

Исследование реакции $p + A \rightarrow p' + X$ на ядрах

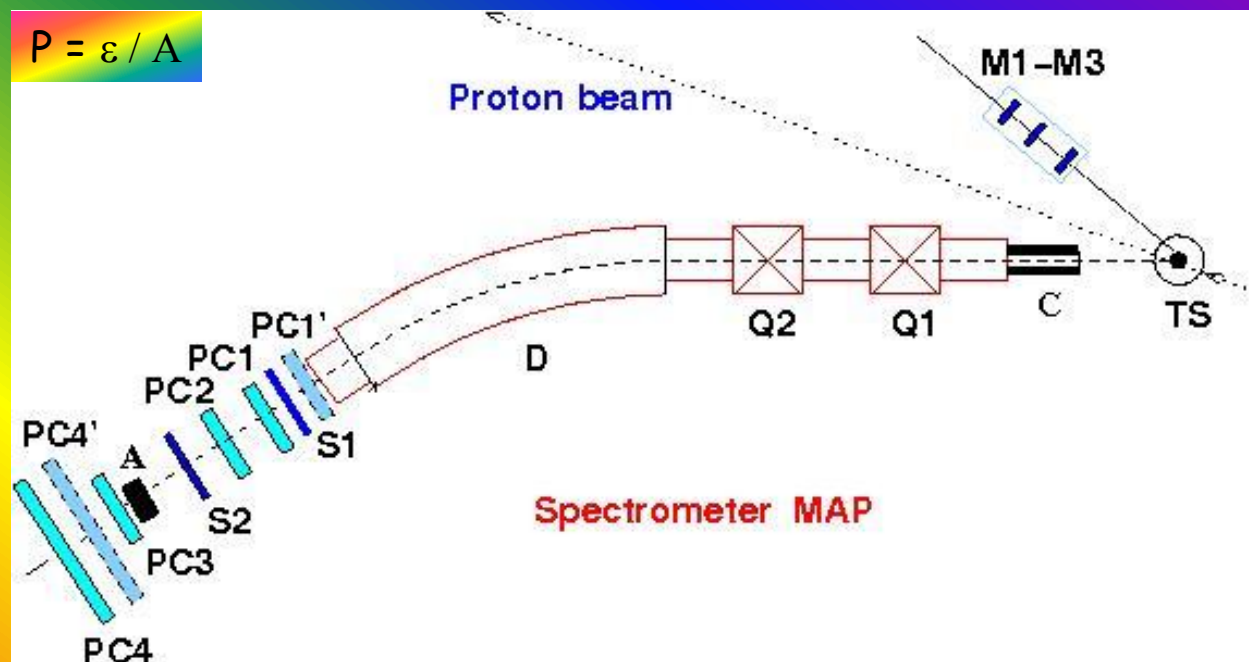
О. Миклухо

тема НИОКР : Исследование структуры ядерной материи на малых расстояниях в квазиупругих и неупругих протон-ядерных взаимодействиях при энергии 1 ГэВ с помощью прецизионного высокоэнергетического плеча двухплечевого магнитного спектрометра на синхроциклотроне ФГБУ «ПИЯФ»

2013 -2016

$$P = \varepsilon / A$$

Main parameters of the MAP polarimeter	
Carbon block thickness, [mm]	155
Polar angular range, [deg]	3 - 16
Average analyzing power	> 0.2
Efficiency, [%]	~ 4



Target	Dimensions [mm] thickness x width x height	Isotope concentration [%]	Density g/cm ³
CH ₂	4.0 x 10 x 70	98.9	1.0
C	4.0 x 10 x 70		1.60
CH ₂ foil	0.1 x 4 x 10		1.0
¹² C	4.0 x 7 x 10	98.9	1.60
⁴⁰ Ca	4.0 x 7 x 10	97.0	1.55
²⁸ Si	4.0 x 7.5 x 9.5	99.9	2.33
⁵⁶ Fe	3.0 x 5.2 x 10.1	91.7	7.86

Main parameters of the magnetic spectrometer MAP	
Maximum particle momentum K, [GeV/c]	1.7
Horizontal angle acceptance Δθ _H , [deg]	0.8
Vertical angle acceptance Δθ _V , [deg]	1.9
Solid angle acceptance Ω, [sr]	4x10 ⁻⁴
Dispersion in the focal plan Df, [mm/%]	22.0
Momentum acceptance ΔK/K, [%]	8.0
Momentum resolution (FWHM) for the C target, [MeV/c]	~ 5.8
Momentum resolution (FWHM) for the Si target, [MeV/c]	~ 6.5
Momentum resolution (FWHM) for the Ca target, [MeV/c]	~ 5.5
Momentum resolution (FWHM) for the Fe target, [MeV/c]	~ 10.5

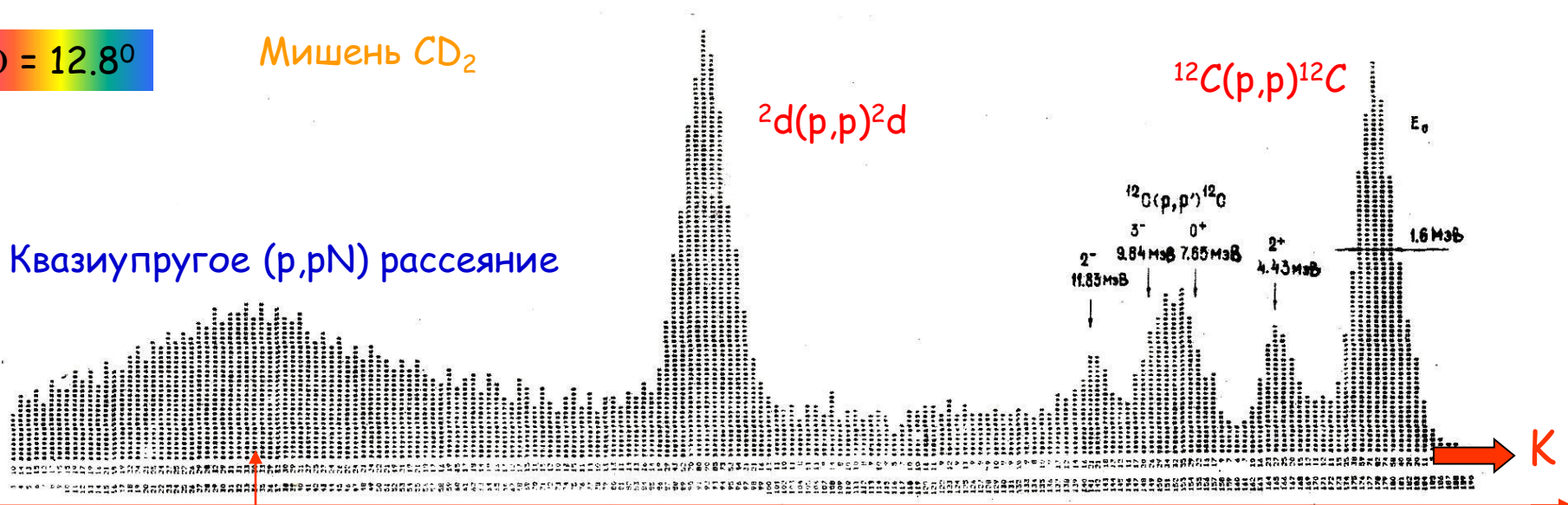
CH₂, C → Θ = 12.25°, 13.5°, 16°, 18.5°, 21°, 23°

С.Л. Белостоцкий, Ю.В. Доценко, С.С. Волков, А.А. Воробьев, А.Г. Кудин,
 Н.Т. Куропаткин, О.В. Миклухо, В.Н. Никулин, О.Е. Прокофьев, М.А. Шуваев.
 Препринт ЛИЯФ № 826, 1983, с.52.

$\Theta = 12.8^\circ$

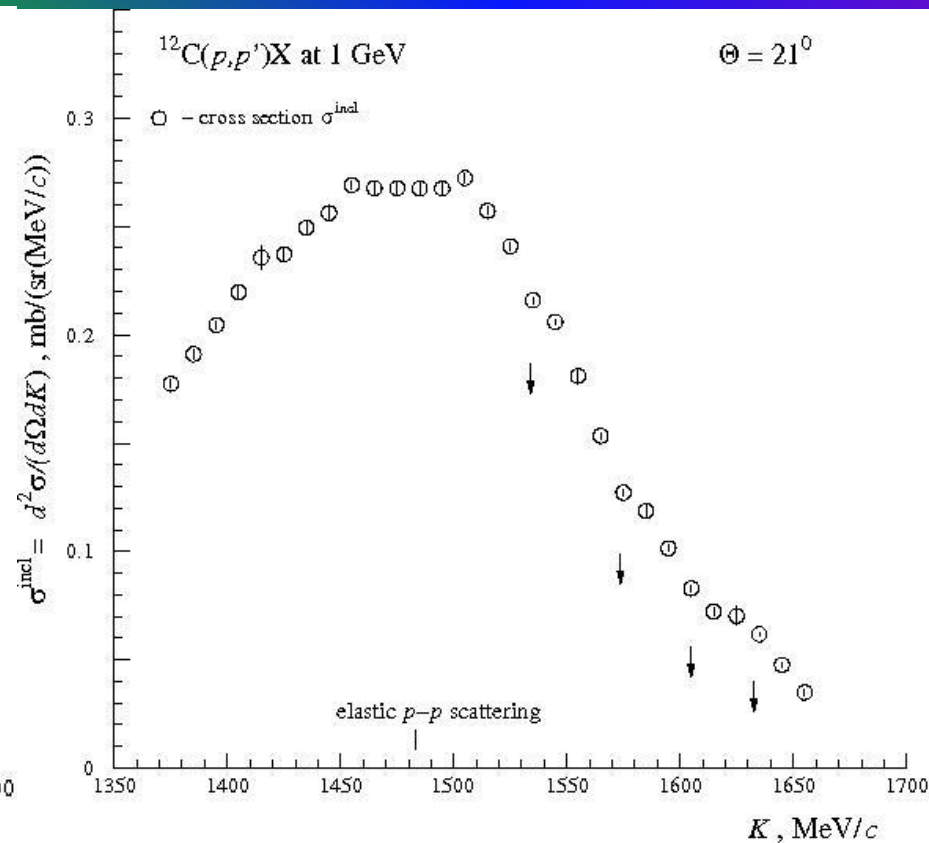
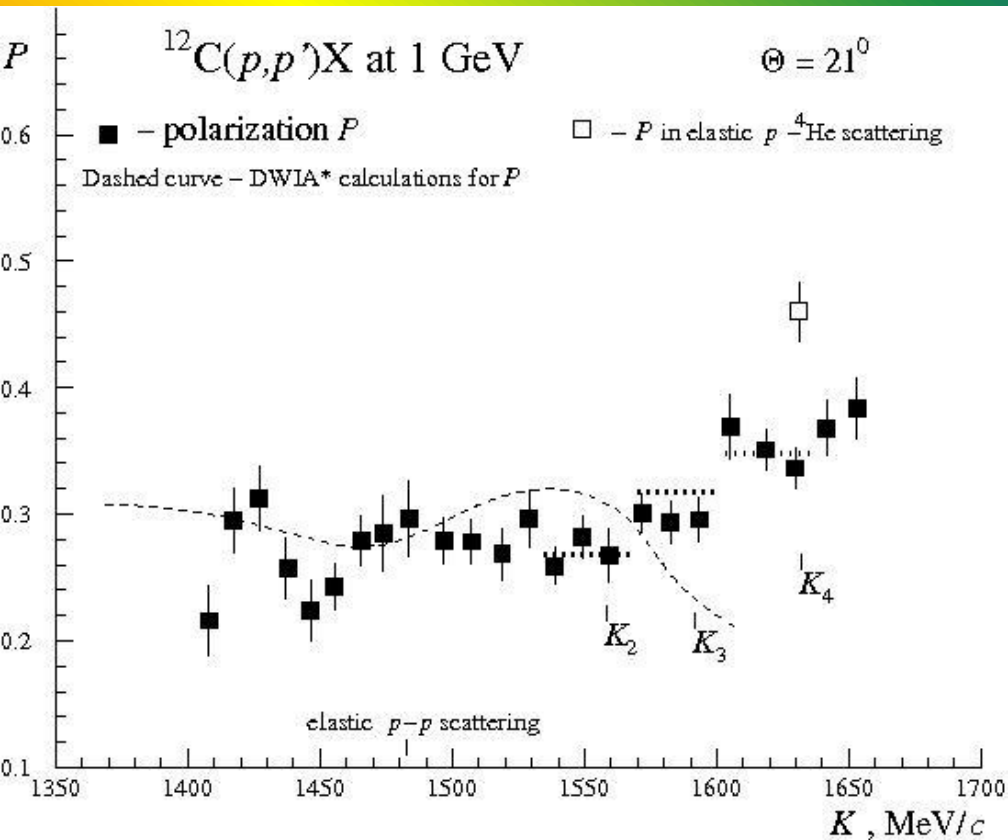
Мишень CD_2

Квазиупругое (p,pN) рассеяние



K_{pN}

$2^+ (4.43 \text{ MeV}), 0^+ (7.85 \text{ MeV}), 3^- (9.84 \text{ MeV}), 2^- (11.83 \text{ MeV})$



Этапы исследований :

Эксперимент 2013 - Декабрь : Измерены поляризация и сечение в рассеянии на ^{12}C , ^{40}Ca под углом $\Theta=21^\circ$ ($Q = 600 \text{ MeV}/c$).

Эксперимент 2015 - Февраль : Исследованы ядра ^{28}Si , ^{56}Fe .

Публикация 2015 - Август :

O.V. Miklukho et al., "Observation of a polarization structure in inelastic $^{40}\text{Ca}(p, p')X$ reaction at 1 GeV", JETP Letters, 2015, Vol. 102, No. 1, pp. 11-13.

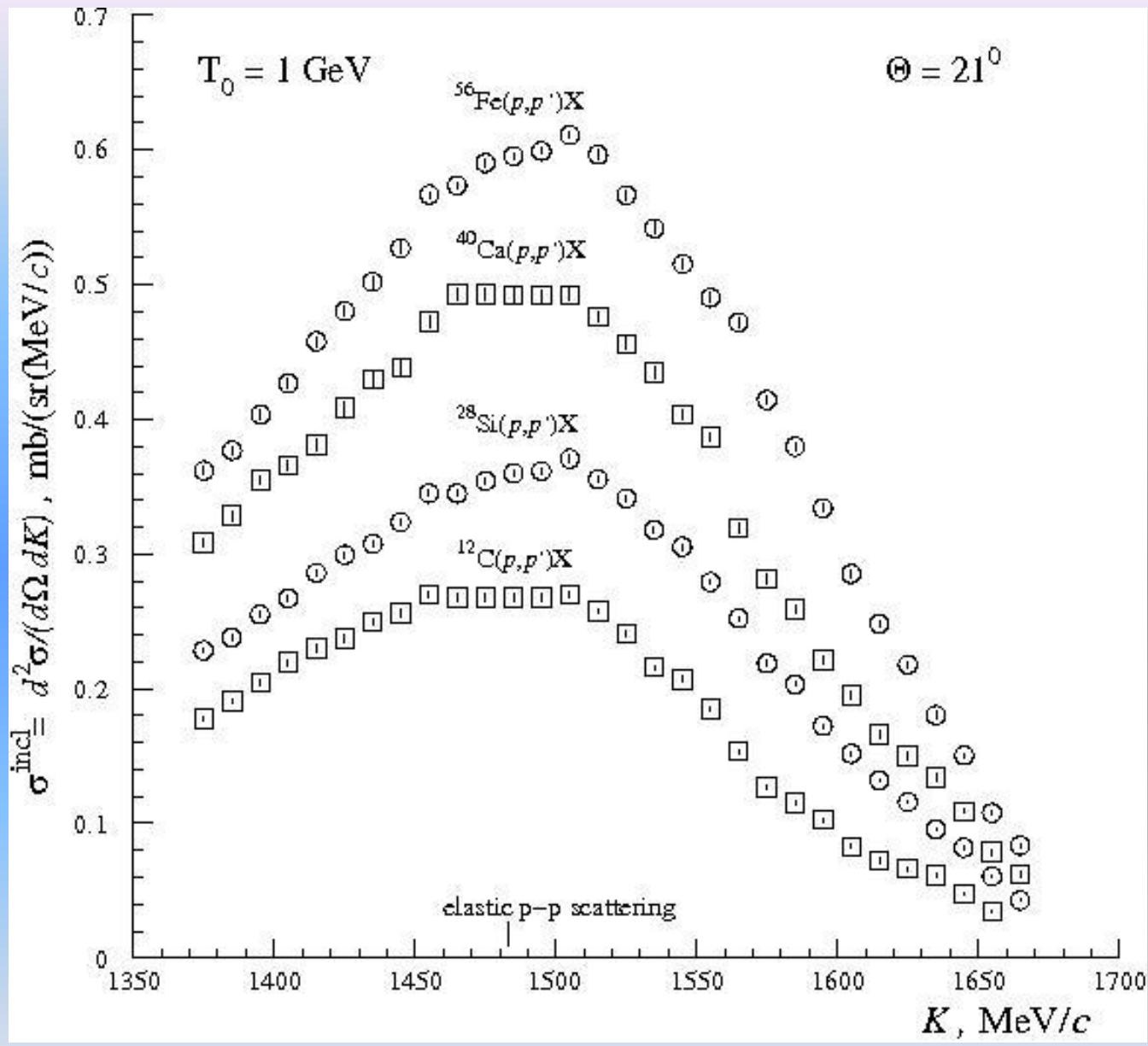
Эксперимент 2015 - Декабрь : Исследованы ядра ^9Be , ^{90}Zr .

Публикация 2016 :

О.В. Миклухо и др., "Структурные эффекты в поляризации и сечениях инклюзивного рассеяния $A(p, p')X$ на ядрах ^{40}Ca и ^{12}C при энергии 1 ГэВ", ЯФ, 80 (№ 1), 1 (2017).

2016 - Ноябрь : Завершен анализ данных эксперимента 2015-Февраль (исследование ядер ^{28}Si , ^{56}Fe). Observation of a structure in cross section ratios in the inclusive (p, p') reaction with nuclei at 1 GeV (JETP Letters - 2017). Результаты эксперимента будут опубликованы в ЯФ.

Эксперимент 2016 - Декабрь : Измерены поляризация и сечение в рассеянии на ^{12}C , ^{40}Ca под углом $\Theta=24.5^\circ$ ($Q = 700 \text{ MeV}/c$).



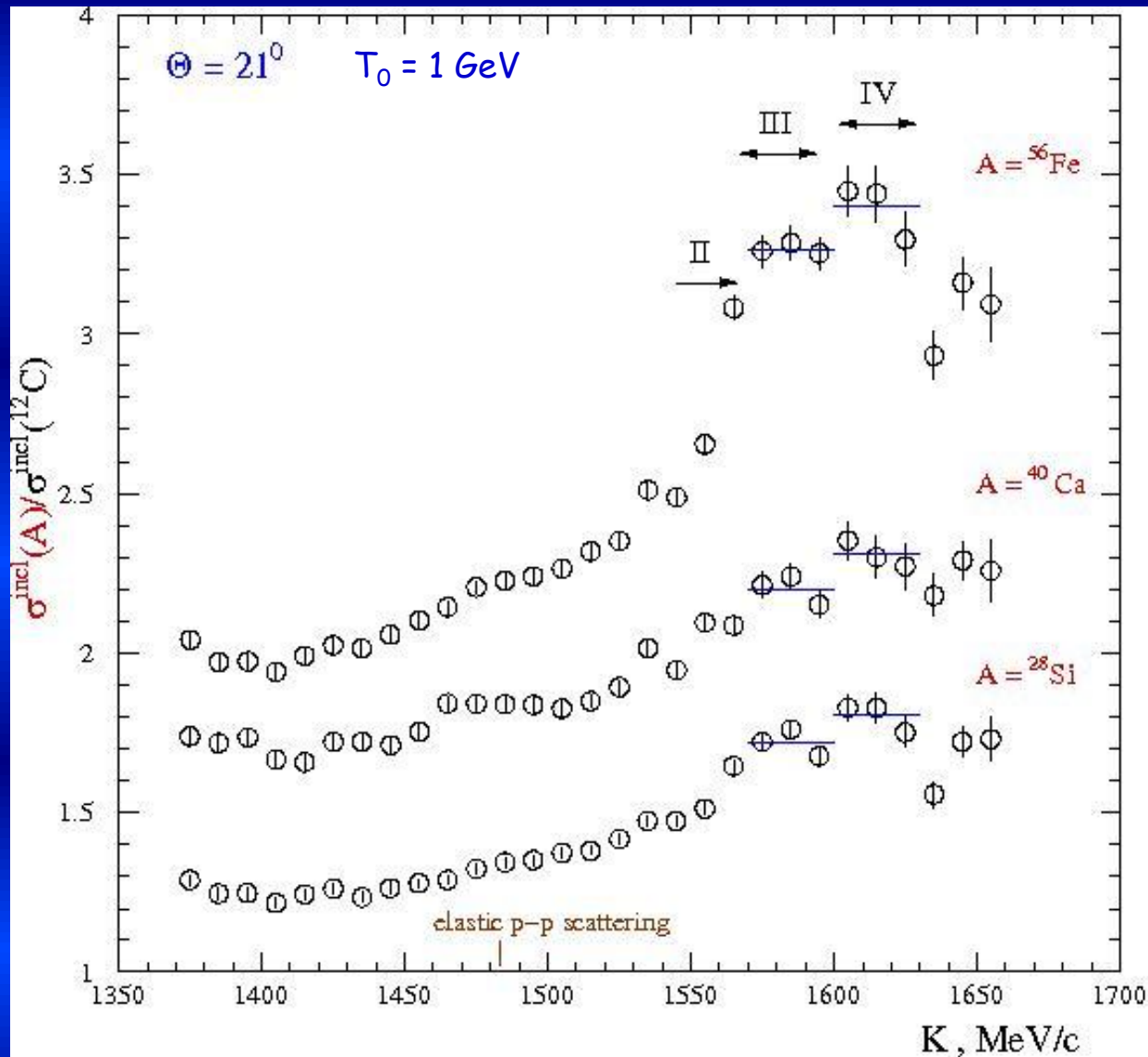
Систематика :

$\delta\sigma/\sigma (\text{Fe}) = \pm 4.2\%$

$\delta\sigma/\sigma (\text{Ca}) = \pm 3.5\%$

$\delta\sigma/\sigma (\text{Si}) = \pm 3.4\%$

$\delta\sigma/\sigma (\text{C}) = \pm 1.5\%$



Систематика :

$$\delta\sigma/\sigma(\text{Fe}/\text{C}) = \pm 4.5\%$$

$$F/\text{C} = 56/12 = 4.667$$

$$\delta\sigma/\sigma(\text{Ca}/\text{C}) = \pm 3.8\%$$

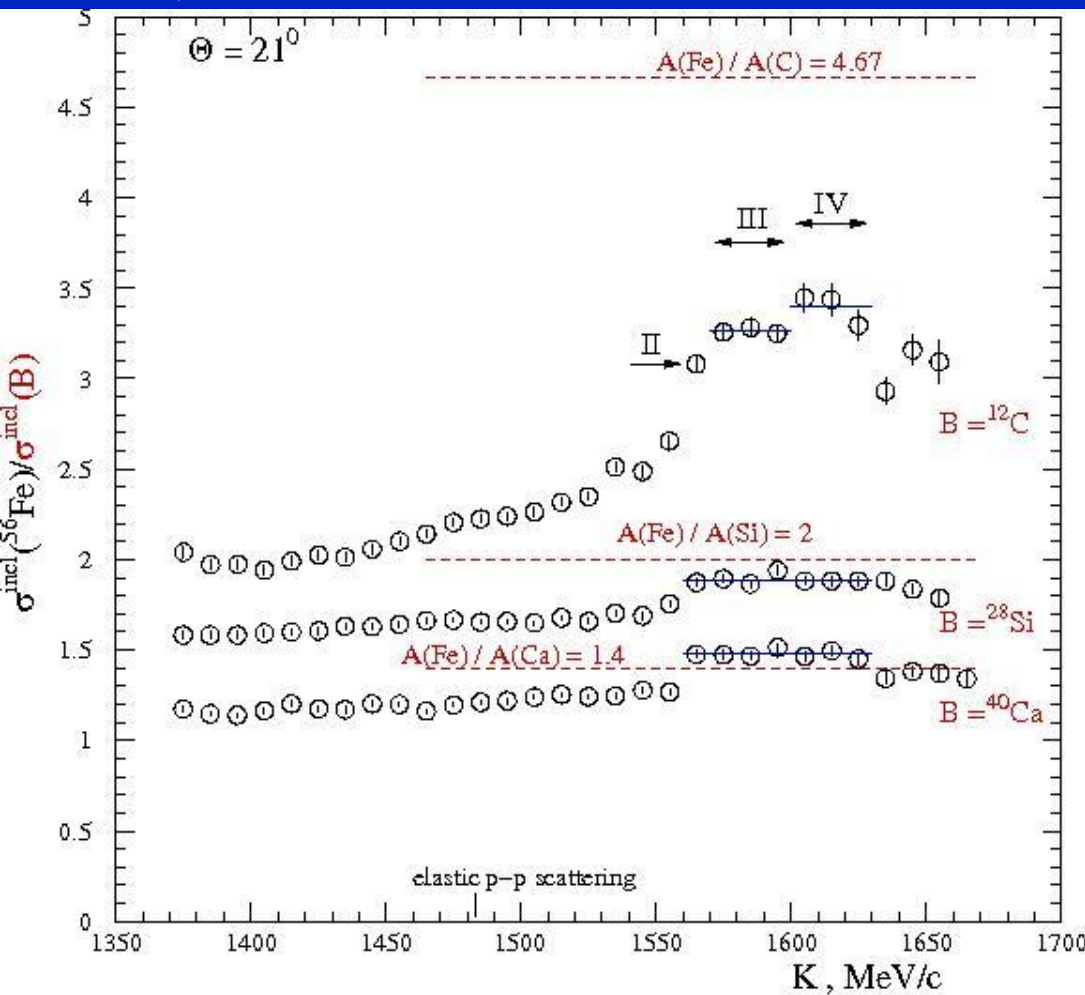
$$\text{Ca}/\text{C} = 40/12 = 3.333$$

$$\delta\sigma/\sigma(\text{Si}/\text{C}) = \pm 3.7\%$$

$$\text{Si}/\text{C} = 28/12 = 2.333$$

Q - practically constant ($\sim 600 \text{ MeV}/c$)
in the range $1480 < K < 1650 \text{ MeV}/c$

$$x_B = Q^2/2m_N v(K)$$



$$x_B = Q^2 / 2m_N v(K)$$

Q - practically constant (~ 600 MeV/c) in the range 1480 < K < 1650 MeV/c

$$\sigma_A(Q^2, X_B) = A \sum_{j=2} (a_j(A)/j) \sigma_j(Q^2, X_B)$$

Вероятность возникновения j-нуклонной корреляции a_j пропорциональна средней ядерной плотности в степени j ($\sim \langle \rho_A^j(r) \rangle$). Сильно падает с ростом j.

$$(\sigma_A / \sigma_C)_j = (A/C) [a_j(A)/a_j(C)] [\sigma_j(A) / \sigma_j(C)].$$

Н.Б. Дашьян (https://www.jlab.org/Hall-B/thesis/Dashyan_thesis.pdf)

Предположим, что

$$\sigma_j(A) / \sigma_j(C) \approx \sigma_{j+1}(A) / \sigma_{j+1}(C).$$

Так как $a_j(A) / a_j(C) \sim \langle \rho_A^j(r) \rangle / \langle \rho_C^j(r) \rangle \sim (1+\alpha)^j$ и средняя нуклонная плотность в ядрах с $A > 12$ больше, чем в ^{12}C ($\alpha > 0$), то отношение $(\sigma_A / \sigma_C)_j$ должно несколько увеличиться с ростом j.

Систематика :

$$\delta\sigma/\sigma(\text{Fe/C}) = \pm 4.5\%, \quad \delta\sigma(\text{Fe/C}) = \pm 0.15$$

$$\delta\sigma/\sigma(\text{Fe/Si}) = \pm 5.4\%, \quad \delta\sigma(\text{Fe/Si}) = \pm 0.10$$

$$\delta\sigma/\sigma(\text{Fe/Ca}) = \pm 5.5\%, \quad \delta\sigma(\text{Fe/Ca}) = \pm 0.08$$

Ближайшие экспериментальные планы :

Исследование ядер ^{12}C и ^{40}Ca (измерение поляризации и сечений); ^9Be , ^{11}B , ^{28}Si , ^{56}Fe , ^{90}Zr (измерение сечений) под углом рассеяния $\Theta = 24.5^\circ$.

Кинематика : Переданный ядру импульс $Q \sim 700 \text{ МэВ/с}$
($Q \sim 3 k_F$).

Предсказания:

- ★ Увидим полочку в отношениях сечений рассеяния на ядрах, соответствующую рассеянию на двухнуклонных корреляциях.
- ★ В пределах импульсных интервалов, соответствующим рассеянию на различных корреляциях, поляризация будет расти с импульсом.

Перспективные планы:

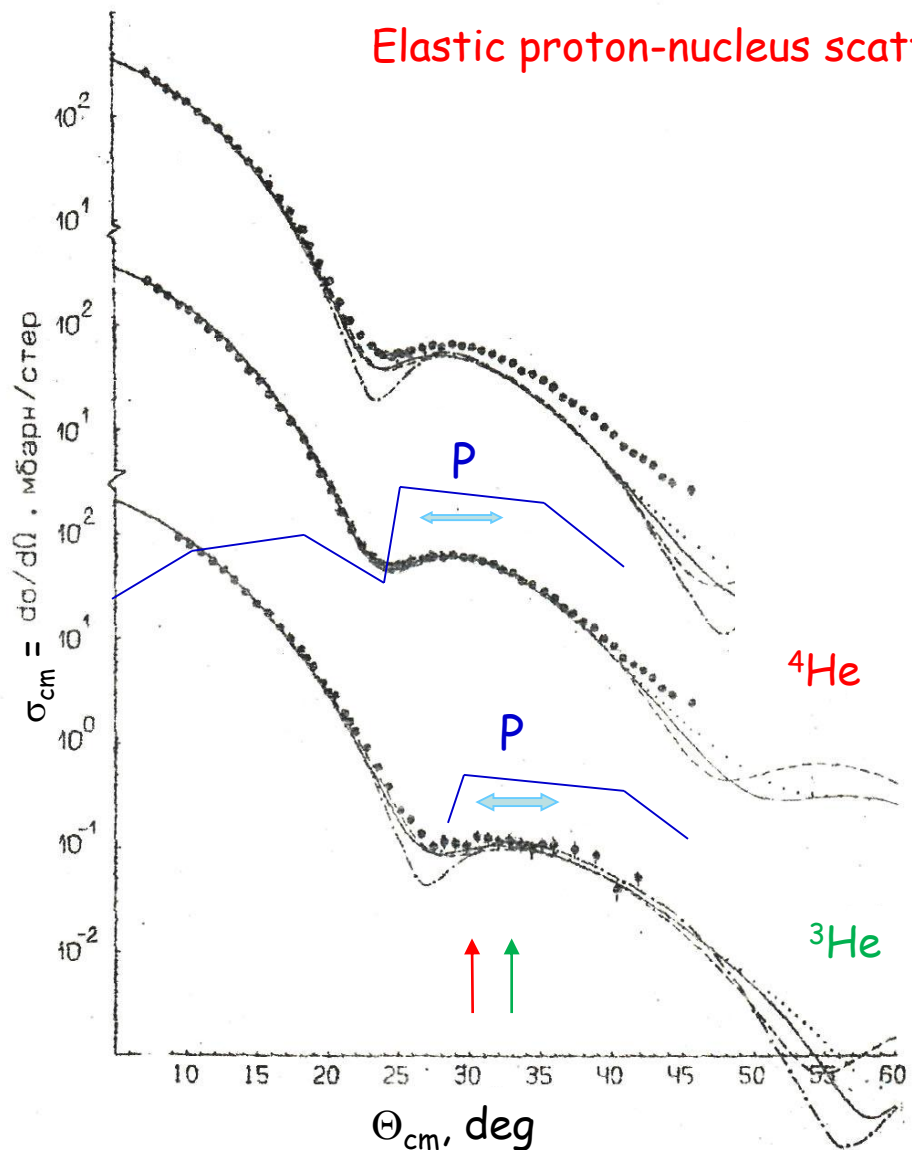
Измерение сечений в инклюзивной реакции (p, p') с ядрами ^4He (^3He ?) с использованием плотных газовых ? и жидких ? мишеней под углами рассеяния $21^\circ, 24.5^\circ$.

Back Slides

Г.Д. Алхазов и др. , Препринт ЛИЯФ-778, Ленинград, 1982.

Elastic proton-nucleus scattering at 1 GeV

P - polarization



$\Theta_{lab} = 21^\circ$

$\Theta_{cm} = 30.15^\circ$

$t = 0.3701 \text{ GeV}^2/c^2$

$\sigma_{cm} \sim 1 \text{ mb/sr}$

$J = 1.973$

^4He

$\Theta_{cm} = 32.73$

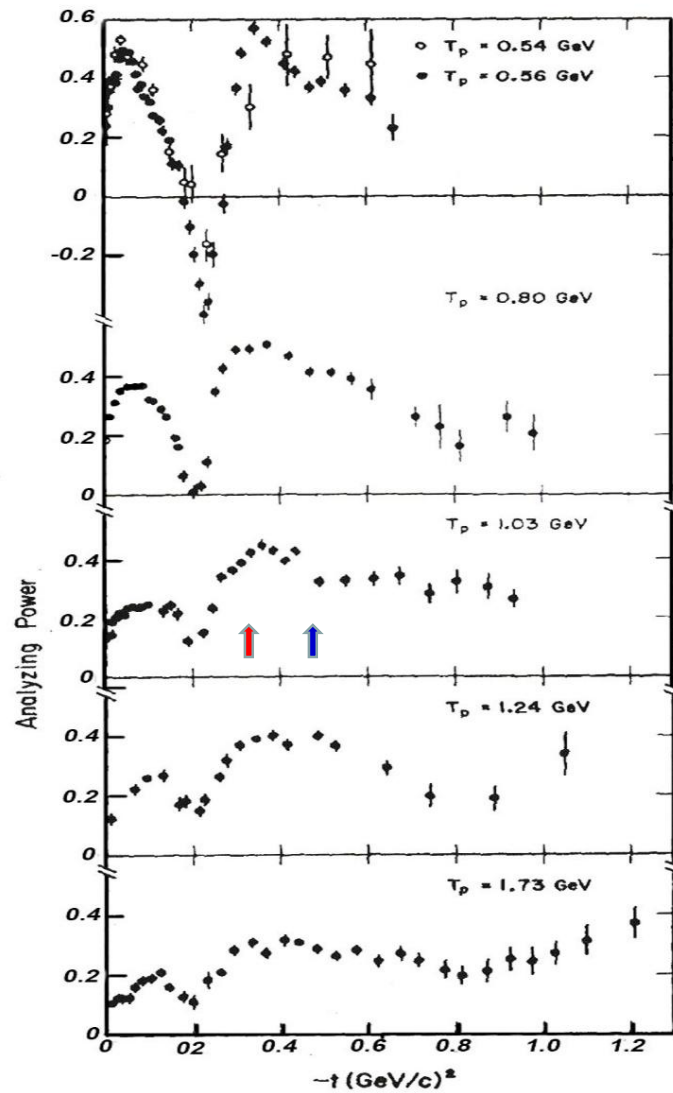
$t = 0.3666 \text{ GeV}^2/c^2$

$\sigma_{cm} \sim 0.1 \text{ mb/sr}$

$J = 2.293$

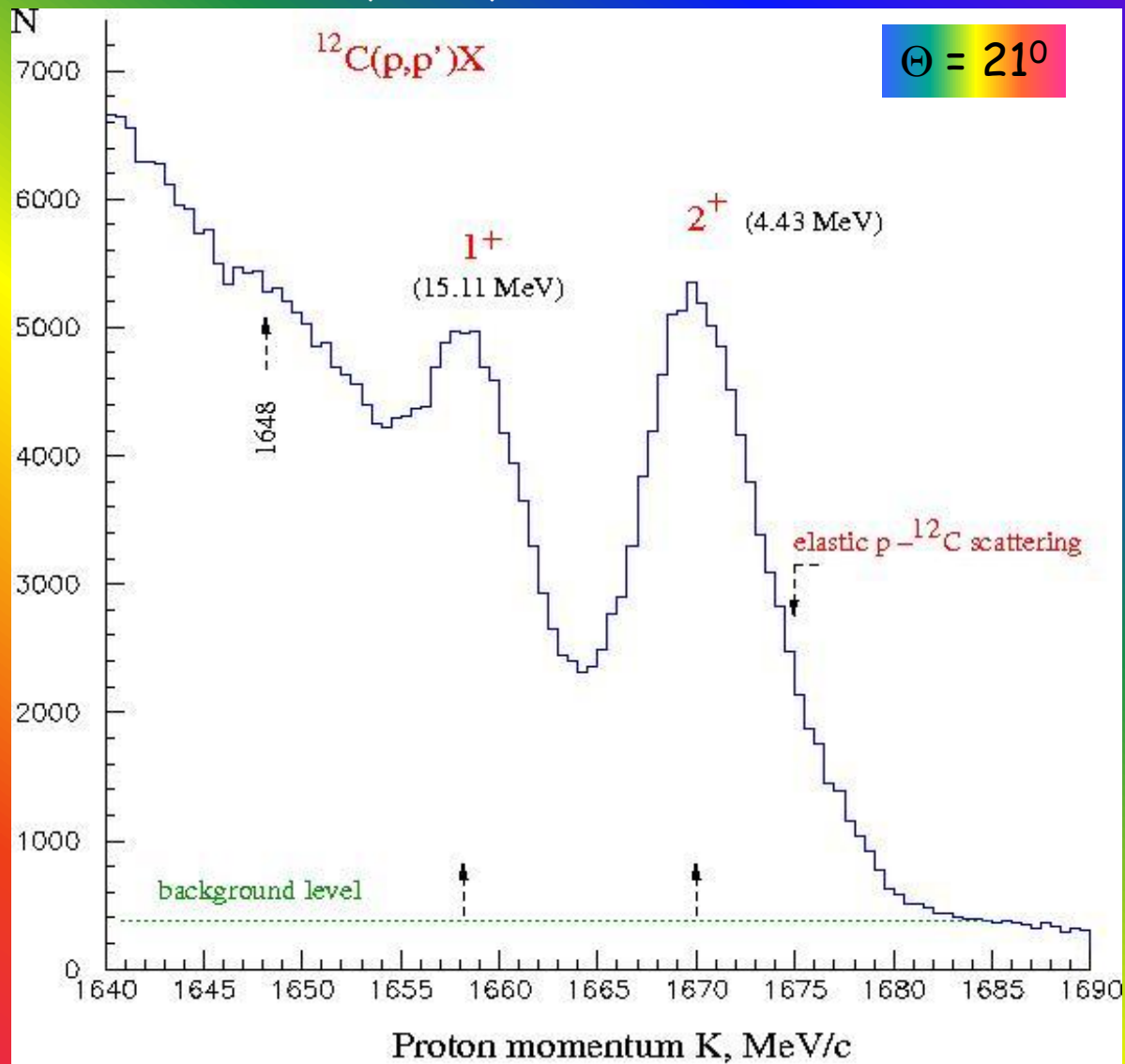
^3He

Анализирующая способность (Au)

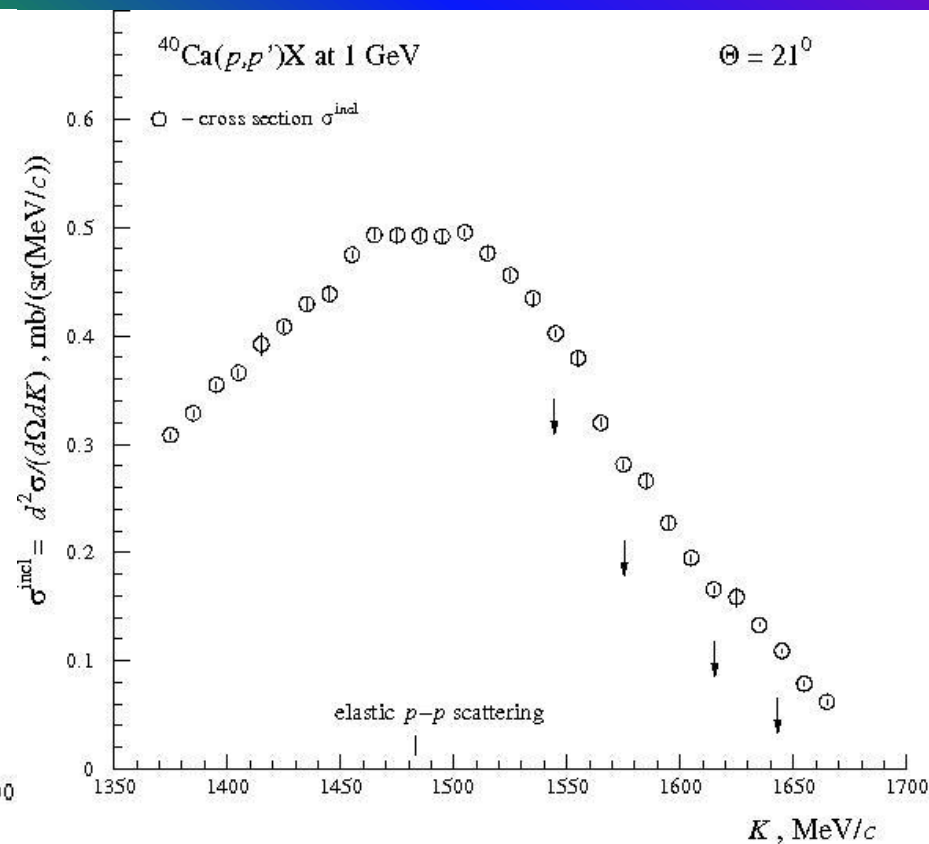
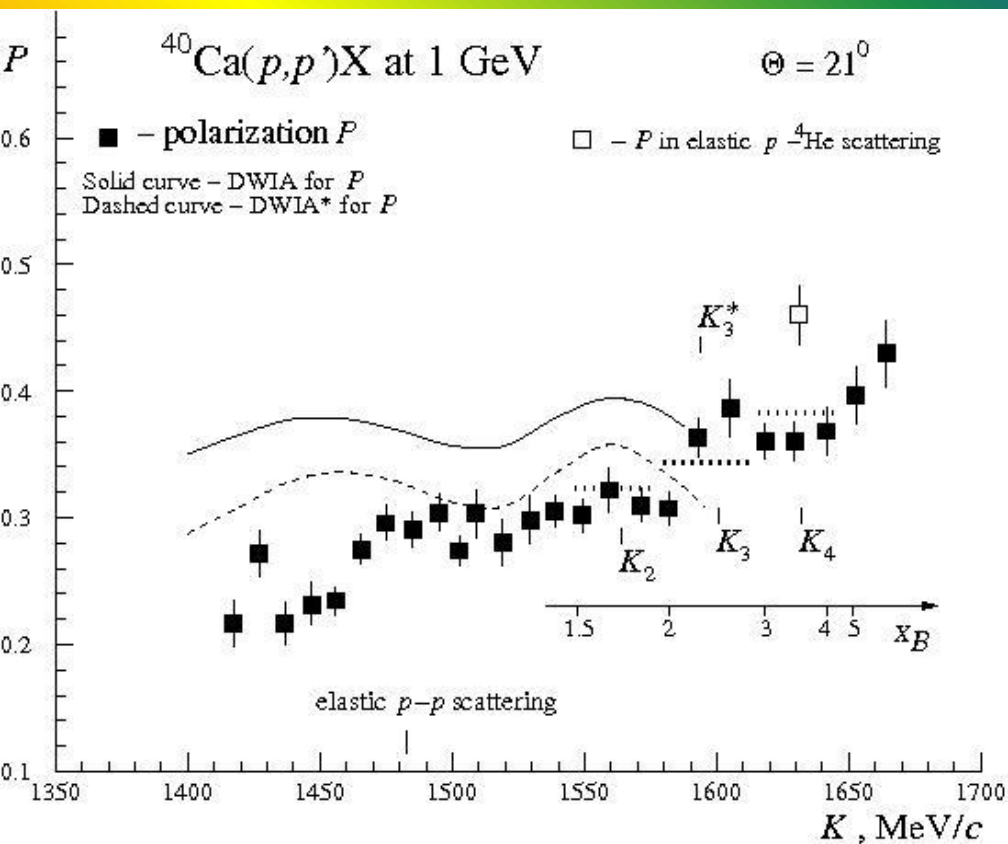
Упругое рассеяние протонов на ядрах ⁴He

Цель работы : Измерение поляризации и дифференциальных сечений в реакции $p + A \rightarrow p' + X$ при энергии 1 ГэВ на ядрах в широкой области импульсов вторичных протонов K , включая область, в которой существенно подавлен вклад от рассеяния на отдельных ядерных нуклонах. Измерения осуществляются в узких интервалах импульсов $\Delta K \sim 10$ МэВ/с с шагом по $K \sim 10$ МэВ/с.

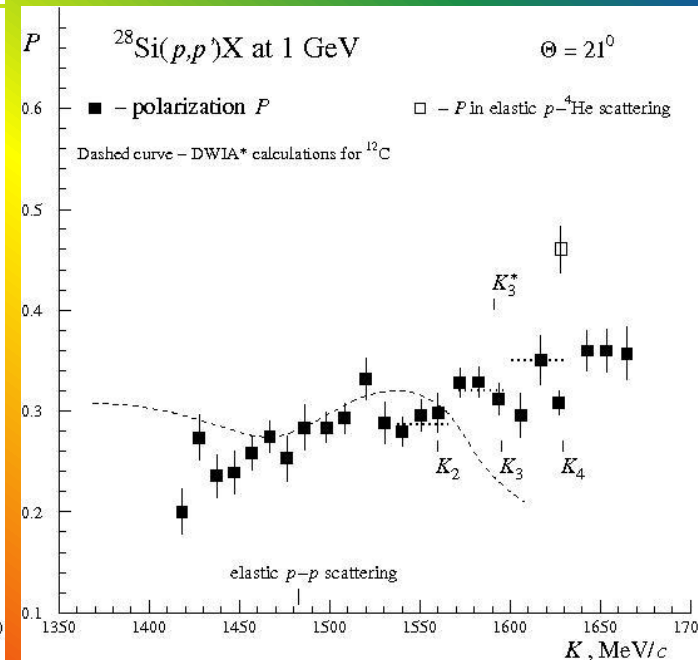
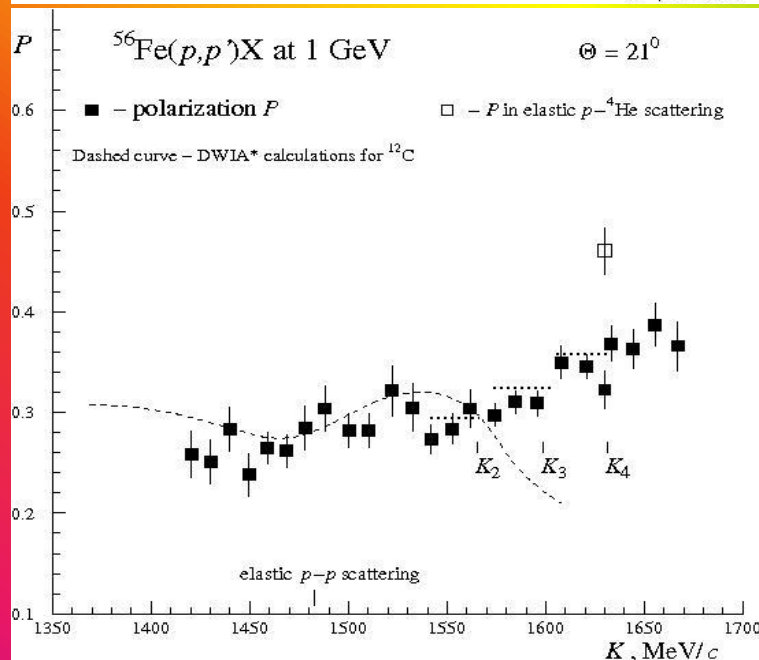
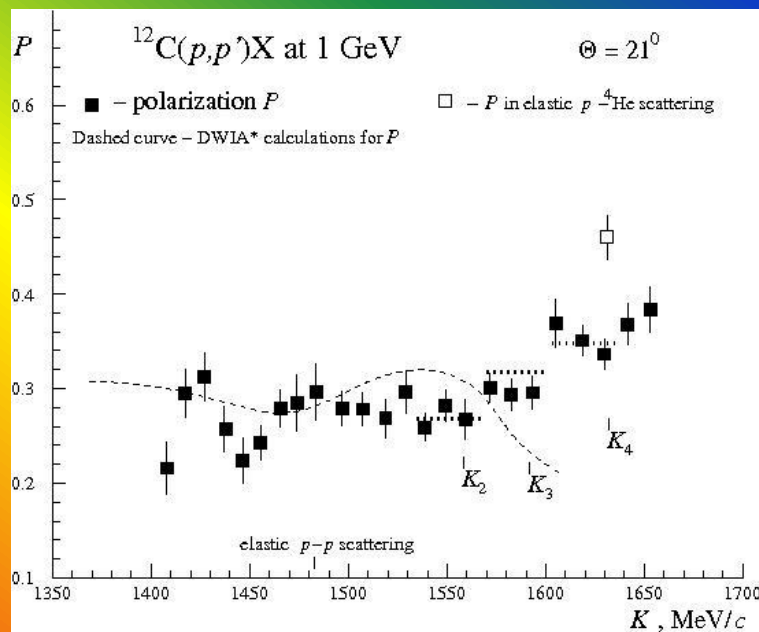
Кинематика : Угол рассеяния $\Theta = 21^\circ$. В области $K > K_{pN}$, где K_{pN} (~ 1480 МэВ/с) соответствует максимуму квазиупругого пика в pN - рассеянии, переданный ядру импульс Q практически не меняется (600 МэВ/с) и несколько больше удвоенного импульса Ферми ($k_F \sim 250$ МэВ/с). В области $K > \sim 1580$ МэВ/с минимальное значение импульса ядерного нуклона превышает величину k_F и вклад от рассеяния на отдельных ядерных нуклонах подавлен.



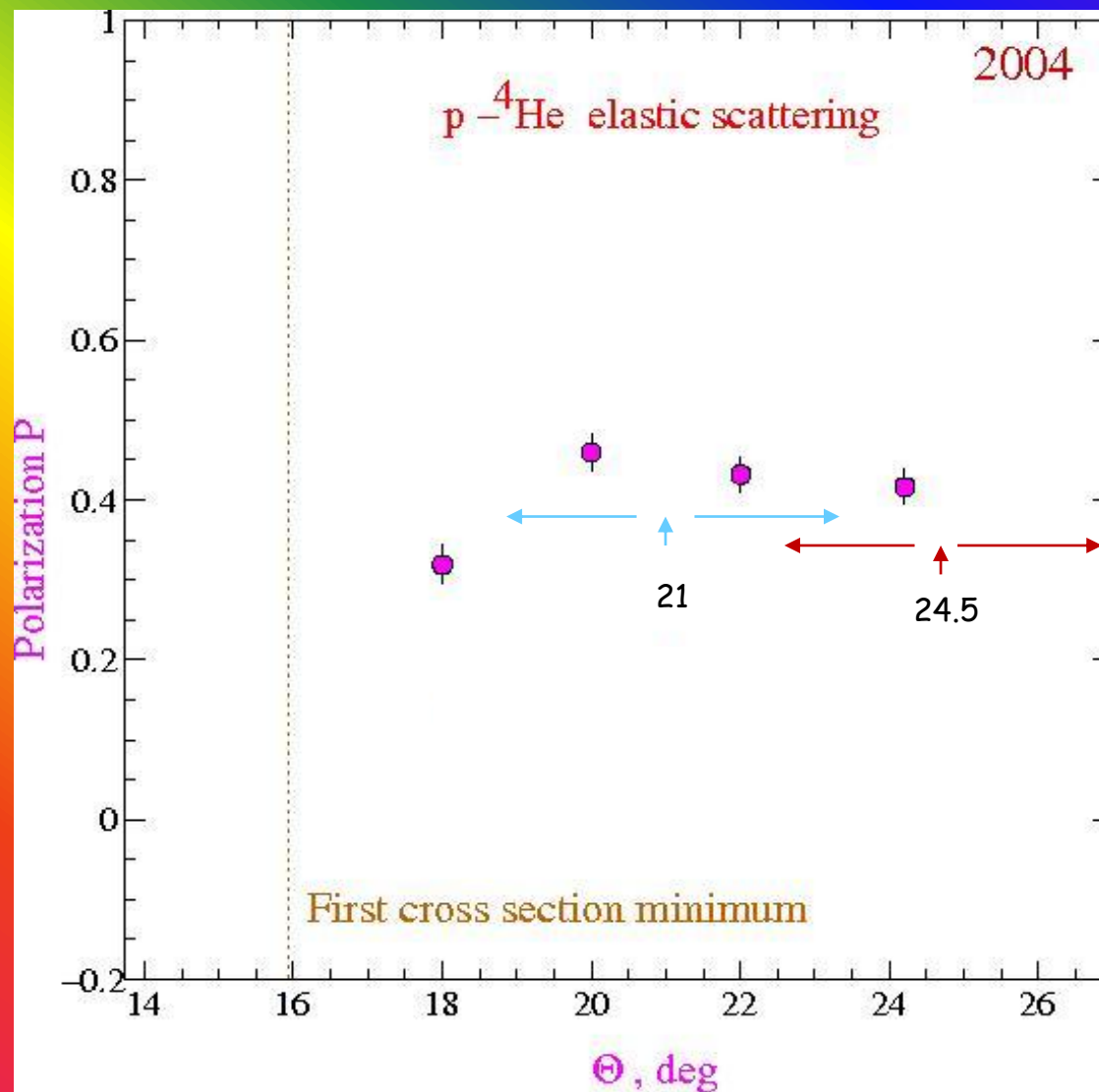
1⁺ → R.D. Viollier, Annals of Physics 93, 335-368 (1975).



Сравнение :

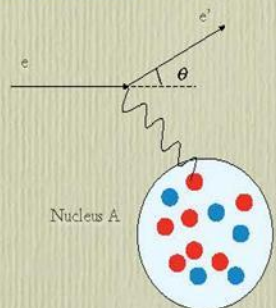


O.V. Miklukho et al., Phys.Atom.Nucl. 63, 474 (2006)



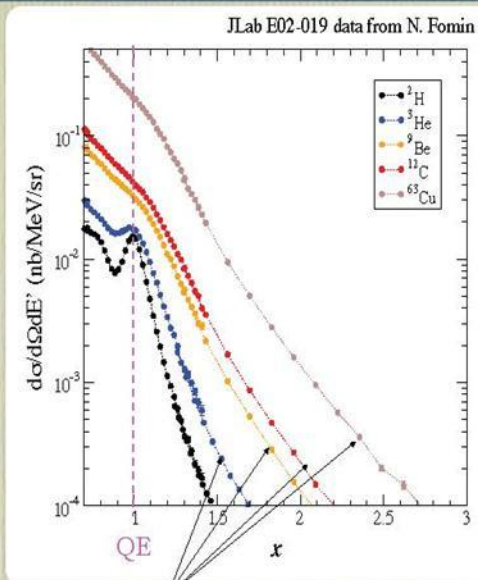
Inclusive scattering at large x

At $x \approx 1$



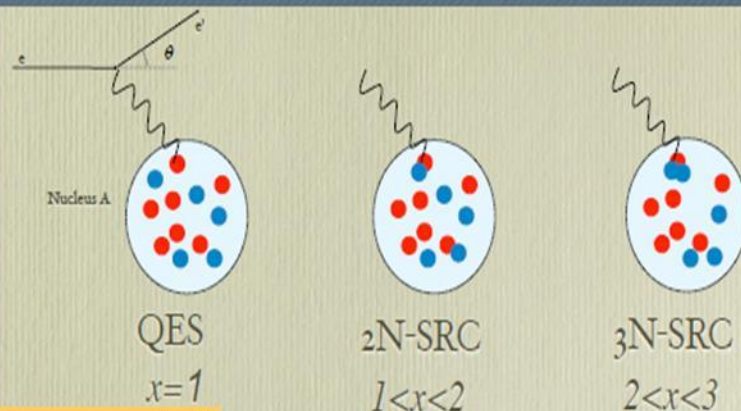
Quasi-Elastic Scattering

$$x = Q^2 / 2m_N v$$



High momentum tails should yield constant ratio if seeing SRC

Short Range Correlations



For $x \geq 1.3$

$$\sigma_A(x, Q^2) = \sum_j \frac{A}{j} a_{jN}(A) \sigma_j(x, Q^2)$$

$$= \frac{A}{2} a_{2N}(A) \sigma_2(x, Q^2) + \frac{A}{3} a_{3N}(A) \sigma_3(x, Q^2) + \dots$$

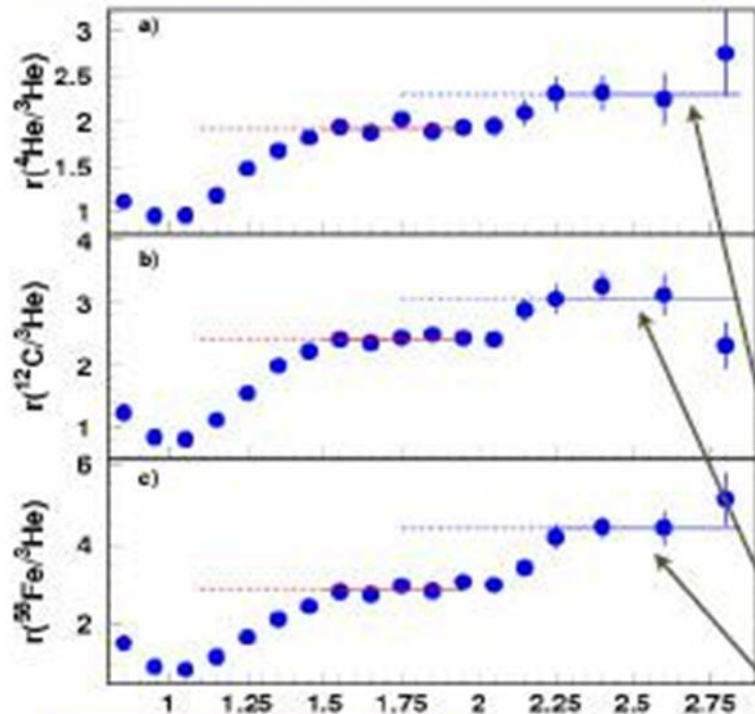
$\sigma_j(x, Q^2)$ - cross section of electron scattering off a j - nucleon correlation

$a_{jN}(A)$ - probability of finding a nucleon in a j - nucleon correlation

SRC evidence at JLab

Hall B $E_{electrons} \approx 4.6 GeV$

CLAS Collaboration, PRL, 96, 082501 (2006)



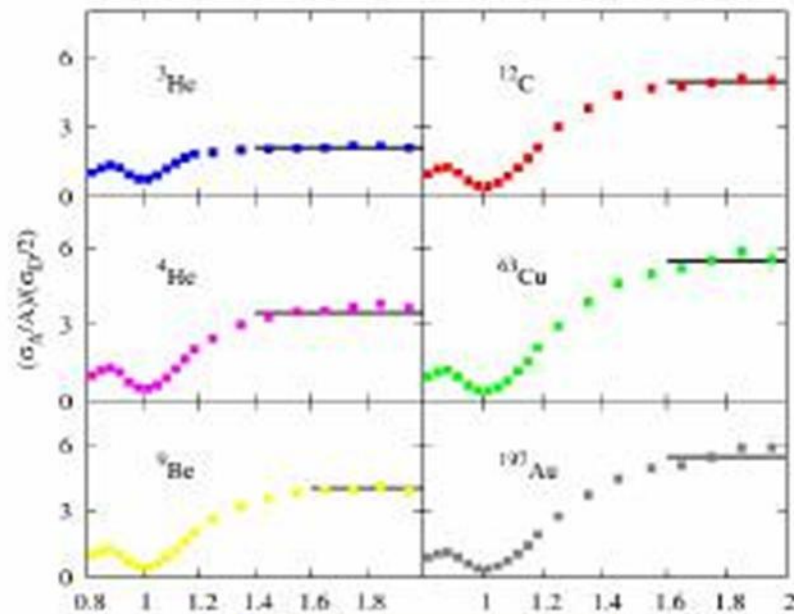
$$x_B = Q^2 / 2m_N v$$

$$Q^2 \geq 1.4 GeV^2 / c^2$$

Hint of 3N-SRC at $x > 2$?

Hall C

N. Fomin et al., Phys. Rev. Lett. 108, 092502 (2012)



$$x_B = Q^2 / 2m_N v$$

$$r(A, {}^3He) = \frac{A(2\sigma_{ep} + \sigma_{en})}{3(Z\sigma_{ep} + N\sigma_{en})} \frac{3Y(A)}{AY({}^3He)} R_{rad}^A$$

Observations :

- Some momentum intervals can be selected where polarization and cross section have specific behavior:
Ca data : interval (MeV/c) **II -> 1545 - 1575; III -> 1575 - 1610; IV -> 1610 - 1645; V -> K > 1645.**
C, Si, Fe data : interval (MeV/c) **II -> 1535 - 1570; III -> 1570 - 1600; IV -> 1600 - 1635; V -> K > 1635.**
 - Polarization in all intervals (excluding the III for Ca data and the IV for Si data) is practically constant. An averaged value of the polarization is different in these intervals.
 - In the intervals we observe slowing the scattering cross section followed by a rapid drop of the latter.
 - The width of a momentum interval is defined by a motion of the correlation in nucleus. Due to this the effective angular acceptance in the ranges II, III, IV is increased up to $\sim \pm 1.2^\circ$, $\pm 1.7^\circ$, $\pm 2.3^\circ$. Maximal value of the correlation momentum (energy) in these ranges is ~ 36 MeV/c (0.34 MeV), 50 MeV/c (0.45 MeV), 68 MeV/c (0.62 MeV), respectively.
- Averaged values of the experimental polarization in the momentum range IV for C, Si, Ca and Fe are close to each other $P_C = 0.348 \pm 0.010$, $P_{Si} \sim 0.351 \pm 0.024$, $P_{Ca} = 0.363 \pm 0.009$, $P_{Fe} = 0.347 \pm 0.010$. Averaged value for these nuclei is $P_{IV} = 0.353 \pm 0.006$. Polarization P_{IV} differs from that in free elastic p-⁴He scattering due to a modification of the interaction in nuclear medium. The relative difference dP/P is about 0.2. This value close to that obtained in the framework of DWIA and DWIA* for the pN - scattering (0.15-0.17).
- DWIA* (DWIA) calculations show that a contribution from scattering off a nuclear uncorrelated nucleon at $K > 1580$ MeV/c is essentially suppressed. In the range the minimal momentum of the nucleon is more than the Fermi momentum (~ 250 MeV/c) and main contribution in the cross section is due to scattering off massive nucleon correlations.
- Наблюдается скейлинговое поведение отношения сечений рассеяния на ядрах (независимость от K) в области доминирующего вклада от взаимодействия с короткодействующими нуклонными корреляциями (КНК). Причем величина отношения определяется относительной вероятностью КНК в этих ядрах. Это основное предсказание модели КНК.

Наблюдения :

- * Поляризация в реакции $p + A \rightarrow p' + X$ с ядрами ступенчато растет в области импульсов вторичных протонов $\sim 1530 < K < \sim 1650$ МэВ/с, где при $K > \sim 1565$ МэВ/с рассеяние на ядерном нуклоне подавлено. Возможно, что такое поведение поляризации связано с рассеянием на нуклонных корреляциях, образующихся из двух, трех и четырех нуклонов. При этом ширина ступеньки в поляризации ΔK обусловлена движением корреляции в ядре. Движение корреляций расширяет горизонтальный угловой захват спектрометра ($\Delta\Theta \sim 0.8^\circ$) и позволяет увидеть угловое распределение поляризации в упругом рассеянии на них в ядерной среде.
- * Наблюдаются замедления в спаде сечений от импульса. Точки замедления близки к границам изменения поляризации (ступенек, соответствующих рассеянию на различных нуклонных корреляциях).
- * Поляризация в рассеянии на четырехнуклонной корреляции меньше, чем в рассеянии на свободном ${}^4\text{He}$. Относительный сброс поляризации при этом близок к относительному сбросу поляризации в протон - нуклонном рассеянии, предсказываемому в рамках DWIA и DWIA* (с учетом влияние ядерной среды).
- * Обнаружены импульсные интервалы в отношениях сечений рассеяния на ядрах, в пределах которых величина этих отношений не изменяется. Такое поведение связывается с универсальностью высокоимпульсной компоненты волновой функции ядер и интерпретируется в рамках модели КНК как рассеяние на ядерных малонуклонных кластерах.

Averaged polarization in scattering off the three-nucleon correlations :

$$\bar{P} = \frac{N_{^3\text{He}} \sigma_{^3\text{He}} P_{^3\text{He}} + N_{^3\text{H}} \sigma_{^3\text{H}} P_{^3\text{H}}}{N_{^3\text{He}} \sigma_{^3\text{He}} + N_{^3\text{H}} \sigma_{^3\text{H}}} = \frac{P_{^3\text{He}} (1 + K_N K_\sigma K_P)}{(1 + K_N K_\sigma)}$$

$$K_N = N_{^3\text{H}} / N_{^3\text{He}} ; \quad K_\sigma = \sigma_{^3\text{H}} / \sigma_{^3\text{He}} ; \quad K_P = P_{^3\text{H}} / P_{^3\text{He}}$$

The values of K_σ (and K_P) for ^{12}C and ^{40}Ca are close to each other.

Isospin asymmetry : $K_N = 1$.

In this case the \bar{P} has the same value for the ^{12}C and ^{40}Ca nuclei.

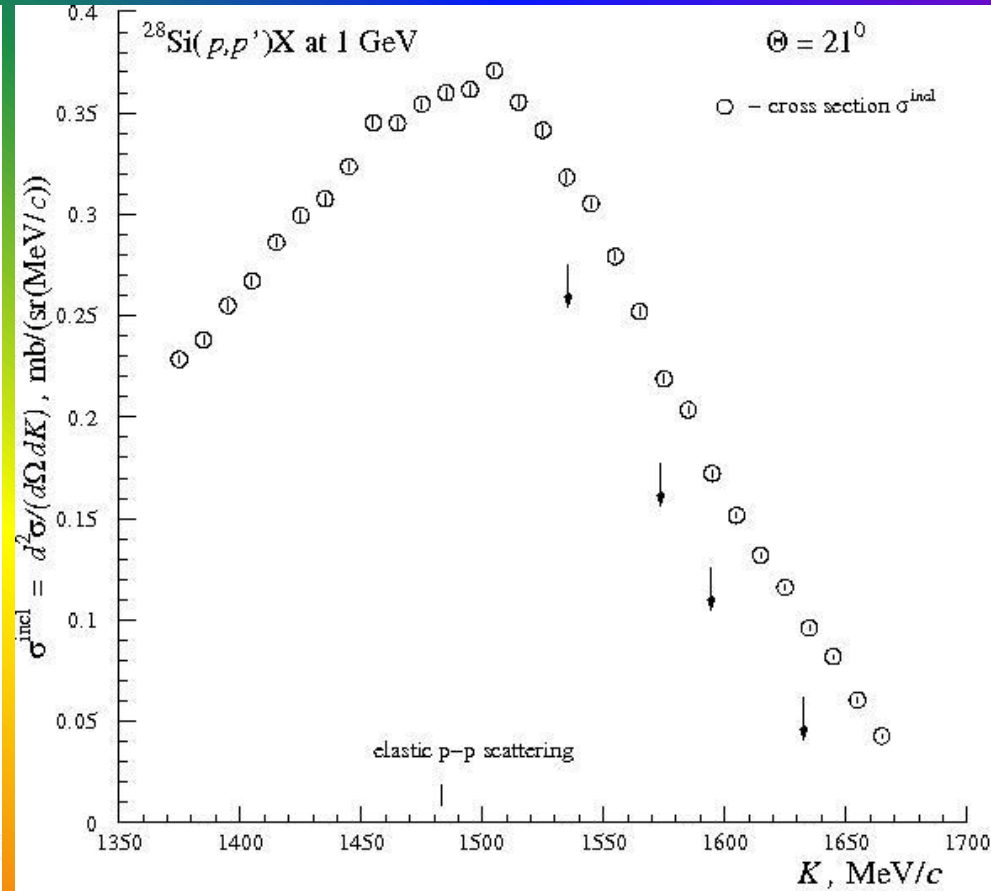
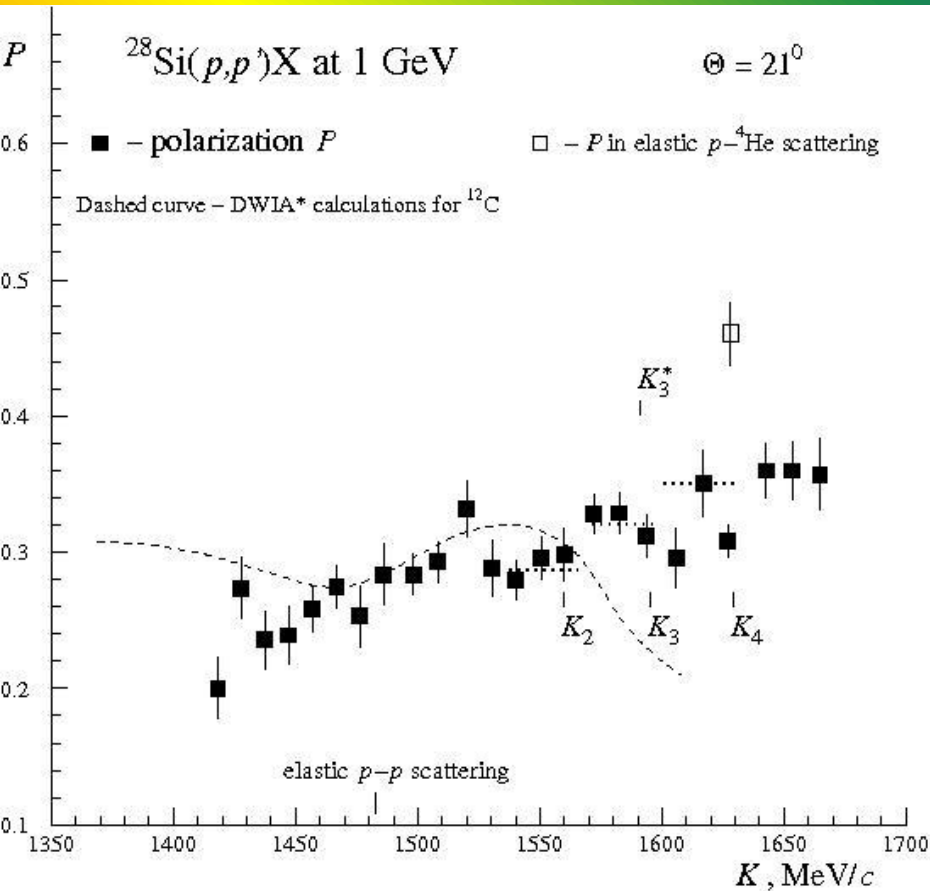
В эксперименте мы наблюдаем существенную разницу между поляризациями в рассеянии на трехнуклонных корреляциях ядер ^{12}C и ^{40}Ca ($P_C = 0.29$ и $P_{Ca} = 0.39$).

Возможно нарушается изотопическая симметрия в ядре ^{40}Ca ? JLAB исследует эту проблему. А если не нарушать! Заметили, что расчетные импульсы K_3 (^3He) и K_3^* (^3H) отличаются на 7 МэВ/с при разрешении установки $\sigma \sim 2$ МэВ/с, причем $K_3 > K_3^*$. Возможна дисперсия!? При $K > K_3^*$ идет рассеяние только на ^3He . При этом подразумевается, что поляризация в упругом рассеянии на ^3He существенно больше, чем на ядре ^3H . Требуются расчеты в рамках теории Глаубера.

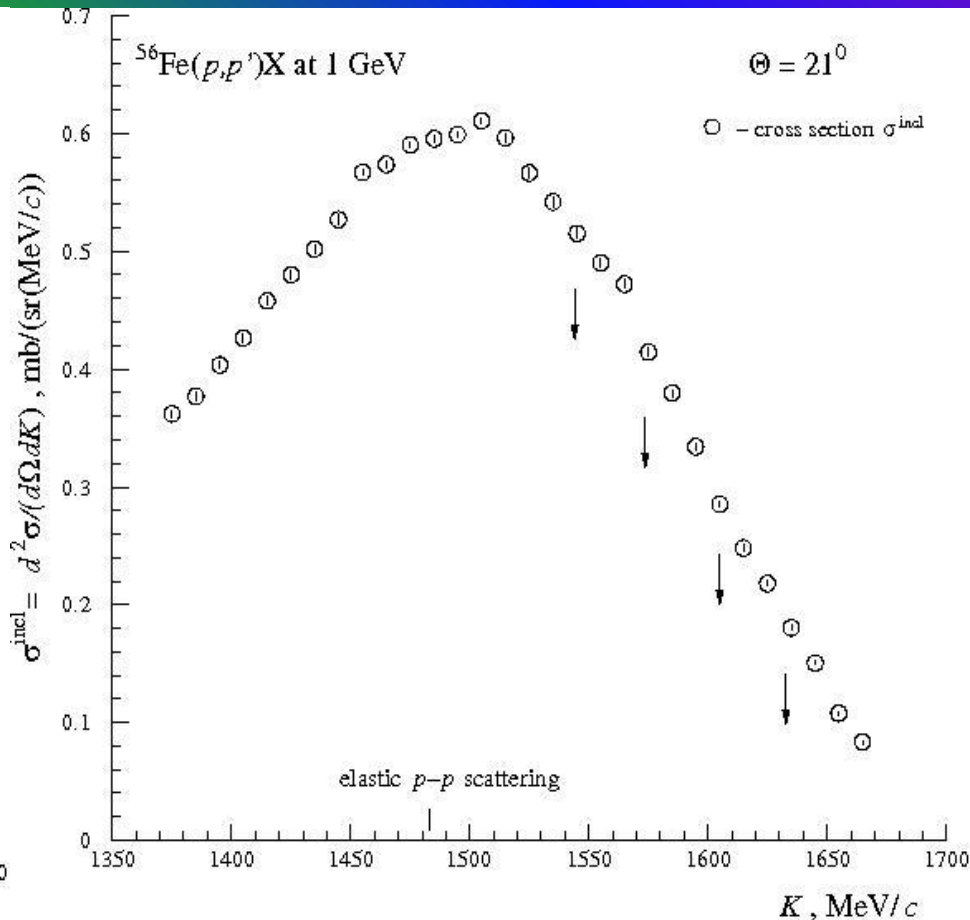
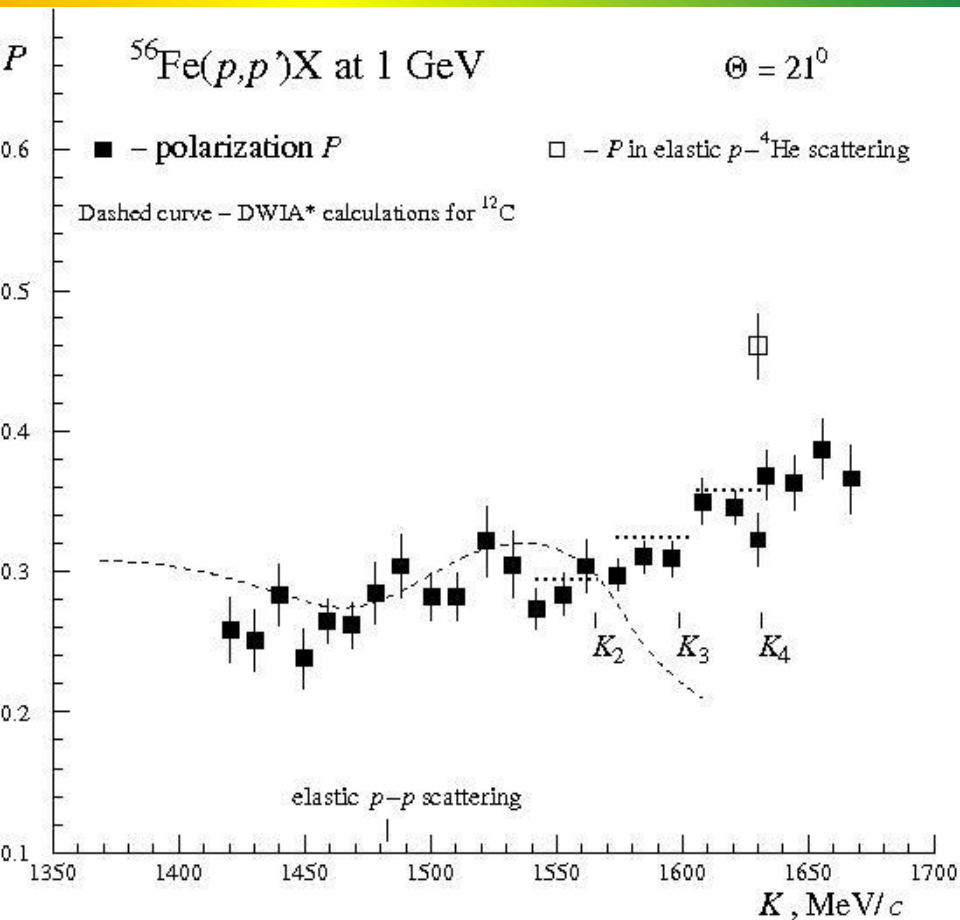
Участники эксперимента в феврале-марте 2015 года

О. Миклухо, А. Киселев, Г. Амальский, В. Андреев,
Г. Гаврилов, А. Жданов, А. Изотов, Д. Ильин,
Д. Майсузенко, В.И. Мурзин, А. Прокофьев, С. Труш,
А. Шведчиков

Эксперимент 2015 - Февраль



Эксперимент 2015 - Февраль



$$R_2 = (\sigma_{pA}/\sigma_{pC})_2 = (A/C) [a_2(A)/a_2(C)] [\sigma_2(A)/\sigma_2(C)]$$

$$R_3 = (\sigma_{pA}/\sigma_{pC})_3 = (A/C) [a_3(A)/a_3(C)] [\sigma_3(A)/\sigma_3(C)]$$

$$\sigma_3(A)/\sigma_3(C) = \sigma_2(A)/\sigma_2(C)$$

$$a_2(A)/a_2(C) = (1 + \alpha)^2$$

$$a_3(A)/a_3(C) = (1 + \alpha)^3$$

$$R_3 / R_2 = (1 + \alpha)$$

$$a_2(A)/a_2(C) = (R_3 / R_2)^2$$

$$R_2 (\text{Fe}/\text{C}) = 3.0802 \pm 0.0374$$

$$a_2(\text{Fe})/a_2(\text{C}) = 1.1273 \pm 0.0366$$

from PNPI (p, 2p) experiment :
 $a_2(^{12}\text{C}) = a_2(^{11}\text{B}) = 0.194 \pm 0.023$

$$R_3 (\text{Fe}/\text{C}) = 3.2704 \pm 0.0351$$

$$\text{PNPI} : a_2(\text{Fe}) = 0.219 \pm 0.027$$

$$\text{JLAB} : a_2(^{12}\text{C}) = 0.193 \pm 0.041$$

$$a_2(^{56}\text{Fe}) = 0.227 \pm 0.047$$

from PNPI (p, 2p) experiment :

$$a_2(^3\text{H}) = 0.0825 \pm 0.0070 \text{ (Stat)}$$

$$0.0116 \text{ (Stat + Sys)}$$

from JLAB (e, e') experiment (+ theory):

$$a_2(^3\text{He}) = 0.080 \pm 0.016$$

CLAS-collaboration, PRL, 96 (2006) 082501

Thus, the absolute per-nucleon probabilities for NN SRC are 0.15, 0.19, and 0.23 for ${}^4\text{He}$, ${}^{12}\text{C}$, and ${}^{56}\text{Fe}$, respectively (see Table I). In other words, at any moment, the numbers of NN SRC [which is $\frac{A}{2} a_{2N}(A)$] are 0.12, 0.3, 1.2,

TABLE I. $a_j(A/{}^3\text{He})$ and $a_{jN}(A)$ ($j = 2, 3$) are the per nucleon relative (to ${}^3\text{He}$) and absolute probabilities of (jN) SRC, respectively. Errors shown are statistical and systematic for a_j and are combined (but systematic dominated) for a_{jN} . The systematic uncertainties due to the Coulomb interaction and SRC c.m. motion are not included. For the ${}^{56}\text{Fe}/{}^3\text{He}$ ratio they are expected to be $<2\%$ – 6% and $<20\%$, respectively, and are somewhat smaller for ${}^{12}\text{C}/{}^3\text{He}$ and smaller still for ${}^4\text{He}/{}^3\text{He}$ ratios.

	$a_2(A/{}^3\text{He})$	$a_{2N}(A)$ (%)	$a_3(A/{}^3\text{He})$	$a_{3N}(A)$ (%)
${}^3\text{He}$	1	8.0 ± 1.6	1	0.18 ± 0.06
${}^4\text{He}$	$1.93 \pm 0.02 \pm 0.14$	15.4 ± 3.3	$2.33 \pm 0.12 \pm 0.19$	0.42 ± 0.14
${}^{12}\text{C}$	$2.41 \pm 0.02 \pm 0.17$	19.3 ± 4.1	$3.05 \pm 0.14 \pm 0.21$	0.55 ± 0.17
${}^{56}\text{Fe}$	$2.83 \pm 0.03 \pm 0.18$	22.7 ± 4.7	$4.38 \pm 0.19 \pm 0.33$	0.79 ± 0.25