ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

# ПРОБЛЕМА ФОРМИРОВАНИЯ УГЛОВЫХ МОМЕНТОВ ОСКОЛКОВ ПРИ ДЕЛЕНИИ ЯДЕР

студент Мико Сотер
научный руководитель
Доц. д-р физ.-мат. наук Барабанов Алексей Леонидович

Москва 2024

# Содержание

# Постановка проблемы

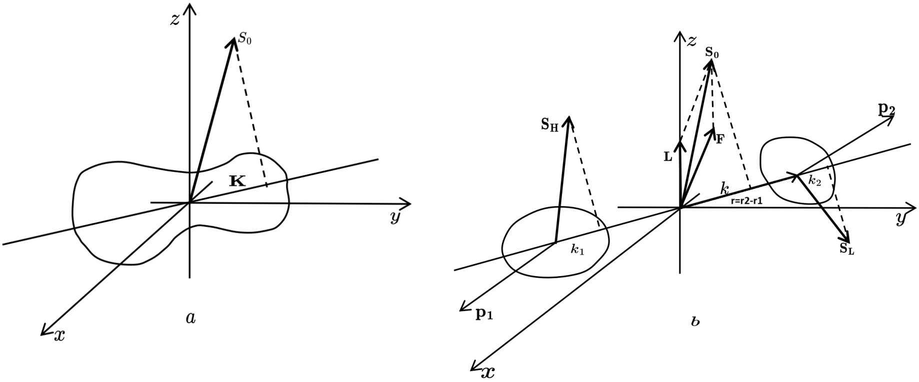


Рис. 1: до деления (a) и после деления (b).

$$K = \vec{n} \cdot \vec{S}_0,\ \vec{n} = \frac{\vec{r}}{r},\ \vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1.$$

$$\vec{F} = \vec{S}_H + \vec{S}_L,\ K_1 = \vec{n} \cdot \vec{S}_H,\ K_2 = \vec{n} \cdot \vec{S}_L,\ \vec{S}_L + \vec{S}_H + \vec{L} = \vec{S}_0.$$

# Постановка проблемы

- Как фрагменты, образующиеся при ядерном делении, приобретают свои собственные спины $S_H$ и $S_L$, и какие механизмы отвечают за генерацию относительного орбитального момента $L$ этих фрагментов?
- Из эксперимента следует, что спиральность $K_1$ и $K_2$ очень маленькие, и возникает проблема почему они такие.

# Важность

- Угловой момент играет важную роль в ядерном делении, особенно в понимании испускании гамма кванты.
- Когда происходит деление, фрагменты находятся в возбужденном состоянии и освобождают энергию возбуждения, испуская 0-2 нейтрона и 1-3 гамма кванты, каждый из которых несет около 2 единиц углового момента.
- Спонтанное деление $^{252}Cf$, которое начинается с нулевым угловым моментом, вызывает вопросы о внутреннем генерировании 5-7 единиц углового момента в каждом фрагменте.

# Цель исследования

Квантово межаническое рассмотрение задачи с учётом принципа неопределённости Гейзенберга и устанвление связи между величинами, которые не являются одновременно измеримыми.

# Квантовое описание состояния ядра

- В квантовой механике важно понимать ограничения одновременного измерения физических величин, такие как принцип неопределенности Гейзенберга, который гласит, что точное измерение одной величины ограничивает точность другой.
- Существует 3 наиболее важных набора коммутирующих операторов и соответствующих им собственных векторов (записаны в краткой форме, указаны только различающиеся квантовые числа):

$$\hat{\vec{J}}^2, \hat{M}, \hat{\vec{S}}_H^2, \hat{\vec{S}}_L^2, \hat{\vec{F}}^2, \hat{K} \qquad |F, K\rangle$$

$$\hat{\vec{J}}^2, \hat{M}, \hat{\vec{S}}_H^2, \hat{\vec{S}}_L^2, \hat{\vec{F}}^2, \hat{\vec{L}}^2 \qquad |F, L\rangle$$

$$\hat{\vec{J}}^2, \hat{M}, \hat{\vec{S}}_H^2, \hat{\vec{S}}_L^2, \hat{K}_1, \hat{K}_2 \qquad |K_1, K_2\rangle$$

Здесь $J \equiv S_0$ и $M \equiv J_z$

# Квантовое описание состояния ядра

Для простоты рассмотрим случай спонтаного деления ${}^{252}Cf$. В этом случае начальный спин $S_0 = 0$, а угловой момент $L = F$. Спиральности полученных фрагментов связаны уравнением $K_1 = -K_2$. Квантовое состояние $|F, 0\rangle$ можно представить в следующем виде:

$$|F,0\rangle = \sum_{K_1} \mathrm{C}^{F0}_{S_H K_1 S_L - K_1} |K_1, -K_1\rangle \tag{1}$$

$$\langle L,0| = \sum_{K_1} \mathrm{C}^{L0}_{S_H K_1 S_L - K_1} \langle K_1, -K_1| \tag{2}$$

$$\langle L,0|\Psi\rangle = \sum_{K_1} \mathrm{C}^{L0}_{S_H K_1 S_L - K_1} \langle K_1, -K_1|\Psi\rangle \tag{3}$$

Это и есть связь между амплитудой обнаружения орбитального момента L и амплитудой обнаружения спиральности $K_1$ причем $K_2 = -K_1$

# Распределение по к1

- Экспериментальные данные показывают, что основные фрагменты деления в среднем имеют спины с величинами от $5\hbar$ до $7\hbar$, ориентированные примерно перпендикулярно оси деления. Это наблюдение подразумевает, что проекция спина фрагмента деления вдоль оси деформации мала .[3, 1]
- Мы предлагаем узкое распределение $P(K_1)$ спиральности для фрагментов деления.

$$P(K_1) \backsim \exp\left(-\frac{K_1^2}{2\sigma_{K_1}^2}\right) \tag{4}$$

# Распределение по к1

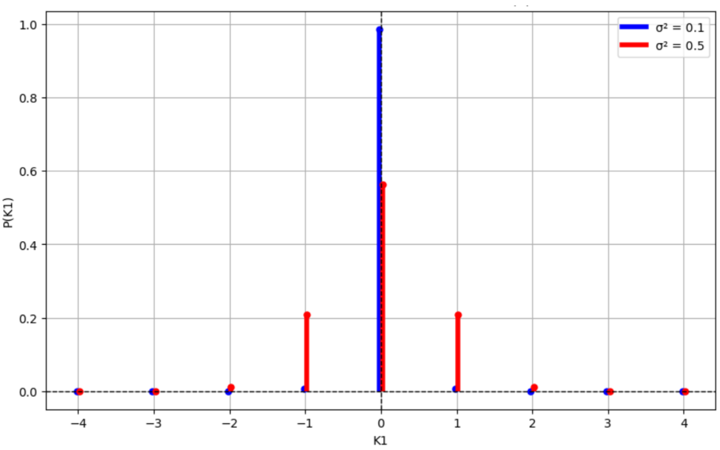


Рис. 2. Распределение P(K1) спиральности осколка деления,

# Распределение по L

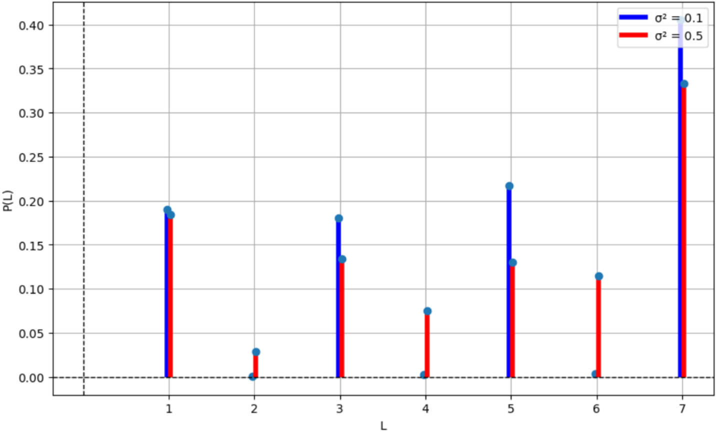


Рис. 3. Распределение P(L) орбитального момента

# Модель FREYA

- FREYA (Fission Reaction Event Yield Algorithm) — это модель Монте-Карло, которая быстро генерирует большие выборки полных событий деления, предоставляя полную кинематическую информацию для сталкивающихся ядер и испускаемых нейтронов и фотонов.[2, 3]
- В модели FREYA предполагается, что распределение P(L) орбитального момента ведет себя в соответствии со статистическим распределением.

$$P_1(\mathrm{L}) \sim (2\mathrm{L}+1)\exp\left(-\frac{\mathrm{L}(\mathrm{L}+1)}{2\sigma_L^2}\right) \tag{5}$$

# Модель FREYA

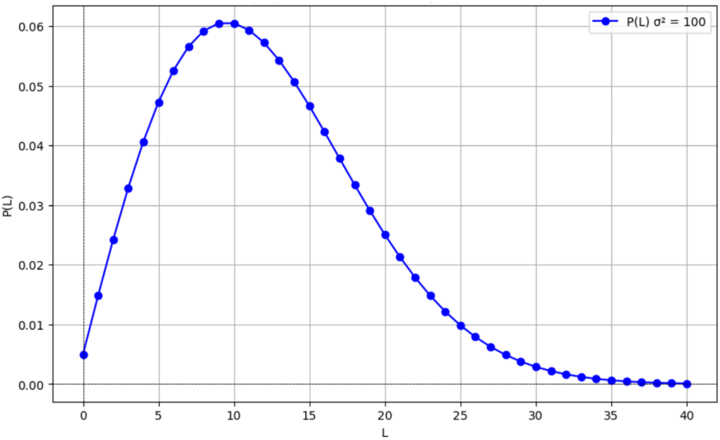


Рис.4. Распределение орбитального момента по модели FREYA

# Заключение

- Подтверждено, что орбитальный момент не является одновременно измеримым со спиральностями
- получено соотношение между амплитудами, вероятностями образования орбитальных моментов и спиральностей
- Показано, что если распределение по спиральности является узким, то распределение по орбитальному моменту не будет гауссовским(противоречие с моделью FREYA)

# Список литературы


M. Lebois;N.Jovancevic J.N. Wilson, D. Thisse.
Angular momentum generation in nuclear fission.
2021.

J.M. Verbeke, J. Randrup, and R. Vogt.
Fission Reaction Event Yield Algorithm, FREYA — for event-by-event simulation of fission.
*Computer Physics Communications*, 191:178–202, 2015.

R. Vogt and J. Randrup.
Angular momentum effects in fission.
*Phys. Rev. C*, 103:014610, Jan 2021.