

La physique nucléaire au GANIL ou comment *Sonder la matière nucléaire extrême*

Olivier LOPEZ (lopezo@lpccaen.in2p3.fr)
Laboratoire de physique corpusculaire de Caen

Université de Caen-Normandie, ENSICAEN, CNRS/IN2P3



UNIVERSITÉ
CAEN
NORMANDIE



Partie I

L'interaction nucléaire

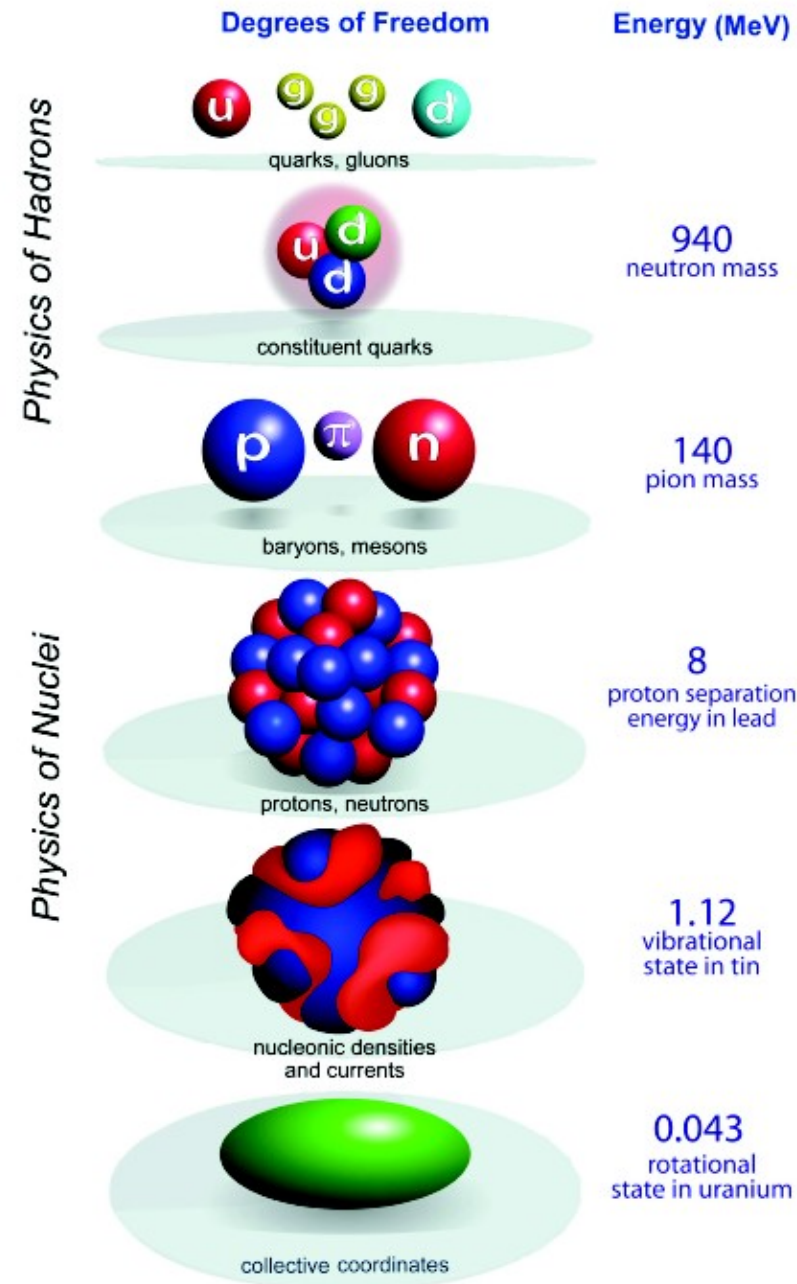
Les échelles d'énergie dans le monde subatomique

Suivant les échelles d'énergie mises en jeu, les systèmes sont décrits par des **degrés de liberté** différents et sont ainsi associés à différentes **(quasi-)particules**

Relation de De Broglie
(résolution spatiale) :

$$\lambda = \hbar / p$$

E_{inc} (MeV)	λ (fm)
1	8
10	1.5
100	0.5



$$1 \text{ MeV} = 1 \text{ méga-électronvolts} = 10^6 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

Les échelles d'énergie dans le monde subatomique

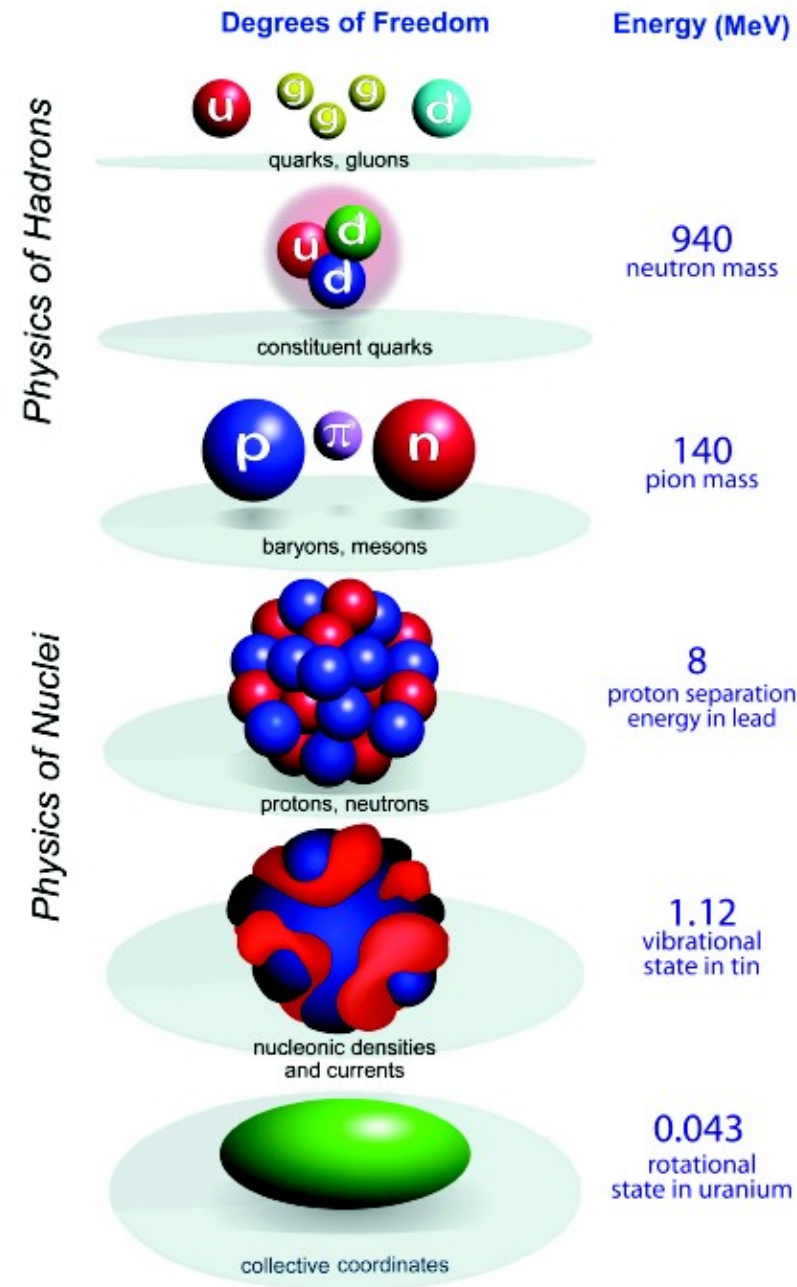
Suivant les échelles d'énergie mises en jeu, les systèmes sont décrits par des **degrés de liberté** différents et sont ainsi associés à différentes **(quasi-)particules**



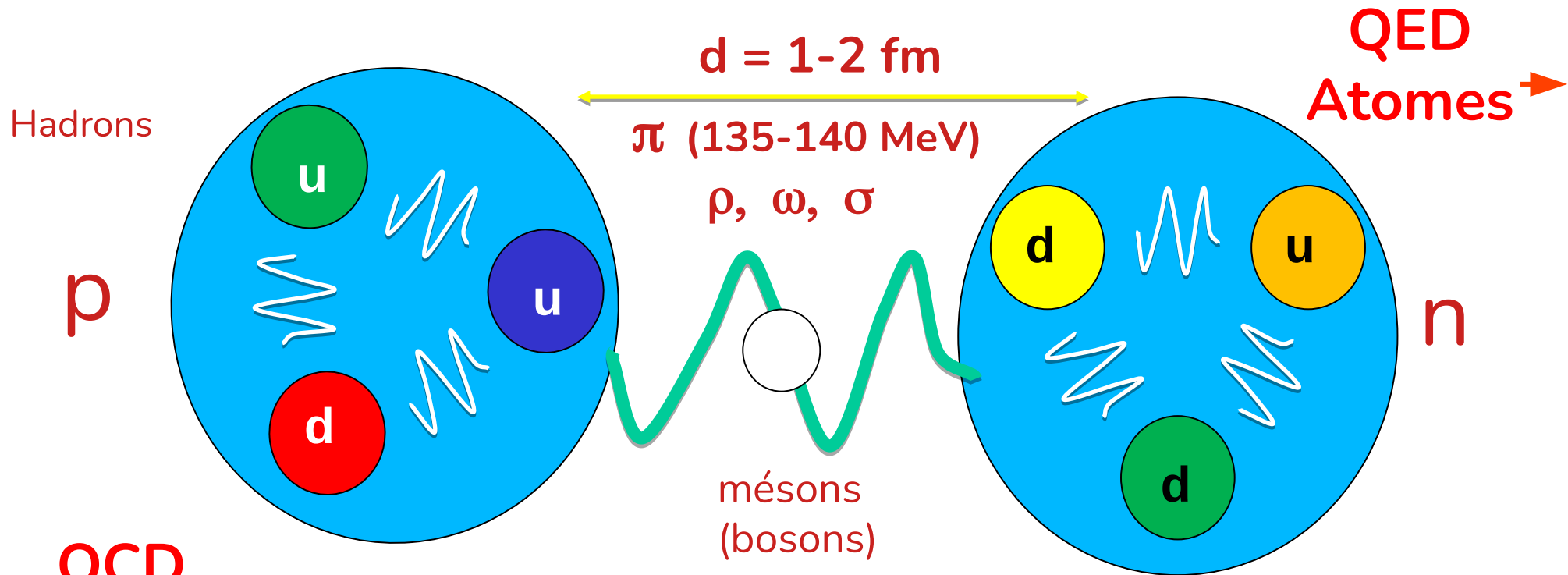
Physique nucléaire à “basse” énergie
 $E_{\text{inc}} = 5 - 100 \text{ MeV/nucléon}$

Sonde les **degrés de liberté nucléaires** et ainsi le **noyau en tant que tel**

- **structure nucléaire**
- **phénomènes collectifs (rotation, vibration)**
- **états excités (température)**
- **volume et surface, agrégats (clusters)**
- **équation d'état nucléaire**



L'interaction forte et l'interaction nucléaire

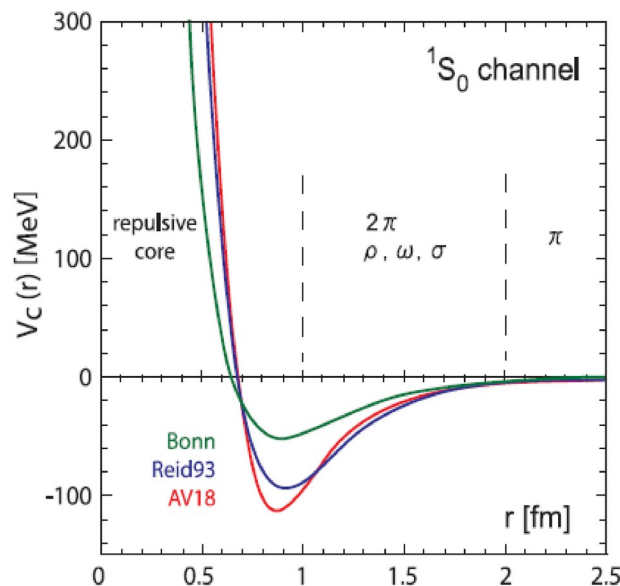


Interaction nucléaire =
Int. forte à « longue » distance
(QCD en régime non-perturbatif)

Coeur dur : $r < 1 \text{ fm}$

Courte portée : $r \approx 1-2 \text{ fm}$

Tenseur and iso-vecteur: n,p



Degrés de liberté :

Densité $\rho = \rho_n + \rho_p$,

Mom. angulaire $J=L+S$

Isospin $I = (\rho_n + \rho_p) / \rho$

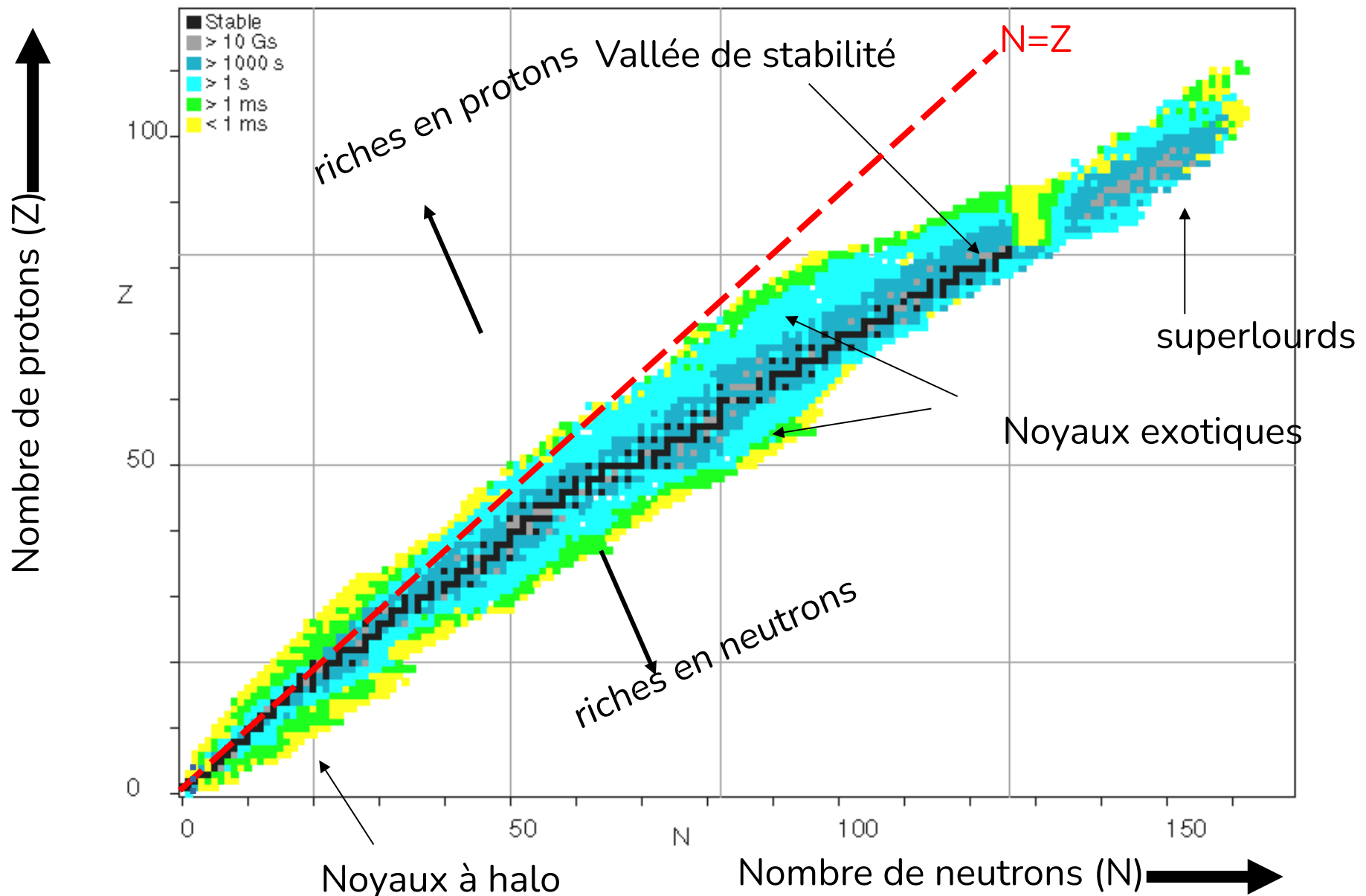
Partie II

Une description classique du noyau

Niveau macroscopique

Des noyaux à la carte

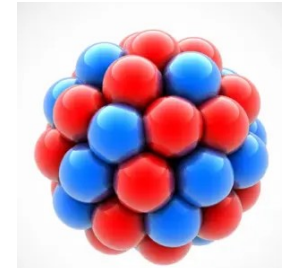
3500 noyaux connus
350 stables !



Description macroscopique du noyau : la goutte liquide

Empilement compact de protons et neutrons sans **direction privilégiée**:

le noyau est une **sphère de rayon** $R = r_0 A^{1/3}$, avec $r_0 = 1.25 \text{ fm}$



Formule de Bethe & Weisacker:

$$B = \overset{\text{volume}}{a_v A} - \overset{\text{surface}}{a_s A^{2/3}} - \overset{\text{coulomb}}{a_c Z^2/A^{1/3}} - \overset{\text{asymétrie n/p (isospin)}}{a_{\text{sym}} (A-2Z)^2/A}$$

+ effets de couches (nombres magiques)

+ appariement (n-n, p-p, n-p)

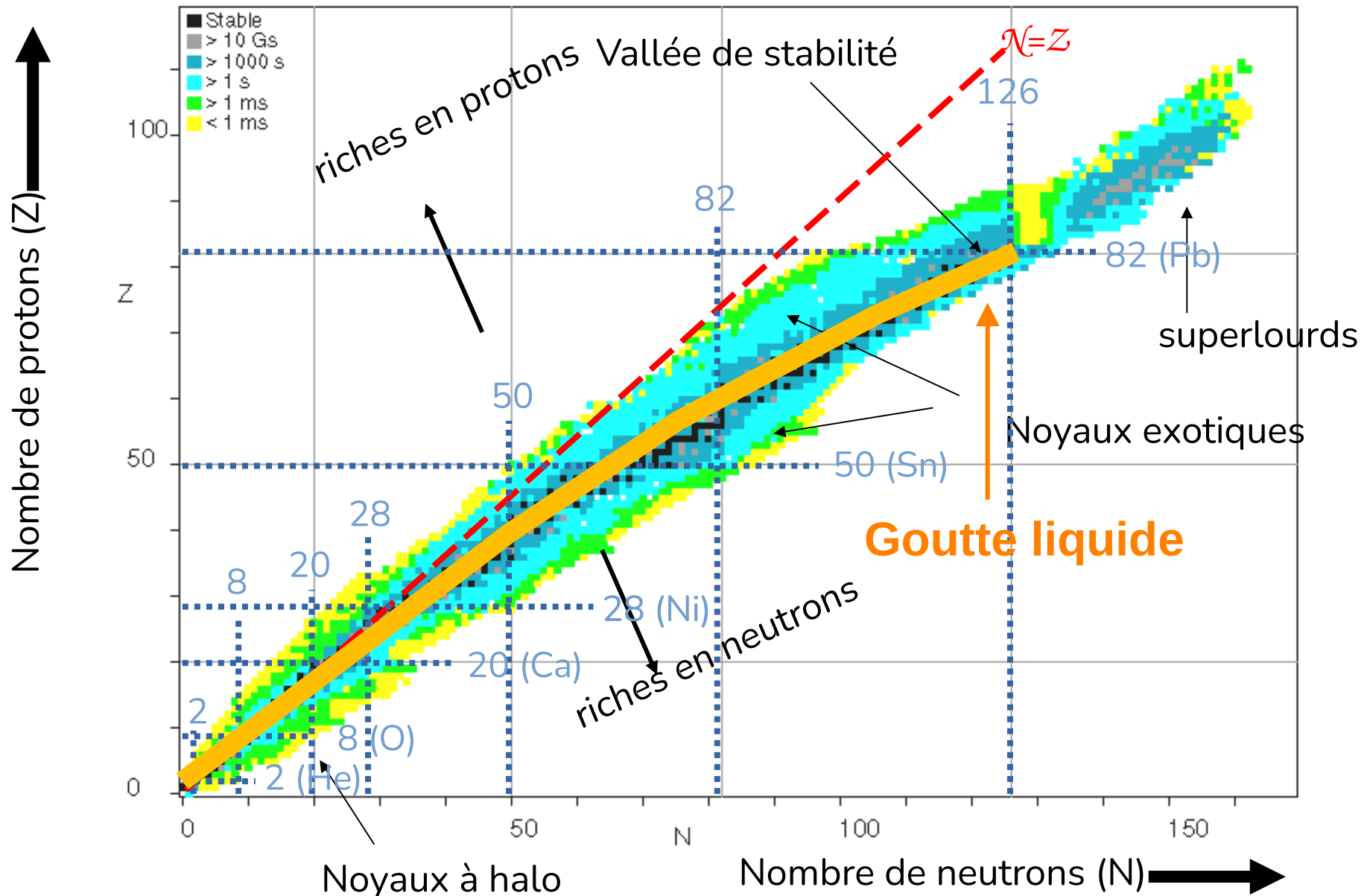
ils contribuent à hauteur de 1 % en énergie

Vallée de stabilité β , B maximum : $\partial B/\partial Z = 0$

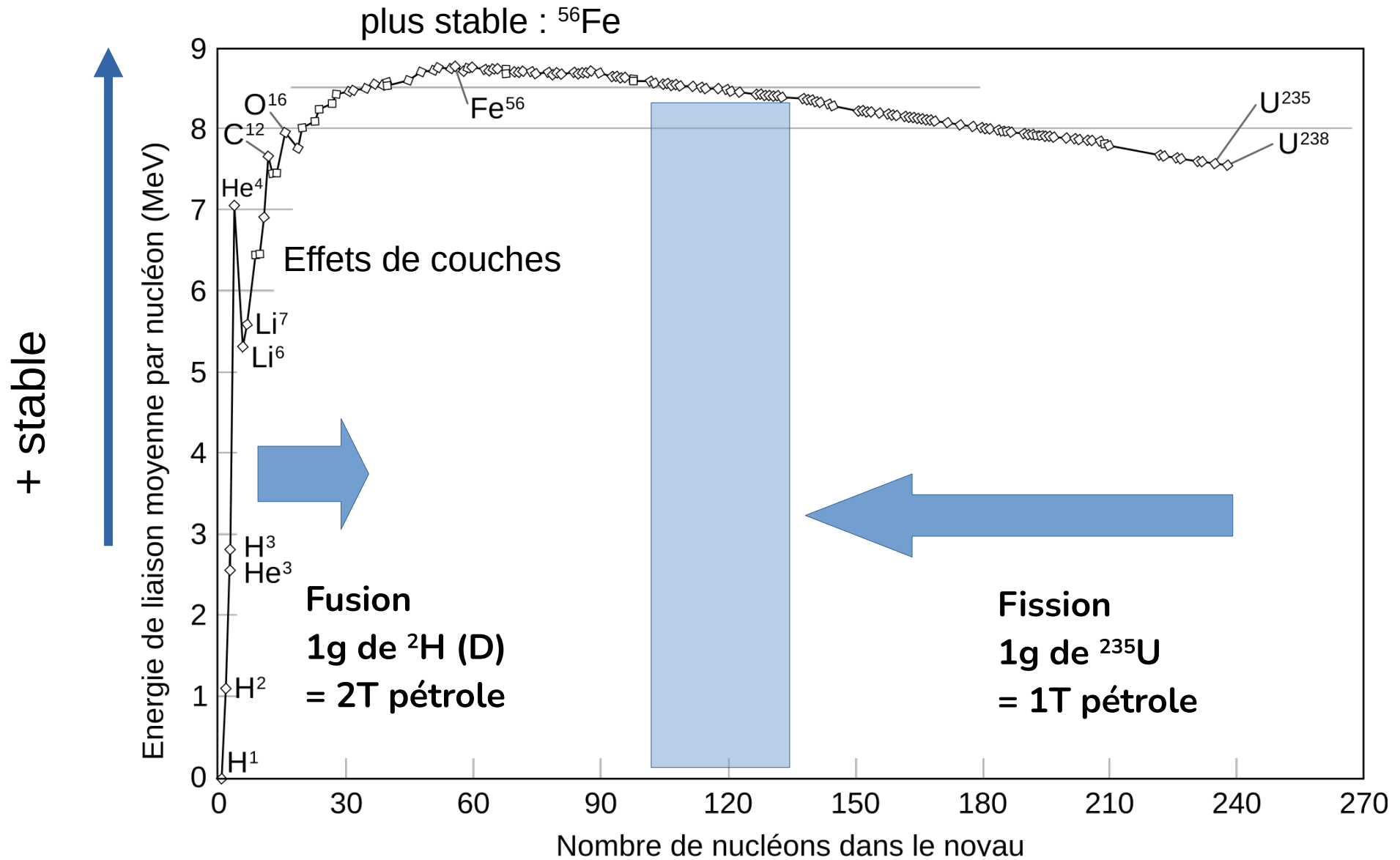
$$Z_{\beta\text{-stable}} \approx (A/2)[1 + a_c/(4a_{\text{sym}})A^{2/3}]^{-1}$$

Des noyaux à la carte

Nombres magiques : 2,8,20,28,50,82,126, ...



Énergie de liaison : la courbe d'Aston (1927)



Nucléosynthèse : d'où viennent les éléments ?

Abondance
des éléments
dans l'Univers

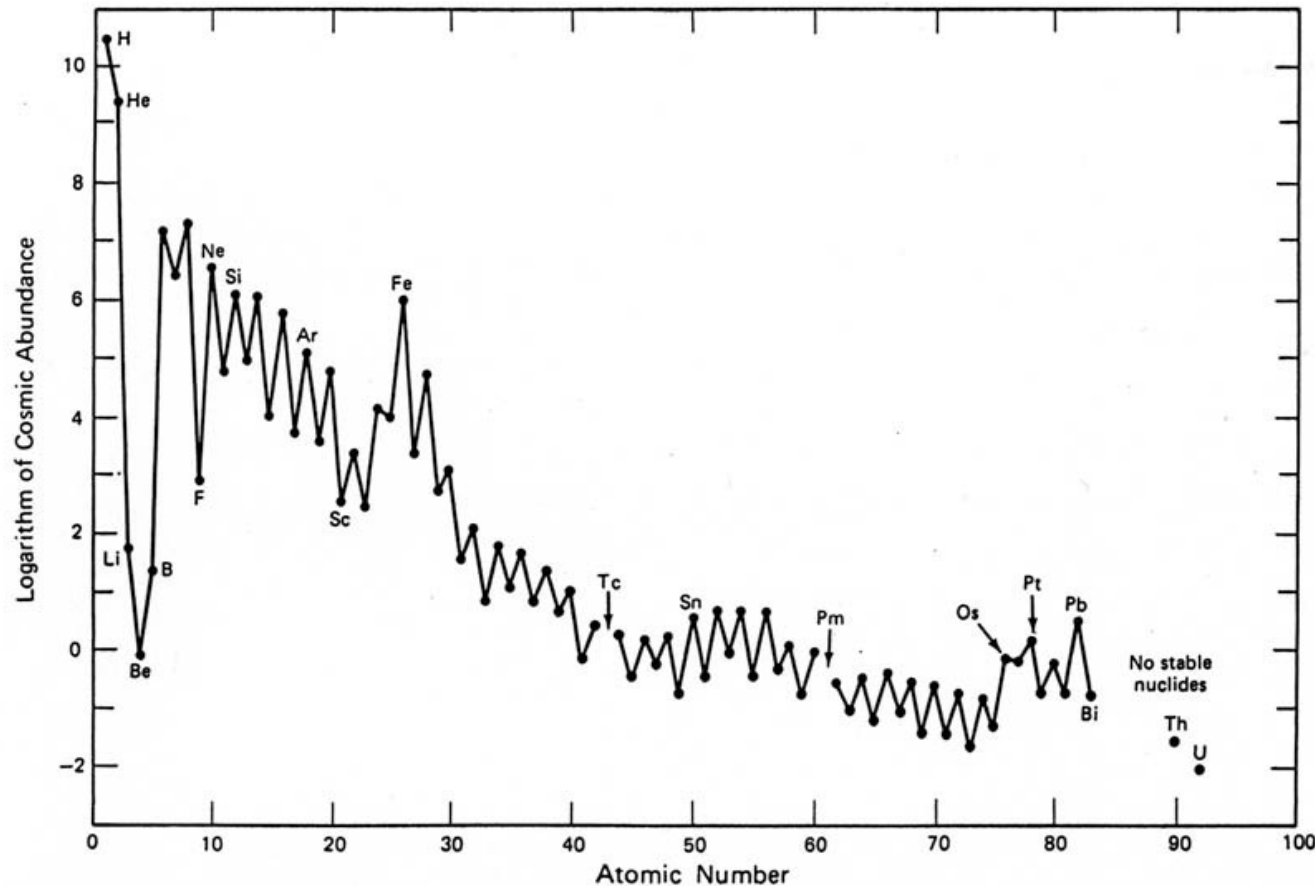


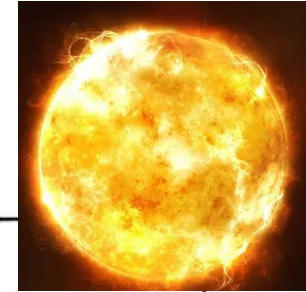
Figure 2.4 Plot of the abundances of the elements in the solar system versus their atomic number. The abundances are expressed as the logarithm of the number of atoms of each element relative to 10^6 atoms of silicon. (Data are listed in Table 2.2 after Anders and Ebihara, 1982.)

Nucleosynthèse : des origines diverses

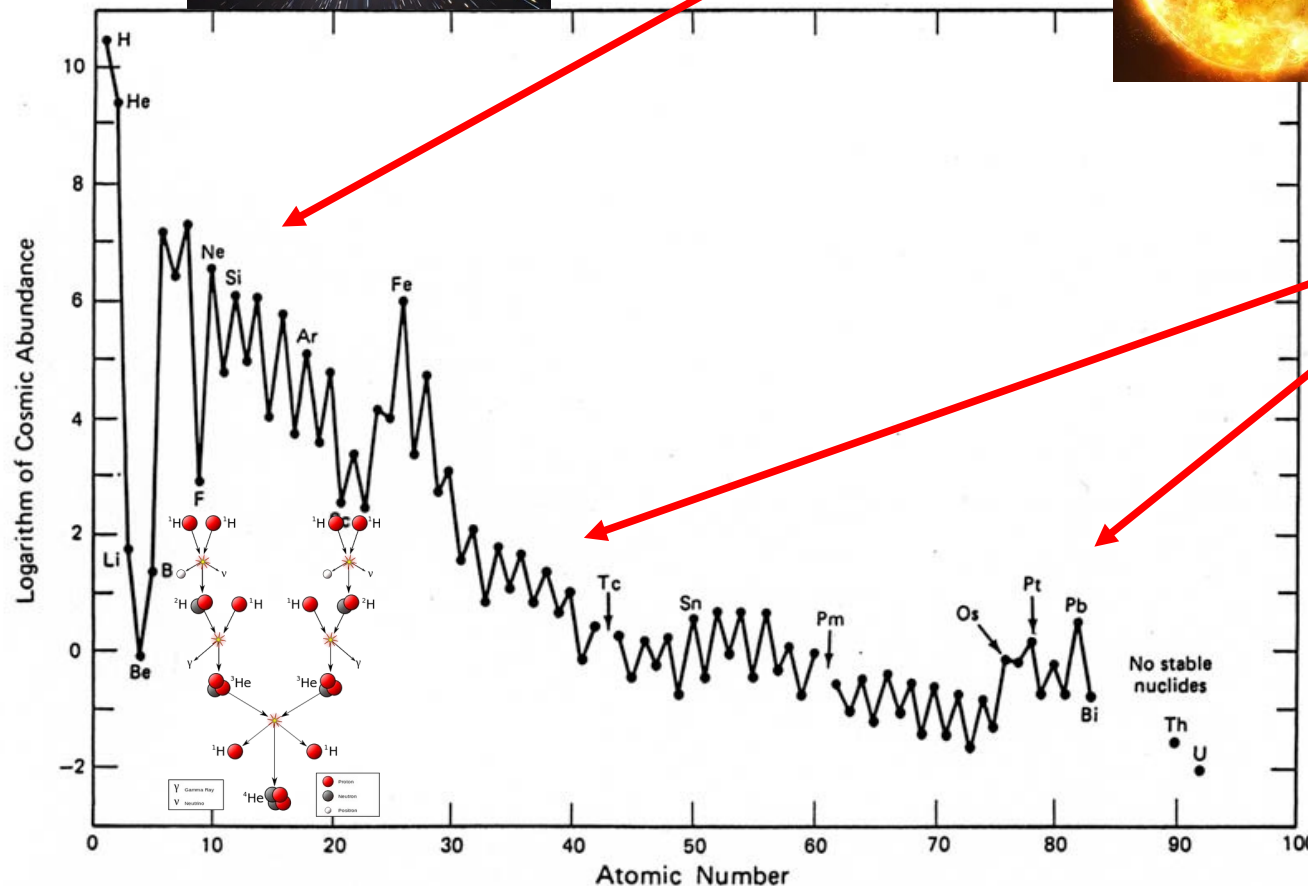
Éléments primordiaux (Big Bang)
 $Z=1-3$



Synthèse stellaire
 $Z=2-26$



Abondance
des éléments
dans l'Univers



$Z > 26$: synthèse extra-
stellaire
Processus r , rp et s
dans les *supernovae* et
les fusions d'étoiles à
neutrons

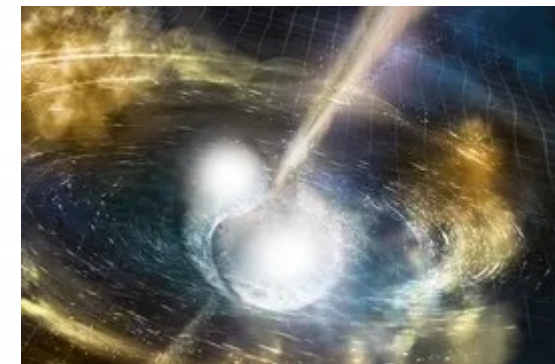


Figure 2.4 Plot of the abundances of the elements in the solar system versus their atomic number. The abundances are expressed as the logarithm of the number of atoms of each element relative to 10^6 atoms of silicon. (Data are listed in Table 2.2 after Anders and Ebihara, 1982.)

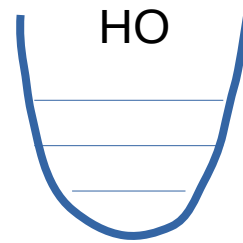
Partie III

Une description quantique du noyau

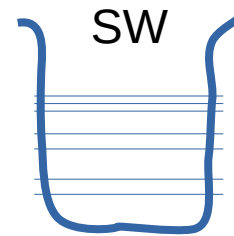
Niveau microscopique

Noyau à $T \approx 0$: réalité quantique

Vers une description de plus en plus réaliste du puits de potentiel nucléaire dans lequel baignent les protons et neutrons :



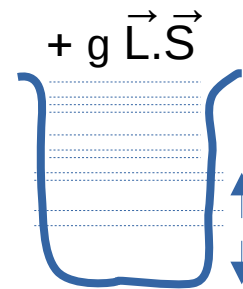
C'est la notion de **champ moyen**



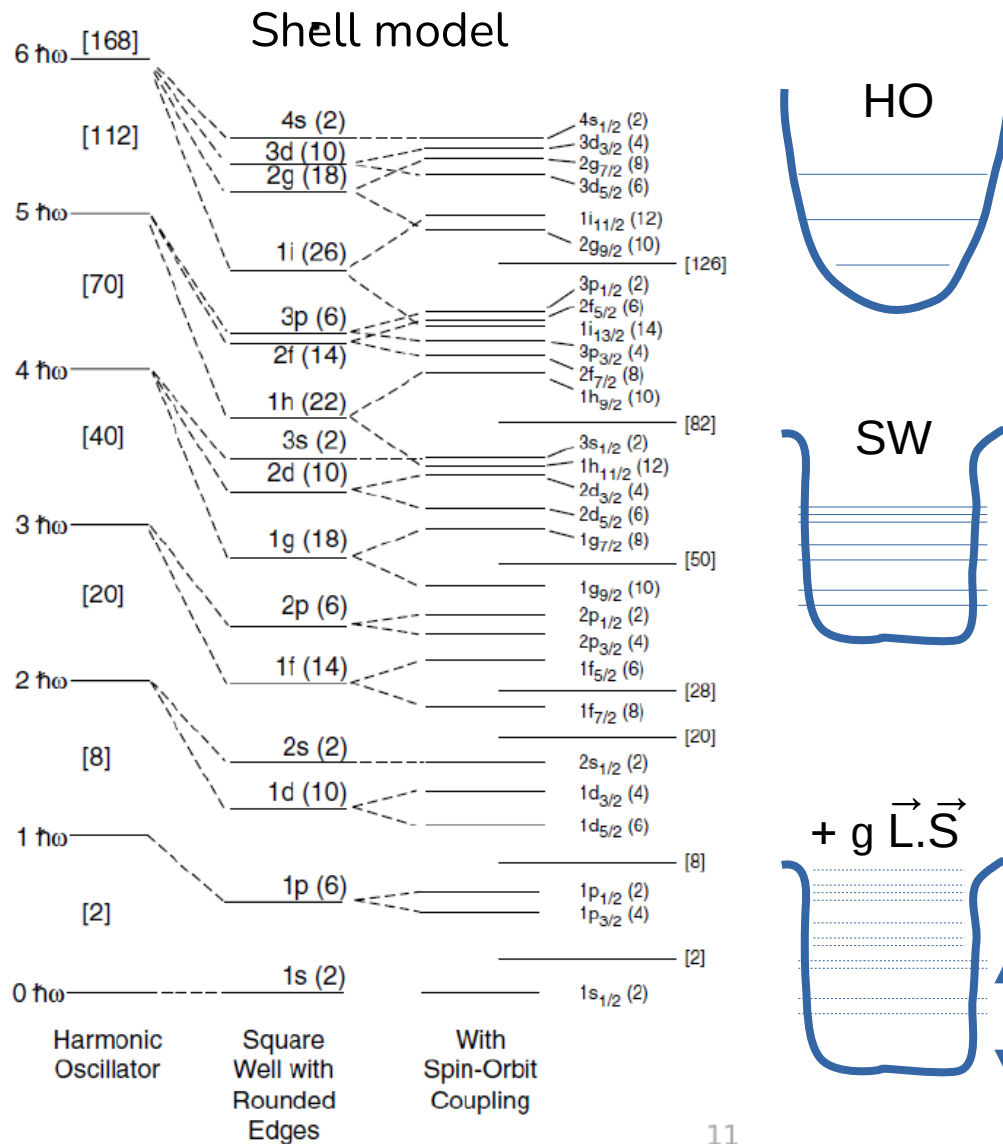
Justification (principe de Pauli)

Libre parcours moyen d'un nucléon

$$\Lambda_{\text{nucléon}} \gg R_{\text{noyau}}$$



Noyau à $T \approx 0$: réalité quantique

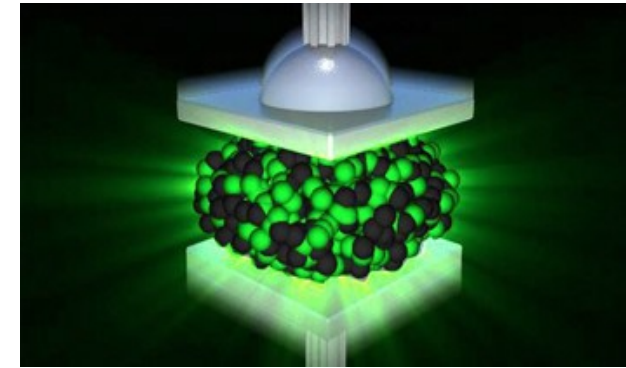
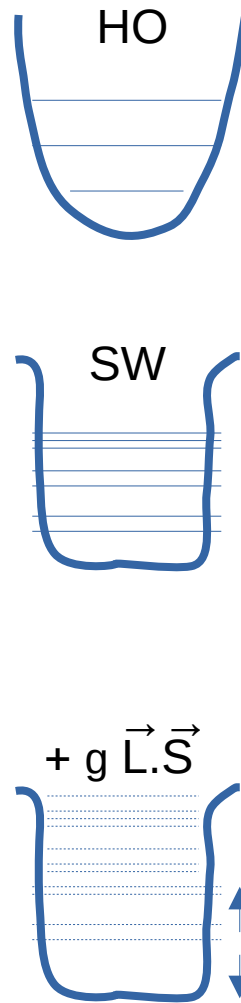
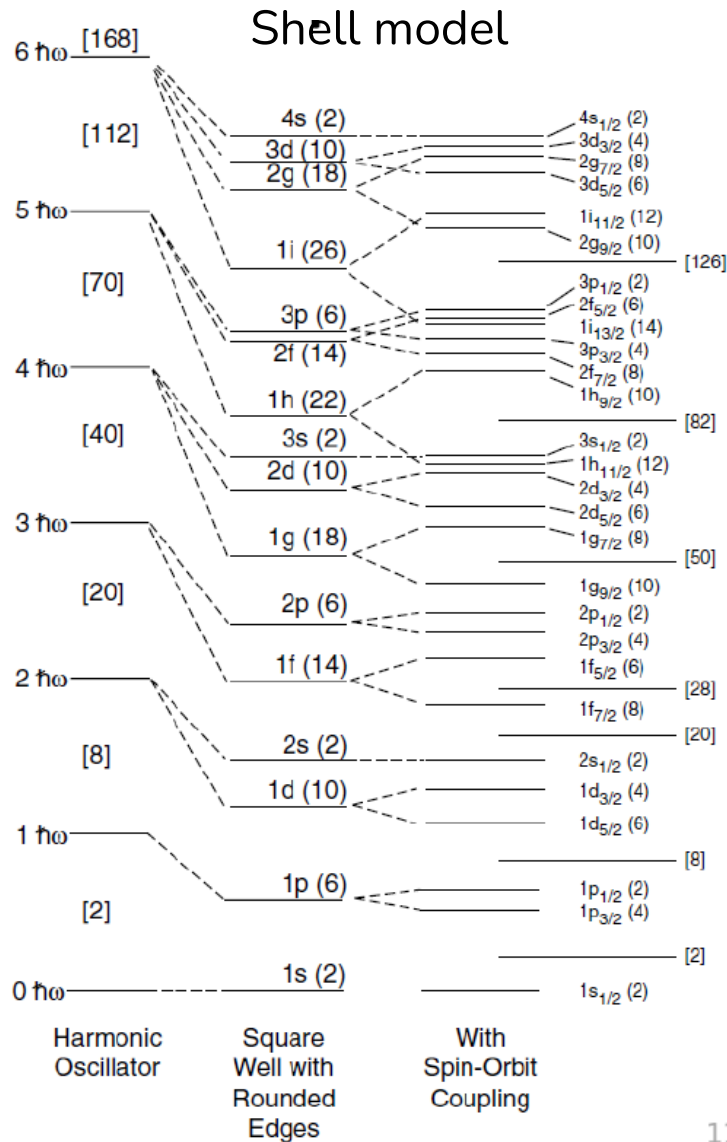


11

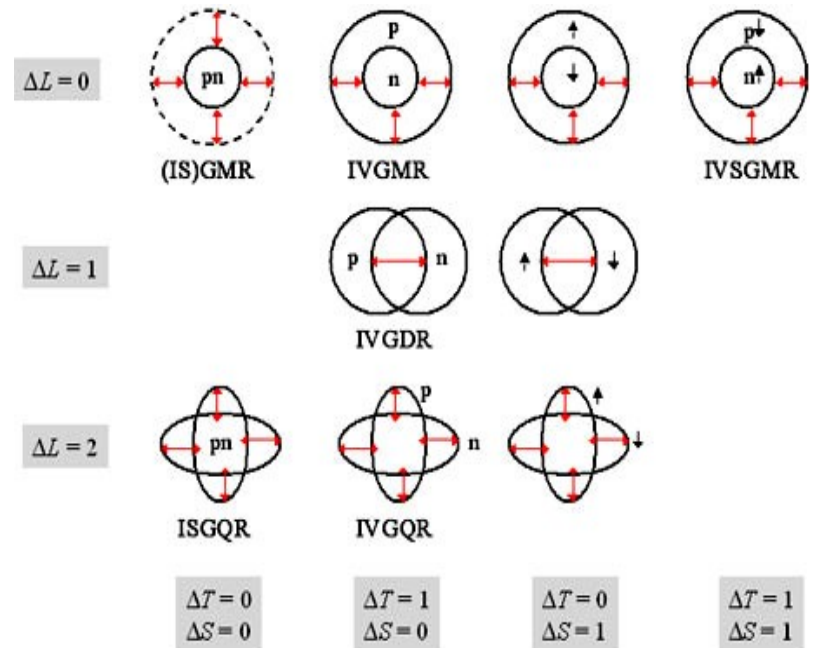
Nombres quantiques pour les orbitales des nucléons n, l, j : $1s_{1/2}$

Structure nucléaire et limites de stabilité (driplines)

Noyau à $T \approx 0$: réalité quantique



Excitations collectives Résonances géantes



Nombres quantiques pour les orbitales des nucléons n, l, j : $1s_{1/2}$

Structure nucléaire et limites de stabilité (driplines)

Grâce à l'avènement d'installations de **production de faisceaux radioactifs**, de nouveaux phénomènes ont émergés depuis les **années 2000**

- nouveaux **nombre magiques** (puits harmonique, $N = 40, 70$)
- noyaux à **halo** (systèmes borroméens)
- systèmes **moléculaires** (agrégats)
- structure nucléaire pour les **éléments super-lourds** ($Z > 100$)
- nouvelles **radioactivités** $2p$, $2n$, **clusters** (couplage au continuum)

Impact sur les théories

Forces à 3 corps et plus (N corps)

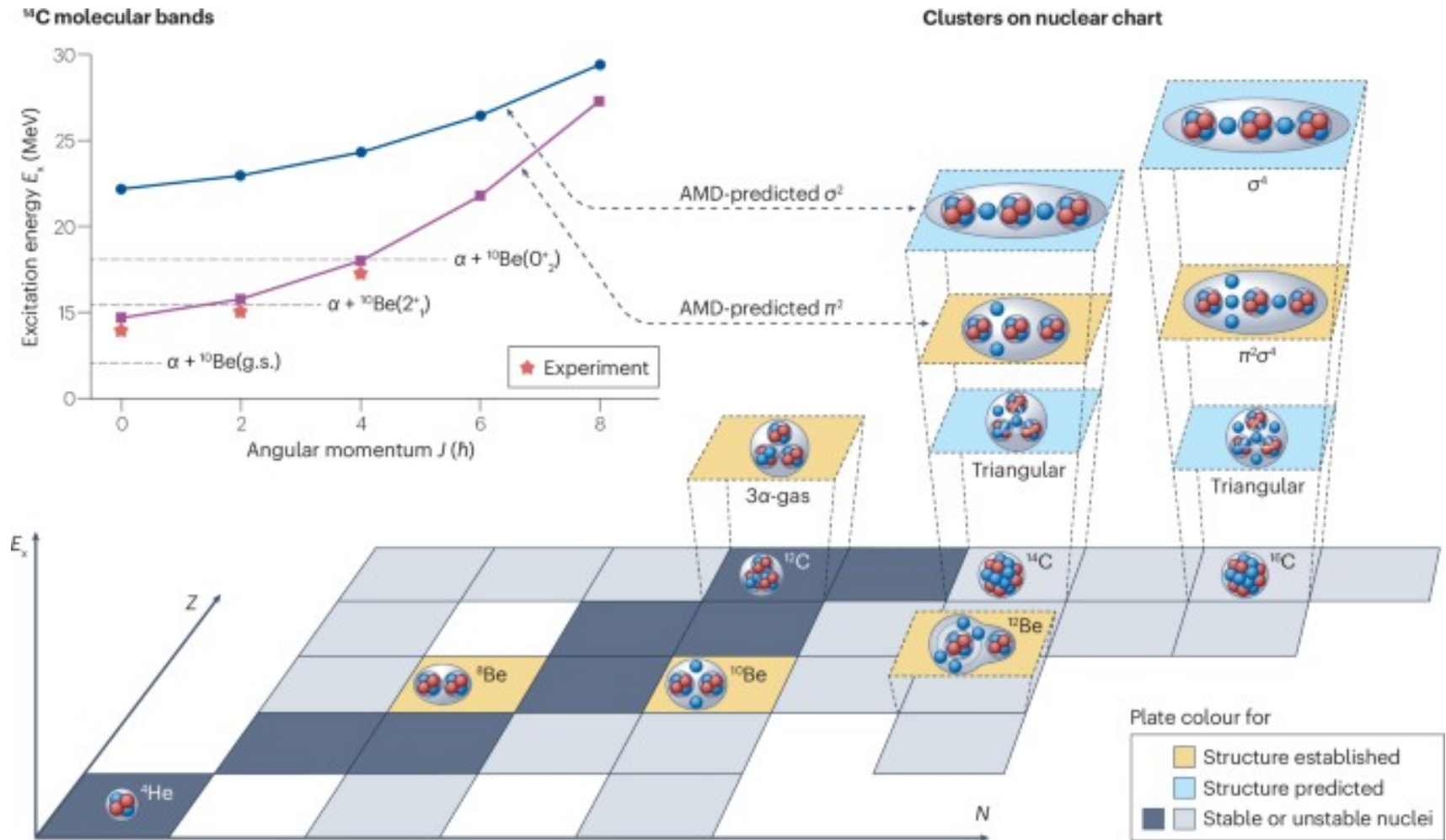
Dépendance en Isospin (N/Z)

Noyaux faiblement liés et couplage au continuum

Corrélations : appariement, superfluidité, courte portée

Structure nucléaire (II)

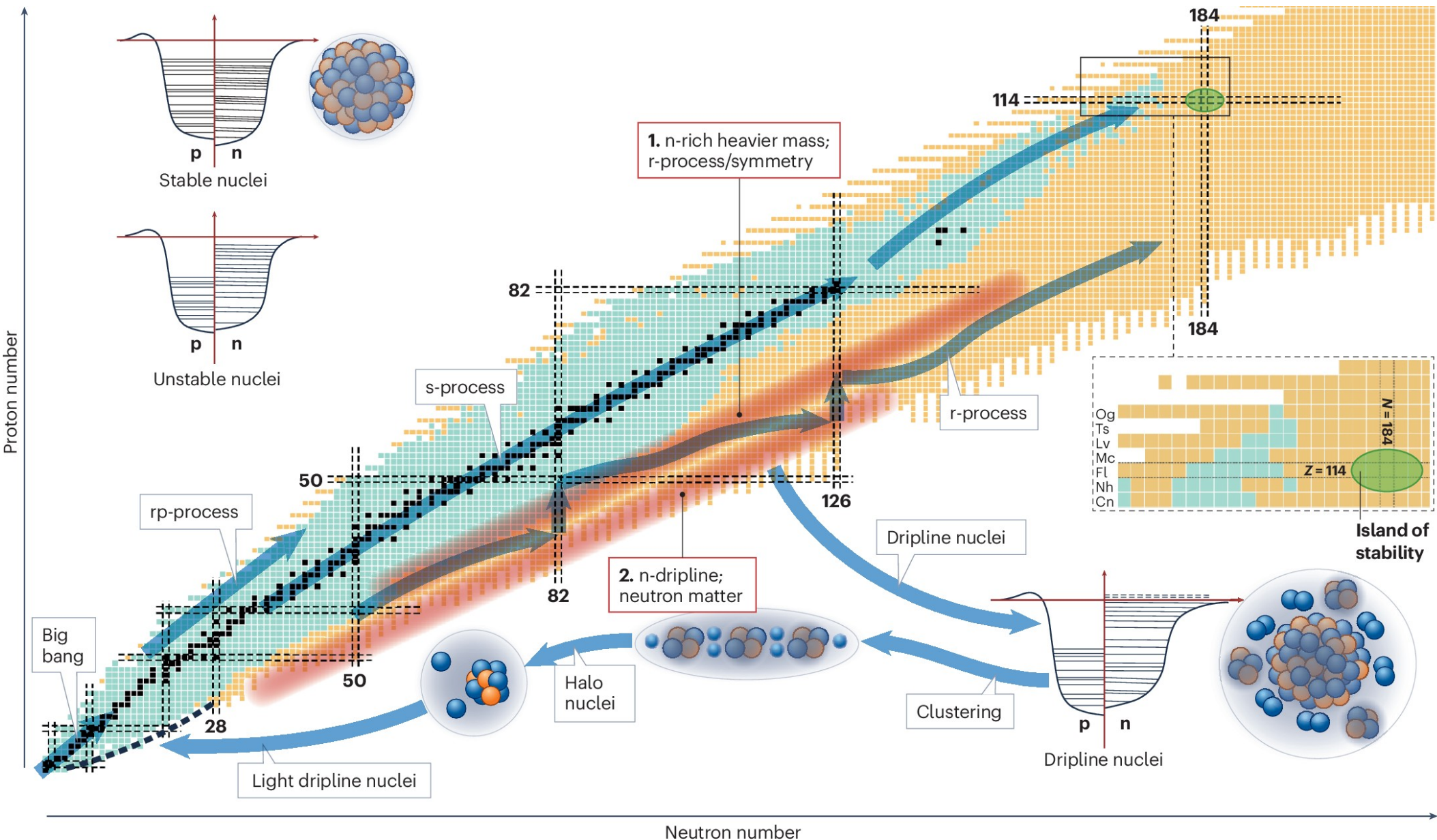
Noyaux légers : structure moléculaire et agrégats !



Y. Ye, X. Yang, H. Sakurai, and B. Hu, Nature Rev. Physics 7, 21 (2024)

Structure nucléaire (III)

Noyaux exotiques : déséquilibre entre nombres de neutrons et protons



Partie IV

La matière nucléaire dans des états extrêmes

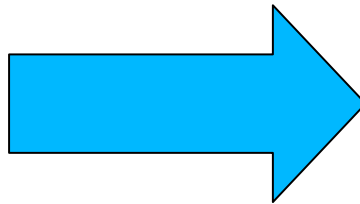
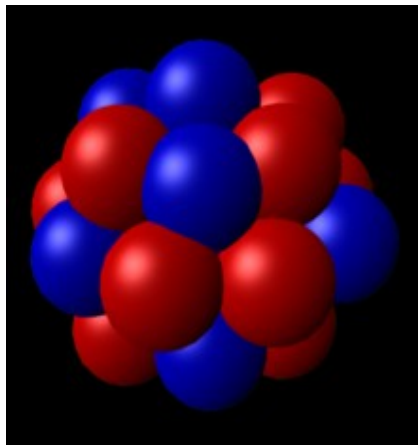
l'équation d'état

Du noyau à un astre compact...

Sous pression !

$$P = 10^{14} \text{ g/cm}^{-3} = 10^8 \text{ T/cm}^3$$

nucleus



Supernova / étoile à neutrons

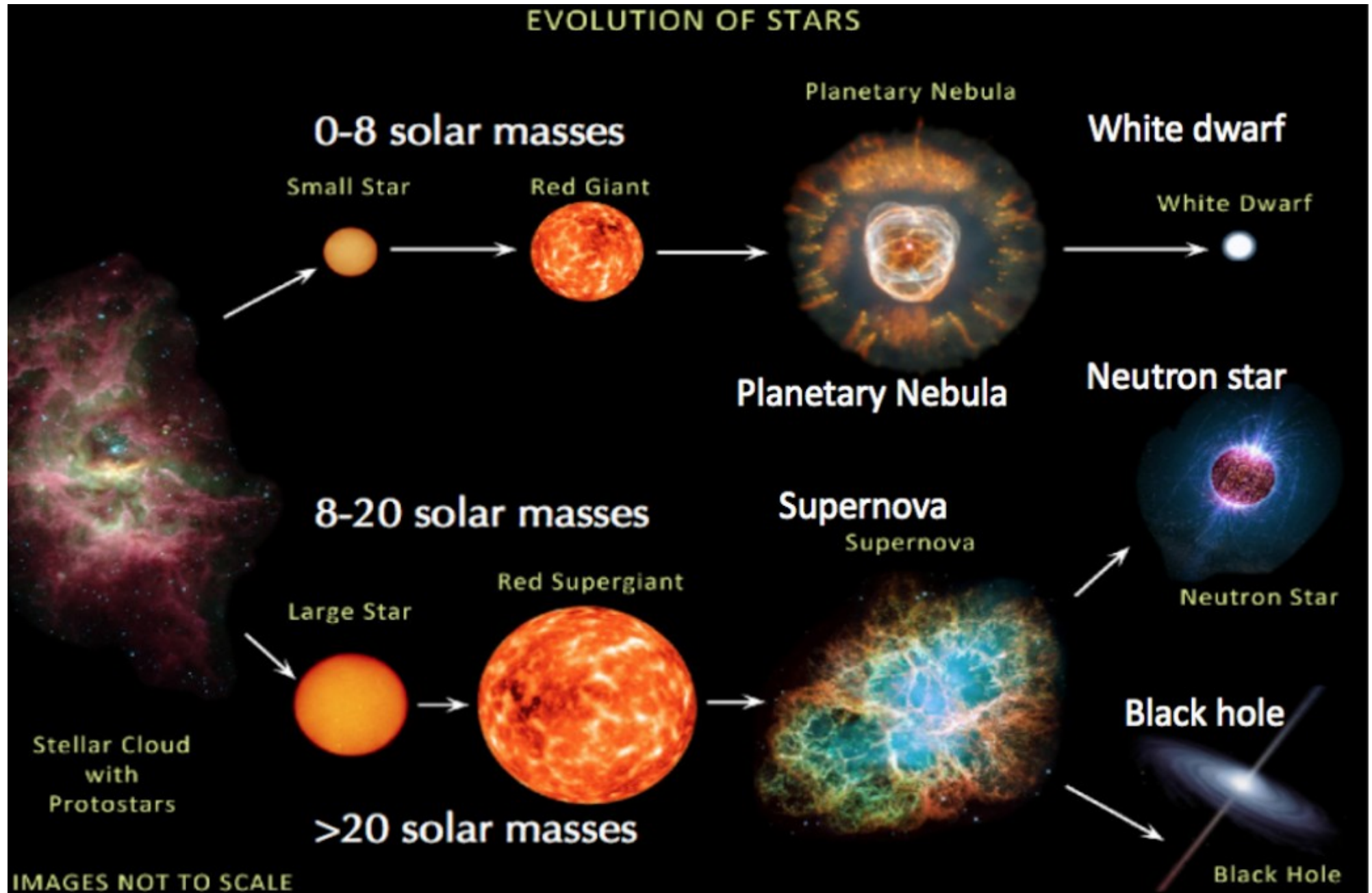


Nucleosynthèse au-delà du Fer

Effondrement du cœur de la supernova (SN II) : $\times 10,000,000,000$ Soleil

La formation de l'étoile à neutrons est directement liée à $E(\rho, T, \delta)$

Comment une étoile devient-elle une étoile à neutrons ?



Les étoiles à neutrons : un rêve de physicien nucléaire !

Nébuleuse du Crabe

Pulsar au centre !

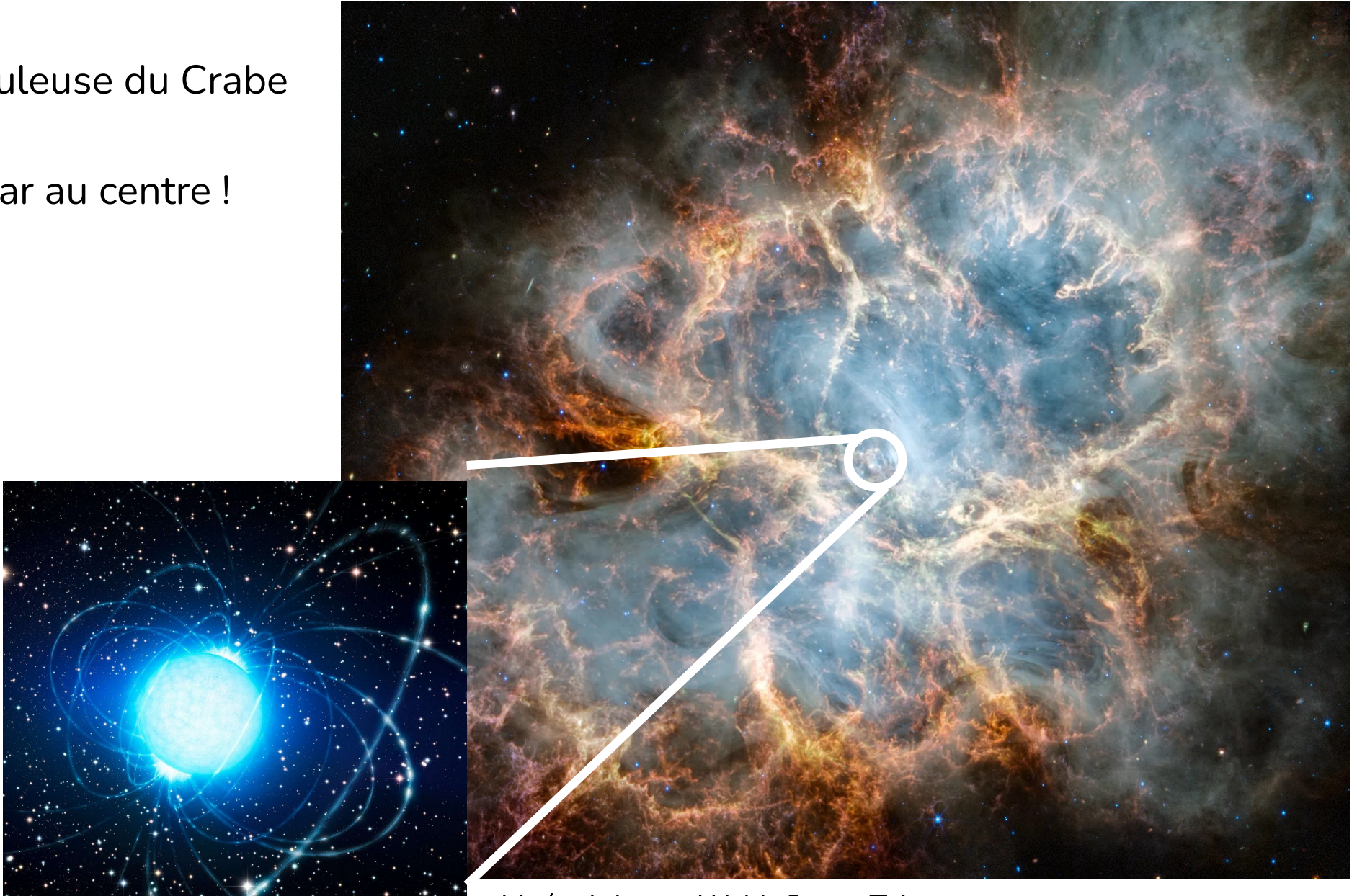
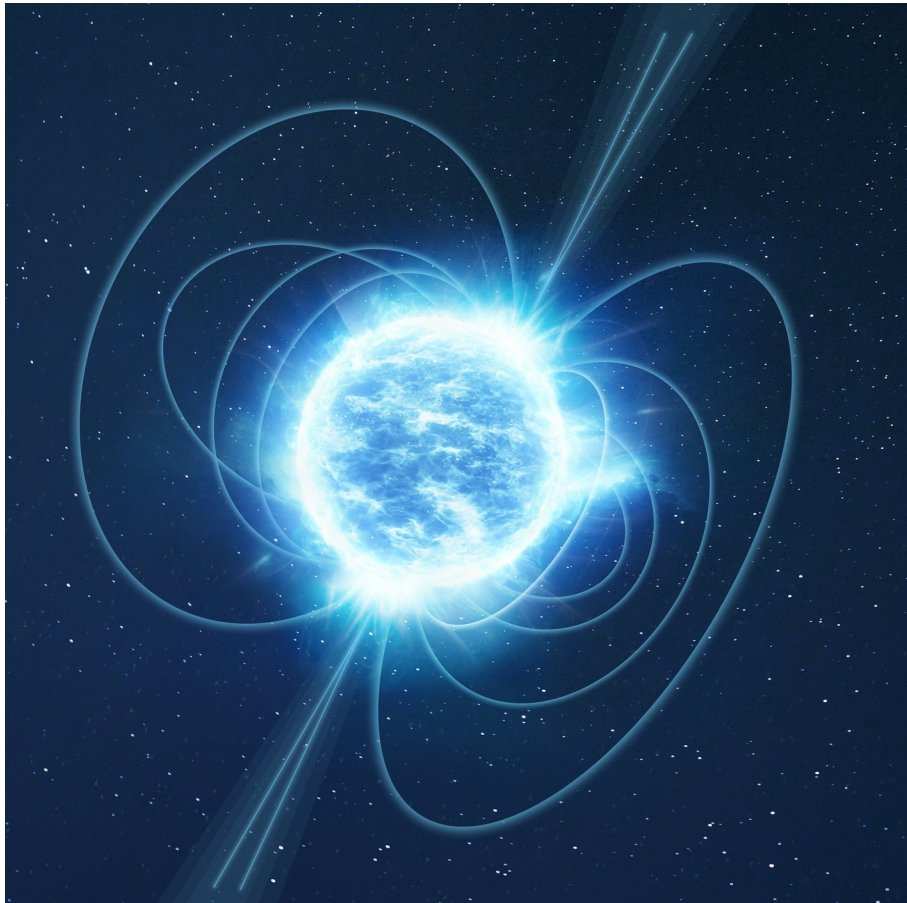


Image combinée du James Webb Space Telescope

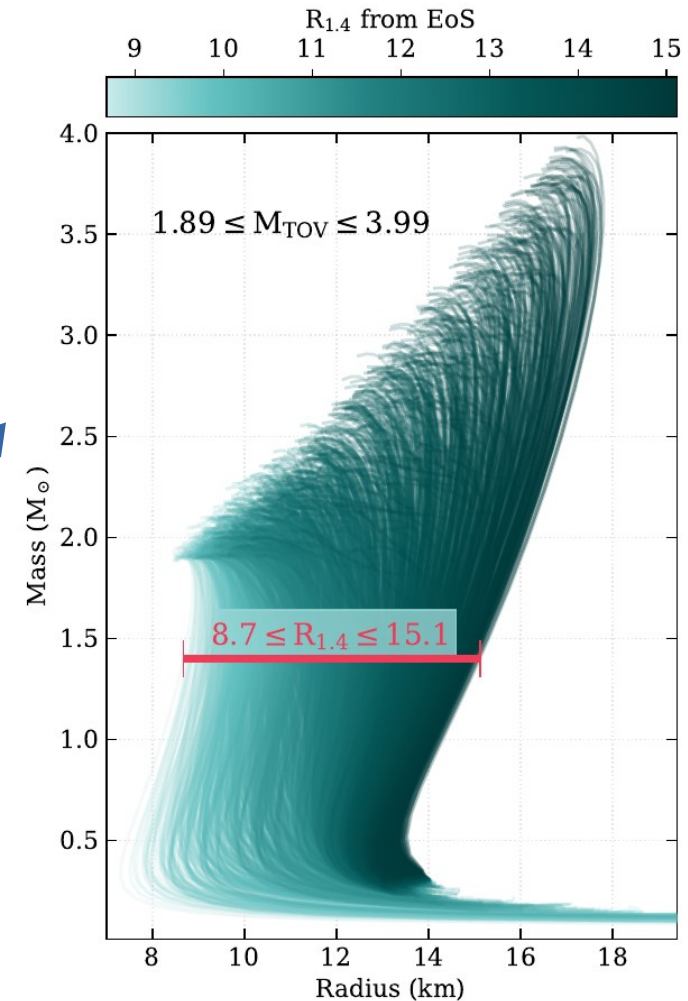
Crédits NASA, ESA, CSA, STScI, T. Temim (Princeton University)

Carte d'identité d'une étoile à neutrons

Masse exprimée en terme de masse solaire



5000 EoS !

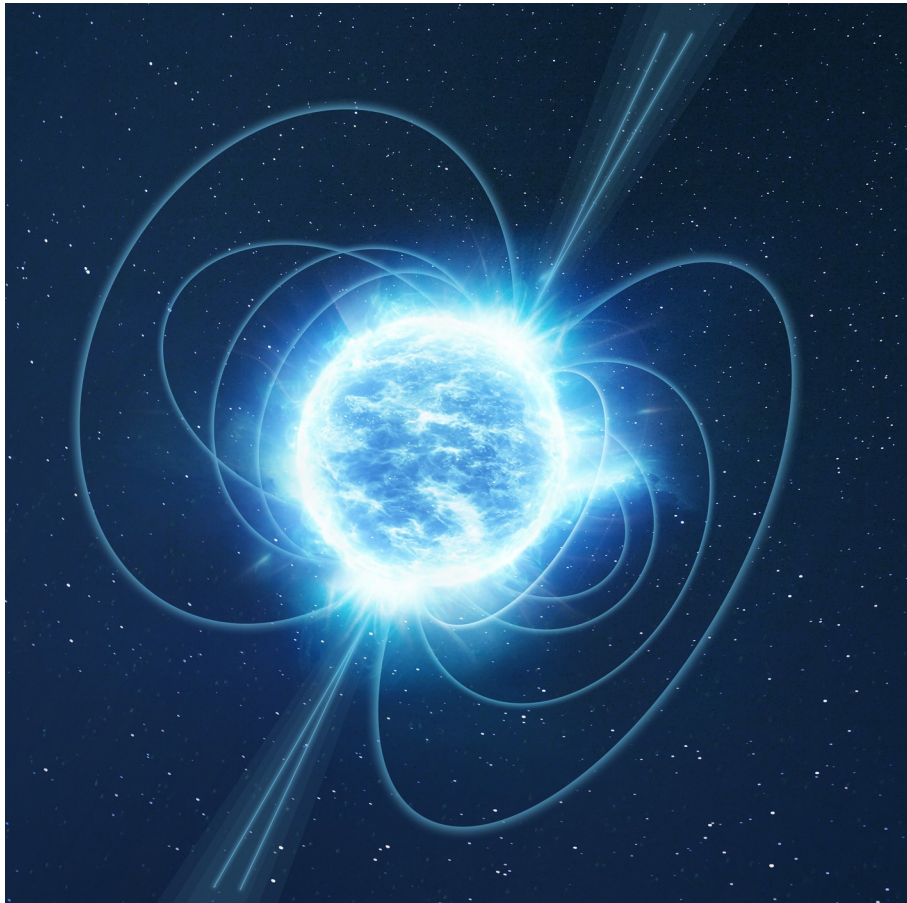


Différentes équations d'état conduisent à des profils de corrélation entre masse et rayon.

Il faut alors choisir la plus réaliste ...

Carte d'identité d'une étoile à neutrons

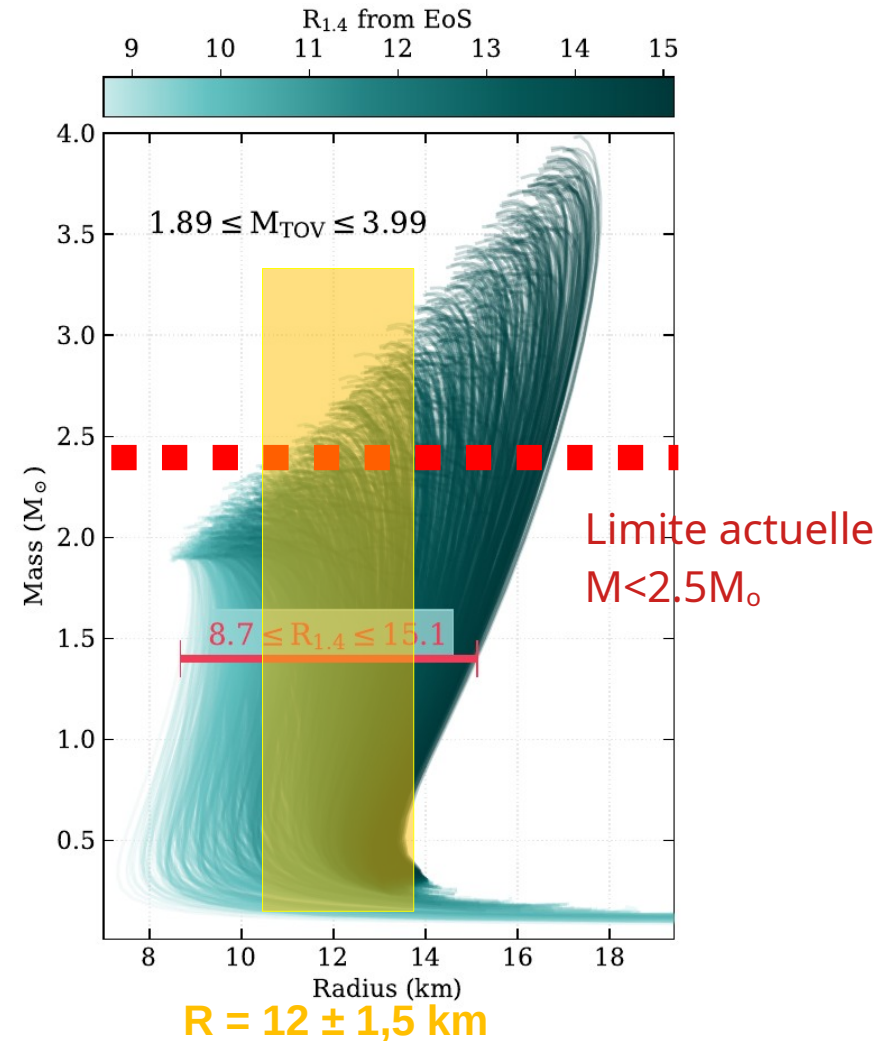
Masse exprimée en terme de masse solaire



Différentes équations d'état conduisent à des profils de corrélation entre masse et rayon.

Il faut alors choisir la plus réaliste ...

1000 EoS !



Taille d'une grande cité ~ 10 km !

Ondes gravitationnelles (LIGO/VIRGO)
+ NICER/Chandra (γ) + neutrinos : analyse bayésienne

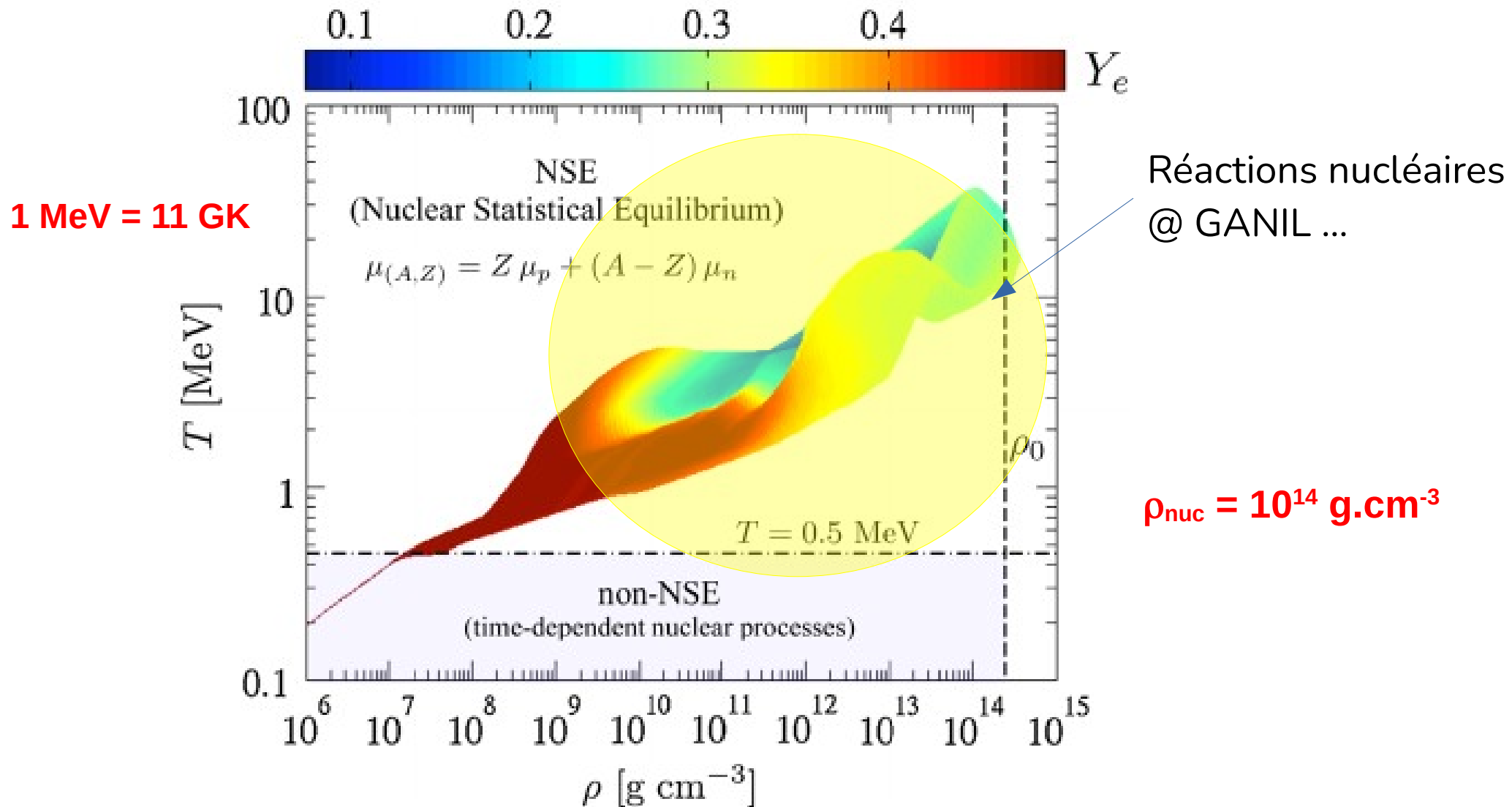
Taille d'une étoile à neutrons

Comparé à la ville de Vancouver ...



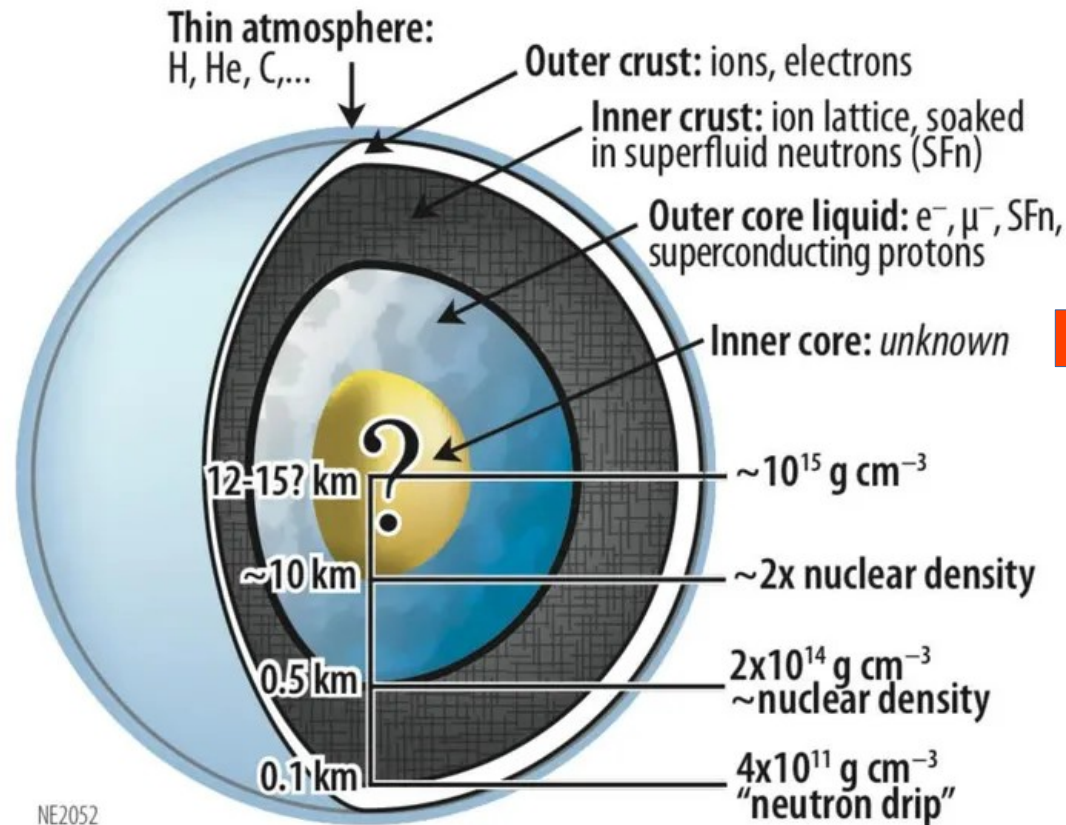
Domaine couvert dans le plan (ρ, T)

Températures et densités atteintes dans une simulation d'effondrement en 1s du cœur d'une supernova de 1.4 masse solaire (masse canonique, **limite de Chandrasekhar**)



M. Oertel et al., Rev. Mod. Phys. 89, Vol. 1 (2017)

Structure d'une étoile à neutrons...

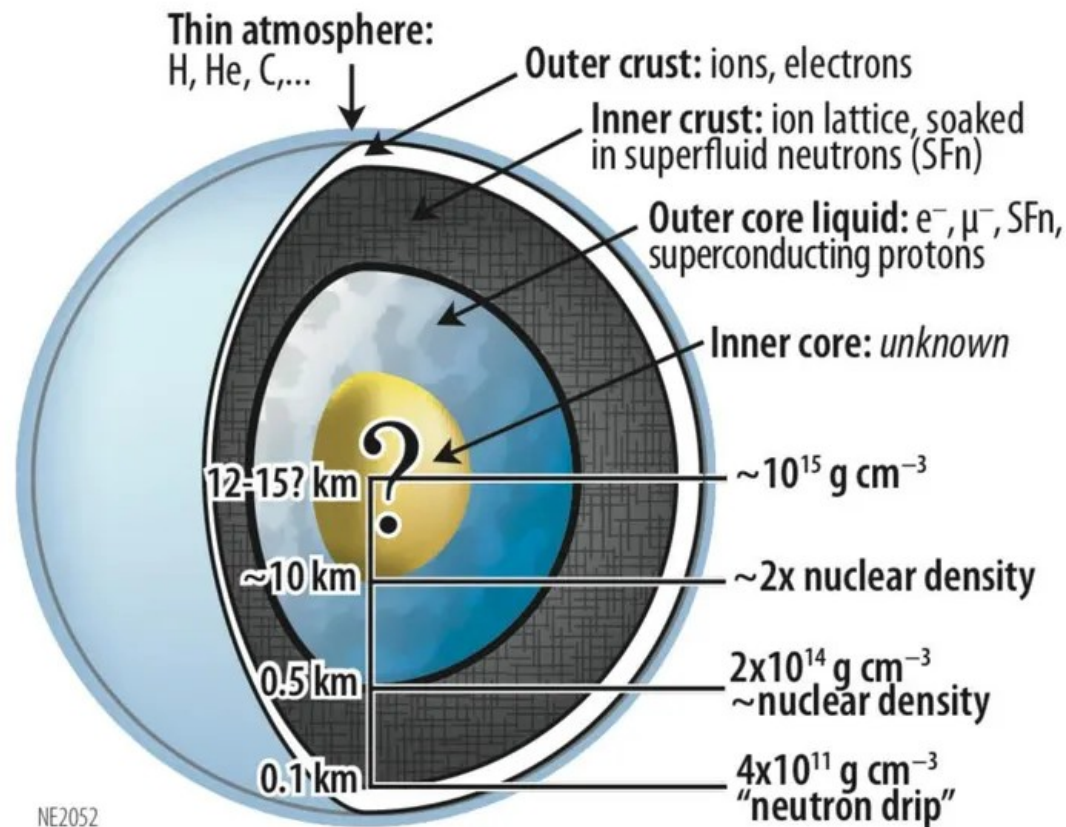


Au centre, la densité peut atteindre **10 fois** la densité nucléaire :

Existence de **transitions de phase** ?

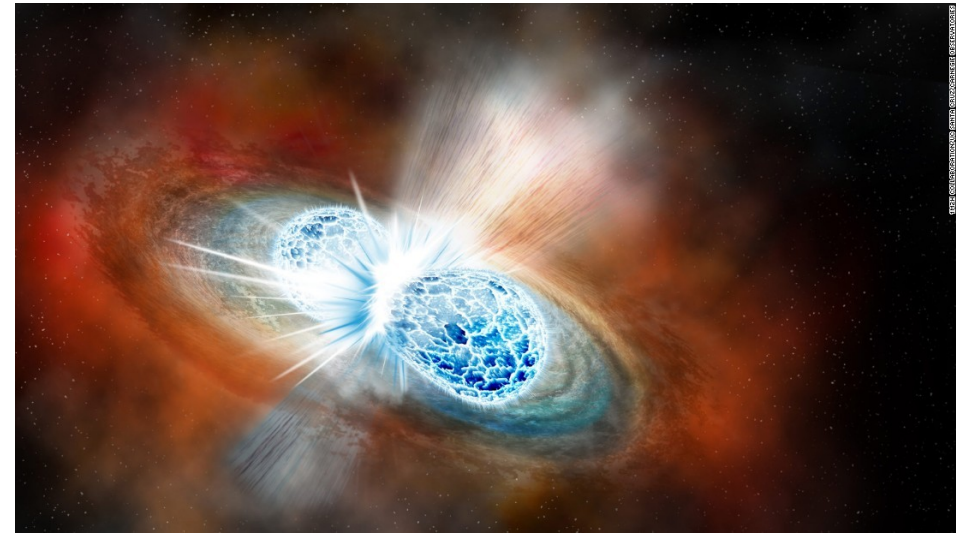
- **matière étrange (hyperons) ?**
- **matière de quarks ??**
- **astres hybrides ??**
- **autres ???**

Structure d'une étoile à neutrons...

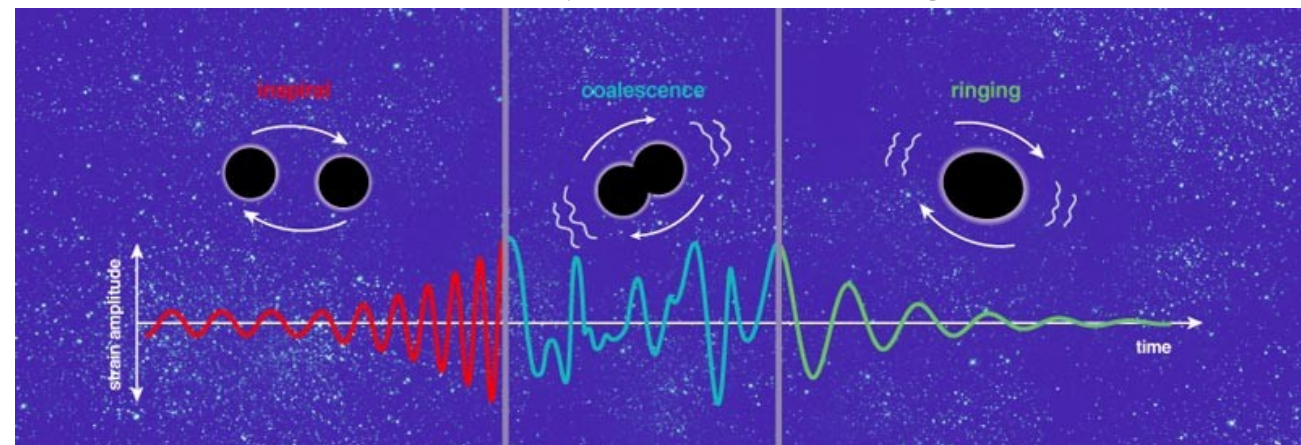


NE2052

Fusion entre 2 étoiles à neutrons (NS – NS merger)



Profil temporel des ondes gravitationnelles

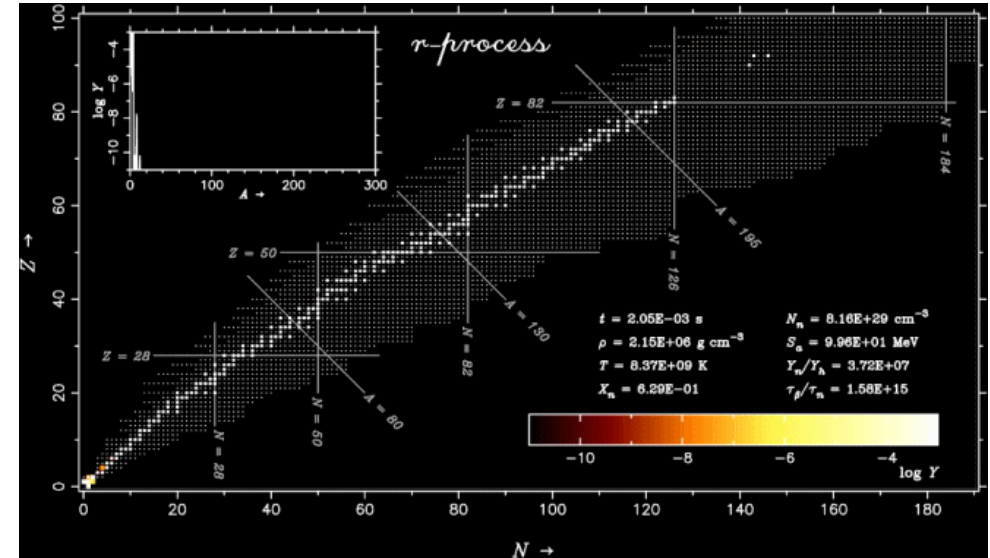
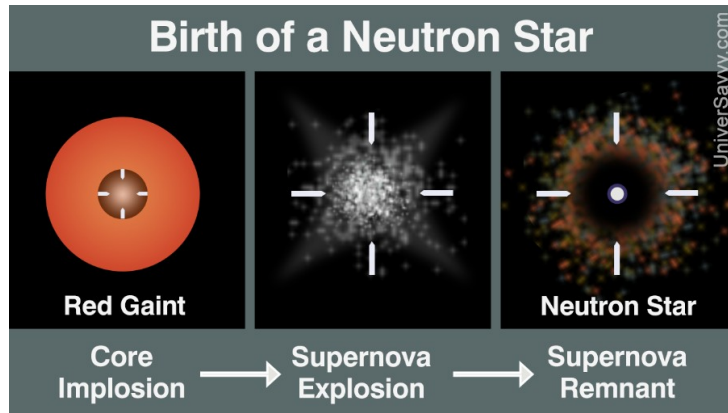


Observatoire Ligo (USA)



Astrophysique des étoiles à neutrons

Systèmes uniques pour étudier la matière
Ultra-compacte dans l'Univers !



B.P. Abbott et al. (LIGO/VIRGO),
PRL **116**, 061102 (2016)
PRL **119**, 161101 (2017)

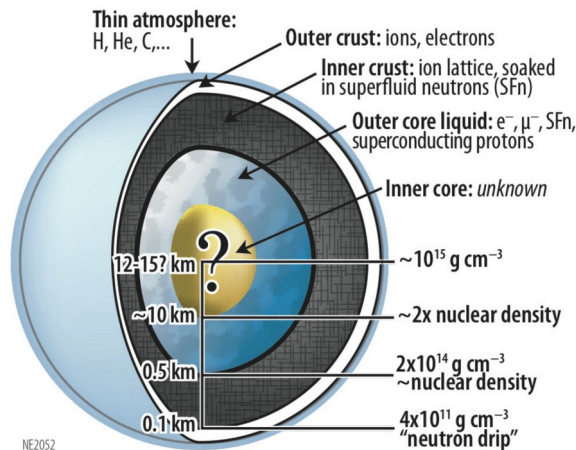
La détection des OG (GW170817) et les observations multi-messagers
renforcent l'intérêt de l'étude de l'équation d'état sur Terre !

Effondrement des supernovae (core collapse Snc)

- EoS (isoscalar/isovector) : ondes de chocs
- E_{sym} : processus r et **nucleosynthèse**
- Refroidissement : processus direct-URCA et **Neutrinosphère**

Structure interne :

- Croûte : phases **pasta** (frustration/**clusters**)
- Transition Croûte/Cœur: Eq. d'état
- Cœur : **hyperons** (matière étrange, QCD)



N. Yunes, M. Coleman Miller, and K. Yagi,
Nature Review Physics **4**, 237 (2022)

NS- NS merger (Kilonova)



Partie V

Des laboratoires sur Terre

Expériences sur Terre

A GANIL (Caen, France), on étudie les **propriétés des noyaux** grâce à la **production de faisceaux stables et radioactifs intenses**.
Il n'existe que **quelques installations (5)** de même nature dans le monde



SPIRAL2

Nouveau *LINAC* supraconducteur:
Faisceaux intenses p,d et ions lourds
 $E_{inc} = 5 - 20 \text{ MeV/nucl.}$

GANIL/SPIRAL1

CSS1/CSS2/CIME :

Faisceaux stables (He-U) $E_{inc} = 5 - 100 \text{ MeV/nucl.}$

Faisceaux radioactifs $E_{inc} = 5 - 15 \text{ MeV/nucl.}$

SPIRAL2

L'ACCÉLÉRATEUR LINÉAIRE SUPRACONDUCTEUR

délivre des faisceaux de particules de très grande intensité : le nombre de collisions entre les particules accélérées et les noyaux de la cible de matière est ainsi plus important.

GANIL

LES SALLES D'EXPÉRIENCES

renferment des systèmes de détection et de mesure très sophistiqués, permettant d'étudier les propriétés de noyaux très exotiques.

GANIL

L'ENSEMBLE ACCÉLÉRATEUR,

composé de cinq cyclotrons, accélère des faisceaux d'ions allant du carbone-12 à l'uranium-238 à différentes énergies adaptées aux types d'expériences réalisées. Les ions de carbone-12 peuvent par exemple atteindre 120 000 kilomètres par seconde, soit plus du tiers de la vitesse de la lumière.

SPIRAL2

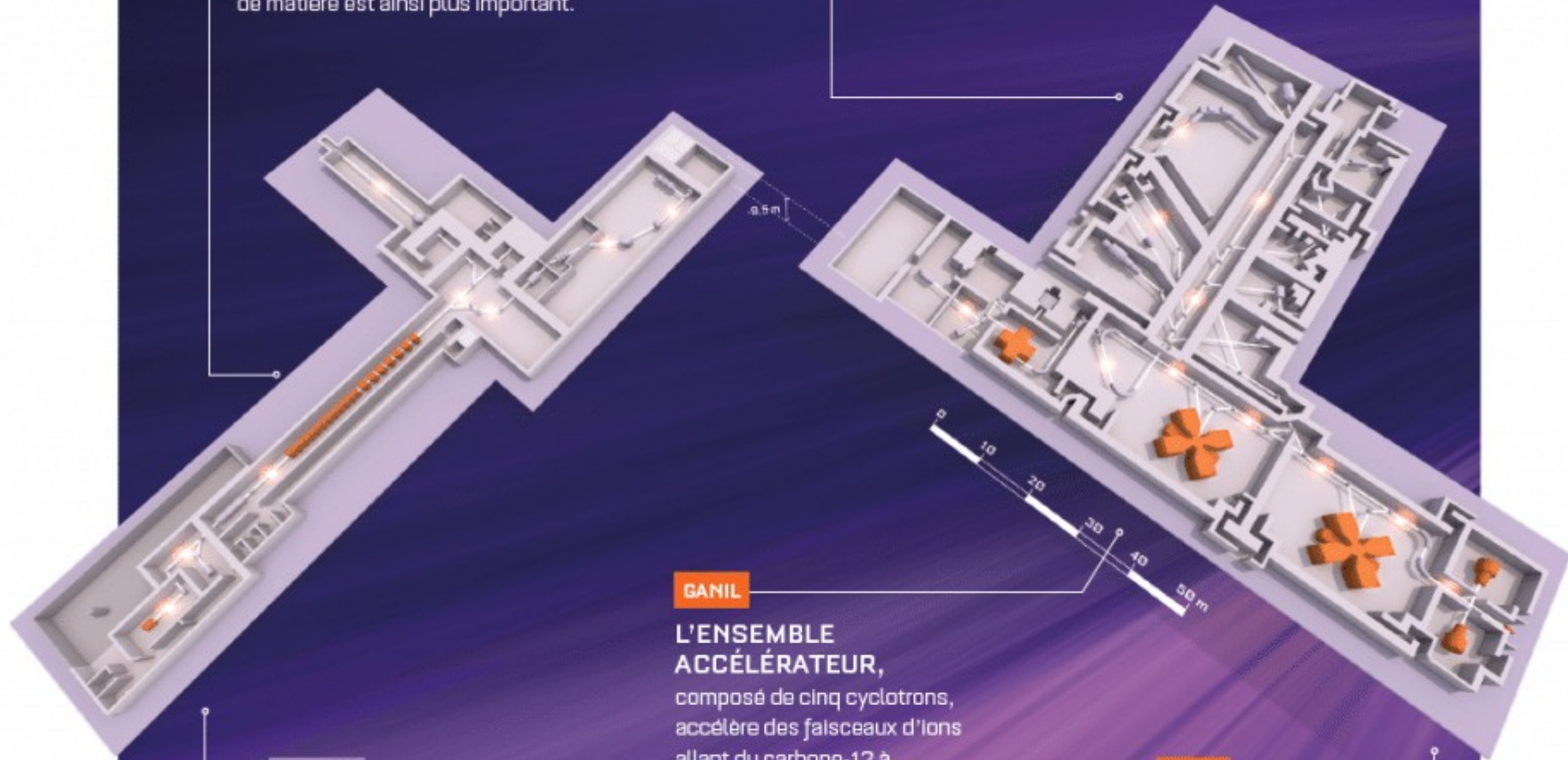
LES SOURCES D'IONS DE SPIRAL2

permettent de produire un large éventail de particules, dont de très légères comme les deutons ou les protons.

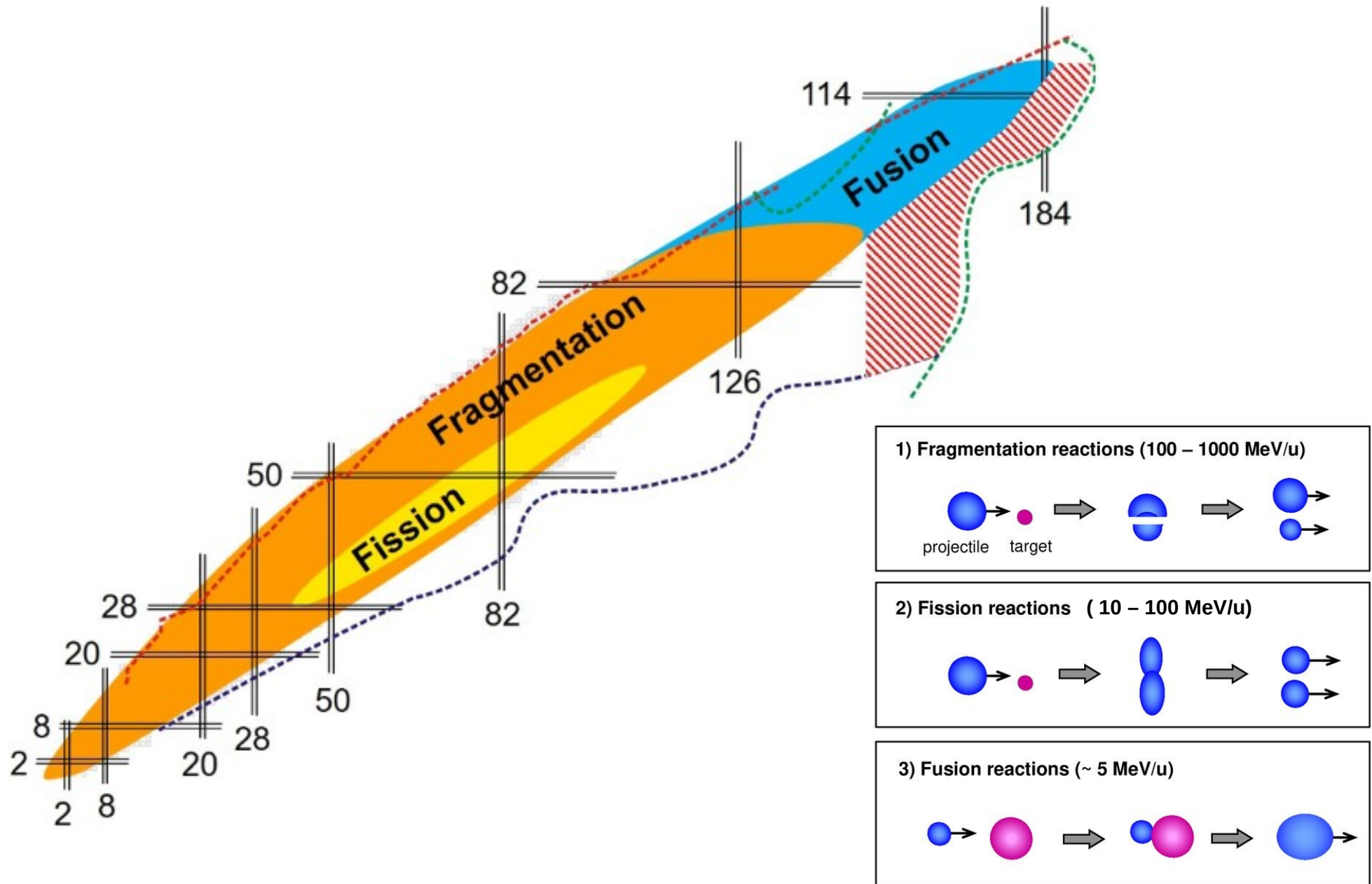
GANIL

LES SOURCES

permettent de produire les ions stables ou radioactifs qui seront ensuite mis en faisceaux et accélérés.

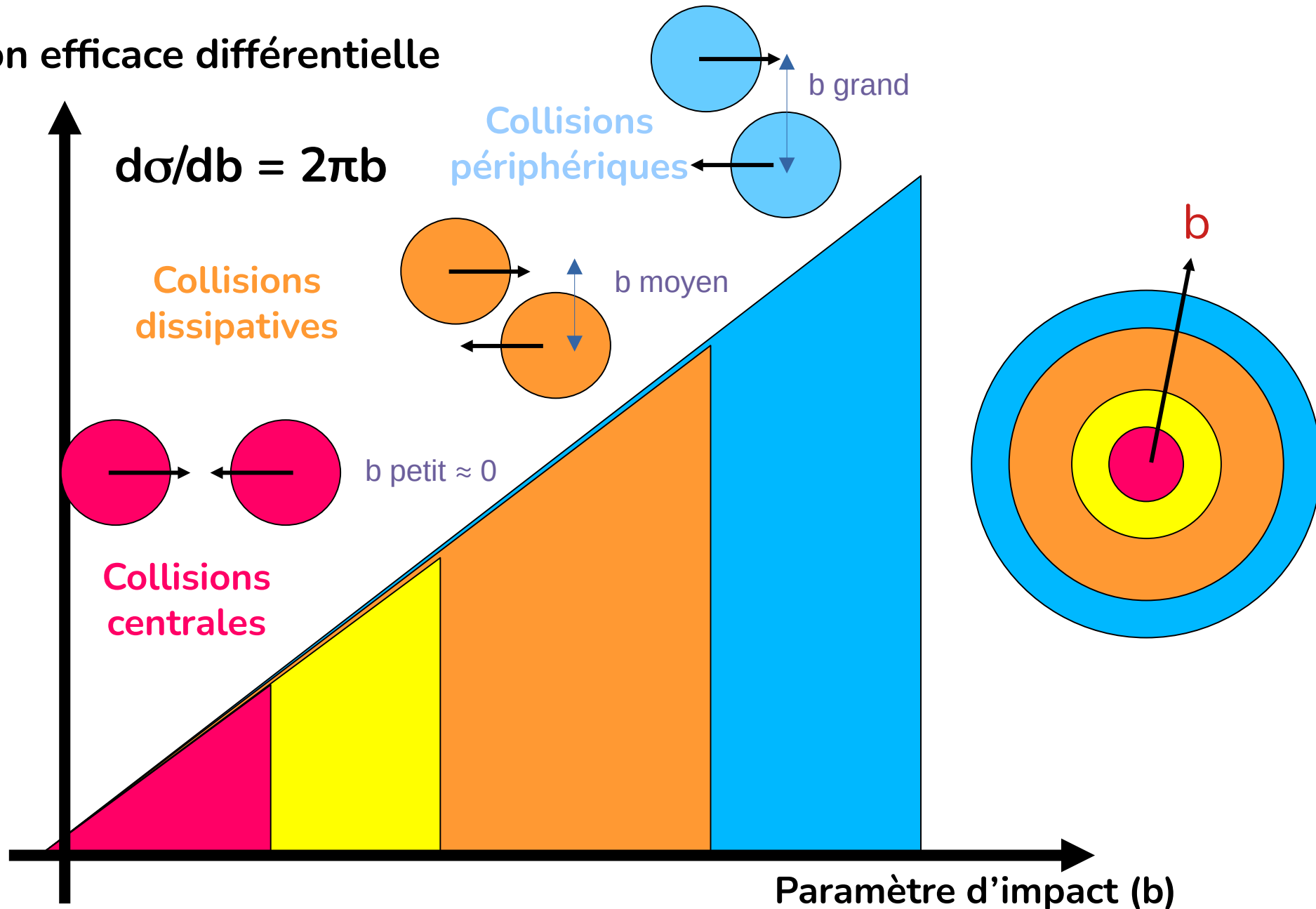


Production de faisceaux radioactifs

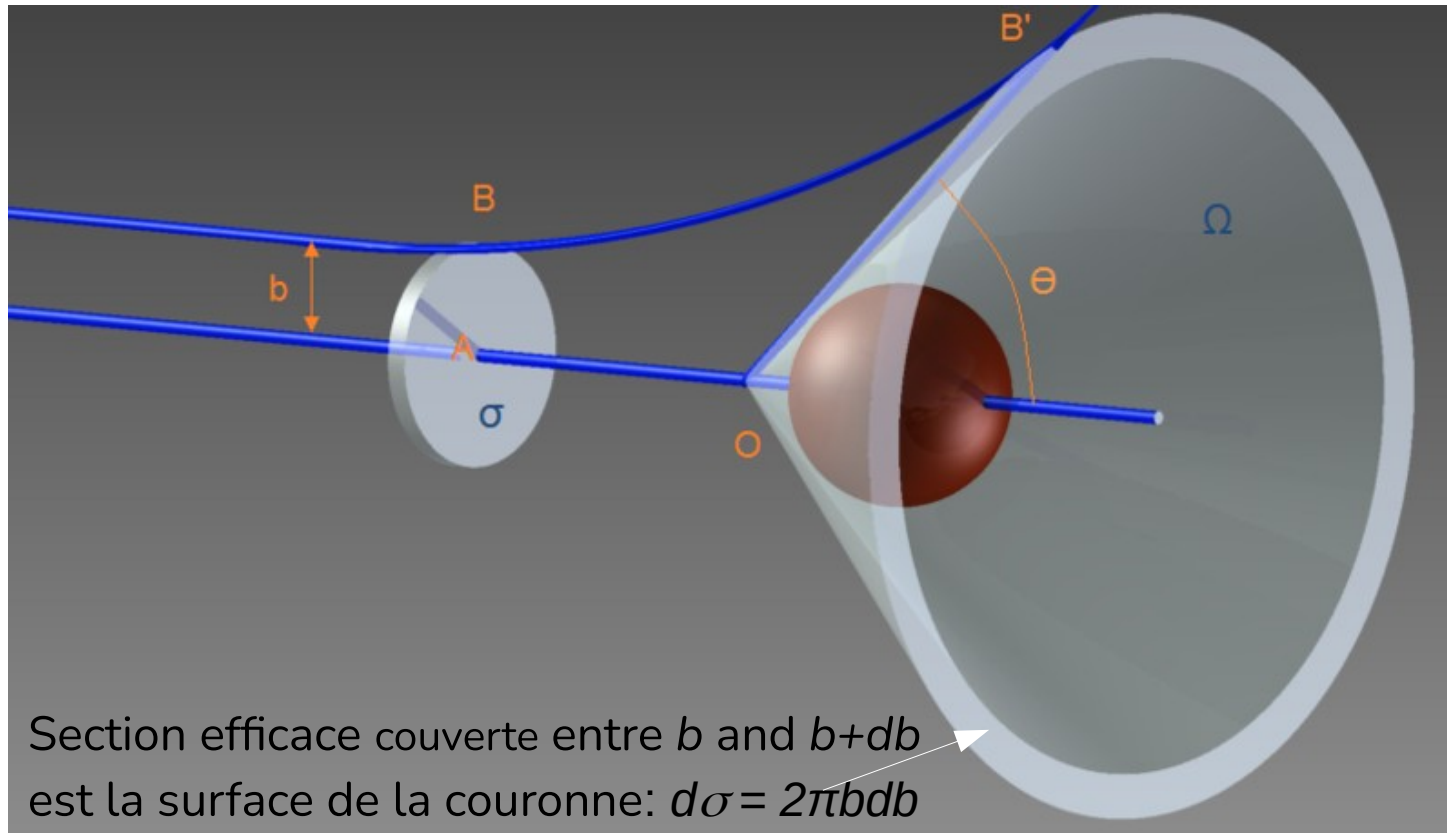


Réactions nucléaires : un jeu de fléchettes

Section efficace différentielle



Notion de section efficace (image classique)



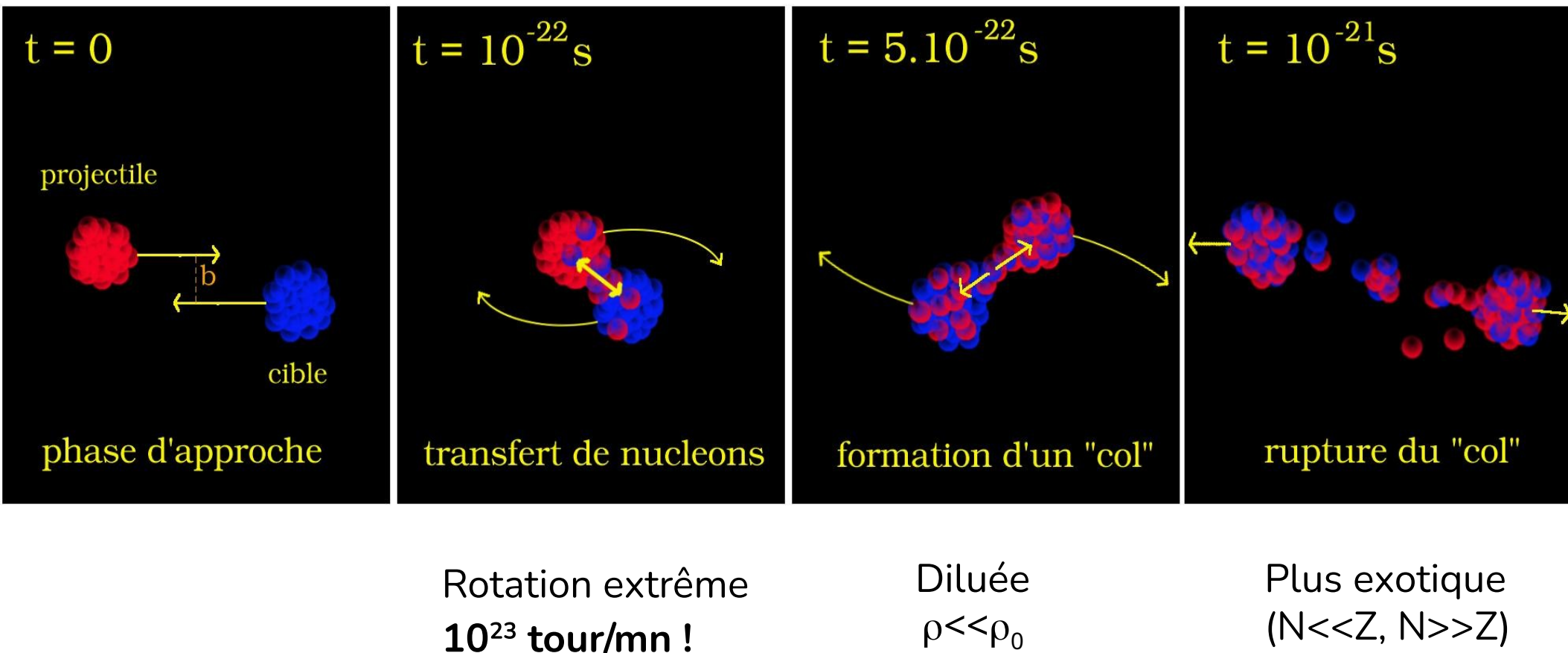
En intégrant sur b , on obtient la section efficace de réaction: $\sigma(b) = \pi b^2$

L'unité est le **barn (b)**, $1b = 10^{-28}m^2 = 10^{-24}cm^2$

Pour une réaction typique entre noyaux (ions lourds), on a $b_{max} \approx 10 fm$,

d'où $\sigma_{nuc} \approx 3,1 b \approx 3100 mb$

Collision semi-périphérique, $b = 6$ fm



Simulation Xe+Sn at 39 MeV/nucleon $b=4$ fm

Nuclear Collision Simulation

($Z=54, A=129$) on ($Z=50, A=119$) @ $E/A = 50 \text{ MeV}$, $b=4.0 \text{ fm}$
HIPSE model - Phys. Rev. C69, 054604 (2004)
D. Lacroix (GANIL) and D. Durand (LPC Caen)

Simulation done by O. Lopez (lopezo@in2p3.fr)
Details at <http://www.lpc-caen.in2p3.fr>

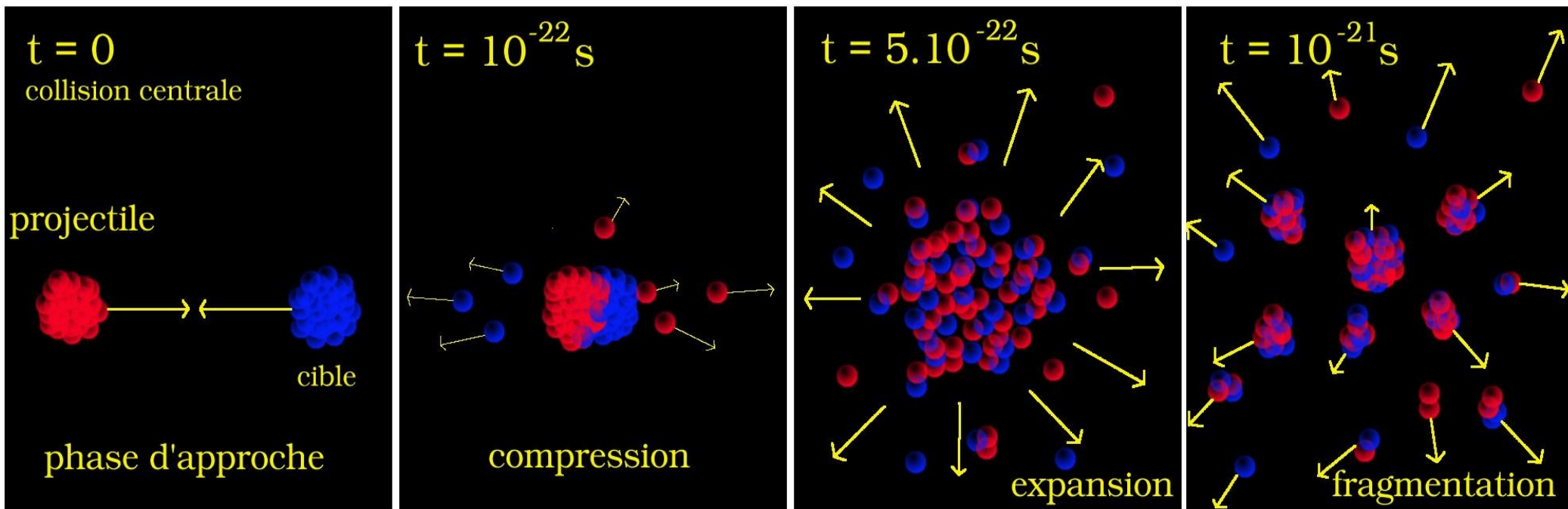
Nuclear Collision Simulation

($Z=54, A=129$) on ($Z=50, A=119$) @ $E/A = 50 \text{ MeV}$, $b=4.0 \text{ fm}$
HIPSE model - Phys. Rev. C69, 054604 (2004)
D. Lacroix (GANIL) and D. Durand (LPC Caen)

Simulation done by O. Lopez (lopezo@in2p3.fr)
Details at <http://www.lpc-caen.in2p3.fr>

Collisions centrales : un petit big bang !

Collision centrale, $b=0$



Ultra-dense
 $\rho / \rho_0 > 2-3$

Très chaud
 $T > 5 \text{ MeV}$
 $1 \text{ MeV} = 10^{10} \text{ K} !$

Clusters
 $N > 10-100$

Simulation Xe+Sn à 39 MeV/nucleon $b=0$ fm

Nuclear Collision Simulation

($Z=54, A=129$) on ($Z=50, A=119$) @ $E/A = 39\text{MeV}$, $b=0.0\text{fm}$

HIPSE model - Phys. Rev. C69, 054604 (2004)
D. Lacroix (GANIL) and D. Durand (LPC Caen)

Simulation done by O. Lopez (lopezo@in2p3.fr)
Details at <http://www.lpc-caen.in2p3.fr>

Nuclear Collision Simulation

($Z=54, A=129$) on ($Z=50, A=119$) @ $E/A = 39\text{MeV}$, $b=0.0\text{fm}$

HIPSE model - Phys. Rev. C69, 054604 (2004)
D. Lacroix (GANIL) and D. Durand (LPC Caen)

Simulation done by O. Lopez (lopezo@in2p3.fr)
Details at <http://www.lpc-caen.in2p3.fr>

Plus de vidéos sont disponibles sur YouTube:

<https://www.youtube.com/watch?v=azCjIx6REKg>

Section efficace et taux d'événements

$$1 \text{ barn (b)} = 10^{-24} \text{ cm}^2$$

Taux d'événements typiques E (s^{-1}) pour une section efficace σ_r :

$$E_{\text{reac}} = \mathcal{F} \rho \mathcal{N} e \sigma_r / A$$

Mince feuille d'or
 $l = 0.3 \text{ mm}$

Faisceau $\mathcal{F} = 10^9 \text{ pps}$	Section efficace	Taux d'événements
Diffusion élastique (Coulomb)	100 b	1000/s
Collisions dissipatives (transfert multi-nucléons)	1 b	10/s
Collisions centrales ($b < 1 \text{ fm}$)	50 mb	1/mn
Réaction de transfert/capture d'un nucléon	10 mb	10/hr
Réaction de fusion	$10 \mu\text{b} - 1 \text{ mb}$	0,1/year - 1/week

$^{58/64}\text{Ni} + ^{58/64}\text{Ni}$ @ 32 et 52 MeV/nucl : E789 – E881 réalisées en 2022 et 2025

INDRA en D5 à GANIL

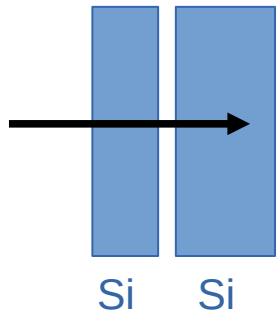
- 240 detection modules (rings 1,2/3,4/5 removed)
- 96 Si-Csl from 16 to 45 deg.
- 144 Csl from 45 to 176 deg.



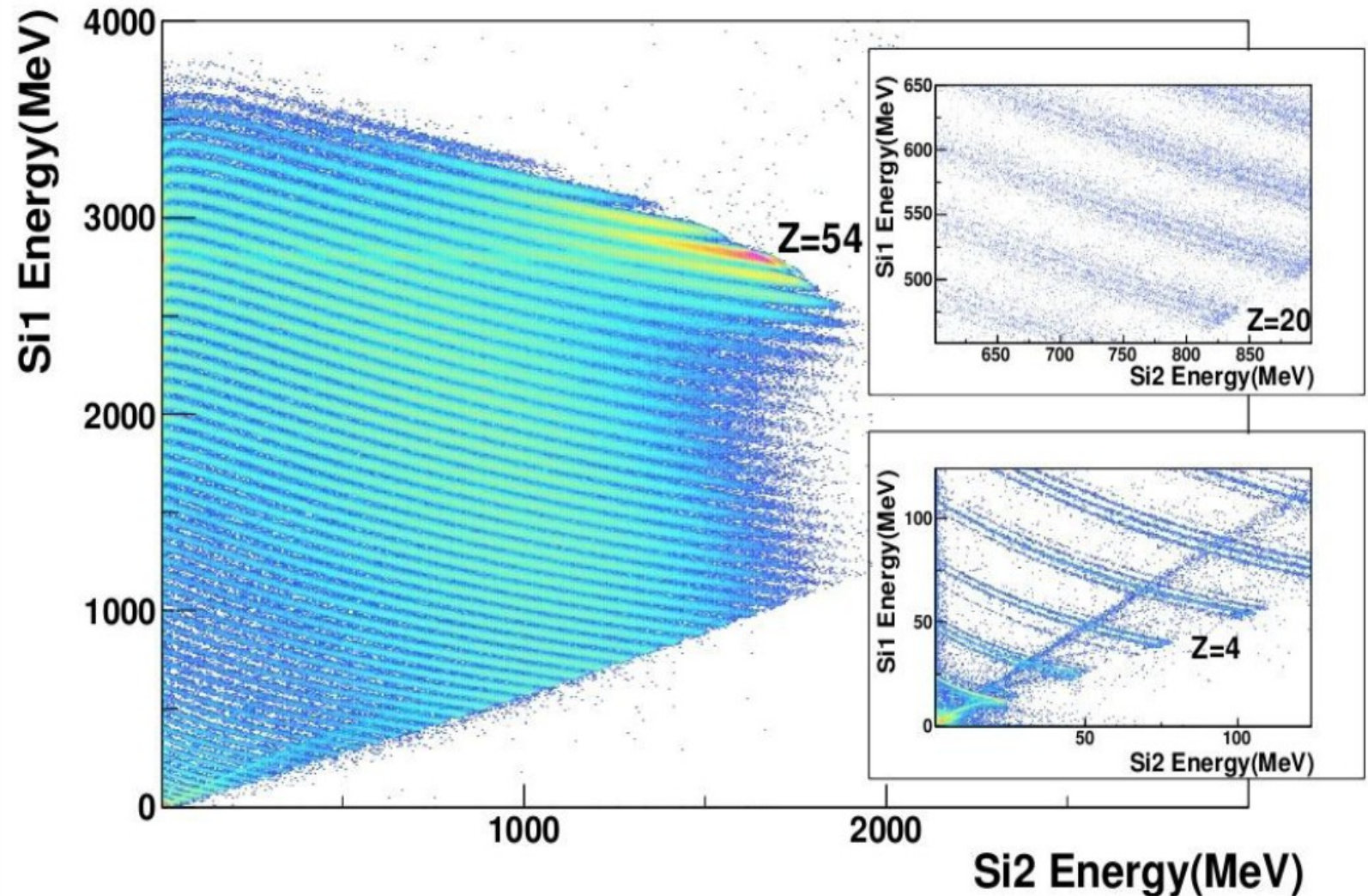
FAZIA geom. acceptance 82% (90%)
Granularity x2 as compared to INDRA

FAZIA demonstrator: 12 blocks of 16 telescopes
192 **High-Quality Si-Si-Csl** telescopes
2 - 14 deg. + dedicated **Full Digital Electronics**

FAZIA : ΔE -E identification



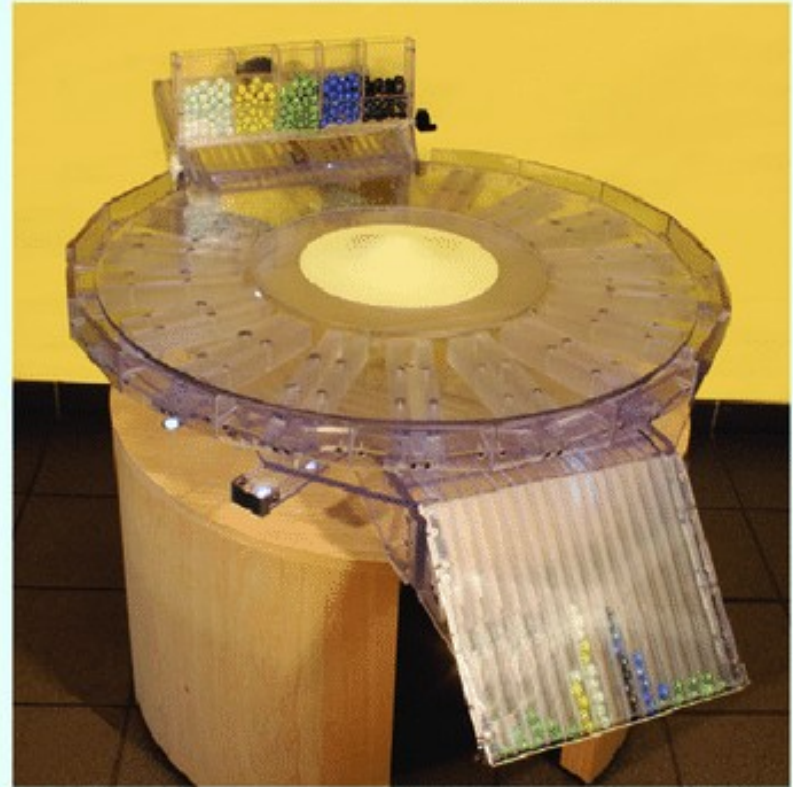
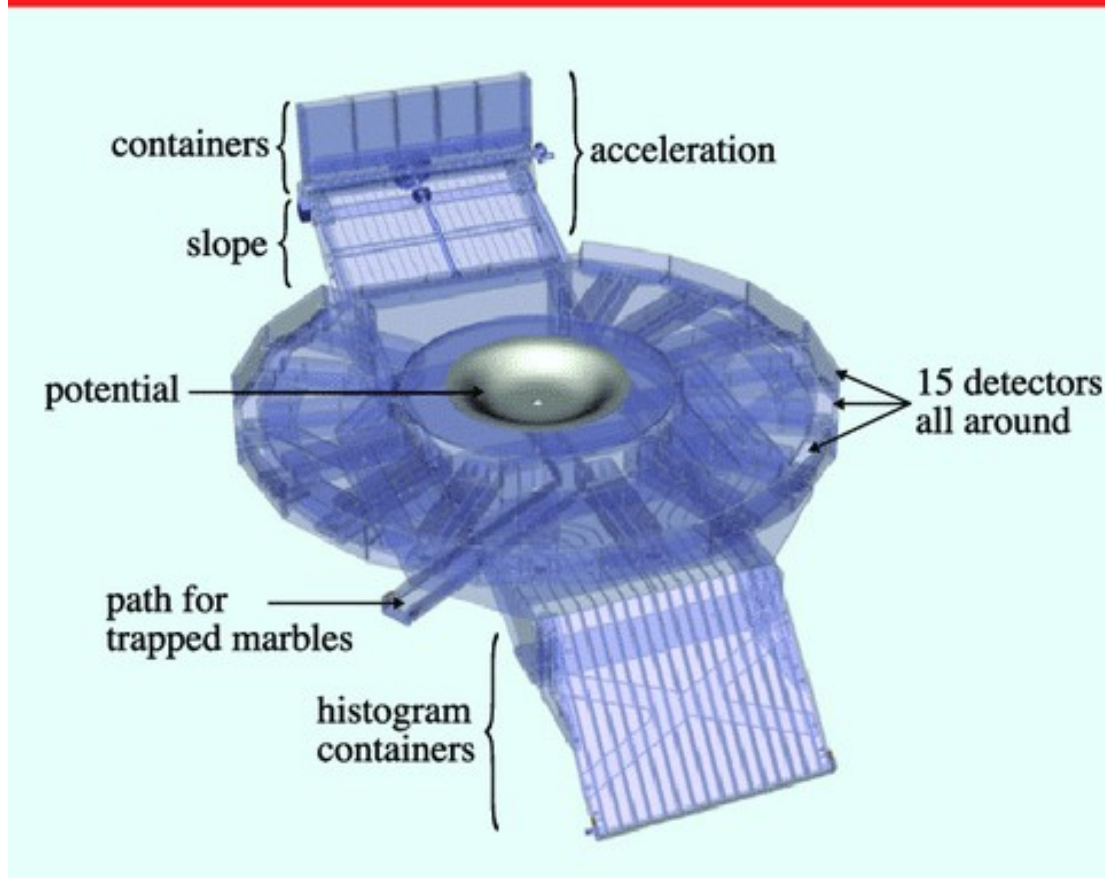
Some results at the end of phase 1: $\Delta E(\text{Si1}) - E(\text{Si2})$



S. Carboni et al., NIMA 664 (2012) 251 *Energy = max of shaped signal (trapezoidal filter)*

Diffusion Rutherford macroscopique : le Billotron

<https://www.lpc-caen.in2p3.fr/grand-public-rencontrer/le-billotron/>



https://youtu.be/_KcK-jS2QQQ

A. Chapon, J. Gibelin, O. Lopez, D. Cussol, D. Dominique Durand, Ph. Desrues, H. Franck De Préaumont, Y. Lemièrre, J. Perronnel, and J.C. Steckmeyer. *The Billotron: a way to experimentally apprehend the subatomic world.*

Physics Education, 50(4):453, 2015. doi: 10.1088/0031-9120/50/4/453. URL <http://hal.in2p3.fr/in2p3-01177619>

Comment peut-on bâtir le noyau atomique en partant des principes premiers de la chromodynamique quantique et des propriétés de l'interaction forte ?

Interactions effectives et modèles ab-initio

Le noyau est un système quantique à N corps : comment peut-on expliquer et prédire les régularités observées : nombres magiques, excitations collectives, appariement, frontières d'existence (driplines) ?

Modèles en couches et approches au-delà du champ moyen

Comment peut-on décrire la matière nucléaire dans les noyaux atomiques et les astres compacts ainsi que prédire leurs propriétés dynamiques ?

Étude de l'équation d'état et des transitions de phase