

# Теоретические и экспериментальные исследования спектров возбуждения $^{10}\text{Ne}$ и $^{17}\text{Ne}$

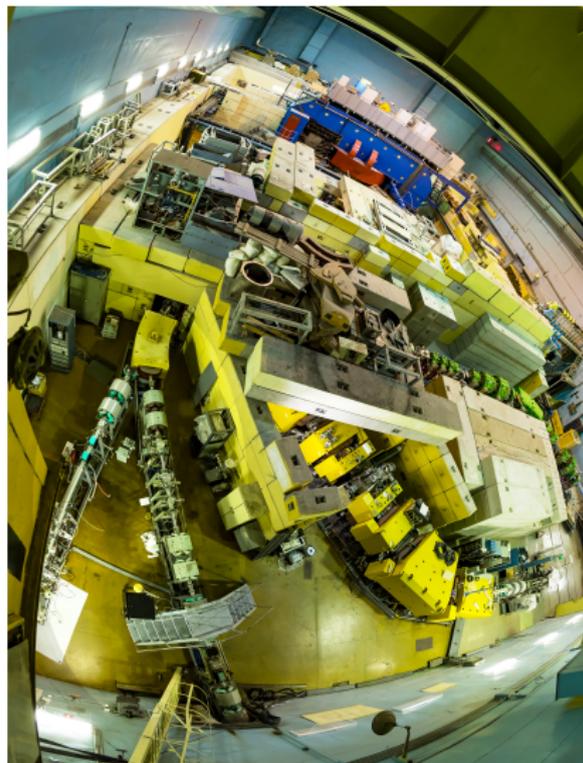
Павел Шаров

ЛЯР ОИЯИ

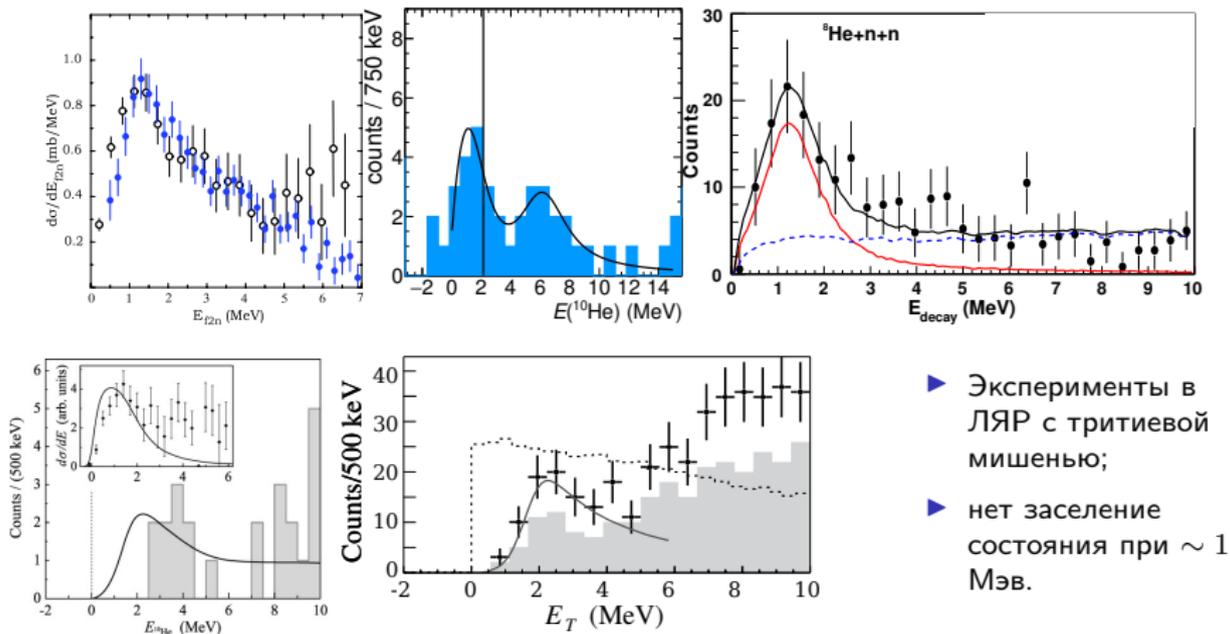
ФРАГМЕНТ-СЕПАРАТОР

АКУЛИНА

1. Заселение изотопа  $^{10}\text{Ne}$  в реакциях выбивания
2. Поиск  $2p$ -распада первого возбужденного состояния  $^{17}\text{Ne}$



# Исследования $^{10}\text{He}$



- ▶ Эксперименты в ЛЯР с тритиевой мишенью;
- ▶ нет заселение состояния при  $\sim 1$  Мэв.

В рассмотренных случаях структура исходного состояния сильно отличается

# Влияние исходного состояния

## Модель с источником

$$(\hat{H}_0 + \underbrace{\hat{V}_3}_{\text{ВКС}} - E)\Psi = \underbrace{\Phi_q}_{\text{СИС}}$$

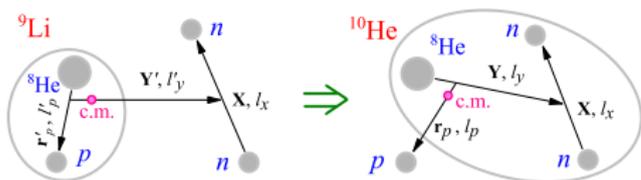
- ▶ Метод гиперсферических гармоник

## Модельный источник

$$\Phi_{q,\gamma}^{JM}(X, Y) = \sum_{K,\gamma} N_{K,\gamma} \frac{f(\rho)}{\rho^{5/2}} \mathcal{J}_{K\gamma}^{JM}(\Omega_\rho),$$

$$f(\rho) = 21 \sqrt{\frac{7}{5}} \frac{\rho^{5/2}}{\rho_0^3} \exp[-\sqrt{21/2} (\rho/\rho_0)].$$

## Приближение мгновенного срыва



$$\Phi_q = \int d\mathbf{r}_p e^{i\mathbf{q}\mathbf{r}_p} \Psi_{11\text{Li}}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{r}_p).$$

Преобразование Райнала-Ревая

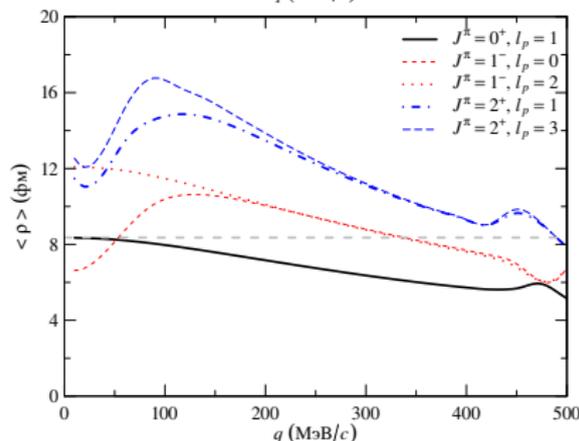
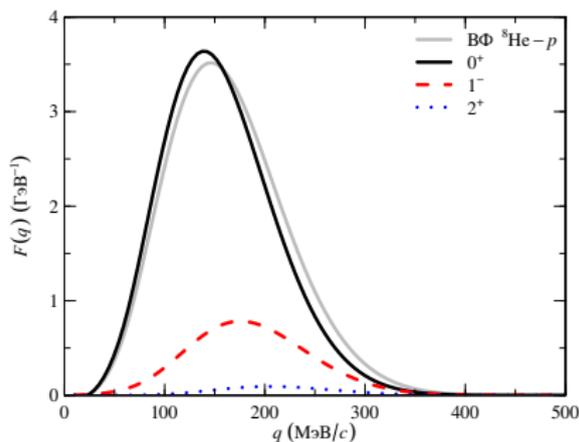
$$\Psi_{11\text{Li}}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}') \otimes \Psi_{9\text{Li}}(\mathbf{r}'_p) \Rightarrow \Psi_{11\text{Li}}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{r}_p).$$

## Свойства источников

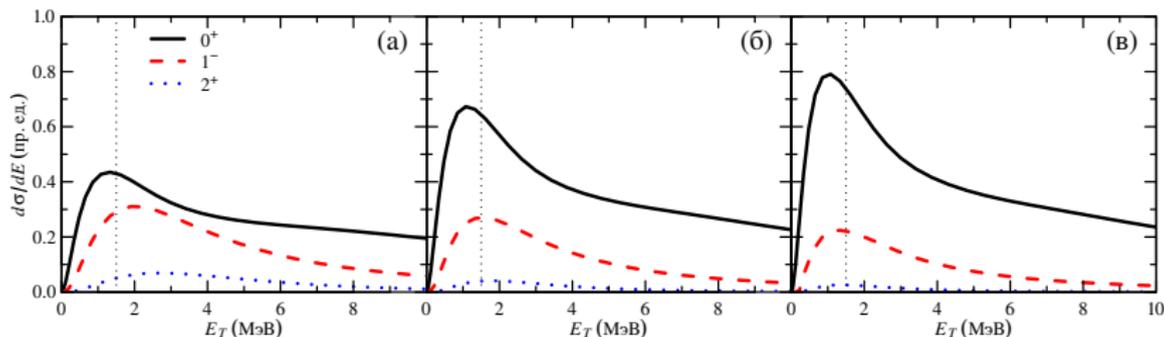
$$F(q) = \int d\Omega_q d\mathbf{X}d\mathbf{Y} |\Phi_{\mathbf{q}}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})|^2$$

$$\langle \rho \rangle = \int d\Omega_q d\mathbf{X}d\mathbf{Y} \rho^2 |\Phi_{\mathbf{q}}(\mathbf{X}, \mathbf{Y})|^2$$

- ▶ Большой размер источников.
- ▶ Заселение конфигураций с различным  $\Delta L$ .
- ▶ Рост размера источника с ростом  $\Delta L$



# Спектр $^{10}\text{He}$ , полученный без учета ВКС



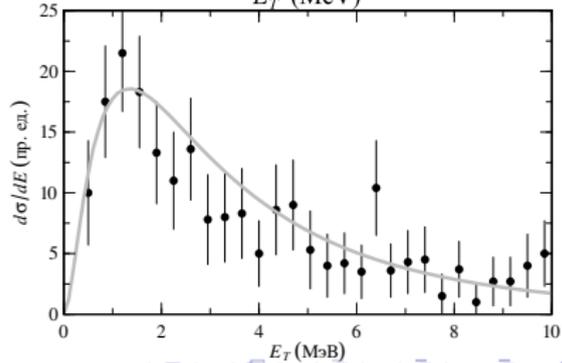
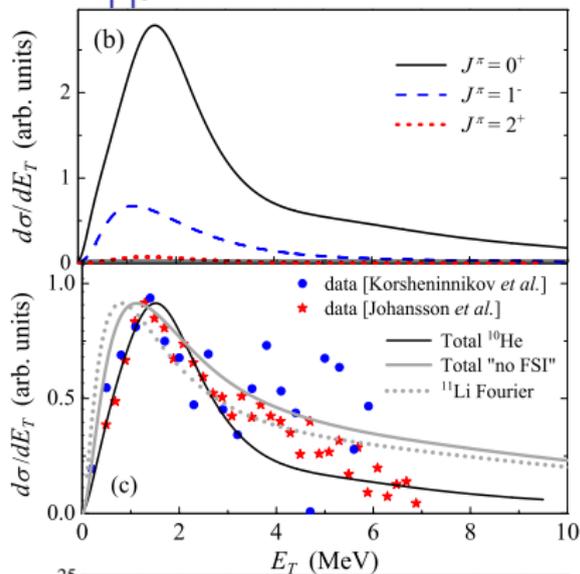
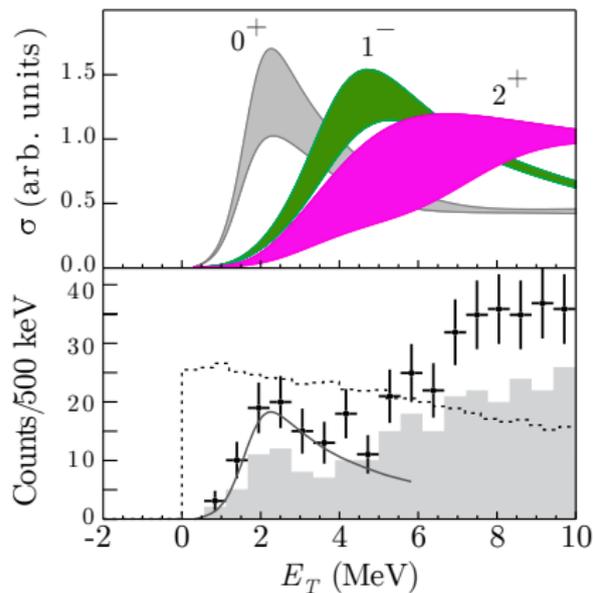
- ▶ Аномальный размер  $^{11}\text{Li}$  приводит к сильному отклику при низких энергиях

	$\langle r'_p \rangle$	$r_{ch}$	$E_b$	$0^+$	$1^-$	$2^+$
(a)	2.00	1.95	30.0	66	28	6
(б)	2.86	2.22	13.9	79	19	2
(в)	3.50	2.45	0.50	85	14	1

- ▶ Передача углового момента растет с ростом асимметрии между энергией связи протона в коре и нейтронов в гало.

# Сравнение с экспериментальными данными

- ▶ Разница в поведении спектров определяется СИС.



# Проблема ${}^9\text{He}$

## Экспериментальные исследования ${}^9\text{He}$



L. Chen, et al. // *Phys. Lett. B.* —2001. —Vol. 505, no. 1–4. —P. 21–26.



Falou H. A., Leprince A., Orr N. // *Journal of Physics: Conference Series.* —2011. —Vol. 312, no. 9. —P. 092012.



T. Al Kalanee, et al. // *Phys. Rev. C.* —2013. —Vol. 88. —P. 034301.

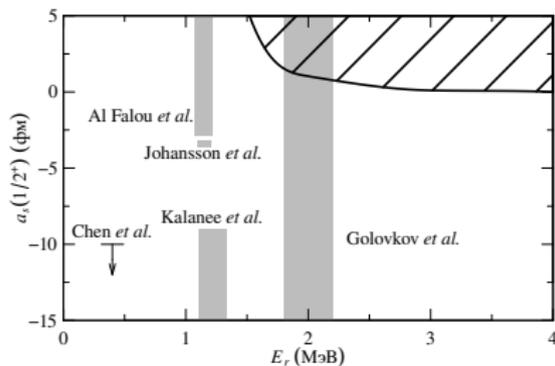
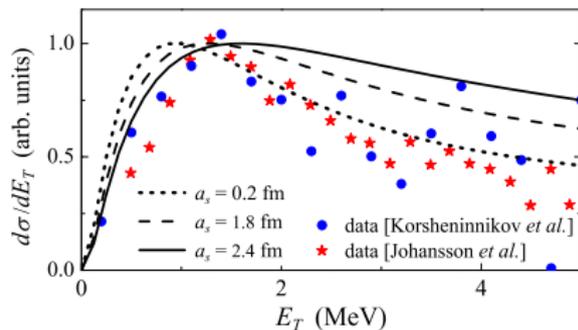


H. T. Johansson, et al. // *Nucl. Phys. A.* —2010. —Vol. 847. —P. 66.



M. S. Golovkov, et al. // *Phys. Rev. C.* —2005. —Vol. 72. —P. 064612.

- ▶ В рамках используемого подхода возможно получить ограничения на свойства  ${}^9\text{He}$ .
- ▶ Данные полученные В ЛЯР согласуются с результатами по  ${}^{10}\text{He}$ .

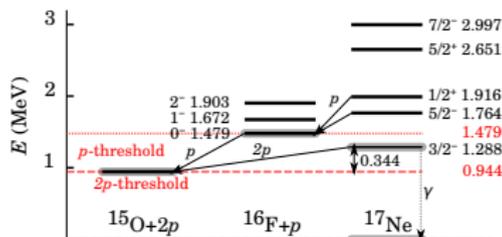


## Выводы по $^{10}\text{He}$

- ▶ Полученные теоретические результаты позволяют объединить результаты различных типов экспериментов.
- ▶ Экспериментальные данные не противоречат друг другу. Различия поведения спектра объясняются СИС.
- ▶ Данные по  $^{10}\text{He}$ , полученные в реакциях выбивания, позволяют наложить значительные ограничения на параметры  $s$  и  $p$  взаимодействия в  $^9\text{He}$ .
- ▶ Результаты по  $^9\text{He}$ , полученные в ЛЯР согласуются с данными по  $^{10}\text{He}$ , полученными в реакциях выбивания.

# Проблема $^{17}\text{Ne}$

- ▶ Кандидат на обладания  $2p$ -галло;
- ▶ проблема существования  $2p$ -галло связана с соотношением  $[s^2]/[d^2]$  компонент в основном состоянии;
- ▶ Истинно  $2p$ -распад из первого возбужденного состояния ( $J^\pi = 3/2^-$ ).



## Отношение ширин $\Gamma_{2p}/\Gamma_\gamma$

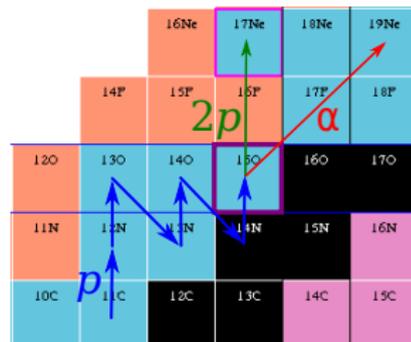
- ▶  $\leq 7.7 \times 10^{-3}$  [M.J. Chromic, et. al., PRC66 2002]
- ▶  $2.5 \times 10^{-6}$  [E. Garrido, et. al., PRC78 2008]
- ▶  $(0.9 - 1.5) \times 10^{-6}$  [L.V. Grigorenko and M.V. Zhukov, PRC76 2007]

В ЛЯР был проведен эксперимент нацеленный на поиск редой ветви  $2p$ -распада первого возбужденного состояния  $^{17}\text{Ne}$  ( $3/2^-$ )

# Астрофизический аспект проблемы $^{17}\text{Ne}$

## rp-процесс

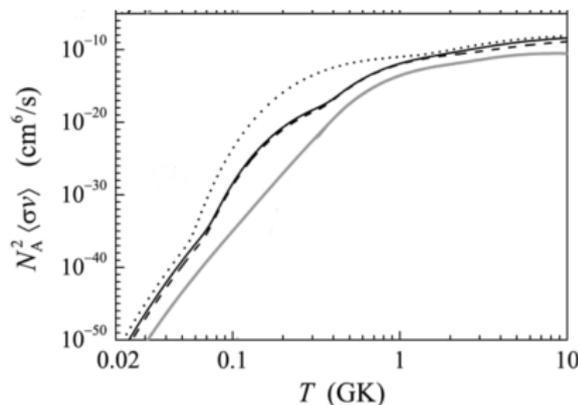
- ▶ процесс быстрого захвата протонов;
- ▶ имеет короткое время протекания;
- ▶ существуют ядра — точки ожидания.
- ▶  $T_{1/2}(^{15}\text{O}) = 122 \text{ с}$



## Резонансная часть интенсивности астрофизического захвата:

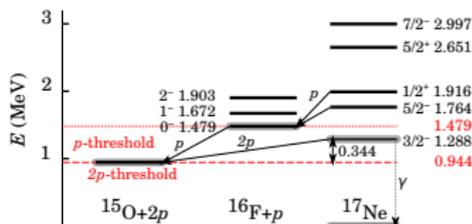
$$\langle \sigma_{\text{part}, \gamma} \rangle (T) \sim T^{-3} e^{-\frac{E_r}{kT}} \frac{\Gamma_\gamma \Gamma_{2p}}{\Gamma_{\text{tot}}}$$

Даже верхняя граница для  
величины  $\Gamma_{2p}/\Gamma_\gamma$  может помочь  
прояснить протекание rp-процесса.



# Методика эксперимента

$$\Gamma_{2p}/\Gamma_{\gamma} = N_{2p}/N_{\gamma} \approx N_{2p}/N_{\text{tot}}$$



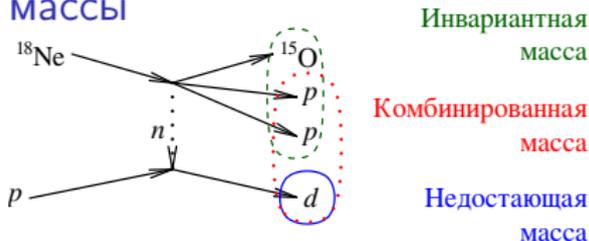
## Эксперимент MSU

- ▶ Кулоновское возбуждение  $\sigma(3/2^-)/\sigma(5/2^-) = 2/3$
- ▶ Регистрация  $\gamma$ -квантов
- ▶ Инвариантная масса

## Эксперимент ЛЯР

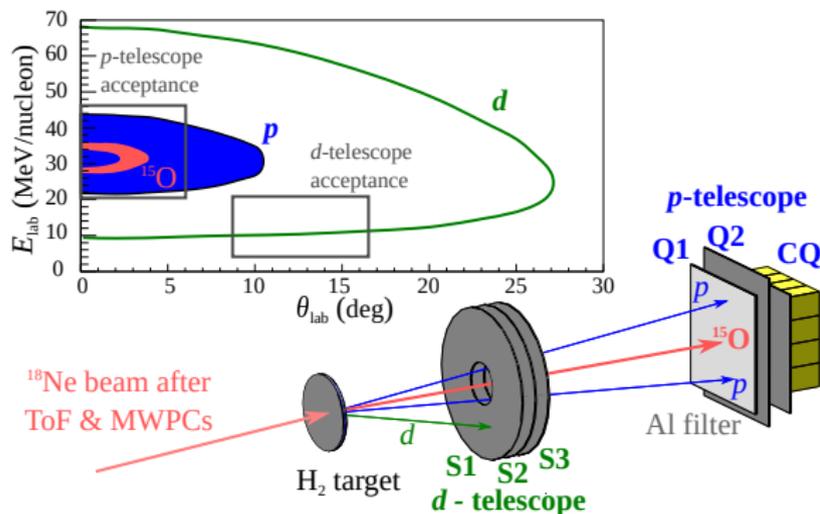
- ▶  $^1\text{H}(^{18}\text{Ne}, d)^{17}\text{Ne}$   
 $\sigma(3/2^-)/\sigma(5/2^-) \gg 1$
- ▶ Недостающая масса
- ▶ Метод комбинированной Массы

## Метод комбинированной массы



- ▶ Регистрация  $^{18}\text{Ne}, d, p, p$  дает полную кинематику
- ▶ Возможно получить достаточно высокое разрешение

# Экспериментальная установка



## Дейтронный телескоп

3 × 1 мм Si детектора

## Протонный телескоп

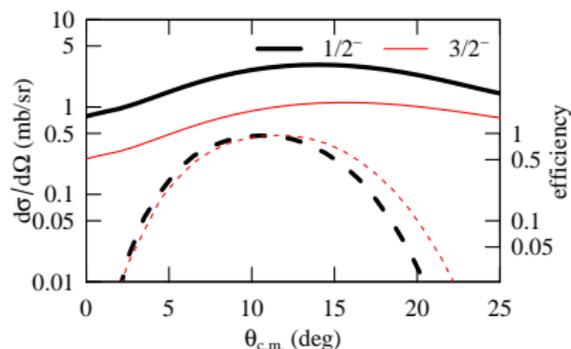
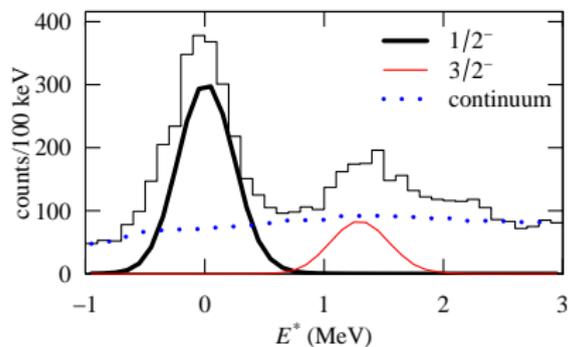
- ▶ 1.4 мм Al фильтр
- ▶ 2 × 1 мм Si детекторы
- ▶ 4 × 4 CsI(Tl) стенка

## Водородная мишень

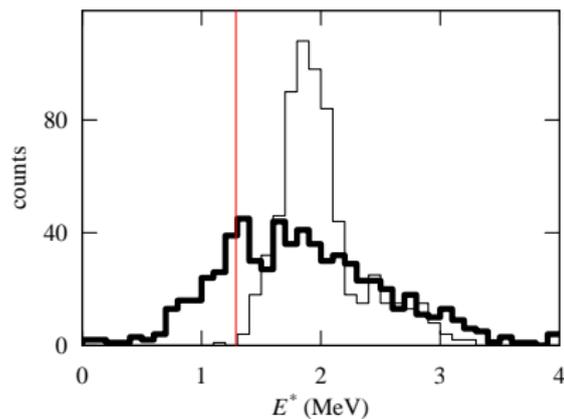
- ▶ “Тонкая” ( $4.6 \times 10^{20}$  ат./см<sup>2</sup>)
- ▶ “Толстая” ( $8.9 \times 10^{21}$  ат./см<sup>2</sup>)

# Экспозиция на тонкой мишени: сечения

- ▶ Получен спектр возбуждения  $^{17}\text{Ne}$
- ▶ Проведено фитирование на основе DWBA
- ▶ Получены оценки сечения для  $1/2^-$  и  $3/2^-$



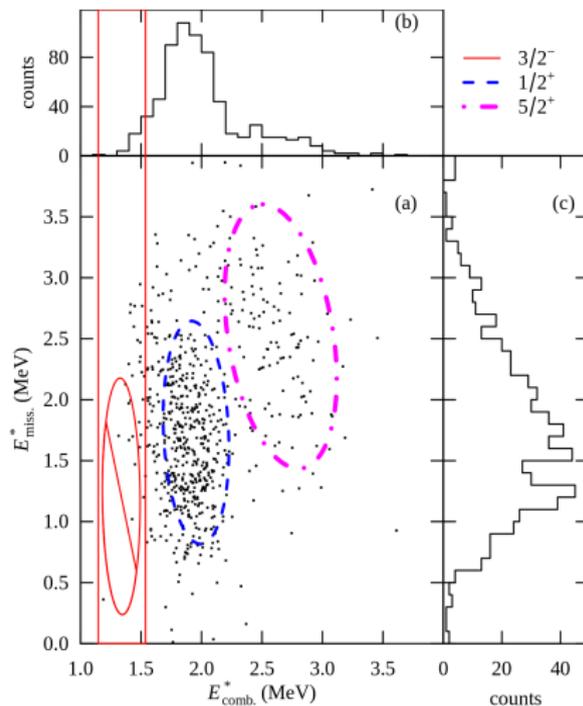
# Экспозиция на толстой мишени: определение отношений ширин



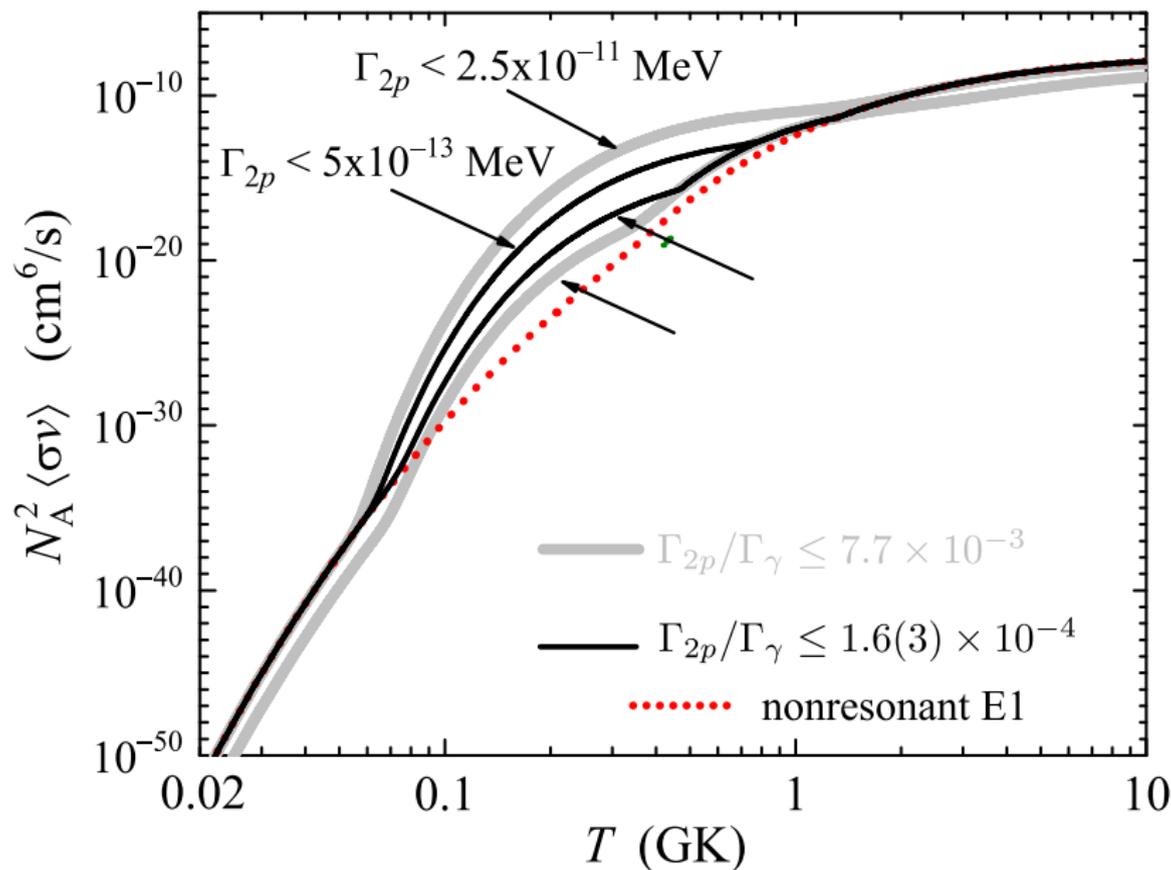
Новый предел  $\Gamma_{2p}/\Gamma_\gamma$ :

- ▶ Нет событий, связанных только с  $2p$ -распадом  $3/2^-$
- ▶  $N_{3/2^-} = 38(6) \times 10^3$

$$\Gamma_{2p}/\Gamma_\gamma \leq 1.6(3) \times 10^{-4}$$

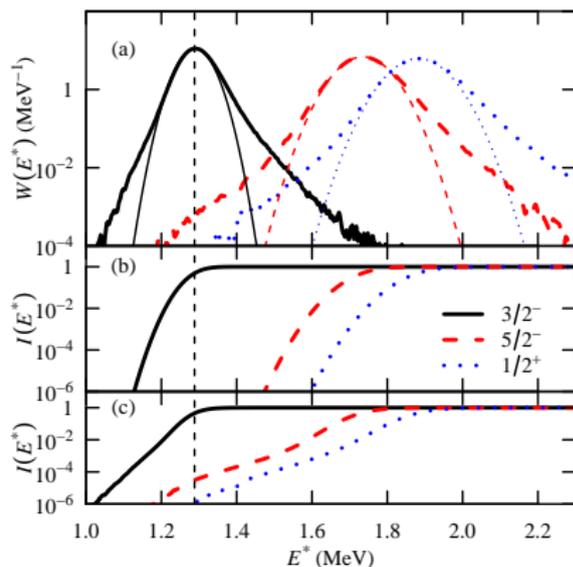


# Интенсивность радиационного захвата $^{15}\text{O} + 2p \rightarrow ^{17}\text{Ne}^*$



## Достижение теоретических значений $\Gamma_{2p}/\Gamma_\gamma$

- ▶ Более тонкая мишень  $(2 - 3) \times 10^{20}$  ат./см<sup>2</sup>
- ▶ Разрешение  $\sigma \sim 30 - 60$  кэВ
- ▶  $5 \times 10^6$  част./с <sup>18</sup>Ne
- ▶  $d\sigma(3/2^-) \sim 0.9$  мб./ср  
 $\Omega > 0.75$  ср
- ▶ 1 событие в 15–20 суток



За 2 мес. пучкового времени возможно перекрыть интервал, в котором лежат теоретические оценки  $\Gamma_{2p}/\Gamma_\gamma$ .

## Выводы по $^{17}\text{Ne}$

- ▶ В ЛЯР ОИЯИ был проведен эксперимент, направленный на поиск редкой ветви распада состояния  $3/2^-$   $^{17}\text{Ne}$ .
- ▶ Был развит и применен новый метод исследования несвязанных состояний — метод комбинированной массы.
- ▶ В результате была получена новая верхняя граница для  $\Gamma_{2p}/\Gamma_{\gamma} \leq 1.6(3) \times 10^{-4}$ .

# Положения выносимые на защиту I

1. Разработано новое теоретическое описание экспериментально наблюдаемого спектра  $^{10}\text{He}$ , полученного в реакциях выбивания нуклонов из гало-ядер. Показано, что в данных реакциях пик, ранее ассоциируемый с основным состоянием  $^{10}\text{He}$ , является смесью трех состояний:  $1^-$ ,  $0^+$  и  $2^+$ , имеющих максимумы при крайне близких энергиях.
2. При заселении  $^{10}\text{He}$  в реакциях выбивания из гало-ядер наблюдается аномальное поведение спектральных плотностей  $1^-$ ,  $0^+$  и  $2^+$ , которое связано с экстремально большим размером исходных гало-ядер  $^{11}\text{Li}$  и  $^{14}\text{Be}$ .
3. На основании расчетов сделан вывод о том, что действительное положение основного ( $0^+$ ) состояния ядра  $^{10}\text{He}$  при энергии  $\sim 2,1$  МэВ над порогом  $^8\text{He} + n + n$ , а не при энергии  $\sim 1,3$  МэВ, как было принято считать с момента открытия  $^{10}\text{He}$  в 1994 году.
4. Основываясь на полученных результатах анализа спектра состояний ядра  $^{10}\text{He}$  и допусении об одночастичной природе низколежащих состояний  $^9\text{He}$ , получены существенные ограничения на предполагаемую структуру состояний  $^9\text{He}$ . В рамках данного допущения, значительная часть имеющихся экспериментальных данных о состояниях  $^9\text{He}$   $1/2^+$  и  $1/2^-$  не согласуется с ограничениями, вытекающими из экспериментальных данных. В то же время, указанные ограничения не вызывают сомнений в достоверности экспериментальных результатов по спектру  $^9\text{He}$ , полученных в ЛЯР.
5. Рассмотренные в работе эффекты влияния начального состояния не специфичны для системы  $^{10}\text{He}$  и могут проявляться во многих реакциях, заселяющих широкие состояния ядерных систем, находящихся за границей нейтронной стабильности.

## Положения выносимые на защиту II

6. Выполнен анализ данных, полученных в эксперименте, нацеленном на поиск двухпротонного распада первого возбужденного состояния (спин-четность  $J^\pi = 3/2^-$ ) изотопа  $^{17}\text{Ne}$ . Измерен и проанализирован спектр низколежащих состояний  $^{17}\text{Ne}$  (при энергии возбуждения  $E^* < 3$  МэВ), полученный в реакции  $^1\text{H}(^{18}\text{Ne}, d)^{17}\text{Ne}$ . В результате, для первого возбужденного уровня  $^{17}\text{Ne}$  получен новый предел отношения парциальных ширин  $\Gamma_{2p}/\Gamma_\gamma \leq 1,6(3) \times 10^{-4}$ , что примерно в пятьдесят раз ниже литературного значения.
7. Значительное улучшение предела отношения  $\Gamma_{2p}/\Gamma_\gamma$  достигнуто благодаря использованию в эксперименте нового подхода к проведению ядернофизических измерений — метода “комбинированной” массы.
8. Использование метода “комбинированной” массы дает возможность напрямую наблюдать в эксперименте редкие ветви распада с  $\Gamma_{\text{part}}/\Gamma_\gamma \sim 10^{-6} - 10^{-5}$ , что делает этот метод перспективным для решения ряда проблем ядерной физики и ядерной астрофизики. В частности, прямое экспериментальное наблюдение двухпротонного распада первого возбужденного состояния  $^{17}\text{Ne}$ .

# Публикации



Sharov P. G., Egorova I. A., Grigorenko L. V. Anomalous population of  $^{10}\text{He}$  states in reactions with  $^{11}\text{Li}$  // *Phys. Rev. C.* —2014. —Vol. 90. —P. 024610.



Search for  $2p$  decay of the first excited state of  $^{17}\text{Ne}$  / P. G. Sharov, A. S. Fomichev, A. A. Bezbakh et al. // *Phys. Rev. C.* —2017. —Vol. 96. —P. 025807.



Sharov P. G. Search for  $2p$  decay of the first excited state of  $^{17}\text{Ne}$  // Proceedings of the International Symposium on Exotic Nuclei / Ed. by Yu. E. Penionzhkevich, Yu. G. Sobolev. —Singapore : Word Scientific, 2017. —P. 105–110.