



HAL
open science

Paul, Penning et les pièges à ions

Jean-Christophe Pain

► **To cite this version:**

Jean-Christophe Pain. Paul, Penning et les pièges à ions. Le Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie, 2024, 118 (1061), pp.1-10. hal-04453436

HAL Id: hal-04453436

<https://hal.science/hal-04453436>

Submitted on 12 Feb 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Paul, Penning et les pièges à ions

Jean-Christophe Pain

Université Paris-Saclay, CEA, Laboratoire Matière en Conditions Extrêmes, 91680 Bruyères-le-Châtel
Cedex

jean-christophe.pain@cea.fr

RESUME

Les pièges de Paul et de Penning permettent de confiner des ions pendant une longue durée, afin d'étudier leurs propriétés avec précision. Ces dispositifs ont en commun l'utilisation d'un champ électrique quadrupolaire. Dans le piège de Paul, ce champ est variable à haute fréquence (typiquement quelques MHz) alors qu'il est constant dans le piège de Penning. Dans ce dernier, un champ magnétique de quelques teslas est combiné au champ électrique statique. Ces pièges, associés à la technique de refroidissement par laser, ont permis des avancées importantes en métrologie, dans le domaine de la spectroscopie et des horloges atomiques, ainsi que dans le développement de l'information quantique.

INTRODUCTION

Les pièges à ions sont des dispositifs permettant de confiner des particules chargées pendant une durée suffisamment longue. Les pièges de Paul [1] et de Penning [2] ont en commun l'utilisation d'un champ électrique quadrupolaire, c'est-à-dire dérivant d'un potentiel de la forme

$$V(x, y, z) = A(x^2 + y^2 - 2z^2).$$

Wolfgang Paul (voir figure 1) naît le 10 août 1913 à Lorenzkirch, un petit village de Saxe. Après des études supérieures à l'université technique de Munich puis à Berlin, il effectue de 1937 à 1939 sa thèse à l'université de Kiel sur l'étude des moments nucléaires du béryllium. Exempté de service militaire, il poursuit ses recherches sur la spectrométrie de masse et la séparation isotopique à Kiel, puis à Göttingen. Nommé professeur à l'université de Bonn en 1952, il y dirige un institut de physique nucléaire bientôt doté d'un synchrotron à électrons dédié à l'étude du noyau atomique. C'est durant les années 1950 qu'il met au point ce qu'on appelle aujourd'hui un piège de Paul [1].

A partir des années cinquante, Paul travaille au développement d'un système électromagnétique capturant les ions suffisamment longtemps pour pouvoir mesurer précisément leurs propriétés [3]. Le potentiel quadrupolaire est confinant selon (Ox) et (Oy), mais pas selon (Oz), car les ions sont accélérés dans cette dernière direction. Si on « retourne » le potentiel, l'ion est au contraire piégé dans la direction verticale (Oz), mais s'échappe dans le plan horizontal (xOy). La solution est de faire osciller le potentiel $V(x, y, z)$ pour que la particule ne puisse s'échapper. Paul montre qu'en ajoutant ainsi une composante alternative au champ électrique, on peut ajuster les paramètres pour que le mouvement complexe d'un ion reste localisé dans une petite région de l'espace. Son idée est de moduler A , ce qui permet de généraliser le caractère « piégeant » du potentiel aux trois axes [4]. Le champ électrique oscillant confine alors les ions dans les trois dimensions. Le dispositif électromagnétique est formé de deux électrodes en forme d'hyperboloïde (on attribue généralement à Pierce [5] l'introduction de ces électrodes) et d'une électrode annulaire reliée à une tension oscillante (voir figures 2, 3 et 4). Il permet de s'affranchir presque totalement de l'effet Doppler qui augmentait jusque-là très fortement les incertitudes de mesure. Plus tard, des expérimentateurs comme Hans Georg Dehmelt (voir figure 5) tireront profit des avantages des pièges de Paul pour effectuer des mesures spectroscopiques radiofréquences de haute précision sur des ions [6,7]. On attribue à Dehmelt la citation suivante : « Watching a flock of birds offers little information about one bird's anatomy. To understand a bird, you first need to catch it. » [8].

Le piège de Paul idéal (ou linéaire) est constitué d'électrodes hyperboloïdes infinies. L'application d'un potentiel statique à ces électrodes crée un potentiel quadrupolaire du type

$$\Phi(x, y) = V_0(\lambda x^2 + \mu y^2).$$

Afin de satisfaire à l'équation de Laplace

$$\Delta\Phi(x, y) = 0,$$

où Δ représente le Laplacien, les coefficients λ et μ doivent être de signes opposés. On a donc, dans le piège de Paul linéaire [9] :

$$\Phi(x, y) = \frac{V_0}{2r_0^2}(x^2 - y^2),$$

r_0 étant la plus petite distance séparant les électrodes hyperboloïdes du centre du piège, et V_0 la différence de potentiel appliquée. Afin d'inverser les axes de fuite et de piégeage au cours du temps, la tension appliquée doit comporter une partie alternative. Si on remplace V_0 par $U_0 - V_0 \cos(\Omega t)$, le potentiel devient

$$\Phi(x, y) = \frac{U_0 - V_0 \cos(\Omega t)}{2r_0^2}(x^2 - y^2),$$

où Ω est la fréquence de la tension, U_0 l'amplitude de la tension continue et V_0 l'amplitude de la tension alternative. Par séparation des variables, les trajectoires d'un ion de masse m et de charge q dans ce potentiel présentent des mouvements découplés suivant chacune des directions radiales x et y . Ces deux mouvements sont décrits par les équations de Mathieu [10] :

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -q[U_0 - V_0 \cos(\Omega t)] \frac{x}{r_0^2},$$

$$m \frac{d^2y}{dt^2} = q[U_0 - V_0 \cos(\Omega t)] \frac{y}{r_0^2},$$

dont les solutions s'expriment sous la forme de sommes infinies de termes exponentiels. La stabilité des ions peut alors être étudiée en fonction des paramètres r_0 , U_0 , V_0 et Ω .

Frans Michel Penning (voir figure 6) est né le 12 septembre 1894 à Gorinchem aux Pays-Bas. Il a donné son nom à un piège à ions et à un procédé d'ionisation éponyme (observé pour la première fois en 1927) qui implique des réactions entre des molécules et des atomes neutres. Ces mélanges sont utilisés dans des lampes à décharges de néon et dans les tubes fluorescents, ou encore dans les décharges contrôlées par barrière diélectriques pour prévenir la présence d'électrons trop énergétiques. Sous la supervision de Heike Kamerlingh Onnes, Penning obtient son doctorat le 25 juin 1923, intitulé « *Metingen over isopyknen van gassen bij lage temperaturen* » (*Mesures des lignes de densité isométriques des gaz à basses températures*). Il a notamment mis au point la « jauge de Penning », un manomètre à ionisation à cathode froide (la mesure de la pression est déduite du courant ionique produit par une décharge dans un champ électrique et en présence d'un champ magnétique).

Dans le piège de Penning [2] (voir figures 2, 7, 8 et 9), appelé aussi « cellule à résonance cyclotronique ionique », le champ électrique ne dépend pas du temps et est combiné à un champ

magnétique intense de l'ordre de 5 teslas. C'est à peu près autant que le champ magnétique dans le Tokamak du projet ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor, Cadarache, France). En effet, une particule chargée, dans un tel champ magnétique, effectuerait, si elle était soumise à l'action de ce seul champ, un mouvement circulaire (ou de précession) à la fréquence cyclotron

$$\omega = qB/m,$$

dû à la force de Lorentz

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B},$$

force centripète qui l'attire vers l'axe (Oz). Dans le piège, si B est suffisamment grand, cette force centripète peut l'emporter sur la force électrique, centrifuge. On obtient ainsi une stabilisation du mouvement dans les trois directions. Penning met au point son piège alors qu'il étudie les propriétés des décharges électriques entre deux cylindres coaxiaux (électrodes) en présence d'un champ magnétique. Le champ électrique évite que les particules ne sortent du piège lorsqu'elles suivent les lignes du champ magnétique, généré par un électro-aimant supraconducteur. Ce champ magnétique, appliqué selon l'axe (Oz), force les particules chargées à parcourir des orbites circulaires, ce qui les maintient à l'intérieur du piège. Ainsi, le champ magnétique statique confine le mouvement des ions dans les directions des axes (Ox) et (Oy) et le champ quadropolaire assure le confinement selon (Oz).

COMPARAISON DES PIEGES DE PAUL ET PENNING

Le piège de Penning présente deux principaux avantages par rapport au piège à radiofréquences de Paul. Le premier est que seuls des champs statiques sont utilisés dans le piège de Penning, ce qui évite les micro-déplacements (fluctuations de position) induits par des champs dynamiques, ainsi que la dissipation d'énergie associée. Le second avantage du piège de Penning est qu'il peut être agrandi sans perte d'efficacité de confinement ; il est *de facto* possible de maintenir l'ion piégé à une plus grande distance de la surface des électrodes, ce qui réduit les phénomènes nuisibles d'échauffement et de décohérence quantique. En revanche, le piège de Paul présente par rapport au piège de Penning l'avantage de permettre le stockage simultané de particules de charges positives et négatives. En information quantique, seul le piège de Paul est utilisé [11]. Le physicien David Jeffrey Wineland (prix Nobel 2012 avec Serge Haroche) a utilisé un piège de Paul pour contrôler l'état quantique des ions avec précision grâce à des photons. Wineland et ses collègues ont ainsi pu mettre en place des opérations élémentaires de calcul quantique, fondements d'un possible futur ordinateur quantique. L'une des voies les plus prometteuses pour parvenir à réaliser un ordinateur quantique, consiste à utiliser des qubits (« bits quantiques ») sous forme de moments cinétiques particuliers, c'est-à-dire de spins, portés par des ions. D'autres groupes de recherche font de même comme l'*Ion Trap Quantum Computing Group* de l'université d'Oxford au Royaume-Uni. Wineland a également mis au point une horloge optique reposant sur les oscillations d'ions aluminium qui est plus d'un ordre de grandeur plus précise que les horloges au césium. Si une telle horloge fonctionnait depuis la naissance de l'Univers, elle aurait perdu moins de cinq secondes !

L'APPORT DU REFROIDISSEMENT LASER

Les principes du refroidissement d'ions sont discutés par Wineland et Dehmelt [12] en 1975, année où Theodor Hänsch et Arthur Leonard Schawlow effectuent leurs travaux sur le refroidissement des atomes [13]. Les ions qui se déplacent dans la direction du laser sont refroidis ; ils sont diffusés vers le centre du piège où ils échangent de l'énergie avec les autres ions, ce qui induit un refroidissement global du gaz ionique (voir figure 2 l'exemple du piège de Penning). La technique du « refroidissement Doppler » [14] repose sur l'absorption d'un photon du laser par l'atome ; l'atome, excité, réémet ensuite par émission spontanée. Les cycles répétés d'absorption-émission génèrent une

force de friction qui ralentit les ions. Il faut accorder le laser sur une transition, ce qui est problématique car les fréquences de transition sont dans le bleu ou l'ultra-violet, régions spectrales dans lesquelles il est difficile de trouver des lasers accordables. Wineland est parvenu à refroidir un gaz de $5 \cdot 10^4$ ions avec un laser accordable doublé en fréquence à 280 nm [15]. Le piège de Paul a ainsi permis de refroidir 50 ions de Ba^+ à l'aide d'un laser à 493.4 nm et la technique a été perfectionnée pour le refroidissement d'un seul ion [16]. Quand les ions sont piégés et refroidis, ils forment des cristaux dont les configurations sont déterminées par un équilibre entre les potentiels de piégeage et la répulsion Coulombienne mutuelle des ions. Sur la photographie de la figure 10, environ 2000 ions de béryllium refroidis par laser sont confinés dans un piège de Penning. Le cristal ionique a une structure cubique centrée avec un espacement d'environ 15 μm entre les ions. Comme dans tous les pièges de Penning, les ions tournent autour de l'axe du piège (normal au centre de la photo), nécessitant une imagerie stroboscopique [17].

UNE MOISSON DE RESULTATS (ET DE PRIX NOBEL) POUR LA SPECTROSCOPIE

Schawlow sera colauréat avec Nicolaas Bloembergen de la moitié du prix Nobel de physique en 1981 pour la spectroscopie laser (l'autre moitié étant remise à Kai Manne Börje Siegbahn pour sa contribution à la spectroscopie électronique de haute résolution). Vingt-quatre ans plus tard, Hänsch partagera avec John Lewis Hall la moitié du prix Nobel de physique 2005 « pour leurs contributions au développement de la spectroscopie de précision au laser, incluant la technique du peigne de fréquence optique » (l'autre moitié étant remise à Roy Jay Glauber pour la théorie quantique de la cohérence optique).

La mise en œuvre des pièges à ions dans le domaine de la spectroscopie atomique de précision vaudra à Hans Dehmelt (avec le piège de Penning) et à Wolfgang Paul (avec le piège portant son nom) le prix Nobel de physique en 1989, partagé avec Norman Foster Ramsey pour ses travaux sur les horloges atomiques et le maser à hydrogène.

CONCLUSION

Grâce aux pièges de Paul (aussi appelés « RFQ trap » pour « Radio-Frequency Quadrupole trap ») et de Penning, il est possible de confiner des ions pendant une durée suffisamment longue pour pouvoir les étudier dans des conditions idéales, les ions étant quasiment « isolés » de tout environnement perturbateur. Ces dispositifs, dont les développements sont le fruit de cheminements scientifiques différents, doivent beaucoup aux travaux de Hans Georg Dehmelt. Ils ont permis, en particulier grâce à la technique de refroidissement par laser, des avancées importantes en métrologie, dans le domaine de la spectroscopie et des horloges atomiques. Ils constituent également des éléments fondamentaux des études relatives à l'ordinateur quantique. Les potentialités de ces pièges électromagnétiques sont immenses, et ils seront sans nul doute encore à l'origine de nombreux progrès scientifiques.

REMERCIEMENTS

Je remercie Caroline Champenois, du laboratoire de Physique des Interactions Ioniques et Moléculaires de l'Université de Marseille, pour les photographies de pièges de Paul et Penning, ainsi que Michel Casanova, du Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives, pour de fructueuses discussions sur le sujet.

BIBLIOGRAPHIE ET NETOGRAPHIE

[1] W. Paul, « *Electromagnetic traps for charged and neutral particles* », Rev. Mod. Phys. **62**, 531-540 (1990).

- [2] F.M. Penning, « *Die glimmentladung bei niedrigem druck zwischen koaxialen zylindern in einem axialen magnetfeld* », *Physica* **3**, 873-894 (1936).
- [3] E. Fischer, « *Die dreidimensionale Stabilisierung von Ladungs-tragern in einem Vierpolfeld* », *Z. Phys.* **156**, 1-26 (1959).
- [4] C. Cohen-Tannoudji, « *Prix Nobel de Physique 2012* », *Reflète de la Physique* **32**, 26-27 (2013).
- [5] J.R. Pierce, in: « *Theory and Design of Electron Beams* », D. van Nostrand Co., New York, 1949, Chap. 3.
- [6] H.G. Dehmelt, « *Radiofrequency spectroscopy of stored ions. I. Storage* », *Adv. Atom. Molec. Phys.* **3**, 53-72 (1967).
- [7] H.G. Dehmelt, « *Radiofrequency spectroscopy of stored ions. II. Spectroscopy* », *Adv. Atom. Molec. Phys.* **5**, 109-154 (1969).
- [8] P. Toschek, « *Hans Dehmelt (1922–2017)* », *Nature* **545**, 290 (2017).
- [9] P. Delahaye, « *Etudes et tests préliminaires à une mesure de la corrélation angulaire $\beta - \nu$ dans la désintégration du noyau ${}^6\text{He}$ à l'aide d'un piège de Paul* », Thèse de doctorat, Université de Caen, 2002.
- [10] R. Campbell, « *Théorie générale de l'équation de Mathieu* », Masson, 1955.
- [11] S. Haroche, Cours au Collège de France du 6 février 2006, « *Les outils de la physique des ions (I): piégeage et refroidissement* ».
http://www.college-de-france.fr/media/serge-haroche/UPL50636_SHaroche_06022006.pdf
- [12] D.J. Wineland and H. Dehmelt, « *Proposed $10^{14} \delta\nu/\nu$ laser fluorescence spectroscopy on Tl^+ monoisotop oscillator III (side band cooling)* », *Bull. Am. Phys. Soc.* **20**, 637 (1975).
- [13] T. W. Hänsch and A. L. Schawlow, « *Cooling of gases by laser radiation* », *Opt. Comm.* **13**, 68-69 (1975).
- [14] O. Dulieu *et al.*, « *Le laser pour refroidir atomes et molécules* », dans « *Le laser : 50 ans de découvertes* », Ouvrage coordonné par F. Bretenaker et N. Treps, 2^{ème} édition (EDP Sciences, 2016)
- [15] D.J. Wineland, R.E. Drullinger and F.L. Walls, « *Radiation-pressure cooling of bound resonant absorbers* », *Phys. Rev. Lett.* **40**, 1639-1642 (1978).
- [16] W. Neuhauser, M. Hohenstatt, H. Dehmelt and P.E. Toschek, « *Optical-Sideband cooling of visible atom cloud confined in parabolic well* », *Phys. Rev. Lett.* **41**, 233-236 (1978).
- [17] C.E. Wieman, D.E. Pritchard and D.J. Wineland, « *Atom cooling, trapping, and quantum manipulation* », *Rev. Mod. Phys.* **71**, S253 (1999).



© <https://photos.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/photos/nobel-gallery/wolfgang-paul>

Figure 1 : Wolfgang Paul

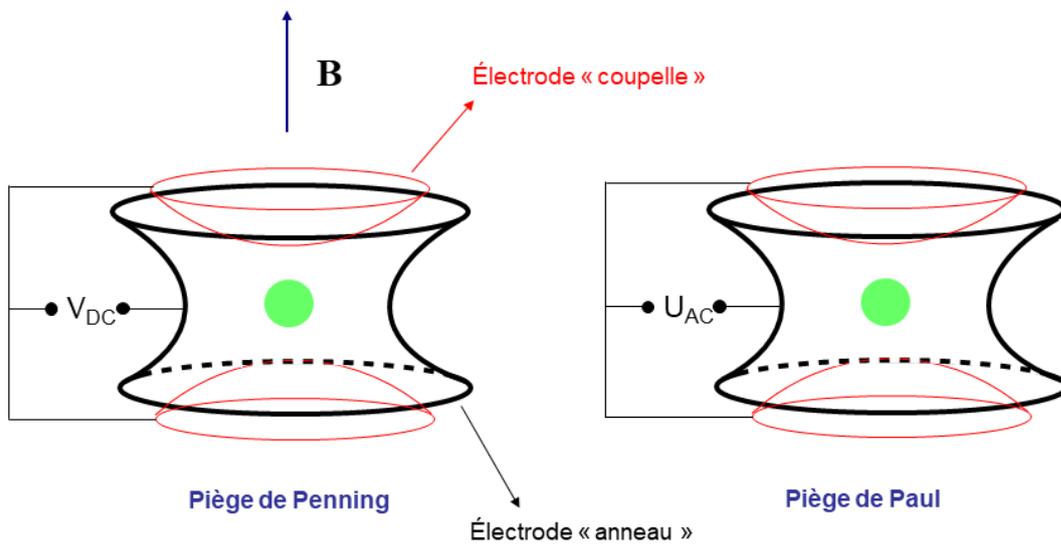
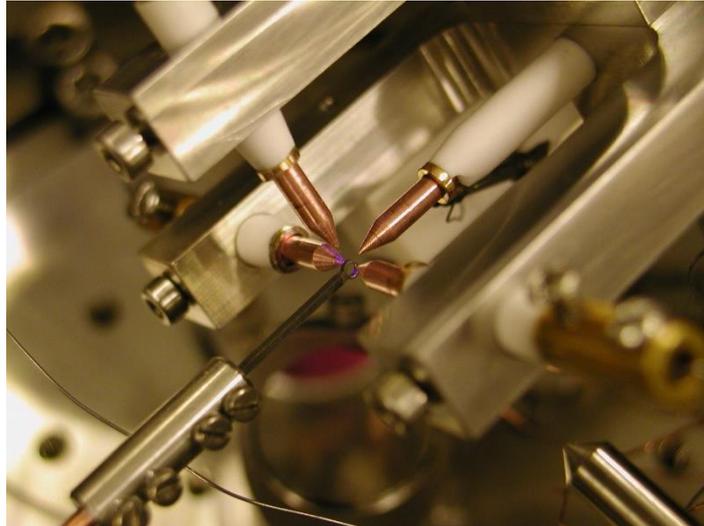
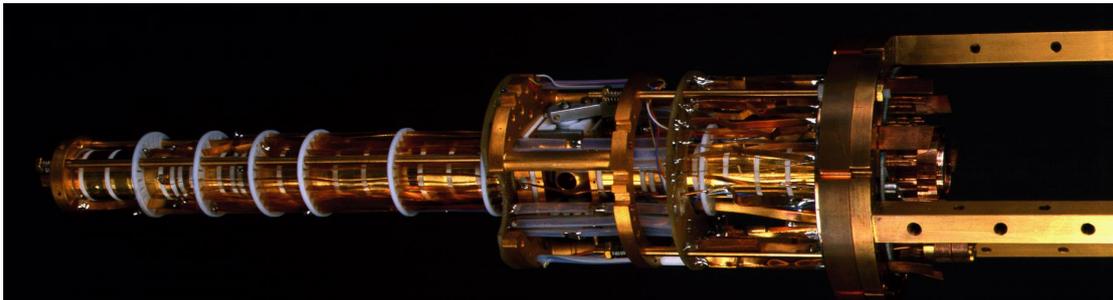


Figure 2 : Schéma simplifié des pièges de Penning et Paul (V_{DC} représente un courant continu et U_{AC} un courant alternatif). B est le champ magnétique (piège de Penning).



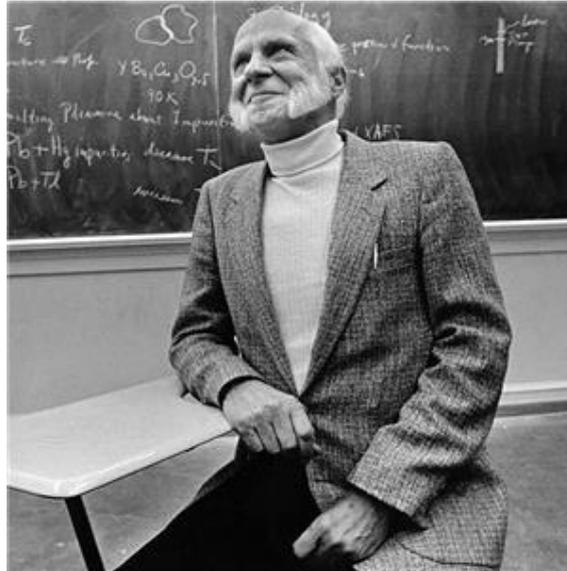
© C. Champenois (Université de Provence, Marseille)

Figure 3 : piège de Paul miniature. Le piège est l'anneau, les électrodes (les pointes) sont très éloignées de l'anneau par rapport à la géométrie conçue par Paul. Ce piège a été élaboré au laboratoire de Physique des Interactions Ioniques et Moléculaires de l'Université de Marseille pour piéger quelques centaines d'ions au maximum. Il est destiné à la métrologie des fréquences optiques.



© C. Champenois (Université de Provence, Marseille)

Figure 4 : piège de Paul linéaire. La partie de droite est un piège quadrupolaire. La partie de gauche avec ses barreaux plus fins est un octupole (8 barreaux). Les tiges métalliques associées aux céramiques blanches ne constituent pas le piège proprement dit mais servent à maintenir la structure. Ce piège est conçu pour confiner de grands échantillons (comportant au moins un million d'ions).



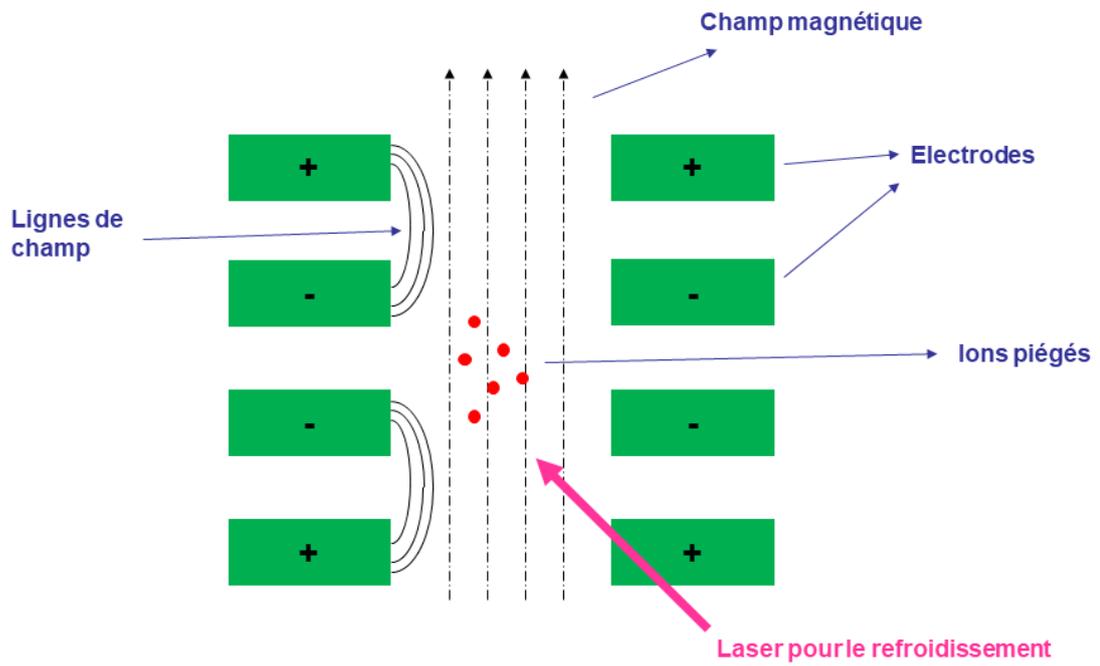
© Robert DeGiulio, Courtesy MOHAI (2000.107.246.04.01)

Figure 5 : Hans Dehmelt à l'Université de Washington, le 12 octobre 1989



© Creative Commons

Figure 6 : Frans Michel Penning



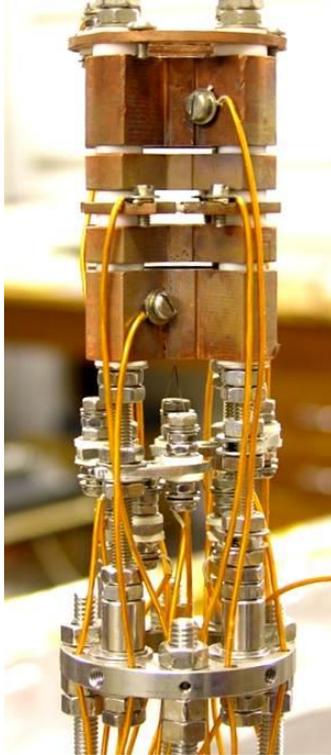
Vue en coupe du piège de Penning

Figure 7 : Vue en coupe d'un piège de Penning utilisé pour le refroidissement laser (schéma de principe simplifié).



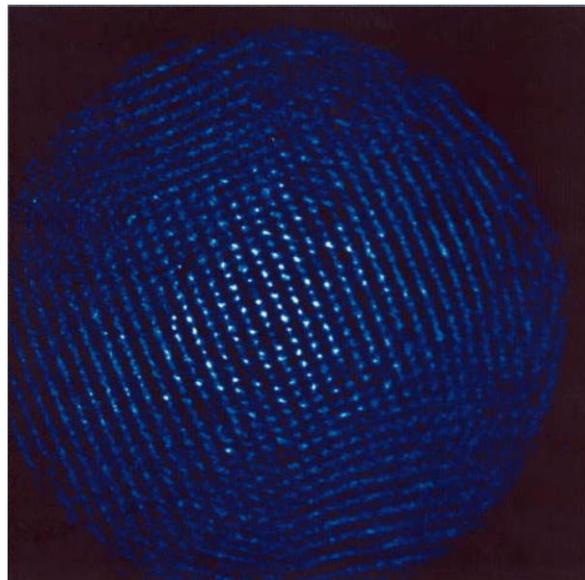
© Imperial College London

Figure 8 : Piège de Penning



© R. Thompson (Imperial College, Londres)

Figure 9 : piège de Penning.



© Image courtesy of John Bollinger (NIST)

Figure 10 : sur cette photographie, environ 2000 ions de béryllium refroidis par laser sont confinés dans un piège de Penning.