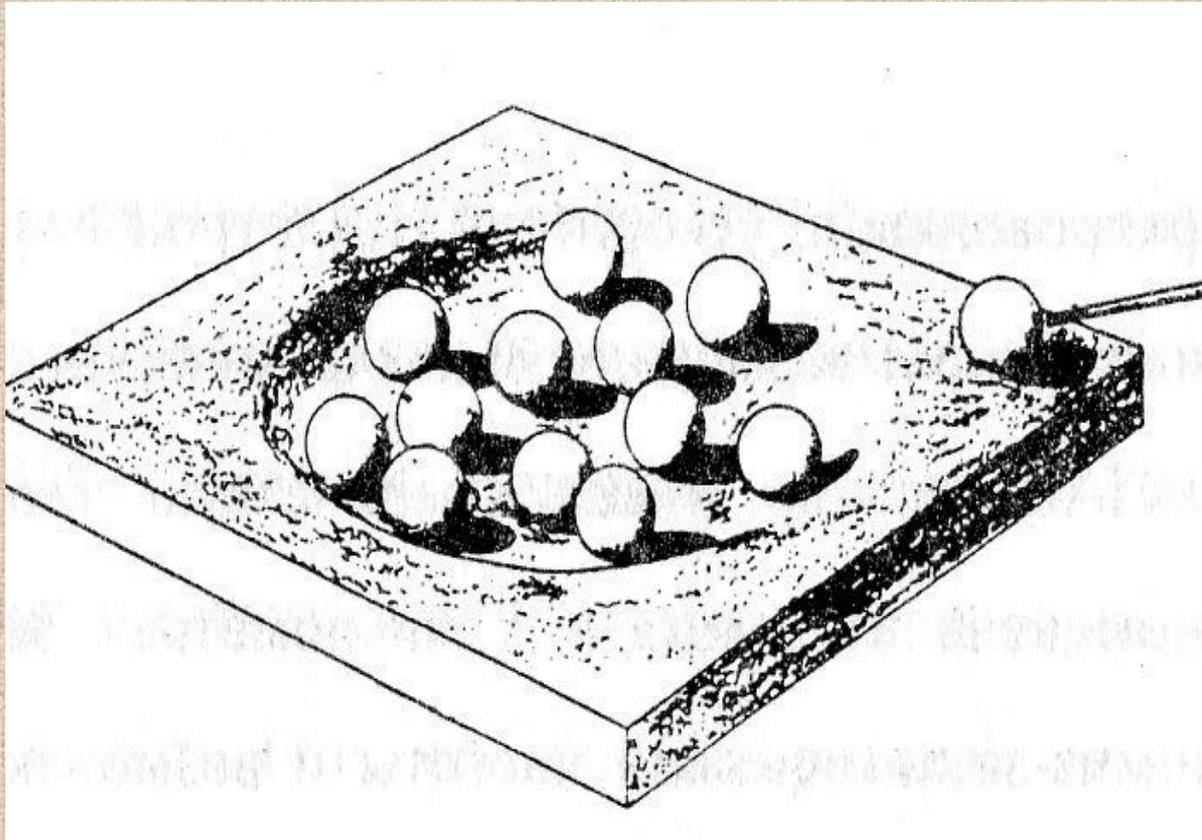


# Горячие и Кипящие Ядра

*к 100-летию открытия ядра  
Э. Резерфордом*

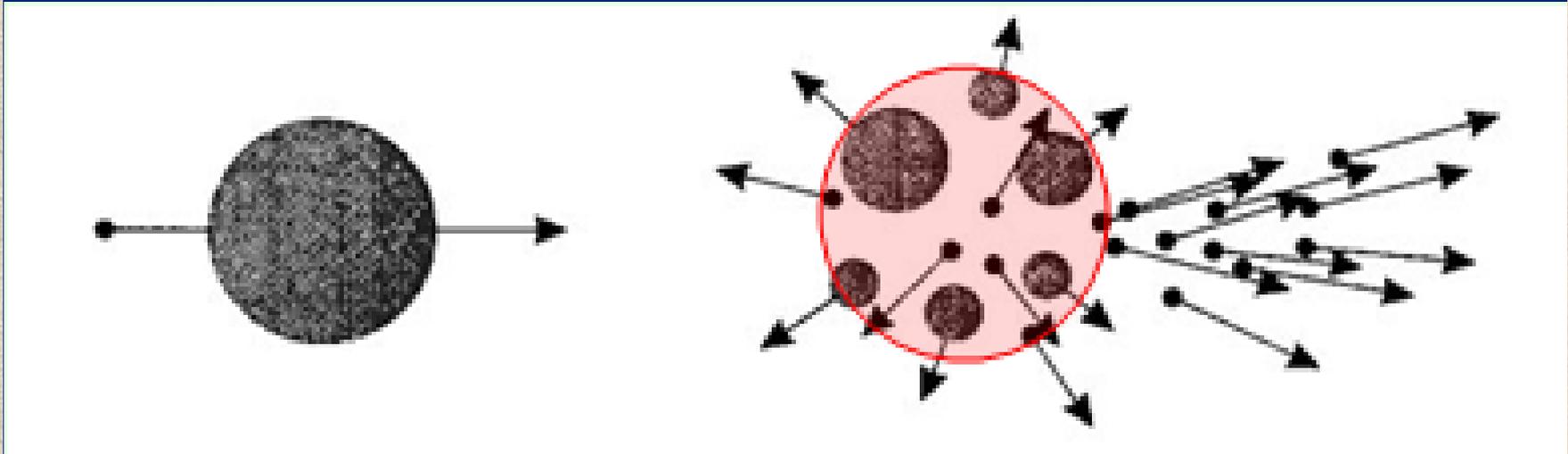
*Карнаухов В.А.*

Лаборатория ядерных проблем им. В.П. Джелепова  
ОИЯИ, Дубна



N. Bohr, Science, 1937

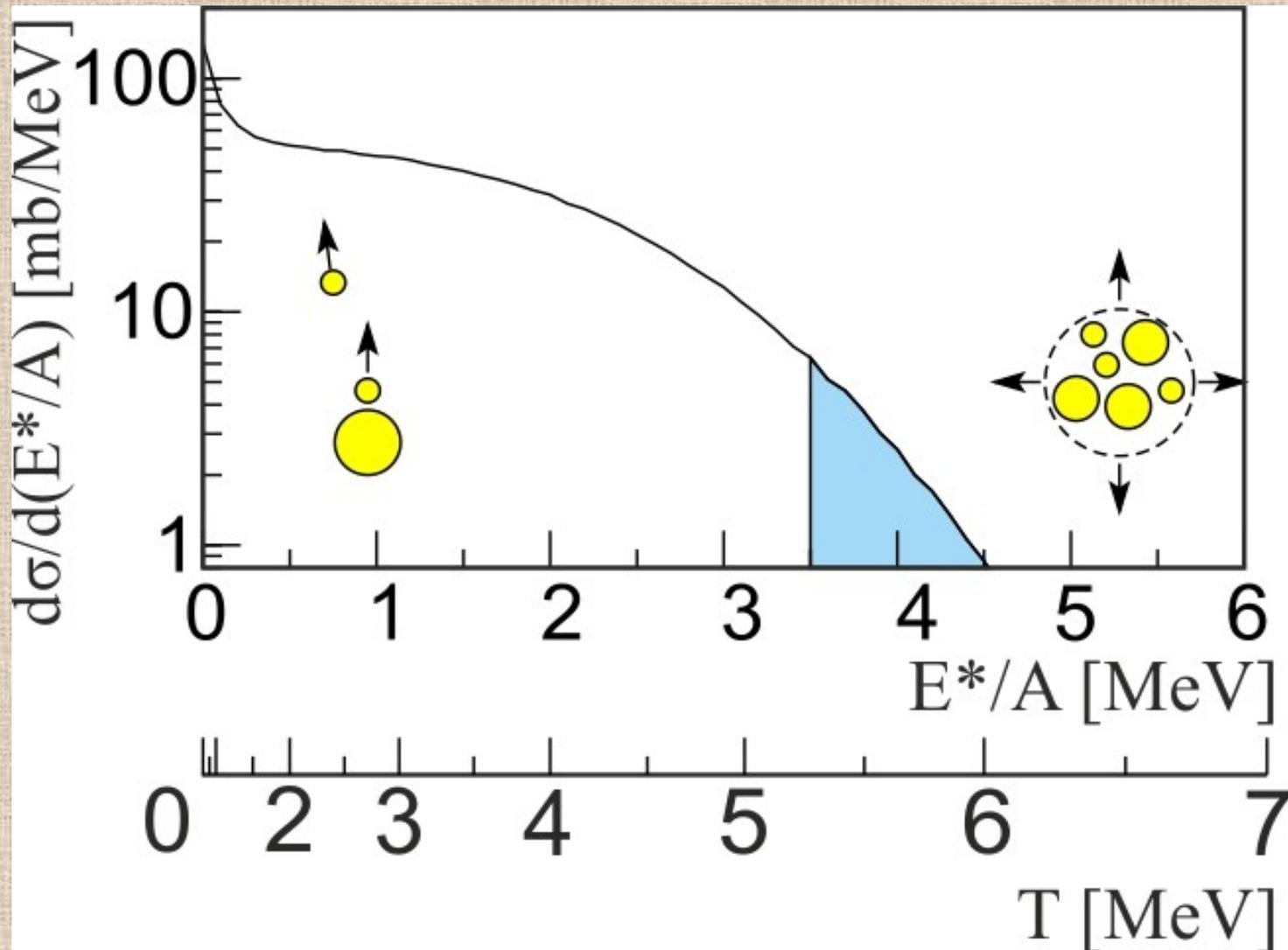
# Образование горячего ядра в соударении легкого релятивистского иона с тяжелой мишенью



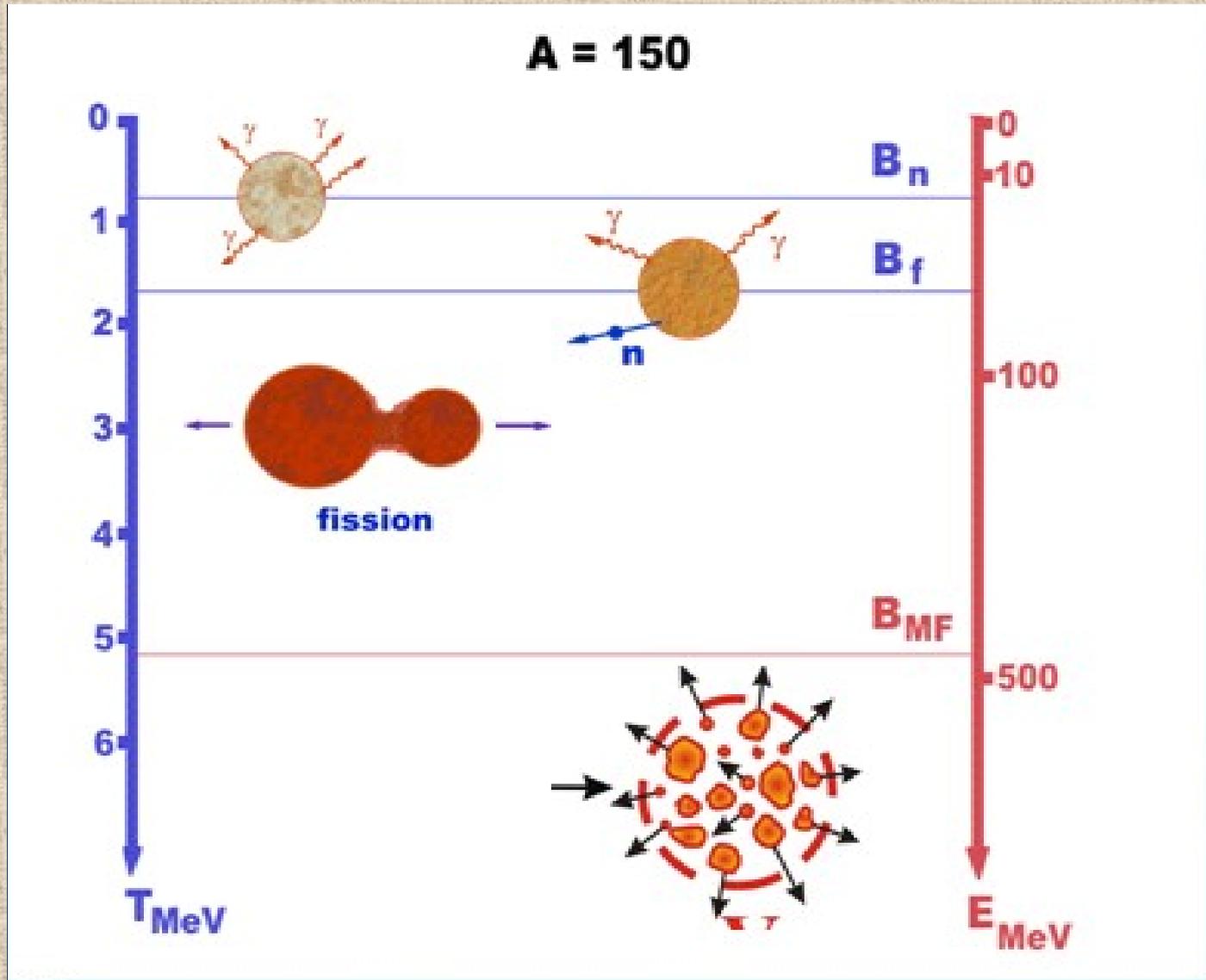
$A = 150-160, E^* > 400 \text{ MeV} (T = 5 - 7 \text{ MeV})$

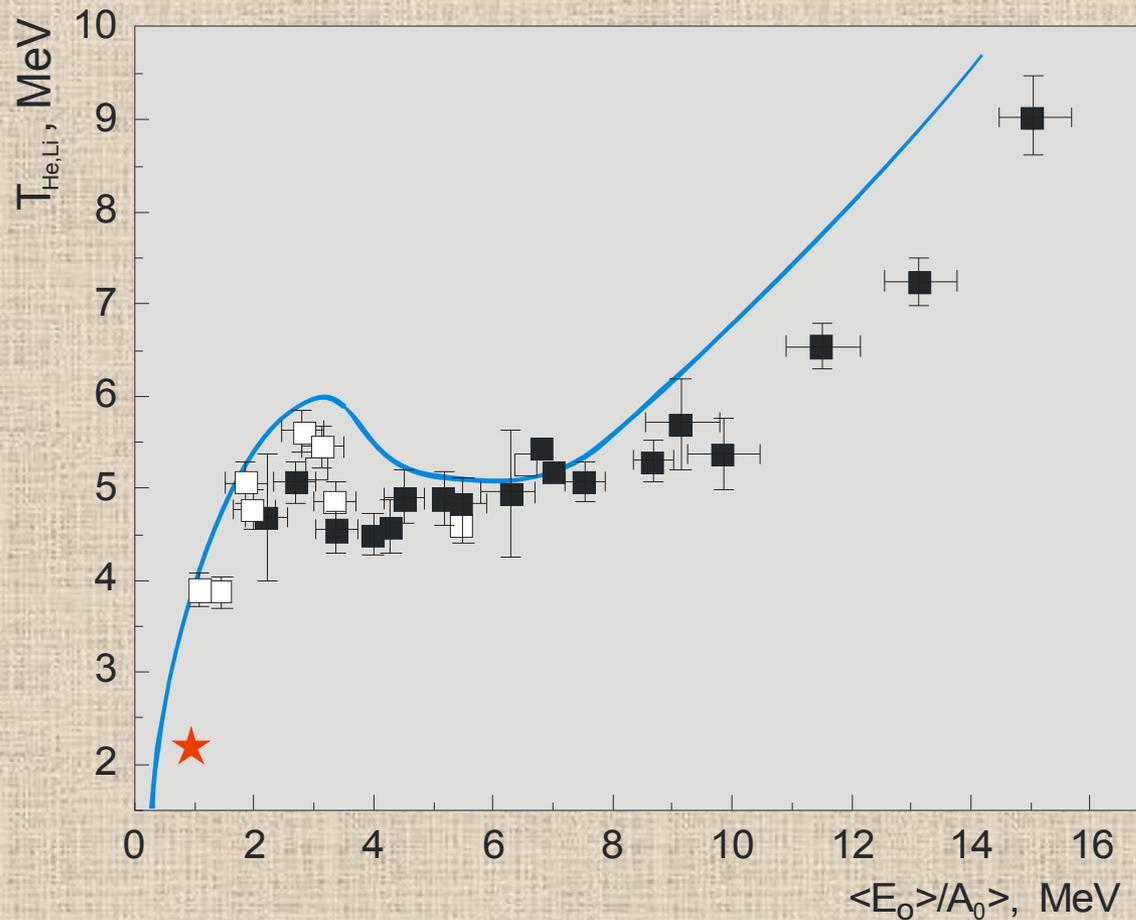
**Фрагменты промежуточной массы :  $2 < Z < 20$**

Распределение энергии возбуждения ядер из реакции  $d(4.4 \text{ GeV}) + \text{Au}$  ( модельный расчет )



# Способы распада возбужденных ядер (от теплых до горячих)



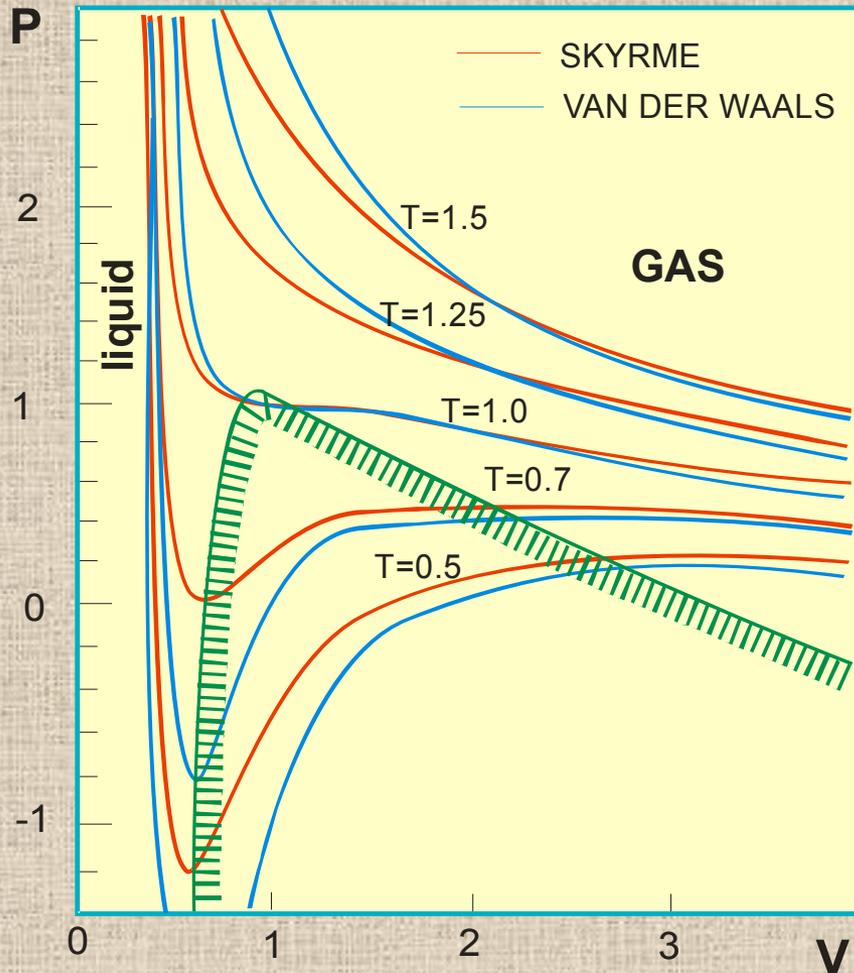


**Температура ядра в зависимости от энергии возбуждения (плато при  $T \approx 5$  МэВ – кипение)**

*J. Pochodzalla et al., Phys. Rev. Lett. 1995*

*I. Mishustin, A. Botvina et al. NPA 1985*

# Классическое и Ядерное Уравнения Состояния



Уравнение Ван дер Ваальса,  
1875 год & ядерное (1983)

(относительные единицы:

$$V/V_c; p/p_c; T/T_c)$$

$$\left. \frac{\partial p}{\partial V} \right|_T > 0$$

H. Jaqaman *et al.*, Phys. Rev. C 27 (1983)2782



Д.И. Менделеев: открыл  
критическую температуру  $T_c$   
для фазового перехода  
жидкость-газ (1860)

вода:  $T_c = 374^\circ \text{C}$

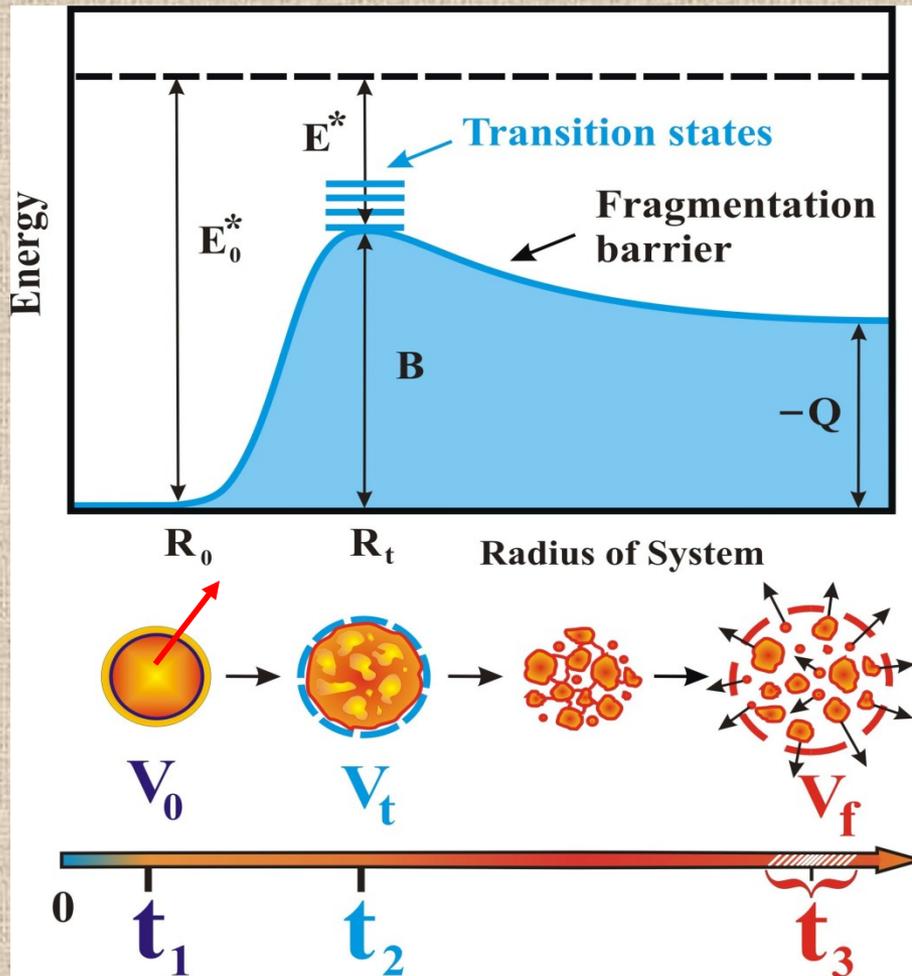
спирт:  $T_c = 243^\circ \text{C}$

# Ядерное Уравнение Состояния

$$\begin{cases} p = \rho \cdot k_B \cdot T - a_0 \cdot \rho^2 + 2a_3 \cdot \rho^3 \\ a_0 = \frac{k_B \cdot T_C}{\rho_C}, & a_3 = \frac{k_B \cdot T_C}{6\rho_C^2} \end{cases}$$

$$T_c = C_T (K / m^*)^{1/2} \rho^{-1/3}$$

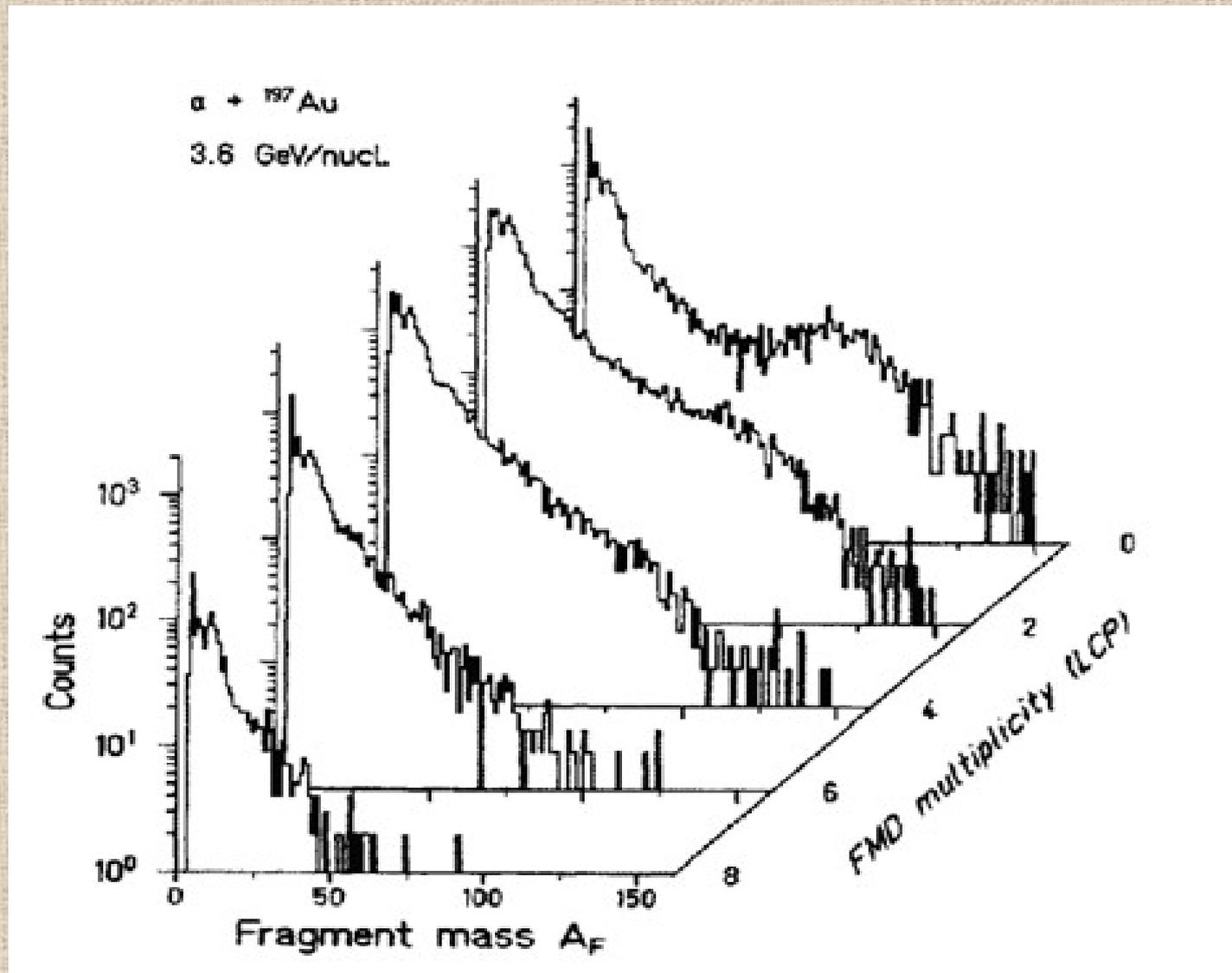
**Критическая температура для фазового  
перехода жидкость-газ и фрагментация**

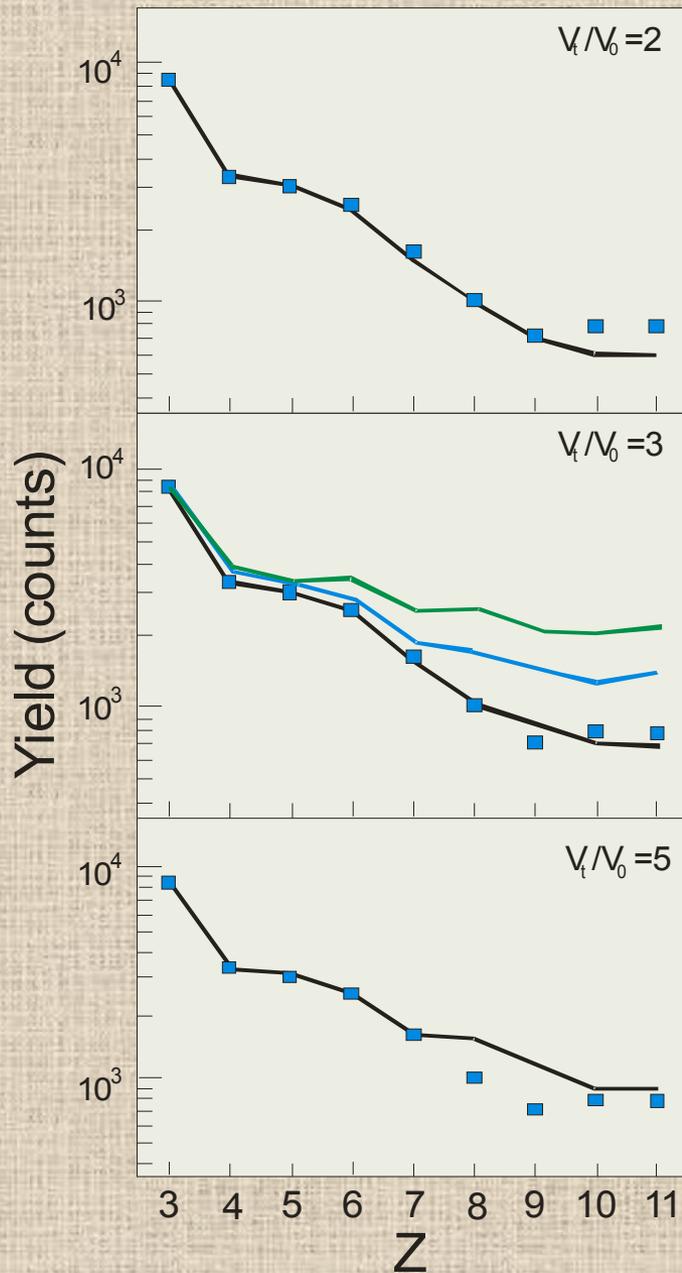


Потенциальная энергия горячего ядра в функции времени

Схема процесса фрагментации и его временная шкала

# Массовое распределение фрагментов из соударений $^4\text{He}$ (14.4 ГэВ) + Au (ФАЗА, ОИЯИ, 1994)



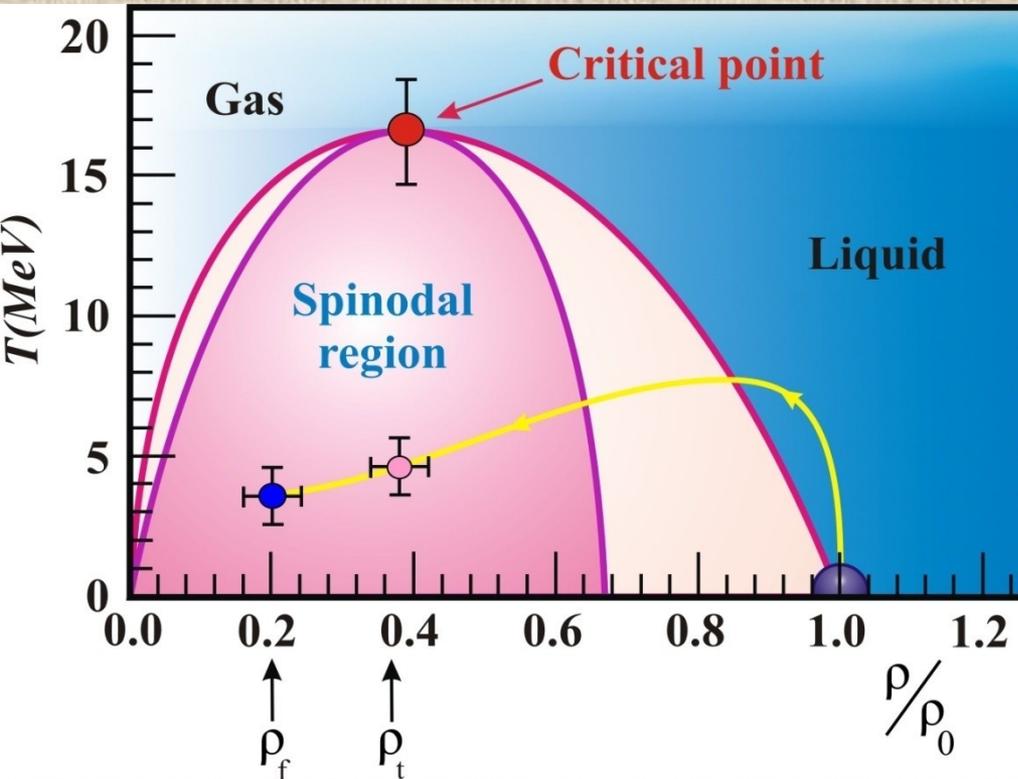


- Зарядовые распределения для ФП из соударений  $d(4.4\text{GeV})+\text{Au}$  .

- Линии- модельный расчет для трех значений критической температуры:  $T_c = 7, 11$  и  $18 \text{ MeV}$

# Экспериментальные результаты

$d(4.4 \text{ GeV}) + \text{Au}$ ,  $4\pi$ -установка ФАЗА, Нуклотрон ОИЯИ

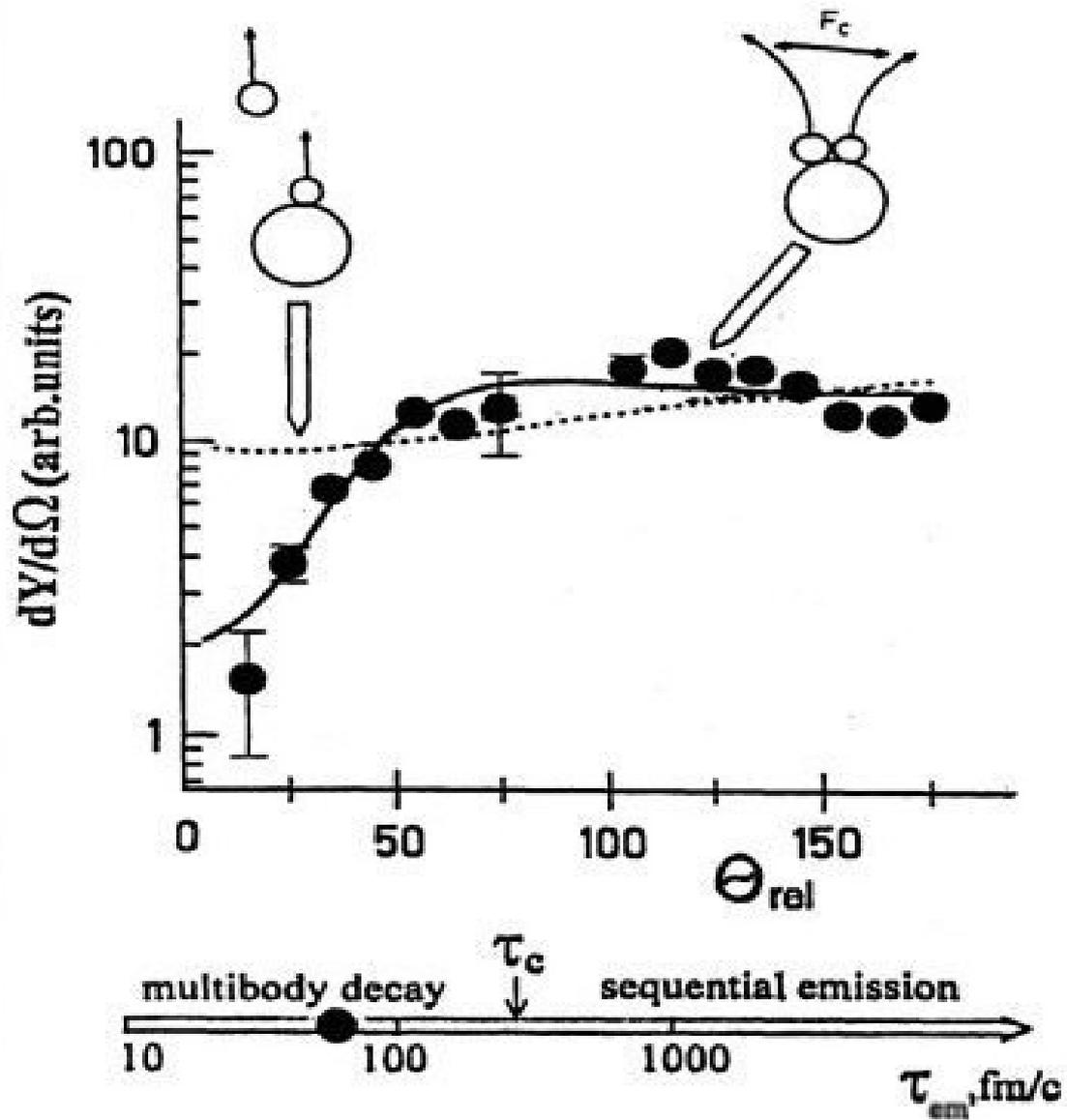


- $T_c = (17 \pm 2) \text{ МэВ}$
- Два характеристических объема системы
- Среднее время распада

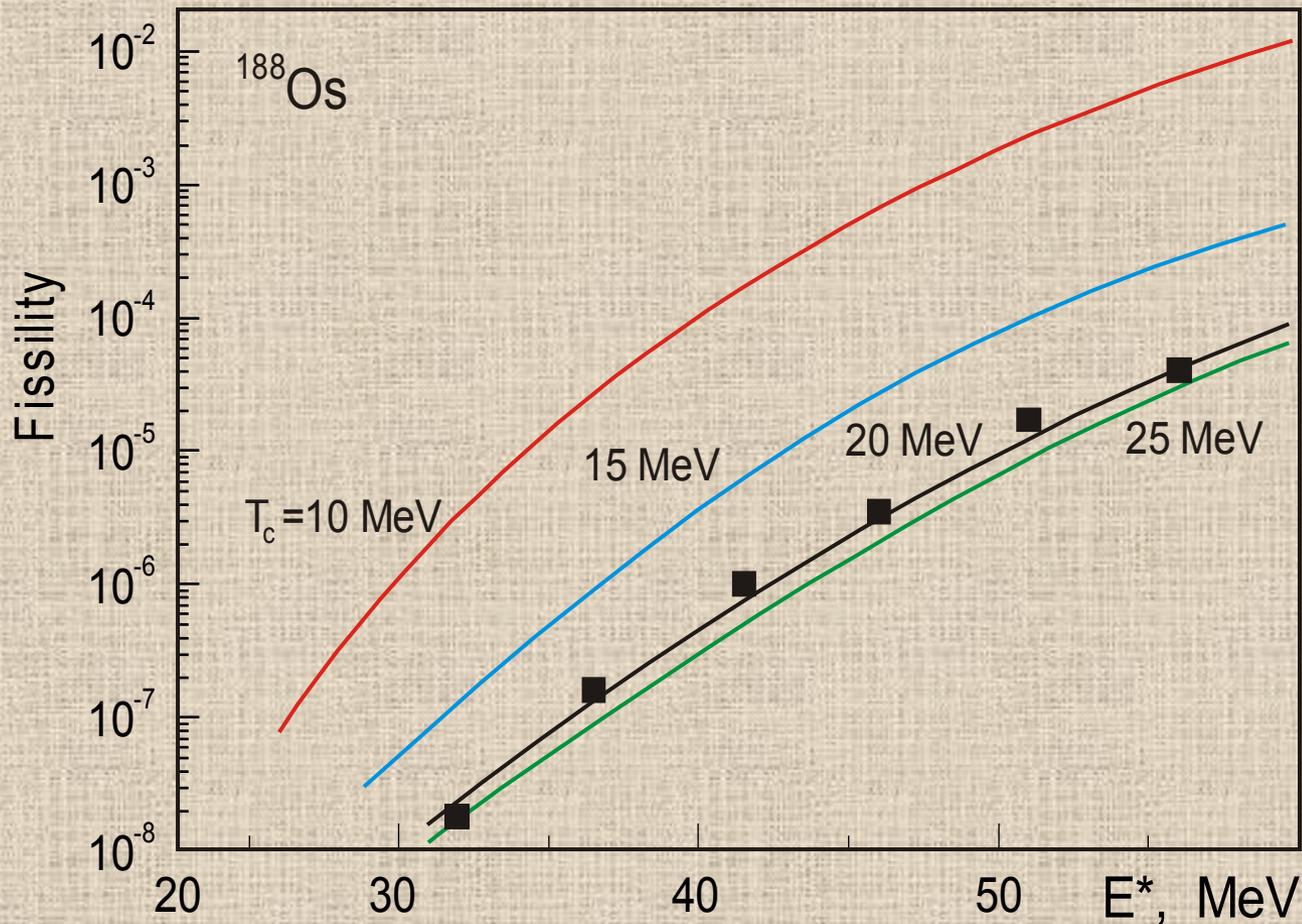
$$\tau_{\text{em}} \approx 1.5 \cdot 10^{-22} \text{ с,}$$

**ядерные фазовые  
переходы: жидкость-туман,  
жидкость-газ**

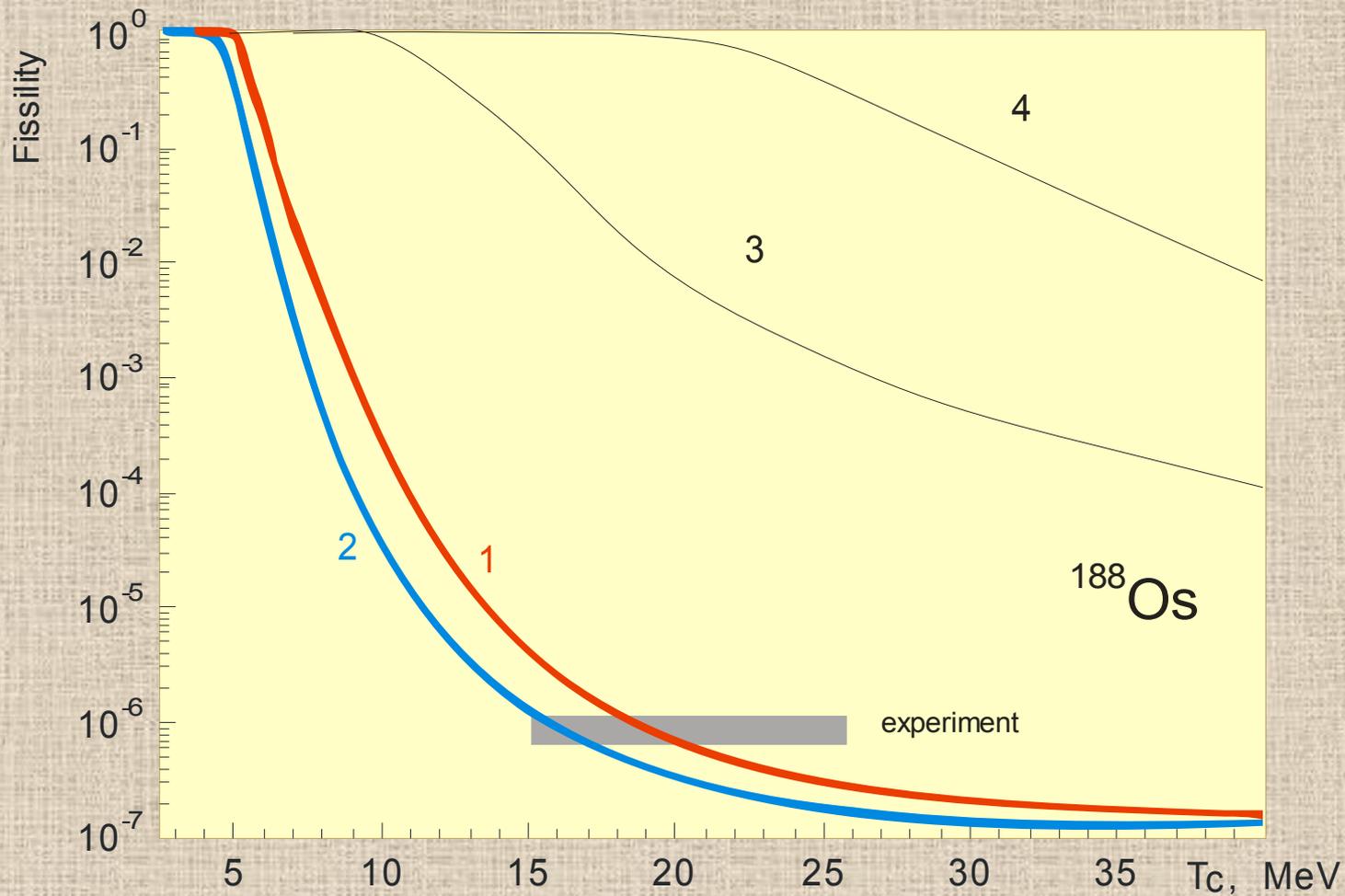




Критическая температура из данных  
по делению возбужденных ядер

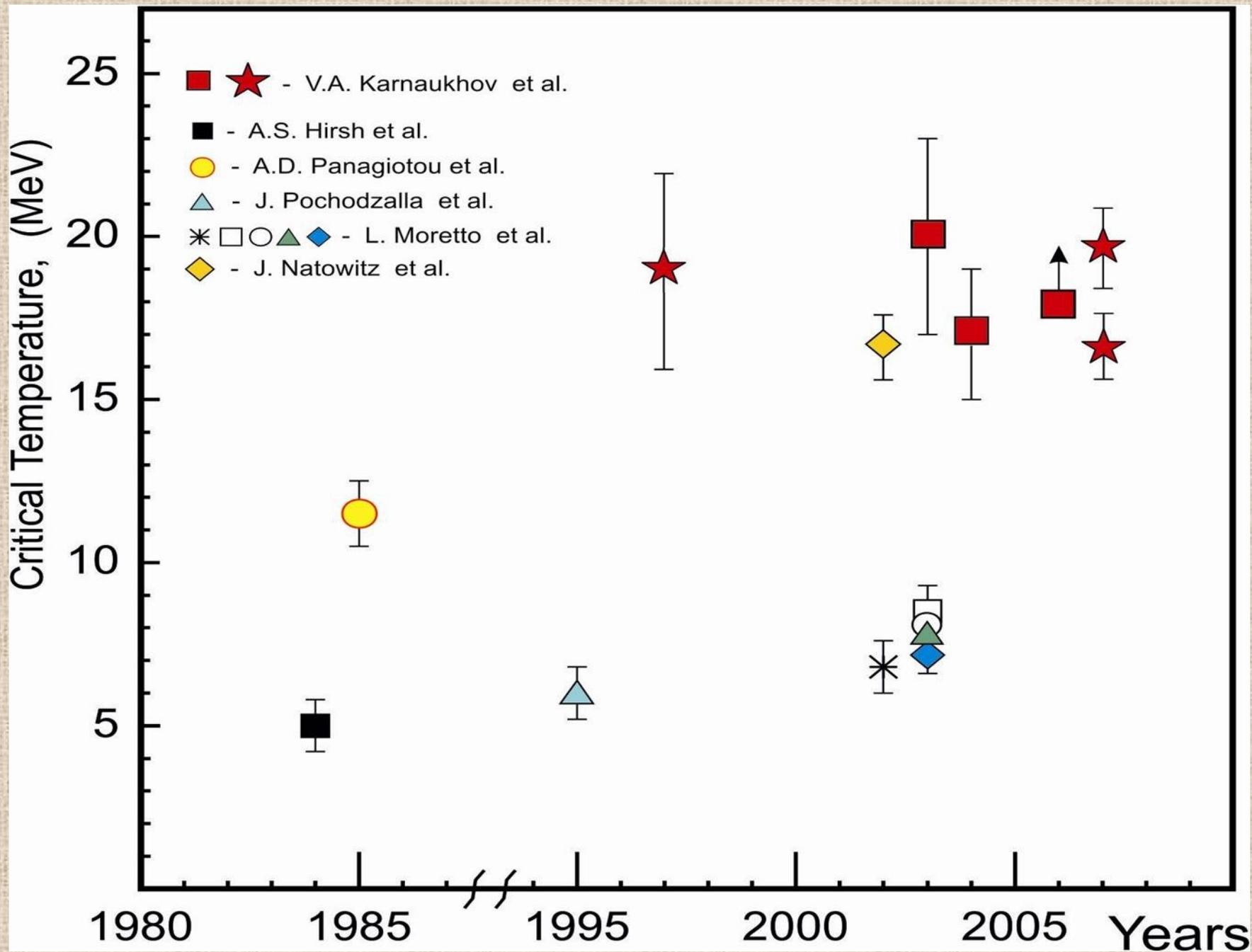


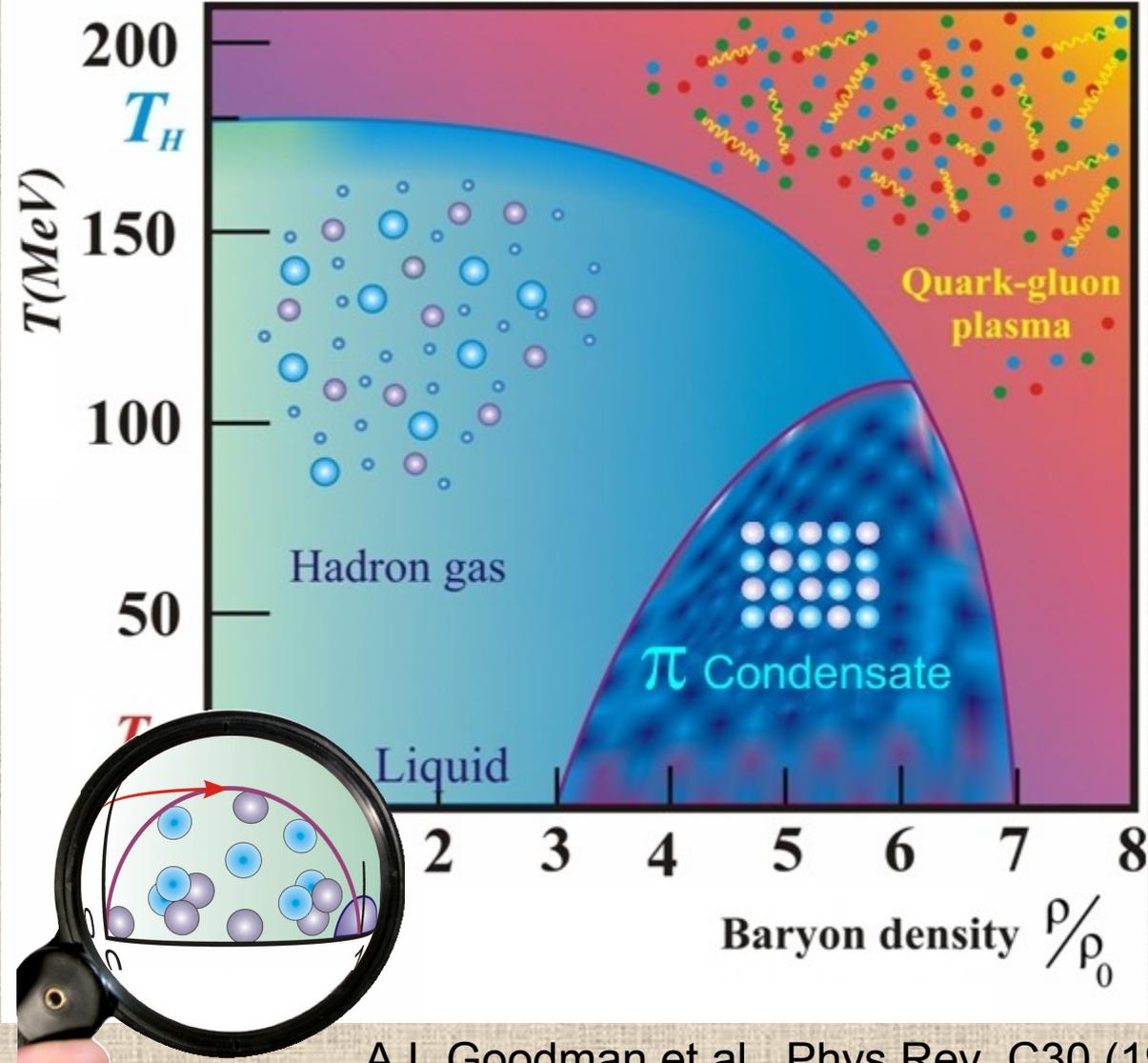
- Вероятности деления  $^{188}\text{Os}$  в зависимости от энергии возбуждения. Символы из работы L.G. Moretto et al., 1972:  $4\text{He} + ^{184}\text{W}$ .
- Линии - расчет для различных значений критической температуры.



*Fission probabilities for  $^{188}\text{Os}$  at excitation energy 40 MeV (Morreto et al. 1972)  
 The calculation are done for different parameterizations of surface tension.*

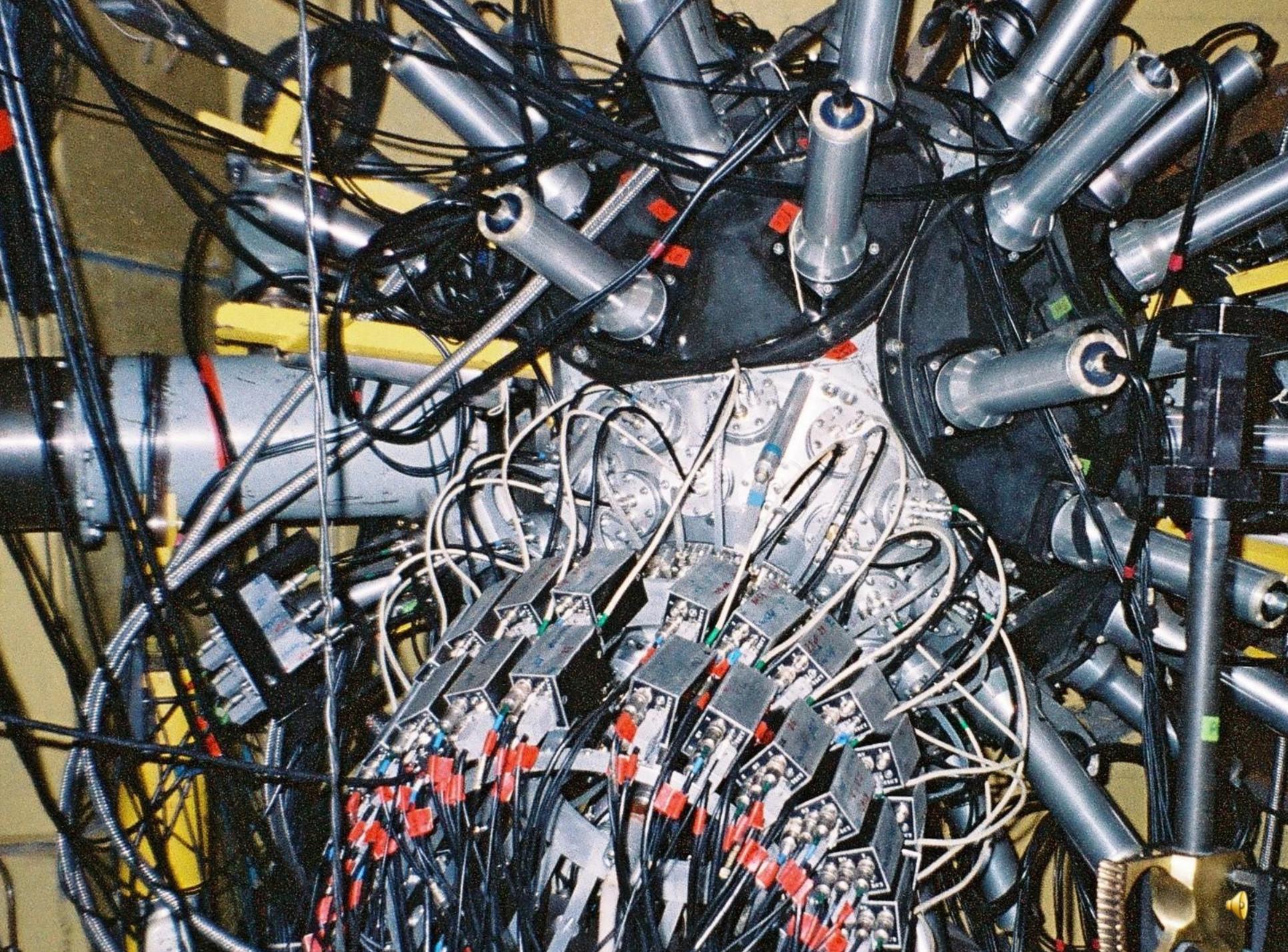
*(1)  $T_c = (19.5 \pm 1.2) \text{ MeV}$       (2)  $T_c = (16.5 \pm 1.0) \text{ MeV}$*





A.L.Goodman et al., Phys.Rev. C30 (1984) 851

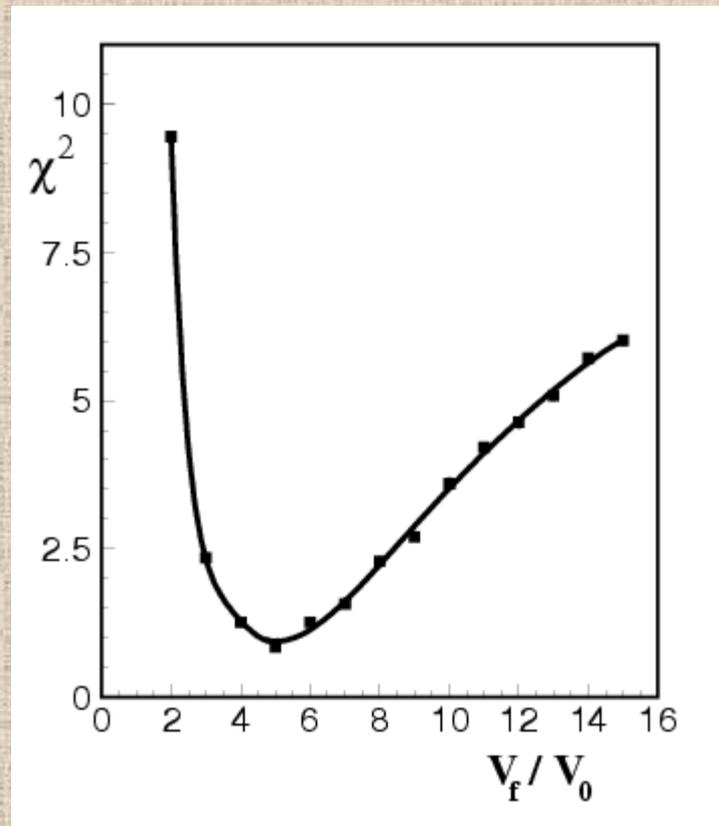
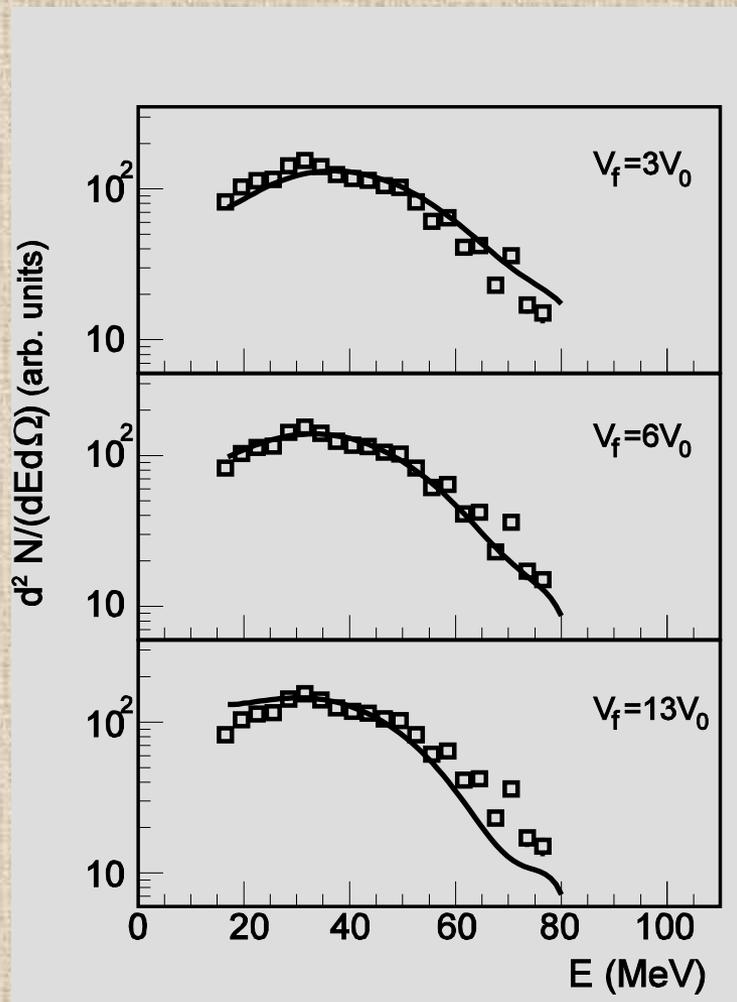
**Критическая температура  $T_c$  для перехода «жидкость-газ» - на вершине спиnodальной области;  $T_H$  – температура Хagedорна (для фазового перехода в кварк-глюонную плазму)**



**Спасибо**



# Определение объема системы из спектра кинетической энергии фрагментов (углерод) (freeze-out volume)



$$V_f = (5 \pm 0.5) V_0 \quad \text{or} \quad \rho_f = (0.2 \pm 0.02) \rho_0$$

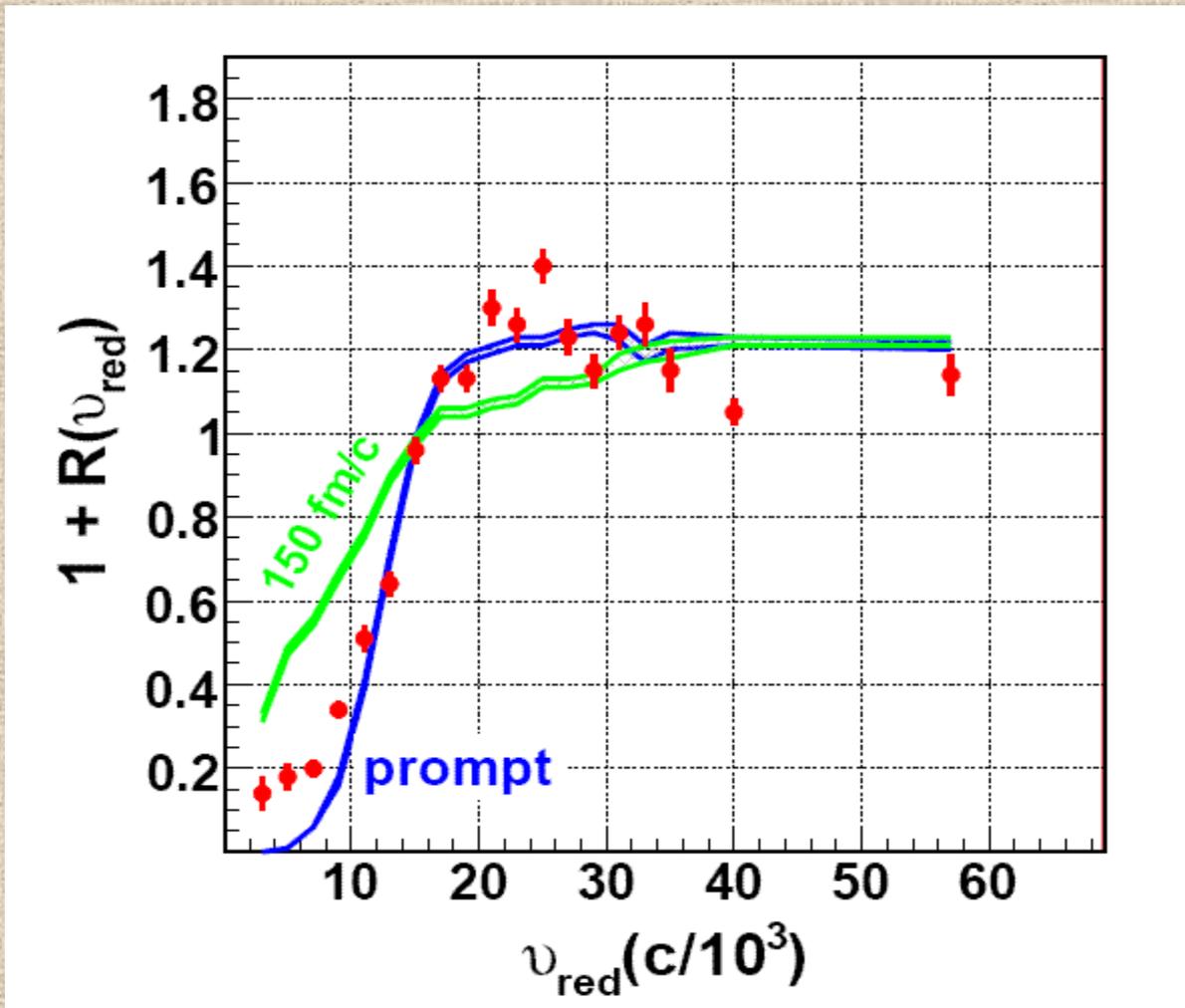


# Свойства фрагментирующих ядер для соударений proj+Au

• proj	$E_{\text{proj}}$	$M_{\text{IMF}}$	$Z_{\text{MF}}$	$A_{\text{MF}}$	$E_{\text{MF}}^*$
• $^2\text{H}$	4.4 GeV	1.9	65	155	547 MeV
• $^4\text{He}$	4.0 GeV	1.8	69	161	502 MeV

Model: INC\*+SMM+ multybody Coulomb trajectory



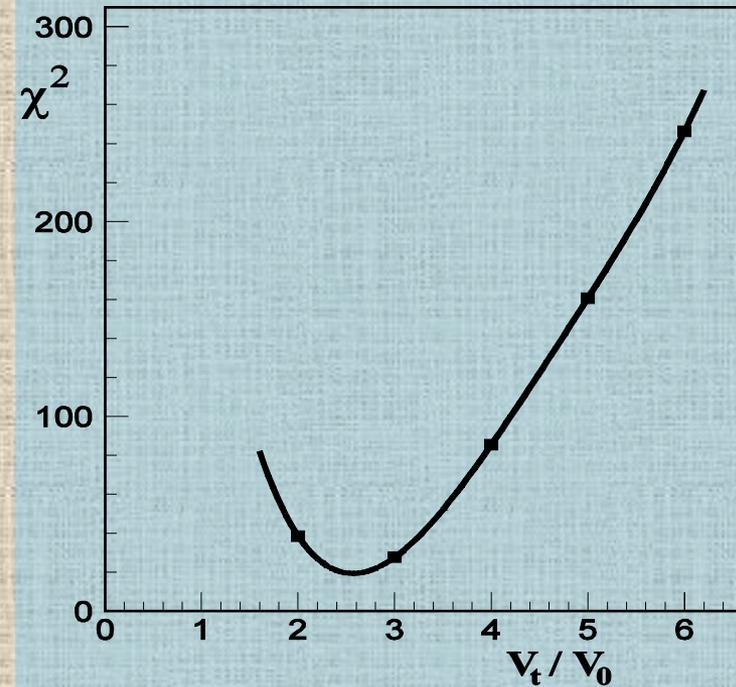
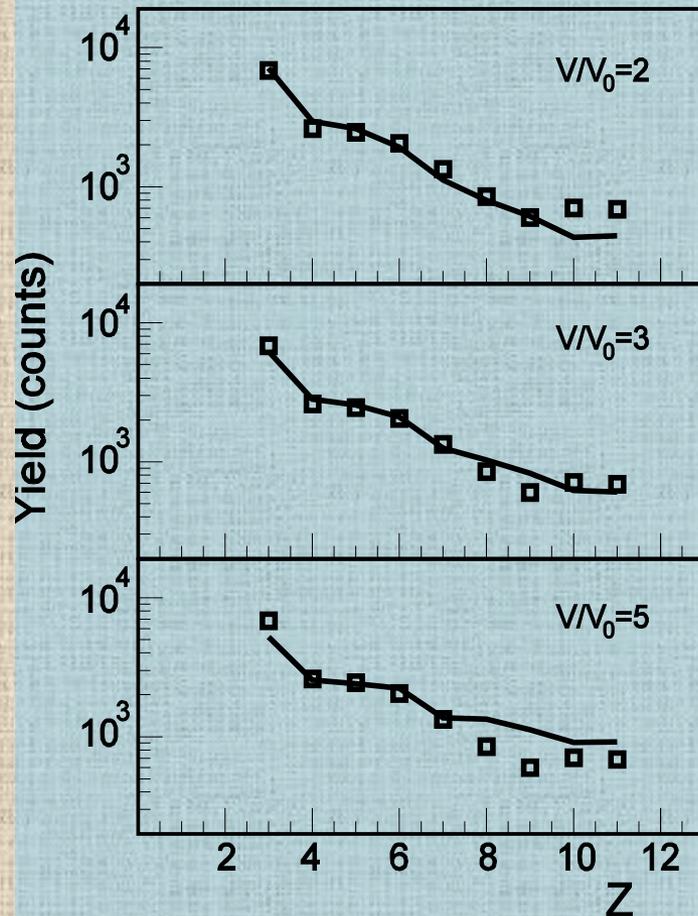


Корреляционные функции по относительной скорости для ФПМ из соударений  $d(4.4 \text{ ГэВ}) + Au$

Время эмиссии  $\tau \leq 40 \text{ fm/c}$  ( $1.3 \cdot 10^{-22} \text{ s}$ )



# Определение объема горячего ядра в момент формирования фрагментов (на барьере фрагментации)



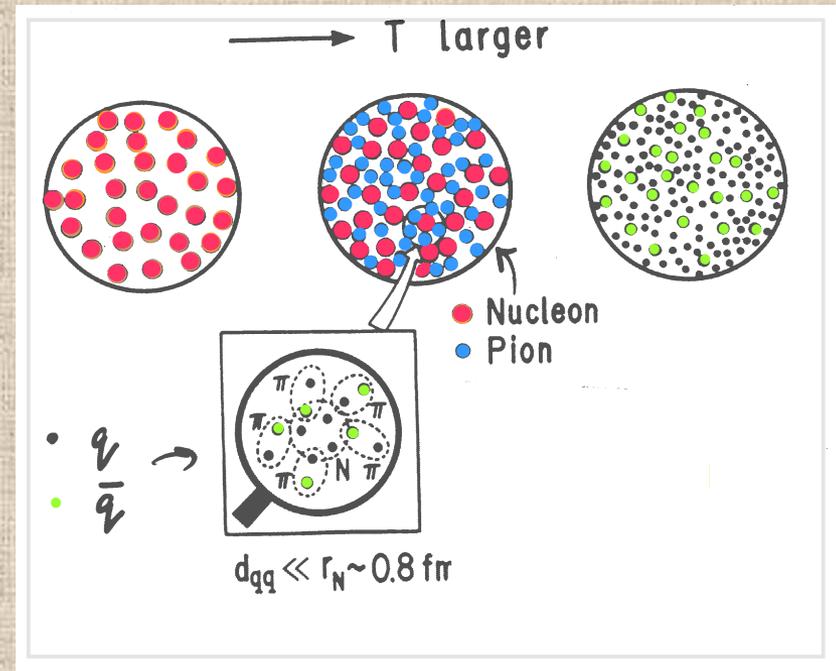
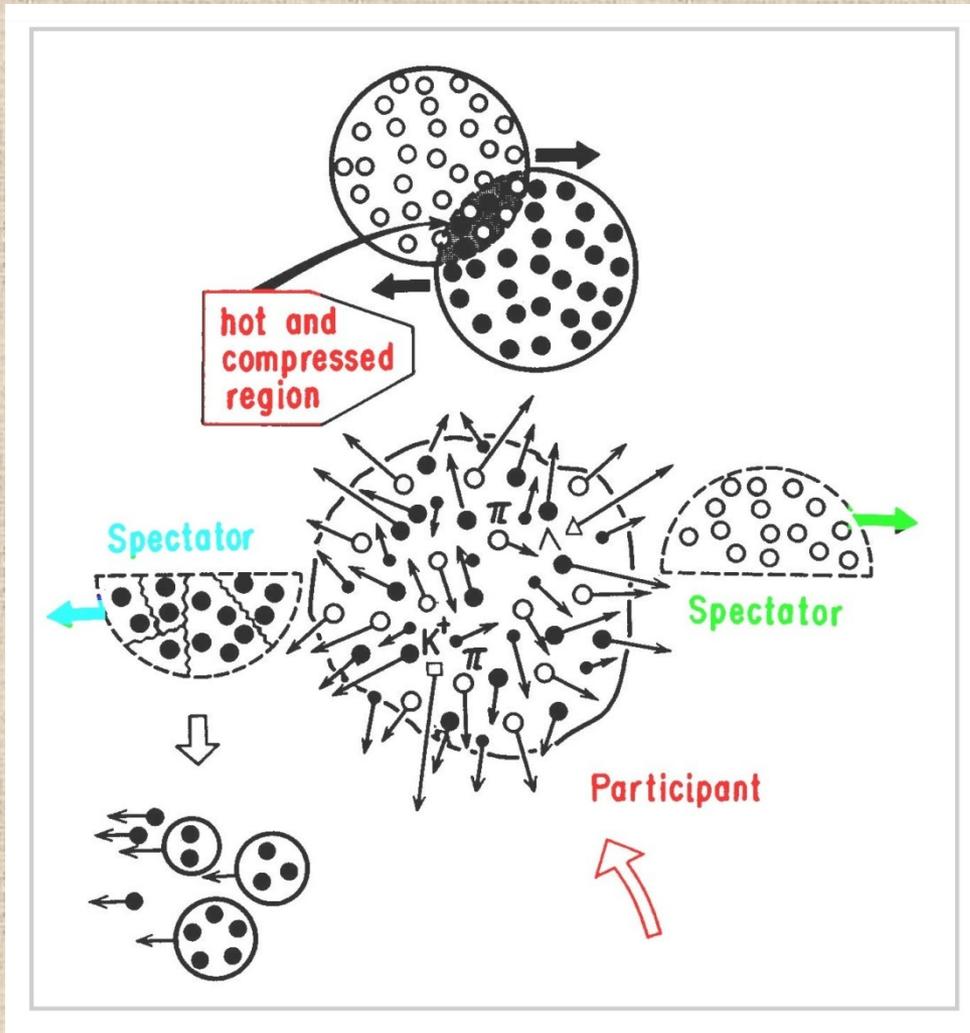
$$V_t = (2.6 \pm 0.3) V_0 \quad \text{or}$$

$$\rho_t = (0.38 \pm 0.04) \rho_0$$

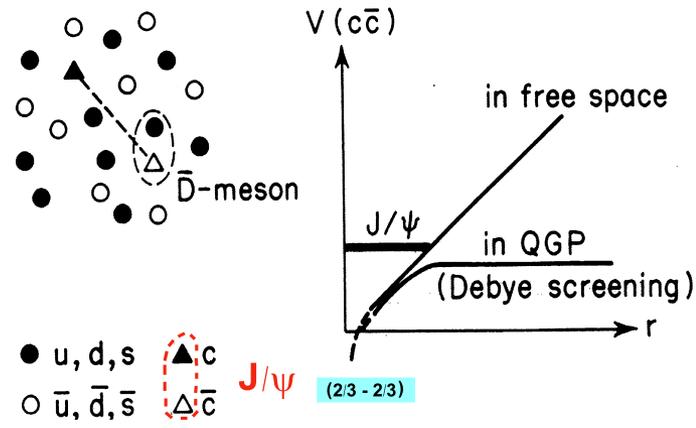


■ From Nuclear Matter to Quark-Gluon Plasma (by heating)

(S. Nagamia, Nucleus-Nucleus III, 1988)



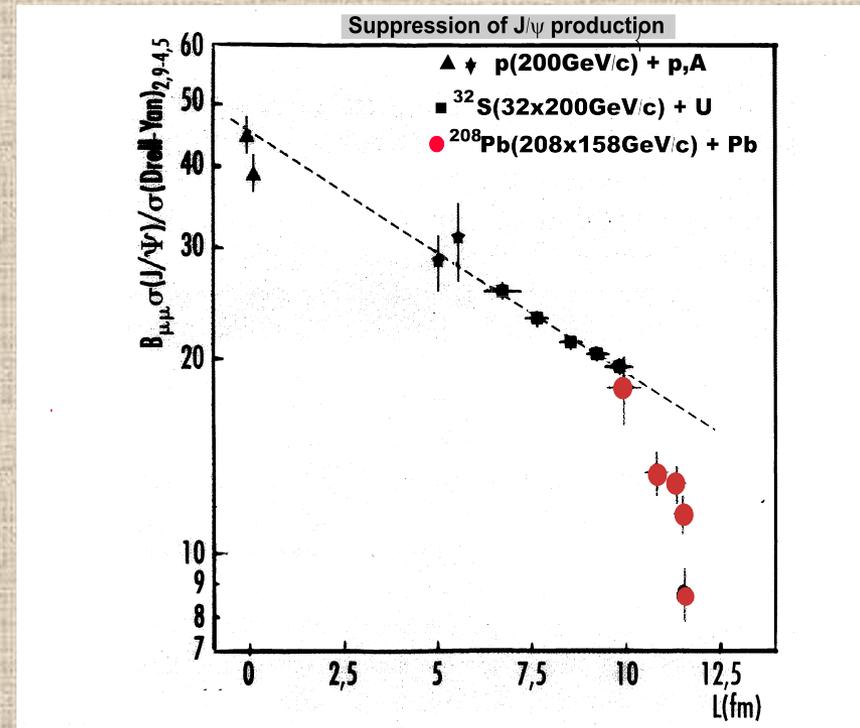
J/ψ Suppression vs. QGP

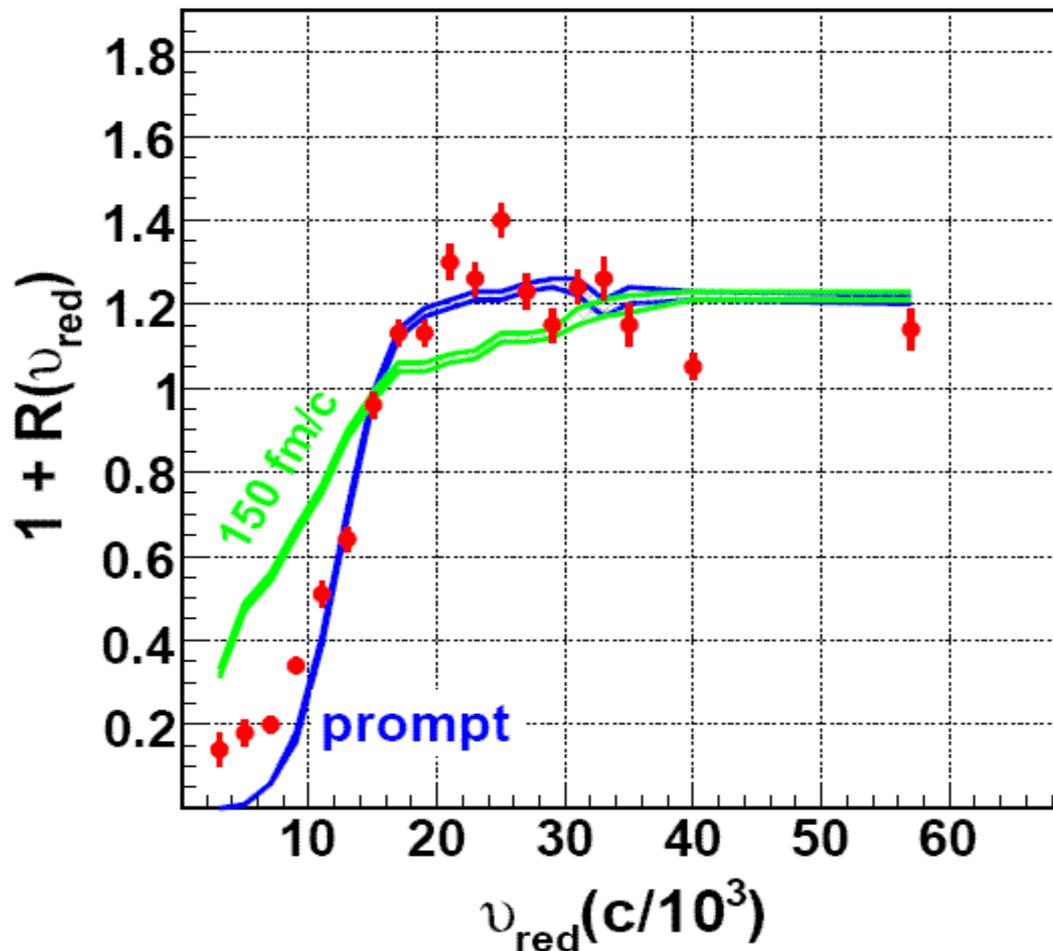


$m_{J/\Psi} = 3097 \text{ MeV}$

$\tau \cong 10^{-20} \text{ s}$

- 1986 Start of CERN heavy ion program
- 1988 The first claim of QGP observation
- 1996 The second claim. The dashed line corresponds to a model where a J/Ψ is absorbed in nuclear matter
- 2003 Latest data



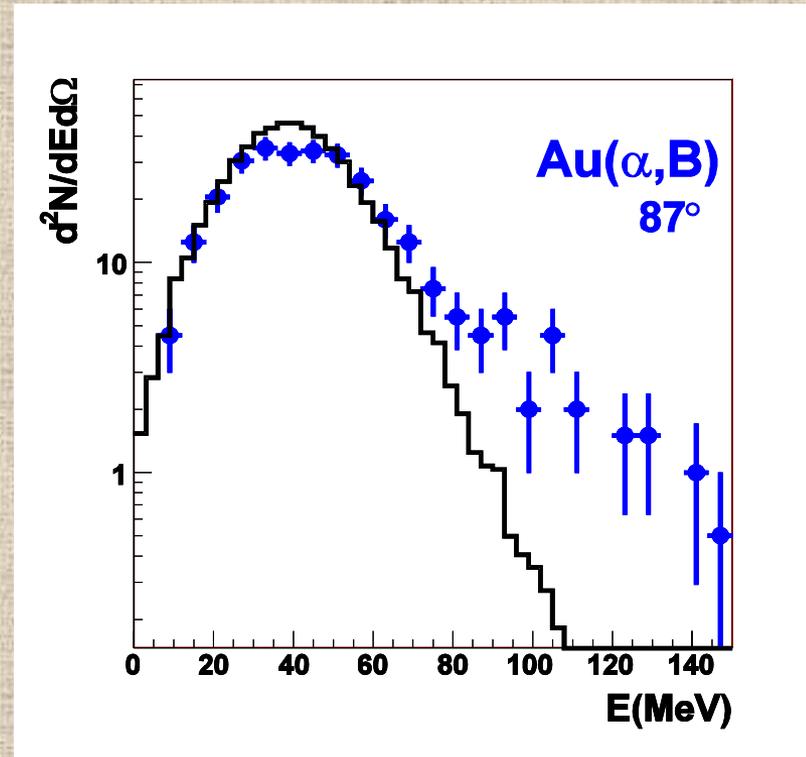
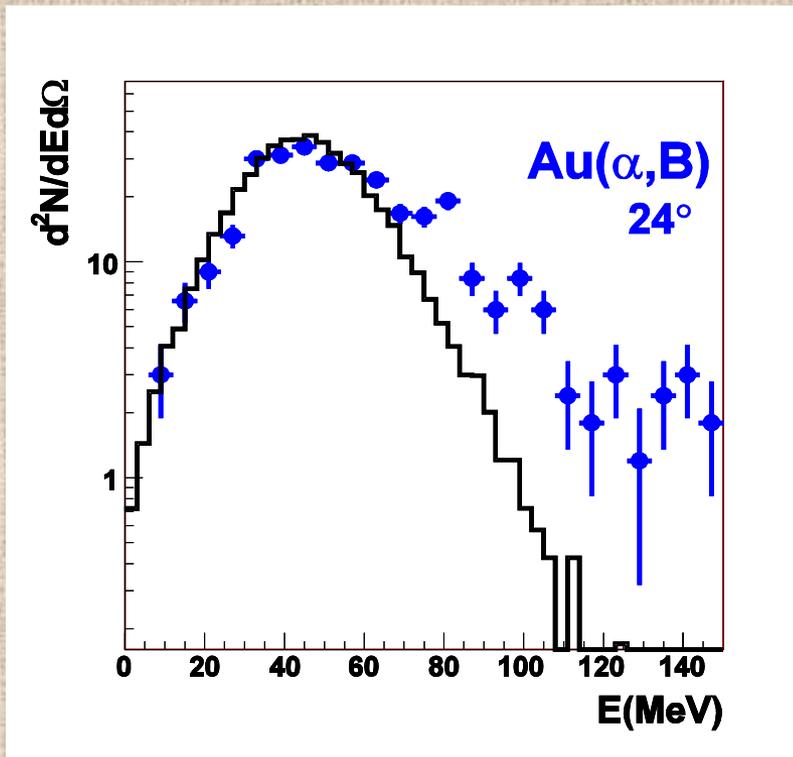


Корреляционные функции по относительной скорости для ФПМ из соударений  $d(4.4 \text{ ГэВ}) + Au$

Время эмиссии  $\tau \leq 40 \text{ fm/c}$  ( $1.3 \cdot 10^{-22} \text{ s}$ )

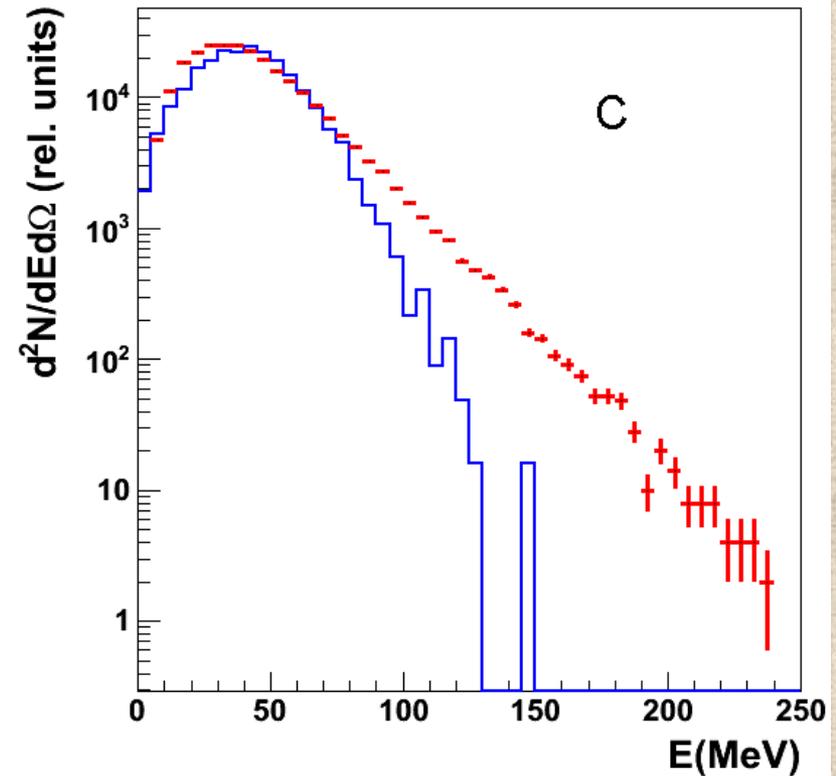
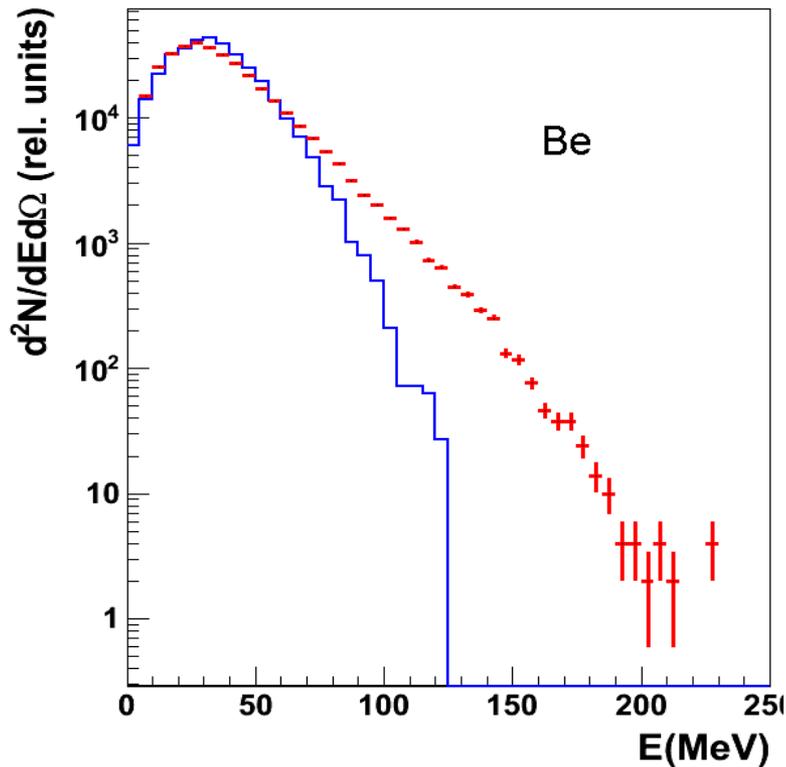


# Kinetic energy spectra of boron from 4He+Au collisions at 4.0 GeV beam energy

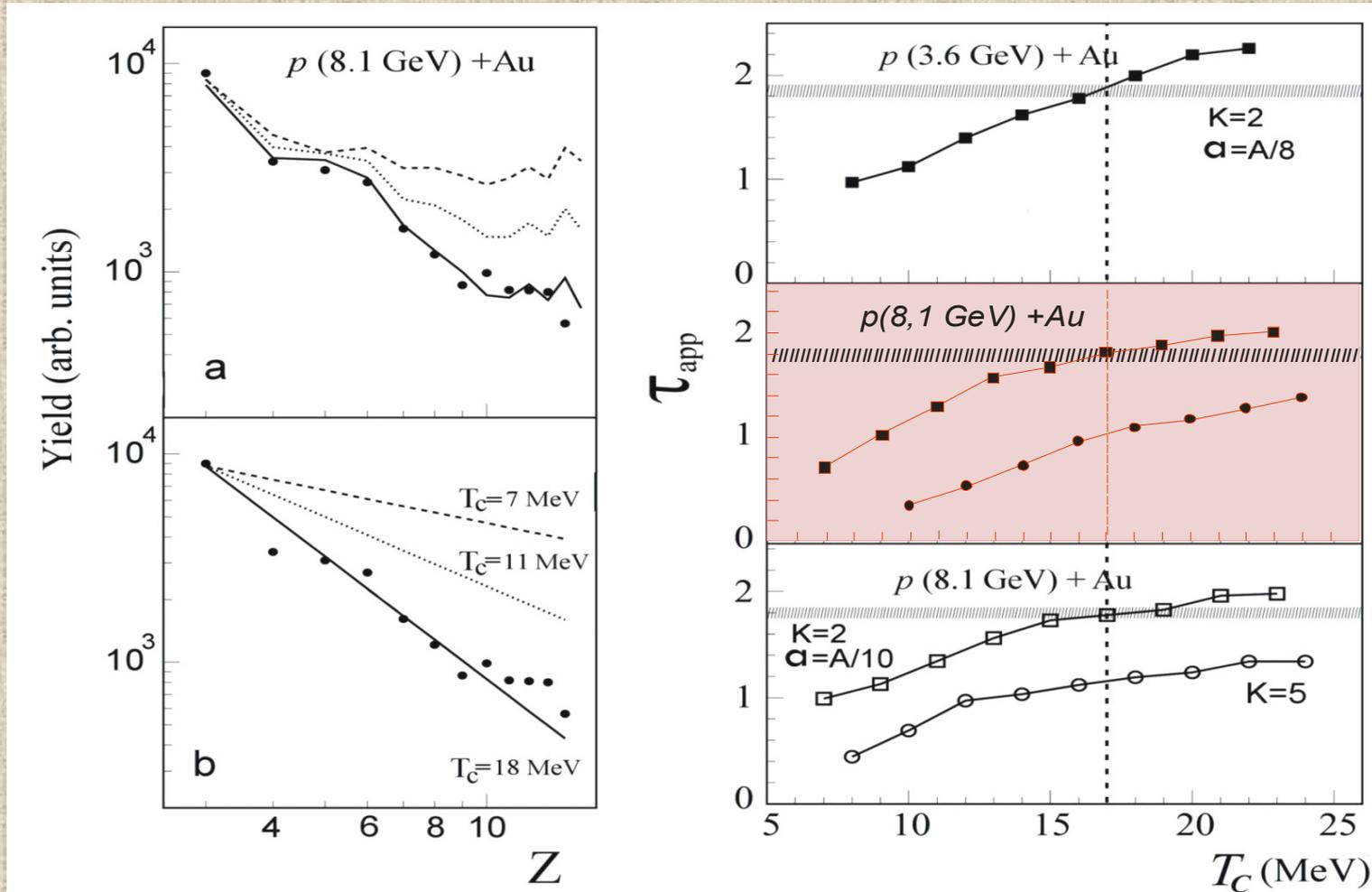


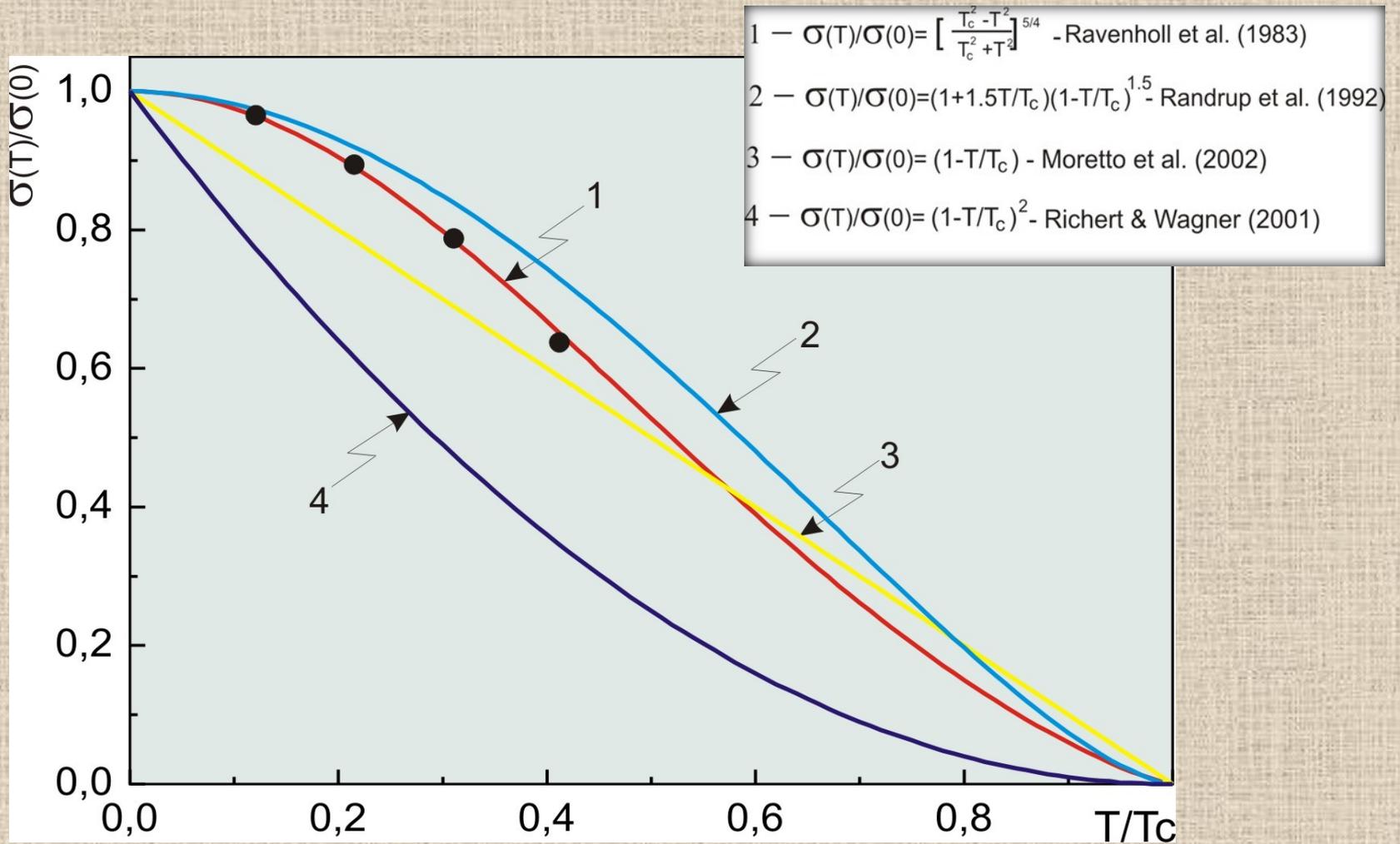
# Transverse kinetic energy spectra of Be and C from collisions $d(4.4\text{GeV})+\text{Au}$

(histograms are obtained within the INC\*+ SMM model + multibody  
Coulomb trajectory calculations)



# Critical temperature from multifragmentation in $p(8.1\text{ GeV})+\text{Au}$ collision (lines are calc.with INC+SMM)





The symbols are taken from G. Sauer, G. Chandra H. and U. Mosel, Nucl. Phys. A264 (1976) 221.