

New results from CLAS on the N^* spectrum and structure

V.I. Mokeev,
Jefferson Laboratory

Nonperturbative QCD 2016, 17th-21st October, Sevilla, Spain

Major Directions in the Studies of N*-Spectrum and Structure with CLAS

Исследования электромагнитных форм факторов N^* являются единственным источником информации о различных проявлениях сильного взаимодействия в непертурбативной области больших величин (~ 1.0) бегущего параметра кварк-глюонного взаимодействия в формировании возбужденных состояний нуклонов с различными квантовыми числами

The experimental program on the studies of N^* spectrum/structure in exclusive meson photo-/electroproduction with CLAS seeks to determine:

- $\gamma_N N^*$ electrocouplings at photon virtualities up to 5.0 GeV^2 for most of the excited proton states through analyzing major meson electroproduction channels
- extend knowledge on N^* -spectrum and on resonance hadronic decays from the data for photo- and electroproduction reactions, in particular, for $\pi^+ \pi^- p$ and $K Y$ final states

A unique source of information on different manifestations of the non-perturbative strong interaction in generating different excited nucleon states.

Review papers:

I.G. Aznauryan and V.D. Burkert, Prog. Part. Nucl. Phys. 67, 1 (2012).

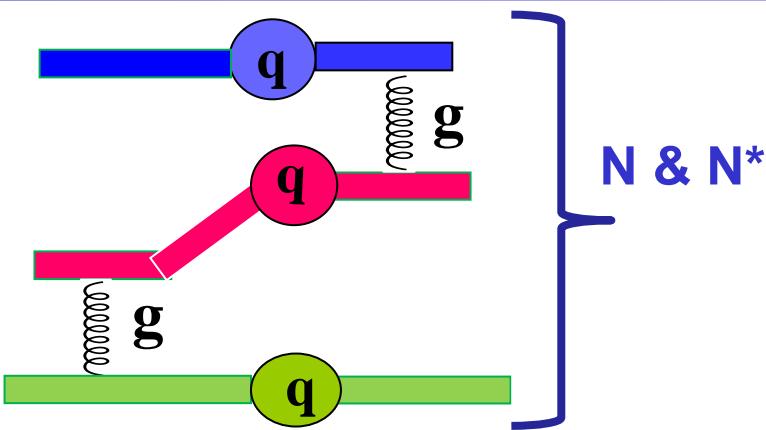
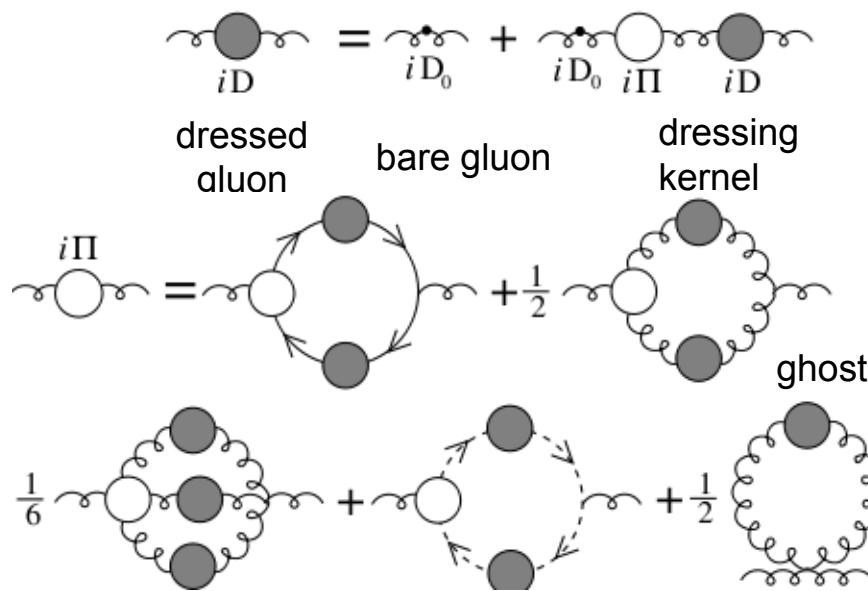
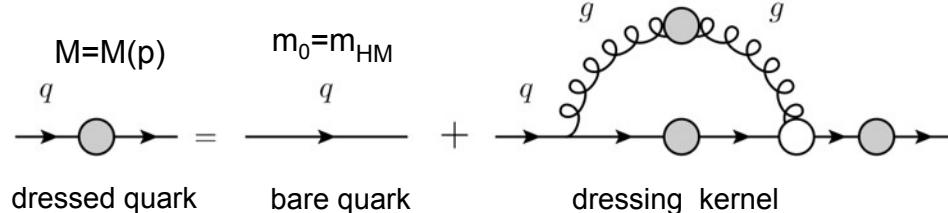
V.D. Burkert, Few Body Syst. 57, 873 (2016).

C.D. Roberts, J. Phys. Conf. Ser. 706, 022003 (2016).

Excited Nucleon States and Insight to Non-Perturbative Strong Interaction

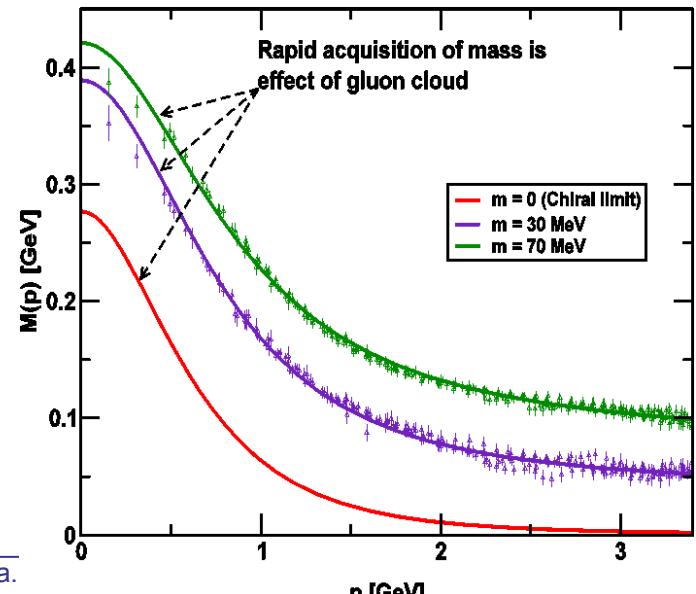
Studies of N^* spectrum/structure suggest that ground and excited nucleon states consist of three dressed (constituent) quarks bound by the quark exchange between the di-quark pairs correlated through dressed gluon exchange

Emergence of dressed quarks and gluons



Dynamical dressed quark mass:

- Account for >98 % of hadron mass.
- Fully define the hadron spectrum and structure.

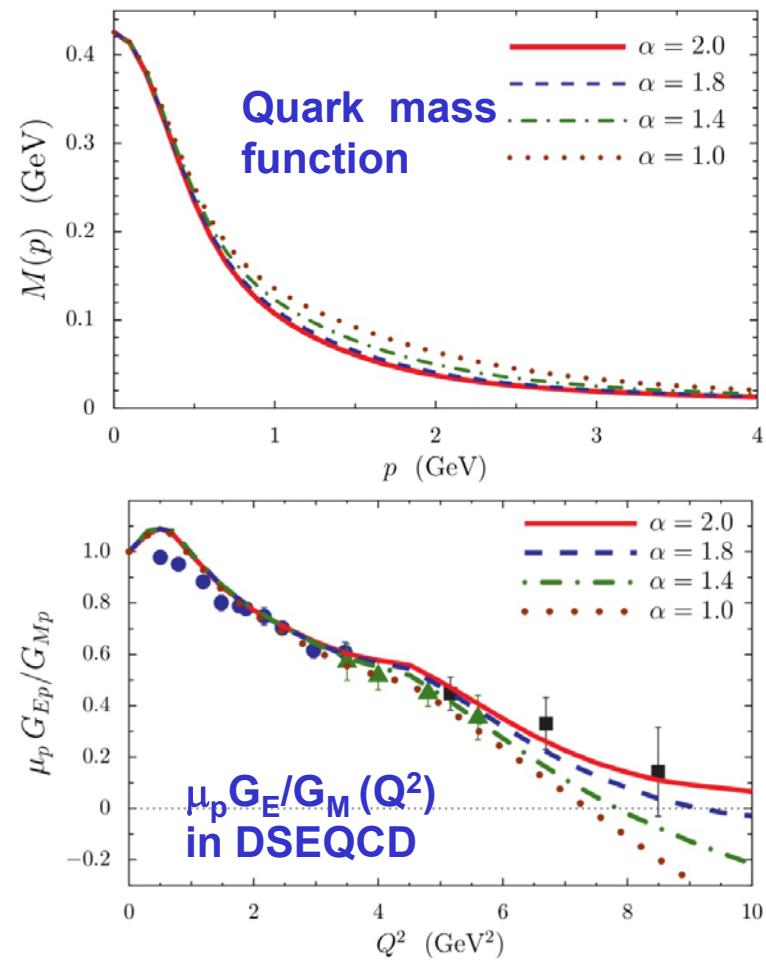


Процессы сильного взаимодействия элементарных夸克ов и глюонов описываемые Лагранжианом КХД приводят к одеванию элементарного夸ка глюонами и夸к-анти夸ковыми парами (верхняя диаграмма). Глюоны, в свою очередь, также одеваются夸к-анти夸ковыми парами и петлями глюонов вследствие самодействия глюонов в КХД (средняя и нижняя диаграммы). В режиме большого (~ 1.0) параметра夸к-глюонной связи, эффекты одевания элементарных夸克ов и глюонов приводят к формированию эффективных объектов - одетых夸克ов и глюонов состоящих из бесконечного числа элементарных夸克ов и глюонов. Эти объекты имеют зависящую от расстояния (переносимого импульса) динамическую структуру, массу (см. зависимость от переносимого импульса бегущей массы одетого夸ка на нижнем правом рис для различных масс элементарных (голых)夸克ов). Их свойства и эффективные взаимодействия сложным образом связаны со свойствами элементарных夸克ов и глюонов и их пертурбативным сильным взаимодействием отраженным в Лагранжиане КХД. Непертурбативные сильные взаимодействия - единственные процессы в природе которые формируют эффективные объекты одетые夸ки и глюоны со свойствами и эффективными взаимодействиями, коренным образом отличающимися от свойств и взаимодействий элементарных полей夸克ов/глюонов в Лагранжиане КХД. Описание непертурбативных сильных взаимодействия на основе Лагранжиана КХД остается последней неисследованной частью Стандартной Модели, включая две фундаментальных нерешенных проблем: механизмы формирования $> 98\%$ массы адронов и природа夸к-глюонного конфайнмента, которые связаны между собой.

Результаты экспериментов по изучению спектра и в особенности электромагнитных форм факторов (амплитуд электровозбуждения) обеспечивают информацию необходимую для проверки теории сильных взаимодействий в непертурбативной области в сравнении с экспериментом. Обмен одетым глюоном между двумя одетыми кварками (верхний правый рис.)должен приводить к кварк-кварковым корреляциям формирующими ди-кварк определенного спина и четности. Последующий обмен одним из двух кварков ди-кварка с третьим нескоррелированным кварком формирует связанное состояние в системе из трех одетых кварков. Таким образом формируются основное и возбужденные состояния нуклона. Поэтому изучение спектра и структуры основного и возбужденных состояний нуклона обеспечивает доступ к динамике механизмов непертурбативных сильных взаимодействий ответственных за формирование N^* . Экспериментальные результаты по электромагнитным форм факторам нуклона и амплитудам электровозбуждения N^* обеспечивают доступ к зависимости массы одетого кварка от величины переносимого кварком импульса, т.н. массовая функция одетого кварка (нижний правый рис.) . Массовая функция одетого кварка имеет ключевое значение в физике сильных взаимодействий в непертурбативной области. Во-первых, она описывает формирование >98 % массы нуклона и его возбужденных состояний в процессах одевания голого КХД кварка глюонами (верхняя левая диаграмма) ответственных за динамическое нарушение киральной симметрии КХД. Масса одетого кварка ~300МэВ формируется в этих процессах даже в киральном пределе безмассового голого кварка (красная линия на нижнем правом рис). Это подчеркивает существенно непертурбативный характер механизмов формирования массы адронов, т.к. в любом порядке теории возмущений ,при нулевой массе голого кварка, масса одетого кварка остается равной нулю. Показанный киральный предел оказывается весьма близким к зависимости от импульса масс легких одетых u- и d- кварков с голыми массами в несколько МэВ входящих в состав нуклонов и их возбужденных состояний N^* .

Открытый недавно в CERN бозон Хиггса отвечает за формирование массы голого кварка, которая в случае легких u - и d -夸ков пренебрежимо мала сравнительно с массами одетых кварков. Вклад масс голых легких кварков в массы адронов <2 %. Механизм Хиггса не в состоянии объяснить формирование доминирующей части массы адронов, которая возникает за счет непертурбативных сильных взаимодействий кварков и глюонов. Исследования спектра и структуры N^* дадут ответ на вопрос о том как формируется > 98% массы адронов во Вселенной. Во-вторых, массовая функция кварка показывает как конфайнмент кварков и глюонов при малых <0.5 ГэВ импульсах кварков возникает из режима пертурбативной КХД при переносимых кварком импульсах выше 2.0 ГэВ. Поэтому доступ к массовой функции легких u - и d -кварков из данных по спектру и структуре N^* является одной из наиболее актуальных нерешенных задач в исследованиях Стандартной Модели фундаментальных процессов Природы.

Mapping –out Quark Mass Function



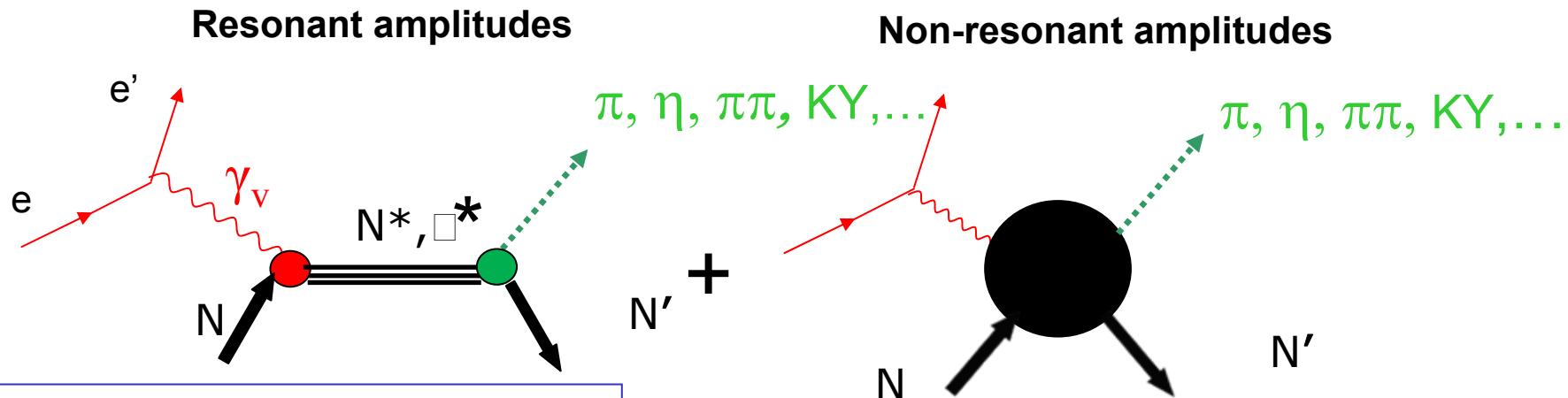
I.C.Cloët, C.D.Roberts, A.W.Thomas,
Phys. Rev. Lett. 111, 101803 (2013).

- elastic form factors are sensitive to momentum dependence of quark mass function.
- mass function should be the same for dressed quarks in the ground and excited nucleon states.
- consistent results on dressed quark mass function determined from the data on elastic form factors and transition $\gamma_N N^*$ electrocouplings are critical to prove a credible access to these quantities.

Studies of elastic and transition $N \rightarrow N^*$ form factors ($\gamma_N N^*$ electrocouplings) represents the central direction in the exploration of strong interaction in non-perturbative regime.

Первоначальная информация о массовой функции одетого кварка может быть получена из данных по электромагнитным форм факторам нуклона. Совместный анализ результатов по электромагнитным форм факторам нуклонов и амплитуд электровозбуждения... является необходимым для проверки надежности доступа к массовой функции одетого кварка.

Extraction of $\gamma_N N^*$ Electrocoupings from the Exclusive Meson Electroproduction off Nucleons



- Real $A_{1/2}(Q^2)$, $A_{3/2}(Q^2)$, $S_{1/2}(Q^2)$ or
- $G_1(Q^2)$, $G_2(Q^2)$, $G_3(Q^2)$ or
- $G_M(Q^2)$, $G_E(Q^2)$, $G_C(Q^2)$

I.G. Aznauryan and V.D. Burkert,
Prog. Part. Nucl. Phys. 67, 1 (2012).

Definition of N^* photo-/electrocoupings employed in the CLAS data analyses:

$$\Gamma_\gamma = \frac{q_\gamma^2}{\pi} \frac{2 M_N}{(2 J_r + 1) M_{N^*}} \left[|A_{1/2}|^2 + |A_{3/2}|^2 \right]$$

Γ_γ stands for N^* electromagnetic decay widths at the photon point ($Q^2=0$) and $W=M_{N^*}$ on the real energy axis.

Consistent results on $\gamma N N^*$ electrocouplings from different meson electroproduction channels and different analysis approaches demonstrate reliable extraction of these quantities.

Три амплитуды $A_{1/2}$, $A_{3/2}$, $S_{1/2}$ показанные в верхней строчке рамки слева полностью определяют электровозбуждение N^* виртуальными фотонами, включая две амплитуды $A_{1/2}$, $A_{3/2}$ для фотонов с поперечной и одну для фотона с продольной поляризациями. Эти амплитуды однозначно определены через связь с модельно независимой и измеряемой шириной электромагнитного распада резонанса Γ_γ (формула на слайде)

Summary of the Published CLAS Data on Exclusive Meson Electroproduction off Protons in N* Excitation Region

Hadronic final state	Covered W-range, GeV	Covered Q ² -range, GeV ²	Measured observables
π^+n	1.1-1.38 1.1-1.55 1.1-1.7 1.6-2.0	0.16-0.36 0.3-0.6 1.7-4.5 1.8-4.5	$d\sigma/d\Omega$ $d\sigma/d\Omega$ $d\sigma/d\Omega, A_b$ $d\sigma/d\Omega$
π^0p	1.1-1.38 1.1-1.68 1.1-1.39	0.16-0.36 0.4-1.8 3.0-6.0	$d\sigma/d\Omega$ $d\sigma/d\Omega, A_b, A_t, A_{bt}$ $d\sigma/d\Omega$
ηp	1.5-2.3	0.2-3.1	$d\sigma/d\Omega$
$K^+\Lambda$	thresh-2.6	1.40-3.90 0.70-5.40	$d\sigma/d\Omega$ P^0, P'
$K^+\Sigma^0$	thresh-2.6	1.40-3.90 0.70-5.40	$d\sigma/d\Omega$ P'
$\pi^+\pi^-p$	1.3-1.6 1.4-2.1	0.2-0.6 0.5-1.5	Nine 1-fold differential cross sections

- $d\sigma/d\Omega$ -CM angular distributions
- A_b, A_t, A_{bt} -longitudinal beam, target, and beam-target asymmetries
- P^0, P' – recoil and transferred polarization of strange baryon

Almost full coverage of the final hadron phase space in πN , $\pi^+\pi^-p$, ηp , KY electroproduction

The measured with the CLAS observables of exclusive electroproduction for all listed final states are stored in the [CLAS Physics Data Base](http://clas.sinp.msu.ru/cgi-bin/jlab/db.cgi) <http://clas.sinp.msu.ru/cgi-bin/jlab/db.cgi>.

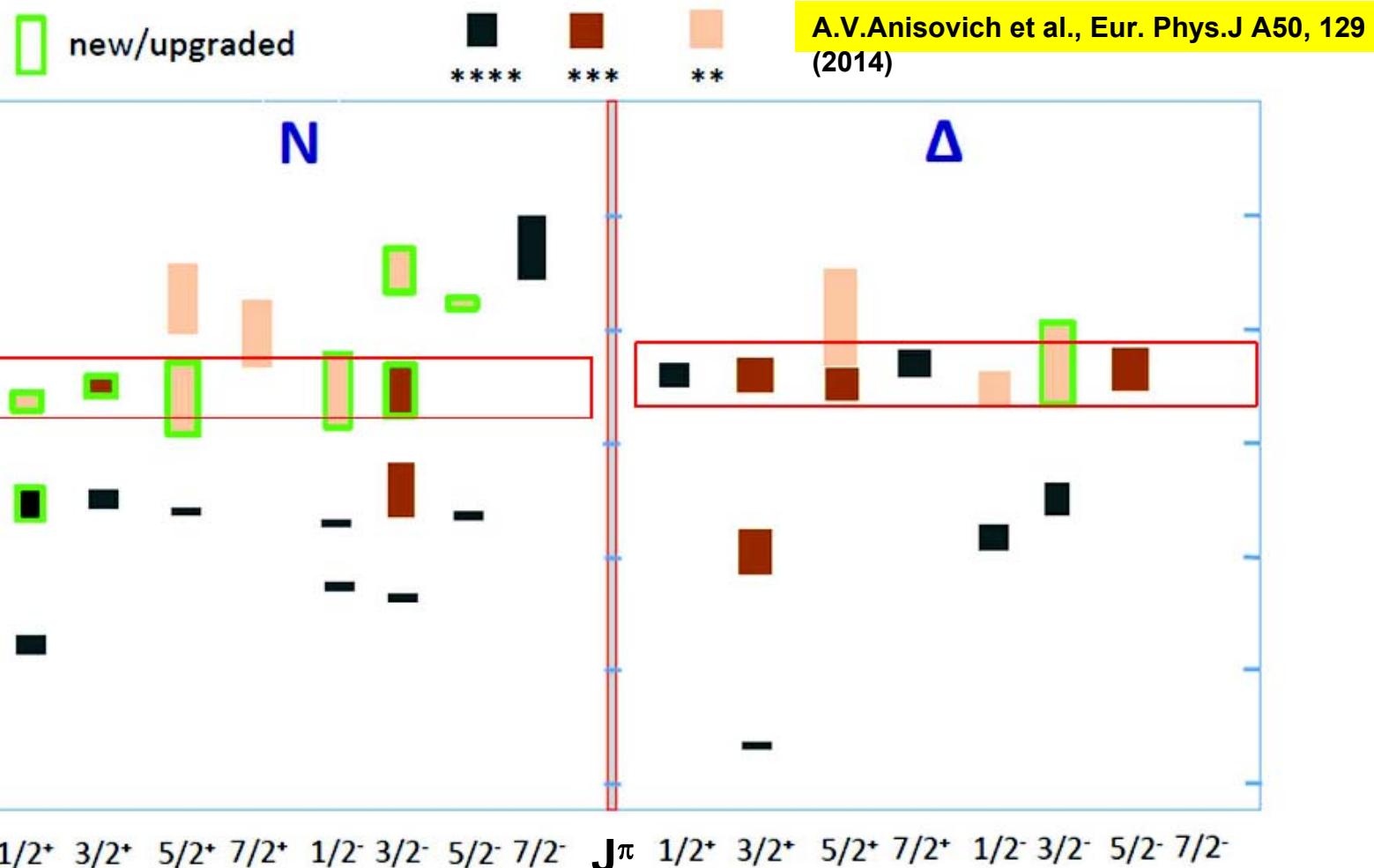
Исследования процессов электровозбуждения N^* во всех эксклюзивных каналах электророждения мезонов в резонансной области стало возможным в экспериментах на детекторе CLAS , где была получена доминирующая часть результатов по реакциям эксклюзивного электророждения мезонов на нуклонах.

Approaches for Extraction of $\gamma_v NN^*$ Electrocouplings from the CLAS Exclusive Meson Electroproduction Data

- **Analyses of different pion electroproduction channels independently:**
- **π^+n and π^0p channels:**
 - Unitary Isobar Model (UIM) and Fixed-t Dispersion Relations (DR)**
 - I.G. Aznauryan, Phys. Rev. C67, 015209 (2003).
 - I.G. Aznauryan et al., CLAS Coll., Phys Rev. C80, 055203 (2009).
 - I.G. Aznauryan et al., CLAS Coll., Phys. Rev. C91, 045203 (2015).
 - Reggeized background employing DR & Finite Energy Sum Rules: under development by JPAC**
- **ηp channel:**
 - Extension of UIM and DR**
 - I.G. Aznauryan, Phys. Rev. C68, 065204 (2003).
 - Data fit at $W < 1.6$ GeV, assuming $N(1535)1/2^-$ dominance**
 - H. Denizli et al., CLAS Coll., Phys. Rev. C76, 015204 (2007).
- **$\pi^+\pi^-p$ channel:**
 - Data driven JLAB-MSU meson-baryon model (JM)**
 - V.I. Mokeev, V.D. Burkert et al., Phys. Rev. C80, 045212 (2009).
 - V.I. Mokeev et al., CLAS Coll., Phys. Rev. C86, 035203 (2012).
 - V.I. Mokeev, V.D. Burkert et al., Phys. Rev. C93, 054016 (2016).
 - B_5 Veneziano model for 3-body background: under development by JPAC**
- Global coupled-channel analyses of the CLAS/world data of $\gamma_{r,v}N$, πN , ηN , $\pi\pi N$, $K\Lambda$, $K\Sigma$ exclusive channels:**
 - T.-S. H. Lee , AIP Conf. Proc. 1560, 413 (2013).
 - H. Kamano et al., Phys. Rev. C88, 035209 (2013).

Для извлечения амплитуд электровозбуждения N^* из сечений и поляризационных асимметрий реакций эксклюзивного электророждения мезонов на протонах были развиты как подходы для извлечения параметров N^* из независимого анализа различных эксклюзивных каналов, так и из совместного анализа данных всех каналов в рамках многоканальных моделей реакций

N^*/Δ^* Spectrum in 2016 from Multi-Channel Photoproduction Data Analysis



Multi-channel analysis of photoproduction data revealed several new baryon states with the biggest impact from the CLAS KY photoproduction data.

Future efforts: extension of the amplitude analysis methods successfully employed in the photoproduction for exclusive meson electroproduction in N^* -region

Группой Бонн-Гатчина был развит подход для совместного анализа данных реакций всех каналов эксклюзивного фоторождения мезонов на нуклонах. Использование этого подхода для глобального анализа всех имеющихся данных реакций эксклюзивного фоторождения мезонов на протонах выявило сигналы 9 новых барионных состояний показанных рамками зеленого цвета. Сигналы от новых возбужденных состояниях были получены в основном из данных CLAS по реакциям эксклюзивного фоторождения KY на протонах.

Summary of the Results on $\gamma_v p N^*$ Electrocouplings from CLAS

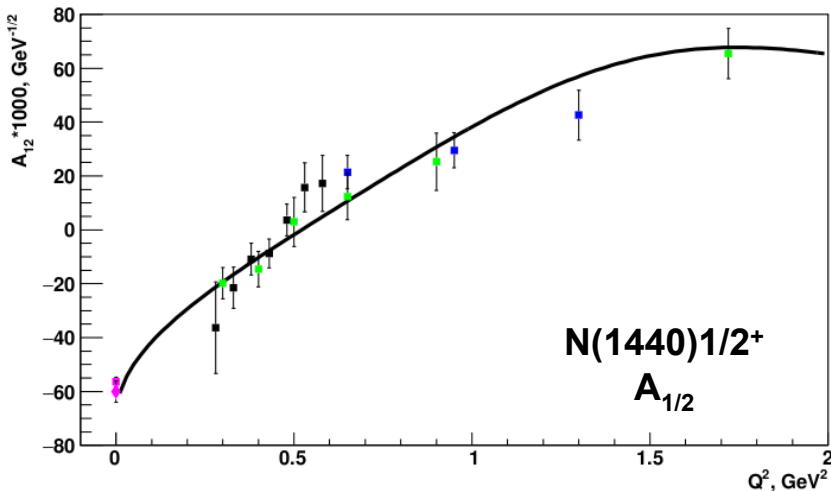
Exclusive meson electroproduction channels	Excited proton states	Q^2 -ranges for extracted $\gamma_v NN^*$ electrocouplings, GeV 2
$\pi^0 p, \pi^+ n$	$\Delta(1232)3/2^+$ $N(1440)1/2^+, N(1520)3/2^-, N(1535)1/2^-$	0.16-6.0 0.30-4.16
$\pi^+ n$	$N(1675)5/2^-, N(1680)5/2^+$ $N(1710)1/2^+$	1.6-4.5
ηp	$N(1535)1/2^-$	0.2-2.9
$\pi^+ \pi^- p$	$N(1440)1/2^+, N(1520)3/2^-$ $\Delta(1620)1/2^-, N(1650)1/2^-, N(1680)5/2^+, \Delta(1700)3/2^-, N(1720)3/2^+, N'(1720)3/2^+$	0.25-1.50 0.5-1.5

The values of resonance electrocouplings can be found in:
https://userweb.jlab.org/~mokeev/resonance_electrocouplings/

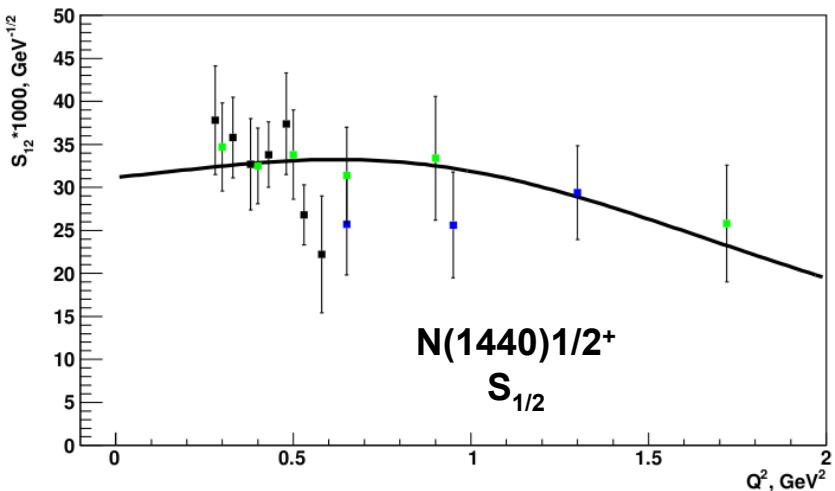
The CLAS results on $\gamma_v p N^*$ electrocouplings for the excited states in mass range up to 1.8 GeV were interpolated/extrapolated in Q^2 -range up to 5.0 GeV 2 . The Fortran code for computation of $\gamma_v p N^*$ electrocoupling values is available in:
userweb.jlab.org/~isupov/couplings/.

Interpolation/Extrapolation of the CLAS Results on γ_{ν} pN* electrocouplings

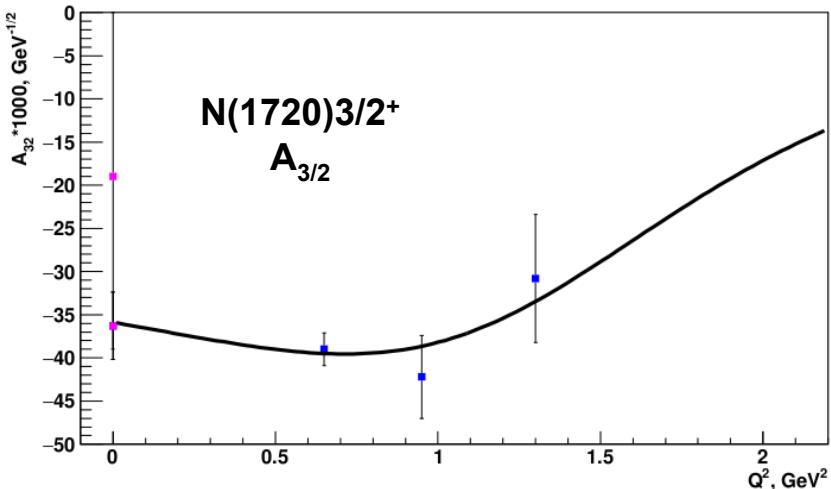
P11_1440_A12



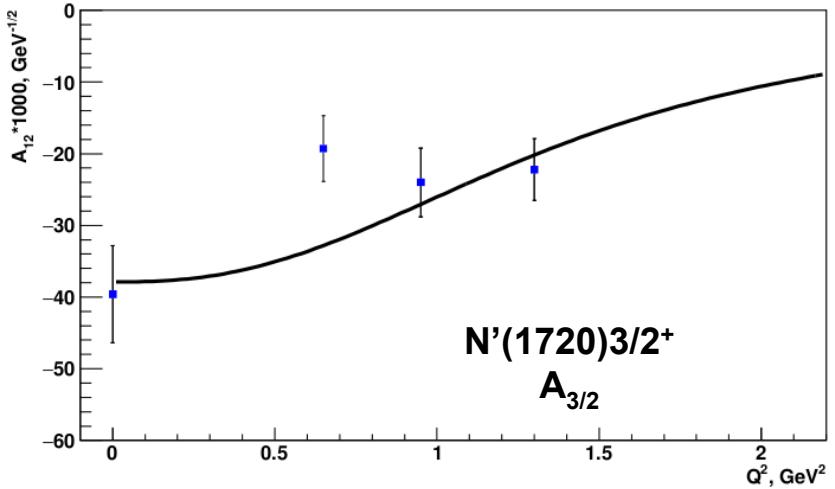
P11_1440_S12



P13_1720_A32



P13_1720_missing_A32

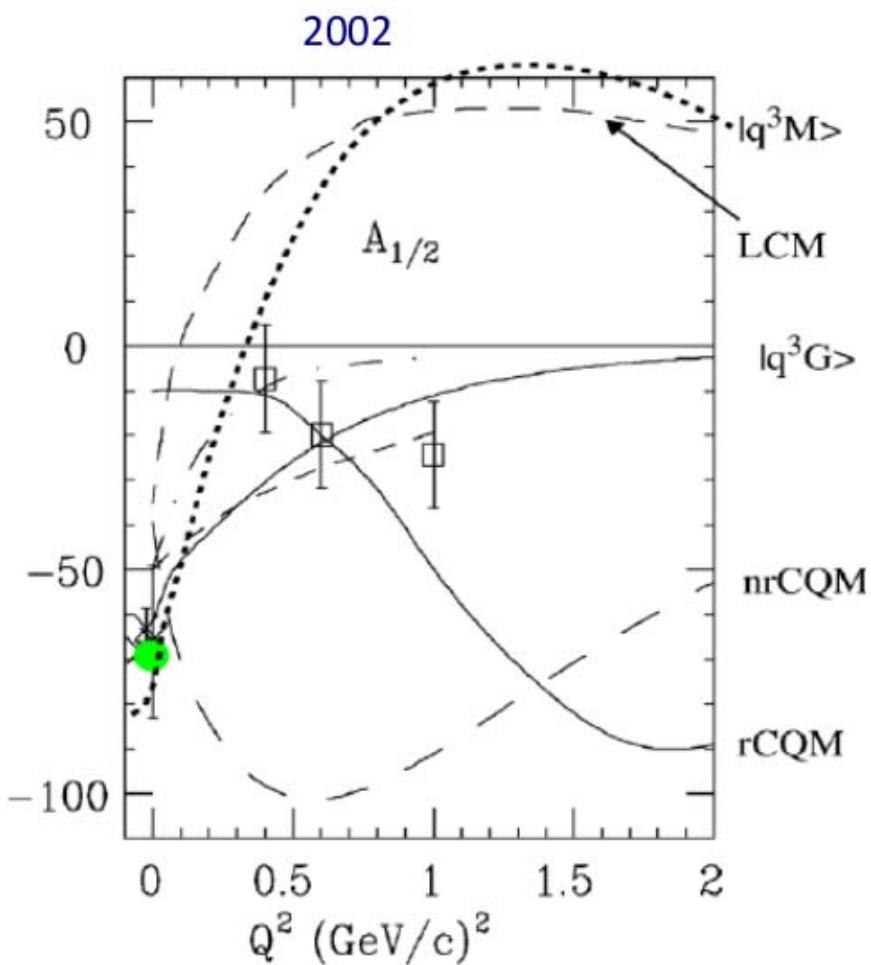


Создана программа осуществляющая интерполяцию/экстраполяцию амплитуд электровозбуждения N^* . Программа позволяет на основе извлеченных из данных CLAS амплитуд электровозбуждения резонансов получить оценку их величин для большинства N^* в области масс до 1.8 ГэВ и в области виртуальностей фотона до 5.0 ГэВ².

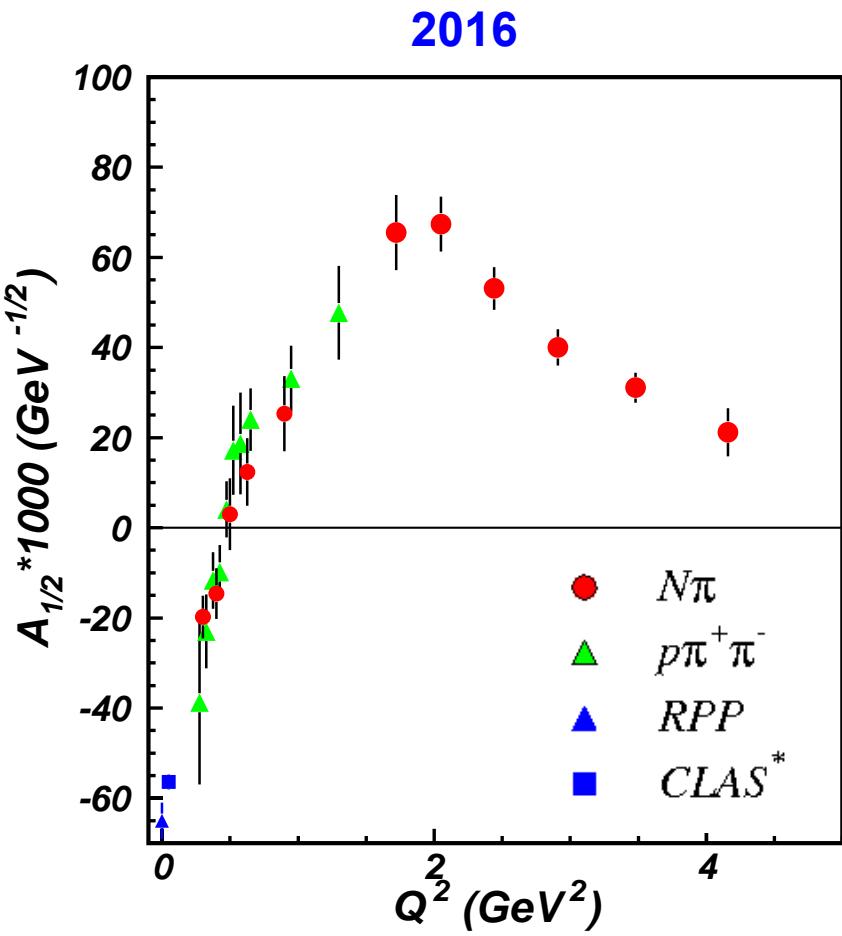
https://userweb.jlab.org/~mokeev/resonance_electrocoupings/



Roper resonance in 2002 & 2016



V. Burkert, Baryons 2002



V. D. Burkert, Baryons 2016

Reliable results on $N(1440)1/2^+$ electrocouplings have become available in the recent decade from independent analyses of $N\pi$ and $\pi^+\pi^-p$ photo-/electroproduction off protons measured with CLAS.

$\gamma_v p N^*$ Electrocouplings from $N\pi$, $\pi^+\pi^-p$, and ηp Electroproduction

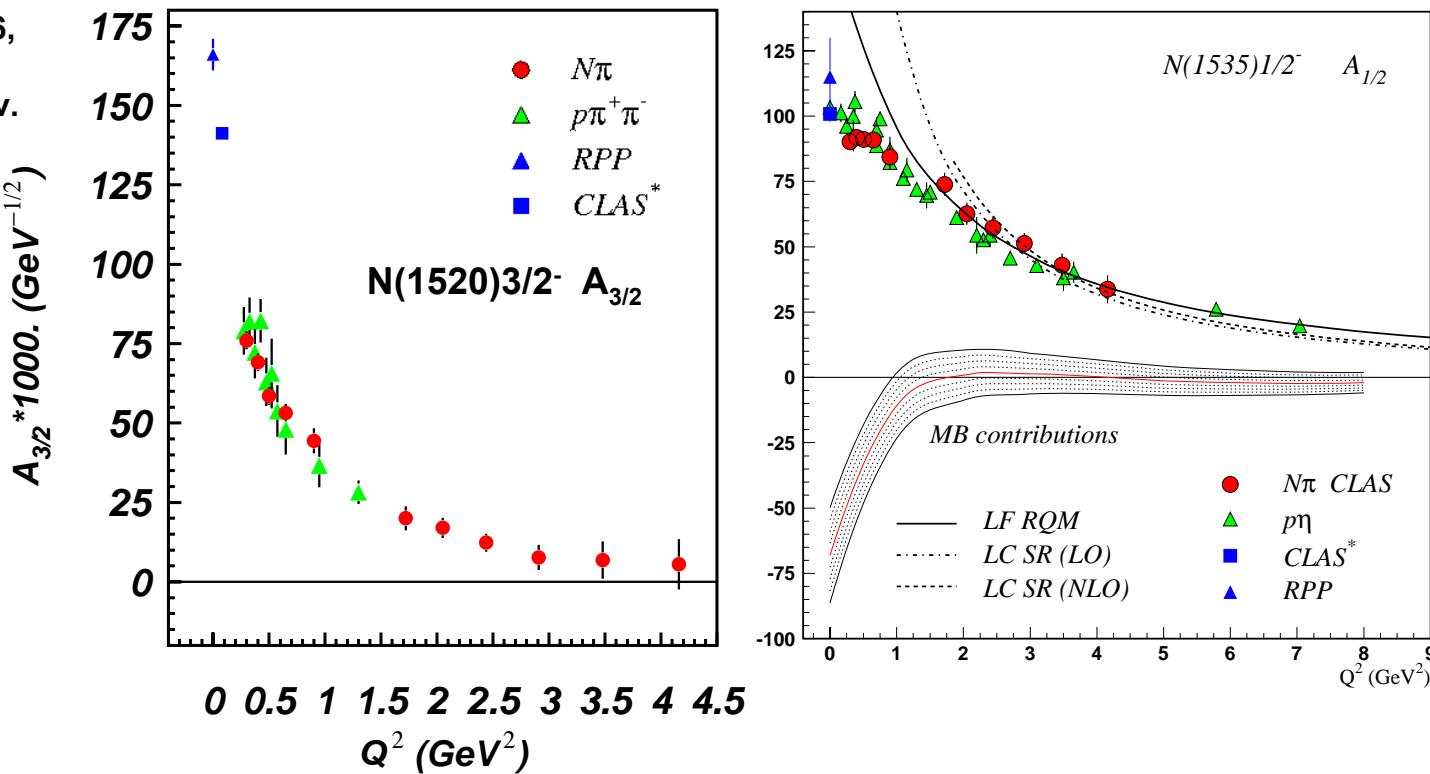
H Denizli et al., Phys. Rev. C76, 015204 (2007).

I.G. Aznauryan et al., Phys. Rev. C80, 055203 (2009).

V.I. Mokeev et al., Phys. Rev. C86, 035203 (2012).

K. Park et al., Phys. Rev. C91, 052014 (2015).

V.I. Mokeev et al., Phys. Rev. C93, 054016 (2016).



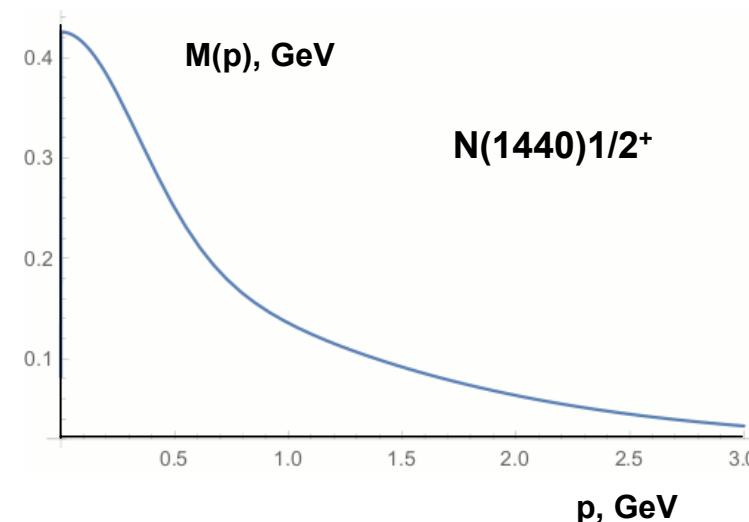
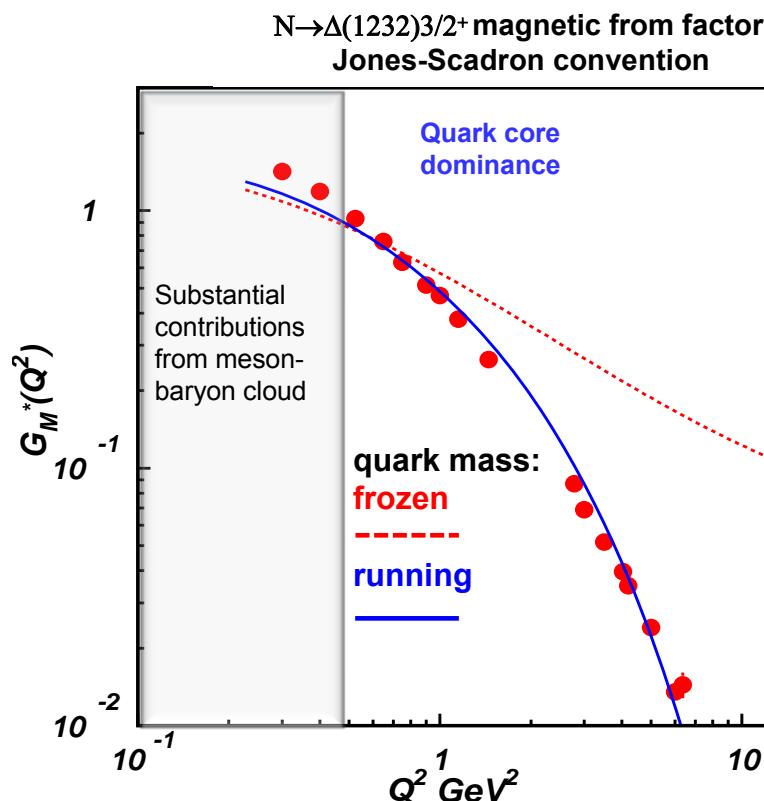
Consistent values of resonance electrocouplings from analyses of $N\pi/\pi^+\pi^-p$ and $N\pi/N\eta$ electroproduction off protons demonstrate the capabilities of the developed reaction models to obtain resonance electrocouplings in independent analyses of these exclusive channels.

Published in the recent edition of the PDG , Chin. Phys. C40, 100001 (2016).

Exploring the Hadron Mass Generation from N* Electroexcitation

Dyson-Schwinger Equations (DSE):

- J. Segovia et al., Phys .Rev. Lett. 115, 171801 (2015).
- J. Segovia et al., Few Body Syst. 55, 1185 (2014).



Common dressed quark mass function employed for description of elastic, $N \rightarrow \Delta$ G_M form factors and $N(1440) 1/2^+$ electrocouplings

Good data description at $Q^2 > 2.0 \text{ GeV}^2$ achieved with the same dressed quark mass function for the ground and excited nucleon states of distinctively different structure provides strong evidence for:

- the relevance of dressed quarks with dynamically generated mass and structure;
- access to quark mass function from the data on elastic and $N \rightarrow N^*$ transition form factors.

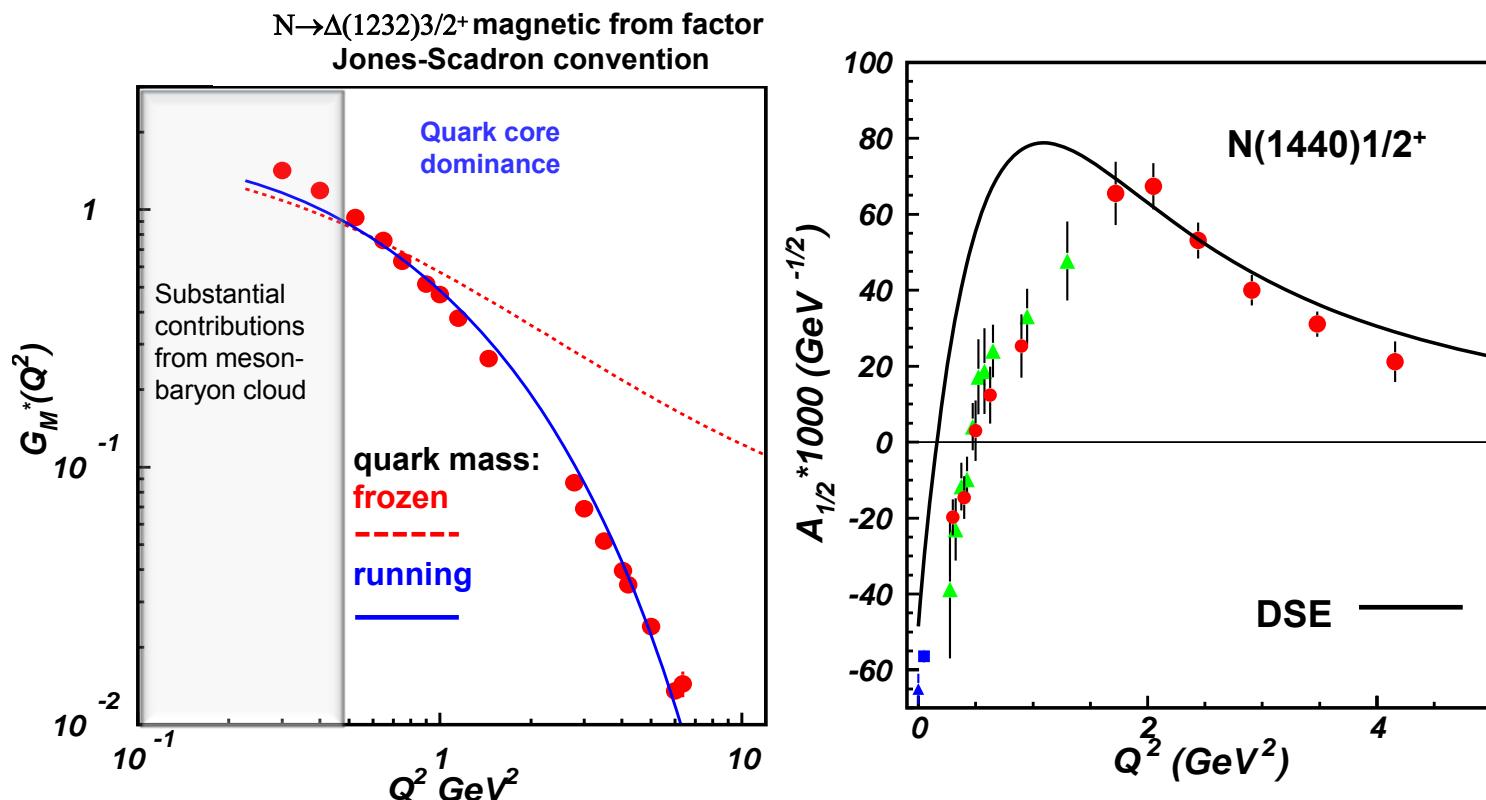
One of the most important achievement in hadron physics of the last decade obtained in synergistic efforts between experimentalists and theorists.

Полученные в экспериментах на детекторе CLAS результаты по амплитудам электровозбуждения низколежащих нуклонных резонансов оказали значительное влияние на развитие теории структуры адронов и впервые обеспечили проверку теоретического описания динамики сильных взаимодействий в непертурбативной области. Впервые достигнуто хорошее описание амплитуд электровозбуждения $\Delta(1232)3/2^+$ и $N(1440)1/2^+$ резонансов при $Q^2 > 2.0 \text{ GeV}^2$ на основе фундаментального лагранжиана КХД в рамках метода уравнений Дайсона-Швингера развитого теоретической группой Argonne National Lab (ANL). На слайде приведено сравнение данных CLAS по магнитному переходному форм фактору $N \rightarrow \Delta(1232)3/2^+$ с результатами его описания в рамках DSE подхода. Результаты получены для: а) упрощенной параметризации qq-взаимодействия как контактного взаимодействия и б) реалистического qq-взаимодействия совпадающего с результатами полученными из решений уравнений Дайсона-Швингера для глюонных пропагаторов и одетых кварак-глюонных вершин используя лагранжиан КХД. Контактное взаимодействие, несмотря на модельные упрощения, воспроизводит динамическую генерацию масс легких одетых夸克ов $\sim 300 \text{ MeV}$, но при этом масса одетого кварка не зависит от импульса переносимого кварком. В случае реалистического qq-взаимодействия, масса одетого кварка зависит от импульса (правый рис слайда). Рассчитанные в рамках DSE Q^2 -эволюция магнитного форм фактора показана на левом рис слайда для двух вариантов qq-взаимодействия. Наблюдается значительное и возрастающее с Q^2 расхождение между результатами эксперимента и DSE для не зависящей от переносимого импульса массы одетого кварка (красная пунктирная линия). В тоже время, результаты хорошо описывают данные при $Q^2 > 1.8 \text{ GeV}^2$ в случае реалистического qq-взаимодействия с массой одетого кварка зависящей от импульса. Таким образом, экспериментальные результаты детектора CLAS по $N \rightarrow \Delta$ магнитному форм фактору впервые подтвердили фундаментальные ожидания теории сильных взаимодействий в непертурбативной области о зависимости массы одетого кварка от импульса.

Exploring the Hadron Mass Generation from N* Electroexcitation

Dyson-Schwinger Equations (DSE):

- J. Segovia et al., Phys .Rev. Lett. 115, 171801 (2015).
- J. Segovia et al., Few Body Syst. 55, 1185 (2014).



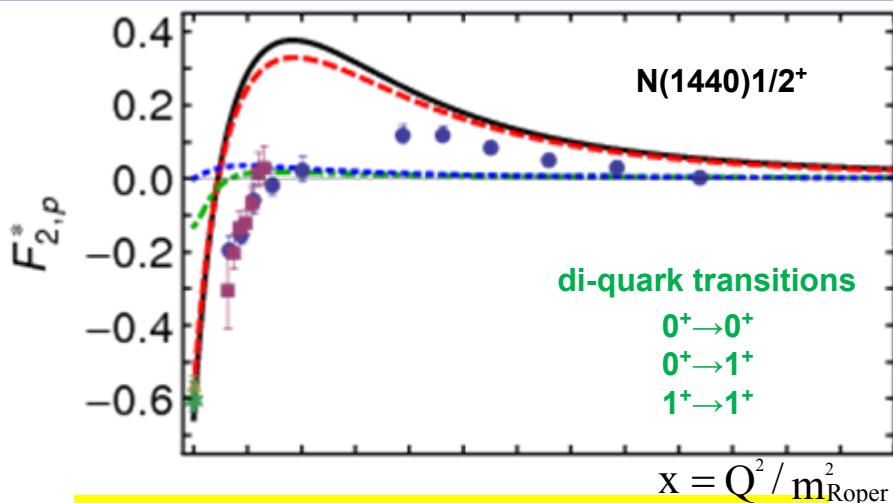
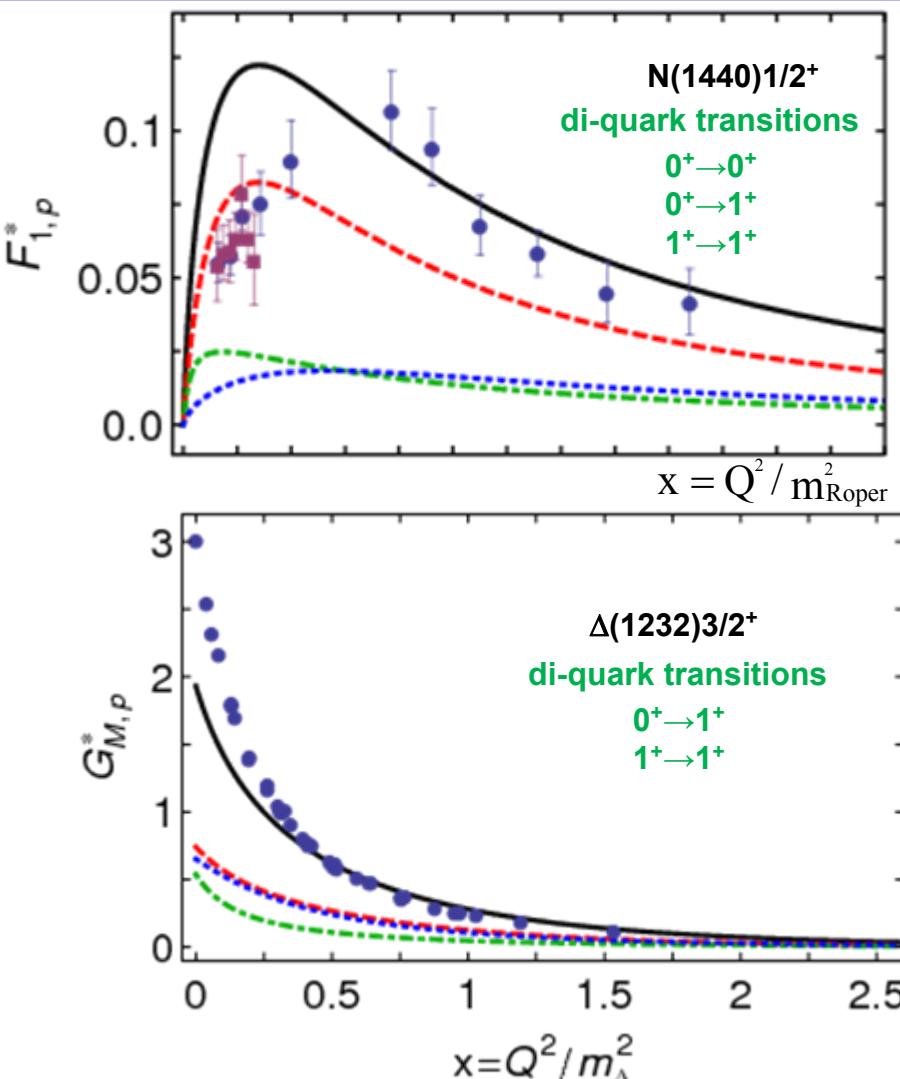
Good data description at $Q^2 > 2.0 \text{ GeV}^2$ achieved with the same dressed quark mass function for the ground and excited nucleon states of distinctively different structure provides strong evidence for:

- the relevance of dressed quarks with dynamically generated mass and structure;
- access to quark mass function from the data on elastic and $N \rightarrow N^*$ transition form factors.

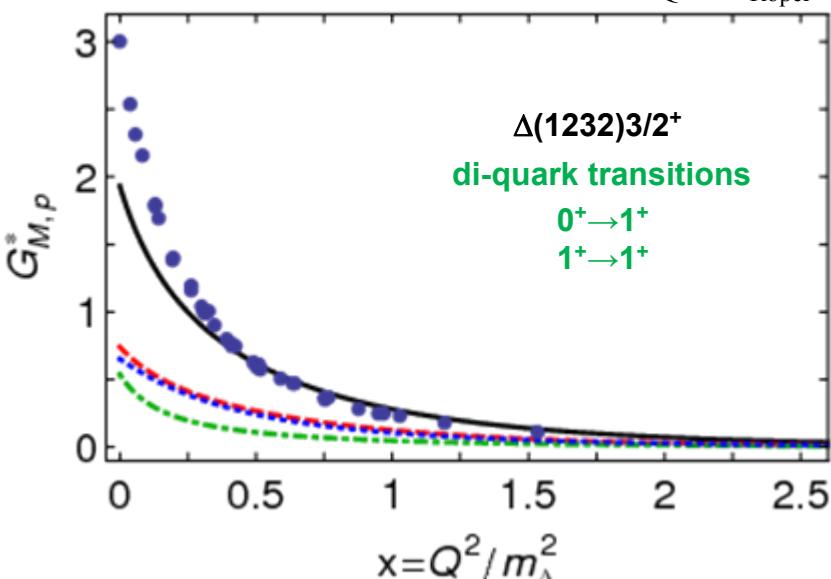
One of the most important achievement in hadron physics of the last decade obtained in synergistic efforts between experimentalists and theorists.

DSE подход развитый группой ANL позволил хорошо описать данные по амплитудам электровозбуждения $(1440)1/2+$ резонанса (см. правый рис) при $Q^2 > 2.0 \text{ GeV}^2$. Хорошее описание данных по амплитудам электровозбуждения $N(1440)1/2+$ достигнуто с той же самой массовой функцией одетого кварка, которая использовалась ранее для успешного описания данных по упругим форм факторам нуклона и переходных форм факторов $N \rightarrow \Delta$ при $Q^2 > 0.8 \text{ GeV}^2$. Хорошее описание упругих форм факторов и амплитуд электровозбуждения Δ и $N(1440)1/2+$ резонансов с совершенно разной структурой свидетельствует о том, что эффективный объект сформированный сильными взаимодействиями в непертурбативной области - одетый кварк - с динамическими массой и структурой, описываемый на основе КХД в рамках DSE, является фундаментальной составляющей структуры кваркового кора основного и возбужденных состояний нуклона. Совпадающие результаты по массовой функции одетого кварка полученные из независимого анализа упругих форм факторов и амплитуд электровозбуждения различных N^* впервые продемонстрировали возможность надежного доступа к массовой функции одетого кварка из совместного анализа упругих электромагнитных форм факторов нуклона и амплитуд электровозбуждения нуклонных резонансов.

Di-quark vs Uncorrelated Quark Contributions from the DSE Analysis of the CLAS Results



J. Segovia and C.D. Roberts, arXiv:1607.04405
[nucl-th], accepted by Rapid Com in Phys.
Rev.



- full DSE result
- Contributions from:
- - - Uncorrelated 3rd quark
- - - Uncorrelated quark from di-quark dissociation
- - - - transitions between di-quarks $Jp \rightarrow Jp'$

- the biggest contribution from uncorrelated quark
- sub leading contribution from di-quark correlations

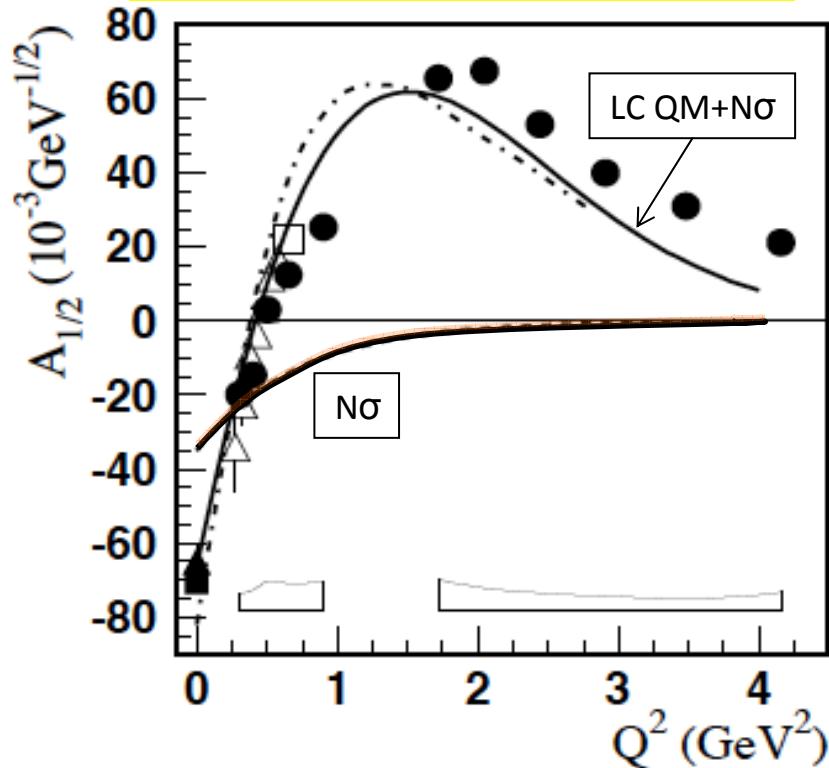
Выполненные в последнее время исследования позволили установить вклады в переходные электромагнитные форм факторы $N \rightarrow \Delta$ и $N \rightarrow N(1440)1/2^+$ от некоррелированных夸克ов и скоррелированных夸ковых пар т.н. ди-кварков с различными спинами и четностями J^P .

Extensions in the Studies of Uncorrelated Quark vs di-Quark Contributions to the Resonance Structure

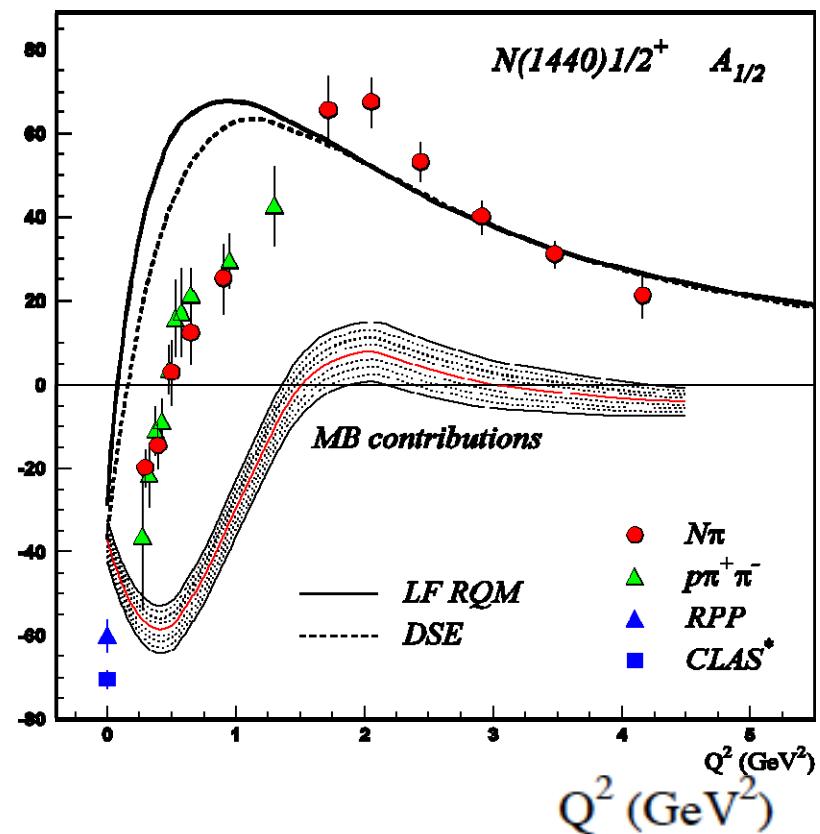
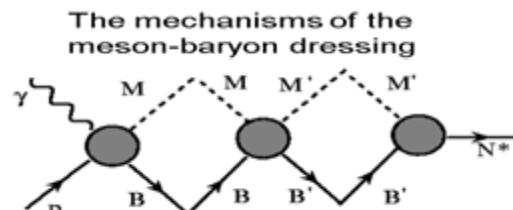
- Extension in the studies of di-quark correlation vs uncorrelated quark contributions to $\Delta(1232)3/2^+$ and $N(1440)1/2^+$ electroexcitation (slide #13) towards high Q^2 up to 12 GeV^2 for analysis of the future results with the CLAS12. Could we approach the distances where the contributions from di-quarks will be negligible with 11 GeV electron beam?
- Evaluation of the (uncorrelated quark)/di-quark contributions to the e.m. form factors/electrocouplings for the orbital excited resonances ($L=1$) in the second and third resonance region. Access to pseudoscalar and vector di-quark correlations. How quark/di-quark contributions evolve with N^* quantum numbers?

Evidence for Interplay between Meson-Baryon Cloud and Quark Core

I.T. Obukhovsky et al., Phys. Rev. D89, 014032 (2012).



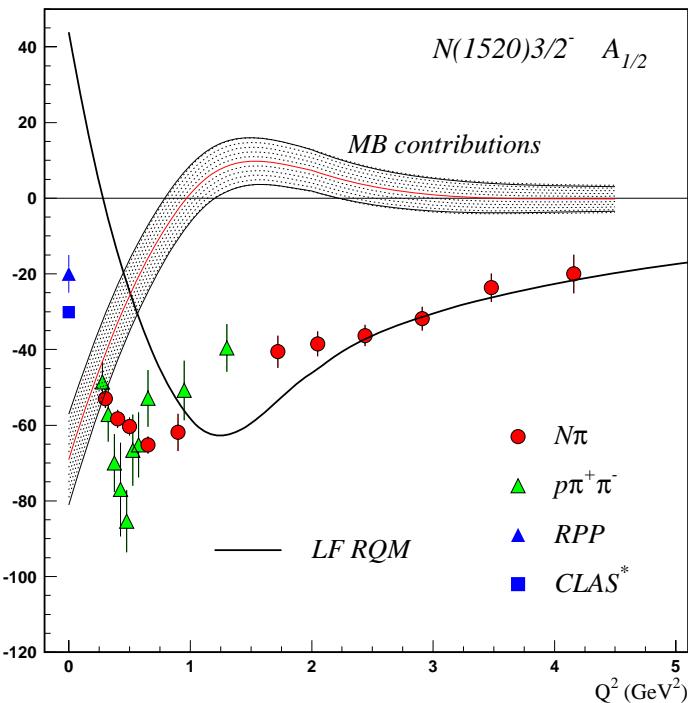
Accounting for the contributions from $N\sigma$ loops and quark core combined allows us to describe the data at $Q^2 < 1.0 \text{ GeV}^2$



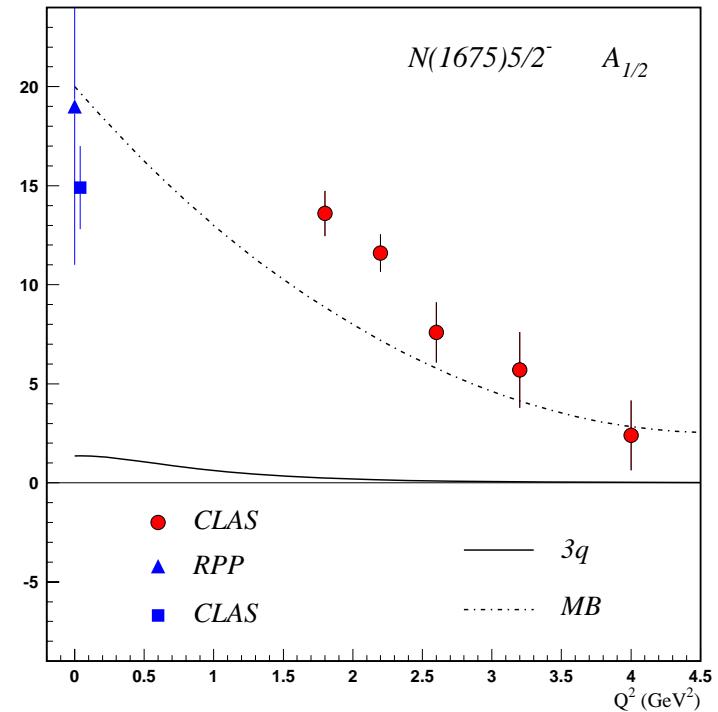
LF RQM: I.G. Aznauryan and V.D. Burkert, arXiv:1603.06692

MB-cloud contribution can be obtained by subtracting the DSE estimates for quark core from the experimental results on resonance electrocouplings

Meson-Baryon Cloud and Quark Core Interplay for Different Resonances



Prospect for direct access to quark core



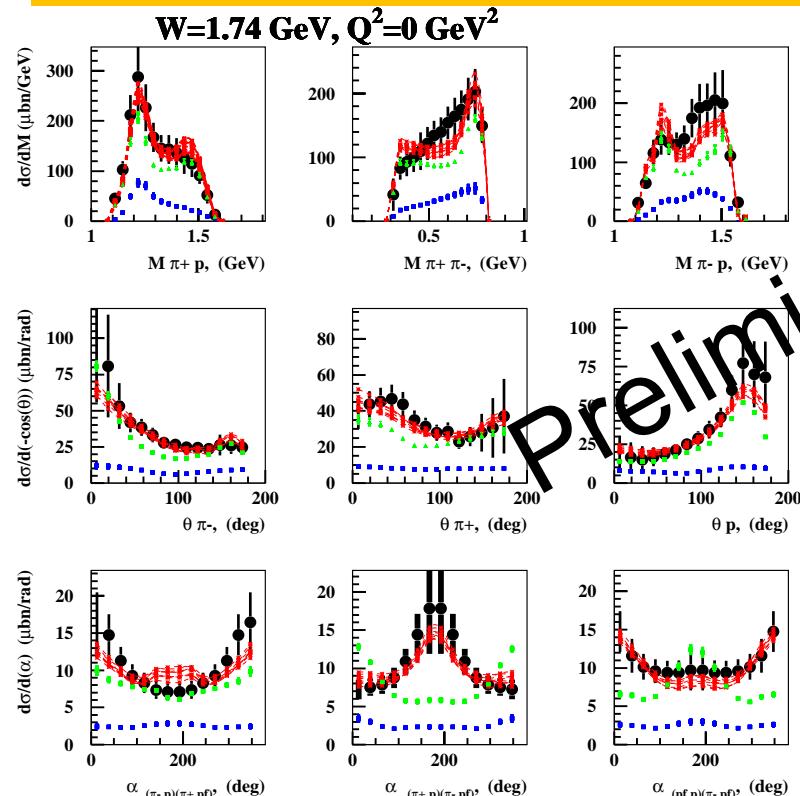
Prospect for direct access to MB-cloud

- The structure of resonances is determined by a complex interplay between inner core of three dressed quarks and external meson-baryon cloud.
- MB-cloud dominance is suggestive for the pronounced DCSB effect in the generation of $N(1675)5/2^-$ resonance

Структура всех возбужденных состояний нуклона исследованных на детекторе CLAS при $Q^2 < 5.0 \text{ GeV}^2$ описывается совместным вкладом внутреннего кора трех одетых夸克ов и внешнего мезон-барионного облака. Хорошее описание夸克ового кора достигнутое в рамках DSE из лагранжиана КХД впервые сделало возможным получить количественную информацию о вкладе мезон-барионного облака в амплитуды электровозбуждения N^* как разность между экспериментальными результатами по этим амплитудам и результатами DSE по вкладу夸克ового кора. Относительные вклады夸克ового кора и мезон-барионного облака оказываются существенно различающимся для резонансов с различными квантовыми числами. Для всех резонансов вклад мезон-барионного облака максимален при $Q^2 < 1.0 \text{ GeV}^2$. Он уменьшается с ростом виртуальности фотона. Фотон высокой виртуальности проникает через внешнее мезон-барионное облако и взаимодействует преимущественно с夸克овым кором. Переход к фотонам высоких виртуальностей $Q^2 > 5.0 \text{ GeV}^2$ позволяет исследовать夸克овый кор резонансов напрямую из данных по амплитудам электровозбуждения N^* с пренебрежимо малыми вкладами от мезон-барионного облака.

Photocouplings of High Lying N* from the $\pi^+\pi^-p$ Photoproduction off Protons with CLAS

Nine differential cross sections at
1.6<W<2.0 GeV in W-bins of 25 MeV width



Fit within the framework of the JM15

resonant contributions

non-resonant contributions

computed in JM15 cross sections selected in the data fit

E.N Golovach, Mosc. State Univ. (MSU)

Resonance	$A_{1/2}$, GeV $^{-1/2} * 1000$, JM15/RPP14	$A_{3/2}$, GeV $^{-1/2} * 1000$, JM15/RPP14
$N(1650)1/2^-$	61 ± 8 53 ± 16	
$N(1680)5/2^+$	-28 ± 4 -15 ± 6	128 ± 11 133 ± 12
$N'(1720)3/2^+$	37 ± 6 N/A	-40 ± 7 N/A
$N(1720)3/2^+$	81 ± 12 97 ± 3 (*)	-34 ± 8 -39 ± 3 (*)
$\Delta(1620)1/2^-$	29 ± 6 27 ± 11	
$\Delta(1700)3/2^-$	87 ± 19 104 ± 15	87 ± 16 85 ± 22
$\Delta(1905)5/2^+$	19 ± 8 26 ± 11	-43 ± 17 -45 ± 20
$\Delta(1950)7/2^+$	-70 ± 14 -76 ± 12	-118 ± 20 -97 ± 10

(*)M. Dugger et al., Phys. Rev. C76, 025211 (2007).

Resonances with dominant decays to the $N\pi\pi$

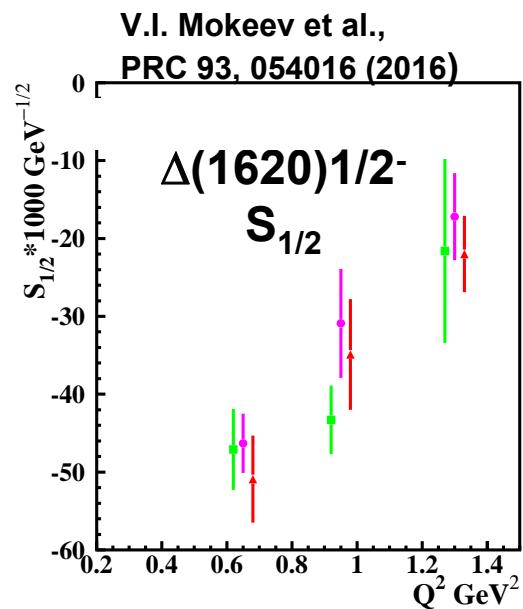
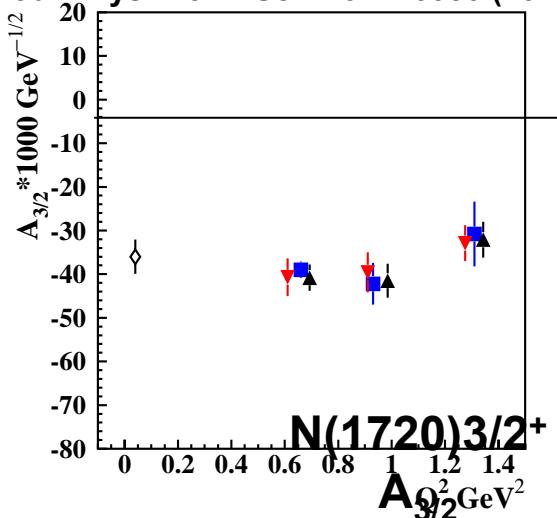
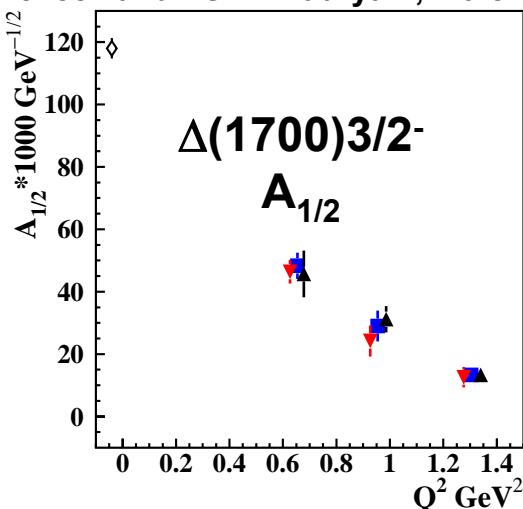
Consistent results from independent analyses of $N\pi$ and $\pi^+\pi^-p$ photoproduction off protons confirmed reliable photocoupling extraction for the first time.

Впервые получены результаты по амплитудам фотовозбуждения высоколежащих резонансов из реакций фоторождения $\pi^+\pi^-$ пар на протонах.



Electrocouplings of the Excited States in the Third Resonance Region from the CLAS $\pi^+\pi^-p$ Electroproduction Data

V.I. Mokeev and I.G. Aznauryan., Int. J. Mod. Phys. Conf. Ser. 26. 146080 (2014)



Independent fits in different W-intervals:

green: $1.51 < W < 1.61 \text{ GeV}$ red: $1.61 < W < 1.71 \text{ GeV}$ black: $1.71 < W < 1.81 \text{ GeV}$

magenta: $1.56 < W < 1.66 \text{ GeV}$ blue: $1.66 < W < 1.76 \text{ GeV}$

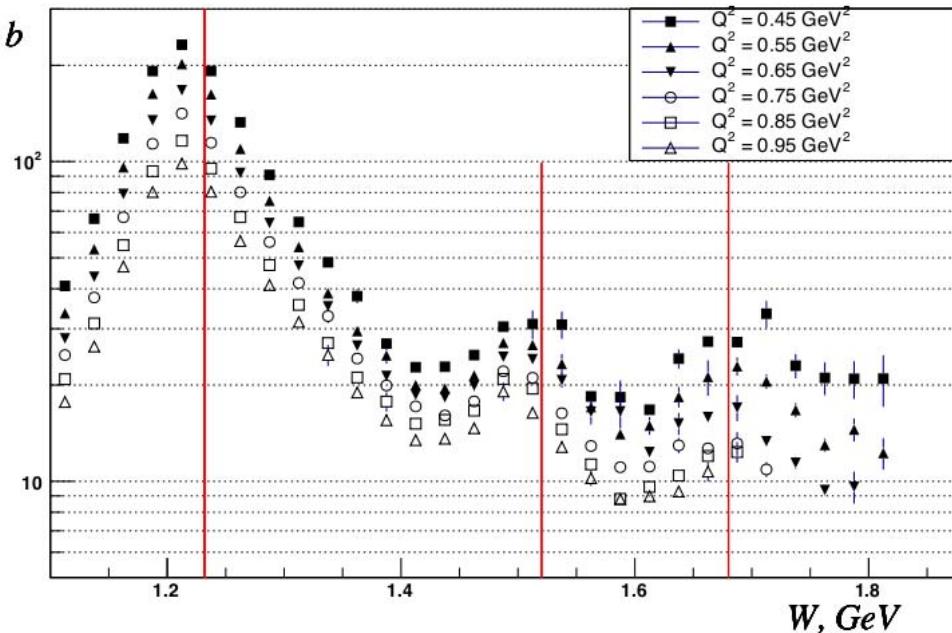
The $\pi^+\pi^-p$ electroproduction is the major source of the information on electrocouplings of the $\Delta(1620)1/2^-$, $\Delta(1700)3/2^-$, and $N(1720)3/2^+$ resonances which decay preferentially to the $N\pi\pi$ final states.

Реакции электророждения $\pi^+\pi^-$ пар на протонах являются основным источником информации об амплитудах электровозбуждения высоколежащих N^* многие из которых распадаются в основном на конечные состояния $N\pi\pi$. На детекторе CLAS впервые получены данные по амплитудам электровозбуждения резонансов показанных на слайде, которые распадаются преимущественно на конечные состояния $N\pi\pi$ из реакции электророждения $\pi^+\pi^-$ пар на протоне. Проведен независимый анализ данных в различных интервалах по W где нерезонансные амплитуды различны, в то время как амплитуды электровозбуждения N^* должны быть одинаковы. Совпадающие результаты по амплитудам электровозбуждения N^* из независимого анализа различных W -интервалов подтверждают надежность извлеченных амплитуд электровозбуждения резонансов.

New CLAS Results on $\pi^0 p$ electroproduction

Fully integrated cross sections

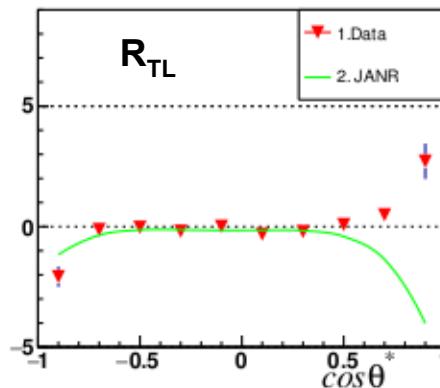
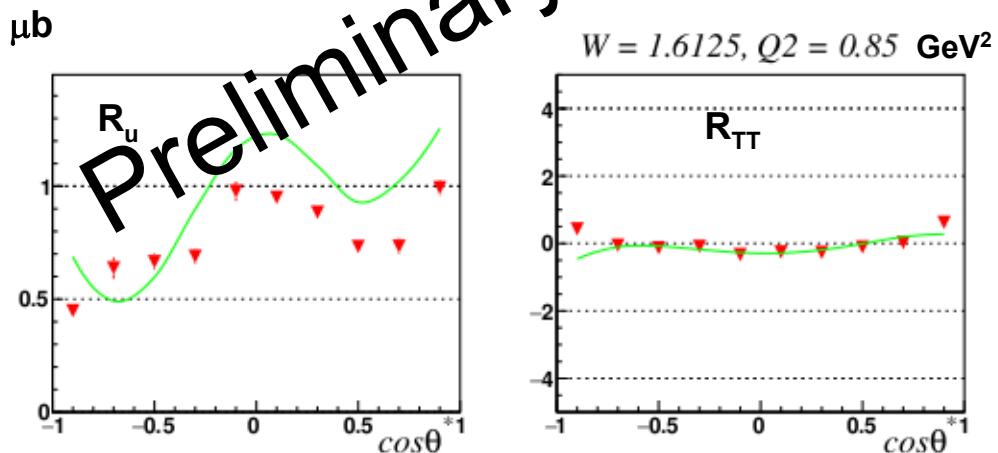
N. Markov, K.Joo, UCONN



$1.10 \text{ GeV} < W < 1.80 \text{ GeV}$,
 $0.3 \text{ GeV}^2 < Q^2 < 1.0 \text{ GeV}^2$

Fit of the structure functions within the framework of UIM/DR (slide#7) will provide electrocouplings of the resonances in mass range up to 1.8 GeV with substantial decays to the $N\pi$ final state.

The structure functions

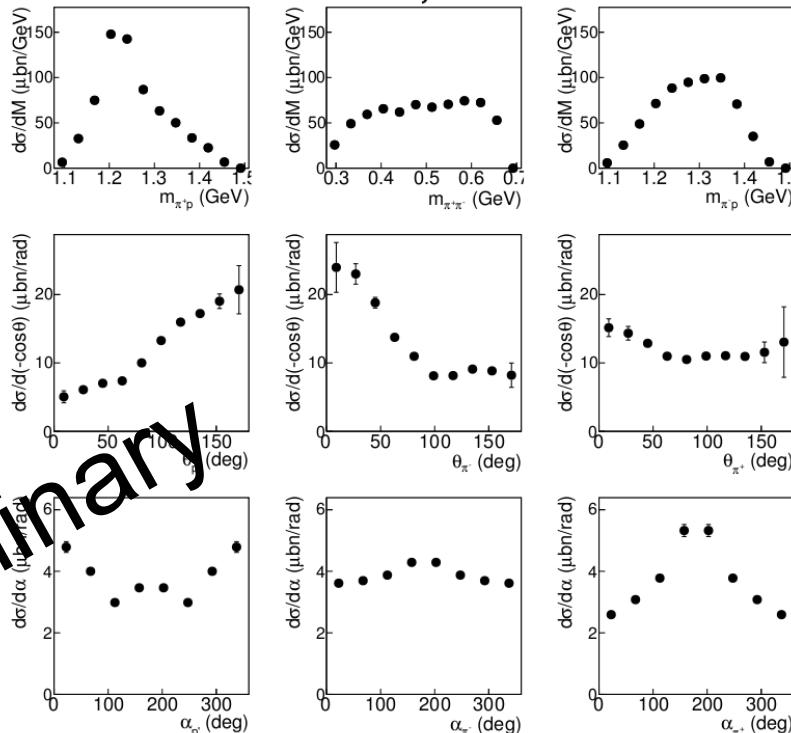
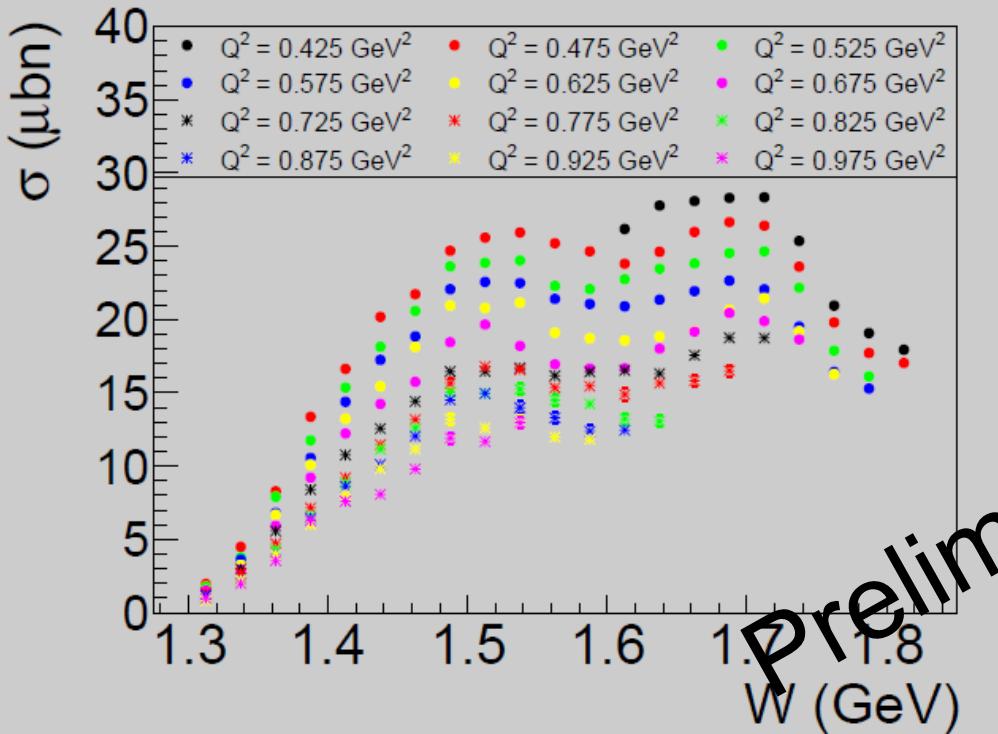


Extension of the CLAS $\pi^+\pi^-p$ Electroproduction Data at $Q^2 < 1.0 \text{ GeV}^2$

1.30 GeV < W < 1.80 GeV, 0.3 GeV 2 < Q 2 < 1.0 GeV 2

G. V. Fedotov , R. W. Gothe,

$Q^2 = 0.475 \text{ GeV}^2$; $W = 1.6125 \text{ GeV}$

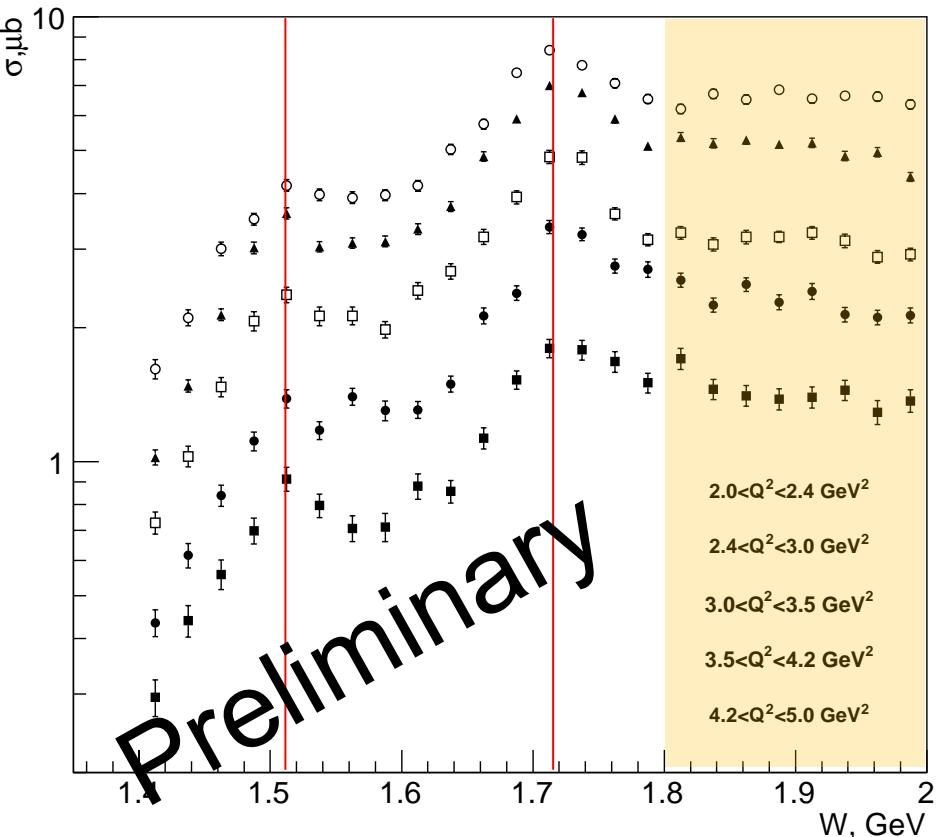


Electrocouplings of all well established resonances in the mass range up to 1.8 GeV and at $0.3 < Q^2 < 1.0 \text{ GeV}^2$ will be available from independent analyses of π^0p and $\pi^+\pi^-p$ channels .

Electrocouplings of the resonances with dominant $N\pi\pi$ decays will be obtained on the grid over Q^2 with the bin size of a factor of 6 smaller than in the previous studies.

E.L. Isupov, K. Hicks, MSU/Ohio Univ.

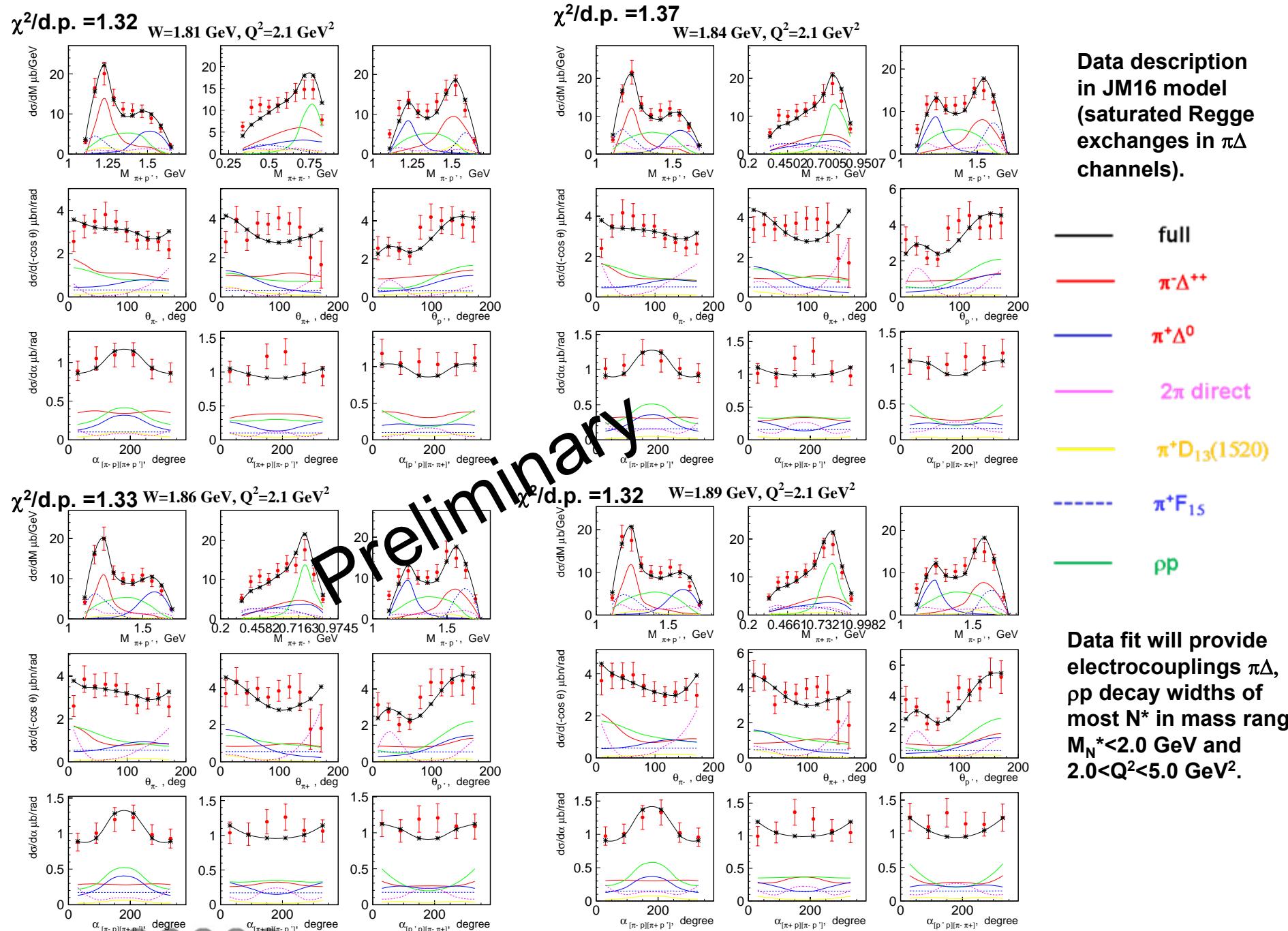
Fully integrated $\pi^+\pi^-p$ electroproduction cross sections off protons



$1.40 \text{ GeV} < W < 2.00 \text{ GeV}$,
 $2.00 \text{ GeV}^2 < Q^2 < 5.0 \text{ GeV}^2$

Analysis objectives:

- Extraction of $\gamma_\nu p N^*$ electrocouplings for most N^* 's in mass range up to 2.0 GeV and $2.0 < Q^2 < 5.0 \text{ GeV}^2$.
- Search for new baryon states suggested by the Bonn-Gatchina multi-channel meson photoproduction analysis through their manifestations in exclusive $\pi^+\pi^-p$ electroproduction with Q^2 -independent masses and decay widths.



Expected Experimental Results on $\gamma_v p N^*$ Electrocouplings and Request for the QCD-based Theory Support

- $\gamma_v p N^*$ electrocouplings of all prominent nucleon resonances in mass range $M_{N^*} < 2.0$ GeV and at $0.3 < Q^2 < 5.0$ GeV 2 will be determined from independent analyses of $N\pi$, $N\pi\pi$, channels measured with the CLAS in the near term future.
- In addition, high mass resonance electro-couplings ($M_{N^*} > 1.6$ GeV) will become available from KY electroproduction.
- DSE evaluations of the electrocouplings for the resonances of [70,1] $SU_{sf}(6)$ -multiplet with $L=1$ in order to address:
 - a) environmental sensitivity of the quark mass function to orbital excitations of three dressed quarks;
 - b) complexity quark-gluon vertex dressing beyond the simplest rainbow-ladder truncation
 - c) access to pseudoscalar and vector di-quark correlations.
- Shed light on DCSB and its evolution with distance from electrocouplings of chiral partners:
 $\Delta(1232)3/2^+/\Delta(1700)3/2^-$, $N(1520)3/2^-/N(1720)3/2^+$, $N(1675)5/2^-/N(1680)5/2^+$

N^* at $0.05 \text{ GeV}^2 < Q^2 < 7.0 \text{ GeV}^2$ with the CLAS12

Hybrid Baryons PR12-16-010	Search for hybrid baryons (qqqq) focusing on $0.05 \text{ GeV}^2 < Q^2 < 2.0 \text{ GeV}^2$ in mass range from 1.8 to 3 GeV in $K\Lambda$, $N\pi\pi$, $N\pi$ (A. D'Angelo, E.Golovach, B.Ishkhanov, E.Isupov V.Mokeev, et al.,)
KY Electroproduction PR12-16-010A	Study N^* structure for states that couple to KY through measurements of cross sections and polarization observables that will yield Q^2 evolution of electrocoupling amplitudes at $Q^2 < 7.0 \text{ GeV}^2$ (D. Carman, E.Golovach, V.Mokeev, et al.,)

Approved by PAC44

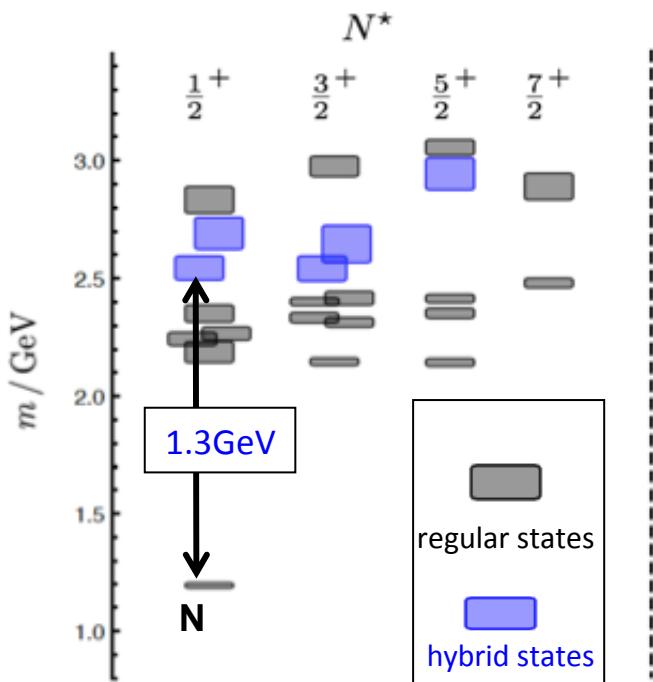
Run Group conditions:
$E_b = 6.6 \text{ GeV}, 50 \text{ days}$
$E_b = 8.8 \text{ GeV}, 50 \text{ days}$

- Polarized electrons, unpolarized LH_2 target
- $L = 1 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

Hunting for Glue in Excited Baryons with CLAS12

Can glue be a structural component to generate hybrid q^3g baryon states?

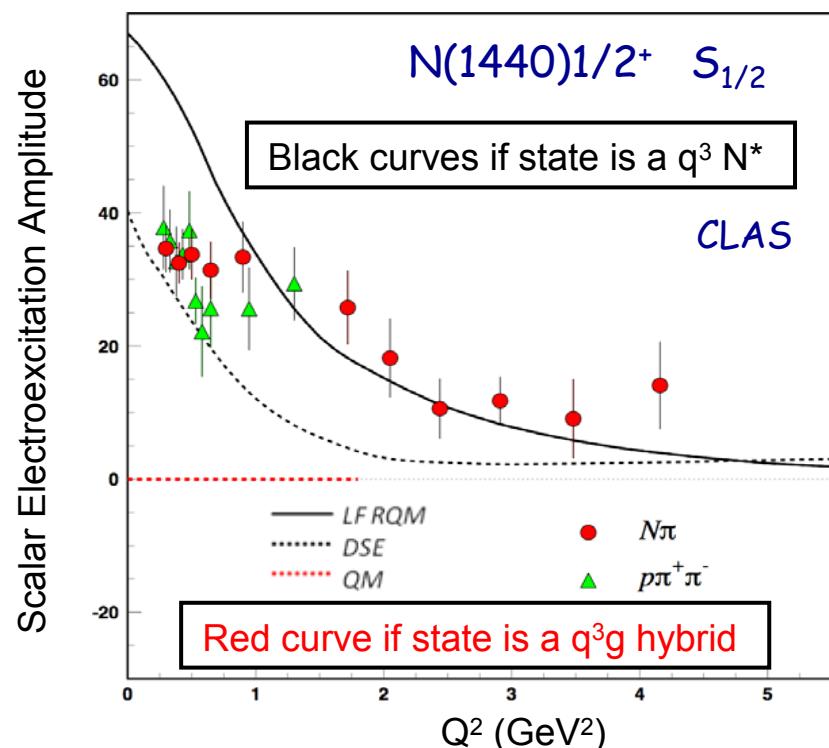
Predictions of the N^* spectrum from QCD show both regular q^3 and hybrid q^3g states



JLab LQCD group results

The only way to establish the nature of a baryon state as q^3 or q^3g is from the Q^2 evolution of its electroexcitation amplitude

Search for hybrid baryons with CLAS12 in exclusive KY and $\pi^+\pi^-p$ electroproduction



E12-09-003

Nucleon Resonance Studies with CLAS12

Burkert, Mokeev, Stoler, Joo, Gothe, Cole

E12-06-108A

KY Electroproduction with CLAS12

Carman, Mokeev, Gothe

- Measure exclusive electroproduction cross sections from an unpolarized proton target with polarized electron beam for N π , N η , N $\pi\pi$, KY:

$E_b = 11 \text{ GeV}$, $Q^2 = 3 \rightarrow 12 \text{ GeV}^2$, $W \rightarrow 3.0 \text{ GeV}$ with the almost complete coverage of the final state phase space

- Key Motivation

Study the structure of all prominent N states in the mass range up to 2.0 GeV vs. Q^2 up to 12 GeV².*

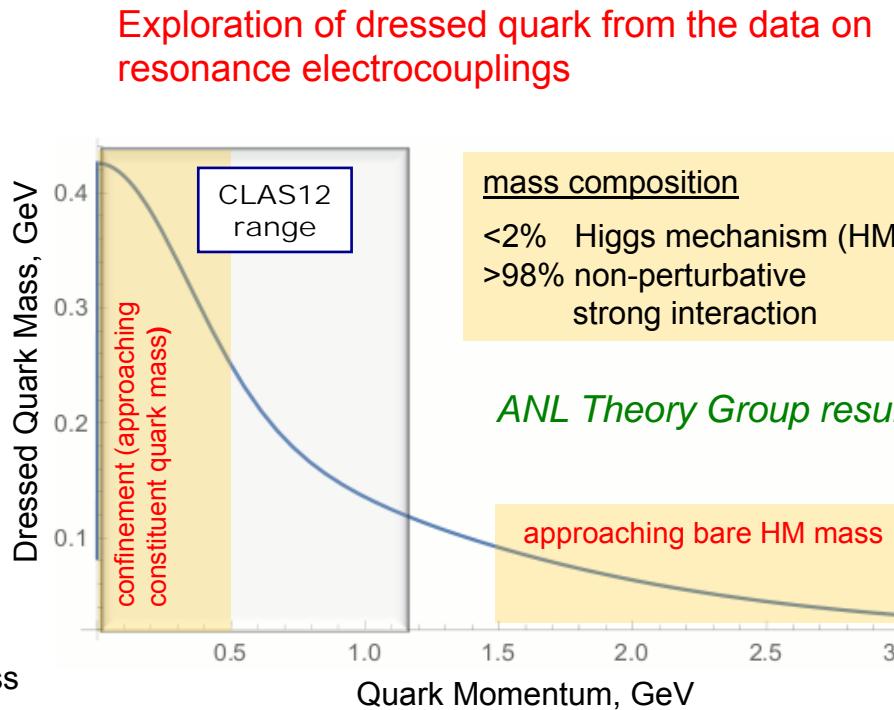
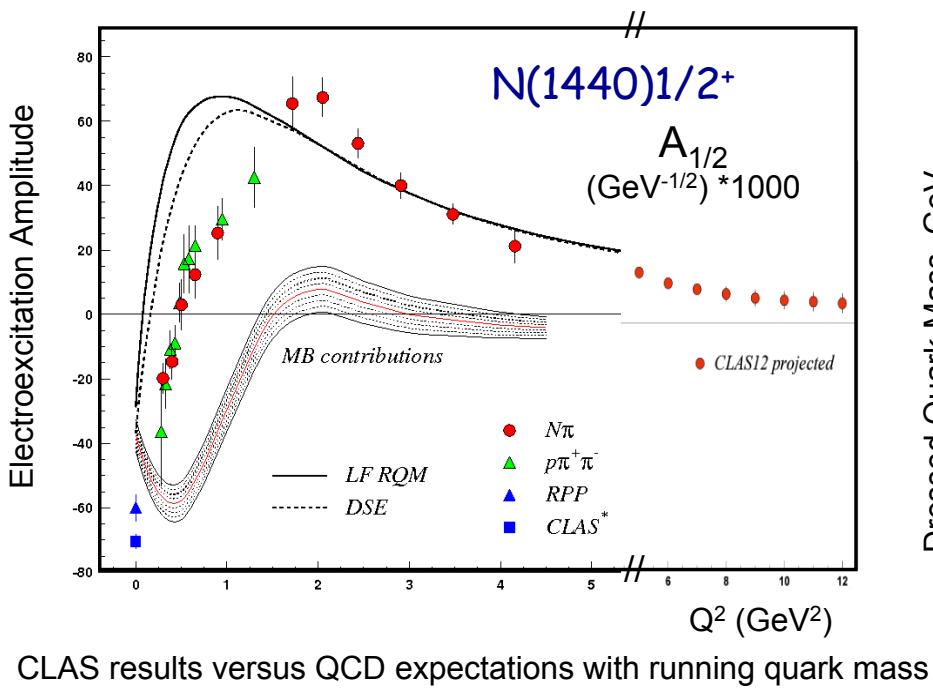
CLAS12 is the only facility foreseen in the world capable to map-out N quark core under almost negligible contributions from meson-baryon cloud*

The experiments will start in the first year of running with the CLAS12 detector.

Emergence of Hadron Mass and Quark-Gluon Confinement

N* electroexcitation studies with CLAS12 in Hall B at JLab will address the critical open questions:

What is the essence of confinement, how is >98% of visible mass generated,?



Conclusions and Outlook

- High quality meson electroproduction data from CLAS allowed us to determine the electrocouplings of most well-established resonances in mass range up to 1.8 GeV from analyses of π^+n , π^0p , ηp and $\pi^+\pi^-p$ electroproduction channels.
- Strong impact of the N^* studies on the QCD-based hadron structure theory:
 - a) first DSE evaluations of $\Delta(1232)3/2^+$ and $N(1440)1/2^-$ electroexcitation amplitudes starting from the QCD Lagrangian;
 - b) synergistic efforts between ANL Theory group and the Hall-B at JLAB conclusively demonstrated the feasibility to explore dressed quark mass function from the experimental results on elastic and transition $N \rightarrow N^*$ form factors.
- Electrocouplings of most resonances in the mass range up to 2.0 GeV will become available at $Q^2 < 5.0$ GeV 2 from independent analyses of the new CLAS data on $N\pi$ and $\pi^+\pi^-p$ electroproduction in the near term future.
- Future analyses the CLAS results on electrocouplings of orbital-excited resonances within the QCD-based framework will provide new insight to non-perturbative strong interaction dynamics addressing:
 - a) the environmental sensitivity of dressed quark mass function,
 - b) complexity of the dressed quark-gluon vertex and di-quark correlation,
 - c) shed light on the DCSB manifestation in the structure of chiral partner resonances,
 - d) emergence of MB-cloud from inner core of three confined quarks.

Conclusions and Outlook

- After 12 GeV Upgrade, CLAS12 will be only available worldwide facility capable to obtain electrocouplings of all prominent N^* states at still unexplored ranges of low photon virtualities down to 0.05 GeV^2 and highest photo virtualities ever achieved for exclusive reactions from 5.0 GeV^2 to 12 GeV^2 from the measurements of exclusive $N\pi, \pi^+\pi^-p$, and KY electroproduction.
- The expected results will allow us:
 - a) search for hybrid-baryons and other new states of baryon matter;
 - b) fully explore the transition to quark-core dominance and emergence of MB-cloud;
 - c) to map out the dressed quark mass function at the distance scales where the transition from quark-gluon confinement to pQCD regime is expected, addressing the most challenging problems of the Standard Model on the nature of >98% of hadron mass and quark-gluon confinement.
- Success of N^* Program with the CLAS12 detector at Jefferson Lab will be very beneficial for hadron physics community .