

Определение оптимальных параметров
адронного генератора JETSET для
наилучшего описания рождения адронов в
глубоконеупругих взаимодействиях нейтрино
на основе данных эксперимента NOMAD

Артём Чуканов

Объединённый институт ядерных исследований, Дубна

14 июня 2017

Содержание доклада

Генераторы нейтринных взаимодействий

Эксперимент NOMAD

Настройка программы моделирования нейтринных взаимодействий

Сравнение данных и МК

Заключение

Часть III: Генераторы нейтринных взаимодействий

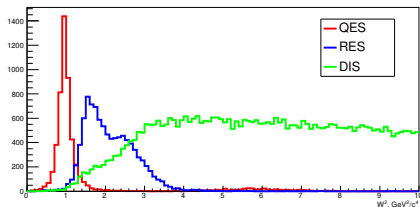
Зачем нужно моделирование взаимодействий

- предварительная оценка чувствительности эксперимента (оптимизация эксперимента)
- отладка и настройка реконструкции
- анализ данных
 - влияние эффективности реконструкции на полученные данные
 - отладка и проверка алгоритмов
 - оценка эффективности и чистоты набора данных
- оценка неопределённостей

Типы нейтринных взаимодействий (ЗТ)

- квазиупругое (QES): $\nu_l N \rightarrow N' l$
- резонансное (RES): $\nu_l N \rightarrow N^* l$
- глубоконеупругое (DIS): $\nu_l N \rightarrow X l$
- когерентное (COH): $\nu_l A \rightarrow A h l$

Распределение взаимодействий по W^2 для CNGS пучка

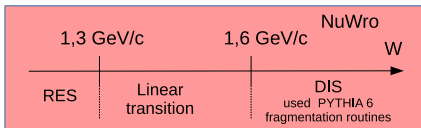
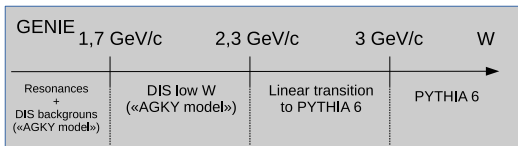
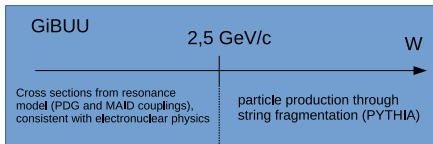
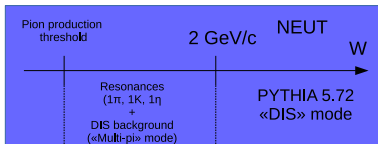


Описание внутриядерного каскада: взаимодействие вторичных частиц с нуклонами ядра-мишени

Основные генераторы нейтринных взаимодействий

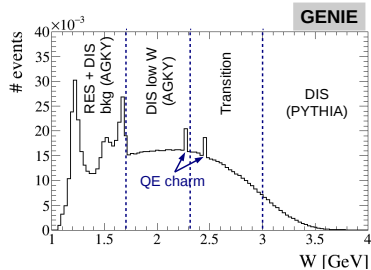
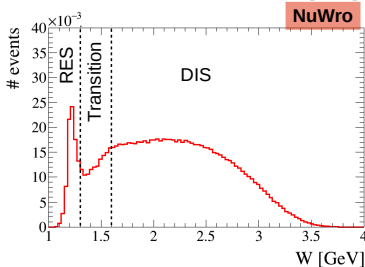
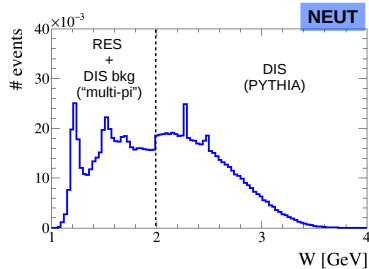
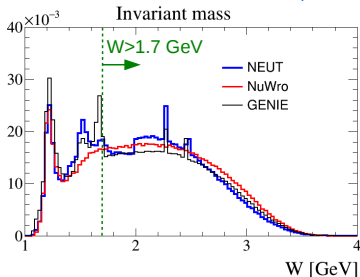
- GENIE (Generate Events for Neutrino Interaction Experiments)
- NuWro (neutrino Wroclaw)
- NEUT
- GiBUU (Giessen Boltzmann-Uehling-Uhlenbeck)
- NUANCE
- NEUGEN

Область **SIS-DIS** в генераторах нейтринных взаимодействий

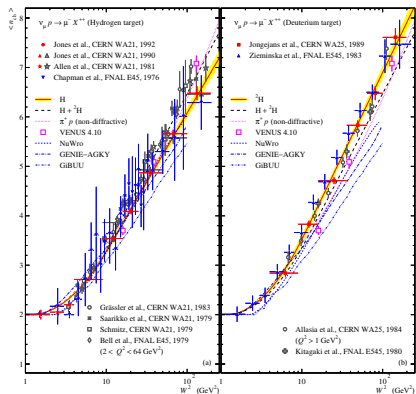


AGKY-модель: переход между KNO и LUND моделями.

Invariant mass distribution ν_μ on Fe, $E_\nu=6.0$ GeV



Множественность рождения заряженных частиц в нейтринных взаимодействиях

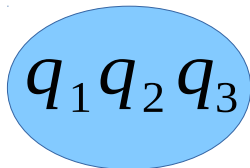


K. S. Kuzmin and V. A. Naumov, Phys. Rev. C 88 (2013) 065501.

KNO модель: $\langle n_{ch} \rangle = a_{ch} + b_{ch} \cdot \lg W^2$

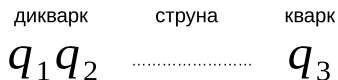
Фрагментация струны - модель Лунд

нуклон



Нейтрино рассеивается на валентном кварке q_3 и выбивает его.

Фрагментация струны - модель Лунд



Между выбитым кварком q_3 и дикварковым остатком образуется струна (при рассеянии на морском кварке между кварком и антикварком).

Фрагментация струны - модель Лунд

дикварк кварк-антикварковые пары кварк

$$q_1 q_2 \dots q_i \bar{q}_i \dots q_j \bar{q}_j \dots q_3$$

Струна разрывается и в ней рождаются кварк-антикварковые или дикварк-антидикварковые пары (свободный параметр).

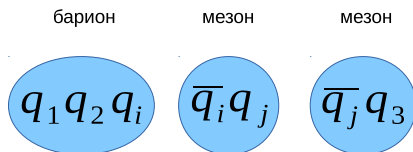
Идея квантовомеханического туннелирования:

$$\exp\left(-\frac{\pi m_{\perp}^2}{k}\right) = \exp\left(-\frac{\pi m^2}{k}\right) \exp\left(-\frac{\pi p_{\perp}^2}{k}\right)$$

Подавление рождения тяжёлых кварков:

$$u : d : s : c \approx 1 : 1 : 0,3 : 10^{-11}$$

Фрагментация струны - модель Лунд



- разыгрывание доли энергии струны, приходящейся на адрон (функция фрагментации):

$$f(z) \propto z^{-1} (1-z)^a \exp(-bm_{\perp}^2/z),$$

a, b - свободные параметры

- выбор аромата кварков ($u\bar{u}, d\bar{d}, s\bar{s}$) - свободные параметры
- выбор типа адрона (спинового состояния) - свободные параметры

Настройка программы моделирования взаимодействий в эксперименте COMPASS

160 ГэВ/с μ^+ пучок.

Настраивались выходы странных частиц и резонансов:

Λ , K^0 , $\bar{\Lambda}$, $\Sigma^{*\pm}$, $\bar{\Sigma}^{*\pm}$, Ξ^- , $\bar{\Xi}^+$

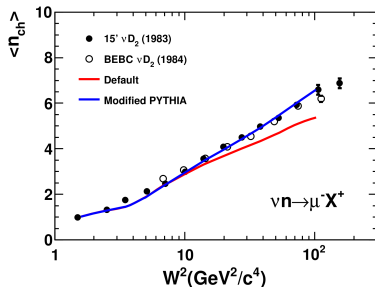
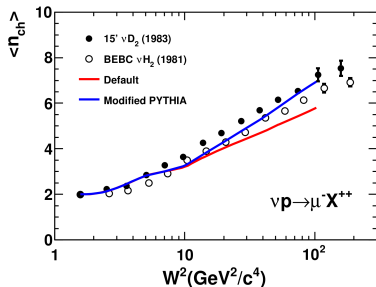
C. Adolph et al., Eur. Phys. J. C **73** (2013) no.10, 2581

Параметр	Описание	По умолчанию	COMPASS
PARJ(1)	$\mathcal{P}(qq)/\mathcal{P}(q)$	0.10	0.030
PARJ(2)	$\mathcal{P}(s)/\mathcal{P}(u)$	0.30	0.450
PARJ(3)	$(\mathcal{P}(us)/\mathcal{P}(ud))/(\mathcal{P}(s)/\mathcal{P}(d))$	0.40	0.175
PARJ(4)	$(1/3)\mathcal{P}(ud_1)/\mathcal{P}(ud_0)$	0.05	0.078
PARJ(5)	$\mathcal{P}(BM\bar{B})/(\mathcal{P}(B\bar{B}) + \mathcal{P}(BM\bar{B}))$	0.50	3.000
PARJ(7)	s-meson suppression in $BM\bar{B}$	0.50	0.130

Настройка программы моделирования взаимодействий GENIE

Настраивалась множественность заряженных частиц

T. Katori and S. Mandalia, J. Phys. G 42 (2015) no.11, 115004.



Настройка программы моделирования взаимодействий

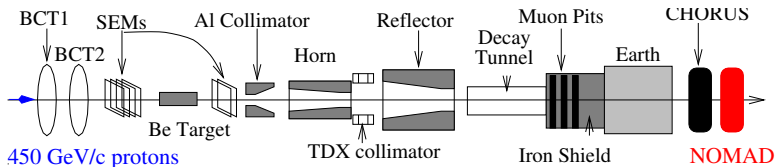
GENIE

Параметр	Описание	По умолчанию	COMPASS	Lund-scan
PARJ(1)	$\mathcal{P}(qq)/\mathcal{P}(q)$	0.10	0.030	0.02
PARJ(2)	$\mathcal{P}(s)/\mathcal{P}(u)$	0.30	0.450	0.25
PARJ(3)	$(\mathcal{P}(us)/\mathcal{P}(ud))/(\mathcal{P}(s)/\mathcal{P}(d))$	0.40	0.175	–
PARJ(4)	$(1/3)\mathcal{P}(ud_1)/\mathcal{P}(ud_0)$	0.05	0.078	–
PARJ(5)	$\mathcal{P}(BM\bar{B})/(\mathcal{P}(B\bar{B}) + \mathcal{P}(BM\bar{B}))$	0.50	3.000	–
PARJ(7)	s-meson suppression in $BM\bar{B}$	0.50	0.13	–
PARJ(11)	$\mathcal{P}(s=1)_{u,d}$	0.50	–	0.51
PARJ(12)	$\mathcal{P}(s=1)_s$	0.60	–	0.57
PARJ(21)	σ_q (GeV)	0.36	–	0.42
PARJ(33)	E_{rem} (GeV)	0.80	–	0.47
PARJ(41)	a	0.30	–	0.68
PARJ(42)	b (GeV ⁻²)	0.58	–	0.35
PARJ(45)	a_{qq}	0.50	–	0.74

Часть I: Эксперимент **NOMAD**

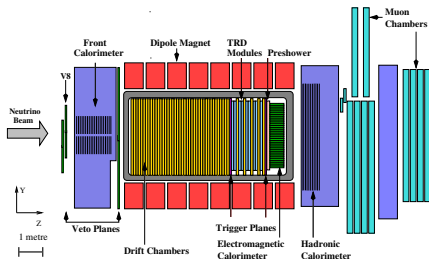
Эксперимент NOMAD

- поиск $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ осцилляций
- энергия протонов от ускорителя SPS (CERN) - 450 ГэВ
- расстояние между распадным каналом π, K мезонов и детектором - 620 м
- средняя энергия нейтрино $\langle E_{\nu_\mu} \rangle$ - 24,3 ГэВ
- большая статистика: 780 000 ν_μ ЗТ, 240 000 ν НТ событий,
> 20 000 идентифицированных нейтральных странных частиц



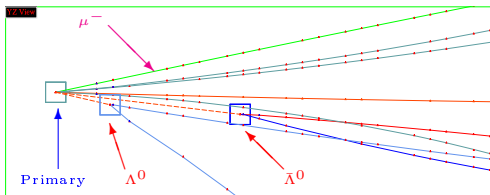
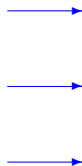
Детектор NOMAD

NOMAD, вид сбоку



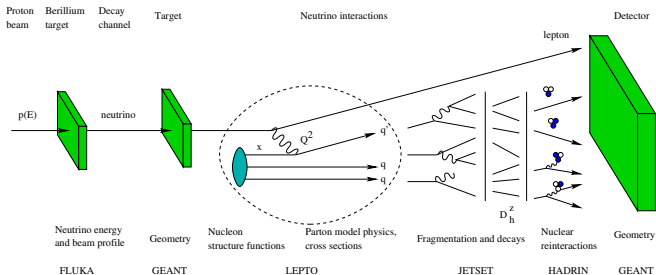
- Дрейфовые камеры мишень для ν_μ (2,7 тонны), измерение импульсов треков (точность 96,5%)
- Магнитное поле: 0,4 Т
- TRD и PRS: идентификация электронов
- ECAL и HCAL: измерение энергии
- Мюонные камеры: идентификация мюонов

ПОТОК ν_μ

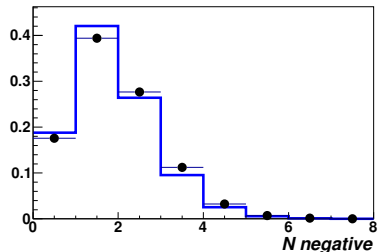
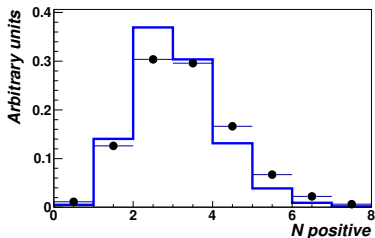
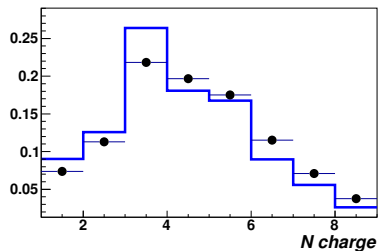
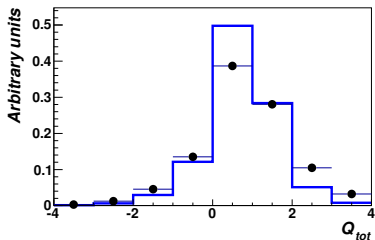


Программа моделирования нейтринных взаимодействий для эксперимента NOMAD

- LEPTO 6.1 (взаимодействие нейтрино с нуклоном)
- JETSET 7.4 (фрагментация струны)
- GEANT 3 (протаскивание частиц через вещество детектора)
- DPMJET (внутриядерные взаимодействия)



Параметры **JETSET** по умолчанию - количество заряженных треков



Параметры JETSET по умолчанию - выходы адронов

Адроны	МК (%)	Данные (%)	МК/Данные
K_S^0	11.8 ± 0.03	8.66 ± 0.08	1.36 ± 0.02
Λ^0	9.2 ± 0.08	6.08 ± 0.08	1.51 ± 0.02
$\bar{\Lambda}^0$	0.77 ± 0.02	0.52 ± 0.02	1.48 ± 0.08
$\rho^0(770)$	25.72	19.50 ± 1.90	1.32 ± 0.13
$f_0(980)$	-	1.80 ± 0.40	-
$f_2(1270)$	-	3.80 ± 0.90	-
D^{*+}	1.22	0.97 ± 0.14	1.26 ± 0.18
D^0	2.44	2.69 ± 0.22	0.91 ± 0.07
Отношения			
$\frac{N(K^{*+} \rightarrow K_S^0 \pi^+)}{N(K_S^0)}$	30.3 ± 0.6	14.3 ± 1.0	2.1 ± 0.2
$\frac{N(K^{*-} \rightarrow K_S^0 \pi^-)}{N(K_S^0)}$	13.5 ± 0.5	8.1 ± 0.7	1.7 ± 0.2
$\frac{N(\Sigma^{*+} \rightarrow \Lambda \pi^+)}{N(\Lambda)}$	16.4 ± 0.6	4.8 ± 1.0	3.5 ± 0.7

Согласие между данными и МК:

распределения по основным кинематическим переменным (E_ν, Q^2, W^2, \dots)

Разногласие между данными и МК:

интегральные выходы странных частиц и резонансов, распределение по множественности заряженных треков

Настройка программы моделирования для эксперимента NOMAD

- Поперечный импульс адронов (*Parj(21)*)
- Множественность первичных заряженных частиц (*Parj(41), Parj(42)*)
- Выходы очарованных, странных частиц и резонансов (*Parj(1) - Parj(17)*)

Итеративная процедура: (1) настраиваем выходы странных частиц и резонансов, (2) настраиваем множественность первичных заряженных частиц, (3) повторяем пункт 1.

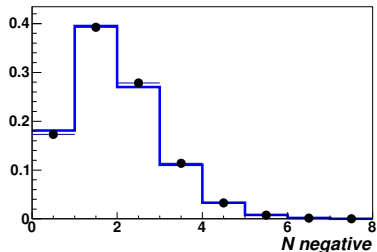
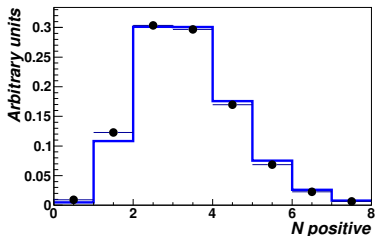
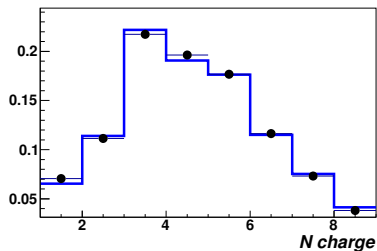
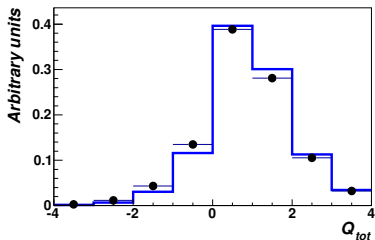
Настроенный набор параметров программы JETSET

Parameter	Description	Default	ALEPH	Lund-scan	COMPASS	NOMAD
PARJ(1)	$\mathcal{P}(qq)/\mathcal{P}(q)$	0.10	0.106	0.02	0.030	0.070
PARJ(2)	$\mathcal{P}(s)/\mathcal{P}(u)$	0.30	0.285	0.25	0.450	0.205
PARJ(3)	$(\mathcal{P}(us)/\mathcal{P}(ud))/$ $(\mathcal{P}(s)/\mathcal{P}(d))$	0.40	0.71	–	0.175	0.200
PARJ(4)	$(1/3)\mathcal{P}(ud_1)/\mathcal{P}(ud_0)$	0.05	–	–	0.078	0.005
PARJ(5)	$\mathcal{P}(BM\bar{B})/$ $(\mathcal{P}(B\bar{B}) + \mathcal{P}(BM\bar{B}))$	0.50	–	–	3.000	0.600
PARJ(6)	$s\bar{s}$ suppression in $BM\bar{B}$	0.50	–	–	–	0.500
PARJ(7)	s-meson suppression in $BM\bar{B}$	0.50	–	–	0.130	0.220
PARJ(11)	$\mathcal{P}(s=1)_{u,d}$	0.50	0.55	0.51	–	0.550
PARJ(12)	$\mathcal{P}(s=1)_s$	0.60	0.47	0.57	–	0.650
PARJ(13)	$\mathcal{P}(s=1)_{c,b}$	0.75	0.65	–	–	0.660
PARJ(14)	$\mathcal{P}(S=0, L=1, J=1)$	0.0	0.12	–	–	0.150
PARJ(15)	$\mathcal{P}(S=1, L=1, J=0)$	0.0	0.04	–	–	0.100
PARJ(16)	$\mathcal{P}(S=1, L=1, J=1)$	0.0	0.12	–	–	0.150
PARJ(17)	$\mathcal{P}(S=1, L=1, J=2)$	0.0	0.20	–	–	0.295
PARJ(19)	Leading baryon suppression	1.0	0.57	–	–	0.500
PARJ(21)	σ_q (GeV)	0.36	0.370	0.42	–	0.400
PARJ(32)	E_{min} (GeV)	1.0	–	–	–	0.200
PARJ(33)	E_{rem} (GeV)	0.80	–	0.47	–	0.200
PARJ(41)	a	0.30	0.40	0.68	–	1.100
PARJ(42)	b (GeV ⁻²)	0.58	0.796	0.35	–	1.400
PARJ(45)	a_{qq}	0.50	–	0.74	–	0.400
PARJ(54)	ε_c	-0.05	-0.04	–	–	-0.165
MSTJ(11)	fragmentation type	4	3	–	–	3
MSTJ(12)	baryon model	2	3	–	–	3

Часть II: Сравнение данных и МК в эксперименте NOMAD.

ν_μ взаимодействия по каналу $3T$

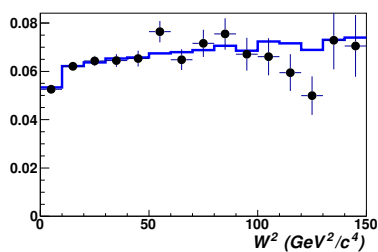
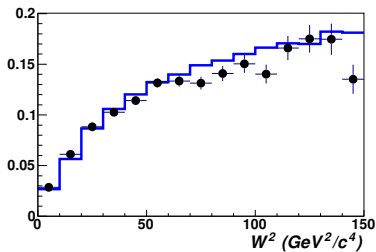
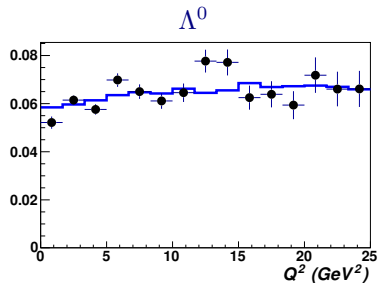
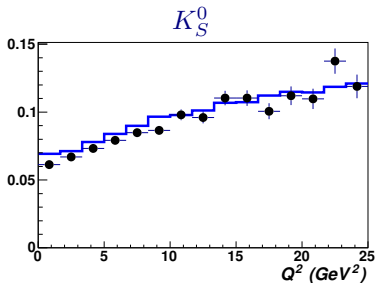
Новый набор JETSET параметров - количество заряженных треков



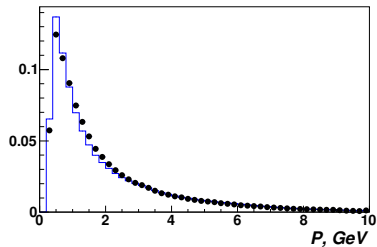
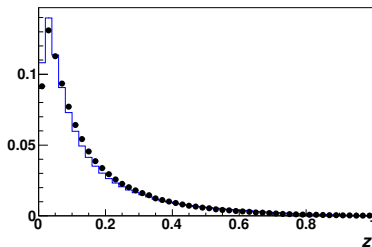
Новый набор JETSET параметров - выходы частиц и резонансов

Адроны	МК (%)	Данные (%)	МК/Данные
K_S^0	8.90 ± 0.06	8.81 ± 0.08	1.00 ± 0.01
Λ^0	5.63 ± 0.05	5.91 ± 0.08	0.95 ± 0.02
$\bar{\Lambda}^0$	0.44 ± 0.01	0.45 ± 0.02	0.98 ± 0.06
$\rho^0(770)$	20.28	19.50 ± 1.90	1.04 ± 0.10
$f_0(980)$	1.87	1.80 ± 0.40	1.04 ± 0.23
$f_2(1270)$	3.93	3.80 ± 0.90	1.04 ± 0.24
D^{*+}	0.92	0.97 ± 0.14	0.95 ± 0.14
D^0	2.34	2.69 ± 0.22	0.87 ± 0.07
Отношения			
$\frac{N(K^{*+} \rightarrow K_S^0 \pi^+)}{N(K_S^0)}$	17.1 ± 0.7	17.2 ± 1.2	1.0 ± 0.1
$\frac{N(K^{*-} \rightarrow K_S^0 \pi^-)}{N(K_S^0)}$	9.7 ± 0.5	8.8 ± 0.8	1.1 ± 0.1
$\frac{N(\Sigma^{*+} \rightarrow \Lambda \pi^+)}{N(\Lambda)}$	6.0 ± 0.8	6.6 ± 1.5	0.9 ± 0.2

Новый набор JETSET параметров - распределение по Q^2 и W^2



Новый набор **JETSET** параметров - распределения по z и импульсу заряженных частиц

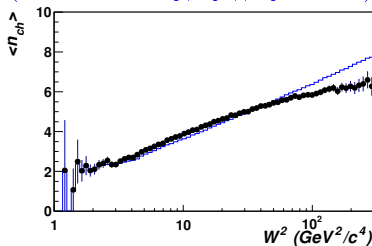


Новый набор JETSET параметров - распределение по W^2

Сравнение данных и МК, сравнение с генератором GENIE

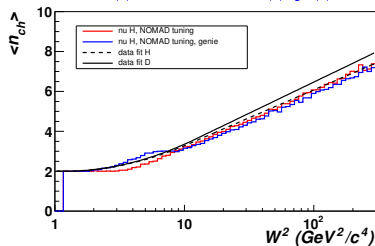
поправленные данные

(неполный набор, предварительно)



генератор событий

взаимодействия на водороде



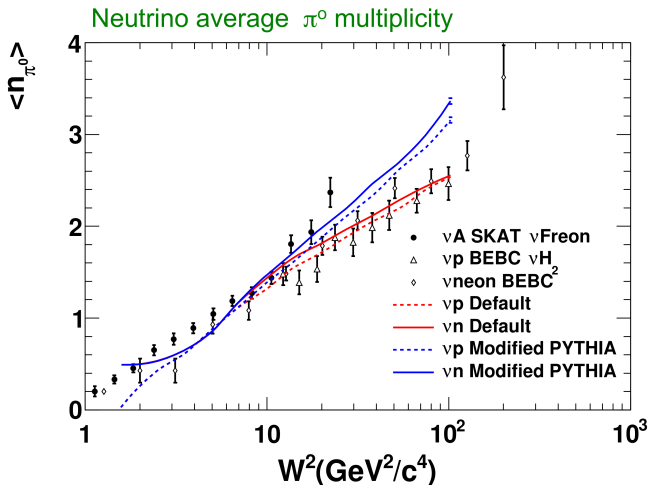
Множественное рождение нейтральных странных частиц

Каналы	Реконструированные события		МК/Данные
	МК	Данные	
$\Lambda^0 X$	7115	7164	0.99 ± 0.02
$K_S^0 X$	14055	13642	1.03 ± 0.01
$\bar{\Lambda}^0 X$	548	577	0.95 ± 0.06
$K_S^0 K_S^0 X$	412	294	1.40 ± 0.11
$\Lambda^0 K_S^0 X$	375	267	1.41 ± 0.11
$\Lambda^0 \bar{\Lambda}^0$	50	39	1.29 ± 0.28
$K_S^0 \bar{\Lambda}^0 X$	18	14	1.30 ± 0.46
$\Lambda^0 \Lambda^0 X$	15	9	1.68 ± 0.71
$K_S^0 K_S^0 K_S^0 X$	4	2	2.01 ± 1.74

В данных выходы K^\pm -мезонов завышены относительно выходов K^0 -мезонов по сравнению с МК

Зависимость множественности рождения π^0 в нейтринных взаимодействиях

T. Katori and S. Mandalia, J. Phys. G 42 (2015) no.11, 115004.



Сравнение настроенного МК для эксперимента NOMAD с генератором GENIE на уровне генерации событий для пучка CNGS

$$E_\nu = 10..300 \text{ ГэВ}, W^2 > 9 \text{ ГэВ}^2/c^4$$

Hadrons	NOMAD (%)	GENIE (%)	NOMAD/GENIE
Λ^0	6.48	5.65	1.15
$\bar{\Lambda}^0$	0.41	0.20	2.05
K^0	7.93	5.34	1.49
\bar{K}^0	5.47	4.08	1.34
$\rho^0(770)$	22.04	22.79	1.07
$f_0(980)$	2.11	2.33	0.91
$f_2(1270)$	4.33	5.34	0.81
D^0	2.38	5.84	0.41
D^+	1.18	2.31	0.51
D^{*+}	0.91	0	–
K^+	12.29	10.09	1.22
K^-	5.44	4.70	1.16

Существенное разногласие между генератором **NOMAD** и **GENIE** (оба основаны на программе JETSET фрагментации струны).

Возможны скрытые настройки генератора **GENIE**

Заключение

- рассмотрены основные генераторы нейтринных взаимодействий
- произведена настройка программы моделирования нейтринных взаимодействий с использованием данных эксперимента **NOMAD**
- получено хорошее согласие по выходам частиц и резонансов
- получено хорошее согласие по множественности рождения заряженных частиц
- Существует разногласие между генератором **NOMAD** и **GENIE** с настроенными параметрами программы JETSET фрагментации струны (предварительно).