

# Spectroscopie par effet de recul d'ions moléculaires piégés et froids

Cyrille SOLARO

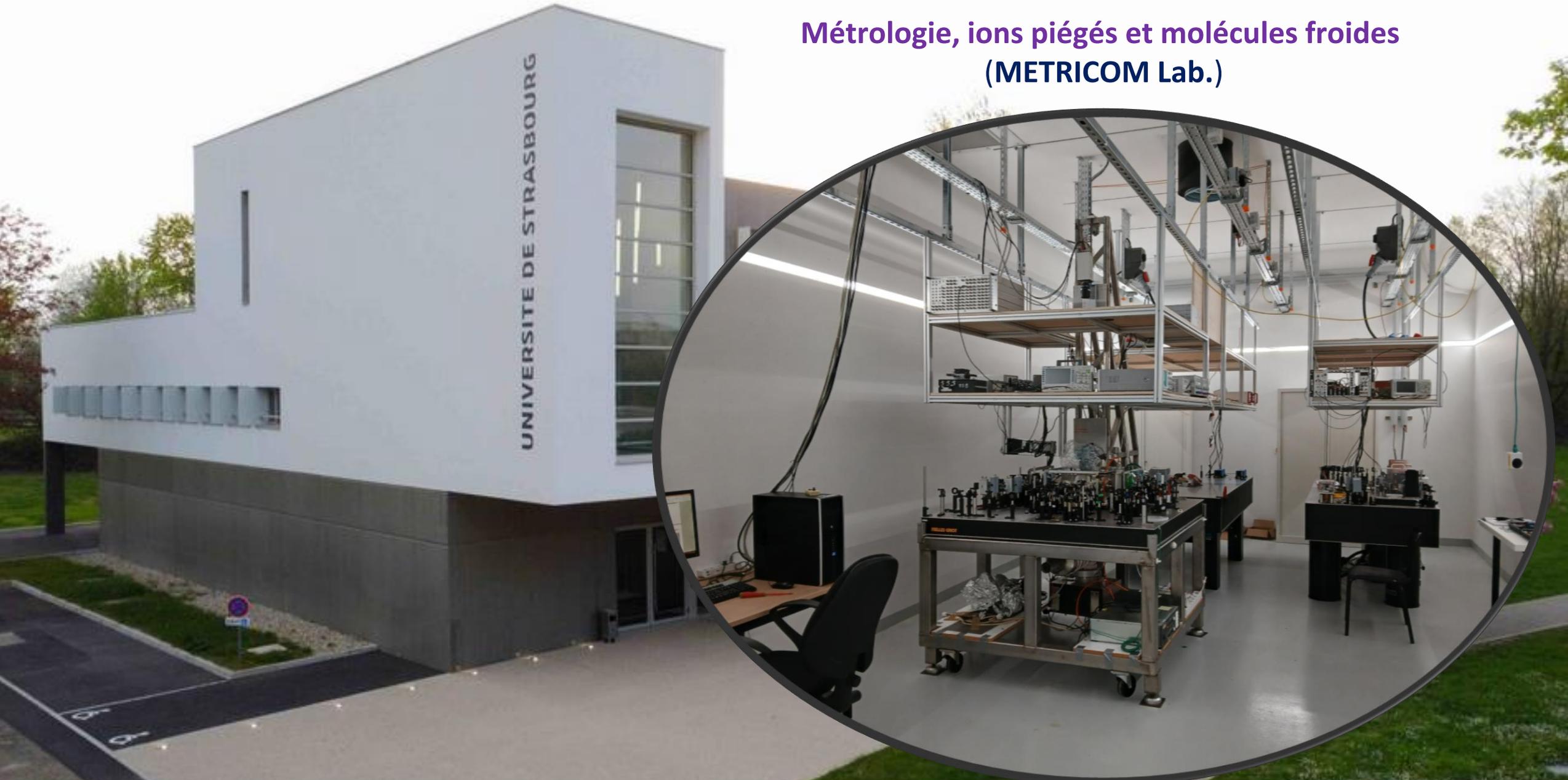
Centre Européen de Sciences Quantiques

Institut de Science et d'Ingénierie Supramoléculaires

Université de Strasbourg, CNRS

# Centre Européen de Sciences Quantiques

Métrieologie, ions piégés et molécules froides  
(METRICOM Lab.)



# Des ions, pourquoi ?

- Peuvent être piégés pendant plusieurs jours (indépendamment de leur structure interne) !

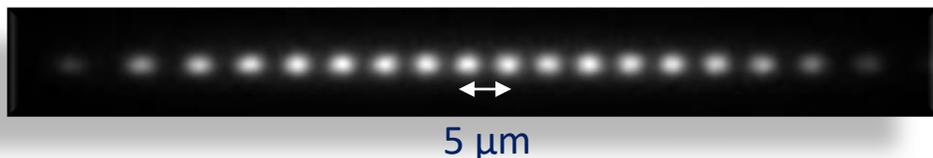
- Certains ions peuvent être refroidis par laser ( $\mu\text{K}$ )

➔ Un système très bien contrôlé

➔ Spectroscopie à très haute résolution

➔ Très bons qubits

Chaîne d'ions

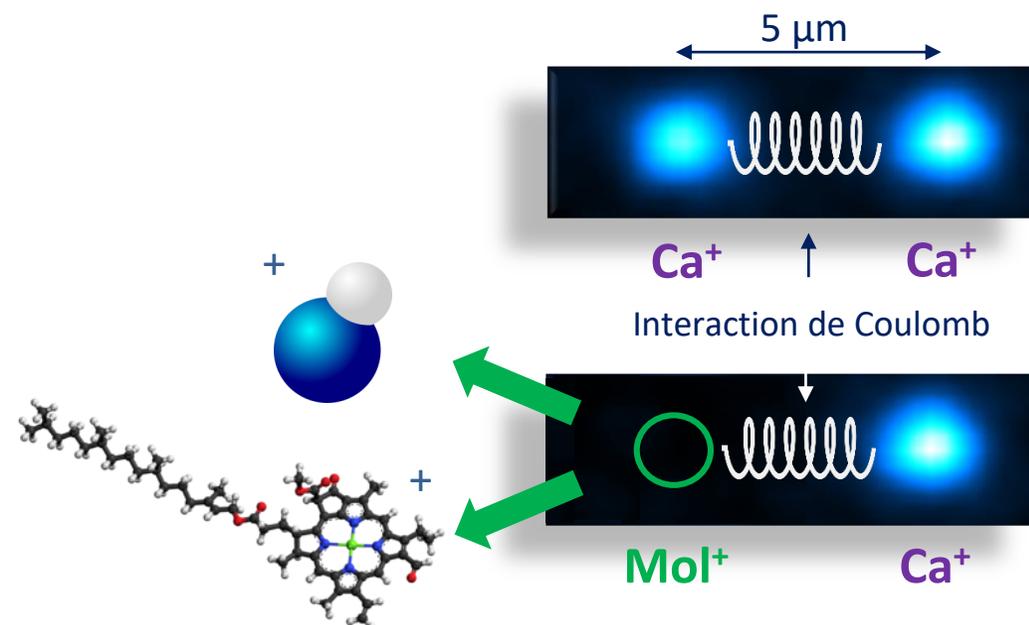


- Refroidissement « sympathique » d'ions moléculaires

➔ Atteindre le même degré de contrôle sur des molécules variées !



Piège de Paul sous vide



# Des ions moléculaires, pourquoi ?

- Une structure en énergie interne très riche:
  - ➡ Transitions sur une large gamme de fréquences (kHz to PHz)
  - ➡ Transitions avec des temps de coherence excellents

- Calcul quantique et simulation quantique

- Spectroscopie de très haute précision

Connaissance précise des systèmes moléculaires

Standards de fréquences, horloges moléculaires

Détermination de constantes fondamentales

L. Hilico (demain)

**Tests de physique fondamentale** ➡ Electron EDM

Violation de la parité dans les molécules chirales

M. Manceau P12

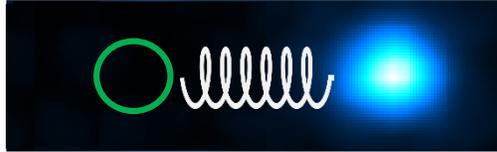
**Variations spatio-temporelles des constantes fondamentales**

M.N. Ngo P14

**Test du principe de superposition**

...

# Spectroscopie par effet de recul



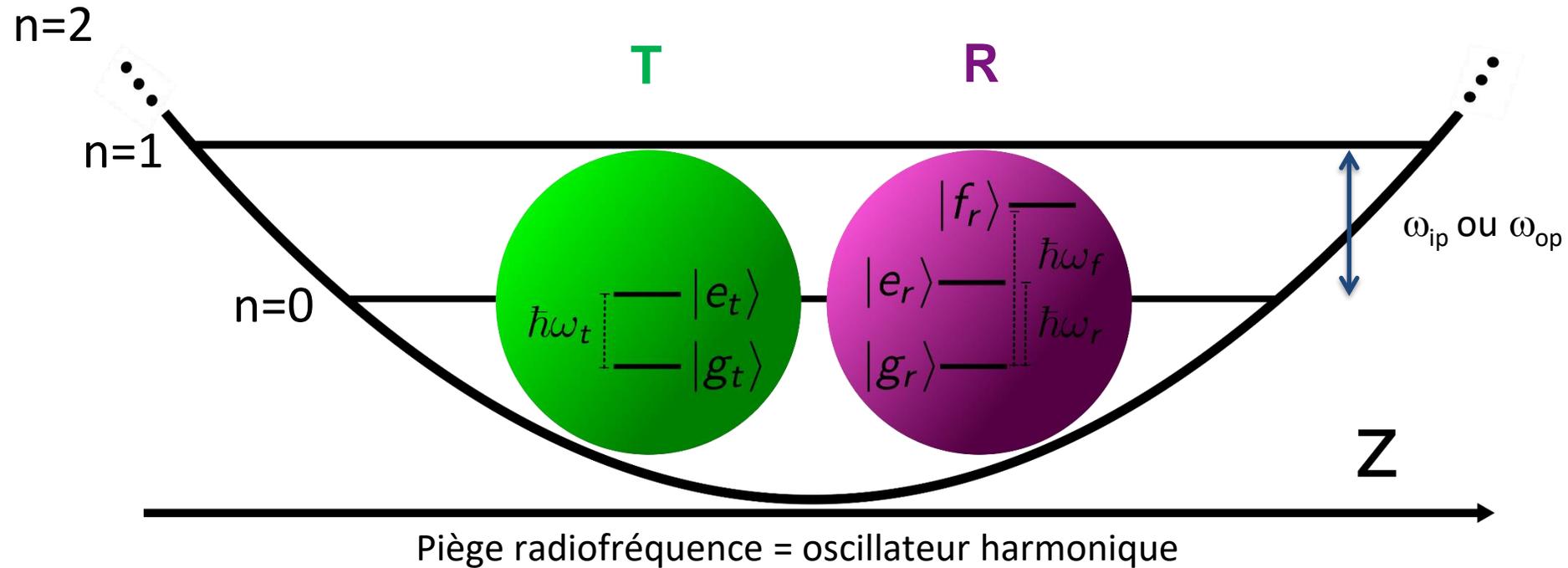
Spectroscopie par la mesure du recul associé à l'absorption ou à l'émission d'un ou de plusieurs photons

## Une extension de la spectroscopie par logique quantique

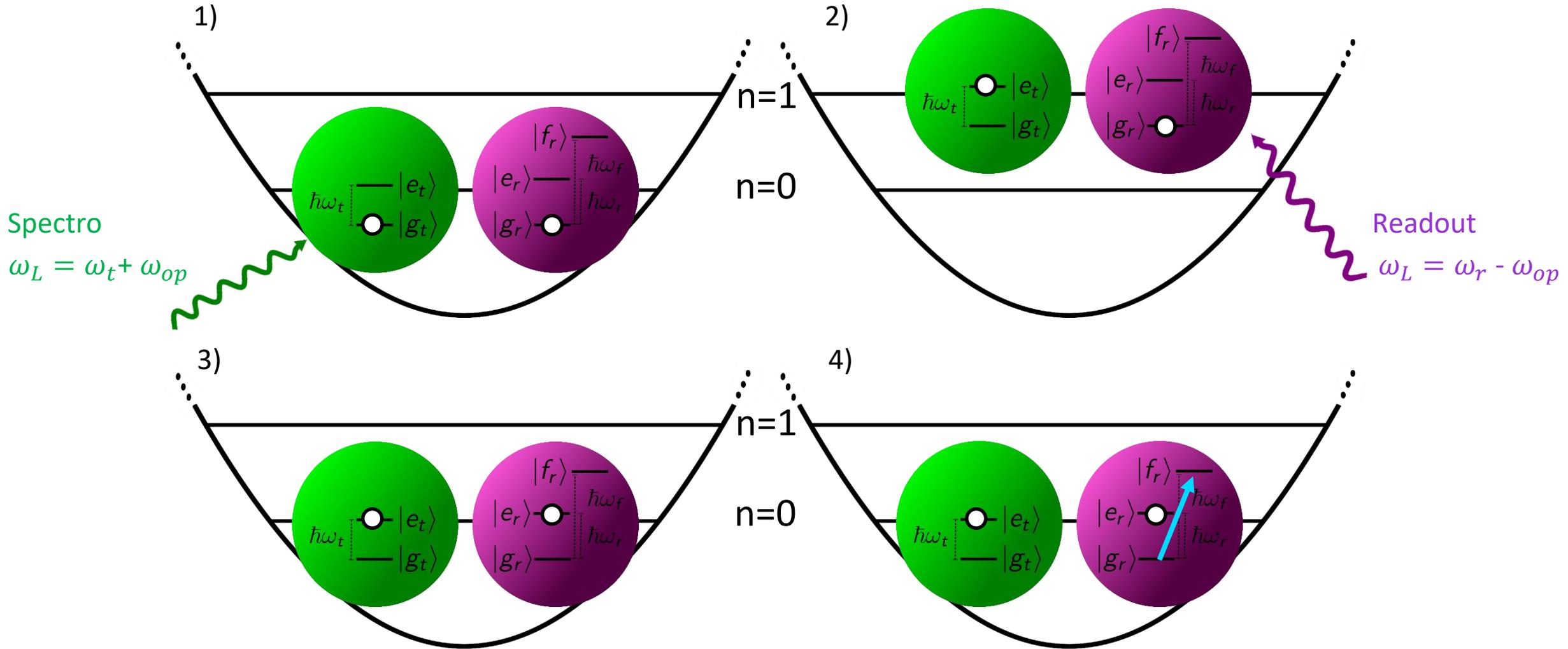
P. O. Schmidt & al. Science 309, 749 (2005)

## Spectroscopy Using Quantum Logic

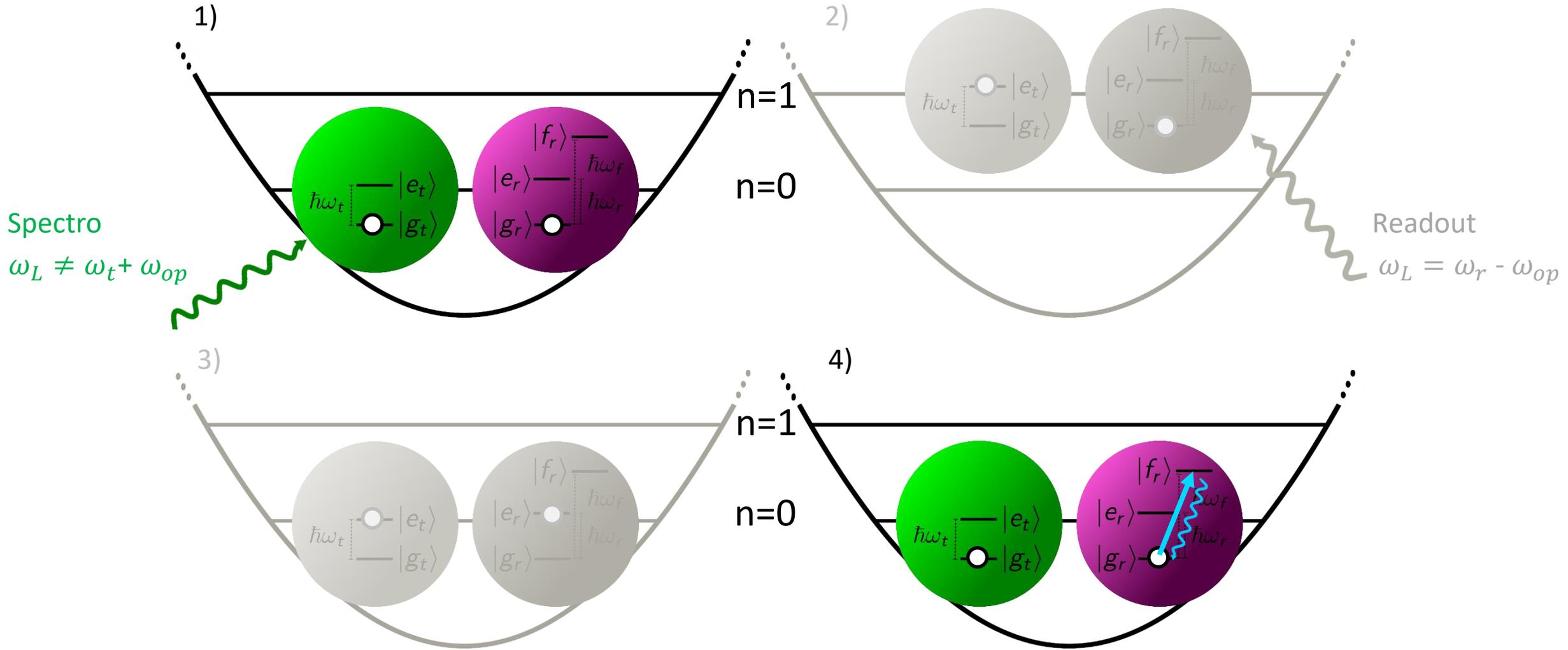
P. O. Schmidt,\*† T. Rosenband, C. Langer, W. M. Itano, J. C. Bergquist, D. J. Wineland



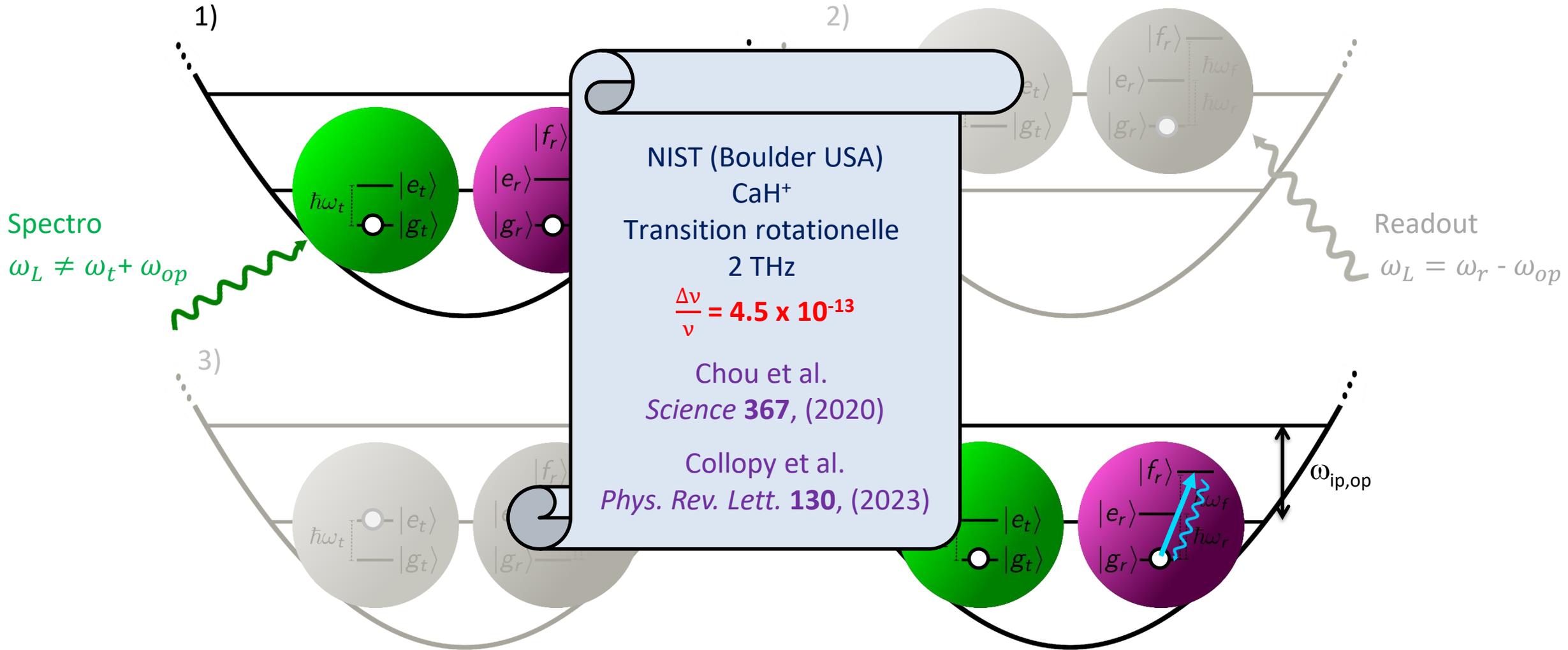
# Spectroscopie par effet de recul



# Spectroscopie par effet de recul



# Spectroscopie par effet de recul



= « Mapping » de l'état interne de l'ion cible (target/molécule) sur l'ion de lecture (readout)

**Condition :  $\omega_{ip,op} \gg \Gamma_t, \Gamma_L \Leftrightarrow$  Il faut résoudre les bandes latérales (mvt dans le piège)**

# Spectroscopie par effet de recul

La condition:  $\omega_{ip,op} \gg \Gamma_t, \Gamma_L$  est très limitante:

1) Pour des ions de masses similaires M:

$$\omega_{ip,op} \propto \frac{1}{\sqrt{M}} \quad \longrightarrow \quad \omega_{ip,op} \text{ très petit pour des molécules lourdes (1kHz-100kHz)}$$

2) Le couplage entre états de l'oscillateur harmonique adjacents:

$$\Omega \propto \eta \propto \frac{1}{\sqrt{\omega_{ip,op}}} \quad \longrightarrow \quad \omega_{ip,op} \text{ petit permet une spectroscopie plus sensible}$$

3) Une largeur de raie laser  $\Gamma_L$  importante facilite la recherche initiale d'une transition moléculaire

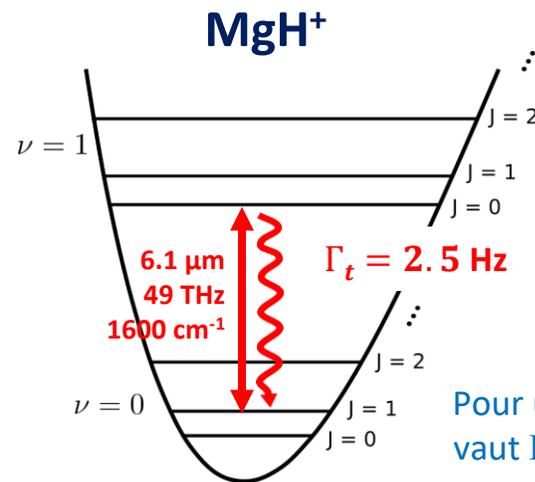
Si  $\omega_{ip,op} \ll \Gamma_L$  or  $\Gamma_t$

↓

Bandes latérales ne sont plus résolues

↓

Transfert/Chauffage incoherent



Transition connue à  $\pm 1.5\text{GHz}$ ...

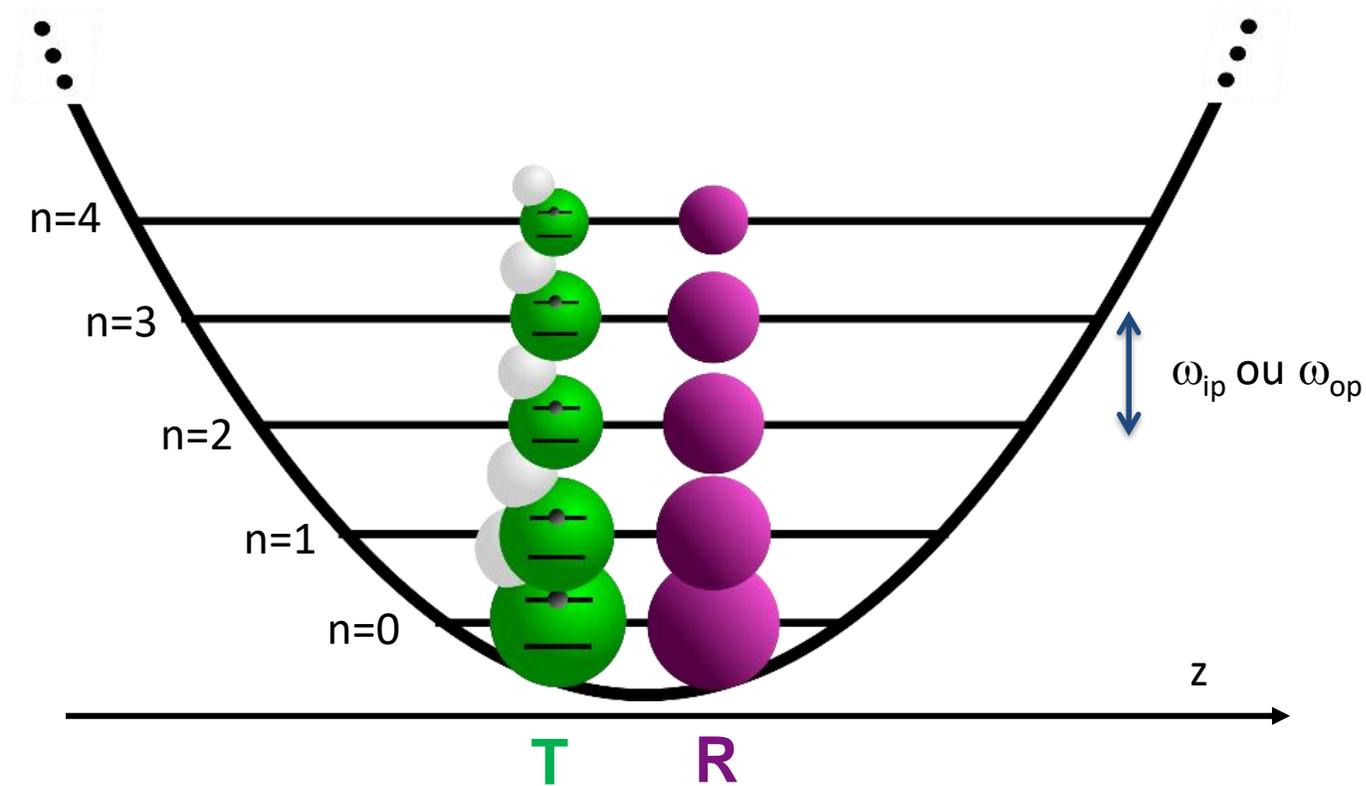
3GHz/100kHz = 30 000 points de mesure...

Pour une recherche initiale, mieux vaut  $\Gamma_L$  entre 10 MHz – 1000 MHz

# Spectroscopie par effet de recul

Après l'étape de spectroscopie de l'ion moléculaire, plusieurs états de l'oscillateur harmonique sont peuplés...

$$\omega_{ip,op} \ll \Gamma_L \text{ or } \Gamma_t$$



... le signal détecté sur l'ion de lecture est plus compliqué.

Dynamique décrite par les coeff. d'Einstein A and B

Chauffage induit par le piège

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} P_{|i_r, g_t, n_{ip}, n_{op}\rangle} = & \sum_{s_{ip}, s_{op}} -R_{\text{abs}}(n_{ip}, n_{op}, s_{ip}, s_{op}) P_{|i_r, g_t, n_{ip}, n_{op}\rangle} \\ & + [R_{\text{stim}}(n_{ip}, n_{op}, s_{ip}, s_{op}) \\ & + R_{\text{spon}}(n_{ip}, n_{ip}, s_{ip}, s_{op})] P_{|i_r, e_t, (n_{ip}+s_{ip}), (n_{op}+s_{op})\rangle} \\ & - (R_{H,ip} + R_{H,op}) P_{|i_r, g_t, n_{ip}, n_{op}\rangle} \\ & + R_{H,ip} P_{|i_r, g_t, (n_{ip}-1), n_{op}\rangle} \\ & + R_{H,op} P_{|i_r, g_t, n_{ip}, (n_{op}-1)\rangle} \end{aligned}$$

Dynamique décrite par les coeff. d'Einstein A and B

Chauffage induit par le piège

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} P_{|i_r, e_t, n_{ip}, n_{op}\rangle} = & \sum_{s_{ip}, s_{op}} -[R_{\text{stim}}(n_{ip} - s_{ip}, n_{op} - s_{op}, s_{ip}, s_{op}) \\ & + R_{\text{spon}}(n_{ip} - s_{ip}, n_{op} - s_{op}, s_{ip}, s_{op})] P_{|i_r, e_t, n_{ip}, n_{op}\rangle} \\ & + R_{\text{abs}}(n_{ip} - s_{ip}, n_{op} - s_{op}, s_{ip}, s_{op}) P_{|i_r, g_t, (n_{ip}-s_{ip}), (n_{op}-s_{op})\rangle} \\ & - (R_{H,ip} + R_{H,op}) P_{|i_r, e_t, n_{ip}, n_{op}\rangle} \\ & + R_{H,ip} P_{|i_r, e_t, (n_{ip}-1), n_{op}\rangle} \\ & + R_{H,op} P_{|i_r, e_t, n_{ip}, (n_{op}-1)\rangle}. \end{aligned}$$

Bases des états de l'OH:  $n_{ip} = 0 - 19$  and  $n_{op} = 0 - 19$

Dynamique décrite par les coeff. d'Einstein A and B

Chauffage induit par le piège

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} P_{|i_r, g_t, n_{ip}, n_{op}\rangle} = & \sum_{s_{ip}, s_{op}} -R_{\text{abs}}(n_{ip}, n_{op}, s_{ip}, s_{op}) P_{|i_r, g_t, n_{ip}, n_{op}\rangle} \\ & + [R_{\text{stim}}(n_{ip}, n_{op}, s_{ip}, s_{op}) \\ & + R_{\text{spon}}(n_{ip}, n_{ip}, s_{ip}, s_{op})] P_{|i_r, e_t, (n_{ip}+s_{ip}), (n_{op}+s_{op})\rangle} \\ & - (R_{H,ip} + R_{H,op}) P_{|i_r, g_t, n_{ip}, n_{op}\rangle} \\ & + R_{H,ip} P_{|i_r, g_t, (n_{ip}-1), n_{op}\rangle} \\ & + R_{H,op} P_{|i_r, g_t, n_{ip}, (n_{op}-1)\rangle} \end{aligned}$$

Dynamique décrite par les coeff. d'Einstein A and B

Chauffage induit par le piège

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} P_{|i_r, e_t, n_{ip}, n_{op}\rangle} = & \sum_{s_{ip}, s_{op}} -[R_{\text{stim}}(n_{ip} - s_{ip}, n_{op} - s_{op}, s_{ip}, s_{op}) \\ & + R_{\text{spon}}(n_{ip} - s_{ip}, n_{op} - s_{op}, s_{ip}, s_{op})] P_{|i_r, e_t, n_{ip}, n_{op}\rangle} \\ & + R_{\text{abs}}(n_{ip} - s_{ip}, n_{op} - s_{op}, s_{ip}, s_{op}) P_{|i_r, g_t, (n_{ip}-s_{ip}), (n_{op}-s_{op})\rangle} \\ & - (R_{H,ip} + R_{H,op}) P_{|i_r, e_t, n_{ip}, n_{op}\rangle} \\ & + R_{H,ip} P_{|i_r, e_t, (n_{ip}-1), n_{op}\rangle} \\ & + R_{H,op} P_{|i_r, e_t, n_{ip}, (n_{op}-1)\rangle}. \end{aligned}$$

+

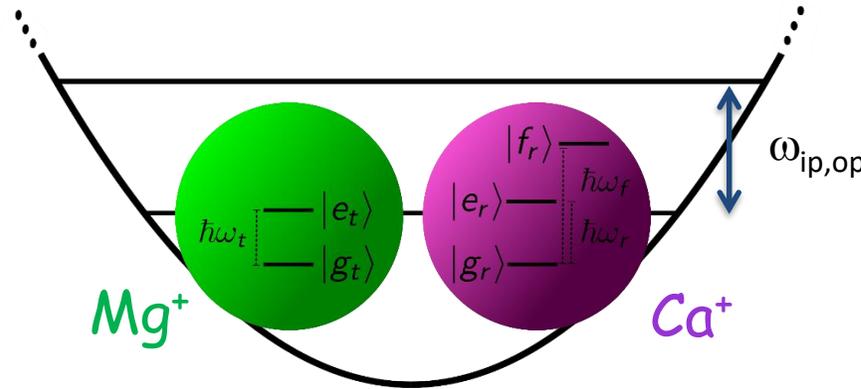
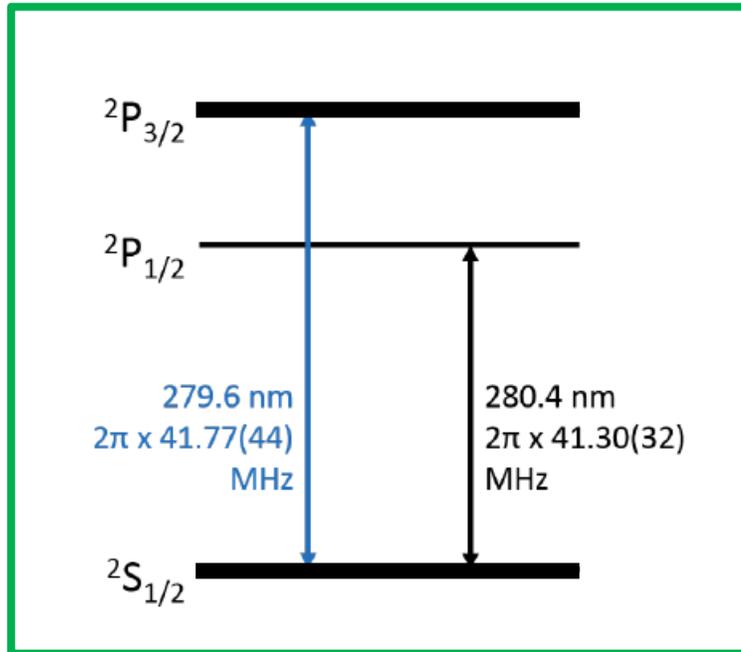
Impulsion laser sur l'ion de lecture

$$P_{|g_r\rangle} = \sum_{n_{ip}, n_{op}, j_t} \sin^2 \left( \Omega_{n_{ip}, n_{op}, s_{ip}=0, s_{op}=-1} \times \frac{\tau_{\text{RSB}}}{2} \right) P_{|g_r, j_t, n_{ip}, n_{op}\rangle}$$

$$\Gamma_t = 2\pi \times 41.8(4) \text{ MHz}$$

$$\Gamma_t \gg \omega_{IP,OP}$$

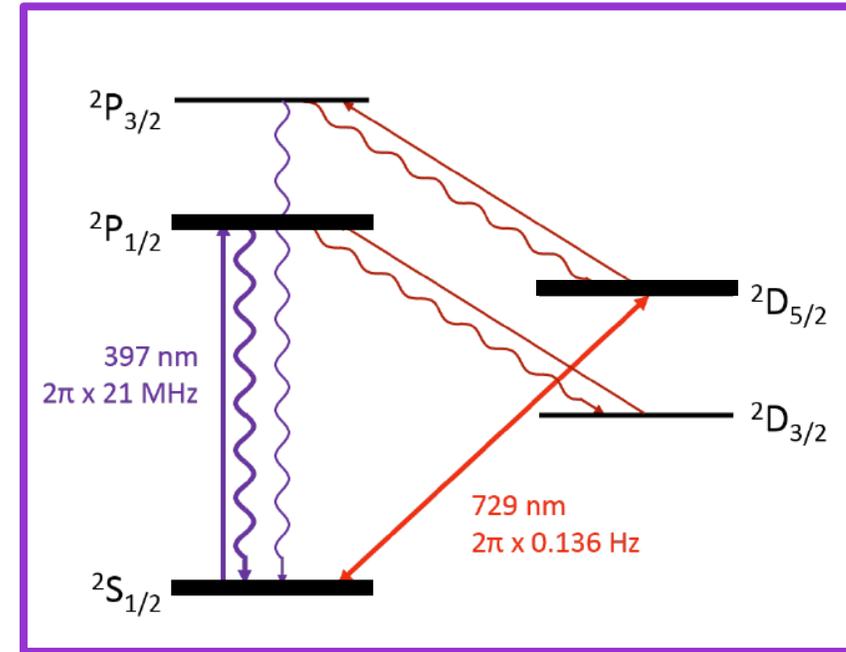
=> **Unresolved sideband transitions (T)**

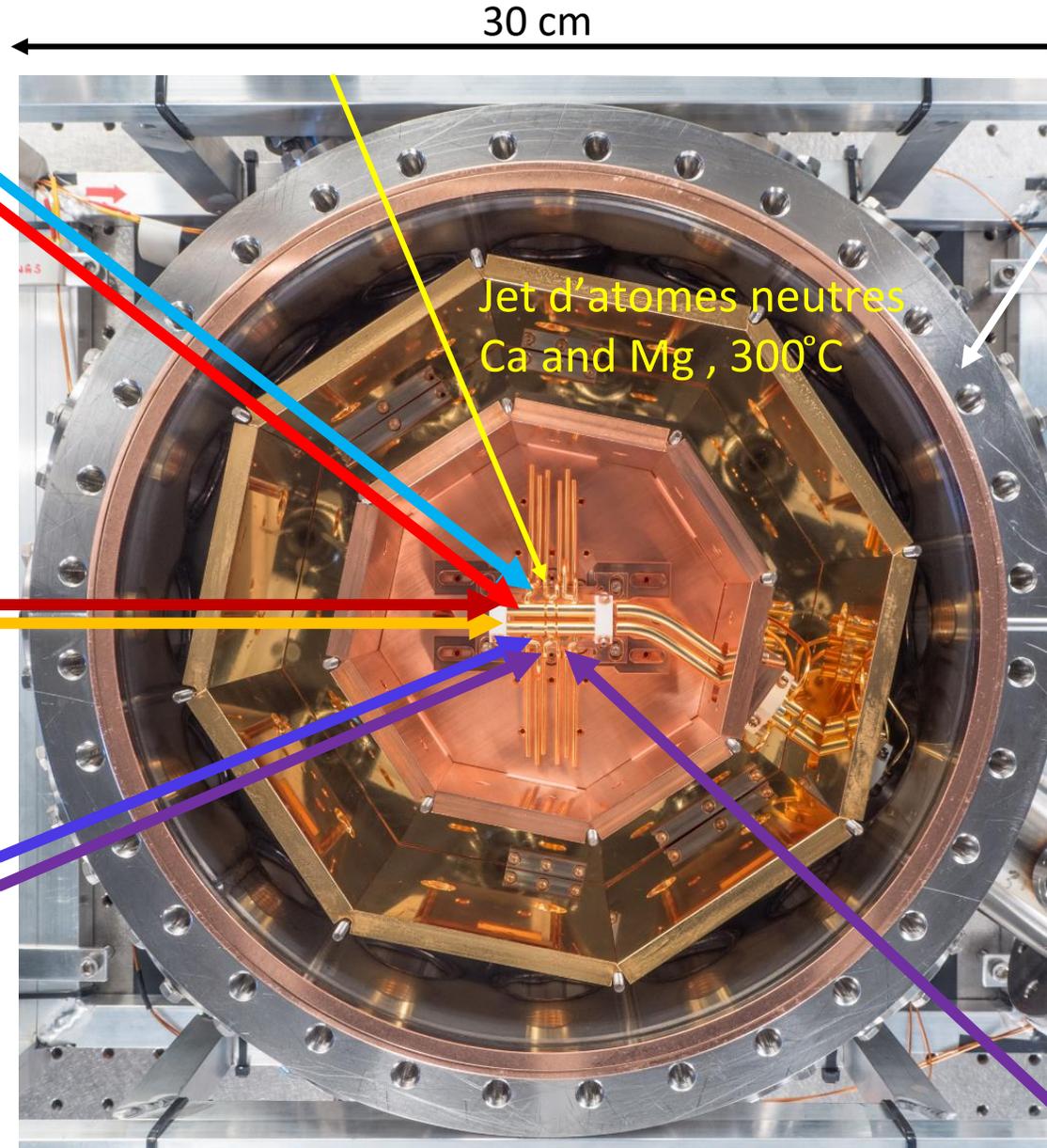


$$\omega_{ip} = 2\pi \times 162.9 \text{ kHz}$$

$$\omega_{op} = 2\pi \times 300.2 \text{ kHz}$$

**Sideband resolved transitions (R)**





Refroidissement  
laser de  $\text{Ca}^+$  :

397 nm,  
866 nm,  
729 nm,  
854 nm

Ionisation de Ca  
à 272 nm  
Ionisation de Mg  
à 285 nm

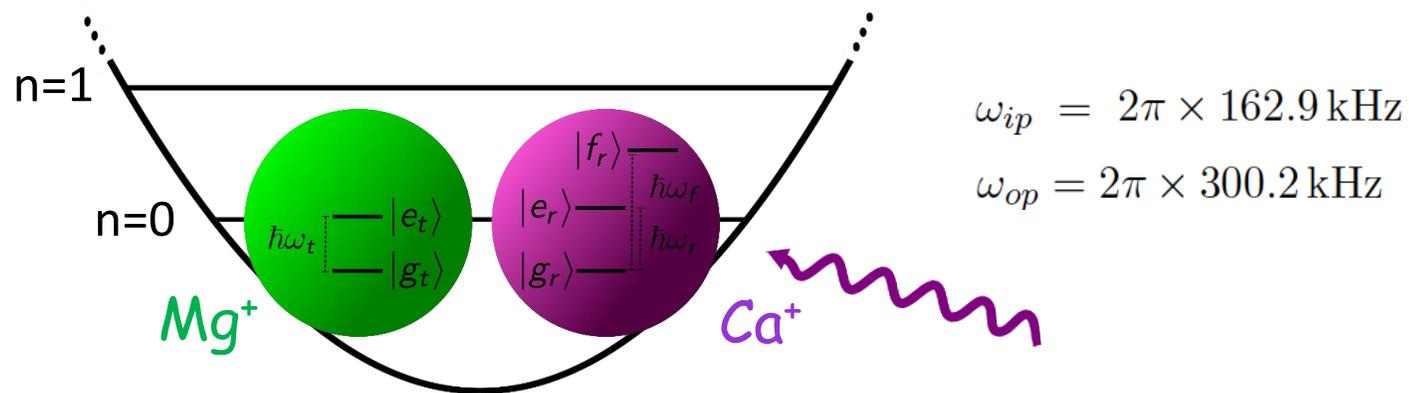
Jet d'atomes neutres  
Ca and Mg , 300°C

Chambre à vide  
 $\sim 10^{-10}$  mbar

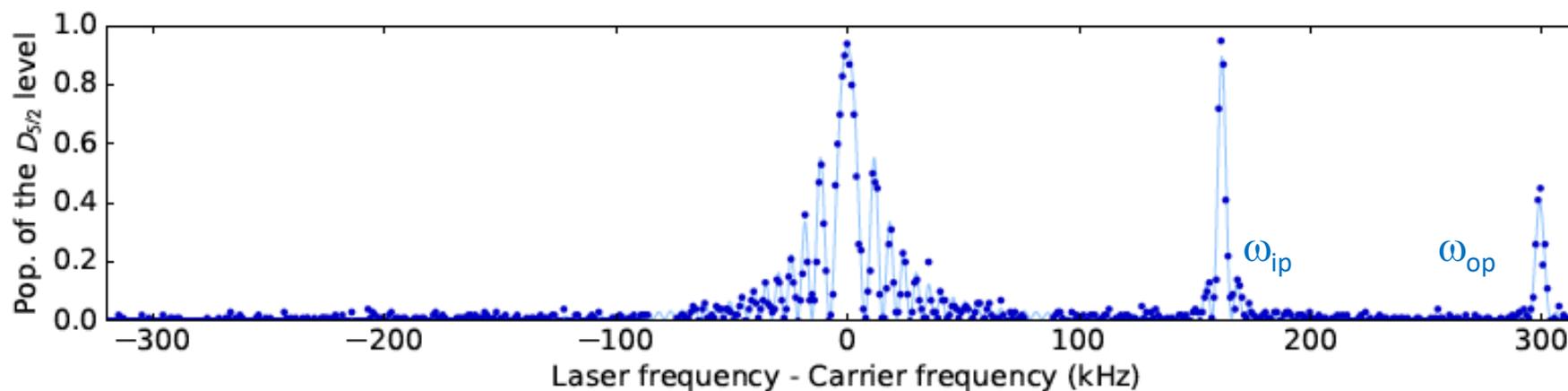
$\text{Atome} \rightarrow \text{Ion}^+ + e^-$



Spectroscopie de  
 $\text{Mg}^+$  à 280 nm

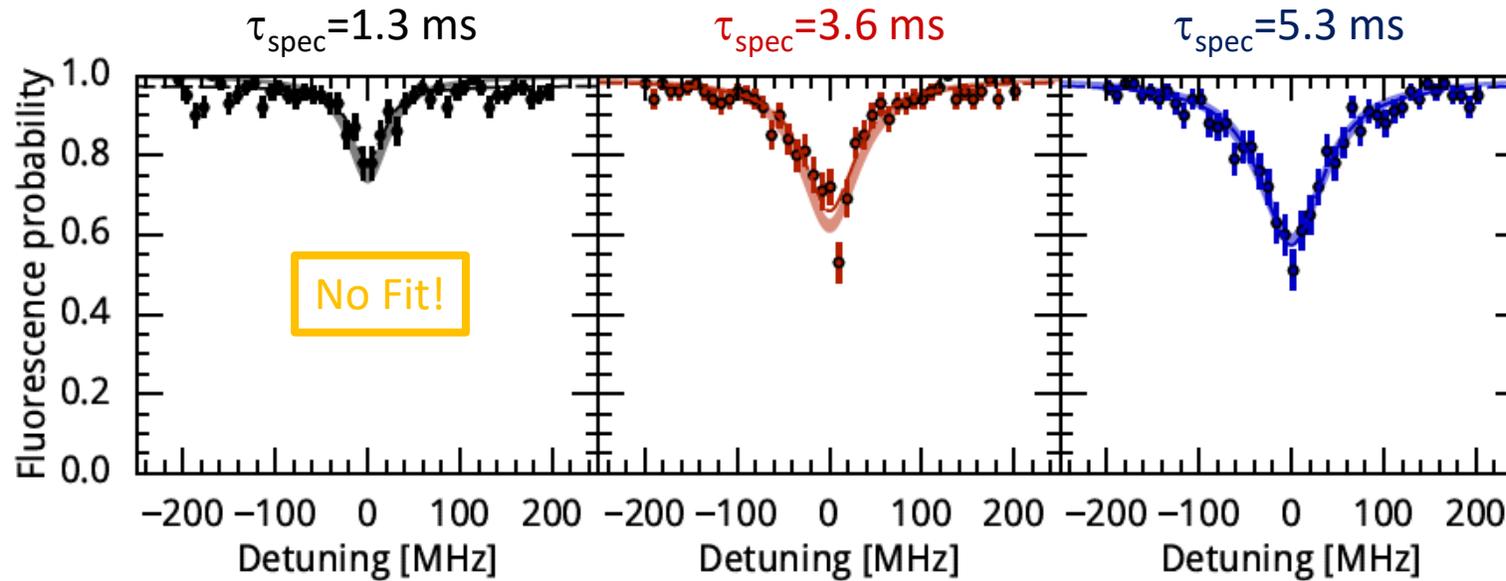
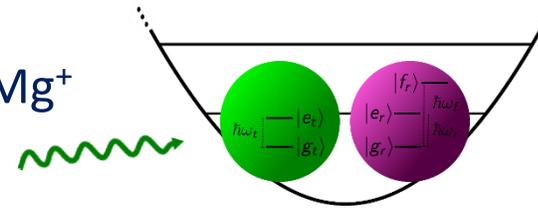


$^{40}\text{Ca}^+ \ ^2S_{1/2} - ^2D_{5/2}$  spectre après refroidissement

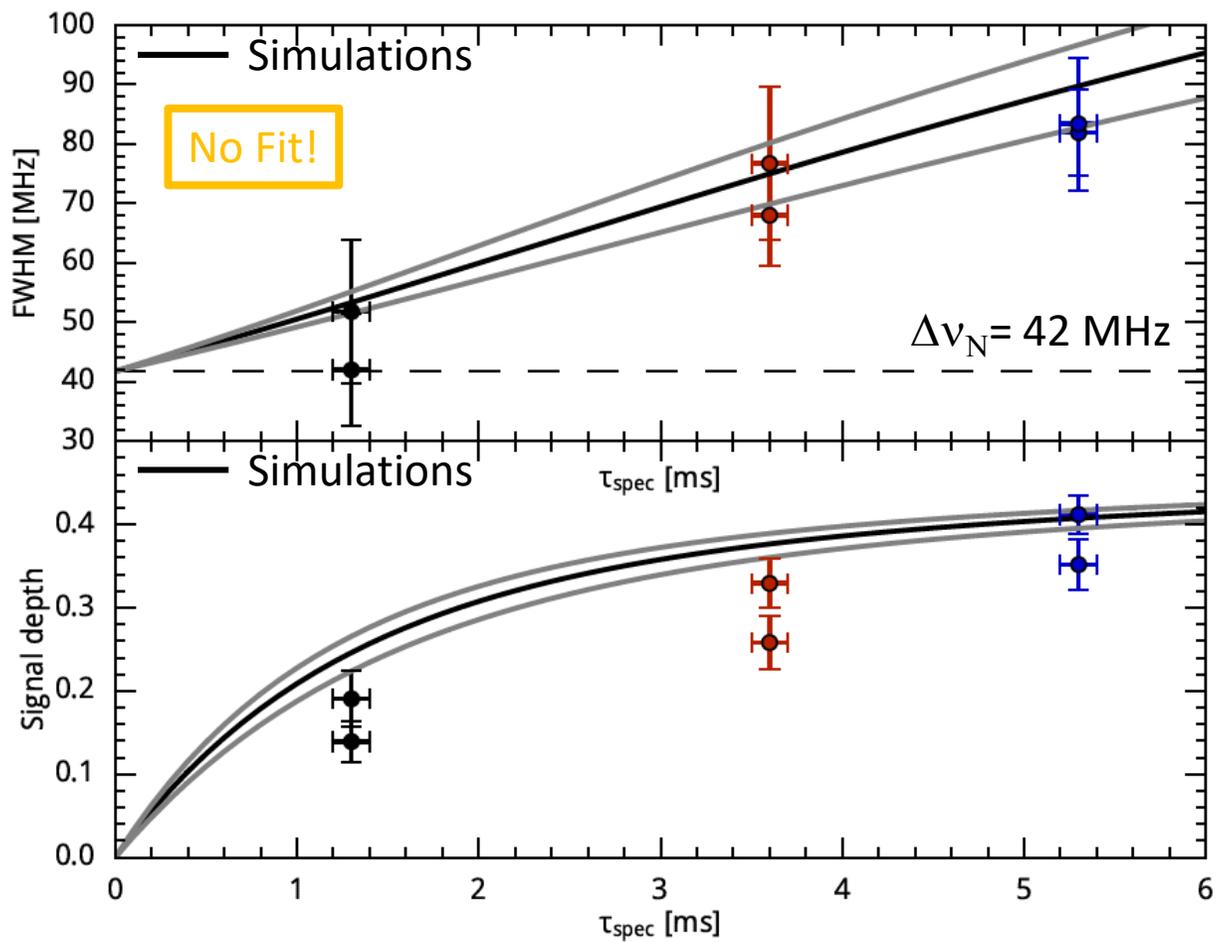
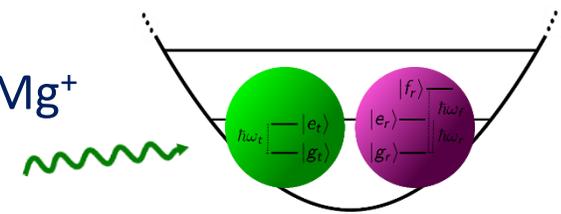


Occupation de l'état fondamental du piège  $\approx 99\%$

Démonstration avec  $^{40}\text{Ca}^+ - ^{24}\text{Mg}^+$



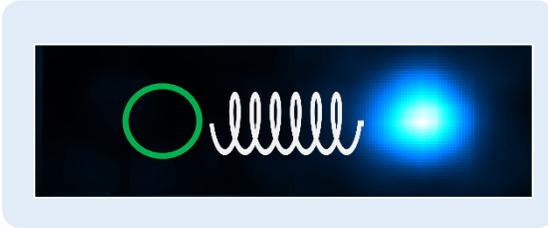
Démonstration avec  $^{40}\text{Ca}^+ - ^{24}\text{Mg}^+$



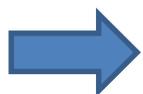
- Elargissement du signal de spectroscopie avec la durée d'impulsion !
- La molécule n'a pas besoin d'être initialement dans l'état de plus basse énergie !
- En principe, permet la détection de l'absorption/émission d'un photon unique !

# Conclusion et perspectives

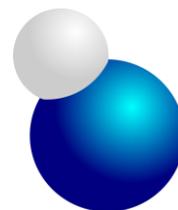
- Les ions moléculaires piégés et refroidis de façon sympathique sont très prometteurs pour la spectroscopie de très haute précision
- La spectroscopie de recul peut être utilisée à la fois pour la manipulation cohérente d'états ro-vibrationnels et pour la recherche initiale de transitions



- **Perspectives à Strasbourg: étendre cette méthode**



spectroscopie vibrationnelle et rotationnelle de **SrH<sup>+</sup>**



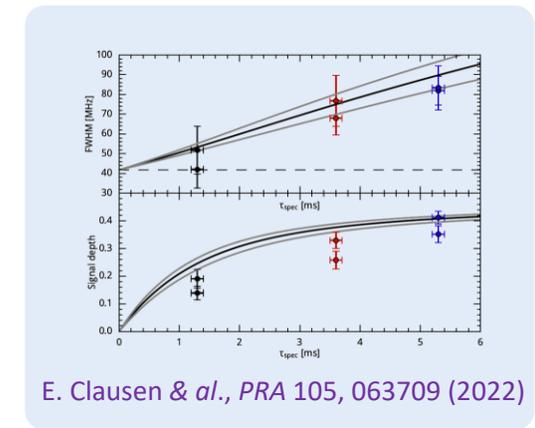
**Test de la variation temporelle de  $m_e/m_p$**



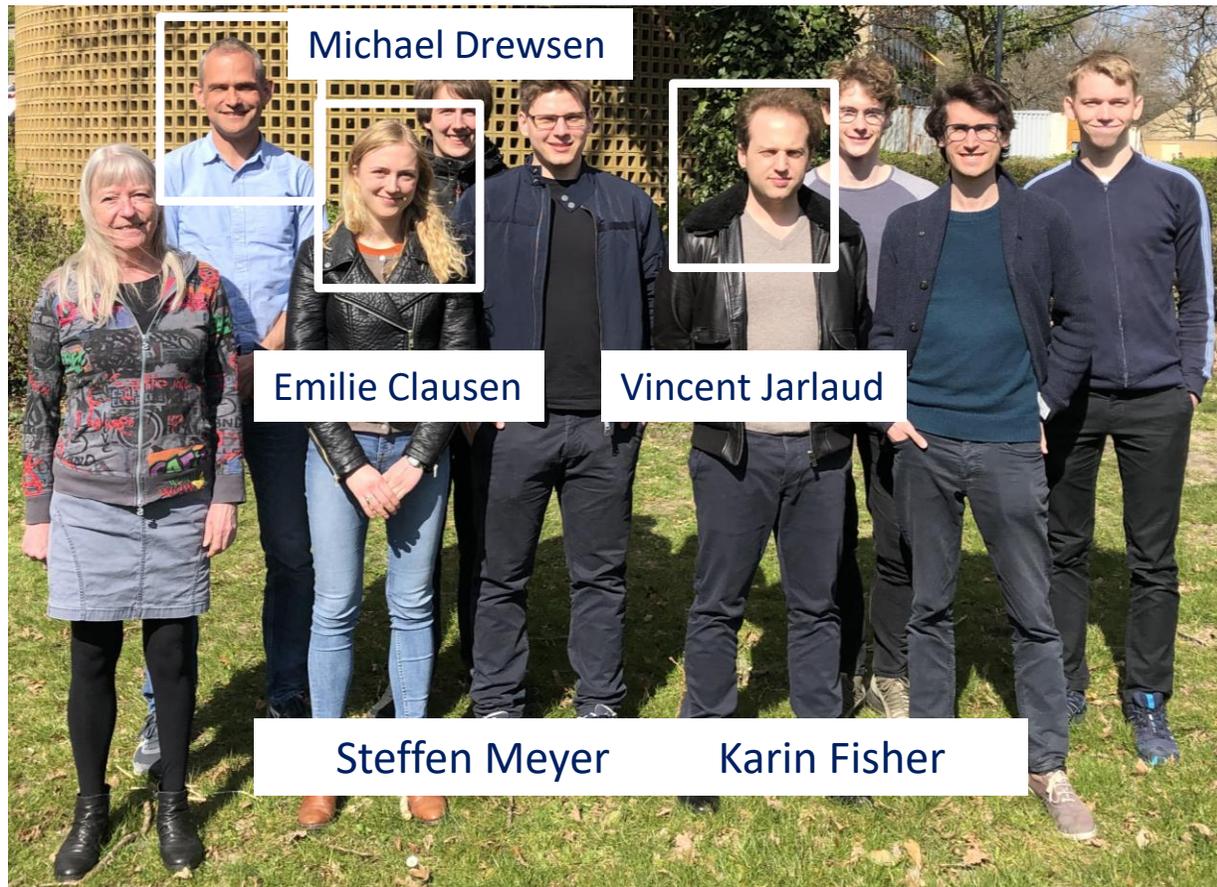
à des systèmes complexes **Big Mol<sup>+</sup>**

Size (10 - 100 Å)  
Mass (100 - 1000 amu)  
Organo-metallic complex

**Test du principe de superposition**



# Thank you for your attention!



Constantijn Karels

Collaborateurs :

Benoît Darquié

Olivier Dulieu

Yann

Michael Drewsen

Mathieu Manceau

Romain Vexiau

Leroy

