

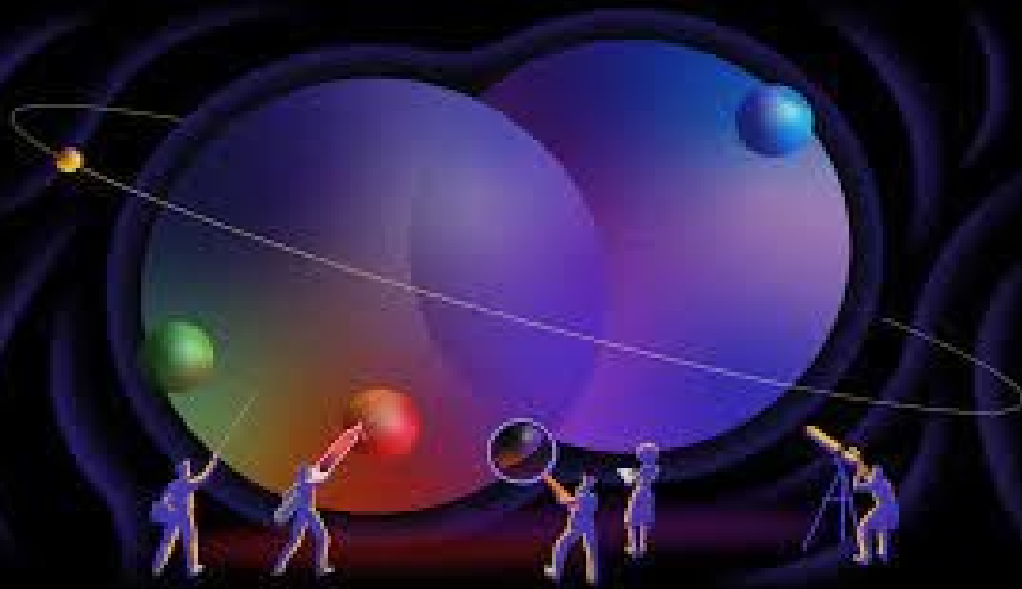
1. Цветовая Прозрачность —

*предсказание и определение,*

*теоретическое описание,*

*экспериментальные поиски.*

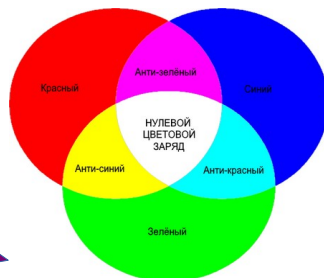
2. Поиск проявлений КХД в ядрах, с использованием явления цветовой когерентности, на установке CLAS12 лаб. Джефферсона.



Свойства, Определения, Предсказания

КХД

Адронизация



Ядро

Жёсткий зонд

Эксклюзивность

Конфайнмент

Цветовая прозрачность  
Color Transparency

PLC Точечноподобная  
конфигурация

SSC Конфигурация малого размера  
пре-адрон

мини-адрон

## КХД Свойства, Определения, Предсказания

$$L = i \sum_q \bar{\psi}_q^a (\nabla_\mu \gamma_\mu + im_q) \psi_q^a - \frac{1}{4} G_{\mu\nu}^n G_{\mu\nu}^n, \quad (1)$$

где

$$\nabla_\mu = \partial_\mu - ig \frac{\lambda^n}{2} A_\mu^n, \quad (2)$$

$$G_{\mu\nu}^n = \partial_\mu A_\nu^n - \partial_\nu A_\mu^n + g f^{nml} A_\mu^m A_\nu^l. \quad (3)$$

Здесь  $\psi_q^a$  и  $A_\mu^n$  обозначают кварковые и глюонные поля,  $a = 1, 2, 3$  и  $n, m, l = 1, 2, \dots, 8$  — цветовые индексы,  $\lambda^n$  и  $f^{nml}$  — матрицы Гелл-Мана и  $f$ -символы,  $m_q$  — токовые массы кварков,  $q = u, d, s, c, b, t$ .

Лагранжиан (1) содержит как члены, описывающие свободное движение, так и взаимодействие кварков и глюонов с силой связи, определенной величиной  $g$ .

*Уменьшение связи с ростом энергии было подтверждено на опыте*

$$\alpha_s = g^2/4\pi = 6\pi/(33-2n_f) \ln(p/p_0)$$



Важнейшим свойством КХД является **антиэкранировка заряда** — с ростом шкалы высоких энергий, константа связи сильного взаимодействия уменьшается с уменьшением расстояния между кварками и растёт при удалении кварков друг от друга. Первая из этих зависимостей **приводит к асимптотической свободе**: кварки, пролетающие на очень малых расстояниях друг от друга, можно в первом приближении считать невзаимодействующими.

Обратная сторона медали: **конфайнмент** кварков. Это значит, что кварки не могут удалиться друг от друга на расстояние, заметно превышающее некоторый радиус конфайнмента (**~1 фм**). Однако два бесцветных состояния могут удалиться друг от друга на произвольное расстояние, поскольку глюонные поля их не удерживают. В результате получается, что **в реальном мире наблюдаются не свободные кварки, а их бесцветные комбинации, которые и отождествляются с адронами.**

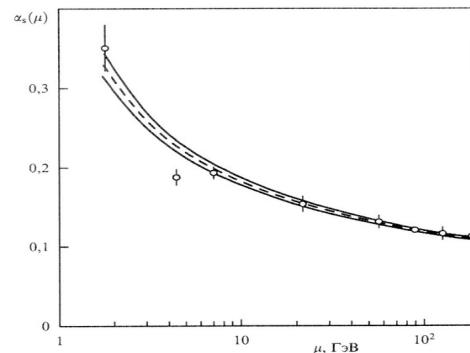
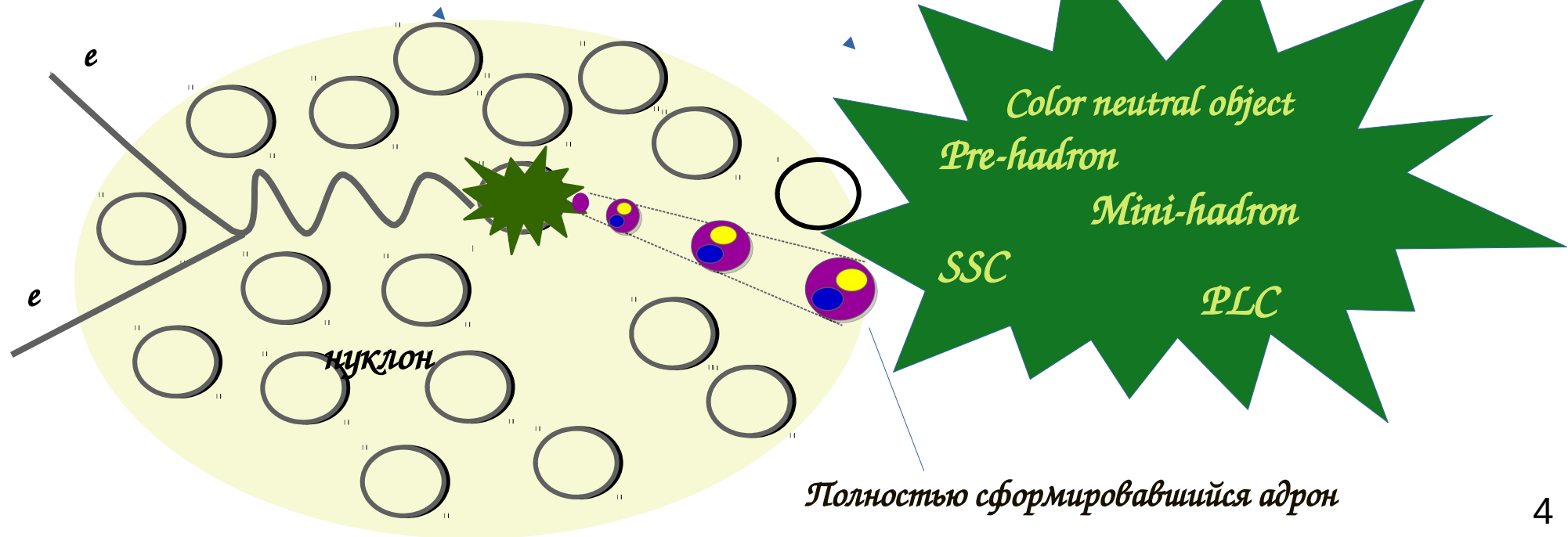


Рис. 1. Сила связи в КХД падает с ростом энергии.

# Цветовая прозрачность – предсказание, определение

» **КХД** предсказывает существование адронподобных конфигураций, которые при определенных условиях будут проходить через ядерную материю с сильно уменьшенным взаимодействием.

» Эти конфигурации имеют малый размер и их взаимодействие с ядром подавлено из-за небольшой пространственной протяженности их цветового поля. Это явление было названо **Цветовой Прозрачностью**.

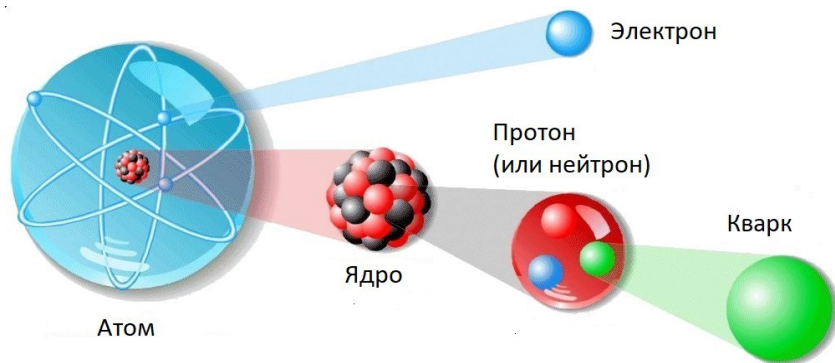


## Ядро, Жёсткий зонд, Эксклюзивность

## Ядро – природная лаборатория

Для выявления эволюции во времени элементарных конфигураций волновой функции адрона может быть использовано ядро, - время, необходимое кварку, чтобы пролететь типичные для замкнутых систем расстояния, составляет порядка **1 фм/с**. С учетом релятивистского фактора замедления времени временная характеристика становится порядка нескольких фм/с.

*Единственной средой, доступной в этом масштабе, является ядро.*



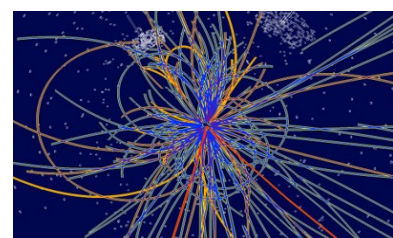


# Ядро, Жёсткий зонд, Эксклюзивность

Жёсткий зонд

&

Эксклюзивность



☛  $Q^2 \gg 1 \text{ ГэВ}$  - жёсткие адронные реакции, -  
рассеяние происходит между отдельными составляющими  
быстро движущихся адронов – **партонами**.

☛  $Q^2 \ll 1 \text{ ГэВ}$  - эффективная адронная теория.

- Качественно наличие жесткого зонда позволяет  
создавать кварк-глюонные конфигурации малых  
размеров, взаимодействия которых можно описать  
в **pQCD**.

- Одна из важных особенностей жестких реакций, -  
**факторизация**, - возможность разделить  
пертурбативную и непертурбативную части  
взаимодействия.

- Эксклюзивность позволяет  
контролировать кинематику начального и  
конечного состояния поотдельности.

Разработанный в **КХД** формализм описания  
глубоких эксклюзивных реакций сделал возможным  
изучение структуры адронов с точки зрения  
взаимодействующих кварков и глюонов с помощью  
**Обобщенных Партоновых Распределений (GPD)**. Здесь  
взаимодействие **факторизуется** на часть жесткого  
рассеяния (точно вычисляемую в **pQCD**) и  
непертурбативную часть структуры нуклона  
(параметризованную через **GPD**).

# ЖЁСТКИЙ ЗОНД vs. Среда

Жесткие эксклюзивные процессы играют ключевую роль в КХД.

## Исследования

- динамика конфайнмента **КХД**:

- процесс адронизации (**CP**-распространение цвета и фрагментация);

- цветовую прозрачность, **CT** (создание и эволюция адронов

малого

размера)

- эффект **EMC** - модификация кварковых распределений в среде ;

- **SRC** - доступ к структуре короткодействующих корреляций;

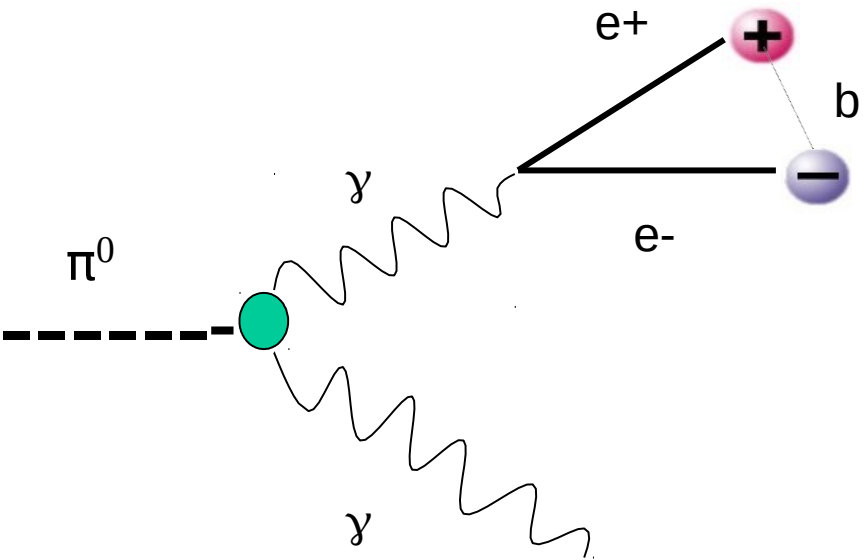
- выполнить трехмерное картирование — ядерных **GPD** и **TMD**

А. Lariouev & M. Strikman, *Particles* 3 (2020)  
K. Gallmeister & U. Mosel, *Nucl. Phys.* A 801  
(2008)



# Цветовая прозрачность – предсказание, определение

## Экранирование заряда в КЭД



Последствия экранирования заряда в КЭД наблюдал Перкинс в 1955 году.

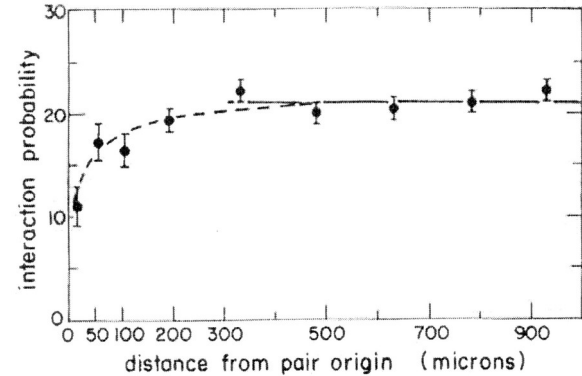


FIGURE 1 Interaction (ionization) probability vs. distance from the origin of the  $e^+e^-$  pair.

200 ТэВ  $\pi^0$  космических лучей наблюдаемые в эмульсии

Пара противоположно заряженных частиц взаимодействует в среде с дипольным сечением, пропорциональным  $b^2$  (Чудаков.)



**Цветовая прозрачность – предсказание, определение**

*КХД, 1982 г.-Бродский, Мюллер*

*Цветовое экранирование: сжатие и замораживание*

*КХД правило подсчёта кварков:*

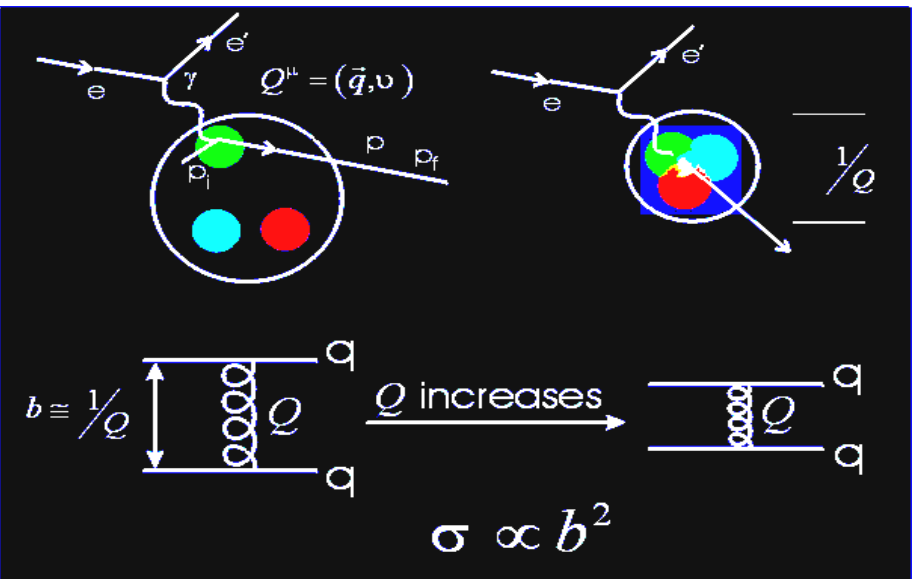
- упругий форм-фактор адрона с  $n_f$  составляющими масштабируется как

$$F(Q^2) \sim 1/(Q^2)^{n_f-1}$$

$N_f = 3$  для протона

при больших  $Q^2$  амплитуда рассеяния на адроне содержащем больше минимального числа составляющих, подавляется степенями  $Q^2$

-Чтобы реакция была упругой, все партоны в волновой функции протона должны располагаться в одном и том же поперечном интервале  $b \leq 1/Q$ ,



*SSC - простая конфигурация волновой функции адрона, содержащая только валентные кварки, которые сблизилась, образуя цветонейтральную систему небольшого размера.*

*Сечение взаимодействия  $\sigma^{SSC} \sim \pi b^2$  , - следствие цветового экранирования и калибровочной инвариантности в модели двухглюонного обмена (nКХД)*

## При условия Цветовой Прозрачности

- » Создание в жёсткой эксклюзивной реакции конфигураций малого размера (**SSC**);
- » **SSC** испытывают ослабленное взаимодействие со средой;

### Цветовая Прозрачность при промежуточных энергиях:

- приближение "замораживания" использовать нельзя;
- **SSC** претерпевает эволюцию во времени;
- в системе покоя **SSC** расширяется с характерным временем  $\tau_0 \approx 1\text{fm}$ ;
- если предположить, что объект движется с высокой энергией  $E$  в лаборатории, то из-за эффекта замедления времени это время станет  $\tau = E/m\tau_0$ .
- оценки показали, что для достаточно больших энергий  $\tau$  достаточно велико, и объект может покинуть ядро, оставаясь достаточно маленьким, чтобы избежать взаимодействия в конечном состоянии, - появляется **CT**.

» **SSC** должен покинуть ядро до расширения ➡ **выживает наименьший!**



## БИБЛИОГРАФИЯ СТ

- Требования необходимые для возникновения в ядре явления цветовой прозрачности установили **Мюллер и Бродский** на основе пертурбативной КХД;
- Важность расширения PLC со временем была обнаружена **Ферраром, Дженнингсом и Мюллером**;
- Идея о том, что цветовая нейтральность приводит к тому, что сечение взаимодействия цветковых синглетных конфигураций с адронами пропорционально квадрату радиуса области, занимаемой цветом, была высказана **Лоу, Нусиновым, Гунионом и Сопером** на основе предположения, что в адрон-адронном взаимодействии высоких энергий преобладает обмен двумя глюонами.
- Непертурбативный механизм подавления взаимодействия PLC с адронами был предложен **Франкфуртом и Стрикманом** на основе кварковых моделей.



## Экспериментальный поиск цветовой прозрачности

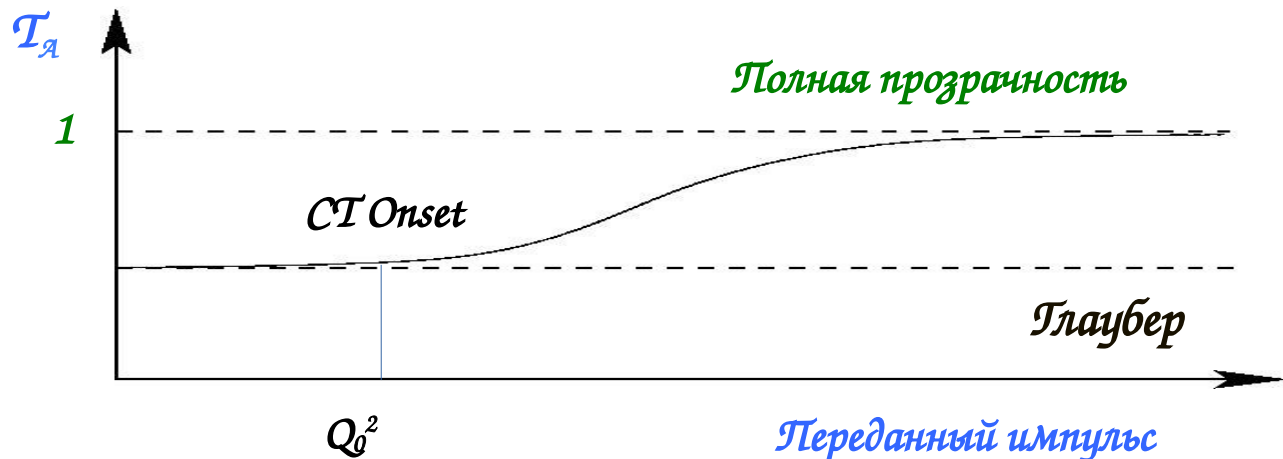
Подход к **CT** зависит от:  $Q^2$  (насколько сильно сжата конфигурация);  
энергии  $\nu$  (как долго конфигурации распространяются до расширения до адрона)  
и **образовавшегося адрона** (преобладание конфигураций малого размера в адроне).

Отличительным знаком Цветовой Прозрачности является увеличение "ядерной" прозрачности среды,  $T_A$  в зависимости от передачи импульса.

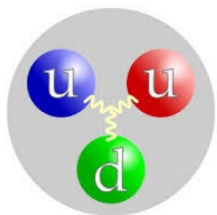
$$T_A = \frac{\sigma_A}{A \sigma_N}$$

$\sigma_N$  сечение рассеяния на свободном нуклоне

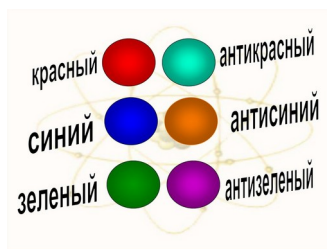
$\sigma_A$  сечение рассеяния на ядре



# Экспериментальный поиск цветовой прозрачности



*Baryon*



*Meson*

$\mathcal{A}(p, 2p)$  *BNL*

$\mathcal{A}(e, e'p)$  *SLAC and JLab*

$\mathcal{A}(\pi, di\text{-jet})$  *FNAL*

$\mathcal{A}(\gamma, \pi^- p)$  *JLab*

$\mathcal{A}(e, e'\pi^+)$  *JLab*

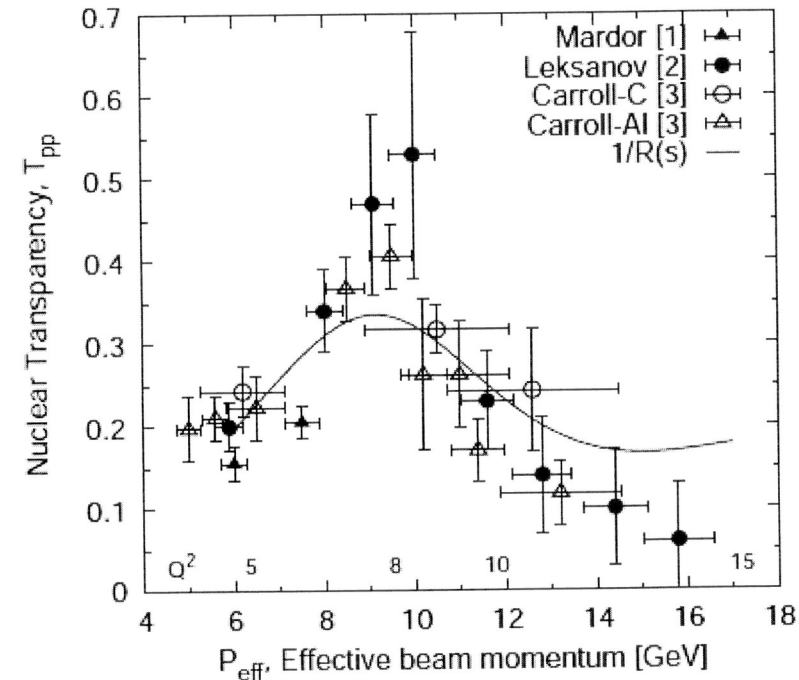
$\mathcal{A}(e, e'p^0)$  *DESY and JLab*

# Поиск цветовой прозрачности в барионном секторе

## ВНЧ, Квазиупругое $A(p, 2p)$

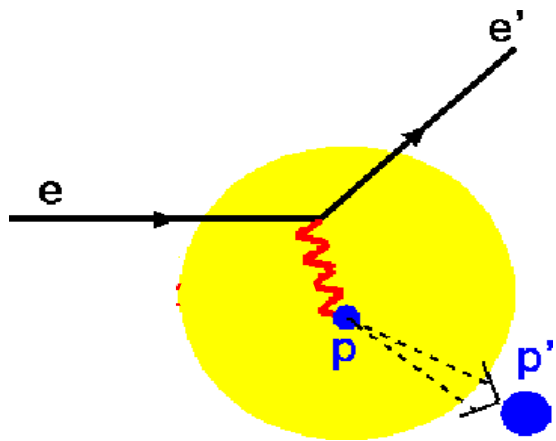
- » Рост прозрачности в диапазоне 6 – 9,5 ТэВ соответствует прогнозам СТ, однако не может быть воспринято однозначно как сигнал.
- » Падение при высоких импульсах 9,5 – 12 ТэВ:
  - ядерная фильтрация мягких амплитуд, возникающих в результате радиационных процессов более высокого порядка (механизм Ландсгофа), (J. Ralston PRL 1988);
  - пересечение порога новых резонансных (очарованных кварков) многокварковых состояний. S. Brodsky PRL 1988

Зависимость ядерная прозрачности для  $^{12}\text{C}$  и  $^{27}\text{Al}$  от эффективного импульса пучка.

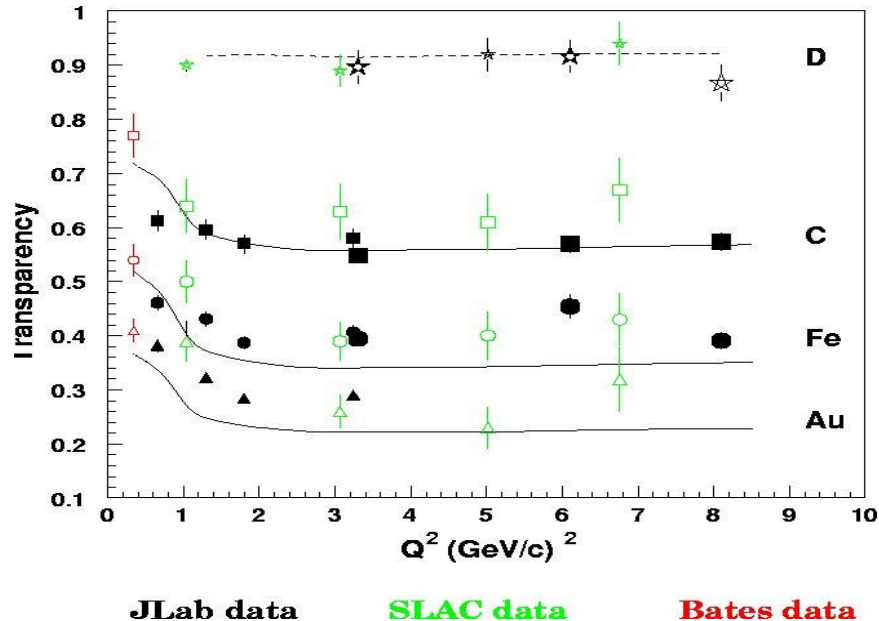


A. Leksanov et al. PRL 2001

# Поиск цветовой прозрачности в барионном секторе



## Квазисвободное $A(E, E')$ рассеянии



нет свидетельств  $CT$

Красные открытые символы — измерения **Bates** [G. Garino et al., PRC 45 (1992) 780].

Незакрашенные зеленые символы взяты из экспериментов **SLAC** [N. C. R. Makins et al., PRL 72 (1994) 1986  
T. G. O'Neill et al., PL 351 (1995) 87]

Черные сплошные символы — это измерения **JLab** [K. Garrow et al., PRC 66 (2002) 044613].

Сплошная кривая для углеродной мишени представляет собой **модель Pandharipande et al** [].

Кривые для железа и золота построены по углеродным расчетам

Традиционные расчеты ядерной физики дают хорошее описание

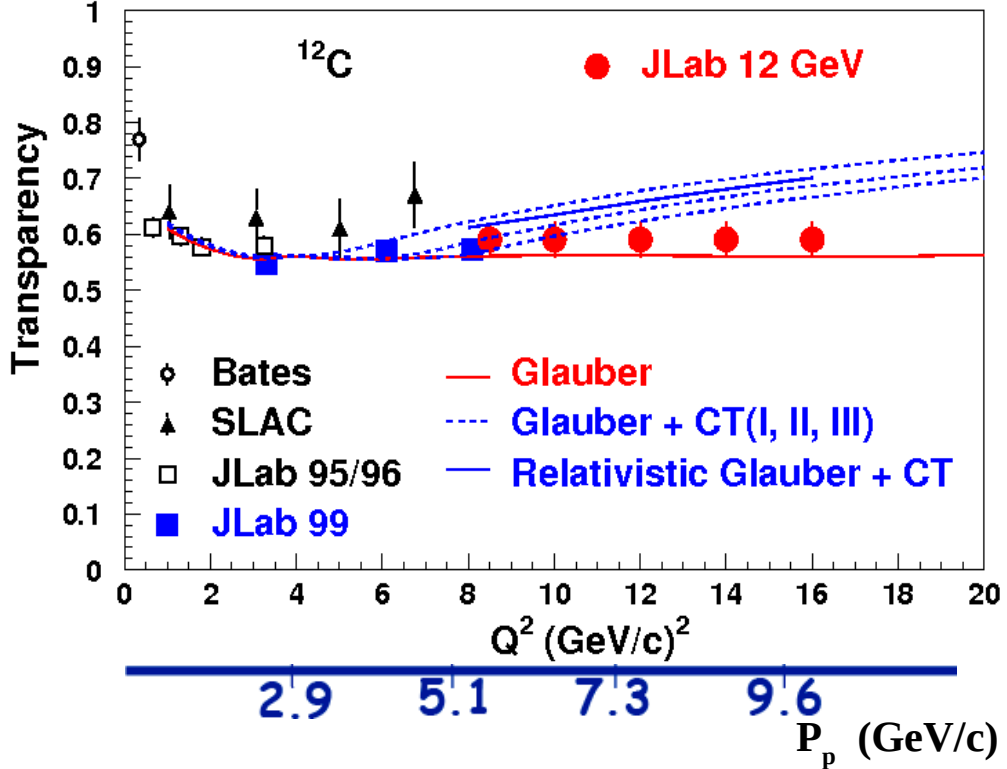
# Поиск цветовой прозрачности в барионном секторе

## Квазисвободное $A(e, e'p)$

Измерялось сечение выбивания протонов, чтобы определить ядерную прозрачность протона для 5 значений  $Q^2$  (8, 10, 12, 14 и 16,4) (ТэВ/с)<sup>2</sup>

- Цель: 1. интерпретировать рост, наблюдаемый в данных  $BNL A(p, 2p)$  при  $P_p = 6-9$  ТэВ/с;
- 2. Поиск начала  $CT$  в трехкварковой системе.

E12-06-107, 2018 г., Зал C, 11 ТэВ



Извлеченные результаты исключают какие-либо эффекты  $CT$

(D. Bheturwal et al. PRL 126 (2021))



- »» Малые размеры более вероятны для систем из двух кварков, таких как пионы и  $\rho^0$ -мезон, чем для протонов;
- »» в системе  $q(\text{анти})q$  начало СТ ожидается при более низком  $Q^2$ .

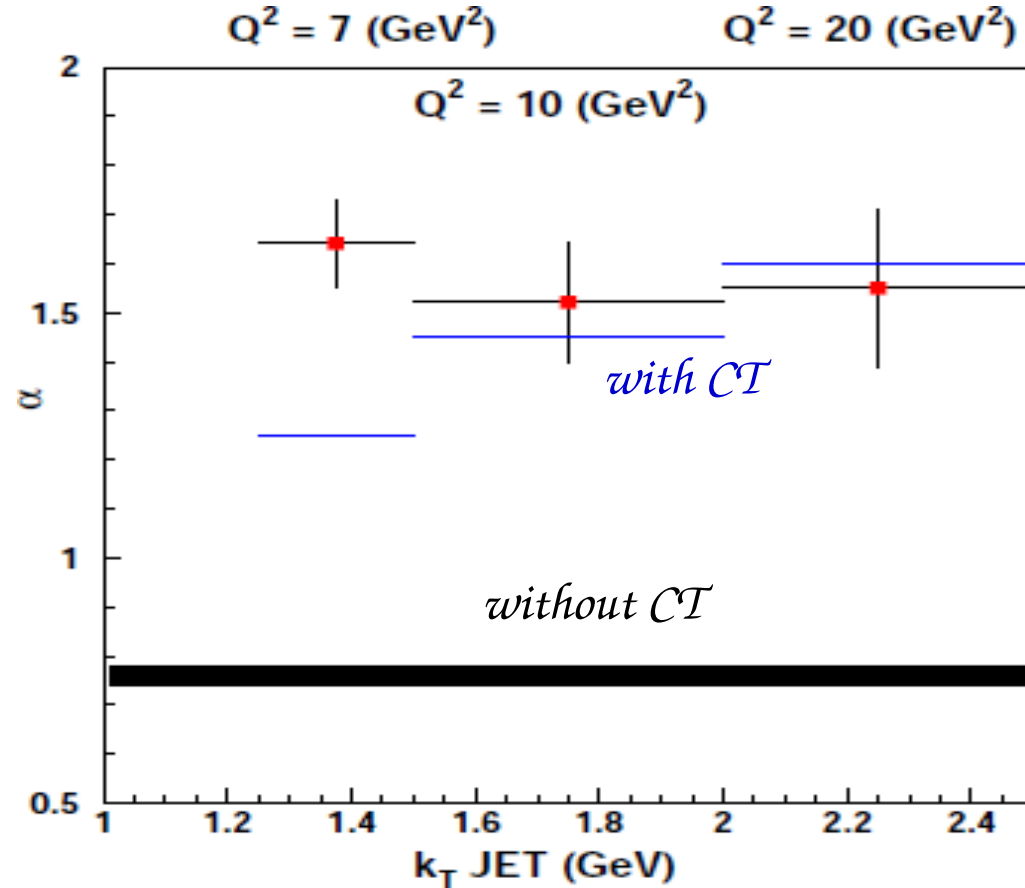
*B. Blattel et al., PRL 70, 896 (1993)*

# Поиск цветовой прозрачности в мезонном секторе

*FNAL, E791,  $\pi$  (500 GeV/c) + C (Pt)  $\rightarrow$  2 jets*

Измерялась  $\mathcal{A}$ -зависимость дифракционной диссоциации на две струи отрицательных пионов с энергией **500 ТэВ**, когерентно рассеивающихся на **углеродных** и **платиновых** мишенях. Сечение на ядро было параметризовано как  $\sigma = \sigma_0 \mathcal{A}^\alpha$  и дало результат  $\alpha \sim 1,6$ , что согласуется с теоретическими предсказаниями, включающими **CT**, и сильно отличается от типичного  $\alpha = 2/3$ , параметризующего поперечное сечение инклюзивного  **$\pi$ -ядерного** взаимодействия.

$$\sigma_{\mathcal{A}} = \sigma_0 \mathcal{A}^\alpha$$

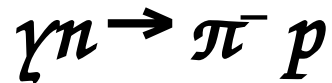


*Aitala et al., PRL 86, 4773 (2001)*

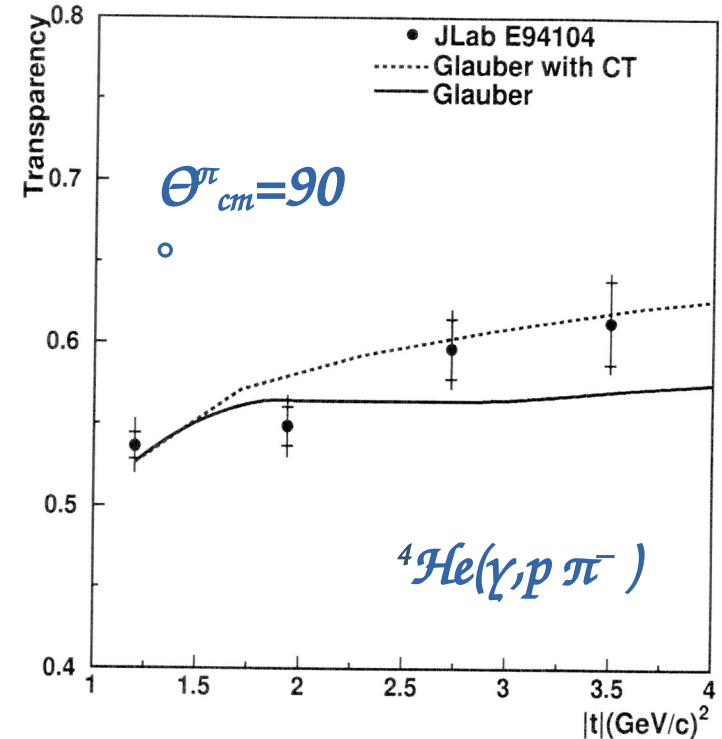
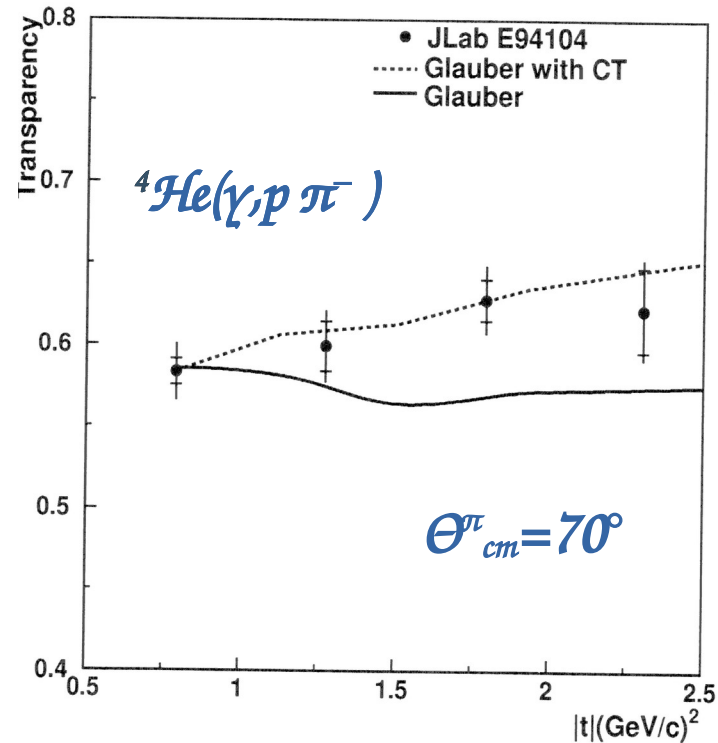
# Поиск цветовой прозрачности в мезонном секторе

D. Dutta, et al., Phys. Rev. C 68, (2003)

E94104, Hall A, JLab



$E_{beam} = 1,6 - 4,5 \text{ GeV}$



» Первые измерения по изучению CT в реакциях фоторождения ;

» Из-за плохой статистической точности был сделан вывод, что для подтверждения этого наблюдения необходимы дальнейшие измерения.

# Поиск цветовой прозрачности в мезонном секторе

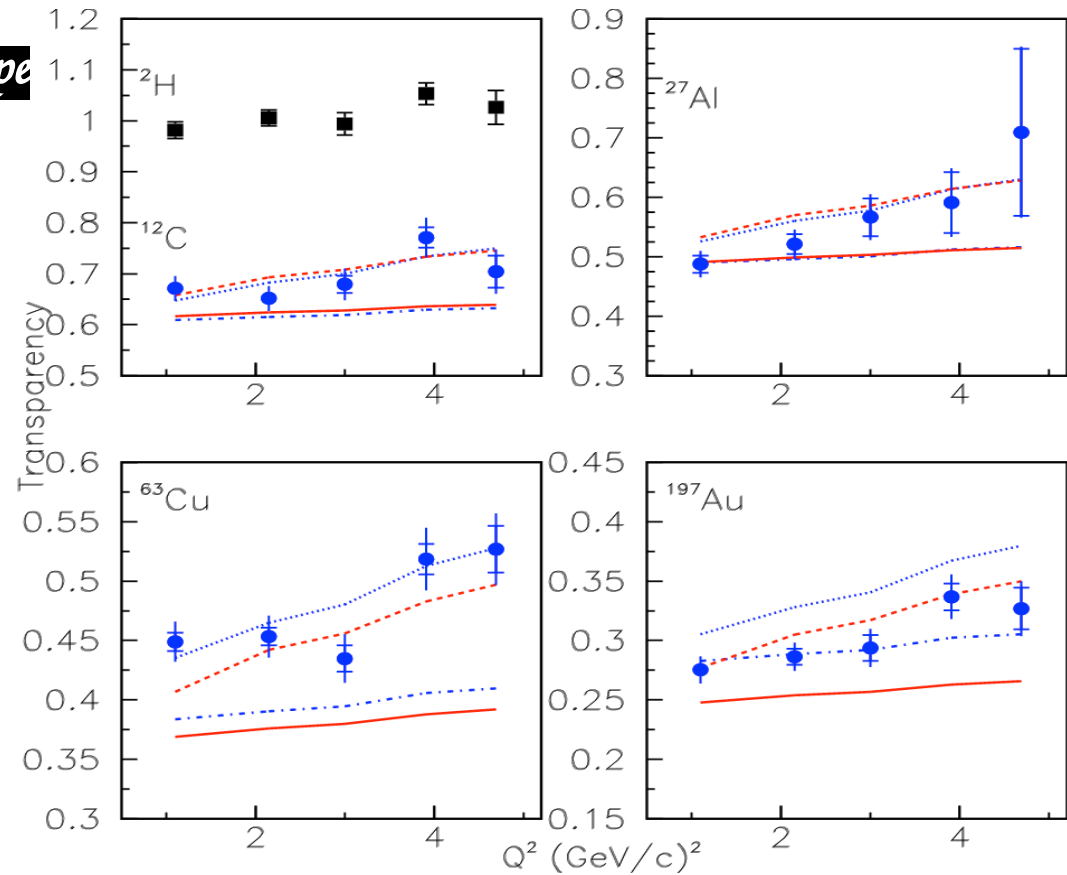
$A(e, e'\pi^+)$ , Jlab, Hall C, 2004 г.

-  $E_{beam}$ : 4 – 5.8 (TeV);  $Q^2$ : 1,1 – 4,7 (GeV/c)<sup>2</sup>;

- Ядерная прозрачность была извлечена как супер-отношение ( $\sigma_A / \sigma_N$ ) из данных к модельным расчётам электророждения пионов на ядрах без  $\pi$ - $n$  взаимодействий в конечном состоянии;

- Результаты зависимости  $A$  и  $Q^2$  от прозрачности ядер показали положительный наклон, что качественно согласуется с теоретическими предсказаниями, включающими эффекты СТ.

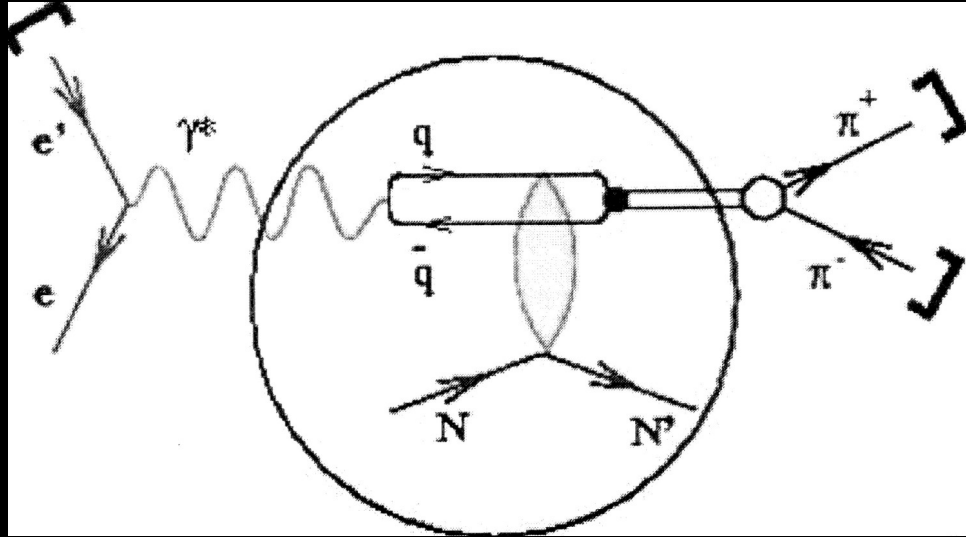
B. Clasie et al. PRL 90, 10001 (2007), X. Qian et al., PRC 81, 055209 (2010)



Сплошные и пунктирные линии — расчеты Глаубера и Глаубера плюс СТ соответственно.

Аналогично, точно-пунктирные и точечные линии представляют собой расчеты Глаубера и Глаубера плюс СТ соответственно. Эти расчеты также включают эффект короткодействующих корреляций (SRC).

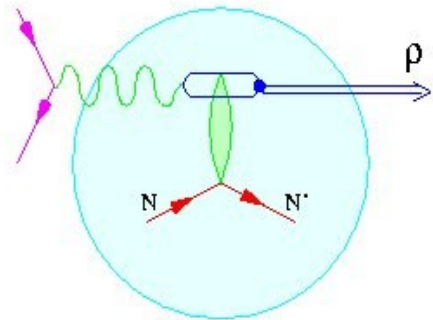
# Поиск цветовой прозрачности в **мезонном** секторе



Эксклюзивное лепто-рождение  $\rho^0$  мезона.

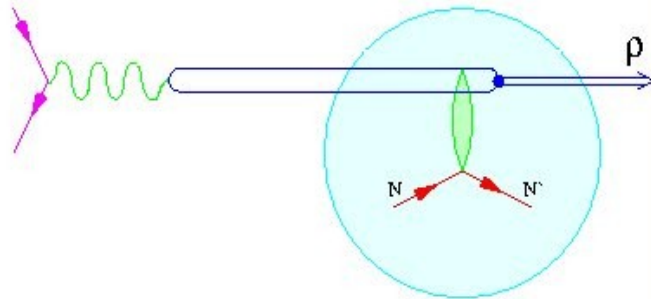
# Исследование $CT$ в эксклюзивном дифракционном электроорождении $\rho^0$ - мезона

Electromagnetic ISI



Small  $lc$

Hadronic ISI



Large  $lc$

Поиск  $CT$  чувствителен к двум временным шкалам, которые могут повлиять на измеренную сигнатуру.

1. время связанное с длиной распространения пары  $q\bar{q}$  -длина когерентности:  $lc = 2v/(Q^2 + M_{q\bar{q}}^2)$   
 $v$  - энергия виртуального фотона в лаб. сис,  
 $Q^2$  - квадрат его массы;  $M_{q\bar{q}}$  масса пары  $q\bar{q}$ .

Эффект, длины когерентности,  $CL$ , может имитировать сигнал  $CT$ .

2. время формирования,

$$\tau_f = 2v/(M_{\rho^2} - M_{\rho^0}^2),$$

$M_{\rho^2}$  - масса первого орбитального возбуждения  $\rho$ -мезона;

$M_{\rho^0}$  - масса его основного состояния.

$\tau_f$  должно быть больше радиуса ядра, чтобы подавить взаимодействия в конечном состоянии.

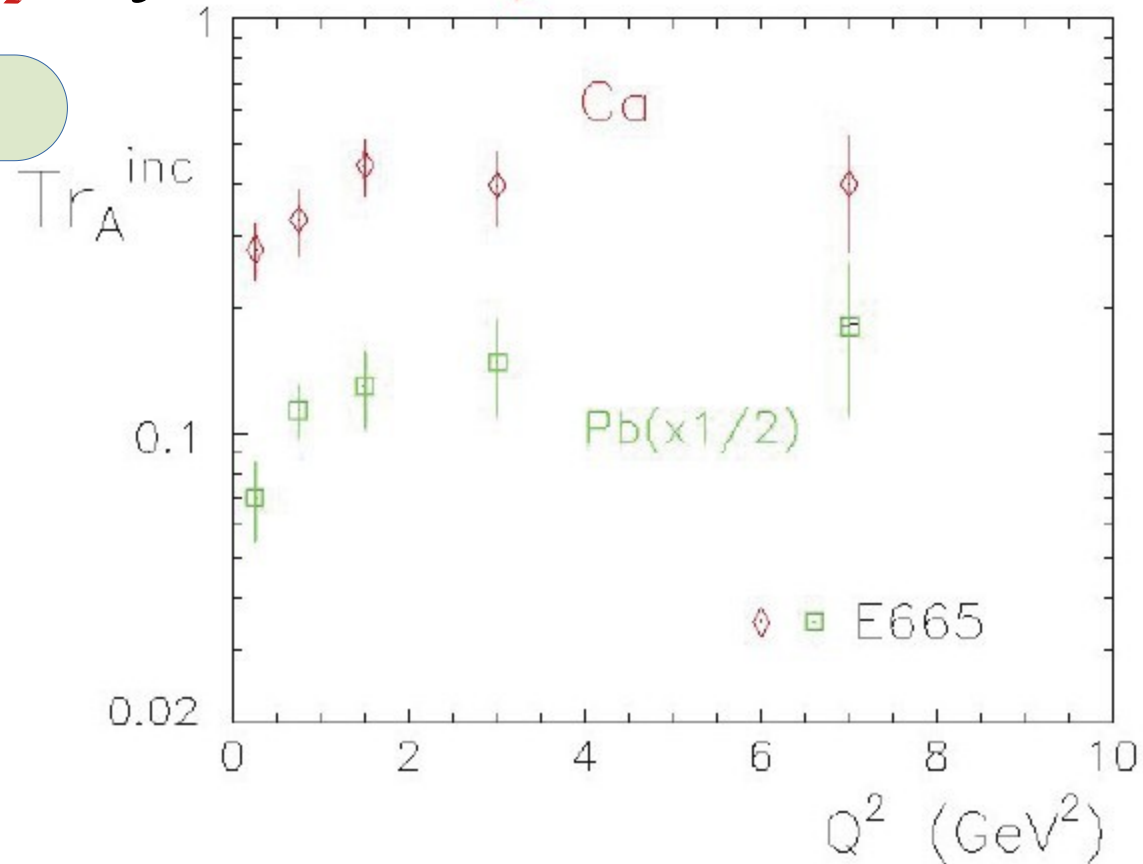
# Поиск цветовой прозрачности в мезонном секторе

FNAL, E665

Эксклюзивное дифракционное лепторождение  $\rho^0$ -мезона:

$E_\mu = 470 \text{ GeV}$

Из-за отсутствия хорошей статистической точности небольшое увеличение прозрачности ядер в зависимости от  $Q^2$  было наводящим на размышления, но безрезультатным в отношении эффектов **CT**.



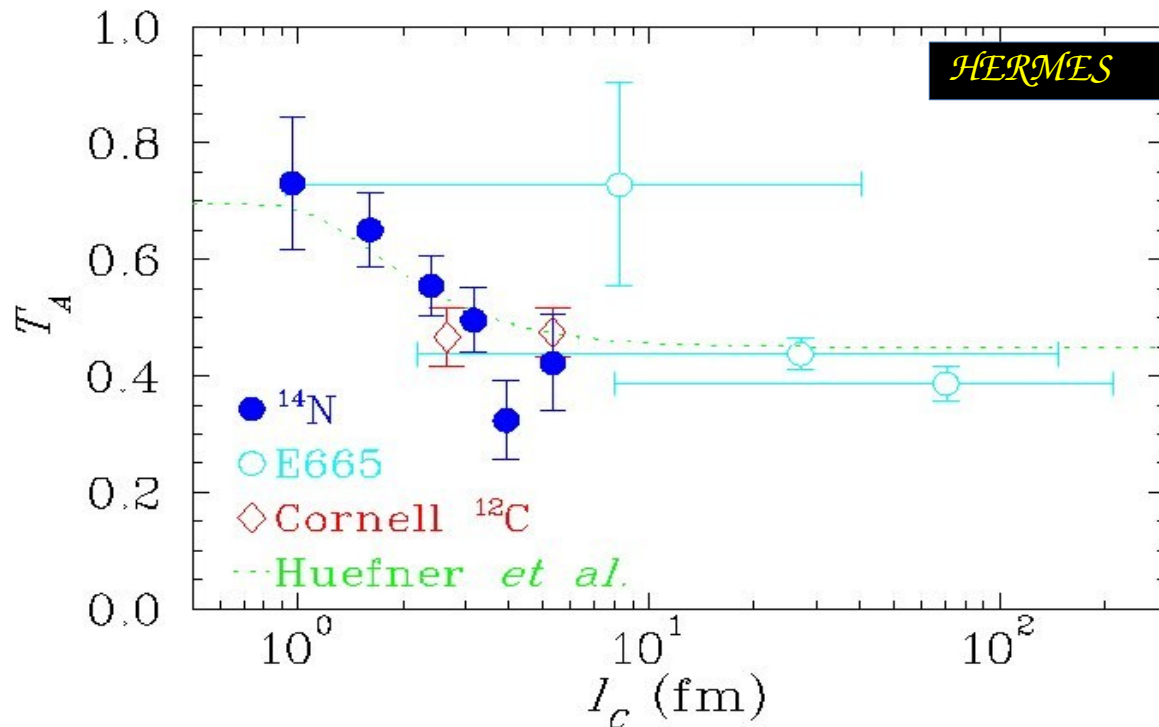
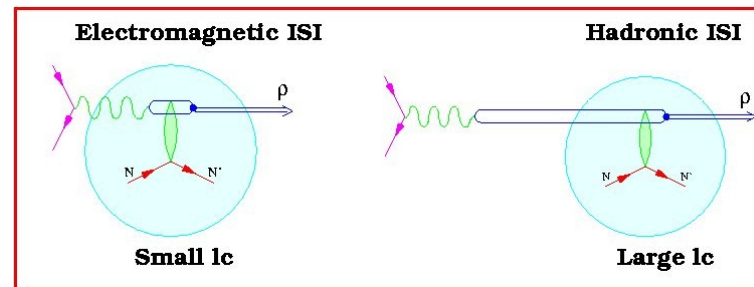
Adams et al. PRL 74, 1525 (1995)

# Поиск цветовой прозрачности в мезонном секторе

☛ Характерная черта  $CT$  :  
увеличение  $T_A$  с  $Q^2$ ,

☛ эффект  $CL$ ,  
 $lc = 2v / (M^2 + Q^2)$ :  
увеличение  $T_A$  с  $Q^2$ .

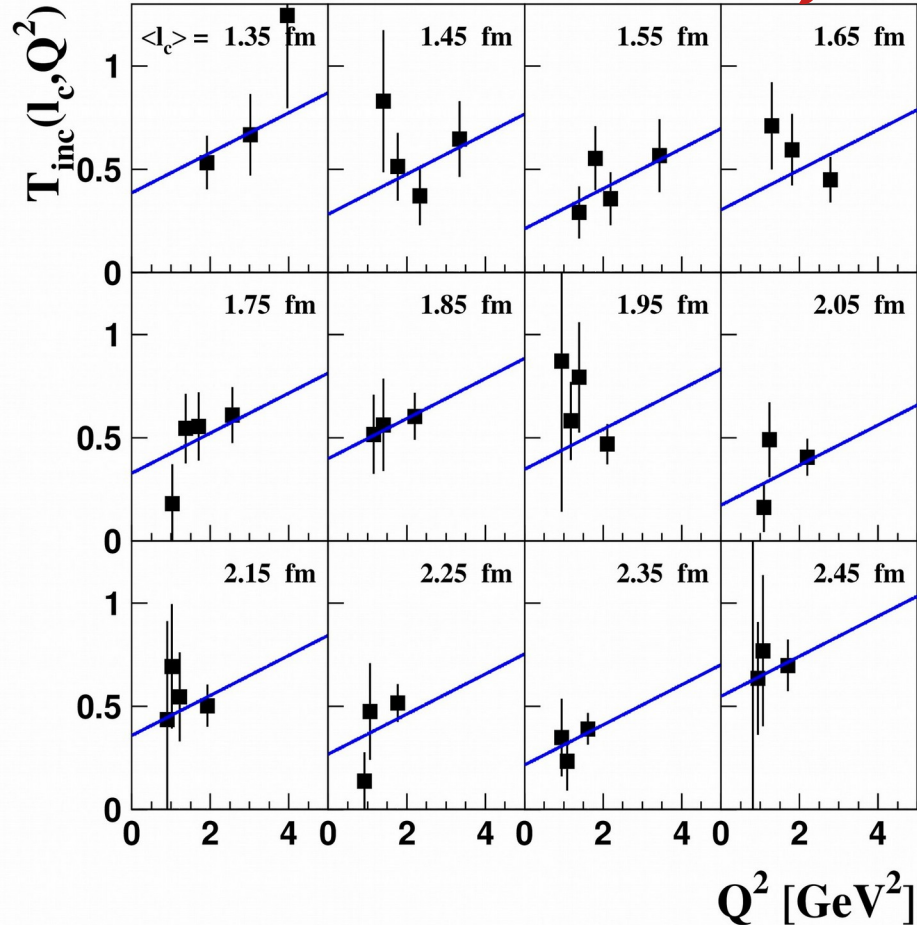
⇒ Чтобы исключить  
 $CL$  зависимость, необходимо  
 $T_A$  от  $Q^2$  измерять при малых  
или фиксированных  $lc$ .





Hermes

$E_{e^+} = 27.5 \text{ GeV}$



- эффекты СТ исследовались в когерентном и некогерентном рождении  $\rho^0$ ;
- использовались мишени  $^2\text{H}$  и  $^{14}\text{N}$ ;
- зависимость  $Q^2$  от  $T_A$  исследовалась при фиксированных  $l_c$ .
- для извлечения общего наклона  $Q^2$ -зависимости как для когерентного так и для некогерентного лепторождения  $\rho^0$ , использовалось синхронное линейное фитирование по всем  $l_c$  бинам.

$$T_{inc}(l_c, Q^2) = P_0 + P_1 Q^2$$

$$P_1 = (0.089 \pm 0.046_{stat} \pm 0.008_{sys}) (\text{GeV}^2)$$

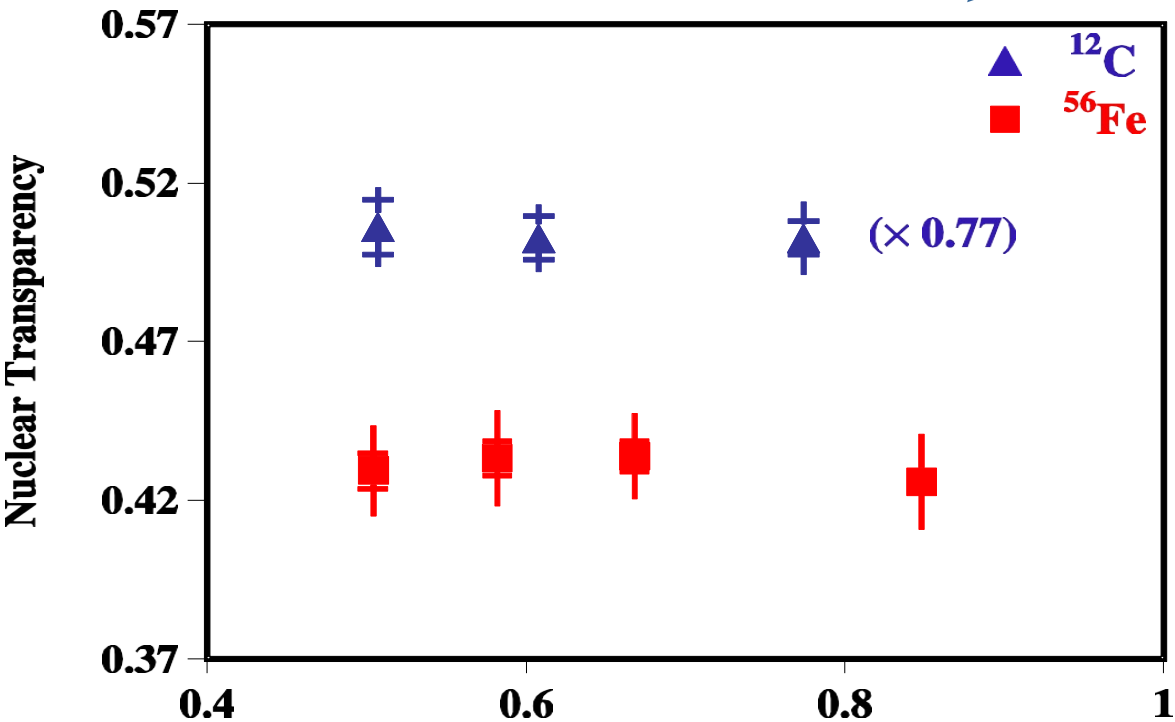
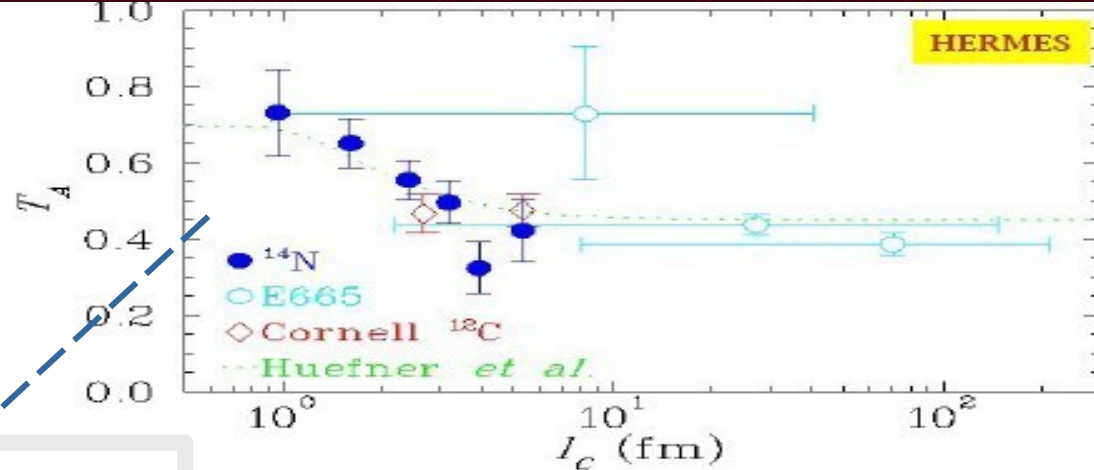
Общий наклон  $Q^2$ -зависимости трактовался как положительный сигнал СТ, который хорошо согласовывался с существующей теоретической моделью

Korbeliovich, et al. Phys. Rev. C 2002, 65, 035201.

# Зависимость $l_c$ от $T_A$

## Длина когерентности

$$l_c = 2v / (\mathcal{M}^2 + Q^2)$$



## Ядерная прозрачность

$$T^{\rho_A} = \mathcal{N}^{\rho_A} / \mathcal{N}^{\rho_D} \times (\rho_D \times t_D) / (\rho_A \times t_A)$$

$\rho_D$  и  $\rho_A$  - плотности мишеней

$t_A$  - толщина твёрдой мишени

$t_D = 2$  см, длина жидкой мишени

# CT в эксклюзивном дифракционном лепторождении $\rho^0$ – мезона на CLAS6

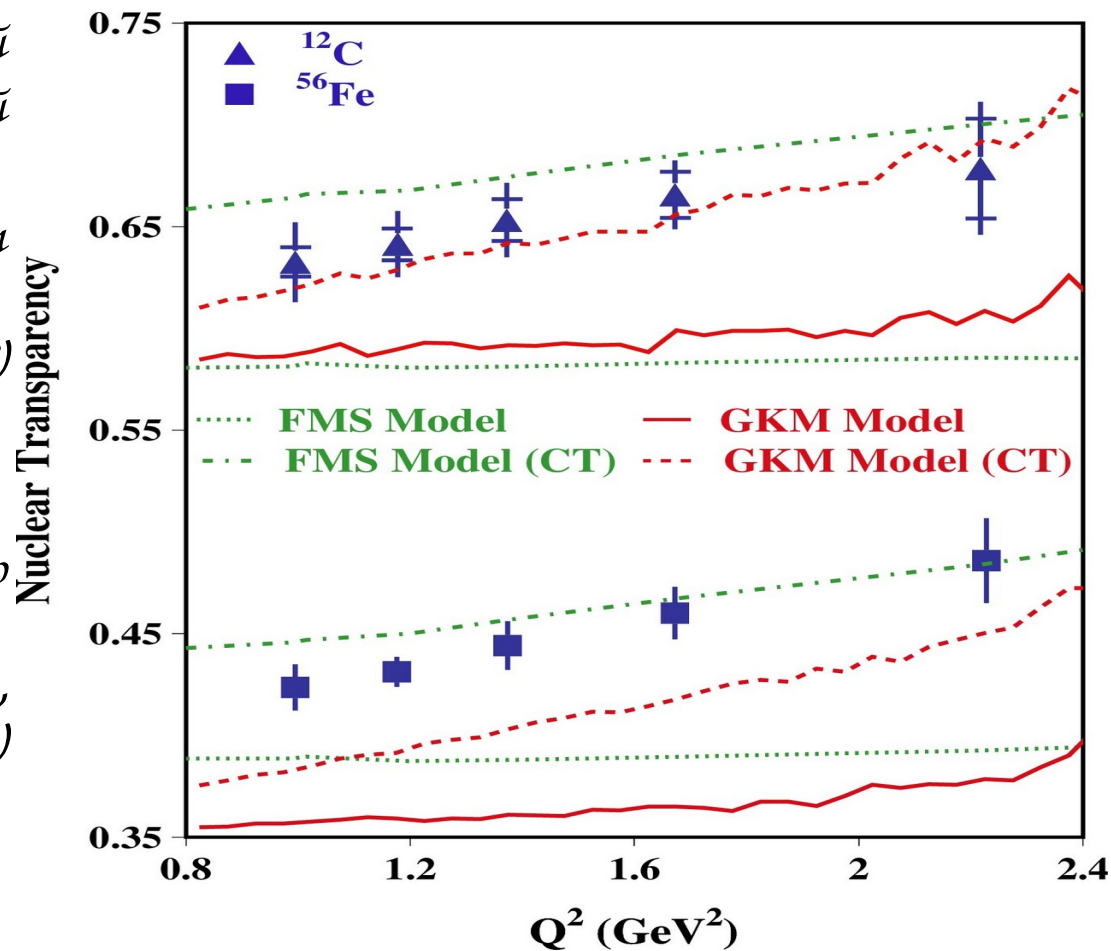
**FMS:** полуклассический глауберовский формализм, основанный на модели квантовой диффузии.

штрих-пунктирная кривая включает эффекты CT, FSI и поглощение  $p_0$ .

Frankfurt, Miller & Strikman, PRC 78 (08)

**GKM:** Пунктирная кривая транспортной модели (GiBUU) включает эффекты CT для  $\rho_0$ , полученного только в режиме DIS!

Gallmeister, Kaskulov & Mosel, PRC 83, 015201 (2011)



L. El Fassi et al. PLB 712, 2012



**Физика цветовой прозрачности включает в себя полное пересечение идей и методов физики элементарных частиц и ядерной физики.**

**Это может стать эффективным методом исследования физики конфайнмента и спонтанно нарушенной киральной симметрии в КХД.**

# HAPPY NEW YEAR 2024!

