

организована южно-африканским Институтом ядерных технологий и наук.

32 студента и аспиранта из 13 южно-африканских университетов были выбраны из 66 претендентов, подавших заявки на участие в школе. Одной из задач программы стал отбор участников 1-го этапа международной студенческой практики ОИЯИ.

**Визиты.** В январе–марте были организованы ознакомительные визиты: для учащихся школы №37 и детского технопарка «Кванториум» (Владимир), для старшеклассников гимназии «Тарасовка» (Пушкино), для учащихся и учителей Немецкой школы им. Ф. П. Гааза (Москва), для учащихся школ №2107 (Москва), для учащихся школ Санкт-Петербурга, а также для студентов Тамбовского государственного технического университета, находящихся на модульном обучении в государственном университете «Дубна».

ered lectures on the research fields of the Institute and gave master classes. The School was organised by the South African Institute for Nuclear Technology and Sciences.

Thirty-two undergraduate and postgraduate students from 13 South African universities were selected from the total of 66 applicants. One of the objectives of the programme was to select participants in Stage 1 of the JINR International Student Practice.

**Visits.** In January–March, introductory visits were organised for students of School No. 37 and the Kvantorium Children’s Technopark (Vladimir city); for high-school students of the Tarasovka Gymnasium (Pushkino); for students and teachers of the Haass German School (Moscow); for students of School No. 2107 (Moscow); for students of St. Petersburg schools, as well as for the students of the Tambov State Technical University, who are doing a modular training programme at Dubna State University.

*A. P. Nagaytsev*

## COMPASS и COMPASS-II. Двадцать лет успешных измерений

В настоящее время COMPASS-II — один из ведущих экспериментов по спиновой физике высоких энергий и адронной спектроскопии, который проводится на суперпротонном синхротроне (SPS) в ЦЕРН (Женева). Эксперимент и коллаборация имеют довольно длинную историю. В феврале 1997 г. эксперимент был одобрен в ЦЕРН, а в сентябре 1998 г. был подписан окончательный меморандум о взаимопонимании, в том числе и с ОИЯИ [1, 2].

Спектрометр (рис. 1) был смонтирован в 1999–2000 гг. и введен в эксплуатацию в ходе технического запуска в 2001 г. Летом 2002 г. начался первый набор экспериментальных данных с мюонным пучком и поляризованными мишенями [3].

Физическая программа измерений, которая была выполнена в 2002–2018 гг., отражена в таблице.

Экспериментальная программа COMPASS-II, утвержденная в 2010 г., в основном посвящена изучению попе-

*A. P. Nagaytsev*

## COMPASS and COMPASS-II: Twenty Years of Successful Measurements

COMPASS-II is currently one of the leading experiments in high-energy spin physics and hadron spectroscopy, running on the Super Proton Synchrotron (SPS) at CERN in Geneva, Switzerland. The experiment and collaboration have a fairly long history; the experiment was approved by CERN in February 1997, and a final Memorandum of understanding including with JINR was signed in September 1998 [1–2].

The spectrometer (Fig. 1) was installed in 1999–2000 and put into operation during the technical run in 2001. In the summer of 2002, the first set of experimental data with a muon beam and polarized targets started [3].

The physical measurement programme performed in 2002–2018 is shown in the table.

The COMPASS-II experimental programme, approved in 2010, is mainly devoted to the study of the transverse and three-dimensional structure of nucleons and Drell–Jan (DY) reactions [4].

Программа измерений экспериментов COMPASS и COMPASS-II / Measurement Programme of COMPASS and COMPASS-II

Year / Год	Beam / Пучок	Target / Мишень	Measurement / Физические измерения
2002	$\mu^-$ , 160 GeV/c	${}^6\text{LiD}$	SIDIS / Полуинклюзивные реакции
2003	$\mu^-$ , 160 GeV/c	${}^6\text{LiD}$	SIDIS / Полуинклюзивные реакции
2004	$\mu^-$ , 160 GeV/c	${}^6\text{LiD}$	SIDIS / Полуинклюзивные реакции
2006	$\mu^-$ , 160 GeV/c	${}^6\text{LiD}$	SIDIS / Полуинклюзивные реакции
2007	$\mu^-$ , 160 GeV/c	$\text{NH}_3$	SIDIS / Полуинклюзивные реакции
2008	$\pi^-$ , 190 GeV/c	$\text{LH}_2$	Hadron spectroscopy / Адронная спектроскопия
2009	$\pi^-$ , 190 GeV/c	$\text{LH}_2$ , Ni, W, Pb	Hadron spectroscopy, Primakoff reactions / Адронная спектроскопия, реакции Примакова
2010	$\mu^-$ , 160 GeV/c	$\text{NH}_3$	SIDIS / Полуинклюзивные реакции
2011	$\mu^-$ , 160 GeV/c	$\text{NH}_3$	SIDIS / Полуинклюзивные реакции
2012	$\mu^-$ , 160 GeV/c (test) $\pi^-$ , 190 GeV/c	$\text{LH}_2$ Ni, C, W, Pb	DVCS / Глубоконеупругое виртуальное рассеяние Hadron spectroscopy, Primakoff reactions / Адронная спектроскопия, реакции Примакова
2014	$\pi^-$ , 190 GeV/c (test)	$\text{NH}_3$	Drell–Yan reactions / Реакции Дрелла–Яна
2015	$\pi^-$ , 190 GeV/c	$\text{NH}_3$	Drell–Yan reactions / Реакции Дрелла–Яна
2016	$\mu^-$ , 160 GeV/c	$\text{LH}_2$	DVCS / Глубоконеупругое виртуальное рассеяние
2017	$\mu^-$ , 160 GeV/c	$\text{LH}_2$	DVCS / Глубоконеупругое виртуальное рассеяние
2018	$\pi^-$ , 190 GeV/c	$\text{NH}_3$	Drell–Yan reactions / Реакции Дрелла–Яна

This measurement programme started in 2012 with a data taking for Primakoff reactions and a preliminary (test) data taking for studies of deep inelastic virtual scattering on a muon beam with an energy of 160 GeV and a long liquid hydrogen target. For these studies, two new detectors were created: the recoil detector and the electromagnetic calorimeter, which was built mainly by the JINR group [5] (Fig. 2).

The physical programme and the results of the COMPASS and COMPASS-II experiments are a unique example of combining very different studies — from Primakoff reactions to gluon polarization. Such a wide range of tasks required new methods for preparing of detectors and targets.

Of particular note are pioneering measurements that have never been performed before in other experiments — the study of transverse spin distributions in Drell–Yan processes on a beam of negative pions and with a polarized proton target. These measurements were successfully completed in 2015 and continued in 2018.

Already the first results of studies of the Drell–Yan processes have shown that such measurements are an important component of the study of the structure of nucleons. The fact is that the parton distributions that are measured in these processes are not evaluated with fragmentation functions, as is the case in semi-inclusive reactions. Thus, it is not necessary to use data from other ex-

periments to obtain results, which significantly improves the systematic uncertainty in the results obtained. Another important feature of research on the structure of nucleons on the COMPASS and COMPASS-II set-up is the possibility to perform measurements of Drell–Yan processes and semi-inclusive processes on the same set of detectors, which again minimizes the systematic uncertainties of the results of parton distributions measured in these processes.

Already the first results of measurements showed great opportunities for installing COMPASS-II to study the Drell–Yan processes [6]. It was found that the observed Sivers asymmetry sign is consistent with the fundamental QCD prediction that the Sivers asymmetry extracted from the data on the Drell–Yan processes has a sign opposite to the sign extracted from the data on the semi-inclusive deep-inelastic scattering (Fig. 3).

The data taking of experimental statistics was continued in 2018. The first results of this data will be presented in the near future.

It is important to note that the analysis of non-polarized experimental data of the Drell–Yan processes is also active. These studies have four main goals:

- study of distributions of valence quarks in a pion;
- getting data on the Boer–Mulders parton distribution;
- check the Lam–Tung ratio;

речной и трехмерной структуры нуклонов и реакций Дрелла–Яна [4]. Эта программа измерений стартовала в 2012 г. с набора данных по реакциям Примакова и предварительного (пробного) набора данных для исследований глубоконеупругого виртуального рассеяния на мюонном пучке энергии 160 ГэВ и с длинной

жидководородной мишенью. Для этих исследований были созданы два новых детектора: детектор отдачи и электромагнитный калориметр, который был построен в основном группой ОИЯИ [5] (рис. 2).

Физическая программа и результаты экспериментов COMPASS и COMPASS-II являются уникальным

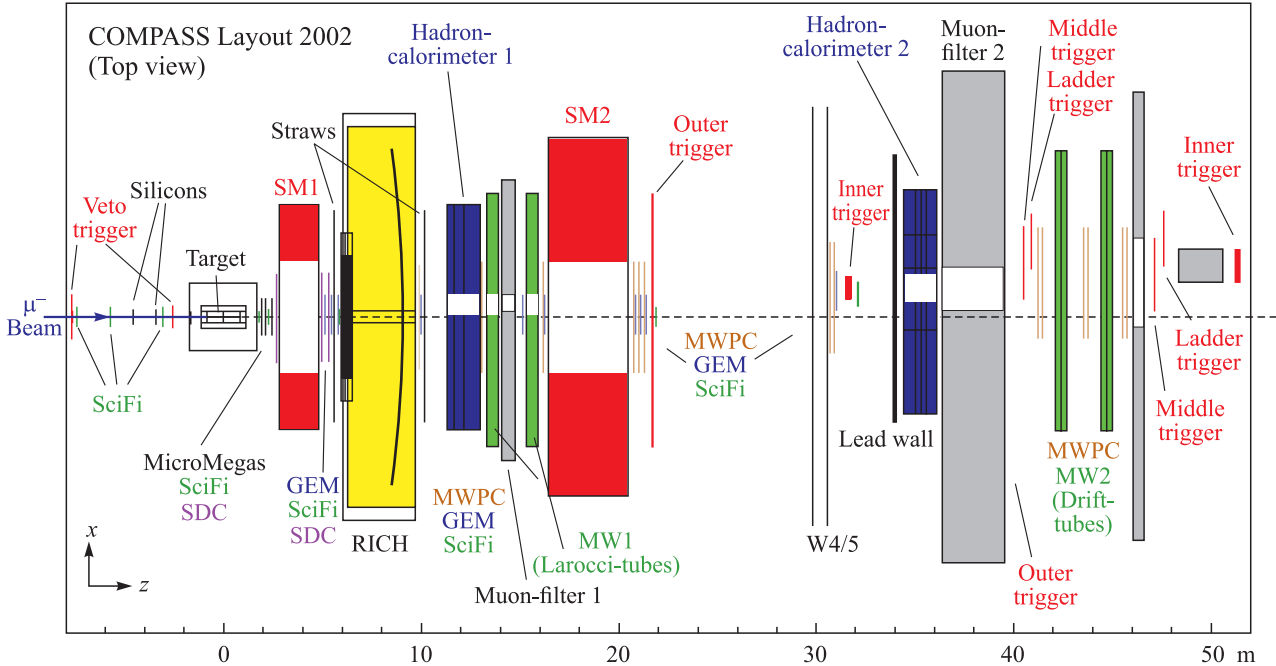


Рис. 1. Экспериментальная установка COMPASS в 2002 г.

Fig. 1. Experimental set-up of COMPASS in 2002

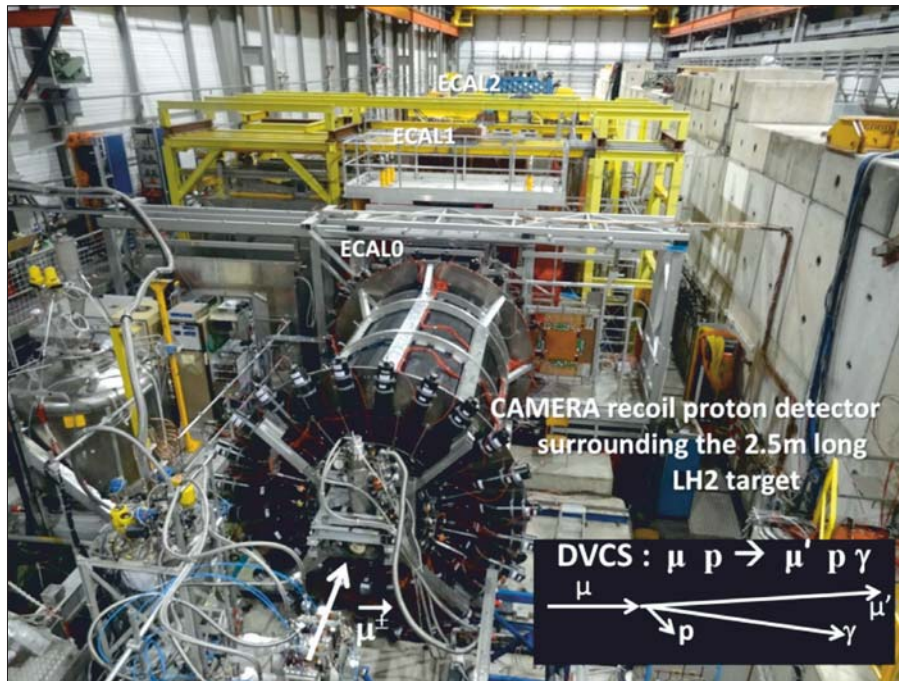


Рис. 2. Передняя по пучку часть установки COMPASS-II для измерений глубоконеупругого виртуального рассеяния лептонов на ядрах

Fig. 2. The forward part of the COMPASS-II set-up for measuring deep inelastic virtual scattering of leptons on nuclei

примером объединения очень сильно отличающихся исследований: от реакций Примакова до поляризации глюонов. Такой широкий спектр задач требовал новых методов подготовки детекторов установки и мишеней.

Особо стоит отметить пионерские измерения, никогда ранее не выполнявшиеся в других экспериментах: изучение поперечных спиновых распределений в процессах Дрелла–Яна на пучке отрицательных пионов и с поляризованной протонной мишенью. Эти измерения были успешно выполнены в 2015 г. и продолжены в 2018 г.

Уже первые результаты исследований процессов Дрелла–Яна показали, что такие измерения являются важнейшей составляющей изучения структуры нуклонов. Дело в том, что партонные распределения, которые измеряются в этих процессах, не «свернуты» с функциями фрагментации, как в полуинклюзивных реакциях. Таким образом, для получения результатов не надо использовать данные других экспериментов, что существенно улучшает систематическую неопределенность в полученных результатах. Также важной особенностью исследований структуры нуклонов на установках COMPASS и COMPASS-II является возможность выполнения измерений процессов Дрелла–Яна и полуинклюзивных процессов на одном и том же наборе детекторов, что также минимизирует систематические неопределенности результатов партонных распределений, измеренных в этих процессах.

Уже первые результаты измерений показали большие возможности установки COMPASS-II по изучению процессов Дрелла–Яна [6]. Было установлено, что наблюдаемый знак асимметрии Сиверса согласуется с фундаментальным предсказанием КХД о том, что асимметрия Сиверса, извлеченная из данных из-

мерений процессов Дрелла–Яна, имеет знак, противоположный знаку, извлеченному из данных измерений полуинклюзивного неупругого рассеяния (рис. 3).

Набор экспериментальной статистики был продолжен в 2018 г. В ближайшее время будут представлены первые результаты по этим данным.

Важно отметить, что активно идет анализ неполяризованных экспериментальных данных процессов Дрелла–Яна. Эти работы имеют 4 основные цели:

— изучение распределений валентных кварков в пионе;

Рис. 3. Асимметрия Сиверса, измеренная в процессах Дрелла–Яна, и теоретические предсказания с учетом смены знака (см. пояснения в тексте)

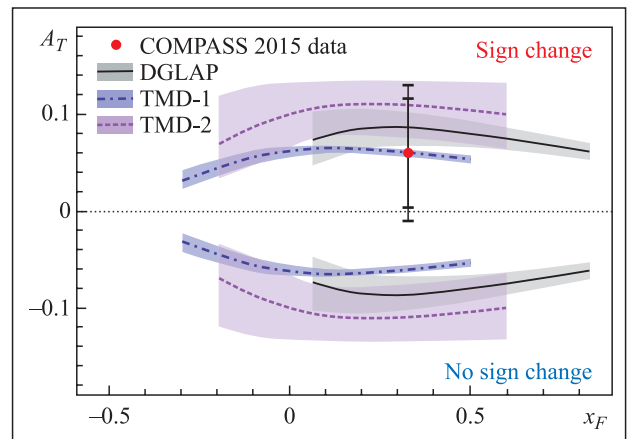


Fig. 3. Siverts asymmetry measured in the Drell–Yan processes and theoretical predictions based on sign changes (see explanations in the text)

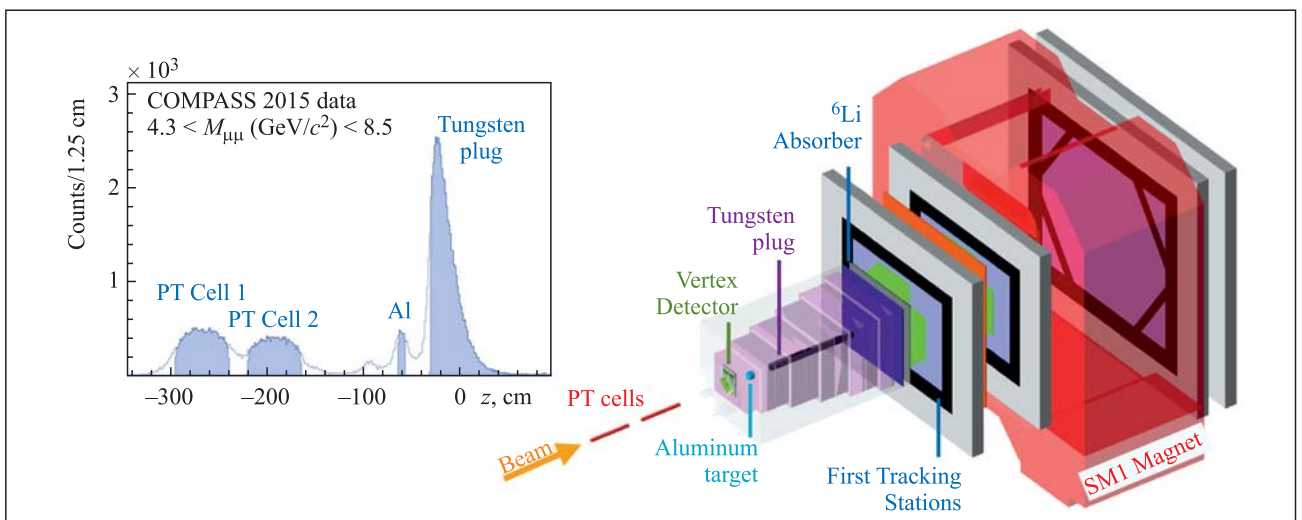


Рис. 4. Абсорбер установки COMPASS-II для измерений процессов Дрелла–Яна и распределение событий в элементах абсорбера

Fig. 4. Compass-II absorber for measuring Drell–Yan processes and event distribution in the absorber elements



— получение данных по партонному распределению Бурра–Мулдерса;  
— проверку соотношения Лама–Тунга;  
— исследование зависимости отношений сечений от ядер различных типов (EMC-эффект и эффект Кронины).

Последний пункт исследований возможен благодаря использованию сложного абсорбера для поглощения адронного фона в измерениях на COMPASS-II (рис. 4) [6].

Это позволяет получать данные не только на ядре водорода, но и на ядрах алюминия и вольфрама. В обработке экспериментального материала по этим ядрам активно участвуют физики ЛЯП.

Важно отметить, что первые теоретические основы измерений процессов Дрелла–Яна были разработаны физиками ОИЯИ в работе [7]. Развитие теории по этой тематике заложило основы для успешных экспериментальных измерений этих процессов в эксперименте COMPASS-II [4–6].

Изучение поляризованных процессов Дрелла–Яна остается важным пунктом научных программ многих экспериментов по физике высоких энергий, в том числе и эксперимента SPD на коллайдере NICA [8].

— study of the dependence of cross-section relations on nuclei of different types (EMC effect and Cronin effect).

The last point of research is possible due to the use of a complex absorber to absorb the hadron background in measurements on the COMPASS-II installation (Fig. 4) [6].

This allows one to get data not only on the hydrogen core, but also on the aluminum and tungsten cores. In the processing of experimental material for these nuclei, DLNP physicists are actively involved.

It is important to note that the first theoretical foundations for measuring Drell–Yan processes were developed by JINR physicists in [7]. The development of the theory on this topic laid the foundations for successful experimental measurements of these processes in the COMPASS-II experiment [4–6].

The radiation of polarized Drell–Yan processes remains an important point in the scientific programmes of many high-energy physics experiments, including the SPD experiment on the NICA collider [8].

## Список литературы / References

1. COMPASS Collab. Proposal. CERN/SPSLC 96-14, SPSLC/P297, 1 March 1996.
2. COMPASS. MoU, 2 September 1998. [http://wwwcompass.cern.ch/compass/gl/documents/mou/MOUFIN\\_D.pdf](http://wwwcompass.cern.ch/compass/gl/documents/mou/MOUFIN_D.pdf).
3. COMPASS Collab. // Nucl. Instr. Meth. A. 2007. V. 577. P. 455–518.
4. COMPASS Collab. COMPASS-II Proposal. SPSC-2010-014/P-340, 17 May 2010. [http://wwwcompass.cern.ch/compass/proposal/compass-II\\_proposal/compass-II\\_proposal.pdf](http://wwwcompass.cern.ch/compass/proposal/compass-II_proposal/compass-II_proposal.pdf).
5. Крумштейн З. В., Нагайцев А. П., Ольшевский А. Г., Савин И. А. Новый электромагнитный калориметр для эксперимента COMPASS в ЦЕРН. <http://www.jinr.ru/posts/novyj-elektromagnitnyj-kalorimetr-dlya-eksperimenta-compass-v-tserne/>.
6. Krumsteyn Z. V., Nagaytsev A. P., Olchevsky A. G., Savin I. A. New Electro-Magnetic Calorimeter for COMPASS at CERN. <http://www.jinr.ru/posts/novyj-elektromagnitnyj-kalorimetr-dlya-eksperimenta-compass-v-tserne/>.
7. COMPASS Collab. // Phys. Rev. Lett. 2017. V. 119. P. 112002.
8. Матвеев В. А., Мурадян Р. М., Тавкхелидзе А. Н. Рождение мюонных пар в сильных взаимодействиях и асимптотические правила сумм. Препринт ОИЯИ P2-4543. Дубна, 1969; Препринт SLAC\_TRANS\_0098.
9. Matveev V., Muradyan R., Tavkhelidze A. Production of Muon Pairs in Strong Interactions and Asymptotic Sum Rules. JINR Preprint P2-4543. Dubna, 1969; Preprint SLAC\_TRANS\_0098.
10. Tsenov R. et al. Conceptual and Technical Design of the Spin Physics Detector (SPD) at the NICA Collider. JINR PAC, Jan 2019, <https://indico.jinr.ru/event/718/>.