

- О возможности интерпретации данных с ускорителей AGS, SPS, RHIC, LHC, как адронизации не кварк-глюонной, а валонной плазмы

О.Д.Чернавская
ФИАН

Что ожидается от ЛНС?

- Бозон Хиггса:

Поле X . – идея нетривиального физического вакуума

$$L_{\text{Higgs}} = \dots + m\phi^2 - \lambda\phi^4 \rightarrow E_{\text{vac}} = -m^2/4\lambda$$

Бозон Хиггса – более высокий порядок взаимодейд.

- «новые данные» о кварк-глюонной плазме (QGP) - ?
- а что есть «старые данные» ?

История вопроса

- Кварки, как они появились: **феноменология**
конституентные или валентные кварки (=валоны) Q:
 $m(Q) = 1/3M_N \cong 330 \text{ MeV}$, $r(Q) \cong 1/3r(N)$
- Цель: наведение порядка в «зоопарке» элементарных частиц = Аддитивная Кварковая Модель (АКМ)

НО:

- Температура Хагедорна:
статсумма $Z(T, V) \sim \int \exp(m/T_H - m/T) dm \leftrightarrow$
 $T_{\text{Hag}} = \text{предельная } T \text{ существования адронов}$
- Конфайнмент: невылетание кварков за пределы адрона
(единственный **абсолютный эффект**)

остается загадкой

Квантовая ХромоДинамика (КХД)

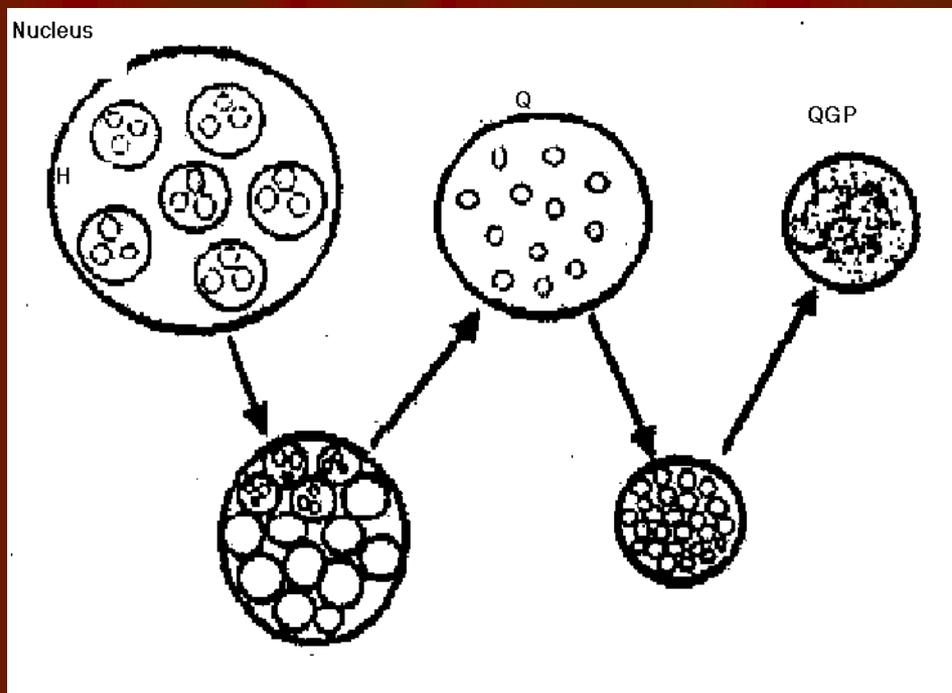
- «точная» теория: количественное описание
- «токовые кварки» и глюоны: $q, g: m=0$
- «бегущая константа связи» $\alpha_s \sim \ln^{-1}(q^2/\Lambda^2)$, $\Lambda \cong 200 \text{ МэВ}$
 - Асимптотическая свобода
 - Инфракрасная расходимость
- Понятия «физический вакуум»: $\epsilon_v < 0$
«пертурбативный вакуум»: пустой, $\epsilon_v = 0$
- Конфанмент — остается загадкой

Кварк-глюонная плазма (QGP)

- В пределе бесконечных T / плотностей:
квасисвободный газ безмассовых кварков и глюонов в пертурбативном вакууме
- В «обычных условиях» : (квази) идеальный адронный газ
- ЧТО В ПРОМЕЖУТКЕ?

Что в промежутке?

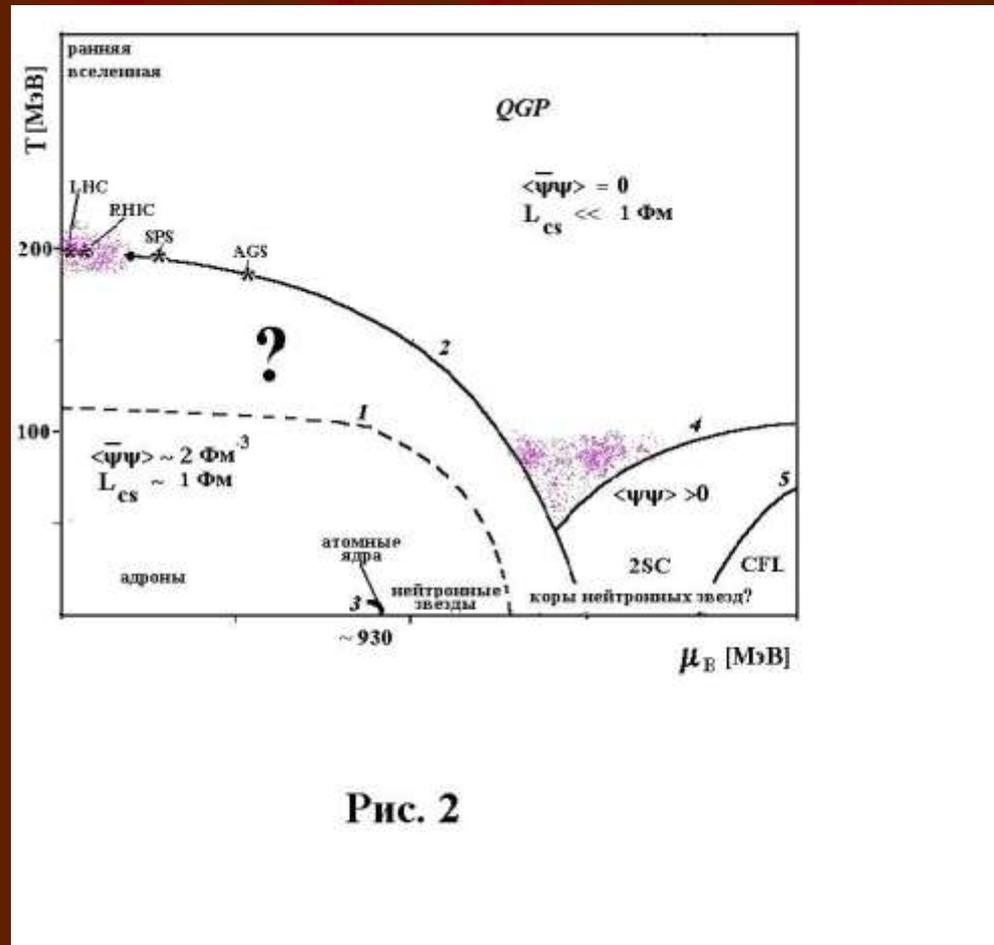
- Е.Л.Фейнберг, 1989 :



На языке КХД:

- Физический вакуум КХД:
 - Глюонный конденсат
$$\varepsilon \sim \langle 0 | F^2(G) | 0 \rangle \cong -500 \div 600 \text{ МэВ} / \Phi_{\text{М}}^3$$
обеспечивает **конфайнмент**
 - Кварковый конденсат: $\langle 0 | \psi\psi | 0 \rangle \sim 1.7 \Phi_{\text{М}}^3$
нарушение киральной симметрии \leftrightarrow **масса** частиц
- Пертурбативный вакуум КХД — пустой, т.е.
в пределе $T, \mu \rightarrow \infty$ *конденсаты разрушаются*
одновременно или нет ?

Сводная диаграмма (из всех теорий)



Модель мешков (MIT bag)

- Придумана для описания спектров адронов $\{m_H\}$:
..... $V_{MIT} \cong 50 \div 100 \text{ МэВ} \cdot \text{Фм}^3$
- Идеология: вытеснение вакуумных полей из адрона создает избыточное внешнее давление
- «модернизированная» модель остается практически единственной, предлагающей хоть какое-то уравнение состояния вещества.

Статсумма $Z_i(T, V, \mu)$ для идеального газа в j -ой фазе

$$\ln Z_j = -\ln Z_{\text{vac}} + \frac{V}{T} \sum_i \frac{G_i^B}{6 \cdot \pi^2} \int \frac{dk k^4}{\sqrt{k^2 + m_i^2}} \frac{1}{\exp\left(\frac{\sqrt{k^2 + m_i^2}}{T}\right) - 1} +$$

$$\frac{V}{T} \sum_i \frac{G_i^F}{6 \cdot \pi^2} \int \frac{dk k^4}{\sqrt{k^2 + m_i^2}} \left[\frac{1}{\exp\left(\frac{\sqrt{k^2 + m_i^2} - \mu_i}{T}\right) + 1} + \frac{1}{\exp\left(\frac{\sqrt{k^2 + m_i^2} + \mu_i}{T}\right) + 1} \right]$$

G_i^F , G_i^B , m_i , μ_i — коэффициенты вырождения, массы и химпотенциал для бозе- и ферми-частиц i -го типа;

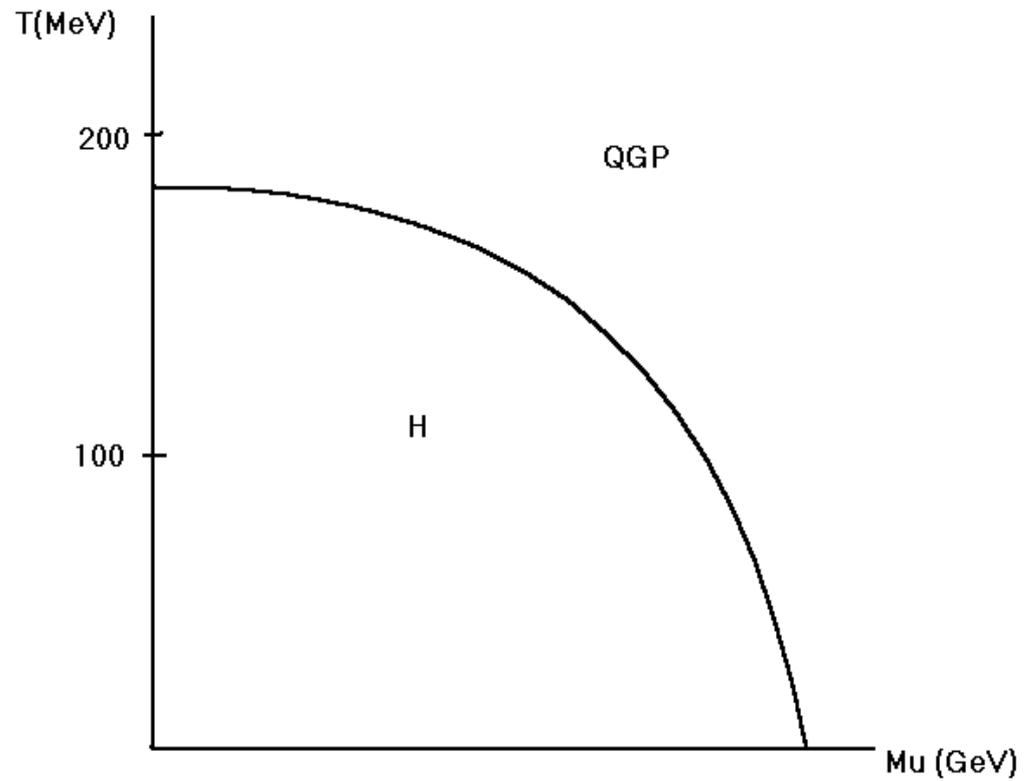
$\ln Z_{\text{vac}}$ - отражает эффективное взаимодействие с вакуумом

p , n , ε - давление, плотность частиц и плотность энергии – соответствующие производные Z

Уравнения состояния для 2-хфазной материи

- QGP: $p_{\text{QGP}} = \{q, g\} - V_{\text{QGP}}, V_{\text{QGP}} = 0.5 \text{ ГэВ} \cdot \Phi_{\text{M}}^3$
- Н: $p_{\text{H}} = \{\pi, K, p, p^-, \Lambda, \dots\}$
- Равновесие фаз:
$$p_{\text{QGP}}(T, V, \mu_{\text{B}}/3) = p_{\text{H}}(T, V, \mu_{\text{B}}) \leftrightarrow T_{\text{c}}(\mu_{\text{B}})$$
- Важно: $T_{\text{c}} \equiv T_{\text{d}} \equiv T_{\text{chir}} \cong 180 \text{ МэВ}$ — де\к\онфайнмент
и восстановление киральной симметрии
совпадают

Диаграмма состояний

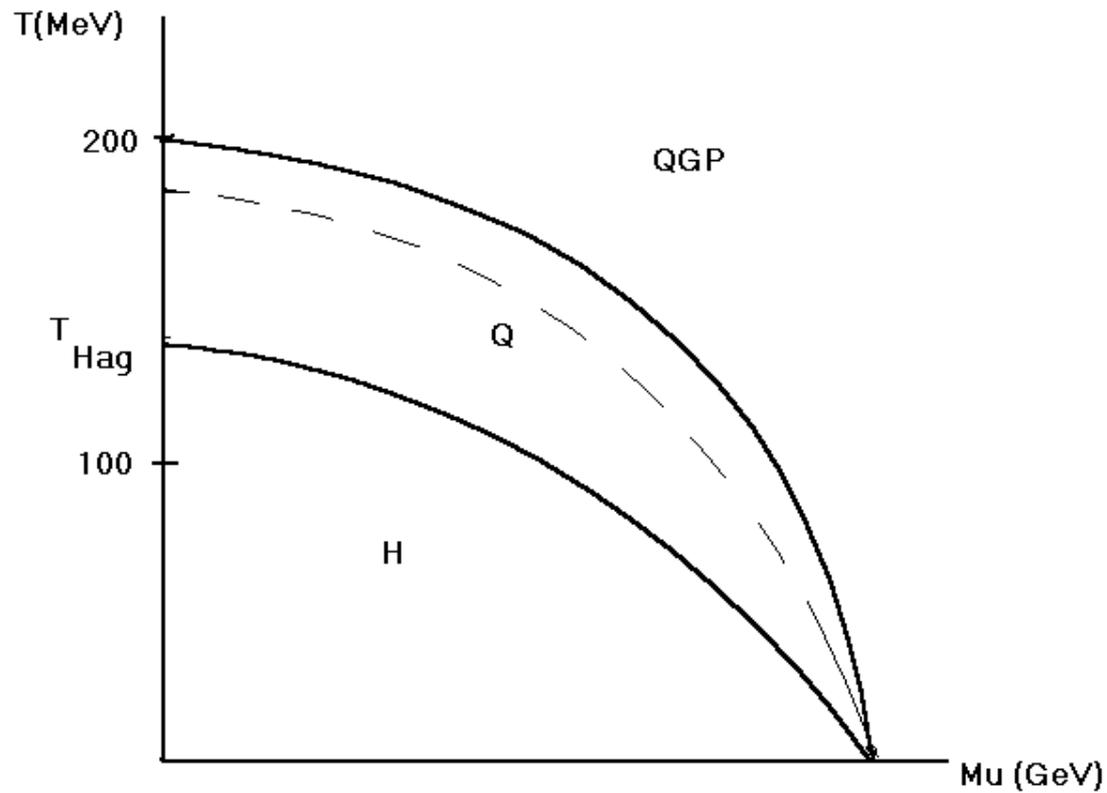


Уравнения состояния 3-х фазной материи

- QGP: $p_{\text{QGP}} = \{q, g\} - B_{\text{QGP}}, B_{\text{QGP}} = 0.5 \text{ ГэВ} \setminus \Phi_{\text{M}}^3$
- Q π : $p_{\text{Q}} = \{Q, \pi, (K)\} - B_{\text{Q}}, B_{\text{Q}} = 50 \text{ МэВ} \setminus \Phi_{\text{M}}^3$
- Н: $p_{\text{H}} = \{\pi, K, p, p^-, \Lambda \dots\}$

- $p_{\text{QGP}}(T, V, \mu_{\text{B}}/3) = p_{\text{Q}}(T, V, \mu_{\text{B}}/3) \leftrightarrow T_{\text{chir}}(\mu_{\text{B}}) \cong 200 \text{ МэВ}$
— восст. \setminus наруш. киральной симметрии
- $p_{\text{Q}}(T, V, \mu_{\text{B}}/3) = p_{\text{H}}(T, V, \mu_{\text{B}}) \leftrightarrow T_{\text{d}}(\mu_{\text{B}}) \cong 140 \text{ МэВ}$
— де \setminus конфайнмент ($\equiv T_{\text{Хагедорна!}}$)

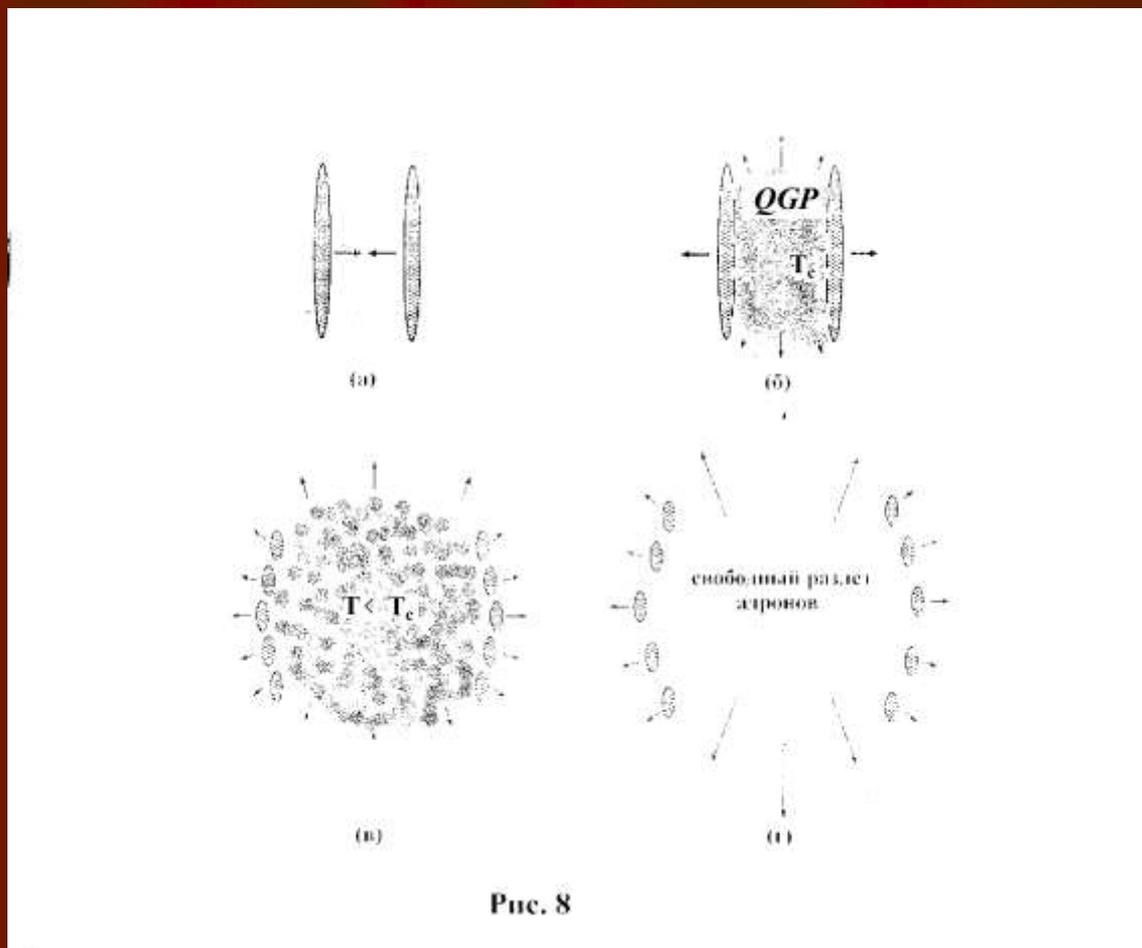
Диаграмма состояний 3-х фазной материи



Как это может проявляться в реальности?

- Ранняя вселенная ?
- Соударения тяжелых ядер на ускорителях

Схематическая картина соударения тяжелых ядер в современных ускорителях



Современные ускорители

ускоритель	Год зап	тип	пучок	\sqrt{s}_{NN} ГэВ	ε_0 расч ГэВ/ФМ ³
AGS//BNL	1992	tar	¹⁹⁷ Au	5	1.5
SPS\\CERN	1994	tar	²⁰⁸ Pb	17.5	3.7
RHIC//BNL	2000	col	¹⁹⁷ Au	160	7.6
LHC\\CERN	2010 ?	col	²⁰⁸ Pb	5000 ?	13?

Экспериментальные наблюдаемые

- Относительный выход вторичных адронов n_i/n_k

- Выход странных частиц

$$\text{--- } T_{ch}$$

- Выход дилептонов

— уравнение сост., длительность τ

- Распределение вторичных адронов по

поперечному импульсу, $\langle p_t \rangle$ — T_f

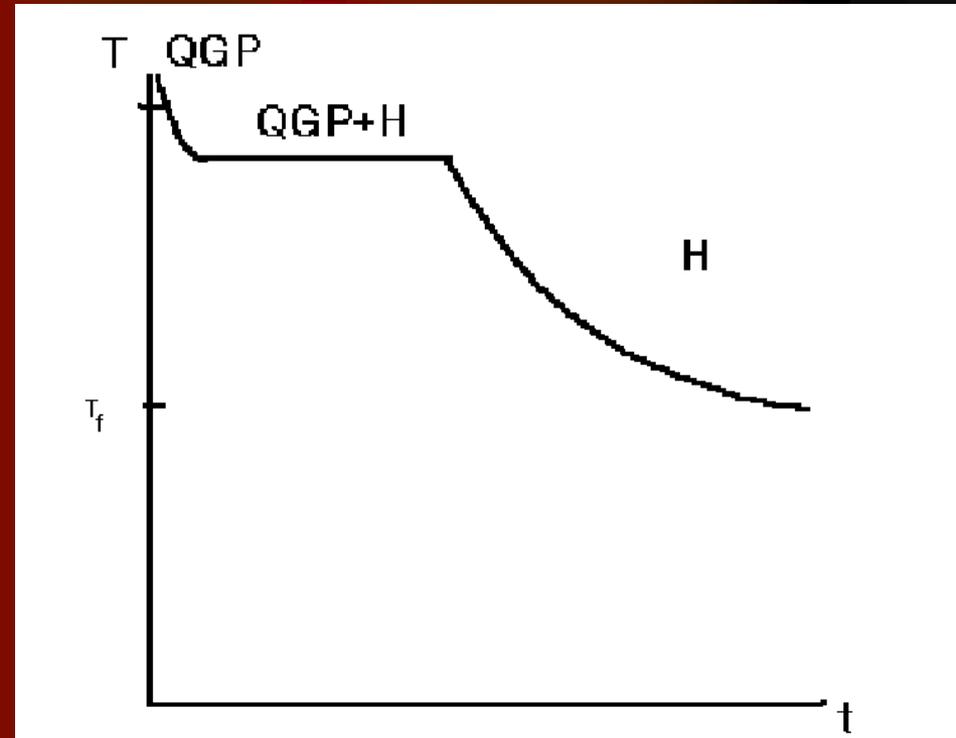
интерпретация зависит от принятой модели, т.е. сценария адронизации

Возможные сценарии охлаждения QGP

- 1: «Прямой ФП» I –го рода
 $QGP \rightarrow H \rightarrow \text{freez-out}$
- 2: ФП I-го рода в 3-х фазной материи
 $QGP \rightarrow Q\pi K \rightarrow H \rightarrow \text{freez-out}$
- 3:!
«Ранний химический Freez-out»: $T = T_{ch}$
- 4: «мягкий» ФП: $QGP \rightarrow Q\pi K \rightarrow \text{freez}$

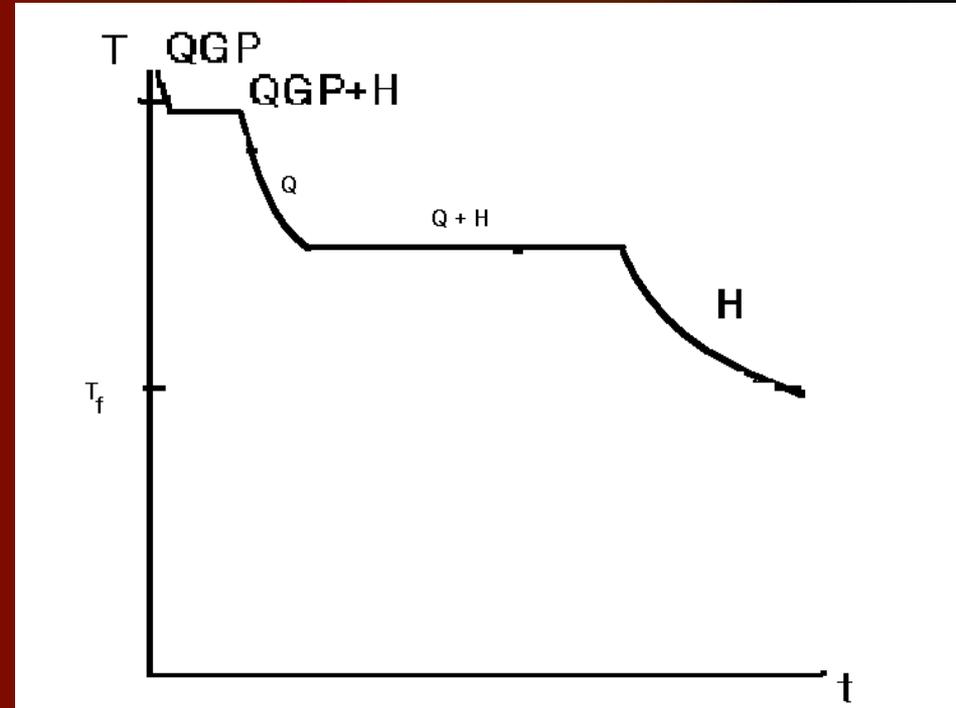
Сценарий 1: «прямой фазовый переход» I-го рода

- QGP \rightarrow H \rightarrow разлет
- $T = T_c \cong 180$ МэВ
mixed phase
- $T_f \cong 100$ МэВ –
свободный разлет
- Адронная фаза H –
длительное время



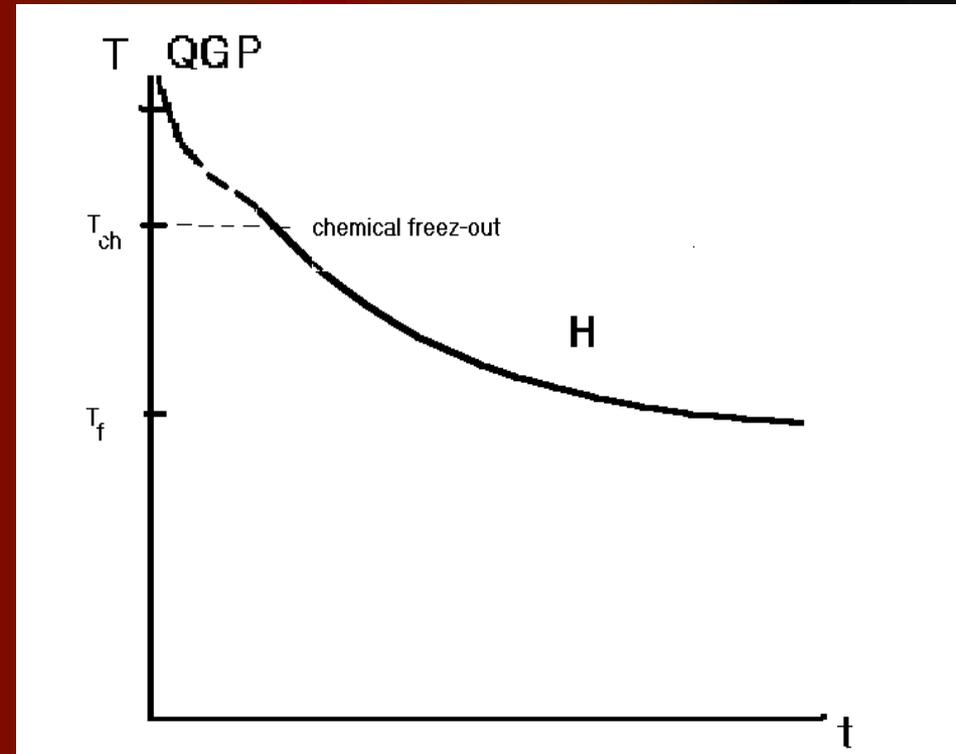
Сценарий 2: два последовательных фазовых перехода I-го рода в 3-х фазной материи

- $QGP \rightarrow Q\pi \rightarrow H \rightarrow$
разлет
- $T = T_{chir} \cong 200 \text{ MeV}$
 $T = T_d \cong 140 \text{ MeV}$ -
смешанные фазы
- $T = T_f \cong 100 \text{ MeV}$ –
свободный разлет
- Длительность H фазы
гораздо меньше



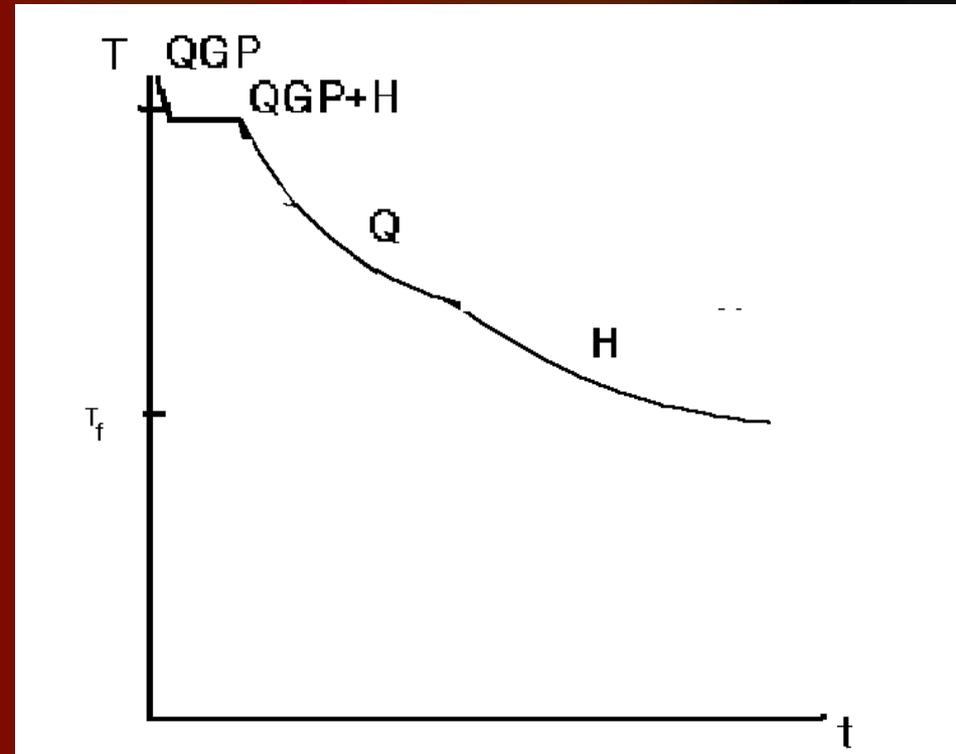
Сценарий 3: ранний химический фриз-аут

- Артефакт
- QGP короткое время, затем (как-то?) квази-идеальный адронный газ Н
- $T=T_{ch}$ – температура «замораживания» состава адронов
- $T=T_f \cong 100$ МэВ – свободный разлет



«Мягкая» адронизация валонной фазы

- QGP \rightarrow Q π 1-го рода
- Q π \rightarrow H – плавный переход
- Адронизация = аннигиляция валонов типа
 $Q + Q^{\bar{}} \rightarrow \pi\pi, pn, KK, \dots$
- $T = T_f \cong T_d \cong 100$ МэВ – свободный разлет практически совпадает с полным деконфайнментом



«за» и «против» раннего химического фризаута

- Единый способ описания данных AGS, SPS, RHIC, LHC
- Единая температура вымораживания для всех типов адронов (! +\− !)
- Простота описания: идеальный адронный газ
- Единый способ описания данных **AGS**, SPS, RHIC, LHC
- уравнения состояния ИГ: при данных T неприменим (искл. объем) – но: другого нет
- «замораживание» хим. состава – немотивировано (особо: pp аннигиляция)

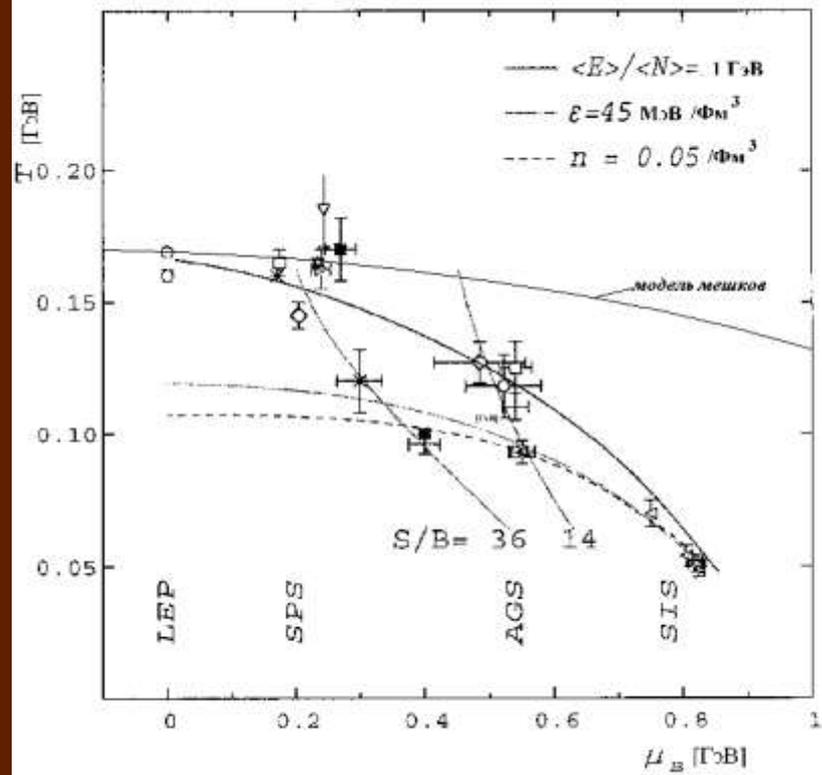


Рис. 10

Относительный выход различных адронов

- «ранний фризаут»

$$N_i \sim (m_i/T) \exp\{(\mu_{B_i} - m_i)/T\} \rightarrow \Phi_{ik} = N_i/N_k$$

минимизация «ошибки» $\chi^2 = \sum (1 - \Phi_{th}/\Phi_{exp})^2 \rightarrow$

$T = T_{ch}$ - единая для всех типов адронов (!)

- Аннигиляция валонов

$$QQ \rightarrow \pi\pi, KK\pi; \quad QQQ \rightarrow p\pi, \Xi\pi, \Lambda\Sigma\pi; \quad \dots$$

→ минимизация ошибки - аналогично →

единая $T_d \cong T_f \cong 110 \text{ MeV}$ для всех ϵ_{in} (!)

Относительный выход различных адронов: сравнение теорий с экспериментом

N/N	Exp	MS	Q	Exp	MS	Q	Exp	MS	Q
/dat	A	G	S	S	P	S	RH	I	C
p/π	1	0.78	0.86	0.228	0.238	0.209	0.126	0.124	0.110
p^-/p *10 ⁻⁴	5	4.7	4.7	0.067	0.055	0.08	0.632	0.629	0.628
K^+/K^-	5.14	4.45	4.49	1.85	1.90	1.89	1.156	1.118	1.125
χ^2		0.17	0.07		0.36	0.4		0.047	0.041
T_{ch}	125	+/-6	MeV	168	+/-2	MeV	174	+/-7	MeV
μ_{ch}		540	MeV		270	MeV		46	MeV
T_f	120	Me	V	115	Me	V	110	Me	V

Выход дилептонов ($e^+ e^-$) - теория

- Е.Л.Фейнберг, 1960 : «прямые фотоны и дилептоны – возможная «проба» субадронных состояний материи»
- QGP: $qq^- \rightarrow g\gamma^* \dots \rightarrow e^+ e^-$
Н: распад резонансов $\rho \rightarrow e^+ e^-$
- Валонная фаза: $QQ^- \rightarrow e^+ e^-$, $\pi^+ \pi^- \rightarrow e^+ e^-$

Выход дилептонов (e^+e^-) - эксперимент

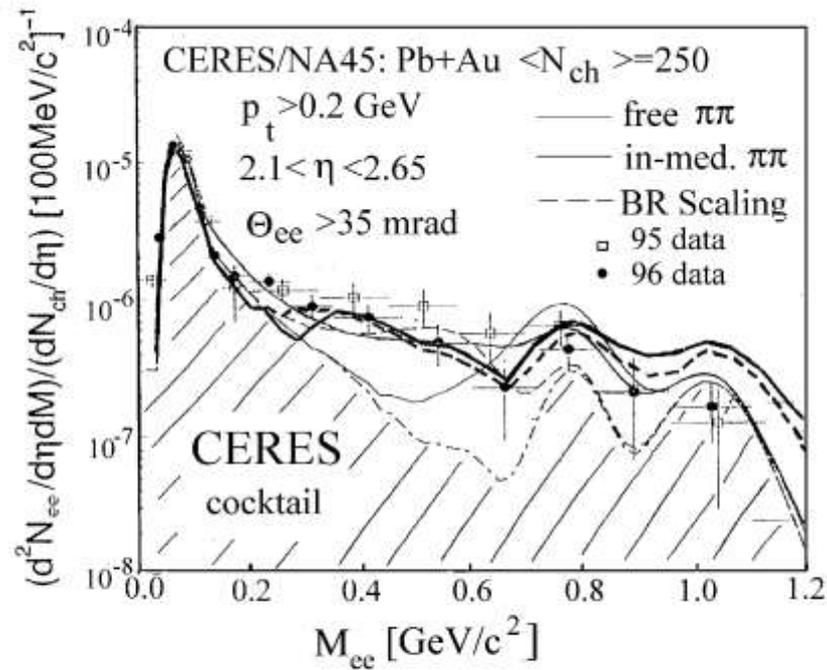


Рис. 13

Дилептоны в стандартной картине и в «валонной» картине

- Без дополнительных предположений – недооценка на порядок в области $M_{ee} \cong 0.5$ ГэВ
- Эффект «плавления резонансов»: неидеальные мезоны (в частн., ρ -мезон) в *плотной* среде

- Удовлетворительное описание мягкого спектра за счет 2-х процессов:

$$\pi\pi \rightarrow e^+ e^-$$

$$QQ^- \rightarrow e^+ e^-$$

- Но: длительность процесса – важный параметр, оценка Сечение взаимодействия QQ^- – ?

Выводы

- Экспериментальные измерения – **объективны**, интерпретация – **модельно зависима**
- Гипотеза «раннего химического фризаута»
= **main stream**
- Гипотеза 3-х фазной материи описывает экс. данные по крайней мере **не хуже**
- Критический эксперимент – в области пл. энергий где QGP не возможна, а Q=валонная фаза уже
- Но: точка зрения не модная = не main stream

Заключение

- «Загадка» температуры Хагедорна – решена
- «Загадка» конфайнмента – нет
 - Бозон Хиггса – имеет отношение
 - Единая T адронизации ?
- ...думать дальше, имея в виду модельную зависимость

Спасибо за внимание

Литература

- 1. Фейнберг Е.Л. «On deconfinement of constituent and current quarks» преп. FIAN №197 (1989)
- Ройзен И.И., Чернавская О.Д. *ЯФ* **66** стр. 185 (2003)
- Feinberg E.L. *Nuovo Cimento* **34** p. 391 (1976)
- Chernavskaya O.D., Feinberg E.L., Royzen I.I. *ЯФ* **65** стр. 167 (2002)
- Ройзен И.И., Фейнберг Е.Л., Чернавская О.Д. *УФН*, **174** № 5 стр. 473 (*and refs. therein*)