

Remarques sur le dossier de mise en perspective didactique d'un dossier de recherche

Rémi Metzdorff

Concours externe spécial de l'agrégation de physique-chimie option physique
Session 2020

1 Parcours universitaire et scientifique

2 Refroidissement vers l'état quantique fondamental

2.1 Mesure de déplacements et optomécanique

2.1.1 Les mesures de déplacements et leurs applications

Exploitation du signal GW150914

Tout est très bien expliqué à un niveau raisonnable dans la dernière référence citée dans le dossier. La relativité générale est par essence non linéaire, mais de nombreuses estimations peuvent être réalisées dans le cadre de la physique newtonienne. Trois hypothèses sont réalisées pour cette étude : masses symétriques, sans spin et orbite circulaire.

Il faut tout d'abord s'assurer que l'évènement correspond à une coalescence de deux objets massifs. L'évolution du signal en témoigne : augmentation de la fréquence et de l'amplitude jusqu'à un maximum suivi d'un ringdown. Cette forme exclue une source constituée du ringdown d'une seule masse : les oscillations d'une goutte sont isochrones et s'amortissent.

La fréquence du signal est le double de la fréquence orbitale car l'émission d'onde gravitationnelle est liée au moment quadrupolaire du système qui est invariant par rotation de π . L'évolution temporelle de la fréquence du signal avant la fusion donne une *chirp mass* d'environ $30 M_{\odot}$. Si le binaire est constitué de deux objets de masses comparables, chacun fait environ $35 M_{\odot}$.

La fréquence maximale du signal permet d'estimer la distance entre les deux objets en utilisant la troisième loi de Kepler. On trouve ~ 320 km, soit une source très compacte. Les seuls objets connus qui remplissent de telles conditions sur leur masse et compacité sont les trous noirs. Les étoiles à neutrons sont exclues car même si elles sont très compactes, elles n'atteignent jamais des masses supérieures à $3 M_{\odot}$ sans s'effondrer en trou noir.

La distance de la source est donnée par la luminosité maximale de l'évènement en la comparant à l'amplitude du signal mesuré. On trouve $d \sim 300$ Mpc. Sa localisation dans le ciel est donnée d'après l'écart temporel entre la réception du signal sur les deux interféromètres LIGO. Le raisonnement est similaire à celui du calcul des anneaux d'égale inclinaison dans le Michelson.

Ordres de grandeur de GW150914 :

- énergie équivalente à $3 M_{\odot}$ rayonnée sous forme d'ondes gravitationnelles ;
- 10^{27} fois la consommation énergétique mondiale ;
- 10^5 fois l'énergie rayonnée par le soleil depuis sa création ;

- énergie rayonnée par toute la galaxie en 500 ans ;
- puissance crête : 4×10^{49} W.

2.1.2 L'optomécanique : entre limite de sensibilité...

2.1.3 ... Et contrôle d'oscillateurs mécaniques

Décohérence

Le principe d'effondrement de la fonction d'onde, la décohérence, est un des postulats de la mécanique quantique. On le constate expérimentalement lors des mesures qui projettent l'état du système mais le mécanisme de ce phénomène reste mystérieux. Voir la [conférence de Michel Brune](#). Penser aux mesures non-lues : les interactions avec l'environnement sont autant de mesures qui projettent l'état du système.

Il faut voir que la décohérence peut avoir de multiples origines et les modèles sont nombreux. Si la gravité est impliquée dans ces processus, alors ses effets deviennent important pour des objets suffisamment massifs. On peut se rappeler d'une interprétation de la masse de Planck m_P : on compare l'énergie d'interaction gravitationnelle entre deux masses m_P séparées par une distance r et l'énergie d'un photon de longueur d'onde $2\pi r$:

$$\frac{Gm_P^2}{r} = \frac{\hbar c}{r}. \quad (1)$$

Étudier la décohérence d'objets massifs préparés dans un état quantique permet de tester les modèles de décohérence et notamment de voir si la gravité intervient ou non. Voilà voilà...

2.2 Les oscillateurs mécaniques

Resonant approximation : lorentzian shape

La susceptibilité mécanique de l'oscillateur amorti s'écrit

$$\chi[\Omega] = \frac{1}{m_{\text{eff}} [\Omega_m^2 - \Omega^2 - i\Gamma_m \Omega]} = \frac{1}{m_{\text{eff}} [(\Omega_m + \Omega)(\Omega_m - \Omega) - i\Gamma_m \Omega]}. \quad (2)$$

Si $\Gamma_m \ll \Omega_m$, on peut s'intéresser à l'évolution de la susceptibilité proche de la résonance, soit pour $\Omega \approx \Omega_m$. On a alors aussi $\Omega_m + \Omega \approx 2\Omega_m$, si bien que

$$\chi[\Omega] \approx \frac{1}{m_{\text{eff}} [2\Omega_m(\Omega_m - \Omega) - i\Gamma_m \Omega_m]} = \frac{1}{m_{\text{eff}} \Gamma_m \Omega_m \left[\frac{\Omega_m - \Omega}{\frac{\Gamma_m}{2}} - i \right]}. \quad (3)$$

Pour la spectre de déplacement, on trace la densité spectrale de puissance du bruit de position, proportionnelle au carré du module de la susceptibilité mécanique

$$|\chi[\Omega]|^2 = \frac{1}{(m_{\text{eff}} \Gamma_m \Omega_m)^2 \left[\left(\frac{\Omega_m - \Omega}{\frac{\Gamma_m}{2}} \right)^2 + 1 \right]}, \quad (4)$$

ce qui est bien une lorentzienne.

Oscillateur harmonique quantique

Refaire le calcul (TD de MQ d'Arnaud) et marquer les différences avec le puits infini rectangulaire. Différentes manifestations de la quantification :

- niveaux d'énergie discrets ;
- énergie minimale non nulle,

qui se traduisent sur la mesure :

- fluctuations de point zéro ;
 - asymétrie des bandes latérales mécaniques.
- Les phonons sont des bosons.

Mouvement brownien

Voir les [cours de Feynman](#) sur le mouvement brownien.

Pour justifier que la variance du mouvement brownien est l'intégrale de la densité spectrale de puissance des déplacements, il faut se rappeler du théorème de Wiener-Kintchine qui relie la DSP à la TF de la fonction d'autocorrélation. La démonstration est faite dans [ce polycopié](#) p13 mais on retiendra :

- la fonction d'autocorrélation prise en 0 donne la valeur RMS du signal. Or pour un signal de moyenne nulle, la valeur RMS est égale à la variance.
- d'autre part, la fonction d'autocorrélation prise en 0 est l'intégrale sur toutes les fréquences de la DSP.

La variance du mouvement brownien est donc bien l'intégrale de la DSP.

Fluctuation-dissipation

Voir Saulson. On retiendra que le théorème de fluctuation-dissipation donne la valeur de la densité spectrale de puissance à chaque fréquence. *Loin de la résonance*, réduire la dissipation réduit les fluctuations de position, mais ce n'est pas vrai à résonance. Il n'y a donc aucun paradoxe avec le théorème d'équipartition de l'énergie qui donne la variance du mouvement brownien (l'intégrale de la DSP). Pour réduire les fluctuations d'un système à *toutes les fréquences* il est donc nécessaire de refroidir. Pour réduire le bruit thermique loin de la résonance, on peut se contenter d'utiliser des systèmes avec une dissipation faible ce qui est la stratégie des interféromètres gravitationnels.

Fourier

Relire la partie consacrée à l'étude spectrale du [cours de Jérémie Neveu](#). Il faut faire la différence entre série de Fourier et transformée de Fourier. La décomposition en série de Fourier s'applique aux fonctions périodiques et constitue les prémisses de l'analyse harmonique. La transformée de Fourier notée TF est une généralisation aux fonctions non périodiques. On choisit pour convention

$$\text{TF}(f(t)) = \hat{f}[\omega] = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt, \quad (5)$$

et pour la transformée inverse

$$\text{TF}^{-1}(\hat{f}[\omega]) = f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{f}[\omega] e^{i\omega t} d\omega. \quad (6)$$

La fonction f peut être réelle ou complexe et sa TF est à priori complexe.

En électronique numérique, on comprend facilement le critère de Shannon pour éviter les repliements de spectre en considérant le signal échantillonné comme le produit d'un signal analogique et d'un peigne de Dirac. Le spectre est alors le produit de convolution des TF du signal et du peigne. La transformée de Fourier discrète est comme son nom l'indique l'équivalent discret de la transformée de Fourier et s'applique au traitement numérique du signal. La FFT est un algorithme particulier de TFD basé sur l'utilisation d'ensembles nombre d'échantillons puissance de 2 qui permet de réduire significativement le temps de calcul. L'algorithme naïf se complexifie comme N^2 où N est le nombre d'échantillons alors que la FFT se complexifie en $N \log N$.

Les problèmes de fenêtrage se comprennent comme un phénomène de diffraction : une fenêtre porte fera apparaître des sinus cardinaux dans le spectre. La mitigation de ces soucis avec l'utilisation de fenêtres particulières (Hanning, etc.) se rapproche de l'apodisation utilisée en optique pour augmenter la résolution des instruments.

La densité spectrale de puissance est le carré du module de la transformée de Fourier divisé par la largeur de la bande spectrale. Elle est utile pour caractériser la puissance du signal contenue dans une bande de fréquence et permet de caractériser les signaux aléatoires tels que les bruits. Le théorème de Wiener-Kintchine donne que c'est aussi la TF de la fonction d'autocorrélation $\gamma(\tau)$ qui caractérise la manière dont les structures que l'on peut voir dans un signal se répètent sur des échelles de temps τ . La densité spectrale d'amplitude correspond à la racine carrée de la DSP.

Au niveau des unités si l'on s'intéresse à un signal temporel d'unité X :

- le spectre donné par le module de la TF signal est en $X \cdot \text{Hz}^{-1}$;
- la densité spectrale de puissance s'exprime en $X^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$;
- la densité spectrale d'amplitude s'exprime en $X \cdot \text{Hz}^{-1/2}$.

2.3 Une cavité optique pour augmenter la sensibilité

Déphasage associé à une cavité

Les calculs pour une cavité symétrique sans perte sont fait dans le Hecht p435. On obtient, avec $r = -r'$ et $tt' = 1 - r^2$

$$E_r = rE_i \frac{1 - e^{-i2kL}}{1 - r^2 e^{-i2kL}} \quad \text{et} \quad E_t = E_i \frac{1 - r^2}{1 - r^2 e^{-i2kL}}. \quad (7)$$

Dans ce cas, si la finesse est suffisamment grande et à résonance, la transmission et la réflexion en intensité valent respectivement 1 et 0. Le passage de la résonance s'accompagne d'un déphasage de π pour le faisceau réfléchi comme pour le faisceau transmis.

Dans le dossier MEPD, on suppose le miroir de fond de la cavité parfaitement réfléchissant. Dans ce cas, le champ réfléchi est donné par

$$E_r = E_i \frac{r - e^{-i2kL}}{1 - r e^{-i2kL}}, \quad (8)$$

et il n'y a pas de champ transmis. Lors du passage de la résonance, la réflexion s'accompagne seulement d'un déphasage égal à 2π cette fois.

2.4 Couplage optomécanique et refroidissement

Friction « chaude »

Pour un système thermodynamique à l'équilibre constitué d'un grand nombre de particules N , les fluctuations ΔX d'une variable X de moyenne \tilde{X} sont données par

$$\frac{\Delta X}{\tilde{X}} = \frac{1}{\sqrt{N}}. \quad (9)$$

Si l'on s'intéresse à la force de pression F_p exercée sur une surface S par un gaz parfait de densité particulaire n , on a

$$F_p = S \times n k_B T. \quad (10)$$

On exprime les variations de cette force par la variance ΔF_p^2 qui vérifie compte tenu des deux résultats précédents :

$$\Delta F_p^2 \propto n. \quad (11)$$

Pour la dissipation associée au contact de l'oscillateur avec l'air environnant, il faut considérer la puissance acoustique \mathcal{P}_a rayonnée par la surface de l'oscillateur. Les calculs sont fait dans les thèses de T. Briant p145 et de L. Neuhaus p94 ainsi que dans le Landau & Lifchitz de mécanique des fluides dans le paragraphe sur l'émission du son. On montre $\mathcal{P}_a = c\rho v^2$ où c est la vitesse du son dans l'air, ρ sans masse volumique et v la vitesse de la surface émettrice. Dans le cas du micro-pilier de hauteur h , ceci revient à associer à l'oscillateur un coefficient d'amortissement dû au couplage avec l'air

$$\Gamma = \frac{4c}{h} \frac{\rho}{\rho_{\text{quartz}}}. \quad (12)$$

On trouve donc également que la dissipation est proportionnelle à n .¹

Ceci montre qu'il est impossible de refroidir un oscillateur avec un amortissement mécanique bruité comme celui causé par l'air : augmenter la pression du gaz augmente l'amortissement mais aussi les fluctuations de la force de pression. Au final, les fluctuations de position de l'oscillateur sont inchangées. Il faut donc utiliser un processus qui n'ajoute pas de bruit pour obtenir la friction froide et le refroidissement.

Approche thermodynamique du self-cooling

Voir Aspelmeyer 2014, Fig. 14. Attention : le cycle de gauche, côté red-detuned, est parcouru dans le sens trigonométrique contrairement à ce qui est indiqué sur le schéma de l'article. On s'en convainc en raisonnant comme suit pour le côté red-detuned :

- la force de pression de radiation est retardée par rapport aux déplacements ;
- en allant dans le sens des x croissants, on reste donc en dessous de la lorentzienne ;
- en allant dans le sens des x décroissants, on reste au dessus de la lorentzienne.

Le travail de la force de pression de radiation est donc bien négatif du côté red-detuned et positif du côté blue-detuned.

Approche quantique : processus Stokes et anti-Stokes

Voir Aspelmeyer 2014.

2.5 Principaux résultats obtenus

2.6 Vers des mesures sous la limite quantique standard

Représentation des états comprimés

On peut expliquer les diagrammes en allumette en les rapprochant des diagrammes de Fresnel. La représentation de Fresnel permet de représenter des sinusoides par des vecteurs dont la norme donne l'amplitude et l'angle par rapport à une direction arbitraire donne la phase. C'est un outils utilisé en PC pour expliquer les interférence à N ondes : voir [?] p748. Il devient clair avec les inégalités d'Heisenberg que le vecteur est associé à une distribution de probabilité en phase et amplitude qui transforme la tête du vecteur en une patatoïde.

1. Le raisonnement ne tient pas si l'on suppose une force de frottement liée à la viscosité de l'air. Dans ce cas, en utilisant la formule de Stokes et le modèle de la viscosité des gaz dilués basé sur la diffusion de quantité de mouvement [?] p95 ou [?] p424, on trouve que la viscosité dynamique η et donc la force de frottement est indépendante de la pression. Les approximations du modèle ne sont pas valables à faible et à basse pression [?] p49. En comparant les ordres de grandeurs, on trouve que l'amortissement acoustique est 500 fois plus important que l'amortissement visqueux à pression ambiante.

Squeezing, portrait de phase et bandes latérales

Voir la [thèse de Sheon](#) p26-27 pour le phasor diagram et voir le notebook `MEPD_simulations`. On s'intéresse aux bruits quantiques à une fréquence donnée ω_n :

- le laser est d'abord décrit comme un champ oscillant à la pulsation ω_p ;
- le bruit d'amplitude est une modulation d'amplitude à la pulsation ω_n ;
- le bruit de phase est une modulation de phase à la pulsation ω_n .

On se place dans le référentiel tournant à ω_p : au premier ordre, les modulations créent des bandes latérales de part et d'autre de la porteuse. Ces bandes latérales tournent dans des sens opposés par rapport à la porteuse fixe (ie. dans le référentiel tournant). Pour la modulation d'amplitude, les deux bandes latérales sont alignées ou anti alignées dans la même direction que la porteuse tous les demi-tours. Pour la modulation de phase, les deux bandes latérales sont alignées ou anti alignées dans la direction orthogonale à la porteuse tous les demi-tours. En sommant vectoriellement la porteuse et les bandes latérales dans le portrait de phase représentant les deux quadratures du champ (partie réelle et imaginaire, diagramme de Fresnel), on retrouve bien l'effet de chaque modulation.

Frequency dependant squeezing

Voir la figure 5 du [rapport](#) p4 pour la représentation graphique du rôle de la cavité de filtrage. Cette rotating cavity permet de déphaser les bandes latérales supérieure et inférieure et de faire tourner l'ellipse de squeezing. Voir aussi cet [article](#) p2.

3 Enseignement, diffusion et vulgarisation

3.1 Valorisation des travaux de recherche

Transferts thermiques

3.1.1 Filtrage, micro-contrôleurs et asservissements

Super-atténuateurs de Virgo

Il s'agit d'un système complexe composé de sept oscillateurs couplés. Il faut relire l'article *The seismic Superattenuators of the Virgo gravitational waves interferometer*, section 3. La cascade de pendules permet d'avoir une dépendance forte de la réponse en déplacement du miroir final avec la fréquence. Au delà de la plus haute des fréquences de résonance f_n associées aux modes propres du système, la réponse d'un pendule composé de N étages est donnée par

$$\frac{C}{f^{2N}}, \quad (13)$$

où $C = \prod_{n=1}^N f_n^2$. Le résultat est similaire dans le cas des lames utilisées pour l'isolation dans la direction verticale.

Dans le cas des pendules, le couplage est inertiel. Dans le cas des lames, le couplage est élastique.

3.1.2 Un interféromètre de Michelson imprimé en 3D

3.2 Enseignements

3.3 Vulgarisation : résonance et ondes gravitationnelles

Bibliographie

Articles cités dans le dossier

- Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger : [PhysRevLett](#) ou [arXiv](#) ;
- Sideband cooling of micromechanical motion to the quantum ground state : [Nature](#) ou [arXiv](#) ;
- Cavity optomechanics : [RevModPhys](#) ou [arXiv](#) ;
- The basic physics of the binary black hole merger GW150914 : [AnnPhys](#) ou [arXiv](#) ;

Autres articles

- An analysis of the LIGO discovery based on Introductory Physics : [arXiv](#) ;
- Gravitational waves from orbiting binaries without general relativity : [AmJourPhys](#) ou [arXiv](#) ;
- LIGO analogy lab—A set of undergraduate lab experiments to demonstrate some principles of gravitational wave detection : [AmJourPhys](#)
- Gravitational waves, diffusion and decoherence : [arXiv](#) ;
- If light waves are stretched by gravitational waves, how can we use light as a ruler to detect gravitational waves ? : [AmJourPhys](#). Voir aussi la [FAQ de LIGO](#) ;
- The Seismic Superattenuators of the Virgo Gravitational Waves Interferometer : [article](#) ;

Ressources

- [Feynman's lectures on physics](#) notamment sur le mouvement brownien ;
- [Thèse de Sheon Chua](#) ;
- [25e olympiades de physique](#) ;
- [Ressources de Montrouge](#), notamment pour les programmes ;
- [Gitlab de Jérémy Neveu](#) ;
- [Virgo website](#), [LIGO website](#) et particulièrement la [galerie LIGO](#) ;
- [Mon drive](#)

Vulgarisation

- [Refroidir un miroir avec la lumière](#) ;
- [Lumineuses pousées](#), Pour la science, 1999.
- [La frontière classique-quantique](#), Pour la science, 1999.