

Обновлённый пакет для анализа в Aurora и спектроскопия K -мезонов на ВЭПП-6

Кирилл Чиликин

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

Совещание по физической программе
для эксперимента на коллайдере ВЭПП-6
4 июня 2025

Распады η_c и новый пакет для анализа

- Одним из возможных источников информации по спектроскопии странных мезонов являются распады $\eta_c \rightarrow K\bar{K}\pi$.
- Вероятность распада $J/\psi \rightarrow \eta_c \gamma$ составляет только $(1.41 \pm 0.14)\%$. При изучении распадов η_c ожидается значительный фон от адронных распадов J/ψ . Для изучения возможности исследования распадов η_c потребовалось моделирование.
- Однако, в существующей версии пакета анализа в версиях 2.x есть множество проблем таких как некорректные комбинации частиц, ненужное копирование данных в конце работы каждого алгоритма, отсутствие кинематических фитов для быстрого моделирования, необходимость вручную задавать свойства частиц (является ли частица истинно нейтральной), и другие. Это потребовало значительного переписывания кода анализа.
- Далее на примере будет показано, как делать анализ в новой версии. Пример доступен в репозитории Aurora:

```
Analysis/AnalysisExamples/jobOptions/ImportBeamParametersJpsi.py  
Analysis/AnalysisExamples/jobOptions/GenerateSignalMCJpsiKpKpiz.py  
Analysis/AnalysisExamples/jobOptions/ReconstructJpsiKpKpiz.py
```

Загрузка сервисов

Вначале производится загрузка сервисов:

```
# Particle data.
particle_data = ParticleDataService('ParticleDataService')

# Conditions database.
conditions = ConditionsService('ConditionsSvc',
    testingPayloadLocations=['local_database/database.txt',
                             AuroraConditions.databasePath()])
```

- Ранее использовался сервис данных частиц из GAUDI, но это создавало проблему наличия двух разных источников информации о частицах (GAUDI и файл evt.pdl для EVTGEN). В новом сервисе используется только второй источник.
- Добавлен сервис базы данных на основе локальной базы данных Belle II. В примере local_database/database.txt содержит энергию пучка, а общая база данных AuroraConditions.databasePath() - магнитное поле.

Входные данные, алгоритм анализа

Сервис событий, алгоритм чтения данных и входной файл подключаются с помощью команды

```
# Event data service and Podio input algorithm.  
podioevent, podioinput = Analysis.inputMdst('jpsi_kpkmpiz_1.root')
```

Далее создаётся алгоритм анализа:

```
# Analysis algorithm.  
analysis = AnalysisAlgorithm(  
    'Analysis',  
    eventLoader=event_loader,  
    analysisTools=[cut1, combiner1, extrainfo1, fit1, combiner2, extrainfo2,  
                   fit2]  
)
```

Алгоритм анализа последовательно вызывает инструменты анализа (AnalysisTool). Первым всегда вызывается загрузчик события, а остальная цепочка конфигурируется пользователем.

Загрузчик события, критерии отбора

Загрузчик события создаётся с помощью команды

```
# Event loader.  
event_loader = EventLoaderTool(  
    'EventLoader',  
    particleLists=['pi+', 'K+', 'gamma']  
)
```

Аргумент particleLists задаёт списки частиц, которые нужно загрузить. Загружаются все частицы, на данном этапе не применяются критерии отбора. Античастицы загружаются автоматически. Критерии отбора применяются с помощью CutTool:

```
# Apply selection criteria for kaons.  
cut1 = CutTool(  
    'Cut1',  
    outputParticleList='K+:sel',  
    inputParticleLists=['K+'],  
    cut='pt > 0.1'  
)
```

Новый список K+:sel содержит каоны из исходного списка K+, которые удовлетворяют требованию $p_t > 0.1$ ГэВ/с.

Создание комбинаций частиц

Составные частицы создаются при помощи ParticleCombinerTool из ранее созданных списков дочерних частиц:

```
# Reconstruct pi0 -> gamma gamma.
combiner1 = ParticleCombinerTool(
    'Combiner1',
    decayString='pi0->gamma gamma',
    cut='0.120<M<0.150'
)
```

На созданные частицы накладываются заданные критерии отбора.
Пример для J/ψ :

```
# Reconstruct J/psi -> K+ K- pi0.
combiner2 = ParticleCombinerTool(
    'Combiner2',
    decayString='J/psi:channel1->K+:sel_K -:sel_pi0',
    cut='2.9<M<3.3 and p<0.6'
)
```

ExtraInfo и кинематические фиты

ExtraInfoTool сохраняет значения заданных переменных в ExtraInfo (карта строка - значение) для частиц из заданного списка. Например, можно сохранить значение инвариантной массы до фита:

```
# Save pi0 mass before fit.  
extrainfo1 = ExtraInfoTool(  
    'ExtraInfo1',  
    particleList='pi0',  
    extraInfo=[[ 'M', 'M' ]]  
)
```

Первый аргумент в списке из двух - имя ExtraInfo, а второй - имя переменной. KinematicFitterTool производит подгонку в массу для частиц из заданного списка:

```
# Perform mass fit for pi0.  
fit1 = KinematicFitterTool(  
    'Fit1',  
    particleList='pi0'  
)
```

Для включения возможности проводить кинематические фиты в быстрое моделирование было добавлено вычисление ковариационных матриц.

Сохранение выходных данных

После анализа реконструированные частицы сохраняются в выходной файл с помощью алгоритма NtupleAlg. Для самой частицы или её выбранных дочерних частиц записываются списки переменных, которые нужно сохранить. Можно изменять имена веток с помощью аргумента aliases.

```
# Define aliases.
aliases = [['M_before_fit', 'extraInfo(M)'],
           ['p_before_fit', 'extraInfo(p)']]

# Create ntuple.
ntuple1 = NtupleAlg('NtupleAlg1',
                    listName='J/psi:channel1',
                    fileName='scttuple/jpsi1',
                    tupleTitle='',
                    vars=[['M_before_fit', 'p_before_fit', 'M', ''],
                          ['E', 'px', 'py', 'pz', 'px_mc', 'py_mc', 'pz_mc', 'pidkpi',
                           'J/psi_→_K+K-π0'],
                          ['E', 'px', 'py', 'pz', 'M_before_fit', 'M', 'J/psi_→_K+K-π0'],
                          ['px', 'py', 'pz', 'px_mc', 'py_mc', 'pz_mc',
                           'J/psi_→_K+K-π0_→_γγ']],
                    aliases=aliases
)
NTupleSvc(Output = ["scttuple_0DATAFILE='jpsi_kpkmpiz_reconstructed.root'_0OPT='M"]
```

Возможно использование нескольких NtupleAlg для различных списков восстановленных частиц.

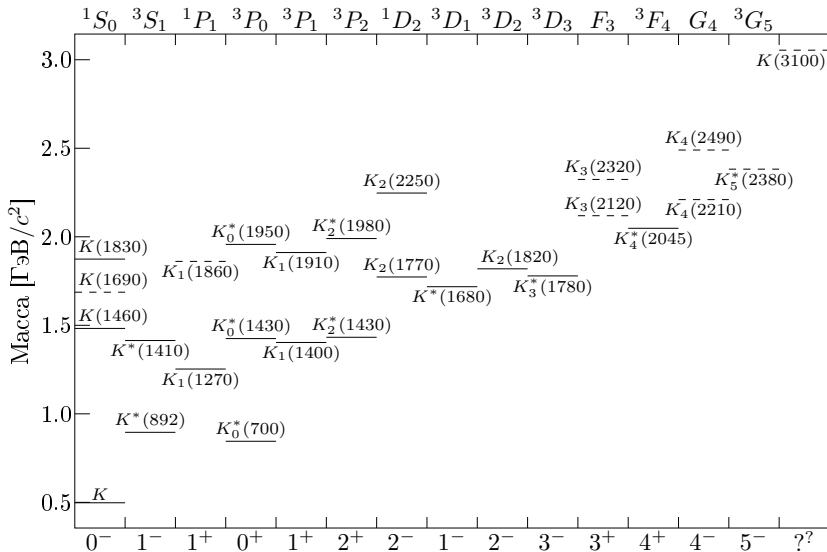
Приложение Gaudi

В конце пользователю нужно создать приложение Gaudi, задав все необходимые алгоритмы и сервисы:

```
# Application.  
options= {  
    'TopAlg' : [podioinput, analysis, ntuple1],  
    'EvtSel' : 'NONE',  
    'ExtSvc' : [particle_data, podioevent, conditions],  
    'EvtMax' : -1,  
    'AuditAlgorithms' : True,  
    'AuditTools' : True,  
    'AuditServices' : True,  
    'OutputLevel' : INFO,  
    'HistogramPersistency' : 'ROOT',  
}  
ApplicationMgr(**options)
```

Описание процедуры анализа также можно посмотреть на странице https://ctd.inp.nsk.su/wiki/index.php/Use_Analysis_package

Спектр странных мезонов



Состояния, показанные штриховыми линиями, требуют подтверждения.

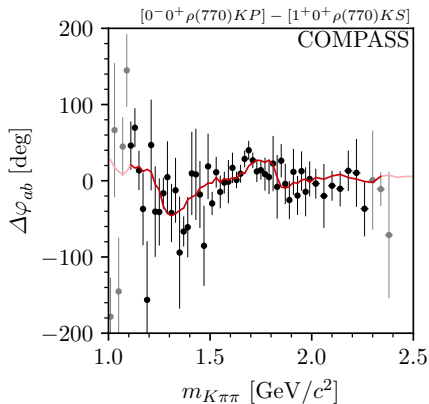
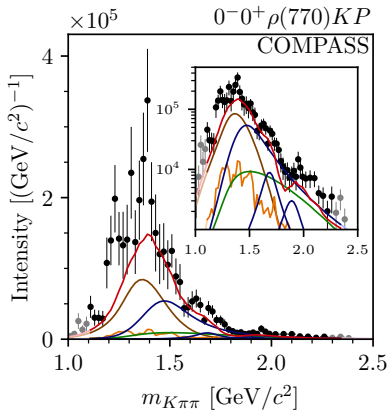
Парциально-волновой анализ COMPASS

- Уже после выхода последнего обзора Particle Data Group в эксперименте COMPASS был выполнен парциально-волновой анализ реакции $K^- p \rightarrow K^- \pi^+ \pi^- p$ (arXiv:2504.09470).
- Были подтверждены состояния $K_1(1910)$ и $K_2(2250)$, а также обнаружены два новых состояния: $K_3(2120)$ с квантовыми числами 3^+ и $K_4(2210)$ с квантовыми числами 4^- . Ранее в реакциях $K^+ p \rightarrow \bar{\Lambda} p p$ и $K^- p \rightarrow \Lambda \bar{p} p$ наблюдались состояния $K_3(2320)$ и $K_4(2500)$ с теми же квантовыми числами, но большими массами [NPB **184**, 1; NPB **227**, 365].
- Наблюдения согласуются с тем, что резонансы $K_3(2120)$ и $K_4(2210)$ соответствуют спектроскопическим состояниям $1F_3$ и $1G_4$, при этом они могут быть как синглетными, так и триплетными, а резонансы $K_3(2320)$ и $K_4(2500)$ - первым радиальным возбуждениям $2F_3$ и $2G_4$. Все четыре указанных состояния требуют подтверждения, а также дальнейшего изучения с целью разделения близких синглетного и триплетного состояний: каждое из них может соответствовать двум различным состояниям.

Парциально-волновой анализ COMPASS

- Было подтверждено состояние $K(1830)$, которое изначально наблюдалось в парциально-волновом анализе реакции $K^-p \rightarrow K^+K^-K^-p$ [NPB **221**, 1]. Указание на его существование также было получено в амплитудном анализе распада $B^+ \rightarrow J/\psi\phi K^+$ в эксперименте LHCb [PRD **95**, 012002], однако, аналогичный анализ с использованием большей статистики не подтвердил его [PRL **127**, 082001]. Данный резонанс - возможный кандидат в спектроскопическое состояние 3^1S_0 .
- Главным результатом анализа COMPASS является обнаружение криптоэкзотического состояния $K(1690)$ с квантовыми числами 0^- . Данное состояние находится между двумя установленными состояниями $K(1460)$ и $K(1830)$, и его масса отличается от теоретических предсказаний для кварк-антикварковых состояний.

Состояние $K(1690)$



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

Распады K -мезонов

Состояние	$K_0^*(1430)\pi$	$K^*(892)\pi$	$K^*(892)\pi\pi$	$K_2^*(1430)\pi$
$K_0^*(700)$	P	P	M	P
$K^*(892)$	P	M	M	M
$K_1(1270)$	$+$	$+$	$-$	M
$K_1(1400)$	$-$	$+$	$-$	M
$K^*(1410)$	P	$+$	$-$	M
$K_0^*(1430)$	P	P	P	P
$K_2^*(1430)$	P	$+$	$+$	M
$K(1460)$	$+$	$-$	$-$	M
$K^*(1680)$	P	$+$	$-$	$-$
$K_2(1770)$	$-$	$+$	$-$	$+$
$K_3^*(1780)$	P	$+$	$-$	$-$
$K_2(1820)$	$-$	$+$	$-$	$+$
$K(1830)$	$-$	$-$	$-$	$-$
$K_2(1950)$	$-$	$-$	$-$	$-$
$K_0^*(1950)$	P	P	P	P
$K_2^*(1980)$	P	$-$	$-$	$-$
$K_4^*(2045)$	P	$-$	$+$	$-$

Основные каналы

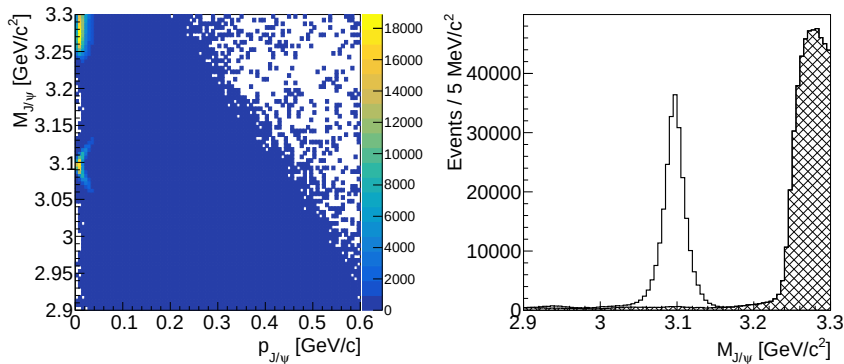
- Основными каналами для изучения состояний K_J^* с естественными квантовыми числами $J^{(-1)^J}$ являются двухчастичные каналы $K\pi$, $K\eta$ и $K\eta'$. Распад состояний с неестественными квантовыми числами $J^{(-1)^{J+1}}$ в эти каналы запрещён по P -чётности, что ограничивает число возможных вкладов и упрощает анализ.
- Основными каналами для исследования состояний K_J^* будут распады $J/\psi \rightarrow K\bar{K}\pi$, $J/\psi \rightarrow K\bar{K}\eta$, $J/\psi \rightarrow K\bar{K}\eta'$. 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 с рождением η_c в распаде $J/\psi \rightarrow \eta_c\gamma$.
- 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 $K_J \rightarrow K\phi$.

Основные каналы

Конечное состояние	J/ψ	η_c
$K^+ K^- \pi^0$	$(2.88 \pm 0.12) \times 10^{-3}$	$(1.18 \pm 0.07) \times 10^{-3}$
$K_S^0 K^\pm \pi^\mp$	$(5.3 \pm 0.5) \times 10^{-3}$	$(2.37 \pm 0.13) \times 10^{-3}$
$K^+ K^- \eta$	не измерена	$(6.60 \pm 0.75) \times 10^{-3}$
$K^+ K^- \eta'$	не измерена	$(8.65 \pm 1.75) \times 10^{-3}$
$K^+ K^- \pi^+ \pi^-$	$(7.0 \pm 1.0) \times 10^{-3}$	$(8.3 \pm 1.8) \times 10^{-3}$
$K_S^0 K_S^0 \pi^+ \pi^-$	$(1.68 \pm 0.19) \times 10^{-3}$	не измерена
$K^\pm K_S^0 \pi^0 \pi^\mp$	$(5.7 \pm 0.5) \times 10^{-3}$	не измерена
$K^+ K^- \pi^0 \pi^0$	$(2.13 \pm 0.22) \times 10^{-3}$	не измерена
$K^+ K^- \pi^0 \pi^0$	$(7.2 \pm 0.8) \times 10^{-4}$	$(1.4 \pm 0.4) \times 10^{-3}$

Моделирование $J/\psi \rightarrow K\bar{K}\pi$

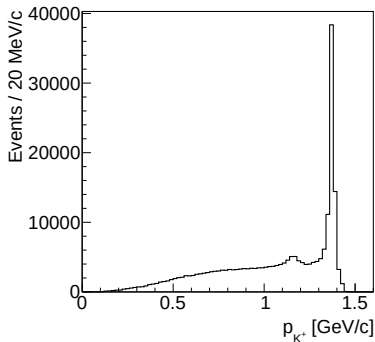
Было смоделировано 50×10^6 распадов J/ψ с обновлённой моделью.



Двумерный график массы и импульса J/ψ и распределение по массе J/ψ для событий с $p_{J/\psi} < 0.1$ ГэВ/с для распада $J/\psi \rightarrow K^+ K^- \pi^0$. Заштрихованная гистограмма показывает часть фона, которая может быть исключена при наложении условий на идентификацию каонов.

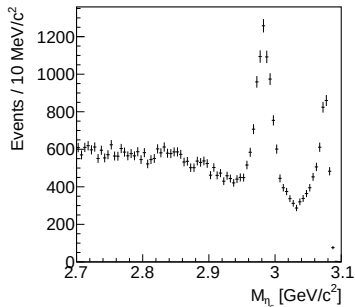
Моделирование $J/\psi \rightarrow K\bar{K}\pi$

Импульс K^+ из распада $J/\psi \rightarrow K^+K^-\pi^0$:



- Максимально возможный импульс $K^\pm$ составляет примерно 1.45 ГэВ/с. Таким образом, для хорошего подавления фона в данном распаде требуется наличие системы идентификации частиц, способной разделять $\pi^\pm$ и $K^\pm$ до 1.45 ГэВ/с.
- Для трёхчастичных распадов J/ψ фон мал, может быть достаточным и меньшее разделение.

Распад $J/\psi \rightarrow \gamma \eta_c (\rightarrow K^\pm K_S^0 \pi^\mp)$



- Использованы критерии отбора на массу и импульс J/ψ , массу K_S^0 и идентификацию частиц. Производится кинематический фит в массу J/ψ .
- В результате оказывается, что пик η_c возможно выделить, но он находится на сравнительно большом фоне. Амплитудный анализ возможен, но является сложной задачей. Перед ним потрубуется провести амплитудные анализы распадов J/ψ , которые дают вклад в фон, для его параметризации.

Заключение

1. Проведено обновление пакета анализа в Aurora. На данный момент код рецензируется и ещё не принят полностью в ветку разработки dev-gcf1.
2. Спектроскопия странных мезонов:
 - Спектр известен достаточно хорошо, тем не менее, есть состояния, требующие подтверждения, включая криптоэкзотические.
 - Для использования в амплитудных анализах в распадах В-мезонов можно также детально измерять амплитуды переходов в $K\pi$, $K\eta$...
 - Основные процессы: $J/\psi \rightarrow K\bar{K}\pi$, $J/\psi \rightarrow K\bar{K}\pi\pi$, $\eta_c \rightarrow K\bar{K}\pi$.
 - Требования к детектору: разделение $\pi^\pm$ и $K^\pm$ до 1.45 ГэВ/с. Возможно, диапазон можно несколько уменьшить, нужно моделирование с разными вариантами системы PID.
 - Для распадов η_c также желательно иметь хорошее разрешение по импульсу фотона из распада J/ψ . Аналогично, нужно моделирование с разными вариантами калориметра.