

# Noyaux exotiques et astrophysique

## O. Sorlin (GANIL, Caen)

### PREMIERE PARTIE

Introduction

Le modèle de l'atome

Radioscopie du noyau, forces, désintégration

Charte des isotopes

Le modèle en couches, les nombres magiques

### DEUXIEME PARTIE

Production de noyaux instables

Détermination de la masse atomique

Disparition des nombres magiques

### TROISIEME PARTIE

Abondance des éléments dans l'univers

Les noyaux magiques en astrophysique

### EPILOGUE

## PREMIERE PARTIE

Introduction

Le modèle de l'atome

Radioscopie du noyau, forces, désintégration

Charte des isotopes

Le modèle en couches, les nombres magiques

## DEUXIEME PARTIE

Production de noyaux instables exotiques

Détermination de la masse atomique

Disparition des nombres magiques

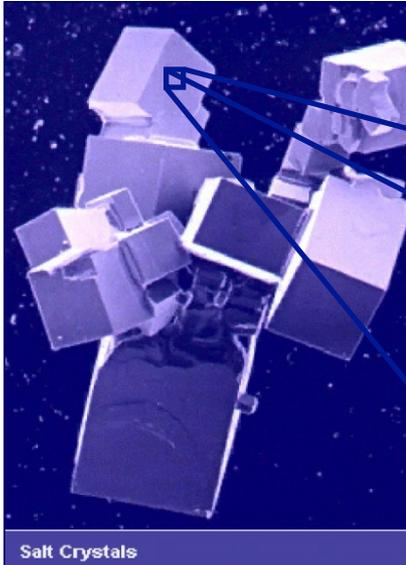
## TROISIEME PARTIE

Abondance des éléments dans l'univers

Les noyaux magiques en astrophysique

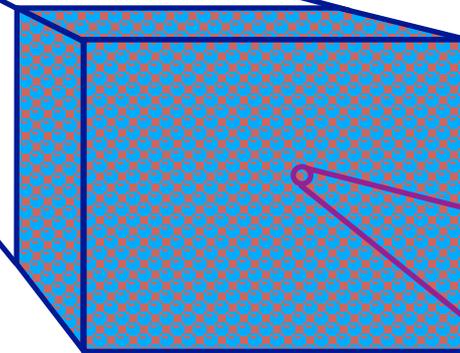
## EPILOGUE

# Voyage au travers de la matière



Les cristaux de sel

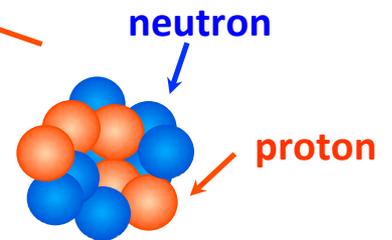
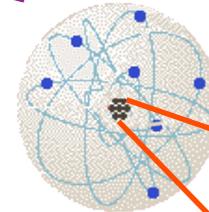
0,01 mm



Un arrangement régulier d'atomes de sodium "Na" et de chlore "Cl"

0,000.000.1 mm

L'atome : un coeur compact (le noyau) entouré d'électrons



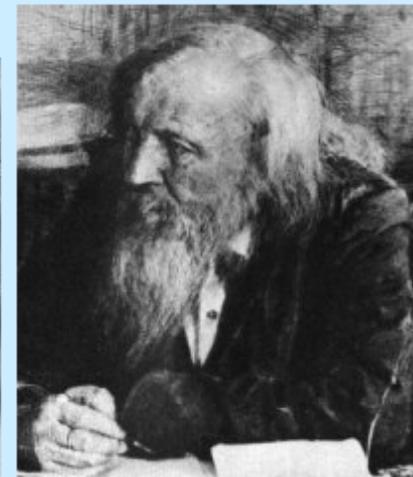
Le noyau atomique : un ensemble de protons et de neutrons (nucléons)

0,000.000.000.001 mm

# Les éléments chimiques

## La table périodique des éléments de Mendeleïev

Periodic Table of the Elements																	
1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8A			1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	8
H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac	Rf	Ha	Sg	Ns	Es	Mt	110	111	112						
Lanthanides			Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb		
Actinides			Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No		



CSNSM CNRS-IN2P3

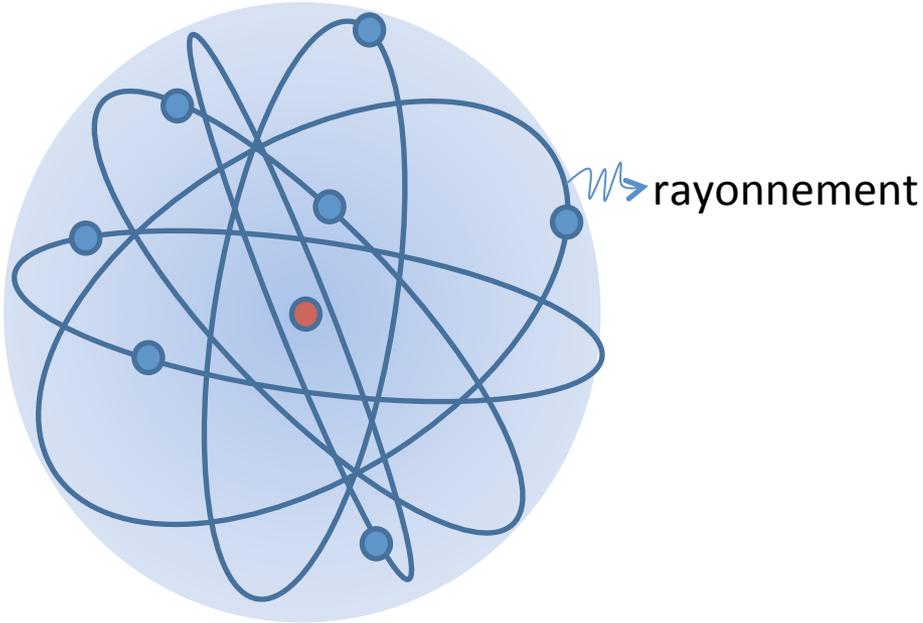
Les atomes ont des propriétés spécifiques

Ils sont parfois des gaz ou des solides plus ou moins réfractaires

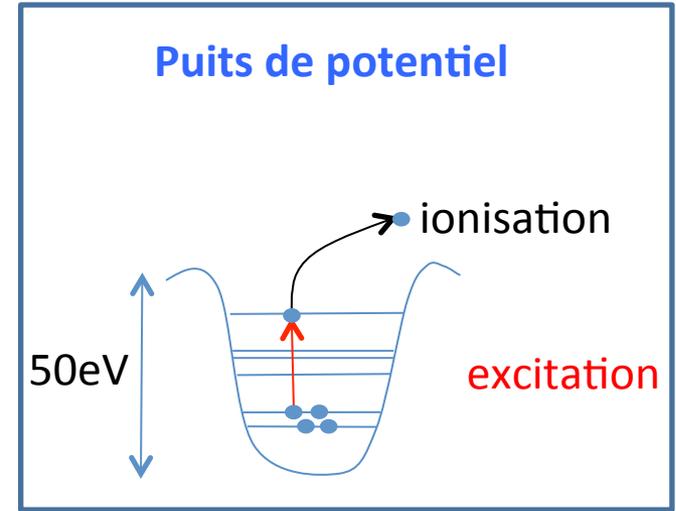
Certains participent fortement à la formation de molécules, utiles à la vie.

# Un bref rappel sur l'atome

atome

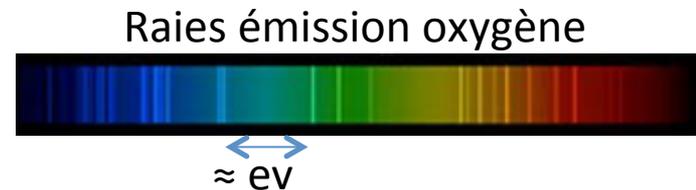


- Dans l'atome les électrons 'voyagent' sur des orbitales
- Ils sont astreints à rester autour du noyau qui les attire



- Les énergies de liaison des orbitales dépendent des atomes
- Elles sont quantifiées

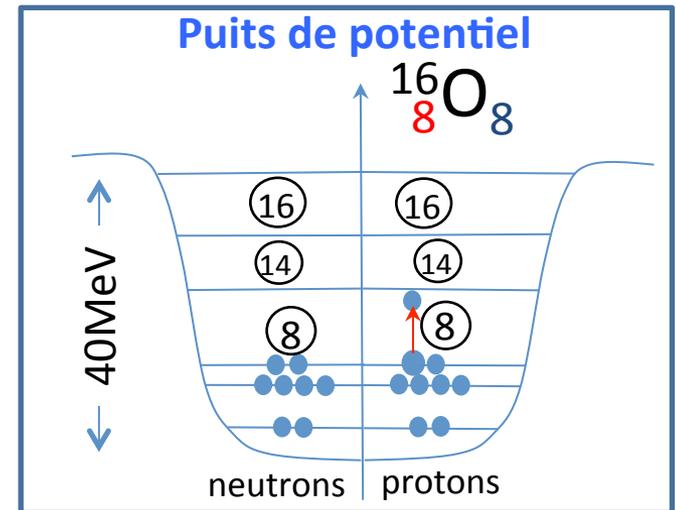
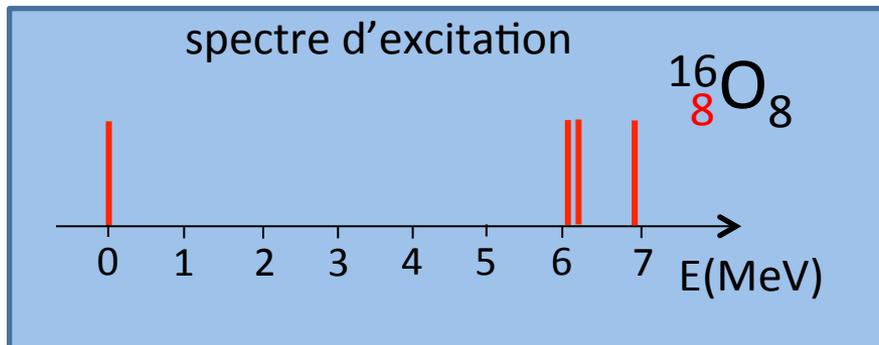
- L'atome peut être excité ou ionisé
- Il émet alors un rayonnement caractéristique



# Fermetures de couches nucléaires et nombres magiques

- Dans le noyau, protons et neutrons créent leur propre interaction
- Ils occupent des orbitales *irrégulièrement* espacées
- Les excitations de nucléons sont plus difficiles à réaliser pour certains noyaux
- Ils sont plus résistants, difficile à exciter, plus abondants, sphériques ....

on les appelle NOYAUX MAGIQUES, e.g.  $^{16}\text{O}$

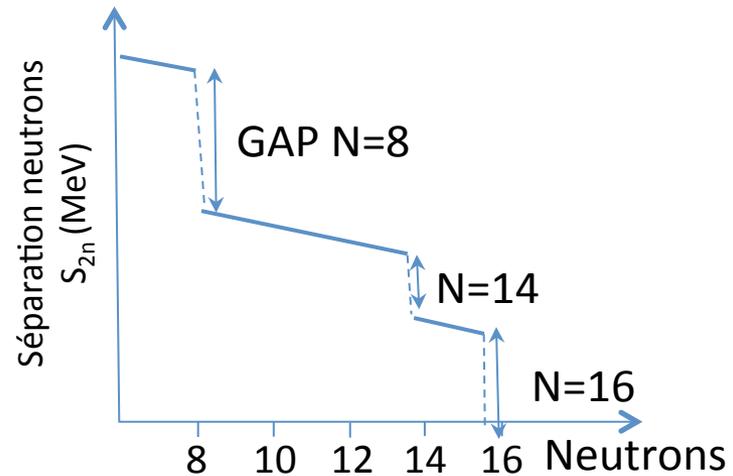
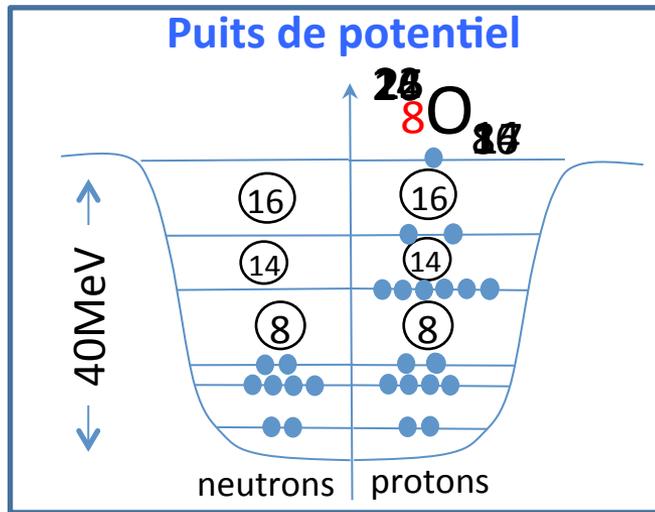


Quelques noyaux sont **DOUBLEMENT MAGIQUES**

Certains sont essentiels à la vie comme le  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$  ou le  $^{40}\text{Ca}$

Les noyaux magiques jouent aussi un rôle essentiel dans les explosions stellaires

# Des noyaux magiques plus résistants : pourquoi ?



Les noyaux à couches fermées et à GAP important présentent une discontinuité de  $S_n$

En remplissant le noyau d'excès de neutrons, ceux-ci deviennent de + en + facile à ôter  
→ limite de liaison nucléaire

On peut étudier la taille du GAP en déterminant  $S_{2n}$  pour une chaîne d'isotopes

Ceci se fait en déterminant leurs masses :

Pour  $(N,Z) \rightarrow (N-2,Z) + 2n$   
on a

$$S_{2n}(N,Z) = M(N,Z) c^2 - M(N-2,Z) c^2 - 2M_n c^2$$

puisque  $E=Mc^2$  et  $Q_{\text{réact}}=E_i-E_f$

## PREMIERE PARTIE

Introduction

Le modèle de l'atome

Radioscopie du noyau, forces, désintégration

Charte des isotopes

Le modèle en couches, les nombres magiques

## DEUXIEME PARTIE

Production de noyaux instables par accélérateurs d'ions

Détermination de la masse atomique

Disparition des nombres magiques -> noyaux exotiques

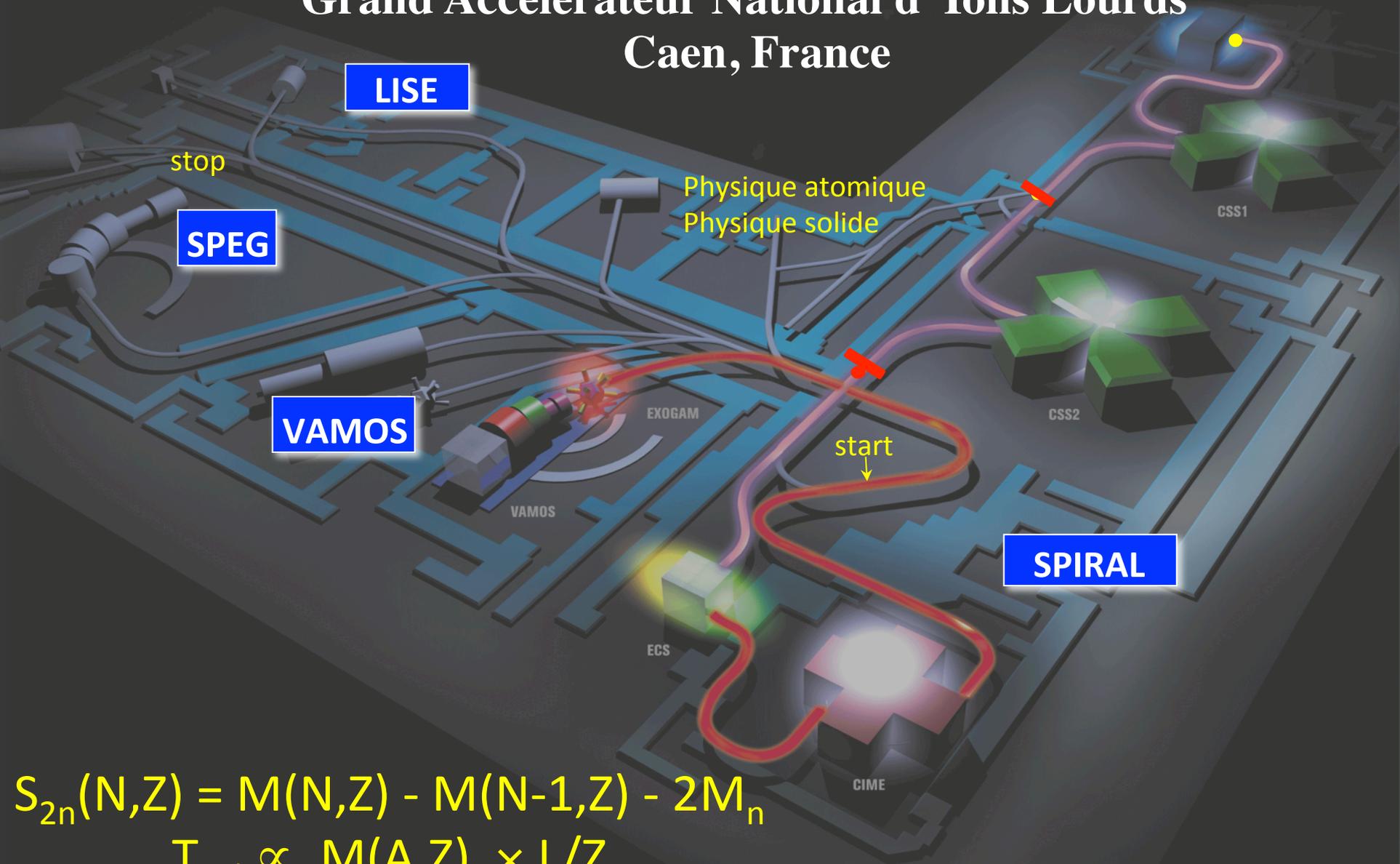
## TROISIEME PARTIE

Abondance des éléments dans l'univers

Les noyaux magiques en astrophysique

## EPILOGUE

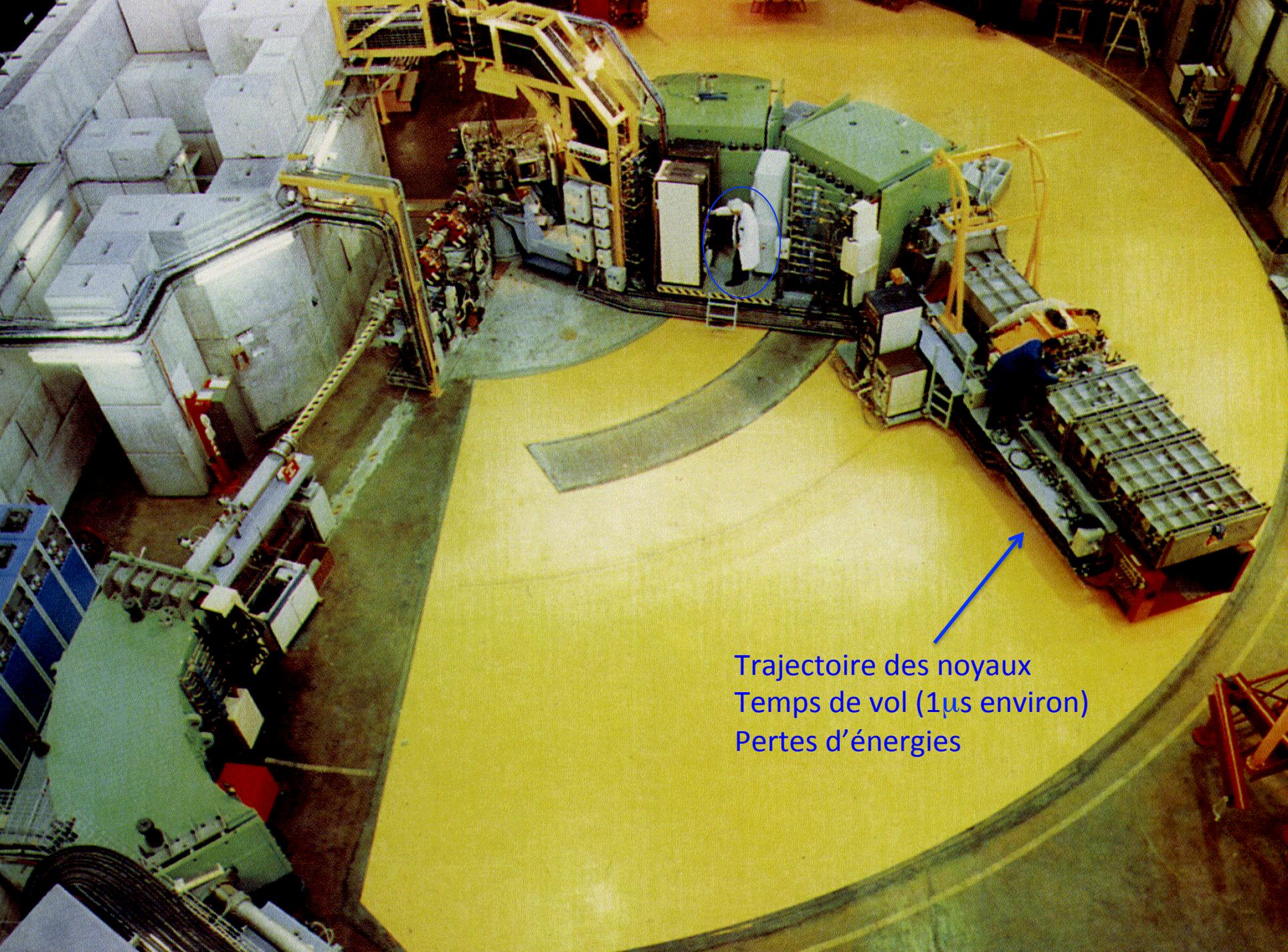
# Production de noyaux instables et mesures de masses au GANIL Grand Accélérateur National d'Ions Lourds Caen, France



$$S_{2n}(N,Z) = M(N,Z) - M(N-1,Z) - 2M_n$$

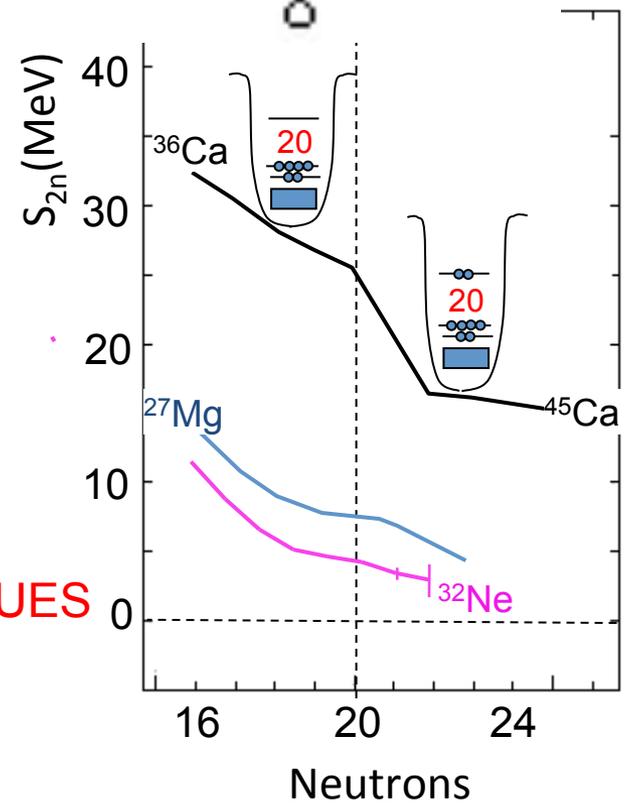
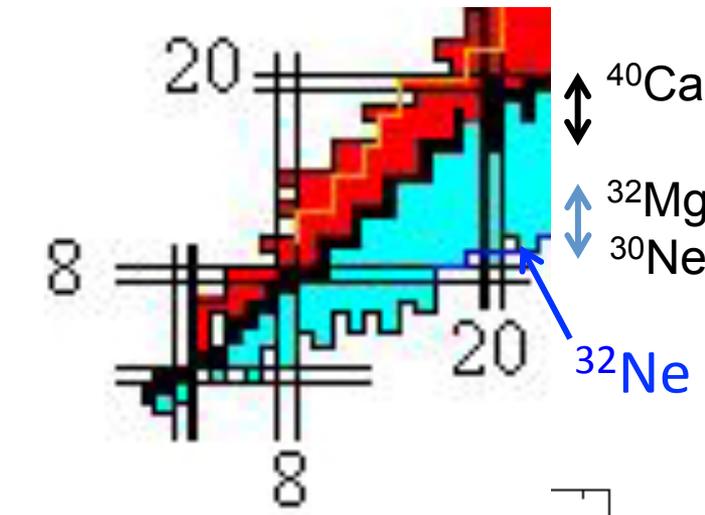
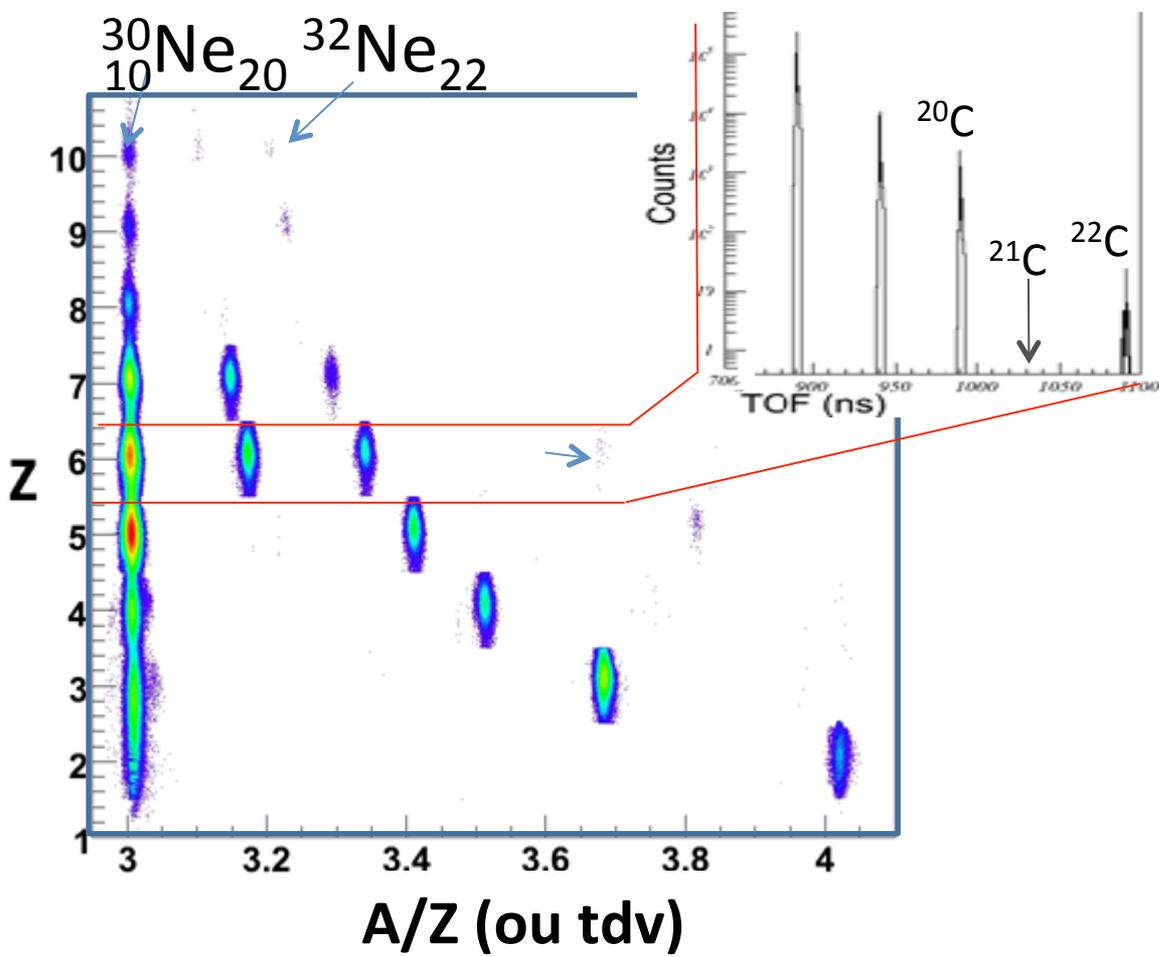
$$T_{\text{vol}} \propto M(A,Z) \times L/Z$$

$$L=80\text{m}$$



Trajectoire des noyaux  
Temps de vol ( $1\mu\text{s}$  environ)  
Pertes d'énergies

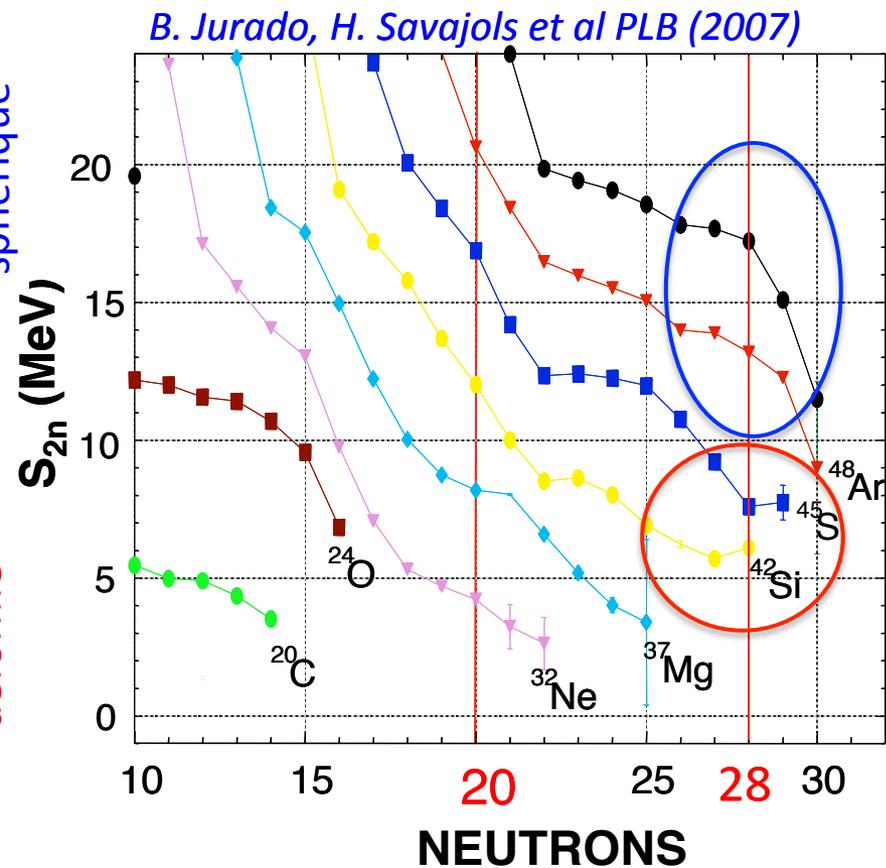
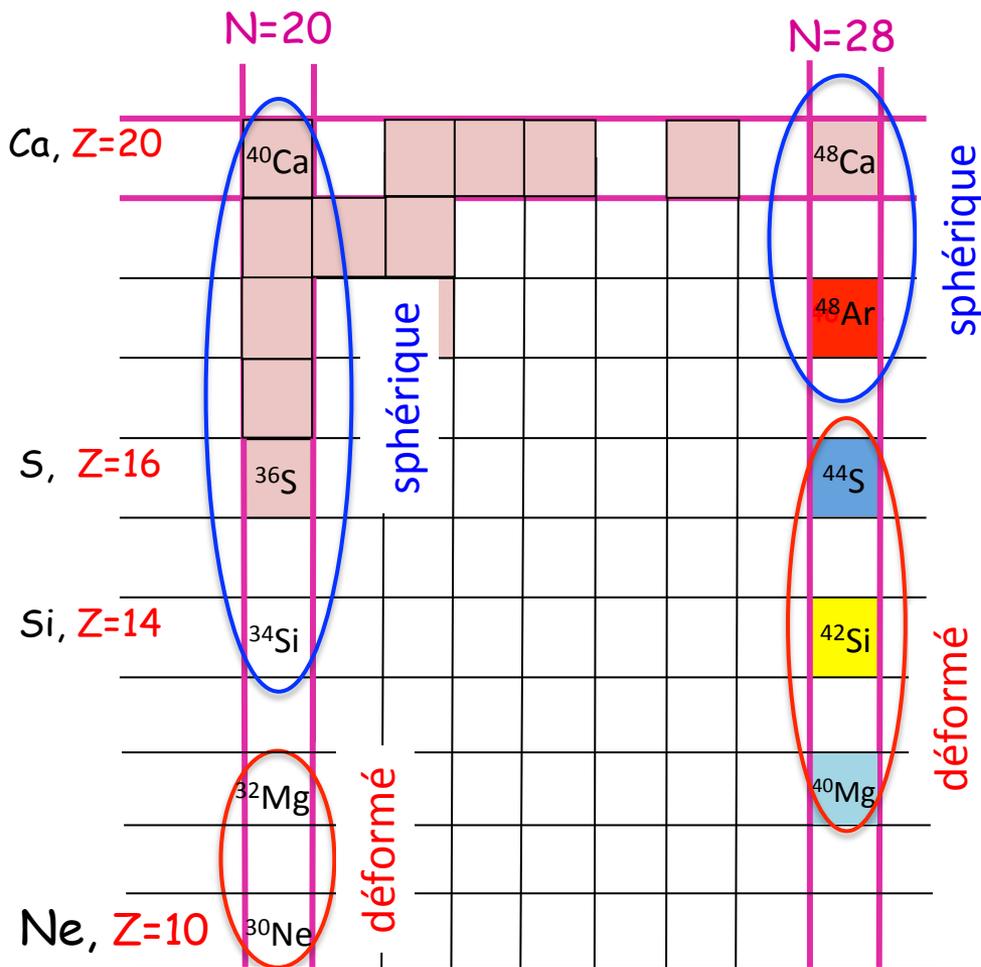
# Noyaux magiques et énergies de séparation de neutrons



Le GAP N=20 disparaît pour  $N \gg Z$   
 Les noyaux ne sont plus sphériques **NOYAUX EXOTIQUES**

→ Nouvelles forces nucléaires mises en jeu

# Qu'en est-il de la fermeture de couche N=28 ?



La fermeture de couche N=28 disparaît également lorsque  $N \gg Z$  !  
 Noyaux magiques disparaissent loin de la vallée de stabilité

## PREMIERE PARTIE

Introduction

Le modèle de l'atome

Radioscopie du noyau, forces, désintégration

Charte des isotopes

Le modèle en couches, les nombres magiques

## DEUXIEME PARTIE

Production de noyaux instables

Détermination de la masse atomique

Disparition des nombres magiques -> noyaux exotiques

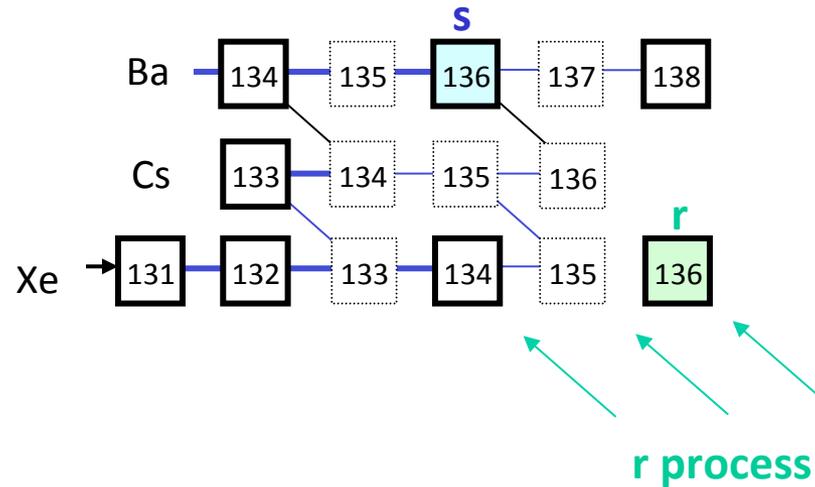
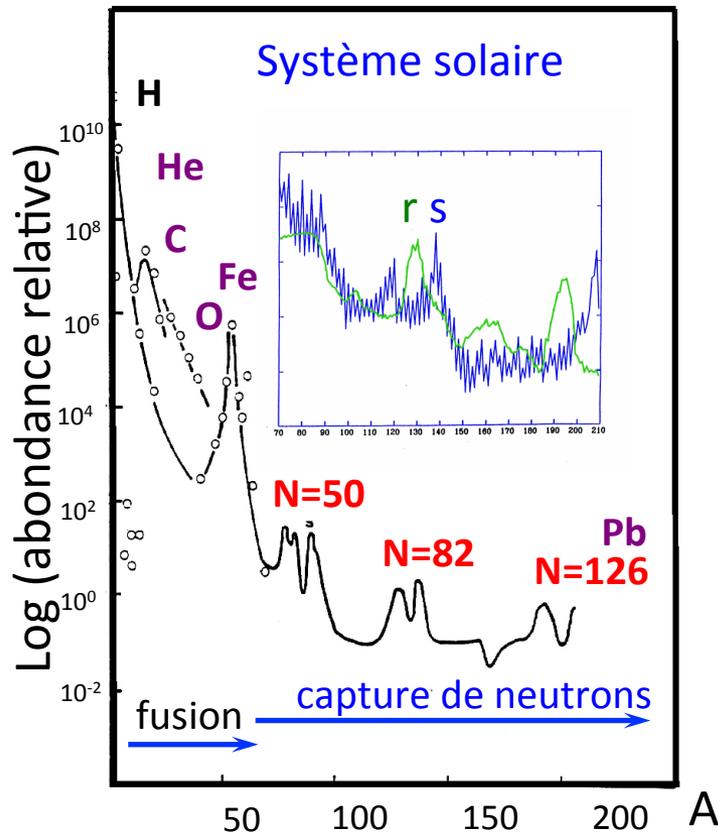
## TROISIEME PARTIE

Abondance des éléments dans l'univers

Les noyaux magiques en astrophysique

## EPILOGUE

# Abondance des éléments dans l'univers



Deux processus de capture de neutrons

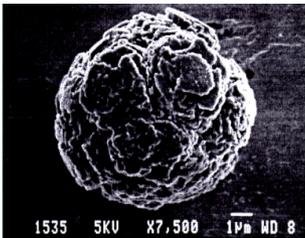
s: slow, faible densité de neutrons  $10^8 \text{cm}^{-3}$

r: rapid, grande densité de neutrons  $> 10^{24} \text{cm}^{-3}$

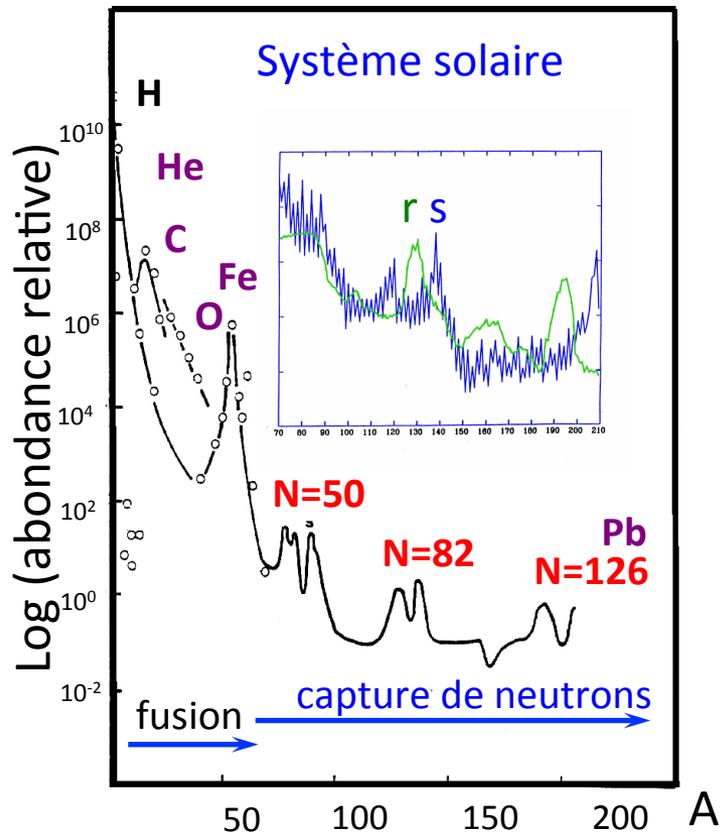
Certains isotopes sont purs s/ r, d'autres mélangés

On peut déduire une courbe r d'abondance solaire à comparer à celle des étoiles du halo galactique riche en éléments r.

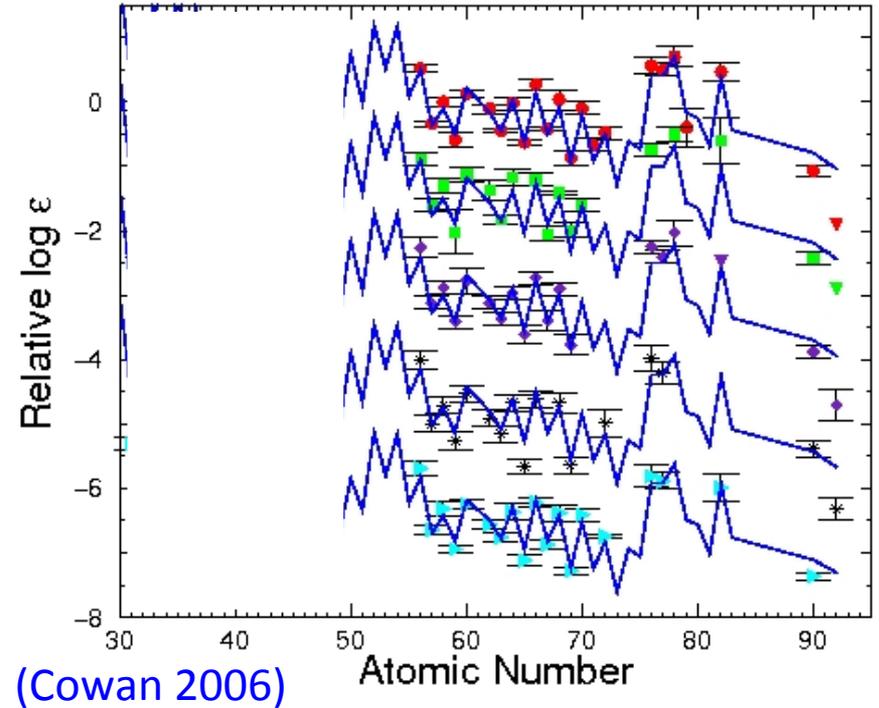
grain pré-solaire



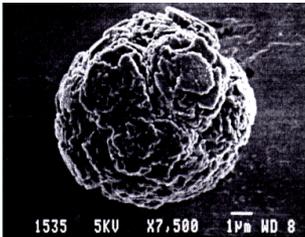
# Abondance des éléments dans l'univers



Etoiles de 1<sup>ère</sup> génération du halo galactique  
Abondance éléments r



grain pré-solaire



Eléments  $Z > 56$  ont la même abondance que solaire  
pour différentes étoiles du halo galactique

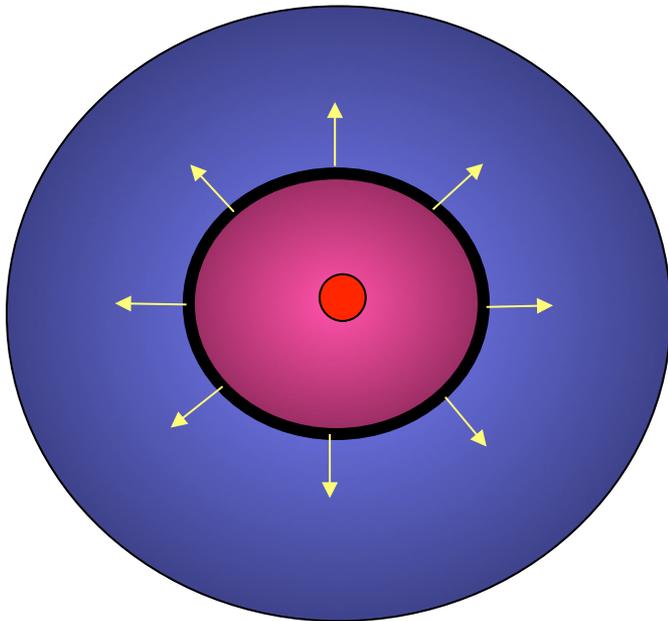
Probablement produits par un seul processus explosif  
Lequel ? noyaux magiques... seuls 'survivants' ...

Pour  $Z < 56$ , ça se complique – autre processus ...

# Sites stellaires pour la production d'éléments lourds

## Une des 10 plus grandes énigmes de la science

Explosion de supernova  
-> bulle de haute entropie ( $T^3/\rho$ )

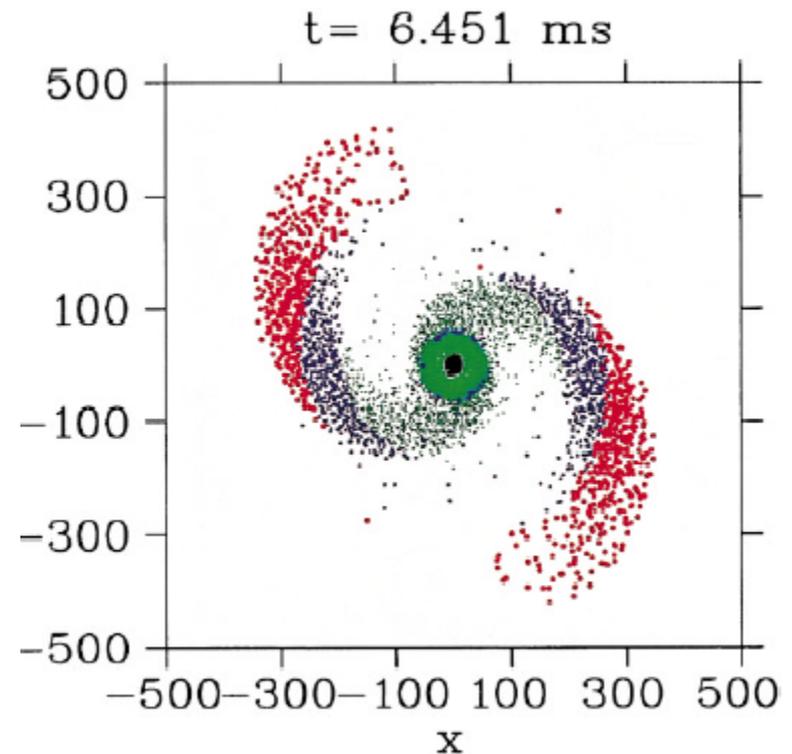


- Étoile à neutron
- Bulle de haute entropie
- Couche externe

*S. Woosley et al. Ap.J. 433, 229 (1994)*  
*R.D. Hoffman et al. Ap.J. 482, 951 (1997)*

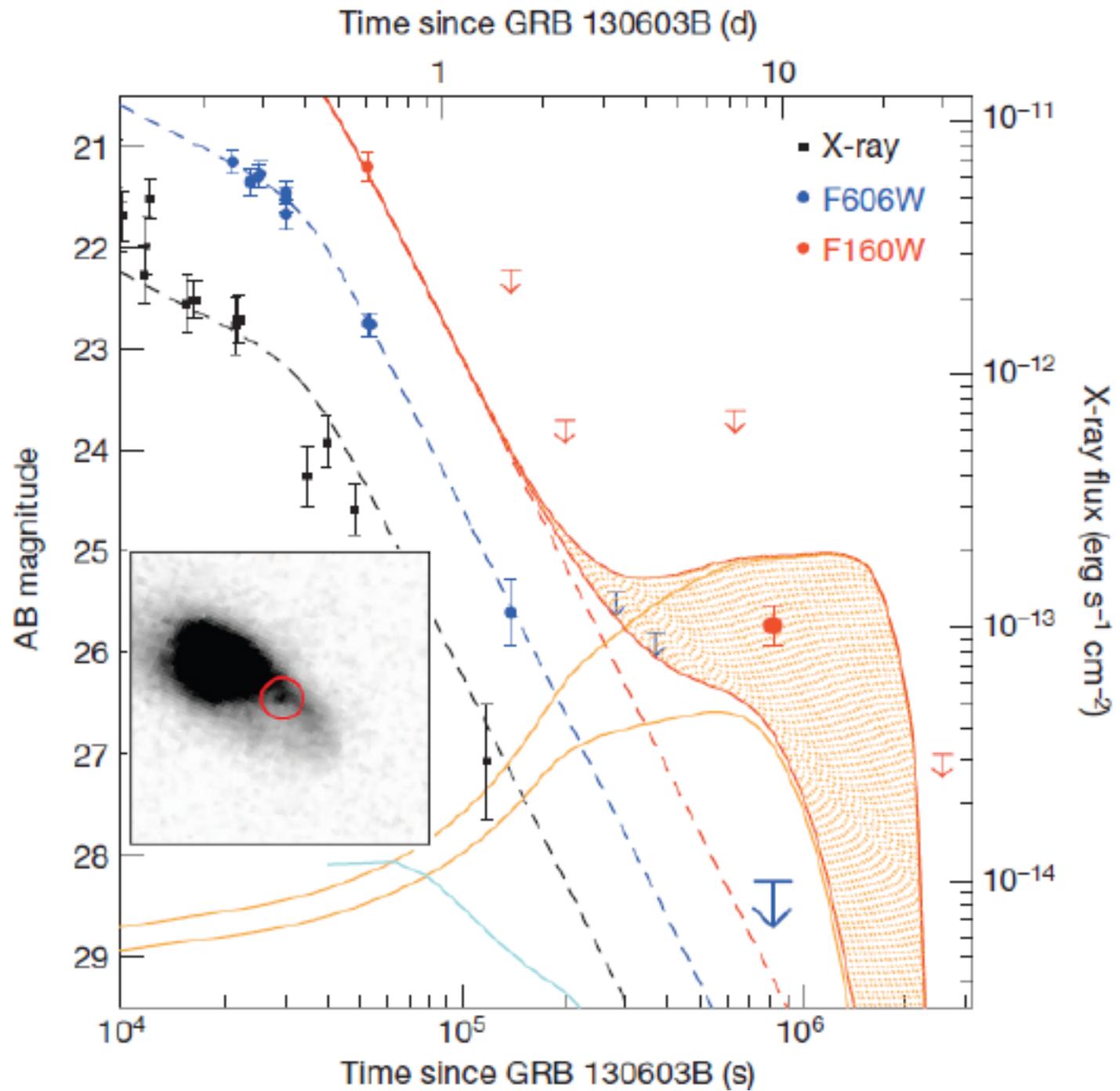
### Etoiles à neutron en accrétion

-> bras spiraux

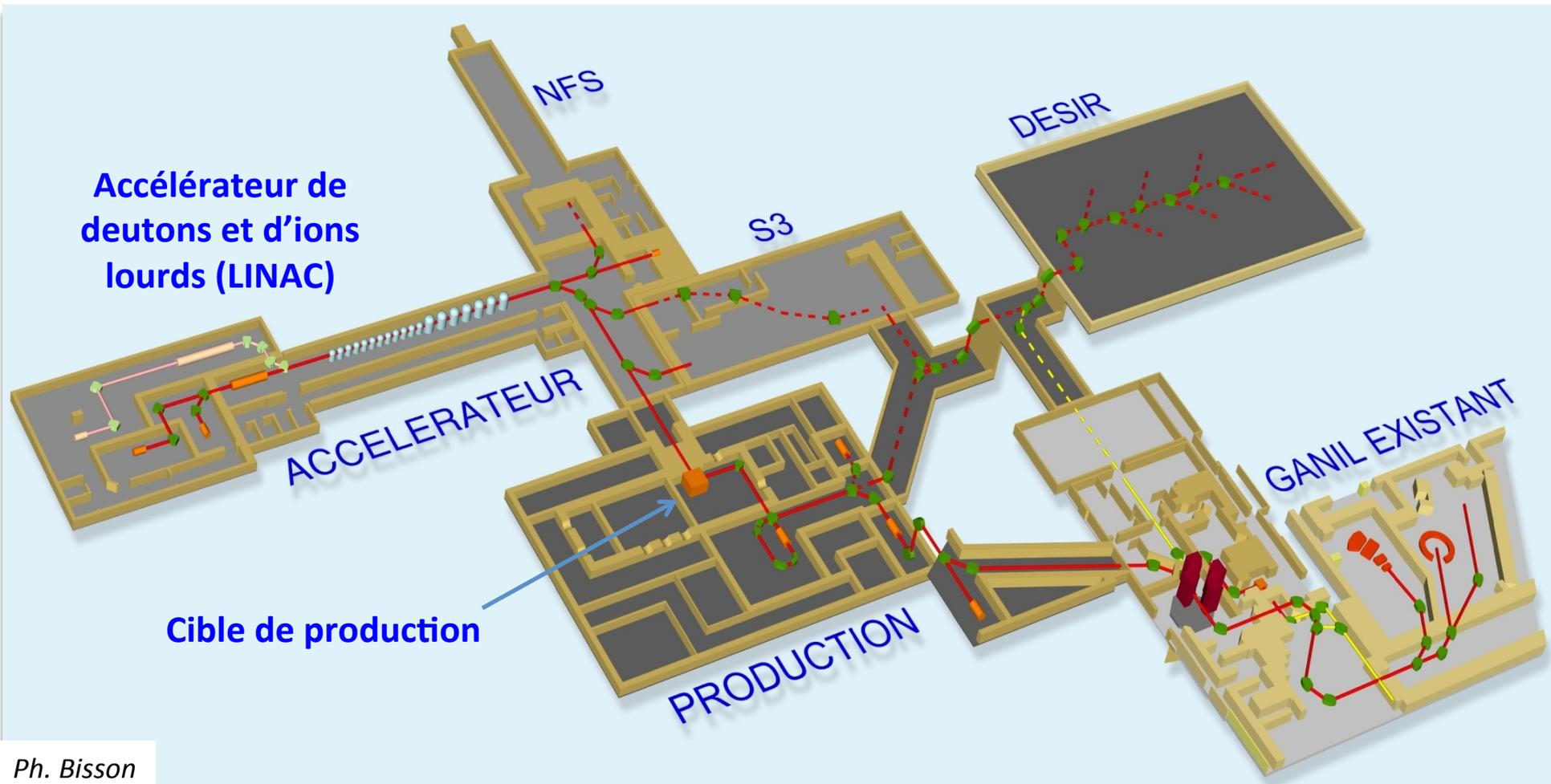


- Matière éjectée des bras spiraux  
nucléosynthèse

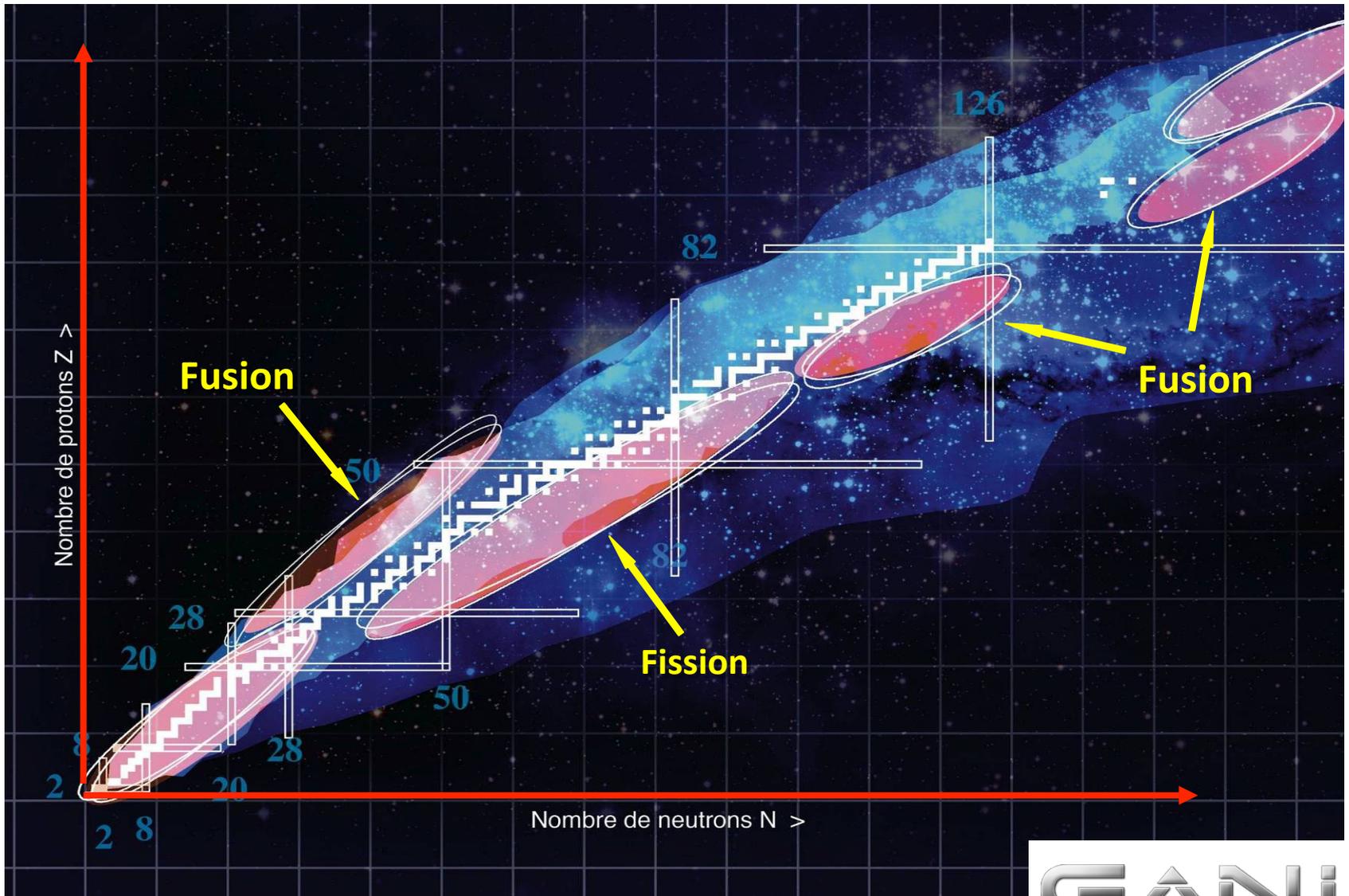
*C. Freiburghaus et al. Ap.J. 525, L121 (1999)*  
*S. Rosswog et al. A&A 341, 499 (1999)*



# S'ouvrir de nouveaux horizons avec (GANIL-)SPIRAL2



# Les horizons de GANIL-SPIRAL2



# Epilogue

Modification des fermetures de couches nucléaires loin de la stabilité

Changement des nombres magiques !

Proviennent des forces nucléaires sous-jacentes peu connues

Produire/étudier des noyaux exotiques grâce aux accélérateurs

Comprendre l'abondance des éléments dans l'Univers

Mais aussi conséquences pour comprendre/modéliser :

la possibilité d'existence de noyaux super lourds

le retraitement de déchets radioactifs de longue durée de vie

les noyaux à halos de neutrons



*' Que la force soit avec toi '*  
Obi-Wan Kenobi 'Star Wars'

Crédit vidéos:

## Noyau atomique, noyaux magiques

Concepteurs:

D. Lhuillier, L. Nalpas, A. Boudard, F. Bugeon, S. Cavata, F. Legrand, H. Moutarde, A. Obertelli,  
J. L. Sida, J.C Thomas

CEA Animéa 2011

## Etoiles à neutrons en accréation

S. Rosswog

## Nucléosynthèse étoiles à neutrons

O. Korobkin, S. Rosswog, A. Arcones, C. Winteler