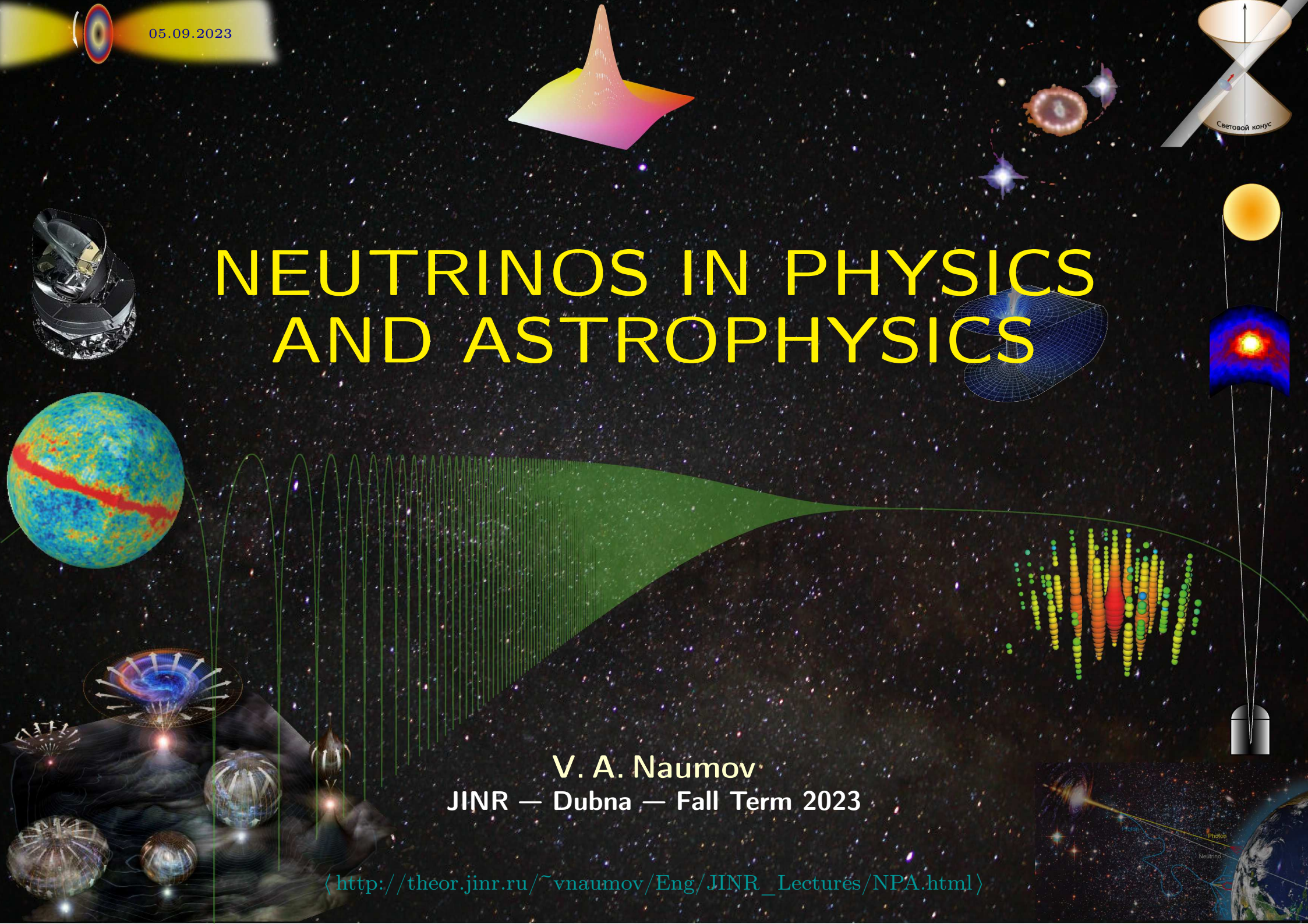


05.09.2023

# NEUTRINOS IN PHYSICS AND ASTROPHYSICS

V. A. Naumov  
JINR — Dubna — Fall Term 2023

[http://theor.jinr.ru/~vnaumov/Eng/JINR\\_Lectures/NPA.html](http://theor.jinr.ru/~vnaumov/Eng/JINR_Lectures/NPA.html)







**We'll start by warming up...**

## Warm-up:



- Как (примерно) зависит от энергии  $E_\nu$  полное сечение  $\nu_\mu N$ -взаимодействия при высоких энергиях ( $E_\nu \gg 100$  ГэВ)? Почему?
- Какое сечение больше –  $\sigma(\nu_e + n \rightarrow p + e^-)$  или  $\sigma(\nu_\tau + n \rightarrow p + \tau^-)$ ? Почему?
- Что такое “резонанс Глэшоу”? Оцените величину резонансной энергии.
- Какая реакция ответственна за максимальный вклад в поток солнечных нейтрино? Какими методами можно измерить поток нейтрино от этой реакции?
- Какова (приблизительно) максимальная энергия солнечных нейтрино?
- Что быстрее покидает солнечное ядро – фотоны или нейтрино?
- Чему равен поток нейтрино в центре Солнца?
- Испускает ли Солнце антинейтрино?
- Что больше – поток солнечных нейтрино с энергиями выше 1 МэВ, или поток нейтрино тех же энергий от промышленного ядерного реактора (вроде фукусимского) на расстоянии  $\sim 100$  м от него?
- Зависит ли поток солнечных нейтрино у Земли от времени года?
- Способны ли солнечные вспышки генерировать нейтрино?
- Перечислите основные реакции, в которых рождаются атмосферные нейтрино и антинейтрино с энергиями ниже 1 ТэВ. Как (приблизительно) меняется с энергией их относительный вклад в поток атмосферных нейтрино?
- Зависит ли поток атмосферных нейтрино у поверхности Земли
  - от географических координат точки наблюдения?
  - от зенитного и азимутального углов?
  - от солнечной активности?

## Warm-up:

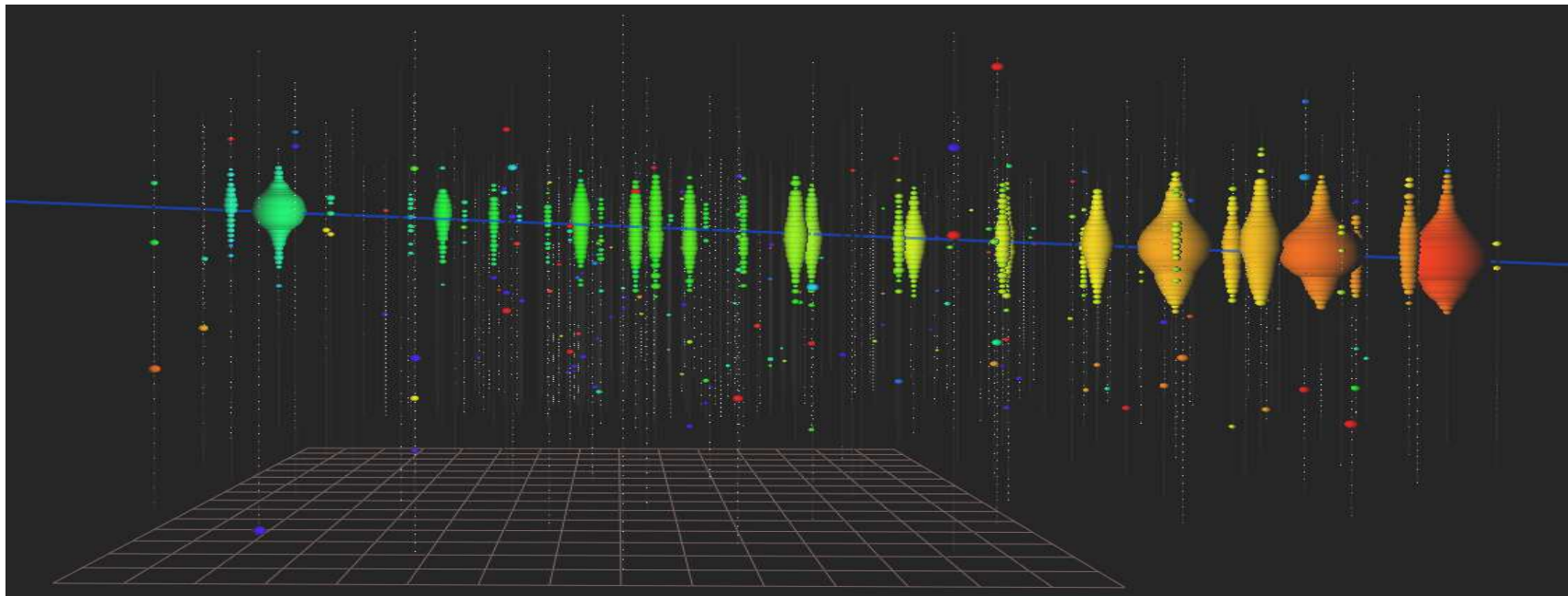


- Где поток атмосферных нейтрино выше – у поверхности Земли, или на высоте 10 км (40 км) над уровнем моря? Зависит ли он от времени года? А от погоды?
- Что такое “быстрые нейтрино”? Объясните качественно различие в угловых распределениях “обычных” ( $\pi - K$ ) и “быстрых” нейтрино.
- Какое отношение имеют атмосферные нейтрино к проблеме поиска распадов протона?
- Какие (предполагаемые) астрофизические источники нейтрино вам известны? В чем разница между точечными и диффузными источниками? Каков экспериментальный статус проблемы астрофизических нейтрино?
- Что Вы знаете о космогенных (ГЗК) нейтрино?
- В чем разница между “Top-down” и “bottom-up” моделями образования космических лучей сверхвысоких энергий?
- Каковы типичные энергии нейтрино, возникающих при взрывах сверхновых?
- Каковы типичные энергии геофизических антинейтрино?
- При каких энергиях (приблизительно) Земля становится непрозрачной для нейтрино?
- Теоретическая оценка средней температуры  $S\nu B$ , средней энергии реликтовых нейтрино, их числовой плотности, локального потока.
- Каковы современные экспериментальные оценки долей обычной материи, радиации, темной материи, темной энергии и нейтрино во Вселенной? В чем заключается проблема “космического совпадения” (cosmic coincidence problem)?
- В чем разница между дираковскими и майорановскими нейтрино?
- Как можно подсчитать число физических фаз  $CP$ -нарушения в вакуумной матрице смешивания нейтрино?

## Warm-up:



- В чем разница между естественной и обратной иерархиями масс нейтрино? Что Вы знаете о современном экспериментальном статусе проблемы спектра масс нейтрино?
- Что означает термин “**график Кюри**”?
- Что означает термин “**качельный механизм**” (*see-saw*)? Какие типы *see-saw* Вы знаете?
- Что Вы знаете об экспериментах по изучению нейтринных осцилляций?
- Как зависит от энергии длина осцилляций нейтрино?
- Могут ли легкие (стандартные) нейтрино осциллировать в (гипотетические) тяжелые?
- Что Вы знаете об МСВ эффекте?
- Что изображено на картинке?



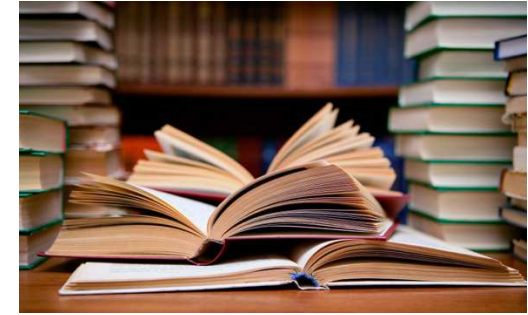


---

## Recommended books and articles

### [Monographs, Textbooks]

- [1] A. De Angelis and M. J. M. Pimenta, [Introduction to Particle and Astroparticle Physics. Questions to the Universe](#). (Springer, 2015).
- [2] V. Barger, D. Marfatia and K. Whisnant, [The Physics of Neutrinos](#). (Princeton University Press, 2012).
- [3] Zhi-Zhong Xing and Shun Zhou, [Neutrinos in Particle Physics, Astronomy and Cosmology](#). Advanced Topics in Science and Technology in China (Zhejiang University Press, Hangzhou and Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 2011).
- [4] Samoil M. Bilenky, [Introduction to the Physics of Massive and Mixed Neutrinos](#). Second Edition. Lect. Notes Phys. **947** (2018) 1–276.
- [5] Mats Lindroos and Mauro Mezzetto, [Beta Beams. Neutrino Beams](#) (Imperial College Press, London, 2010).
- [6] Donald H. Perkins, [Particle Astrophysics](#). Second Edition. Oxford Master Series in Particle Physics, Astrophysics, and Cosmology (Oxford University Press, 2009).
- [7] Carlo Giunti and Chung W. Kim, [Fundamentals of Neutrino Physics and Astrophysics](#) (Oxford University Press Inc., New York, 2007).
- [8] Claus Grupen, [Astroparticle Physics](#) (Springer, 2005).
- [9] Kai Zuber, [Neutrino Physics](#). Series in High Energy Physics, Cosmology and Gravitation (Taylor & Francis, 2004).
- [10] Rabindra N. Mohapatra and Palash B. Pal, [Massive Neutrinos in Physics and Astrophysics](#). Third Edition. World Scientific Lecture Notes in Physics, Vol. **72** (World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2004).
- [11] Masataka Fukugita and Tsutomu Yanagida, [Physics of Neutrinos and Applications to Astrophysics](#). Texts and Monographs in Physics (Springer-Verlag, 2003).



- 
- [12] H. V. Klapdor-Kleingrothaus and K. Zuber, [Particle Astrophysics](#). Revised Edition (Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 2000).  
Г. В. Клапдор-Клайнгротхаус, К. Цюбер, [Астрофизика элементарных частиц](#) (М.: Редакция журнала «Успехи физических наук», 2000. Перевод первого немецкого издания 1997 года).
- [13] N. Schmitz, [Neutrino Physik](#) (B.G. Teubner, Stuttgart, 1997).
- [14] H. V. Klapdor-Kleingrothaus and A. Staudt, [Non-accelerator Particle Physics](#) (Institute of Physics Publishing Ltd., 1995).  
Г. Клапдор-Клайнгротхаус, А. Штаудт, [Неускорительная физика элементарных частиц](#) (М.: Наука, 1997).
- [15] Felix Boehm and Petr Vogel, [Physics of Massive Neutrinos](#). Second Edition (Cambridge University Press, 1992).  
Феликс Боум, Петр Фогель, [Физика массивных нейтрино](#) (М.: «Мир», 1990). Перевод первого английского издания 1987 года).
- [16] John N. Bahcall, [Neutrino Astrophysics](#) (Cambridge University Press, Cambridge, 1989).  
Дж. Бакал, [Нейтринная астрофизика](#) (М.: «Мир», 1993).
- [17] Самоил М. Биленький, [Лекции по физике нейтринных и лептон-нуклонных процессов](#) (М.: «Энергоиздат», 1981). Samoil M. Bilenky, [Introduction to the Physics of Electroweak Interactions](#), translated by G. B. Pontecorvo (Pergamon Press, 1982).

### [Lectures, Reviews]

- [18] S. M. Bilenky, [Neutrino. History of a unique particle](#), arXiv:1210.3065 [hep-ph].
- [19] P. Hernández, [Neutrino Physics](#), in Proceedings of the 2009 CERN – Latin-American School of High-Energy Physics, edited by C. Grojean and M. Spiropulu (Recinto Quirama, Antioquia Region, Colombia, March 15–28, 2009), CERN-2010-001, pp. 229–278 (arXiv:hep-ph/1010.4131).
- [20] J. M. Conrad, [Neutrino Experiments](#), arXiv:0708.2446 [hep-ex].
- [21] André De Gouvêa, [TASI Lectures on Neutrino Physics](#), arXiv:hep-ph/0411274.
- [22] Esteban Roulet, [Neutrinos in Physics and Astrophysics](#), Lect. Notes Phys. **556** (2000) 233–258, hep-ph/9910383.

---

## [Popular Books]

- [23] Ray Jayawardhana, *Neutrino Hunters: The Thrilling Chase for a Ghostly Particle to Unlock the Secrets of the Universe* (Scientific American, Farrar, Straus and Giroux, 2013).  
Рэй Джаявардхана. *Охотники за нейтрино. Захватывающая погоня за призрачной элементарной частицей* (Библиотека фонда «Династия», Альпина нон-фикшн, 2015).
- [24] Frank Close, *Neutrino* (Oxford University Press Inc., New York, 2010).
- [25] Александр А. Боровой. *Как регистрируют частицы. По следам нейтрино* (Библиотечка «Квант», вып.15). М.: «Наука». 1981).
- [26] Александр А. Боровой. *12 шагов нейтринной физики* (М.: «Знание», 1985).
- [27] Isaac Asimov, *The Neutrino. Ghost Particle of the Atom* (Dennis Dobson: London, 1966).  
Айзек Азимов. *Нейтрино – призрачная частица атома* (М.: «Атомиздат», 1969).

