

Prospectives DPhP 16 octobre 2017

thématique: tout ce qui n'est pas traité dans les autres thématiques

Marc Besançon, Sotiris Loucatos

Dans cette thématique la réflexion a porté sur de possibles sujets de physique qui entrent dans le cadre de la physique des particules et de l'exploration des lois fondamentales de l'univers et qui ne relèvent pas des autres thématiques déjà couvertes par ailleurs.

Outre les quelques propositions faites lors de discussions préliminaires un appel à idées a été effectué au sein du DPhP.

Le retour de cet appel a permis d'établir une liste de sujets supplémentaires: mesure des oscillations de neutron, mesure du moment dipolaire électrique du neutron, recherche de la désintégration du muon en électron gamma (expérience du type MEG), expérience Ptolemy de détection de neutrino relique, expérience de recherche de matière noire avec des techniques de détection directionnelle (expérience MIMAC), étude de l'interaction faible à courant neutre cohérente, recherche d'ondes gravitationnelles stochastiques avec LISA et recherche de transition de phase du premier ordre, tests observationnels de l'inflation (à l'aide de la recherche des modes B, polarimétrie des rayons X et gamma avec techniques TPC, test de la relativité générale par effets gravitomagnétique.

Ces propositions nous ont semblé plutôt relever des thématiques traitées par ailleurs à savoir la physique de la saveur, les neutrinos, la recherche directe matière noire, la cosmologie, les approches multi-messagers, ou bien de développements plus purement instrumentaux qui mériteraient une réflexion spécifique.

Nous avons par conséquent choisi de nous concentrer sur les deux sujets de physique très fondamentale issus de nos réflexions préliminaires à savoir une proposition d'expérience pour explorer le paradoxe de perte d'information dans les trous noirs faite par P. Chen et G. Mourou [1] et une proposition d'expérience de recherche de signaux à l'échelle de Planck faite par J.D. Bekenstein [20,21].

Après un résumé des deux propositions, davantage de détails sont donnés dans les sections 1 et 2.

a. Proposition d'expérience pour explorer le paradoxe de perte d'information dans les trous noirs [1]

Cette proposition est motivée par une des questions parmi les plus fondamentales de la physique actuelle qui est de savoir si l'évaporation des trous noirs telle que prédit par S.Hawking viole l'unitarité et par conséquent se traduit par la perte d'information autrement dit si un état quantique pure peut évoluer en un état quantique mélangé [2,3]. Une autre manière d'aborder ce problème consiste à se demander comment cette information peut être récupérée lorsqu'un trou noir s'est complètement évaporé. Plusieurs approches théoriques ont été proposées pour aborder cette question donnant lieu à des prédictions très différentes. Une bibliographie est donnée dans [1] et dans la discussion deux possibilités sont considérées. La notion de la perte d'information dans le cas d'un trou noir est actuellement connue pour être étroitement liée à la notion d'intrication quantique (entanglement). Afin de préserver l'unitarité du trou noir Wilczek suggère [4] que les

modes partenaires des particules de la radiation de Hawking sont piégés au-delà de l'horizon jusqu'à la fin de l'évaporation où ils sont relâchés et où le trou noir revient vers un son état quantique pur initial avec un coût en énergie essentiellement nul. Plus récemment, dans [5], l'idée que les modes partenaires relâchés ne se distinguent pas des fluctuations du vide (zéro point fluctuations) a aussi été défendue. L'autre possibilité discutée envisage la disparition 'explosive' du trou noir par un burst de particules (la température du trou noir augmente lorsque sa masse diminue par évaporation ce qui conduirait à une disparition explosive lorsque la masse diminue jusqu'à des valeurs de l'ordre de la masse de Planck).

Quarante ans après la découverte du rayonnement de Hawking, sa nature exacte reste insaisissable. Si le rayonnement de Hawking ne transmet pas d'information sur le trou noir en rétrécissement perpétuel (ever shrinking), il semble que l'unitarité soit violée une fois que le trou noir s'évapore complètement. D'autre part, les tentatives pour récupérer l'information via l'intrication quantique conduisent à la controverse du firewall. Au milieu de ce débat, la possibilité que l'évaporation du trou noir s'arrête avec un reste (remnant) est restée impopulaire et a été peu souvent considérée à cause de certaines propriétés indésirables d'un tel objet [6].

La proposition d'expérience pour explorer ces questions repose sur l'utilisation d'un système analogue à l'évaporation des trous noirs, à savoir l'utilisation de miroirs accélérés qui sont des systèmes analogues connus depuis plusieurs décennies [7,8,9]. Un observateur lointain d'un miroir qui s'éloigne en accélérant voit un flux de particules émis par le miroir. Si l'accélération du miroir est constante, l'observateur voit un flux thermal de particules exactement analogue au flux thermal de la radiation de Hawking (ce phénomène n'est pas sans rappeler l'effet Unruh également connu depuis longtemps où un observateur uniformément accéléré dans un espace temps plat voit un flux thermal de particules complètement analogue à la radiation de Hawking [10,11]). L'arrêt brutal du miroir est, lui, analogue à l'évolution tardive du trou noir i.e. la fin de l'évaporation par radiation de Hawking.

L'autre aspect de la proposition de l'expérience repose sur l'utilisation de miroirs plasmas relativistes induits par un faisceau intense de rayons X qui peuvent être accélérés lors du passage dans une cible solide et être brutalement arrêtés, voir section 1.

b. Proposition d'expérience de recherche de signaux à l'échelle de Planck [20,21]

Cette proposition est motivée par une autre question fondamentale de physique concernant la structure de l'espace-temps à des échelles de longueur de l'ordre de la longueur de Planck en particulier par la spéculation dite de mousse quantique (quantum foam) introduite par Wheeler [22].

La faisabilité d'une expérience de type table top pour explorer cette question est discutée. Elle repose sur l'effet du moment d'un photon optique célibataire sur le mouvement du centre de masse d'un bloc macroscopique transparent avec des paramètres tels que le bloc se déplace dans l'espace d'une distance de l'ordre de la longueur de Planck. Ce déplacement devrait être sensible à la structure de l'espace à ces échelles et devrait réagir en retour (back react) sur la probabilité du photon de traverser le bloc compte tenu de la conservation du moment du photon. En répétant l'expérience avec des runs successifs de photon optique célibataire, il devrait être possible de déterminer le taux de transmission des photons et de comparer ce taux avec les prédictions provenant des coefficients de transmission classique, des réflexions multiples et des absorptions.

Une mesure donnant un taux de transmission plus petit que les prédictions pourrait être interprétée comme le signal d'une rugosité (roughness) de l'espace à ces échelles, voir section 2.

1. Proposition d'expérience pour explorer le paradoxe de perte d'information dans les trous noirs : détails.

Les miroirs plasma accélérés sont couramment créés par les Laser de puissance de quelques petawatt avec des impulsions ultras courtes i.e. de l'ordre de la femtoseconde (Au Lidil de l'Iramis du CEA Saclay les propriétés optiques des miroirs plasmas relativistes induits par ces lasers de puissance femtoseconde sont explorées, voir par exemple [12,13,14]).

Dans la proposition d'expérience de P. Chen et G. Mourou, une impulsion ultra-brève d'un laser optique pilote traverse une première cible (gazeuse et uniforme) et crée ainsi un miroir plasma relativiste avec une distribution de densité transverse concave. Une impulsion source préparée par le même laser optique est réfléchi sur ce miroir plasma avec une fréquence augmentée par un facteur égal à 4 fois le facteur de Lorentz au carré du premier miroir créant ainsi une impulsion de rayon X. Cette impulsion X passe à travers un cristal de diffraction de Bragg et arrive sur la seconde cible qui est une cible solide avec un gradient de densité, fabriquée par des techniques de nanotechnologie, créant un second miroir plasma. Sous l'effet du gradient de densité, ce second miroir plasma accélère (principe du wakefield) et joue ainsi le rôle du système analogue d'un trou noir en évaporation. Ici le miroir plasma accéléré émet la partie haute fréquence de l'analogie de la radiation de Hawking dans la direction opposée à l'impulsion X initiale. Lorsque ce second miroir plasma arrive à l'extrémité arrière de la cible solide, il s'arrête brutalement jouant ainsi le rôle de l'évolution tardive du trou noir c'est à dire la disparition du trou noir après évaporation complète (figure 1).

Le burst en énergie ou bien les fluctuations quantiques, selon les spéculations théoriques, l'un ou l'autre associé à la fin de vie du trou noir, seront mesurés en amont de cette seconde cible par un système de condenseurs, amplificateurs et photo-senseur tandis que les particules de Hawking et les particules partenaires (si ces dernières sont réelles), suffisamment basse en fréquence par rapport à l'impulsion X, seront diffractées par le cristal de Bragg vers un photo-senseur permettant des mesures en temps avec des résolutions de l'ordre de la femtoseconde de manière à pouvoir distinguer la radiation d'Hawking du burst final de rayonnement.

Deux physiciens du DPhP (JFG et MB) ont rencontré et 'Skypé' avec P. Chen (directeur du Leung Center for Cosmology and Particle Astrophysics à l'université National de Taïwan et membre du Kavli Institute for Particle Astrophysics and Cosmology à SLAC) et G. Mourou (Izest École Polytechnique) à l'École Polytechnique le 15/9/2017 pour discuter de plusieurs aspects du montage expérimental.

P. Chen et G. Mourou proposent d'utiliser comme point de départ le laser vert de 10 petawatt de l'installation Appolon-Cilex [15] (Appolon est implanté dans l'ancien bâtiment de l'accélérateur linéaire de Saclay. Il est porté par le CNRS, l'École polytechnique et le CEA, avec la participation de l'Institut d'Optique Graduate School, l'ENSTA ParisTech, l'Université Paris-Sud, et l'UPMC) située au CEA-Saclay à l'Orme des Merisiers qui devrait entrer en service en 2018-2019 (dans un futur plus lointain ils envisagent d'utiliser un laser 100 petawatt à l'étude à l'université de Shanghai Jiao Tong dont la conception est actuellement passée en revue avec G. Mourou et P. Chen parmi les reviewers). Le laser Appolon-Cilex devrait permettre de fournir une impulsion

laser par minute environ. Des simulations préliminaires effectuées par deux étudiants de P. Chen (publication en cours) ont permis de montrer que de l'ordre de 1000 impulsions seront nécessaires pour obtenir un photon (un nouveau développement pourrait provenir de ce que P. Chen appelle un Coherent Amplifier Network dans plusieurs années).

Les photo-senseurs devraient être capables de détecter des photons dans la gamme 0.1-1.6 eV (IR proche, visible), faire des mesures en énergie et en polarisation et devraient être constitués de détecteurs solides cryogéniques (pour minimiser le bruit thermique). Les résolutions en temps de l'ordre de la femtoseconde pour les mesures en temps ne semblent pas poser de problèmes pour les experts des lasers de puissance ultra-bref selon G. Mourou grâce à l'utilisation de techniques d'auto-corrélation. Comme mentionné plus haut, cet ordre de grandeur pour les résolutions en temps doit permettre de distinguer la radiation d'Hawking du burst final de rayonnement. Elle doit aussi permettre de synchroniser les différents pulses laser (pulses pilote et pulse signal) et les signaux mesurés dans les photo-senseurs.

P. Chen souhaite procéder par étape pour la mise en œuvre de cette expérience. Quelques grandes étapes ont déjà été identifiées. Une étape consiste en une R&D pour la fabrication de la seconde cible solide à gradient de densité par des techniques de nanotechnologie. Le département de physique de matière condensée de l'université de Taïwan mène actuellement cette R&D. En parallèle un démonstrateur devrait être mis en place à l'Advanced Laser group du Kansai Photon Science Institute (Kyoto) auprès d'un laser de 1 à 3 petawatt avec des cibles gazeuses dans des capillaires pour jouer le rôle de la seconde cible. L'étape suivante consiste à valider l'accélération d'un miroir plasma avec la cible à gradient de densité et, en parallèle, effectuer les calculs théoriques et simulations spécifiques à l'expérience pour le signal de la radiation de Hawking ainsi que le signal de disparition du trou noir (burst d'énergie ou zero-point fluctuation) incluant les signaux de corrélation (énergie et polarisation) et intrication. Enfin les deux dernières étapes incluent d'abord une détection de la radiation de Hawking en provenance du miroir accéléré puis finalement une détection des signaux de corrélation/intrication en énergie et en polarisation de la radiation de Hawking et des particules partenaires.

Une collaboration internationale est en cours de construction avec le Leung Center for Cosmology and Particle Astrophysics à l'université National de Taïwan, le laboratoire Izest de l'École Polytechnique, l'Advanced Laser Group du Kansai Photon Science Institute, l'université Jiao Tong de Shanghai. Le sujet a été discuté avec le LLR qui a de l'expertise en accélération plasma (A. Specka). P. Chen et G. Mourou sont ouverts à de nouveaux collaborateurs et ouverts à de nouvelles idées pour cette expérience. Une possibilité pour l'Irfu serait de contribuer aux photo-senseurs cryogéniques.

G. Mourou (un des pères fondateurs de l'installation Appolon et expert mondial du domaine avec T. Tajima et S.V. Bulanov) souhaiterait faire de cette proposition d'expérience une expérience phare pour l'installation Appolon-Cilex. P. Chen propose également de venir faire un séminaire au DPhP au début de 2018.

Pour conclure, cette expérience représente une opportunité unique. Elle propose d'explorer des questions de physique très fondamentales. C'est une expérience dite table-top qui aura lieu sur le site de l'Orme des Merisiers du CEA-Saclay auprès de l'installation Appolon-Cilex qui devrait entrer en service en 2018-2019. Une collaboration internationale de taille modeste comparée à la taille des expériences de physique des particules plus traditionnelles est en cours de construction.

Cette expérience se trouve à l'interface de plusieurs domaines de physique qui intéressent la DRF du CEA (Irfu, Iramis) et regroupe des compétences très diverses.

Il faut aussi mentionner qu'un rayonnement Hawking spontané, stimulé par les fluctuations quantiques du vide aurait été observé [16] dans un autre type de système analogue à savoir dans les condensats de Bose-Einstein [17,18,19]. Des corrélations auraient été observées entre les particules Hawking à l'extérieur du trou noir et des particules partenaires à l'intérieur.

2. Proposition d'expérience de recherche de signaux à l'échelle de Planck : détails.

Si l'on considère un photon de longueur d'onde 445 nm (2.78 eV) et un bloc diélectrique (cristallin ou amorphe, suppose être optiquement isotrope) rectangulaire de 1mm x 5mm x 5mm et de masse 0.15 gramme, transparent aux ondes électromagnétiques optiques (indice $n=1.6$ comme c'est le cas pour le verre au plomb) le déplacement du centre de masse du bloc est de l'ordre de $1.98 \cdot 10^{-35}$ m soit de l'ordre de grandeur de la longueur de Planck.

On s'attend qu'à ces échelles les fluctuations quantiques de la métrique soient grandes et qu'elles entravent la translation du centre de masse du bloc associée au transit du photon avec une certaine probabilité. En raison de la conservation du moment lors du transfert de moment du photon au bloc puis en retour du bloc vers le photon, le photon peut être empêché de traverser le bloc. Le photon peut être réfléchi ou absorbé par le bloc et cette contribution s'ajoute aux contributions requises par les formules de Fresnel (ou de leur extension compte tenu de possibles imperfections dans la transparence du bloc). Des runs multiples sont ainsi nécessaires pour déterminer si le photon est détecté moins fréquemment que les prédictions de Fresnel (en tenant compte de l'efficacité quantique des détecteurs de photon). Une détection moins fréquente pourrait être interprétée comme une rugosité de l'espace-temps. La probabilité mentionnée plus haut ne peut pas être calculée sans hypothèses spécifiques sur l'espace-temps quantique mais il serait possible de déterminer l'échelle critique au-delà de laquelle le bloc 'perçoit' un espace-temps lisse en jouant sur l'indice, les dimensions et la masse du diélectrique.

Ainsi un bloc cubique de dimension 1mm x 1mm x 1mm, de masse 6 microgrammes subira une translation de l'ordre de $4.96 \cdot 10^{-34}$ m soit environ 30 fois la longueur de Planck lorsqu'un photon optique de la longueur d'onde mentionnée plus haut le traverse. Aucune entrave à la translation de ce bloc n'est alors anticipée (espace-temps lisse avec les symétries habituelles par translation et boost de Lorentz). Ce bloc devrait être donc insensible à la supposée rugosité de l'espace-temps à la longueur de Planck et les taux de transmission des photons devraient correspondre aux prédictions de Fresnel.

Cette observation amène à proposer un montage avec deux blocs suspendus par une fibre mince à savoir un premier bloc rectangulaire dit bloc de test constitué de verre au plomb de dimension 1mm x 5mm x 5mm et de masse 0.15 gramme et un deuxième bloc dit bloc de calibration de 1mm x 1mm x 1mm et de masse 6 microgrammes.

Les deux blocs suspendus sont éloignés l'un de l'autre d'une distance de l'ordre d'une vingtaine de centimètres pour minimiser les effets gravitationnels entre les deux blocs.

Une source de photon optique émet des photons dirigés sur un séparateur permettant d'envoyer les photons sur le bloc test ou sur le bloc de calibration. A chaque bloc est associé un détecteur de

photon célibataire. Une fibre optique, permettant de retarder les photons, placée en amont du séparateur ainsi qu'une électronique associée à la source de photon et aux détecteurs de photons doivent permettre d'assurer le déclenchement de ces détecteurs dans les bonnes fenêtres en temps (voir figure 2).

Les blocs pourraient a priori être constituées de verre au plomb de haute qualité (par exemple l'auteur propose des cristaux au plomb dit de Schott N-SF2). Plusieurs sources de bruits de fond ont par ailleurs déjà été identifiées qui ont un impact important sur le montage expérimental. Une des sources de bruit de fond les plus dangereuses provient de la gigue thermique (thermal jitter) du bloc test (provenant de la collision avec les atomes de l'atmosphère environnant). En conséquence les deux blocs devraient être placés dans une enceinte où un vide de haute qualité est fait. La probabilité d'un choc avec un atome de gaz résiduel serait réduite à 1% pour un vide de 10^{-11} Pa (un vide de 10^{-15} Pa serait souhaité). Compte tenu de la distance nécessaire entre les deux blocs, l'enceinte à vide devrait avoir un volume de l'ordre de 1 m^3 (les blocs devraient également être distants des parois de l'enceinte). Une autre source de bruit de fond provient de la lumière parasite et pour y faire face du blindage ainsi que des filtres à bandes étroites pour les détecteurs de photons doivent être prévus. Pour réduire le bruit de fond optique thermique, le volume de l'enceinte doit également être refroidi. Le bruit de fond des photons thermiques peut être réduit à 1% du signal si le volume est refroidi à 4 K. Les bruits de fond dus aux chocs des rayons cosmiques, des neutrinos solaires et même des particules de matière noire ont été évaluées comme n'étant pas un problème. Un éventuel bruit de fond de nature sismique n'a pas été discuté par l'auteur.

Pour conclure, cette expérience explore une question très fondamentale de physique à des échelles que les expériences de physique des particules plus traditionnelles ne parviennent pas à explorer. Cette expérience représente aussi une opportunité pour aborder d'une manière relativement simple une question fondamentale de physique. Cette expérience 'table top' devrait pouvoir être effectuée avec les technologies actuelles de vide, de basse température et de cryogénie qui sont des compétences fortes qu'on trouve à l'Irfu. Elle pourrait être une réalisation unique et originale de l'Irfu (DACM-DPhP) et pourrait se dérouler dans ses locaux (dans une échelle de temps relativement courte par rapport aux expériences auprès du LHC et à des coûts plus modestes).

Sa faisabilité reste toutefois encore à affermir et les différents effets systématiques pouvant obscurcir l'interprétation des résultats doivent encore être soigneusement évalués. Un travail exploratoire dans ces directions devrait pouvoir être entrepris.

Il est rappelé que la rugosité de l'espace-temps a été également explorée dans d'autres contextes [23-26], notamment par HESS, avec participation de l'Irfu. Les hypothèses théoriques utilisées sont parfois optimistes pour favoriser des signatures détectables.

On peut noter aussi qu'il existe d'autres suggestions d'expériences dite 'table top' se proposant d'explorer la physique à l'échelle de Planck ou bien des notions fondamentales de physique quantique. Par exemple il existe des propositions d'expérience à base d'optique quantique (plus particulièrement à l'aide d'oscillateur optomécanique [27]). Celles ci semblent toutefois être plus dans le domaine de compétences, par exemple, du Laboratoire Kastler Brossel qui dispose d'un 'groupe optomécanique et mesures quantiques' [28].

Références

- [1] P. Chen, G. Mourou, Accelerating Plasma Mirrors to Investigate the Black Hole Information Loss Paradox, PRL 118 (2017) 045001.
- [2] S.W. Hawking, Particle Creation by Black Holes, Commun. Math. Phys. 43, 199 (1975).
- [3] S.W. Hawking, Breakdown of predictability in gravitational collapse, PRD 14 (1975) 2460.
- [4] F. Wilczek, Quantum Purity at a Small Price : Easing a Black Hole Paradox, hep-th/9302096.
- [5] M. Hotta, R. Schutzhold, W.G. Unruh, Partner Particles for moving mirrors radiation and black hole evaporation, PRD 91 (2015) 124060.
- [6] P. Chen, Y.C. Ong, D-H. Yeom, Black Hole Remnants and the Information Loss Paradox, Phys. Rep. 603, 1 (2015).
- [7] W.G. Unruh, R.M. Wald, Information Loss, Rept. Prog. Phys. 80 (2017) 092002.
- [7] N.D. Birrell, P.C.W. Davies, Quantum Fields in Curved Space, Cambridge University Press, Cambridge 1984.
- [8] R.D. Carlitz, R.S. Willey, Reflections on moving mirrors, PRD 36 (1987) 2327.
- [9] R.D. Carlitz, R.S. Willey, Lifetime of a black hole, PRD 36 (1987) 2336.
- [10] W.G. Unruh, Notes on black hole evaporation, PRD 14 (1976) 870.
- [11] R.M. Wald, Quantum Field theory in Curved Spacetime and Black Hole Thermodynamics, The University of Chicago Press 1994.
- [12] G. Doumy, F. Quéré, O. Gobert, M. Perdrix, P. Martin (IRAMIS CEA-Saclay) and P. Audebert, J. C. Gauthier, J.-P. Geindre, T. Wittmann (École Polytechnique), Complete characterization of a plasma mirror for the production of high-contrast ultraintense laser pulses, Phys. Rev. E 69 (2004) 026402.
- [13] F. Quéré, C. Thauray, J-P. Geindre, G. Bonnaud, P. Monot, P. Martin, Phase Properties of Laser High-Order Harmonics Generated on Plasma Mirrors, Phys. Rev. Lett. 100 (2008) 095004.
- [14] H. Vincenti, S. Monchocé, S. Kahaly, G. Bonnaud, P. Martin, F. Quéré (IRAMIS CEA-Saclay), Optical properties of relativistic plasma mirrors, nature communications 5 (2014) 3403.
- [15] <https://portail.polytechnique.edu/luli/fr/cilex-apollo/cilex>
<http://cilexsaclay.fr/index.php>
- [16] J. Steinhauer, Nat. Phys. 10, 864 (2014).
- [17] R. Parentani, From vacuum fluctuations across an event horizon to long distance correlations, Phys. Rev. D82 (2010) 025008.
- [18] I. Zapata, M. Albert, R. Parentani, F. Sols, Resonant Hawking radiation in Bose-Einstein condensates, New J.Phys. 13 (2011) 063048.

- [19] P.R. Anderson, R. Balbinot, A. Fabbri, R. Parentani, Hawking radiation correlations in Bose Einstein condensates using quantum field theory in curved space, Phys.Rev. D87 (2013) 124018.
- [20] J.D. Bekenstein (1947-2015), Is a tabletop search for Planck scale signals feasible? Phys. Rev. D86 (2012) 124040.
- [21] J.D. Bekenstein, Can Quantum Gravity be Exposed in the Laboratory ? Found. Phys. 44 (2014) 452.
- [22] J.A. Wheeler, Geons, Phys.Rev. 97 (1955) 511
- [23] Y. J. Ng arXiv:1701.00017 (et références à l'intérieur)
- [24] N. Mavromatos arXiv:0909.2319 (et références à l'intérieur)
- [25] [Tests of quantum gravity from observations of gamma-ray bursts](#)
[G. Amelino-Camelia](#), [John R. Ellis](#), [N.E. Mavromatos](#), [Dimitri V. Nanopoulos](#), [Subir Sarkar](#)
Published in Nature 393 (1998) 763-765, e-Print: [astro-ph/9712103](#)
- [26] F. Aharonian, et al. [HESS Collaboration], Astrophys. J. 664 (2007) L71.
- [27] I. Pikovski, M.R. Vanner, M. Aspelmeyer, M.S. Kim, C. Brukner, Probing Planck-scale physics with quantum optics, Nature Phys. 8 (2012) 393 (et références à l'intérieur).
- [28] <http://www.lkb.upmc.fr/optomechanics/quantumlimits/>
<http://www.lkb.upmc.fr/optomechanics/optotransducers/>

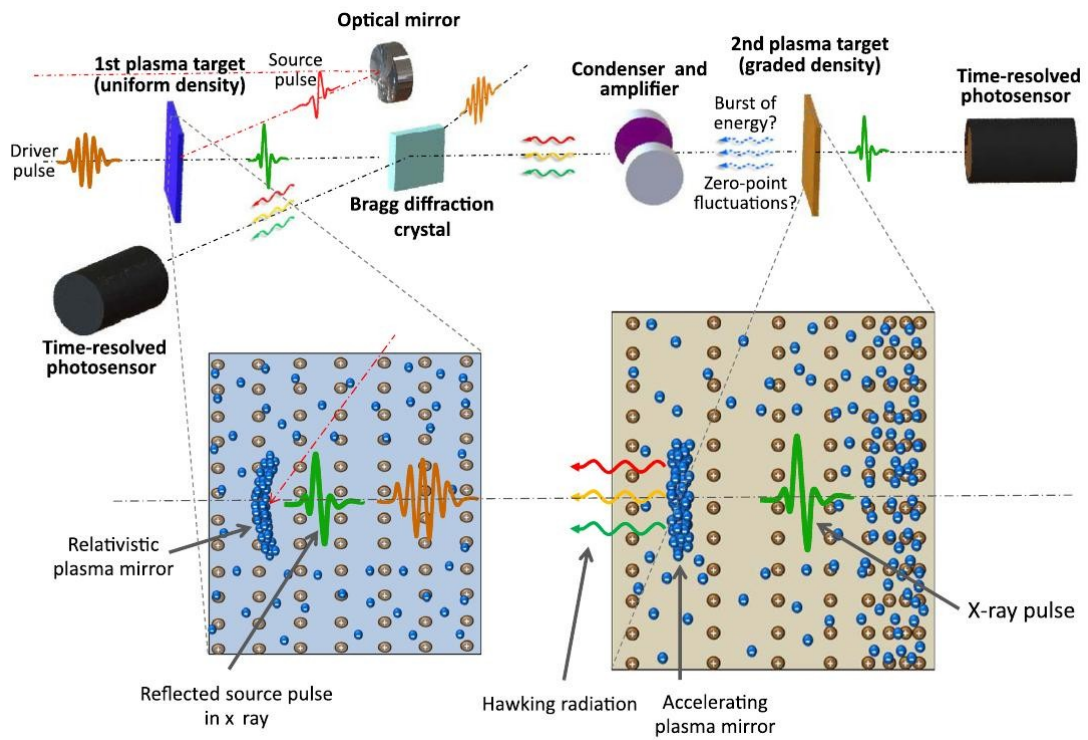


Figure 1. Schéma de la proposition d'expérience pour explorer la paradoxe de la perte d'information dans les trous noirs d'après [1].

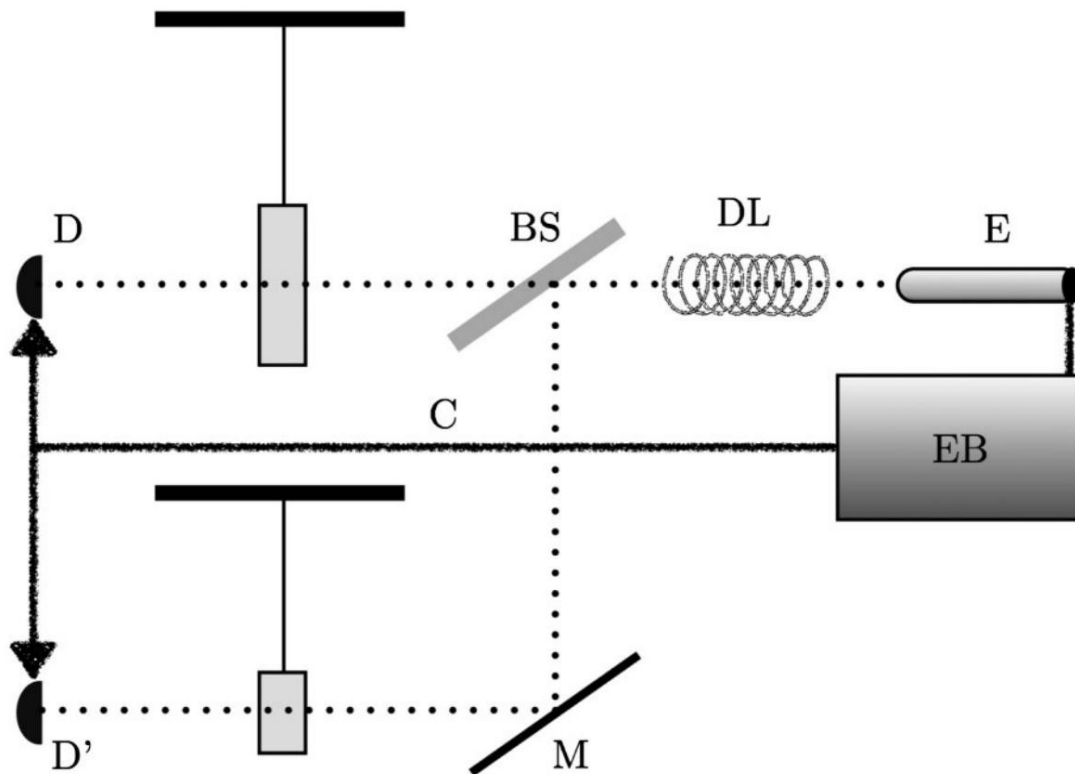


Figure 2. Schéma de la proposition d'expérience de recherche de signaux à l'échelle de Planck d'après [20,21]. E représente la source de photon et DL la fibre optique pour retarder les photons. EB représente l'électronique pour le déclenchement de la source et des détecteurs de photons D et D' situés derrière les blocs de cristaux (représentés l'un au dessus de l'autre sur la figure mais placés en réalité l'un à coté de l'autre dans l'expérience). Le signal de déclenchement est transmis par le câble C aux détecteurs de photons D et D'.