

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»



Институт ядерной физики и технологий Кафедра физики элементарных частиц №40

Выпускная квалификационная работа студента на тему:

# Поиск ρ(1700) в ультрапериферических столкновениях тяжелых ионов в условиях эксперимента ATLAS

Научный руководитель:

Тимошенко С. Л.

Студентка 4 курса:

Журкина А. О.

ИЯФиТ

# Введение

- Столкновения ядер при прицельных параметрах больше удвоенного ядерного радиуса (*b* > 2*R*<sub>A</sub>) называются ультрапериферическими столкновениями (UPC)
- Небольшой поперечный импульс фотона, испущенного ионом *А* ограничен *ħс/R<sub>A</sub>≈90 МэВ* для *Pb* пучков
- Максимальная продольная компонента  $\gamma \hbar c/R_A \approx 100 \ \Gamma \Rightarrow B$
- На LHC энергия  $\gamma\gamma$ -взаимодействий  $E_{\gamma max} \approx 200 \ \Gamma \Rightarrow B$
- Одной из наиболее интенсивно изучаемых реакций UPC является реакция рождения векторных мезонов
- Рождение векторных мезонов происходит через виртуальный фотон  $\gamma^*$ посредством процесса  $\gamma^* p \to V p$



# Данные PDG

На основе результатов полученных в процессе различных экспериментов по исследованию возбужденных состояний  $\rho^0$  наблюдается широкий диапазон значений масс и ширин в канале распада на два пиона, который PDG относит к  $\rho''(1700)$ .

				TECH	COLUMENT	VALUE (MeV)	EVTS	DOCUMENT ID		TECN	COMMENT
VALUE (MeV)	EVIS	DOCUMENTID		IECN	COMMENI		• • We do not	use the following data f	or average	es, fits, <mark>l</mark> imits, etc.	••
	• • We do	not use the following data t	or average	es, fits, limits,	etc. • •	$268.98 \pm \! 11.40$		<sup>1</sup> BARTOS	2017	RVUE	$e^+~e^-  o \pi^+\pi^-$
$1770.54 \pm \! 5.49$		<sup>1</sup> BARTOS	2017	RVUE	$e^+~e^-  o \pi^+\pi^-$	$489.58 \pm 16.95$		<sup>2</sup> BARTOS	2017A	RVUF	$e^+ \ e^-  ightarrow \pi^+ \pi^-$
$1718.50 \pm \! 65.44$		<sup>2</sup> BARTOS	2017A	RVUE	$e^+ \; e^-  ightarrow \pi^+ \pi^-$			3 PARTOS	20174	DVLIE	
$1766.80 \pm 52.36$		<sup>3</sup> BARTOS	2017A	RVUE	$ au^-  o \pi^- \pi^0  u_ au$	414.71 ±119.46	201	- DARIOS	2017A	RVUE	$\tau \rightarrow \pi \pi^- \nu_{\tau}$
$1644 \pm 36$	20k	<sup>4</sup> LEES	2017C	BABR	$J/\psi  o \pi^+\pi^-\pi^0$	109 ±19	20k	* LEES	2017C	BABK	$J/\psi  o \pi^+\pi^-\pi^0$
$1780 \pm 20 \ ^{+15}_{-20}$	63.5k	<sup>5</sup> ABRAMOWICZ	2012	ZEUS	$e \; p  o e \pi^+ \pi^- p$	$310 \pm 30  {}^{+25}_{-35}$	63.5k	<sup>5</sup> ABRAMOWICZ	2012	ZEUS	$e \; p  o e \pi^+ \pi^- p$
1861 ±17		<sup>6</sup> LEES	2012G	BABR	$e^+ \; e^-  ightarrow \pi^+ \pi^- \gamma$	$316 \pm 26$		<sup>6</sup> LEES	2012G	BABR	$e^+~e^-  o \pi^+\pi^-\gamma$
$1728 \pm 17 \pm 89$	5 4M	7,8 FLUKAWA	2008	BELL	$\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \mu$	$164 \pm 21 \ ^{+89}_{-26}$	5.4M	<sup>7, 8</sup> FUJIKAWA	2008	BELL	$ au^-  o \pi^- \pi^0  u_ au$
$1720 \pm 11 \pm 00$ $1780 \pm 37$	0.4/11	9 ABELE	1007	CRAR	$\overline{n} \ n \rightarrow \pi^{-} \pi^{0} \pi^{0}$	$275~{\pm}45$		<sup>9</sup> ABELE	1997	CBAR	$\overline{p} \; n  o \pi^- \pi^0 \pi^0$
1710 - 29 1719 +15		9 BERTIN	1997C	OBLX	$p \ n \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$	$310 \pm \! 40$		<sup>9</sup> BERTIN	1997C	OBLX	0.0 $\overline{p} \; p  o \pi^+ \pi^- \pi^0$
$1730 \pm 30$		CLEGG	1994	RVUE	$e^+ \; e^-  ightarrow \pi^+ \pi^-$	$400 \pm 100$		CLEGG	1994	RVUE	$e^+~e^-  o \pi^+\pi^-$
$1768 \pm 21$		BISELLO	1989	DM2	$e^+ \; e^-  ightarrow \pi^+ \pi^-$	$224 \pm 22$		BISELLO	1989	DM2	$e^+~e^-  o \pi^+\pi^-$
$1745.7 \pm 91.9$		DUBNICKA	1989	RVUE	$e^+ \; e^-  ightarrow \pi^+ \pi^-$	$242.5\ {\pm}163.0$		DUBNICKA	1989	RVUE	$e^+~e^-  o \pi^+\pi^-$
$1546 \pm 26$		GESHKENBEIN	1989	RVUE		$620~{\pm}60$		GESHKENBEIN	1989	RVUE	
1650		<sup>10</sup> ERKAL	1985	RVUE	20–70 $\gamma~p  o \gamma \pi$	< 315		<sup>10</sup> ERKAL	1985	RVUE	20–70 $\gamma~p  o \gamma \pi$
$1550 \pm 70$		ABE	1984B	HYBR	20 $\gamma~p  o \pi^+\pi^-p$	$280 \ ^{+30}_{-80}$		ABE	1984B	HYBR	20 $\gamma~p  o \pi^+\pi^-p$
$1590 \pm 20$		<sup>11</sup> ASTON	1980	OMEG	20–70 $\gamma~p  o p$ 2 $\pi$	$230~{\pm}80$		<sup>11</sup> ASTON	1980	OMEG	20–70 $\gamma~p  o p$ 2 $ au$
$1600 \pm 10$		<sup>12</sup> ATIYA	1979B	SPEC	50 $\gamma~{ m C}  o~{ m C}$ 2 $\pi$	$283 \pm \! 14$		<sup>12</sup> ATIYA	1979B	SPEC	50 $\gamma~{ m C}  ightarrow { m C}$ 2 $\pi$
$1598 \ _{-22}^{+24}$		BECKER	1979	ASPK	17 $\pi^- p$ polarized						

# Мотивация и цель

Примеры экспериментов и реакций, в которых изучался  $\rho^0$  и его возбужденные состояния:

Experiment	Reaction
BELL	$\tau^-  o \pi^- \pi^0 \nu_{ au}$
ZEUS	$ep \to \pi^+\pi^-p$
RVUE	$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$
BABR	$e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$
OBLX	$\widetilde{p}p \to \pi^+\pi^-\pi^0$
STAR	$AuAu \to \rho^0 Au^* Au^*$

На STAR проводился поиск возбужденного состояния  $\rho^0$ , наблюдался только  $\rho'(1450)$  в распаде на 4 пиона, а  $\rho''(1700)$  в распаде на 2 пиона не наблюдался.

Целью данной дипломной работы является изучение ультрапериферических столкновений, физики процесса, применимости и перспектив данной темы, изучение реакции рождения возбужденного состояния векторного р0 мезона –  $\rho''(1700)$  и его распада на два пиона, рассмотрение распределения  $\pi^+\pi^-$  масс в диапазоне 1400–1700 МэВ в условиях эксперимента ATLAS на БАК при энергии сталкивающихся ядер свинца 5,02 ТэВ/нуклон.

# ATLAS



- $PbPb \rightarrow VPb*Pb*$
- Ядра, участвующие в столкновениях могут возбуждаться и впоследствии для снятия возбуждения испускать нейтроны, регистрируемые ZDC детекторами



Схематическое изображение фотоядерного производства векторного мезона V в ультрапериферическом столкновении Pb-Pb и его последующего распада на четыре заряженных пиона. Производство мезона в процессах слияния фотона  $\gamma^*$  и померона Р сопровождается взаимным кулоновским возбуждением ионов пучка с последующим испусканием нейтронов.

# Набор данных и триггер

- Pb+Pb Run 2 (2018 г)
- 39 датасетов
- Общий объем данных 220 миллионов событий
- Светимость  $L_{int} = 1.44 \text{ H}6^{-1}$
- Триггер на малую множественность в UPC:

-HLT\_mb\_sptrk\_exclusiveloose\_vetosp1500\_L1VTE20

- Люмиблоки со стабильными пучками
  Число событий 42 миллиона
- N = 2 track
  - 12 миллионов событий с двумя треками



Распределение блоков светимости по 39 датасетам



#### Результаты анализа



Распределение по поперечному импульсу суммы двух треков

В распределении наблюдается выраженный пик, демонстрирующий наличие когерентного взаимодействия, которое и является областью изучения. Для отбора событий, относящихся к когерентным взаимодействиям на поперечные импульсы суммы треков pt и каждого трека в отдельности  $pt_i$  наложены ограничения, приведенные на следующем слайде.



Распределение по углу разлета двух треков

# Критерии отбора

- N tracks = 2
- Q = 0 (сигнал)
- TRT seed
- pt < 0,12 ГэВ
- $|\eta_i| < 2.4$
- $\alpha = 1 \frac{|\Delta \varphi|}{\pi} < 0,1$
- |d0i| < 1,5 мм
- $|zO_i sin \theta| < 1,5$  мм
- pt<sub>i</sub>>0,2 ГэВ
  - pt<sub>i</sub>>0,4 ГэВ
  - pt<sub>i</sub>>0,6 ГэВ



Распределение по поперечному импульсу без учета ограничений



7

Распределение по быстроте без учета ограничений

## Результаты анализа



# Результаты фитирования

Основной резонанс в области 770, узкий резонанс в области 1270 и широкий резонанс 1700 в отдельности были профитированы следующим распределением Брейта-Вигнера:

$$rac{dN}{dm} = |A \cdot BW_{
ho} + B|^2$$

где A - нормировочный множитель функции Брейта–Вигнера  $(BW_{\rho})$  для  $\rho^0$ , B - нерезонансная амплитуда. Релятивистское распределение Брейта–Вигнера для векторного мезона  $\rho^0$ :

$$BW_{
ho} = rac{\sqrt{m \cdot m_{
ho^0} \cdot \Gamma(m)}}{m^2 - m_{
ho^0}^2 \cdot \Gamma(m)},$$
где  $\Gamma(m) = \Gamma(m_{
ho^0}) \cdot rac{m_{(
ho)^0}}{m} \cdot \left(rac{m^2 - 4m_{\pi}^2}{m_{
ho^0}^2 - m_{\pi}^2}
ight)^{3/2},$ 

где  $\Gamma(m_{\rho 0})$  - ширина векторного мезона  $\rho^0, m_{\pi}$  - масса пиона.



#### Параметры фитирования области 770 МэВ

Parameter	Value	Error	PDG
Const	0.73	0.01	
Width	0.1947 GeV	0.0002  GeV	$149.4 \pm 1.0 \ {\rm MeV}$
Mass $\rho^0$	$0.76503~{\rm GeV}$	$0.00008~{\rm GeV}$	$775.5\pm0.4~{\rm MeV}$
А	206.33	0.77	
В	-83.22	0.34	

# Результаты фитирования



Красной линией обозначен фит в области узкого резонанса (1270) распределением Брейта-Вигнера:

$$\frac{dN}{dm} = |A \cdot BW_{\rho} + B|^2,$$

Зеленой кривой показан фит в области широкого резонанса (1700) следующим распределением:

$$\frac{dN}{dm} = |A \cdot BW_{\rho} + B|^2 + f_{BG}$$

### Параметры фитирования области узкого резонанса *f*(*1270*)

Parameter	Value	Error	PDG
Const	1.09	0.04	
Width	$0.51 { m GeV}$	0.06  GeV	$186.7\pm2.2~{\rm MeV}$
Mass $f(1270)$	1.27  GeV	0.02  GeV	$1275.4 \pm 1.1 \ {\rm MeV}$
А	45.96	12.76	
В	-58.75	14.29	
$\chi^2/NDF$	0.	82	

Параметры фитирования области широкого резонанса  $\rho''(1700)$ 

Parameter	Value	Error	
Const	0.02	0.01	
Width	0.17  GeV	0.04 GeV	
Mass $\rho''(1700)$	1.65  GeV	$0.05 { m GeV}$	
А	-56.47	35.26	
В	-42.01	47.21	
p0	84039.10	14180.80	
p1	-2.16	0.12	
$\chi^2/NDF$	0.80		

# Результаты фитирования



Глобальный фит распределения по инвариантной массе двух пионов, состоящий из суммы трех распределений Брейта-Вигнера. Зеленой пунктирной линией обозначен хвост распределения  $\rho^0(770)$  с фиксированными параметрами, синяя пунктирная линия представляет собой распределение Брейта-Вигнера в области широкого резонанса  $\rho''(1700)$ , фиолетовая пунктирная линия - в области узкого резонанса f(1270). Красной линией изображен глобальный фит f(1270) и  $\rho''(1700)$ . Синим цветом изображены экспериментальные данные.

#### Параметры глобального фита

Parameter	Value	Error	PDG
Const	0.250	0.001	
Width	0.1943  GeV	0.0003  GeV	$149.4 \pm 1.0 \text{ MeV}$
Mass $\rho^0$	0.7687  GeV	0.0001  GeV	$775.5\pm0.4~{\rm MeV}$
А	495.33	1.91	
В	-220.02	1.16	
Const	0.191	0.002	
Width	$0.29 \mathrm{GeV}$	$0.02  {\rm GeV}$	$186.7\pm2.2~{\rm MeV}$
Mass $f(1270)$	$1.272 \mathrm{GeV}$	$0.004 \mathrm{GeV}$	$1275.4 \pm 1.1 \ {\rm MeV}$
А	58.83	3.59	
В	-46.67	4.23	
Const	0.069	0.007	
Width	$0.43 { m GeV}$	$0.02  {\rm GeV}$	
Mass $\rho''(1700)$	$1.755 \mathrm{GeV}$	$0.009  {\rm GeV}$	
A	61.07	4.72	
В	-72.26	5.46	
$\chi^2/NDF$	1.	26	

Получено отношение количества событий  $\rho''(1700) \kappa \rho^0(770)$ :

$$\frac{N_{1700}}{N_{770}} = \frac{34577}{4,1332 \cdot 10^6}$$

#### Результаты анализа ZDC

- $Pb Pb \rightarrow VPb*Pb*$
- Ядра, участвующие в столкновениях могут возбуждаться и впоследствии для снятия возбуждения испускать нейтроны, регистрируемые ZDC детекторами



# Заключение

- Проведено ознакомление со стратегией анализа данных
- Изучены данные других экспериментов по исследованию возбужденного состояния векторного ρ<sup>0</sup> мезона - ρ''(1700)
- Пройдено обучение ATLAS Software Tutorial
- Написана собственная программа для анализа данных, полученных в UPC тяжелых ионов на эксперименте ATLAS при энергии сталкивающихся ядер 5,02 ТэВ/нуклон
- Построены различные характерные кинематические распределения
- Профитированы наиболее характерные распределения по инвариантной массе
- Получены значения массы и ширины возбужденного состояния  $\rho''(1700)$ :

 $m_{
ho''(1700)} = 1,755 \pm 0,009 \ \Gamma$ əB  $\Gamma_{
ho''(1700)} = 0,43 \pm 0,02 \ \Gamma$ əB

• Получено отношение количества событий  $\rho''(1700)$  к  $\rho^{0}(770)$  :

$$\frac{N_{1700}}{N_{770}} = \frac{34577}{4,1332 \cdot 10^6}$$

• Осуществлена попытка включения в анализ ZDC

# Спасибо за внимание

# Дополнительные слайды

# Track Seeding

Первичный этап реконструкции трека начинается с формирования треков (track seeds), зерен состоящих ИЗ триплетов пространственных точек или хитов, которые совмещаются с точками вдоль треков заряженных частиц. Близко расположенные хиты могут приводить К возникновению ложных треков, которые необходимо исключать ДЛЯ получения корректных данных.



# Информация о датасетах

Run N	Lumiblock	Beam condition
367384	82-194	5.02TeV, 8.23 µb-1, 271x271 bunches
367365	135-431	5.02TeV, 52.62 µb-1, 733x733 bunches
367364	108-661	5.02TeV, 67.58 µb-1, 733x733 bunches
367363	88-132	5.02TeV, 13.32 µb-1, 733x733 bunches
367321	179-669	5.02TeV, 66.53 µb-1, 733x733 bunches
367318	9-555	5.02TeV, 65.84 µb-1, 733x733 bunches
367273	146-616	5.02TeV, 56.48 µb-1, 733x733 bunches
367233	171-683	5.02TeV, 56.80 µb-1, 733x733 bunches
367170	88-886	5.02TeV, 48.74 µb-1, 620x620 bunches
367165	138-167	5.02TeV, 8.80 µb-1, 733x733 bunches
367134	85-628	5.02TeV, 73.83 µb-1, 733x733 bunches
367099	172-661	5.02TeV, 68.06 µb-1, 733x733 bunches
367023	119-691	5.02TeV, 66.72 µb-1, 733x733 bunches
366994	143-176	5.02TeV, 9.92 µb-1, 733x733 bunches
366931	104-462	5.02TeV, 59.34 µb-1, 733x733 bunches
366919	82-719	5.02TeV, 76.05 µb-1, 733x733 bunches
366878	87-566	5.02TeV, 65.58 µb-1, 733x733 bunches
366860	147-673	5.02TeV, 66.36 µb-1, 733x733 bunches
366805	81-684	5.02TeV, 74.77 µb-1, 733x733 bunches
366754	208-722	5.02TeV, 63.69 µb-1, 733x733 bunches
366691	234-753	5.02TeV, 56.63 µb-1, 607x607 bunches
366627	139-569	5.02TeV, 37.80 µb-1, 460x460 bunches
366528	130-427	5.02TeV, 33.69 µb-1, 460x460 bunches
366526	83-91	5.02TeV, 1.31 µb-1, 460x460 bunches
366476	124-594	5.02TeV, 43.13 µb-1, 620x620 bunches
366413	126-542	5.02TeV, 41.47 µb-1, 620x620 bunches

Run N	Lumiblock	Beam condition
366383	июл.36	5.02TeV, 0.23 µb-1, 620x620 bunches
366337	113-796	5.02TeV, 45.36 µb-1, 620x620 bunches
366268	337-929	5.02TeV, 55.67 µb-1, 620x620 bunches
366142	97-575	5.02TeV, 42.55 µb-1, 620x620 bunches
366092	83-527	5.02TeV, 45.98 µb-1, 620x620 bunches
366029	236-693	5.02TeV, 43.95 µb-1, 620x620 bunches
366011	131-581	5.02TeV, 44.73 µb-1, 620x620 bunches
365932	166-648	5.02TeV, 42.94 µb-1, 620x620 bunches
365914	131-490	5.02TeV, 6.93 µb-1, 288x288 bunches
365834	153-382	5.02TeV, 5.95 µb-1, 288x288 bunches
365768	3-626	5.02TeV, 7.74 µb-1, 288x288 bunches
365763	41-555	5.02TeV, 6.98 µb-1, 288x288 bunches
365752	244-720	5.02TeV, 37.83 µb-1, 552x552 bunches
365709	235-715	5.02TeV, 36.39 µb-1, 552x552 bunches
365681	178-614	5.02TeV, 25.40 µb-1, 456x456 bunches
365678	196-372	5.02TeV, 17.16 µb-1, 460x460 bunches
365627	99-477	5.02TeV, 25.82 µb-1, 460x460 bunches
365602	156-452	5.02TeV, 10.43 µb-1, 244x244 bunches
365573	124-415	5.02TeV, 8.05 µb-1, 244x244 bunches
365512	70-229	5.02TeV, 0.97 µb-1, 40x40 bunches
365502	3-295	5.02TeV, 1.07 µb-1, 40x40 bunches
365498	73-144	5.02TeV, 0.47 µb-1, 40x40 bunches
365491	1-212	5.02TeV, unstable beams, Pb+Pb
365394	1-775	5.02TeV, unstable beams, Pb+Pb
365318	1-298	5.02TeV, unstable beams, Pb+Pb
365304	1-1210	5.02TeV, unstable beams, Pb+Pb

### Некоторые характерные распределения



#### Некоторые характерные распределения

