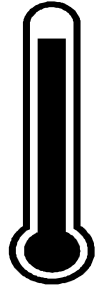


La Termodinamica nelle Interazioni Forti



un (parziale) punto di vista fenomenologico

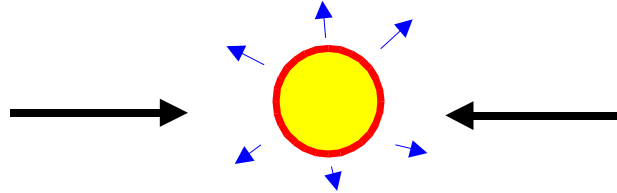
SOMMARIO:

- Introduzione
- Modello statistico e collisioni elementari
- Modello statistico e collisioni di ioni pesanti -
Aumento di produzione di stranezza
- Prospettiva

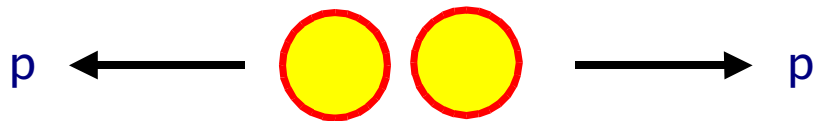
Modelli statistici-termodinamici:

spiegazione della produzione multipla di particelle nelle collisioni adroniche di energia nel centro di massa $\sim 1 - 10$ GeV

➡ Koppe, Fermi '50s



➡ Hagedorn '60s



Ciascun stato multiadronico del cluster (fireball) compatibile con le leggi di conservazione è ugualmente probabile



$$|\langle f|T|i\rangle|^2$$

$$T = C \sum_k |k\rangle \langle k|$$

$|k\rangle$ stato multiadronico permesso

$|i\rangle$ stato iniziale del cluster

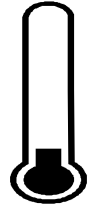
Hagedorn (Statistical Bootstrap Model) *prevede anche l'esistenza di una temperatura limite universale legata alla particolare forma dello spettro di massa adronico*

$$T_0 \sim 160 \text{ MeV}$$

Problemi:

- poche evidenze sperimentali (spettro esponenziale p_T)
- difficoltà nell'effettuare i calcoli numerici su sistemi di interesse (~ 10 particelle)

.....



L'interesse per questo tipo di approccio è diminuito considerevolmente a partire dagli anni '70 dopo l'apparizione del nuovo paradigma delle interazioni forti, la QCD.

Malgrado i suoi molti successi, in QCD non si riesce tuttora a calcolare grandezze di interesse nei processi di collisione di alta energia, quando entrano in gioco scale di distanza 'grandi' ($\sim 1\text{fm}$) o di energia 'bassa' ($\sim 1\text{ GeV}$)

- ➔ Molteplicità delle varie specie adroniche (inclusive e esclusive)
- ➔ Correlazioni globali e locali tra particelle
- ➔ Correlazioni di Bose-Einstein
- ➔ ...



MODELLI DI ADRONIZZAZIONE

Cercano di calcolare ciò che non si riesce a fare con la QCD

Larga applicazione in implementazioni codici MonteCarlo per gli esperimenti e^+e^- e pp di alta energia negli anni '80 e '90

● MODELLO A STRINGA (Anderson, Sjostrand et al.)

Tra quarks e gluoni esiste un tubo di flusso di colore (**stringa**) nel quale si immagazzina rapidamente energia potenziale (tensione $\sim 1 \text{ GeV/fm}$) fino alla rottura con la creazione ai capi di 2 nuovi quarks.

Gli adroni si formano a partire dai quarks con il vincolo di neutralita' di colore

● MODELLO A CLUSTER (Marchesini, Webber et al.)

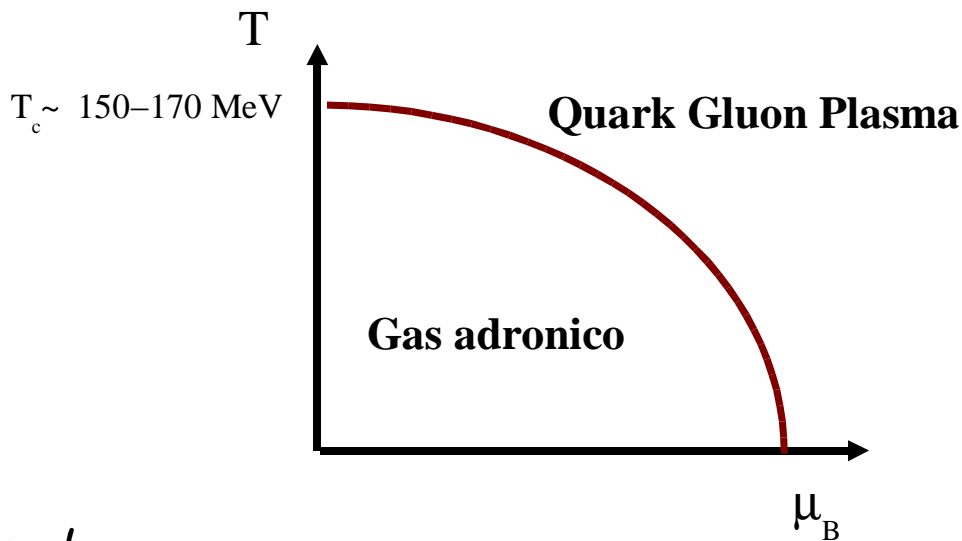
I quarks finali vengono messi insieme in oggetti massivi preadronici secondo il vincolo della neutralita' di colore (preconfinamento). Questi vengono fatti decadere in due adroni secondo lo spazio dello fasi relativistico $d^3p/2E$



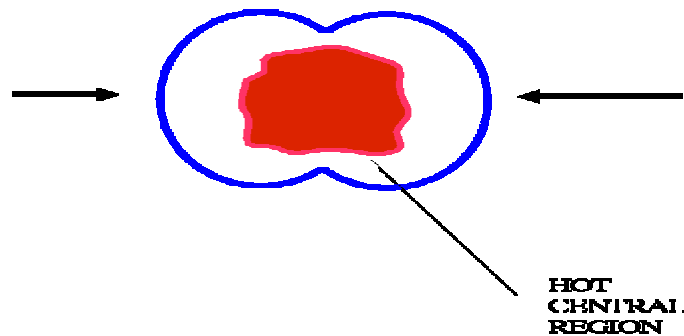
MOLTI PARAMETRI DA FISSARE !

L'uso dell'approccio statistico e' continuato in modo sotterraneo in applicazioni particolari come per esempio l'annichilazione pp a riposo sulla quale c'e' una vasta letteratura

Previsione di QCD: a T alta quarks e gluoni diventano particelle debolmente interagenti (deconfinamento)



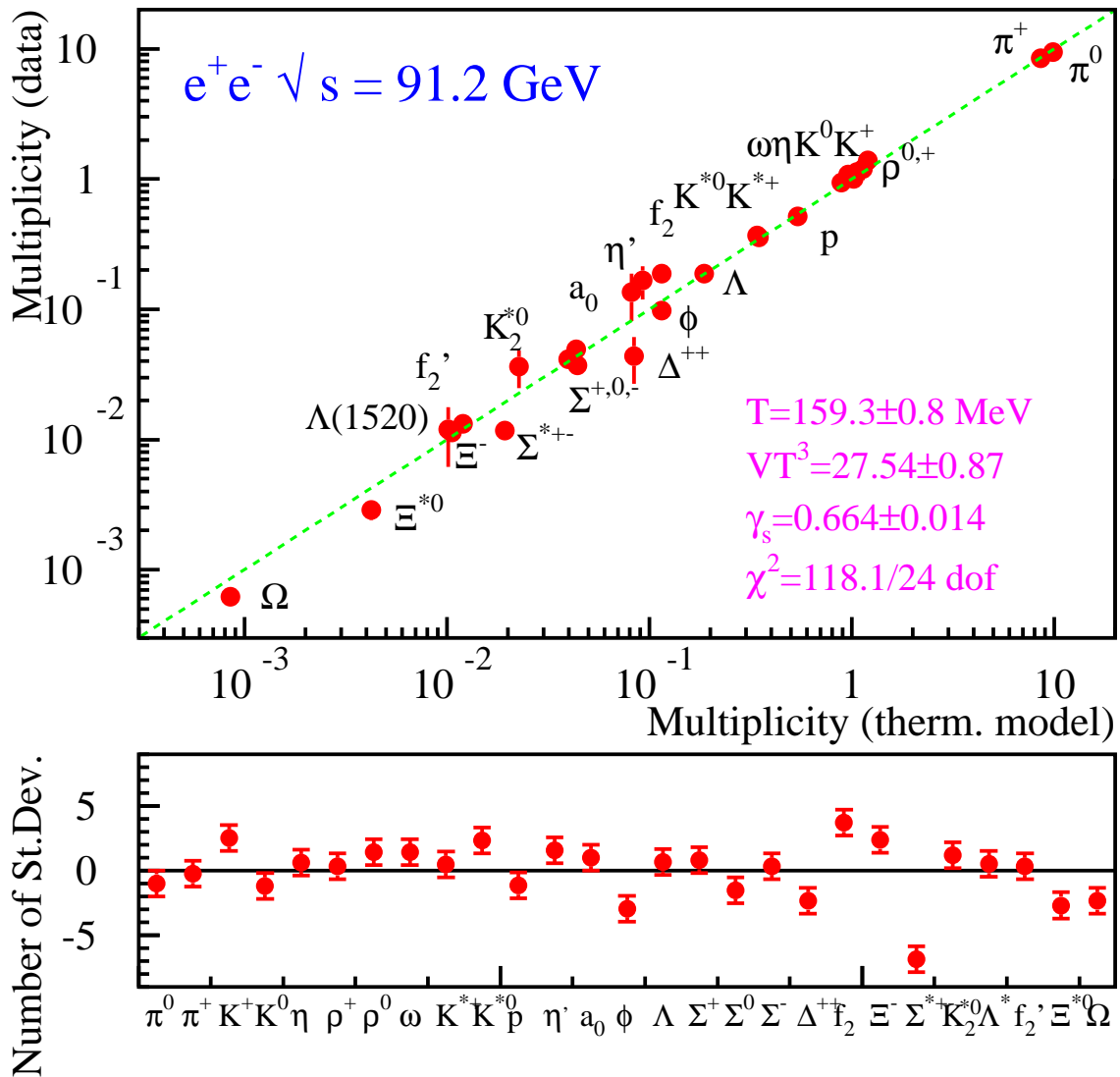
COLLISIONI DI IONI PESANTI DI ENERGIA ELEVATA



Zona centrale *grande* (molti adroni di diametro), molto *densa e calda*

→ QGP e' un transiente: problema delle signature ←

Possibile osservazione di radiazione adronica da una o piu' sorgenti termalizzate all'equilibrio



Molteplicita' adroniche in accordo con ansatz statistico-termodinamico per molte collisioni 'elementari' su un vasto range di energie:

F. B. Z. Phys. C 69 (1996) 485 e tesi di Dottorato

F. B. in Erice 1996 hep-ph 9701275

F. B., U. Heinz, Z. Phys. C 76 (1997) 269



Le molteplicita' sono riprodotte con solo 3 parametri liberi: T, V, γ_s

$$\langle n_j \rangle = \frac{(2J_j + 1)V}{(2\pi)^3} \gamma_s \int d^3p \exp(-\sqrt{p^2 + m_j^2}/T) \frac{Z(Q - q_j)}{Z(Q)}$$

PREVISIONI SULLA PRODUZIONE DI ADRONI CON QUARKS PESANTI



J. Phys. G 23 (1997) 1933

Hadron	Prediction	Measured	Pull
D^+	0.0926	0.087 ± 0.008 (ADO)	-0.67
D^0	0.233	0.227 ± 0.012 (ADO)	-0.50
D_s	0.0579	0.066 ± 0.010 (O)	+0.81
D^{*+}	0.108	0.0880 ± 0.0054 (ADO)	-3.7
$D_s^+/\text{c-jet}$	0.103	0.128 ± 0.027 (A)	+0.92
$D_1/\text{c-jet}$	0.0347	0.038 ± 0.009 (A)	+0.37
$D_2^*/\text{c-jet}$	0.0471	0.135 ± 0.052 (A)	+1.7
$D_{s1}/\text{c-jet}$	0.00536	0.016 ± 0.0058 (O)	+1.8
$B^0/\text{b-jet}$	0.412	0.384 ± 0.026 (AD)	-1.1
B^*/B	0.692	0.747 ± 0.067 (ADLO)	+0.82
$B^*/\text{b-jet}$	0.642	0.65 ± 0.06 (D)	+0.13
$B_s/\text{b-jet}$	0.106	0.122 ± 0.031 (A)	+0.52
$B_{u,d}^{**}/\text{b-jet}$	0.206	0.26 ± 0.05 (DO)	+1.0
B^{**}/B	0.251	0.27 ± 0.06 (A)	+0.32
$B_s^{**}/\text{b-jet}$	0.021(0.011)	0.048 ± 0.017 (D)	+1.6
B_s^{**0}/B^+	0.026(0.013)	0.052 ± 0.016 (O)	+1.6
Λ_c^+	0.0248	0.0395 ± 0.0084 (O)	+1.7
$\text{b-baryon}/\text{b-jet}$	0.0717	0.115 ± 0.040 (A)	+1.1
$(\Sigma_b + \Sigma_b^*)/\text{b-jet}$	0.0404	0.048 ± 0.016 (D)	+0.48
$\Sigma_b/(\Sigma_b^* + \Sigma_b)$	0.411	0.24 ± 0.12 (D)	-1.4

DELPHI collaboration, Z. Phys. C 73 (1996) 11

JETSET (modello a stringa)

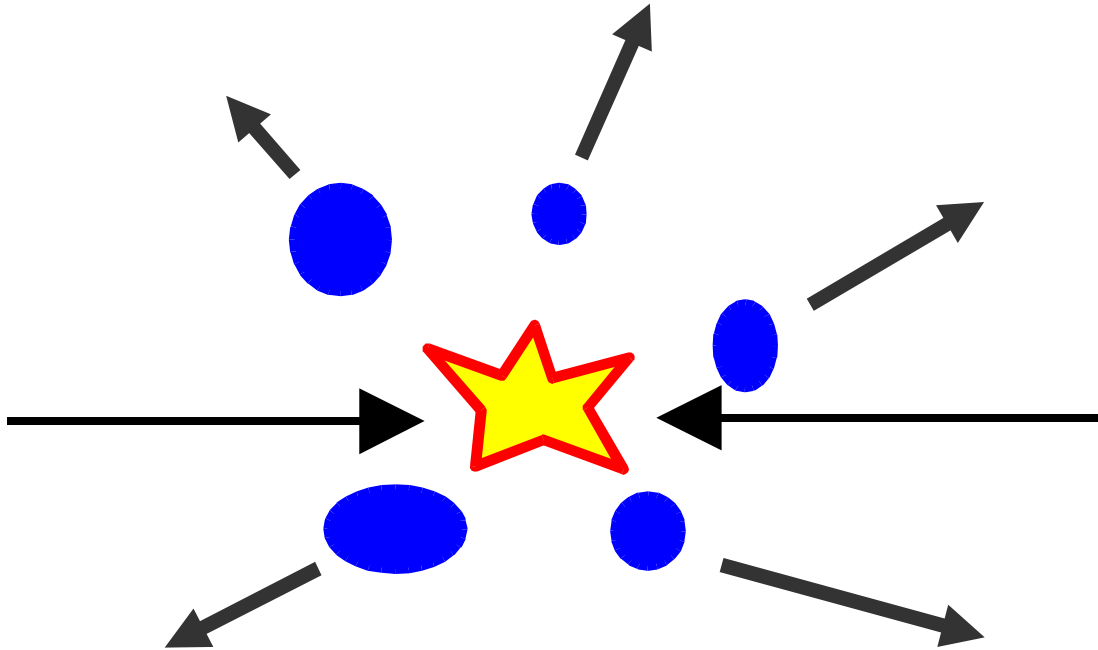
Parameter	Name	Default	Range gen.	Fit Result		
				Value	stat.	sys.
Λ_{QCD}	PARJ(81)	0.29	0.25 - 0.35	0.297	± 0.004	$\pm \begin{smallmatrix} 0.007 \\ 0.008 \end{smallmatrix}$
Q_0	PARJ(82)	1.0	1.0 - 2.0	1.56	± 0.11	$\pm \begin{smallmatrix} 0.21 \\ 0.15 \end{smallmatrix}$
a	PARJ(41)	0.3	0.1 - 0.5	0.417	± 0.022	$\pm \begin{smallmatrix} 0.011 \\ 0.015 \end{smallmatrix}$
b	PARJ(42)	0.58	0.850	optimized		
σ_q	PARJ(21)	0.36	0.36 - 0.44	0.408	± 0.005	$\pm \begin{smallmatrix} 0.004 \\ 0.004 \end{smallmatrix}$
$P(^1S_0)_{ud}$	-	0.5	0.3 - 0.5	0.297	± 0.021	$\pm \begin{smallmatrix} 0.102 \\ 0.011 \end{smallmatrix}$
$P(^3S_1)_{ud}$	-	0.5	0.2 - 0.4	0.289	± 0.038	$\pm \begin{smallmatrix} 0.004 \\ 0.026 \end{smallmatrix}$
$P(^1P_1)_{ud}$	-	0.	see text	0.096		
$P(\text{other } P \text{ states})_{ud}$	-	0.	see text	0.318		
γ_s	PARJ(2)	0.30	0.27 - 0.31	0.308	± 0.007	$\pm \begin{smallmatrix} 0.004 \\ 0.036 \end{smallmatrix}$
$P(^1S_0)_s$	-	0.4	0.3 - 0.5	0.410	± 0.038	$\pm \begin{smallmatrix} 0.026 \\ 0.013 \end{smallmatrix}$
$P(^3S_1)_s$	-	0.6	0.2 - 0.4	0.297	± 0.021	$\pm \begin{smallmatrix} 0.020 \\ 0.004 \end{smallmatrix}$
$P(P \text{ states})_s$	-	0.	see text	0.293		
ϵ_c	PARJ(54)	-	variable	-0.0372	± 0.0007	$\pm \begin{smallmatrix} 0.0011 \\ 0.0012 \end{smallmatrix}$
$P(^1S_0)_c$	-	0.25	0.26			
$P(^3S_1)_c$	-	0.75	0.44	adj. to data		
$P(P \text{ states})_c$	-	0.	0.3			
ϵ_b	PARJ(55)	-	variable	-0.00284	± 0.00005	$\pm \begin{smallmatrix} 0.00012 \\ 0.00010 \end{smallmatrix}$
$P(^1S_0)_b$	-	0.25	0.175			
$P(^3S_1)_b$	-	0.75	0.525	adj. to data		
$P(P \text{ states})_b$	-	0.	0.3			
$P(qq)/P(q)$	PARJ(1)	0.1	0.08 - 0.11	0.099	± 0.001	$\pm \begin{smallmatrix} 0.005 \\ 0.002 \end{smallmatrix}$
$[P(us)/P(ud)]/\gamma_s$	PARJ(3)	0.4	0.593	adj. to data		
$P(qq1)/P(qq0)$	PARJ(4)	0.05	0.07	adj. to data		
extra baryon supp.	PARJ(19)	0.	0.5	adj. to data, only for uds		
extra η supp.	PARJ(25)	1.0	0.65	0.65 ± 0.06		
extra η' supp.	PARJ(26)	1.0	0.23	0.23 ± 0.05		

HERWIG (modello a cluster)

Parameter	Default	Range gen.	Fit Result		
			Value	stat.	sys.
QCGLAM	0.18	0.155 - 0.205	0.163	± 0.001	$\pm \begin{smallmatrix} 0.004 \\ 0.005 \end{smallmatrix}$
RMASS(13)	0.75	0.64 - 0.96	0.65	± 0.01	$\pm \begin{smallmatrix} 0.02 \\ 0.01 \end{smallmatrix}$
CLMAX	3.35	2.35 - 4.35	3.48	± 0.04	$\pm \begin{smallmatrix} 0.20 \\ 0.13 \end{smallmatrix}$
CLPOW	2.0	1.0 - 2.0	1.49	± 0.04	$\pm \begin{smallmatrix} 0.16 \\ 0.08 \end{smallmatrix}$
CLSMR	0.	0.0 - 1.0	0.36	± 0.04	$\pm \begin{smallmatrix} 0.06 \\ 0.01 \end{smallmatrix}$
DECWT	1.0	0.0 - 1.0	0.77	± 0.08	$\pm \begin{smallmatrix} 0.28 \\ 0.24 \end{smallmatrix}$
PWT(3)	1.0	0.0 - 1.0	0.83	± 0.02	$\pm \begin{smallmatrix} 0.03 \\ 0.09 \end{smallmatrix}$
PWT(7)	1.0	0.0 - 1.0	0.74	± 0.09	$\pm \begin{smallmatrix} 0.37 \\ 0.25 \end{smallmatrix}$



Nel modello a stringa versione originale non e' prevista una dipendenza della molteplicita' dalla massa dell'adrone



Il modello di adronizzazione statistico nelle collisioni di alta energia

- Ogni cluster, singoletto di colore, e' caratterizzato da un volume V , un quadrimpulso P e un insieme di cariche (elettrica, stranezza ecc.) $Q = (Q_1, \dots, Q_n)$ che sono 'ereditati' dalla dinamica precedente
- *Ogni cluster produce adroni secondo il postulato fondamentale della Meccanica Statistica: ogni stato compatibile con le leggi di conservazione e' equiprobabile*

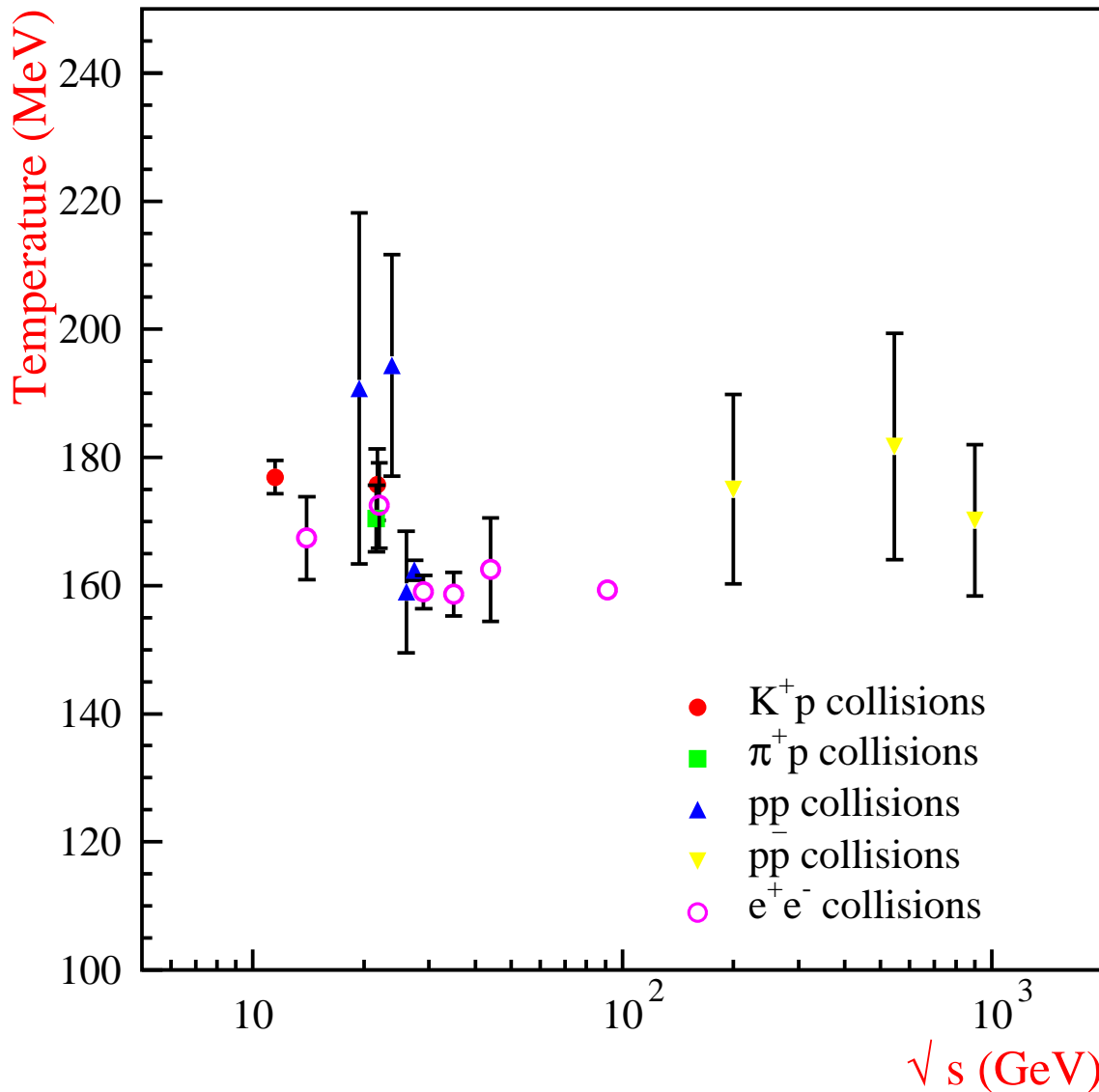
- Universalita' del processo di adronizzazione
- Modello statistico NON IMPLICA termalizzazione per collisioni inelastiche adroniche nello stato finale. Gli adroni 'nascono' in uno stato di equilibrio statistico (R. Hagedorn, 1970)
- Si ritrovano le formule a 3 parametri con un solo volume per le molteplicita' solo se si introducono opportune condizioni aggiuntive per le fluttuazioni delle cariche dei clusters
- La temperatura puo' essere introdotta se il sistema complessivo e' sufficientemente grande (da insieme microcanonico a canonico)



Temperature fittate in collisioni elementari

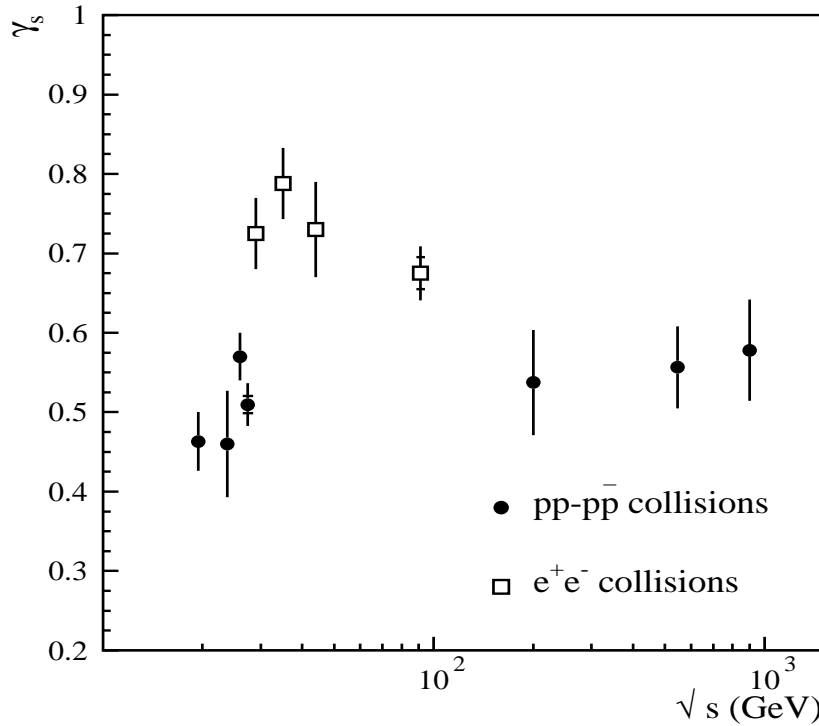
$$T_{had} \cong 160 \text{ MeV ad alta energia}$$

Statistical QCD 2001, hep-ph 0206203



E' stata avanzata l'ipotesi che questa sia proprio la temperatura critica della QCD, ovvero che il processo di adronizzazione sia un fenomeno critico (F. B., U. Heinz, R. Stock)

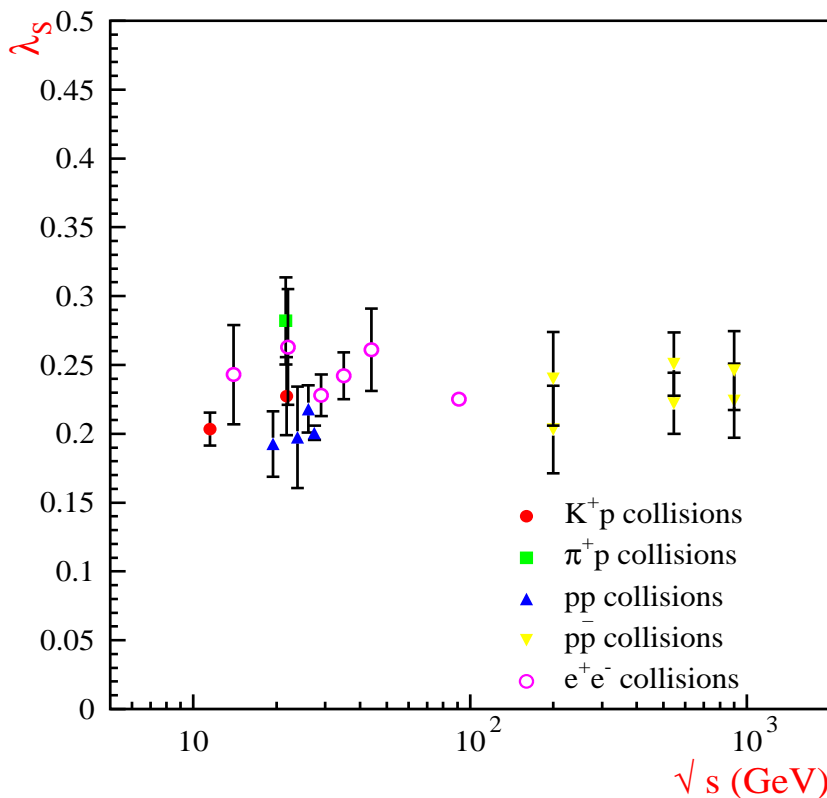
Soppressione di stranezza e λ_s



F. B., U. Heinz,
Z. Phys. C 76 (1996) 269

$$\lambda_s = \frac{2\langle s\bar{s} \rangle}{\langle u\bar{u} \rangle + \langle d\bar{d} \rangle}$$

Conteggio sugli adroni
primari delle
coppie prodotte dal vuoto

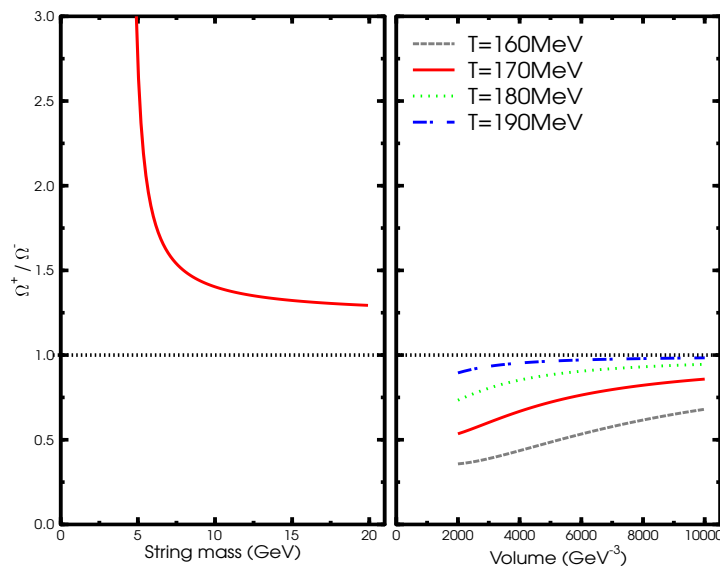
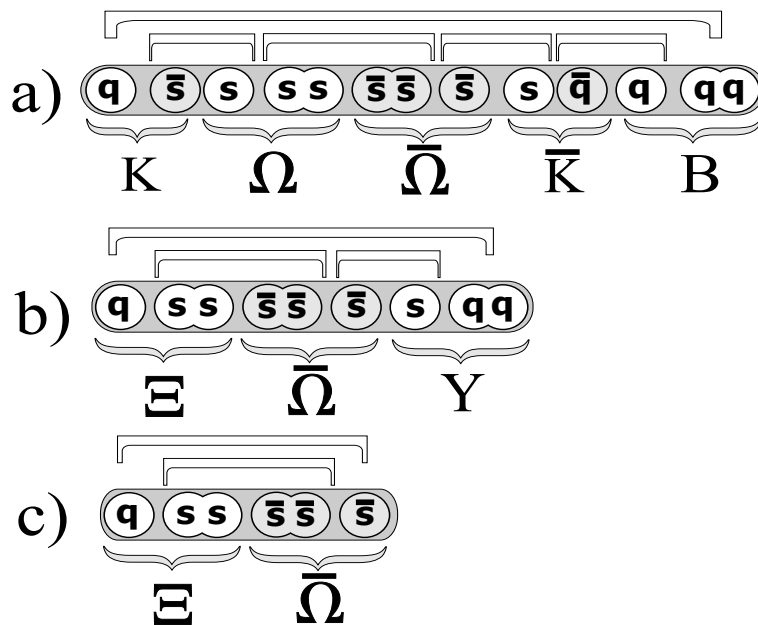


Statistical QCD 2001,
hep-ph 0206203

Un test sperimentale per discriminare tra modello a stringa e modello statistico: Ω^+/Ω^- in collisioni pp a energie intermedie (10-30 GeV)

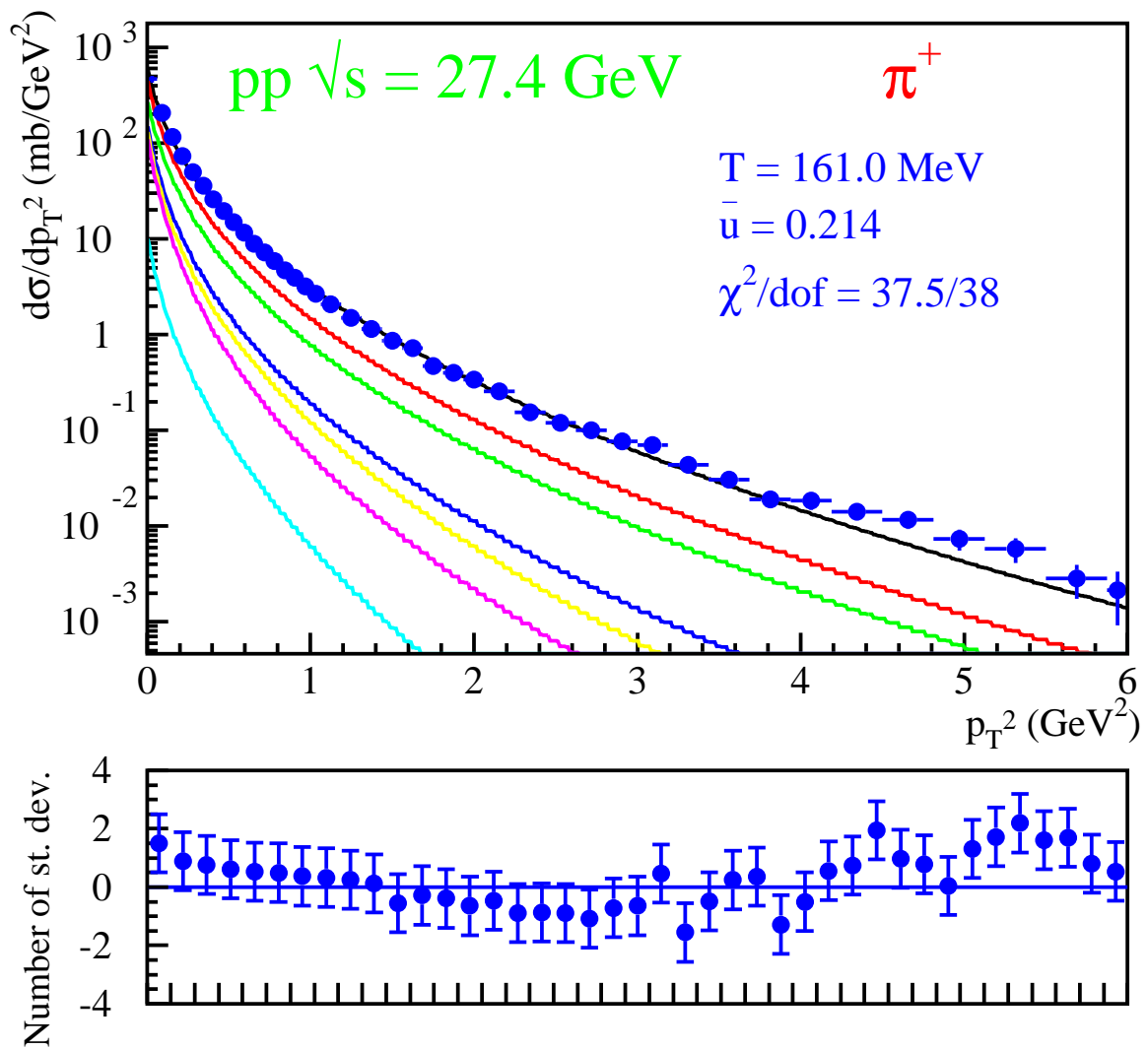
M. Bleicher et al., Phys. Rev. Lett. 88 (2002) 202501

A causa del particolare contenuto in quarks della Ω , modello statistico e stringa danno previsioni opposte, per qualunque valore dei parametri



L'analisi degli spettri di p_T in collisioni adroniche ha confermato la consistenza dello schema

F.B., G. Passaleva, Eur. Phys. J. C 23 (2002) 551



Modello statistico e collisioni di ioni pesanti

Lo schema fisico a clusters e' lo stesso delle collisioni elementari ma...

- *Termalizzazione di quarks e gluoni su un grande (molti adroni) volume nella prima della fase dell'evoluzione, ben prima dell'adronizzazione, con deconfinamento vero e proprio del colore*
- *A seconda della velocita' di espansione della materia adronica gia' formata, ci puo' essere una fase di re-scattering adronico sia inelastico che elastico*

Il modello statistico-termodinamico, in varie versioni, ha avuto larga applicazione a partire dai primi anni '90 nell'analisi delle molteplicita' e degli spettri di p_T per determinare i parametri della sorgente:

Au+Au, Ni+Ni	GSI	$p = 1.7 \text{ A GeV}/c$
Si+Au, Au+Au	AGS	$p = 11.6 - 14.6 \text{ A GeV}/c$
S+S, S+Ag, Pb+Pb	SPS	$p = 40 - 200 \text{ A GeV}/c$
Au+Au	RHIC	$\sqrt{s}_{NN} = 130 - 200 \text{ GeV}$
Pb+Pb	LHC	$\sqrt{s}_{NN} \sim 10 \text{ TeV}$

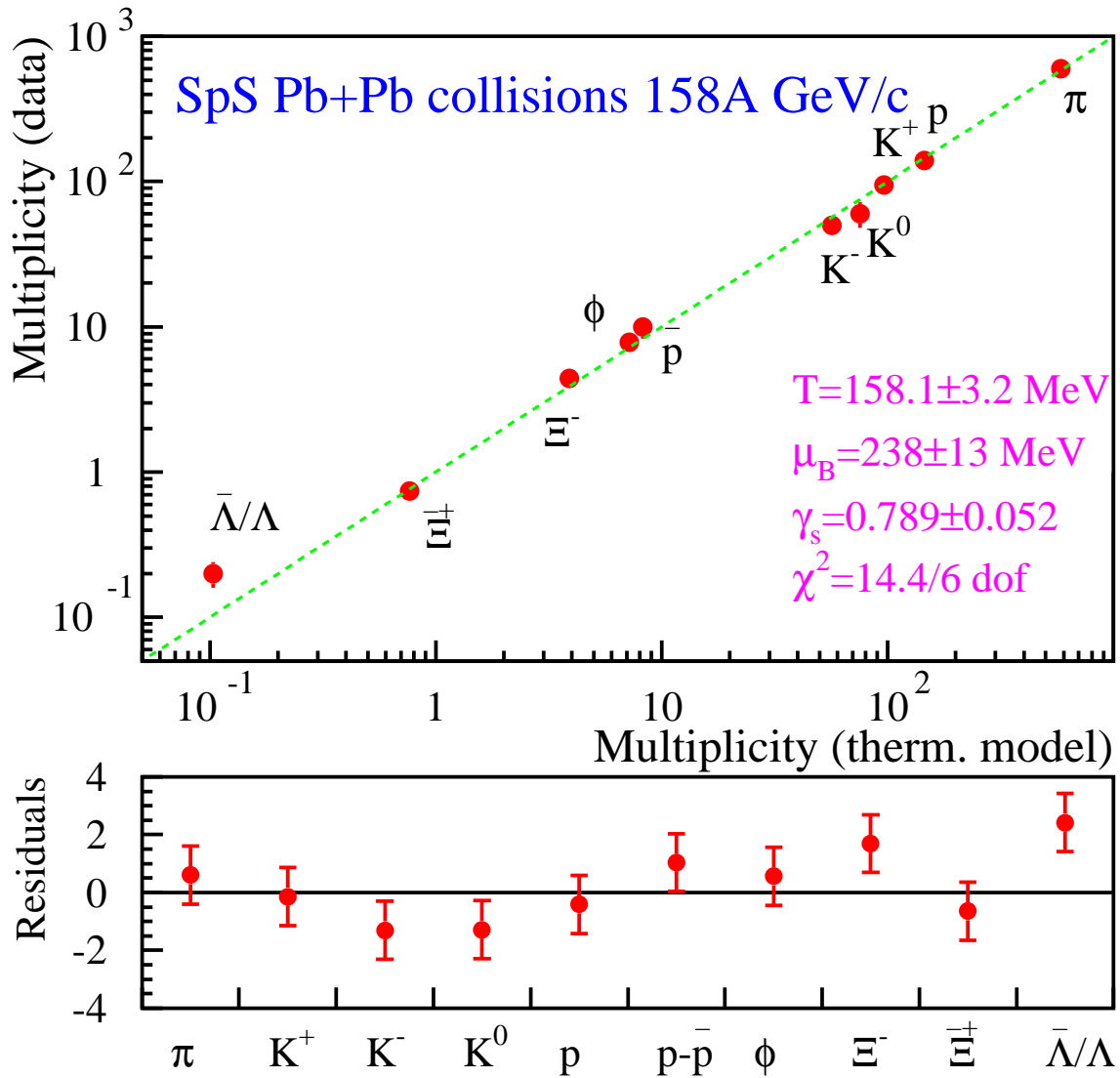
Le conclusioni sono abbastanza in accordo tra i vari autori eccezion fatta per l'equilibrio chimico di stranezza



L'aumento di stranezza e' stato proposto come una possibile segnatura della formazione del QGP (Muller e Rafelski 1980)

Fit alle molteplicita' di Pb+Pb @ 158 A GeV/c

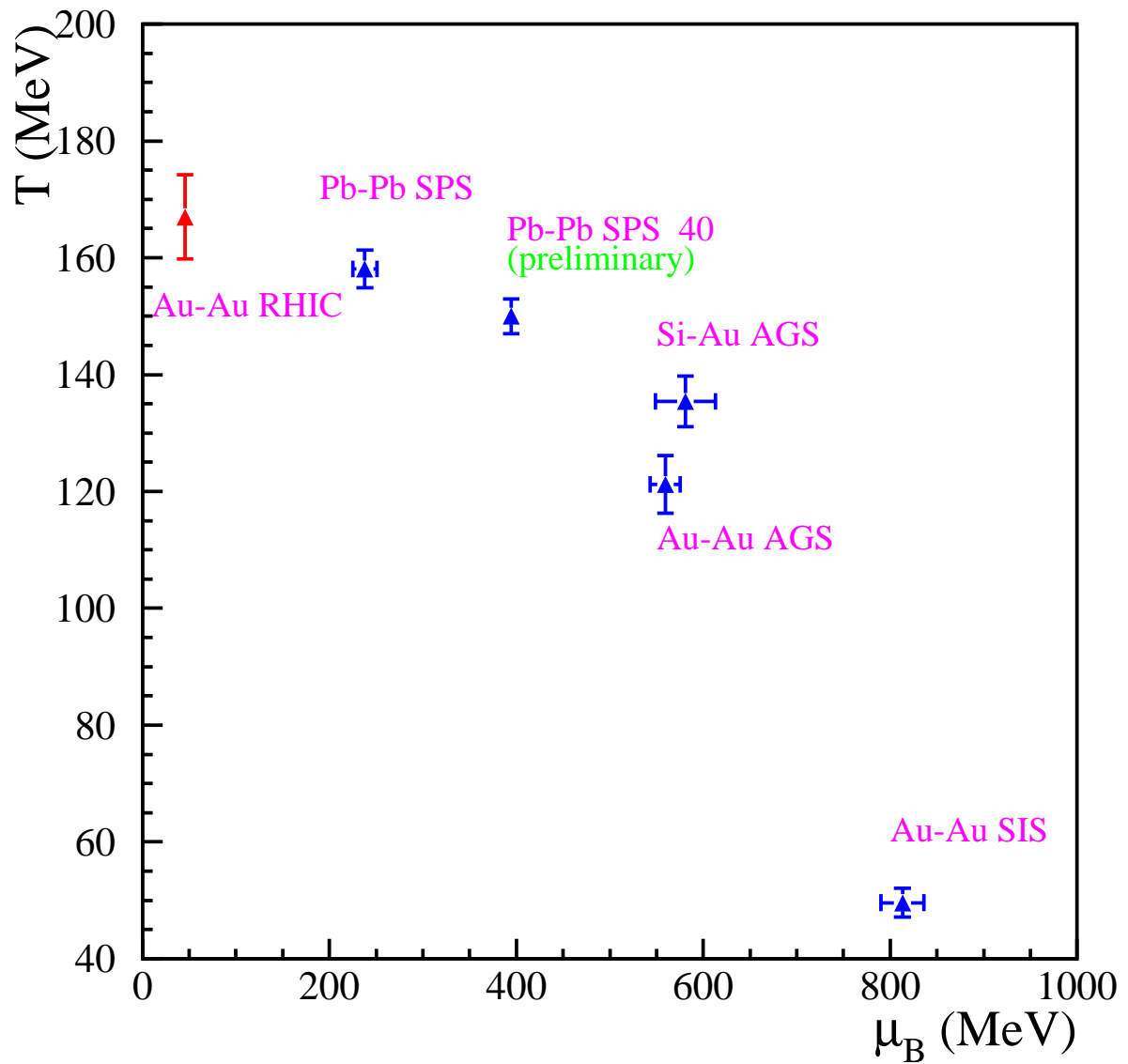
F.B., J. Cleymans, A. Keranen et al. Phys. Rev. C 64 (2001) 024901



Altre analisi di molti altri gruppi danno risultati compatibili
 eccetto γ_s nell'analisi di P. B. Munzinger et al.

Temperature e potenziale chimico barionico

Strange Quark Matter 2001 J. Phys. G 28 (2002) 1553



In ioni pesanti:

Freeze-out chimico < Freeze-out cinetico

La determinazione del freeze-out cinetico viene effettuata con l'analisi combinata di spettri trasversi e correlazioni di Bose-Einstein (studio della dimensione della sorgente in espansione)

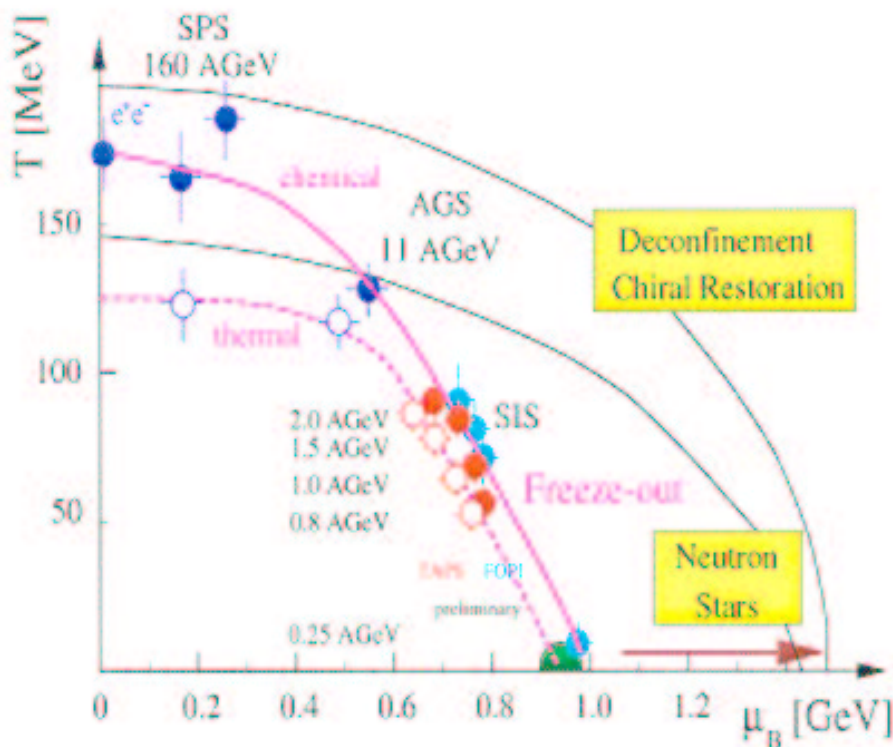
E' stato mostrato che $T_{kin} < T_{chem}$ in molte collisioni →

esiste una fase di re-scattering adronici essenzialmente elastici che tengono le sorgenti in equilibrio

J. P. Blaizot, summary talk in Quark Matter 99

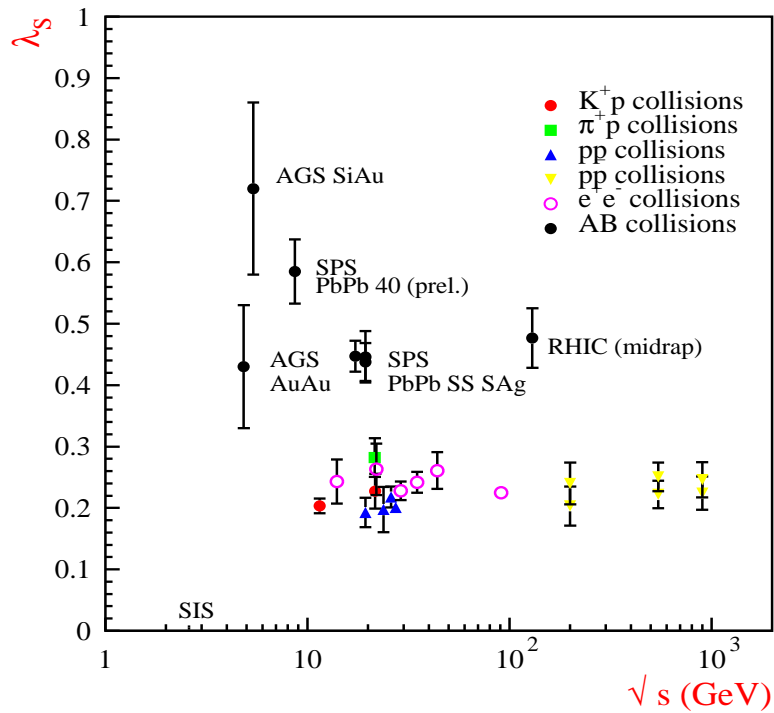
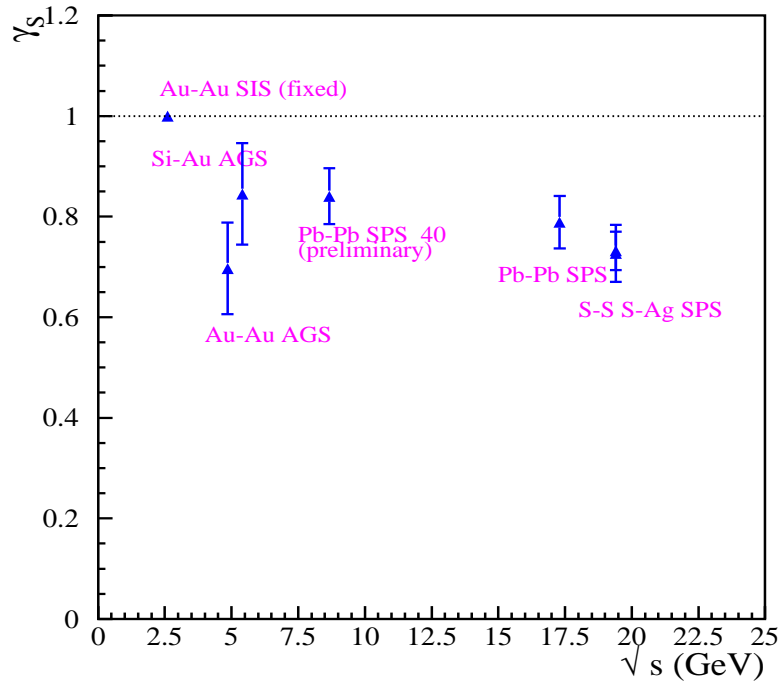
Phase Diagram

Hadronic freeze-out from SIS to SPS



Soppressione ed aumento relativo di stranezza

Strange Quark Matter 2001, J. Phys. G 28 (2002) 1553



Produzione di stranezza e modelli effettivi

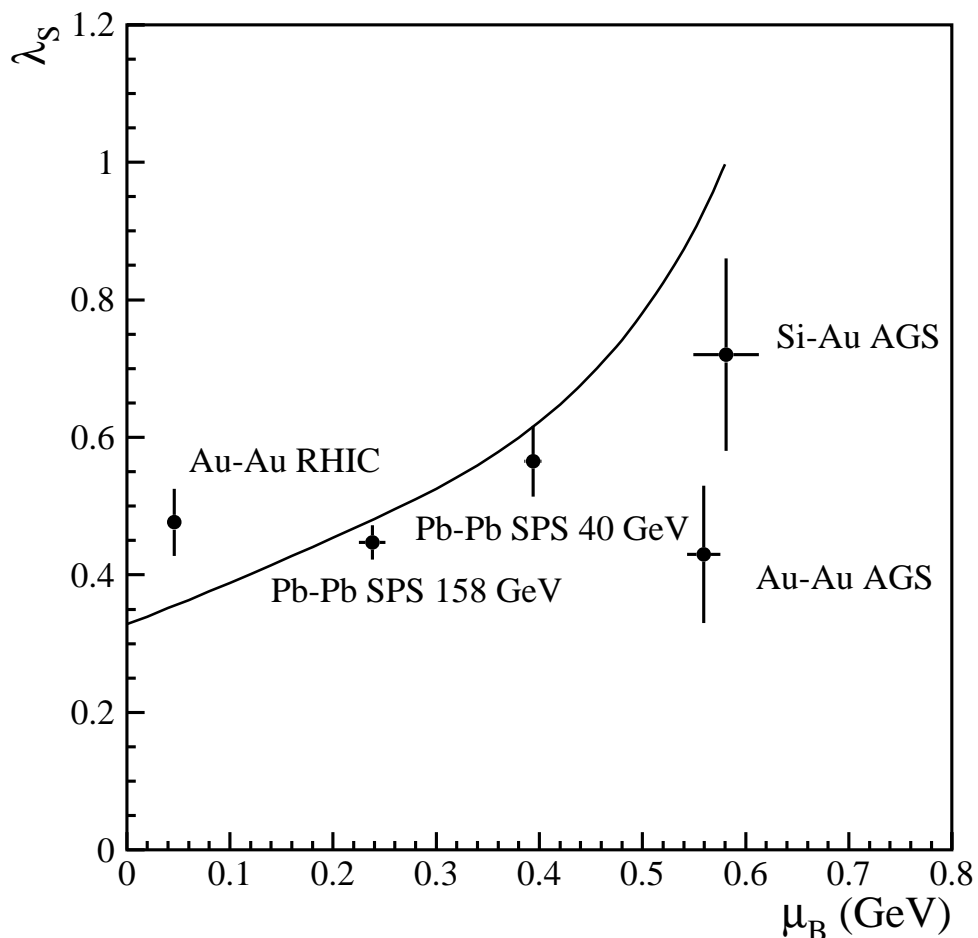
Interpretazione del rapporto s/u osservato con modello statistico per quarks costituenti (modello NJL) all'equilibrio chimico (F. B., G. Pettini 2001-2002)

- Collisioni di ioni pesanti: s/u determinato da densità barionica e temperatura
- Collisioni elementari: s/u determinato anche da dimensione del sistema e dimensione del singolo cluster singoletto di colore

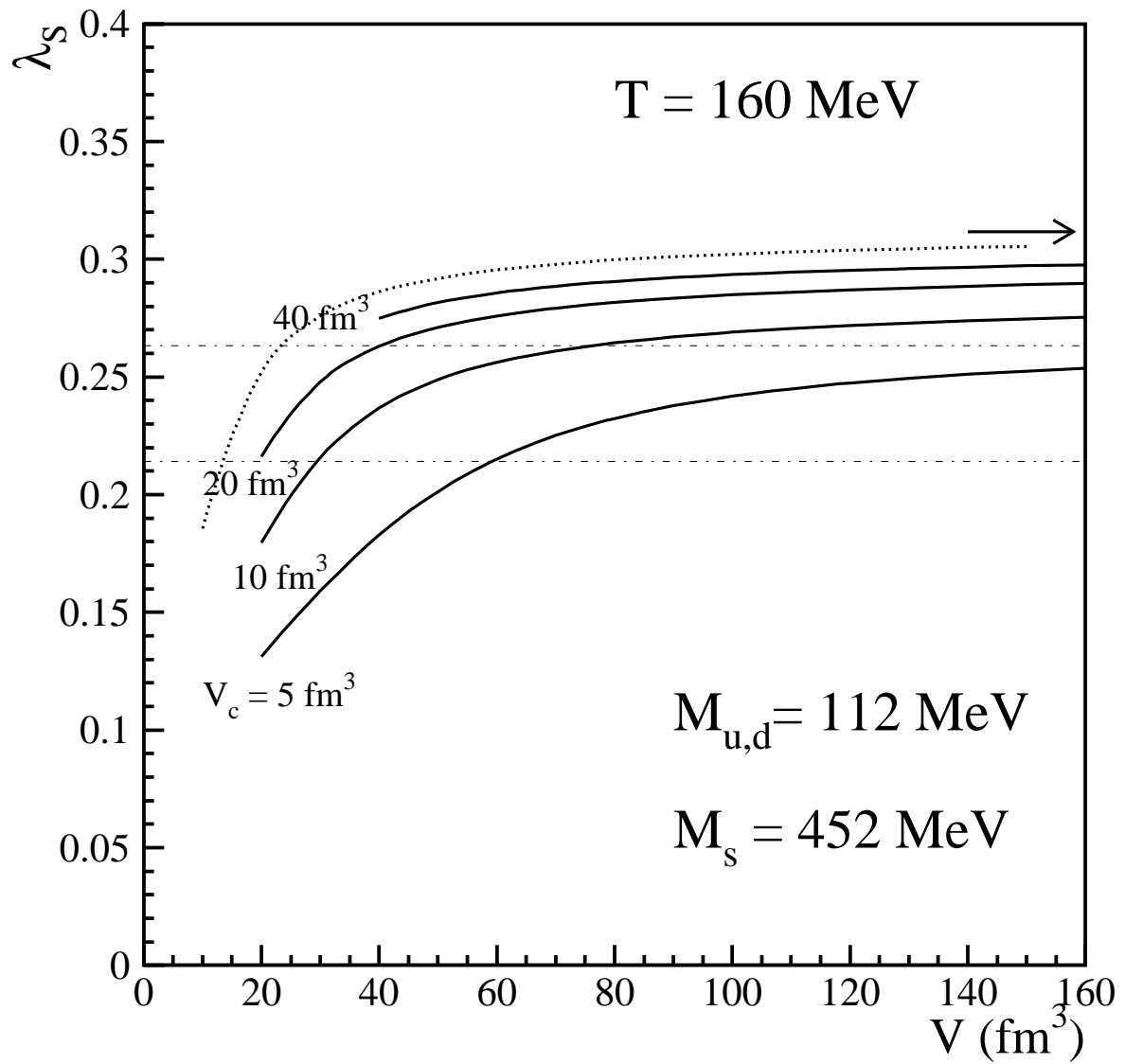
Un approccio diverso (ma con idee simili) proposto da:

O. Scavenius, J. Lenaghan, A. Dumitru 2001

F.B., G. Pettini, hep-ph 0204340



EFFETTO DEL VOLUME FINITO IN SISTEMA e^+e^-



Attività in corso e futura a Firenze

- ➔ Calcoli microcanonici per il modello statistico di adronizzazione (complicati) per testare il modello stesso a basse energie e nei canali esclusivi
- ➔ Realizzazione di un algoritmo di Monte-Carlo per il modello statistico e applicazione preliminare alle collisioni e^+e^-

F. B., A. Keranen, L. Ferroni (tesi di Laurea), R. Ugoccioni

- ➔ Uso di modelli effettivi diversi per calcolo s/u e confronto coi dati

L. Ravagli (tesi di Laurea), G. Pettini

PROPOSTA DI UNA INIZIATIVA SULLA FENOMENOLOGIA DELLE COLLISIONI DI IONI PESANTI E FISICA RELATIVA A PARTIRE DAL 2003:

FI61

Catania (1), Firenze (2), Torino (3), Trieste (1)