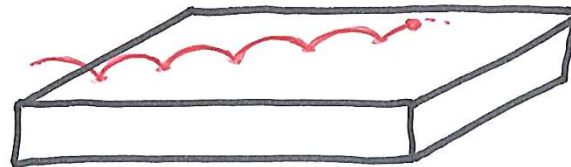


Gravitation en laboratoire

Quelques exemples d'expériences



Benoit Clément

Université Grenoble Alpes

Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie

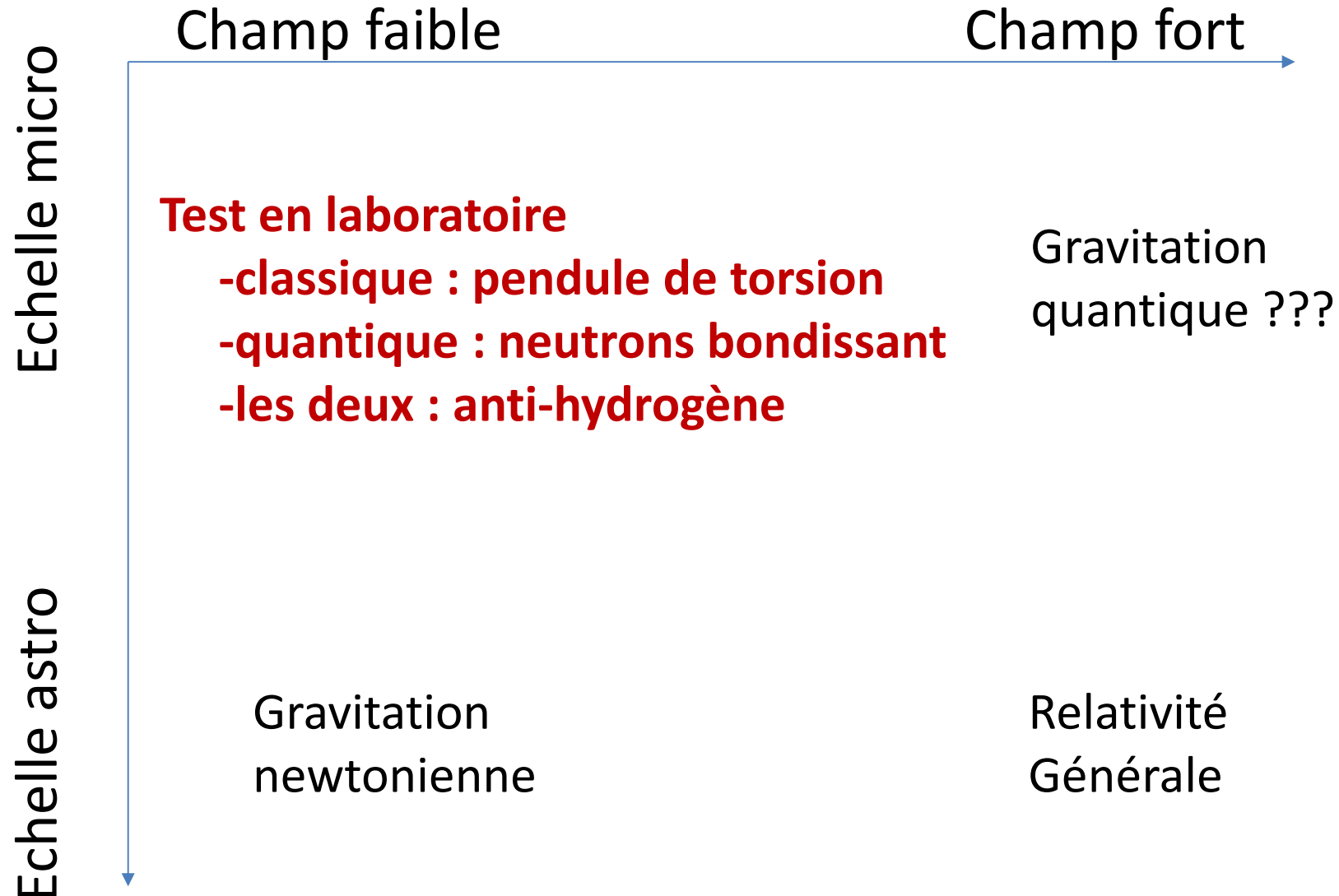
1. Motivations

2. Les balances de torsions

3. Neutrons bondissant

4. Antihydrogène

La Gravitation



Universalité de la chute libre



David Scott sur la lune en 1971(Apollo 15)

Les masses

Masse grave m_g : « charge » de l'interaction gravitationnelle : $\vec{F} = \frac{Gm_{g1}m_{g2}}{r_{12}^2}$, $V = m_g g z$

Masse inertielle m_i : invariance de Lorentz, énergie cinétique : $E_k = \frac{m_i v^2}{2}$, $m_i^2 c^4 = E^2 - p^2 c^2$

Relativité générale :

Il est impossible de différencier la pesanteur de la chute libre dans un référentiel inertiel

$$m_i = m_g$$

Principe d'équivalence faible

Conséquence : on ne peut pas mesurer la masse d'un objet qui tombe

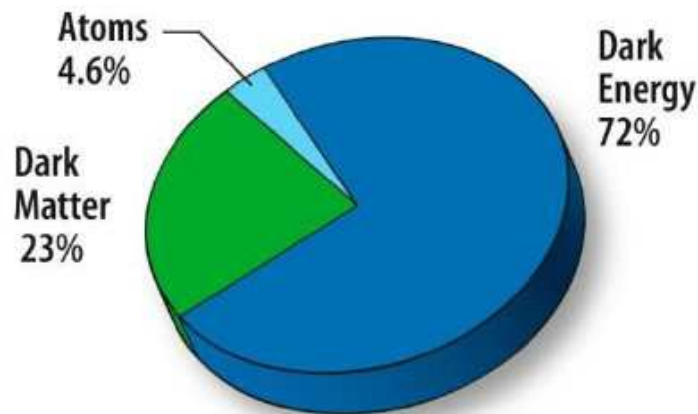
La masse est indépendante de la composition d'un objet

Interprétation des résultats

Si une violation du principe d'équivalence faible est observée :

- soit ce principe est faux :
- soit les forces sont mal estimées :
 - modification de la gravité à courte portée
 - 5^{ème} force, type « Yukawa » : $V = \alpha e^{-\frac{x}{r}}$

A quelle échelle ?



Densité d'énergie noire:

$$\rho = 3.8 \text{ keV}/\text{cm}^3$$

$$\lambda = \left(\frac{\hbar c}{\rho}\right)^{1/4} \approx 82 \mu\text{m}$$

Comment aller sonder à des échelles plus petite ?

Modèle Caméléon

[Khoury & Weltman PRD 69 (2004)]

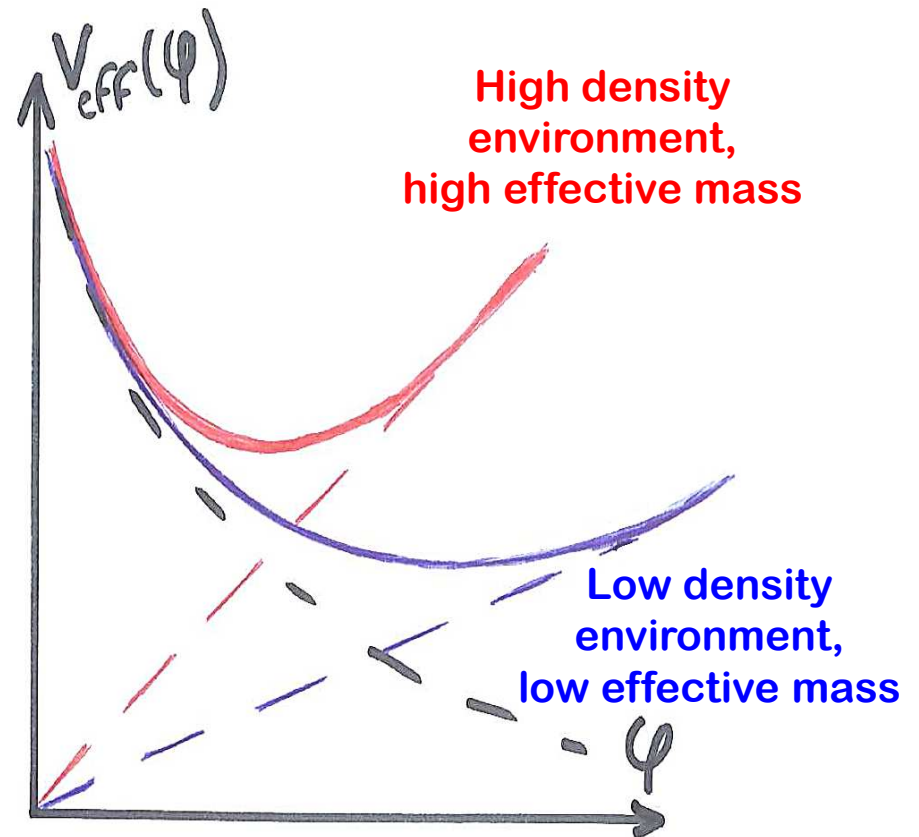


$$\varphi(z) \approx \frac{m_n}{M_{pl}} \Lambda \left(\frac{\Lambda z}{\hbar c} \right)^{2/(2+n)}$$

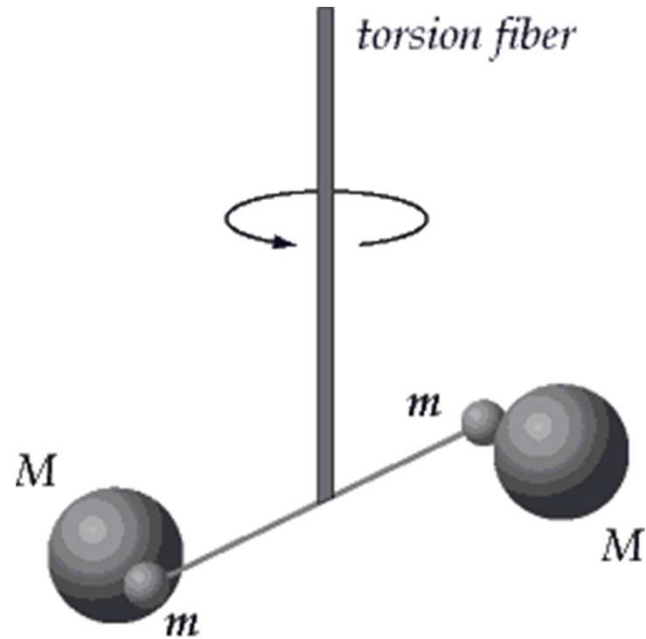
$$\frac{\hbar c}{\Lambda} = 82 \mu m$$

Modèle d'énergie sombre :
nouvelle force

- couplage faible dans les milieux denses
- couplage fort dans le vide



L'expérience de Cavendish (1798)



Balance de torsion :

Système rigide suspendu à un fil
Déviation angulaire : bilan des forces/accélérations transverses non nul

Masses M source, fixes

Masses m sonde, mobile dans le plan

A l'équilibre :

compensation en torsion et gravité :

Petites fluctuations :

oscillations amorties

Position d'équilibre + période d'oscillation => Mesure de G

Masses de 10kg et 100g séparées de 20 cm, fil de Tungstène de 50 um : $\theta_{eq} = 10\text{mrad}$

$$\theta_{eq} = \frac{GM}{Ld^2\omega^2} \quad \omega^2 = \frac{C}{2mL^2} - \frac{2GM}{d^3}$$

Première mesure par Cavendish en **1798** : $G = 6.75 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2\text{kg}^{-2}$

Aujourd'hui (PDG) $G = 6.67408 (31) \times 10^{-11} \text{ Nm}^2\text{kg}^{-2}$

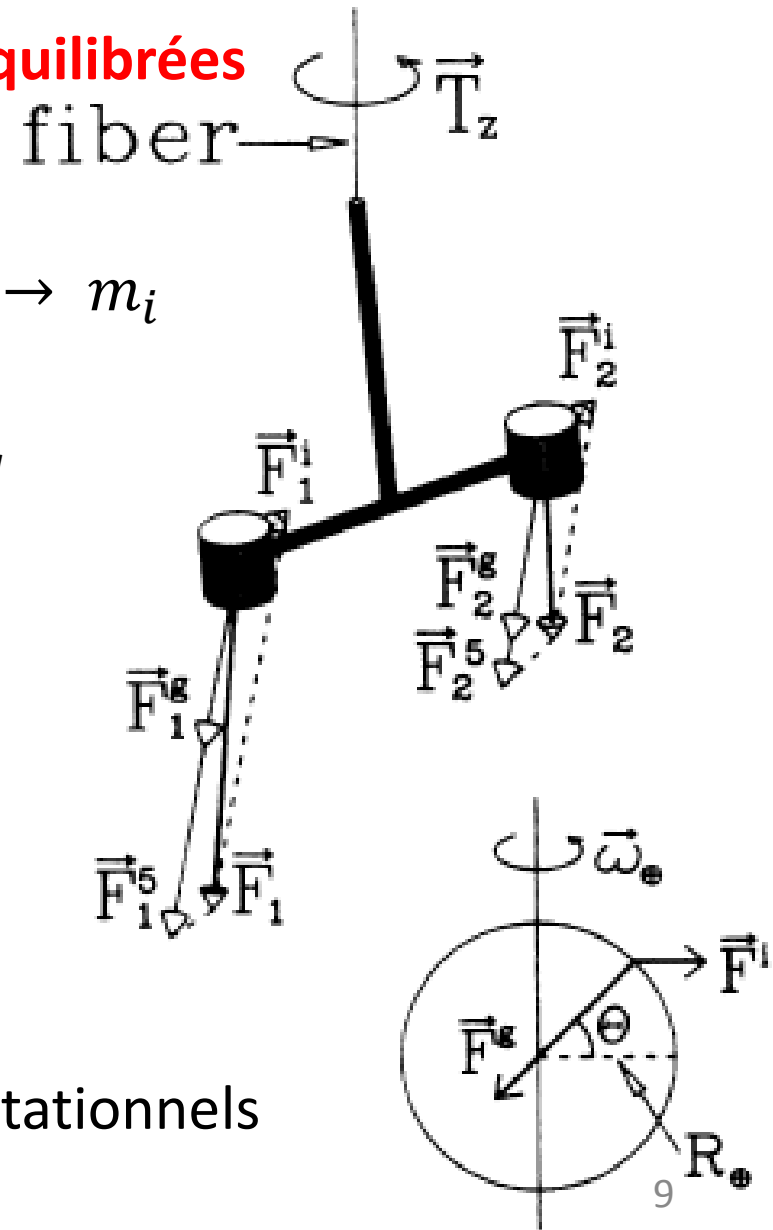
Rem : précision actuelle $\frac{\Delta G}{G} \approx 5 \times 10^{-5}$

L'expérience d'Eötvös (1885-90)

Balance de torsion avec deux masses équilibrées

- force centrifuge (rotation de la terre) $\rightarrow m_i$
- champ de pesanteur terrestre : $\rightarrow m_g$

Couple de torsion si $\left(\frac{m_i}{m_g}\right)_1 \neq \left(\frac{m_i}{m_g}\right)_2$

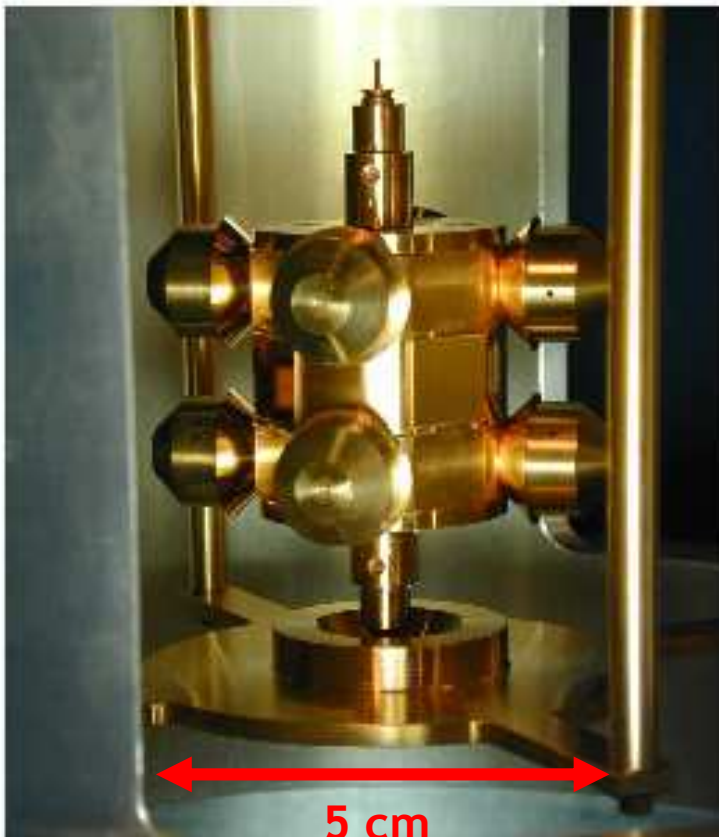


Sensibilité limitée par les gradients gravitationnels

Version améliorée

Depuis 1980 : expérience Eöt-Wash (CENPA/University of Washington)

Améliorer la symétrie du dispositif pour réduire les effets multipolaires



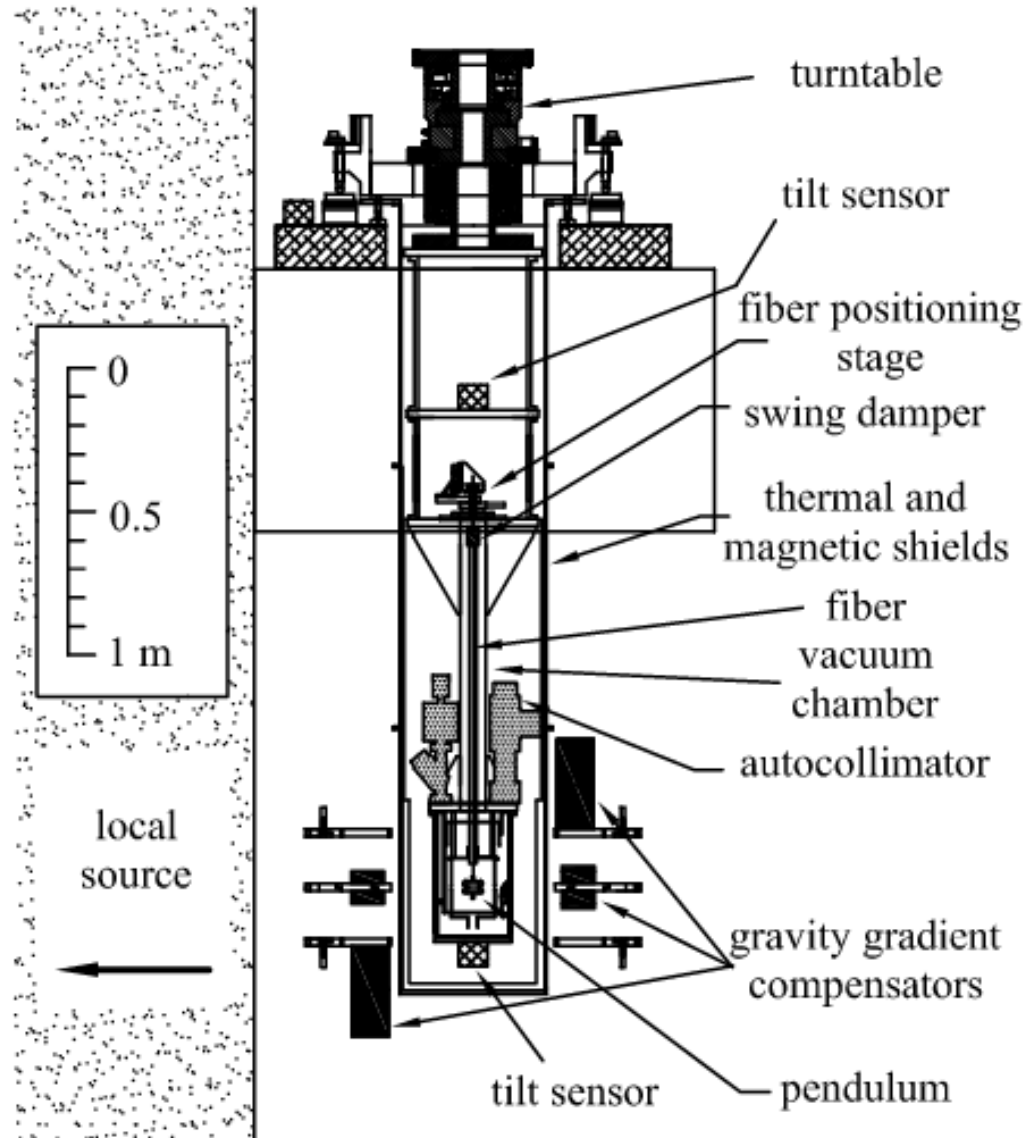
Fil de tungstène de $20\mu\text{m}$, 1m de long

8 masses tests de 4.84 g (4 Be & 4 Ti)
ou (4 Be & 4 Al)

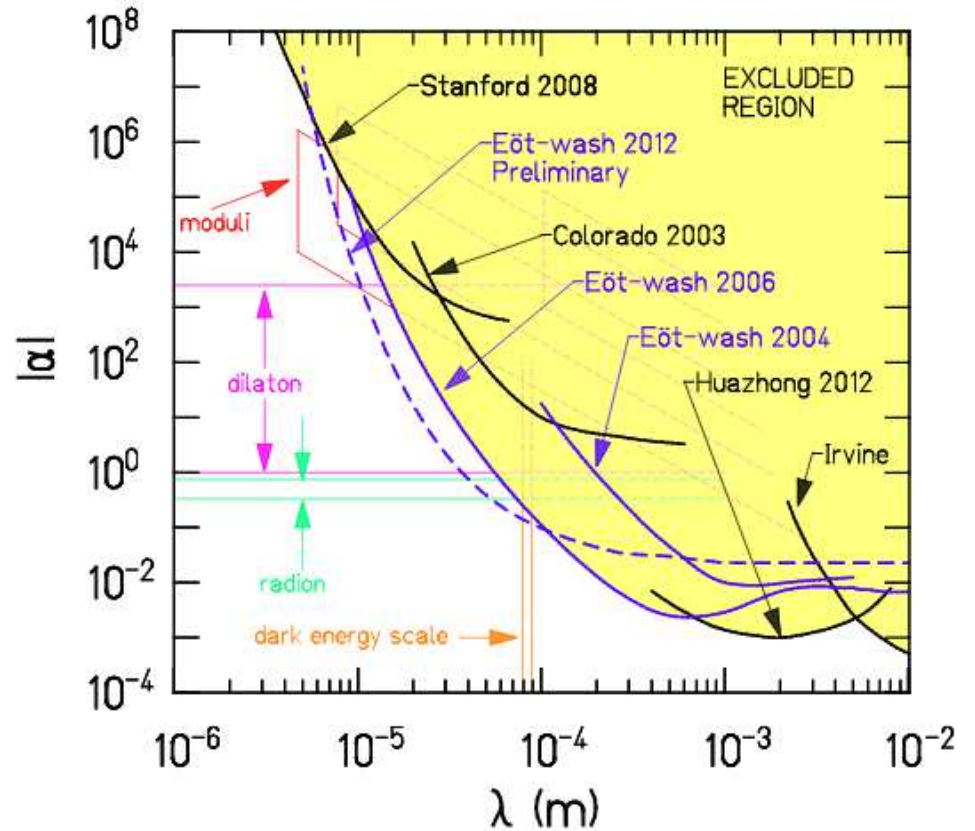
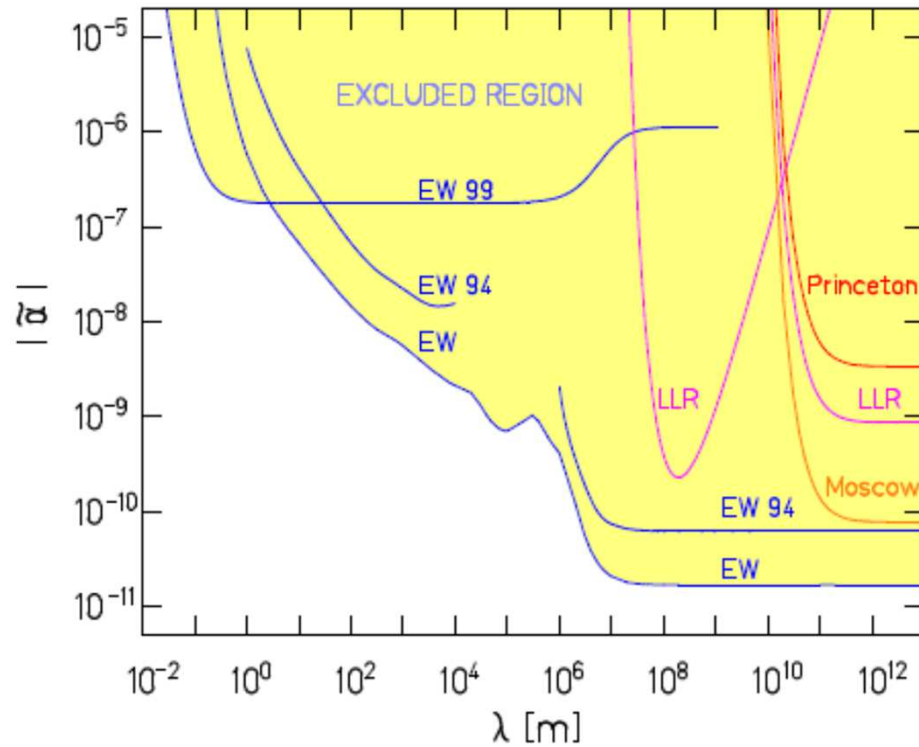
Miroirs+Laser pour mesurer le couple

Aujourd'hui (2012) $\frac{m_g}{m_i} - 1 < 10^{-12}$

Environnement contrôlé



Forces de Yukawa



Source(s) de la force de Yukawa

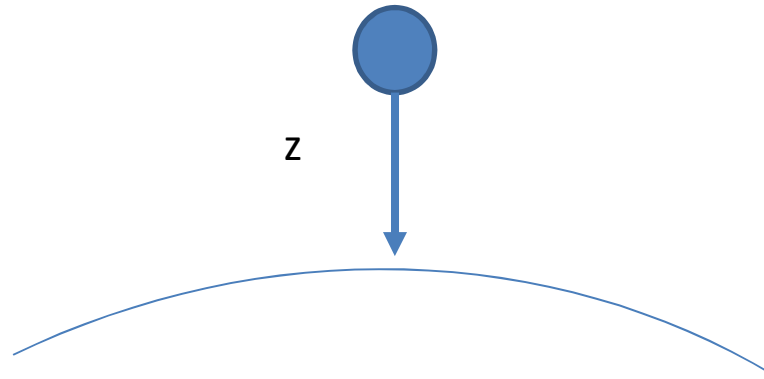
0.5m < λ < 5m le labo lui même (murs, équipement)

1m < λ < 50km topographie

5km < λ < 1000km Variations de densité de la croûte terrestre

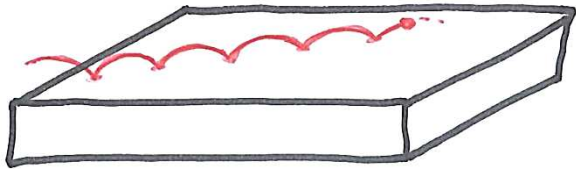
1000km < λ < 10000km Modèle de la terre PREM

Chute libre classique



$$m_i \vec{a} = m_g \vec{g} \Rightarrow \ddot{z} = \frac{m_g}{m_i} g$$

Chute libre quantique



Pour un **état lié dans un potentiel vertical**

$$\text{Equation de Schrödinger : } \left(\frac{\hbar^2}{2m_i} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + m_g g z \right) \psi = E \psi$$

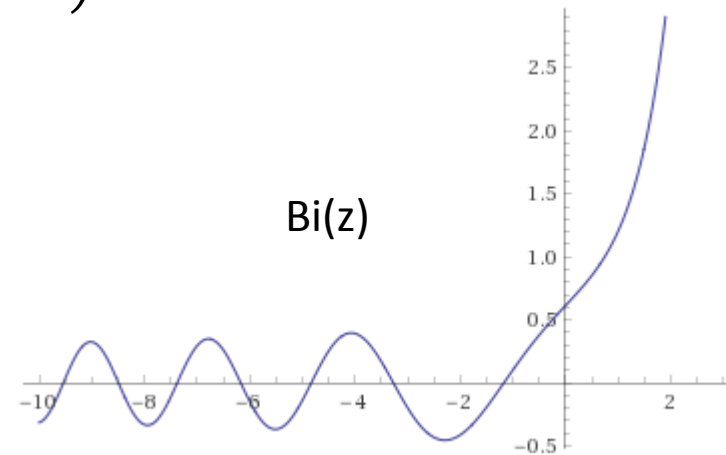
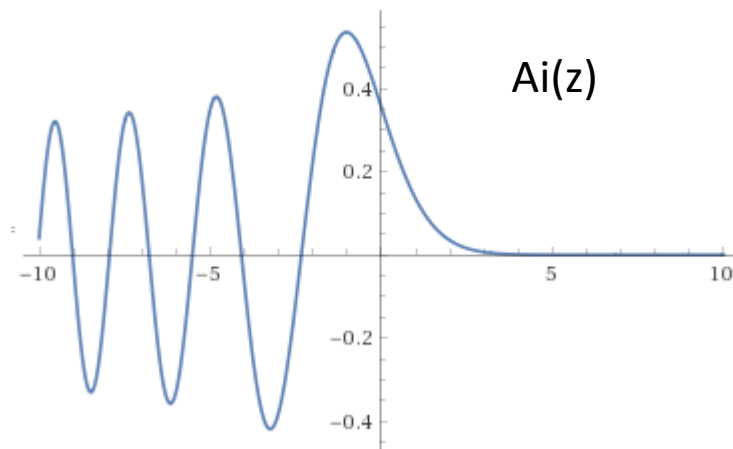
$$\text{On pose } z_0 = \left(\frac{\hbar^2}{2m_i m_g g} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$\epsilon = \frac{E}{m_g g z_0}$$

$$Z = \frac{z}{z_0} - \epsilon$$

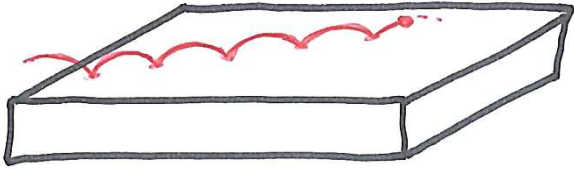
l'équation de Schrödinger devient : $\left(\frac{\partial^2}{\partial Z^2} + Z \right) \psi = 0$

→ **équation d'Airy**



$$\psi(z) = K_a Ai \left(\frac{z}{z_0} - \epsilon \right) + K_b Bi \left(\frac{z}{z_0} - \epsilon \right)$$

Rebond quantique

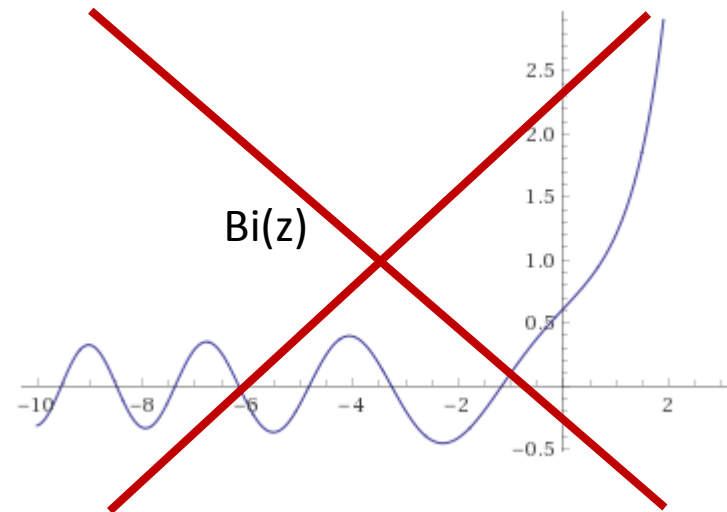
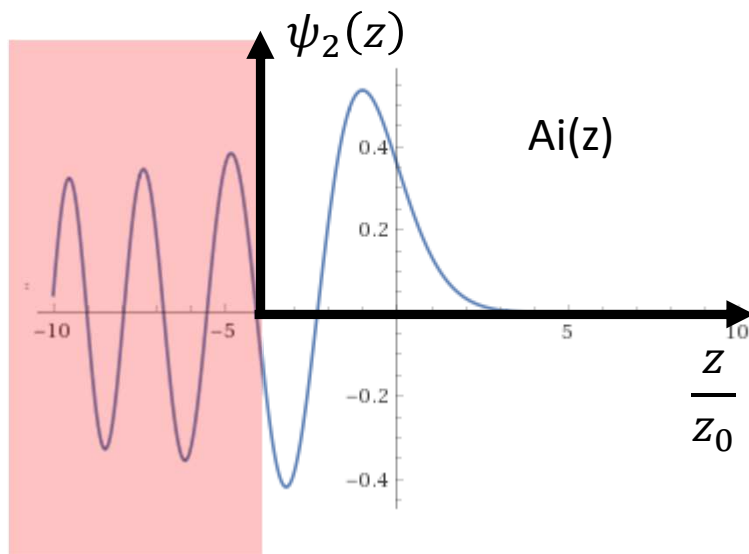


Rebond sur un miroir : les conditions aux limites quantifient les énergies E_k

$$\psi(z) = C_a Ai\left(\frac{z}{z_0} - \epsilon_k\right) + C_b Bi\left(\frac{z}{z_0} - \epsilon_k\right)$$

$$\psi(z < 0) = 0, \quad \int_0^{+\infty} \psi(z) dz = 1 \Rightarrow \lim_{z \rightarrow \infty} \psi(z) = 0 \Rightarrow \mathbf{K_b = 0}$$

$\psi(0) = 0 \Rightarrow Ai(-\epsilon_k) = 0$: Energies sont données par les zero de la fonction d'Airy ξ_k

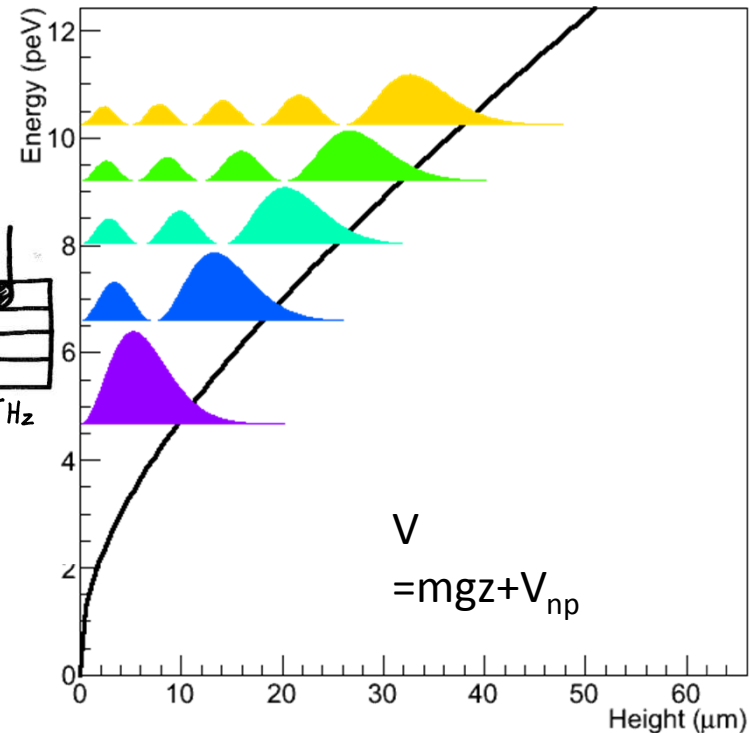
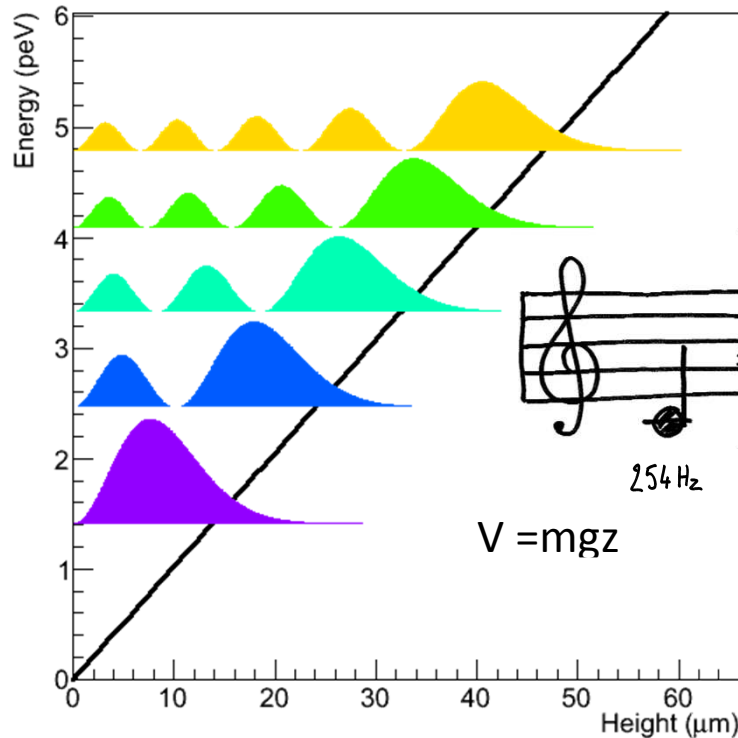


$$\psi_k(z) = C_k Ai\left(\frac{z}{z_0} + \xi_k\right)$$

Application au neutron

$$E_0 = mgz_0 = 0.602 \text{ peV}$$

$$z_0 = \left(\frac{\hbar^2}{2m^2g} \right)^{\frac{1}{3}} = 5.87 \text{ } \mu\text{m},$$



Deux types d'observables :

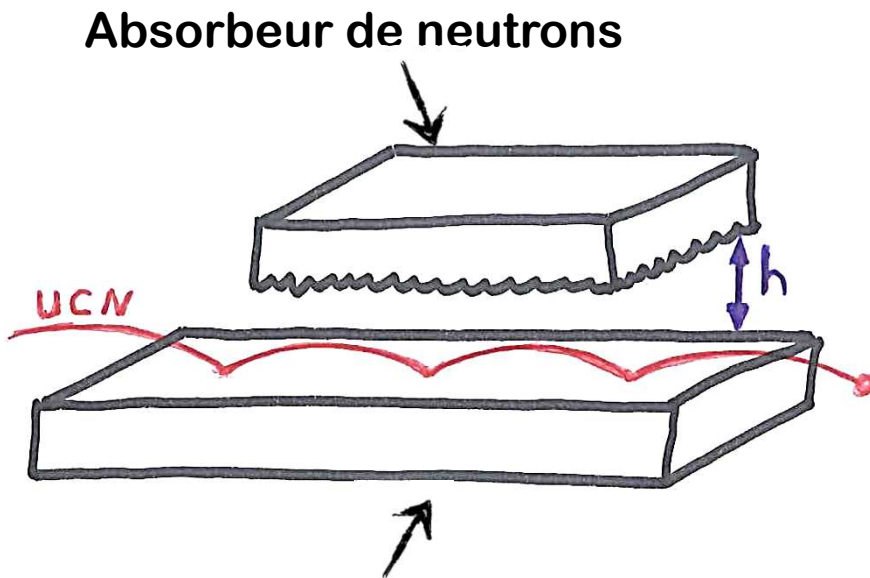
Energies quantifiées : GRANIT mesure les transitions entre niveaux

Fonction d'onde : forme, position des noeuds.

Découverte des états quantiques

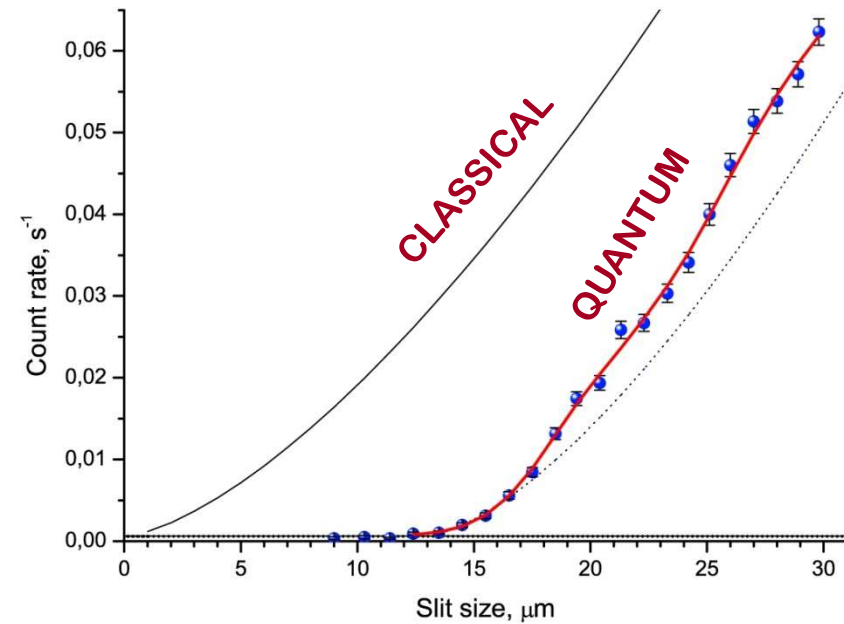
[Nesvizhevsky *et al* Nature 415 (2002)]

[Nesvizhevsky *et al* EPJC 40 (2005)]



Miroir (verre),

Longueur 10 cm



$$z_1^{\text{exp}} = 12.2 \pm 1.8_{\text{sys}} \pm 0.7_{\text{stat}} \mu\text{m}$$

$$z_1^{\text{q.c.}} = \frac{3}{2} \langle 1|z|1 \rangle = 13.7 \mu\text{m}$$

Violation de l'universalité de la chute libre

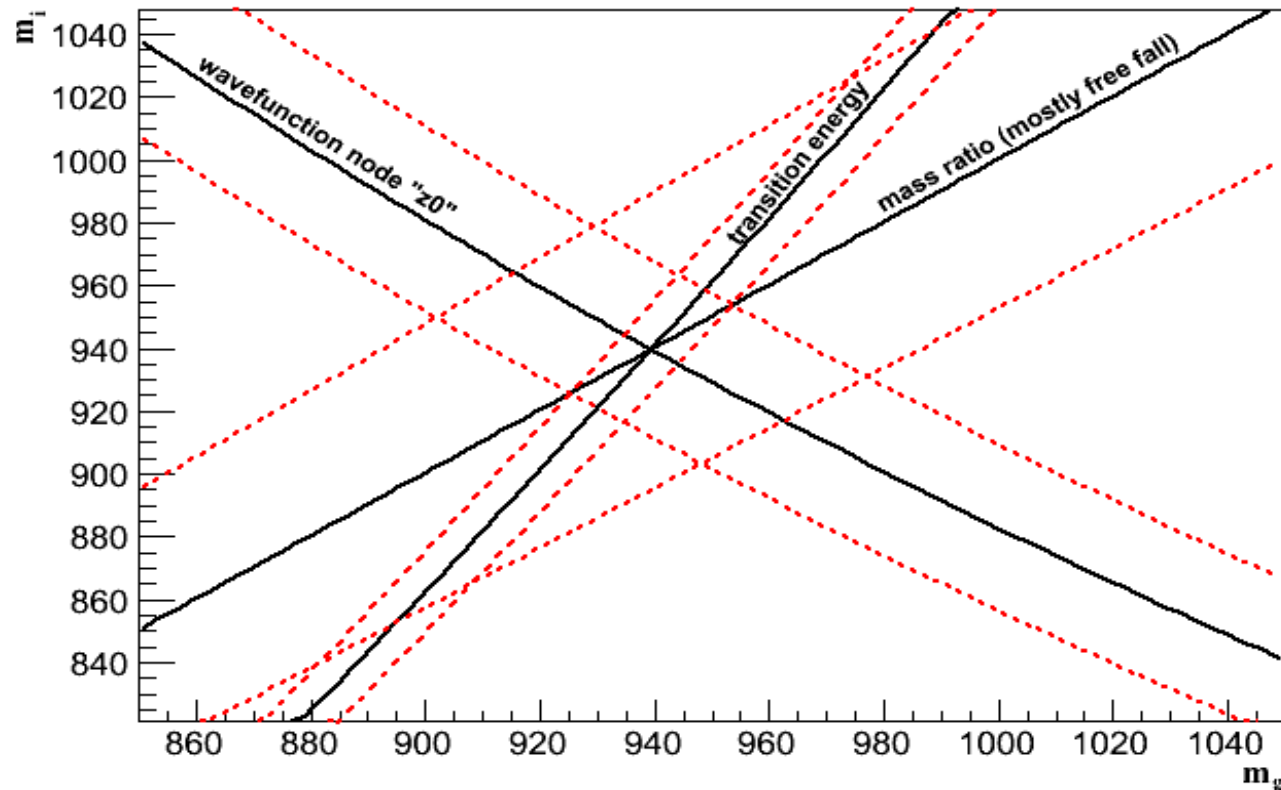
Extension de la fonction d'onde :

$$z_0 \sim \left(\frac{1}{m_i m_g} \right)^{1/3}$$

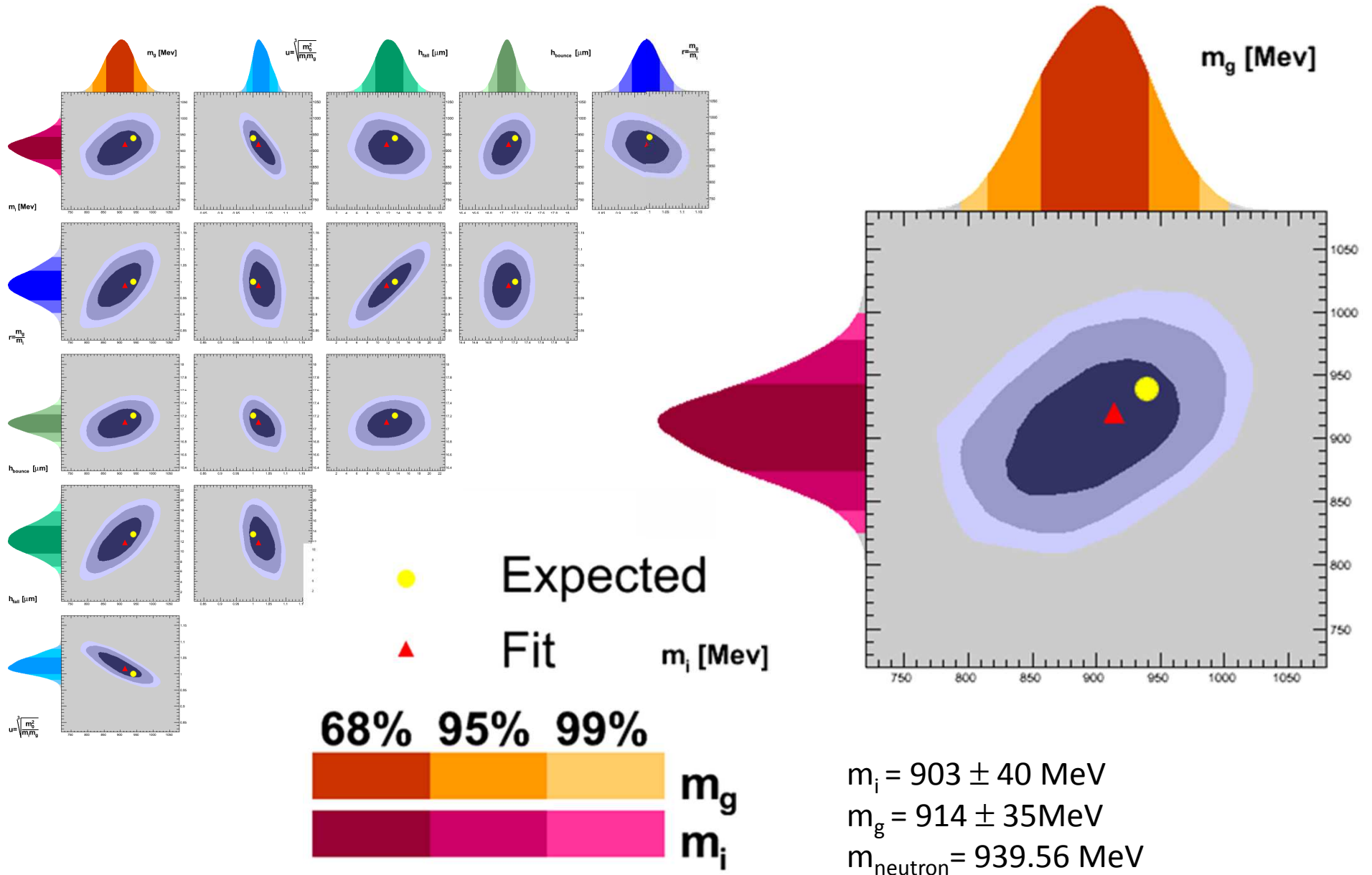
Niveaux d'énergie :

$$E_0 \sim \left(\frac{m_g^2}{m_i} \right)^{1/3}$$

On peut mesurer la masse d'un neutron en le regardant tomber !

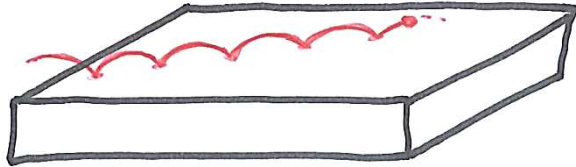


Masse inertielle vs Masse grave



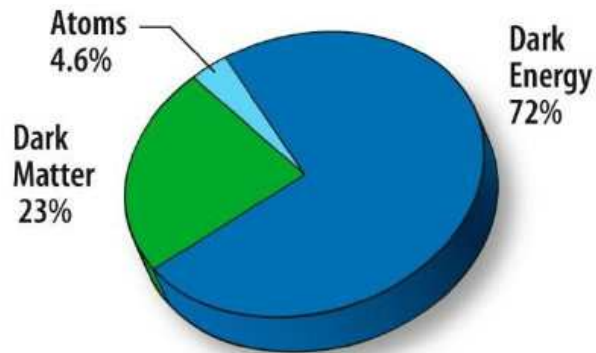
Forces de courte portée

Interaction de portée micrométrique



Dilatation du spectre en énergie

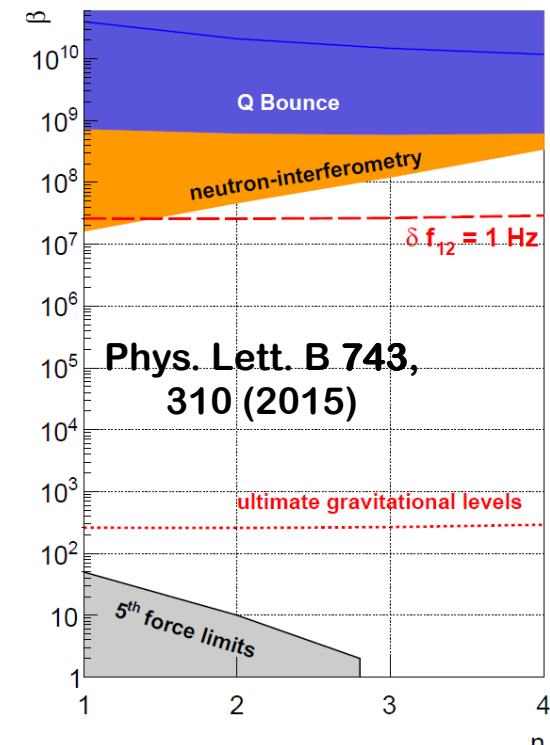
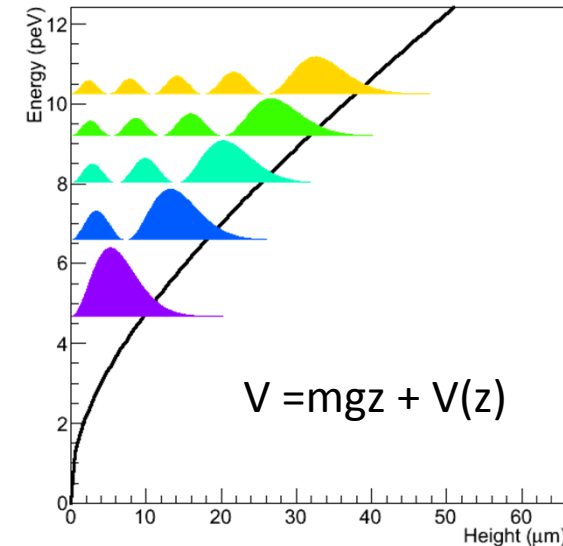
Contraction des fonctions d'onde :



Exemple : modèles caméléon

$$\varphi(z) \approx \frac{m_n}{M_{pl}} \Lambda \left(\frac{\Lambda z}{\hbar c} \right)^{\frac{2}{2+n}} \quad \text{with} \quad \frac{\hbar c}{\Lambda} = 82 \mu\text{m}$$

Potentiel : $V(z) = mgz + \beta\varphi(z)$



Potentiel de Fermi

Si $\lambda \gg$ *distance interatomique* : diffusion cohérente sur les noyaux

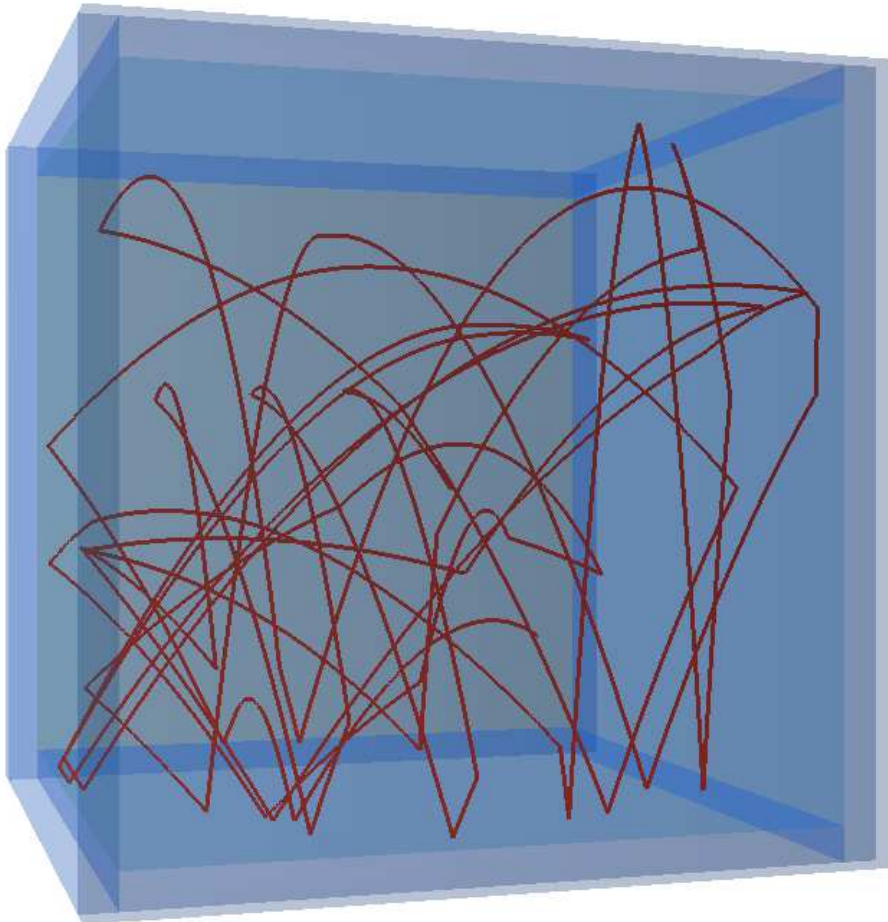
Reflexion si $E_{kin} \cos\theta < V_{fermi}$

Pour $E_{kin} < V_{fermi}$ reflexion à toutes incidences

Material	Fermi potential (neV)	Free path at 100 neV (μm)
Titanium	-50.1	57.1
Boron 10	-6.7	0.04
Helium II	18.5	$+\infty$ (if no ^3He)
Boron 11	225.6	-
Aluminum	54.1	1400
Copper	170.1	-
Fomblin oil	106.5	-
Stainless steel	~ 190	-
Beryllium	250.8	-
BeO	256.5	-

Neutrons ultra froid (UCN)

Neutrons à 4m/s dans une boîte
d'50cm de coté



$E \sim 100\text{-}200 \text{ neV}$
 $v \sim 5\text{-}10 \text{ m/s}$

Il est possible :

de **stocker les UCNs** pendant
plusieurs centaines de sec.

de **guider ces UCN** avec de
simples tuyaux.

Ces UCNs sont sensibles à la
gravité :

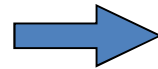
$$m_n g \times (1\text{m}) = 100 \text{ neV}$$

UCN et interactions fondamentales

Les UCN ressentent les 4 interactions faiblement, mais sensiblement

- **L'interaction faible**

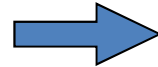
désintégration β en 886 s



Mesurer 886 s

- **L'interaction forte**

Potentiers de Fermi ~ 100 neV

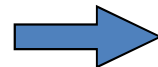


Stockage et guidage des UCN

- **L'électromagnétisme**

Charge 0

B = 1 T induit une séparation Zeeman de ~ 100 neV



Mesurer nEDM = 0

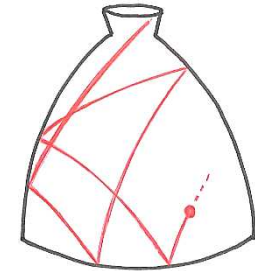
- **La gravité**

le neutron gagne 1 m

gagne ~ 100 neV

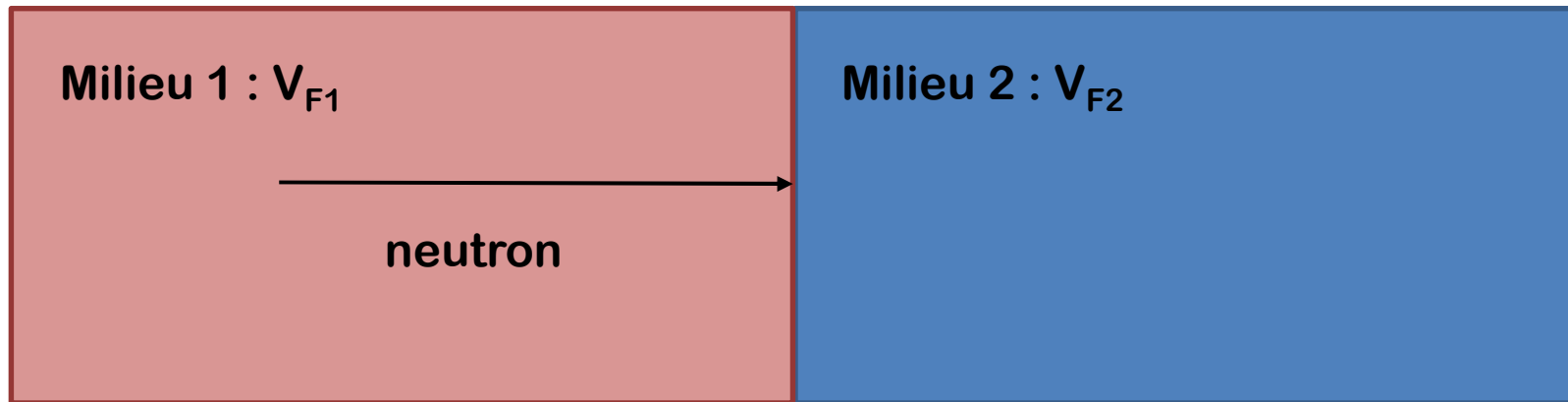


États quantiques de pesanteur



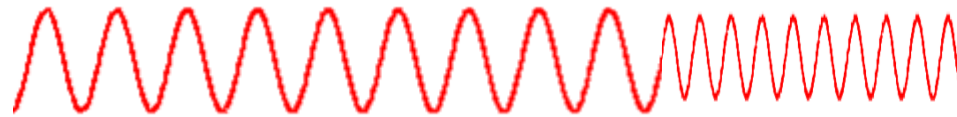
**Modification de la gravité à courte distance ?
Recherche d'une cinquième interaction ?**

Puit et barrière

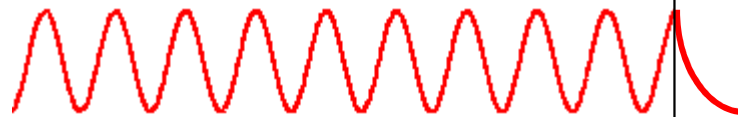


Neutron : onde plane $\exp(ikx)$

Si $k^2/2m = E > V$: onde transmise $\exp(i(k - \sqrt{2mV})x)$ et onde réfléchie



Si $k^2/2m = E < V$: onde réfléchie



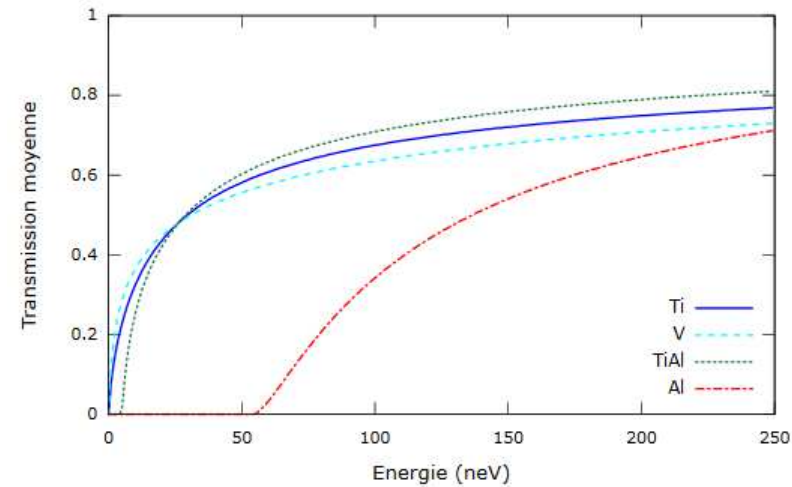
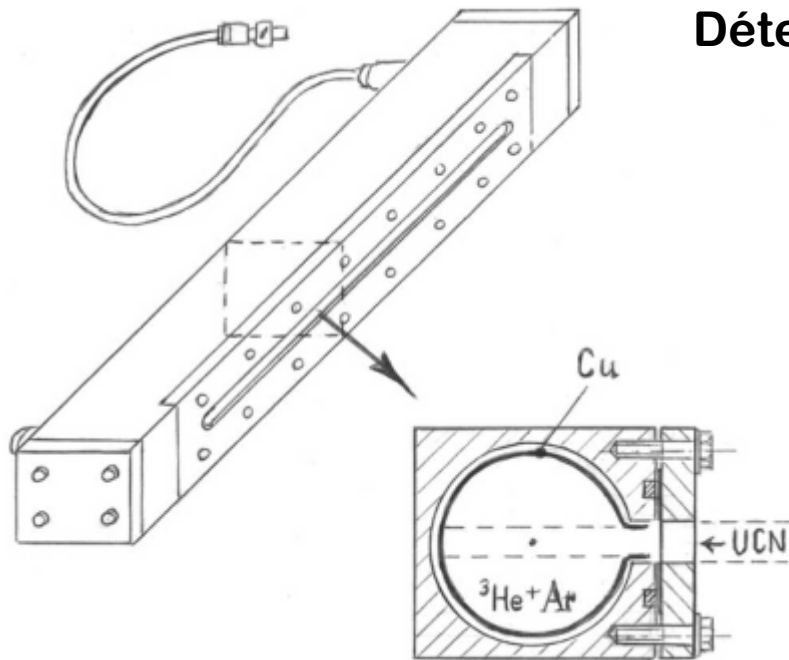
Si section efficace de capture non négligeable : pertes collisionnelles

$$V = V_{F2} - V_{F1}$$

0

Detecter des UCN

Détecteur gazeux : Potentiel de la fenêtre d'entrée

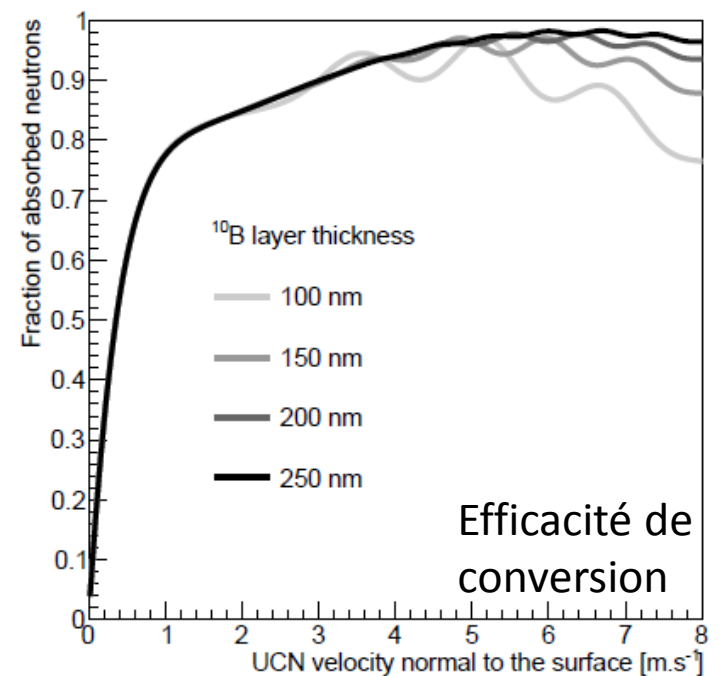


Détecteur solide (Silicium) :
potentiel de la couche de conversion

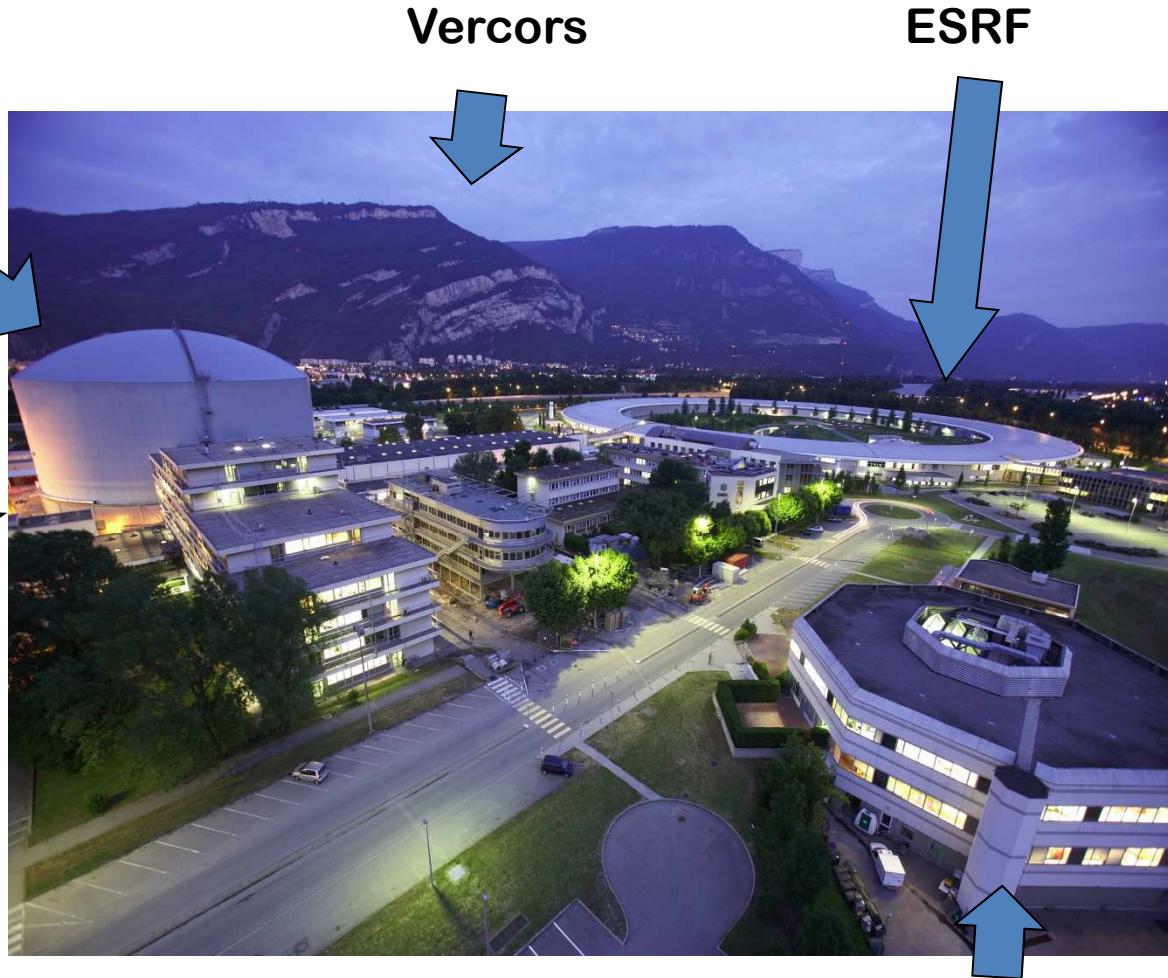
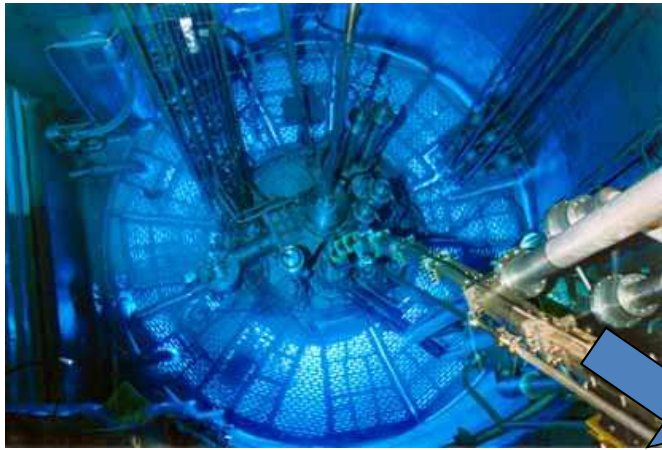
${}^6\text{Li}$: $V_f = 28 \text{ neV}$

${}^{10}\text{B}$: $V_f = -3 \text{ neV}$ (20% de B naturel)

Dépôt directement sur la surface active du
détecteur



Institut Laue-Langevin



Vercors

ESRF

L'ILL :

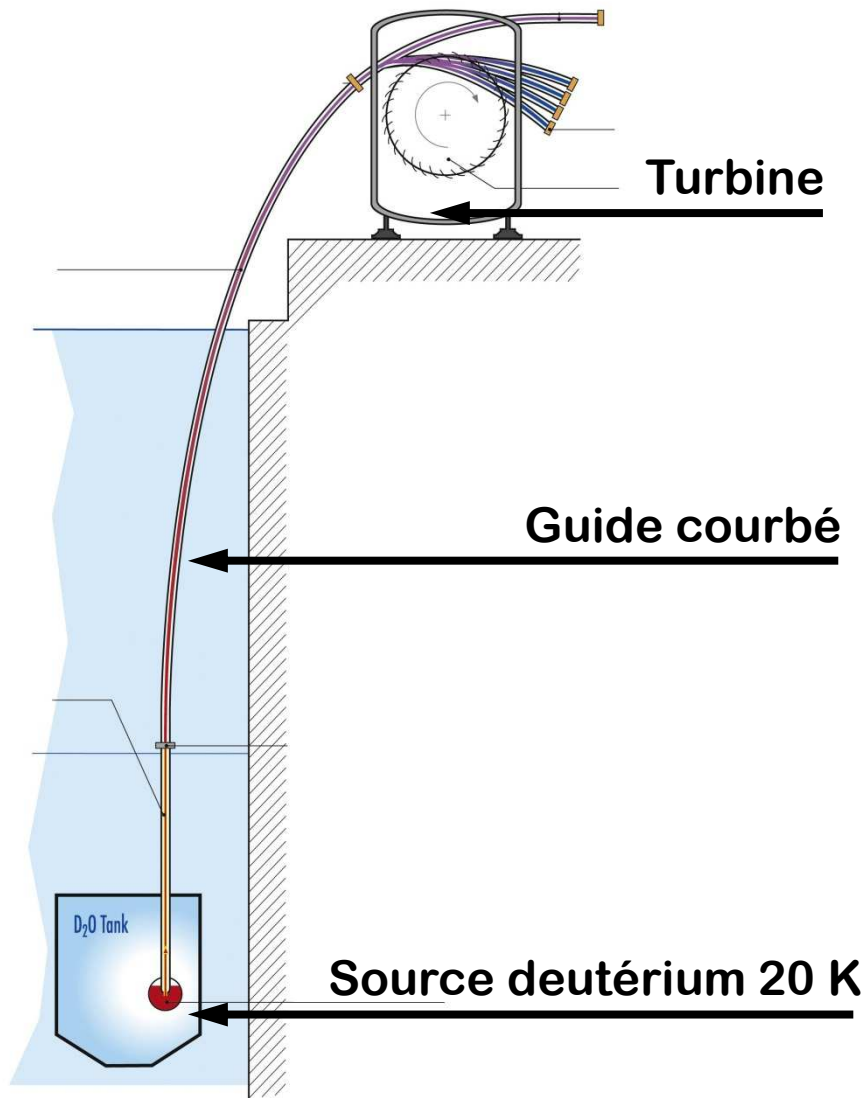
Réacteur nucléaire 58 MW

Source de neutrons la plus intense du monde

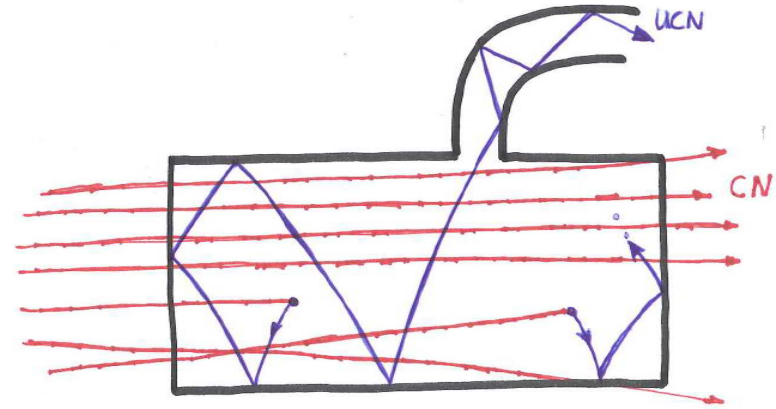
Cafétaria

Fabriquer des UCNs

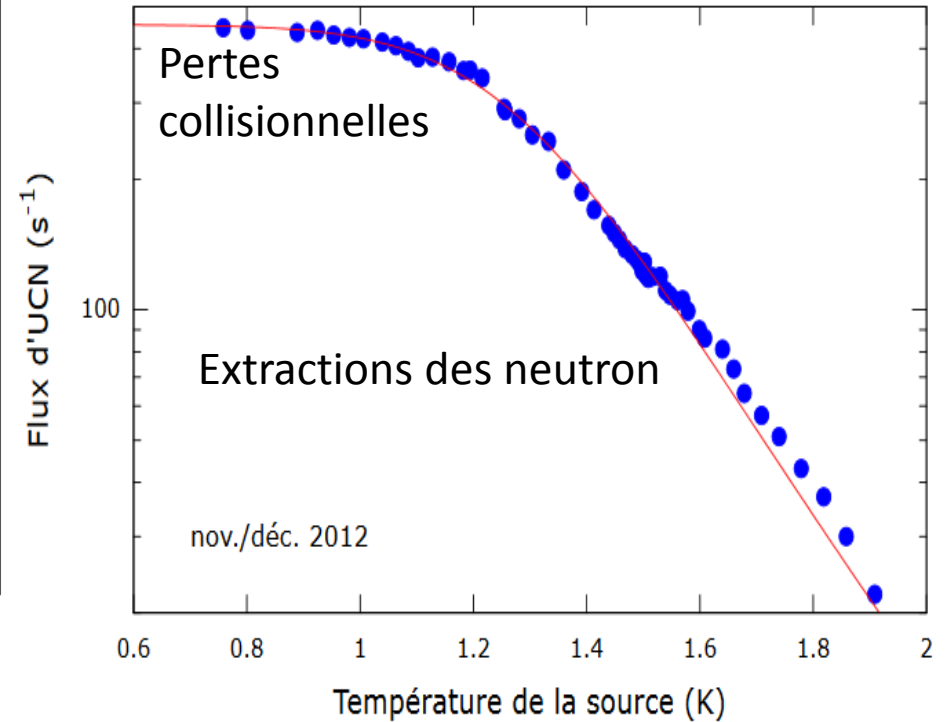
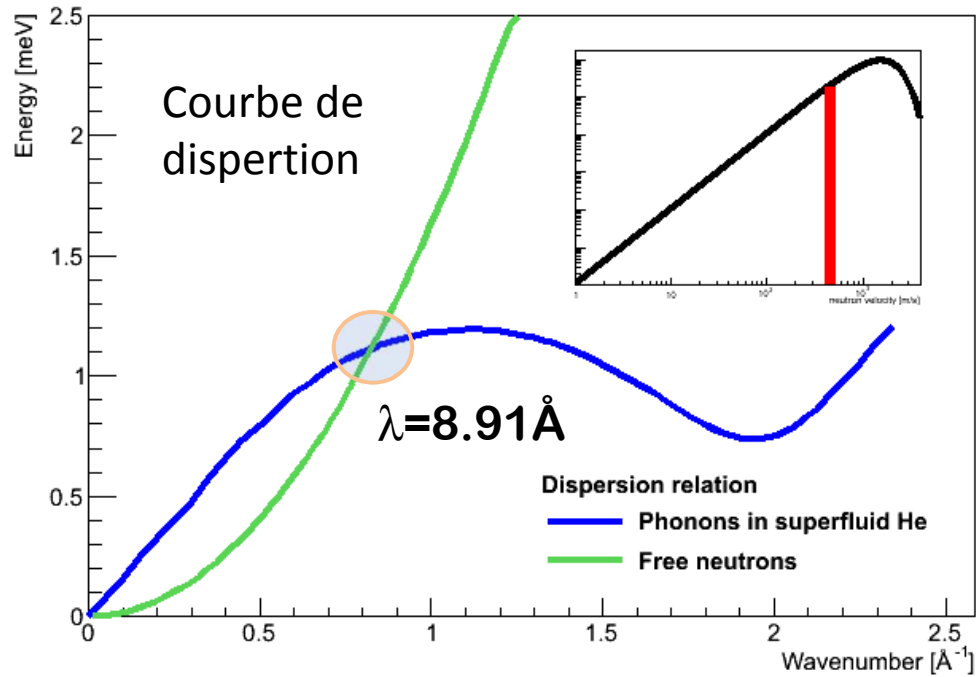
Mécanique : Gravité plus turbine



Superthermale :
Interaction entre neutron
et l'hélium superfluide à 0.8K



Source ^4He

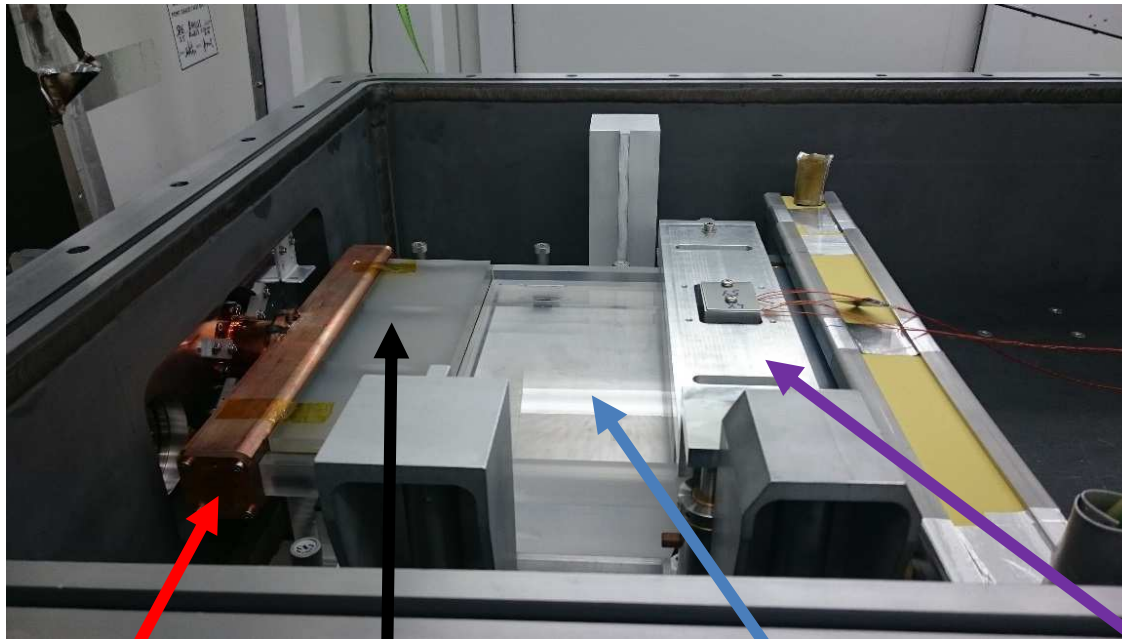


Taux de production

$$N_{\text{He}} 4\pi b^2 \alpha^2 \left[\int \frac{d\Phi(k_1)}{dE} S\left(k_1, \omega = \frac{\alpha k_1^2}{2}\right) dk_1 \right] \frac{k_c^3}{3} \text{UCN cm}^{-3} \text{s}^{-1}$$

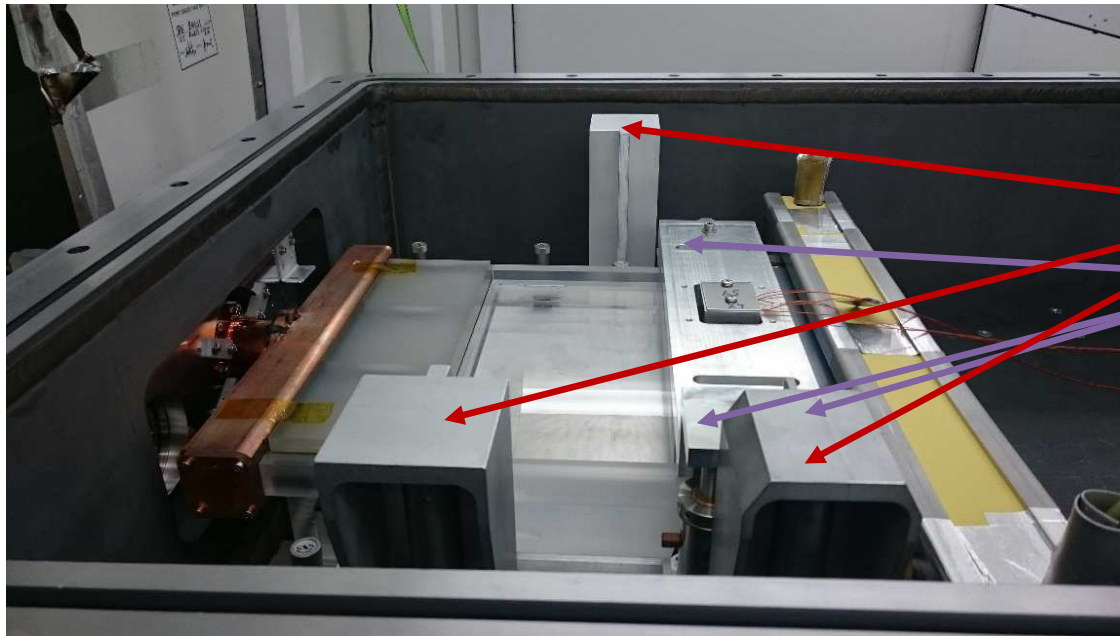
Le spectromètre

- Sélectionner les neutrons de vitesse verticale nulle : **fente semi-diffusive**
- Supprimer les états quantiques 1 à X : **marche**
- Supprimer les états quantiques Y à l'infini : **absorbeur mobile**



Le spectromètre

- Sélectionner les neutrons de vitesse verticale nulle : **fente semi-diffusive**
- Supprimer les états quantiques 1 à X : **marche**
- Supprimer les états quantiques Y à l'infini : **absorbeur mobile**



Moteurs

Piezoélectriques:

- marche (x3)
- absorbeur (x3)

Déplacement relatif : $0.5 \mu\text{m}$

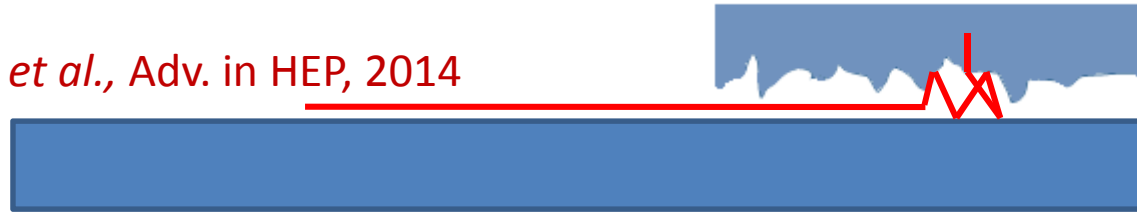
Position absolue : $2 \mu\text{m}$

Horizontalité : $10 \mu\text{rad}$



Absorbeur rugueux

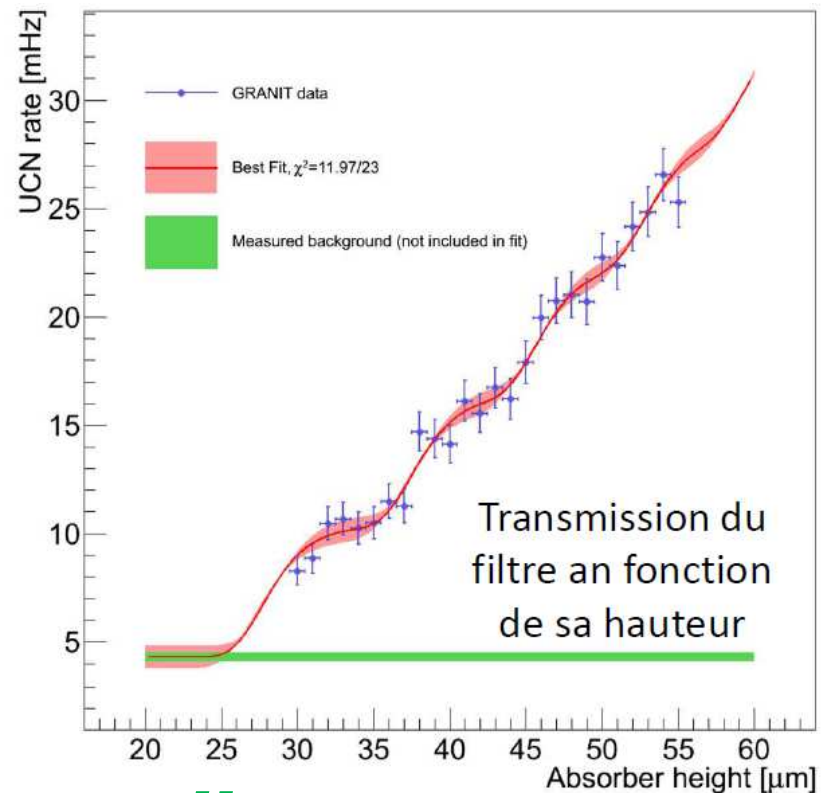
Escobar *et al.*, Adv. in HEP, 2014



Rugosité : up scattering $|i\rangle \rightarrow |j\rangle : j \gg i$, transfert d'impulsion de k_x vers k_z

Transmission d'un état $|i\rangle$
dépend de :

- la **rugosité de l'absorbeur** : φ
- la **vitesse du neutron** : V
- la **longueur de l'absorbeur** : L
- la **probabilité de présence** au niveau de l'absorbeur



$$T_i(z) = e^{-t/\tau(z)} = e^{-f(\varphi) \left(\frac{V}{L}\right) \psi_i^2(z)}$$

Pour induire une transition

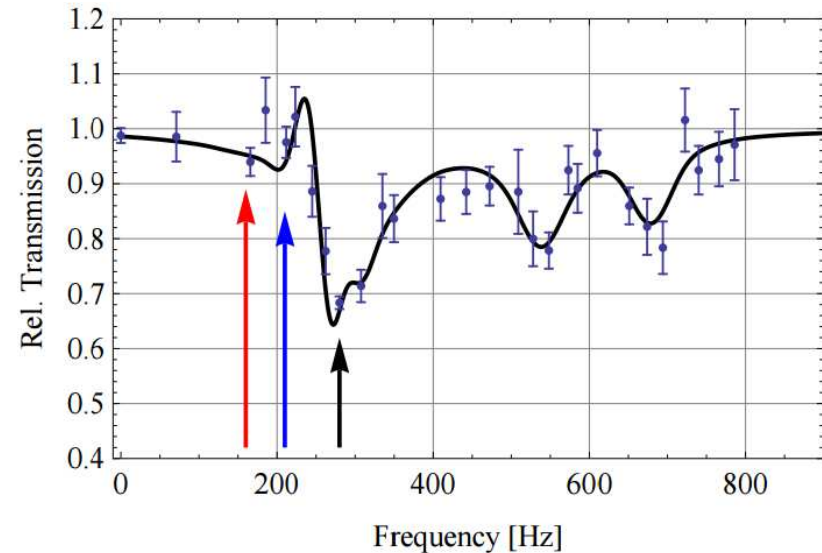
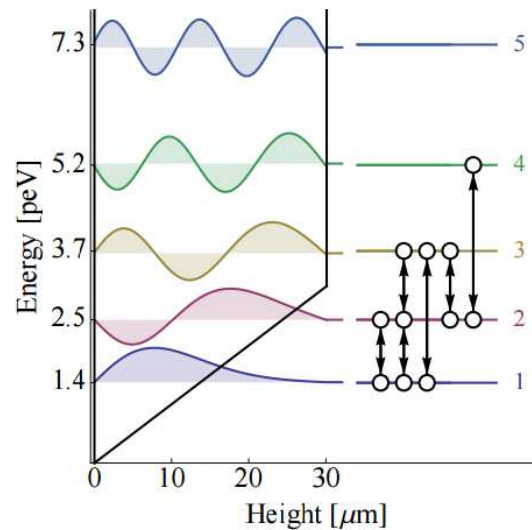
Force verticale oscillante

Excitation mécanique

Jenke *et al*, Phys. Rev. Lett. 112 (2014)

qBounce

$|1\rangle \rightarrow |2\rangle$
 $|1\rangle \rightarrow |3\rangle$
 ...



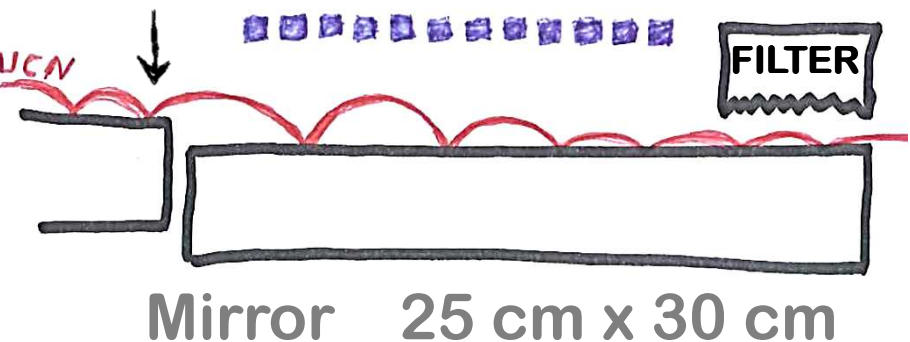
Excitation magnétique

$$V = \pm \mu \cdot B$$



$|2\rangle \rightarrow |1\rangle$
 $|3\rangle \rightarrow |1\rangle$
 $|3\rangle \rightarrow |2\rangle$
 ...

step **Magnetic excitation**

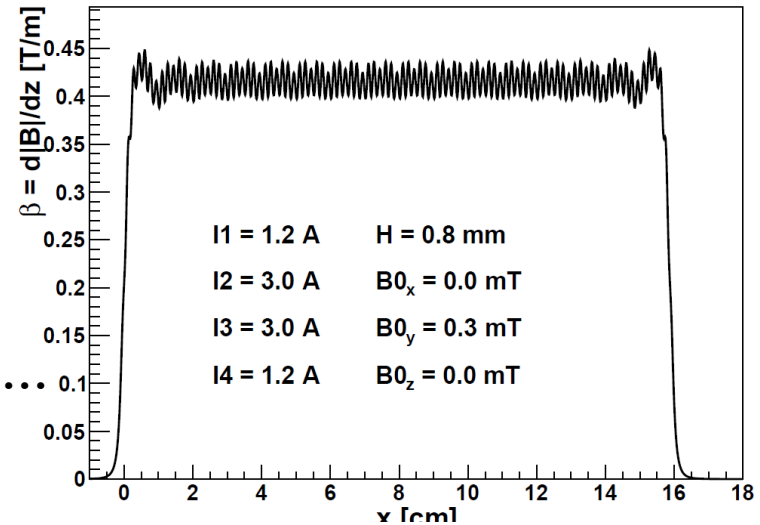
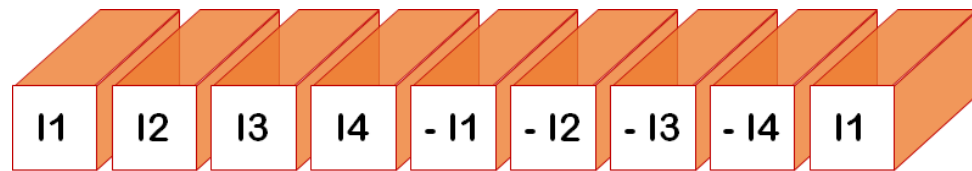


Excitation magnétique

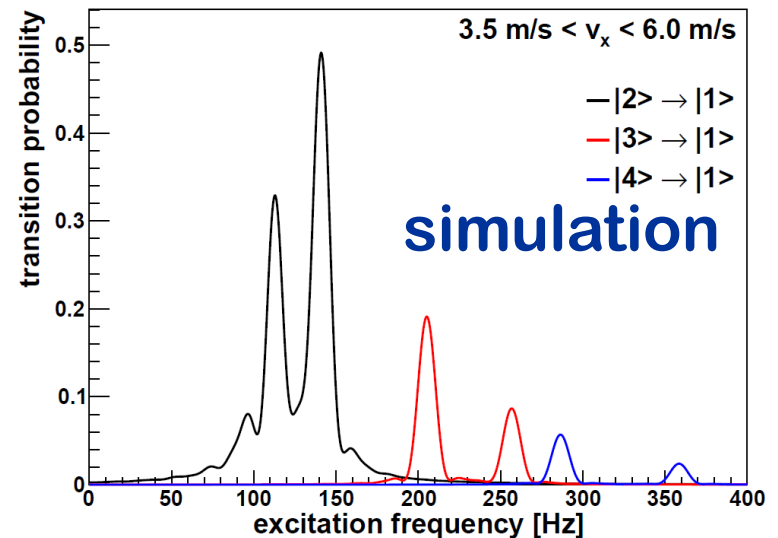
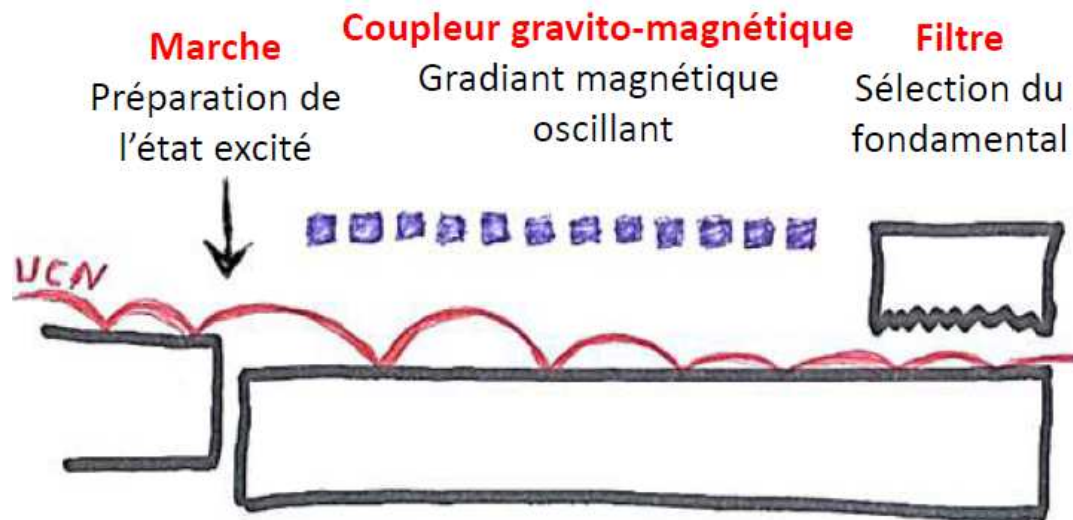
Potentiel d'excitation linéaire en z : $V(z) = \pm \mu \frac{dB}{dz} z$

Avec un gradient $\frac{dB}{dz}$
oscillant dans le temps
constant dans l'espace

Grille de fils

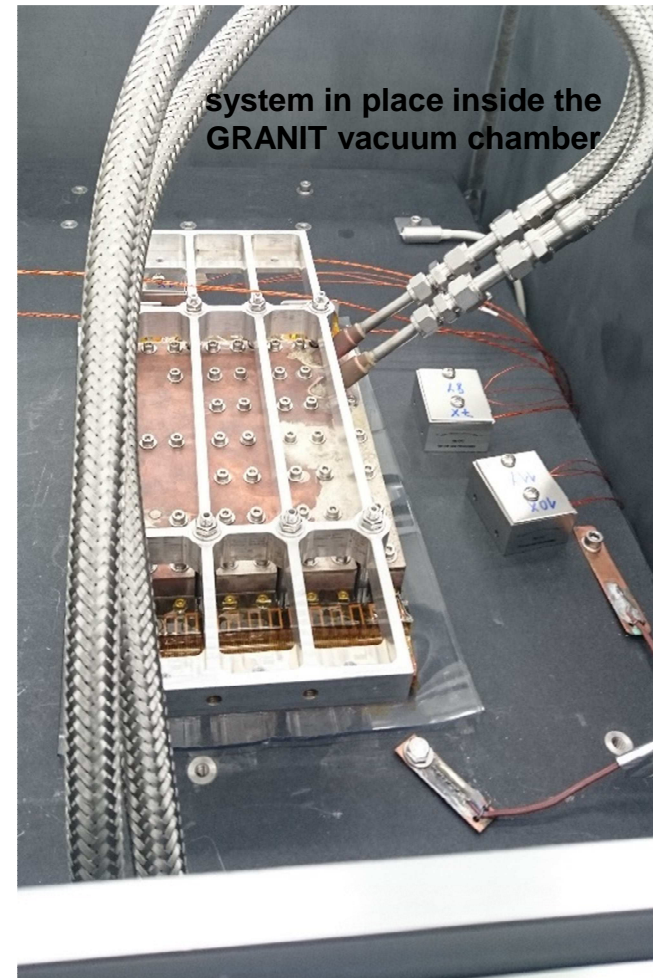
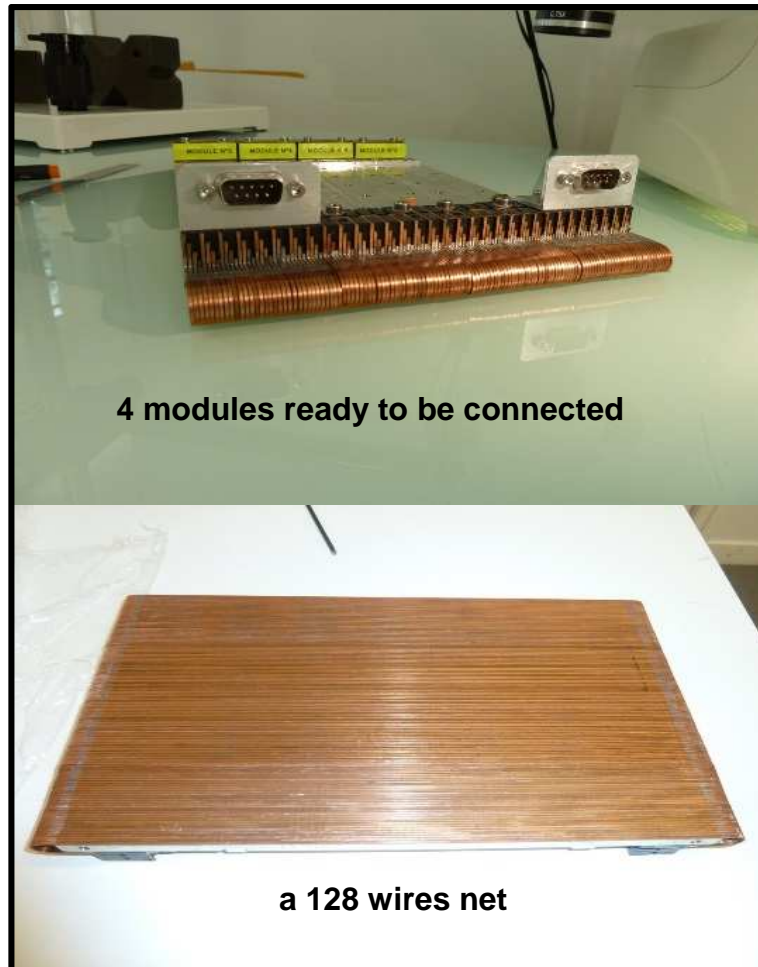


Frequence de transition = 2 x fréquence d'excitation

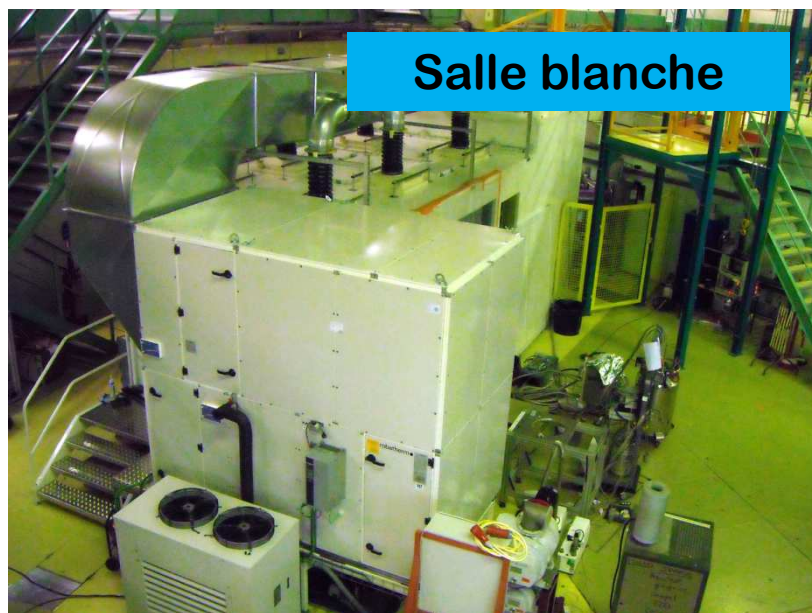


Coupleur gravito-magnétique

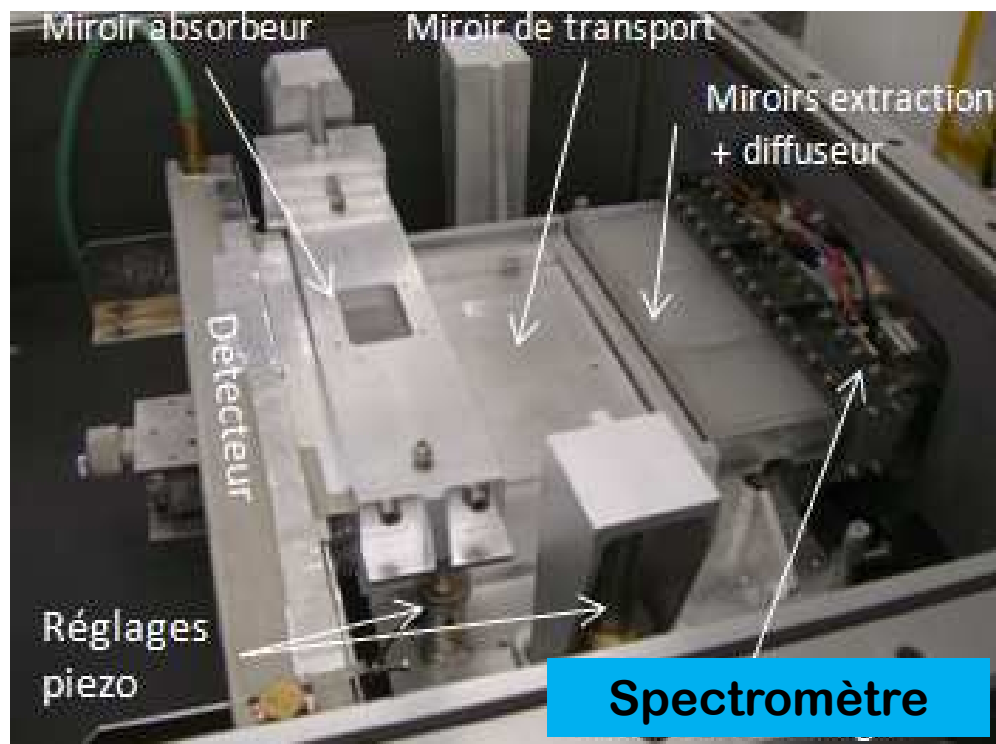
- 4 Magnetic field generator modules assembled and connected together
- 128 wires, 1mm² square section - Gap between wires : 0.25 mm
- Cooled by gaseous N₂



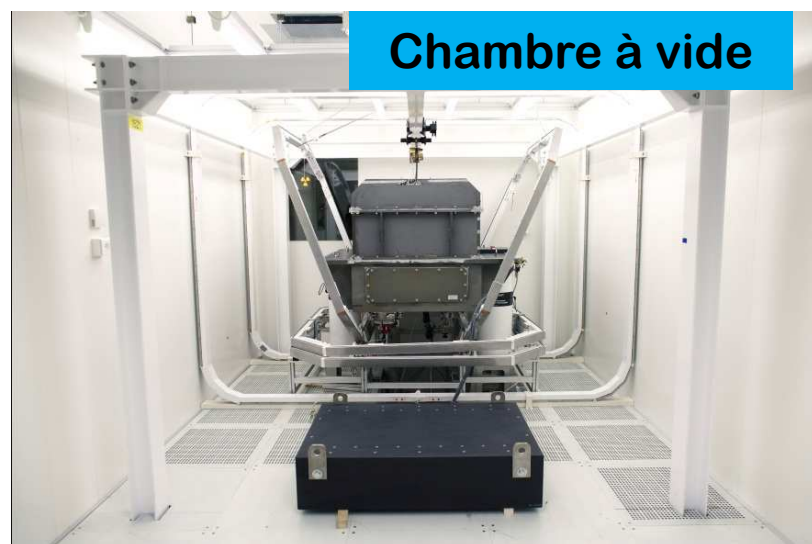
Quelques photos



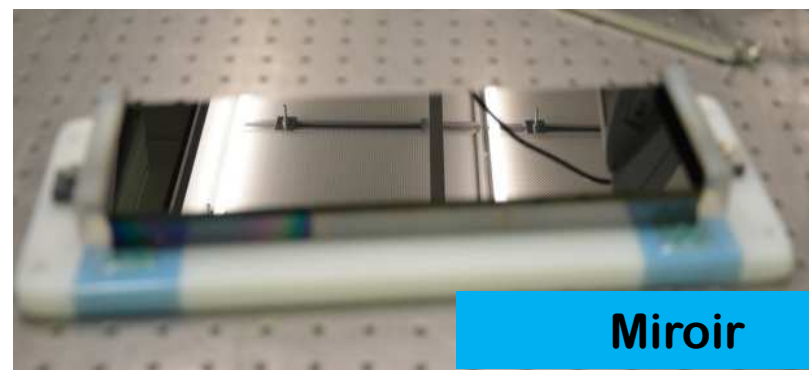
Salle blanche



Spectromètre

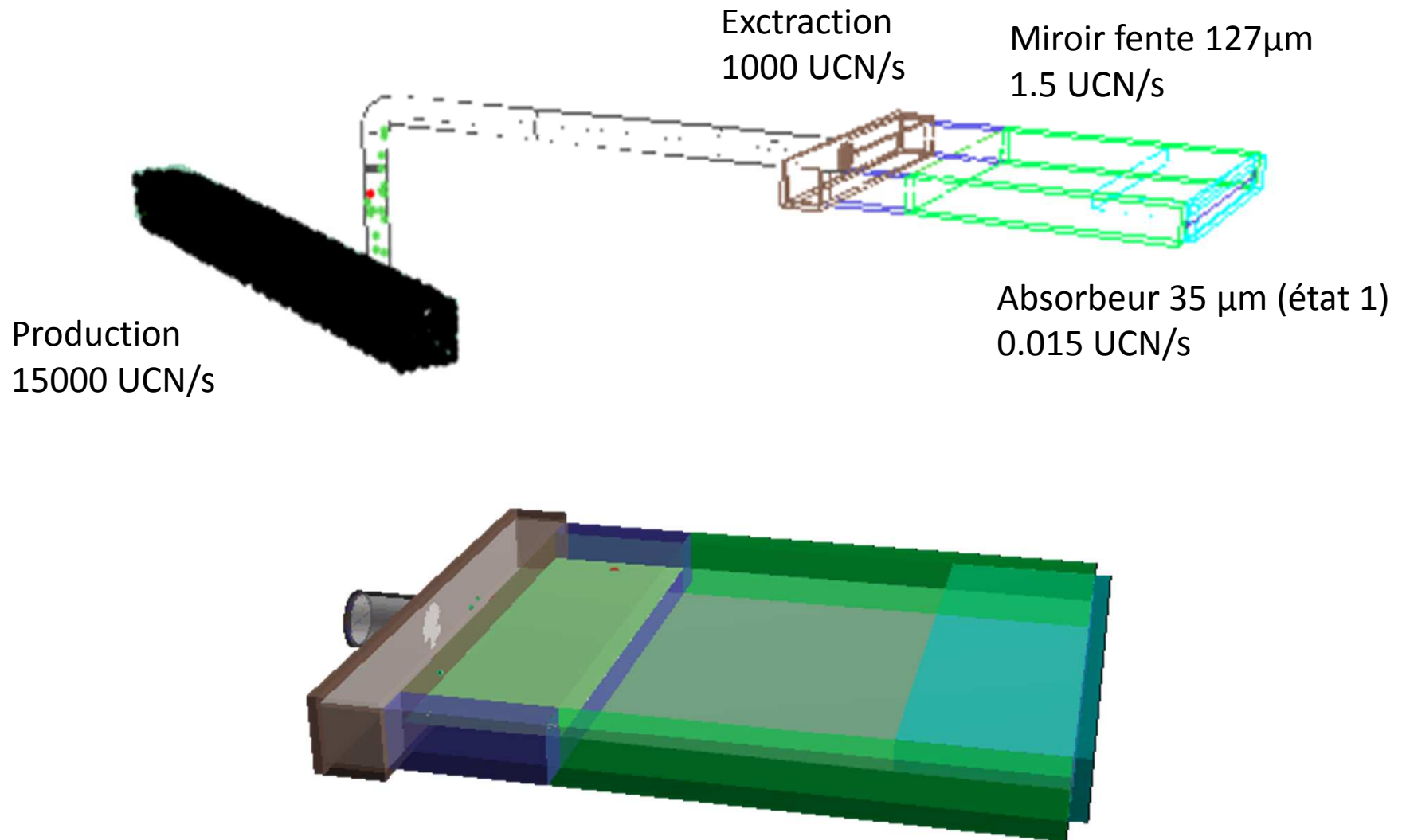


Chambre à vide

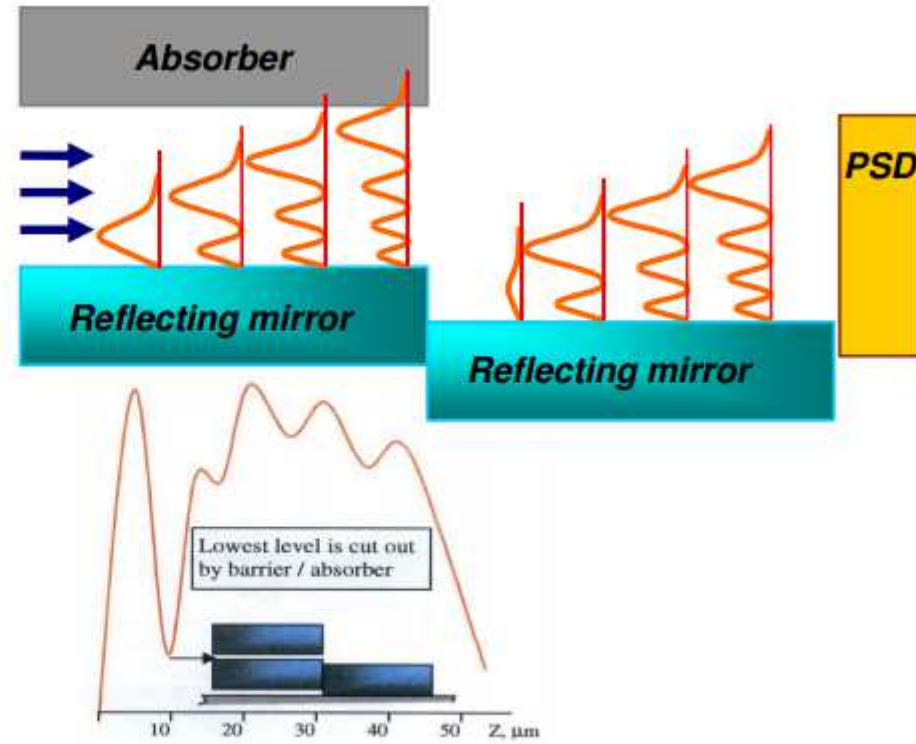
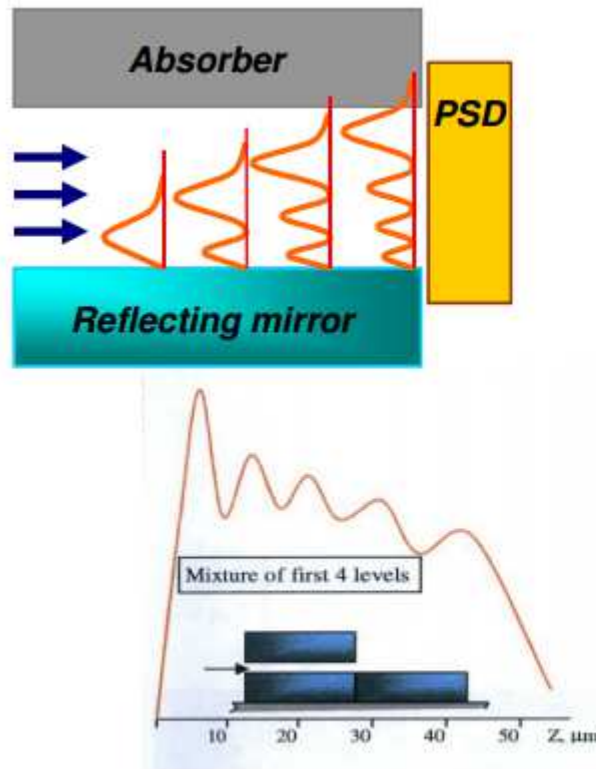


Miroir

Spectromètre GRANIT

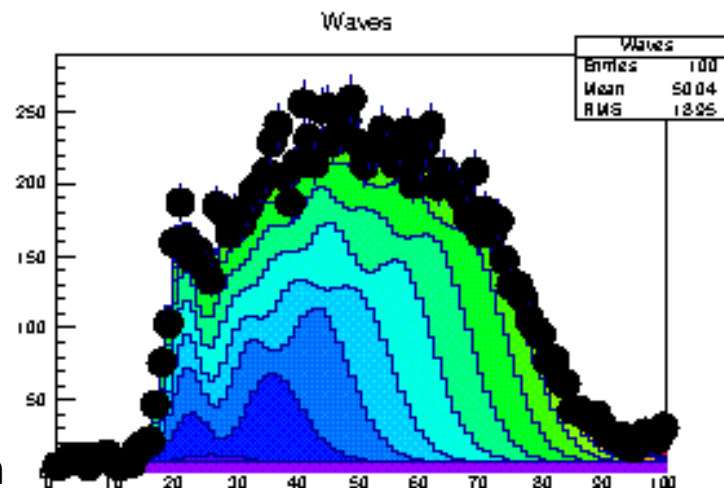


Mesures des fonctions d'onde



$F(z) = \sum \alpha_i |\psi_i|^2$: Mesurer la position (hauteur) d'impact du neutron sur le détecteur.

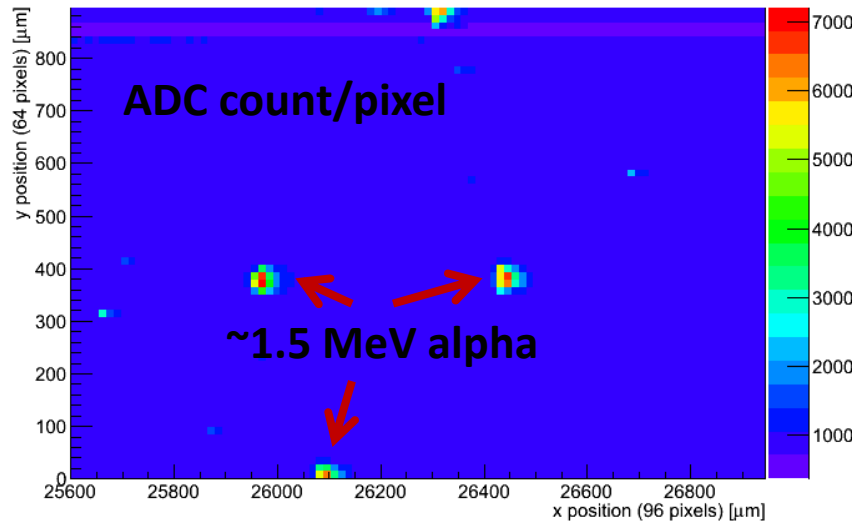
Données « test » en 2008 : $z_0 = 6.0 \pm 0.2 \mu\text{m}$



Détecteur UCNBox

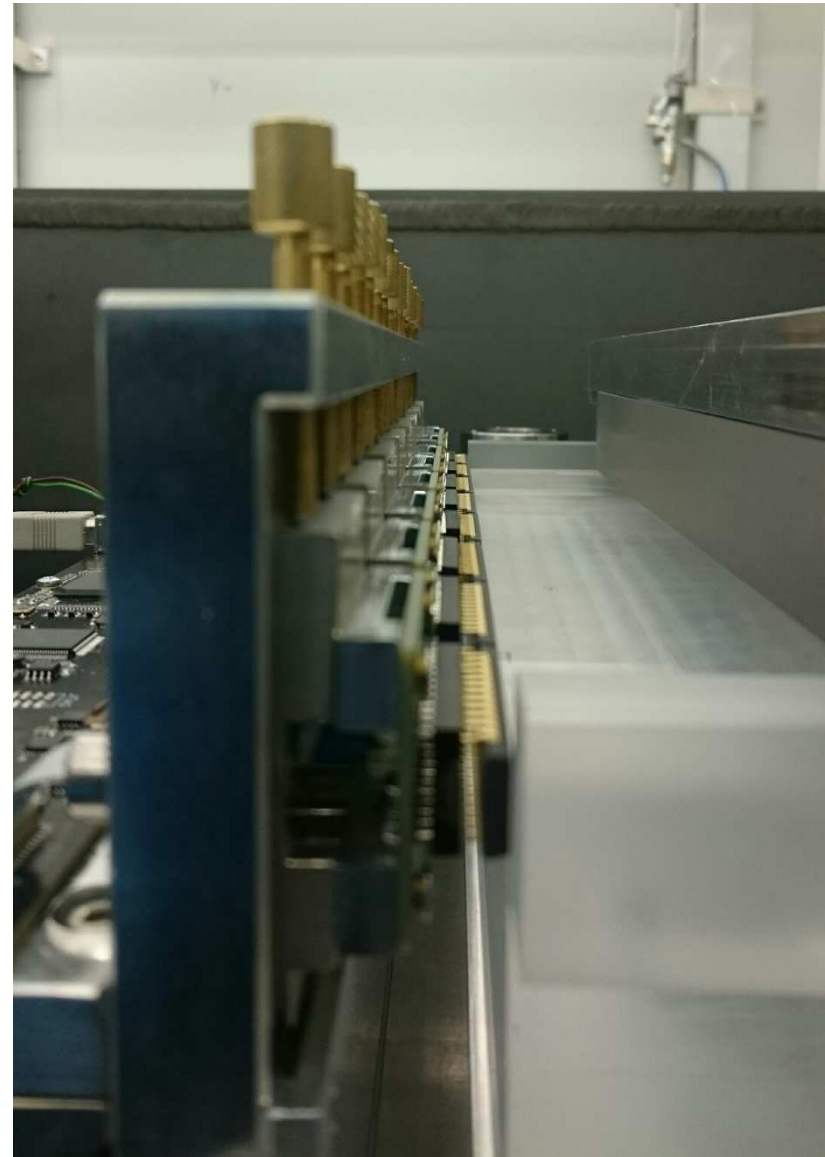
UCN Boron pixels :

- CCD sans fenêtres
- couche de conversion : 200 nm de ^{10}B
- 2048x64 pixels, 14x14 μm
- 8 capteurs pour couvrir 30cm (20cm utiles)

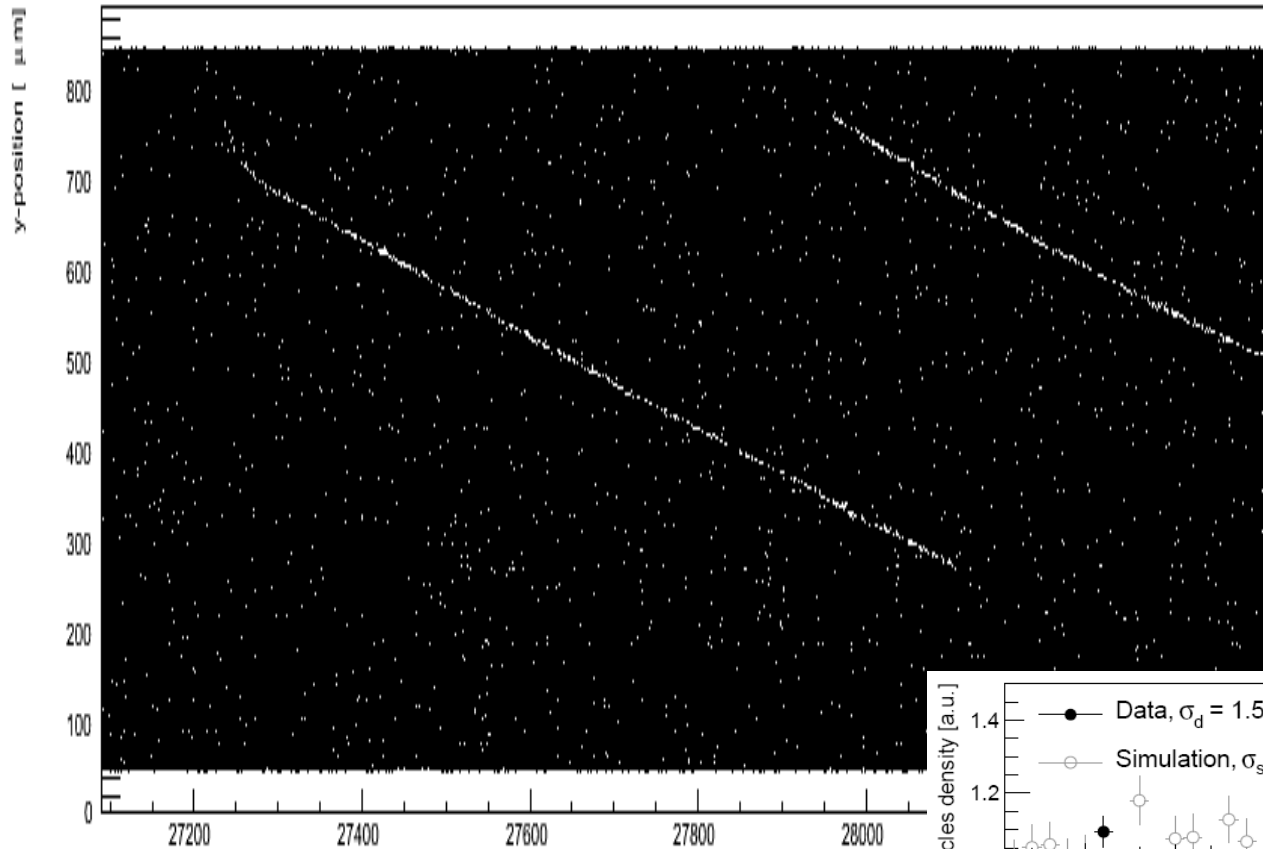


Barycentre des cluster selon la direction du fil

Résolution spatiale ~ 1 μm

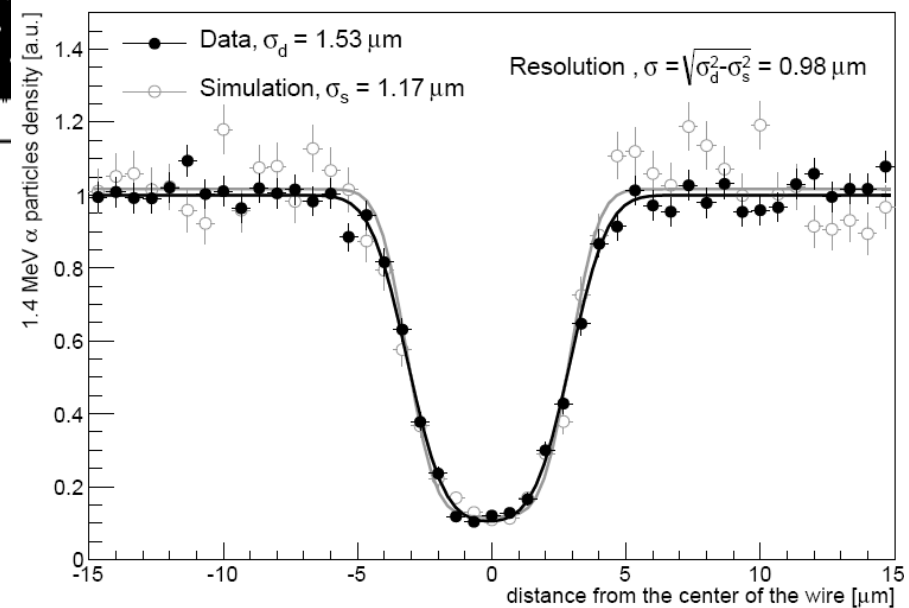


Résolution spatiale

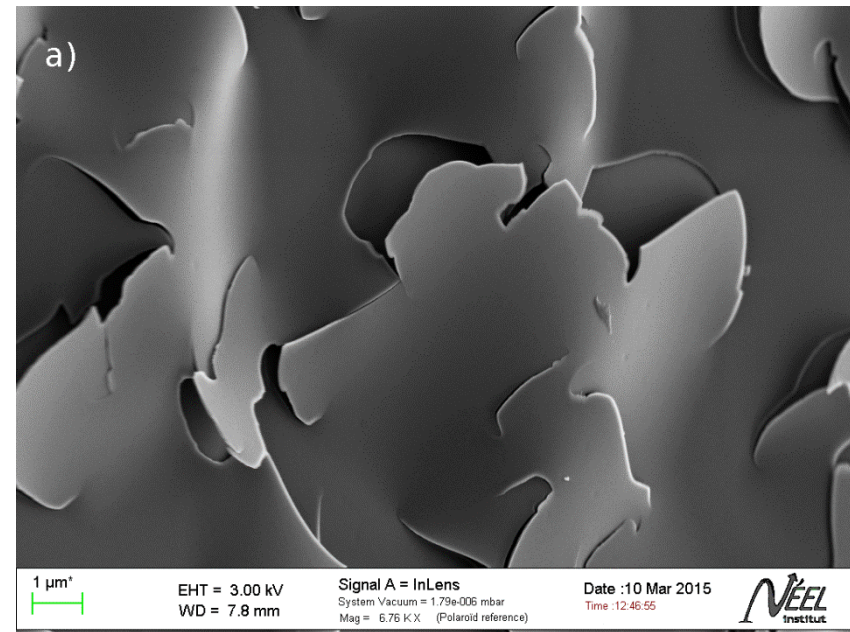
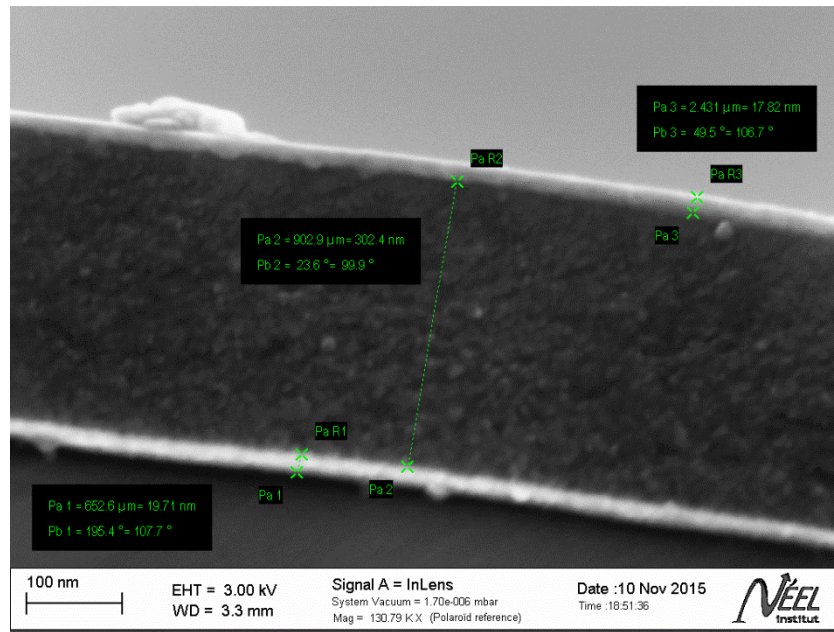


Particules alpha reconstruites
6μm tungsten wire

Barycentre des cluster selon la
direction du fil
Résolution : 1μm



Qualité de la couche de bore



Fente de 50 μm , éclairée par des neutrons froids



Gravitation de l'antimatière

L'antimatière subit-elle une gravitation répulsive ?

A priori non : essentiel de la masse d'un antiatome vient de l'énergie de liaison QCD

Mais il est possible que la chute libre soit différente pour les quarks de valence

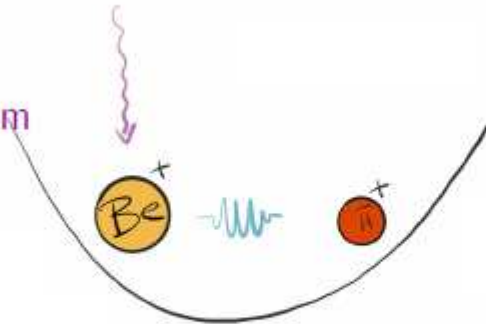
Collaboration Alpha : $\frac{m_i}{m_g} - 1 < 110$

Deux projets au CERN : GBar et AEGIS
Participation française dans les deux

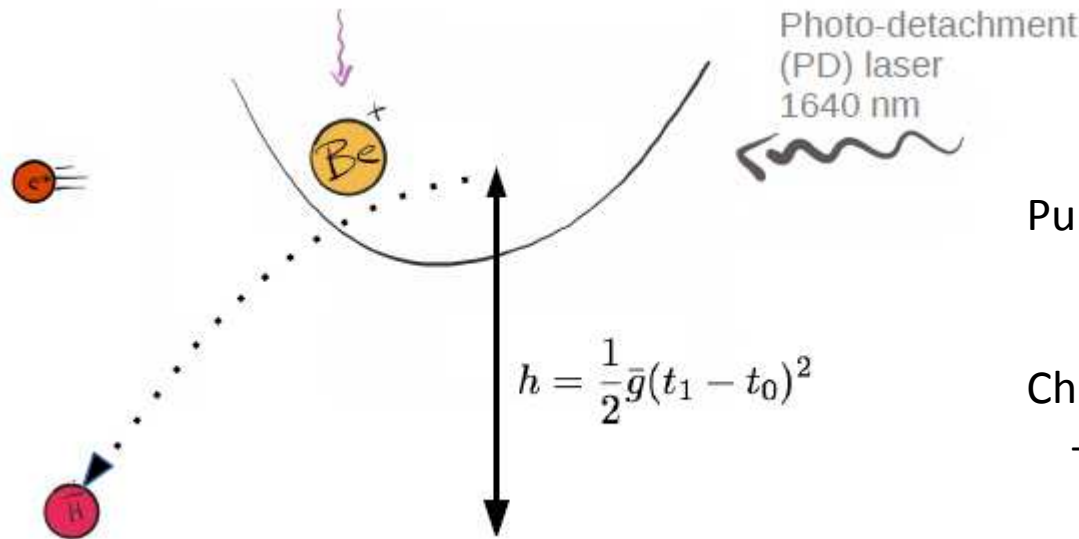


Principe de la mesure

Raman
Sidenband
Cooling
laser 313 nm



Fabrication d'antiprotons
Fabrication de positronium
Formation d'ions H⁺
Piège magnéto-optique
Refroidissement sympathique par Be⁺
-> 1μK, V ~ 1 m/s



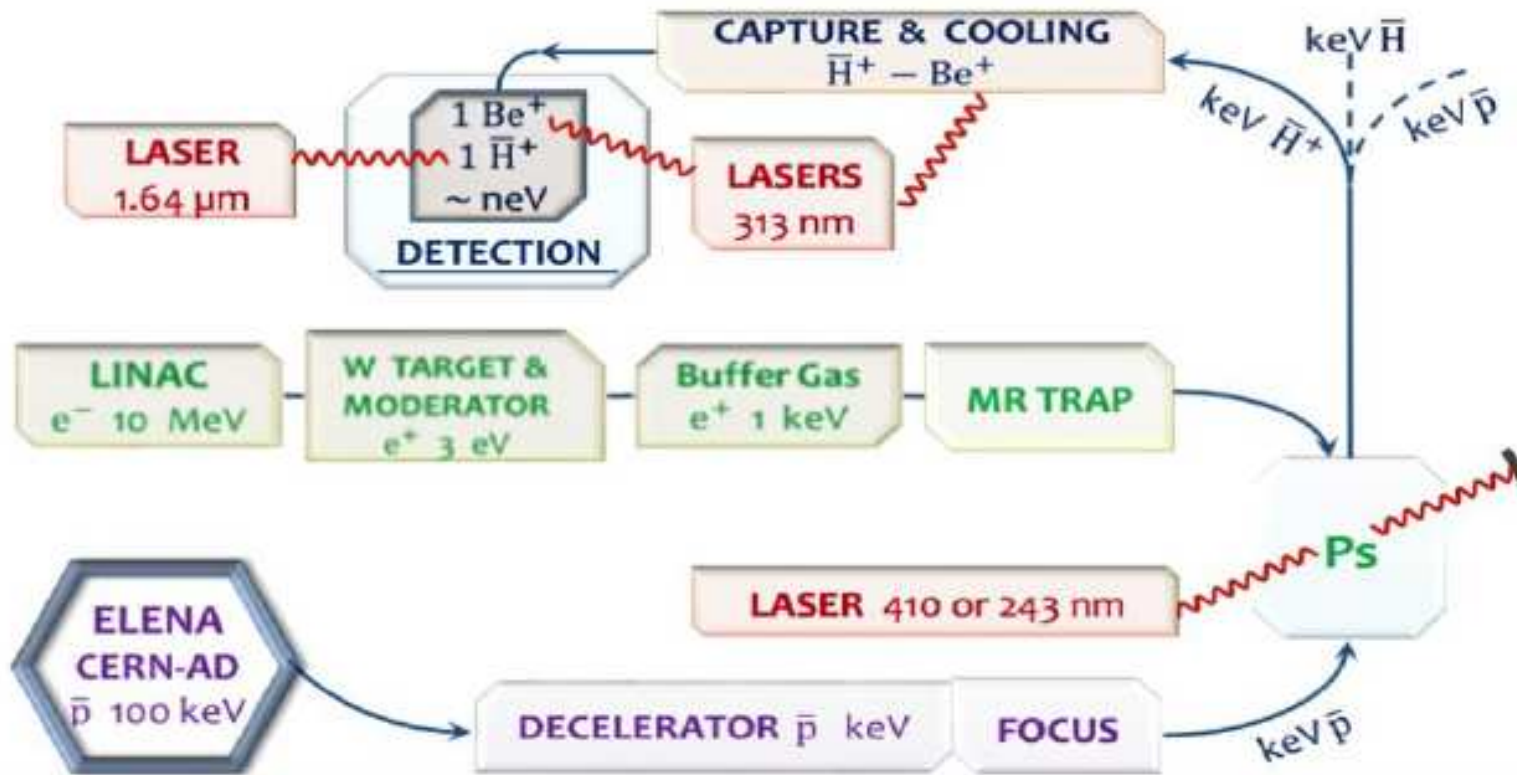
Pulse laser arrache l'électron superflu
-> Start

Chute libre et détection
-> Stop

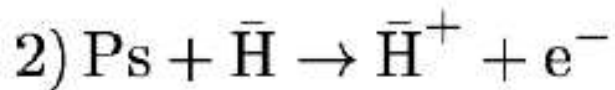
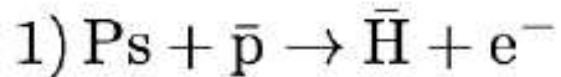
J. Walz & T. Hänsch,

General Relativity and Gravitation, **36** (2004) 561

Fabrication de l'antihydrogène



$\bar{\text{H}}^+$ production via two step charge exchange reactions:



EXP. H: J. P. Merrison et al. Phys. Rev. Lett. 78, 2728 (1997).
 EXP. $\bar{\text{H}}$: A. Speck et al., Phys. Lett. B597, 257 (2004).

TH. $\bar{\text{H}}^+$: P. Comini and P.-A. Hervieux, New J. Phys. 15, 095022 (2013)

Fabrication de l'antihydrogène

2018 : Premiers antiprotons délivrés par l'accélérateur ELENA

LINAC installed (awaiting for beam permit, 22.9.2017)

Free fall chamber & Detectors

Antiproton decelerator installed and connected to ELENA

Pair production target and positron moderator installed

Buffer gas trap (CEA)

The ELENA ring - under commissioning

Installation et tests pendant le shut-down LHC 2019-2021

Résumé

Différents systèmes permettent de sonder la gravitation en laboratoire, à courte distance

Test du principe d'équivalence

ou

Recherche de 5eme force

- **Systèmes classiques :**

Chute dans le vide

Balances de torsion

- **Systèmes quantiques**

Neutron ultrafroids

Antihydrogène

Positronium

- **Antimatière**

