

*Г. М. Тер-Акопьян, А. С. Фомичев,  
П. Г. Шаров*

## Поиск $2p$ -распада первого возбужденного состояния $^{17}\text{Ne}$

В масштабах более чем столетнего периода, прошедшего со времени открытия радиоактивности, открытие двухпротонного распада атомных ядер было сделано совсем недавно, в 2002 г. (ядро  $^{45}\text{Fe}$  [1, 2]). К настоящему времени экспериментально получены данные о четырех ядрах ( $^{19}\text{Mg}$ ,  $^{45}\text{Fe}$ ,  $^{48}\text{Ni}$ ,  $^{54}\text{Zn}$ ), находящихся на границе протонной стабильности, которые испытывают двухпротонный радиоактивный распад. Отражая свойства ядерной структуры, механизм испускания двух протонов является чувствительным индикатором динамики процесса ядерного распада на три тела.

Ядро  $^{17}\text{Ne}$  в основном состоянии является стабильным в отношении вылета двух протонов. Однако для первого возбужденного состояния этого ядра, имеющего спин-четность  $3/2^-$  и энергию возбуждения 1288 кэВ, наряду с испусканием гамма-квантов энергетически возможен распад, приводящий к вылету двух протонов и ядра  $^{15}\text{O}$ . Такая ветвь распада этого состояния представляет истинно  $2p$ -распад, так как энергетически невозможно

---

*G. M. Ter-Akopian, A. S. Fomichev,  
P. G. Sharov*

## Search for $2p$ Decay of the First Excited State of $^{17}\text{Ne}$

In the context of a 100-year time frame, the discovery of the two-proton decay of atomic nuclei in 2002 is relatively recent ( $^{45}\text{Fe}$  nucleus [1, 2]). Up to now, the experimental data on the four proton drip-line nuclei ( $^{19}\text{Mg}$ ,  $^{45}\text{Fe}$ ,  $^{48}\text{Ni}$ ,  $^{54}\text{Zn}$ ) undergoing two-proton radioactive decay have been obtained. Reflecting the properties of the nuclear structure, the two-proton decay mechanism is a sensitive indicator of the three-body decay.

The  $^{17}\text{Ne}$  nucleus is particle stable in the ground state with respect to two-proton emission, while  $\gamma$ -quanta emission and a  $2p$  decay to  $^{15}\text{O}$  are energetically favoured for the first excited state in  $^{17}\text{Ne}$  with spin parity  $3/2^-$  at an excitation energy of 1288 keV. This state is therefore a true  $2p$ -decay since sequential proton emission accompanied by the transition to  $^{16}\text{F}$  — a nucleus unstable to proton decay — is energetically unfavoured. The two-proton decay from the  $^{17}\text{Ne}$   $3/2^-$  state is of particular interest in gaining the data on

последовательное испускание протонов с переходом в ядро  $^{16}\text{F}$ , нестабильное в отношении вылета протона. Двухпротонный распад  $3/2^-$ -состояния  $^{17}\text{Ne}$  особенно интересен для получения информации о динамике этого процесса, так как  $^{17}\text{Ne}$ , находящийся в основном и в первом возбужденном состоянии, представляет уникальную ядерную систему, для которой теоретически с высокой степенью достоверности предсказано существование двухпротонного гало [3].

Расчеты парциальной ширины гамма-распада уровня  $^{17}\text{Ne}(3/2^-, 1288)$  по модели оболочек дают оценку  $\Gamma_\gamma \approx 5,5 \cdot 10^{-9}$  МэВ [4]. Расчеты, выполненные для распада этого состояния на два протона и  $^{15}\text{O}$ , предсказывают очень малую величину отношения ширин:  $\Gamma_{2p}/\Gamma_\gamma \sim (0,9-2,5) \cdot 10^{-6}$  [5]. Вместе с тем измерение

вероятности этой слабой ветви распада ядра  $^{17}\text{Ne}$  дало бы ключ к определению возможности радиационного захвата протонной пары ядром  $^{15}\text{O}$ , являющимся так называемой «точкой ожидания» в астрофизическом  $rp$ -процессе нуклеосинтеза. Захват двух протонов представляет собой путь обхода этой «точки ожидания», который может на 3–8 порядков величины увеличить темп прохождения нуклеосинтеза в  $rp$ -процессе.

Целью эксперимента, выполненного в ЛЯР ОИЯИ на пучке радиоактивных ядер сепаратора ACCULINNA, было получить для распада первого возбужденного уровня  $^{17}\text{Ne}$  как можно более низкий предел отношения  $\Gamma_{2p}/\Gamma_\gamma$ . Состояния ядра  $^{17}\text{Ne}$  заселяли в реакции передачи  $^1\text{H}(^{18}\text{Ne}, d)^{17}\text{Ne}$  при бомбардировке водород-

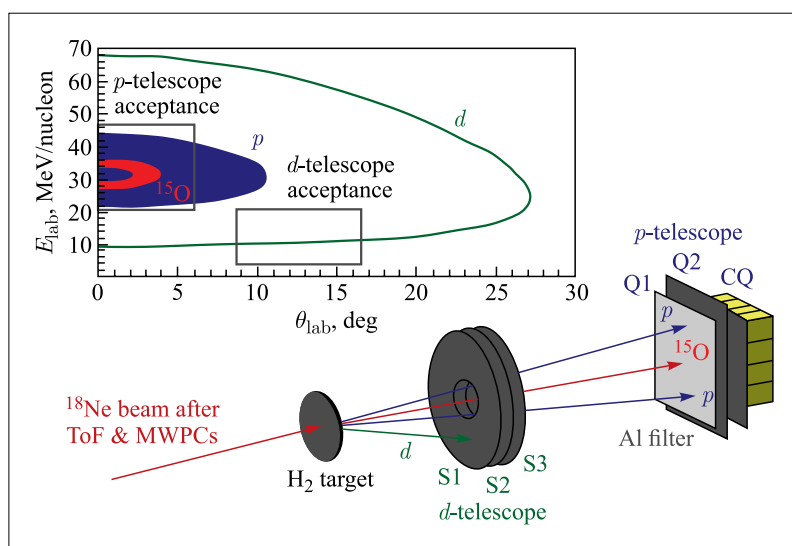


Схема эксперимента по обнаружению ветви  $2p$ -распада  $^{17}\text{Ne}(3/2^-, 1288)$  в реакции  $^1\text{H}(^{18}\text{Ne}, d)^{17}\text{Ne}^*$  методом комбинированной массы (из  $d$ - $p$ -совпадений)

A schematic drawing of the detector setup used to search for the  $2p$ -decay branch of the  $^{17}\text{Ne}(3/2^-, 1288)$  excited state in the  $^1\text{H}(^{18}\text{Ne}, d)^{17}\text{Ne}^*$  transfer reaction with the combined mass method (from  $d$ - $p$ -coincidences)

the process dynamics.  $^{17}\text{Ne}$  in its ground and first excited states is a unique nuclear system and a candidate to possess a two-proton halo whose existence was theoretically predicted with high certainty [3].

The shell model calculations led to an estimated partial width of  $\gamma$  decay ( $3/2^-, 1288$ )  $\Gamma_\gamma \approx 5.5 \cdot 10^{-9}$  MeV [4]. The theoretically predicted width ratio for the two-proton decay to  $^{15}\text{O}$  was extremely small, i.e.,  $\Gamma_{2p}/\Gamma_\gamma \sim (0.9-2.5) \cdot 10^{-6}$  [5]. However, the probability measurements for the weak decay branch could be the key to the determination of the radiative capture of the proton pair by  $^{15}\text{O}$  known as a “waiting point” in the astrophysical  $rp$  process. The  $2p$  capture is known to be a possible by-path for the “waiting point” and can speed up nucleosynthesis in the  $rp$  process by 3–8 orders of magnitude.

The experiments were performed at the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions, JINR. The objective was to obtain a smaller ratio  $\Gamma_{2p}/\Gamma_\gamma$  for the decay of the first excited state in  $^{17}\text{Ne}$  using beams of radioactive nuclei at

ACCULINNA. The  $^{17}\text{Ne}$  states of interest were populated in the  $^1\text{H}(^{18}\text{Ne}, d)^{17}\text{Ne}$  transfer reaction. A hydrogen target was bombarded by a beam of  $^{18}\text{Ne}$  radioactive nuclei at 35 MeV/nucleon with an intensity of  $3.6 \cdot 10^4$  s $^{-1}$ . In the process, a neutron from the  $^{18}\text{Ne}$  nucleus hits the hydrogen target nucleus thus forming a deuteron. The reaction under discussion used to populate the  $^{17}\text{Ne}$   $3/2^-$  state is the best possible choice since its transverse cross section is dozens of times higher than that of the reaction resulting in the  $^{17}\text{Ne}(5/2^-, 1764)$  state, the nearest within the energy range. The decay of this and other high-lying  $^{17}\text{Ne}$  states involves a sequential two-proton emission, which complicates the detection of the weak two-proton decay branch of the  $^{17}\text{Ne}(3/2^-, 1288)$  state. In particular, a new upper limit for the branching ratio  $\Gamma_{2p}/\Gamma_\gamma < 7.7 \cdot 10^{-3}$  was set and earlier discussed in [6].

The experimental results obtained by the ACCULINNA group were published in [7]. The authors developed and used a novel method — a combined mass

ной мишени пучком радиоактивных ядер  $^{18}\text{Ne}$  с энергией 35 МэВ/нуклон и интенсивностью  $3,6 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ . В таком процессе нейтрон из ядра  $^{18}\text{Ne}$  переходит на ядро водородной мишени, образуя дейтрон. Выбор указанной реакции оптимален ввиду того, что поперечное сечение реакции, заселяющей  $3/2^-$ -состояние  $^{17}\text{Ne}$ , в десятки раз превосходит по величине сечение реакции, приводящей к получению ближайшего по энергии состояния  $^{17}\text{Ne}(5/2^-, 1764)$ . Распад этого состояния и других состояний  $^{17}\text{Ne}$ , находящихся выше по энергии возбуждения, идет путем последовательного испускания двух протонов. Это осложняет задачу обнаружения слабой ветви  $2p$ -распада уровня  $^{17}\text{Ne}(3/2^-, 1288)$ . В частности, фоном протонов был ограничен предел отношения  $\Gamma_{2p}/\Gamma_{\gamma} < 7,7 \cdot 10^{-3}$ , полученный ранее в [6].

Результаты экспериментов, выполненных группой ACCULINNA, были опубликованы в работе [7]. Авторы разработали и применили новый метод определения спектра возбужденных состояний ядра  $^{17}\text{Ne}$ , испытывающих  $2p$ -распад, получивший название метода «комбинированной» массы. В этом методе спектр резонансных состояний  $^{17}\text{Ne}$ , распадающихся путем испускания двух протонов, определяется регистрацией этих протонов в совпадении с дейтроном. Для ре-

гистрации дейтрона есть лишь одно условие: угол его вылета должен быть определен с погрешностью, находящейся в пределах одного градуса, достаточной для определения энергии и угла вылета образовавшегося ядра  $^{17}\text{Ne}$  с точностью 0,06% и 0,1° соответственно. Таким образом, измеряя энергию и угол вылета каждого из двух протонов, испущенных в совпадении с дейтроном, можно определить с хорошей точностью энергию распада  $^{17}\text{Ne}$ .

Работа [7] посвящена испытанию метода комбинированной массы и применению этого метода для поиска слабой ветви двухпротонного распада первого возбужденного уровня  $^{17}\text{Ne}$ . С помощью этого нового метода в работе [7] для данного  $3/2^-$ -состояния ядра  $^{17}\text{Ne}$  был установлен новый предел отношения ширины:  $\Gamma_{2p}/\Gamma_{\gamma} < 1,6 \cdot 10^{-4}$ . Полученный результат в 50 раз ниже по величине в сравнении с результатом работы [6]. Результаты работы [7] позволяют исключить из рассмотрения применение упрощенной модели дипротонного распада (двухчастичной модели) [6], давшей для  $^{17}\text{Ne}$  более высокое значение величины отношения ширины.

#### Список литературы / References

1. *Pfützner M. et al.* // Eur. Phys. J. A. 2002. V. 14. P. 279.
2. *Giovinazzo J. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2002. V. 89. P. 102501.
3. *Grigorenko L. V., Parfenova Yu. L., Zhukov M. V.* // Phys. Rev. C. 2005. V. 71. P. 051604(R), 1.
4. *Chromik M. J. et al.* // Phys. Rev. C. 1997. V. 55. P. 1676.
5. *Grigorenko L. V., Zhukov M. V.* // Phys. Rev. C. 2007. V. 76. P. 014008.
6. *Chromik M. J. et al.* // Phys. Rev. C. 2002. V. 66. P. 024313.
7. *Sharov P. G. et al.* // Phys. Rev. C. 2017. V. 96. P. 025807.

method — to determine the excitation spectrum of  $^{17}\text{Ne}$  associated with  $2p$  decay. Using the method, a spectrum of  $2p$ -decay resonance states of  $^{17}\text{Ne}$  is measured by the detection of protons in coincidence with a deuteron. One requirement should be fulfilled when registering a deuteron: its emission angle must be measured with the deviation not exceeding one degree, which is sufficient enough to specify the energy and escape direction of  $^{17}\text{Ne}$  with an accuracy of 0.06% and 0.1°, respectively. Therefore, the  $^{17}\text{Ne}$  decay energy can be precisely measured by defining the energy and escape angle of each of the two protons emitted in coincidence with the deuteron.

The objective of work [7] was to test the combined mass method and use it to search for the weak  $2p$ -decay branch of the first excited state of  $^{17}\text{Ne}$ . Using the novel method in work [7], a new upper limit obtained for the width ratio,  $\Gamma_{2p}/\Gamma_{\gamma} < 1,6 \cdot 10^{-4}$ , was established for the  $3/2^-$  state of  $^{17}\text{Ne}$ . The value of the limit was lower by a factor of 50 compared to that defined in work [6]. The results presented in work [7] rule out the predictions of the simplified di-proton decay model (two-particle model) [6], which yielded a higher width ratio for  $^{17}\text{Ne}$ .