



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»



Изучение поляризованного dd -синтеза в эксперименте PoIFusion. Мотивация эксперимента и методика обработки экспериментальных данных.

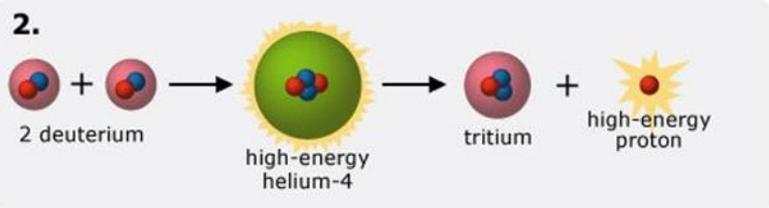
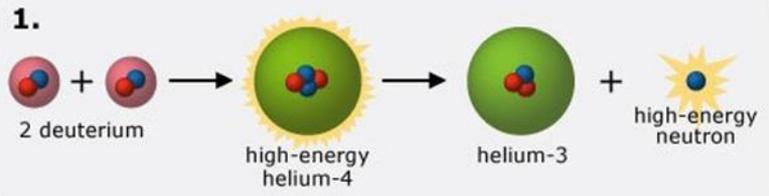
Андреянов Алексей Владимирович
ЛКСТ, ОВФЭ

Гатчина 2022

Содержание

1. Описание эксперимента PolFusion
2. Мотивация:
 - Первичный нуклеосинтез
 - Термоядерная энергетика
 - Ядерное взаимодействие
3. Обзор теоретических моделей
4. Методика обработки экспериментальных данных — парциально-волновой анализ

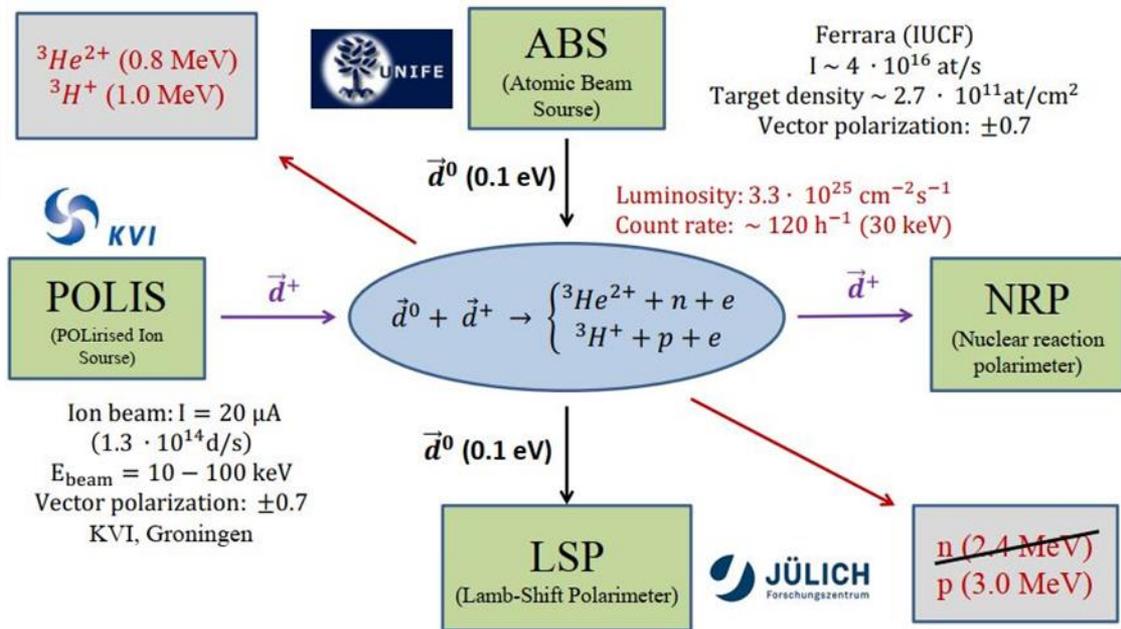
Эксперимент PolFusion



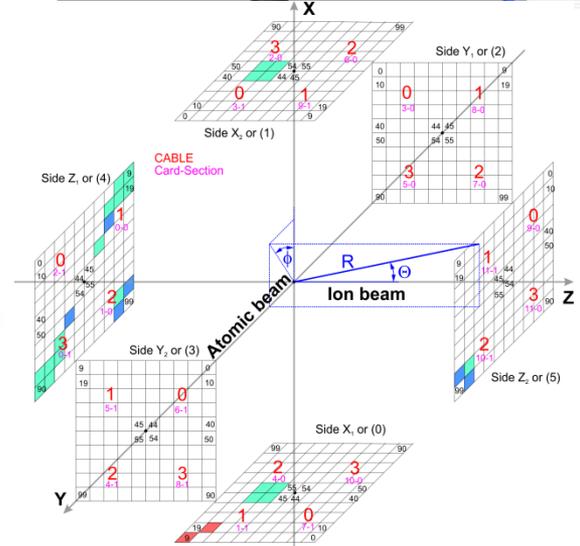
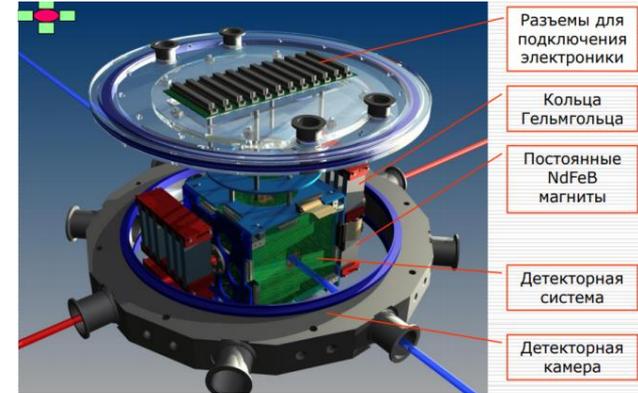
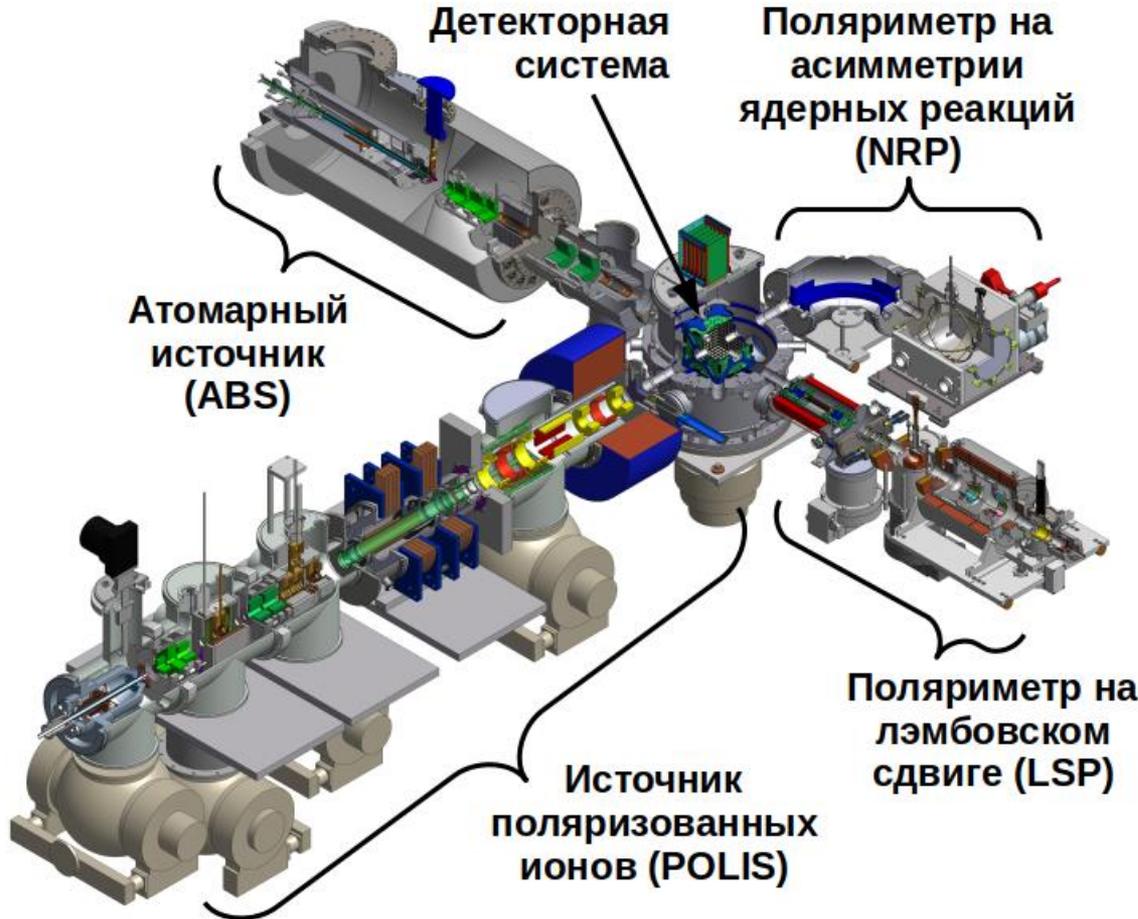
Исследование реакций $D(d,p)^3H$ и $D(d,n)^3He$ с поляризацией исходных частиц при низких энергиях (до 100 кэВ).

Коллаборация PolFusion

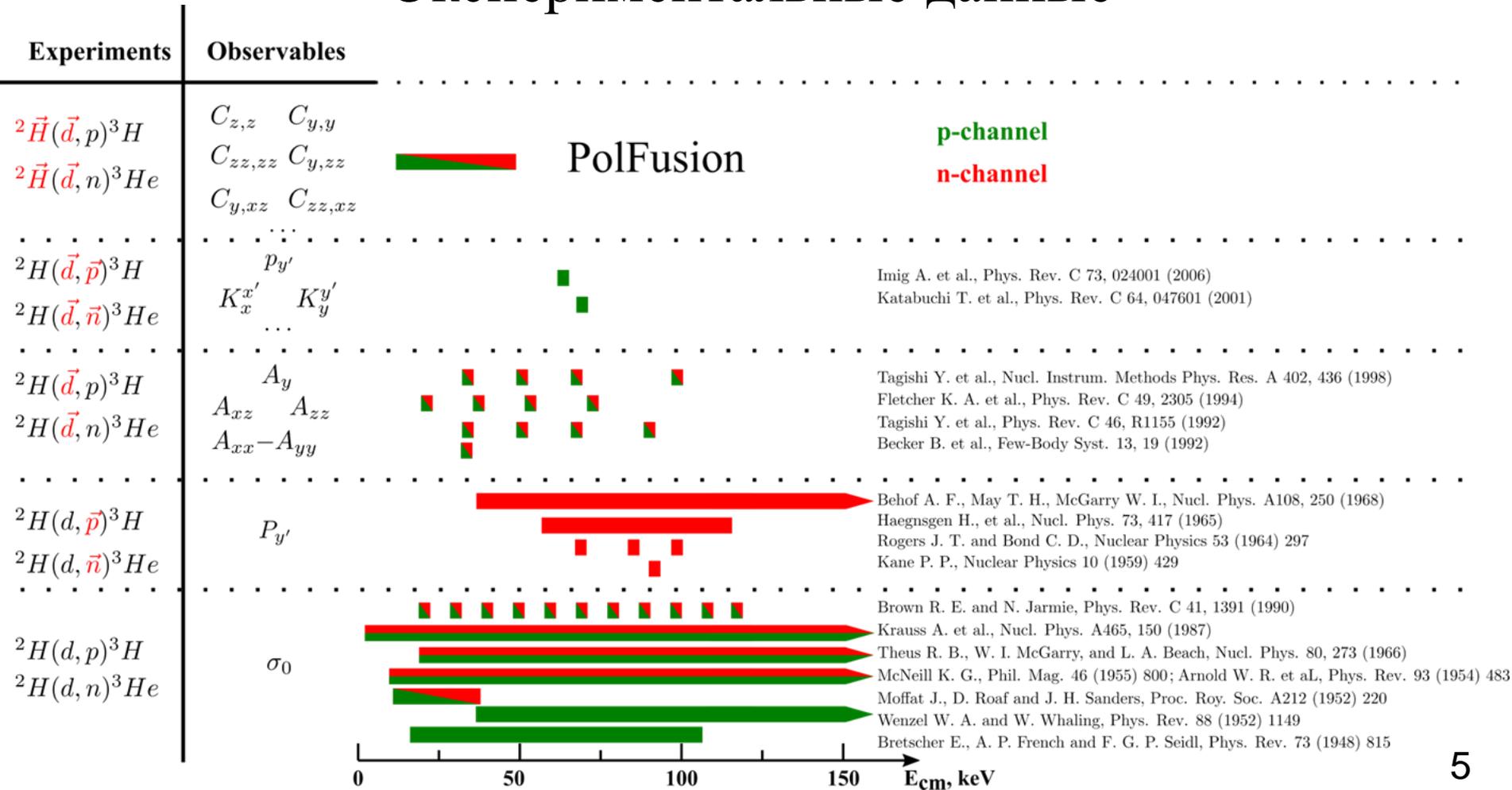
1. НИЦ «Курчатовский институт» -- ПИЯФ, РФ;
2. Исследовательский центр Юлиха, Германия;
3. Университет города Феррары, Италия.



Экспериментальная установка



Экспериментальные данные

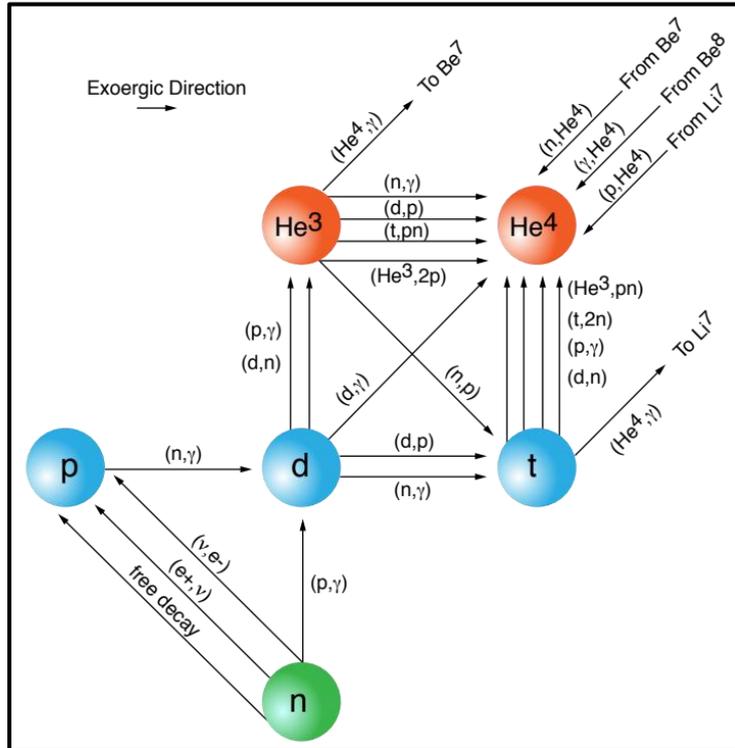


Мотивация. Космология

Астрофизическое содержание дейтерия с 1% точностью

наблюдение $D/H = (2.527 \pm 0.030) \times 10^{-5}$ at 68% of C.L.

[Cooke R. J., *Astrophys. J.* 855, 102 (2018)]



Реакции первичного нуклеосинтеза

Значения доли барионной энергии $\omega_b \equiv \Omega_b h^2$ и эффективное количество видов нейтрино для различных случаев с доверительным интервалом 68%.

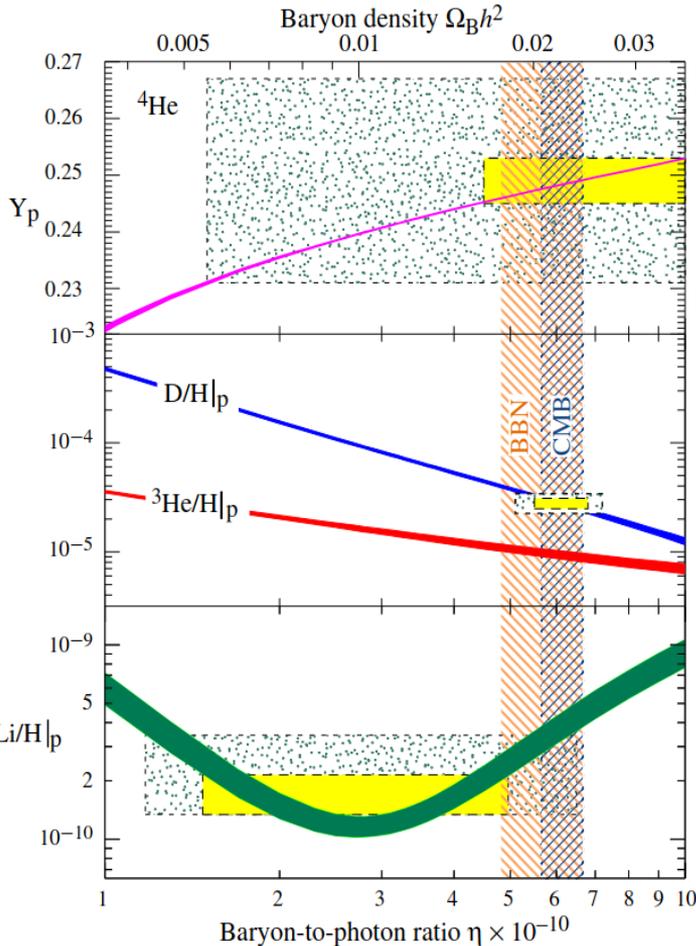
	ω_b	N_{eff}
Planck	0.02237 ± 0.00015	3.045
Planck+BAO	0.02242 ± 0.00014	3.045
D- 3ν	0.02233 ± 0.00036	3.045
D+Planck	0.02224 ± 0.00022	2.95 ± 0.22
BBN [5]	0.0220 ± 0.0005	2.84 ± 0.20
BBN [6]	0.0221 ± 0.0006	2.86 ± 0.28
BBN [7]	0.0234 ± 0.0005	3.60 ± 0.17
BBN [8]	0.0219 ± 0.0006	2.78 ± 0.28

Четыре расчета по первичному нуклеосинтезу относятся к различным предсказаниям содержания первичного ^4He

[Aghanim N et al. [Planck] 2020 *Astron. Astrophys.* 641 A6]

[O. Pisanti et al., *JCAP* 04 (2021) 020]

Мотивация. Космология



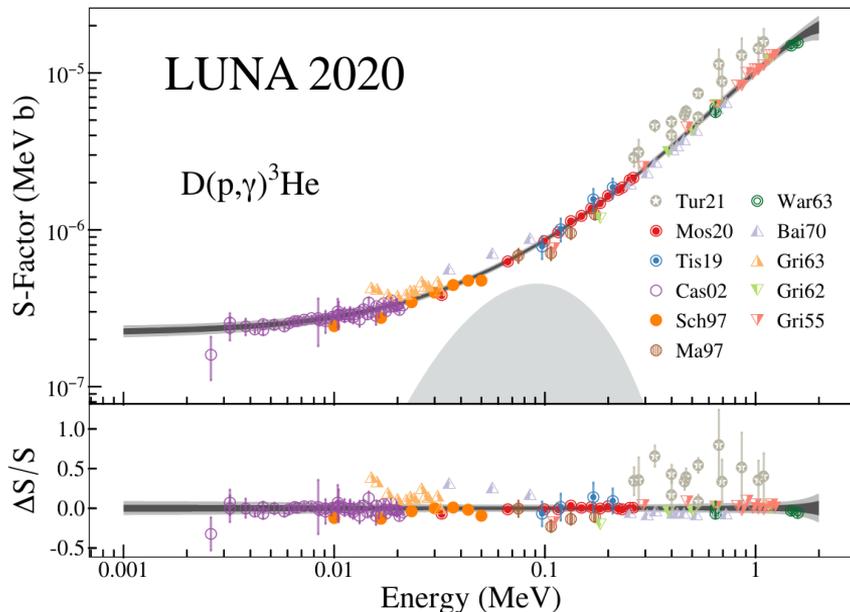
Предсказания нуклеосинтеза для распространенностей первичных ^4He , D , ^3He , ^7Li вместе с результатами наблюдений. 2σ неопределенности: статистические -- длинный пунктир, статистические и систематические -- короткий пунктир. Неопределенности в вычислении распространенностей соответствуют толщине линий. Вертикальная полоса “CMB” – результат для η_B следующий из анализа анизотропии реликтового излучения. По оси абсцисс отложено $\eta_{10} = \eta_B \cdot 10^{10}$, по оси ординат

$$Y = \frac{n_{4\text{He}} m_{4\text{He}}}{n_p m_p}$$

– массовая концентрация ^4He , n_{D}/n_p , $n_{^3\text{He}}/n_p$ и $n_{^7\text{Li}}/n_p$ – распространенности других элементов.

Мотивация. Космология

$$S(E) \equiv \sigma(E)E e^{\sqrt{E_G/E}}$$



S-фактор и фиты для реакции $D(p,\gamma)^3\text{He}$. Круги определяют данные с абсолютной нормировкой, треугольники – с относительной. Пределы ошибок даны только для статистических неопределенностей и только для абсолютных данных. Серый пик показывает пик Гамова при температуре $T=0.8$ GK. Снизу: разница между фитом или данными по отношению к медианному значению S-фактора при каждой энергии.

[O. Pisanti et al., JCAP 04 (2021) 020]

Reaction i	$10^5 \sigma_i(\text{D/H})$	$10^5 \sigma_{\text{omit } i}(\text{D/H})$
$d(p, \gamma)^3\text{He}$	0.036	0.097
$d(d, n)^3\text{He}$	0.081	0.065
$d(d, p)t$	0.054	0.089
$^3\text{He}(d, p)^4\text{He}$	0.002	0.103
$p(n, \gamma)d$	0.002	0.103
$^3\text{He}(n, p)t$	0.002	0.103
all	0.103	—

Неопределенности содержания дейтерия. Первый столбец – ошибки реакции i в случае когда все остальные ошибки = 0; второй столбец – ошибка в отсутствии реакции i .

[Tsung-Han Yeh et al JCAP 03 (2021) 046]

Мотивация. Термоядерная энергетика

Идея использования поляризованного топлива

- [R. M. Kulsrud, Phys. Rev. Lett. T. 49, 17. 1248-1251 (1982)]
- [Hale G., Doolen G. Los Alamos national laboratory report. 1984. No. LA-9971-MS.]
- [Micklich B., Princeton plasma physics laboratory report 1983 No. PPPL-1994.]
- [Coppi B., Phys. Rev. Lett. 51, 892 (1983)]

Reazioni	Temperatura di ignizione	Energia prodotta keV
 $D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n$	4 keV	17,600
 $D + \text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p$	30 keV	18,300
 $D + D \rightarrow {}^3\text{He} + n$	35 keV	4,000
 $D + D \rightarrow T + p$	35 keV	4,000

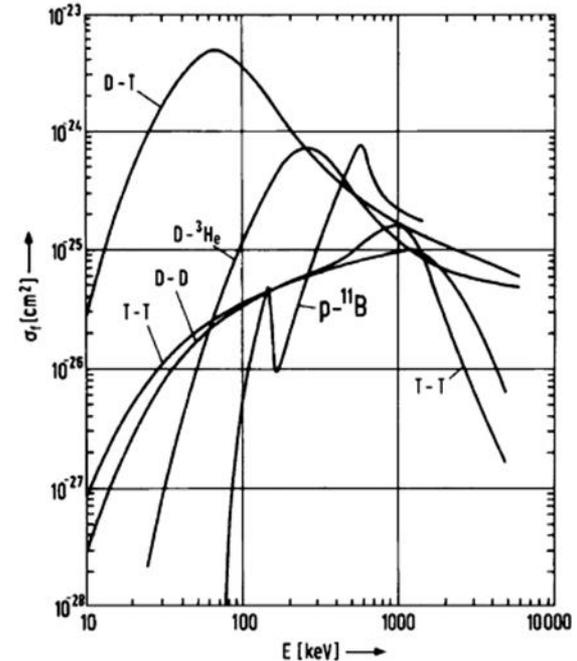


Fig. 3. Integrated cross-sections of fusion reactions as a function of the energy of relative motion (From [14] by permission of Springer-Verlag, Heidelberg.)

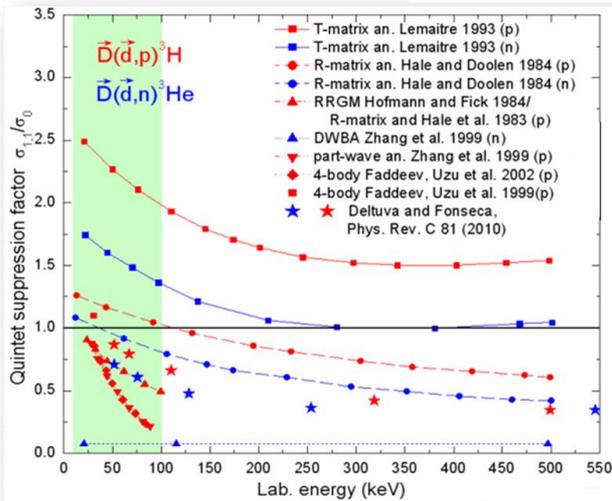
Проект ИТЭР

Преимущества и сложности поляризованного синтеза

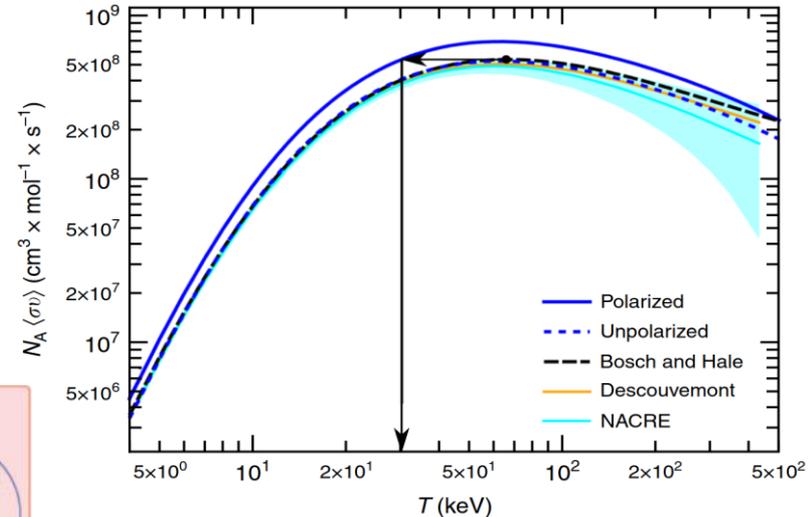
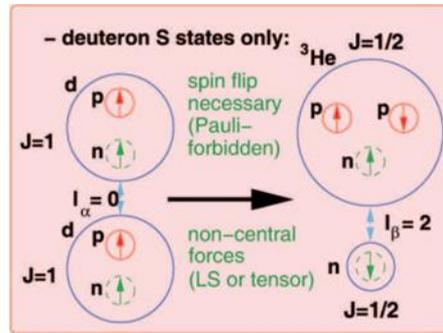
Преимущества использования поляризованного топлива заключаются в следующем:

1. Увеличение сечения при использовании топлива с сонаправленными спинами (в 1.5 раза для случая DT-синтеза [Hupin]).
2. Управление угловым распределением вылета продуктов реакции.
3. Реакторы с малым выходом нейтронов.

$$QSF = \frac{\sigma_{1,1}}{\sigma_0} \quad \sigma_0 = \frac{1}{9} \left(\underbrace{2\sigma_{1,1}}_{\text{Quintet}} + \underbrace{4\sigma_{1,0}}_{\text{Triplet}} + \underbrace{\sigma_{0,0} + 2\sigma_{1,-1}}_{\text{Singlet}} \right)$$



[H. Paetz gen. Schieck
Eur. Phys. J. A 44,
(2010) 321]



Сравнение между скоростями реакции DT для неполяризованного и поляризованного топлива с сонаправленными спинами как функция температуры T . pz, pzz = 0.8 qz = 0.8.

Мотивация. Термоядерная энергетика

Сложности для реализации синтеза с поляризованным топливом следующие:

1. Создание достаточного количества поляризованного топлива.
2. Хранение и транспортировка поляризованного топлива
3. Сохранение поляризации в условиях плазмы

Table 2

ITER vs. IGNITOR: depolarization rates.

Depolarization mechanism	Rate (s^{-1}) ITER	Rate (s^{-1}) IGNITOR
Ion + electron recombination (Hyperfine mixing) $\propto B_c/B_0^2$ [2]	10^{-4} – 10^{-5}	10^{-6}
Binary collisions: dominated by nuclear spin-orbit coupling [2]	For ^3H : $8.0 \cdot 10^{-6}$ for ^2H : $3.0 \cdot 10^{-7}$	For ^3H : $8.0 \cdot 10^{-5}$ for ^2H : $3.0 \cdot 10^{-6}$
Wall recycling: expected for non- metallic materials [8]	≤ 1 .	≤ 1 .
Field inhomogeneities (see Eq. (38) in [2] with n_D = deuteron density in units of $10^{14}/\text{cm}^3$)	For ^2H : $1.3 \cdot 10^{-5} n_D$	For ^2H : $4.7 \cdot 10^{-5} n_D$
Resonant plasma waves: spin-flip matrix element [2] for $\delta B_{\perp} = 1$ G	For ^3H : 0.07 for ^2H : 0.01	For ^3H : 0.027 for ^2H : 0.004

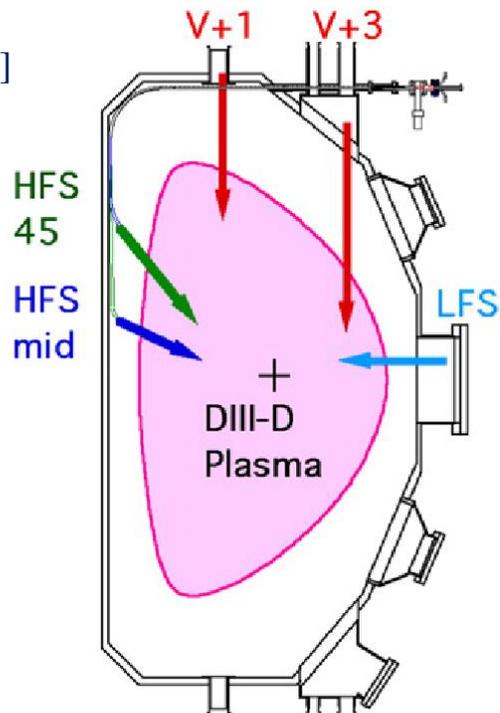


Гранулы: слева, 4 мм Poly alpha methyl styrene (PAMS) гранула с толщиной стенок 35 микрон; в центре, Glow Discharge Polymer (GDP) гранула – 20 микрон; справа, 4 мм Divinil Benzene (DVB) гранула – 260 микрон.

Реактор DIII-D

Инжектор гранул -- Ignitor Pellet
Injector (IPI), (ENEA и ORNL)

[A. Frattolillo et al., doi:10.1109/SOFE.2011.6052237]



Гранулы – $C_2(CH_3)H_2$

Размеры:

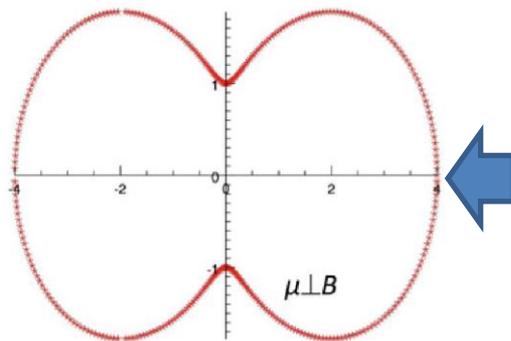
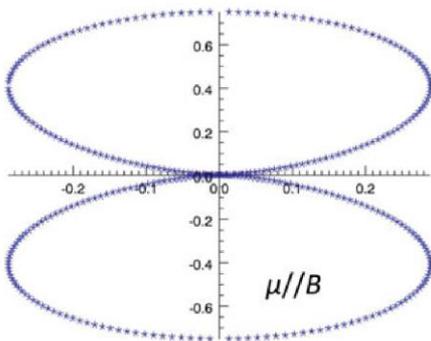
D 2.7 мм – $6 \cdot 10^{20}$ атомов

D 1.8 мм -- $2 \cdot 10^{20}$ атомов

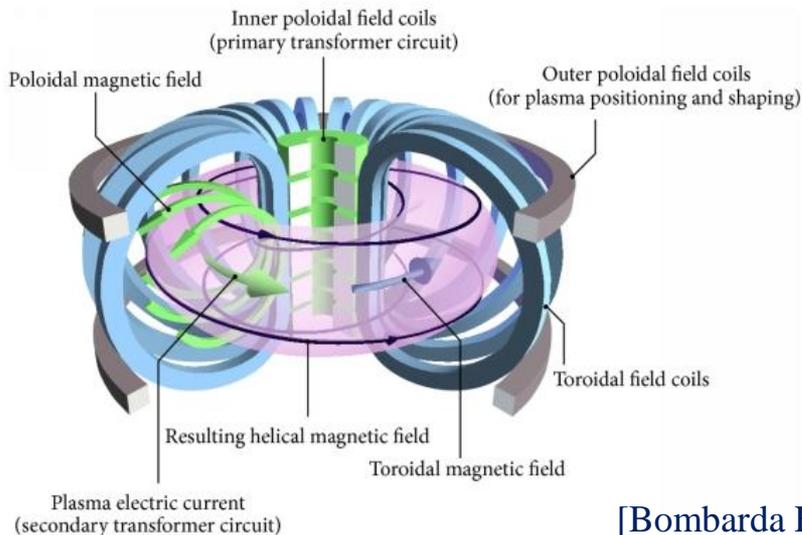
[Sandorfi A.M., arXiv:1703.06165]

Figure 1. The pellet injection locations on DIII-D mapped to a poloidal cross section.

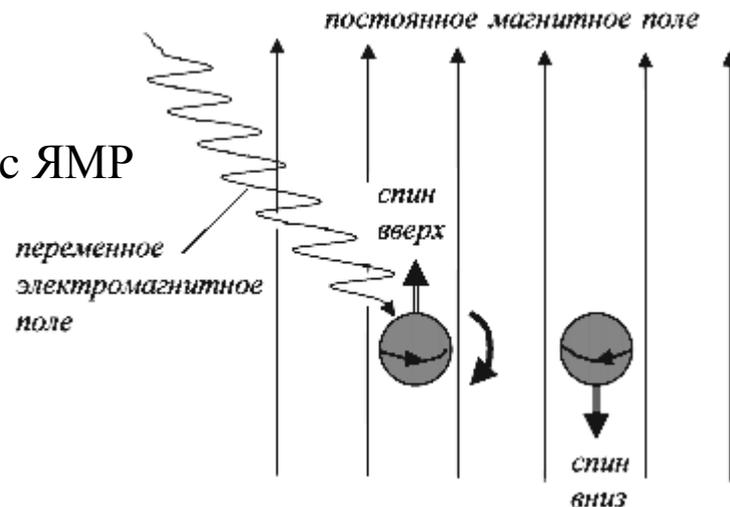
Мотивация. Термоядерная энергетика



Полярная плоскость углового распределения продуктов синтеза D-T для поляризации параллельной (левая) и перпендикулярной (правая) тороидальному магнитному полю.



Аналогия с ЯМР



Другие возможности применения

1. Изучение влияния электронного экранирования на скорость реакции при низких энергиях.

[Rolf C., Progress of Theoretical Physics Supplement, 154, 373 (2004)]

2. Нарботка трития и гелия-3.

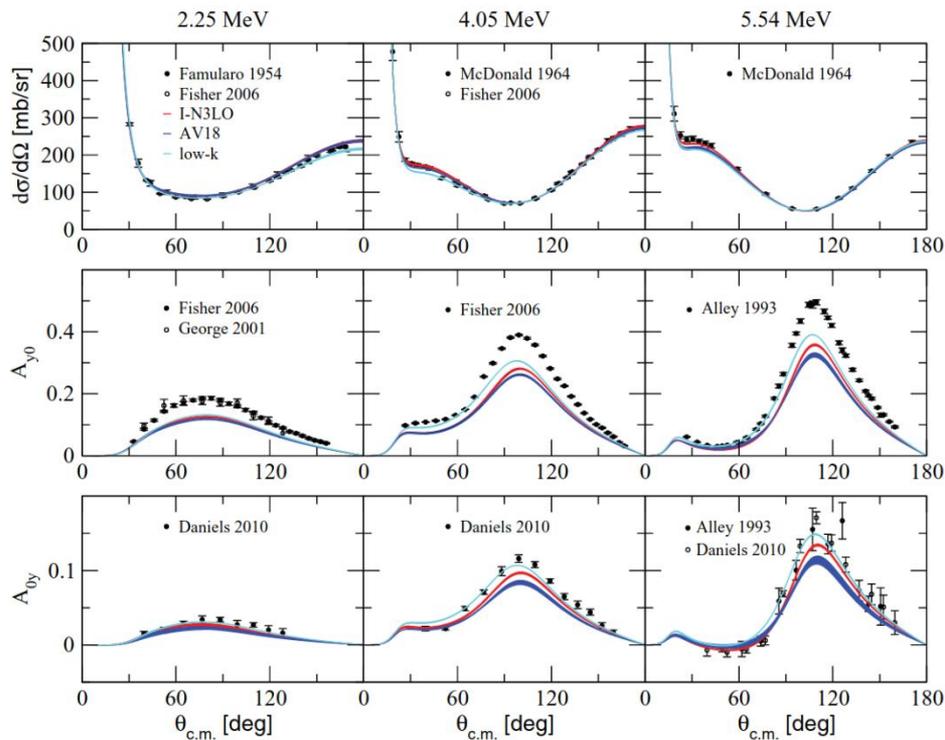
3. Источник нейтронов для наработки медицинских препаратов -- $^{100}\text{Mo}(n,2n)^{99}\text{Mo}$ (SORGENTINA-RF project).

[P. Agostini et al., Eur. Phys. J. Plus 136, 1140 (2021)]

Мотивация. Ядерное взаимодействие

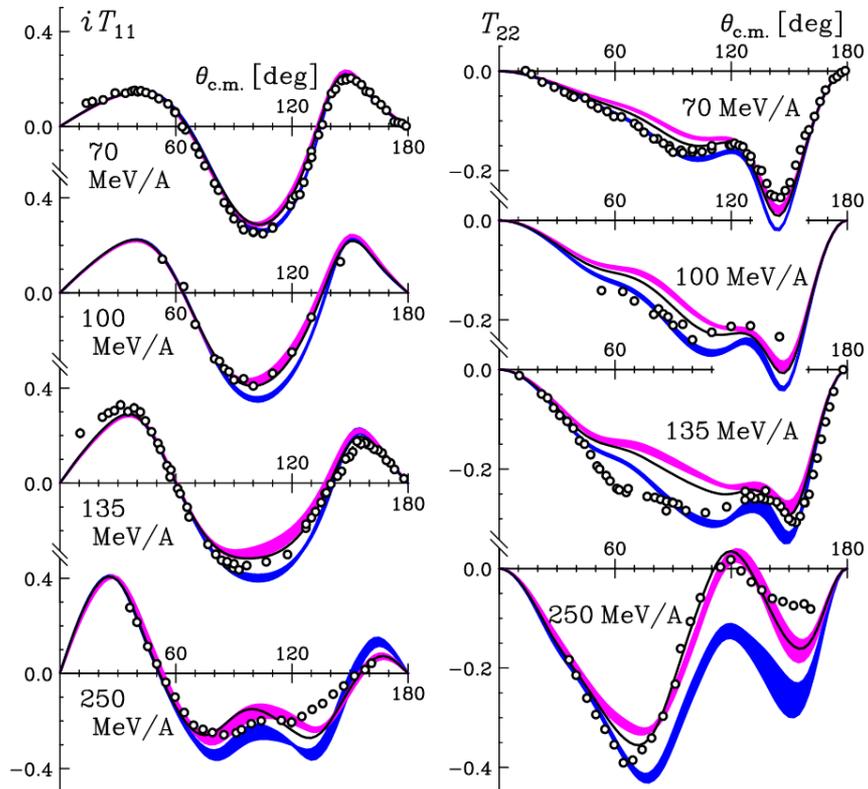
- NN-взаимодействия – Argonne V18, CD-Bonn, Reid93, Nijmegen I/II и др.
 - 3N-взаимодействия – Urbana-Illinois (Urbana IX), CD-Bonn+ Δ и др.
1. Уравнения Фадеева-Якубовского (FY) (Lazauskas)
 2. Уравнения Альта-Грассбергера-Сандаса (AGS) (Fonseca, Deltuva)
 3. Метод гиперсферических гармоник (HH) (Viviani, Kievsky, Rosati)
 4. Метод резонирующих групп (RGM+NCSM) (Hofmann, Hale)
 5. Ab initio метод (Deltuva, Fonseca)
 6. Киральная эффективная теория поля (ChEFT) (Epelbaum)

Обзор теоретических моделей



Дифференциальные сечения, анализирующая способность p , анализирующая способность ^3He для упругого p - ^3He рассеяния. I-N3LO (красные линии), AV18 (синие линии) потенциалы, CD Bonn (low-k) (голубые линии). Каждая линия содержит результаты трех методов – FY, AGS, HH.

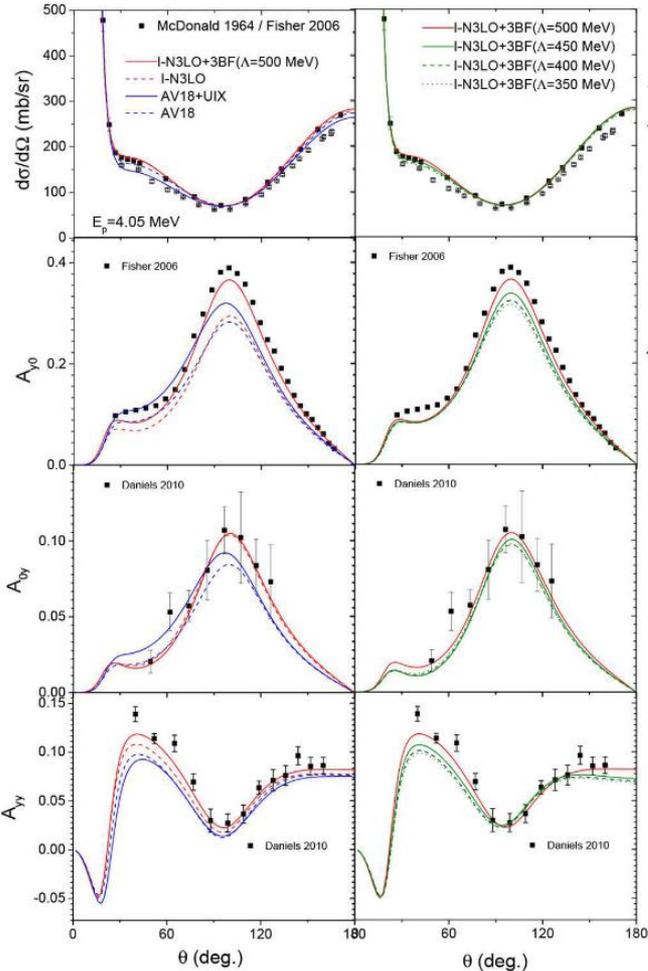
[M. Viviani et al., Phys. Rev. C 84, 054010 (2011)]



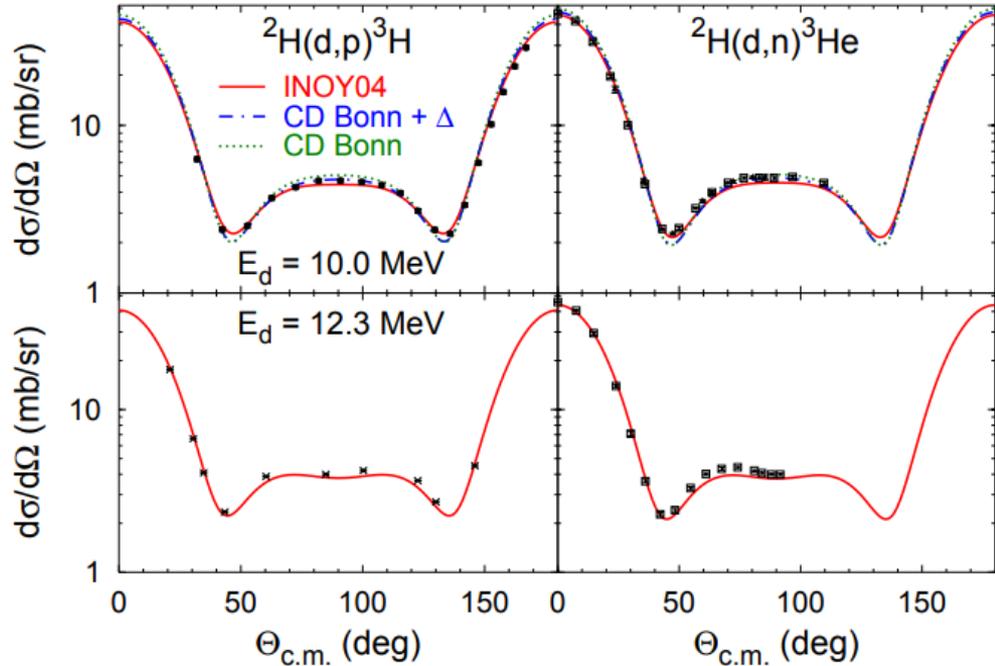
Анализирующие способности дейтрона для dp упругого рассеяния. Сравнение с FY. Синяя линия – 2NF (AV18, CDBonn, Nijmegen I/II), красные линии -- +3NF (Tucson-Melbourne 99). Сплошная линия – AV18+Urbana IX.

[K. Sekiguchi et al., 2011 J. Phys.: Conf. Ser. 312 082038] 16

Обзор теоретических моделей

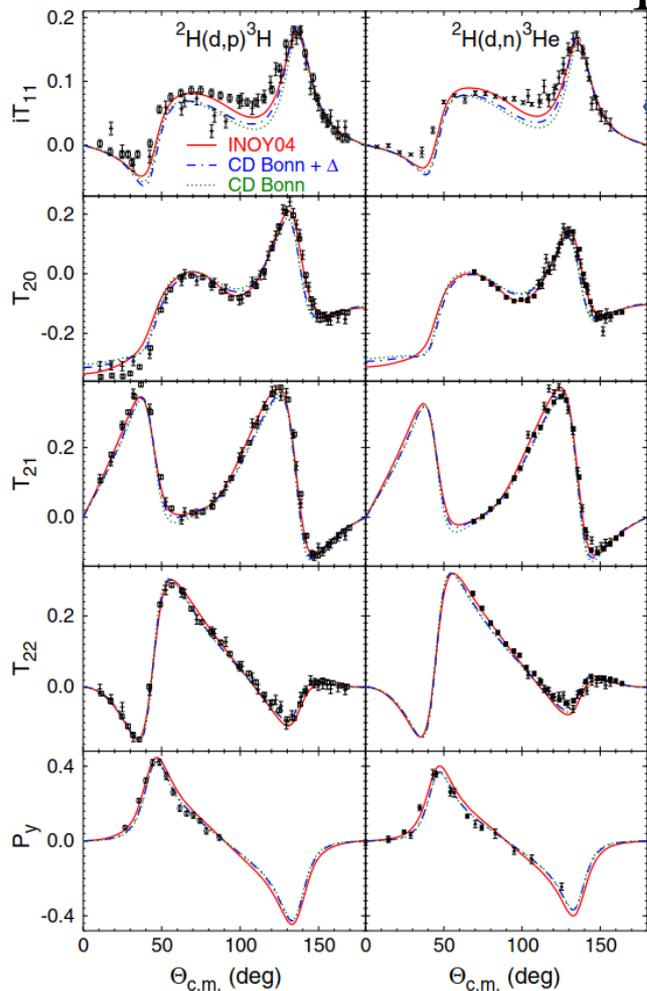


Расчеты FY наблюдаемых для упругого рассеяния p-3He при $E=4.05$ МэВ [Lazauscas et al., Front. Phys., 7 (2020)]

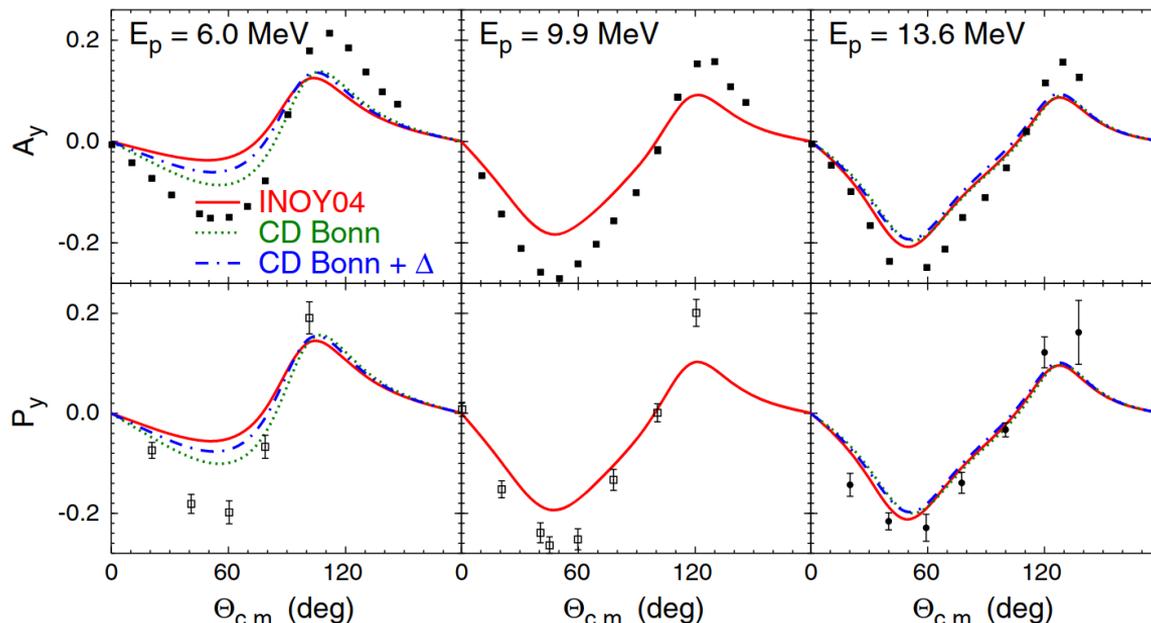


Дифференциальное сечение для dd-реакций
[Fonseca, A.C., Few-Body Systems, 58(2) (2017)]

Обзор теоретических моделей



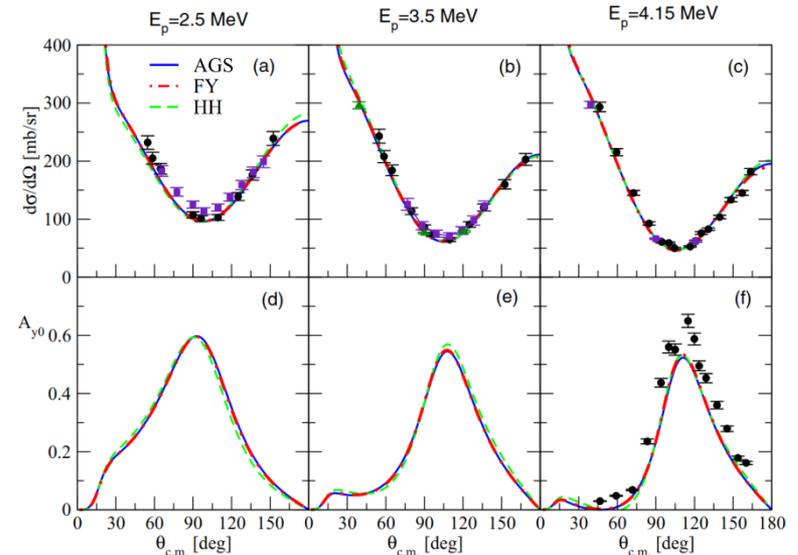
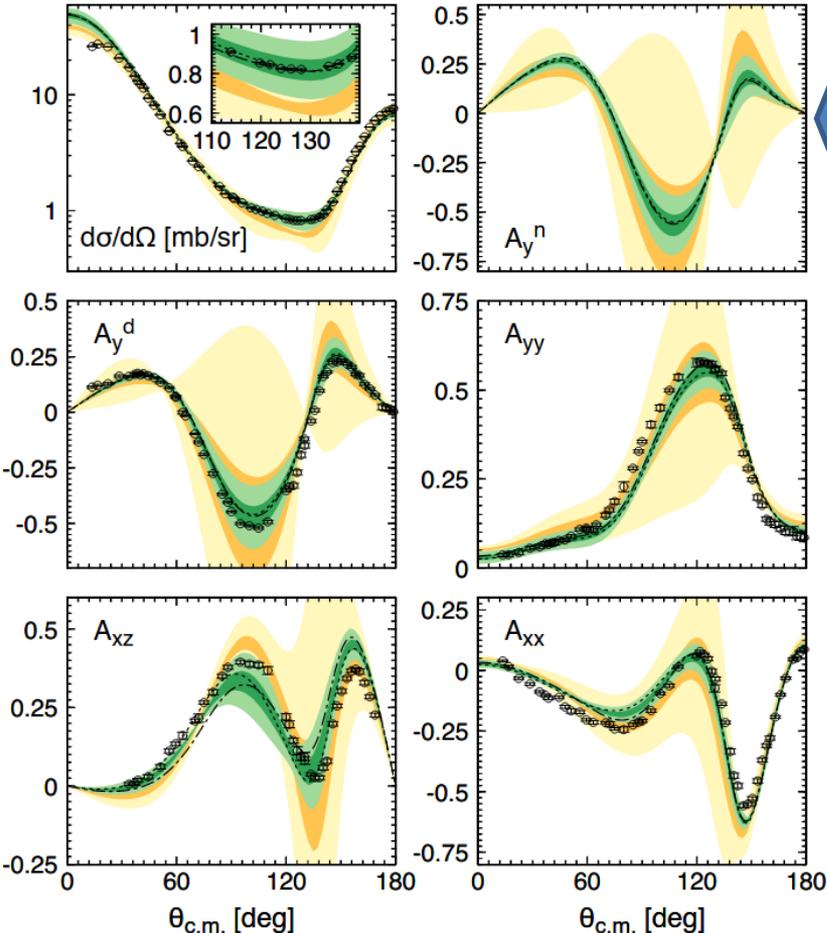
Анализирующие способности дейтрона и поляризация вылетающего нейтрона для dd-реакций при 10 МэВ.



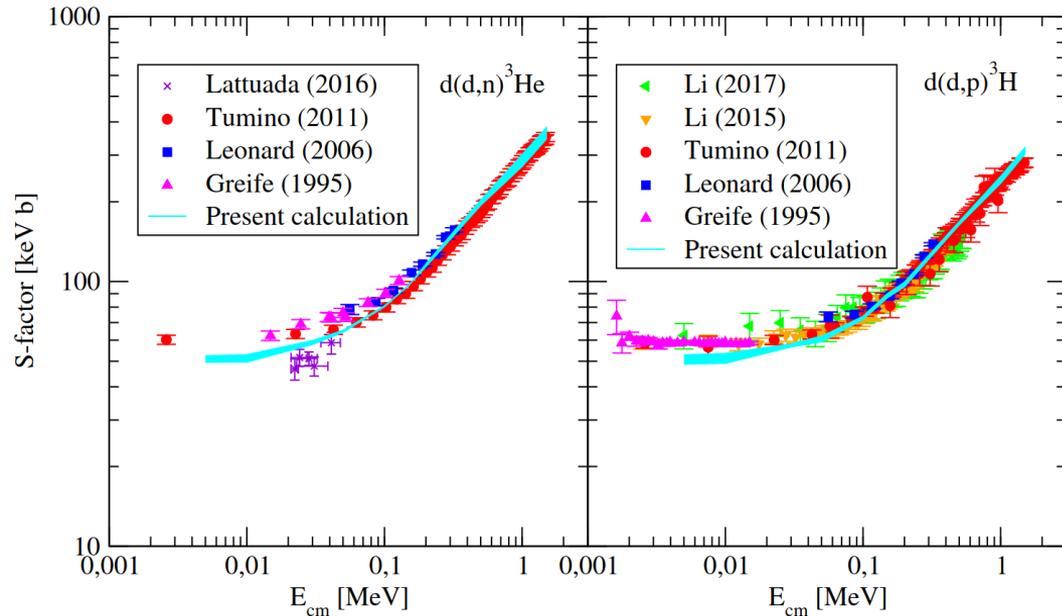
Анализирующая способность протона и поляризация вылетающего нейтрона в реакции ${}^3\text{H}(p,n){}^3\text{He}$.

Обзор теоретических моделей

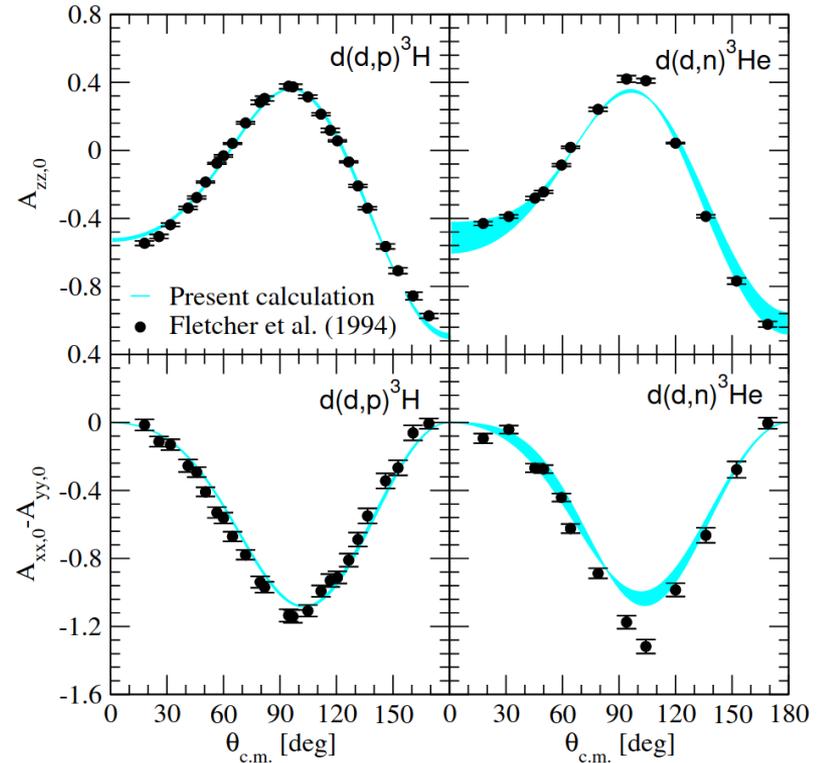
Дифференциальное сечение, анализирующие способности нуклона и дейтрона, тензорные анализирующие способности дейтрона в упругом N-d рассеянии при $E = 70$ МэВ. Желтые полосы – NLO, зеленые полосы – N2LO до 450 МэВ. Штриховая линия – N2LO расчеты с NN силами; штрих-пунктирная линия – N2LO с NN+3NF взаимодействиями. Светлая область – 95% степень достоверности, темная – 68%. Открытые круги – данные по рd-рассеянию.



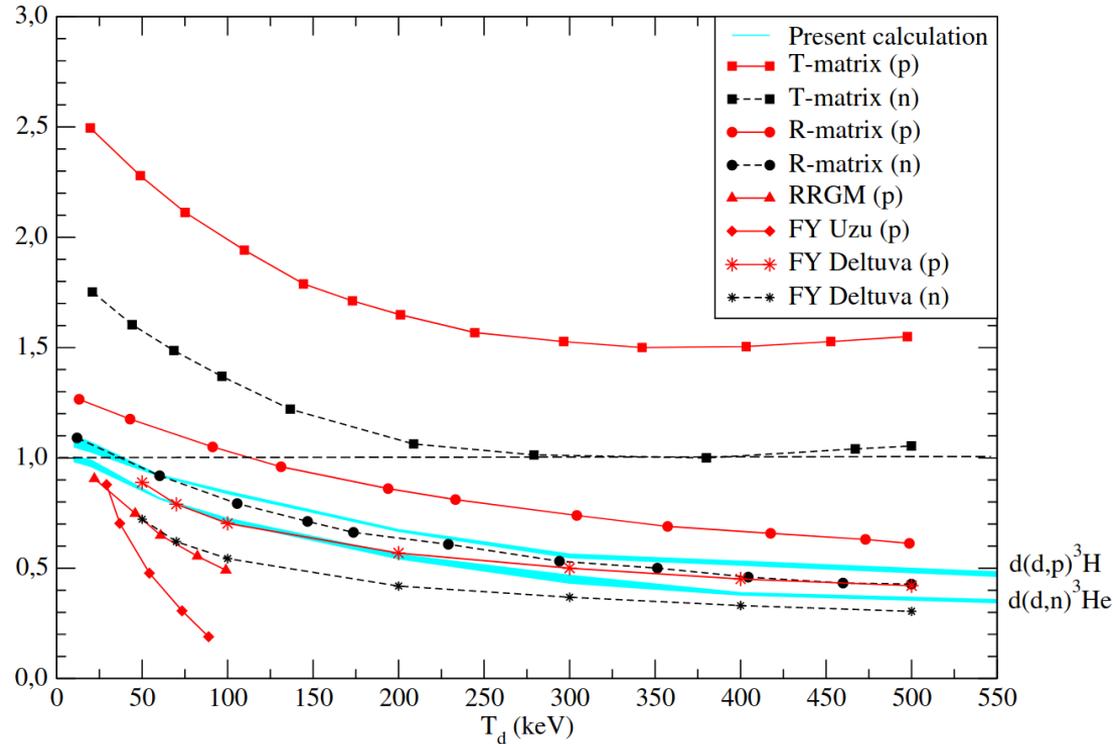
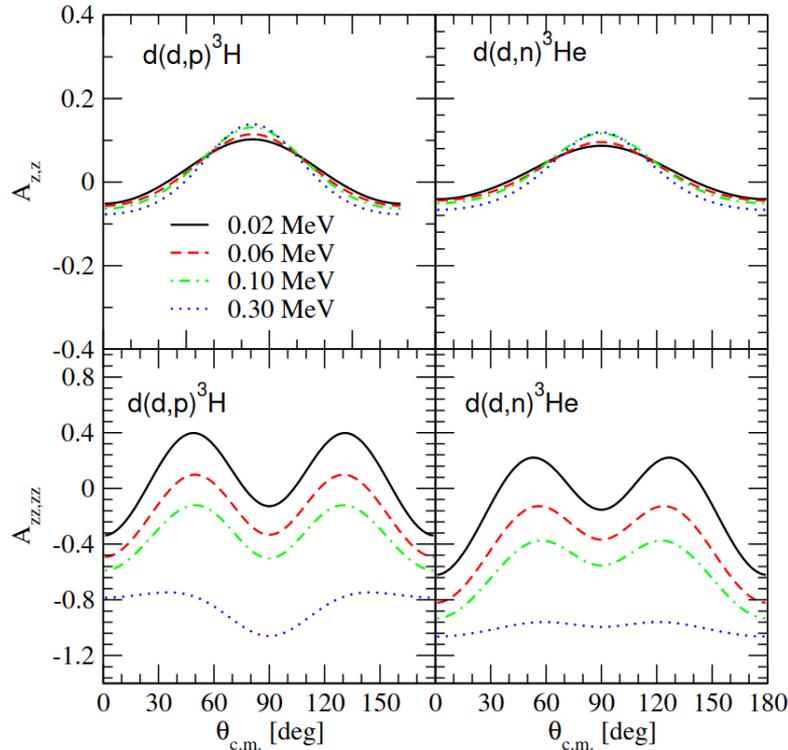
Дифференциальные сечения и анализирующие способности протона для упругого рассеяния p-3H.



Астрофизический S-фактор для dd-реакций вычисленный с помощью взаимодействий N3LO500/N2LO500 и N3LO600/N3LO600.



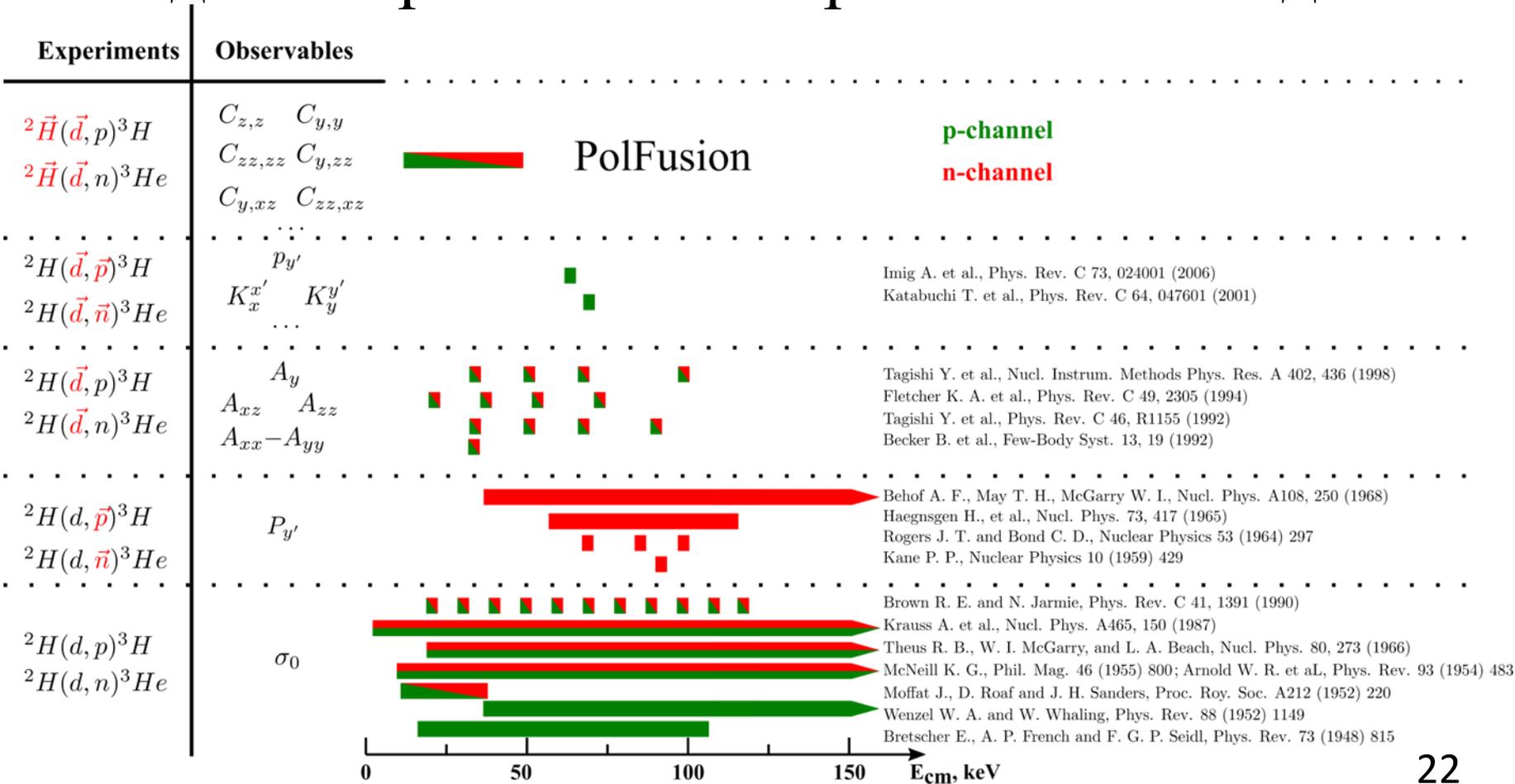
Анализирующие способности для dd-реакций при энергии $E=21$ кэВ.



Спин-корреляционные коэффициенты для dd-реакций при различных лабораторных энергиях. Теоретическая ошибка порядка 5%.

QSF для dd-реакций вычисленный с помощью различных моделей.

Методика обработки экспериментальных данных



Анзац о факторизации кулоновского вклада

$$T_{\beta,\alpha}(E) = C_{l\alpha} \tilde{T}_{\beta\alpha},$$

$$\frac{d\sigma_{\alpha \rightarrow \beta}}{d\Omega} = \frac{k_{\beta}}{k_{\alpha}} |T_{\beta\alpha}|^2 = \frac{k_{\beta}}{k_{\alpha}} |C_{l\alpha} \tilde{T}_{\beta\alpha}|^2.$$

$$C_l(r_0) = \sqrt{P_l(r_0) \exp(i(\delta_l(r_0) + \varphi_l(r_0)))}.$$

$$P_l(r_0) = \frac{|u_l^-(r \rightarrow \infty)|^2}{|u_l^-(r = r_0)|^2} = \frac{1}{F_l^2(r_0) + G_l^2(r_0)},$$

$$r_0 = k_{\alpha}' r_0'; \quad k_{\alpha} = 0.219 \sqrt{E_{cm}} [fm^{-1}].$$

$$\varphi_l = \arg \Gamma(l + i\eta + 1),$$

$$\delta_l = -\arctan\left(\frac{F_l(r_0)}{G_l(r_0)}\right),$$

[H. Paetz gen. Schieck Eur. Phys. J. A 44, (2010) 321]

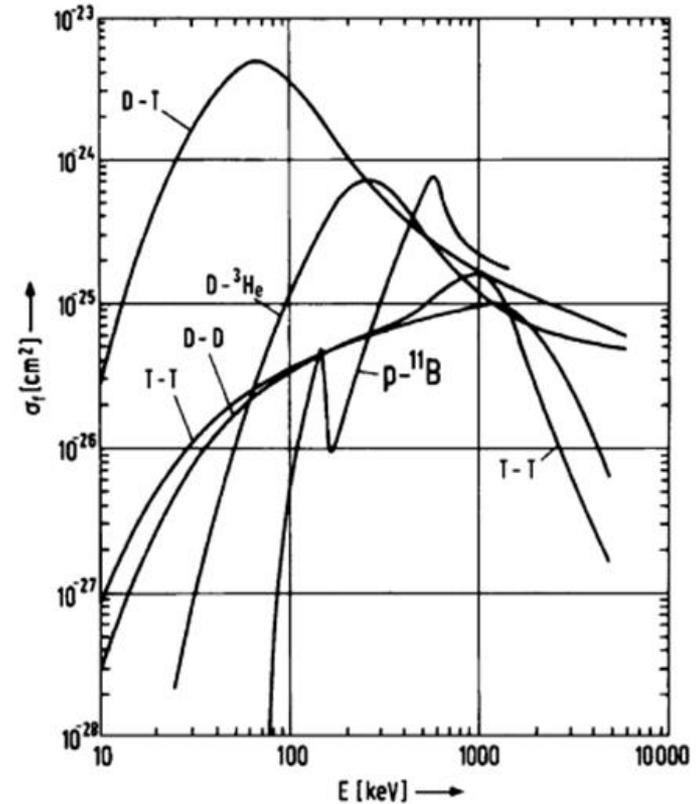


Fig. 3. Integrated cross-sections of fusion reactions as a function of the energy of relative motion (From [14] by permission of Springer-Verlag, Heidelberg.)

Математический аппарат

Когерентное наложение сферических волн

$$\Psi_{in}(r) = e^{ikz} = \sum_l (2l+1) i^l u_l(kr) P_l(\cos(\theta))$$

Матричные элементы переходов между состояниями

$$T_{\beta\alpha} = \langle 2S_\alpha+1 l_{\alpha J} | J^\pi | 2S_\beta+1 l_{\beta J} \rangle$$

Правила отбора:

S_α четно

l_α четно

l_β четно

$S_\beta = 0, 1$

S_α нечетно

l_α нечетно

l_β нечетно

$S_\beta = 0, 1$

$T_1 = \alpha_0 = \langle {}^1S_0 0^+ {}^1S_0 \rangle$	$T_{17} = \langle {}^5D_3 3^+ {}^3G_3 \rangle$
$T_2 = \alpha_{10} = \langle {}^3P_0 0^- {}^3P_0 \rangle$	$T_{18} = \langle {}^5D_4 4^+ {}^1G_4 \rangle$
$T_3 = \beta_{11} = \langle {}^3P_1 1^- {}^1P_1 \rangle$	$T_{19} = \langle {}^5D_4 4^+ {}^3G_4 \rangle$
$T_4 = \alpha_{11} = \langle {}^3P_1 1^- {}^3P_1 \rangle$	$T_{20} = \langle {}^3F_2 2^- {}^3P_2 \rangle$
$T_5 = \alpha_{12} = \langle {}^3P_2 2^- {}^3P_2 \rangle$	$T_{21} = \langle {}^3F_2 2^- {}^3F_2 \rangle$
$T_6 = \alpha_2 = \langle {}^1D_2 2^+ {}^1D_2 \rangle$	$T_{22} = \langle {}^3F_3 3^- {}^1F_3 \rangle$
$T_7 = \beta_2 = \langle {}^1D_2 2^+ {}^3D_2 \rangle$	$T_{23} = \langle {}^3F_3 3^- {}^3F_3 \rangle$
$T_8 = \alpha_3 = \langle {}^3P_2 2^- {}^3F_2 \rangle$	$T_{24} = \langle {}^3F_4 4^- {}^3F_4 \rangle$
$T_9 = \gamma_1 = \langle {}^5S_2 2^+ {}^1D_2 \rangle$	$T_{25} = \langle {}^5G_2 2^+ {}^1D_2 \rangle$
$T_{10} = \gamma_2 = \langle {}^5D_0 0^+ {}^1S_0 \rangle$	$T_{26} = \langle {}^5G_2 2^+ {}^3D_2 \rangle$
$T_{11} = \gamma_3 = \langle {}^5D_2 2^+ {}^1D_2 \rangle$	$T_{27} = \langle {}^5G_3 3^+ {}^3D_3 \rangle$
$T_{12} = \delta_1 = \langle {}^5S_2 2^+ {}^3D_2 \rangle$	$T_{28} = \langle {}^1G_4 4^+ {}^1G_4 \rangle$
$T_{13} = \delta_2 = \langle {}^5D_1 1^+ {}^3S_1 \rangle$	$T_{29} = \langle {}^1G_4 4^+ {}^3G_4 \rangle$
$T_{14} = \delta_3 = \langle {}^5D_1 1^+ {}^3D_1 \rangle$	$T_{30} = \langle {}^5G_3 3^+ {}^3G_3 \rangle$
$T_{15} = \delta_4 = \langle {}^5D_3 3^+ {}^3D_3 \rangle$	$T_{31} = \langle {}^5G_4 4^+ {}^1G_4 \rangle$
$T_{16} = \delta_5 = \langle {}^5D_2 2^+ {}^3D_2 \rangle$	$T_{32} = \langle {}^5G_4 4^+ {}^3G_4 \rangle$
	$T_{33} = \langle {}^5G_5 5^+ {}^3G_5 \rangle$

Математический аппарат

Матрица реакции в представлении
общего спина

$$B = \frac{1}{2i\sqrt{k_i k_f}} \begin{pmatrix} B_{12}^{12} & B_{11}^{12} & B_{11}^{11} & B_{10}^{12} & B_{10}^{11} & B_{10}^{10} & B_{1-1}^{12} & B_{1-1}^{11} & B_{1-2}^{12} \\ B_{02}^{12} & B_{01}^{12} & B_{01}^{11} & B_{00}^{12} & B_{00}^{11} & B_{00}^{10} & B_{0-1}^{12} & B_{0-1}^{11} & B_{0-2}^{12} \\ B_{02}^{02} & B_{01}^{02} & B_{01}^{01} & B_{00}^{02} & B_{00}^{01} & B_{00}^{00} & B_{0-1}^{02} & B_{0-1}^{01} & B_{0-2}^{02} \\ B_{-12}^{12} & B_{-11}^{12} & B_{-11}^{11} & B_{-10}^{12} & B_{-10}^{11} & B_{-10}^{10} & B_{-1-1}^{12} & B_{-1-1}^{11} & B_{-1-2}^{12} \end{pmatrix}$$

Матричные элементы
амплитуды реакции

$$B_{\sigma_\beta \sigma_\alpha}^{S_\beta S_\alpha} = \sum_{J=0}^{\infty} \sum_{l_\alpha=|J-S_\alpha|}^{J+S_\alpha} \sum_{l_\beta=|J-S_\beta|}^{J+S_\beta} i^{l_\alpha-l_\beta} \sqrt{4\pi(2l_\alpha+1)} C_{l_\alpha 0 S_\alpha \sigma_\alpha}^{J \sigma_\alpha} C_{l_\beta (\sigma_\alpha-\sigma_\beta) S_\beta \sigma_\beta}^{J \sigma_\alpha} \times$$

- комплексная парциальная амплитуда;
- сферические функции;
- полный момент для данной парциальной волны;
- орбитальные моменты начального и конечного состояния;
- коэффициенты Клебша-Гордана;
- присоединенные полиномы Лежандра;
- полиномы Лежандра.

$$\times T_{l_\beta S_\beta, l_\alpha S_\alpha}^J Y_{l_\beta, (\sigma_\alpha-\sigma_\beta)}(\theta, \varphi);$$

$$Y_{lm}(\theta, \phi) = e^{im\varphi} \sqrt{\frac{2l+1}{4\pi} \frac{(l-m)!}{(l+m)!}} P_l^m(\cos(\theta));$$

$$P_l^m(\cos(\theta)) = (\sin(\theta))^m \frac{d^m P_l(\cos(\theta))}{d(\cos(\theta))^m};$$

Математический аппарат

$$\begin{aligned}
 \sigma_p(\theta) = \sigma_0(\theta) \left\{ 1 + \frac{3}{2} [A_y^{(b)}(\theta)p_y + A_y^{(t)}(\theta)q_y] + \frac{1}{2} [A_{zz}^{(b)}(\theta)p_{zz} + A_{zz}^{(t)}(\theta)q_{zz}] + \right. \\
 + \frac{1}{6} [A_{xx-yy}^{(b)}(\theta)p_{xx-yy} + A^{(t)}(\theta)q_{xx-yy}] + \\
 + \frac{9}{4} [C_{y,y}(\theta)p_yq_y + C_{x,x}(\theta)p_xq_x + C_{x,z}(\theta)p_xq_z + C_{z,x}(\theta)p_zq_x + C_{z,z}(\theta)p_zq_z] + \\
 + \frac{3}{4} [C_{y,zz}(\theta)p_yq_{zz} + C_{zz,y}(\theta)p_{zz}q_y] + C_{y,xz}(\theta)p_yq_{xz} + \\
 C_{x,z,y}(\theta)p_{xz}q_y + C_{x,y,z}(\theta)p_xq_{yz} + C_{y,z,x}(\theta)p_{yz}q_x + C_{z,y,z}(\theta)p_zq_{yz} + C_{y,z,z}(\theta)p_{yz}q_z + \\
 + \frac{1}{4} [C_{y,xx-yy}(\theta)p_yq_{xx-yy} + C_{xx-yy,y}(\theta)p_{xx-yy}q_y + C_{zz,zz}(\theta)p_{zz}q_{zz}] + \\
 + \frac{1}{3} [C_{zz,xz}(\theta)p_{zz}q_{xz} + C_{xz,zz}(\theta)p_{xz}q_{zz}] + \\
 + \frac{1}{12} [C_{zz,xx-yy}(\theta)p_{zz}q_{xx-yy} + C_{xx-yy,zz}(\theta)p_{xx-yy}q_{zz}] + \\
 + \frac{4}{9} [C_{xz,xz}(\theta)p_{xz}q_{xz} + C_{yz,yz}(\theta)p_{yz}q_{yz}] + \frac{8}{9} [C_{xy,yz}(\theta)p_{xy}q_{yz} + C_{yz,xy}(\theta)p_{yz}q_{xy}] + \\
 + \frac{16}{9} C_{xy,xy}(\theta)p_{xy}q_{xy} + \frac{1}{9} [C_{xz,xx-yy}(\theta)p_{xz}q_{xx-yy} + C_{xx-yy,xz}(\theta)p_{xx-yy}q_{xz}] + \\
 + \frac{1}{36} C_{xx-yy,xx-yy}(\theta)p_{xx-yy}q_{xx-yy} + \\
 \left. + \frac{1}{2} [C_{x,xy}(\theta)p_xq_{xy} + C_{xy,x}(\theta)p_{xy}q_x + C_{z,xy}(\theta)p_zq_{xy} + C_{xy,z}(\theta)p_{xy}q_z] \right\}.
 \end{aligned}$$

$$\frac{d\sigma_0}{d\Omega} = \frac{1}{9} \left[(|B_{00}^{00}|^2 + |B_{00}^{02}|^2 + |B_{00}^{11}|^2) + 2 (|B_{01}^{01}|^2 + |B_{01}^{02}|^2 + |B_{02}^{02}|^2 + |B_{10}^{10}|^2 + \right. \\
 + |B_{01}^{11}|^2 + |B_{10}^{11}|^2 + |B_{11}^{11}|^2 + |B_{1-1}^{11}|^2 + |B_{01}^{12}|^2 + |B_{02}^{12}|^2 + |B_{10}^{12}|^2 + |B_{11}^{12}|^2 + \\
 \left. + |B_{1-1}^{12}|^2 + |B_{1-2}^{12}|^2) \right];$$

$$\begin{aligned}
 A_y^{(b)} = \frac{1}{18} \sqrt{6} \operatorname{Im} [- (B_{01}^{01})^* B_{00}^{02} - (B_{11}^{11})^* B_{10}^{12} - (B_{1-1}^{11})^* B_{10}^{12} + \\
 + 3 ((B_{00}^{02})^* B_{01}^{02}) + (B_{10}^{12})^* B_{11}^{12} - (B_{10}^{12})^* B_{1-1}^{12}] \\
 + \frac{1}{6} \sqrt{2} \operatorname{Im} [(B_{00}^{11})^* B_{01}^{11} + (B_{10}^{11})^* B_{11}^{11} - (B_{10}^{11})^* B_{1-1}^{11} - (B_{00}^{11})^* B_{01}^{12} - (B_{10}^{11})^* B_{11}^{12} - \\
 - (B_{10}^{11})^* B_{1-1}^{12}] + \frac{2}{9} \sqrt{3} \operatorname{Im} [- (B_{00}^{00})^* B_{01}^{01} - (B_{10}^{10})^* B_{11}^{11} - (B_{10}^{10})^* B_{1-1}^{11}] \\
 + \frac{1}{3} \operatorname{Im} [- (B_{01}^{01})^* B_{02}^{02} + (B_{01}^{02})^* B_{02}^{02} - (B_{01}^{11})^* B_{02}^{12} + (B_{01}^{12})^* B_{02}^{12} - (B_{11}^{11})^* B_{12}^{12} + \\
 + (B_{11}^{12})^* B_{12}^{12} - (B_{1-1}^{11})^* B_{1-2}^{12} - (B_{1-1}^{12})^* B_{1-2}^{12}];
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C_{z,z} = \frac{1}{6} \sqrt{2} \operatorname{Re} [- (B_{00}^{00})^* B_{00}^{02} - 2 (B_{10}^{10})^* B_{10}^{12}] + \\
 + \frac{1}{12} \left[- |B_{00}^{02}|^2 - 2 (|B_{00}^{00}|^2 + |B_{10}^{12}|^2) - 3 |B_{00}^{11}|^2 - 4 |B_{10}^{10}|^2 + \right. \\
 \left. + 6 (|B_{02}^{02}|^2 - |B_{10}^{11}|^2 + |B_{02}^{12}|^2 + |B_{12}^{12}|^2 + |B_{1-2}^{12}|^2) \right]
 \end{aligned}$$

Заключение

1. Данные эксперимента PolFusion могут быть полезны в теории первичного нуклеосинтеза, в термоядерной энергетике, а также в фундаментальных ядерных исследованиях.
2. Для обработки экспериментальных данных будет использован математический аппарат разложения по парциальным волнам с анзацем о факторизации кулоновского вклада в амплитуду реакции.

Спасибо за внимание

Математический аппарат

Среднее значение любого оператора L , действующего в спиновом пространстве, будет выражаться формулой

$$\langle L \rangle = \frac{\sum_i \langle \Omega_i \rangle Sp(LT\Omega_i T^\dagger)}{\sum_i \langle \Omega_i \rangle Sp(T\Omega_i T^\dagger)}$$

Выражения для анализирующих способностей и спин-корреляционных коэффициентов

$$A_i = \frac{Sp(TS_i T^\dagger)}{Sp(TT^\dagger)}; \quad A_{ij} = \frac{Sp(TS_{ij} T^\dagger)}{Sp(TT^\dagger)};$$

$$C_{i,j} = \frac{Sp(TS_i S_j T^\dagger)}{Sp(TT^\dagger)}; \quad C_{i,jk} = \frac{Sp(TS_i S_{jk} T^\dagger)}{Sp(TT^\dagger)};$$

$$C_{ij,k} = \frac{Sp(TS_{ij} S_k T^\dagger)}{Sp(TT^\dagger)}; \quad C_{ij,kl} = \frac{Sp(TS_{ij} S_{kl} T^\dagger)}{Sp(TT^\dagger)}.$$

Поляризованное сечение в декартовой системе координат

$$\begin{aligned} \sigma_p(\theta) = \sigma_0(\theta) \left\{ 1 + \frac{3}{2} [A_y^{(b)}(\theta)p_y + A_y^{(t)}(\theta)q_y] + \frac{1}{2} [A_{zz}^{(b)}(\theta)p_{zz} + A_{zz}^{(t)}(\theta)q_{zz}] + \right. \\ \left. + \frac{1}{6} [A_{xx-yy}^{(b)}(\theta)p_{xx-yy} + A^{(t)}(\theta)q_{xx-yy}] + \right. \\ \left. + \frac{9}{4} [C_{y,y}(\theta)p_y q_y + C_{x,x}(\theta)p_x q_x + C_{x,z}(\theta)p_x q_z + C_{z,x}(\theta)p_z q_x + C_{z,z}(\theta)p_z q_z] + \right. \\ \left. + \frac{3}{4} [C_{y,zz}(\theta)p_y q_{zz} + C_{zz,y}(\theta)p_{zz} q_y] + C_{y,xz}(\theta)p_y q_{xz} + \right. \\ C_{xz,y}(\theta)p_{xz} q_y + C_{x,yz}(\theta)p_x q_{yz} + C_{yz,x}(\theta)p_{yz} q_x + C_{z,yz}(\theta)p_z q_{yz} + C_{yz,z}(\theta)p_{yz} q_z + \\ \left. + \frac{1}{4} [C_{y,xx-yy}(\theta)p_y q_{xx-yy} + C_{xx-yy,y}(\theta)p_{xx-yy} q_y + C_{zz,zz}(\theta)p_{zz} q_{zz}] + \right. \\ \left. + \frac{1}{3} [C_{zz,xz}(\theta)p_{zz} q_{xz} + C_{xz,zz}(\theta)p_{xz} q_{zz}] + \right. \\ \left. + \frac{1}{12} [C_{zz,xx-yy}(\theta)p_{zz} q_{xx-yy} + C_{xx-yy,zz}(\theta)p_{xx-yy} q_{zz}] + \right. \\ \left. + \frac{4}{9} [C_{xz,xz}(\theta)p_{xz} q_{xz} + C_{yz,yz}(\theta)p_{yz} q_{yz}] + \frac{8}{9} [C_{xy,yz}(\theta)p_{xy} q_{yz} + C_{yz,xy}(\theta)p_{yz} q_{xy}] + \right. \\ \left. + \frac{16}{9} C_{xy,xy}(\theta)p_{xy} q_{xy} + \frac{1}{9} [C_{xz,xx-yy}(\theta)p_{xz} q_{xx-yy} + C_{xx-yy,xz}(\theta)p_{xx-yy} q_{xz}] + \right. \\ \left. + \frac{1}{\infty} C_{xx-yy,xx-yy}(\theta)p_{xx-yy} q_{xx-yy} + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} [C_{x,xy}(\theta)p_x q_{xy} + C_{xy,x}(\theta)p_{xy} q_x + C_{z,xy}(\theta)p_z q_{xy} + C_{xy,z}(\theta)p_{xy} q_z] \right\}. \end{aligned}$$

На радиационно-доминированной стадии связь температуры первичного вещества с временем t от начала расширения следует из формулы для зависимости плотности всей материи ρ_{Σ} от времени:

$$\rho_{\Sigma} = \xi \frac{a_r T^4}{c^2} = \frac{3}{32\pi G t^2} \quad (11.20)$$

где ξ - безразмерная величина, характеризующая отношение плотности числа всех частиц к плотности числа фотонов (так, равновесным $\gamma, e^+, e^-, \nu_e, \tilde{\nu}_e, \nu_{\mu}, \tilde{\nu}_{\mu}$ соответствует $\xi = 9/2$).

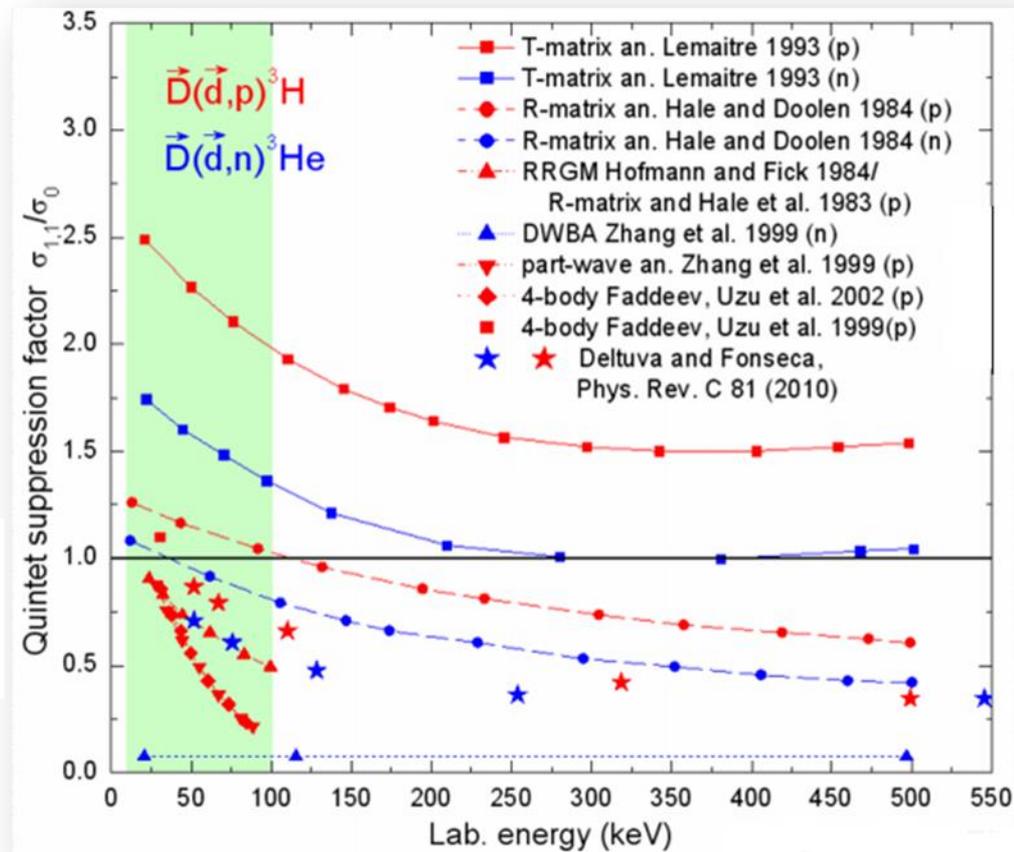
ξ - безразмерная величина, характеризующая отношение плотности числа всех частиц к плотности числа фотонов

Обзор теоретических моделей

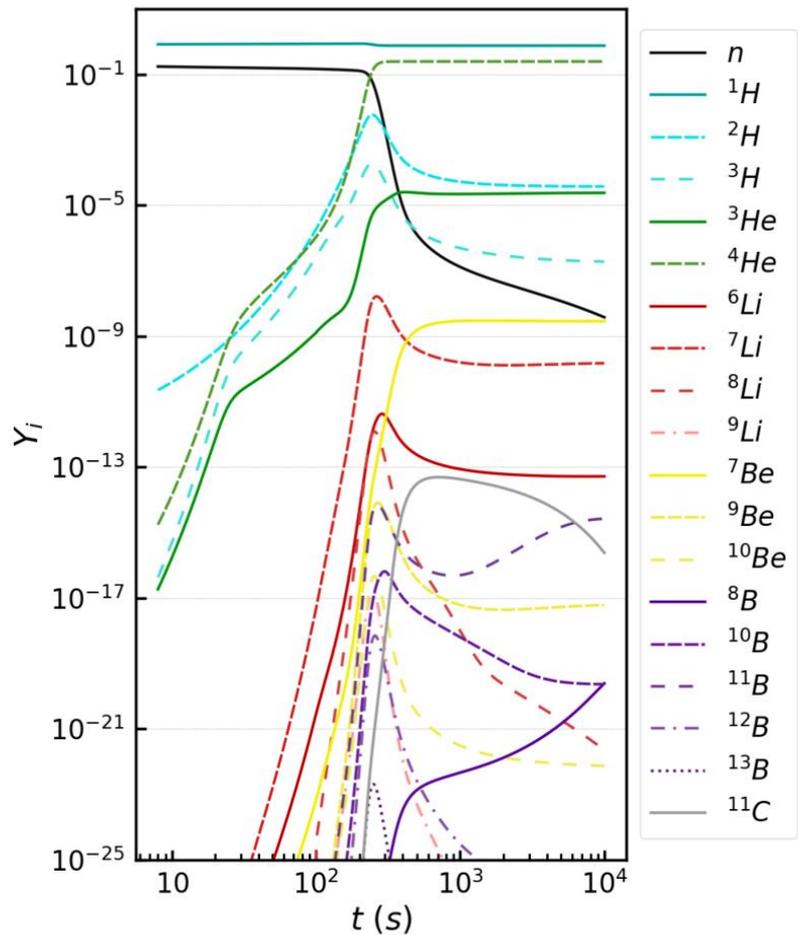
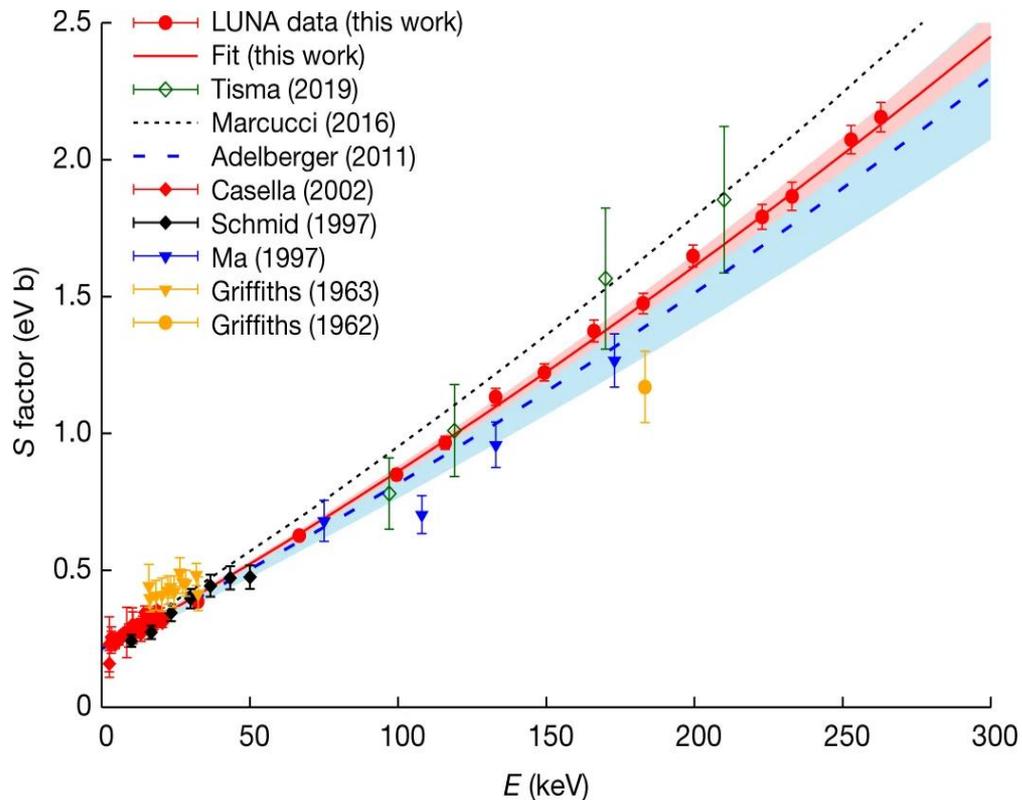
1. Уравнения Фадеева-Якубовского (FY) (Lazauskas)
2. Метод R-матрицы (Hale, Doolen)
3. Уравнения Альта-Грассбергера-Сандаса (AGS) (Fonseca, Deltuva)
4. Метод гиперсферических гармоник (НН) (Viviani, Kievsky, Rosati)
5. Метод резонансных групп (RGM+NCSM) (Hofmann, Hale)
6. Ab initio метод (Deltuva, Fonseca)

$$QSF = \frac{\sigma_{1,1}}{\sigma_0} \quad \sigma_0 = \frac{1}{9} \left(\underbrace{2\sigma_{1,1}}_{\text{Quintet}} + \underbrace{4\sigma_{1,0}}_{\text{Triplet}} + \underbrace{\sigma_{0,0} + 2\sigma_{1,-1}}_{\text{Singlet}} \right)$$

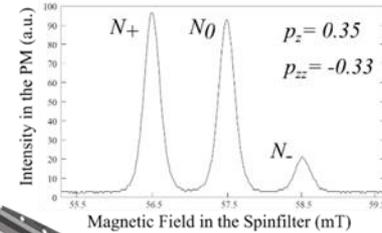
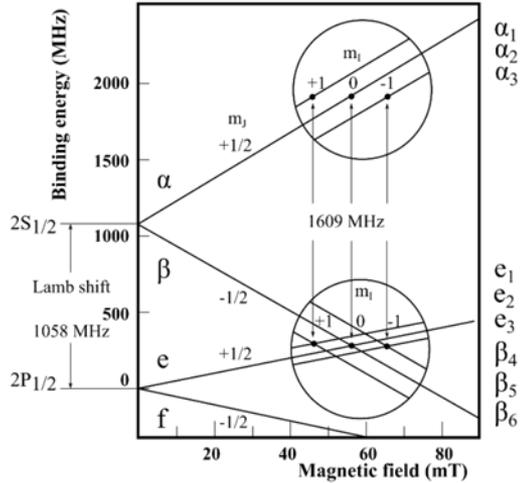
[H. Paetz gen. Schieck Eur. Phys. J. A 44, (2010) 321]



$$\langle \sigma v \rangle (T) = \sqrt{\frac{8}{\pi \mu_{ij}}} T^{-3/2} \int_0^{+\infty} dE E \sigma(E) e^{-E/T}$$

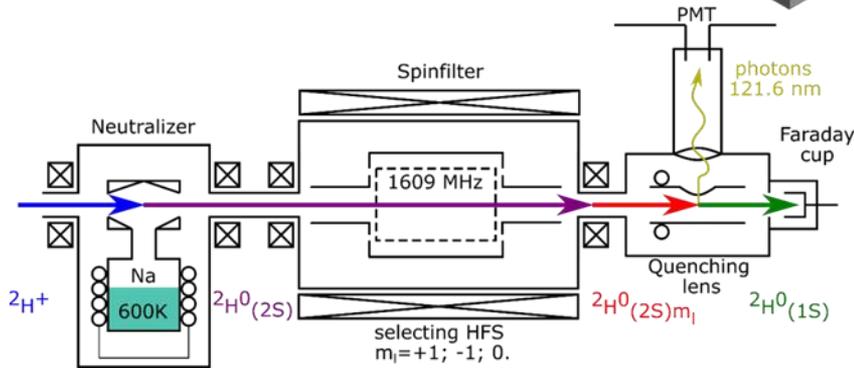
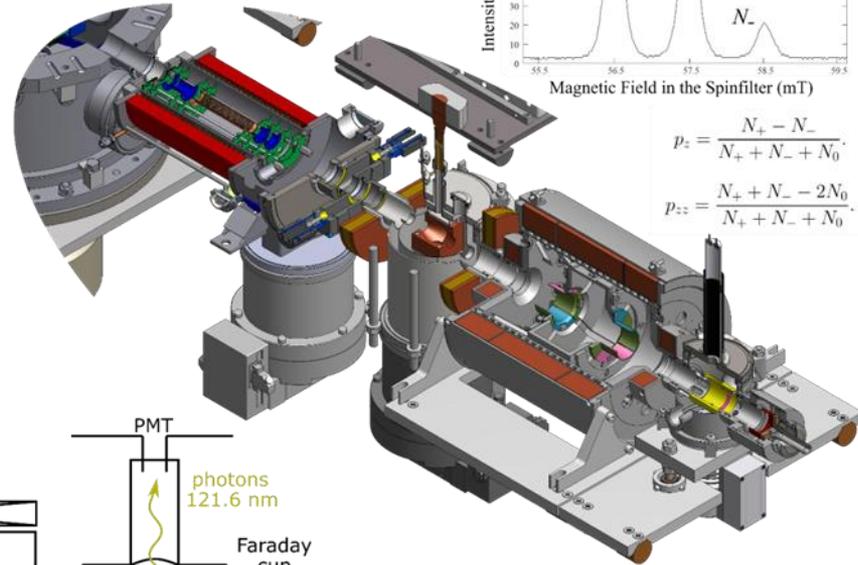


Lamb Shift Polarimeter



$$p_z = \frac{N_+ - N_-}{N_+ + N_- + N_0}$$

$$p_{zz} = \frac{N_+ + N_- - 2N_0}{N_+ + N_- + N_0}$$



Nuclear reaction polarimeter



$$\frac{L - R}{L + R} = \frac{\frac{3}{2} P_{ZZ} \sin \beta A_y}{1 + \frac{1}{2} P_{ZZ} [\sin^2 \beta A_{yy} + \cos^2 \beta A_{zz}]}$$

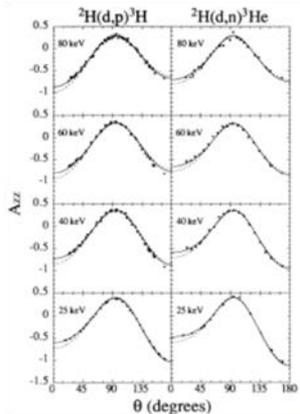
$$\frac{U - D}{U + D} = \frac{P_{ZZ} \sin \beta \cos \beta A_{xz}}{1 + \frac{1}{2} P_{ZZ} [\sin^2 \beta A_{xx} + \cos^2 \beta A_{zz}]}$$

$$\frac{2(L - R)}{L + R + U + D} = \frac{\frac{3}{2} P_{ZZ} \sin \beta A_y}{1 + \frac{1}{4} P_{ZZ} [3(\cos^2 \beta - 1) A_{zz}]}$$

$$\frac{2(U - D)}{L + R + U + D} = \frac{P_{ZZ} \sin \beta \cos \beta A_{xz}}{1 + \frac{1}{4} P_{ZZ} [3(\cos^2 \beta - 1) A_{zz}]}$$

$$\frac{(L + R) - (U + D)}{L + R + U + D} = \frac{-\frac{1}{4} P_{ZZ} \sin^2 \beta (A_{xx} - A_{yy})}{1 + \frac{1}{4} P_{ZZ} [3(\cos^2 \beta - 1) A_{zz}]}$$

G.G. Ohlsen, P.W. Keaton, Jr., Nucl. Instr. and Meth. **109**, 41 (1973).



K. Fletcher, et al., Phys. Rev. C **49**, 2305 (1994).

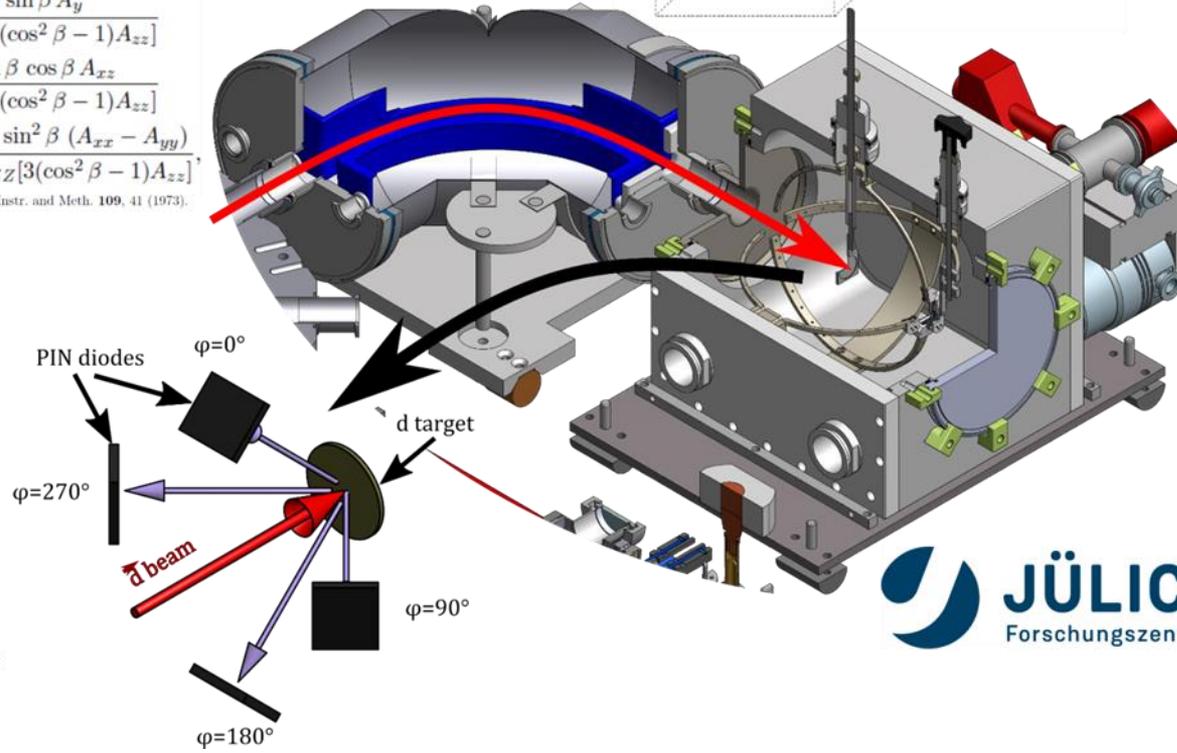
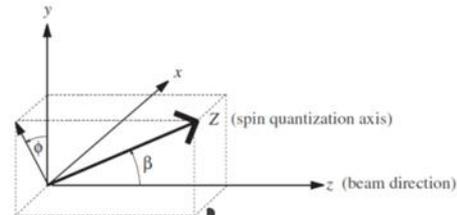
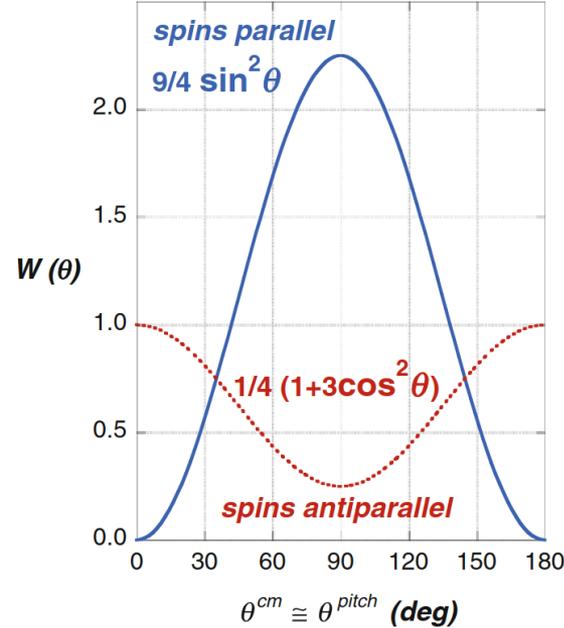
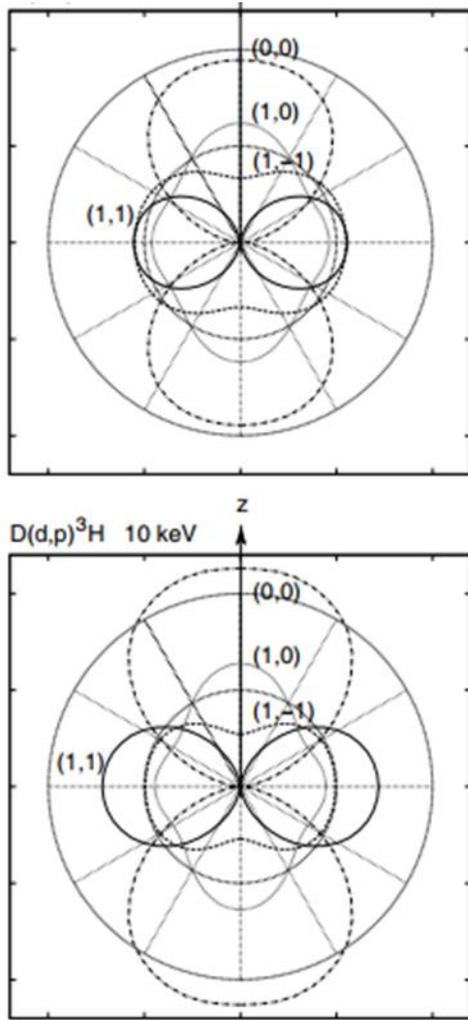
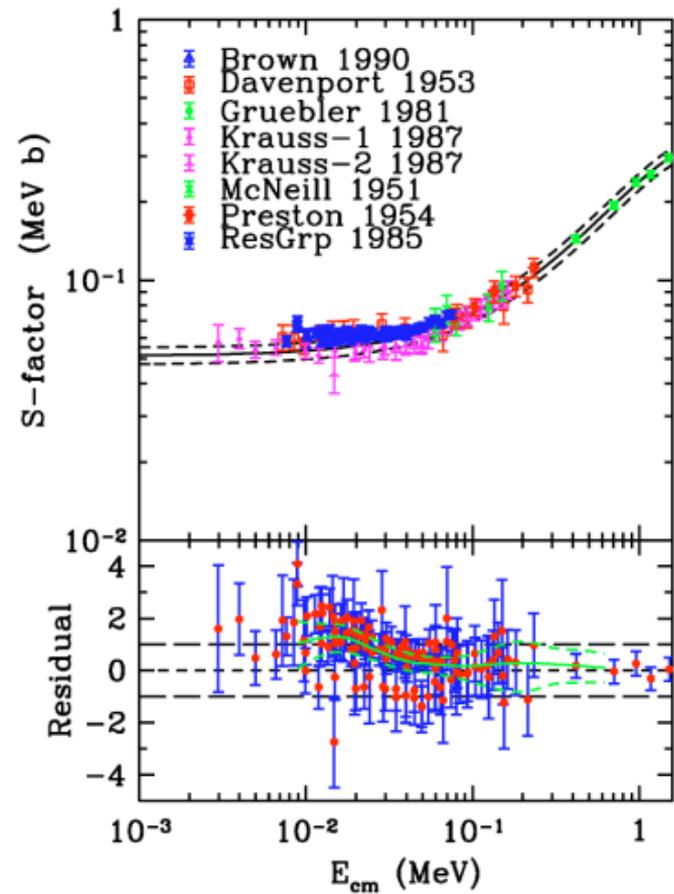
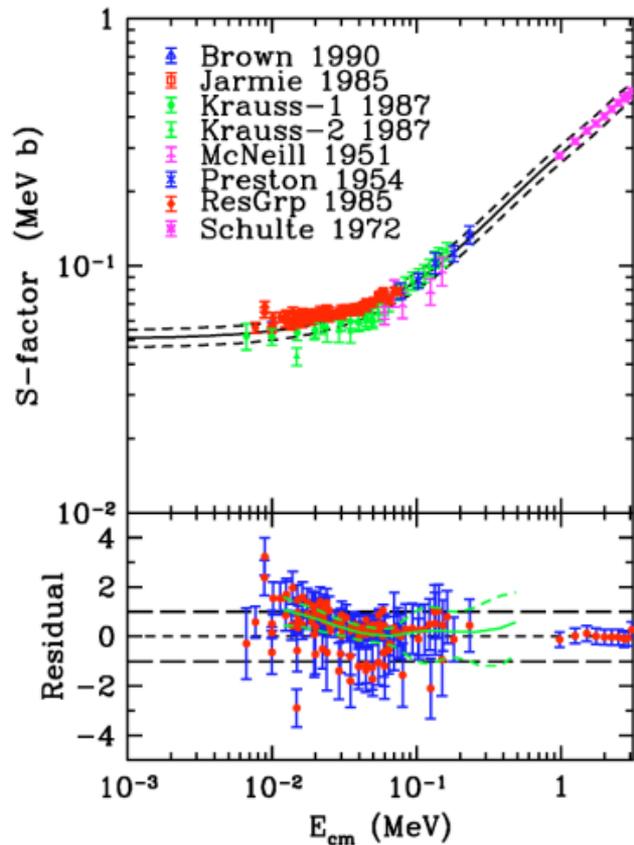


Fig. 16. Emission anisotropies of the spin-dependent partial reaction rates $\langle \sigma_{m,n} \cdot v \rangle$ of the ${}^2\text{H}(d,p){}^3\text{H}$ and ${}^2\text{H}(d,n){}^3\text{He}$ reactions at a plasma temperature corresponding to $kT = 10$ keV and for different deuteron spin orientations, from R -matrix parametrization, calculated from data of ref. [48]. In ref. [48] also calculations for other energies and for cross-sections are given. The averaging was done over the Maxwellian velocity distribution for temperature T . Results for both reactions are shown on the same (relative) scales.

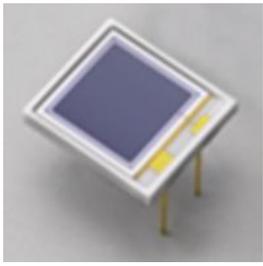


$$\begin{aligned} \langle \sigma(\theta)v \rangle &= \frac{1}{4\pi} \langle \sigma_0 v \rangle W(\theta) \\ &= \langle \sigma_0 v \rangle \left\{ 1 + \frac{1}{2} \vec{P}_D^v \cdot \vec{P}_{{}^3\text{He}} \right\} \end{aligned}$$



Скорость реакции для реакции $d(d,n)^3\text{He}$. Сплошная линия представляет лучший фит, пунктирная кривая – 1-сигма погрешность. Данные показаны с ошибками в 1-сигму. Нижняя часть показывает разницу в данных около лучшего фита, где ошибки выбраны ± 1 .

$D(d,p)^3\text{H}$



- 4- π detector with 51% filling
- 576 Hamamatsu PIN-diodes (S3590-09)
- PIN-diode active area: 1 cm²
- depleted layer: 300 μ m
- energy resolution: <50keV
- low reverse voltage (\leq 50V)

