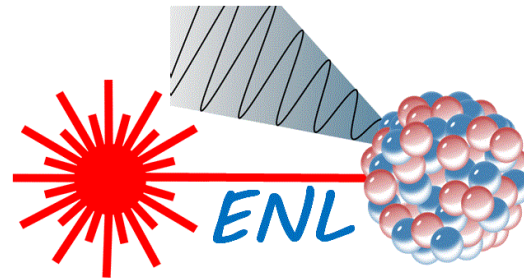




## Excitations Nucléaires par Laser

-ENL-



# Apport des lasers de puissance à la physique nucléaire

LAL, Orsay le 21/02/17

Th. Bonnet, H. Faure, F. Gobet, F. Hannachi, J.L. Henaes, M. Tarisien, X. Raymond and M. Versteegen

- 1. Le laser de puissance → accélération de projectiles**
- 2. Le laser de puissance → milieu plasma**
- 3. La physique nucléaire auprès des lasers de puissance**
  - Exemple du  $^{84}\text{Rb}$
  - Les défis à relever

# Le laser

*Light Amplification by Stimulated  
Emission of Radiation*



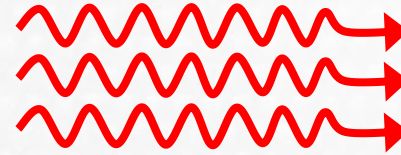
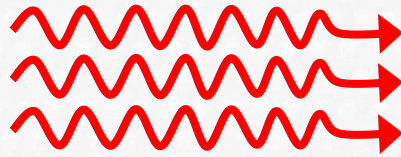
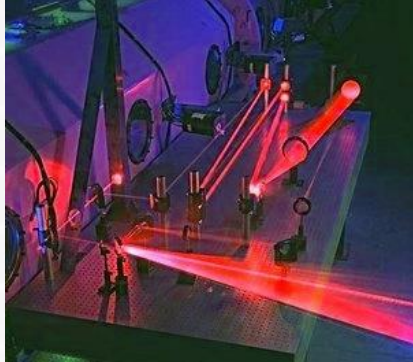
**Théodore Maiman : 1960 LASER rubis**

# Le laser de puissance

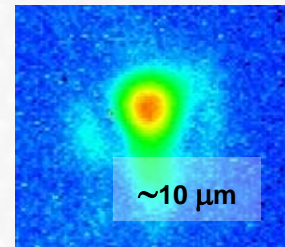
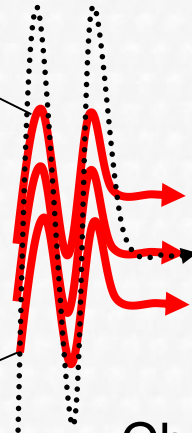
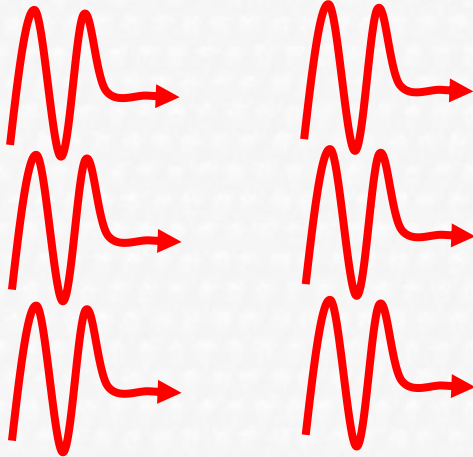


LULI  
2000

# Le laser de puissance



$\lambda = 900 \text{ nm}$   
 $T = 3 \text{ fs}$   
 $\Leftrightarrow 1.3 \text{ eV}$



$$I = \frac{E}{\Delta t \cdot S}$$

Champ équivalent :  
 $E \text{ (V/cm)} = 27.46 \sqrt{I \text{ (W/cm}^2\text{)}}$

$$27.46 \sqrt{10^{19} \text{ W/cm}^2} \approx 10^{11} \text{ V/cm}$$

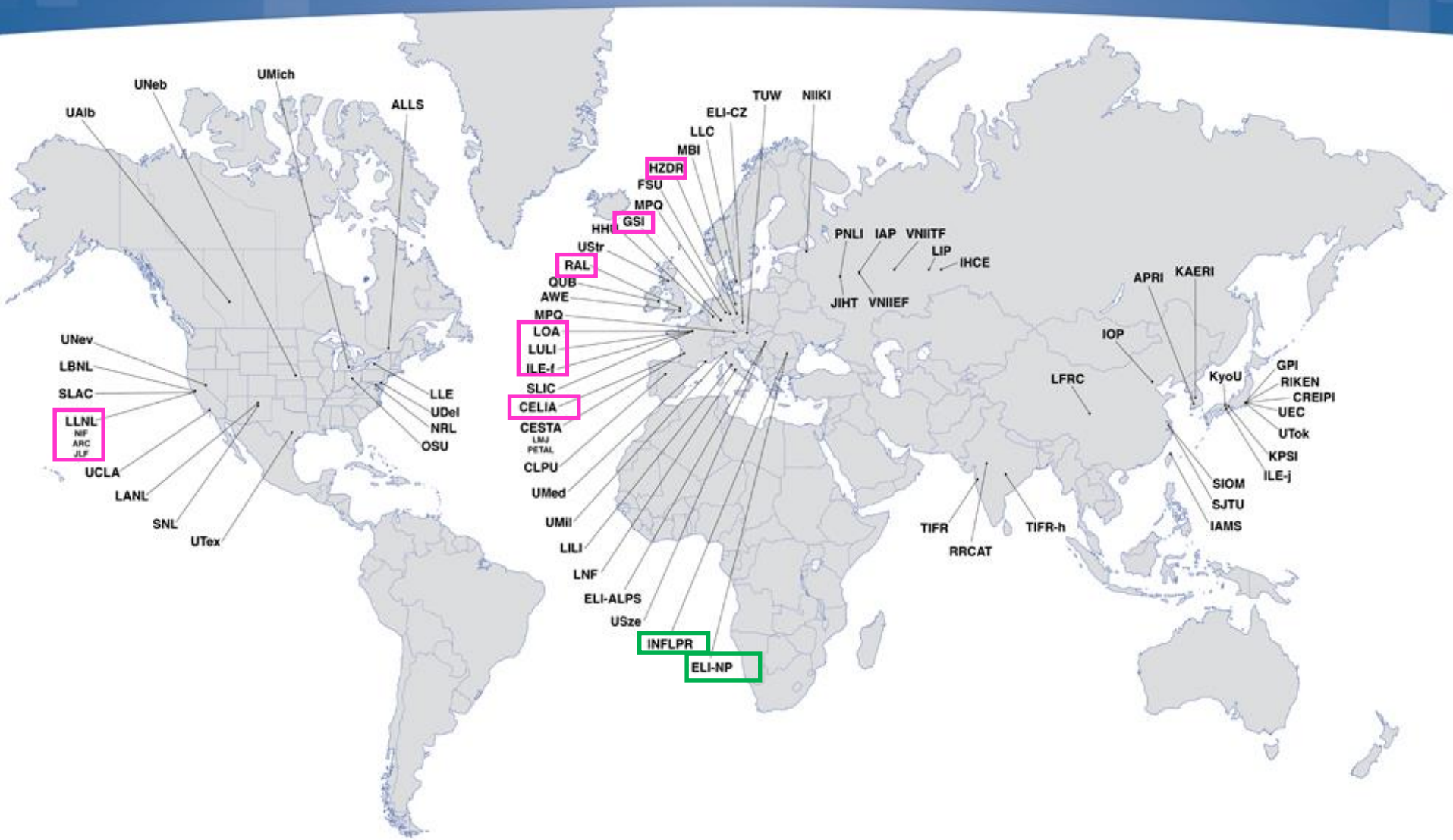
Typiquement :  
 $10^{19} \text{ W.cm}^{-2}$



$1.73 \cdot 10^{17} \text{ W}$

# Les lasers de puissance

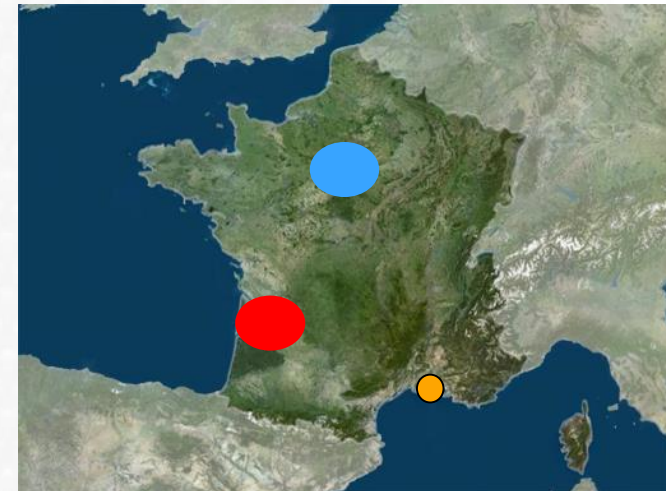
ICUIL World Map of Ultrahigh Intensity Laser Capabilities



# Les lasers de puissance

Laser	Energie (Joules)	Durée du pulse (Fs)	Puissance (TW)	Cadence (Hz)	Intensité (W/cm <sup>2</sup> )
CELIA Aurore	0,007	25	3,E-01	1000	1E+16
CELIA Eclipse	0,1	10	10	10	1E+18
LP3	1	25	40	10	1E+18
LASERIX	2	40	50	10	1E+19
UHI100	2,5	25	100	10	1E+20
LOA salle jaune	2	30	67	10	1E+19
LULI Elfie	20	350	57	5,00E-04	1E+19
PETAL	3600	10000	360	-	1E+20
Apollon/ELI-NP	150	15	10000	1,67E-02	1E+22
LULI 2000	1600	1500000	1,07	1,85E-04	1E+18
LIL	30 000	20000000	1,5	-	1e13 - 1e19
CENBG	1	5000000	2,E-04	10	1E+13

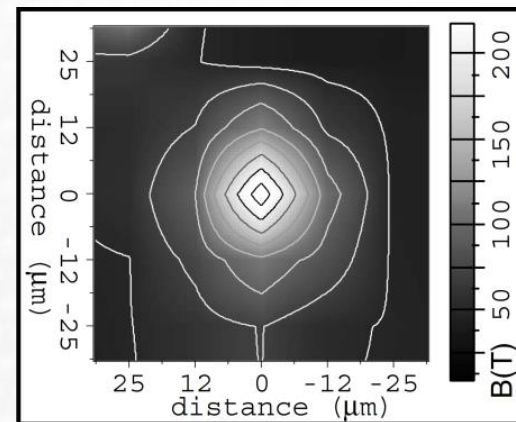
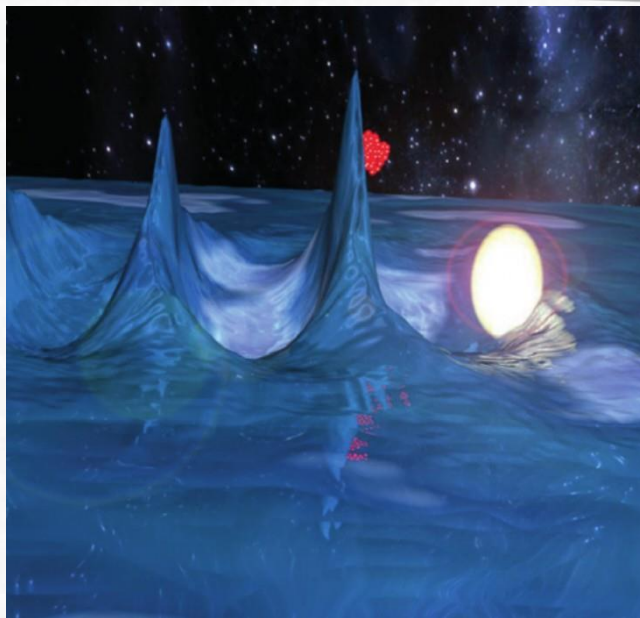
En France  
(liste non exhaustive)



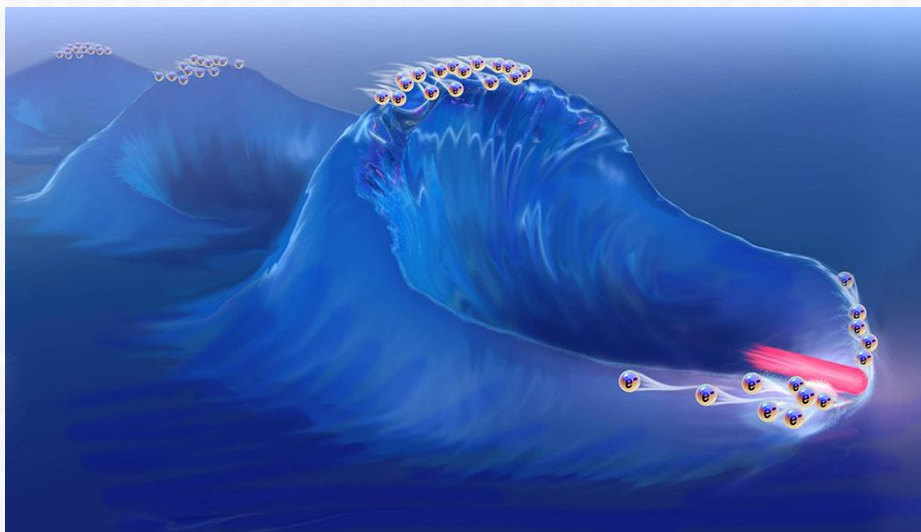
$$I = \frac{E}{\Delta t \cdot S}$$

# Accélération d'électrons par laser , source X

laser UHI :  
 $I \sim 10^{18-20} \text{ W/cm}^2$   
 $\Delta t = \sim 10 \text{ fs} - \text{ps}$



Mesure :  
Z. Najmudin et al,  
Phys. Rev. Lett.  
87, 215004 (2001)



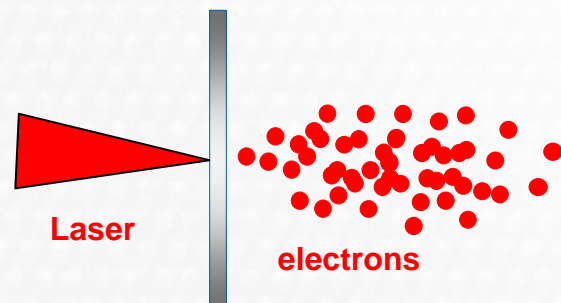
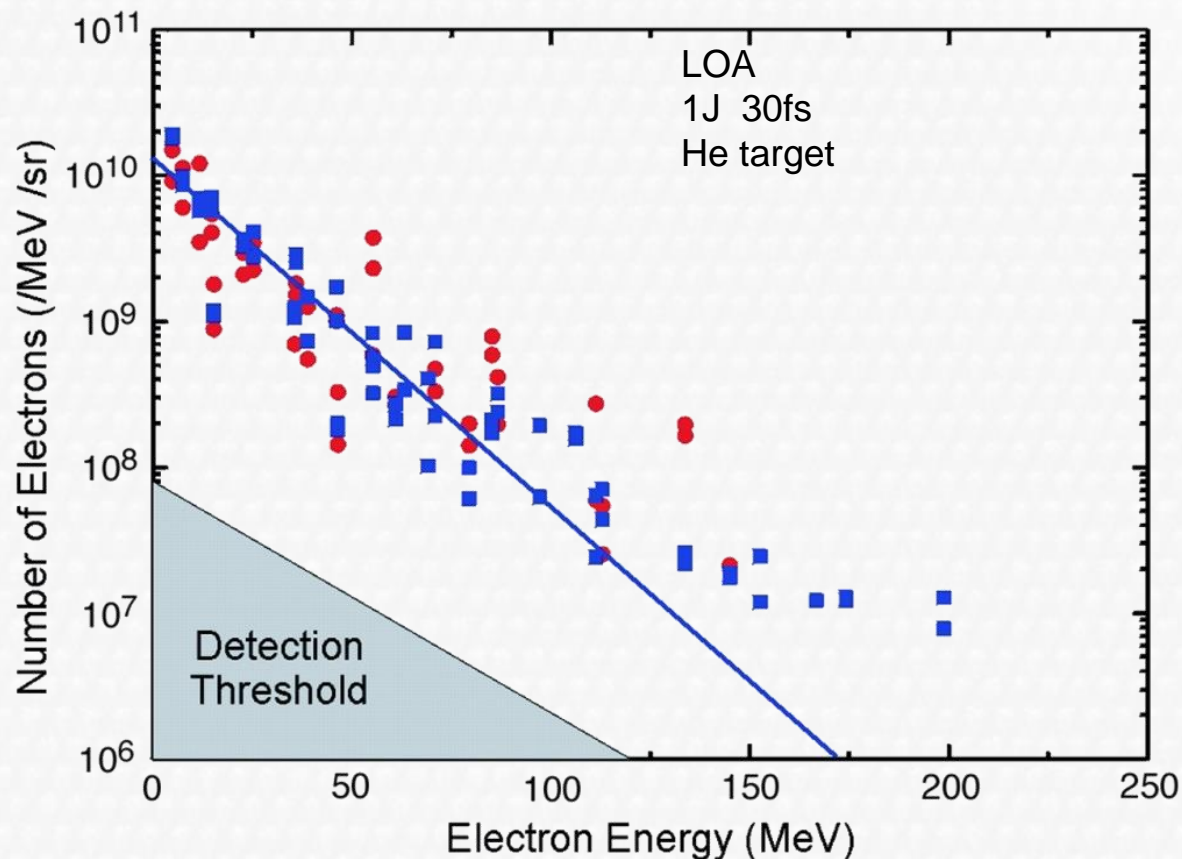
Champs extrêmement intenses

$E > 10^9 \text{ V/cm}$   
 $B > 100 \text{ T}$

➔ Environnement exceptionnel



# Accélération d'électrons par laser , source X

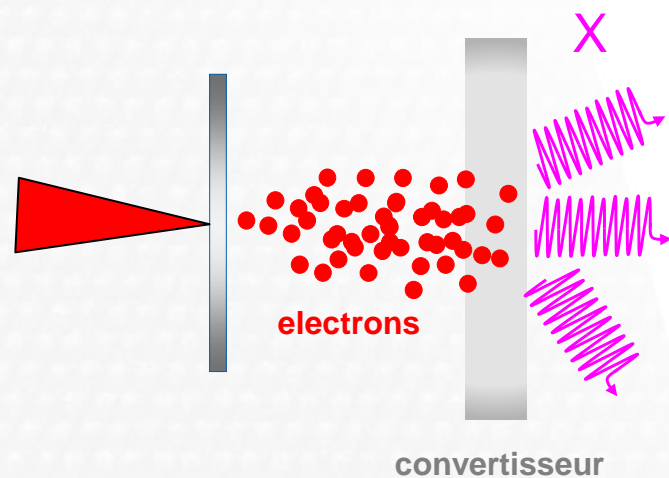
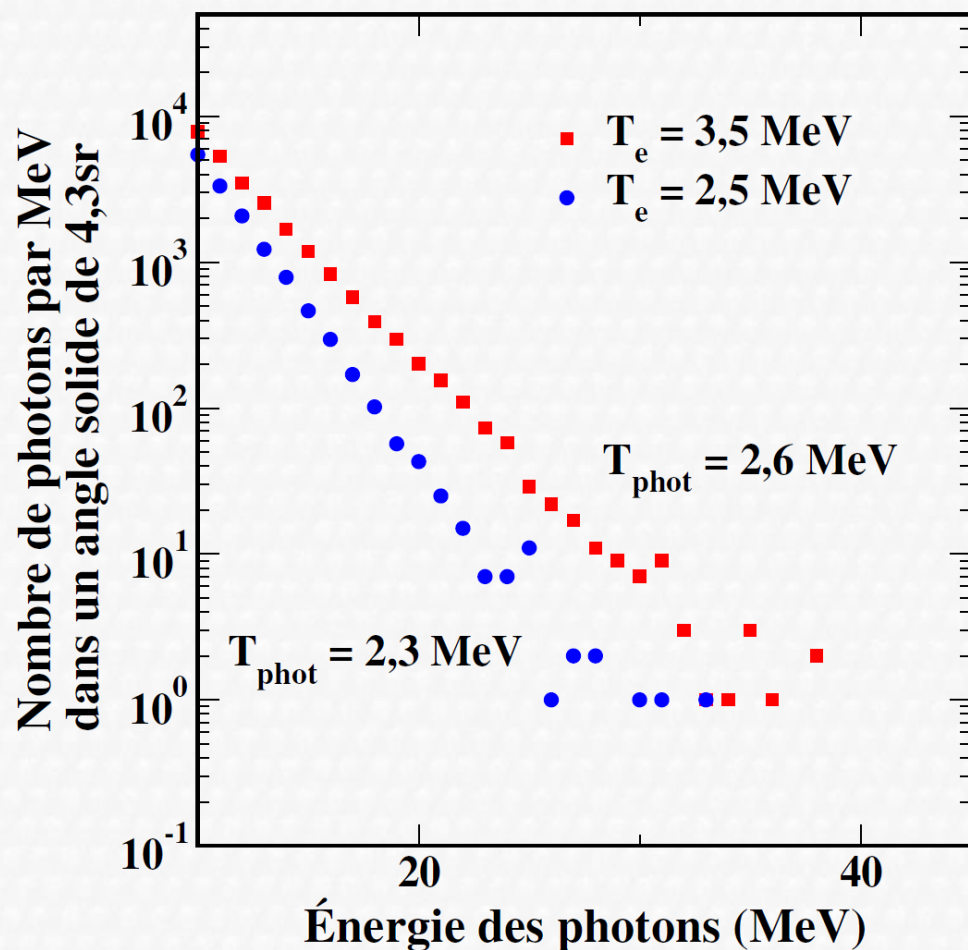


Salle Jaune of LOA :

Laser 1 J ; 30-fs ; jet de gaz He supersonique ;  $3 \times 10^{18} \text{W/cm}^2$

# Accélération d'électrons par laser , source X

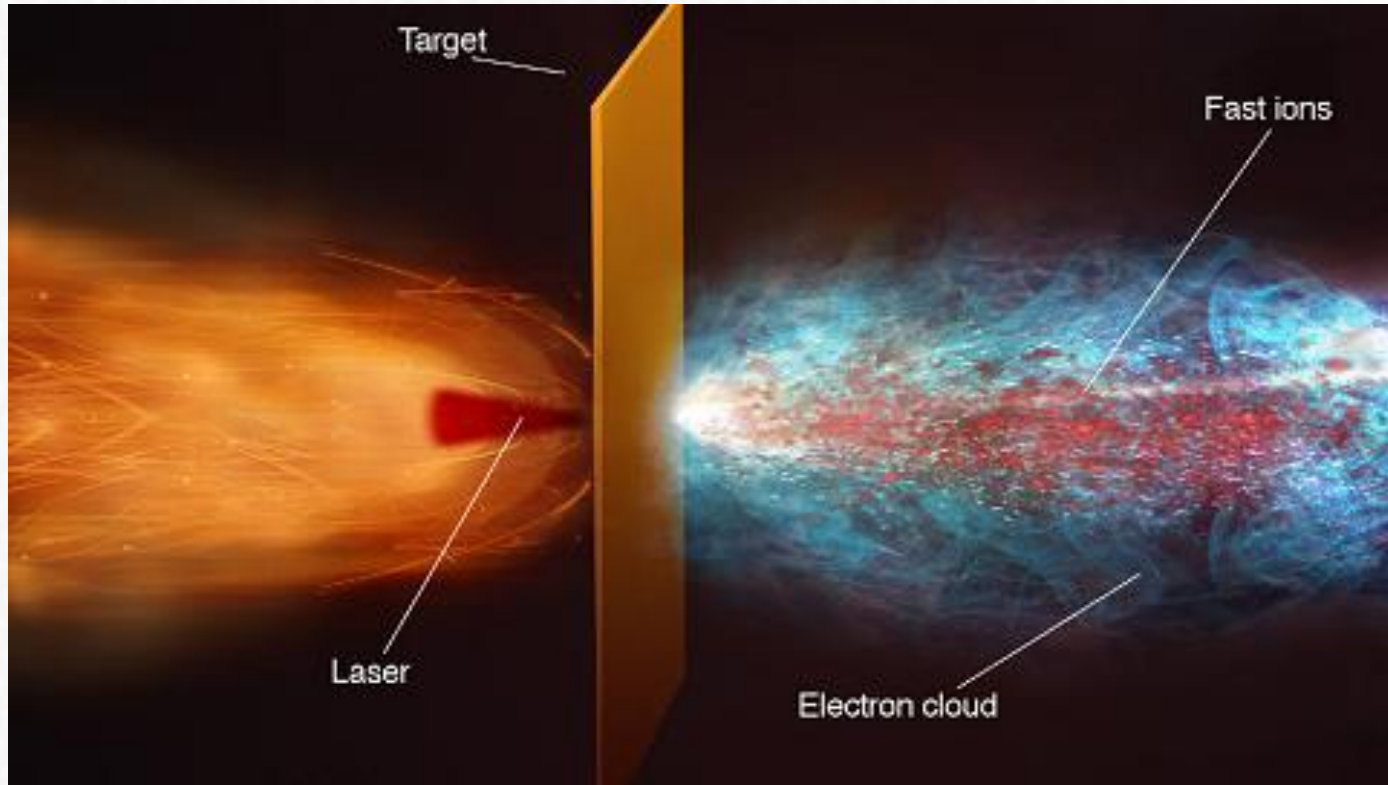
X produits par rayonnement de freinage



Mesures obtenues sur ELFIE en 2013

*Th. Bonnet, thèse université de Bordeaux, 2014*

# Accélération d'ions par laser

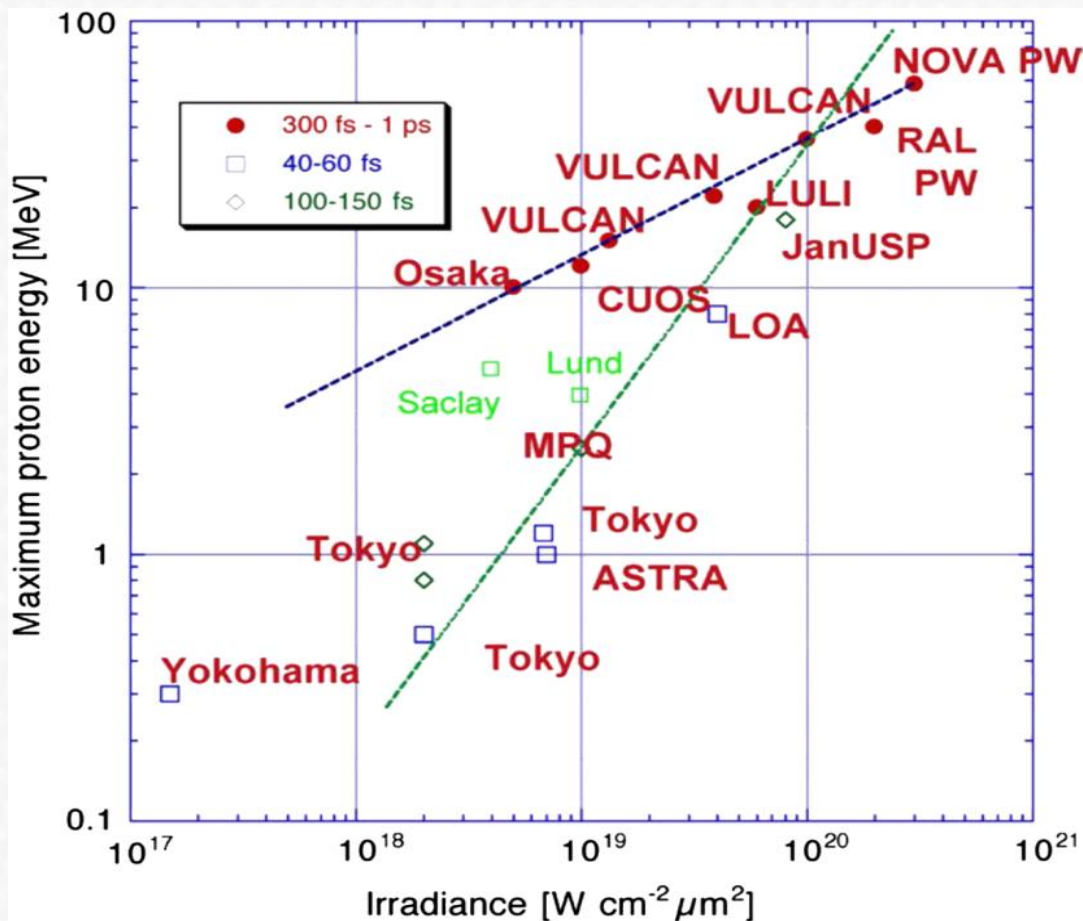


## Target Normal Sheath Acceleration (TNSA)

*ROTH, Met al. Ion Acceleration—Target Normal Sheath Acceleration. CERN Yellow Reports, [S.I.], v. 1, p. 231, feb. 2016.*

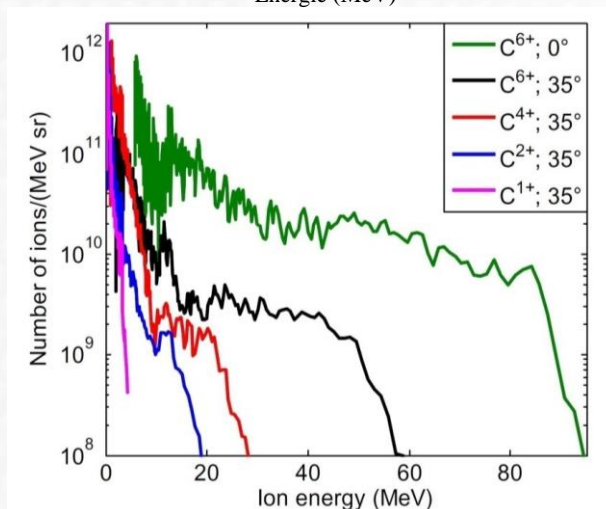
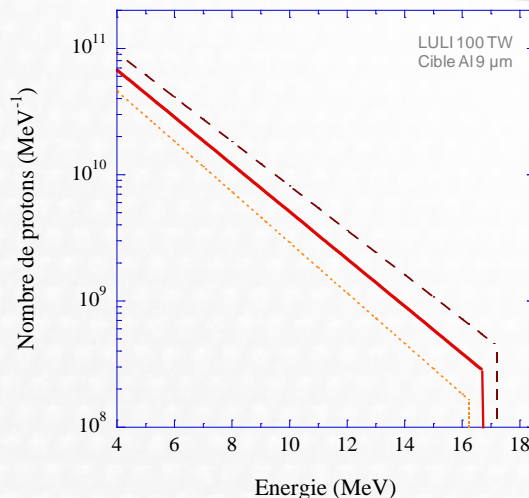
# Accélération d'ions par laser

## Protons accélérés par laser dans le monde



Macchi et al. *Rev. Mod. Phys.*, **85**, 751 (2013)

M. Gerbaux, thèse université de Bordeaux, 2007



Carroll, D. C et al., *New Journal of Physics* **12** (2010) 045020 (15pp)

Astra-Gemini Laser : 115 TW ; 6 J ; 50 fs  
 $\Rightarrow 7 \times 10^{20} \text{ W cm}^{-2}$

# Accélération d'ions par laser

- ✓ TNSA capable d'accélérer  $>10^{13}$  ions [1~100] MeV
- ✓ Complications des cibles solides pour accélérer une large gamme d'ions
- ✓ Problèmes à haut taux de répétition (10 Hz) : régénération et alignement des cibles, projection de débris

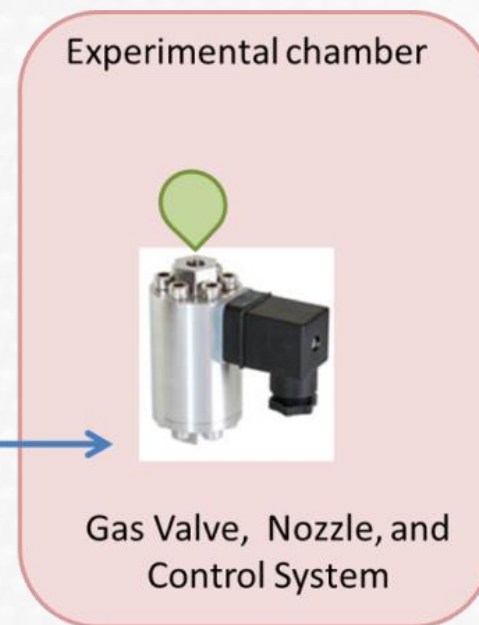
→ jet de gaz solution?



Gas source  
~200 bar



Compressor  
Compress up to 1000 bar



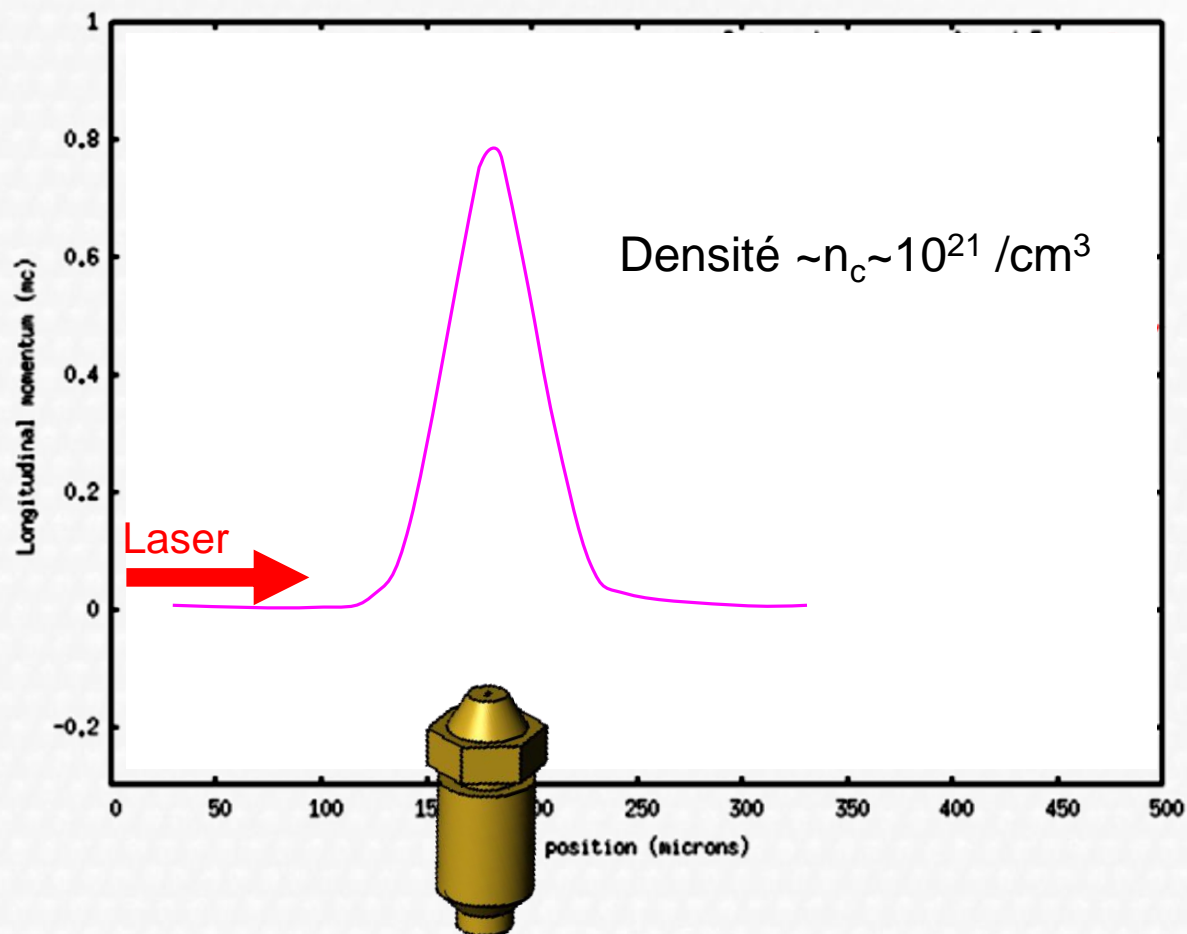
Experimental chamber

Gas Valve, Nozzle, and  
Control System

# Accélération d'ions par laser

## Collisionless Shock acceleration (CSA)

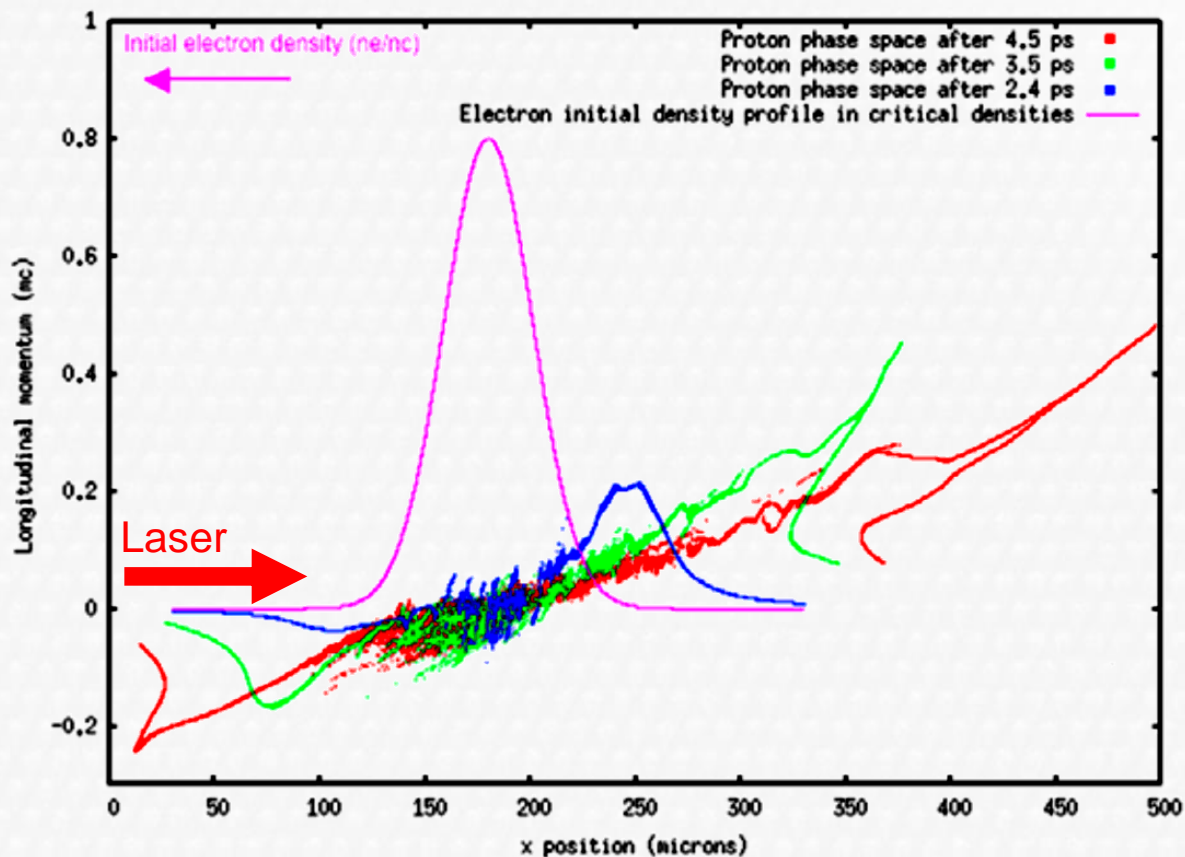
*E. d'Humières et al Plasma Phys. Control. Fusion 55 (2013) 124025 (7pp)*



# Accélération d'ions par laser

## Collisionless Shock acceleration (CSA)

*E. d'Humières et al Plasma Phys. Control. Fusion 55 (2013) 124025 (7pp)*

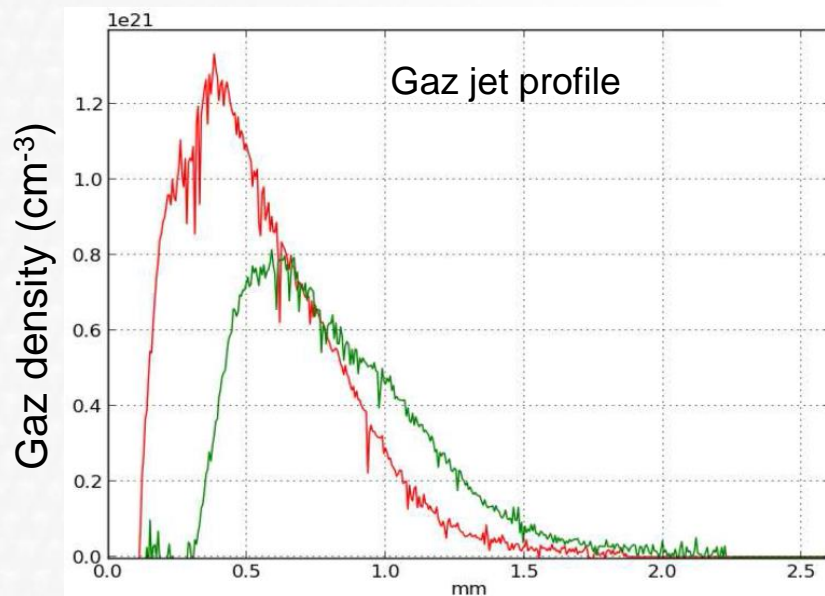
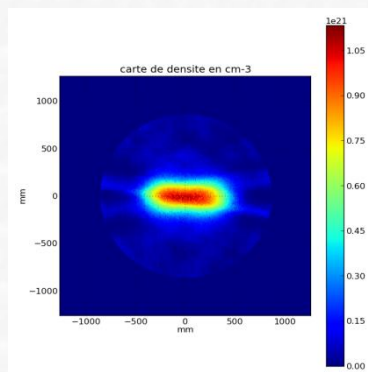
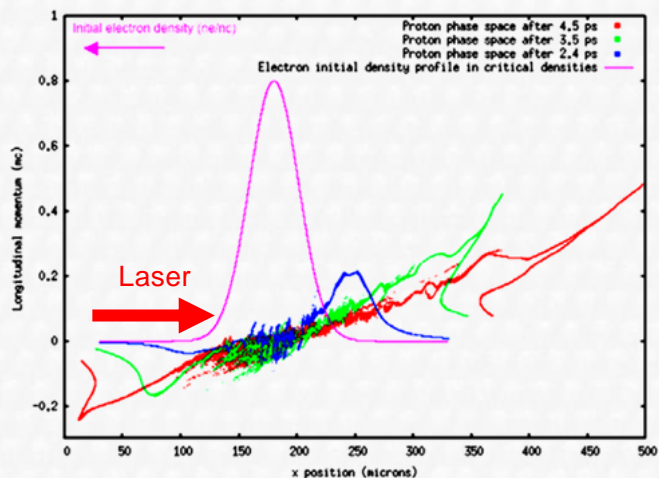


Simulations PIC 2D ; laser : 150 J, 700 fs ; intensité :  $10^{20}$  W/cm<sup>2</sup>  
Energie maximum atteinte par protons : **~300 MeV**.

# Accélération d'ions par laser

## Collisionless Shock acceleration (CSA)

E. d'Humières et al *Plasma Phys. Control. Fusion* 55 (2013) 124025 (7pp)



Optimisation du profile de densité pour accélérer avec le choc électrostatique

- ✓ possibilité d'accélérer une large gamme d'ions
- ✓ accélération se produit dans le volume : un grand nombre d'ions attendu

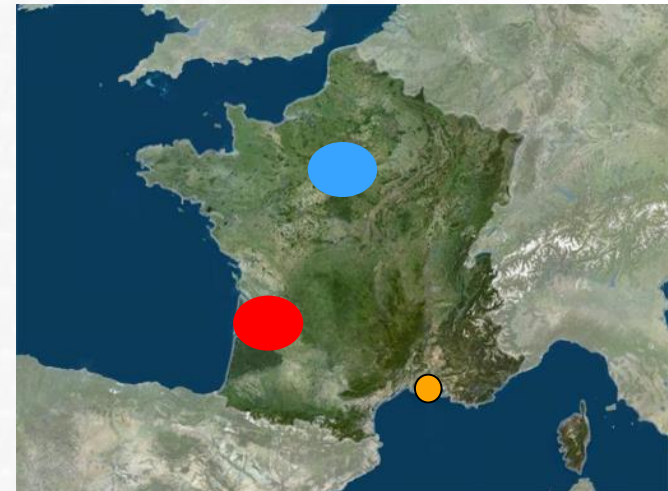
Etudes du CSA sur **Apollon** : groupe de travail ELI-NP/LULI/LIDYL/CELIA/CENBG  
→ Expérience sur PICO2000 en octobre 2017



# Les lasers de puissance

Laser	Energie (Joules)	Durée du pulse (Fs)	Puissance (TW)	Cadence (Hz)	Intensité (W/cm <sup>2</sup> )
CELIA Aurore	0,007	25	3,E-01	1000	1E+16
CELIA Eclipse	0,1	10	10	10	1E+18
LP3	1	25	40	10	1E+18
LASERIX	2	40	50	10	1E+19
UHI100	2,5	25	100	10	1E+20
LOA salle jaune	2	30	67	10	1E+19
LULI Elfie	20	350	57	5,00E-04	1E+19
PETAL	3600	10000	360	-	1E+20
Apollon/ELI-NP	150	15	10000	1,67E-02	1E+22
LULI 2000	1600	1500000	1,07	1,85E-04	1E+18
LIL	30 000	20000000	1,5	-	1e13 - 1e19
CENBG	1	5000000	2,E-04	10	1E+13

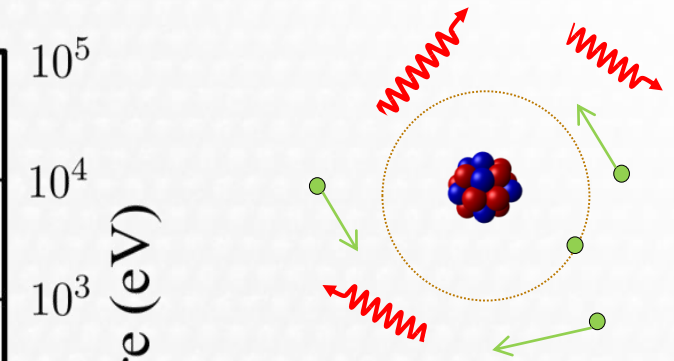
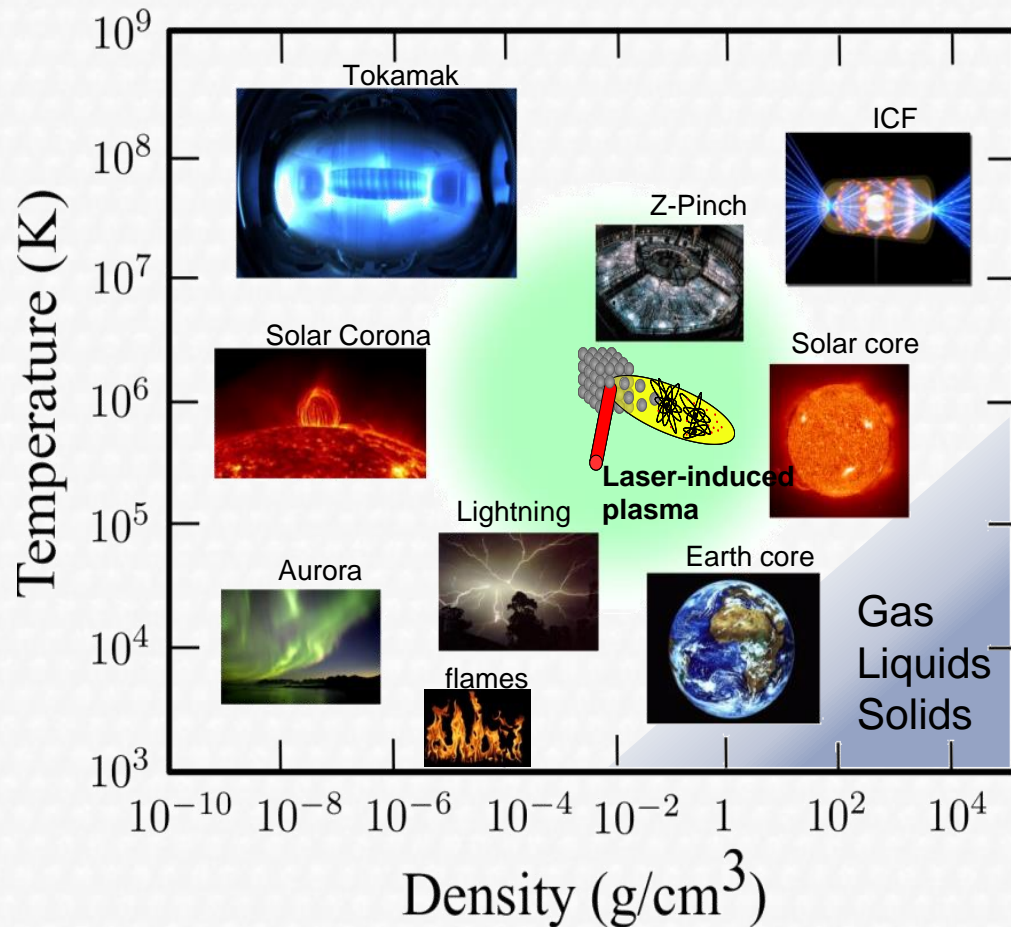
En France  
(liste non exhaustive)



$$I = \frac{E}{\Delta t \cdot S}$$

# Le plasma

Le quatrième état de la matière (99.9% de la matière visible)



- Ions multichargés
- Electrons libres
- Photons

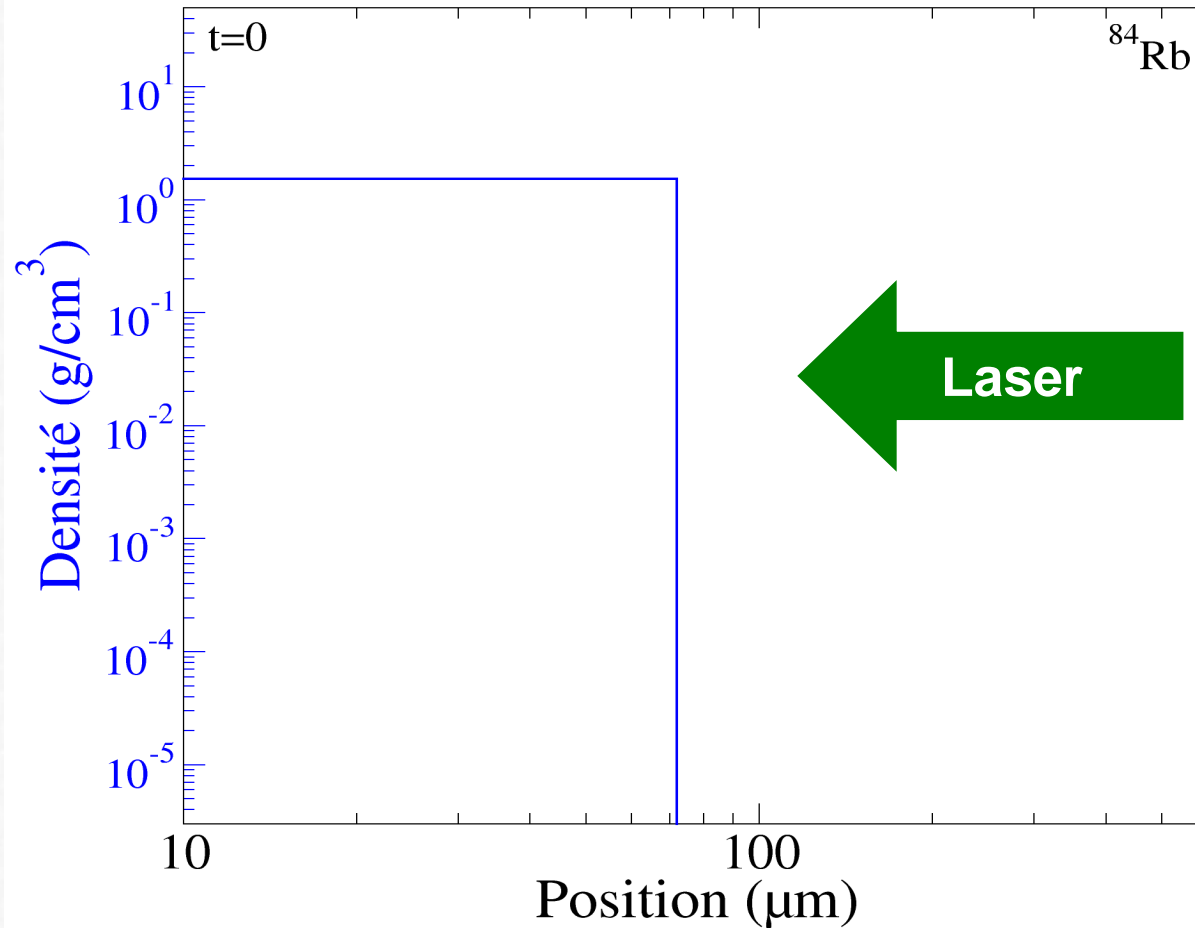
3 températures  $T_{ion}$  ;  $T_e$  ;  $T_{ph}$

Equilibre Thermodynamique :  
 $T_{ion} = T_e = T_{ph}$  jamais atteint

Equilibre Thermodynamique Local :  
 $T_{ion} = T_e \neq T_{ph}$

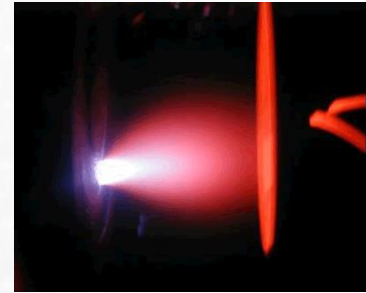
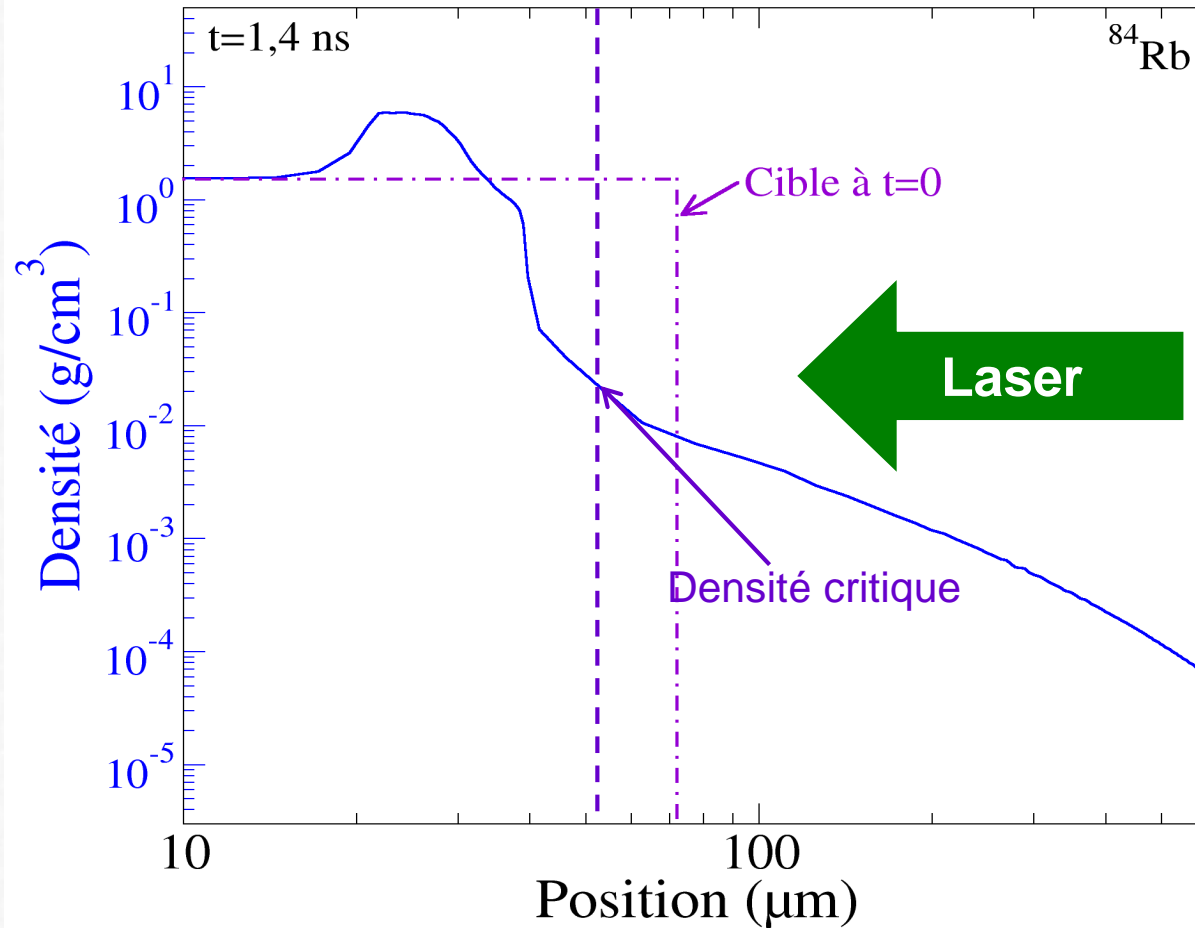
# Plasma généré par laser

$$I=10^{14} \text{ W/cm}^2$$



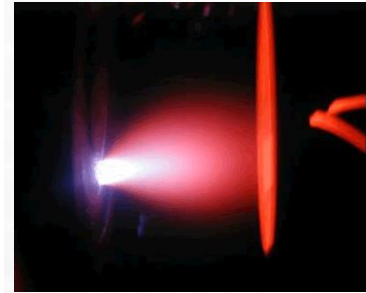
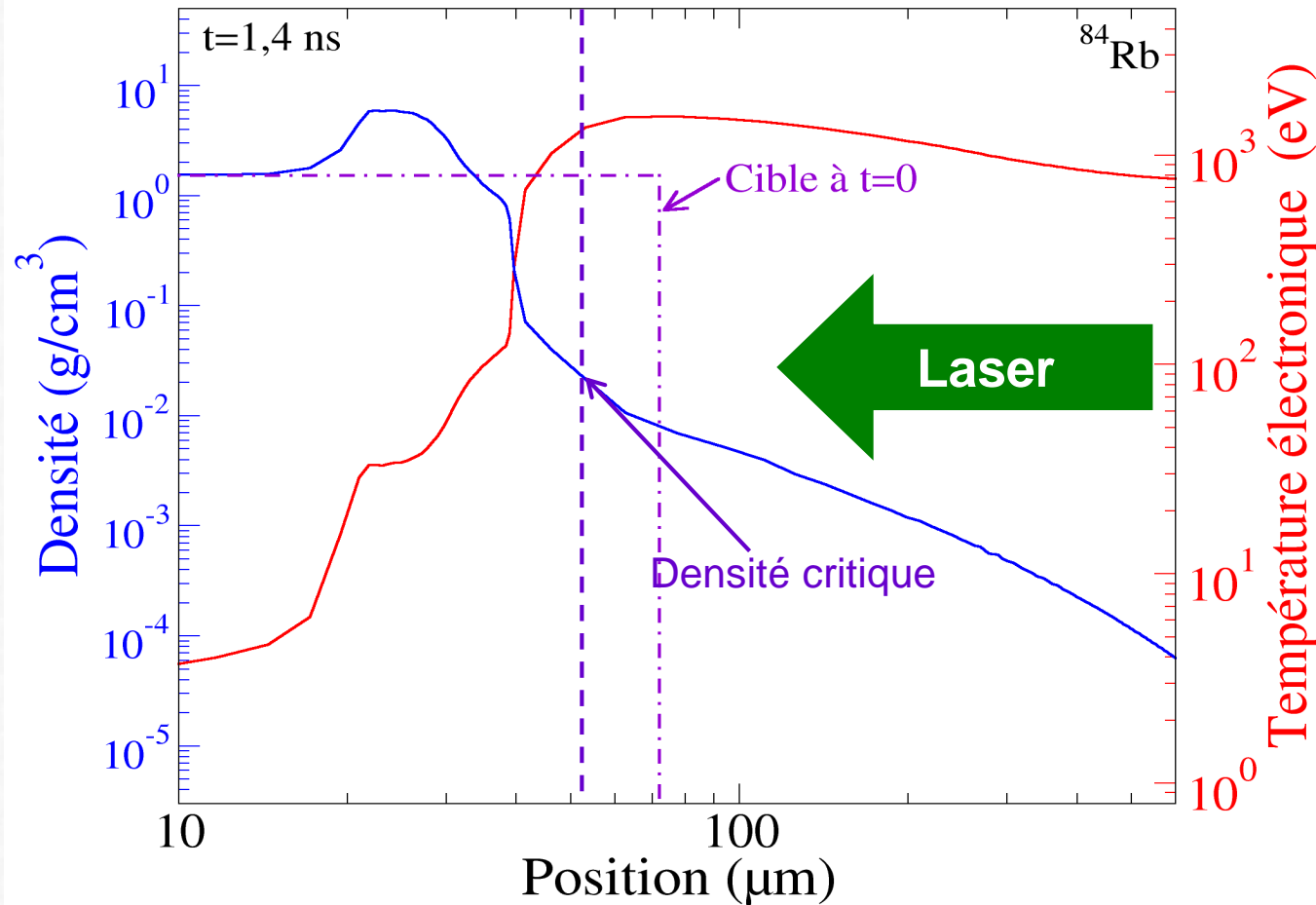
# Plasma généré par laser

$$I=10^{14} \text{ W/cm}^2$$



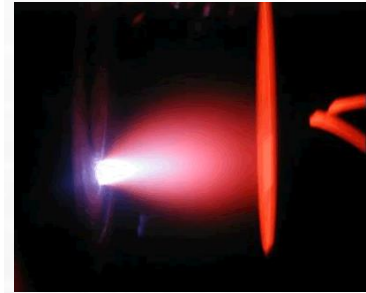
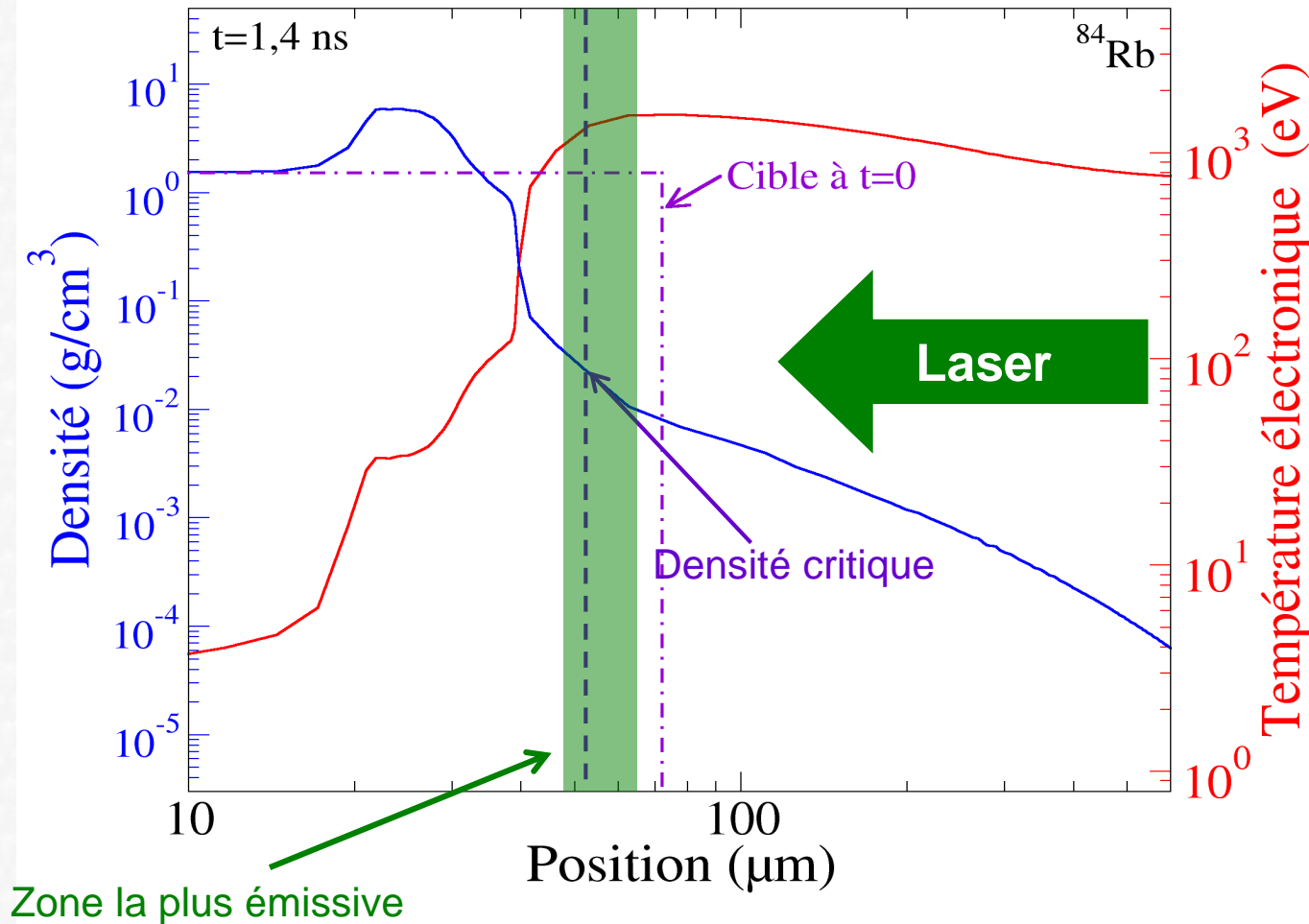
# Plasma généré par laser

$$I=10^{14} \text{ W/cm}^2$$

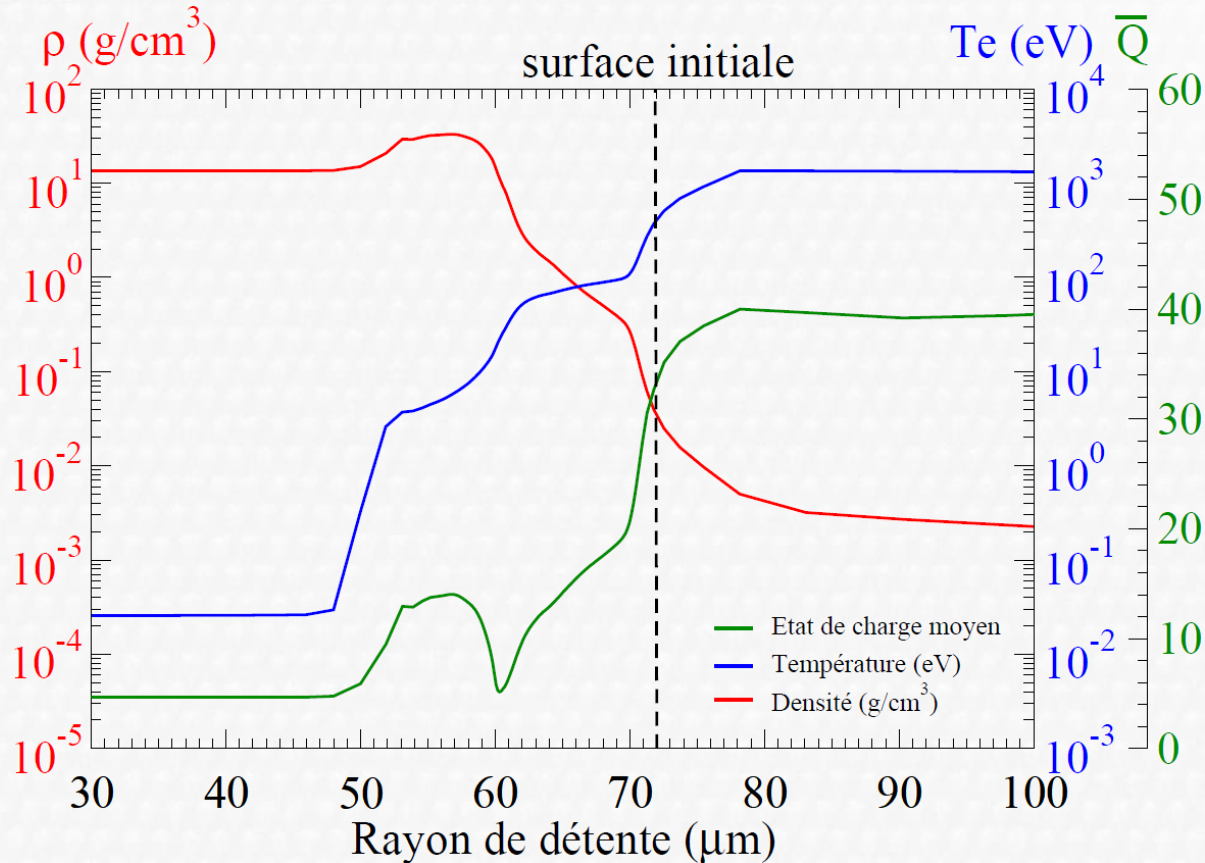


# Plasma généré par laser

$$I=10^{14} \text{ W/cm}^2$$



# Plasma généré par laser



$I=10^{14} \text{ W}/\text{cm}^2$

$E=35\text{J}$ ,

$\tau=4 \text{ ns}$

$\phi=100 \mu\text{m}$

$\lambda=1.06 \mu\text{m}$

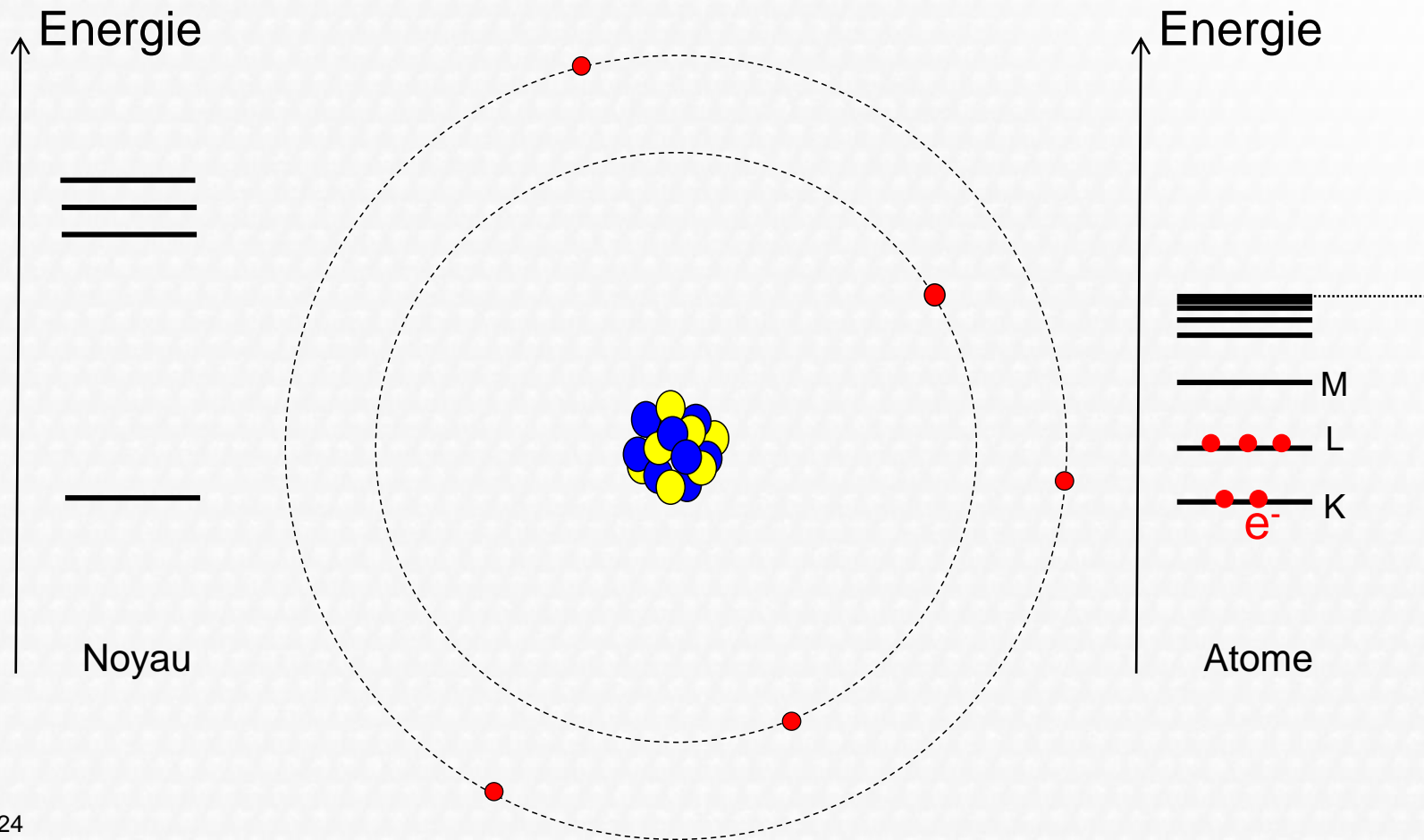
Cible de Mercure  $_{80}\text{Hg}$

Profils à la fin du pulse laser

*M. Comet, thèse université de Bordeaux, 2014*

- Etats charge et températures élevés
- Collisions multiples  $\Delta t \Delta E \geq h/4\pi \rightarrow$  favorise les phénomènes résonnants
- Configurations atomiques multiples

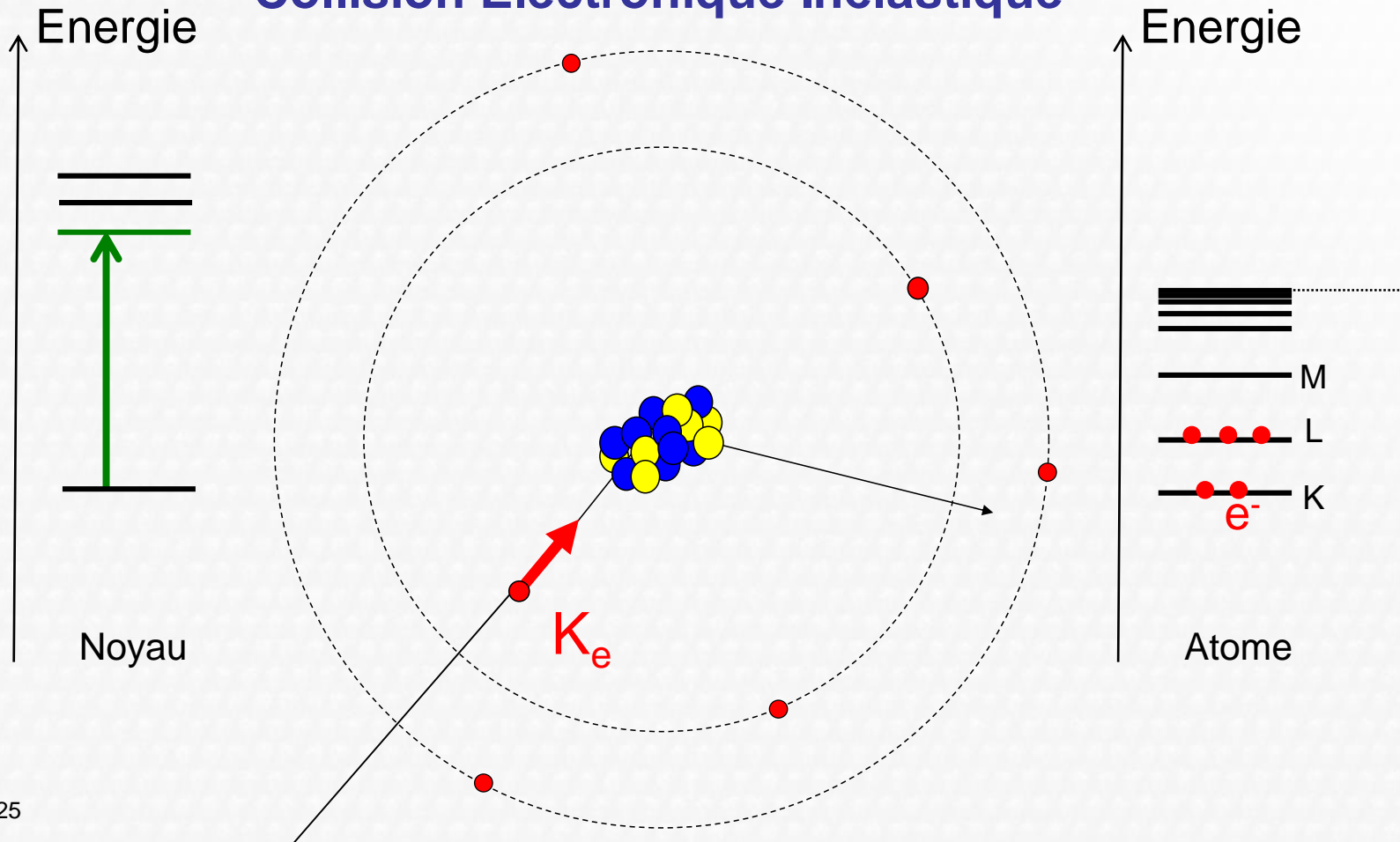
# Excitation / désexcitation du noyau





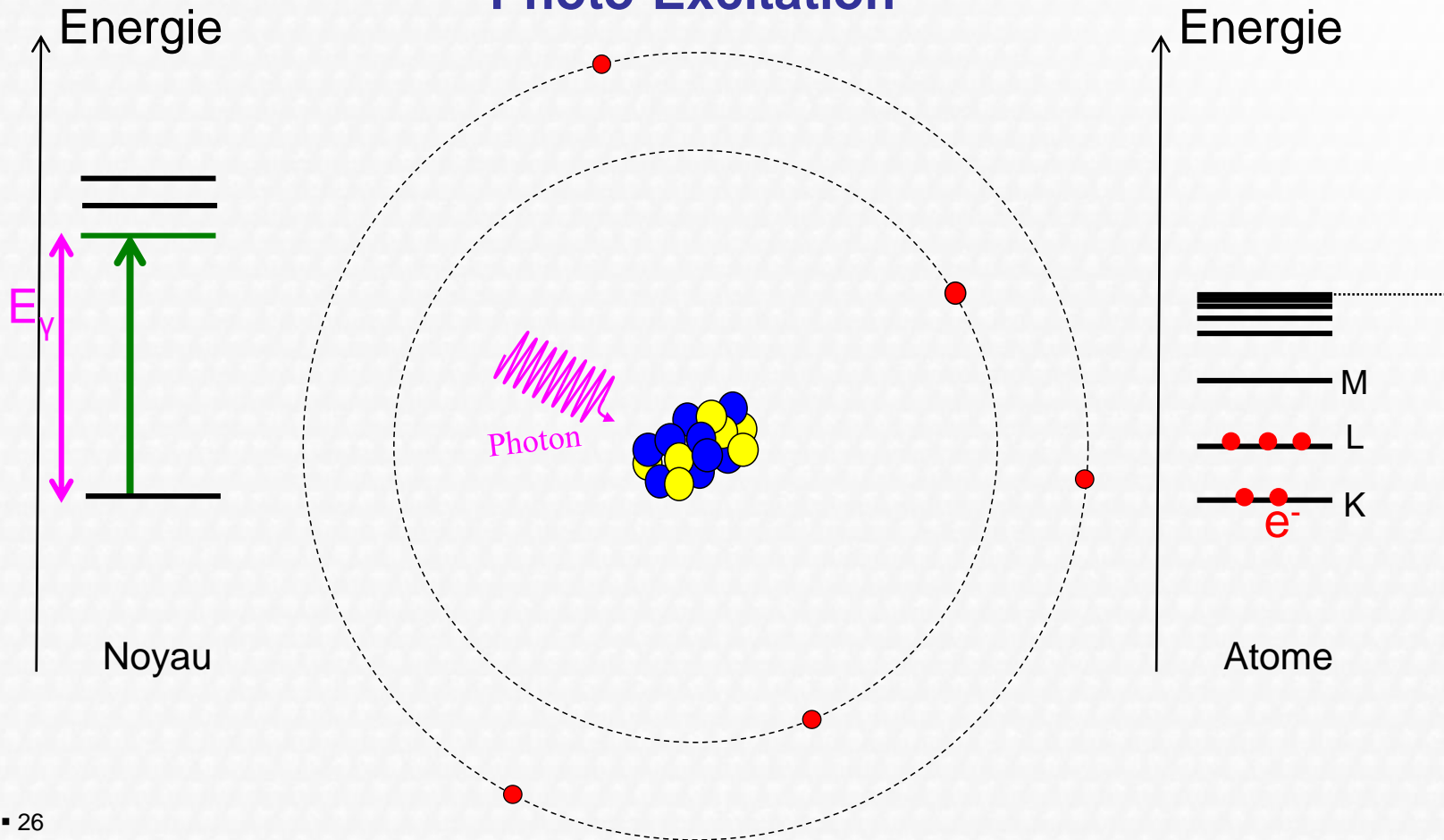
# Excitation / désexcitation du noyau

## Collision Électronique Inélastique



# Excitation / désexcitation du noyau

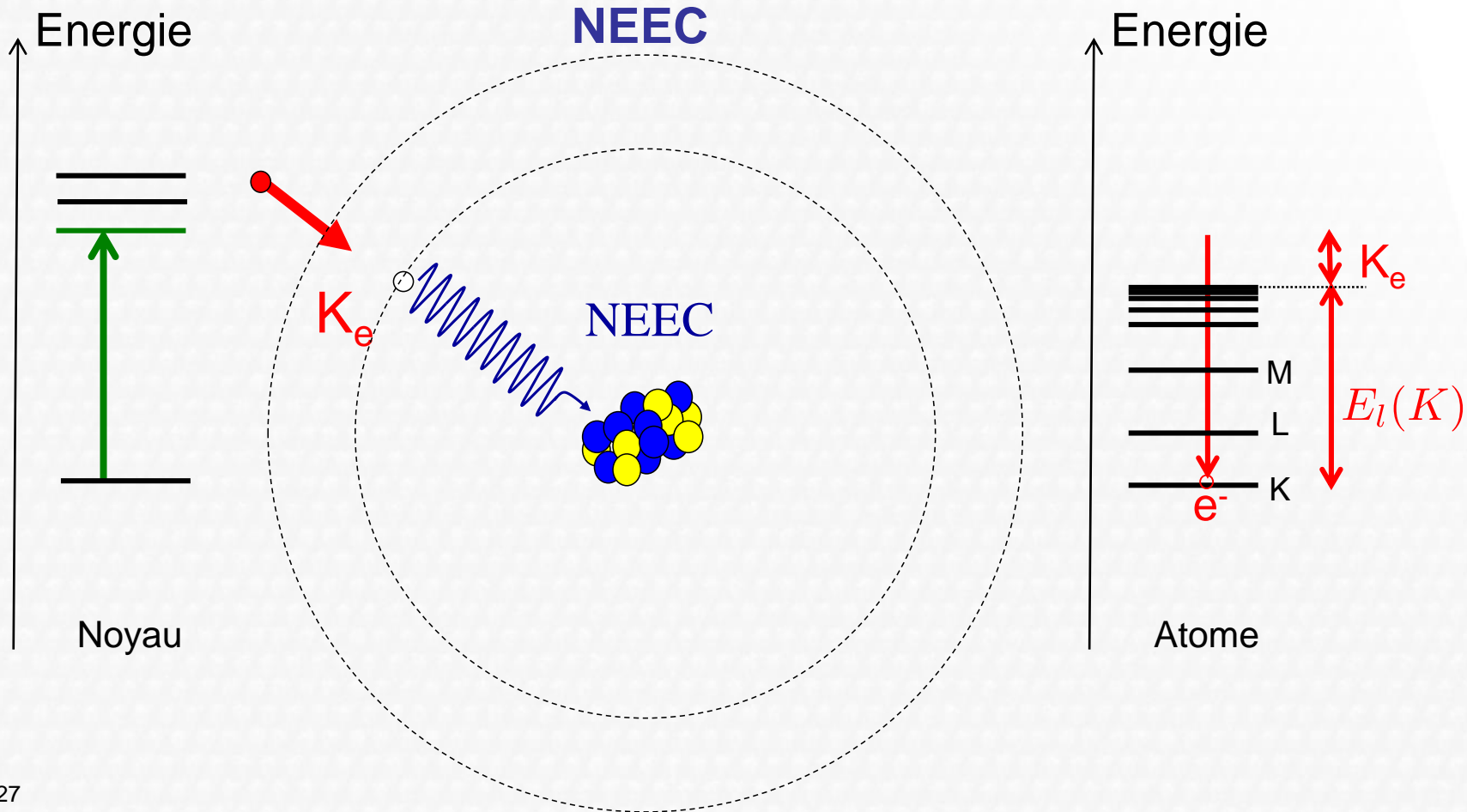
## Photo-Excitation



# Excitation / désexcitation du noyau

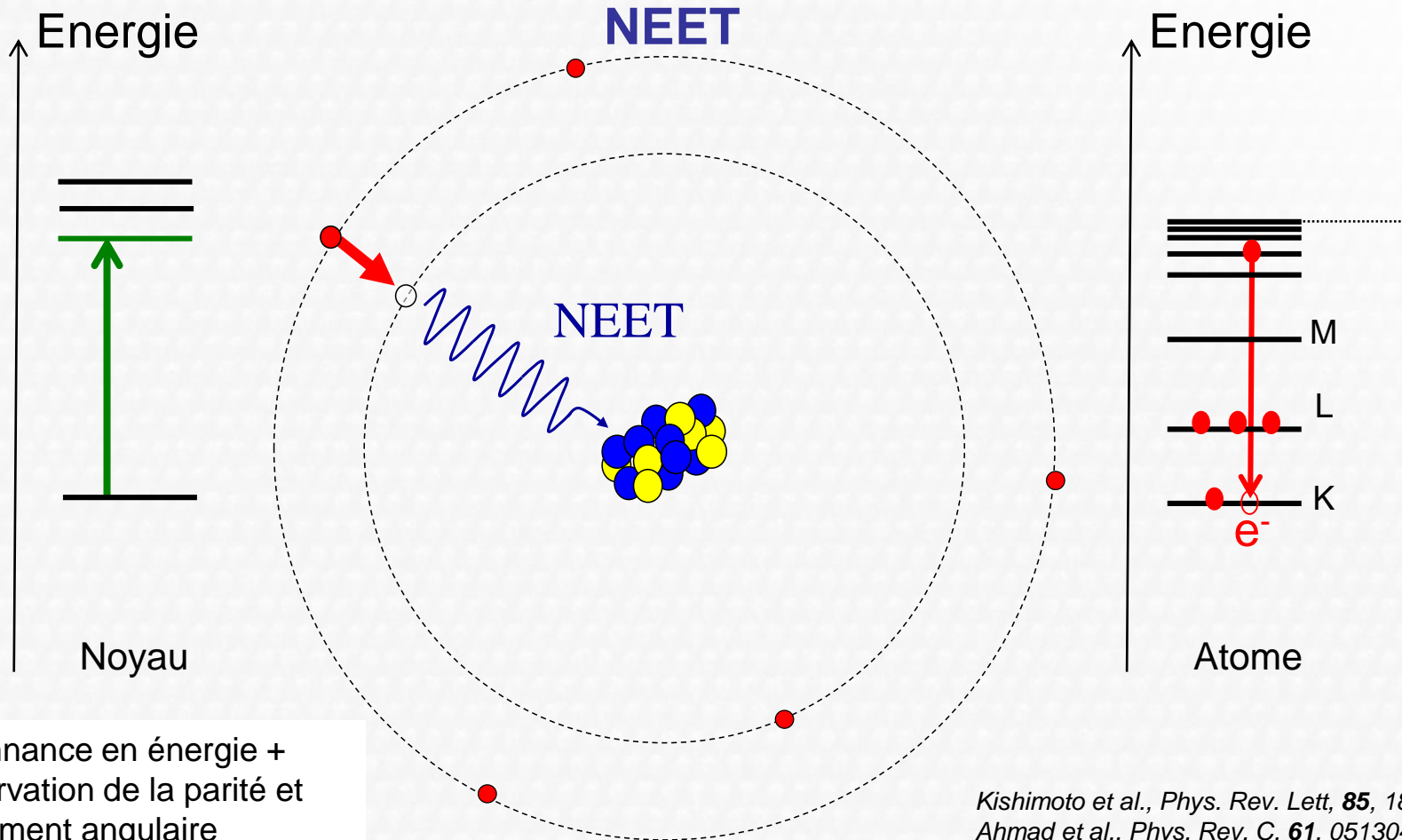
## Excitation Nucléaire par capture électronique

### NEEC



# Excitation / désexcitation du noyau

## Excitation Nucléaire par transition électronique NEET

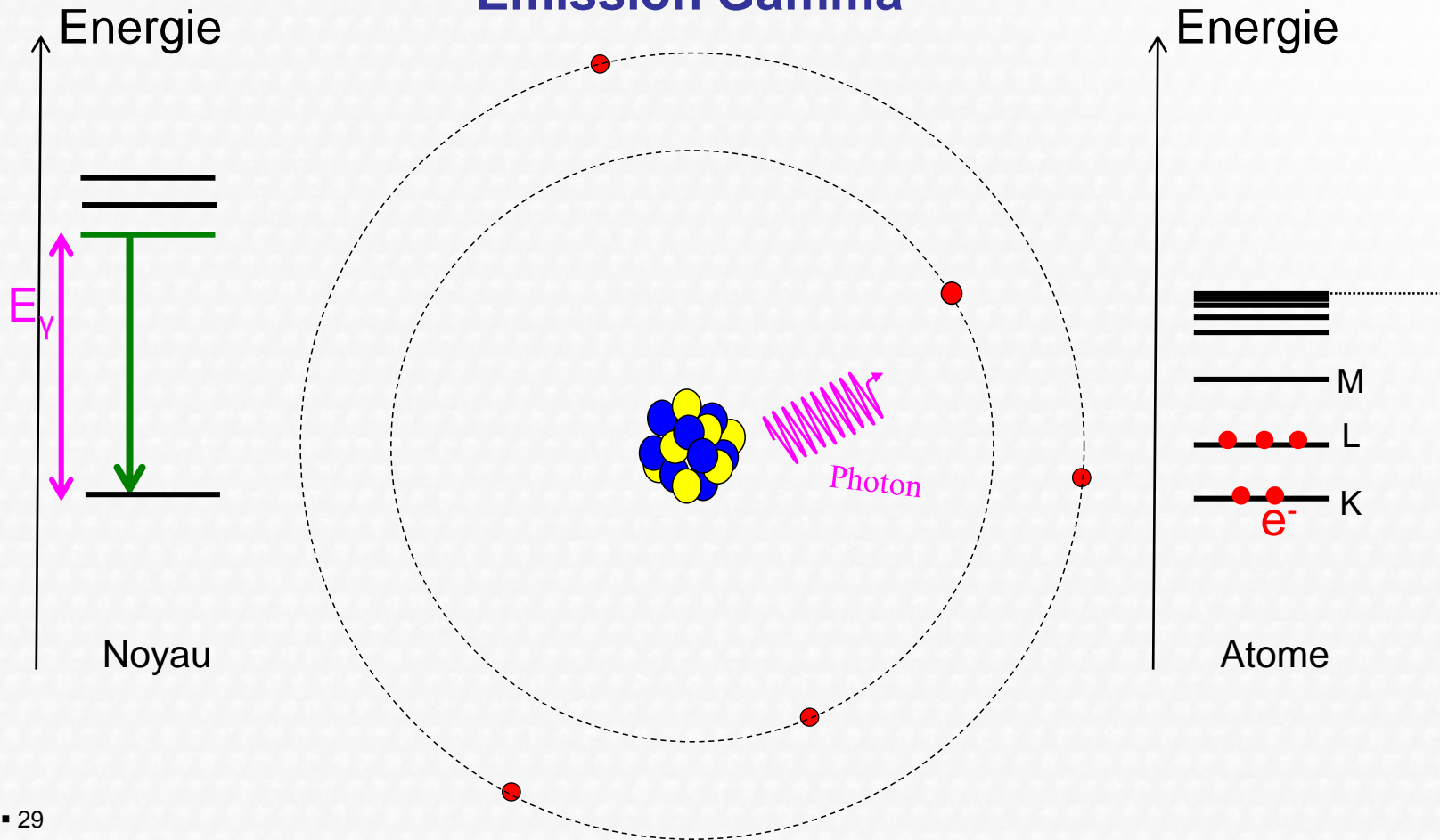


Résonance en énergie +  
conservation de la parité et  
du moment angulaire

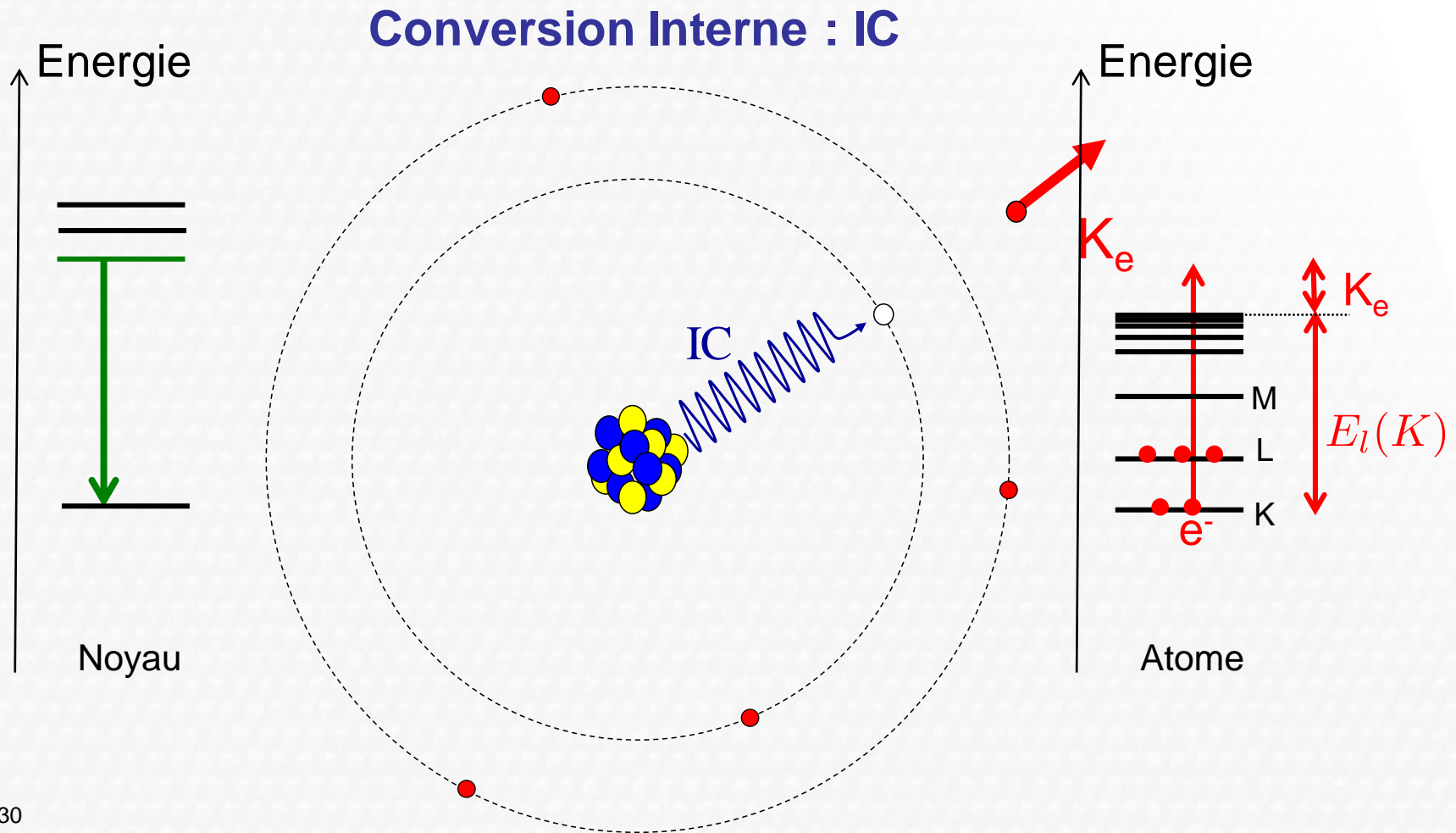
*Kishimoto et al., Phys. Rev. Lett, **85**, 1831 (2000)*  
*Ahmad et al., Phys. Rev. C, **61**, 051304 (2000)*  
*Kishimoto et al., Nucl. Phys. A, **748**, 3 (2005)*

# Excitation / désexcitation du noyau

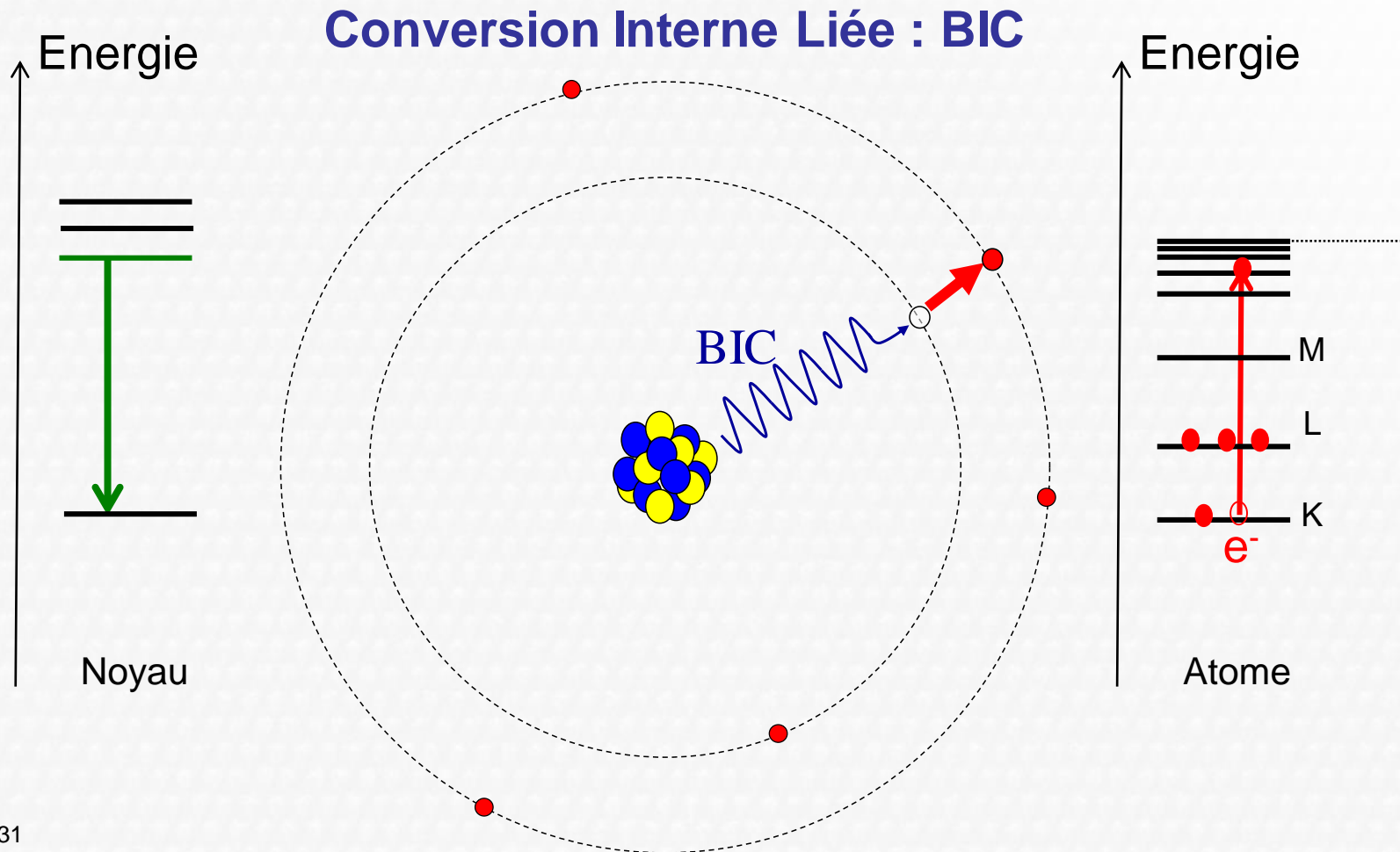
## Émission Gamma



# Excitation / désexcitation du noyau



# Excitation / désexcitation du noyau



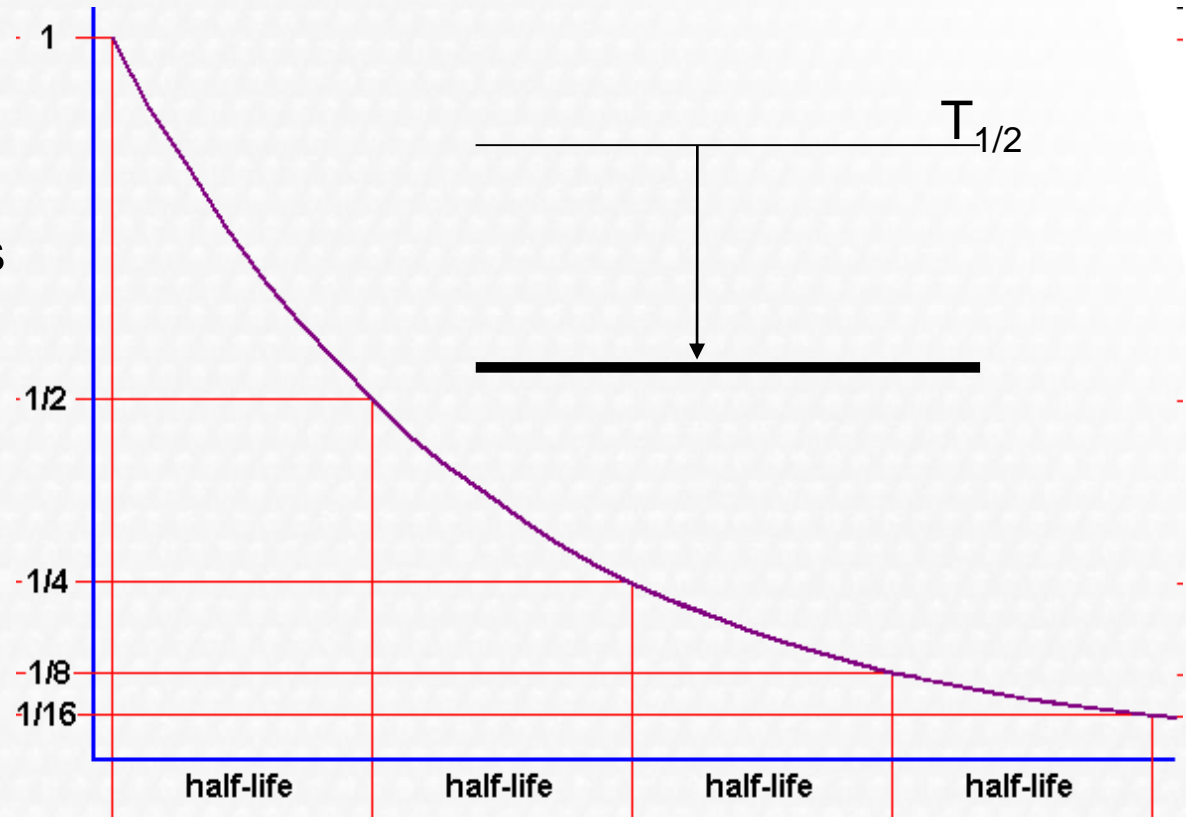
# Le temps de vie d'un état excité

Une observable de ces processus : durée de vie d'un état nucléaire



$\lambda$  : probabilité du processus  
 $s^{-1} \text{ noyau}^{-1}$

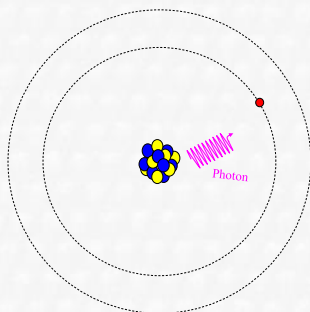
$$T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda}$$



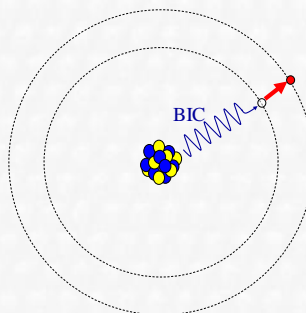


# Le temps de vie d'un état excité

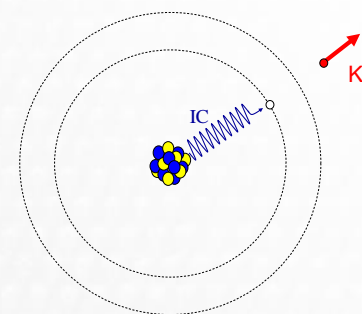
Émission photonique



Conversion Interne Liée : BIC



Conversion Interne : IC



Collision Électronique Inélastique

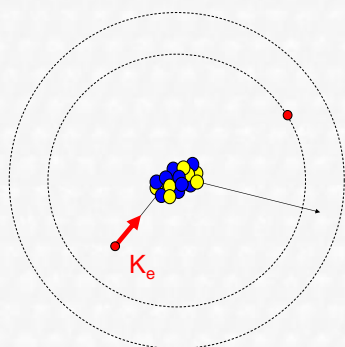
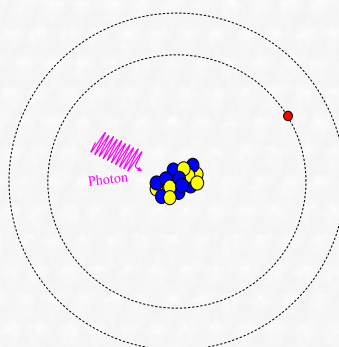
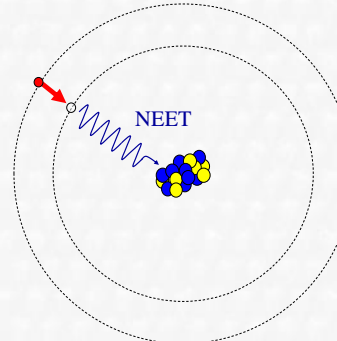


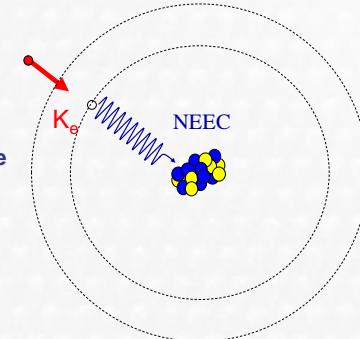
Photo-Excitation



Excitation Nucléaire par transition électronique  
NEET



Excitation Nucléaire par capture électronique  
NEEC

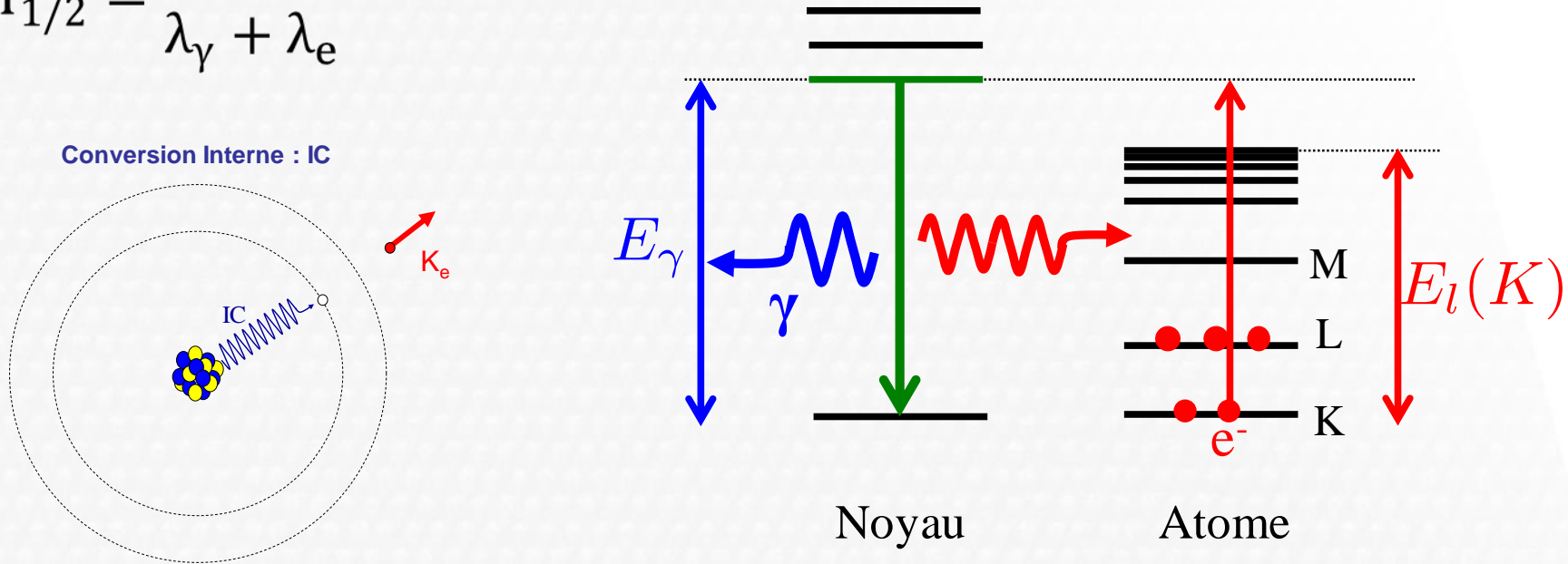


$$T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda_{\gamma} + \sum_i \lambda_i}$$

# Le temps de vie d'un état excité

$$T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda_\gamma + \lambda_e}$$

Effet de la charge de l'ion



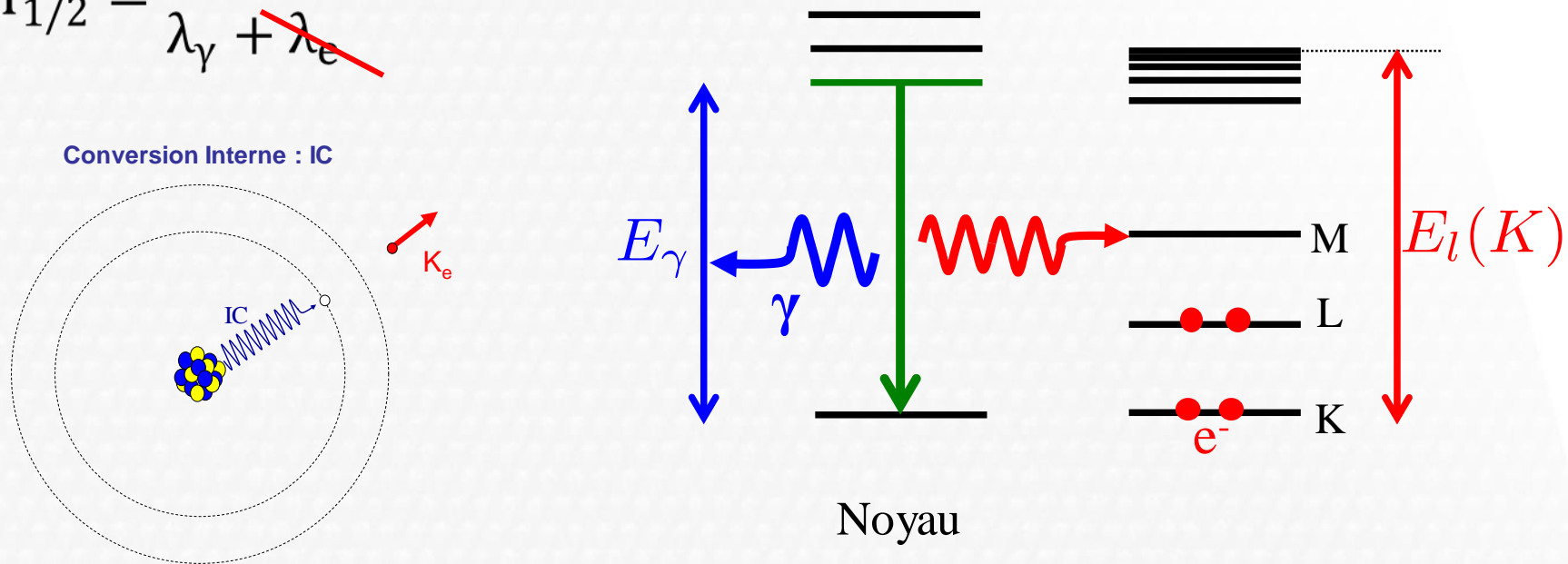
$^{125}_{52}\text{Te}$  1<sup>er</sup> état excité à 35,5 keV

Q	$T_{1/2}$ (ns)	$E_l(K)$ (keV)
0 (neutre)	1,49	31,8
48 <sup>+</sup>	11 ± 2	36,6

# Le temps de vie d'un état excité

$$T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda_\gamma + \lambda_e}$$

Effet de la charge de l'ion



$^{125}_{52}\text{Te}$  1<sup>er</sup> état excité à 35,5 keV

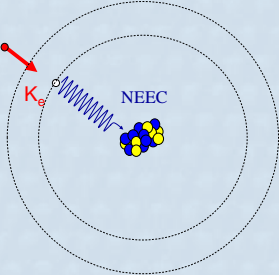
Q	$T_{1/2}$ (ns)	$E_l(K)$ (keV)
0 (neutre)	1,49	31,8
48 <sup>+</sup>	11 ± 2	36,6



# Modification des $T_{1/2}$ en milieu plasma

- Modification des  $T_{1/2}$  à cause des processus de **désexcitation**
- Mais aussi à cause des processus **d'excitation**

Excitation Nucléaire par capture électronique  
NEEC



Collision Électronique Inélastique

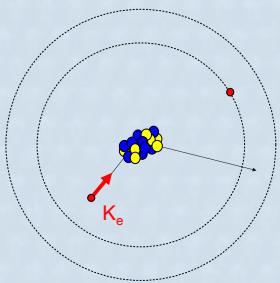
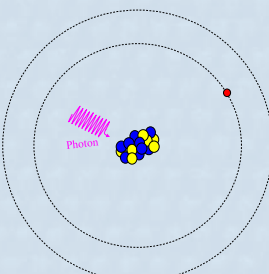
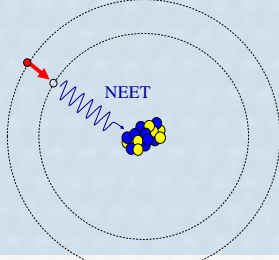


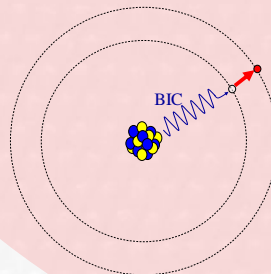
Photo-Excitation



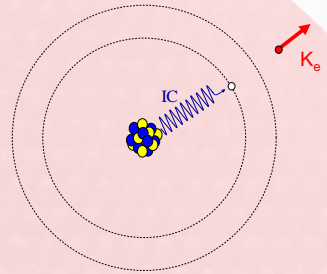
Excitation Nucléaire par transition électronique  
NEET



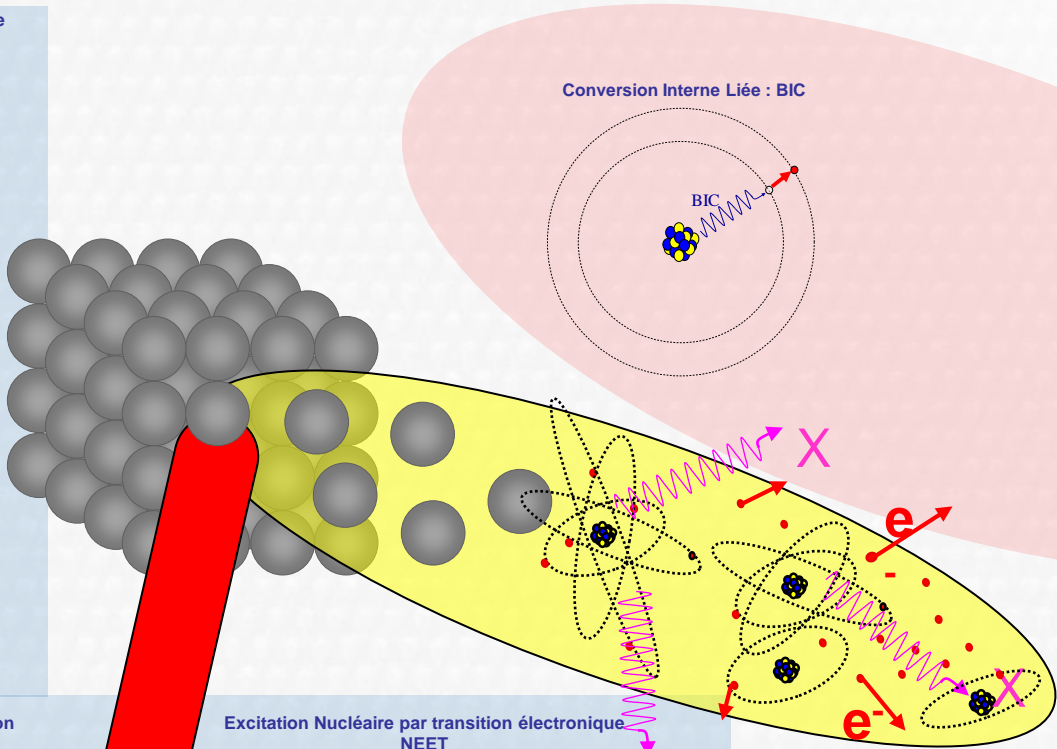
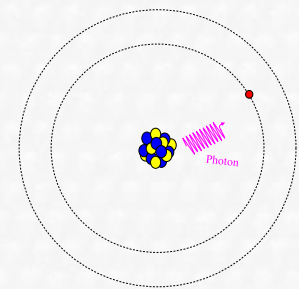
Conversion Interne Liée : BIC



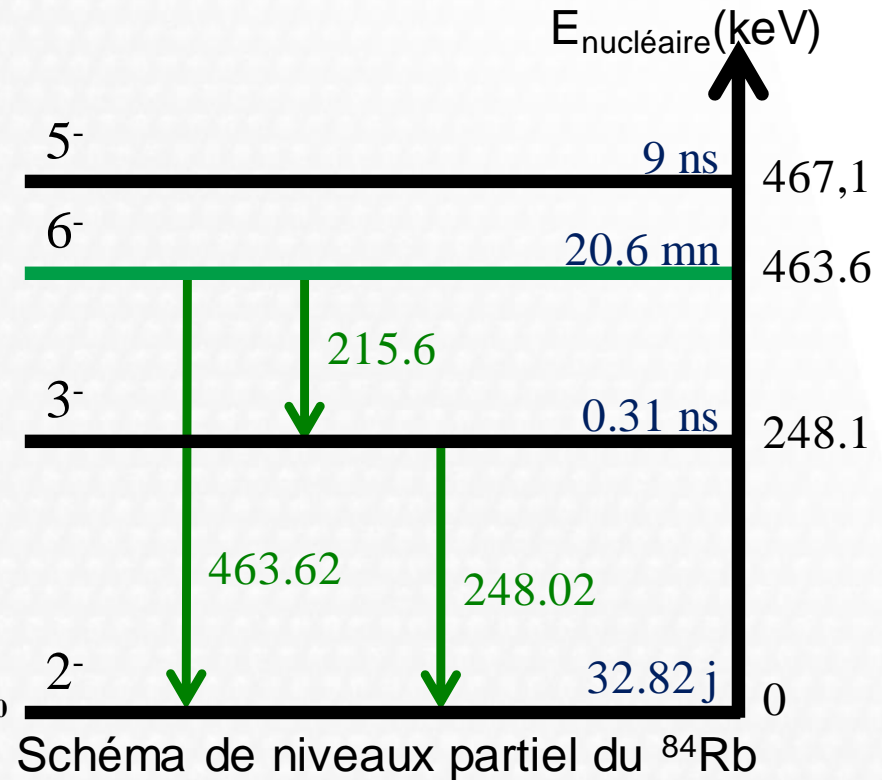
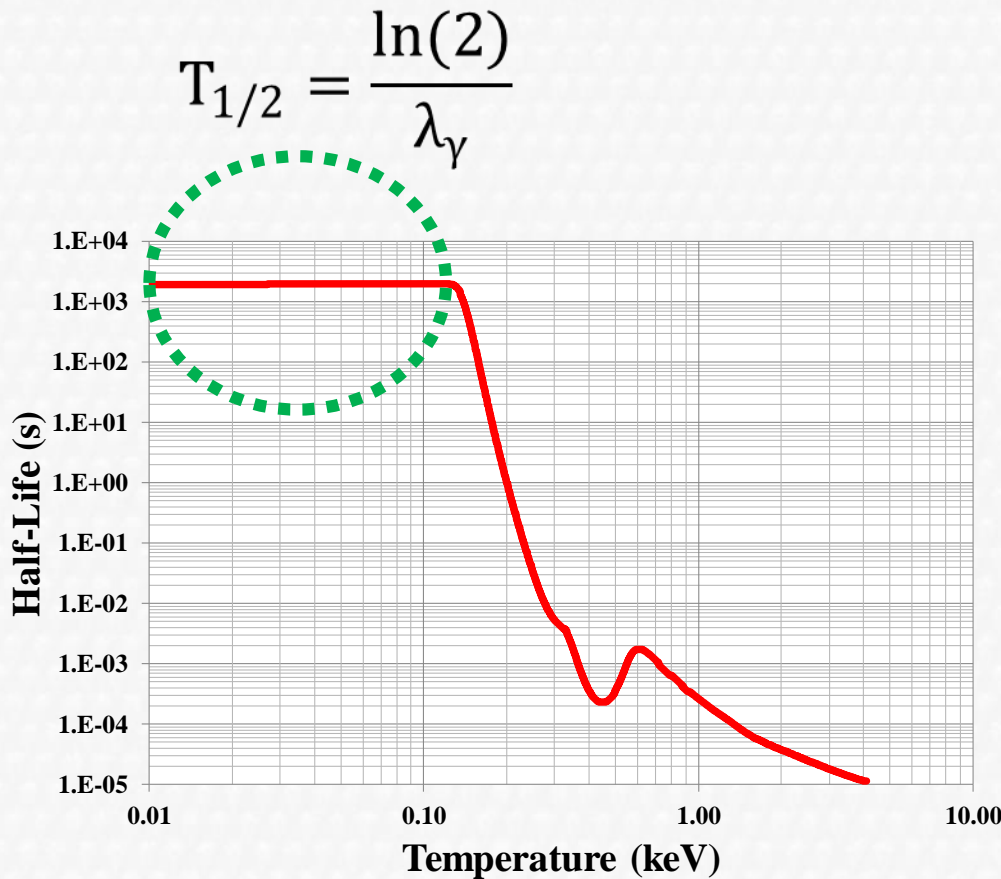
Conversion Interne : IC



Émission photonique



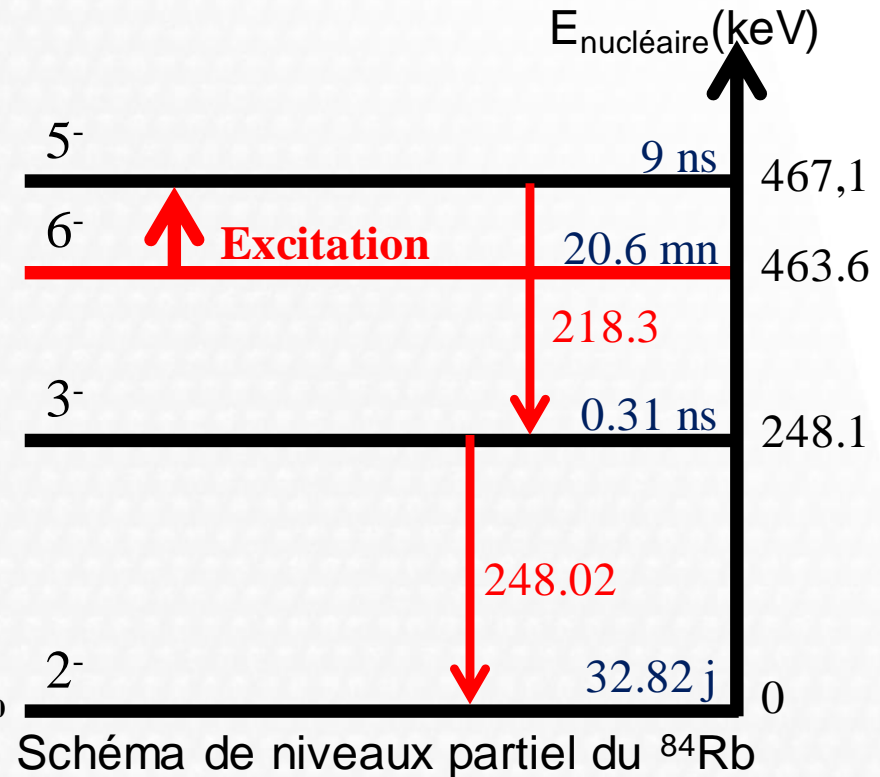
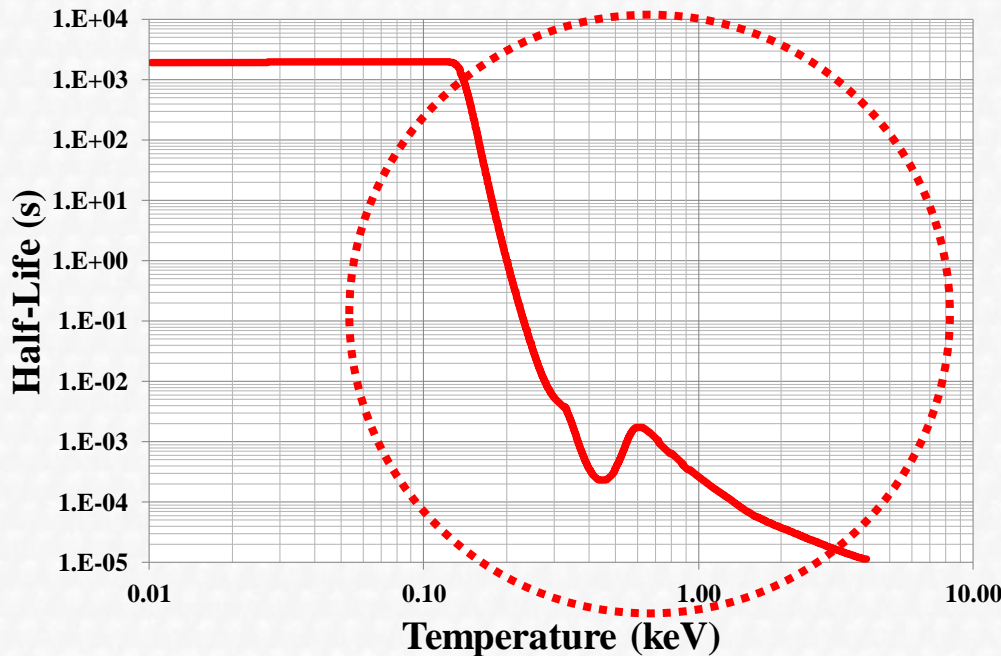
# Modification des $T_{1/2}$ en milieu plasma



*D.Denis-Petit et al., ALPA book, Eds. Parodi, Bolton, Schreiber, CRC press, Taylor&Francis Group (2017)*

# Modification des $T_{1/2}$ en milieu plasma

$$T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda_{\gamma} + \lambda_{\text{excit}}}$$



D.Denis-Petit et al., ALPA book, Eds. Parodi, Bolton, Schreiber, CRC press, Taylor&Francis Group (2017)

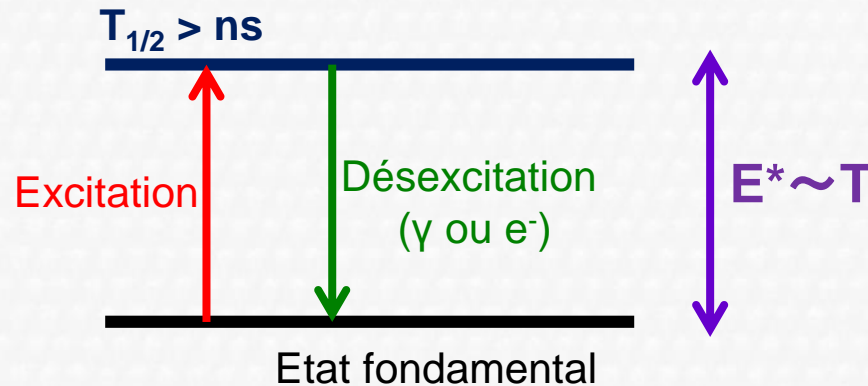
➤ Demi-vies apparentes modifiées en milieu plasma

→ astrophysiques, désexcitations rapides des états isomériques

→ **Intérêt d'études des excitations dans un plasma**

# Excitations nucléaires dans un plasma

- Critères pour définir les noyaux d'intérêt :
  - énergie d'excitation  $E^* \sim T \rightarrow$  **Etat à basse énergie d'excitation** :
  - demi-vie plus longue que la durée de vie du plasma & détection  $\rightarrow$  **Etat isomérique**




- Noyaux avec un état **fondamental stable** :  $\sim 10$  noyaux avec  $E^* < 15$  keV


	<sup>45</sup> Sc	<sup>169</sup> Tm	<sup>181</sup> Ta	<sup>201</sup> Hg	<sup>83</sup> Kr	<sup>73</sup> Ge	<sup>57</sup> Fe	<sup>187</sup> Os	<sup>235</sup> U	<sup>205</sup> Pb
$E^*$ (keV)	14,2	8,4	6,2	1,56	9,4	13,3	14,4	9,7	0,077	2,3
$T_{1/2}$	318 ms	4,1 ns	6,1 $\mu$ s	81 ns	154ns	2,9 $\mu$ s	98 ns	2,4 ns	27 min	24 $\mu$ s


# Excitations nucléaires dans un plasma

## Expériences sur des états fondamentaux stables


	$^{181}\text{Ta}$	$^{235}\text{U}$	$^{201}\text{Hg}$
$E^*$ (keV)	6,2	0,077	1,565
$T_{1/2}$	6,1 $\mu\text{s}$	27 min	81 ns
Processus d'excitation	Excitation directe	NEET	NEET


 Gobet et al., *J.Phys. B* **41**, 145701 (2008)


 Spohr et al., *Mod Opt* **53** 2633 (2006)


 Andreev et al., *JETP* **91**, 1063 (2000)

 Claverie et al., *Phys. Rev. C* **70**, 044303 (2004)

 Bouns et al., *Phys. Rev. C*, **46**, 852 (1992)

 Arutyunyan et al., *Sov.J.NP* **53**, 23 (1991)

 Izawa et al., *Phys. Lett.* **88B**, 59 (1979)

 M.Comet et al., *Phys.Rev. C* **92**, 054609 (2015)  
M. Comet, Thèse université de Bordeaux (déc. 2014)

Laser: 50 fs,  $I=10^{16}$  W.cm<sup>-2</sup>

A.V.Andreev et al. : **20 000 ± 5 000** excitations/tir

F.Gobet et al. : **< 30** excitations/tir

Laser: ns,  $I = 10^{13}$  W.cm<sup>-2</sup>

Taux NEET < 6. 10<sup>-6</sup> noyau<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>

Laser ns,  $I = 10^{14}$  W.cm<sup>-2</sup>

M.Comet et al. :  $\sim 10^6$  excitations /tir

(**estimation**) → 1<sup>ère</sup> expérience  
LULI mars 2017

- A ce jour : pas de mise en évidence claire d'une excitation nucléaire dans un plasma !

Expériences complexes :

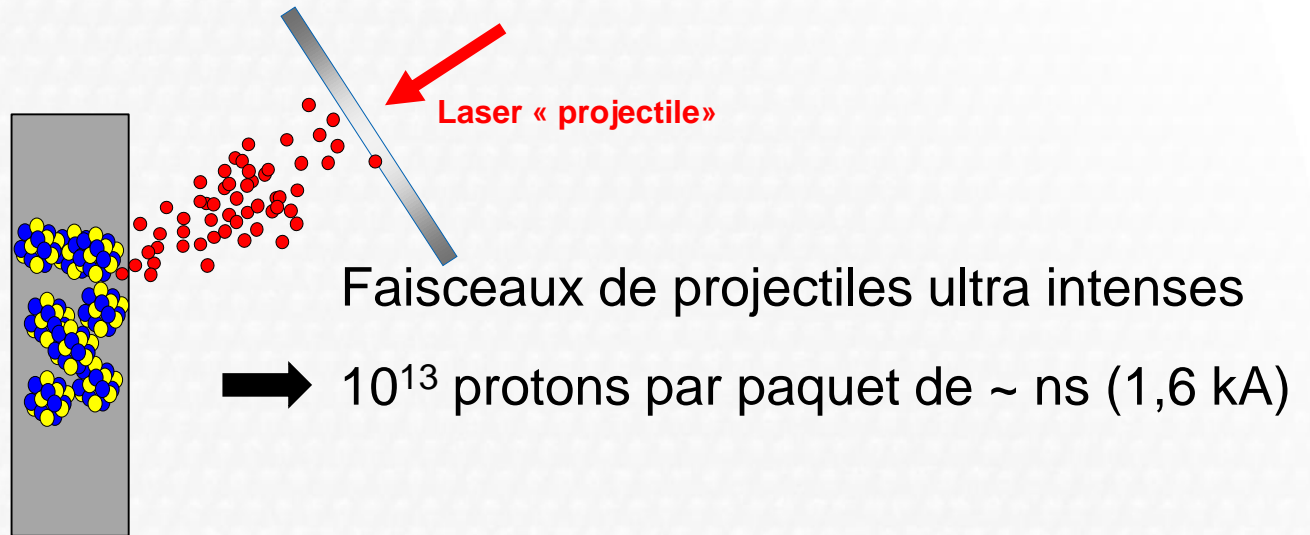
- Signal faible / bruit de fond important → détection difficile
- Etats isomériques faiblement couplés → excitation directe plus difficile pour ces états

• **Autres candidats que des états fondamentaux ?**

→ **Créer des noyaux/états instables**

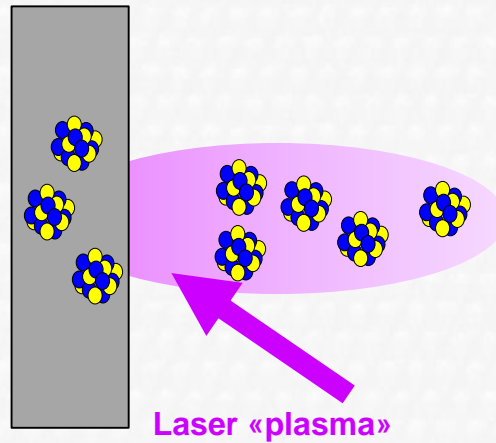


# Excitations nucléaires dans un plasma



Noyaux instables créés in situ

# Excitations nucléaires dans un plasma

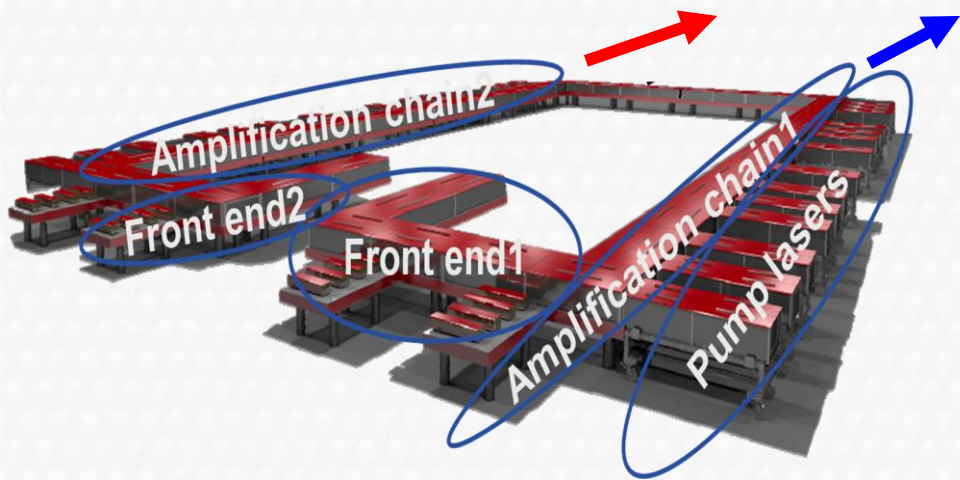


Noyaux instables créés in situ

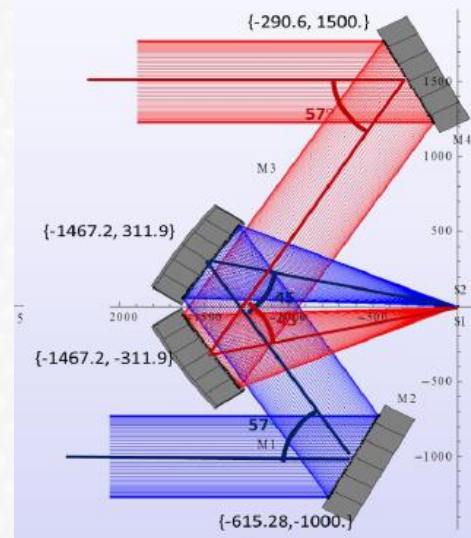
$$T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda_{\gamma} + \sum_i \lambda_i}$$

# Exemple du $^{84}\text{Rb}$

Expérience sur ELI-NP?



Small-angle focusing



0,1 PW / 0,1s  
10 PW / 60s

# Exemple du $^{84}\text{Rb}$

- $^{84}\text{Rb}$ : noyau instable : Production in situ par réactions nucléaires :

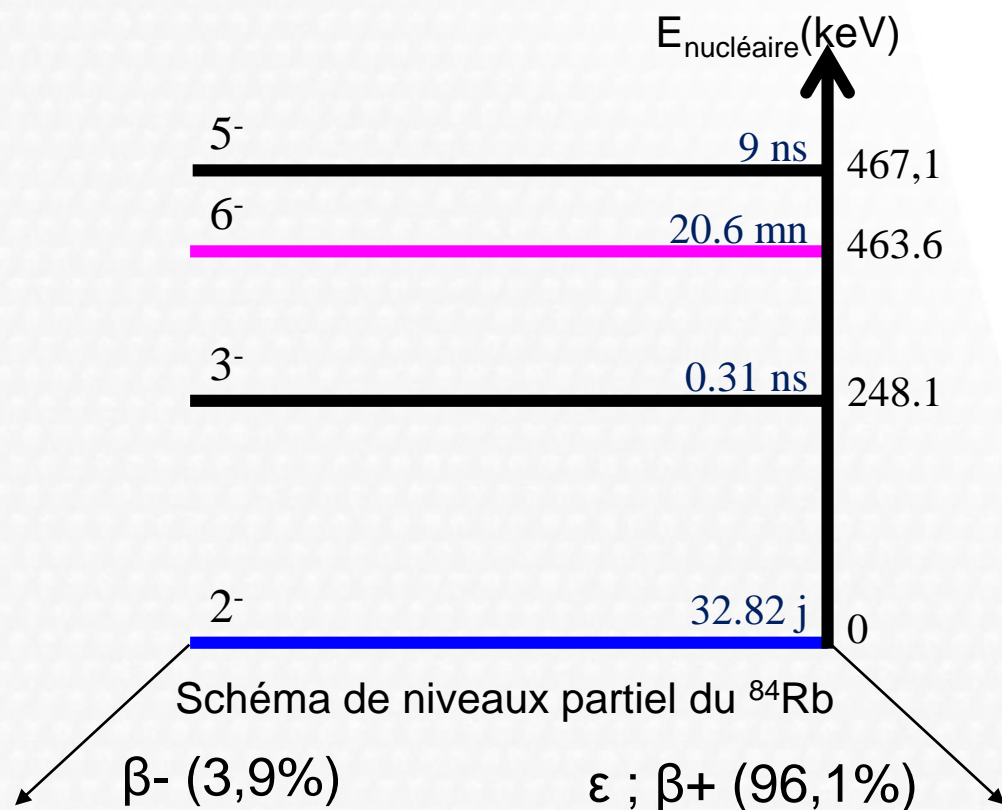
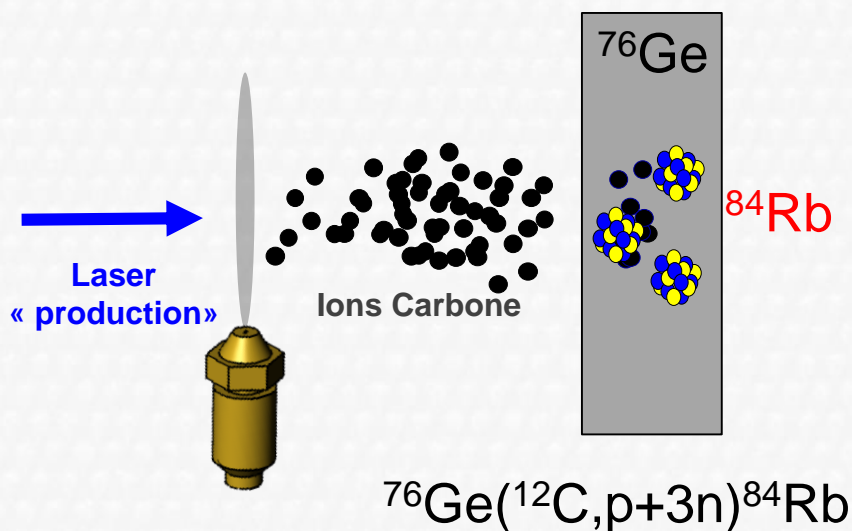
*F. Negoita et al. , Romanian Reports in Physics, Vol. 68, Supplement, P. S37–S144, 2016*

*D.Denis-Petit et al., ALPA book, Eds. Parodi, Bolton, Schreiber, CRC press, Taylor&Francis Group (2017)*

0,1 PW @10Hz (pendant 1 heure)

3J – 30 fs

$8 \cdot 10^{20}$  W/cm



# Exemple du $^{84}\text{Rb}$

- Processus de dépopulation de l'état isomérique

$$T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda_{\gamma} + \lambda_{\text{excit}}}$$

10 PW /min (pendant 10 min)

150 J – 0,5 ns

$10^{15}$  W/cm

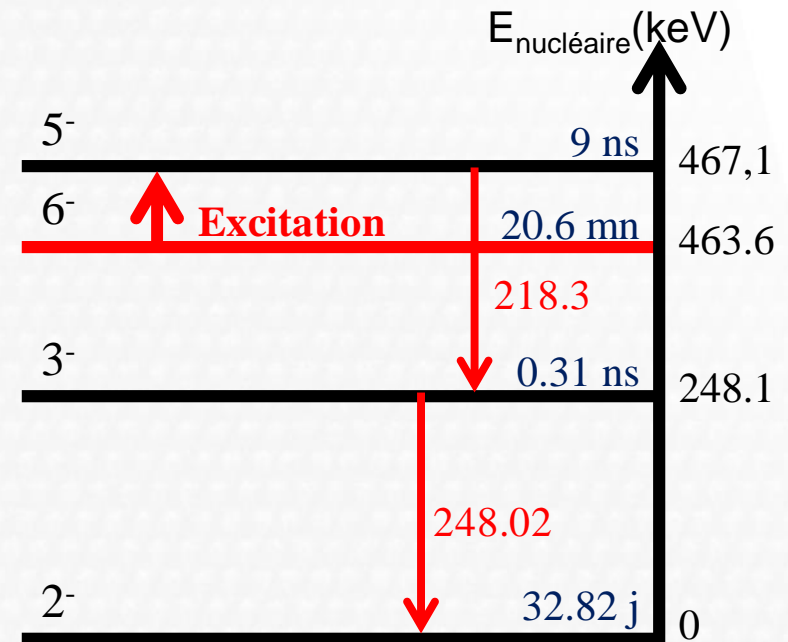
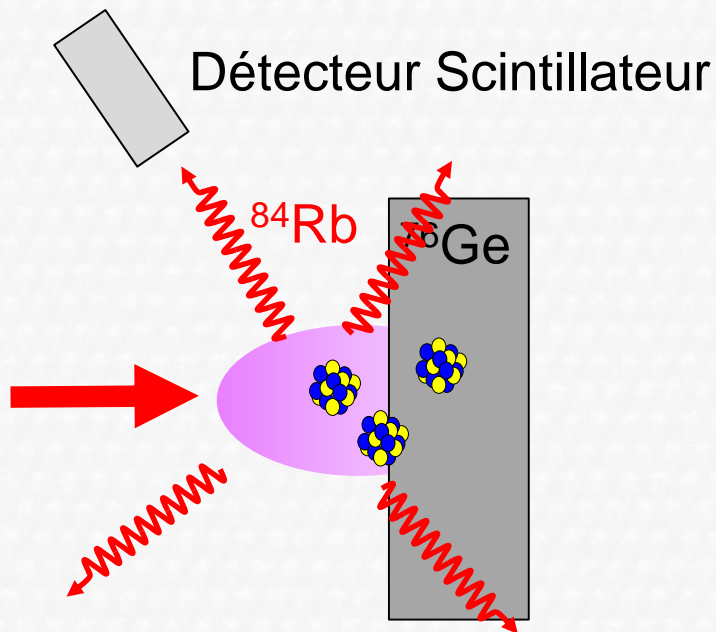
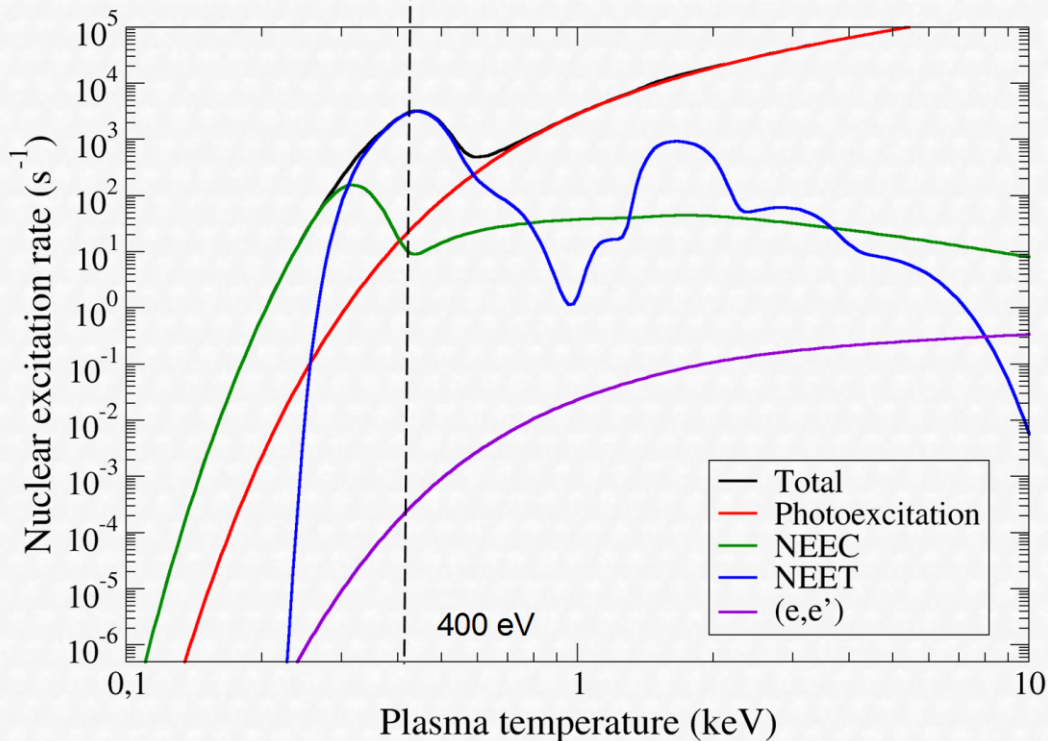


Schéma de niveaux partiel du  $^{84}\text{Rb}$

# Exemple du $^{84}\text{Rb}$

NEET : pourrait être le processus d'excitation dominant des plasmas où  $T \sim 400\text{eV}$



D. Denis-Petit, thèse université de Bordeaux, 2014  
G. Goslin (CEA/DIF)

par tir :  $0.1 < N_{\text{de-ex}} < 80$   
par jour :  $18 < N_{\text{de-ex}} < 14200$

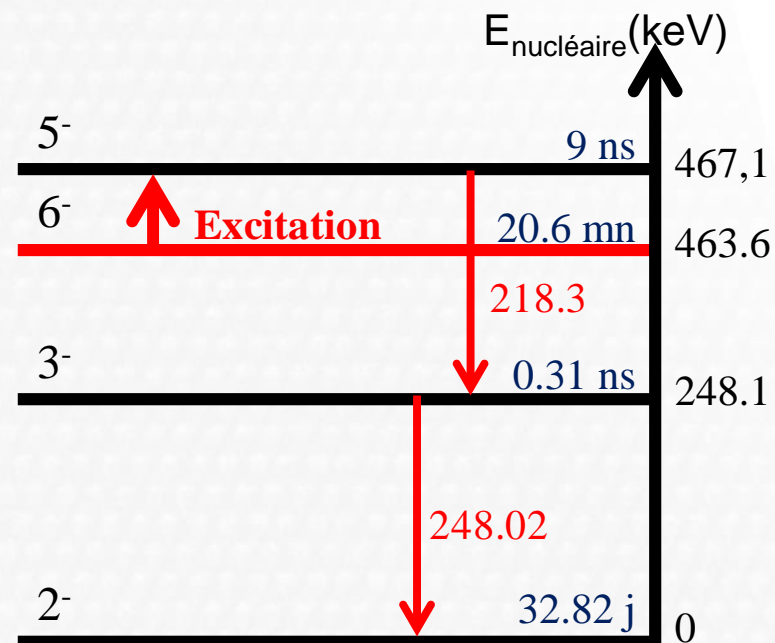
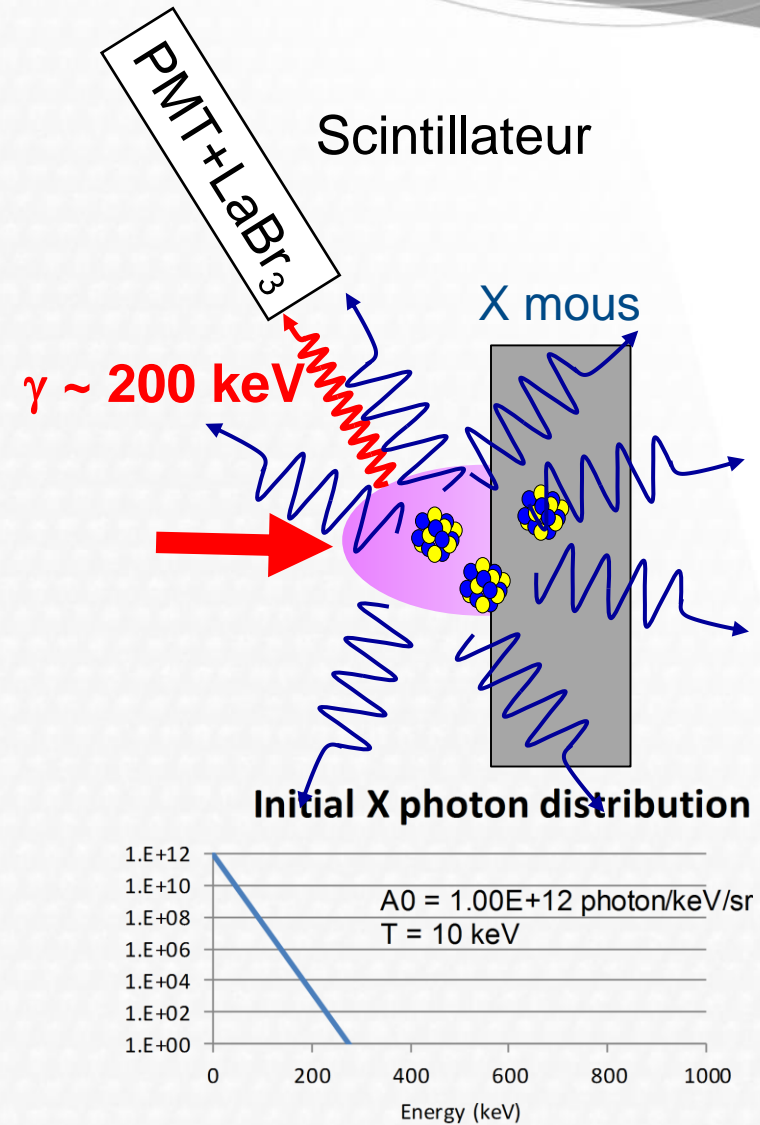


Schéma de niveaux partiel du  $^{84}\text{Rb}$

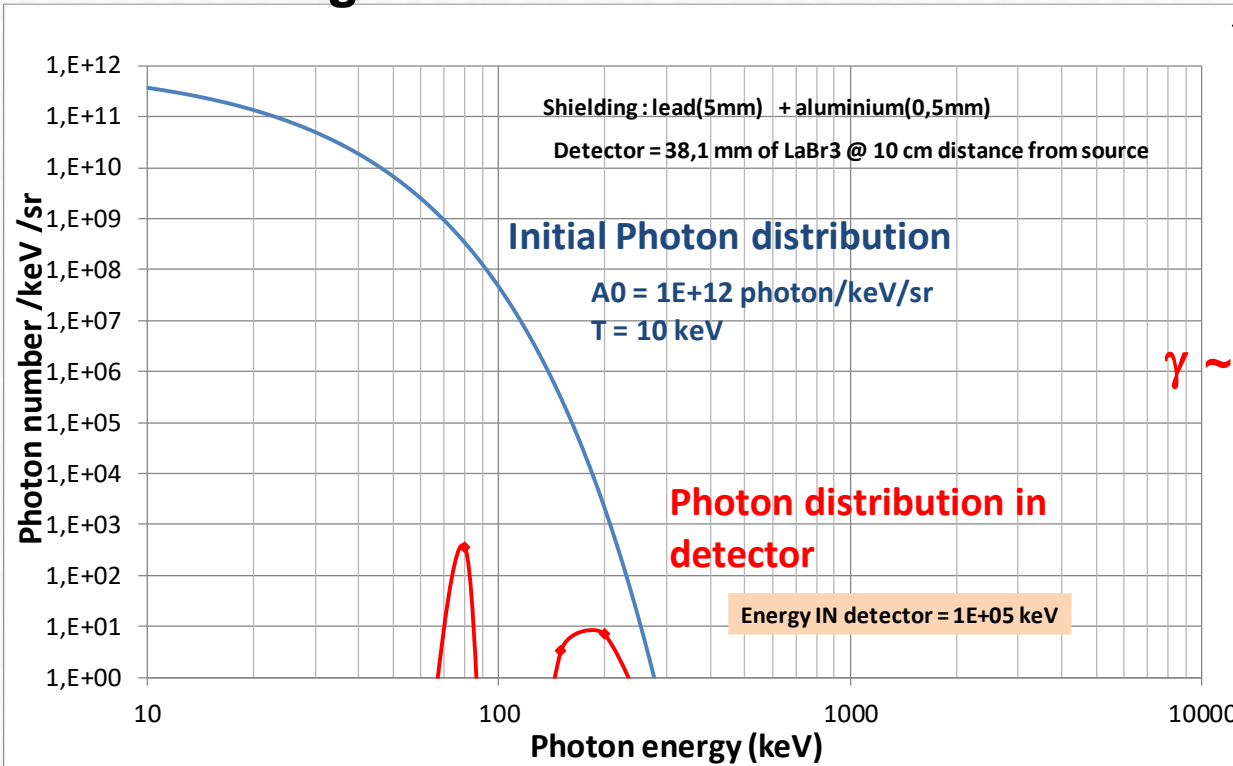
Avantage de détecter  $\gamma \sim 200\text{keV}$   
dans un plasma  $T \sim 400\text{eV}$  ????

# Spectroscopie $\gamma$ et tir laser



# Spectroscopie $\gamma$ et tir laser

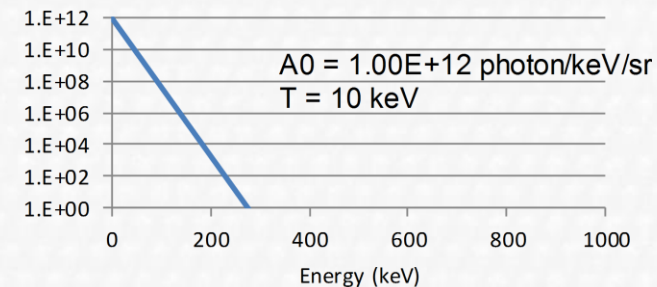
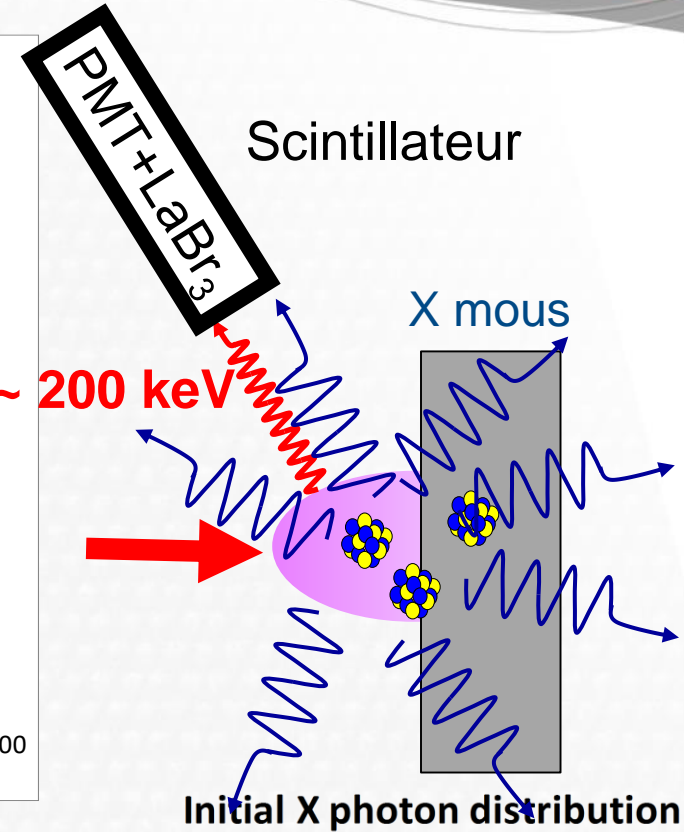
## Blindage



100 MeV de dépôt d'énergie dans le détecteur à travers le blindage

Un trou de 10 $\mu$ m de diamètre @ 10 cm  $\rightarrow$  800 MeV d'énergie déposée

Il faut un blindage hermétique... mais il faut aussi détecter

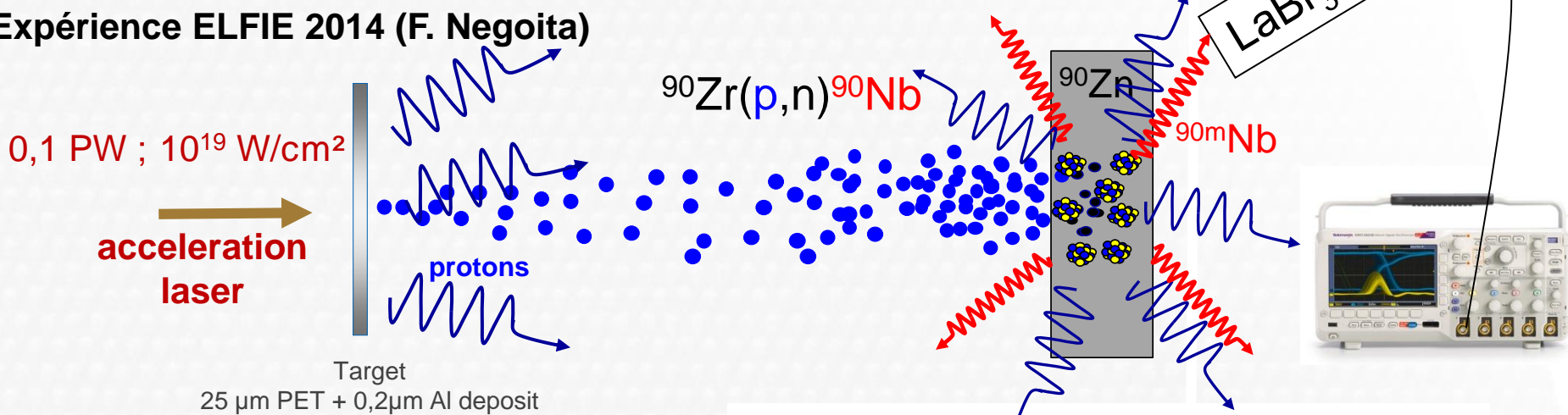




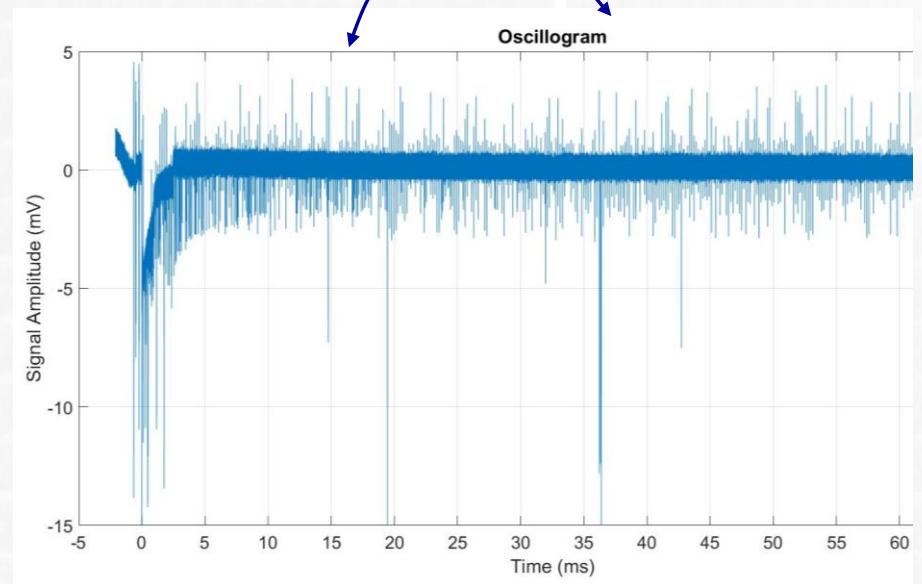
# Spectroscopie $\gamma$ et tir laser

## Alternative: un détecteur rapide

Expérience ELFIE 2014 (F. Negoita)



Emitted gamma ray energy	Half life
122.37 keV	63 $\mu$ s
257.34 keV	6.19 ms



F. Negoita, et al. AIP Conference Proceedings 1645, 228 (2015)

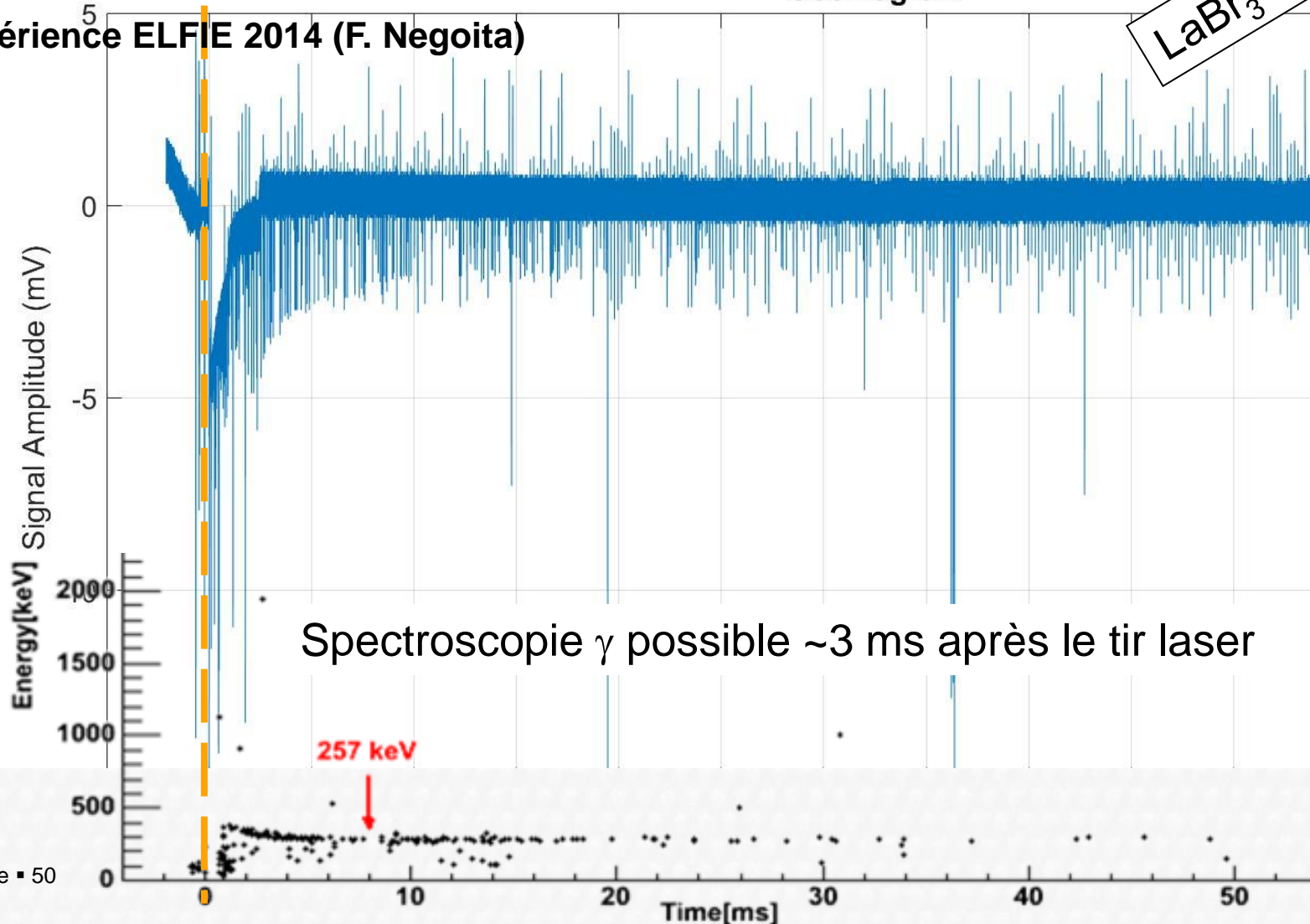
# Spectroscopie $\gamma$ et tir laser

F.Negoita et al., AIP Conference Proceedings 1645, 228 (2015)

Oscillogram

Expérience ELFIE 2014 (F. Negoita)

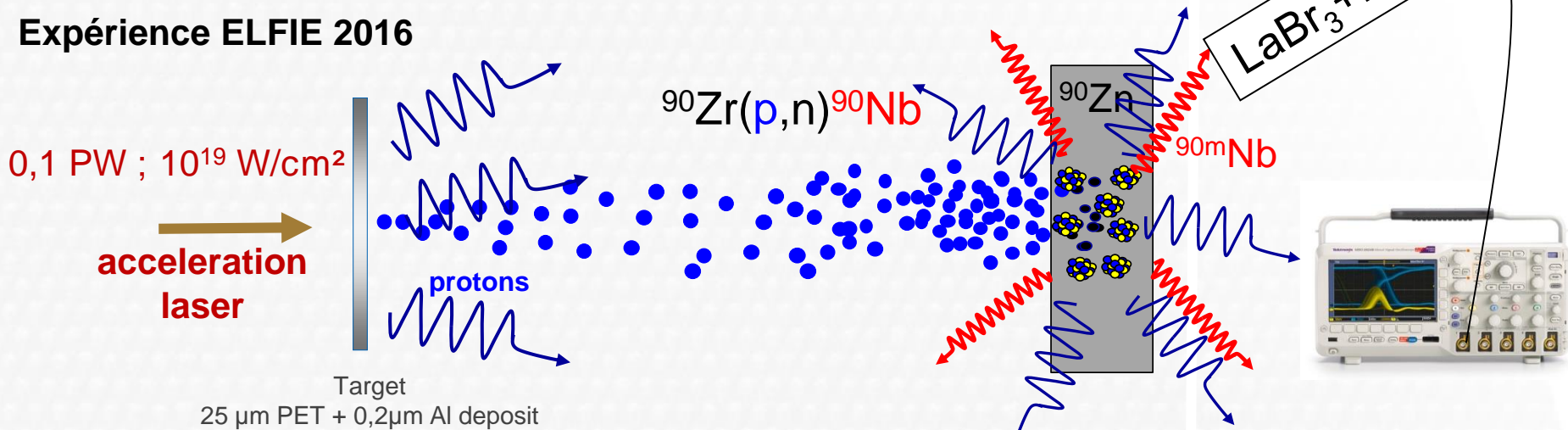
LaBr<sub>3</sub>+PMT



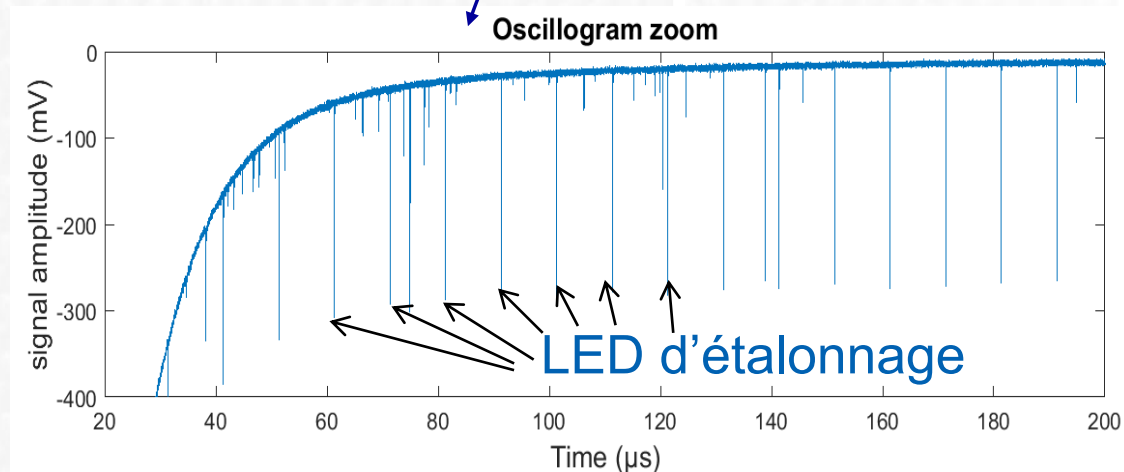
# Spectroscopie $\gamma$ et tir laser

## Alternative: un détecteur rapide

Expérience ELFIE 2016

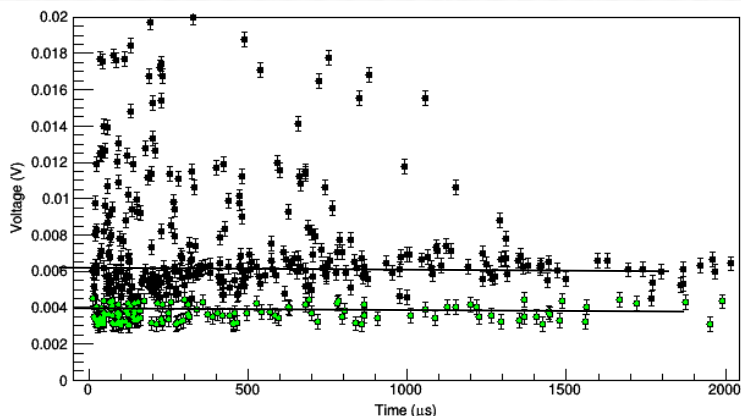


Emitted gamma ray energy	Half life
122.37 keV	63 $\mu$ s
257.34 keV	6.19 ms

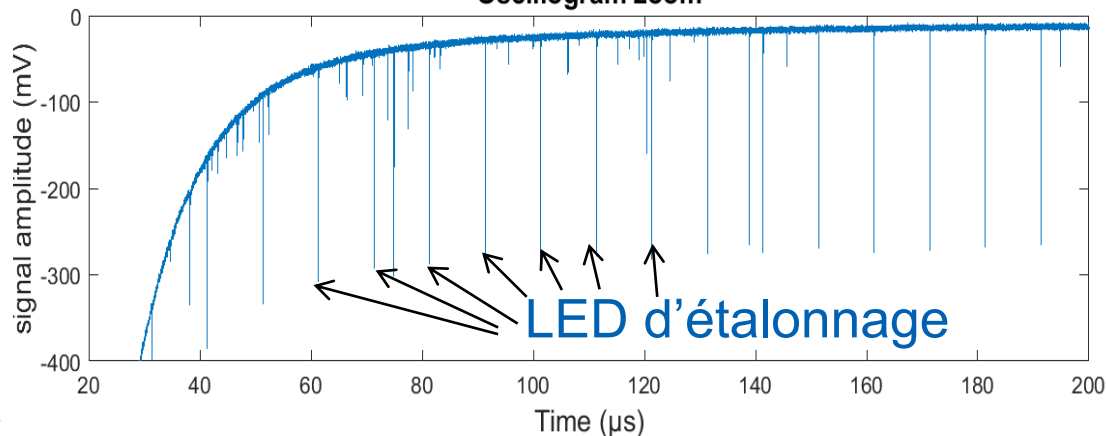
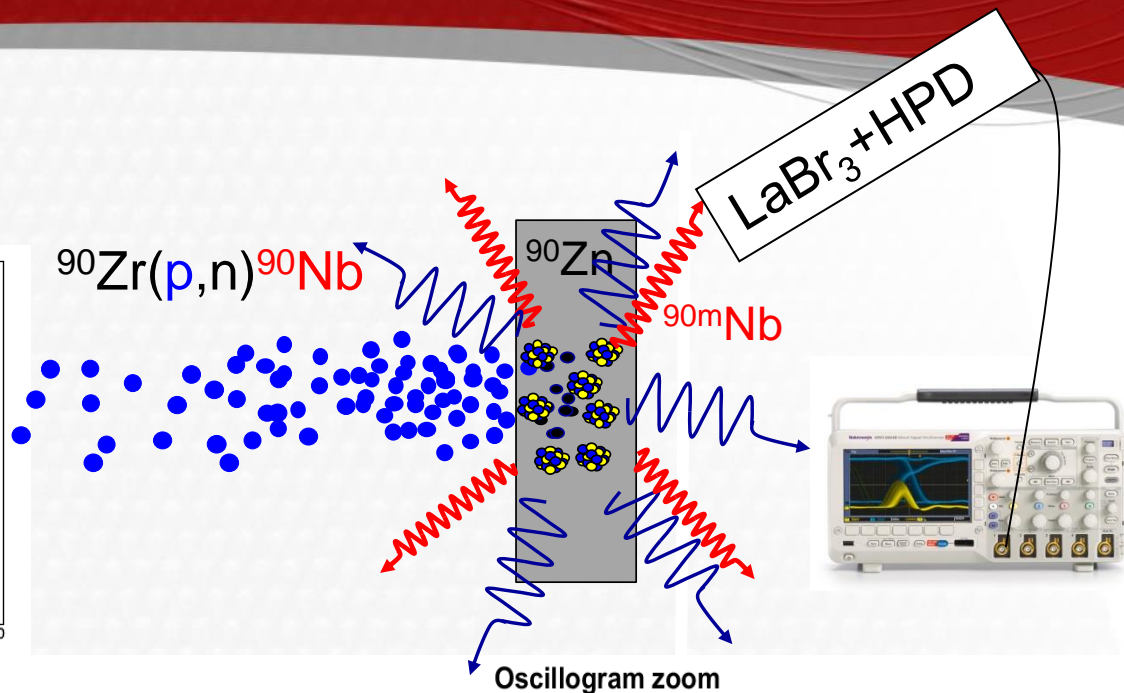
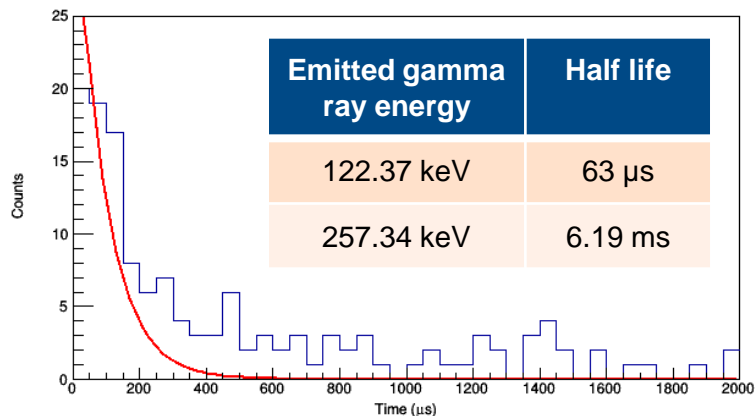


# Spectroscopie $\gamma$ et tir laser

## Expérience ELFIE 2016



Decay



# Conclusion

## Utilisation des lasers de puissance pour étudier le noyau en milieu plasma

- pour produire le plasma → études d'excitations nucléaires depuis l'état fondamental.
- pour accélérer les particules → études d'excitations nucléaires depuis des état préalablement excités.
- L'exemple du  $^{84}\text{Rb}$ , une expérience 100% laser

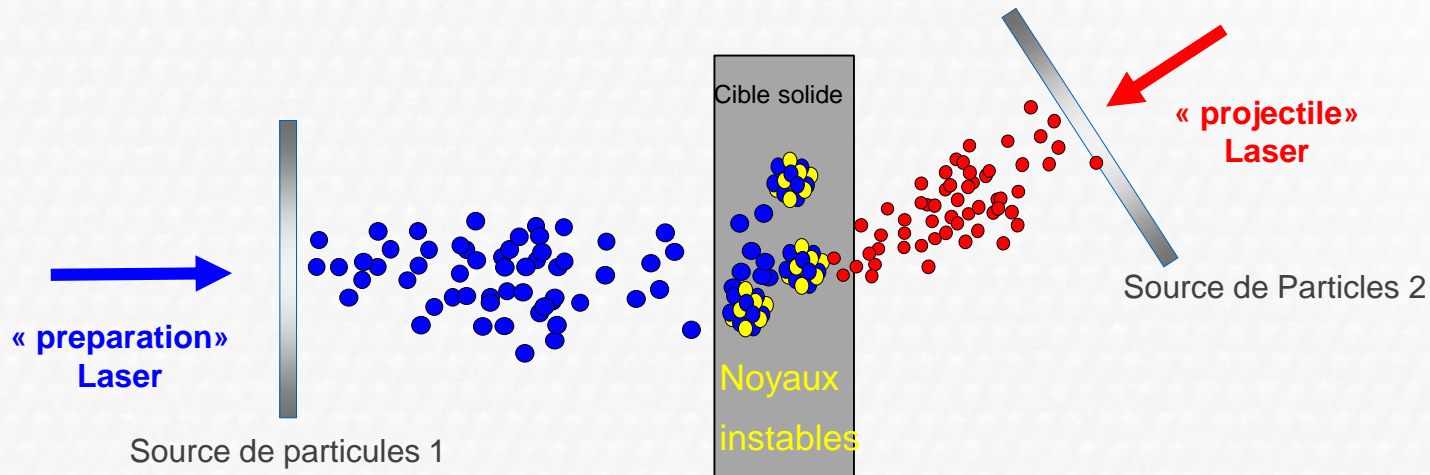
## Des défis à relever

- Produire des hauts flux d'ions à partir de jet de gaz (CSA) :  
*(Connaissances sur les jets de gaz au LAL?)*
- Détecter des observables nucléaires en environnement laser :  
*(cherchons des informations en HPD, scintillateurs plastiques, commutation rapide de hautes tensions, numérisation 14 bits?)*

# Ouverture de nouvelles voies pour la physique nucléaire?

- Réactions nucléaires sur des noyaux radioactifs et/ou excités

➔  $10^{13}$  protons par paquet de  $\sim$  ns (1,6 kA)



Petit calcul avant la fin du séminaire :

$10^{21}$  noyaux/cm<sup>2</sup> ×  $10^{13}$  particules sur un spot  $\varnothing$  100 $\mu$ m × section efficace: 0,1 barn

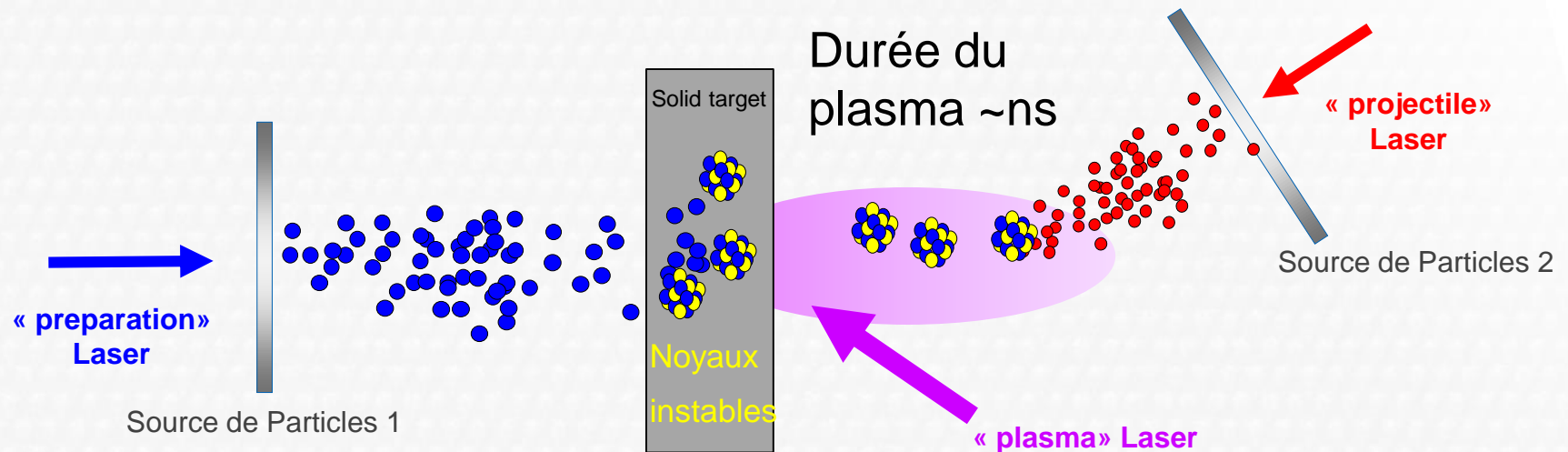
→  $10^{13}$  /cm<sup>2</sup> **cibles secondaires** ×  $10^{13}$  projectiles → 10 réactions/tir laser

@1tir/min ↔ 14 400 réactions /jour

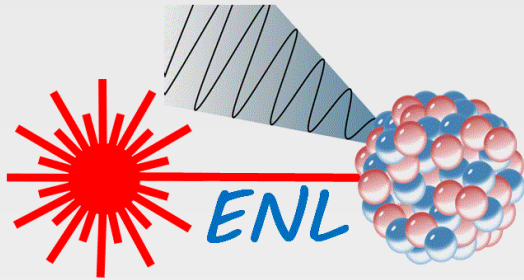
@10 Hz ↔  $6,64 \cdot 10^6$  réactions/jour

# Ouverture de nouvelles voies pour la physique nucléaire?

- Expériences sur des réactions nucléaires en milieu plasma
- Comportement du noyau en milieu extrême (champs électromagnétiques très intenses)



**Prochainement possible grâce aux lasers à hauts taux de répétition**



<http://www.cenbg.in2p3.fr/-Excitations-Nucleaires-par-Laser-?lang=fr>

Merci pour votre attention