

#### Les défis technologiques des détecteurs d'ondes gravitationnelles

Jerome Degallaix



JOGLY - Février 2019

#### **Dans les prochaines 40 minutes**

- Comment atteindre la sensibilité ?
  - avec de longues cavités
  - avec de la puissance
- Des technologies clés :
  - Ie vide
  - Ies suspensions
  - Ia compensation thermique
  - les pièges à lumière
  - les super miroirs sur le campus

# Comment atteindre la sensibilité ?

#### L'effet d'une onde gravitationnelle



### Amplitude d'une onde gravitationnelle (OG)



#### **Ordre de grandeur** $\Delta L = 0.5 h \times L$

#### Si h ~ $10^{-23}$ nous devons mesurer :

#### La distance soleil - proxima centaury avec une précision de 0.2 µm



#### Ou 2 km avec une précision de 10<sup>-20</sup> mètre!

#### L'interferomètre de Michelson



Particulièrement adapté pour mesurer un changement différentiel de longueur des 2 bras

#### L'interferomètre de Michelson



Particulièrement adapté pour mesurer un changement différentiel de longueur des 2 bras

#### **Quelques remarques**

- Une onde gravitationnelle produit une différence de phase de la lumière réfléchie dans les 2 bras
- A la détection, nous ne pouvons mesurer une différence de phase mais nous mesurons une variation d'intensité
- Pour augmenter la sensibilité augmenter la différence de phase !
  - diminuer la longueur d'onde
  - augmenter la longueur des bras

Longueur d'onde de la lumière est fixé : 1064 nm (disponibilité de lasers ultra-stables et d'optiques hautes performances)

#### Limitation pour la longueur des bras

- La courbure de la terre
- Le coût :



#### **Des cavités Fabry-Perot dans les bras**



#### La cavité Fabry-Perot

Deux miroirs, l'un en face de l'autre séparés par une distance.



Création d'interférences lumineuses à l'intérieur de la cavité, augmentant ou annulant le champs électrique entre les deux miroirs.

#### Puissance qui circule à l'intérieur de la cavité



ISL = Intervalle Spectral Libre

#### **Quelques nombres clés**



#### **Quelques nombres clés**

Pour Virgo :



Gain en signal : 290

Pour Advanced Virgo :  $R_{IM} = 98.6 \%$  $R_{EM} = 99.999 \%$ 

#### Notre nouvel interféromètre :



#### Un bruit fondamental : le bruit de grenaille (shot noise en anglais)

Mesurer une puissance, c'est compter le nombre de photon sur un intervalle de temps



A cause de la nature discrète de la lumière, le temps d'arrivée des photons suit une loi de Poisson.

On peut calculer le bruit équivalent en h

#### La sensibilité si seulement ce bruit



18

#### Le bruit de pression de radiation

En mesurant la position du miroir, nous induisons une action en retour : la pression de radiation sur le miroir



Densité spectrale de bruit en puissance :

$$S_{\rm h}^{\rm RP}(f) = \frac{1}{mLf^2} \sqrt{\frac{4h_{\rm p}P_0}{c\lambda}}$$

### La limite quantique pour un Michelson simple



#### Et avec des cavités dans les bras



#### **Comment atteindre plusieurs kW de puissance ?**



• Afin de démultiplier la puissance circulant dans l'interféromètre

#### **Modifier la bande passante**



 Modifier la réponse optique de l'interféromètre, en particulier augmenter la bande passante

#### Le schéma optique simplifié



#### Les bruits que nous pensons connaître

Pour la configuration finale du détecteur Advanced Virgo



Très similaire pour Advanced LIGO

Classical and Quantum Gravity, 32(2), 024001, (2014)

#### Les bruits que nous mesurons (nos meilleurs ennemis)



from Virgo Interferometer Monitoring

26

## ΙΙ

# Sélection de technologies clés le vide

- les suspensions
- la compensation thermique
- les pièges à lumière diffusée

#### Les chambres à vide de la partie centrale



VIRGO Vacuum System Overview - A. Pasqualetti

#### Les spécifications pour le vide



# Π

# Sélection de technologies clés • le vide

### eles suspensions

- la compensation thermique
- les pièges à lumière diffusée

#### Le sol bouge tout le temps

#### Comparaison de différents sites



Gravitational radiation detection with laser interferometry – R. Adhikari - Rev. Mod. Phys. 86, 121

#### But : isoler sismiquement le miroir du sol

- Dans tous les degrés de libertés
- Le pendule est la base du système de suspension



TF: GEO 600 triple pendulum suspension system: Seismic isolation and control, rev sci in Vol 71, Num 6

#### **Pour aller plus loin...**

How to get more isolation?



In practice: employ combination of these measures

#### Le super atténateur de Virgo



Plan schématique

Fonction de transfert de l'isolation

#### Le dernier étage de la suspension

#### Où le miroir est attaché Input Payloads



Taken from: The payloads of Advanced Virgo: current status and upgrades – Naticchioni – Amaldi 12

#### Mais pas seulement pour les gros miroirs

Mais aussi pour les bancs optiques les plus critiques



Suspension compact pour petites tours à vide

Banc externe à l'air

# ΙΙ

# Sélection de technologies clés • le vide

- les suspensions
- la compensation thermique
  - les pièges à lumière diffusée

#### **Une histoire de puissance**



#### Effet de l'absorption optique

# Une partie infime (~ppm) du faisceau laser est absorbée et convertie en chaleur.



de: Compensation of strong thermal lensing in advanced interferometric gravitational waves detectors

#### Effet de l'absorption optique

Une partie infime (~ppm) du faisceau laser est absorbée et convertie en chaleur.



#### de: Compensation of strong thermal lensing in advanced interferometric gravitational waves detectors

#### Le système de compensation thermique



#### Le système de compensation thermique



#### Ce système en quelques images



Anneau chauffant



Banc du laser CO<sub>2</sub>



Miroirs de renvoi pour le Hartman



Installation sur le site

# ΙΙ

# Sélection de technologies clés

- le vide
- les suspensions
- la compensation thermique

les pièges à lumière diffusée

#### Un ennemi redoutable : la lumière diffusée

Tous les interféromètres ont déjà été limités par la lumière diffusée ! C'est une source de pertes optiques mais aussi de bruit quan

C'est une source de pertes optiques mais aussi de bruit quand cette lumière se recombine avec le faisceau principal.

Recherches pour :

- comprendre son origine, l'estimer
- réduire le nombre de défaut dans les couches
- simuler son chemin optique, influence sur la sensibilité
- trouver le matériau pour la piéger (et où positionner les ouvertures ?)

#### Les stratégies sur l'interféromètre



Piège à lumière autour des miroirs, dans les tubes à vide et sur les bancs optiques

*Optiques importantes sous vide et suspendues* 



Cyril FRESILLON/VIRGO/CNRS Photothèque

# III

# Focus sur les miroirs des bras, les plus critiques

#### Les 3 ingrédients d'un miroir:



#### **Cela ressemble à :**



#### Les cavités des bras

- Cavités longues de 3 km
- Où le signal de l'onde est imprimé sur la phase de la lumière
- 2 paramètres essentiels
  - La finesse

• Les pertes par aller retour

NI

NE

#### The arm cavities



• Où le signal de l'onde est imprimé sur la phase de la lumière



 La finesse
 Définie la bande passante du détecteur

Transmission du miroir d'entrée



NI

Gain de recyclage de puissance

NE

#### The arm cavities



• Où le signal de l'onde est imprimé sur la phase de la lumière



• La finesse 450

Définie la bande passante du détecteur

Transmission du miroir d'entrée T=1.4%

 Les pertes par aller retour
 75 ppm
 Définie la puissance réfléchie par les bras
 f
 Gain de recyclage de puissance

NI

G = 40

NE

#### Les pertes par aller retour (RTL)

- Un chiffre critique
- Qui est ridiculement petit < 0.008%
- Contraintes sur la forme du miroir, le dépôt réfléchissant







Mauvais contraste, modes optiques d'ordre supérieur, lumière perdue

Lumière perdue

#### Le substrat roi: la silice fondue

Quelques propriétés particulièrement intéressantes pour les détecteurs d'OG

- optiquement: matériau exceptionnel
- disponible en grandes tailles
- très faible bruit thermique
- possibilité de suspension monolithique





### Un polissage remarquable

#### Possibilités de polissage exceptionnelle pour la silice (et répétables)



#### $RMS < 0.2 nm (PV = \lambda/300)$ sur diamètre 150 mm

#### 1 Rms=0.082nm PTV=0.510nm Rms=0.095nm PTV=0.595nm $^{-1}$ -1 \_2 0 -2 -11 -2 $^{-1}$ 0 1 2 5 6 Rms=0.086nm PTV=0.543nm Rms=0.107nm PTV=0.661nm $^{-1}$ \_' -2 -2 -10 -10 -2

Rugosité :

*RMS* < 0.1 *nm* 

La machine de dépot IBS dans la salle blanche du LMA, la plus grande de ce type au monde



Où a été fait le traitement des miroirs les plus critiques de tous les détecteurs d'ondes gravitationnelles

#### Procédé de pulvérisation par faisceau d'ions

Bloc de verre poli à traiter



Faisceau d'ions

#### **Principe d'un miroir multicouches**



1 surface,  $R \sim 4\%$  2 surfaces,  $R \sim 20\%$  40 surfaces,  $R \sim 100\%$ 

Empilement de 20 paires de couches d'oxyde de tantale et silice (verre)

### La métrologie sur grande taille

Étape essentielle pour connaître les caractéristiques des miroirs :

- transmission
- absorption optique
- front d'onde (mesure la planéité)
- profilomètre (mesure la rugosité / défauts)
- diffusion





Mesure de surface (planéité et rugosité)



#### Performances après dépôt

- Planéité identique malgré le dépôt de 6 μm
- Transmission identique pour les miroirs d'entrée (à 0.002 % près)
- Transmission des miroirs de fin : 4 ppm

#### Performances typiques à 1064 nm



Diffusion





ppm

réflectivité AR



61

#### En chiffre, les grands miroirs ce sont :







- 10 ans de R&D sur les matériaux
- 4 ans deR&D sur l'uniformité
- 24 substrats de 40 kg traités
- 480 h de dépôt (avec 15 nuits)
- 0.1 mm épaisseur cumulée déposée.
- 240 jours pour la qualification









#### Conclusion

- La détection des OG est aussi une prouesse technologique
- Qui a été un moteur de formidables avancés en particulier dans l'optique
- Et la recherche continue...