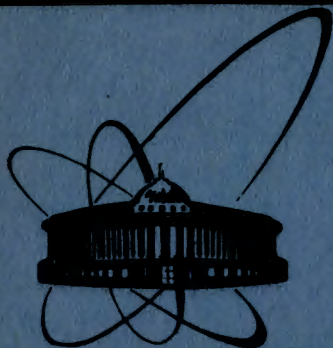


9/7-84



ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

277/84

P1-83-709

В.Д.Ананьев, Н.А.Калинина*, В.И.Лушиков,
В.Г.Ольшевский, Ю.Н.Покотиловский,
А.В.Стрелков, Д.М.Хазинс, Е.П.Шабалин

ПОИСК АКСИОНА
НА ИМПУЛЬСНОМ РЕАКТОРЕ ИБР-2

Направлено в журнал
"Physics Letters B"

* НИИЯФ МГУ

1983

1. Аксион /нейтральная, псевдоскалярная и сравнительно слабо взаимодействующая частица/ был предсказан в 1978 г.^{/1,2/} как следствие введения Печчеи и Квинн^{/3/} в стандартную теорию электрослабого взаимодействия дополнительного хиггсовского дублета, сделанного с целью удаления из теории возможности нарушения CP-симметрии в сильном взаимодействии. Поиску аксиона посвящено большое количество работ. Экспериментально его искали среди продуктов взаимодействия протонов и электронов разных энергий с веществом^{/4-8/}, в распадах мезонов: $K \rightarrow a\gamma$ ^{/9/}, $J/\psi \rightarrow a\gamma$ ^{/10/}, $\Upsilon \rightarrow a\gamma$ ^{/11/}, среди излучения радиоактивных источников^{/12/} и ядерных реакторов^{/13-17/} *. Большинство из авторов этих работ аксиона не обнаружили. Исключение составляют только работы Файснера^{/6,14/}, дающие указание на аксион с массой $m_a \sim 250$ кэВ. Существенные результаты были получены в реакторном опыте Зендера и др.^{/15/} и последовавших за ним работах^{/16,17/}, которые сильно противоречат предположению о существовании аксиона в интервале масс от 150 кэВ до $2m_e$. Данная работа является продолжением^{/16/}, но с существенно увеличенной чувствительностью.

Свойства стандартного аксиона подробно описаны в^{/7,18/}. Масса аксиона $m_a \geq 150$ кэВ. Если $m_a < 2m_e$, он распадается на два фотона с временем жизни $\tau_a = 0,7 \cdot \left(\frac{m_e}{100 \text{ кэВ}}\right)^{-5}$ с. Аксион может образовываться в ядерных переходах магнитного типа. Вероятность этого процесса по отношению к излучению γ -кванта (ω_a/ω_γ) характеризуется множителем $a_a/a_\gamma = 2,2 \cdot 10^{-4}$ и сильно зависит от квантовых чисел перехода и массы аксиона.

2. Источником предполагаемых аксионов в данной работе является импульсный реактор ИБР-2^{/19/} со средней мощностью 1 МВт, длительностью импульса мощности 230 мкс /на полувысоте/, частотой следования импульсов - 5 Гц. Рассматривались аксионы, рождение которых теоретически возможно в реакциях, приведенных в табл.1.

Благодаря большому количеству бора в защите реактора и наличию водяных замедлителей, интенсивность реакции захвата нейтронов ядрами бора и водорода довольно высока. Эта величина вычислялась методом случайных испытаний с использованием 26-групповой системы констант^{/20/}, описывающих взаимодействие нейтронов

* Приведенные здесь ссылки носят выборочный характер и далеко не полны.

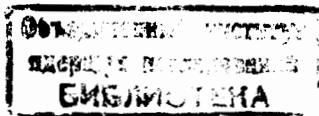


Таблица 1

Реакция	Тип перехода	Энергия перехода E_a , кэВ	Интенсивность реакции R , c^{-1}
$n + {}^{10}B \rightarrow {}^7Li^* + \alpha$ \downarrow ${}^7Li + \alpha$	протонный M1	478	$3,46 \cdot 10^{16}$ /1/
$n + p \rightarrow d + \alpha$	изовекторный M1	2230	$0,34 \cdot 10^{16}$ /2/

с ядрами элементов, входящих в состав активной зоны и защиты реактора по программе МНВ /21/. Довольно сложное расположение элементов зоны и защиты аппроксимировалось пространственной конфигурацией, состоящей из 3000 элементов.

Необходимо отметить, что импульсная интенсивность реакции /1/ в реакторе ИБР-2 / $3 \cdot 10^{19} c^{-1}$ / в несколько раз превосходит соответствующую интенсивность реакций в известных энергетических реакторах. Это улучшает отношение ожидаемого эффекта к фону космических лучей и естественной радиоактивности, который служит главной помехой при поиске аксиона. Кроме того, импульсный характер работы реактора позволяет одновременно с основными вести фоновые измерения, что практически исключает влияние дрейфа аппаратуры и вариаций фона.

3. Экспериментальная установка показана на рис.1. Опыт нацелен на регистрацию фотонных пар от распада аксионов, проникающих сквозь биологическую защиту реактора. Для детектирования фотонов используется система из 12 сцинтилляционных счетчиков на основе полистирола размером $17 \times 17 \times 40$ см³ каждый. В интересующей нас области энергий счетчики имеют довольно высокую эффективность регистрации фотонов и позволяют, хотя и с плохим разрешением, судить об энергии фотонов. Результаты измерений эффективности с помощью стандартных γ -источников показаны на рис.2. Счетчики объединены в две группы /по 6/, которые включены на совпадения с разрешающим временем 80 нс. Между группами счетчиков имеется прослойка из свинца толщиной 10 см для подавления возможности регистрации одного фотона в двух группах счетчиков. Перед системой счетчиков находится распадный объем размером $1 \times 1,2 \times 4$ м³, окруженный защитой из бетона, чугуна и борированного полиэтилена.

В эксперименте в виде двумерного спектра регистрировались суммарная амплитуда сигналов обеих групп счетчиков /в диапазоне энергий $0,2 \text{ МэВ} < E_1 + E_2 < 6 \text{ МэВ}$ / и интервал времени от стартового импульса реактора до импульса совпадений (t). Фоновая

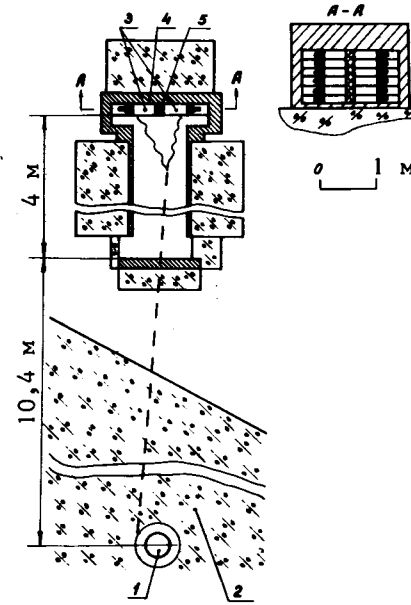
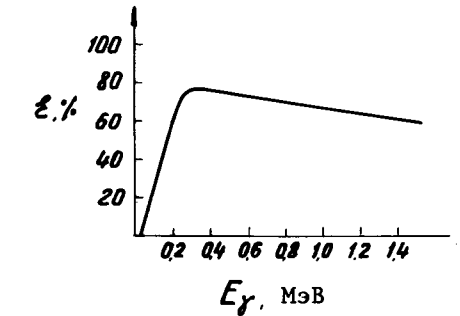


Рис.1. План расположения установки. 1 - активная зона реактора, 2 - бетонная защита, 3 - сцинтилляционные счетчики, 4 - защита из железа, 5 - свинец.

Рис.2. Эффективность сцинтилляционных счетчиков.



скорость счета установки составляла $n \sim 7 c^{-1}$ и была обусловлена, по-видимому, каскадными переходами в ядрах вещества, находящегося перед счетчиками, вследствие естественной радиоактивности и облучения космическими частицами. Полное время набора статистики составило 14,5 сут. В течение этого времени все пучки реактора были закрыты.

4. Временное распределение всех зарегистрированных событий представлено на рис.3 /показано отклонение содержимого временных каналов от среднего фонового уровня вне вспышки/. Наблюдается несомненный избыток счета в области времен задержек от 1 до 2 мс. Однако временное распределение этого эффекта не соответствует форме импульса мощности реактора /кривая 1/, оно имеет

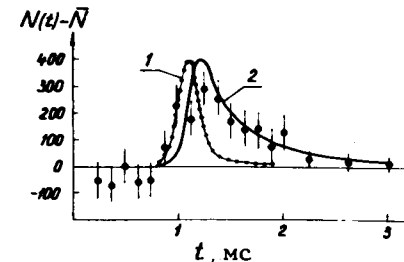


Рис.3. Временное распределение зарегистрированных событий. Из содержимого отдельных каналов вычтен средний фоновый уровень вне импульса реактора. Кривая 1 показывает форму импульса мощности реактора. Кривая 2 - результат эксперимента с повышенным нейтронным фоном.

явно запаздывающий характер. Наиболее естественное объяснение наблюдаемому эффекту - фон нейтронов, которые при захвате в веществе защиты могут давать каскадные γ -кванты. Запаздывание может быть обусловлено дрейфом нейтронов до установки и последующим их замедлением в защите. Для проверки этой гипотезы мы провели измерения с многократно усиленным /в десятки раз/ нейтронным фоном в экспериментальном зале. С этой целью открывались шиберы нейтронных каналов других установок, расположенных в этом же зале. Результаты измерений оказались не зависящими от расстояния между нашей установкой и открываемым каналом; они представлены кривой 2. При обработке основной статистики эта кривая использовалась для определения формы временного спектра нейтронного фона. Для нормировки спектра использовался избыточный эффект, наблюдавшийся за вспышкой реактора /1,3 мс < t < 2,1 мс/, который не может быть обусловлен аксионами. Полученный таким образом спектр вычитался из временного распределения статистики.

5. Для определения скорости счета аксионов от реакций /1/ и /2/ в амплитудном спектре суммарного энерговыделения выделялись окна, которые определялись на основании калибровки аппаратуры γ -источниками ^{137}Cs , ^{119}Sn и ^{60}Co . Скорость счета аксионов (n) вычислялась с учетом временного распределения импульса мощности

$$\text{реактора } (W_i) \text{ по формуле: } n = \frac{1}{T \sum_i W_i^2} \sum_i \frac{N_i - \bar{N}}{\bar{N}} \cdot W_i$$

где N_i - число событий, зарегистрированных в i -ом временном канале, \bar{N} - средний уровень фона вне импульса реактора, T - астрономическое время измерений, $\sum_i W_i = 1$. Полученные результаты приведены в табл.2.

Таблица 2

$n_{\text{Li}}, \text{c}^{-1}$	n_d, c^{-1}	
$(21 \pm 6) \cdot 10^{-5}$	$(33 \pm 7) \cdot 10^{-5}$	без вычитания нейтронного фона
$(8 \pm 11) \cdot 10^{-5}$	$(3 \pm 9) \cdot 10^{-5}$	с вычитанием нейтронного фона

6. Величина n связана с характеристиками аксиона и параметрами установки соотношением:

$$n = Q \cdot R \cdot \frac{\Omega}{4\pi} \cdot \frac{\ell}{v} \cdot K \cdot \epsilon_a \quad \text{Здесь}$$

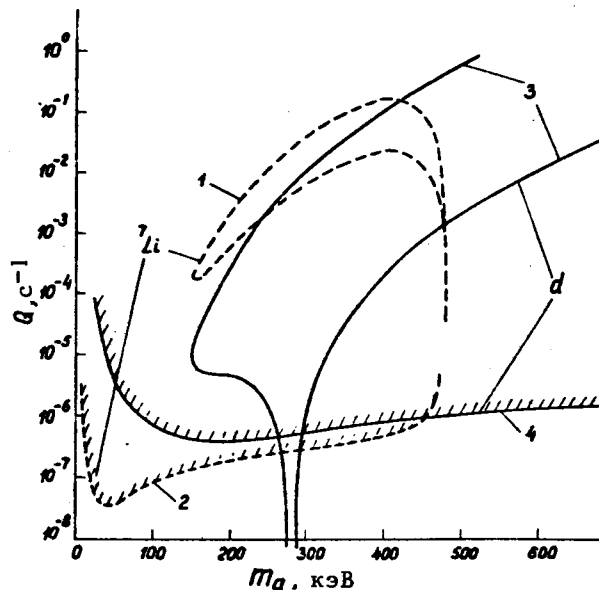


Рис.4. Относительная вероятность испускания аксиона при снятии возбуждения в $^7\text{Li}^*$ /кривая 1 и кривая 2/ и при образовании d /кривые 3,4/. Кривые 1, 3 рассчитаны теоретически; кривые 2, 4 указывают верхний предел на 95% уровне достоверности, полученный в данной работе.

$$Q = \frac{\omega_a / \omega_\gamma}{r_a \cdot E_a / m_a} - \text{величина, которая включает в себя основные}$$

свойства аксиона и может быть вычислена чисто теоретически; R - интенсивность реакций /1/, /2/ /см. табл.1/, Ω - телесный угол установки, ℓ - длина распадного объема, v - скорость аксиона, K - множитель, учитывающий потери при введении ограничений по амплитуде, ϵ_a - эффективность регистрации аксионов, попавших в распадный объем, которая учитывает вероятность попадания и регистрации пар фотонов в детекторах. Величина ϵ_a рассчитывалась методом статистических испытаний, она зависит от массы и энергии аксиона. /Для ориентировки $\epsilon_a = 0,05$ при $m_a = 250$ кэВ и $E_a = 478$ кэВ/.

Теоретические расчеты величины Q по формулам из /7/ и ее экспериментальная верхняя граница на 95% уровне достоверности, полученная после вычитания нейтронного фона, приведены на рис.4. Из сопоставления теоретических и экспериментальных кривых следует, что данные по ^7Li исключают аксион с массой $m_a < 470$ кэВ. При больших массах, вплоть до $m_a = 2m_e$, когда еще возможен распад аксиона на два фотона, он исключается данными по дейтрону. Минимальная величина отношения теоретического значения Q к экспериментальному верхнему пределу составляет $f = 1300$ при $m_a = 150$ кэВ. Для сравнения в табл.3 приведены аналогичные величины, полученные из результатов других работ, которые также исключают стандартный аксион с массой $m_a < 2m_e$.

Таблица 3

Источник аксионов	Энергетические реакторы		Радиоактив- ный источ- ник ^{65}Zn /12/	ИБР-2, данная работа
	Гёсген /15/	Бюже /17/		
f	470	200	54	1300

В заключение авторы выражают свою признательность А.В.Купцову и Л.Л.Неменову, предоставившим сцинтилляционные счетчики, В.В.Карпухину, Д.М.Иванову и А.В.Белову за помощь в работе, А.Д.Рогову - за вычисления на ЭВМ.

ЛИТЕРАТУРА

- Weinberg A. Phys.Rev.Lett., 1978, 40, p.223.
- Wilczek F. Phys.Rev.Lett., 40, p.279.
- Peccei R.D., Quinn H.R. Phys.Rev.Lett., 1977, 38, p.1440.
- Jacques P.F. et al. Phys.Rev., 1980, D21, p.1206.
- Faissner H. et al. Phys.Lett., 1980, 86B, p.201.
- Faissner H. et al. Phys.Lett., 1981, 103B, p.234.
- Donnelly T.W. et al. Phys.Rev., 1978, D18, p.1607.
- Bechies D.J. et al. Phys.Rev.Lett., 1979, 42, p.1511.
- Asano Y. et al. Phys.Lett., 1981, 107B, p.159.
- Edwards C. et al. Phys.Rev.Lett., 1982, 48, p.903.
- Alam M.S. et al. Phys.Rev., 1983, D27, p.1665.
- Lehman P. et al. Phys.Lett., 1982, 115B, p.270.
- Micelmacher G., and Pontecorvo B. Rev.Roum.Phys., 1978, 23, p.757.
- Faissner H. In: Proc.Int.Neutrino Conf. Maui 1981.
- Zehnder A., Gabathuler K., Vuilleumier J.L. Phys.Lett., 1982, 110B, p.419.
- Алексеев Г.Д. и др. Письма в ЖЭТФ, 1982, 36, с.94.
- Cavaignac J.F. et al. Phys.Lett., 1983, 121B, p.193.
- Bardeen W.A., Tye S.H.H. Phys.Lett., 1978, 74B, p.229.
- Ананьев В.Д. и др. ОИЯИ, 13-4395, 1969; ПТЭ, 1977, № 5, с.17.
- Абагян Л.П. и др. Групповые константы для расчета ядерных реакторов. Атомиздат, М., 1964.
- Рогов А.Д. Шабалин Е.П. ОИЯИ, 61-11-9327, Дубна, 1975.

Рукопись поступила в издательский отдел
13 октября 1983 года

НЕТ ЛИ ПРОБЕЛОВ В ВАШЕЙ БИБЛИОТЕКЕ?

Вы можете получить по почте перечисленные ниже книги, если они не были заказаны ранее.

Д3-11787	Труды III Международной школы по нейтронной физике. Алушта, 1978.	3 р. 00 к.
Д13-11807	Труды III Международного совещания по пропорциональным и дрейфовым камерам. Дубна, 1978.	6 р. 00 к.
Д1,2-12036	Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, 1978 /2 тома/	7 р. 40 к.
Д1,2-12450	Труды V Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1978	5 р. 00 к.
Д1,2-12450	Труды XII Международной школы молодых ученых по физике высоких энергий. Приморско, НРБ, 1978.	3 р. 00 к.
Д11-80-13	Труды VII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, Дубна, 1980 /2 тома/	8 р. 00 к.
Д4-80-271	Труды рабочего совещания по системам и методам аналитических вычислений на ЭВМ и их применению в теоретической физике, Дубна, 1979	3 р. 50 к.
Д4-80-385	Труды Международной конференции по проблемам нескольких тел в ядерной физике. Дубна, 1979.	3 р. 00 к.
Д2-81-543	Труды Международной школы по структуре ядра. Алушта, 1980.	5 р. 00 к.
Д10,11-81-622	Труды VI Международного совещания по проблемам квантовой теории поля. Алушта, 1981	2 р. 50 к.
Д1,2-81-728	Труды Международного совещания по проблемам математического моделирования в ядерно-физических исследованиях. Дубна, 1980	2 р. 50 к.
Д17-81-758	Труды VI Международного семинара по проблемам физики высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 60 к.
Д1,2-82-27	Труды II Международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики. Дубна, 1981.	5 р. 40 к.
Р18-82-117	Труды Международного симпозиума по поляризационным явлениям в физике высоких энергий. Дубна, 1981.	3 р. 20 к.
Д2-82-568	Труды IV совещания по использованию новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и народнохозяйственных задач. Дубна, 1981.	3 р. 80 к.
Д9-82-664	Труды совещания по исследованиям в области релятивистской ядерной физики. Дубна, 1982.	1 р. 75 к.
Д3,4-82-704	Труды совещания по коллективным методам ускорения. Дубна, 1982.	3 р. 30 к.
Д3,4-82-704	Труды IV Международной школы по нейтронной физике. Дубна, 1982.	5 р. 00 к.

Заказы на упомянутые книги могут быть направлены по адресу:
101000 Москва, Главпочтамт, п/я 79
Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований

**ТЕМАТИЧЕСКИЕ КАТЕГОРИИ ПУБЛИКАЦИЙ
ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ**

Индекс	Тематика
1.	Экспериментальная физика высоких энергий
2.	Теоретическая физика высоких энергий
3.	Экспериментальная нейтронная физика
4.	Теоретическая физика низких энергий
5.	Математика
6.	Ядерная спектроскопия и радиохимия
7.	Физика тяжелых ионов
8.	Криогеника
9.	Ускорители
10.	Автоматизация обработки экспериментальных данных
11.	Вычислительная математика и техника
12.	Химия
13.	Техника физического эксперимента
14.	Исследования твердых тел и жидкостей ядерными методами
15.	Экспериментальная физика ядерных реакций при низких энергиях
16.	Дозиметрия и физика защиты
17.	Теория конденсированного состояния
18.	Использование результатов и методов фундаментальных физических исследований в смежных областях науки и техники
19.	Биофизика

Ананьев В.Д. и др.

PI-83-709

Поиск аксиона на импульсном реакторе ИБР-2

Выполнен поиск аксиона на импульсном реакторе ИБР-2 с помощью пластических сцинтилляционных счетчиков с общим объемом сцинтиллятора - 139 л. Полученная верхняя оценка скорости счета по крайней мере в 1300 раз меньше величины, предсказываемой теорией стандартного аксиона в области масс $m_a < 2m_e$.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем и Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Ananjev V.D. et al.

PI-83-709

Search for Axion on IBR-2 Pulsed Reactor

A search for axion has been performed at IBR-2 pulsed reactor with plastic scintillation counters, full volume 139 l. The obtained upper limit of count rate is at least by a factor of 1300 less than the value predicted by the standard axion theory in the mass range $m_a < 2m_e$.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems and the Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 1983

Перевод авторов