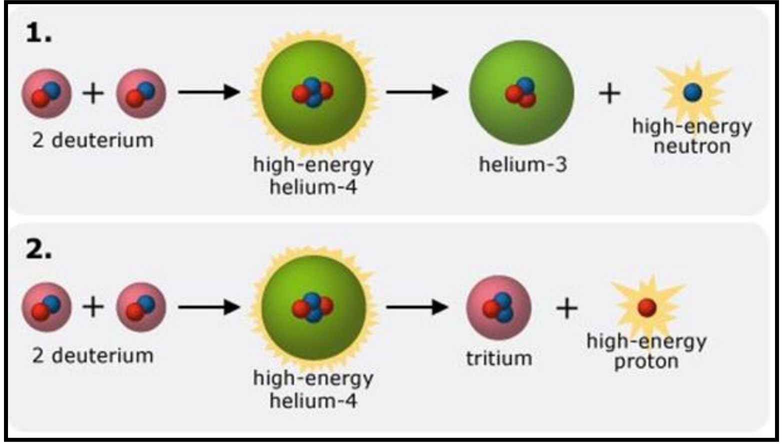
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»
Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»

Измерение и анализ угловых распределений сечения ядерной реакции DD-синтеза с участием поляризованных пучков дейтронов в эксперименте POLFUSION

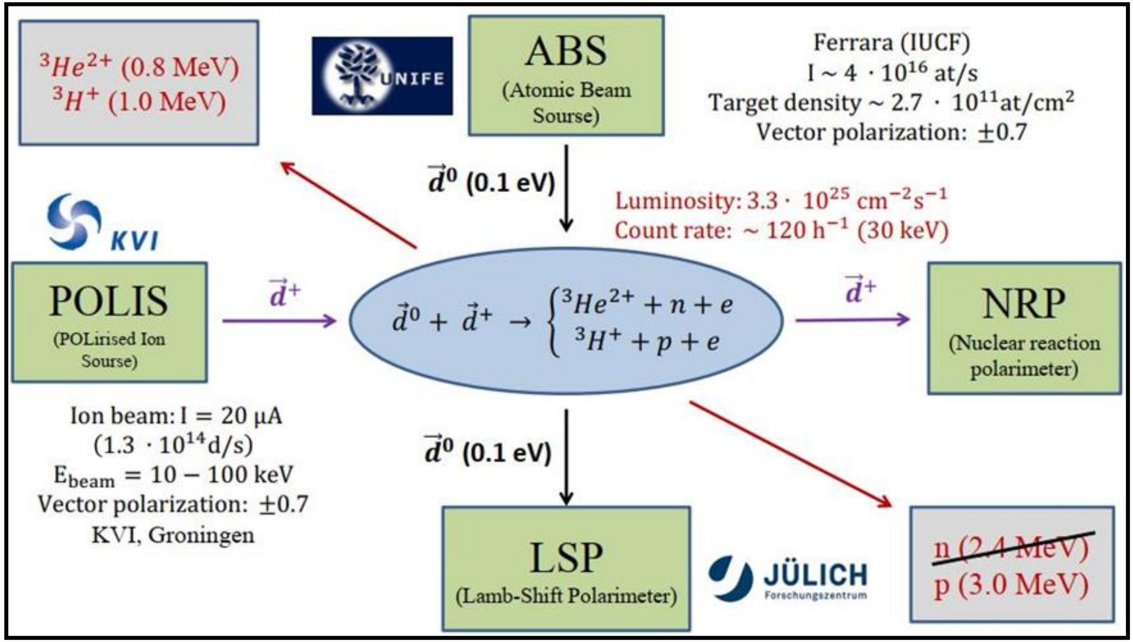
Андреянов Алексей Владимирович
ПИЯФ, ОФВЭ, ЛКСТ

Вопросы поляризационной физики легких ядер
Гатчина 2022

Эксперимент PolFusion



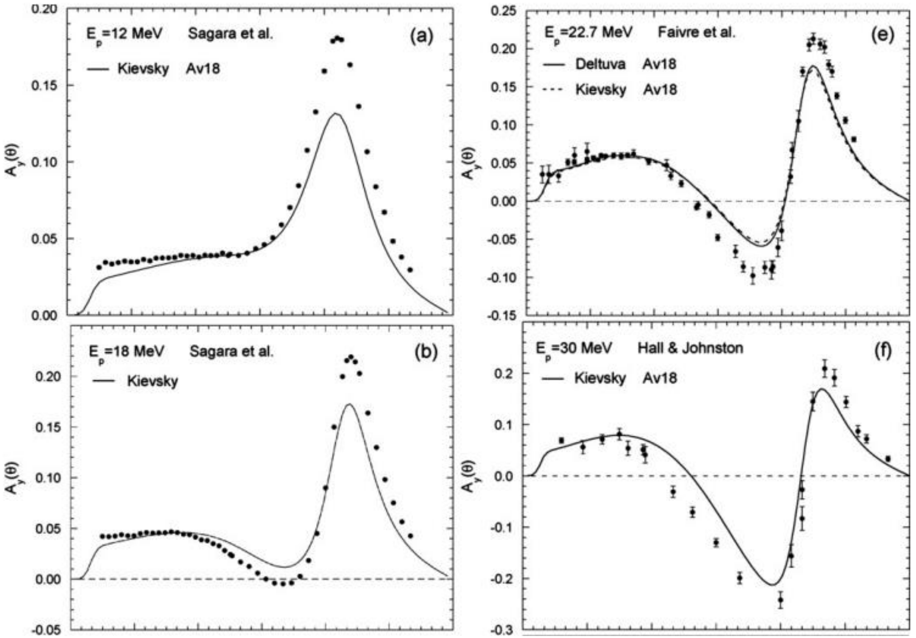
Исследование реакций $D(d,p)^3H$ и $D(d,n)^3He$ с поляризацией исходных частиц при низких энергиях (до 100 кэВ).



Коллаборация PolFusion

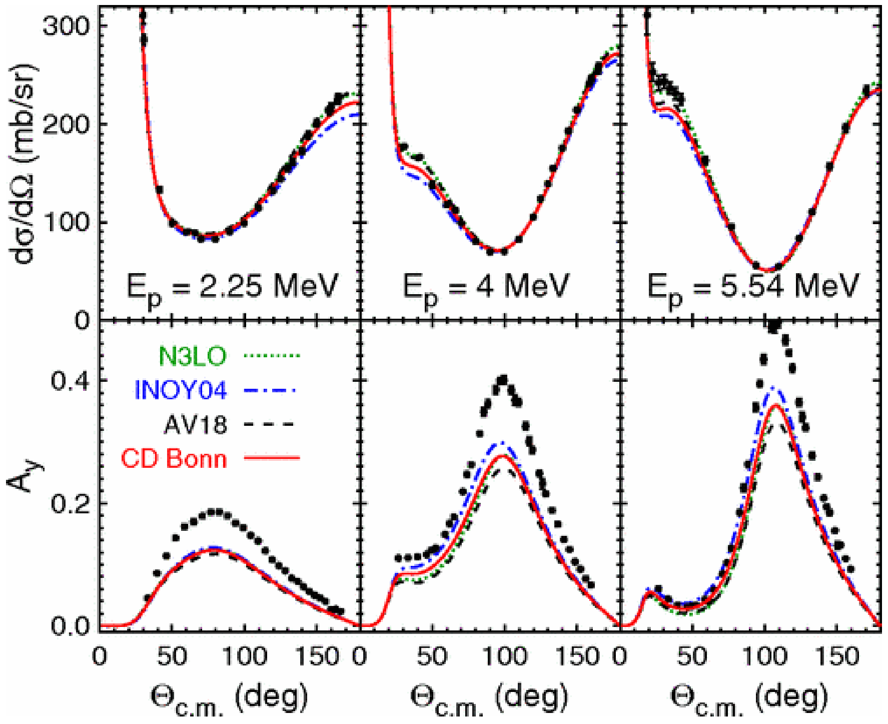
1. НИЦ «Курчатовский институт» -- ПИЯФ, РФ;
2. Исследовательский центр Юлиха, Германия;
3. Университет города Феррары, Италия.

Мотивация. Микроскопические теории.



Расхождение между измерениями Ay и предсказаниями уравнений Фадеева-Якубовского для 3N-системы (nucleon-D).

[W. Tornow et al., J. Phys. G 35, 125104 (2008)]



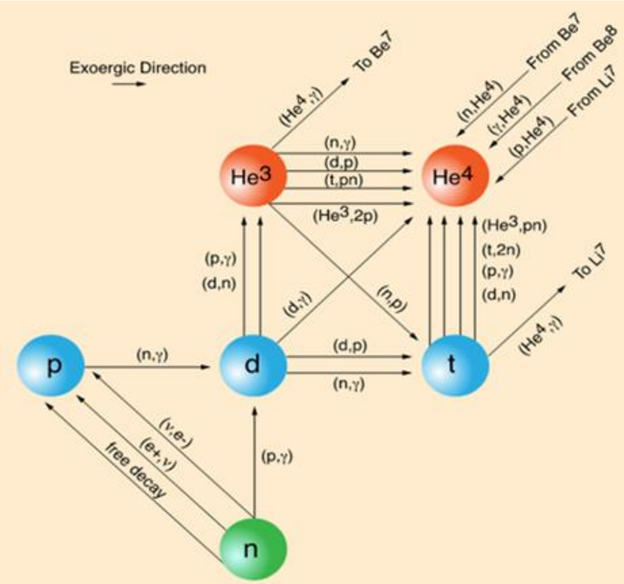
Дифференциальное сечение и протонная анализирующая способность реакции p-He3. Результаты включают кулоновское взаимодействие с потенциалами CD Bonn, AV18, INOY04, N3LO.

[Deltuva, Fonseca. Phys.Rev.Let., 98(16) (2007)]

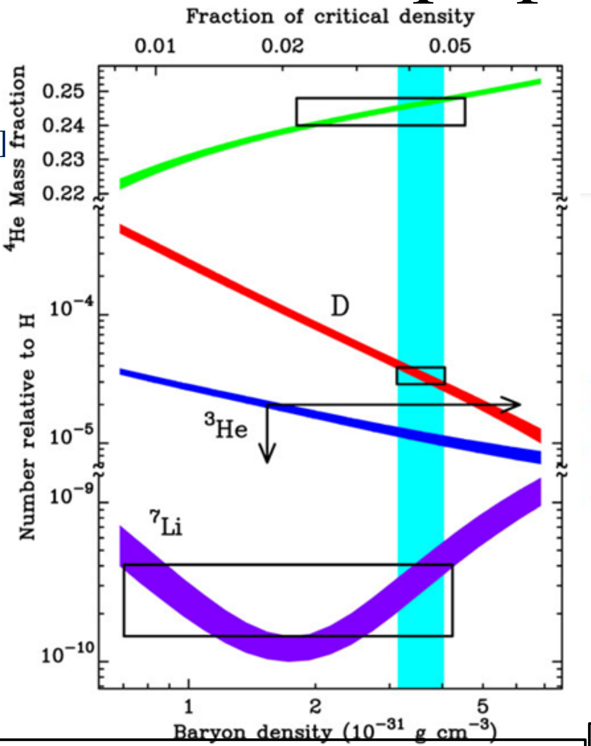
Мотивация. Астрофизика

Первичный нуклеосинтез

- [G.Huey, Phys. Rev. D 69, 103503 (2004)]
- [R.H. Cyburt Phys. Rev. D 70, 023505 (2004)]



Реакции первичного нуклеосинтеза

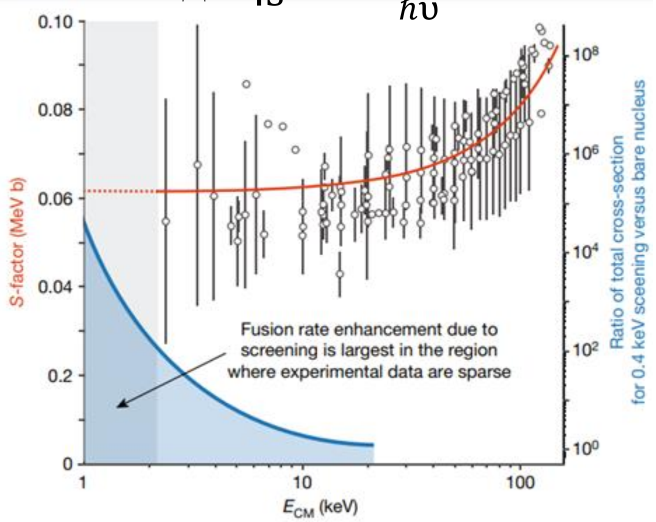


Предсказания нуклеосинтеза для распространенностей первичных 4He, D, 3He, 7Li вместе с результатами наблюдений и 2σ неопределенностями.

Астрофизический S-фактор:

$$S(E_{c.m.}) = \sigma_{tot} \cdot E_{c.m.} \cdot e^{2\pi\eta_S}$$

$$\text{где } \eta_S = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{\hbar\upsilon}$$



Данные по астрофизическому S-фактору для dd-синтеза как функции энергии. Синяя линия показывает отношение вычисленного сечения с учетом экранирующего потенциала к сечению для голого ядра.

[C.P.Berlinguette, et al. Nature 2019, V570]

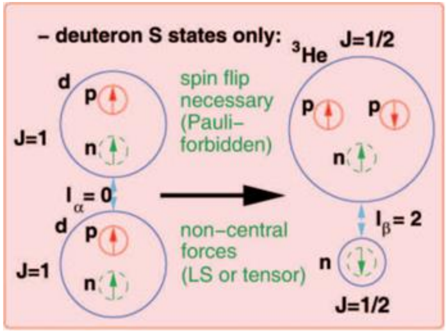
Мотивация. Термоядерная энергетика

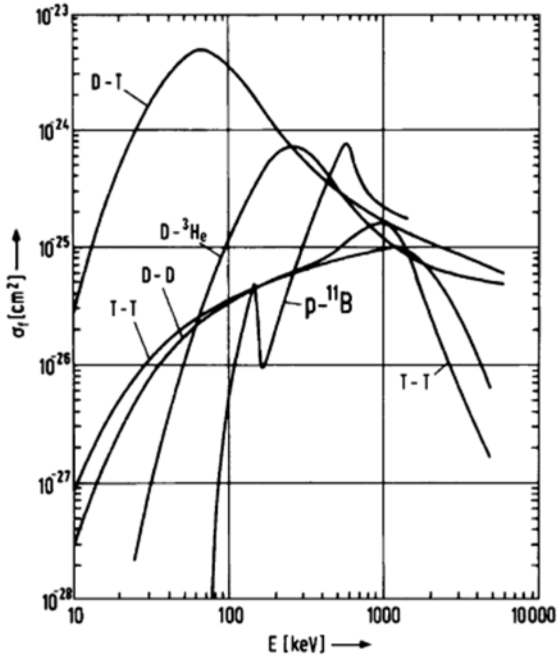
Управление вылетом нейтронов

- [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.]

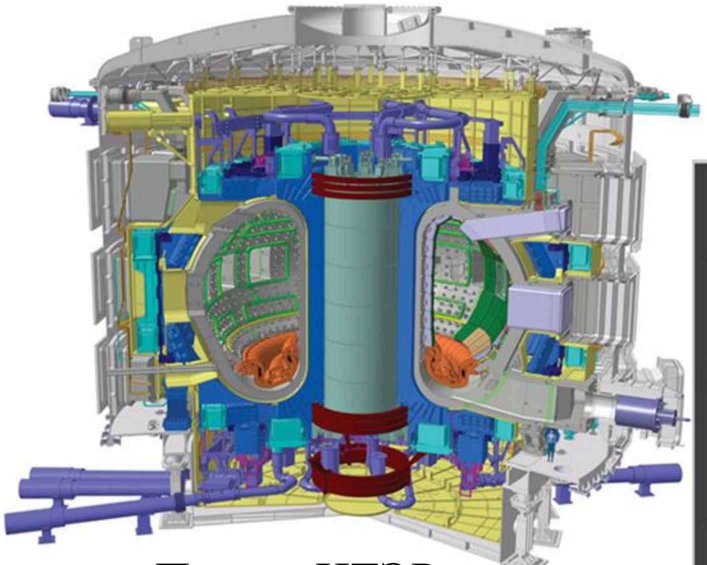
Подавление нейтронного канала

- [H. Paetz gen. Schieck, Eur. Phys. J. A 44, 321–354 (2010)]
- [Deltuva and Fonseca, Phys. Rev. C 81 (2010)]

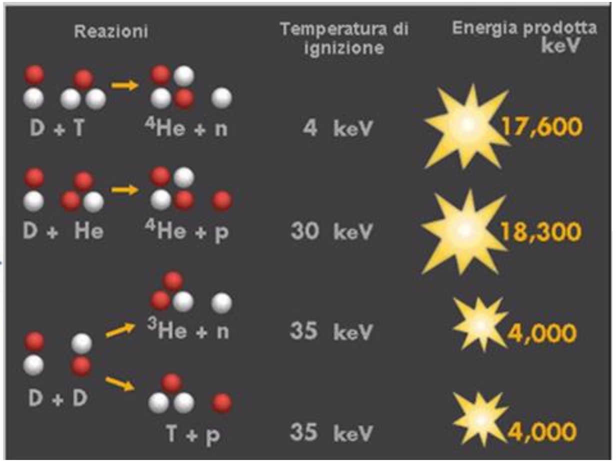




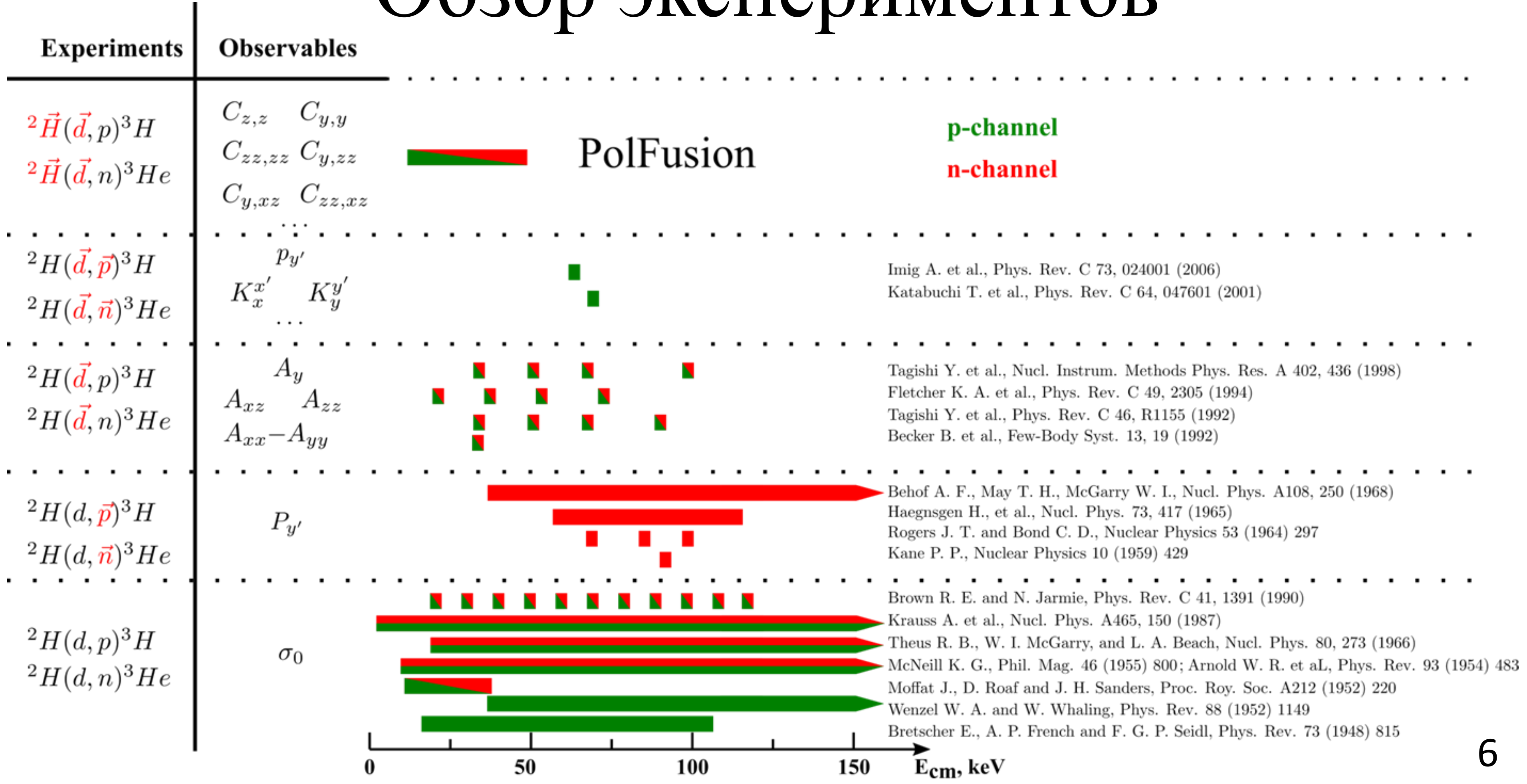
Интегральное сечение реакций синтеза как функция энергии относительного движения.



Проект ИТЭР



Обзор экспериментов

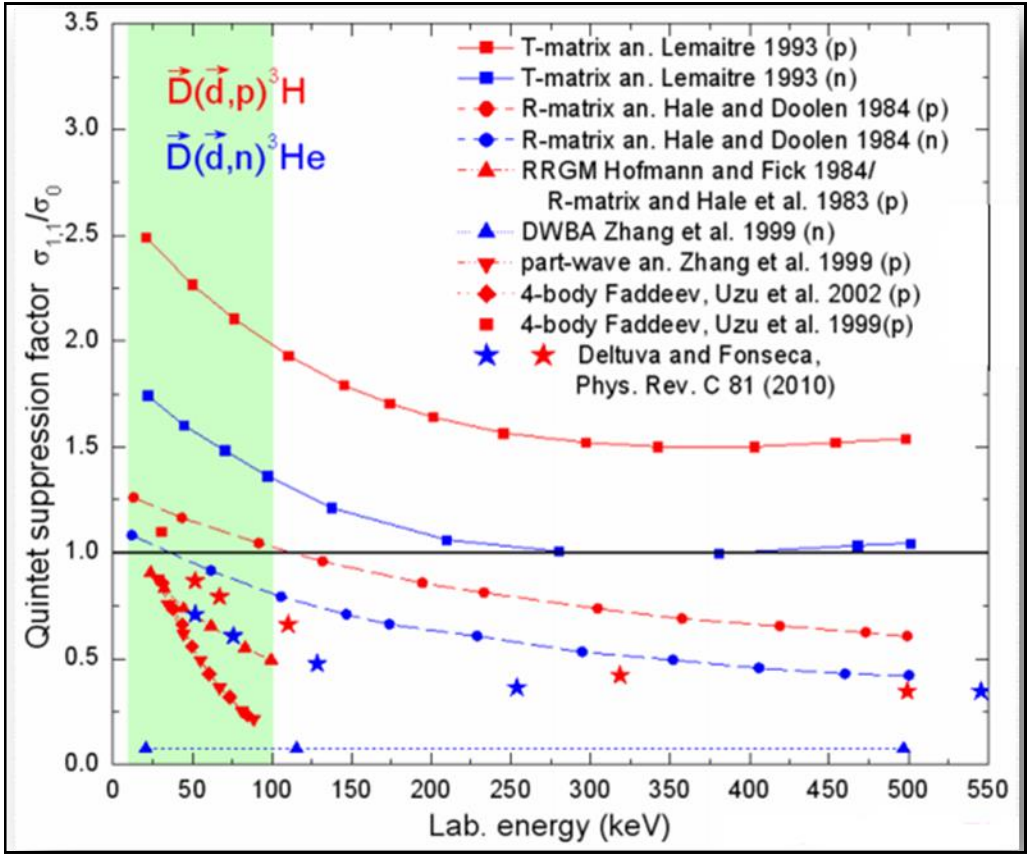


Обзор теоретических моделей

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)

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

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



Математический аппарат разложения по парциальным волнам

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

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

Правила отбора:

S_α четно	S_α нечетно
l_α четно	l_α нечетно
l_β четно	l_β нечетно
$S_\beta = \mathbf{0}, \mathbf{1}$	$S_\beta = \mathbf{0}, \mathbf{1}$

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

Математический аппарат

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = Sp(\rho_{out}) = Sp(T\rho_{in}T^{\dagger})$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{9}Sp\left(T\left[I+\frac{3}{2}\sum_{i}p_iS_i+\frac{1}{3}\sum_{i,j}p_{ij}S_{ij}\right]\left[I+\frac{3}{2}\sum_{i}q_iS_i+\frac{1}{3}\sum_{i,j}q_{ij}S_{ij}\right]T^{\dagger}\right)$$

$$=\frac{1}{9}Sp(TT^{\dagger})\left[1+\frac{3}{2}\sum_{i}q_iA_i+\frac{1}{3}\sum_{ij}q_{ij}A_{ij}+\frac{3}{2}\sum_{i}p_iA_i+\frac{9}{4}\sum_{ij}p_iq_jC_{i,j}+\right.$$

$$\left.+\frac{1}{2}\sum_{ijk}p_iq_{jk}C_{i,jk}+\frac{1}{3}\sum_{ij}p_{ij}A_{ij}+\frac{1}{2}\sum_{ijk}p_{ij}q_kC_{ij,k}+\frac{1}{9}\sum_{ijkl}p_{ij}q_{kl}C_{ij,kl}\right],$$

Выражения для анализирующих способностей и спин-корреляционных коэффициентов

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

$$C_{i,j} = \frac{Sp(TS_iS_jT^{\dagger})}{Sp(TT^{\dagger})}; \qquad C_{i,jk} = \frac{Sp(TS_iS_{jk}T^{\dagger})}{Sp(TT^{\dagger})};$$

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

Поляризованное сечение в декартовой системе координат

$$\sigma_p(\theta) = \sigma_0(\theta)\left\{1+\frac{3}{2}\left[A_y^{(b)}(\theta)p_y+A_y^{(t)}(\theta)q_y\right]+\frac{1}{2}\left[A_{zz}^{(b)}(\theta)p_{zz}+A_{zz}^{(t)}(\theta)q_{zz}\right]+\right.$$

$$+\frac{1}{6}\left[A_{xx-yy}^{(b)}(\theta)p_{xx-yy}+A^{(t)}(\theta)q_{xx-yy}\right]+$$

$$+\frac{9}{4}\left[C_{y,y}(\theta)p_yq_y+C_{x,x}(\theta)p_xq_x+C_{x,z}(\theta)p_xq_z+C_{z,x}(\theta)p_zq_x+C_{z,z}(\theta)p_zq_z\right]+$$

$$+\frac{3}{4}\left[C_{y,zz}(\theta)p_yq_{zz}+C_{zz,y}(\theta)p_{zz}q_y\right]+C_{y,xz}(\theta)p_yq_{xz}+$$

$$C_{xz,y}(\theta)p_{xz}q_y+C_{x,yz}(\theta)p_xq_{yz}+C_{yz,x}(\theta)p_{yz}q_x+C_{z,yz}(\theta)p_zq_{yz}+C_{yz,z}(\theta)p_{yz}q_z+$$

$$+\frac{1}{4}\left[C_{y,xx-yy}(\theta)p_yq_{xx-yy}+C_{xx-yy,y}(\theta)p_{xx-yy}q_y+C_{zz,zz}(\theta)p_{zz}q_{zz}\right]+$$

$$+\frac{1}{3}\left[C_{zz,xz}(\theta)p_{zz}q_{xz}+C_{xz,zz}(\theta)p_{xz}q_{zz}\right]+$$

$$+\frac{1}{12}\left[C_{zz,xx-yy}(\theta)p_{zz}q_{xx-yy}+C_{xx-yy,zz}(\theta)p_{xx-yy}q_{zz}\right]+$$

$$+\frac{4}{9}\left[C_{xz,xz}(\theta)p_{xz}q_{xz}+C_{yz,yz}(\theta)p_{yz}q_{yz}\right]+\frac{8}{9}\left[C_{xy,yz}(\theta)p_{xy}q_{yz}+C_{yz,xy}(\theta)p_{yx}q_{xy}\right]+$$

$$+\frac{16}{9}C_{xy,xy}(\theta)p_{xy}q_{xy}+\frac{1}{9}\left[C_{xz,xx-yy}(\theta)p_{xz}q_{xx-yy}+C_{xx-yy,xz}(\theta)p_{xx-yy}q_{xz}\right]+$$

$$+\frac{1}{36}C_{xx-yy,xx-yy}(\theta)p_{xx-yy}q_{xx-yy}+$$

$$\left.+\frac{1}{2}\left[C_{x,xy}(\theta)p_xq_{xy}+C_{xy,x}(\theta)p_{xy}q_x+C_{z,xy}(\theta)p_zq_{xy}+C_{xy,z}(\theta)p_{xy}q_z\right]\right\}.$$

Математический аппарат

Матрица реакции в представлении общего спина

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

Матричные элементы амплитуды реакции

$$\boxed{B^{S_\beta S_\alpha}_{\sigma_\beta \sigma_\alpha}} = \sum_{J=0}^{\infty} \sum_{l_\alpha=|J-S_\alpha|}^{J+S_\alpha} \sum_{l_\beta=|J-S_\beta|}^{J+S_\beta} i^{l_\alpha - l_\beta} \sqrt{4\pi(2l_\alpha+1)}\, C^{J\sigma_\alpha}_{l_\alpha 0 S_\alpha \sigma_\alpha} C^{J\sigma_\alpha}_{l_\beta(\sigma_\alpha-\sigma_\beta) S_\beta \sigma_\beta} \times$$

$$\boxed{\times T^J_{l_\beta S_\beta, l_\alpha S_\alpha}} Y_{l_\beta,(\sigma_\alpha-\sigma_\beta)}(\theta,\varphi);$$

${T^J}_{l_\beta S_\beta l_\alpha S_\alpha}$ – комплексная парциальная амплитуда;
$Y_{lm}(\vartheta,\varphi)$ – сферические функции;
J – полный момент для данной парциальной волны;
l_α, l_β – орбитальные моменты начального и конечного состояния;
${C^{JM}}_{j_1 m_1 j_2 m_2}$ – коэффициенты Клебша-Гордана;
${P^m}_l(\cos(\vartheta))$ – присоединенные полиномы Лежандра.

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

Математический аппарат

Явный вид некоторых матричных элементов амплитуды реакции, выраженных через парциальные амплитуды , определяющих угловую зависимость:

$$B^{11}_{11} = \frac{1}{2}\left[P^0_1\left(3T^1_{11,11} + 3T^2_{11,11} - \sqrt{6}T^2_{11,31}\right) + \right.$$
$$\left. + P^0_3\left(-\sqrt{6}T^2_{31,11} + 2T^2_{31,31} + 7T^3_{31,31} + 5T^4_{31,31}\right)\right]$$

$$B^{12}_{1-2} = \frac{1}{2}e^{-3i\varphi}\left[P^3_4\left(\frac{1}{4}\sqrt{\frac{1}{6}}T^3_{41,22} - \frac{1}{4}\sqrt{\frac{3}{70}}T^4_{41,22} - \frac{1}{4}\sqrt{\frac{1}{15}}T^3_{41,42} + \right.\right.$$
$$\left.\left. + \frac{9}{20}\sqrt{\frac{3}{77}}T^4_{41,42} - \frac{1}{10}\sqrt{\frac{1}{6}}T^5_{41,42}\right)\right];$$

$$B^{11}_{01} = \frac{1}{\sqrt{2}}e^{i\varphi}\left[P^1_1\left(-\frac{3}{2}T^1_{11,11} + \frac{3}{2}T^2_{11,11} - \sqrt{\frac{3}{2}}T^2_{11,31}\right) + \right.$$
$$\left. + P^1_3\left(\sqrt{\frac{3}{2}}T^2_{31,11} - \frac{2}{3}T^2_{31,31} - \frac{7}{12}T^3_{31,31} + \frac{5}{4}T^4_{31,31}\right)\right];$$

$$B^{10}_{00} = 0, \quad B^{10}_{-10} = B^{10}_{10}, \quad B^{01}_{00} = 0, \quad B^{01}_{0-1} = B^{01}_{01},$$

$$B^{11}_{-1-1} = B^{11}_{11}, \quad B^{11}_{0-1} = -B^{11}_{01}, \quad B^{11}_{-10} = -B^{11}_{-10}, \quad B^{11}_{-11} = B^{11}_{1-1},$$

$$B^{02}_{0-1} = -B^{02}_{01}, \quad B^{02}_{0-2} = B^{02}_{02}, \quad B^{12}_{00} = 0,$$

$$B^{12}_{-1-2} = B^{12}_{12}, \quad B^{12}_{-12} = B^{12}_{1-2}, \quad B^{12}_{-1-1} = -B^{12}_{11},$$

$$B^{12}_{0-2} = -B^{12}_{02}, \quad B^{12}_{-10} = B^{12}_{10}, \quad B^{12}_{0-1} = B^{12}_{01}, \quad B^{12}_{-11} = -B^{12}_{1-1},$$

Математический аппарат

$$\sigma_p(\theta) = \sigma_0(\theta)\left\{1 + \frac{3}{2}\left[A_y^{(b)}(\theta)p_y + A_y^{(t)}(\theta)q_y\right] + \frac{1}{2}\left[A_{zz}^{(b)}(\theta)p_{zz} + A_{zz}^{(t)}(\theta)q_{zz}\right] + \right.$$
$$+\frac{1}{6}\left[A_{xx-yy}^{(b)}(\theta)p_{xx-yy} + A^{(t)}(\theta)q_{xx-yy}\right] +$$
$$+\frac{9}{4}\left[C_{y,y}(\theta)p_y q_y + C_{x,x}(\theta)p_x q_x + C_{x,z}(\theta)p_x q_z + C_{z,x}(\theta)p_z q_x + C_{z,z}(\theta)p_z q_z\right] +$$
$$+\frac{3}{4}\left[C_{y,zz}(\theta)p_y q_{zz} + C_{zz,y}(\theta)p_{zz} q_y\right] + C_{y,xz}(\theta)p_y q_{xz} +$$
$$C_{xz,y}(\theta)p_{xz}q_y + C_{x,yz}(\theta)p_x q_{yz} + C_{yz,x}(\theta)p_{yz}q_x + C_{z,yz}(\theta)p_z q_{yz} + C_{yz,z}(\theta)p_{yz}q_z +$$
$$+\frac{1}{4}\left[C_{y,xx-yy}(\theta)p_y q_{xx-yy} + C_{xx-yy,y}(\theta)p_{xx-yy}q_y + C_{zz,zz}(\theta)p_{zz}q_{zz}\right] +$$
$$+\frac{1}{3}\left[C_{zz,xz}(\theta)p_{zz}q_{xz} + C_{xz,zz}(\theta)p_{xz}q_{zz}\right] +$$
$$+\frac{1}{12}\left[C_{zz,xx-yy}(\theta)p_{zz}q_{xx-yy} + C_{xx-yy,zz}(\theta)p_{xx-yy}q_{zz}\right] +$$
$$+\frac{4}{9}\left[C_{xz,xz}(\theta)p_{xz}q_{xz} + C_{yz,yz}(\theta)p_{yz}q_{yz}\right] + \frac{8}{9}\left[C_{xy,yz}(\theta)p_{xy}q_{yz} + C_{yz,xy}(\theta)p_{yx}q_{xy}\right] +$$
$$+\frac{16}{9}C_{xy,xy}(\theta)p_{xy}q_{xy} + \frac{1}{9}\left[C_{xz,xx-yy}(\theta)p_{xz}q_{xx-yy} + C_{xx-yy,xz}(\theta)p_{xx-yy}q_{xz}\right] +$$
$$+\frac{1}{36}C_{xx-yy,xx-yy}(\theta)p_{xx-yy}q_{xx-yy} +$$
$$\left. +\frac{1}{2}\left[C_{x,xy}(\theta)p_x q_{xy} + C_{xy,x}(\theta)p_{xy}q_x + C_{z,xy}(\theta)p_z q_{xy} + C_{xy,z}(\theta)p_{xy}q_z\right]\right\}.$$

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

$$A_y^{(b)} = \frac{1}{18}\sqrt{6}\,\mathrm{Im}\left[-\left(B_{01}^{01}\right)^* B_{00}^{02} - \left(B_{11}^{11}\right)^* B_{10}^{12} - \left(B_{1-1}^{11}\right)^* B_{10}^{12} + \right.$$
$$\left. + 3\left(\left(B_{00}^{02}\right)^* B_{01}^{02}\right) + \left(B_{10}^{12}\right)^* B_{11}^{12} - \left(B_{10}^{12}\right)^* B_{1-1}^{12}\right]$$
$$+\frac{1}{6}\sqrt{2}\,\mathrm{Im}\left[\left(B_{00}^{11}\right)^* B_{01}^{11} + \left(B_{10}^{11}\right)^* B_{11}^{11} - \left(B_{10}^{11}\right)^* B_{1-1}^{11} - \left(B_{00}^{11}\right)^* B_{01}^{12} - \left(B_{10}^{11}\right)^* B_{11}^{12} - \right.$$
$$\left. - \left(B_{10}^{11}\right)^* B_{1-1}^{12}\right] + \frac{2}{9}\sqrt{3}\,\mathrm{Im}\left[-\left(B_{00}^{00}\right)^* B_{01}^{01} - \left(B_{10}^{10}\right)^* B_{11}^{11} - \left(B_{10}^{10}\right)^* B_{1-1}^{11}\right]$$
$$+\frac{1}{3}\,\mathrm{Im}\left[-\left(B_{01}^{01}\right)^* B_{02}^{02} + \left(B_{01}^{02}\right)^* B_{02}^{02} - \left(B_{01}^{11}\right)^* B_{02}^{12} + \left(B_{01}^{12}\right)^* B_{02}^{12} - \left(B_{11}^{11}\right)^* B_{12}^{12} + \right.$$
$$\left. + \left(B_{11}^{12}\right)^* B_{12}^{12} - \left(B_{1-1}^{11}\right)^* B_{1-2}^{12} - \left(B_{1-1}^{12}\right)^* B_{1-2}^{12}\right];$$

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

Кулоновские поправки

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

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

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

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

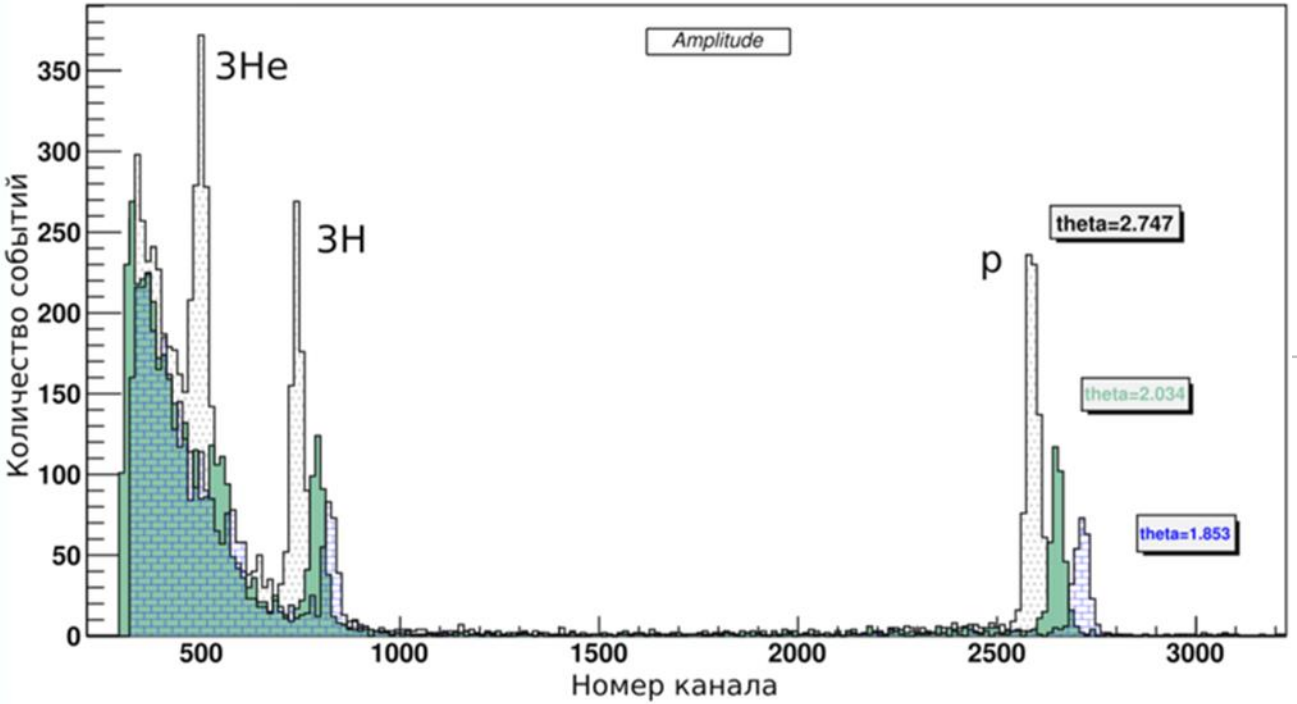
$$r_0 = k_\alpha r_0^{'}; \quad k_\alpha = 0.219\sqrt{E_{cm}}[fm^{-1}].$$

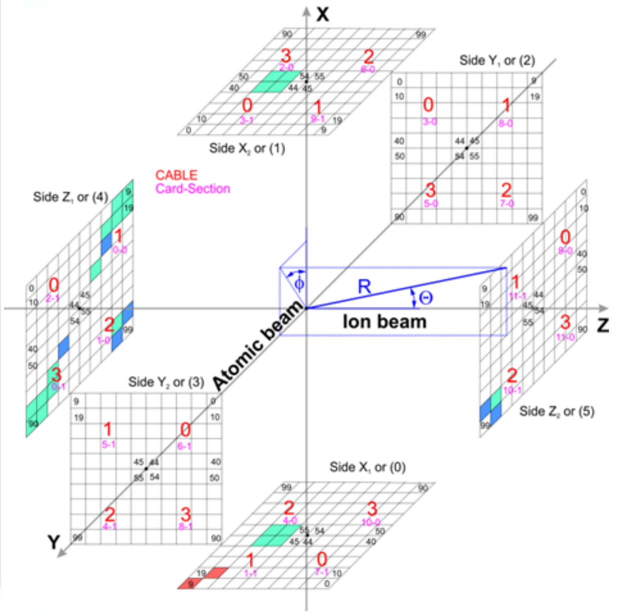
$$\varphi_l = arg\Gamma(l + i\eta + 1),$$

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

Спасибо за внимание

Тестовые сеансы





Мишень: пары тяжелой воды
Время набора: ~ 500 часов
Энергия: 15 и 25 кэВ

Кулоновские поправки

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

$$\left[\frac{d^2}{dr^2} + 1 - \frac{l(l+1)}{r^2} - 2\frac{\eta}{r}\right] u_l^{\pm}(r) = 0,$$

$$u_l^{\pm}(r) = \left(G_l(r) \mp iF_l(r)\right) e^{\mp i\varphi_l},$$

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

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

$$r = kr^{'}.$$

$$u_l^{\pm}(r) \xrightarrow[r\to\infty]{} \exp\left(\mp i(r - \eta\ln(2r) - \frac{\pi}{2})\right)$$

$$\eta = \frac{Z_1 Z_2 \alpha}{v/c} = 0.1574 Z_1 Z_2 \sqrt{\frac{m_r}{E_{cm}}},$$

$$\eta_{D+D} = \frac{0.1574}{\sqrt{E_{cm}}},$$

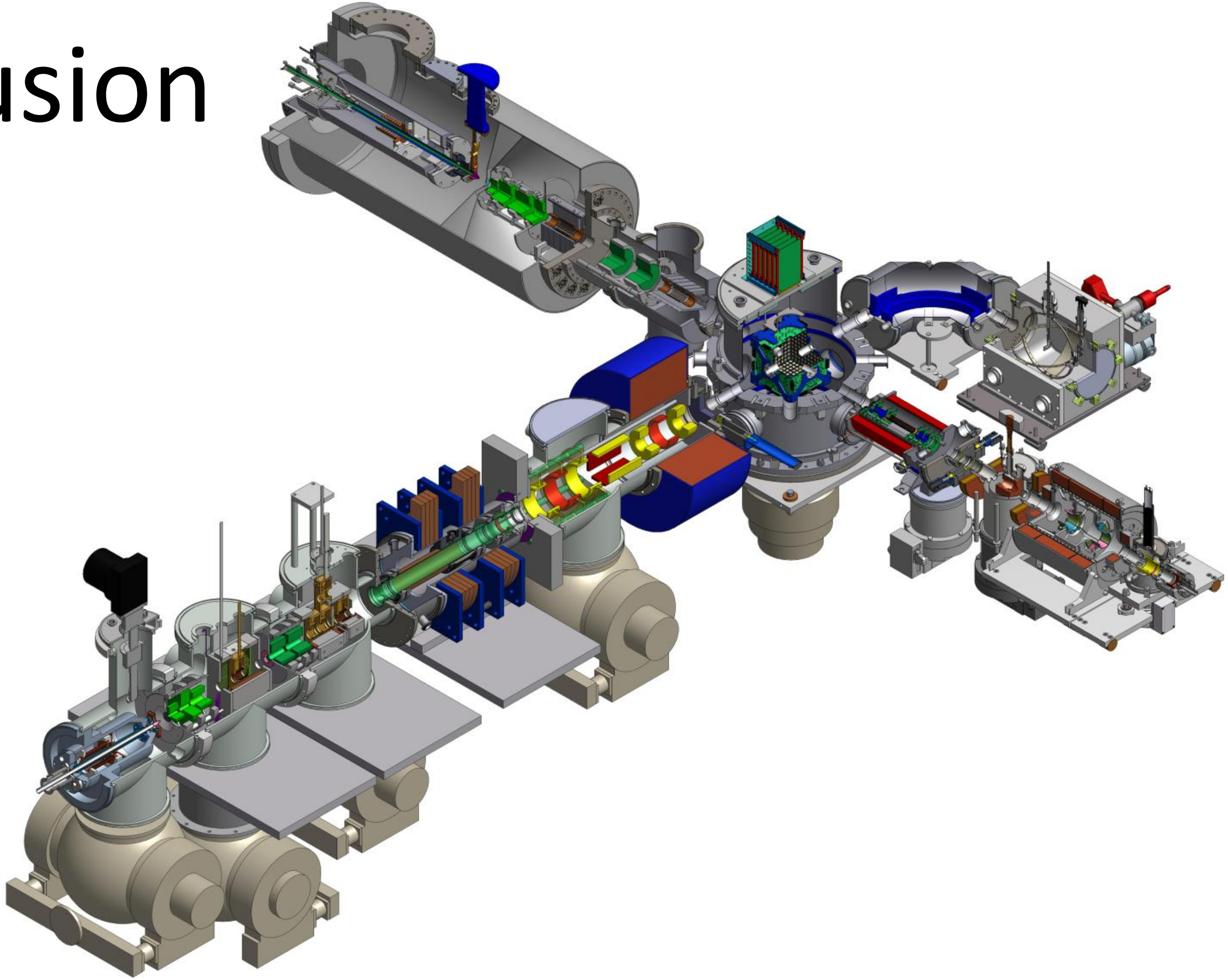
$$P_l(r_0) = \frac{|u_l^-(r\to\infty)|^2}{|u_l^-(r = r_0)|^2} = \frac{1}{F_l^2(r_0) + G_l^2(r_0)},$$

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

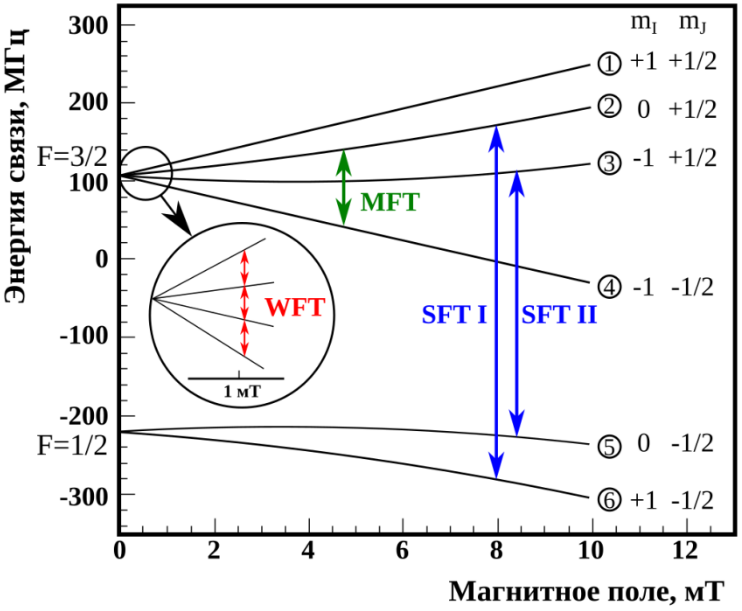
$$C_l(r_0) = \sqrt{P_l(r_0)\exp(i(\delta_l(r_0) + \varphi_l(r_0)))}.$$

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

PolFusion



POLIS



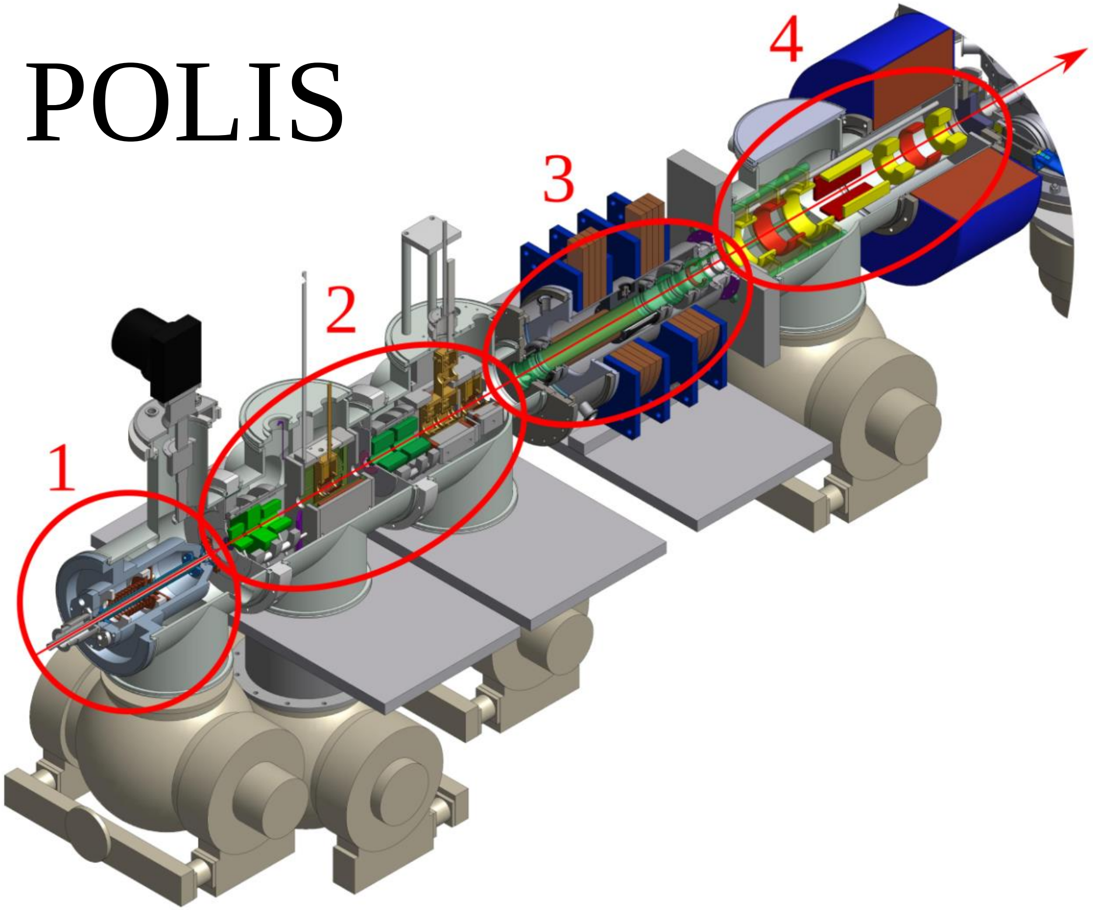
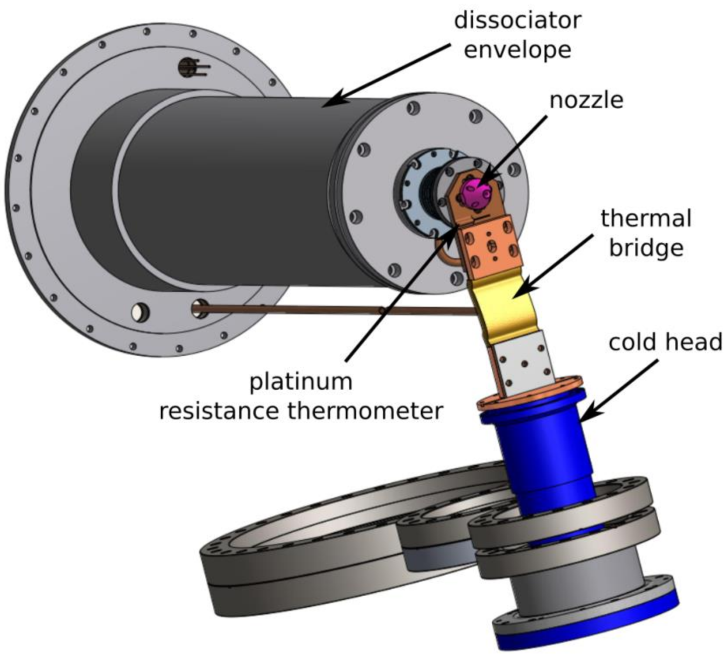
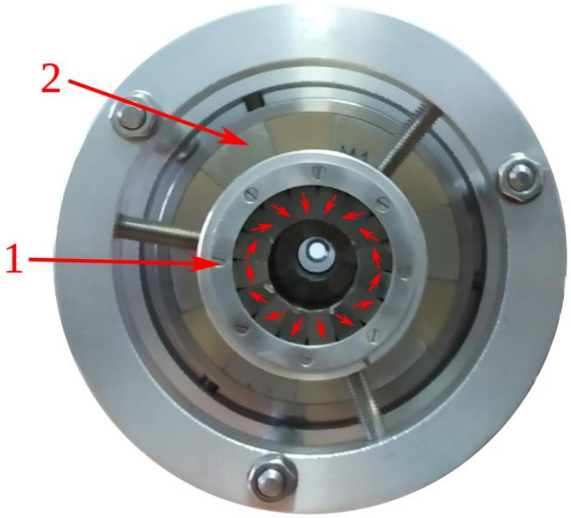


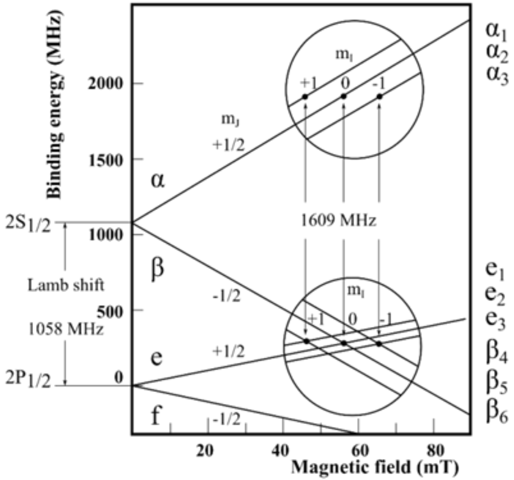
Рис. 2.2. Источник поляризованных дейтронов POLIS. Цифрами на рисунке обозначены: 1 – диссоциатор; 2– поляризатор; 3– ионизатор; 4 – система фокусировки ионного пучка.

ABS

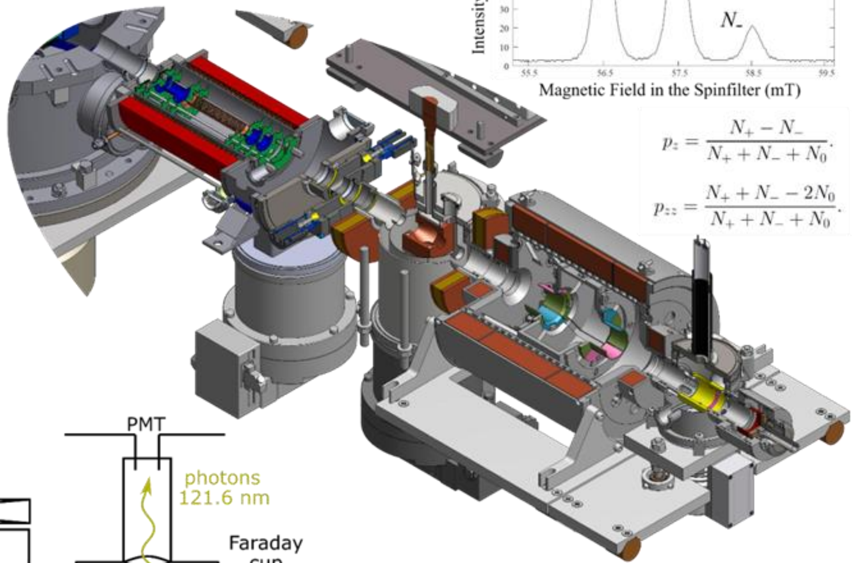

dissociator
envelope
nozzle
thermal
bridge
cold head
platinum
resistance thermometer

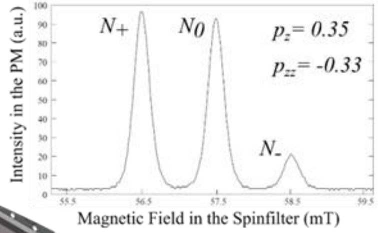

2
1

Lamb Shift Polarimeter



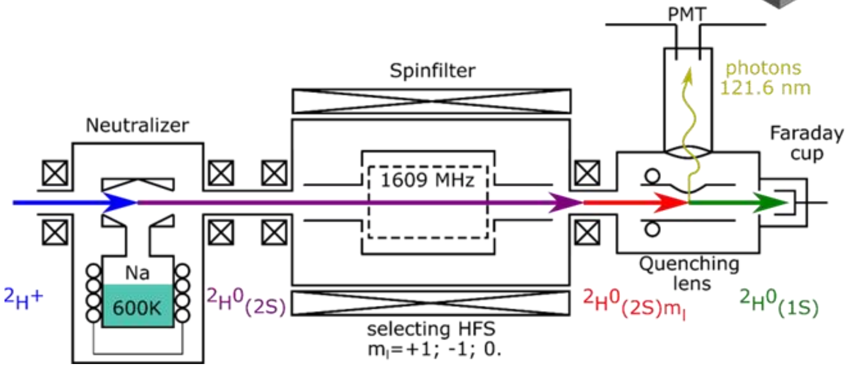
PNPI - NRC KI





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

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



JÜLICH
Forschungszentrum

Nuclear reaction polarimetr

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

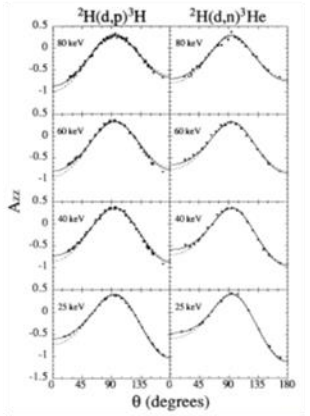
$$\frac{U-D}{U+D} = \frac{P_{ZZ}\sin\beta\,\cos\beta\, A_{xz}}{1+\frac{1}{2}P_{ZZ}[\sin^2\beta A_{xx} + \cos^2\beta A_{zz}]}$$

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

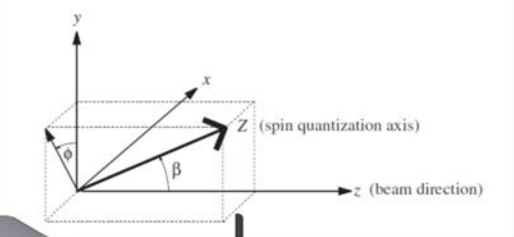
$$\frac{2(U-D)}{L+R+U+D} = \frac{P_{ZZ}\sin\beta\,\cos\beta\, A_{xz}}{1+\frac{1}{4}P_{ZZ}[3(\cos^2\beta-1)A_{zz}]}$$

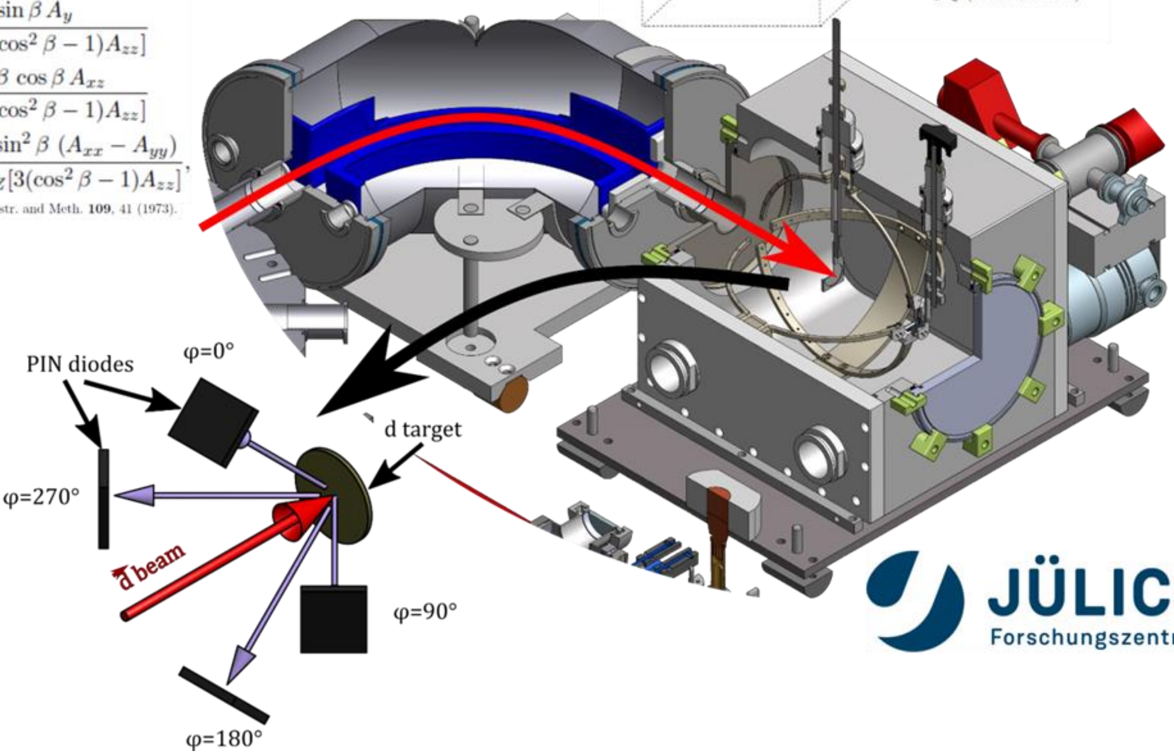
$$\frac{(L+R)-(U+D)}{L+R+U+D} = \frac{-\frac{1}{4}P_{ZZ}\sin^2\beta\,(A_{xx}-A_{yy})}{1+\frac{1}{4}P_{ZZ}[3(\cos^2\beta-1)A_{zz}]},$$

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



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





PNPI - NRC KI

JÜLICH Forschungszentrum

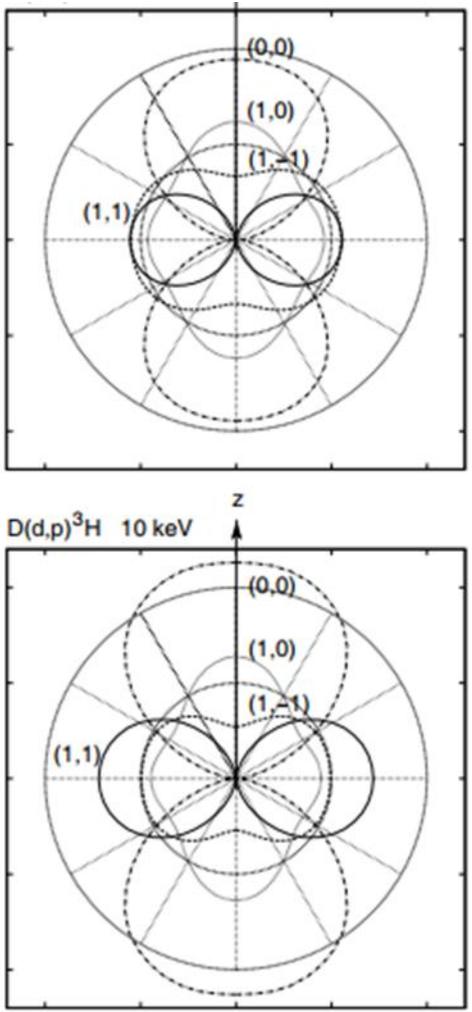
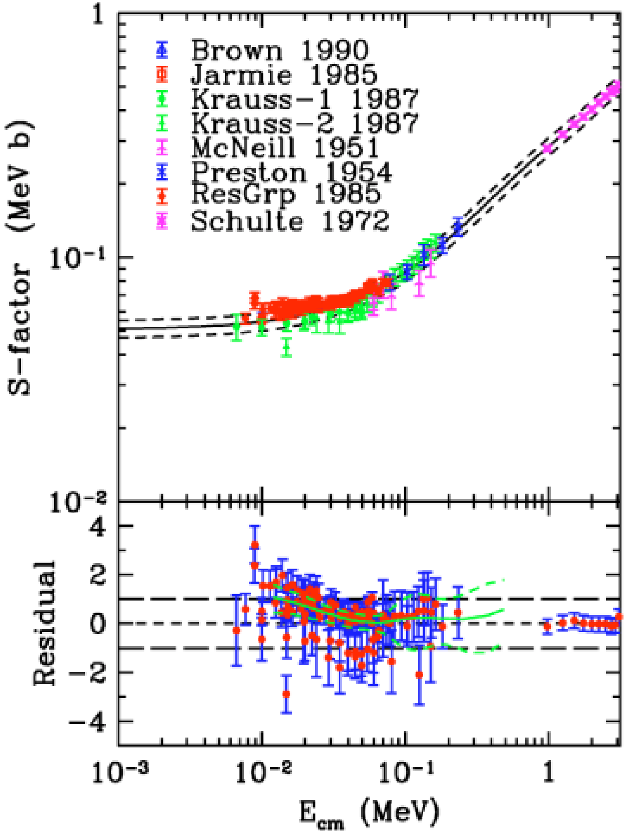
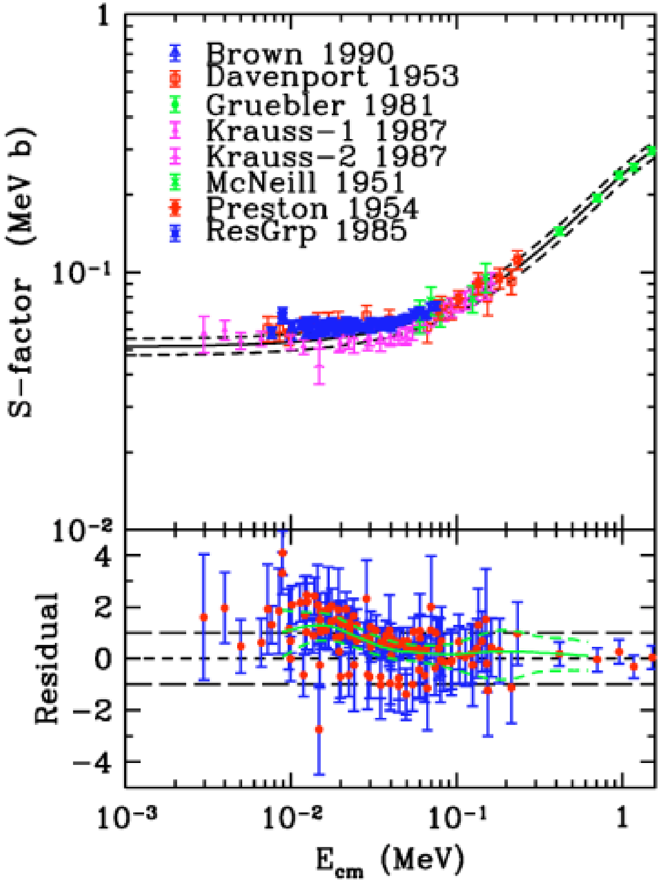


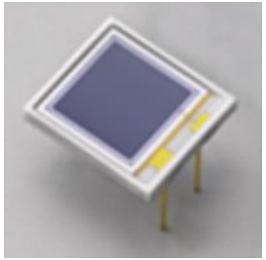
Fig. 16. Emission anisotropies of the spin-dependent partial reaction rates $\langle \sigma_{m,n} \cdot v \rangle$ of the ^{2}H$(d,p)^3$H and ^{2}H$(d,n)^3$He reactions at a plasma temperature corresponding to $kT = 10\,\mathrm{keV}$ and for different deuteron spin orientations, from R-matrix parametrization, 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.



Скорость реакции для реакции d(d,n)3He . 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)3H



- 4-π detector with 51% filling
- 576 Hamamatsu PIN-diodes (S3590-09)
- PIN-diode active area: 1 cm^2
- depleted layer: 300 um
- energy resolution: <50keV
- low reverse voltage (<=50V)