

# Исследование реакции $p + A \rightarrow p' + X$ 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 - 2016

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. Трокофьев,  
С. Труш, А. Шведчиков

# План доклада

- \* Эффект от рассеяния на нуклонных корреляциях в ядрах в инклюзивном  $(e, e')$  - эксперименте при энергии  $\sim 4.6$  ГэВ (JLAB) CLAS Collaboration, PRL 96, 082501 (2006)
- \* Методика  $(p, p')$  эксперимента при энергии 1 ГэВ (PNPI)
- \* Результаты исследований
- \* Экспериментальные планы

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

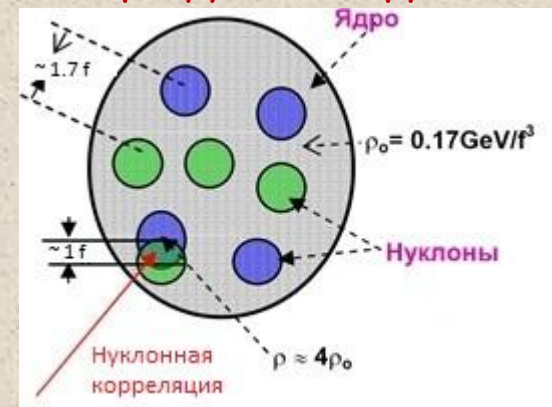
K. S. Egiyan,<sup>1,34</sup> N. B. Dashyan,<sup>1</sup> M. M. Sargsian,<sup>10</sup> M. I. Strikman,<sup>28</sup> L. B. Weinstein,<sup>27</sup> G. Adams,<sup>30</sup> P. Ambrozewicz,<sup>10</sup>

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).**

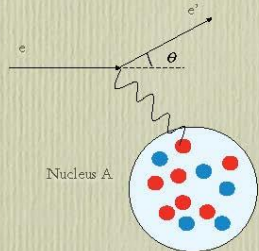
A characteristic feature of these dynamics is that the momentum  $k$  of a high-momentum nucleon is balanced, not by the rest of the nucleus, but by the other nucleons in the correlation. Therefore, for a 2-nucleon ( $NN$ ) SRC, the removal of a nucleon with large momentum,  $k$ , is associated with 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 ?**



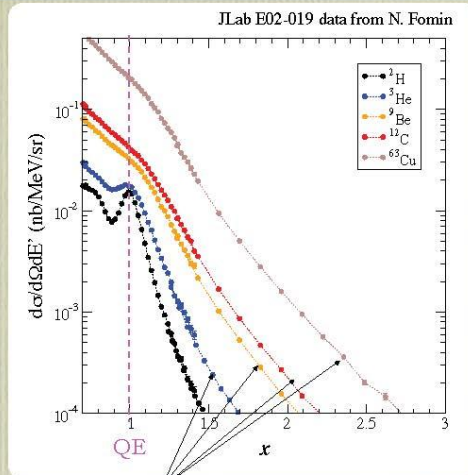
# Inclusive scattering at large x

At  $x \approx 1$



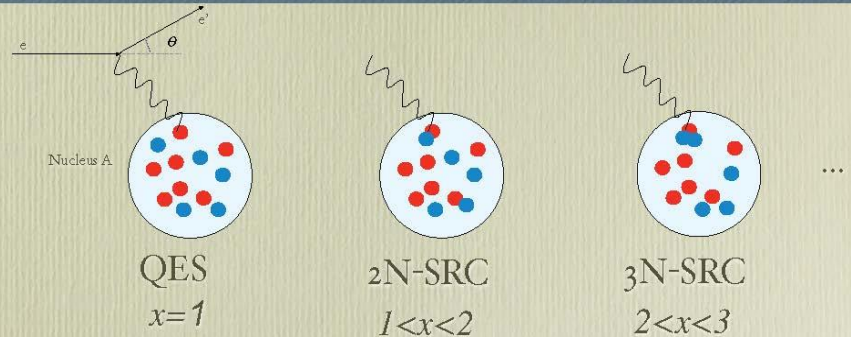
Quasi-Elastic Scattering

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



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.

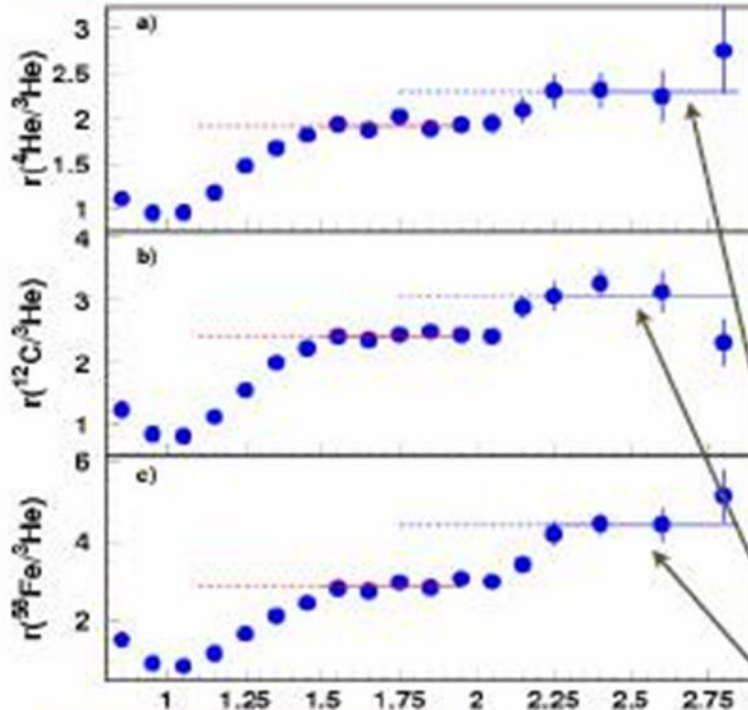
В (e,e')-эксперименте в JLAB при энергии  $\sim 4.6$  ГэВ в области  $Q^2 > 1.4$  GeV<sup>2</sup>/c<sup>2</sup> и  $x_B > 1.3$  ( $K_N > K_F$ ), где вклад от рассеяния на нуклонах среднего ядерного поля подавлен, обнаружены  $x_B$ -интервалы, в пределах которых отношения сечений рассеяния на ядрах не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

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

## CLAS-collaboration, PRL, 96 (2006) 082501

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.

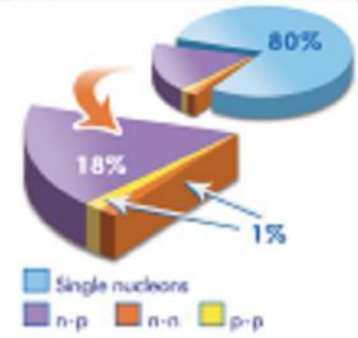
	$a_2(A/{}^3\text{He})$	$a_{2N}(A)$ (%)	$a_3(A/{}^3\text{He})$	$a_{3N}(A)$ (%)
${}^3\text{He}$	1	$8.0 \pm 1.6$	1	$0.18 \pm 0.06$
${}^4\text{He}$	$1.93 \pm 0.02 \pm 0.14$	$15.4 \pm 3.3$	$2.33 \pm 0.12 \pm 0.19$	$0.42 \pm 0.14$
${}^{12}\text{C}$	$2.41 \pm 0.02 \pm 0.17$	$19.3 \pm 4.1$	$3.05 \pm 0.14 \pm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

# Summary

SRCs are an important component to nuclear structure:

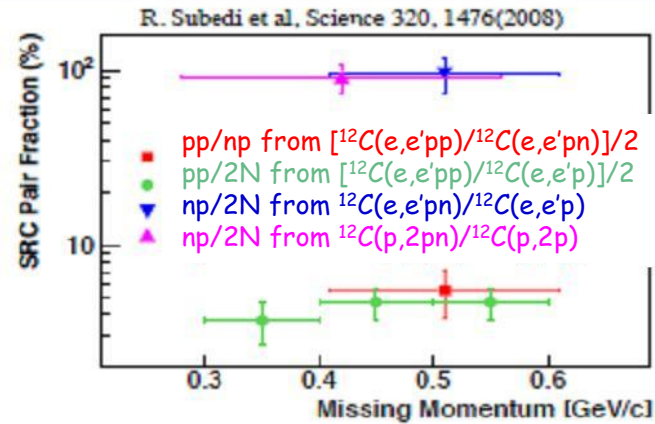
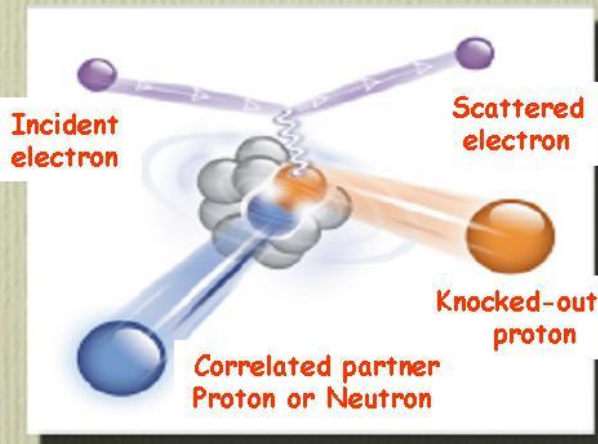
~20% of nucleons in SRC

Very few (~1%) p-p, n-n pairs



## Isospin Symmetry of SRCs ?

Two-nucleon knock-out experiment



Simple SRC model assumes isospin independence

Data show large asymmetry between np, pp pairs:  
Qualitative agreement with calculations; effect of tensor force  
Huge violation of often assumed isospin symmetry

Tomas Jefferson National Accelerator Facility

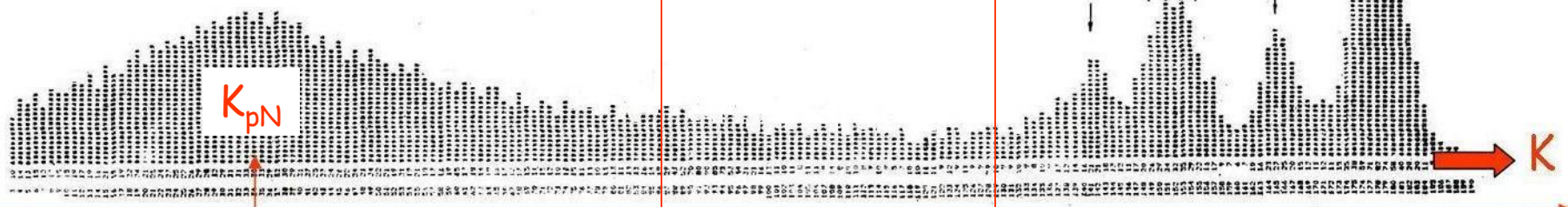


$\Theta = 12.8^\circ$

Мишень C

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

Квазиупругое (p,pN) рассеяние



$$K_N^{\min} = F(K) \quad K \uparrow \Rightarrow K_N^{\min} \uparrow \quad K_N^{\min} > K_F (\sim 250 \text{ MeV}/c)$$

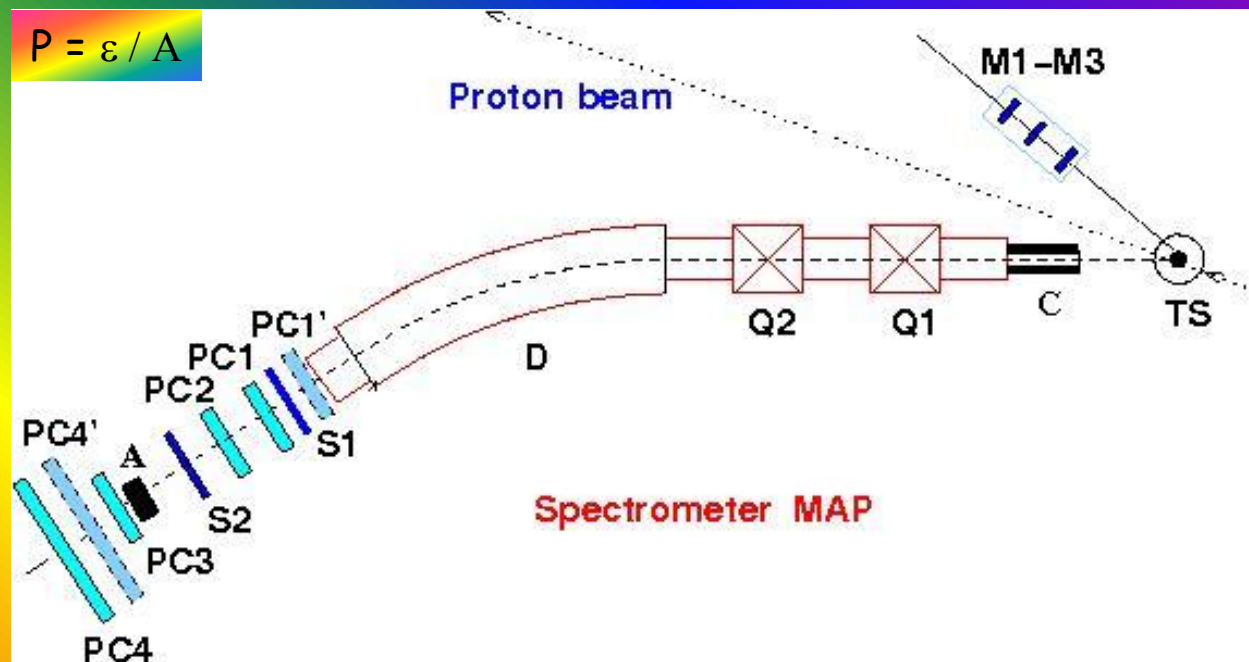
Измерение поляризации и дифференциальных сечений в реакции  $p + A \rightarrow p' + X$  в широкой области импульсов вторичных протонов  $K$ , включая область, в которой существенно подавлен вклад рассеяния на отдельных ядерных нуклонах. Измерения осуществляются в узких интервалах импульсов  $\Delta K \sim 10 \text{ МэВ}/c$  с шагом по  $K \sim 10 \text{ МэВ}/c$ .

**Кинематика:** Угол рассеяния  $\Theta = 21^\circ$ . В области  $K > K_{pN}$  переданный ядру импульс  $Q$  практически не меняется ( $600 \text{ МэВ}/c$ ) и больше удвоенного импульса Ферми ( $K_F \sim 250 \text{ МэВ}/c$ ).

2013 -2016

$$P = \varepsilon / A$$

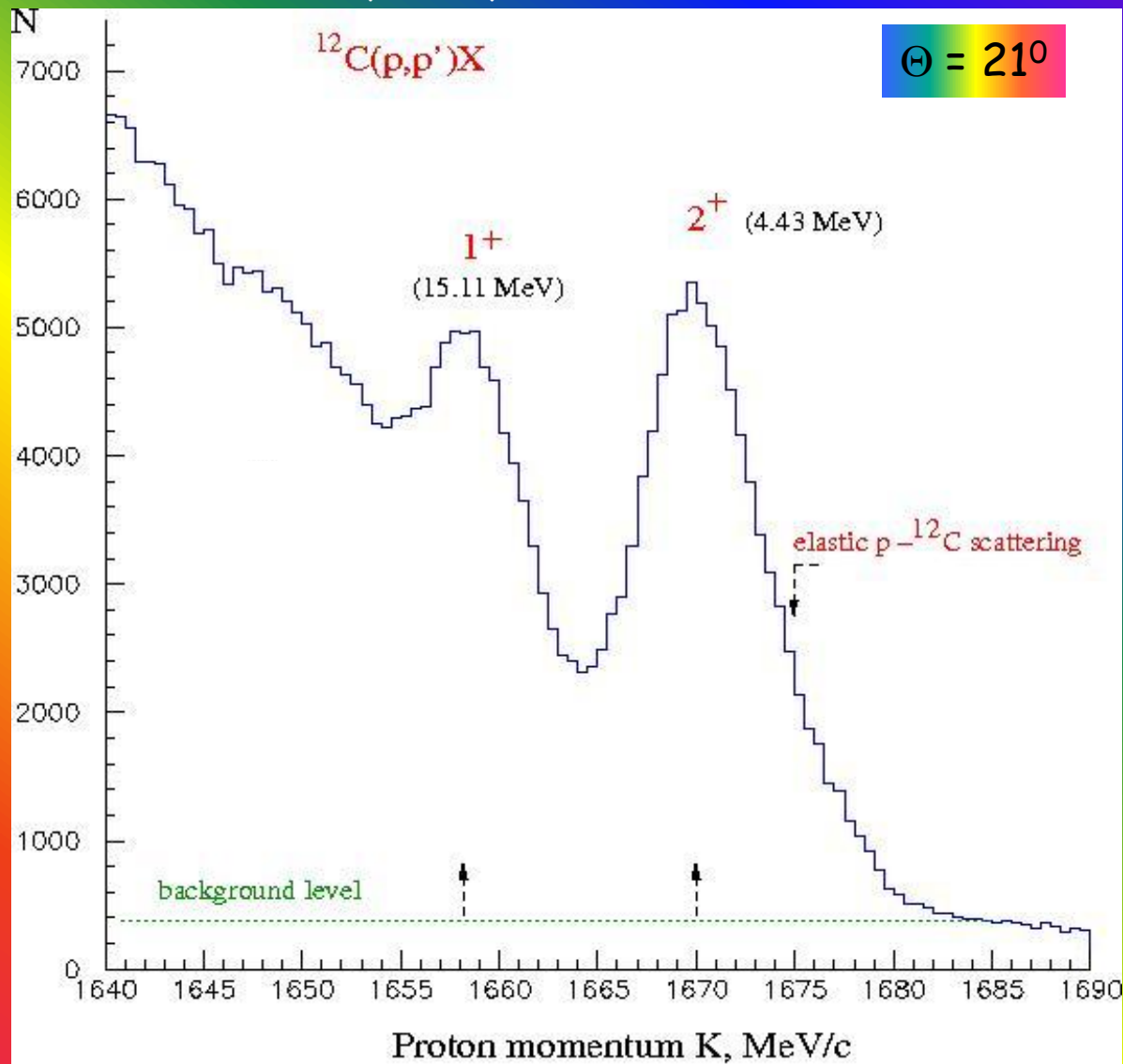
Main parameters of the MAP polarimeter	
Carbon block thickness, [mm]	155
Polar angular range, [deg]	3 - 16
Average analyzing power	> 0.2
Efficiency, [%]	~ 4



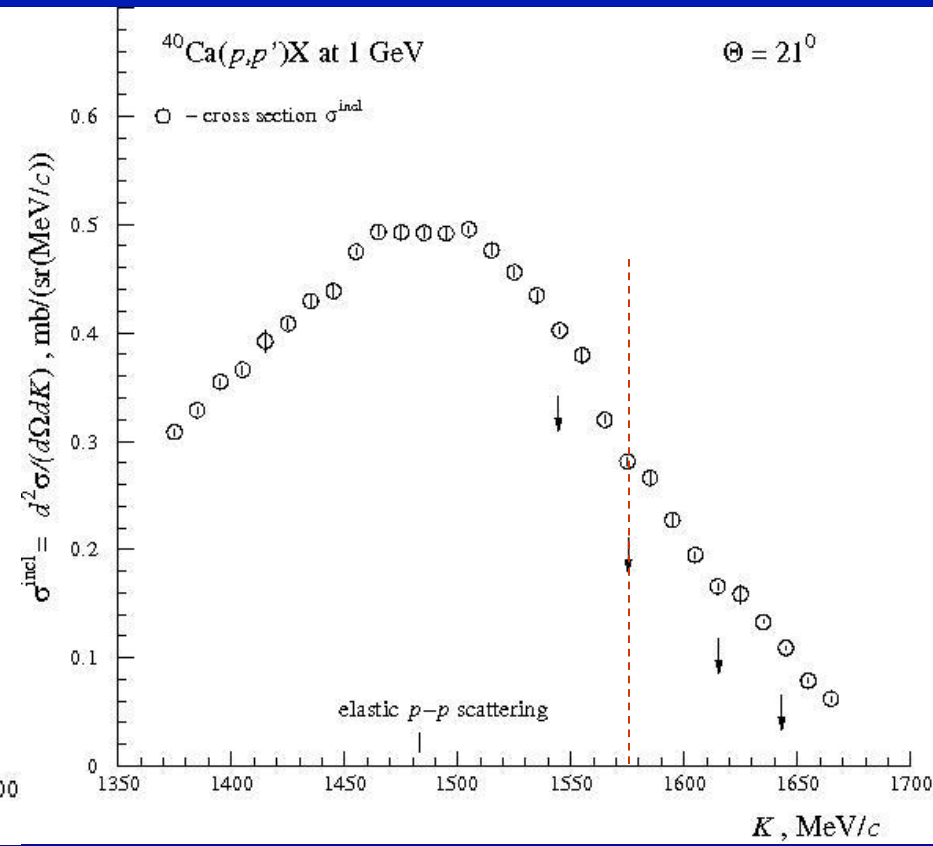
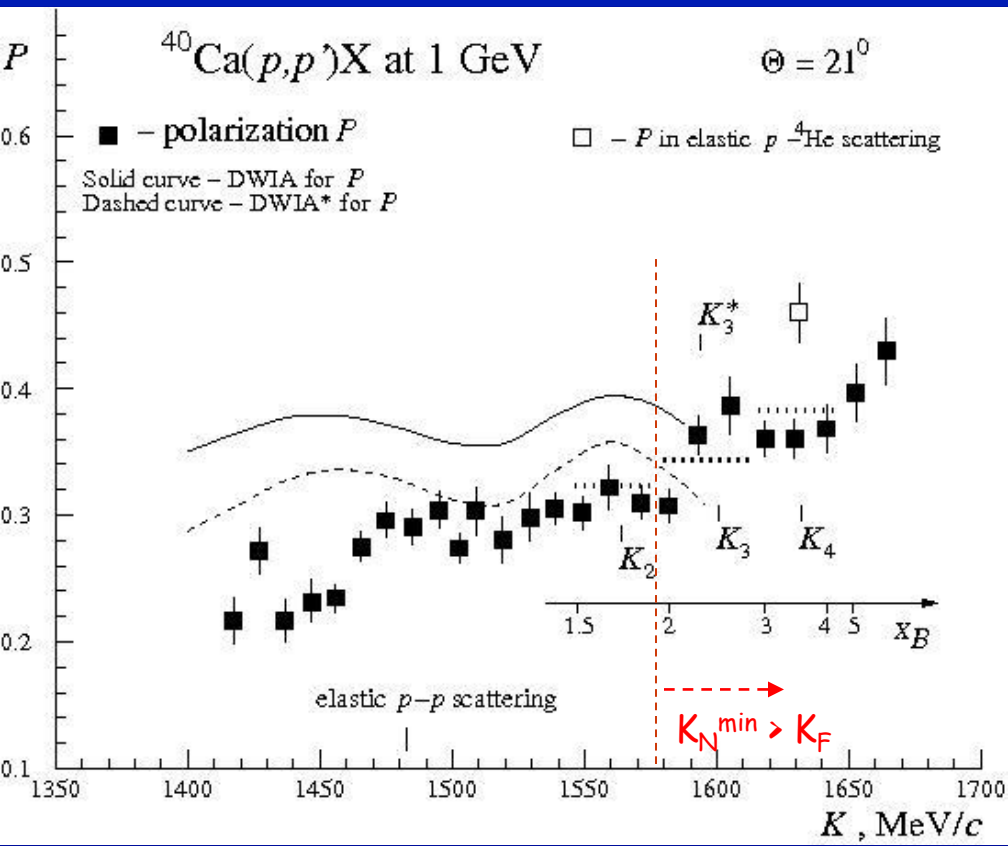
Target	Dimensions [mm] thickness x width x height	Isotope concentration [%]	Density g/cm <sup>3</sup>
CH <sub>2</sub>	4.0 x 10 x 70		1.0
C	4.0 x 10 x 70	98.9	1.60
CH <sub>2</sub> foil	0.1 x 4 x 10		1.0
<sup>12</sup> C	4.0 x 7 x 10	98.9	1.60
<sup>40</sup> Ca	4.0 x 7 x 10	97.0	1.55
<sup>28</sup> Si	4.0 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

CH<sub>2</sub>, C → Θ = 12.25°, 13.5°, 16°, 18.5°, 21°, 23°



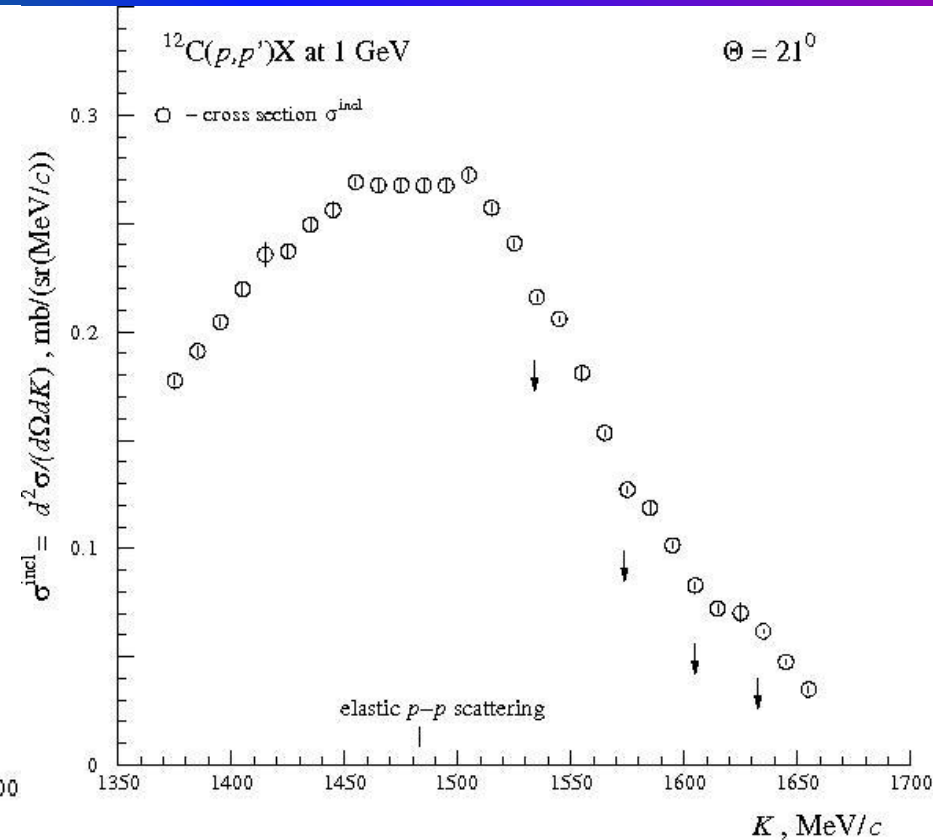
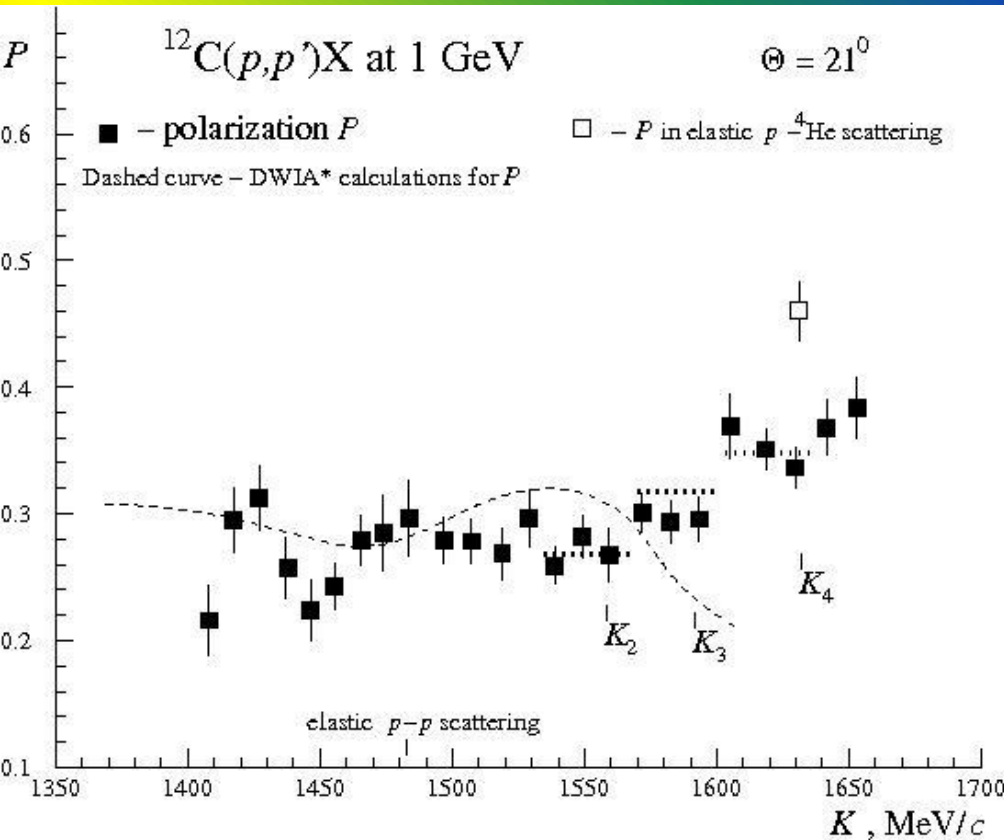
$1^+ \rightarrow$  R.D. Viollier, Annals of Physics 93, 335-368 (1975).



$K_N^{\min} = F(K) \quad K \uparrow \longrightarrow K_N^{\min} \uparrow$   
 at  $K > \sim 1580 \text{ MeV/c}$   
 $K_N^{\min} > K_F (\sim 250 \text{ MeV/c})$

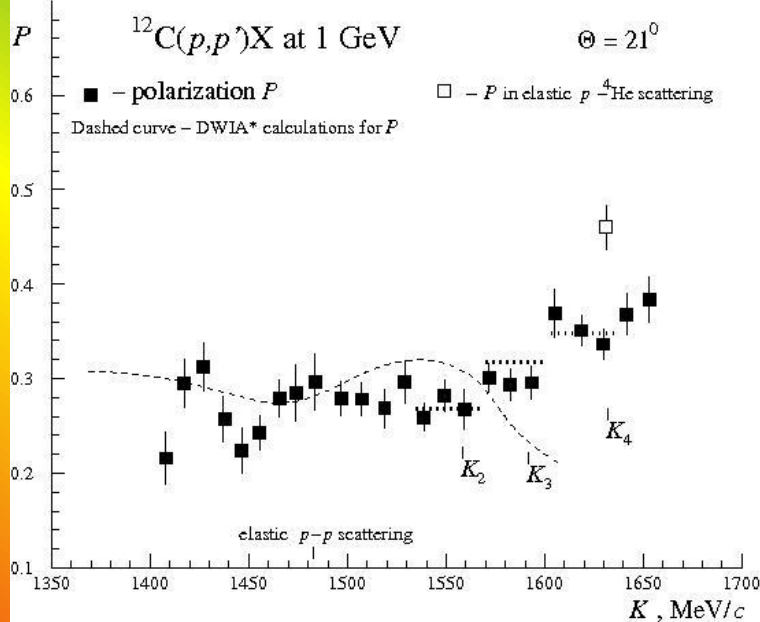
- Вычисление  $K_i$ :**
1. Остаточное ядро в основном состоянии.
  2. Корреляция покоится.
  3. Масса корреляции - масса свободного простейшего ядра ( $d, {}^3\text{He}({}^3\text{H}), {}^4\text{He}$ ).

$x_B = Q^2 / 2m_N v$   
 $v = E_0 - E(K)$   
 $Q$  - practically constant  
 $\sim 600 \text{ MeV/c}$   
 $x_B = F(K)$



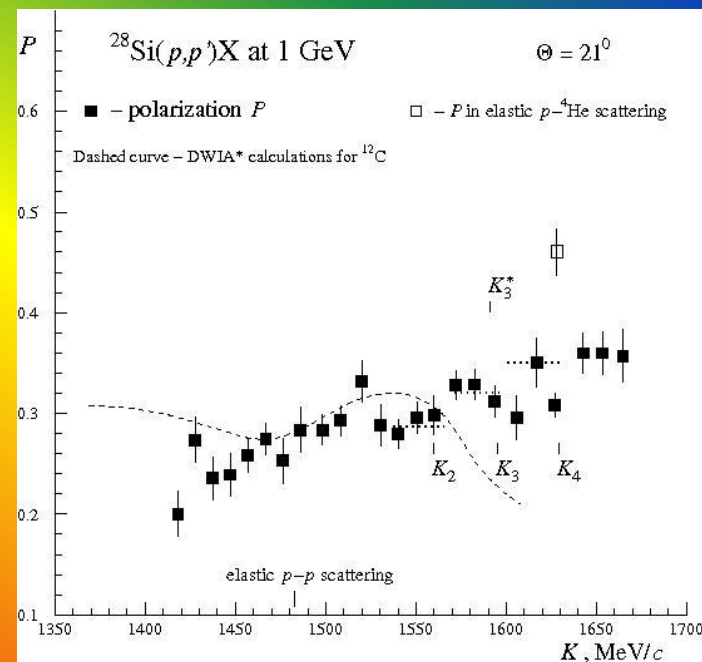
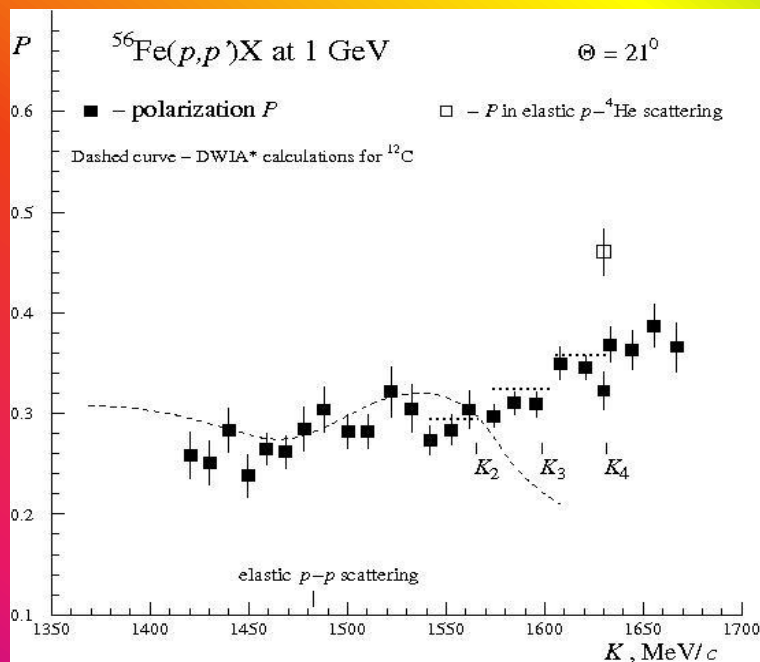
### Вычисление $K_i$ :

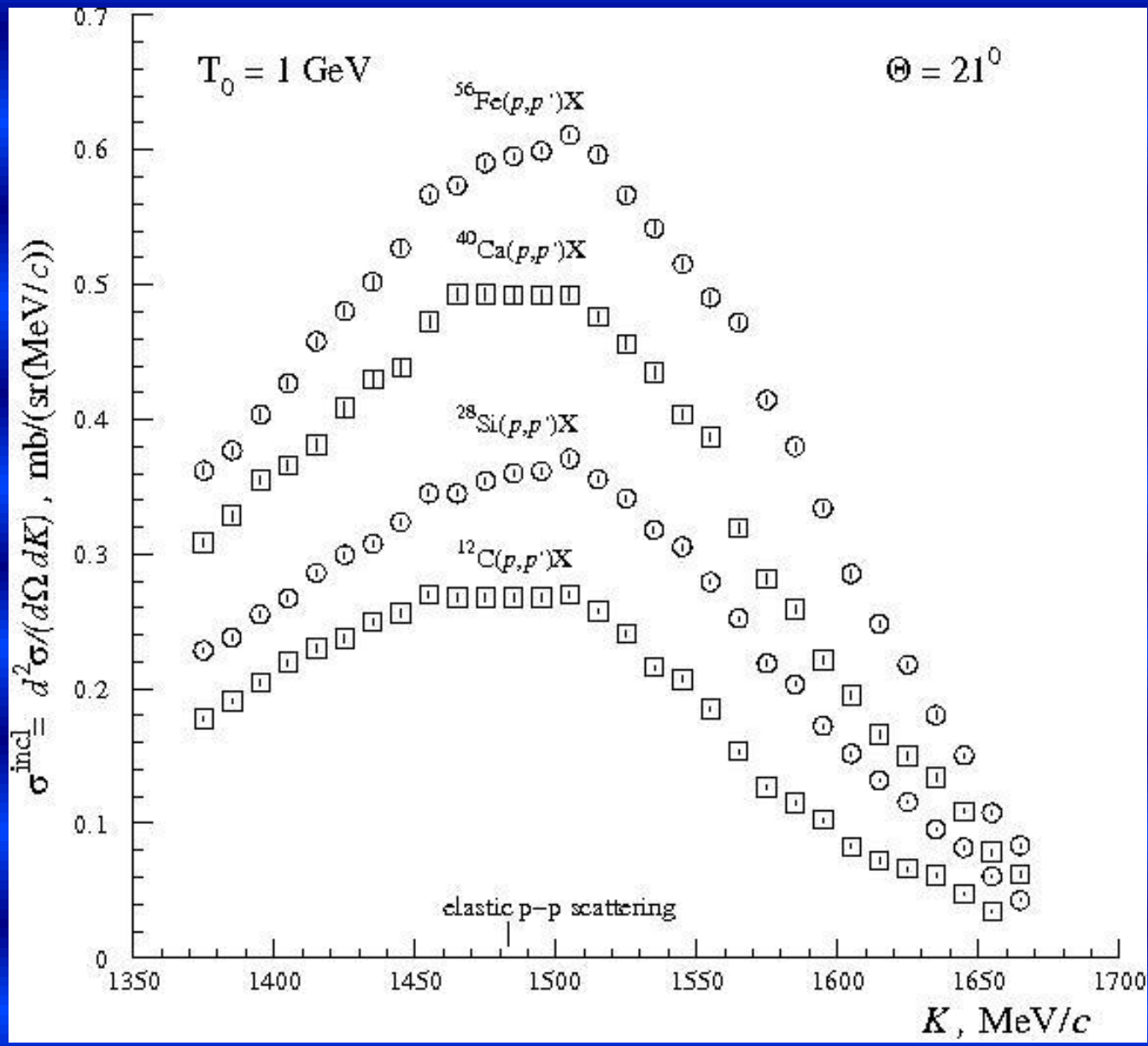
1. Остаточное ядро в основном состоянии.
2. Корреляция покоится.
3. Масса корреляции - масса свободного простейшего ядра ( $d$ ,  $^3\text{He}$ ( $^3\text{H}$ ),  $^4\text{He}$ ).



## Эксперимент 2015 - Февраль

Сравнение :





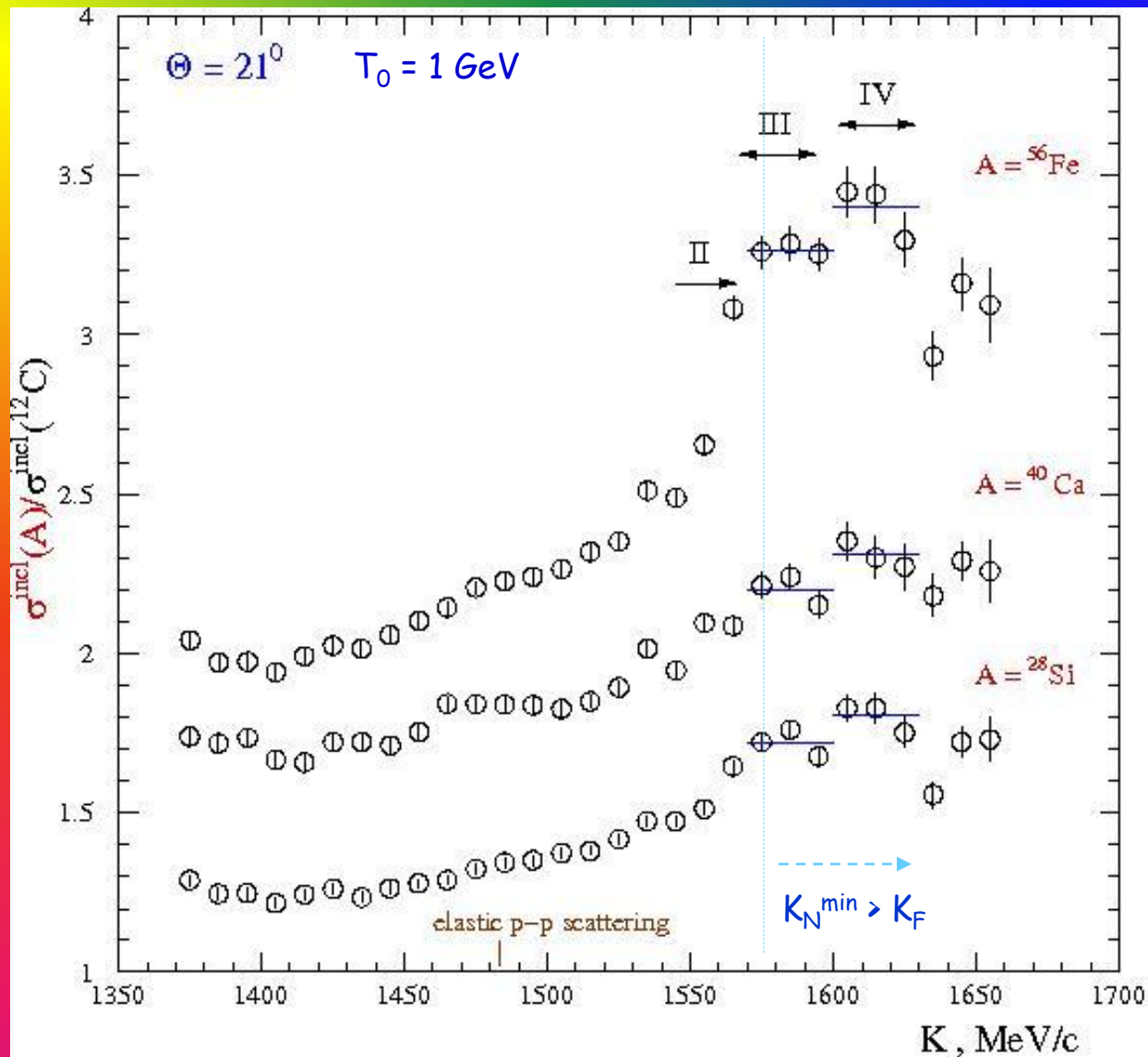
Систематика :

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

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

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

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



Систематика :

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

$$F/C = 56/12 = 4.667$$

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

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

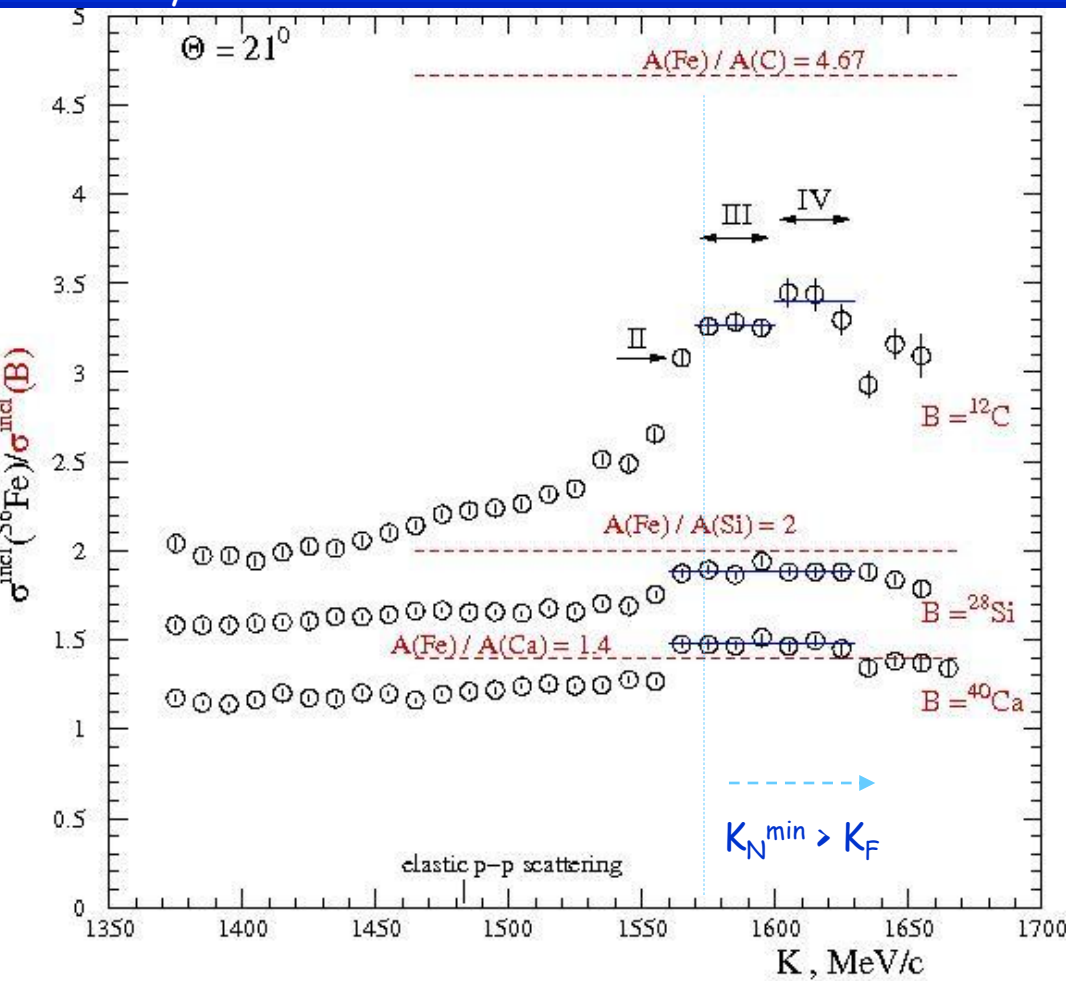
$$\delta\sigma/\sigma(\text{Si}/\text{C}) = \pm 3.7\%$$

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

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

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





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

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 :**

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

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

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

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

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

## 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  $K > \sim 1580$  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  $\Delta K$  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 можно связать с универсальностью высокоимпульсной компоненты волновой функции ядер при  $K_N > K_F$  и предположительно рассматривать как рассеяние на ядерных малонуклонных корреляциях.

## Ближайшие экспериментальные планы :

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

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

### Ожидается

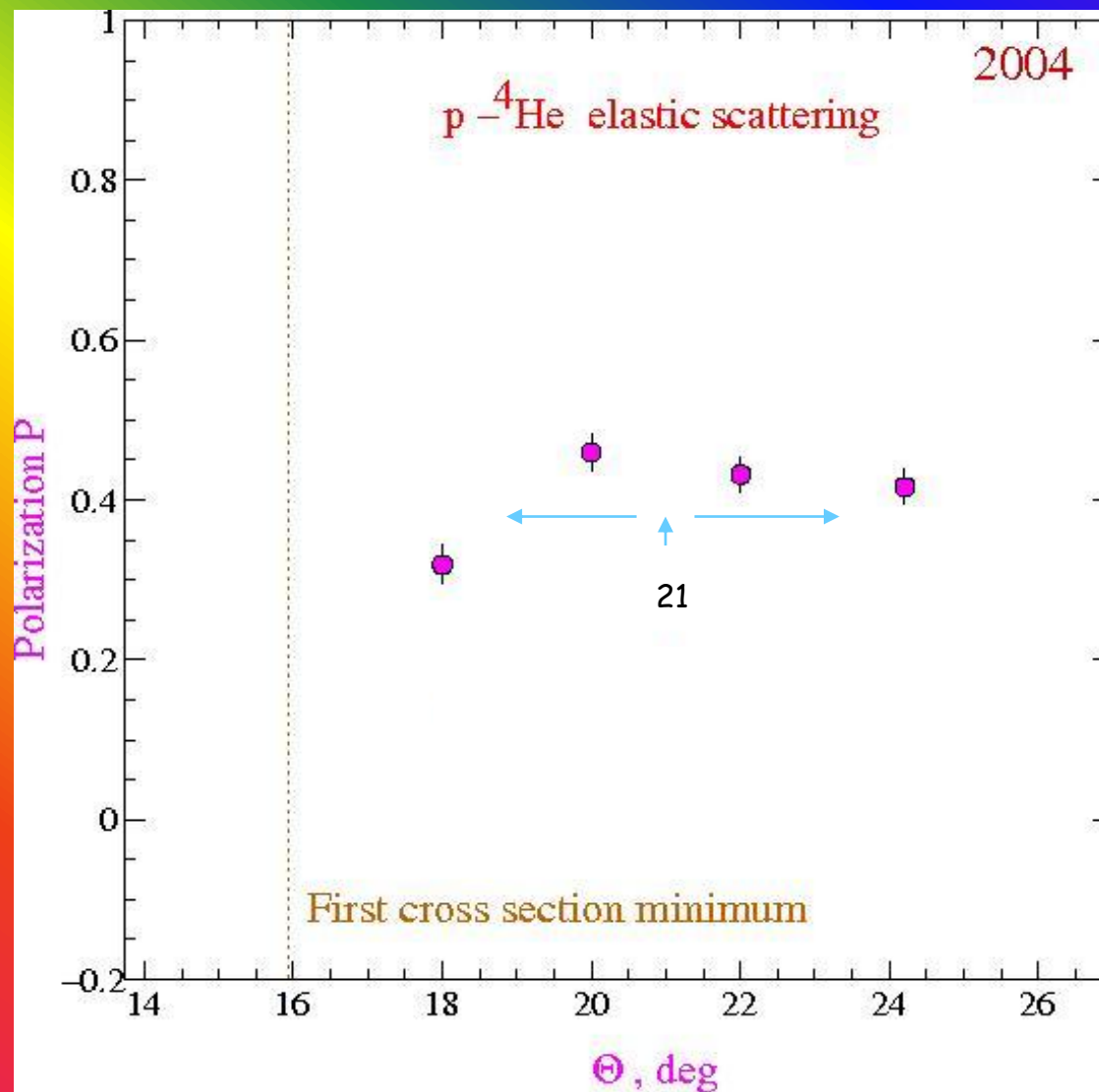
- ★ увидеть полочку в отношениях сечений рассеяния на ядрах, соответствующую рассеянию на двухнуклонных корреляциях.
- ★ что, в пределах импульсных интервалов, соответствующих рассеянию на различных корреляциях, поляризация будет расти с импульсом.

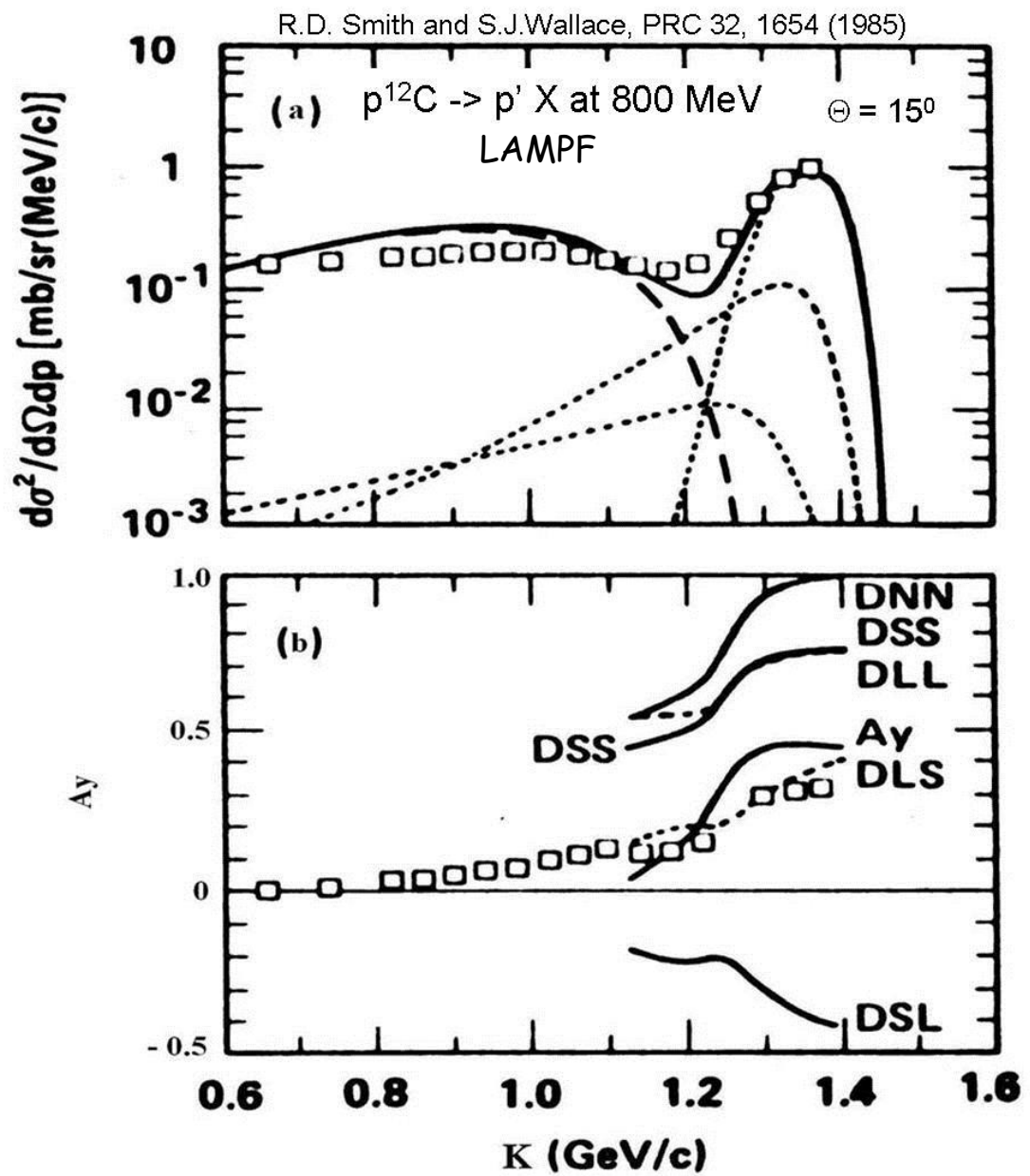
### Перспективные планы:

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

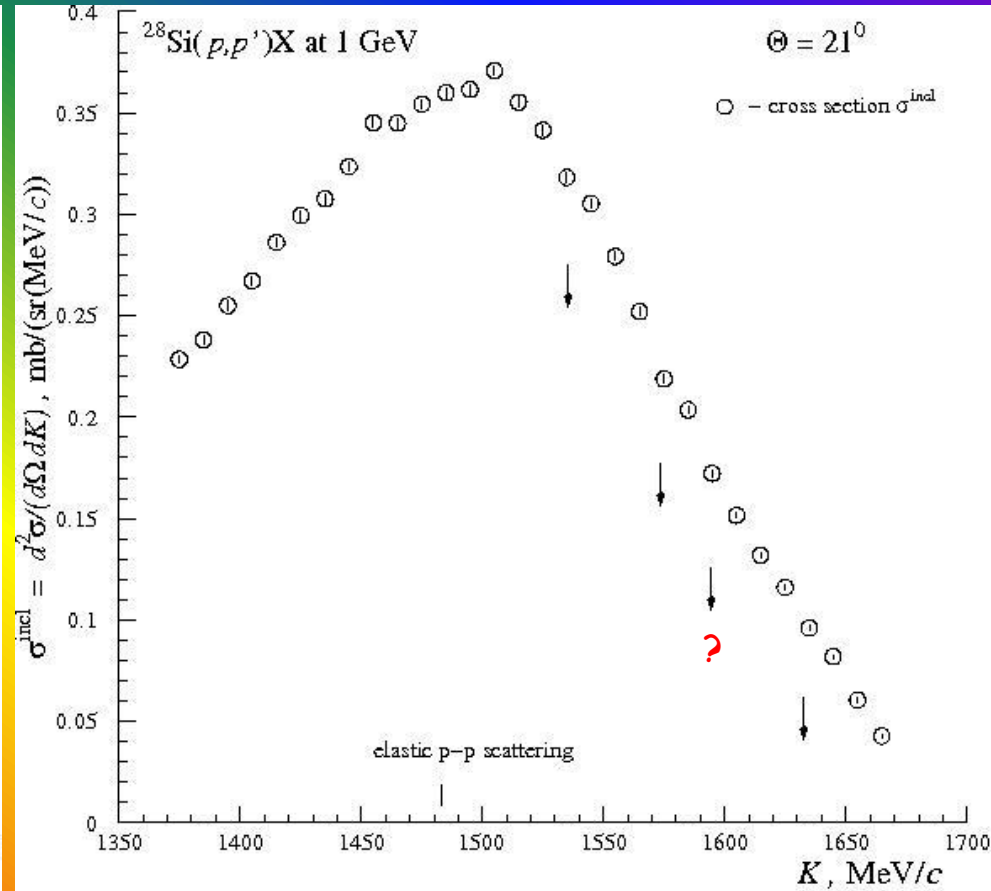
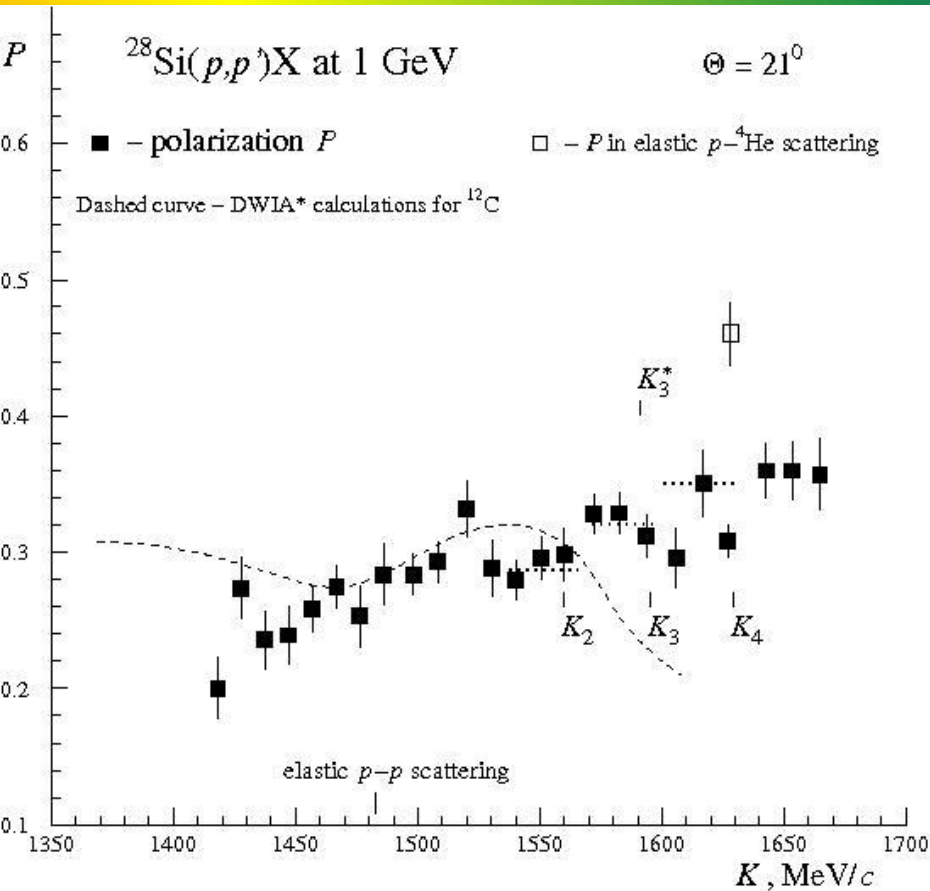
# Back Slides

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

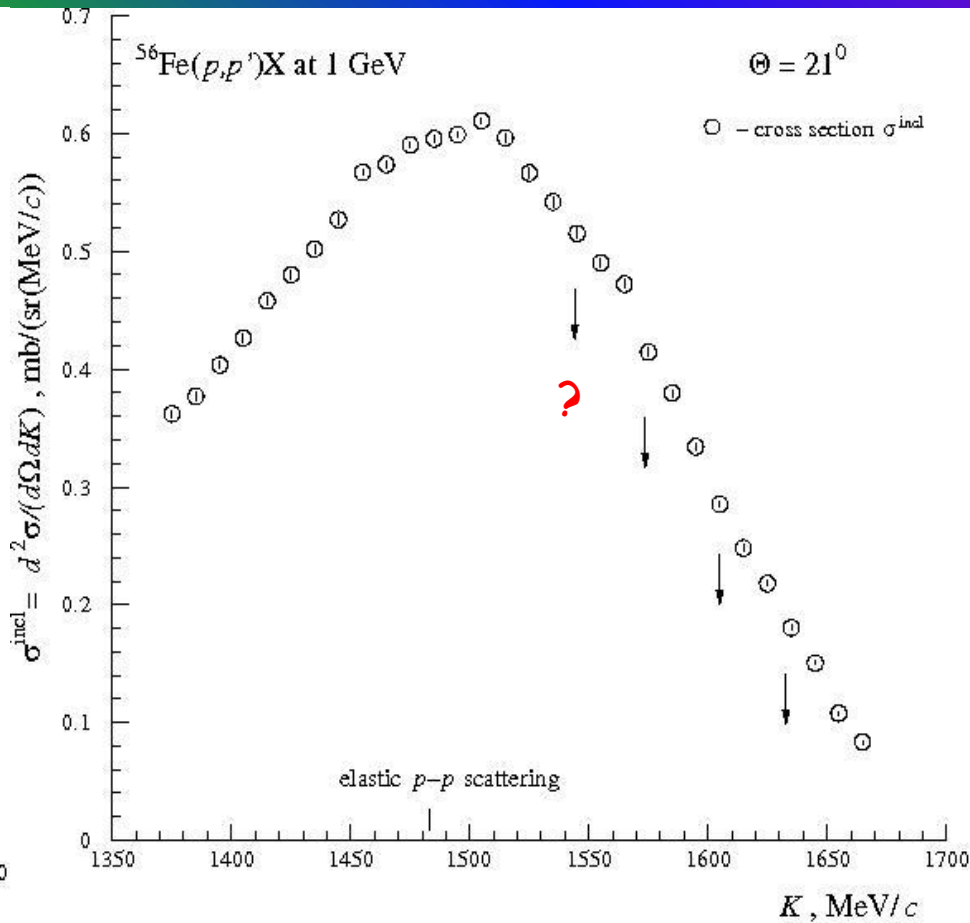
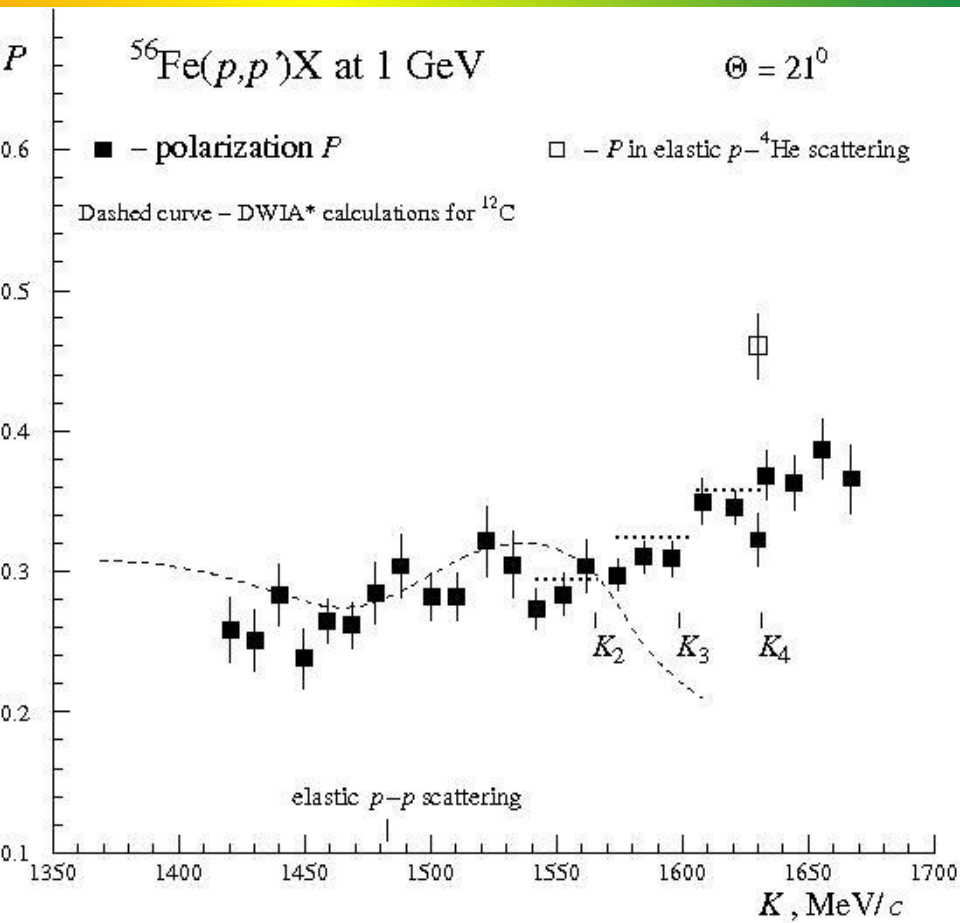




# Эксперимент 2015 - Февраль

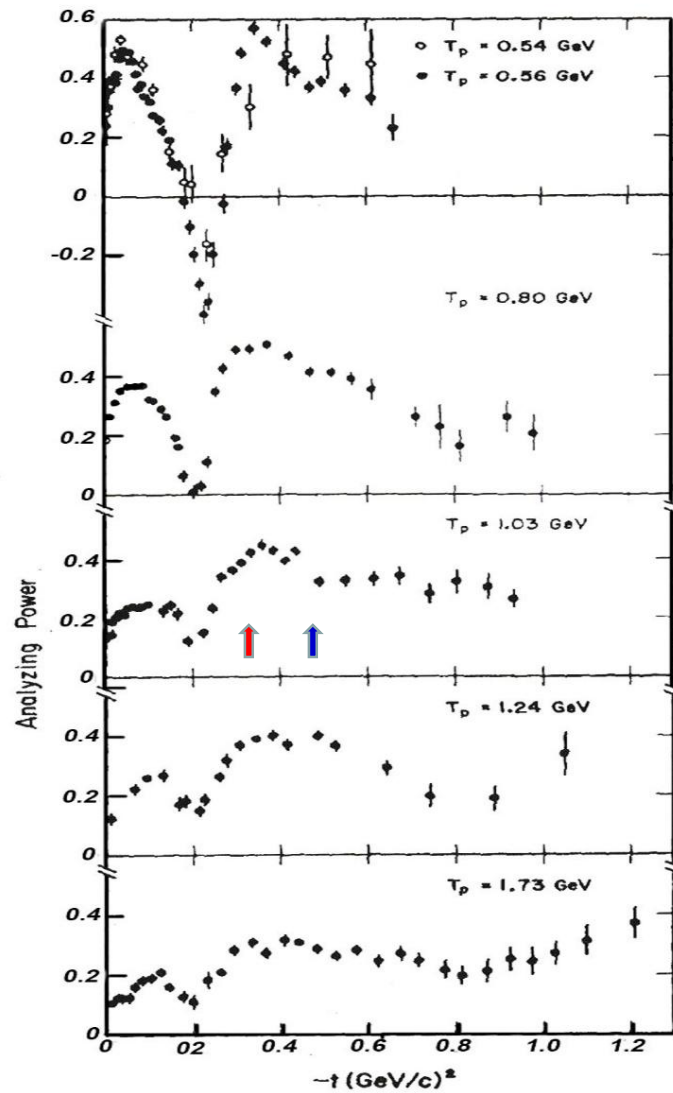


# Эксперимент 2015 - Февраль





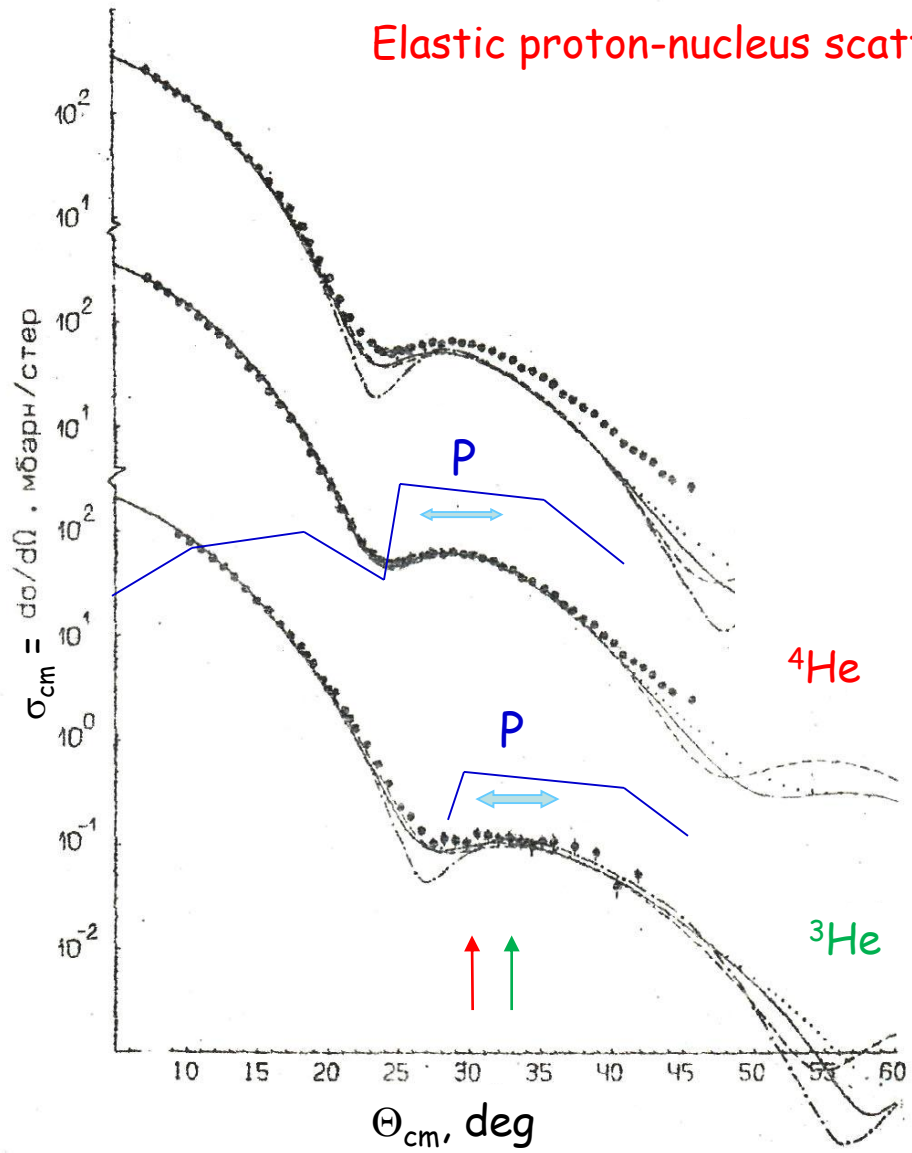
Анализирующая способность (Au)

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

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

### Elastic proton-nucleus scattering at 1 GeV

P - polarization



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

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

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

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

$J = 1.973$

$^4\text{He}$

$\Theta_{cm} = 32.73$

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

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

$J = 2.293$

$^3\text{He}$