



Фундаментальная ядерная физика в ОФАЯ

К 95-летию А.Ф. Тулинова

В.И. Кукулин

Семинар ОФАЯ
26 сентября 2019

Содержание

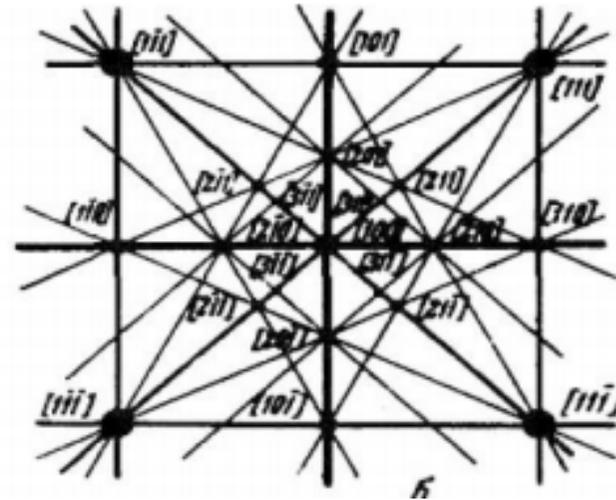
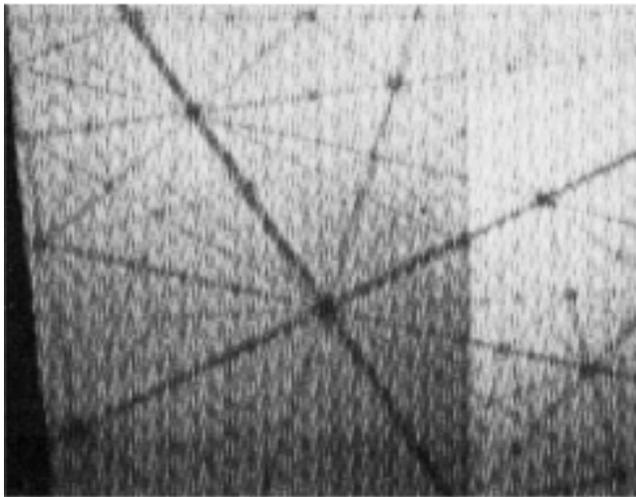
- 1. Каналирование быстрых заряженных частиц в кристаллах и эффект теней.**
- 2. Загадка ядерных сил.**
- 3. Стандартная концепция сил – мезонные обмены.**
- 4. Дибарионы и s-канальные обмены.**
- 5. Описание наблюдаемых в рамках дибарионной модели.**
- 6. Заключение.**

Каналирование быстрых заряженных частиц в кристаллах и эффект теней (исторические реминисценции)

Письма в ЖЭТФ, 1965, 2, №1, 48-50.

О НОВОМ МЕТОДЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ
МОНОКРИСТАЛЛОВ

А.Ф.Тулинов, Б.Г.Ахметова, А.А.Пузанов,
А.А.Бедняков



Загадка ядерных сил

Некоторые авторы моделей сил:

Э. Ферми, И.Е. Тамм, В. Гейзенберг, Х. Юкава, Г. Брейт, Г. Бете, В.Л. Гинзбург, С. Вейнберг, Ф. Дайсон

Physics Today 7(2), 5 (1954)

«За четверть текущего столетия огромное количество экспериментальных, трудовых и умственных усилий было затрачено на проблему нуклон-нуклонного взаимодействия: возможно больше, чем на любую другую проблему в истории человечества...»

Г. Бете (1953)

Mesons and Nuclear Force

The text of the twenty-second Joseph Henry Lecture delivered before the Philosophical Society of Washington
April 24, 1953

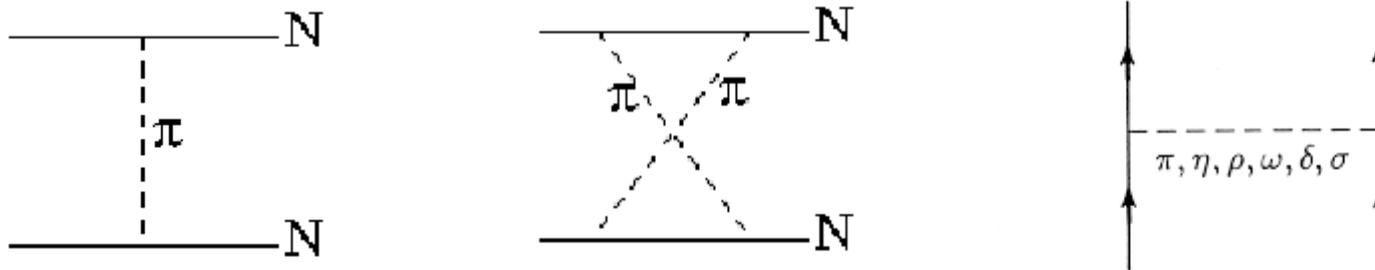
By Hans A. Bethe



Hans A. Bethe is professor of physics at Cornell University. Born and educated in Germany, Professor Bethe received his PhD at Munich in 1928 and taught physics at Frankfurt, Stuttgart, Munich,

THE HISTO clear forces in recent scient the folly of sci began in 1932 v made possible a the nucleus, na posed of neutro by very strong any other forces Only three years the start of nuc nuclear forces particles, the ne as yet undiscove by the name of should be such of 100 to 200 ti be charged, and probably either Three years Particles were groups of peopl at the Californ

Стандартная концепция сил – мезонный обмен в духе Юкавы

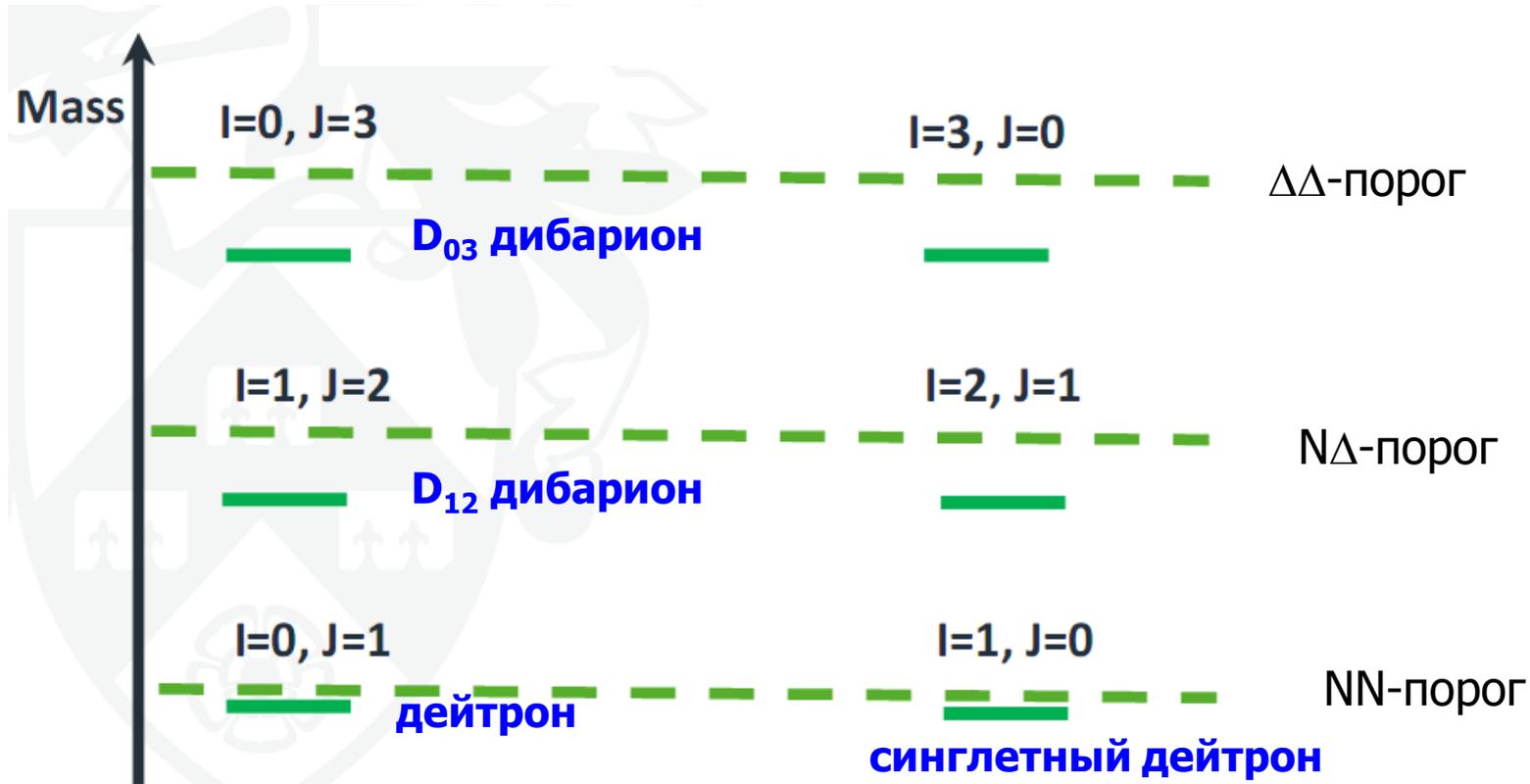


Это так называемые t-канальные обмены.

Дибарионы и s-канальные обмены

Первое предсказание дибарионов в NN-системе

F.J. Dyson and N.-H. Xuong, PRL 13, 815 (1964)



Массовая формула SU(6): $M = A + B[I(I+1) + J(J+1) - 2]$

(A – масса дейтрона, $B \approx 47$ МэВ)

Предсказания для масс $N\Delta$ и $\Delta\Delta$ S -волновых резонансов:

$$M(D_{12}) \approx 2160 \text{ MeV} \approx M(N) + M(\Delta) - 10 \text{ МэВ},$$

$$M(D_{03}) \approx 2350 \text{ MeV} \approx M(\Delta) + M(\Delta) - 110 \text{ МэВ}.$$

Открытие дибариона D_{03} в эксперименте по упругому np -рассеянию

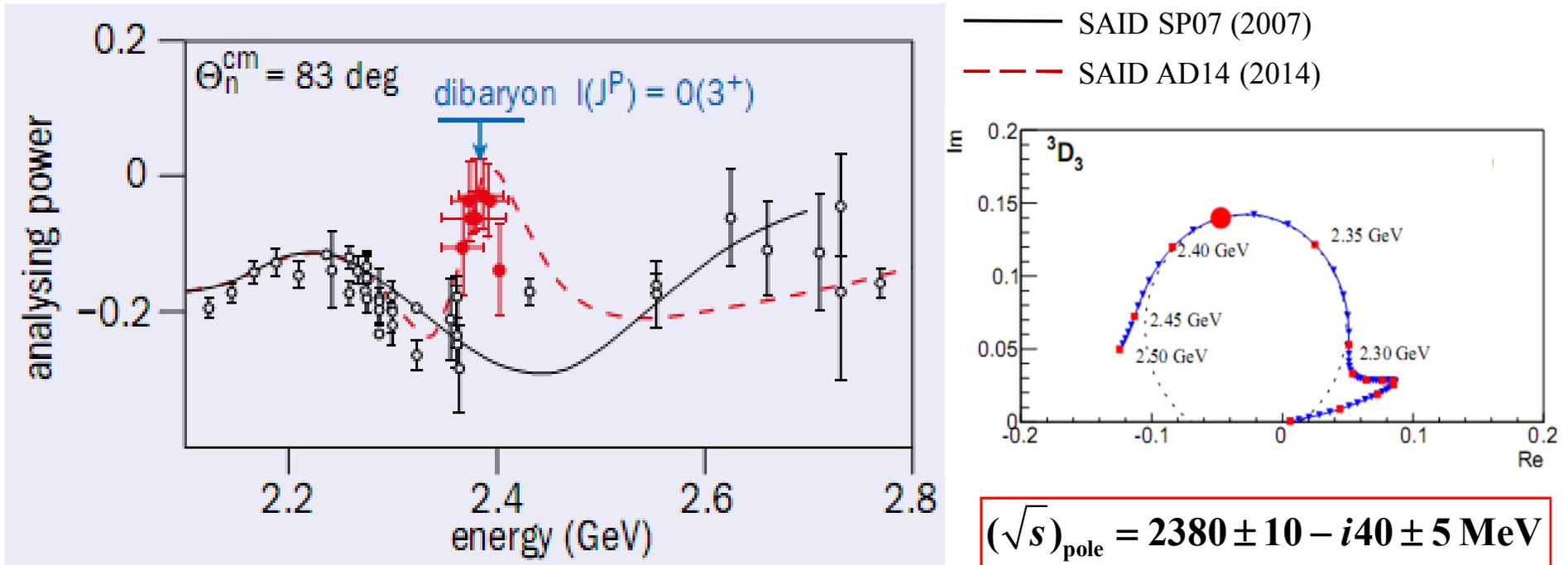
PRL 112, 202301 (2014)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
23 MAY 2014

Evidence for a New Resonance from Polarized Neutron-Proton Scattering

(WASA-at-COSY Collaboration) & (SAID Data Analysis Center)



$$D_{03} \approx \Delta\Delta(30\%) + C\bar{C}(70\%)$$

$$r(D_{03}) \approx 0.7\text{--}0.9 \text{ fm}$$

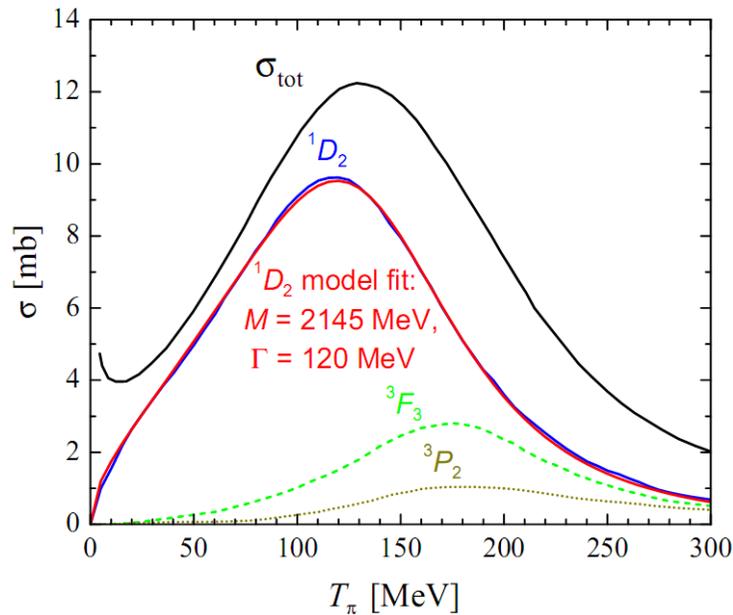
[Y. Dong et al., PRC91(2015)064002; F. Huang et al., Sci.China Phys. Mech.Astron.59(2016)622002; M. Bashkanov, S. Brodsky, H. Clement, PLB727(2013)438]

Резонанс D_{03} оказался настоящим дибарионным ($6q$) состоянием, имеющим связь с $\Delta\Delta$ -каналом, а не просто $\Delta\Delta$ -связанным состоянием. 8

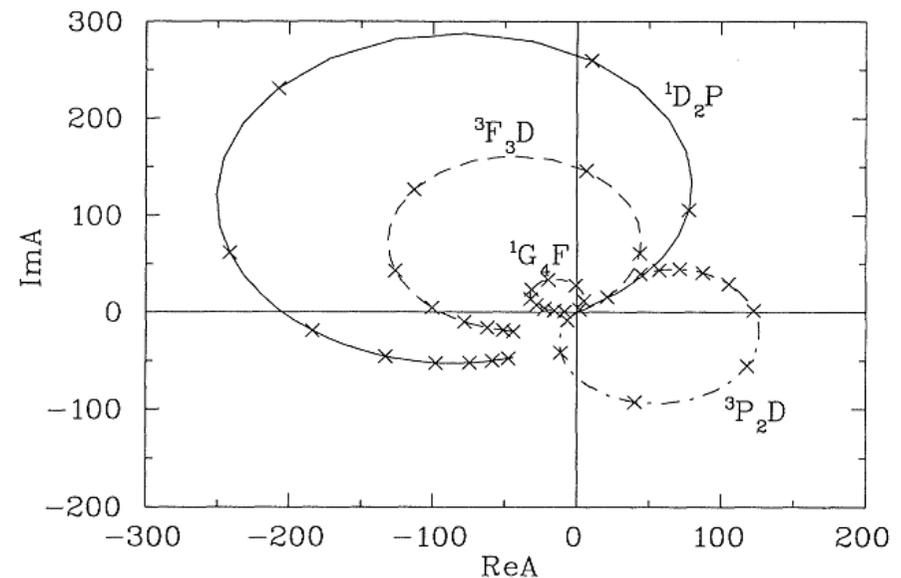
Серия изовекторных дибарионов

- Эксперименты по $\vec{p} + \vec{p}$ упругому рассеянию (I. Auer et al., 1978) и парциально-волновой анализ (partial-wave analysis – PWA) процессов $pp \rightarrow pp$, $\pi^+d \rightarrow \pi^+d$ и $\pi^+d \rightarrow pp$ (N. Hoshizaki, 1979, 1993; R. Arndt et al., 1981, 1993; etc.): обнаружение **целой серии изовекторных резонансов в NN -каналах 1D_2 , 3F_3 , 1G_4 , 3P_2 и т.д.**
- Резонанс в NN -канале 1D_2 с квантовыми числами $I(J^P) = 1(2^+)$ совпадает с ранее предсказанным D_{12} -дибарионом:
 $M \approx 2140\text{--}2160 \text{ МэВ} \approx M(N+\Delta) - (10\text{--}30 \text{ МэВ}), \quad \Gamma \approx 100\text{--}120 \text{ МэВ} \approx \Gamma(\Delta).$

Парциальные сечения реакции
 $\pi^+d \rightarrow pp$ в доминирующих каналах
 $^1D_2P, ^3F_3D$ и 3P_2D



Диаграммы Аргана для доминирующих
 парциально-волновых амплитуд
 реакции $\pi^+d \rightarrow pp$: **резонансные петли!**



R. Arndt et al., PRC48(1993)1926

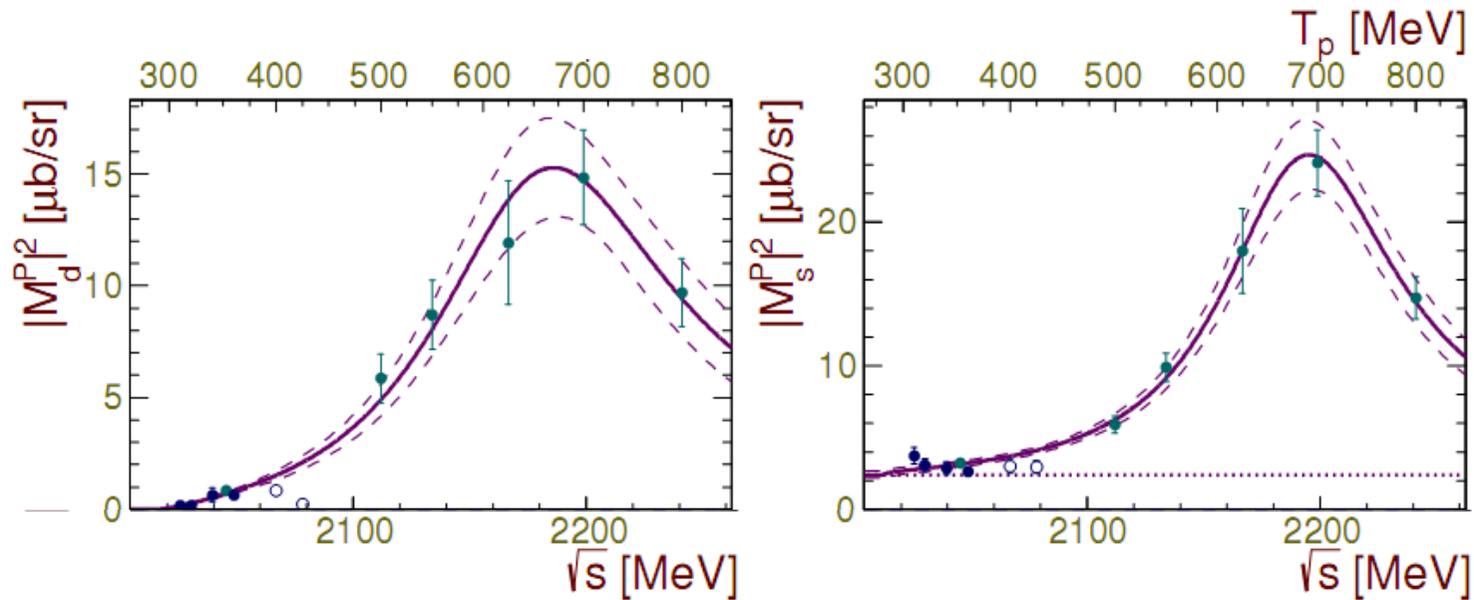
Все эти резонансы лежат вблизи $N\Delta$ -порога (2170 МэВ).

P-волновые изовекторные дибарионы

V.I. Komarov et al., Phys. Rev. C 93 (2016) 065206, ANKE-COSY

Реакция: $pp \rightarrow \{pp\}_s \pi^0$ Два основных перехода: ${}^3P_2 \rightarrow {}^1S_0 d$, ${}^3P_0 \rightarrow {}^1S_0 s$

Парциальные амплитуды:



Параметры резонанса 3P_2 :

$$E_R = 2197 \pm 8 \text{ МэВ}, \Gamma = 130 \pm 21 \text{ МэВ}$$

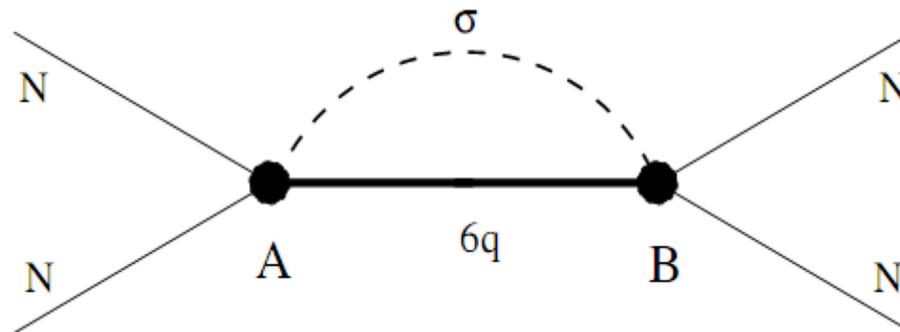
Первое указание на резонанс 3P_0 с параметрами:

$$E_R = 2201 \pm 5 \text{ МэВ}, \Gamma = 91 \pm 12 \text{ МэВ}$$

- with A_y
- phase ϕ fixed from $pp \rightarrow pp$
- excluded from fit
- modified Breit-Wigner fit
- - - 68% confidence interval

Дибарионная модель ядерных сил

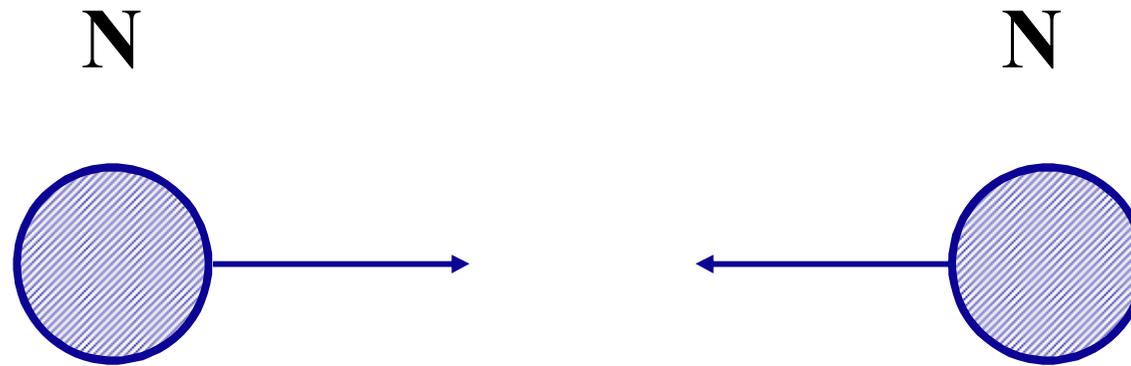
Принципиально новый механизм NN-взаимодействия – **s-канальный дибарионный обмен:**



Предложен в 1998 г. (V.I. Kukulin, in *Proc. XXXIII PIYaF Winter School (Gatchina, 1998)*, St.-Petersburg, 1999, p. 207)

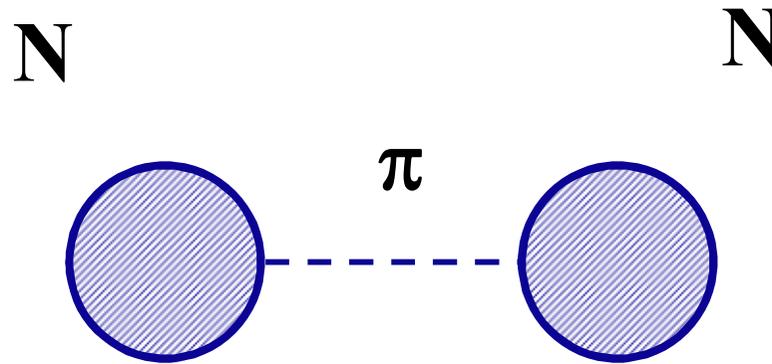
Такой механизм заменяет традиционный t -канальный σ -обмен между двумя нуклонами на s -канальный обмен шестикварковым состоянием, одетым полем σ -мезонов.

NN-взаимодействие на промежуточных и коротких расстояниях



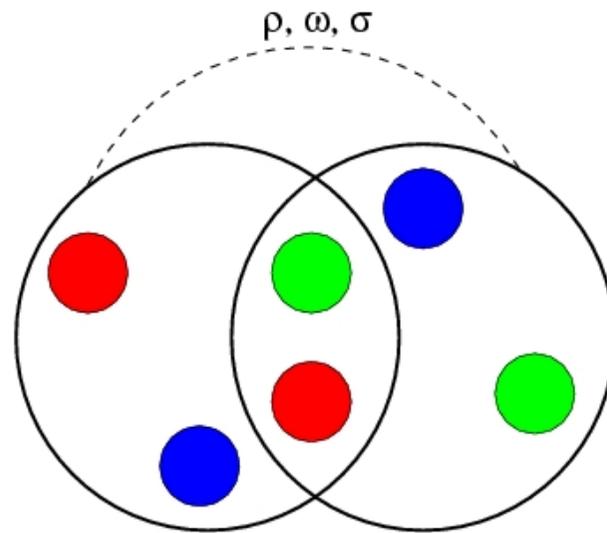
$$r_{NN} > 3 \lambda_{\pi}$$

NN-взаимодействие на промежуточных и коротких расстояниях



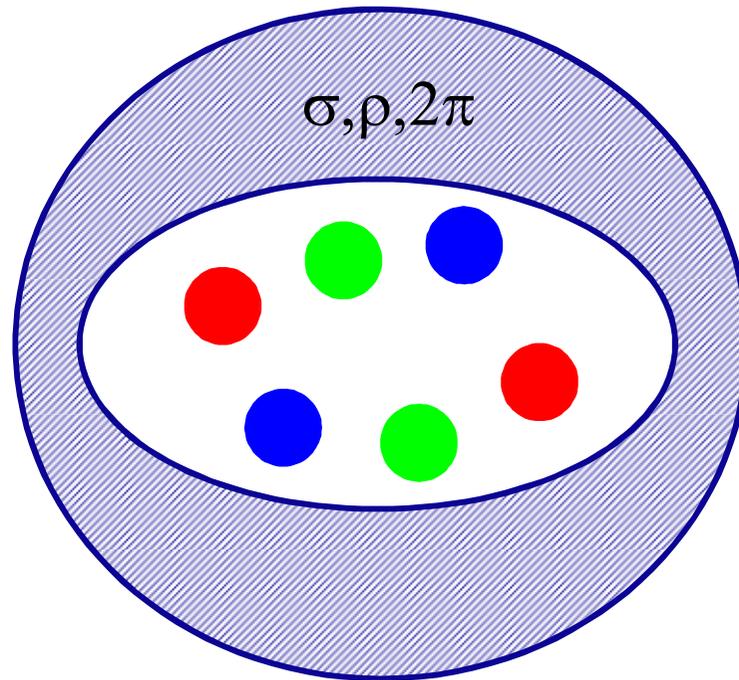
$$r_{NN} \sim \lambda_{\pi} \sim 1.4 \text{ fm}$$

NN-взаимодействие на промежуточных и коротких расстояниях



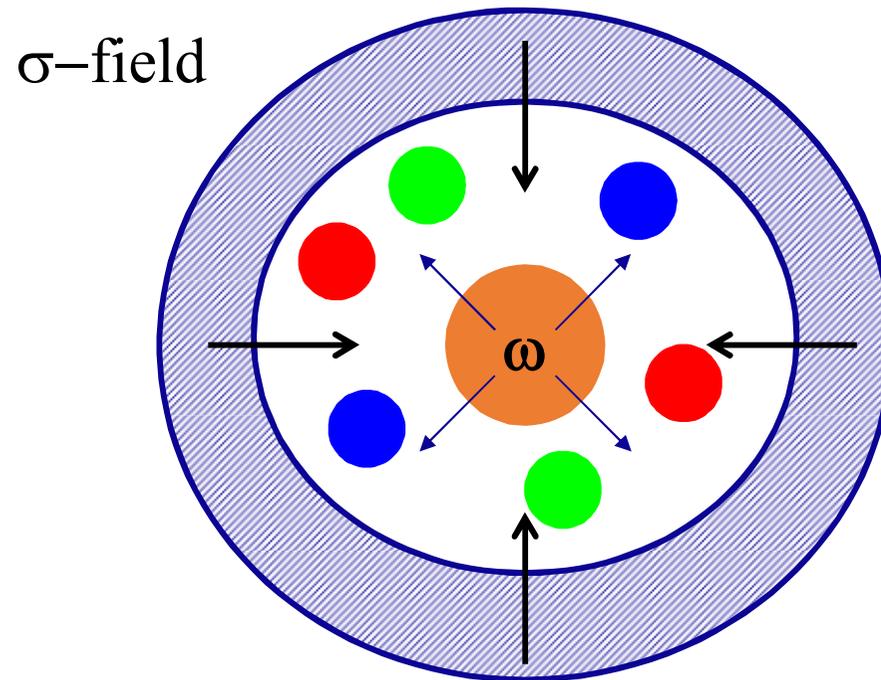
$$r_{NN} < 1 \text{ fm}$$

NN-взаимодействие на промежуточных и коротких расстояниях



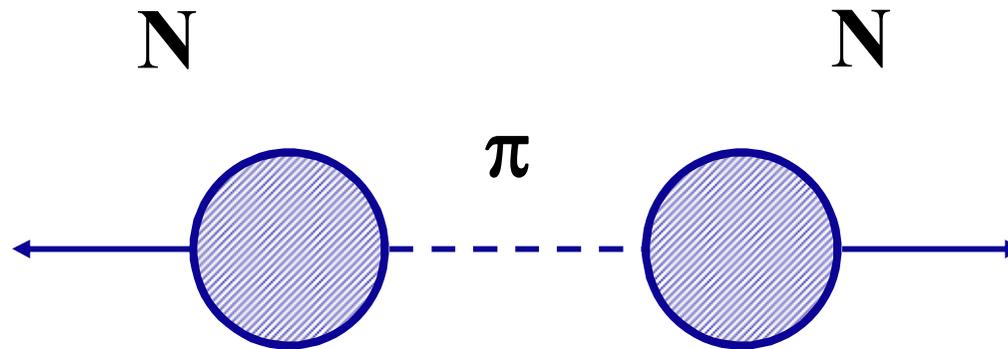
$$r_{NN} < 1 \text{ fm}$$

NN-взаимодействие на промежуточных и коротких расстояниях



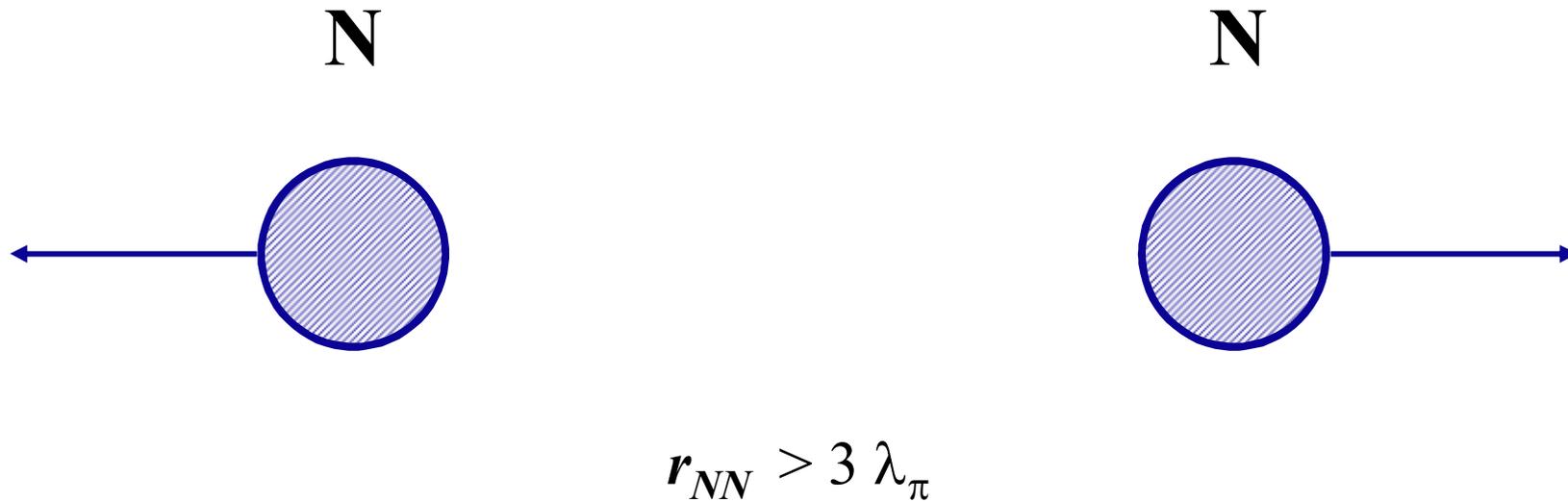
$$r_{NN} < r_{\text{core}} \sim 0.5 \text{ fm}$$

NN-взаимодействие на промежуточных и коротких расстояниях



$$r_{NN} \sim \lambda_{\pi} \sim 1.4 \text{ fm}$$

NN-взаимодействие на промежуточных и коротких расстояниях



На кварковом уровне

Две нижайшие конфигурации в 6q-системе:

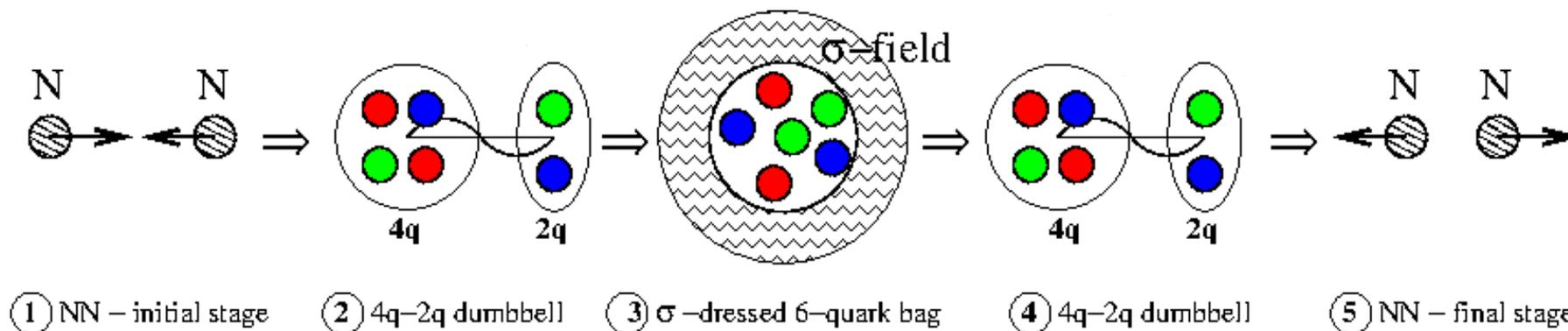
$$\left| s^6 [6]_x L = 0; ST \right\rangle$$

полностью симметричная

$$\left| s^4 p^2 [42]_x LST \right\rangle$$

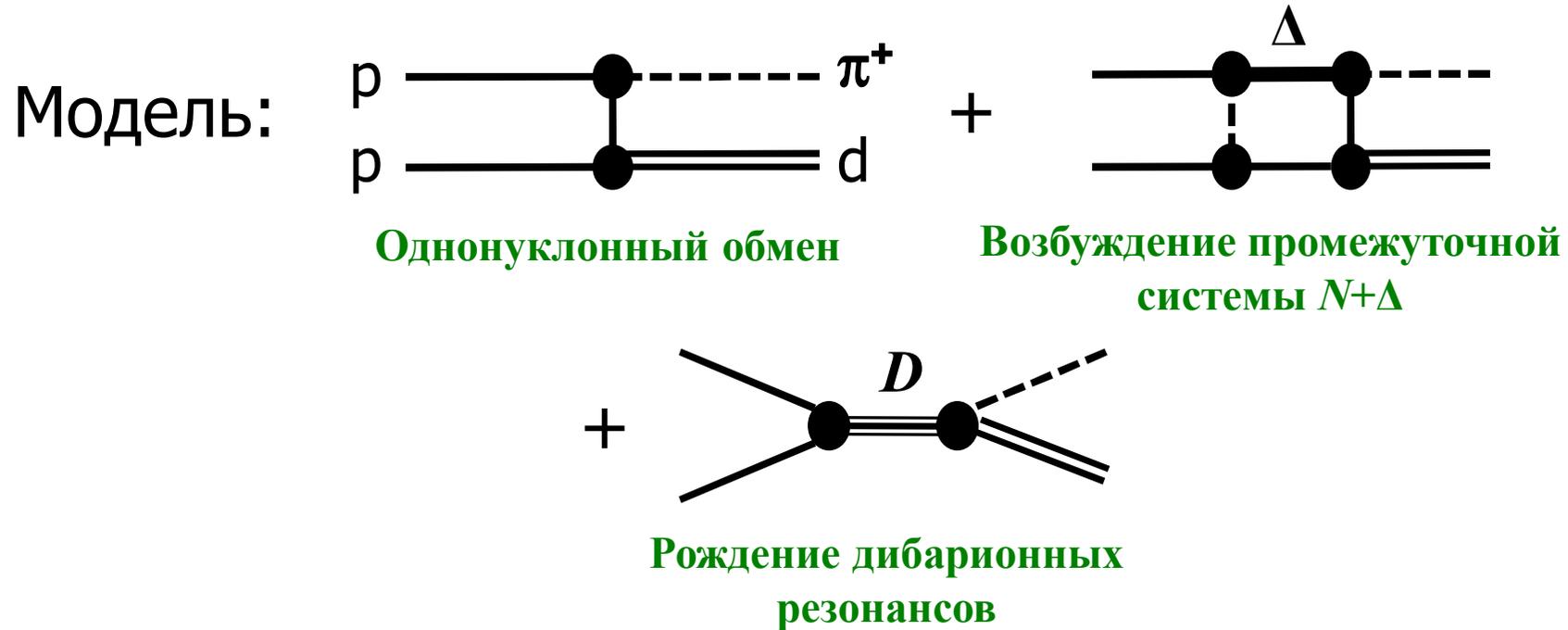
смешанной симметрии

$$N + N \rightarrow D: |s^4 p^2 [42] L_q = 0, 2; ST\rangle \rightarrow |s^6 [6] L_q = 0; ST + \sigma\rangle$$



Кластерная конфигурация 6q-системы (4q-2q) была впервые изучена в модели Университета Наймегена (P.J. Mulders et al.) и ИТЭФ (Л.А. Кондратюк и др.)

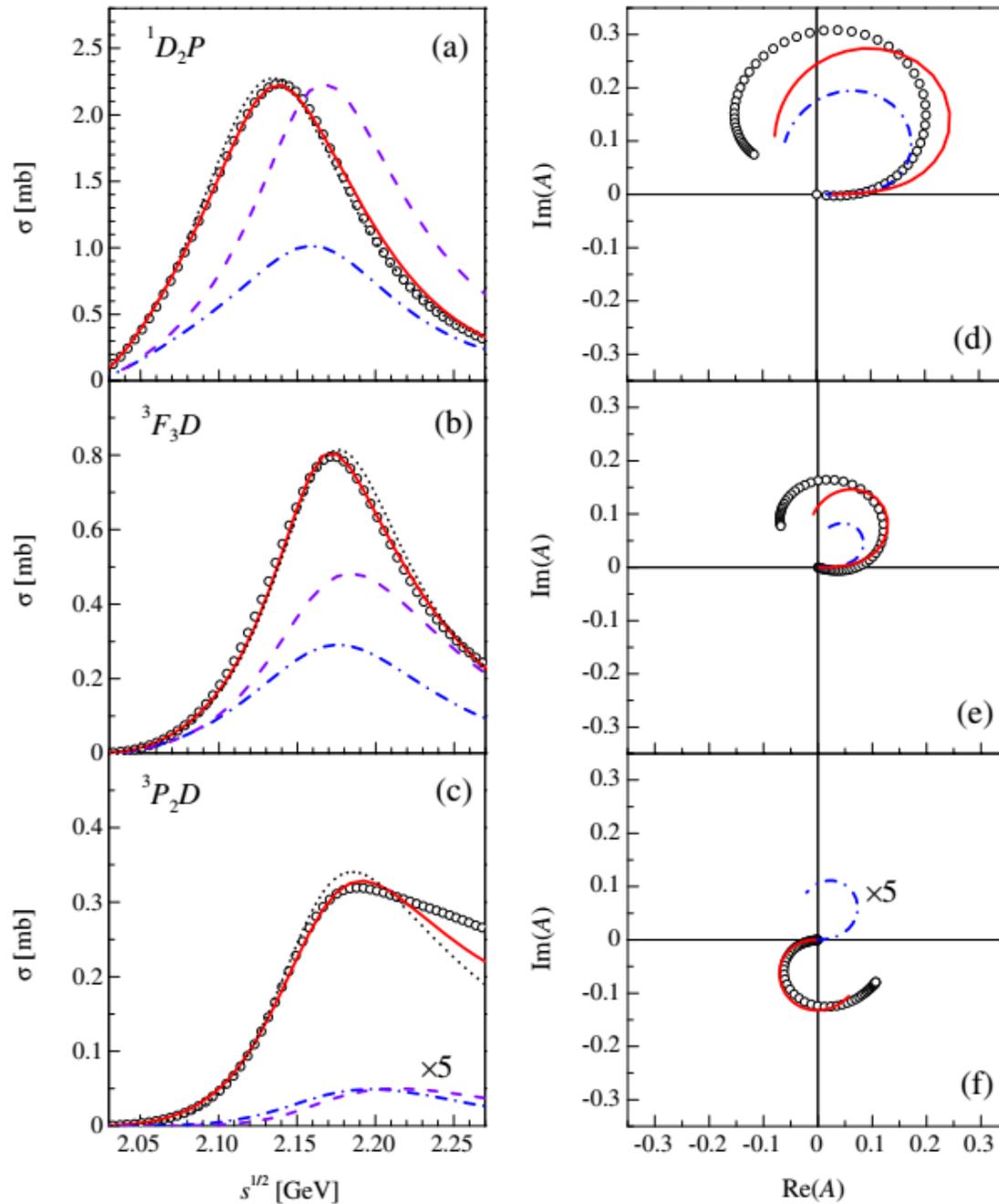
Описание базовой реакции однопионного рождения $pp \rightarrow d\pi^+$ с учетом дибарионных резонансов



1) M.N. Platonova and V.I. Kukulín, *Hidden dibaryons in one- and two-pion production in NN collisions*, Nucl. Phys. A **946**, 117 (2016).

2) M.N. Platonova and V.I. Kukulín, *Manifestation of the P-wave diproton resonance in single-pion production in pp collisions*, Phys. Rev. D **94**, 054039 (2016).

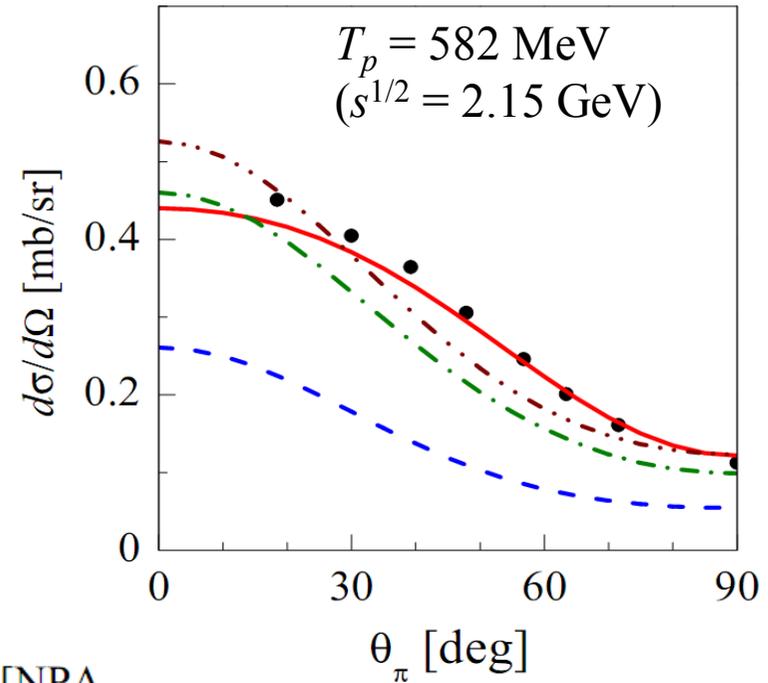
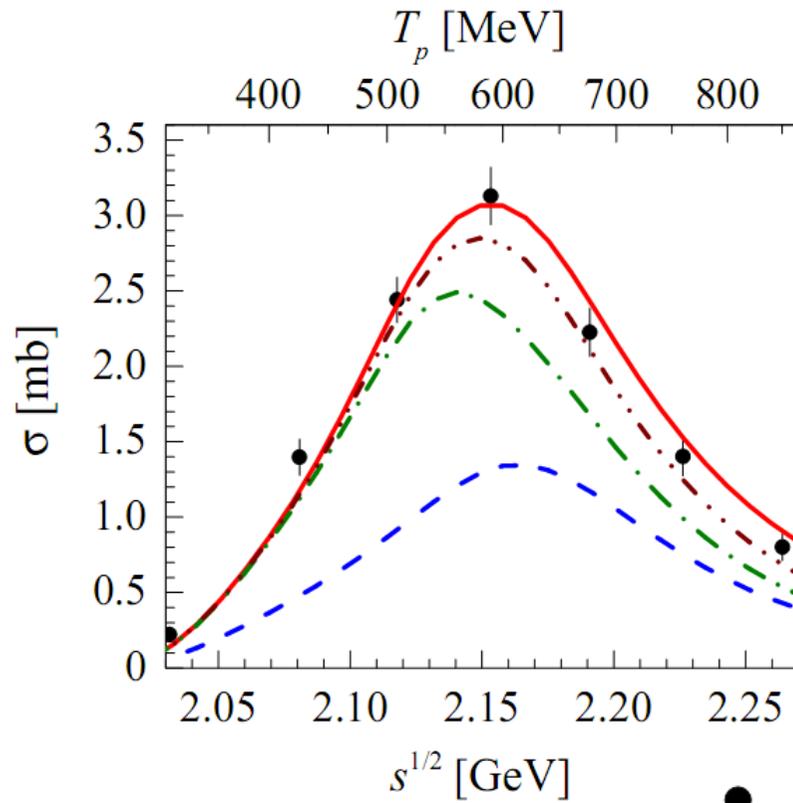
Парциальные сечения и диаграммы Аргана



- PWA (SAID, C500)
- ⋯ PWA (SAID, SP96)
- - - ONE + $N\Delta$ ($\Lambda_{\pi N\Delta} = 0.3$ GeV)
(consistent with πN elastic scattering)
- - - ONE + $N\Delta$ ($\Lambda_{\pi N\Delta} = 0.52$ GeV)
(enhanced *ad hoc* to describe 1D_2P)
- ONE + $N\Delta$ + D^* (full calc.)

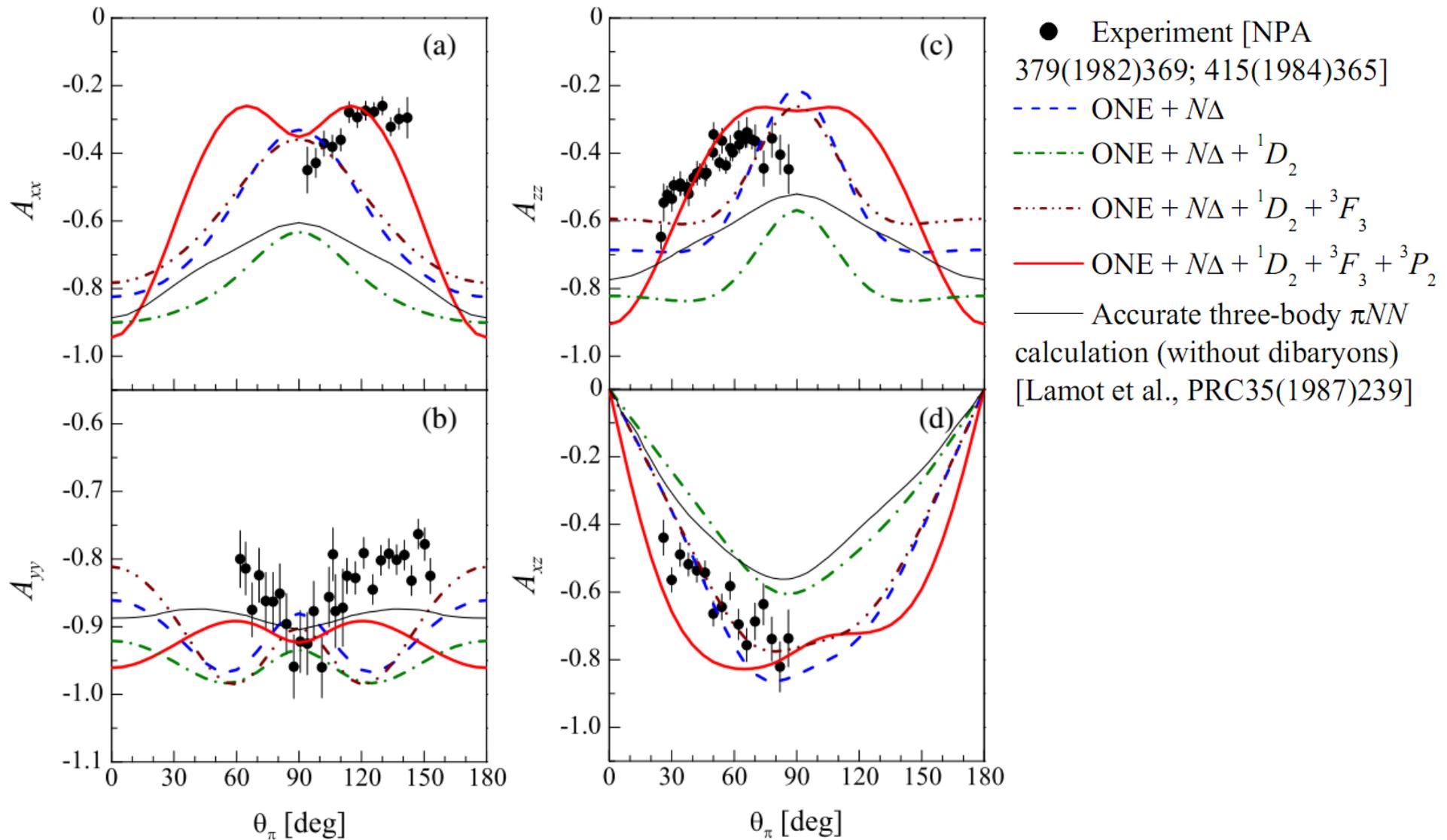
- Традиционные механизмы (ONE+ $N\Delta$) с «мягким» параметром обрезания $\Lambda_{\pi N\Delta}$ в $\pi N\Delta$ -вершине (найденным из описания πN упругого рассеяния) дают **40-50% парциальных сечений в каналах 1D_2P и 3F_3D и всего лишь 2.5% сечения в канале 3P_2D .**
- Увеличение параметра $\Lambda_{\pi N\Delta}$ *ad hoc* не позволяет описать все три доминирующие амплитуды одновременно.

Полное и дифференциальное сечения



- Experiment [NPA
386(1982)571; 402(1983)429]
- - - ONE + $N\Delta$
- · - ONE + $N\Delta$ + 1D_2
- · · ONE + $N\Delta$ + 1D_2 + 3F_3
- ONE + $N\Delta$ + 1D_2 + 3F_3 + 3P_2

Протон-протонные спин-корреляционные параметры при энергии $T_p = 582$ МэВ



Поведение pp спин-корреляционных параметров *не объясняется традиционными моделями, учитывающими рождение промежуточной Δ -изобары.*

Только учет промежуточного дибариона в канале 3P_2D качественно меняет поведение этих высокочувствительных наблюдаемых, значительно улучшая согласие с данными.

Эти результаты являются **независимым теоретическим подтверждением существования изовекторного 3P_2 -дибариона**, найденного недавно в экспериментах коллаборации ANKE-COSY (V.I. Komarov et al., Phys. Rev. C 93 (2016) 065206).

Дибарион в двухпионном рождении и АВС-эффект

Высокоточные эксперименты в полной 4π-геометрии (WASA@COSY) по реакции $p + d \rightarrow p_{\text{spectator}} + d + \pi^0 \pi^0$ @ $T_p = 1.0 - 1.4$ GeV ясно показали рождение **изоскалярного дибарионного резонанса D_{03}** (или d^*) с параметрами:

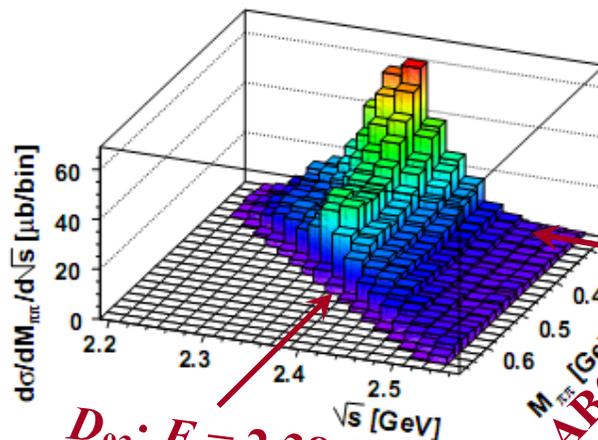
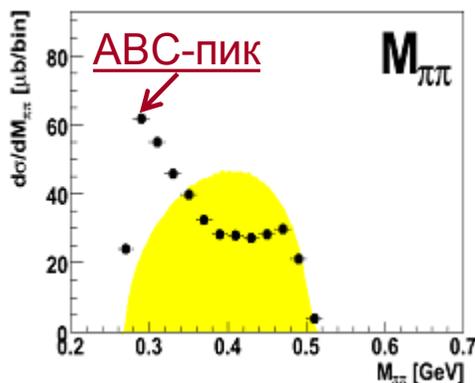
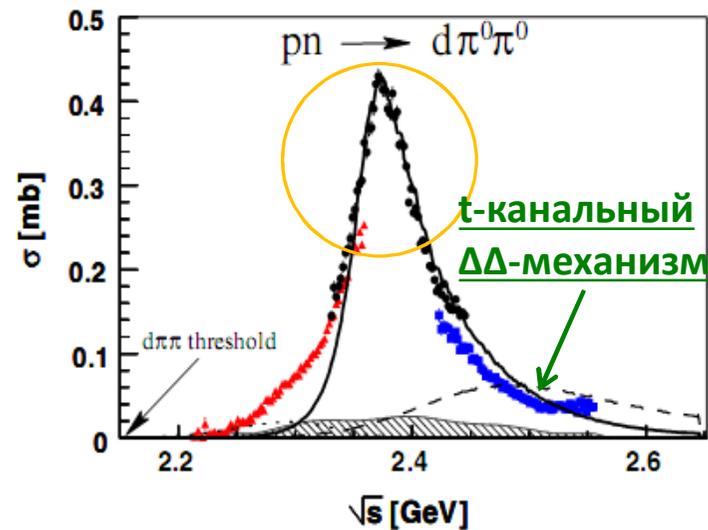
$$I(J^P) = 0(3^+)$$

$$M \approx 2380 \text{ MeV} = 2M_{\Delta} - 80 \text{ MeV}$$

$$\Gamma \approx 70 \text{ MeV} \ll 2\Gamma_{\Delta}$$

и прямую связь этого резонанса с известным с 1960-х гг. АВС-эффектом

[A. Abashian, N.E. Booth, K.M. Crowe, PRL5 (1960) 258]:



$D_{03}: E = 2.38 \text{ GeV}$

$ABC: M_{\pi\pi} = 290 \text{ MeV}$

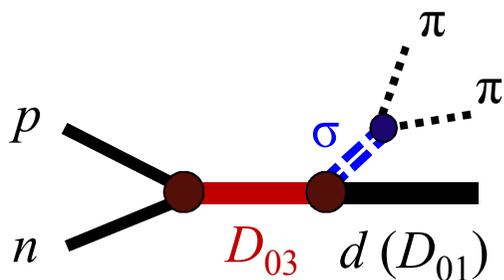
[P. Adlarson et al.,
PRL 106 (2011) 242302]

Дибарионная модель для реакции $pn \rightarrow d + (\pi\pi)_0$

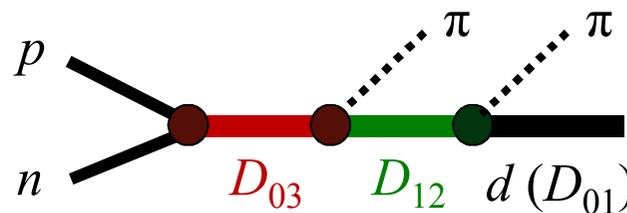
- В дибарионной модели предполагается, что основной вклад в сечение реакции $pn \rightarrow d + (\pi\pi)_0$ при энергиях $T_p = 1.0\text{--}1.4$ ГэВ, соответствующих рождению дибариона $D_{03}(2380)$, дают две интерферирующие моды распада этого дибариона:

(a) эмиссия пионной пары из промежуточного скалярного σ -мезона,

(b) последовательная эмиссия двух пионов через образование промежуточного изовекторного дибариона $D_{12}(2150)$.



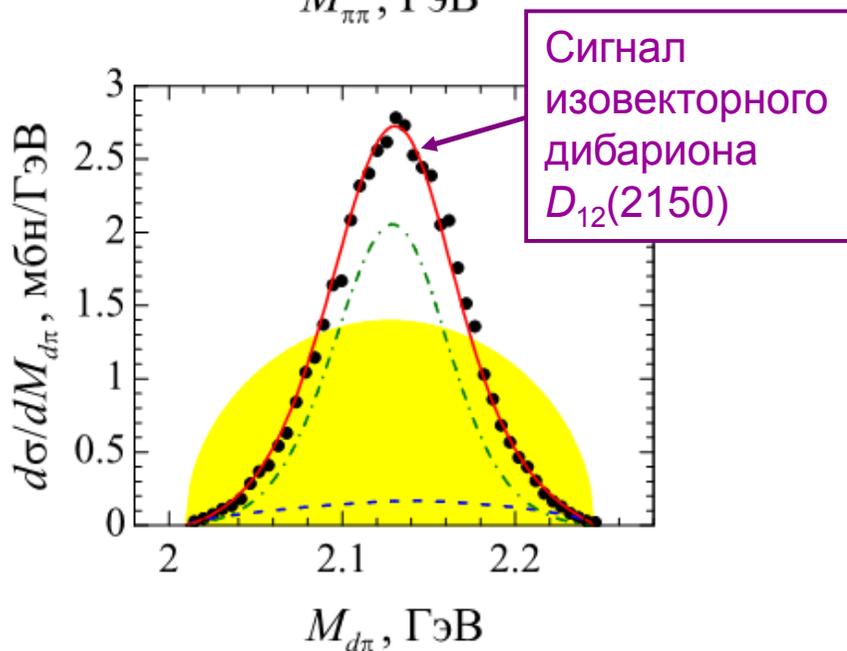
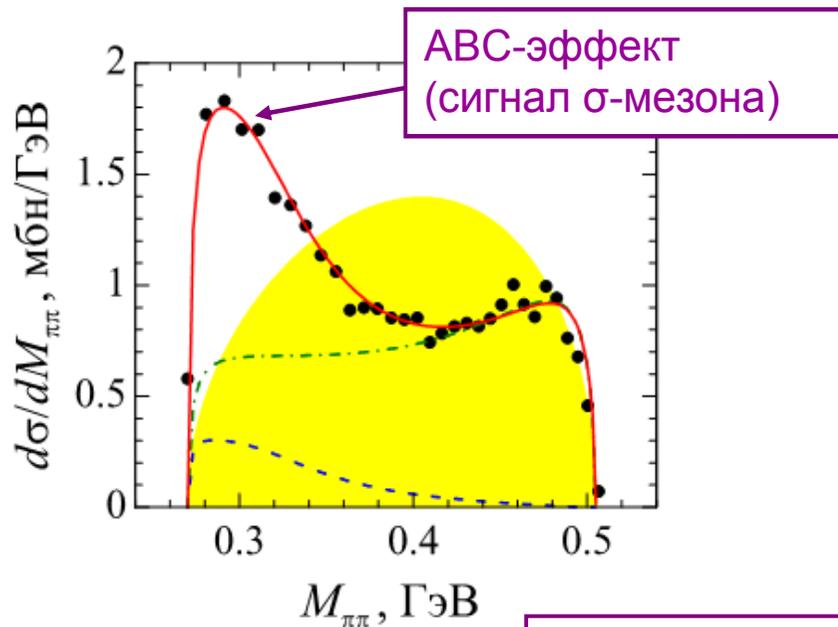
(a)



(b)

- Впервые рассмотрены переходы между различными дибарионными состояниями, по аналогии с известными переходами между барионами (ср., например, распады Роперовского резонанса $N^*(1440) \rightarrow N + \sigma \rightarrow N + \pi\pi$ и $N^*(1440) \rightarrow \Delta(1232) + \pi \rightarrow N + \pi\pi$).

Спектры инвариантных масс при $E = 2.38$ ГэВ



● Experiment WASA@COSY
[PRL106(2011)242302,
renorm. in PLB721(2013)229]

- phase space
- - - $D_{03} \rightarrow d + \sigma$
- · - · $D_{03} \rightarrow D_{12} + \pi$
- Full calculation

Каждый из двух механизмов распада дибариона D_{03} дает резонансное усиление в соответствующем спектре инвариантных масс:

- ABC-пик появляется вследствие рождения промежуточного околопорогового σ -мезона;
- пик в спектре масс $M_{d\pi}$ отражает рождение изовекторного D_{12} -дибариона.

Новый формализм NN-рассеяния: модель с внутренними и внешними каналами

Полный гамильтониан дибарионной модели:

$$H = \begin{pmatrix} h_{NN} & \lambda |\varphi\rangle\langle B| \\ \lambda |B\rangle\langle\varphi| & h^{\text{in}} \end{pmatrix}$$

h_{NN} – гамильтониан, действующий во внешнем пространстве относительного движения двух нуклонов .

Внутреннее пространство отвечает кварковым степеням свободы. В простейшем случае учитывается одно состояние:

$$h^{\text{in}} = E_D |B\rangle\langle B|$$

Эффективный гамильтониан во внешнем канале:

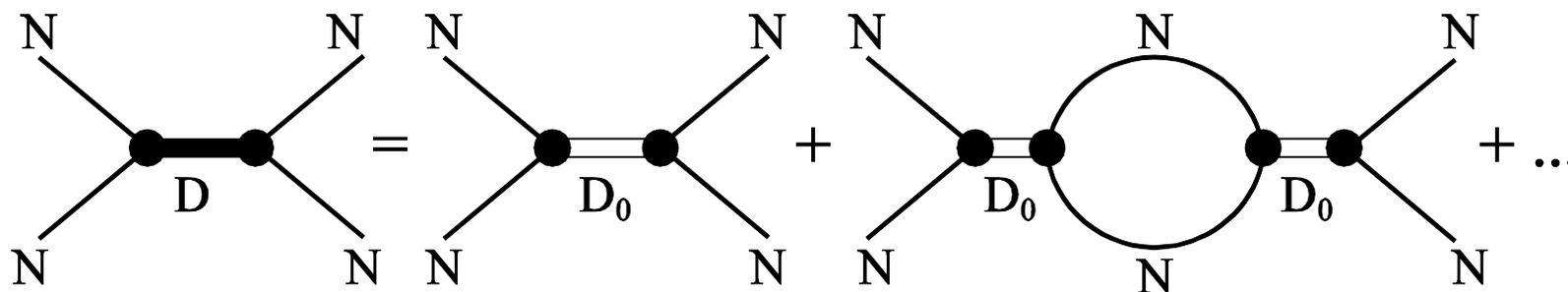
$$H_{\text{eff}}(E) = h_{NN} + \frac{\lambda^2}{E - E_D} |\varphi\rangle\langle\varphi|$$

Эффективный гамильтониан

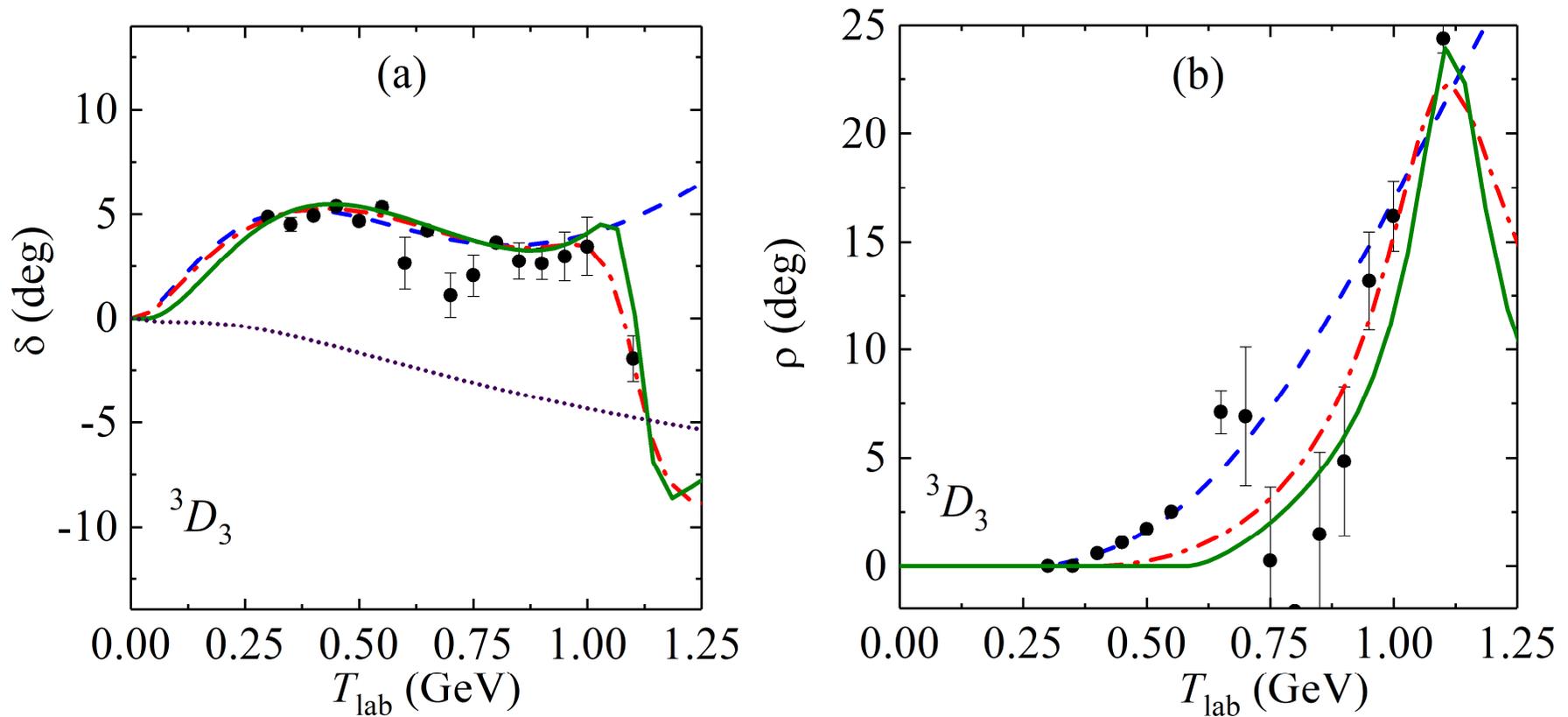
$$H_{\text{eff}}(E) = t_{NN} + V_{OPE} + V_{\text{orth}} + \frac{\lambda^2}{E - E_D} |\varphi\rangle\langle\varphi|$$

Внутреннее состояние в виде резонанса: $E_D = E_0 - i\Gamma(E)/2$

Ширина $\Gamma(E)$ учитывает вероятности распада дибарионного состояния во все неупругие каналы ($N\Delta$, $\Delta\Delta$ и др.).



Связанные каналы 3D_3 - 3G_3



- SAID single-energy
- SAID SM16
- · - SAID AD14
- Dib. Model
- pure OPEP

Параметры резонанса в дибарионной модели:

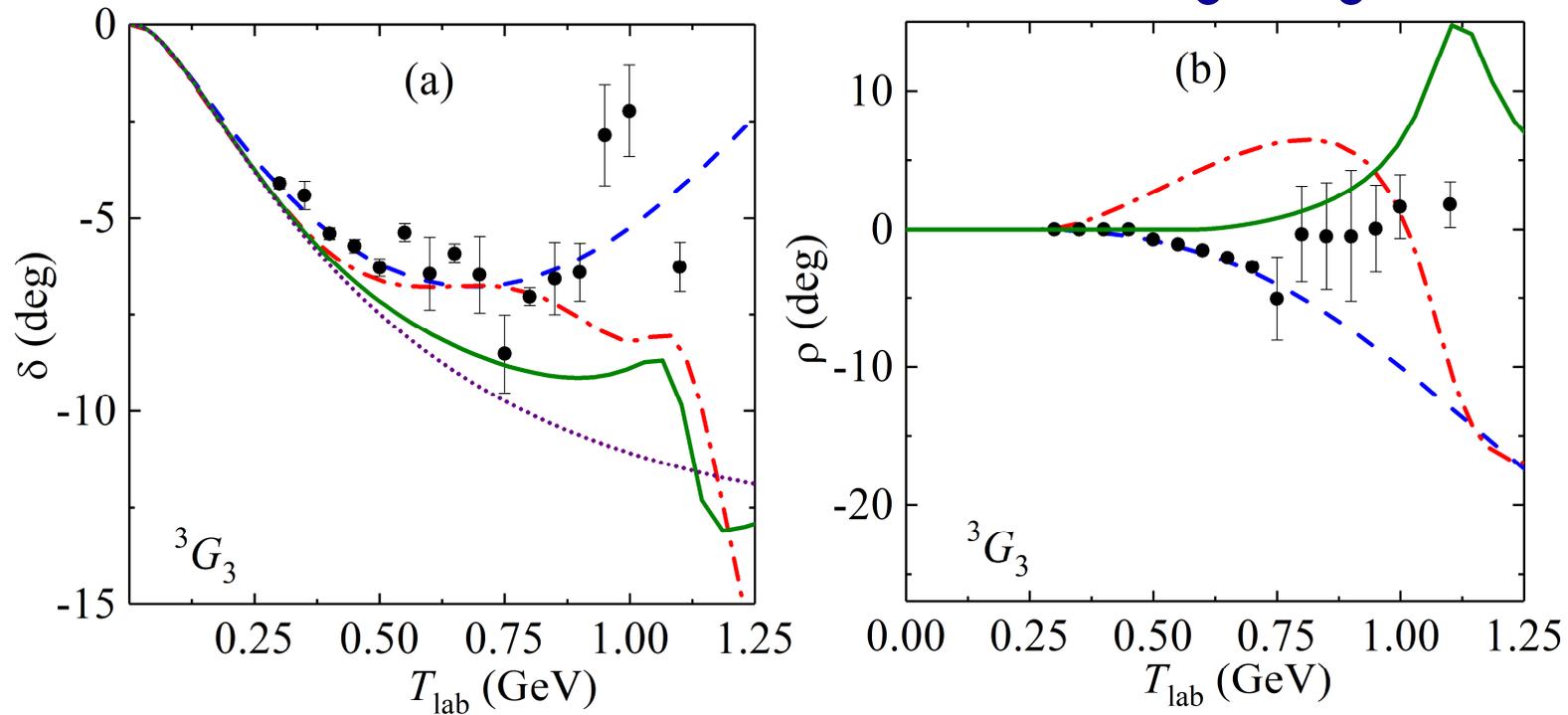
$$M_{\text{th}} = 2.376 \text{ ГэВ}, \quad \Gamma_{\text{th}} = 0.084 \text{ ГэВ}.$$

Экспериментальные значения:

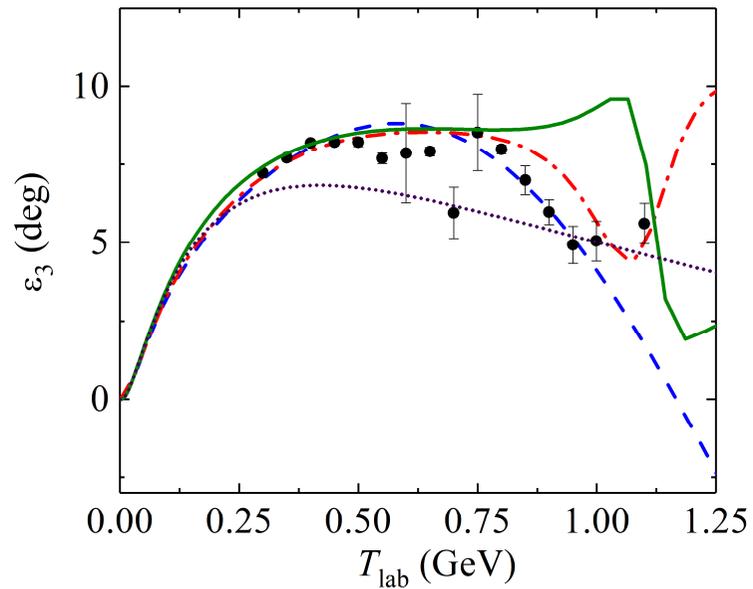
$$M_{\text{exp}}(d^*) = 2.38 \pm 0.01 \text{ ГэВ},$$

$$\Gamma_{\text{exp}}(d^*) = 0.08 \pm 0.01 \text{ ГэВ}.$$

Связанные каналы 3D_3 - 3G_3

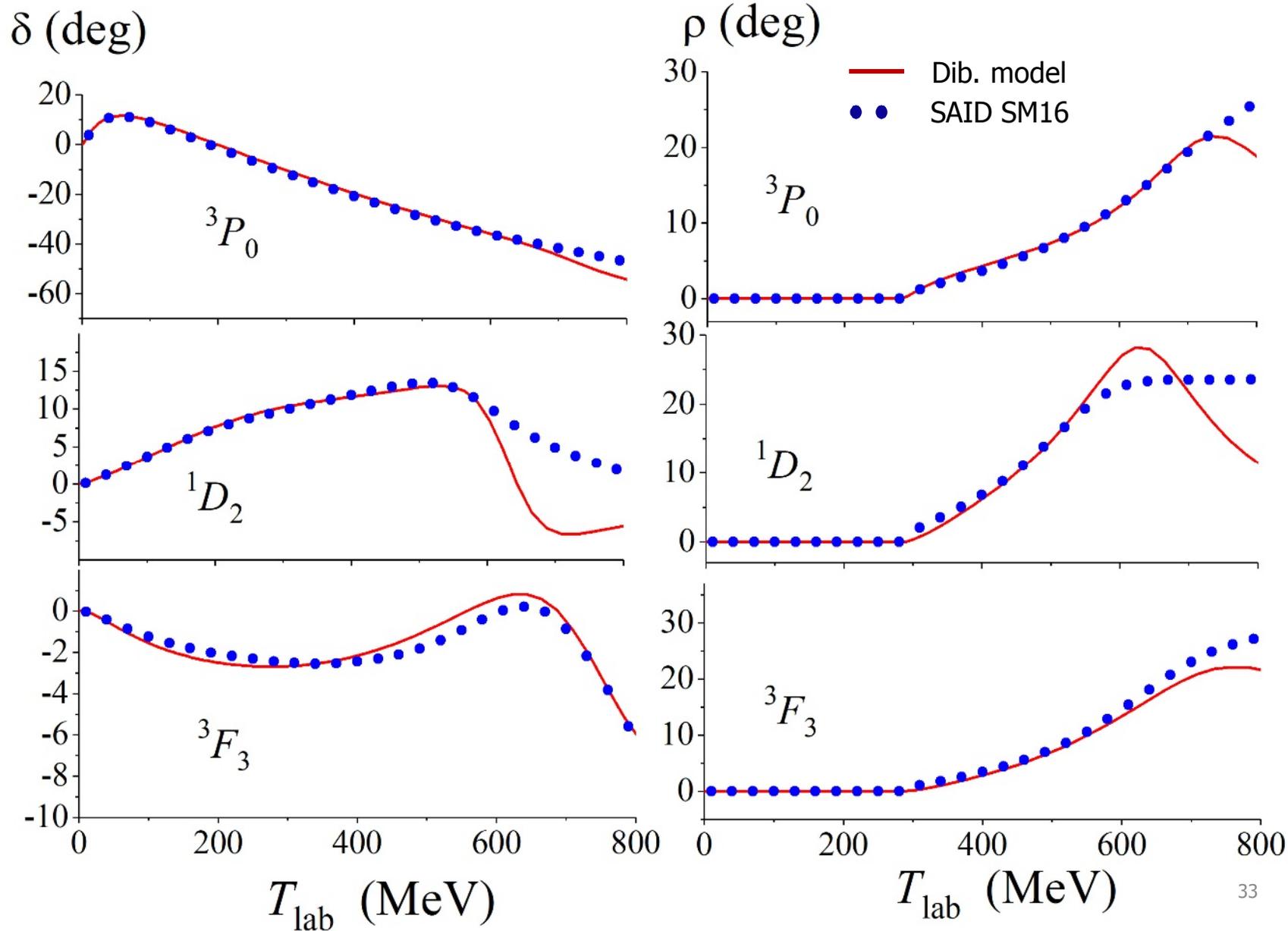


- SAID single-energy
- SAID SM16
- - SAID AD14
- Dib. Model
- ⋯ pure OPEP



Изовекторные каналы

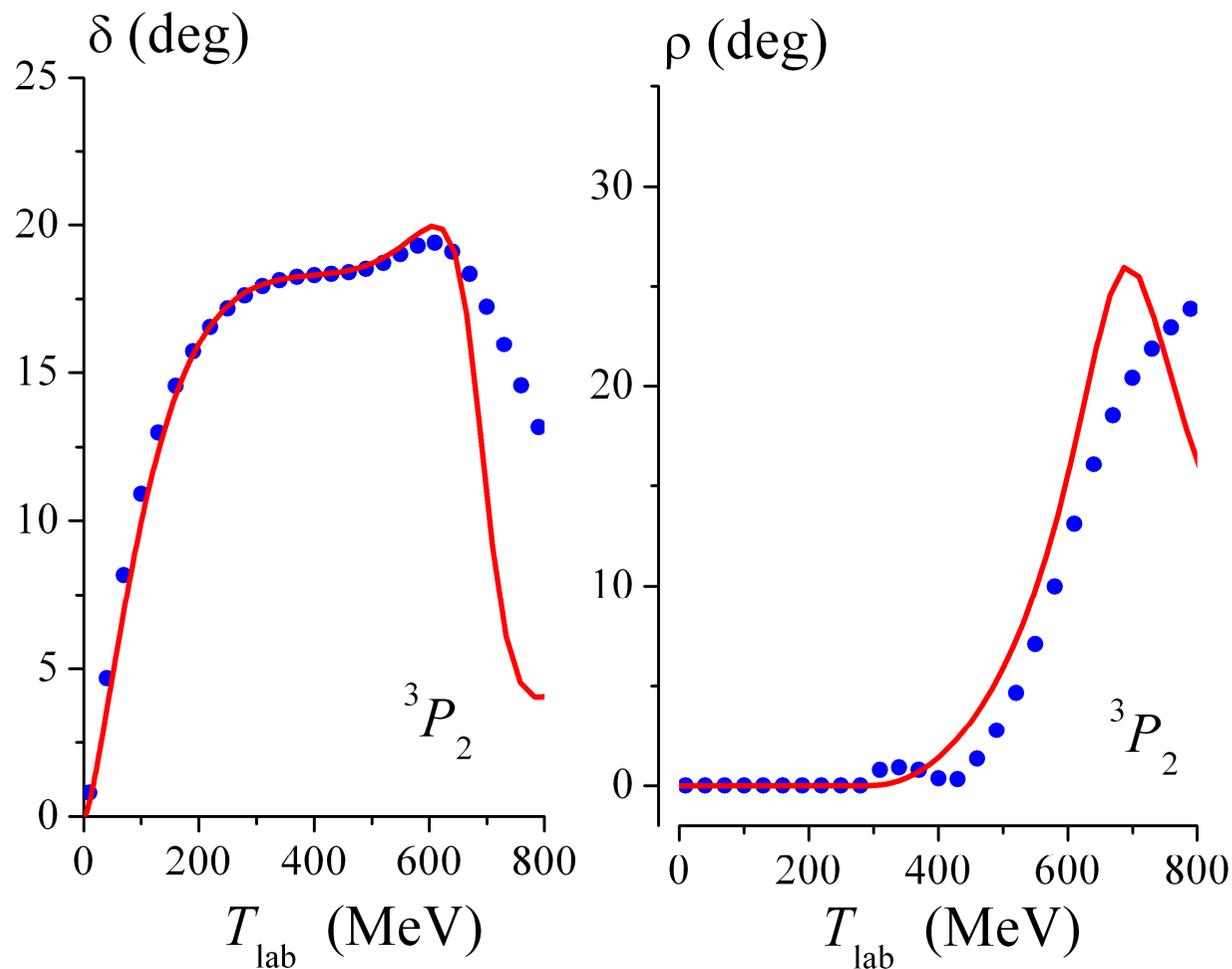
(V.N. Pomerantsev et al., Few-Body Syst. **60**, 48 (2019))



Сравнение параметров резонансов
с экспериментальными данными:

$^{2S+1}L_J$	M_{th}	Γ_{th}	M_{exp}	Γ_{exp}
3P_0	2.21	0.1	2.20(5)	0.091(12)
1D_2	2.18	0.11	2.14–2.18	0.05–0.1
3F_3	2.22	0.17	2.20–2.26	0.1–0.2

Связанные каналы 3P_2 - 3F_2



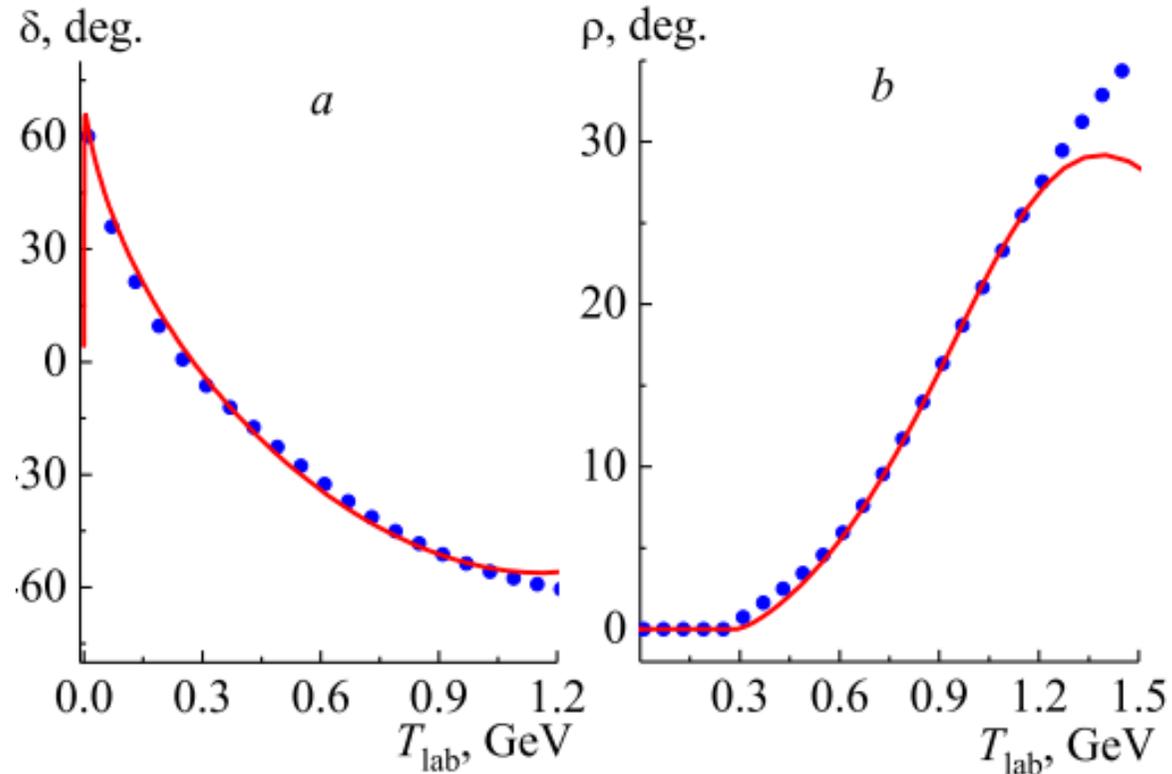
$$M_{\text{th}} = 2216 \text{ MeV}, \Gamma_{\text{th}} = 144 \text{ MeV}$$

Экспериментальные значения:

$$M_R = 2197 \pm 8 \text{ MeV}, \Gamma = 130 \pm 21 \text{ MeV}$$

Канал 1S_0

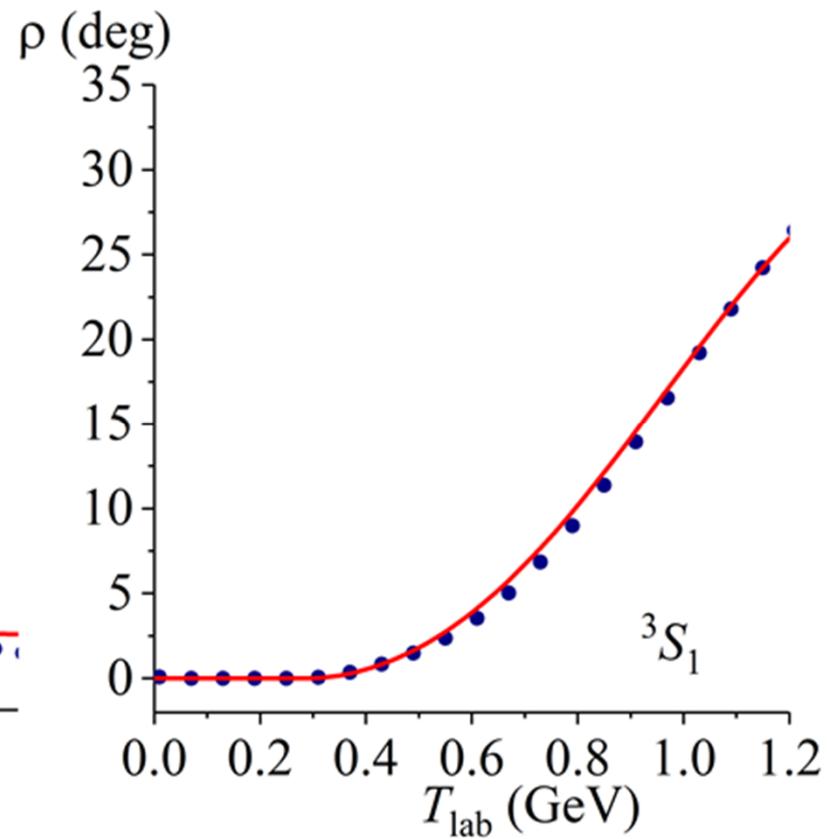
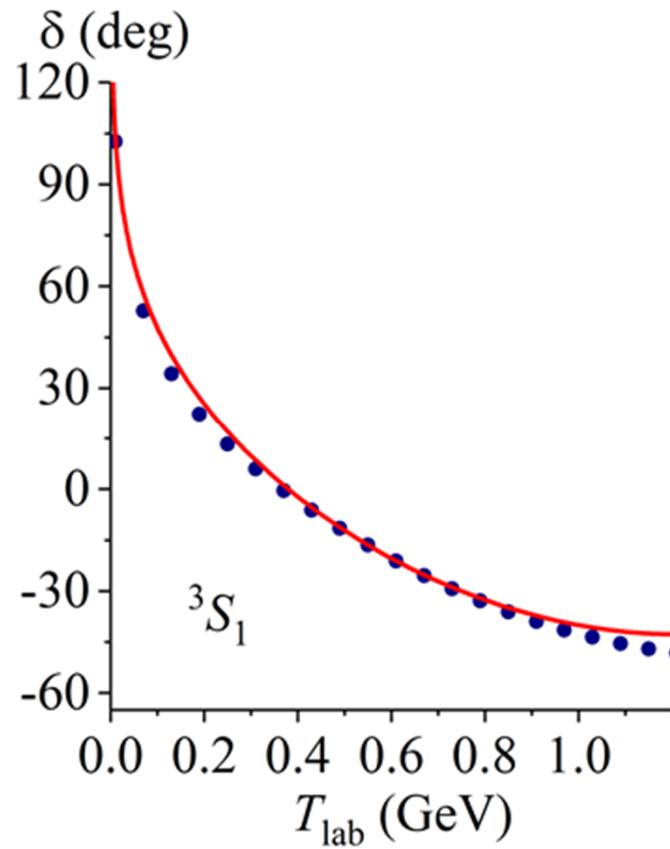
V.I. Kukulín et al., Phys. At. Nucl. (2019); arXiv:1908.10551[nucl-th]



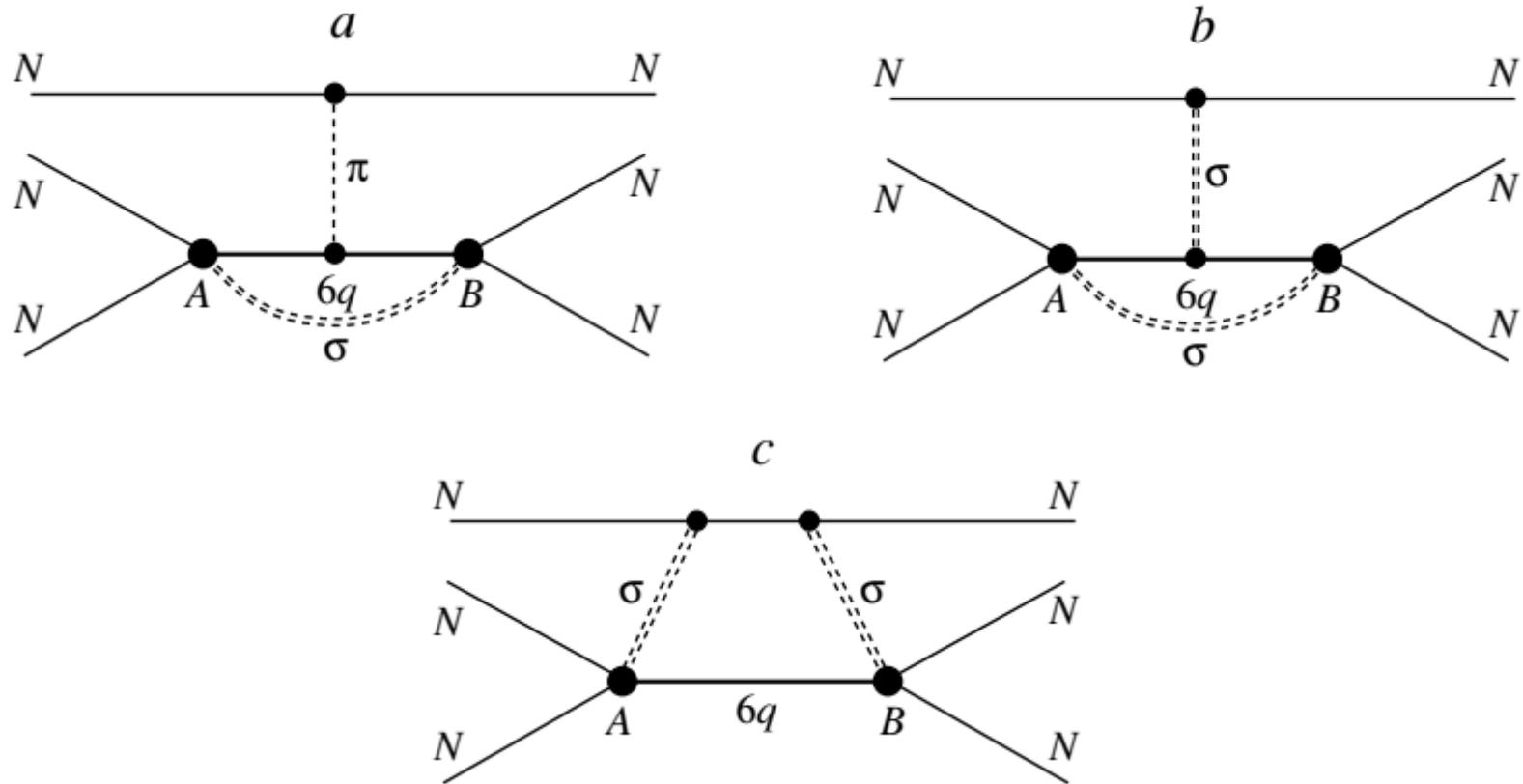
Найден дополнительный (к синглетному дейтрону) широкий резонанс:

$$M_{th} = 2.6 \text{ GeV}, \Gamma_{th} = 0.6 \text{ GeV}$$

Связанные каналы 3S_1 - 3D_1 (дейтронный канал)



Трехчастичные силы



Свойства ядер ${}^3\text{H}$ и ${}^3\text{He}$

(V.N. Pomerantsev et al., Phys. At. Nucl. **68**, 1453 (2005))

Model	E, MeV	$P_D, \%$	$P_{6qN}(P_{\text{in}}), \%$		
				T	$V({}^3N)$
DBM(I) $g = 9.577^{\text{a}}$	-8.482	6.87	10.99	112.8	-7.15
DBM(II) $g = 8.673^{\text{a}}$	-8.481	7.08	7.39	112.4	-4.69
AV18 + UIX ^b	-8.48	9.3	—	51.4	-1.19
DBM(I)	-7.772	6.85	10.80	110.2	-6.88
DBM(II)	-7.789	7.06	7.26	109.9	-4.51
AV18 + UIX ^(b)	-7.76	9.25	—	50.6	-1.17

$$\Delta E_{\text{Coul}} = 754 \text{ keV} \quad (\Delta E_{\text{Coul}}^{\text{exp}} = 764 \text{ keV})$$

Цикл работ

«ДИБАРИОННАЯ КОНЦЕПЦИЯ ЯДЕРНЫХ СИЛ И ЕЕ СЛЕДСТВИЯ ДЛЯ ЯДЕРНОЙ СТРУКТУРЫ»

Авторы: Кукулин Владимир Иосифович, Померанцев Владимир Назарович, Платонова Мария Николаевна

1. Кукулин В. И. *Современные модели ядерных сил и роль дибарионных резонансов (учебное пособие)* // КДУ, Москва, 2017.
2. Platonova M. N., Kukulin V. I. *Manifestation of the P-wave diproton resonance in single-pion production in pp collisions* // *Physical Review D*. — 2016. — Vol. 94. — P. 054039.
3. Platonova M. N., Kukulin V. I. *Hidden dibaryons in one- and two-pion production in NN collisions* // *Nuclear Physics A*. — 2016. — Vol. 946. — P. 117–157.
4. Platonova M. N., Kukulin V. I. *ABC effect as a signal of chiral symmetry restoration in hadronic collisions* // *Physical Review C*. — 2013. — Vol. 87. — P. 025202.
5. Kukulin V. I., Grabmayr P., Faessler A., Abraamyan Kh. U., Bashkanov M., Clement H., Skorodko T., Pomerantsev V. N. *Experimental and theoretical indications for an intermediate sigma-dressed dibaryon in the NN interaction* // *Annals of Physics*. — 2010. — Vol. 325. — P. 1173.

6. Fritzsch C., Kukulin V.I., Platonova M.N., et al. *Experimental and theoretical study of deuteron-proton elastic scattering for proton kinetic energies between $T_p = 882.2$ MeV and $T_p = 918.3$ MeV* // *Physics Letters B*. — 2018. — Vol. 784. — P. 277–283.
7. Кукулин В. И., Померанцев В. Н. *Dibaryon concept for nuclear force and its experimental evidence* // *Ядерная физика*. — 2009. — Vol. 72, no. 10. — P. 1845–1853.
8. Кукулин В. И., Платонова М. Н. *Дибарионные резонансы в адронной и ядерной физике: новые результаты* // *Физика элементарных частиц и атомного ядра*. — 2017. — Т. 48, № 6. — С. 846–852.
9. Кукулин В. И., Платонова М. Н. *Короткодействующие компоненты ядерных сил: эксперимент против мифологии* // *Ядерная физика*. — 2013. — Т. 76, № 12. — С. 1549–1565.
10. Кукулин В. И. *Ди- и мультибарионные кластеры в ядрах: нетрадиционный взгляд на природу ядерных сил и структуру ядер* // *Ядерная физика*. — 2011. — Т. 74, № 11. — С. 1594–1614.
11. Платонова М. Н. *NN and Nd scattering with intermediate dibaryons* // *Few-Body Systems*. — 2017. — Vol. 58. — P. 64–67.
12. Конобеевский Е.С., Кукулин В.И., Померанцев В.Н. и др. *Низкоэнергетические параметры нейтрон-нейтронного взаимодействия: анализ данных, извлеченных из реакций nd - и dd -развала* // *Ядерная физика*. — 2018. — Т. 81, № 5. — С. 555–563.

13. Pomerantsev V. N., Kukulín V. I., Rubtsova O.A. *Model with coupled internal and external channels for 2N and 3N systems* // *Few-Body Systems*. — 2019. — Vol. 60. — P. 48.
14. Kukulín V. I. *Dibaryon concept for short-range 2N and 3N forces: consequences for hadronic and nuclear physics* // *Few-Body Systems*. — 2014. — Vol. 55, no. 8-10. — P. 633–638.
15. Platonova M. N. *New interpretation of the ABC effect in two-pion production in NN collisions* // *Few-Body Systems*. — 2014. — Vol. 55. — P. 791–794.
16. Kukulín V. I., Platonova M. N. *Digamma diagnostics for the mixed-phase generation at NICA* // *EPJ Web of Conferences*. — 2017. — Vol. 138. — P. 03006.
17. Kukulín V. I., Platonova M. N. *Chiral symmetry restoration in σ -meson production in hadronic processes* // *EPJ Web of Conferences*. — 2014. — Vol. 73. — P. 05005.
18. Platonova M. N., Kukulín V. I. *Quark degrees of freedom in the deuteron and their testing in nucleon-deuteron scattering* // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2012. — Vol. 381. — P. 012110.
19. Kukulín V. I., Pomerantsev V. N. *Experimental and theoretical backgrounds for generation of dibaryons in NN and 3N interactions* // *EPJ Web of Conferences*. — 2010. — Vol. 3. — P. 03034.
20. Kukulín V. I., Platonova M. N. *Non-nucleonic degrees of freedom and formation of mixed phase embryos in cold nuclei* // *Proceedings of the XIX International Baldin Seminar on High-Energy Physics Problems*. — Vol. 1. — JINR Dubna, 2009. — P. 16–22.

Заключение

- В ОФАЯ в последние годы был сделан важный шаг в области фундаментальной ядерной физики: построена современная концепция ядерных сил, включающая как парные, так и трехчастичные силы.
- Этот новый подход позволяет объединить традиционную для всей ядерной физики концепцию t -канального мезонного обмена с кварк-глюонной картиной взаимодействия, свойственной КХД, через механизм образования промежуточных дибарионных резонансов, экспериментально найденных в последние годы.
- Такой синтез дает совершенно новый взгляд на ядерную физику в целом и позволяет объяснить многие ядерно-физические загадки, долгое время не находившие объяснения в рамках традиционных моделей ядерных сил.

Спасибо за внимание!