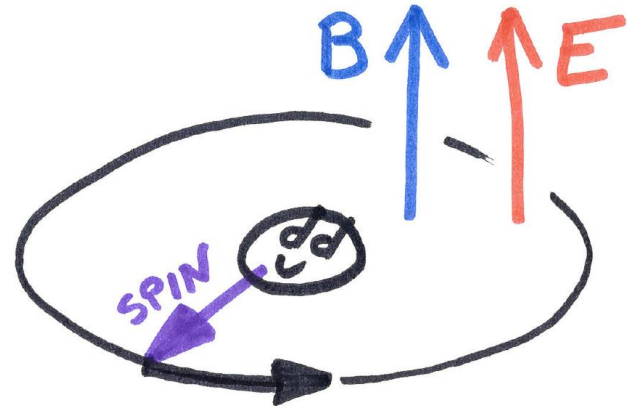
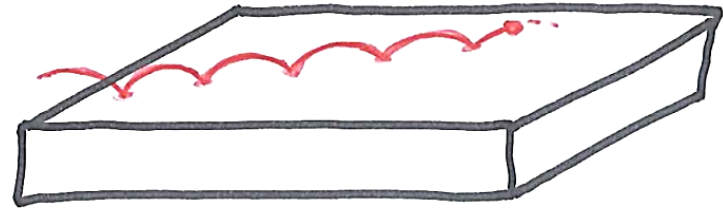
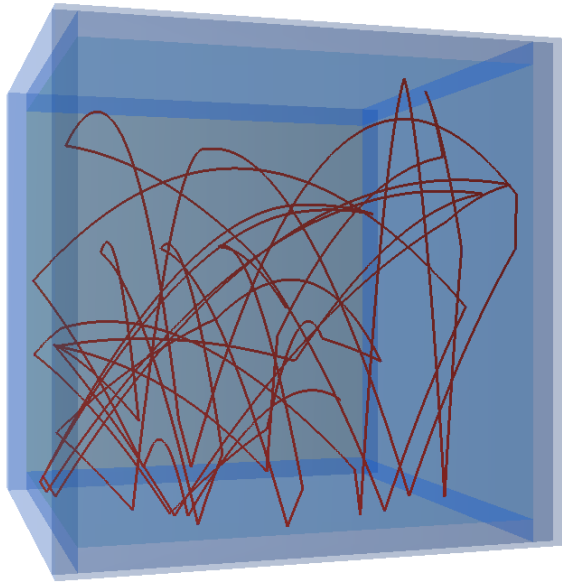


Equipe Neutrons Ultrafroids

tests de précision des symétries fondamentales



Visite HCERES session plénière
08/01/2020
Guillaume Pignol

Composition de l'équipe

Liste des chercheurs de l'équipe actuelle:

4 permanents

- **Guillaume Pignol**, MCF UGA HDR (2015), responsable d'équipe
- **Benoit Clément**, MCF UGA HDR (2012)
- **Konstantin Protassov**, PR, <10%
- **Dominique Rebreyend**, DR

2 post-doctorants

- **Romain Viot**, ERC NEDM, 11/2017 -> 11/2020
- **Sélim Touati**, ERC NEDM, 02/2020 -> 02/2022

2 Doctorants

- **Yinghao Xi**, GRANIT, financ. UGA, 2016-2019
encadrants Benoit Clément + Alexandre Bes (Plasma)
- **Laura Ferraris**, ERC NEDM, 2017-2020
encadrant Guillaume Pignol

Chercheurs ayant quitté l'équipe entre 2015 et 2019:

1 post-doctorant

- **Arnaud Leredde**, ERC NEDM, 04/2017-> 07/2019

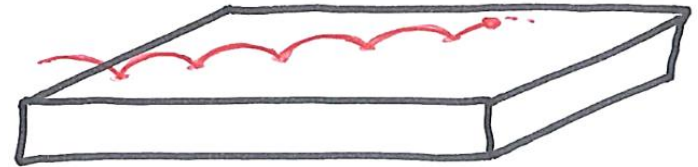
2 Doctorants

- **M. Guigue** (thèse soutenue en 2015) – recherche 5^e force (→ MCF à Sorbonne/LPNHE)
- **Y. Kermaidic** (thèse soutenue en 2016) – nEDM (→ Postdoc à Heidelberg)

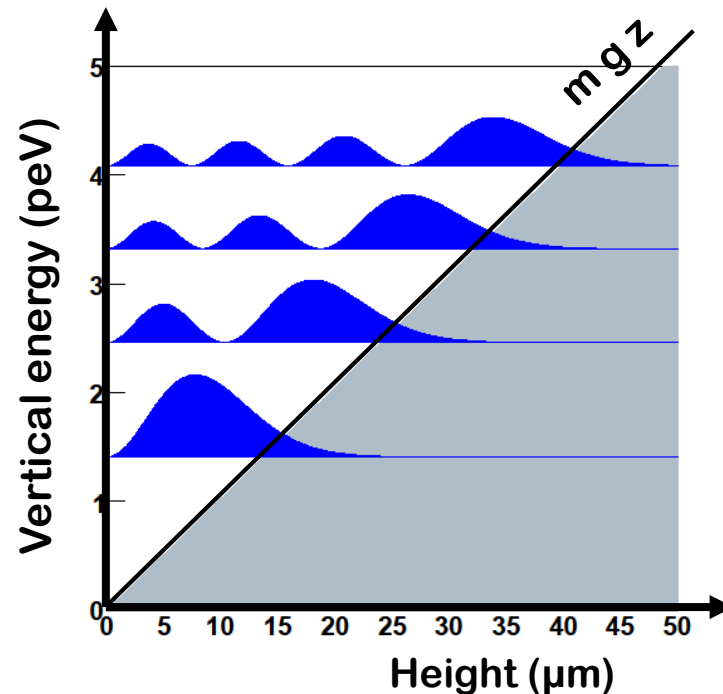
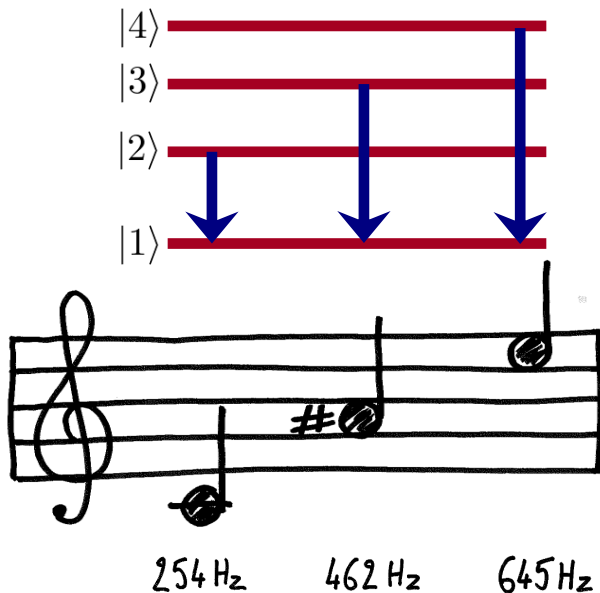
Thèmes de recherche 1/2

Tests de précision des symétries fondamentales avec les neutrons ultrafroids

Etude de la gravité avec le neutron bondissant, par **spectroscopie** et **photographie** des états stationnaires discrétisés, pour tester le principe d'équivalence dans un régime quantique



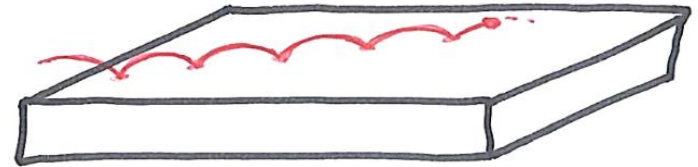
$$-\frac{\hbar^2}{2m_i} \frac{d^2\psi_n}{dz^2} + m_g g z \psi_n = E_n \psi$$



Thèmes de recherche 1/2

Tests de précision des symétries fondamentales avec les neutrons ultrafroids

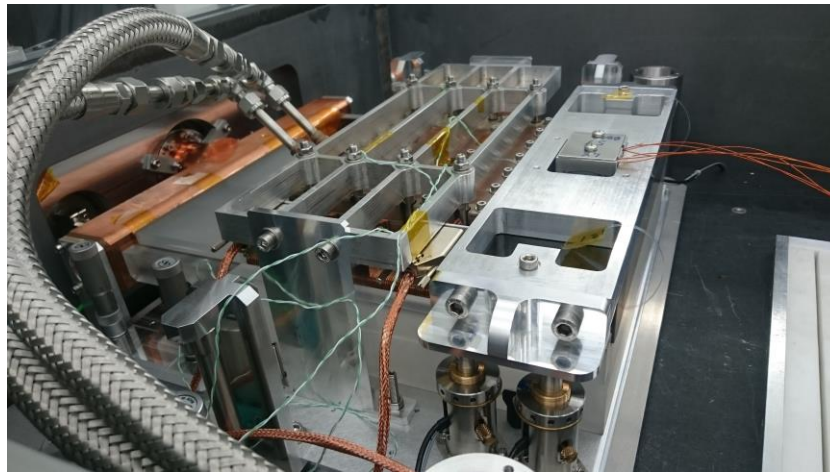
Etude de la gravité avec le neutron bondissant, par **spectroscopie** et **photographie** des états stationnaires discrétisés, pour **tester le principe d'équivalence** dans un régime quantique



$$-\frac{\hbar^2}{2m_i} \frac{d^2\psi_n}{dz^2} + m_g g z \psi_n = E_n \psi$$

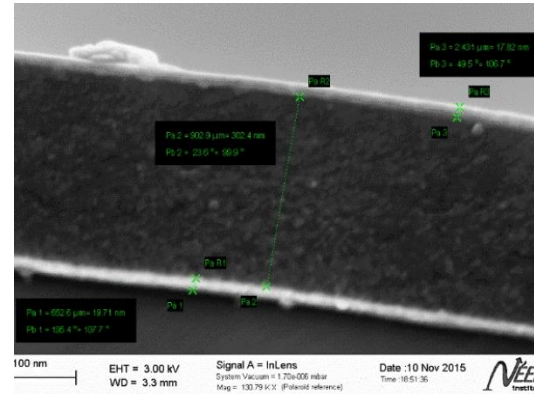
Expérience GRANIT (@ILL)
configurée en spectroscopie

Mécanique ! Francis Vezzu *et al*



Fait marquant 1/3 : détecteur CCD GRANIT

Détecteur UCN sensible à la position :
CCD + couche de conversion en ^{10}B



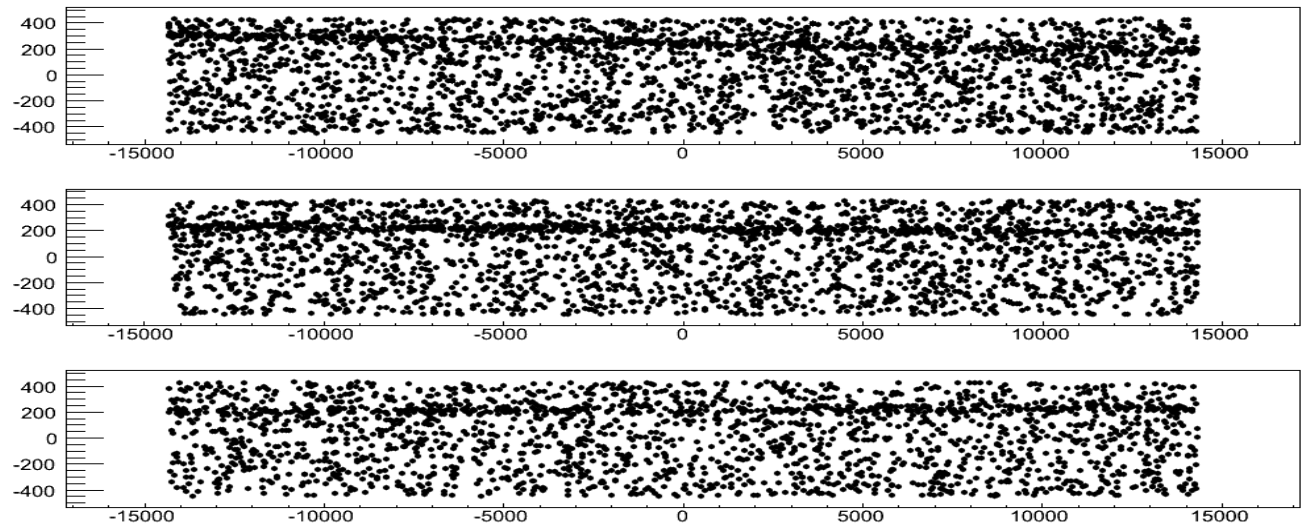
Dépôt plasma LPSC
20 nm titane
200 nm bore-10
20 nm nickel

Electronique et mécanique made in LPSC

Tests du détecteur complet (8 modules dont 1 inactif)

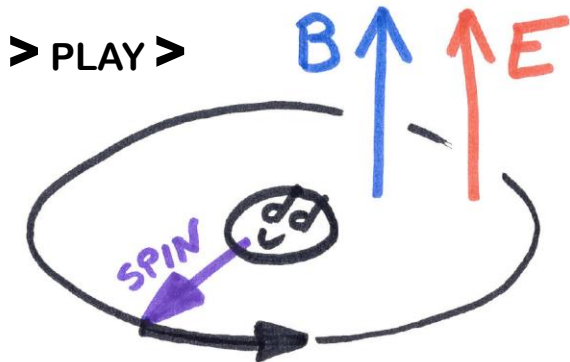
Cycle mars 2018 tests UCNs sur GRANIT: 18,000 UCNs en 1 nuit

UCNs en sortie d'une fente de $\sim 40\mu\text{m}$ dans GRANIT vue sur trois capteurs

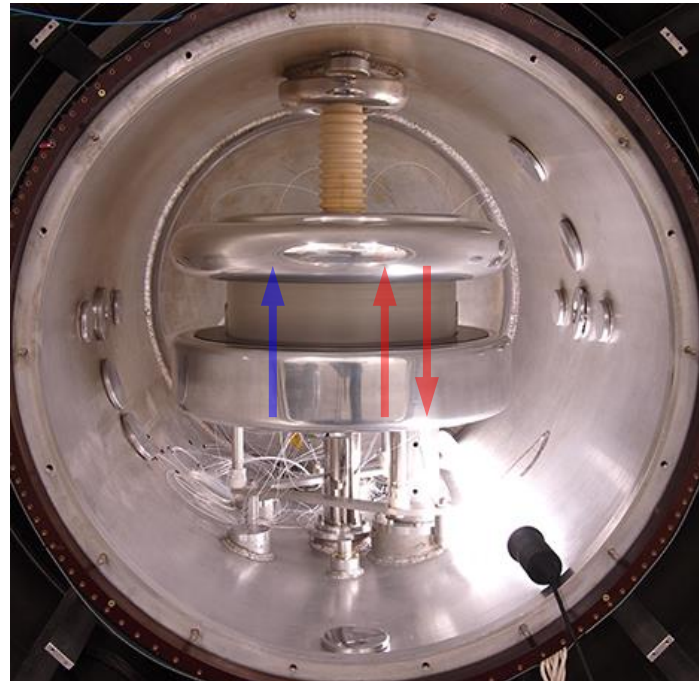
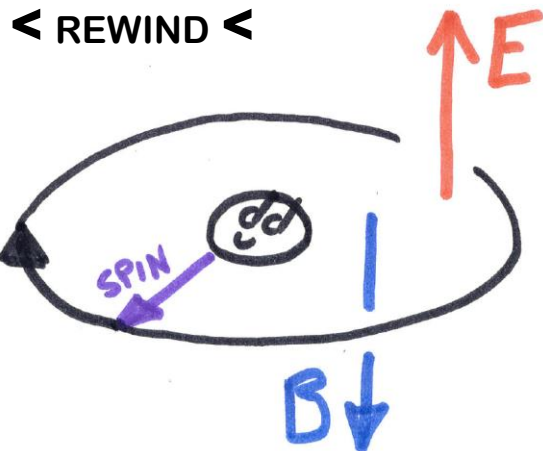


Thèmes de recherche 2/2

Tests de précision des symétries fondamentales avec les neutrons ultrafroids



Mesure du dipôle électrique (EDM) du neutron pour découvrir la nouvelle physique violant T (et CP)



Expérience nEDM (@PSI)

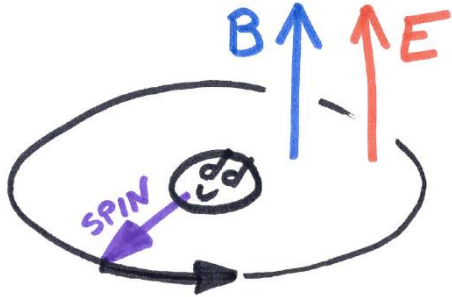
Expériences nEDM et n2EDM

1998 1999 2000 2001 2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008

ILL data production



Best limit: $d_n < 3 \times 10^{-26} e \text{ cm}$
 [Baker *et al*, PRL (2006)
 Pendlebury *et al*, PRD (2015)]



2009 2010 2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018 2019 2020 2021 2022 2023 2024

PSI data

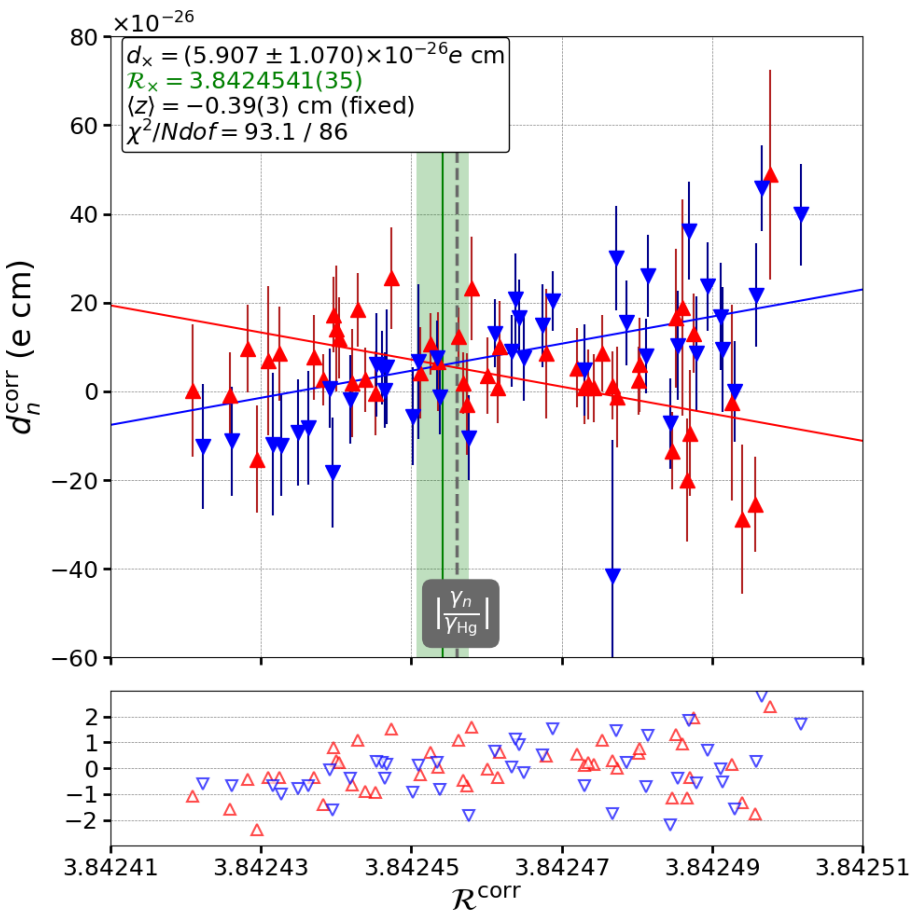
n2EDM data...



Move of the (upgraded) apparatus at PSI -

Dismantling nEDM Starting n2EDM construction -

Fait marquant 2/3 : résultat nEDM imminent



Données nEDM 2015-2016

- Analyse statistique :
thèse Y. Kermaidic
- Correction systématique :
thèse L. Ferraris-Bouchez

« **double-blind analysis** »

- Deux groupes optimisent séparément leurs analyses stat. et syst. (2014-2019)
→ comparaison des erreurs et corrections ✓
- Octobre 2019 : levée du premier blinding
→ Résultats en accord à 0.2σ ✓
- Fin novembre 2019 : unblinding final ✓

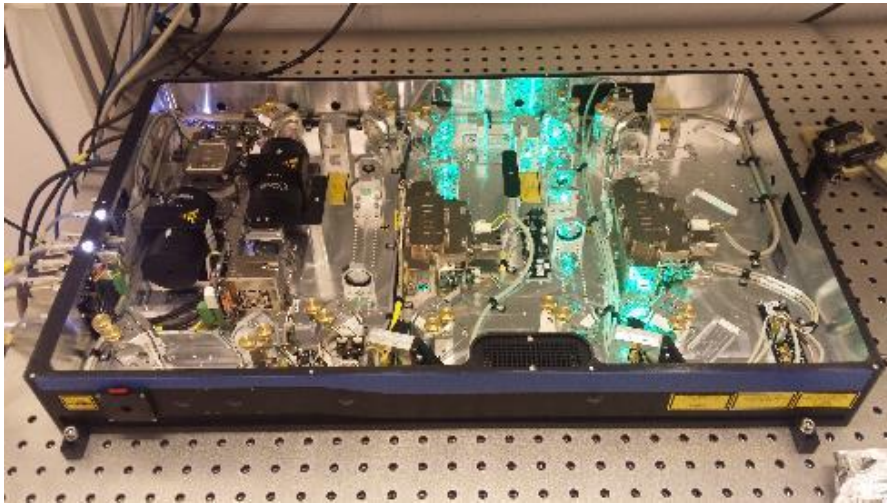
Résultat soumis mi décembre à PRL (embargo jusqu'au 28/01/2020)

$$d_n = (x.x \pm 1.1_{\text{stat}} \pm 0.2_{\text{sys}}) \times 10^{-26} \text{ e cm}$$

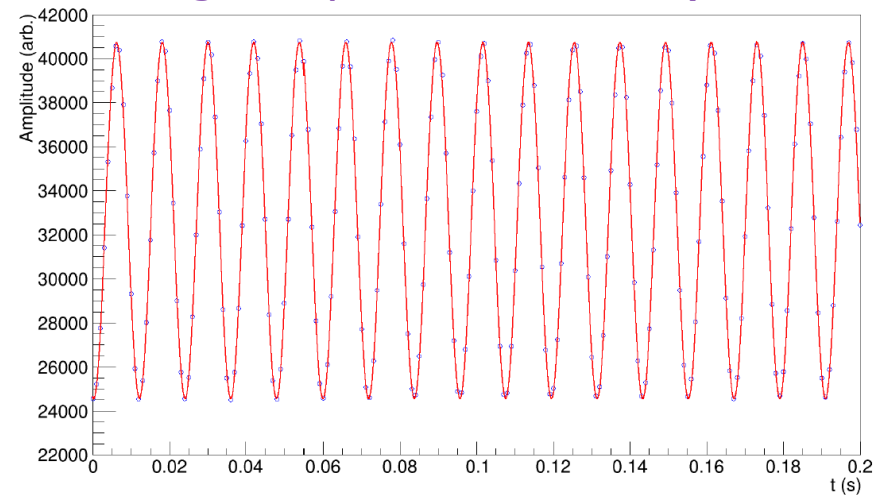
Fait marquant 3/3 : ERC NEDM

Sujet : les effets systématiques dans nEDM et n2EDM, période 2017 – 2022

- Analyse nEDM - Thèse de Laura Ferraris-Bouchez en cours
- Design et construction pour n2EDM
 - Postdoc Romain Virot en cours + Joann Menu (mécanique)
- Création du L4M - Postdoc Arnaud Leredde + Clément Thomassé (SDI)
(Laboratoire pour la Mesure du Moment Magnétique du Mercure)



Acquisition laser UV (fréquence quadruplée)
 $\lambda=254$ nm, développement de la stabilisation active de fréquence



Signal optique du spin des atomes de mercure, précession dans un champ B

$$f = \frac{\gamma_{\text{Hg}} B}{2\pi}$$

Production scientifique

- Bilan des Publications 2014-2019 du groupe UCN

- **6 articles liés à GRANIT dont :**

Boron-10 conversion layer for ultra-cold neutron detection, B. Clément et al, JINST (2019)

- **16 articles liés à nEDM dont :**

A magic magnetic field to measure the neutron EDM, G. Pignol, PLB (2019)

Revised experimental upper limit on the EDM of the neutron, M. Pendlebury et al, PRD (2015)

Measurement of a false EDM signal from ^{199}Hg atoms exposed to an inhomogeneous magnetic field, S. Afach et al, EPJD (2015)

A measurement of the neutron to ^{199}Hg magnetic moment ratio, S. Afach et al, PLB (2014)

- **8 diverses autres publiés (énergie noire, 5e force...) dont :**

Neutron Interferometry constrains dark energy chameleon fields, H. Lemmel et al, PLB (2015)

Constraining short-range spin-dependent forces with polarized ^3He , M. Guigue et al, PRD (2015)

En orange, les articles issus des thèses de Y. Kermaidic et M. Guigue (leurs autres papiers sont pré-2015)

Projet scientifique

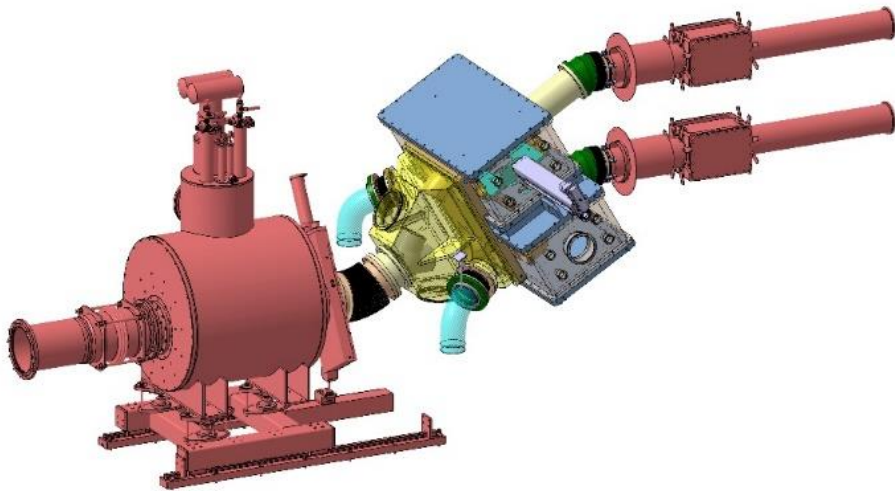
- Exploitation de GRANIT à court terme (2020)
+ participations ponctuelles à des expériences à l'ILL
- Construction puis exploitation n2EDM long terme
>> amélioration de la précision d'un facteur 10 en 10 ans,
- Développement et exploitation du laboratoire de magnétométrie mercure

Evolution du groupe à venir

Après le départ en retraite de D. Rebreyend (~2022) il n'y aura plus de chercheur CNRS permanent dans l'équipe

Assemblage de n2EDM en 2021

Distributeur
« switch » de
neutrons



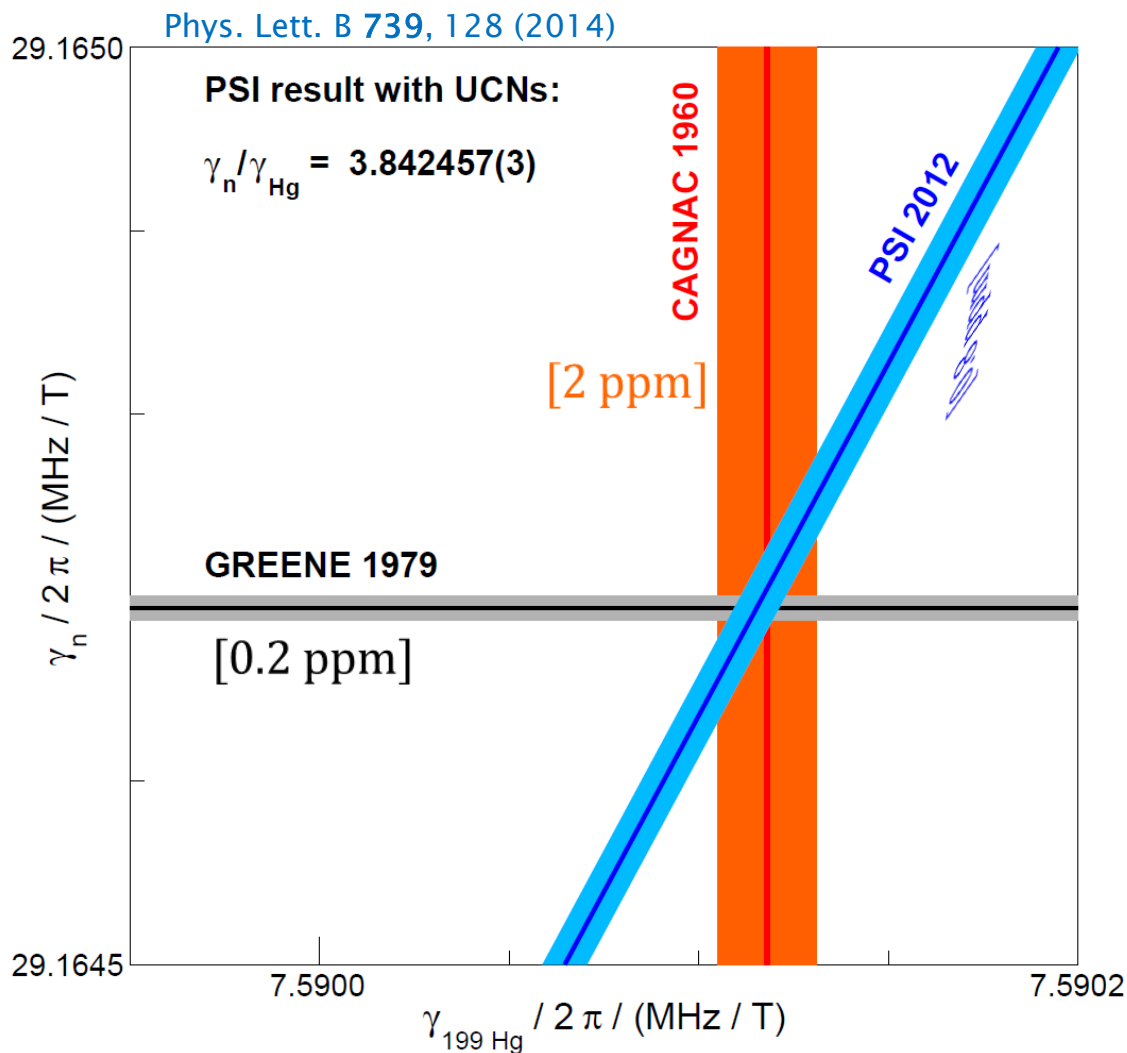
Robot « mapper » pour la
cartographie du champ
magnétique



Mais aussi
Construction d'éléments du comagnétomètre mercure
électronique (source de courant ultra-stable) et
informatique (web data quality monitor)

Puis commisionning et exploitation à partir de 2022 !

Comagnéométrie Hg/³He @ L4M



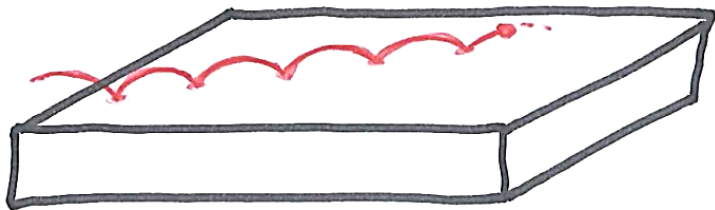
Comagnéomètre X/Y :

$$\frac{f_X}{f_Y} = \frac{\gamma_X B}{\gamma_Y B} = \frac{\gamma_X}{\gamma_Y}$$

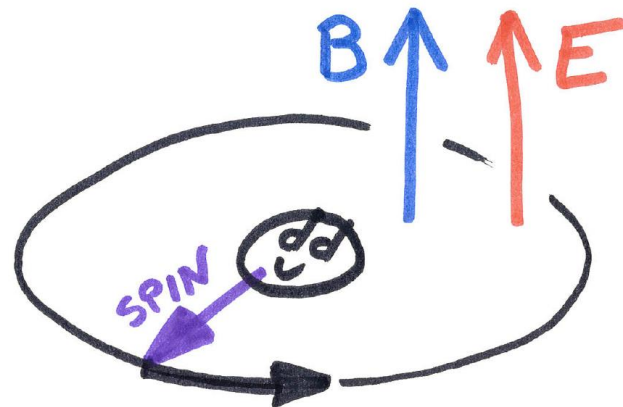
*Objectif : mesure de $\frac{\gamma(^{199}\text{Hg})}{\gamma(^3\text{He})}$
 Avec une précision de 0.1 ppm*



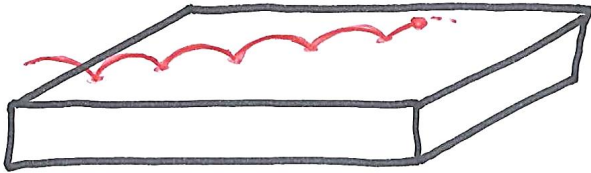
Cellule pour la comagnéométrie
 hélium-3 / mercure-199



Merci !



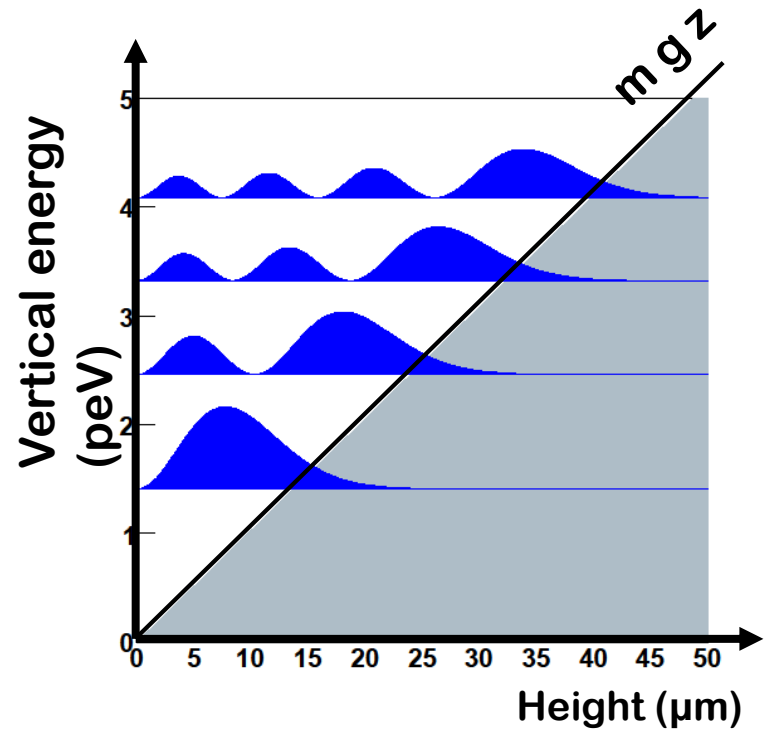
Bouncing neutrons: quantum states



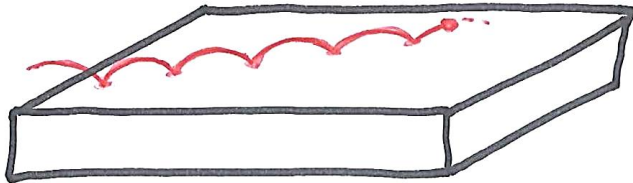
The vertical motion is a simple quantum well problem

$$-\frac{\hbar^2}{2m_i} \frac{d^2\psi}{dz^2} + m_g g z \psi = E \psi$$

We want to test Einstein's equivalence principle for a quantum particle in a classical gravity field.

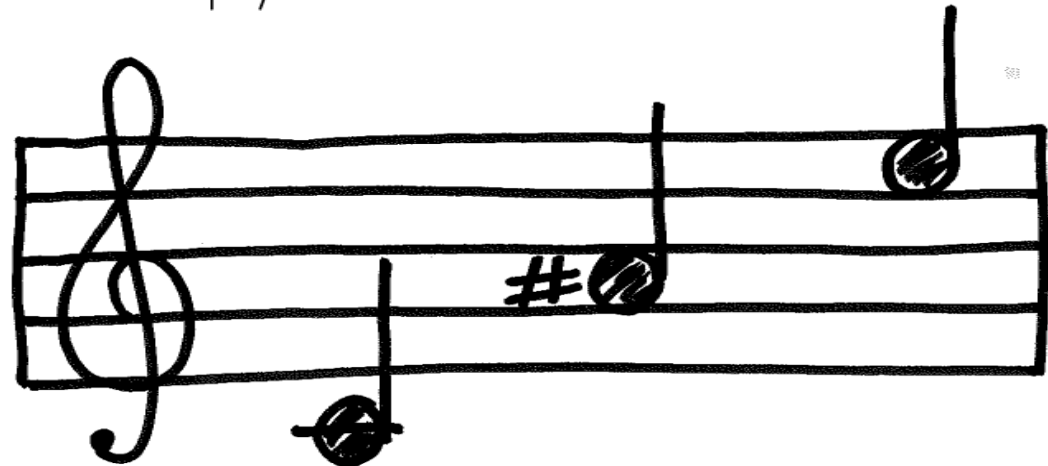
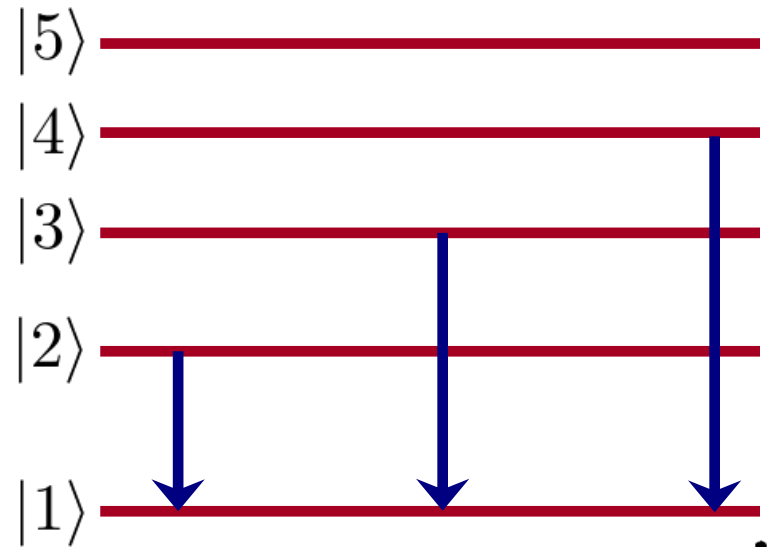


Bouncing neutron: quantum music



$$\Delta E = h \times f$$

$$\frac{1}{2\pi} \sqrt[3]{\frac{mg^2}{2\hbar}} \times \begin{array}{c} 1,75 \\ 3,18 \\ 4,45 \\ \vdots \end{array}$$

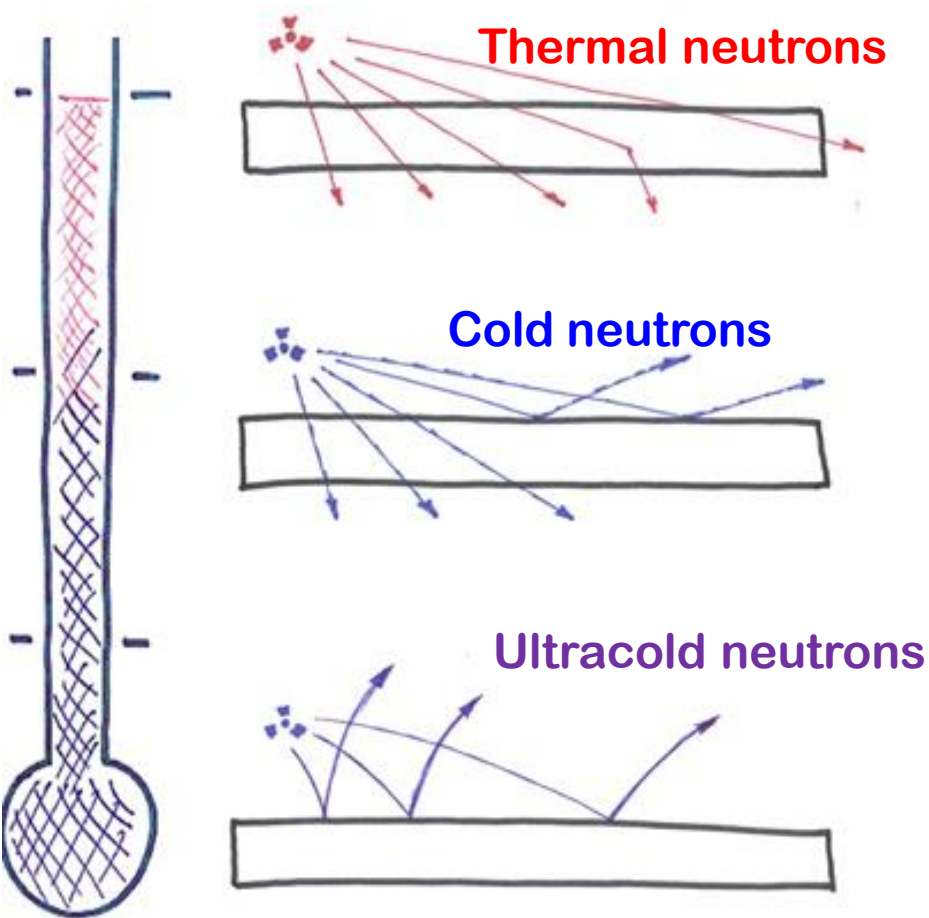


254 Hz

462 Hz

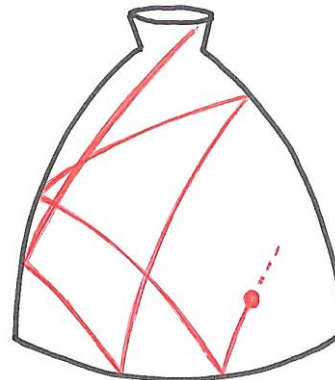
645 Hz

Neutron optics, cold and ultracold neutrons



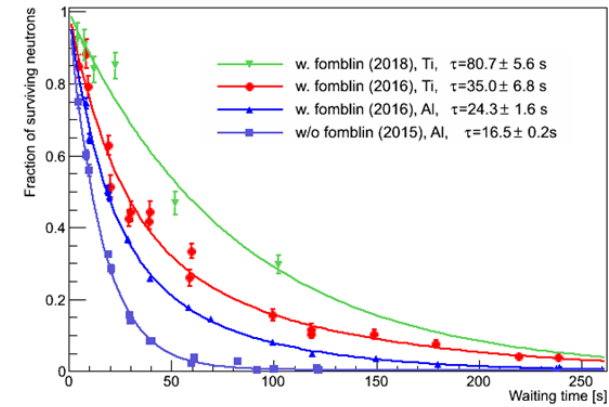
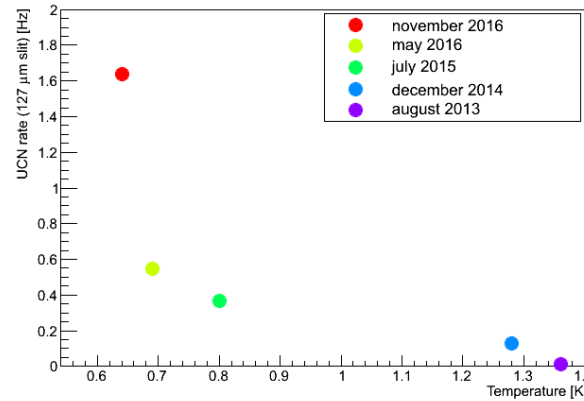
Cold neutrons
($E < kT = 25 \text{ meV}$)
have large wavelength
($\lambda > 0.2 \text{ nm}$)
They behave like waves,
affected by the Fermi
potential of matter
(order of 100 neV)

Neutrons with energy $< 100 \text{ neV}$,
are reflected by material walls they
can be stored in material bottles.

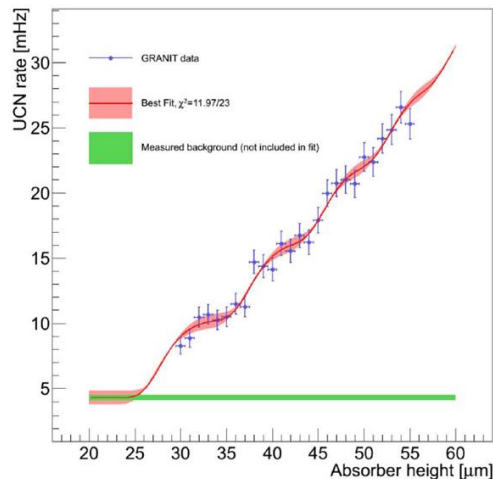


L'histoire de GRANIT

Comissioning source (2010-2018)
Amélioration des performances cryogéniques et neutroniques de la source.



Commissioning spectro (2016-2018)
Sélection des états quantiques



Exploitation (2018-2020) :
recherche des transitions
résonantes induites par le coupleur
gravitomagnétique.

