

Амплитудные анализы распадов чармония в мезоны

Кирилл Чиликин

Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск

Совещание по физической программе
для эксперимента на коллайдере ВЭПП-6
25 сентября 2025

Распады чармония

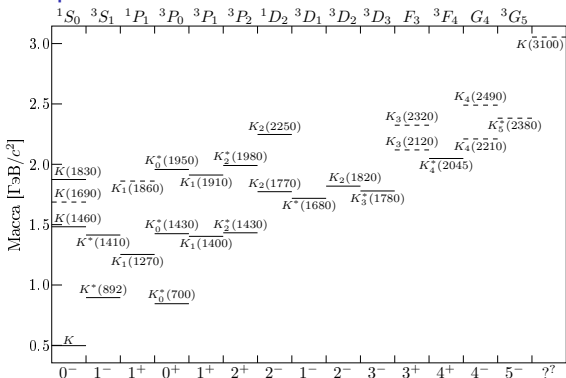
- При наборе данных на энергии J/ψ доступны распады состояний J/ψ , которое рождается напрямую, и η_c , которое рождается в распаде $J/\psi \rightarrow \eta_c \gamma$. Это делает доступным амплитудные анализы следующих процессов, предполагая восстановление всех частиц в конечном состоянии:

1. Трёхчастичные распады J/ψ : $J/\psi \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$, $J/\psi \rightarrow K^+ K^- \pi^0$, $J/\psi \rightarrow K^\pm K_S^0 \pi^\mp$.
2. Четырёхчастичные распады J/ψ : $J/\psi \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$, $J/\psi \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \pi^0$, $J/\psi \rightarrow K^+ K^- \pi^+ \pi^-$, $J/\psi \rightarrow K^+ K^- \pi^0 \pi^0$, $J/\psi \rightarrow K^\pm K_S^0 \pi^0 \pi^\mp$, $J/\psi \rightarrow K_S^0 K_S^0 \pi^+ \pi^-$, $J/\psi \rightarrow K^+ K^- K^+ K^-$, $J/\psi \rightarrow K^+ K^- K_S^0 K_S^0$.
3. Трёхчастичные распады η_c : $\eta_c \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$, $\eta_c \rightarrow K^+ K^- \pi^0$, $\eta_c \rightarrow K^+ K^- \pi^0$, $\eta_c \rightarrow K_S^0 K_S^0 \pi^0$.

Также возможно изучение аналогичных распадов с η или η' в конечном состоянии вместо π^0 .

- Основной физической задачей при этом является изучение спектроскопии и распадов возбуждённых лёгких и странных мезонов. Рассмотрим последние в качестве примера.

Спектр странных мезонов



- Хотя спектр странных мезонов известен достаточно хорошо, некоторые состояния, показанные штриховыми линиями, требуют подтверждения.
- Особый интерес представляет состояние $K(1690)$, обнаруженное в недавнем анализе реакции $K^- p \rightarrow K^- \pi^+ \pi^- p$ в COMPASS (arXiv:2504.09470): ему невозможно найти соответствие в потенциальных моделях.

Распады K -мезонов

Для изучения спектроскопии K -мезонов могут быть использованы распады $X_{c\bar{c}} \rightarrow KK_J(\rightarrow f)$, где $X_{c\bar{c}}$ - состояние чармония, K_J - возбуждённый K -мезон и f - конечное состояние, в которое он распадается.

Состояние	$K\pi$	$K\eta$	$K\eta'$	$Kf_0(1370)$	$K\rho$	$K\omega$	$K\phi$	$Kf_2(1270)$	$K\gamma$	$K_0^*(1430)\pi$	$K^*(892)\pi$	$K^*(892)\pi\pi$	$K_2^*(1430)\pi$
$K_0^*(700)$	+	M	M	P	P	P	P	P	P	P	P	M	P
$K^*(892)$	+	M	M	P	M	M	M	M	+	P	M	M	M
$K_1(1270)$	P	P	P	+	+	+	M	M	+	+	+	-	M
$K_1(1400)$	P	P	P	+	+	+	+	M	+	-	+	-	M
$K^*(1410)$	+	-	M	P	-	-	+	M	-	P	+	-	M
$K_0^*(1430)$	+	+	+	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
$K_2^*(1430)$	+	+	-	P	+	+	-	M	+	P	+	+	M
$K(1460)$	P	P	P	-	+	-	+	M	-	+	-	-	M
$K^*(1680)$	+	+	-	P	+	-	+	M	-	P	+	-	-
$K_2(1770)$	P	P	P	-	-	+	+	+	-	-	+	-	+
$K_3^*(1780)$	+	+	-	P	+	-	-	-	-	P	+	-	-
$K_2(1820)$	P	P	P	-	-	+	+	+	-	-	+	-	+
$K(1830)$	P	P	P	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-
$K_1(1910)$	P	P	P	-	+	-	+	-	-	-	-	-	-
$K_0^*(1950)$	+	-	-	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
$K_2^*(1980)$	-	+	-	P	-	-	-	-	-	P	-	-	-
$K_4^*(2045)$	+	-	-	P	-	-	-	-	-	P	-	+	-

Здесь “+” означает, что распад известен, “-” - неизвестен, P - запрещён по чётности и M - запрещён по массе.

Основные каналы

Из таблицы распадов можно сделать следующие выводы:

- Основными каналами для изучения состояний K_J^* с естественными квантовыми числами $J^{(-1)^J}$ являются двухчастичные каналы $K\pi$, $K\eta$ и $K\eta'$. Распад состояний с неестественными квантовыми числами $J^{(-1)^{J+1}}$ в эти каналы запрещён по P -чётности, что ограничивает число возможных вкладов и упрощает анализ. Поэтому основными процессами для исследования таких состояний будут распады $J/\psi \rightarrow K\bar{K}\pi$, $J/\psi \rightarrow K^+K^-\eta$, $J/\psi \rightarrow K^+K^-\eta'$.
- Однако, в распадах J/ψ невозможно рождение состояний $K_0^*(700)$ и $K_0^*(1430)$, поскольку распад $J/\psi \rightarrow K_0^*\bar{K}$ запрещён по P -чётности. Для их изучения необходимо использование распадов η_c в те же конечные состояния.
- Для изучения резонансов с неестественными квантовыми числами $J^{(-1)^{J+1}}$ необходимо использовать трёхчастичные конечные состояния, такие как $K\pi\pi$, учитывая все промежуточные двухчастичные резонансы. Таким образом, основные процессы для их изучения - $J/\psi \rightarrow K\bar{K}\pi\pi$, а также $J/\psi \rightarrow K\bar{K}K\bar{K}$ для канала $K_J \rightarrow K\phi$.

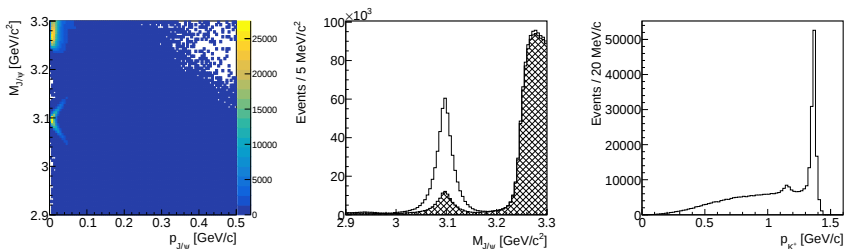
Моделирование

- Для оценки требований к детектору было проведено моделирование распадов J/ψ по всем возможным каналам. Было сгенерировано 100×10^6 распадов J/ψ . Моделировались только распады J/ψ , аннигиляция в лёгкие кварки, физические фоны ($e^+e^- \rightarrow e^+e^-$, двухфотонные процессы, ...) отсутствуют. Фон от ускорителя также отсутствует.
- Основным параметром, на который будут устанавливаться требования - вероятность некорректной идентификации $\pi^\pm$ как $K^\pm$. Поскольку быстрое моделирование не очень реалистично (например, распады частиц на лету меняют вероятности идентификации), для оценки верхнего предела на вероятность идентификации удобно установить её не зависящей от импульса. Вероятности некорректной идентификации $\pi^\pm$ как $K^\pm$ и наоборот были установлены равными 10%.

Моделирование $J/\psi \rightarrow K^+ K^- \pi^0$

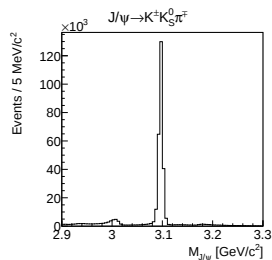
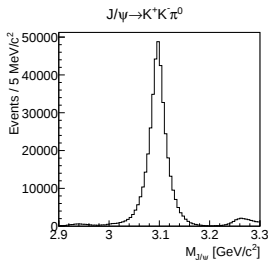
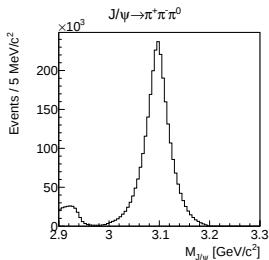
Модель сигнала была заложена с учётом результатов анализа BESIII [Phys. Rev. D **100**, 032004 (2019)]. Для кандидатов в J/ψ -мезоны были потребованы условия $2.9 < M_{J/\psi} < 3.3$ ГэВ/ c^2 и $p_{J/\psi} < 0.5$ ГэВ/ c .

Двумерный график массы и импульса J/ψ , распределение по массе J/ψ для событий с $p_{J/\psi} < 0.1$ ГэВ/ c и импульсный спектр каонов показаны ниже. Заштрихованная гистограмма показывает часть событий, которая исключается при наложении условий на идентификацию каонов.



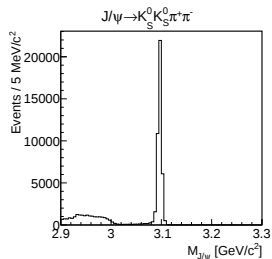
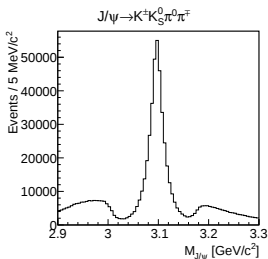
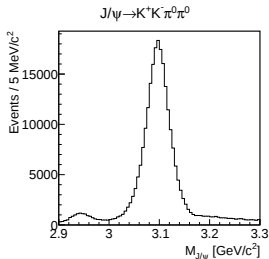
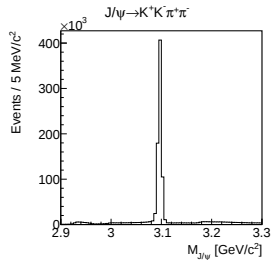
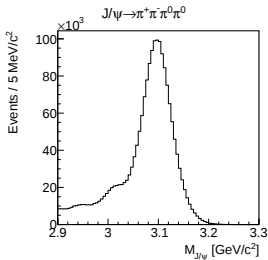
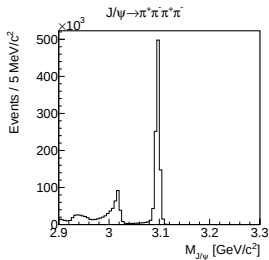
- Требуется наличие системы идентификации частиц.
- У значительной части событий импульс большой (до ~ 1.45 ГэВ/ c)!

Трёхчастичные распады



Применяется отбор по идентификации $K^{\pm}$. Ожидаемый фон невелик, заложенный уровень некорректной идентификации можно считать достаточным.

Четырёхчастичные распады



Уровень фона остаётся сравнительно низким.

Технические требования к амплитудным анализам

Объём данных будет очень велик. Для основных распадов J/ψ при образце данных в 0.5×10^{12} распадов J/ψ ожидаемое число сигнальных событий составляет больше или порядка 1.0×10^8 . С учётом нормировочного Монте-Карло число событий, требующих обработки, может достигать 5×10^9 . Из этого следует:

- Построение модели потребует использования модельно-независимой амплитуды. В таком подходе распределения по инвариантным массам разделяются на бины, в пределах которых амплитуда считается постоянной.
- Для ускорения сходимости погонки обязательно вычисление градиента функции правдоподобия.
- При амплитудном анализе необходимо предварительное вычисление амплитуд в зависимости от точки фазового пространства и их буферизация. При 5×10^9 событий размер буфера составит 37 гигабайт на одно 64-битное число. Всего нужно порядка 500 гигабайт.
- Необходимо использовать параллельные вычисления. Возможны параллельные вычисления на ядрах процессора с использованием серверных машин с необходимым объёмом памяти или вычисления с использованием нескольких машин, возможно, на графических процессорах.

Требования к детектору и ускорителю

- Главное - это высокая светимость. Из физики критерий на неё сформулировать невозможно, чем она будет больше, тем лучше. Нижний предел можно задать, сравнивая с доступным образцом данных BES $((10087 \pm 44) \times 10^6$ событий J/ψ). Для получения принципиально новых результатов желательно иметь не менее чем в 50 раз большее количество данных $(0.5 \times 10^{12}$ событий J/ψ).
- Для распадов J/ψ необходима система идентификации с разделением $K^\pm$ и $\pi^\pm$ до импульса 1.45 ГэВ/с, некорректная идентификация $\pi^\pm$ как $K^\pm$ на уровне 10% или меньше во всём диапазоне.