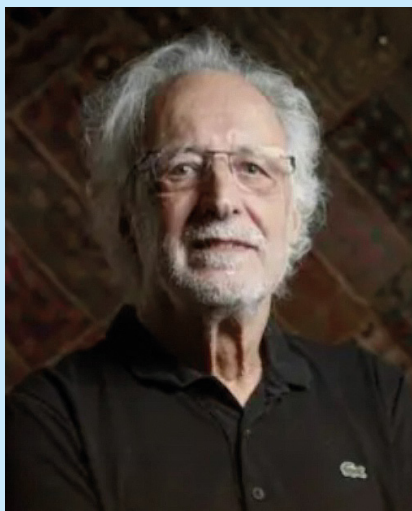




Entretien avec Pierre Agostini

Physicien spécialiste des interactions ultracourtes laser-matière, lauréat du Prix Nobel de Physique 2023 pour ses travaux sur la détection des impulsions attosecondes.

<https://doi.org/10.1051/photon/202513315>

COMMENT AVEZ-VOUS DÉCOUVERT LES SCIENCES ?

J'ai vécu à Tunis jusqu'à la fin de mon année de seconde, au lycée Carnot. Lorsque mes parents se sont installés à Marseille, ils m'ont envoyé au Prytanée militaire de la Flèche dans la Sarthe pour suivre des études en mathématiques, puis en classes préparatoires. C'est là que j'ai découvert les mathématiques et les sciences en général. À la fin de ma première année en mathématiques supérieures, j'ai décidé de revenir à Marseille en 1960 pour suivre un cycle universitaire en sciences, de la licence au DEA, puis la thèse.

QUEL ÉTAIT LE SUJET DE VOTRE THÈSE ?

Ma thèse portait sur l'optique, un domaine très présent à Marseille à cette époque. Il s'agissait d'une thèse expérimentale. J'ai fabriqué un instrument pour mesurer l'épaisseur d'une couche optique durant l'évaporation. L'innovation résidait dans la mesure de la dérivée de la transmission en fonction de l'épaisseur. La transmission passe par des maxima et des minima, et nous cherchions des zéros de transmission plutôt que de mesurer la transmission elle-même. Mon directeur de thèse était Henri Chantrel.

COMMENT AVEZ-VOUS DÉCOUVERT LE SUJET DE L'INTERACTION LASER-MATIÈRE ?

J'ai été recruté au CEA tout de suite, peut-être même avant d'avoir fini ma thèse. Yves Gontier, qui travaillait au CEA et avait fait de la physique théorique à Marseille, était revenu chercher des candidats pour travailler sur l'ionisation multiphotonique. C'était la première équipe à travailler sur ce sujet en France. Il n'y avait qu'un seul groupe à Moscou qui travaillait sur ces sujets. J'ai

accepté immédiatement. Je suis allé voir mon directeur de thèse, Henri Chantrel, pour lui parler de cette opportunité. Il m'avait conseillé de ne pas m'engager dans cette voie, mais j'ai tout de même rejoint le CEA en 1967, l'année de ma soutenance de thèse.

QUELLES ÉTAIENT VOS CONDITIONS DE TRAVAIL LORSQUE VOUS ÊTES ARRIVÉ AU CEA ? AVIEZ-VOUS DES LASERS À DISPOSITION ?

Mon collègue Gérard Mainfray avait un laser à rubis et travaillait sur l'ionisation multiphotonique des gaz rares. Lorsque je suis arrivé, après avoir fait une thèse en optique, on m'a demandé de travailler sur l'instrumentation optique. Il y avait toute une série de problèmes d'optique avec le laser, notamment la focalisation et la détermination du profil d'intensité le long de l'axe. J'ai donc été responsable de ces aspects dès le début. La première chose que j'ai faite a été de déterminer la meilleure méthode pour focaliser le laser. Avec les intensités de ce laser, les lentilles ne tenaient pas longtemps et étaient rapidement détruites. Il fallait surveiller cela, ainsi que la focalisation et mesurer les dimensions du faisceau le long de l'axe.

EN QUELLE ANNÉE AVEZ-VOUS OBTENU VOS PREMIERS RÉSULTATS ?

Je crois que la première publication date de la fin de 1968. Très rapidement, ces lasers étaient vendus ou devaient être fabriqués à partir d'une publication. Nous avons acheté un laser, et il y avait un soutien important du CEA pour développer ces recherches.

VOTRE GROUPE AU CEA ÉTAIT PRÉCURSEUR DANS CE DOMAINE.

À part les Russes à Moscou, qui étaient en avance sur nous, je crois que nous étions les

premiers en France à travailler sur ce sujet. Longtemps après, j'ai découvert, cité dans le fameux article de Keldysh, qu'un autre groupe avait aussi commencé à s'intéresser au problème à Ohio State (!) dès 1962.

SUR QUELS ATOMES TRAVAILLIEZ-VOUS ?

Nous travaillions sur les gaz rares. Ensuite, nous sommes passés aux alcalins.

QUELLES ONT ÉTÉ LES GRANDES ÉTAPES DE DÉVELOPPEMENT AU COURS DE VOS RECHERCHES ?

Au début, il y avait d'un côté le papier de Keldysh qui parlait de l'effet tunnel. De l'autre côté, il y avait la théorie des perturbations, qui était plus soutenue que l'effet tunnel. La théorie des perturbations ne permettait pas de mesurer grand-chose en valeur absolue, mais nous pouvions mesurer la dépendance avec l'intensité. Cette dépendance, en théorie des perturbations, est très simple : c'est l'intensité à la puissance du nombre de photons absorbés. Malheureusement, l'expérience ne donnait jamais ça, alors nous étions très inquiets. Mais nous trouvions toujours quelques bonnes raisons. L'effet Tunnel n'a été démontré qu'en 1985 par mon collègue québécois See Leang Chin et la théorie non-perturbative de l'ionisation à haute intensité a dû attendre 1993 et les travaux de Ken Kulander et Paul Corkum.

EN QUELLE ANNÉE AVEZ-VOUS PUBLIÉ VOS PREMIERS RÉSULTATS SUR LE SUJET ?

En 1968. Il a fallu un an et demi. Même si nous n'étions pas très sûrs de l'interprétation. Nous partions de la théorie des perturbations qui était au début la base de notre interprétation.



QUELLES ONT ÉTÉ LES GRANDES ÉTAPES DANS VOS RECHERCHES À PARTIR DES ANNÉES 70 ?

À la fin des années 70, nous avons découvert à Saclay ce qui s'appelle la théorie ATI (Above Threshold Ionization). Cette théorie décrit le fait que si les atomes absorbent des photons pour être ionisés, l'absorption ne s'arrête pas là, et les atomes peuvent absorber des photons supplémentaires. Si N photons sont nécessaires pour l'ionisation, l'atome peut absorber $N+S$ photons. C'est cela l'ATI. Nous avons découvert cela à Saclay. Gérard Mainfray a posé la question : « Qui veut regarder les électrons ? » J'ai dit, OK, je vais regarder les électrons. Nous avons fabriqué un petit analyseur d'énergie pour électrons et avons eu la chance de voir presque tout de suite deux pics dans le spectre des photoélectrons, séparés par l'énergie du photon. C'était l'objet de cette publication dans PRL en 1979. Une découverte majeure a été lorsque nous nous sommes aperçus que non seulement l'atome pouvait absorber un photon de plus, mais il pouvait absorber des dizaines de photons de plus. Cela devenait très difficile de traiter ce problème par la théorie des perturbations, c'était quasiment impossible. Il y a eu à ce moment-là plusieurs avancées par Paul Corkum et deux théoriciens. Ils ont commencé à résoudre l'équation de Schrödinger numériquement et Paul Corkum a eu l'idée de traiter la partie du spectre qui se passe dans le continuum classiquement. Grâce à cette astuce, il a trouvé très rapidement que l'énergie cinétique des photoélectrons pouvait être très grande et qu'elle dépendait en particulier de l'intensité du laser. Cette découverte a donné naissance à la physique des hautes intensités.

AVEZ-VOUS EU DES COLLABORATIONS DE LONG TERME ?

Des collaborateurs nouveaux sont arrivés. En général, c'étaient des thésards, mais quelquefois ils étaient tellement brillants qu'ils restaient au CEA. Avec Gérard Mainfray ainsi

qu'avec mon ami Guillaume Petite, la collaboration s'est poursuivie pendant des décades. L'équipe des théoriciens, Yves Gontier et Michel Trahin, a été là pratiquement tout le temps où je suis resté au CEA. À l'extérieur, j'ai eu une collaboration avec Harm Greet Muller (Amsterdam) pendant une quinzaine d'années, jusqu'à l'expérience sur les attosecondes de 2001 au LOA, et avec Louis DiMauro à Brookhaven et Ohio State qui dure encore ! L'expérience de 2001 a été réalisée au LOA, alors sous la direction d'Andre Antonetti avec qui nous avons déjà collaboré de nombreuses années.

QUELLE ÉTAIT L'ATMOSPHÈRE DE TRAVAIL ?

Il y avait beaucoup de séminaires. Nous avions des visiteurs qui venaient de l'École Normale et d'ailleurs pour apprendre un peu ce qu'était le multiphoton, car nous étions les précurseurs dans ce domaine. Un peu plus tard, il y a eu des gens à l'École Normale qui ont fait des thèses sur le multiphoton aussi, mais en général, ils se contentaient de processus à 2 ou 3 photons, tandis que nous, c'était beaucoup plus que ça. Je travaillais dans le groupe de Guillaume Petite et nous nous étions spécialisés dans la détection des photoélectrons. Anne L'Huillier s'est dirigée vers la détection des photons. Nous collaborions et échangeions continuellement. L'atmosphère du groupe favorisait les échanges, nous déjeunions ensemble.

ON A L'IMPRESSION D'UNE GRANDE LIBERTÉ DANS LES CHOIX SCIENTIFIQUES QUE VOUS FAISIEZ.

Oui, en fait le CEA nous donnait de l'argent pour travailler, mais il ne s'occupait pas vraiment de nous donner des directions de recherche. Les directions de recherche, c'était le groupe qui décidait de ce qu'il fallait faire ou de ce que nous pouvions faire, etc. Nous n'avions pas d'autres obligations que celles-là.

QUELLES ONT ÉTÉ LES GRANDES AVANCÉES DANS LES ANNÉES 1980 ET 90 ?

Les grandes étapes ont été, d'abord, l'invention de Gérard Mourou sur le CPA (Chirped Pulse Amplification), qui a été installé à Saclay pour la première fois par Louis-André Lompré et Anne L'Huillier. C'est à cette époque qu'Anne L'Huillier a commencé à faire ses études sur les harmoniques. Elle a passé sa thèse à Saclay, mais pas sur les harmoniques, sur l'ionisation multiphotonique. Son directeur de thèse était en Suède et elle avait déjà un pied en Suède. Ensuite, elle a commencé à faire ses études en 1985 ou 1986 sur les harmoniques. Elle était tout à fait étonnée de cette découverte. Elle était pratiquement la seule. Il y avait aussi quelqu'un à Chicago qui faisait quelque chose comme ça, mais il était parti avec des lasers UV alors qu'Anne L'Huillier est partie sur un CPA à 1 micron. Elle avait beaucoup plus de chances de trouver des harmoniques à ce moment-là que lui, et l'expérience a effectivement montré qu'elle pouvait voir des harmoniques jusqu'à des ordres très élevés. Donc, ça a été une des grandes avancées à ce moment-là. Si les impulsions attosecondes sont nées, c'est bien à ce moment-là, bien que personne ne le sache et ne se doute que c'était à cause de ça. Mais c'est maintenant clair que sans les harmoniques, nous n'aurions jamais fait d'attosecondes.

QUELS ONT ÉTÉ VOS PRINCIPAUX TRAVAUX DURANT CES ANNÉES LÀ ?

Nous avons fait plusieurs choses. C'est à ce moment-là qu'a commencé la collaboration avec le LOA (Laboratoire d'Optique Appliquée). Le LOA avait des lasers femtosecondes que nous n'avions pas encore à Saclay. Donc, je suis allé faire plusieurs fois des expériences au LOA pour ces lasers femtosecondes. Il y avait aussi la collaboration avec le FOM d'Amsterdam avec Harm Greet Muller. Nous avons fait plusieurs expériences, dont une assez spectaculaire peut-être en 1993 : nous avons fabriqué une source de rayons X avec un métal liquide dans lequel nous focalisons le laser. Cette approche entraînait plusieurs difficultés, comme par exemple le fait que le liquide était éjecté un peu partout et qu'il fallait nettoyer les optiques assez souvent. Nous avons publié un article dans PRL sur ce sujet en 1994 que

LASER & ÉLECTRONIQUES DE PUISSANCE

Lasers et électronique pour la génération/accélération de particules, pompage OPCPA et fusion par confinement inertiel



LASERS SÉRIE FLUX

- ▲ Pompage par lampe flash : énergie d'impulsion jusqu'à 10J
- ▲ Pompage par diode : puissance moyenne jusqu'à 500 W
- ▲ Solutions innovantes de mise en forme des impulsions
- ▲ Synchronisation précise entre différentes sources laser

CELLULES DE POCKELS ET DRIVER ASSOCIÉ



- ▲ Temps de montée ultra-rapide <10 ns
- ▲ Synchronisation parfaite pour les systèmes fs & CPA
- ▲ Compatibilité haute tension pour lignes laser à forte énergie
- ▲ Stabilité longue durée en environnement intensif



j'aime beaucoup. J'ai commencé à travailler avec Louis F. DiMauro qui était à Brookhaven à ce moment-là. Les expériences se sont un peu dirigées vers les femtosecondes et les XUV. Les deux sujets pouvaient laisser prévoir les attosecondes, mais personne ne pouvait à l'époque les prédire.

MAIS VOS TRAVAUX PUBLIÉS EN 2001 VONT ENFIN PERMETTRE DE DÉTECTER DES IMPULSIONS ATTOSECONDES

Oui, c'est l'expérience que nous avons faite au LOA, basée en partie sur la théorie développée par les trois théoriciens de Pierre et Marie Curie, Valérie Vénier, Richard Taïeb et Alfred Maquet. Ils avaient un papier datant de 1996 dans lequel ils avaient calculé ce qui se passe avec l'ionisation à trois couleurs : deux harmoniques consécutives et l'infrarouge. Ils avaient prédit l'apparition de side-bands et que la probabilité de ces side-bands allait dépendre des phases. C'est l'article qui nous a servi de base pour l'expérience de 2001 qui a été couronnée par le prix Nobel, peut-on dire.

POUVEZ-VOUS NOUS DÉCRIRE PLUS PRÉCISÉMENT LE CONTEXTE DE CETTE EXPÉRIENCE ET LES PRINCIPALES DIFFICULTÉS QU'IL A FALLU SURMONTER ?

Le problème était d'observer les photoélectrons, donc il fallait prendre un spectre avec un spectromètre à photoélectrons, ce qui était déjà un standard à l'époque par temps de vol. Une fois qu'on avait ça, on pouvait voir, quand on mélangeait sur l'atome irradié les harmoniques et le fondamental, toute une série de pics correspondant aux harmoniques et une série de pics intermédiaires qui correspondaient aux side-bands. Les side-bands étant des transitions ATI à deux photons, un photon harmonique et un photon infrarouge. Ce qui était ensuite un peu plus difficile à faire, c'était de trouver le bon régime d'intensité pour que ce soit des transitions ATI à deux photons, pas à trois ou quatre ou six, parce que ça, ça complique vraiment beaucoup les détectations et l'indépendance en intensité des phases. Donc, une fois qu'on avait trouvé ça, l'expérience a été assez simple. Il fallait avoir un interféromètre qui permette de faire varier dans l'échelle attoseconde la différence de marche entre les harmoniques et le fondamental. On faisait

alors varier cette différence de marche et on regardait comment variaient les amplitudes des side-bands en fonction de la différence de marche et en fonction du retard entre les harmoniques et l'infrarouge. Cette différence de marche, la théorie dit qu'elle contient la différence de phase entre les deux harmoniques qui ont servi, qui sont de part et d'autre du photon infrarouge. Une fois qu'on avait ça, on avait les phases de pratiquement toutes les harmoniques et donc on pouvait faire un tracé de ces phases et une fois qu'on avait les phases et les amplitudes, on avait tout ce qu'il fallait pour reconstituer dans le domaine temporel l'impulsion. C'est là tout le secret de l'expérience de 2001.

L'EXPÉRIENCE DE 2001 A ÉTÉ UN PEU COMPLIQUÉE PAR LE FAIT QUE PENDANT UN CERTAIN TEMPS, VOUS N'OBTENIEZ PAS DE RÉSULTAT. QUELLE EN ÉTAIT LA RAISON ?

Parce que le laser avait des fluctuations d'intensité et ces fluctuations d'intensité se traduisaient par des fluctuations de l'amplitude des side-bands qui, au lieu de suivre une belle sinusoïde, formaient un nuage de points. Ce n'est que deux ou trois mois plus tard que nous avons trouvé que c'était très simple : il suffisait de normaliser les résultats au compte total et hop, les sinusoïdes sont apparues. Nous avons pu mesurer les phases et donc en déduire l'apparition du premier train d'attosecondes.

AVEZ-VOUS PERÇU L'AMPLEUR ET L'IMPACT DE CES RÉSULTATS ?

Non, pas vraiment. Nous avons été très contents que le papier soit publié presque tout de suite dans Science, mais à part ça, non. Nous sentions bien qu'il y avait quelque chose d'intéressant là-dedans. Mais les attosecondes, c'était un mot un peu à la mode ! C'est à peu près à ce moment-là que j'ai été invité à Marseille à faire un exposé à la Société Française de Physique. Vers 2003 ou 2004, il y a eu un journal de sciences populaires qui a décidé qu'il y avait quelque chose là et qu'un des auteurs ou peut-être plusieurs allaient être prix Nobel, mais bon, c'était en 2003 ou 2004, et le type a dû être renvoyé depuis parce qu'il a fallu attendre 20 ans pour que le prix Nobel arrive.

IL S'AGISSAIT BIEN DE LA TOUTE PREMIÈRE DÉTECTION EXPÉRIMENTALE D'IMPULSIONS ATTOSECONDES.

Oui, c'est la toute première. Et à ce moment-là, comme notre train d'impulsions était un train d'impulsions, le laser que nous avions était un laser assez long, d'une cinquantaine de femtosecondes. Nous n'avions pas le moyen de faire ce qui a été fait par Ferenc Krausz à Vienne à ce moment-là, de faire des impulsions attosecondes uniques. Donc pour nous, c'était simplement un train qui se répétait toutes les demi-périodes du fondamental. C'est la première publication. Presque la même année, Ferenc Krausz a publié une publication avec une impulsion unique de 500 attosecondes. Voilà, et à partir de là, nous avons fait plusieurs publications.

QUEL ÉTAIT LE PAYSAGE CONCURRENTIEL ? SAVIEZ-VOUS QUE CE RÉSULTAT ÉTAIT ATTENDU PAR BEAUCOUP DE GROUPES DEPUIS LE DÉBUT DES ANNÉES 80 ?

Pas vraiment. Lorsque nous avons obtenu le résultat, nous étions très contents, bien sûr. Nous avons eu la chance d'être les premiers, je dirais que c'est vraiment un coup de chance. Parce que bon, quelques mois après, ça aurait pu être Ferenc Krausz. Nous participions à un réseau européen dans lequel participaient Ferenc Krausz et Anne L'Huillier. Et je me souviens lors d'une réunion à Paris où mon étudiant de l'époque, qui s'appelait Pierre-Mary Paul et qui était le premier auteur de la publication, était très content d'être là. Et quand nous avons annoncé le résultat, Ferenc a dit : « Ah mais oui, bien sûr, ils ont travaillé dans le spectre » parce que lui, il a essayé de trouver les attosecondes directement dans le domaine temporel. Nous ne pouvions pas faire ça et dans notre méthode, qui s'appelle RABBIT depuis 2002, c'est un peu la même chose que la méthode de Rick Trebino appelée FROG pour les femtosecondes, transposée dans l'ultraviolet extrême et les attosecondes.

AVEZ-VOUS DÉVELOPPÉ CETTE MÉTHODE RABBIT SPÉCIFIQUEMENT POUR CETTE EXPÉRIENCE DE 2001 ?

Oui, nous l'avons développée spécifiquement pour l'expérience de 2001. C'était la première fois que nous montions cette expérience, et

c'était la première fois qu'elle était montée. Nous avons une manipulation en 1994 pour mesurer la durée d'impulsion X que nous fabriquions avec un miroir de gallium, mais c'étaient des impulsions qui étaient de l'ordre de 500 femtosecondes, ce n'était pas du tout des attosecondes que nous mesurions, mais nous avions déjà une idée de ce qu'il fallait faire pour mesurer des temps.

COMMENT AVEZ-VOUS TRAVAILLÉ POUR GÉNÉRER CES IMPULSIONS ATTOSECONDES ?

La question était de savoir si nous générions une bande passante suffisante pour faire des attosecondes. Il s'avère qu'avec 5 harmoniques, nous avons la bande passante suffisante. Les premières impulsions étaient de l'ordre de 200 à 300 attosecondes, donc ce n'était pas extrêmement court, ce n'était pas le record du monde, mais c'était quand même des attosecondes et nous n'avions pas besoin de faire autre chose que de sélectionner 5 harmoniques à ce moment-là.

VOUS AVEZ RÉALISÉ CETTE EXPÉRIENCE MAJEURE APRÈS 30 ANS DE CARRIÈRE.

Nous avons publié ces résultats en 2001 et je suis parti à la retraite en 2002. À cette époque là à Saclay, il n'y avait pas le choix : si on avait les annuités et plus de 60 ans, la retraite était obligatoire.

MAIS VOUS ÊTES RESTÉ PAR LA SUITE PARTICULIÈREMENT ACTIF EN RECHERCHE.

À partir de 2002, et la prise de ma retraite, il me devenait très difficile d'accéder à Saclay et de travailler dans la laboratoire. Donc c'est à partir de là que j'ai passé 6 mois au Québec puis 6 mois à Amsterdam ou encore à Berlin au MBL. Jusqu'en 2005, j'étais un peu à droite à gauche mais je ne considérais pas que j'étais encore en âge de partir à la retraite. Je me sentais en pleine forme et j'avais bien envie de continuer. C'est à ce moment là que Louis DiMauro a installé son groupe à Columbus. Et il m'a proposé de postuler pour obtenir un poste à Columbus et j'ai été recruté en 2005. Ce fut le début d'une autre activité parce qu'il a fallu que j'enseigne. Et c'est ainsi que j'ai commencé une nouvelle carrière à 64 ans d'enseignant-chercheur dans une université américaine.

AVEZ-VOUS FAIT ÉVOLUER VOS THÉMATIQUES DE RECHERCHE ?

Oui parce que les recherches étaient essentiellement les recherches de Louis DiMauro qui avait l'équipement et les étudiants pour les faire. Et donc ce sont des recherches qui étaient plutôt orientées vers les hautes intensités que vers les attosecondes.

JUSQU'À QUELLE ANNÉE AVEZ-VOUS ENSEIGNÉ ?

Jusqu'en 2017, année où je pris une 2^e retraite, mais volontaire cette fois-ci. L'enseignement devenait un peu lourd et me prenait beaucoup de temps.

EN OCTOBRE 2023, PRESENTEZ-VOUS LE COUP DE TONNERRE QUI VA SURVENIR AVEC L'ANNONCE DES PRIX NOBEL ?

Pas du tout. Et je ne m'occupais pas de savoir qui avait été nommé prix Nobel, donc ça a été une grande surprise pour moi. C'est ma fille qui m'a appelé en fin de matinée pour me dire « tu as le prix Nobel, et je n'en sais rien ?! ». Le Président du jury avait essayé de me joindre au téléphone mais il n'y parvenait pas parce qu'il essayait de me joindre à Columbus alors j'étais à Paris à l'époque. Ce n'est que dans le courant de l'après-midi que j'ai pu m'entretenir avec lui, après l'annonce des résultats.

QU'AVEZ-VOUS RESENTI ?

J'étais tout d'abord très surpris, et puis à la fois content et inquiet parce que je ne m'imaginai pas obtenir le prix Nobel. Lorsque je suis allé à Stockholm, après la cérémonie de remise du prix, au moment de signer le livre d'or où tous les prix Nobel ont apposé leur signature, je me demandais s'il fallait vraiment que je signe. Je me souviens du prix Nobel de Claude Cohen Tannoudji et des cours qu'il donnait au collège de France et je ne me voyais pas au même rang que lui.

QUEL A ÉTÉ L'IMPACT SUR VOTRE SUR VOTRE VIE DE CE PRIX NOBEL ?

L'année dernière a été une année très chargée avec beaucoup de visites, d'invitations. J'étais à la retraite de l'Ohio State et ma principale occupation était les meetings en visio avec le groupe de Lou, et ce quotidien a été complètement bouleversé. ●