



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова  
Национального исследовательского центра  
«Курчатовский институт»

Препринт 2023-7

В.А. Петров, Н.П. Ткаченко

**ATLAS vs TOTEM: тревожное расхождение**

Протвино 2023

### Аннотация

В.А. Петров и др. ATLAS vs TOTEM: тревожное расхождение: Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2023-7. – Протвино, 2023. – 15 с., 9 рис.

С использованием новой амплитуды  $C + N$ , корректно учитывающей CNI для всех порядков в  $\alpha$  значения параметров  $\rho^{pp}$ ,  $\sigma_{tot}^{pp}$  и  $B^{pp}$  анализируются на основе данных, опубликованных коллаборациями TOTEM и ATLAS при энергии  $\sqrt{s} = 13$  ТэВ. Результат как совместного, так и отдельного анализа этих данных подтвердил, в частности, заметную разницу между центральными значениями  $\sigma_{tot}^{pp}$ , измеренными TOTEM и АТЛАС-АЛЬФА, достигающими до 8 стандартных отклонений ATLAS.

### Abstract

V.A. Petrov et al. ATLAS vs TOTEM: Disturbing Divergence: NRC «Kurchatov Institute» – IHEP Preprint 2023-7. – Protvino, 2023. – p. 15, figs. 9.

With use of a new  $C + N$  amplitude which correctly accounts for CNI to all orders in  $\alpha$  the values of the parameters  $\rho^{pp}$ ,  $\sigma_{tot}^{pp}$  and  $B^{pp}$  are analysed on the basis of data published by the TOTEM and ATLAS collaborations at energy  $\sqrt{s} = 13$  TeV. The result of both joint and separate analyses of these data confirmed, in particular, a noticeable difference between the central values of  $\sigma_{tot}^{pp}$ , as measured by the TOTEM and by the ATLAS-ALFA, reaching up to 8 standard deviations ATLAS.

## 1. Введение

В работе [1] нами исследовалось извлечение параметров  $\rho^{pp}$ ,  $\sigma_{\text{tot}}^{pp}$  и  $B^{pp}$  из экспериментальных данных TOTEM [2] при энергии  $\sqrt{s} = 13$  TeV на основе амплитуды кулон-ядерной интерференции во втором порядке малости по постоянной тонкой структуре  $\alpha$ . Исследование во втором порядке малости проводилось по причине что нам не удалось в то время вычислить общую формулу для амплитуды кулон-ядерной интерференции. С тех пор появились экспериментальные данные по дифракционному рассеянию с эксперимента ATLAS, которые в полном объеме выложены на HER DATA [3] и нам удалось получить выражение для амплитуды в общем виде. На основе этого мы и представляем здесь вновь полученные результаты.

### Экспериментальные данные ATLAS и TOTEM

На Рис. 1 показаны  $d\sigma/dt_{pp}$  измеренные на установках ATLAS и TOTEM при энергии  $\sqrt{s} = 13$  TeV. Хорошо видно что они существенно разнятся между собой даже с учетом больших ошибок на установке TOTEM - экспериментальные данные ATLAS систематически лежат ниже экспериментальных данных TOTEM. **Априори даже непонятно насколько корректным будет операция совместного фитирования этих экспериментальных данных.** Тем не менее мы проведем эту операцию и посмотрим какие результаты при этом получаются. При этом надо иметь в виду в этом случае что к этим результатам надо относиться как к оценочным.

Согласно рекомендациям авторов ATLAS мы не используем в анализе две экспериментальные точки с минимальными значениями  $|t|$ . Далее это везде подразумевается, хотя на графиках мы эти две точки приводим. Таким образом далее во всех фитах используются только экспериментальные точки у которых  $|t| > 0.00045$  GeV<sup>2</sup> (пунктирная вертикальная линия на левом графике рис. 1).

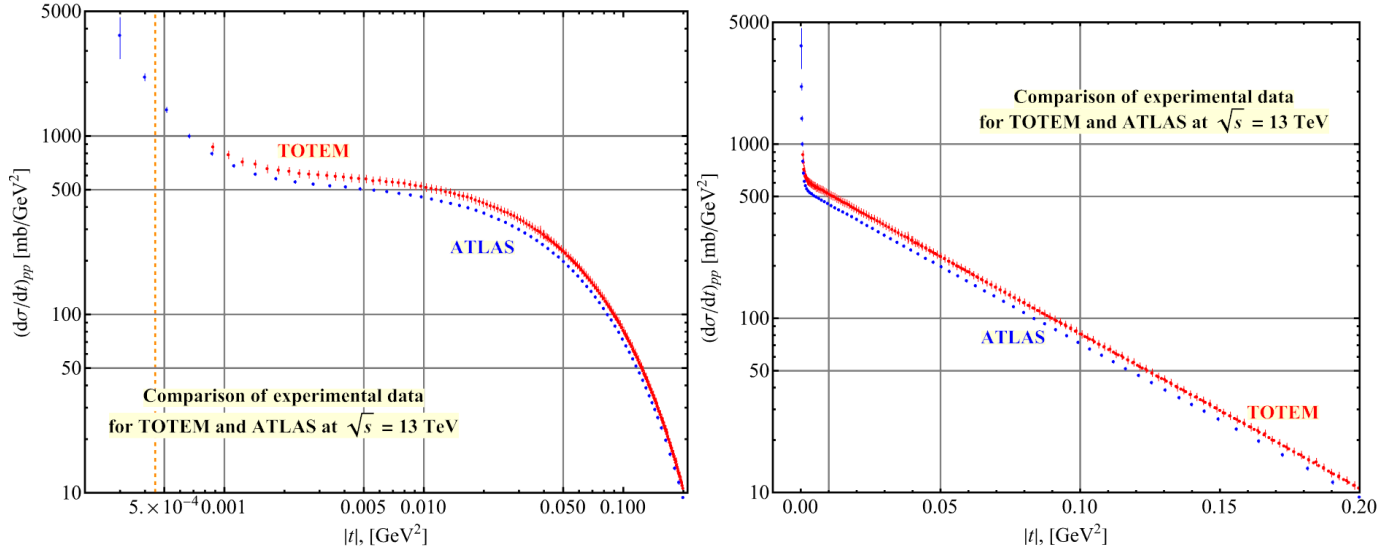


Рис. 1. Дифференциальные сечения  $pp$  при  $\sqrt{s} = 13$  TeV измеренные ATLAS и TOTEM в двойном логарифмическом (слева) и полулогарифмическом масштабах.

## Описание модели

Мы следуем модели описанной в [1]. Здесь мы приведем соотношения применительно к общему случаю вычисления амплитуды, а не во втором приближении, как это было сделано ранее. Основные соотношения следующие:

$$T_N(q^2) = T_N(0, s)e^{-Bq^2/2} = \frac{s(i + \rho)\sigma_{\text{tot}}}{(\hbar c)^2} e^{-Bq^2/2}, \quad (1)$$

где  $(\hbar c)^2 = 0.389379$  [mb·GeV<sup>2</sup>].

$$\bar{T}_N(q'^2, q^2) = T_N(q^2)e^{-Bq'^2/2}I_0(Bq'q) = \frac{s(i + \rho)\sigma_{\text{tot}}}{(\hbar qc)^2} e^{-B(q'^2+q^2)/2}I_0(Bq'q), \quad (2)$$

где  $I_0(x)$  – модифицированная функция Бесселя первого рода (функция Инфельда) [5]. Модель, как и в [1], написана для дипольного формфактора:

$$F(q^2) = (1 + q^2/\Lambda)^{-2},$$

где  $\Lambda = \sqrt{0.71}$  [GeV].

Формула для кулон-ядерной амплитуды записывается в виде:

$$T_{C+N} = -2is\Xi(q^2) + \frac{1}{4\pi} \int_0^\infty dq'^2 \Xi(q'^2) \bar{T}_N(q'^2, q^2), \quad (3)$$

где<sup>1</sup>

$$\Xi(q) = 2\pi \int_0^\infty db b J_0(qb) e^{2i\delta_c(b)}, \quad (4)$$

<sup>1</sup> $J_0$  – функция Бесселя первого рода [5].

причем  $\delta_c(b)$  выражается через G-функцию Мейера<sup>2</sup>

$$\delta_c(b) = \alpha \int_0^\infty (dk/k) F^2(k^2) [1 - J_0(kb)] = \frac{\alpha}{12} \text{G-M} \left[ \left\{ \{1, 1\}, \{ \} \right\}, \left\{ \{1, 4\}, \{0, 0\} \right\}, \left( \frac{b\Lambda}{2} \right)^2 \right], \quad (5)$$

где  $\alpha$  – постоянная тонкой структуры.

Прямой подстановкой (5) в (4) интеграл не вычисляется аналитически. Но функция  $\delta_c(b)$  допускает хорошую аппроксимацию:

$$\delta_c^{\text{appr}}(b) = \frac{1}{2 \cdot 137} \cdot \ln \left[ 1 + \left( \frac{3\Lambda b}{10} \right)^2 \right] \cong \frac{\alpha}{2} \cdot \ln \left[ 1 + \left( \frac{3\Lambda b}{10} \right)^2 \right], \quad (6)$$

график которой мы приводим на рис.2 С такой аппроксимацией интеграл в выраже-

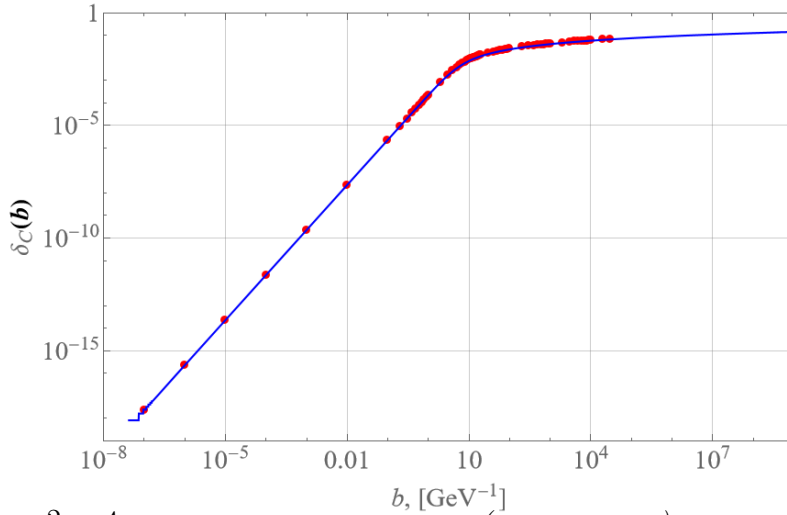


Рис. 2. Аппроксимационная кривая (синяя линия) и точно вычисленные значения функции  $\delta_c(b)$ , которые обозначены красными точками.

нии (4) вычисляется аналитически и функция  $\Xi(q)$  приобретает вид<sup>3</sup>:

$$\Xi(q) = \frac{40\pi}{3\Gamma\left(-\frac{i}{137}\right)} \cdot \frac{K_{1+\frac{i}{137}}\left(\frac{10\sqrt{|t|}}{3\Lambda}\right)}{\Lambda\sqrt{|t|}\left(\frac{1}{2}\frac{10\sqrt{|t|}}{3\Lambda}\right)^{\frac{i}{137}}} \quad (7)$$

где  $K_\mu(\nu)$  – модифицированная функция Бесселя второго рода (функция Макдональда) [5]. Эта функция имеет размерность  $[\text{GeV}^{-2}]$ . Полная амплитуда  $T_{C+N}$  при этом получается безразмерной.

<sup>2</sup>Meijer G-function - обобщенная гипергеометрическая функция [5], определяемая через интеграл Меллина-Барнса, а интеграл в(5) вычисляется через преобразование Меллина.

<sup>3</sup>Для справок:  $\int_0^\infty \Xi(q') dq' = 4\pi$ , т.е. интеграл сходится, из чего вытекает сходимость интеграла в окончательном выражении для полной амплитуды (3)

Подстановка этого выражения в (3) опять приводит к интегралу, который не берется аналитически. Однако если разложить функцию  $I_0(z)$  в ряд Тейлора в окрестности нуля, то интеграл почленно вычисляется аналитически. Весь вопрос только сколько членов ряда надо брать для сохранения точности. Чем больше значение аргумента, тем больше членов ряда надо брать для сохранения точности. У нас в вычислениях не используются данные у которых  $|t| > 0.2$ . При таком ограничении прямые вычисления показывают что шесть значащих цифр в этом интеграле вполне обеспечиваются первыми восемью членами разложения в ряд.

После этого дифференциальное сечение вычисляется по стандартной формуле:

$$\frac{d\sigma}{dt} = (\hbar c)^2 \frac{|T_{C+N}|^2}{16\pi s^2} \left[ \frac{\text{mb}}{\text{GeV}^2} \right]. \quad (8)$$

Далее везде суммарное выражение для  $\chi^2$  составляется с использованием именно этого выражения для дифференциального сечения с помощью весовых матриц. Весовые матрицы статистических и систематических ошибок эксперимента ATLAS указаны в HEPData [3]. Эксперимент TOTEM результаты своих измерений в HEPData не поместил. И поэтому матрица систематических ошибок в этом эксперименте вычисляется из источников систематических ошибок эксперимента, приведенных в [2]. Матрицу статистических ошибок эксперимент TOTEM не указывает, и поэтому она взята из полных статистических ошибок в диагональном виде, приведенных там же в [2].

## Извлечение параметров из экспериментов ATLAS и TOTEM

### 1.1. Общие замечания по методике обработки

В наших оценках для извлечения параметров  $\rho^{pp}$ ,  $\sigma_{\text{tot}}^{pp}$  и  $B$  мы старались как можно точнее выполнить условие  $|t| \rightarrow 0$ , что является необходимым условием для наиболее точного извлечения этих параметров. Поэтому мы выполняли фитирование с постепенным отсечением экспериментальных точек с большими значениями  $|t|$ . Параметры извлекались только из таких наборов экспериментальных данных, для которых фит давал значение  $P\text{Value} > 0.9$  (высокий уровень доверительности)<sup>4</sup>.

В большинстве случаев по мере отсечения данных с большим  $|t|$  извлекаемые параметры начинали проявлять крайнюю нестабильность своих значений. В этом случае мы отбрасывали и данные с малыми значениями  $|t|$  на которых наблюдалась нестабильность поведения параметров и фит проводился на наборе данных в которых значения передаваемого импульса были ограничены как снизу так и сверху. Во всех случаях всегда мы указываем область  $|t|$ , на которой получены извлекаемые значения параметров.

<sup>4</sup> $P\text{Value}$  определяется как  $2 \text{Min}(P_{\text{left}}, P_{\text{right}})$ , где аргументы в скобках - величины для вычисления тестов на проверку левосторонней и правосторонней альтернативы соответственно.

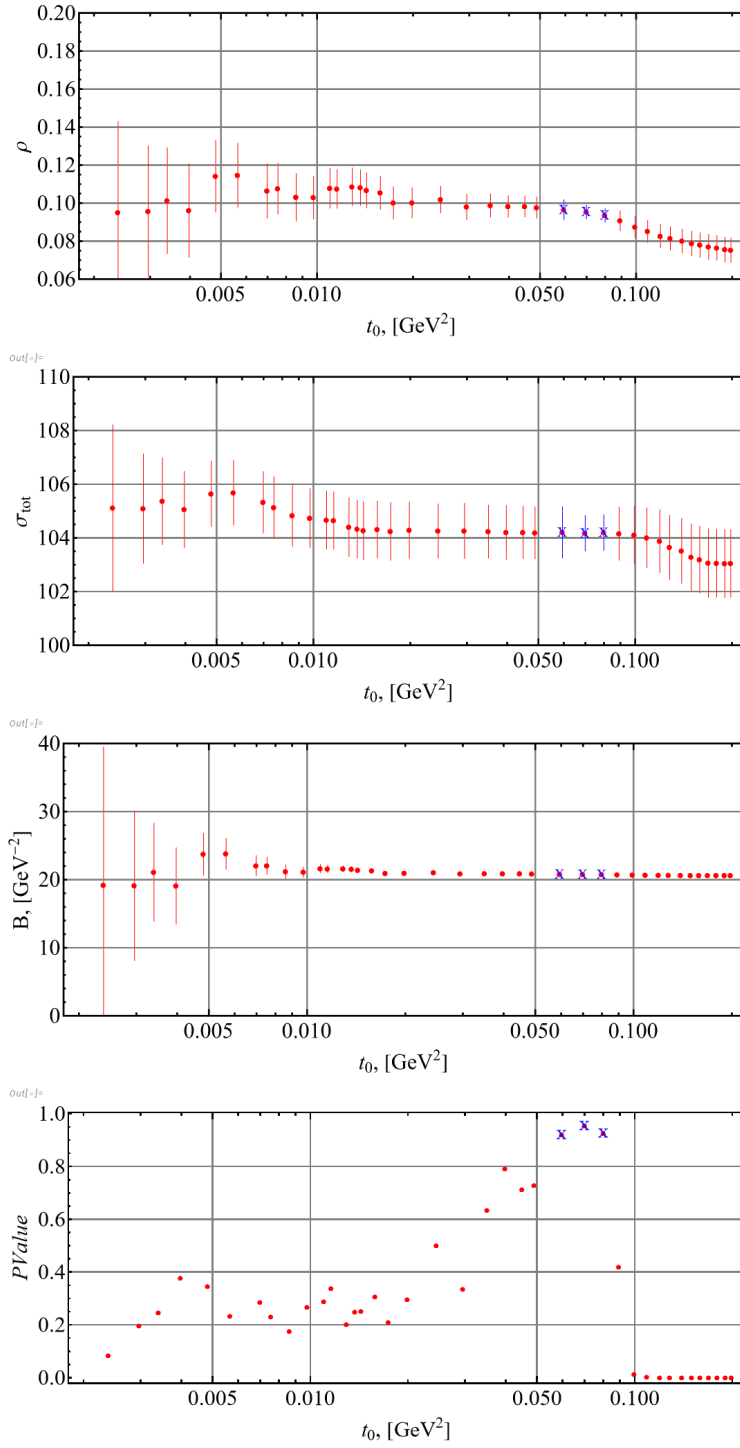


Рис. 3. Поведение параметров модели при постепенном отбрасывании экспериментальных данных с большими значениями  $|t|$ , больше некоторого значения  $t_0$ . Крестиками при этом обозначены результаты, у которых уровень доверительности выше 90%.

Все фиты по приведенной модели строились на основе вычисления функции  $\chi^2$  с помощью весовых матриц, которые получались из соответствующих матриц ковариаций.

Матрицы ковариаций систематических и статистических ошибок эксперимента ATLAS брались из базы данных HEPData [3].

Эксперимент TOTEM результаты в HEPData не выложил. Однако, в своей статье [2] они привели источники систематических ошибок, по которым мы и построили матрицу ковариаций систематических ошибок в этом эксперименте. Данные по источникам статистических ошибок не приведены экспериментаторами, показаны только полные статистические ошибки. Поэтому не оставалось ничего другого, как выписать матрицу ковариаций статистических ошибок в диагональном виде.

## Совместное фитирование двух экспериментов

Полные матрицы ковариаций определялись как сумма матриц ковариаций статистических и систематических ошибок, и затем вычислялись весовые матрицы.

При совместном фитировании матрица ковариаций составлялась как блочная матрица из матриц ковариаций двух экспериментов. Остальные элементы полагались равными нулю, что соответствует отсутствию корреляций между измерениями в двух экспериментах. Такое предположение вряд ли допустимо, так как установки находятся на одних и тех же пучках. И это, безусловно, является слабым местом такого подхода, что лишний раз говорит о том, что к результатам совместного рассмотрения надо относиться как к оценочным величинам.

На рис. 3 показаны результаты совместного фитирования экспериментов ATLAS и TOTEM, методом постепенного отсечения экспериментальных данных с большими значениями  $|t|$ . Имеются всего лишь три точки у которых PValue  $> 0.9$  и расположены они рядом на интервале  $0.06 < t_0 < 0.08 \text{ GeV}^2$ . При больших значениях  $t_0$  уровень доверительности вообще нулевой.

Ниже в таблице мы приводим соответствующие этому отсечению значения параметров.

$$\left( \begin{array}{l} \rho = 0.0935262 \pm 0.0037266 \quad [ ] \quad |t|_{\max} \equiv t_0^{\max} = 0.079905 \quad [\text{GeV}^2] \\ \sigma_{\text{tot}} = 104.2 \pm 0.676403 \quad [\text{mb}] \quad |t|_{\min} \equiv t_0^{\min} = 0.000515 \quad [\text{GeV}^2] \\ B = 20.747 \pm 0.0251808 \quad [\text{GeV}^{-2}] \quad \chi^2_{\text{red}} = 123.851 \\ \text{DoP} = 129 \quad \chi^2_{\text{red}}/\text{DoP} = 0.960087 \quad \text{NoF} = 126 \quad \chi^2_{\text{red}}/\text{NoF} = 0.982946 \\ \text{PValue} = 0.925055 \\ (d\sigma/dt)_{pp}^{\text{(TOTEM)}} \quad \text{at} \quad \sqrt{s} = 13 \quad [\text{TeV}] \quad F(t) \equiv (1-t/\Lambda^2)^{-2} \end{array} \right)$$

$$\text{Correlation matrix [\%]} = \begin{pmatrix} \rho & \sigma_{\text{tot}} & B \\ \rho & 1. & -0.56713 & 0.507556 \\ \sigma_{\text{tot}} & & 1. & -0.14746 \\ B & & & 1. \end{pmatrix}$$

Minimum number of decimal places in correlation matrix: 1

Minimum number of decimal places for parameter  $\rho$ : 3 ;

Minimum number of decimal places for parameter  $\sigma_{\text{tot}}$ : 1 ;

Minimum number of decimal places for parameter B: 2 ;



Исходя из рис. 3 мы не видим никаких оснований для того чтобы отсекаль какие-либо точки с малыми значениями  $|t|$ , т.к. с учетом ошибок значения параметров при  $t_0 < 0.08 \text{ GeV}^2$  лежат на одном плато. Тем не менее, отбросить небольшое количество таких точек имеет смысл с тем, чтобы посмотреть как они влияют на устойчивость значений извлекаемых параметров. Мы отбросили экспериментальные точки, для которых  $|t| < 0.004 \text{ GeV}^2$ , а также точки, соответствующие условию  $|t| > 0.014 \text{ GeV}^2$  т.е. мы рассматриваем экспериментальные точки, которые удовлетворяют условию  $0.004 < |t| < 0.014 \text{ GeV}^2$ . Это соответствует примерно интервалам, которые мы использовали для извлечения параметров в работе [1]. И при этом сохраняется высокий уровень доверительности. Результаты получаются следующие:

$$\left( \begin{array}{l} \rho = 0.154936 \pm 0.0531287 \quad [ ] \quad |t|_{\max} \equiv t_0^{\max} = 0.01369 \quad [\text{GeV}^2] \\ \sigma_{\text{tot}} = 105.663 \pm 1.14859 \quad [\text{mb}] \quad |t|_{\min} \equiv t_0^{\min} = 0.004738 \quad [\text{GeV}^2] \\ \text{B} = 22.198 \pm 0.981294 \quad [\text{GeV}^{-2}] \quad \chi^2_{\Sigma} = 24.8939 \\ \text{DoP} = 26 \quad \chi^2_{\Sigma}/\text{DoP} = 0.957459 \quad \text{NoF} = 23 \quad \chi^2_{\Sigma}/\text{NoF} = 1.08235 \\ \text{PValue} = 0.711553 \\ \text{(d}\sigma/\text{d}t)_{pp}^{\text{(TOTEM)}} \text{ at } \sqrt{s} = 13 \quad [\text{TeV}] \quad \text{F}(|t|) \equiv (1-t/\Lambda^2)^{-2} \end{array} \right)$$

$$\text{Correlation matrix [\%]} = \begin{pmatrix} \rho & \sigma_{\text{tot}} & \text{B} \\ \rho & 1. & -0.0179883 & 0.936463 \\ \sigma_{\text{tot}} & & 1. & 0.0344706 \\ \text{B} & & & 1. \end{pmatrix}$$

Minimum number of decimal places in correlation matrix: 2  
 Minimum number of decimal places for parameter  $\rho$ : 2 ;  
 Minimum number of decimal places for parameter  $\sigma_{\text{tot}}$ : 1 ;  
 Minimum number of decimal places for parameter B: 1 ;

Мы видим, что наблюдается резкое изменение центральных значений параметров и резкое возрастание ошибок.

На рис.4 приведены графики, теоретических кривых, соответствующие этим двум случаям.

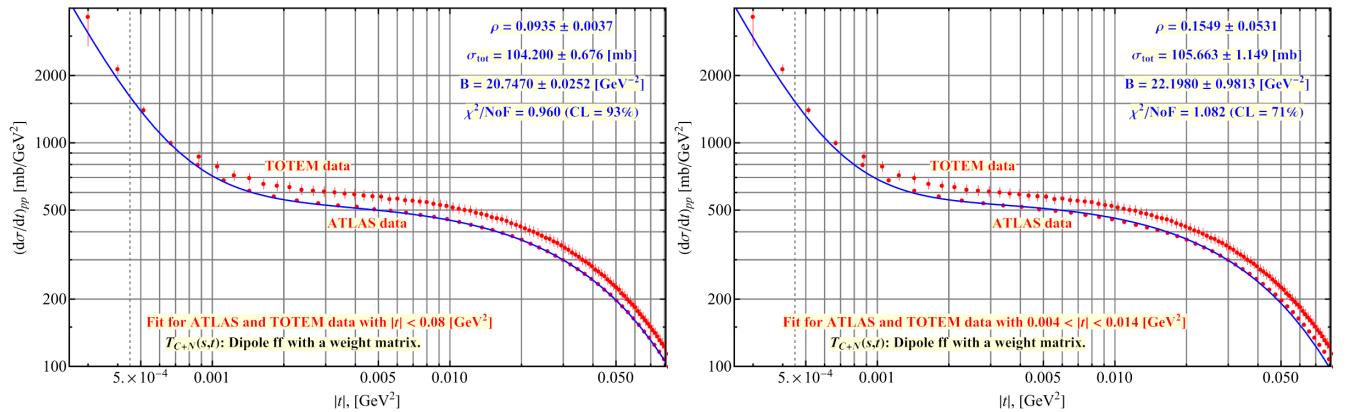


Рис. 4. Экспериментальные данные ATLAS и TOTEM и теоретические кривые дифференциального сечения, соответствующие двум приведенным выше таблицам.

Кривые однозначным образом тяготеют к экспериментальным данным ATLAS, что вообще говоря неудивительно, ибо экспериментальные ошибки у ATLAS существенно ниже экспериментальных ошибок у TOTEM.

Однако, как мы говорили выше, к этим результатам надо относиться исключительно как к оценочным величинам - в силу существенно разных экспериментальных измерений одного и того же процесса.

## Извлечение параметров из каждого эксперимента в отдельности

### 1.2. TOTEM

В таблицах ниже представлены параметры, извлекаемые из фитов при разных отсеечениях экспериментальных точек, у которых  $|t|$  больше некоторого значения  $t_0 \max$ , указанного в таблицах.

$$\left( \begin{array}{l} \rho = \quad 0.0875302 \quad \pm \quad 0.00693576 \quad [ ] \quad |t|_{\max} \equiv t_0 \max = \quad 0.02946 \quad [\text{GeV}^2] \\ \sigma_{\text{tot}} = \quad 110.485 \quad \pm \quad 1.71791 \quad [\text{mb}] \quad |t|_{\min} \equiv t_0 \min = \quad 0.000879 \quad \chi^2_{\frac{1}{2}} = \quad 44.1859 \\ \mathbf{B} = \quad 20.78 \quad \pm \quad 0.0909749 \quad [\text{GeV}^{-2}] \quad \text{PValue} = \quad 0.903003 \\ \text{DoP} = \quad 49 \quad \chi^2_{\frac{1}{2}}/\text{DoP} = \quad 0.901754 \quad \text{NoF} = \quad 46 \quad \chi^2_{\frac{1}{2}}/\text{NoF} = \quad 0.960564 \\ (\text{d}\sigma/\text{d}t)_{\text{pp}}^{\text{TOTEM}} \quad \sqrt{s} = \quad 13 \quad [\text{TeV}] \quad \text{F}(t) \equiv (1-t/\Lambda^2)^{-2} \end{array} \right)$$

$$\text{Correlation matrix} = \begin{pmatrix} & \rho & \sigma_{\text{tot}} & \mathbf{B} \\ \rho & 1. & -0.73017 & 0.699492 \\ \sigma_{\text{tot}} & & 1. & -0.336099 \\ \mathbf{B} & & & 1. \end{pmatrix}$$

**Minimum number of decimal places in correlation matrix: 1**

**Minimum number of decimal places for parameter  $\rho$ : 3 ;**

**Minimum number of decimal places for parameter  $\sigma_{\text{tot}}$ : 1 ;**

**Minimum number of decimal places for parameter  $\mathbf{B}$ : 2 ;**

$$\left( \begin{array}{l} \rho = \quad 0.0901134 \quad \pm \quad 0.0103489 \quad [ ] \quad |t|_{\max} \equiv t_0 \max = \quad 0.013594 \quad [\text{GeV}^2] \\ \sigma_{\text{tot}} = \quad 110.104 \quad \pm \quad 1.84207 \quad [\text{mb}] \quad |t|_{\min} \equiv t_0 \min = \quad 0.000879 \quad \chi^2_{\frac{1}{2}} = \quad 27.0905 \\ \mathbf{B} = \quad 20.7759 \quad \pm \quad 0.345346 \quad [\text{GeV}^{-2}] \quad \text{PValue} = \quad 0.973357 \\ \text{DoP} = \quad 31 \quad \chi^2_{\frac{1}{2}}/\text{DoP} = \quad 0.873888 \quad \text{NoF} = \quad 28 \quad \chi^2_{\frac{1}{2}}/\text{NoF} = \quad 0.967519 \\ (\text{d}\sigma/\text{d}t)_{\text{pp}}^{\text{TOTEM}} \quad \sqrt{s} = \quad 13 \quad [\text{TeV}] \quad \text{F}(t) \equiv (1-t/\Lambda^2)^{-2} \end{array} \right)$$

$$\text{Correlation matrix} = \begin{pmatrix} & \rho & \sigma_{\text{tot}} & \mathbf{B} \\ \rho & 1. & -0.719863 & 0.816384 \\ \sigma_{\text{tot}} & & 1. & -0.396166 \\ \mathbf{B} & & & 1. \end{pmatrix}$$

**Minimum number of decimal places in correlation matrix: 2**

**Minimum number of decimal places for parameter  $\rho$ : 3 ;**

**Minimum number of decimal places for parameter  $\sigma_{\text{tot}}$ : 1 ;**

**Minimum number of decimal places for parameter  $\mathbf{B}$ : 1 ;**

Графики кривых приведены на рис. 5

В увеличенном масштабе видно, что теоретические кривые систематически проходят ниже экспериментальных точек. Такой эффект уже наблюдался нами в [1] при описании экспериментальных точек TOTEM во втором порядке малости по постоянной тонкой структуре.

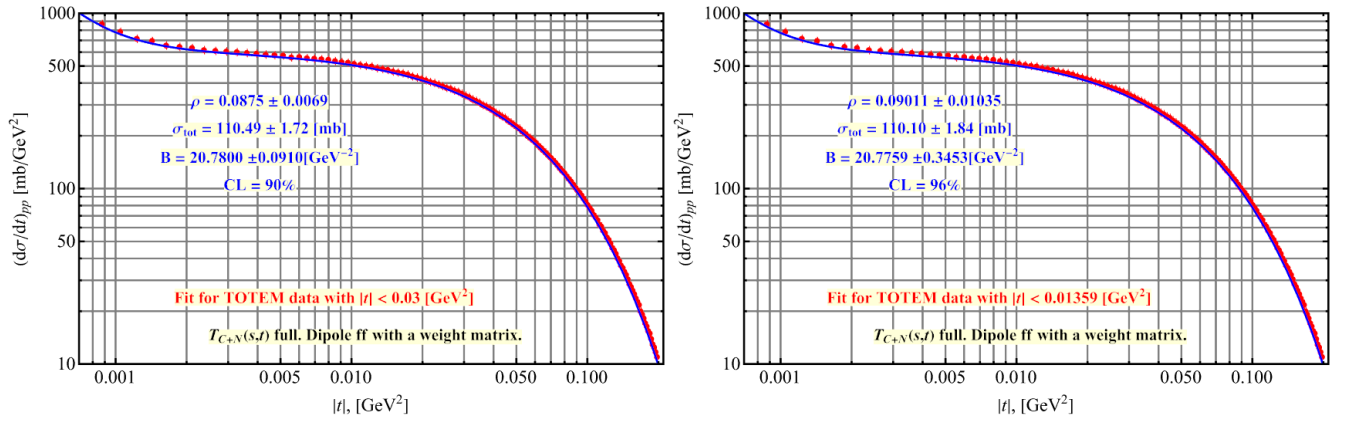


Рис. 5. Экспериментальные данные TOTEM и теоретические кривые дифференциального сечения, соответствующие приведенным выше таблицам.

Этот эффект получил название PPP эффекта ("Peele's pertinent puzzle"). Связан он с переопределенностью (или недоопределенностью) систематических ошибок и описан в [4]. По этой причине к извлеченным параметрам надо относиться исключительно как к оценочным величинам. Для наглядности мы приводим увеличенный масштаб левого графика для демонстрации этого эффекта – рис. 6.

В дальнейшем нам еще придется говорить о таком сдвиге и мы для краткости не будем каждый раз приводить увеличенный масштаб таких графиков.

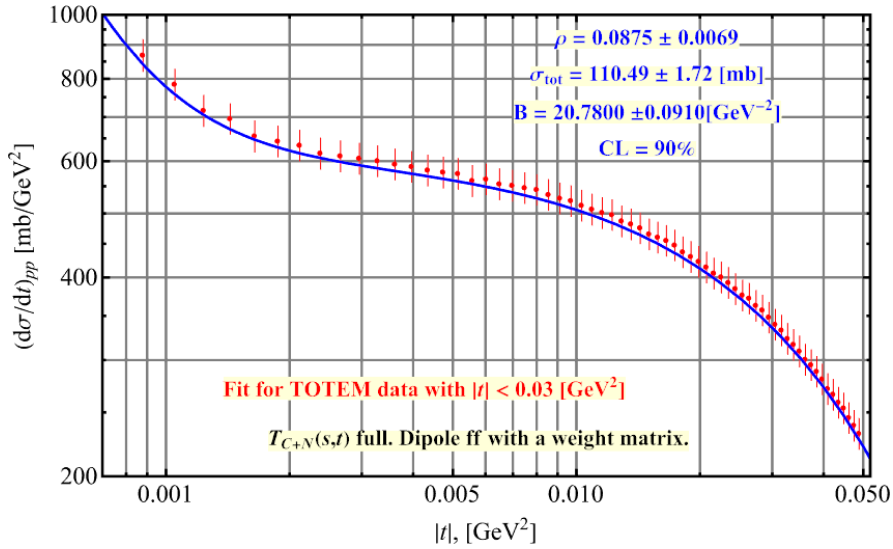


Рис. 6. Систематический сдвиг теоретической кривой относительно экспериментальных точек – демонстрация PPP эффекта.

В работе [1] по мере постепенного отбрасывания экспериментальных точек с большими значениями  $|t|$  больше некоторого значения  $t_0$  при некотором, как правило очень малом, его значении, наблюдалась область неустойчивости в значениях параметров. По этой причине мы отбрасывали экспериментальные точки в этой области очень малых  $|t|$ . Удивительным образом это позволяло избавиться от этого систематического сдвига при одновременном сохранении достаточно высокого уровня достоверности.

Мы и в этом случае отбросили такие точки в приведенных выше массивах и получили следующие результаты:

$$\left( \begin{array}{l} \rho = \quad 0.0818237 \quad \pm \quad 0.0137782 \quad [ ] \quad |t|_{\max} \equiv t_{0\max} = \quad 0.02946 \quad [\text{GeV}^2] \\ \sigma_{\text{tot}} = \quad 111.849 \quad \pm \quad 2.17436 \quad [\text{mb}] \quad |t|_{\min} \equiv t_{0\min} = \quad 0.003972 \quad \chi^2_{\Sigma} = \quad 33.6545 \\ \mathbf{B} = \quad 20.7516 \quad \pm \quad 0.120837 \quad [\text{GeV}^{-2}] \quad \text{PValue} = \quad 0.968902 \\ \text{DoP} = \quad 37 \quad \chi^2_{\Sigma}/\text{DoP} = \quad 0.909581 \quad \text{NoF} = \quad 34 \quad \chi^2_{\Sigma}/\text{NoF} = \quad 0.989839 \\ (\text{d}\sigma/\text{d}t)_{\text{pp}}^{\text{TOTEM}} \quad \sqrt{s} = \quad 13 \quad [\text{TeV}] \quad \text{F}(t) \equiv (1-t/\Lambda^2)^{-2} \end{array} \right)$$

$$\text{Correlation matrix} = \begin{pmatrix} & \rho & \sigma_{\text{tot}} & \mathbf{B} \\ \rho & 1. & -0.114785 & 0.831975 \\ \sigma_{\text{tot}} & & 1. & 0.0115306 \\ \mathbf{B} & & & 1. \end{pmatrix}$$

**Minimum number of decimal places in correlation matrix: 1**

**Minimum number of decimal places for parameter  $\rho$ : 3 ;**

**Minimum number of decimal places for parameter  $\sigma_{\text{tot}}$ : 1 ;**

**Minimum number of decimal places for parameter  $\mathbf{B}$ : 2 ;**

$$\left( \begin{array}{l} \rho = \quad 0.11039 \quad \pm \quad 0.047472 \quad [ ] \quad |t|_{\max} \equiv t_{0\max} = \quad 0.013594 \quad [\text{GeV}^2] \\ \sigma_{\text{tot}} = \quad 111.941 \quad \pm \quad 3.12173 \quad [\text{mb}] \quad |t|_{\min} \equiv t_{0\min} = \quad 0.003972 \quad \chi^2_{\Sigma} = \quad 16.4028 \\ \mathbf{B} = \quad 21.2263 \quad \pm \quad 0.990554 \quad [\text{GeV}^{-2}] \quad \text{PValue} = \quad 0.850434 \\ \text{DoP} = \quad 19 \quad \chi^2_{\Sigma}/\text{DoP} = \quad 0.863307 \quad \text{NoF} = \quad 16 \quad \chi^2_{\Sigma}/\text{NoF} = \quad 1.02518 \\ (\text{d}\sigma/\text{d}t)_{\text{pp}}^{\text{TOTEM}} \quad \sqrt{s} = \quad 13 \quad [\text{TeV}] \quad \text{F}(t) \equiv (1-t/\Lambda^2)^{-2} \end{array} \right)$$

$$\text{Correlation matrix} = \begin{pmatrix} & \rho & \sigma_{\text{tot}} & \mathbf{B} \\ \rho & 1. & -0.00638899 & 0.942631 \\ \sigma_{\text{tot}} & & 1. & 0.0489155 \\ \mathbf{B} & & & 1. \end{pmatrix}$$

**Minimum number of decimal places in correlation matrix: 2**

**Minimum number of decimal places for parameter  $\rho$ : 2 ;**

**Minimum number of decimal places for parameter  $\sigma_{\text{tot}}$ : 1 ;**

**Minimum number of decimal places for parameter  $\mathbf{B}$ : 1 ;**

Графики, соответствующие этим таблицам приведены ниже на рис. 7

Обратим внимание что в этом случае теперь отсутствуют РРР эффект систематического смещения теоретической кривой вниз от экспериментальных точек и сохраняется высокий уровень достоверности.

Вероятней всего надо ориентироваться на значения параметров из правого графика на рис. 7, ибо на нем существенно лучше выполнено условие  $|t| \rightarrow 0$ . При этом параметр  $\rho$  существенно меняет свое значение, в то время как параметры  $\sigma_{\text{tot}}$  и  $\mathbf{B}$ , меняются совсем незначительно. Конечно, при этом ошибки становятся значительно больше, но тут ничего не поделаешь - надо увеличивать число точек на интервале фитирования.

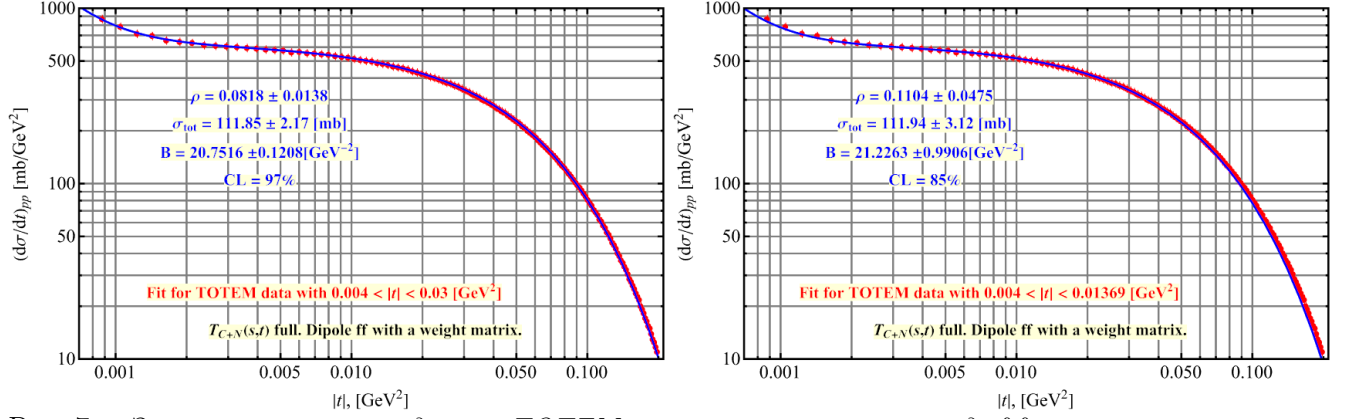


Рис. 7. Экспериментальные данные TOTEM и теоретические кривые дифференциального сечения, соответствующие приведенным выше таблицам.

### 1.3. ATLAS

В этом эксперименте наблюдается аналогичная предыдущему рассмотрению картина, правда в существенно более жестком варианте, нежели в эксперименте с TOTEM в силу того, что ошибки эксперимента ATLAS намного меньше ошибок эксперимента TOTEM.

Так же как и в предыдущем пункте, выберем два варианта отсечения данных с большими  $|t|$ , у которых наблюдаются уровни доверительности выше 90%:

$$\left( \begin{array}{l} \rho = 0.0882993 \pm 0.00624442 \quad [ ] \quad |t|_{\max} \equiv t_{0\max} = 0.069275 \quad [\text{GeV}^2] \\ \sigma_{\text{tot}} = 103.295 \pm 0.755171 \quad [\text{mb}] \quad |t|_{\min} \equiv t_{0\min} = 0.000515 \quad \chi^2_{\frac{1}{2}} = 38.5235 \\ \mathbf{B} = 20.7278 \pm 0.0359609 \quad [\text{GeV}^{-2}] \quad \text{PValue} = 0.982861 \\ \text{DoP} = 42 \quad \chi^2_{\frac{1}{2}}/\text{DoP} = 0.917227 \quad \text{NoF} = 39 \quad \chi^2_{\frac{1}{2}}/\text{NoF} = 0.987783 \\ (\frac{d\sigma}{dt})_{\text{pp}}^{\text{ATLAS}} \quad \sqrt{s} = 13 \quad [\text{TeV}] \quad \mathbf{F}(t) \equiv (1-t/\Lambda^2)^{-2} \end{array} \right)$$

$$\text{Correlation matrix} = \begin{pmatrix} \rho & \sigma_{\text{tot}} & \mathbf{B} \\ \rho & 1. & -0.511735 & 0.640479 \\ \sigma_{\text{tot}} & & 1. & -0.186967 \\ \mathbf{B} & & & 1. \end{pmatrix}$$

Minimum number of decimal places in correlation matrix: 1

Minimum number of decimal places for parameter  $\rho$ : 3 ;

Minimum number of decimal places for parameter  $\sigma_{\text{tot}}$ : 1 ;

Minimum number of decimal places for parameter  $\mathbf{B}$ : 2 ;

$$\left( \begin{array}{l} \rho = 0.101181 \pm 0.00846706 \quad [ ] \quad |t|_{\max} \equiv t_{0\max} = 0.01369 \quad [\text{GeV}^2] \\ \sigma_{\text{tot}} = 104.542 \pm 0.787928 \quad [\text{mb}] \quad |t|_{\min} \equiv t_{0\min} = 0.000515 \quad \chi^2_{\frac{1}{2}} = 14.8423 \\ \mathbf{B} = 22.3863 \pm 0.448729 \quad [\text{GeV}^{-2}] \quad \text{PValue} = 0.927563 \\ \text{DoP} = 19 \quad \chi^2_{\frac{1}{2}}/\text{DoP} = 0.781173 \quad \text{NoF} = 16 \quad \chi^2_{\frac{1}{2}}/\text{NoF} = 0.927643 \\ (\frac{d\sigma}{dt})_{\text{pp}}^{\text{ATLAS}} \quad \sqrt{s} = 13 \quad [\text{TeV}] \quad \mathbf{F}(t) \equiv (1-t/\Lambda^2)^{-2} \end{array} \right)$$

$$\text{Correlation matrix} = \begin{pmatrix} \rho & \sigma_{\text{tot}} & \mathbf{B} \\ \rho & 1. & -0.210946 & 0.682114 \\ \sigma_{\text{tot}} & & 1. & 0.214774 \\ \mathbf{B} & & & 1. \end{pmatrix}$$

Minimum number of decimal places in correlation matrix: 1

Minimum number of decimal places for parameter  $\rho$ : 3 ;

Minimum number of decimal places for parameter  $\sigma_{\text{tot}}$ : 1 ;

Minimum number of decimal places for parameter  $\mathbf{B}$ : 1 ;

Графики, соответствующие этим таблицам, приведены ниже на рис. 8

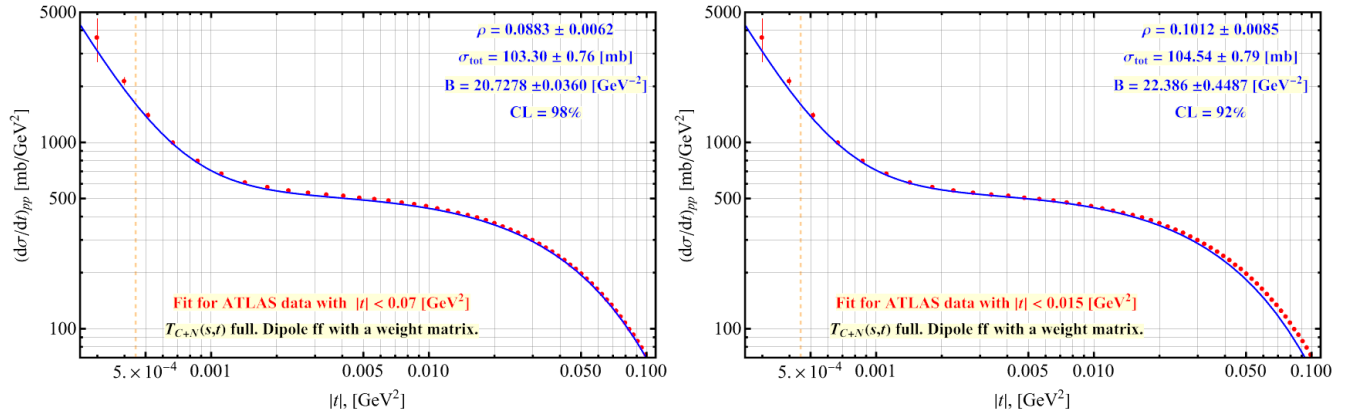


Рис. 8. Экспериментальные данные ATLAS и теоретические кривые дифференциального сечения, соответствующие приведенным выше таблицам.

В более крупном масштабе заметно, что эти кривые систематически проходят ниже центральных значений экспериментальных точек<sup>5</sup>, так же, как и в случае с данными TOTEM, описанными нами в [1], хотя визуально этот эффект не столь заметен, как в случае с TOTEM. Поэтому следует воспринимать приведенные выше значения параметров как оценочные, а не как окончательные. Тем не менее, отметим, что значения параметров, сильно изменяются по мере выполнения условия  $|t| \rightarrow 0$ , что хорошо видно из сравнения параметров на правом графике рис. 8 с левым графиком на том же рисунке (либо из предшествующих таблиц).

Эффект смещения теоретической кривой, в случае данных TOTEM, исчезал, когда из рассмотрения по объективным причинам выбрасывалось небольшое количество точек с самыми малыми значениями  $|t|$ . В случае ATLAS тоже имеются причины отбросить все экспериментальные точки, у которых  $|t| < 0.0025 \text{ GeV}^2$ , т.к. для них наблюдается зона нестабильности значений параметров. Это приводит к следующим результатам, приведенными в таблицах и графике на рис. 9:

Так же, как и в эксперименте TOTEM, в этих случаях теоретические кривые не смещены относительно центральных значений экспериментальных точек (отсутствует PPP эффект [4]) и сохраняется довольно высокий уровень достоверности.

Нет оснований для того, чтобы отбросить любой из этих двух вариантов. Конечно, можно склониться в пользу варианта, в котором задействованы экспериментальные данные с меньшими значениями  $|t|$ , но не факт, что с появлением новых экспериментальных данных и эти значения окажутся неприемлимыми. Тем не менее, значения параметров, из имеющихся экспериментальных данных, показанные на правом графике рис. 9, надо считать наиболее достоверными в силу того, что в этом случае выполняется важное условие  $|t| \rightarrow 0$ .

<sup>5</sup>Этот эффект получил название "Peele's pertinent puzzle"(PPP)(see the paper [4]). Он является следствием переоценки систематических ошибок и проявляется в свойствах весовой матрицы, используемой для составления функции  $\chi^2$ .

$$\left( \begin{array}{l} \rho = 0.0772503 \pm 0.011391 \quad [ ] \quad |t|_{\max} \equiv t_{0\max} = 0.069275 \quad [\text{GeV}^2] \\ \sigma_{\text{tot}} = 103.902 \pm 0.825709 \quad [\text{mb}] \quad |t|_{\min} \equiv t_{0\min} = 0.0028 \quad \chi^2_{\text{f}} = 26.9181 \\ \mathbf{B} = 20.6944 \pm 0.0459045 \quad [\text{GeV}^{-2}] \quad \text{PValue} = 0.556689 \\ \text{DoP} = 35 \quad \chi^2_{\text{f}}/\text{DoP} = 0.769088 \quad \text{NoF} = 32 \quad \chi^2_{\text{f}}/\text{NoF} = 0.84119 \\ (\text{d}\sigma/\text{d}t)_{\text{pp}}^{\text{ATLAS}} \quad \sqrt{s} = 13 \quad [\text{TeV}] \quad \text{F}(t) \equiv (1-t/\Lambda^2)^{-2} \end{array} \right)$$

$$\text{Correlation matrix} = \begin{pmatrix} \rho & \sigma_{\text{tot}} & \mathbf{B} \\ \rho & 1. & -0.113039 & 0.799646 \\ \sigma_{\text{tot}} & & 1. & -0.0224594 \\ \mathbf{B} & & & 1. \end{pmatrix}$$

Minimum number of decimal places in correlation matrix: 1

Minimum number of decimal places for parameter  $\rho$ : 3 ;

Minimum number of decimal places for parameter  $\sigma_{\text{tot}}$ : 1 ;

Minimum number of decimal places for parameter  $\mathbf{B}$ : 2 ;

$$\left( \begin{array}{l} \rho = 0.0913147 \pm 0.0179188 \quad [ ] \quad |t|_{\max} \equiv t_{0\max} = 0.01369 \quad [\text{GeV}^2] \\ \sigma_{\text{tot}} = 104.871 \pm 0.861389 \quad [\text{mb}] \quad |t|_{\min} \equiv t_{0\min} = 0.0028 \quad \chi^2_{\text{f}} = 6.50018 \\ \mathbf{B} = 21.8454 \pm 0.591009 \quad [\text{GeV}^{-2}] \quad \text{PValue} = 0.621998 \\ \text{DoP} = 12 \quad \chi^2_{\text{f}}/\text{DoP} = 0.541681 \quad \text{NoF} = 9 \quad \chi^2_{\text{f}}/\text{NoF} = 0.722242 \\ (\text{d}\sigma/\text{d}t)_{\text{pp}}^{\text{ATLAS}} \quad \sqrt{s} = 13 \quad [\text{TeV}] \quad \text{F}(t) \equiv (1-t/\Lambda^2)^{-2} \end{array} \right)$$

$$\text{Correlation matrix} = \begin{pmatrix} \rho & \sigma_{\text{tot}} & \mathbf{B} \\ \rho & 1. & 0.119797 & 0.785524 \\ \sigma_{\text{tot}} & & 1. & 0.25702 \\ \mathbf{B} & & & 1. \end{pmatrix}$$

Minimum number of decimal places in correlation matrix: 1

Minimum number of decimal places for parameter  $\rho$ : 2 ;

Minimum number of decimal places for parameter  $\sigma_{\text{tot}}$ : 1 ;

Minimum number of decimal places for parameter  $\mathbf{B}$ : 1 ;

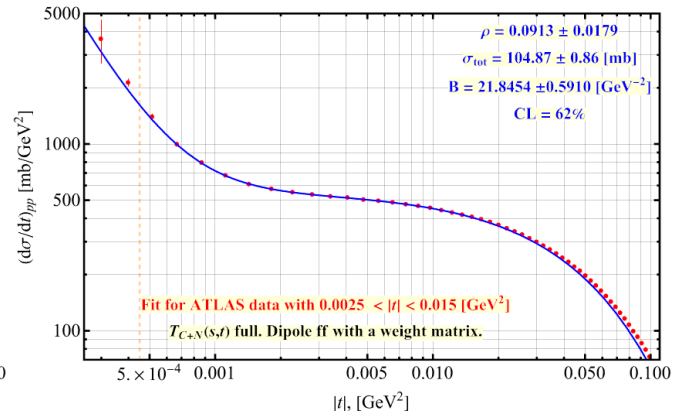
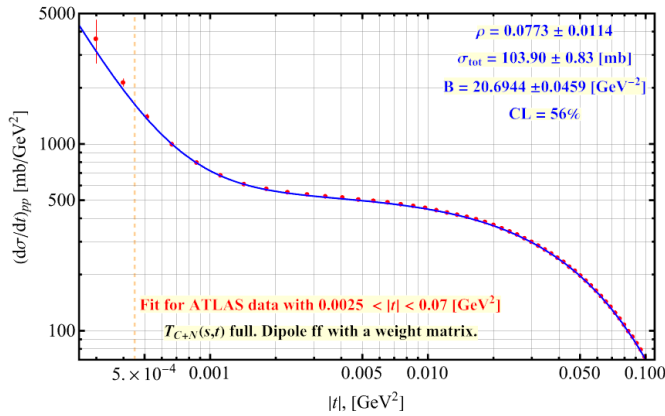


Рис. 9. Экспериментальные данные ATLAS и теоретические кривые дифференциального сечения ATLAS, соответствующие отсечению экспериментальных данных как сверху так и снизу.

## Выводы

1. Из рассмотрения результатов извлечения параметров из экспериментов ATLAS и TOTEM мы имеем фактически два набора этих параметров:

	TOTEM	ATLAS
$\rho$	$0.1104 \pm 0.0475$	$0.0913 \pm 0.0179$
$\sigma_{\text{tot}}$ [mb]	$111.94 \pm 3.12$	$104.87 \pm 0.86$
$B$ [GeV <sup>-2</sup> ]	$21.2263 \pm 0.9906$	$21.8454 \pm 0.5910$
[GeV <sup>2</sup> ]	$0.004 <  t  < 0.014$	$0.003 <  t  < 0.014$

- С полными сечениями повторяется ситуация, как на TEVATRON, где крайние значения расходятся более чем на 3 стандартных ошибки. В нашем случае центральное значение полного сечения ATLAS отстоит от центрального значения полного сечения TOTEM более чем на восемь (!) **стандартных ошибок ATLAS** (мы отталкиваемся именно от эксперимента ATLAS по той причине что суммарные ошибки этого эксперимента принципиально меньше ошибок эксперимента TOTEM). Этот факт говорит о том что не следует объединять эти два массива в один единый массив данных и делать его фитирование (о чем кратко упомянуто в начале статьи). И уж тем более не следует извлекать значения основных параметров из совместного фита этих двух объединённых экспериментальных массивов. Тем более что экспериментальные значения ATLAS приведены в полном объёме и выставлены на сайте HEPData, в то время как эксперимент TOTEM до сих пор не представил свои измерения на этом сайте. И поэтому мы говорим об отличии измерений TOTEM по отношению к эксперименту ATLAS. Но никак не в обратном порядке. Нельзя смешивать в один единый массив эти два эксперимента.
- Значения  $\rho$  параметра с учетом ошибок значительно перекрываются, но ошибка этого параметра в TOTEM огромная и составляет более 40%. В эксперименте ATLAS эта ошибка составляет около 20%.
- И только значения  $B$  параметра близки друг к другу и не вызывают вопросов.

Все это позволяет сделать однозначные выводы о том что значения полного сечения в этих двух экспериментах недопустимо разнятся друг от друга, Значение  $\rho$  параметра измерено недостаточно точно и сильно расходятся в двух экспериментах, что не позволяет отдать предпочтение одному из них с точностью не хуже 10% (как это заявляют авторы TOTEM).

2. Подробная обработка результатов экспериментов приводит к выводу о том, что значения дифференциального сечения в обоих экспериментах измерены недостаточно точно, особенно при малых значениях передачи импульса, что приводит к систематическому сдвигу теоретических результатов (PPP эффект). В



обоих экспериментах вызывают подозрения экспериментальные данные, у которых  $|t| < 0.003 \text{ GeV}^2$ .

3. Для надежного извлечения параметров кулон ядерной интерференции не представляют интереса экспериментальные данные у которых  $|t| > 0.07 \text{ GeV}^2$ .
4. В целом, оба этих эксперимента в совокупности не дают надежных оснований для точных теоретических оценок полного сечения рассеяния и  $\rho$  параметра.

## Acknowledgements

Мы признательны Анатолию Лиходеду за полезные обсуждения этой работы.

## Список литературы

- [1] V.A. Petrov, N.P. Tkachenko,  
Phys. Rev. D **106** (2022) 5, 054003;  
V.A. Petrov, N.P. Tkachenko,  
arXiv:2204.08815;
- [2] G. Antchev et al. TOTEM Collaboration.  
Eur.Phys.J. **C79** (2019) no.9, 785,  
arXiv:1812.04732; CERN-EP-2017-335-v3.
- [3] Measurement of the total cross section and  $\rho$ -parameter from elastic scattering in collisions at TeV with the ATLAS detector.  
The ATLAS collaboration CERN-EP-2022-129, 2022.  
<https://www.hepdata.net/record/ins2122408>
- [4] R. Frühwirth, D. Neudecker and H. Leeb,  
EPJ Web of Conferences, **27** (2012)00008 .
- [5] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik,  
Table of Integrals, Series and Products. Seventh Edition.  
A. Jeffrey(ed.), D. Zwillinger (ed.)  
Academic Press as an imprint of Elsevier.  
ISBN-13: 978-0-12-373637-6, ISBN-10:0-12-373637-4.

*Рукопись поступила 4 мая 2023 г.*

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

В.А. Петров, Н.П. Ткаченко  
ATLAS vs TOTEM: тревожное расхождение.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы **L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X**.

---

Подписано к печати 18.05.2023 Формат 60 × 84/16. Цифровая печать.  
Печ.л. 1,25. Уч.-изд.л. 1,6. Тираж 60. Заказ 8. Индекс 3649.

---

НИИ «Курчатовский институт» – ИФВЭ  
142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

[www.ihep.ru](http://www.ihep.ru); библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

---

П Р Е П Р И Н Т 2023–7,  
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2023

---