



ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКИ

80190057102

ИТЕФ-- 58-89

А.С.БАРАБАШ

ВОЗМОЖНОСТИ СЧЕТЧИКОВЫХ
ЭКСПЕРИМЕНТОВ ДЛЯ ПРОВЕРКИ
СТАБИЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРОНА И
СПРАВЕДЛИВОСТИ ПРИНЦИПА ПАУЛИ
В АТОМАХ

Москва — ЦНИИатоминформ — 1989

ВОЗМОЖНОСТИ СЧЕТЧИКОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ДЛЯ ПРОВЕРКИ СТАБИЛЬНОСТИ ЭЛЕКТРОНА И СПРАВЕДЛИВОСТИ ПРИНЦИПА ПАУЛИ В АТОМАХ: Препринт ИТЭФ 89-58/

А.С.Барабаш - М.: ЦНИИатоминформ, 1989 - 12 с.

Показано, что с помощью современных низкофоновых установок сравнительно просто можно достичь чувствительности $\sim 10^{24} + 2 \cdot 10^{25}$ лет для времени жизни электрона относительно его распада и относительно нарушения принципа Паули в атомах. В частности, предлагаются эксперименты с полупроводниковыми детекторами из обогащенного германия, с эмиссионной камерой и с низкотемпературными детекторами.

Рис. - I, список лит. - 28 назв.

"Possibility of counting experiments for test an electron stability and the possibility of Pauli principle violation in atoms"

A.S.Barabash

It is shown, that it is possible to achieve sensitivity $\sim 10^{24} - 2 \cdot 10^{25}$ years for life-time of electron relative to his decay and to the Pauli principle violation in atoms by modern low-background installations. In particular, experiments with enriched germanium detectors, with emission detectors and with low temperature detectors are proposed.

Экспериментальные поиски нестабильности электрона ведутся с 1959 года /1/. Электрон является самой легкой заряженной частицей, поэтому его распад на легкие нейтральные частицы возможен только при нарушении закона сохранения электрического заряда^{x/}. При распаде электрона на одной из внутренних оболочек атома образуется вакансия, которая заполняется электроном из другой оболочки. В результате выделяется энергия в виде рентгеновских γ -квантов (характеристическое излучение) или Ож^и-электронов, причем полное энергосодержание равно энергии ионизации атома на соответствующей оболочке. С экспериментальной точки зрения наиболее подходящими для поиска электронных распадов являются электроны К-оболочки, так как в этом случае выделяется наибольшая энергия (E_K).

Поиски такого распада велись на низкофоновых установках с использованием как сцинтилляционных детекторов на основе кристал-

x/ В принципе, могли бы существовать распады электрона с сохранением электрического заряда на неизвестные пока заряженные частицы с массой меньше массы электрона. Однако, в настоящее время не существует каких-либо экспериментальных или теоретических указаний на существование таких частиц.

лов $Na\text{J}$ /1-3/, так и $Ge(Li)^2$ - детекторов /4,5/. Наиболее жесткое ограничение на время жизни электрона безотносительно к моде его распада было получено в 1979 году с помощью детектора $Na\text{J}$: $\tau_p > 3 \cdot 10^{22}$ лет /3/. За прошедшие 10 лет это ограничение улучшено не было.

Если электрон в нарушение принципа Паули "сваливается" на более низколежащую атомную оболочку (например, на K-оболочку), то в результате испускается характеристическое излучение (или Оже-электроны), как и в случае распада электрона на K-оболочке.

В работе /6/, из данных эксперимента по проверке закона сохранения электрического заряда, впервые было получено ограничение на время жизни электрона в атоме относительно нарушения принципа Паули в атомах йода: $\tau_p > 10^{20}$ лет. Однако затем в работе /7/ было показано, что в рамках известных теоретических моделей эти данные не могут быть интерпретированы с точки зрения нарушения принципа Паули. Позднее в /8/ была построена непротиворечивая квантовомеханическая модель, позволяющая описывать малые отклонения от принципа Паули. Обобщение этой модели на случай релятивистской квантовой теории было сделано в /9/. Авторы работы /8/ отмечают, что модель /8,9/ свободна от возражений, приведенных в /7/ относительно возможности проверки принципа Паули в такого рода эксперименте. Совсем недавно в /10/ была сконструирована свободная полевая модель с явным нарушением принципа Паули. В этой работе подчеркивается, что особое место принципа Паули в современной теоретической физике не означает, что он не нуждается в дальнейшей тщательной экспериментальной проверке, скорее наоборот, именно фундаментальный характер принципа Паули придает такой проверке по всей таблице Менделеева специальный интерес.

В связи с этим становится актуальным вопрос о наиболее эффективных методах поиска процессов, происходящих с нарушением принципа Паули. В работах /10,11/ указывается на некоторые методы поиска нарушения этого запрета, в том числе на метод, основанный на регистрации характеристического излучения, возникающего при переходе "непаулевского" электрона на заполненную К-оболочку атома. В /10,11/ из данных по проверке закона сохранения электрического заряда /3/ получили: $\tau_n > 3 \cdot 10^{22}$ лет.

В последнее время для поиска нарушения принципа Паули предложены геохимический метод /11/ и метод изотопного анализа элементов /12/. Чувствительность этих экспериментов по оценкам авторов составит $\sim 10^{30}$ и $\sim 10^{25} \pm 10^{31}$ лет соответственно. Мы не будем подробно обсуждать эти предложения, укажем только, что реальная чувствительность экспериментов может оказаться на несколько порядков хуже (см. обсуждение в работе /12/). Кроме того не ясно, как долго может находиться "непаулевский" электрон на запрещенной орбите, и не испытывает ли он достаточно быстро обратный переход. В последнем случае методы, предложенные в /11,12/ могут оказаться неэффективными. Поэтому проверка справедливости принципа Паули в прямых экспериментах представляет самостоятельный интерес.

В настоящей работе рассмотрена перспектива поиска процессов, связанных с нестабильностью электрона и с нарушением принципа Паули с помощью счетчиковой методики, основанной на регистрации характеристического излучения. Показано, что сравнительно просто поднять чувствительность таких экспериментов до $10^{24} \pm 2 \cdot 10^{35}$ лет для времени жизни электрона относительно указанных процессов. Отметим однако, что эта методика не дает возможности различать эти процессы.

2. ВОЗМОЖНОСТИ СЧЕТЧИКОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

2.1. ДЕТЕКТОРЫ НА ОСНОВЕ NaI

Именно с использованием детектора NaI (\varnothing 200x200мм) весом ~ 20 кг /3,13/ был получены лучшие на сегодня пределы для τ_e и τ_n : $3 \cdot 10^{22}$ лет. Эксперимент проводился в подземной низкофоновой лаборатории на глубине 660 м в.э. Детектор был окружен мощной пассивной защитой. Исследовался спектр в области энергии $E_K = 33,2$ кэВ, набранный за 583 часа. Энергетическое разрешение составляло 49%. По отсутствию пика в этой области и был установлен указанный выше предел. Индекс фона в области 33,2 кэВ составил $\sim 0,8$ соб/кэВ·ч ·кг и трудно ожидать существенного снижения фона. Поэтому возможен, видимо, лишь экстенсивный путь. Так, увеличение массы NaI до 100 кг (5 отдельных детекторов) позволит за 1 год измерений поднять чувствительность эксперимента до $\sim 2,5 \cdot 10^{23}$ лет.

2.2. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ИЗ ОБОГАЩЕННОГО ГЕРМАНИЯ

На Ge -детекторе лучший результат по исследованию стабильности электрона безотносительно к моде распада был получен в работе /5/: $\tau_e > 2 \cdot 10^{22}$ лет. Измерения проводились на низкофоновой установке с Ge(Li) -детектором из естественного Ge объемом ~ 135 см³. Установка размещалась на глубине ~ 5000 м в.э. и была окружена пассивной защитой. Индекс фона в области 11,1 кэВ (эта энергия соответствует энергии связи электрона на К-оболочке атома Ge) составил ~ 2 соб/кэВ·ч·кг, энергетическое разрешение - $\sim 10\%$, время измерения ~ 4000 часов.

В настоящее время техника низкофоновых Ge -детекторов существен-

но *продвигаться* вперед. Рассмотрим, например, установку из работы /14/, которая использовалась для поиска 2β -распада ^{76}Ge .

Эта установка содержит 8 отдельных детекторов из сверхчистого Ge объемом $\sim 160 \text{ см}^3$ каждый. Она размещена на глубине $\sim 200 \text{ м}$, детекторы окружены пассивной и активной (NaI) защитой. Два из этих Ge-детекторов были модифицированы для поиска темного вещества Галактики (порог снижен до $\sim 3 \text{ кэВ}$). На рис. показан спектр от этих двух детекторов примерно за 1500 часов набора информации /15/. Видны пики от ^{68}Ge ($E=10,4 \text{ кэВ}$; $T_{1/2}=275$ дней) и ^{65}Zn ($E=9,7 \text{ кэВ}$; $T_{1/2}=245$ дней). Но уже в области энергии $\sim 14 \text{ кэВ}$ индекс фона составляет очень низкую величину - $0,5 \text{ ссб/кэВ}\cdot\text{сут}\cdot\text{кг}$. Ядра ^{68}Ge и ^{65}Zn образовались в результате воздействия на детектор космического излучения, когда он находился на поверхности земли. ^{68}Ge , в частности, образовался в результате реакции $^{70}\text{Ge}(\text{n}, 3\text{n})^{68}\text{Ge}$ (содержание ^{70}Ge в естественном Ge - $20,55\%$). Если же изготовить детекторы из германия, обогащенного германием - 76 (в котором содержание ^{70}Ge $< 0,1\%$ /16/), то пиков от ^{68}Ge и ^{65}Zn практически не будет и, при том же уровне фона чувствительность такой установки из 8-ми кристаллов за 1 год измерений составит $\sim 2 \cdot 10^{24}$ лет для времени жизни электрона относительно его распада или относительно нарушения принципа Паули в атоме Ge. Установки такого типа (и даже большего объема) на основе кристаллов из обогащенного Ge предполагается использовать в ближайшее время для поиска 2β -распада ^{76}Ge . Очевидно, что на этих же установках можно будет изучать и стабильность электрона и возможное нарушение принципа Паули. То же можно сказать и относительно действующей установки ИТЭР-Ерм /17/. В настоящее время на этом 3-х кристалльном детекторе с общим объемом обогащенного Ge до $\sim 300 \text{ см}^3$ уже ведется поиск 2β -распада ^{76}Ge . Если удастся достичь в области малых энергий столь же низкого фона, как и в работе

/15/, то чувствительность этой установки за I год измерений составит $\sim 10^{24}$ лет для ${}^76\text{Ge}$ и ${}^76\text{Zn}$.

В принципе, видимо, можно использовать детекторы и из естественного ${}^{68}\text{Ge}$, но высокая чувствительность измерений на таких установках возможна только после выдержки ${}^{68}\text{Ge}$ -детекторов в подземных условиях в течение $\sim 4+5$ лет - с тем, чтобы распались изотопы ${}^{68}\text{Ge}$ и ${}^{65}\text{Zn}$.

2.3. ЭМИССИОННАЯ КАМЕРА

В работе /18/ была рассмотрена низкофоновая установка на основе эмиссионной камеры на жидких углеводородах (вес рабочего вещества ~ 100 кг) для поиска темного вещества Галактики. Там же отмечалось, что при заполнении такой камеры тетраметилсиланом, твердым неоном и т.п. рабочими средами можно использовать ее для поиска распада электрона и возможного нарушения принципа Паули в атомах по регистрации рентгеновских лучей (или $0\nu\beta\beta$ -электронов) с энергией, равной энергии связи ^{ЭКРАНИ} на k -оболочке. Оценки, проведенные в работе /18/, показали, что при определенных условиях в области низких энергий ($\sim 1+30$ кэВ) можно достичь уровня фона $\approx 0,3$ соб/кэВ.сут.кг. А это позволит вести поиск указанных процессов на уровне $\sim 2 \cdot 10^{25}$ лет для ${}^76\text{Ge}$ и ${}^76\text{Zn}$.

Принцип регистрации в таком детекторе следующий. Рентгеновские кванты ($0\nu\beta\beta$ -электроны), возникающие от распада электрона или в результате нарушения принципа Паули в атомах Ne , Si и т.п., ионизируют рабочую жидкость. Электроны ионизации электрическим полем вытягиваются из жидкости в газовую фазу, где и происходит их регистрация на проволочках, работающих в пропорциональном режиме. Предполагается, что детектор будет иметь пространственное разрешение

($\sim 5+10$ м по всем 3-м координатам), что важно для подавления фона.

Создание подобной установки с весом рабочего вещества в несколько тонн позволит поднять чувствительность до $\sim 10^{26}$ лет для ${}^6\text{Fe}$ и ${}^7\text{Li}$. Подчеркнем, что подобная установка имела бы многоцелевое назначение. Помимо поиска распада электрона и нарушения принципа Паули - это также поиск темного вещества Галактики, поиск 2β -распада (при заполнении камеры $\text{Si}(\text{CH}_3)_4$, $\text{Ge}(\text{CH}_3)_4$, ${}^{136}\text{Xe}$ и т.п.), регистрация солнечных ν (при массе рабочего вещества $\geq 10+100$ т).

2.4. МНОГОСЕКЦИОННЫЙ ПРОПОРЦИОНАЛЬНЫЙ СЧЕТЧИК (МПС) ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Для поиска 2β -распада ${}^{136}\text{Xe}$ в работе /19/ был использован многосекционный пропорциональный счетчик высокого давления на ксенеоне (см. описание счетчика также в /20/). Счетчик размещен в подземной низкофоновой лаборатории и окружен пассивной защитой. Объем счетчика ~ 80 литров, он состоит из 61 независимой пропорциональной ячейки. В принципе, пропорциональный режим позволяет регистрировать даже одиночные электроны, поэтому порог регистрации такого счетчика может быть сделан достаточно низким ($\lesssim 1\text{кэВ}$) и при использовании соответствующих рабочих газов можно вести поиск процессов, связанных с распадом электрона и с возможным нарушением принципа Паули по регистрации событий с энергией E_{K} . В этом смысле методика регистрации такая же, как и в случае эмиссионной камеры (см.2.3). Преимущество эмиссионной камеры в том, что она позволяет сочетать высокую плотность рабочего вещества с пропорциональным режимом регистрации. В случае же пропорционального счетчика для повышения плотности (и, в конечном счете, исследуемой массы) необходимо использовать газ под давлением. Если принять, что фон МПС в области

низких энергий может быть сделан таким же, как в работе /15/, то для счетчика, работающего /19,20/ при давлении ~ 10 атм, чувствительность для I года измерений составит $\sim (0,5+3) \cdot 10^{24}$ лет в зависимости от сорта исследуемого газа. Особое внимание должно быть уделено выбору рабочего газа. Так, например, в Ar, Kr и Xe содержатся долгоживущие изотопы ^{39}Ar и ^{85}Kr , которые ухудшают фоновые условия эксперимента. Подходящими газами являются, видимо, неон, а также обогащенный ксенон (^{136}Xe)—в работе /21/ было показано, что ^{136}Xe практически не содержит ^{85}Kr , хотя в естественном Xe его содержание достаточно велико. Опасность представляют также примеси в рабочем газе молекул H_2 , H_2O , CO_2 , поскольку они содержат радиоактивные ядра ^3H и ^{14}C . Поэтому рабочий газ должен тщательно очищаться от этих примесей. Следует также тщательно подбирать материал для анодных и катодных нитей МПС.

2.5. НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

В последнее время определенные надежды в области 2β -распада, физики нейтрино низких энергий (регистрация ν от солнца, от реактора, измерение массы нейтрино и т.п.), при обсуждении возможности регистрации темного вещества Галактики связываются с низкотемпературными детекторами различных типов (см., например, /22-25/). Ожидается, что такие детекторы способны обеспечить очень высокое энергетическое разрешение — вплоть до I эВ.

Методические исследования в этой области ведутся достаточно интенсивно и уже получены обнадеживающие результаты /26-28/. Так, в работе /28/ с помощью такого типа детектора при регистрации рентгеновских γ -квантов с энергией 5,89 и 6,5кэВ от ^{55}Fe было получено энергетическое разрешение 35 эВ, а уровень шума соста-

вил 4,5 эВ (с.т.з.). Масса детектора составляла 10^{-5} г, а рабочая температура была 100мк. Поскольку шумы $\sim T^{5/2} \cdot M^{1/3}$ (где T — температура, а M — масса детектора), то ожидается, что при температуре 15мк можно будет иметь детектор с тем же разрешением, но с массой в несколько сотен граммов (например, кристаллы Si или Ge). Представляется, что такие детекторы могут быть использованы для поиска распада электрона и нарушения принципа Паули в атомах по регистрации рентгеновского излучения, сопровождающего эти процессы. Если удастся достичь таких же фоновых условий, как и в работе /15/, то на установке из десяти детекторов общим весом 1+2 кг можно будет исследовать эти процессы с чувствительностью $\sim 10^{25}$ лет для Ge и Si за один год измерений. В литературе рассматривается возможность создания низкотемпературных детекторов с весом ~ 10 г для регистрации ν от Солнца /24/. На таких детекторах, работающих в низкофоновых условиях, можно будет одновременно вести исследования по изучению стабильности электрона и возможности нарушения принципа Паули с чувствительностью $\sim 10^{27}$ лет.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показал, что возможности современных счетчиковых экспериментов при изучении стабильности электрона и возможного нарушения принципа Паули в атомах — это $\sim 10^{24} + 2 \cdot 10^{25}$ лет для времени жизни электрона относительно этих процессов. Т.е. возможно улучшение имеющихся пределов в $10+10^3$ раз. Наиболее простым в реализации является эксперимент с детекторами из обогащенного германия, поскольку можно использовать уже имеющиеся (или создаваемые) для поиска $\beta\beta$ -распада установки. Эксперименты с чувствительностью $\sim 10^{26} + 10^{27}$ лет могут быть реализованы на достаточно

сложных и массивных детекторах следующего поколения, разработываемых, в частности, для целей нейтринной физики. Отметим, что такие детекторы будут иметь многоцелевое назначение: поиск редких распадов, поиск темного вещества Галактики, регистрация ν от Солнца и т.п.



Рис. Скорость счета в области энергий (3+25)кэВ для двух Cs -детекторов /15/.

Масса детекторов - 1,8 кг; время измерения - 1500 часов.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Feinberg G., Goldhaber M. // Proc. Nat. Ac. Sci. (US), 1959, v.45, 1301.
2. Мое М.К., Reines F. // Phys. Rev., 1965, V. B140, N 4, p.992.
3. Ковальчук Е.Л., Поманский А.А., Смольников А.А. // Письма в ЭТФ, 1979, т.29, вып.2, с.163.
4. Steinberg E.I., Kwistowski K., Macuhant W., Wall N.S. // Phys. Rev., 1975, V. D12, N.9, p.2582.
5. Bellotti E., Cremonesi O., Fiorini F. et al. // Phys. Lett., 1983, V.124B, N 5, p.435.
6. Reines F., Sobel H. // Phys. Rev. Lett., 1974, V.32, N 17, p.954.
7. Amado A.D., Primakoff H. // Phys. Rev., 1980, V. C22, N 3, p.1338.
8. Игнатъев А.Д., Кузьмин В.А. // ЯФ, 1987, т.43, № 3, с.786.
9. Greenberg O.W., Mohapatra R.N. Preprint Univ. of Maryland, N.88-030, 1987.
10. Окунь Л.Б. // Письма в ЭТФ, 1987, т.46, вып. II, с.420.
11. Игнатъев А.Д., Кузьмин В.А. // Письма в ЭТФ, 1988, т.47, вып. I, 6.
12. Новиков В.М., Поманский А.А. // Письма в ЭТФ, 1989, т.49, вып. 2, 68.
13. Ковальчук Е.Л. Дис... канд. физ.-мат. наук. М.: ИИИ АН СССР, 1982.
14. Caldwell D.O. // Nucl. Instr. Meth., 1988, V. A264, N.1, p.106.
15. Caldwell D.O. Preprint UCSB-HEP, 1988, N.10.
16. Васенко А.А., Верещагин Д.Н., Кирпичников И.В. и др. М., Препринт ИТЭФ, 1988, № 8.
17. Васенко А.А., Кирпичников И.В., Кузнецов В.А. и др. М., Препринт ИТЭФ, 1988, № 75.
18. Барабаш А.С., Болотиния А.И. М., Препринт ИТЭФ, 1989, № 12.
19. Alessandrello A., Giuliani A., Bellotti E. et al. // Nucl. Phys., 1988, V. A478, p.453.
20. Alessandrello A., Bellotti E., Cattadori C. et al. // Nucl. Instr. Meth., 1986, V. B17, N.5-6, p.411.
21. Барабаш А.С., Кузьминов В.В., Лобашев В.М. и др. // Письма в ЭТФ, 1987, т.45, вып. 4, с.171.
22. Милельмахер Г.В., Неганов Б.С., Трофимов В.Н. Сообщение ОИИИ, 1982, № P8-82-549.
23. Fiorini E., Niinikoski T.O. // Nucl. Instr. Meth., 1984, V.224, N 1, p.83.
24. Cabrera B., Krauss L., Wilczek F. // Phys. Rev. Lett., 1985, V.55, N 1, p.25.

25. Cabrera B., Caldwell D., Sadoulet B. Preprint UCSP-HEP, 1986, N 11.
26. Alessandrello A., Camin D.V., Fiorini E.//Phys.Lett., 1988, V.B202, N 4, p.611.
27. Moseley S.H., Kelley R.L., Mather J.C. et al.//IEEE Trans.Nucl.Sci., 1985, V.NS-32, N 1, p.134.
28. McCannan D., Juda M., Zhang J. et al.//IEEE Trans.Nucl.Sci., 1986, V.33, N 1, p.236.

А.С.Барабан

Возможности счетчиковых экспериментов для проверки стабильности электрона и справедливости принципа Паули в атомах.

Редактор Н.Д.Леонова

Корректор О.Ю.Ольховникова

Работа поступила в ОНТИ 14.03.89

Подписано к печати 21.03.89

Т09250

Формат 60x90 1/16

Объем печ. Усл.-печ.л.0,75. Уч.-изд.л.0,5. Тираж 250 экз.

Заказ 58

Индекс 3649

Цена 7 коп.

7 коп.

ИНДЕКС 3624