

На конкурс научных работ ОИЯИ за 2020 год
ПРЕДСТАВЛЕНИЕ

Представляется работа

Измерение анализирующих способностей в нуклон-ядерном рассеянии в диапазоне импульсов от 1.75 до 5.4 ГэВ/с

Раздел: Научно-методические работы

КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ:

Гавришук О. П.
Кириллов Д. А.
Мушински Я.
Пердрисат Ч.
Пискунов Н. М.
Пунджаби В.
Рукояткин П. А.
Ситник И. М.
Томази-Густафссон Э.
Шиндин Р. А.

В представленный цикл работ входит 3 публикации:

1. L.S. Azhgirey, V.A. Arefiev, I. Atanasov, S.N. Basilev, Yu.P. Bushuev, V.V. Glagolev, M.K. Jones, D.A. Kirillov, P.P. Korovin, G.J. Kumbartzki, P.K. Manyakov, J. Mus̄insky', L. Pentchev, C.F. Perdrisat, V. Punjabi, N.M. Piskunov, I.M. Sitnik, V.M. Slepnev, I.V. Slepnev, E. Tomasi-Gustafsson
Measurement of analyzing powers for the reaction $p + CH_2$ at $p_p = 1.75-5.3$ GeV/c
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 538 (2005) 431–441
2. J. R. Puckett, E. J. Brash, M. K. Jones, W. Luo, M. Meziane, L. Pentchev, C. F. Perdrisat, V. Punjabi, F. R. Wesselmann, A. Afanasev, A. Ahmidouch, I. Albayrak, K. A. Aniol, J. Arrington, A. Asaturyan, H. Baghdasaryan, F. Benmokhtar, W. Bertozzi, L. Bimbot, P. Bosted, W. Boeglin, C. Butuceanu, P. Carter, S. Chernenko, M. E. Christy, M. Comisso, J. C. Cornejo, S. Covrig, S. Danagoulian, A. Daniel, A. Davidenko, D. Day, S. Dhamija, D. Dutta, R. Ent, S. Frullani, †H. Fenker, E. Frlez, F. Garibaldi, D. Gaskell, S. Gilad, R. Gilman, Y. Goncharenko, K. Hafidi, D. Hamilton, D. W. Higinbotham, W. Hinton, T. Horn, B. Hu, J. Huang, G. M. Huber, E. Jensen, C. Keppel, M. Khandaker, P. King, D. Kirillov, M. Kohl, V. Kravtsov, G. Kumbartzki, Y. Li, V. Mamyán, D. J. Margaziotis, A. Marsh, Y. Matulenko, J. Maxwell, G. Mbianda, D. Meekins, Y. Melnik, J. Miller, A. Mkrtchyan, H. Mkrtchyan, B. Moffit, O. Moreno, J. Mulholland, A. Narayan, S. Nedev, Nuruzzaman, E. Piasetzky, W. Pierce, N.M. Piskunov, Y. Prok, R. D. Ransome, D. S. Razin, P. Reimer, J. Reinhold, O. Rondon, M. Shabestari, A. Shahinyan, K. Shestermanov, †S. Sirca, I. Sitnik, L. Smykov, † G. Smith, L. SolovyeV, P. Solvignon, † R. Subedi, E. Tomasi-Gustafsson, Vasiliev, M. Veilleux, B.B. Wojtsekhowski, S. Wood, Z. Ye, Y. Zanevsky, X. Zhang, Y. Zhang, X. Zheng, and L. Zhu
Polarization Transfer Observables in Elastic Electron-Proton Scattering at $Q^2 = 2.5, 5.2, 6.8$ and 8.5 GeV²,
Phys.Rev.C 96 (2017) 5, 055203, Phys.Rev.C 98 (2018) 1, 019907 (erratum) e-Print: [1707.08587](https://arxiv.org/abs/1707.08587) [nucl-ex]
3. S.N. Basilev, Yu.P. Bushuev, O.P. Gavrishchuk, V.V. Glagolev, D.A. Kirillov, N.V. Kostayeva, A.D. Kovalenko, K.S. Legostaeva, A.N. Livanov, I.A. Philippov, N.M. Piskunov, A.A. Povtoreiko, P.A. Rukoyatkin, R.A. Shindin, A.V. Shipunov, A.V. Shutov, I.M. Sitnik, V.M. Slepnev, I.V. Slepnev, A.V. Terletskiy, K. Hamilton, R. Montgomery, J. R.M. Annand, D. Marchand, Y. Wang, E. Tomasi-Gustafsson, C.F. Perdrisat, V. Punjabi, G. Martinska, J. Urban, and J. Mušinsky
Measurement of neutron and proton analyzing powers on C, CH, CH₂ and Cu targets in the momentum region 3-4.2 GeV/c,
Eur.Phys.J.A 56 (2020) 26 Special Article - New Tools and Techniques, e-Print: [1908.06159](https://arxiv.org/abs/1908.06159) [nucl-ex]

Поскольку все фундаментальные взаимодействия зависят от спина, то знание поляризационных наблюдаемых важно для понимания структуры адронов и механизма ядерных реакций. Во время проведения экспериментов возникает необходимость измерения поляризации продуктов ядерных реакций, а также измерения или калибровки поляризации пучков из поляризованных источников поляриметрами с высокой эффективностью

в широком диапазоне энергий и точно известной анализирующей способностью. Поляризация протонов промежуточной энергии (т.е. в диапазоне от нескольких сотен МэВ до нескольких ГэВ) обычно измеряется с помощью поляриметров, расположенных в фокальной плоскости с полным азимутальным акцептансом и измеряющих угловые распределения заряженных частиц, образованных в результате инклюзивной реакции, обычно это рассеяние на углеродной мишени.

Так как поляризационные эксперименты, как правило, занимают много времени, то необходима тщательная оптимизация характеристик поляриметра. Это требует тщательного выбора и изучения анализирующей реакции, которая должна иметь большой выход и большую анализирующую способность; оптимизации выбора материала и толщины мишени-анализатора, детекторов регистрации – особенно при создании широкоапертурных поляриметров для проведения измерений отношения электромагнитных форм факторов в Лаборатории Джефферсона в США.

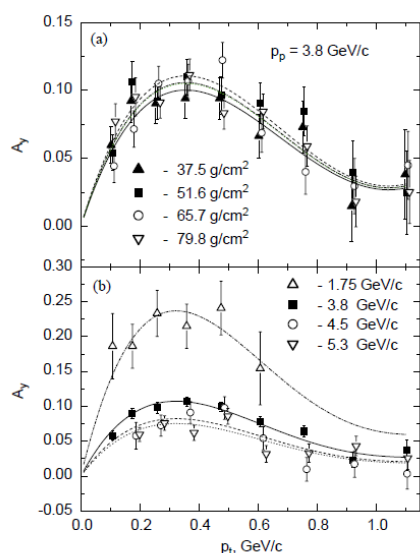


Fig. 4. Analyzing powers as a function of p_T : (a) for different target thicknesses at $p_p = 3.8$ GeV/c; (b) for different momenta at $L = 51.6$ g/cm².

На первом этапе была измерена анализирующая способность A_y для инклюзивной реакции $p + \text{CH}_2 \rightarrow \text{одна заряженная частица} + X$ при импульсах протонов 1.75, 3.8, 4.5 и 5.3 ГэВ/с [1]. Для проведения измерений в Дубне из Франции были привезены пропорциональные камеры для регистрации частиц в широком угловом диапазоне.

Результаты измерений показали следующие интересные особенности:

- Для протонов 3.8 ГэВ/с; A_y практически не зависит от количества материала в анализаторе, от 37 до 80 г/см²;
- Толщина мишени свыше длины ядерного столкновения и акцептанс поляриметра выше $p_T > 0.7$ ГэВ/с не улучшают качество (Figure of merit, FOM) поляриметра.
- A_y уменьшается с увеличением налетающего импульса, но все еще остается значительной при импульсе протона 5.3 ГэВ/с;
- CH_2 показывает большую A_y , чем углерод.
- Высокое угловое разрешение поляриметра очень важно для увеличения FOM.
- В измеренном диапазоне импульсов A_y обратно пропорциональна налетающему импульсу.

Предварительные результаты измерений в Дубне немедленно были рассмотрены в Лаборатории Джефферсона: РАС 20 (17-20 июля 2001 г.) одобрил предложение эксперимента E-01-109 «Измерение G_{Ep}/G_{Mp} до $Q^2 = 9$ (ГэВ/с)² путем измерения поляризации протона отдачи» указав, что: «Чувствительность эксперимента зависит от анализирующей способности поляриметра (2 x 60 см CH_2), которая значительно отлична от нуля в соответствующем диапазоне импульсов. На момент написания предложения не было доступных данных о величинах анализирующей способности, которые подтверждали бы экстраполяции, сделанные при подготовке нового эксперимента. Сотрудничеством был проведен измерения этой анализирующей способности в Дубне, и комитет рад отметить, что предварительные результаты, полученные этим летом, разумно согласуются с экстраполяциями, сделанными в предложении» (см. Приложение 1).

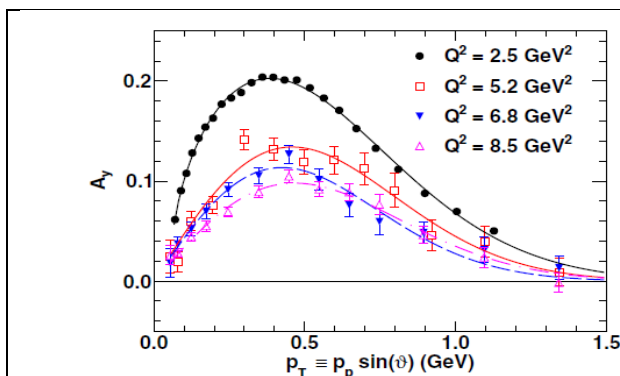


FIG. 14. Analyzing power A_y vs $p_T \equiv p_p \sin \vartheta$ for the four different Q^2 values from GEP-III/ 2γ . Data are from both polarimeters combined. Curves are the fits to the data, used to estimate the position and value of the maximum in $A_y(p_T)$. See text for details.

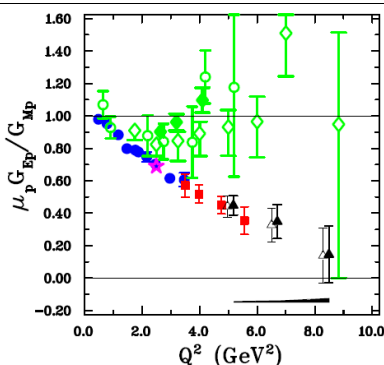


FIG. 18. Final results of GEP-III (black filled triangles) for $\mu_p G_p^E / G_{Mp}$, with selected existing data from cross section and polarization measurements. The error bars shown are statistical. The band below the data shows the final, one-sided systematic uncertainties for GEP-III. The originally published results [31] (black empty triangles) are shown for comparison, offset slightly in Q^2

С учетом результатов калибровочного эксперимента в Дубне в 2001 г. для эксперимента E-01-109 в Лаборатории Джефферсона был создан новый поляриметр, состоящий из 2-х CH_2 мишеней длиной 60 см

каждая [2]. Для регистрации треков использовались дрейфовые камеры, изготовленные в Дубне под руководством Ю.В. Заневского. На левой панели Рисунок 14 из [2] показана угловая зависимость A_y , выраженная через «поперечный импульс» pt для всех четырех значений Q^2 , соответствующих импульсам протонов 2.07, 3.59, 4.46 и 5.4 ГэВ/с. Как видно из рисунка характер поведения A_y и величины находятся в согласии с ранее полученными данными. На правой панели представлены окончательные результаты измерений отношения электромагнитных форм факторов протона.

На втором этапе были проведены измерения анализирующих способностей на пучках поляризованных протонов и нейтронов в диапазоне импульсов от 3 до 4.2 ГэВ/с [3]. Особенность этих измерений заключается в следующем: впервые использовался адронный калориметр для измерения энергии частиц, вылетающих из мишени, а для нейтронов в качестве анализирующей реакции впервые использовалась реакция перезарядки.

Включение адронного калориметра определяется тем фактом, что уже при 7 ГэВ/с только около 30% реакций в анализаторе являются упругими, т.е. без образования вторичных частиц (мезонов). Таким образом с увеличением энергии увеличивается вероятность регистрации всех частиц конечного состояния; это зависит от особенностей детектора, таких как угловое разрешение, способность выбирать лидирующую частицу, способность восстанавливать многочастичные события и так далее. Можно ожидать, что наибольшая анализирующая способность будет получена, когда выбранная частица имеет наименьший угол рассеяния и наибольшую энергию; тогда эта частица с большей вероятностью будет рассеянной налетающей частицей.

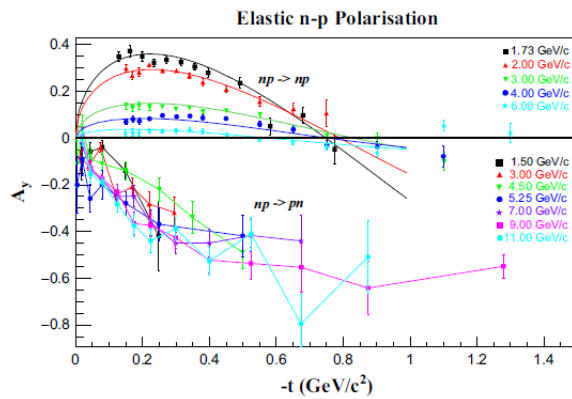


Fig. 4 Top: t -dependence of the polarisation of np scattering for different values of p_{lab} [34,35]. The smooth dotted lines show the fit of Ref. [38] to the np data. Bottom: the t -dependence of charge-exchange np scattering, for different values of p_{lab} [39,40]. The color coding relates the data to momentum labels

Для нейтронов анализирующие способности и дифференциальные сечения известны только для тонких водородных мишеней как для упругого канала, так и для реакции, причем для упругого канала анализирующая способность падает с ростом энергии, а для перезарядки растет в ГэВном интервале энергий. В нейтронных широкоапертурных поляриметрах использовалась только упругая реакция, требующая регистрации быстрого нейтрона и протона отдачи, в качестве мишени применялся сцинтиллятор. В случае перезарядки можно регистрировать только одну заряженную частицу, вылетевшую из мишени вперед.

свертку физических процессов и эффектов конечного разрешения системы регистрации. Pt -распределение для $n + C$ -рассеяния при 3.75 ГэВ/с представлено на рис. 14. Оно описывается суммой двух экспоненциальных функций с параметрами наклона $b_1 = 24,5$ (ГэВ/с) $^{-2}$ и $b_2 = 3.2$ (ГэВ/с) $^{-2}$. Распределение pt^2 для $p + CH_2$ -рассеяния при 3.75 ГэВ/с описывается суммой трех экспоненциальных функций. Первая, форма которой связана с многократным кулоновским рассеянием на малые углы, свернутым с экспериментальным угловым разрешением, не показана на рис. 15. Параметр наклона для второй функции равен $b'_2 = 71.3$ (ГэВ/с) $^{-2}$, который близок к параметру наклона для упругого рассеяния $p + C$. Третья компонента $b'_3 = 7.4$ (ГэВ/с) $^{-2}$ соответствует наклону pp -упругого рассеяния.

Распределение выхода нуклонов в зависимости от pt^2 показано на рис. 15 для $p + CH_2$ -рассеяния и на рис. 14 для $n + C$ -рассеяния при импульсе 3.75 ГэВ/с. Анализ ограничен кинематической областью $pt < 0,4$ ГэВ/с, чтобы избежать поправок, связанных с аксептансом поляриметра. Эти распределения представляют собой

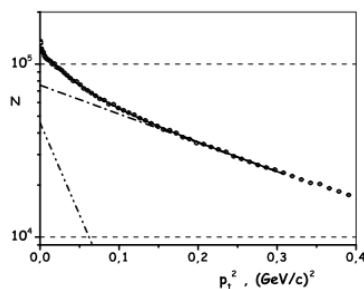


Figure 14: p_t^2 -distribution for $n + C$ scattering events at 3.75 GeV/c (arbitrary units). The solid line is the sum of exponential functions, the dot-dot-dashed and the dot-dashed lines correspond respectively to the two contributions with slope parameters b_1 and b_2 .

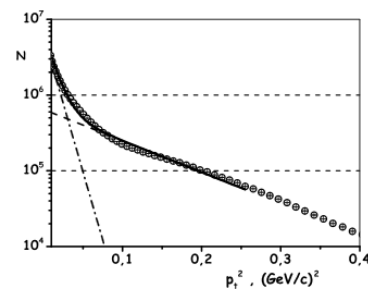


Figure 15: p_t^2 -distribution for $p + CH_2$ scattering events at 3.75 GeV/c (arbitrary units). The solid line is the sum of exponential functions, the long dashed and the dot-dashed lines correspond to the two contributions with slope parameters b'_2 and b'_3 , respectively.

Зависимость A_y от материала мишени, представленная на рис. 18 из [5]. Значение очень слабое, и нет существенной разницы между данными по C, CH, CH₂ и Cu и это не удивительно, так как реакция перезарядки одинакова и на свободных протонах и протонах в ядре.

Асимметрия рассеяния может быть получена независимо как по трекам с дрейфовых камер, так и по сработавшим модулям адронного калориметра, результаты для $p + CH_2$ при импульсе 3.0 ГэВ/с показаны на рис. 17 (закрашенные квадраты). Прекрасное согласие позволяет использовать калориметр для поляриметрии протонов наряду с трековыми детекторами, так и в том случае, когда трековые детекторы отсутствуют.

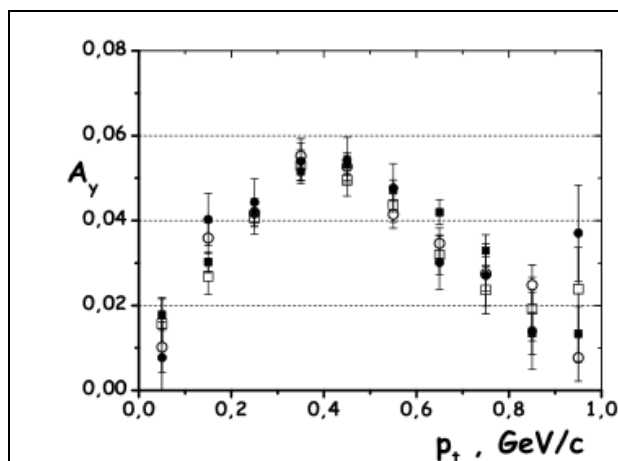


Figure 18 from Ref.1. A_y as a function of p_t : for 3.75 GeV/c incident neutrons on different polarimeter targets: on CH₂ (solid squares), CH (open circles), C (open squares), and Cu (solid circles).

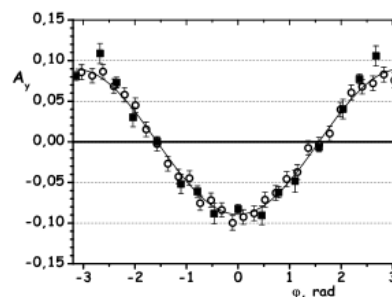


Figure 17: A_y for $p + CH_2$ scattering at a momentum 3.0 GeV/c determined from the hadron calorimeter (filled black squares), compared to averaged values determined from the tracks (empty circles).

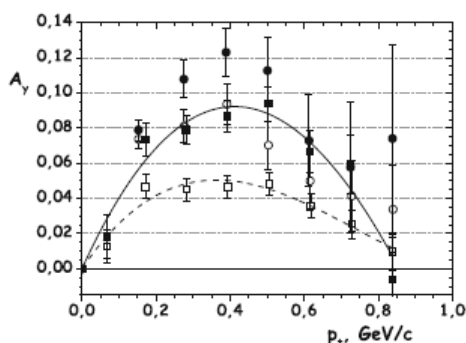


Fig. 19 p_t -dependence of A_y for quasi-elastic $p + Cu \rightarrow$ one charged particle $+ X$ as open circles (solid circles) and charge-exchange $n + Cu \rightarrow$ one charged particle $+ X$ as open squares (solid squares), for incident p and n momentum of 3.75 GeV/c before (after) selection of events with large energy deposit (> 6000 [channels]) in the calorimeter. The lines represent eye guides through the data points for $n + Cu \rightarrow p + X$ before selection (dashed line) and after selection (solid line)

Впервые были получены данные по анализирующим способностям с поляризованными протонами и нейтронами с импульсом 3.75 ГэВ/с, падающими на медную мишень, с регистрацией одной заряженной частицы, летящей вперед, и энергетического порога срабатывания калориметра. На рис. 19 из работы 3 сравнивается A_y для перезарядки $n + Cu \rightarrow p + X$ с квазиупругим $p + Cu \rightarrow p + X$. Если не учитывать энерговыделение в калориметре, то A_y для $p + Cu$ примерно вдвое больше, чем для $n + Cu$. Однако после отбора событий с выделением энергии, превышающим 6000 [каналов], A_y для $n + Cu$ увеличивается в ~ 2 раза, в то время как увеличение для $p + Cu$ составляет ~ 1.3 . Это приводит к увеличению FOM для $n + Cu$ реакции перезарядки почти на 40%. Для медной мишени толщиной 4 см FOM равна $8,0 \times 10^{-5}$, а при отборе событий калориметром увеличился до $1,1 \times 10^{-4}$.

Три новых подхода в развитии поляриметрии, а именно: включение калориметра для отбора высокоэнергетических нуклонов в конечном состоянии, использование реакции перезарядки и замена богатой водородом легкой мишени более тяжелыми ядрами, открывают путь к более простым и эффективным измерениям поляризации протонов и нейтронов в области ГэВ-ных энергий. Будущие эксперименты в Лаборатории Джефферсона, требующие поляриметрии нуклонов отдачи, уже интегрировали эти концепции, как и в случае экспериментов E12-07-109 и E12-17-004, см. Приложение 2 и рисунок ниже, где представлены текущее состояние и планируемые измерения нейтронных электромагнитных форм-факторов.

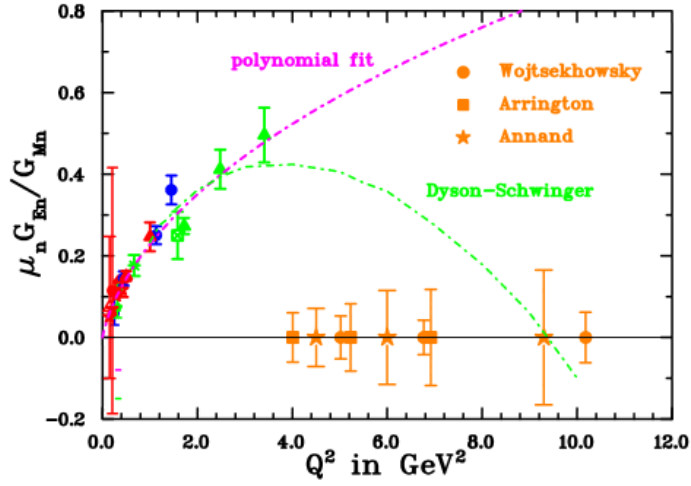


Figure 2: The future data points proposed for recoil polarization G_E^n/G_M^n experiments at JLab [19, 20], and the JLab polarized ^3He experiment [21]. Also shown are the data from Becker (filled green diamonds) [22], Eden (filled blue squares) [23], Glazier (red diamonds with internal +) [24], Golak (empty green diamonds) [25], Herberg (empty red triangles) [26], Meyerhof (filled green stars) [27], Ostrick (filled red diamonds) [28], and Passchier (filled red circles) [29].

Report of the
 July 17-20, 2001
 Meeting of the
 Jefferson Lab
 Program Advisory Committee
 PAC 20

Individual Proposal Report

Proposal: E-01-109

Title: Measurement of G_{Ep} / G_{Mp} to $Q^2 = 9 \text{ (GeV/c)}^2$ Via recoil polarization

Spokespersons: C. Perdrisat, V. Punjabi, M. Jones, E. Brash

Motivation: This proposal aims to extend measurements of G_{Ep} / G_{Mp} to $Q^2 = 9 \text{ (GeV/c)}^2$, which is the highest momentum transfer practically accessible with a 6 GeV beam at CEBAF. The results of previous high precision measurements taken by this collaboration via the recoil polarization technique in Hall A have shown that the ratio of G_{Ep} / G_{Mp} falls steadily with increasing Q^2 . This very clear and startling discovery is a highlight of the recent JLab scientific program and has stimulated new theoretical attempts to describe the nucleon form factors. It is important to pursue these measurements to higher momentum transfers to see if the trend continues.

Measurements and Feasibility: The recoil polarization technique has a number of advantages over the traditional Rosenbluth separation method for determining G_{Ep} / G_{Mp} . The results do not depend on a precise knowledge of the beam polarization and the polarimeter analyzing power, since a ratio of polarization components are measured simultaneously with the same device. On the other hand, the results are dependent on correctly accounting for spin precession of the outgoing polarized protons in the spectrometer, which rely on detailed simulations of the magnetic field.

The new measurements will be carried out in Hall C using the HMS, a new focal plane polarimeter, and a lead glass array to detect the scattered electrons. The feasibility of using the lead glass calorimeter for electron detection was tested already, with a small array, in Hall A at moderate momentum transfers, and the results agreed with the two-spectrometer data taken previously. The collaboration now proposes a low Q^2 point at 4.2 (GeV/c)^2 to overlap earlier data taken with different apparatus in Hall A, plus two new data points at 7.5 and 9 (GeV/c)^2 .

Issues: The sensitivity of the experiment relies on the analyzing power for the polarimeter ($2 \times 60 \text{ cm CH}_2$), being significantly nonzero in the appropriate momentum range. At the time of writing the proposal, there were no analyzing power data available that would validate extrapolations that were made to design the new experiment. The collaboration has undertaken to measure this analyzing power at Dubna, and the committee is pleased to note that preliminary results obtained this summer are in reasonable agreement with extrapolations made in the proposal. A second issue is that of radiative corrections involving the proton at these high momentum transfers. Work in progress, for example by Afanasev et al., addresses this issue and it will be important to evaluate the radiative corrections carefully before the experiment is carried out. Finally, the committee agrees that the low Q^2 point will provide a very important cross check in comparison with earlier results taken with a completely different spectrometer and polarimeter system.

This proposal was submitted to PAC18 and deferred pending results of E-99-007 to a momentum of 5.6 (GeV/c)^2 . The committee was pleased to see the preliminary results of E-99-007, which show a consistent trend with earlier measurements at lower Q^2 , and also to learn that the new apparatus could be used up to 12 (GeV/c)^2 in the longer term, as limited by the highest momentum accessible to the HMS. This experiment will not be ready to run until 2004 at the earliest, since construction and testing of the new equipment will take approximately 3 years to complete. However the committee acknowledges the importance and urgency of the proposed measurements.

Recommendation: Approve for 40 days in Hall C.

Scientific Rating: A

**REPORT
OF THE 45th PROGRAM ADVISORY COMMITTEE
(PAC45) MEETING**

July 10 - 14, 2017

PR12-17-004

Scientific Rating: A-

Recommendation: Approve for Five Days

Title: Measurement of the Ratio G_E^n/G_M^n by the Double-polarized $2H(e,e'n)$ Reaction

Spokespersons: J. Annand (Contact), V. Bellini, M. Kohl, N. Piskunov, B. Sawatzky, B. Wojtsekhowski

Motivation: Measurements of the neutron electromagnetic form factors are a cornerstone of the physics program at JLab12, providing unprecedented insight into the structure of the neutron and QCD dynamics. Present data on G_E^n/G_M^n run out at $Q^2 = 3.4 \text{ GeV}^2$. There is much interest in extending the Q^2 regime to higher values, in order to confront theoretical calculations, to probe the possible onset of scaling behavior predicted by perturbative QCD, and to combine with existing and forthcoming proton data to obtain a quark flavor decomposition of the form factors. Given the experience with proton form factor extractions, it is crucial to employ various different methods, either based on cross section measurements with Rosenbluth separation, or on polarization. The proposed experiment will scatter a longitudinally polarized electron beam off a deuterium target, measuring the polarization of the neutron recoiling from the interaction. Compared to the previously approved experiment E12-11-009 that will use the same general technique, the present experiment uses a different method for neutron polarimetry that also provides access to the charge-exchange channel $np \rightarrow pn$. As the latter dominates at high neutron energy and hence at higher Q^2 , the proposed method would provide an avenue for future high- Q^2 measurements of the form factor ratio via recoil polarimetry.

Measurement and Feasibility: The proposed measurement will be carried out in Hall A. It will make use of all apparatus required for the already approved G_E^n/G_M^n experiment E12-09-019 (LD2 target, BigBite spectrometer for electron detection, 48D48 dipole in hadron arm, HCAL hadron calorimeter), and operate at the same settings. It would hence prefer to run immediately following E12-09-019. A new neutron recoil polarimeter will be added, consisting mainly of a copper polarization analyzer with GEM chambers. The 48D48 dipole magnet will be used to process the spin of the recoil neutron from longitudinal to vertical direction. The form factor ratio G_E^n/G_M^n may then be obtained directly from the polarization ratio P_x/P_z . The analyzing power cancels in this ratio. The focus is on detecting forward protons from the charge-exchange process $np \rightarrow pn$, although there is also potential for seeing large angle, low energy protons from the channel $np \rightarrow np$, which would provide valuable information for E12-11-009.

The proposed experiment requests 5 days of running. It plans to access a single value of $Q^2 = 4.5 \text{ GeV}^2$, which is sufficient for exploring and validating the new recoil polarimetry method. A precision of about 0.1 (absolute value) on the ratio G_E^n/G_M^n is anticipated.

Issues: The case for polarimetry via $np \rightarrow pn$ has recently been strengthened significantly by preliminary data from JINR/Dubna showing a sizable analyzing power for $n+A \rightarrow p+X$. Since most of the equipment is standard Hall-A equipment and the polarimeter mainly consists of a simple copper analyzer, no technical issues are foreseen. The TAC report raises the issue of a high DAQ data volume, which has been addressed by the collaboration and does not appear to be a reason for concern. Running consecutively with E12-09-019 appears to be a must.