

# FISICA NUCLEARE

- Termodinamica nucleare
  - Descrizione termodinamica di un nucleo
  - Fasi della materia nucleare
  - Materia adronica
  - Diagramma di fase della materia nucleare
  - Quark gluon plasma

## Descrizione termodinamica di un nucleo

- **Temperatura nucleare**: Bethe e Weisskopf 1937 per descrivere evoluzione del nucleo composto. Concetto esteso a descrizione **materia nucleare** e sue transizioni di fase.
- Sviluppate tecniche sperimentali per estrarre caratteristiche **termiche** di sistemi nucleari altamente eccitati.

Mecc. statistica: 
$$\frac{1}{T} = \frac{\partial S(E, N)}{\partial E} = \frac{\partial \ln \rho(E, N)}{\partial E}$$
 ( $N$  = num. particelle d'energia  $E$ ;  $S$  = entropia;  $T$  = temperatura;  $\rho(E, N)$  = densità stati)

Applicabilità richiede:

1. sistema in completo equilibrio statistico [ogni stato di  $\rho(E, N)$  popolato con ugual probabilità];
2. conosciuta densità stati;

### ► **NON scontato per sistemi nucleari**

- Grado equilibrio in interazioni fra ioni pesanti ad alte/altissime energie non conoscibile a priori; evoluzione dinamica sistema ancora poco capita. Densità stati note solo a basse energie.

Inoltre:

- **Nucleo sistema microscopico**  $\Rightarrow$  **non utilizzabili sonde esterne**  $\Rightarrow$  info. su temp. da particelle e frammenti emessi assumendo che fossero parte del sistema equilibrato e contribuissero a densità stati del sistema (condizione necessaria perché siano rappresentative dell'intero sistema-nucleo).

- **Nucleo sistema isolato**: breve range interaz. impedisce scambio energia con ambiente. Sistema nucleo definito da:  $E = \text{cost.}$ ,  $N_{part} = \text{cost.}$   $\Rightarrow$  **ensemble stat.** appropriato è **microcanonico**. Arduo fissare sperim. energia, quella depositata può variare per le diverse interazioni, specie se diversi meccanismi conducono a emissione di stessi prodotti
- **Nucleo è sistema Fermionico**: nucleoni su diversi livelli, principio d'esclusione ne limita numero che possono ripartirsi energia eccitaz. disponibile. Numero gradi libertà dipende da energia d'eccitazione. Proprietà globali nucleo mutano dinamicamente con energia (... , densità cala con espansione termica, ...)
- **Nucleo elettricamente carico**: interaz. coulombiana a lungo range fra protoni introduce instabilità che possono ridurre temperatura critica
- **Nucleo si scalda e raffredda con processi dinamici**. Evidenze diverse da diverse condizioni o fasi di **freeze-out**. **Produz. framm. per evaporazione** contribuisce a rese d'emissione di frammenti leggeri; **espansione globale** influenza energie cinetiche dei frammenti
- **Parametri termodinamici ( $P$ ,  $V$ , potenziale chimico) NON sotto controllo**. NON si ha accesso sperimentale diretto a parametri termodinamici, bisogna ricorrere a **calcoli di modello**
- **Evidenze sperimentali modificate da decadimenti secondari**. Bisogna individuare prodotti finali poco affetti da decadimenti secondari, come ad esempio (IMF)

**Estrazione temperatura materia nucleare**, sfrutta tecniche, anche in funzione delle entità delle energie d'eccitazione, che possono raggrupparsi in:

- **Utilizzo popolazioni stati eccitati del sistema nucleo**. Si basa su **concetto gran-canonico**: temperatura nucleare estratta da rese dei cluster prodotti, assumendo distribuzione Boltzmann:

$$Y_i \propto e^{-E_i/T}$$

Tecniche più utilizzate:

- doppio rapporto delle rese isotopiche (S.Albergo et al., N.C. 89 (1985) 1; J.Pochodzalla et al., P.R.L. 75 (1995) 1040), detto anche **termometro isotopico**;
  - **popolazione stati eccitati**, legati oppure no (D.J. Morrissey, Ann.Rev.Nucl.Part.Sci. 44 (1994) 27);
  - le **rese isobariche** per sorgenti definite.
- **Approccio cinetico**. Si basa su **ensemble canonico**.  $T$  estratta da pendenze spettri in energia cinetica (**termometro delle pendenze**). Processi tipici: evaporazione termica di nucleoni o loro cluster da nucleo composto, o brusca disintegrazione di sorgente equilibrata con emissione di nuclei leggeri, nucleoni, particelle, raggi  $\gamma$ .

- **Approccio termico**. Energia eccitazione sistema al **freeze-out** estratta da misure cascata d'evaporazione da sorgente termalizzata in funzione del rapporto  $N/Z$ . Corrispondente temp. al **freeze-out** ottenuta dal valore dedotto per l'energia d'eccitazione

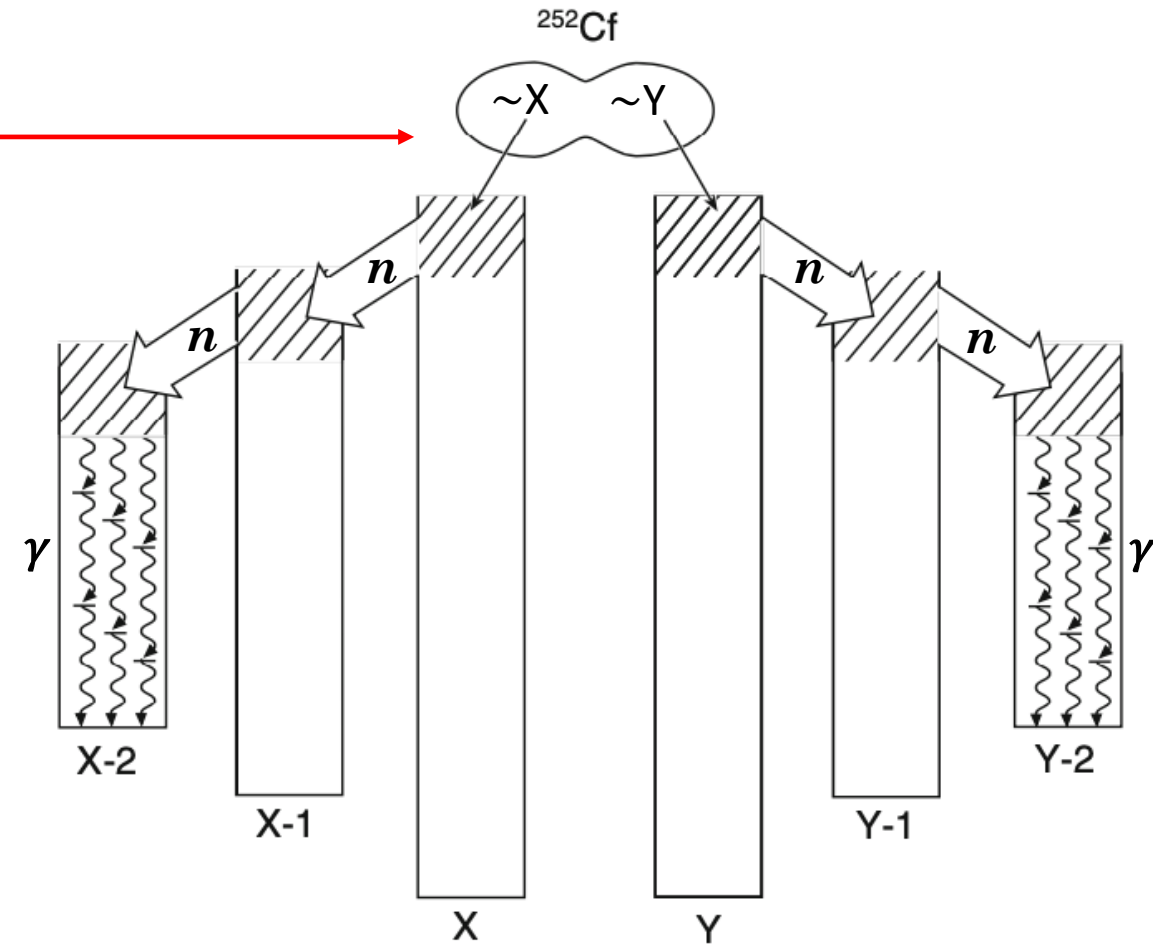
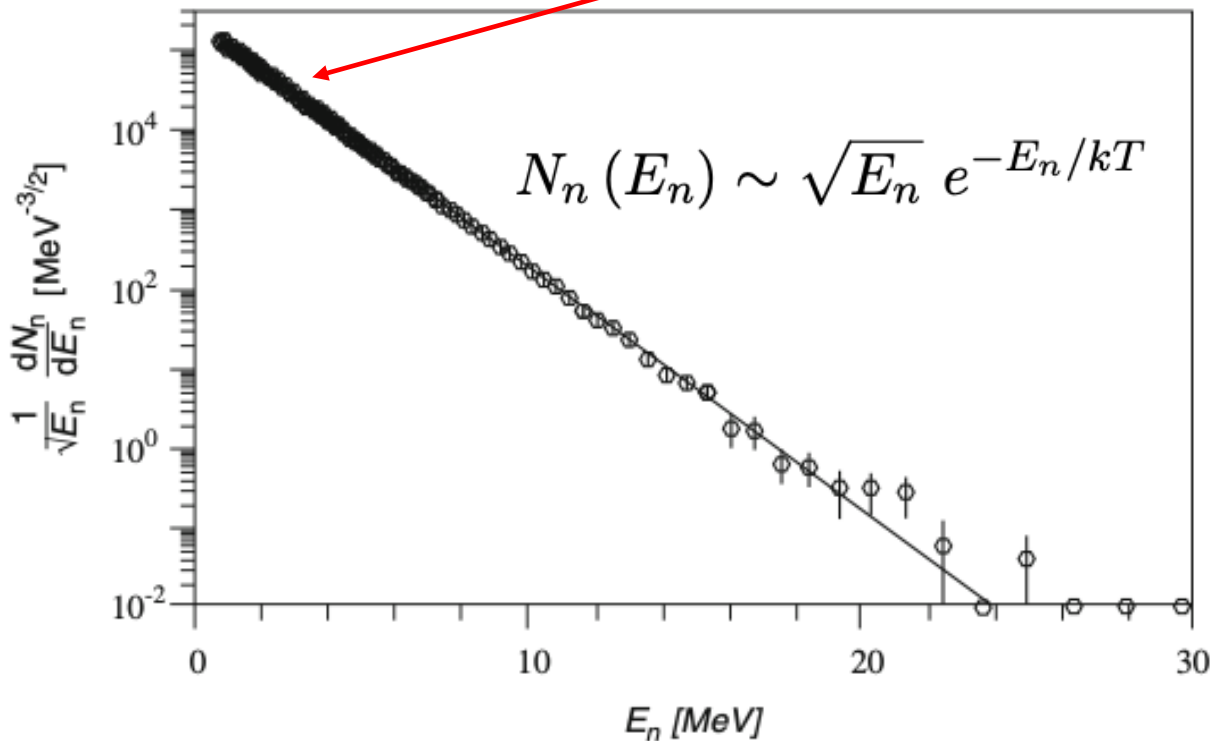
## Descrizione termodinamica d'un nucleo

- Nuclei in stato fond. o debolmente eccitato  $\rightleftharpoons$  sistema degenerare numericamente limitato di fermioni
- **Forza nucleare**  $\Rightarrow$  **campo medio** in cui nucleoni si muovono come particelle quasi libere
- **Modello shell**: dimens. finita e stati di singoli nucleoni caratterizzati da eccitaz. radiali e mom. angolari
- **T = 0** al sistema nello stato fondamentale
- Se nuclei molto eccitati, camm. libero medio nucleone nel nucleo  $\sim 1$  fm; nucleo  $\neq$  sistema fermionico degenerare, è  $\sim$  una sorta di liquido, tanto più al crescere delle eccitazioni
- **Naturale approccio statistico che ne descriva caratteristiche e comportamento con linguaggio termodinamico**
- **Eccitazione d'un nucleo caratterizzata da sua temperatura**. Ma si può associare  $T$  solo a sistema ampio ed equilibrato, e neppure nuclei più pesanti soddisfano. Nucleo eccitato lontano da equilibrio, piuttosto in raffreddamento rapido per emissione di nucleoni e  $\gamma$

- Si parla di **Materia nucleare**, sottintendendo che si estrapola ad ampi sistemi di nucleoni.  
Reazioni con **ioni pesanti**  $\Rightarrow$  formazione per breve tempo di **materia nucleare** di accresciute  $\rho$  e **T**
- Termodinamica materia nucleare importante anche per **cosmologia** e **astrofisica**.  
Primi stadi Universo ha attraversato fasi con  $\rho$  e **T** molti ordini di grandezza superiori agli attuali.  
Urti **ioni a energie relativistiche** riproducono in laboratorio, in parte e su scala molto ridotta, alcune condizioni che hanno caratterizzato la materia in quella fase
- Ad energie eccitazione sopra soglia produzione particelle, nucleo non ha stati discreti, solo **spettro continuo**.  
In regione transizione, attorno soglia, molte risonanze strette che però non danno info. strutturali sul nucleo.  
Esso in queste condizioni mostra **caos quantistico** il cui studio coinvolge metodi statistici e il concetto di **temperatura nucleare**
- Esempio: **fissione spontanea di  $^{252}\text{Cf}$** , con  $\tau \simeq 2.6 \text{ y}$  e **3.1% prob. di fissionare**. Ragionevole immaginare che durante separazione dei due frammenti si attui  **$\sim$  attrito** fra essi, e non tutta l'energia disponibile per fissione si converta in cinetica dei frammenti. Una parte incrementa energia interna di questi e li **scalda**

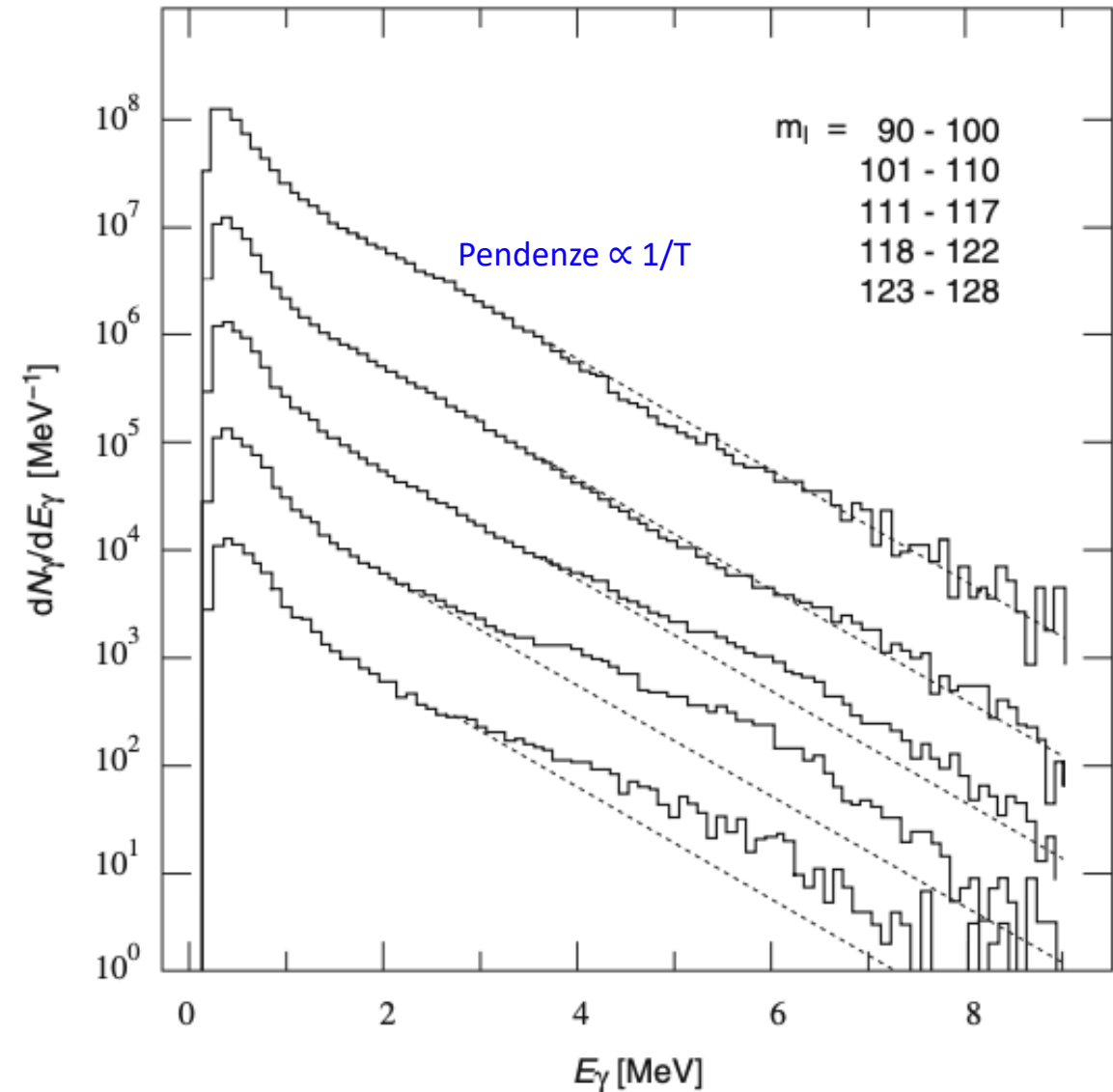
Successivo raffreddamento dei frammenti di fissione schematizzato in figura.

Inizia con emissione di  $n$  lenti, tipicamente 4 con en. kin. media di 2.1 MeV. Quando frammenti raffreddati sotto soglia d'emissione, ulteriore raffreddamento solo emettendo  $\gamma$ . Spettro  $n$  ha tipica forma **evaporativa Maxwelliana**



Schema processo raffredd. framm. fissione di  $^{252}\text{Cf}$ . Nucleo genitore si spezza in due frammenti con numeri di massa X ed Y, che si raffreddano emettendo dapprima neutroni e quindi  $\gamma$ .

- Discesa exp. spettro caratterizzata da **T** del sistema; per  $^{252}\text{Cf}$   $kT = 1.41 \text{ MeV}$
- Frammenti fissione emessi da nuclei diversi hanno anche **T** diverse, come  $^{236}\text{U}$ , con  $kT = 1.29 \text{ MeV}$ .  
In fig. spettri  $\gamma$  di diseccitazione dei framm. di fissione.  
Qui ogni fissione spontanea produce in media **20  $\gamma$** , l'80% dei quali ha energie **< 1 MeV**
- **Somiglianza con tipico spettro evaporativo !**
- Forte pendenza spettro  $\gamma$ , rispetto ai  $n$ , indica che durante emissione  $\gamma$ , che avviene in condizioni di minor eccitazione nucleare, la **T** del sistema è inferiore
- Forma spettri si può derivare da studio statistico della densità degli stati di un gas di Fermi degenere

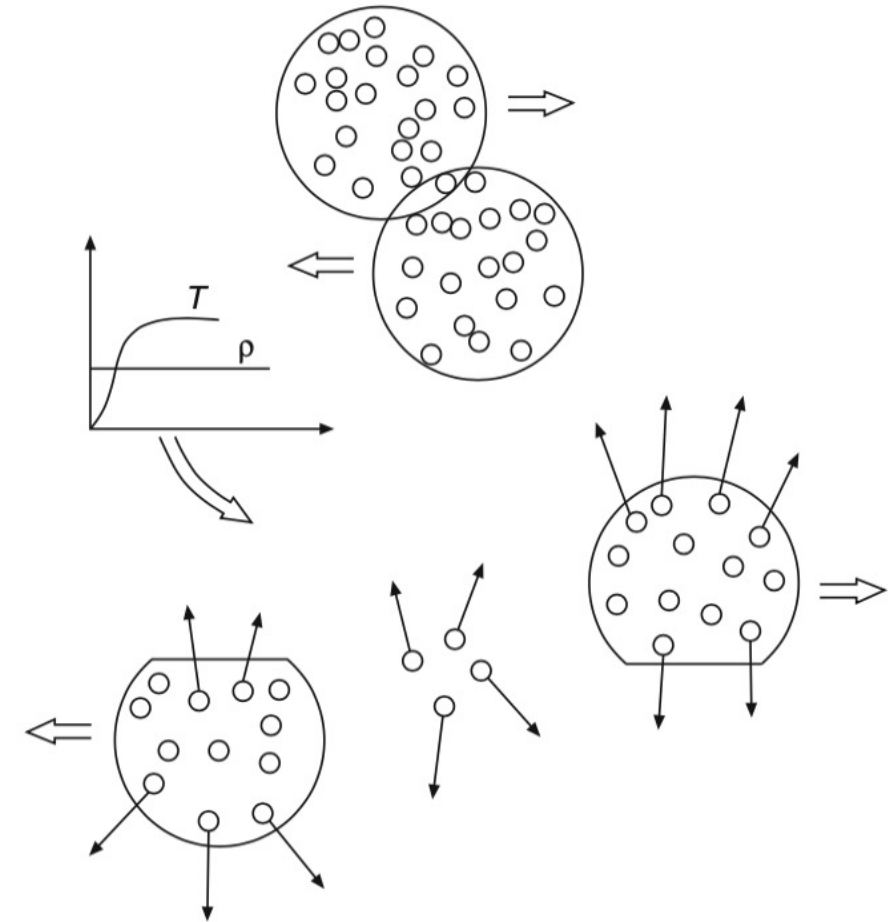




## Fasi della materia nucleare

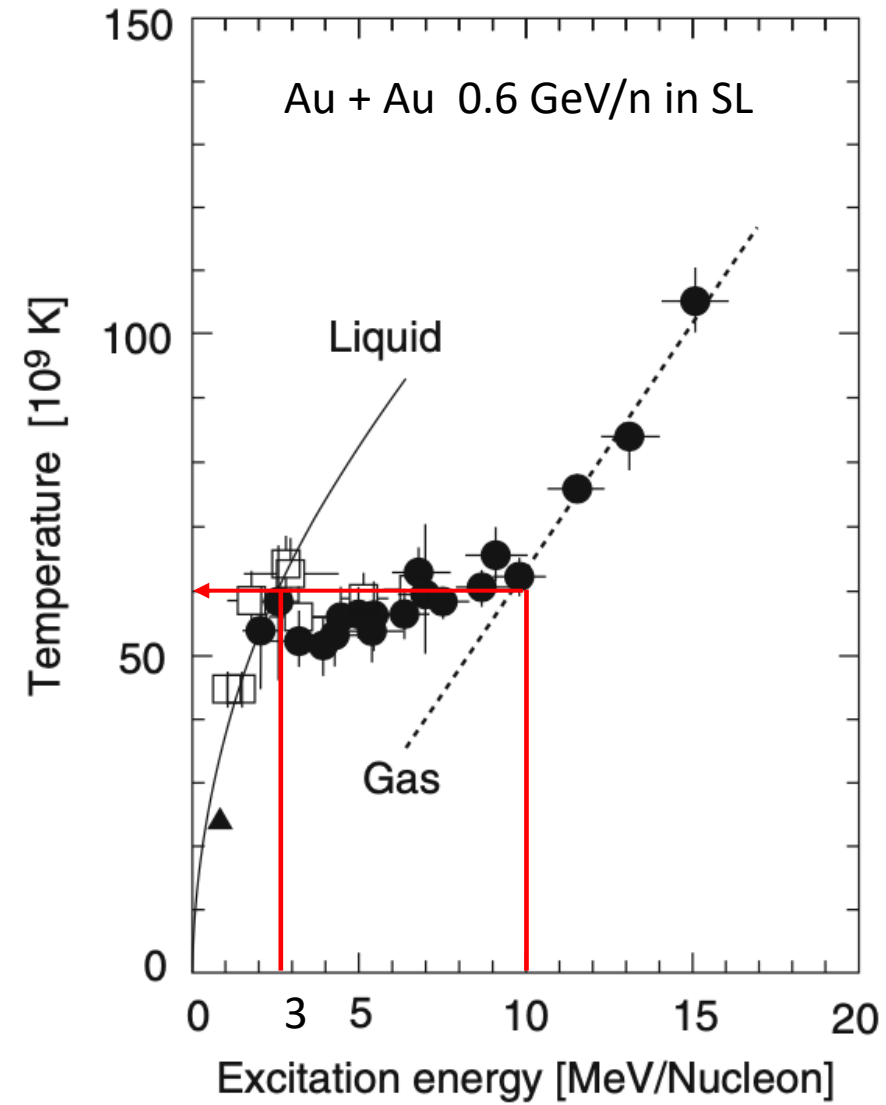
- **Reazioni periferiche** fra **H.I.** efficaci per **riscaldare** nuclei in modo **controllabile**. Interazione **radente**  $\Rightarrow$  due frammenti principali **scaldati** da **"attrito"** sviluppatosi durante la reazione
- **T** frammenti da **distrib. maxwell** dei prodotti di decadimento; **energia totale** sistema si determina **rivelando tutte le particelle** prodotte nello stato finale (**Sistemi di rivelazione "completi"**)
- In **SL**, frammento principale del proiettile mantiene  $\sim$  stessa direzione e verso del genitore  $\Rightarrow$  suoi prodotti di decadimento si possono distinguere cinematicamente da quelli del frammento bersaglio e dai nucleoni di evaporazione emessi durante interazione radente
  - Si separano e distinguono così energia trasportata da frammenti, dall'energia persa per **attrito** durante l'interazione

**Esempi:** **Au + Au** a 600 MeV/n  $\Rightarrow$  prodotti di reazione tracciati con rivelatore a  $4\pi$ .  
**Xe + Cu** a  $\sim$  76 MeV/n  $\Rightarrow$  in cinematica inversa ...



In fig. la **curva calorica** ( $T$  dei frammenti % energia/n fornita al sistema)

- Per  $E/A$  fino  $\sim 3 \text{ MeV/n}$  rapida crescita di  $T$
  - Per  $E/A$  compresi fra circa  $3 \text{ MeV/n}$  e  $10 \text{ MeV/n}$ ,  $T \sim \text{cost.}$
  - Poi  $T$  ricomincia a crescere rapidamente
- Ricorda evaporazione acqua vicino punto di ebollizione, durante transizione fase **liquido % vapore**, con  $T = \text{cost.}$  mentre viene fornita energia al sistema finché tutto il liquido non si è convertito in vapore
- Naturale interpretare dipendenza di  $T$  del sistema da energia fornita come **trans. fase materia nucleare** da stato liquido a vapore-equivalente
- Concetti a prestito da **termodinamica sistemi in equilibrio**, cioè termalizzati
- Raggiunta  $E/A \sim 3 \text{ MeV/n}$ , attorno nucleo si forma strato nucleoni in fase **vapore/gas** che non sfugge ma resta in equilibrio con parte più coesa del nucleo, scambiando con essa nucleoni. Tale **gas di nucleoni** potrà essere ulteriormente scaldato solo quando tutto il liquido nucleonico sarà nella condizione di **vapore/gas**



## Materia adronica

**Urti centrali** fra **H.I.** con energie  $\approx 10 \text{ GeV/n}$   $\Rightarrow$  molti  $\pi$  carichi e neutri.

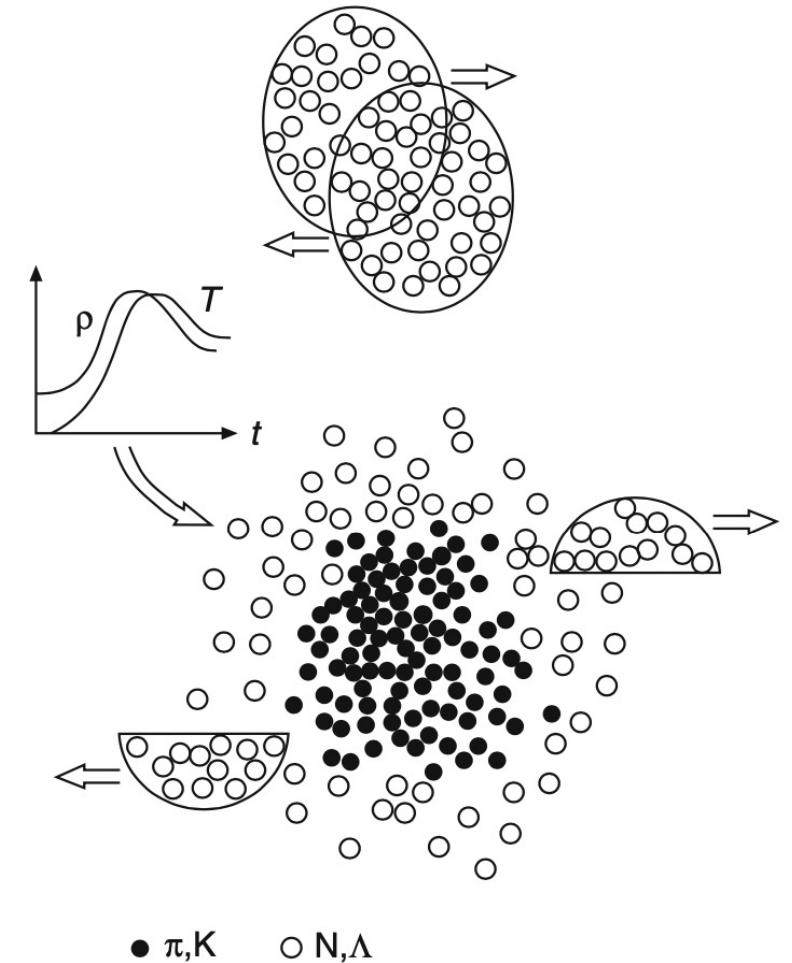
- Eccitazione nucleonica con formazione di  $\Delta$ ,  $N+N \rightarrow \Delta+N$ ,  $\sigma_{\Delta} = 40 \text{ mb}$ ;
- **lunghezza d'interazione**  $\lambda \approx 1/\sigma\rho_N$  nel nucleo  $\sim 1 \text{ fm}$

- Quindi in urto fra **H.I.**  $\Rightarrow$  urti multipli e per energie suff. alte ogni nucleone coinvolto sarà eccitato in media almeno una volta allo stato di **barione  $\Delta$**
- Termodinamicamente equivale ad **apertura nuovo grado di libertà**
- $\Delta$  decadono rapidamente ma vengono continuamente riformate tramite reazione inversa  $\pi+N \rightarrow \Delta$ . **Creazione e decadimento**,  $\pi+N \leftrightarrow \Delta$ , raggiungono una sorta di **equilibrio dinamico**. Questa miscela di **nucleoni**, barioni  $\Delta$ ,  $\pi$  ed eventualmente **altri mesoni**, è detta **materia adronica**

- I  $\pi$ , per loro relativamente piccola massa, principali responsabili di scambi energetici in materia adronica.

Da loro studio **densità d'energia** e **T** della materia adronica prodotta in urto fra due ioni

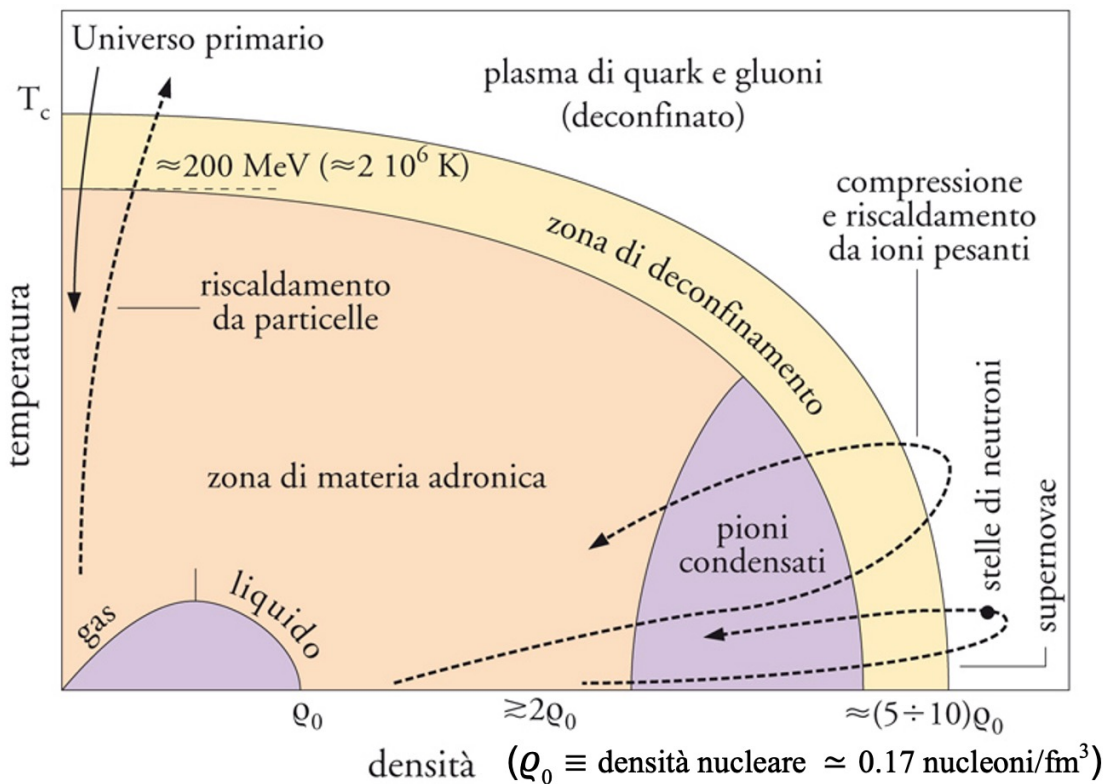
- **T** si ottengono da distribuzioni energetiche dei  $\pi$  emessi  $\perp$  rispetto al fascio, che mostrano andamento esponenziale tipico di distribuzione di **Boltzman**



$$\frac{dN}{dE_{kin}} \propto e^{-E_{kin}/kT}$$

- Sperimentalmente  $kT$  della **radiazione pionica**  $\approx 150 \text{ MeV}$ , indep. da quanto salgano energie dei nuclei collidenti  $\Rightarrow$  materia nucleare eccitata da un certo punto in poi si espande isotermicamente
- **Sotto  $kT \approx 150 \text{ MeV}$**  probabilità di interazioni adroniche per  $\pi$ , quindi di scambi energetici fra essi e altre particelle presenti, **decresce rapidamente**  $\Rightarrow$  **freezing out** pionico

## Diagramma di fase della materia nucleare



- Parallelo con diagramma fase per materia ordinaria
  - Nuclei in stato fond. sono freddi: densità  $\rho_N$  e  $kT = 0$
  - Stella ai neutroni ha anche  $kT = 0$ , ma  $\rho \sim 5\rho_N \div 10\rho_N$
- Fornendogli gradualmente energia, un nucleo si scalda ed emette nucleoni o loro piccoli cluster  $\sim$  come goccia di liquido evapora atomi o molecole
- Confinando materia ordinaria e fornendole energia, si eccitano gradi di libertà interni (ecc. rotazionali o vibrazionali)
- I nucleoni nei nuclei si eccitano come risonanze  $\Delta$  o stati a energie superiori. Miscuglio di nucleoni,  $\pi$  e altro che consegue ai decadimenti è **materia adronica**

## Quark gluon plasma

- Dissociando completamente atomo in **nucleo** ed **elettroni** si ha **plasma atomico**; dissociando completamente nucleoni e pioni d'un nucleo in **quark** e **gluoni** si ha **quark-gluon plasma (QGP)**

... si osservi che **plasma atomico** ha volume maggiore degli atomi originari; **QGP**, per confinamento quark e concetto di libertà asintotica, ha volume minore ...

A densità nucleare standard ogni nucleone dispone di  $\sim 6 \text{ fm}^3$ , e ne occupa col proprio volume circa  $1/3$

- Immaginando di comprimere un nucleo **senza scaldarlo** ( $T = 0$ ) fino ad alcune volte  $\rho_N$ , i singoli nucleoni tendono a sovrapporsi l'un l'altro perdendo gradualmente la propria individualità. A questo punto quark e gluoni dovrebbero **muoversi in modo  $\sim$  libero** nell'intero volume comune costituitosi
- Si può seguire un altro percorso nel diagramma di fase, partendo da materia nucleare standard e seguendo una via  $\sim$  parallela all'asse verticale delle **T**, accrescendo di fatto **T** senza però modificare la densità. Raggiunti  $kT \approx 200 \text{ MeV}$  ogni interazione nucleone-nucleone dispone di energia sufficiente, per effetto della produzione di  **$\pi$** , ad accrescere densità adronica e frequenza degli urti mutui, tanto da rendere **impossibile** assegnare un **q** o un **g** a uno specifico adrone.  
Lo Stato raggiunto è detto **quark-gluon plasma**