

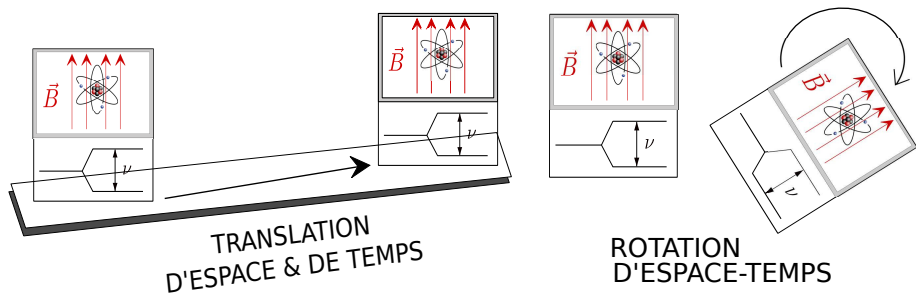
# Des horloges atomiques à la mission MICROSCOPE: l'espace-temps isotrope résiste encore et toujours aux tests - AG Labex First-TF 2018 -

Hélène Pihan-Le Bars<sup>1</sup>, Peter Wolf<sup>1</sup>, C. Guerlin<sup>2,1</sup>

<sup>1</sup> Observatoire de Paris,<sup>2</sup> Laboratoire Kastler Brossel



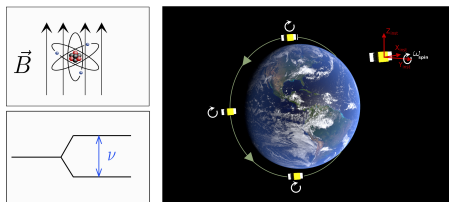
# Les symétries de l'espace-temps



## Espace-temps homogène et isotrope

Les lois de la physique sont les mêmes peu importe les rotations et les translations uniformes effectuées.

# La symétrie de Lorentz



## Le principe d'invariance locale de Lorentz

Le résultat d'une expérience locale non-gravitationnelle est indépendante de la vitesse et de l'orientation du repère en chute libre dans lequel l'expérience est réalisée.

*C. Will, 1993*

## La symétrie de Lorentz en physique

Les symétries d'espace-temps interviennent directement en la Relativité Générale et indirectement dans le Modèle Standard de la physique des particules

# La symétrie de Lorentz dans les théories au-delà de la Relativité Générale (RG) et du Modèle Standard (MS)

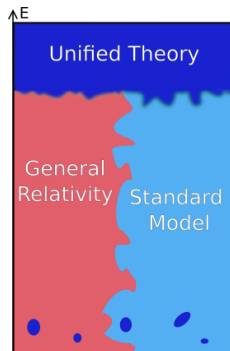
Certaines théories au-delà de la RG et du MS envisagent une brisure de la symétrie de Lorentz à haute énergie

## Effets très haute énergie ( $10^{19}$ GeV)

- Non accessible directement par l'expérience
- Pas d'observable basse énergie

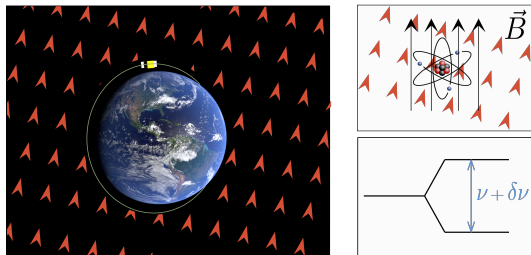
## Solution: L'extension du Modèle Standard

- Recherche de signatures à basse énergie
- Cadre théorique général : observables pour une grande variété d'expériences



# L'extension du Modèle Standard

- Théorie effective construite à partir des champs usuels du Modèle Standard et incluant des effets dus à un espace temps courbe
- Paramétrise les amplitudes de violation grâce à des coefficients SME (tenseurs SME)



- Champs de fond SME supposés fixes dans l'espace et constant dans le temps.
- Par convention les coefficients SME sont exprimés dans le référentiel héliocentrique non tournant.

*Kostelecky et al., PRD 51, 1995, [Kostelecky et al., PRD 58, 1998*

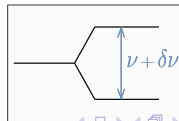
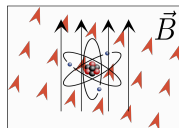
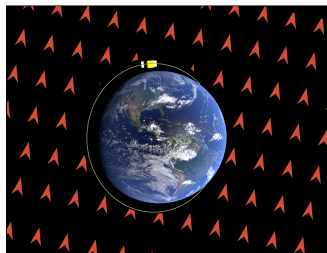
# Comment tester la symétrie de Lorentz

## Besoins

- Expérience avec orientation privilégiée
- Expérience stable dans le temps

## Forme et dépendance des signaux

- Recherche de signaux périodiques liés au mouvement de l'expérience par rapport à des champs de fond
  - ◇ orientation dans l'espace
  - ◇ vitesse  $\beta = v/c$

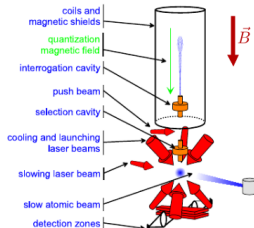
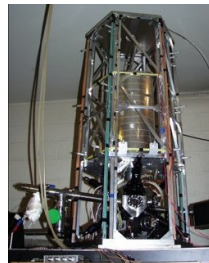
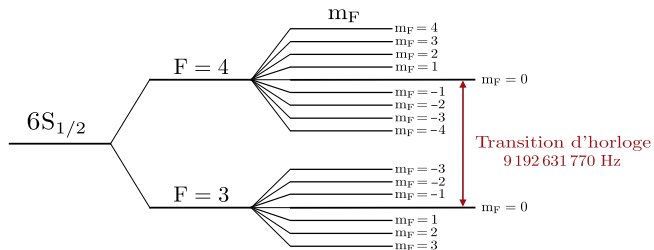


# Expérience: la fontaine double F02

- Fontaine à atomes froids de  $^{133}\text{Cs}$  et  $^{87}\text{Rb}$   
↔ en opération au SYRTE
- Spectroscopie haute précision

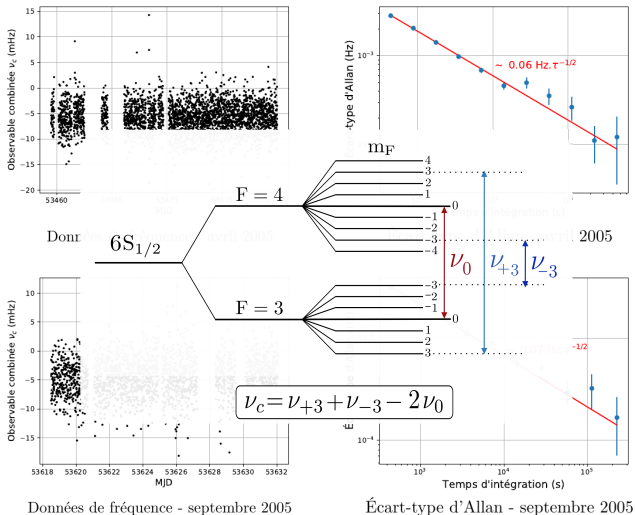
$$|F = 3, m_F\rangle \longleftrightarrow |F = 4, m_F\rangle$$

⇒ Permet des mesures de longue durée



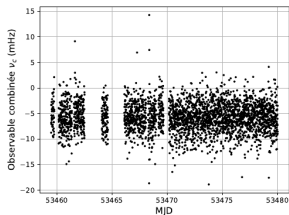
(A. Clairon, J. Guéna, S. Bize)

# Données de fréquence

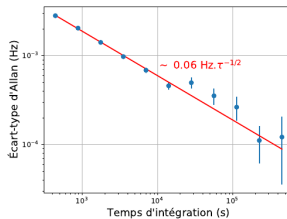




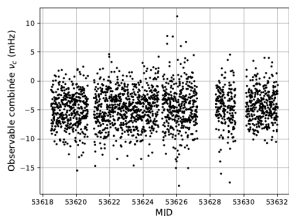
# Données de fréquence



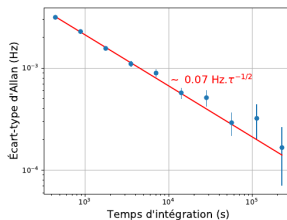
Données de fréquence - avril 2005



Écart-type d'Allan - avril 2005

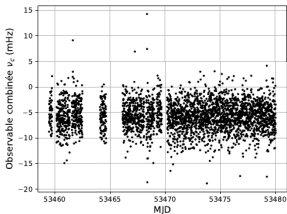


Données de fréquence - septembre 2005

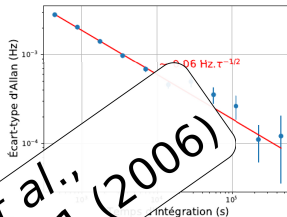


Écart-type d'Allan - septembre 2005

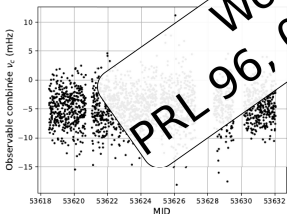
# Données de fréquence



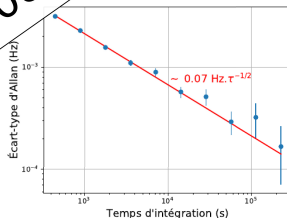
Données de fréquence - avril 2005



Écart-type d'Allan - avril 2005



Données de fréquence - septembre 2005



Écart-type d'Allan - septembre 2005

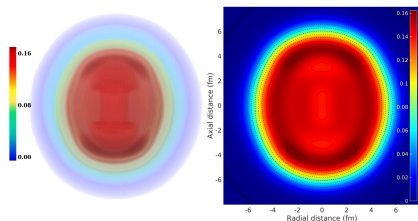
Wolf et al.,  
PRL 96, 060801 (2006)

# Modèle SME

## Lien entre mesure de fréquence et SME

$$V_C^{SME} \propto \sum_{w=p,n} \gamma_w \sum_n C_{\omega_n} \cos(\omega_n t) + S_{\omega_n} \sin(\omega_n t)$$

- ◇ Facteur de sensibilité  $\gamma_w \propto \langle 3p_z^2 - p^2 \rangle$
- ◇  $C_{\omega_n}$  et  $S_{\omega_n}$  dépendent du tenseur SME  $c_{\mu\nu} \in$  **secteur de la matière**



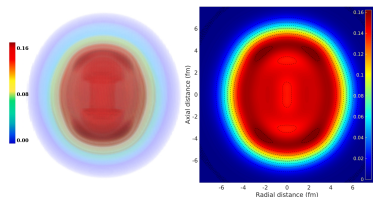
$$C_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} C_{TT} & C_{TX} & C_{TY} & C_{TZ} \\ C_{XT} & C_{XX} & C_{XY} & C_{XZ} \\ C_{YT} & C_{YX} & C_{YY} & C_{YZ} \\ C_{ZT} & C_{ZX} & C_{ZY} & C_{ZZ} \end{pmatrix}$$

**Figure:** Densité des nucléons dans le noyau de  $^{133}\text{Cs}$ . Figure réalisée par R.D. Lasserri, IPN, Orsay.

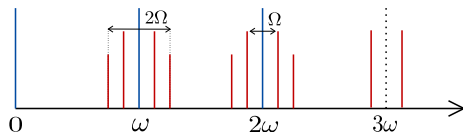
# Modèle SME

## Améliorations apportées au modèle

- ◇ Inclusion des variations annuelles
- ◇ Inclusion de termes d'ordre 2 en  $\beta$   
↪ Collaboration avec Q. Bailey (ERAU - Arizona)
- ◇ Nouveau modèle nucléaire pour l'estimation du facteur de sensibilité  $\gamma_w$   
↪ Collaboration avec R. D. Lasserri, J.-P. Ebran et E. Khan (IPN - Orsay)

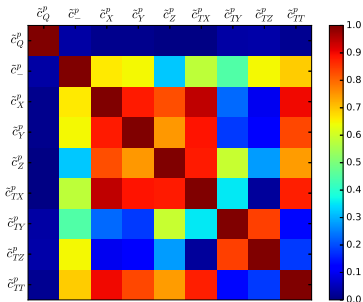


**Figure:** Densité des nucléons dans le noyau de  $^{133}\text{Cs}$ . Figure réalisée par R.D. Lasserri, IPN, Orsay.



**Figure:** Harmoniques comprises dans le modèle

# Résultats



Matrice de corrélation

Coefficient	$\tilde{c}_{\max}^p$ (GeV)	$\tilde{c}_{\max}^n$ (GeV)
$\tilde{c}_Q^p + 0.021 \tilde{c}_Q^n$	$10^{-21}$	<b><math>10^{-20(7)}</math></b>
$\tilde{c}_-^p + 0.021 \tilde{c}_-^n$	$10^{-23}$	$10^{-21}$
$\tilde{c}_X^p + 0.021 \tilde{c}_X^n$	$10^{-23}$	$10^{-21}$
$\tilde{c}_Y^p + 0.021 \tilde{c}_Y^n$	$10^{-23}$	$10^{-22}$
$\tilde{c}_Z^p + 0.021 \tilde{c}_Z^n$	$10^{-23}$	$10^{-21}$
$\tilde{c}_{TX}^p + 0.021 \tilde{c}_{TX}^n$	$10^{-19}$	<b><math>10^{-17(12)}</math></b>
$\tilde{c}_{TY}^p + 0.021 \tilde{c}_{TY}^n$	$10^{-19}$	<b><math>10^{-17(12)}</math></b>
$\tilde{c}_{TZ}^p + 0.021 \tilde{c}_{TZ}^n$	$10^{-19}$	<b><math>10^{-18(13)}</math></b>
$\tilde{c}_{TT}^p + 0.021 \tilde{c}_{TT}^n$	<b><math>10^{-15(4)}</math></b>	<b><math>10^{-13(2)}</math></b>

Pihan-Le Bars *et al*, PRD 95, 075026 (2017)

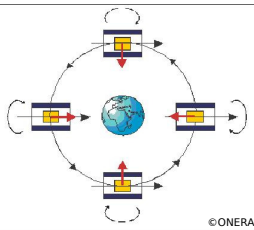
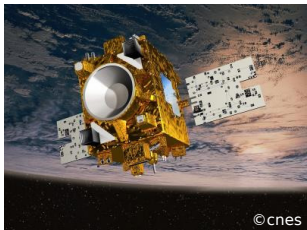
- **Pas de violation d'invariance de Lorentz détectée**
- Amélioration de 2 à 13 ordres de grandeur des limites sur 6 composantes de  $c_{\mu\nu}$  pour les protons et les neutrons
- Incertitudes limitées par les corrélations entre coefficients

# La mission MICROSCOPE

## Objectif

Test d'universalité de la chute libre avec une précision de  $10^{-15}$  sur le paramètre d'Eötvös

$$\delta(A, B) \sim \frac{m_{g,1}}{m_{i,1}} - \frac{m_{g,2}}{m_{i,2}}$$



Collaborations:



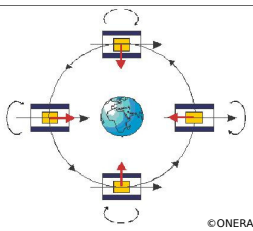
# La mission MICROSCOPE

## Instrument et mesures

- Double accéléromètre différentiel T-SAGE
- Mesure d'accélération relative de deux masses d'épreuve (Ti/Pt) ou (Pt/Pt)

## Satellite

- Micro-satellite de la filière Myriade (CNES)
- Orbite circulaire héliosynchrone (altitude  $\sim 700\text{km}$ )
- En vol depuis Avril 2016, en cours de désorbitation



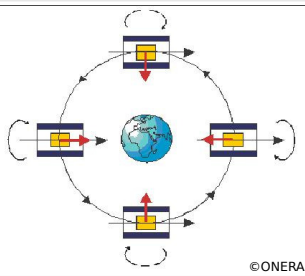
# La mission MICROSCOPE

## Premiers résultats

Analyse d'une session de 120 orbites:

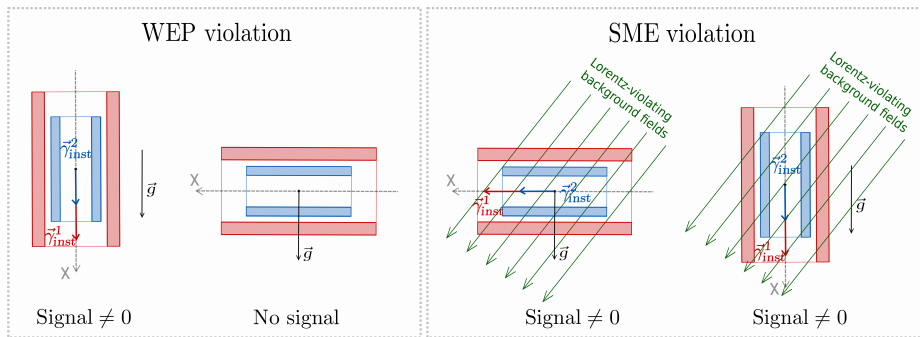
$$\delta = [-1 \pm 9 \text{ (stat)} \pm 9 \text{ (syst)}] \times 10^{-15}$$

*Touboul et al., PRL, 119, 231101 (2017)*



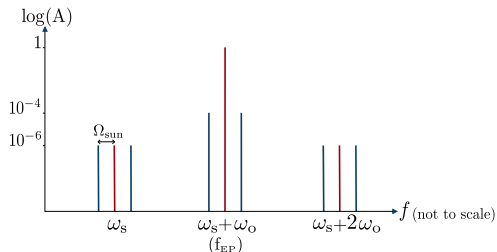


# Lien entre test du Principe d'Équivalence faible et test d'invariance de Lorentz

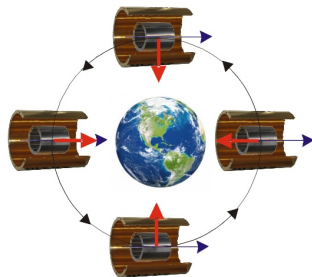


- Test dans le secteur des couplages matière-gravité, contraintes sur les composantes du tenseur  $\alpha(\bar{a}_{eff})_{\mu}^W$
- $\alpha(\bar{a}_{eff})_{\mu}^W$  représente une modification de la trajectoire suivie par les corps, qui dépend de leur composition.

# Les signaux recherchés



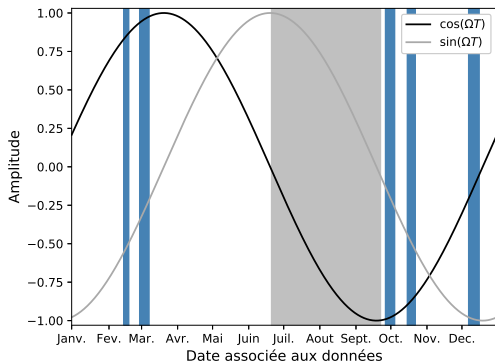
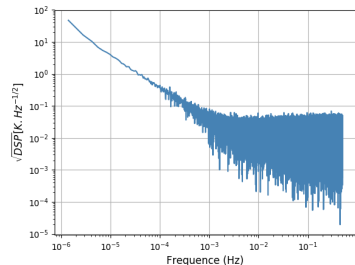
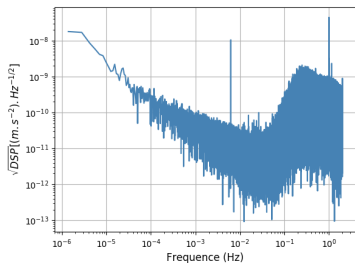
**Figure:** Signal théorique. J. Tasson et G. Mo, Carleton College.



**Figure:** Crédit ONERA.

- Recherche d'une variation d'accélération relative selon l'orientation de l'axe sensible dans l'espace.
- Recherche de variations harmoniques liées au mouvement du satellite au cours de son orbite et de sa révolution autour du Soleil.

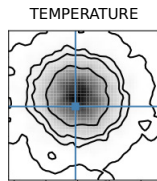
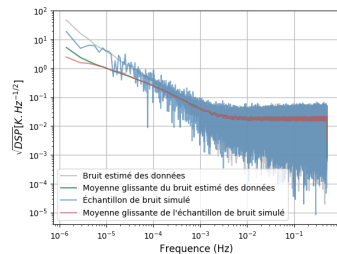
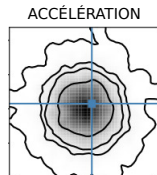
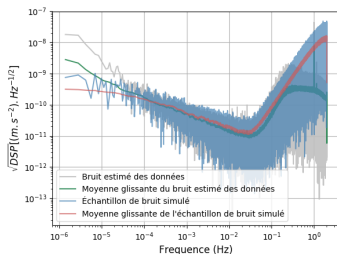
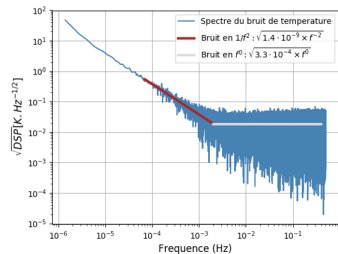
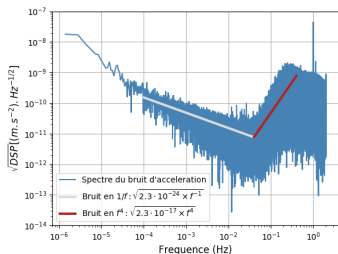
# Données analysées



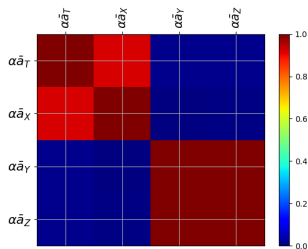
5 sessions - 480 orbites  
30 j de données cumulées

# Quelques éléments d'analyse

## méthode: analyse moindres-carrés Monte-Carlo



# Résultats



Paramètres SME	Sensibilités maximales			Unité
	$e$	$p$	$n$	
$\alpha (\bar{a}_{\text{eff}})_T^W$	$10^{-12}(1)$	$10^{-12}(1)$	$10^{-12}(1)$	GeV
$\alpha (\bar{a}_{\text{eff}})_X^W$	$10^{-8}(2)$	$10^{-8}(2)$	$10^{-8}(3)$	GeV
$\alpha (\bar{a}_{\text{eff}})_Y^W$	$10^{-6}(1)$	$10^{-7}(2)$	$10^{-6}(1)$	GeV
$\alpha a (\bar{a}_{\text{eff}})_Z^W$	$10^{-6}(1)$	$10^{-6}(1)$	$10^{-6}(1)$	GeV

- Analyse combinée de 5 sessions de mesure
- **Toujours pas de violation d'invariance de Lorentz**
- Amélioration de 1 à 3 OG des contraintes sur les composantes du tenseur SME  $\alpha (\bar{a}_{\text{eff}})_\mu^W$

# Conclusion

- **2 tests** d'invariance de Lorentz réalisés dans le cadre du SME
- **2 secteurs** explorés: le secteur de la matière et celui des couplages matière-gravité
- **2 expériences** très différentes: horloge atomique au sol un accéléromètre électrostatique en orbite

**Aucune violation détectée**