

Institute for Nuclear Research
of the Russian Academy of Sciences

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований
Российской академии наук



В.В. Синева

Потоки антинейтринного излучения
от ядерных реакторов в предполагаемых местах
постройки детектора для регистрации геонейтрино

препринт
preprint

ПРЕПРИНТ ИЯИ РАН
1396/2015
ФЕВРАЛЬ 2015

МОСКВА 2015 MOSCOW



Institute for Nuclear Research
of the Russian Academy of Sciences

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований
Российской академии наук



В.В. Синев

Потоки антинейтринного излучения
от ядерных реакторов в предполагаемых местах
постройки детектора для регистрации геонейтрино

ПРЕПРИНТ ИЯИ РАН
1396/2015
ФЕВРАЛЬ 2015

МОСКВА
2015

Institute for Nuclear Research
of the Russian Academy of Sciences
60-th October Anniversary prospect 7a,
Moscow 117312, Russia

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук
проспект 60-летия Октября, 7а
Москва, 117312

В.В. Синева

Потоки антинейтринного излучения
от ядерных реакторов в предполагаемых
местах постройки детектора
для регистрации геонейтрино

Для детекторов геонейтрино, предлагаемых для постройки в различных местах земного шара, одним из основных фонов является антинейтринное излучение от атомных электростанций, расположенных в промышленно развитых странах. Их суммарная мощность достигает порядка 1 ТВт. Этот фон рассчитывался в предлагаемых проектах неоднократно. С течением времени расположение и мощность отдельных электростанций меняется, поэтому возникает необходимость уточнения этого фона. В настоящей работе предлагается расчет фона от действующих реакторов по состоянию на конец 2014 г.

V.V. Sineva

Antineutrino fluxes produced by nuclear
reactors at proposed locations of detector for
geoneutrino registration

The main source of background for proposed geoneutrino detectors is antineutrino flux produced by nuclear power plants placed in industrial countries. Their total power achieves value of about 1 TW. This background was calculated non-uniquely for each project. In time the power and location of nuclear power plants can change sufficiently, that's why there is necessity to improve the calculations of the background. In this work we present the calculation of nuclear power background for a number of locations

В.В. Синева

Потоки антинейтринного излучения
от ядерных реакторов в предполагаемых местах
постройки детектора
для регистрации геонейтрино

Препринт 1396/2015

Февраль 2015

Подписано в печать 15.01.2015

Ф-т 60x84/8. Уч.-изд.л. 0,7. Зак. 22344 Тираж 50 экз.

Бесплатно

Печать цифровая
Издательский отдел

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований Российской академии наук

117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а

ISBN 978-5-94274-283-6

© Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
Институт ядерных исследований
Российской академии наук, 2015
Institute for Nuclear Research
of the Russian Academy of Sciences, 2015

Введение

С начала 2000х предлагается ряд проектов детекторов для регистрации антинейтринного излучения от радиоактивных изотопов в недрах Земли, так называемых геонейтрино, и других слабых природных нейтринных и антинейтринных потоков [1–4]. Предполагается, что это должен быть сцинтилляционный детектор с массой мишени более 10 килотонн. Наряду с исследуемыми потоками будет регистрироваться и поток реакторных антинейтрино, производимый мощными атомными станциями, расположенными в развитых странах. Этот поток будет являться фоновым для детектора геонейтрино. Он меняется в зависимости от географического положения детектора на Земле. К счастью он может быть предсказан с хорошей точностью при наличии данных о работе всех ядерных реакторов в мире.

Ранее неоднократно фон от атомных станций рассчитывался для различных местоположений детектора [5]. Однако с течением времени строятся новые реакторы и некоторые выводятся из эксплуатации. Поэтому реакторный фон может меняться от года к году даже и для одного положения детектора. Этот фон требует мониторинга в течение эксплуатации детектора геонейтрино.

Нами был проведен пересмотр базы ядерных реакторов на сегодняшний день и заново рассчитан фон от работающих ядерных реакторов.

Спектр антинейтрино

Антинейтрино, испускаемые ядерным реактором, имеют характерный спектр, который определяется составом активной зоны реактора, точнее загруженным в него топливом. В ряде работ рассматривается спектр антинейтрино от реактора и анализируется его изменение в ходе реакторной кампании [6, 7]. Обычно в мире используется всего несколько типов реакторов, это PWR, BWR, CANDU и несколько других. Спектры всех реакторов отличаются, хотя и не очень сильно от спектра чистого ^{235}U . Различия обусловлены различным составом топлива, но из-за того, что мире преобладает тип реактора PWR можно говорить о некотором усредненном спектре, как стандартном, особенно на больших временных интервалах.

Мы используем спектр, полученный в результате измерений в Ровно, так как этот спектр был изменен напрямую на российском реакторе ВВЭР, который является аналогом реакторов PWR и BWR [8].

Регистрация антинейтрино сцинтилляционным детектором

Антинейтрино в детекторе регистрируются при помощи реакции обратного бета-распада (ОБР) $\nu_e + p \rightarrow e^+ + n$ методом задержанных совпадений. Это стандартный метод регистрации для экспериментов в потоках антинейтрино от реактора. В детекторе наблюдается спектр позитронов реакции ОБР, который повторяет спектр антинейтрино. Интеграл этого спектра дает полное число событий, производимое потоком от ядерных реакторов.

Действующие ядерные реакторы на 2014 год

После аварии в 2011 году на АЭС Фукусима в Японии приостановлена эксплуатация атомных электростанций. Это привело к изменению в суммарном потоке антинейтрино от АЭС. Кроме того были закрыты некоторые блоки на АЭС в Канаде, США и Германии. В России наоборот была введена в действие Ростовская АЭС. Также активно идет строительство АЭС в Китае. Всего на сегодняшний день мы насчитали 386 активных блоков АЭС в мире, которые вырабатывают 329 ГВт электроэнергии при тепловой мощности 988 ГВт (почти 1 ТВт). В таблицах 1-4 приведен список АЭС по странам и мощности энергоблоков. Исследовательские реакторы в расчет не принимались, так как их суммарная мощность составляет не более десятых долей процента от атомных станций (наиболее мощные до 100 МВт, обычно 3-5 МВт).

Таблица 1. Энергоблоки России, Украины и Армении

Страна	АЭС	Число реакторов	Координаты (приблизительно)	Суммарная тепловая мощность, МВт
Россия	Смоленск	3	54.2° СШ, 33.2° ВД	8214
	Ростов	2	47.5° СШ, 42.3° ВД	5890
	Нововоронеж	3	51.25° СШ, 39.2° ВД	5333
	Ленинград	4	59.8° СШ, 29.0° ВД	10952
	Курск	4	51.7° СШ, 35.5° ВД	10952
	Кола	4	67.5° СШ, 32.5° ВД	5468
	Калинин	4	57.9° СШ, 35.0° ВД	11780
	Билибино	4	68.0° СШ, 166.5° ВД	132
	Белоярск	1	56.9° СШ, 61.3° ВД	1680
	Балаково	4	52.0° СШ, 47.9° ВД	11780
Украина	Хмельницкий	2	50.3° СШ, 26.7° ВД	5890
	Ровно	4	51.3° СШ, 25.9° ВД	8237
	Южноукраинск	3	47.8° СШ, 31.2° ВД	8835
Армения	Запорожье	6	47.5° СШ, 34.5° ВД	17670
	Метзамор	1	40.2° СШ, 44.1° ВД	1070
	Итого	49		113883

Фон антинейтрино от атомных электростанций

Для расчета фона от атомных электростанций использовались координаты энергоблоков, полученные при помощи сайта http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_nuclear_reactors и программы Google Earth. Номинальные мощности действующих энергоблоков можно найти на том же сайте.

Необходимо также учитывать, что тепловая мощность ядерного реактора примерно в три раза превосходит электрическую мощность, производимую данным реактором. Коэффициент пересчета варьируется от 2.9 до 3.1 в зависимости от типа реактора. Мы использовали коэффициент 3.0, так как он соответствует наиболее распространенному типу реакторов PWR (BWR), которых большинство на действующих АЭС.

Таблица 2. Энергоблоки Европы

Страна	АЭС	Число реакторов	Координаты (приблизительно)	Суммарная тепловая мощность, МВт
Бельгия	Doel	4	51.3° СШ, 4.3° ВД	2598
	Tihange	3	50.5° СШ, 5.3° ВД	6024
Голландия	Borssele	1	51.3° СШ, 3.7° ВД	1545
Испания	Almaraz	2	39.8° СШ, 5.7° ЗД	6051
	Asco	2	41.2° СШ, 0.5° ВД	5976
	Cofrentes	1	39.2° СШ, 1.0° ЗД	3192
	Trillo	1	40.8° СШ, 2.8° ЗД	3009
	Vandellors	1	40.9° СШ, 0.9° ВД	3135
Швейцария	Beznau	2	47.5° СШ, 8.2° ВД	2190
	Goesgen	1	47.6° СШ, 8.0° ВД	2955
	Leibstadt	1	47.5° СШ, 8.2° ВД	3660
	Muehleberg	1	47.0° СШ, 7.3° ВД	1119
Великобритания	Dungeness	2	50.9° СШ, 0.9° ВД	3120
	Hartlepool	2	54.5° СШ, 1.2° ЗД	3540
	Heysham	4	54.0° СШ, 2.9° ЗД	7140
	Hinkley Point	1	54.2° СШ, 3.1° ЗД	2610
	Hunterston	2	55.8° СШ, 4.8° ЗД	2760
	Sizewell B	1	52.2° СШ, 1.8° ВД	3573
	Torness	2	55.9° СШ, 2.5° ЗД	3570
Wylfa	1	53.5° СШ, 4.5° ЗД	1470	
Болгария	Козлодуй	2	43.7° СШ, 23.8° ВД	5718
Финляндия	Loviisa	2	60.3° СШ, 26.3° ВД	2976
	Olkiluoto	2	61.2° СШ, 21.5° ВД	5280
Швеция	Ringhals	4	57.2° СШ, 12.1° ВД	10750
	Forsmark	3	60.4° СШ, 18.1° ВД	9879
	Oskarshamn	3	57.4° СШ, 16.8° ВД	7533
Словения	Krsko	1	45.9° СШ, 15.5° ВД	2064
Словакия	Bohunice	2	48.5° СШ, 17.8° ВД	2829
	Mochovce	2	48.3° СШ, 18.5° ВД	2616
Румыния	Chernavada	2	44.3° СШ, 28.0° ВД	4233
Венгрия	Paks	4	46.5° СШ, 18.9° ВД	5661

Чехия	Dukovany	4	49.1° СШ, 16.1° ВД	5634	
	Temelin	2	49.2° СШ, 14.3° ВД	6018	
Германия	Brokdorf	1	53.8° СШ, 9.4° ВД	4230	
	Emsland	1	52.5° СШ, 7.4° ВД	3987	
	Grafenrheinfeld	1	50.0° СШ, 10.2° ВД	3825	
	Grohnde	1	52.0° СШ, 9.4° ВД	4080	
	Gundremmingen	2	48.5° СШ, 10.4° ВД	7716	
	Isar	1	48.6° СШ, 12.3° ВД	4230	
	Neckarwestheim	1	49.0° СШ, 9.2° ВД	3930	
	Phillipsburg	1	49.3° СШ, 8.4° ВД	4206	
	Франция	Belleville	2	47.5° СШ, 2.8° ВД	7860
		Blayais	4	45.3° СШ, 0.8° ЗД	10920
Bugey		4	45.9° СШ, 5.4° ВД	10740	
Cattenom		4	49.5° СШ, 6.2° ВД	15600	
Chinon_B		4	47.3° СШ, 0.2° ВД	10860	
Chooz_B		2	50.1° СШ, 4.8° ВД	9000	
Civaux		2	46.5° СШ, 0.8° ВД	8970	
Cruas		4	44.6° СШ, 4.8° ВД	10980	
Dampierre		4	47.7° СШ, 2.5° ВД	10680	
Fessenheim		2	47.8° СШ, 7.5° ВД	5280	
Flamanville		2	49.5° СШ, 1.8° ЗД	7980	
Golfech		2	44.1° СШ, 0.8° ВД	7860	
Gravelines		6	51.0° СШ, 2.2° ВД	16380	
Nogent_s/Seine		2	48.5° СШ, 3.5° ВД	7860	
Paluel		4	49.8° СШ, 0.7° ВД	15720	
Penly		2	50.0° СШ, 1.2° ВД	7980	
Saint_Alban	2	45.4° СШ, 4.7° ВД	8010		
Saint_Laurent	2	47.7° СШ, 1.5° ВД	5490		
Tricastin	4	44.4° СШ, 4.8° ВД	10980		
Итого		135		365782	

В Табл. 5 показана скорость счета детектора в 1 кт от ядерных реакторов вместе со скоростью счета геонейтрино для ряда положений детектора на планете. Мы заново рассчитали эффект от геонейтрино согласно данным, взятым из [9, 10] о нахождении в земных резервуарах радиоактивных элементов и профиля плотности Земли. Символом R обозначен интеграл событий от реакторов по полному спектру антинейтрино от реактора, символом R_G интеграл реакторных событий в окне геонейтрино (< 3.5 МэВ), а символом G – интеграл событий по спектру геонейтрино. $\langle D \rangle$ – средневзвешенное значение расстояния до реактора.

Таблица 3. Энергоблоки стран Азии

Страна	АЭС	Число реакторов	Координаты (приблизительно)	Суммарная тепловая мощность, МВт
Китай	Daya_Bay	2	22.5° СШ, 114.5° ВД	5664
	Fangjashan	1	30.5° СШ, 120.9° ВД	3000
	Lingao	4	22.5° СШ, 114.5° ВД	11742
	Quinshan	7	30.5° СШ, 120.9° ВД	12114
	Ningde	2	27.0° СШ, 120.3° ВД	6108
	Fuqing	1	25.5° СШ, 119.5° ВД	3000
	Hongyanhe	2	39.8° СШ, 121.5° ВД	6366
	Tianwan	2	34.8° СШ, 119.5° ВД	5940
	Yangjiang	1	21.8° СШ, 112.2° ВД	3000
	Корея	Yonggwang	6	35.5° СШ, 126.5° ВД
Ulchin		6	37.1° СШ, 129.3° ВД	17718
Kori		4	35.3° СШ, 129.3° ВД	9708
Wolsong		4	35.8° СШ, 129.5° ВД	8052
Sh-Wolsong		1	35.8° СШ, 129.5° ВД	2973
Тайвань	Jinshan	2	25.2° СШ, 121.5° ВД	3624
	Kuosheng	2	25.2° СШ, 121.6° ВД	5910
	Maanshan	2	22.0° СШ, 120.8° ВД	5562
Индия	Tarapur	4	19.8° СШ, 72.8° ВД	4200
	Rawatbhata	6	24.8° СШ, 75.5° ВД	3471
	Kajga	4	14.8° СШ, 74.5° ВД	2640
	Kakrapar	2	21.2° СШ, 73.3° ВД	1320
	Kalpakkam	2	12.5° СШ, 80.2° ВД	1230
	Kudankulam	1	8.2° СШ, 77.8° ВД	2751
	Narora	2	28.2° СШ, 78.5° ВД	1320
	Пакистан	Karachi	1	24.8° СШ, 66.8° ВД
Chashma		2	32.5° СШ, 71.5° ВД	1800
Итого		73		147200

Таблица 4. Энергоблоки Американского континента и ЮАР

Страна	АЭС	Число реакторов	Координаты (приблизительно)	Суммарная тепловая мощность, МВт
США	Beaver_Valley	2	40.6° СШ, 80.5° ЗД	5670
	Calvert_Cliffs	2	38.5° СШ, 76.5° ЗД	5208
	Ginna	1	43.2° СШ, 77.3° ЗД	1830
	Hope_Creek	1	39.5° СШ, 75.5° ЗД	3177
	Indian_Point	2	41.2° СШ, 73.9° ЗД	6027
	James Fitzpatrick	1	45.5° СШ, 76.3° ЗД	2514
	Limerick	2	40.2° СШ, 75.5° ЗД	6804
	Millstone	2	41.3° СШ, 72.2° ЗД	6111
	Nine_Mile	2	45.5° СШ, 76.5° ЗД	5283
	Oyster_Creek	1	39.8° СШ, 74.2° ЗД	1908

	Peach_Bottom	2	39.8° СШ, 76.3° ЗД	6672
	Pilgrim	1	41.9° СШ, 70.5° ЗД	2055
	Salem_Creek	2	39.5° СШ, 75.5° ЗД	6912
	Seabrook	1	42.9° СШ, 70.9° ЗД	3582
	Susquehanna	2	41.1° СШ, 76.1° ЗД	8100
	Three_Mile_Island	1	40.1° СШ, 76.7° ЗД	2406
	Vermont_Yankee	1	42.8° СШ, 72.5° ЗД	1542
	Alvin W. Vogtle	2	33.2° СШ, 81.8° ЗД	7290
	Browns_Ferry	3	34.8° СШ, 87.1° ЗД	9873
	Brunswick	2	33.9° СШ, 78.0° ЗД	5574
	Catawba	2	35.1° СШ, 81.1° ЗД	6774
	Edwin_Hatch	2	31.9° СШ, 82.3° ЗД	5544
	Robinson	1	34.5° СШ, 80.2° ЗД	2205
	Joseph_Farley	2	31.2° СШ, 85.1° ЗД	5460
	McGuire	2	35.5° СШ, 80.9° ЗД	6600
	North_Anna	2	38.1° СШ, 77.8° ЗД	5625
	Oconee	3	34.8° СШ, 82.8° ЗД	7614
	Sequoyah	2	35.2° СШ, 85.1° ЗД	6822
	Shearon_Harris	1	35.7° СШ, 78.9° ЗД	2700
	St_Lucie	2	27.3° СШ, 80.2° ЗД	6012
	Surry	2	37.2° СШ, 76.7° ЗД	4794
	Turkey_Point	2	25.5° СШ, 80.3° ЗД	4158
	Virgil_C_Summer	1	34.3° СШ, 81.3° ЗД	3000
	Watts_Bar	1	35.5° СШ, 84.8° ЗД	3363
	Byron	2	42.1° СШ, 89.3° ЗД	6908
	Breadwood	2	41.2° СШ, 88.2° ЗД	6726
	Clinton	1	40.2° СШ, 88.8° ЗД	3129
	Davis-Besse	1	41.5° СШ, 83.1° ЗД	2667
	Donald_C_Cook	2	41.8° СШ, 86.5° ЗД	6330
	Dresden	2	41.3° СШ, 88.2° ЗД	5202
	Duane_Arnold	1	42.1° СШ, 91.8° ЗД	1743
	Enrico_Fermi	1	41.9° СШ, 83.2° ЗД	3294
	Kewaunee	1	44.3° СШ, 87.5° ЗД	1668
	LaSalle_County	2	41.2° СШ, 88.8° ЗД	7200
	Monticello	1	45.3° СШ, 93.8° ЗД	1830
	Palisades	1	42.3° СШ, 86.3° ЗД	2400
	Perry	1	41.7° СШ, 81.1° ЗД	3693
	Point_Beach	2	44.3° СШ, 87.5° ЗД	3078
	Prairie_Island	2	44.7° СШ, 92.7° ЗД	3288
	Quad_Cities	2	41.7° СШ, 90.3° ЗД	5472
	Arcansas	2	35.3° СШ, 93.2° ЗД	5328
	Callaway	1	38.8° СШ, 91.8° ЗД	3900
	Columbia	1	46.5° СШ, 119.3° ЗД	3510
	Comanche_Peak	2	32.3° СШ, 97.7° ЗД	6624
	Cooper_Station	1	40.3° СШ, 95.6° ЗД	3210

	Diablo_Canyon	2	35.2° СШ, 120.8° ЗД	6720
	Fort_Calhoun	1	41.5° СШ, 96.1° ЗД	1428
	Grand_Gulf	1	32.0° СШ, 91.0° ЗД	4500
	Palo_Verde	3	33.3° СШ, 112.9° ЗД	13023
	River_Bend	1	30.8° СШ, 91.3° ЗД	2934
	South_Texas	2	28.8° СШ, 96.0° ЗД	7500
	Waterford	1	30.0° СШ, 90.5° ЗД	3654
	Wolf_Creek	1	38.2° СШ, 95.7° ЗД	3750
Канада	Pickering_A_B	6	43.8° СШ, 79.0° ЗД	9720
	Darlington	4	43.8° СШ, 78.8° ЗД	10572
	Bruce_A	4	44.3° СШ, 81.6° ЗД	9000
	Bruce_B	4	44.3° СШ, 81.5° ЗД	9425
	Point_Lepreau	1	45.1° СШ, 66.5° ЗД	1905
Аргентина	Atucha	2	33.9° ЮШ, 59.2° ЗД	3081
	Embalse	1	32.2° ЮШ, 64.4° ЗД	1944
Бразилия	Angra	2	23.0° ЮШ, 44.5° ЗД	5652
Мексика	Laguna_Verde	2	19.8° СШ, 44.5° ЗД	3990
ЮАР	Koeberg	2	33.8° ЮШ, 18.5° ВД	5580
	Итого	129		360787

Таблица 5. Скорость счета антинейтрино от ядерных реакторов и геонейтрино для предполагаемых положений детектора

Расположение	$\langle D \rangle$, км	R , TNU Полный реакторный спектр	R_G , TNU То же в окне геонейтрино	G , TNU спектр геонейтрино	R_G/G
Baksan	1738.1	38.24	14.37	52.6	0.3
Gran Sasso	1135.8	94.15	35.35	39.8	0.9
Sudbury	605.6	190.74	72.85	49.9	1.4
Pyhasalmi	1184.7	72.97	27.61	52.9	0.5
Hawaii	7720.5	3.44	1.29	15.3	0.1
Kamioka	1675.0	27.79	10.30	31.7	0.3

В данном расчете считалось, что в нижней мантии и обоих ядрах нет урана и тория. Добавление в центральные области небольшого количества радиоактивности в эти области ($a_U = 0.55 \cdot 10^{-8}$ г/г и $a_{Th} = 3.9 a_U$) приводит 10% увеличению скорости счета. Приведенные в Табл. 5 скорости счета геонейтрино совпадают с расчетами других авторов (см., например, [5]), а скорости счета от реакторов отличаются для некоторых сайтов довольно значительно. Это может объясняться как раз тем фактом, что расположение реакторов перераспределилось за 2014 год. Соответственно, изменилось и отношение скорости счета реакторных антинейтрино и геонейтрино.

На рисунке показаны спектры антинейтрино от реакторов и геонейтрино для приведенных в таблице шести сайтов.

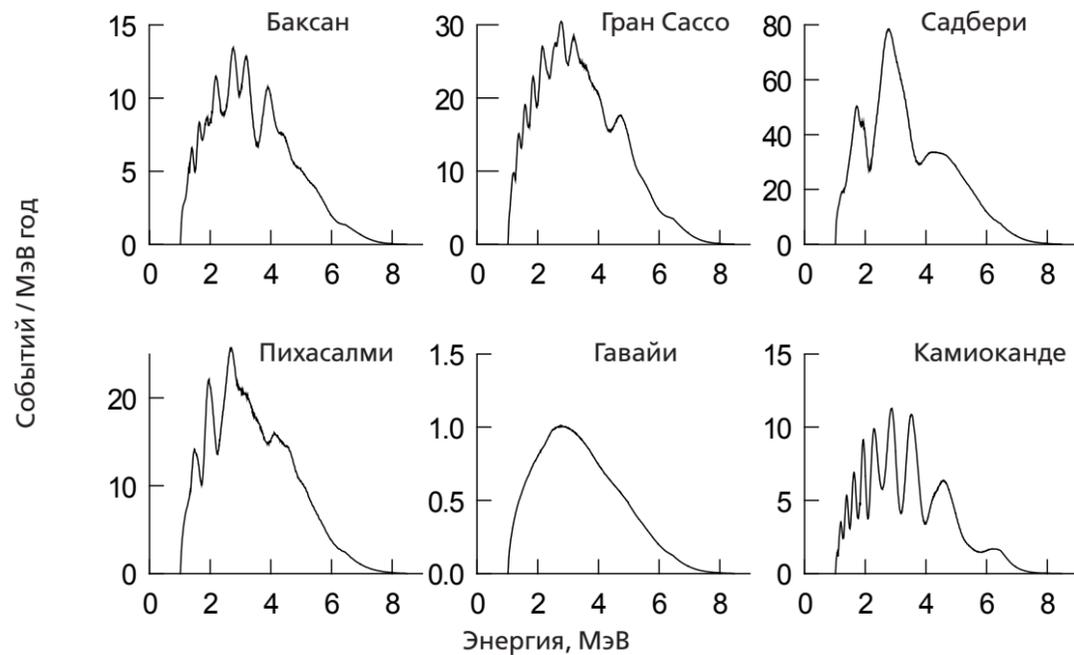


Рис. Наблюдаемые в детекторе спектры антинейтрино от ядерных реакторов для сайтов, приведенных в табл. 5

Расчет учитывал только вакуумные осцилляции, не используя эффект вещества Земли. Для вероятности выживания электронного антинейтрино использовалось следующее выражение:

$$P_{ee} = 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2(\Delta_{13}) - \cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} \sin^2(\Delta_{12}) + \frac{1}{2} \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{12} (\cos^2(\Delta_{13} - \Delta_{12}) - \cos \Delta_{13}),$$

где $\Delta_{ij} = \frac{1.2669 \Delta m_{ij}^2 R}{E}$

Принятые в расчете параметры осцилляций взяты из [11]:

$$\sin^2 2\theta_{12} = 0.846 \pm 0.021, \Delta m_{21}^2 = (7.53 \pm 0.018) \times 10^{-5} \text{ эВ}^2,$$

$$\sin^2 2\theta_{23} = 0.999_{-0.018}^{+0.001}, \Delta m_{23}^2 = (2.44 \pm 0.06) \times 10^{-3} \text{ эВ}^2,$$

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.093 \pm 0.008, \Delta m_{31}^2 = \Delta m_{21}^2 + \Delta m_{23}^2.$$

Заключение

Мы приводим расчет фона реакторных антинейтрино для нового расположения реакторов в мире. Со времени последних расчетов произошли существенные изменения, например, полностью остановлены все реакторы в Японии. Теперь

детектор KamLAND становится по уровню фона от реакторов сравнимым с Баксаном, Гран Сассо и Пихасалми.

За прошедшее с 2009 года время фон реакторов существенно изменился из-за остановки всех атомных станций Японии и приостановки работы ряда реакторов в Европе.

Автор выражает благодарность Б.К. Лубсандоржиеву и Л.Б. Безрукову за обсуждение проблемы фонов в БНО ИЯИ РАН и стимулирование расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wurm Michael, Beacom John F., Bezrukov Leonid B. et al., The next-generation liquid-scintillator neutrino observatory LENA, Whitepaper for the LENA low-energy neutrino detector, arXiv:1104.5620 [astro-ph.IM].
2. Chen Mark, The SNO Liquid Scintillator Project, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 154 (2005), 65-68.
3. Learned John G., Dye Stephen T. and Pakvasa Sandip, HANOHANO: A deep ocean anti-neutrino detector for unique neutrino physics and geophysics studies, arXiv:0810.4975 [hep-ex].
4. Барабанов И.Р., Новикова Г.Я., Синева В.В., Янович Е.А., Исследование природных потоков нейтрино при помощи сцинтилляционного детектора большого объема на Баксане. Препринт ИЯИ РАН 1228/2009; Barabanov I. R., Novikova G. Ya., Sineva V. V. and Yanovich E. A., Research of the natural neutrino fluxes by use of large volume scintillation detector at Baksan. arXiv: 0908.1466 [hep-ph].
5. Ricci B., Mantovani F., Baldoncini M. et al., Reactor antineutrino signal all over the world, talk at XV Workshop on Neutrino Telescopes, Venice, Italy; arXiv:1403.4072 [hep-ex]; Baldoncini Marica, Callegari Ivan, Fiorentini Giovanni et al., A reference worldwide model for antineutrinos from reactors, arXiv:1411.6475 [physics.ins-det].
6. Bemporad Carlo, Gratta Giorgio, Vogel Petr, Reactor-based Neutrino Oscillation Experiments, Rev.Mod.Phys.74:297,2002; arXiv:hep-ph/0107277.
7. Копейкин В.И., Микаэлян Л.А. и Синева В.В., Components of antineutrino emission in nuclear reactor, Ядерная физика, т. 67, № 11, с. 1987, 2004. (Physics of Atomic Nuclei, v. 67, № 11, p. 1963, 2004.
8. Синева В.В., Спектр антинейтрино ядерного реактора и спектры основных делящихся изотопов, ЯФ, 5, , 2013.
9. Mantovani Fabio, Carmignani Luigi, Fiorentini Gianni, Lissia Marcello, Antineutrinos from Earth: A reference model and its uncertainties, Phys.Rev.D69:013001,2004; Gianni Fiorentini, Marcello Lissia, Fabio Mantovani, Geo-neutrinos and Earth's interior, Phys.Rept.453:117-172,2007; arXiv:0707.3203 [physics.geo-ph].
10. <http://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust2.html>.
11. Сайт Particle Data Group <http://pdg.lbl.gov/2014/tables/rpp2014-sum-leptons.pdf> (2014).