

FISICA NUCLEARE

- Termodinamica nucleare
 - Descrizione termodinamica di un nucleo
 - Fasi della materia nucleare: transizione di fase liquido-vapore
 - 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 **materia nucleare** e sue **transizioni di fase**
- Sviluppate tecniche 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 = particelle d'energia E ; S = entropia;
 T = temperatura; $\rho(E, N)$ = densità stati)

Applicabilità richiede:

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

► **NON scontato per sistemi nucleari**

- Grado equilibrio in interazioni fra ioni ad alte/altissime energie non conoscibile a priori; evoluzione dinamica sistema ancora poco capita. Densità stati note solo a basse energie
- **Nucleo sistema microscopico** \Rightarrow **non utilizzabili sonde esterne** \Rightarrow info. su temp. da particelle e framm. emessi, assumendoli parte del sistema equilibrato e che contribuissero a sua densità stati (condiz. necess. perché siano rappresentativi dell'intero sistema-nucleo)

- **Nucleo sistema isolato**: breve range interaz. \Rightarrow no scambio energia con ambiente
Sistema definito da: $E = \text{cost.}$, $N_{part} = \text{cost.}$ \Rightarrow **ensemble stat.** appropriato è **microcanonico**
Arduo fissare sperim. energia, quella depositata varia per le diverse interazioni, specie se diversi meccanismi conducono a emissione di stessi prodotti
- **Nucleo sistema Fermionico**: nucleoni su diversi livelli, princ. esclusione limita numero che possono ripartirsi en. eccitaz. disponibile. # gradi libertà dipende da en. d'eccitazione. Proprietà globali nucleo mutano dinamicam. con energia (... densità cala con espansione termica ...)
- **Nucleo carico**: interaz. coulomb. a lungo range fra protoni introduce instabilità che possono ridurre temp. critica
- **Nucleo si scalda e raffredda con processi dinamici**. Evidenze diverse da diverse condizioni o fasi di **freeze-out**. **Produz. framm. evaporativi** contribuisce a rese d'emissione di framm. leggeri; **espansione globale** influenza energie cinetiche 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: tecniche, anche in funzione delle energie d'eccitazione, che possono raggrupparsi in:

- **Utilizzo popolazioni stati eccitati del sistema nucleo.** Si basa su **concetto gran-canonical**: 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)
 - **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; brusca disintegrazione di sorgente equilibrata con emissione di nuclei leggeri, nucleoni, particelle, raggi γ

- **Approccio termico**. En. eccitazione sistema al **freeze-out** da misure della cascata evaporativa da sorgente termalizzata in funzione di N/Z . Corrispondente temp. al **freeze-out** ottenuta dal valore dedotto per energia d'eccitazione

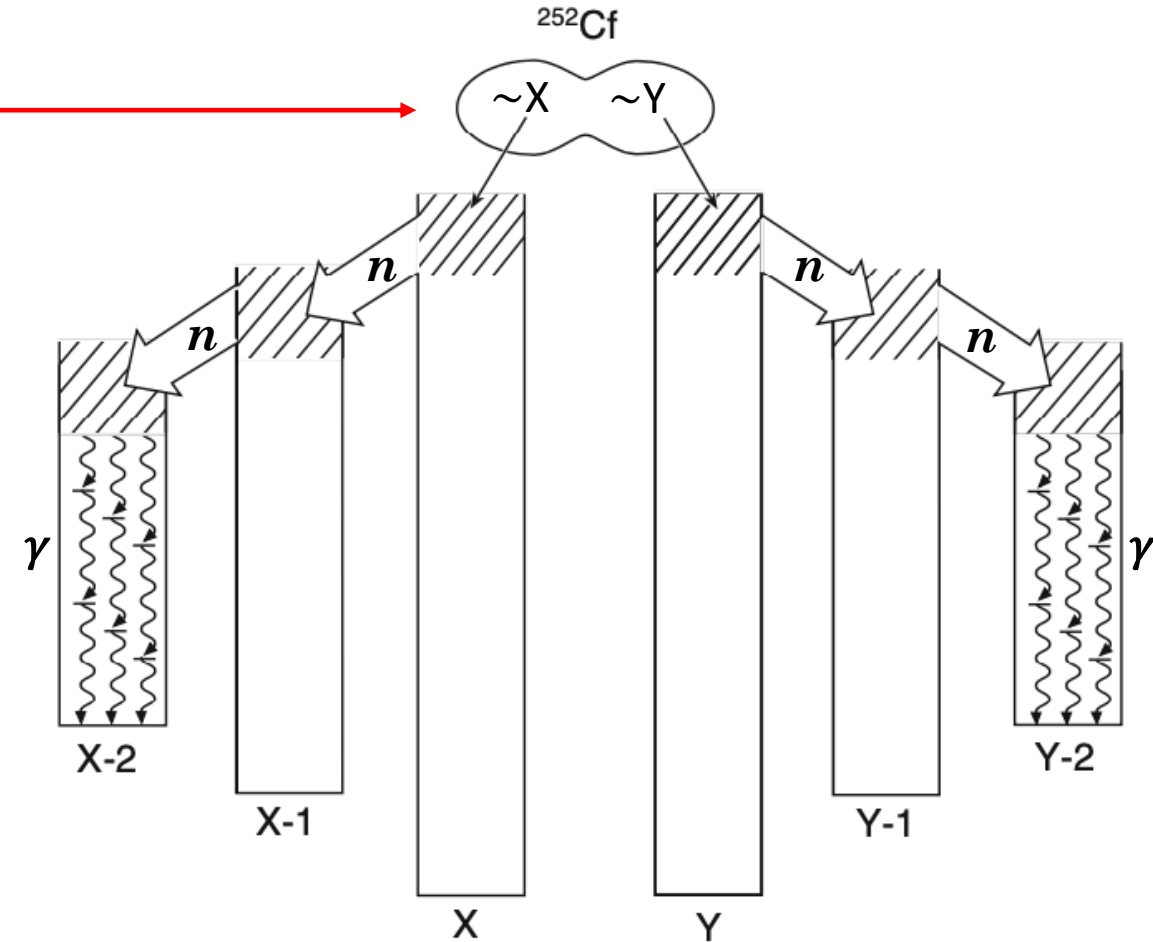
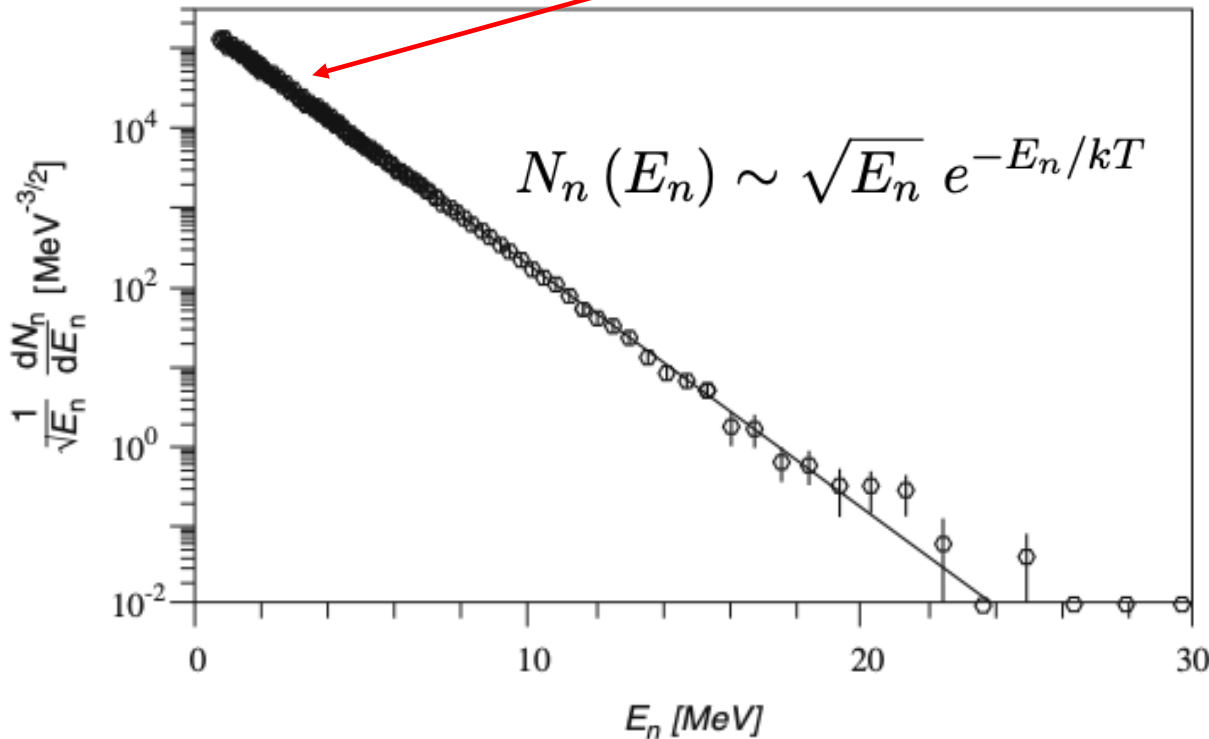
Descrizione termodinamica d'un nucleo

- Nuclei in stato fond. o debolmente eccitato \Leftrightarrow 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** \Rightarrow sistema in stato fondamentale
- Nuclei molto eccitati \Rightarrow camm. libero medio nucleone in nucleo ~ 1 fm; nucleo \neq sist. 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 nucleo caratterizzata da sua temperatura**. Si può associare **T** solo a sistemi ampi ed equilibrati, e neppure nuclei più pesanti soddisfano. Nucleo eccitato è lontano da equilibrio, in raffreddamento rapido per emissione di **nucleoni** e γ

- 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 ρ e **T**
- Termodinamica materia nucleare importante per **cosmologia** e **astrofisica**
Universo iniziale ha attraversato fasi con ρ e **T** molti ordini di grandezza superiori agli attuali.
Urti **ioni a energie relativistiche** riproducono in lab., in parte e su scala molto ridotta, alcune condizioni che hanno caratterizzato la materia in quella fase
- Ad energie ecc. 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**
- Es.: **fissione spontanea di ^{252}Cf** , con $\tau \simeq 2.6 \text{ y}$ e **3.1% prob. di fissione**. Ragionevole immaginare che durante separazione dei due frammenti si attui **\sim attrito** fra essi, e non tutta l'energia disponibile per fissione si converte in cinetica dei frammenti. Una parte incrementa energia interna di questi e li **scalda**

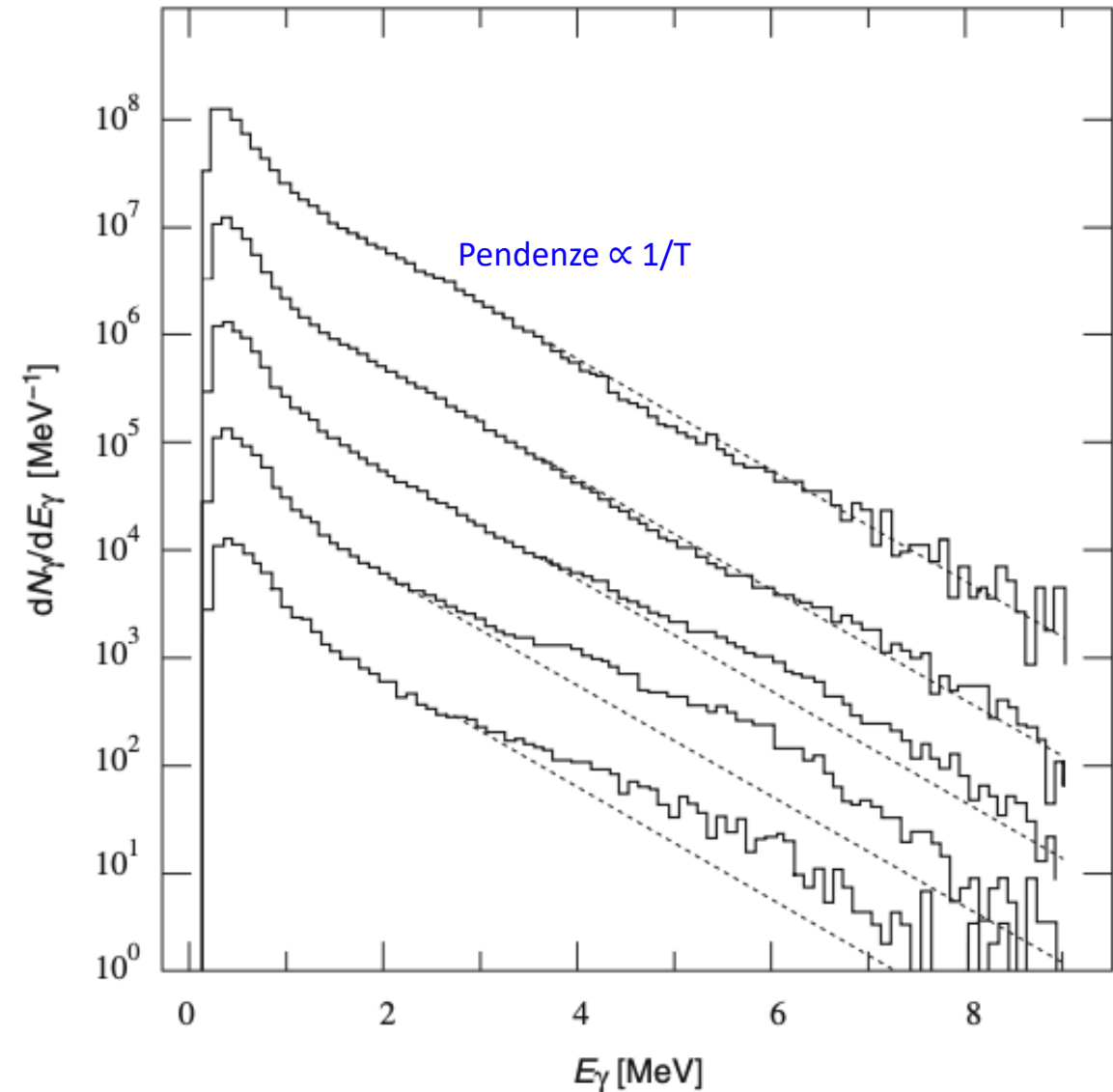
Successivo raffreddamento dei frammenti di fissione schematizzato in figura.

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



Schema raffredd. framm. fissione di ^{252}Cf .
Genitore si spezza in due frammenti con masse X ed Y, che si raffreddano emettendo dapprima n e quindi γ .

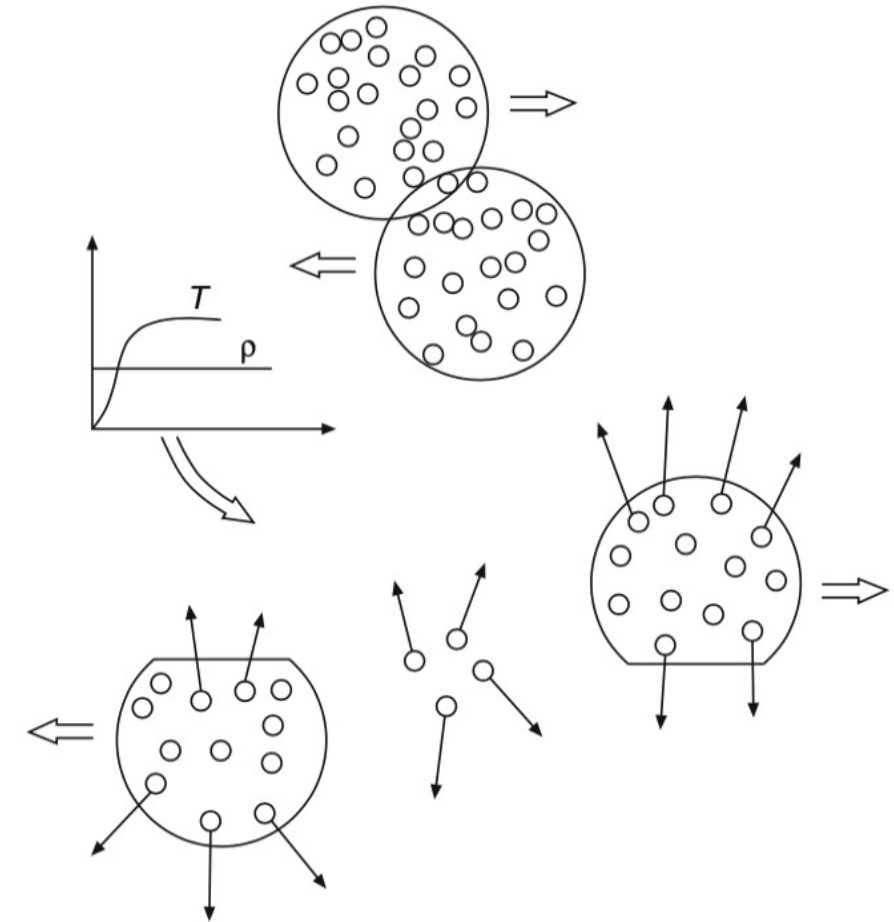
- Discesa exp. spettro caratterizzata da **T** del sistema; per ^{252}Cf $kT = 1.41 \text{ MeV}$
- Frammenti fissione da nuclei diversi hanno **T** diverse, come ^{236}U , con $kT = 1.29 \text{ MeV}$.
In fig. spettri γ di diseccitazione di framm. di fissione. Qui ogni fissione spontanea produce $\sim 20 \gamma$, 80% dei quali ha energie $< 1 \text{ MeV}$
- **Somiglia tipico spettro evaporativo !**
- Forte pendenza spettro γ , rispetto n , indica che durante emissione γ , in condizioni di minor eccitazione, la **T** del sistema è inferiore
- Forma spettri da studio statistico della densità degli stati di un gas di Fermi degenerare



Fasi della materia nucleare

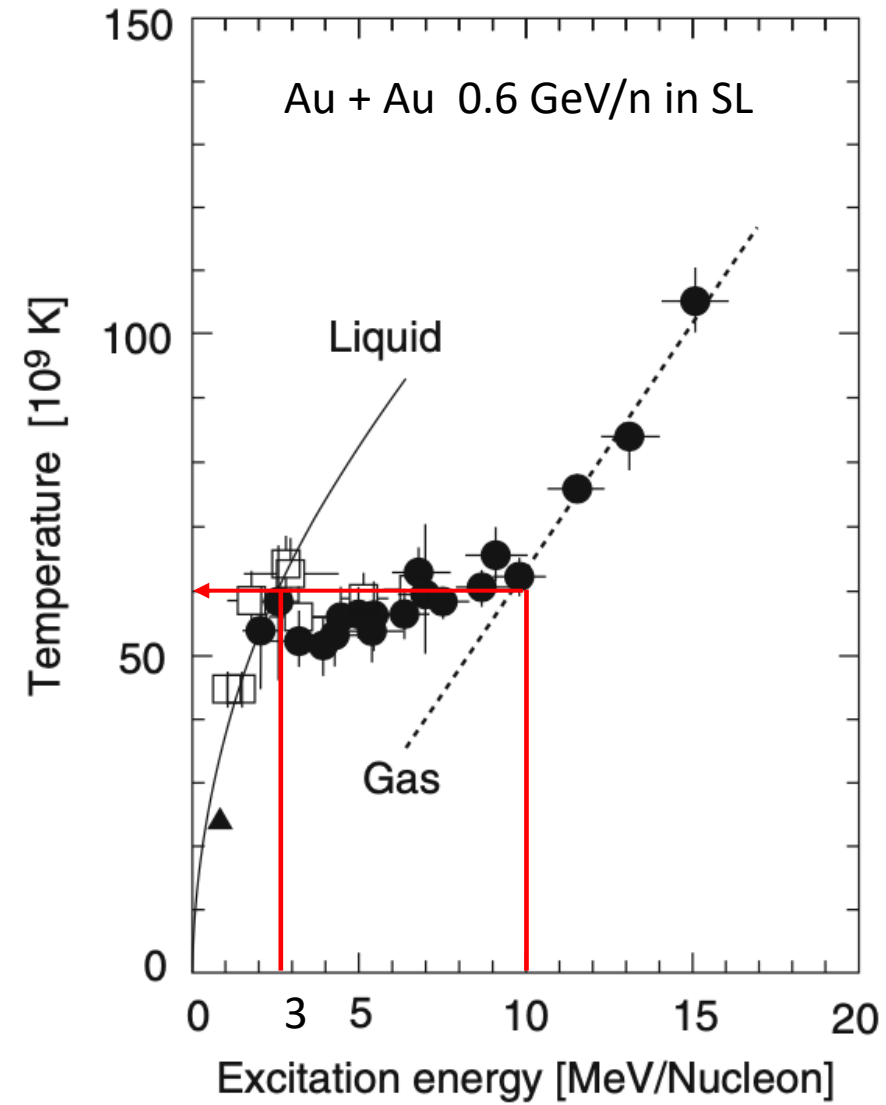
- **Reazioni periferiche** fra **H.I.** efficaci per **scaldare** nuclei in modo **controllabile**. Interazione **radente** \Rightarrow 2 frammenti principali **scaldati** da **"attrito"** sviluppatosi durante la reazione
- **T** frammenti da **distr. maxwell** dei prodotti di decadimento; **en. tot.** sistema si determina **rivelando tutte le particelle** prodotte nello stato finale (**Sistemi di rivelazione "completi"**)
- In **SL**, frammento principale del proiettile mantiene \sim direzione e verso del genitore \Rightarrow **suoi prodotti decad.** si distinguono 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 4π
Xe + Cu a \sim 76 MeV/n \Rightarrow in **cinematica inversa** ...



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

- E/A fino $\sim 3 \text{ MeV/n}$ \Rightarrow rapida crescita di T
 - E/A fra $\sim 3 \text{ MeV/n}$ e 10 MeV/n $\Rightarrow T \sim \text{cost.}$
 - Poi T ricomincia a crescere rapidamente
- Ricorda evaporazione acqua vicino punto ebollizione, durante trans. 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 da E 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 $\gtrsim 10 \text{ GeV/n} \Rightarrow$ molti π

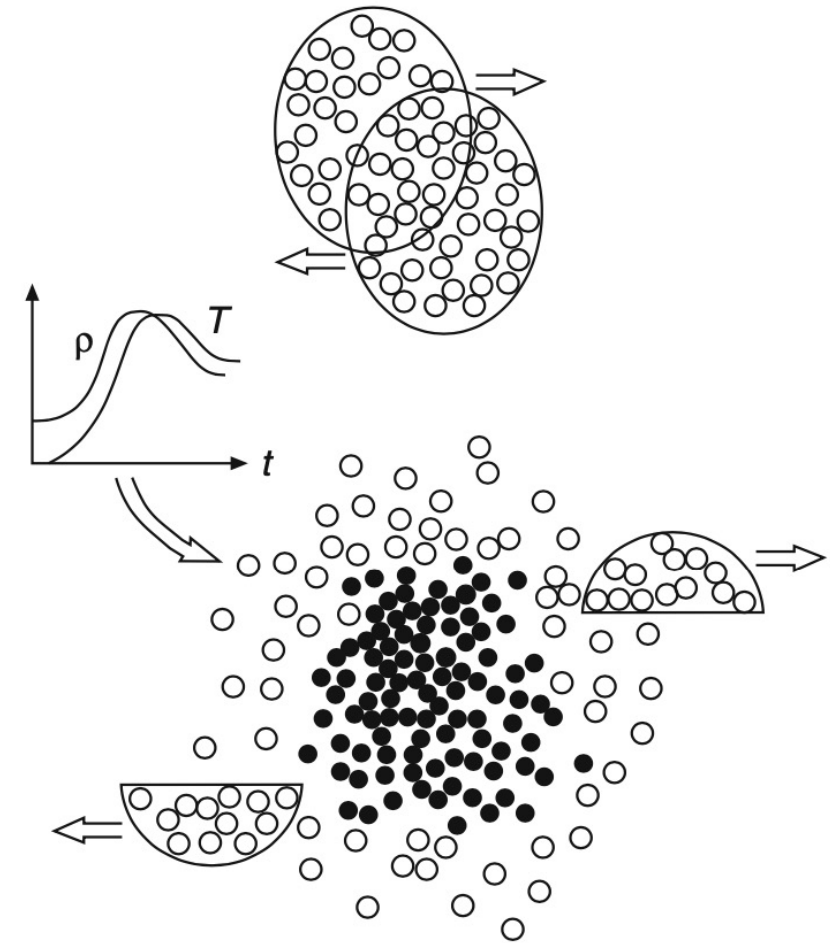
- Eccitazione nucleonica con formazione di Δ , $N+N \rightarrow \Delta+N$, $\sigma_{\Delta} = 40 \text{ mb}$;
- **Lunghezza d'interazione** nel nucleo: $\lambda \approx 1/\sigma\rho_N \sim 1 \text{ fm}$

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

- π , data piccola massa, principali responsabili scambi energetici in materia adronica ● π, K ○ N, Δ
Loro studio \Rightarrow **densità d'energia** e **T** materia adronica prodotta in urto fra ioni

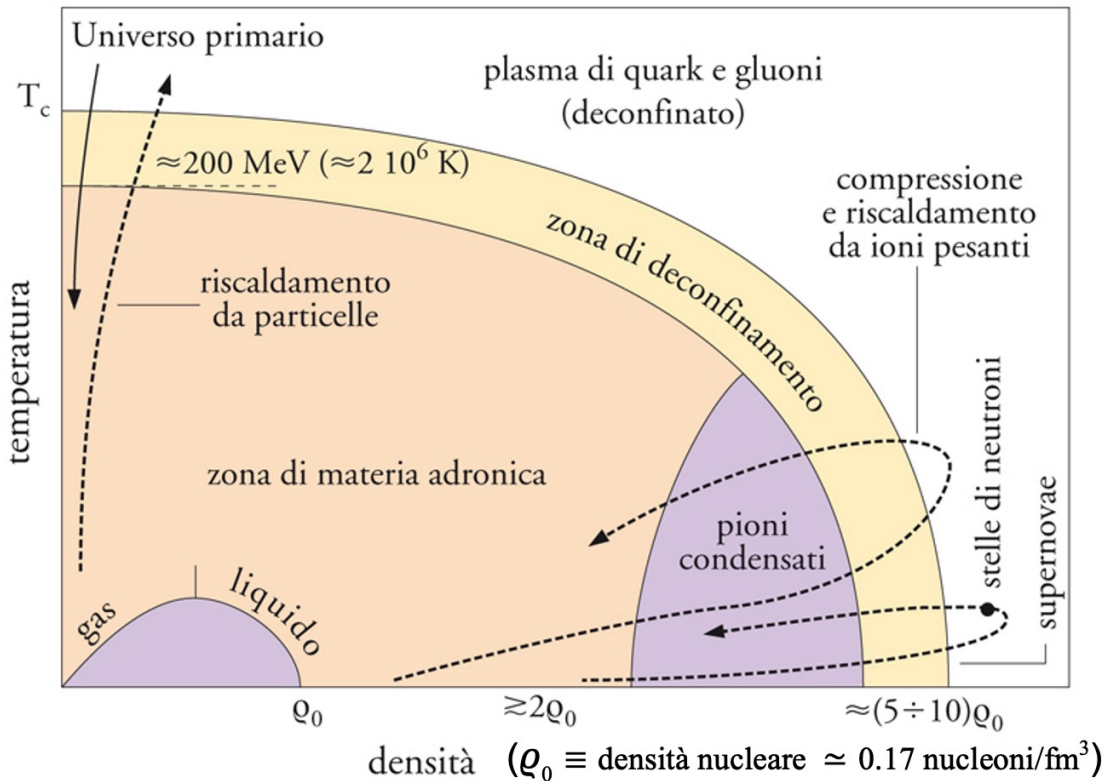
- **T** da distribuzioni energetiche dei π emessi **L** rispetto al fascio, che mostrano andamento esponenziale tipico di distribuzione di **Boltzman**

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



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

Diagramma di fase della materia nucleare



- Parallelo con materia ordinaria
 - Nuclei in stato fond. \Rightarrow freddi: densità ρ_N e $kT = 0$
 - Stella neutroni ha anche $kT = 0$, ma $\rho \sim 5\rho_N \div 10\rho_N$
- Fornendogli gradualmente energia, un nucleo si riscalda 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 Δ o stati a energie superiori. Miscuglio di nucleoni, π 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)**

... **plasma atomico** ha volume maggiore degli atomi originari; **QGP**, per confinamento quark e ... 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 ρ_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 (core n -stars)
- Altro percorso nel diagramma di fase, partendo da materia nucleare standard per via \sim parallela all'asse verticale delle T , accrescendo di fatto T senza modificare la densità. Raggiunti $kT \approx 200 \text{ MeV}$ ogni interazione nucleone-nucleone dispone di energia sufficiente, per effetto produzione di π , ad accrescere densità adronica e frequenza urti mutui, tanto da rendere **impossibile assegnare un q o un g a uno specifico adrone**

Stato così raggiunto è detto **quark-gluon plasma**