

# Использование ЭМС-эффекта для вычисления ВФКЛ интерсепта $\omega$

Егембердиев Р.К.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Группа Б23-182

Научный руководитель: к.ф.-м.н. М.Н. Алфимов

# Зависимость сечения

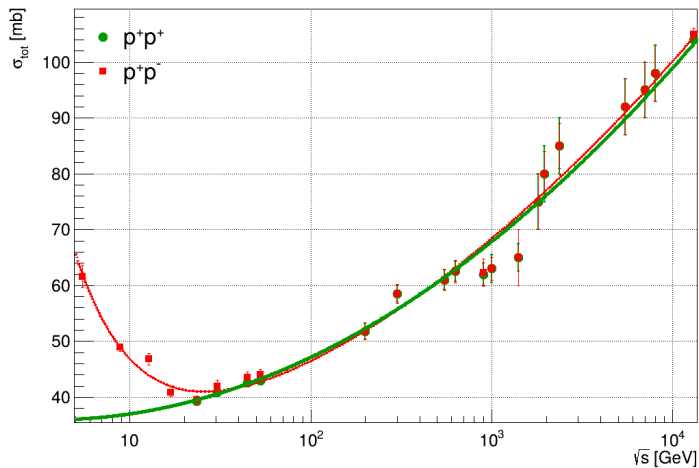


Рис.: Полные сечения  $pp$  и  $p\bar{p}$

## Проблемы и подход

- Расходимости  $\ln(1/x)$  при  $s \geq Q^2 \geq \Lambda_{\text{QCD}}$
- Громоздкость вычислений после древесного порядка
- **БФКЛ-подход** (Балицкий—Фадин—Кураев—Липатов) позволяет обойти эти проблемы

## Уравнение БФКЛ

$$\frac{\partial \mathcal{F}(k, k', Y)}{\partial Y} = (\mathcal{K} \otimes \mathcal{F}(k, k', Y))$$

$\mathcal{F}$  — глюонная плотность,  $Y = \ln(s/s_0)$  — быстрота,  $\mathcal{K}$  — ядро БФКЛ

## Интерсепт $\omega$

В LLA-приближении решение даёт:

$$\mathcal{F}(Y, k, k') \sim \frac{\exp(\omega Y)}{\sqrt{k^2 k'^2 Y}} \exp\left(-\frac{\ln(k/k')}{Y}\right)$$

$$\omega = 1 + \sum_{n=0}^{\infty} \omega_n \left(\frac{\alpha_s N_c}{\pi}\right)^{n+1}, \quad N_c = 3$$

## Амплитуда и оптическая теорема

BFKL-уравнение даёт амплитуду рассеяния вперед:

$$\mathcal{A}(s) \sim s^\omega, \quad \sigma_{\text{tot}} = \frac{\text{Im } \mathcal{A}(s)}{s} \sim s^{\omega-1}$$

# Померон и глюонная лестница

## Квантовые числа померона

$$J^{PC} = 0^{++}$$

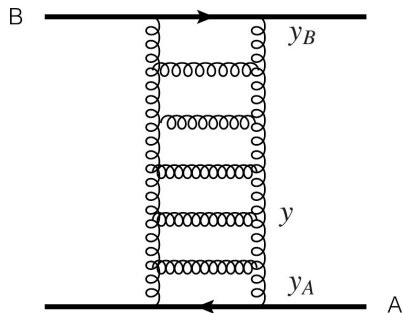


Рис.: Глюонная лестница БФКЛ

## Основные свойства померона

- **Универсальность:** один и тот же померон описывает рост полных сечений  $pp$ ,  $p\bar{p}$ ,  $\pi p$ ,  $Kp$ ,  $\gamma p$  и структурных функций  $F(x)$  при малых  $x$  так как его квантовые числа равны 0.

# Структурные функции

## Общий вид

Протон, как и другие адроны, является составной частицей. Вводятся безразмерные **структурные функции**  $F(Q^2, x)$ , описывающие распределение импульса и полей внутри протона:

$$F(Q^2, x) = x \sum_q e_q^2 [q_+(Q^2, x) + q_-(Q^2, x)]$$

## Поведение при малых $x$

Поведение при малых  $x$  также дается BFKL уравнением

$$F(x) = x^{-\omega}$$

# Цель и актуальность работы

## Цель работы

Разработка альтернативного метода расчёта интерсепта  $\omega$  с использованием структурных функций протона.

## Актуальность

- Исследование процессов упругого высокоэнергетического столкновения адронов проливает свет на фундаментальные особенности сильного взаимодействия
- Показана связь между внутренней структурой протона и процессами рассеяния

# EMC-эффект и область затемнения

## EMC-эффект

Отношение структурной функции ядра к сумме структурных функций нуклонов:

$$R = \frac{F_{\text{nuc}}(Q^2, x)}{AF_n(Q^2, x)}$$

Отклонение  $R$  от единицы — EMC-эффект

## Область затемнения (shadowing)

При  $x \lesssim 10^{-2}$  наблюдается резкое падение  $R$  — перекрытие глюонных полей нуклонов в ядре

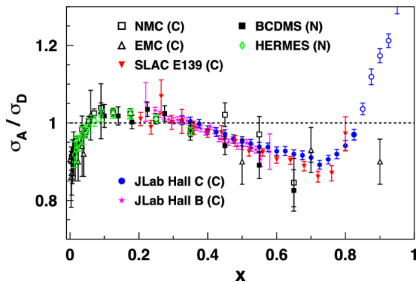


Рис.: EMC-эффект

Структурная функция ядра  $F_2^A(x)$

$$F_2^A(x) = \int \frac{d^3 p}{(2\pi)^3} \left[ \frac{M_A - E_{A-1} - p_3}{E_N} F_2^N(x_N) - \frac{\Delta_A^N}{E_N} x_N \frac{dF_2^N(x_N)}{dx_N} \right] \frac{f^{N/A}(M_A, p)}{8M_A E_N E_{A-1} \Delta_A^{N2}}$$

Это теоретическое выражение для структурной функции ядра  $F_2^A(x)$ , полученное из релятивистского уравнения Бете-Солпитера

# Упрощение формулы Молочкова и вывод рабочей формулы

1. Полная формула (область затемнения, малые  $x$ )

$$R \simeq 1 - \frac{\langle \Delta_A^N \rangle}{m} \cdot \frac{1}{F(x)} \frac{dF(x)}{dx}, \quad R = \frac{F_{\text{нuc}}(x)}{AF_n(x)}$$

2. Параметр  $\Delta_A^N$  (энергия сдвига)

$$\Delta_A^N = \varepsilon_A - T_A \frac{A}{A-1}$$
$$T_A \simeq T_c \left( 1 - 0.98 \frac{N_s(A)}{A} \right), \quad T_c = 20-24 \text{ МэВ}$$

# Вывод рабочей формулы

Степенной вид  $F(x)$  в NLO

$$F(x) \sim x^{-\omega} \Rightarrow \frac{1}{F} \frac{dF}{dx} = -\frac{\omega}{x}$$

Подстановка в формулу Молочкова

$$R \simeq 1 - \frac{\Delta_A^N}{m} \left( -\frac{\omega}{x} \right) = 1 + \frac{\Delta_A^N \omega}{mx}$$

Выражение для интерсепта  $\omega$

$$\omega \simeq \frac{mx}{\Delta_A^N} (R - 1)$$

# Параметры расчёта и экспериментальные данные

Таблица: Энергия сдвига  $\Delta_A^N$

Элемент	A	$\Delta_A^N$ , МэВ
Li	6	-4.26
C	12	-4.56
Fe	56	-5.92
Sn	118	-7.16
Pb	208	-8.82

Таблица:  $R = F_{\text{нuc}}/(AF_n)$  при  $x \leq 10^{-2}$

x	Li	C	Fe	Sn	Pb
$10^{-2}$	0.94	0.90	0.84	0.81	0.76
$5 \cdot 10^{-3}$	0.93	0.88	0.81	0.78	0.72
$2 \cdot 10^{-3}$	0.91	0.85	0.77	0.73	0.66
$10^{-3}$	0.89	0.82	0.73	0.69	0.61
$5 \cdot 10^{-4}$	0.87	0.79	0.69	0.64	0.55
$10^{-4}$	0.84	0.74	0.63	0.57	0.48

# Результаты расчёта интерсепта $\omega$

Таблица:  $\omega(x)$  для различных ядер

$x$	Li	C	Fe	Sn	Pb
$10^{-2}$	0.1321	0.2057	0.2534	0.2489	0.2554
$5 \cdot 10^{-3}$	0.0771	0.1234	0.1505	0.1441	0.1490
$2 \cdot 10^{-3}$	0.0396	0.0617	0.0729	0.0707	0.0724
$10^{-3}$	0.0242	0.0371	0.0427	0.0406	0.0413
$5 \cdot 10^{-4}$	0.0143	0.0216	0.0245	0.0238	0.0239
$10^{-4}$	0.0035	0.0055	0.0059	0.0056	0.0057

Таблица: Средние  $\langle \omega \rangle$

Элемент	$\langle \omega \rangle$
Li	0.0485
C	0.0758
Fe	0.0917
Sn	0.0890
Pb	0.0913

## Сравнение с мягким помероном

$$\omega_{\text{soft}} \approx 0.08-0.09$$

## Основные результаты

- Для ядер с  $A \geq 56$  (Fe, Sn, Pb)  $\langle \omega \rangle$  выходит на плато 0.089–0.092
- Отличное согласие с интерсептом мягкого померона  
 $\omega_{\text{soft}} \approx 0.08\text{--}0.09$
- Заниженное значение для лития ( $\langle \omega \rangle = 0.0485$ ) показывает, что формула Молочкова не применима для лёгких ядер

# Заключение









## Результаты работы

- Разработан альтернативный метод вычисления интерсепта  $\omega$  через структурные функции и ЕМС-эффект
- Получено:  $\langle \omega \rangle \approx 0.089\text{--}0.092$  из данных ЕМС-эффекта для тяжёлых ядер.
- Хорошее согласие с мягким помероном ( $\omega_{\text{soft}} \approx 0.08\text{--}0.09$ )

## Перспективы

В следующем семестре планируется более детальное теоретическое исследование особенностей БФКЛ-уравнения

Спасибо за внимание!

-  I.Ya. Pomeranchuk, "On the theorem on the cross section at high energies Sov. Phys. JETP 7, 499 (1958)
-  L.N. Lipatov, "Reggeization of the vector meson Sov. J. Nucl. Phys. 23, 338 (1976)
-  A. Molochkov, "The EMC effect in the few-body bound states AIP Conf. Proc. 1388, 451 (2001)
-  E665 Collaboration, "Shadowing in muon-nucleus scattering Phys. Lett. B 296, 159 (1992)
-  NMC Collaboration, "Shadowing in inelastic scattering of muons on nuclei Nucl. Phys. B 445, 3 (1995)
-  "NLO Phenomena in the BFKL approach Phys. Rev. D 60, 074016 (1999)
-  CERN-ISR Collaboration, Phys. Lett. B 44, 527 (1973)
-  TOTEM Collaboration, Eur. Phys. J. C 79, 861 (2019)