino oscillations 2017. [arXiv:1708.01186 \[hep-ph\]](#), submitted for publication.
9. P.C. de Holanda, A.Y. Smirnov. Solar neutrino spectrum, sterile neutrinos, and additional radiation in the Universe. *Phys. Rev. D* **83** (2011) 113011.
10. A. Palazzo. Hint of nonstandard Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein dynamics in solar neutrino conversion. *Phys. Rev. D* **83** (2011) 101701.
11. F. Vissani. Solar neutrino physics on the beginning of 2017. *Nucl. Phys. At. Energy* **18(1)** (2017) 5.
12. J.N. Bahcall, A.M. Serenelli, S. Basu. New Solar Opacities, Abundances, Helioseismology, and Neutrino Fluxes. *Astrophys. J.* **621** (2005) L85.
13. N. Vinyoles et al. A New Generation of Standard Solar Models. *Astrophys. J.* **835** (2017) 202.
14. D.G. Yakovlev et al. Simple analytic model for astrophysical  $S$  factors. *Phys. Rev. C* **82** (2010) 044609.
15. E.G. Adelberger et al. Solar fusion cross sections. II. The  $pp$  chain and CNO cycles. *Rev. Mod. Phys.* **83** (2011) 195.
16. R.J. de Boer et al. Monte Carlo uncertainty of the  ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$  reaction rate. *Phys. Rev. C* **90** (2014) 035804.
17. A. Di Leva, talk at [18].
18. [Int. Conf. "Recent Developments in Neutrino Physics and Astrophysics"](#), 4 - 7 Sept. 2017, Assergi, Italy.
19. B.T. Cleveland et al. Measurement of the Solar Electron Neutrino Flux with the Homestake Chlorine Detector. *Astrophys. J.* **496** (1998) 505.
20. SAGE Collaboration (J.N. Abdurashitov et al.). Measurement of the solar neutrino capture rate with gallium metal. III. Results for the 2002 - 2007 data-taking period. *Phys. Rev. C* **80** (2009) 015807.
21. F. Kaether et al. Reanalysis of the Gallex solar neutrino flux and source experiments. *Phys. Lett. B* **685** (2010) 47.
22. Borexino Collaboration (G. Bellini et al.). Absence of a day-night asymmetry in the  ${}^7\text{Be}$  solar neutrino rate in Borexino. *Phys. Lett. B* **707** (2012) 22.
23. Borexino Collaboration (M. Agostini et al.). Improved measurement of  ${}^8\text{B}$  solar neutrinos with 1.5 kt y of Borexino exposure. [arXiv:1709.00756 \[hep-ex\]](#), submitted for publication.
24. J.N. Bahcall et al. Standard neutrino spectrum from  ${}^8\text{B}$  decay. *Phys. Rev. C* **54** (1996) 411.
25. W.T. Winter et al. The  ${}^8\text{B}$  neutrino spectrum. *Phys. Rev. C* **73** (2006) 025503.
26. F. Vissani. [We saw the engine of the Sun!](#)

Надійшла 27.09.2017  
Received 27.09.2017