

Научная сессия Объединённого учёного совета по физическим наукам СО РАН
17 сентября 2025, г. Новосибирск

Конкурс работ молодых учёных

«Малочастичная динамика в ядерных реакциях и структуре ядер»

Егоров Михаил Викторович
к.ф.-м.н , доцент НИ ТГУ, нс ЛТФ ОИЯИ



ОИЯИ

[Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSWM-2025-0023)]

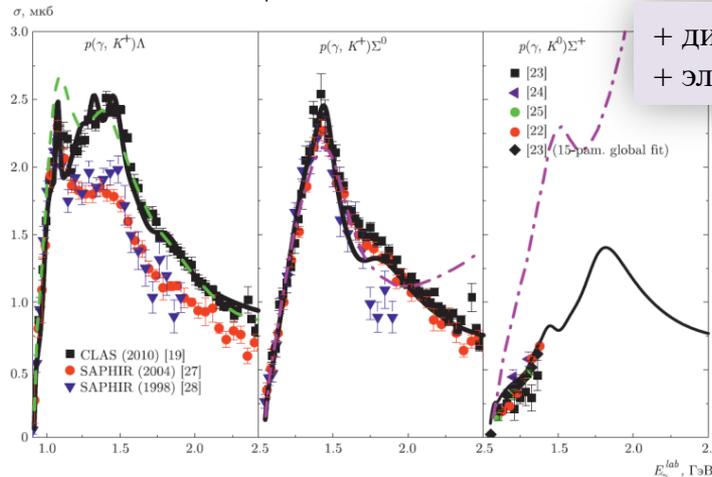
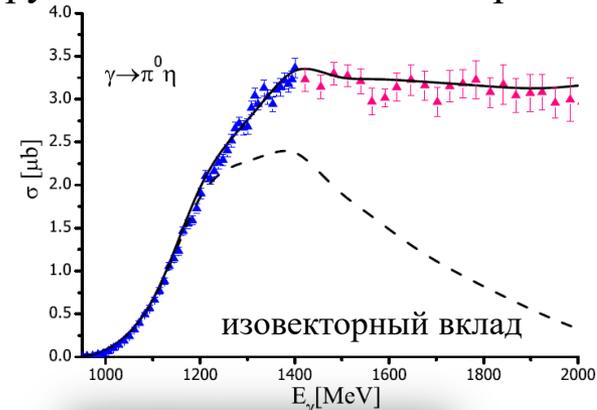
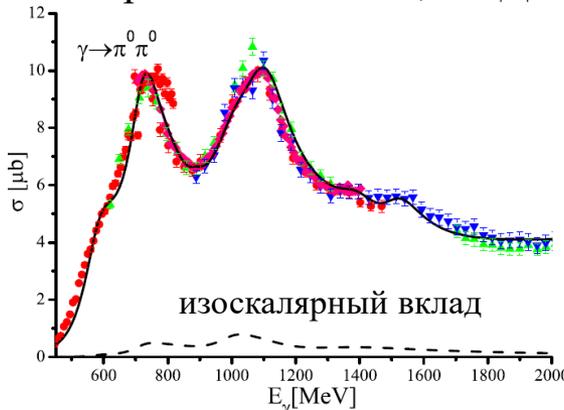
Поиск операторов фоторождения $\pi^0\pi^0$, $\pi^0\eta$ процессах $A(\gamma, \pi^0\pi^0)A$, $A(\gamma, \pi^0\eta)A$, где $A \in [p, d, {}^3\text{He}, {}^4\text{He}, {}^6\text{Li}, {}^7\text{Li}]$ и операторов фото- и электророждения каонов в процессах ${}^2\text{H}(\gamma, K^0\Lambda){}^1\text{H}$, ${}^2\text{H}(\gamma, K^+\Lambda)n$, ${}^2\text{H}(\gamma, K^+\Sigma^0)n$, ${}^2\text{H}(\gamma, K^+\Sigma^-){}^1\text{H}$, ${}^3\text{He}(\gamma_\nu, K^+){}^3_\Lambda\text{H}$, ${}^3\text{He}(\gamma_\nu, K^+\Lambda)X$

$\gamma \rightarrow \pi^0\pi^0, \pi^0\eta$

$\gamma \rightarrow KY$

N(1440)1/2 ⁺	N(1440)1/2 ⁺
N(1520)3/2 ⁻	N(1535)1/2 ⁻
N(1535)1/2 ⁻	N(1650)1/2 ⁻
N(1650)1/2 ⁻	N(1675)5/2 ⁻
N(1675)5/2 ⁻	N(1680)5/2 ⁺
N(1680)5/2 ⁺	N(1700)3/2 ⁻
N(1700)3/2 ⁻	N(1710)1/2 ⁺
N(1710)1/2 ⁺	N(1720)3/2 ⁺
N(1720)3/2 ⁺	N(1860)5/2 ⁺
N(1875)3/2 ⁻	N(1875)3/2 ⁻
N(1880)1/2 ⁺	N(1880)1/2 ⁺
N(1900)3/2 ⁺	N(1920)3/2 ⁺
N(2100)1/2 ⁺	N(1990)7/2 ⁺
N(2120)3/2 ⁻	N(2000)5/2 ⁺
$\Delta(1232)3/2^+$	N(2060)5/2 ⁻
$\Delta(1600)3/2^+$	N(2100)1/2 ⁺
$\Delta(1620)1/2^-$	N(2120)3/2 ⁻
$\Delta(1700)3/2^-$	$\Delta(1600)3/2^+$
$\Delta(1750)1/2^+$	$\Delta(1620)1/2^-$
$\Delta(1900)1/2^-$	$\Delta(1700)3/2^-$
$\Delta(1905)5/2^+$	$\Delta(1900)1/2^-$
$\Delta(1910)1/2^+$	$\Delta(1905)5/2^+$
$\Delta(1920)3/2^+$	$\Delta(1910)1/2^+$
$\Delta(1940)3/2^-$	$\Delta(1920)3/2^+$
$\Delta(1950)7/2^-$	$\Delta(2200)7/2^+$

- решена проблема недостающих резонансов (на основании описания экспериментальных данных установлено соответствие между феноменологией и предсказаниями кварковых моделей, КХД и другими экзотическими теориями)



+ дифф. распределения
+ электророждение

Результаты:

М.В.Егоров, Электророждение каонов на протоне // ЖЭТФ 160(1) (2021) 42-54
 M.V.Egorov, Photoproduction of $K^+\Lambda$, $K^0\Sigma^+$ and $K^+\Sigma^0$ on the proton // J.Phys.G: Nucl.Part.Phys. 47 (2020) 125006
 M.V.Egorov, Coherent photoproduction of neutral pseudoscalar mesons $\pi^0\pi^0$ on light nuclei // Physics of Atomic Nuclei 83(5) (2020) 738-741



Поиск операторов фоторождения $\pi^0\pi^0$, $\pi^0\eta$ процессах $A(\gamma, \pi^0\pi^0)A$, $A(\gamma, \pi^0\eta)A$, где $A \in [p, d, {}^3\text{He}, {}^4\text{He}, {}^6\text{Li}, {}^7\text{Li}]$ и операторов фото- и электророждения каонов в процессах ${}^2\text{H}(\gamma, K^0\Lambda){}^1\text{H}$, ${}^2\text{H}(\gamma, K^+\Lambda)n$, ${}^2\text{H}(\gamma, K^+\Sigma^0)n$, ${}^2\text{H}(\gamma, K^+\Sigma^-){}^1\text{H}$, ${}^3\text{He}(\gamma_\nu, K^+){}^3_\Lambda\text{H}$, ${}^3\text{He}(\gamma_\nu, K^+\Lambda)X$

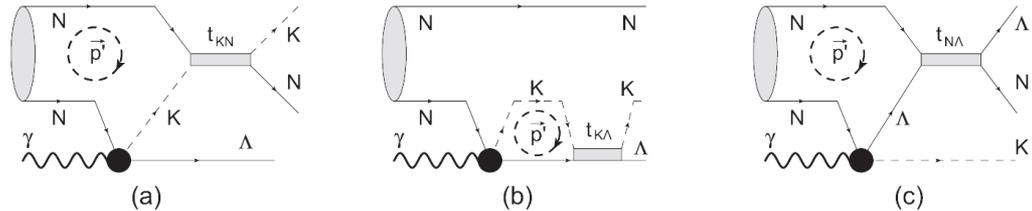
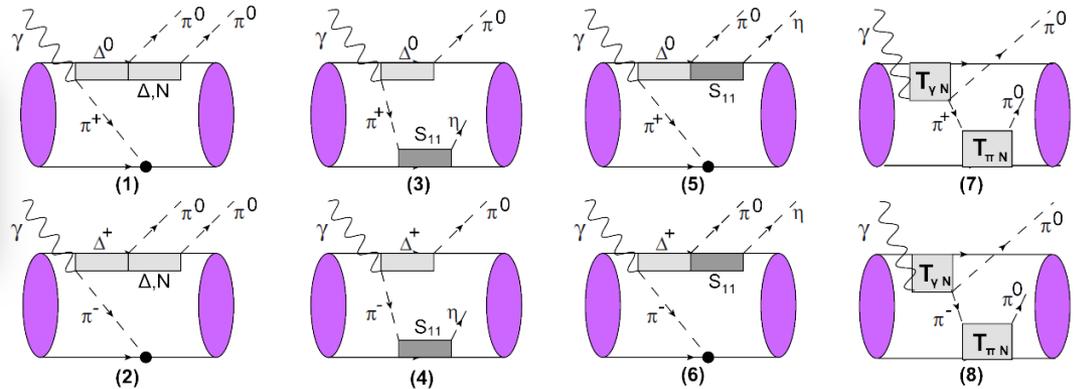
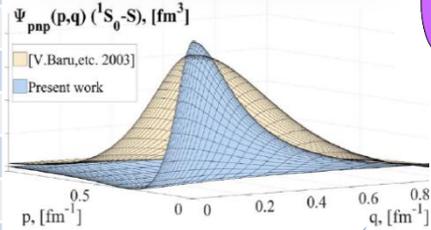
$\gamma \rightarrow \pi^0\pi^0, \pi^0\eta$

$\gamma \rightarrow KY$

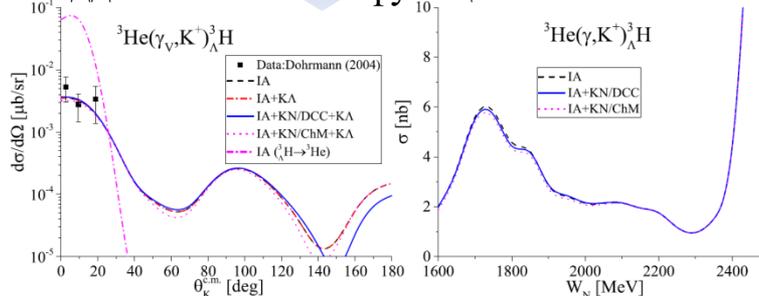
N(1440)1/2 ⁺	N(1440)1/2 ⁺
N(1520)3/2 ⁻	N(1535)1/2 ⁻
N(1535)1/2 ⁻	N(1650)1/2 ⁻
N(1650)1/2 ⁻	N(1675)5/2 ⁻
N(1675)5/2 ⁻	N(1680)5/2 ⁺
N(1680)5/2 ⁺	N(1700)3/2 ⁻
N(1700)3/2 ⁻	N(1710)1/2 ⁺
N(1710)1/2 ⁺	N(1720)3/2 ⁺
N(1720)3/2 ⁺	N(1860)5/2 ⁺
N(1875)3/2 ⁻	N(1875)3/2 ⁻
N(1880)1/2 ⁺	N(1880)1/2 ⁺
N(1900)3/2 ⁺	N(1920)3/2 ⁺
N(2100)1/2 ⁺	N(1990)7/2 ⁺
N(2120)3/2 ⁻	N(2000)5/2 ⁺
$\Delta(1232)3/2^+$	$\Delta(2060)5/2^-$
$\Delta(1600)3/2^+$	N(2100)1/2 ⁺
$\Delta(1620)1/2^-$	N(2120)3/2 ⁻
$\Delta(1700)3/2^-$	$\Delta(1600)3/2^+$
$\Delta(1750)1/2^+$	$\Delta(1620)1/2^-$
$\Delta(1900)1/2^-$	$\Delta(1700)3/2^-$
$\Delta(1905)5/2^+$	$\Delta(1900)1/2^-$
$\Delta(1910)1/2^+$	$\Delta(1905)5/2^+$
$\Delta(1920)3/2^+$	$\Delta(1910)1/2^+$
$\Delta(1940)3/2^-$	$\Delta(1920)3/2^+$
$\Delta(1950)7/2^-$	$\Delta(2200)7/2^+$

- Учтены механизмы перерасеяния мезонов и взаимодействия в конечном состоянии на ядрах. Построены микроскопические волновые функции ${}^3\text{He}$, ${}^3_\Lambda\text{H}$

+ дейтрон как изоскалярный $\pi^0\pi^0$ /изовекторный $\pi^0\eta$ фильтр



Сечения с Фаддеевскими функциями



Результаты:

M.Egorov, Coherent photoproduction of two neutral pseudoscalar mesons on light nuclei // Phys.Rev. C101 (2020) 065205

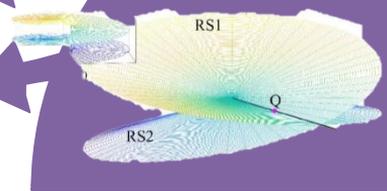
M.Egorov, Kaon electroproduction on ${}^2\text{H}$ and ${}^3\text{He}$ // Phys. Rev. C107 (2023) 014611

Фаддеевская динамика 3-х тел в импульсном пространстве [Энергии связи]

- Вклад 3N сил в энергии связи ${}^3\text{He}$, ${}^3\text{H}$ мал и он зарядово-зависимый
- Неопределенность моделей ΛN перекрывает разброс энергии связи ${}^3\Lambda\text{H}$
- Микроскопика (ESC16 – YN, Bonn – NN) предсказывает связанные состояния в $\Xi^- NN$
- Впервые рассчитаны низшие состояния ядро-лептон-ядро систем, в которых кулоновское взаимодействие (в двухпотенциальной манере) трактуется в единой манере с короткодействующими вкладами в спектре состояния

Система	RS	Полюса [keV]
dte^-	1	-0.143
	2	Нет
$dt\mu^-$	1	-3.30,-5.52,-11.52
	2	-3.46,-5.5
	2	$1.5-i2.5\cdot 10^{-3}, 2.5-i5\cdot 10^{-2}, 5-i5\cdot 10^{-3},$ $6.5-i2.5\cdot 10^{-3}, 8.7-i5\cdot 10^{-3}$
dde^-	1	Нет
	2	Нет
$dd\mu^-$	1	-3.5,-5.0,-14.0
	2	Нет
	2	$3.0-i5\cdot 10^{-2}, 6.5-i2.5\cdot 10^{-2}, 7-i2.5\cdot 10^{-3},$ $8-i5\cdot 10^{-2}, 9.5-i2.5\cdot 10^{-3}$

M.Egorov, Virtual and resonance states in the three-body $D - \mu^- - T, D - \mu^- - D$ systems // Int.J.Mod.Phys.E. 33(11)(2024)2441001



M.Egorov, Binding energies of ${}^3\text{H}$ and ${}^3\text{He}$ nuclei in three-body Faddeev Equations with direct integration // Phys.Atom.Nucl.87(6)(2024)682-696
 $E_b=8.04-8.27$ МэВ (${}^3\text{H}$)
 $E_b=7.404-7.65$ МэВ (${}^3\text{He}$)

- ${}^3\text{He}, {}^3\text{H}$
- ΛNN
- ΞNN
- $d\mu d, d\mu t$

$E_b=4.5$ МэВ ($\Xi^- nn$)
 $E_b=5.5$ МэВ ($\Xi^- np$)
 $E_b=2.7, 4.4$ МэВ ($\Xi^- pp$)

$S_\Lambda=0.124-0.32$ МэВ (Λpn)

M.Egorov, Binding energies of light hypernuclei // Phys.Part.Nucl.53(3)(2022)697-705

M.Егоров, Поиск связанных состояний $\Xi^- nn$ -, $\Xi^- pn$ - и $\Xi^- pp$ -систем // Ядерная Физика.86(3)(2023)416-427

+ Аналитические продолжения на RS2 $\text{Im}(E)<0$
 + Виртуальные и резонансные состояния

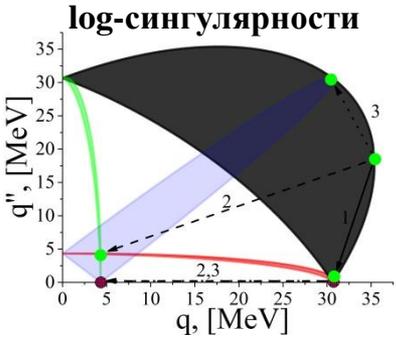


Фаддеевская динамика 3-х тел в импульсном пространстве [Сечения]

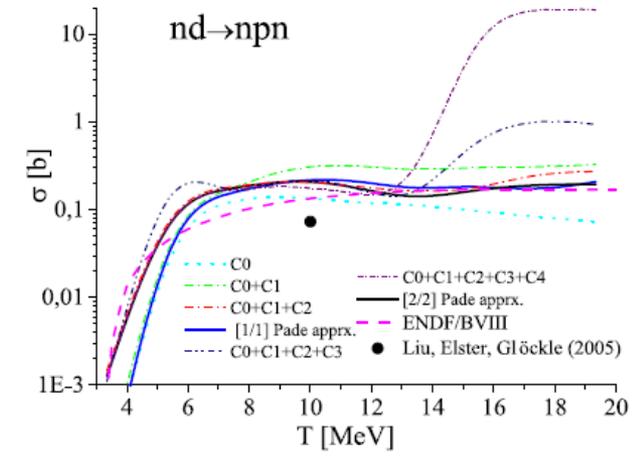
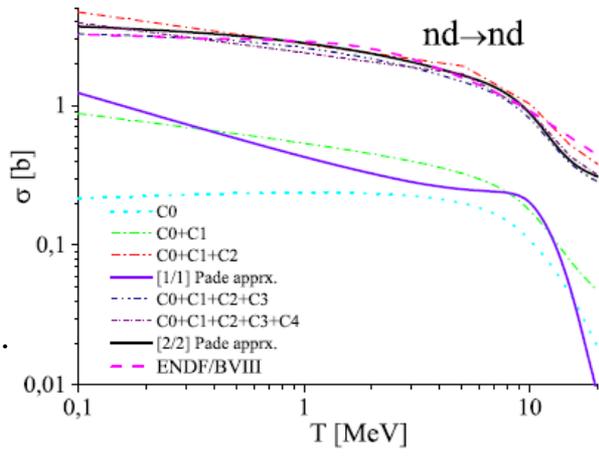
$$T_1 = t_1 \Psi_2 + t_1 \Psi_3 + t_1 R_0 T_2 + t_1 R_0 T_3$$

$$T_2 = t_2 \Psi_1 + t_2 \Psi_3 + t_2 R_0 T_1 + t_2 R_0 T_3$$

$$T_3 = t_3 \Psi_1 + t_3 \Psi_2 + t_3 R_0 T_1 + t_3 R_0 T_2$$



итерации
Паде-аппрокс.



$$1(E_1, \vec{q}_0) + 2(W - E_1, -\vec{q}_0) \rightarrow 1'(E'_1, \vec{q}) + 2'(W - E'_1, -\vec{q}) \quad \frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{E_1(W - E_1)E'_1(W - E'_1)}{(2\pi W)^2} \cdot \frac{|\vec{q}|}{|\vec{q}_0|} \cdot \frac{\sum |U(\vec{q}, \vec{q}_0)|^2}{(2j_1 + 1)(2j_2 + 1)}$$

$$1(E_1, \vec{q}_0) + (23)(W - E_1, -\vec{q}_0) \rightarrow 1'(E'_1, \vec{q}) + 2'(E'_2, \vec{p}'_2) + 3'(W - E'_1 - E'_2, \vec{p}'_3)$$

$$\omega'_{23} \in \left[m'_2 + m'_3 + Q, m_1 + T \cdot \frac{M_t}{M_t + m_1} + M_t - m'_1 \right] \quad \frac{d\sigma}{d\omega'_{23} d\Omega'_{23} d\Omega'_1} = \frac{E_1(W - E_1)q p'_{23} E'_1 E'_2 E'_3}{q_0 W^2 (2\pi)^5} \cdot \frac{\sum |U_0(\vec{p}, \vec{q}; \vec{q}_0)|^2}{(2j_1 + 1)(2j_2 + 1)}$$

$$U(\vec{q}, \vec{q}_0) = \phi_{(23)} \left(-\vec{q} \frac{m_1}{m_1 + m_3} - \vec{q}_0 \right) \left(E - \frac{q^2}{2\mu_{23}} - \frac{q_0^2}{2\mu_{13}} - \frac{q_0 q y_{q q_0}}{m_3} \right) \phi_{(31)} \left(\vec{q} + \vec{q}_0 \frac{m_2}{m_2 + m_3} \right) +$$

$$+ \phi_{(23)} \left(\vec{q} \frac{m_1}{m_1 + m_2} + \vec{q}_0 \right) \left(E - \frac{q^2}{2\mu_{23}} - \frac{q_0^2}{2\mu_{12}} - \frac{q_0 q y_{q q_0}}{m_2} \right) \phi_{(12)} \left(-\vec{q} - \vec{q}_0 \frac{m_3}{m_2 + m_3} \right) +$$

$$+ \int d^3 q' \left[\langle \Psi_{1(23)} | -\vec{q} \frac{m_1}{m_1 + m_3} - \vec{q}', \vec{q}' \rangle \langle \vec{q} + \vec{q}' \frac{m_2}{m_2 + m_3}, \vec{q}' | T_2 | \Psi_{2(31)} \rangle + \right.$$

$$\left. + \langle \Psi_{1(23)} | \vec{q} \frac{m_1}{m_1 + m_2} + \vec{q}', \vec{q}' \rangle \langle -\vec{q} - \vec{q}' \frac{m_3}{m_2 + m_3}, \vec{q}' | T_3 | \Psi_{3(12)} \rangle \right]$$

$$U_0(\vec{p}, \vec{q}; \vec{q}_0) = \langle \vec{p}\vec{q} | T_1 | \vec{\Psi}_{1(23)} \rangle + \langle \vec{p}\vec{q} | T_2 | \Psi_{2(31)} \rangle + \langle \vec{p}\vec{q} | T_3 | \Psi_{3(12)} \rangle$$

- Верифицирован инструмент поиска сечений в динамике трёх тел с автоматическим определением и обходом зоны логарифмических сингулярностей для трёх тел разной массы в импульсном пространстве.

M.Egorov, Three-dimensional integral Faddeev equations without a certain symmetry // Few-Body Syst. 66 (2025) 24

Фаддеевская динамика 3-х тел в импульсном пространстве [Сечения]

Расширение на каналы реакций

$$t_1 \rightarrow t_1^{\alpha\beta} = \begin{pmatrix} t_1^{y^{-3}\text{H} \rightarrow y^{-3}\text{H}} & 0 \\ 0 & t_1^{y^{-4}\text{He} \rightarrow y^{-4}\text{He}} \end{pmatrix}$$

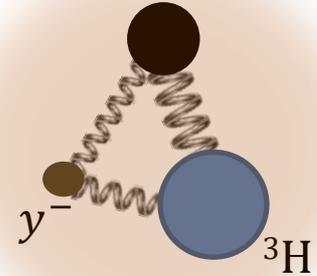
$$t_2 \rightarrow t_2^{\alpha\beta} = \begin{pmatrix} t_2^{d^3\text{H} \rightarrow d^3\text{H}} & t_2^{d^3\text{H} \rightarrow n^4\text{He}} \\ t_2^{n^4\text{He} \rightarrow d^3\text{H}} & t_2^{n^4\text{He} \rightarrow n^4\text{He}} \end{pmatrix}$$

$$t_3 \rightarrow t_3^{\alpha\beta} = \begin{pmatrix} t_3^{y^{-d} \rightarrow y^{-d}} & 0 \\ 0 & t_3^{y^{-n} \rightarrow y^{-n}} \end{pmatrix}$$

Для процессов вида $d + (y^{-3}\text{H}) \rightarrow n + y^{-} + {}^4\text{He}$, где $y^{-} \in [e^{-}, \mu^{-}]$ наряду с индексами разбиений имеются индексы каналов.

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ d & y^{-} & {}^3\text{H} \\ n & y^{-} & {}^4\text{He} \end{pmatrix} \alpha \quad \beta$$

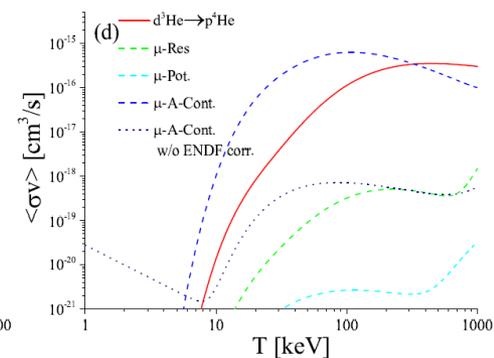
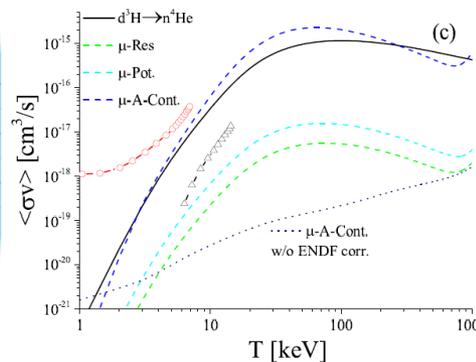
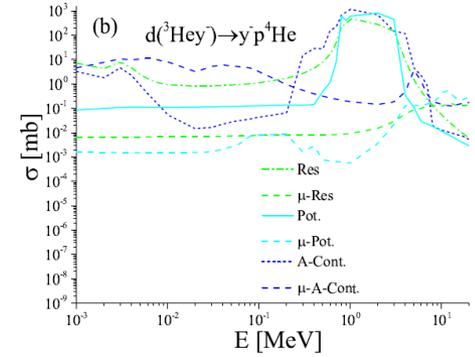
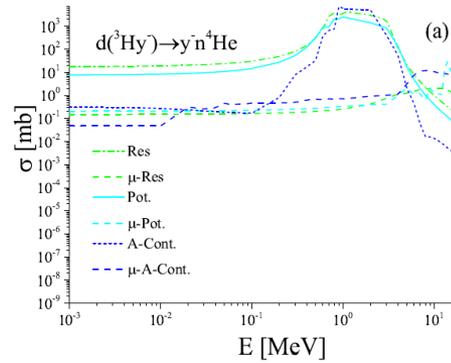
$$T_i \rightarrow T_i^{\alpha\beta}$$



$$\begin{pmatrix} T_1^{11} \\ T_1^{21} \\ T_2^{11} \\ T_2^{21} \\ T_3^{11} \\ T_3^{21} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_1^{11}(\phi_2 + \phi_3) \\ t_1^{21}(\phi_2 + \phi_3) \\ t_2^{11}(\phi_3 + \phi_1) \\ t_2^{21}(\phi_3 + \phi_1) \\ t_3^{11}(\phi_1 + \phi_2) \\ t_3^{21}(\phi_1 + \phi_2) \end{pmatrix} +$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & t_1^{11}G_0 & 0 & t_1^{11}G_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & t_1^{22}G_0 & 0 & t_1^{22}G_0 \\ t_2^{11}G_0 & t_2^{12}G_0 & 0 & 0 & t_2^{11}G_0 & t_2^{12}G_0 \\ t_2^{21}G_0 & t_2^{22}G_0 & 0 & 0 & t_2^{21}G_0 & t_2^{22}G_0 \\ t_3^{11}G_0 & 0 & t_3^{11}G_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & t_3^{22}G_0 & 0 & t_3^{22}G_0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_1^{11} \\ T_1^{21} \\ T_2^{11} \\ T_2^{21} \\ T_3^{11} \\ T_3^{21} \end{pmatrix}$$

Сечения и скорости термоядерных реакций:



Итоги

- В процессах электромагнитного образования псевдоскалярных мезонов ($\pi^0\pi^0, \pi^0\eta, K^{+0}$) реализована динамика трёх тел (помимо эффектов парных перерассеяний) с целью оценки эффектов взаимодействия в конечном состоянии и нахождения волновых функций трёхчастичных ядер в т.ч. Λ -гипертритона. Вклады $3b$ взаимодействий оказались малыми.
- В импульсном пространстве развит Фаддеевский подход прямого численного решения системы интегральных уравнений для трёх тел разной массы без обязательной процедуры парциально-волнового разложения. Алгоритмическим образом обнаруживается и обходится зона логарифмических сингулярностей выше порога развала системы в непрерывном спектре энергий. Получено расширение Фаддеевских уравнений для ядерных реакций.
- Выделен относительный эффект присутствия μ^- в зоне термоядерной реакции в процессах $d + (y^{-3}\text{H}) \rightarrow n + y^- + {}^4\text{He}, d + (y^{-3}\text{He}) \rightarrow p + y^- + {}^4\text{He}$ когда $y^- \in [e^-, \mu^-]$. Проведено сравнение мощности катализированных мюоном термоядерных реакций на лету с мощностью тормозных потерь электрона в плазме эффективного заряда.

Температура	$d^3\text{H} \rightarrow n^4\text{He}$	$d^3\text{He} \rightarrow p^4\text{He}$	$d(^3\text{H}\mu^-) \rightarrow n^4\text{He}\mu^-$	$d(^3\text{He}\mu^-) \rightarrow p^4\text{He}\mu^-$
T_{in}	6.93	43.55	6.23	13.16
T_{opt}	55.56	249.8	46.15	75.23

Результаты доложены на сессии-конференции ОФН РАН (февраль 2025), конференции «Ядро-2025» (июль 2025) и направлены в печать в J.Mod.Phys.E, письма в ЭЧАЯ, и ЯФ.

Благодарю за внимание!

