

Исследование поляризационных эффектов в квазиупругом рассеянии протонов на ядрах при энергии 1GeV

Александр Киселёв

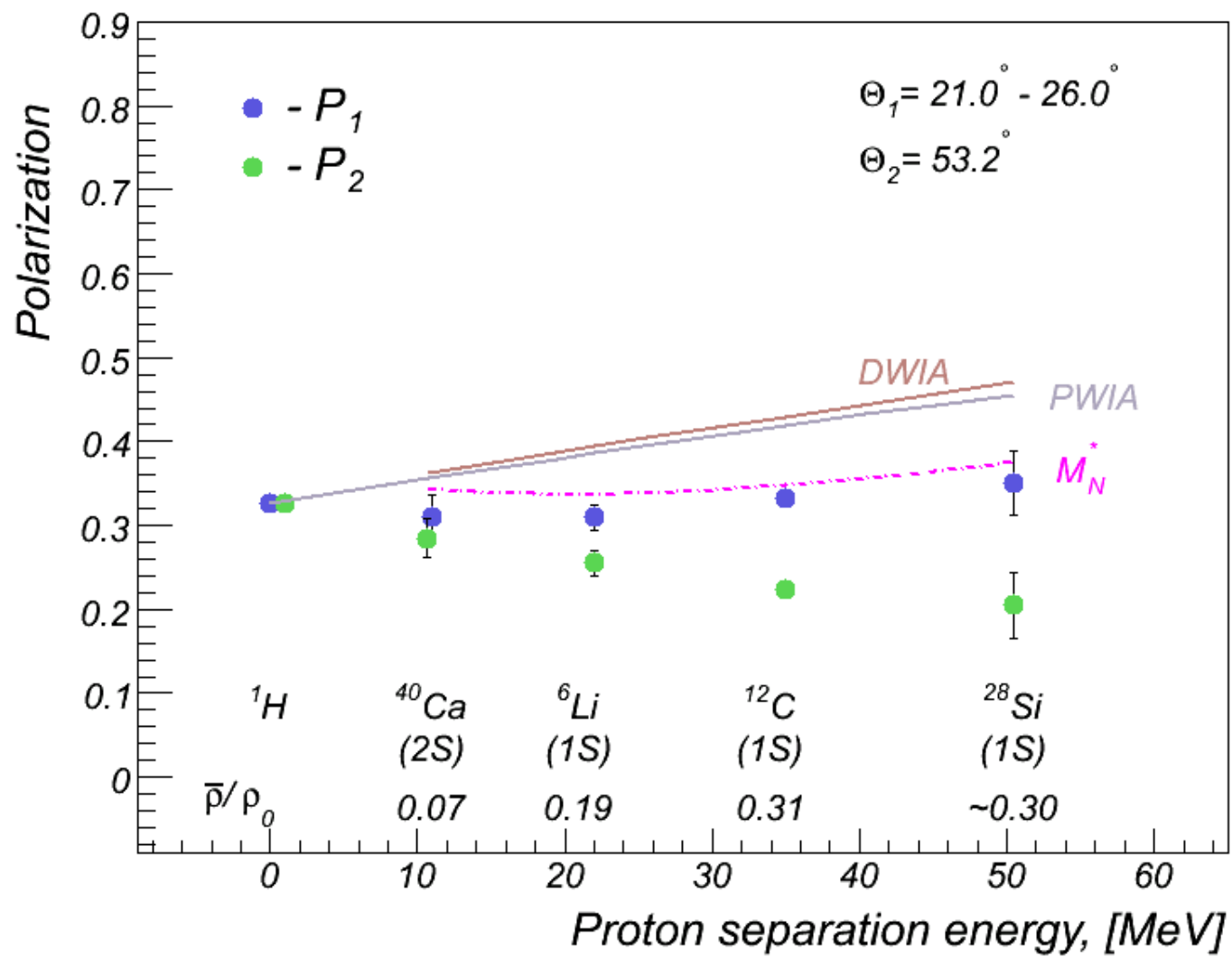
ОФВЭ ПИЯФ, Гатчина, 03.04.2012

Исследование поляризации
в реакции (p,2p) с протонами
S-оболочек ядер ${}^6\text{Li}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{28}\text{Si}$ и ${}^{40}\text{Ca}$
при энергии 1GeV

Содержание доклада

- Постановка задачи
- Экспериментальная установка
- Методика обработки данных
- Моделирование установки методом Monte-Carlo
- Представление экспериментальных данных
- Физическая интерпретация результатов

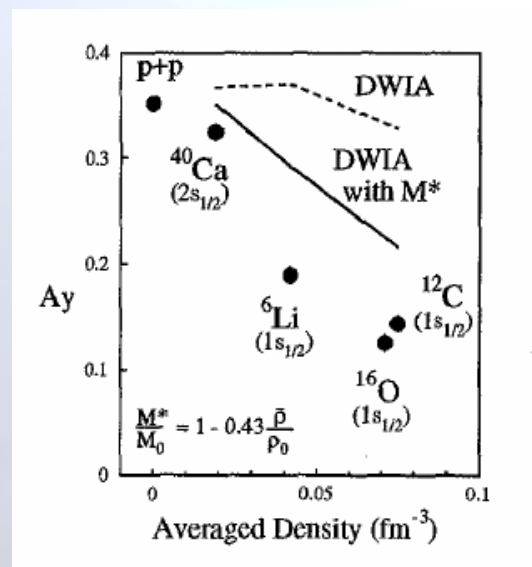
- Положения, выносимые на защиту



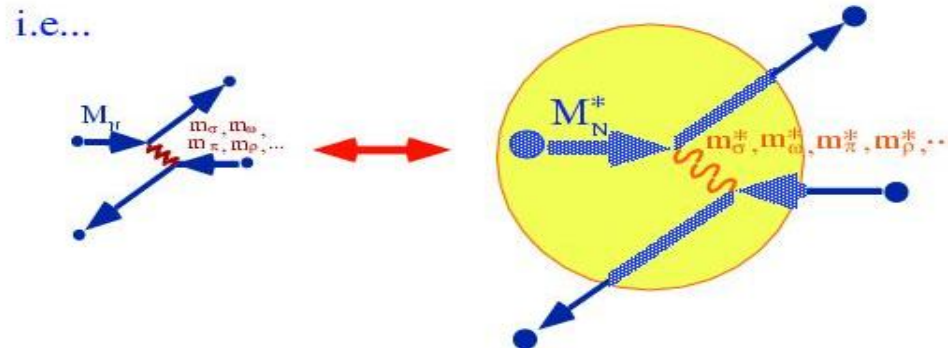
Постановка задачи

Физическая мотивация

- Конец 1990-х годов:
 - Данные TRIUMF на ^{16}O при 500 MeV
 - Данные Осака при 400 MeV (^{40}Ca .. ^{12}C)
- > анализирующая способность A_y в (p,2p) резко подавлена по сравнению с модельными расчётами!



- **Modification of nucleon spinor**
Dirac approach : strong Scaler and Vector potential
 $M^* = M + S \rightarrow$ enhancement of lower component
(Relativistic Distortion Effect)
- **Modification of meson mass**
Modification of vacuum by quark field
(Partial restoration of chiral symmetry)



Постановка задачи

- Повторить эксперимент при большей энергии, в той же идеологии (1 GeV, S-оболочки, нулевой импульс ядра-остатка):
 - Меньше искажения
 - Меньше off-shell эффекты
 - Больше доступный диапазон по переданному импульсу
 - Нет эффективной поляризации
 - Меньше неопределённость в выборе оптических потенциалов
 - Есть возможность оценить эффективную плотность
- > **измеряем поляризацию, причём в обоих каналах!**

Экспериментальная установка

Общая схема установки

- 1GeV протонный пучок
- Твёрдая мишень
- Двухплечевой спектрометр
- Поляриметры в обоих каналах

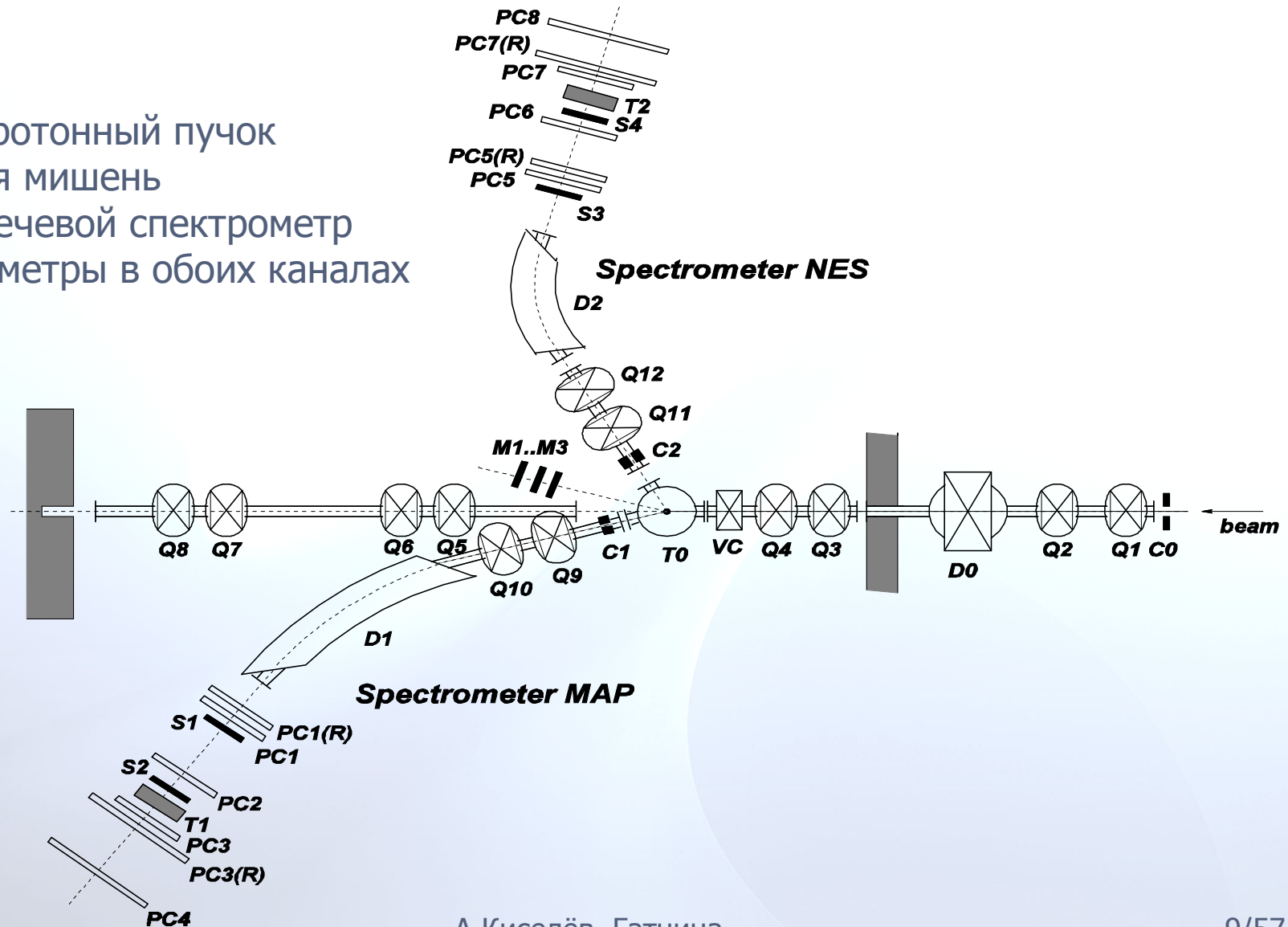
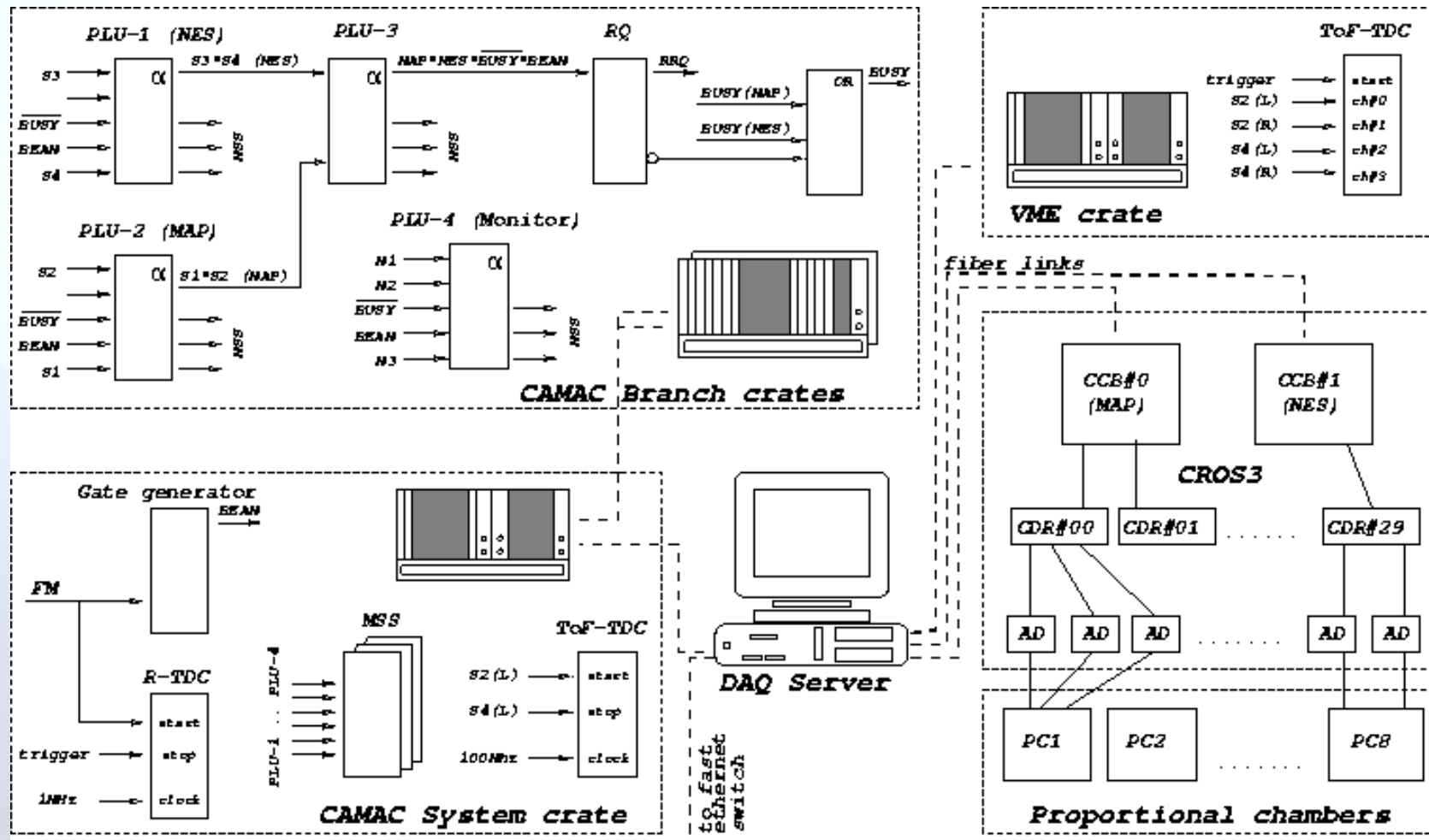


Схема электроники

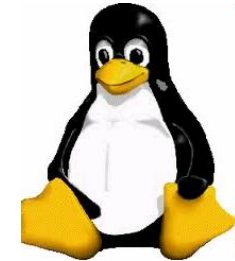


■ CAMAC, VME

■ CROS3, ~3000 каналов

Система набора данных (DAQ)

- Linux kernel модули CROS3, CAMAC, VME, DAQ
- Асинхронная мода набора (multi-event)
- Прерывания; pipeline; буферизация в ядре; ...
- SMP; kernel multi-threading; ...

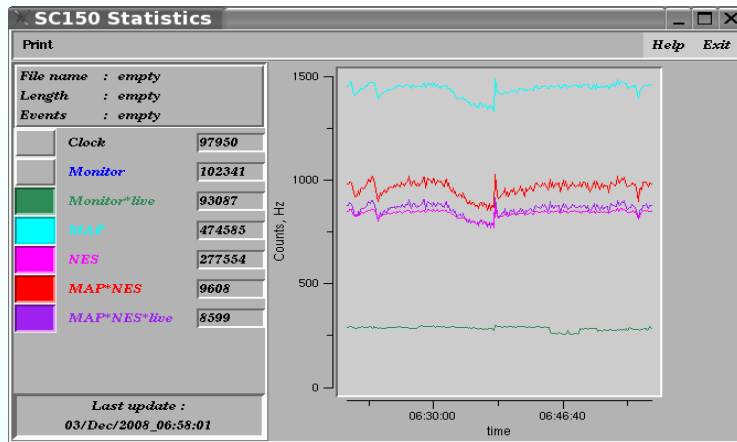


- User-space библиотека
- DAQ код (interruptible sleep mode)
- Online monitoring software
- Online физический анализ
- ! Оптимизация CROS3 readout-a
 - Format optimization; PCI slave prefetch; ...

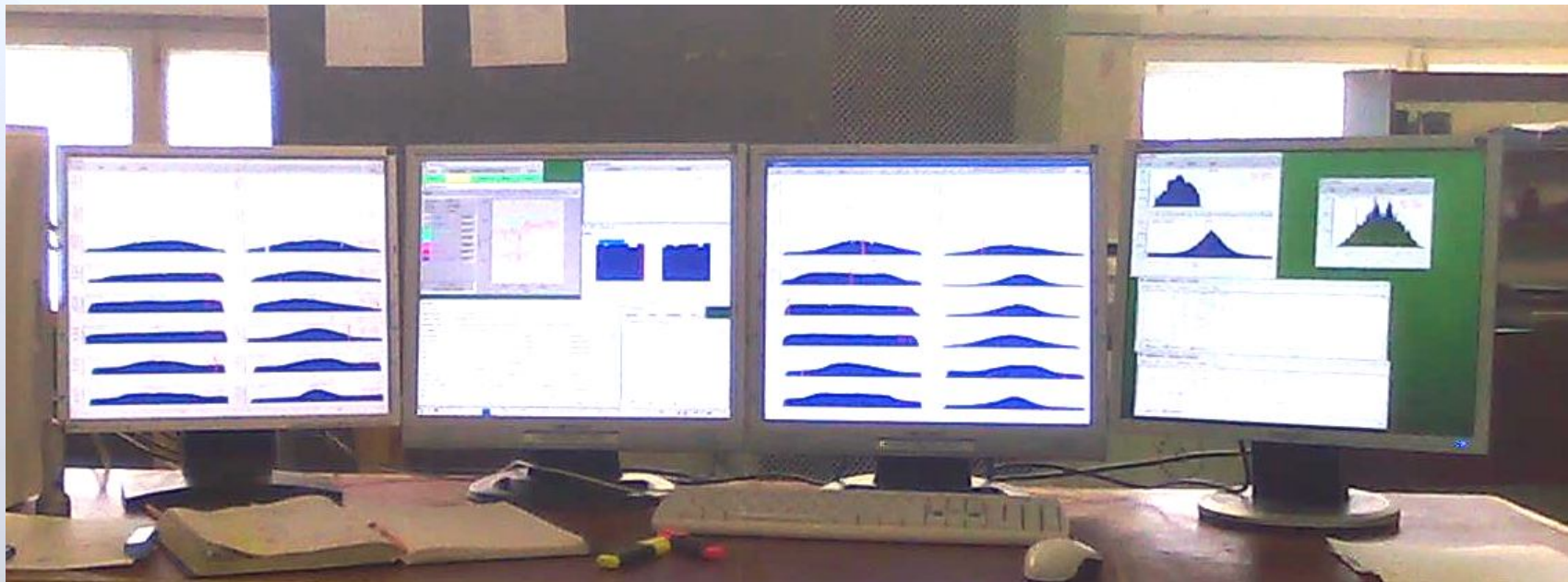
Сеанс	Объём данных
1993	~0.1GB
...	
2000	~8GB
2001	~16GB
2002	~4GB
2009(1)	~360GB
2009(2)	~890GB
2010	~350GB

-> скорость набора в pp-elastic до 12kHz (~50% dead time)

Online контроль за набором данных



- Мультискалеры
- Эффективности проп. камер
- Wire maps
- ToF, P-ПВК, ...
- Физические параметры



Обработка данных

Offline software

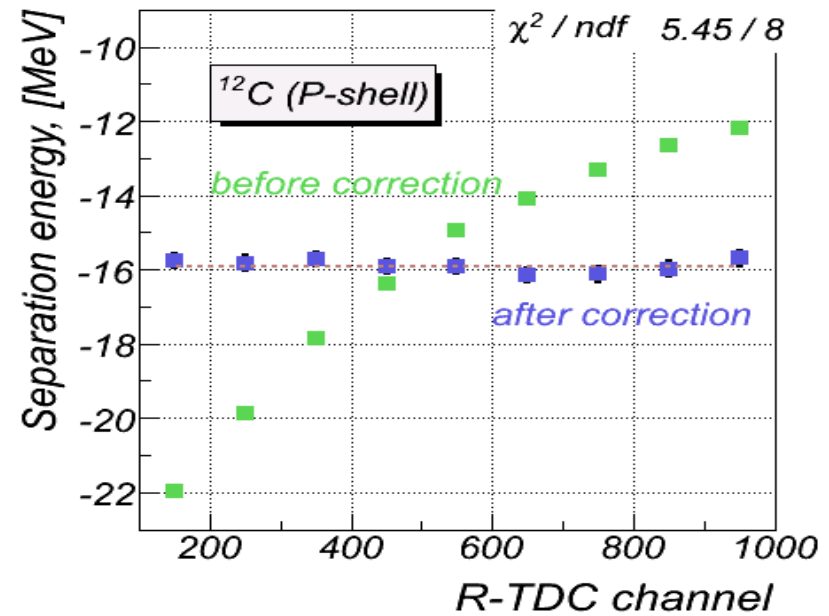
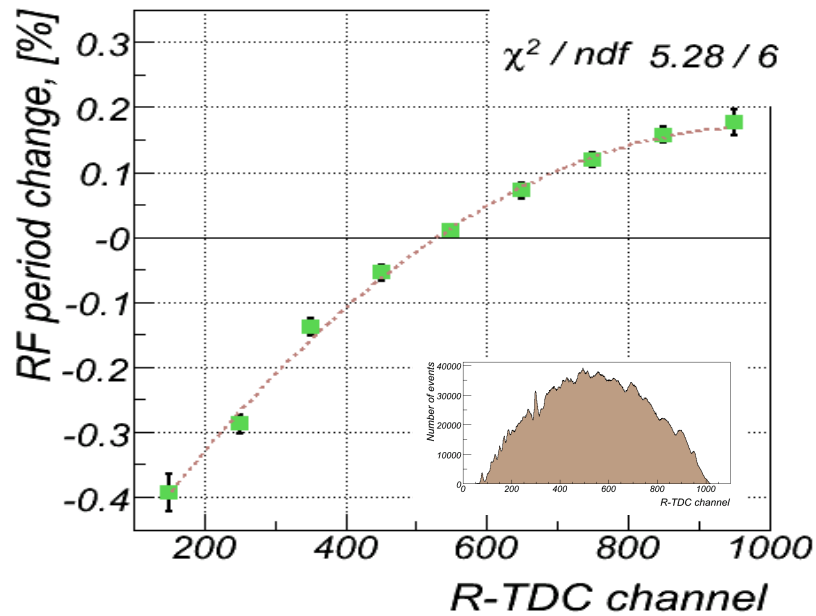
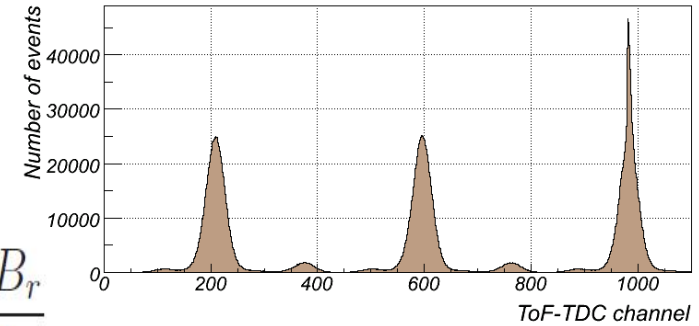
- Программа обработки
 - CERNLIB (HBOOK, MINUIT, ...)
 - PAW и ROOT n-tuples на выходе
 - Linux multi-threading
 - Трекинг, time-of-flight, поляризация, ...
 - Драйверы для CROS1, CROS3, Monte-Carlo данных
- Monte-Carlo код

-> общий объём кода на C >50к строк ...

Калибровка энергии протонного пучка

-> путём непосредственной привязки к RF ускорителя

$$\frac{\Delta E}{E_{beam}} = -\frac{1}{k} \cdot \frac{\Delta f}{f} \quad k = 1 + \frac{n}{\beta^2(1-n)}, \quad n = \frac{r}{B_r} \frac{dB_r}{dr}$$



Расчёт кинематики реакции

- 1) определяем параметры вторичных протонов в точке взаимодействия разложением нелинейной функции

$$\mathbb{F} : \vec{x}_f = \{x, y, s_x, s_y\}_f \rightarrow \vec{x}_t = \{p, \alpha_x, Y_t, L\}_t$$

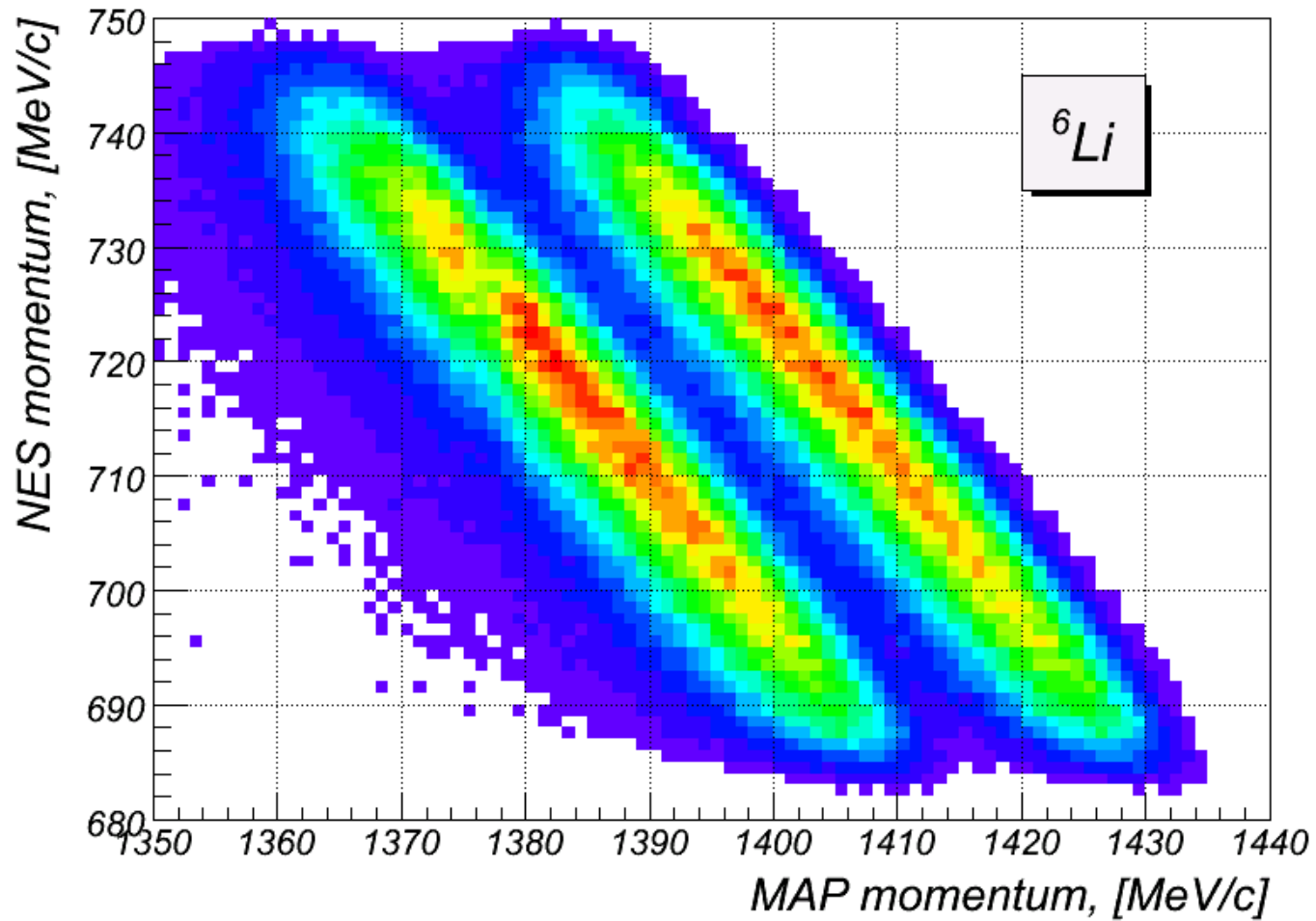
в ряд Тэйлора с использованием Monte-Carlo данных

- 2) рассчитываем корреляционные параметры (энергия отделения, импульс ядра остатка в плоскости рассеяния, сшивка по вертикальной координате в мишени)

-> типичное разрешение по энергии отделения $\sigma_{dE} \sim 2.0-2.5 \text{ MeV}$

-> по вертикальной координате в мишени $\sigma_{dY} \sim 2.0-2.5 \text{ мм}$

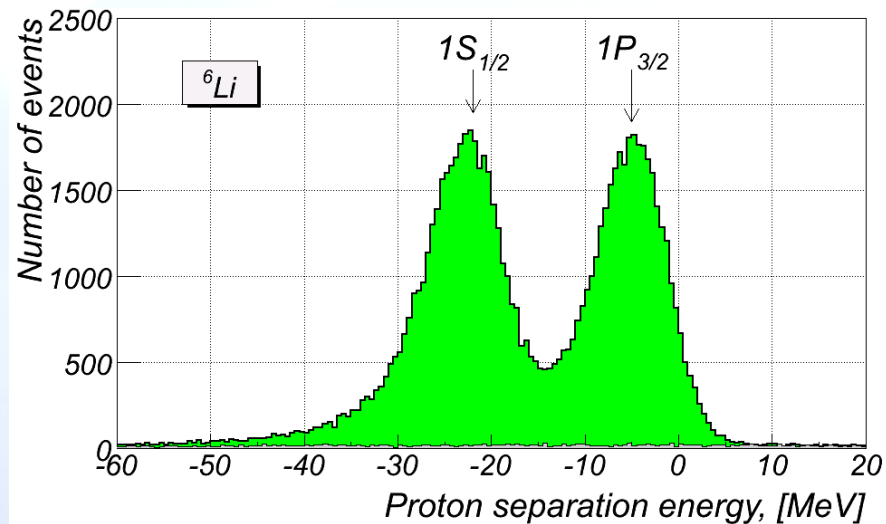
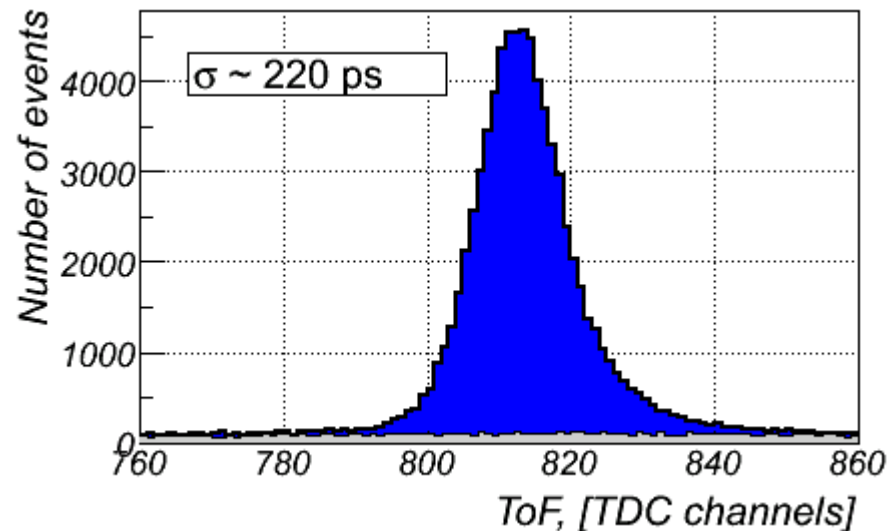
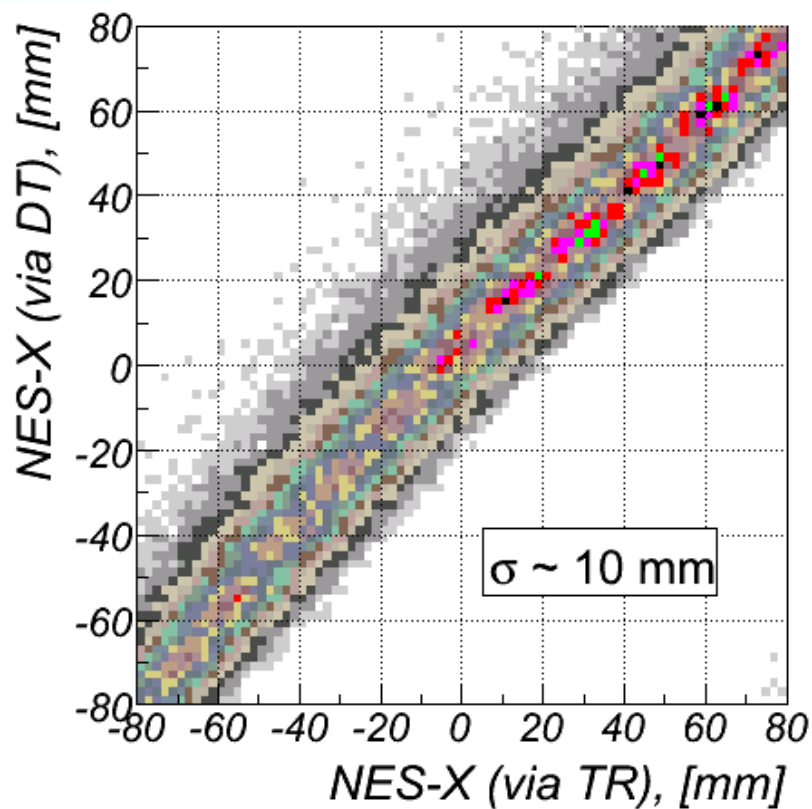
Разделение оболочек



Время-пролётные измерения

-> использовали разработки для PANDA
(ФЭУ, TDC, пластик, ...)

- коррекция на импульс (скорость)
- коррекция на длину траектории



Измерение поляризации

-> путём вторичного рассеяния на углероде

Ожидаемое азимутальное распределение:

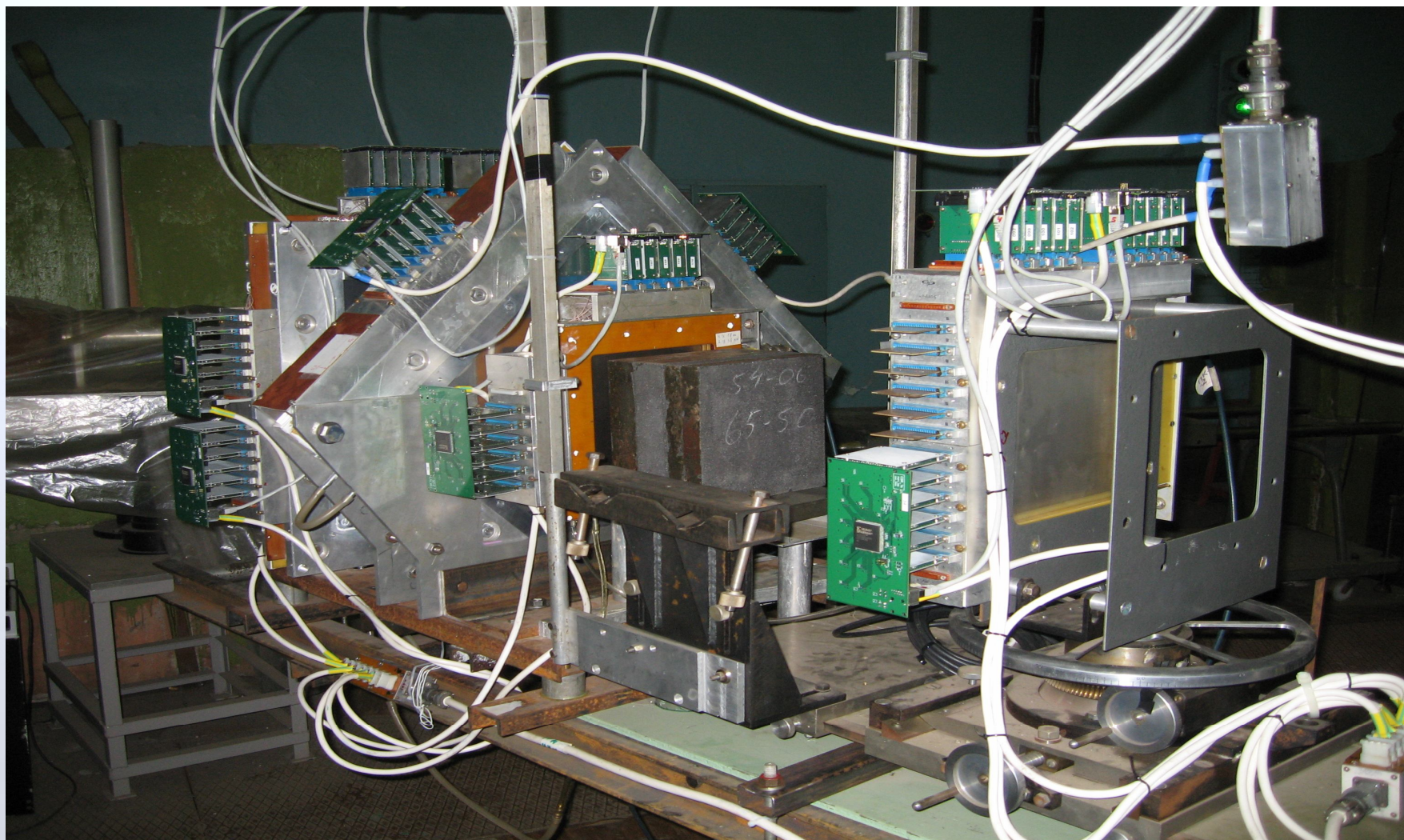
$$dN(\phi) = \frac{N_0}{2\pi} (1 + P \langle A(p, \theta) \rangle \cos \phi + \xi_V \sin \phi) d\phi$$

Минимизируемый функционал:

$$\Psi(P, \xi_V) = \sum_i 2(N_i^{th}(P, \xi_V) - N_i^{exp}) + 2N_i^{exp} \ln(N_i^{exp} / N_i^{th}(P, \xi_V))$$

-> с использованием χ^2_λ статистики

Измерение поляризации

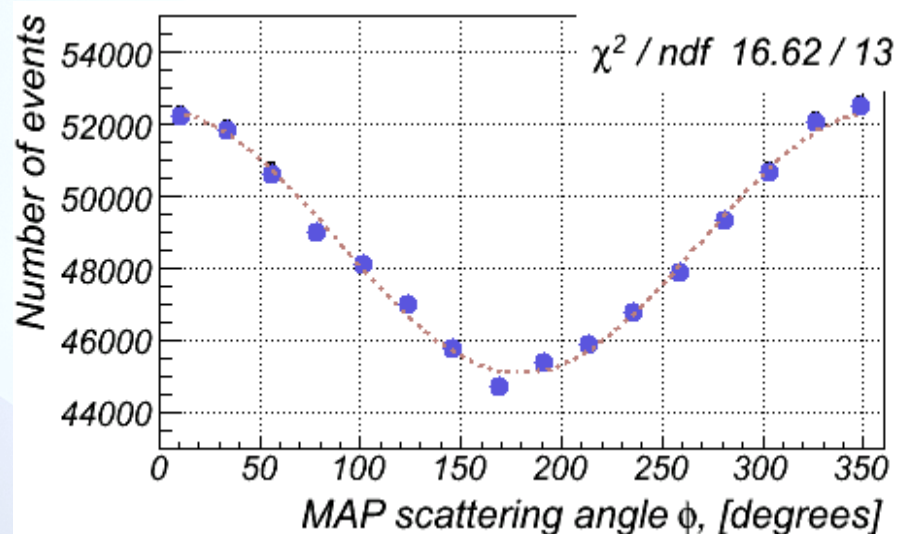


03.04.2012

А.Киселёв, Гатчина

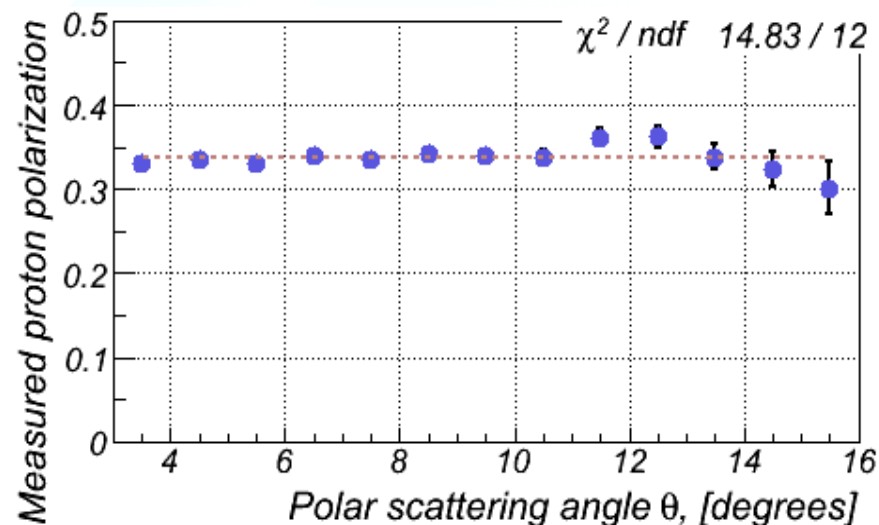
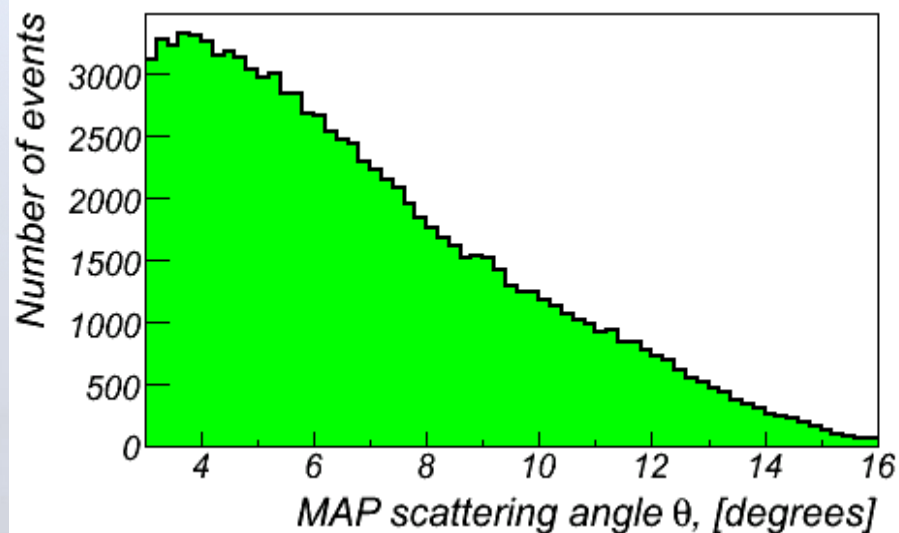
20/57

Измерение поляризации (МАП)

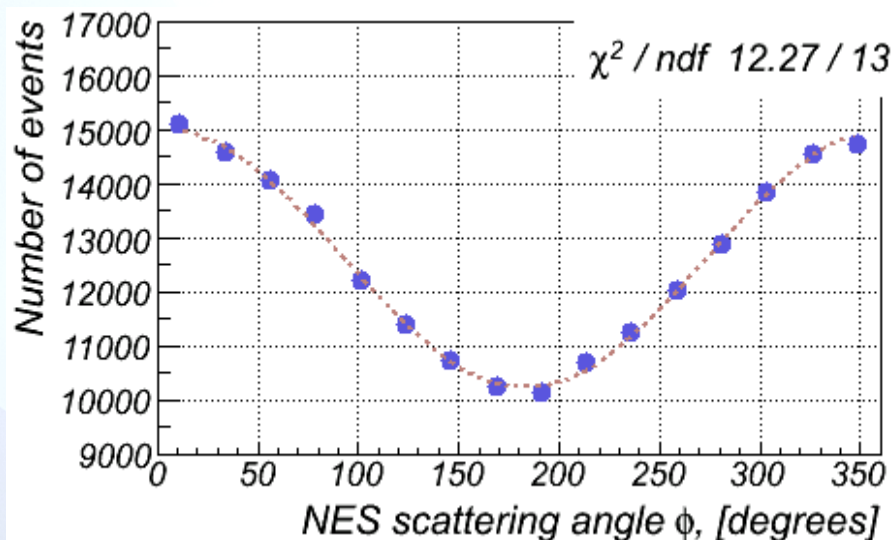


Анализатор	155мм, 199мм
Угловой диапазон	[3..16] градусов
<Кулоновский угол>	~0.6 градуса
<Анализирующая способность>	~0.25

АР: О.Я.Фёдоров, препринт ЛИЯФ 484 (1979)

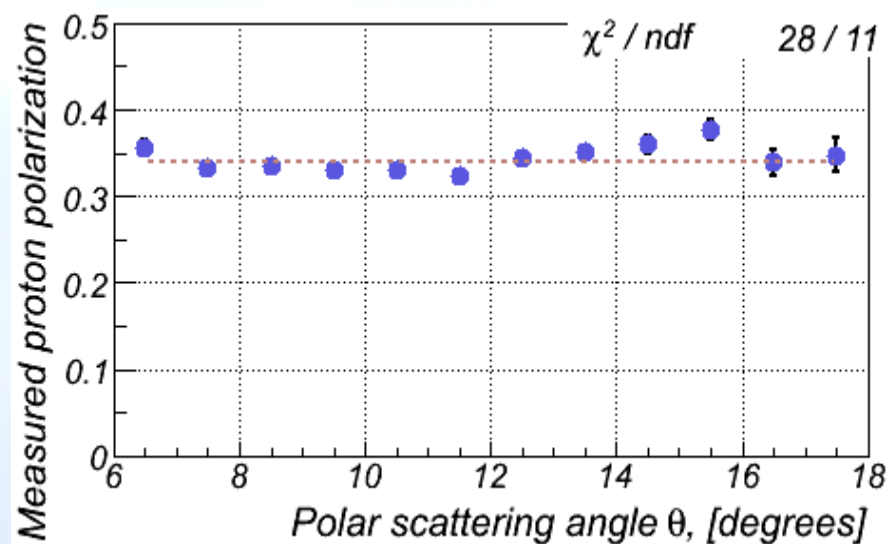
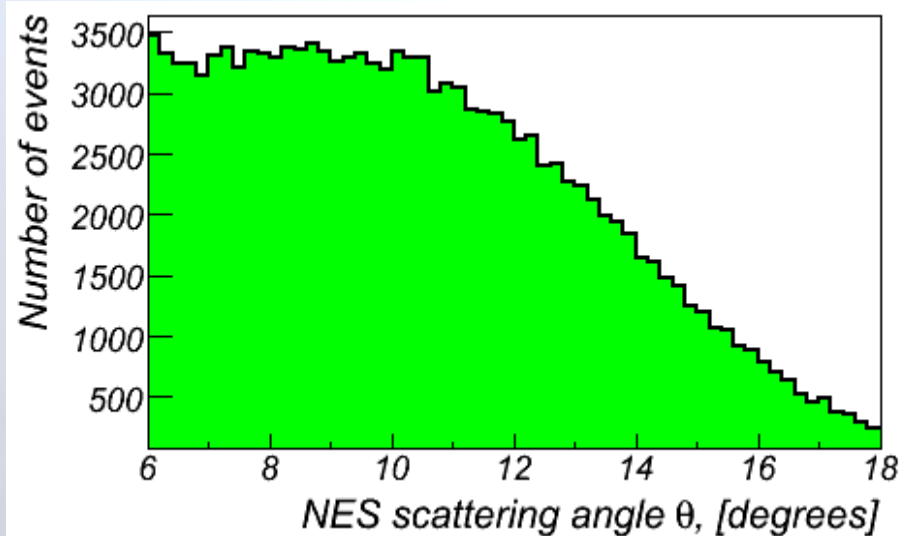


Измерение поляризации (НЭС)



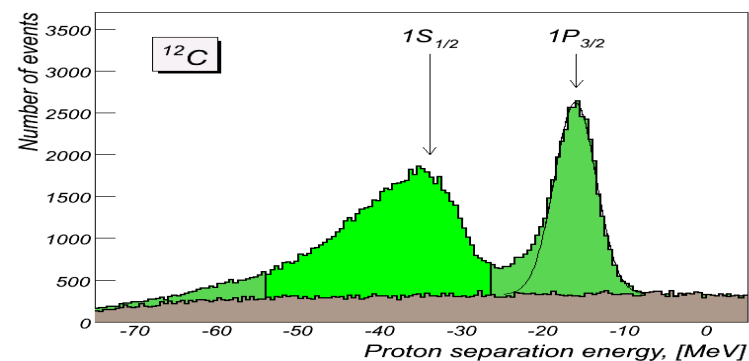
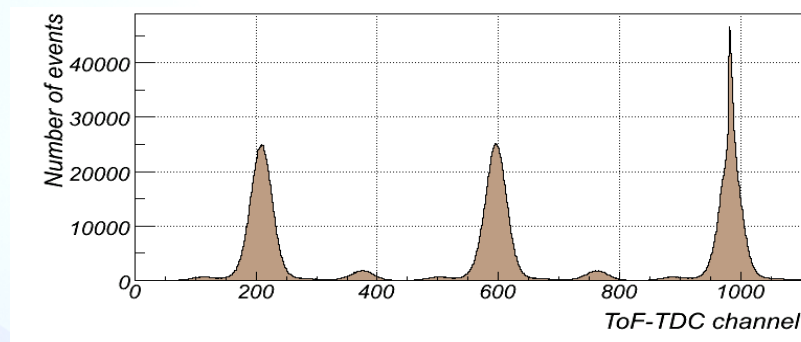
Анализатор	69мм, 79мм
Угловой диапазон	[6..18] градусов
<Кулоновский угол>	<1.5 градуса
<Анализирующая способность>	~0.50

AP: G.Waters et al., NIM 153 (1978) 401



Учёт фона случайных совпадений

-> работаем в условиях большой фоновой загрузки!



Формализм несколько усложняется:

$$dN_{sum}(\phi) = \frac{N_{true} + N_{bg}}{2\pi} (1 + \epsilon_{sum} \cos \phi + \xi_V \sin \phi) d\phi$$

$$dN_{bg}(\phi) = \frac{N_{bg}}{2\pi} (1 + P_{bg} A_{bg} \cos \phi + \xi_V \sin \phi) d\phi$$

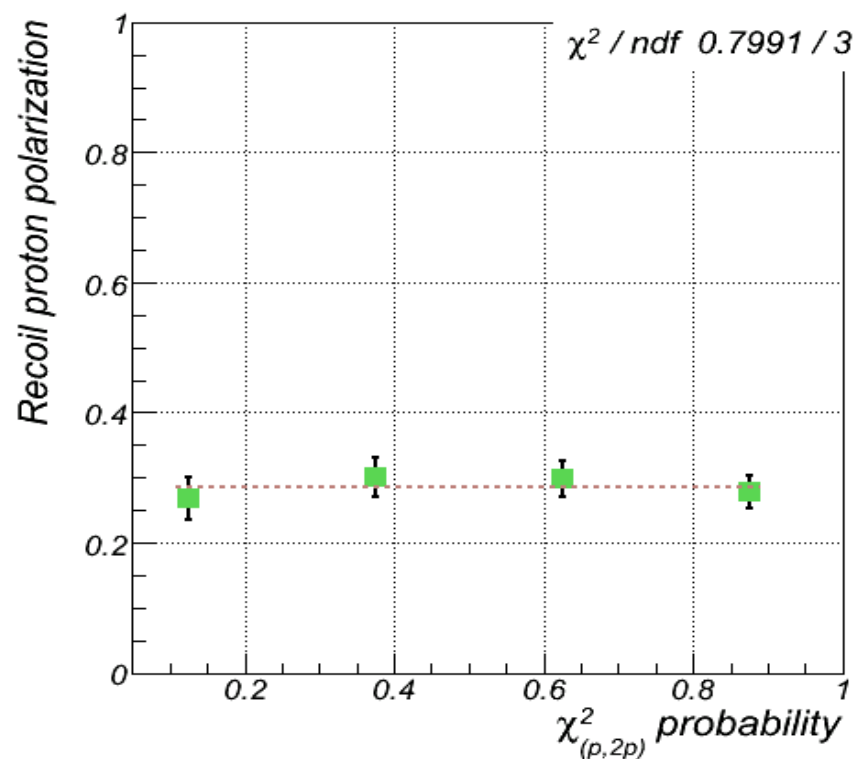
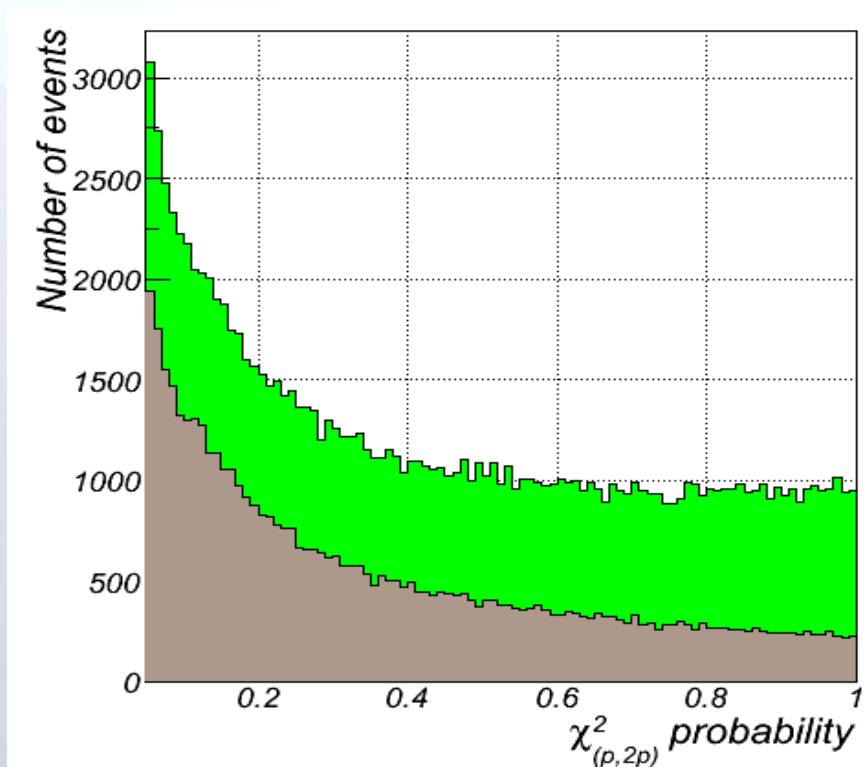
$$\Psi(\vec{\alpha}) = \sum_i \Psi_{bg}(N_{bg}, P_{bg}, A_{bg}, \xi_V) + \Psi_{sum}(\vec{\alpha}) \quad \vec{\alpha} = \{N_{true}, P_{true}, A_{true}, N_{bg}, P_{bg}, A_{bg}, \xi_V\}$$

Учёт фона случайных совпадений

Оптимизация соотношения сигнал/фон:

$$\chi_{(p,2p)}^2 = \frac{(t_{diff} - \langle t_{diff} \rangle)^2}{\sigma_{t_{diff}}^2} + \frac{(dY_t - \langle dY_t \rangle)^2}{\sigma_{dY}^2}$$

$$\Psi(\vec{\alpha}) = \sum_{\chi^2 bins} \Psi_k(\vec{\alpha})$$



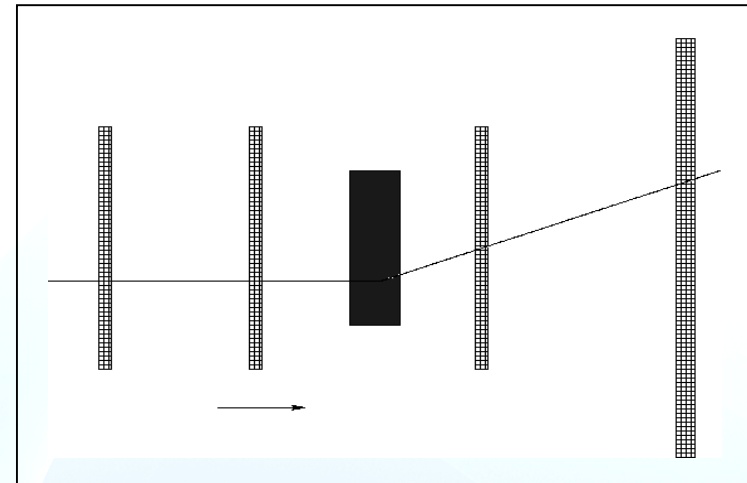
Выстройка камер поляриметров

- На “реальных” данных (с установленными анализаторами)

$$\vec{x}_f = \{x, y, s_x, s_y\}_f, \vec{x}_b = \{x, y, s_x, s_y\}_b$$

$$\vec{dx} = \vec{x}_b - \vec{x}_f \in \mathbb{R}^4$$

$$\Psi = \sum_{tracks} \vec{dx}^T \hat{M}(p) \vec{dx}$$

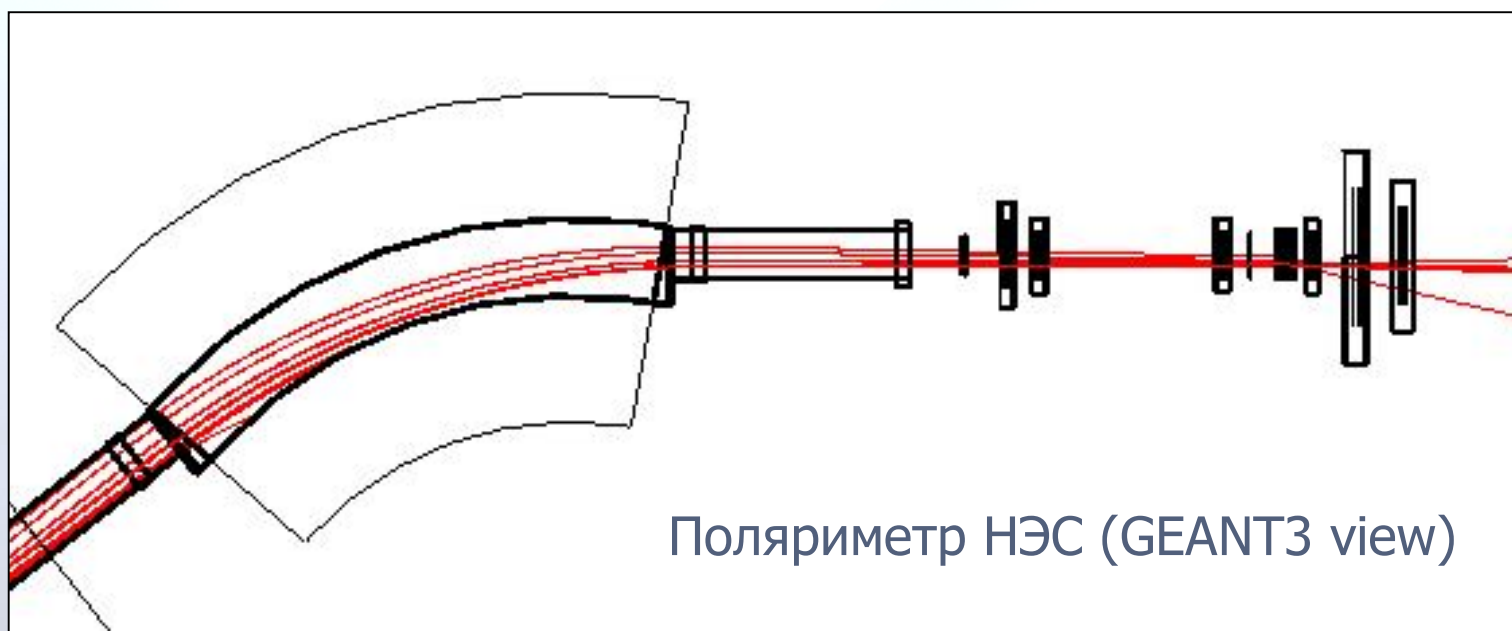


- > проверено с использованием Kalman filter методики ...
- > ... и на Monte-Carlo данных
- > Y-асимметрия ~ 0 и коррелирует с возможными сдвигами

Monte-Carlo моделирование

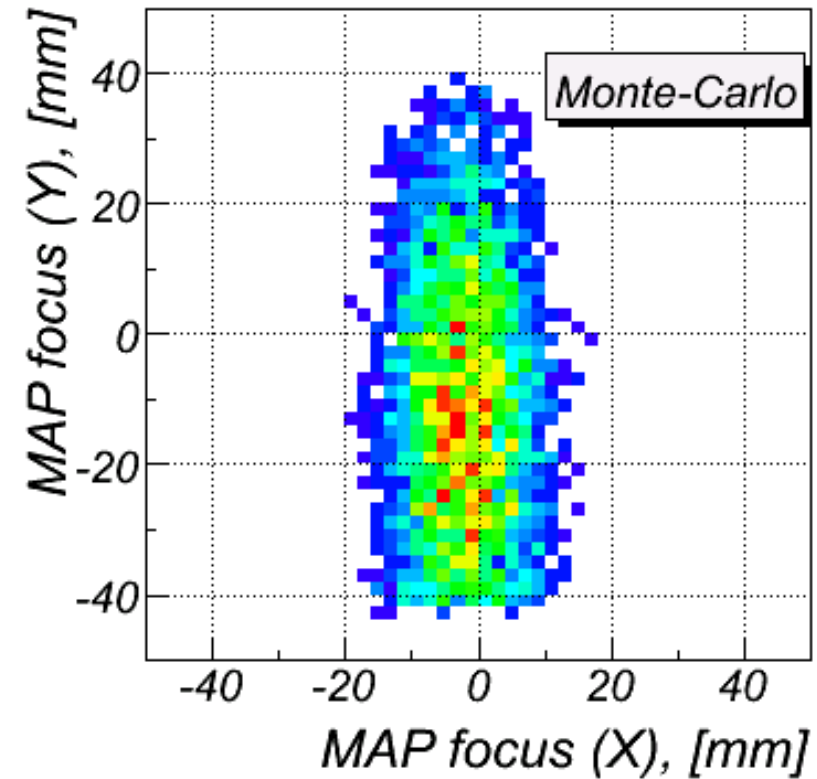
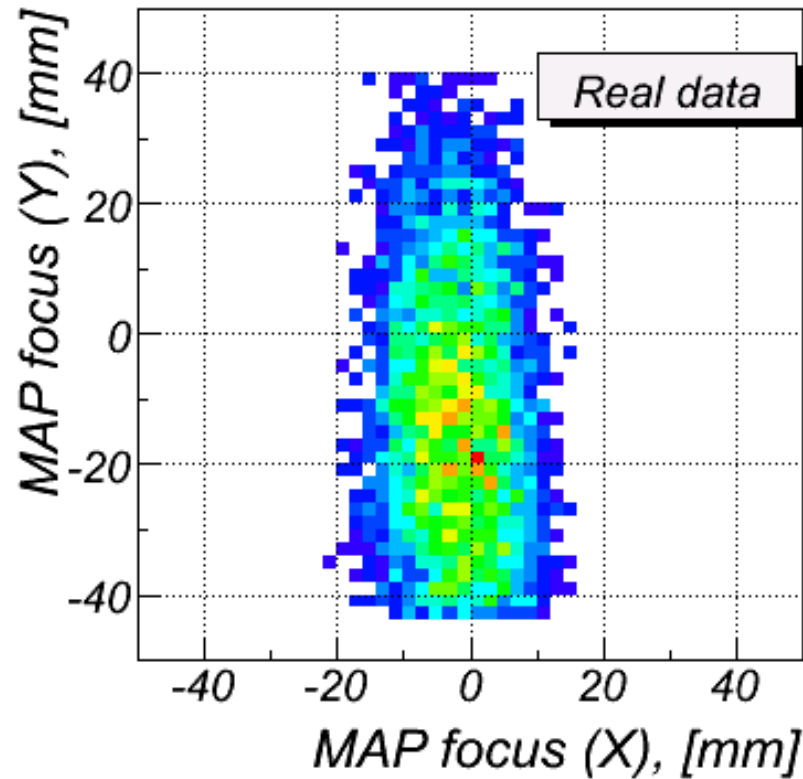
Геометрия установки

- GEANT3, "best knowledge" описание геометрии детектора
- Магнитные поля с out-of-plane разложением и краевыми эффектами
- Аксептанс, разрешение, dE/dx параметризация, ...
- Настройка оптики спектрометров
- Проверка алгоритмов offline обработки



Поляриметр НЭС (GEANT3 view)

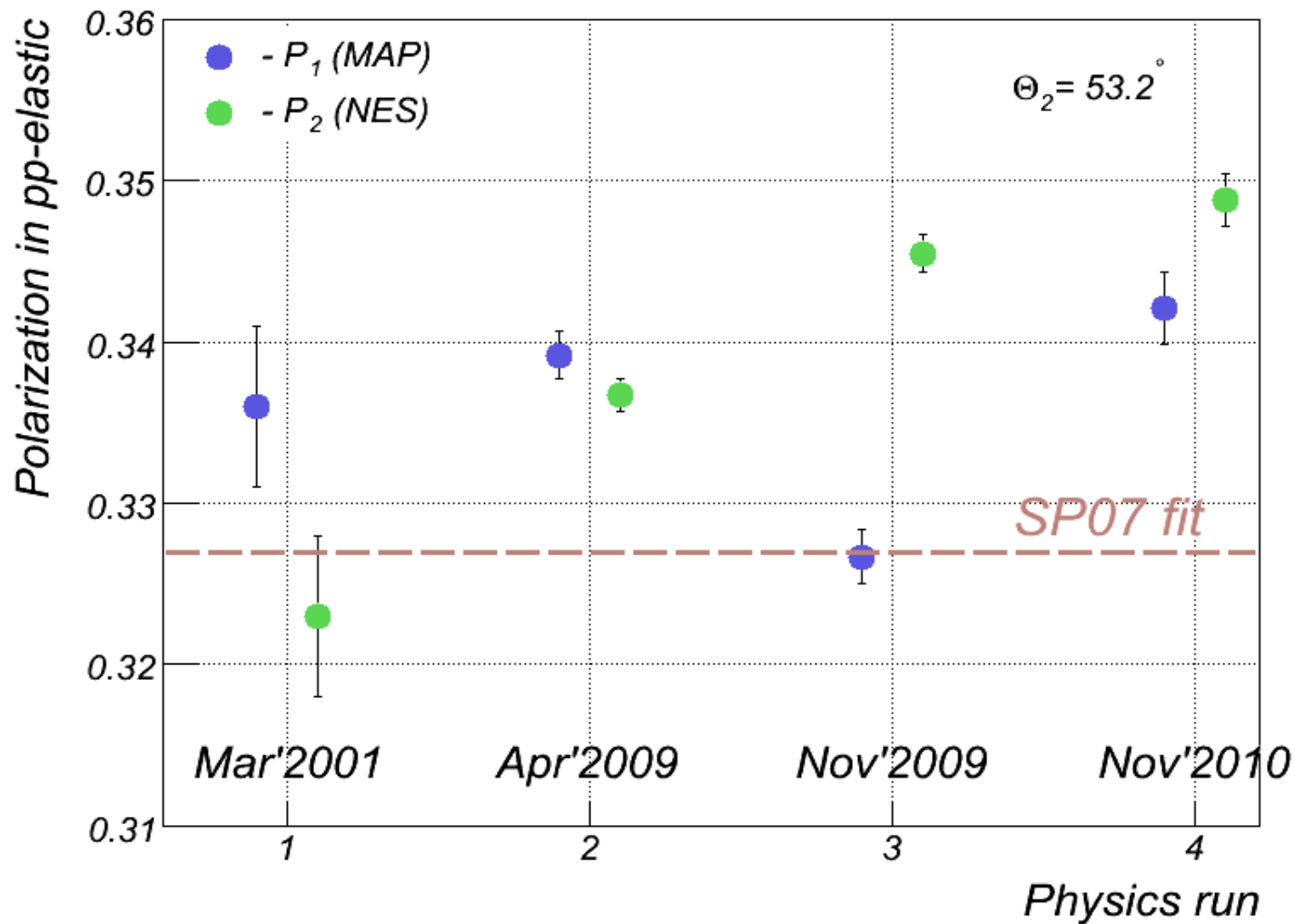
МАП: pp-elastic рассеяние



- Практически идеальное описание ...

Представление данных

Калибровка в pp-elastic рассеянии



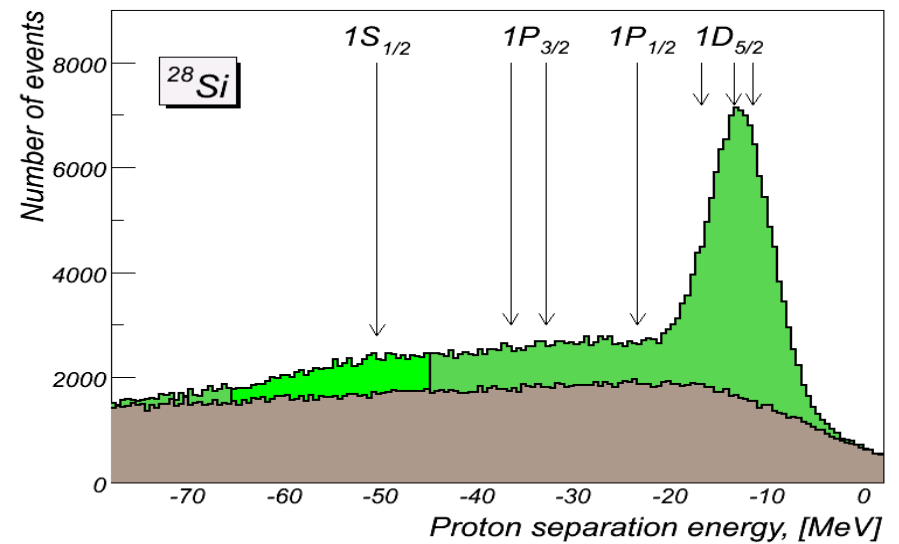
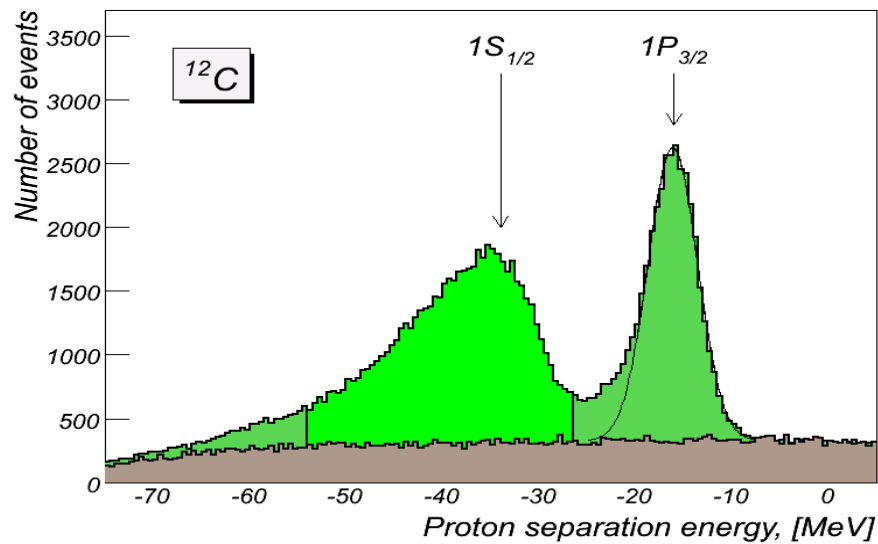
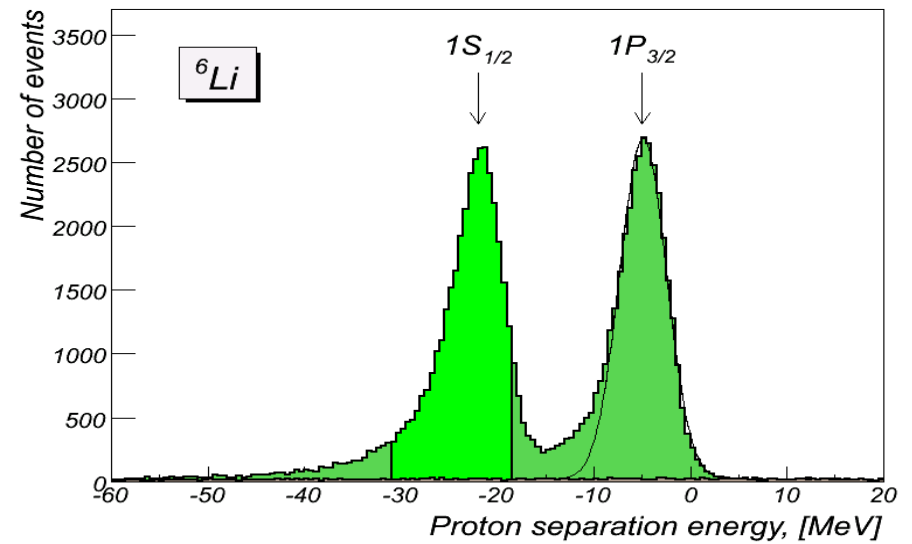
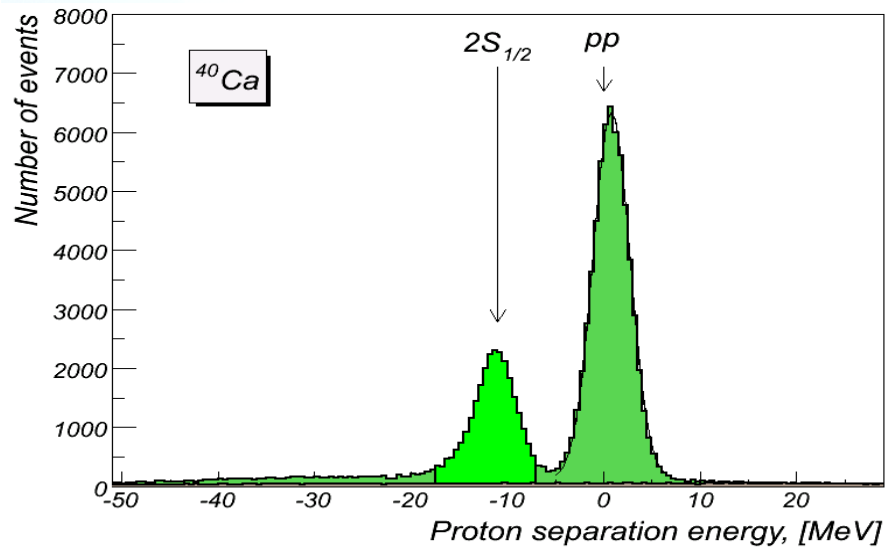
-> вариации от сеанса к сеансу в пределах +/- 0.015!

Мишени, использованные в (p,2p)

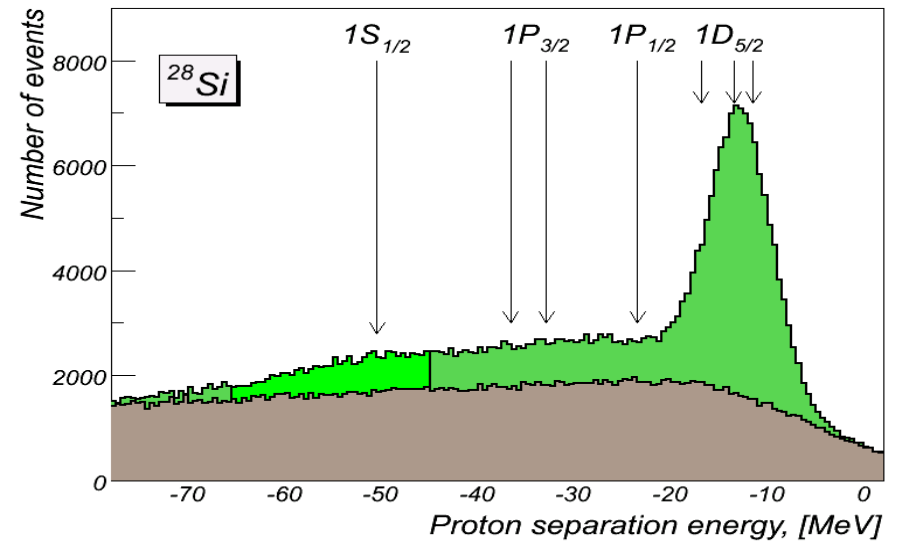
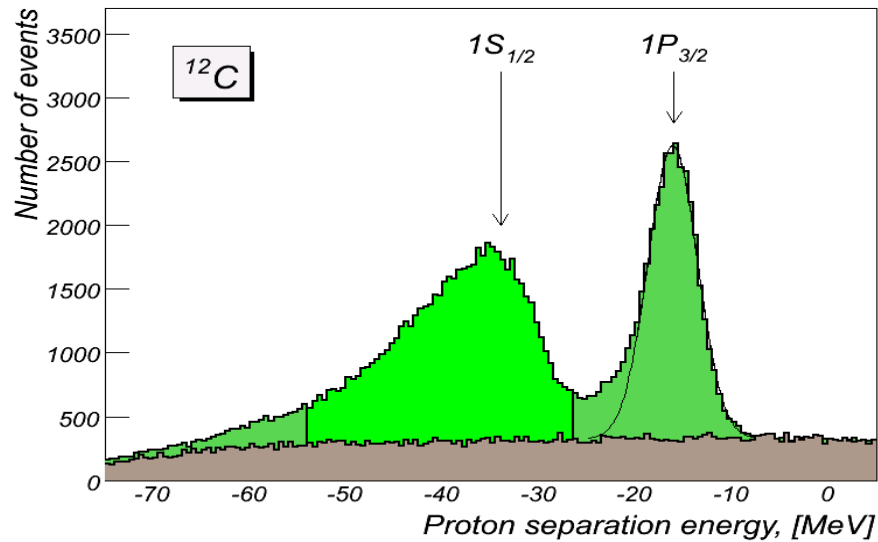
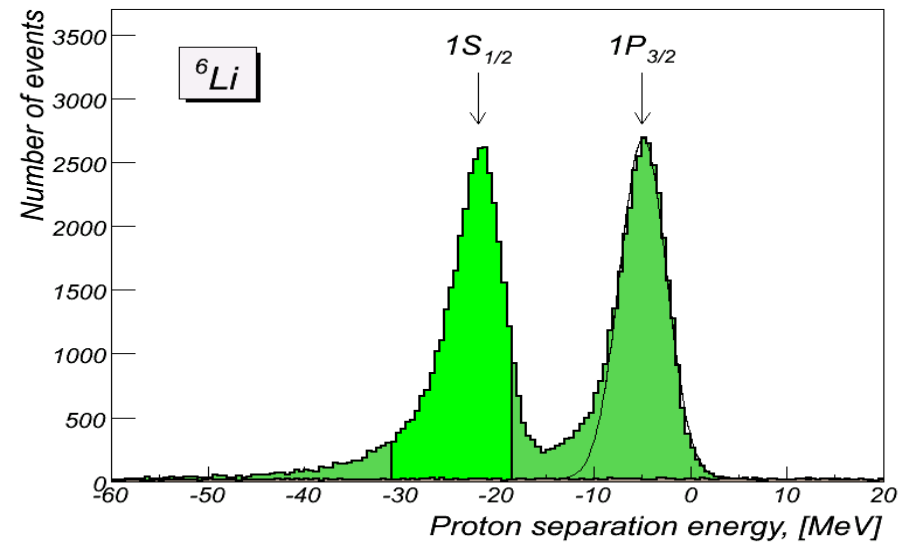
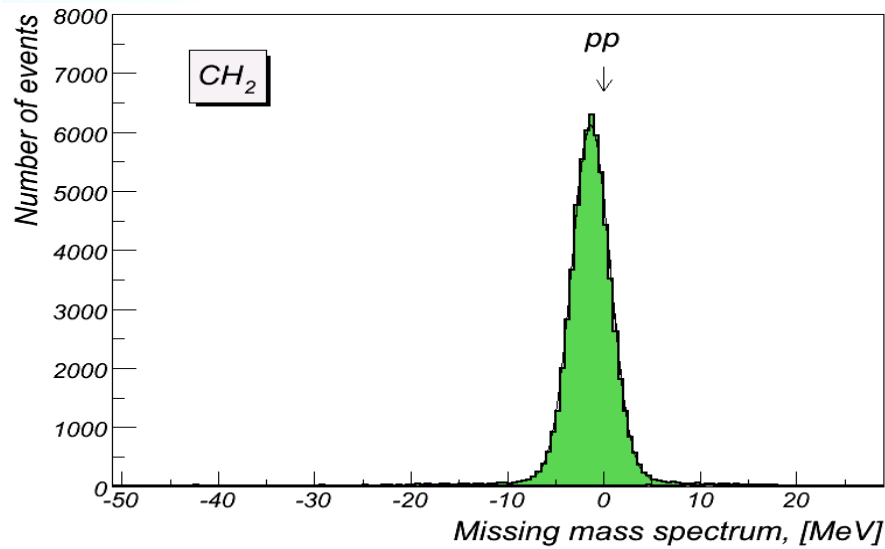
Оболочка	E_s , MeV	Γ (FWHM), MeV
$^{40}\text{Ca}(2S_{1/2})$	11.0 +/- 0.1	4.0 +/- 0.5
$^6\text{Li}(1S_{1/2})$	22.0 +/- 0.3	4.7 +/- 0.2
$^{12}\text{C}(1S_{1/2})$	33.9 +/- 0.9	13.5 +/- 0.7
$^{28}\text{Si}(1S_{1/2})$	50.5 +/- 0.5	16.1 +/- 0.5

Мишень	Размеры, МАП x НЭС, мм ²
^{40}Ca	4 x 10
^6Li	4 x 16, 5 x 12
^{12}C	4 x 10, 4 x 18, 6 x 25
^{28}Si	6 x 25

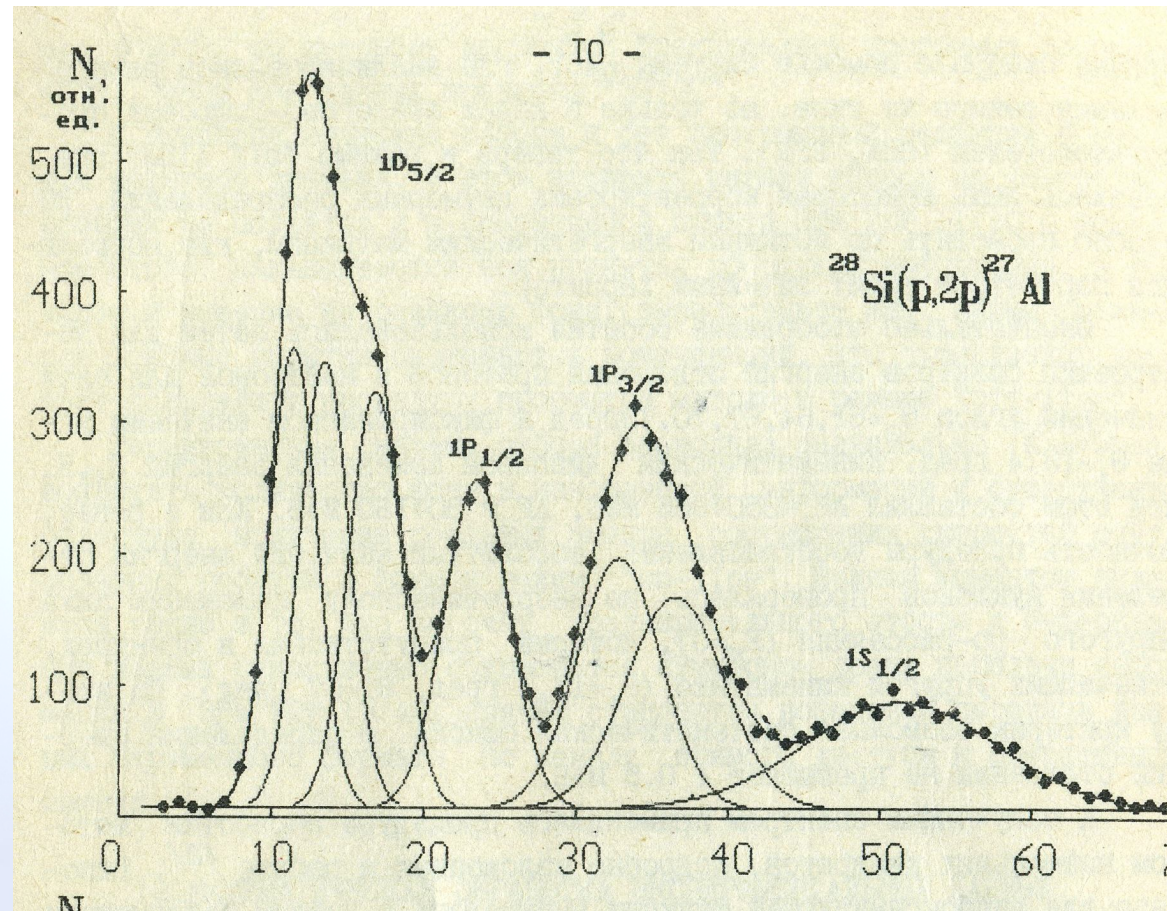
Спектры по энергии отделения



Спектры по энергии отделения

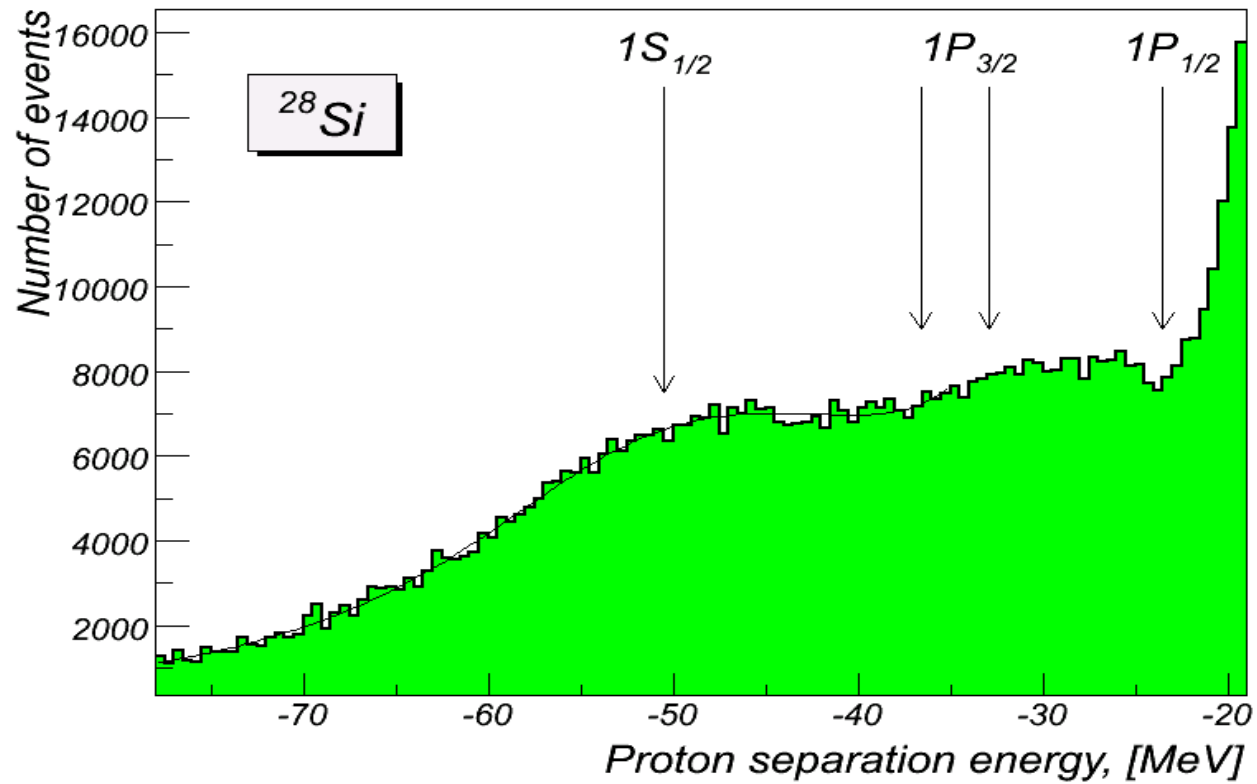


Спектры по энергии отделения

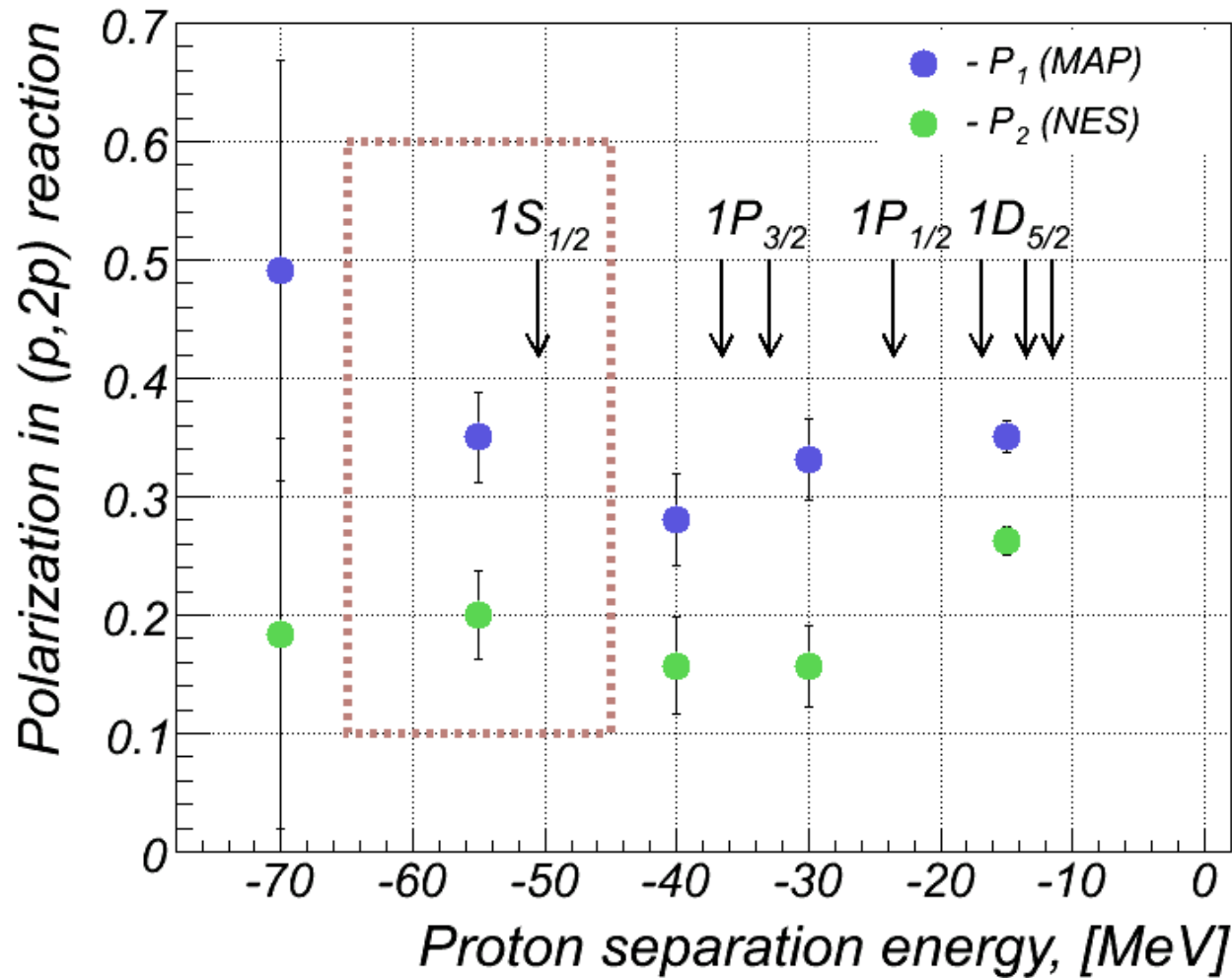


- Препринт ПИЯФ 1812 (1992)

Спектры по энергии отделения

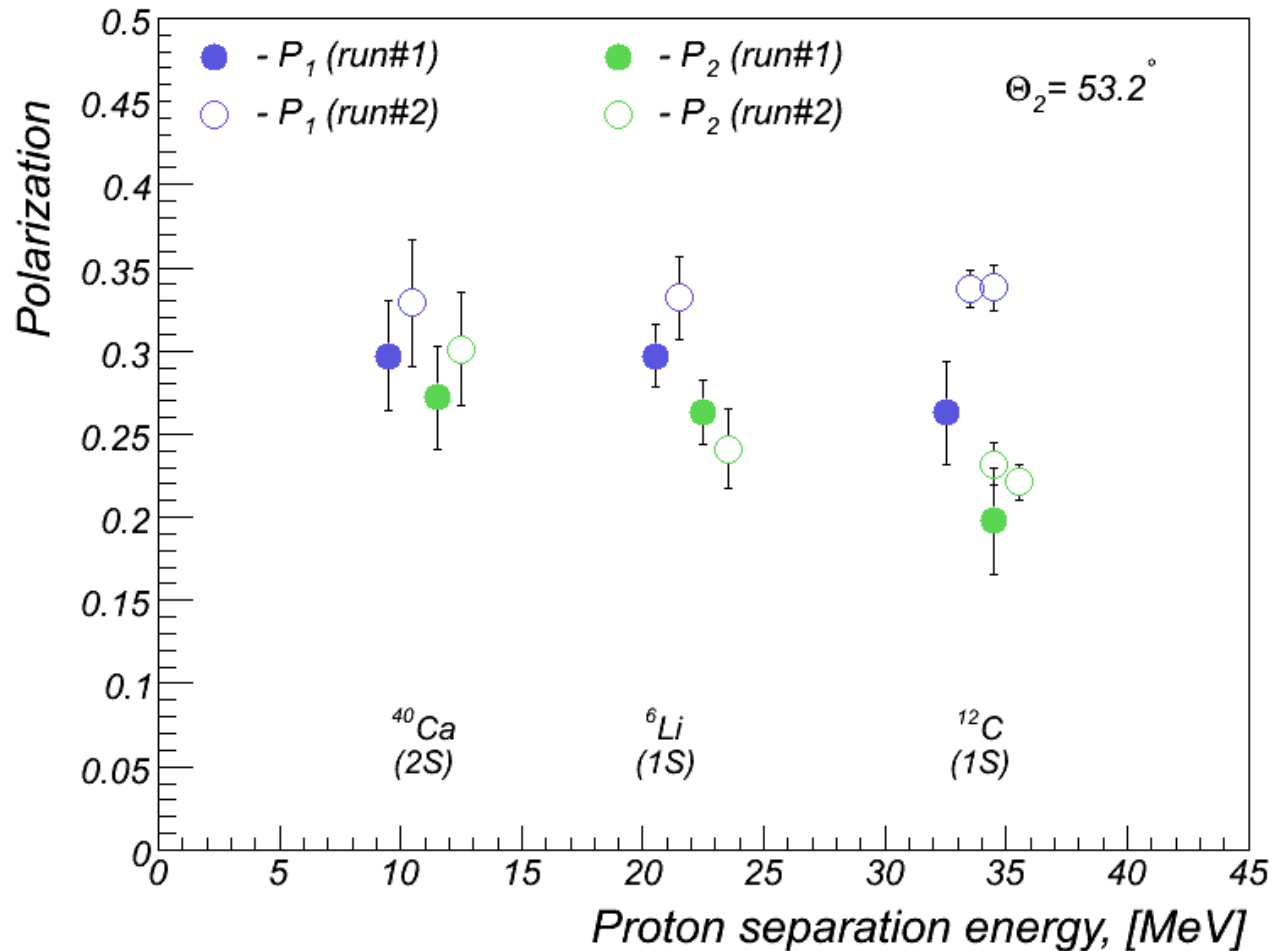


Поляризация на мишени ^{28}Si



-> отсутствие выраженной зависимости от энергии связи

Совместность данных Run#1 и Run#2



-> согласие хорошее, за исключением точки ^{12}C (run#1)!

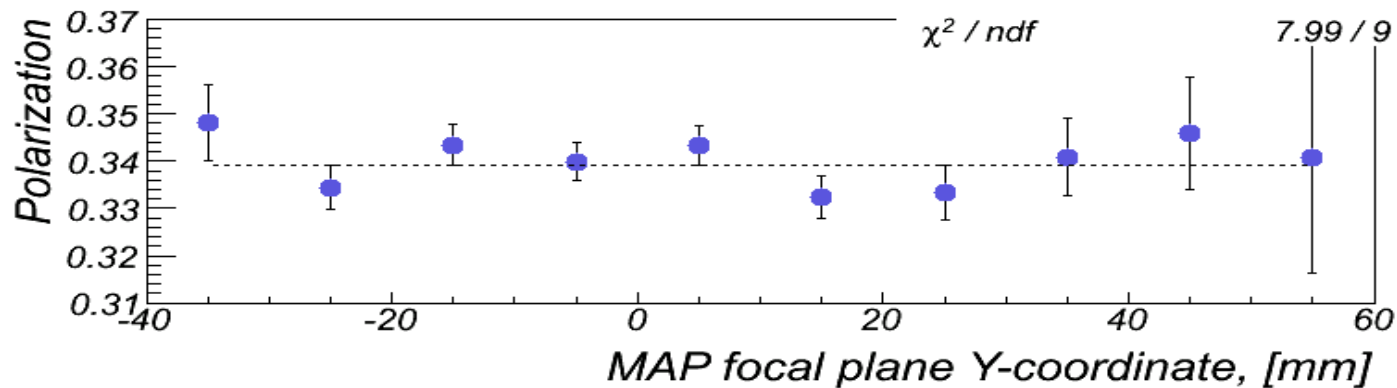
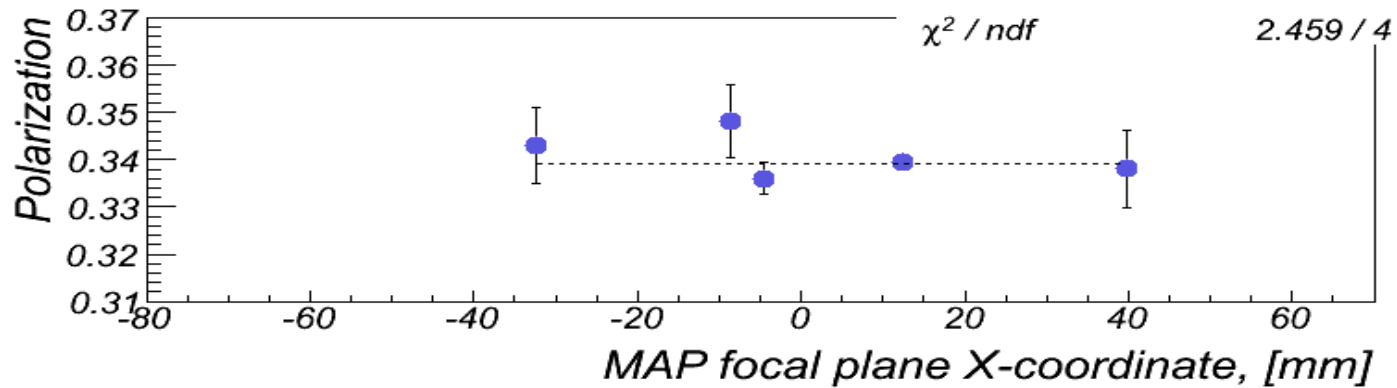
Оценка систематической неопределённости

Источники систематической ошибки

- Зависимость поляризации от аксептанса
- Ошибки выстройки пропорциональных камер
- Влияние фоновой загрузки в зале
- Неэффективность пропорциональных камер
- Нестабильности в работе установки
- Систем. ошибка от реконструкции событий
- Неправильное вычитание инклюзивного фона
- Влияние фита анализирующей способности
- И другие ...

(He)зависимость от аксептанса: МАП

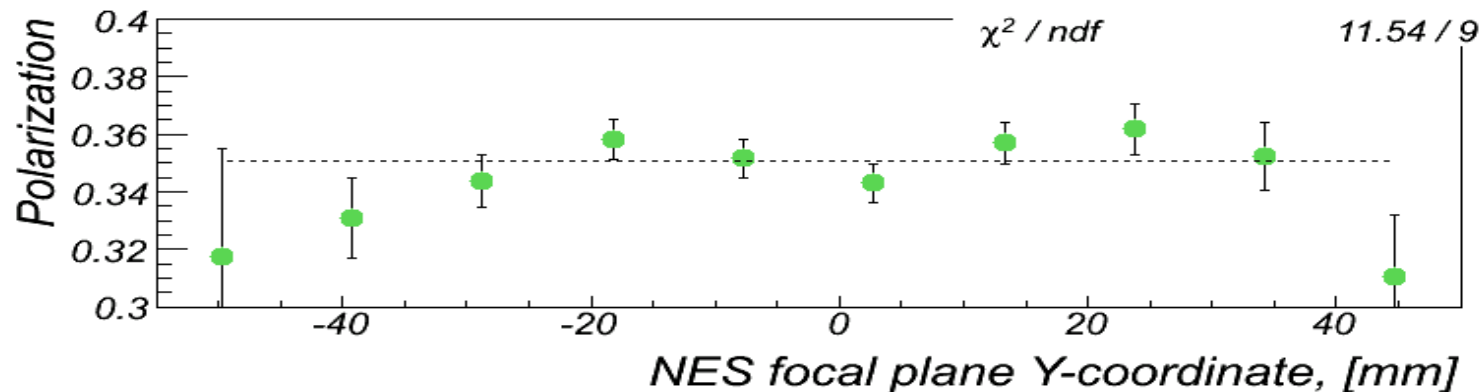
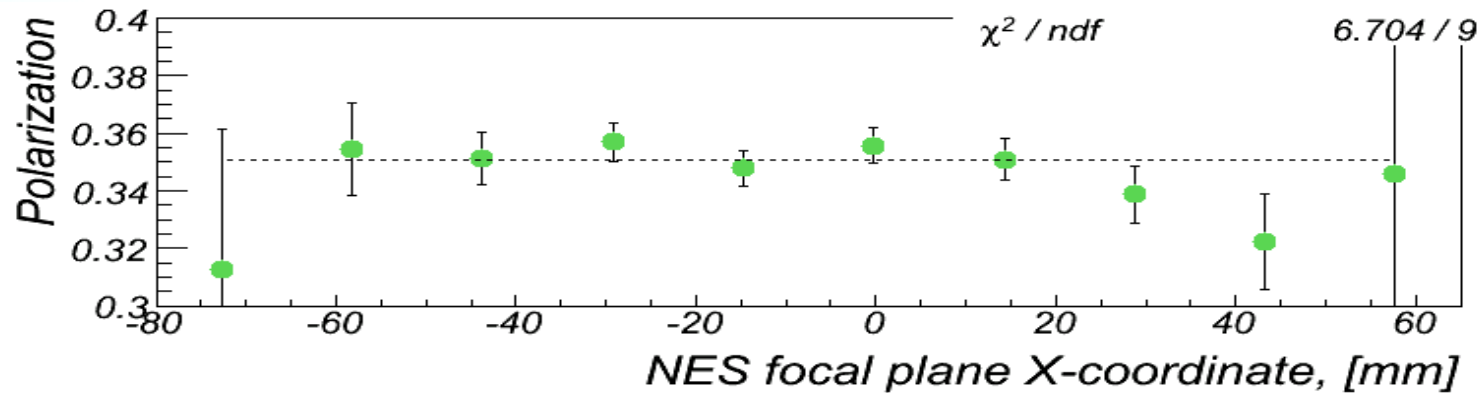
- “Сканирование” фокальной плоскости в pp-elastic рассеянии



NB: вертикальная шкала +/-0.030!

(He)зависимость от аксептанса: НЭС

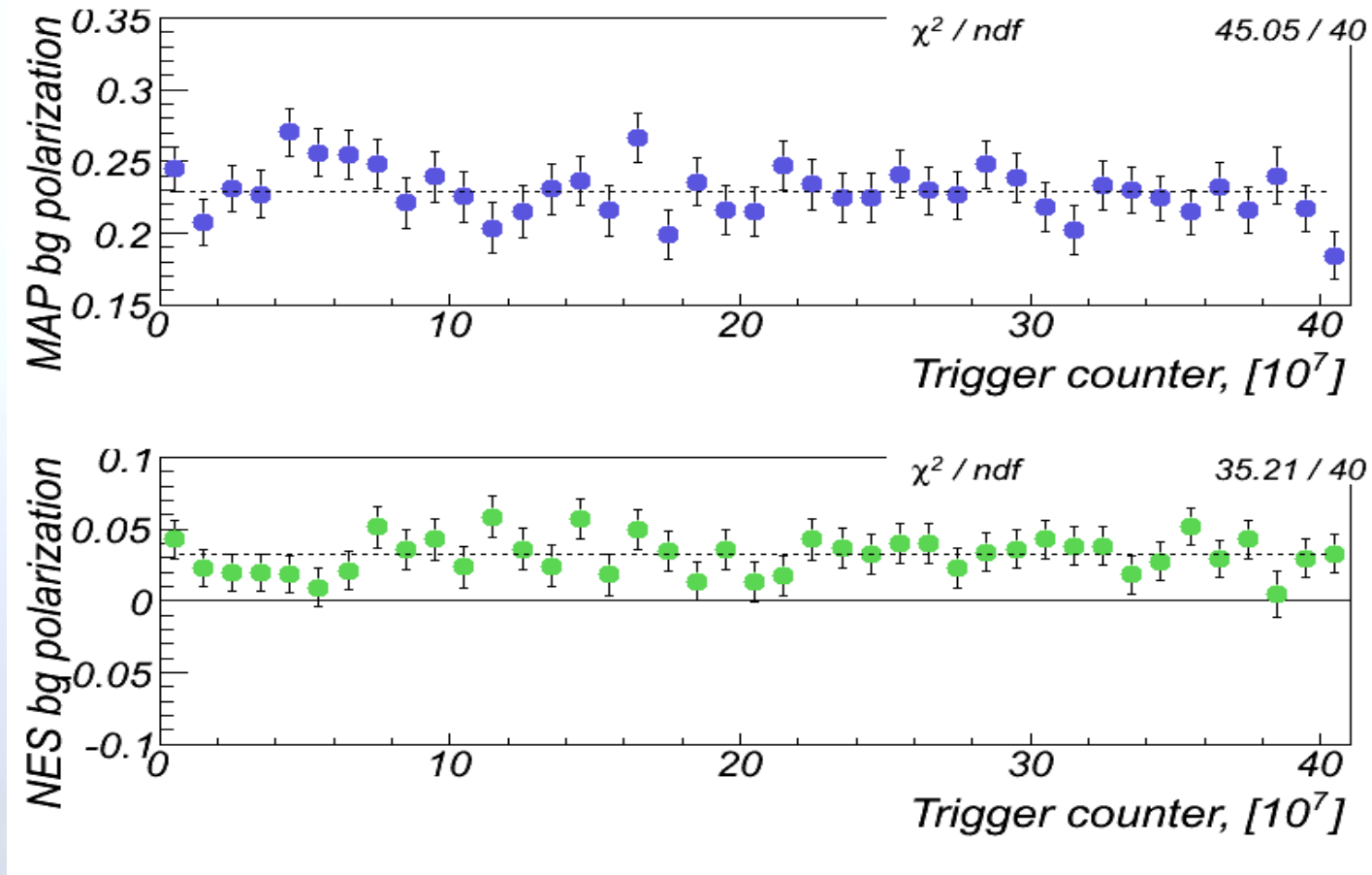
- Здесь просто использовали XY-binning для pp-elastic данных ...



NB: вертикальная шкала +/-0.050

Стабильность работы установки

- Контроль за величиной инклюзивной поляризации!



-> величина флуктуаций использована в оценке систематики ...

Интегральная оценка

- Выстройка пропорциональных камер
 - Контроль за углами Кулоновского рассеяния
 - Контроль за Y-асимметрией
- Влияние фоновой загрузки в зале
 - Подмешивание хитов из соседнего микроимпульса (CROS3!)
- Выбор фита анализирующей способности
 - Нормировка на упругое pp-рассеяние при ~тех же импульсах

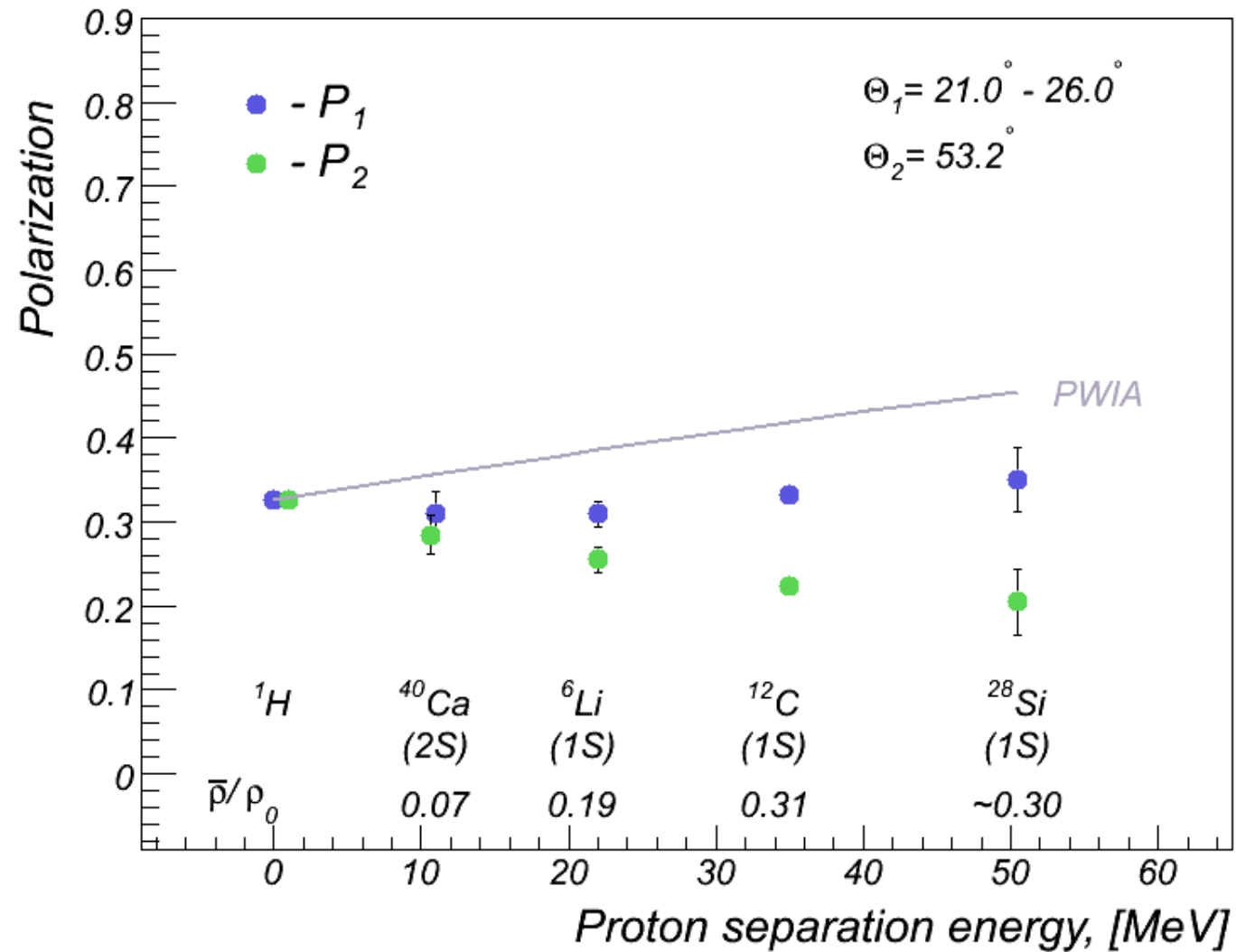
в целом: не более ± 0.015 на точку

Физические модели

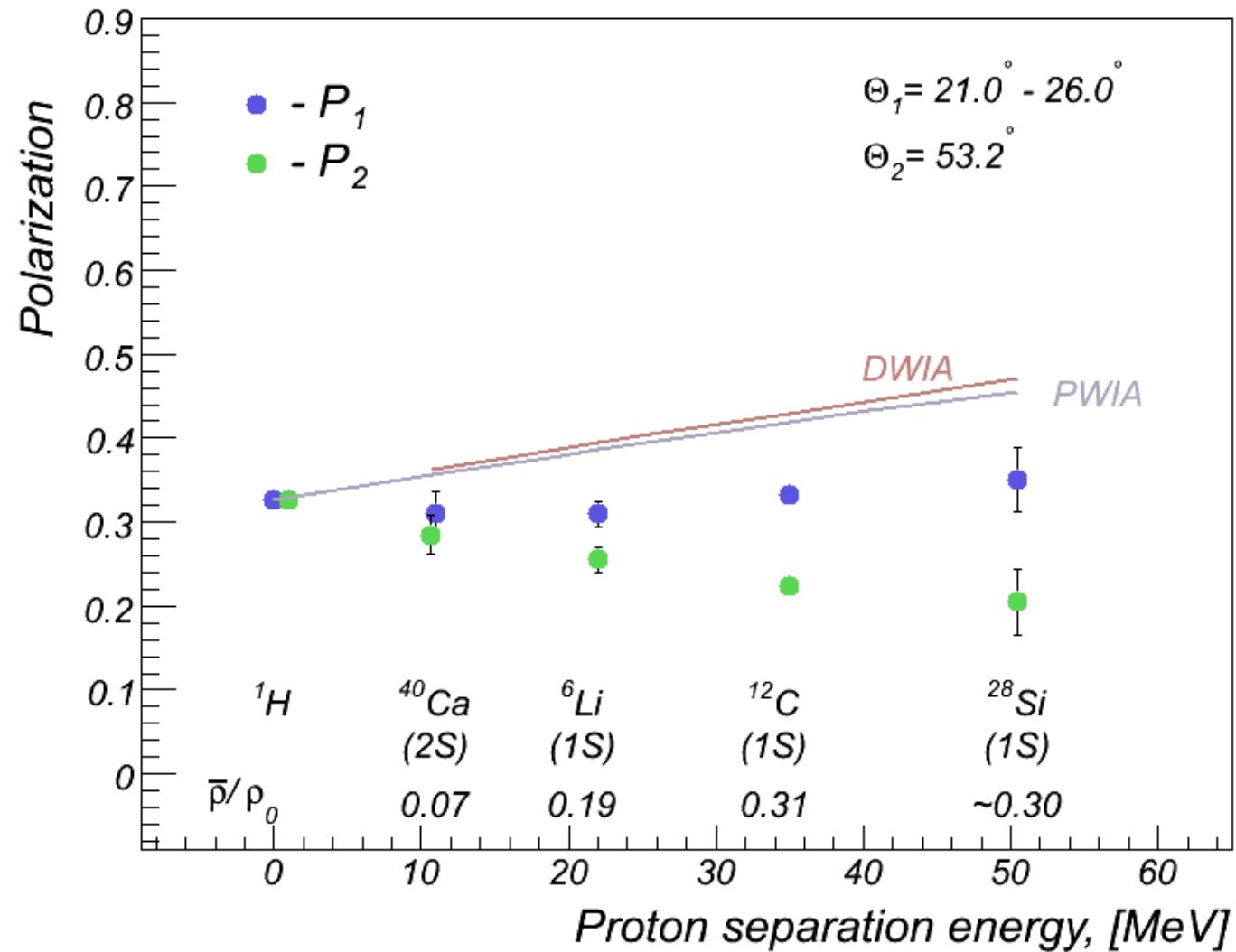
Модельное рассмотрение

- Фазовый анализ SP07 для PWIA оценок
 - “Final energy prescription”
- Компьютерный код THREEDEE
 - Расчёт искажений
 - Расчёт эффективной поляризации
 - Модель для учёта средней плотности
 - Широкие конфигурационные возможности

Импульсное приближение (PWIA)



Импульсное приближение (DWIA)



Модификация масс спиноров

- Т-матрица для $(p, 2p)$ реакции в релятивистском виде:

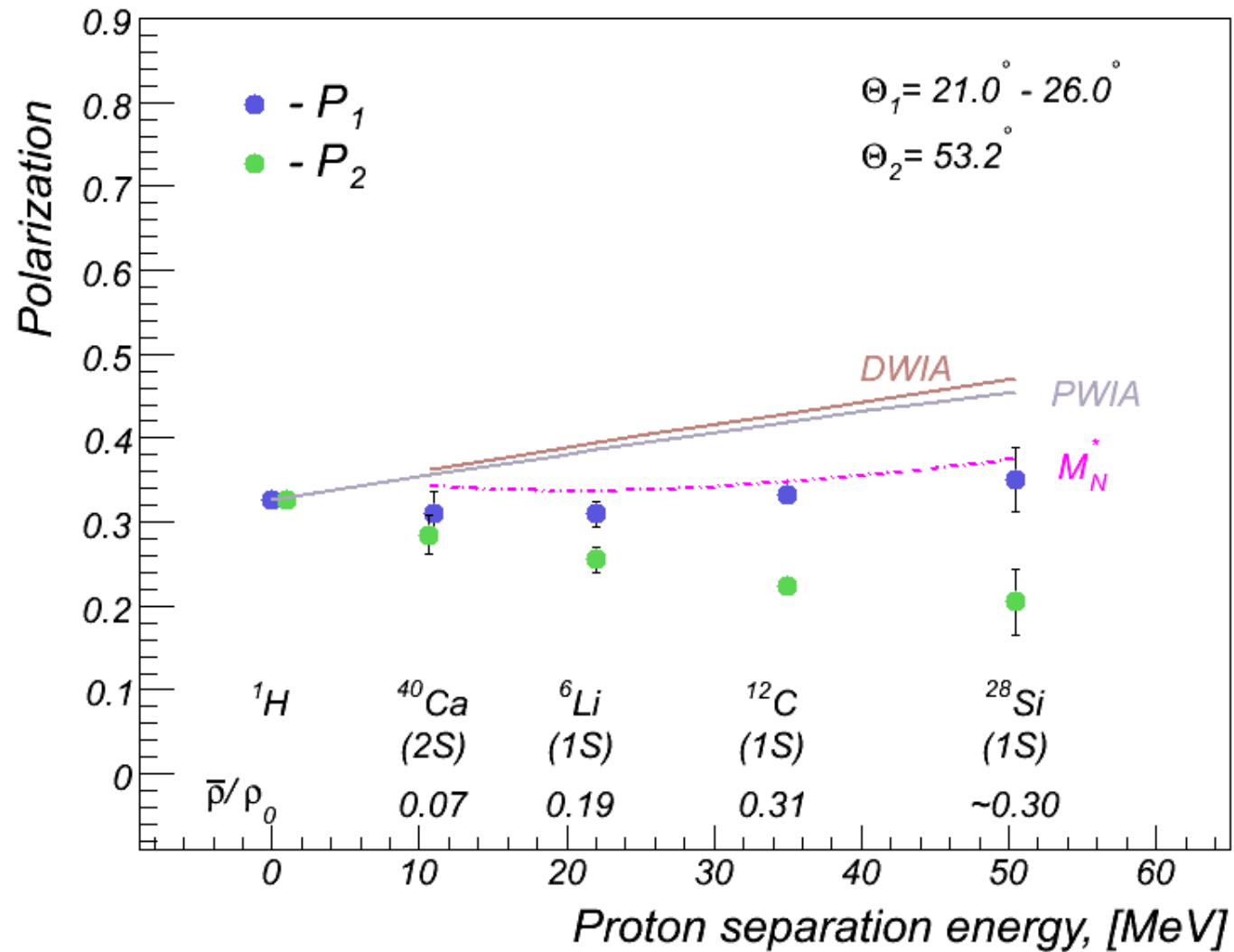
$$T = F_k \int \bar{\Psi}_1(r) \bar{\Psi}_2(r) \hat{F} \Phi(r) \Psi_0(r) dr$$

- Делаются модельные предположения:

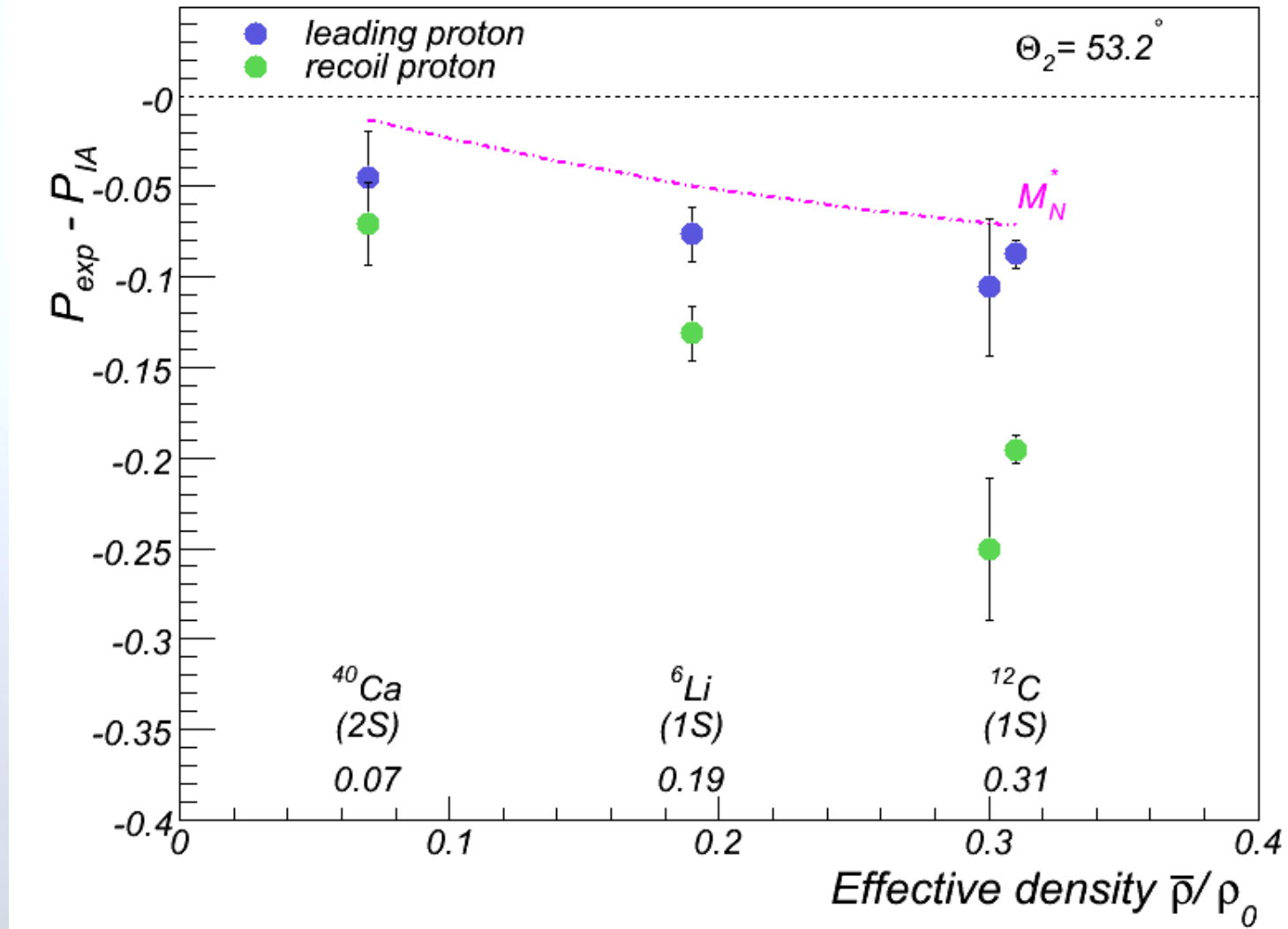
- 1) Амплитуда F от плотности не зависит
- 2) Масса нуклонов линейно падает с плотностью

-> вводится эффективная Т-матрица в нерелятивистском приближении и задача сводится к решаемой в рамках этого программного кода

Модификация масс спиноров



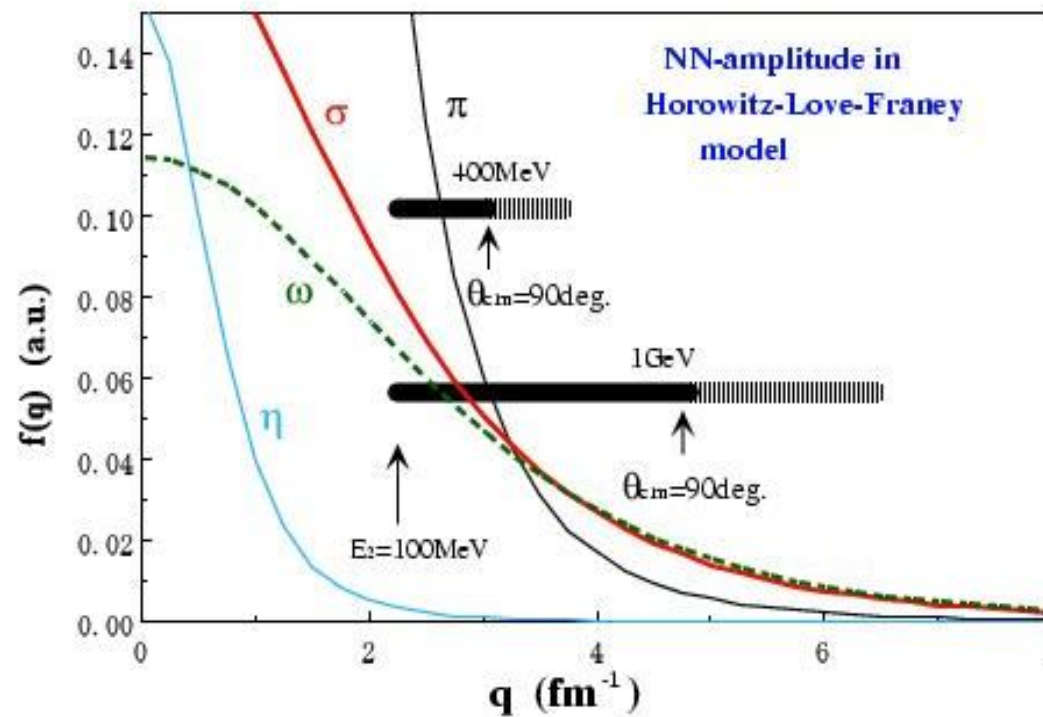
Отклонение от PWIA vs ρ



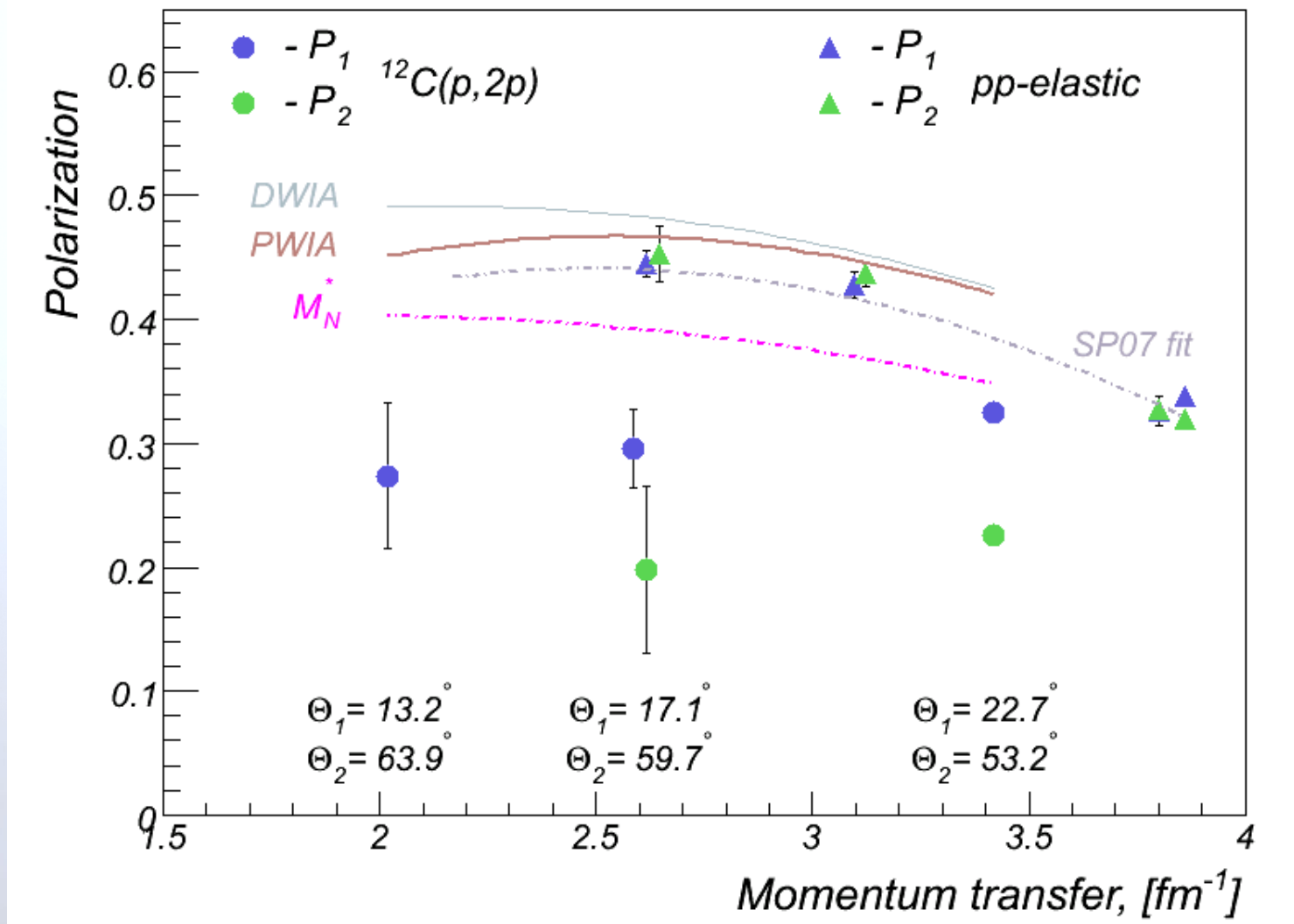
Зависимость от переданного импульса

- амплитуды в RLF модели:

$$\hat{F} \sim \frac{g_j^2}{q^2 + m_j^2} (1 + q^2 / \Lambda_j^2)^{-2}$$



Зависимость от переданного импульса



Положения, выносимые на защиту

Часть #1

- 1) С помощью двухплечевого магнитного спектрометра и поляриметров на основе пропорциональных камер впервые экспериментально измерены поляризации обоих вторичных протонов в реакции (p,2p) с протонами S-оболочек ядер ${}^6\text{Li}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{28}\text{Si}$ и ${}^{40}\text{Ca}$ при энергии 1 GeV.
- 2) Разработаны методика и программное обеспечение для быстрого считывания информации с электроники спектрометра, позволившие эффективно регистрировать корреляционные события в реакции (p,2p) в условиях большого фона случайных совпадений от инклюзивных процессов.
- 3) Создан пакет программ для моделирования установки методом Monte-Carlo и эффективной offline обработки данных.

Часть #2а

- 4) Установлено, что экспериментально измеренные значения поляризации в реакции $(p,2p)$ с протонами S-оболочек ядер существенно отличаются от предсказанных в рамках импульсного приближения с использованием параметров свободного протон-протонного рассеяния. Показано, что величина этого отличия определяется плотностью ядерной материи в эффективной области pp -взаимодействия.
- 5) Показано, что при больших ($q \sim 3.2 - 3.7 \text{ fm}^{-1}$) переданных импульсах величина поляризации лидирующих протонов может быть описана в релятивистском приближении с учётом модификации Дираковских спиноров взаимодействующих нуклонов в ядерной среде. Однако описать в рамках этого подхода данные, полученные на ядре ^{12}C при значениях переданного импульса $q < 2.6 \text{ fm}^{-1}$, не удаётся.

Часть #2b

6) Обнаружено, что поляризации лидирующего протона и протона отдачи в реакции $(p,2p)$ существенно отличаются по величине. В рамках нерелятивистского импульсного приближения с искажёнными волнами показано, что это отличие не может быть связано с тривиальным эффектом ядерной среды – деполяризацией вторичных протонов вследствие протон-нуклонных перерассеяний в ядре.

Статьи по теме диссертации

- 1) "Study of nuclear medium effects on polarization in (p,2p) scattering at 1 GeV", Czech.J.Phys., Vol.52 (2002) 293-300.
- 2) "Polarizations for proton knockout reactions from $S_{1/2}$ orbits at 1 GeV", PRC C69 (2004) 024604.
- 3) "First precise measurement of the polarization correlation parameter C_{nn} in elastic pp-scattering using unpolarized proton target and unpolarized 1 GeV proton beam", preprint PNPI 2782 (2008) 29p.
- 4) "Measurement of the polarization correlation parameter C_{nn} in the pp-elastic scattering with an unpolarized proton target and unpolarized 1 GeV proton beam", Phys.Atom.Nucl., V73 no 6 (2010) 927-936.
- 5) "Polarization and spin correlation parameters in proton knockout reactions from $S_{1/2}$ orbits at 1 GeV", <http://arxiv.org> [nucl-ex] 1203.4057 v1.