

Etats quantiques du neutron dans le champ de pesanteur

- Motivations
- Découverte expérimentale
- Etat des lieux
- Perspectives – GRANIT

Quatre interactions

Electromagnétique

Etats liés : atomes, molécules

Quantum : photon

Forte

Etats liés : noyaux, nucléons

Quantum : gluon

Faible

Etats liés : -

Quantum : W, Z

Gravitationnelle

Etats liés : ?

Quantum : ?

"Let us consider another possibility, an atom held together by gravity alone. For exemple, we might have two neutrons in a bound state. When we calculate the Bohr radius of such an atom, we find that it would be 10^8 light years, and that the atomic binding energy would be 10^{-70} Rydbergs. There is then little hope of ever observing gravitational effects on systems which are simple enough to be calculable in quantum mechanics."

Brian Hatfield, in "Feynman Lectures on Gravitation" ;
R.P. Feynman, F.B. Morinigo, W.G. Wagner, Ed. Brian Hatfield

Addison-Wesley Publishing Company, 1995, p. 11

Historique

- La solution de l'équation de Schrödinger dans un potentiel linéaire a été trouvée en **1928** :
G. Breit, *Phys Rev* **32** (1928) 273
- Première expérience de stockage des neutrons ultra froids a effectuée au JINR (Dubna) en **1968** :
V.I. Luschnikov et al., *JETP Lett* **9** (1969) 40
- En **1976**, on a proposé à chercher les niveaux quantiques avec des neutrons ultra froids :
V.I. Luschnikov, *Physics Today* **42** (1977) 51;
V.I. Luschnikov and A.I. Frank, *JETP Lett* **28** (1978) 559
- Première observation des niveaux quantiques du neutron dans le champ de pesanteur a fait à ILL en **1999** :
V.V.Nesvizhevsky et al., *Nature* **415** (2002) 297;
Phys Rev **D87** (2003) 102002

Choix du système

Les états quantiques peuvent apparaître pour un neutron ultra froids

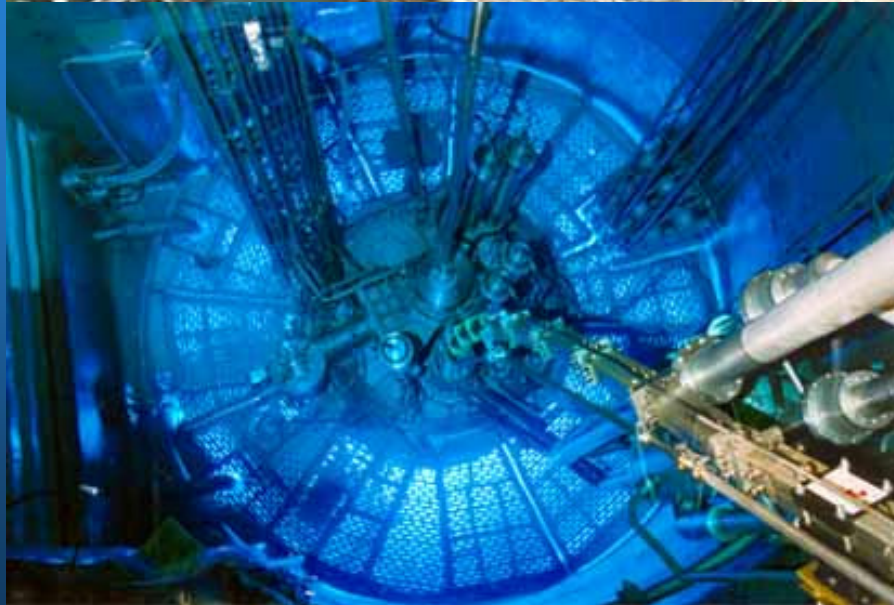
- une particule neutre
- d'une longue durée de vie
- d'une faible masse
- d'une faible énergie (température)

dans un puits formé par un miroir

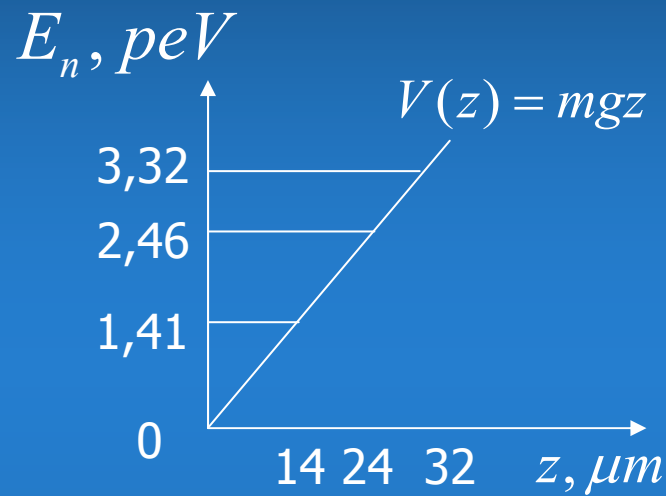
- diffusion élastique à 99,99%
- absorption 10^{-5}
- diffusion inélastique 10^{-4}
- grande barrière de potentiel

et le champ de pesanteur

Institut Laue Langevin, Grenoble



Exercice de mécanique quantique



$$z_0 = \sqrt[3]{\frac{\hbar^2}{2gm^2}} = 5,87 \mu\text{m}$$

$$E_n^{\text{qc}} \approx \sqrt[3]{\left(\frac{9m}{8}\right) \cdot \left(\pi\hbar g \left(n - \frac{1}{4}\right)\right)^2}$$

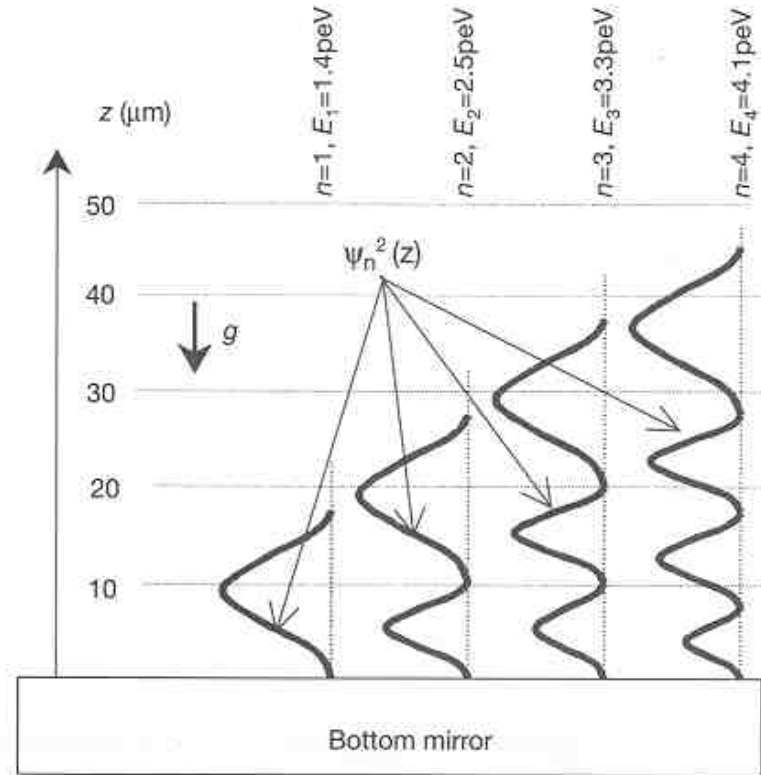
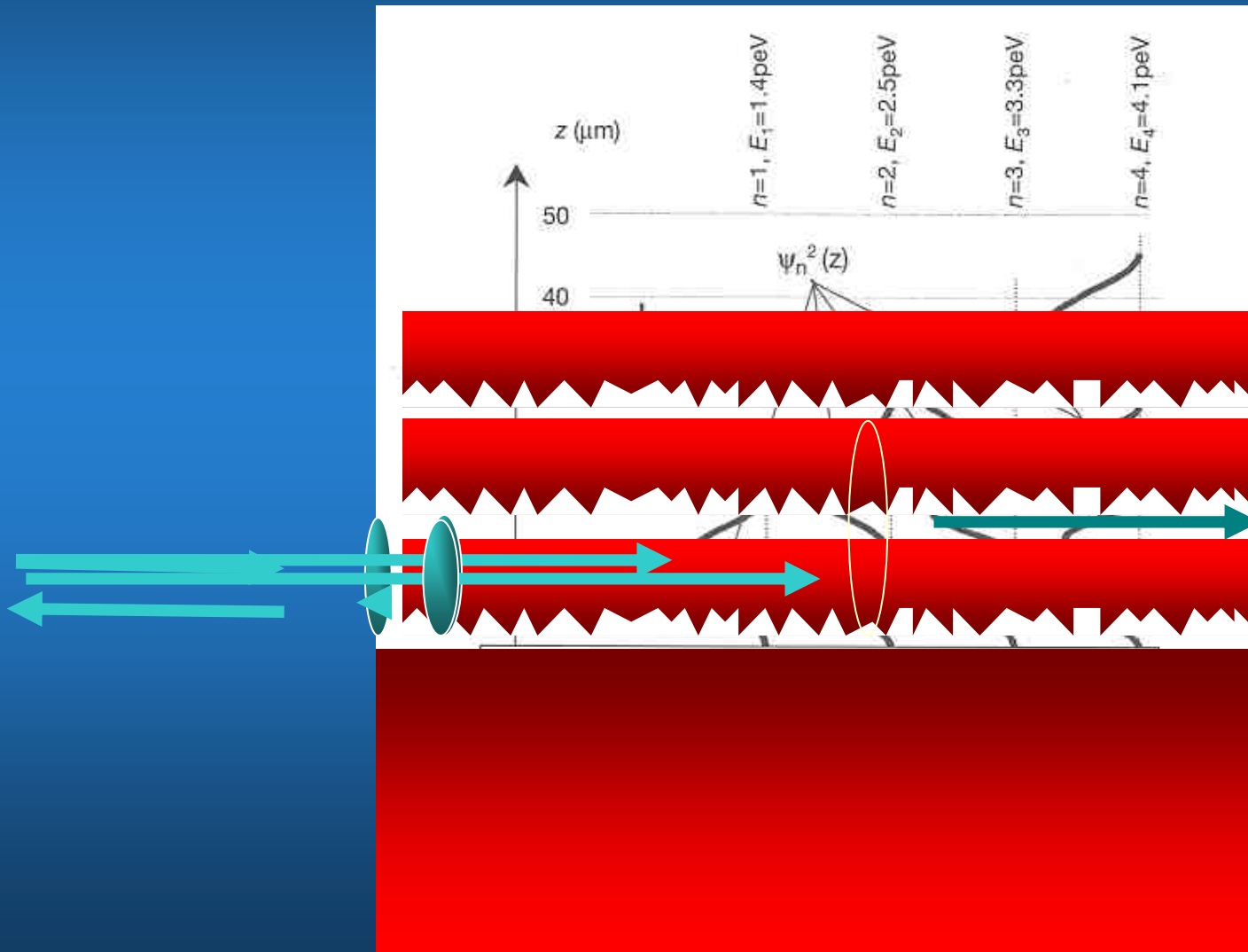


Figure 1 Wavefunctions of the quantum states of neutrons in the potential well formed by the Earth's gravitational field and the horizontal mirror. The probability of finding neutrons at height z , corresponding to the n th quantum state, is proportional to the square of the neutron wavefunction $\psi_n^2(z)$. The vertical axis z provides the length scale for this phenomenon. E_n is the energy of the n th quantum state.

Méthodes d'observation

- Méthode intégrale (recherche d'un paramètre avec un comportement discret)
- Méthode différentielle (visualisation de la fonction d'onde – « photo »)
- *Recherche des transitions entre les niveaux quantiques*

Méthode intégrale



Idée de l'installation :

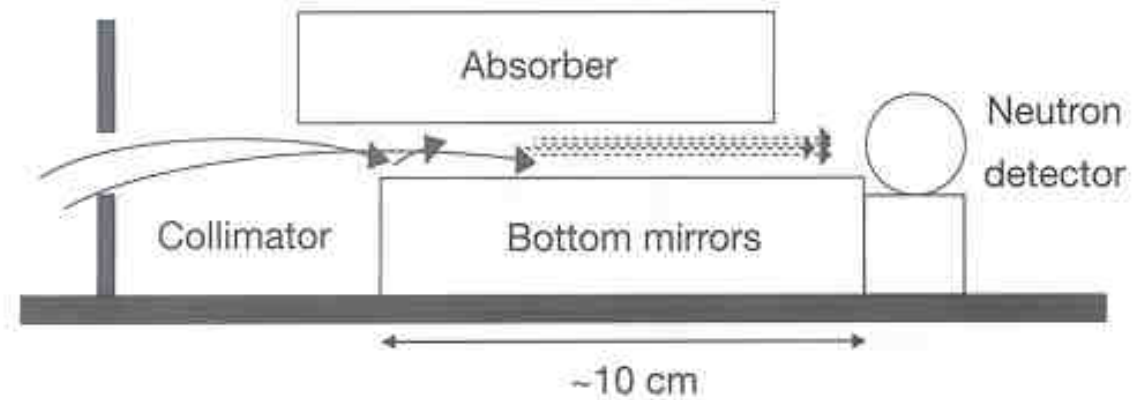
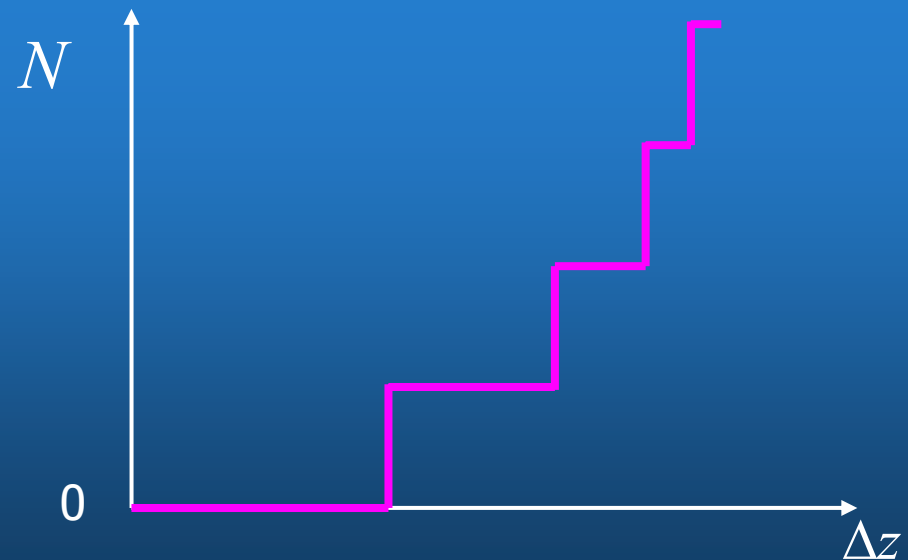


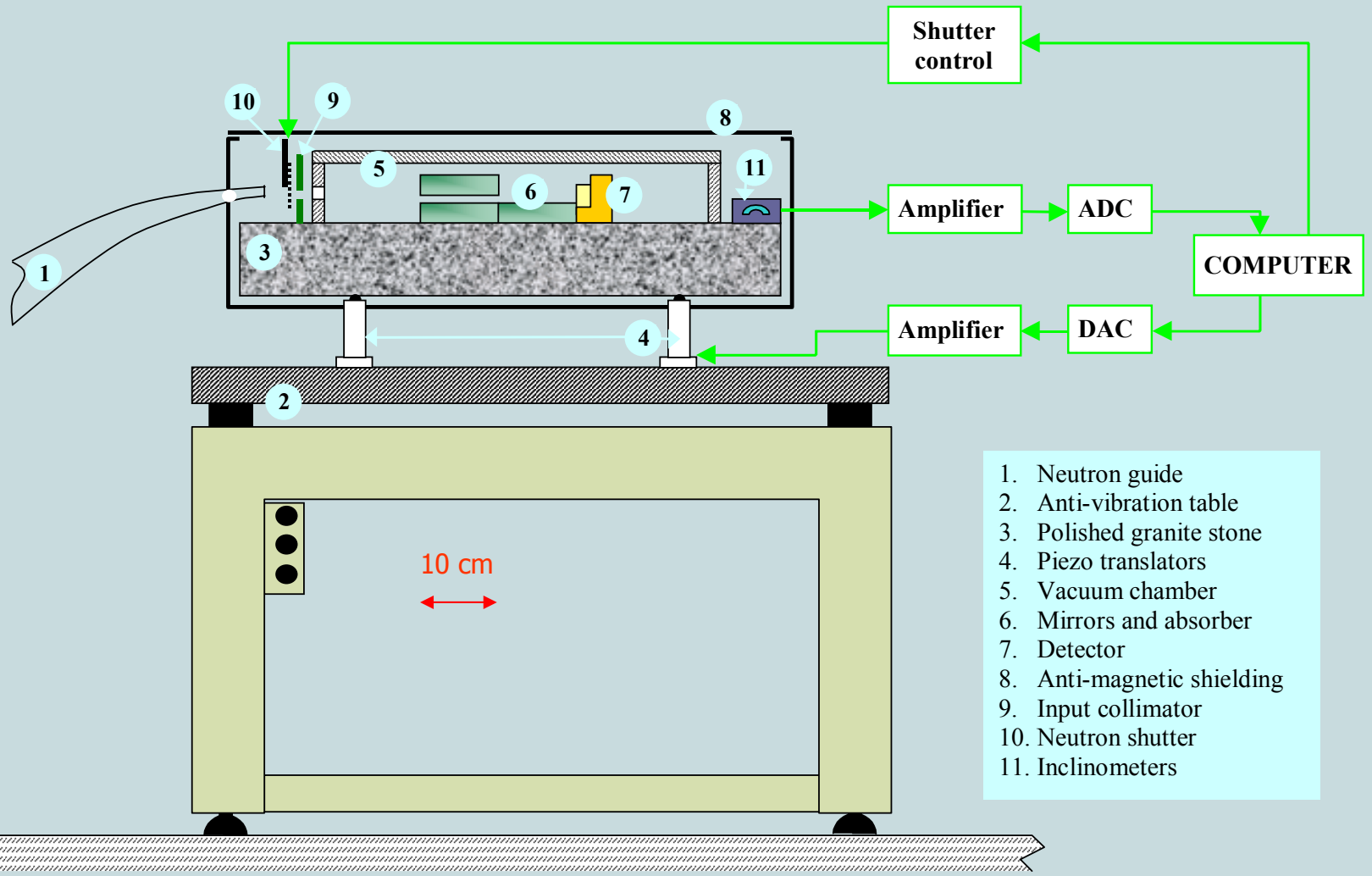
Figure 2 Layout of the experiment. The limitation of the vertical velocity component depends on the relative position of the absorber and mirror. To limit the horizontal velocity component we use an additional entry collimator. The relative height and size of the entry collimator can be adjusted.

Résultat espéré (naïvement) :

$$N \propto (E_n^{\text{qc}})^{2/3} \propto \Delta z^{2/3} \text{ pour } \Delta z \rightarrow \infty$$



Installation



Premiers résultats (1999)

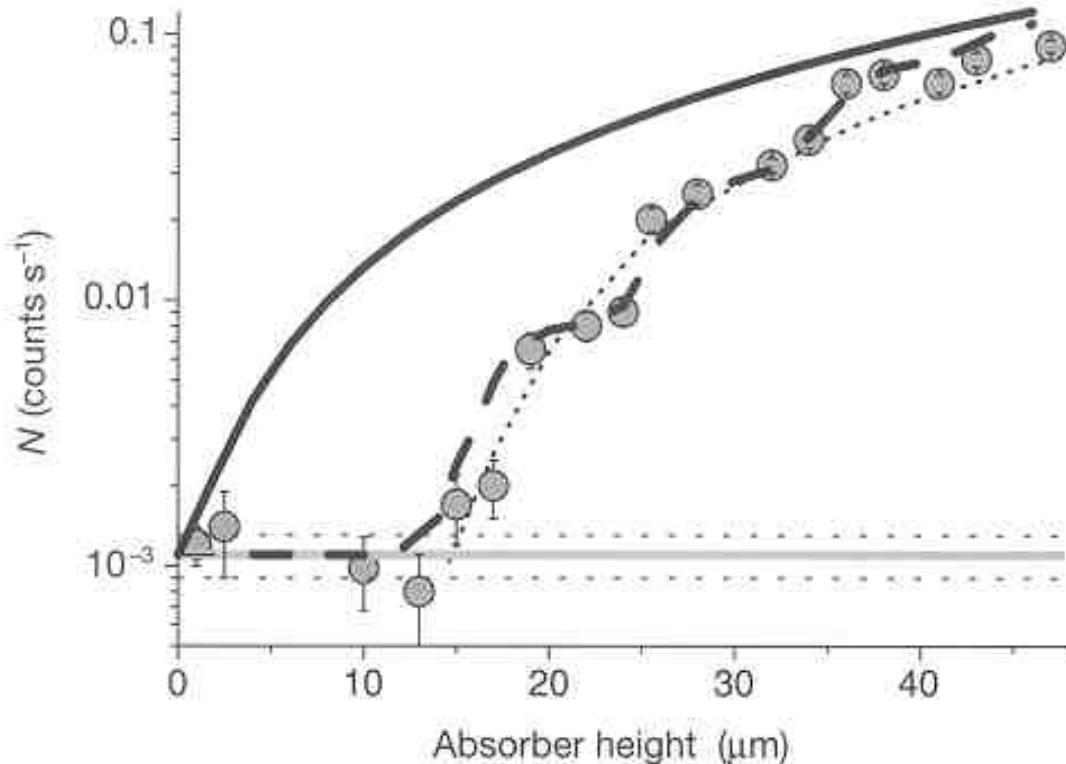


Figure 4 The neutron throughput versus the absorber height at low height values. The data points are summed up in intervals of $2 \mu m$. The dashed curve corresponds to a fit using the quantum-mechanical calculation, in which all level populations and the height resolution are fitted from the experimental data. The solid curve is again the full classical treatment. The dotted line is a truncated fit in which it is assumed that only the lowest quantum state—which leads to the first step—exists.

On voit l'état
fondamental
!!!

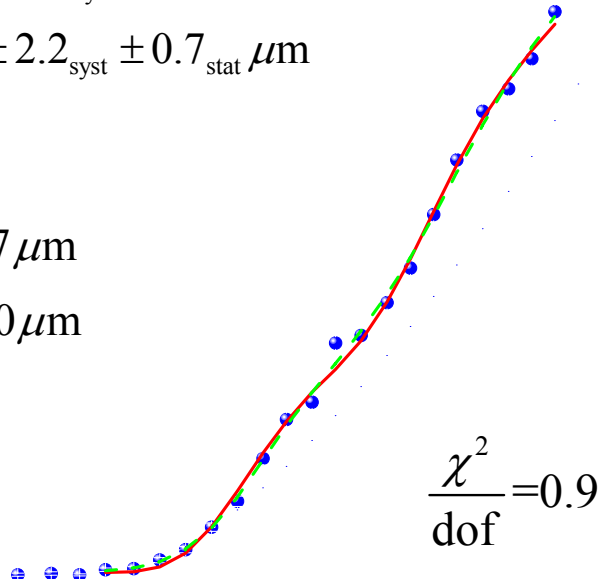
Problème de la résolution

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

$$z_2^{\text{exp}} = 21.3 \pm 2.2_{\text{syst}} \pm 0.7_{\text{stat}} \mu\text{m}$$

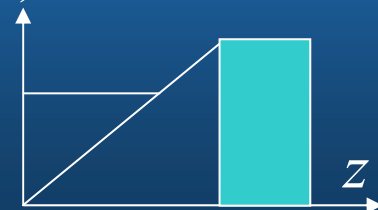
$$z_1^{\text{qc}} = 13.7 \mu\text{m}$$

$$z_2^{\text{qc}} = 24.0 \mu\text{m}$$



- Il existe une résolution minimale que l'on peut pas améliorer
- Cette résolution est directement liée au champ gravitationnel lui-même
- Elle est due à l'effet tunnel à travers de la barrière

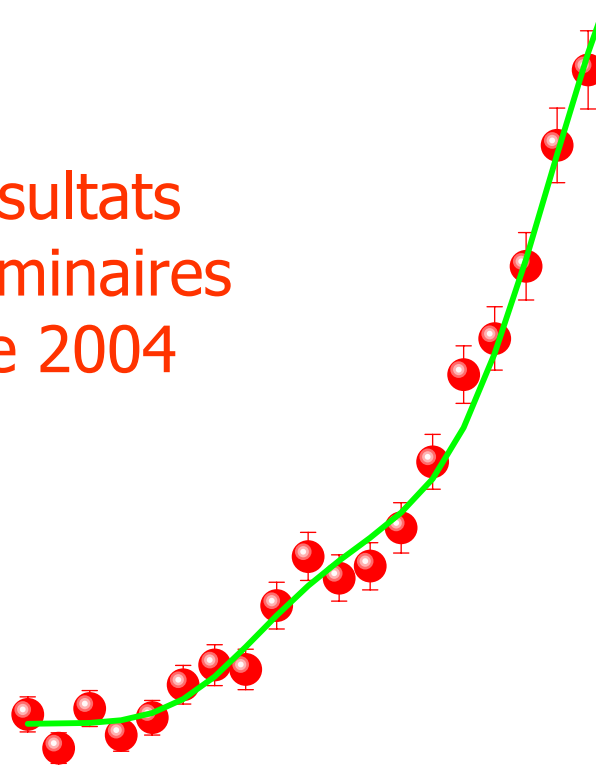
$V(z)$ gravitationnelle



$$N(\Delta z) = \sum_n \beta_n \text{Exp} \left(-\alpha \text{Exp} \left(-\frac{4}{3} \left(\frac{\Delta z - z_n}{z_0} \right)^{\frac{3}{2}} \right) \right)$$

Peut-on voir un état excité ?

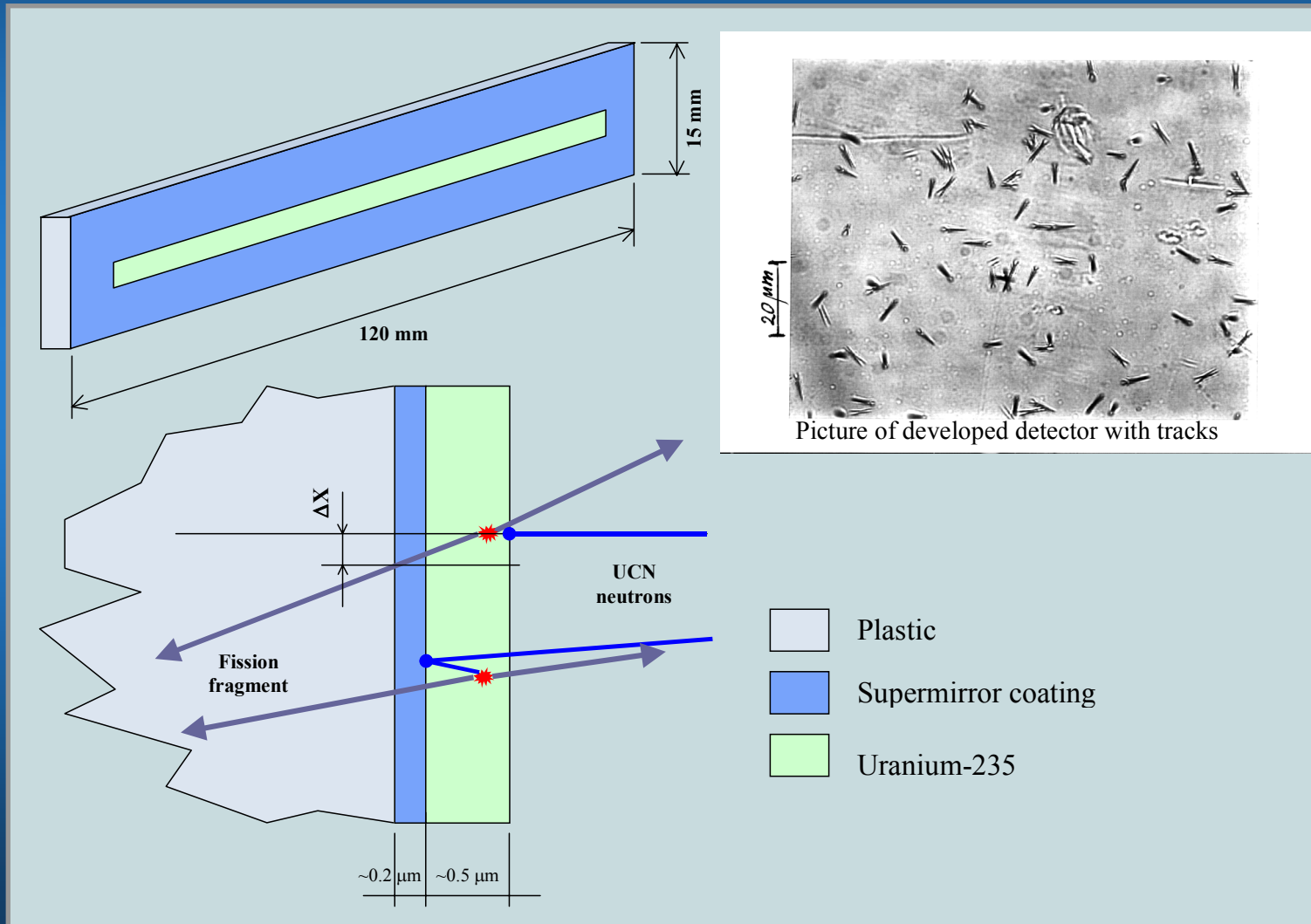
Résultats
préliminaires
de 2004



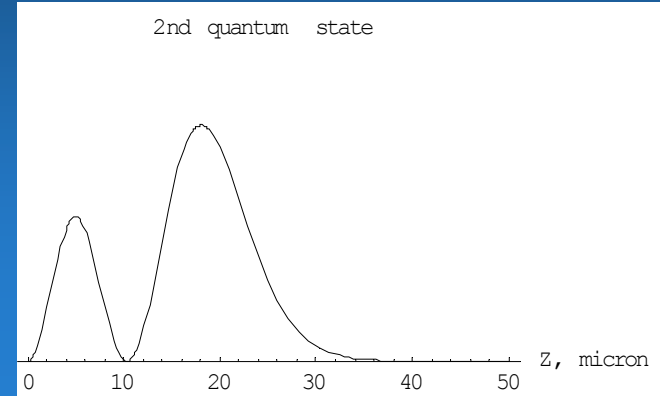
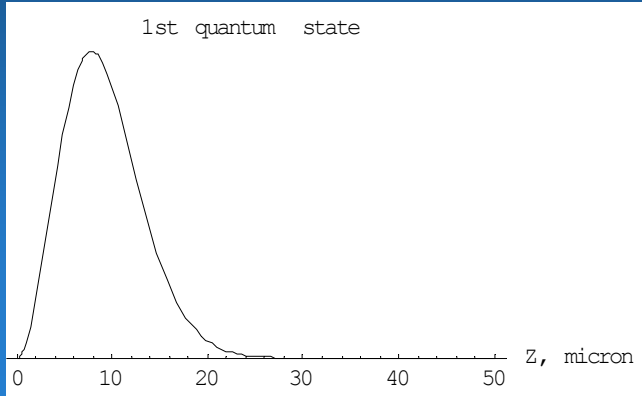
- Oui, mais...
- Si l'on veut le voir plus explicitement il faut chercher autre chose...

« Photo » de la fonction d'onde

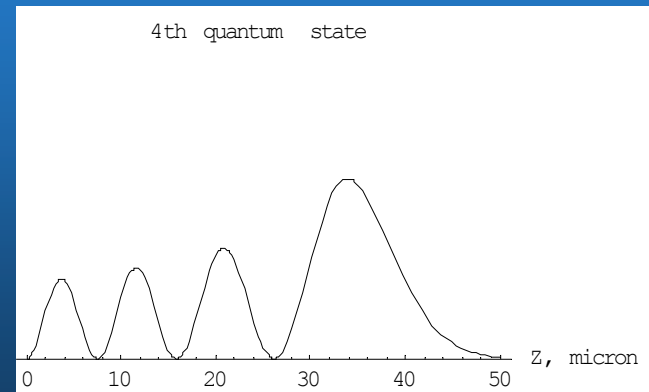
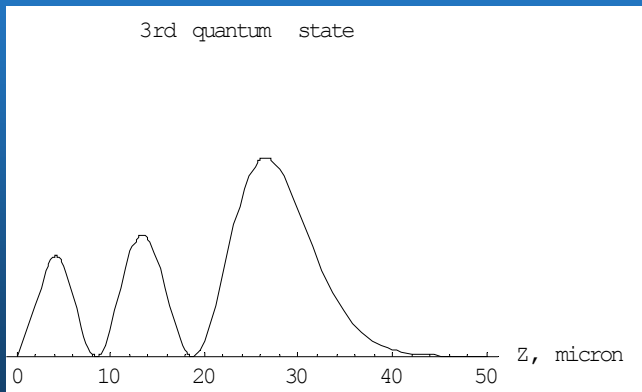
(détecteur à haute résolution spatiale)



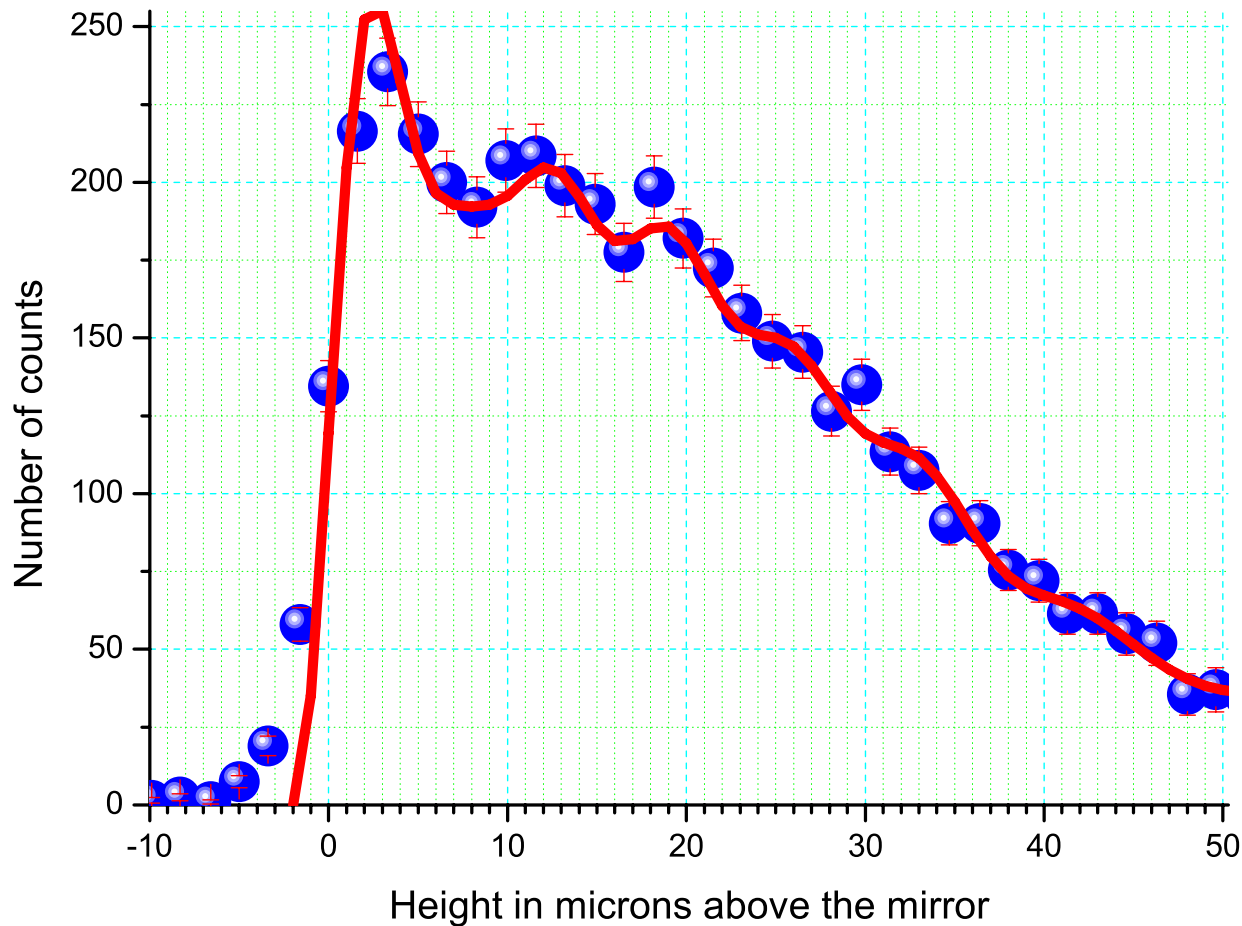
Fonctions d'onde



$$\psi_n^2(z)$$



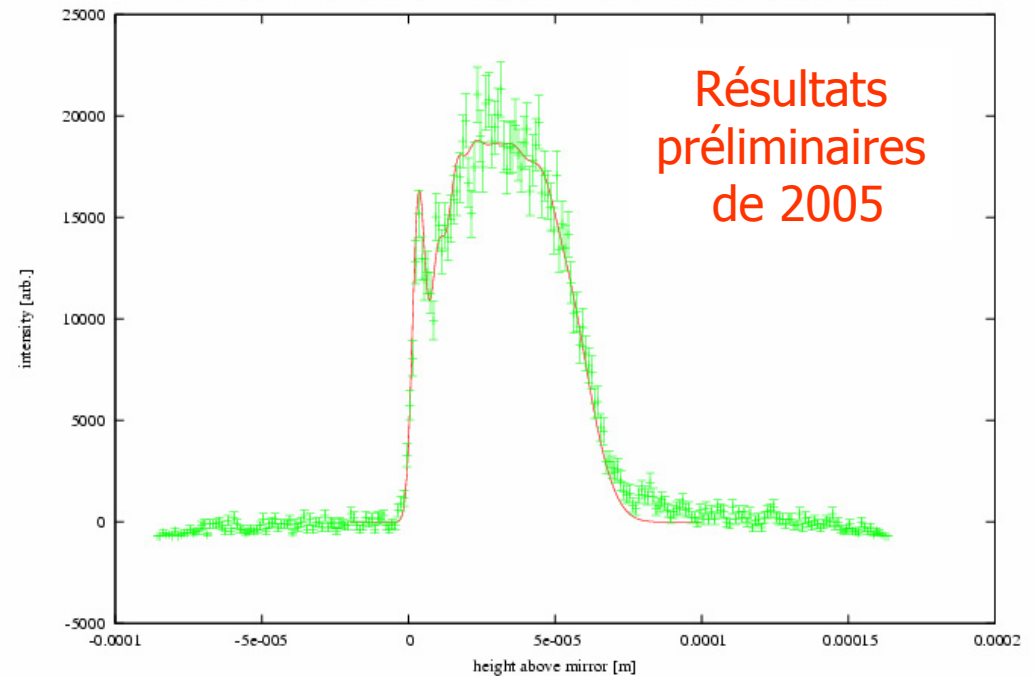
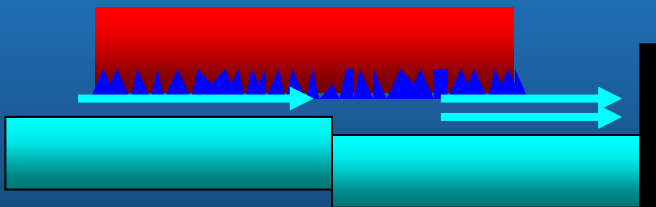
La première photo



Nesvizhevsky et al.,
J. Phys. **C40** (2005)
479

La photo d'aujourd'hui

Pour se débarrasser de l'état fondamentale il faut modifier légèrement notre installation :



Applications inattendues

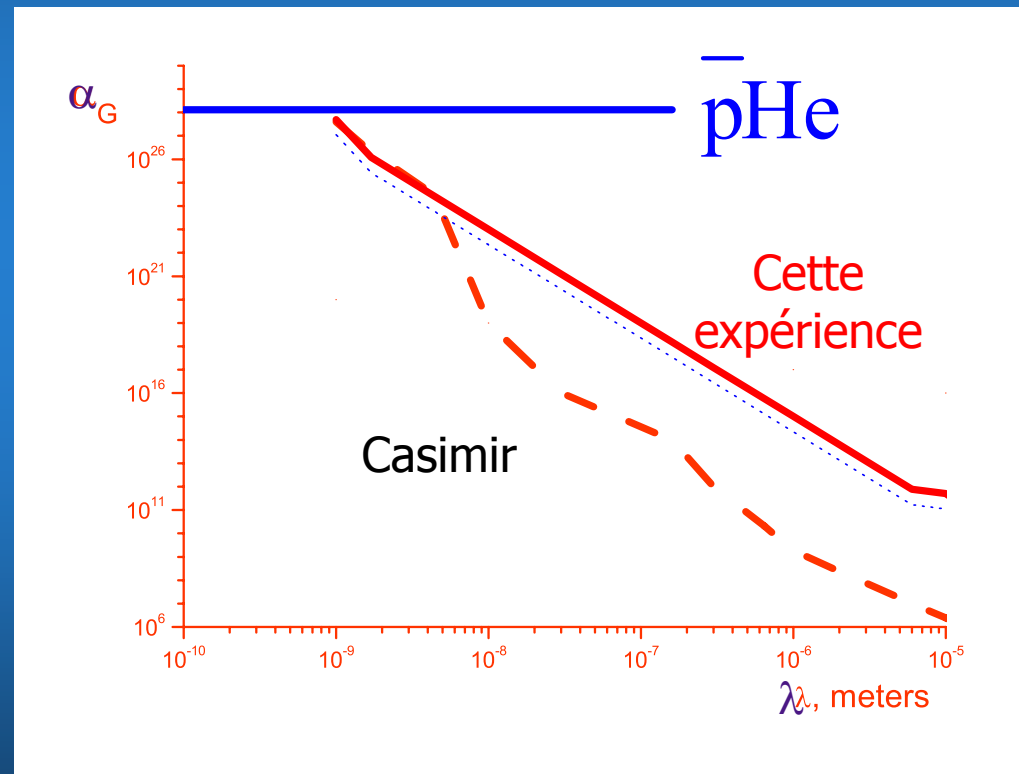
Recherches des forces nouvelles (dimensions supplémentaires...)
V.V. Nesvizhevsky, K.V. Protasov, *Class. Quant. Grav.* **21** (2004) 4557

Une interaction
supplémentaire

$$V(r) = -G \frac{m_1 m_2}{r} (1 + \alpha_G e^{-r/\lambda})$$

modifie le potentiel

$$\delta V(z) = -U_0 e^{-z/\lambda} = -2\pi G m \rho \alpha_G \lambda^2 e^{-z/\lambda}$$



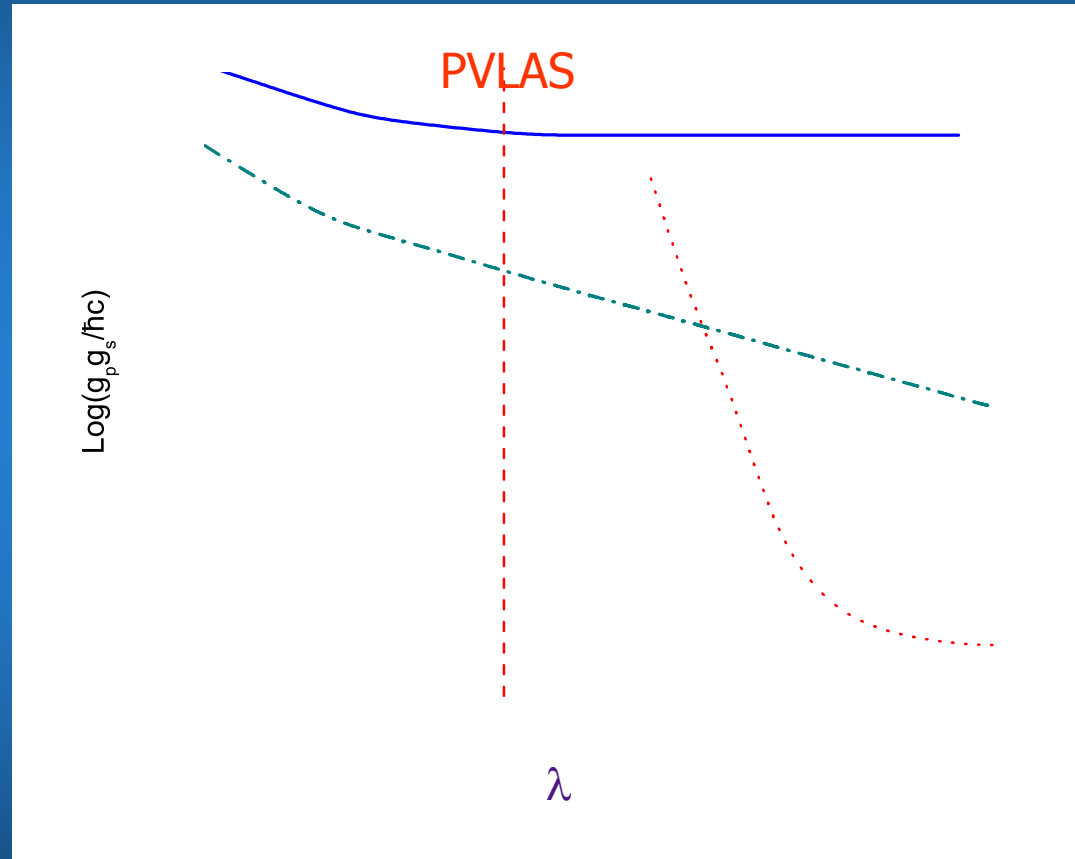
Recherches de l'axion

S. Baessler, V.V. Nesvizhevsky, K.V. Protasov, A.Yu. Voronin,
Phys. Rev. D **75** (2007) 075006

Une interaction
supplémentaire

$$V(\vec{r}) = \hbar g_p g_s \frac{\vec{\sigma} \cdot \vec{n}}{8\pi m c} \left(\frac{1}{\lambda r} + \frac{1}{r^2} \right) e^{-r/\lambda}$$

introduit la séparation
des niveaux



Notre collaboration

V. V. Nesvizhevsky, A. K. Petukhov, H. G. Börner

Institut Laue-Langevin, Grenoble, France

A. M. Gagarski, G. A. Petrov

Petersburg Nuclear Physics Institute, Gatchina, Russia

A. V. Strelkov

Joint Institute of Nuclear Research, Dubna, Russia

K. V. Protasov

Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie, Grenoble, France

A. Yu. Voronin

Lebedev Physical Institute, Moscow, Russia

S. Baeßler

University of Mainz, Germany

H. Abele

University of Heidelberg, Germany

A. Westphal

DESY, Hamburg, Germany



GRAvitational Neutron Induced Transitions

Recherche des transitions résonnantes entre les niveaux quantiques (ANR-2005 : ILL, LPSC, LMA)

Objectifs

- Obtenir la durée de vie du neutron dans un état quantique de l'ordre d'une seconde
- Observer les transitions résonnantes induites par le gradient du champ magnétique

Idée de l'expérience

Fin 2008

1. Peupler la partie basse du spectre

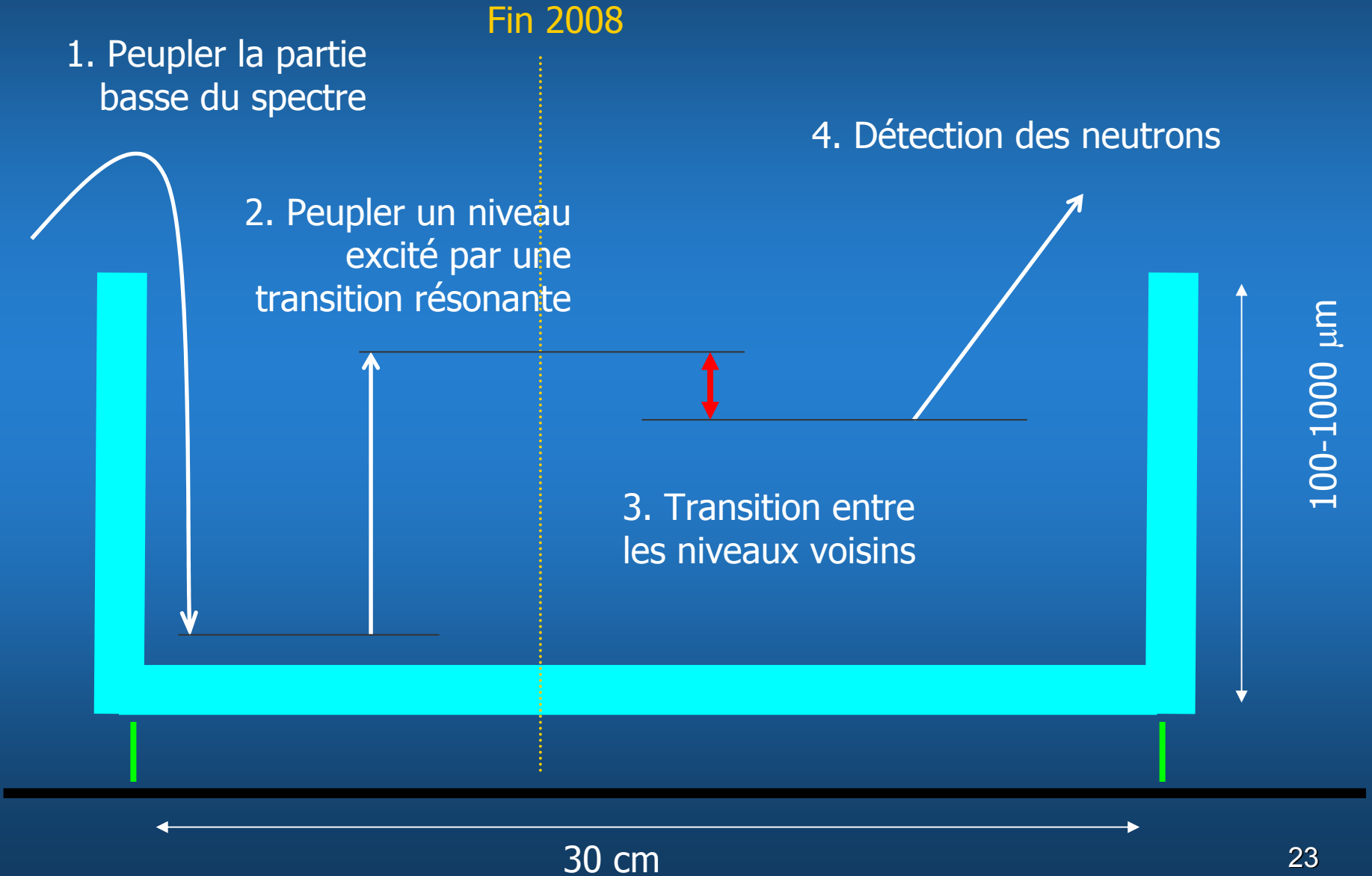
2. Peupler un niveau excité par une transition résonante

4. Détection des neutrons

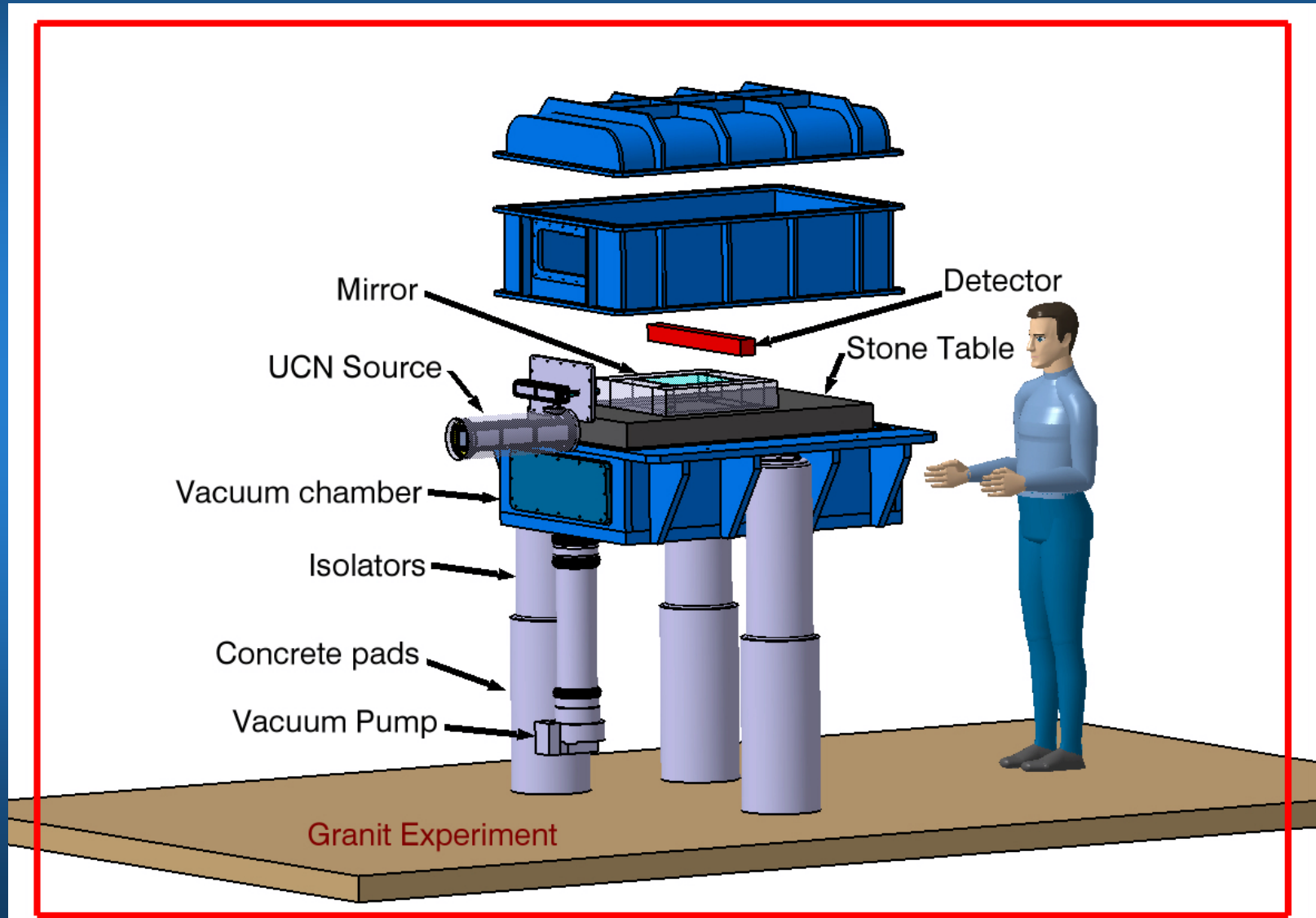
3. Transition entre les niveaux voisins

100-1000 μm

30 cm



Expérience avec une source locale



Conclusions

- Même si la réalisation technique est très difficile
- La physique est très belle et ... imprévisible
- Toutes les bons idées et les collaborateurs intéressés sont bienvenus