

# L'expérience GRANIT

Un spectromètre pour mesurer les niveaux quantiques du neutron dans le champ de pesanteur.

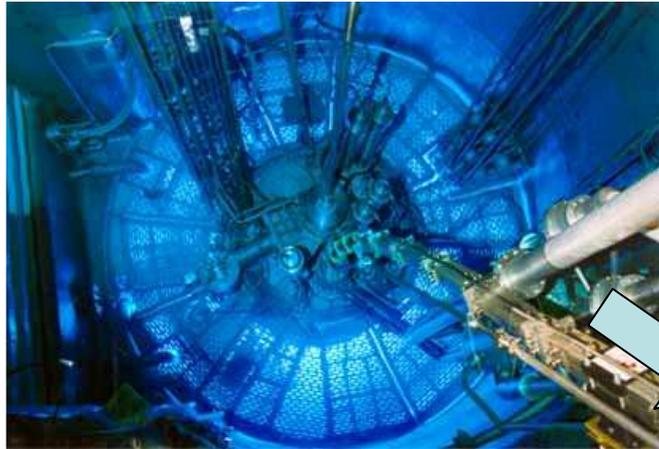


Séminaire LPNHE

# Sommaire

- 1 Physique des neutrons ultra froids
- 2 Etats quantiques des neutrons bondissants
- 3 Le futur spectromètre GRANIT
- 4 GRANIT et les interactions supplémentaires

# L'institut Laue-Langevin



Vercors

Synchrotron européen



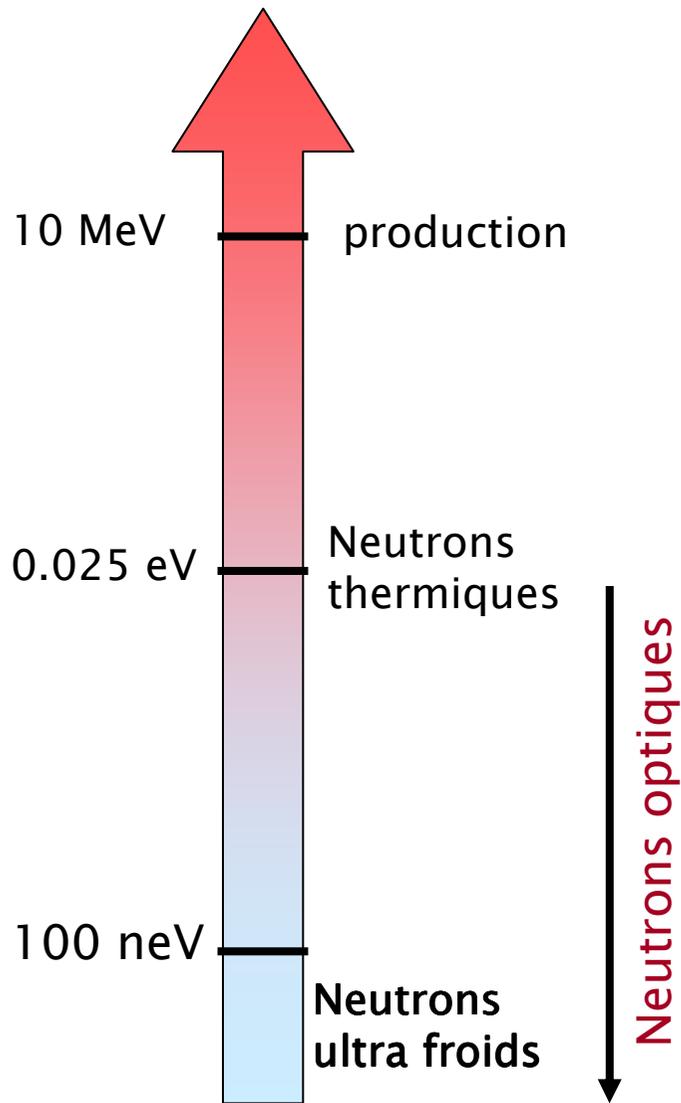
L'ILL :

- Réacteur nucléaire 53 MW
- Source de neutrons la plus intense du monde

# Sommaire

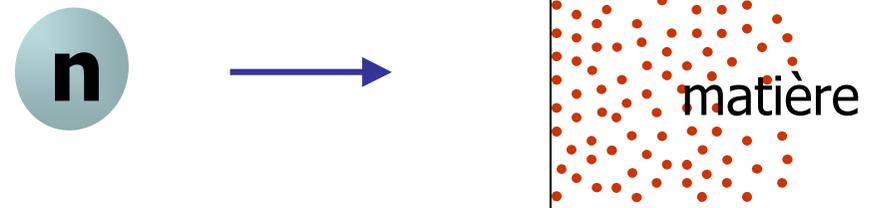
- 1 Physique des neutrons ultra froids
- 2 Etats quantiques des neutrons bondissants
- 3 Le futur spectromètre GRANIT
- 4 GRANIT et les interactions supplémentaires

# Les neutrons ultra froids (UCN)



## Neutrons optiques

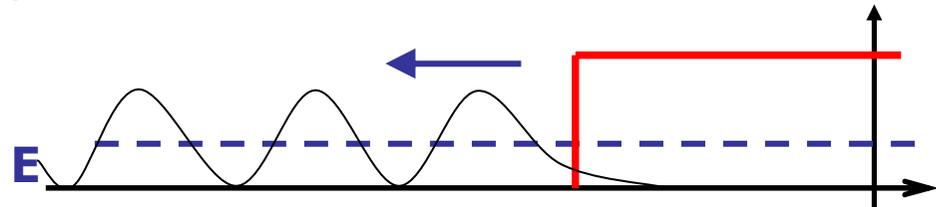
- longueur d'onde  $> 2 \text{ \AA}$
- interaction avec la matière décrite par un potentiel moyen (de Fermi)  $\sim 100 \text{ neV}$



## Neutrons ultra froids

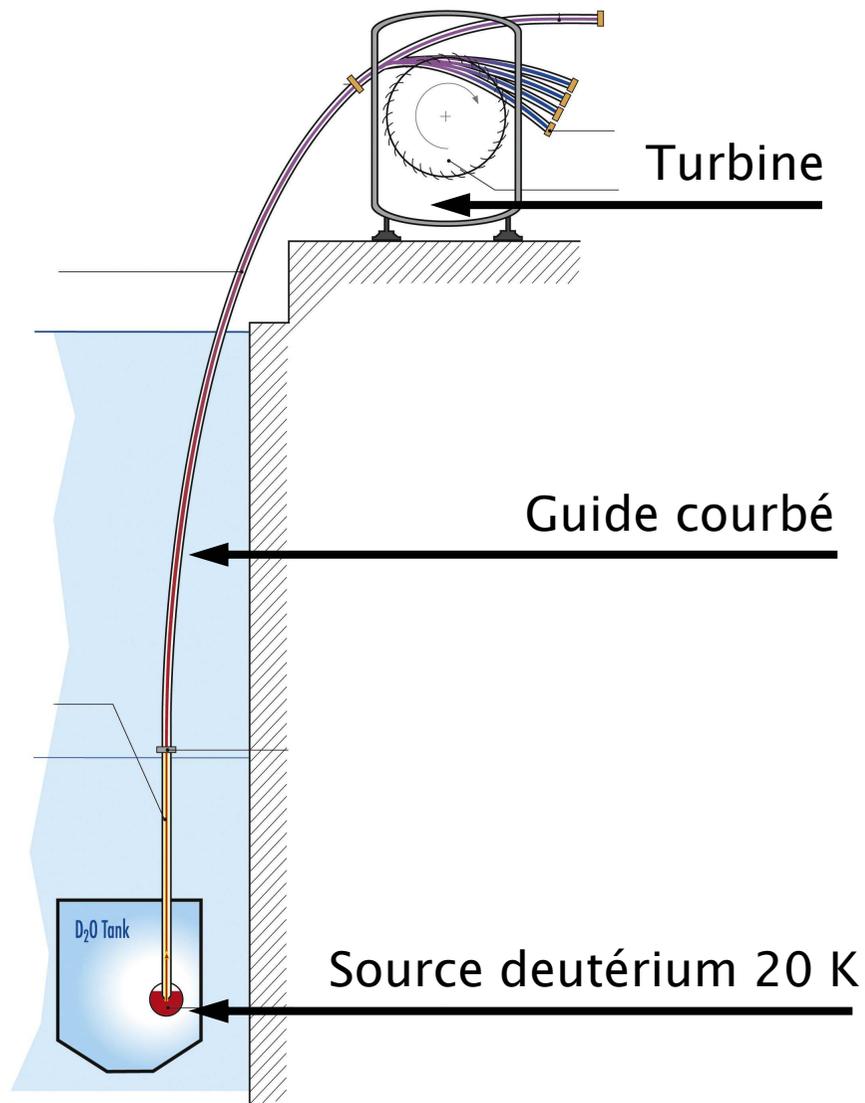
- énergie  $<$  potentiel de Fermi
- réflexion totale sur les surfaces

→ peuvent être stockés dans des boîtes



vitesse  $< 7 \text{ m/s}$

# Production d'UCN à l'ILL



## *Extraction des UCN*

- Proportion  $10^{-9}$  du spectre maxwellien à 20 K
- Densité 50 UCN / cm<sup>3</sup>

# Les UCN et les interactions fondamentales

Les UCN ressentent toutes les interactions.

- **Interaction faible**

désintégration  $\beta$  en 886 s

- **Interaction forte**

potentiel de Fermi  $\sim 100$  neV

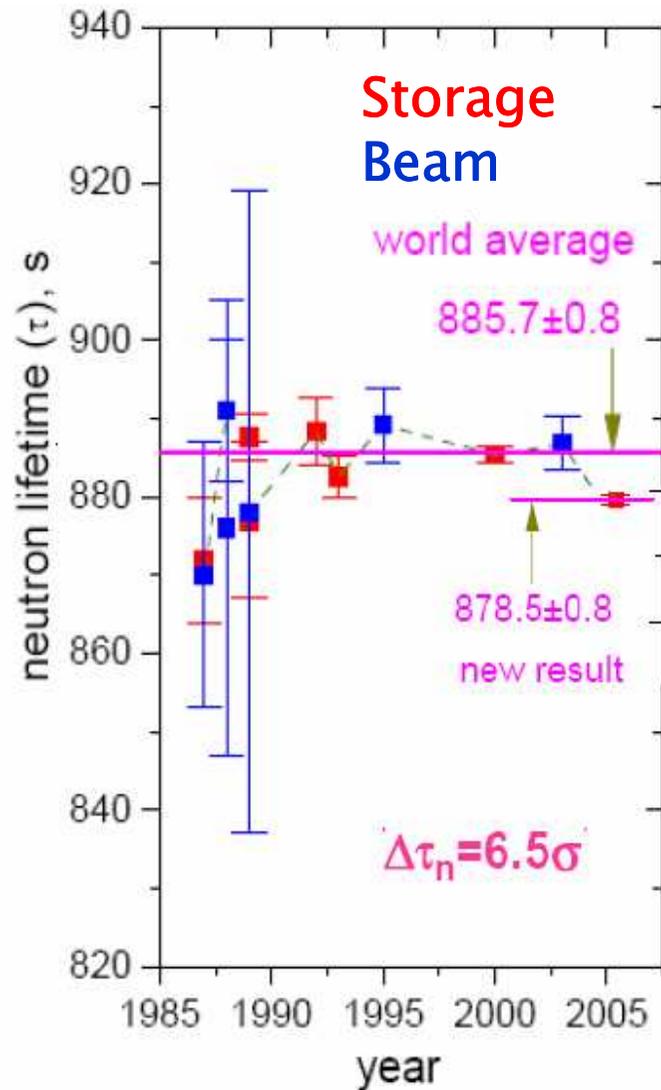
- **Electromagnétisme**

$B = 1$  T induit une séparation Zeeman de  $\sim 100$  neV

- **Gravitation**

le neutron gagne  $\sim 100$  neV pour une chute de 1 m

# Mesure de la durée de vie du neutron



## *Deux méthodes en compétition*

- Faisceaux
- Stockage

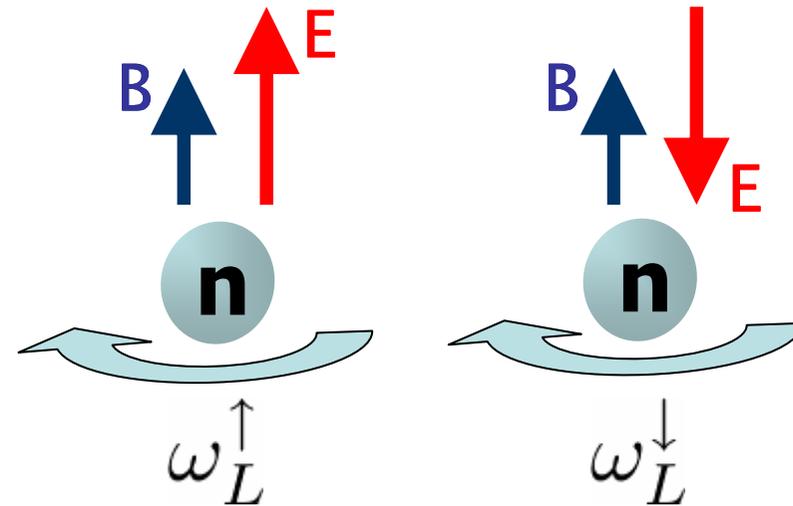
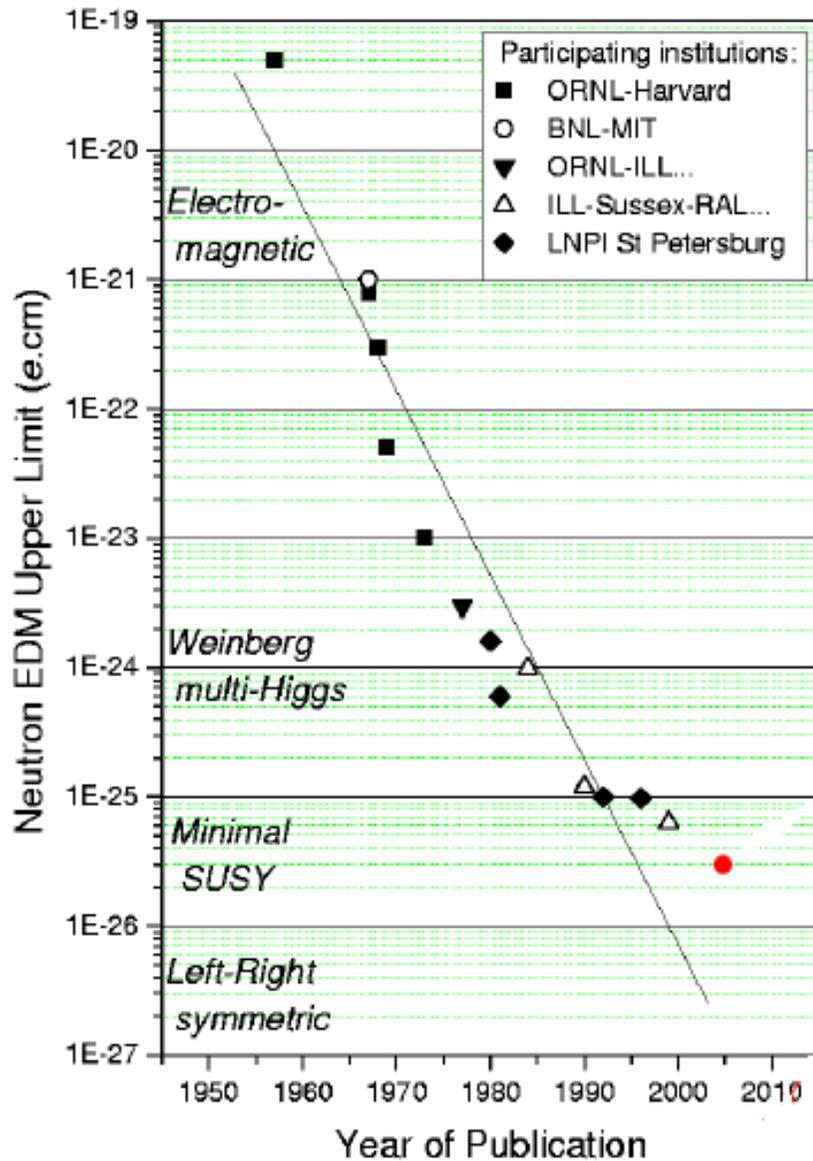
## *Nucléosynthèse primordiale*

$\tau$  est fondamental pour prédire  
l'abondance primordiale de  $^4\text{He}$

## *Matrice CKM*

$$|V_{ud}|^2 = \frac{4908 \pm 4s}{\tau (1 + 3(g_V/g_A)^2)}$$

# Le moment dipolaire électrique du neutron



Mesure de la fréquence de Larmor pour deux orientations du champ électrique par la méthode de Ramsey

*Précession du spin*

$$\delta\omega \cdot T \approx 1$$

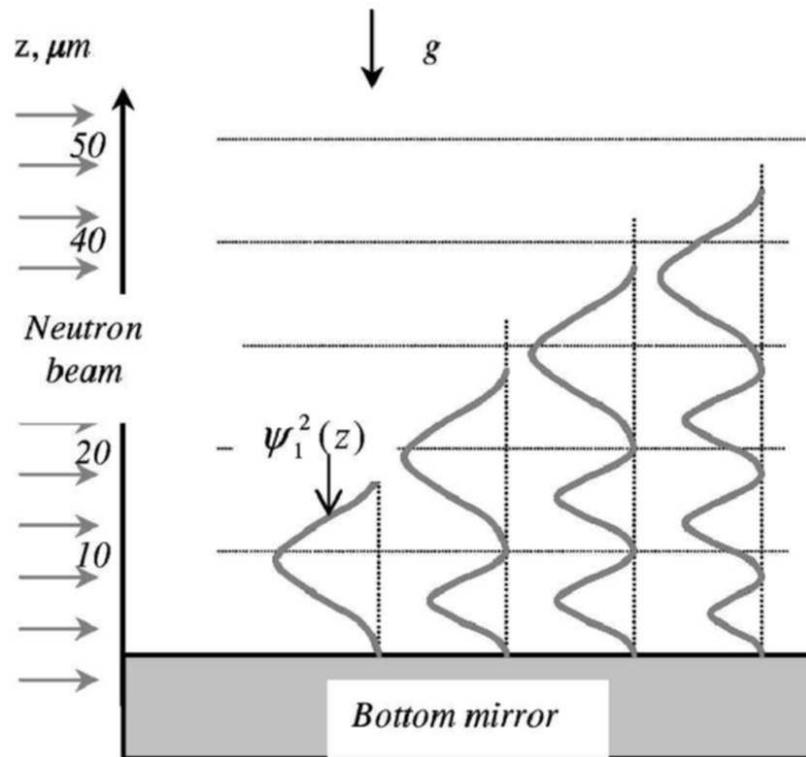
↑  
Temps de stockage

# Sommaire

- 1 Physique des neutrons ultra froids
- 2 Etats quantiques des neutrons bondissants
- 3 Le futur spectromètre GRANIT
- 4 GRANIT et les interactions supplémentaires

# Etats quantiques du neutron bondissant

Une particule rebondissant au dessus d'un miroir possède un spectre d'énergie discret.



Equation de Schrödinger

$$\left( -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dz^2} + mgz \right) \psi = E \psi$$

	gravitational neutron	hydrogen atom
size	10 μm	$5 \times 10^{-11}$ m
energy	1 peV	10 eV
frequency	250 Hz	$2 \times 10^{15}$ Hz

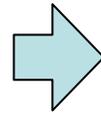
Stabilité radiative des états excités :  $T \sim 10^{77}$  s

Pignol, Protasov, Nesvizhevsky Class. Quantum Grav. 24 (2007)

# Violation de l'universalité de la chute libre

Equation de Newton

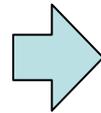
$$\cancel{m} \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = \cancel{m} \vec{g}$$



Chute classique  
indépendante de la masse

Equation de Schrödinger

$$\left( -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dz^2} + mgz \right) \psi = E \psi$$



Taille caractéristique des fonctions  
d'onde dépendantes de la masse

$$\begin{aligned} z_0 &= \left( \frac{\hbar^2}{2m^2 g} \right)^{1/3} \\ &= 5.87 \mu\text{m} \end{aligned}$$

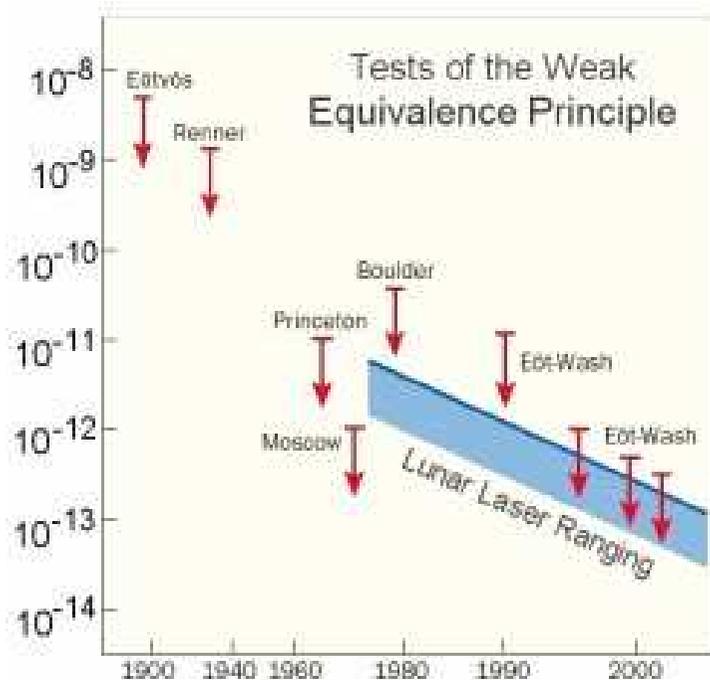
On peut mesurer la masse d'un neutron en le regardant tomber :

$$m = 1120 \pm 250 \text{ MeV}$$

# Le principe d'équivalence

$$\left( \underbrace{-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dz^2}}_{\text{Inerte}} + \underbrace{mgz}_{\text{Grave}} \right) \psi = E \psi$$

On vérifie l'égalité de la masse grave et de la masse inerte à 20 % près.



- Chute du neutron Koester, PRD 14 (1976)  $\left| \frac{m_g - m_i}{m} \right| < 3 \times 10^{-4}$

- Futur **MICROSCOPE** lancement 2010

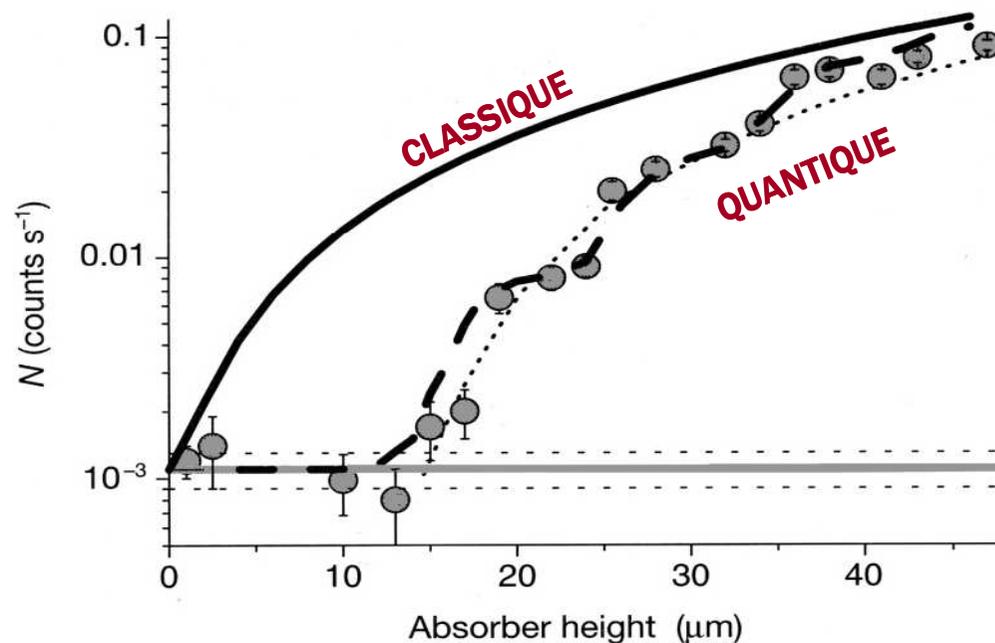
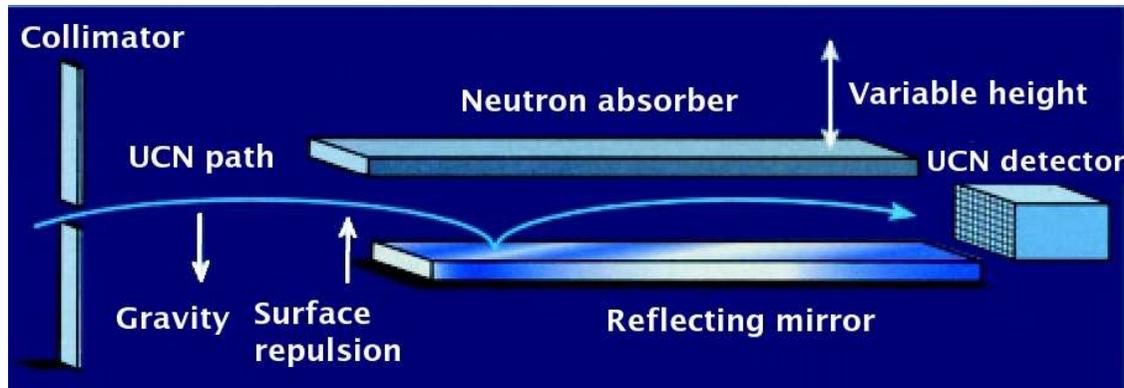
$$\left| \frac{m_g - m_i}{m} \right| < 10^{-15}$$

- Futur **Satellite Test of Eq Principle**

$$\left| \frac{m_g - m_i}{m} \right| < 10^{-18}$$

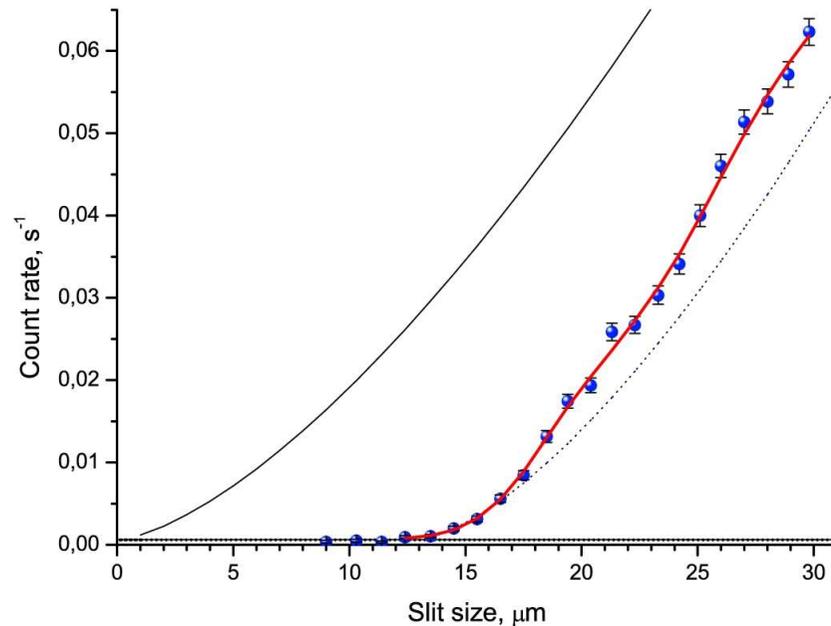
# Découverte des états quantiques en 1999

Nesvizhevsky *et al*, Nature 415 (2002)



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

# Situation actuelle



Nesvizhevsky *et al*, Eur. Phys. J. C 40 (2005)

$$z_1^{\text{exp}} = 12.2 \pm 1.8_{\text{sys}} \pm 0.7_{\text{stat}} \mu\text{m}$$
$$z_1^{\text{th}} = \langle 1|\hat{z}|1 \rangle = 13.7 \mu\text{m}$$

$$z_2^{\text{exp}} = 21.6 \pm 2.2_{\text{sys}} \pm 0.7_{\text{stat}} \mu\text{m}$$
$$z_2^{\text{th}} = \langle 2|\hat{z}|2 \rangle = 24.0 \mu\text{m}$$

- Précision des mesures limitée par la résolution de l'absorbeur
- Spectrométrie des états excités difficile

## Prochaine étape : l'expérience GRANIT

- GRAvity Neutrons Induced Transitions
- Mesures précises d'observables **de type énergie**
- Début des mesures : fin 2008.

# Sommaire

- 1 Physique des neutrons ultra froids
- 2 Etats quantiques des neutrons bondissants
- 3 Le futur spectromètre GRANIT  
**GRA**avity **N**eutron **I**nduced **T**ransitions
- 4 GRANIT et les interactions supplémentaires

# La collaboration GRANIT

- V. V. Nesvizhevsky, A. K. Petukhov, H. G. Börner, T. Soldner, P. Schmidt-Wellenburg, M. Kreuz  
*Institut Laue Langevin, Grenoble, France.*
- K. V. Protasov, G. Pignol, D. Rebreyend, G. Quemener, F. Vezzu  
*Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie, Grenoble, France.*
- D. Forest, P. Ganau, J. M. Makowsky, C. Michel, J. L. Montorio, N. Morgado, L. Pinard, A. Remillieux  
*Laboratoire des Matériaux Avancés, Villeurbanne, France.*
- A. M. Gagarski, G. A. Petrov  
*Petersburg Nuclear Physics Institute, Gatchina, Russia.*
- A. M. Kusmina *Khlopin Institute, St. Petersburg, Russia.*
- A. V. Stelkov *Joint institute of Nuclear Research, Dubna, Russia.*
- H. Abele *University of Heidelberg, Germany.*
- S. Baessler *University of Mainz, Germany.*
- A. Yu. Voronin *Lebedev Physical Institute, Moscow, Russia.*
- A. Meyerovich *University of Rhodes Island, USA.*

# Exciter des transitions résonantes

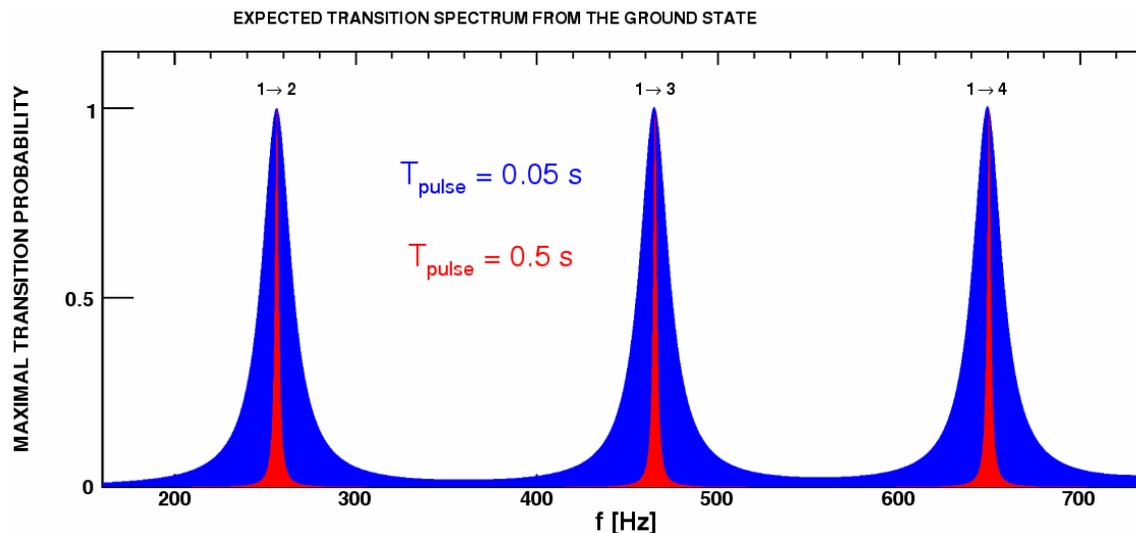
Neutron initialement  $|N\rangle$ , soumis à la perturbation  $\hat{V}(t) = \text{Re}(V(z)e^{i\omega t})$

Probabilité d'observer le neutron dans l'état excité  $|n\rangle$  à l'instant  $t$

$$P_{N \rightarrow n}(t) = \frac{\sin^2 \left( \sqrt{(\omega - \omega_{Nn})^2 + \Omega_{Nn}^2} \frac{t}{2} \right)}{1 + \left( \frac{\omega - \omega_{Nn}}{\Omega_{Nn}} \right)^2}$$

$$\Omega_{Nn} = \frac{2}{\hbar} \langle n | V(z) | N \rangle$$

Pulsation de Rabi définissant l'intensité de la perturbation pour la transition  $N \rightarrow n$



Observation de **résonances**

Mesure des différences d'énergie

# Exciter des transitions résonantes

Largeur des résonances

$$\Delta E \cdot T_{\text{pulse}} = h$$

- Temps minimal pour résoudre les niveaux voisins : 10 ms
- Temps disponible « en vol » :  $T \approx \frac{0.3 \text{ m}}{5 \text{ m/s}} \approx 50 \text{ ms}$
- Précision ultime liée à la durée de vie du neutron

$$(\Delta E)_{\beta} = 5 \times 10^{-6} \text{ peV} \quad \frac{(\Delta E)_{\beta}}{E} \approx 10^{-6}$$

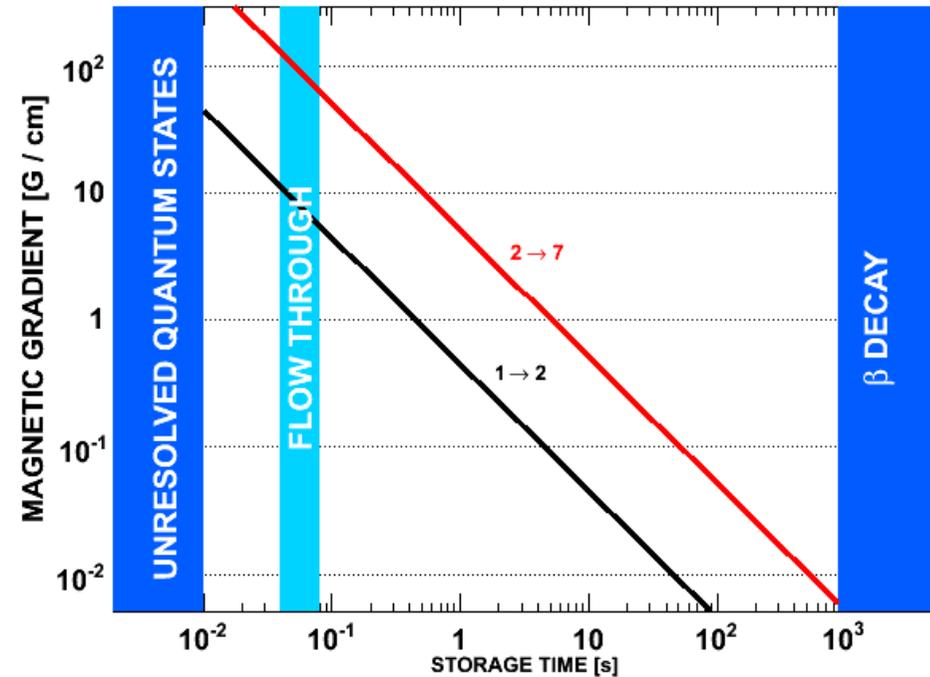
- Etape 1 : mettre en évidence les transitions en vol
- Etape 2 : **piéger les états quantiques** pour approcher la sensibilité ultime

# Excitation magnétique des transitions

Avec un gradient magnétique

$$\mathbf{B} = \beta \mathbf{e}_z z \cos(\omega t) + \dots$$

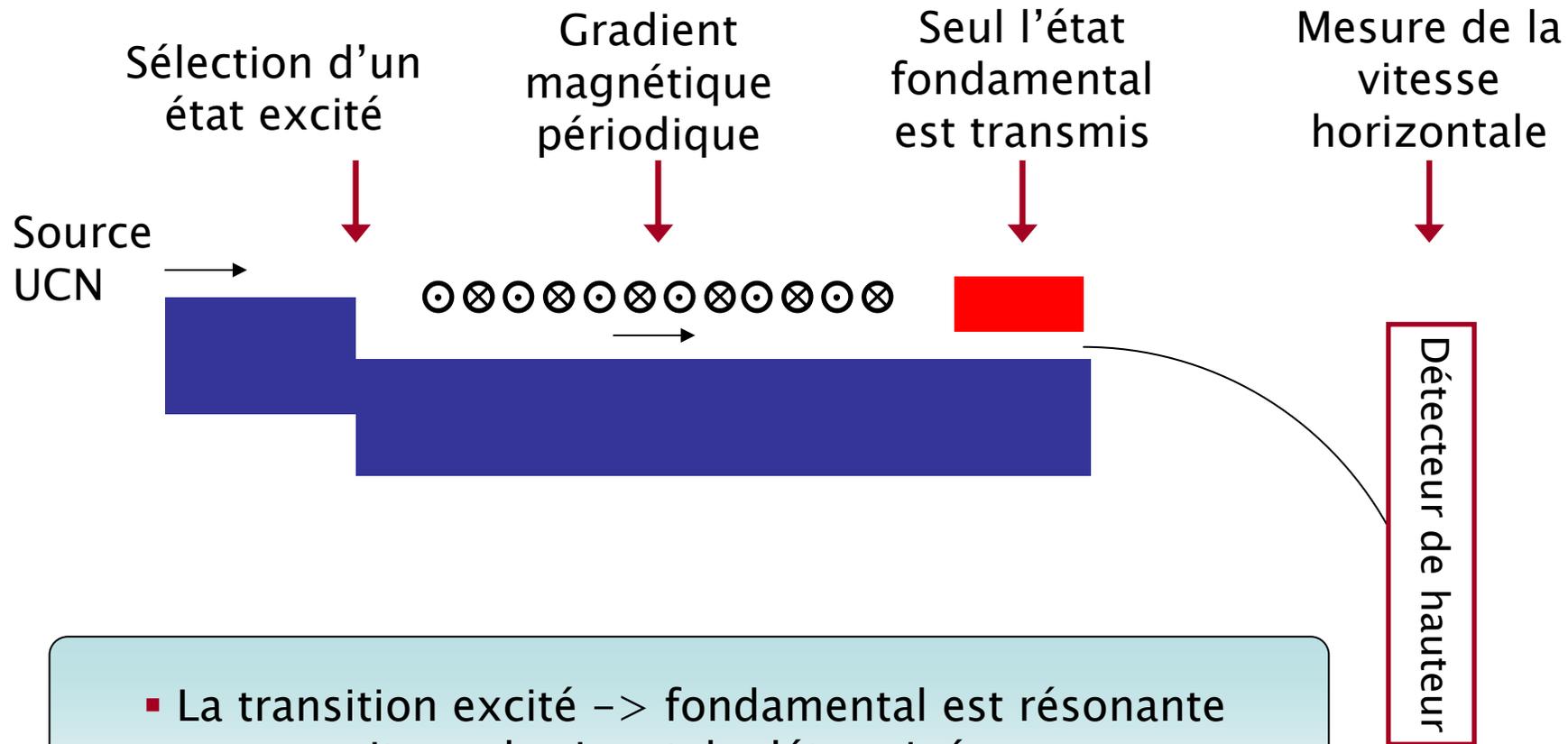
$$\hat{V}(t) = -\hat{\mu}_z \beta_z \hat{z} \cos(\omega t)$$



## Expériences futures

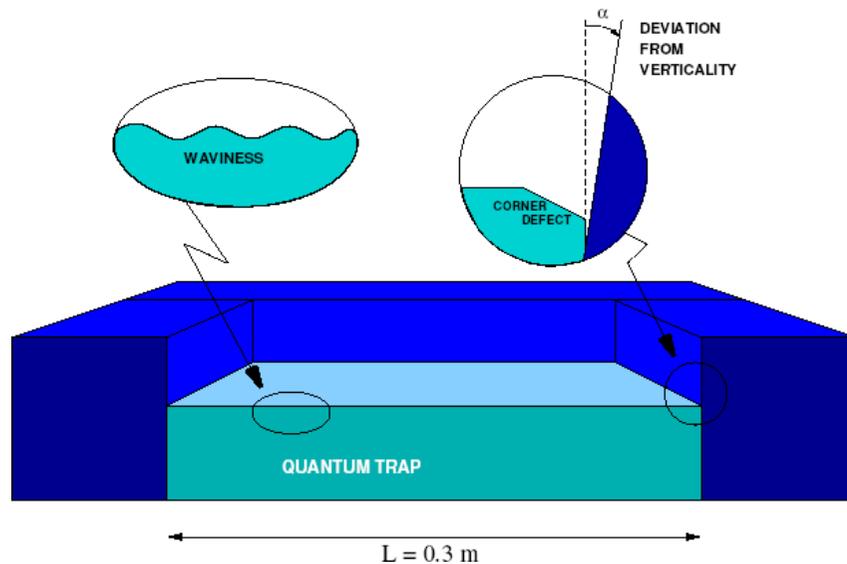
- Perturbation utilisant un miroir oscillant
- Perturbation gravitationnelle : masse oscillante

# Excitation des résonances en vol



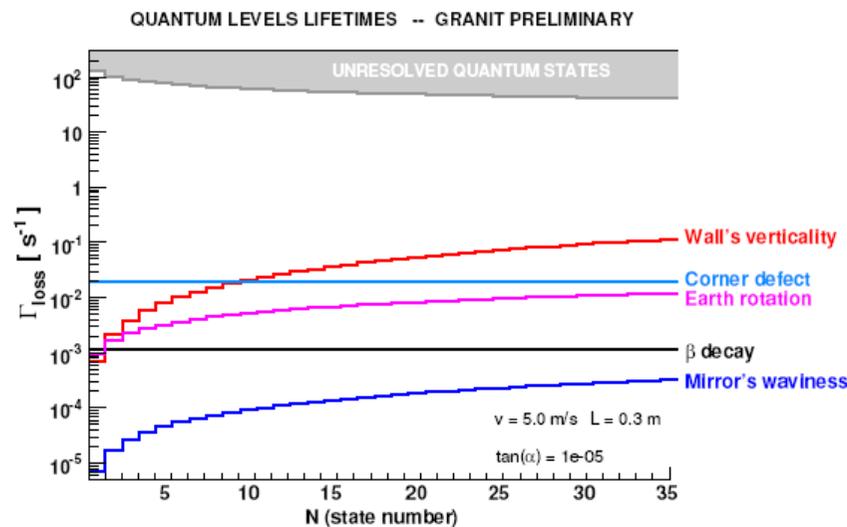
- La transition excité  $\rightarrow$  fondamental est résonante pour une vitesse horizontale déterminée.
- Mesure à 1% des fréquences de transitions

# Piéger les états quantiques



## Séquences de mesure

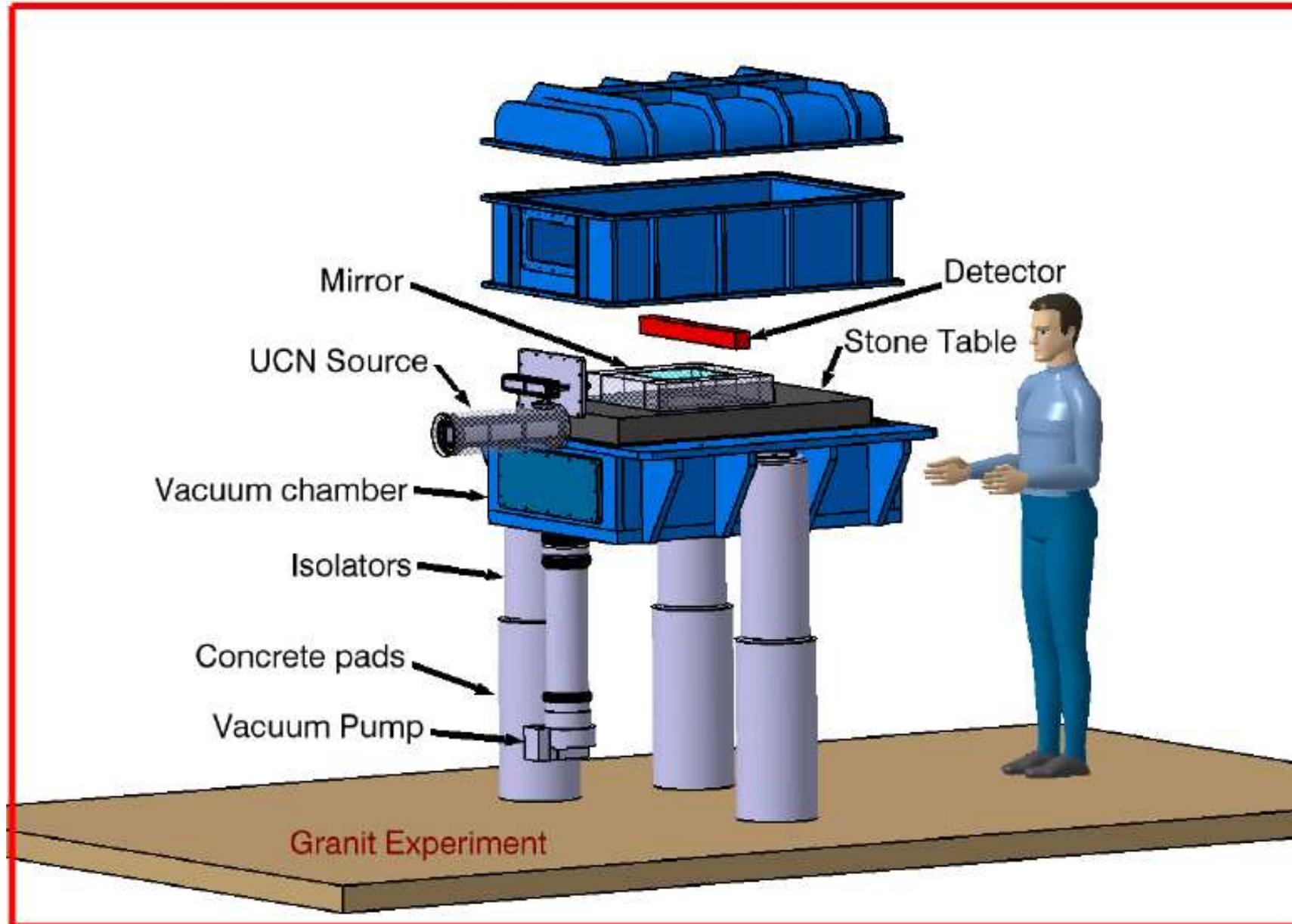
- Remplissage du piège
- Gradient magnétique oscillant
- Extraction



## Temps de stockage

- Objectif :  $T = 1 \text{ s}$
- Précision  $10^{-3}$  sur les fréquences de transitions

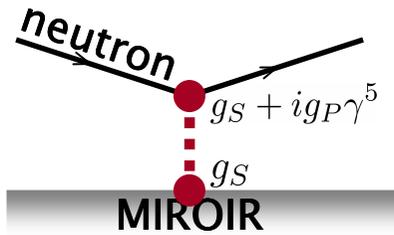
# Le spectromètre GRANIT



# Sommaire

- 1 Physique des neutrons ultra froids
- 2 Etats quantiques des neutrons bondissants
- 3 Le futur spectromètre GRANIT
- 4 GRANIT et les interactions supplémentaires

# Sensibilité à de nouvelles interactions



Nouveau boson léger de masse  $M$

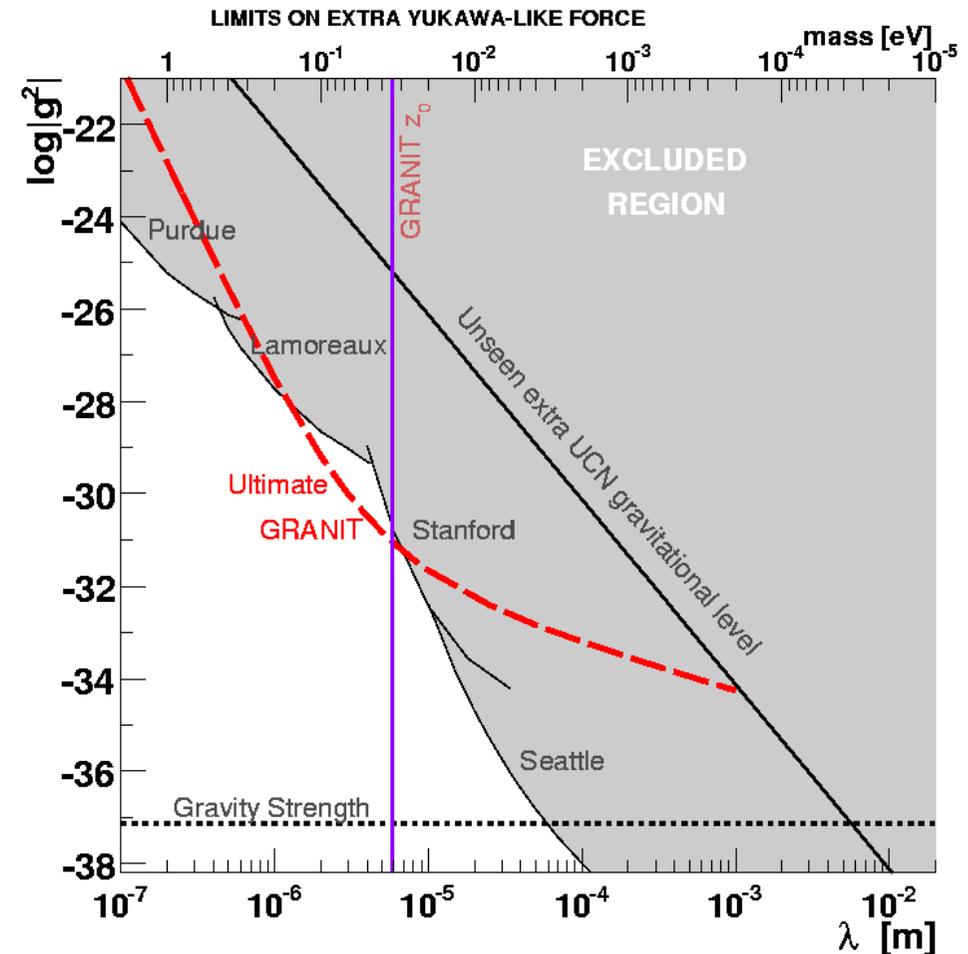
➔ Interaction supplémentaire entre le neutron et le miroir de portée

$$\lambda = \hbar c / M$$

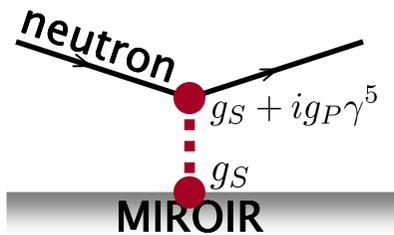
**Couplage monopole-monopole indépendant du spin**

$$V_{SS}(z) = \frac{g_S^2}{2} \frac{\rho}{m} \hbar c \lambda^2 e^{-z/\lambda}$$

➔ Modification du spectre



# Interactions supplémentaires dépendant du spin



Nouveau boson léger de masse  $M$

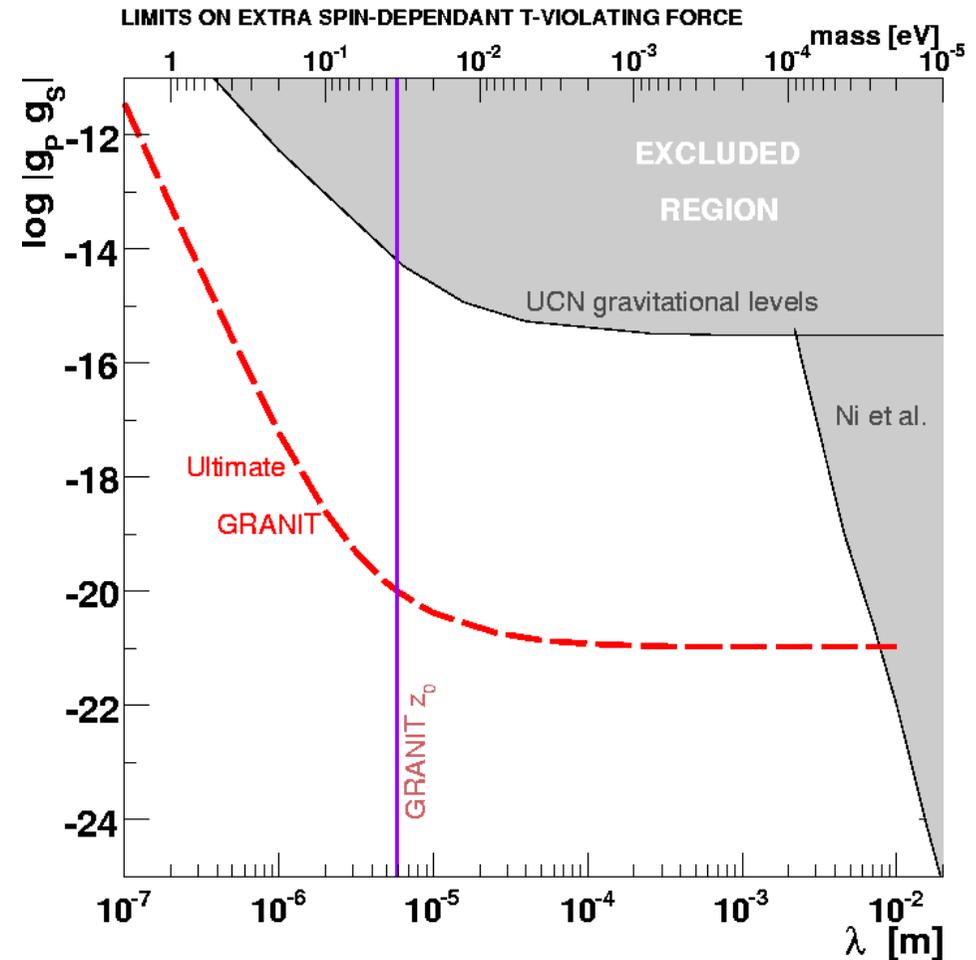
➔ Interaction supplémentaire entre le neutron et le miroir de portée

$$\lambda = \hbar c / M$$

**Couplage monopole-dipole dépendant du spin**

$$V_{SP}(z) = \frac{g_P g_S}{8} \frac{\rho}{m} \frac{(\hbar c)^2}{m c^2} \lambda \hat{\sigma}_z e^{-z/\lambda}$$

➔ Spectre différent pour deux composantes de spin



# Conclusions

- Les états quantiques du neutron dans le champ de pesanteur ont été découverts en 1999. Ce phénomène quantique associé au champ de pesanteur contredit **l'universalité de la chute libre**.
- Le spectromètre GRANIT permettra une **mesure précise du spectre** des états quantiques de pesanteur du neutron:
  - Observation des transitions résonantes **en vol**
  - Augmenter la précision avec des **états quantiques piégés**.
- GRANIT testera le **principe d'équivalence dans un régime quantique**, et sera sensible aux **interactions supplémentaires de courte portée dépendant du spin**.
- Le spectromètre est en construction. Les premières mesures commencent **fin 2008**.