

# Nucl-ex

## 1 Introduzione

Il gruppo di studio Nucl-ex ha svolto diversi incontri fra settembre 2001 e giugno 2002 allo scopo di scambiare informazioni sulle esperienze nello studio delle reazioni nucleari fra diversi gruppi che hanno lavorato in questo campo di ricerca.

Uno degli scopi del gruppo di studio era la verifica della possibilità di un lavoro comune sugli argomenti di maggiore attualità.

È stato trovato un interesse comune fra ricercatori provenienti dagli esperimenti Fiasco, Strega e Costhir, che si pongono come obiettivo lo studio di aspetti dinamici e termodinamici delle reazioni nucleari fra ioni pesanti, tramite esperimenti da effettuarsi presso i Laboratori Nazionali di Fisica Nucleare dell'INFN, Legnaro e Catania.

L'apparato che ci si prefigge di utilizzare ai Laboratori di Legnaro è Garfield, con opportune migliorie.

Per quanto riguarda i Laboratori del Sud si intende chiedere al gruppo Chimera di poter utilizzare l'apparato per alcune misure. Verrà anche valutata la possibilità di utilizzare in futuro, quando saranno completate le nuove sale sperimentali, l'apparato Fiasco con migliorie, oppure con altri apparati ad esso accoppiati.

Un'attività in sviluppo presso i Laboratori del Sud, a cui la collaborazione Nucl-ex è fortemente interessata ed ha aderito per le prime prove sperimentali, è il progetto FRIBS. Tale progetto prevede lo studio della produzione di fasci secondari non stabili, prodotti da frammentazione del proiettile (accelerato dal CS). La collaborazione è interessata al proseguimento di queste misure, in modo da poter eventualmente programmare esperimenti con fasci esotici ad energie intermedie, in linea con le attuali tendenze della ricerca europea di fisica nucleare.

L'esperimento Nucl-ex è stato suddiviso in due linee di ricerca distinte (termodinamica e dinamica), ma con aspetti comuni.

Complessivamente partecipano 37 ricercatori delle Sezioni di Bologna, Firenze, Laboratori Nazionali di Legnaro, Milano, Napoli e Trieste con 23.1 FTE.

Responsabile presso la CSNIII è Mauro Bruno (INFN Bologna), responsabile della parte di dinamica è Alessandro Olmi (INFN Firenze) e responsabili della parte di termodinamica sono Fabiana Gramegna (INFN-LNL) e Arialdo Moroni (INFN Milano).

- **Termodinamica**

La proposta indica una linea di ricerca per i prossimi quattro anni nei quali

saranno effettuati una serie di esperimenti ai due laboratori con fasci stabili ad energie comprese fra 10 e 35 AMeV.

Parallelamente verrà sviluppato uno studio di utilizzazione di elettronica digitale in modo da aumentare le potenzialità dell'apparato Garfield.

Il numero totale di ricercatori partecipanti alla parte termodinamica è di 33 con 13.5 FTE.

- **Dinamica**

Nel prossimo anno ci si prefigge l'obiettivo di studiare un piano dettagliato per investigare gli aspetti dinamici delle reazioni nucleari fra ioni pesanti, in modo da essere in grado, nel giugno 2003, di fare un piano per i 3 anni seguenti.

Il numero totale di ricercatori partecipanti alla parte di dinamica è di 19 con 9.6 FTE.

## 2 Termodinamica

### 2.1 Transizioni di fase

L'identificazione sperimentale delle diverse transizioni di fase della materia nucleare (Fig.1) <sup>1</sup> è una delle questioni più importanti della fisica nucleare.

Per una rassegna delle evidenze sperimentali fino ad ora ottenute e i problemi che necessitano di ulteriori approfondimenti, sia teorici che sperimentali, vedi Ref. [1]. In Ref.s [2] e [3] sono anche esaminate le connessioni fra le diverse transizioni di fase e fenomeni cosmo-gravitazionali, quali formazione dell'Universo al *big-bang* e collassi gravitazionali.

La somiglianza delle keywords utilizzate nello studio delle due transizioni di fase della materia nucleare (suppression/enhancements of channels, fluctuations, critical temperature, critical exponents and universality class, equilibrium and relaxation time) suggeriscono che le transizioni di fase possano venire inquadrare nell'ambito più generale di fenomeni critici, pur rimanendo ben differenziati i metodi sperimentali di misura degli osservabili indicatori di tali transizioni [4].

A basse energie (temperature) e densità l'esistenza di una regione in cui i sistemi nucleari si comportano come un liquido o come un gas o come un fluido in cui questi due aspetti coesistono, predetta da calcoli teorici dagli anni '60, è stata sperimentalmente dedotta da una serie di segnali (Fig.2), tutti **necessari ma non sufficienti singolarmente** (*circumstantial evidences*), che indicano drastici cambiamenti delle proprietà del sistema nucleare in studio. Questi segnali sono stati osservati in misure iniziate negli anni '90, con l'avvento dei primi multirivelatori a  $4\pi$ .

Molti di questi segnali sono solo qualitativi, e possono dare informazioni sulla regione dello spazio delle fasi in cui il sistema nucleare in studio si trova, ma non sulla traiettoria dettagliata (pressione, volume, temperatura, isospin) che il sistema percorre per passare da una fase all'altra. Poichè la traiettoria è determinata dalla equazione di stato della materia nucleare (finita) e dalle condizioni iniziali in cui il sistema viene formato, si comprende la necessità di indagini più approfondite.

Altri segnali, pur quantitativi (ad es. misure di temperatura) sono comunque distorti dal fatto che la rivelazione dei prodotti di diseccitazione è effettuata ad un tempo infinito ( $\sim 10^{-9}$  s), rispetto alla loro produzione ( $\sim 10^{-22}$  s). Le grandezze misurate asintoticamente devono venire "corrette" per estrarre le informazioni relative agli istanti iniziali della reazione. Da ciò è evidente che serve una informazione asintotica sperimentale molto dettagliata, per poter ricostruire sperimentalmente una mappa dello spazio delle fasi e tracciare le traiettorie percorse dal sistema. Inoltre gli effetti del canale di ingresso sui modi di diseccitazione del sistema possono

---

<sup>1</sup>La figura 1 e' da intendersi come qualitativa. Infatti la terza dimensione dell'equazione di stato ( $N/Z$ , isospin) non e' rappresentata e fenomeni che corrispondono a isospin completamente diversi (ad es. transizione liquid-gas e neutron stars) vengono proiettati nel piano  $T - \rho$ .

essere determinanti sulla esplorazione dello spazio delle fasi e di grande importanza per stabilire sperimentalmente l'equazione di stato multidimensionale della materia nucleare.

Una serie di misure effettuata con apparati  $4\pi$  di seconda generazione è quindi fondamentale per lo studio della transizione di fase. Da questi studi può inoltre emergere un piano di lavoro da effettuare con fasci esotici e con apparati di terza generazione.

### 2.1.1 Segnali sperimentali di transizione di fase

Esaminiamo brevemente quali osservabili sperimentali hanno dato indicazione di transizione di fase liquido-gas e quali sono le difficoltà sperimentali nel "misurare" questo fenomeno.

Da Fig.3 si vede che le osservazioni sperimentali esistenti se esaminate per energie di eccitazione (temperature) crescenti, mostrano che il frammento più pesante (parte liquida del sistema nucleare) diminuisce in taglia, fino a diventare della stessa dimensione degli altri frammenti [5]. Aumentando ancora l'energia di eccitazione si arriva alla vaporizzazione (gas) del sistema, mentre la asimmetria in taglia dei frammenti cala ulteriormente. Questa tendenza è evidenziata dai Dalitz plots e dalle funzioni di correlazione in taglia [6].

Aumentando l'energia di eccitazione del sistema, il canale della Giant Dipole Resonance (GDR) viene soppresso. I tempi di diseccitazione del sistema, da valori tipici di una fissione ( $\sim 10^{-18,-19}s$ ) calano fino a valori caratterizzanti una multiframmentazione istantanea ( $\sim 10^{-20,-22}s$ ) [7].

Corrispondentemente alla variazione della distribuzione in carica dei prodotti rivelati, osservabili "qualitativi" mostrano la coesistenza, nello stesso intervallo di temperatura, di eventi contenenti ancora il ricordo del "liquido" con eventi che preannunciano la pura fase "gas" (bimodalità [8]). Altri segnali "qualitativi" che indicano il passaggio da fase liquida a fase gassosa del sistema sono i cosiddetti "rise and fall" della multiframmentazione [9].

Recentemente [10] è stato anche osservato sperimentalmente dal gruppo Multics (Bologna, LNL, Milano, Trieste) un comportamento caratteristico di un sistema di taglia finita alla transizione di fase del primo ordine: una capacità termica negativa, delimitata da due divergenze, che permettono una stima del calore latente della transizione.

Tutti questi cambiamenti nel comportamento di sistemi pesanti eccitati sono evidenza di una transizione liquido-gas all'aumentare della temperatura del sistema (**necessarietà**). Purtroppo **non sono sufficienti** per determinare le altre coordinate termodinamiche, come volume (densità) e pressione. Inoltre non è sperimentalmente stabilito quanto il rapporto  $N/Z$  del sistema nucleare, che entra nel termine di asimmetria dell'equazione di stato della materia nucleare, influenzi i modi

di diseccitazione del sistema eccitato.

Nelle osservazioni sperimentali fino ad ora effettuate ci sono alcune indicazioni che il modo in cui il sistema nucleare si è formato (collisioni centrali o periferiche) influenzi lo spazio delle fasi accessibile al sistema. Ad esempio, un problema ancora da studiare riguarda la pendenza delle distribuzioni in carica (esponente  $\tau$ ) di sistemi equilibrati.

Numerose osservazioni sperimentali mostrano che in collisioni periferiche (Multics, Aladin) o in collisioni centrali asimmetriche, in cui la taglia del proiettile e bersaglio sono molto diverse fra loro (EOS, Isis) la distribuzione in carica ha la forma di una legge di potenza con esponente  $\tau \simeq 2$  ad una energia di eccitazione di circa 2/3 dell'energia di legame del sistema considerato. In collisioni centrali, alla stessa energia di eccitazione e per un sistema formato da proiettile e bersaglio di ugual massa, la distribuzione in carica è molto più piatta e l'esponente che la caratterizza è circa 1 [11].

A parte possibili imprecisioni nella determinazione della sorgente e la possibile influenza del momento angolare sulla distribuzione in carica, la osservazione precedente implica che una o più coordinate termodinamiche non misurate (pressione, densità, isospin) siano diverse.

Poichè il valore degli esponenti critici (tra cui  $\tau$ ) stabilisce la classe di universalità del sistema in studio, diventa ancor più importante uno studio dettagliato di sistemi che, a parità di taglia ed energia di eccitazione, siano formati in modi diversi.

### **2.1.2 Misure proposte per studi termodinamici di transizione di fase in sistemi finiti**

Dai primi risultati sperimentali ottenuti con l'apparato Garfield [12] risulta evidente che già ad energie di eccitazione abbastanza basse ( $< 3$  A MeV) il sistema nucleare manifesta comportamenti critici.

La serie di misure che vengono qui proposte per studiare sperimentalmente la regione di coesistenza riguarda essenzialmente collisioni centrali a energia incidente tra circa 10 e 25 A MeV, con proiettili e bersagli tali da ottenere nel centro di massa una energia disponibile fino a circa 4-5 A.MeV.

Il vantaggio di operare con collisioni centrali di bassa energia consiste nella eliminazione di una serie di fenomeni, compresi solo parzialmente, che quindi costituiscono un "disturbo dinamico" per studi termodinamici. Uno di questi è il flow radiale, osservato in collisioni centrali a partire da energie incidenti di circa 35 A MeV, in conseguenza della compressione iniziale della materia nucleare. Un altro fenomeno esempio di "disturbo dinamico" è, in collisioni periferiche, l'insorgere della *mid-velocity emission*.

Una serie di misure (fino ad ora mai effettuate con rivelatori a  $4\pi$ ) ad energie di fascio relativamente basse (15 A MeV) potrebbe essere rivolta alla determinazione

**quantitativa** delle caratteristiche termodinamiche (temperatura, energia di eccitazione, volume) del sistema nucleare all'apertura dei diversi canali di decadimento, in funzione dell'isospin  $N/Z$ , che sembra determinante dal punto di vista della temperatura limite [13, 14].

La temperatura limite, come definita da Bonche e Levit [13, 14] è la temperatura massima alla quale un nucleo (liquido), di fissato  $N$  e  $Z$ , evapora particelle leggere in modo statistico. Questa temperatura è stata recentemente messa in connessione [15] con un brusco cambio della densità dei livelli del sistema e con i plateau delle curve caloriche [16], cioè con gli stati di coesistenza liquido-gas. Esaminando le temperature isotopiche del plateau, misurate in diversi esperimenti, in funzione della taglia della sorgente e confrontandole con i valori previsti da Bonche e Levitt, si è osservato un ragionevole accordo (vedi Fig.4) tra valori sperimentali e calcolati, purchè si tenga conto del valore dell'isospin del sistema.

Se realmente l'isospin modifica la densità dei livelli, uno studio termodinamico al variare del rapporto  $N/Z$  del sistema, può dare accesso allo studio della terza dimensione della equazione di stato della materia nucleare. Basandosi sui primi risultati degli esperimenti Strega e Reverse (apparati Garfield e Chimera), si potrebbe estrapolare che il canale evaporativo e/o la GDR siano soppressi, a favore di canali a molti frammenti, ad energie di eccitazione più basse per sistemi *neutron poor*, rispetto ai sistemi *neutron rich*.

Il fatto che la regione di coesistenza liquido-gas inizi a circa 2.5-3.5 A.MeV di energia di eccitazione, permette di progettare una serie di studi termodinamici a bassa energia incidente (LNL-ALPI), che può venire completata da esperimenti effettuati con fasci ad energie incidenti maggiori (LNS).

In Fig.5 e seguenti sono riportati alcuni esempi di reazioni che portano alla formazione di sistemi intermedi di masse fra  $\sim 50$  e  $150$ ,  $N/Z$  tra  $\sim 1$  e  $1.3$ , energia di eccitazione fra 2.5 e 5 A MeV, per i quali si prevede una temperatura limite minore della temperatura del liquid drop. Queste reazioni sono adatte per essere misurate ai LNL con l'apparato Garfield, caratterizzato da una rivelazione con basse soglie di identificazione a grandi angoli. Misure alla stessa energia incidente, con fasci/target arricchiti in neutroni darebbero modo di confrontare l'influenza dell'isospin del sistema sui modi di decadimento.

Si riporta qui di seguito un esempio di misure che si propongono per i LNL a basse energie di fascio (tra 13 e 20 A MeV) e per i LNS, a energie tra 25 e 35 A.MeV.

Le misure a basse energie di fascio verranno effettuate con l'apparato Garfield ai LNL. Viste le caratteristiche geometriche di rivelazione dell'apparato, si propongono misure in cinematica diretta.

Per poter misurare la temperatura della sorgente che si forma in collisioni centrali è necessario avere informazioni sulla massa oltre che sulla carica di frammenti e particelle leggere emesse nella reazione. Questo consente di poter determinare la cosid-

detta "temperatura isotopica" che si ottiene da rapporti quadrupli di rese di diversi isotopi. Le informazioni su massa e carica dei frammenti possono contribuire anche alla determinazione del rapporto N/Z della sorgente e ad una migliore definizione della energia di eccitazione della sorgente, calcolata tramite metodi calorimetrici.

Per ottenere queste informazioni supplementari è necessario un "upgrading" dell'apparato Garfield, rispetto alle prestazioni con cui ha funzionato fino ad ora.

È previsto il completamento di Garfield ad angoli piccoli, con un rivelatore (Ring Counter), che permetterà la identificazione isotopica ad angoli minori di 30 gradi.

Inoltre nella "camera in avanti" di Garfield vi è uno "spacco" di circa 45° in angolo azimutale e fra 30° e 90° in angolo polare, dove si vuole inserire un certo numero di telescopi "spare" dell'apparato Multics costituiti da camera a ionizzazione, rivelatore al silicio sensibili alla posizione xy (200-500  $\mu m$ ) e scintillatore CsI(Tl). Questi telescopi si sono rivelati di grande precisione per la identificazione isotopica dei frammenti (fino a  $Z = 8,10$ ). Sono caratterizzati da basse soglie per la identificazione in carica (circa 1 A MeV con una pressione di CF4 nelle camere a ionizzazione di circa 70 mbar). La soglia per la identificazione in massa è circa 4.5 (9) A MeV per  $Z = 2$  ( $Z = 6$ ) in uno spessore di Silicio di 200 $\mu m$ , mentre per uno spessore di 500 $\mu m$  diventa 8.5 (15) e A MeV per  $Z = 2$  ( $Z = 6$ ). Le risoluzioni in energia sono circa 1% per il rivelatore al silicio e circa 3% per le camere a ionizzazione e gli scintillatori. Le risoluzioni in posizione sono dell'ordine di 0.1° – 0.3°.

Infine è previsto uno studio approfondito per poter utilizzare l'elettronica digitale, sviluppata dal gruppo di Firenze per l'apparato Fiasco, per lo studio della forma dei segnali per i rivelatori più lenti dell'apparato e cioè camere a ionizzazione (utilizzate come camere di Bragg) e scintillatori CsI(Tl).

Le misure a energie di fascio di 30-35 A MeV verranno proposte per i LNS, con l'apparato Chimera. Misure in cinematica inversa risultano più appropriate per questo rivelatore.

La reazione  $Ni^{58} + Ca^{40}$  in collisioni centrali, a seguito della fusione incompleta del proiettile e del target porta alla formazione di un sistema intermedio di carica circa 40 e N/Z circa 1.02. La reazione neutron-rich  $Ni^{62} + Ca^{48}$  porta invece ad un sistema di ugual carica ma con N/Z=1.28. Le temperature limite [13] per questi sistemi risultano 6.92 MeV e 8.36 MeV, che corrispondono a valori del parametro densità dei livelli di circa 8 per il sistema n-poor e 12 per il sistema n-rich.

Una differenza in temperatura (a parità di energia di eccitazione) a causa dell'isospin della sorgente è prevista anche da calcoli di modelli microcanonici di multiframmentazione [17]. La temperatura microcanonica del sistema n-poor è prevista essere inferiore a quella del sistema n-rich tra 2.5 e 7 A MeV di energia di eccitazione e questo comporta una differenza nelle partizioni del sistema. Il sistema n-poor ha meno partizioni *liquide* del sistema n-rich, cioè emette frammenti con una minore asimmetria in carica.

È interessante verificare sperimentalmente queste previsioni teoriche. Misurando contemporaneamente alle cariche dei frammenti anche la composizione isotopica delle partizioni, è possibile calcolare le temperature isotopiche e risalire alla temperatura microcanonica del sistema, attraverso funzioni di correlazione tra frammenti e particelle leggere rivelate asintoticamente. La energia di eccitazione del sistema può sperimentalmente essere valutata tramite metodi calorimetrici e il volume medio del sistema attraverso un'analisi di traiettorie coulombiane dei frammenti rivelati. Con queste analisi il sistema formatosi in collisioni centrali può venire caratterizzato dalle sue coordinate termodinamiche  $T$ - $\rho$  e isospin.

Ognuna delle misure proposte può quindi fornire risultati nuovi e interessanti, non solo se analizzata insieme alle altre, ma anche presa singolarmente.

## 2.2 Studio della formazione di sistemi nucleari caldi

La discussione che segue sulle finalità dell'esperimento riflette il contributo che il gruppo di Milano intende portare sulla base della sua specifica competenza maturata in una serie di recenti ricerche.

Un obiettivo fisico di grande interesse è lo studio della formazione di materia nucleare calda equilibrata e la determinazione della sua energia di eccitazione sia in funzione dell'energia incidente che della massa e carica degli ioni interagenti. Studi precedenti [18] portano a pensare che, anche in una collisione centrale, durante la fase di termalizzazione del nucleo intermedio (che si forma nella fusione dei due ioni e in cui l'energia cinetica, ordinata, si trasforma in energia disordinata di riscaldamento), una frazione notevole dell'energia disponibile venga emessa sotto forma di nucleoni e aggregati di nucleoni di energia maggiore di quella che avrebbero se fossero evaporati da un nucleo caldo equilibrato e, nel caso di aggregati di nucleoni, con una probabilità molto maggiore di quella corrispondente a un processo di evaporazione. In una serie di precedenti lavori (per esempio [19]) è stato mostrato che le molteplicità e gli spettri doppio differenziali delle particelle emesse nella fase di termalizzazione, mediati sui diversi possibili processi che possono avvenire, possono venir calcolate con un approccio teorico basato sulla soluzione di un gruppo di Boltzmann Master Equations (BME) accoppiate. Questo metodo, proposto nella metà degli anni sessanta da Harp, Miller e Berne, è stato grandemente sviluppato e portato a un alto grado di predittività. Per molti scopi tuttavia è importante poter calcolare la probabilità di particolari processi, come eventi che portino all'emissione di un numero predeterminato di particelle la cui natura sia specificata. Questo è, ad esempio, essenziale per calcolare la sezione d'urto di produzione di un particolare residuo. Per fare questo è stata sviluppata una tecnica di Monte Carlo, che associata alla soluzione delle BME permette di calcolare la probabilità di una particolare sequenza di eventi e di simulare un esperimento considerando tutte le limitazioni

dell'apparato sperimentale e le condizioni poste nella raccolta dei dati. In questo modo, oltre alla molteplicità e agli spettri delle particelle emesse in processi sia di tipo inclusivo che esclusivo, è possibile calcolare anche la distribuzione delle energie di eccitazione dei nuclei equilibrati formati dopo la fase di termalizzazione. Accoppiando la fase di termalizzazione con la susseguente evaporazione statistica dei nuclei equilibrati, si possono calcolare le molteplicità e le distribuzioni angolari ed energetiche totali delle particelle, degli aggregati di nucleoni emessi e dei residui prodotti. Poichè la stessa teoria può essere utilizzata nello studio delle reazioni indotte da particelle leggere, essa rappresenta una unificazione della teoria delle reazioni nucleari indotte da nucleoni e particelle leggere e reazioni di fusione di ioni pesanti che in tutti i casi ha come principale obiettivo lo studio globale e contemporaneo di tutti i canali di reazione. Noi riteniamo che questo approccio microscopico unito a una trattazione termodinamica degli stessi processi che altri proponenti dell'esperimento hanno sviluppato possa aiutare a chiarire problemi di grande interesse quali lo studio dell'energia e temperatura limite di materia calda equilibrata in reazioni tra ioni pesanti e lo studio della transizione di fase (liquido-gas) della materia nucleare.

Un secondo grande filone di ricerca riguarda lo studio globale delle reazioni che possono avvenire nell'interazione di ioni leggeri con nuclei del tessuto biologico in connessione con l'uso di questi ioni in terapia dei tumori.

Di particolare interesse, nell'ambito degli argomenti citati, appare lo studio dell'emissione di frammenti di massa intermedia che precedenti studi mostrano essere rilevante anche ad energie incidenti dell'ordine di soli 15 - 20 A MeV [18, 21]. La teoria BME prevede che in collisioni centrali questi frammenti si formino prevalentemente per la coalescenza di nucleoni nelle fasi iniziali della termalizzazione, con molteplicità che dipendono dal loro A, Z, spin e isospin [18]. Per verificare la validità delle previsioni teoriche è importante l'identificazione in Z ed A dei frammenti di massa intermedia prodotti e la rivelazione dei frammenti emessi a grandi angoli.

### 3 Dinamica

Per questa linea, tenendo conto dei motivi più oltre elencati, sembra prematuro proporre adesso un piano pluriennale dettagliato per 4 anni. Volendo iniziare comunque un coordinamento fra ricercatori che provengono da esperienze diverse, si propone di articolare la proposta di esperimento in un primo anno di approfondimento e di R & D, seguito poi da altri tre anni di realizzazione, il cui piano dettagliato verrà presentato alla Commissione III nel Luglio 2003.

I motivi a cui si è accennato sono di carattere:

- scientifico: è infatti appena iniziata la fase di analisi della seconda presa dati di Fiasco e si vorrebbe attenderne i primi risultati per formulare la nuova proposta;

- logistico: non si sa quando sarà di nuovo disponibile ai LNS la camera di uso generale Ciclope, in cui sta per essere installato il multirivelatore Chimera nella sua configurazione completa;
- strumentale: per una ricerca ottimale, è opportuno confrontarsi con Chimera e quindi appurare se la collaborazione Chimera è interessata a queste tematiche fisiche ed al tempo stesso valutare i vantaggi e le eventuali limitazioni che tale apparato comporta (soglie, identificazione, utilizzo a bassa energia, risoluzione spaziale...) rispetto, per esempio, ad un nuovo utilizzo di Fiasco, eventualmente migliorato o integrato con altri sistemi di misura. Questo è il motivo della richiesta di trasferte interne ai LNS, per partecipare ad alcuni turni della presa dati di Chimera e per poter eventualmente effettuare alcune brevi prese dati su sistemi simili, per massa ed energia, a quelli di nostro interesse.

Qui di seguito vengono prima brevemente illustrati due temi che potrebbero essere argomento della proposta dettagliata di qui ad un anno.

### 3.1 Meccanismo di reazione: evoluzione da processi di diffusione a processi di non equilibrio

Un aspetto non ancora ben compreso nei dettagli è quello dell'evoluzione del meccanismo di reazione al crescere dell'energia di bombardamento. Da processi basati sullo scambio di nucleoni – tipici delle basse energie – si passa infatti ad alte energie a processi tipicamente di non-equilibrio che sembrano ben spiegati, almeno nei loro tratti essenziali, dal cosiddetto modello “partecipanti-spettatori”.

A basse energie di bombardamento ( $\leq 10$  AMeV), un meccanismo di scambio di nucleoni attraverso una finestra di contatto fra i due nuclei interagenti sembra poter dare una spiegazione coerente al trasferimento di massa e di momento angolare, nonché alla dissipazione di energia cinetica. Tale meccanismo diffusivo è corroborato dalla osservazione sperimentale di distribuzioni di massa e carica che si allargano progressivamente all'aumentare della inelasticità della reazione (e quindi del tempo di interazione), producendo nel canale di uscita frammenti tipo-proiettile (PLF) caratterizzati da probabilità confrontabili di presentare massa (e carica) minore o maggiore di quella del proiettile (cosiddetto “diffusion-plot”).

Sperimentalmente si osserva però che, al crescere dell'energia di bombardamento, la produzione di nuclei secondari (cioè post-evaporativi) con massa e carica maggiori del nucleo proiettile di partenza si riduce progressivamente, fino a scomparire quasi del tutto alle energie di Fermi (circa 30-40 AMeV). La spiegazione di tale mancanza di nuclei finali con massa e carica accresciute non è univoca [22]:

- si potrebbe infatti ipotizzare un meccanismo fortemente dissipativo, ancora

basato sullo scambio di nucleoni, che produca nuclei anche di massa e carica maggiori di quella di partenza, ma talmente eccitati da risultare alla fine, dopo l'evaporazione sequenziale di molte particelle leggere, comunque più leggeri del nucleo proiettile.

- oppure si potrebbe ipotizzare un nuovo meccanismo dinamico (in qualche modo simile al modello “partecipanti-spettatori”) che, sottraendo massa, carica ed energia in una fase precoce della collisione, produca due nuclei residui ovviamente più leggeri che nella precedente ipotesi ed eventualmente poco eccitati e quindi soggetti a limitata evaporazione sequenziale;

D'altra parte, recenti misure hanno messo in evidenza l'esistenza di una abbondante emissione di particelle leggere cariche (LCP) e di frammenti di massa intermedia (IMF) dalla regione di spazio delle fasi intermedia fra quella del proiettile e del bersaglio (quindi non riconducibile alla evaporazione sequenziale dai due nuclei primari), che fa pensare ad un meccanismo tipicamente di pre-equilibrio.

A ciò si aggiunge che la correlazione fra la carica del frammento tipo-proiettile (PLF) – o la carica del frammento con carica massima  $Z_{max}$  – e la sua velocità  $v(Z_{max})$  diviene sempre più piatta (v. per es. la fig.12 di [23]); in altre parole, la velocità del più grosso residuo del proiettile tende a discostarsi sempre meno dalla velocità iniziale del proiettile per un ambito di  $Z_{max}$  sempre più ampio. Ciò a prima vista sembrerebbe suggerire senz'altro un processo di frammentazione del proiettile; tuttavia va notato che, anche nel caso di reazione binaria dissipativa seguita da evaporazione sequenziale, la correlazione  $Z_{PLF}$  vs.  $v(Z_{PLF})/v(\text{beam})$  si appiattisce perchè, a parità di energia dissipata, la diminuzione relativa di velocità del PLF si riduce al crescere dell'energia di bombardamento.

Per poter discriminare fra le due ipotesi enunciate (o meglio per individuare dove avvenga la transizione fra l'una e l'altra, visto che ad alte energie sicuramente il meccanismo dissipativo non è più applicabile) si pensa di ricorrere a misure in coincidenza, che misurino i frammenti tipo-proiettile (e tipo-bersaglio, TLF) e le loro emissioni associate di LCP e IMF. Se si identifica la carica del PLF, si può aggiungere la carica della sua emissione evaporativa e ricostruire la carica primaria (o pre-evaporativa)  $Z_{prim}$  da cui esso ha avuto origine e quindi determinare se essa può essere anche maggiore di quella iniziale.

Per una riprova del metodo di analisi, l'ideale sarebbe poter fare un bilancio totale di carica, sommando evento per evento le cariche di PLF e TLF, le loro emissioni statistiche ed anche le emissioni “dinamiche” a velocità intermedie, per verificare che si riproduca la somma delle cariche di proiettile e bersaglio. Ciò non sembra però alla portata degli attuali rivelatori per quanto riguarda l'identificazione del TLF (risoluzione insufficiente) e della sua evaporazione (soglie troppo alte). Pertanto il bilancio andrebbe fatto in media, per classi di eventi, o ricorrendo ad un canale di

ingresso simmetrico, o studiando una stessa reazione in cinematica sia diretta che inversa. Dovendo fare comunque un bilancio in media per classi di eventi, l'utilizzo di un rivelatore a  $4\pi$ , ancorchè utile, non sarebbe indispensabile, mentre la massima attenzione andrebbe posta sulla individuazione di buoni estimatori, per esempio, del parametro d'urto.

Per studiare la transizione da un meccanismo sicuramente di tipo dissipativo ad uno con contributi dinamici è necessario effettuare la misura per varie energie di bombardamento, comprese fra 8–10 AMeV e 30–40 AMeV. In ogni caso, è fondamentale disporre di un sistema di rivelazione con soglie sufficientemente basse da poter misurare ed identificare almeno tutti i prodotti di reazione emessi in avanti nel sistema del centro di massa globale.

### **3.2 Meccanismi di reazione: frammentazione in collisioni fra ioni leggeri**

Si ritiene importante lo studio dell'emissione di frammenti di massa intermedia o di frammenti simili al proiettile e al bersaglio prodotti con meccanismi dinamici.

Tra questi possiamo considerare la frammentazione del proiettile o della targhetta, processi di trasferimento di massa tra gli ioni collidenti, collisioni fortemente anelastiche con formazione di un "collo", processi di fusione-fissione. C'è ancora molto da studiare sia a basse che alte energie e appare di grande interesse lo studio di questi processi in funzione sia dell'energia di interazione che della massa degli ioni interagenti (collisioni molto asimmetriche e collisioni simmetriche) e variando l'isospin degli ioni interagenti. Infine, un argomento di rilevante interesse riguarda lo studio del meccanismo di interazione tra due ioni leggeri a basse energia per cui sono state finora proposte sostanzialmente due teorie: formazione e decadimento di risonanze quasi molecolari e un processo di fusione-fissione [26]. Sarebbe per noi di notevole interesse studiare anche un modello alternativo: la frammentazione binaria sia del proiettile che del bersaglio. La eventuale presenza di questo meccanismo di cui abbiamo messo in luce l'esistenza in reazioni indotte tra ioni leggeri e nuclei pi pesanti potrebbe essere messa in luce considerando una coppia di ioni leggeri (con massa e carica abbastanza diverse) che possano essere usati sia come fascio che come bersaglio, scambiando i loro ruoli in due successivi esperimenti. Se nei due casi si sceglie l'energia del proiettile in modo che l'energia del centro di massa sia la stessa, studiando gli spettri dei frammenti emessi si dovrebbe essere in grado di distinguere tra i diversi meccanismi sopra citati. In questo contesto appare di particolare importanza la osservazione dei frammenti emessi dal bersaglio che, per ragioni cinematiche, nel sistema del laboratorio sono rilevabili ad angoli piuttosto grandi (vicini a  $90^\circ$ ) con energia molto bassa (a volte di solo alcuni MeV). Questo richiede la costruzione di opportuni sistemi di rivelazione, attualmente non inclusi

nell'apparato Garfield, caratterizzati da soglie di identificazione molto basse.

### 3.3 Emissioni a “mid-velocity”

Un altro problema tuttora aperto, riguardante le caratteristiche “dinamiche” delle reazioni fra ioni pesanti attorno alle energie di Fermi, è quello della emissione di particelle leggere (LCP) e di frammenti di massa intermedia (IMF) a “mid-velocity”. In particolare, adesso che la presenza di queste emissioni è stata ampiamente verificata su numerosi sistemi ed anche in collisioni periferiche (esperimenti effettuati con gli apparati: Indra, Fiasco, Multics, Lassa-Miniball-Miniwall), restano da chiarire le caratteristiche salienti di queste emissioni ed in particolare la caratterizzazione della sorgente e dei meccanismi alla base del fenomeno. Riteniamo opportuno limitare al momento la discussione alle collisioni periferiche o semiperiferiche perché per esse i tempi di collisione e contatto sono tali da far ritenere comunque poco probabile (o almeno non ovvio) il raggiungimento dell'equilibrio termodinamico da parte della materia nucleare nella zona di sovrapposizione; pertanto si può presumere che i fenomeni di tipo più propriamente dinamico risultino più evidenti. Elenchiamo qui di seguito le domande, riguardanti le emissioni a mid-velocity in collisioni periferiche fra ioni pesanti, che riteniamo di maggior attualità:

- 1). il meccanismo alla base del fenomeno è unico, oppure tali emissioni hanno origine da meccanismi distinti, magari tutti di origine dinamica, ma separati o nel tempo o nelle configurazioni spaziali?

Più esplicitamente [24] sembra di poter individuare due meccanismi, entrambi su scale temporali brevi rispetto alle emissioni statistiche:

- 1a). emissione “immediata” di LCP e IMF dalla zona di sovrapposizione geometrica durante la collisione. Potrebbe trattarsi di una emissione riconducibile o alle prime collisioni nucleone-nucleone oppure ad una emissione dal “neck” che presumibilmente si forma al contatto e permane fino alla separazione di due frammenti primari. Tale contributo si può mettere in evidenza in quanto risulta concentrato, nello spazio delle velocità parallele e perpendicolari (rispetto all'asse di separazione dei frammenti), nella regione intermedia fra quasi-proiettile e quasi-target; le particelle così emesse risentono inoltre del focheggiamento dovuto al campo Coulombiano di entrambi i frammenti.
- 1b). emissione di IMF da parte dei frammenti primari immediatamente dopo la separazione. Tale emissione è indetificabile in vari modi: le particelle emesse secondo questo meccanismo risentono principalmente del campo Coulombiano del frammento emettitore e pertanto esse, nella usuale rappresentazione nello spazio delle velocità, tendono a disporsi su

archi di cerchi Coulombiani prossimi alla regione di velocità intermedie. Questa emissione avverrebbe con un meccanismo analogo alla cosiddetta “fast oriented fission”, in cui, per divisioni del quasi-proiettile certo meno asimmetriche, sono state evidenziate [25] correlazioni caratteristiche fra la direzione di emissione del frammento più leggero e l’asse di separazione degli altri due frammenti principali (emissione quasi collineare).

- 2). qual è la composizione isotopica degli IMF emessi a mid-velocity?

La composizione isotopica si differenzia per i due meccanismi ipotizzati?

Le previsioni teoriche prevedono effettivamente delle composizioni isotopiche dei frammenti che risentono fortemente dei tempi di emissione, della dipendenza della EoS dall’isospin e del dettaglio del meccanismo coinvolto. Il problema di quale sia l’energia di eccitazione di tali IMF primari e di quale sia l’effetto del loro successivo decadimento sulle composizioni isotopiche è però un punto ancora aperto.

Comunque, indipendentemente dal grado di informazione quantitativa che si possa poi trarre dal confronto fra le composizioni isotopiche e le attese teoriche, è di grande interesse poter determinare le composizioni isotopiche per i due contributi anzidetti: già una eventuale differenza nei due casi parlerebbe in netto favore dell’esistenza di due meccanismi distinti, molto di più di quanto non possa dire una differente composizione elementare; quest’ultima infatti comunque risente in maniera diretta del campo Coulombiano che influenza pesantemente la configurazione finale osservata.

L’esistenza o meno di questi due meccanismi, entrambi *pronti* rispetto alle emissioni statistiche dai frammenti eccitati, ma comunque temporalmente fra loro distinti, è tuttora dibattuta e merita -a nostro parere- ulteriori approfondimenti sperimentali, per chiarire il quadro della fenomenologia, possibilmente esaminando l’andamento dei fenomeni in funzione dell’energia di bombardamento. Si potrebbe considerare, in particolare, uno studio a varie energie di bombardamento (fra circa 15 e 40 AMeV) di reazioni con sistemi con differente grado di asimmetria iniziale: Sn + Au, Sn, Ni, Al. La selezione del parametro di impatto, fondamentale per limitare lo studio alle reazioni semiperiferiche o periferiche, potrebbe essere effettuata con vari metodi alternativi, eventualmente da mettere a confronto (TKEL, velocità relativa dei frammenti, informazione congiunta della velocità relativa dei frammenti e della carica del residuo del proiettile,...); le diverse asimmetrie dei sistemi interagenti permetterebbero di accedere alla informazione sulla collocazione cinematica della sorgente “immediata” di particelle (meccanismo 1a). Infatti al variare della asimmetria del sistema, si potrà comprendere se tale emissione è riconducibile ad un meccanismo di collisioni nucleone-nucleone oppure ad un comportamento collettivo della materia nucleare a contatto, tipo “neck”. Nella prima ipotesi ci si aspetta che

la emissione sia sempre centrata propriamente a mid-velocity, ovvero nel sistema di riferimento nucleone-nucleone; se viceversa il meccanismo alla base è la rottura del “neck”, ci si aspetta una emissione centrata preferenzialmente nel centro di massa del sistema interagente.

## 4 Sviluppi strumentali

Lo studio della composizione isotopica dei frammenti, essenziale per molti degli argomenti fin qui esposti, richiede uno sforzo sul fronte dei rivelatori per rendere questa discriminazione possibile, in particolare anche per i frammenti che emergono dal target a basse energie. La strada che al momento sembra la più promettente per ottenere ciò è la discriminazione in forma dei segnali delle particelle che si arrestano in rivelatori al Silicio, disposti in modo che le particelle entrino dal lato con campo elettrico più debole.

Questa tecnica va ulteriormente studiata su prototipi di rivelatori, con brevi turni di misura con fasci leggeri, cioè di massa simile a quella dei frammenti di massa intermedia. Si ritiene che tali turni di prova, sia per la vicinanza, sia per il supporto logistico, possano essere meglio svolti ai LNL.

Un altro sviluppo strumentale riguarda il completamento di un adeguato numero di canali di elettronica “digitale”. Questa, per la sua semplicità, compattezza e versatilità, è la direzione di sviluppo scelta da molti progetti e viene oggi resa possibile dalla disponibilità di campionatori di segnale sempre più veloci e precisi: sono già disponibili commercialmente campionatori a 12 bit da 130 MHz (e sono annunciati campionatori da 200 MHz), mentre gli sviluppi più spinti sono ancora basati su integrati “proprietary”.

Schematicamente, i moduli progettati a Firenze sono costituiti da una scheda-madre (in standard VME), che con una logica programmabile (Altera) gestisce l’indirizzamento ed il colloquio con il bus VME. Sulla scheda-madre si innestano le schede “piggy back” contenenti i singoli canali di campionamento ed elaborazione del segnale. Ogni canale si compone di uno stadio di ingresso (filtro antialiasing), seguito da un campionatore, uno “shift register” ed una memoria “FiFo”, che fornisce poi i dati ad un DSP, il quale li elabora e quindi li trasferisce (via scheda-madre) al bus VME. Ciò garantisce la versatilità del dispositivo (per un diverso rivelatore basterà riprogrammare il DSP) e permette eventualmente di estrarre informazione non solo dall’integrale, ma anche dalla forma del segnale. Tali moduli possono vantaggiosamente sostituire quelli di elettronica convenzionale non solo per la normale acquisizione (al posto dei normali ADC, siano essi “peak-sensing” o di carica) di segnali “formati” da un amplificatore, ma possono anche essere usati per l’analisi di forma dei segnali di rivelatori “lenti” (CsI, camere a ionizzazione e phoswich basati su plastico veloce+lento+CsI; vedi Tesi di L. Bardelli, Firenze 2001 e articolo di

L.Bardelli et al, "Application of digital sampling techniques to particle identification in scintillation detectors" accettato da NIM A).

Per l'apparato Fiasco, sarebbero necessari 180 canali di elettronica digitale per l'analisi di forma dei rivelatori phoswich e CsI(Tl), cosa che permetterebbe di migliorare l'identificazione di particelle leggere e frammenti di massa intermedia; altri 190 canali servirebbero per l'acquisizione dei segnali "formati" dei 96 telescopi a silicio.

Per l'apparato Garfield invece, sarebbero utili 180 canali per l'analisi di forma dei segnali di CsI(Tl) delle camere fra 30° e 170°, e circa 90 canali per il rivelatore ad angoli piccoli (64 silici, 16 CsI e 8 Camere di Ionizzazione).

Data la versatilità e riprogrammabilità dell'elettronica digitale, chiediamo alla Commissione III di finanziare il numero di canali comune alla necessità dei due apparati, e cioè 220 canali per un totale di 114 kEuro (divisi circa in parti uguali sulle due linee di ricerca a Firenze), avendo già tenuto conto dell'avvenuto finanziamento da parte della Commissione di 50 canali sui fondi 2001-2002).

Riguardo all'apparato Garfield va ricordato che esso usa un recente sistema di acquisizione, basato su moduli speciali VME dotati dell'interfaccia veloce FAIR, interamente sviluppato dal Laboratorio Sviluppo Sistemi (LASS) coordinato da Antonio Ordine della Sezione INFN di Napoli.

Tale sistema richiede un continuo upgrading, per l'ottimizzazione e l'adeguamento delle prestazioni alle crescenti esigenze sperimentali. Negli anni futuri infatti, già a partire dal 2003, sono previsti sviluppi legati alla integrazione dell'elettronica di front end basata su DSP, in sviluppo a Firenze, con i convertitori FAIR.

La prevista integrazione di tecniche di DSP su moduli FAIR è di grande importanza per la collaborazione, anche in vista di futuri impegni in questa direzione in ambito europeo (vedi documento allegato DAQ-EURISOL) ed in sinergia con il progetto FV2 della Commissione V INFN.

## References

- [1] Ph.Chomaz: *The Nuclear Liquid Gas Phase transition and Phase Coexistence* International Nuclear Physics Conference INPC 2001, AIP Proceedings Vol.No.610 2002.
- [2] Rapporto Nupecc-1996, Conferenza Strasburgo 2001, APS Focus January-2002.
- [3] P. J. Siemens, Nature **305**, 410 (1983), G.F. Bertsch and P.J. Siemens, Phys. Lett. **B126**, 9(1983).
- [4] See for instance: hep-phys/0110012v2, PRL 18 Feb. 2002, nucl-ex/0108011, hep-phys/0103273, nucl-th/0201070, PRL 14 Jan.2002, APS Focus 21 Dec.2001
- [5] M. D'Agostino et al, Nucl. Phys. **A650**, 329 (1999); J. B. Elliott et al, Phys. Rev. Lett. **85**, 1194 (2000).

- [6] Borderie B. et al, nucl-ex/0102015 and Phys. Rev. Lett. 86 3252(2001)
- [7] V.Viola for ISIS collaboration, Nucl. Phys. A681 199c(2001)
- [8] M. F. Rivet nucl-ex/0205010
- [9] D. Durand, Nucl.Phys. **A630** (1997) 52c
- [10] M. D'Agostino et al, Phys. Lett. B473 219(2000) and Nucl. Phys. A699 (2002)795.
- [11] N. Le Neindre Proceedings of Bormio 2002
- [12] F. Gramegna et al. - Proceedings of the International Conference on Nuclear Physics at Border Lines, Lipari, May 2001
- [13] P. Bonche, S. Levit, H. Vautherin, Nucl. Phys. **A427**, 278 (1984); **A436**, 265 (1986).
- [14] J. Besprosvany and S. Levit, Phys. Lett. B **217**, 1 (1989).
- [15] J. B. Natowitz et al. Phys. Rev. C **65**, 034618 (2002).
- [16] J. Pochodzalla *et al.*, Phys. Rev. Lett **75**, 1040 (1995).
- [17] J. P. Bondorf, A. S. Botvina, A. S. Iljinov, I. N. Mishustin, K. Sneppen, Phys. Rep. **257** (1995) 133.
- [18] E. Gadioli et al., Nucl. Phys., in corso di pubblicazione
- [19] M. Cavinato et al., Nucl. Phys. A643 (1998) 15
- [20] M. Cavinato et al., Nucl. Phys. A679 (2001) 753
- [21] E. Gadioli et al., Eur. Phys. J. A11 (2001) 161
- [22] Dayras et al. PRL 62 (89) 1017)
- [23] Plagnol et al. PR C61 (99), 014606
- [24] Piantelli et al., PRL 88, 052701, (2002)
- [25] Casini PRL 71(93)2567, Lecolley PL B354(95)202, Bocage NP A676(00)391]
- [26] C. Beck, Acta Physica Polonica B 30 (1999)1527

Fig.1 *The phase diagram of dense matter. At high energy or density one can see the quark-gluon plasma while around the nuclear matter saturation point the liquid-gas coexistence region is shown. The trajectories followed by different cosmic events are sketched: the big-bang, the collapse of a supernova core in a neutron star and a heavy ion reaction.*

Fig.2 *Compilation of different signals, indicating a liquid-gas phase transition.*

Fig.3 *From hot nucleus to fragments. The top part is the fragment distribution from Ref. [5] showing the disappearance of the heavy fragment. The left lower panel shows the GDR suppression for excitation energies larger than  $150 \div 200$  MeV. Rise and fall of fragment multiplicity is shown in the lower right panel.*

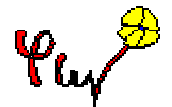
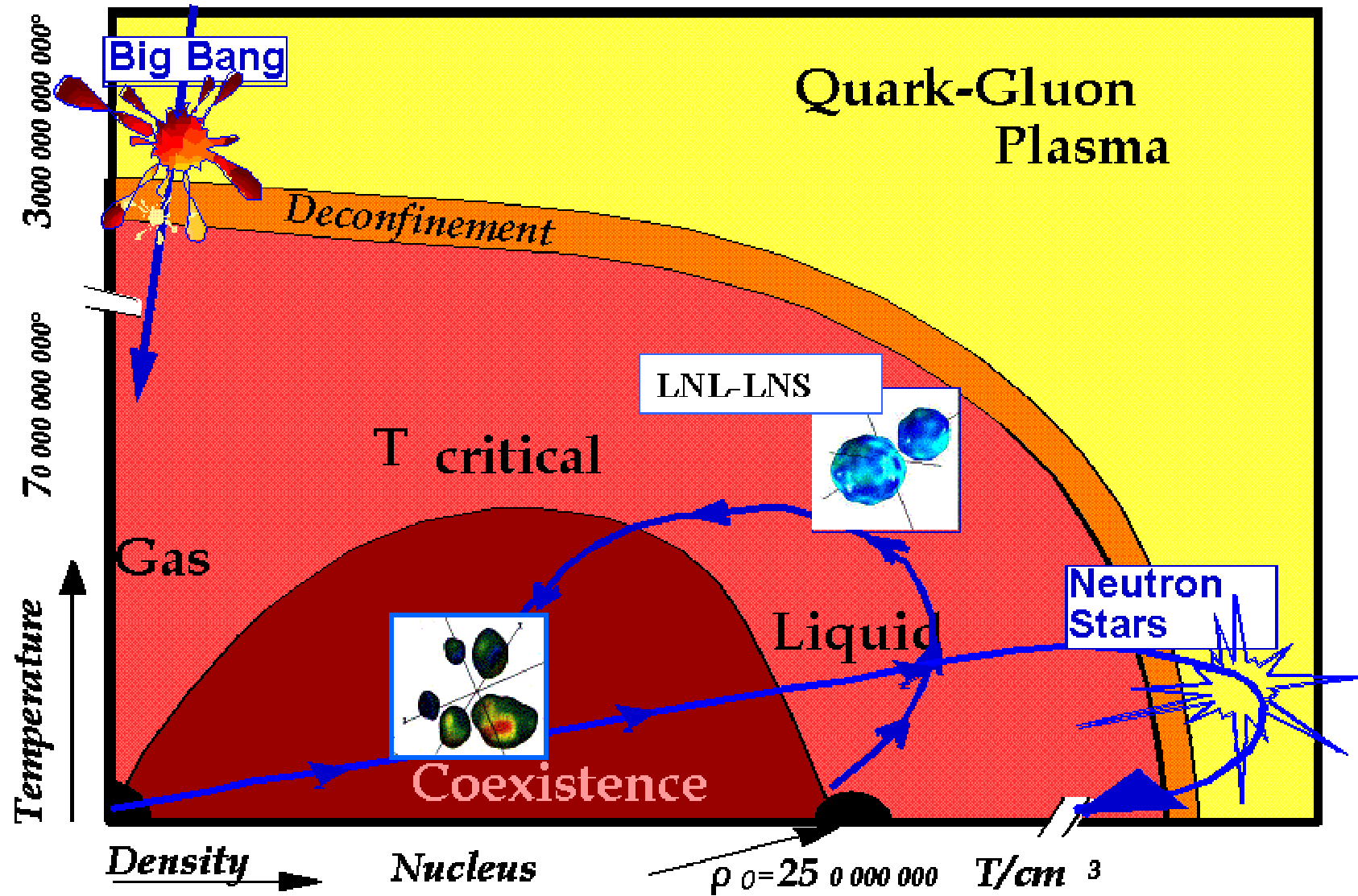
Fig.4 *Upper panel: the limiting temperature  $T_{lim}$  as a function of the mass number  $A$ . The continuous line shows the values for nuclei along the  $\beta$  stability line and the dot-dashed along the  $N=Z$  line, as calculated in Ref. [14]. The points show the data collected in several experiments as listed in Ref. [15]. Lower panels: determination of limiting temperature from caloric curve (see Ref. [15]).*

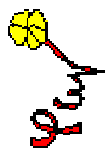
Fig.5 *Feasible measurements with present and future ALPI beams in the plot showing the limiting temperature as a function of the mass number of the system.*

Fig.6 *Characteristics of the systems formed in reactions with future beams at the ALPI accelerator*

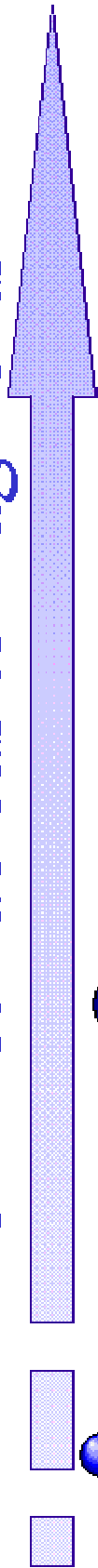
Fig.7 *Characteristics of the systems formed in reactions with present beams at the ALPI accelerator*

# Equation of State (EOS)

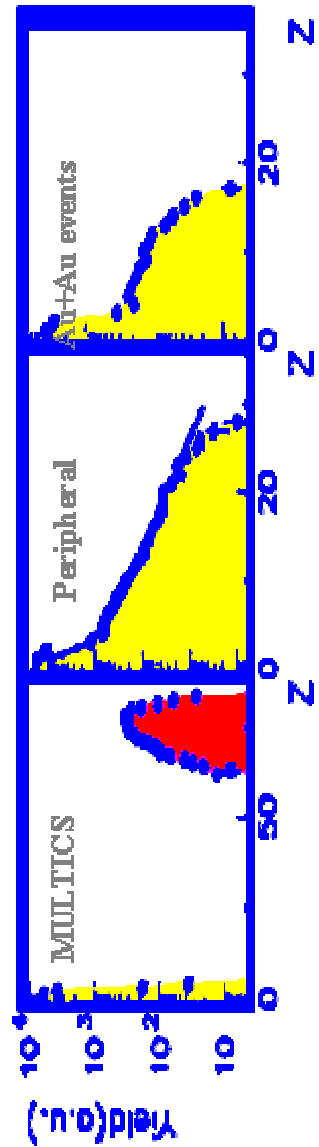
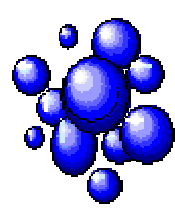
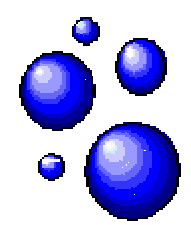
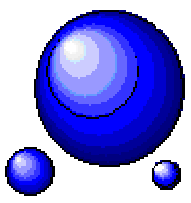




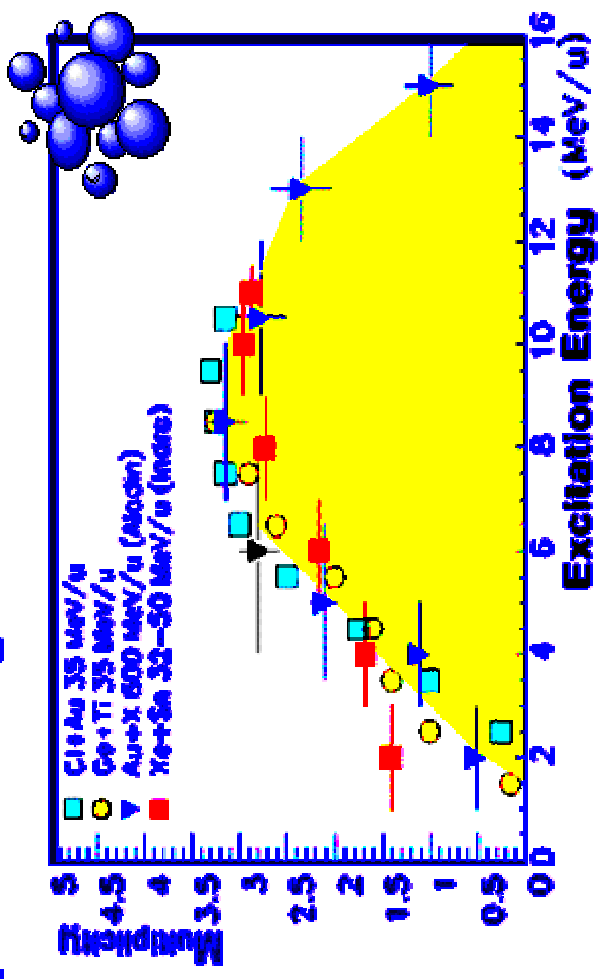
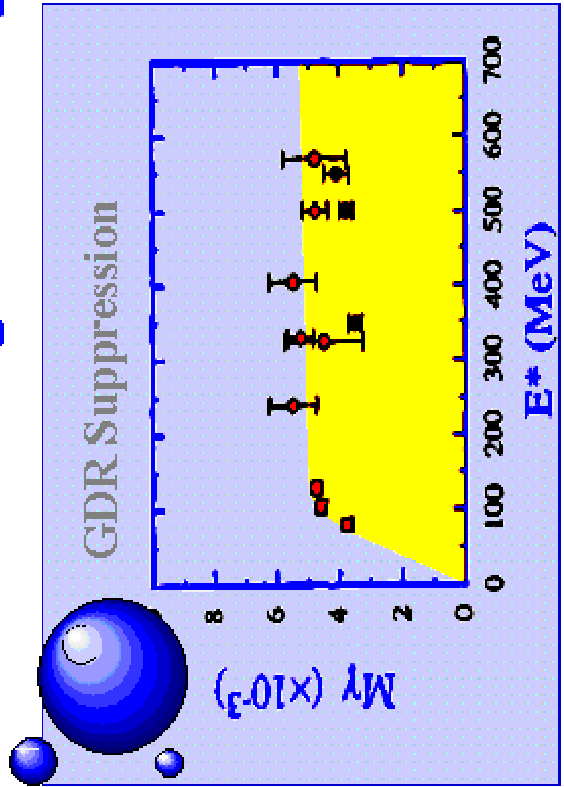
# From hot nucleus to fragments



## Increasing $E^*$



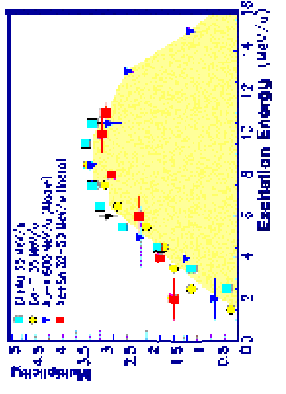
Rise (**enhancement**) and fall (**suppression**) of many fragment production



Temperature  
100 000 000 000

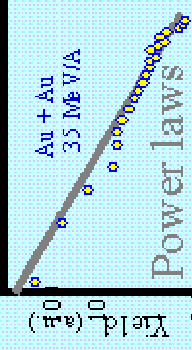
# The 13 reasons

## Rise and fall



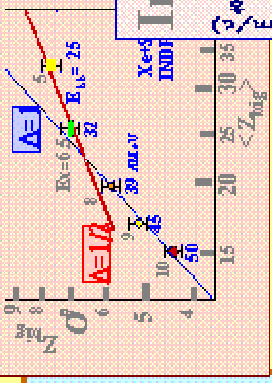
Vaporisation

## Critical Gas

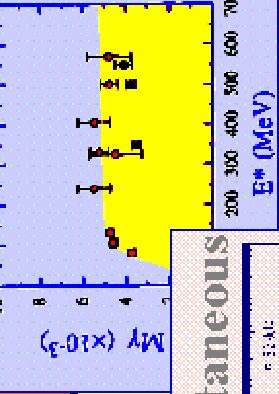


Power laws

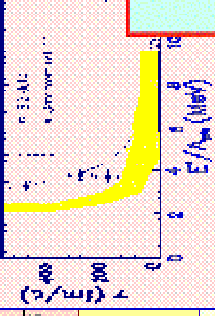
## Scaling Liquid



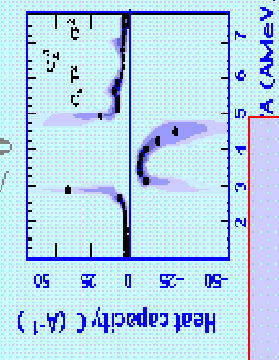
## GDR Suppression



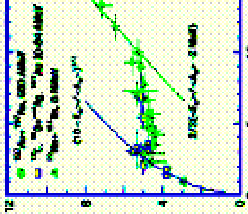
## Instantaneous



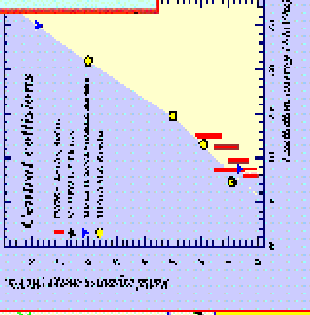
## Heat Capacity Spinodal



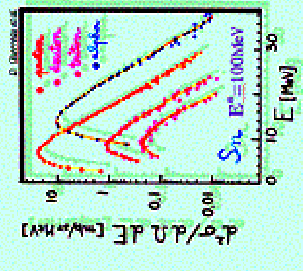
## Caloric Curve



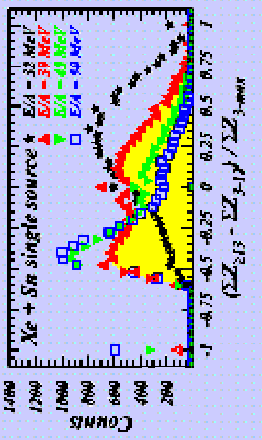
## Explosion



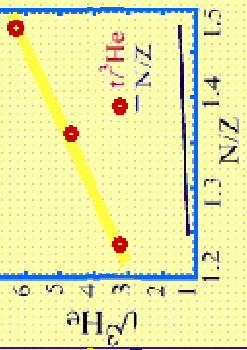
## Evaporation



## Bimodality



## Fractionation

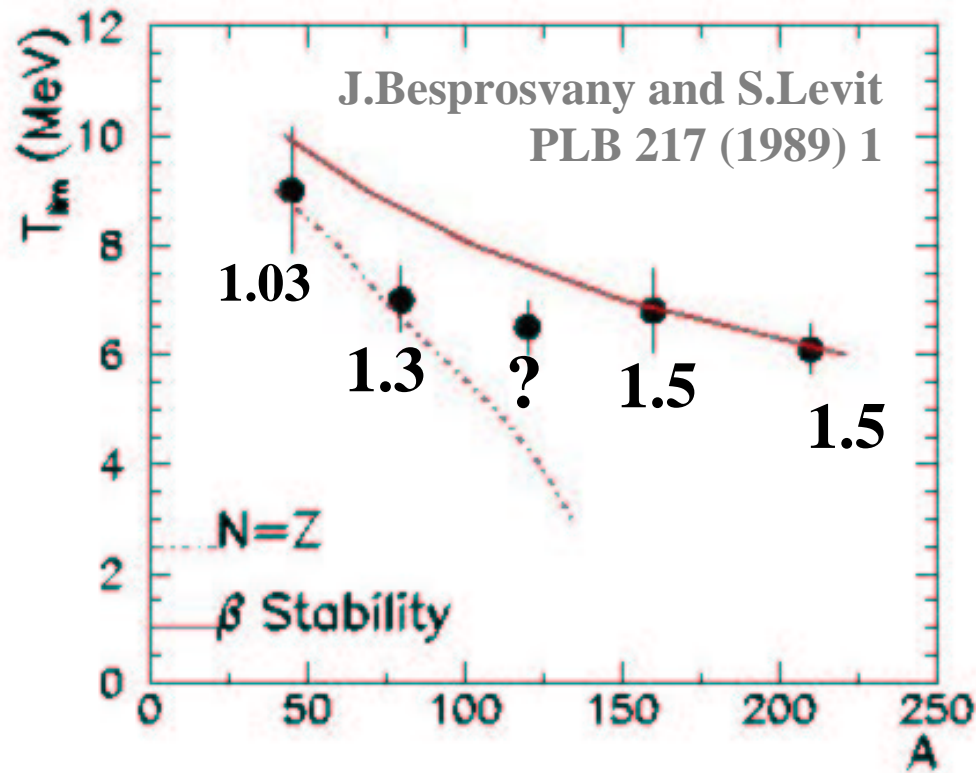


Liquid

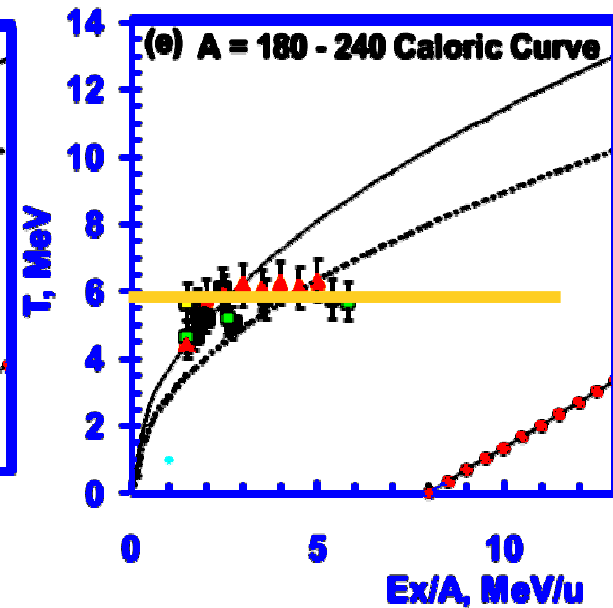
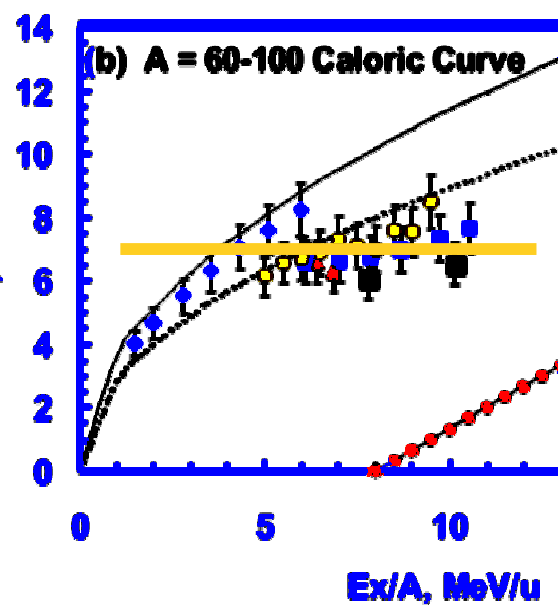
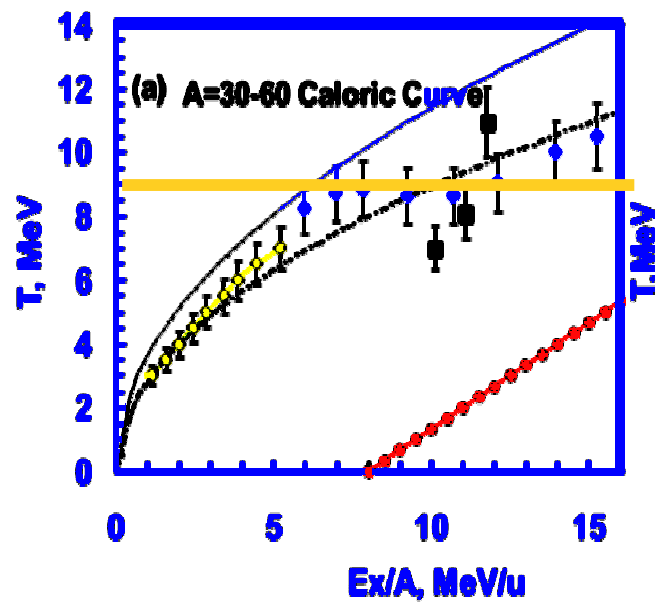
$\rho$  250 000 000 T/cm<sup>2</sup>

Gas

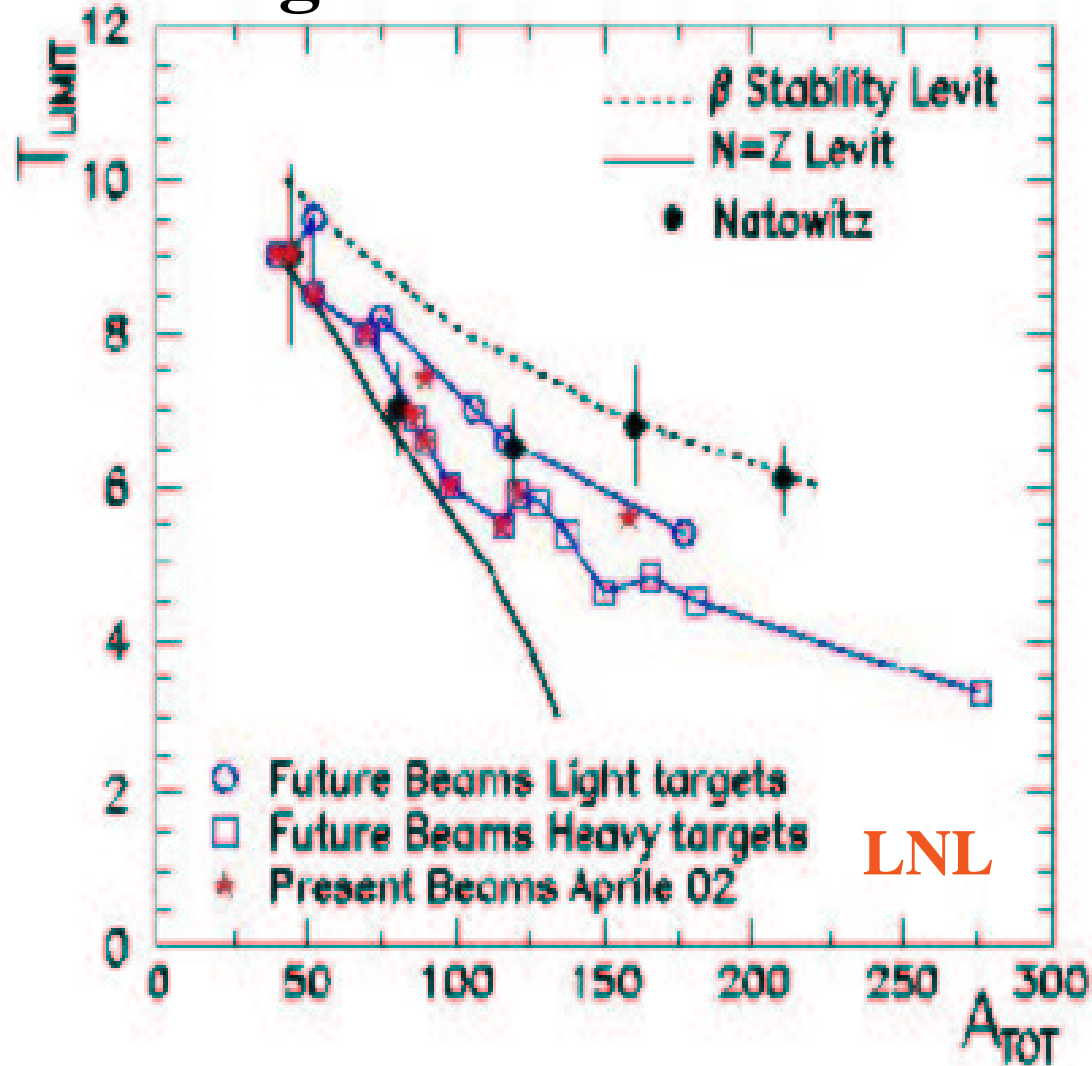
# Coulomb instability pushes the nucleus in the coexistence



Natowitz et al, nucl-ex/0106016



# Feasible measurements to investigate the region around $A=100$ with stable beams



2003

- at LNL with Garfield +  $\gamma$  detectors at  $90^\circ$  (mass identification has to be extended to  $90^\circ$ )

200?

- at LNS with ??

As soon as possible  
measurements  
with p-rich beams

Reaction	Elab (A.MeV)	$\theta$ grazing	$\sigma$ fus. (mb)	A,Z,N/Z c.n.	E* (A.MeV)	T (MeV)	T lim (MeV)
<b>Future beams (6 new cryostats)</b>							
(14,28)Si + (28,58)Ni	27	4	300	77-38-1,03	5,0	7,4	6,9
(16,32)S + (28,58)Ni	26	4	305	80-39-1,05	5,2	7,6	6,6
(20,40)Ca + (28,58)Ni	24	5	320	86-42-1,05	5,3	7,6	6,5
(28,58)Ni + (28,58)Ni	21	5	350	99-48-1,06	5,1	7,5	5,8
(28,58)Ni + (32,70)Ge	21	6	350	112-52-1,15	5,0	7,4	6,4
(28,58)Ni + (42,92)Mo	21	7	330	136-63-1,16	4,6	7,1	5,6
(28,58)Ni + (47,104)Ag	21	8	340	152-69-1,2	4,4	6,9	4,9
(29,63)Cu + (28,58)Ni	20	5	377	106-50-1,12	4,8	7,3	6,2
(35,79)Br + (28,58)Ni	17	6	440	126-58-1,17	4,0	6,6	6,3
(35,79)Br + (46,102)Pd	17	9	370	166-75-1,21	4,0	6,7	5,0
(20,48)Ca + (28,64)Ni	24	4	380	97-42-1,31	5,4	7,7	8,1

Reaction	Elab (A.MeV)	$\theta$ grazing	$\sigma$ fus. (mb)	A,Z,N/Z c.n.	E* (A.MeV)	T (MeV)	T lim (MeV)
<b>April 2002 beams</b>							
(14,28)Si + (28,58)Ni	19	6	425	80-39-1,05	3,8	6,5	6,7
(16,32)S + (28,58)Ni	17	7	470	84-41-1,05	3,6	6,3	6,8
(20,40)Ca + (28,58)Ni	16	7	480	91-45-1,02	3,7	6,4	6,0
(28,58)Ni + (28,58)Ni	13	9	565	109-53-1,06	3,2	6,0	5,2
(29,63)Cu + (28,58)Ni	12	9	630	116-54-1,15	3,0	5,7	5,9
(35,79)Br + (35,79)Br	10	13	760	156-69-1,26	2,5	5,3	5,5
(20,48)Ca + (28,64)Ni	16	6	570	103-44-1,34	3,8	6,4	8,3