

## ОБ ОДНОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ВОЗМОЖНОСТИ НАБЛЮДЕНИЯ ДВУХНЕЙТРИННОГО ДВОЙНОГО БЕТА-РАСПАДА

A.C. Барабаш

Получены оценки значений периода полураспада  $^{100}\text{Mo}$ ,  $^{96}\text{Zr}$  и  $^{150}\text{Nd}$  по каналу  $2\beta(2\nu)$  на возбужденный уровень  $O_1^+$  дочерних ядер ( $\sim 10^{20} \div 2 \cdot 10^{21}$  лет) и показано, что эти распады могут регистрироваться на современных низкофоновых установках. Предлагаются соответствующие эксперименты.

Поиски  $2\beta$ -распада на возбужденные уровни дочерних ядер ведутся, как правило, попутно с поисками  $2\beta$ -распада на основной уровень. Лишь несколько работ были специально посвящены поиску таких переходов <sup>1–5</sup>. Поскольку энергия  $2\beta$ -перехода в этом случае меньше, чем при переходе на основной уровень, то и вероятность распада тоже существенно меньше. Поэтому поиск  $2\beta$ -распада на возбужденные уровни не вызывал особого оптимизма у экспериментаторов.

В настоящей работе мы покажем, что, несмотря на это, на современных низкофоновых установках с использованием Ge-детекторов можно регистрировать процесс  $2\beta(2\nu)$ -распада  $^{100}\text{Mo}$ ,  $^{96}\text{Zr}$  и  $^{150}\text{Nd}$  на  $O_1^+$  – возбужденный уровень дочерних ядер.

Очевидно, что регистрация  $2\beta(2\nu; O^+ - O_1^+)$ -переходов даст такую же информацию о  $2\beta(2\nu)$ -распаде, как и регистрация  $2\beta(2\nu)$ -переходов на основное  $O^+$ -состояние дочерних ядер. С точки зрения величины фазового объема интерес представляют переходы на низко-лежащие  $O_1^+$ -уровни. Проведенный анализ показал, что среди всех известных кандидатов наиболее подходящими ядрами являются  $^{100}\text{Mo}$ ,  $^{96}\text{Zr}$  и  $^{150}\text{Nd}$ , которые имеют энергию  $2\beta(O^+ - O_1^+)$ -перехода 1902,6, 2202,1 и 2627 кэВ, соответственно. Каковы же ожидаемые периоды полу-распада для этих  $2\nu(O^+ - O_1^+)$ -переходов? Поскольку теоретических оценок в литературе нет (да они и не могут обеспечить достаточную точность), то оценим эти значения из имеющихся экспериментальных данных по  $2\nu(O^+ - O^+)$ -распаду.  $^{100}\text{Mo} - ^{100}\text{Ru}(O_1^+; 1130,4 \text{ кэВ})$ . В этом случае энергия  $2\beta(2\nu; O^+ - O_1^+)$ -перехода составляет 1902,6 кэВ. В работе <sup>6</sup> сообщается о наблюдении положительного эффекта при поиске  $2\beta(2\nu; O^+ - O_1^+)$ -распада  $^{100}\text{Mo}$  (энергия  $2\beta$ -перехода – 3033 кэВ). Приписав весь наблюдаемый эффект  $2\beta(2\nu; O^+ - O_1^+)$ -распаду  $^{100}\text{Mo}$  авторы получают, что  $T_{1/2} = 3,3^{+2}_{-1} \cdot 10^{18}$  лет<sup>1)</sup>. Предполагая равенство ядер-

<sup>1)</sup> Часть эффекта обусловлена фоновыми событиями и, видимо, истинное значение периода полураспада в  $1,5 \div 2$  раза выше.

ных матричных элементов для обоих переходов и учитывая разницу фазовых объемов получаем предсказание на величину периода полураспада  $^{100}\text{Mo}$  для  $(2\nu; O^+ - O_1^+)$ -моды:  $T_{1/2} \approx (4 \div 9) \cdot 10^{20}$  лет, а с учетом замечания<sup>1)</sup>  $T_{1/2} \approx (0,6 \div 1,8) \cdot 10^{21}$  лет.

В работе<sup>7</sup> так же наблюдается избыточное количество событий от  $^{100}\text{Mo}$  в области  $(2\nu; O^+ - O_1^+)$ -моды. Если приписать весь избыток  $2\beta(2\nu; O^+ - O_1^+)$ -распаду  $^{100}\text{Mo}$ , то  $T_{1/2} = 7 \cdot 10^{18}$  лет. Отсюда для  $2\beta(2\nu; O^+ - O_1^+)$ -перехода получаем:  $T_{1/2} \approx 1,2 \cdot 10^{21}$  лет.

Аналогичный анализ по результатам для  $^{76}\text{Ge}$  ( $T_{1/2} (2\nu; O^+ - O_1^+) = 8,6^{+2,6}_{-1,7} \cdot 10^{20}$  лет)<sup>2)</sup> приводит к следующей оценке на  $2\beta(2\nu; O^+ - O_1^+)$ -распад  $^{100}\text{Mo}$ :  $T_{1/2} \approx (1,5 \div 2) \cdot 10^{21}$  лет.

Таким образом можно ожидать, что период полураспада  $^{100}\text{Mo}$  по каналу  $2\beta(2\nu; O^+ - O_1^+)$  составит  $\sim (0,6 \div 2) \cdot 10^{21}$  лет.  $^{96}\text{Zr} - ^{96}\text{Mo}(O_1^+; 1147,9 \text{ кэВ})$ . В этом случае энергия  $2\beta(2\nu; O^+ - O_1^+)$ -распада составляет 2202,1 кэВ, что даже больше, чем для зарегистрированного в  $^{76}\text{Ge}$   $2\beta(2\nu; O^+ - O_1^+)$ -распада ( $E_{2\beta} = 2041$  кэВ). Предполагая равенство ядерных матричных элементов у этих переходов и учитывая разницу фазовых объемов получаем предсказание на  $2\beta(2\nu; O^+ - O_1^+)$ -распад  $^{96}\text{Zr}$ :  $T_{1/2} \approx (3 \div 4) \cdot 10^{20}$  лет.

Аналогичная оценка из результатов для  $^{100}\text{Mo}$ <sup>6,7</sup> дает для  $2\beta(2\nu; O^+ - O_1^+)$ -распада  $^{96}\text{Zr}$ :  $T_{1/2} \approx (1 \div 3,6) \cdot 10^{20}$  лет.  $^{150}\text{Nd} - ^{150}\text{Sm}(O_1^+; 740,4 \text{ кэВ})$ . В этом случае энергия  $2\beta(2\nu; O^+ - O_1^+)$ -перехода составляет 2627 кэВ, что превышает энергию  $2\beta(2\nu; O^+ - O_1^+)$ -перехода  $^{130}\text{Te} - ^{130}\text{Xe}$  ( $E_{2\beta} = 2533$  кэВ), для которого в геохимических экспериментах зарегистрирован положительный эффект —  $T_{1/2} = (0,5 \div 2,75) \cdot 10^{21}$  лет<sup>9,10</sup>. Поэтому можно ожидать, что для  $^{150}\text{Nd} - T_{1/2} (2\nu; O^+ - O_1^+) \approx (0,3 \div 1,8) \cdot 10^{21}$  лет. Для перехода на  $O_2^+$  (1255,5 кэВ) — состояние  $^{150}\text{Sm}$  ( $E_{2\beta} = 2111,5$  кэВ) получаем следующую оценку:  $T_{1/2} \approx (0,4 \div 2) \cdot 10^{22}$  лет. Заметим, что в случае  $^{150}\text{Nd}$  корректнее проводить сравнение именно с  $^{130}\text{Te}$  ввиду близких значений  $A$  и  $Z$ .

При  $2\beta$ -переходе на возбужденный уровень  $O_1^+$  дочернего ядра энергия возбуждения снимается путем испускания двух каскадных  $\gamma$ -квантов с определенной энергией. Таким образом эти переходы можно обнаружить как по регистрации одного  $\gamma$ -кванта из каскада, так и в режиме совпадений, когда разными детекторами регистрируются оба каскадных  $\gamma$ -кванта.

Здесь следует особо подчеркнуть, что в случае поиска  $2\beta(2\nu)$ -распада на возбужденные состояния дочерних ядер мы имеем дело (в такой постановке эксперимента) с регистрацией линии со строго фиксированной энергией, а не распределенного спектра, как при поиске перехода на основное  $O^+$ -состояние дочернего ядра. Поэтому высокое энергетическое разрешение Ge-детекторов позволяет обеспечить высокую чувствительность экспериментов к процессу  $2\beta(2\nu)$ -распада на возбужденные состояния — достаточную, как будет показано ниже, для регистрации  $2\beta(2\nu; O^+ - O_1^+)$  — переходов в  $^{100}\text{Mo}$ ,  $^{96}\text{Zr}$  и  $^{150}\text{Nd}$ .

Подробный анализ уровня фона, достижимого на современных низкофоновых установках, был проведен в работе<sup>11</sup>. Наиболее низкий индекс фона достигнут на установке Ф.Афиньена и др., которая представляет собой HPGe-детектор объемом 202 см<sup>3</sup>, окруженный многослойной пассивной защитой<sup>12</sup>. Установка размещена на глубине 1438 м. В области энергий 539,59 кэВ (что соответствует энергии одного из  $\gamma$ -квантов, испускаемого при  $2\beta(2\nu; O^+ - O_1^+)$ -распаде  $^{100}\text{Mo}$ ) фон составил  $\sim 3,7$  соб/кэВ·год. Если такой детектор окружить исследуемым образцом (например, 1 кг  $^{100}\text{Mo}$ , который имеется в ИТЭФ) и провести измерения в течение года, то чувствительность к  $2\beta(2\nu; O^+ - O_1^+)$ -распаду составит  $\sim 2 \cdot 10^{22}$  лет (за 2000 часов измерений —  $\sim 10^{22}$  лет). Примерно такая же чувствительность будет получена и при поиске  $2\beta(2\nu; O^+ - O_1^+)$ -распада  $^{96}\text{Zr}$  и  $^{150}\text{Nd}$ <sup>3)</sup>. Сходный уровень чувствитель-

<sup>2)</sup> Результат группы ИТЭФ — ЕрФИ; приводится, например, в обзоре<sup>8</sup>.

<sup>3)</sup> В настоящее время можно иметь  $\sim 100$  г  $^{150}\text{Nd}$  и  $\sim 10 \div 20$  г  $^{96}\text{Zr}$ . Получение 1 кг этих изотопов не является неразрешимой задачей.

ности можно иметь и на установке Д.Колдуэла и др.  $^{13}$  при работе в режиме совпадений (более подробно это рассмотрено в  $^{11}$ ). Сравнивая полученную оценку чувствительности с предсказаниями на  $T_{1/2}$  для этих изотопов приходим к однозначному выводу – на современных низкофоновых установках можно зарегистрировать двухнейтринный двойной  $\beta$ -распад  $^{100}\text{Mo}$ ,  $^{96}\text{Zr}$  и  $^{150}\text{Nd}$  на возбужденный уровень  $O_1^+$  дочерних ядер.

Таким образом предлагается провести серию экспериментов по регистрации  $2\beta(2\nu; O^+ - O_1^+)$ -распада  $^{100}\text{Mo}$ ,  $^{96}\text{Zr}$  и  $^{150}\text{Nd}$  на существующих низкофоновых установках. Причем положительный эффект может быть получен и при исследовании образцов из естественной смеси изотопов, поскольку в этом случае можно использовать образцы с большой массой (до  $5 \div 10$  кг, а на многокристальных установках до  $40 \div 50$  кг).

### Литература

1. *Bellotti E. et al.* Nuovo Cim., 1982, **33**, 273.
2. *Norman E.B., Meekhof D.M.* Phys. Lett. B, 1987, **195**, 126.
3. *Bellotti E. et al.* Europhys. Lett., 1987, **3**, 889.
4. *Барабаш А.С. и др.* Препринт ИТЭФ № 125. М.: ЦНИИ Атоминформ, 1989.
5. *Барабаш А.С. и др.* Препринт ИТЭФ № 184. М.: ЦНИИ Атоминформ, 1989.
6. *Klimenko A.A. et al.* Preprint INR, № 11-89, M., 1989.
7. *Watanabe T. et al.* In: Proc. Int. Symp. WEIN-89, Montreal, 1989, p. PC04.
8. *Барабаш А.С.* Препринт ИТЭФ № 130. М.: ЦНИИ Атоминформ, 1989.
9. *Kiraten T. et al.* In: Proc. Int. Symp. "Nuclear Beta Decay and Neutrinos, Osaka-1986", Singapore, 1986, p. 81.
10. *Manuel O.K.* Ibid, p. 71.
11. *Барабаш А.С.* Препринт ИТЭФ № 188. М.: ЦНИИ Атоминформ, 1989.
12. *Brodzinski R.L. et al.* Preprint PNL-SA-17191, 1989.
13. *Caldwell D.O. et al.* In: Proc. VIII-th Moriond Workshop on 5-th Force-Neutrino Physics, Singapore, 1988, p. 39.

Институт теоретической и экспериментальной физики  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
4 января 1990 г.