Mesures des forces à petite distance: L'effet Casimir

Astrid Lambrecht
Laboratoire Kastler Brossel (Univ. Paris 6, ENS, CNRS)

avec Francesco Intravaia & Serge Reynaud (LKB),
Guillaume Jourdan (LKB-LEPES), Marc-Thierry Jaekel (LPT-ENS),
Paulo Maia Neto (Univ. Rio de Janeiro)

Discussions avec
Gabriel Barton (Sussex Univ.), Federico Capasso (Harvard),
Joël Chevrier & Gauthier Torricelli (LEPES-Grenoble),
Ephraim Fischbach (Purdue Univ.), Umar Mohideen (Univ. of Riverside),
Valery Nezvizhevsky (ILL-Grenoble), Roberto Onofrio (Dartmouth College),
Clive Speake (Univ. of Birmingham)

http://www.spectro.jussieu.fr/Vacuum

GREX Nice, 29 octobre 2004

Une motivation pour les mesures de l'effet Casimir : tester la loi de Newton

Nouvelles forces hypothétiques

Représentation générique :
potentiel de Yukawa +
potentiel de Newton

$$V(r) = V_N(r) + V_Y(r)$$

$$V_N(r) = -G_N \frac{M_1 M_2}{r}$$

$$V_Y(r) = V_N(r)\alpha \exp(-r/\lambda)$$

$$F(r) = F_N(r) + F_Y(r)$$

$$F_N(r) = -G_N \frac{M_1 M_2}{r^2}$$

$$F_Y(r) = F_N(r)\alpha\left(1 + \frac{r}{\lambda}\right)\exp(-r/\lambda)$$

Modification de la loi de Newton entre deux masses ponctuelles

The Search for Non-Newtonian Gravity, **E. Fischbach & C. Talmadge (1998)**

Comment tester la loi de Newton ?

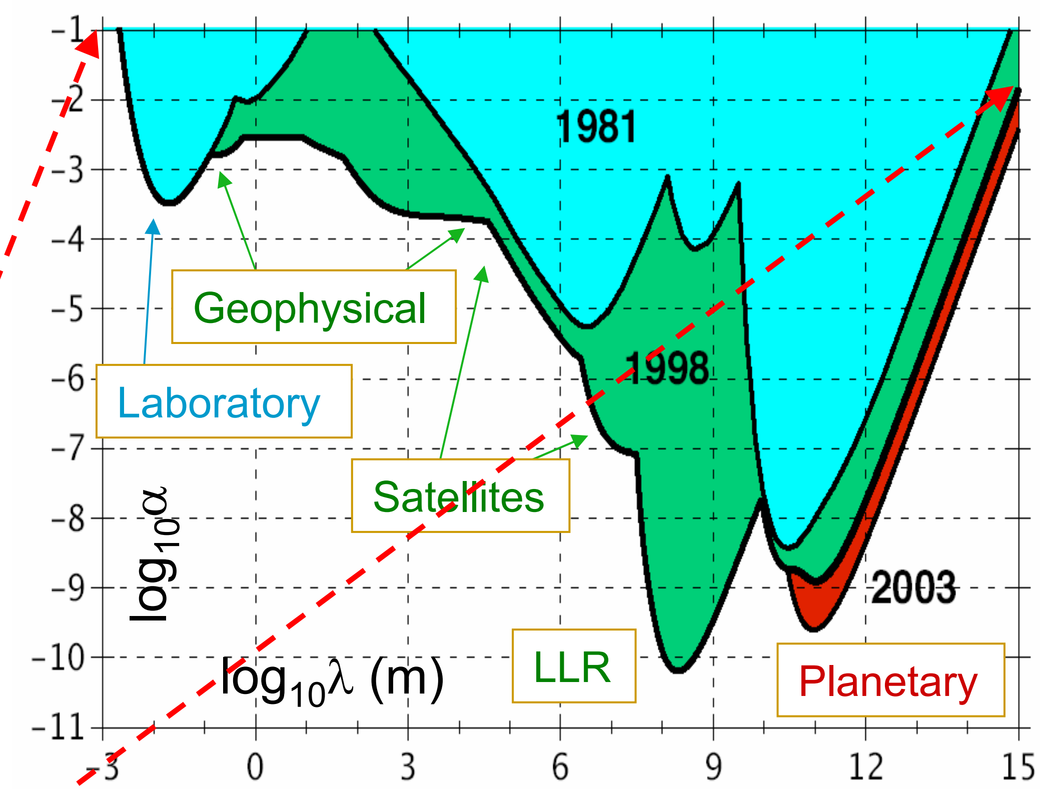
Mesures donnent des contraintes dans le plan (λ, α)

Fenêtres ouvertes à courte distance…

$\boxed{\lambda < 10^{-3}\,\mathrm{m}}$

et à longue distance

$\boxed{\lambda > 10^{16}\,\mathrm{m}}$



Courtesy : J. Coy, E. Fischbach, R. Hellings, C. Talmadge, and E. M. Standish (2003)

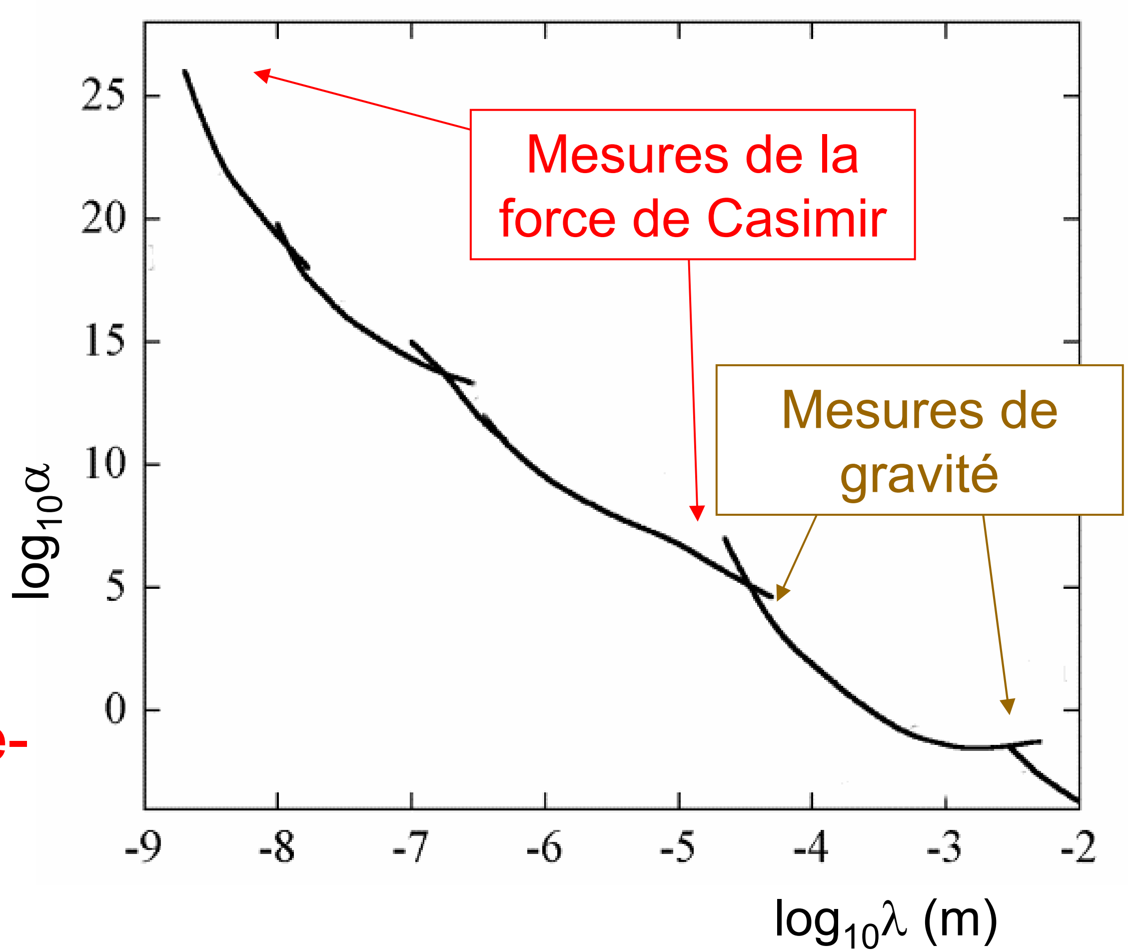
The Search for Non-Newtonian Gravity, **E. Fischbach & C. Talmadge (1998)**

Tests à courte distance

- Mesures de gravité à courte distance

  λ > qq 10µm

- Distances plus courtes: Comparaisons théorie-expériences pour la force de Casimir

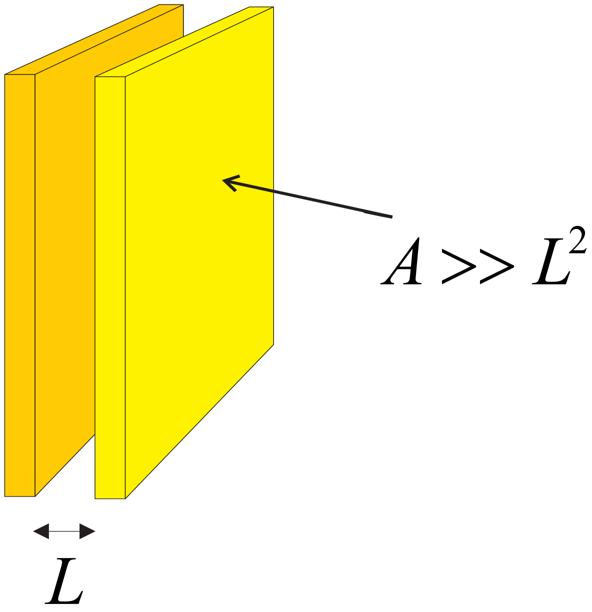


E. Adelberger *et al* Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. (2003) *hep-ph/0307284*

Casimir 1948

$$F_{\text{Cas}} = \frac{\hbar c \pi^2}{240\, L^4} A$$

$$E_{\text{Cas}} = -\frac{\hbar c \pi^2}{720\, L^3} A$$

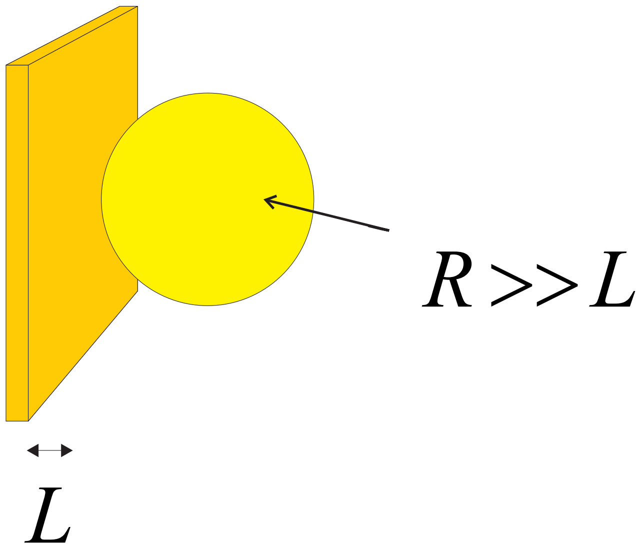


- Hypothèses
  - miroirs plans parallèles
  - réflexion parfaite
  - température nulle
  - surfaces parfaitement planes
- Ordre de grandeur de la pression de Casimir

$$L = 1\,\mu\text{m} \rightarrow \frac{F_{Cas}}{A} \approx 10^{-3}\,\text{Pa}$$

La géométrie plan-sphère

Les forces de Newton et de Yukawa sont additives, mais pas la force de Casimir



Proximity force approximation

- les contributions des éléments de surface sont additionnées comme si elles étaient indépendantes

$$F_{PS} = \int d^2x \frac{F_{PP}(x)}{A}$$

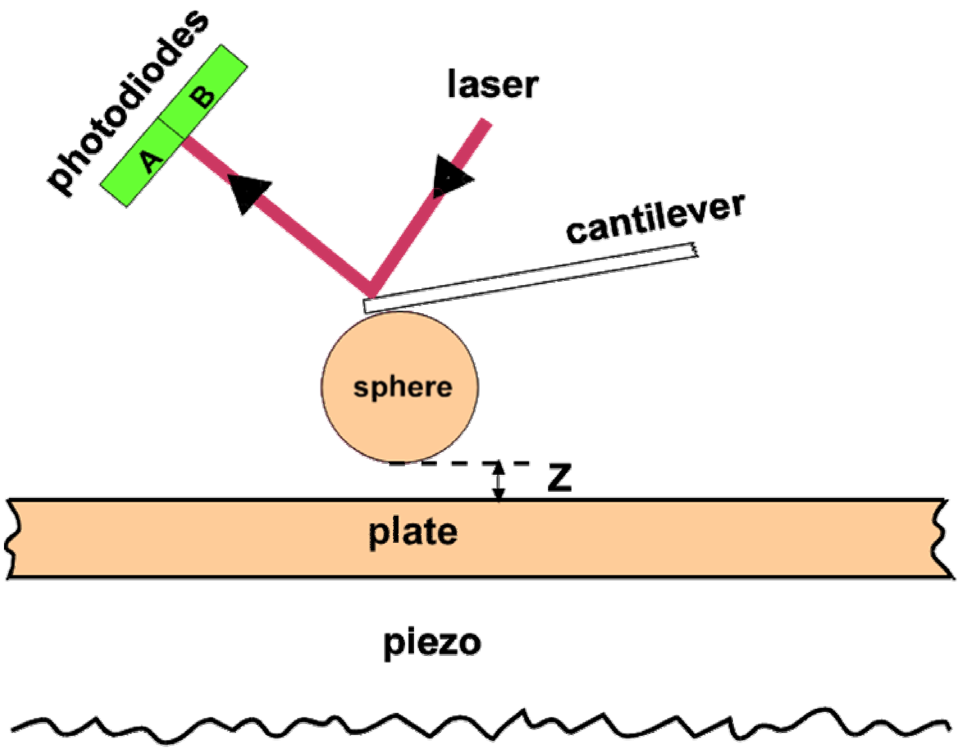
- pour la géométrie plan-sphère (si *R*>>*L*)

$$F_{PS} = 2\pi R \frac{E_{PP}}{A}$$

Mohideen *et al* (Riverside)

Microscope à force atomique (AFM)

- Géométrie plan-sphère
- Sphère (100µm) et plaque recouvertes d'or
- Distances 60-900nm
- Lecture optique
- Précision expérimentale mieux que 2% aux plus courtes distances



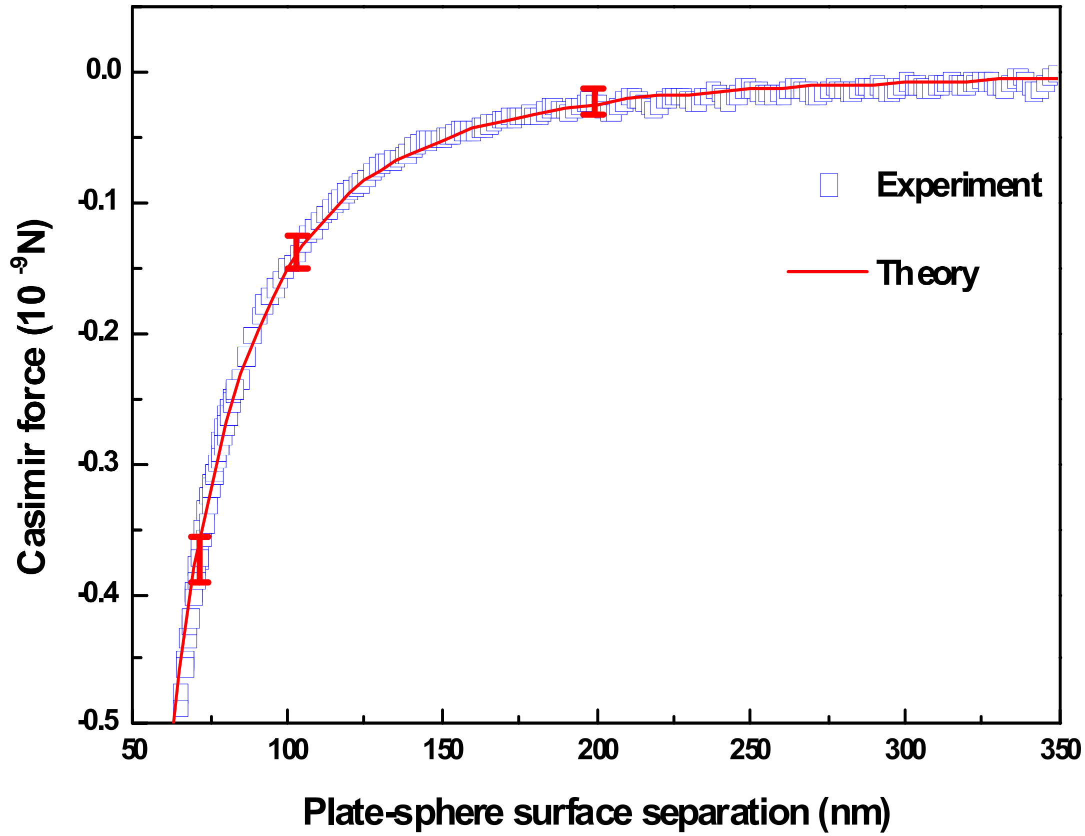
Courtesy U. Mohideen

B.W. Harris *et al* Phys. Rev. A62 052109 (2003)

Comparaison entre théorie et expériences

Accord satisfaisant si on tient compte des effets suivants

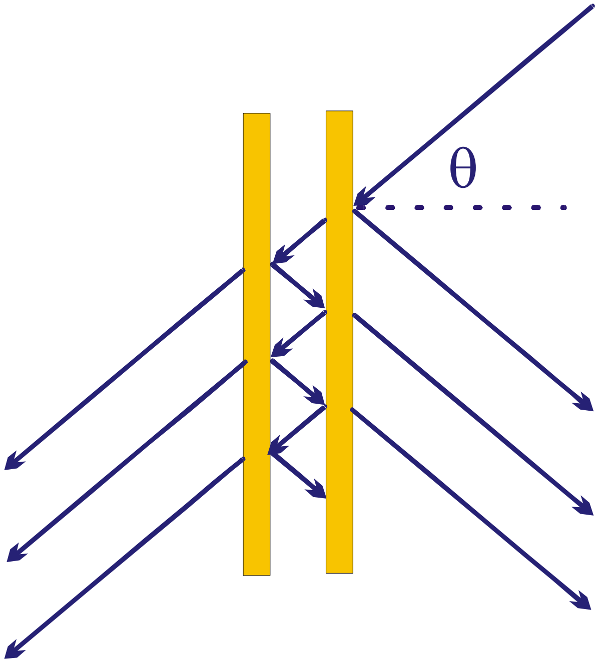
- Géométrie plan-sphère
- Réflexion imparfaite
- Température ambiante (correction < 1%)
- Rugosité des surfaces (correction < 1%)



Courtesy U. Mohideen

Réflexion imparfaite

La pression de radiation du vide



- en dehors de la cavité : $\dfrac{\hbar\omega}{2}\cos^2\theta$
- dans la cavité : $\dfrac{\hbar\omega}{2}\cos^2\theta \times g(\omega)$

Fonction d'Airy:

$$g_k^p(\omega) = \frac{1-\left|r_1^{\,p}(\omega) r_2^{\,p}(\omega) e^{2ik_zL}\right|^2}{\left|1-r_1^{\,p}(\omega) r_2^{\,p}(\omega) e^{2ik_zL}\right|^2}$$

$$k_z = \frac{\omega}{c}\cos\theta$$

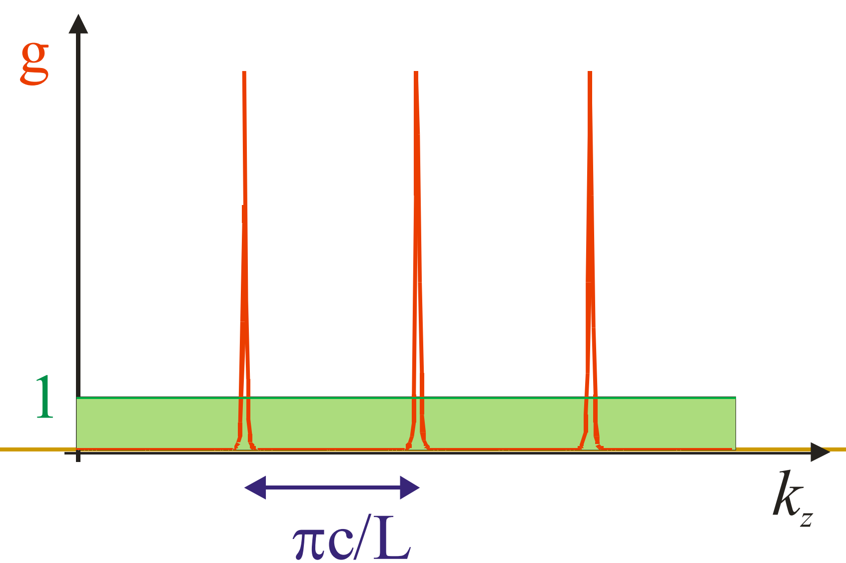
vecteur d'onde

La fonction d'Airy et la force de Casimir

- Force de Casimir =
  intégrale sur tous les modes du champ

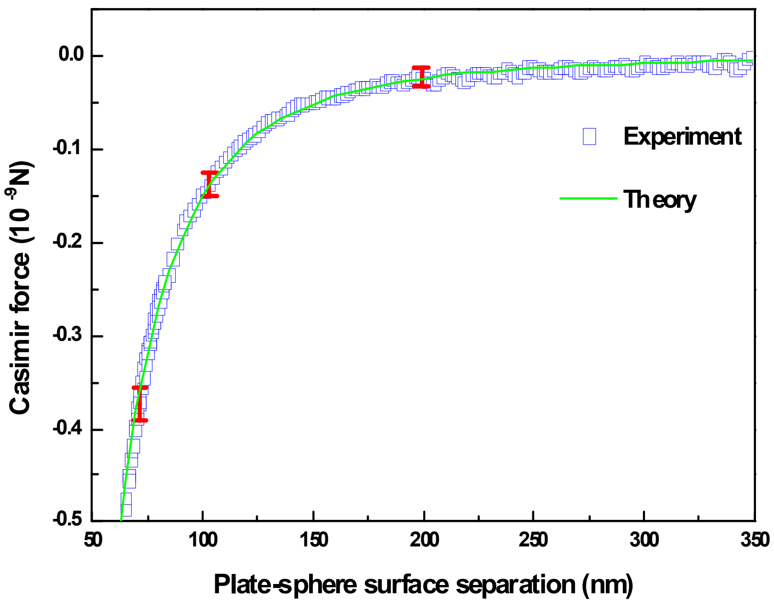
$$F = A \sum_p \int \frac{\mathrm{d}^2 k}{4\pi^2} \int_0^\infty \frac{\mathrm{d}k_z}{2\pi} \hbar\omega \cos^2\Theta \left(1\text{-}g_k^p(\omega)\right) ; \quad p = \mathrm{TE}, \mathrm{TM}$$

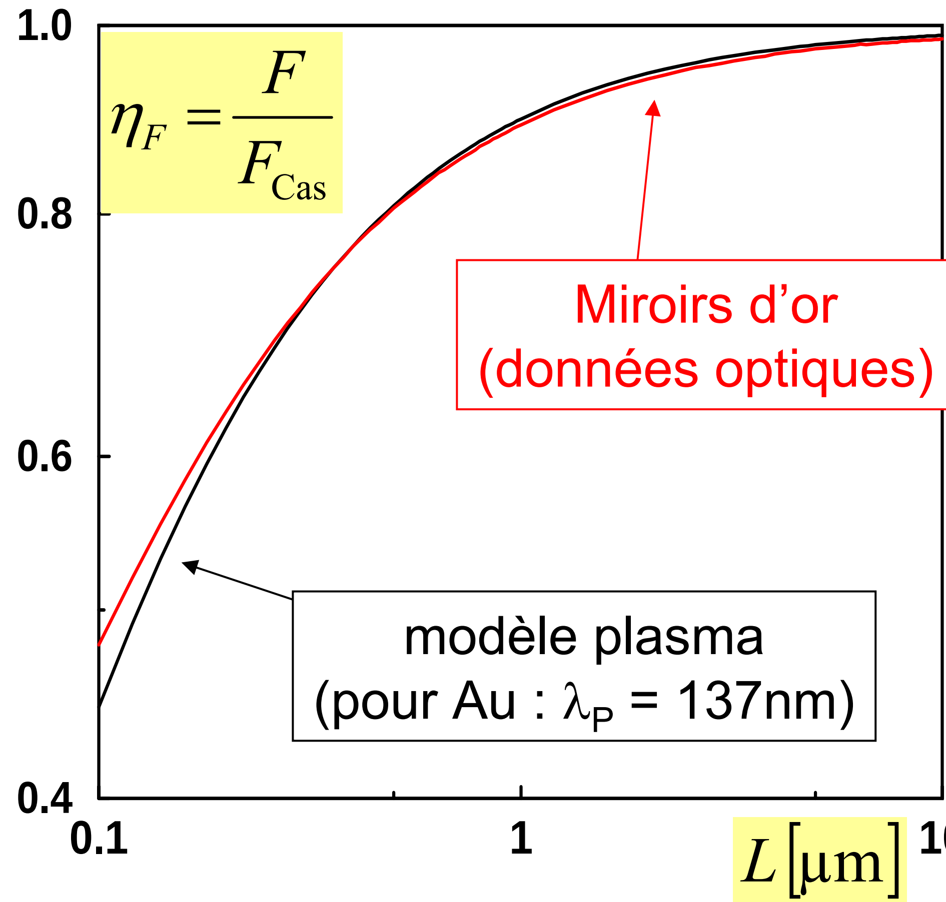
- Bilan détaillé entre contributions attractives et répulsives déterminé par la fonction d'Airy



Intégration des données optiques

nécessaire pour une précision de l'ordre du %





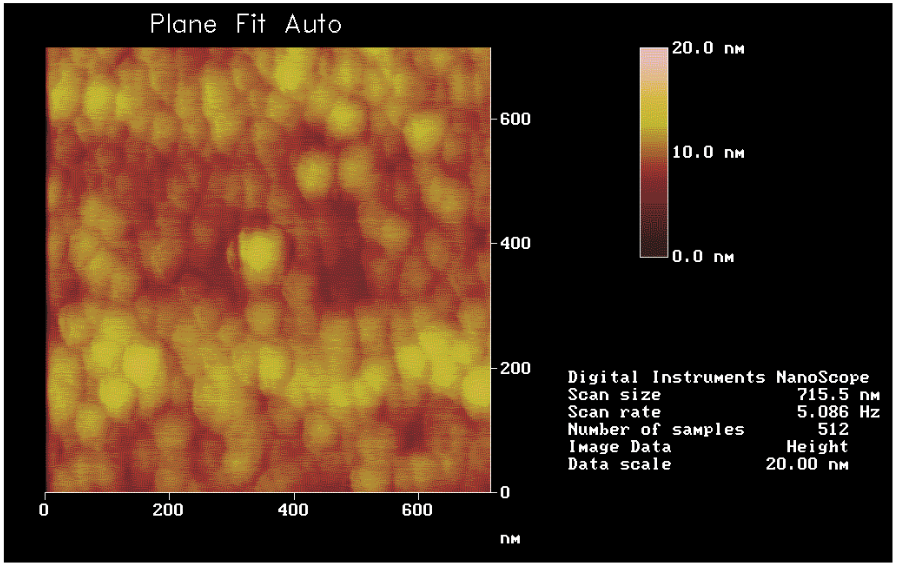
A. Lambrecht & S. Reynaud, Eur. Phys. J. D8 309 (2000)

Rugosité des surfaces

- Calcul approximatif par PFA
  Réflexion spéculaire : correction de 0.15%
- Longueur caractéristique >> distance

- Spectre de rugosité

- Calcul exact nécessaire



Courtesy U. Mohideen

Réflexion non-spéculaire : Méthode

- Profils de rugosité des deux miroirs $h_\mathrm{i}(\boldsymbol{r})$
- Spectre de rugosité $\sigma(k) = \sum_{i=1,2} \int \mathrm{d}^2 r \exp(-ikr) \langle h_i(r) h_i(0) \rangle$
- Correction $\delta E = \int \frac{\mathrm{d}^2 k}{(2\pi)^2} G(k) \;\; \sigma(\mathrm{k})$
- *G(k)* contient les coefficients de réflexion qui mélangent les polarisations et les vecteurs d'onde
- Calcul de $\rho(k) = \frac{G(k)}{G(0)}$

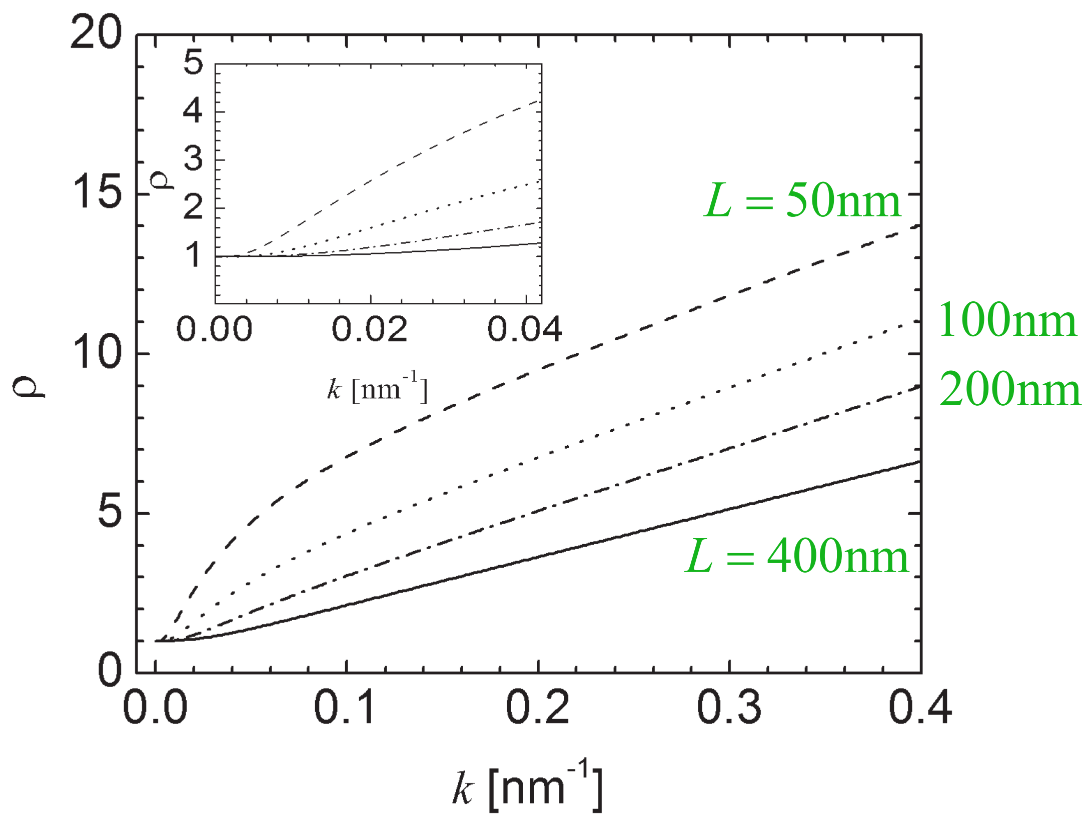
C. Genet , A. Lambrecht, P. Maia Neto & S. Reynaud, EPL 62, 484 (2003)

Réflexion non-spéculaire : Résultats

- Correction est toujours plus grande que prévue par PFA

- Miroirs de Mohideen
  L ~ 200 nm
  k^{-1} ~ 50 nm

- ρ ~ 4
  Correction ~ 0.6%
  (au lieu de ~ 0.15%)

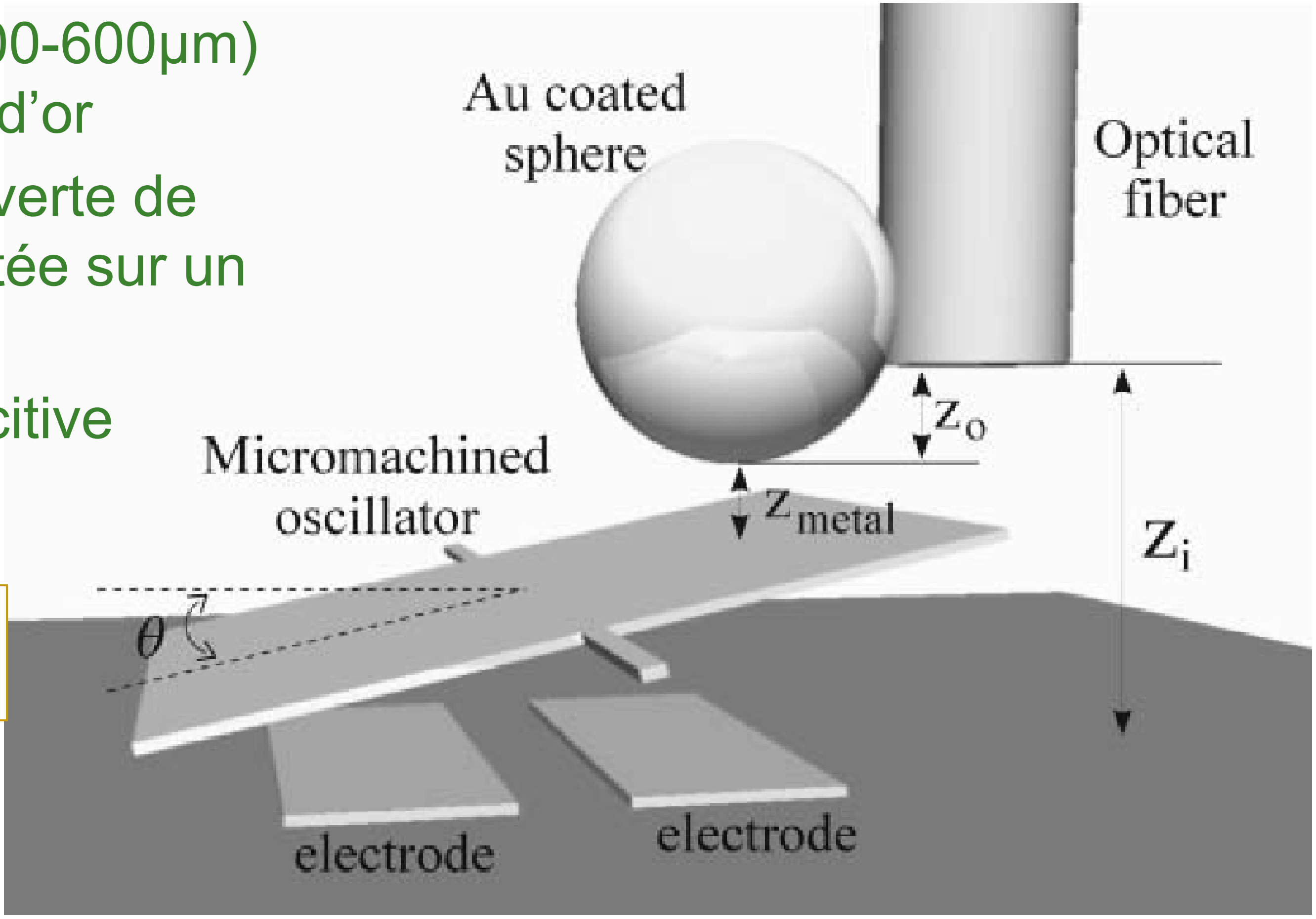


Fischbach *et al* (Purdue)

Sphère (R=100-600µm) recouverte d'or

Plaque recouverte de cuivre montée sur un MEMS

Mesure capacitive



Mesures statiques et dynamiques

L = 260-1200nm

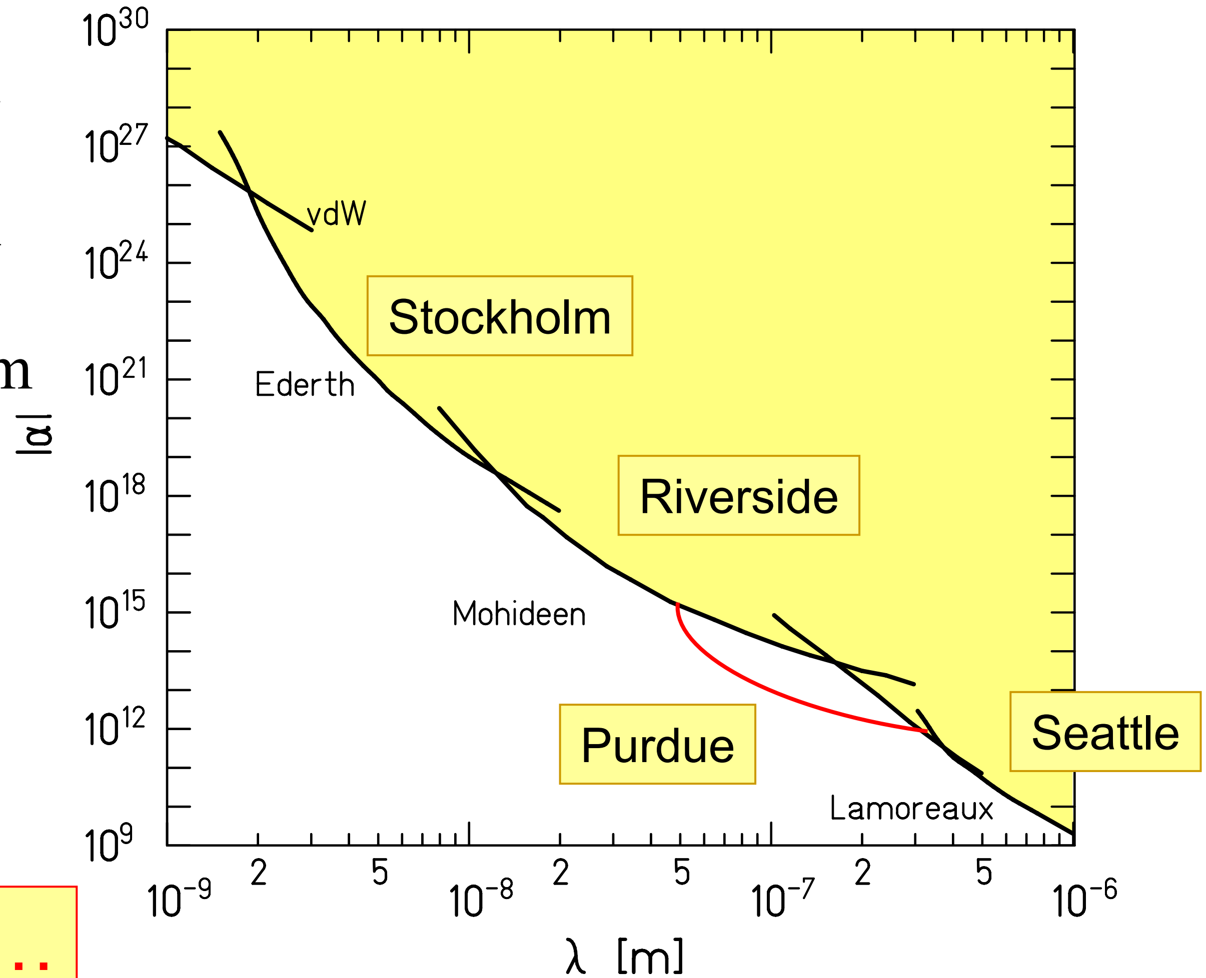
R. Decca *et al* Phys. Rev. D68, 116003 (2003)

Mesures de la force de Casimir : Résumé

$\alpha < 1$ pour $\lambda \approx 200\mu m$

$\alpha < 10^5$ pour $\lambda \approx 10\mu m$

$\alpha < 10^{12}$ pour $\lambda \approx 100nm$



Peut faire mieux…

E. Adelberger *et al* Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. (2003) *hep-ph/0307284*