

L'expérience GRANIT

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

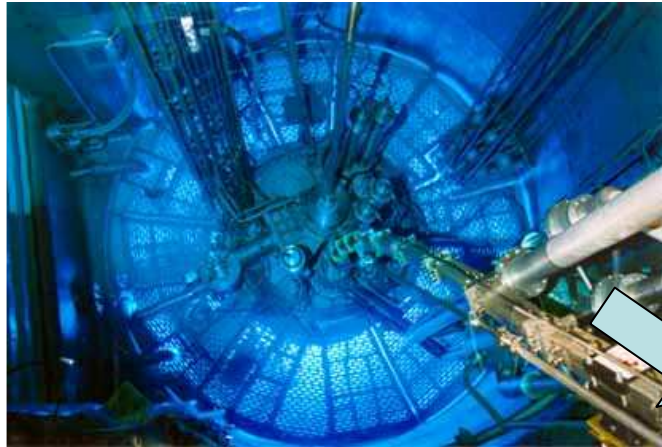


Séminaire LAPP

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



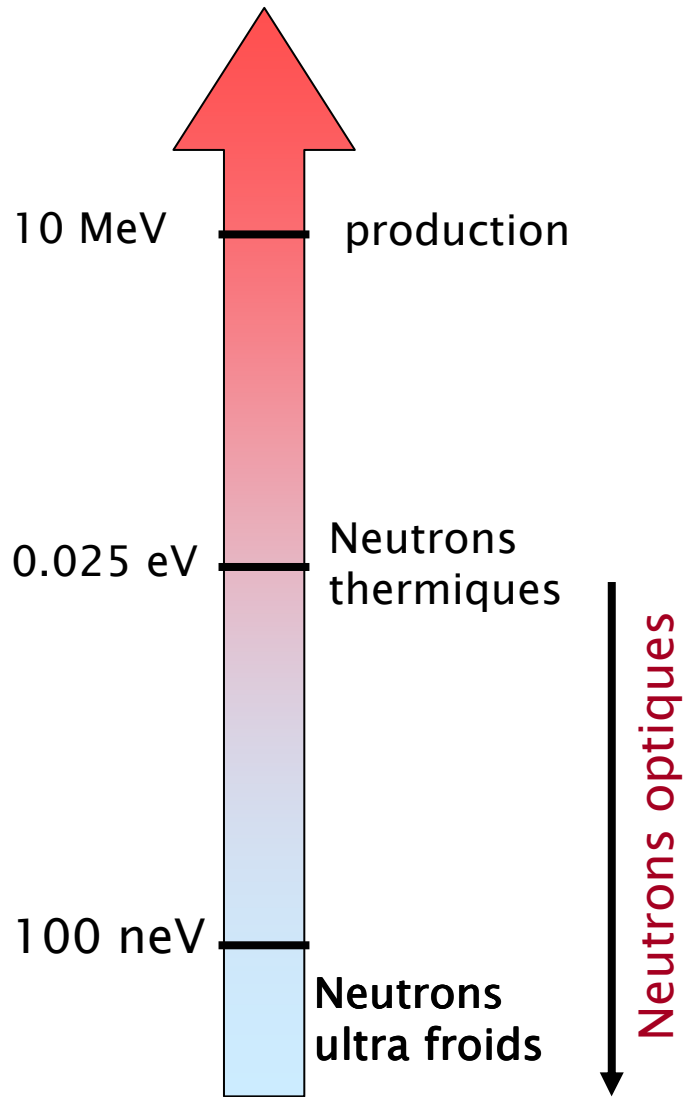
L'ILL :

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

Sommaire

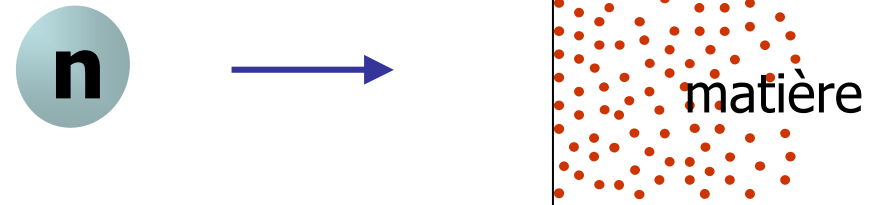
- 1 Physique des neutrons ultra froids
- 2 Etats quantiques des neutrons bondissants
- 3 Le futur spectromètre GRANIT
- 4 GRANIT et les interactions supplémentaires

Les neutrons ultra froids (UCN)



Neutrons optiques

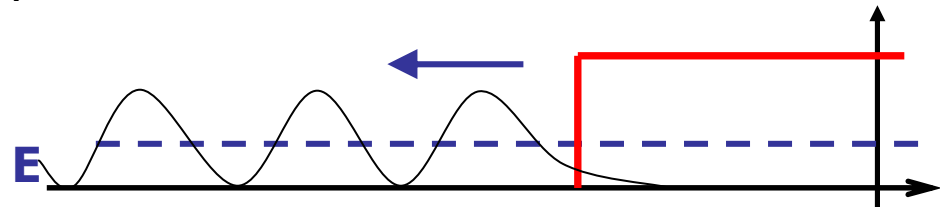
- longueur d'onde $> 2 \text{ \AA}$
- interaction avec la matière décrite par un potentiel moyen (de Fermi) $\sim 100 \text{ neV}$



Neutrons ultra froids

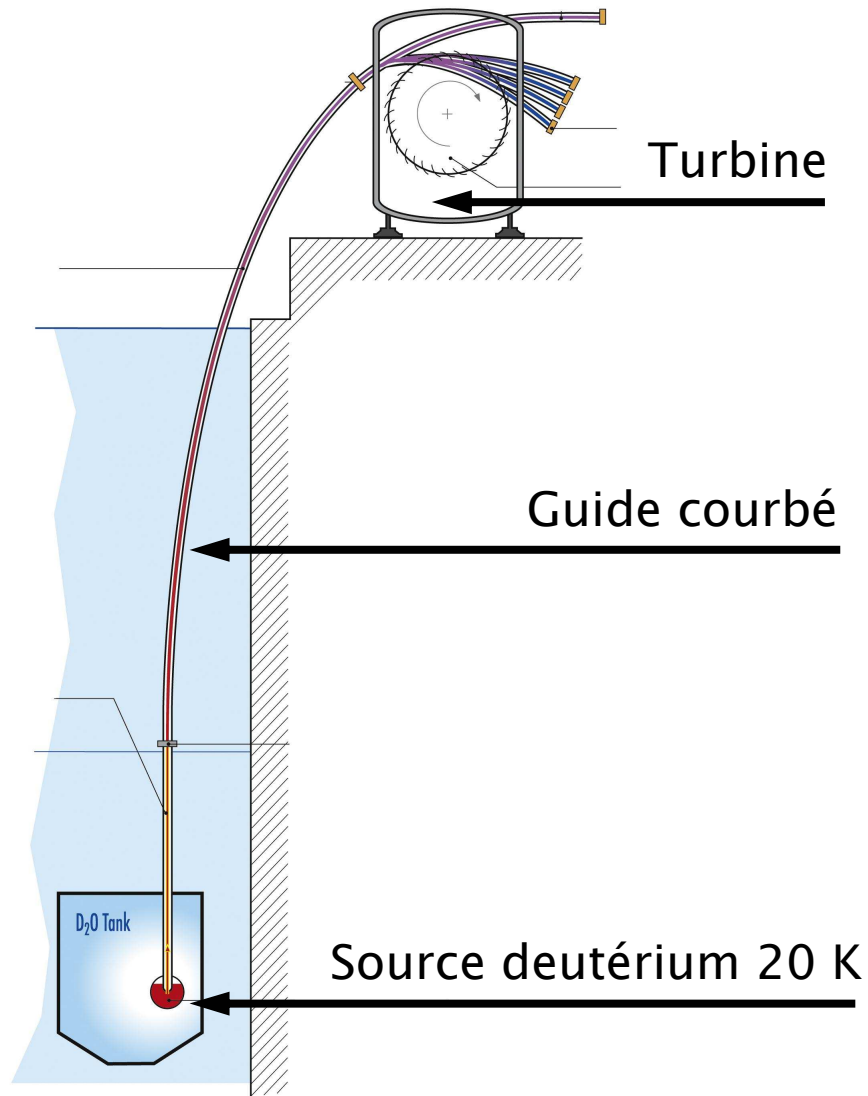
- énergie $<$ potentiel de Fermi
- réflexion totale sur les surfaces

→ 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 $50\text{ UCN} / \text{cm}^3$

Les UCN et les interactions fondamentales

Les UCN ressentent toutes les interactions.

- **Interaction faible**

désintégration β en 886 s

- **Interaction forte**

potentiel de Fermi ~ 100 neV

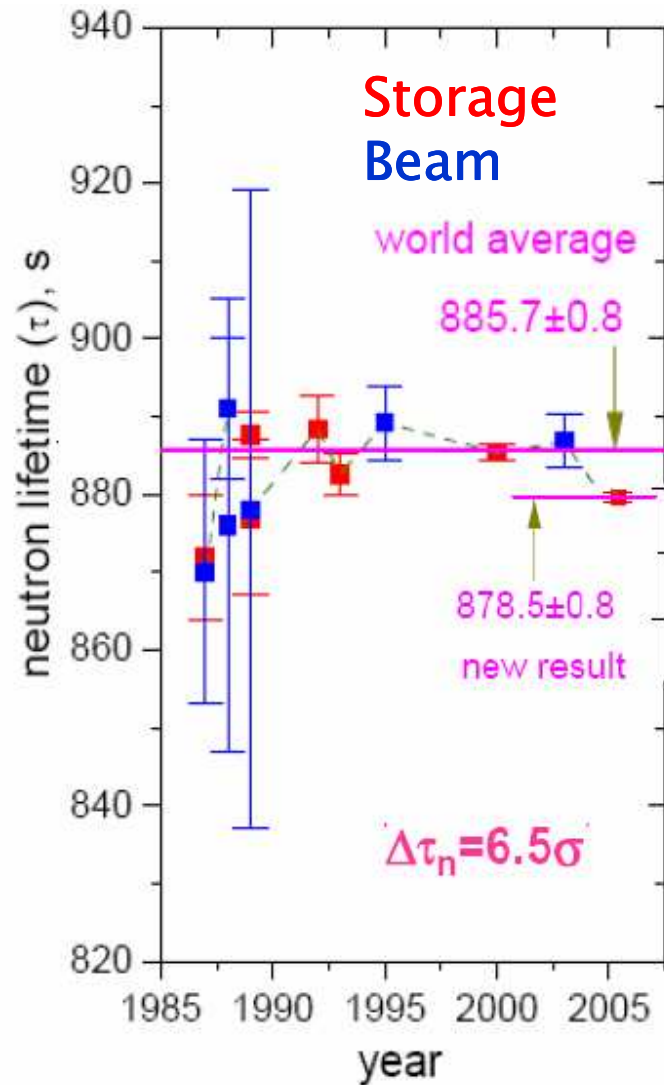
- **Electromagnétisme**

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

- **Gravitation**

le neutron gagne ~ 100 neV pour une chute de 1 m

Mesure de la durée de vie du neutron



Deux méthodes en compétition

- Faisceaux
- Stockage

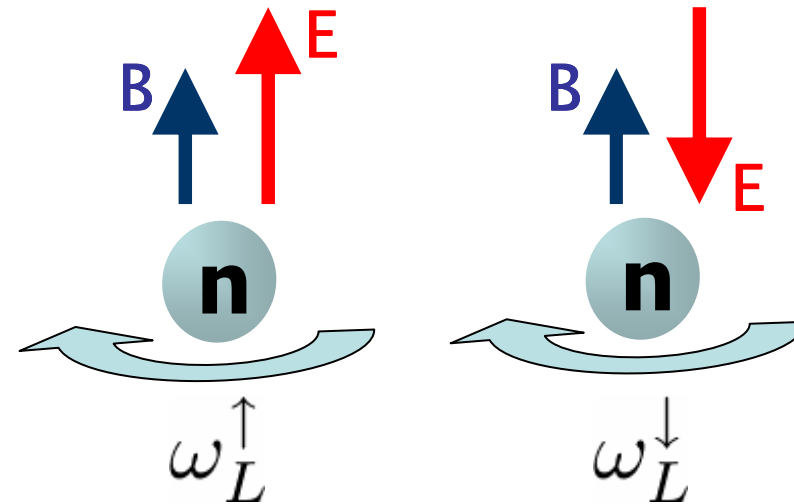
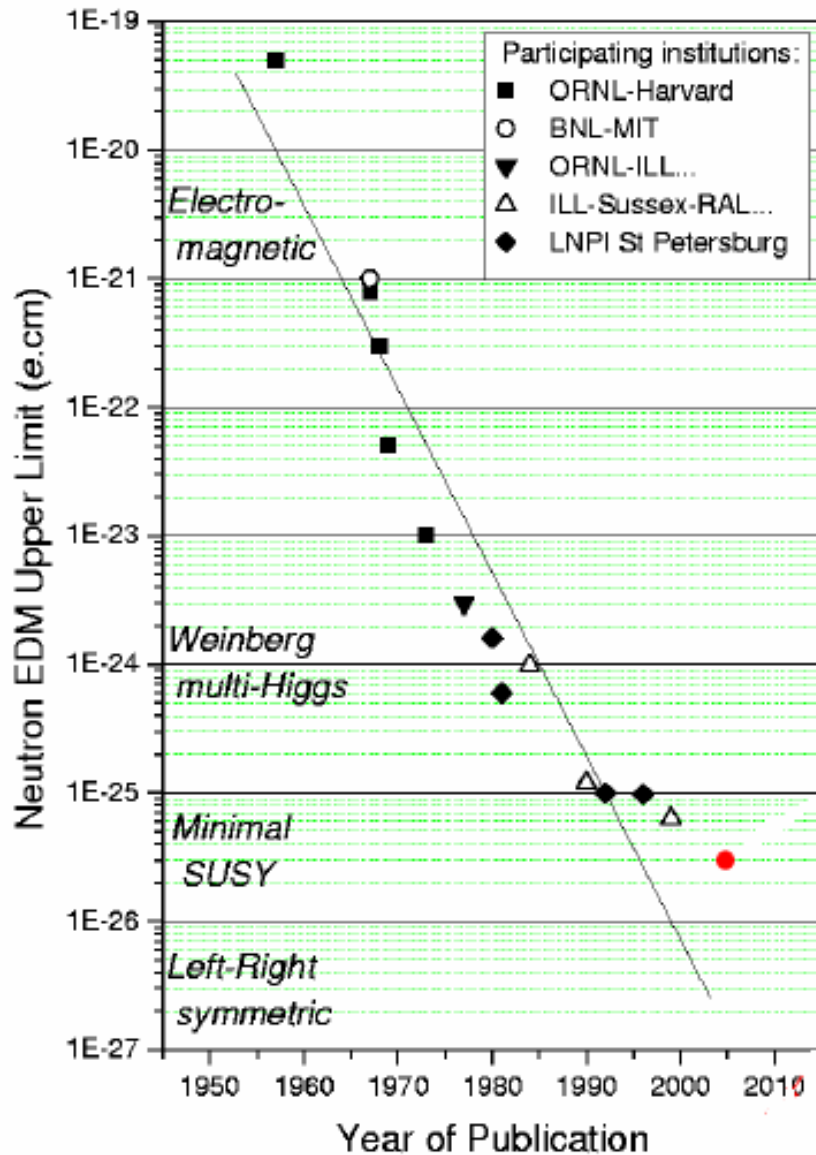
Nucléosynthèse primordiale

τ est fondamental pour prédire
l'abondance primordiale de ^4He

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

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

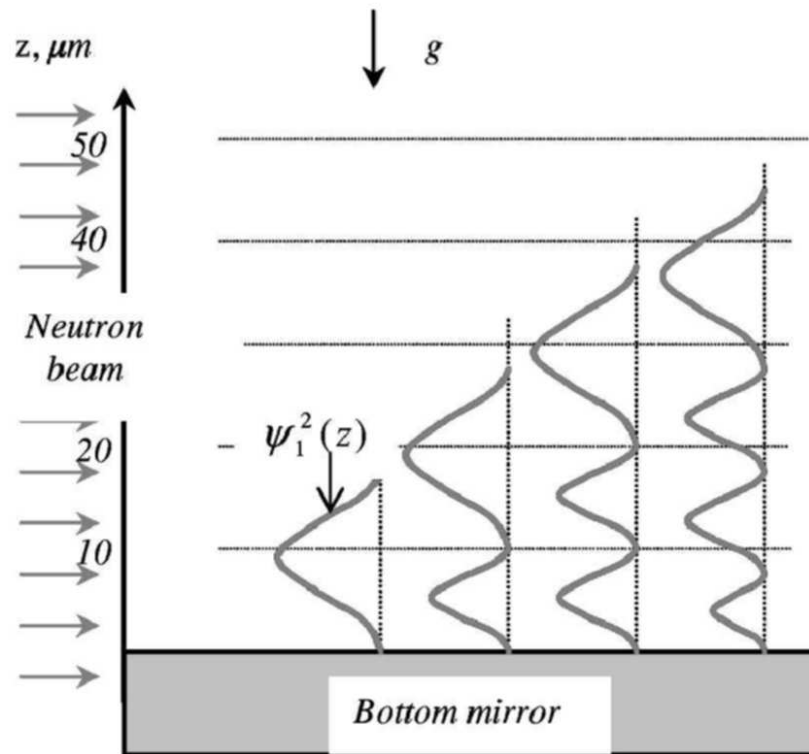
↑
Temps de stockage

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	5×10^{-11} m
energy	1 peV	10 eV
frequency	250 Hz	2×10^{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

David Scott : bodies fall at the same rate regardless of mass

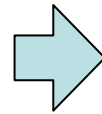
Pour voir la video :

http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/lunar/apollo_15_feather_drop.html

Violation de l'universalité de la chute libre

Equation de Newton

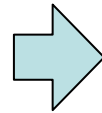
$$\cancel{m} \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = \cancel{m} \vec{g}$$



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

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

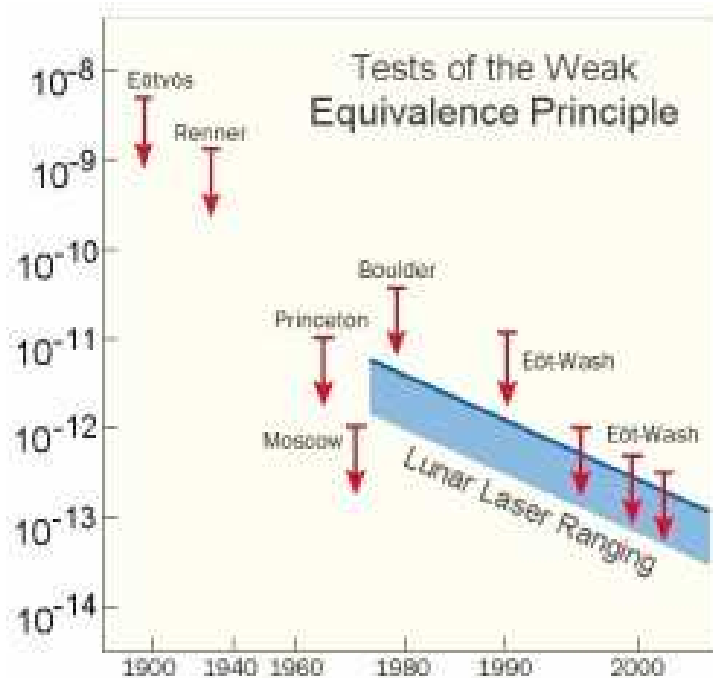
On peut mesurer la masse d'un neutron en le regardant tomber :

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

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

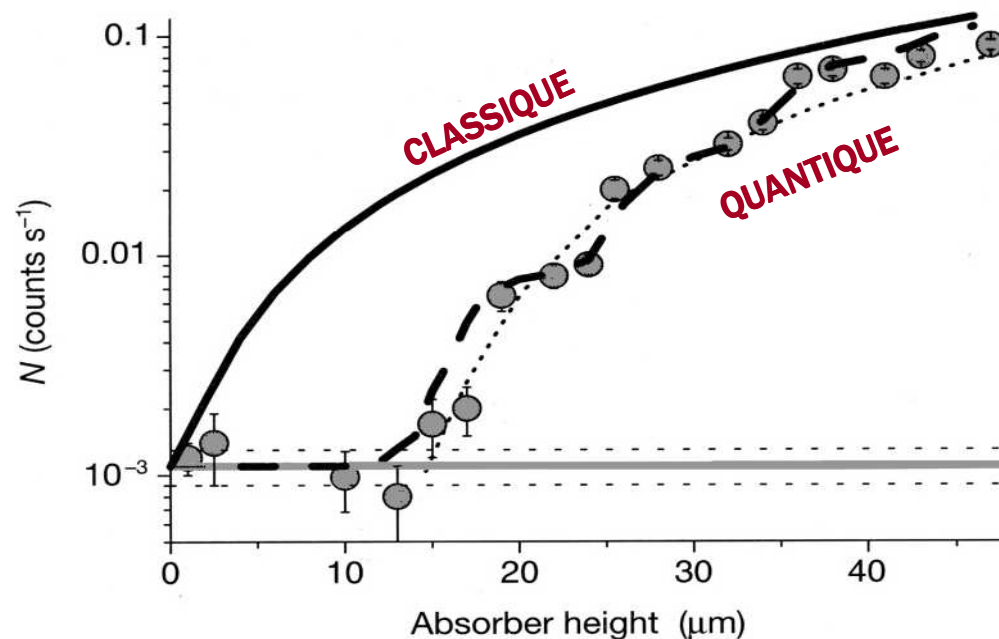
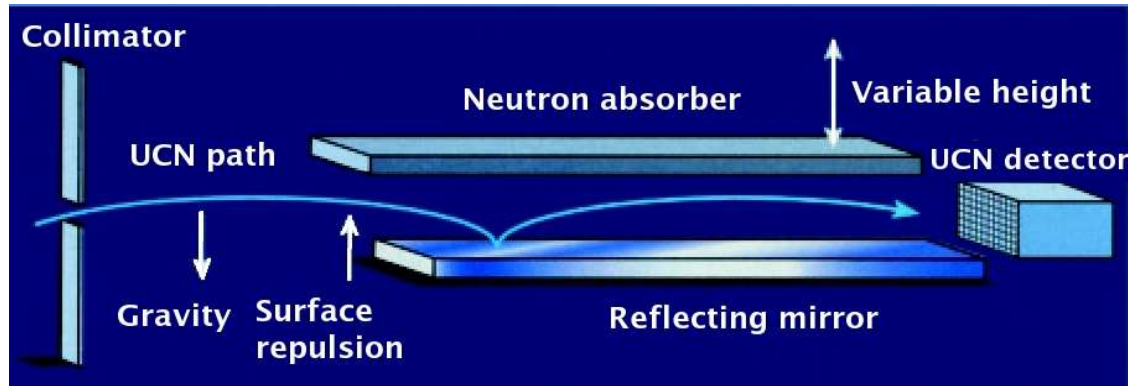
$$\left| \frac{m_g - m_i}{m} \right| < 10^{-15}$$

- Futur **Satellite Test of Eq Principle**

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

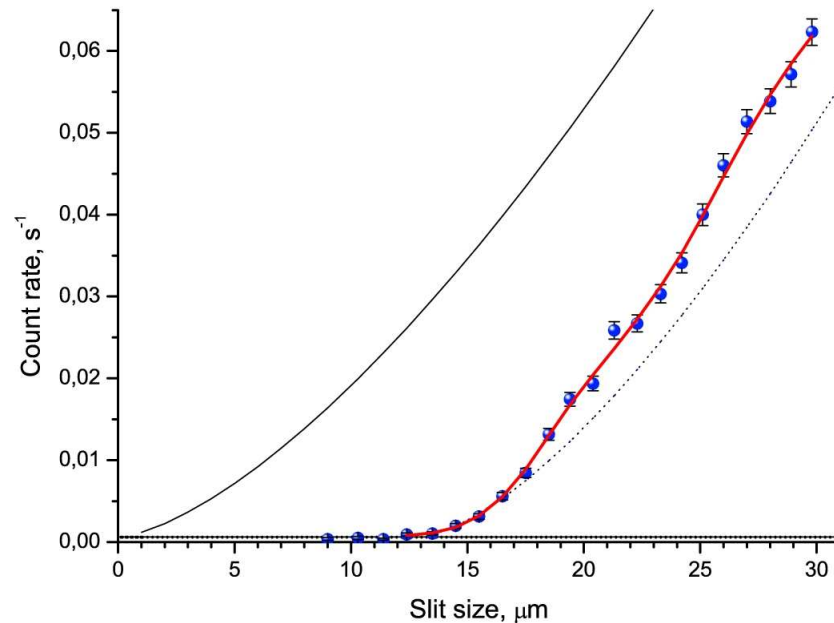
Découverte des états quantiques en 1999

Nesvizhevsky *et al*, Nature 415 (2002)



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

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 précise 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
GRAvity **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

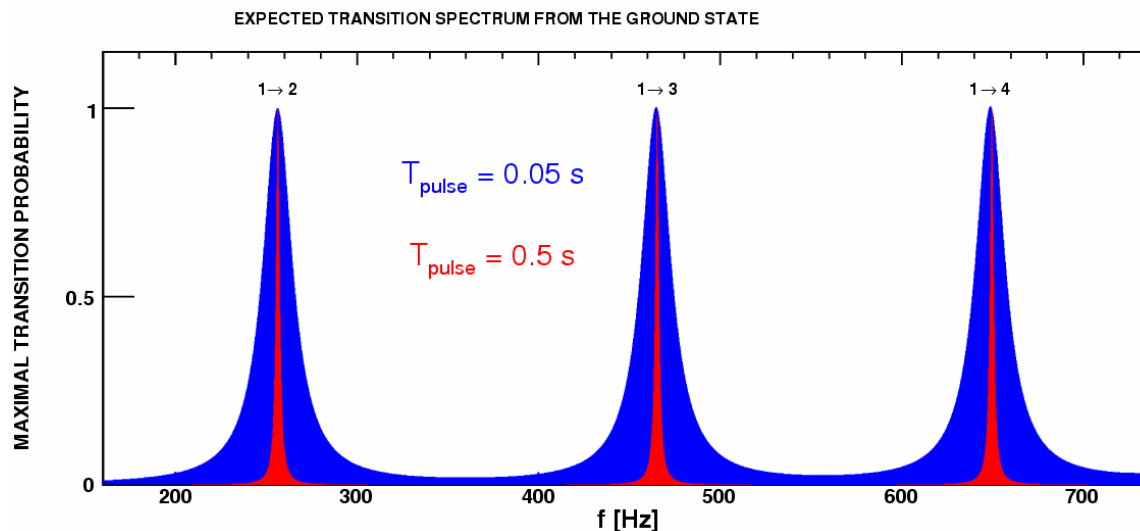
Neutron initialement $|N\rangle$, soumis à la perturbation $\hat{V}(t) = \text{Re}(V(z)e^{i\omega t})$

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

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

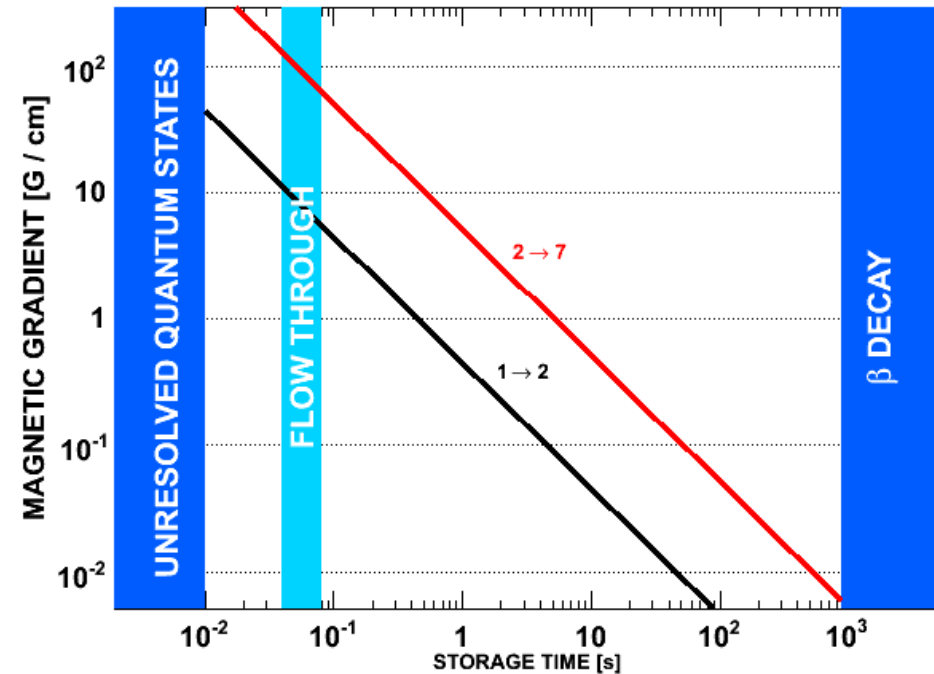
- Etape 1 : mettre en évidence les transitions en vol
- Etape 2 : **piéger les états quantiques** pour approcher la sensibilité ultime

Excitation magnétique des transitions

Avec un gradient magnétique

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

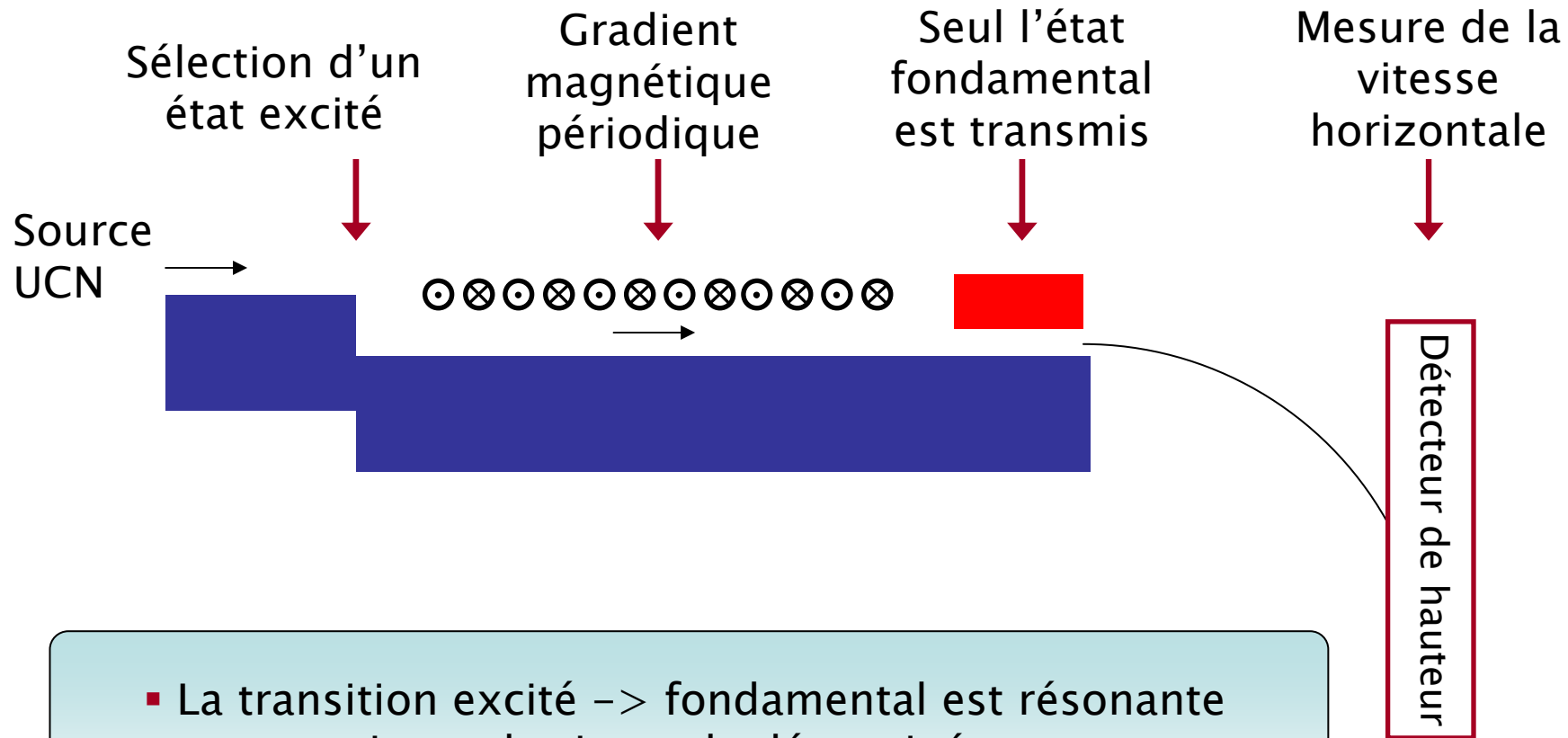
$$\hat{V}(t) = -\hat{\mu}_z \beta_z \hat{z} \cos(\omega t)$$



Expériences futures

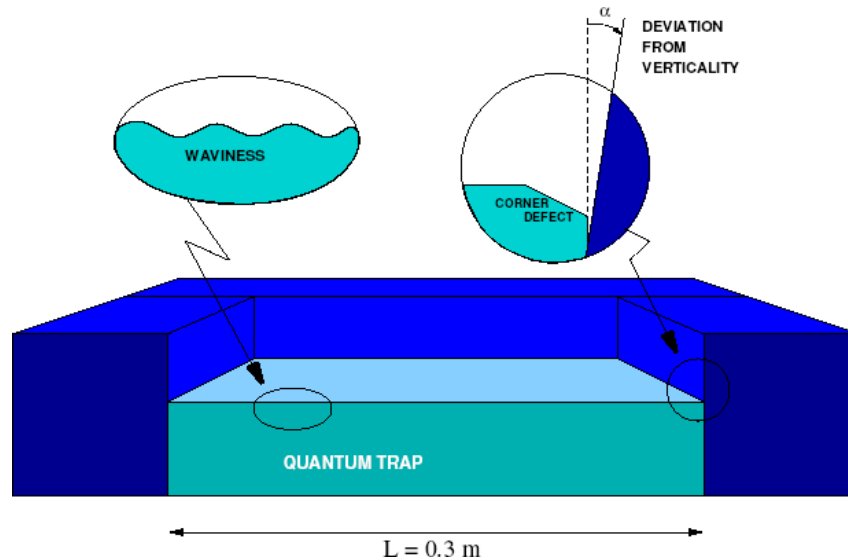
- Perturbations utilisant un miroir oscillant
- Perturbations gravitationnelle : masse oscillante

Excitation des résonances en vol



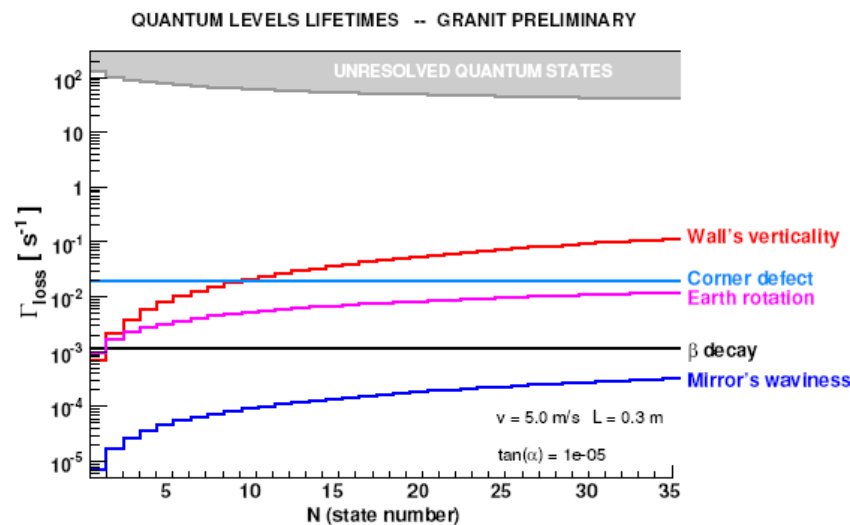
- La transition excité \rightarrow fondamental est résonante pour une vitesse horizontale déterminée.
- Mesure à 1% des fréquences de transitions

Piéger les états quantiques



Séquences de mesure

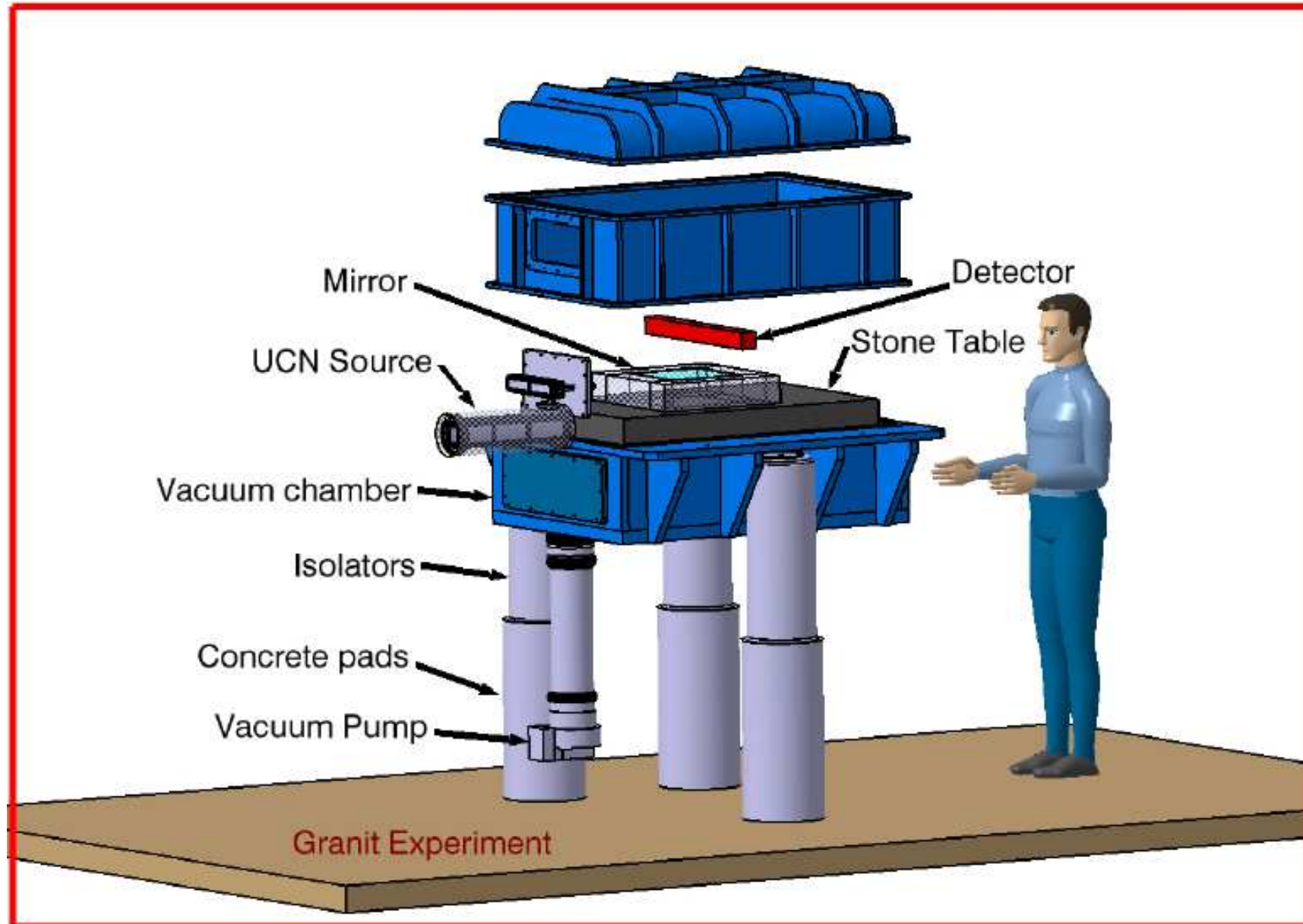
- Remplissage du piège
- Gradient magnétique oscillant
- Extraction



Temps de stockage

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

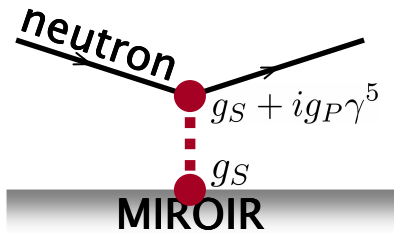
Le spectromètre GRANIT



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

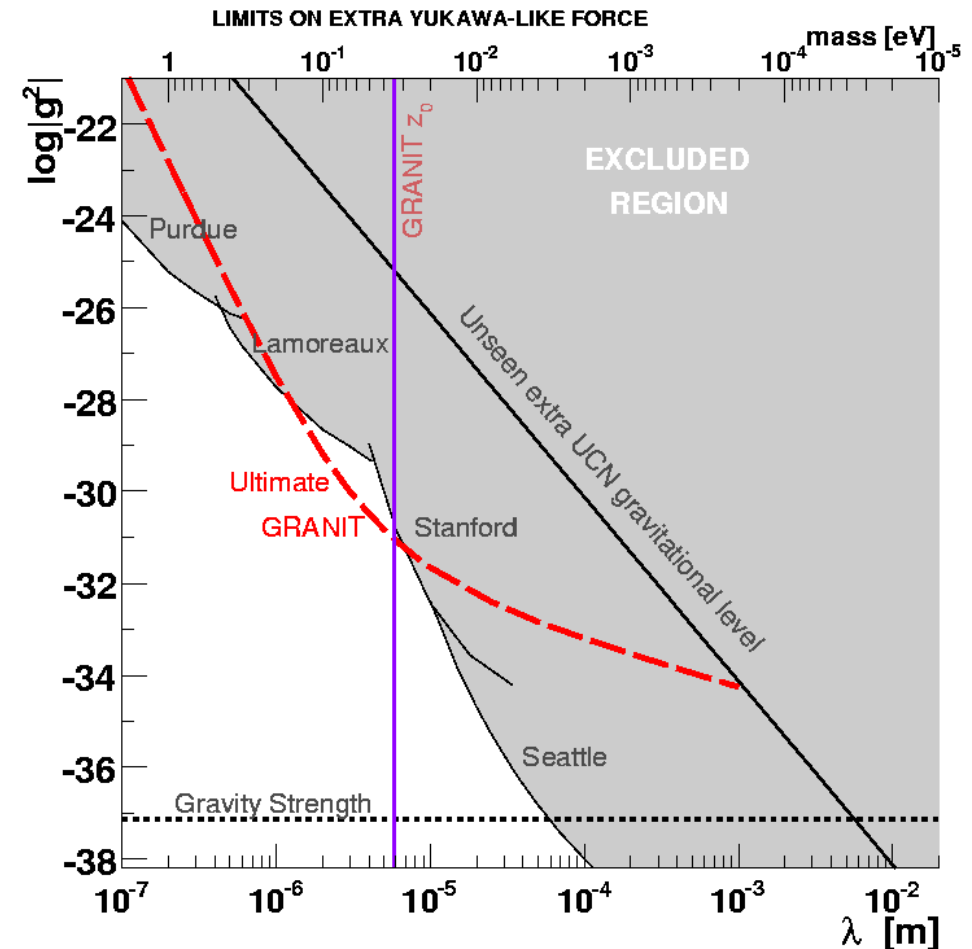
Interaction supplémentaire
entre le neutron et le miroir
de portée

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

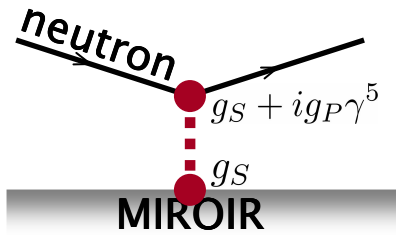
**Couplage monopole-monopole
indépendant du spin**

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

Modification du spectre



Interactions supplémentaires dépendant du spin



Nouveau boson léger de masse M

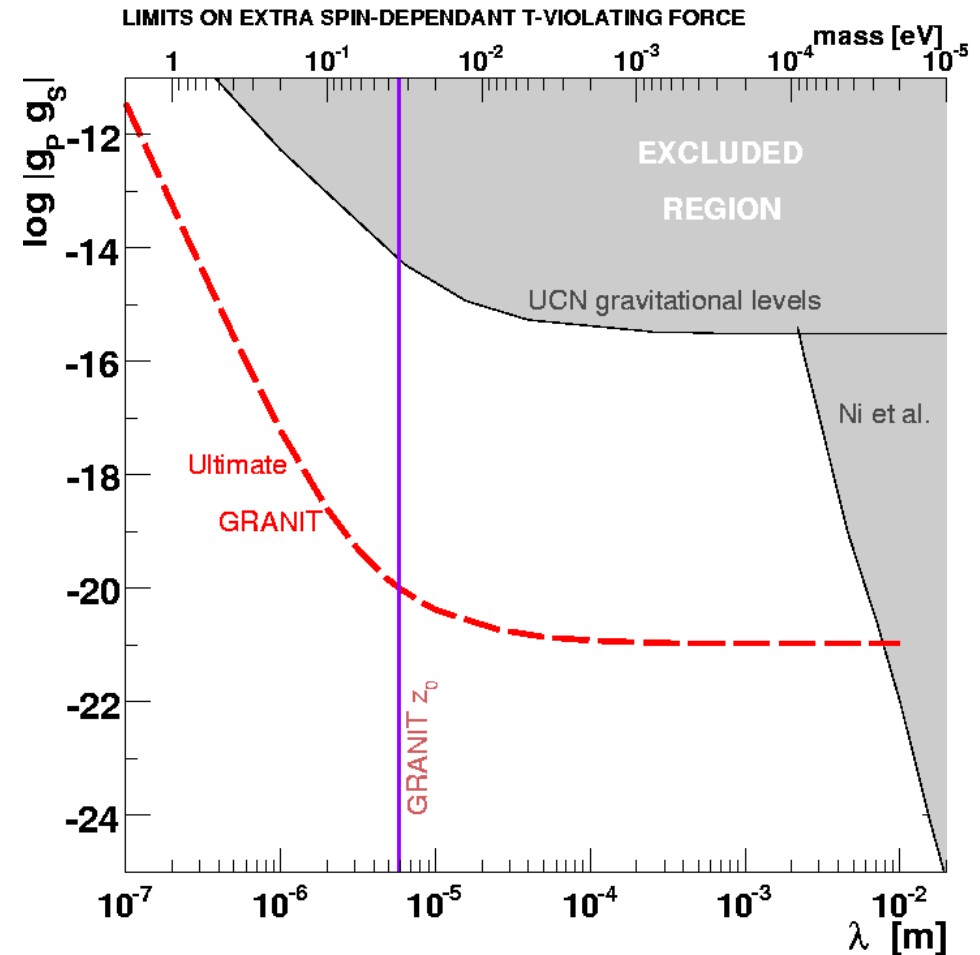
Interaction supplémentaire
entre le neutron et le miroir
de portée

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

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**.