

Н. М. Пискунов, Э. Томази-Густафссон (от имени коллаборации ALPOM-2)

Измерение анализирующих способностей в нуклон-ядерном рассеянии в диапазоне импульсов от 1,75 до 5,4 ГэВ/с

Нуклоны (протоны и нейтроны), составляющие атомного ядра, могут быть поляризованы. Это означает, что их спины предпочтительно выстроены вдоль оси квантования. Спин — это квантовое свойство частицы, его классический аналог — волчок. Сильное взаимодействие, которое действует между нуклонами в атомном ядре, чувствительно к поляризации. Для лучшего понимания сильного взаимодействия и структуры нуклона и ядер интересно измерить поляризацию частиц, образующихся в ядерной реакции. Приборы, измеряющие поляризацию, называются поляриметрами. Для разработки, создания, тестирования и подтверждения принципа работы адронных поляриметров требуются поляризованные пучки протонов и нейтронов с известной поляризацией. Сегодня такие пучки в ГэВ-ном диапазоне энергий доступны только на нуклотроне ОИЯИ (Дубна). Проведено первое

измерение анализирующей способности поляризованных нейтронов на толстой (тяжелой) мишени.

Упругая реакция $eN \rightarrow eN$ (N — нейтрон или протон) с продольно-поляризованным пучком электронов и последующее измерение поляризации нуклона отдачи позволяют получить отношение электрического и магнитного формфакторов $\mu G_{Ep}/G_{Mp}$ по методу, предложенному А. И. Ахиезером и М. П. Рекало [1]. Такая наблюдаемая двойной поляризации зависит от интерференционного члена и очень чувствительна к небольшому электрическому вкладу. Серия экспериментов в Лаборатории Джефферсона (США) внесла значительный вклад в изучение отношения формфакторов протона [2, 3] (рис. 1).

Предложенный метод требует двух последовательных реакций: первичной реакции с регистрацией частицы отдачи, поляризация которой должна быть

N. M. Piskunov, E. Tomasi-Gustafsson (on behalf of the ALPOM-2 Collaboration)

Measurement of Analyzing Powers for Nucleon-Nucleus Scattering in the Momentum Range from 1.75 to 5.4 GeV/c

Nucleons (protons and neutrons), the components of the atomic nucleus, can be polarized. This means that their spins are preferentially aligned along a quantization axis. The spin is a quantum property of a particle and has its classical analogue in a spinning top. The strong interaction that acts among nucleons in the atomic nucleus is sensitive to polarization. For a better understanding of the strong interaction and of the structure of the nucleon and nuclei, it is interesting to measure the polarization of the particles produced in a nuclear reaction. The instruments measuring the polarization are called polarimeters. Conceiving, building, testing and validating the working principle of hadron polarimeters requires proton and neutron polarized beams of known polarization. Today, such beams of energy in the GeV range are available only at the Nuclotron complex of JINR (Dubna) in Russia. The first measurement of analyzing powers for polarized neutrons on a thick (heavy) target has been carried out.

The elastic reaction $eN \rightarrow eN$ (N is a neutron or a proton) with a longitudinally polarized electron beam and measuring the polarization of the recoil nucleon allow one to access the electric to magnetic form factor ratio $\mu G_{Ep}/G_{Mp}$, following a method suggested by A. I. Akhiezer and M. P. Rekalov [1]. Such a double polarization observable depends on an interference term and is very sensitive to a small electric contribution. A series of experiments at the Jefferson Laboratory (USA) have made significant contribution to studying the ratio of the form factors of the proton [2, 3] (Fig. 1).

The proposed method requires two successive reactions: 1) a primary reaction with the detection of the recoil particle, the polarization of which must be measured; 2) the second interaction with the polarimeter target to measure its polarization. The second reaction should be simple for identification and very sensitive to the particle polarization. This is quantified by two observables: 1) the cross section, which characterizes the probability that such

измерена, и второго взаимодействия с мишенью поляриметра для измерения ее поляризации. Вторая реакция должна быть простой для идентификации и очень чувствительной к поляризации частиц. Это количественно оценивается двумя величинами: 1) поперечным сечением, которое характеризует вероятность того, что такая реакция происходит; 2) анализирующей способностью A_y , которая количественно определяет чувствительность реакции к поляризации падающих частиц. Характеристики поляриметра представлены в виде величины FOM (Figure of Merit), $FOM = \varepsilon A_y^2$, которая является функцией эффективности ε , определяемой как отношение числа «полезных» ко всем регистрируемым событиям, и анализирующей способности A_y .

Анализирующая способность протонов была измерена на синхрофазотроне ОИЯИ на мишени CH_2 для импульсов пучка в диапазоне 1,75–5,3 ГэВ/с. Результаты по анализирующей способности как функции поперечного импульса $p_t = p_{lab} \sin \theta$ показаны на рис. 2 [4]. После получения предварительных результатов измерений в Дубне программно-консультативный комитет Лаборатории Джефферсона одобрил измерение коллаборации GEp(3) (рис. 1) отношения формфакторов протонов до 8,5 ГэВ².

a reaction occurs; 2) the analyzing power A_y that quantifies the sensitivity of the reaction to the polarization of the incoming particles. The performance of a polarimeter is given in terms of Figure of Merit, $FOM = \varepsilon A_y^2$, which is the function of the efficiency, ε , defined as the ratio of “useful” to incident events and of the analyzing power, A_y .

Proton analyzing powers have been measured at the JINR synchrophasotron on a CH_2 target for beam momenta in the range 1.75–5.3 GeV/c. The results on the analyzing powers as a function of the transverse momentum $p_t = p_{lab} \sin \theta$ are shown in Fig. 2 for different proton momenta [4]. After obtaining preliminary measurement results in Dubna, Jefferson Laboratory PAC approved the GEp(3) (Fig. 1) measurement of the ratio of proton form factors up to 8.5 GeV².

In order to compensate for the decrease of the analyzing powers when the energy of the particle increases (Fig. 2), it is necessary to develop new-generation polarimeters and study their performances. Three major findings were highlighted in our recent measurements at Nuclotron, where the analyzing powers were determined at proton (neutron) momentum from 3 to 4.2 GeV/c [5]:

1. A hadron calorimeter was added downstream. The granularity was sufficient to measure the azimuthal

Чтобы компенсировать уменьшение анализирующей способности при увеличении энергии частицы (см. рис. 2), необходимо разработать поляриметры нового

Рис. 1. Отношение формфакторов протона как функция квадрата переданного импульса, измеренное коллаборацией JLab-GEp в серии экспериментов [2]. Приведены значения будущих измерений в эксперименте E12-07-109 [3] (пурпурные квадраты)

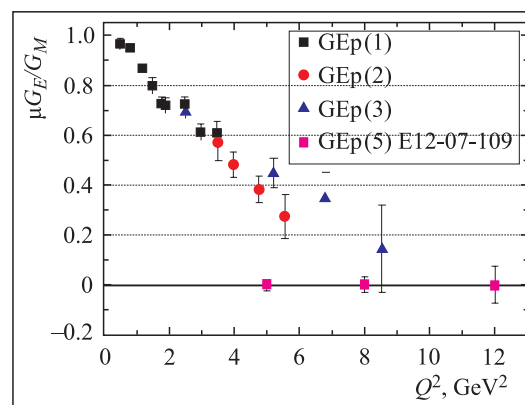


Fig. 1. Proton form factor ratio as a function of the momentum transfer squared, measured by the JLab-GEp Collaboration in a series of experiments [2]. The values of future measurements in experiment E12-07-109 [3] are also shown (purple squares)

Рис. 2. Зависимость анализирующей способности от поперечного импульса $p_t = p_{lab} \sin \theta$ для различных импульсов пучка протонов [4]

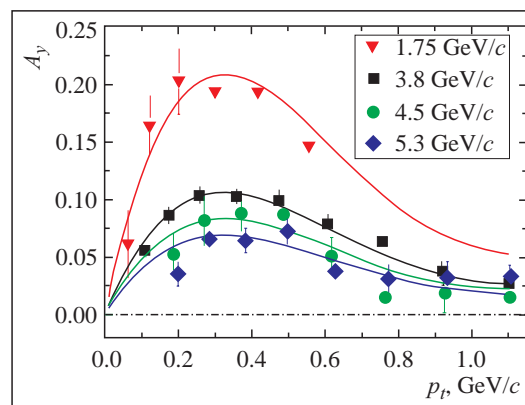


Fig. 2. Dependence of the analyzing powers on the transverse momentum $p_t = p_{lab} \sin \theta$ for different momenta of the proton beam [4]

asymmetry of the detected particles to be compared with the asymmetry reconstructed from the tracks (Fig. 3). Excellent agreement between both asymmetry measurements makes it possible to use the calorimeter for proton polarimetry with and even without track detectors. The impact of the selection on the energy deposit in the calorimeter is shown in Fig. 4 for the neutron case. A twofold increase in A_y

поколения и изучить их характеристики. Недавно при измерениях на нуклотроне, когда анализирующая способность была определена при импульсе протона (нейтрона) от 3 до 4,2 ГэВ/с, было обнаружено следующее [5]:

Рис. 3. Азимутальная зависимость A_y для $p + \text{CH}_2$ -рассеяния при импульсе 3,0 ГэВ/с, полученная из сработавших модулей адронного калориметра (синие квадраты) и по трекам (красные кружки)

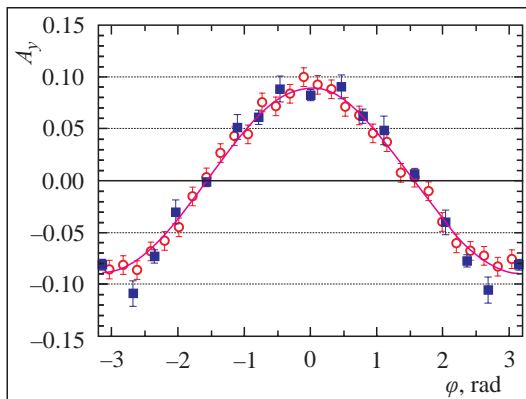


Fig. 3. Azimuthal dependence A_y for $p + \text{CH}_2$ - scattering at a momentum of 3.0 GeV/c, obtained from triggered modules of the hadron calorimeter (blue squares) and by tracks (red circles)

Рис. 4. Анализирующие способности для реакции перезарядки $n + \text{Cu}$ в зависимости от порога энергии, выделяемой заряженной частицей в калориметре, как показано вверху справа

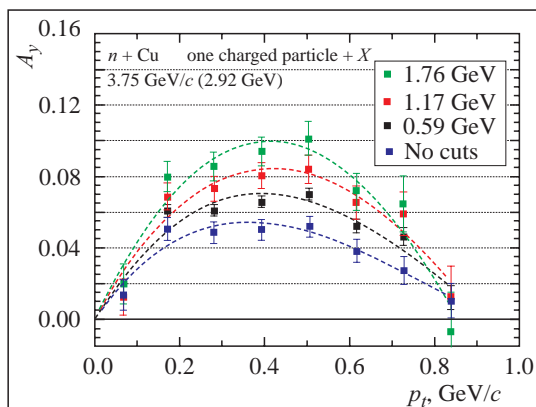


Fig. 4. Analyzing powers for the charge exchange $n + \text{Cu}$ corresponding to different cuts on the energy deposit by the charged particle detected in the calorimeter, as shown on top right

is seen for the charge exchange reaction caused by the neutron beam, and the FOM value changes from $8 \cdot 10^{-5}$ to $1.1 \cdot 10^{-4}$ at irradiation of a copper target 4 cm thick. For the reaction caused by a proton beam, A_y increases by a factor of 1.3. Selecting tracks with high-energy deposit removes the events with multiple tracks that dilute the information on the polarization.

1. В установку был добавлен адронный калориметр. Гранулярности модулей было достаточно, чтобы измерить азимутальную асимметрию регистрируемых частиц и сравнить с асимметрией, восстановленной с помощью треков (рис. 3). Хорошее согласие между данными обоих измерений асимметрии позволяет использовать калориметр для поляриметрии протонов с трековыми детекторами и даже без них. Влияние порога энерговыделения в калориметре на величину измеренной анализирующей способности показано на рис. 4 для нейтронного случая. Видно увеличение A_y в 2 раза для реакции перезарядки, вызванной нейтронным пучком, а величина FOM меняется с $8 \cdot 10^{-5}$ до $1,1 \cdot 10^{-4}$ при облучении медной мишени толщиной 4 см. Для реакции, вызванной пучком протонов, величина A_y растет в 1,3 раза. Отбор треков с высоким энерговыделением удаляет события с несколькими треками, поэтому информация о поляризации менее выразительна.

2. С ростом импульса реакция перезарядки становится намного эффективнее по сравнению с упругим (или неупругим) рассеянием и с очевидным преимуществом в нейтронном случае, когда одна заряженная частица (протон) регистрируется в направлении вперед.

3. Тяжелые мишени, по крайней мере, так же эффективны, как и легкие мишени, богатые водородом,

2. With an increase in the momentum, the charge exchange reaction becomes much more efficient in comparison with elastic (or inelastic) scattering and with an obvious advantage in the neutron case, when one charged particle (proton) is detected in the forward direction.

3. Heavy targets are at least as efficient as hydrogen-rich light targets, which greatly simplifies the conception of a polarimeter; this is understood as if the reaction carrying the information on the particle polarization is the "quasi free" NN scattering.

The ALPOM-2 results show that it is still possible to conceive high-energy polarimeters, and therefore to pursue high-energy polarization measurements. In particular, the future Jefferson Lab measurements of form factors for protons [3] and for neutrons [6] at large momentum transfer have already integrated the implementation of hadron calorimetry, the use of heavy secondary targets and the detection of the charge-exchange reaction. The ALPOM-2 Collaboration will pursue the polarimetry studies to the largest beam momenta that will be available in Dubna. About twenty physicists from JINR, France, Russia, Slovakia, USA, and the United Kingdom take part in the measurements.

что значительно упрощает концепцию поляриметра; это понимается как реакция, несущая информацию о поляризации частицы, — «квазисвободное» рассеяние NN .

Результаты ALPOM-2 показывают, что все еще возможно изобрести поляриметры высоких энергий, а следовательно, проводить измерения поляризации высоких энергий. В частности, будущие измерения формфакторов для протонов [3] и нейтронов [6] в Лаборатории Джефферсона при большой передаче импульса уже включают применение адронной калориметрии, использование тяжелых вторичных мишеней и регистрацию реакции перезарядки. Коллаборация ALPOM-2 будет проводить поляриметрические исследования пучков с наибольшими импульсами, которые будут доступны в Дубне. Измерения проводят около двадцати физиков из ОИЯИ, России, Словакии, США, Франции и Великобритании.

Список литературы / References

1. *Akhiezer A. I., Rekalov M. P.* // Sov. J. Part. Nucl. 1974. V.4. P.277.
2. *Puckett A. J. R. (The GEp Collab.)* // Phys. Rev. C. 2017. V.96. P.055203; Ibid. 2018. V.98. P.019907.
3. *Perdrisat C. F. et al.* JLab Exp. E12-07-109. 2007.
4. *Azhgirei L. S. et al.* // Nucl. Instr. Meth. A. 2005. V. 538. P. 277.
5. *Basilev S. N. et al.* // Eur. Phys. J. A. 2020. V.56. P.26.
6. *Annand J. R. M. et al.* JLab Exp. E12-17-004. 2017.