

НОВЫЕ ИДЕИ О ПРИРОДЕ ЯДЕРНЫХ СИЛ И ИХ СЛЕДСТВИЯ ДЛЯ СТРУКТУРЫ ЯДЕР

В.И. Кукулин

**Семинар по ядерной физике НИИЯФ МГУ
19 ноября 2019 г.**

- Эти исследования инициировал В.Г. Неудачин в Лаборатории теории атомного ядра в начала 1970-х гг.
- С тех пор в этих работах участвовали многие ученые как в НИИЯФ, так и за его пределами.
- Основные участники:

*В.Г. Неудачин, Ю.Ф. Смирнов, И.Т. Обуховский,
В.И. Кукулин, В.Н. Померанцев, О.А. Рубцова,
М.Н. Платонова,
а также А. Фесслер, Х. Клемент, П. Грабмайр
(Тюбингенский университет) и др.*

Основные работы, опубликованные по данной тематике за последние 10 лет

1. Кукулин В. И. *Современные модели ядерных сил и роль дибарионных резонансов (учебное пособие)* // КДУ, Москва, 2017.
2. Platonova M. N., Kukulín 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., Kukulín 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., Kukulín V. I. *ABC effect as a signal of chiral symmetry restoration in hadronic collisions* // *Physical Review C*. — 2013. — Vol. 87. — P. 025202.
5. Kukulín 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. 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.
7. 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.
8. Кукулин В. И., Платонова М. Н. *Короткодействующие компоненты ядерных сил: эксперимент против мифологии* // Ядерная физика. — 2013. — Т. 76, № 12. — С. 1549–1565.
9. 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.
10. Кукулин В. И., Померанцев В. Н., Рубцова О. А., Платонова М. Н. *К природе ядерных сил* // Ядерная физика. — 2019. — Т. 82, № 6. — С. 521–540.
11. Pomerantsev V. N., Kukulkin 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.
12. Platonova M. N. *NN and Nd scattering with intermediate dibaryons* // Few-Body Systems. — 2017. — Vol. 58. — P. 64–67.

13. 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.
14. 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.
15. Kukulín V. I., Platonova M. N. *Digamma diagnostics for the mixed-phase generation at NICA* // *EPJ Web of Conferences*. — 2017. — Vol. 138. — P. 03006.
16. 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.
17. 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.
18. 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.

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

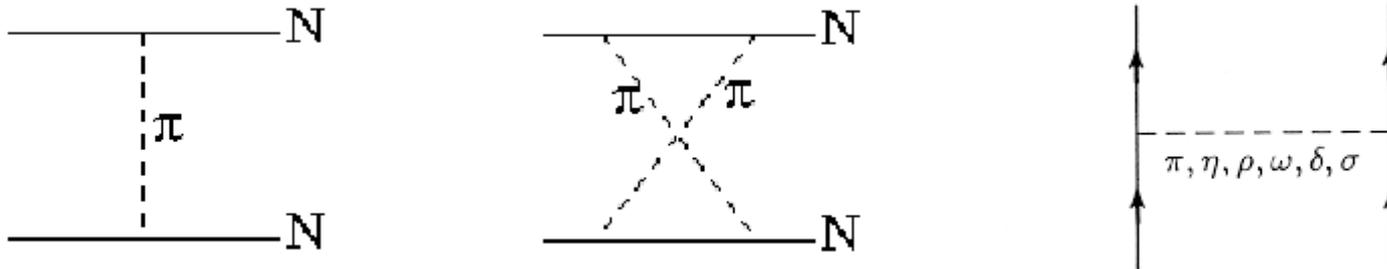
By *Hans A. Bethe*



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 Californi

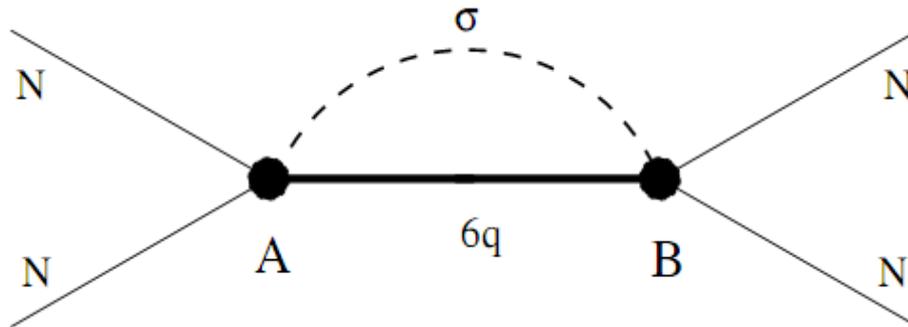
Стандартная концепция сил – мезонный обмен в духе Юкавы



- Это так называемые *t-канальные обмены*. Соответствующие амплитуды NN-рассеяния имеют особенности по квадрату переданного импульса $|t|$. Обычно такие особенности отвечают большим расстояниям, или малым $|t|$.
- На малых расстояниях более важны механизмы *s-канального обмена*, амплитуды которых имеют особенности по квадрату полной энергии s .

Дибарионная модель ядерных сил

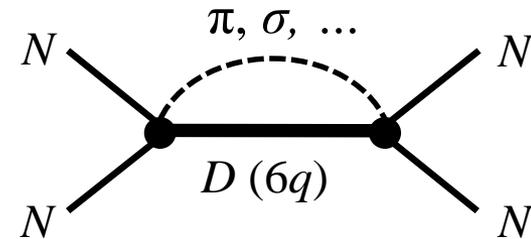
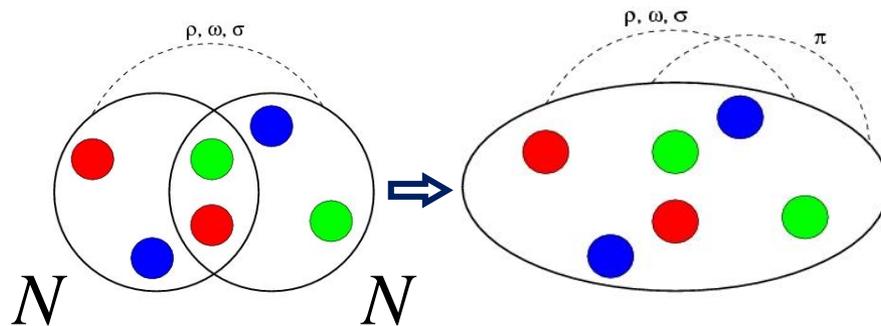
Принципиально новый механизм NN-взаимодействия – **s-канальный дибарионный обмен:**



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 скалярный (σ -) обмен между двумя нуклонами на s -канальный обмен bq -состоянием, одетым полем σ -мезонов.

На кварковом уровне



Системе $N+N$ отвечает $[3]_x \times [3]_x \Rightarrow$

$\Rightarrow [6]_x + [42]_x$ для четных L

$\Rightarrow [51]_x + [33]_x$ для нечетных L

Для $L=0$ имеем две нижайшие конфигурации в $6q$ -системе:

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

полностью симметричная

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

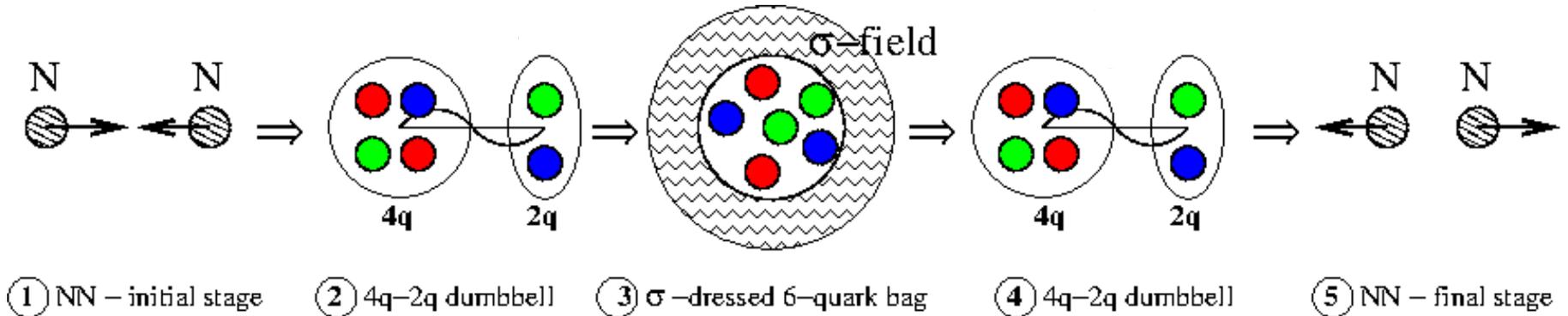
смешанной симметрии

Тогда возможны переходы:

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

На кварковом уровне

Т.е. в промежуточном состоянии образуется симметричный 6q-мешок, погруженный в легкое скалярное поле σ -мезонов.

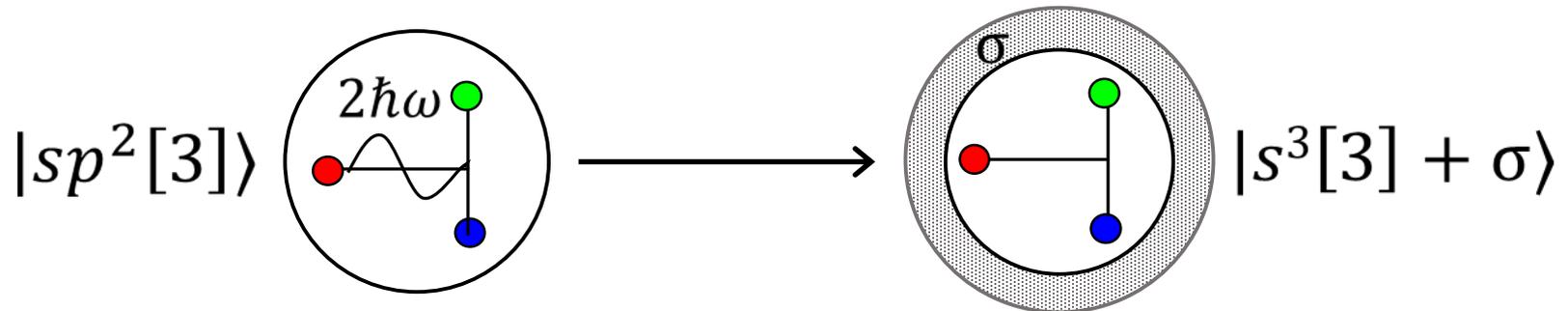


При рождении 6q-мешка доминирующей смешанной симметрии образуется $2\hbar\omega$ -возбужденная струна, связывающая два кварковых кластера 4q и 2q. При девозбуждении это струны рождается скалярный σ -мезон, «прилипающий» к мешку из-за сильной связи $\sigma+6q$.

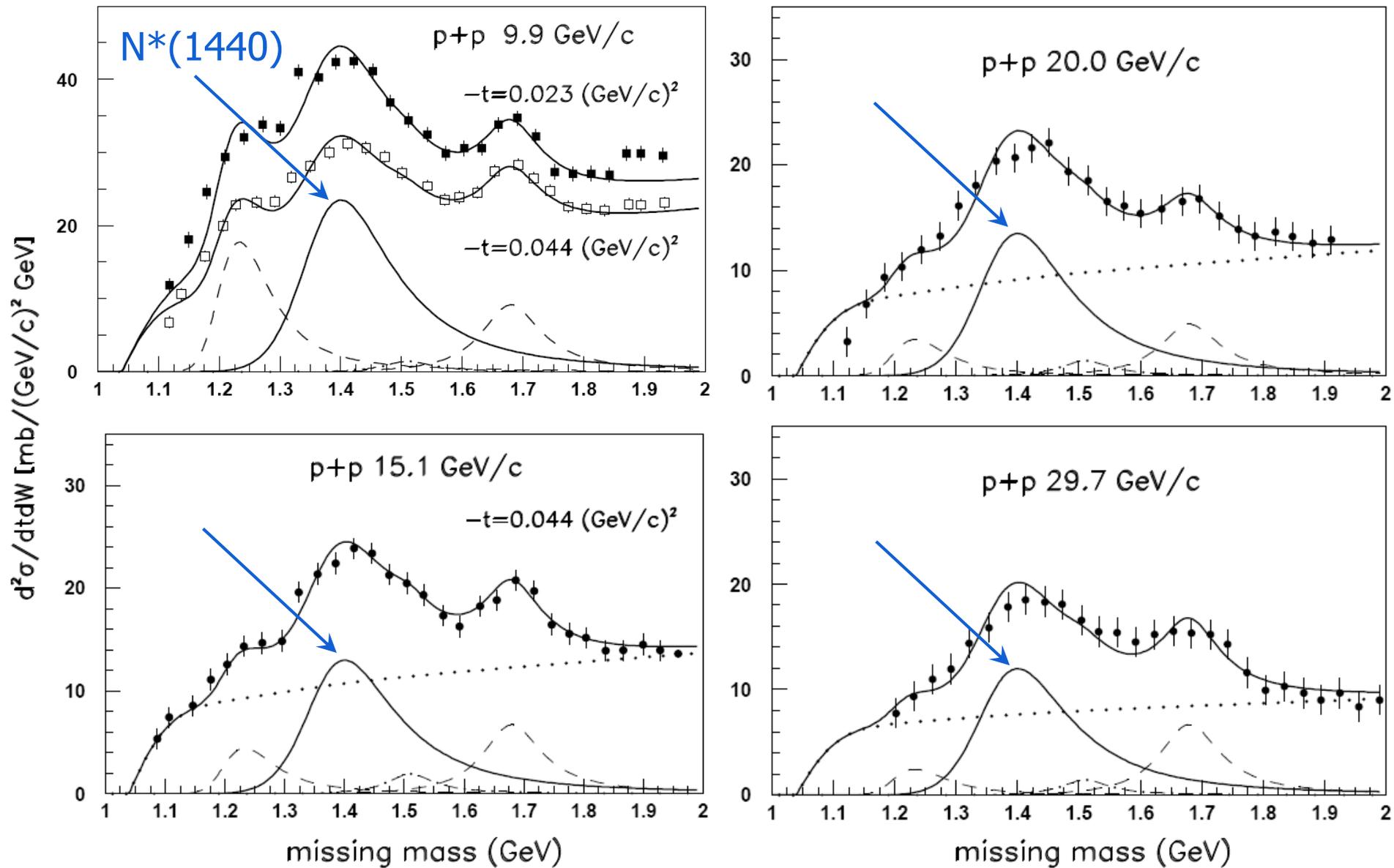
Кластерная конфигурация 6q-системы (4q-2q) была впервые изучена в модели Университета Наймегена (P.J. Mulders et al.) и ИТЭФ (Л.А. Кондратюк и др.)

Дибарионы и резонанс Ропера

- Нижайшее возбужденное состояние нуклона $N^*(1440)$ (роперовский резонанс) — это $2\hbar\omega$ -возбуждение такой же цветной струны, но в $3q$ -системе.



- Тогда механизм рождения (или распада) роперовского резонанса должен быть аналогичен механизму рождения (или распада) дибарионных резонансов.
- Иначе говоря, резонанс $N^*(1440)$ должен интенсивно рождаться в неупругих NN-соударениях, причем его распад через девозбуждение цветной струны в основном приводит к излучению пионных пар $\pi^0\pi^0$ или $\pi^+\pi^-$ в скалярной (σ) моде.



[H. Morsch, P. Zupranski, PRC 71 (2005) 065203]

Струны, σ -мезоны и помероны

Рождение σ -мезона из померона
в pp-соударениях при 50 ГэВ

[L. Kisslinger, W. Ma, P. Shen,
PRD 71 (2005) 094021]

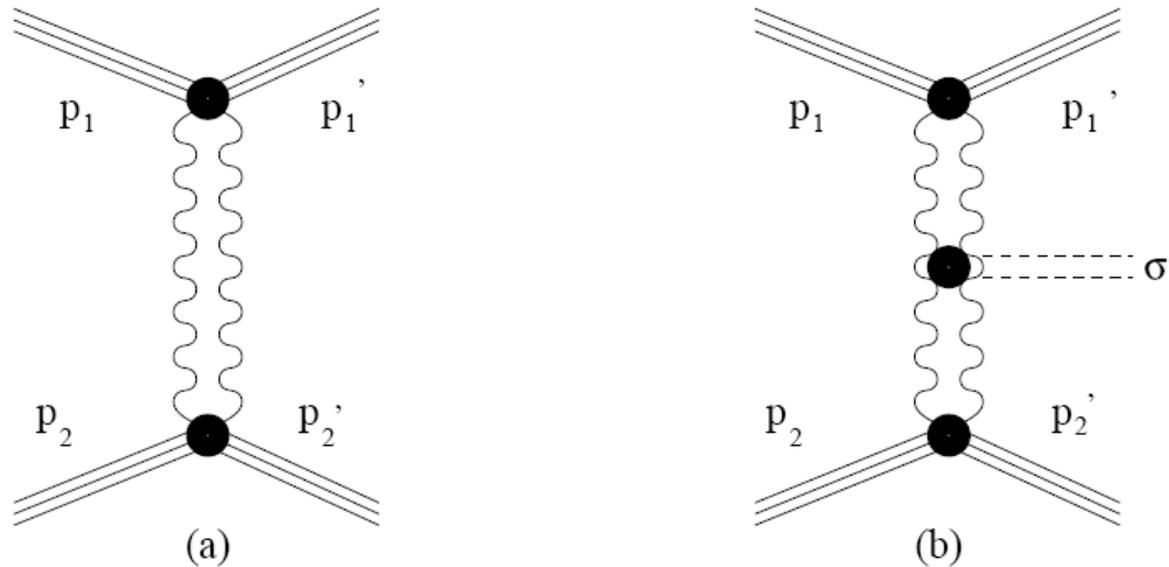


FIG. 1: a) Elastic p-p scattering with Pomeron exchange , b) peripheral production with double Pomeron exchange.

$$A^{pp\sigma} \simeq V(t_1) \bar{D}_\sigma^P(t_1, t_2, s) V(t_2),$$

where \bar{D}_σ^P is the propagator of the exchanged Pomeron coupled to a propagating σ (which decays to the $I=0$ 2π resonance), which is often called a double Pomeron, $t_1 = (p_1 - p_1')^2$ and $t_2 = (p_2 - p_2')^2$.

Рождение двух σ -мезонов из померона в pp -соударениях при 50 ГэВ

[L. Kisslinger, W. Ma, P. Shen,
PRD 71 (2005) 094021]

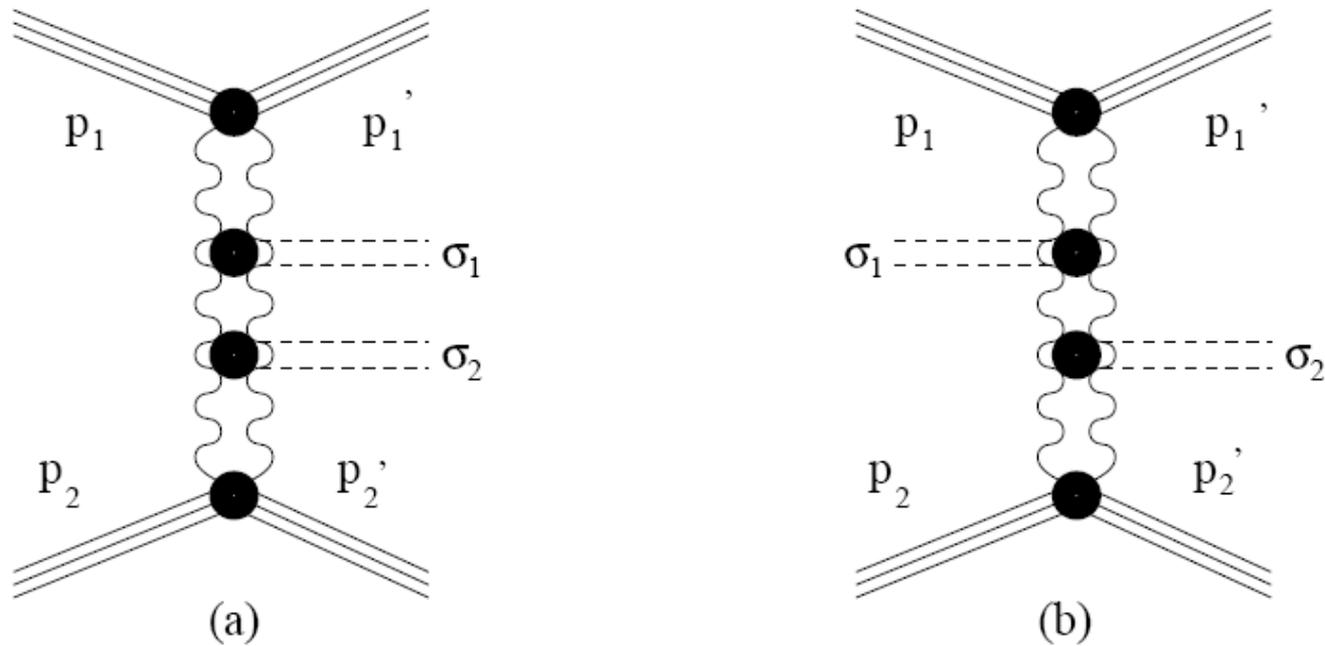
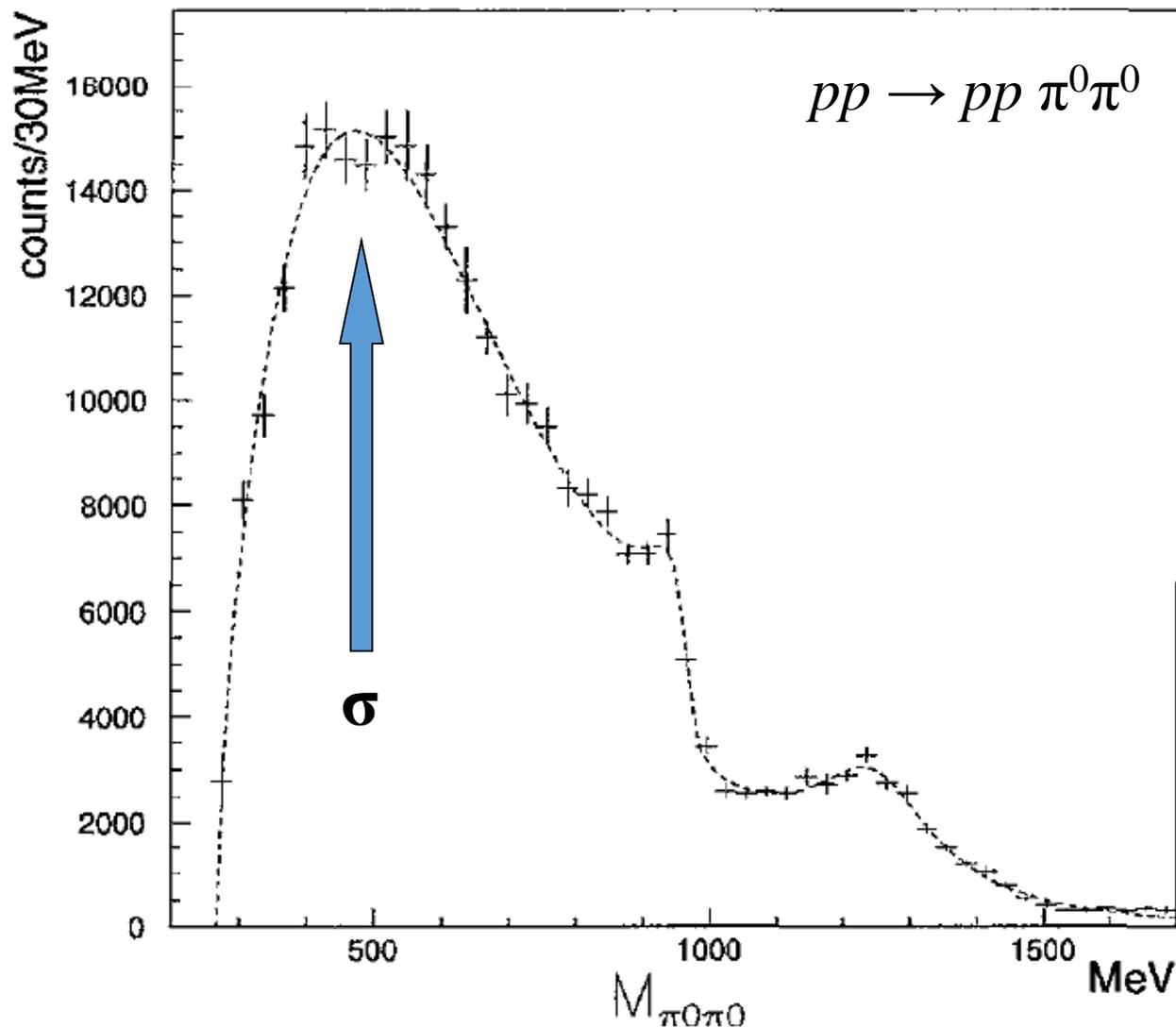


FIG. 4: a) Peripheral production from each gluonic leg of pomeron; (b) Double peripheral production from one leg

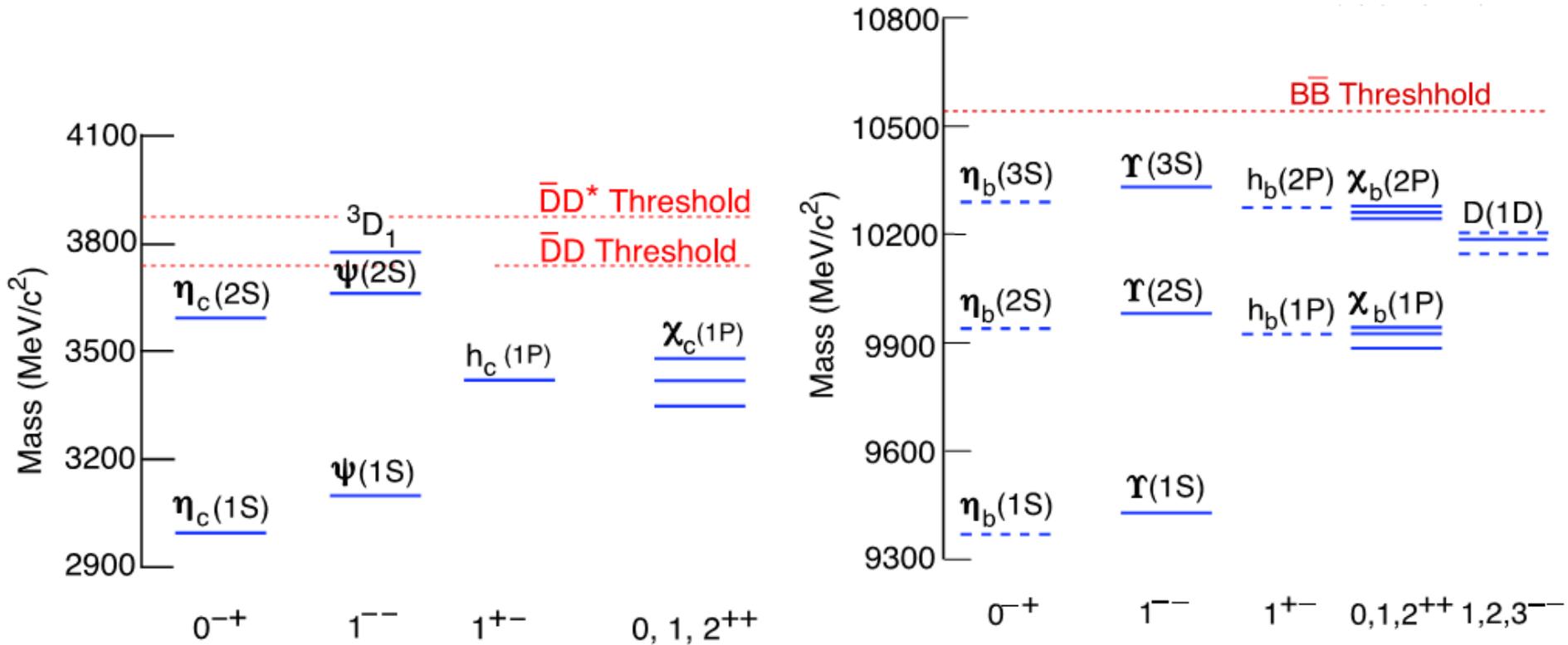
Рождение σ -мезонов в pp -рассеянии при 450 ГэВ/с

[D. Alde et al. (GAMS Coll.),
PLB 397 (1997) 350]



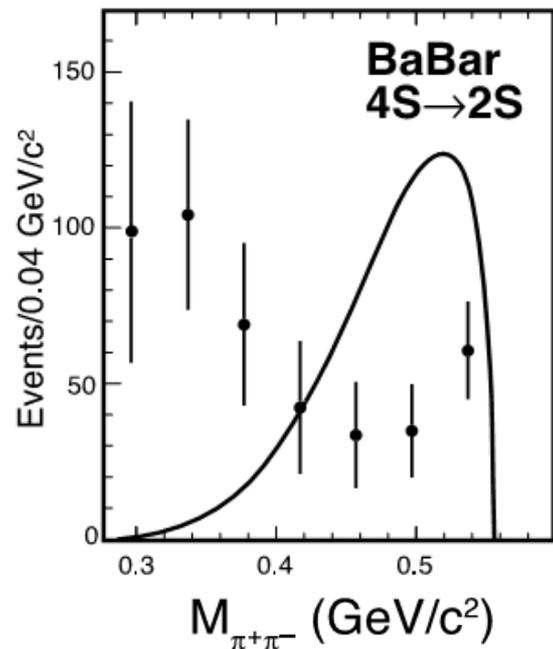
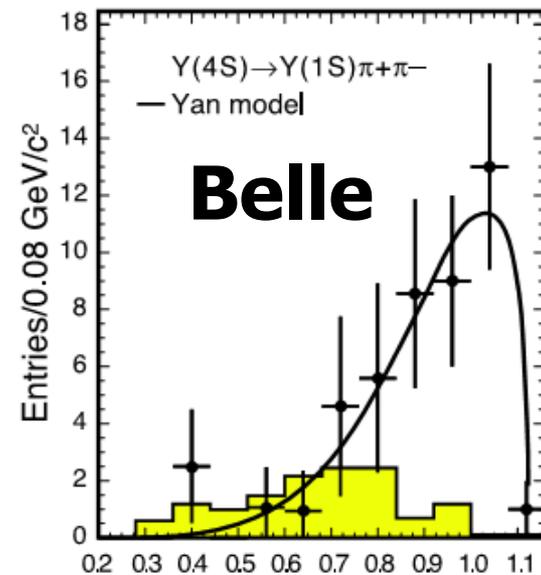
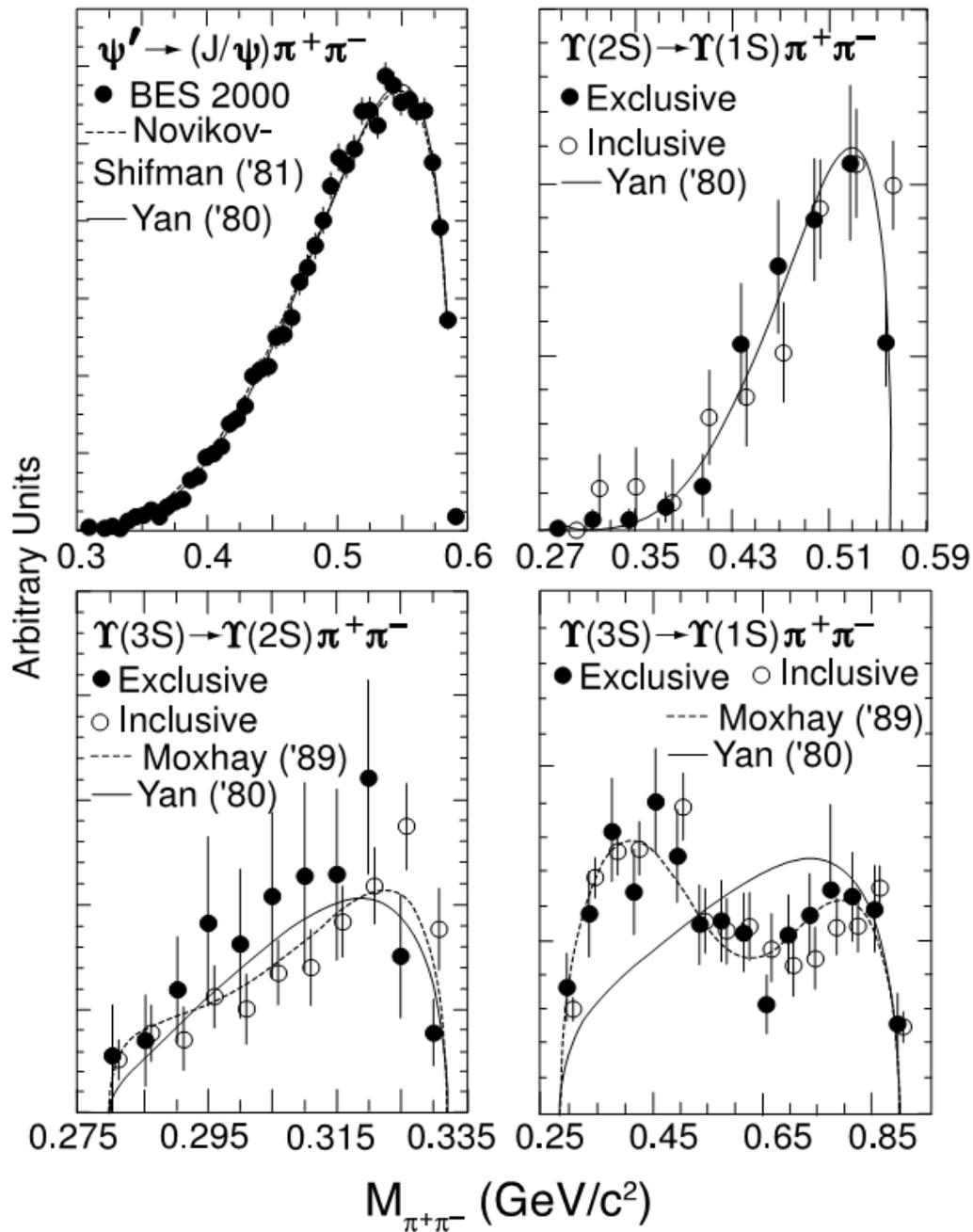
Рождение σ -мезонов в распадах кваркониев

[D. Kreinick,
Proc. CHARM 2007,
arXiv:0710.5929]



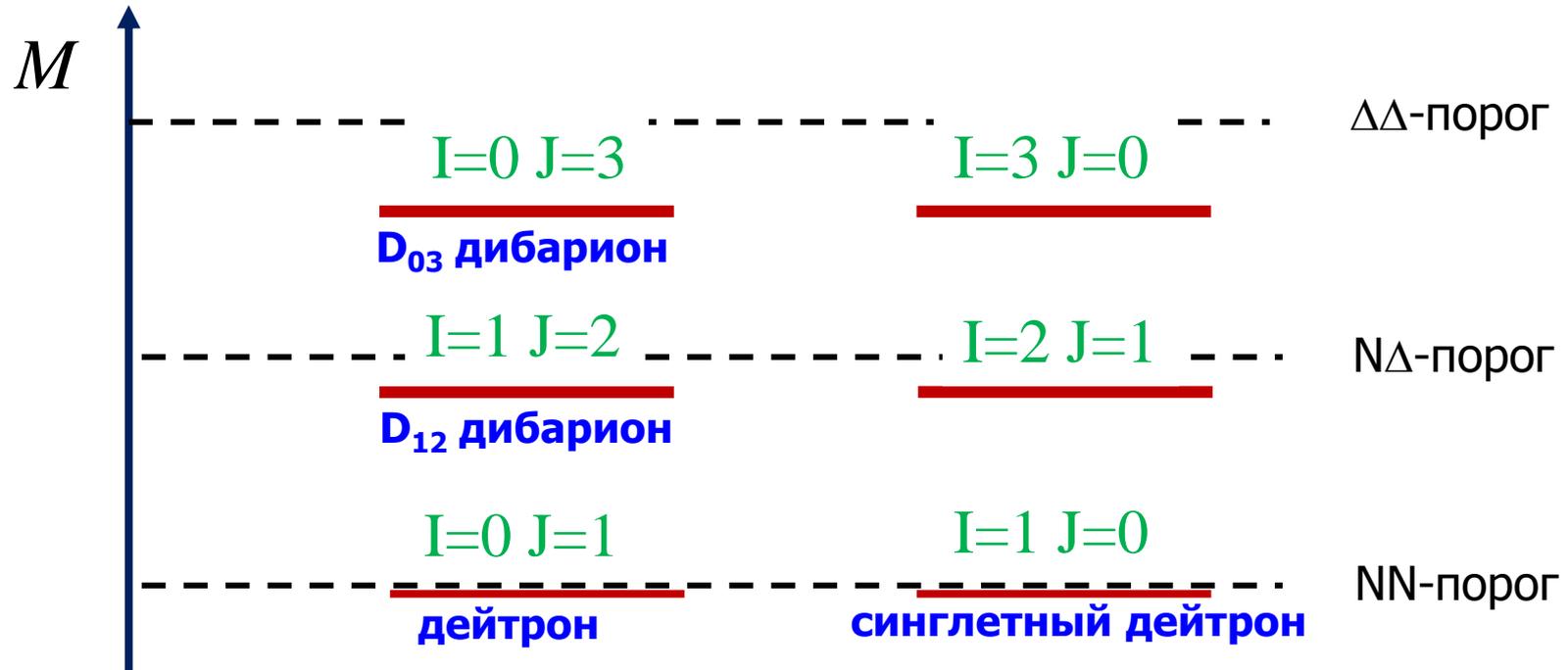
Спектры связанных чармония и боттомония. Состояния, которые еще не наблюдались, отмечены штриховыми линиями.

[D. Kreinick, Proc. CHARM 2007, arXiv:0710.5929]



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:

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

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

Дибарион D_{03} в двухпионном рождении и АВС-эффект

Высокоточные эксперименты в полной 4π-геометрии (WASA@COSY) по реакции $p + d \rightarrow p_{\text{spectator}} + d + \pi^0 \pi^0 @ T_p = 1.0 - 1.4 \text{ GeV}$

ясно показали рождение **изоскалярного дибарионного резонанса D_{03}** (или d^*) с параметрами:

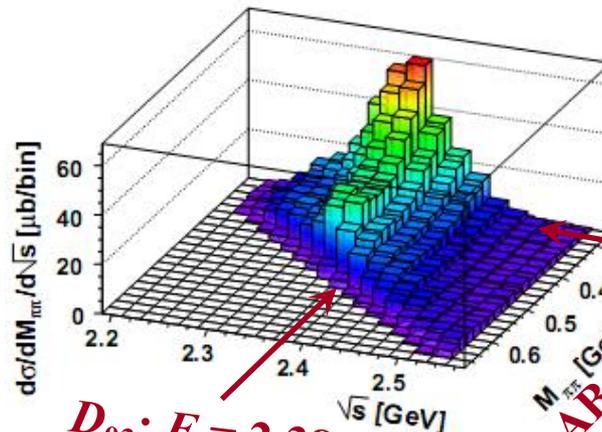
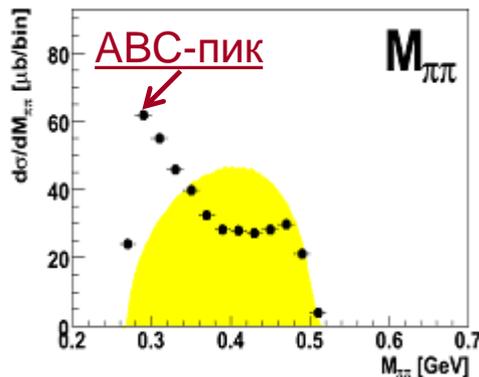
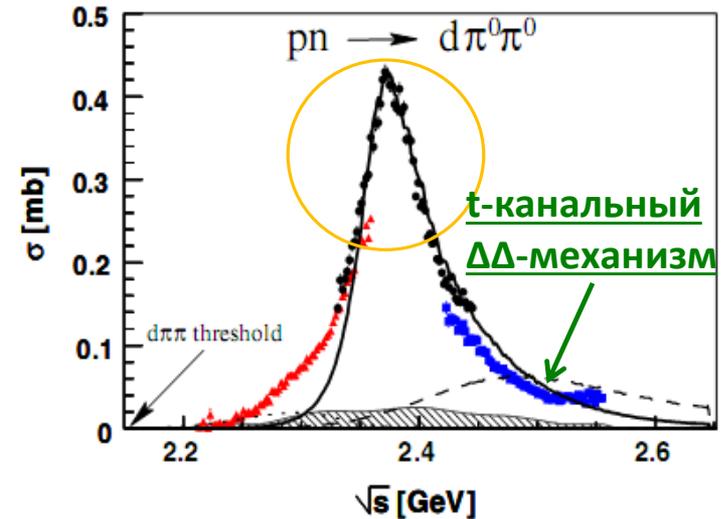
$$I(J^P) = 0(3^+)$$

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

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

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]

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

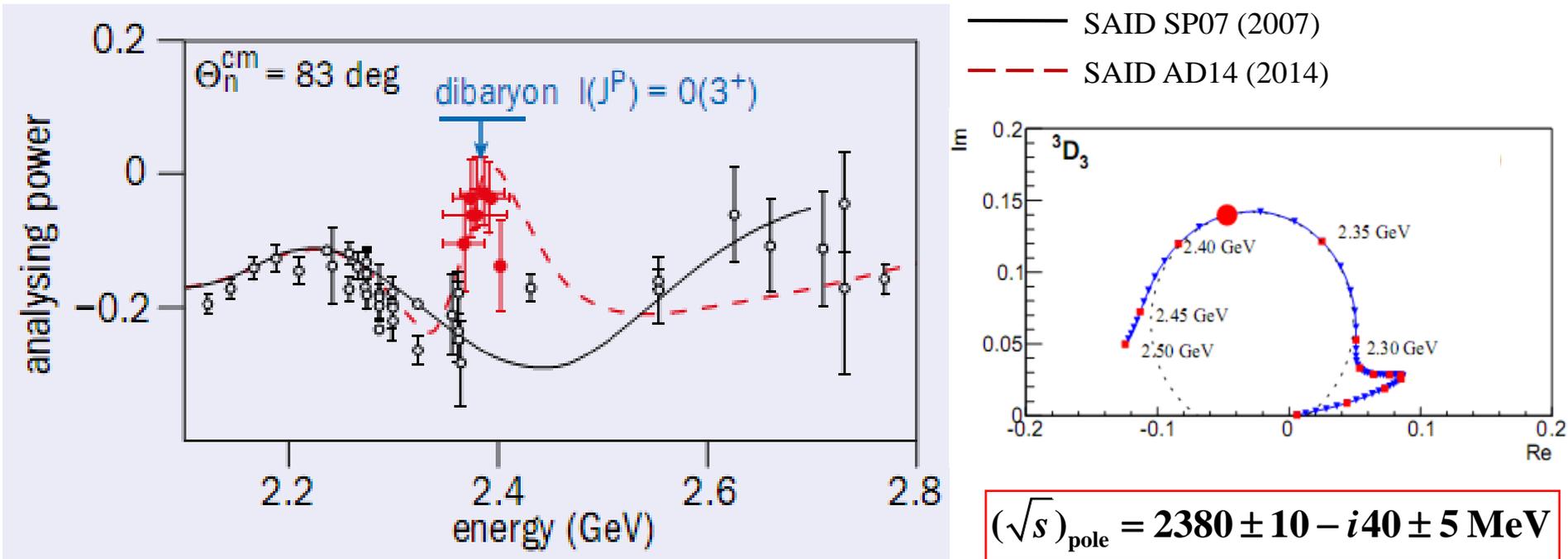
PRL 112, 202301 (2014)

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)



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

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

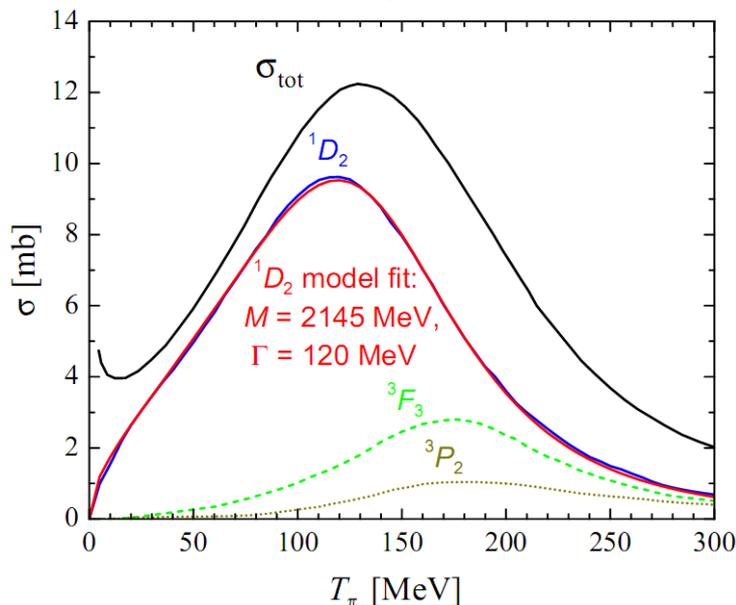
[Y. Dong et al., PRC91(2015)064002; F. Huang et al., Sci.China Phys. Mech.Astron.59(2016)622002; M. Bashkanov, S. Brodsky, H. Clement, PLB727(2013)438]

Резонанс D_{03} оказался настоящим дибарионным ($6q$) состоянием, имеющим связь с $\Delta\Delta$ -каналом, а не просто $\Delta\Delta$ -связанным состоянием.²¹

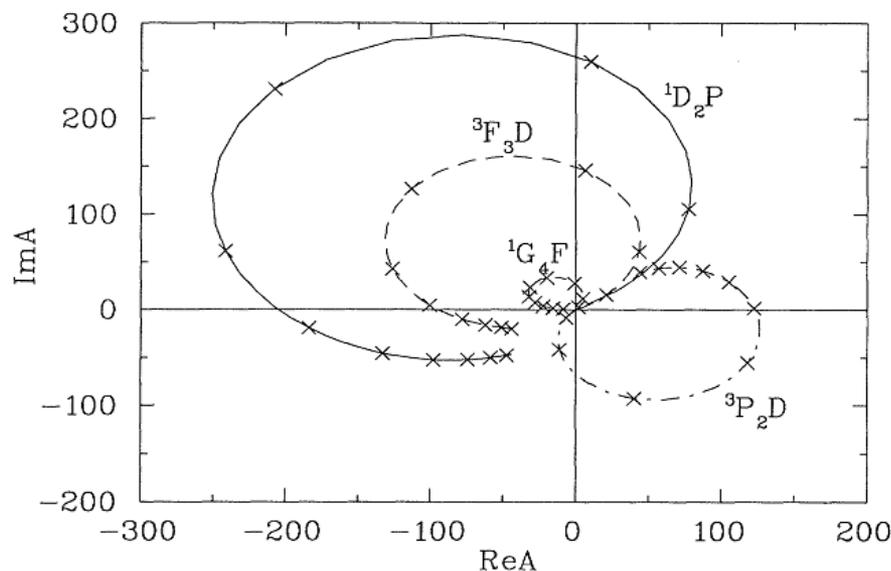
Серия изовекторных дибарионов

- 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 и т.д.**
- Резонанс в NN -канале 1D_2 с квантовыми числами $I(J^P) = 1(2^+)$ совпадает с ранее предсказанным D_{12} -дибарионом:
 $M \approx 2140\text{--}2160$ МэВ $\approx M(N+\Delta)$ - (10–30 МэВ), $\Gamma \approx 100\text{--}120$ 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

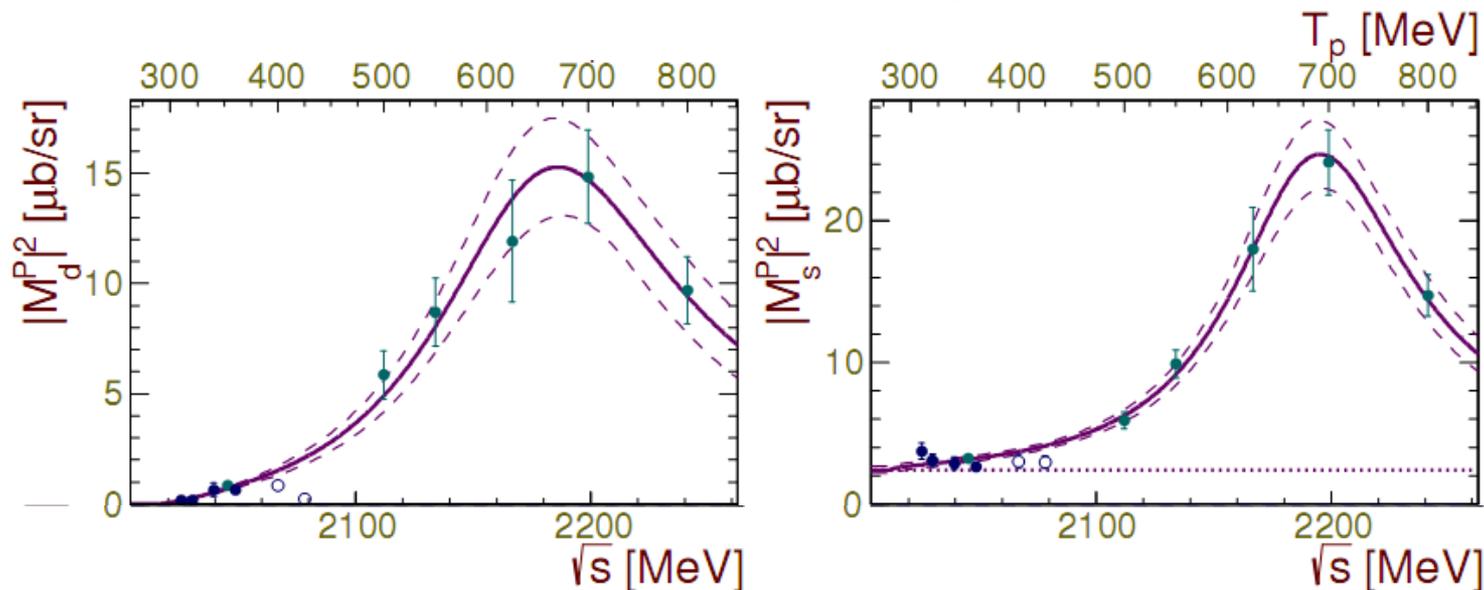
Все эти резонансы лежат вблизи $N\Delta$ -порога (2170 МэВ).

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 :

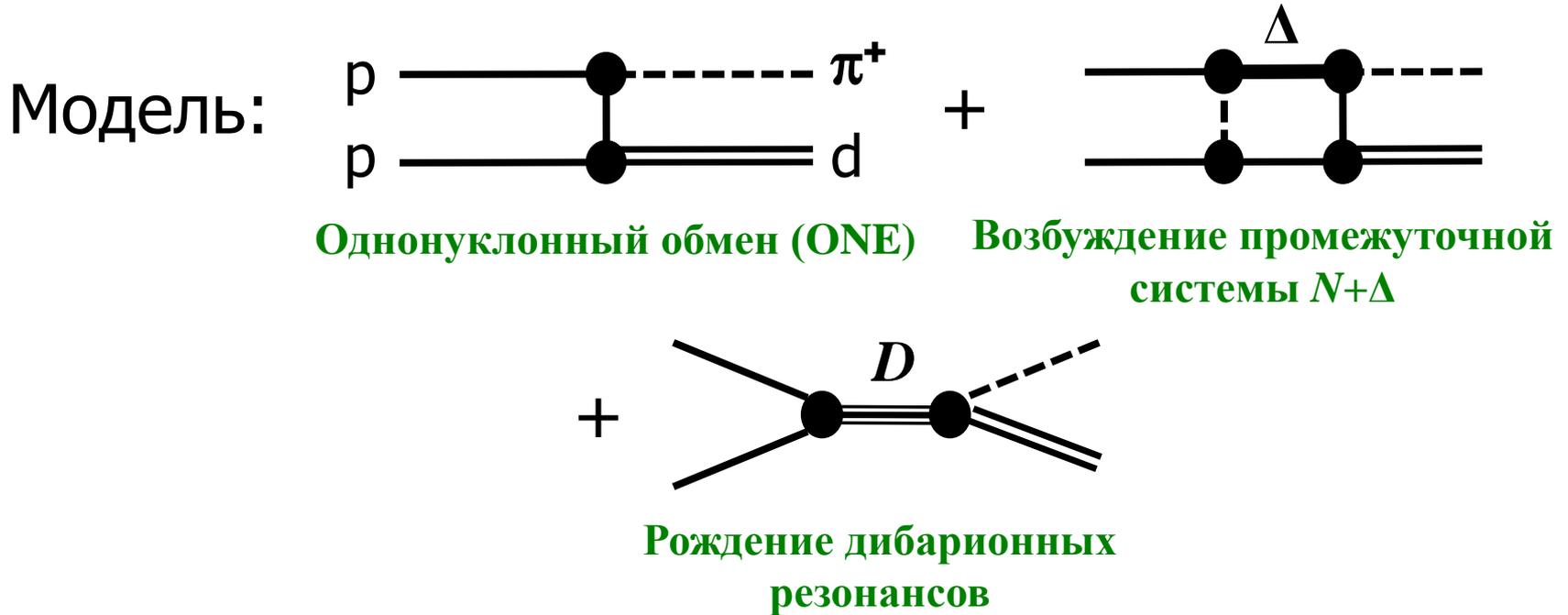
$M = 2197 \pm 8$ МэВ, $\Gamma = 130 \pm 21$ МэВ

Первое указание на резонанс 3P_0 с параметрами:

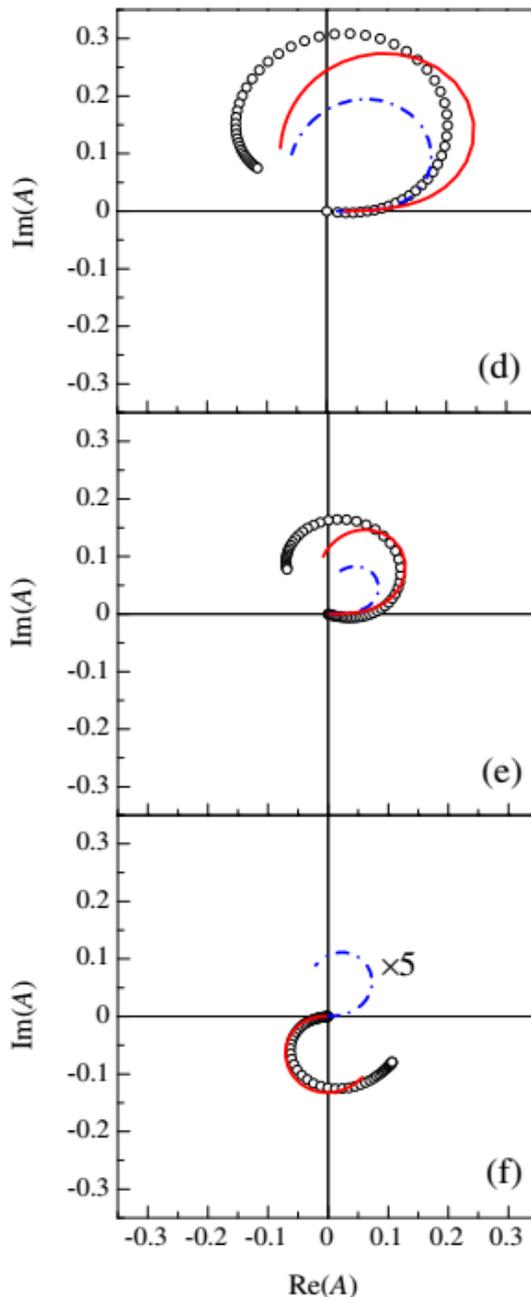
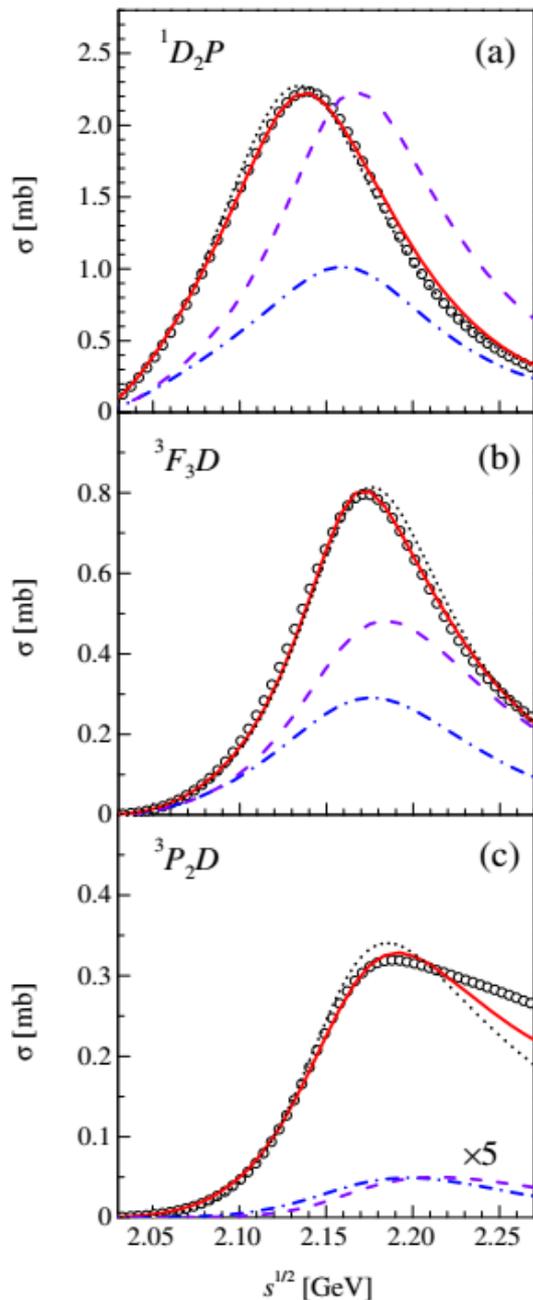
$M = 2201 \pm 5$ МэВ, $\Gamma = 91 \pm 12$ МэВ

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

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



Парциальные сечения и диаграммы Аргана

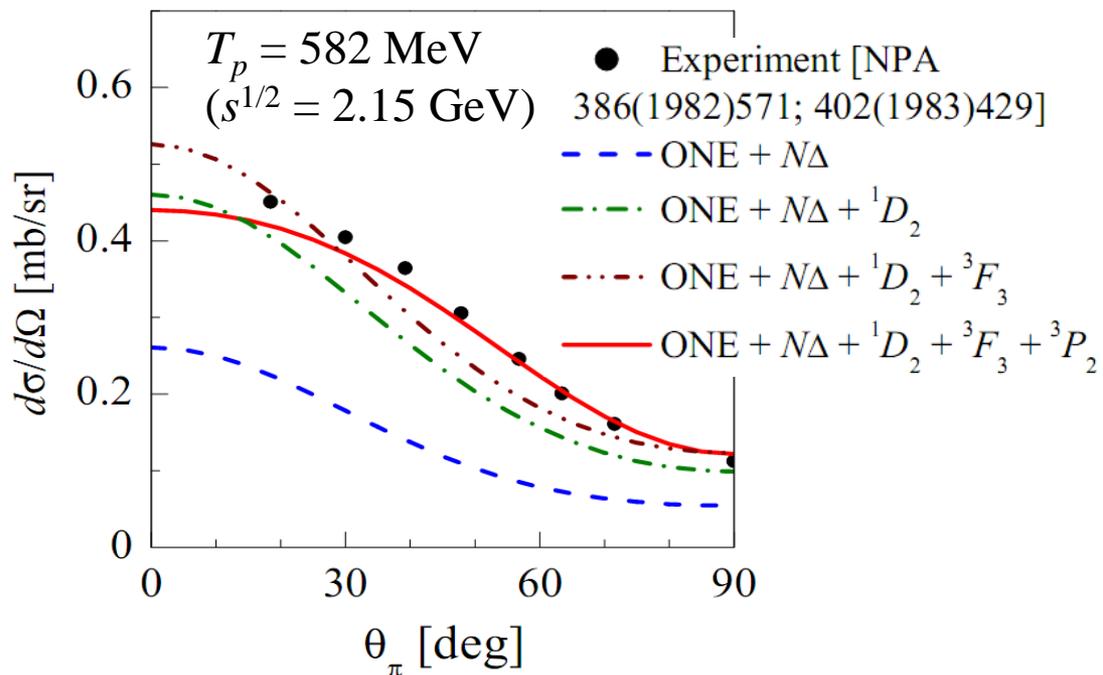
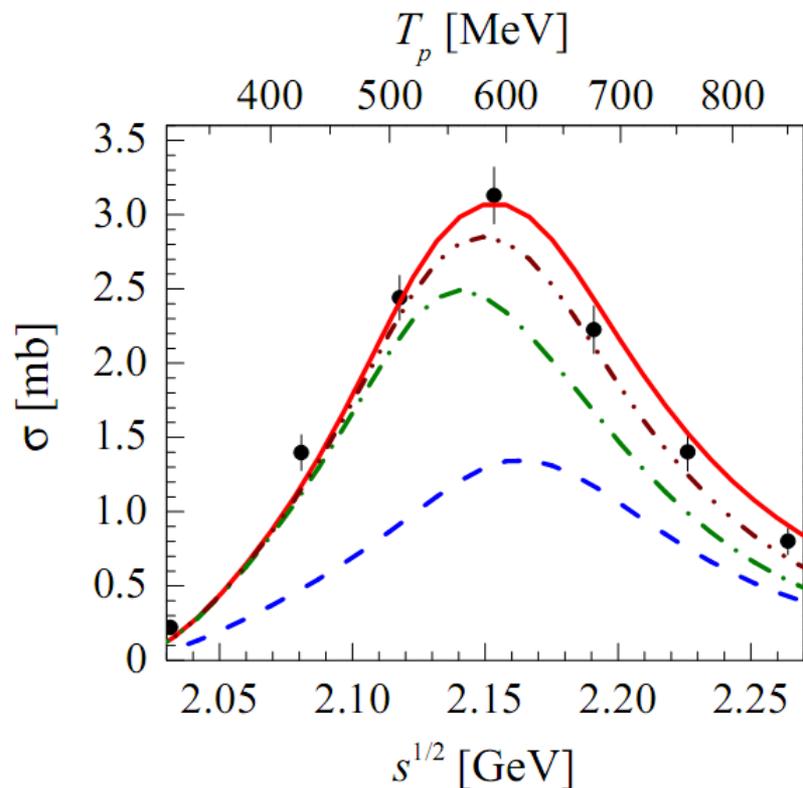


- PWA (SAID, C500)
- ⋯ PWA (SAID, SP96)
- - - ONE + $N\Delta$ ($\Lambda_{\pi N\Delta} = 0.3$ GeV)
(consistent with πN elastic scattering)
- - - ONE + $N\Delta$ ($\Lambda_{\pi N\Delta} = 0.52$ GeV)
(enhanced *ad hoc* to describe 1D_2P)
- ONE + $N\Delta$ + D^* (full calc.)

• Традиционные механизмы (ONE+ $N\Delta$) с «мягким» обрезанием в $\pi N\Delta$ -вершине (согласующимся с данными по упругому πN -рассеянию) дают 40-50% парциальных сечений в каналах 1D_2P и 3F_3D и всего лишь 2.5% сечения в канале 3P_2D .

• Увеличение параметра обрезания $\Lambda_{\pi N\Delta}$ *ad hoc* не позволяет описать все три доминирующие амплитуды одновременно.

Полное и дифференциальное сечения

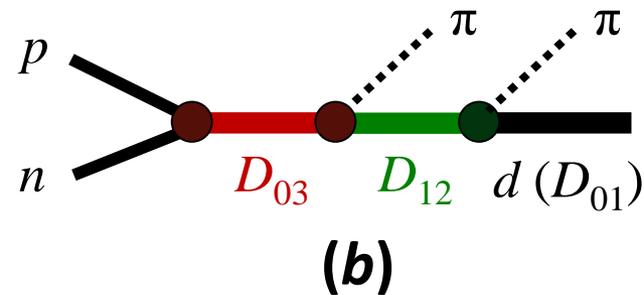
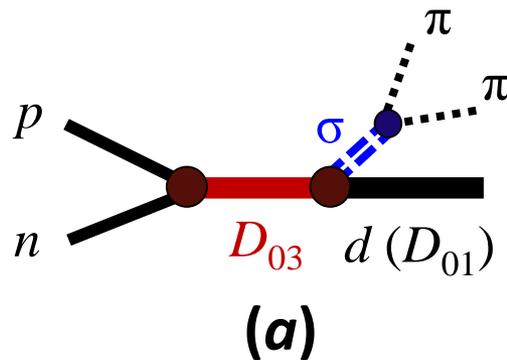


- Традиционные механизмы (ONE+NΔ) с параметрами, найденными из описания упругого πN-рассеяния, дают **только половину** сечения $pp \rightarrow d\pi^+$. **Учет рождения дибарионных резонансов в трех доминирующих парциальных каналах реакции приводит к согласию с экспериментальными данными.**
- Изовекторный дибарион ${}^3P_2(2200)$, найденный в недавних в экспериментах коллаборации ANKE-COSY (V.I. Komarov et al., PRC 93 (2016) 065206), играет **ключевую роль** в описании поляризационных наблюдаемых A_{xx} , A_{yy} , A_{zz} .

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

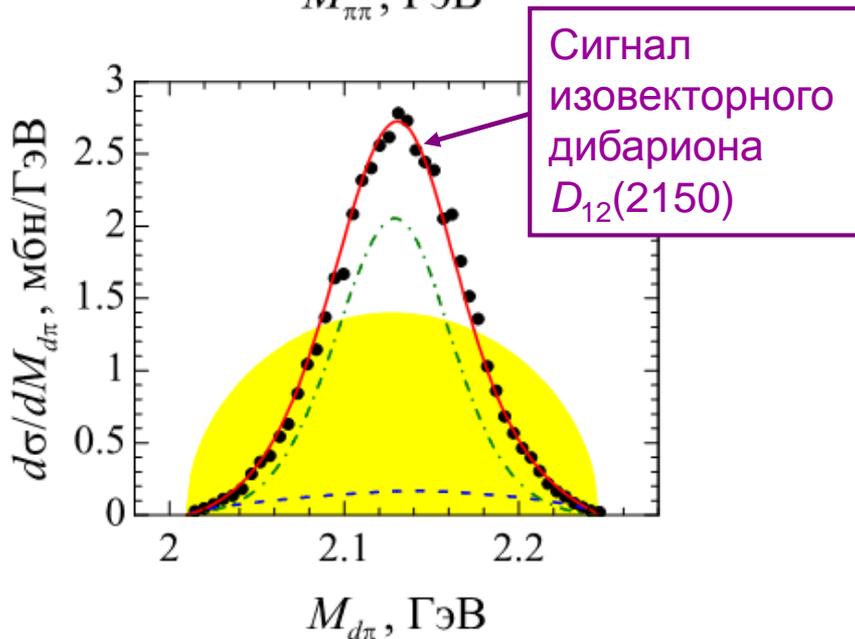
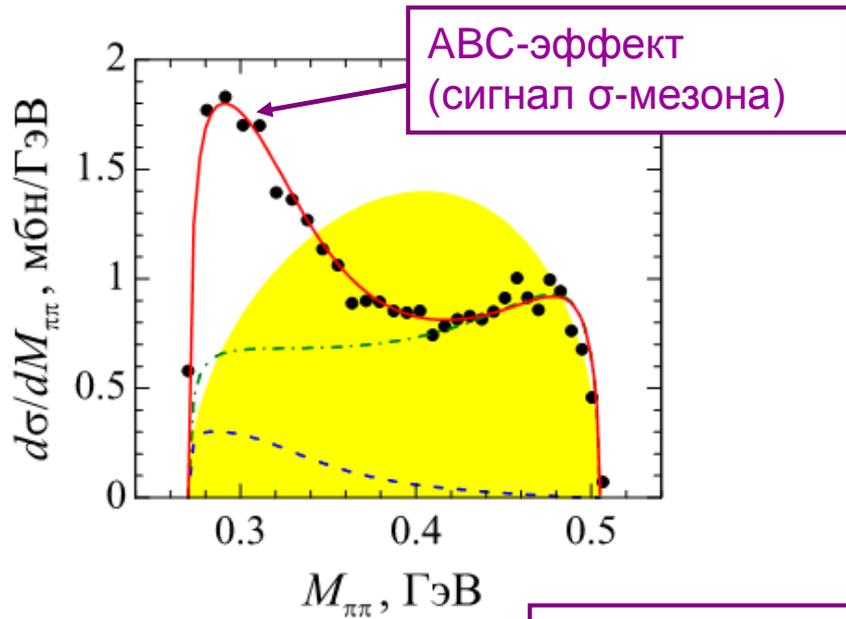
- В дибарионной модели предполагается, что основной вклад в сечение реакции $pn \rightarrow d + (\pi\pi)_0$ при энергиях $T_p = 1.0\text{--}1.4$ ГэВ, соответствующих рождению изоскалярного дибариона $D_{03}(2380)$, дают две интерферирующие моды распада этого дибариона:

- (a) эмиссия пионной пары из промежуточного скалярного σ -мезона,
- (b) последовательная эмиссия двух пионов через образование промежуточного **изовекторного дибариона $D_{12}(2150)$** .



- 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 предложенных механизмов распада дибариона D_{03} дает резонансное усиление в соответствующем спектре инвариантных масс:

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

- Несмотря на активный интерес к дибарионам, вызванный открытиями последних лет, они до сих пор рассматривались как **мультикварковая экзотика, по аналогии с тетра- и пентакварками** (также недавно открытыми на LHC).
- В серии работ по рождению мезонов в NN-соударениях мы показали важную роль экспериментально открытых дибарионных резонансов в базовых реакциях неупругого NN-рассеяния — одно- и двухпионном рождении.
- Но наш главный результат состоит в ***построении единой модели упругого и неупругого NN-взаимодействия в широком интервале энергий (от 0 до 1 ГэВ) на основе универсального s-канального дибарионного механизма.***
- **Только в дибарионной модели ядерных сил дибарионные резонансы рассматриваются не как экзотика, а как регулярная мода в NN-взаимодействии на малых расстояниях.**

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:

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

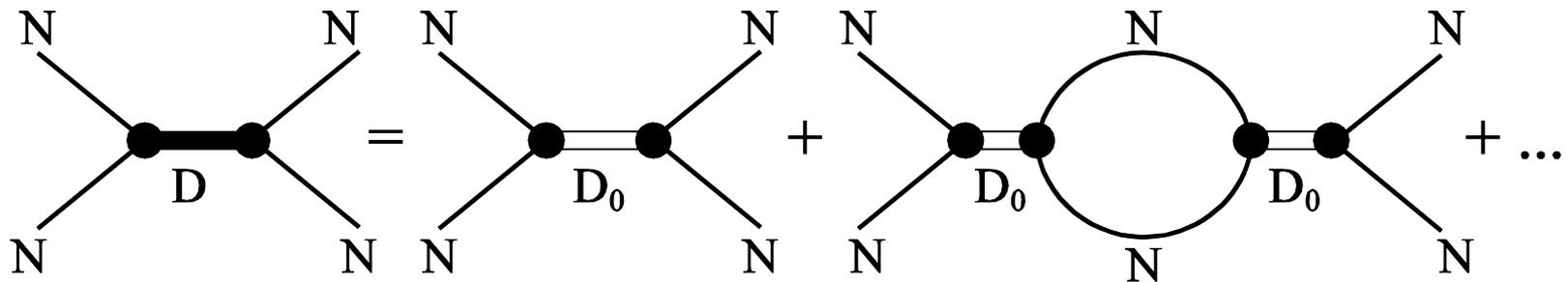
(Математическая основа нашего подхода – метод расширения гильбертова пространства [см. работы ленинградской группы Ю.А. Куперин и др., ТМФ 75, 431 (1988); 76, 242 (1988)].)

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: $E_D = E_0 - i\Gamma(E)/2$

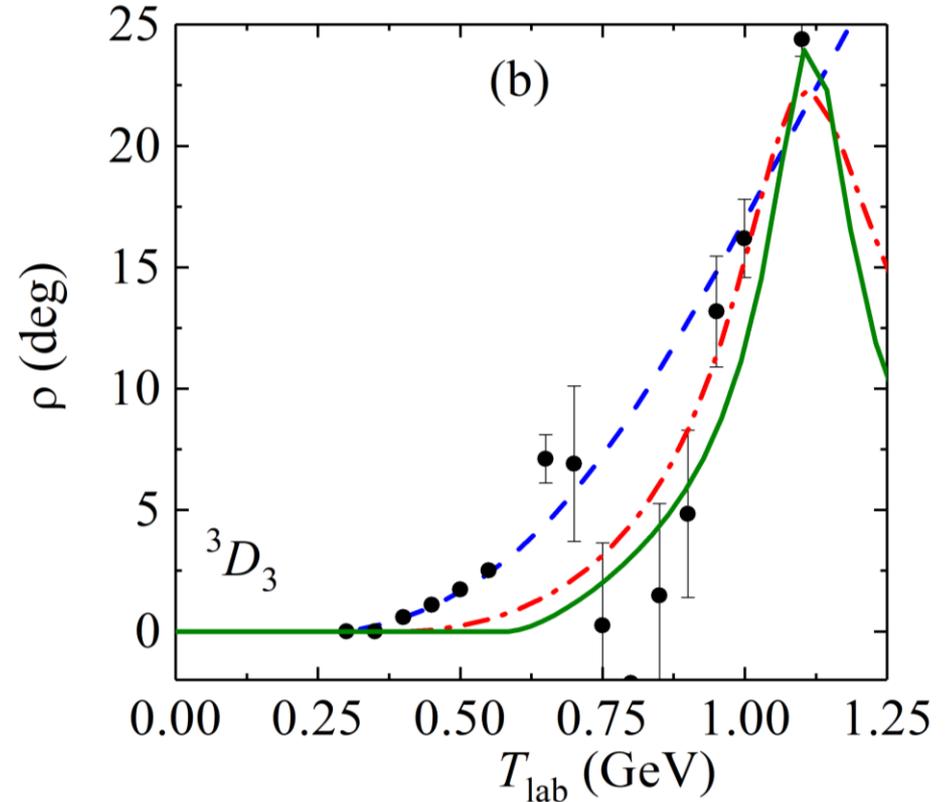
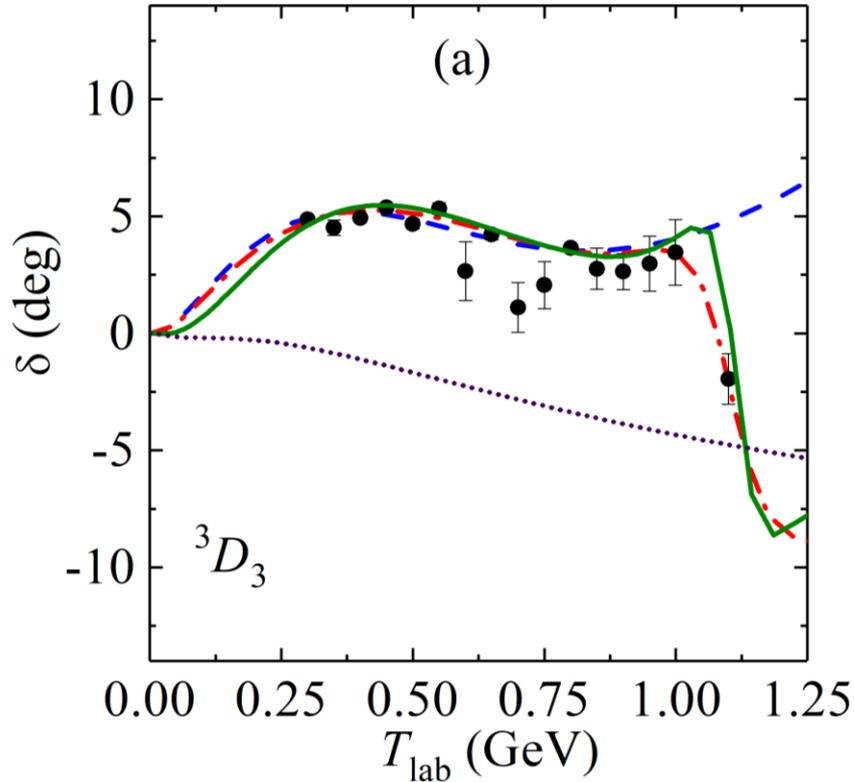
Ширина $\Gamma(E)$ учитывает вероятности распада дибарионного состояния во все неупругие каналы ($N\Delta$, $\Delta\Delta$ и др.).



В модели есть только один резонансный полюс в каждой парциальной волне и периферический пионный обмен!

Связанные каналы 3D_3 - 3G_3

(открытие дибариона $d^*(2380)$ – WASA@COSY, 2011)



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

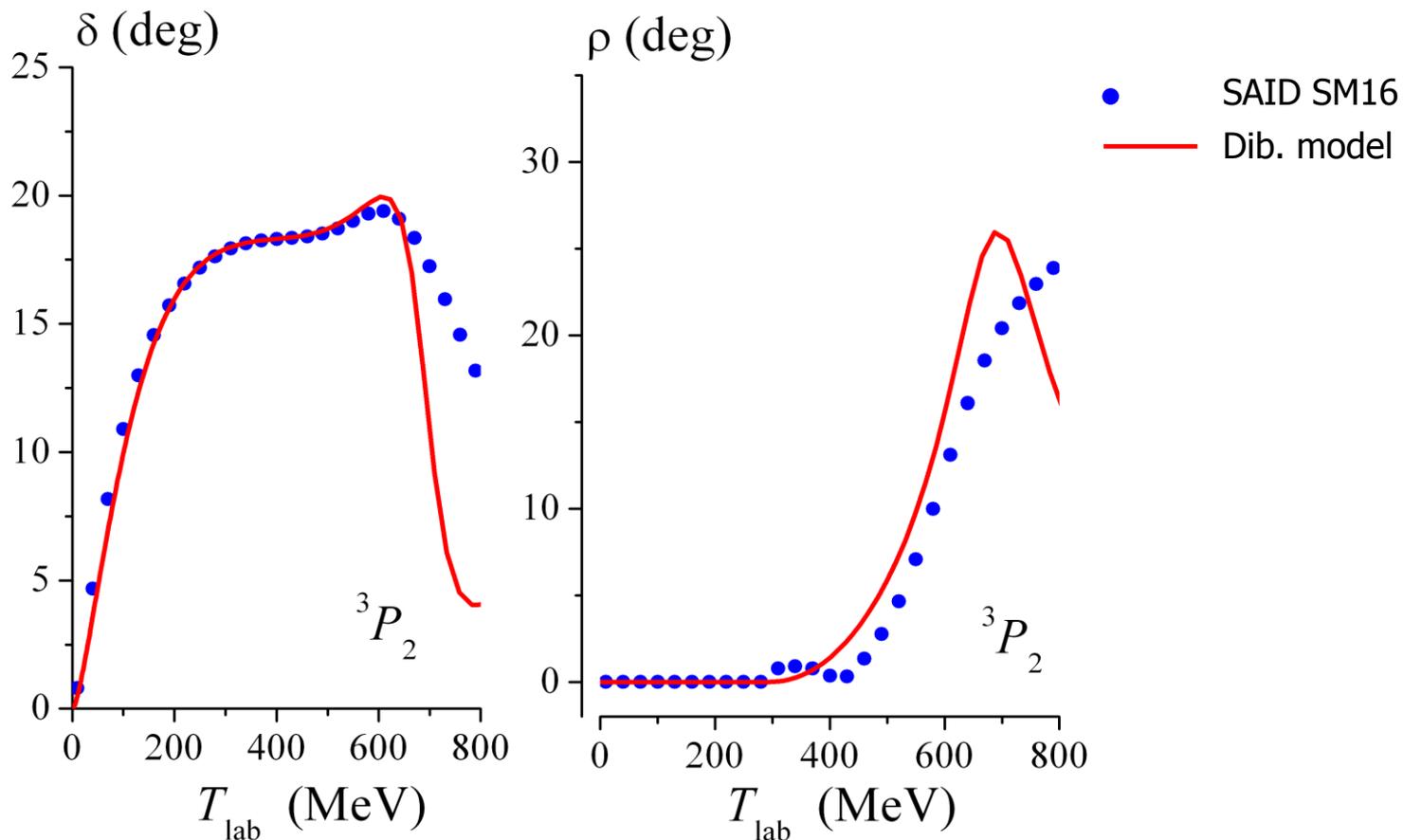
Параметры резонанса в дибарионной модели:

$$M_{\text{th}} = 2376 \text{ МэВ}, \quad \Gamma_{\text{th}} = 84 \text{ МэВ}.$$

Экспериментальные значения:

$$M_{\text{exp}}(d^*) = 2380 \pm 10 \text{ МэВ}, \quad \Gamma_{\text{exp}}(d^*) = 80 \pm 10 \text{ МэВ}.$$

Связанные каналы 3P_2 - 3F_2 (открытие дибариона ${}^3P_2(2200)$ – ANKE-COSY, 2016)



Параметры резонанса в дибарионной модели:

$$M_{\text{th}} = 2216 \text{ МэВ}, \quad \Gamma_{\text{th}} = 144 \text{ МэВ.}$$

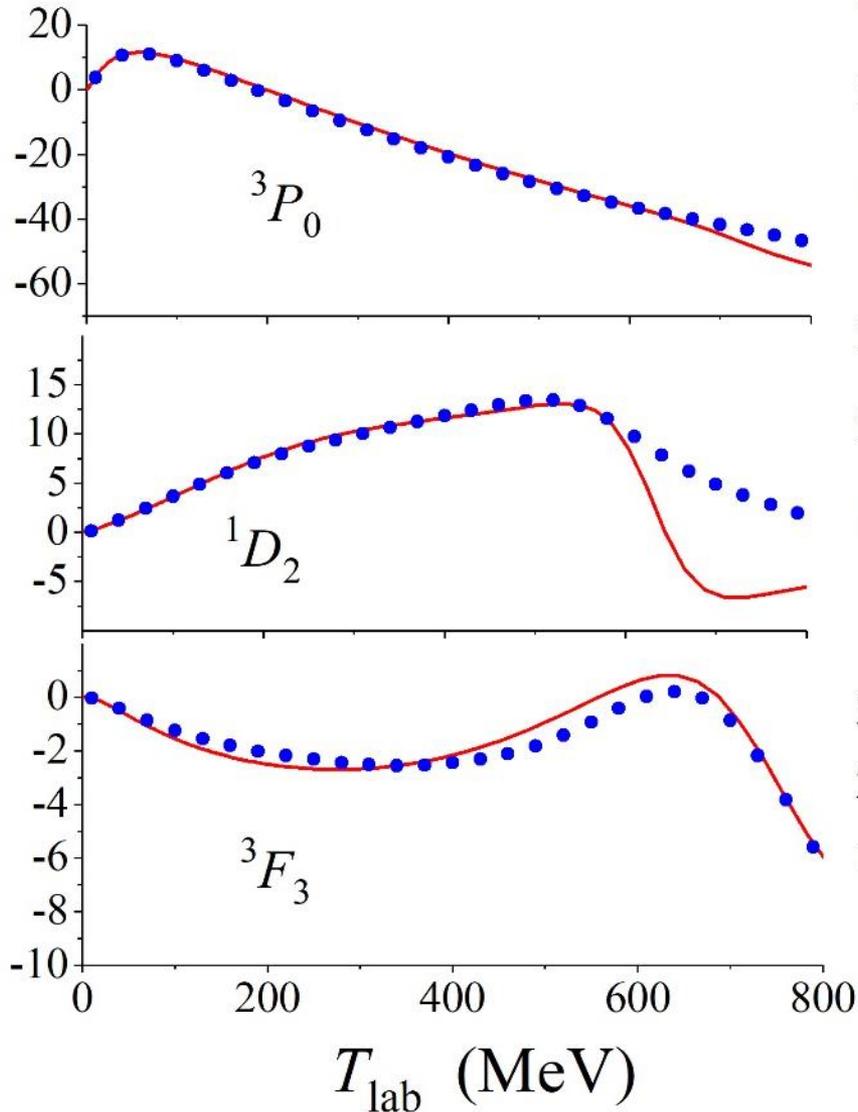
Экспериментальные значения:

$$M_{\text{exp}}({}^3P_2) = 2197 \pm 8 \text{ МэВ}, \quad \Gamma_{\text{exp}}({}^3P_2) = 130 \pm 21 \text{ МэВ.}$$

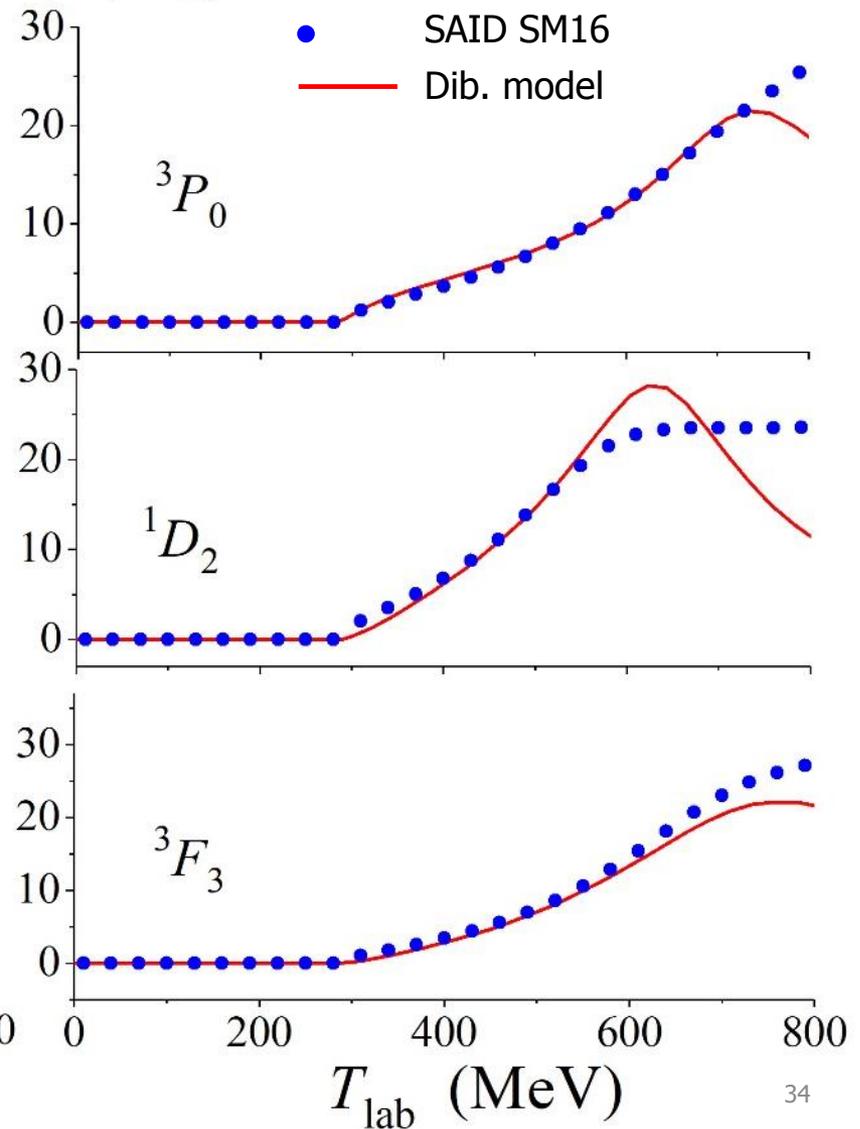
Изовекторные каналы

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

δ (deg)



ρ (deg)



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

Параметры дибарионов не были заложены в модель, но получились из описания NN-рассеяния в соответствующих парциальных каналах очень близкими к экспериментальным значениям!

Скрытые резонансы в S-волнах?

V. Komarov et al.

EPJ Web of Conferences **199**, 02016 (2019)

MESON 2018

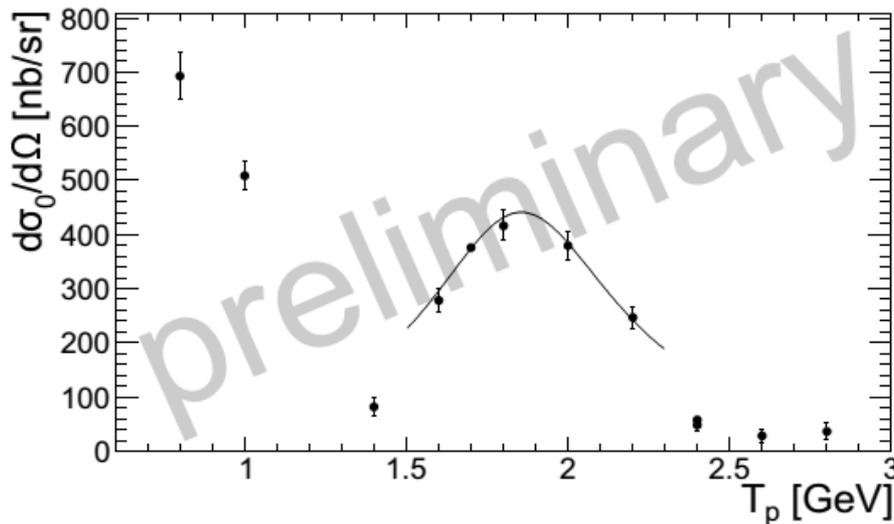
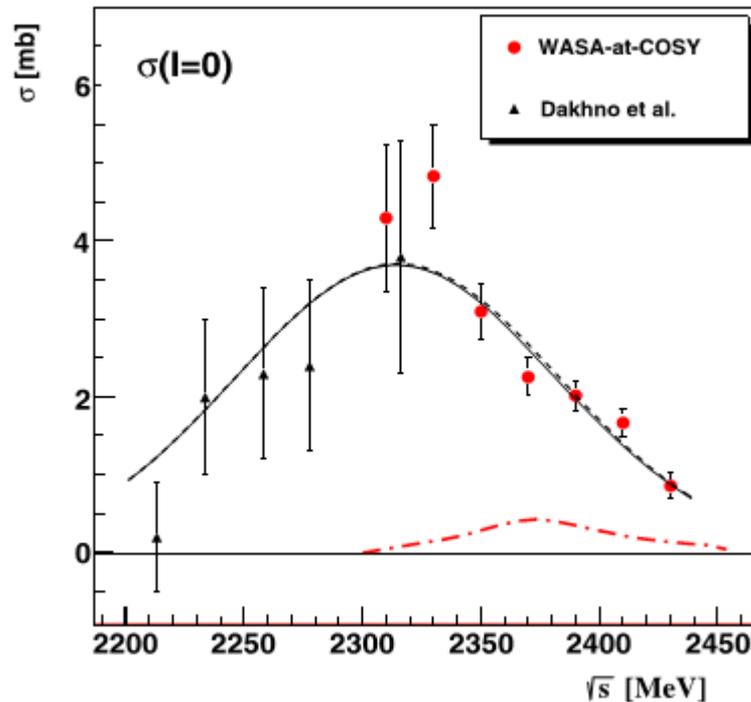


Figure 2. Energy dependence of the differential cross section $d\sigma/d\Omega$ at zero angle for the reaction $pp \rightarrow \{pp\}_s\pi^0$. The curve is a Breit-Wigner fit to the data with the mass $m = 2646 \pm 5$ MeV and the width $\Gamma = 132 \pm 14$ MeV.

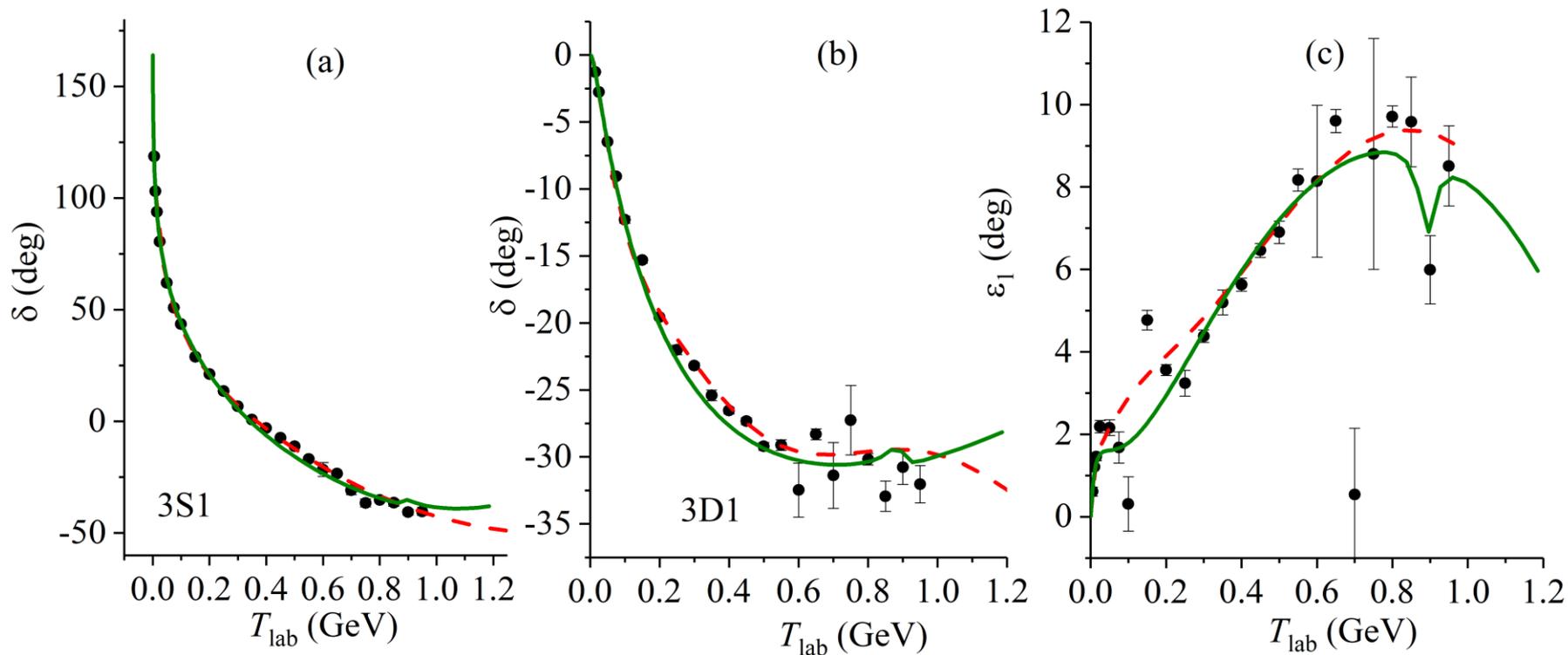
- Preliminary results have been obtained for the resonance peak in the $pp \rightarrow \{pp\}_s\pi^0$ reaction with the mass $m = 2646 \pm 5$ MeV and the width $\Gamma = 132 \pm 14$ MeV.
- Preliminary data suggest an existence of the $NN^*(1535)$ resonance in the $pd \rightarrow pd\eta$ reaction. Further analysis of the data on this reaction is planned.



The fit resulting in $M=M_R+M_N$ and $\Gamma=170$ MeV yields an excellent description (dashed curve) of both data sets.

Fig. 7. (Color online.) The isoscalar single-pion production cross section in NN collisions in dependence of the total c.m. energy \sqrt{s} . Shown are the results of this work (circles) together with the results from Dakhno et al. [5] (triangles) at lower energies. The dash-dotted line illustrates a 10% $d^*(2380)$ resonance contribution. Solid and dashed lines show a fit to the data using a Gaussian with and without d^* contribution, respectively.

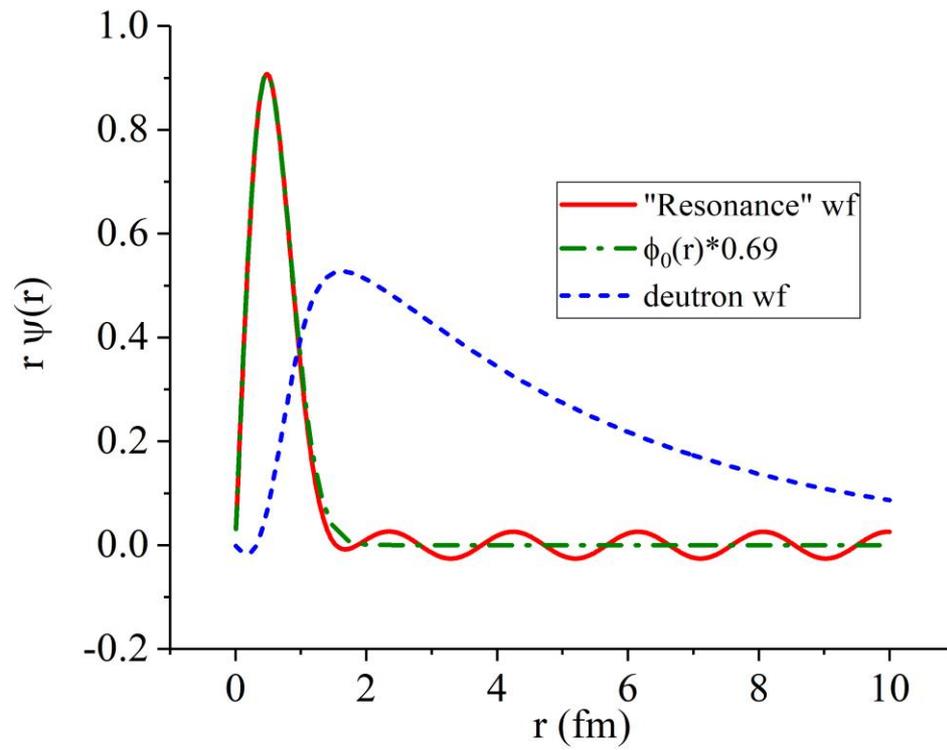
Дейтронный канал



- - - SAID SM
- SAID single energy
- Dibaryon model

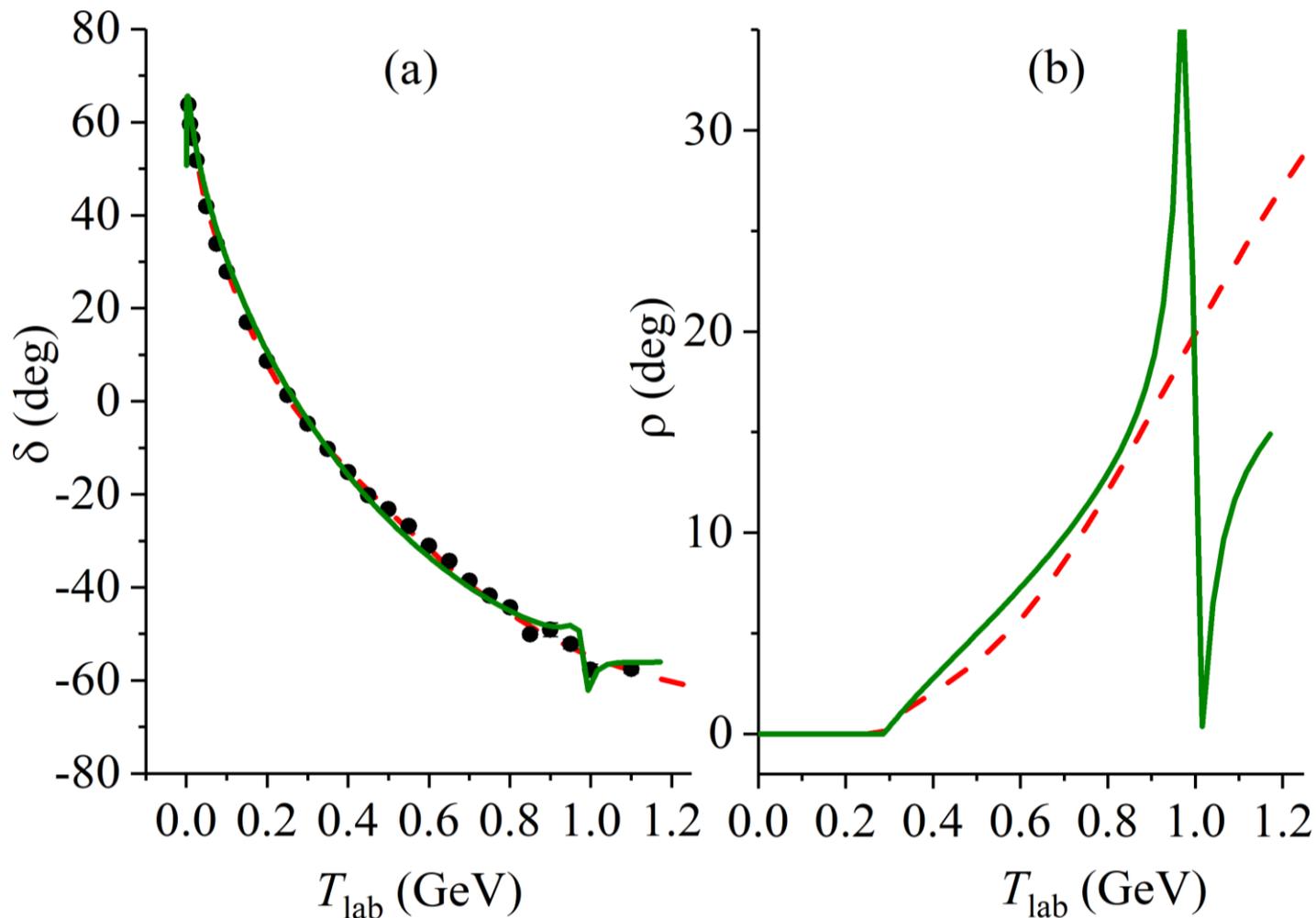
$$M_{\text{th}} = 2.28 \text{ GeV}, \Gamma_{\text{th}} = 0.054 \text{ GeV}$$

Волновая функция резонанса



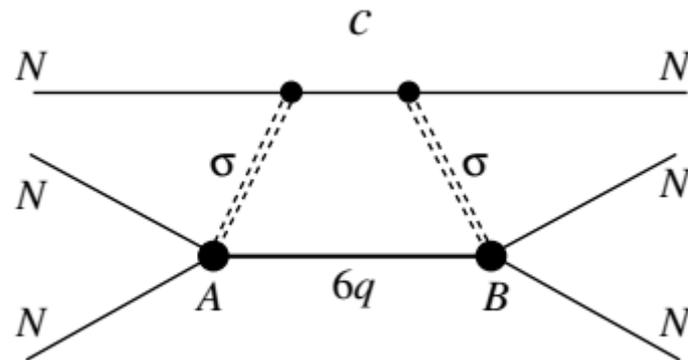
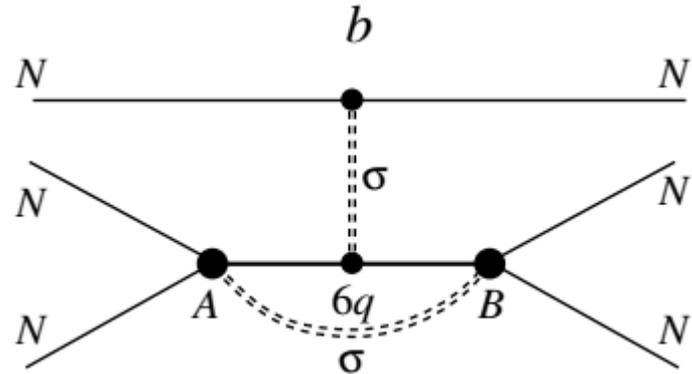
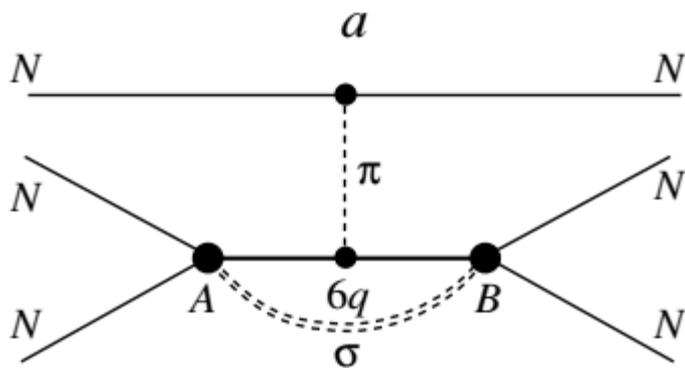
Канал 1S_0

- SAID SM
- SAID single energy
- Dibaryon model



$$M_{\text{th}} = 2.317 \text{ GeV}, \Gamma_{\text{th}} = 0.016 \text{ GeV}$$

Трехчастичные силы



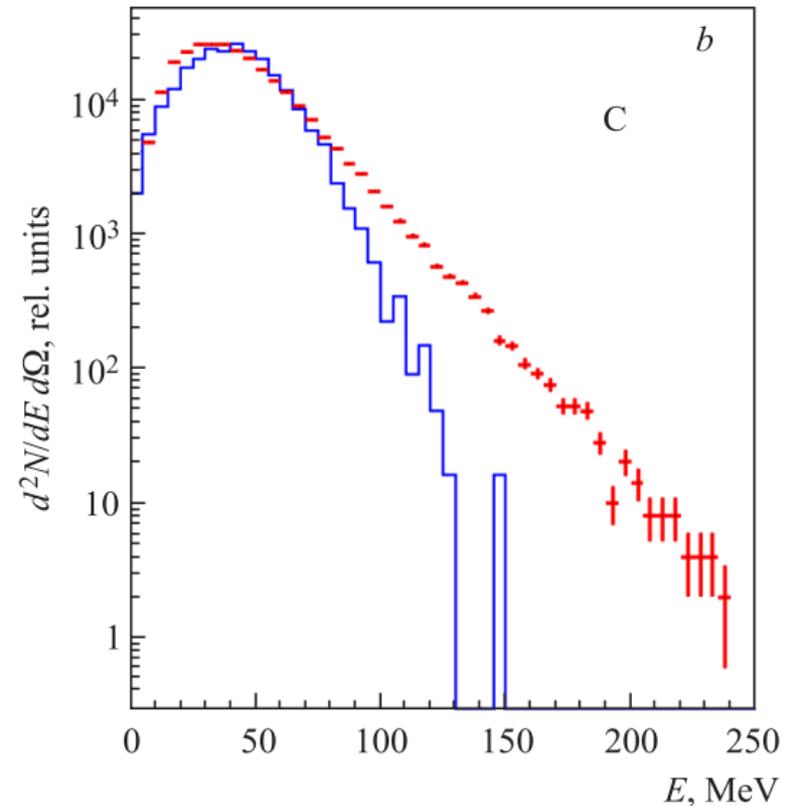
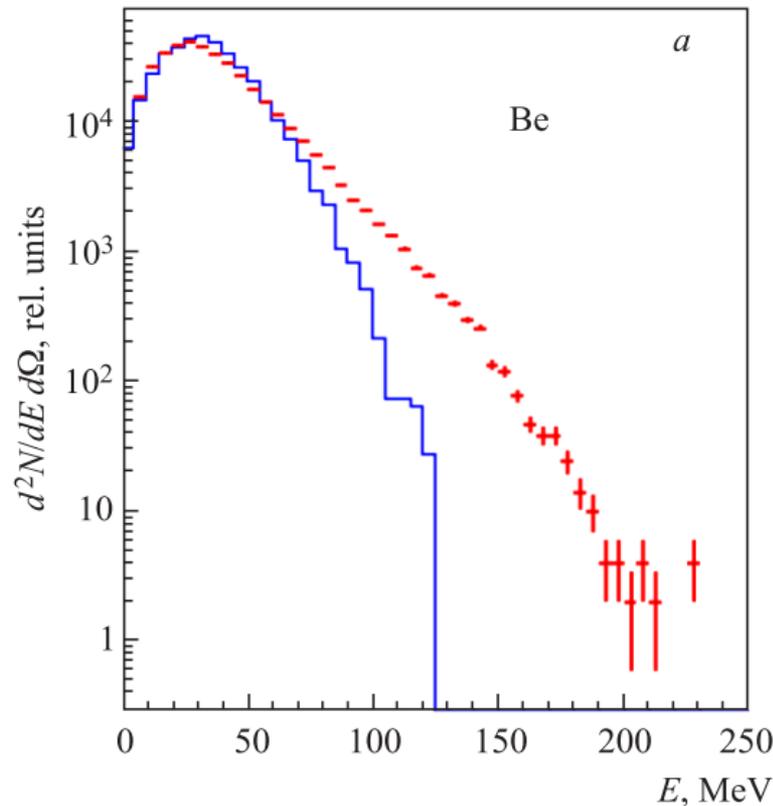
Свойства ядер ${}^3\text{H}$ и ${}^3\text{He}$

Model	E , MeV	P_D , %	$P_{6qN}(P_{in})$, %		
				T	$V({}^3N)$
${}^3\text{H}$					
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
${}^3\text{He}$					
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

Кулоновская разность энергий: $\Delta E_{\text{Coul}}^{\text{DBM}} = 754 \text{ keV}$ ($\Delta E_{\text{Coul}}^{\text{exp}} = 764 \text{ keV}$)

Средняя кинетическая энергия нуклонов увеличена в 2 раза (по ср. с традиционными моделями ядерных сил)!

Экспериментальное подтверждение увеличения внутренней кинетической энергии нуклонов в ядрах (по сравнению с традиционной теорией ядерной материи)



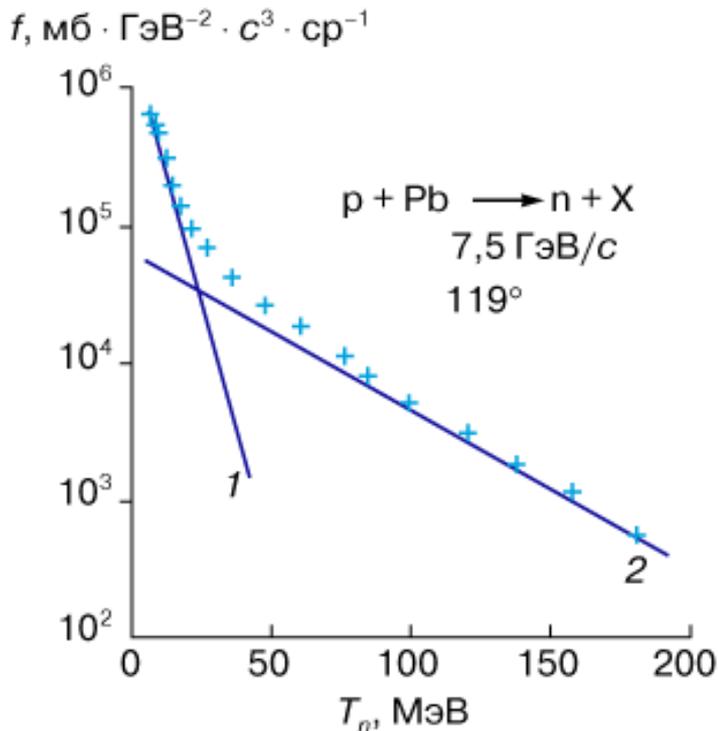
Энергетический спектр ядерных фрагментов (Be и C), выбиваемых дейтронами в соударениях $d(4.4 \text{ ГэВ})+Au$ в поперечной плоскости (в с.ц.и.). Кривые – расчет, учитывающий как испарительные, так и высокоимпульсные процессы.

[V. A. Karnaukhov et al., Письма в ЭЧАЯ 8, 35 (2011)].

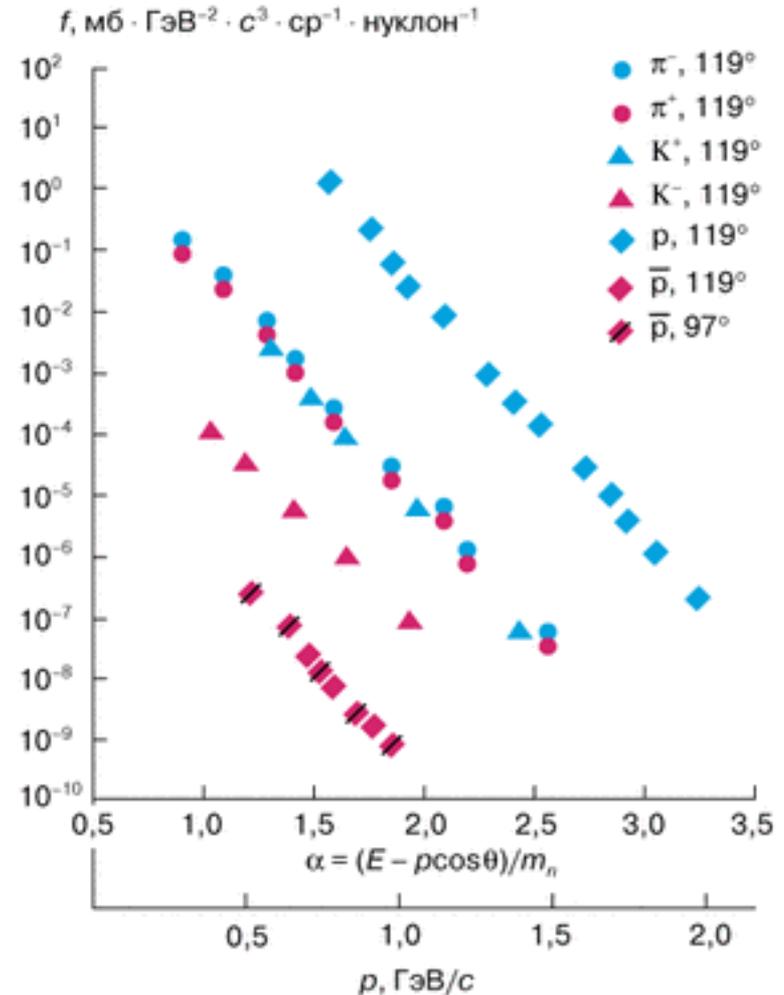
Традиционная теория не описывает высокоэнергетическую часть спектров вылетающих фрагментов!

Кумулятивные процессы на ядрах (А.М.Балдин, Г.А. Лексин и др.)

Рождение высокоэнергичных частиц под большими углами при рассеянии быстрых протонов на ядрах



Зависимость выхода нейтронов от кинетической энергии: 1 – “испарительные” нейтроны, 2 – кумулятивные нейтроны



Зависимость выхода различных кумулятивных частиц из ядер от эффективной массы мультимариона, участвующего в процессе.

Следствия дибарионной модели сил для ядерной физики и астрофизики

- **Увеличение выхода высокоэнергетических фрагментов и рождение кумулятивных частиц при рассеянии быстрых частиц на ядрах**
- **Несжимаемость (постоянство плотности) ядерной материи** (за счет увеличенной внутренней кинетической энергии нуклонов в ядрах – аналогия с обычной водой)
- **Объяснение разности энергий изобар-аналоговых состояний ядер** (за счет дополнительной кулоновской энергии между заряженным дибарионом и валентным протоном).
Традиционные модели ядерных сил систематически недооценивают эту разность на 15% при одинаковых значениях длин pp- и pp-рассеяния – т. наз. *аномалия Нолена–Шиффера*
- **Появление сверхтекучих парных корреляций в ядрах**
- **«Жесткое» уравнение состояния ядерной материи при повышенной плотности, в т.ч. внутри нейтронных звезд**
- **и т.д.**

Заключение

- В НИИЯФ МГУ 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 природу ядерных сил и позволяет объяснить многие загадки и парадоксы, долгое время не находившие объяснения в рамках традиционных подходов.

Спасибо за внимание!