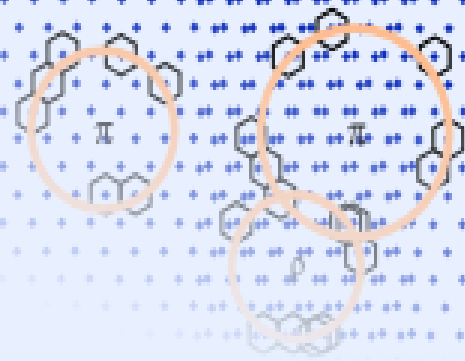




Десятые
Черенковские
чтения

Новые методы в экспериментальной ядерной физике и физике частиц



Москва, ФИАН, 18 апреля 2017 г.

Б.А.Чернышев¹, Ю.Б. Гуров^{1,2}, С. В. Лапушкин¹,
В. Г. Сандуковский²,

*Исследование легких нейтронно-избыточных ядер с
помощью многослойного полупроводникового
спектрометра*

1 – Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

2 – Объединенный институт ядерных исследований

Современные регистрирующие комплексы должны одновременно обеспечивать высокую точность корреляционных измерений частиц и ядер с энергиями до нескольких сотен МэВ/нуклон, идентифицировать новые ядерные состояния и измерять их энергетические уровни с разрешением $\sim (0,1-1,0)$ МэВ.

Решение этих задач требует развитие новых экспериментальных методик и создание спектрометрической аппаратуры с соответствующими характеристиками. С точки зрения достижения высокого энергетического разрешения многослойные системы на основе полупроводниковых детекторов (п.п.д.-телескопы) значительно превосходят установки, состоящие из сцинтилляционных и газовых детекторов

Телескопические п.п.д.

Кремниевые поверхностно-барьерные детекторы (Si(Au)-п.п.д.)

с толщинами от 10 мкм до 1 мм, предназначенные в основном для идентификации частиц

Кремниевые литий-дрейфовые детекторы (Si(Li) –п.п.д.) с

толщинами ~ 3 мм

Детекторы из сверхчистого германия (HPGe -п.п.д.)

с толщинами 5 -10 мм

}

Основные элементы при регистрации длиннопробежных заряженных частиц с энергией $E \sim 100$ МэВ/нуклон

HPGe-детекторы

Преимущества – большая толщина чувствительного объема; более высокая тормозная способность.

Недостатки – необходимость охлаждения до температуры жидкого азота.

Si -детекторы

Преимущества – эксплуатация при комнатной температуре; возможность создания многоплечевых установок; возможность изготовления тонких п.п.д. для регистрации ядерных фрагментов и пионов низких энергий.

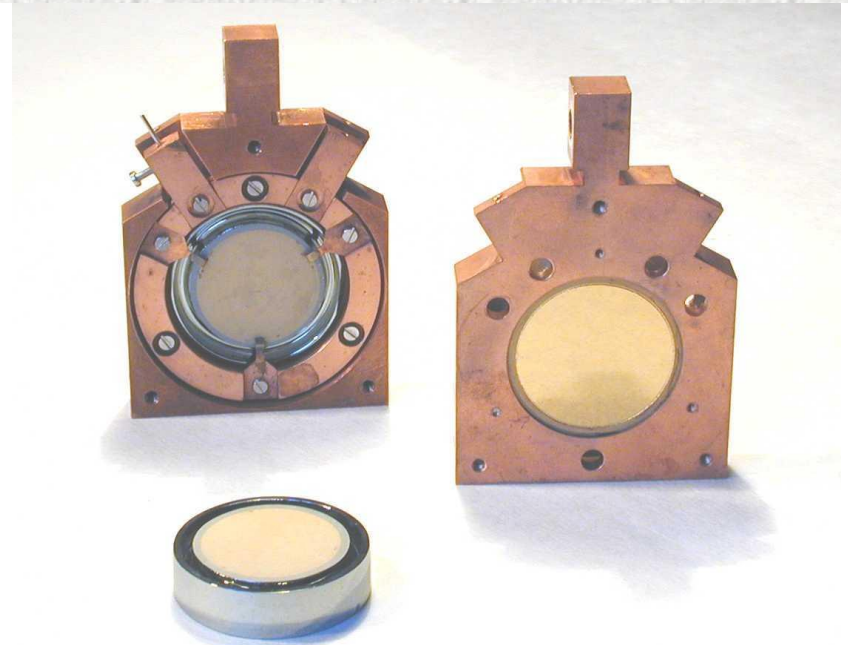
Телескопические п.п.д.

Результаты технологических разработок:

- реализация методов изготовления телескопических детекторов, которые позволили минимизировать их «мертвые» слои;
- изготовлен большой набор детекторов из кремния и сверхчистого германия, которые успешно эксплуатировались в течение длительных ускорительных сеансов.



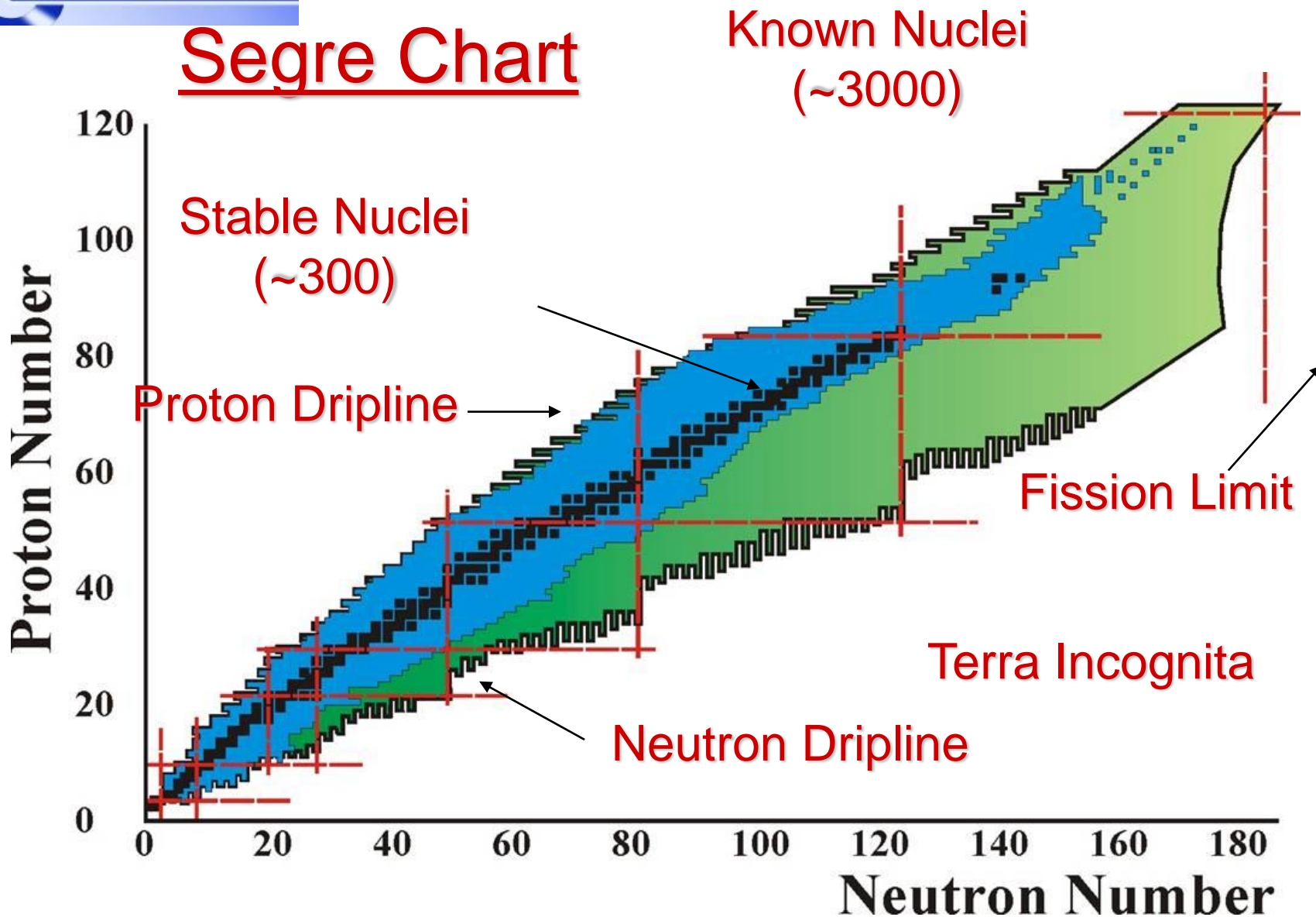
Si-п.п.д.



HPGe-п.п.д.



Segre Chart



Исследование свойств экзотических легких ядер с большим избытком нейтронов – одно из основных направлений развития современной ядерной физики

Мультинейтронные системы–

2n (динейтрон), 3n (тринейтрон), 4n (тетранейтрон),...

Сверхтяжелые изотопы водорода– ^4H , ^7H

Тяжелые изотопы гелия – ^5He , $^6,7\text{He}$, ^8-10He

Тяжелые изотопы лития – ^8-12Li

Тяжелые изотопы бериллия – $^{11-13}\text{Be}$

Энергии возбуждения $0 \leq E_x \leq 40$ МэВ



Десятые
Черенковские
чтения

Методы синтеза нейтронно-избыточных изотопов легких элементов

Реакции деления

1 - Ю.Э.Пенионжкевич, Р.Г.Калпакчиева,
Легкие ядра у границы нейтронной
стабильности, Дубна - 2016

Реакции фрагментации ядра мишени

Реакции фрагментации бомбардирующего иона

Реакции передачи

Реакции с тяжелыми ионами, сопровождающиеся
эмиссией быстрых частиц

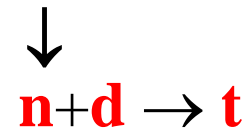
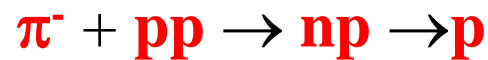
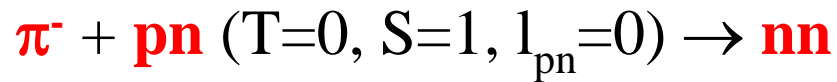
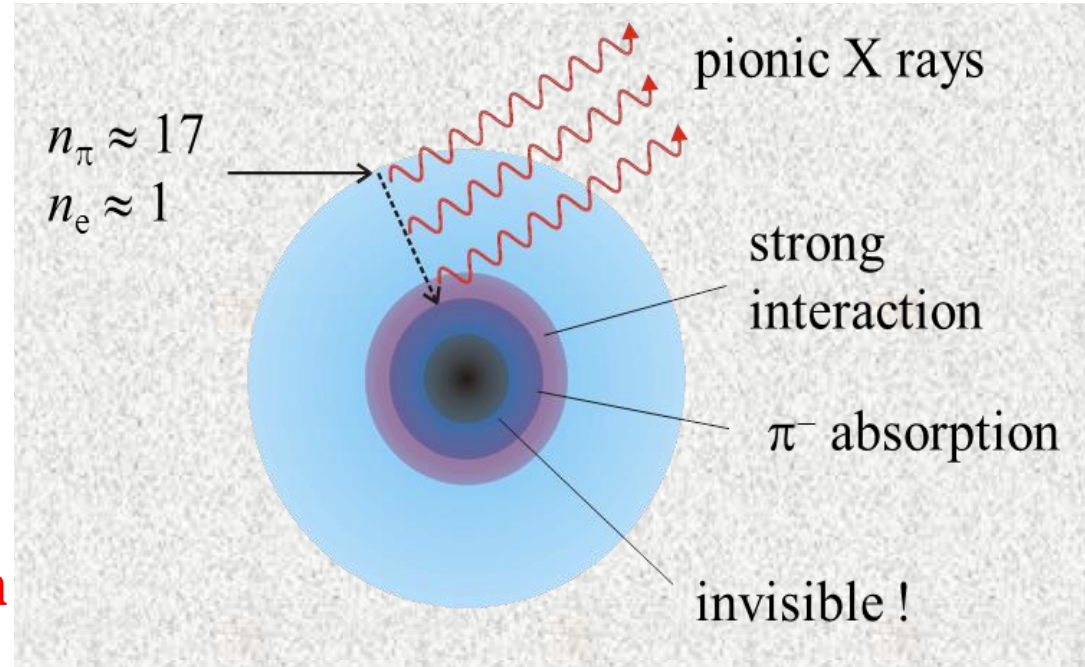
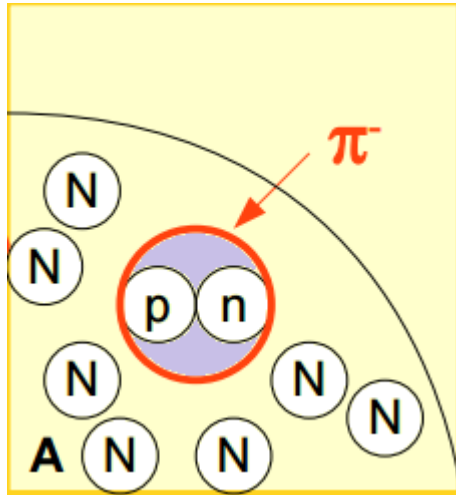
Глубоконеупругие реакции
передачи, квазиделение

Реакции перезарядки, включая
перезарядку пионов

**Реакция поглощения остановившихся
отрицательных пионов**



Механизмы поглощения остановившихся пионов



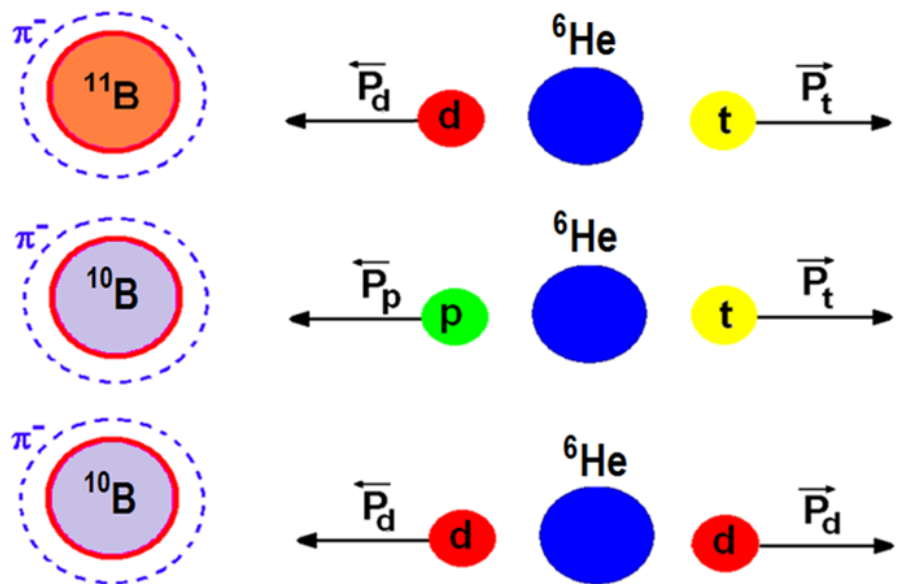
Кластерное
поглощение



Вторичный подхват

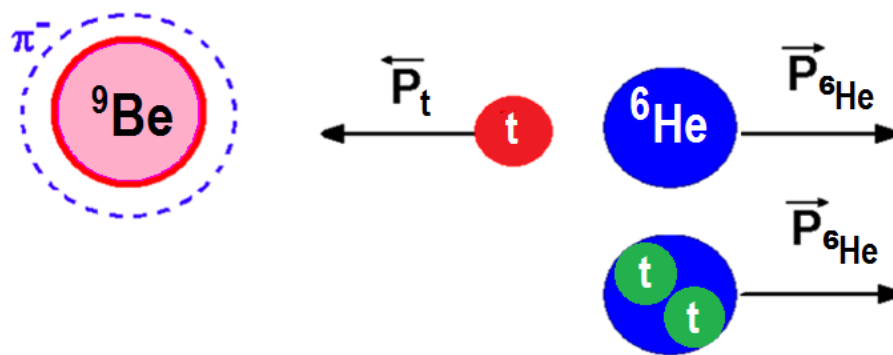
Поглощение пионов - инструмент образования нейтронно-избыточных ядерных состояний

Трех-частичные каналы

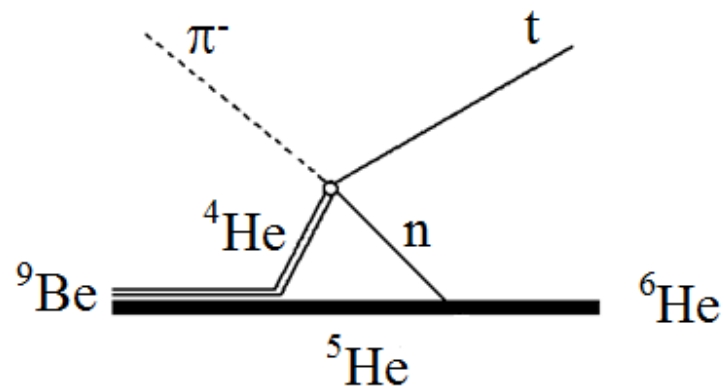


$P_R \sim 100 \text{ МэВ/с}$

Двух-частичные каналы



$P_R \sim 500 \div 700 \text{ МэВ/с}$



Остаточные ядра формирующиеся при поглощении π^- -мезонов ядрами

Частицы	<i>p</i>	<i>d</i>	<i>t</i>	^3He	^4He
Инклюзив	^8He	^7He	^6He	^6H	^5H
<i>p</i>	^7H	^6H	^5H	^5n	^4n
<i>d</i>	^6H	^5H	^4H	^4n	^3n
<i>t</i>	^5H	^4H	^3H	^3n	^2n
^3He	^5n	^4n	^3n	-	-
^4He	^4n	^3n	^2n	-	-

^9Be

^{11}B

Частицы	<i>p</i>	<i>d</i>	<i>t</i>	^3He	^4He
Инклюзив	^{10}Li	^9Li	^8Li	^8He	^7He
<i>p</i>	^9He	^8He	^7He	^7H	^6H
<i>d</i>	^8He	^7He	^6He	^6H	^5H
<i>t</i>	^7He	^6He	^5He	^5H	^4H
^3He	^7H	^6H	^5H	^5n	^4n
^4He	^6H	^5H	^4H	^4n	^3n

Поглощение пионов - инструмент образования нейтронно-избыточных ядерных состояний

Преимущества и недостатки

Преимущества метода :

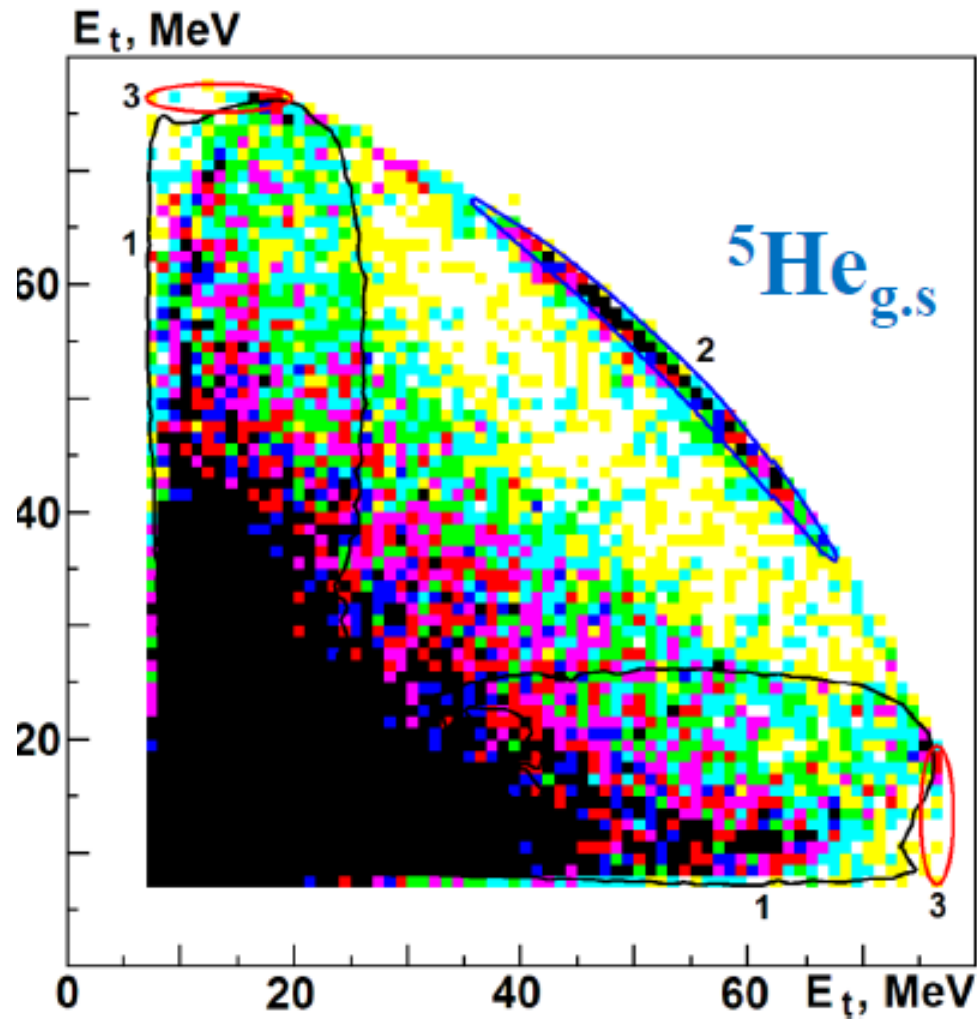
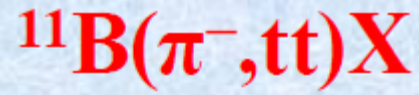
- Образование остаточных ядер с большим избытком нейтронов $N \gg Z$
- Отсутствие погрешностей, обусловленных энергетическим разрешением и угловой расходимостью пучка
$$E_0 = M_A + m_\pi - |B_\pi|; \quad P = 0$$
- Большая область исследуемых энергий возбуждений $0 \leq E_x \leq 40 \text{ МэВ}$
- Возможность исследования широкой области ядер в одном экспериментальном сеансе

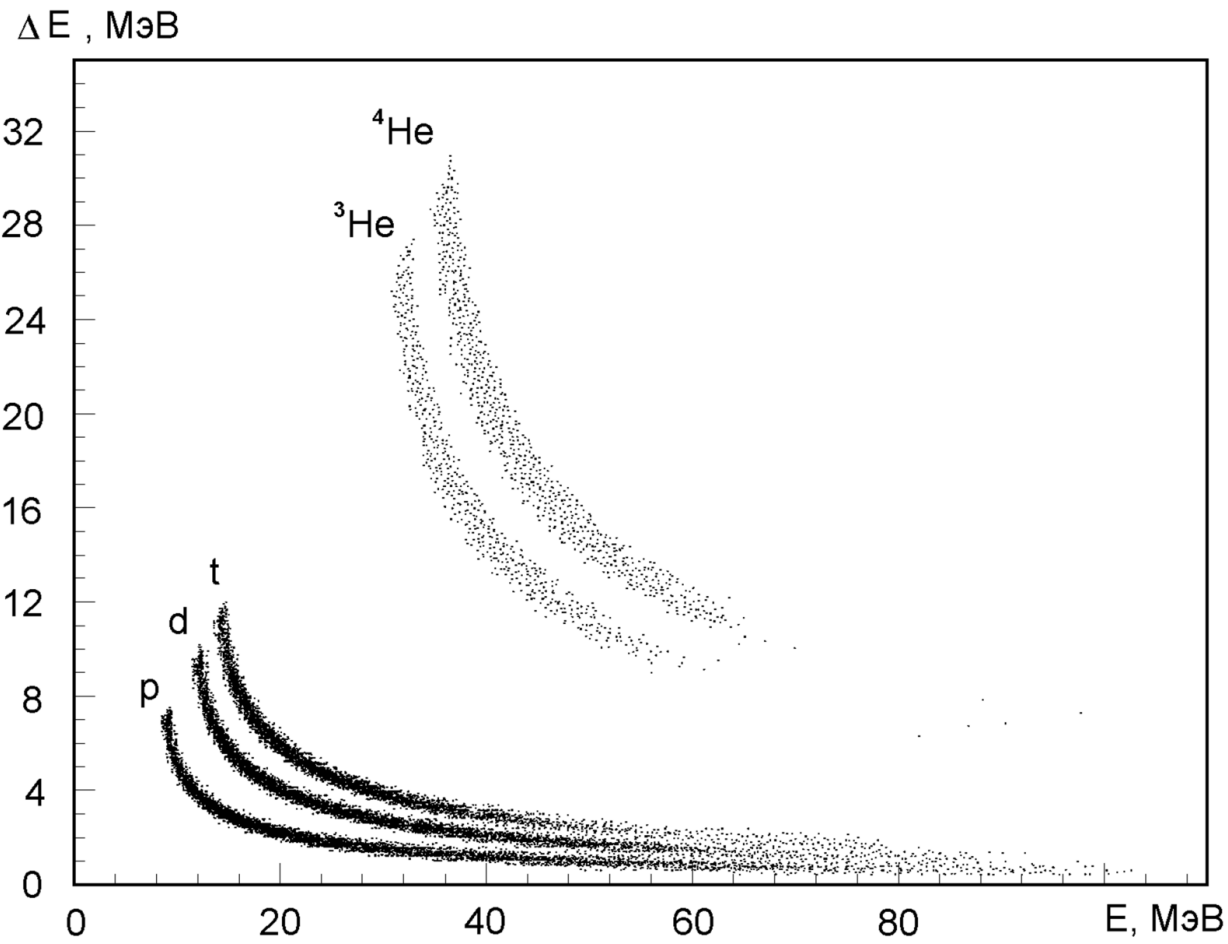
Недостатки метода :

- Отсутствие надежных теоретических моделей, которые описывают исследуемую реакцию
- Затруднения в определении квантовых чисел исследуемых состояний



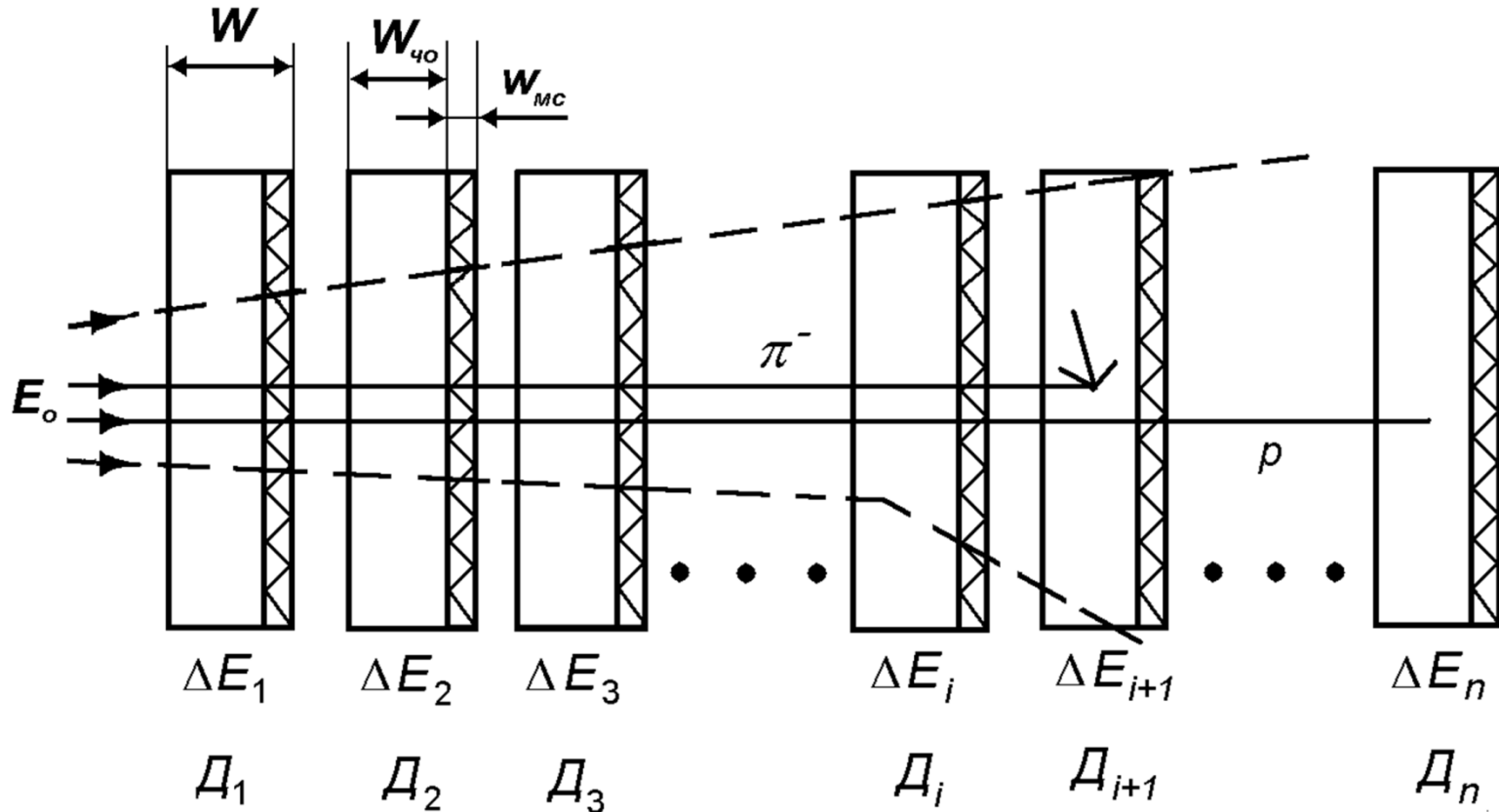
Пример диаграммы Далица







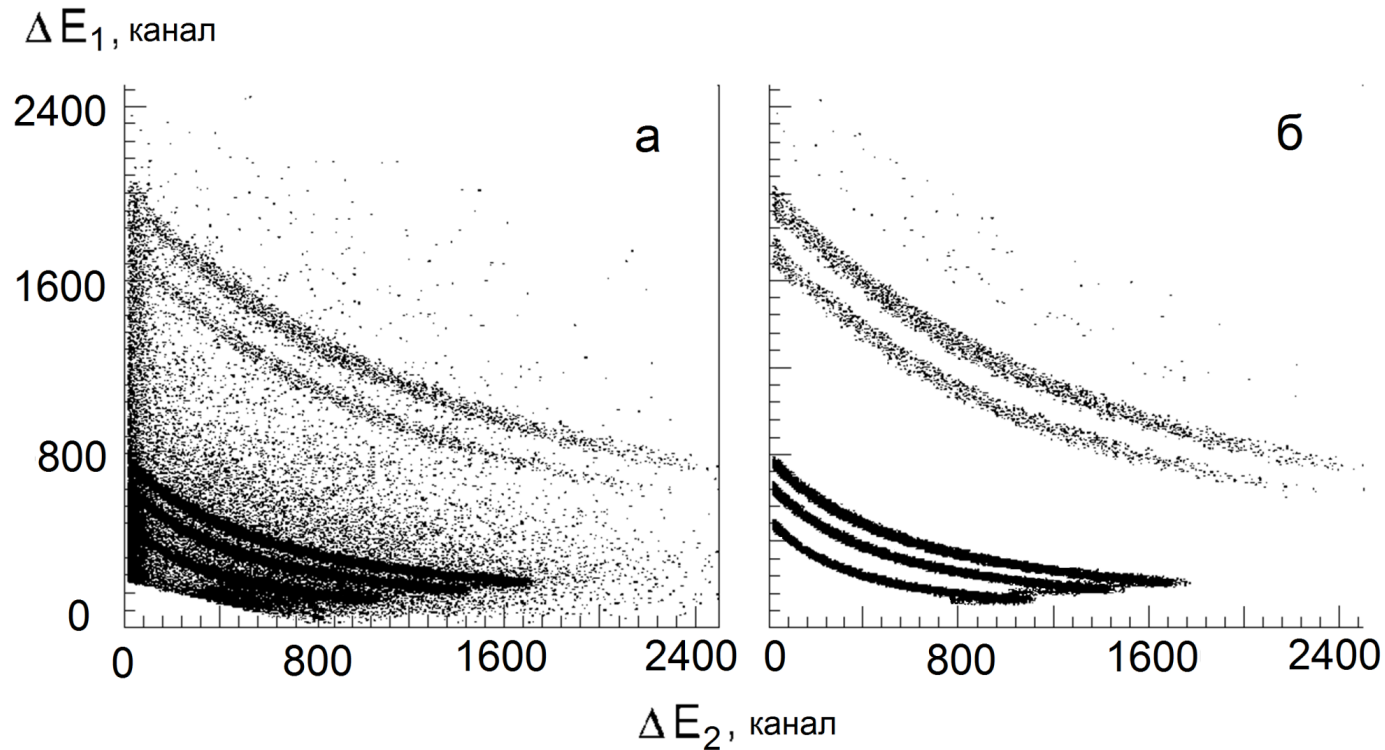
Структурная схема многослойного п.п.д.-телескопа



$$E_0 = \sum_i^n (\Delta E_i + \bar{\Delta}_{iMC})$$



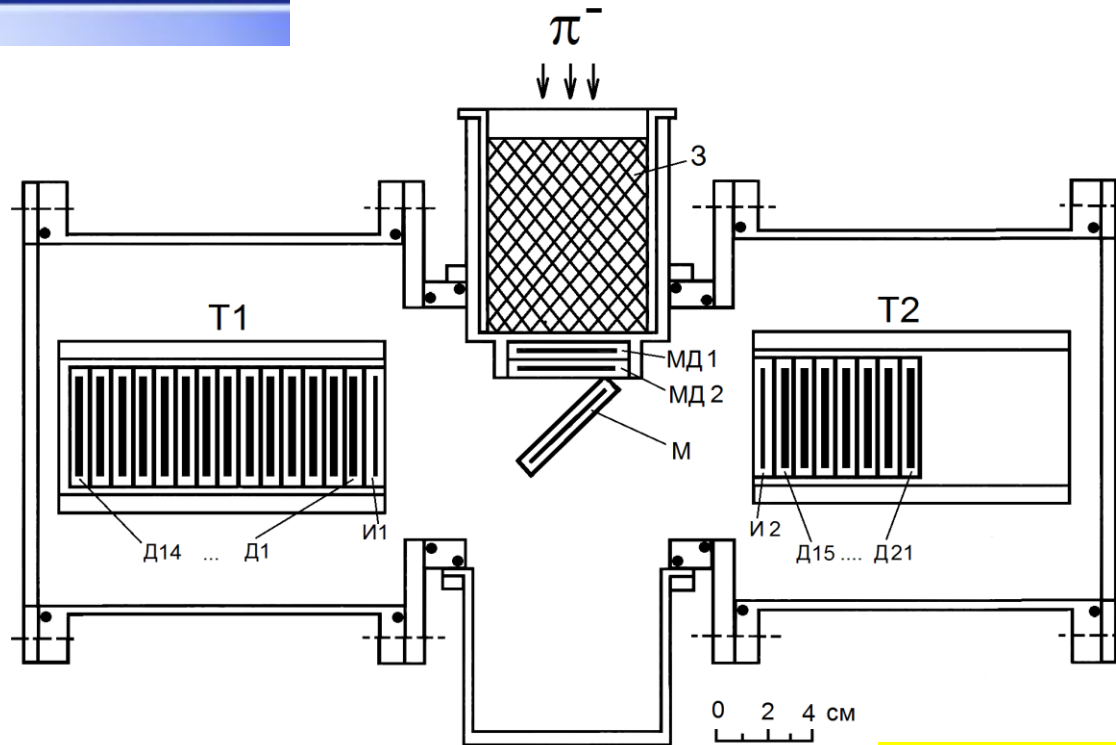
Распределение энерговывделений в идентификаторе (ΔE_1) и Si(Li)-п.п.д. (ΔE_2) при регистрации частиц от захвата $\pi^-^9\text{Be}$



а - до обработки, по критерию χ^2 для гипотезы остановки в 1-ом Si(Li)-п.п.д. телескопа
б - после прохождения процедуры отбраковки



Схема двухплечевого п.п.д.-спектрометра для измерений в ПИЯФ



п.п.д.- телескоп: Si(Au)-п.п.д. с $W = 200$ мкм,
14 (7) Si(Li)-п.п.д. с $W \sim 3$ мм ($w_{MC} \sim 350$ мкм)
 $E_{p,d,t} - 10 - 100$ МэВ

T1 и T2 – п.п.д.-телескопы

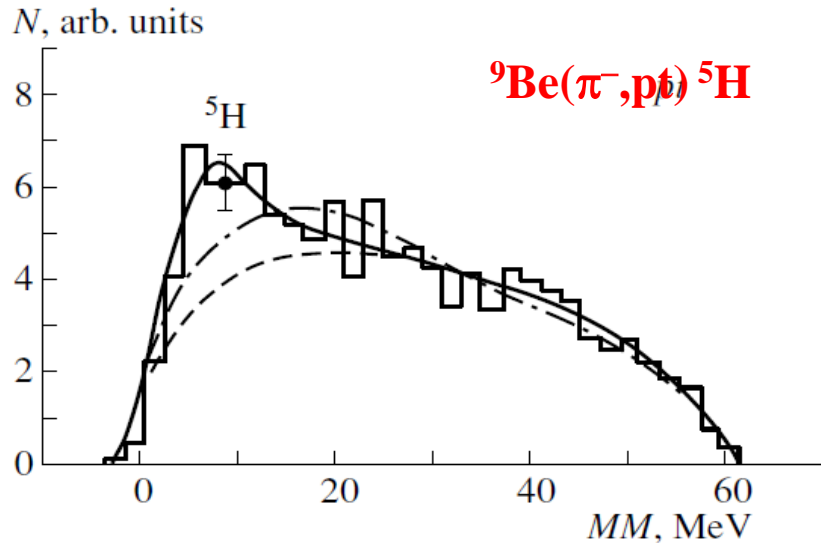
3 – графитовый замедлитель

М – мишень, пластины $\varnothing 32$ мм, толщиной ~ 100 мкг/см²

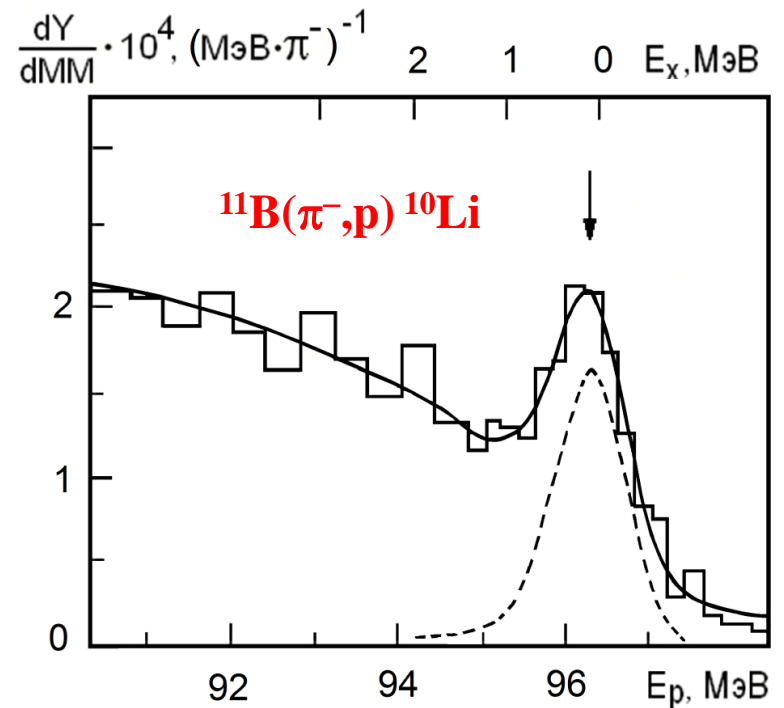
МД1 и МД2 – мониторные детекторы

Первые наблюдения ^5H и ^{10}Li

Thoennessen M. Discovery of the Isotopes with $Z \leq 10$ // *Atom. Data and Nucl. Data Tabl.* 2012. 98. 43.



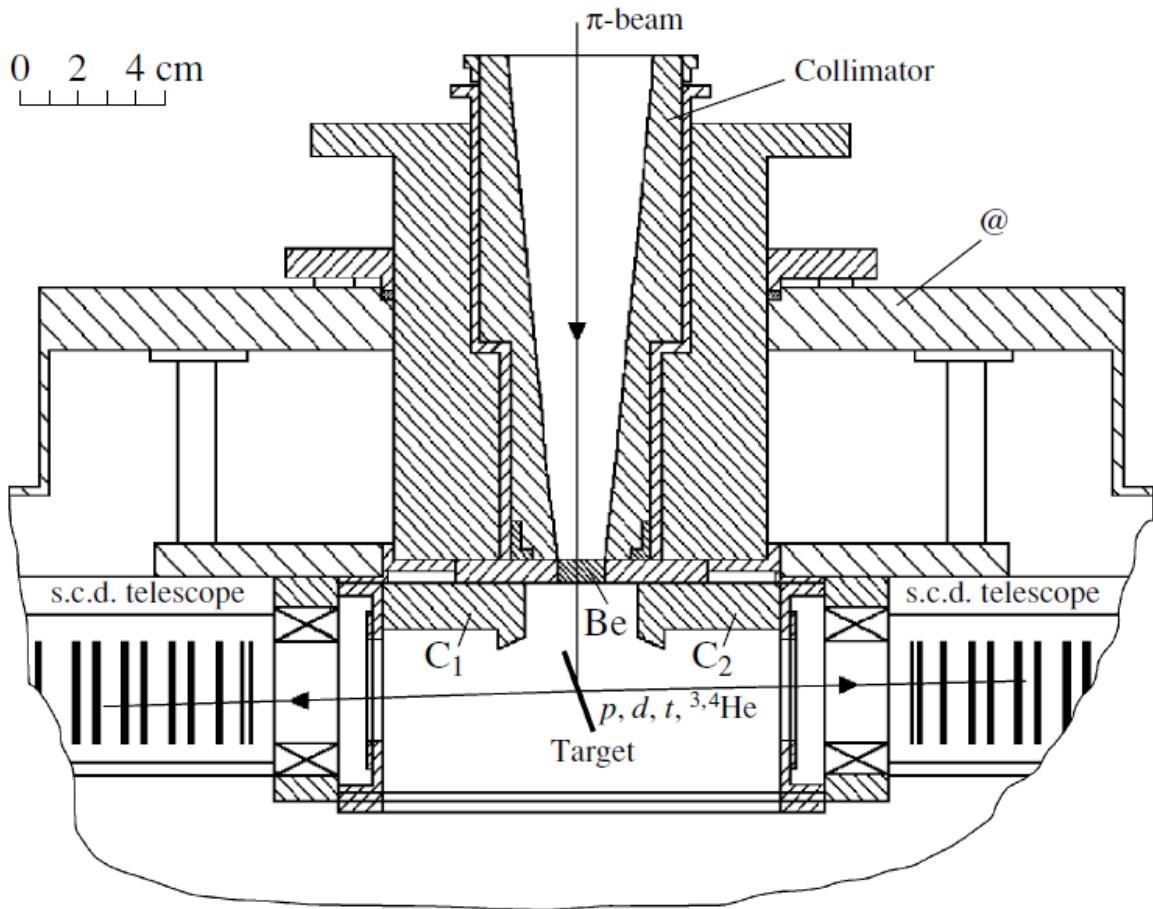
Gornov M.G. et al. // *Nucl. Phys. A.* 1991. 531. 613.



Амелин А.И. и др. // *ЯФ.* 1990. Т. 52. 1231.

Схема спектрометра (LANL)

Пучок	Мишень	Размеры и примеси	Скорость остановок, 1/с	ППД- Телескопы	Пороги(МэВ)
$E_{\pi} = 30$ МэВ ($\Delta p/p = \pm 1\%$)	${}^9\text{Be}$ ${}^{10,11}\text{B}$ ${}^{12,14}\text{C}$	Толщина – 25 мг/см ² , (135μм) диаметр – 26 мм, 23% ${}^{12}\text{C}$ в ${}^{14}\text{C}$	$\sim 6 \cdot 10^4$	2 Si(Au) -T=100, 450μм 14 Si(Li) -T= 3 мм, Wd≈0.1мм S= 8 см ² Ω=55÷15 мстер	$E_p \approx 3.5,$ $E_d \approx 4,$ $E_t \approx 4.5,$ $E_{\text{He}} \approx 15.$





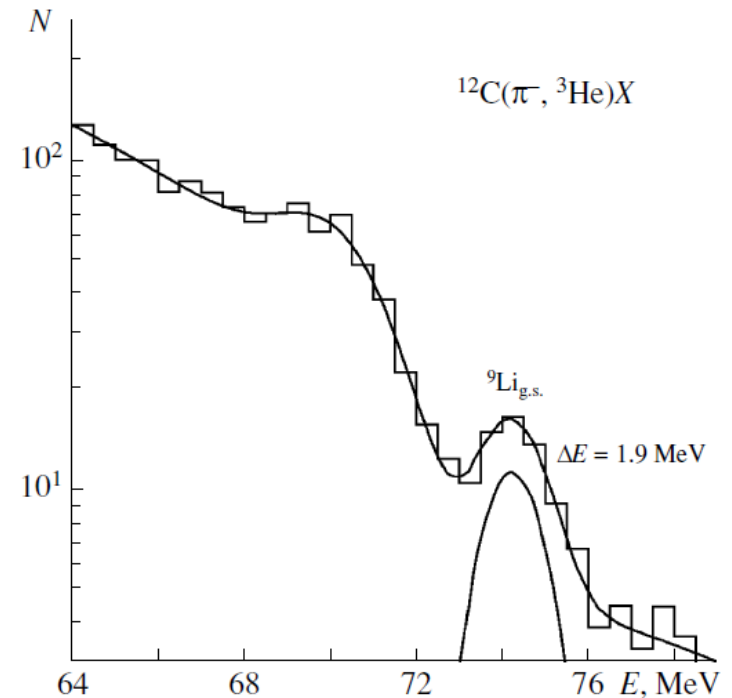
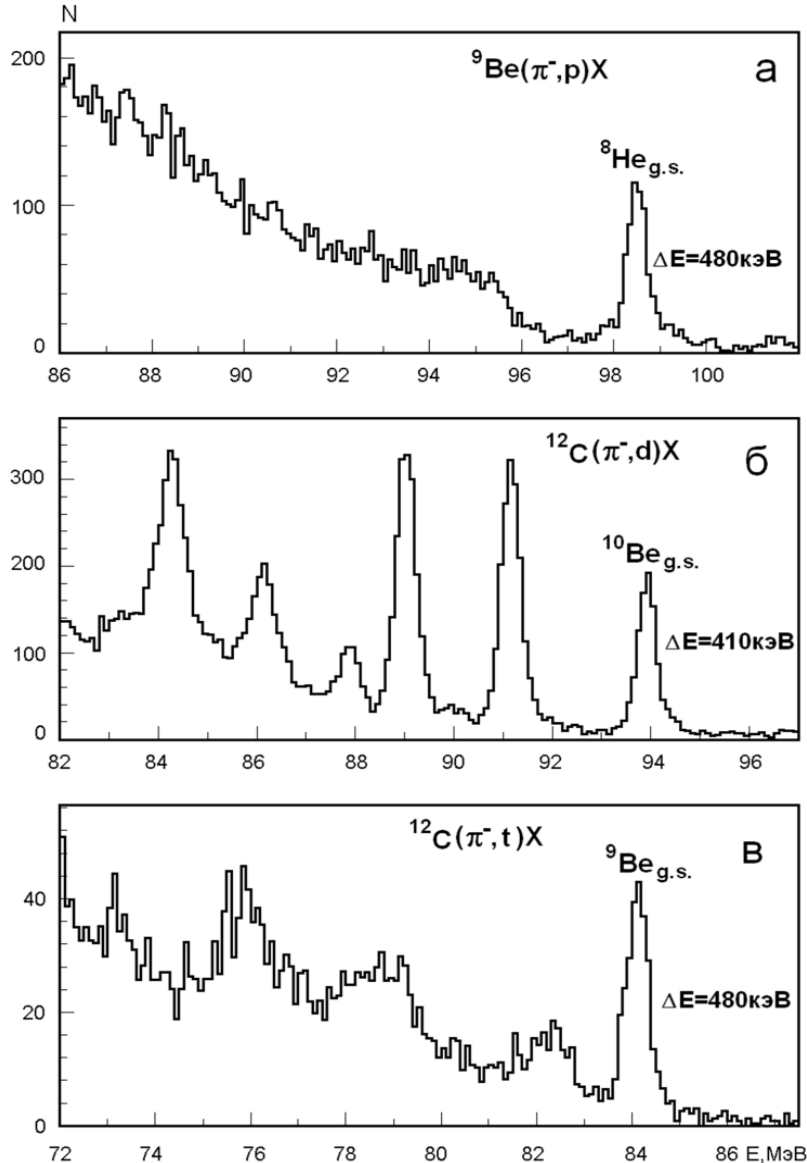
Расчетные и экспериментальные значения энергетического разрешения п.п.д.-телескопа (FWHM) и их составляющие

Энергия частицы, МэВ	$E(p) = 98.5$	$E(d) = 93.9$	$E(t) = 84.1$
Вклады в $\Delta E_{\text{рас}}$, кэВ:			
$\Delta E_{\text{миш}}$	110	230	377
$\Delta E_{\text{мс}}$	306	237	200
$\Delta E_{\text{эл}}$	327	219	183
$\Delta E_{\text{рас}}$, кэВ	462	400	466
$\Delta E_{\text{экс}}$, кэВ	480 ± 25	410 ± 15	480 ± 30

Энергетическое разрешение

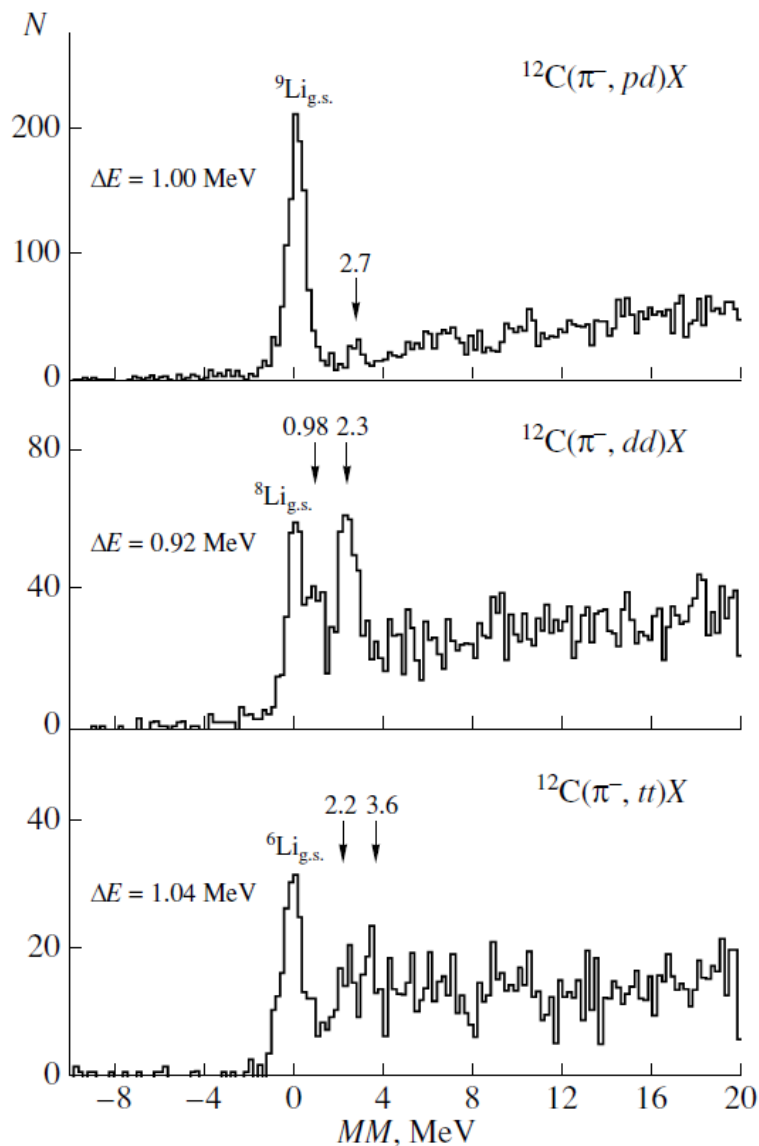
Однозарядные частицы

Двухзарядные частицы

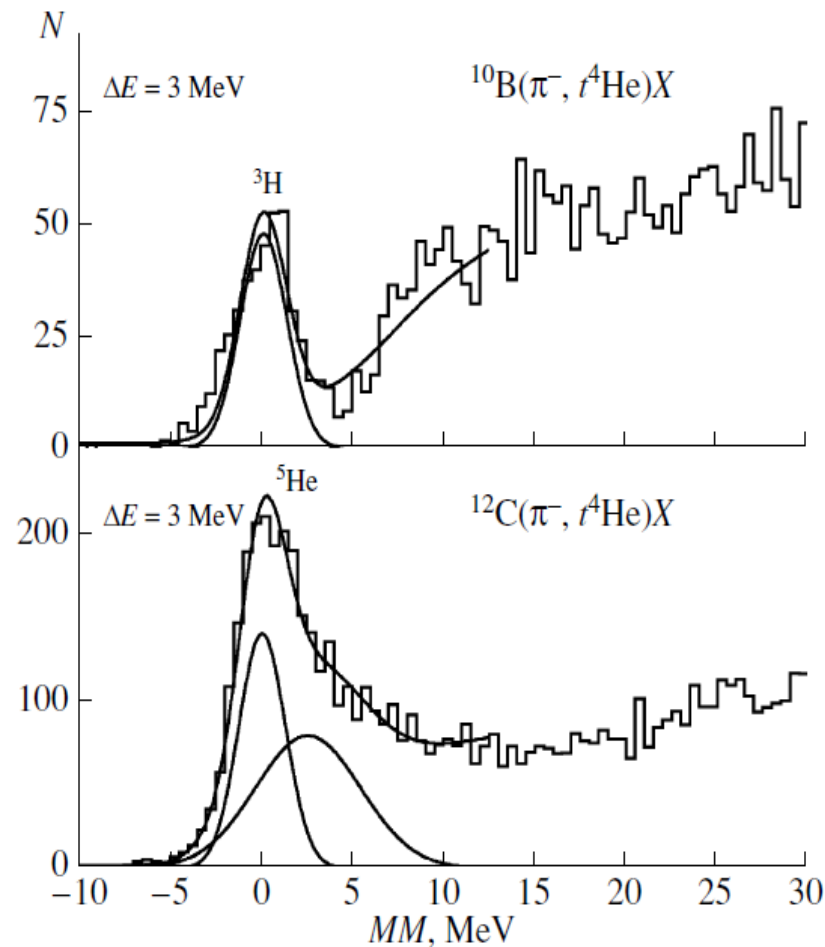


$$\delta E(p, d, t) \leq 0.45 \text{ МэВ}$$

Однозарядные пары



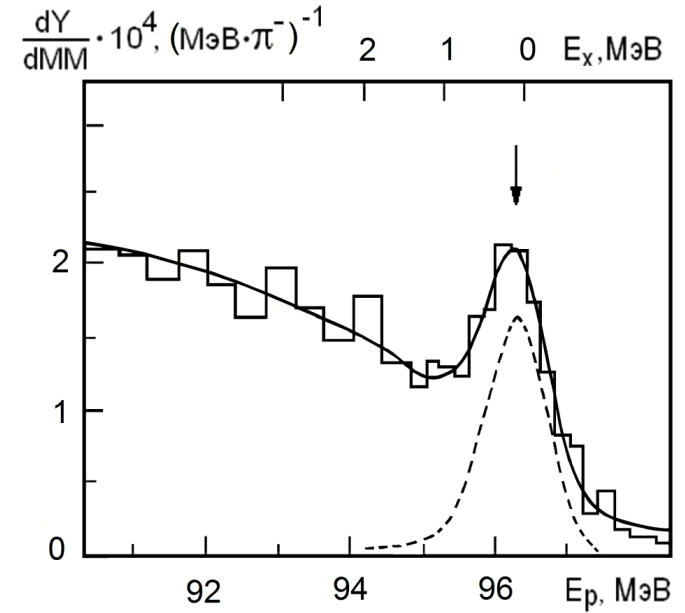
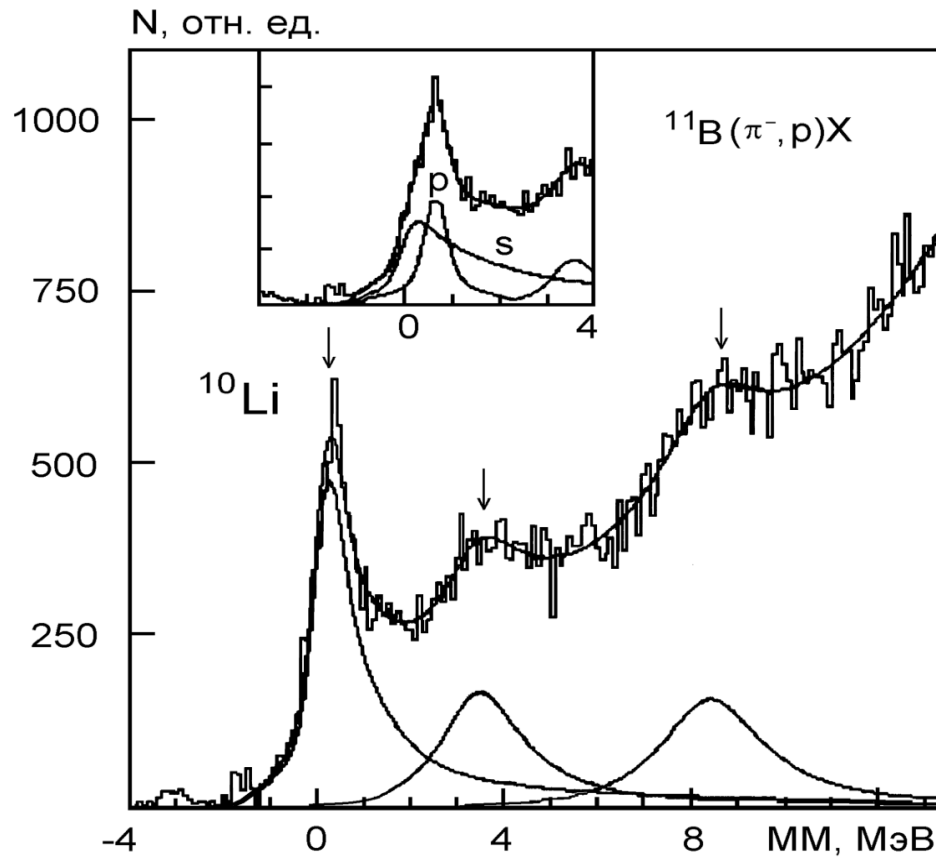
Однозарядные и двухзарядные пары



$$\delta MM(p, d, t) \leq 1 \text{ МэВ}$$

Спектр возбуждений изотопа ^{10}Li

LANL



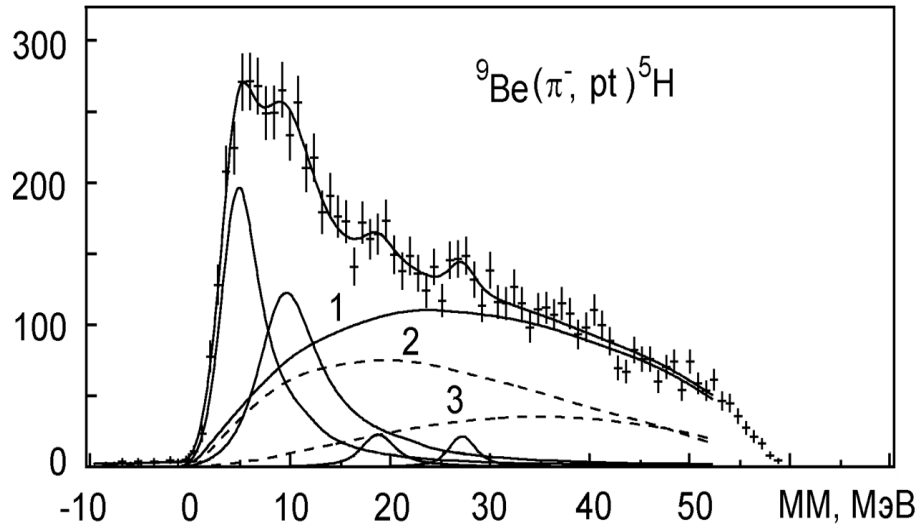
ПИЯФ

Сверхтяжелый изотоп водорода ${}^5\text{H}$

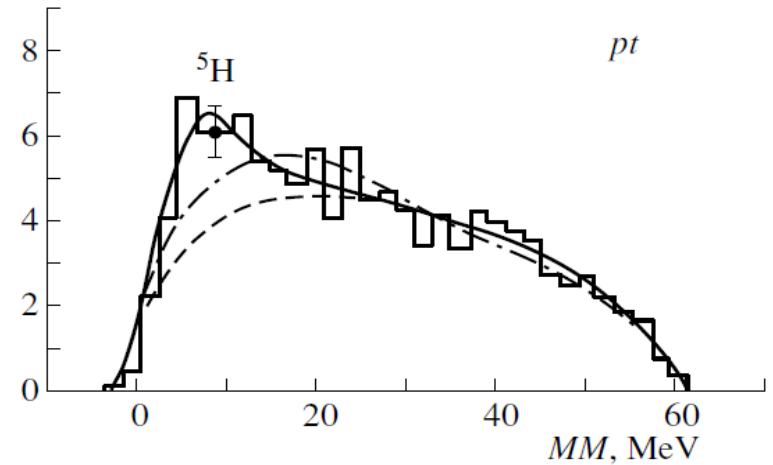
Thoennessen M. Discovery of the Isotopes with $Z \leq 10$ // *Atom. Data and Nucl. Data Tabl.* 2012. **98**. 43.

Gornov M.G. et al. // *Nucl. Phys. A.* 1991. **531**. 613.

N, отн. ед.



N, arb. units



${}^9\text{Be}(\pi^-, pt)\text{X}$, ${}^9\text{Be}(\pi^-, dd)\text{X}$

${}^{10}\text{B}(\pi^-, p^4\text{He})\text{X}$, ${}^{10}\text{B}(\pi^-, d^3\text{He})\text{X}$,
 ${}^{11}\text{B}(\pi^-, d^4\text{He})\text{X}$ and ${}^{11}\text{B}(\pi^-, t^3\text{He})\text{X}$

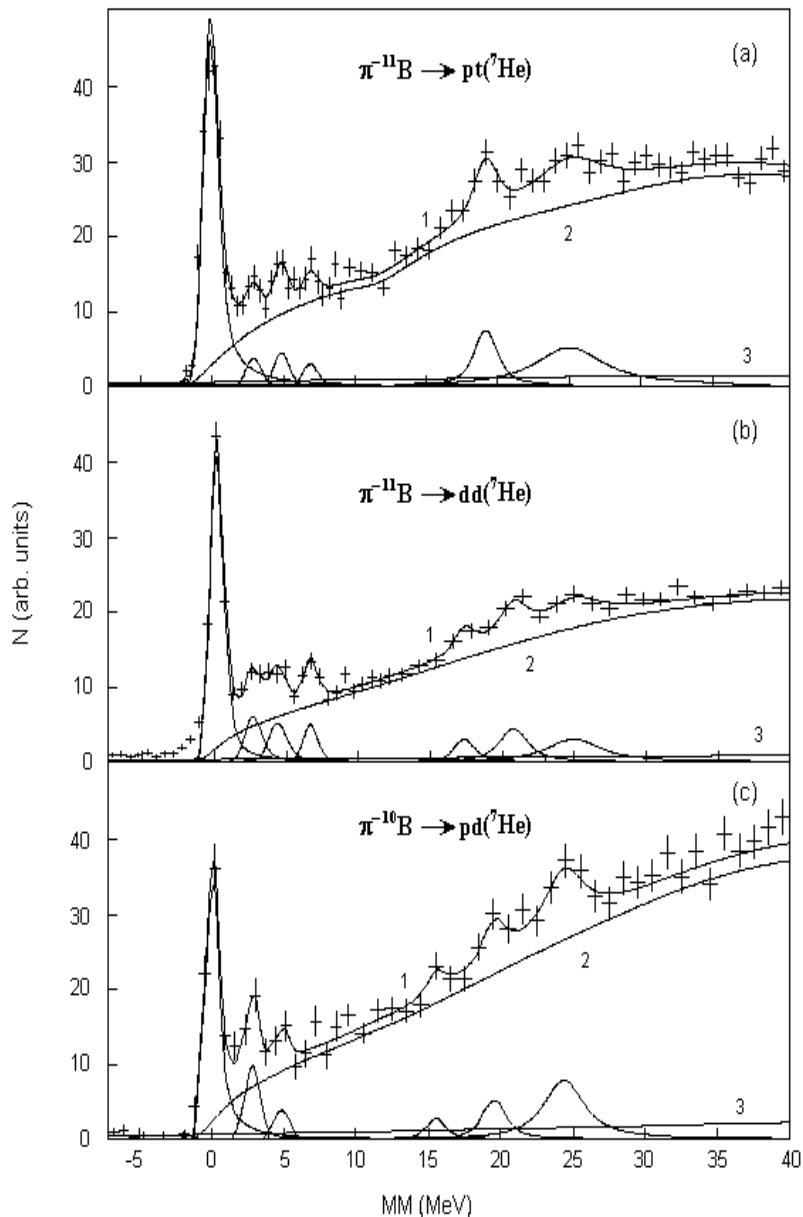
${}^6\text{Li}(\pi^-, p)\text{X}$, ${}^7\text{Li}(\pi^-, d)\text{X}$ and ${}^9\text{Be}(\pi^-, {}^4\text{He})\text{X}$

Reaction channel			
${}^9\text{Be}(\pi^-, pt){}^5\text{H}$		${}^9\text{Be}(\pi^-, dd){}^5\text{H}$	
E_r , MeV	Γ , MeV	E_r , MeV	Γ , MeV
5.2(3)	5.5(5)	6.1±0.4	4.5±1.2
10.4(3)	7.4(6)	11.4±0.7	5±1
18.7(5)	3.9(2.0)	18.3±0.5	5.5±1.7
26.8(4)	3.0(1.4)	26.5±1.0	6±3

Reaction	E_r , MeV	Γ , MeV	
$p({}^6\text{He}, pp){}^5\text{H}$	1.7±0.3	1.9±0.4	RIKEN
$t(t, p){}^5\text{H}$	1.8±0.1	≤ 0.5	JINR
	2.7±0.1	≤ 0.5	
$t(t, p){}^5\text{H}$	≈ 1.8	≈ 1.3	JINR
	~ 5-6		
	~ 5-6		
${}^{12}\text{C}({}^6\text{He}, 2nt)\text{X}$	~ 3.0	~ 6.0	GSI



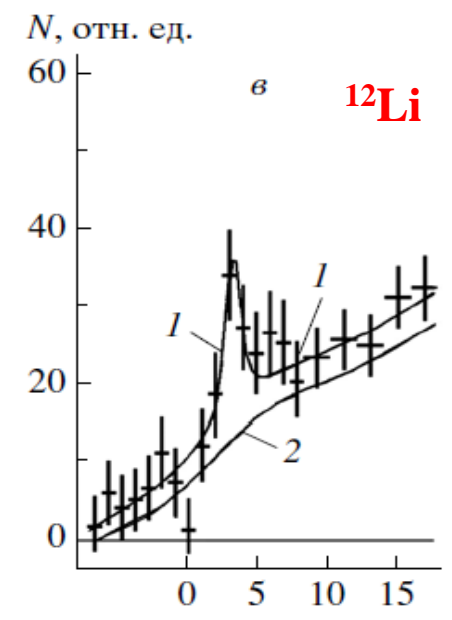
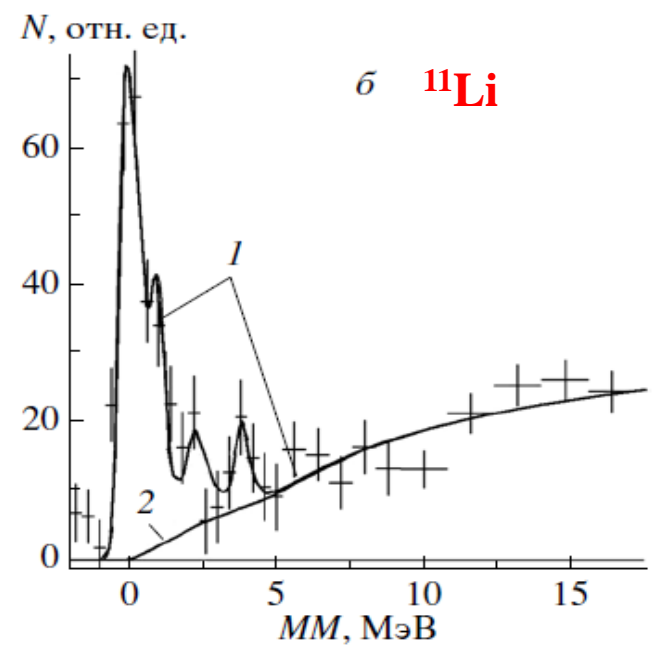
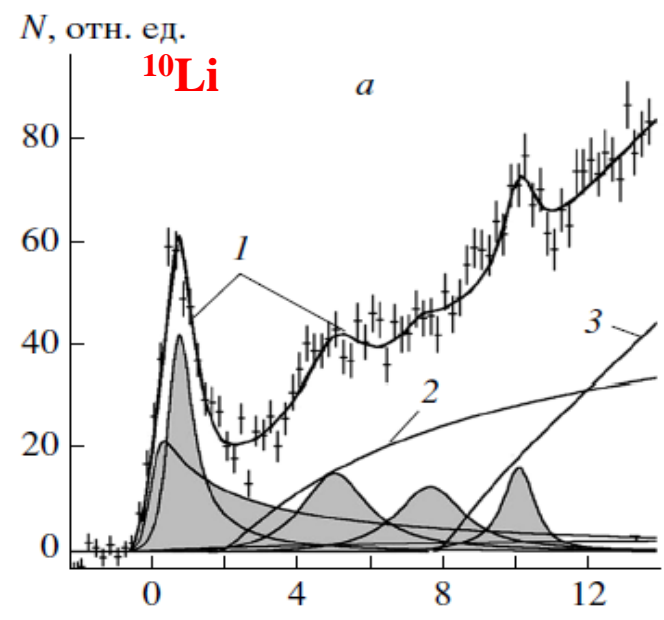
Образование ${}^7\text{He}$ при поглощении остановившихся пионов



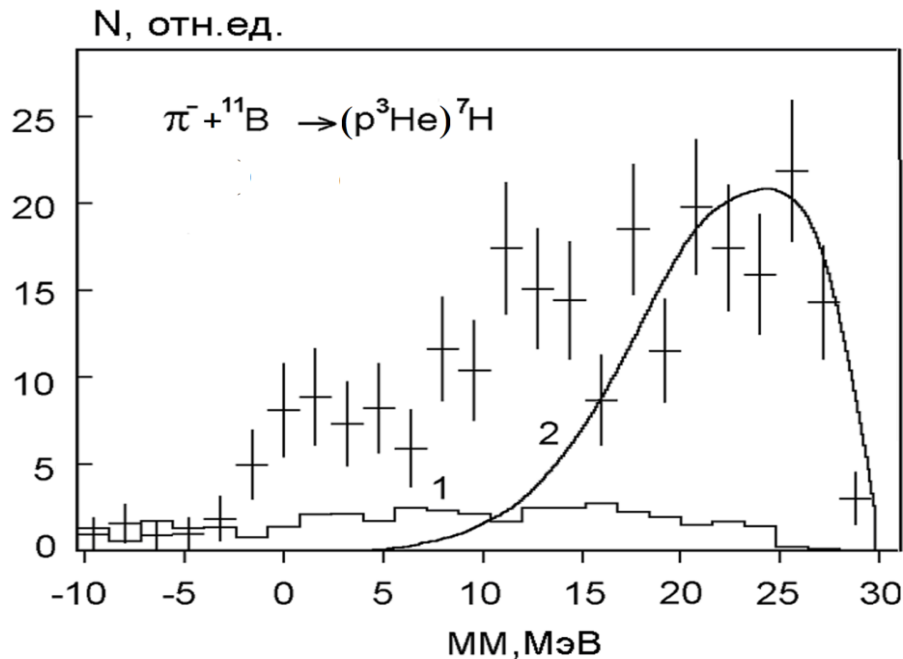
E_x , MeV	Γ , MeV	Наши данные.	Work
g.s.	-	1), 2), 3)	[1]
0.6(1)	0.75(8)		[2]
0.9(5)	1.0(9)		[3]
≈ 1.45	≈ 2		[4]
≈ 2.6	≈ 2		[5]
2.9(3)	2.0(3)		[6]
2.92(9)	1.99(17)		[1]
3.1(1)	≤ 0.5	1), 2), 3)	
4.9(2)	≤ 0.5	1), 2), 3)	
5.8(3)	4(1)		[7]
6.7(2)	≤ 0.5	1), 2)	
≈ 8.0	~ 7		[8]
16.9(5)	1.0(3)	2), 3)	
≈ 18.0	~ 7		[8]
18.0(1.5)	~ 10		[9]
19.8(3)	1.5(3)	1), 2), 3)	
20(1)	9(2)		[10]
24.8(4)	4.6(7)	1), 2), 3)	

E_r (IAS) ~ 3 MeV

Тяжелые изотопы лития $^{10-12}\text{Li}$

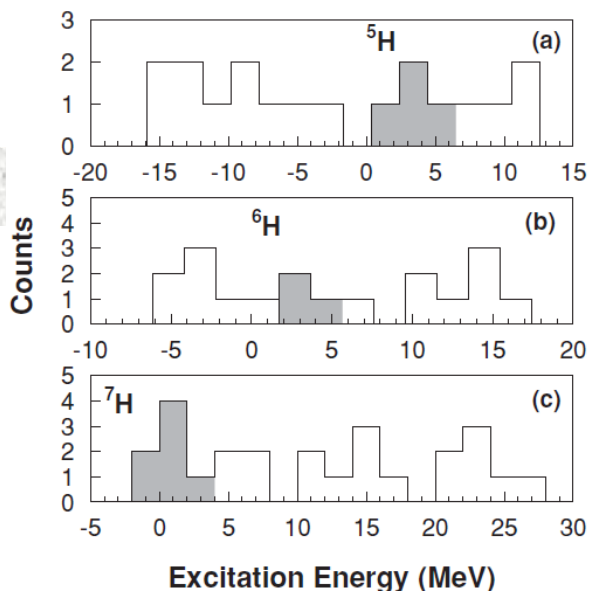


Сверхтяжелый изотоп водорода ${}^7\text{H}$

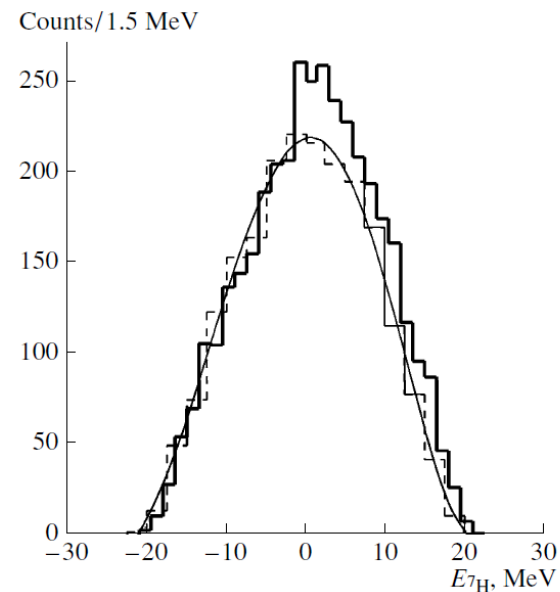


${}^9\text{Be}(\pi^-, pp)X$,
 ${}^{11}\text{B}(\pi^-, p^3\text{He})X$

$E_r(\text{IAS}) \sim 0 \text{ MeV}$



RIKEN



GANIL



Разработан и реализован метод прецизионного измерения энергии заряженных частиц с помощью многослойных п.п.д.- спектрометров на ускорителях.

Разработанный подход позволяет измерять энергию частиц в диапазоне от нескольких до сотен МэВ и идентифицировать частицы с различными массами – от пионов до многозарядных ядерных фрагментов.



Десятые
Черенковские
чтения

**Благодарю
за
внимание!**