Выпускная квалификационная работа на тему:
Квантовый подход к описанию угловых моментов осколков в делении ядер

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

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

Оглавление

Постановка проблемы

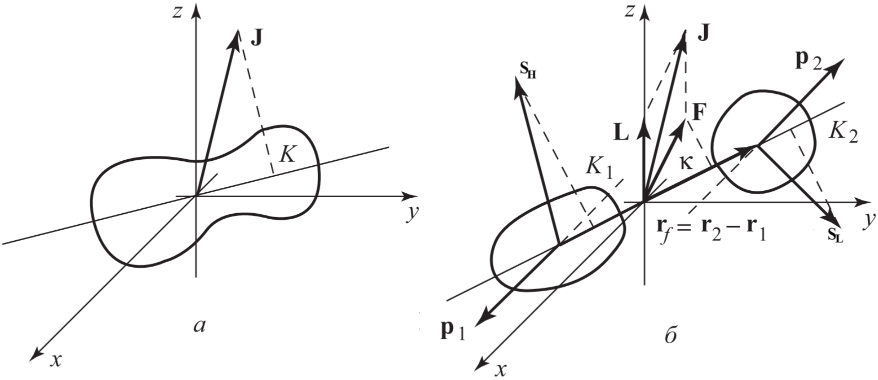

Рис. 1: до деления (а) и после деления (б)

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.
- Особый интерес представляет спонтоное деление ядра ^{252}Cf, так как его спин равен нулю и следовательно после деления $\vec{L} + \vec{S}_H + \vec{S}_L = 0$ и $K_1 = -K_2$

Цель исследования

Цель

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

Угловые моменты в делении ядер

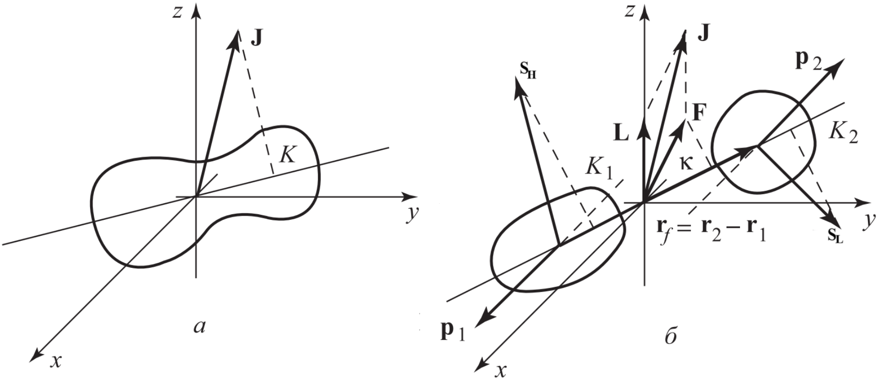

Рис. 2: до деления (а) и после деления (б)

Квантовое описание состояния ядра

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

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

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

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

Здесь $M \equiv J_z$

Квантовое описание состояния ядра

Для простоты рассмотрим случай спонтаного деления ^{252}Cf. В этом случае начальный спин ядра материи $J = 0$, $F = L$ и $K_1 = -K_2$

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

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

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

Распределение по K1 и L

- Эксперименты [3, 4] показывают, что в распределениях по K_1 и K_2 доминируют малые значения. т.е спины осколков направлены поперёк оси деления.
- Предлагается узкое распределение $P(K_1)$ спиральности для фрагментов деления.(принято $S_H = 6\hbar$ и $S_L = 5\hbar$)

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

- В работах [1, 2] принято, что распределение угловых моментов, включая спин и орбитальный момент, является гауссовским.

Распределение по к1

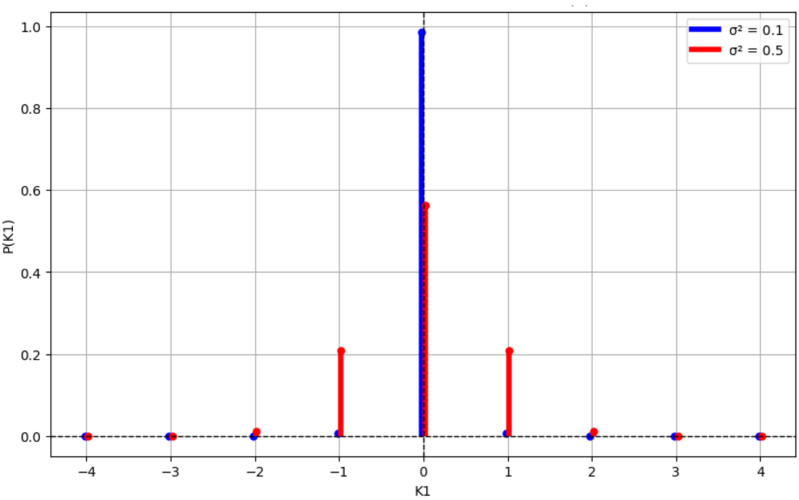

Рис. 3: Распределение P(K1) спиральности осколка деления

Распределение по L

Взяв квадрат модулей выражения (2) получится соответствуюшая связь между вероятностей.

$$P(L) = |\langle L, 0|\Psi\rangle|^2 = \sum_{K_1} \left(C^{L0}_{S_H K_1 S_L K_2}\right)^2 P(K_1) \tag{4}$$

Здесь учтено что, амплитуды $\langle K_1, -K_1|\Psi\rangle$ являются случайными комплексными величинами с ненаправленными фазами и статистической независимостью. В этом случае среднее значение перекрёстных (интерференционных) членов обнуляется, и остаётся только диагональная сумма

Распределение по L

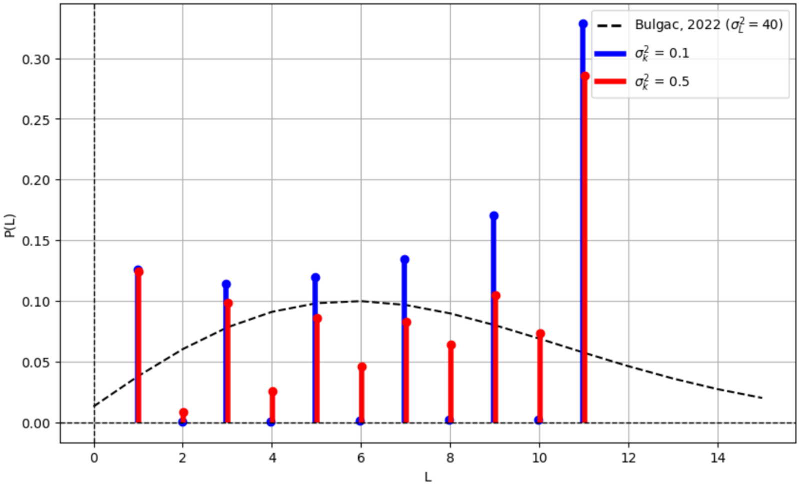

Рис. 4: Распределение P(L) орбитального момента

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:

$$P(L) \backsim \exp\left(-\frac{(L-\mu)^2}{2\sigma_L^2}\right) \tag{5}$$

Распределение по K1 из Распределение по L

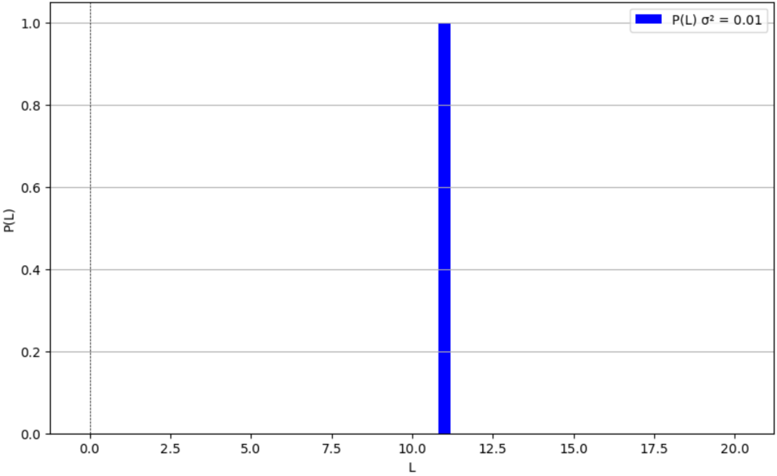

Рис. 5: Распределение P(L) орбитального момента

Распределение по K1 из Распределение по L

Аналогично (см. слайд 9) обратная связь между амплитудой обнаружения орбитального момента L и амплитудой обнаружения спиральности K1 есть:

$$|K_1, -K1\rangle = \sum_L \mathrm{C}^{L0}_{S_H K_1 S_L - K_1} |L, K = 0\rangle \tag{6}$$

Распределение по спиральности осколка K_1 может быть получено взяв квадрат модуля выражения (6).

$$P(K_1) = |\langle K_1, -K_1|\Psi\rangle|^2 = \sum_L \left(C^{L0}_{S_H K_1 S_L K_2}\right)^2 P(L) \tag{7}$$

Распределение по K1 из Распределение по L

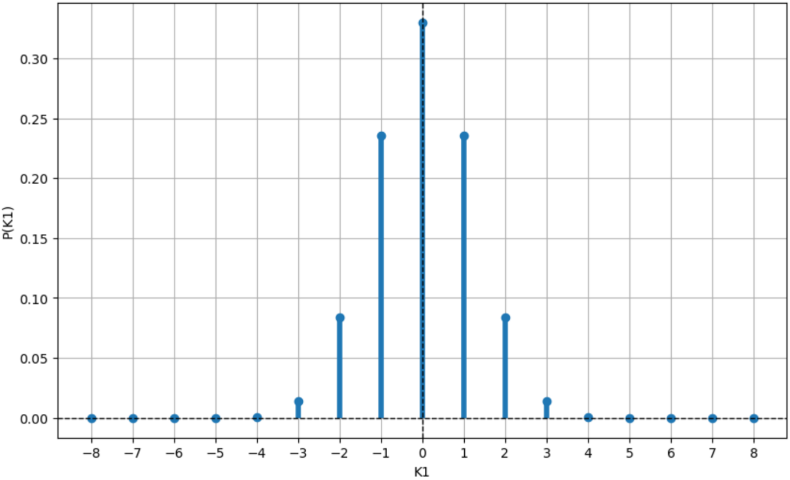

Рис. 6: Распределение P(K1) спиральности осколка деления

Заключение

- 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 предложенным распределением углового момента в работе [1])
- Показано, что для получения узкого распределения (вблизи $K = 0$) спиральности фрагмента деления для случая $^{252}\mathrm{Cf}$ распределение орбитального момента должно иметь значительный максимум при $L \approx S_H + S_L$

Распределение по K1 из гауссовского распределения по L

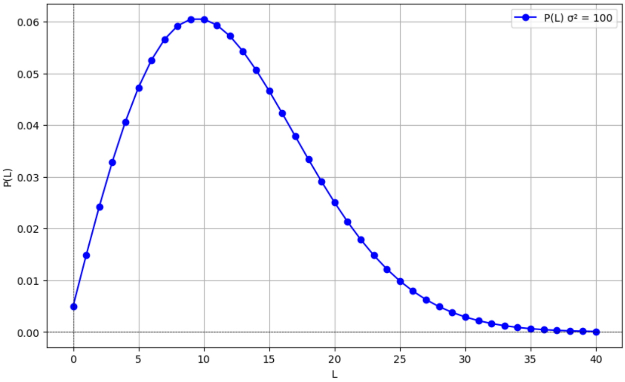

Рис. 7: Распределение P(L) орбитального момента как в работе [1]

Распределение по K1 из гауссовского распределения по L

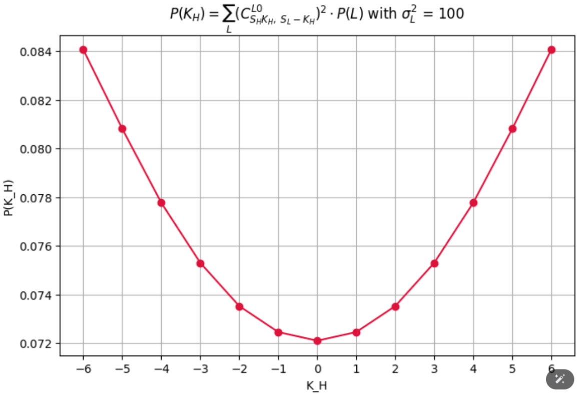

Рис. 8: Распределение P(K1) спиральности осколка деления по заданным гоуссовским распределением по L

Источники

[1] A. Bulgac и др. “Fragment Intrinsic Spins and Fragments’ Relative Orbital Angular Momen-tum in Nuclear Fission”. В: *Phys. Rev. Lett.* 128.022501 (2022), с. 6.

[2] T. Døssing и др. “Angular momentum in fission fragments”. В: *Phys. Rev. C* 109.034615 (2024), с. 15.

[3] R. Vogt и J. Randrup. “Angular momentum effects in fission”. В: *Phys. Rev. C* 103.014610 (2021), с. 11.

[4] J.N. Wilson и др. “Angular momentum generation in nuclear fission”. В: *Nature* 590.7847 (2021), с. 566—570.

Спасибо за внимание!