

# Исследование реакции неупругого рассеяния $A(p, p')X$ на ядрах при энергии 1 ГэВ

*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»

## Участники работы 2013 - 2017

Г. Амальский, В. Андреев, Г. Гаврилов, А. Жданов,  
А. Изотов, Д. Ильин, А. Киселев, Н. Козленко,  
П. Кравченко, М. Левченко, Д. Майсузенко, О. Миклухо,  
В.А. Мурзин, В.И. Мурзин, Д. Новинский, А.Н. Прокофьев,  
С. Труш, А. Шведчиков

# План доклада

- \* Мотивация исследований
- \* Методика  $A(p, p')$  эксперимента
- \* Основные результаты исследований
- \* Планы дальнейших исследований

## Мотивация исследований

1. В различных ядерных реакциях на электронных и протонных пучках наблюдались эффекты от рассеяния на ядерных частицах (нуклонных кластерах, нуклонных корреляциях) с массой существенно большей, чем масса нуклона. Эксперименты проводились как в кумулятивной, так и в квазиупругой кинематике рассеяния. В основном измерялись дифференциальные сечения рассеяния на ядрах и их отношения. Эти эффекты наблюдались также и в немногочисленных поляризационных экспериментах.

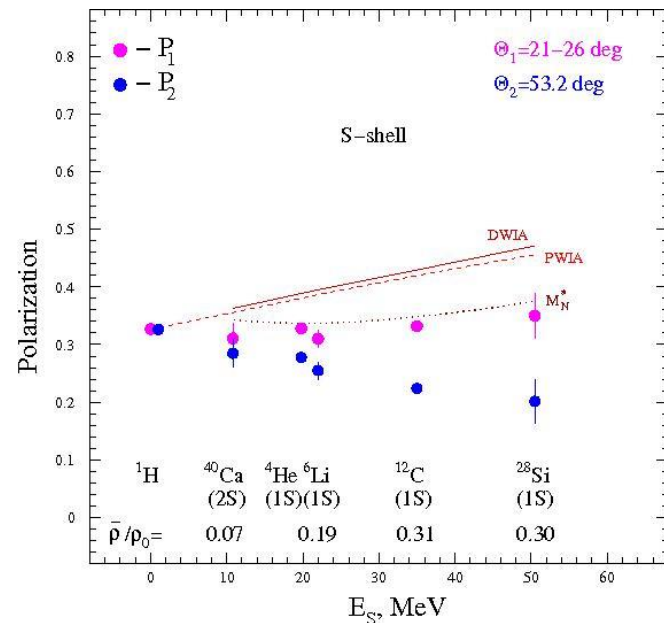
[e.g., Refs in Miklukho et al., JETP Letters 106, No. 2, 69 (2017)].

1. D.I. Blokhintsev, Zh. Eksp. Teor. Fiz. **33**, 1295 (1957) [Sov. Phys. JETP **6**, 995 (1958)].
2. G.A. Leksin, Zh. Eksp. Teor. Fiz. **32**, 445 (1957).
3. L.S. Azhgirei, I.K. Vzorov, V.P. Zrelov, M.G. Mescheriakov, B.S. Neganov, A.F. Shabudin, Zh. Eksp. Teor. Fiz. **33**, 1185 (1957).
4. Y.D. Bayukov, L.S. Vorobev, G.R. Kartashov, G.A. Leksin, V.B. Fedorov, and V.D. Khovansky, Izv. Akad. Nauk, Ser. Fiz. **30**, 521 (1966) [Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **30**, 530 (1966)].
5. A.M. Baldin, S.B. Gerasimov, N. Guiordenescu, V.N. Zubarev, L.K. Ivanova, A.D. Kirillov, V.A. Kuznetsov, N.S. Moroz, V.B. Radomanov, V.N. Ramzhin, V.S. Stavinskii, M.I. Yatsuta, Yad. Fiz. **18**, 79 (1973).
6. Y.D. Bayukov, L.S. Vorobev, G.A. Leksin, V.L. Stolin, V.B. Fedorov, and V.D. Khovanskii, Yad. Fiz. **18**, 1246 (1973) [Sov. J. Nucl. Phys. **18**, 639 (1974)].
7. A.B. Efremov, A.B. Kaidalov, V.T. Kim, G.I. Lykasov, and N.V. Slavin, Yad. Fiz. **47**, 1364 (1988) [Sov. J. Nucl. Phys. **47**, 868 (1988)].
8. L.S. Vorobev, G.A. Leksin, and A.V. Stavinsky, Yad. Fiz. **59**, 694 (1996) [Phys. Atom. Nucl. **59**, 662 (1996)].
9. С.Г. Кадменский, Кластеры в ядрах // Соросовский Образовательный Журнал, Том 6, № 3, С. 27-92.
10. K.S. Egiyan, N.B. Dashyan, M.M. Sargsian, et al., (CLAS Collab.), Phys. Rev. Lett. **96**, 082501 (2006).
11. N.B. Dashyan, Thesis: [https://www.jlab.org/Hall-B/general/thesis/Dashyan\\_thesis.pdf](https://www.jlab.org/Hall-B/general/thesis/Dashyan_thesis.pdf), pp. 1-122 (2006).

2. В ПТИЯФ наблюдается существенная разница поляризаций двух вторичных протонов из реакции  $(p, 2p)$  с ядрами при энергии 1 ГэВ. O.V. Miklukho et al., Phys.Atom.Nucl. 76, 871 (2013)

Этот эффект может быть объяснен взаимодействием в конечном состоянии реакции с нуклонными корреляциями, уменьшающим поляризацию в низкоэнергетическом канале двухплечевого магнитного спектрометра.

Proceedings of the XV Advanced Research Workshop on High Energy Spin Physics (DSPIN-13), 247 (2014)

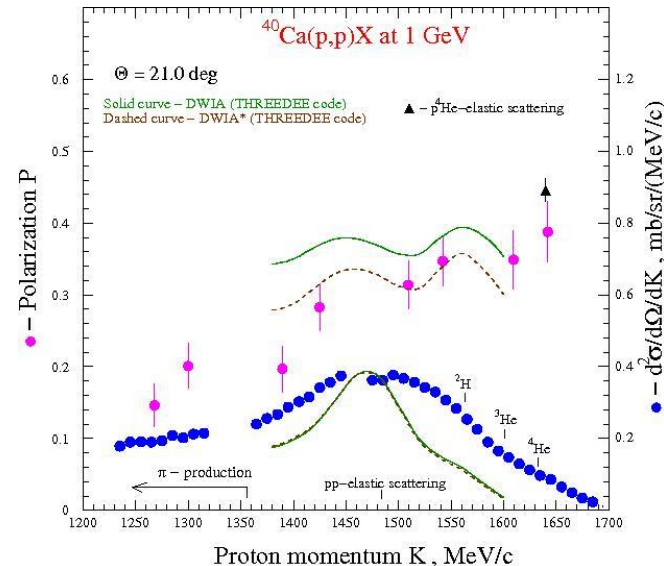


3. В ПТИЯФ при исследовании реакции  $(p, p')$  с ядром  $^{40}\text{Ca}$  под углом рассеяния  $21^\circ$  обнаружен рост поляризации с импульсом вторичных протонов  $K$ .

При импульсе  $K$ , соответствующим кинематике квазиупругого рассеяния на ядре  $^4\text{He}$  внутри ядра  $^{40}\text{Ca}$ , поляризация в реакции  $(p, p')$  оказалась близкой к поляризации в свободном упругом  $p^4\text{He}$ -рассеянии.

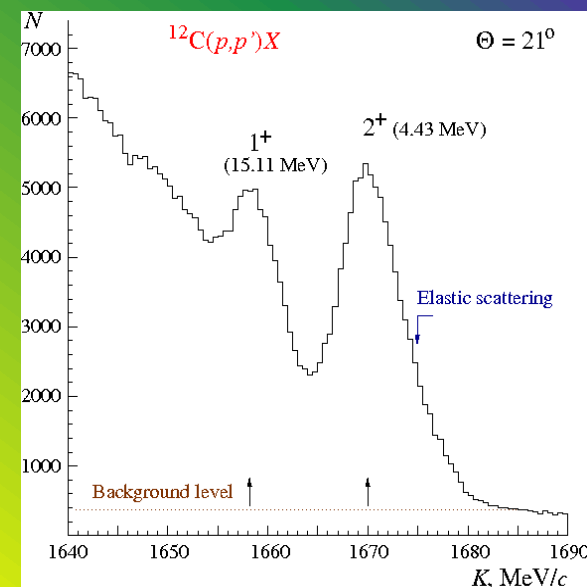
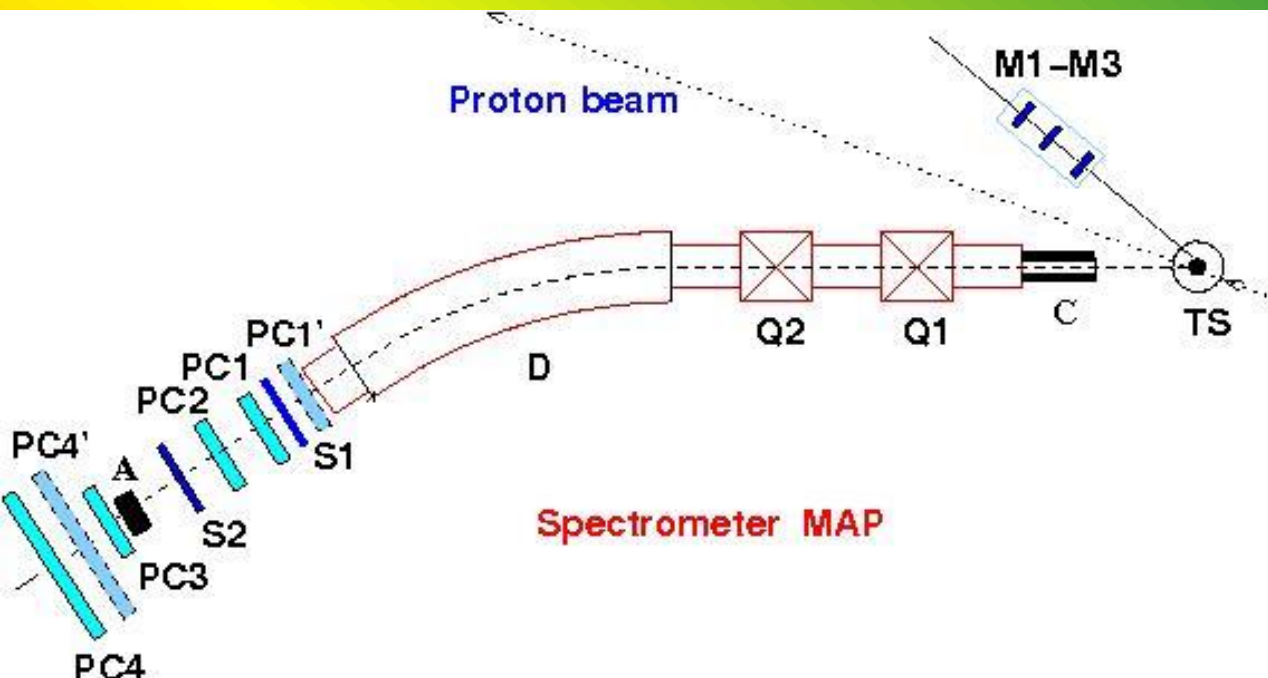
O.V. Miklukho et al., arXiv: 1103.6113v1 [nucl-ex] (2011)

O.V. Miklukho et al., JETP Letters 102, No 1, 11 (2015)



# Experimental setup 2013 -2017

O.V. Miklukho et al., Phys.Atom.Nucl. **80** (No. 2), 299 (2017); **81** (No. 3), (2018)



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

Target	Dimensions [mm] thickness x width x height	Isotope concentration [%]	Density g/cm <sup>3</sup>
CH <sub>2</sub>	4.0 x 10 x 70		1.0
C	4.0 x 10 x 70	98.9	1.60
CH <sub>2</sub> foil	0.1 x 4 x 10		1.0
<sup>12</sup> C	4.0 x 7 x 10	98.9	1.60
<sup>40</sup> Ca	4.0 x 7 x 10	97.0	1.55
<sup>28</sup> Si	4.0 x 7.5 x 9.5	99.9	2.33
<sup>56</sup> 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 <sub>H</sub> , [deg]	0.8
Vertical angle acceptance Δθ <sub>V</sub> , [deg]	1.9
Solid angle acceptance Ω, [sr]	4x10 <sup>-4</sup>
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

$$P = \varepsilon / A$$

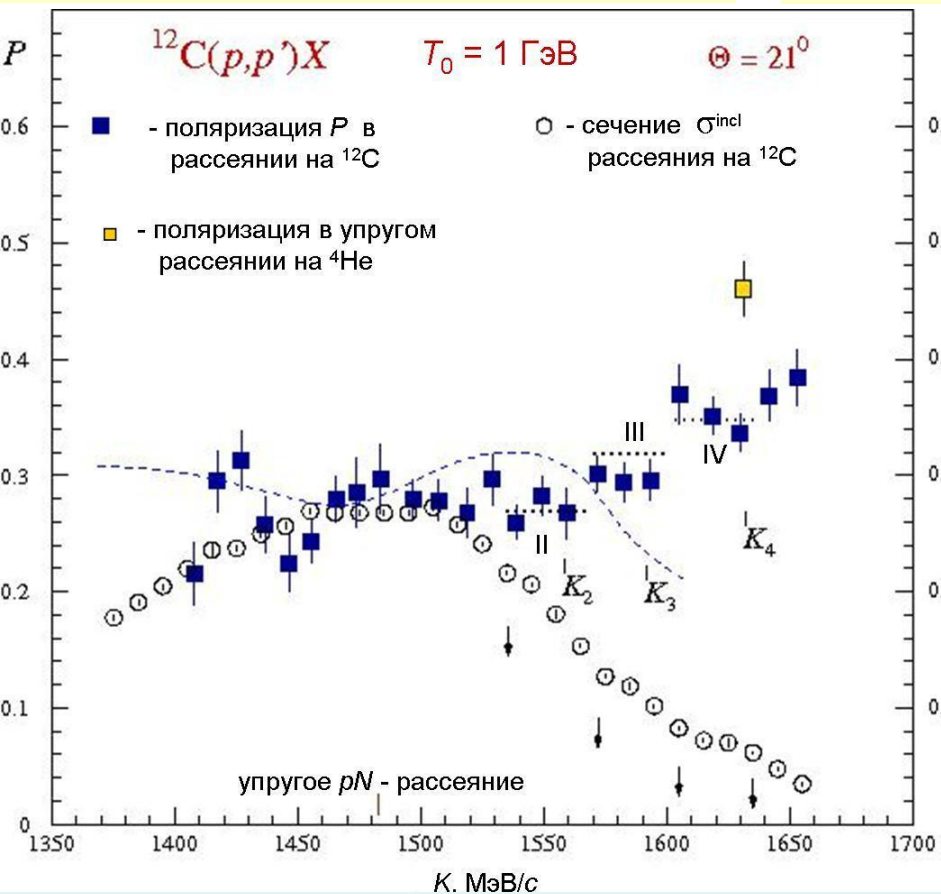
Main parameters of the MAP polarimeter	
Carbon block thickness, [mm]	155
Polar angular range, [deg]	3 - 16
Average analyzing power	> 0.2
Efficiency, [%]	~ 4

# Основные результаты исследований 2013 - 2017 ( $p, p'$ )-эксперименты при угле рассеяния $\Theta = 21^\circ$ ( $Q \sim 600$ МэВ/с)

О. Миклухо

O.V. Miklukho et al., JETP Letters **102**, 11 (2015);

O.V. Miklukho et al., Phys.Atom.Nucl. **80** (No. 2), 299 (2017); **81** (No. 3), (2018)

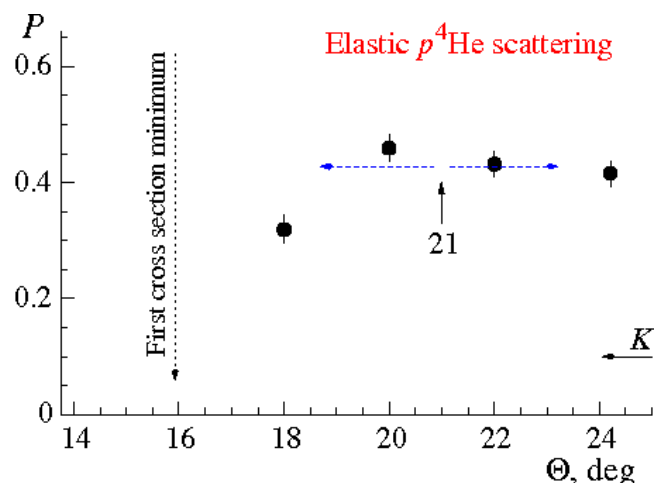


Завершены ( $p, p'$ )-эксперименты с ядрами  $^{12}\text{C}$ ,  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{56}\text{Fe}$ .

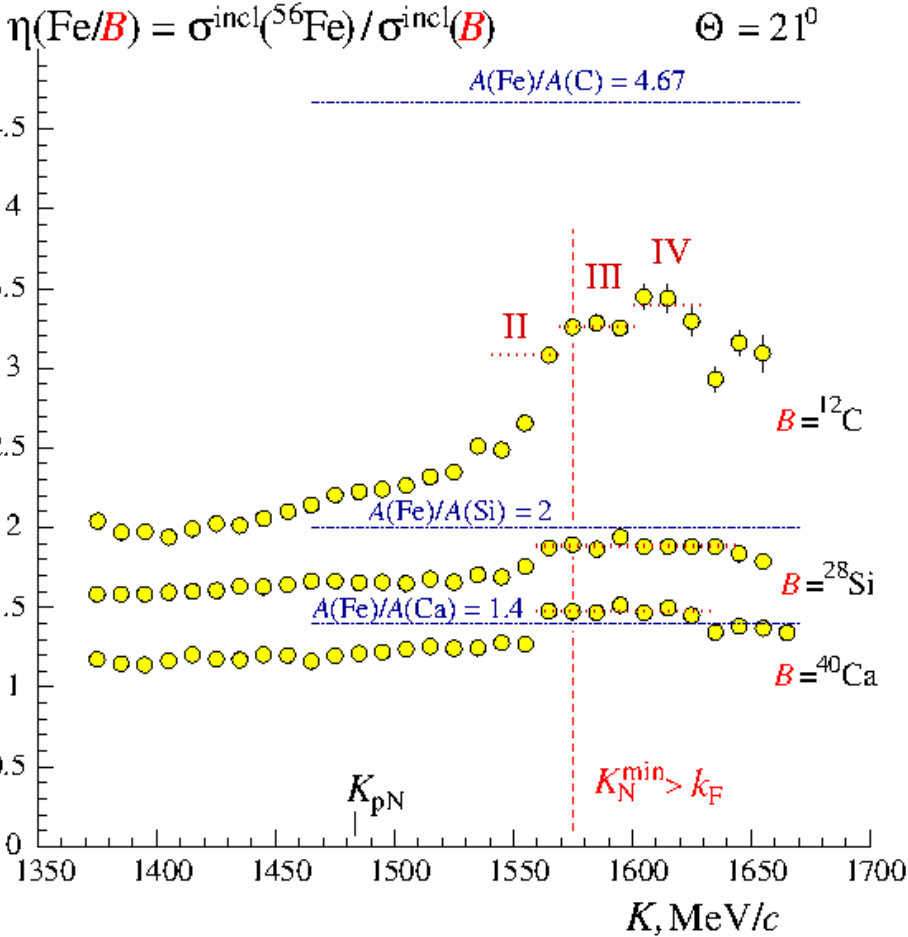
Наблюдена структура в поляризации и сечении рассеяния (импульсные интервалы **II**, **III** и **IV**), возможно связанная с упругим рассеянием на ядерных частицах с массой существенно большей, чем масса нуклона. Этими частицами могут быть двух-, трех- и четырех нуклонные кластеры либо корреляции  $^2\text{H}$  (**II**),  $^3\text{He}$ ,  $^3\text{H}$  (**III**),  $^4\text{He}$  (**IV**).

Интервалы структуры для всех ядер, исключая  $^{40}\text{Ca}$ , совпадают с точностью  $\pm 5$  МэВ/с.

Проведен пробный ( $p, p'$ )-эксперимент с ядрами  $^{90}\text{Zr}$ ,  $^{90}\text{Zr}$ .



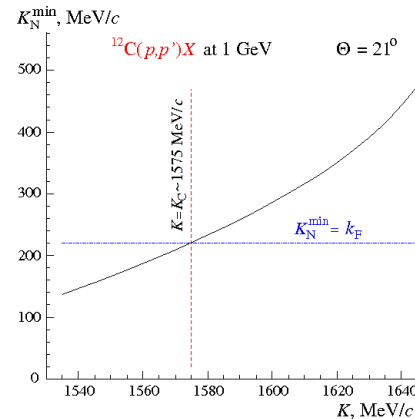
O.V. Miklukho et al., Phys.Atom.Nucl. **63**, 474 (2006)



Наблюдается независимость величины отношений сечений рассеяния  $\eta(\text{Fe}/\text{C})$  в импульсных интервалах **III, IV** и  $\eta(\text{Fe}/\text{Si})$ ,  $\eta(\text{Fe}/\text{Ca})$  в области  $K = 1560 - 1635 \text{ МэВ}/c$ .

Интервалы III и IV для отношения  $\eta(\text{Fe}/\text{C})$  совпадают с аналогичными интервалами, наблюдаемыми в поляризации и сечении для реакции  $(p, p')$  с ядром  $^{12}\text{C}$  и предположительно соответствующими рассеянию на трехнуклонных и четырехнуклонных корреляциях.

**Кинематика для угла  $\Theta=21^\circ$ :** В области  $K = K_{pN} - 1650 \text{ МэВ}/c$   $Q \approx 600 \text{ МэВ}/c$  и переменная Бьеркена  $x_B = Q^2/2m\nu(K)$  определяется только величиной импульса  $K$  и изменяется в интервале 1-5.



Модель КНК (JLAB, PRL 96, 082501 (2006)):  $\sigma_A(Q^2, x_B) = A \sum_{j=2} (a_j(A)/j) \sigma_j(Q^2, x_B)$

Отношение сечений в j-интервале:  $(\sigma_{\text{Fe}}/\sigma_A)_j = (\text{Fe}/A) [a_j(\text{Fe}) / a_j(A)] [\sigma_j(\text{Fe}) / \sigma_j(A)]$ .

Отношение вероятностей возникновения  $[a_j(\text{Fe}) / a_j(A)] \sim \langle \rho_{\text{Fe}}^j(r) \rangle / \langle \rho_A^j(r) \rangle \sim (1 + \beta)^j$ ,  
j-корреляции в ядрах Fe и A:  $\beta \geq 0$ .



# Планируемые ( $p, p'$ )-эксперименты с ядрами при угле рассеяния $\Theta = 24.5^\circ$ ( $Q \sim 700$ МэВ/с)

Исследование ядер  $^{12}\text{C}$  и  $^{40}\text{Ca}$  (измерение поляризации и сечений) и ядер  $^9\text{Be}$ ,  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{56}\text{Fe}$ ,  $^{90}\text{Zr}$  (измерение сечений).

\* Обозначится интервал  $\Pi$  в отношениях сечений рассеяния  $\eta(A/C)$ , соответствующий рассеянию на двухнуклонных корреляциях.

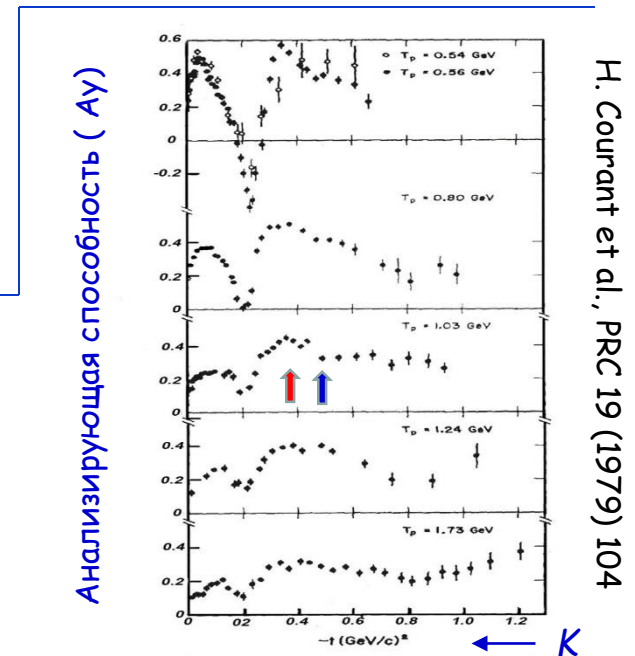
Это позволит более надежно определить вероятность возникновения двухнуклонных корреляций  $a_2(A)$  в ядре  $A$ , используя значение  $a_2(C)$  для ядра  $^{12}\text{C}$ , найденное в ПИЯФ в ( $p, 2p$ )-эксперименте  $a_2(^{12}\text{C}) = 0.194 \pm 0.023$  (Proc. of the Workshop DSPIN-13, 247 (2014)).

Основываясь на данных эксперимента при угле рассеяния  $\Theta = 21^\circ$ : для  $A = ^{56}\text{Fe}$  вероятность  $a_2(^{56}\text{Fe}) = 0.219 \pm 0.027$ .

( $e, e'$ )-эксперимент в JLAB :  $a_2(^{56}\text{Fe}) = 0.227 \pm 0.047$ .

\* В пределах импульсных интервалов, соответствующих рассеянию на различных корреляциях, поляризация будет расти с импульсом.

Проведен пробный ( $p, p'$ )-эксперимент с ядрами  $^{12}\text{C}$ ,  $^{40}\text{Ca}$  под углом рассеяния  $\Theta = 24.5^\circ$ .



Упругое рассеяние протонов на ядрах  $^4\text{He}$

- 2018:**
- Завершить обработку ранее выполненного пробного эксперимента с ядрами  $^9\text{Be}$ ,  $^{90}\text{Zr}$  под углом рассеяния  $\Theta = 21^\circ$ , включив данные эксперимента 2018 года.
  - Измерение сечений ( $p, p'$ )-реакции с ядрами  $^9\text{Be}$ ,  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{56}\text{Fe}$ ,  $^{90}\text{Zr}$  под углом рассеяния  $\Theta = 24.5^\circ$  и поляризации в реакции с ядрами  $^9\text{Be}$ ,  $^{90}\text{Zr}$  под углом рассеяния  $\Theta = 21^\circ$ .
- 2019:**
- Завершить анализ данных экспериментов с ядрами  $^9\text{Be}$ ,  $^{90}\text{Zr}$  под углом рассеяния  $\Theta = 21^\circ$ . Публикация результатов исследования.
  - Обработка данных (сечения) эксперимента 2018 года с ядрами  $^9\text{Be}$ ,  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{56}\text{Fe}$ ,  $^{90}\text{Zr}$  и пробного эксперимента 2016 года с ядрами  $^{12}\text{C}$ ,  $^{40}\text{Ca}$  для угла  $\Theta = 24.5^\circ$ .
  - Дополнительный эксперимент с ядрами  $^{12}\text{C}$ ,  $^{40}\text{Ca}$  (поляризация) при угле рассеяния  $\Theta = 24.5^\circ$ .
- 2020:**
- Завершить анализ данных (сечения) экспериментов с ядрами  $^9\text{Be}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{28}\text{Si}$ ,  $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{56}\text{Fe}$ ,  $^{90}\text{Zr}$  под углом рассеяния  $\Theta = 24.5^\circ$ . Публикация результатов.
  - Обработка данных (поляризация) экспериментов с ядрами  $^{12}\text{C}$ ,  $^{40}\text{Ca}$  под углом рассеяния  $\Theta = 24.5^\circ$ .
- 2021:**
- Завершить анализ данных (поляризация и сечения) экспериментов с ядрами  $^{12}\text{C}$ ,  $^{40}\text{Ca}$  под углом рассеяния  $\Theta = 24.5^\circ$ . Расчеты поляризации с помощью ThreeDee code. Публикация результатов.
- 2022:**

# Back Slides

# Вычисление $a_2(^{56}\text{Fe})$ по известному значению $a_2(^{12}\text{C})$

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

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

При  $K = 1570 \text{ МэВ/с}$   $\sigma_3(A)/\sigma_3(C) = \sigma_2(A)/\sigma_2(C)$

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

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

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

$$a_2(\text{Fe})/a_2(\text{C}) \approx (R_3 / R_2)^2$$

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

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

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

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

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

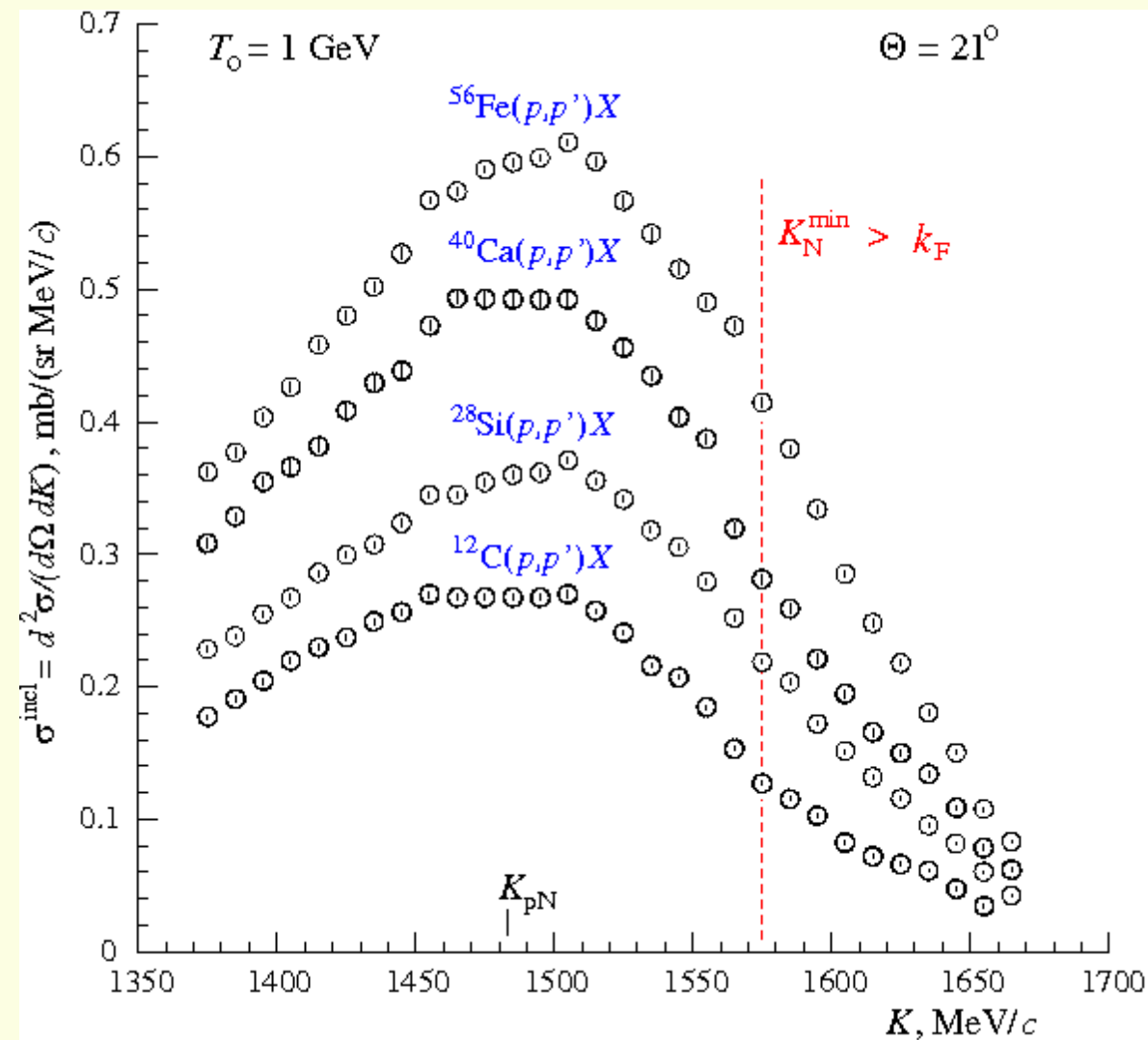
$$\text{PNPI : } a_2(\text{Fe}) = 0.219 \pm 0.027$$
 !!!

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

from PNPI (p, 2p) experiment :  
 $a_2(^3\text{H}) = 0.0825 \pm 0.0070$  (Stat)  
 $\pm 0.0116$  (Stat + Sys)

from JLAB (e, e') experiment (+ theory):  
 $a_2(^3\text{He}) = 0.080 \pm 0.016$

## Дифференциальные сечения неупругого рассеяния на ядрах



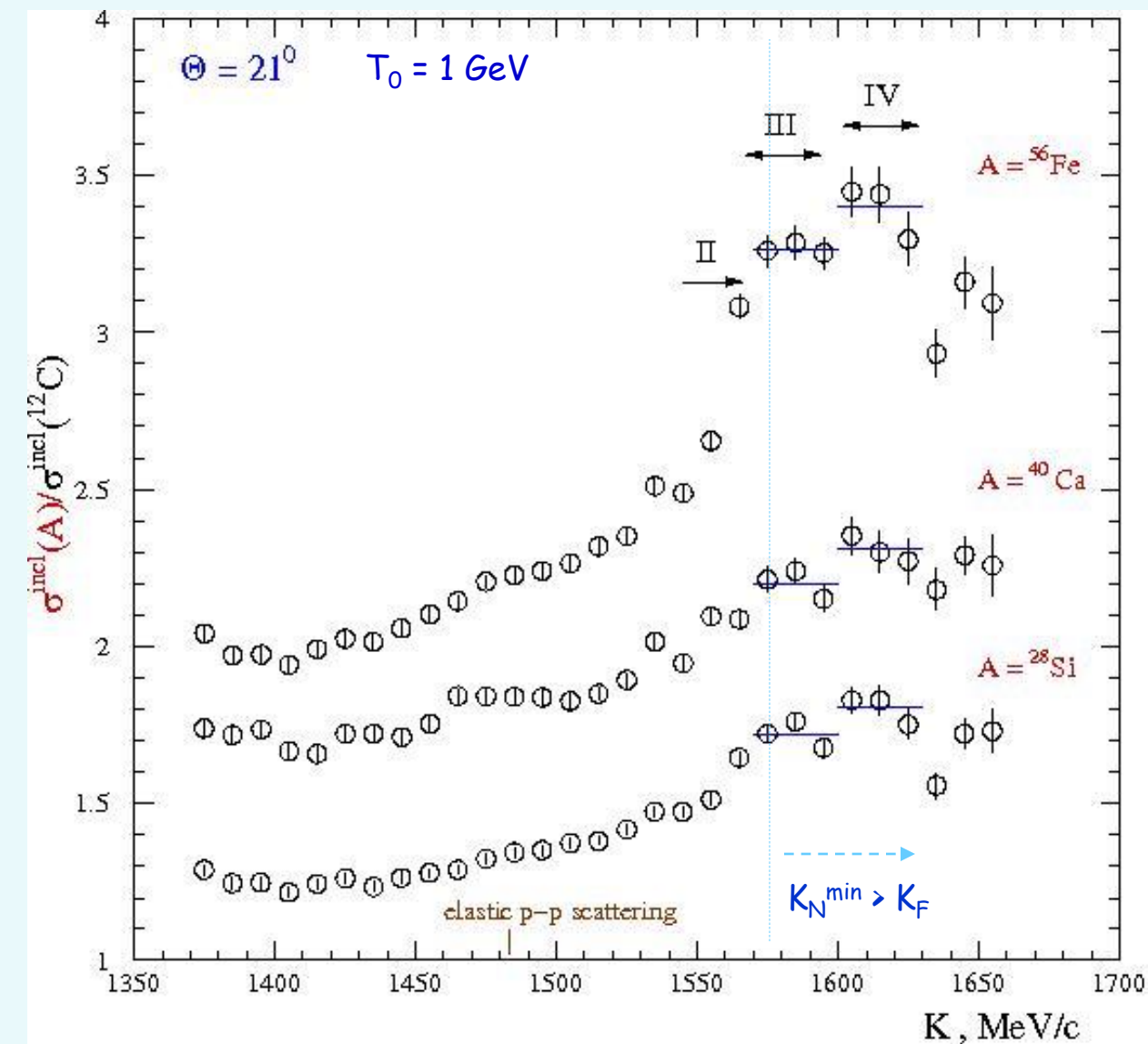
Систематика :

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

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

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

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



**Систематика :**

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

$\text{Fe}/\text{C} = 56/12 = 4.67$

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

$\text{Ca}/\text{C} = 40/12 = 3.33$

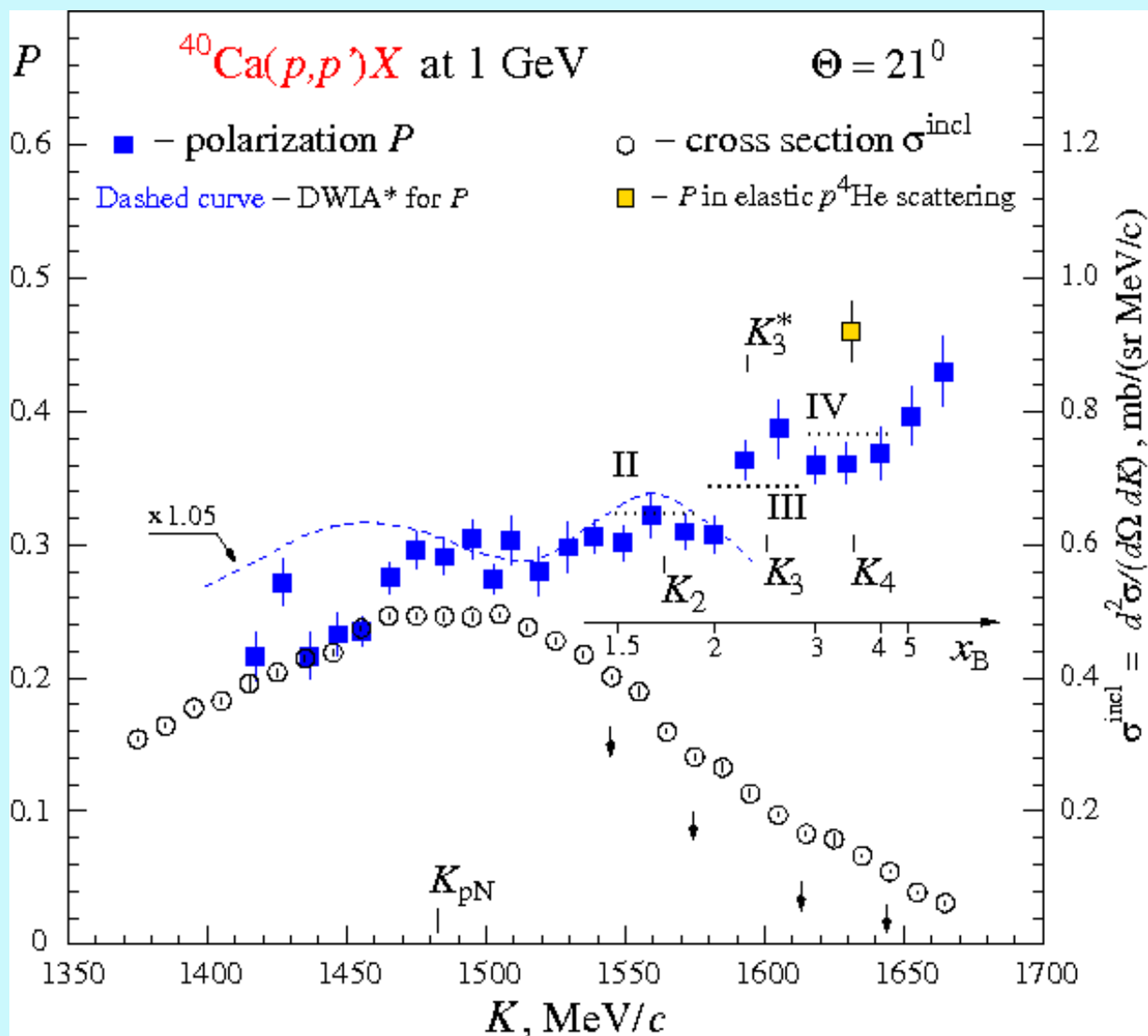
$\delta\sigma/\sigma(\text{Si}/\text{C}) = \pm 3.7\%$

$\text{Si}/\text{C} = 28/12 = 2.33$

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

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

# Результаты (p, p')-эксперимента с ядром $^{40}\text{Ca}$



## Averaged polarization in scattering off the three-nucleon correlations :

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

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

We observe a significant difference between the polarizations in scattering by three-nucleon correlations (the momentum range III) in the nuclei  $^{12}\text{C}$  and  $^{40}\text{Ca}$  ( $P_C = 0.29$  and  $P_{Ca} = 0.39$ ).

Если  $K_\sigma(\text{Ca}) = K_\sigma(\text{C}) < 1$  and  $K_P(\text{Ca}) = K_P(\text{C}) < 1$ , тогда :  $K_N(\text{C}) - K_N(\text{Ca}) = (P_{Ca}/P_C) / [(1 - K_P) \ln(1 + K_\sigma)]$

Примеры: -  $K_\sigma = 0.7$ ;  $K_P = 0.50$ ;  $K_N(\text{C}) = 1 \rightarrow K_N(\text{Ca}) = 0.117$

-  $K_\sigma = 0.7$ ;  $K_P = 0.25$ ;  $K_N(\text{C}) = 1 \rightarrow K_N(\text{Ca}) = 0.255$

-  $K_\sigma = 1.0$ ;  $K_P = 0.50$ ;  $K_N(\text{C}) = 1 \rightarrow K_N(\text{Ca}) = 0.145$

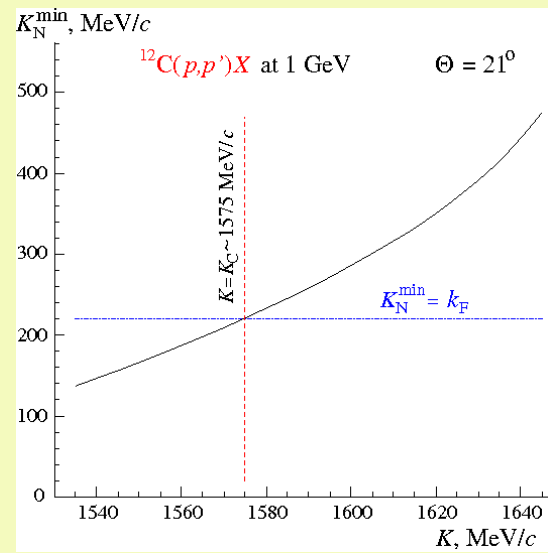
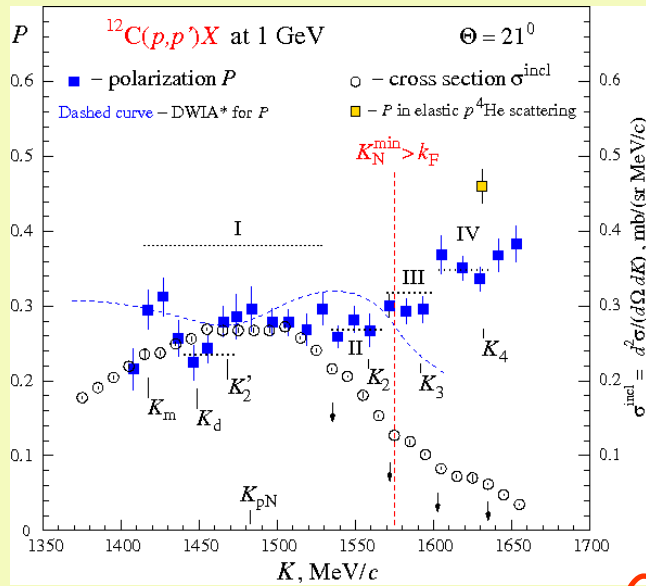
\* **А если не нарушать изотопическую симметрию в ядре кальция ( $K_N = 1$ ).** Заметили, что расчетные импульсы  $K_3$  ( $^3\text{He}$ ) и  $K_3^*$  ( $^3\text{H}$ ) отличаются на  $\sim 7$  МэВ/с при разрешении установки  $\sigma \sim 2$  МэВ/с, причем  $K_3 > K_3^*$ .

**Возможна дисперсия?** При  $K > K_3^*$  идет рассеяние только на  $^3\text{He}$ . При этом подразумевается, что поляризация в упругом рассеянии на ядре  $^3\text{He}$  существенно больше, чем на ядре  $^3\text{H}$ . Требуется расчеты в рамках теории Глаубера.

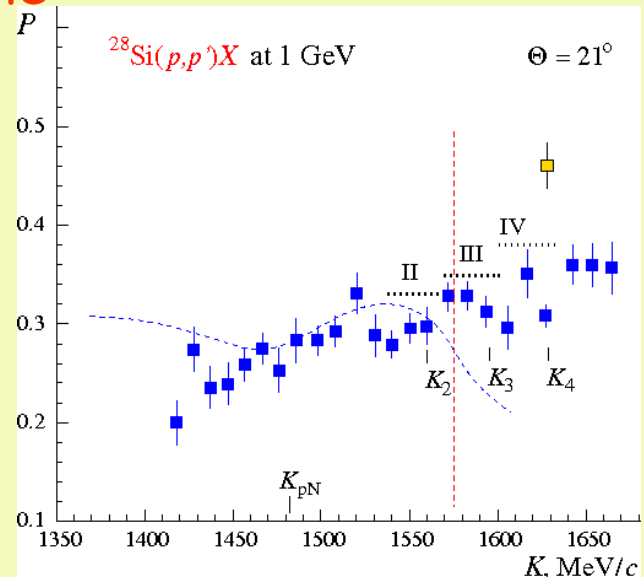
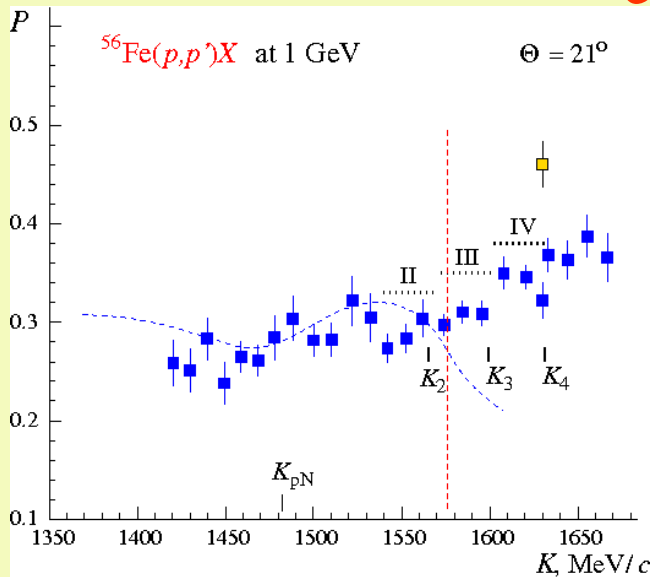
\* If  $K_P = 1$  (the polarization in elastic proton scattering on the nuclei  $^3\text{He}$  and  $^3\text{H}$  is the same) then the measured polarization in scattering off the nuclei  $^{12}\text{C}$  and  $^{40}\text{Ca}$  in the interval III should be the same regardless of the  $K_N$  and  $K_\sigma$  values.

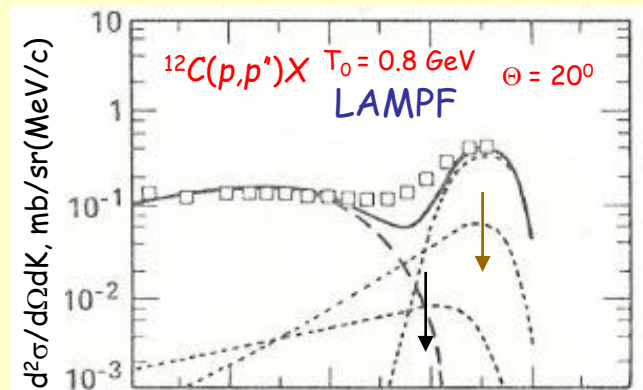
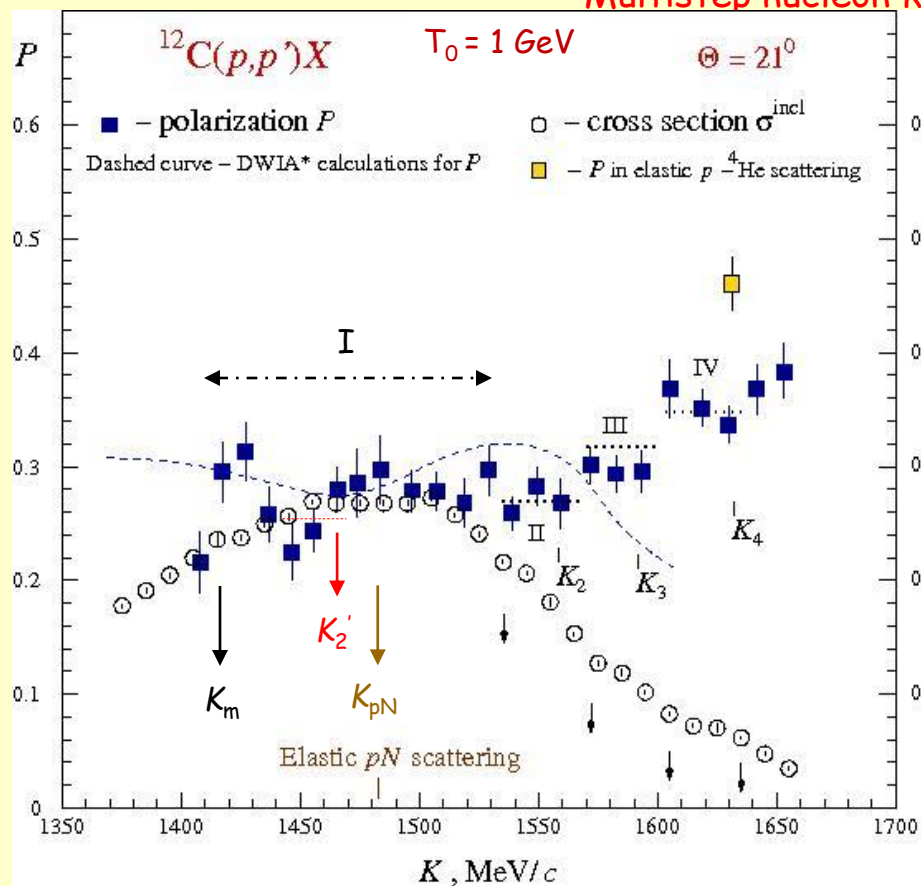
\* **Возможно нарушается изотопическая симметрия в ядре  $^{40}\text{Ca}$  ( $K_N < 1$ ).** JLAB исследует это.



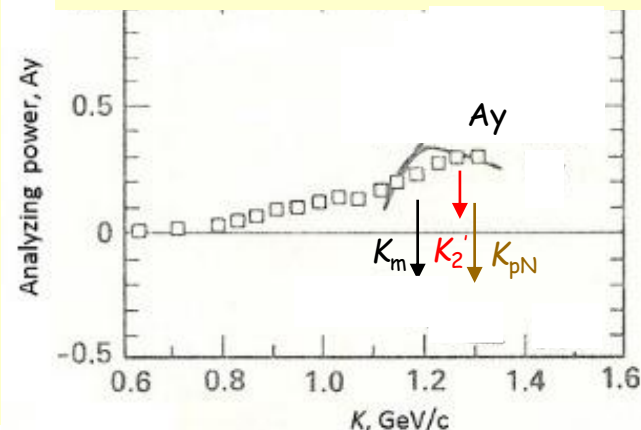


Сравнение :





R.D. Smith and S.J. Wallace, PRC 32, 1654 (1985)

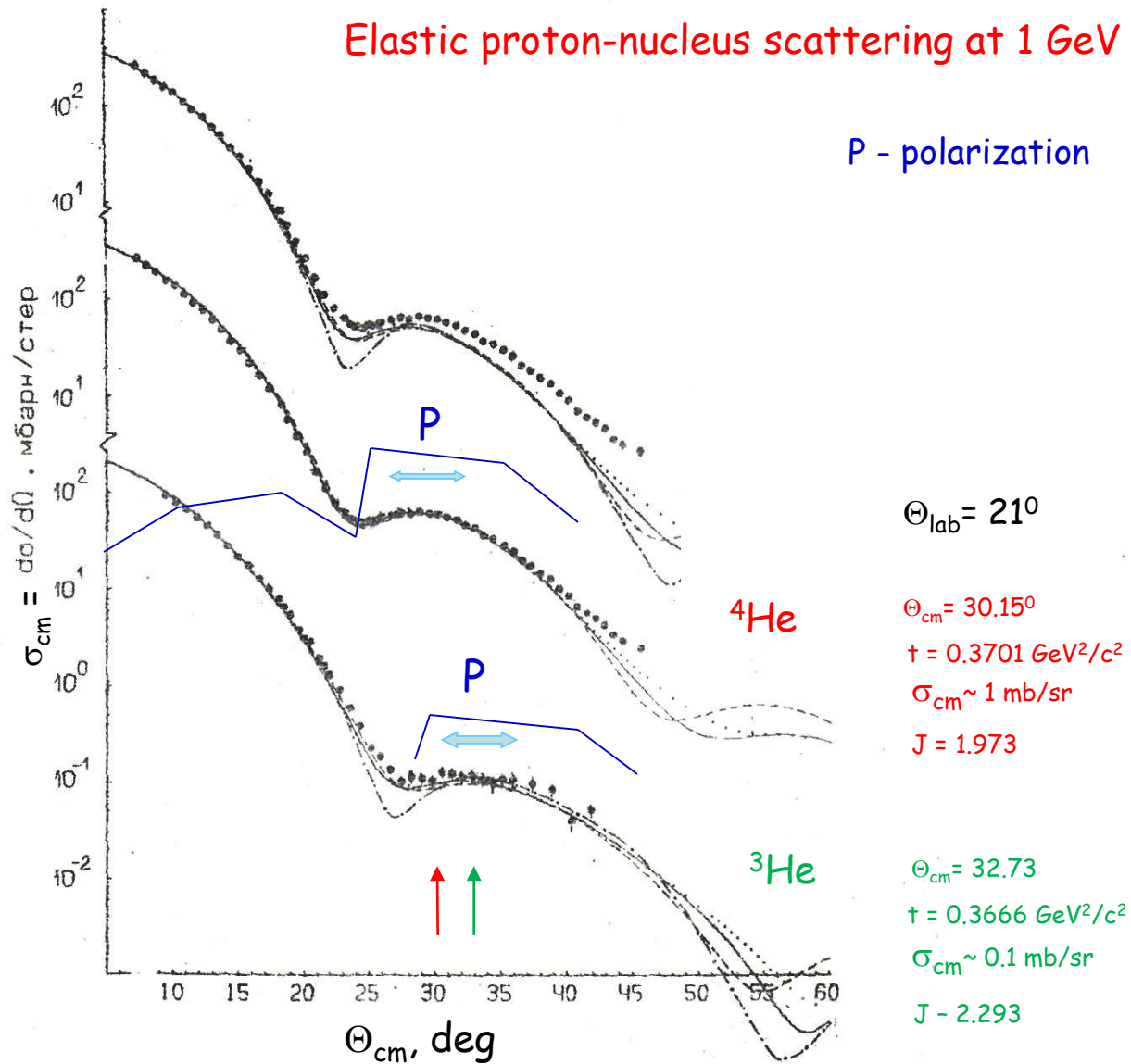


\* In the range I, where the cross section for the  $(p, p')$  reaction has large values, the contribution from multistep processes of nucleon knockout from a nucleus can be sizable. The outgoing proton momentum is lower in these processes than in the one-step  $(p, p')$  reaction under investigation. This effect distorts the smooth shape of the cross section at  $K = K_m$  marked by an arrow. At  $K < K_m$ , the  $P$  as well as the  $A_y$  falls. We observe a noticeable minimum in the  $P$  between the momenta of the  $K_m$  and  $K_{pN}$ . We do not see such a minimum in the  $A_y$  of both experimental and theoretical data at  $T_0 = 0.8$  GeV.

\* This minimum is possibly due to scattering by a two-nucleon correlation leading to its decay into two nucleons. The  $P$  in the process can be essentially smaller than that in the quasielastic scattering by an uncorrelated nucleon (see the interval II).

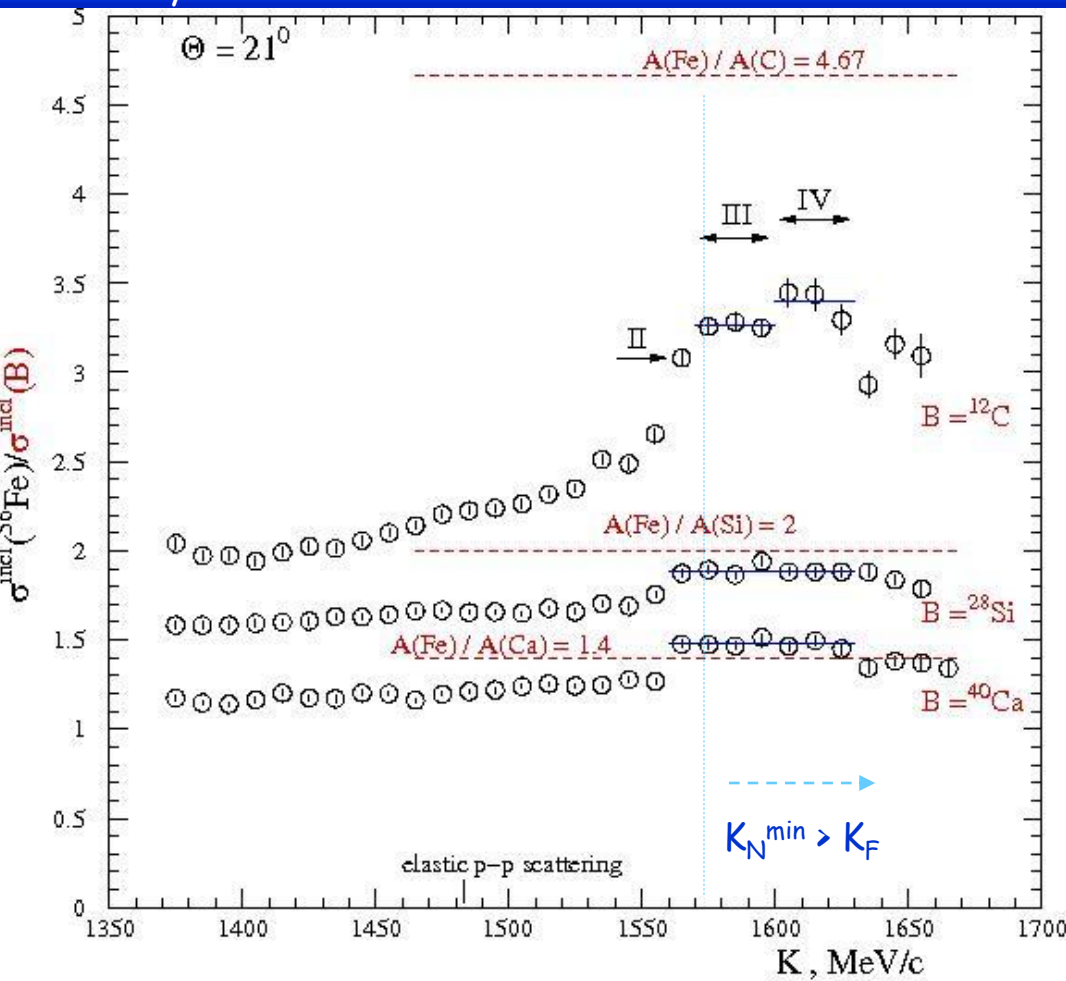
\* In the SRC approach, two nucleons belonging to the two-nucleon correlation have oppositely directed momenta of nearly equal magnitude more than the Fermi momentum  $\sim 250$  MeV/c (the kinetic energy  $\sim 35$  MeV). The  $K_2'$  was obtained in the kinematic program at the excitation energy of the residual nucleus  $\sim 2 \times 35 = 70$  MeV.

### Elastic proton-nucleus scattering at 1 GeV



# 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  $\sim \pm 1.2^\circ$ ,  $\pm 1.7^\circ$ ,  $\pm 2.3^\circ$ . A maximal value of the correlation momentum (energy) in these ranges is  $\sim 36$  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  $p\text{-}^4\text{He}$  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 ( $\sim 250$  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.



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

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](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  $^{12}\text{C}$  ( $\alpha > 0$ ), то отношение  $(\sigma_A / \sigma_C)_j$  должно несколько увеличиться с ростом  $j$ .

**Систематика :**

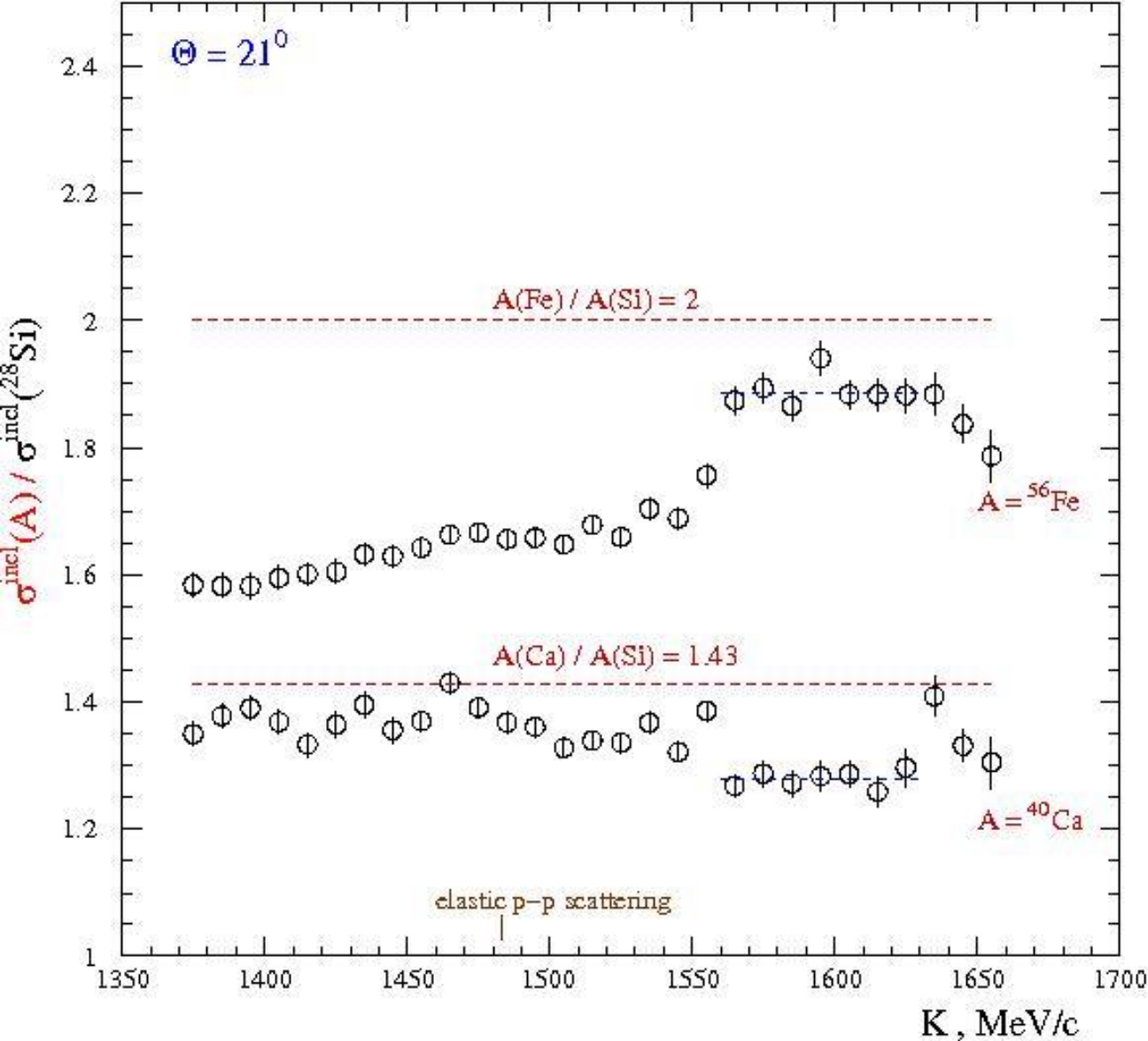
$$\begin{aligned} \delta\sigma/\sigma(\text{Fe/C}) &= \pm 4.5\%, \quad \delta\sigma(\text{Fe/C}) = \pm 0.15 \\ \delta\sigma/\sigma(\text{Fe/Si}) &= \pm 5.4\%, \quad \delta\sigma(\text{Fe/Si}) = \pm 0.10 \\ \delta\sigma/\sigma(\text{Fe/Ca}) &= \pm 5.5\%, \quad \delta\sigma(\text{Fe/Ca}) = \pm 0.08 \end{aligned}$$

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

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

$$\sigma_j(\text{Fe})/\sigma_j(\text{C}) < \sigma_j(\text{Fe})/\sigma_j(\text{Si}) < \sigma_j(\text{Fe})/\sigma_j(\text{Ca}) < 1$$

$$\sigma_j(\text{Fe})/\sigma_j(\text{C}) < \sigma_j(\text{Ca})/\sigma_j(\text{C}) < \sigma_j(\text{Si})/\sigma_j(\text{C}) < 1$$



$\sigma_j(\text{Fe})/\sigma_j(\text{Si}) < \sigma_j(\text{Ca})/\sigma_j(\text{Si}) < 1$

Систематика :

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

$\delta\sigma(\text{Fe}/\text{Si}) = \pm 0.10$

$\delta\sigma/\sigma(\text{Ca}/\text{Si}) = \pm 4.9\%$

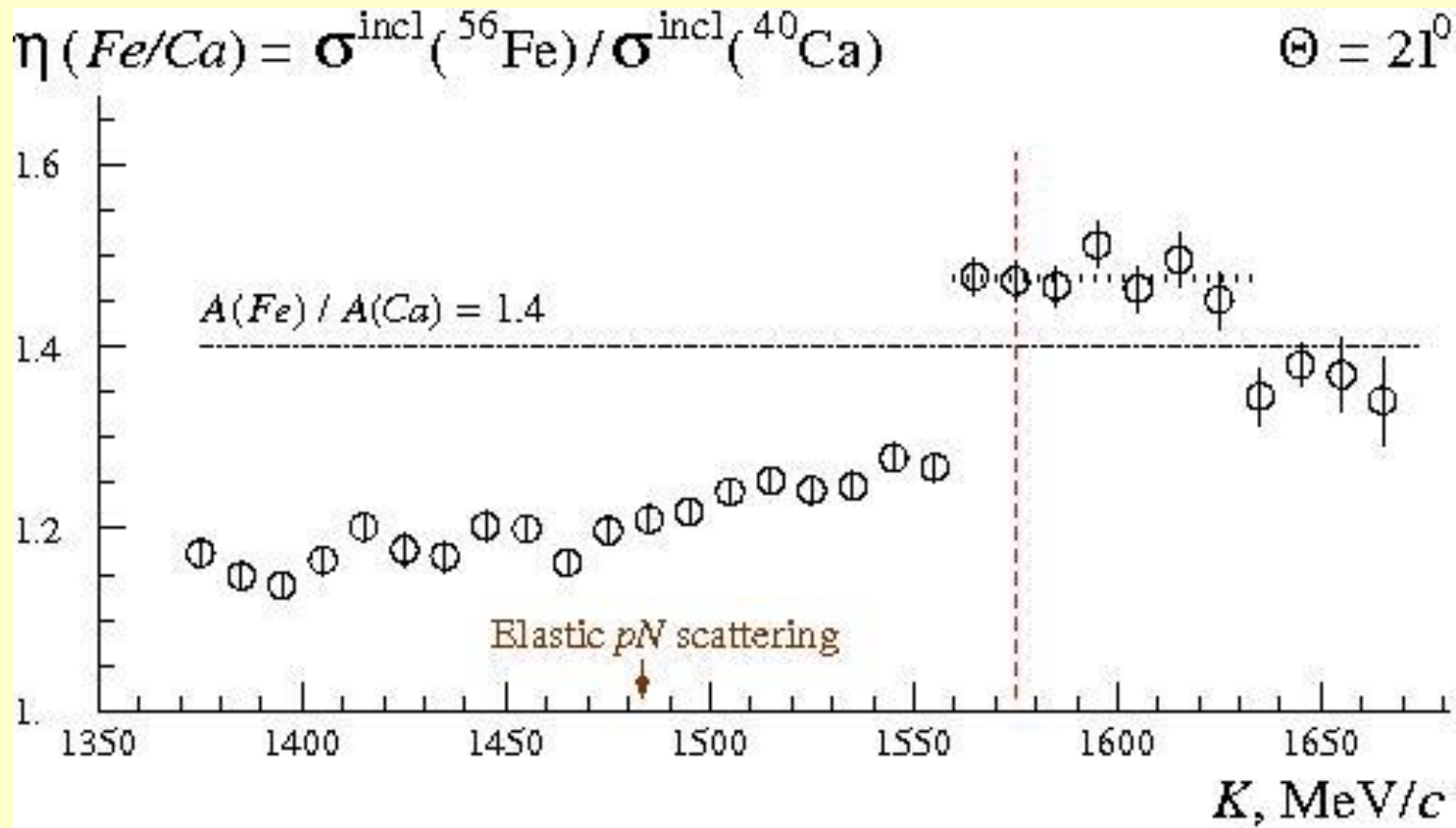
$\delta\sigma(\text{Ca}/\text{Si}) = \pm 0.07$

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

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

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

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



## Measurement of Two- and Three-Nucleon Short-Range Correlation Probabilities in Nuclei

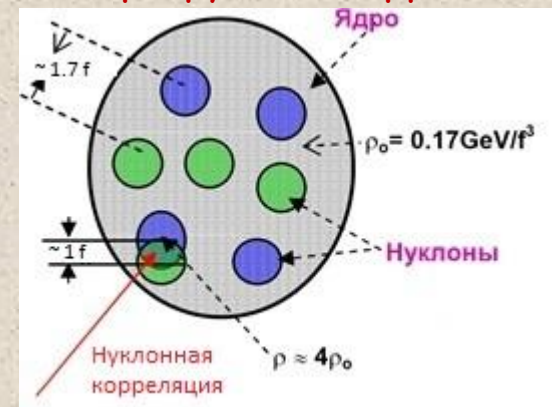
K. S. Egiyan,<sup>1,34</sup> N. B. Dashyan,<sup>1</sup> M. M. Sargsian,<sup>10</sup> M. I. Strikman,<sup>28</sup> L. B. Weinstein,<sup>27</sup> G. Adams,<sup>30</sup> P. Ambrozewicz,<sup>10</sup>

Understanding short-range correlations (SRC) in nuclei has been one of the persistent though rather elusive goals of nuclear physics for decades. Calculations of nuclear wave functions using realistic nucleon-nucleon ( $NN$ ) interactions suggest a substantial probability for a nucleon in a heavy nucleus to have a momentum above the Fermi momentum  $k_F$ . The dominant mechanism for generating high momenta is the  $NN$  interaction at distances less than the average internucleon distance, corresponding to nuclear densities comparable to neutron star core densities. It involves both tensor forces and short-range repulsive forces, which share two important features, locality and large strength. The SRC produced by these forces result in the universal shape of the nuclear wave function for all nuclei at  $k > k_F$  [see, e.g., Refs. [1,2]].

**Нуклонные корреляции, обусловленные тензорным и короткодействующим отталкивающим  $NN$ -взаимодействием на малых расстояниях, приводят к универсальной форме ядерной волновой функции для всей ядер при импульсах нуклонов  $K_N$  больших, чем импульс Ферми  $K_F$  ( $\sim 250$  МэВ/с).**

A characteristic feature of these dynamics is that the momentum  $k$  of a high-momentum nucleon is balanced, not by the rest of the nucleus, but by the other nucleons in the correlation. Therefore, for a 2-nucleon ( $NN$ ) SRC, the removal of a nucleon with large momentum,  $k$ , is associated with a large excitation energy  $\sim k^2/2m_N$  corresponding to the kinetic energy of the second nucleon. The relatively large energy scale ( $\geq 100$  MeV) involved in the interaction of the nucleons in the correlation makes it very difficult to resolve correlations in intermediate energy processes. The use of high energy electron-nucleus scattering measurements offers a promising alternative to improve our understanding of these dynamics.

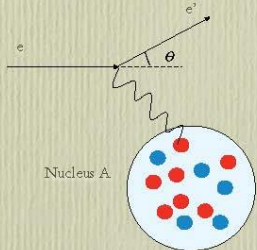
**А если не разрушать корреляцию ?**





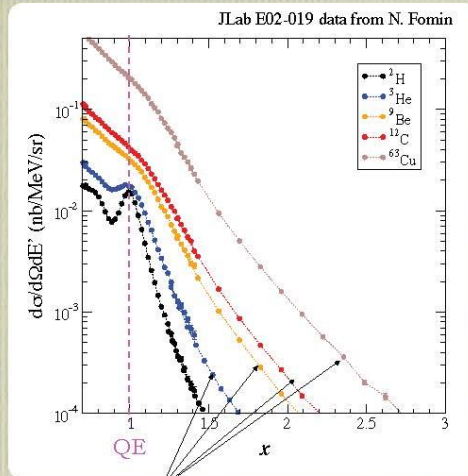
# Inclusive scattering at large x

At  $x \approx 1$



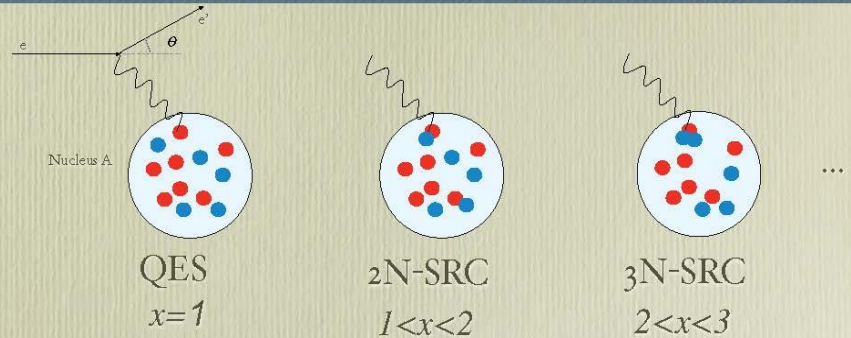
Quasi-Elastic Scattering

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



High momentum tails should yield **constant ratio** if seeing SRC

# Short Range Correlations



For  $x \geq 1.3$ :

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

$\sigma_j \rightarrow$  cross section from a  $j$ -nucleon correlation

$a_j(A) \propto$  probability of finding a nucleon in a  $j$ -nucleon correlation

Since the probabilities of  $j$ -nucleon SRC should drop rapidly with  $j$  (since the nucleus is a dilute bound system of nucleons) one expects that scattering from  $j$ -nucleon SRC will dominate at  $j - 1 < x_B < j$ . Therefore the cross section ratios of heavy and light nuclei should be independent of  $x_B$  and  $Q^2$  (i.e., scale) and have discrete values for different  $j$ :  $\frac{\sigma(A)}{\sigma(A')} = \frac{A}{A'} \cdot \frac{a_j(A)}{a_j(A')}$ . This “scaling” of the ratio will be strong evidence for the dominance of scattering from a  $j$ -nucleon SRC.

PRL 96, 082501 (2006)

Moreover, the relative probabilities of  $j$ -nucleon SRC,  $a_j(A)$ , should grow with the  $j$ th power of the density  $\langle \rho_A^j(r) \rangle$ , and thus with  $A$  (for  $A \geq 12$ ) [3]. Thus, steps in the ratio  $\frac{\sigma(A)}{\sigma(A')}$  should increase with  $j$  and  $A$ . Observation of such steps (i.e., scaling) would be a crucial test of the dominance of SRC in inclusive electron scattering.

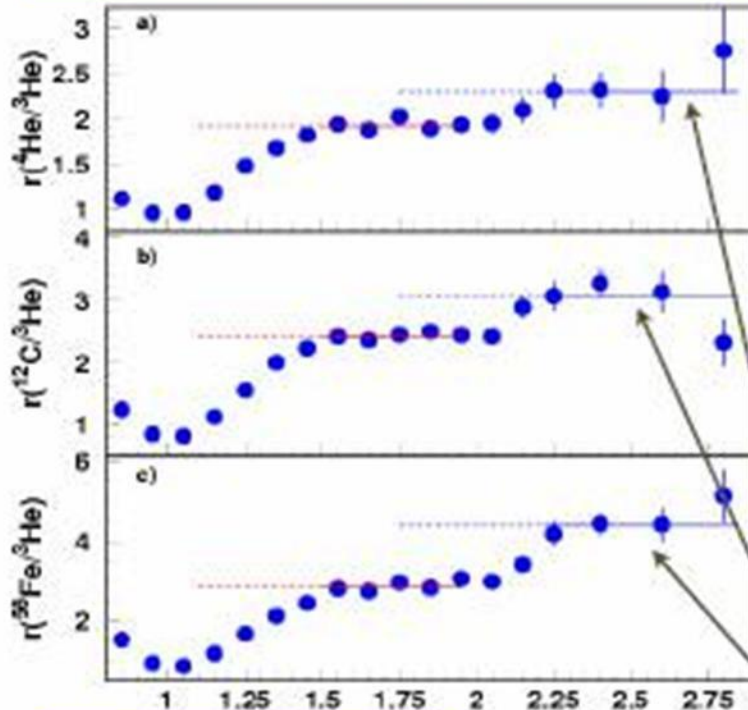
В (e,e')-эксперименте в JLAB при энергии  $\sim 4.6$  ГэВ в области  $Q^2 > 1.4$  GeV<sup>2</sup>/c<sup>2</sup> и  $x_B > 1.3$  ( $K_N > K_F$ ), где вклад от рассеяния на нуклонах среднего ядерного поля подавлен, обнаружены  $x_B$ -интервалы, в пределах которых отношения сечений рассеяния на ядрах не зависят от  $x_B$ .

# SRC evidence at JLab

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

Н.Б. Дашьян ([https://www.jlab.org/Hall-B/thesis/Dashyan\\_thesis.pdf](https://www.jlab.org/Hall-B/thesis/Dashyan_thesis.pdf))

CLAS Collaboration, PRL, 96, 082501 (2006)



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

Отношение сечений рассеяния на ядрах :  
 $(\sigma_A/\sigma_{{}^3\text{He}})_j = (A/{}^3\text{He}) [a_j(A) / a_j({}^3\text{He})]$

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  $j$ .

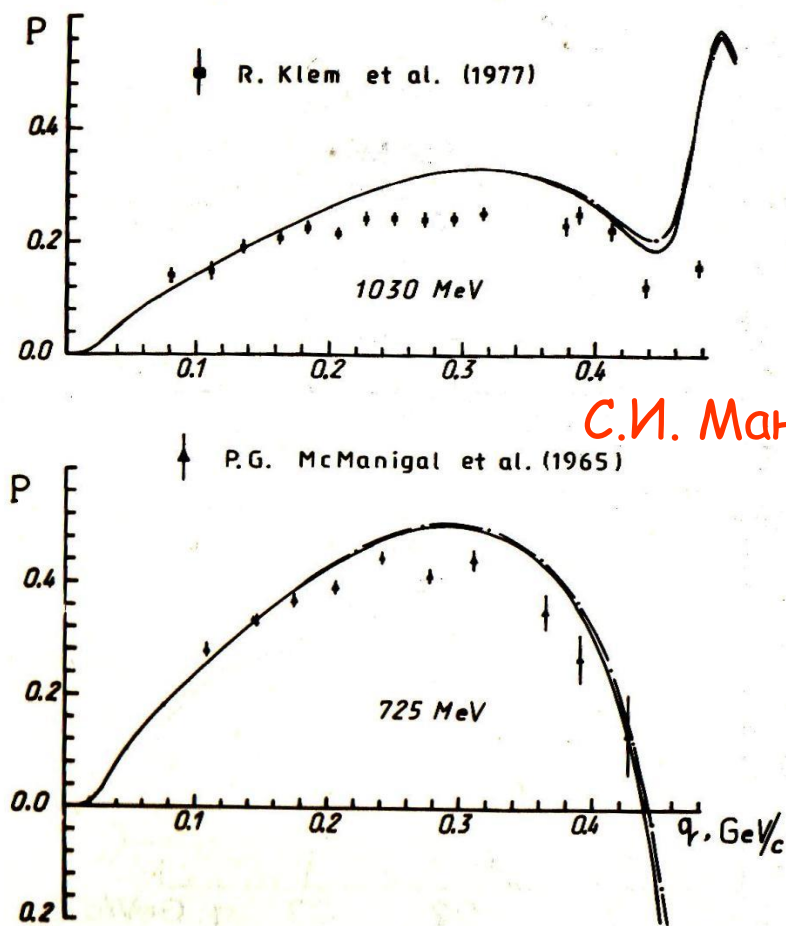
Так как  $a_j(A)/a_j({}^3\text{He}) \sim \langle \rho_A^j(r) \rangle / \langle \rho_{{}^3\text{He}}^j(r) \rangle \sim (1+\alpha)^j$  и средняя нуклонная плотность в ядрах с  $A > 3$  больше, чем в  ${}^3\text{He}$  ( $\alpha > 0$ ), то отношение  $(\sigma_A / \sigma_{{}^3\text{He}})_j$  должно увеличиться с ростом  $j$ .

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

$$Q^2 \geq 1.4 \text{ GeV}^2 / c^2$$

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

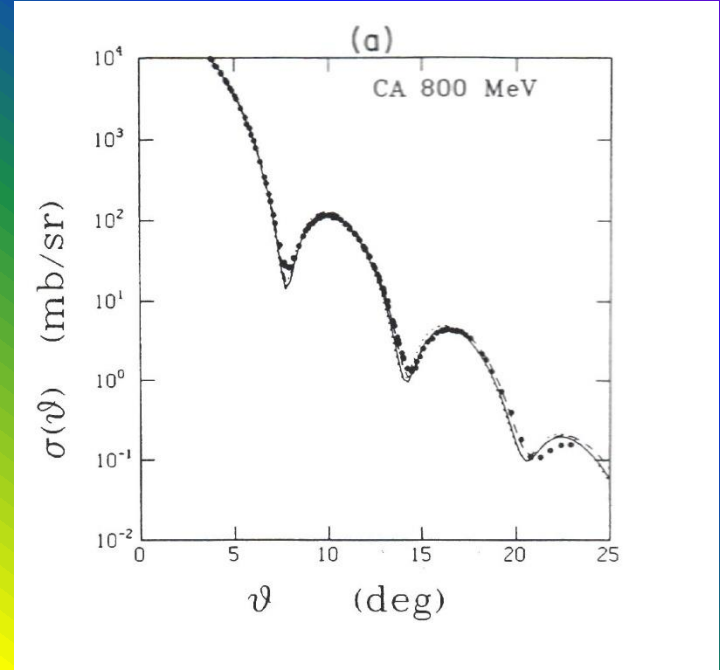
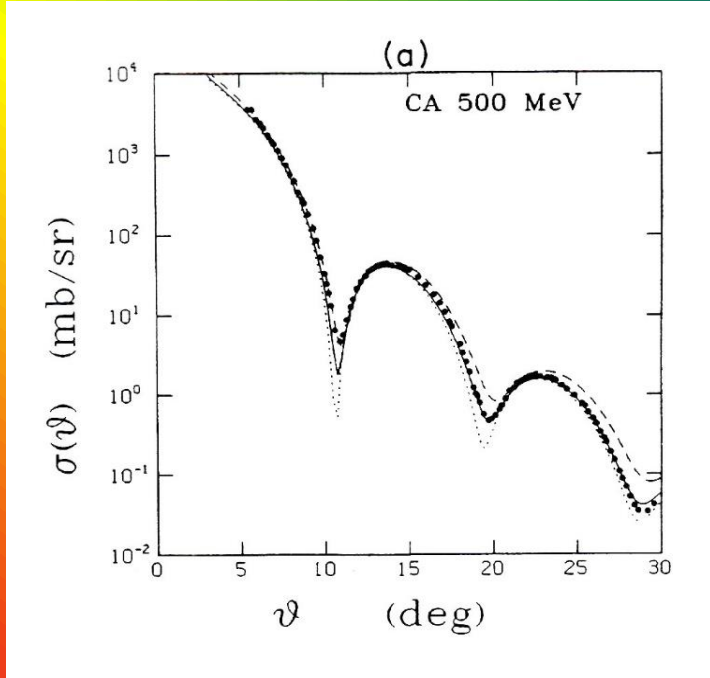
$$r(A, {}^3\text{He}) = \frac{A(2\sigma_{ep} + \sigma_{en})}{3(Z\sigma_{ep} + N\sigma_{en})} \frac{3Y(A)}{AY({}^3\text{He})} R_{\text{rad}}^A$$



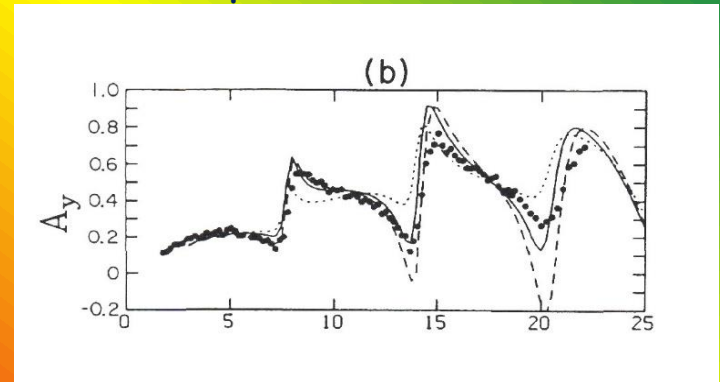
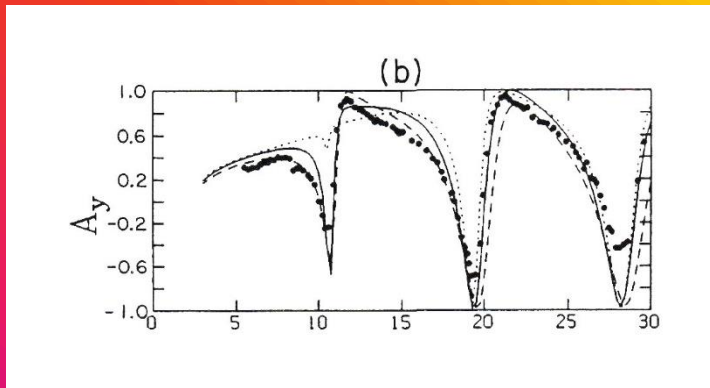
С.И. Манаенков

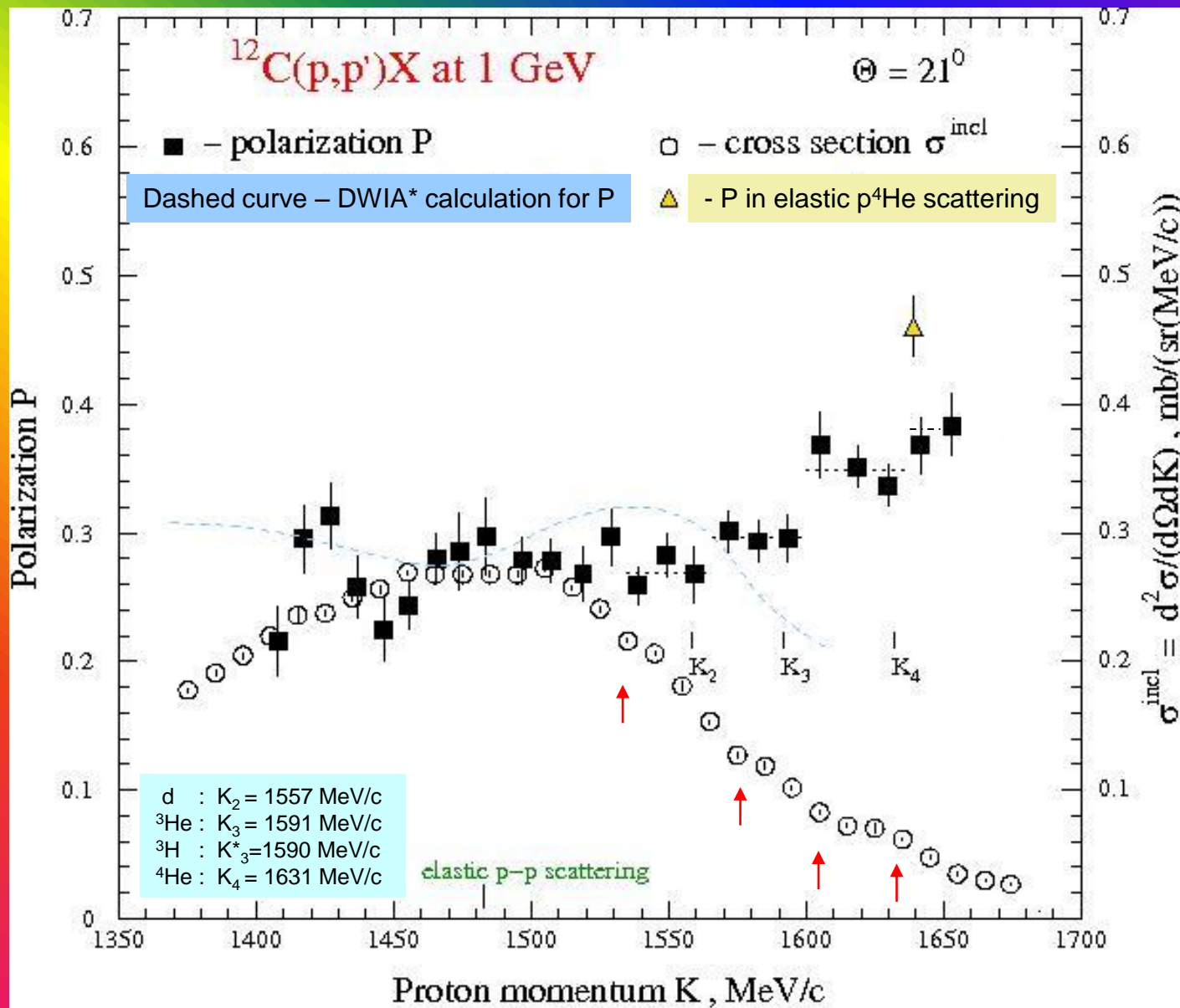
Figure 6. The polarization  $P$  of the scattered protons. The theoretical results for  $P$  are shown in solid lines (the SSC/A wave function) and dash-dotted ones (the EH wave function). The data are from refs. [20, 25].

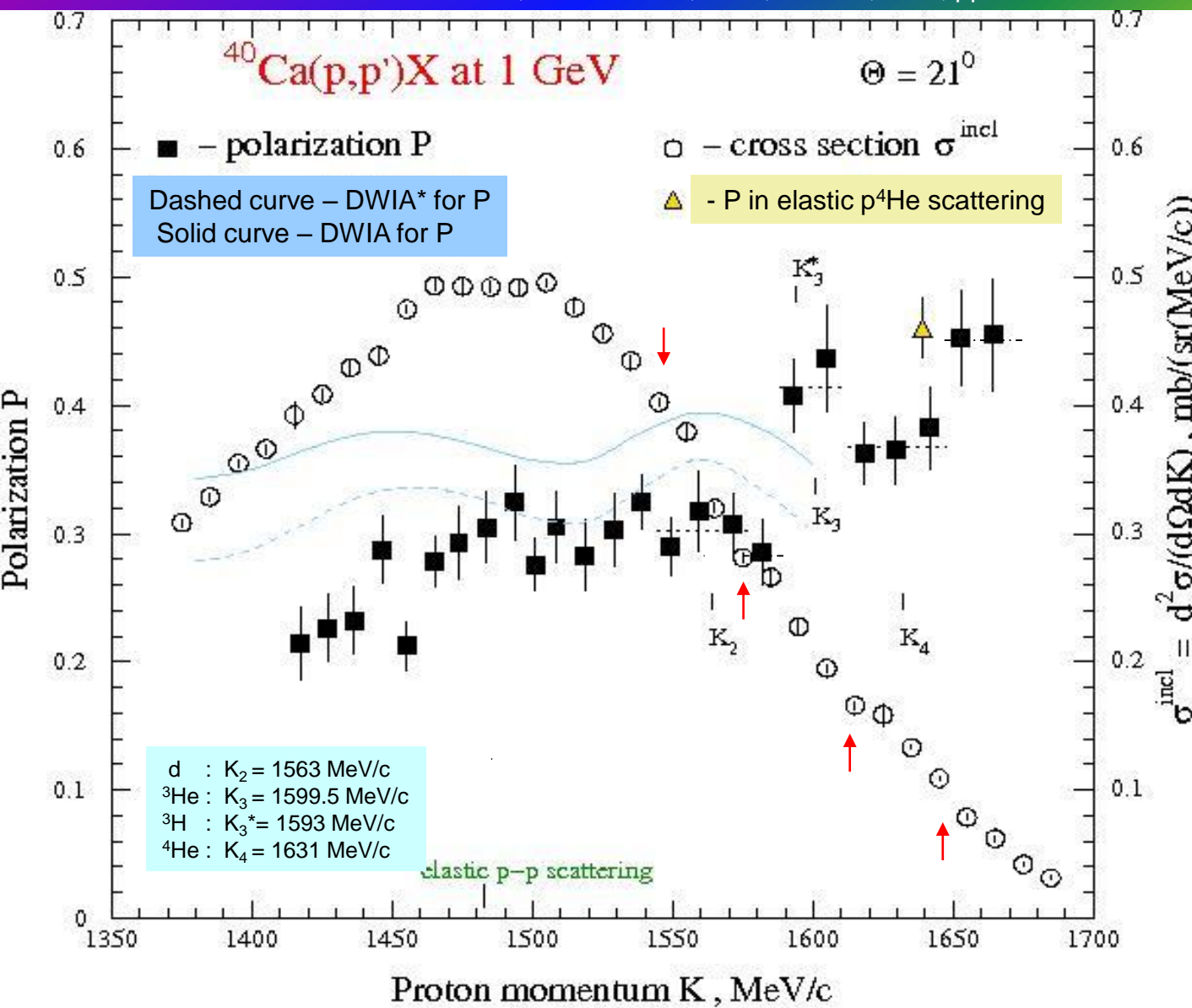
N. Ottenstein, S.J. Wallace, and J.A. Tjon, PRC 38 (1988), 2272



Упругое рассеяние протонов на ядрах  $^{40}\text{Ca}$







- Вычисление  $K_i$ :**
1. Остаточное ядро в основном состоянии.
  2. Корреляция покоится.
  3. Масса корреляции - масса свободного простейшего ядра ( $d$ ,  $^3\text{He}$ ( $^3\text{H}$ ),  $^4\text{He}$ ).

