ПРОБЛЕМА ФОРМИРОВАНИЯ УГЛОВЫХ МОМЕНТОВ ОСКОЛКОВ ПРИ ДЕЛЕНИИ ЯДЕР

НИЯУ МИФИ

Научный руководитель:
д.ф.-м.н., проф. Барабанов А. Л.
студент: Мико С.

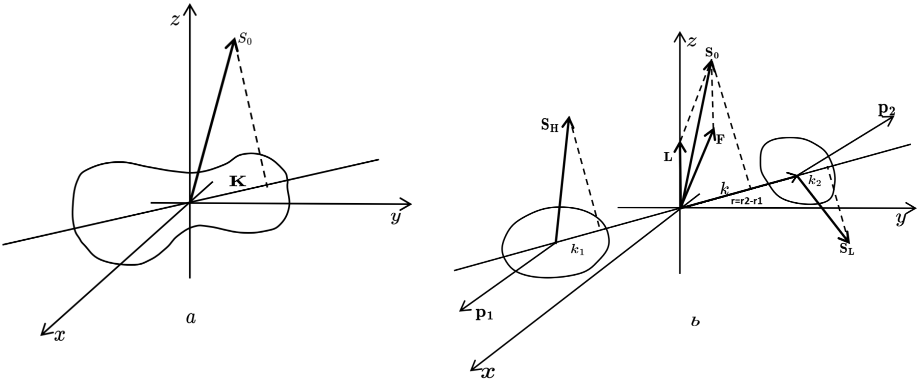

Рис. 1: до деления (a) и после деления (b).

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 механическое рассмотрение задачи с учётом принципа неопределённости Гейзенберга и установление связи между величинами, которые не являются одновременно измеримыми.

- 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 $M \equiv J_z$

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:

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

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

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

- 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 (J.N. Wilson, 2021; R. Vogt, 2021).
- В ряде научных статей отмечается, что распределение угловых моментов, включая спин и орбитальный момент, является гауссовским (T. Dossing, 2024).
- Предлагается узкое распределение $P(K_1)$ спиральности для фрагментов деления.(принято $S_H = 6\hbar$ и $S_L = 5\hbar$)

$$P(K_1) \backsim \exp\left(-\frac{K_1^2}{2\sigma_{K_1}^2}\right) \qquad (3)$$

Распределение по к1

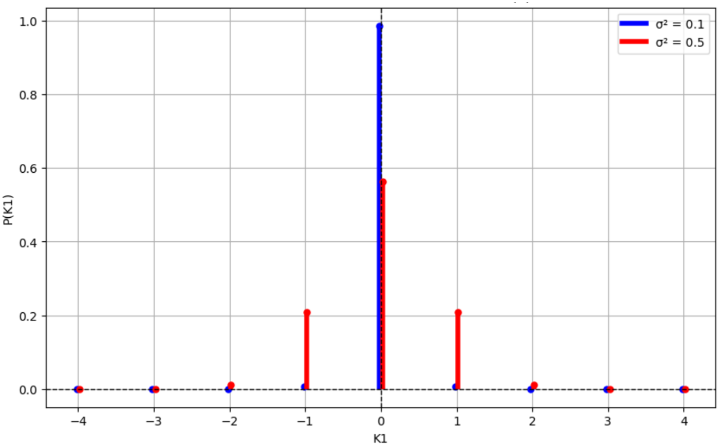

Рис. 2: Распределение P(K1) спиральности осколка деления

Распределение по L

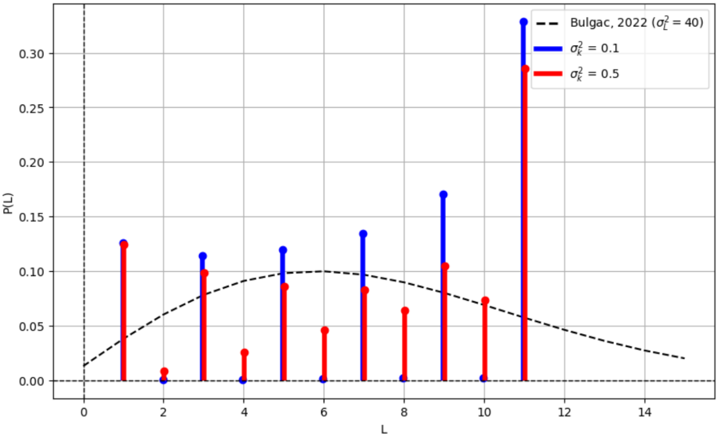

Рис. 3: Распределение P(L) орбитального момента

Распределение по K1 из Распределение по L

- Фрагменты появляются с угловыми моментами, которые почти перпендикулярны направлению их относительного движения, что приводит к высокому компенсирующему орбитальному угловому моменту (в случае ядра калифорния).
- Разделение фрагментов включает только колебательные и изгибные вращательные режимы, которые способствуют образованию значительного углового момента.
- Предлагается гаусовское распределение $P(L)$ орбитального момента, которое следует вышеизложенным фактам в следующей форме:

$$P(L) \backsim \exp\left(-\frac{(L-\mu)^2}{2\sigma_L^2}\right) \tag{4}$$

Распределение по K1 из Распределение по L

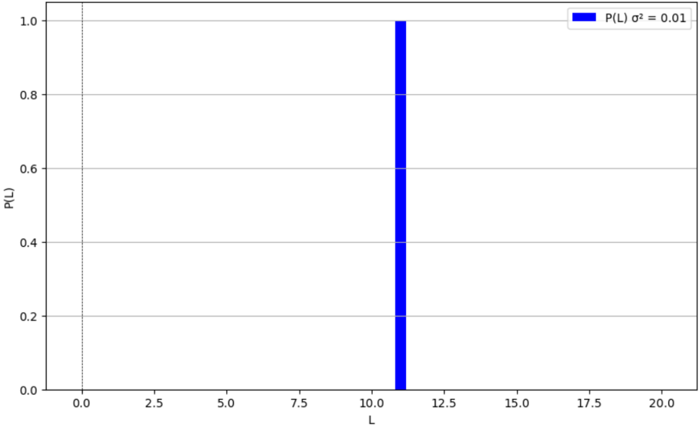

Рис. 4: Распределение P(L) орбитального момента

Распределение по K1 из Распределение по L

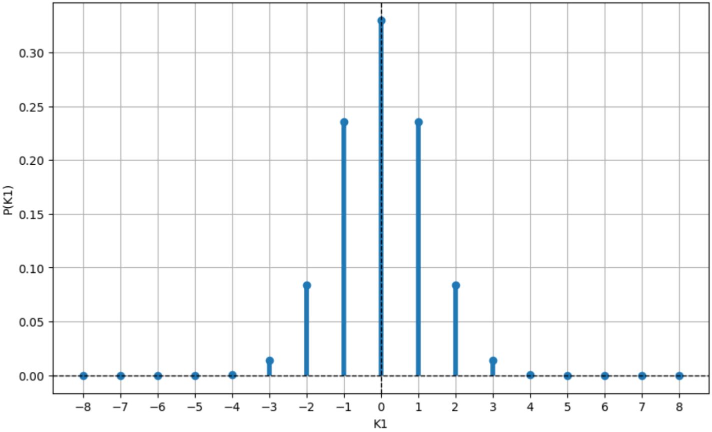

Рис. 5: Распределение P(K1) спиральности осколка деления

- Получено соотношение между амплитудами, вероятностями образования орбитальных моментов и спиральностей
- Показано, что если распределение по спиральности является узким вблизи $K = 0$, то распределение по орбитальному моменту не будет гауссовским(противоречие с моделью FREYA)
- Показано, что для получения узкого распределения (вблизи $K = 0$) спиральности фрагмента деления для случая ^{252}Cf распределение орбитального момента должно иметь значительный максимум при $L \approx S_H + S_L$

Список литературы

1. J.N. Wilson et al. Angular momentum generation in nuclear fission // Nature. 2021. V. 590: 566.
2. R. Vogt and J. Randrup. Angular momentum effects in fission // Phys. Rev. C. 2021. V. 103: 014610.
3. A. Bulgac et al. Fragment intrinsic spins and fragments' relative orbital angular momentum in nuclear fission // Phys. Rev. Lett. 2022. V. 128: 022501.
4. T. Dossing et al. Angular Momentum in fission fragments // Phys. Rev. C. 2024. V. 109: 034615.