Analysis Note

Time shift TOF calibration and PID procedure in the Xe+Cs(I) collisions at 3.8 AGeV (BM@N run8)

Valery Troshin[1],Fedor Karpushkin, Mikhail Rumyantsev, Alexander Demanov, Irina Zhavoronkova[2], Mikhail Mamamev[3], Arkadiy Taranenko[4], Petr Parfenov.
National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia
Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

В настоящей AnalysisNote представлена калибровка времяпролётных детекторов TOF400 и TOF700 для данных, полученных в эксперименте BM@N в Run8 при столкновениях ядер Xe+Cs(I) с энергией 3,8 АГэВ. Обоснована необходимость калибровки положений пиков реконструированных квадратов масс частиц; показаны зависимость временных сдвигов от периода набора данных и неоднородность этих сдвигов в пределах детекторов. Калибровка плоскостей детекторов выполнена по разности между зарегистрированным и ожидаемым временем пролёта протонов для всех периодов набора данных, а калибровка отдельных стрипов — для групп периодов. Для снижения зависимости временных сдвигов от импульса, а также для согласования временных сдвигов протонов и пионов проведено масштабирование реконструированного импульса. Представлены итоговые положения пиков реконструированных частиц; показаны отсутствие их зависимости от периода набора данных и улучшение временного разрешения детекторов. Показана процедура отбора двухзарядных частиц по ионизационным потерям и последующая идентификация заряженных частиц(PID).

---

[1]E-mail: troshin@jinr.ru
[2]E-mail: irina.calv.45@gmail.com
[3]E-mail: mam.mih.val@gmail.com
[4]E-mail: AVTaranenko@mephi.ru

Contents

1 Введение **3**

2 Данные и критерии отбора событий и треков **6**

3 Калибровка TOF400 и TOF700 **8**

4 How to use **19**

5 Идентификация по ионизационным потерям **23**

6 Идентификация заряженных частиц **25**

1 Введение

Времяпролётные детекторы TOF400 и TOF700 предназначены для идентификации заряженных частиц по времени их пролёта от мишени до плоскости детектора. Детекторы состоят из стриповых многозазорных резистивных плоских камер (Multigap Resistive Plate Chamber, MRPC). Рабочая область каждого MRPC-модуля TOF400 имеет размеры 60×30 см^2 и образует рабочую плоскость из 48 считывающих стрипов, ориентированных вертикально вдоль оси Y. Детектор TOF700 включает плоскости двух типов: "тёплые", расположенные вблизи оси пучка, и "холодные", размещённые по краям детектора. Рабочая область "тёплых" плоскостей имеет размеры 16×35 см^2 и состоит из 32 стрипов, ориентированных горизонтально вдоль оси X. Рабочая область "холодных" плоскостей имеет размеры 30×56 см^2 и включает 16 горизонтально ориентированных стрипов. Геометрическое расположение плоскостей TOF400 и TOF700 в проекции на плоскость X–Y представлено на Рис. 1.

Координата попадания частицы вдоль стрипа определяется по разности времён регистрации сигнала на его концах, а координату по другой оси — по положению сработавшего стрипа. Таким образом реконструируются координаты и время попадания частицы в плоскость детектора. В процессе реконструкции глобальные треки `BmnGlobalTrack`, предварительно экстраполированные к вершине взаимодействия, также экстраполируются до плоскостей TOF. Алгоритм сопоставления трека с хитами TOF основан на поиске хита, ближайшего к экстраполированной координате трека в плоскости детектора. Размер области поиска зависит от импульса реконструированной частицы и уменьшается с его увеличением. Если соответствующий хит найден, в объект `BmnGlobalTrack` записывается зарегистрированное этим хитом время; при отсутствии ассоциированного хита записывается значение -1. Расстояние от вершины взаимодействия до хита определяется как сумма длины траектории, восстановленной трекинговой системой, и длины участка её линейной экстраполяции до плоскости детектора.

Время, записываемое в хите TOF, представляет собой разность абсолютных времён, измеренных системами TOF и T0. Полученное время используется для расчёта квадрата массы частицы и последующей её идентификации.

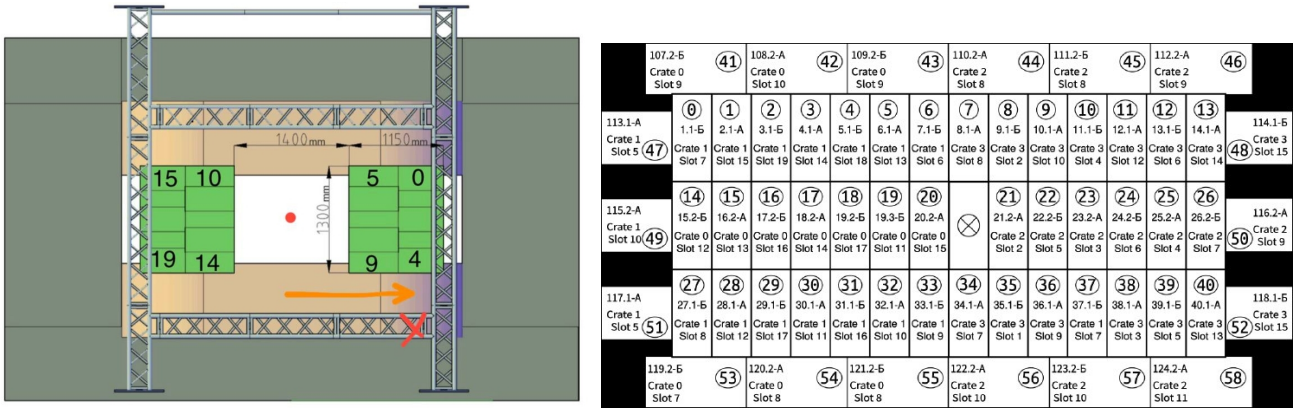


Figure 1: Расположение и нумерация плоскостей детекторов TOF400 (слева) и TOF700 (справа) в проекции на плоскость X–Y.

На рис. 2 представлены распределения $(m/q)^2$ в зависимости от p/q, полученные на основе DST-файлов продакшена версии 25.09.0. Слева приведено распределение для детектора TOF400, справа — для TOF700.

На полученных зависимостях, особенно для TOF400, наблюдаются выраженные полосы, пересекающие области ожидаемых значений квадратов масс идентифицируемых частиц. Кроме того, положения пиков масс смещены относительно значений PDG, причём величина смещения зависит от импульса. На рис. 3 показаны распределения $(m/q)^2$ в узком интервале $2 < p/q < 2{,}1$ ГэВ/c с указанием ожидаемых положений пиков. Указанные особенности обусловили необходимость дополнительной калибровки детекторов TOF с целью повышения качества идентификаци заряженных частиц.

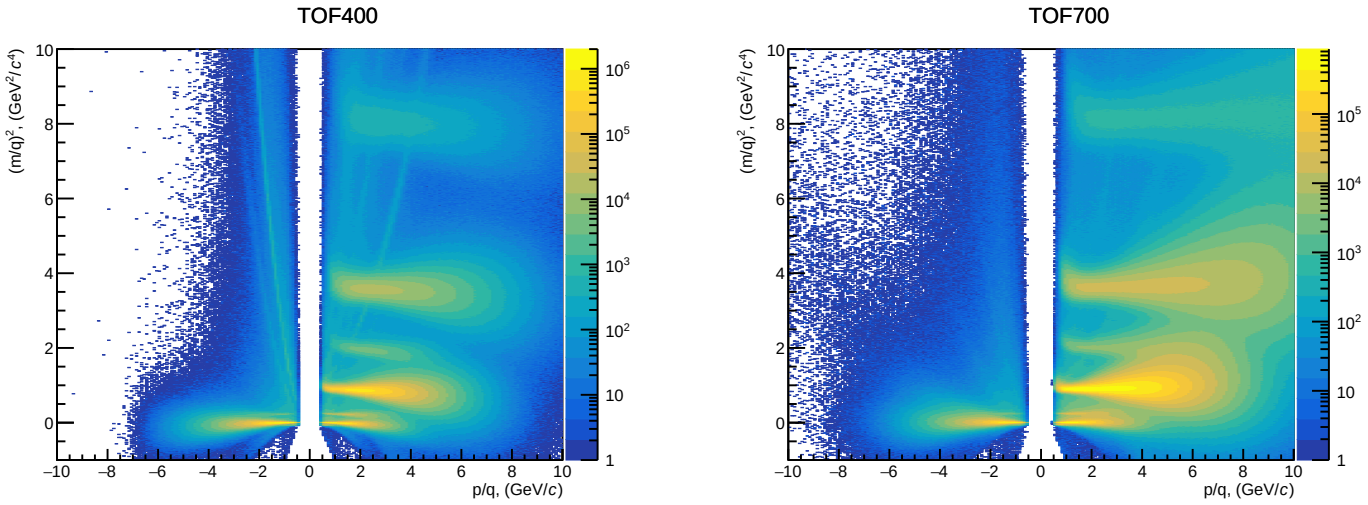


Figure 2: Распределения $(m/q)^2$ в зависимости от p/q для треков, идентифицированных с использованием детекторов TOF400 (слева) и TOF700 (справа). Распределения представлены в логарифмическом масштабе.

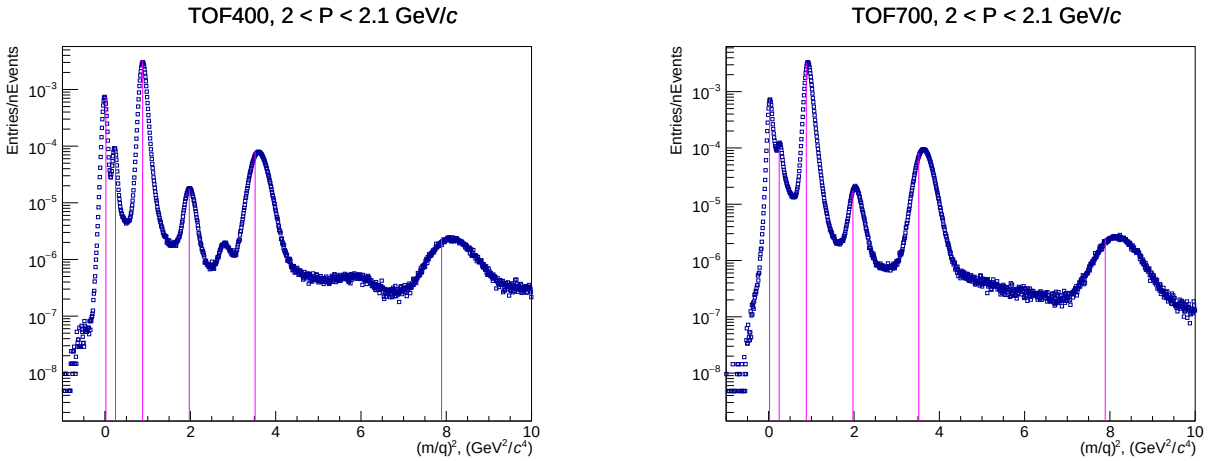


Figure 3: Распределения $(m/q)^2$ в интервале $2 < p/q < 2{,}1$ ГэВ/c для треков, идентифицированных с использованием детекторов TOF400 (слева) и TOF700 (справа). Распределения представлены в логарифмическом масштабе; фиолетовыми вертикальными линиями отмечены ожидаемые положения пиков идентифицируемых частиц.

2 Данные и критерии отбора событий и треков

В январе 2023 года в эксперименте BM@N было зарегистрировано около 500 млн событий столкновений Xe+Cs(I) при энергии пучка 3,8A ГэВ. Для анализа применялись следующие критерии отбора данных и событий:

1. Для калибровки использовались данные продакшена версии 25.09.0.

2. Периоды набора данных с идентификатором `runId` менее 6950 исключались вследствие нестабильной работы детекторов GEM и FSD, зафиксированной в электронном журнале BM@N, а также недостаточного объёма статистики для проведения калибровки.

3. В анализ включались события физических сеансов набора данных, зарегистрирован с использованием триггера CCT2.

4. По результатам контроля качества данных были исключены 74 периода набора данных, содержавшие 18 млн событий (см. Analysis Note “Report on the QA and run-by-run systematics in the Xe+Cs(I) run8”).

5. События с наложением взаимодействий (pileup) отбирались в соответствии с методикой, изложенной в Analysis Note “Event classification in the Xe+Cs(I) collisions at 3.8 AGeV collected by the BM@N experiment (Run 8)”.

6. Для реконструкции первичной вершины `vtxMpd` требовалось наличие не менее двух треков.

7. Координата первичной вершины вдоль оси Z (`vtxZMpd`) должна находиться в интервале $[-1; 1]$ см, а её положение в плоскости X–Y ограничивалось областью радиусом 1,5 см.

Для обеспечения требуемого качества реконструкции треков применялись следующие критерии:

1. Число хитов внутренней трековой системы BM@N, использованных при реконструкции трека заряженной частицы, должно удовлетворять условию $N_{\text{hits}} > 5$.

2. Качество аппроксимации траектории трека должно удовлетворять условию $\chi^2/\mathrm{NDF} < 5$.

3. Расстояние наибольшего сближения трека с первичной вершиной (distance of closest approach, DCA) в плоскости X–Y не должно превышать 2,5 см.

3 Калибровка TOF400 и TOF700

Калибровка основана на анализе разности между временем, зарегистрированным детектором TOF, и ожидаемым временем пролёта, рассчитанным в предположении заданного типа частицы:

$$\Delta T = T_{\text{TOF hit}} - \frac{L_{\text{tr}}}{c}\frac{\sqrt{p_{\text{tr}}^2 + m_{\text{expected}}^2}}{p_{\text{tr}}}, \tag{1}$$

где $T_{\text{TOF hit}}$ — время регистрации хита в детекторе TOF относительно начала события, L_{tr} — длина пути частицы от вершины взаимодействия до хита, p_{tr} — реконструированный импульс, m_{expected} — масса частицы предполагаемого типа.

Для частиц выбранного типа распределение ΔT содержит пик со средним значением, близким к нулю. Ширина пика характеризует временное разрешение детектора, а широкий расходящийся фон обусловлен частицами других типов. Отклонение положения пика от нуля далее называется временным смещением. Его величину определяют путём аппроксимации пика функцией Гаусса; пример такой аппроксимации приведён на рис. 4.

На рис. 5 для выбранного стрипа TOF400 показаны зависимости временного смещения и временного разрешения от идентификатора периода набора данных `runId`. Значения получены в предположении, что частицы с импульсом $2 < p < 4$ ГэВ/c являются протонами. Кроме того, временные смещения различаются для отдельных стрипов одного детектора. На рис. 6 приведены зависимости среднего временного смещения от глобального номера стрипа для TOF400 и TOF700.

Глобальный номер стрипа TOF400 определяется как

$$N_{\text{global}} = 48N_{\text{plane}} + N_{\text{strip}},$$

а для TOF700 используется функция

$$N_{\text{global}} = \begin{cases} 32N_{\text{plane}} + N_{\text{strip}}, & N_{\text{plane}} < 41, \\ 1312 + 16(N_{\text{plane}} - 41) + N_{\text{strip}}, & N_{\text{plane}} \geq 41. \end{cases}$$

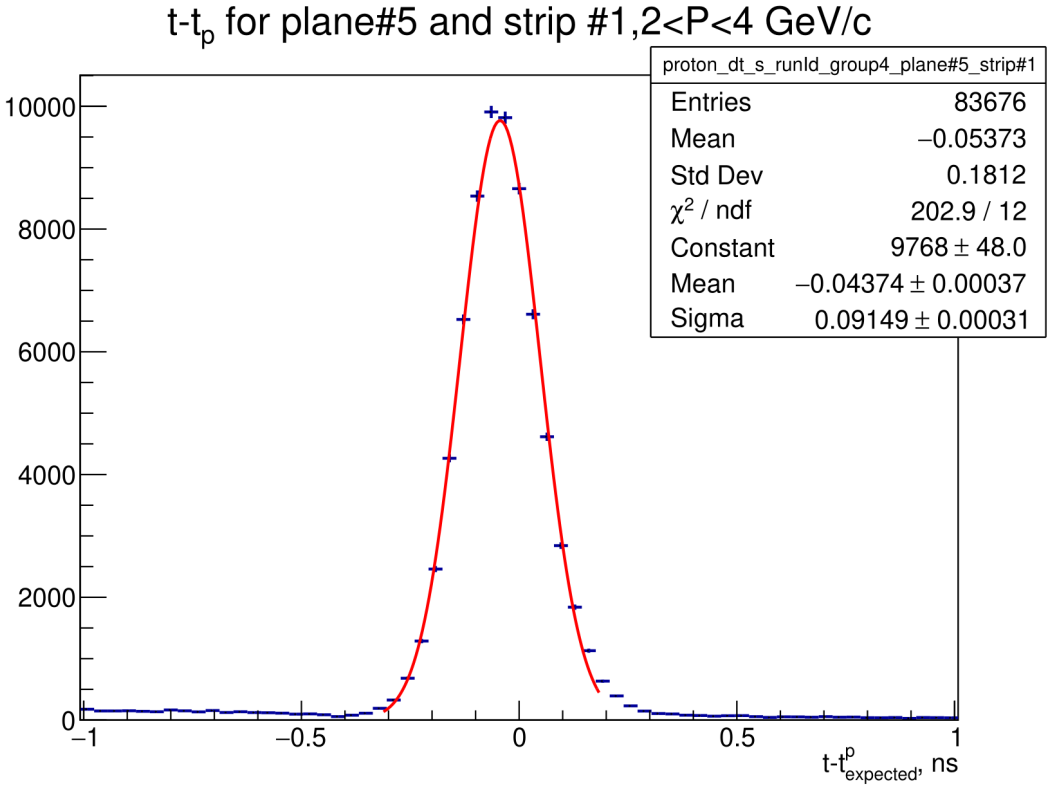


Figure 4: Распределение $T - T_p$ для частиц с импульсом $2 < p < 4$ ГэВ/c в выбранном стрипе детектора TOF400. Результат аппроксимации пика функцией Гаусса показан красной линией.

Полученные результаты показывают, что временные смещения различаются как между стрипами детекторов TOF, так и между периодами набора данных. Поэтому для каждого стрипа и каждой группы значений `runId` рассчитывается поправка, противоположная по знаку среднему значению распределения и смещающая его к нулю.

Для нескольких стрипов TOF400 (№ 41, 307, 616, 878 и 949) абсолютные значения временных смещений приблизительно на два порядка превышают типичные. Это может быть связано с ошибками, допущенными на предыдущих этапах калибровки. Пример соответствующего распределения приведён на рис. 7. Перед выполнением общей калибровки к временам этих стрипов применяют фиксированные поправки величиной от 3 до 12,5 нс, смещающие распределения к нулю.

На рис. 8 показаны зависимости среднего временного смещения от `runId` для протонов с импульсом $2 < p < 4$ ГэВ/c и отрицательно заряженных пионов с импульсом $1 < p < 2$ ГэВ/c. Среднее смещение для каждого `runId` рассчитано

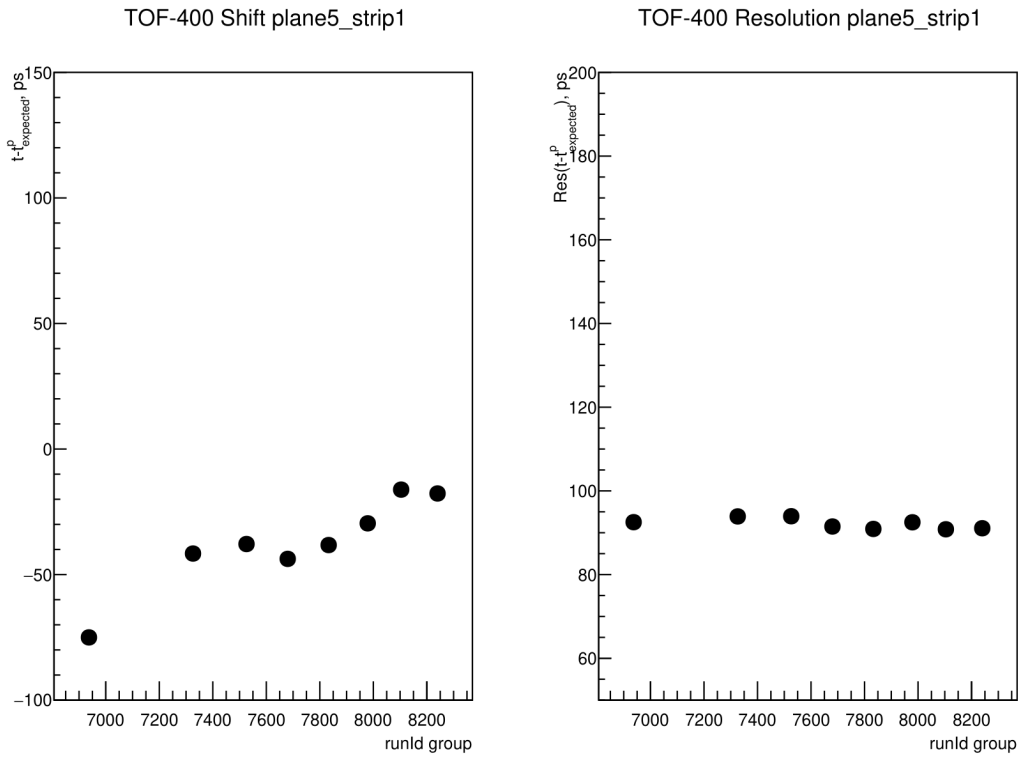


Figure 5: Зависимости среднего значения $T - T_p$ (слева) и временного разрешения (справа) от `runId` для выбранного стрипа детектора TOF400. Использованы частицы с импульсом $2 < p < 4$ ГэВ/c.

по совокупности всех стрипов. Чёрными точками показаны результаты до калибровки, а синими квадратами — после первого этапа, на котором каждый стрип калибровали отдельно для соответствующей группы значений `runId`. Калибровочные поправки определяли по протонам и применялись к пионам в том же виде.

После первого этапа абсолютные значения временных смещений и их зависимость от `runId` существенно уменьшаются, в том числе для пионов, однако средние значения остаются отличными от нуля. Это обусловлено тем, что из-за ограниченной статистики поправка для каждого стрипа определяется для группы периодов набора данных, а не для каждого `runId` отдельно. На втором этапе временные смещения анализируются для групп стрипов, принадлежащих одной плоскости. Объединение стрипов обеспечивает достаточную статистику для определения поправки для каждой плоскости и каждого `runId`. Пример такого анализа представлен на рис. 9.

Результаты второго этапа калибровки показаны на рис. 8 красными символами.

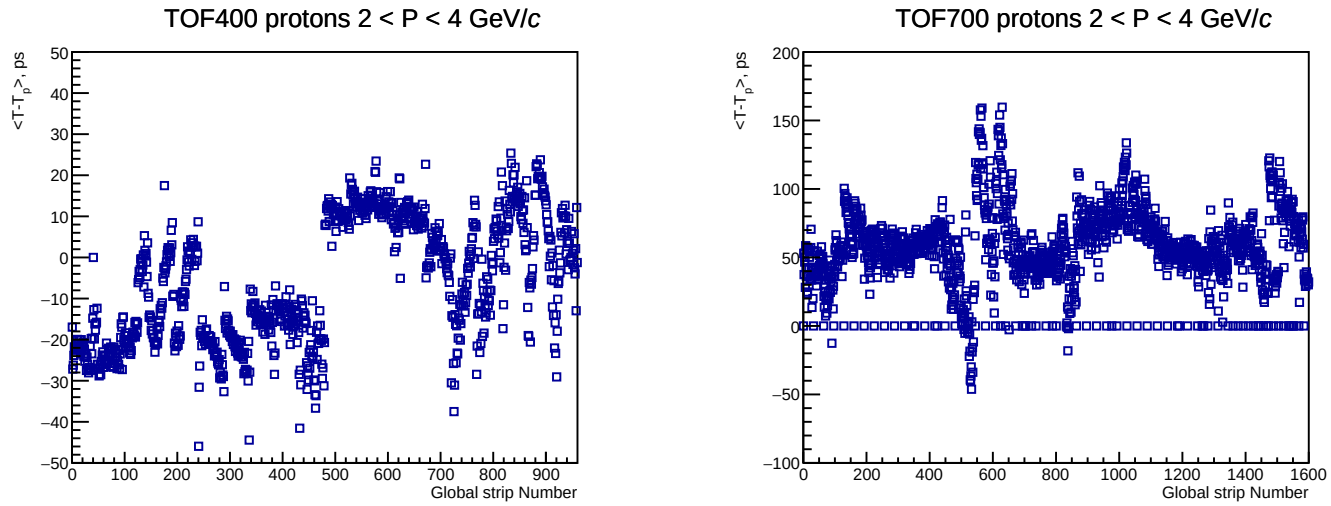


Figure 6: Зависимость среднего значения $T - T_p$ от глобального номера стрипа для детекторов TOF400 (слева) и TOF700 (справа). Использованы частицы с импульсом $2 < p < 4$ ГэВ/c.

Для протонов, по которым рассчитывали поправки, средние временные смещения близки к нулю, а зависимость от `runId` устранена. Средние смещения пионов также практически не зависят от `runId`, однако систематически на 30–40 пс меньше соответствующих значений для протонов.

Зависимости временных смещений от реконструированного импульса приведены на рис. 10. Протоны обозначены чёрным цветом, положительно заряженные пионы — красным, отрицательно заряженные пионы — синим. Временные смещения заметно изменяются во всём рассматриваемом диапазоне импульсов.

В ультрарелятивистском пределе траектории частиц близки к прямолинейным, а различия их скоростей уменьшаются, поэтому временные смещения протонов и пионов при больших импульсах должны согласовываться. Наблюдаемое расхождение может быть связано с переоценкой реконструированного импульса, используемого при вычислении ожидаемого времени пролёта и массы частицы. Для проверки этого предположения реконструированный импульс был уменьшен на 2%. Полученные зависимости представлены на рис. 11: при импульсах выше 1 ГэВ/c кривая для протонов существенно приближается к кривым для пионов. Влияние масштабирования импульса на зависимость временного смещения от `runId` показано фиолетовыми символами на рис. 8.

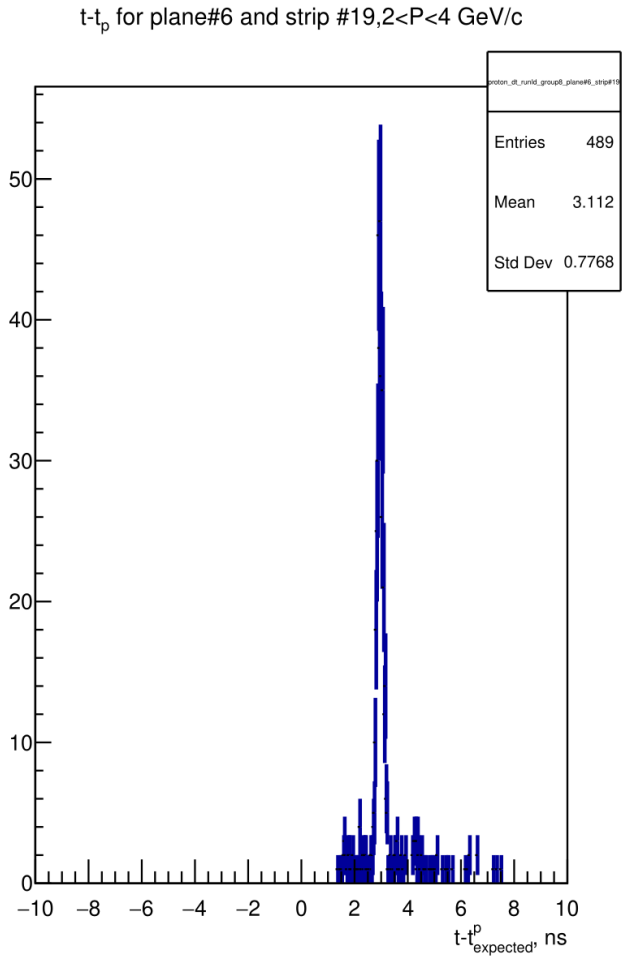


Figure 7: Распределение $T - T_p$ для частиц с импульсом $2 < p < 4$ ГэВ/c в стрипе № 307 детектора TOF400.

После масштабирования импульса средние временные смещения становятся отрицательными. Поэтому первые два этапа калибровки, выполняемые для отдельных стрипов и плоскостей, повторяются с учётом скорректированного импульса, чтобы сместить итоговые распределения к нулю.

Итоговые зависимости временных смещений от `runId` приведены на рис. 12: протоны обозначены красными символами, пионы — синими; результаты для TOF400 показаны слева, для TOF700 — справа. Для протонов зависимость от `runId` отсутствует, а для пионов остаётся пренебрежимо малой. Величины смещений для протонов и пионов хорошо согласуются. Итоговые зависимости от реконструированного импульса представлены на рис. 13. По форме они аналогичны зависимостям на рис. 11, но расположены ближе к нулю.

Влияние калибровки на распределение $(m/q)^2$ в зависимости от p/q показано

на рис. 14. После калибровки положение частиц становится менее зависимым от импульса и приближается к ожидаемым значениям. Это также видно на рис. 15–16, где результаты после калибровки обозначены красными символами и согласуются с распределением, полученному по реконструированным симуляционным данным, обозначенных зелеными маркерами. Кроме того, ширина пиков уменьшается, что свидетельствует об улучшении разрешения. Аналогичный эффект наблюдается в зависимости временного разрешения от номера стрипа, представленной на рис. 17: устранение зависимости временных смещений от `runId` уменьшает ширину итоговых распределений.

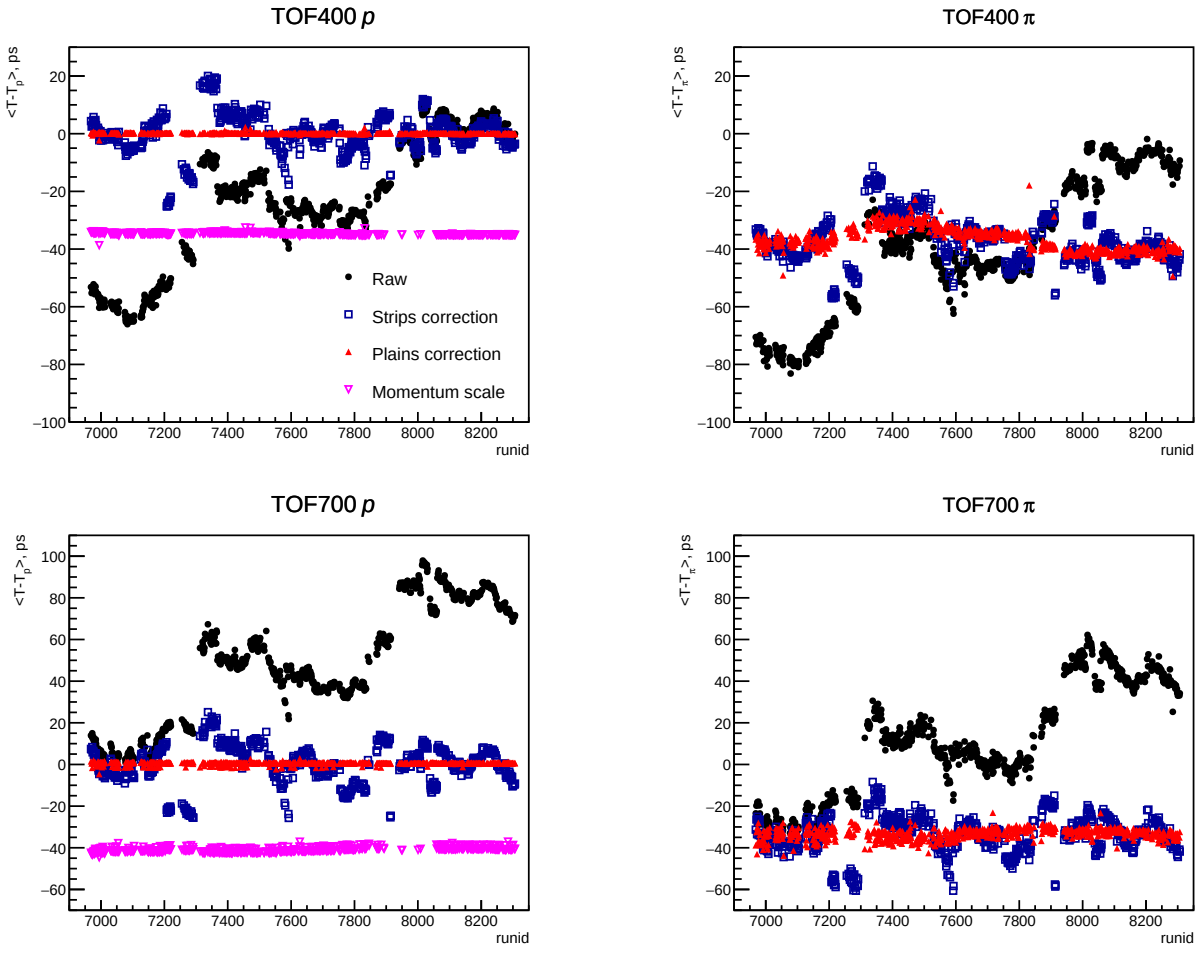


Figure 8: Зависимость среднего значения $T - T_{\text{expected}}$ от `runId` для протонов с импульсом $2 < p < 4$ ГэВ/c (слева) и отрицательно заряженных пионов с импульсом $1 < p < 2$ ГэВ/c (справа). Верхний ряд соответствует TOF400, нижний — TOF700.

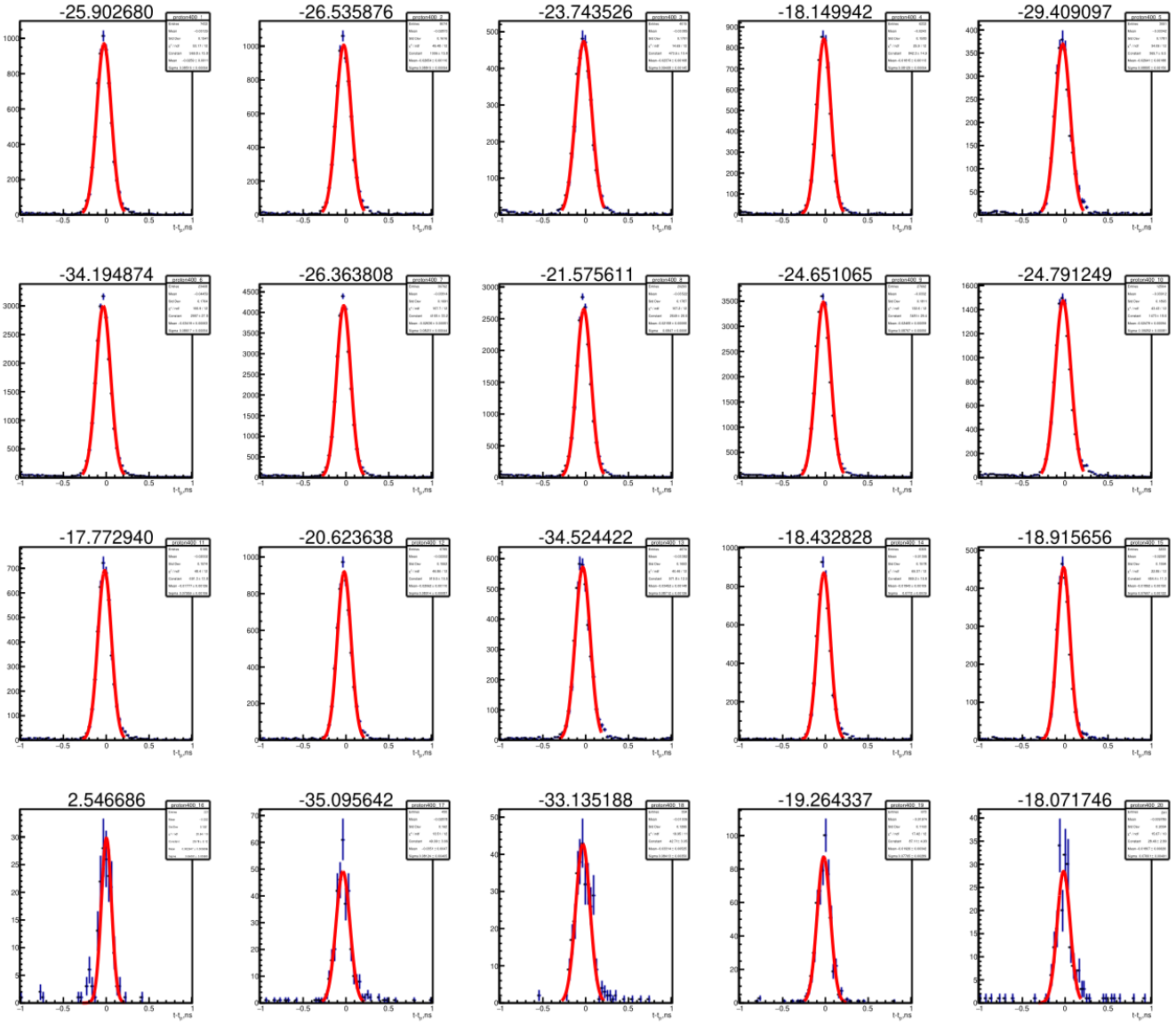


Figure 9: Распределения $T - T_p$ для частиц с импульсом $2 < p < 4$ ГэВ/c по плоскостям TOF400 для выбранного `runId`. Пики аппроксимированы функцией Гаусса; над каждой гистограммой указано полученное временное смещение в пикосекундах.

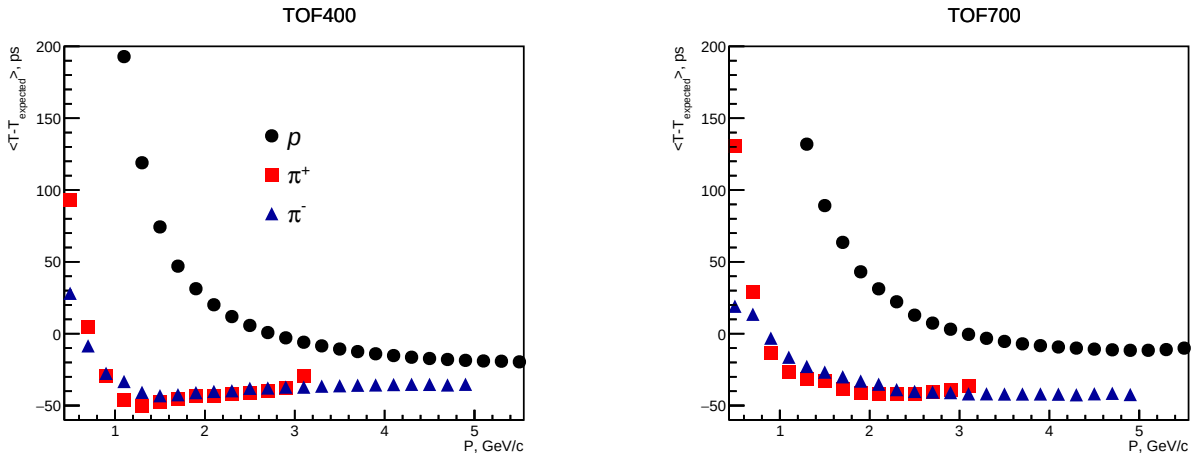


Figure 10: Зависимость среднего значения $T - T_{\text{expected}}$ от реконструированного импульса для TOF400 (слева) и TOF700 (справа). Протоны обозначены чёрным цветом, положительно заряженные пионы — красным, отрицательно заряженные пионы — синим.

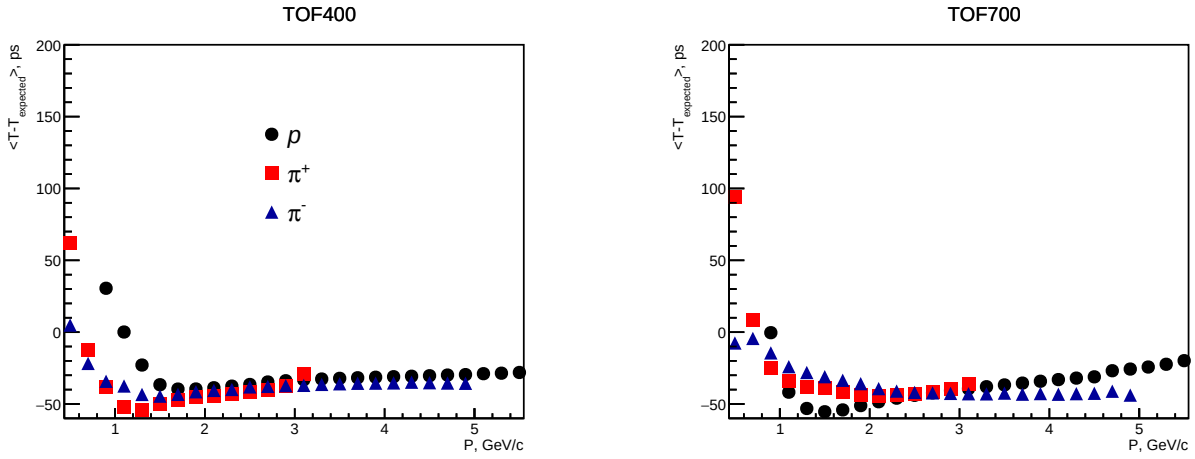


Figure 11: Зависимость среднего значения $T - T_{\text{expected}}$ от реконструированного импульса после его уменьшения на 2% для TOF400 (слева) и TOF700 (справа). Протоны обозначены чёрным цветом, положительно заряженные пионы — красным, отрицательно заряженные пионы — синим.

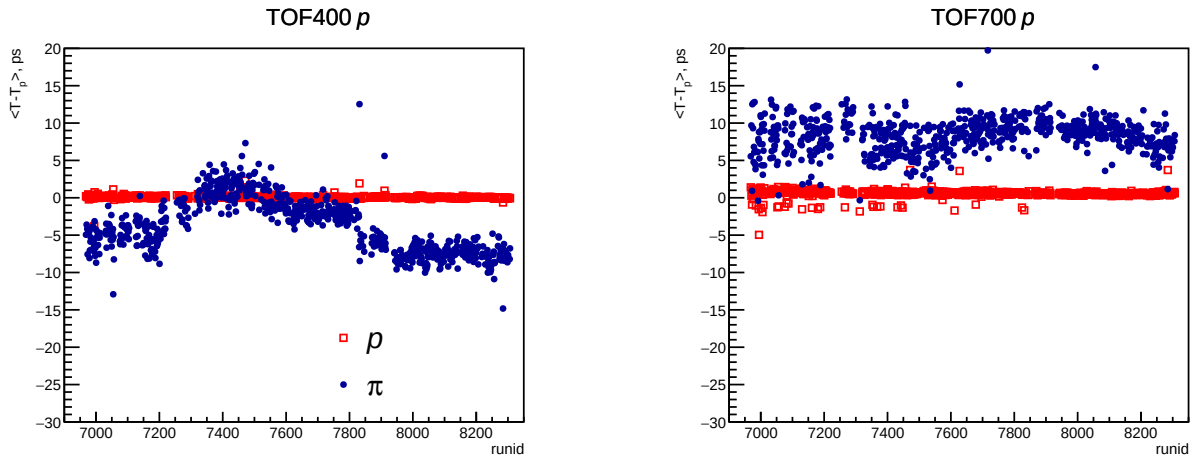


Figure 12: Итоговая зависимость среднего значения $T - T_{\text{expected}}$ от `runId` для протонов с импульсом $2 < p < 4$ ГэВ/c (красные символы) и отрицательно заряженных пионов с импульсом $1 < p < 2$ ГэВ/c (синие символы). Результаты для TOF400 показаны слева, для TOF700 — справа.

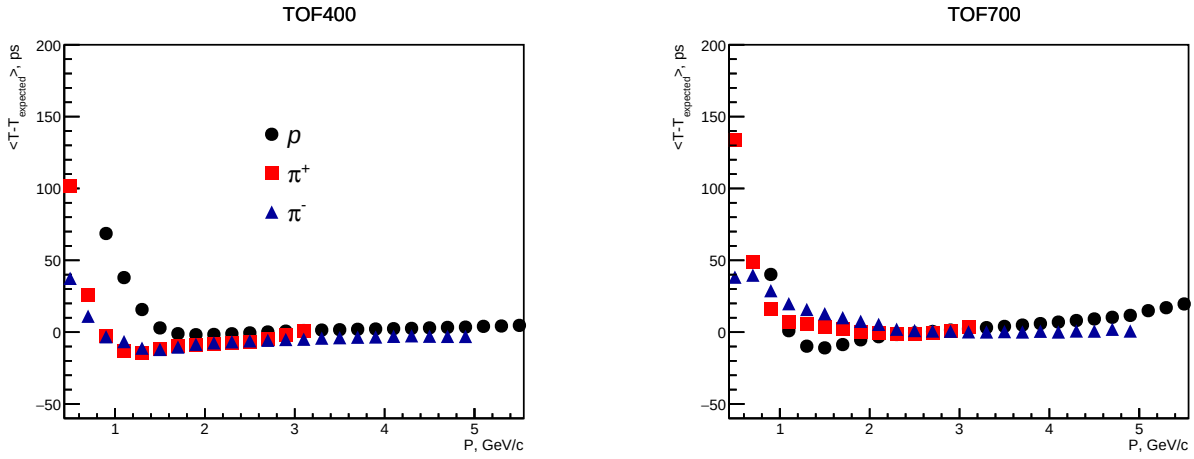


Figure 13: Итоговая зависимость среднего значения $T - T_{\text{expected}}$ от реконструированного импульса после его уменьшения на 2% для TOF400 (слева) и TOF700 (справа). Протоны обозначены чёрным цветом, положительно заряженные пионы — красным, отрицательно заряженные пионы — синим.

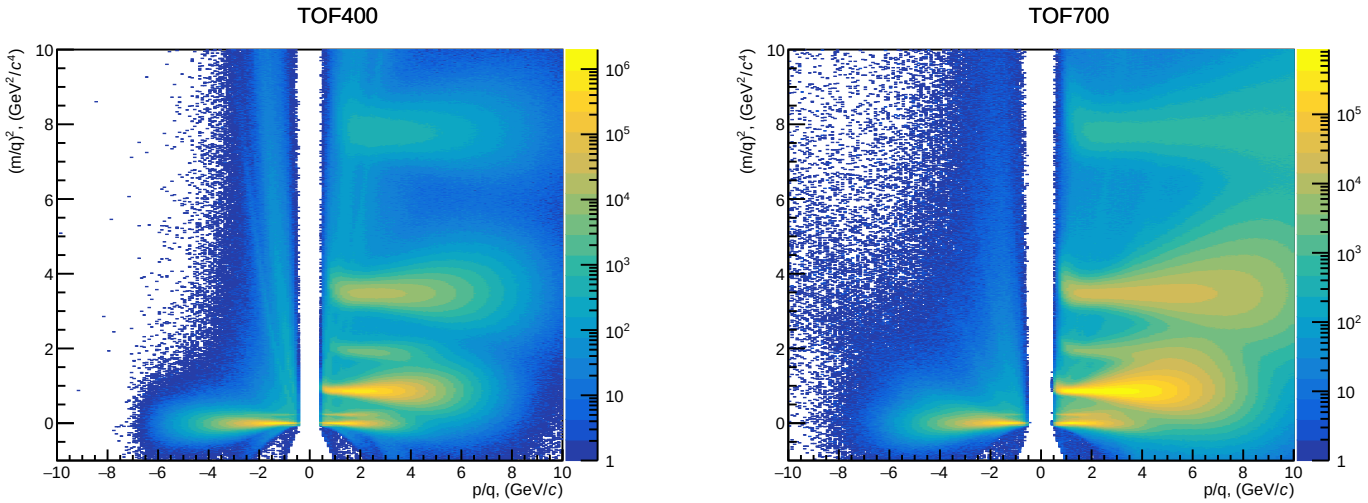


Figure 14: Распределения $(m/q)^2$ в зависимости от p/q для треков, идентифицированных с использованием детекторов TOF400 (слева) и TOF700 (справа) после калибровки. Распределения представлены в логарифмическом масштабе.

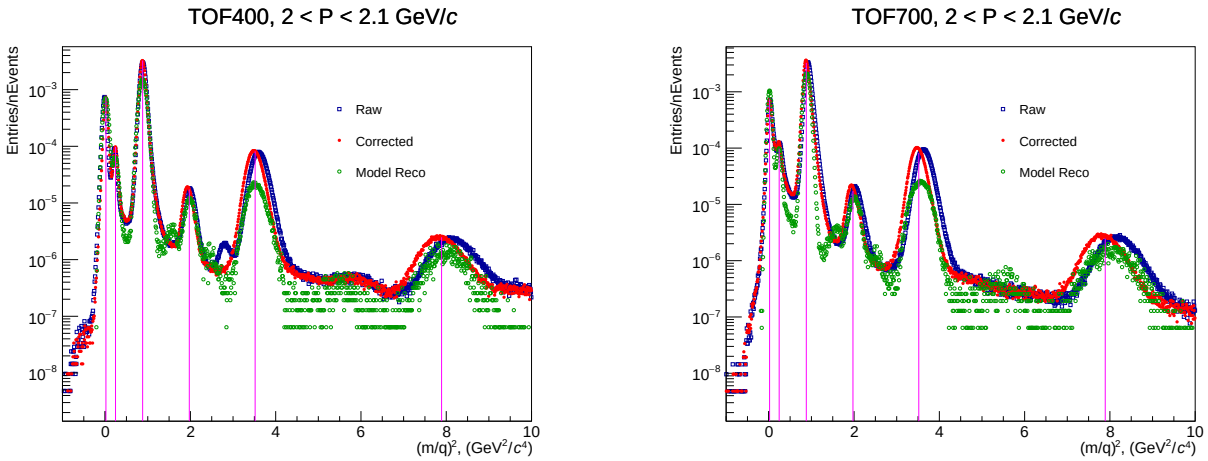


Figure 15: Распределения $(m/q)^2$ в интервале $2 < p/q < 2{,}1$ ГэВ/c для треков, идентифицированных с использованием детекторов TOF400 (слева) и TOF700 (справа). Распределения представлены в логарифмическом масштабе. Синими символами показаны результаты до калибровки, красными — после калибровки, а зелеными — распределение по реконструированным данным симуляции; фиолетовыми вертикальными линиями отмечены ожидаемые положения пиков идентифицируемых частиц.

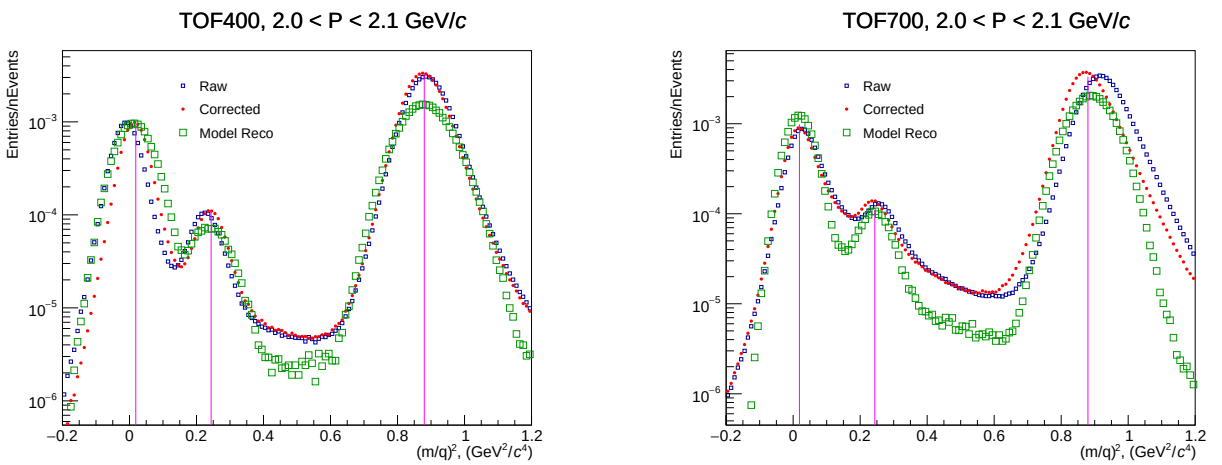


Figure 16: Распределения $(m/q)^2$ в интервале $2 < p/q < 2{,}1$ ГэВ/c для треков, идентифицированных с использованием детекторов TOF400 (слева) и TOF700 (справа). Распределения представлены в логарифмическом масштабе. Синими символами показаны результаты до калибровки, красными — после калибровки, а зелеными — распределение по реконструированным данным симуляции; фиолетовыми вертикальными линиями отмечены ожидаемые положения пиков идентифицируемых частиц.

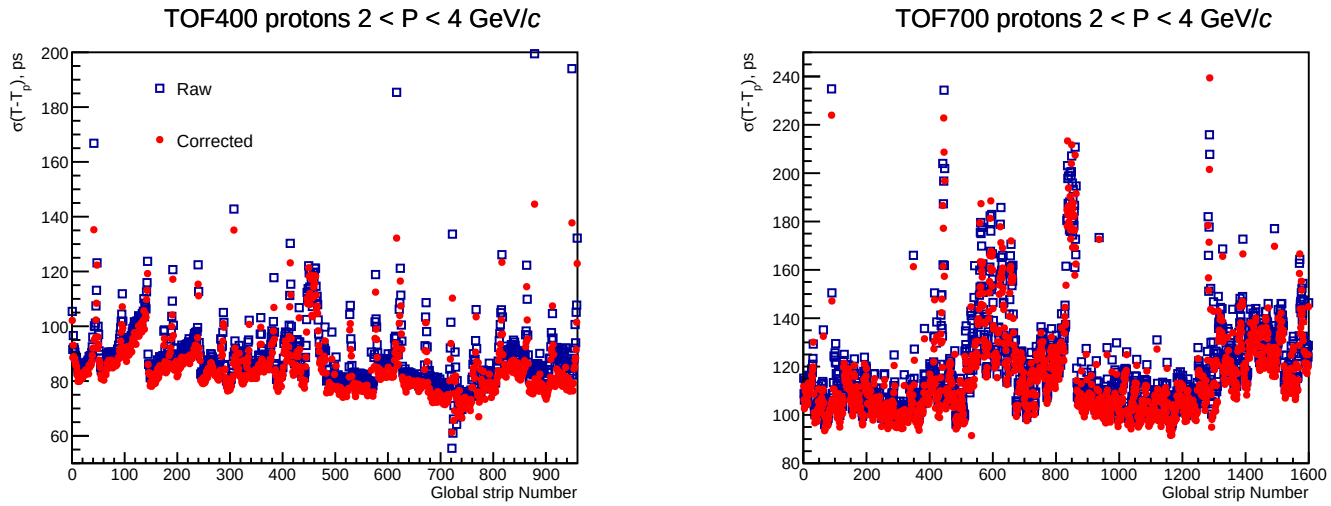


Figure 17: Зависимость временного разрешения, определённого по распределению $T - T_p$ для частиц с импульсом $2 < p < 4$ ГэВ/c, от глобального номера стрипа для TOF400 (слева) и TOF700 (справа). Синим цветом показаны результаты до калибровки, красным — после её выполнения.

4 How to use

Listing 1: Input histograms

```
//TOF runid calib
  auto file_calib_runid_tof = TFile::Open(str_run_tof_calib_file.
     c_str(), "READ");
  if (!file_calib_runid_tof || file_calib_runid_tof->IsZombie())
  {
      std::cerr << "Error: Could not open file " << "\n";
      return;
  }
  file_calib_runid_tof->cd();
TH2D* h2_400_run_calib = nullptr;
  TH2D* h2_700_run_calib = nullptr;
  file_calib_runid_tof->GetObject("h_400_runid_mean_shift",
     h2_400_run_calib);
  file_calib_runid_tof->GetObject("h_700_runid_mean_shift",
     h2_700_run_calib);
// for strip
  TH2D* h2_400_run_strip_calib = nullptr;
  TH2D* h2_700_run_strip_calib = nullptr;
  file_calib_runid_tof->GetObject("corr_400_strip_map",
     h2_400_run_strip_calib);
  file_calib_runid_tof->GetObject("corr_700_strip_map",
     h2_700_run_strip_calib);
```

Listing 2: Global numeration for strips

```
.Define( "GlobalTof400StripNumber_toTr", [](ROOT::VecOps::RVec<
   float> vec_P, ROOT::VecOps::RVec<int> hit_num,vector<int>
   num_plane,vector<int> num_strip){
    std::vector<int> vec_strip_tr{};
    vec_strip_tr.reserve(vec_P.size());
    for( int i=0; i<vec_P.size(); ++i ){
        if(hit_num.at(i)==-1){
            vec_strip_tr.push_back(-999);
            continue;
        }
        vec_strip_tr.push_back(num_plane.at(i)*48+num_strip.at(i));
    }
    return vec_strip_tr;
}, {"trP","trTof400hit","trTof400Plane","trTof400Strip"} )
.Define( "GlobalTof700StripNumber_toTr", [](ROOT::VecOps::RVec<
   float> vec_P, ROOT::VecOps::RVec<int> hit_num,vector<int>
   num_plane,vector<int> num_strip){
    std::vector<int> vec_strip_tr{};
    vec_strip_tr.reserve(vec_P.size());
    for( int i=0; i<vec_P.size(); ++i ){
        if(hit_num.at(i)==-1){
            vec_strip_tr.push_back(-999);
            continue;
        }
        int plane_num = num_plane.at(i);
        int strip_num = num_strip.at(i);
        if(plane_num<41)
            vec_strip_tr.push_back(plane_num*32+strip_num);
        else
            vec_strip_tr.push_back(1312+(plane_num-41)*16+strip_num
               );
    }
    return vec_strip_tr;
}, {"trP","trTof700hit","trTof700Plane","trTof700Strip"} )
```

Listing 3: Corrected time

```
.Define( "tof700hitT_corr" ,[&]( ROOT::VecOps::RVec<double> vec_T,
   UInt_t run_id, std::vector<int> strip_700_num,ROOT::VecOps::RVec
   <float> vec_P,ROOT::VecOps::RVec<int> hit_num){
    ROOT::VecOps::RVec<double> vec_Tcorr{};
    vec_Tcorr.reserve(vec_P.size());
    for(int i=0;i<vec_P.size();i++){
        if(hit_num.at(i)==-1){
            vec_Tcorr.push_back(-999);
            continue;
        }
        double binx;
        binx = h2_700_run_calib->GetXaxis()->FindBin(run_id);
        double binx2 = h2_700_run_strip_calib->GetXaxis()->FindBin(
           run_id);
        double biny = strip_700_num.at(i)+1;
        vec_Tcorr.push_back(vec_T.at(hit_num.at(i)) +
           h2_700_run_calib->GetBinContent(binx,biny)/1000.+
           h2_700_run_strip_calib->GetBinContent(binx2,biny)/1000.)
           ;
    }

    return vec_Tcorr;
}, {"tof700hitT","runId","GlobalTof700StripNumber_toTr","trP","
   trTof700hit"} )
.Define( "tof400hitT_corr" ,[&]( ROOT::VecOps::RVec<double> vec_T,
   UInt_t run_id, std::vector<int> strip_400_num,ROOT::VecOps::RVec
   <float> vec_P,ROOT::VecOps::RVec<int> hit_num){
    ROOT::VecOps::RVec<double> vec_Tcorr{};
    vec_Tcorr.reserve(vec_P.size());
    for(int i=0;i<vec_P.size();i++){
        if(hit_num.at(i)==-1){
            vec_Tcorr.push_back(-999);
            continue;
        }
        double binx;
        binx = h2_400_run_calib->GetXaxis()->FindBin(run_id);
        double binx2 = h2_400_run_strip_calib->GetXaxis()->FindBin(
           run_id);
```

```
296         double biny = strip_400_num.at(i)+1;
297         vec_Tcorr.push_back(vec_T.at(hit_num.at(i))+
298            h2_400_run_calib->GetBinContent(binx,biny)/1000.+
299            h2_400_run_strip_calib->GetBinContent(binx2,biny)/1000.)
300            ;
301     }
302     return vec_Tcorr;
303 }, {"tof400hitT","runId","GlobalTof400StripNumber_toTr","trP","
304    trTof400hit"} )
305
```

5 Идентификация по ионизационным потерям

Совместное использование времяпролётных детекторов и трекинговой системы позволяет определить величину $(m/q)^2$, поэтому положение пика частицы зависит от отношения её массы к заряду. Как показано на Рис. 15, пик ядер $^3_2$He расположен между пиками протонов и дейтронов, причём хвосты его распределения могут вносить вклад в обе соседние области. Вследствие близости значений m/q ядра $^4_2$He попадают непосредственно в область дейтронного пика. Таким образом, идентификация только по данным TOF не позволяет полностью отделить протоны и дейтроны от вклада ядер гелия.

Для дополнительного разделения частиц по зарядовому числу используется информация об удельных ионизационных потерях энергии $\mathrm{d}E/\mathrm{d}x$, поскольку $\mathrm{d}E/\mathrm{d}x \propto q^2$.

Для оценки ионизационных потерь используется внутренняя трековая система FSD+GEM, расположенная внутри анализирующего магнита. Детектор FSD (Forward Silicon Detector), установленный непосредственно за мишенью, состоит из четырёх кремниевых станций. Расположенный за ним детектор GEM (Gas Electron Multiplier) включает семь станций с газовым чувствительным объёмом. Зарегистрированные в станциях сигналы в первую очередь используются для определения координат хитов, по совокупности которых реконструируется траектория частицы.

Вместе с тем амплитуда сигнала связана с энергией, оставленной частицей в чувствительном объёме детектора. Экспериментально измеряемой величиной является наведённый заряд Q_i в i-й станции. В качестве оценки средних ионизационных потерь используется средний зарядовый сигнал

$$\langle Q \rangle \equiv \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}N} \equiv \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} Q_i, \qquad 1 \leq N \leq 11, \tag{2}$$

где N — число станций FSD и GEM, в которых для данного трека были восстановлены хиты. Величина $\mathrm{d}Q/\mathrm{d}N$, коррелирующая с $\mathrm{d}E/\mathrm{d}x$, используется для разделения частиц по зарядовому числу.

На Рис. 18 слева представлено распределение $\mathrm{d}Q/\mathrm{d}N$ в зависимости от

p/q для всех реконструированных треков. Раздельные полосы однозарядных и двузарядных частиц наблюдаются даже без предварительной идентификации с помощью детекторов TOF. Справа приведено соответствующее распределение для кандидатов в дейтроны, предварительно отобранных по данным TOF. Красной линией показана зависящая от p/q граница, разделяющая однозарядные дейтроны и двузарядные ядра $^4_2$He. Граница выбрана таким образом, чтобы при заданном p/q треки, удовлетворяющие условию, соответствовали дейтронам с вероятностью не менее 95%. После применения данного критерия доля однозарядных частиц в полной выборке кандидатов в дейтроны, предварительно отобранных по TOF, превышает 99%.

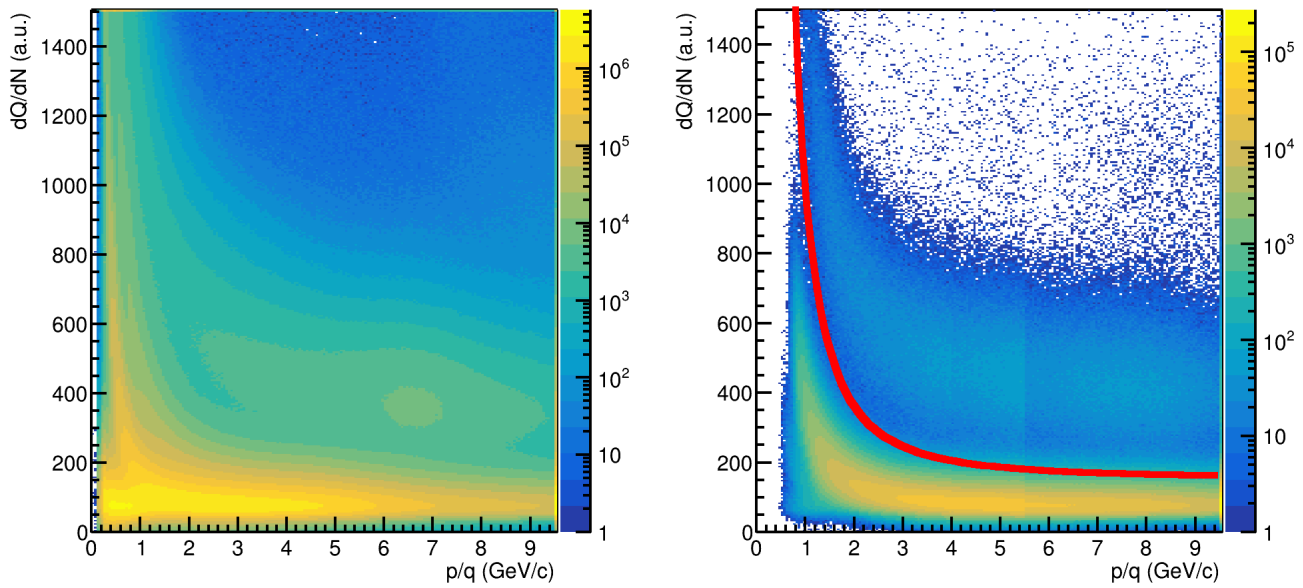


Figure 18: Распределение среднего зарядового сигнала $\mathrm{d}Q/\mathrm{d}N$ в зависимости от p/q для всех реконструированных треков (слева) и для кандидатов в дейтроны, предварительно отобранных по данным TOF (справа). Красной линией показана граница между однозарядными дейтронами и двузарядными ядрами $^4_2$He. Цветовая шкала представлена в логарифмическом масштабе.

Таким образом, отбор по среднему зарядовому сигналу позволяет существенно подавить вклад двузарядных ядер в распределение $(m/q)^2$ и тем самым повысить чистоту выборок протонов и дейтронов.

6 Идентификация заряженных частиц

Заключительным этапом обработки данных после калибровки TOF400 и TOF700 является идентификация заряженных частиц. Для каждого типа частиц определяются зависимости среднего значения $\mu_{m^2}(p/q)$ распределения $(m/q)^2$ и его среднеквадратичного отклонения $\sigma_{m^2}(p/q)$ от p/q. Эти зависимости характеризуют положение и разрешение соответствующего пика и в дальнейшем используются как функции идентификации частиц (particle identification, PID).

Для определения указанных параметров распределение $(m/q)^2$ в каждом узком интервале p/q аппроксимируются суммой сигнальных компонент, соответствующих отдельным типам частиц, и фоновой компоненты. Пики протонов и дейтронов описываются распределением Стьюдента

$$f(x) = A\,\frac{\Gamma\left(\frac{\nu+1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{\nu}{2}\right)\sqrt{\nu}\,\sigma}\left[1+\frac{1}{\nu}\left(\frac{x-x_0}{\sigma}\right)^2\right]^{-\frac{\nu+1}{2}}, \tag{3}$$

пики остальных частиц — функцией Гаусса, а фоновую компоненту — функцией Коши

$$f(x) = A\,\frac{\gamma}{(x-\mu)^2+\gamma^2}, \tag{4}$$

где A — амплитуда компоненты, x_0 и μ — параметры положения, σ и γ — параметры ширины, ν — число степеней свободы распределения Стьюдента. Примеры аппроксимации распределений для частиц положительного и отрицательного заряда, зарегистрированных детекторами TOF400 и TOF700, представлены на рис. 19.

Для каждого типа частиц положения пиков и соответствующие среднеквадратичные отклонения определяются во всех интервалах p/q. Полученные зависимости представлены на рис. 20–33 и используются для построения PID-функций. На рис. 34 цветными линиями показаны границы областей идентификации, соответствующие $\mu_{m^2}(p/q) \pm 3\sigma_{m^2}(p/q)$.

На основе полученных аппроксимаций PID-функций для каждого типа частиц были построены распределения $n\sigma$ отдельно для детекторов TOF400 и TOF700. Величина $n\sigma$ используется в качестве критерия отбора частиц заданного

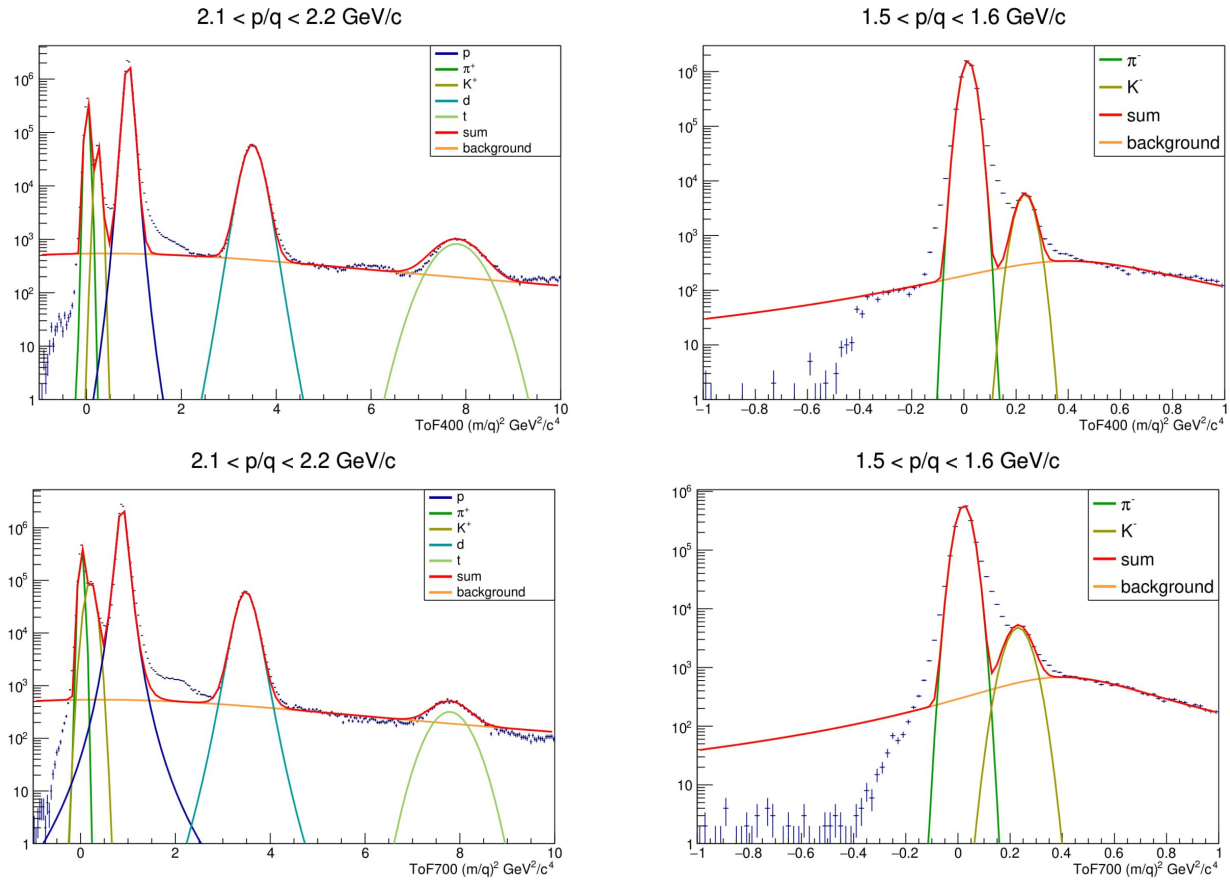


Figure 19: Распределения $(m/q)^2$ для положительно заряженных частиц в интервале $2{,}1 < p/q < 2{,}2$ ГэВ/c (слева) и отрицательно заряженных частиц в интервале $-1{,}6 < p/q < -1{,}5$ ГэВ/c (справа). Верхний ряд соответствует детектору TOF400, нижний — TOF700. Распределения представлены в логарифмическом масштабе. Пики протонов и дейтронов описаны распределениями Стьюдента, пики остальных частиц — функциями Гаусса, фон — функцией Коши.

типа при дальнейшем анализе.

Для проверки стабильности полученной параметризации распределения $n\sigma$ аппроксимировались функцией Гаусса в отдельных интервалах импульса, а также для различных групп периодов набора данных в фиксированном интервале импульса от 1,8 до 1,9 ГэВ/c. При корректной параметризации среднее значение распределения должно быть близко к нулю, а его ширина — к единице. Примеры аппроксимации распределений $n\sigma$ для протонов и пионов приведены на рис. 37. Полученные средние значения и ширины близки к ожидаемым.

Зависимости среднего значения и ширины распределений $n\sigma$ от p/q для

протонов и пионов в детекторах TOF400 и TOF700 представлены на рис. 38–43. Соответствующие зависимости от идентификатора периода набора данных `runId` приведены на рис. 44–49.

Распределения $n\sigma$ протонов и пионов обоих знаков заряда в зависимости от p/q для детекторов TOF400 и TOF700 показаны на рис. 35 и 36. Пунктирные линии обозначают границы областей отбора, соответствующие $n\sigma = \pm 2$ и $n\sigma = \pm 3$.

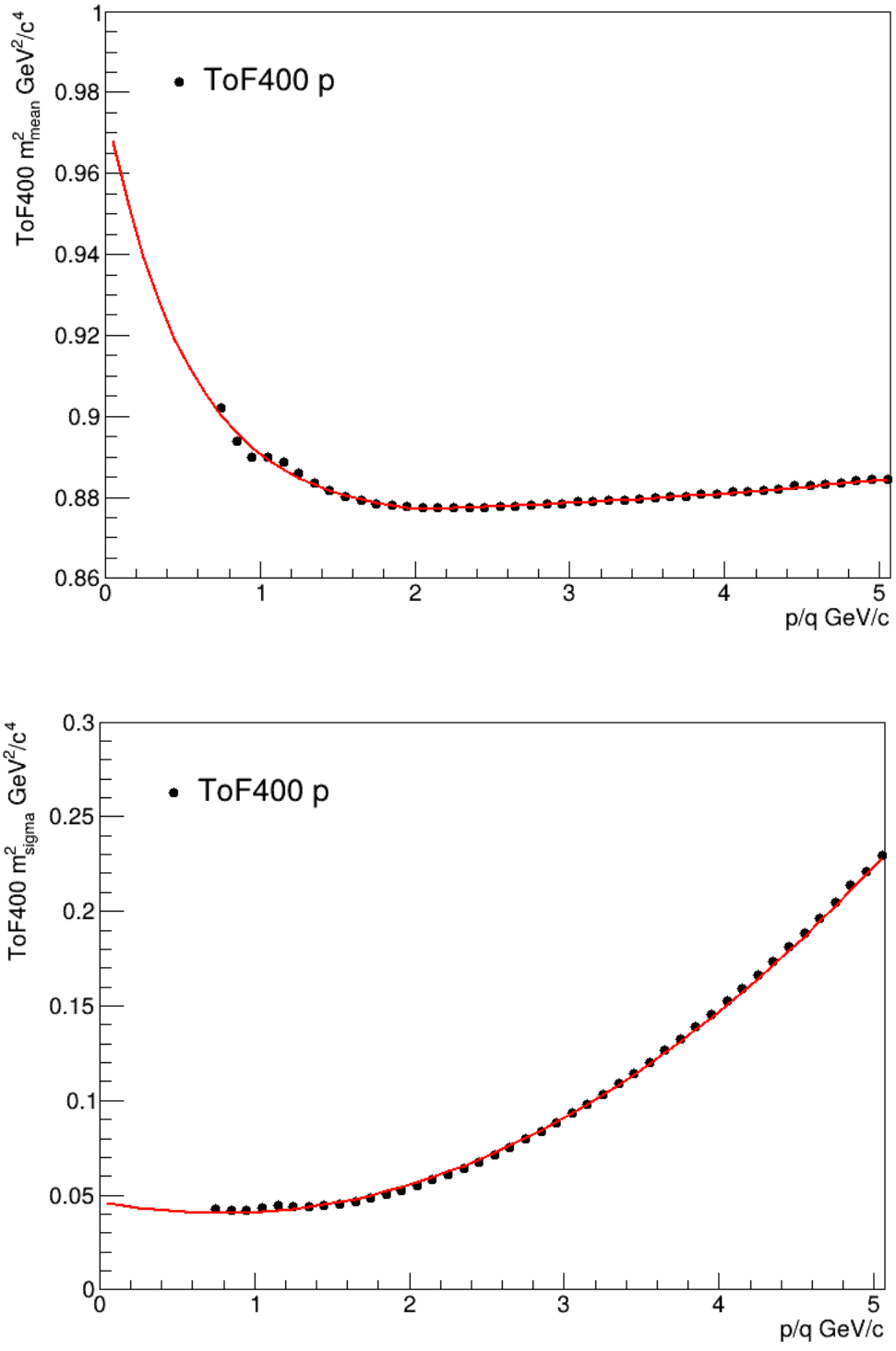


Figure 20: Зависимости среднего значения $(m/q)^2$ (сверху) и его среднеквадратичного отклонения (снизу) от p/q для протонов, зарегистрированных детектором TOF400.

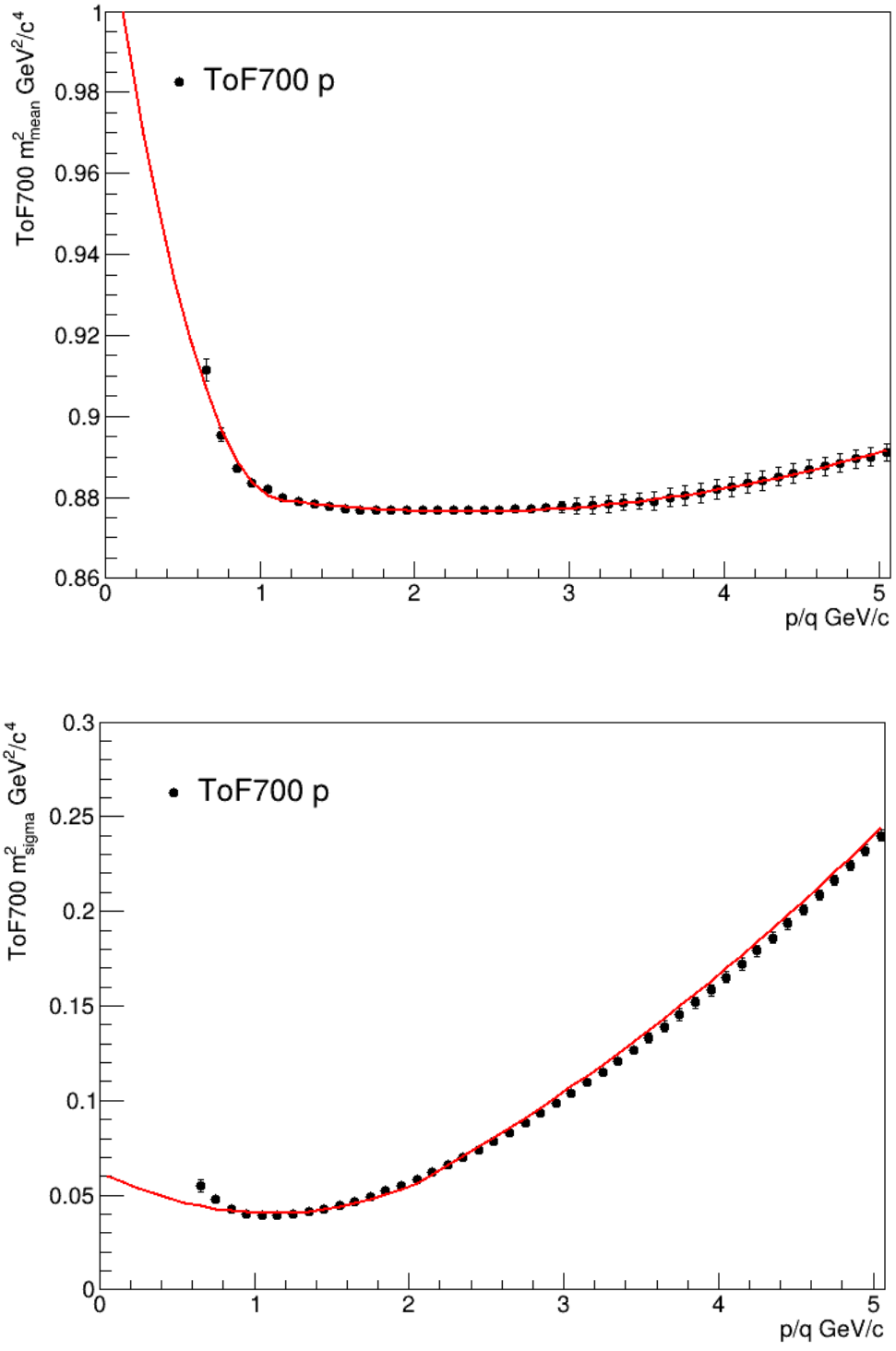


Figure 21: Зависимости среднего значения $(m/q)^2$ (сверху) и его среднеквадратичного отклонения (снизу) от p/q для протонов, зарегистрированных детектором TOF700.

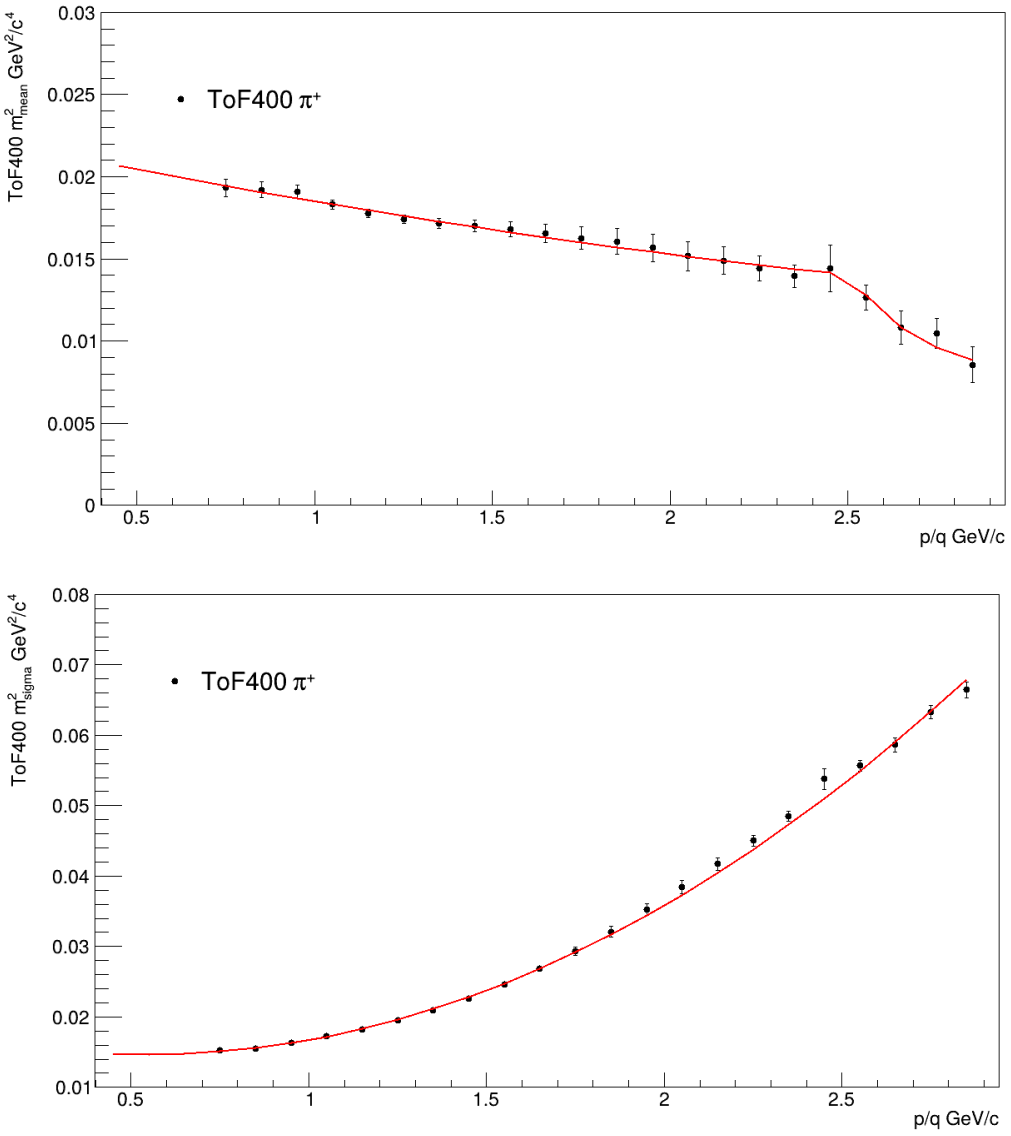


Figure 22: Зависимости среднего значения $(m/q)^2$ (сверху) и его среднеквадратичного отклонения (снизу) от p/q для положительно заряженных пионов, зарегистрированных детектором TOF400.

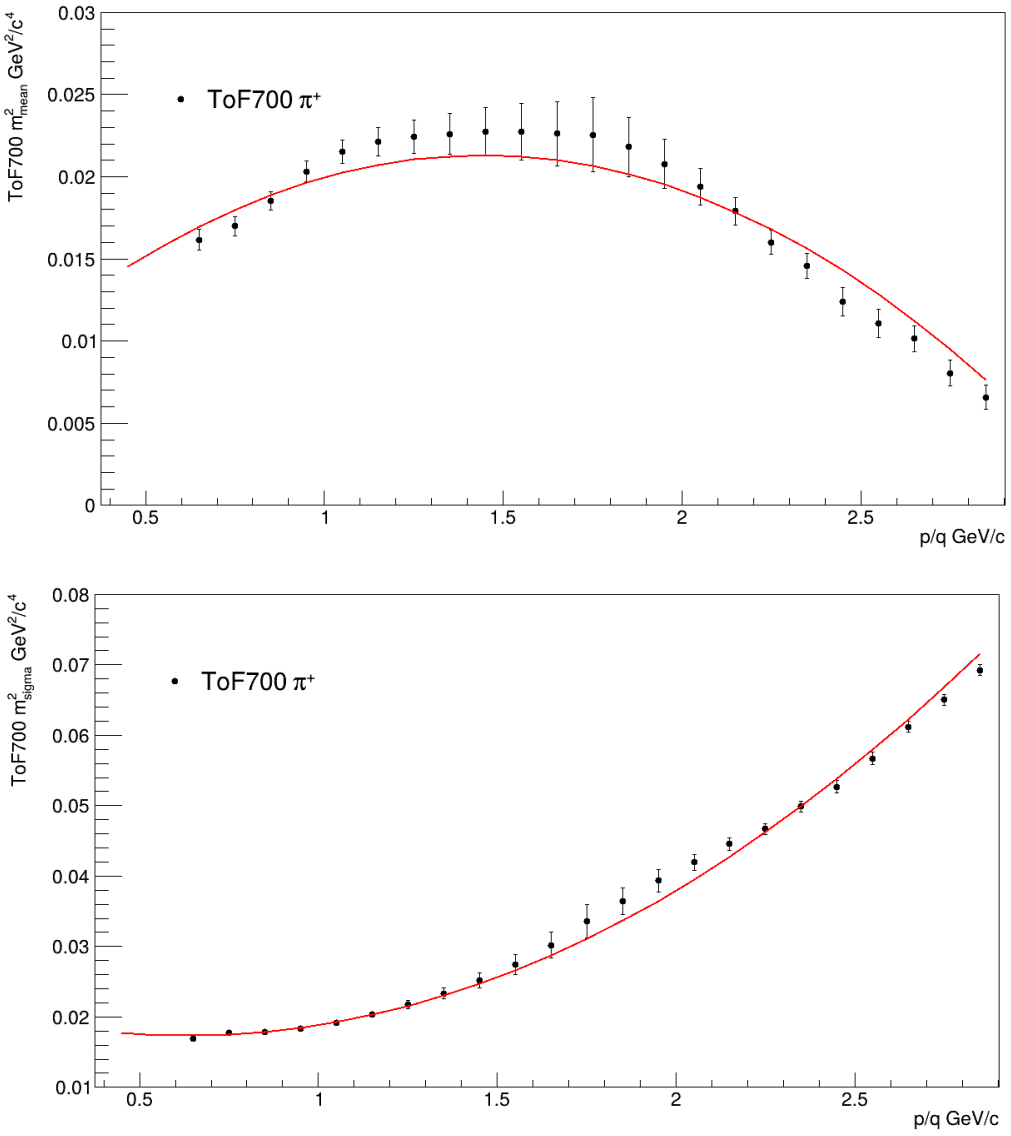


Figure 23: Зависимости среднего значения $(m/q)^2$ (сверху) и его среднеквадратичного отклонения (снизу) от p/q для положительно заряженных пионов, зарегистрированных детектором TOF700.

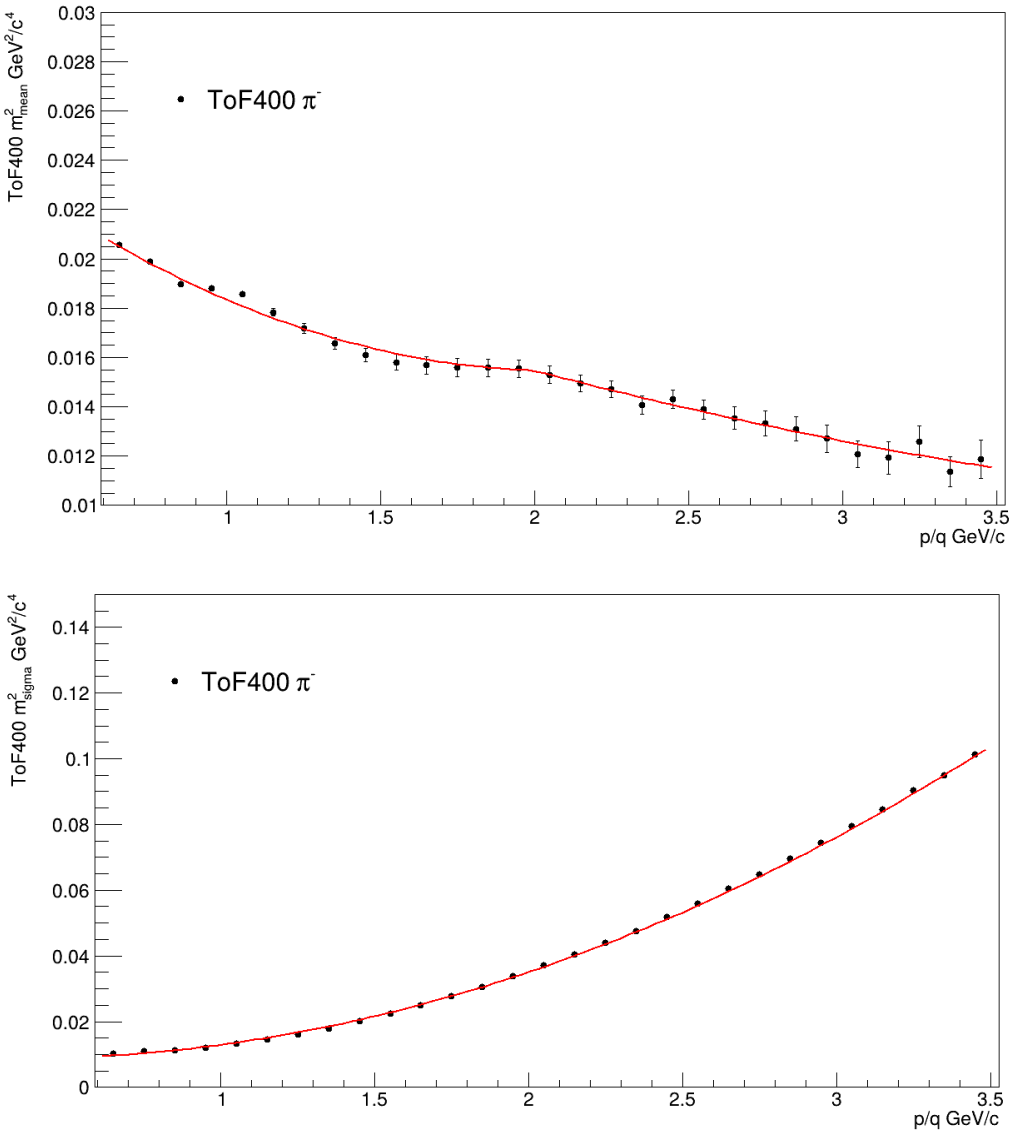


Figure 24: Зависимости среднего значения $(m/q)^2$ (сверху) и его среднеквадратичного отклонения (снизу) от p/q для отрицательно заряженных пионов, зарегистрированных детектором TOF400.

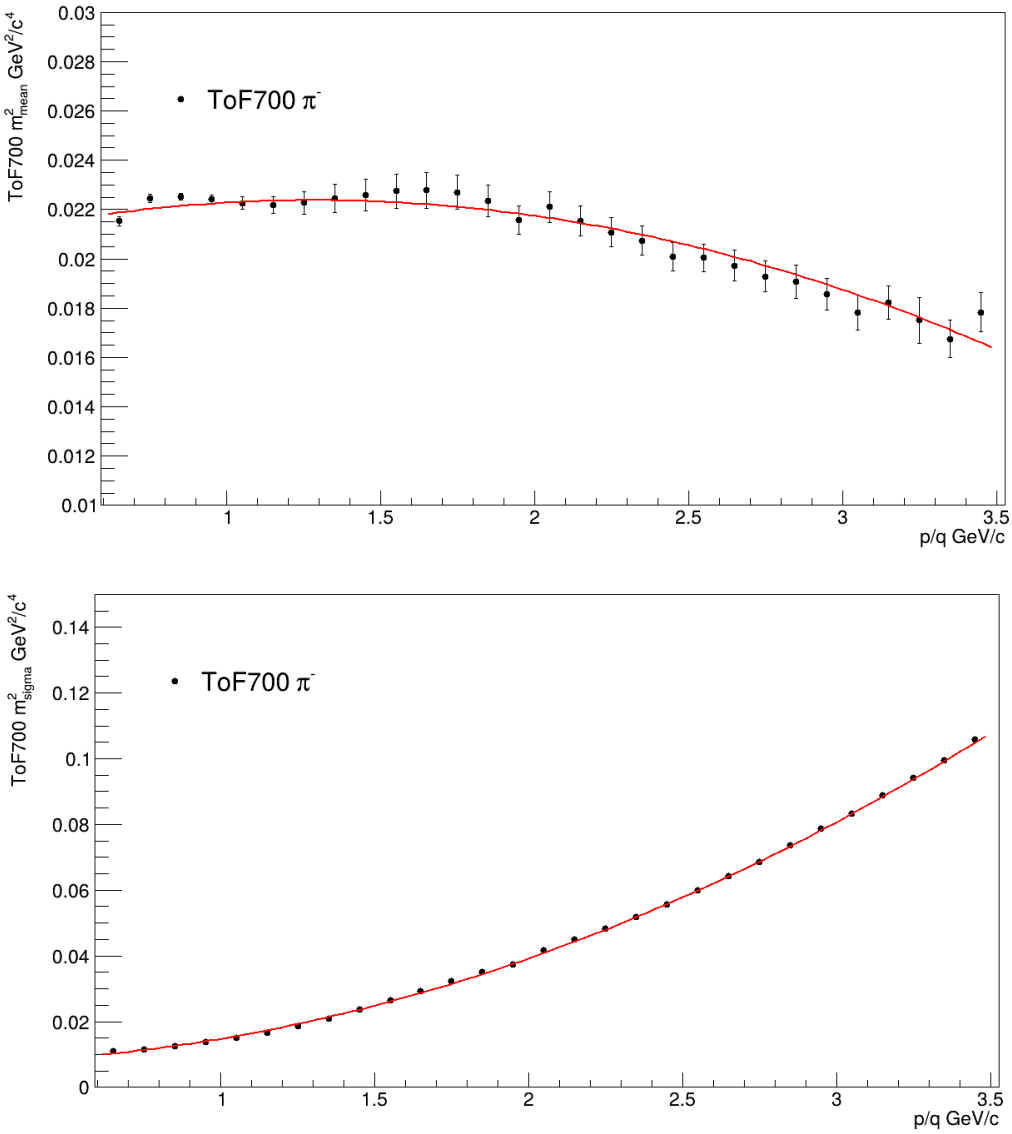


Figure 25: Зависимости среднего значения $(m/q)^2$ (сверху) и его среднеквадратичного отклонения (снизу) от p/q для отрицательно заряженных пионов, зарегистрированных детектором TOF700.

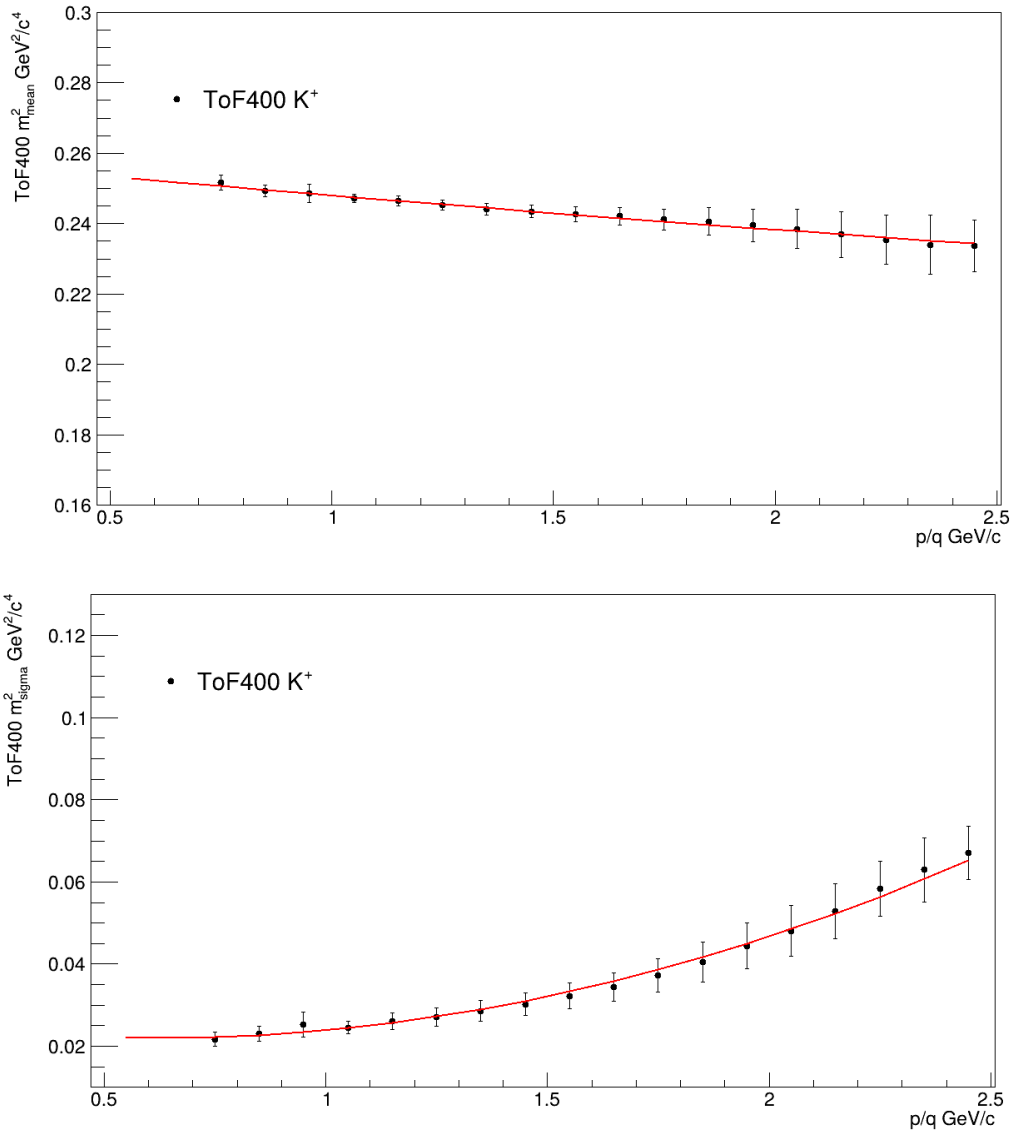


Figure 26: Зависимости среднего значения $(m/q)^2$ (сверху) и его среднеквадратичного отклонения (снизу) от p/q для положительно заряженных каонов, зарегистрированных детектором TOF400.

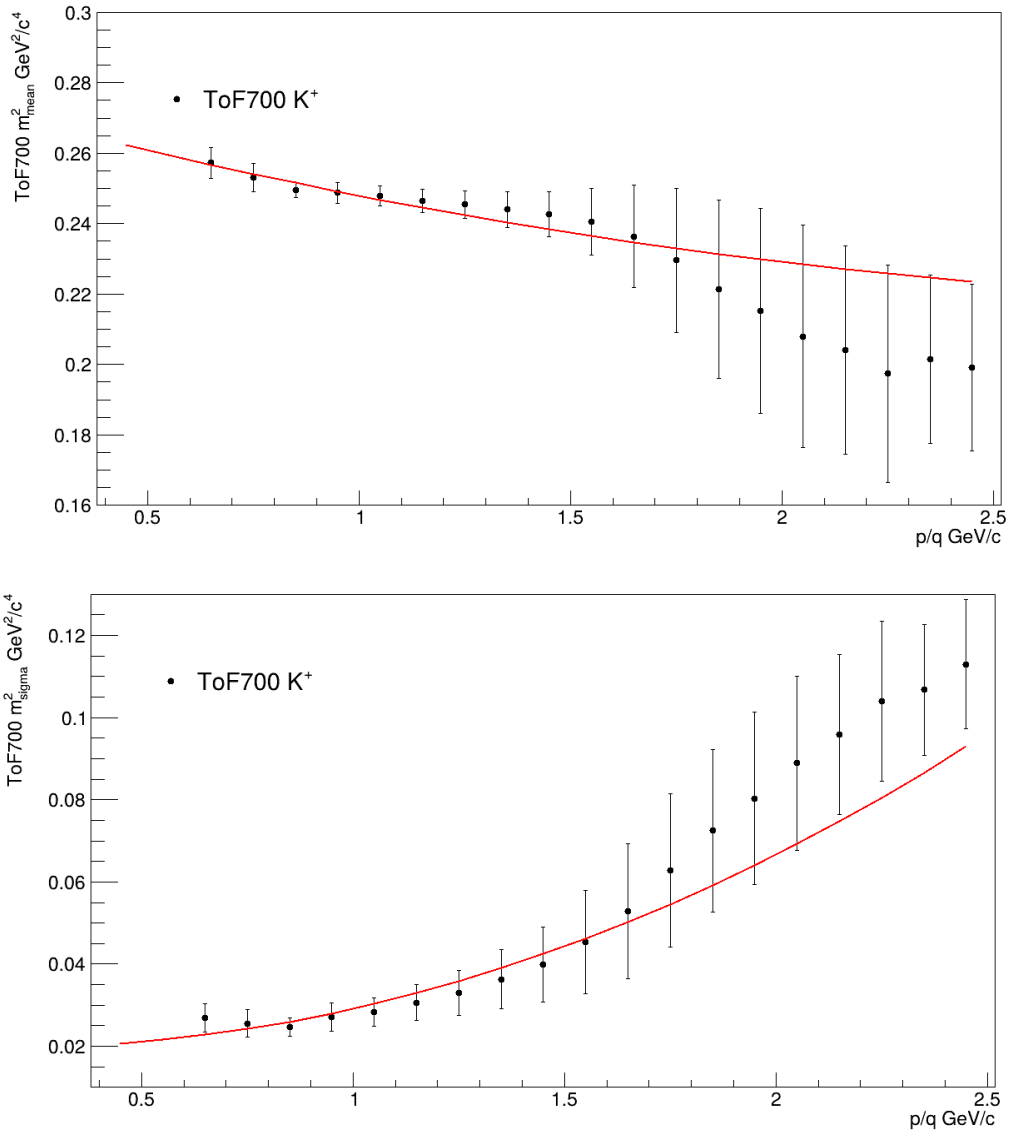


Figure 27: Зависимости среднего значения $(m/q)^2$ (сверху) и его среднеквадратичного отклонения (снизу) от p/q для положительно заряженных каонов, зарегистрированных детектором TOF700.

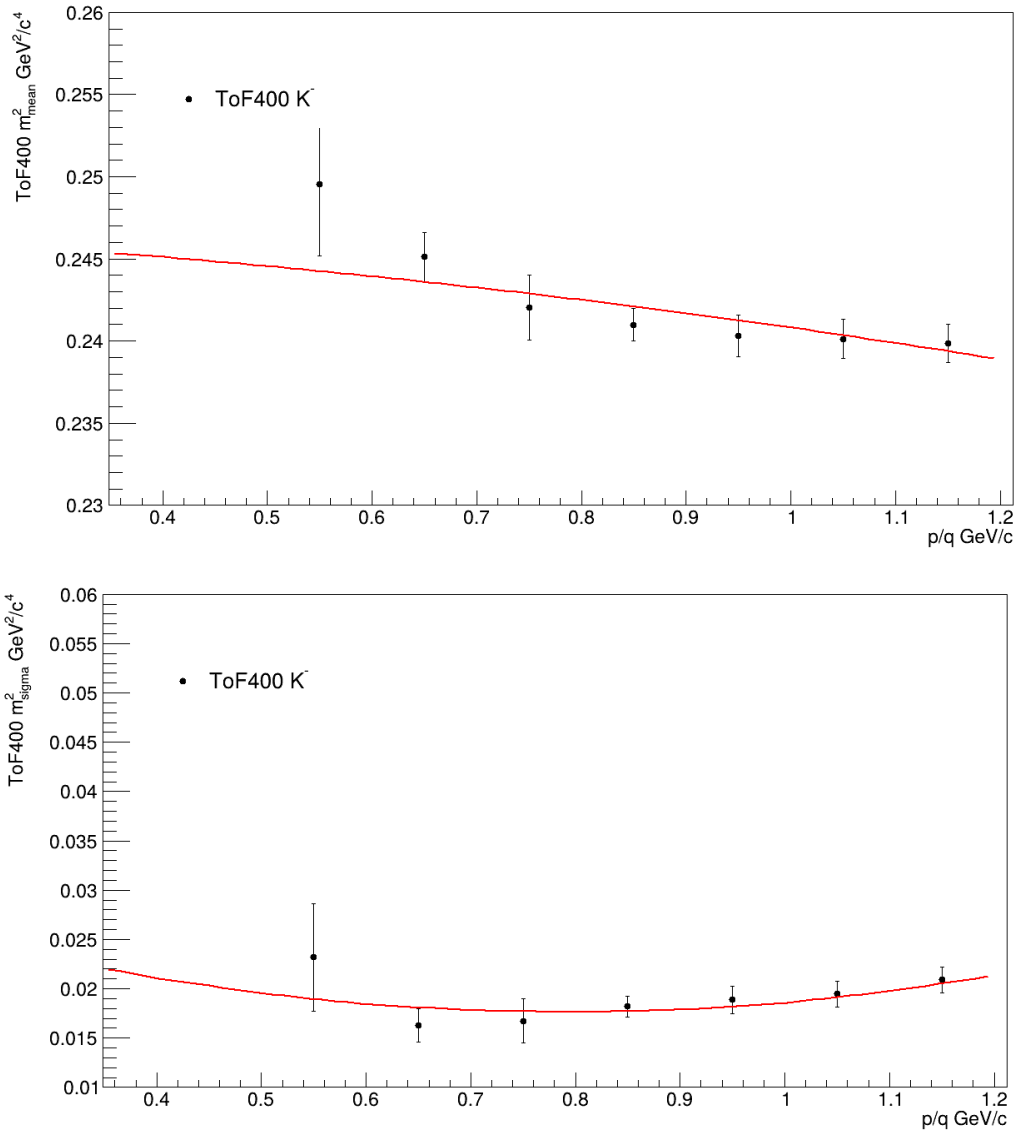


Figure 28: Зависимости среднего значения $(m/q)^2$ (сверху) и его среднеквадратичного отклонения (снизу) от p/q для отрицательно заряженных каонов, зарегистрированных детектором TOF400.

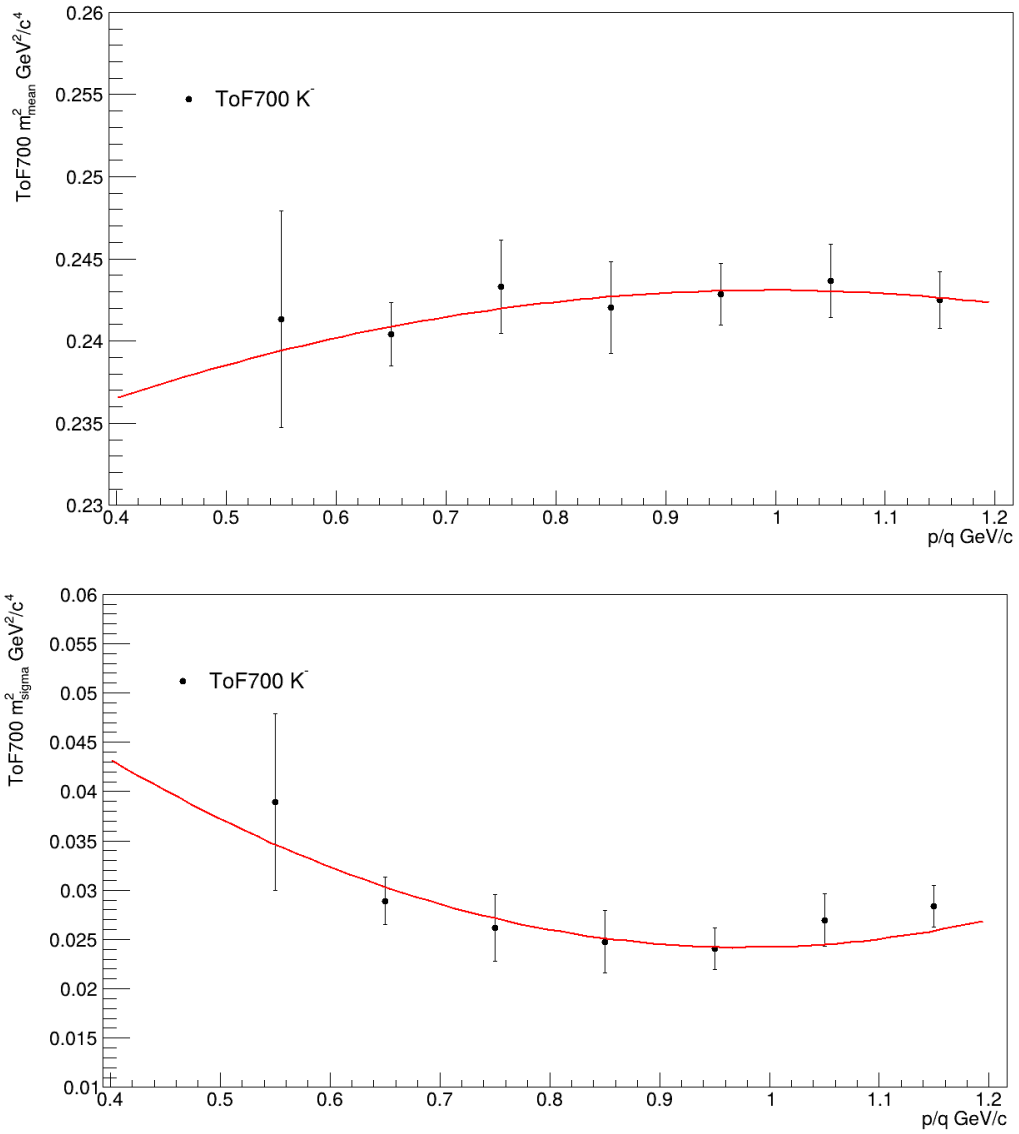


Figure 29: Зависимости среднего значения $(m/q)^2$ (сверху) и его среднеквадратичного отклонения (снизу) от p/q для отрицательно заряженных каонов, зарегистрированных детектором TOF700.

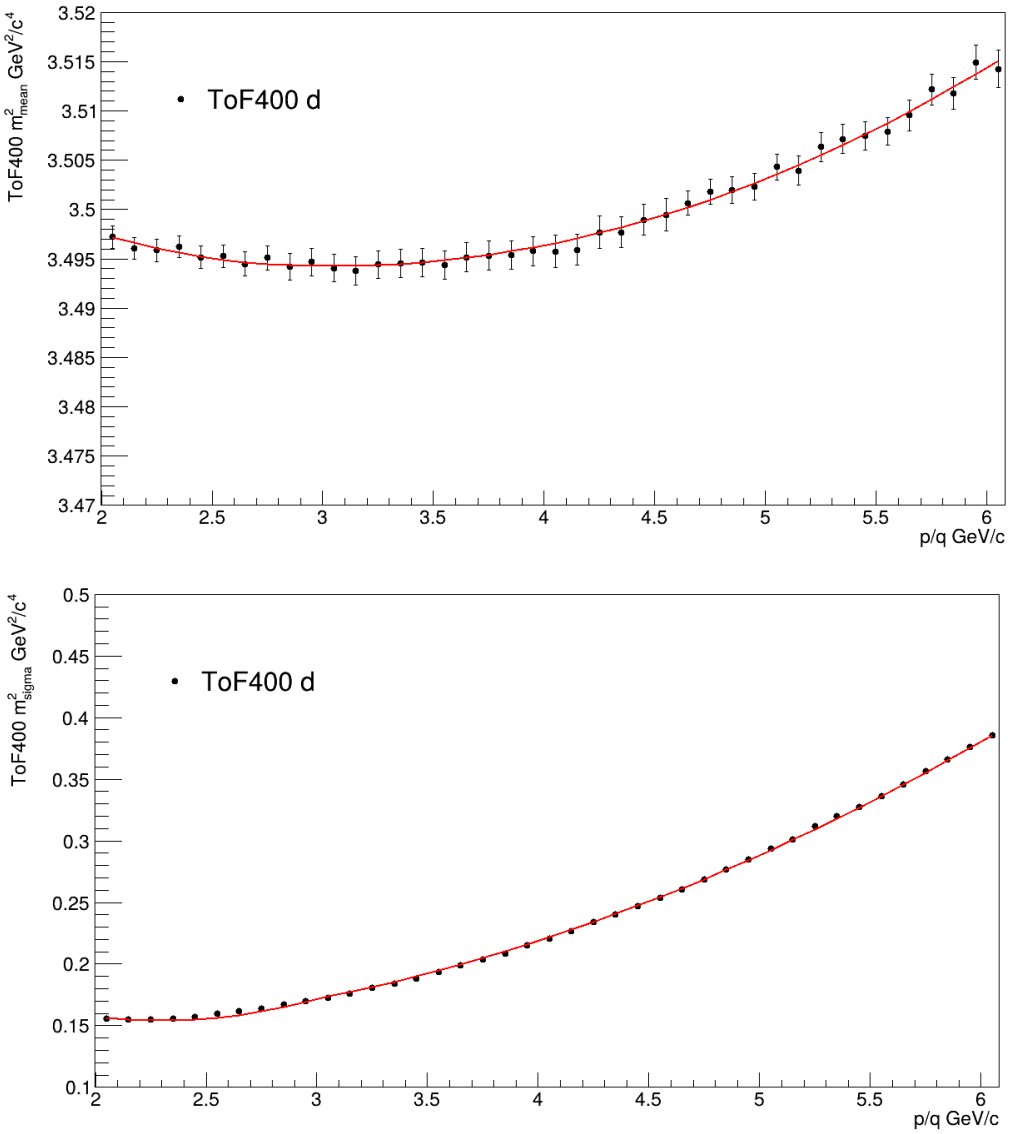


Figure 30: Зависимости среднего значения $(m/q)^2$ (сверху) и его среднеквадратичного отклонения (снизу) от p/q для дейтронов, зарегистрированных детектором TOF400.

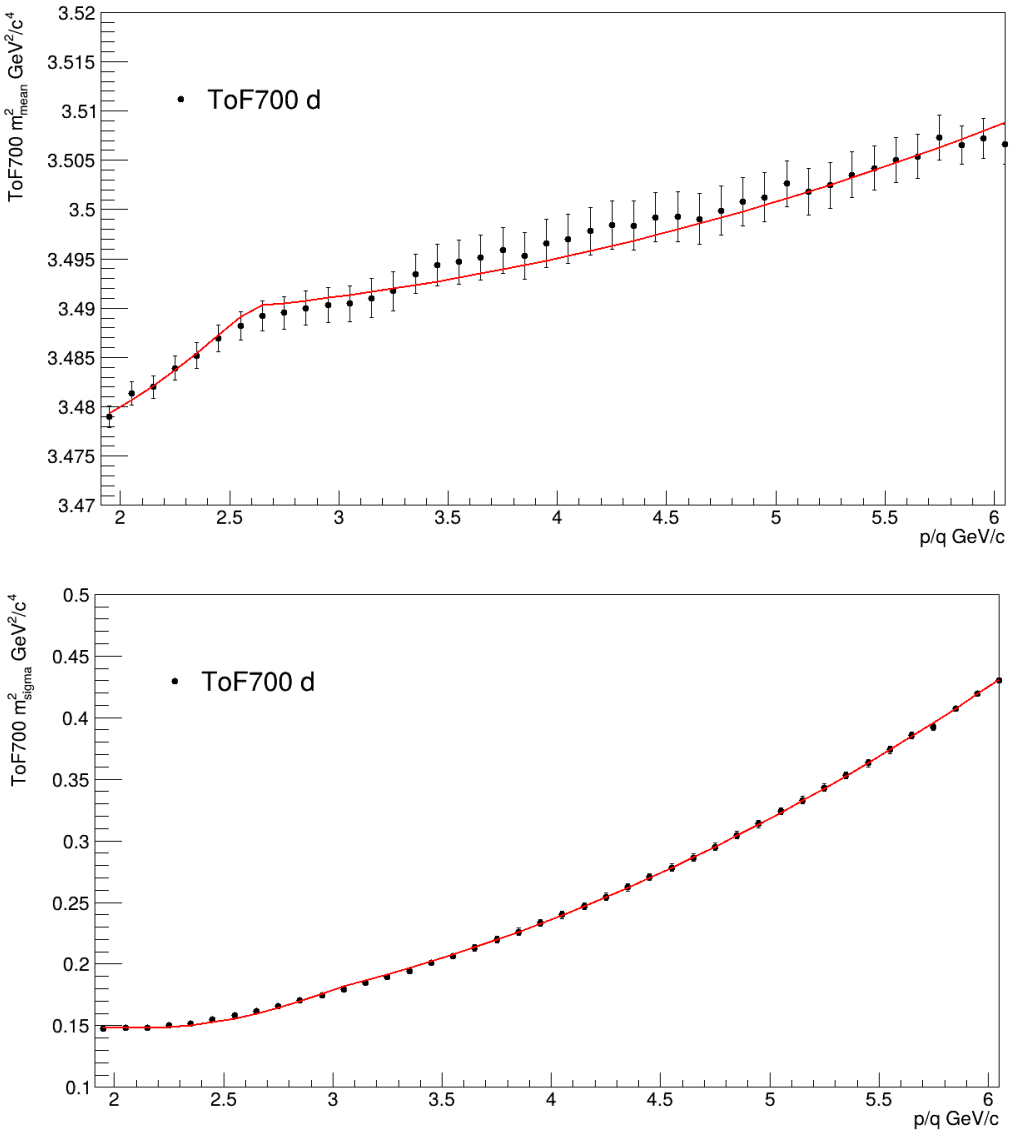


Figure 31: Зависимости среднего значения $(m/q)^2$ (сверху) и его среднеквадратичного отклонения (снизу) от p/q для дейтронов, зарегистрированных детектором TOF700.

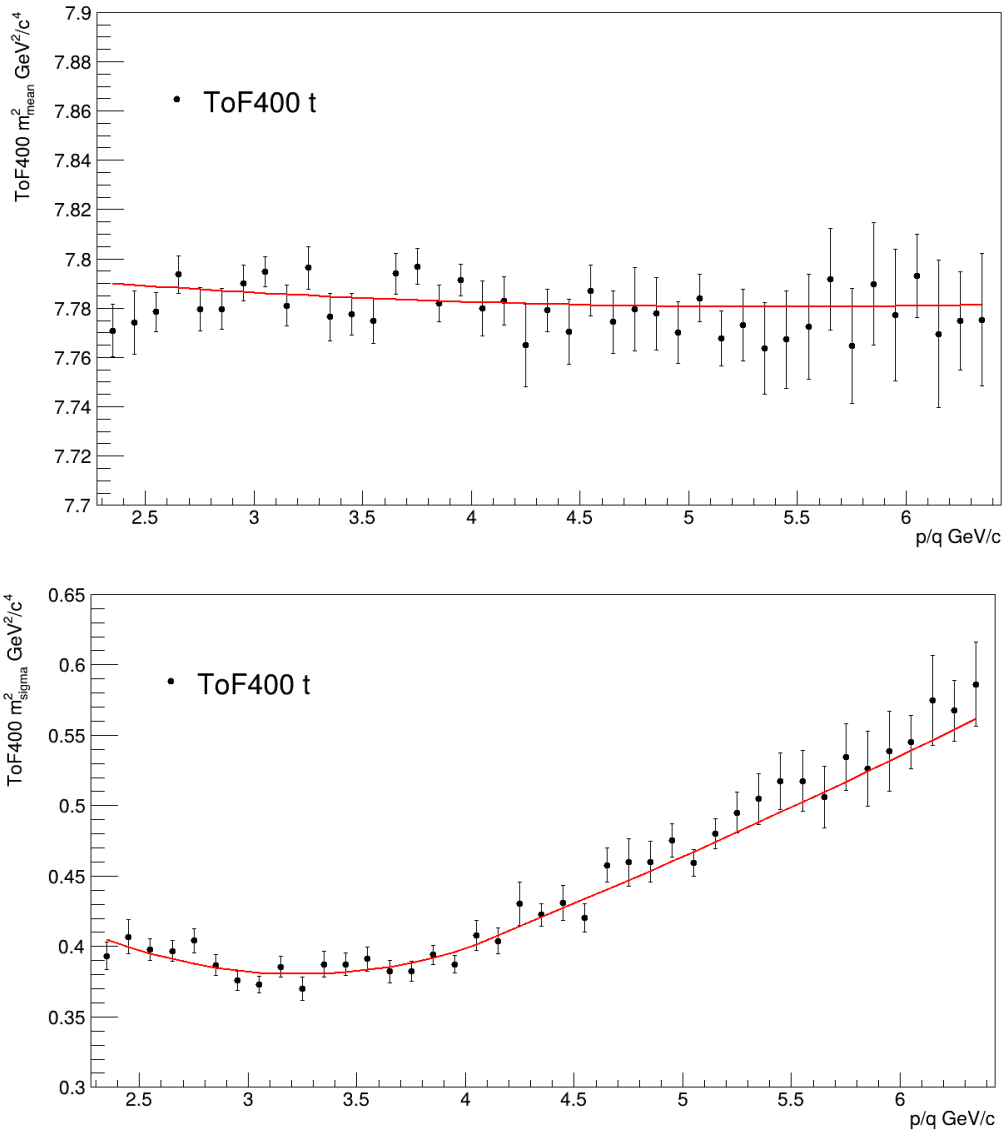


Figure 32: Зависимости среднего значения $(m/q)^2$ (сверху) и его среднеквадратичного отклонения (снизу) от p/q для тритонов, зарегистрированных детектором TOF400.

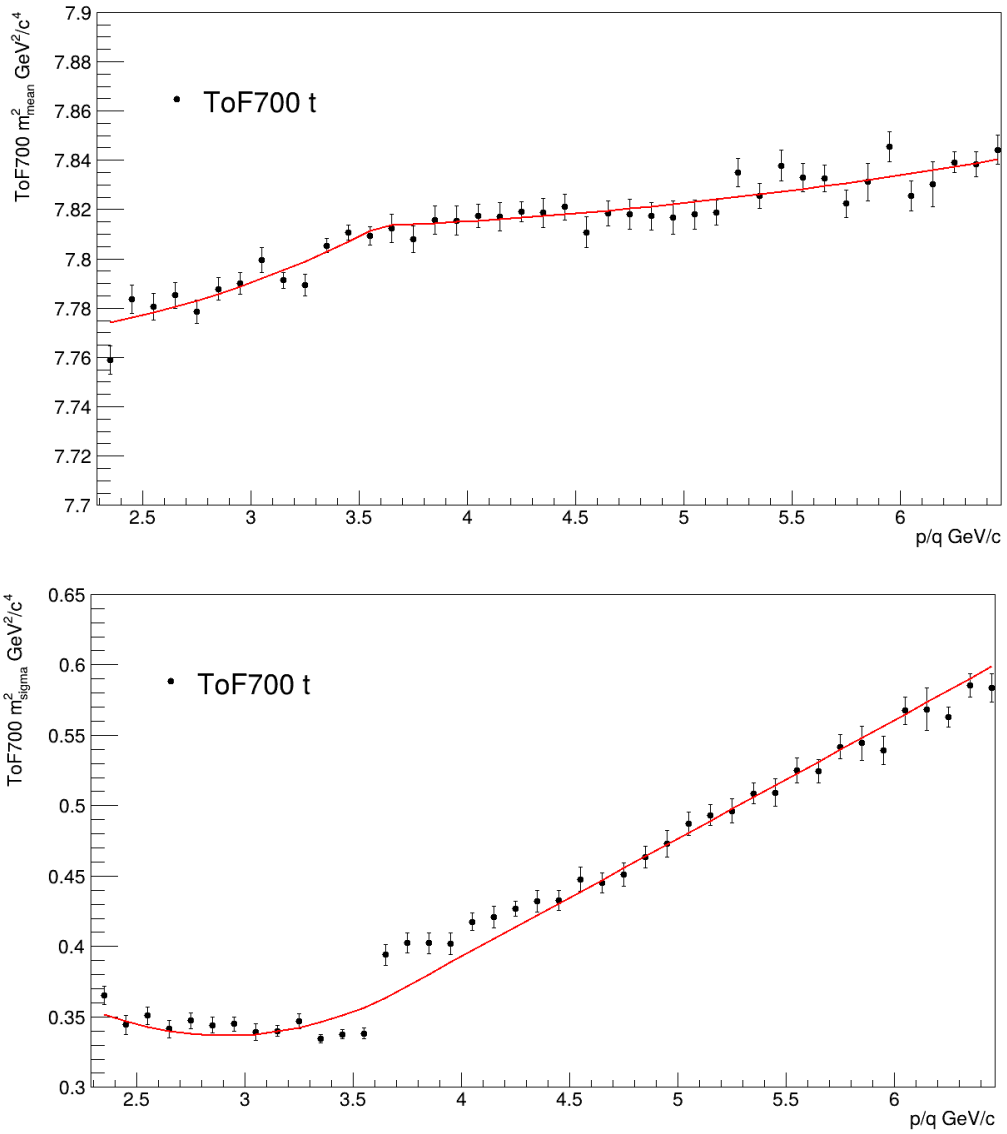


Figure 33: Зависимости среднего значения $(m/q)^2$ (сверху) и его среднеквадратичного отклонения (снизу) от p/q для тритонов, зарегистрированных детектором TOF700.

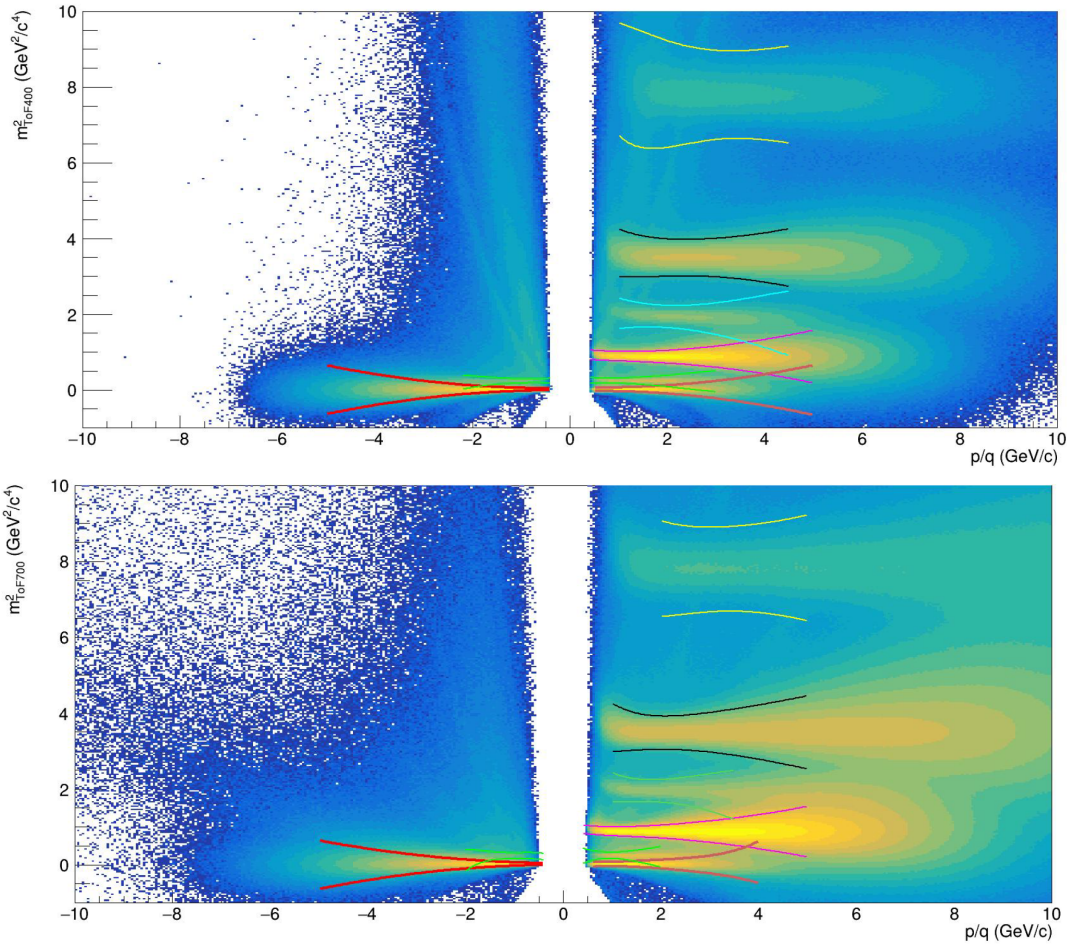


Figure 34: Распределения $(m/q)^2$ в зависимости от p/q для треков, зарегистрированных детекторами TOF400 (сверху) и TOF700 (снизу). Цветными линиями показаны верхние и нижние границы областей идентификации различных типов частиц, определённые как $\mu_{m^2}(p/q) \pm 3\sigma_{m^2}(p/q)$.

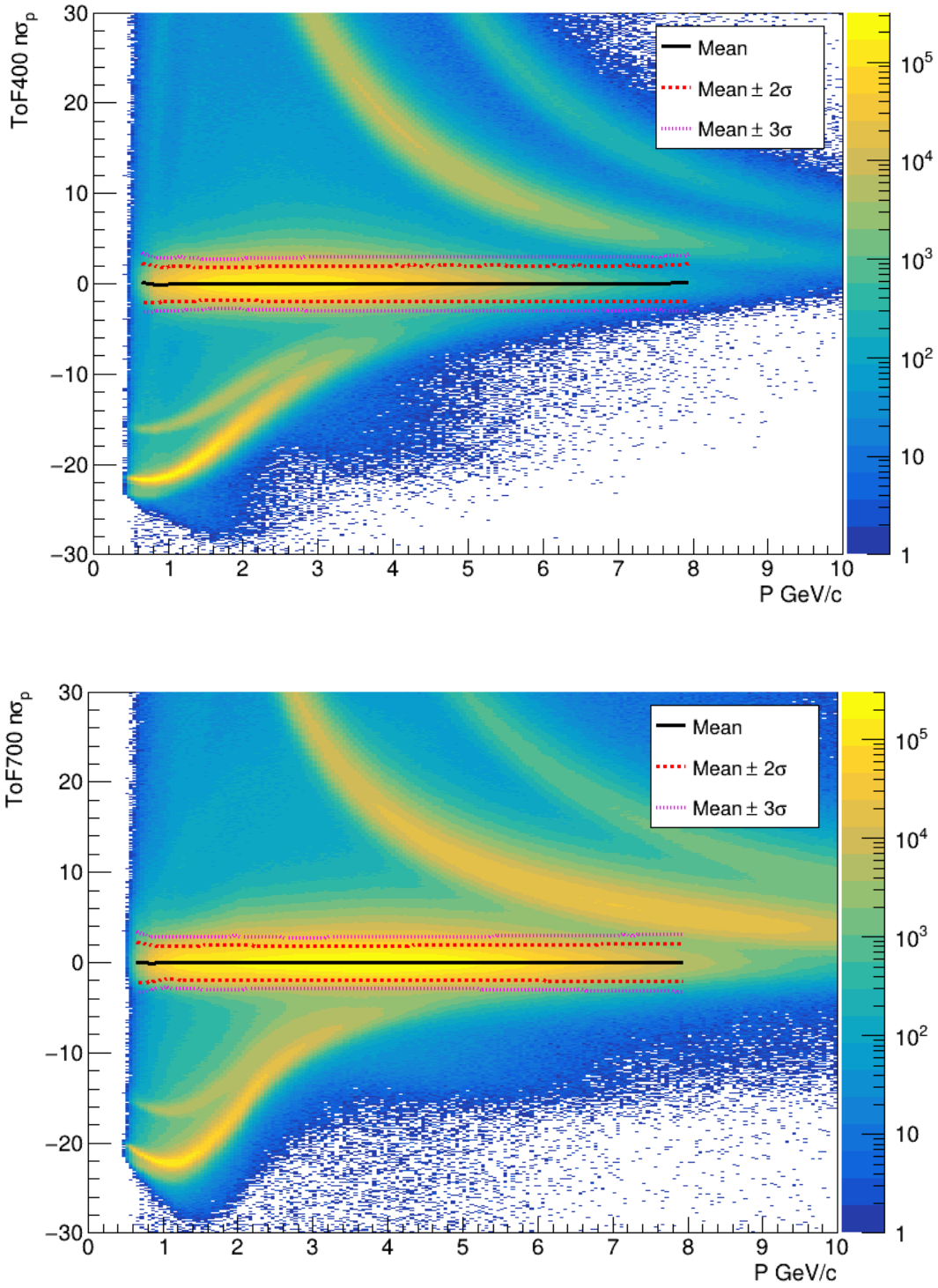


Figure 35: Распределения $n\sigma$ протонов в зависимости от p/q для треков, зарегистрированных детекторами TOF400 (сверху) и TOF700 (снизу). Цветными пунктирными линиями показаны границы областей отбора протонов: $n\sigma = \pm 2$ и $n\sigma = \pm 3$.

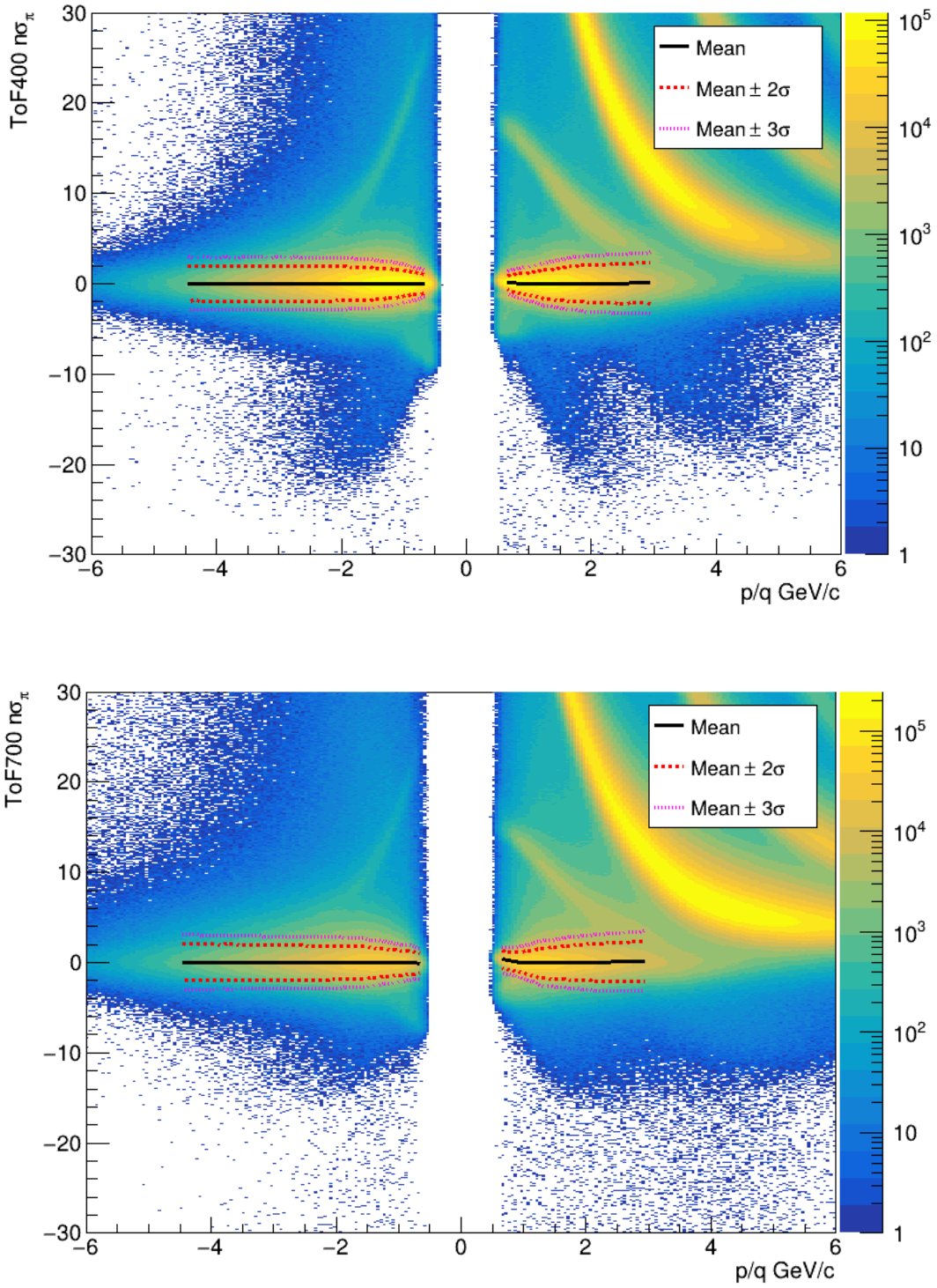


Figure 36: Распределения $n\sigma$ пионов обоих знаков заряда в зависимости от p/q для треков, зарегистрированных детекторами TOF400 (сверху) и TOF700 (снизу). Цветными пунктирными линиями показаны границы областей отбора пионов: $n\sigma = \pm 2$ и $n\sigma = \pm 3$.

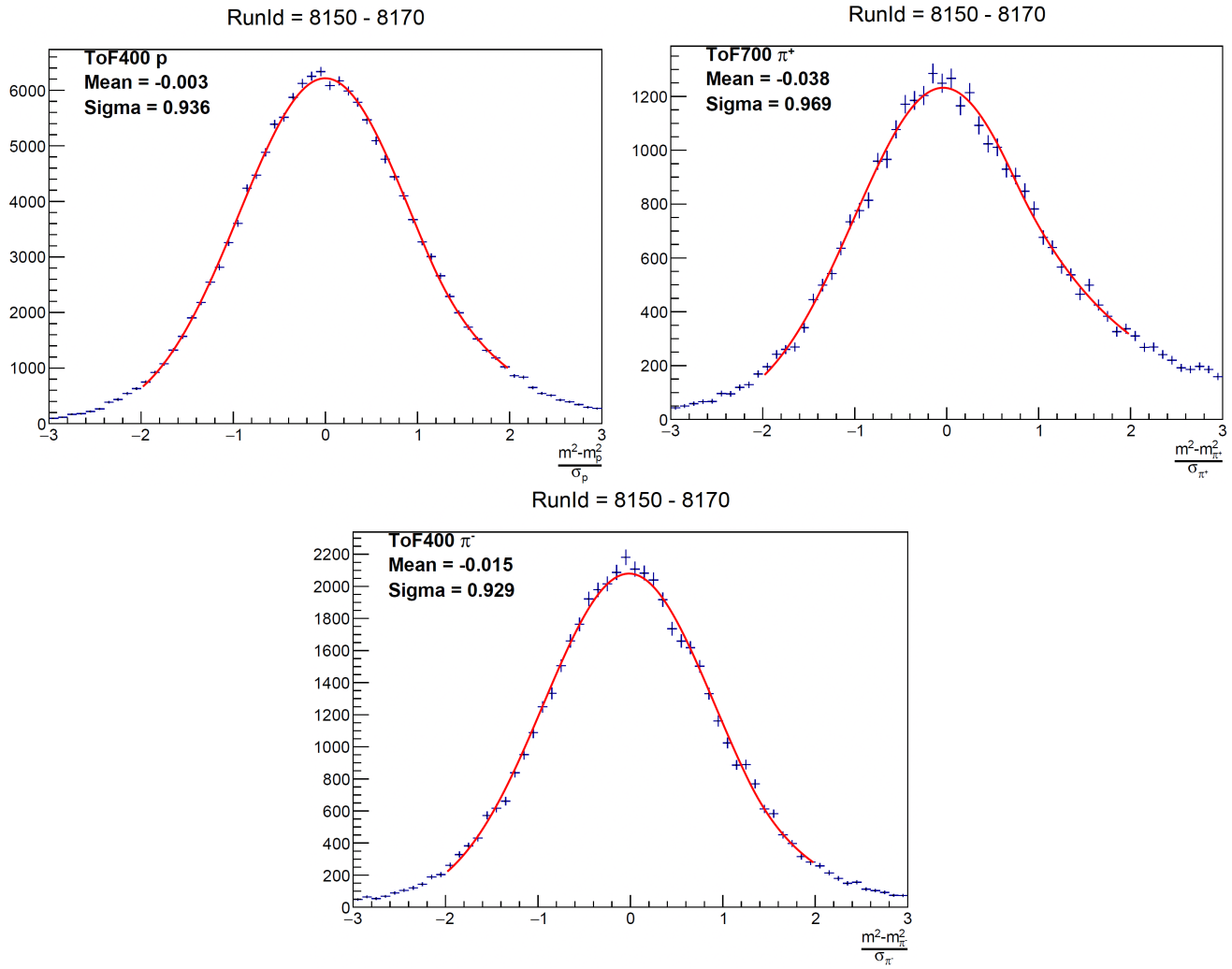


Figure 37: Распределения $n\sigma$ протонов и пионов обоих знаков заряда в интервале импульса от 1,8 до 1,9 ГэВ/c для группы периодов набора данных с `runId` от 8150 до 8170. Показаны результаты аппроксимации распределений функцией Гаусса.

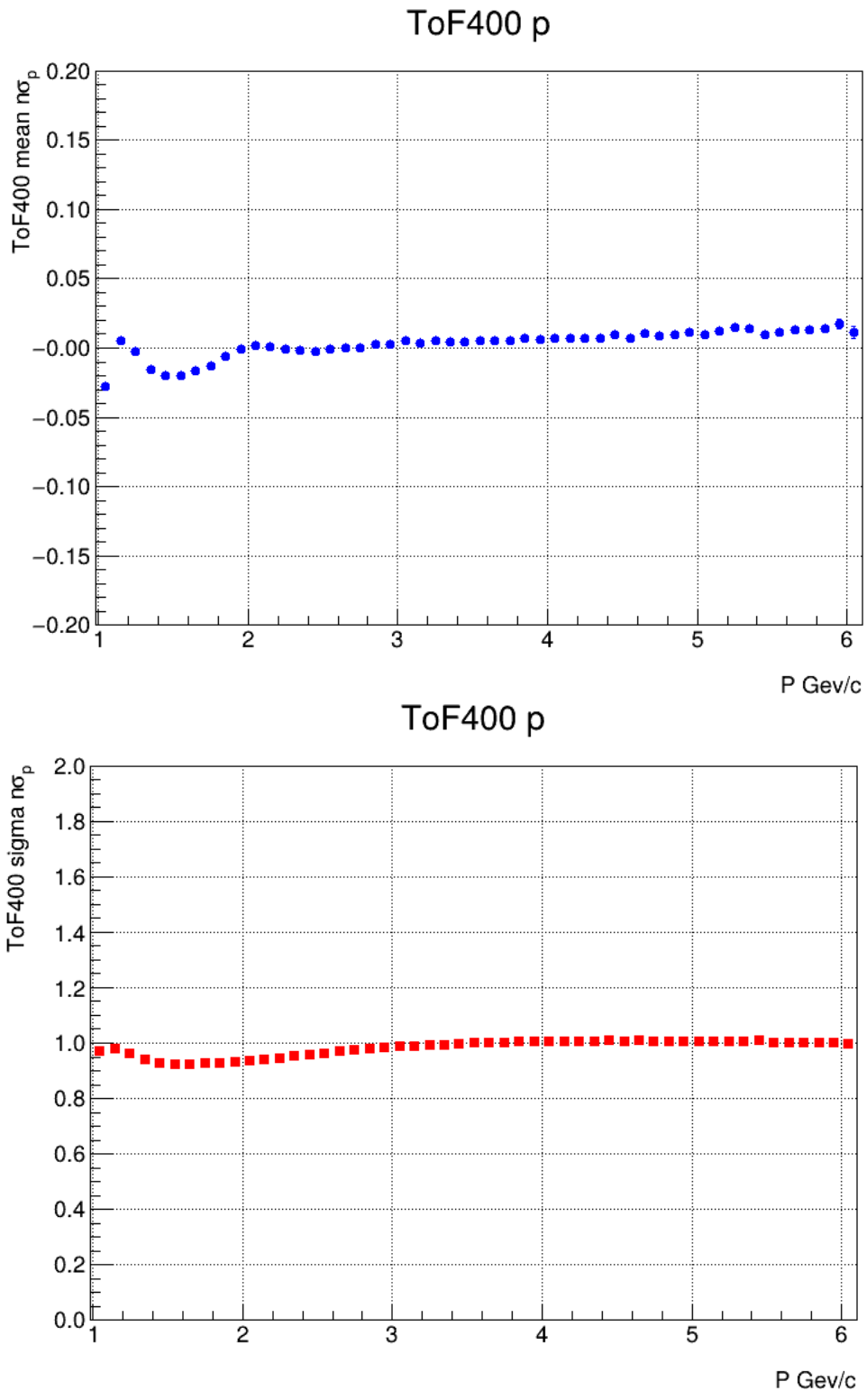


Figure 38: Зависимости среднего значения (сверху) и ширины (снизу) распределения $n\sigma$ от p/q для протонов, зарегистрированных детектором TOF400.

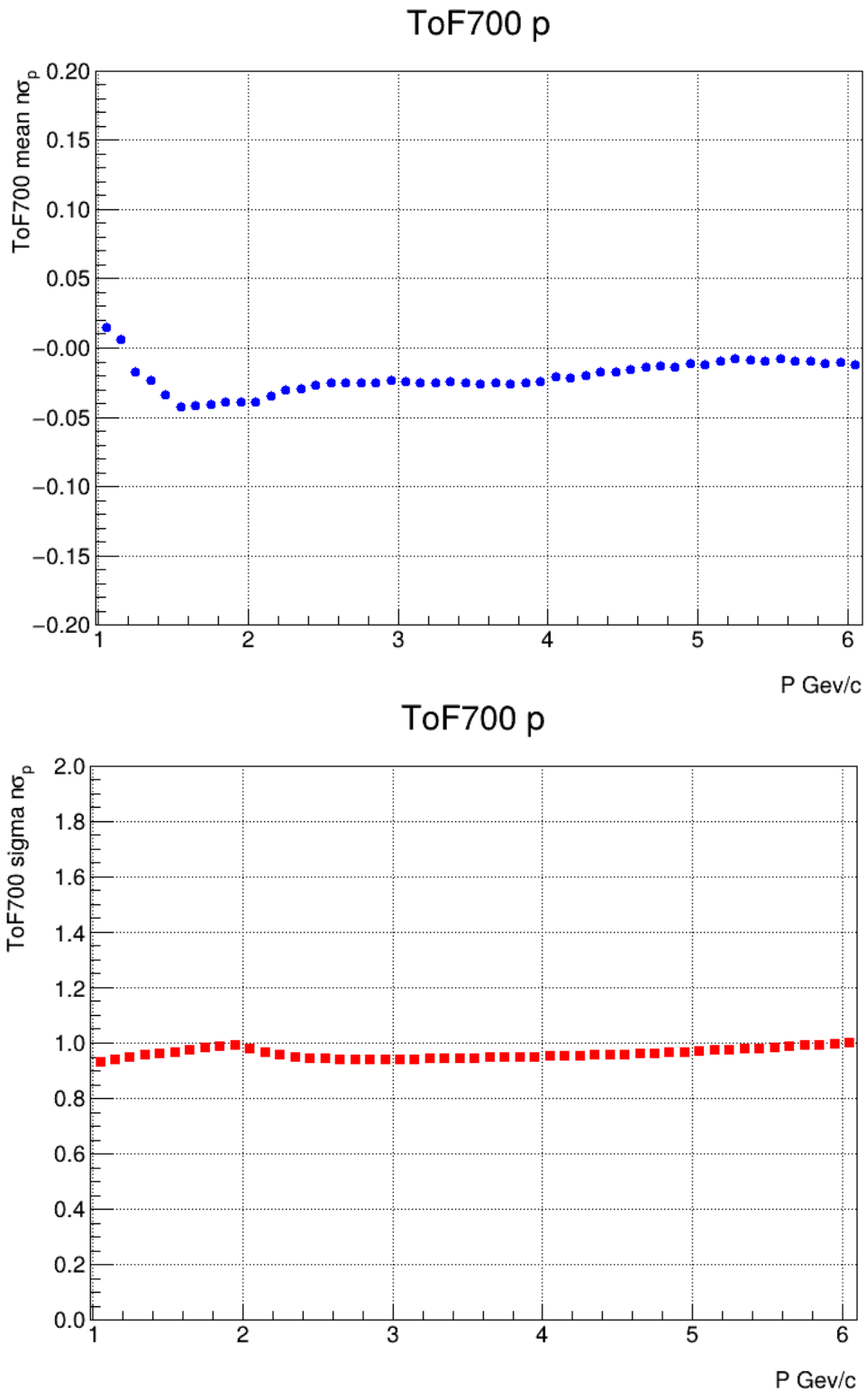


Figure 39: Зависимости среднего значения (сверху) и ширины (снизу) распределения $n\sigma$ от p/q для протонов, зарегистрированных детектором TOF700.

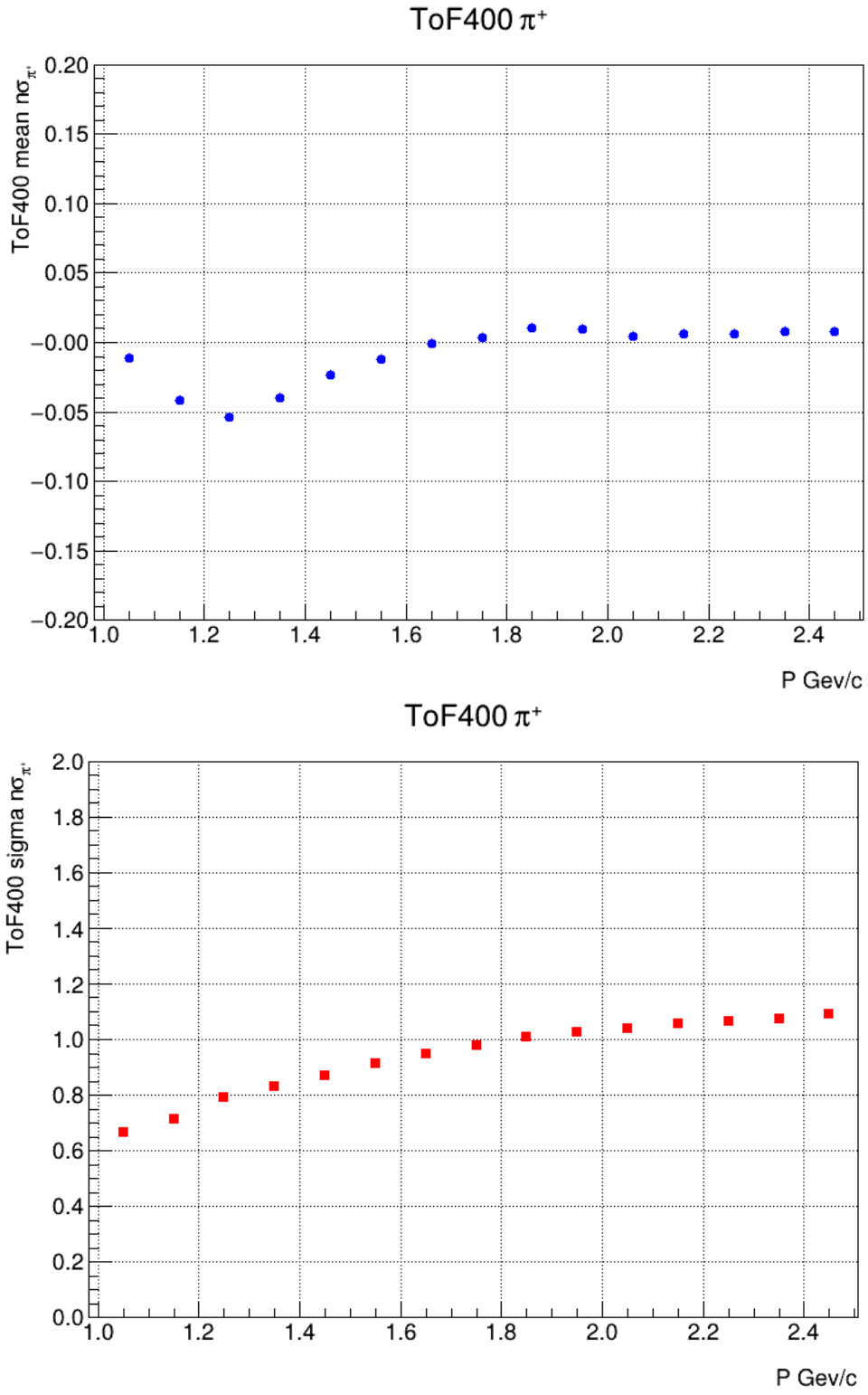


Figure 40: Зависимости среднего значения (сверху) и ширины (снизу) распределения $n\sigma$ от p/q для положительно заряженных пионов, зарегистрированных детектором TOF400.

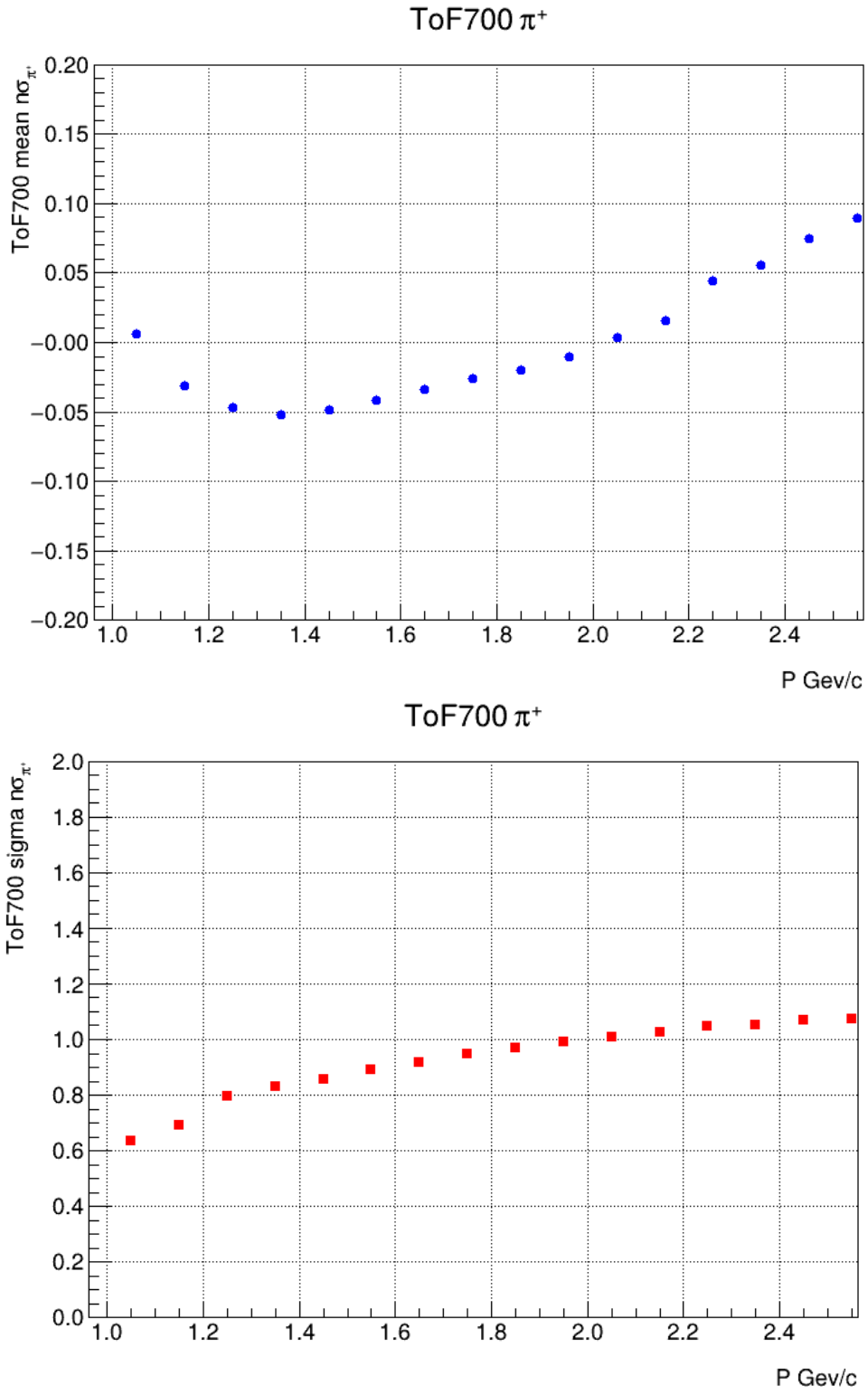


Figure 41: Зависимости среднего значения (сверху) и ширины (снизу) распределения $n\sigma$ от p/q для положительно заряженных пионов, зарегистрированных детектором TOF700.

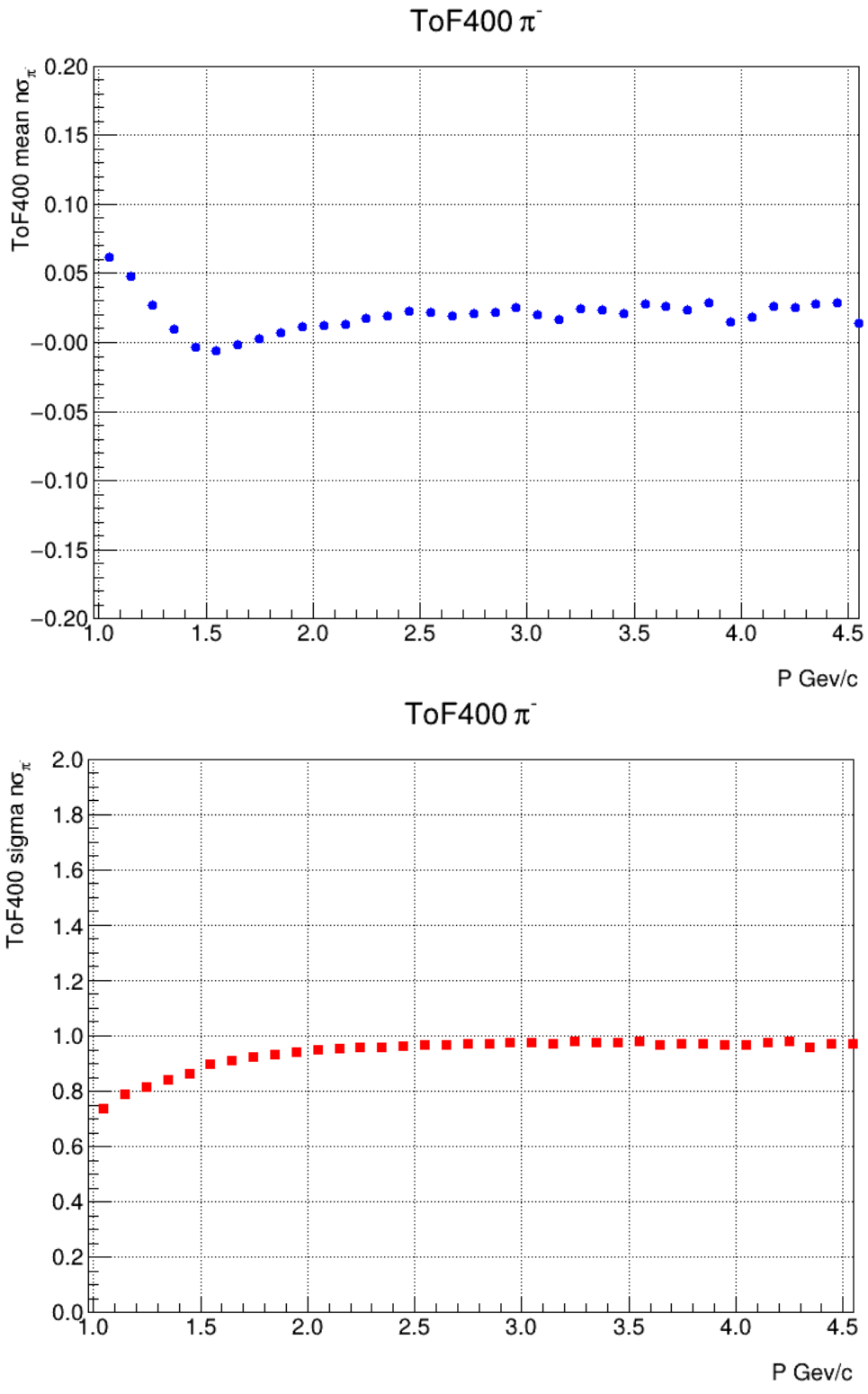


Figure 42: Зависимости среднего значения (сверху) и ширины (снизу) распределения $n\sigma$ от p/q для отрицательно заряженных пионов, зарегистрированных детектором TOF400.

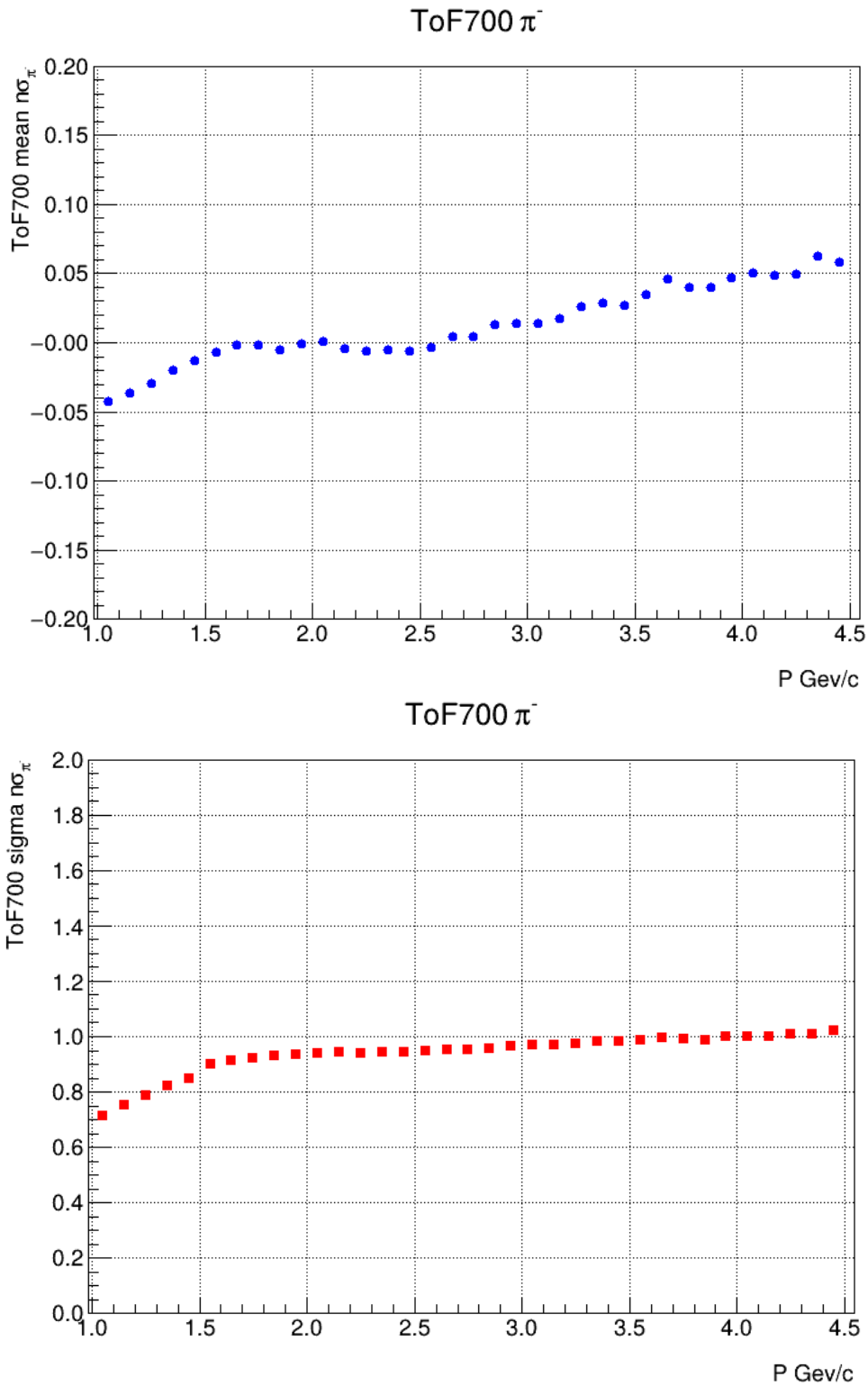


Figure 43: Зависимости среднего значения (сверху) и ширины (снизу) распределения $n\sigma$ от p/q для отрицательно заряженных пионов, зарегистрированных детектором TOF700.

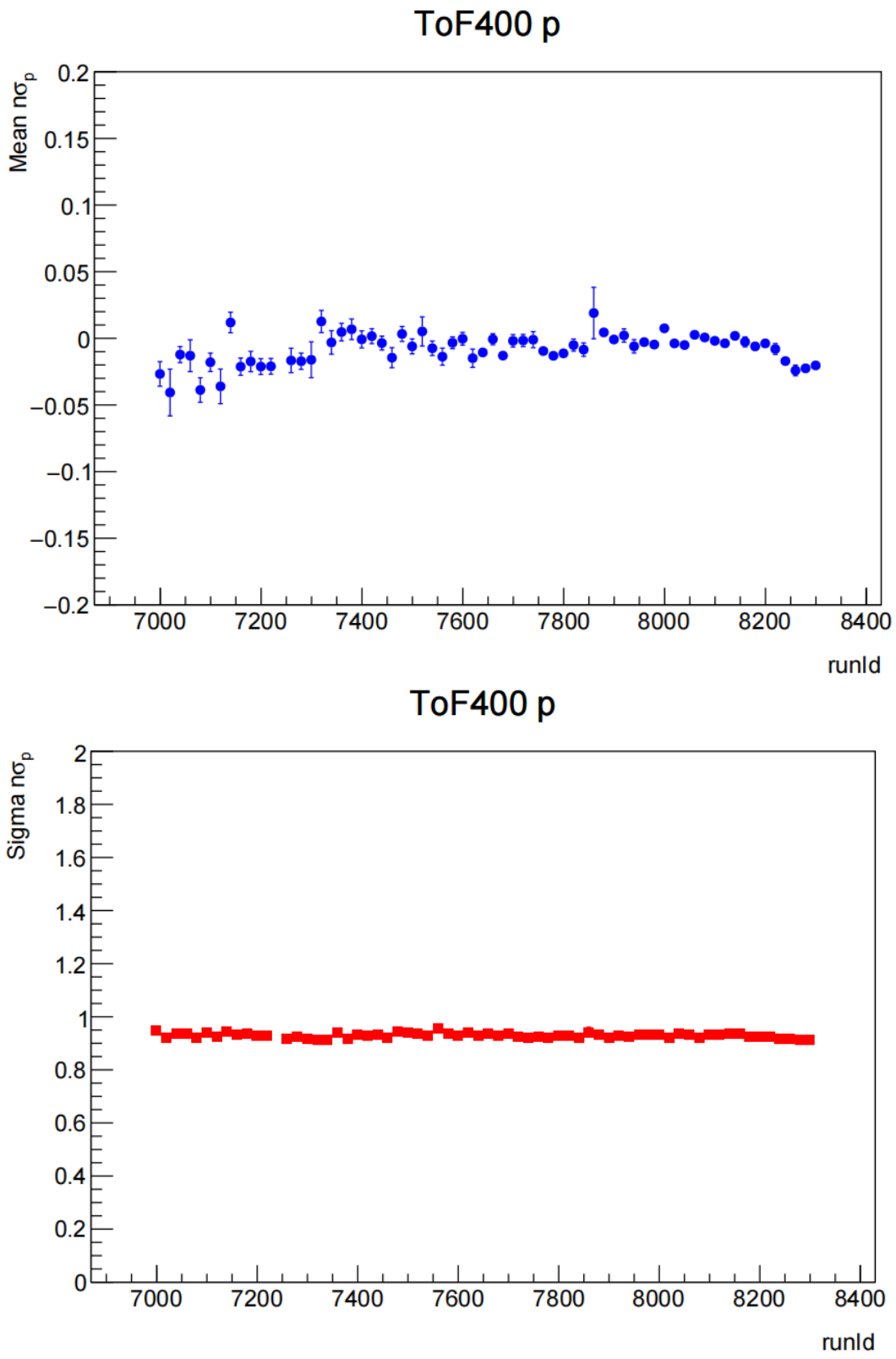


Figure 44: Зависимости среднего значения (сверху) и ширины (снизу) распределения $n\sigma$ от `runId` для протонов, зарегистрированных детектором TOF400. Использованы частицы в интервале импульса от 1,8 до 1,9 ГэВ/c.

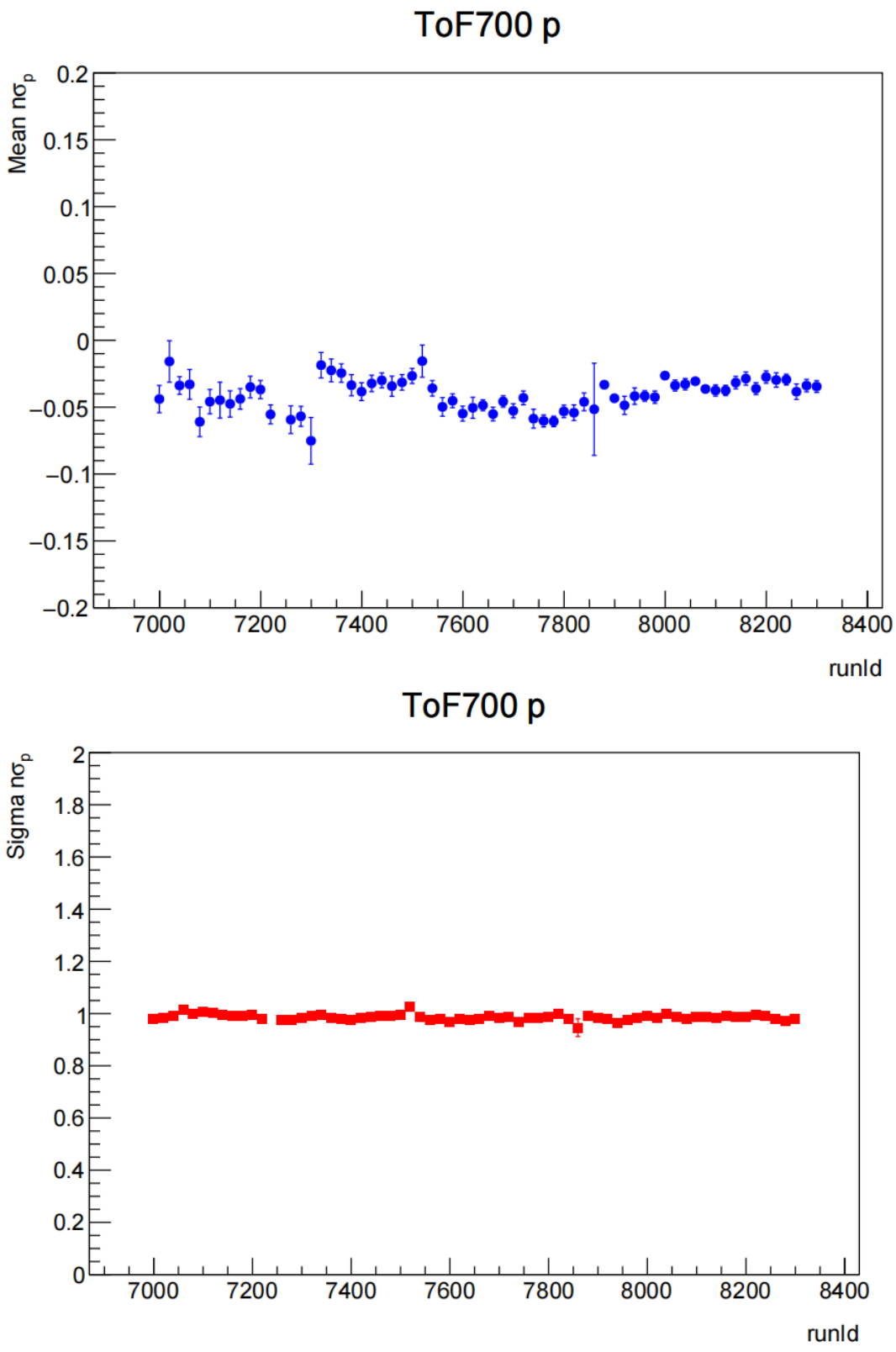


Figure 45: Зависимости среднего значения (сверху) и ширины (снизу) распределения $n\sigma$ от `runId` для протонов, зарегистрированных детектором TOF700. Использованы частицы в интервале импульса от 1,8 до 1,9 ГэВ/c.

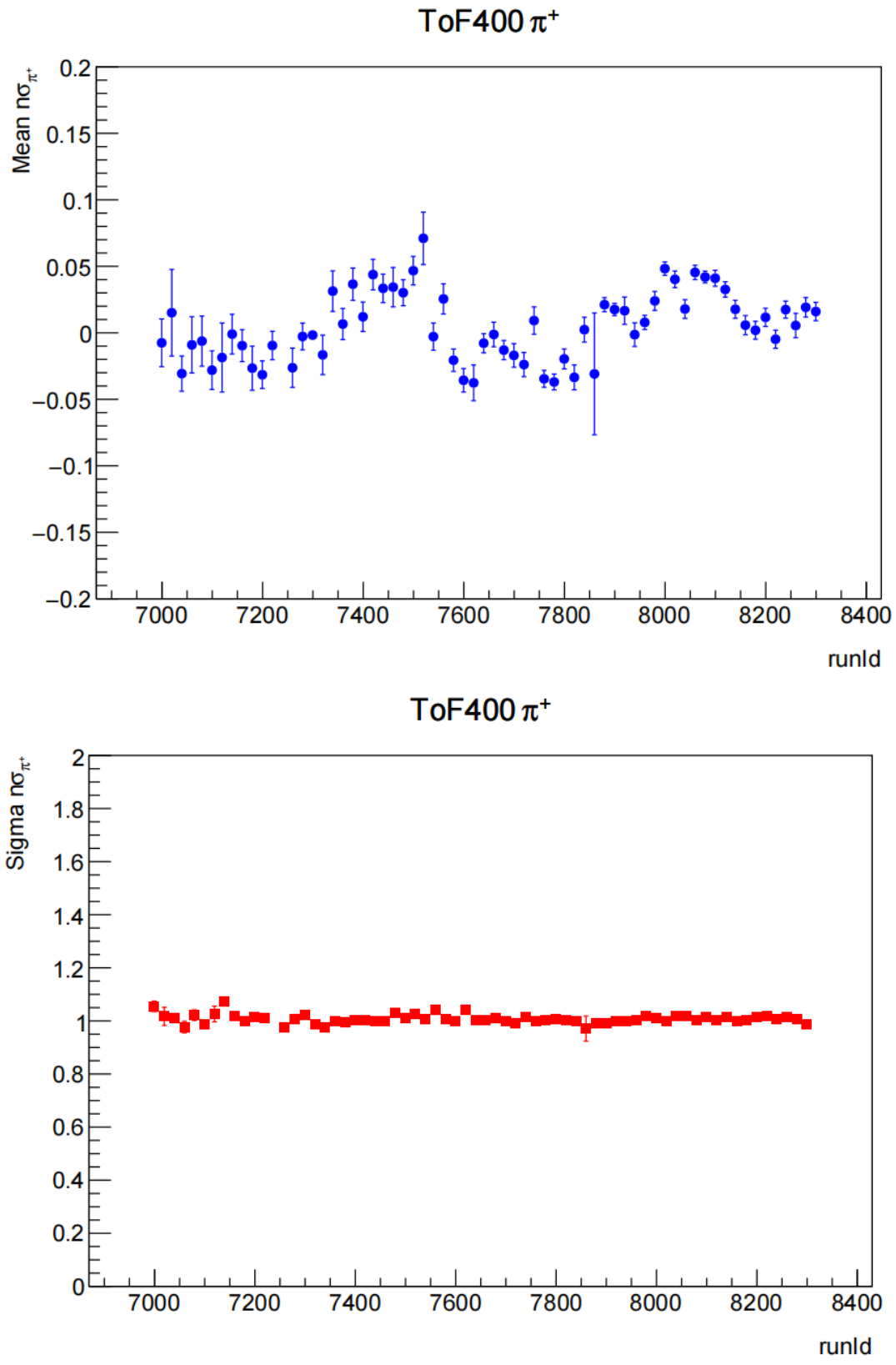


Figure 46: Зависимости среднего значения (сверху) и ширины (снизу) распределения $n\sigma$ от `runId` для положительно заряженных пионов, зарегистрированных детектором TOF400. Использованы частицы в интервале импульса от 1,8 до 1,9 ГэВ/c.

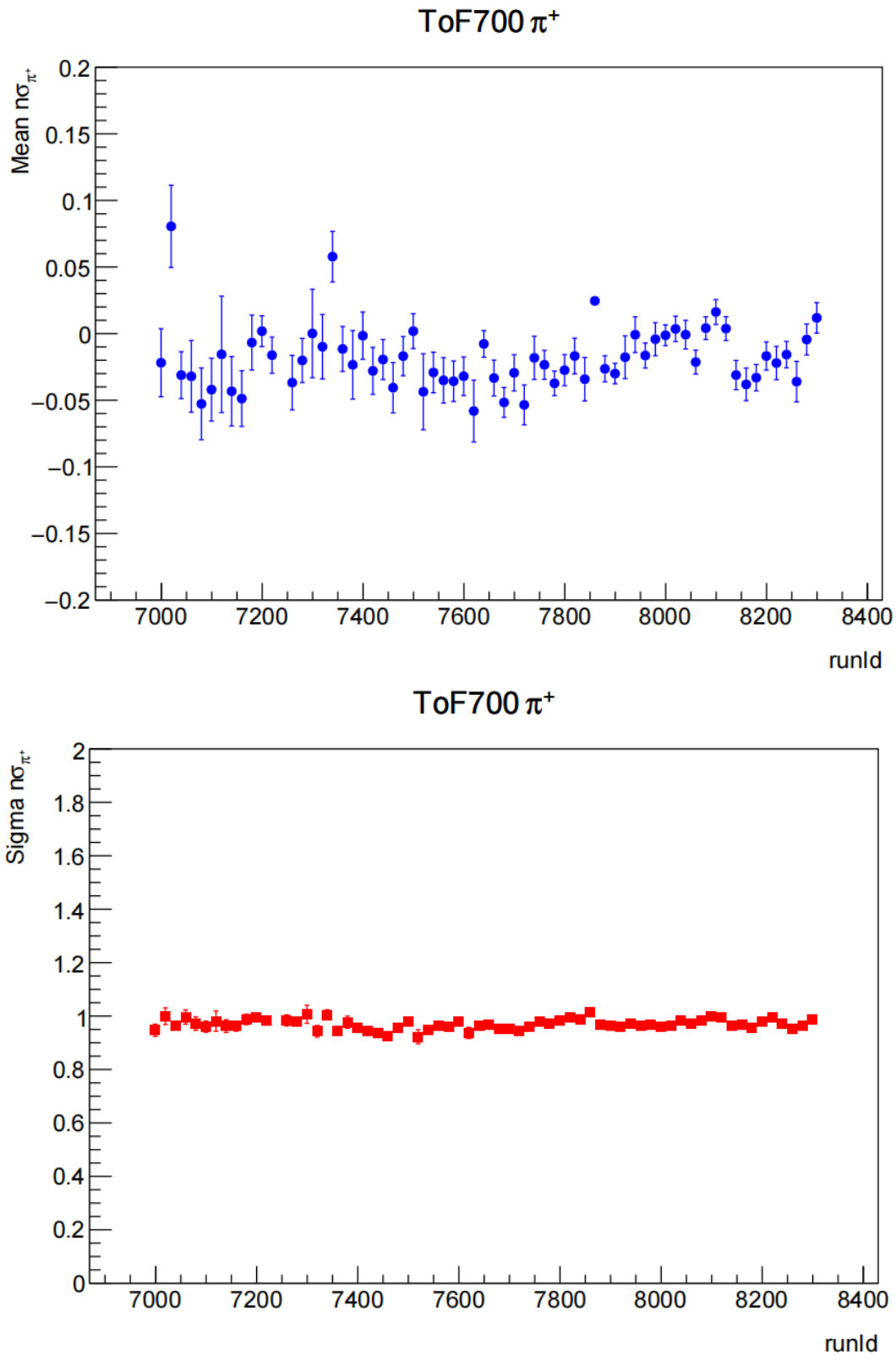


Figure 47: Зависимости среднего значения (сверху) и ширины (снизу) распределения $n\sigma$ от `runId` для положительно заряженных пионов, зарегистрированных детектором TOF700. Использованы частицы в интервале импульса от 1,8 до 1,9 ГэВ/c.

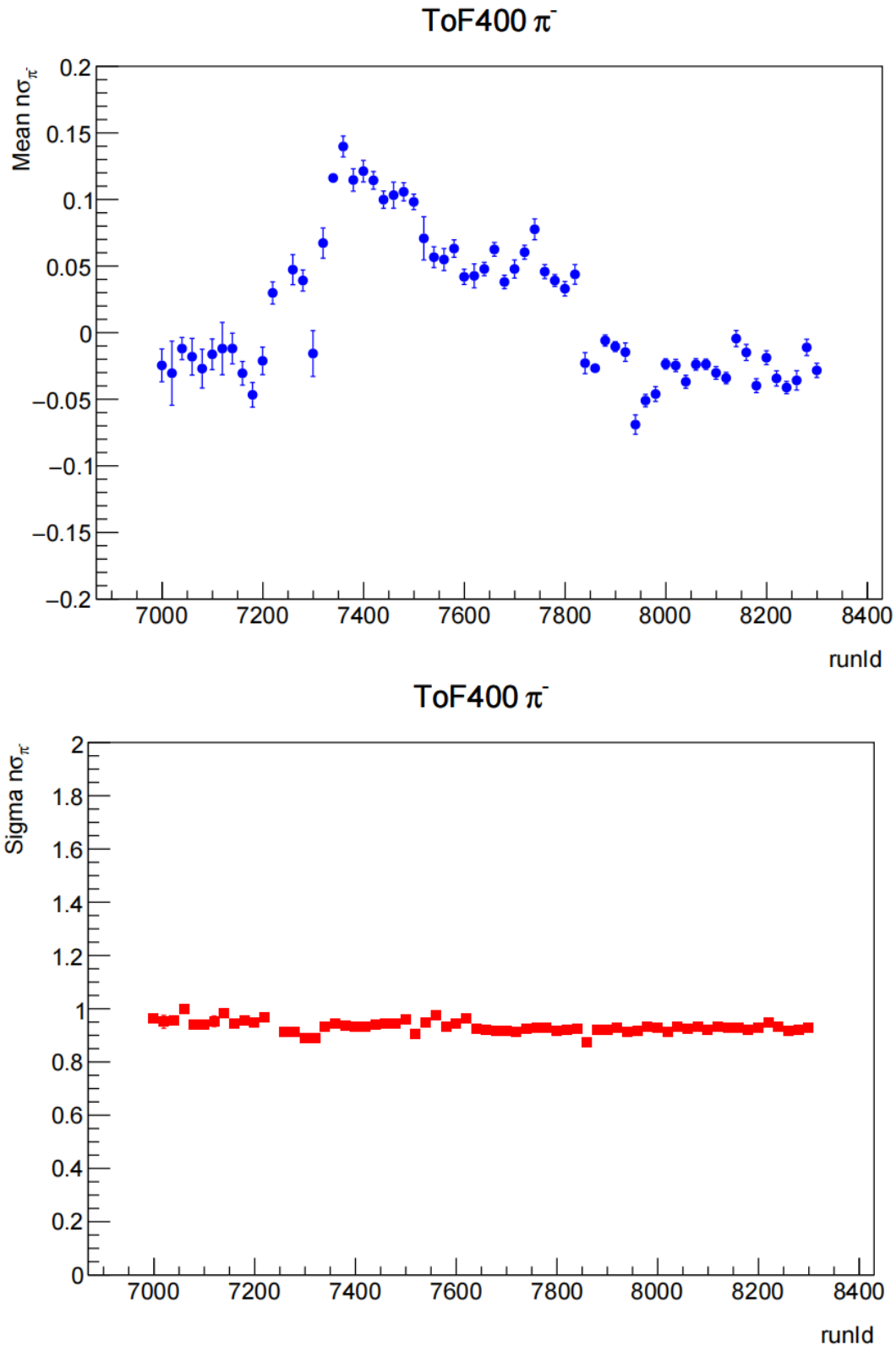


Figure 48: Зависимости среднего значения (сверху) и ширины (снизу) распределения $n\sigma$ от `runId` для отрицательно заряженных пионов, зарегистрированных детектором TOF400. Использованы частицы в интервале импульса от 1,8 до 1,9 ГэВ/c.

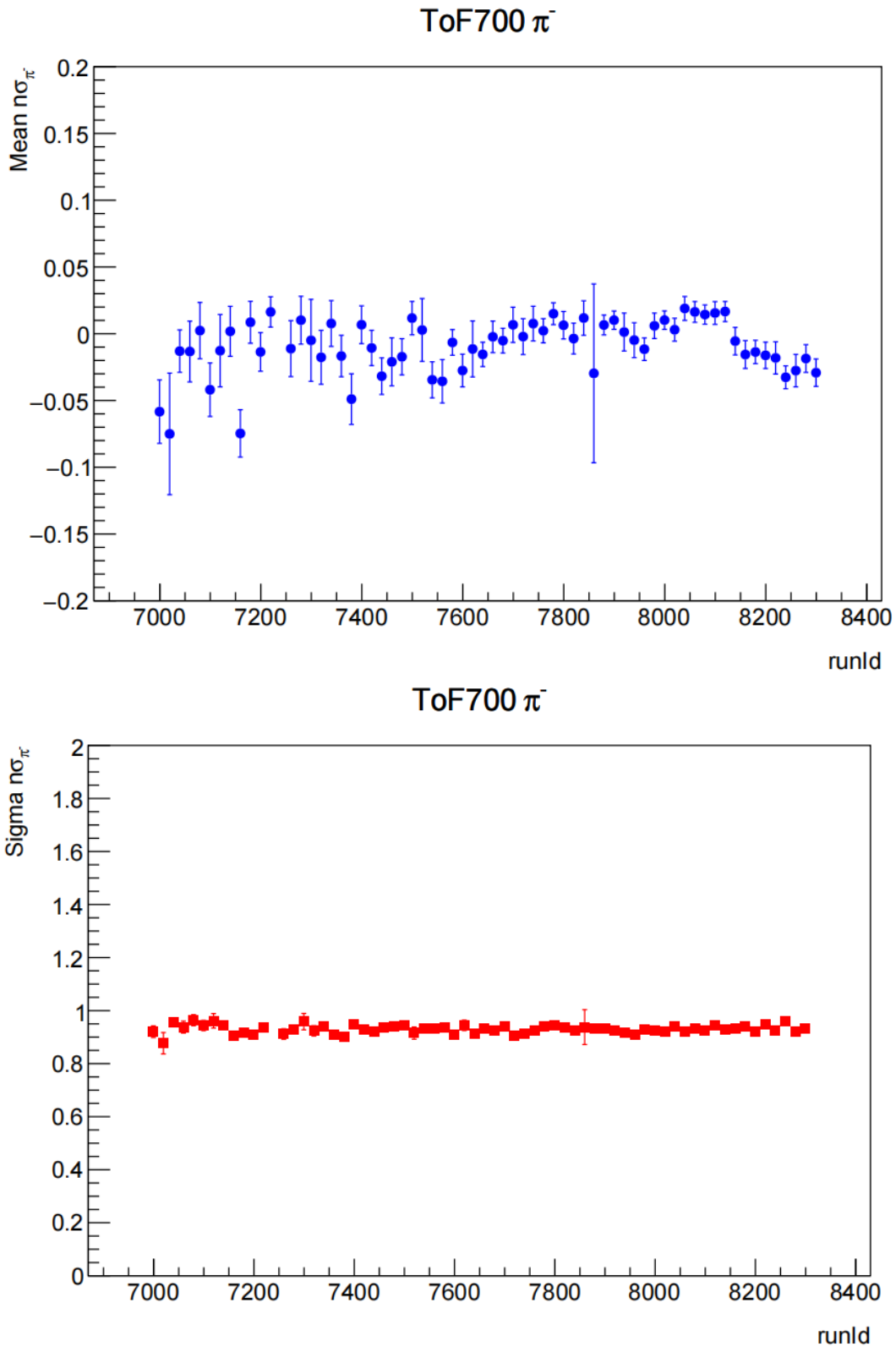


Figure 49: Зависимости среднего значения (сверху) и ширины (снизу) распределения $n\sigma$ от `runId` для отрицательно заряженных пионов, зарегистрированных детектором TOF700. Использованы частицы в интервале импульса от 1,8 до 1,9 ГэВ/c.