

Soutenance
de thèse

R. Dubessy

Introduction

Tutoriel ions
piégés

Chauffage
anormal

Micro-
fabrication

Dispositif
expérimental

Conclusion

Réalisation, étude et exploitation d'ensembles d'ions refroidis par laser stockés dans des pièges micro-fabriqués pour l'information quantique

Romain Dubessy

12 Octobre 2010

Soutenance
de thèse

R. Dubessy

Introduction

Tutoriel ions
piégés

Chauffage
anormal

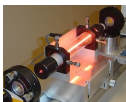
Micro-
fabrication

Dispositif
expérimental

Conclusion

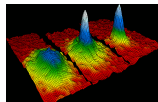
Lumière “quantique”

- spectroscopie
- pompage optique
Brossel, Kastler et Winter, 1952
- lasers
Maiman, 1960



Matière “quantique”

- refroidissement
Chu, Cohen-Tannoudji et Philips, 1997
- état vibrationnel
- condensats
Cornell et Wieman, 1995



Etape plus récente

- intrication lumière - matière
- calculateur quantique ?

Soutenance
de thèse

R. Dubessy

Introduction

Tutoriel ions
piégés

Chauffage
anormal

Micro-
fabrication

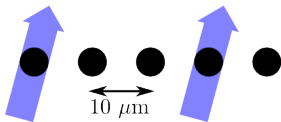
Dispositif
expérimental

Conclusion

Intérêt des ions piégés

- confinement & cohérence,
- opérations élémentaires (adressage),
- couplage déterministe (intrication).

Cirac et Zoller, PRL **74**, 4091 (1995)



Soutenance
de thèse

R. Dubessy

Introduction

Tutoriel ions
piégés

Chauffage
anormal

Micro-
fabrication

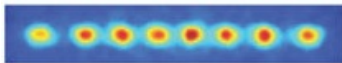
Dispositif
expérimental

Conclusion

Intérêt des ions piégés

- confinement & cohérence,
- opérations élémentaires (adressage),
- couplage déterministe (intrication).

Cirac et Zoller, PRL **74**, 4091 (1995)



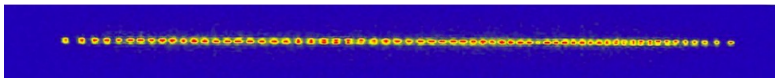
→ Jusqu'à 8 ions intriqués

Haffner et al., Nature **438**, 643-646 (2005)

Intérêt des ions piégés

- confinement & cohérence,
- opérations élémentaires (adressage),
- couplage déterministe (intrication).

Cirac et Zoller, PRL **74**, 4091 (1995)



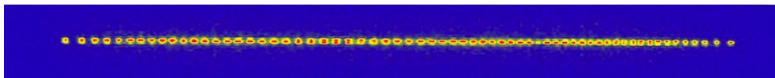
→ 64 ions adressables
→ Jusqu'à **14** ions intriqués !

Monz et al., arXiv :1009.6126 (2010)

Intérêt des ions piégés

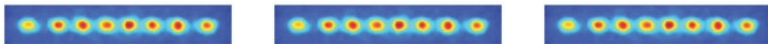
- confinement & cohérence,
- opérations élémentaires (adressage),
- couplage déterministe (intrication).

Cirac et Zoller, PRL **74**, 4091 (1995)



→ 64 ions adressables
 → Jusqu'à **14** ions intriqués !

Monz et al., arXiv :1009.6126 (2010)



Communication quantique

Soutenance
de thèse

R. Dubessy

Introduction

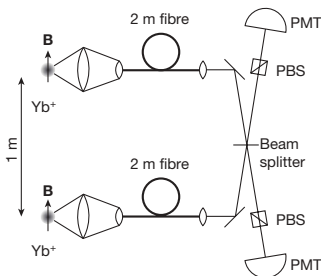
Tutoriel ions
piégés

Chauffage
anormal

Micro-
fabrication

Dispositif
expérimental

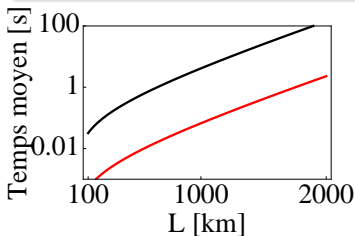
Conclusion



Moehring et al., *Nature*, **449**, 68 (2007)

Intrication

- état quantique “macroscopique”,
- Longue distance ?
- Communication quantique ?



N. Sangouard, R. Dubessy et C. Simon,

PRA, **79**, 042340 (2009)

Soutenance
de thèse

R. Dubessy

Introduction

Tutoriel ions
piégés

Chauffage
anormal

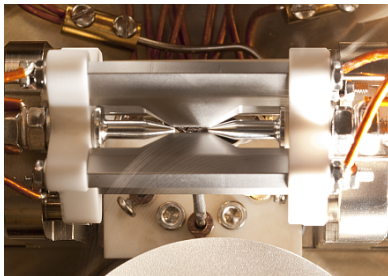
Micro-
fabrication

Dispositif
expérimental

Conclusion

Intégrabilité ?

- miniaturisation
- problématique expérimentale :
Boulder, Maryland, Oxford, Ulm, Innsbruck ... Paris.



Soutenance
de thèse

R. Dubessy

Introduction

Tutoriel ions
piégés

Chauffage
anormal

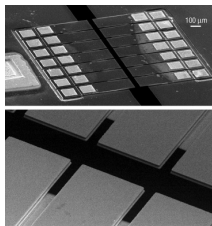
Micro-
fabrication

Dispositif
expérimental

Conclusion

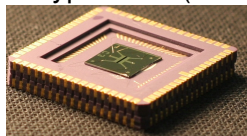
Intégrabilité ?

- miniaturisation
- problématique expérimentale :
Boulder, Maryland, Oxford, Ulm, Innsbruck ... Paris.
- 2002-2005 : Piège semi-conducteur (Maryland),



Stick et al., Nat. Phys. **2**, 36–39 (2006)

Prototype MPQ (2005) :

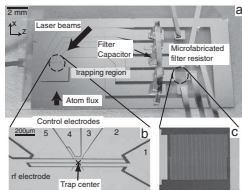


S. Ducci & P. Filloux

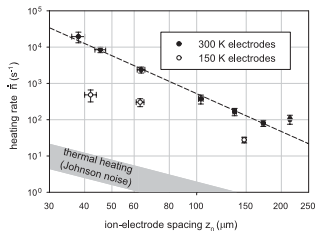
Thales - RT (Palaiseau)

Intégrabilité ?

- miniaturisation
- problématique expérimentale : Boulder, Maryland, Oxford, Ulm, Innsbruck ... Paris.
- 2002-2005 : Piège semi-conducteur (Maryland),
- 2005-2006 : Piège planaire (Boulder).



Seidelin et al., PRL **96** 253003 (2006)



Deslauriers et al., PRL **97** 103007 (2006)

Soutenance
de thèse

R. Dubessy

Introduction

Tutoriel ions
piégés

Chauffage
anormal

Micro-
fabrication

Dispositif
expérimental

Conclusion

- 1 Chauffage anormal
- 2 Micro-fabrication
- 3 Dispositif expérimental

Soutenance
de thèse

R. Dubessy

Introduction

Tutoriel ions
piégés

Chauffage
anormal

Micro-
fabrication

Dispositif
expérimental

Conclusion

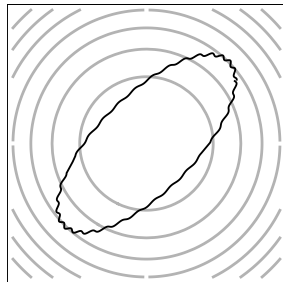
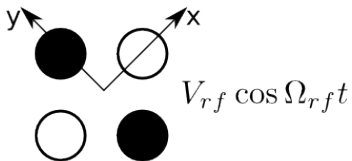
TUTORIEL IONS PIÉGÉS

Piégeage d'une particule chargée

Pièges radiofréquence

- $\vec{E}(t)$:
 - pseudo-potential,
 - micro-mouvement.

Paul, 1989



Soutenance de thèse

R. Dubessy

Introduction

Tutoriel ions piégés

Chauffage anormal

Micro-fabrication

Dispositif expérimental

Conclusion

Piégeage d'une particule chargée

Soutenance de thèse

R. Dubessy

Introduction

Tutoriel ions piégés

Chauffage anormal

Micro-fabrication

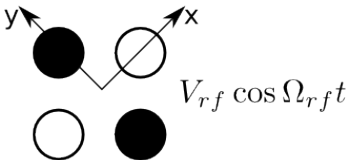
Dispositif expérimental

Conclusion

Pièges radiofréquence

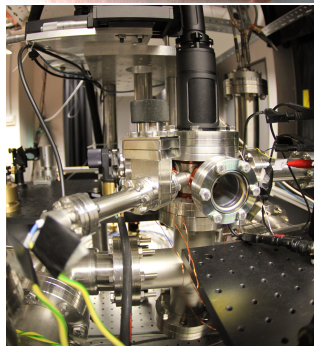
- $\vec{E}(t)$:
- pseudo-potential,
- micro-mouvement.

Paul, 1989



$$V_{rf} \approx 200 \text{ V,}$$

$$\Omega_{rf} \approx 2\pi \times 5.7 \text{ MHz}$$



Refroidissement laser

Soutenance de thèse

R. Dubessy

Introduction

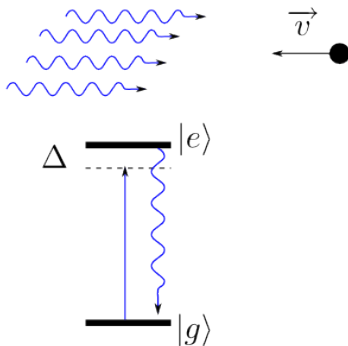
Tutoriel ions piégés

Chauffage anormal

Micro-fabrication

Dispositif expérimental

Conclusion



Principe

- Effet Doppler favorise absorption,
- Emission spontanée redistribue l'impulsion,
- Effet net : friction,
- Limité par émission spontanée.

$$T_{lim} \sim \frac{\hbar\Gamma}{k_B} \sim 500 \mu\text{K}$$

L'ion Strontium

Soutenance
de thèse

R. Dubessy

Introduction

Tutoriel ions
piégés

Chauffage
anormal

Micro-
fabrication

Dispositif
expérimental

Conclusion

$^{88}\text{Sr}^+$

● Alcalino-terreux.

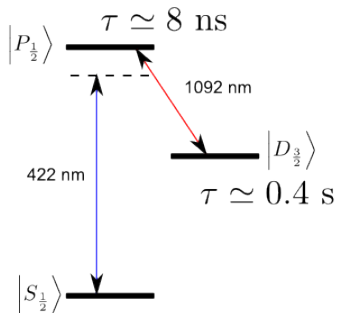
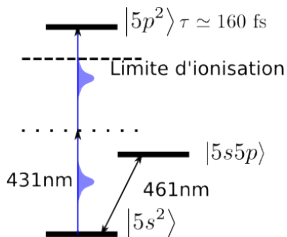
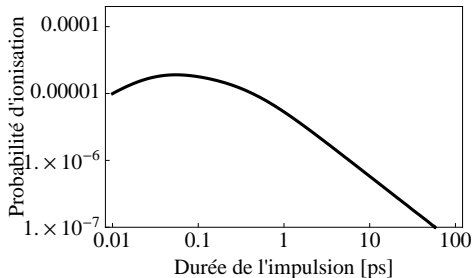


Photo-ionisation



Paramètres

- Ti :Al₂O₃ doublé,
- 400 mW, 100 fs @ 431 nm.



Soutenance
de thèse

R. Dubessy

Introduction

Tutoriel ions
piégés

Chauffage
anormal

Micro-
fabrication

Dispositif
expérimental

Conclusion

- 1 **Chauffage anormal**
- 2 Micro-fabrication
- 3 Dispositif expérimental

Soutenance
de thèse

R. Dubessy

Introduction

Tutoriel ions
piégés

Chauffage
anormal

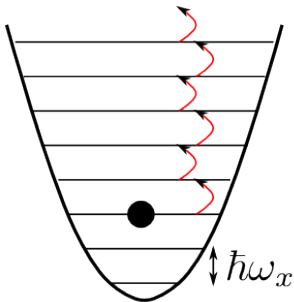
Micro-
fabrication

Dispositif
expérimental

Conclusion

Champ parasite “dynamique”

- oscillateur forcé $F = eE(t)$,
- règle d’or de Fermi
- transfert d’énergie (= chauffage).



$$\dot{n} = \frac{e^2}{4m\hbar\omega_x} S_E(\omega_x, r)$$

Piège surfacique

Soutenance
de thèse

R. Dubessy

Introduction

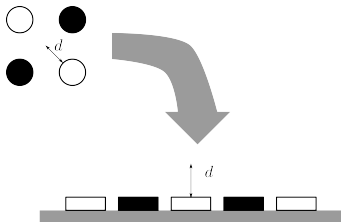
Tutoriel ions
piégés

Chauffage
anormal

Micro-
fabrication

Dispositif
expérimental

Conclusion



Piège surfacique

Soutenance
de thèse

R. Dubessy

Introduction

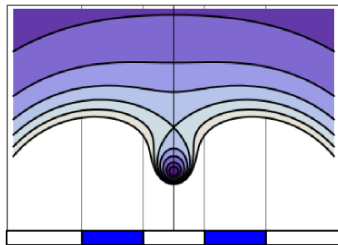
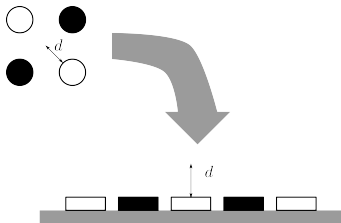
Tutoriel ions
piégés

Chauffage
anormal

Micro-
fabrication

Dispositif
expérimental

Conclusion



Potentiel électriques

- simulations numériques,
- potentiel connu analytiquement.

House, PRA 78, 033402 (2008)

Soutenance de thèse

R. Dubessy

Introduction

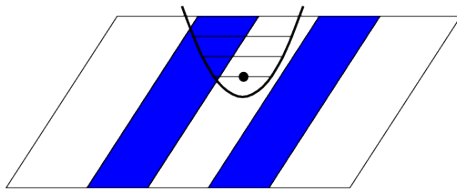
Tutoriel ions piégés

Chauffage anormal

Micro-fabrication

Dispositif expérimental

Conclusion



Potentiel aléatoire ?

Soutenance
de thèse

R. Dubessy

Introduction

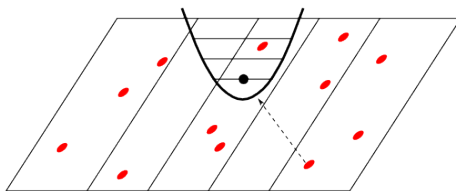
Tutoriel ions
piégés

Chauffage
anormal

Micro-
fabrication

Dispositif
expérimental

Conclusion



Potentiel aléatoire ?

- $\phi(t, r) = \sum_i V_i(t) \phi_i(r)$

R. Dubessy, T. Coudreau et L. Guidoni, PRA **80** 031402 (2009)

Soutenance
de thèse

R. Dubessy

Introduction

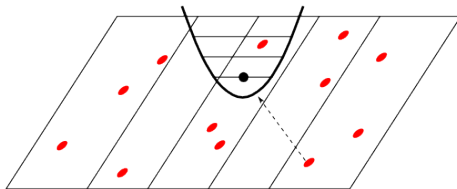
Tutoriel ions
piégés

Chauffage
anormal

Micro-
fabrication

Dispositif
expérimental

Conclusion



Potentiel aléatoire ?

- $\phi(t, r) = \sum_i V_i(t) \phi_i(r)$
- $S_E(\omega, r) \sim |\nabla \phi(\omega, r)|^2 = S_V(\omega) \langle \nabla \phi_S(r) \nabla' \phi_S(r') \rangle$
- $\langle \nabla \phi_S(r) \nabla' \phi_S(r') \rangle = e^{-|r-r'|/\zeta}$

R. Dubessy, T. Coudreau et L. Guidoni, PRA **80** 031402 (2009)

Soutenance de thèse

R. Dubessy

Introduction

Tutoriel ions piégés

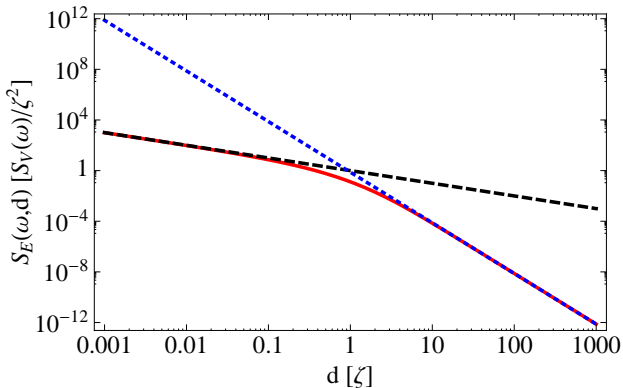
Chauffage anormal

Micro-fabrication

Dispositif expérimental

Conclusion

$$S_E(\omega, d) = 2 \frac{S_V(\omega)}{\zeta^2} \int_0^\infty dk \frac{k^3 e^{-2\frac{d}{\zeta}k}}{(1+k^2)^{3/2}}$$



Modèle & données

Soutenance de thèse

R. Dubessy

Introduction

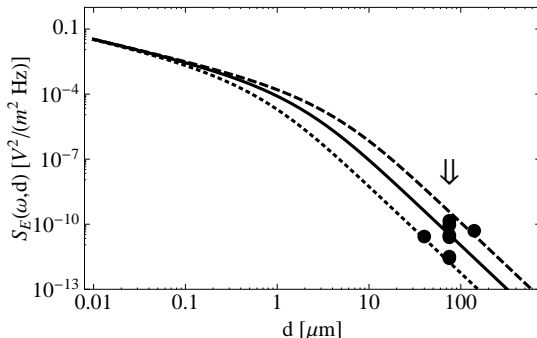
Tutoriel ions piégés

Chauffage anormal

Micro-fabrication

Dispositif expérimental

Conclusion



Caractéristiques

- taux de chauffage dans des pièges surfaciques (Or),
- normalisés à 1 MHz (bruit rose ω^{-1}).
- ζ : taille de grain du métal.

Soutenance
de thèse

R. Dubessy

Introduction

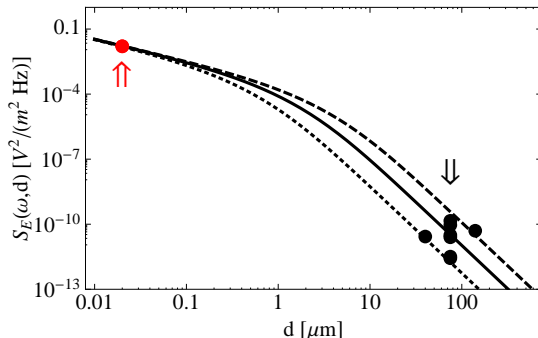
Tutoriel ions
piégés

Chauffage
anormal

Micro-
fabrication

Dispositif
expérimental

Conclusion



Caractéristiques

- taux de chauffage dans des pièges surfaciques (Or),
- normalisés à 1 MHz (bruit rose ω^{-1}).
- ζ : taille de grain du métal.

Modèle & données

Soutenance
de thèse

R. Dubessy

Introduction

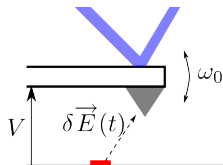
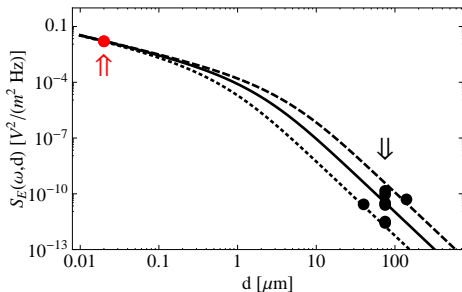
Tutoriel ions
piégés

Chauffage
anormal

Micro-
fabrication

Dispositif
expérimental

Conclusion



$$\Gamma \sim \frac{C^2 V^2}{4k_B T} S_E(\omega_0, d)$$

Stipe et al, PRL **87**, 096801 (2001)

→ comparaison directe des régimes $d \gg \zeta$ et $d \ll \zeta$.

Soutenance
de thèse

R. Dubessy

Introduction

Tutoriel ions
piégés

Chauffage
anormal

Micro-
fabrication

Dispositif
expérimental

Conclusion

- 1 Chauffage anormal
- 2 Micro-fabrication**
- 3 Dispositif expérimental

Protocole de fabrication

Soutenance de thèse

R. Dubessy

Introduction

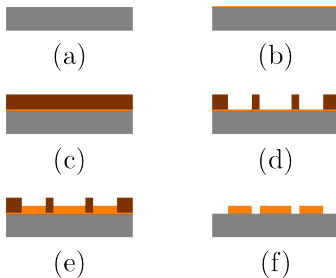
Tutoriel ions piégés

Chauffage anormal

Micro-fabrication

Dispositif expérimental

Conclusion



C. Manquest (MPQ)

Collaboration avec M. Woytasik, IEF (Orsay)

Technologie

- (a) substrat poli (SiO_2),
- (b) dépôt (Cu/Ti),
- (c) enrésinement,
- (d) lithographie optique,
- (e) micro-moulage (Cu),
- (f) nettoyage.

Piège IEF

Soutenance
de thèse

R. Dubessy

Introduction

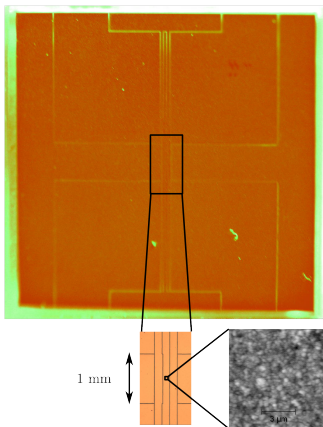
Tutoriel ions
piégés

Chauffage
anormal

Micro-
fabrication

Dispositif
expérimental

Conclusion



Caractéristiques

- largeur de piste : $150 \mu\text{m}$,
- épaisseur : $\sim 4 \mu\text{m}$,
- rugosité : 40 nm (RMS),

Piège IEF

Soutenance
de thèse

R. Dubessy

Introduction

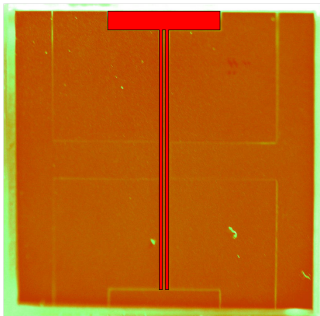
Tutoriel ions
piégés

Chauffage
anormal

Micro-
fabrication

Dispositif
expérimental

Conclusion



Caractéristiques

- largeur de piste :
 $150 \mu\text{m}$,
- épaisseur : $\sim 4 \mu\text{m}$,
- rugosité : 40 nm
(RMS),
- $V_{rf} \approx 50\text{V}$,
 $\Omega_{rf} = 2\pi \times 15 \text{ MHz}$,
 $U_T \approx 0.05 \text{ eV}$

Piège IEF

Soutenance
de thèse

R. Dubessy

Introduction

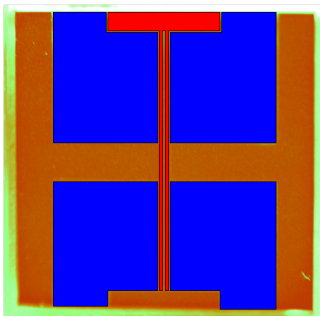
Tutoriel ions
piégés

Chauffage
anormal

Micro-
fabrication

Dispositif
expérimental

Conclusion



Caractéristiques

- largeur de piste :
 $150 \mu\text{m}$,
- épaisseur : $\sim 4 \mu\text{m}$,
- rugosité : 40 nm
(RMS),
- $V_{rf} \approx 50\text{V}$,
 $\Omega_{rf} = 2\pi \times 15 \text{ MHz}$,
 $U_T \approx 0.05 \text{ eV}$
- $V_{end} \approx 1\text{V}$,

Soutenance
de thèse

R. Dubessy

Introduction

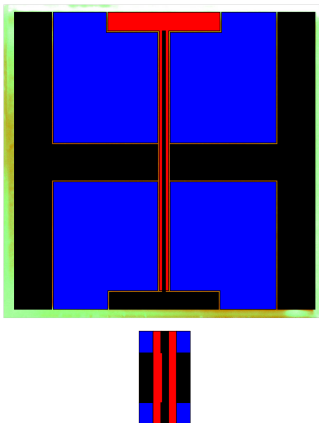
Tutoriel ions
piégés

Chauffage
anormal

Micro-
fabrication

Dispositif
expérimental

Conclusion



Caractéristiques

- largeur de piste :
 $150 \mu\text{m}$,
- épaisseur : $\sim 4 \mu\text{m}$,
- rugosité : 40 nm
(RMS),
- $V_{rf} \approx 50\text{V}$,
 $\Omega_{rf} = 2\pi \times 15 \text{ MHz}$,
 $U_T \approx 0.05 \text{ eV}$
- $V_{end} \approx 1\text{V}$,
- $V_{dc} \approx 0.1\text{V}$.

Soutenance
de thèse

R. Dubessy

Introduction

Tutoriel ions
piégés

Chauffage
anormal

Micro-
fabrication

Dispositif
expérimental

Conclusion

- 1 Chauffage anormal
- 2 Micro-fabrication
- 3 Dispositif expérimental**

Montage

Soutenance
de thèse

R. Dubessy

Introduction

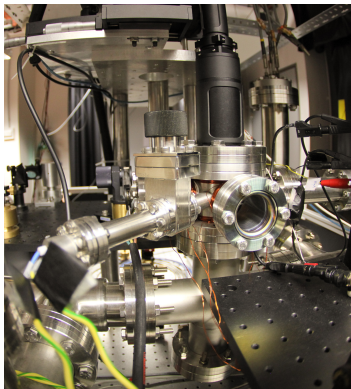
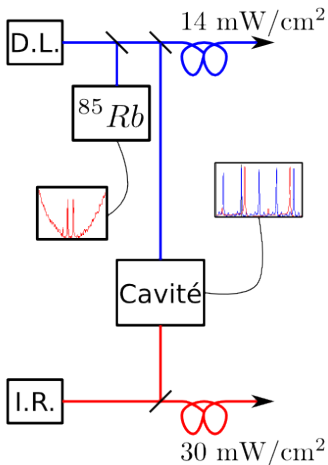
Tutoriel ions
piégés

Chauffage
anormal

Micro-
fabrication

Dispositif
expérimental

Conclusion



Montage

Soutenance de thèse

R. Dubessy

Introduction

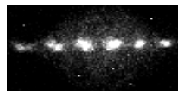
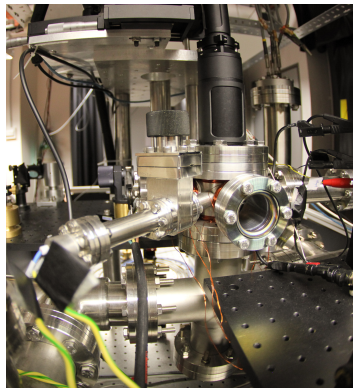
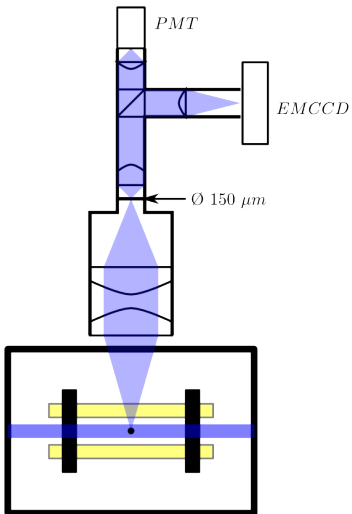
Tutoriel ions piégés

Chauffage anormal

Micro-fabrication

Dispositif expérimental

Conclusion



Mesures de taux de chauffage

Soutenance de thèse

R. Dubessy

Introduction

Tutoriel ions piégés

Chauffage anormal

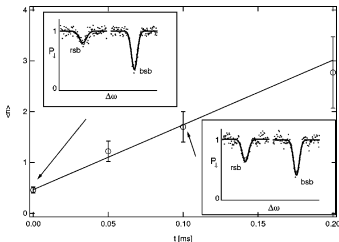
Micro-fabrication

Dispositif expérimental

Conclusion

Spectroscopie

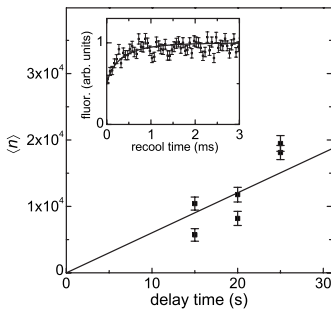
- prépare l'état $\langle n \rangle \simeq 0$,
- mesure $p(n)$.



Turchette et al., PRA **61**, 063418 (2000)

Méthode plus simple

- Fluorescence,
- Modèle analytique.



Epstein et al., PRA **76**, 033411 (2007)

Taux de chauffage

Soutenance de thèse

R. Dubessy

Introduction

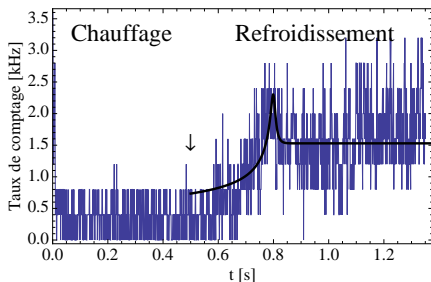
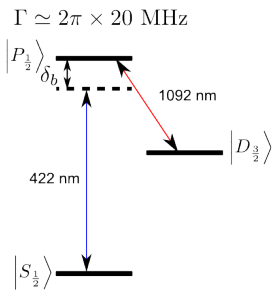
Tutoriel ions piégés

Chauffage anormal

Micro-fabrication

Dispositif expérimental

Conclusion



Mesure préliminaire

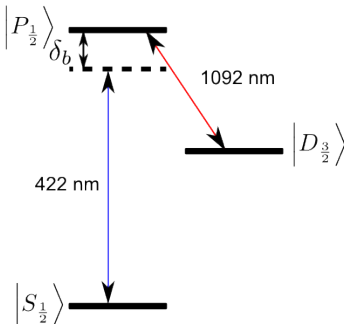
- sur une réalisation,
- sur un ion unique,
- $\dot{T} \sim 12 \text{ K/s}$.

Spectre de refroidissement

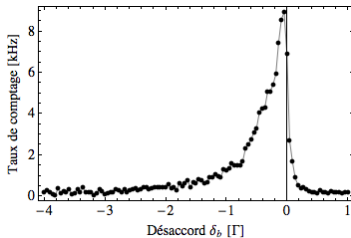
Séquence

- vapeur atomique,
- photo-ionisation,
- refroidissement.

$$\Gamma \simeq 2\pi \times 20 \text{ MHz}$$



Modèle ?



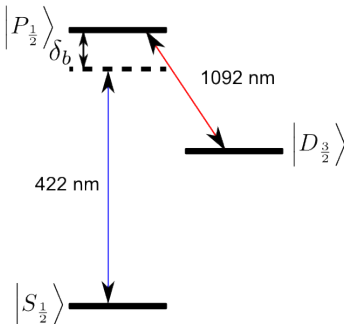
ion unique

Spectre de refroidissement

Séquence

- vapeur atomique,
- photo-ionisation,
- refroidissement.

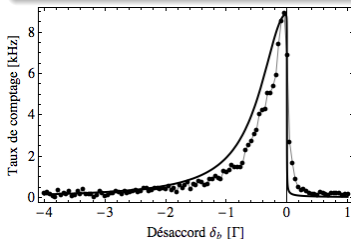
$$\Gamma \simeq 2\pi \times 20 \text{ MHz}$$



Modèle

- atome à deux niveaux,
- équations de Bloch,
- oscillateur 1D.

Weisenberg et al., PRA 76 053416 (2007)



Dynamique de refroidissement

Soutenance
 de thèse

R. Dubessy

Introduction

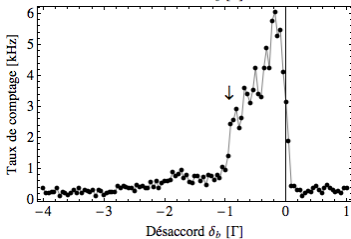
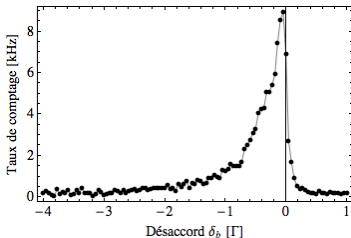
Tutoriel ions
 piégés

Chauffage
 anormal

Micro-
 fabrication

Dispositif
 expérimental

Conclusion



Séquences identiques
 Non contrôlé : état initial

Dynamique de refroidissement

Soutenance
 de thèse

R. Dubessy

Introduction

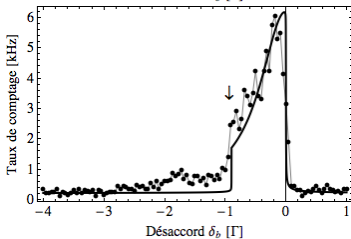
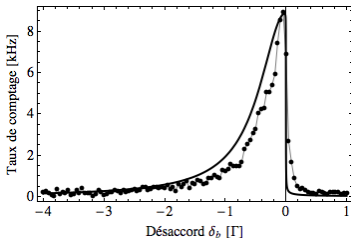
Tutoriel ions
 piégés

Chauffage
 anormal

Micro-
 fabrication

Dispositif
 expérimental

Conclusion



Séquences identiques
 Non contrôlé : état initial
 Modèle : ajustement
 énergie initiale.

Dynamique de refroidissement

Soutenance
de thèse

R. Dubessy

Introduction

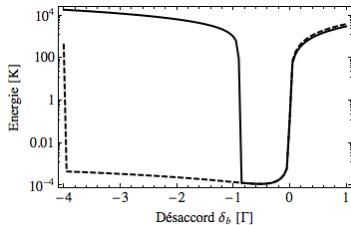
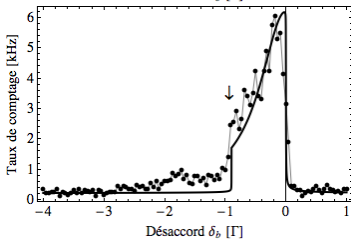
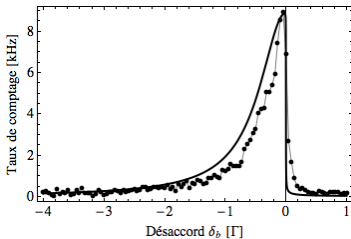
Tutoriel ions
piégés

Chauffage
anormal

Micro-
fabrication

Dispositif
expérimental

Conclusion



Piège surfacique "mésoscopique"

Soutenance
de thèse

R. Dubessy

Introduction

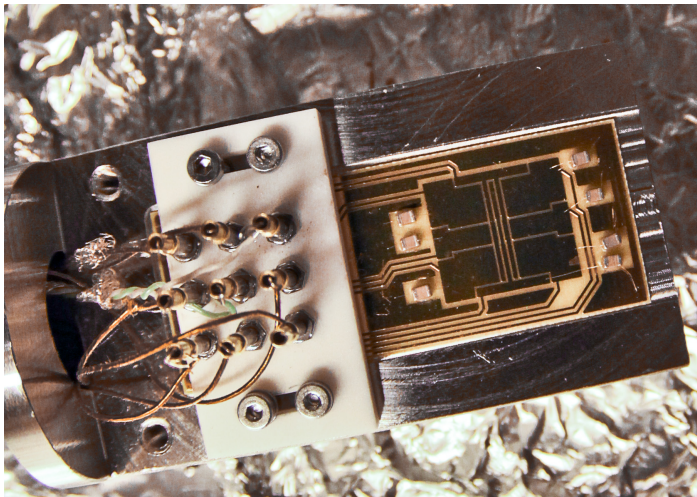
Tutoriel ions
piégés

Chauffage
anormal

Micro-
fabrication

Dispositif
expérimental

Conclusion



Soutenance
de thèse

R. Dubessy

Introduction

Tutoriel ions
piégés

Chauffage
anormal

Micro-
fabrication

Dispositif
expérimental

Conclusion

Résultats

- modèle microscopique du chauffage anormal,
- pièges micro-fabriqués,
- mesures préliminaires du taux de chauffage,
- étude quantitative des spectres de refroidissement.

Conclusion

Soutenance
de thèse

R. Dubessy

Introduction

Tutoriel ions
piégés

Chauffage
anormal

Micro-
fabrication

Dispositif
expérimental

Conclusion

Résultats

- modèle microscopique du chauffage anormal,
- pièges micro-fabriqués,
- mesures préliminaires du taux de chauffage,
- étude quantitative des spectres de refroidissement.

Autres études théoriques

- protocole de communication,
- modélisation de la photo-ionisation fs ,
- protocole de manipulation d'états protégés.

Conclusion

Soutenance
de thèse

R. Dubessy

Introduction

Tutoriel ions
piégés

Chauffage
anormal

Micro-
fabrication

Dispositif
expérimental

Conclusion

Résultats

- modèle microscopique du chauffage anormal,
- pièges micro-fabriqués,
- mesures préliminaires du taux de chauffage,
- étude quantitative des spectres de refroidissement.

Prochaines étapes

- démonstration du fonctionnement de micro-pièges,
- mesures AFM électrique,
- optimisation de la surface des électrodes.

Soutenance
de thèse

R. Dubessy

Introduction

Tutoriel ions
piégés

Chauffage
anormal

Micro-
fabrication

Dispositif
expérimental

Conclusion

MERCI POUR VOTRE ATTENTION

Piège Thalès

Soutenance
de thèse

R. Dubessy

Introduction

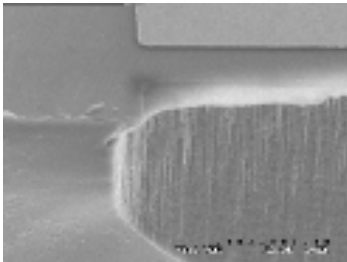
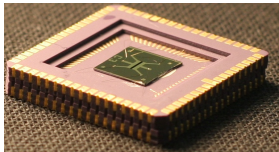
Tutoriel ions
piégés

Chauffage
anormal

Micro-
fabrication

Dispositif
expérimental

Conclusion



Difficultés techniques

- Irrégularités de la gravure,
- présence de Silice.

Difficultés pratiques

- pertes dans le silicium (RF),
- effet "FET".

→ changement de
technologie

Piège IEF

Soutenance de thèse

R. Dubessy

Introduction

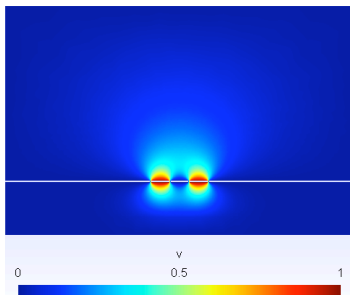
Tutoriel ions piégés

Chauffage anormal

Micro-fabrication

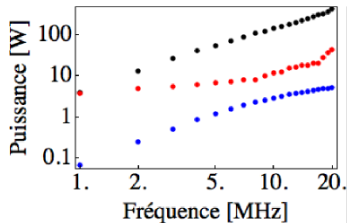
Dispositif expérimental

Conclusion



Choix du substrat

- pertes radio-fréquence,
- puissance dissipée (à 100 V) ?



→ substrat en silice !