



### СПЕКТРОСКОПИЯ ТЯЖЕЛОГО ИЗОТОПА ГЕЛИЯ <sup>9</sup>Не В РЕАКЦИЯХ ПОГЛОЩЕНИЯ ОСТАНОВИВШИХСЯ ПИОНОВ

### Б.А. Чернышев

Национальный Исследовательский Ядерный Университет «МИФИ»

## Тяжелый изотоп гелия <sup>9</sup>Не

<sup>9</sup>Не имеет очень большое отношение числа нейтронов к числу протонов: N/Z = 3.5.

Впервые <sup>9</sup>Не наблюдался в реакции перезарядки пионов <sup>9</sup>Ве $(\pi^-,\pi^+)^9$ Не. Основное состояние оказалось нестабильным относительно нейтронного распада <sup>9</sup>He<sub>g.s.</sub>  $\rightarrow$  <sup>8</sup>He + n ( $S_n = -1.13(10)$  МэВ). Seth K.K., et al. // Phys. Rev. Lett. 1987 58 1930.









T. Al Kalanee, et al, Phys. Rev. C, 2013 88 034301. (GANIL)

Be(<sup>12</sup>B, <sup>8</sup>He +n). <sup>12</sup>B,  $E_{lab} = 45 \text{ MeV/u}$ 





D. Votaw, *et al*, Phys. Rev. C, 2020 **102** 014325. (MSU)

### Основное состояние <sup>9</sup>Не

Стандартная оболочечная модель предсказывает, что в основном состоянии <sup>9</sup>Не последний нейтрон находится на  $p_{1/2}$ -оболочке, и поэтому это состояние имеет спинчетность  $J^P = 1/2^-$ .

В то же время в нескольких экспериментах были получены указания на то, что основное состояние <sup>9</sup>Не представляет собой виртуальное *s*-волновое состояния с длиной рассеяния -4 фм  $\leq a_s \leq$  -20 фм, что соответствует максимуму в спектре возбуждения  $\approx 0.2$  МэВ. В этом случае для <sup>9</sup>Не<sub>g.s.</sub> спин-четность  $J^P = 1/2^+$ .

Следует отметить достаточно низкую статистическую обеспеченность результатов по наблюдению s-волнового состояния

Таким образом, вопрос о спин-четности основного состояния <sup>9</sup>Не (и возможно аномальной четности этого уровня) остается открытым, также как и положение этого состояния.

## Возбужденные состояния <sup>9</sup>Не

Столь же неопределенной является ситуация с возбужденными состояниями <sup>9</sup>Не

Таблица 1. Экспериментальные результаты по возбужденным уровням <sup>9</sup>Не.

Реакция	Г, МэВ	E <sub>x</sub> , МэВ
${}^{9}\text{Be}(\pi^{-},\pi^{+}){}^{9}\text{He}$	<mark>0.42(10)</mark>	<b>2.33(10)</b>
LAMPF, 1987	<mark>0.5(1)</mark>	<mark>4.93(10)</mark>
	<mark>≈0.6</mark>	<mark>≈ 7</mark>
<sup>9</sup> Be( <sup>13</sup> C, <sup>13</sup> O) <sup>9</sup> He		1.15(10)
<b>MPI, 1988</b>		3.80(12)
<sup>9</sup> Be( <sup>14</sup> C, <sup>14</sup> O) <sup>9</sup> He	<mark>0.7(2)</mark>	<b>1.15(10)</b>
MPI, 1995		<b>3.03(10)</b>
		<b>3.98(12)</b>
	<mark>0.7(2)</mark>	<mark>≈ 8</mark>
<sup>14</sup> C(π <sup>-</sup> , p <sup>4</sup> He) <sup>9</sup> He	<mark>≤1</mark>	<mark>≈ 4</mark>
	<mark>≤1</mark>	<mark>≈ 7</mark>
	<mark>≈1.5</mark>	<mark>≈ 12.5</mark>
<sup>14</sup> C(π <sup>-</sup> , d <sup>3</sup> He) <sup>9</sup> He	<mark>≤1</mark>	<mark>≈ 4</mark>
	<mark>≤1</mark>	<mark>≈ 7</mark>
Реакция	Г, МэВ	<i>Е<sub>r</sub></i> , МэВ
<sup>1</sup> H( <sup>11</sup> Li, <sup>8</sup> He + n)X	0.1(6)	1.33(8)
<b>GSI, 2010</b>	0.7(2)	2.42(10)
<sup>2</sup> H( <sup>8</sup> He, p) <sup>9</sup> He	<mark>~2</mark>	2.0(2)
<b>JINR, 2007</b>	<mark>&gt;0.5</mark>	<mark>≥4.2</mark>
<sup>2</sup> H( <sup>8</sup> He, p) <sup>9</sup> He	~0.1	1.2(1)
<b>GANIL</b> , 2013	2.9(4)	3.4(8)
${}^{9}Be({}^{12}B, {}^{8}He + n)X$	>1.3	1.1(7)

#### СПЕКТРОСКОПИЯ ТЯЖЕЛОГО ИЗОТОПА ГЕЛИЯ <sup>9</sup>Не В РЕАКЦИЯХ ПОГЛОЩЕНИЯ ОСТАНОВИВШИХСЯ ПИОНОВ

### <sup>11</sup>B(π<sup>-</sup>, pp)<sup>9</sup>He

<sup>14</sup>C(π<sup>-</sup>, p<sup>4</sup>He)<sup>9</sup>He

<sup>14</sup>C(π<sup>-</sup>, d<sup>3</sup>He)<sup>9</sup>He

Yu.B.Gurov, et al. Bull. Russian Ac. Sci.: Physics, 2020, Vol. 84, p. 879.

#### Предыдущие исследования

Сверхтяжелые изотопы водорода <sup>4-7</sup>Н Тяжелые изотопы гелия <sup>5-8</sup>Не Тяжелые изотопы лития <sup>9-12</sup>Li Поглощение остановившихся пионов ядрами – Инструмент для образования нейтронно-избыточных ядер

# $\pi^-$ + <sup>9</sup>Be, <sup>10,11</sup>B, <sup>12</sup>C $\rightarrow$ exotic nuclei + X



**Cluster absorption** 

- $\pi^- + {}^4\text{He} \rightarrow \text{nt}$ 
  - $\pi^{-} + {}^{4}\text{Li} \rightarrow \text{pt}$

 $\pi^{-}$  + <sup>4</sup>Be(Tetraproton)  $\rightarrow$  p <sup>3</sup>He

### Поглощение остановившихся пионов ядрами – Инструмент для образования нейтронно-избыточных ядер

Трех-частичные каналы



Поглощение остановившихся пионов ядрами – Инструмент для образования нейтронно-избыточных ядер Преимущества и недостатки

Преимущества метода:

Формирование остаточных ядер с большим избытком нейтронов N >> Z

Отсутствие погрешностей, обусловленных энергетическим разрешением и угловой расходимостью пучка  $E_0 = M_A + m_{\pi} - /B_{\pi}/;$  P = 0

Исследование широкой области энергий возбуждения  $0 \le E_r \le 40 \; \mathrm{MeV}$ 

Возможность исследовать большое число ядер в одном экспериментальном сеансе

Недостатки метода:

Отсутствие надежных теоретических моделей описания исследуемых реакций

Определение квантовых чисел исследуемых состояний весьма затруднительно

# Layout of spectrometer (LAMPF)

Beam	Target	Sizes and Impurities	Stop rate, 1/s	SCD- telescopes	Threshold(MeV)
Eπ= 30 MeV (Δp/p=±1%)	<sup>9</sup> Be <sup>10,11</sup> B <sup>12,14</sup> C	Thickness – 25 mg/sm <sup>2</sup> , (135μm), diameter – 26 mm,	~ 6·10 <sup>4</sup>	2 Si(Au) -T=100, 450μm 14 Si(Li) -T=3 mm, Wd≈0.1mm S=8 mm <sup>2</sup> Ω=55÷15 mster	$E_{p} \approx 3.5,$ $E_{d} \approx 4,$ $E_{t} \approx 4.5,$ $E_{He} \approx 15.$



•Gornov M. G. et al. // Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res. A 2000. V. 446. P. 461.

## $^{14}C(\pi^-, d^3He)^9He$



<sup>14</sup>C(π<sup>-</sup>, p<sup>4</sup>He)<sup>9</sup>He



# <sup>11</sup>B(π<sup>-</sup>, pp)<sup>9</sup>He



<i>Е</i> , МэВ	Г, МэВ
-	-
1,2 ± 0,3	≤ 0, 5
2,2 ± 0,3	≤ 0,5
4,4 ± 0,4	$1,0 \pm 0,5$
10,5 ± 0,2	1,5 ± 0,5

		Гсинции
<b>2.33(10)</b>	<mark>0.42(10)</mark>	${}^{9}\text{Be}(\pi^{-},\pi^{+}){}^{9}\text{He}$
<mark>4.93(10)</mark>	<b>0.5(1)</b>	LAMPF, 1987
<mark>≈ 7</mark>	<mark>≈0.6</mark>	
1.15(10)		<sup>9</sup> Be( <sup>13</sup> C, <sup>13</sup> O) <sup>9</sup> He
3.80(12)		<b>MPI, 1988</b>
<b>1.15(10)</b>	0.7(2)	<sup>9</sup> Be( <sup>14</sup> C, <sup>14</sup> O) <sup>9</sup> He
<b>3.03(10)</b>		MPI, 1995
<b>3.98(12)</b>		
<mark>≈ 8</mark>	0.7(2)	
$1,2 \pm 0,3$	$\le$ 0, 5	<sup>11</sup> B(π <sup>-</sup> ,pp) <sup>9</sup> He
$2,2 \pm 0,3$	≤ 0,5	
4,4 ± 0,4	$1,0 \pm 0,5$	
$10,5 \pm 0,2$	$1,5 \pm 0,5$	
<mark>≈ 4</mark>	<mark>≤1</mark>	<sup>14</sup> C(π <sup>-</sup> , p <sup>4</sup> He) <sup>9</sup> He
<mark>≈ 7</mark>	<mark>≤1</mark>	
<mark>≈ 12.5</mark>	<mark>≈1.5</mark>	
<mark>≈ 4</mark>	<mark>≤1</mark>	<sup>14</sup> C(π <sup>-</sup> , d <sup>3</sup> He) <sup>9</sup> He
<mark>≈ 7</mark>	<mark>≤1</mark>	
<i>Е</i> <sub><i>r</i></sub> , МэВ	Г, МэВ	Реакция
1.33(8)	0.1(6)	${}^{1}\mathrm{H}({}^{11}\mathrm{Li}, {}^{8}\mathrm{He} + n)\mathrm{X}$
2.42(10)	0.7(2)	GSI, 2010
2.0(2)	~2	<sup>2</sup> H( <sup>8</sup> He, p) <sup>9</sup> He
<mark>≥ 4.2</mark>	<mark>&gt;0.5</mark>	<b>JINR, 2007</b>
1.2(1)	~0.1	<sup>2</sup> H( <sup>8</sup> He, p) <sup>9</sup> He
3.4(8)	2.9(4)	<b>GANIL</b> , 2013
1.1(7)	>1.3	${}^{9}Be({}^{12}B, {}^{8}He + n)X$

# Заключение

•Структура уровней тяжелого изотопа гелия <sup>9</sup>Не наблюдалась в трех реакциях поглощения остановившихся пионов

•Во всех реакциях указаний на существование sволнового виртульного состояния вблизи порога обнаружено не было

•В реакции <sup>11</sup>В( $\pi^-$ ,pp)Х впервые наблюдалось узкое состояние с рекордной энергией возбуждения  $E_r = 10.5(2)$  MeV.

