

*A. V. Гуськов*

## COMPASS проверил основы киральной теории

Как известно, адронами называют частицы, состоящие из кварков, удерживаемых вместе сильным взаимодействием. Силы, связывающие кварки в адронах, как следует из их названия, очень велики, поэтому адроны являются объектами весьма компактными и жесткими. Устойчивость таких объектов к деформации во внешних электрических и магнитных полях может быть описана такими величинами, как электрическая поляризуемость  $\alpha$  и магнитная поляризуемость  $\beta$ . Эти величины являются фундаментальными характеристиками адронов, поэтому сравнение предсказываемых значений с непосредственно измеренными служит строгой проверкой различных теоретических моделей в области низких энергий. Так, киральная эффективная теория (КЭТ), являющаяся наиболее успешной в данной области, предсказывает для заряженного пиона — одного из легчайших адронов — значения  $\alpha_\pi = (2,9 \pm 0,5) \cdot 10^{-4} \text{ фм}^3$  и  $\beta_\pi = (-2,8 \pm 0,5) \cdot 10^{-4} \text{ фм}^3$  [1].

Комптоновское рассеяние фотона на адроне представляет собой удобный процесс для изучения деформаций адронов, а значения поляризуемостей могут быть непосредственно извлечены из дифференциального сечения комптоновского рассеяния. Изучение комптоновского рассеяния на протонной и дейтронной мишенях давно позволило измерить поляризуемости протона и нейтрона с достаточно высокой точностью. Однако для заряженных пионов экспериментальная ситуация осложняется их недоступностью в виде неподвижных мишеней.

Впервые идея измерения поляризуемостей заряженного пиона была выдвинута группой сотрудников ОИЯИ в 1980 г. [2]. Предложенный метод основывается на допущении, что электрическое поле ядра можно представить как поток почти реальных фотонов, на которых могут рассеиваться налетающие частицы, представляя, таким образом, комптоновское рассеяние с обратной кинематикой. Измерения были выполнены

*A. V. Guskov*

## COMPASS Tested the Basis of Chiral Theory

As is known, particles consisting of quarks bound together by strong interaction are named hadrons. As the name implies, the binding force between quarks in hadrons is very strong, and the hadrons are accordingly very compact and stiff. The rigidity of such objects against deformation by external electric and magnetic fields can be described by the electric polarizability  $\alpha$  and the magnetic polarizability  $\beta$ . They are the fundamental characteristics of hadrons, and the comparison of theoretically predicted and directly measured values provides a stringent test or various theoretical models in the low-energy region. The Chiral Perturbation Theory (ChPT), the most successful model in this region, predicts for the charged pion, one of the lightest hadrons, values  $\alpha_\pi = (2.9 \pm 0.5) \cdot 10^{-4} \text{ fm}^3$  and  $\beta_\pi = (-2.8 \pm 0.5) \cdot 10^{-4} \text{ fm}^3$  [1].

The Compton scattering of photon off the hadron is the suitable process where deformation of hadron can be studied, while the values of polarizabilities can be extracted directly from differential Compton cross section. From Compton scattering off proton and deuteron targets,

polarizabilities of proton and neutron have been determined lately with relatively high accuracy. In contrast, for charged pions the experimental situation is more difficult since they are not available as fixed target.

The first idea to measure the polarizabilities of the charged pion was proposed by a group of scientists from JINR in 1980 [2]. The proposed method is based on the assumption that the electric field around nucleus can be presented as a flux of quasi-real photons, on which incident particles can be scattered, thus representing Compton scattering in inverse kinematics. The measurement was performed at the SIGMA spectrometer installed at the secondary beam of the proton synchrotron U-70 (Protvino) with active participation of the JINR group. The sample collected with 40 GeV/c  $\pi^-$  beam and carbon target was about 7000 events of the  $\pi^- + (A, Z) \rightarrow \pi^- + (A, Z) + \gamma$  reaction. The corresponding result for pion polarizabilities (under the assumption  $\alpha_\pi + \beta_\pi = 0$ ) is  $\alpha_\pi = -\beta_\pi = (6.8 \pm 1.4 \text{ (stat.)} \pm 1.2 \text{ (syst.)}) \cdot 10^{-4} \text{ fm}^3$  [3] is not in the perfect agreement with ChPT prediction.

на спектрометре СИГМА, установленном на вторичном пучке протонного синхротрона У-70 (Протвино), при активном участии группы из ОИЯИ. Статистика, набранная на пучке  $\pi^-$  с импульсом 40 ГэВ/с и графитовой мишенью, составила около 7000 событий реакции  $\pi^- + (A, Z) \rightarrow \pi^- + (A, Z) + \gamma$ . Из анализа дифференциального сечения такой реакции для поляризуемостей пиона (в предположении  $\alpha_\pi + \beta_\pi = 0$ ) был получен результат  $\alpha_\pi = -\beta_\pi = (6,8 \pm 1,4 \text{ (стат.)} \pm 1,2 \text{ (сист.)}) \times 10^{-4} \text{ фм}^3$  [3], не очень хорошо согласующийся с предсказаниями КЭТ.

В дальнейшем были предприняты попытки оценить поляризуемость пиона, используя фоторождение пиона на ядре-мишени и рождение  $\pi^+\pi^-$ -пары в электрон-позитронных столкновениях. Однако полученные результаты также имели не очень высокую точность и не слишком хорошо согласовывались между собой. В начале 2015 г. результаты нового прецизионного из-

мерения поляризуемостей заряженного пиона были представлены в журнале «Physics Review Letters» коллаборацией COMPASS [4].

COMPASS — эксперимент на вторичном пучке суперпротонного синхротрона в ЦЕРН, в задачи которого входит изучение структуры адронов с использованием мюонных и адронных пучков высокой интенсивности. Установка COMPASS представляет собой универсальный детектор на базе двух спектрометрических магнитов, способный решать широкий круг задач. Для измерения поляризуемостей пионов использовался тот же метод, что и в Протвино: пучок отрицательных пионов с импульсом 190 ГэВ/с испытывал рассеяние на тонкой никелевой мишени с испусканием жесткого фотона. Угол рассеяния пиона измерялся высокоточными кремниевыми детекторами, размещенными до и после мишени, величина импульса рассеянного пиона определялась в магнитном спектрометре, а испущенный фотон



Лаборатория ядерных проблем им. В. П. Дзелепова. Сотрудники ОИЯИ, внесшие принципиальный вклад в постановку эксперимента по измерению поляризованного пиона и анализ полученных результатов З. В. Крумштейн, А. Г. Ольшевский, А. В. Гуськов

The Dzhelepov Laboratory of Nuclear Problems. JINR staff members who made a principle contribution to the development of the experiment on measuring the polarized pion and analysis of the results Z. Krumshtein, A. Olshevsky, and A. Guskov

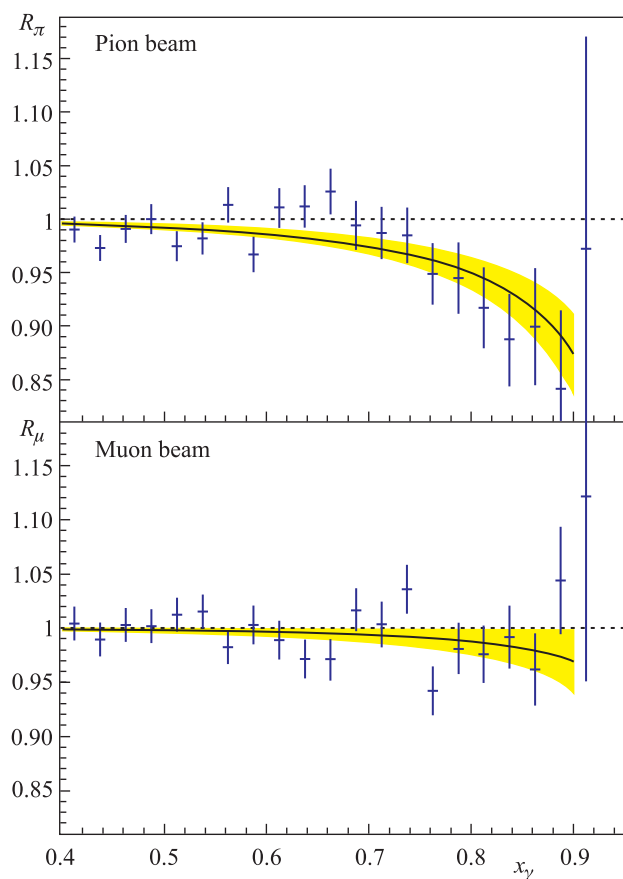
Further several attempts to estimate the pion polarizabilities were performed using pion photoproduction on nuclear target and  $\pi^+\pi^-$ -pair production in electron–positron collisions. But the results obtained also had quite low accuracy and discrepancies between them. In early 2015 the results of the new precise measurement of the pion polarizabilities were presented in the “Physics Review Letters” by the COMPASS collaboration [4].

COMPASS is an experiment at the secondary beam of the Super Proton Synchrotron at CERN. The purpose of this experiment is the study of hadron structure and hadron spectroscopy with high-intensity muon and hadron

beams. The COMPASS setup is a universal detector based on two spectrometric magnets designed for the wide range of physical tasks. The technique used for the measurement of the pion polarizabilities was the same as in Protvino experiment: a negative pion beam of 190 GeV/c is scattered off the thin nickel target with hard photon emission. Pion scattering angle is measured by high-precision silicon detectors up- and downstream the target, its momentum is determined by the magnetic spectrometer, and the photon is reconstructed in the electromagnetic calorimeter. In COMPASS there is a unique possibility to use not only pion but also muon beam of the same energy. Since the muon doesn't have an internal structure, the cross section of the reaction with muon must correspond to the cross section for a point-like particle with spin 1/2. So the muon data were used for studies and control of various systematic effects.

The figure shows the ratio of the measured energy spectrum of emitted photons to the expected spectrum for the point-like pion, based on the statistics of about 63 000 detected events (top) and muon (bottom). Quantity  $x_\gamma$  is the ratio of the emitted photon energy to the beam

Отношение измеренного энергетического спектра испущенных фотонов к ожидаемому для точечной частицы — пиона (вверху) и мюона (внизу)



The ratio of the measured energy spectrum of emitted photons to that expected for a point particle — pion (top) and muon (bottom)

energy. Deviation of this ratio for the pion from a constant at high energies corresponds to the values of the pion polarizabilities  $\alpha_\pi = -\beta_\pi = (2.0 \pm 0.6 \text{ (stat.)} \pm 0.7 \text{ (syst.)}) \times 10^{-4} \text{ fm}^3$  (under the assumption  $\alpha_\pi + \beta_\pi = 0$ ). The result has two times better accuracy than the accuracy of Protvino measurements and is in agreement with ChPT prediction. The corresponding ratio for the muon is consistent within the errors with the hypothesis of the structureless particle. The result obtained by the COMPASS collaboration was reviewed in the official CERN press release.

It should be noted that JINR group made a decisive contribution at each stage of this work, starting from planning of the measurement and data taking to data analysis and obtaining of the physics result. Theoretical support of this analysis was also provided. This is an excellent example of how investigation, initiated by scientists from JINR, relying on strong base of international collaboration, was brought to a new level with their active participation.

регистрировался электромагнитным калориметром. В эксперименте COMPASS существует уникальная возможность использовать наряду с пионным пучком мюонный пучок той же энергии. Поскольку мюон не имеет внутренней структуры, сечение реакции с его участием должно полностью соответствовать таковому для точечной частицы со спином 1/2. Таким образом, мюонные данные использовались для изучения и контроля различных систематических эффектов.

На рисунке показано основывающееся на статистике в 63 000 зарегистрированных событий отношение измеренного энергетического спектра испущенных фотонов к ожидаемому для точечной частицы — пиона (вверху) и мюона (внизу). Величина  $x_\gamma$  является отношением энергии испущенного фотона к энергии пучка. Отклонение данного отношения для пиона от константы в области больших энергий соответствует значению поляризуемостей пиона  $\alpha_\pi = -\beta_\pi = (2,0 \pm 0,6 \text{ (стат.)} \pm 0,7 \text{ (сист.)}) \cdot 10^{-4} \text{ фм}^3$  (в предположении  $\alpha_\pi + \beta_\pi = 0$ ). Этот результат по точности вдвое превосходит результат, полученный в Протвино, и находится в согласии с предсказанием КЭТ. Что касается соответствующего отношения для мюона, то оно в пределах ошибок согласуется с гипотезой о бесструктурной частице. Результат, полученный коллаборацией COMPASS, был освещен в официальном пресс-релизе ЦЕРН.

Следует отметить, что группа ОИЯИ внесла определяющий вклад в данную работу на всех ее этапах — от планирования измерений и набора данных до их обработки и получения физического результата. Было обеспечено и теоретическое сопровождение анализа. Это отличный пример того, как исследования, инициированные учеными из ОИЯИ, опираясь на мощную базу международного сотрудничества, были выведены при их активном участии на новый уровень.

### Список литературы / References

1. Gasser J., Ivanov M.A., Sainio M.E. Revisiting  $\gamma\gamma \rightarrow \pi^+\pi^-$  at Low Energies // Nucl. Phys. B. 2006. V. 745. P. 84.
2. Galperin A.G., Mitselmakher G.V., Olshevski A.G., Pervushin V.N. On a Possibility to Investigate Pion Polarizability in Radiative Scattering on Nuclei at High Energies // Yad. Fiz. 1980. V. 32. P. 1053.
3. Antipov Yu. et al. Experimental Evaluation of the Sum of the Electric and Magnetic Polarizabilities of Pions // Z. Phys. C. 1985. V. 26. P. 495.
4. Adolph C. et al. Measurement of the Charged-Pion Polarizability // Phys. Rev. Lett. 2015. V. 114. P. 062002.