

Кентавр события

Серафим Серюбин

November 2022

1 Введение

С точки зрения процессов получения данных о многочастичных процессах привлекательность экспериментов с космическими лучами обусловлена их высокими энергиями и возможностью исследовать область фрагментации при энергиях, еще не достигнутых на ускорительно-коллайдерных экспериментах.

Однако, хотя эксперименты с космическими лучами позволяют исследовать область фрагментации процессов образования многих частиц, они сталкиваются с рядом трудностей. Существенной проблемой является неопределенность состава первичных космических лучей при энергиях выше 10^{15} эВ, и то, что поток первичных космических лучей быстро уменьшается с увеличением энергии (см рис. 1).

Широкие атмосферные ливни. Само название — широкие атмосферные ливни (ШАЛ) довольно хорошо отражает феноменологическую картину явления, которое возникает при прохождении частиц космического излучения сверхвысокой энергии через атмосферу - образования каскадов частиц.

Существование атмосферных ливней, охватывающих площади в тысячи квадратных метров, было показано в 1938 г. экспериментами П. Оже. Открытие лавин из большого числа заряженных частиц совпало с появлением электронно-фотонной каскадной теории, что позволило отождествить широкие атмосферные ливни с электронно-фотонными лавинами, возникающими в атмосфере от первичных электронов сверхвысокой энергии (см. рис. 2)

Эта точка зрения на природу широких атмосферных ливней была общепризнанной в течение ряда лет. Однако Д. В. Скобельцын в 1942 г., анализируя данные о пространственном распределении частиц в широких атмосферных ливнях, предположил, что имеет место наложение двух распределений - одно из этих распределений соответствует электронно-фотонной каскадной теории. Другое, более широкое, связано с вмешательством дополнительных взаимодействий.

Событие типа «Кентавр». Многолетние измерения процессов, происходящих с космическими частицами в атмосфере Земли, выполненные различными экспериментальными методиками, привели к обнаружению ряда экзотических явлений, не укладывающихся в современное представление о взаимодействиях при высоких и сверхвысоких энергиях. Одним из первых экзотических явлений, наблюдаемым в 80-х годах прошлого века, было событие, зарегистрированное установкой калориметрического типа. Событие, которое было зарегистрировано японскими физиками имело множество труднообъяснимых явлений. Это событие было названо «Кентавром».

«Кентавр» - это особый тип ядерного взаимодействия, при котором, как предполагается, образуется около ста барионов (и, возможно, включая антибарионы) без какого-либо значительного излучения мезонов. Кроме этого существует аналогичный тип событий с большой множественностью барионов (10-20), который называется «Мини-Кентавр».

in progress...

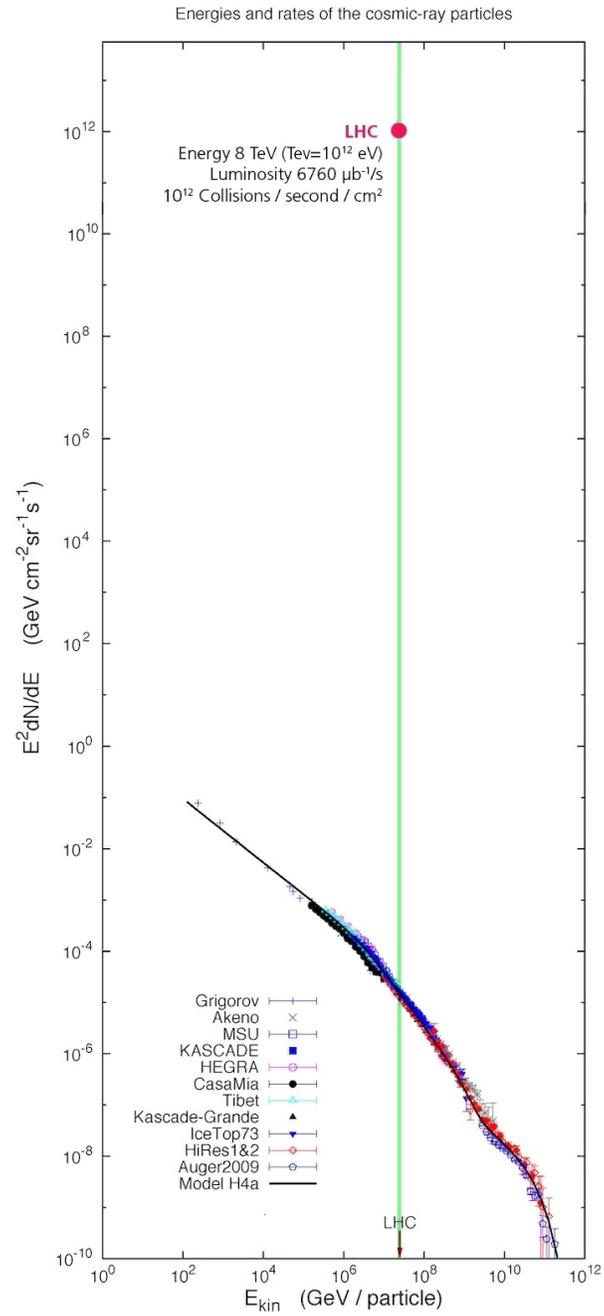


Рис. 1: Наглядное сравнение коллайдерных экспериментов и экспериментов с космическими лучами.

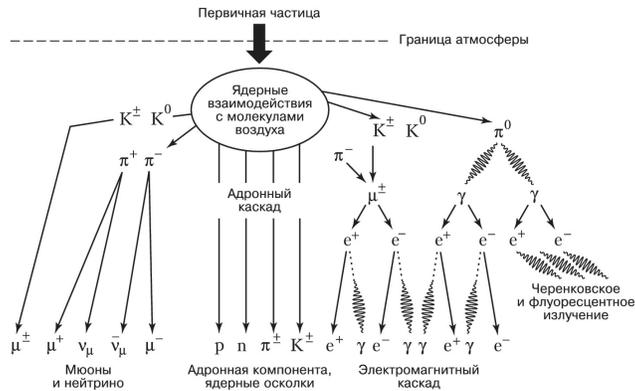


Рис. 2: Схема развития широкого атмосферного ливня: K^\pm и K^0 – заряженные и нейтральный К-мезоны, π^\pm и π^0 – заряженные и нейтральный π -мезоны, μ_\pm – мюоны, p – протон, n – нейтрон, γ – фотон

2 Экспериментальные установки

2.1 Идентификация широких атмосферных ливней

Электромагнитная компонента ШАЛ. В широком атмосферном ливне присутствуют электромагнитная, мюонная и адронная компоненты. Электромагнитная компонента ливня является наибольшей по числу частиц и превышает все остальные примерно на два порядка. Следовательно, обычные гейгеровские, сцинтилляционные или водные черенковские детекторы, расположенные на поверхности, регистрируют в основном эту компоненту. Большая часть установок, созданных для изучения ШАЛ, измеряет прежде всего электромагнитную компоненту.

Многие из перечисленных установок также регистрируют мюонную компоненту. Для отбора мюонных событий используются детекторы, защищенные достаточной для поглощения электронов и гамма-квантов толщиной вещества. В основном это либо подземные детекторы, либо детекторы под толстым слоем поглотителя (например, железа), либо водные черенковские детекторы большого объема.



Рис. 3: Эмульсионный эксперимент на г. Чакалтая (Анды, Боливия). Уникальные характеристики установки - высота расположения (4370 м н.у.м.); крупнейшая в мире ($\sim 1000 \text{ m}^2$) твердотельная трековая камера с высоким пространственным разрешением ($\sim 10 \text{ мкм}$) и с высоким порогом регистрации частиц ($\sim 4 \text{ ТэВ}$)

Адронная компонента ШАЛ. Значительно хуже дело обстоит с адронной компонентой. Для её изучения применялись рентгеновские пленки и ядерные эмульсии в экспериментах на Чакалтайе и Памире, ионизационные калориметры, нейтронные мониторы. Основной проблемой при изучении адронной компоненты является сложность и дороговизна используемых детекторов, и как следствие их малочисленность по сравнению с обычными ливневыми детекторами. Большая часть установок, регистрирующих ШАЛ, вообще не имеет адронных детекторов. А в тех установках, где такие детекторы есть, их площадь несопоставима с размерами изучаемых ливней и площадью детекторов электромагнитной компоненты (не больше нескольких сотен квадратных метров).

Адронная компонента в глубине атмосферы в основном состоит из протонов, нейтронов и пионов. Доля пионов в потоке космических лучей зависит от энергии и высоты. При небольших энергиях пионы быстро распадаются, и их поток в атмосфере невелик. С ростом энергии пионов вероятность распада уменьшается, и при определенной критической энергии распад станет маловероятным, чем ядерное взаимодействие. При энергиях значительно превышающих распад пионов играет малую роль, и их поток велик.

В экспериментах с космическими лучами измеряется сечение неупругого - взаимодействия, т.е. взаимодействием считается рождение хотя бы одной дополнительной частицы, заряженной или нейтральной. В таком случае - одним из важных параметров является множественность. Полная множественность представляет собой сумму заряженных и нейтральных частиц.

При анализе прохождения частиц космического излучения через вещество необходимо знать спектры адронов, которые образуются в ядерных взаимодействиях. Одним из важных свойств сильных взаимодействий является ограниченность среднего поперечного импульса вторичных частиц. Эксперимент показывает, что поперечный импульс вторичных пионов слабо растет от 0.3 ГэВ/с и до 0.42 ГэВ/с. Средний поперечный импульс больше в тех событиях, где больше множественность.

В адронных взаимодействиях важную роль играет коэффициент неупругости, который определяется, как доля энергии первичной частицы уносимая вторичными частицами. При высоких энергиях проявляется процесс глубоко-неупругих столкновений. В результате адронизации они превращаются в пучки адронов - струи, имеющие большие поперечные импульсы. При большой энергии кварк, в процессе адронизации, успевает испустить глюон, и тогда может возникнуть три струи (т.н. «трехструйные события»).

Измеренные сечения в экспериментах с космическими лучами, содержат систематические ошибки, причиной которой является сложный состав космического излучения, зависящим от энергии (за пределами атмосферы - сложный изотопный состав первичных частиц, в глубине атмосферы - примесь пионов). Независимость от энергии взаимодействующих нуклонов величины парциального коэффициента неупругости во взаимодействиях с ядрами свинца, также как и пробега поглощения ядерно-каскадных лавин нуклонов с энергией ниже 10 ТэВ, указывают на сохранение масштабной инвариантности при столкновениях нуклонов с ядрами вплоть до указанной выше энергии.

in progress...

2.2 Обсерватория Чакалтайя

Конструкция экспериментальной установки представляет собою гетерогенный калориметр из пластин ядерной фотоэмульсии и свинцовых поглотителей. Гамма-излучение или электрон, либо попадающий в калориметр снаружи, либо генерируемый внутри самой камеры, создает электрон-фотон-позитронный ливень. Наложённые друг на друга фотоэмульсионные пластины записывают треки электромагнитного каскада.

Структура всего детектора в Чакалтайе состояла из четырех частей:

- верхний детектор;

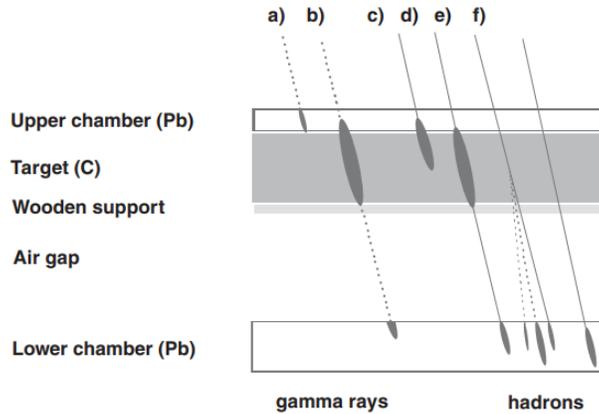


Рис. 4: **Основная структура камеры Чакалтайя.** Идентификация ливня - (а) луч трек продолжения; (b) трек с продолжением; (c) Рb-струи в верхней камере без продолжения; (d) Рb-струи в верхней камере с продолжением; (e) ливни из C-струи в мишени; (f) Рb-струи в нижней камере.

- слой поглотителя;
- воздушный зазор;
- нижний детектор

Детектор, который сообщил об экзотическом сигнале, не был сконструирован для охоты на события типа «Кентавр». Первоначально детектор был разработан для изучения множественного образования пионов, образующихся при взаимодействии адронов космических лучей с углеродом. Это определило конкретный тип детектора.

Целью было исследовать ядерные взаимодействия, возникающие в слое поглотителя, толщина которого соответствует $1/3$ средней длины свободного пробега для ядерных взаимодействий. Адронная струя в эксперименте обозначалась как «C-jet» (C-струя), поскольку основной состав материала поглотителя в экспериментах подобного типа был углерод.

Идея создания этой двухуровневой камеры исходит из следующих трех соображений. Во-первых, верхний детектор работает здесь как экран от атмосферных гамма-лучей и электронов, попадающих в поглотитель и нижний детектор. Во-вторых, целевой слой изготовлен из материала с низким Z , так что он почти прозрачен для гамма-лучей, испускаемых C-струей. И, в-третьих, воздушный зазор обеспечивает достаточное разделение гамма-лучей от C-струй.

Когда электронный ливень распространяется через чувствительный слой в камере, он создает темное пятно на рентгеновской пленке. Темнота пятна измеряется с помощью фотометра. Высокоэнергетический адрон взаимодействует с ядрами свинца или углерода. Ядерные взаимодействия, возникающие в слое мишени, регистрируются в виде рентгеновских лучей в нижнем детекторе. Признаком такого процесса является распад пионов (π^0), которые генерируются в этих столкновениях. Распад пионов приводит к образованию γ -лучей. Порог обнаружения энергии ливней, наблюдаемых в рентгеновской пленке, составляет 1 ТэВ.

3 События типа «Кентавр»

«Кентавр» - это особый тип взаимодействия, при котором образуется около ста барионов без какого-либо значительного излучения мезонов.

Событие было обнаружено первым во время сканирования рентгеновской пленки для нижней камеры для исследования С-струй. На рентгеновской пленке была видна группа из нескольких десятков пятен ливня, сгруппированных в узкой области диаметром 1 см, с общей видимой энергией значительно более $\sim 200-300$ ТэВ.

В так называемых нормальных случаях предполагается, что семейство в верхнем детекторе несколько раз больше, как по количеству, так и по энергии, чем его продолжение в нижнем детекторе. Ситуация с «Кентавром-I» была противоположной. Верхняя половина события не позволяла реконструировать его нижнюю половину, и наоборот. Из-за этого дисбаланса название «Кентавром-I» и было выбрано. Согласно первоначальному анализу, событие состояло только из одного γ -луча и 49 адронов.

Первоначальная интерпретация события «Кентавр-I» предполагало, что с этим событием были связаны два семейства космических лучей. Была также выдвинута гипотеза, что взаимодействия могут происходить не только в камере, но и на больших высотах. Характерными чертами, которые, как полагают, имеют отношение к описанию явления, были (1) большое количество адронов и (2) небольшое количество γ -лучей. Еще один характерный момент связан с долей адронной энергии Q_h от общей наблюдаемой энергии события. (Таким образом, были найдены еще четыре кандидата, названные Кентавр-II, III, IV, V).

3.1 Феноменология события

Наблюдаемая множественность пяти событий «Кентавр» находится в диапазоне 63-90 адронов, со средним числом в 75. Поскольку первичных γ -ливней обнаружено не было, можно сделать вывод, что для сохранения изоспина эти адроны не могут содержать пионов. Поэтому было широко признано, что адроны должны быть барионами. Адроны изотропно испускаются, и их распределение энергии и поперечного импульса имеет экспоненциальную форму:

$$\frac{dN}{dp_T^2} \sim \exp(-p_T^2/p_{T0}^2)$$

Средний наблюдаемый поперечный импульс, рассчитанный на основе выведенной точки распада файерболла события «Кентавр-I», составляет $p_T = 0.35 \pm 0.14$ ГэВ/с. Отсюда можно оценить средний поперечный импульс событий, который составляет $(p_T = 1.75 \pm 0.7$ ГэВ/с. Это очень большой поперечный импульс, примерно в три раза превышающий средний поперечный импульс, измеренный для барионов при столкновениях ядро-ядро при $\sqrt{s} = 200.4$ ГэВ в CERN SPS, что приводит к идеи о взрывном распаде сверхплотного огненного шара, а не о типичной ядерной фрагментации.

События «Кентавр» наблюдались в экспериментах с космическими лучами в области малых быстрот и предположительно, распределение продольного импульса файерболла подчиняется тому же закону масштабной инвариантности, описываемому эмпирической формулой, установленной при более низких энергиях для больших x_F :

$$\frac{dN}{dx_F} \sim (1 - x_F)^n$$

Средняя наблюдаемая энергия событий была около 348 ТэВ. Если мы примем коэффициент неупругости $k_\gamma = 0, 2$, то общая средняя энергия взаимодействия Центавра составит

$$\langle E_h \rangle = \frac{\langle E_h(\gamma) \rangle}{k_\gamma} \sim 1740 \text{ TeV}$$

В системе координат шаровой молнии каждая изотропно испускаемая частица (нуклон) имеет энергию:

$$\langle E_n \rangle = \sqrt{\left(\frac{4}{\pi} \langle p_T \rangle\right)^2 + M_n^2} \sim 2.4 \pm 0.8 \text{ GeV}$$

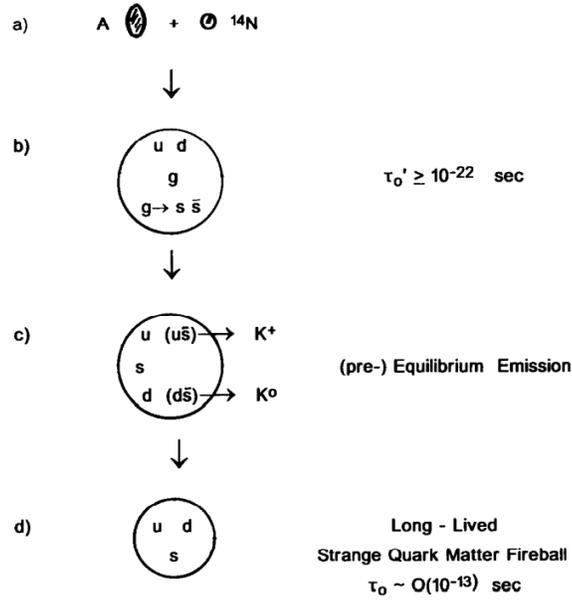


Рис. 5: Схемы эволюции файерболла из кварковой материи в странное состояние перед распадом.

, где M_n - масса нуклона. При средней множественности, равной $\langle N_h \rangle = 75$, масса среднего файерболла становится:

$$\langle E_f \rangle = \langle N_h \rangle \langle E_n \rangle \sim 180 \pm 60 \text{ GeV}$$

in progress...

3.2 Другие события подобные событию «Кентавр»

Помимо «классического Кентавра», вполне разумная статистика кентавроподобных (или богатых адронами) событий была собрана как Чакалтайей, так и Памирскими экспериментами. К сожалению, в отличие от «Кентавр-I», некоторые из этих событий родились на довольно больших расстояниях от аппарата, поэтому они обладают значительной долей электромагнитной составляющей, которая, вероятно, была сгенерирована в ядерных и электромагнитных каскадных процессах в атмосферном слое над камерой. Кроме того, серьезные трудности возникли при измерениях и анализе некоторых экзотических суперсемейств (с очень высокой видимой энергией, $E_{vis} \geq 500 \text{ ТэВ}$), которые очень часто сопровождается так называемым «галло». В таблице 1 приводится описание событий.

4 Физические модели Кентавр события

4.1 Кварк-глюонная плазма

Экспериментально наблюдаемые характеристики, такие как множественность, поперечные импульсы, энергетические спектры и распределения по псевдобыстроте вторичных частиц, вдохновили модель файерболла, посредством которой были получены оценки термодинамических параметров.

На первом этапе эволюции, после столкновения - кварк-глюонная плазма, называемая первичным файерболлом содержит u - и d -кварки и глюоны. Высокий бариохимический потенциал препятствует фрагментации глюонов на пары $u\bar{u}$ и $d\bar{d}$. Поэтому глюоны фрагментируются на пары $s\bar{s}$ и достигается состояние частичного химического равновесия.

В течение этого времени s -кварки соединяются с u - и d -кварками, и некоторое количество K^+ и K^0 испускается из первичного огненного шара, уменьшая температуру и энтропию. В конце этой

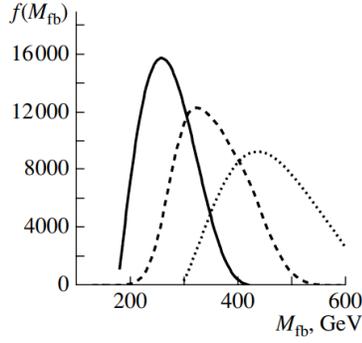
Таблица 1: События типа «Кентавр»

Событие,	Коллаб., Камера.		N	Энергия [ТэВ]	Q_h	$\langle ER \rangle$ [GeV · m]	E_{halo} [TeV]	E_{th} [TeV]	Прим.
CENT. NEW	Brasil- Japan 2-storey	γ	0	0	1.			1	
		h	13	51.2					
CENT. VI	Brasil- Japan	γ	56	361	0.52	735 ¹		4	
		h	157	644				2	
	2-storey	h	28	390				4	
		h	68	496				2	
		tot		751				4	
			1140	0.44	803 ¹	2			
CENT. VII	Brasil- Japan	γ	547	2978	0.46		500	2	Centauro or Chiron
		h	265	2179				4	
	h	129	2486	2					
	2-storey	h	74	2328				4	
		tot		5464				2	
			4506	0.52	842	4	penetr. cascades and mini- clusters, halo		
				0.8	857 ¹	20			
CENT. PAMIR	USSR- Japan	γ	15	95	0.82	67		4	
		h	120	298				1	
	h	22	444	4					
	standard carbon	h	37	476				1	
		tot		539				4	
				0.62	495 ¹	1			
ELENA	Pamir	γ	78	600	0.65±0.05	360		4	str.pen. leading cascade
		h	23	1100				4	
	deep carbon	tot		1700				4	
		h	22 ²	300 ²				4	
C-K	Pamir	γ	74	306	0.64	111		~ 1	str.pen. cascades
		h	55	531					
	deep Pb	tot		382 ³					
		γ	27	198					
	h	22	446						
				297 ³					

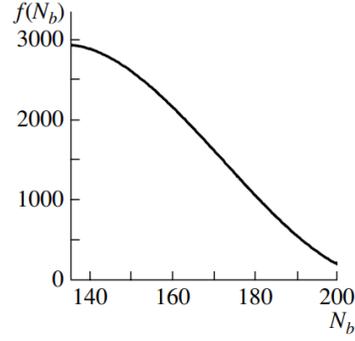
¹ измеряется ливнями с $E(\gamma) \geq 20$ TeV

² без лидирующего каскада

³ энергия высвобождается только в первых пиках



(a) Вид распределения по массе



(b) Вид распределения по множественности

стадии фиброболл превратится в шар кварк-глюонной плазмы с большой странностью и большим временем жизни $\tau \sim 10^{-9}$ сек). В случае космических лучей этого достаточно, для того чтобы преодолеть атмосферу и достичь вершин гор. В то же время механизм образования странных частиц может привести к тому, что содержание странных кварков в шаровой молнии будет накапливаться и наконец, распадется на нестранные барионы и легкие частицы странной кварковой материи - стрейнджлеты. Процесс показан на рисунке ??

Для оценки некоторых параметров рассмотрим столкновения ядер, атомные веса которых равны A_1 и A_2 , а заряды - Z_1 и Z_2 . Параметр центральности взаимодействия ограничен естественными условиями:

$$0 < b < R_1 + R_2$$

, где $R_i = 1.15A_i^{1/3}$. В области ядерного перекрытия образуется фиброболл. Т.к. все выброшенные нуклоны из области перекрытия участвуют в процессе взаимодействия, то также определяют барионное число фиброболла. Таким образом, барионное число огненного шара N_b может быть оценено на основе простых геометрических соображений. Предполагая равномерное распределение нуклонов по ядру, можно выразить N_b в терминах отношения объемов.

$$N_b = 0.9A_1 \frac{V_0}{V_1}$$

Где коэффициент 0,9 был введен для того, чтобы исключить вклад в N_b от границы области перекрытия. Естественно предположить, что ядра пучка и мишени распределены равномерно по поперечной плоскости, что эквивалентно равномерному распределению параметра удара в квадрате b^2 . Это предположение определяет форму всех распределений. Также, следует отметить, что фиброболл «Кентавра» должен чаще возникать при центральных, чем при периферийных столкновениях, потому что первые имеют более высокую содержание барионов.

Начальная стадия эволюции огненного шара нестабильна, но в течение временного интервала $\Delta t \sim 10^{-21}$, глюоны фрагментируются на пары $s\bar{s}$, после чего устанавливается химическое равновесие. В первом порядке пертурбативной КХД плотность энергии произведения кварк-глюонная плазма, состоящая из $u, d, 4$ кварков и глюонов с температурой T , определяется как:

$$\epsilon = \epsilon_g + \epsilon_{u,d} + \epsilon_s$$

Масса фиброболла, соответственно будет определяться как:

$$M_{fb} = \epsilon V_{fb}$$

Более точно, рассчитанные распределения массы и барионной множественности показаны на рисунках ниже.

in progress...

5 Заключение

Список используемой литературы

- [1] A.D. Panagiotou et al., Z. Phys. A333 (1989), 355.
- [2] A.D. Panagiotou et al., Phys. Rev. D45 (1992) 3134.
- [3] M.N. Asprouli, A.D. Panagiotou and E. Gladysz-Dziadu´s, Astropart. Phys. 2 (1994) 167.
- [4] C.M.G. Lattes, Y. Fujimoto and S. Hasegawa, Phys. Rep. 65 (1980) 151
- [5] Chacaltaya and Pamir Collaboration, Contributions to 23rd ICRC (Calgary, 19–30 July, 1993), ICRR-Report-295-93-7 (1993)
- [6] ALICE Technical Proposal, CERN/LHCC/95-71
- [7] Physical Review. D, Particles Fields; ISSN 0556-2821; Worldcat; v. 23(3); p. 771-776
- [8] O.P. Theodoratou and A.D. Panagiotou, Astropart. Phys. 13 (2000) 173
- [9] M. Martinis, Phys.Rev.D51:2482-2485,1995
- [10] Kopenkin, V.; Fujimoto, Y. (2006). "Exotic models are no longer required to explain the Centauro events". Phys. Rev. D. 73 (8): 082001.
- [11] Janusz Kempa(Warsaw U. of Tech.), Bryan Pattison(CERN), Ewa Gladysz-Dziadus(Cracow, INP), Lawrence W. Jones(Michigan U.), Rauf Mukhamedshin(Moscow, INR). "Emulsion chamber observations of Centauros, aligned events and the long-flying component". Published in: Central Eur.J.Phys. 10 (2012) 723-741
- [12] Aurélie Guilbert-Lepoutre, Anastasios Gkotsinas, Sean N. Raymond, David Nesvorny. "The gateway from Centaurs to Jupiter-family Comets: thermal and dynamical evolution". arXiv:2212.06637 [astro-ph.EP]