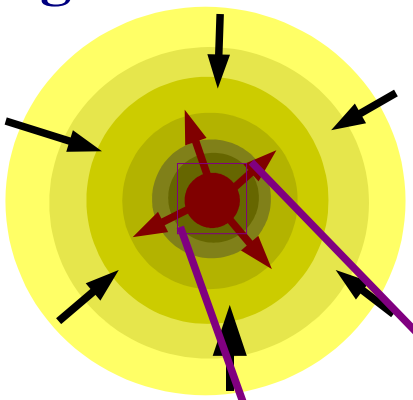
# Des noyaux aux étoiles denses

*Prospectives pour les modèles de supernovae et d'étoiles denses*

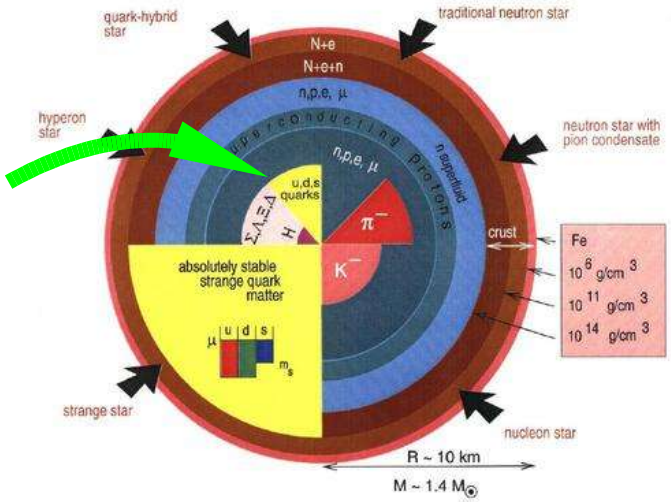
Jérôme Margueron

*IPN Orsay*

## Effondrement gravitationnel

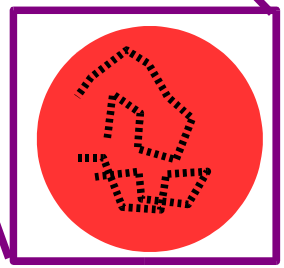


## Etoile à neutrons



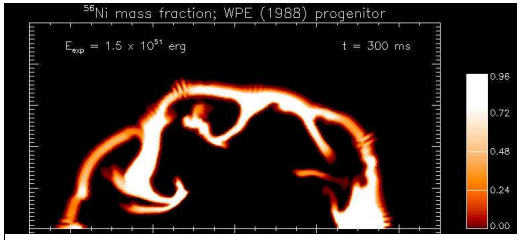

Equation d'état ?

## Résidu central



Propagation des neutrinos ?

## Onde de choc



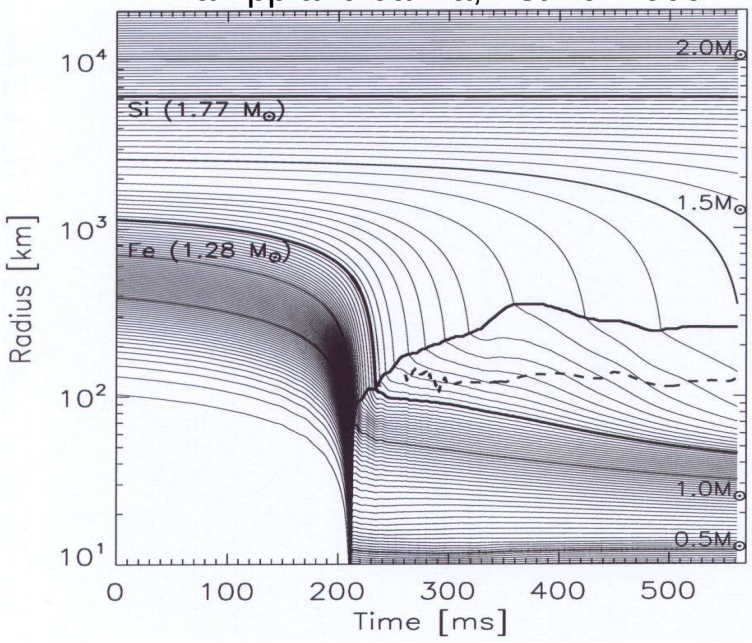

Réchauffement par vents neutriniques ?

Site possible pour la r-nucléosynthèse ?

# Effondrement gravitationnel

*un mécanisme qui reste à élucider*

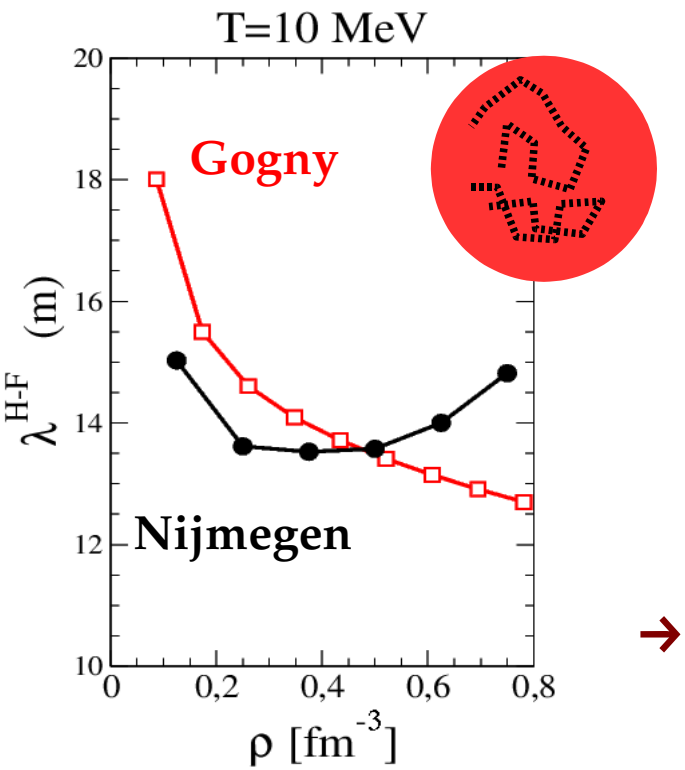
Rampp and Janka, Astr. J. 2000

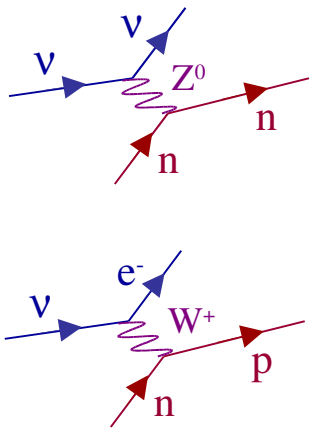



## Aspects hydrodynamiques :

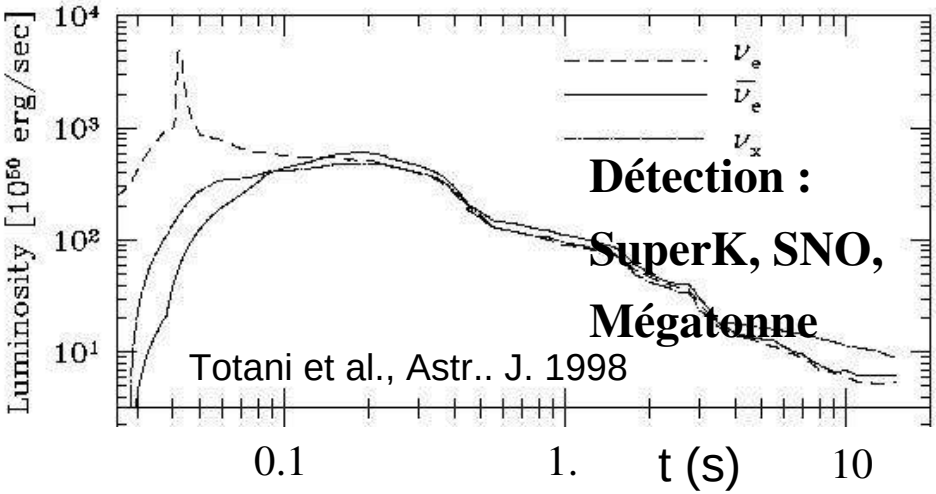
Cf. *Univers thermonucléaire*,
J.-P. Chièze.

## Propagation des _ dans le résidu central :




Luminosité neutrinos



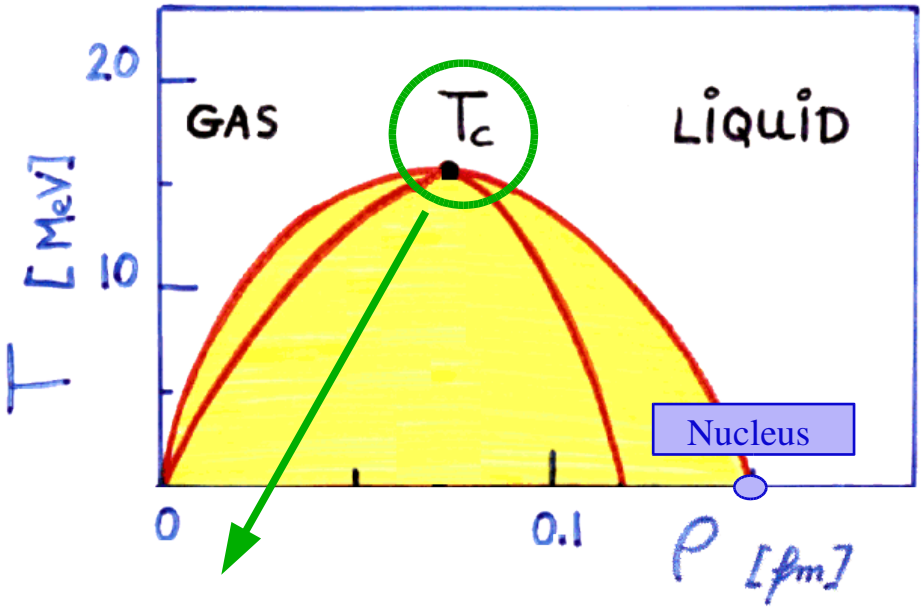

→ **Effets du milieu nucléaire**

(excitations multipaires, opalescence critique)

# Effets du milieu :

## *Opalescence critique des neutrinos ?*

Diffusion des neutrinos sur les fluctuations de densité associées à la transition de phase liquide-gaz.




Cf. *Dynamique et thermodynamique nucléaire*, Rémi Bougault.

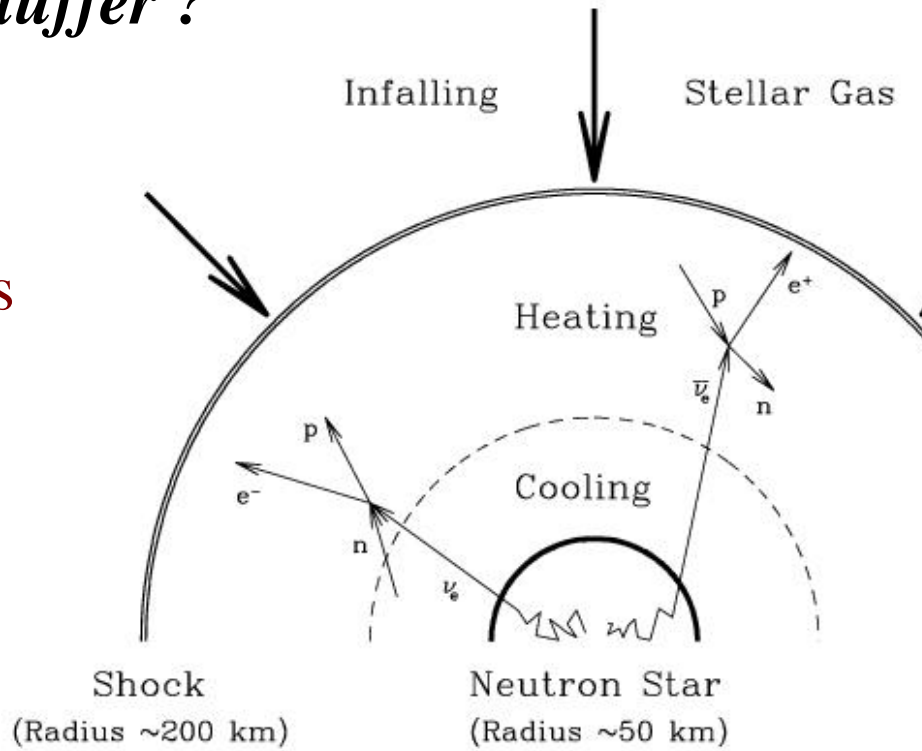
**L'opalescence critique est observée pour les fluides de type Van der Waals, envisagée en physique nucléaire**

**→ Conséquences pour l'explosion SN II ?**

**→ Développement d'un nouveau modèle ?**

# Onde de choc

***Comment la rechauffer ?***




**<u>Vents neutriniques :</u>** Interaction -noyau

→ Calculs extensifs de sections efficaces

→ Beta-beams de basse énergie

→ Physique des neutrinos

Cf. *Neutrinos dans l'univers*,
Cristina Volpe.

**<u>Nouveaux scénarios ???</u>**

→ conséquences de l'opalescence critique...

**→ Site possible pour le processus r de la nucléosynthèse**

# Production de faisceaux de noyaux radioactifs :

*exemple de Spiral II au Ganil*

**GSI, RIA, EURISOL.**

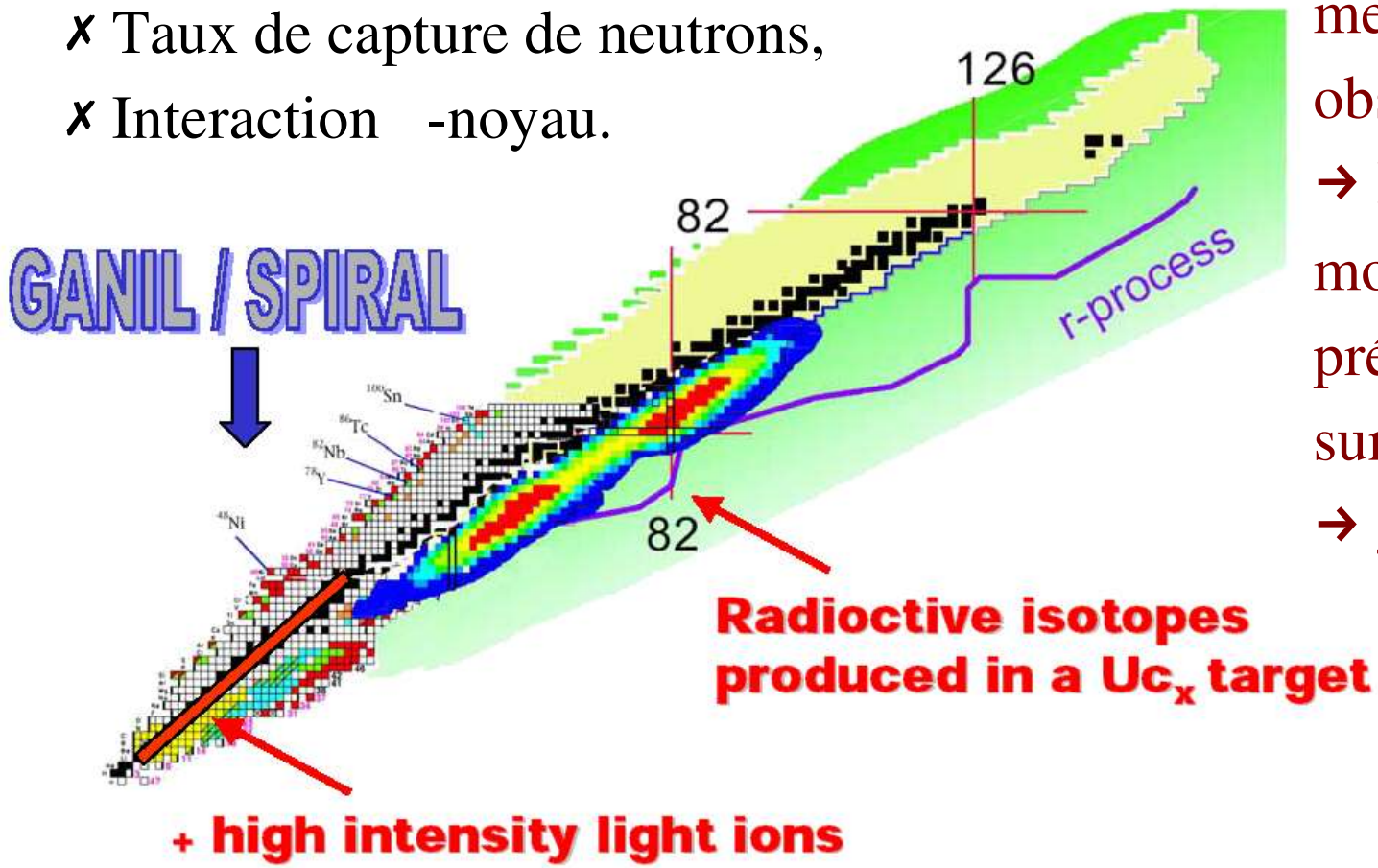
**Observables nécessaires :**

✗ Energie de séparation neutron,
(Fermeture de couche)

✗ Périodes , , fission, ...

✗ Taux de capture de neutrons,

✗ Interaction -noyau.




**Lien Théorie – Expériences**

Il est impossible de mesurer toutes les observables

→ Développement d'un modèle nucléaire prédictif validé sur quelques mesures.

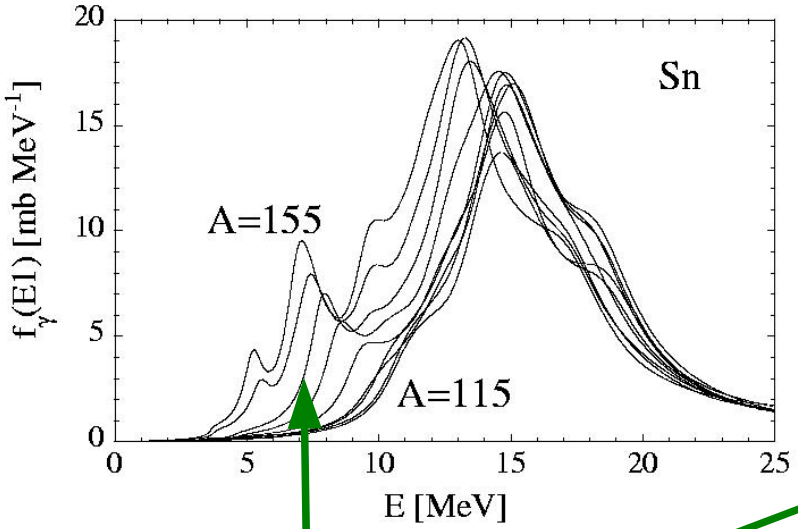
→ Théories microscopiques.

# Modèle <u>microscopique</u> pour le processus r

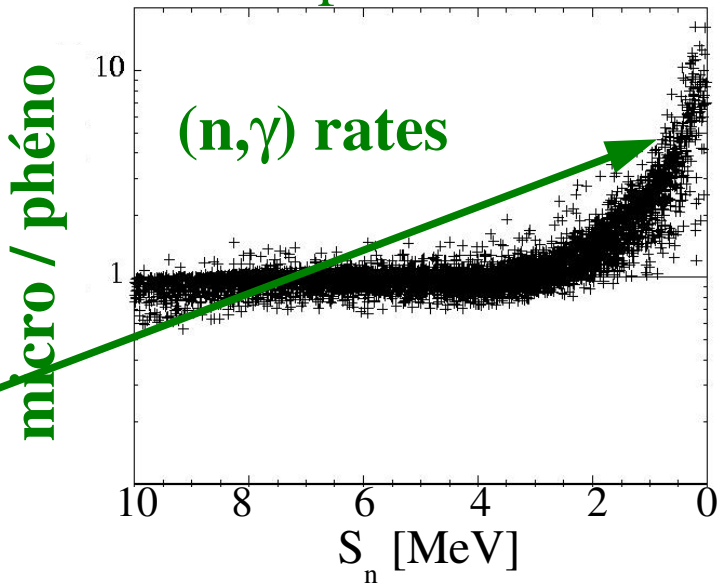
**Modèle de masse** microscopique développé à Bruxelles (HFB).

→ **<u>Modèle à grande échelle pour les modes collectifs (QRPA)</u>**

$E_{GDR}$(micro) ~ $E_{GDR}$(phéno) : =400 keV




taux de capture de neutrons



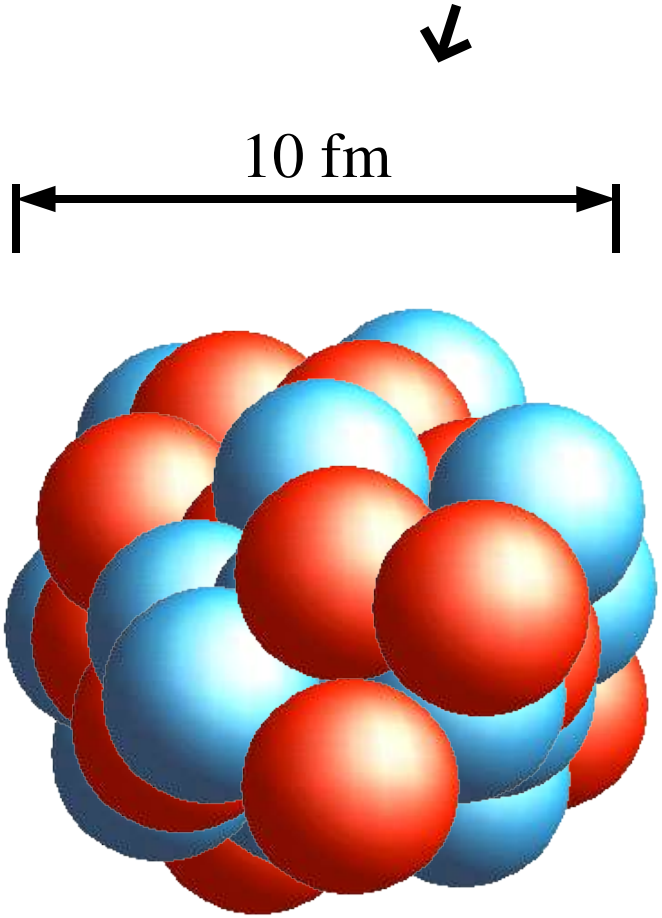

résonance de basse énergie

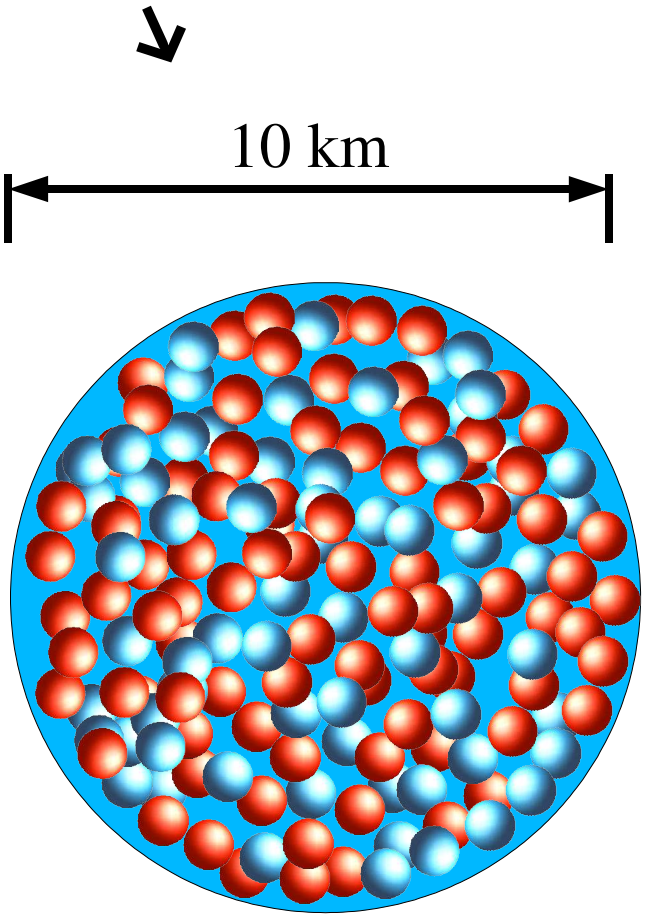
**A l'avenir** :

✗ Interactions - noyau,

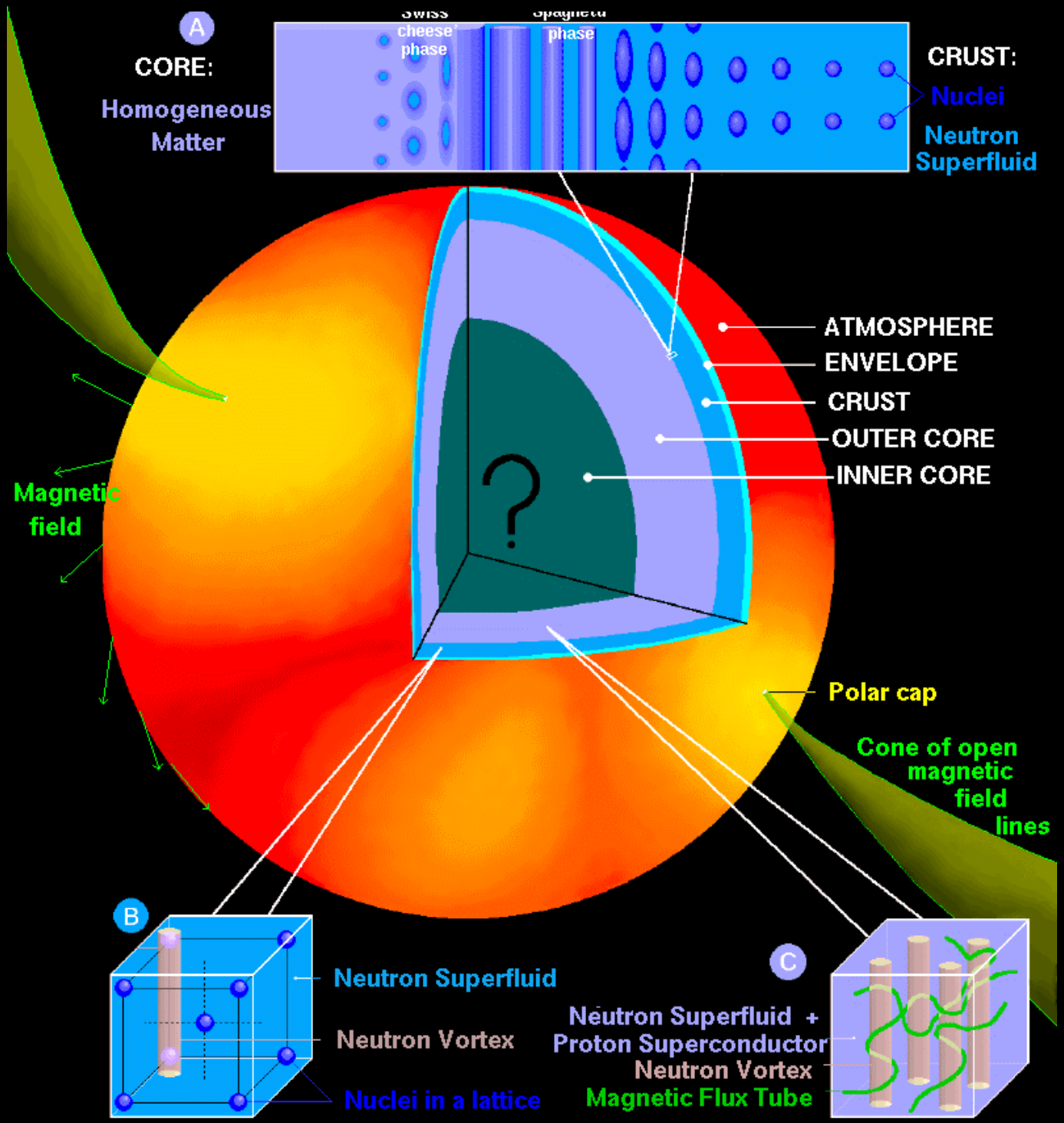
✗ Perfectionnement des modèles microscopiques.

# Des noyaux aux étoiles à neutrons



# Structure d'une étoile à neutrons

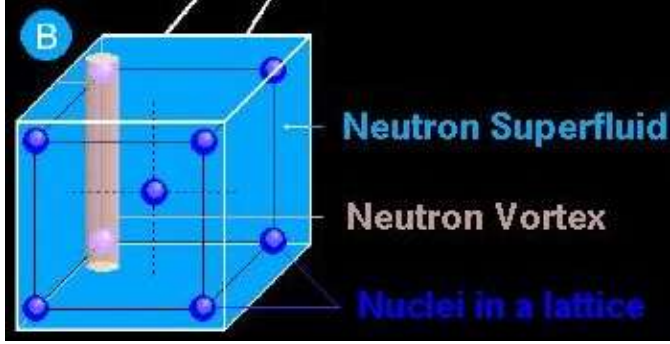



**1.5 Masse solaire**

**10 km de rayon**

**rotation (10-1000 ms)**

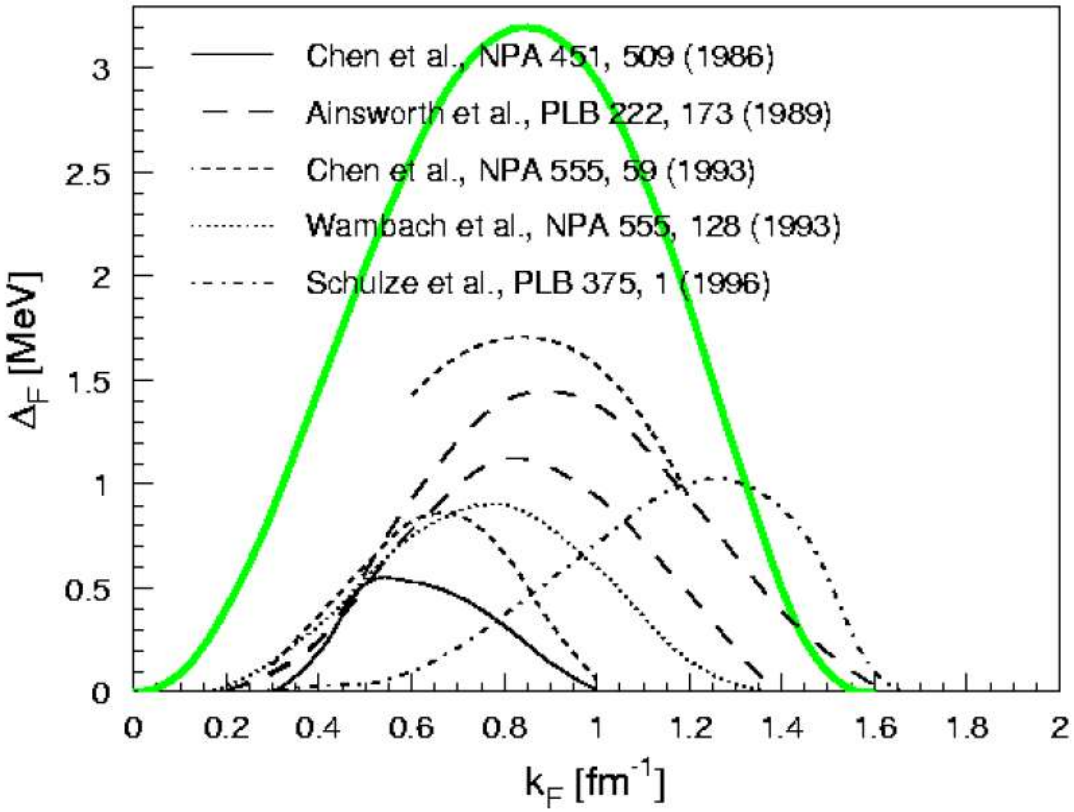
$10^{11}$-$10^{14}$ g/cm$^3$



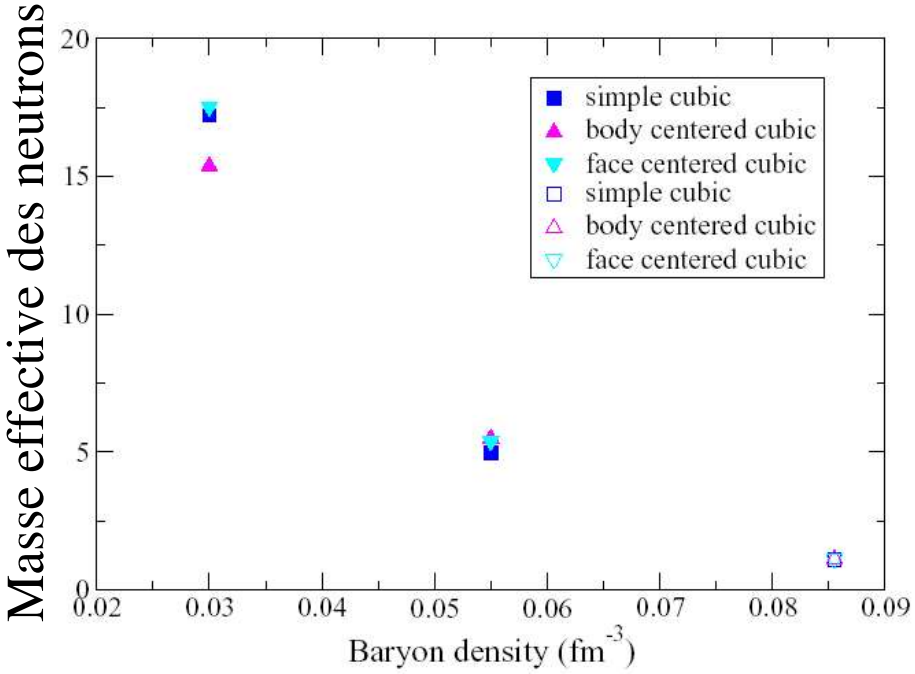

# Ecorce des étoiles à neutrons

*Vortex superfluides attachés au cristal*

→ **Comprendre l'appariement à basse densité**




→ **Comprendre le couplage des vortex au cristal**

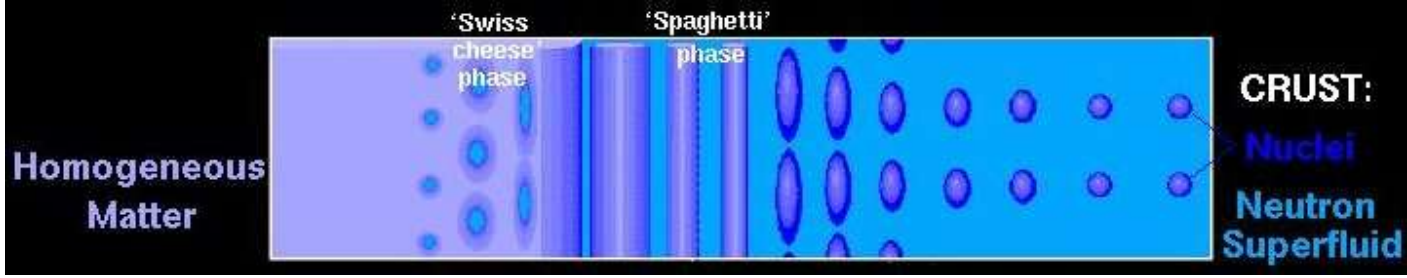



→ Refroidissement,

→ Glitches,

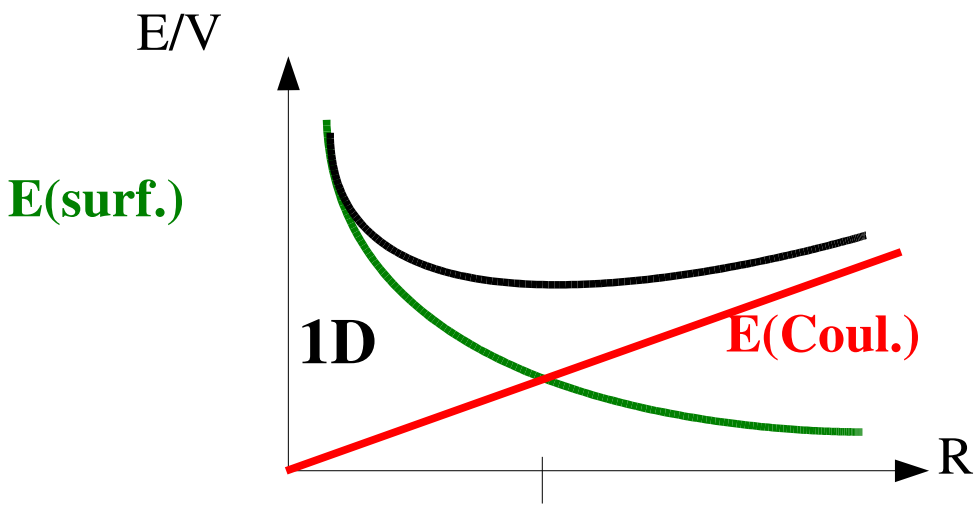
→ Oscillations de surface.

~ $10^{14}$ g/cm$^3$




# Pasta-Phases :

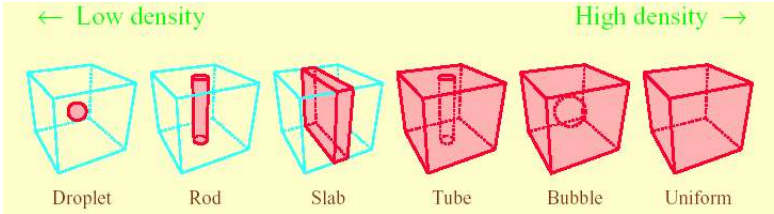
*Transition de phase dans un système frustré !*




Historique :

Negele-Vautherin

Bonche-Vautherin




→ **Application des outils développés en multifragmentation**

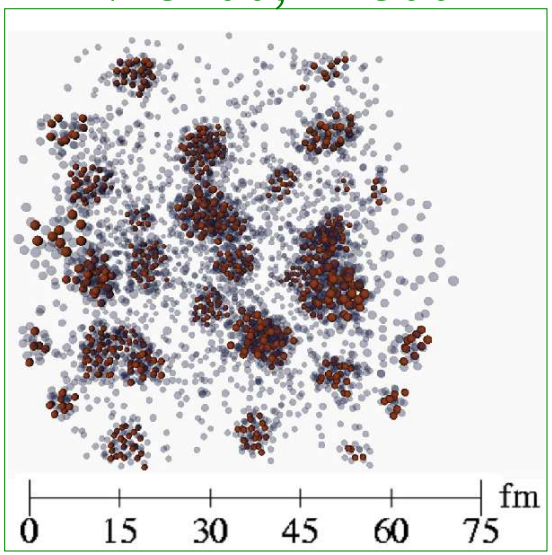
**Exemple :** Modèle semi-classique

configurations générés par métropolis

T=1 MeV, $Y_e$=0.2, ρ=0.01 fm$^{-3}$

**et aussi AMD ...**

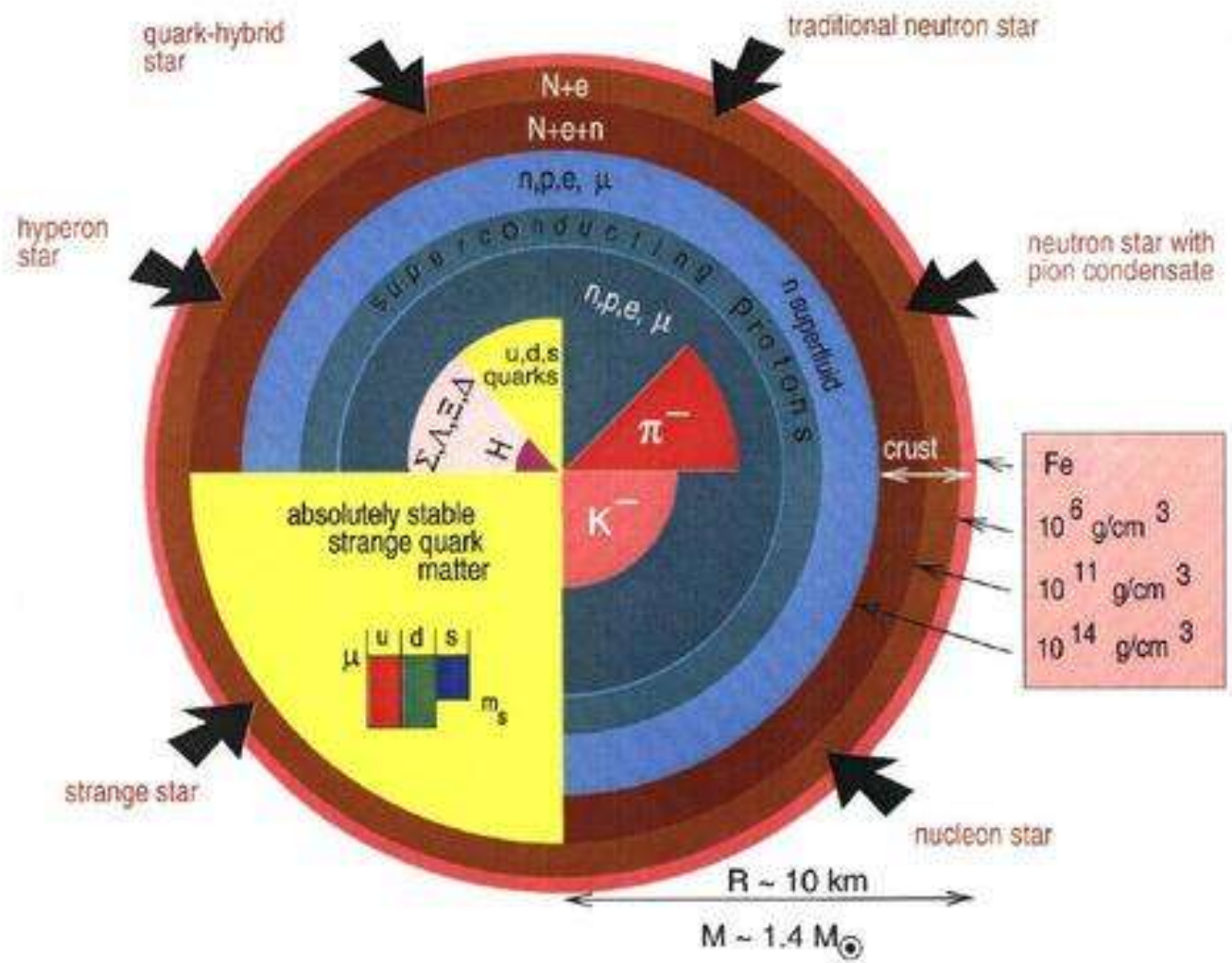
N=3200, Z=800



$> 3.10^{14}$ g/cm$^3$

# Région centrale du résidu

*Qu'est-ce qu'une «étoile à neutrons» ?*




✗ **Etoile de neutrons ?**

✗ **Condensât de pions ?**

✗ **Condensât de Kaons ?**

✗ **Etoile étrange ?**

✗ **Rôle des Hypérons ?**

✗ **Etoile hybride ?**

# Equation d'état de la matière nucléaire

***Noyau dis moi tout !!***

J.-P. Blaizot (~80) : mode résonant monopolaire → **incompressibilité**

Interactions nucléaires :

| **Interactions effectives** | **Interactions réalistes** |
|---|---|
| Skyrme, Gogny | Potentiel de Paris |
| Champ moyen relativiste | Potentiel de Bonn |

**Résultats attendus des études expérimentales :**

**Diagramme de phase à basse densité**

***multifragmentation (INDRA).***

**Dépendance en Isospin**

***peaux de neutrons, halo, modes collectifs dans les noyaux exotiques, multifragmentation asymétrique en isospin (FAZIA).***

Cf. *Dynamique et thermodynamique nucléaire*, Rémi Bougault.

**Diagramme de phase à haute densité**

***déconfinement des quarks (CBM GSI).***

Cf. *Plasma - quark - gluon*, Session 2.

# Prospectives pour les modèles de supernovae et d'étoiles denses

*De nombreuses questions à résoudre*

- ✗ **Interactions ν – matière, ν – noyau ;**
- ✗ **Processus r de la nucléosynthèse ;**
- ✗ **Propriétés des écorces des étoiles à neutrons ;**
- ✗ **Equation d'état de la matière dense.**

**<u>Projets en reflexion :</u> être aussi capable d'appliquer nos résultats in-situ.**

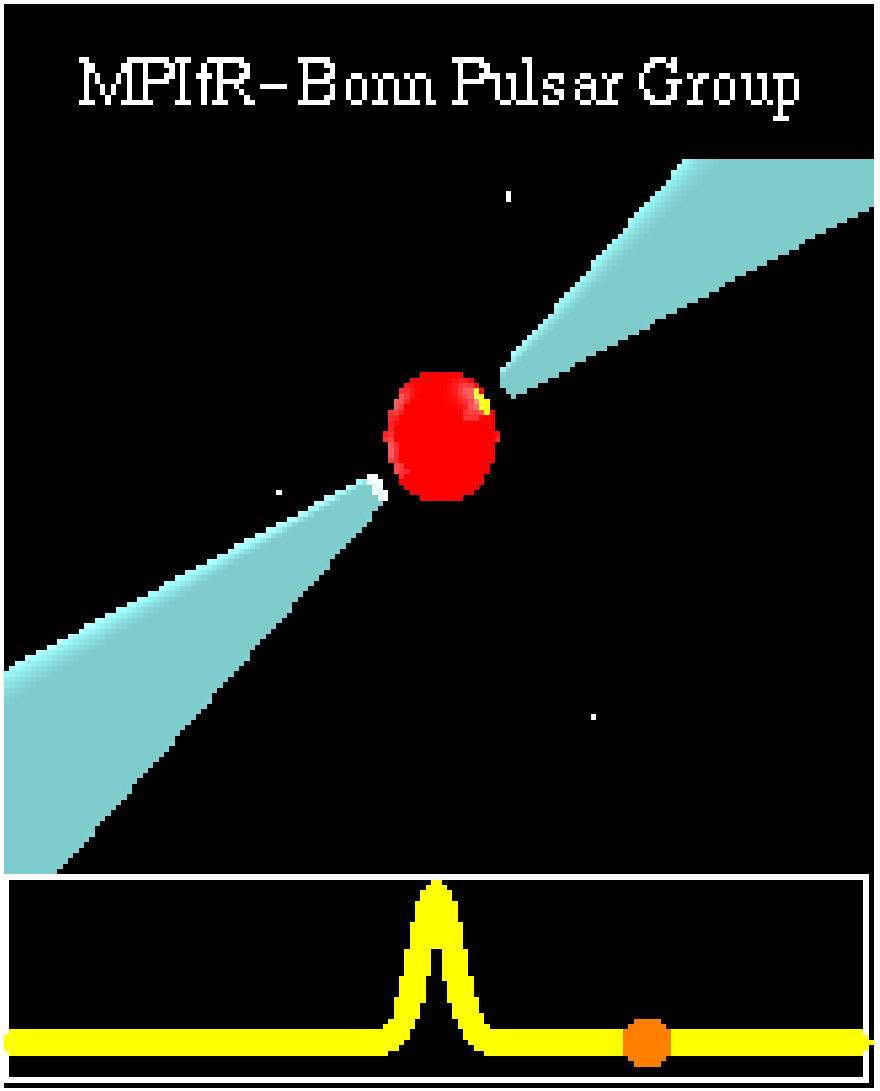
✗ Développement d'un modèle de supernova type II associant : propagation des neutrinos, vents neutriniques, nucléosynthèse, éjection de matière ;

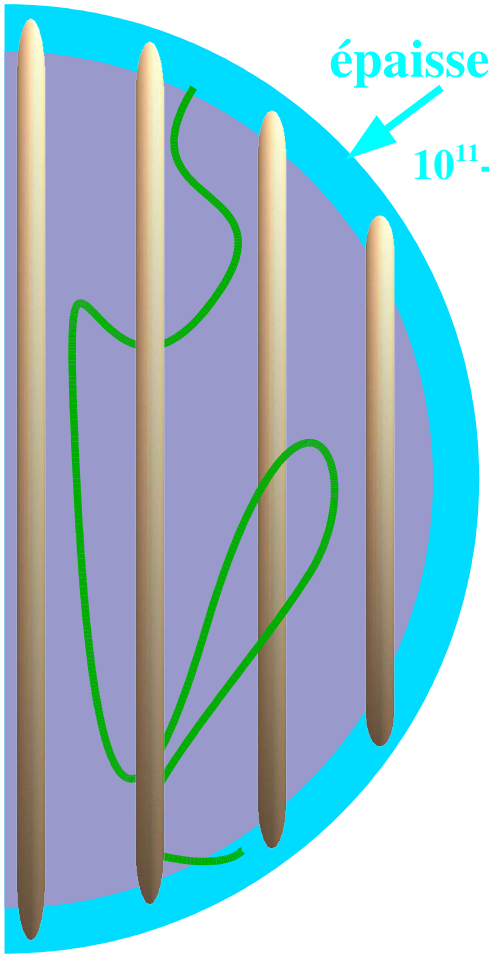
✗ Modèle d'étoile à neutrons.

# Perspectives

*Nouveaux faisceaux & nouvelles observations → nouveaux modèles*

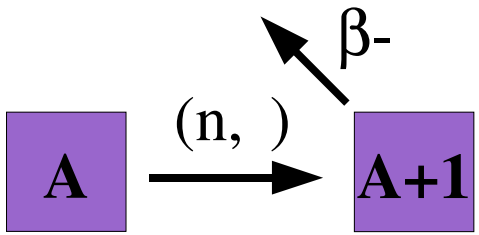
- ✗ **Qu'est-ce qu'une «étoile à neutrons» ?**
- ✗ **Interactions ν – matière :**
  - → **Effets du milieu nucléaire (excitation multipaires)**
  - → **Opalescence critique des neutrinos**
- ✗ **Interactions ν – noyau :**
  - → **Lien avec la nucléosynthèse (vents neutriniques, hydrodynamique)**
  - → **Physique des neutrinos**
- ✗ **Processus r :**
  - → **Nouvelles mesures, nouveaux modèles**
  - → **Site : Onde de choc, coalescence finale d'étoiles à neutrons doubles**
- ✗ **Ecorce des étoiles à neutrons :**
  - → **Nouvelles propriétés de la matière (appariement, masse effective)**
  - → **Interaction Coulombienne dans les pasta phases**

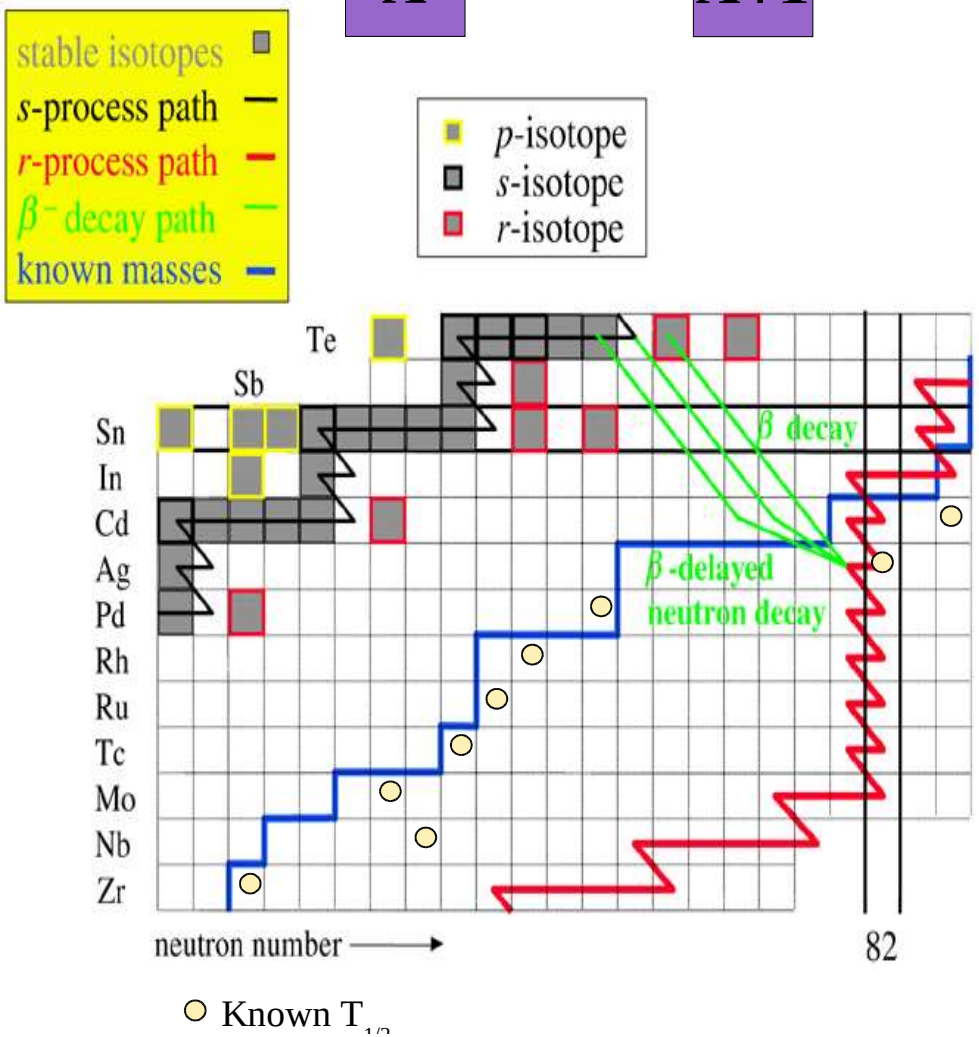

MPIfR-Bonn Pulsar Group


Ecorce
épaisseur 1 km
$10^{11}$-$10^{14}$ g/cm$^3$

# Processus r de la nucléosynthèse

*une nouvelle aire de modèles*




**Observables nécessaires :**

- ✗ Energie de séparation neutron, (Fermeture de couche)
- ✗ Temps de ½ vie ,
- ✗ Taux de capture de neutrons,
- ✗ Interaction -noyau.

**Lien Théorie – Expériences**

Il est impossible de mesurer toutes les observables

→ Théorie nucléaire indispensable validée sur quelques mesures.

# Des noyaux aux étoiles denses

*Comprendre l'univers grâce aux laboratoires terrestres*

**Effondrement gravitationnel :**

- Aspects hydrodynamiques ;
- Couplage neutrinos – matière nucléaire : temps de diffusion, opalescence ;

**Onde de choc :**

- Réchauffement par vents neutriniques ;
- Site possible pour la r-nucléosynthèse ;

**Région centrale de l'étoile à neutrons :**

- Equation d'état de la matière dense ;
- Effets de la température, de l'asymétrie d'isospin ;

**Ecorce de l'étoile à neutrons :**

- Pasta-phases ;
- Couplage du superfluide de neutrons à l'écorce ;

**Systèmes d'étoiles doubles**

**DAPNIA Saclay**

**GANIL Caen**

**IPN Lyon**

**IPN Orsay**

**LUTH Meudon**

# Historique rapide

**1880,** Camille Flammarion à propos du soleil

*«La chaleur émise par le soleil à chaque seconde est égale à celle qui résulterait de la combustion de $10^{24}$ tonnes de charbon de terre brûlant ensemble.»*

**1932,** Découverte du neutron,

Landau suggère l'existence des étoiles à neutrons

**1939,** 1er modèle d'étoile à neutrons (TOV)

**1957,** 1er modèle d'étoile sur séquence principale ($B^2HF$)

**1966,** 1er calcul quantitatif de supernovae (scénario prompt)

**1967,** Observation d'un pulsar radio

**1984,** Scénario retardé (vents neutriniques)

**1987,** Obervation en direct d'une supernova

?? restes de supernovae

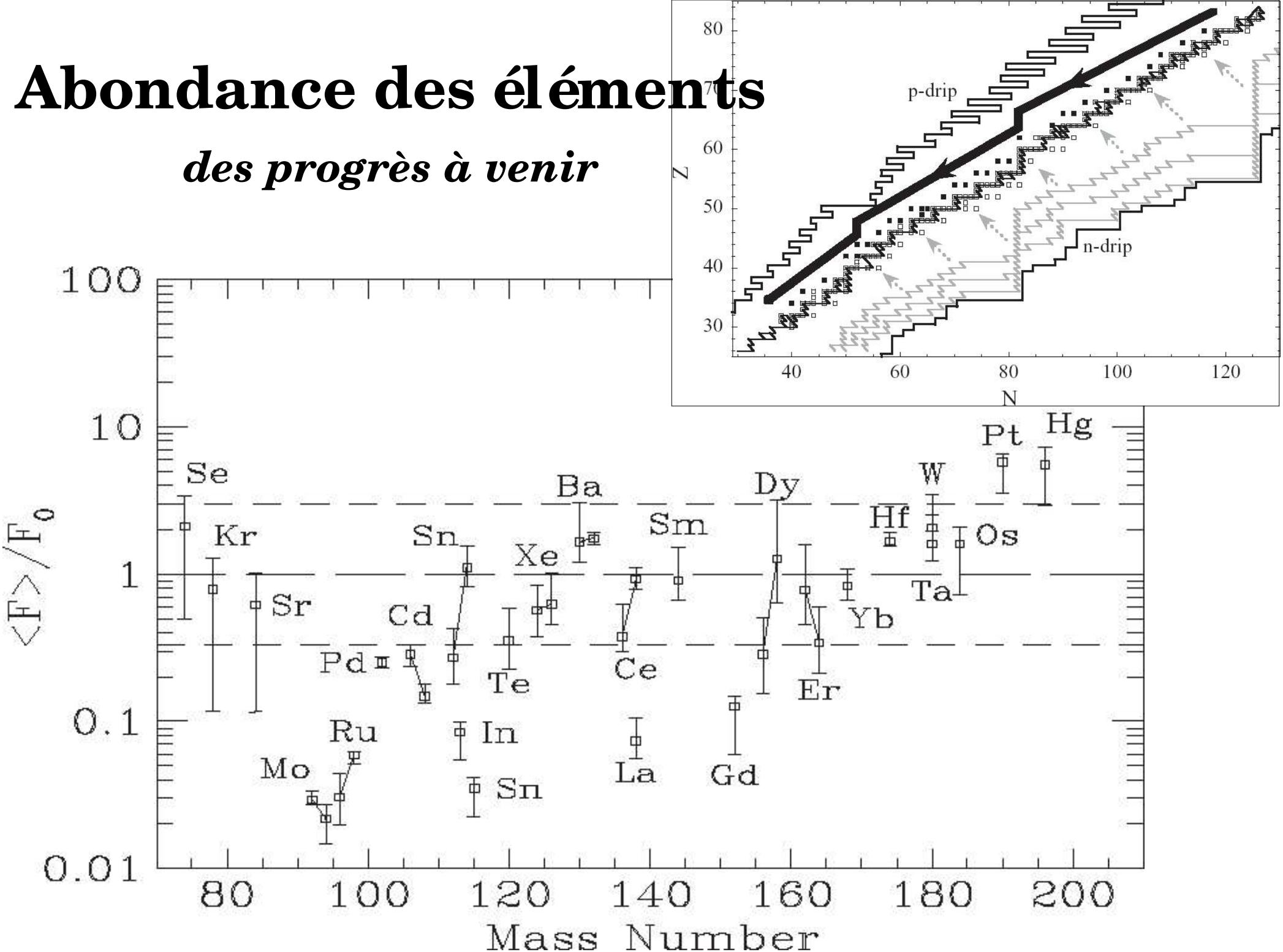
1200 pulsars radio

200 pulsars X

6 Etoiles à neutrons doubles

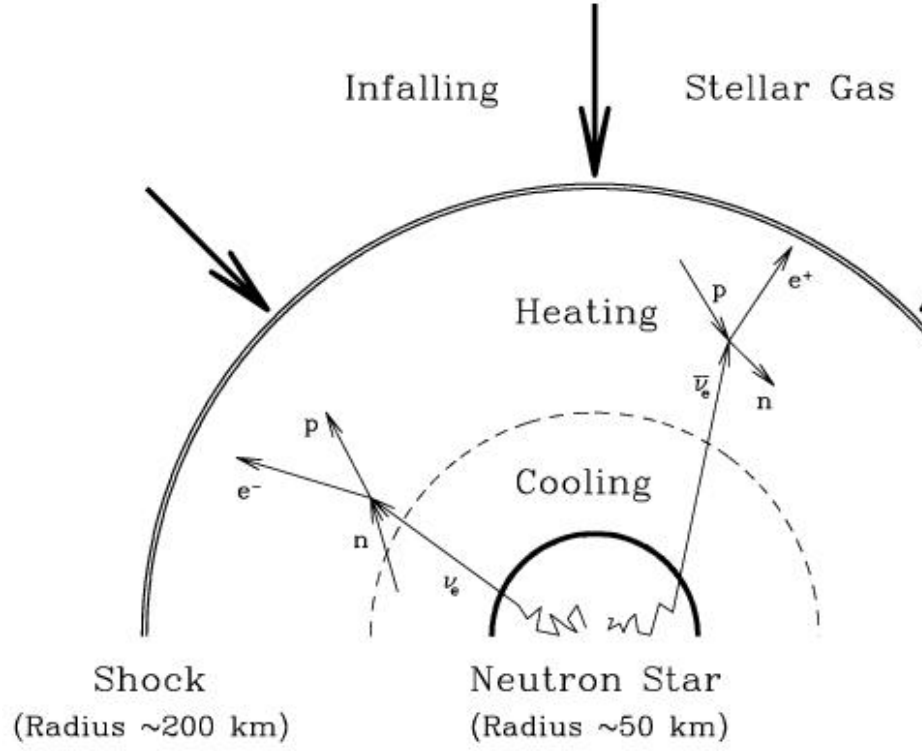
# Abondance des éléments

***des progrès à venir***



# Onde de choc

## *Comment la rechauffer ?*




**<u>Vents neutriniques :</u>** Interaction -noyau

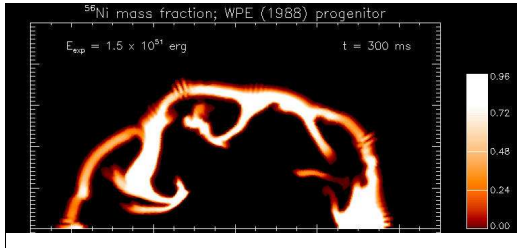
- → Calculs théoriques sections efficaces
- → Beta-beams de basse énergie
- → Physique des neutrinos

Cf. *Neutrinos dans l'univers*, Cristina Volpe.

**<u>Autres mécanismes ???</u>**

Cf. *Univers thermonucléaire*, J.-P. Chièze.

- → Convections, champ magnétique, ...
- → 2ème explosion centrale
  (EN → trou noir, effets dynamiques)




**localisation du $^{56}$Ni, t ~ 0.5 s**

**→ Site possible pour le processus r ?**

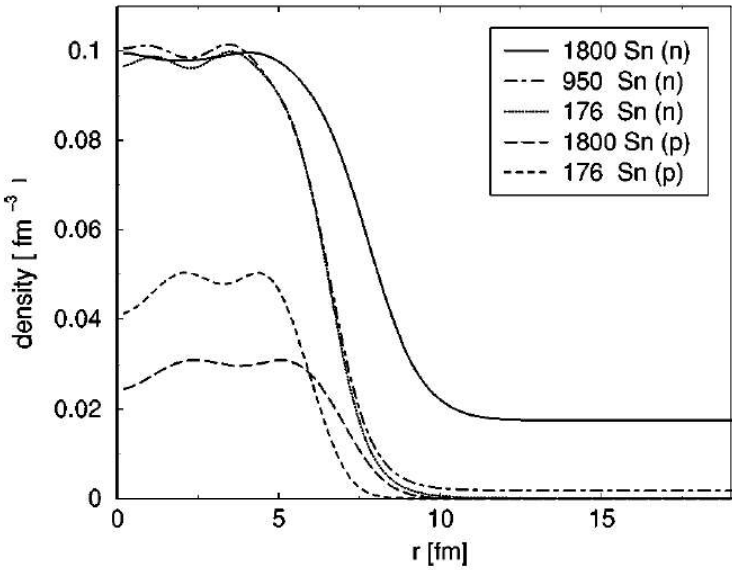
**→→ développement de modèles hydrodynamiques associant vents neutriniques + nucléosynthèse**

$10^{11}$-$10^{14}$ g/cm$^3$

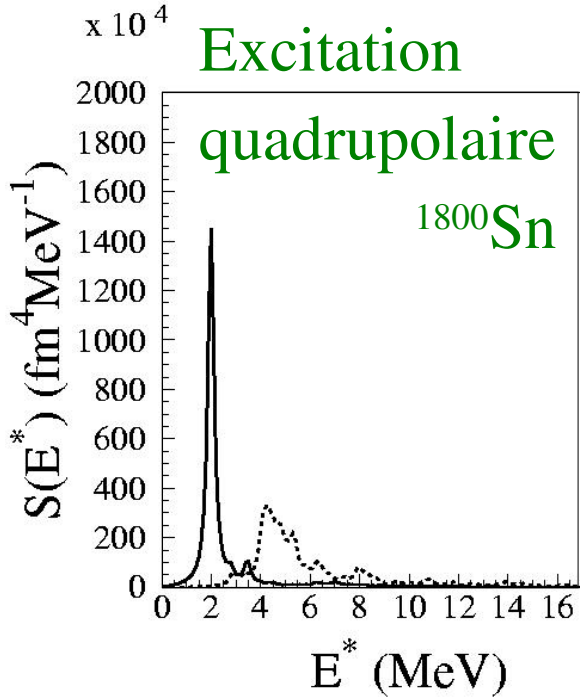
# Ecorce des étoiles à neutrons

***cristal baigné dans un fluide de neutrons***

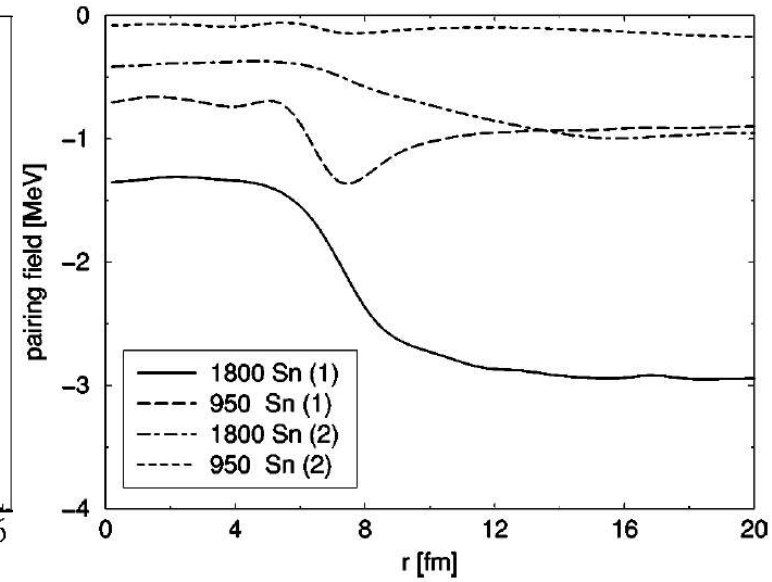
densité de matière




Excitation quadrupolaire $^{1800}$Sn




appariement



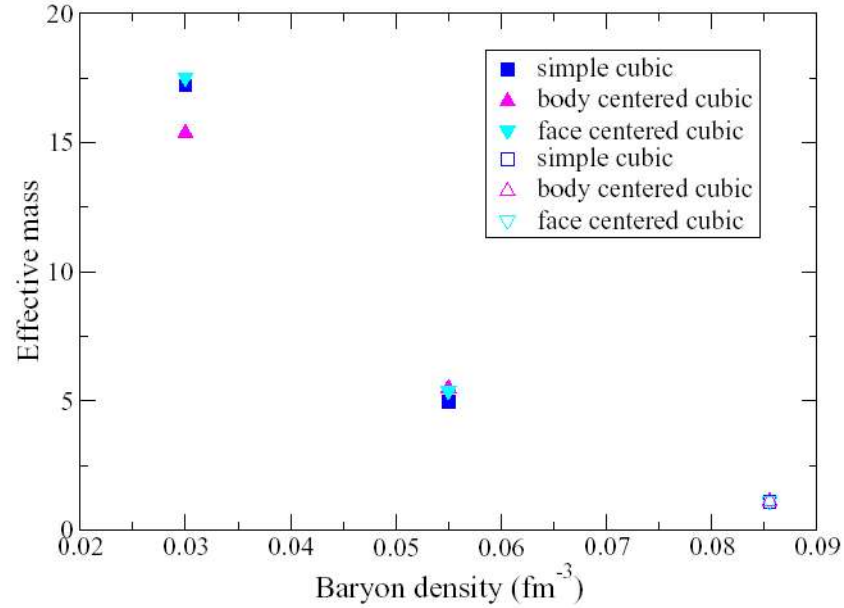

↗

Calcul Hartree-Fock Bogoliubov :

Résolution des équations de diffusion :

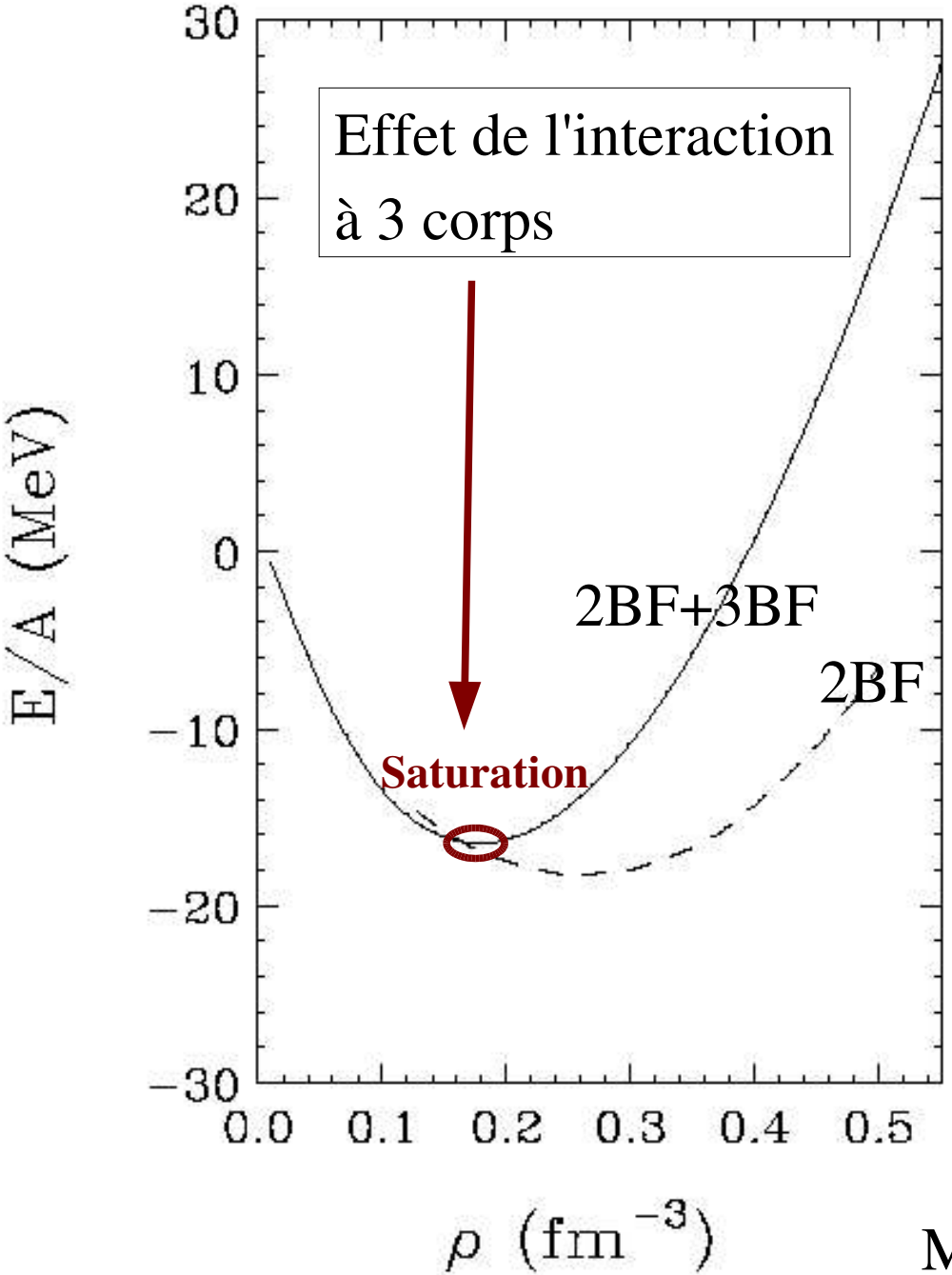
Modification de la masse des neutrons par diffusion sur le cristal

→

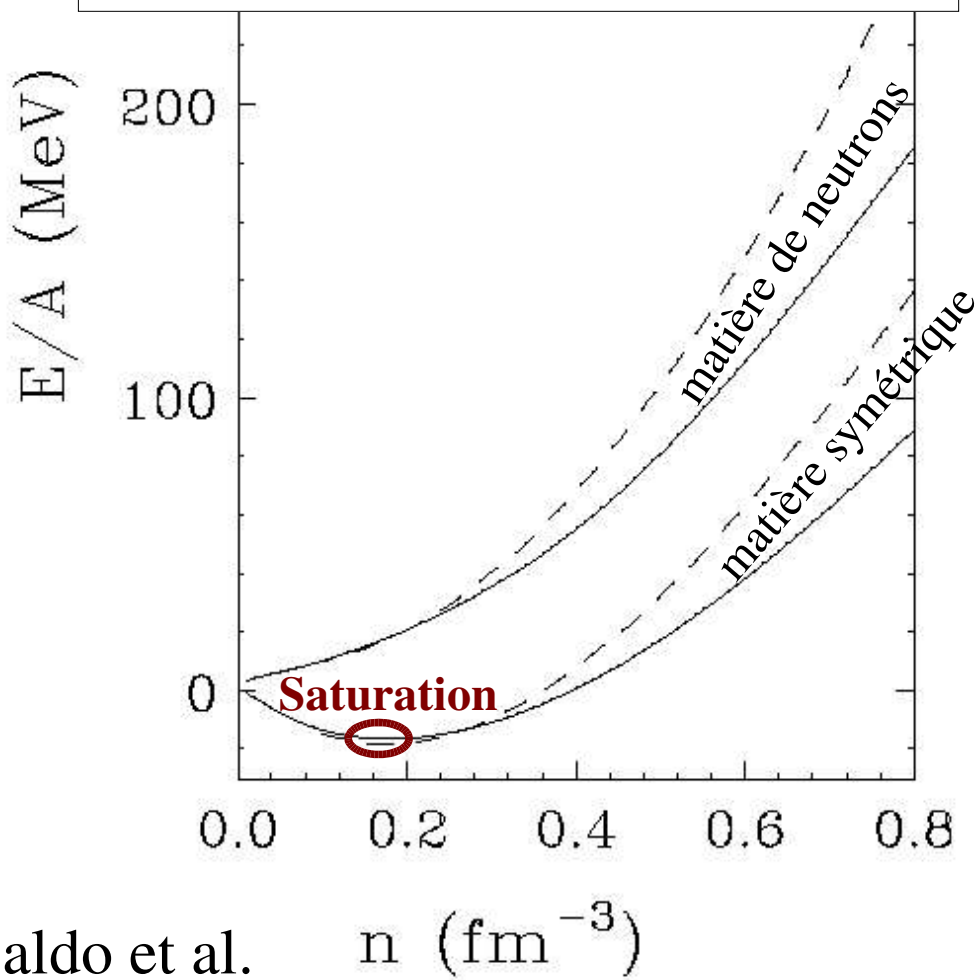


# Equation d'état de la matière nucléaire

***Calculs ab-initio***



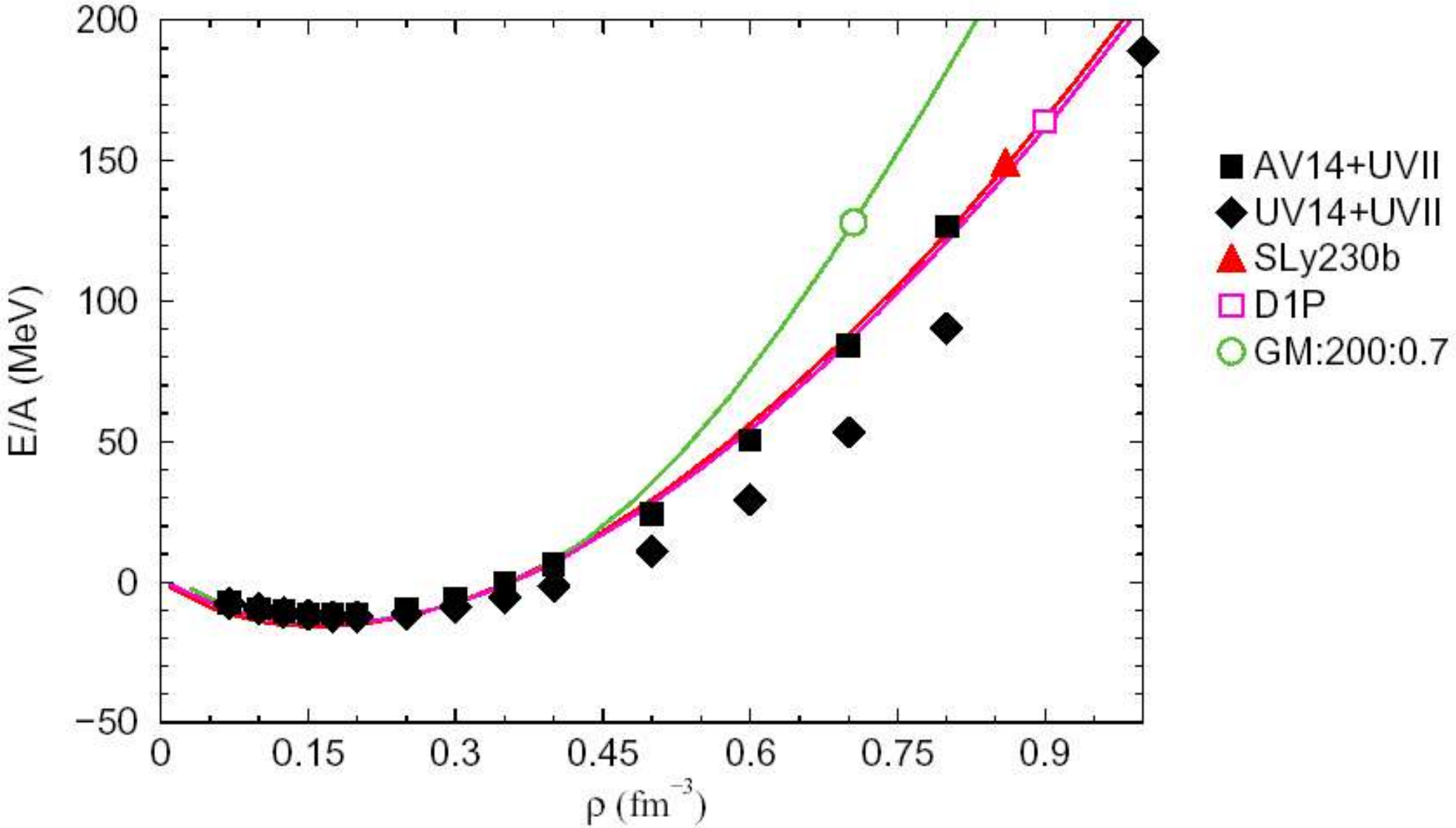

Comparaison :
modèle non-relativiste 2BF+3BF
⇕
modèle relativiste 2BF




M. Baldo et al.

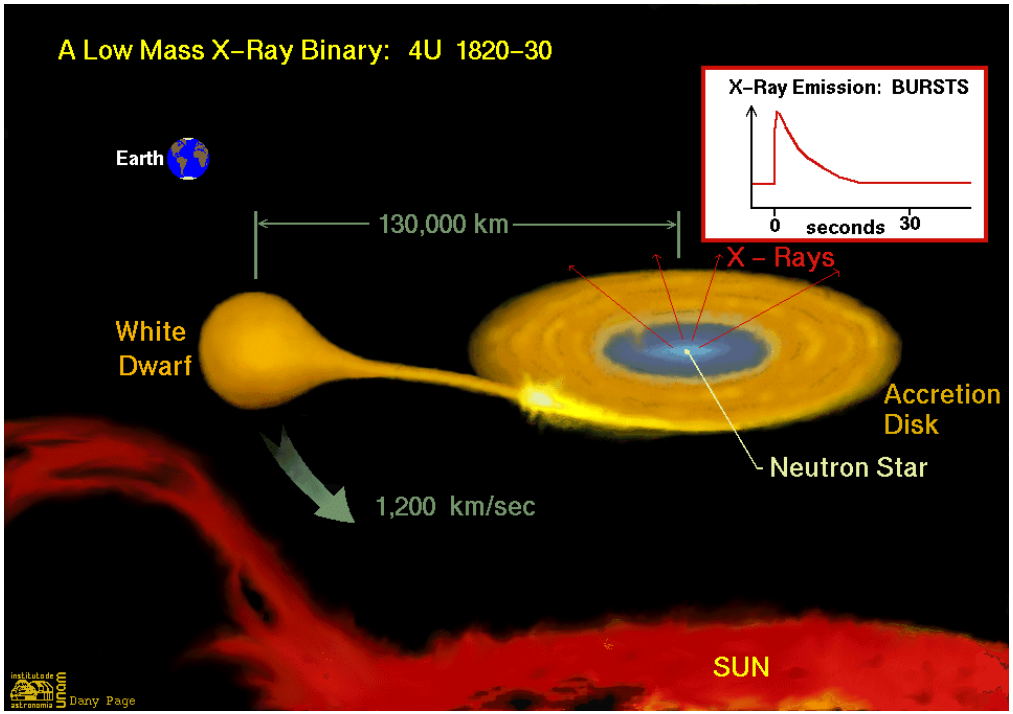
# Equation d'état de la matière nucléaire

*Contrainte des modèles effectifs*



# Systèmes binaires

***moitiée des étoiles compactes observées***




**<u>Source de rayons X</u>**

Etoile à neutrons accrétant la matière d'un compagnon

→ processus rp

**<u>Source d'ondes gravitationnelles</u>**

Système double d'étoiles compactes (oscillations périodiques, coalescence finale)

→ Equation d'état de la matière dense

→ processus r

# Les perspectives dépendent aussi très fortement des observations

**Proto-étoiles à neutrons**

Matière chaude et asymétrique.

Flux de neutrinos provenant d'une SN proche.

**Etoiles à neutrons**

Propriétés de la croûte,
Pairing.

Refroidissement (X, ...),
Glitches,
Sursauts $\gamma$.

**Etoiles hybrides – Etoiles étranges**

Déconfinement des quarks.

Fréquence de rotation rapide.

**Systèmes binaires**

Accrétion, coalescence.

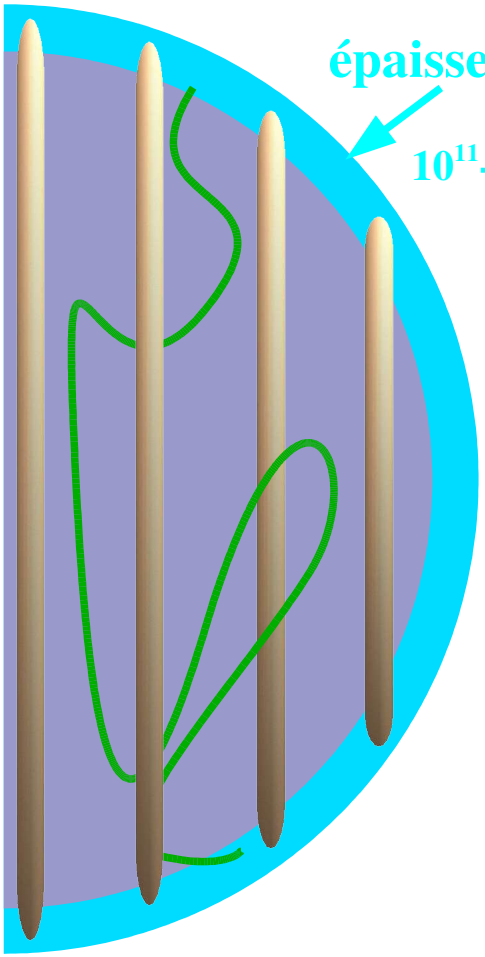
Rayonnement X,
Ondes gravitationnelles.

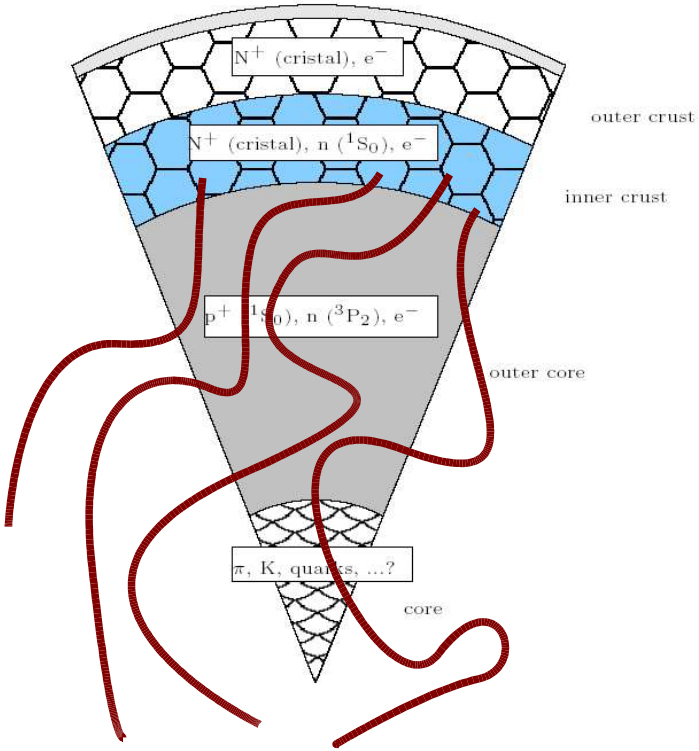
# Perspectives

Expériences en laboratoire

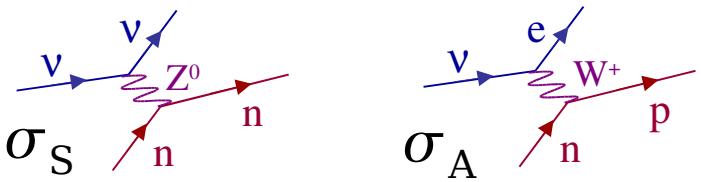
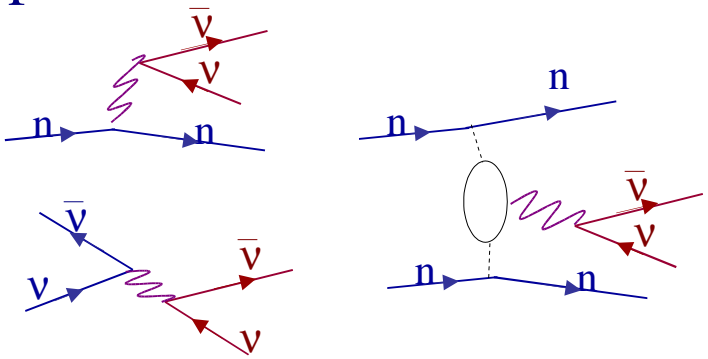
Observations

Modélisations



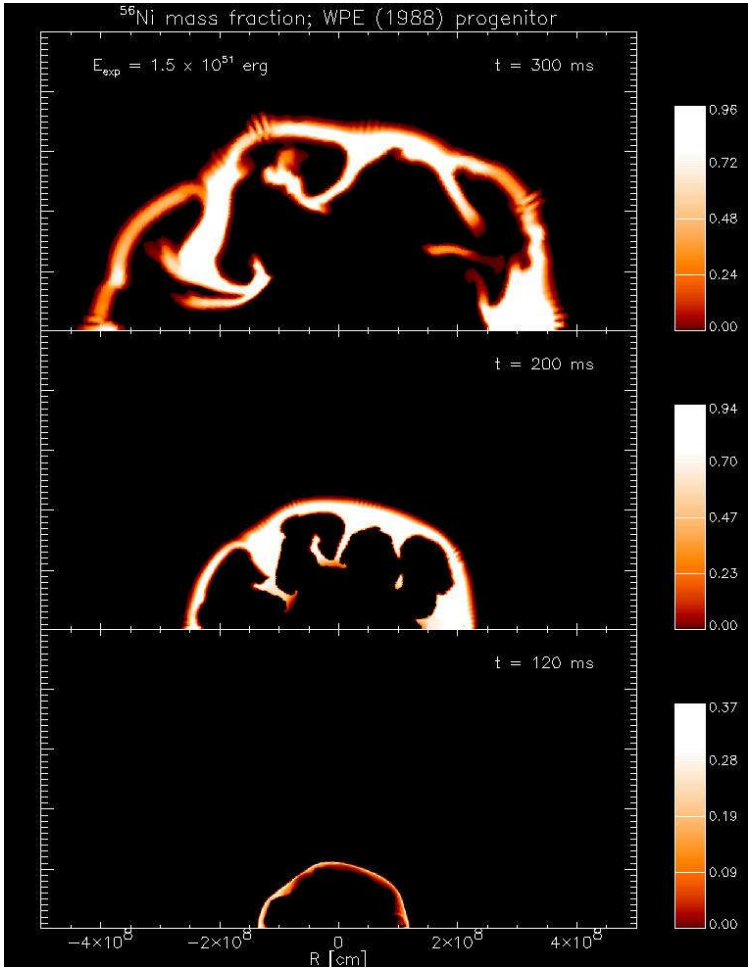
# Rôle de l'interaction faible dans les SNII

| | processus | moyens d'étude |
|---|---|---|
| ms | - Capture électronique<br>$e^- + p \rightarrow n +$ | Réactions d'échange de charge avec des noyaux exotiques (GANIL, GSI, RIA). |
| s | - Emissivité neutrinos<br>  <br> | Détecteurs (SuperK, Mégatonne), Physique des neutrinos, Corrélations dans la matière nucléaire basse densités (INDRA). |
| s | - Interaction neutrino-noyau | Faisceaux de neutrinos (beta-beam de basse énergie) |
| h<br>Ma | - Opacité neutrinos<br>  <br> | Refroidissement des étoiles à neutrons (Chandra, XMM-Newton), Glitches. |

temps

# Problématiques liées aux supernovae II

## Explosion convective



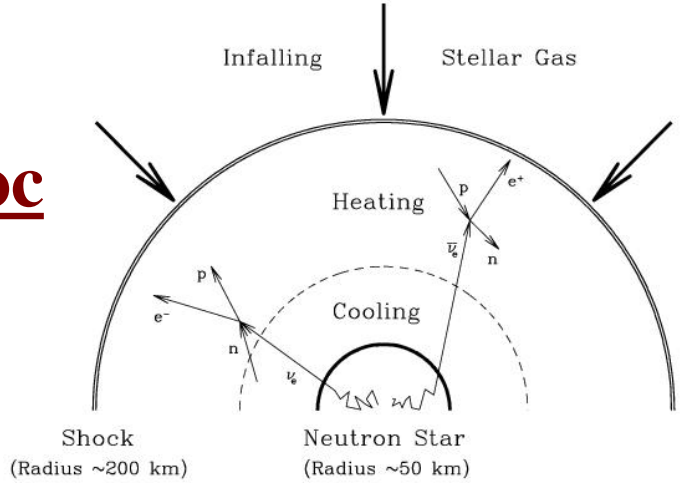

Aspects hydrodynamiques,

Nucléosynthèse éléments lourds

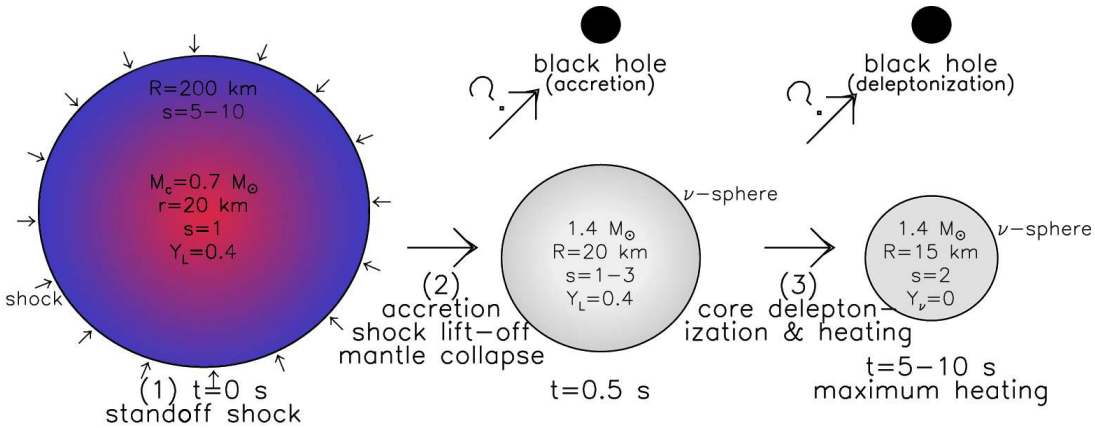
## Onde de choc

Interaction

-noyaux



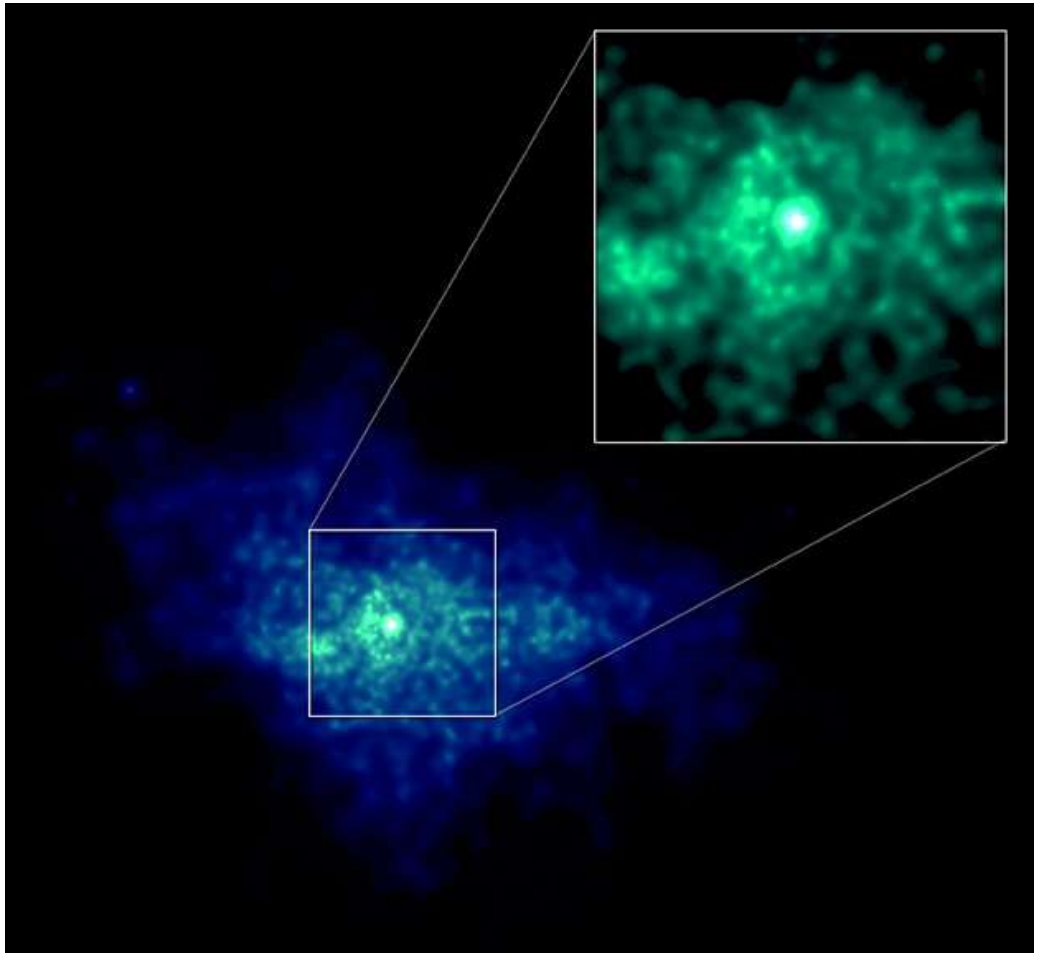

## Résidu central

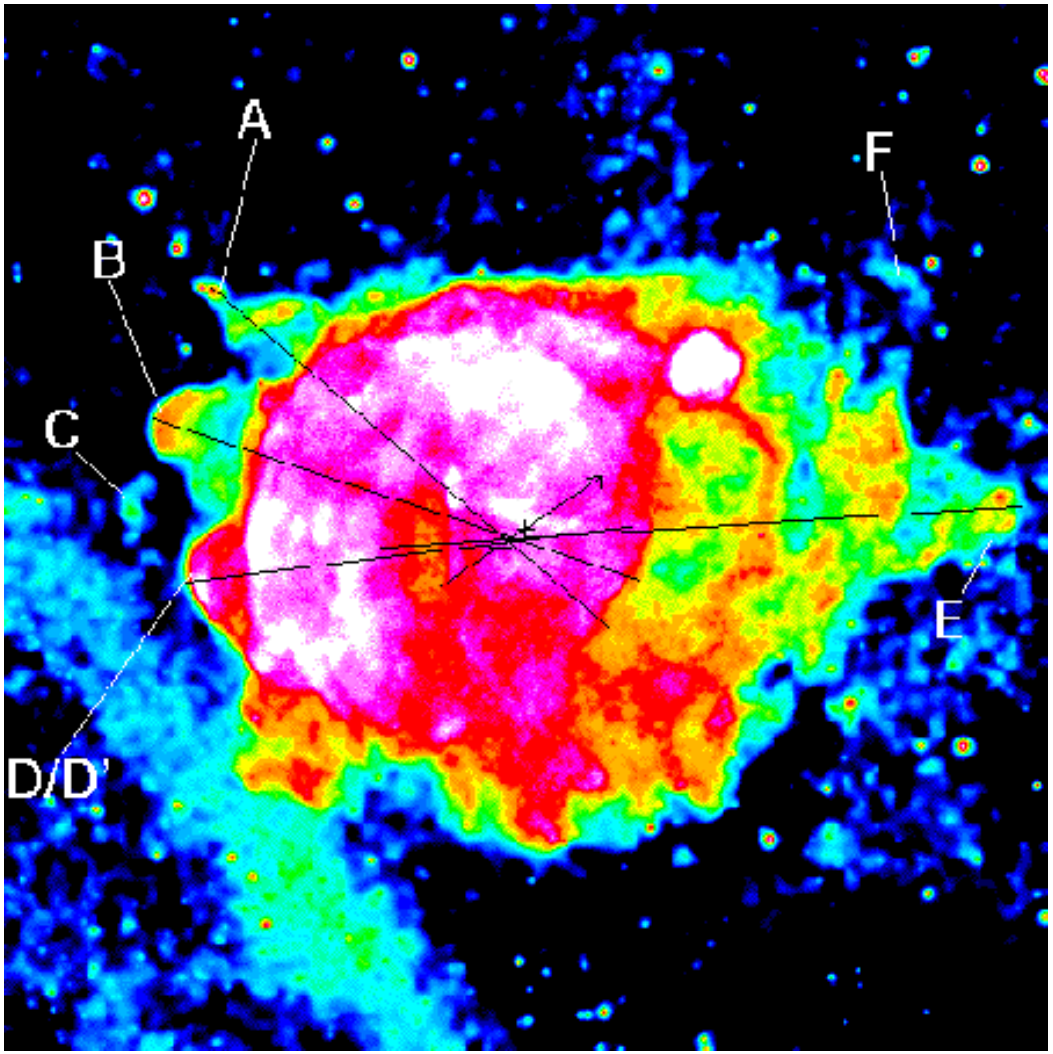



Equation d'état matière chaude asymétrique,

Interaction -matière

# Vela SuperNova Remnant



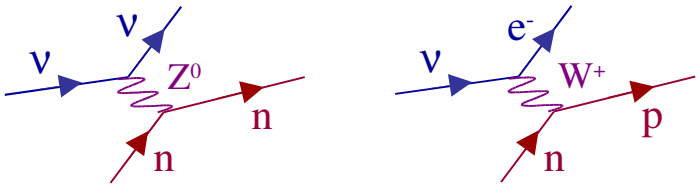


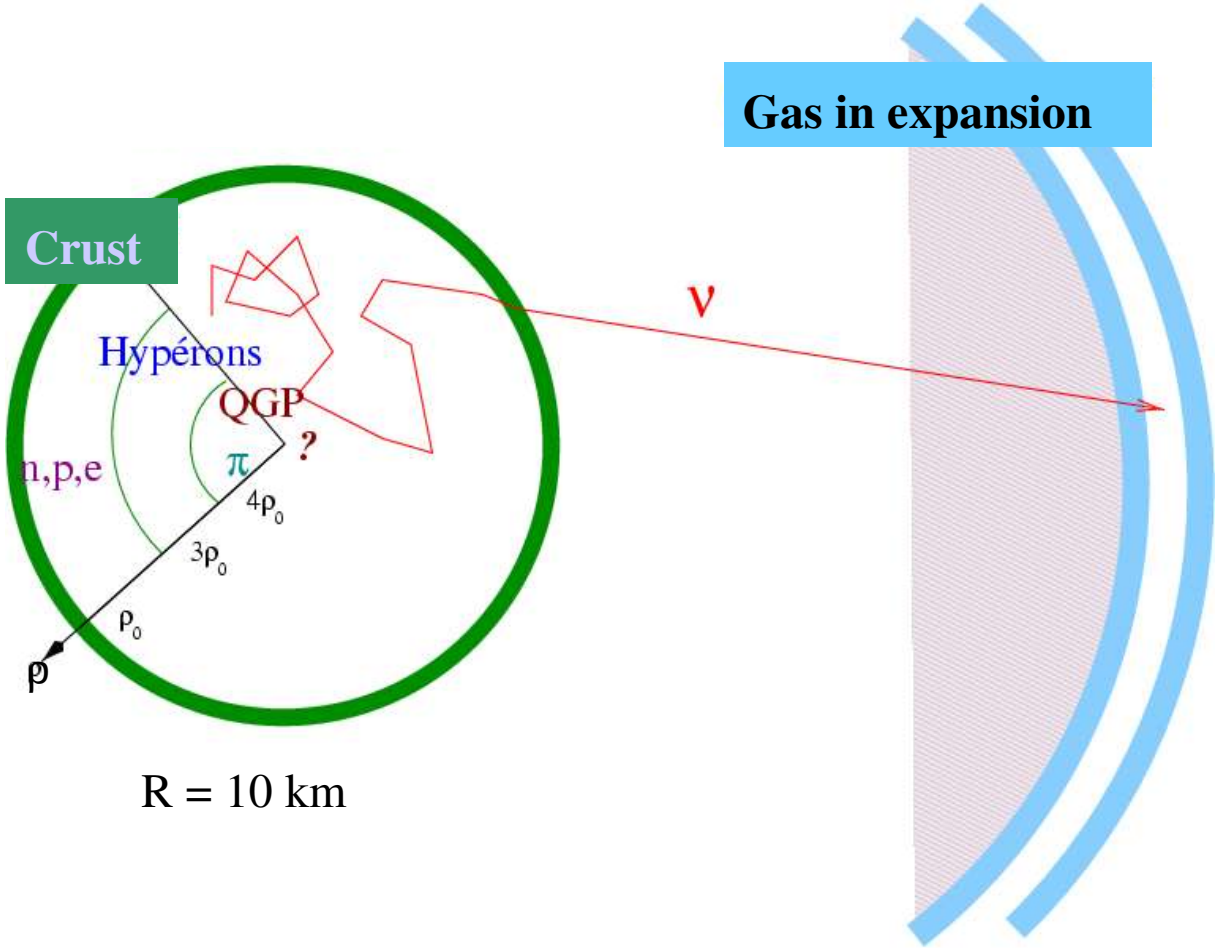
# Neutrino heating

**Composition : n, p, e, ν**

**Reactions :**

**scattering** **absorption**




R = 10 km

**ν "rich" phase**

$Y_l = \rho_l/\rho_B = 0.4, \; E_\nu = \mu_\nu$

**ν "poor" phase**

$\mu_\nu = 0, \; E_\nu = 3T$

**$0.5\,\rho_0 < \rho < 4\,\rho_0$**

**$5 < T < 50$ MeV**

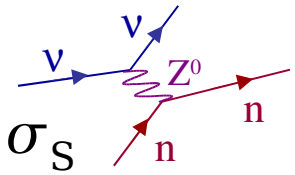
**Model : pure neutron star**

**Only neutrons**

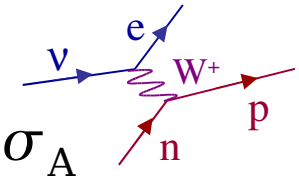
**Only scattering reactions**

# Processus de refroidissement du résidu central

Emissivité :

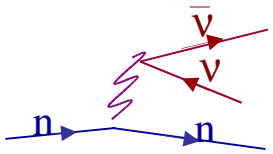


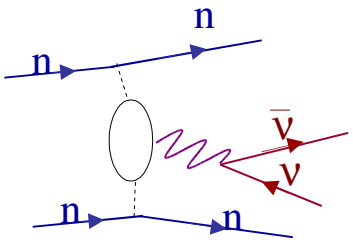

$\sigma_S$

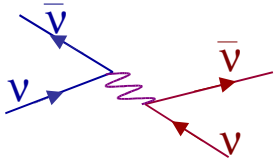



$\sigma_A$

Opacité :

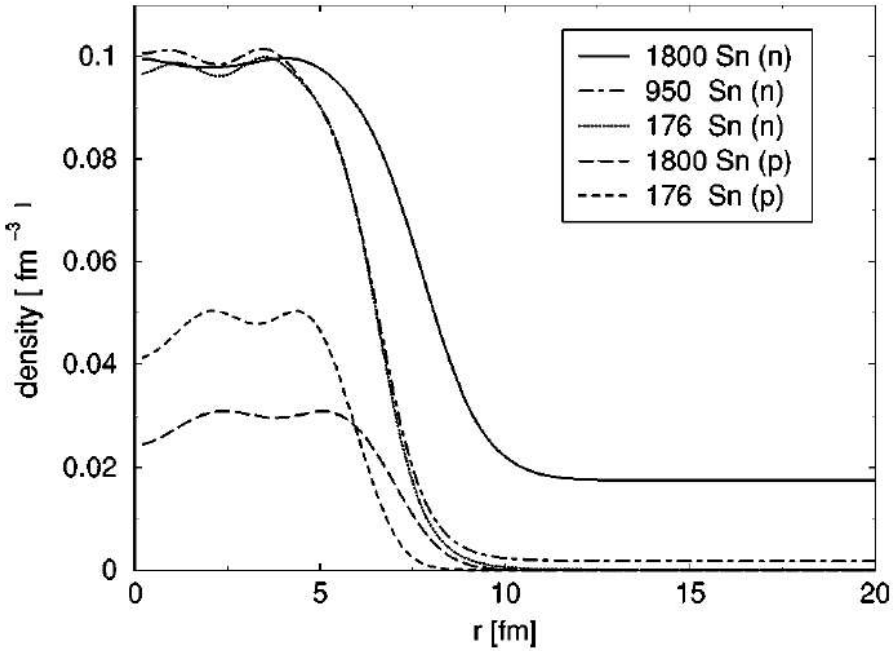


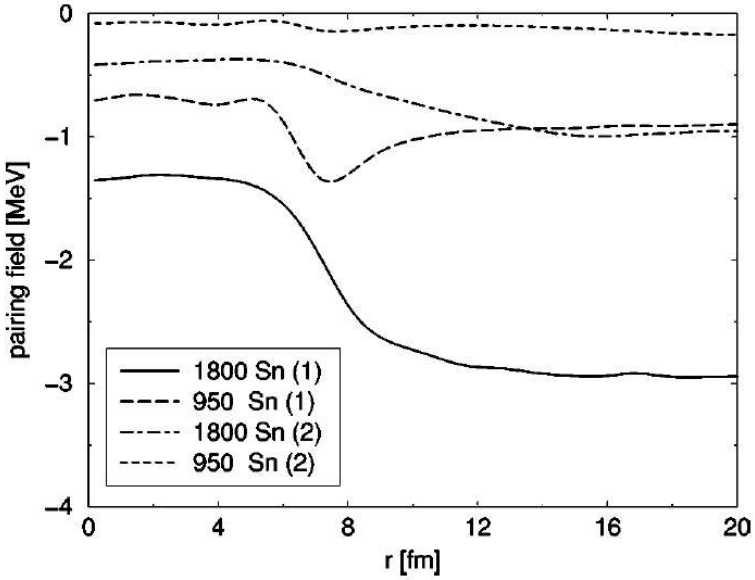



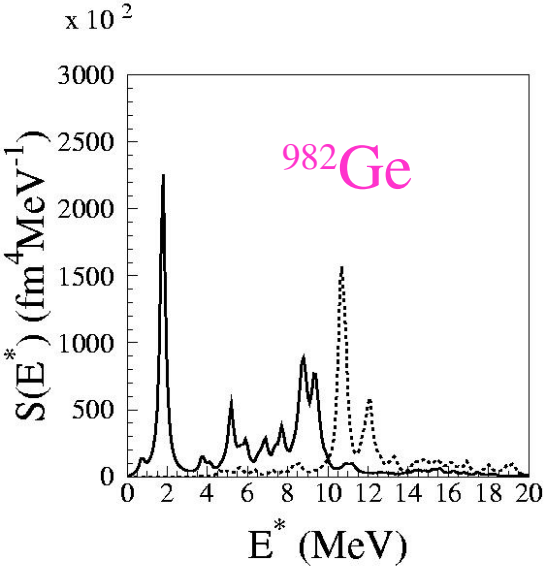



# gap, capacité calorifique

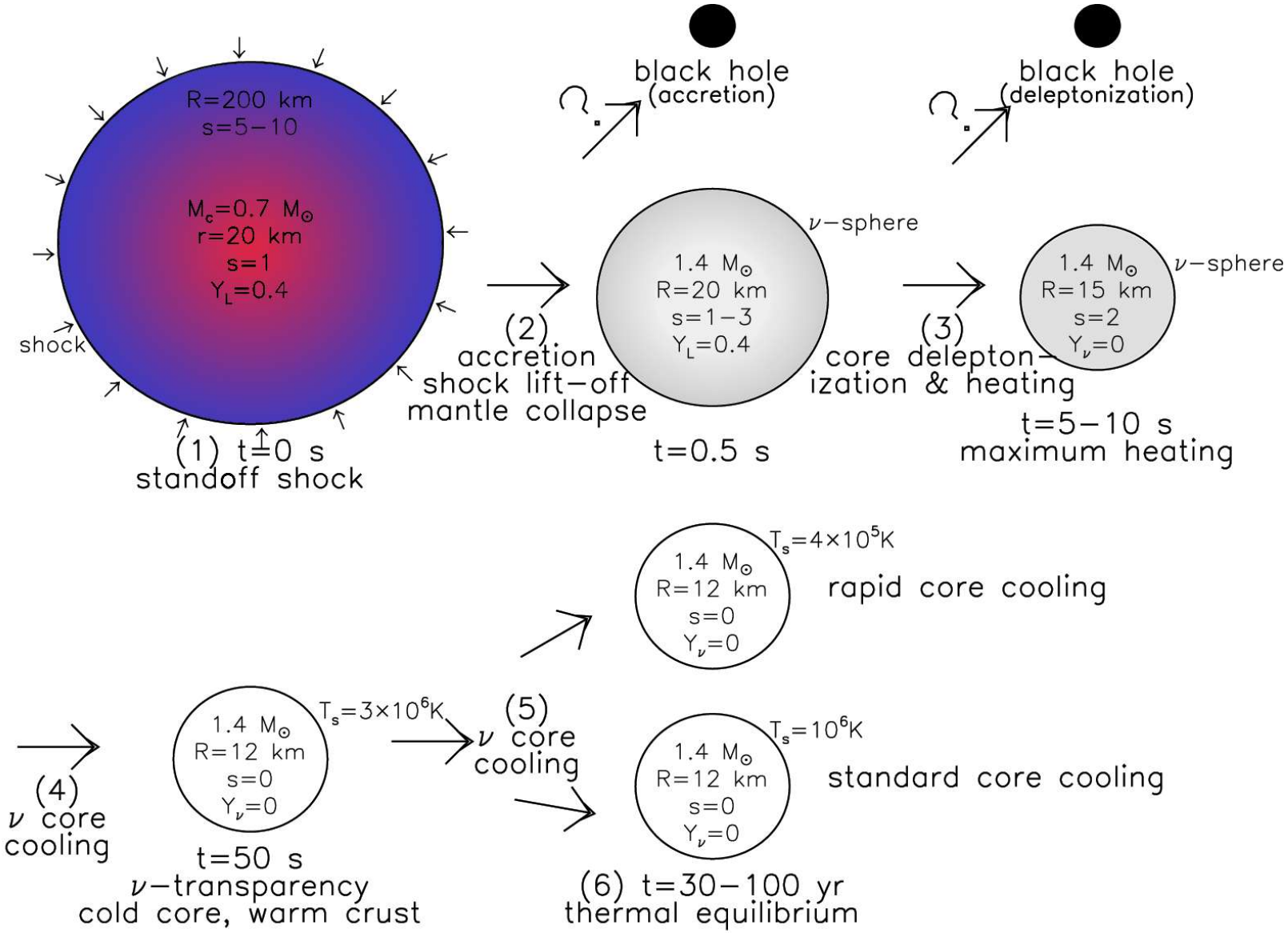
$$C_p \propto E^{-\Delta}$$



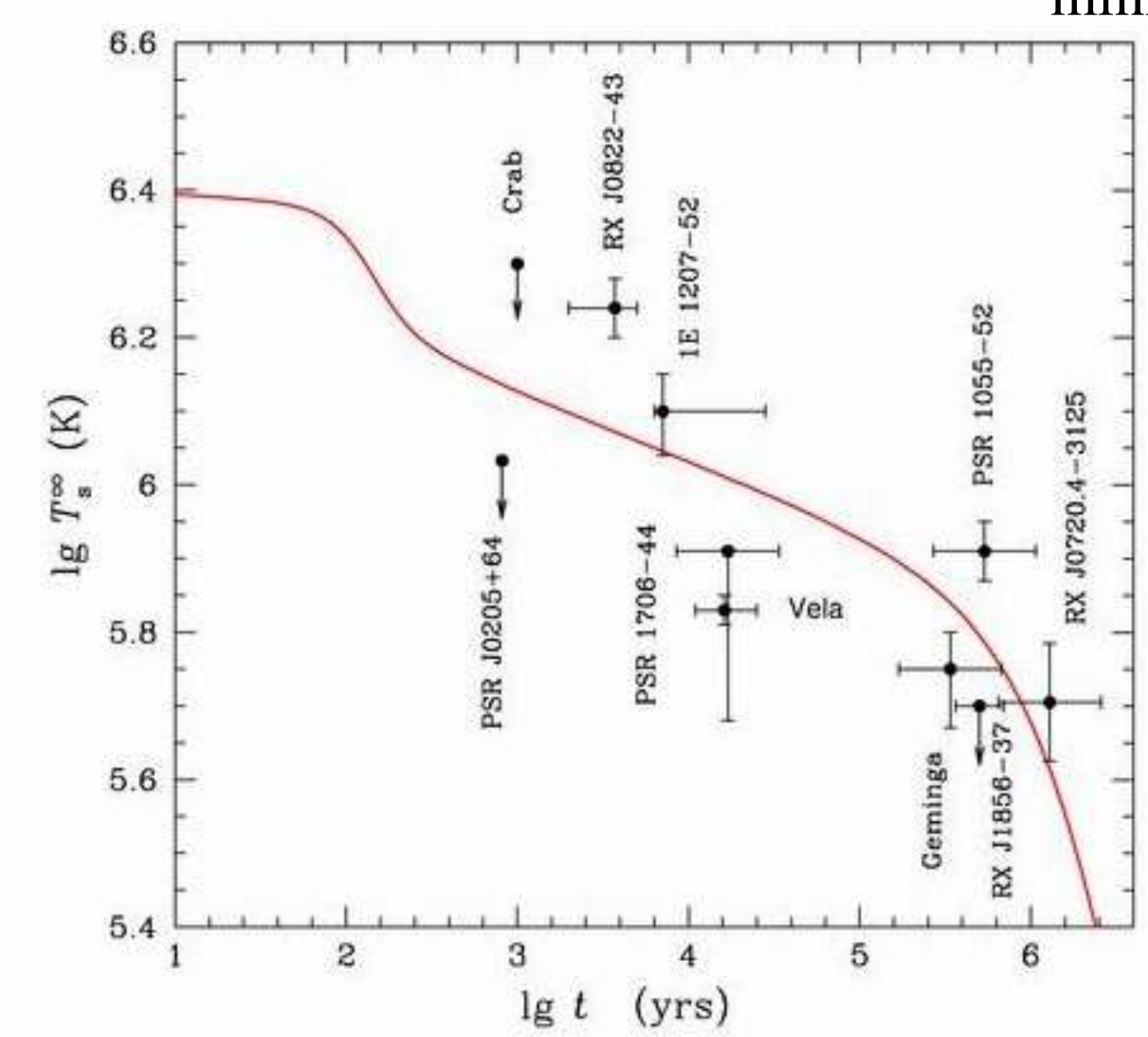
# Résidu central des Supernovae II



# Refroidissement des étoiles à neutrons

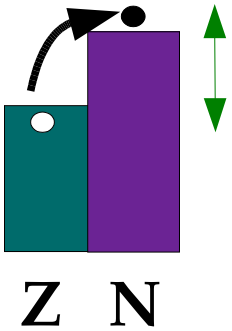
Pairing !!

minimal model !!



# Taux de captures électroniques

$$e^- + p \rightarrow \nu + n$$




- **Fueller** (1985) : Pendant l'effondrement, $Y_e$ diminue
  - ⇨ Les noyaux sont de plus en plus riches en neutrons
  - ⇨ capture electronique sur les noyaux bloquée par Pauli

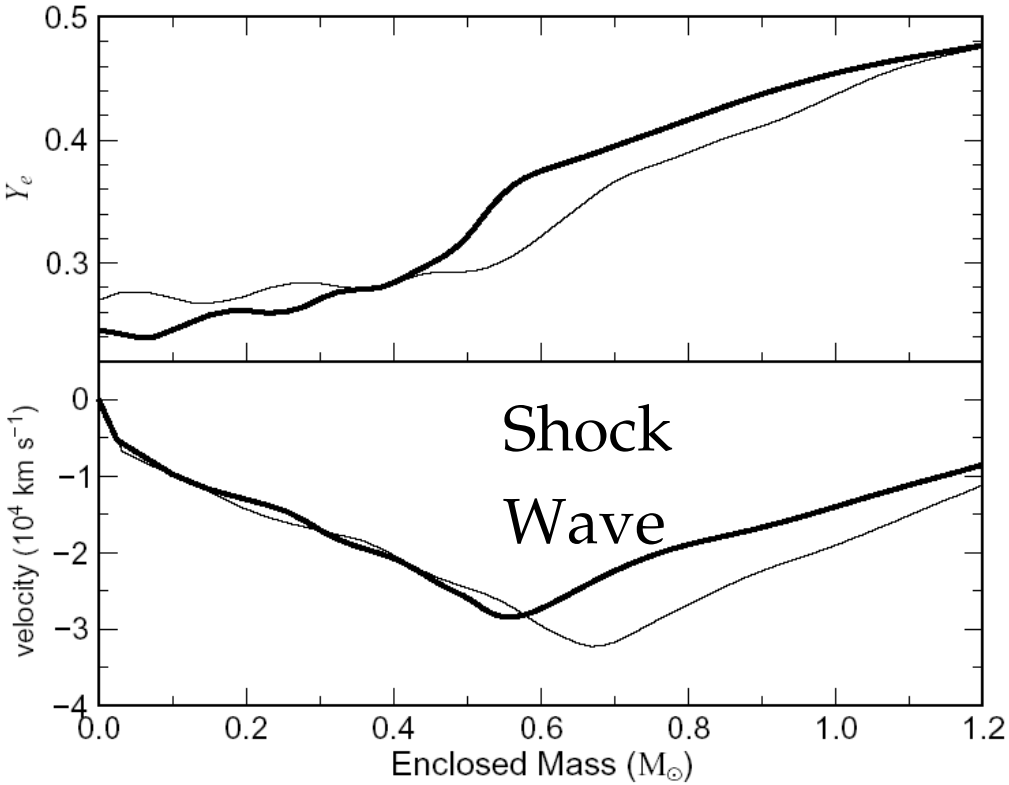
  **Seuls les protons libres interviennent dans la capture electronique**

- **Langanke, Martinès-Pinedo** PRL 90 (2003) : Noyaux N>40

Bloquage de Pauli réduit par
la **temperature**
et les **corrélations**

Effet (GT) observé dans
$^{68}$Ni, $^{72}$Ge et $^{76}$Se

Monte Carlo Shell Model
pour A=65-112
dans la couche pf-sdg



# Perspectives

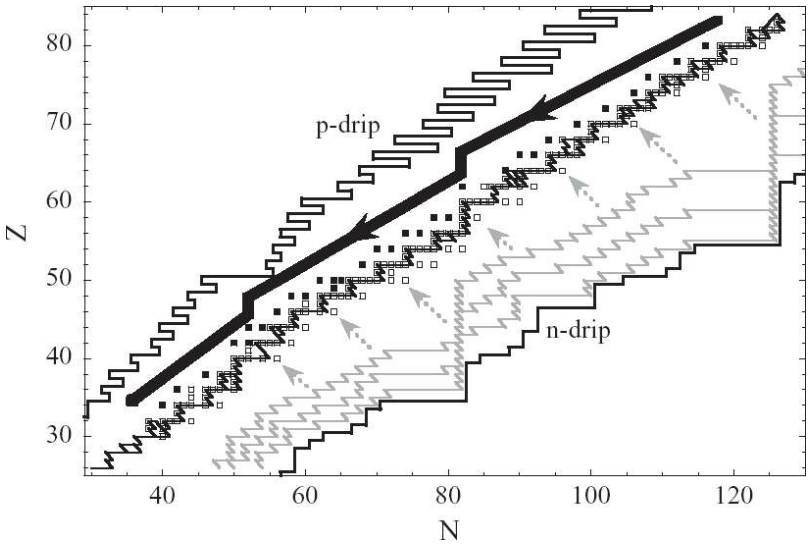
• Nucléosynthèse : généralisation et unification des calculs microscopiques à grande échelle

•RCUHE : effets sur la cheville et la coupure GZK

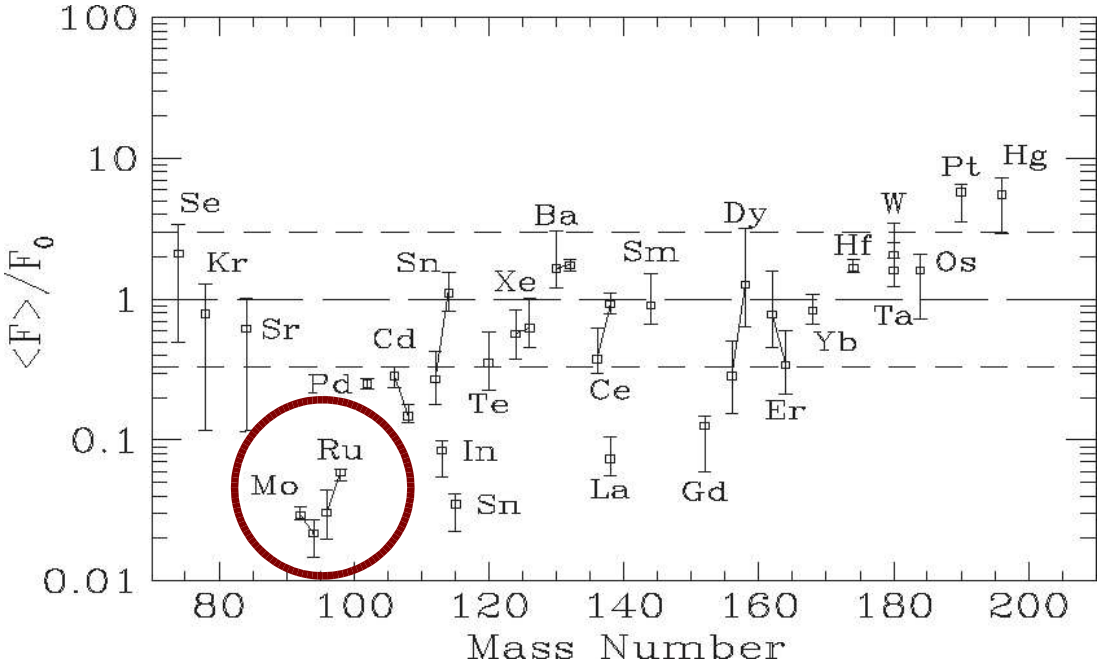
•Etoiles à neutrons : effets des excitations sur la chaleur spécifique

Ejection de matière riche en protons

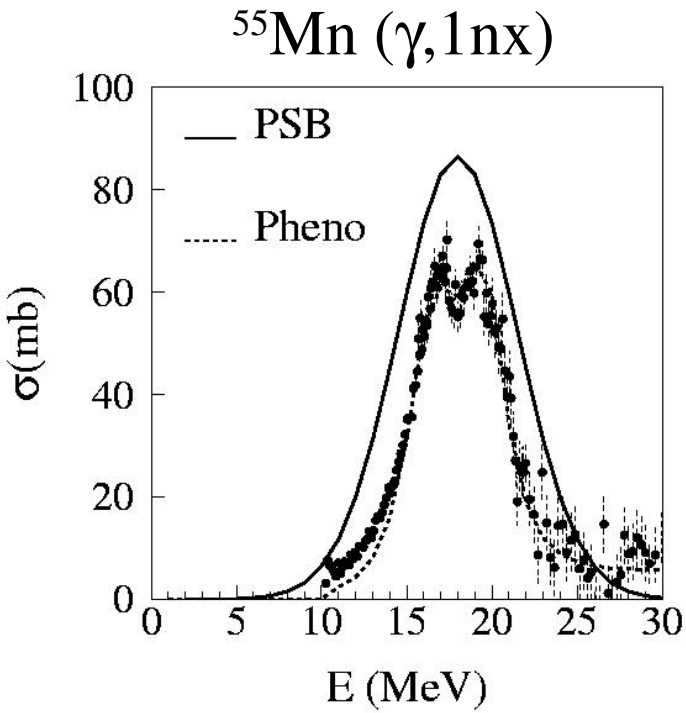
→ nucléosynthèse (processus p)

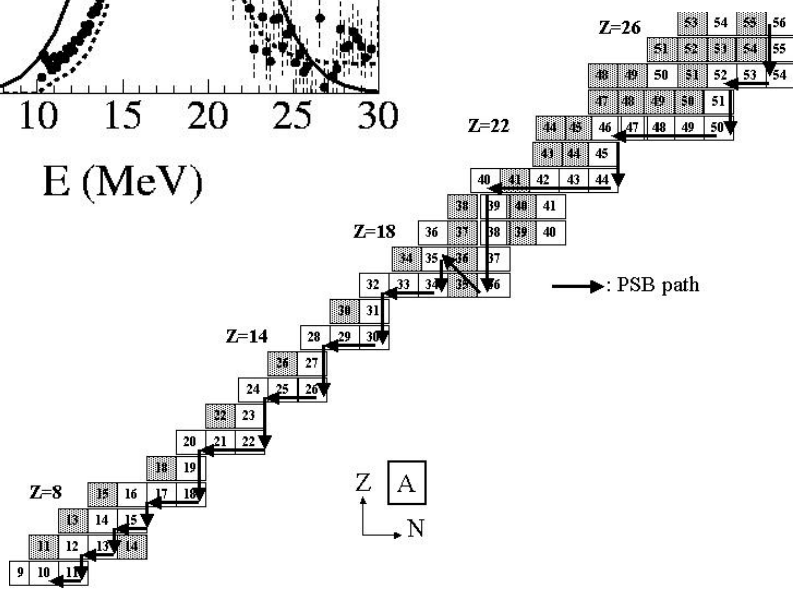


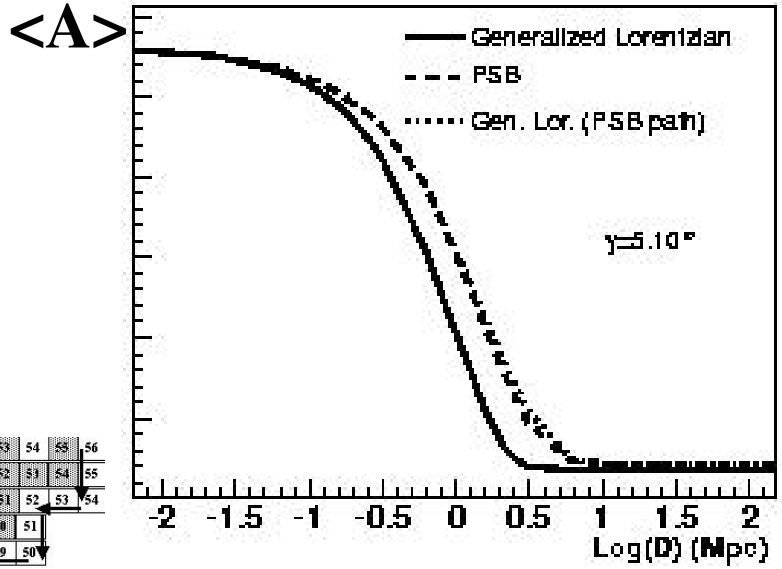

Problématique actuelle du processus p :
synthèse du Molybdène et du Ruthénium



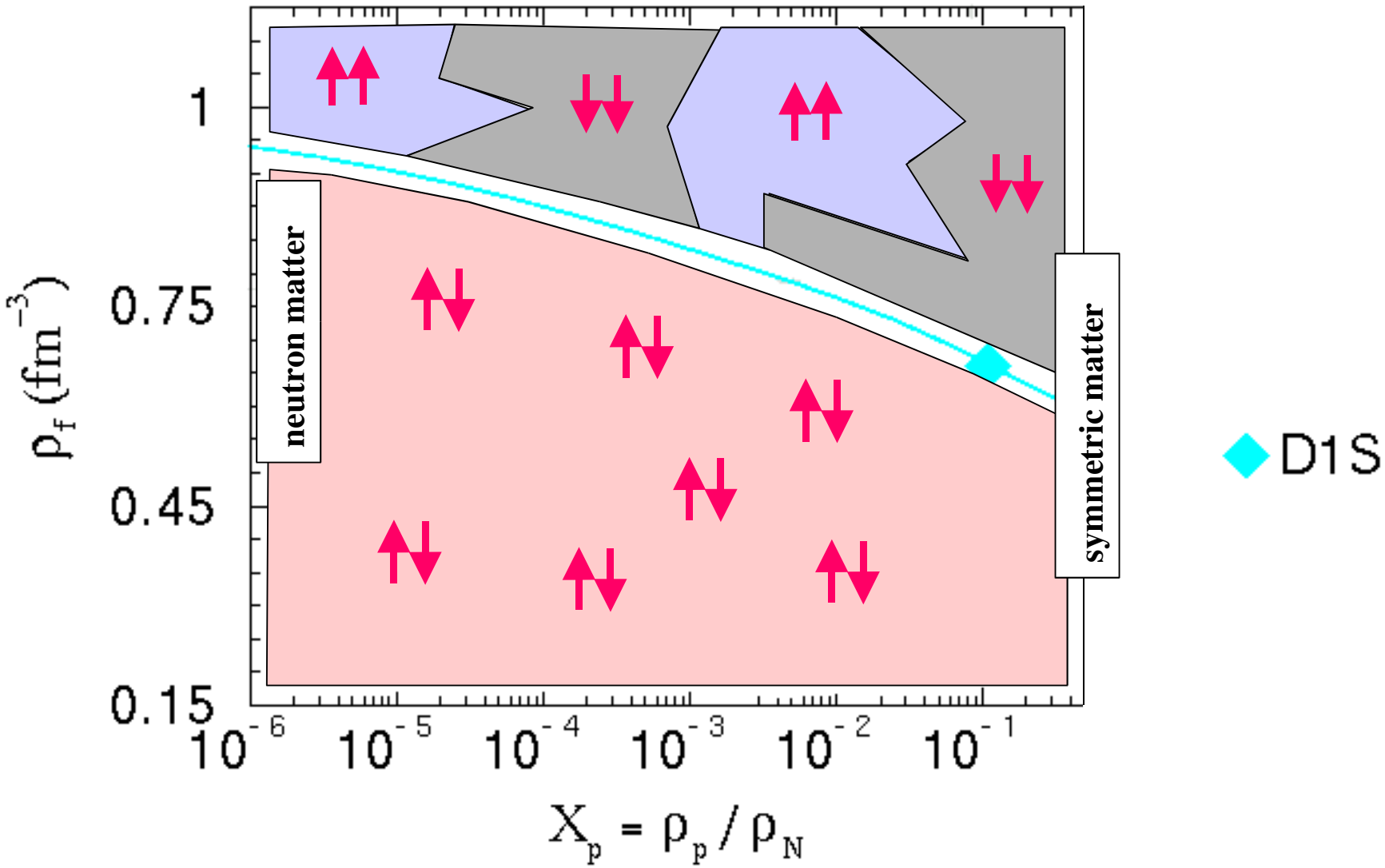
# Rayons cosmiques de Ultra-Haute Energie : les noyaux



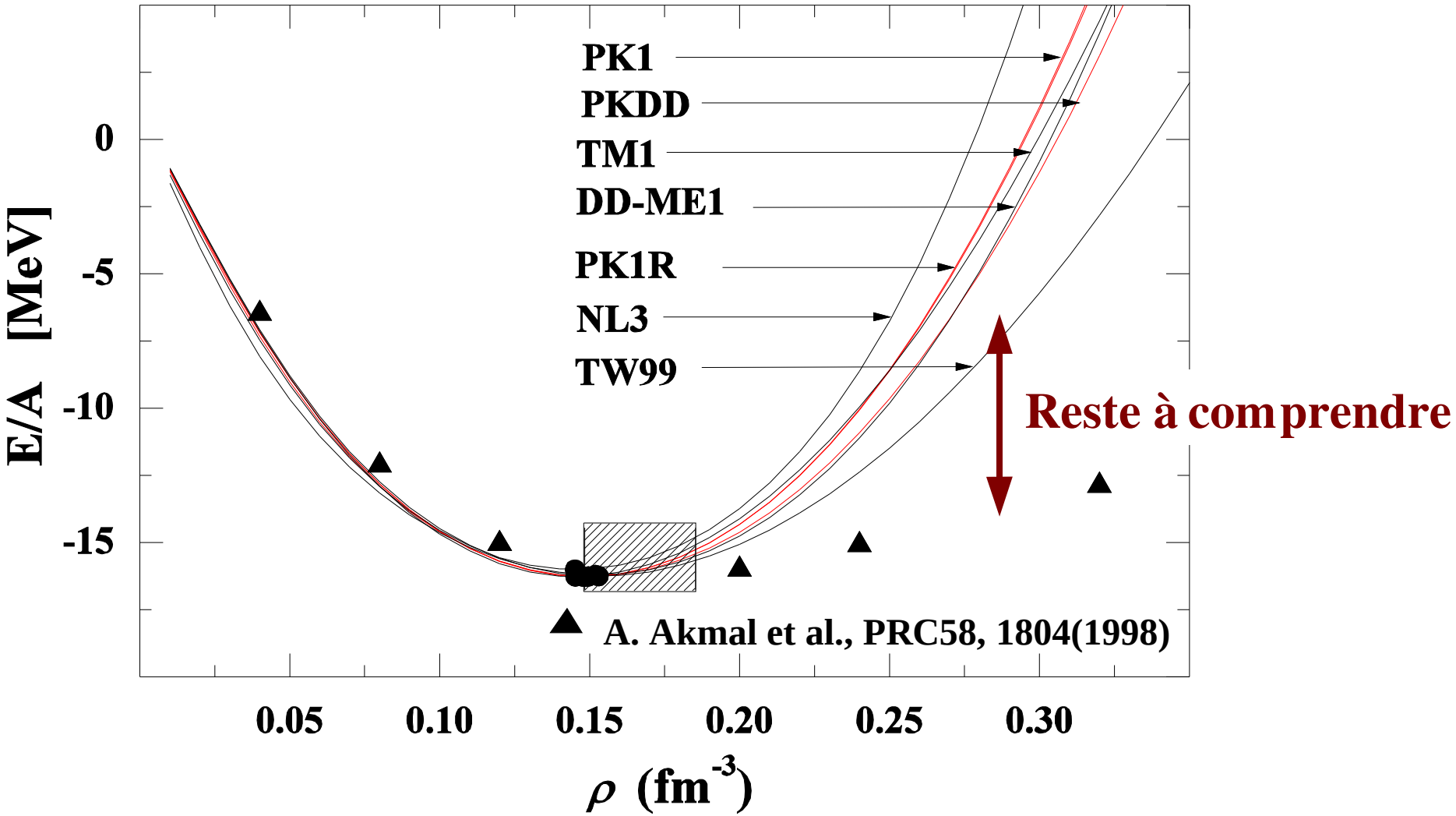



# Ferromagnetic phase diagram



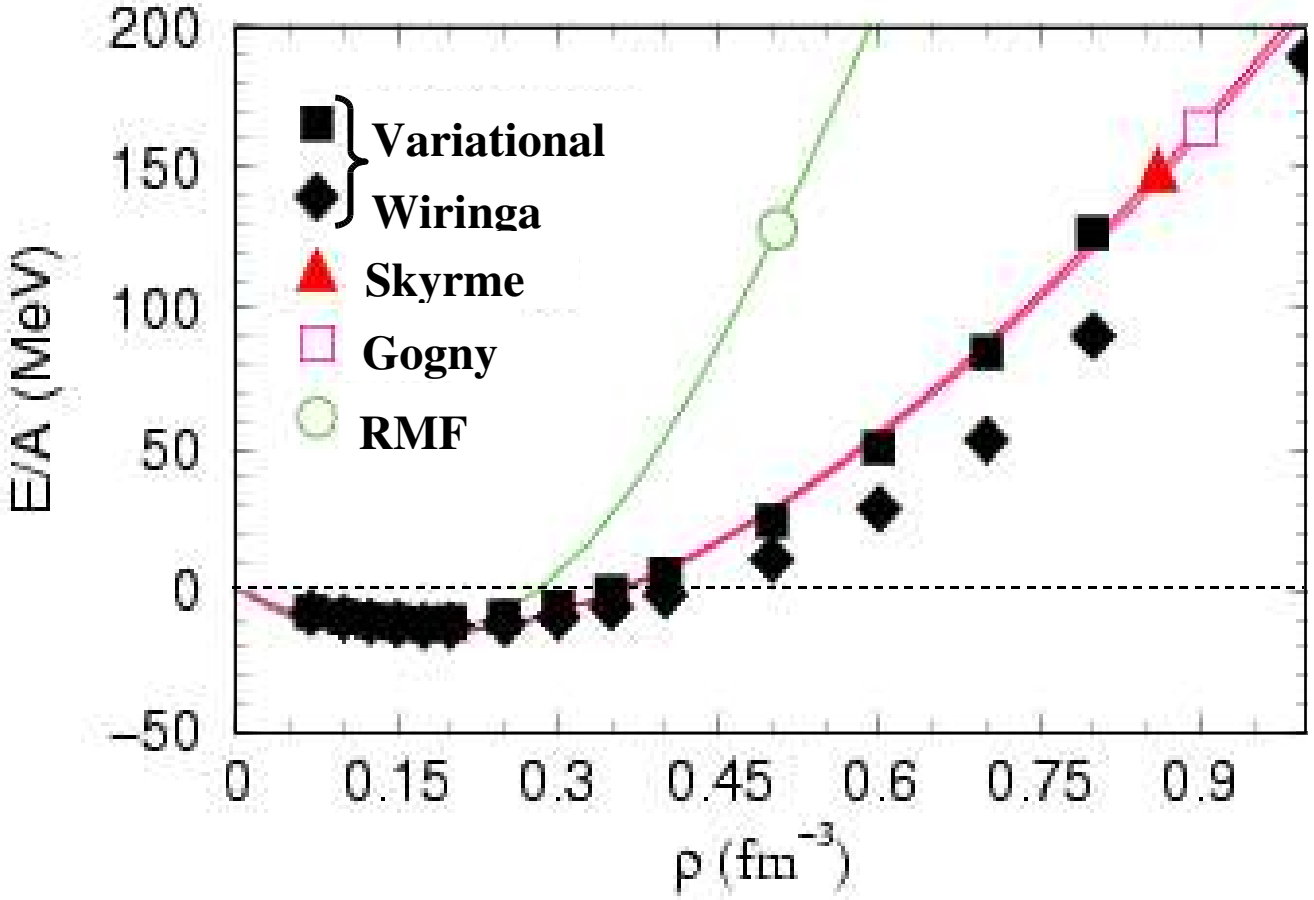
# Equation d'état de la matière nucléaire

## Modèles relativistes



# Equation d'état de la matière nucléaire

## Modèles non-relativistes




3 corps

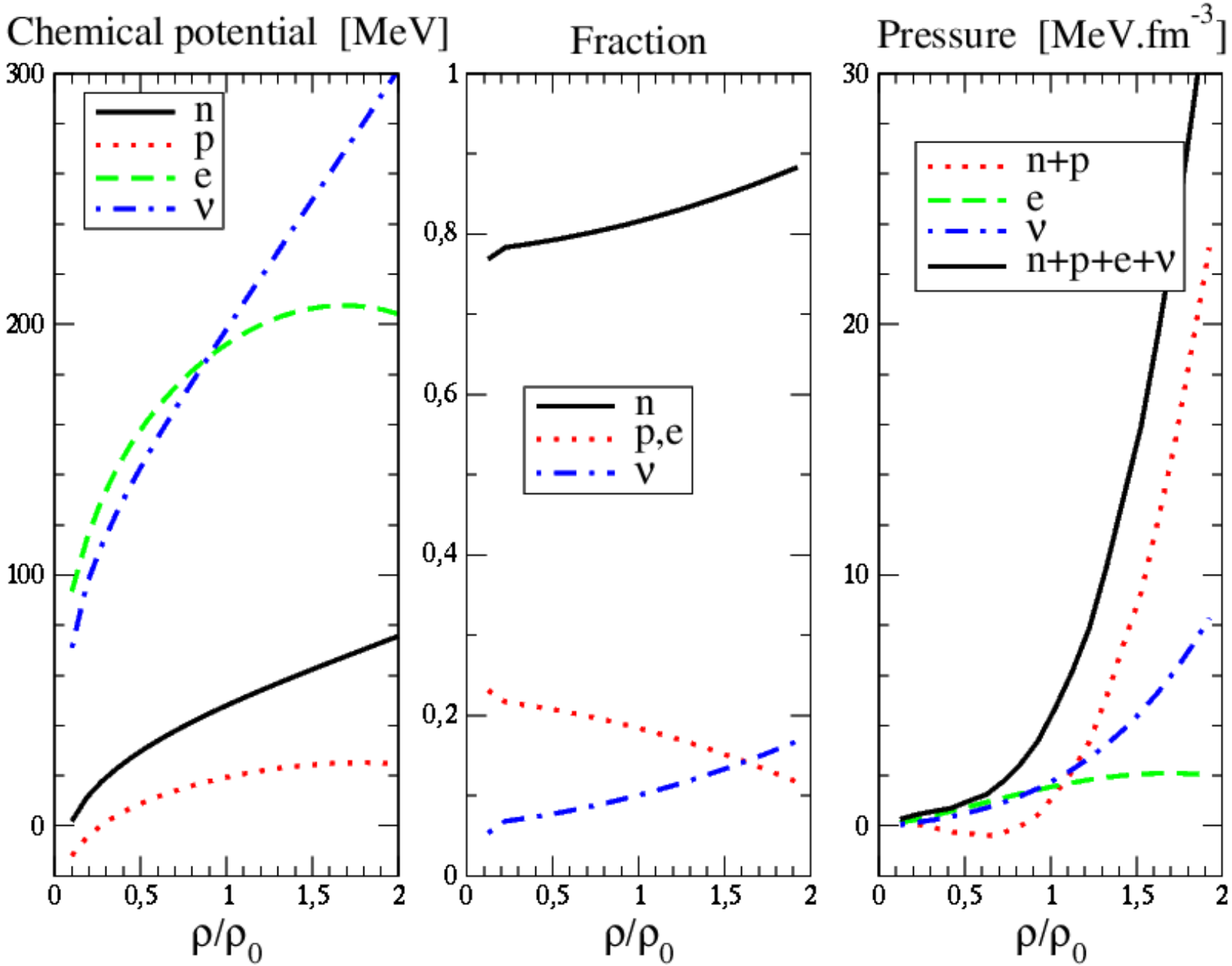
Contraintes des interactions effectives :

données connues de la matière nucléaire (saturation, incompressibilité, ...)

propriétés de certains noyaux sphériques (O, ...)

# Equation d'état + équilibre chimique β

**$n + \nu \Leftrightarrow p + e^-$**

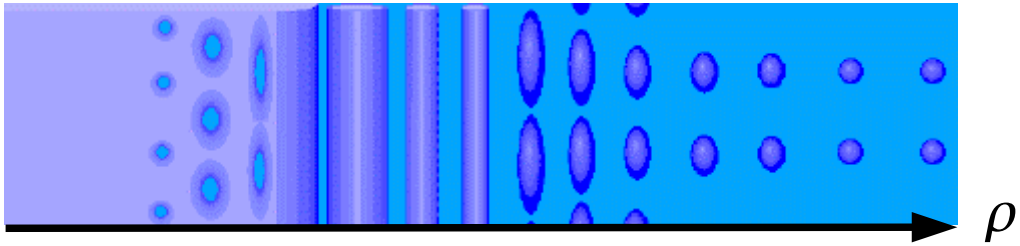


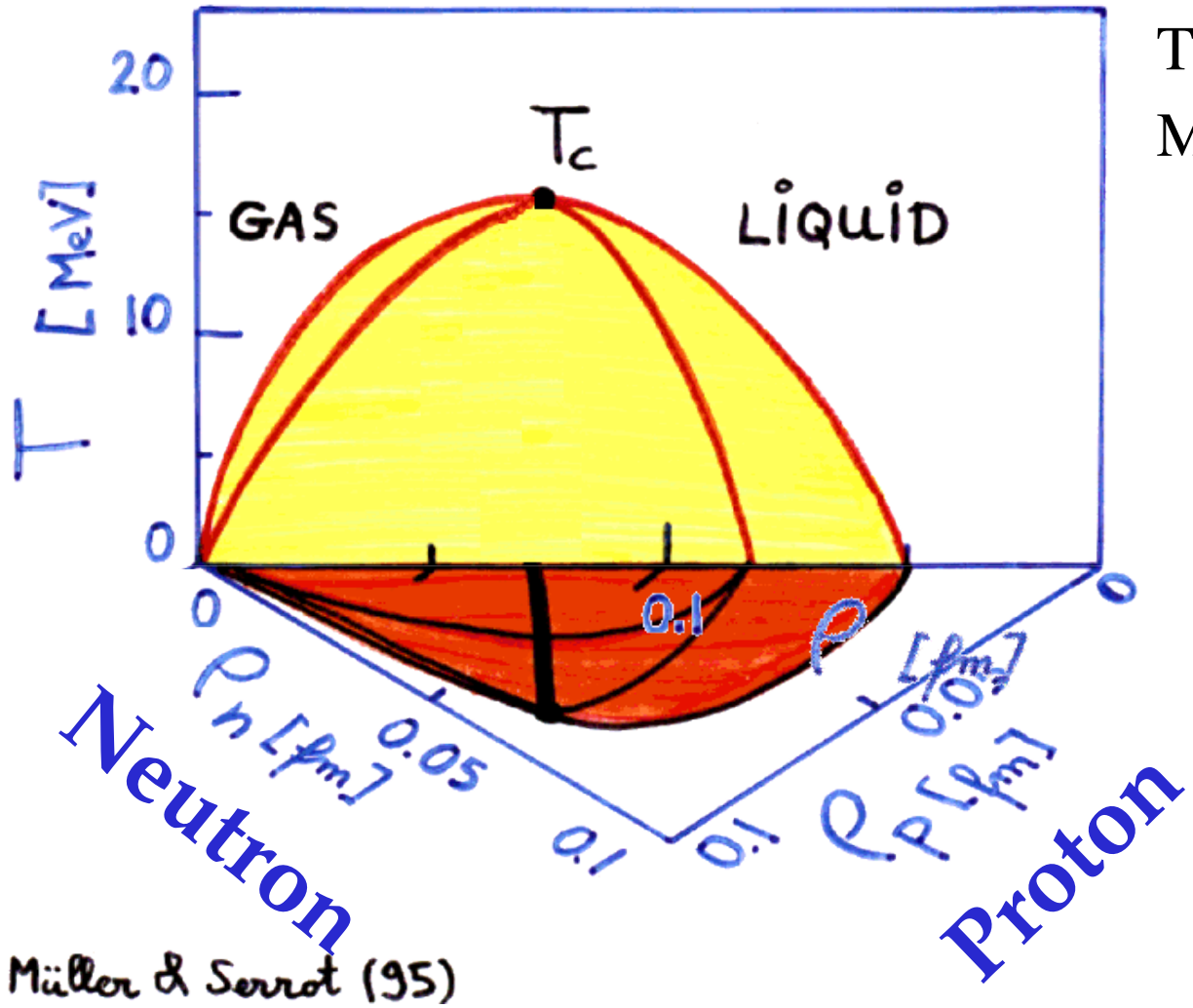

Gogny D1P

T=10 MeV

$y_p$=0.3

# Diagramme de phase à basse densité



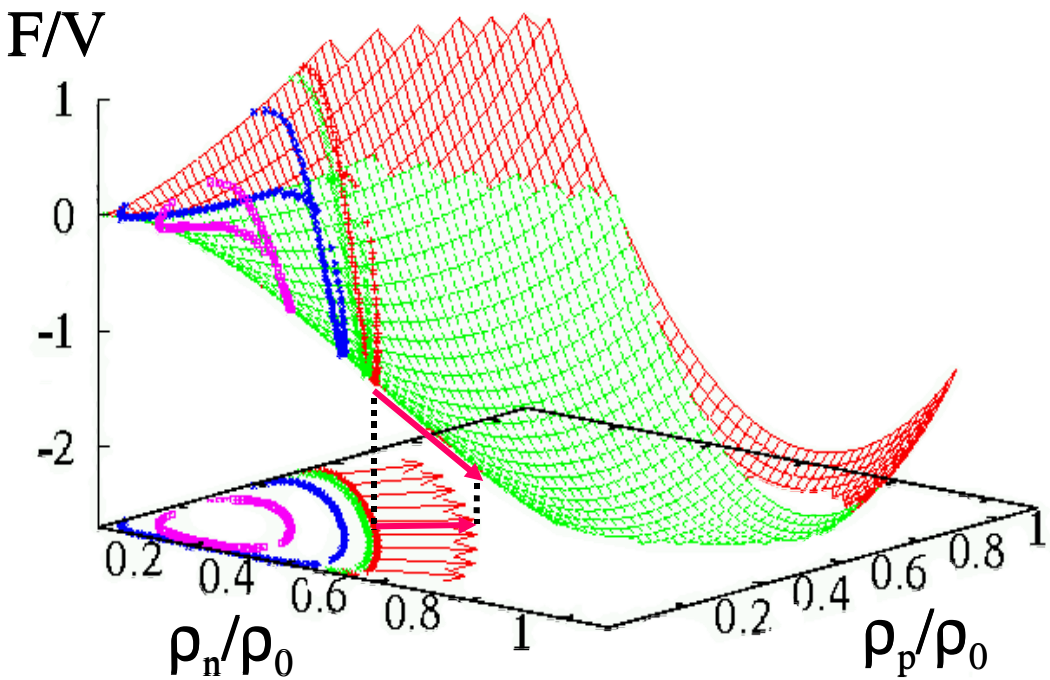

Transition liquide-gaz :

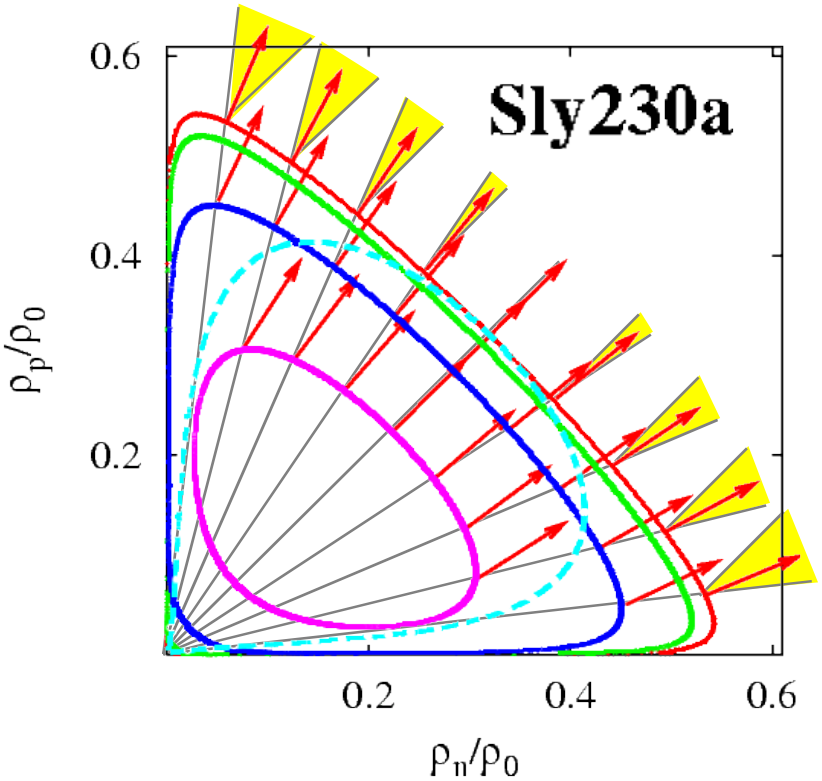
Multifragmentation (INDRA)

# Matière asymétrique peu dense

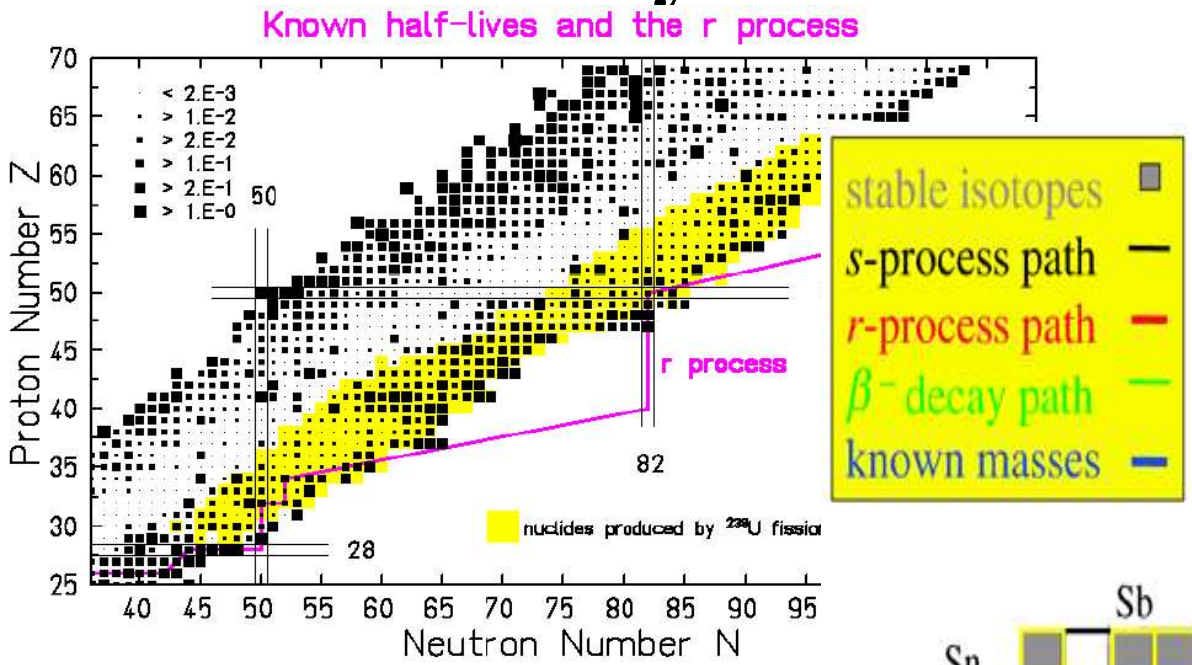
Etude de la topologie de l'énergie libre dans le système infini

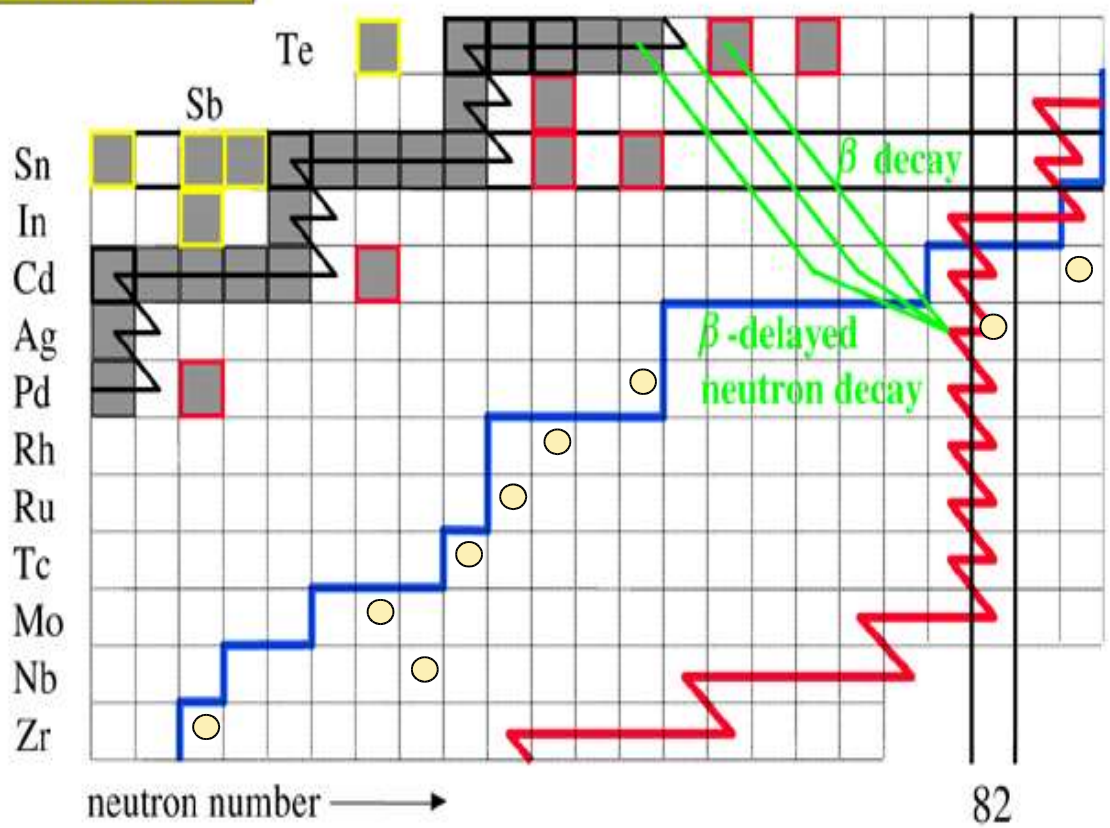
➔ mode propre d'instabilité (isoscalaire)

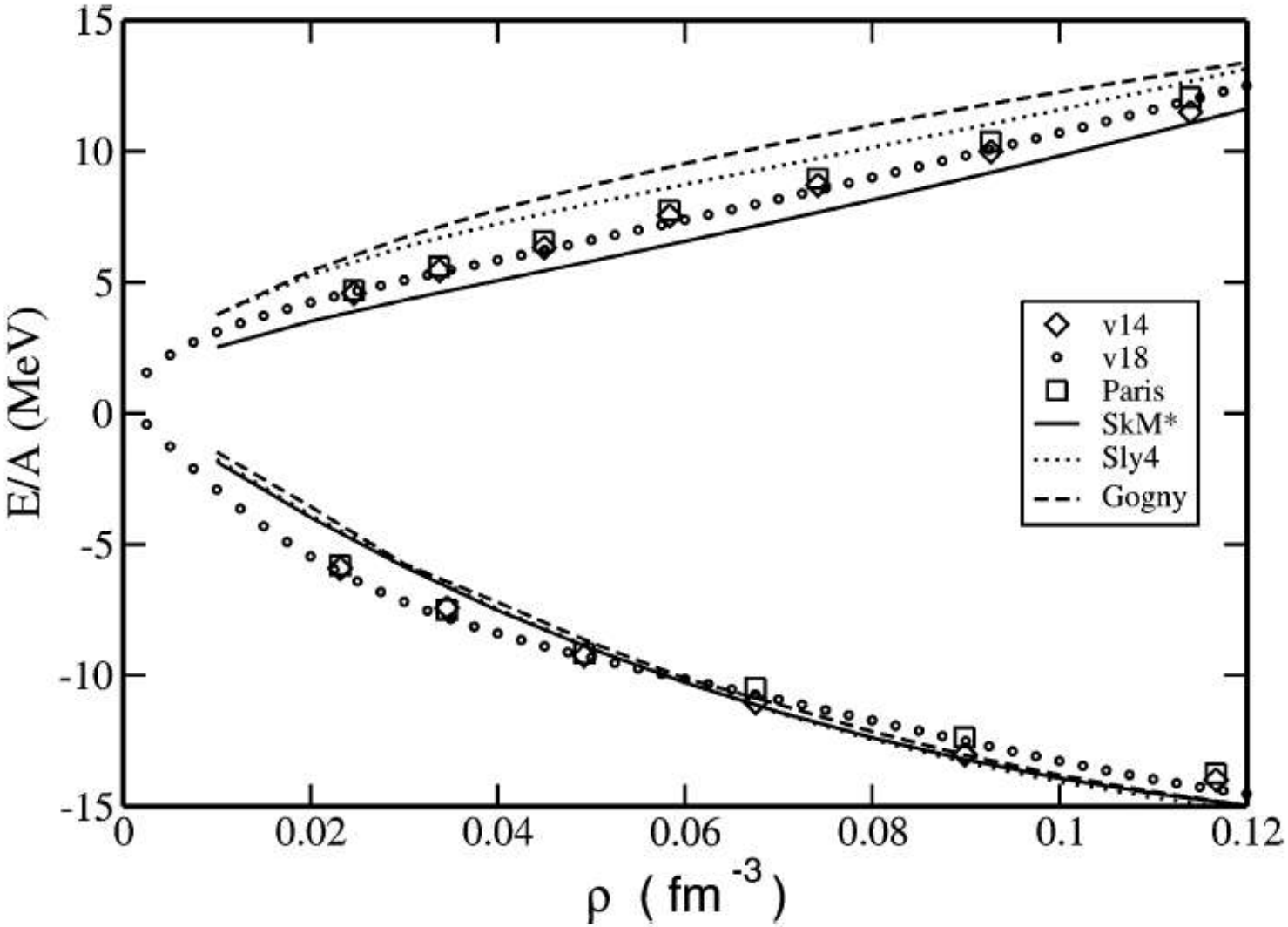


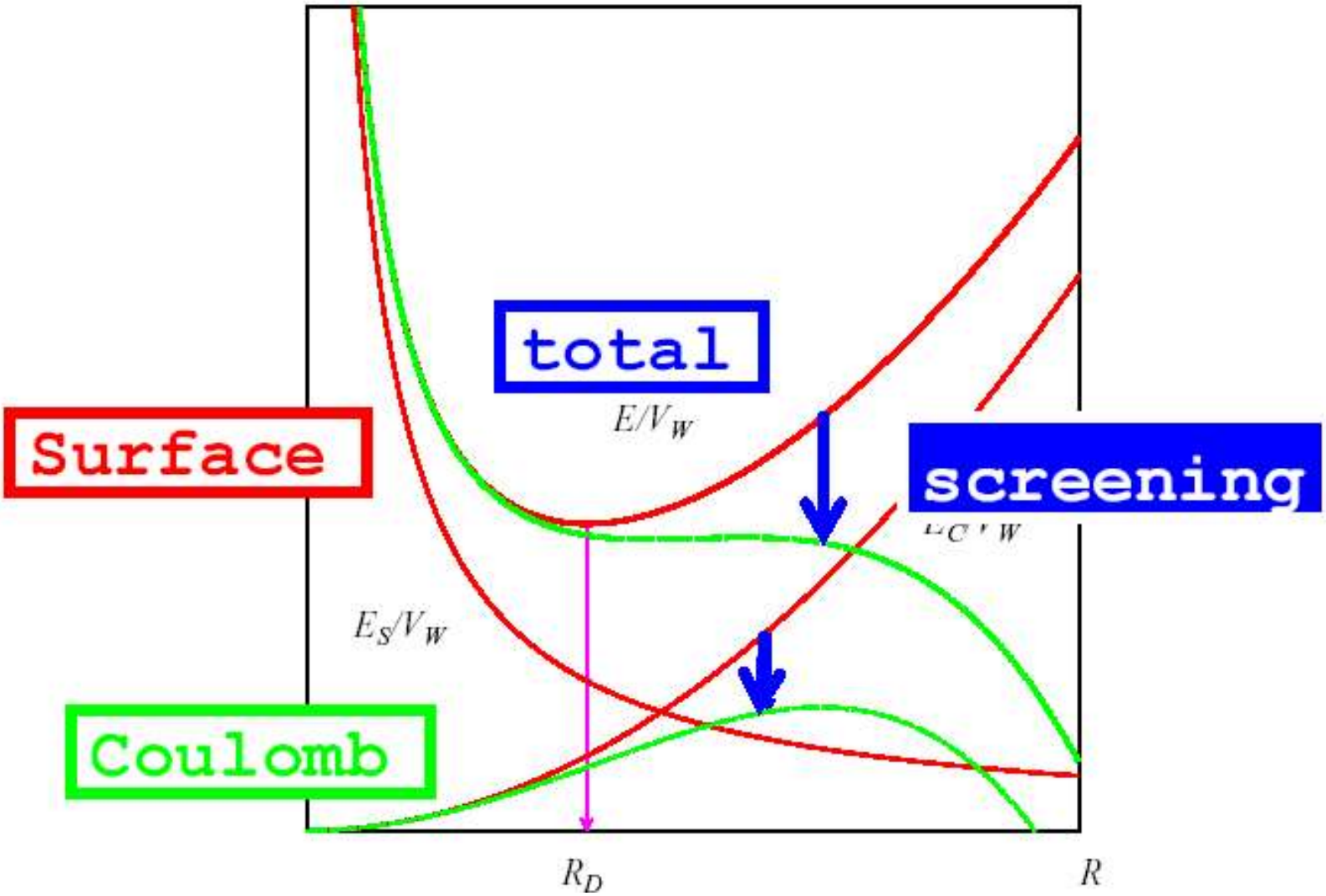
# Nucléosynthèse des éléments lourds



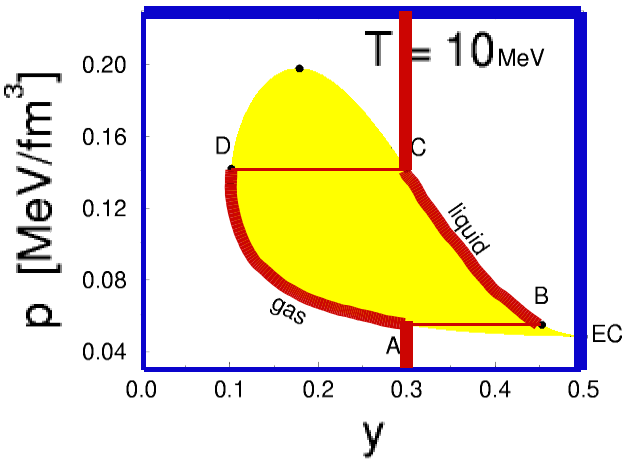

15
10
5
0
-5
-10
-15
E/A (MeV)
0
0.02
0.04
0.06
0.08
0.1
0.12
ρ ( fm -3 )
v14
v18
Paris
SkM*
Sly4
Gogny

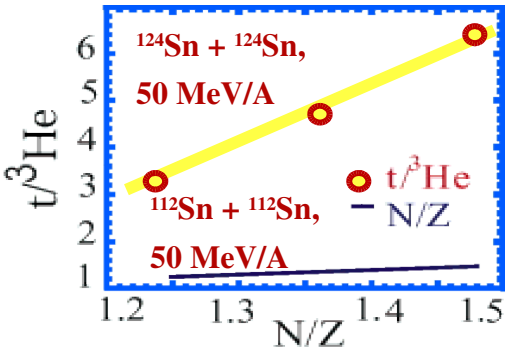
# Effet d'écrantage : discussion qualitative



# Probe low-density asymmetric matter

- Multifragmentation & liquid-gas phase transition :

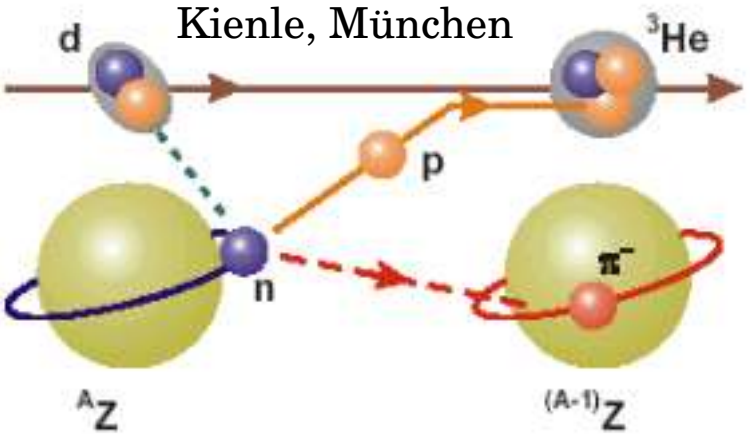


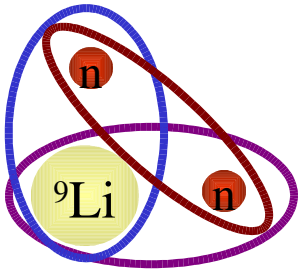

Tsang et al, Xu et al PRL85(00)716

- Deeply bound pionic states :

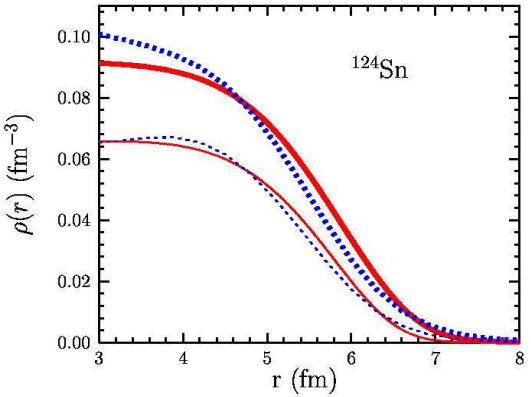
Kienle, München



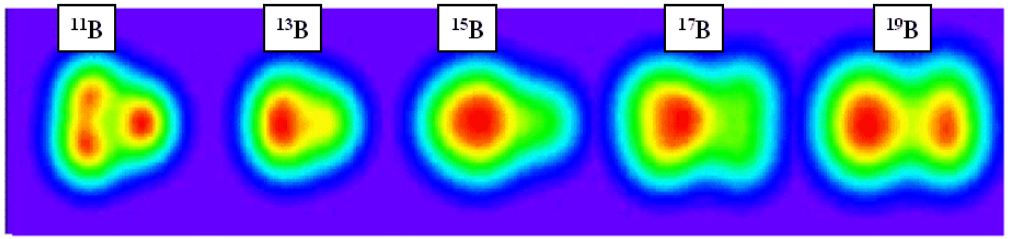

- Halo nuclei :

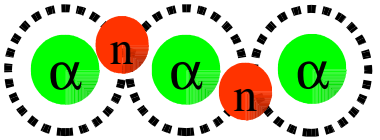



- Neutron skin :

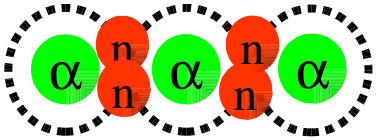



- Exotic Clusters :



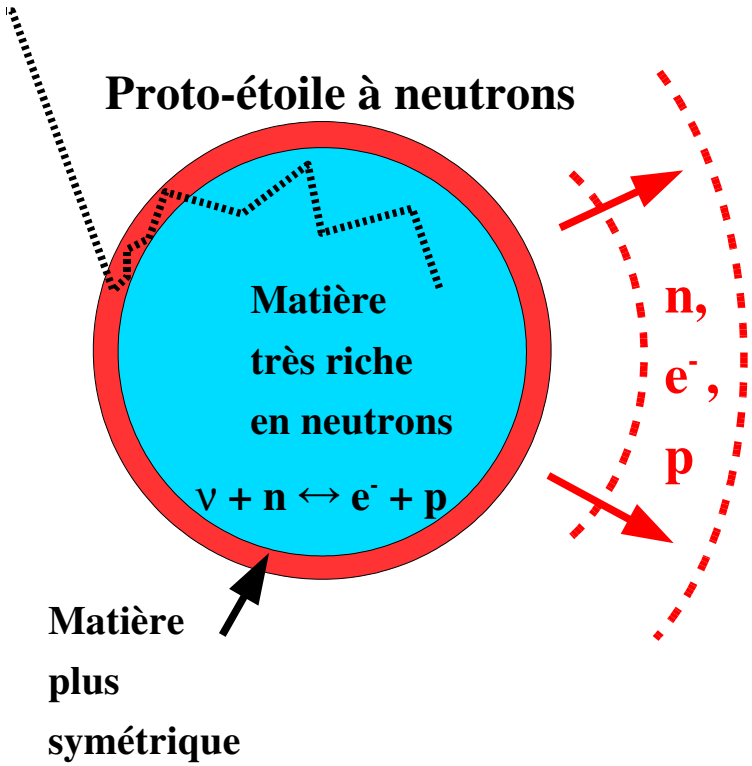

$^{14}$C*




$^{16}$C*

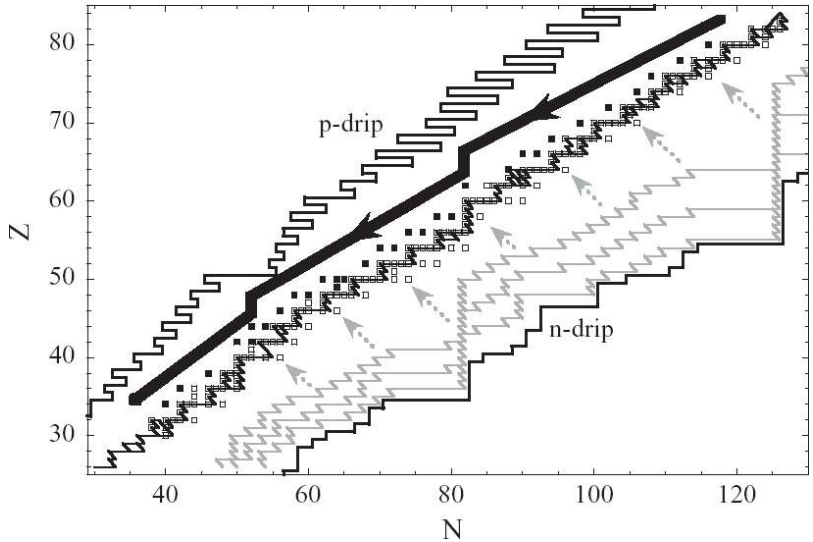
# Supernovae : conséquences

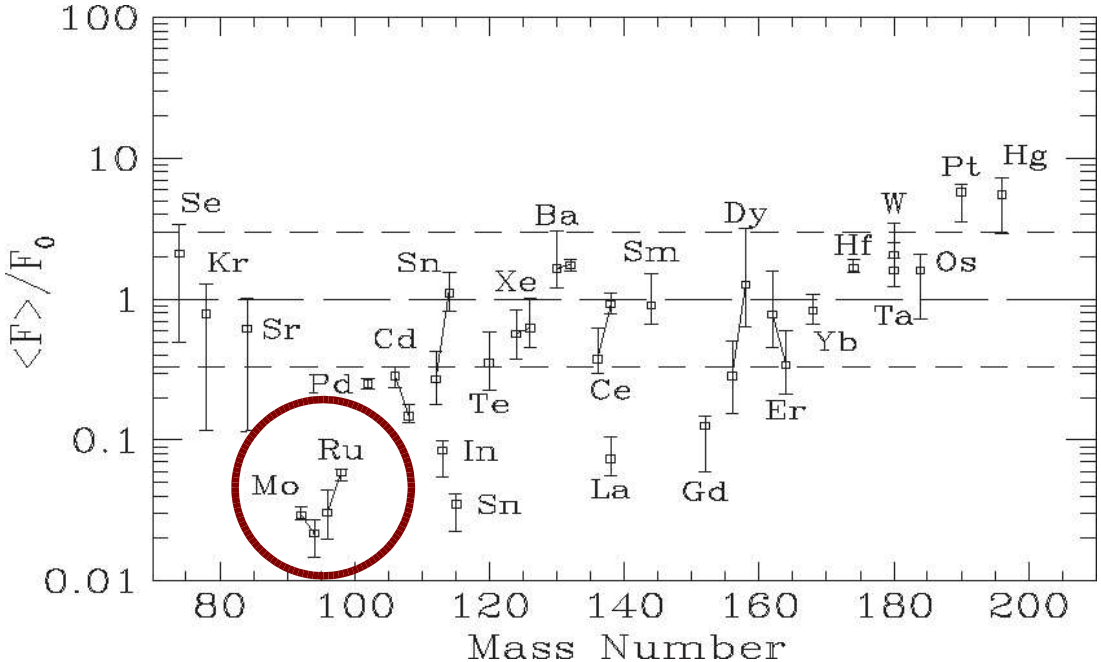
## *matière éjectée riche en protons*




Ejection de matière riche en protons

→ nucléosynthèse (processus p)



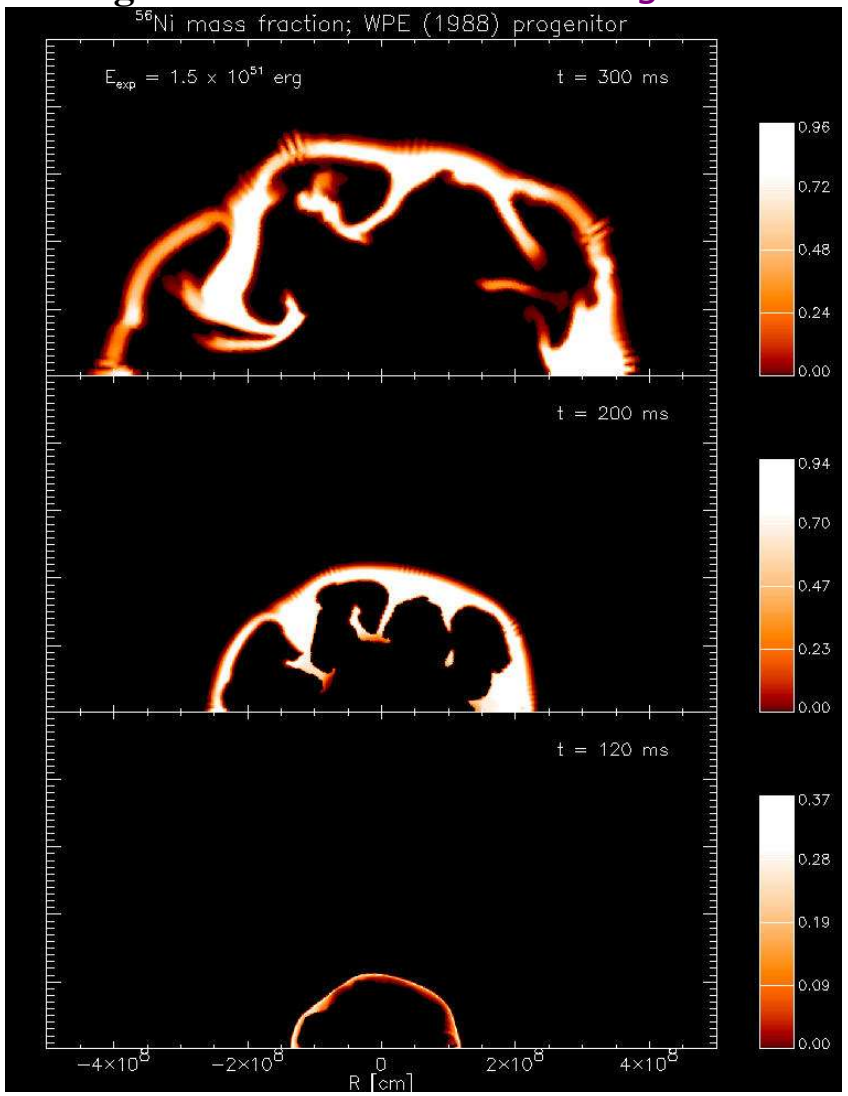

Problématique actuelle du processus p :
synthèse du Molybdène et du Ruthénium

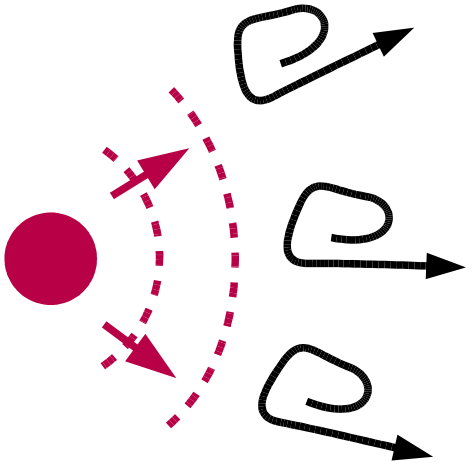
# Accélération de particules chargées

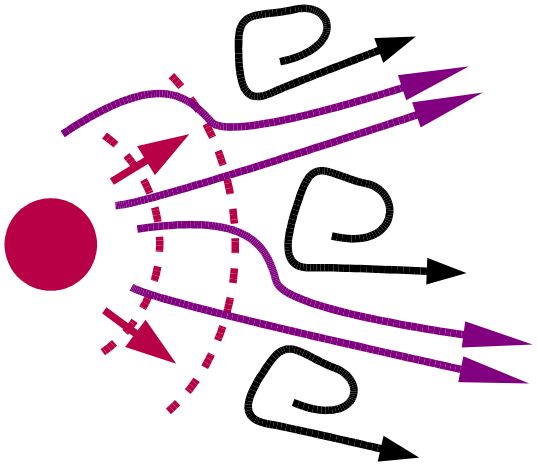
1d → 2d : convection

**$^{56}$Ni synthesized in 2D simulations during the first 0.3 s**

Janka et al.





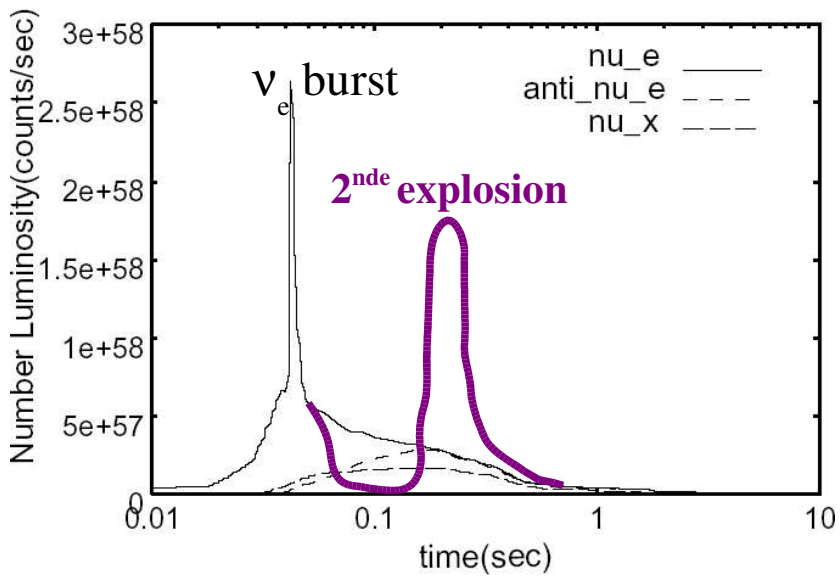
**«E ffet Venturi»**

**$e^-$, p, $\alpha$**

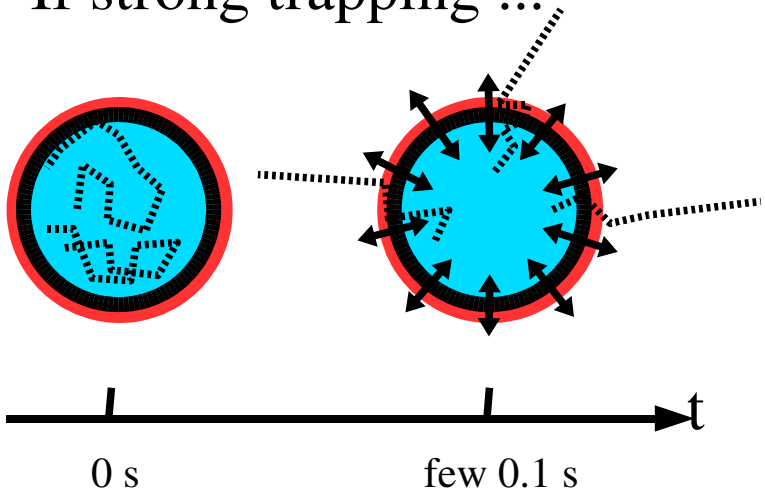
**Explosion très anisotropique → dynamique complexe potentiellement riche en nouveaux phénomènes**

# Supernovae : possible consequences

***neutrino emission spectrum***

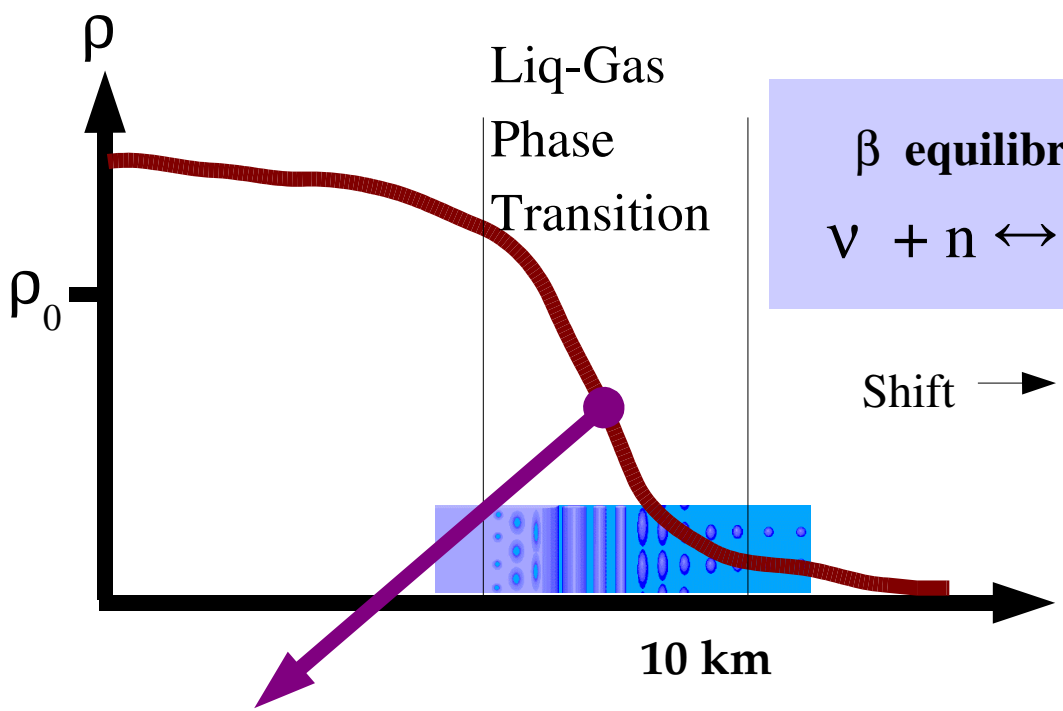



If strong trapping ...



# Dynamical self-consistent effect

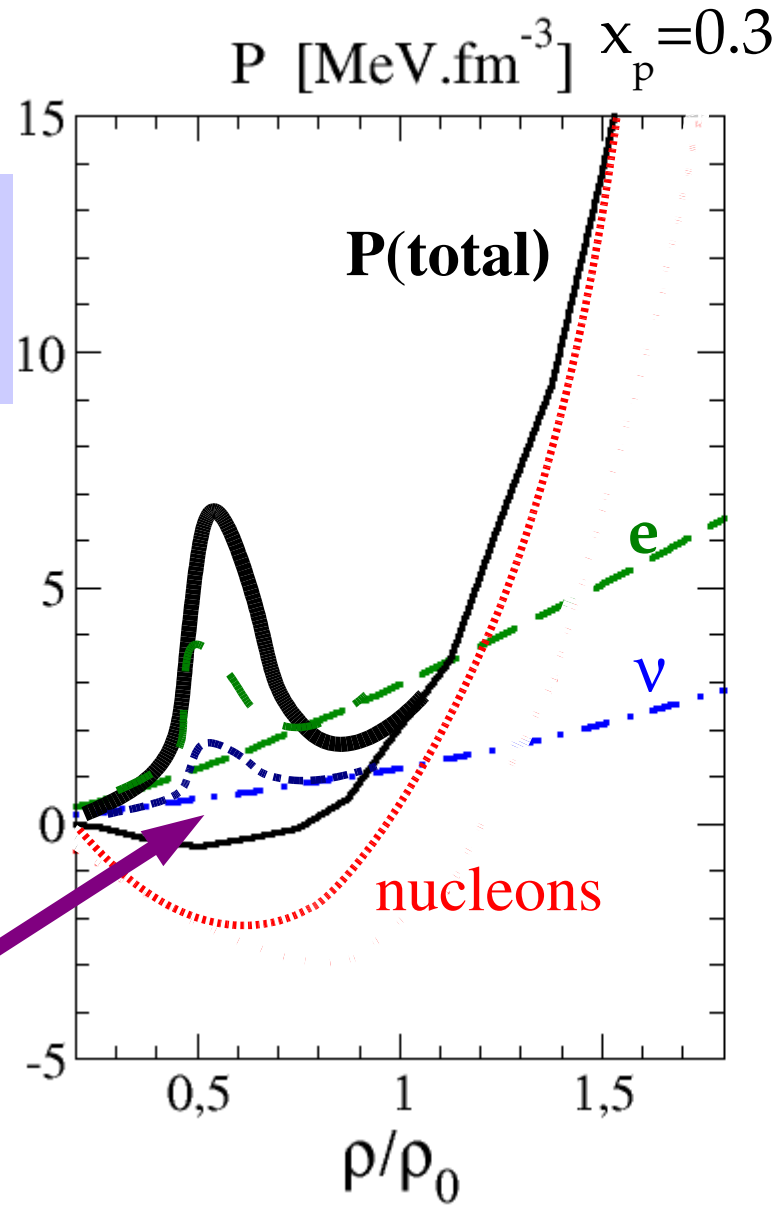
**Density profil of a proto-neutron star**




**β equilibrium**

$\nu + n \leftrightarrow e^- + p$

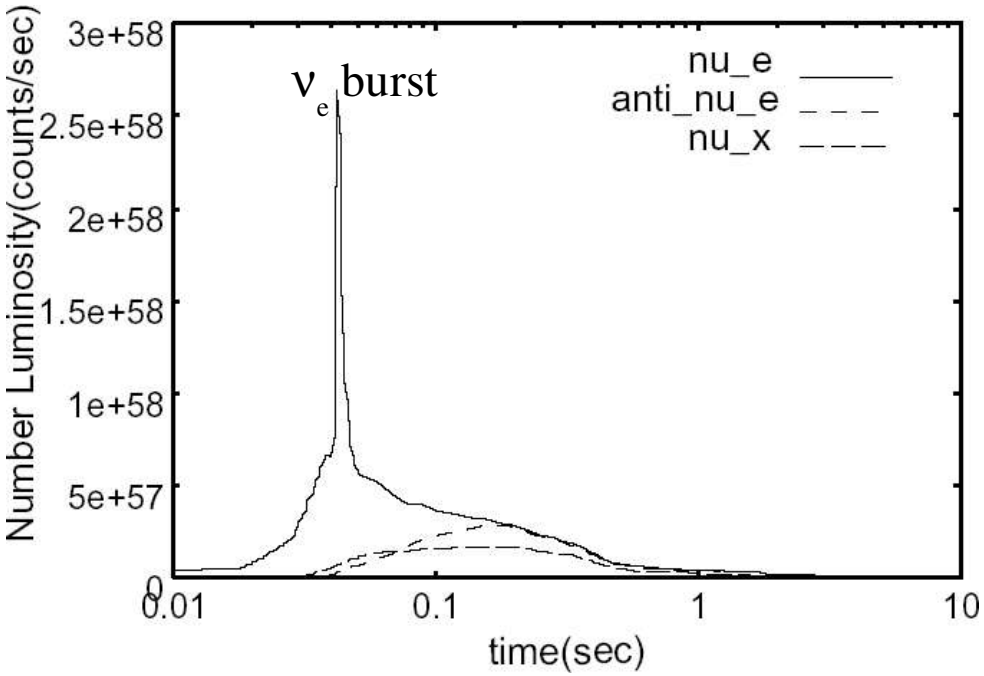
Shift →

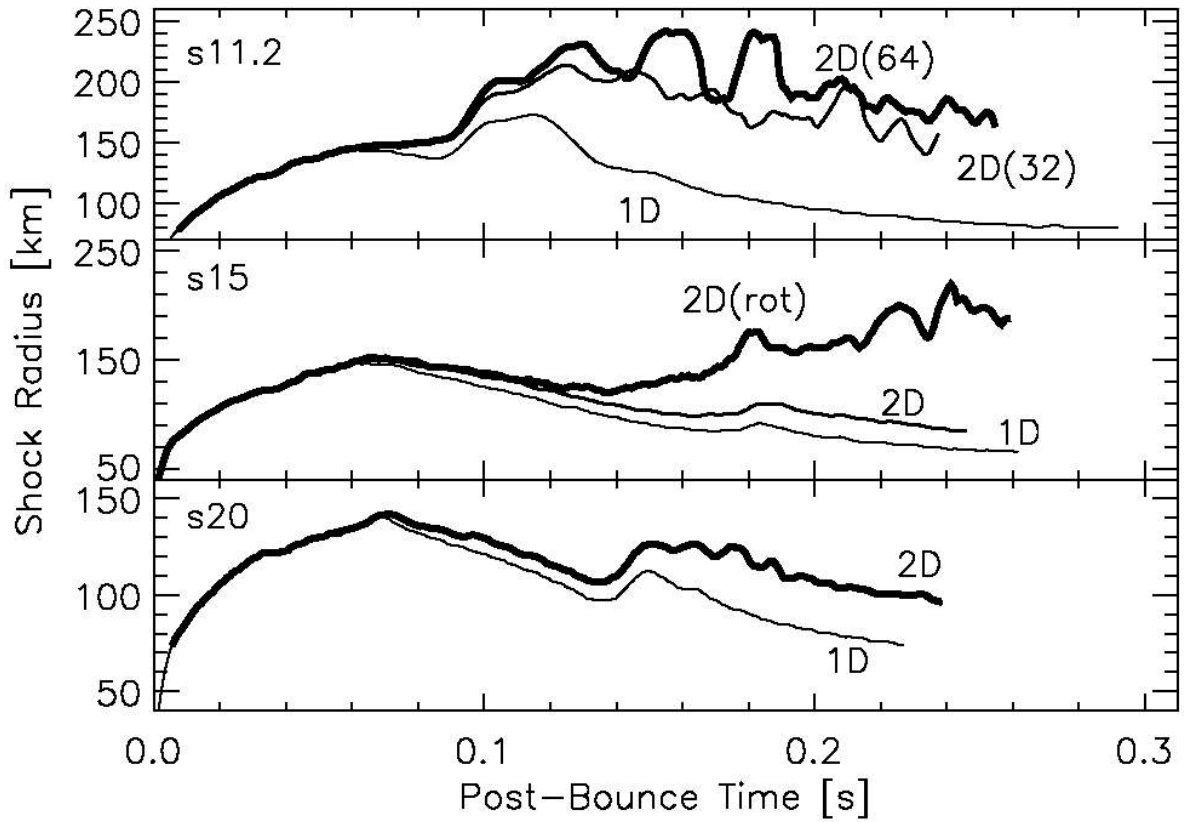



**Huge density fluctuations**

**critical opalescence**

**neutrinos trapping**


Number Luminosity(counts/sec)
3e+58
2.5e+58
2e+58
1.5e+58
1e+58
5e+57
0
0.01
0.1
1
10
time(sec)
$\nu_e$ burst
nu_e
anti_nu_e
nu_x


Shock Radius [km]
s11.2
2D(64)
2D(32)
1D
s15
2D(rot)
2D
1D
s20
2D
1D
250
200
150
100
50
0.0
0.1
0.2
0.3
Post−Bounce Time [s]