

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УГЛОВЫХ КОРРЕЛЯЦИЙ ПРОДУКТОВ ТРОЙНОГО ДЕЛЕНИЯ ^{233}U И ^{235}U ПОЛЯРИЗОВАННЫМИ ХОЛОДНЫМИ НЕЙТРОНАМИ

Petersburg Nuclear Physics Institute, Gatchina,	RUSSIA
Physikalisches Institut, Tübingen,	GERMANY
Institut für Kernphysik, TU Darmstadt,	GERMANY
Khlopin Radium Institute, St.Petersburg,	RUSSIA
Department of Physics, University of Juvaskyla,	FINLAND
Institut Laue-Langevin, Grenoble,	FRANCE

Тройное деление

• Деление тяжелых ядер при низких энергиях возбуждения в $2,5 \cdot 10^{-3}$ случаев сопровождается испусканием легких заряженных частиц. (1946)

• В ~97% это He и H изотопы, а в ~90% – α -частицы.

• Легкие частицы в делении, – «свидетель» разрыва ядерной материи \mathcal{P} возможность получить информацию о конфигурации ядерной системы в момент разрыва \mathcal{P} интенсивно изучались их выходы, энергетические и угловые распределения.

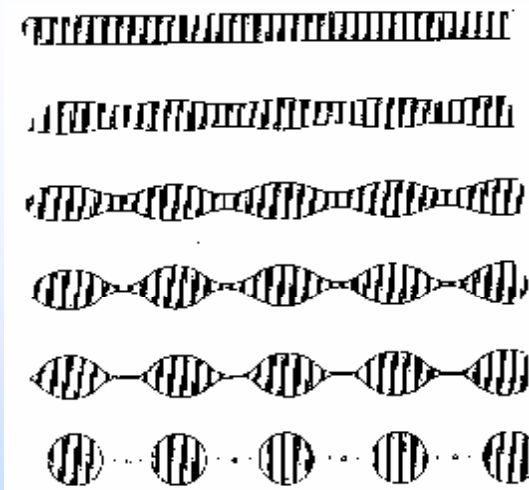
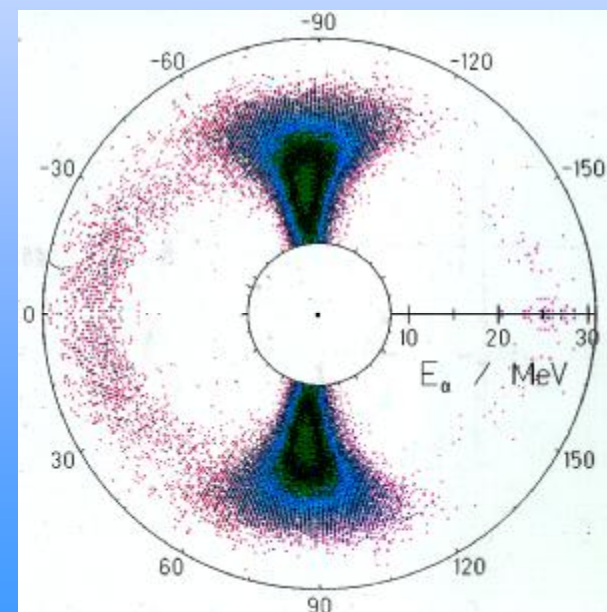


FIGURE 1. Formation of large and small droplets after the disintegration of a liquid cylinder. (From Plateau, *Le Statique Expérimentale et Théorique des Liquides Soumis aux Forces Moléculaires*, Gauthier-Villars, Paris, 1873. With permission.)



Тройное деление поляризованными нейтронами

В 1998 нашей коллаборацией по предложению Г.В.Даниляна было начато исследование асимметрии вида:

$$W(W)d\Omega \sim (1 + D \times s \times [p_f \cdot p_{TP}])d\Omega$$

p_f – импульс лёгкого осколка деления (FF),

p_{TP} – импульс тройной частицы (TP),

σ – спин нейтрона.

Первоначально рассматривалась по аналогии с аналогичной корреляцией в распаде нейтрона ($s \times [p_e \cdot p_n]$), как возможный тест Т-инвариантности.

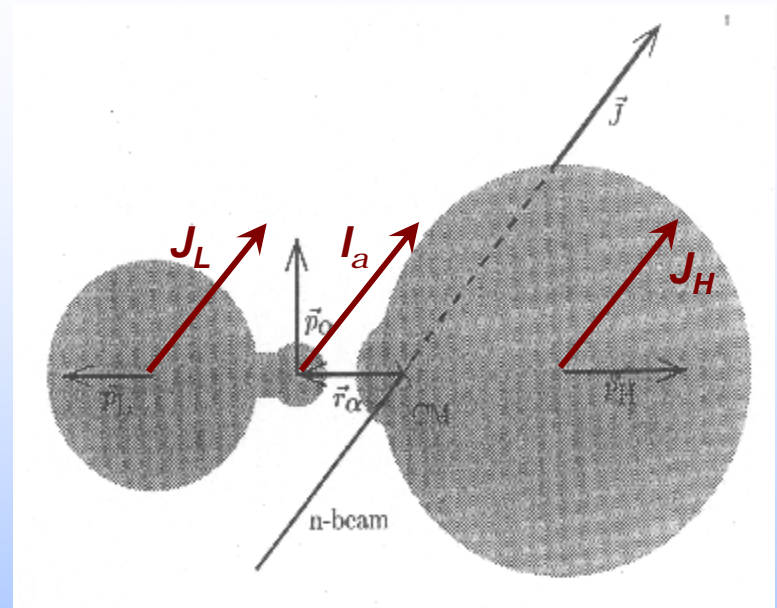
Но в неупругих процессах такая корреляция может возникать в результате взаимодействий в начальном и конечном состояниях. Корреляция связана с механизмом деления.

В первых же экспериментах на пучке холодных поляризованных нейтронов в ИЛЛ (Гренобль) была обнаружена такая асимметрия в тройном делении ^{233}U на уровне $\sim 10^{-3}$!

Это заставило искать менее сенсационное объяснение и предпринимать дальнейшие исследования.

Модель Бунакова

- Есть некоторый вклад начального спина нейтрона в соответствующую проекцию углового момента осколков в момент деления
- ТР уносит угловой из делящейся системы
- В зависимости от направления эмиссии ТР, соответствующая проекция углового момента осколков увеличивается или уменьшается
- плотность уровней системы зависит этой проекции, а в статистической модели плотность уровней определяет вероятность!



Модель Бунакова

Выражение для коэффициента асимметрии i -фрагмента в статистическом подходе Бунакова:

$$D_i \approx \frac{\hbar^2 J l_a \sqrt{a_i}}{2\mathfrak{I}_i \sqrt{E_{xi}^{sc}}} \cdot m_{11} P(J)$$

Спин компаунд ядра

Угловой момент TP

Параметр плотности уровней

Поляризация компаунд ядра

Фактор передачи поляризации

Внутреннее возбуждение осколков

Момент инерции

$$P(J^+) = (2I + 3) / [3 \times (2I + 1)] \times P_n \quad \text{для} \quad J^+ = I + 1/2$$

$$P(J) = -1/3 \times P_n \quad \text{для} \quad J = I - 1/2$$

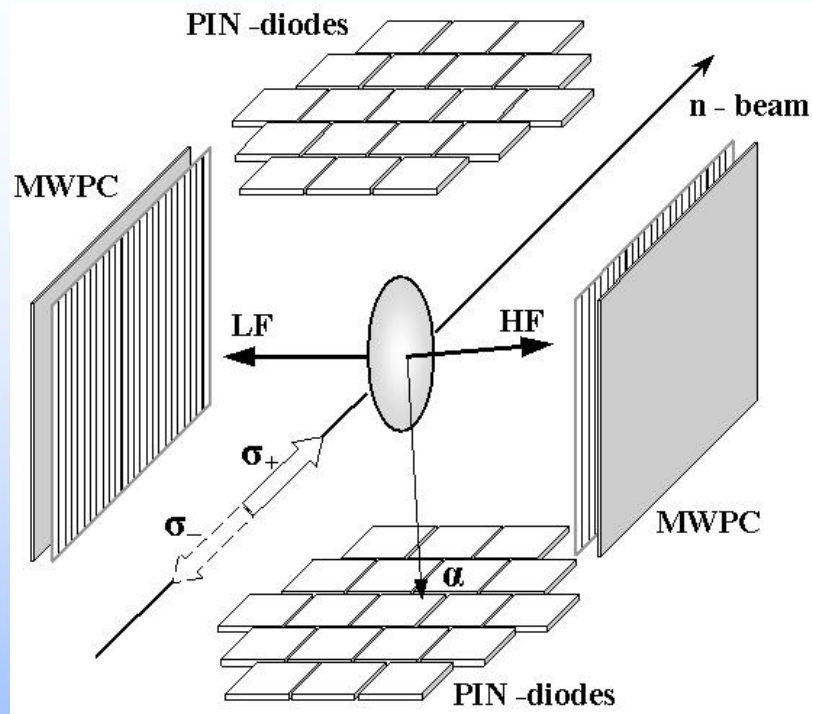
Сечение при низких энергиях – суперпозиция резонансов \mathfrak{P}

$$D = [D(J^+) \times \sigma(J^+) + D(J) \times \sigma(J)] / [\sigma(J^+) + \sigma(J)]$$

Экспериментальное исследование

- Измерение коэффициента Т-нечётной корреляции для различных изотопов-мишеней (^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu , ^{245}Cm)
- Исследование зависимостей асимметрии от параметров продуктов деления:
 - типа легкой частицы,
 - её энергии,
 - параметров основных осколков,
 - относительных углов разлета продуктов
- Исследование зависимости эффекта от энергии поляризованного нейтрона
- Измерение Т-нечетной асимметрии для нейтронов деления

Общая схема экспериментов



Экспериментальная величина асимметрии определялась следующим образом:

$$\langle D \rangle_{\text{exp } i} = \frac{N_i^{(-)} - N_i^{(+)}}{N_i^{(-)} + N_i^{(+)}}$$

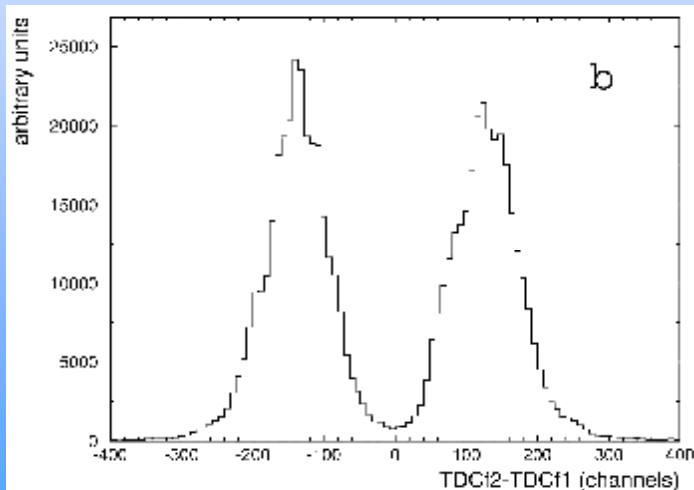
где $N_i^{(-)}$ счёт совпадений TP–FF для разных критериев отбора по углам, E_{TP} и другим регистрируемым параметрам акта деления; (-) (+) – направления спина нейтрона, которое периодически переворачивается (~1 Гц).

- Сравнение величин $\langle D \rangle_{\text{exp } i}$ полученных при эквивалентных параметрах i , но для событий, зарегистрированных симметричными комбинациями детекторов, позволяет контролировать ложные систематические эффекты. (Статистически значимое различие означает наличие систематики)
- Дополнительный контроль приборной асимметрии изменением направления ведущего магнитного поля (~раз в сутки). (Различие в абсолютных значениях измеренной асимметрии \mathcal{P} присутствие ложного приборного эффекта.)

Общая схема экспериментов (разделение осколков на группы)

- В делении два фрагмента испускаются в приблизительно противоположных направлениях. Причём их средние массы существенно отличаются (~ 100 и 140 а.е.м)
- Очевидно, что знаки коэффициентов асимметрий противоположны для них. Требуется, как минимум, отделить фрагменты одной массовой группы от другой.
- Разделение проводилось методом времени полета стартом служил сигнал с детектора легких частиц, стоп – сигнал с детекторов осколков :

$$(t_{\text{fragment1}} - t_{\alpha}) - (t_{\text{fragment2}} - t_{\alpha}) = (t_{\text{fragment1}} - t_{\text{fragment2}})$$

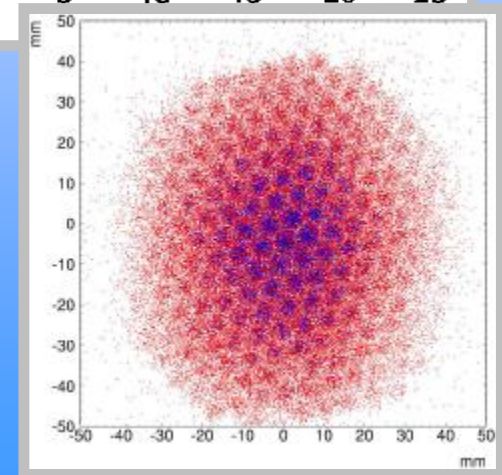
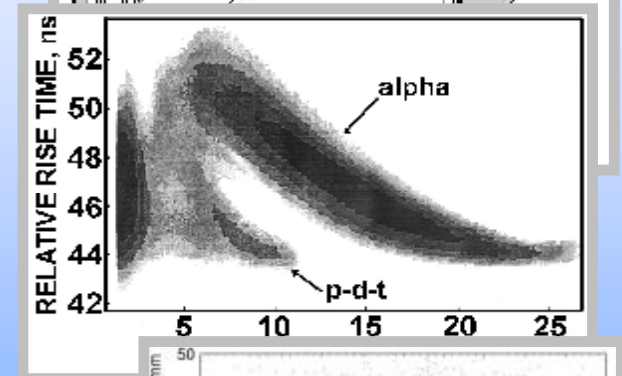
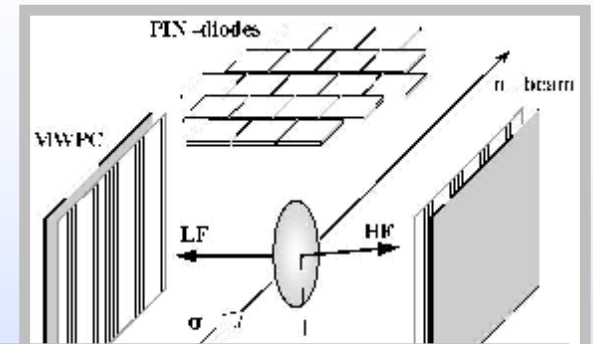


типичное распределение
($t_{\text{fragment1}} - t_{\text{fragment2}}$)

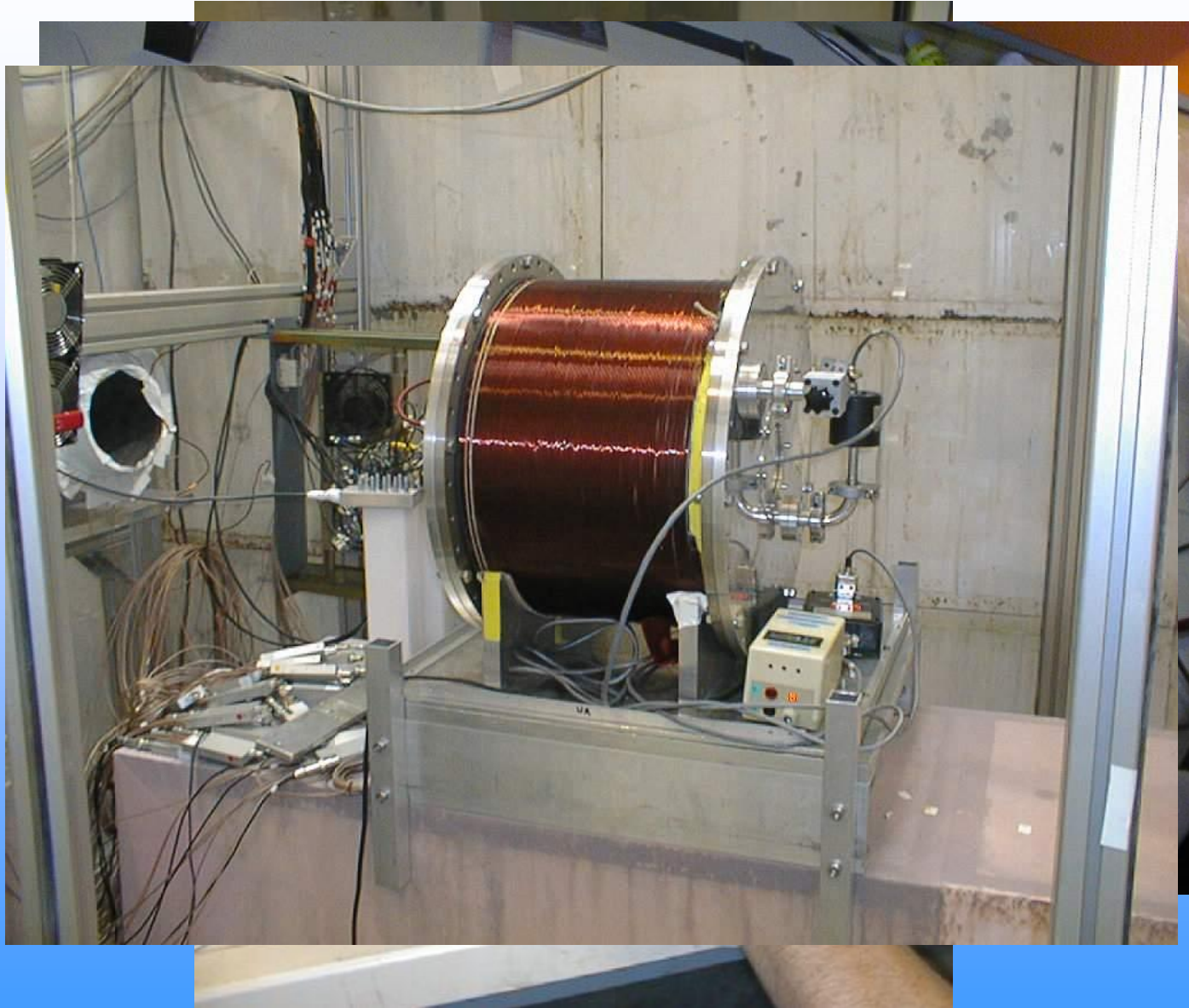
$$M1/M2 \gg t_{\text{fragment1}} / t_{\text{fragment2}}$$

Исследование Т-нечётной асимметрии в зависимости от параметров продуктов деления

- Нейтронный пучок (PF1 в ИЛЛ):
 $\langle \lambda \rangle \sim 4.5 \text{ \AA}$; $\Phi_{\text{capture}} \sim 6 \cdot 10^8 \text{ n/cm}^2\text{s}$;
продольно поляризован $\sim 94 \pm 1 \%$;
радиочастотный флиппер 1 Гц
- Мишень $\sim 3.4 \text{ мг } ^{233}\text{U}$ (UF_4) $\sim 100 \text{ мкг/см}^2$ на тонкой титановую пленке ($\sim 100 \text{ мкг/см}^2$)
- 12 + 12 PIN диодов для ТР, каждый 30 × 30 мм, толщина 380 мкм
- **Определение типа частицы по времени нарастания сигналов с PIN диодов**
- **Координатная чувствительность MWPC** ($\sim 2 \text{ мм}$ по обеим координатам) φ положение на мишени и углы φ можно определить:
 - массу осколков : $M1/M2 \gg T1/T2$,
(Разрешение невелико L , поскольку $DT/T \sim 1/10$)



Установка (фото)



23 января 2006 г.

XL Зимняя школа ПИЯФ

А. Гагарский

10

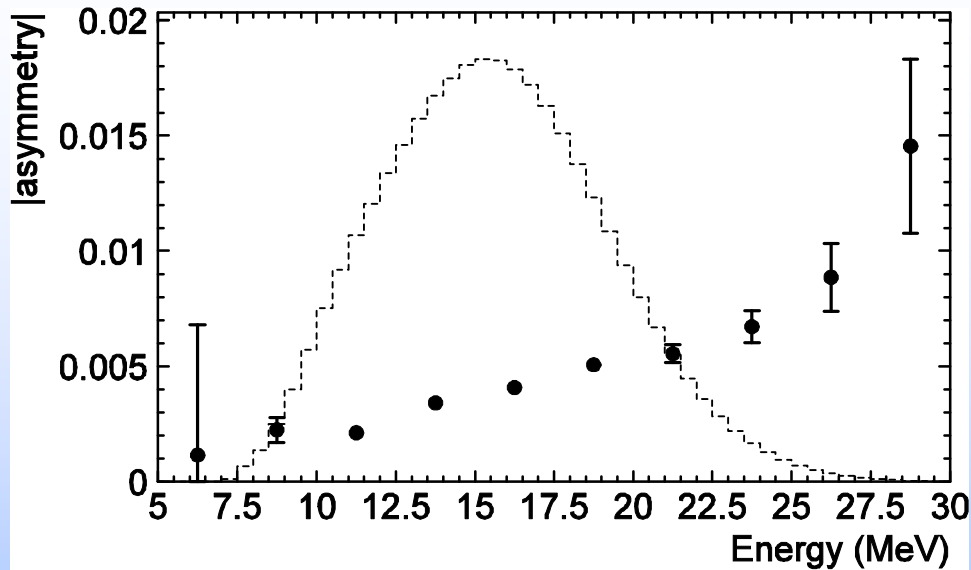
Исследование Т-нечётной асимметрии в зависимости от параметров продуктов деления
(средние D для тритонов и альфа-частиц)

Средние значения коэффициента Т-нечетной асимметрии D в делении ^{233}U холодными нейтронами :

$$\langle D \rangle_a = -3.9 \pm 0.12 \cdot 10^{-3} \text{ и } \langle D \rangle_{p-d-t} = -2.9 \pm 0.5 \cdot 10^{-3}$$

(После ввода поправок на геометрическую эффективность и поляризацию нейтронного пучка – всего ~ 1.2 ; все остальные поправки – на фон случайных совпадений, на смешивание групп осколков – очень малы).

Исследование Т-нечётной асимметрии в зависимости от параметров продуктов деления (от E_{TP})



В модели Бунакова это разумно объясняется – параметр E_{xi} в формуле !

$$D_i \approx \frac{\hbar^2 J l_a \sqrt{a_i}}{2 \mathfrak{S}_i \sqrt{E_{xi}^{sc}}} \cdot m_{11} P(J)$$

Известна анти-корреляция $E_{TP} - \langle T X E \rangle$ тройном делении. Полагаем, что анти-корреляция есть и для E_{xi}

Длинный спуск



вытянутая конфигурация



сильный нагрев (большое E_{xi})



медленная TP (маленькое E_{α})

\hat{U}

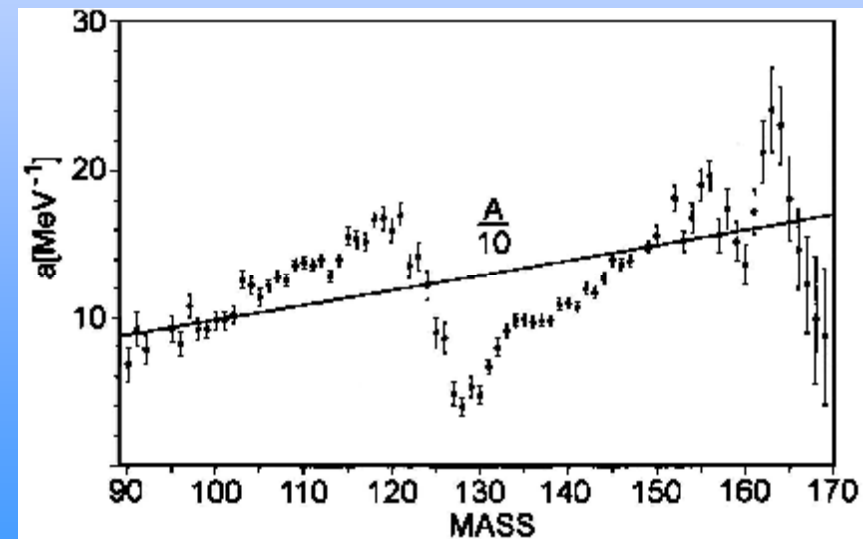
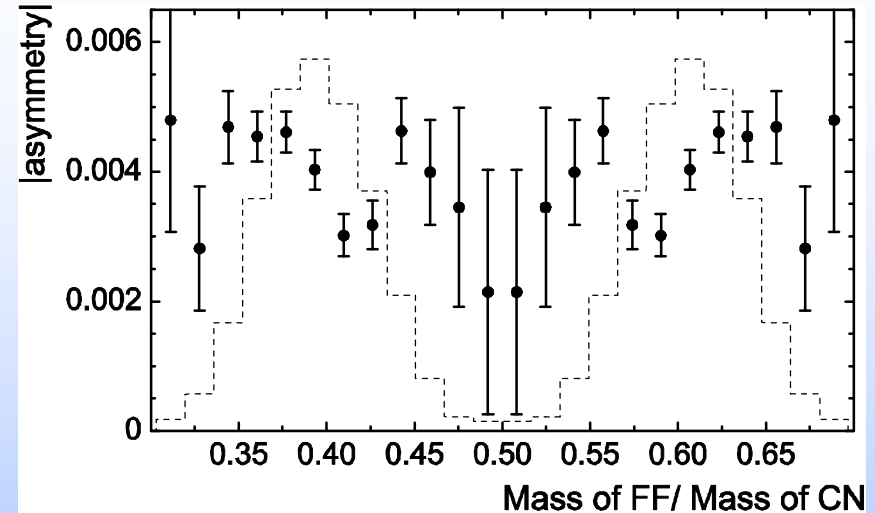
В уранах $\langle E_{xi} \rangle \gg 6$ МэВ $\langle E_{\alpha} \rangle \gg 16$ МэВ,
полагаем $\langle E_{xi} \rangle \gg 0$ МэВ $\langle E_{\alpha} \rangle \gg 30$ МэВ

Р Эмпирическое выражение : $E_{xi} = 6 - 0.2 E_{\alpha}$ Р $D \sim (6 - 0.2 E_{\alpha})^{-1/2}$

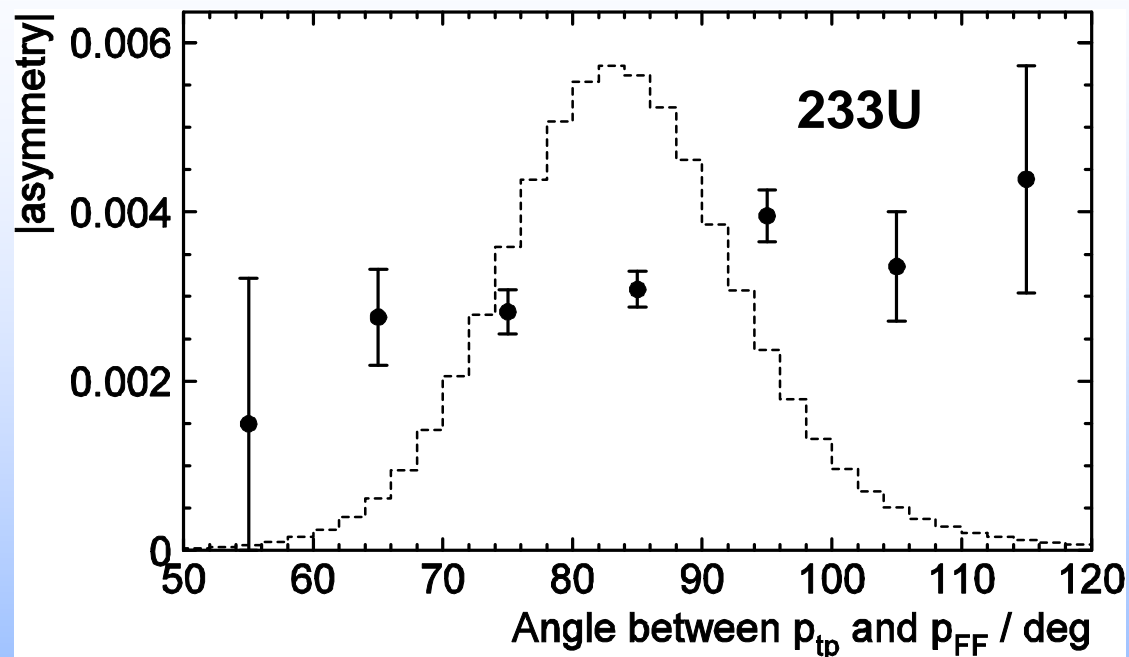
Исследование Т-нечётной асимметрии в зависимости от параметров продуктов деления (от массы осколков)

- По-видимому, присутствует сильная зависимость от массы FFs (она еще очень замазана разрешением!)
- Зависимость тоже следует из модели – параметры a_i и \bar{A} в формуле!

$$D_i \approx \frac{\hbar^2 J_a \sqrt{a_i}}{2\mathcal{S}_i \sqrt{E_{xi}^{sc}}} \cdot m_{11} P(J)$$

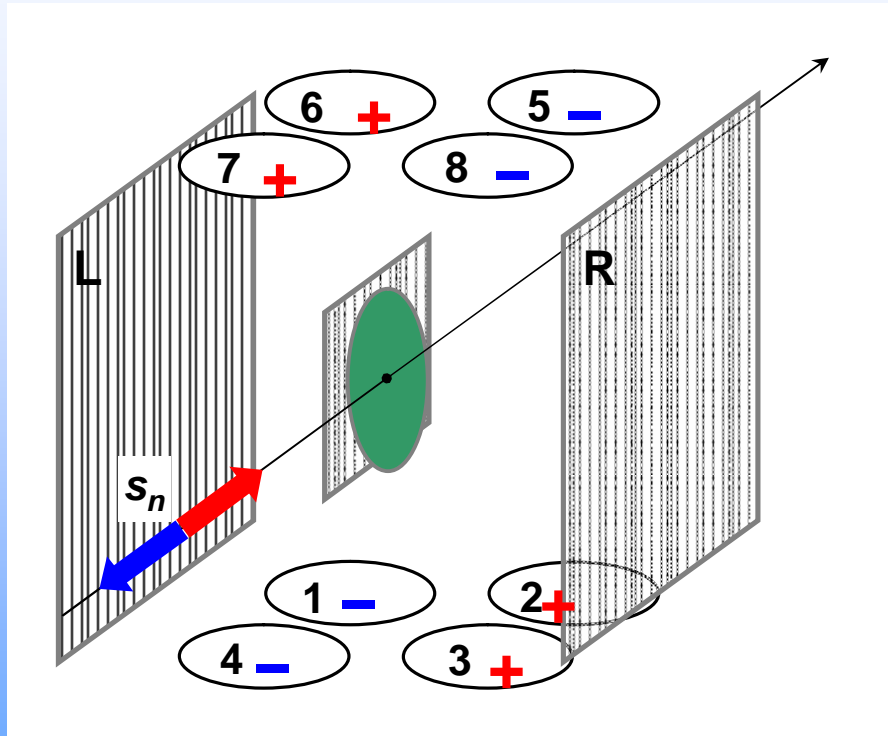


Исследование Т-нечётной асимметрии в зависимости от параметров продуктов деления (от углов)



**Обнаружение угловой зависимости
коэффициента асимметрии D в тройном делении
 ^{235}U холодными поляризованными нейтронами
(ROT эффект) (PF1B, ILL, Гренобль, июль 2005)**

Схема эксперимента (^{235}U , продольная поляризация)



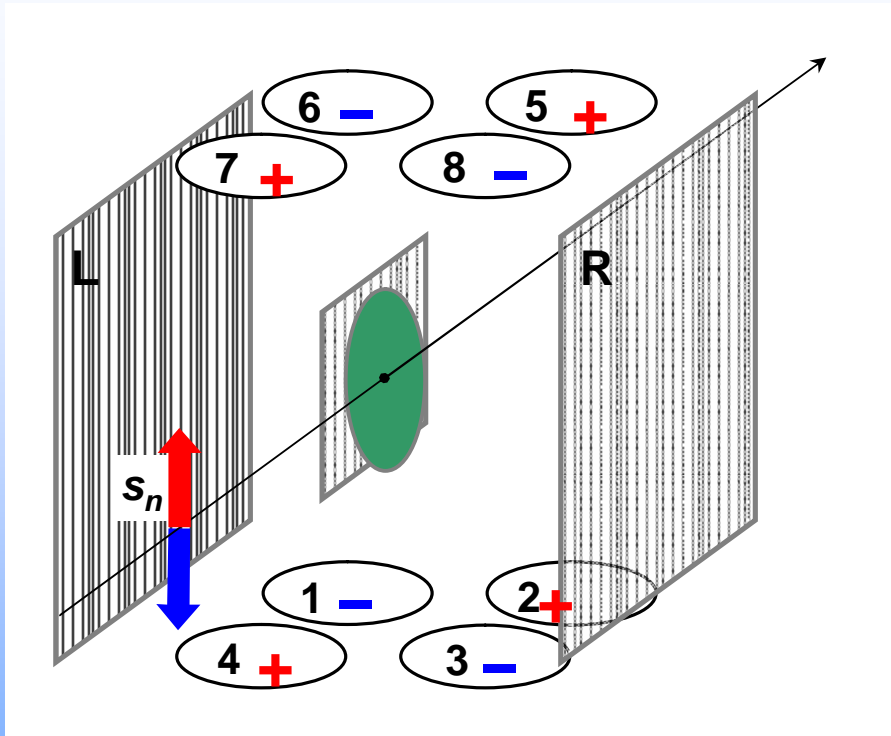
1÷8 – Детекторы лёгких частиц (ППД)
 L,R – Детекторы осколков деления (Многопроводные пропорциональные счетчики низкого давления)

Средние значения коэффициента асимметрии

Комбинация детекторов	1+4+5+8	2+3+6+7
$\langle D \rangle \times 10^3$	$-3,4 \pm 0,19$	$+3,2 \pm 0,19$

$$D_i = \frac{N_i^- - N_i^+}{N_i^- + N_i^+}$$

ROT эффект (поперечная поляризация - 1)

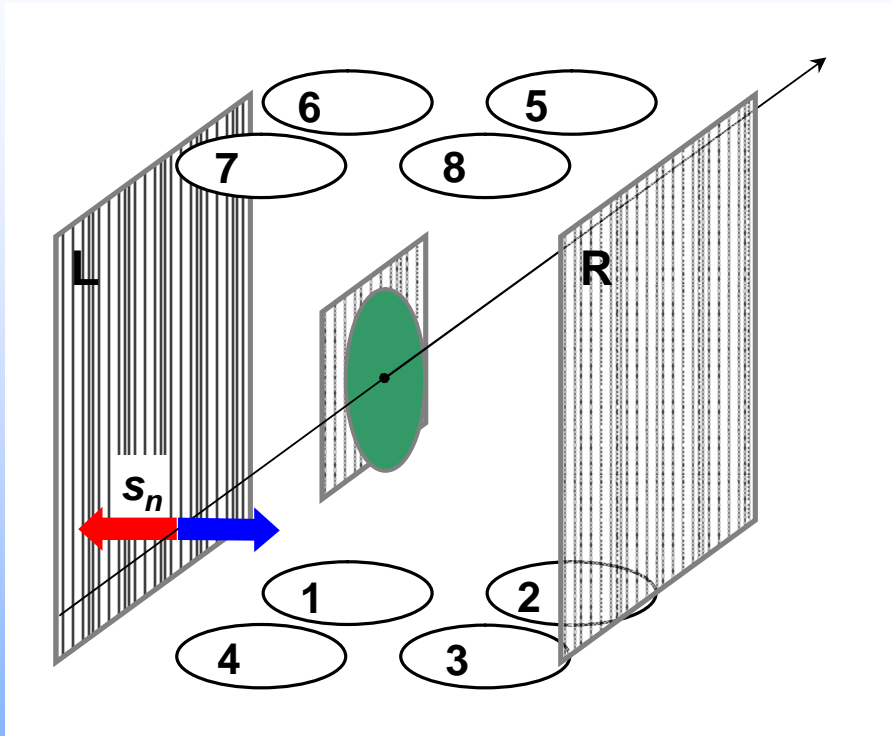


Средние значения коэффициента асимметрии (исправить!!!)

Комбинация детекторов	2+4+5+7	1+3+6+8
$\langle D \rangle \times 10^3$	$+0,92 \pm 0,26$	$-1,39 \pm 0,23$

$$D_i = \frac{N_i^- - N_i^+}{N_i^- + N_i^+}$$

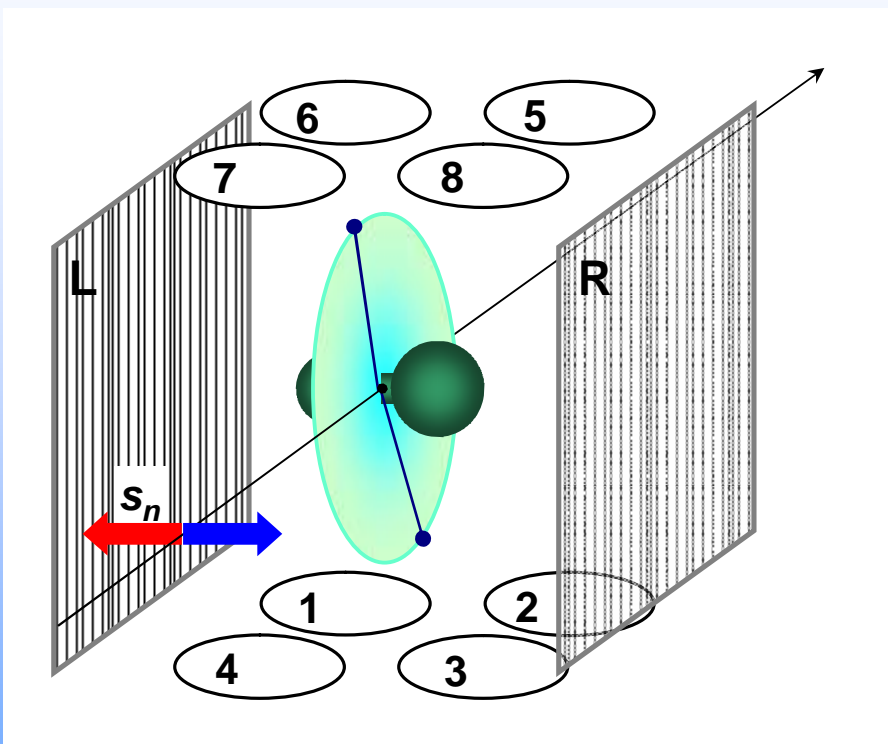
ROT эффект (поперечная поляризация - 2)



Средние значения коэффициента асимметрии		
<i>Комбинация детекторов</i>	1+4+5+8 <i>и</i> 2+4+5+7	2+3+6+7 <i>и</i> 1+3+6+8
$\langle D \rangle \times 10^3$	~ 0	~ 0

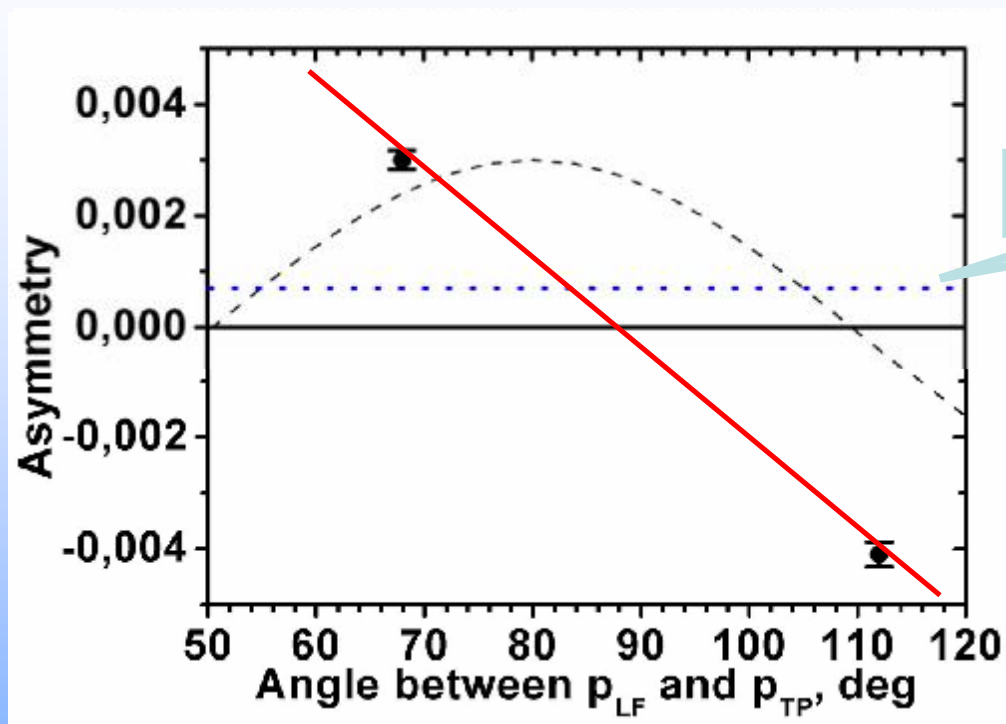
$$D_i = \frac{N_i^- - N_i^-}{N_i^- + N_i^-}$$

Гипотеза вращения плоскости углового распределения легких частиц



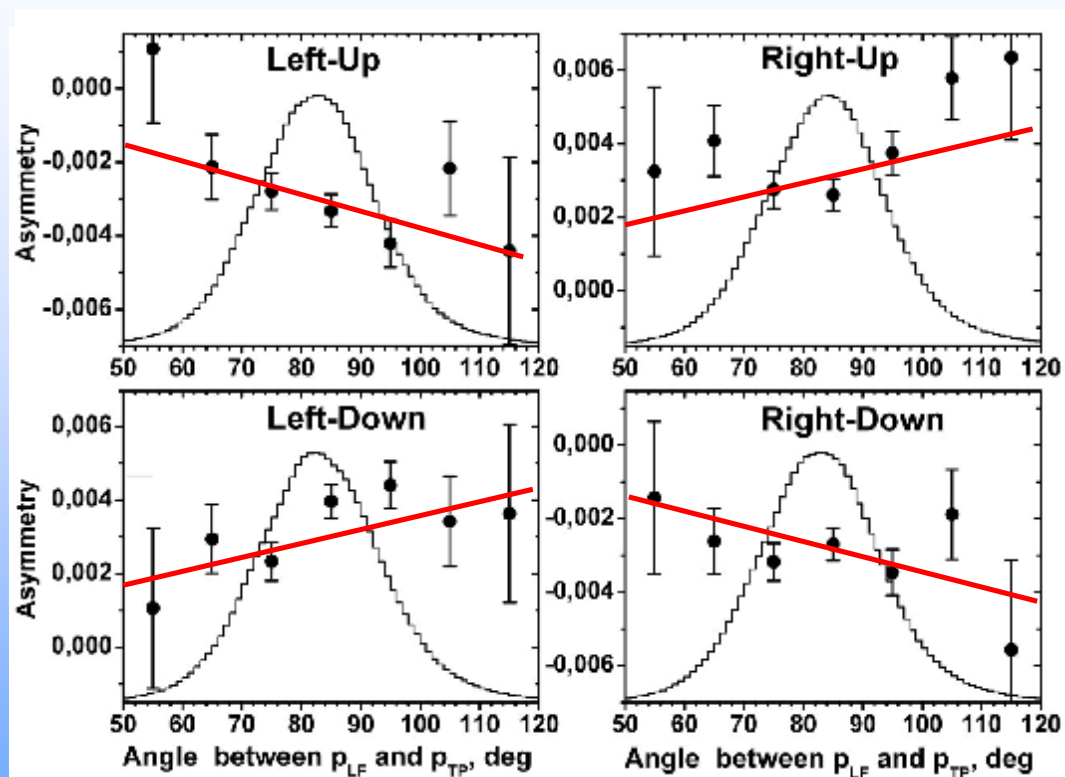
Полученное значение D соответствует сдвигу углового распределения альфа-частиц относительно легкого осколка на $\sim 0,1^\circ$ при переключении спина

Угловая зависимость асимметрии (^{235}U , продольная поляризация)

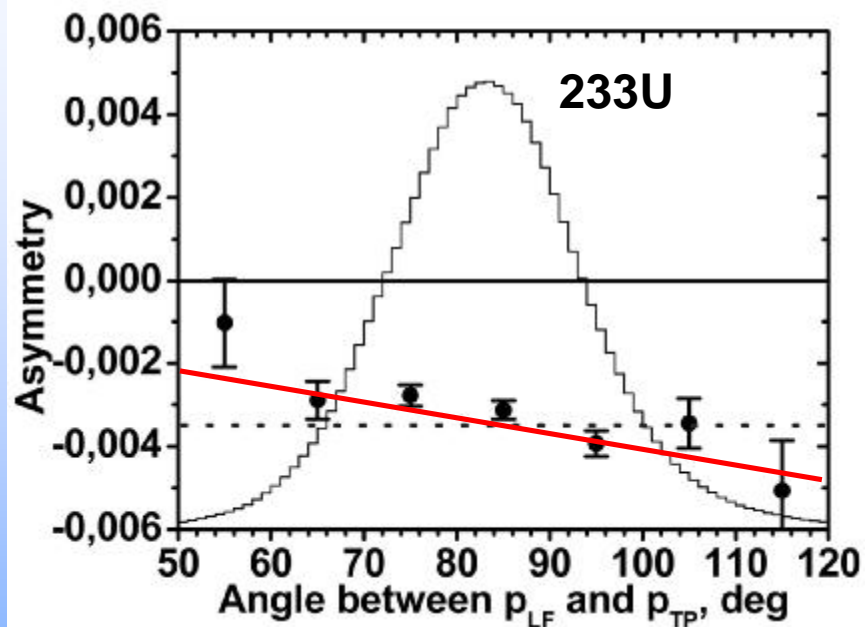


$+0.66 \pm 0.13 \cdot 10^{-3}$

Угловая зависимость асимметрии (^{233}U , продольная поляризация)



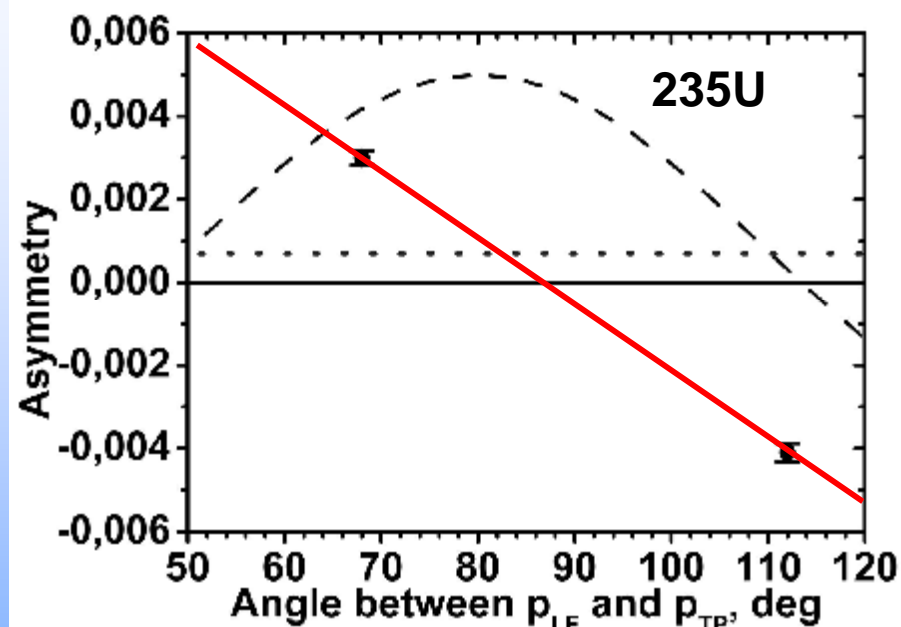
Угловая зависимость асимметрии для ^{233}U и ^{235}U (сравнение)



233U

TRI ~ 0.004

ROT ~ 0.001

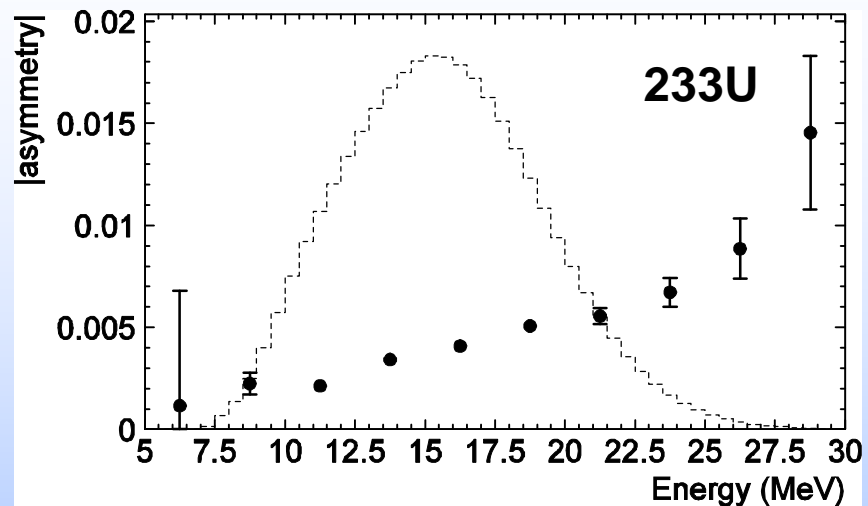
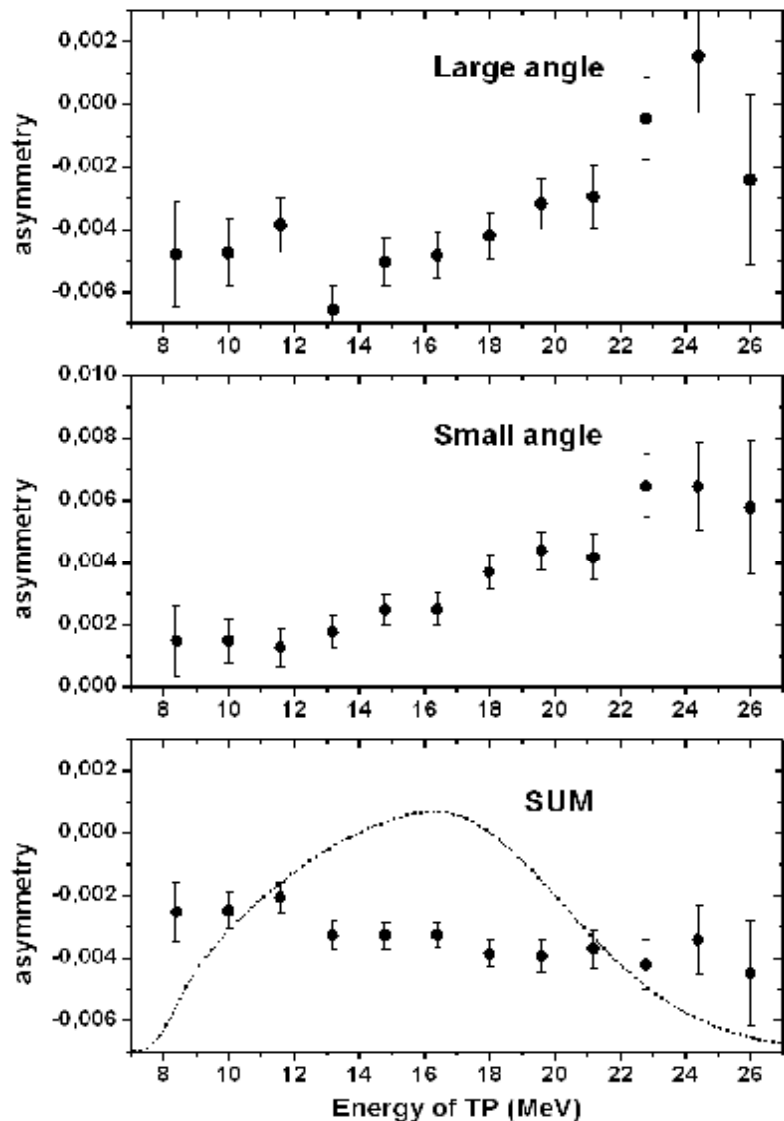


235U

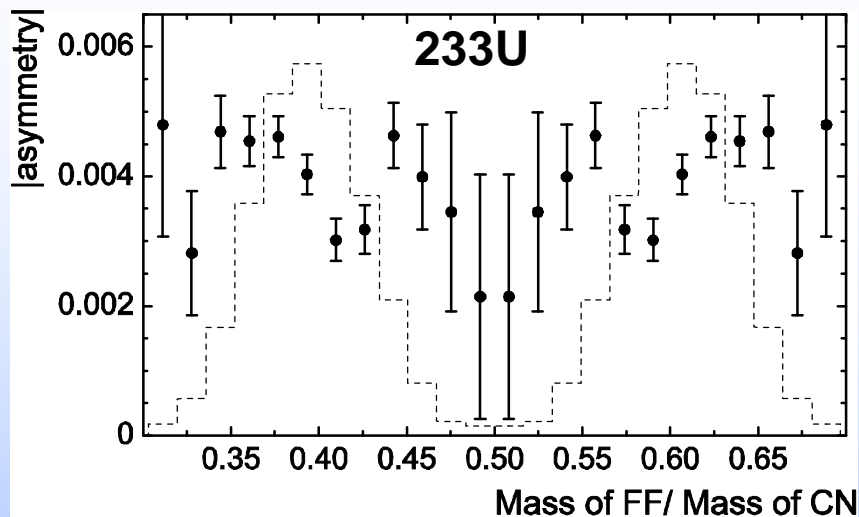
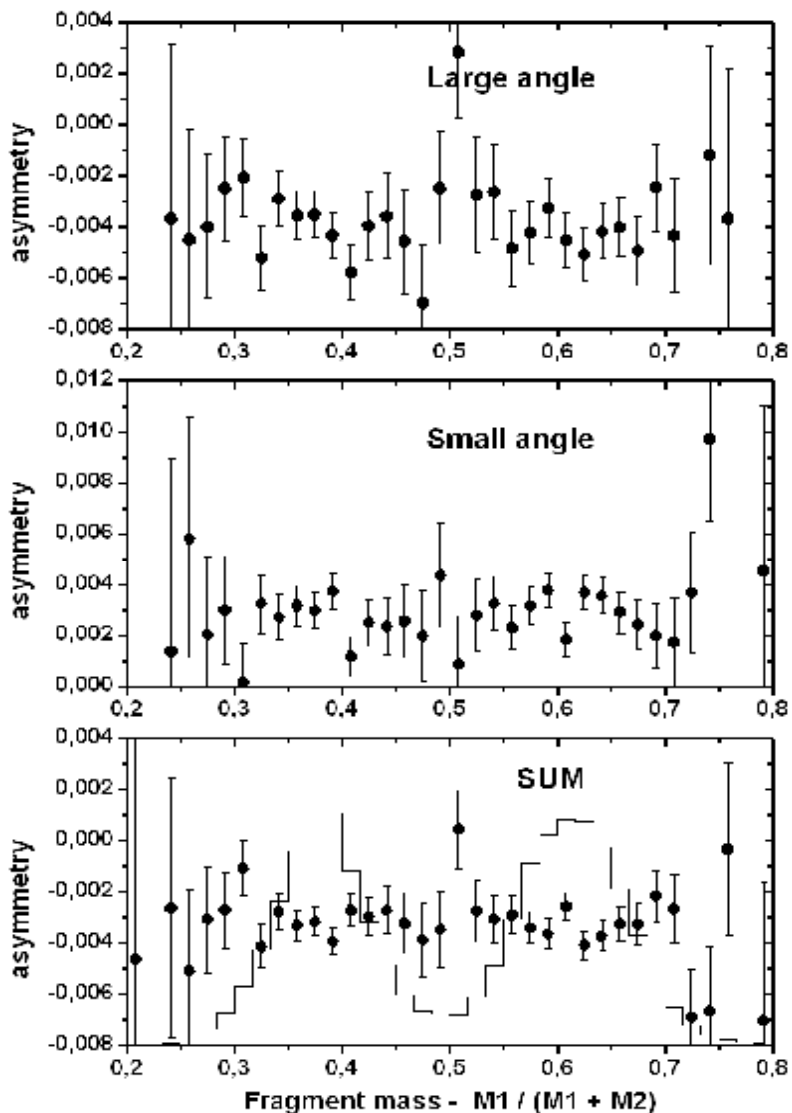
TRI ~ 0.001

ROT ~ 0.004

Зависимость эффекта ROT в ^{235}U от энергии третьей частицы



Зависимость эффекта ROT в ^{235}U от массы основных осколков деления



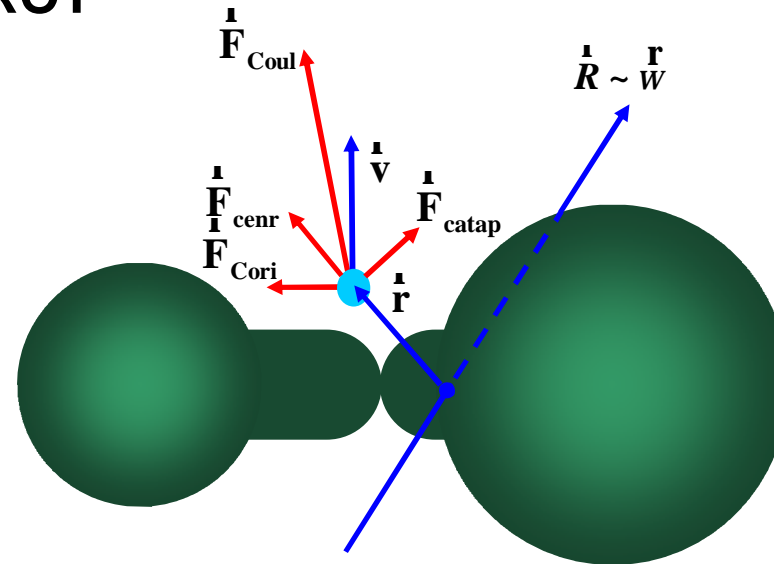
Механизм возникновения ROT эффекта

$$F_{\text{Cori}} = -2m [\dot{v} \times \omega]$$

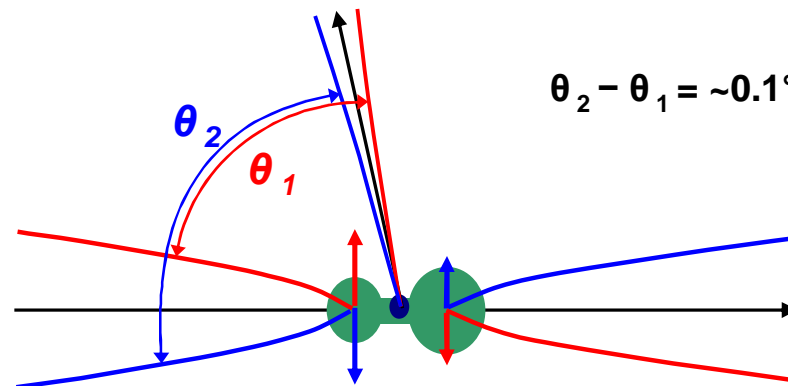
$$F_{\text{catap}} = m [r \times d\omega/dt]$$

$$F_{\text{centr}} = m\omega \times [r \times \omega]$$

ROT

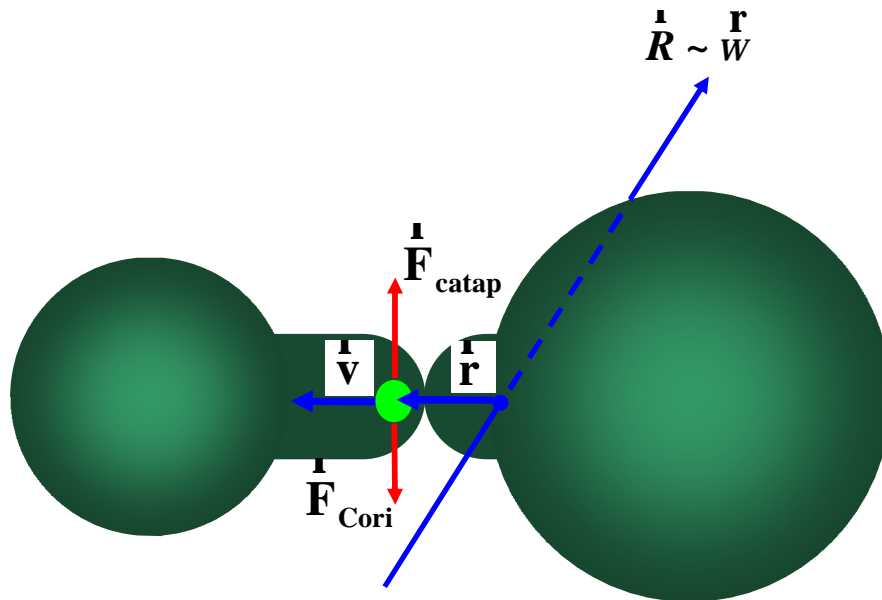


Траектории продуктов деления для двух направлений вращения ядра (схематически)



Механизм возникновения TRI эффекта

TRI



$$F_{\text{Cori}} = -2m [\mathbf{v} \times \boldsymbol{\omega}]$$

$$F_{\text{catap}} = m [r \times d\boldsymbol{\omega}/dt]$$

$$F_{\text{centr}} = m\boldsymbol{\omega} \times [r \times \boldsymbol{\omega}]$$

Заключение

- Обнаружена и исследована корреляция $s \times [p_f \sim p_{TP}]$ в тройном делении ^{233}U , ^{235}U
- В ^{233}U
 - Средний коэффициент асимметрии для альфа частиц $-3.9 \pm 0.12 \cdot 10^{-3}$
 - Практически нет зависимости коэффициента асимметрии от угла между легким осколком и третьей частицей (вариация $\sim 1 \cdot 10^{-3}$)
 - Обнаружена сильная зависимость коэффициента асимметрии от E_{TP}
 - Обнаружена сильная зависимость коэффициента асимметрии от массы осколков
- В ^{235}U
 - Средний коэффициент асимметрии для третьих частиц $+0.66 \pm 0.13 \cdot 10^{-3}$
 - Очень сильная зависимость коэффициента асимметрии от угла между легким осколком и третьей частицей
 - Среднее **абсолютное значение** коэффициента асимметрии для третьих частиц $3.3 \pm 0.13 \cdot 10^{-3}$
 - Обнаружена сильная зависимость коэффициента асимметрии от E_{TP} , но совершенно отличная от наблюдаемой в ^{233}U !
 - Не обнаружено зависимости коэффициента асимметрии от массы осколков

Заключение

- Высказана гипотеза о том, что подобные корреляции возникают как результат вращения делящегося ядра вблизи точки разрыва
- На основании экспериментальных фактов сделано предположение о существовании двух эффектов возникающих в результате этого вращения:
 - **ROT**: движение в кулоновском поле после разрыва вращающегося ядра, прямой индикатор этого вращения, позволяет определить его скорость и направление
 - **TRI**: влияние вращения на внутреннее движение нуклонов в шейке прямо перед разрывом или в момент разрыва.
 - Оба эффекта связаны с динамикой деления, с конфигурацией в момент разрыва ... → новый инструмент в физике деления
- Планируется выполнить более детальные измерения для ^{235}U :
 - Координатная чувствительность для детекторов осколков, меньший размер детекторов легких частиц → угловое разрешение $5\div 10^\circ$
 - Улучшенные спектрометрические качества детекторов третьей частицы
 - Улучшенное разрешение по массам осколков

The end

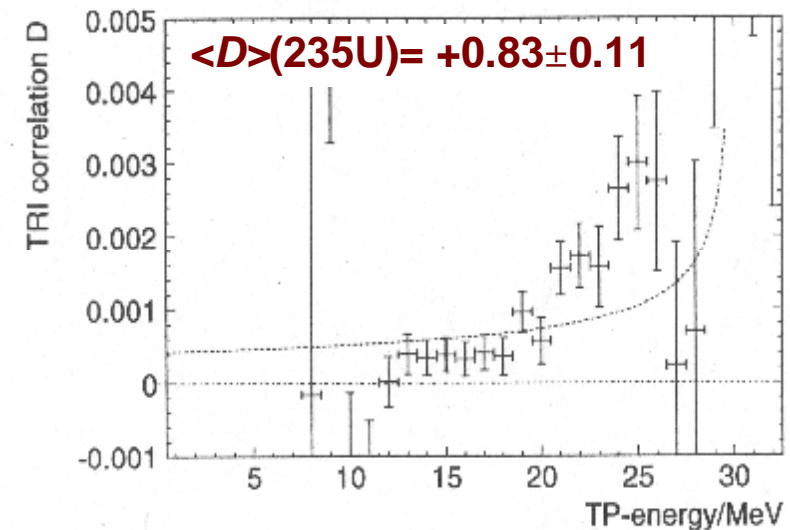
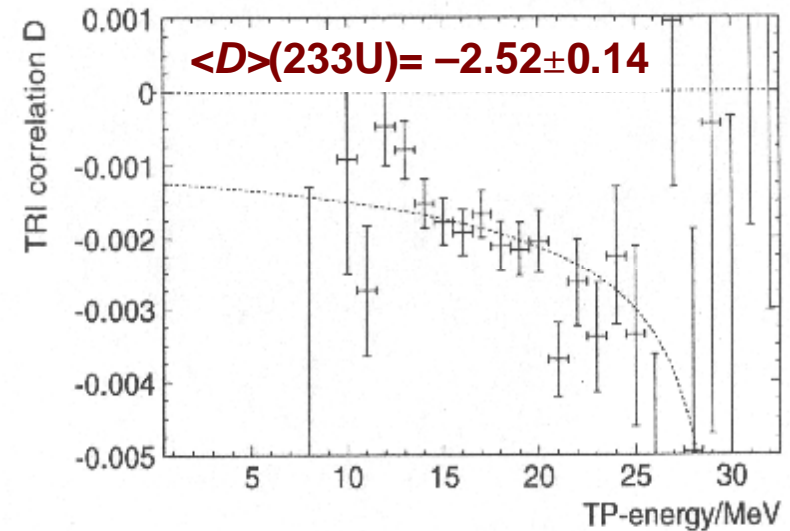
ССЫЛКИ

- K. Schreckenbach, *Internal ILL Report 88SCO9T*, ILL, Grenoble, 1988
- K. Schreckenbach et al., in *Time Reversal Invariance and Parity Violation in Neutron Reactions*, C.R. Gould et al (Ed.), World Scientific, Singapore, 1994, p. 187
- P. Jesinger et al., *Proc. of the International Workshop "Nuclear fission and fission product spectroscopy"*, Seyssins, France, AIP Conference Proceedings 447, Woodbury, New York, 1998, p. 395
- P. Jesinger et al., *Nucl. Instr. Methods*, A440 (2000), 618
- P. Jesinger et al., *Yad. Fiz.*, 65 (2002), 662 [*Phys. At. Nucl.*, 65 (2002), 630]
- A. Gagarski et al., *Proc. International Seminar ISINN-9*, Dubna, Russia, 2001, 214-218
- V.E. Bunakov et al., *Internal ILL Report, ILL01BU03T*, ILL, Grenoble, 2001
- V.E. Bunakov, *Yad. Fiz.*, 65 (2002), 648 [*Phys. At. Nucl.*, 65 (2002), 616]
- V.E. Bunakov, F. Gönnenwein, *Yad. Fiz.*, 65 (2002), 2096 [*Phys. At. Nucl.*, 65 (2002), 2036]
- V.E. Bunakov, S.G. Kadmsky, *Yad. Fiz.*, 66 (2003), 1894 [*Phys. At. Nucl.* 66 (2003), 1846]
- E.M. Rastopchin et al., *Yad. Fiz.*, 55 (1992), 310
- C. Budtz-Jorgensen, H.-H. Knitter, *Nucl. Phys.*, A490 (1988), 307
- V.E. Bunakov, L. Pikelner, *Prog. Part. Nucl Phys.*, 39 (1997), 337
- Yu. Kopach et al., *Yad. Fiz.*, 62 (1999), 900 [*Phys. At. Nucl.* 62 (1999), 840]
- M. Mutterer et al., *IEEE Trans. Nucl. Science*, 47 (2000), 756
- C. Guet et al., *Nuclear Physics*, A314 (1979), 1
- J. Pannicke et al., *Proc. Journées d'Etudes sur la Fission*, Arcachon, France, Report CENBG 8722, 1987, D13
- P. Heeg et al., in "Proc. Conf. on 50 Years with Nuclear Fission, Gaithersburg, 1989" (La Grange Park, IL:American Nuclear Society), Vol.1, p.299
- V.E. Bunakov, *Proc. Intern. Seminar ISINN-12*, Dubna, Russia, 2004, this book
- V.P. Alfimenkov, G.V. Val'ski, A.M. Gagarski et al., *Yad. Fiz.*, 58 (1995), 799
- Fig. 1. Asymmetry D vs. α -particle energy
- A.Barabanov, V.E.Bunakov et al., *Proc. International Seminar ISINN-9*, Dubna, Russia, 2001, 104.
- A.Gagarski, G.Petrov, F.Goennenwein et al., *Proc. XVI International Conference on Fission*, IPPE, Obninsk, Russia, 2003, (in press)
- A.Gagarski, G.Petrov et al., *Proc. International Seminar ISINN-12*, Dubna, Russia, 2004, (in press)
- N.Kornilov et al., *Nucl.Phys.* A686 (2001), 187
- G.Val'ski, *Yad. Fiz.*, 24 (1976), 140 [*Phys. At. Nucl.*, 24 (1976), ?]
- V.E.Sokolov, A.Gagarski, G.Petrov et al., *Proc. International Seminar ISINN-12*, Dubna, Russia, 2004, (in press)

Исследование Т-нечётной асимметрии в различных ядрах

- Можно ожидать изменения величины коэффициента D для разных изотопов.
- Количественные оценки Т - нечетной корреляции для ^{235}U и ^{233}U сделаны Бунаковым и они находятся в хорошем согласии с экспериментальными результатами.

	^{233}U	^{235}U
D_{theo}	$-2 \cdot 10^{-3}$, $+3 \cdot 10^{-3}$	$+1.5 \cdot 10^{-3}$



Сравнительное измерение среднего значения D в ^{233}U и ^{239}Pu (установка)

- Нейтронный пучок (PF1 в ИЛЛ):
 $\langle \lambda \rangle \sim 4.5 \text{ \AA}$; $\Phi_{\text{capture}} \sim 6 \cdot 10^8 \text{ н/см}^2\text{с}$; продольно поляризован $\sim 94 \pm 1 \%$; флиппер «фольга с током» (1 Гц).
- Мишени: $\sim 0.5 \text{ мг } ^{233}\text{U}$ (слой с толщиной $\sim 140 \text{ мкг/см}^2$) и $\sim 1.1 \text{ мг } ^{239}\text{Pu}$ (слой с толщиной $\sim 300 \text{ мкг/см}^2$) на толстой 0.3 мм титановой фольге непрозрачной для осколков. Мишени помещались в камеру одновременно как «сэндвич»
- $(t_{\text{fragment1(or2)}} - t_{\text{alpha}})$ использовалось для разделения групп осколков $P \sim 6\%$ примеси тяжелого осколка к лёгкому.
- 4 + 4 поверхностно барьерных диода в каждом массиве, охлаждаемые до $+5 \text{ C}^0$, 70 мм диаметр, толщина $\sim 350 \text{ мкм}$
- НЕТ идентификации частиц по времени нарастания, НЕТ координат на MWPC

Сравнительное измерение среднего значения D в ^{233}U и ^{239}Pu (результаты)

В результате ~30 дней измерений получены следующие результаты :

	^{233}U	^{239}Pu
$\langle D \rangle_{\text{exp}}$	$-4.6 \pm 0.7 \cdot 10^{-3}$	$-0.2 \pm 0.3 \cdot 10^{-3}$

(Поправлено на геометрию регистрации, перекрытие массовых групп, поляризацию холодных нейтронов – всего ~ 1,3).

Практически нулевая асимметрия для ^{239}Pu может быть объяснена в модели Бунакова:

- $J^- = 0$ в ^{239}Pu ($I=1/2$) P нет спина – нет асимметрии!
- $J^+ = 1$ P поляризация компаунд-ядра высока (~0.67), но спин маленький P
- ⇒ результирующая проекция, которая определяет плотности уровней осколков и, следовательно, вероятности конечных состояний, образована главным образом орбитальным моментом TP
- ⇒ взаимная ориентация импульса TP , и начальное спина ядра становится не важной
- ⇒ нет причины для большой Т-Нечетной асимметрии.

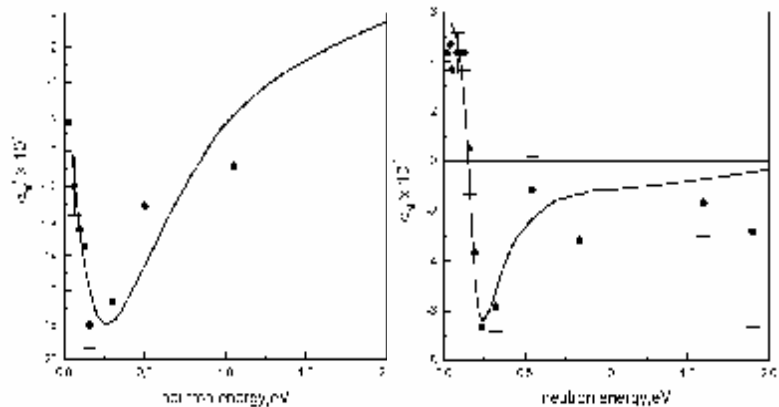
Измерение Т-нечетной асимметрии в ^{233}U при делении горячими нейтронами 0.16 eV

Играют ли роль p -резонансы в механизме формирования Т-нечетной корреляции?

P -нечетная и P -четная лево-правая асимметрии в делении получаются в результате интерференции s - и p -резонансов в компаунд-ядре.

Их сильная зависимость от энергии в ^{233}U объясняется наличием p -резонанса в окрестности 0.16 eV.

Если Т - Нечетная корреляция также связана с s - p интерференцией, можно ожидать увеличения эффекта вплоть до 10 раз.



Лево-правая (слева) and P -нечетная (справа) асимметрии в делении ^{233}U в зависимости от энергии нейтрона

Измерение Т-нечетной асимметрии в ^{233}U при делении горячими нейтронами 0.16 eV (установка)

- Нейтронный пучок (D3 дифрактометр в ИЛЛ) : $\sim 0.711 \text{ \AA}$ (0.16 eV); $\Phi \sim 1 \cdot 10^7 \text{ н/см}^2\text{с}$; иридиевый фильтр гармоник; поляризация $\sim 89 \pm 1 \%$; спин-флип 0,2 Hz , “сгуо”- флиппер
- Мишень: $\sim 15 \text{ мг } ^{233}\text{U}$, два слоя с толщинами $\sim 500 \text{ мкг/см}^2$ на двух сторонах 22 мкм Алюминиевой фольге (не прозрачная для осколков!)
- $(t_{\text{fragment1(or2)}} - t_{\text{alpha}})$ использовалось для разделения групп осколков $P \sim 6\%$ примеси тяжелого осколка к лёгкому
- 4 + 4 поверхностно барьерных диода в каждом массиве, охлаждаемые до $+5 \text{ C}^0$, 70 мм диаметр, толщина $\sim 350 \text{ мкм}$
- НЕТ идентификации частиц по времени нарастания, НЕТ координат на MWPC

Измерение Т-нечетной асимметрии в ^{233}U при делении горячими нейтронами 0.16 eV (результат)

Предварительная (on-line) величина асимметрии :

$$-2.4 \pm 0.8 \cdot 10^{-3}$$

(С учетом поправки на геометрию регистрации, перекрывание массовых групп осколков и нейтронную поляризацию – всего ~ 1,4).

- Отличие от величины для **ХОЛОДНЫХ** нейтронов $< 2\sigma$
- Это подтверждает существующие модели для Т-нечетная корреляции, где асимметрия (в отличие от PNC и LR асимметрий в двойном делении) **возникает в выходном канале реакции, а не в результате s-и p-интерференции в составном ядре.**

PNC и LR корреляции в тройном делении (холодные нейтроны)

- Установка позволяла исследовать и другие корреляции в тройном делении:

- P-нечётной для осколков

$$W(W)d\Omega \sim (1 + \alpha^{PNC} \times (s \times p_f)) d\Omega$$

- лево-правой для осколков

$$W(W)d\Omega \sim (1 + \alpha^{LR} \times p_f \times [s \cdot p_n]) d\Omega$$

- P-нечётной для α -частиц

$$W(W)d\Omega \sim (1 + A^{PNC} \times (s \times p_{TP})) d\Omega$$

- лево-правой для α -частиц

$$W(W)d\Omega \sim (1 + A^{LR} \times p_{TP} \times [s \cdot p_n]) d\Omega$$

- Для ^{233}U было получено

$$\langle \alpha^{LR} \rangle = - (0.31 \pm 0.18) \cdot 10^{-3}$$

$(-0.233 \pm 0.025) \cdot 10^{-3}$ – бинарное)

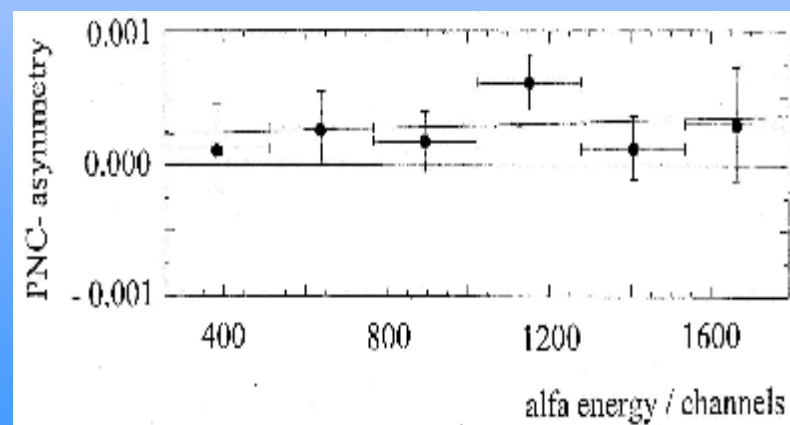
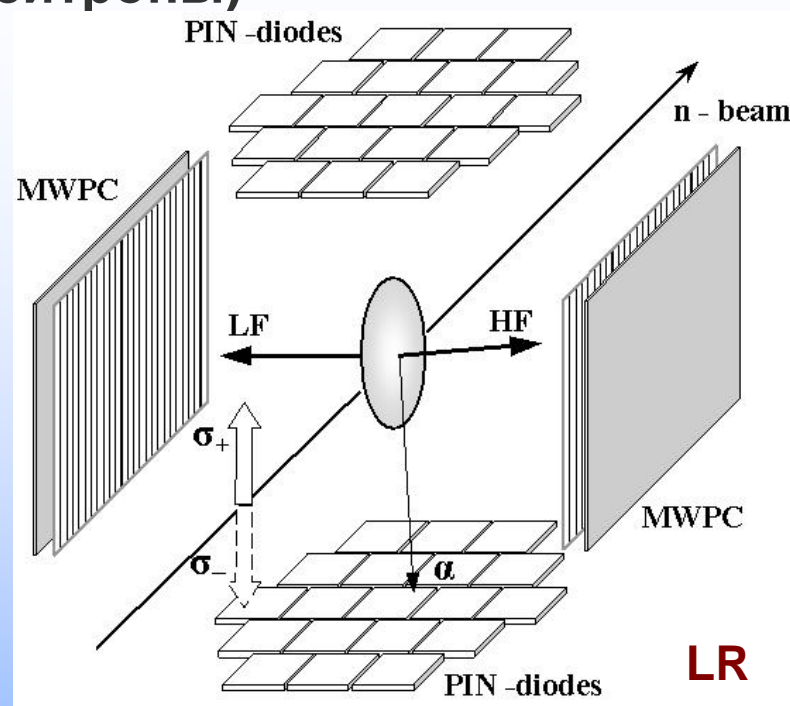
$$\langle \alpha^{PNC} \rangle = + (0.37 \pm 0.10) \cdot 10^{-3}$$

$(+ 0.365 \pm 0.006) \cdot 10^{-3}$ – бинарное)

$$A^{PNC} = - (0.06 \pm 0.04) \cdot 10^{-3}$$

$$A^{LR} = - (0.08 \pm 0.08) \cdot 10^{-3}$$

(равны 0 в пределах ошибок)



Исследование Т-нечётной асимметрии в зависимости от параметров продуктов деления (от полной энергии осколков)

•Зависимость от полной энергии осколков – (если она тут есть...) – тоже может быть связана с известной корреляцией $E_{TP} - E_{tot_kin_FF}$ в тройном делении.

•Чтоб «распутать клубок» требуется увеличить качество экспериментальных данных, а также построить модель с учётом всей имеющейся информации по тройному делению.

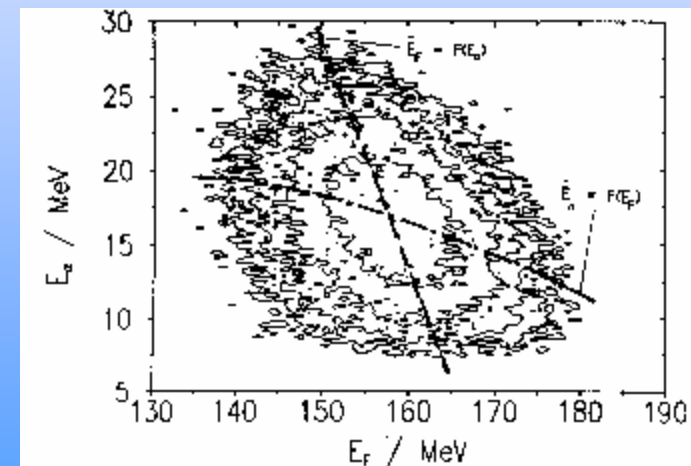
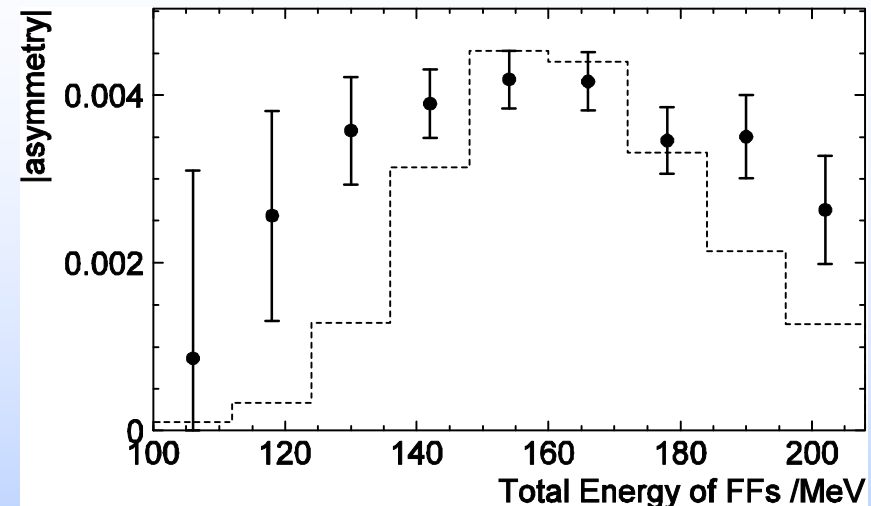


FIGURE 10. Correlation between the tertiary α energy and the total kinetic energy of the corresponding fission fragments for $^{235}\text{U}(n_{th},f)$. The interrupted heavy lines represent E_α as a function of E_f and b_p as a function of E_α . (From Fannicke, J., Hoeg, P., Kowzen, P., Krasko, F., Mulrenn, M., Schall, P., Thierbold, J., Weingartner, K., Berres, G., Lehou, B., and Gorenzwein, H., in *Proc. Journées d'Études sur la Fission*, Arachon (FR), Report CENBG 8722, 1987, D13. With permission.)

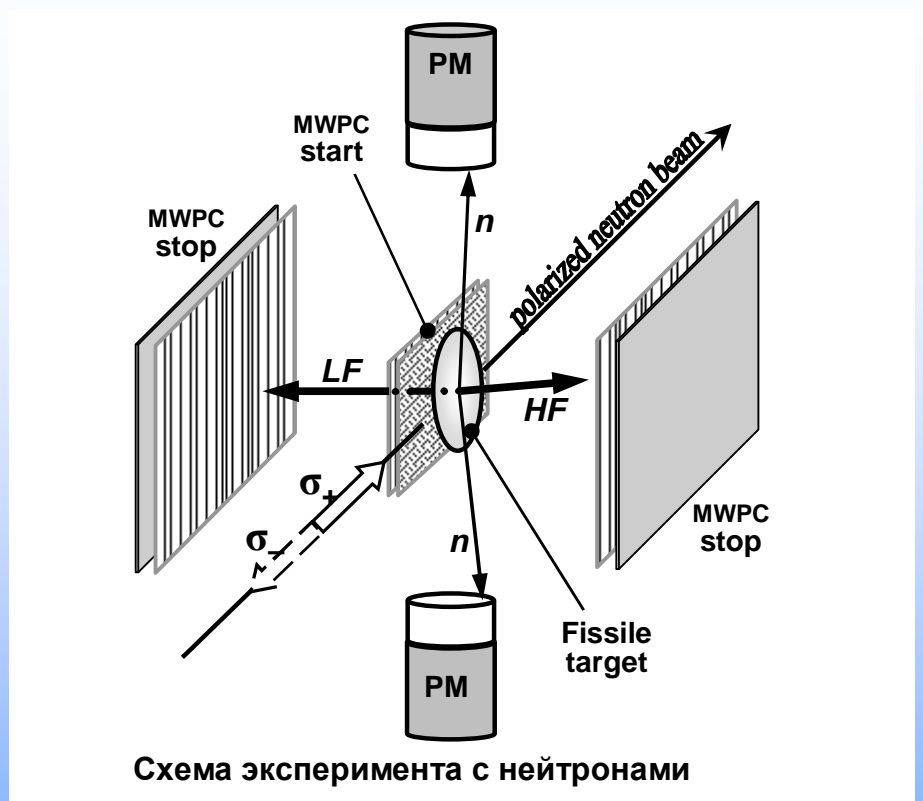
Сравнение Т-нечётной, PNC и LR корреляции в тройном делении

	PNC			TRI tern TP+FF
	bin	tern		
	FF	FF	TP	
Величина	$\sim 10^{-4}$	$\gg \sim 10^{-4}$	$> \sim 0$	$\sim 10^{-3}$
Зависимость от характеристик продуктов	нет	нет	нет	сильная
Зависимость от E_n	сильная	сильная	сильная	нет

- Р-нечётные и лево-правые эффекты формируются на стадии компаунд-ядра, на которой присутствуют также различные механизмы их усиления.
- Т-нечётная асимметрия формируется близко к разрыву.
- Угловое распределение осколков формируется барьере (переходные состояния Бора)
- Детали распределения характеристик продуктов определяются на спуске и в момент разрыва.
- Процессы двойного и тройного деления отличаются только после прохождения барьера
- TP рождается на последней стадии деления в результате двойного разрыва шейки

T-нечётная асимметрия при испускании нейтронов

- Поиск подобного эффекта для нейтронов, сопровождающих деление, не только естественное продолжение работы, но и заслуживает особого внимания по следующим причинам:
- наблюдение эффекта для электрически нейтральных частиц существенно для детального понимания асимметрии.
- отличная от нуля асимметрия для нейтронов прямо свидетельствовала бы о существовании «scission» нейтронов – поскольку показано, что такая корреляция может иметь место только если частица испускается одновременно с осколками.



На 6 пучке реактора ВВР-М: ($\sim 10^7$ н/см²с, поляризация $\sim 80\%$)

$$^{233}\text{U}: \quad \langle D_n \rangle = - (0.46 \pm 1.03) \cdot 10^{-4}, \quad ^{235}\text{U}: \quad \langle D_n \rangle = - (1.65 \pm 0.87) \cdot 10^{-4}$$

После всех поправок на 95% уровне достоверности:

$$^{233}\text{U}: \quad | \langle D_n \rangle | < 1,8 \cdot 10^{-3}, \quad ^{235}\text{U}: \quad | \langle D_n \rangle | < 1,9 \cdot 10^{-3}$$

Заключение и планы

- Обнаружена и исследована корреляция $s \times [p_f \sim p_{TP}]$ в тройном делении
 - Измерено $\langle D \rangle$ в ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu и ^{245}Cm
 - Обнаружена сильная зависимость асимметрии от E_{TP}
 - Обнаружена сильная зависимость асимметрии от массы осколков
 - Измерено $\langle D \rangle$ для ^{233}U при делении 'горячими' нейтронами
 - Измерены LR и PNC асимметрии в тройном делении. Проверено отсутствие зависимости PNC от E_{TP}
 - Проведён первый эксперимент по измерению T-нечетной асимметрии для нейтронов
- Полученные экспериментальные данные удовлетворительно объясняются в рамках существующей модели
- Надо измерять:
 - Более точно $\langle D \rangle$ в ^{235}U , т.к. это хороший 'репер' для теории
 - Исследовать более точно зависимость от параметров осколков...
 - Измерить более точно $\langle D \rangle$ для тритонов (сравнить с альфа-частицами)...
 - Повысить точность в эксперименте с нейтронами...