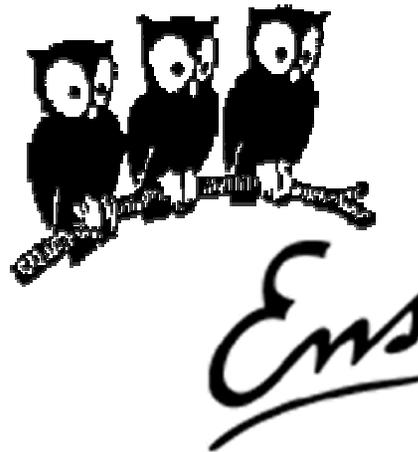


Pompage optique de $l'^3\text{He}$ à forte pression dans un champ magnétique de 1.5 Tesla



Marie Abboud

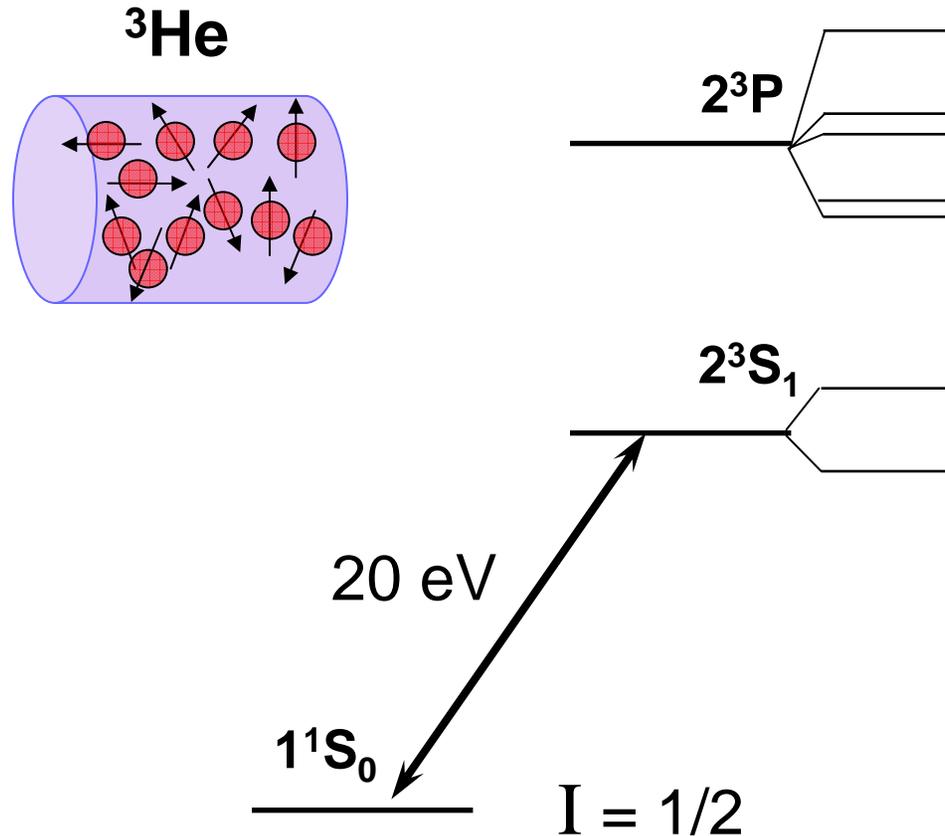
Soutenance de thèse
12 Juillet 2005

Laboratoire Kastler Brossel
Équipe Hélium Polarisé et Fluides Quantiques

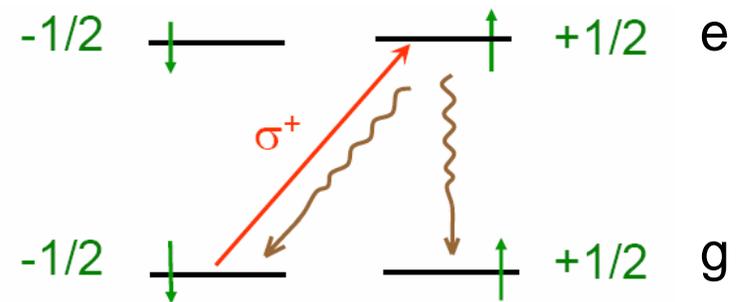
Plan

- Introduction
- Mécanisme du pompage optique à 1.5 Tesla
- Étude expérimentale à 1.5 Tesla
- Conclusion

Pompage optique



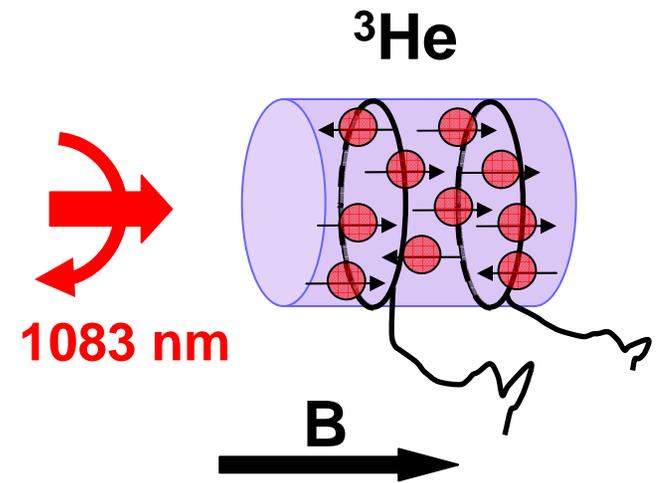
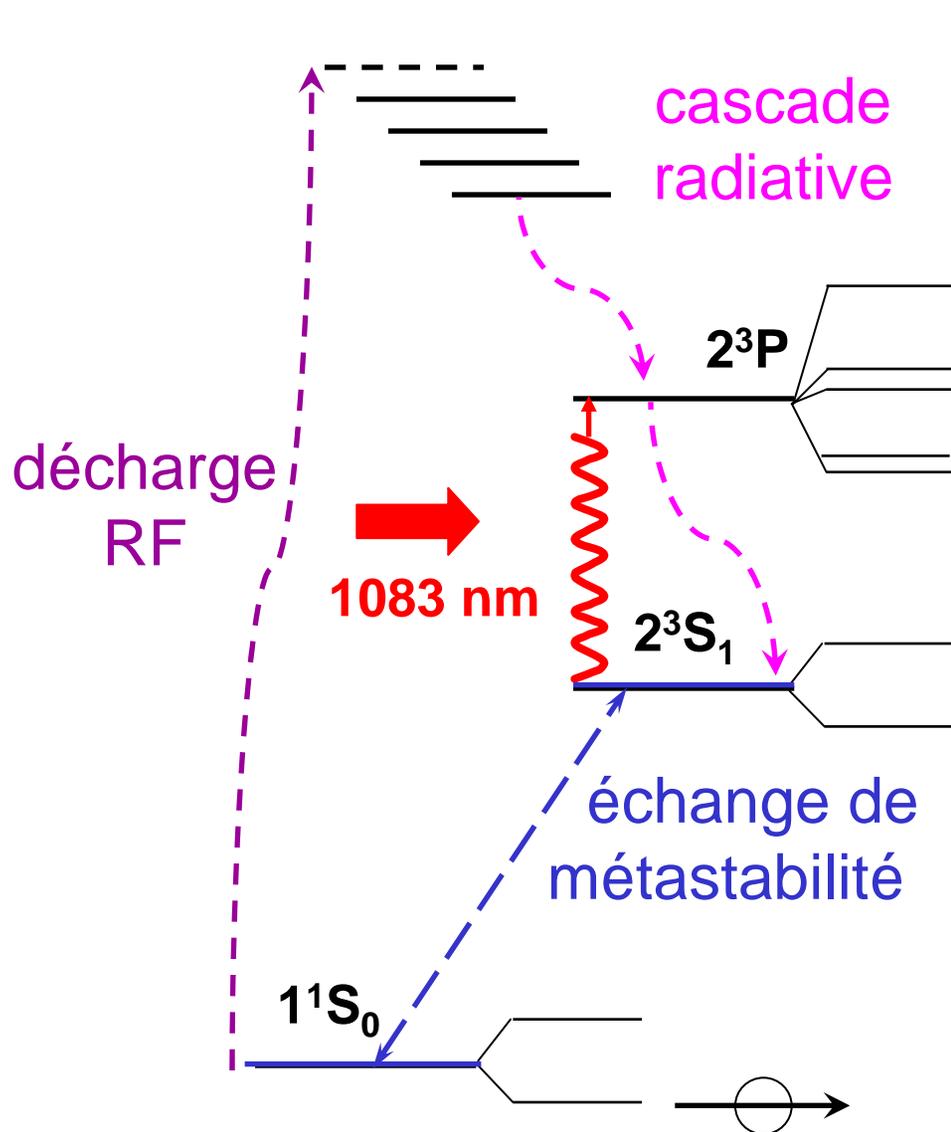
A. Kastler
Prix Nobel 1966



Polarisation

$$M = \frac{N_{\uparrow} - N_{\downarrow}}{N_{\uparrow} + N_{\downarrow}}$$

Pompage optique par échange de métastabilité



$$n_m = 10^{10} - 10^{11} \text{ at/cm}^3$$

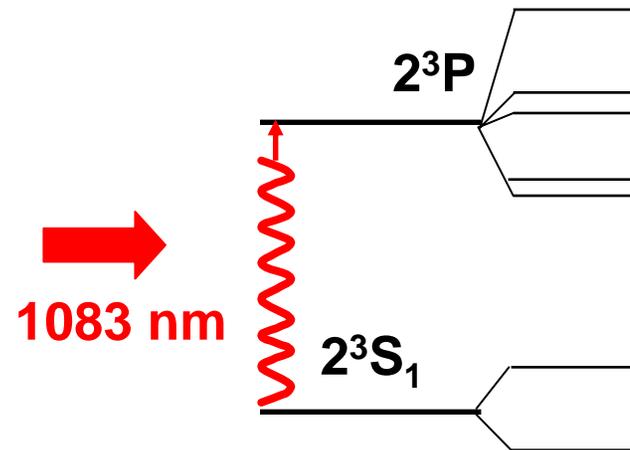
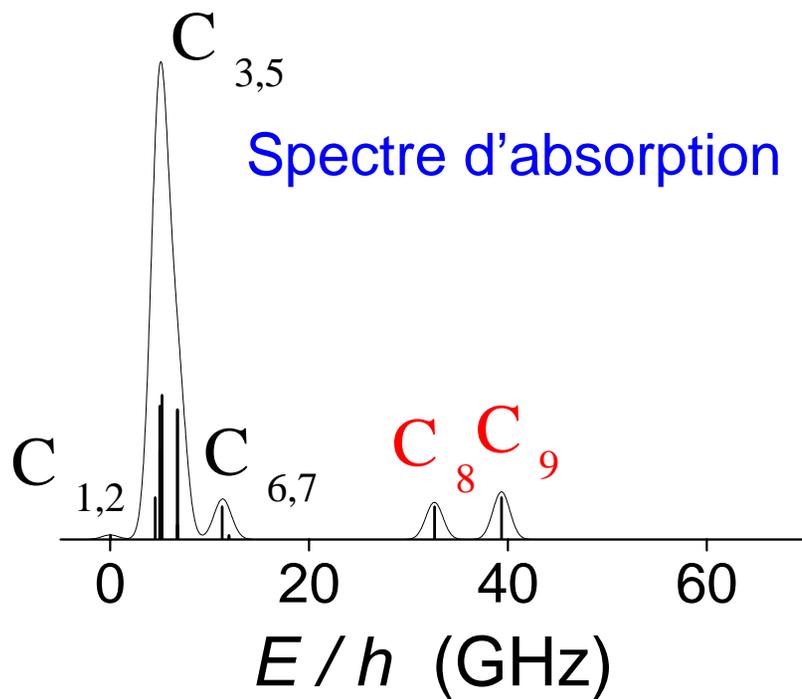
$$n_m / N_g = 10^{-6} \text{ à } 1 \text{ mbar}$$



$$\gamma_e = 3.75 \times 10^6 \text{ s}^{-1}/\text{mbar}$$

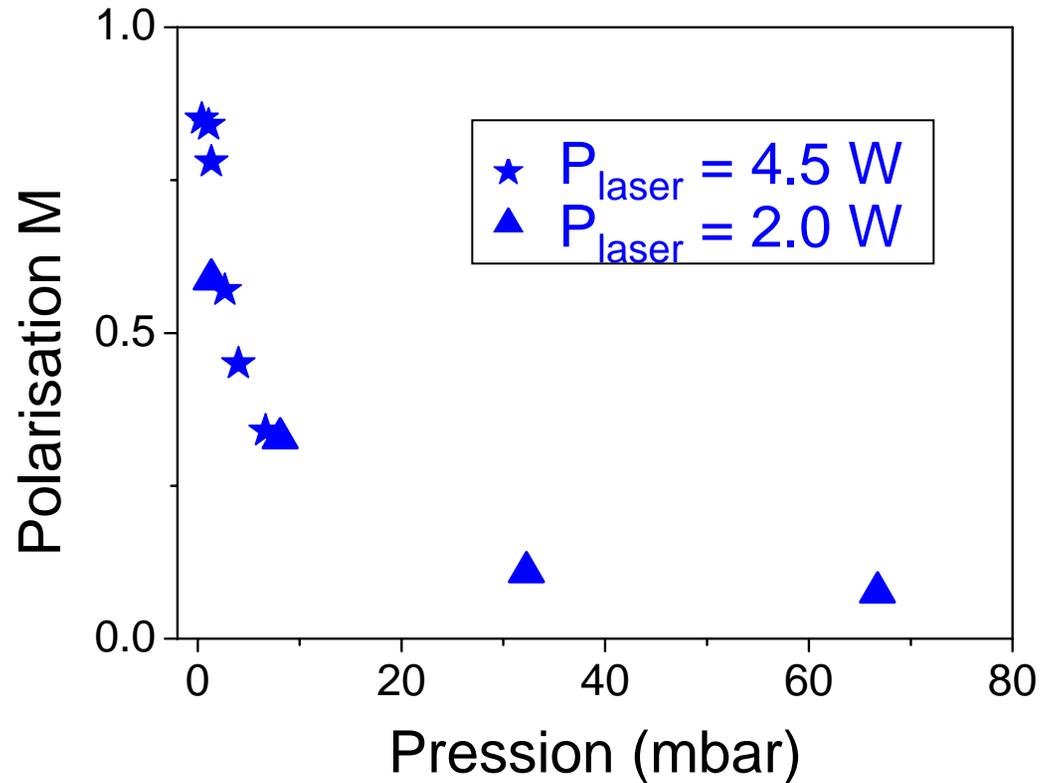
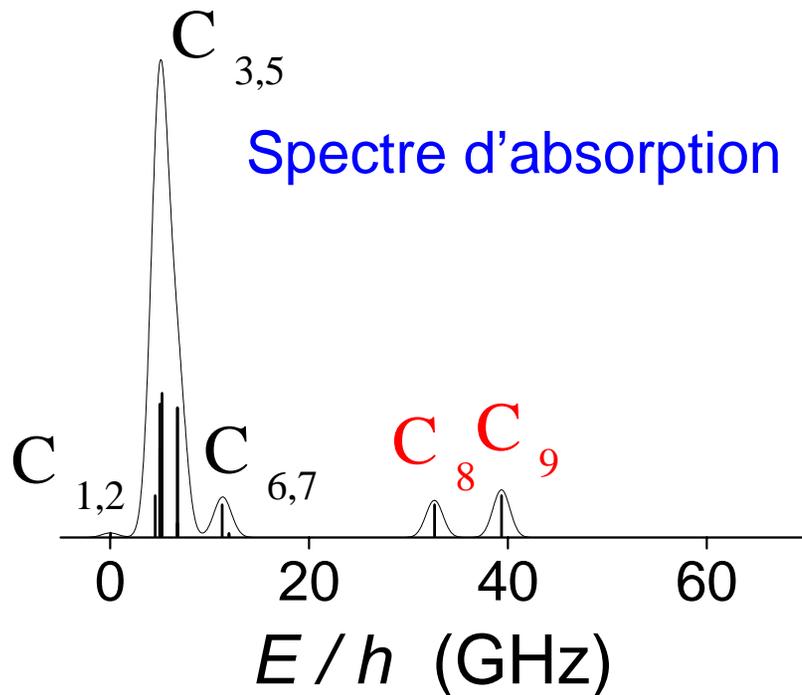
$$\Gamma_e = \gamma_e n_m / N_g \sim 1.53 \text{ s}^{-1}$$

Conditions standard et performances



Champ magnétique $B \sim$ mTesla

Conditions standard et performances



Champ magnétique $B \sim \text{mTesla}$

$M \sim 0.8$

Gaz à pression $P \sim \text{mbar}$

$t_b \sim 20 \text{ s}$

Compression sans perte de polarisation pour les applications *par ex.* IRM des poumons (1:1000)

Facteurs limitant M à pression élevée

- rapport n_m / N_g diminue quand la pression augmente
car n_m limitée par les collisions Penning

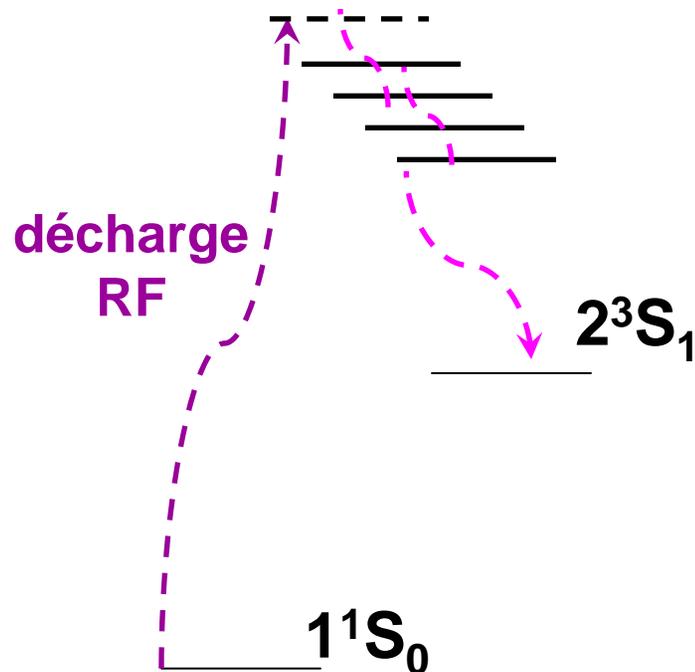


- collision à 3-corps $\text{He}^* + 2\text{He} \rightarrow \text{He}_2^* + \text{He}$
augmente avec la pression
(proportionnel à N_g^2)

Effets bénéfiques d'un champ intense

Expériences: Améliorations des polarisations stationnaires à forte pression en pompant à 0.1 Tesla

par ex. 0.07 → 0.15 à 32 mbar



Fuite de moment cinétique
orientation nucléaire → électronique

e.g. émission de lumière polarisée dans la cascade radiative

DECOUPLAGE HYPERFIN (sauf 2^3S)

Motivations de l'étude

Intérêts d'une étude en champ magnétique intense

- Pratique



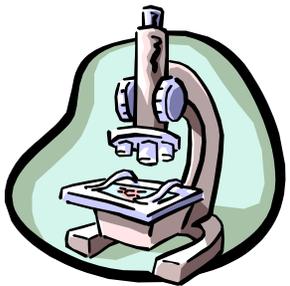
Caractérisation d'un 'nouveau' schéma du pompage optique efficace à forte pression

Compression simplifiée

Champ 1.5 Tesla très répandu

Variation de B? Existence d'un champ optimal pour les performances du pompage optique

- Fondamental



Pompage optique en régime de fort découplage hyperfin

Étude des processus limitant la polarisation à forte pression

Plan

- Introduction
- Mécanisme du pompage optique à 1.5 Tesla
 - Structure atomique de l'hélium-3 à 1.5 Tesla
 - Schémas du pompage optique
 - Échange de métastabilité en champ intense
 - Modèle élémentaire
- Étude expérimentale à 1.5 Tesla
- Conclusion

Effets du champ sur la structure atomique

Calcul des énergies des sous-niveaux 2^3S et 2^3P : $H = H_F + H_{HF} + H_Z$

B = 1.5 Tesla

dans la base découplée $|m_J, m_I\rangle$

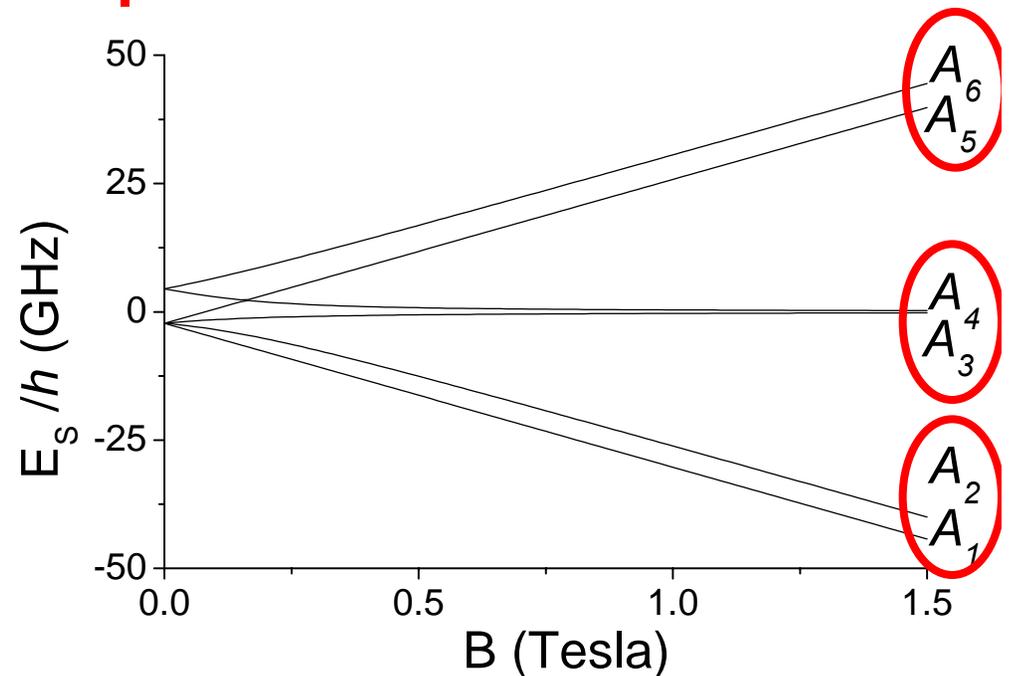
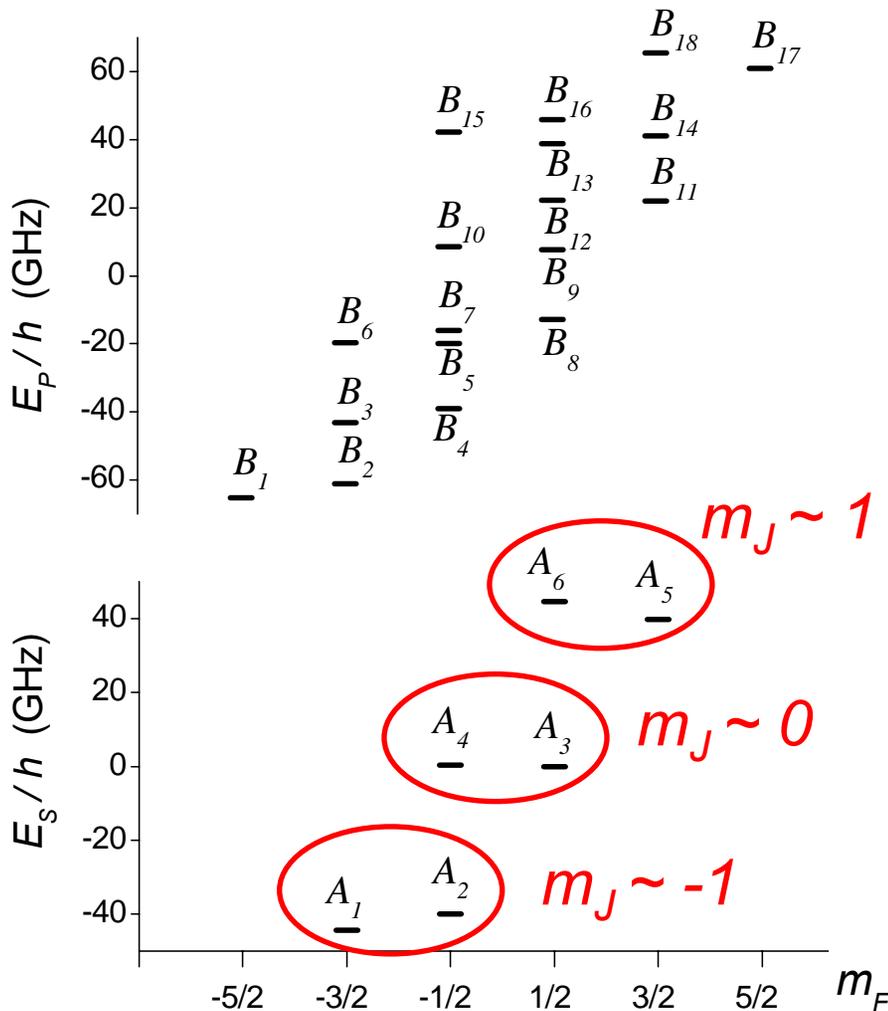
$$A_5 = |1, +\rangle$$

$$A_6 = -\sin \theta_+ |0, +\rangle + \cos \theta_+ |1, -\rangle$$

$$\sin \theta_+ \approx 0.07$$

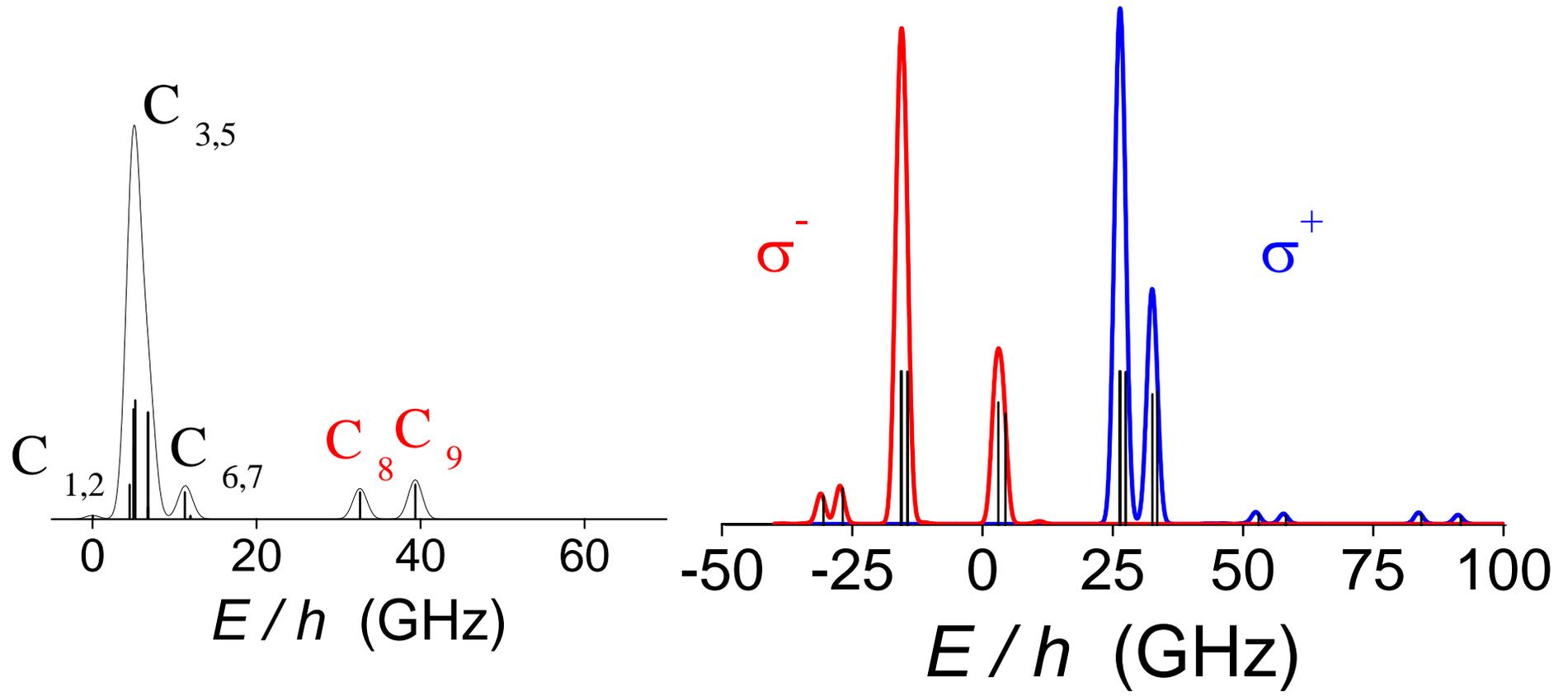
états propres peu mélangés

3 paires de sous-niveaux

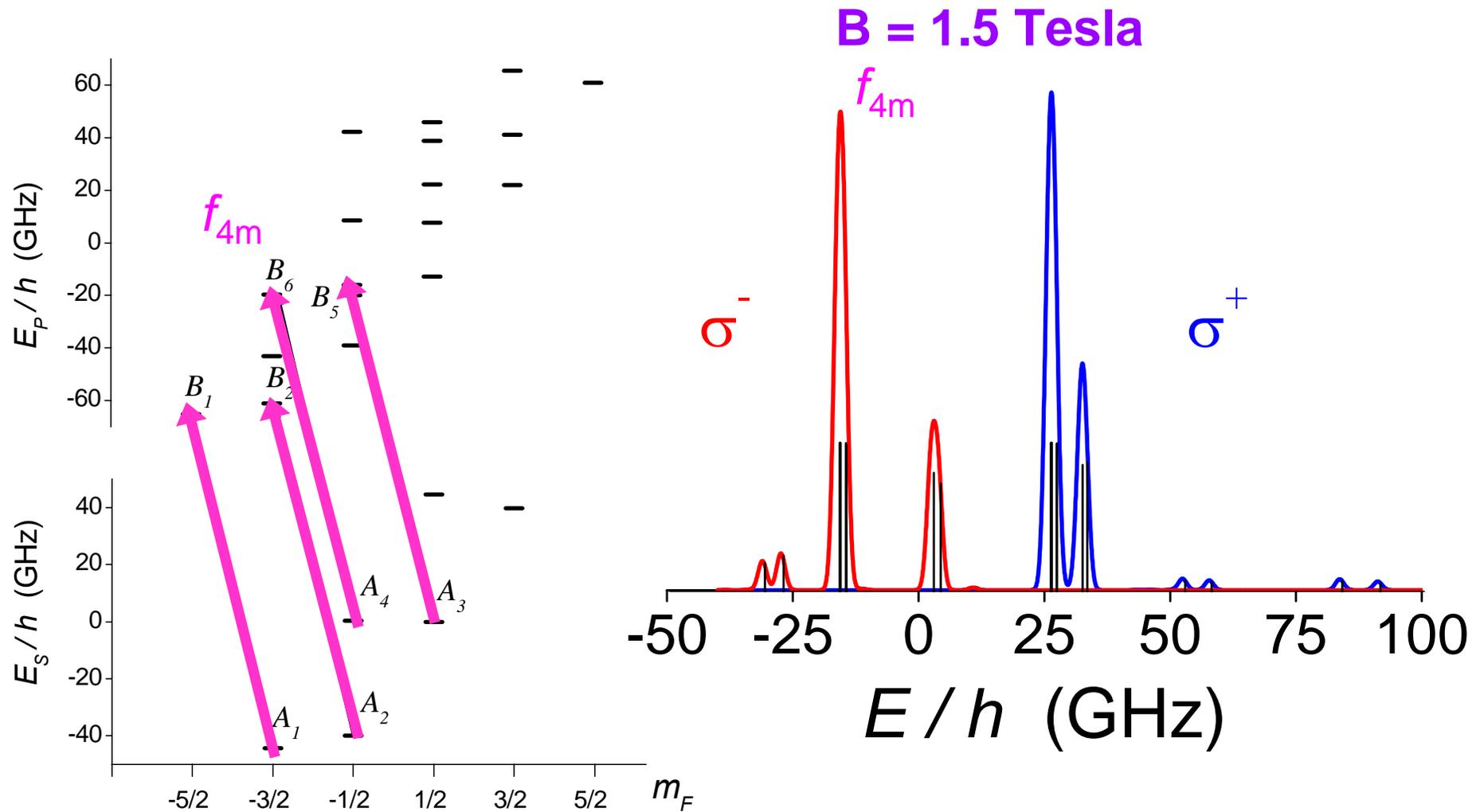


Effets du champ sur le spectre d'absorption

$B = 1.5$ Tesla

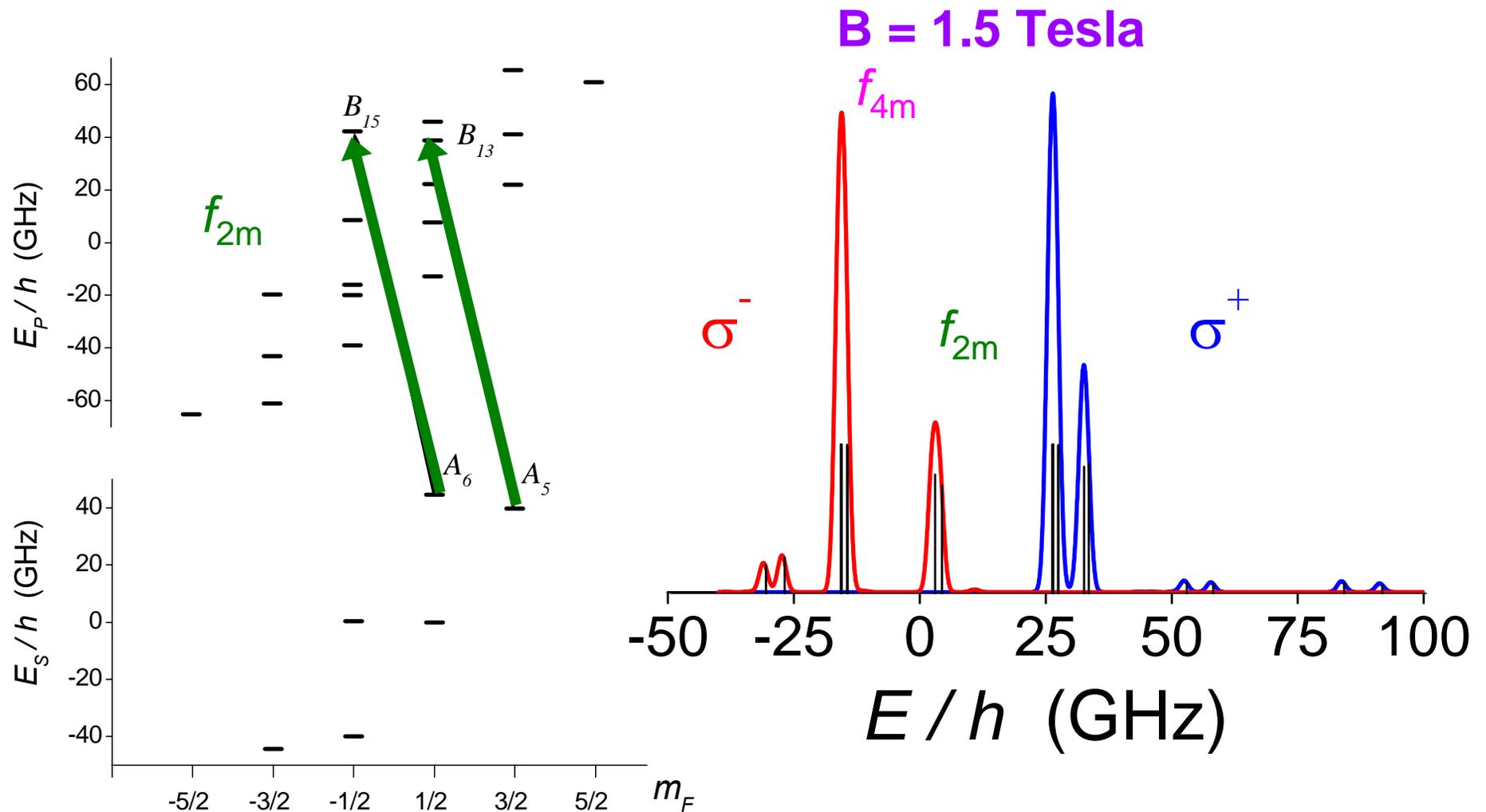


Effets du champ sur le spectre d'absorption



- 4 ou 2 sous-niveaux métastables excités (f_4 ou f_2)
- double sélection: polarisation et fréquence de la lumière vs $B \sim m \text{ Tesla}$

Effets du champ sur le spectre d'absorption



- 4 ou 2 sous-niveaux métastables excités (f_4 ou f_2)
- double sélection: polarisation et fréquence de la lumière vs $B \sim m\text{Tesla}$

Modélisation du pompage: principe

1. Échange de métastabilité (γ_e)



2. Interaction atome-laser ($\gamma_p, \gamma_{\text{rad}}$)



3. Processus de relaxation

états 2^3S_1 et 2^3P

pression élevée: redistribution dans 2^3P (γ_{rel})

Populations des sous-niveaux du 2^3S et du 2^3P

variables rapides

$$M^* = \langle I_z \rangle$$

polarisation

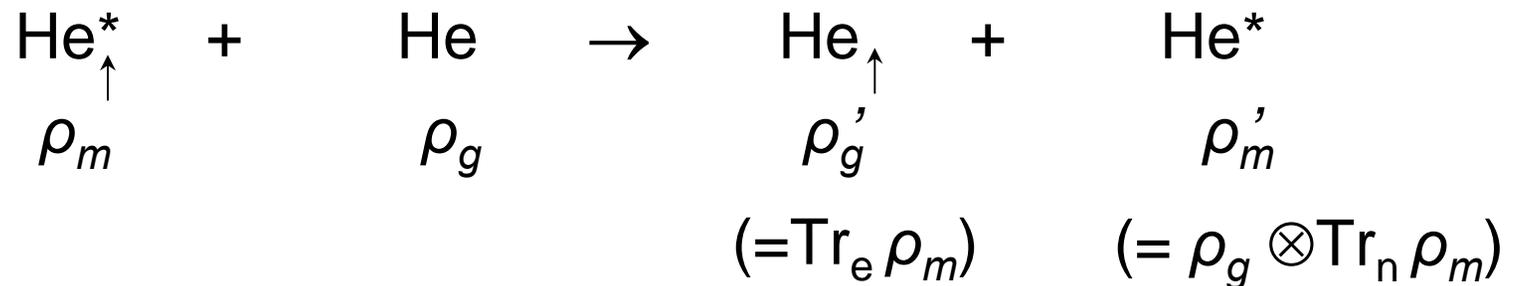
nucléaire du 2^3S

Évolution de la polarisation nucléaire M

variable lente

$$\dot{M} = \Gamma_e (M^* - M) - \Gamma_1 M$$

Collisions d'échange de métastabilité



Équations d'évolution de ρ_m et ρ_g

$$\dot{\rho}_g = \Gamma_e (-\rho_g + \text{Tr}_e \rho_m) \quad \rightarrow \quad \dot{M} = \Gamma_e (M^* - M) - \Gamma_1 M$$

$$\dot{\rho}_m = \gamma_e (-\rho_m + \sum_i |A_i\rangle\langle A_i| \rho_g \otimes \text{Tr}_n \rho_m |A_i\rangle\langle A_i|)$$

Solution à l'état stationnaire et en absence d'autres processus

$$a_i \propto e^{\beta m_F} \quad e^{\beta} = \frac{a_2}{a_1} = \dots = \frac{a_5}{a_6} = \frac{N_{\uparrow}}{N_{\downarrow}} = \frac{1+M}{1-M}$$

M dicte aux populations une distribution en température de spin $1/\beta$

utilisée pour méthode de détection

Échange de métastabilité en champ intense

Effets sur les populations des sous-niveaux métastables

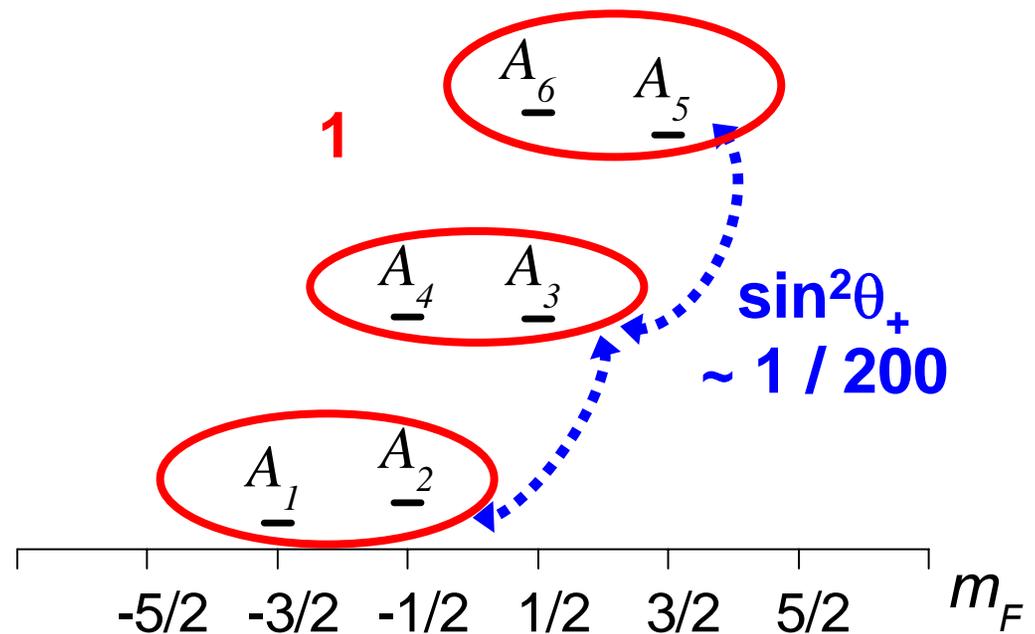


$$\rho_m' = \rho_g \otimes \text{Tr}_e \rho_m$$

par ex. E.I. $A_5 = |1, +\rangle$

A_5	$\frac{1+M}{2}$
A_6	$\frac{1-M}{2} \cos^2 \theta_+$
A_3	$\frac{1-M}{2} \sin^2 \theta_+$

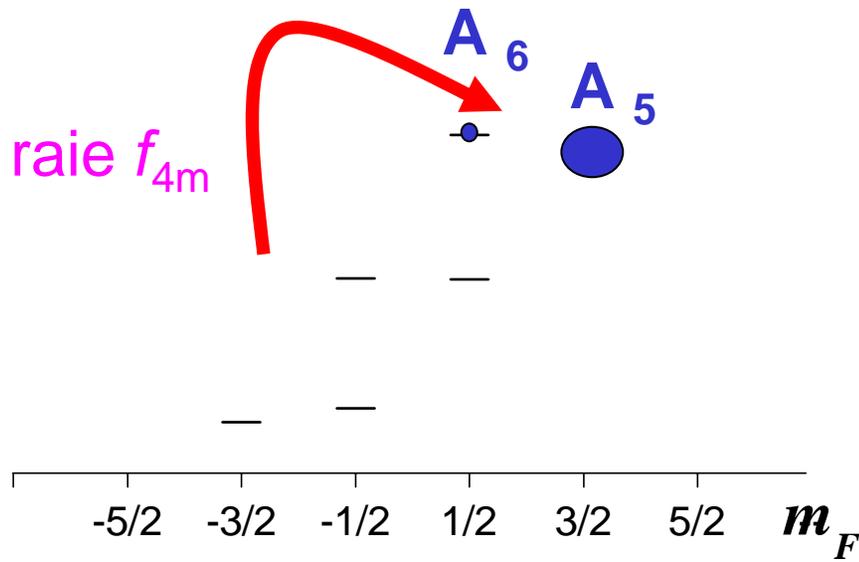
$B = 1.5 \text{ Tesla}$
 $\sin^2 \theta_+ \approx 0.55 \times 10^{-2}$



Intra-paire 1 collision d'EM
 Inter-paire ~ 200 collisions d'EM

Modèle élémentaire

1. Pompage dans (A_5, A_6)



2. Construction de M grâce aux collisions d'échange

$$A_5 \quad a_5 = \frac{1+M}{2} \quad \langle I_z \rangle = \frac{\hbar}{2}$$

$$A_6 \quad a_6 = \frac{1-M}{2} \quad \langle I_z \rangle = -\frac{\hbar}{2} + \hbar \sin^2 \theta_+$$

$$\dot{M} = \Gamma_e \left\{ (1-M) \sin^2 \theta_+ \right\} - \Gamma_1 M$$

Modèle élémentaire

Polarisation $M_{\text{stat}} = \left(1 + \frac{\Gamma_1}{\Gamma_e \sin^2 \theta_+}\right)^{-1}$ Compétition entre Γ_1 et Γ_e

Temps de construction de la polarisation

$$t_b = \frac{M_{\text{stat}}}{\Gamma_e \sin^2 \theta_+}$$

**B augmente: $\sin^2 \theta_+$ diminue
 t_b se rallonge**

t_b indépendant de la pression

À 1.5 Tesla: $n_m = 10^{10} - 10^{11} \text{ at/cm}^3 \longrightarrow t_b = 10 - 150 \text{ s}$

Modèle ne décrit pas les effets de la puissance laser

**Étude comparative quantitative avec les résultats expérimentaux
Modèle plus rigoureux**

Plan

- Introduction
- Mécanisme du pompage optique à 1.5 Tesla
- Étude expérimentale à 1.5 Tesla
 - Montage expérimental
 - Méthode de mesure
 - Résultats expérimentaux
 - Discussion
- Conclusion

Dispositif expérimental à 1.5 Tesla



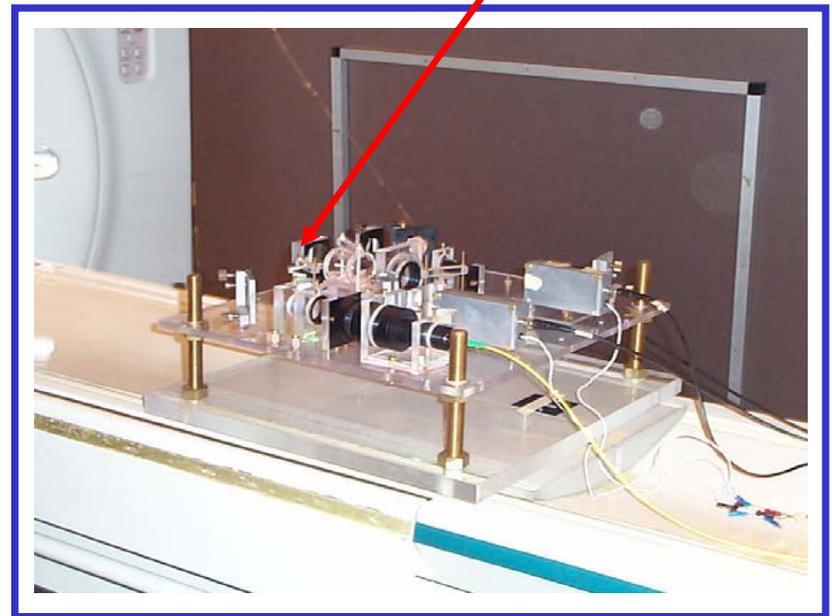
Imageur clinique opérant à 1.5 Tesla
Hôpital du Kremlin-Bicêtre

Expériences de pompage dans le champ
de fuite de l'imageur (B : 0 à 1.5 T)



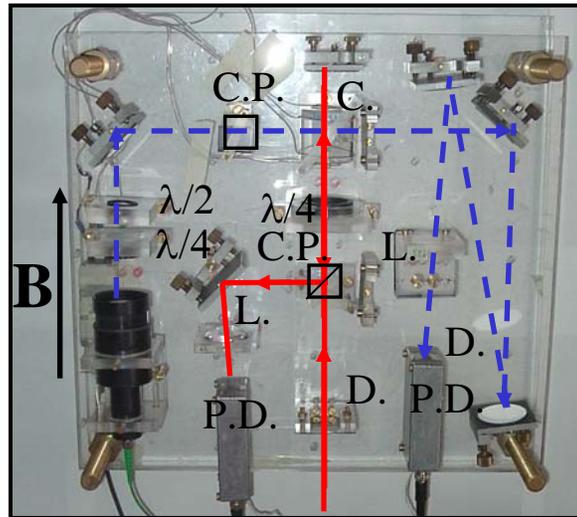
gradients de champ élevés

Cellule cylindrique
scellée d' ^3He
(5 cm x 5 cm)



dispositif portable
lasers fibrés

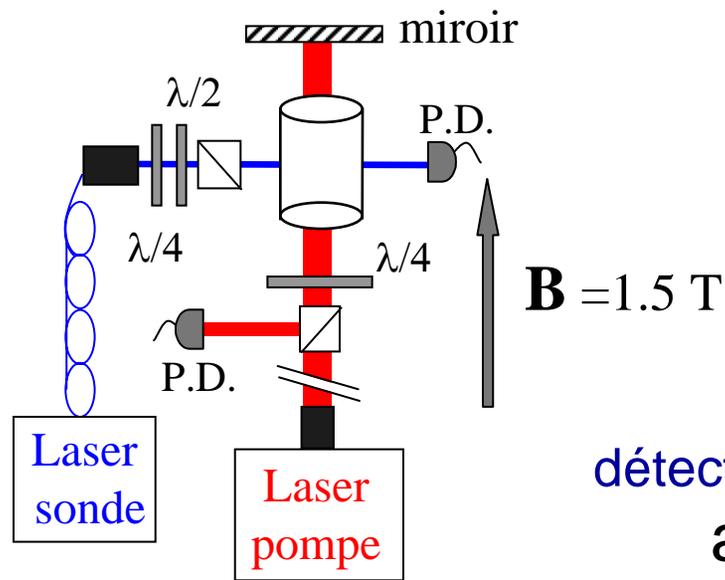
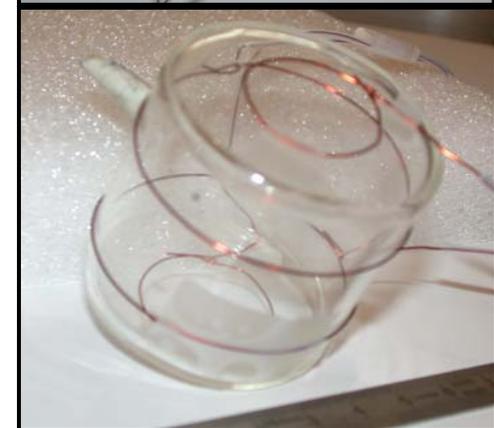
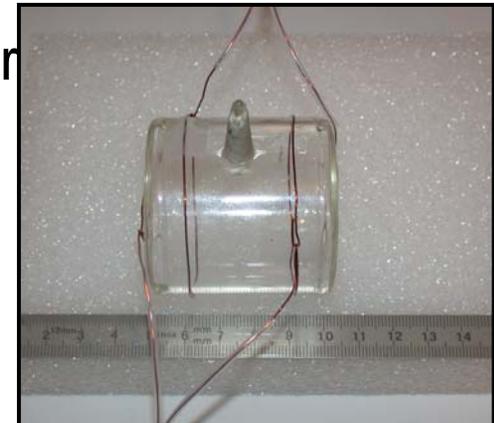
Dispositif expérimental à 1.5 Tesla



4 cellules:
1.33, 8, 32 et 67 mbar

Laser pompe
Diode amplifiée
 $P_{\max} = 0.5 \text{ W}$
waist 1.3 cm

cellule cylindrique
5 cm x 5 cm

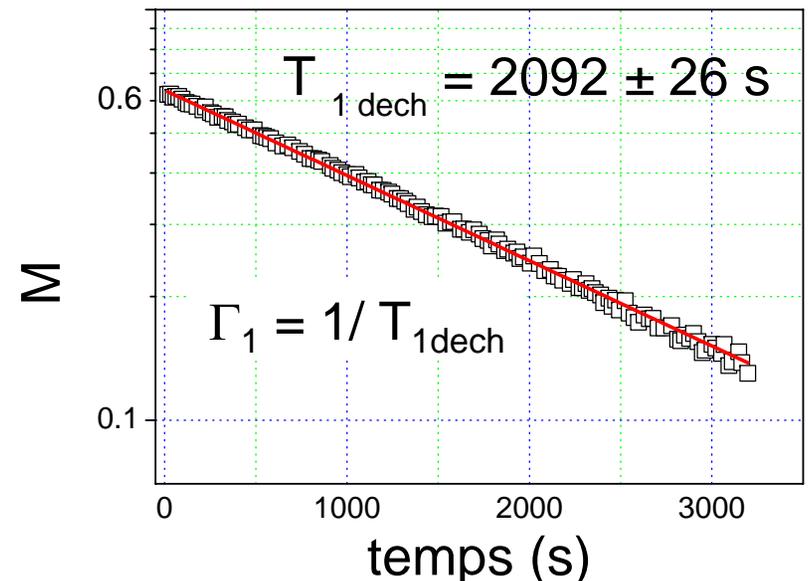
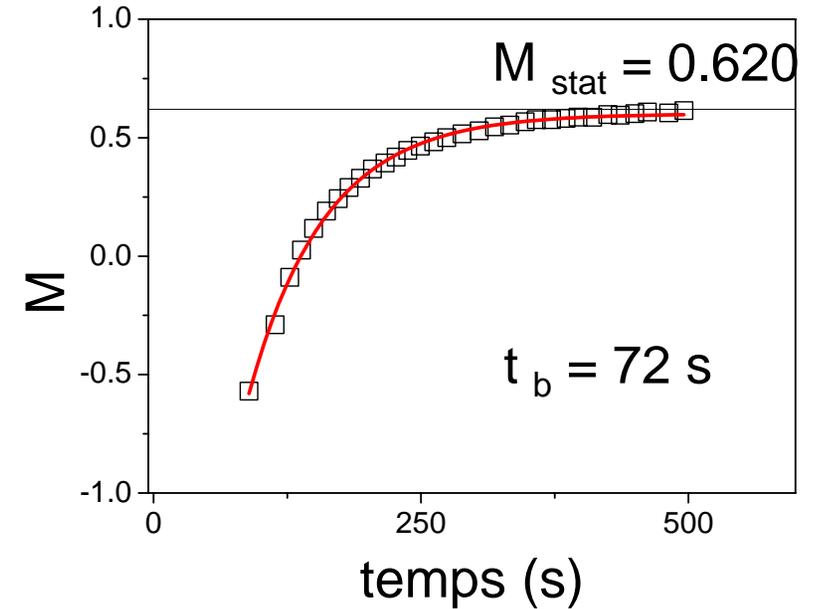
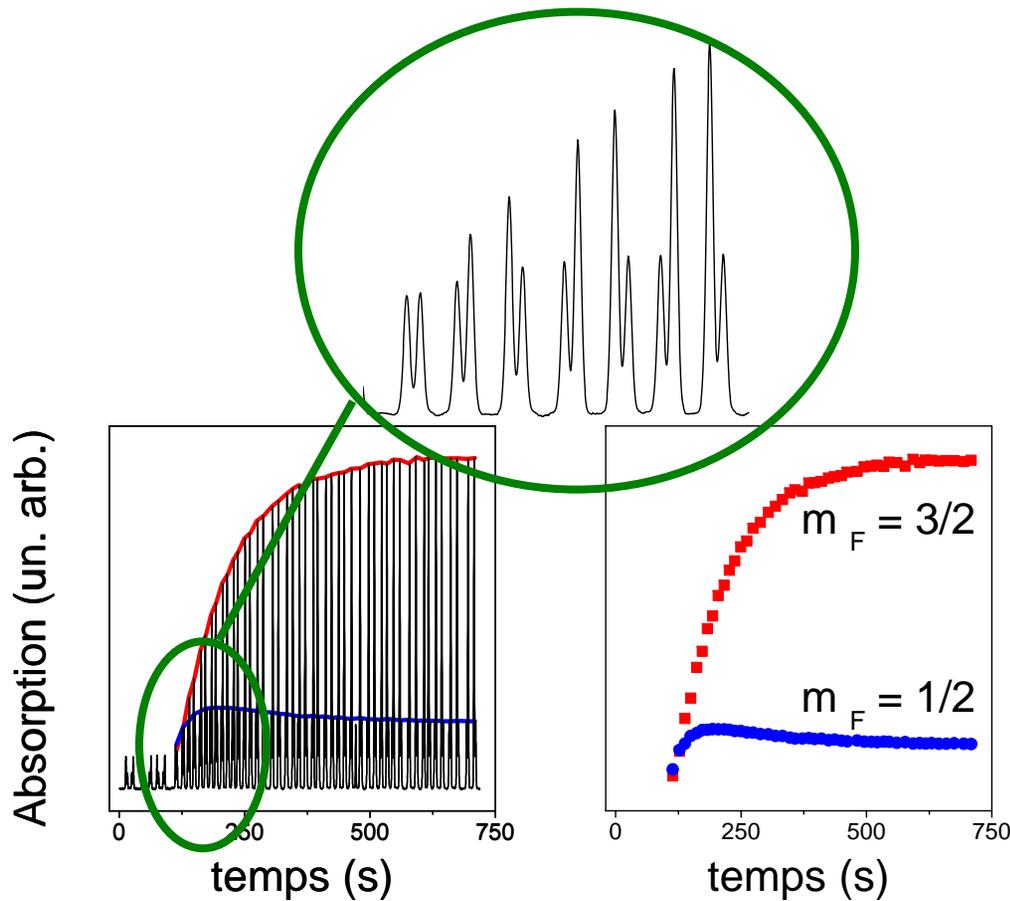


Laser sonde
détection par absorption

e.g.
$$\frac{a_5}{a_6} = \frac{1 + M}{1 - M}$$

Exemple de mesure

Balayages consécutifs du laser sonde au niveau du doublet



8 mbar

$P_{\text{laser}} = 0.25 \text{ W}$

Étude systématique

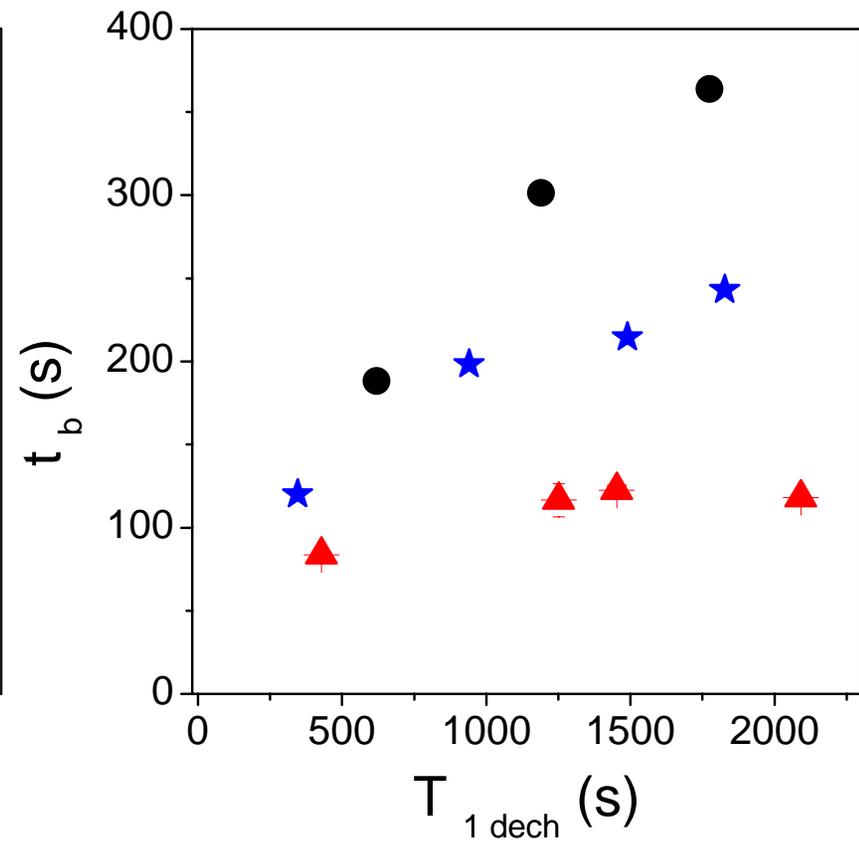
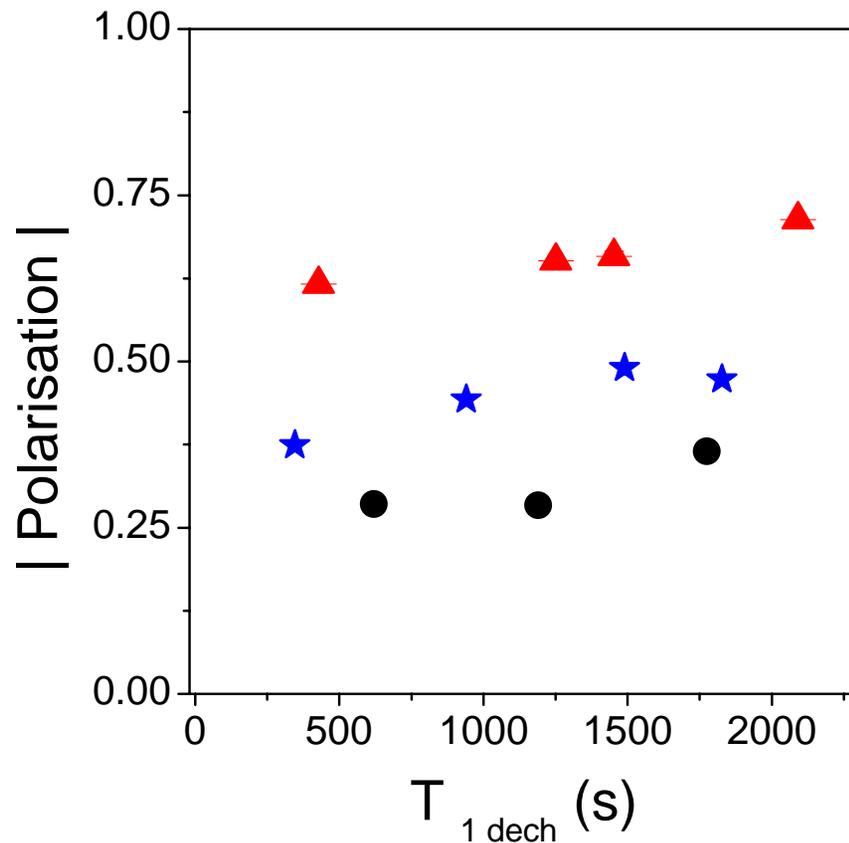
- But de l'étude systématique:
Détermination des conditions favorables au pompage optique dans ces conditions nouvelles (**pression élevée** et **champ magnétique intense**)
 - raie atomique
 - décharge
 - puissance du laser pompe
- Quelques résultats illustratifs de l'étude systématique

Résultats à pression élevée et à 1.5 Tesla

Raie f_{2m}

$P_{\text{laser}} = 0.25 \text{ W}$

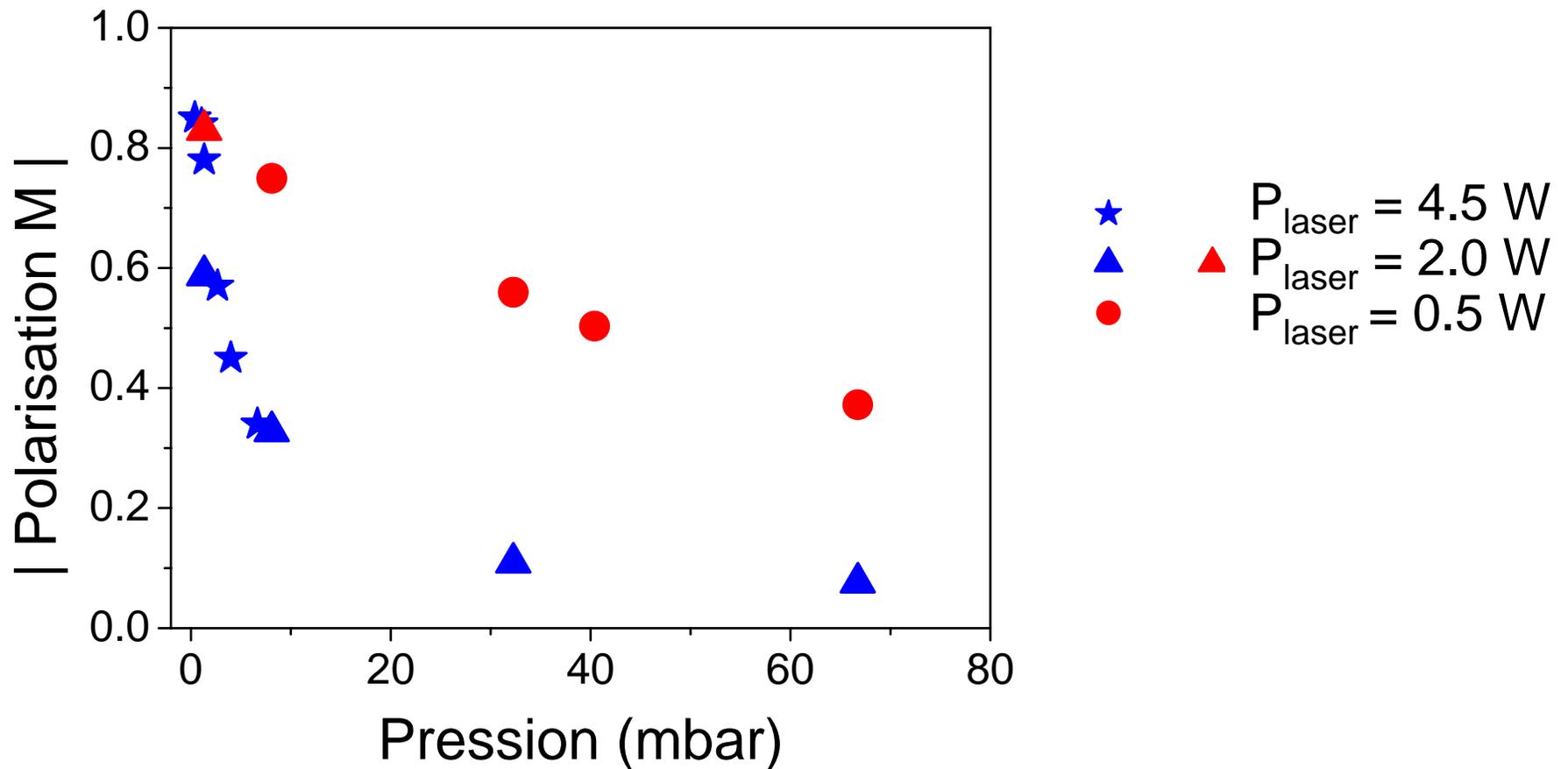
▲ 8 mbar
★ 32 mbar
● 67 mbar



Faible dépendance des polarisations vis à vis de $T_{1\text{dech}}$

Résultats marquants de polarisation

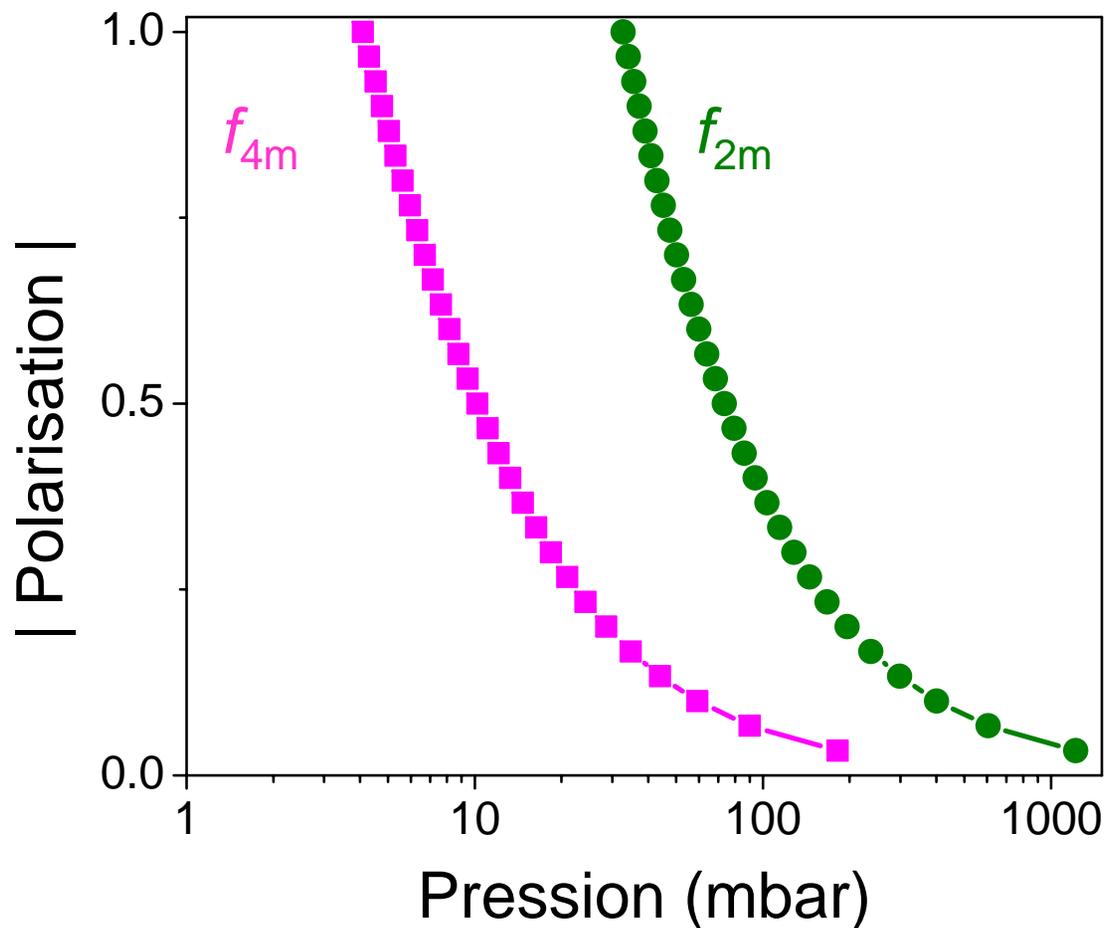
M_{stat} obtenues à **1.5 T** vs **B~mTesla**



Modèle: Limite $P_{\text{laser}} \rightarrow \infty$

$$\dot{M}_{f_{2m}} = -\Gamma_e \sin^2 \theta_+ \frac{(1+M)^2}{(5+M)} \left\{ 5 - |M| \left(1 + \frac{1}{3} \frac{\gamma_e}{\gamma_{\text{rad}}} \right) \right\}$$

Bornes supérieures pour la polarisation dépendant de la pression



Il est possible de dépasser ces limites en pompant sur les raies isolées et moins intenses

Résultats à pression élevée et à 1.5 Tesla: P_{laser}

Décharge douce

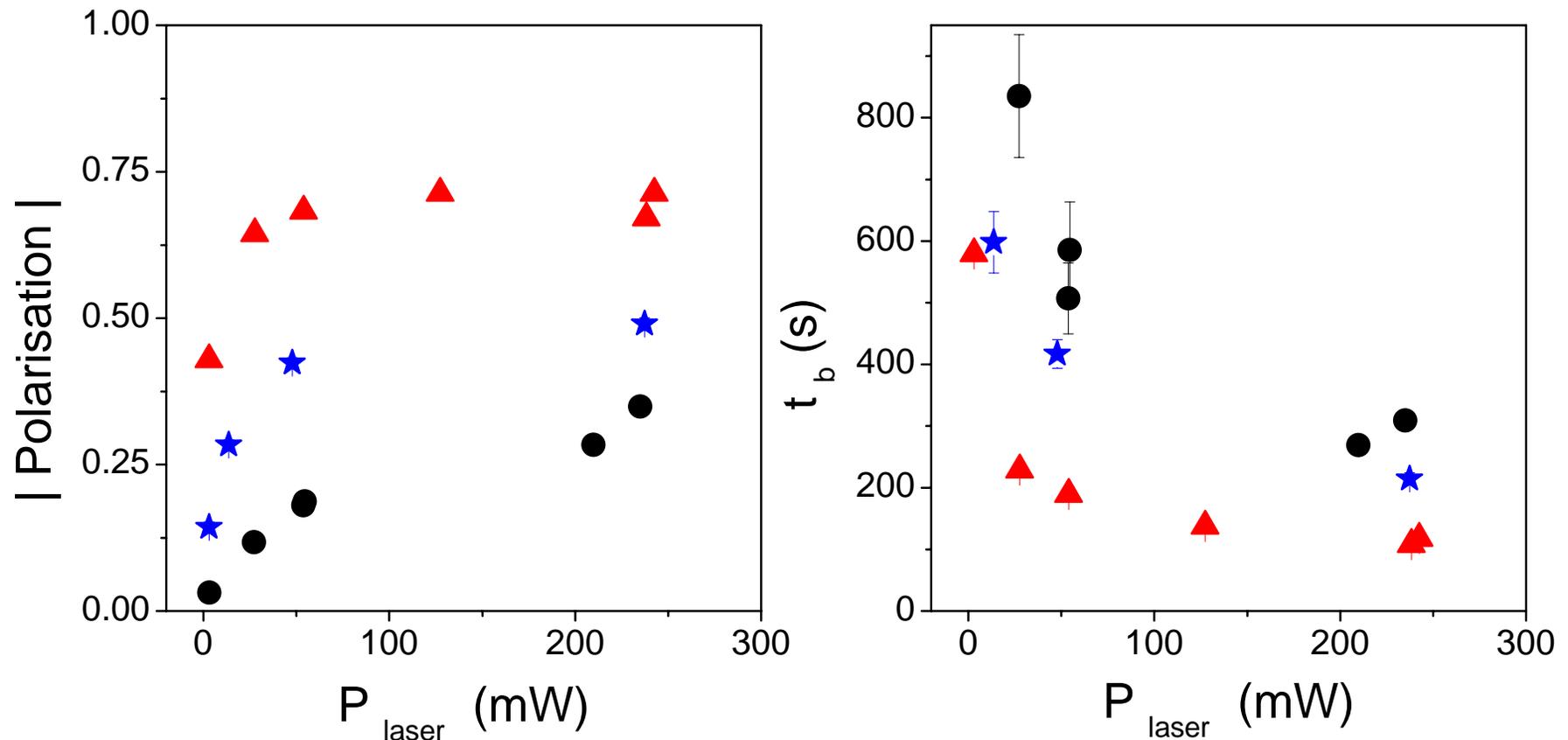
$T_{1\text{dech}} > 1000$ s

Raie f_{2m}

▲ 8 mbar

★ 32 mbar

● 67 mbar



prédictions numériques: 250 mW puissance insuffisante pour saturer le pompage optique à 32 et 67 mbar

Interprétation des résultats expérimentaux

Évolution de la polarisation $\dot{M} = \Gamma_e (M^* - M) - \Gamma_1 M$

1. Mesures effectuées à $M=0$

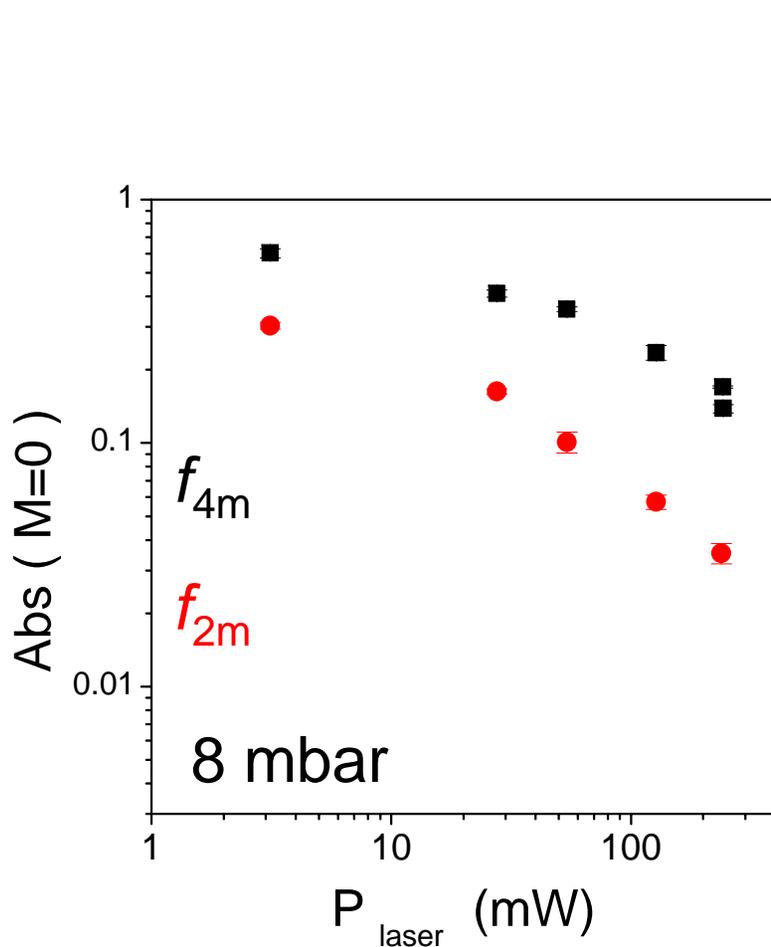
quantités indépendantes de Γ_1

$$\dot{M} = \Gamma_e M^*$$

2. Mesures effectuées à l'état stationnaire

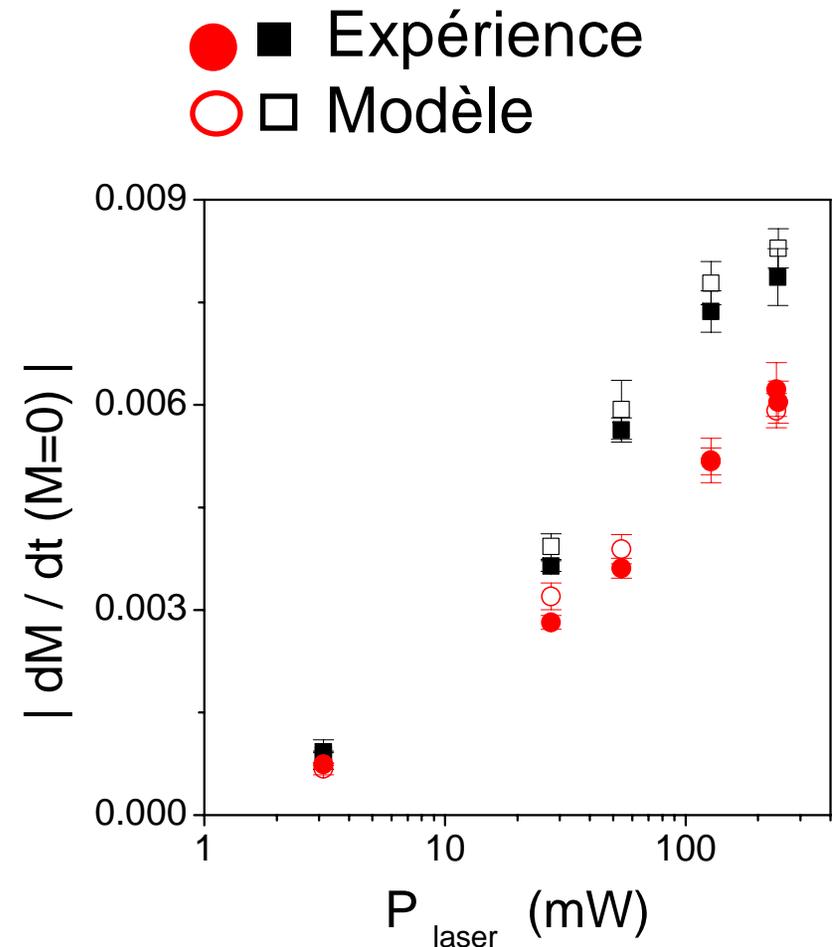
$$M_{\text{stat}} = \frac{\Gamma_e}{\Gamma_e + \Gamma_1} M^*$$

Mesures effectuées à M=0: taux de pompage



Dépôt de moment cinétique

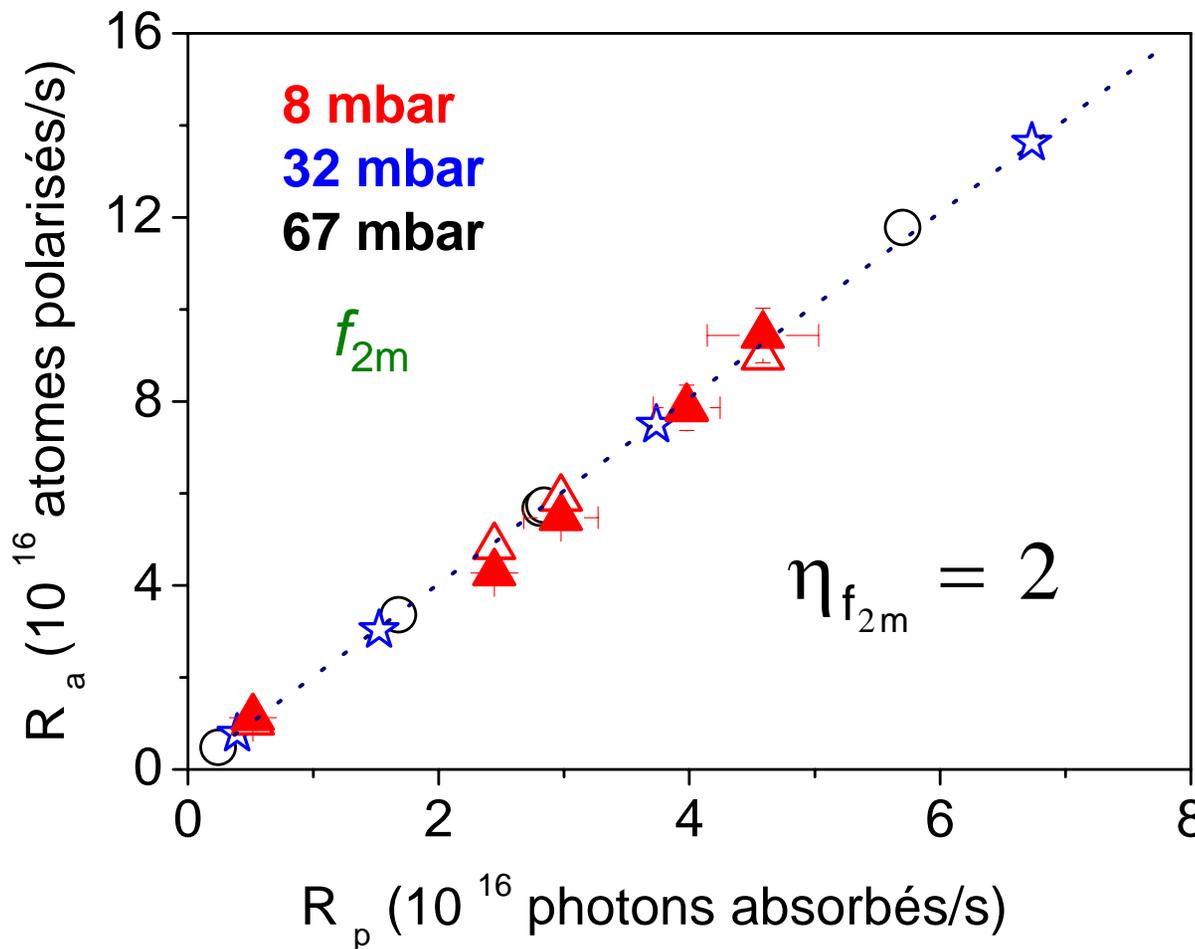
$$R_p = \text{Abs} \times P_{\text{laser}} / h\nu$$



Transfert du moment aux noyaux

$$R_a = N_g \times dM/dt$$

Rendement quantique



1 cycle pompage
absorption,
redistribution 2^3P
émission spontanée

$$\langle \Delta m_F \rangle = -1$$

+

collisions d'EM
(conservation du
moment cinétique)

=

dans l'état
fondamental

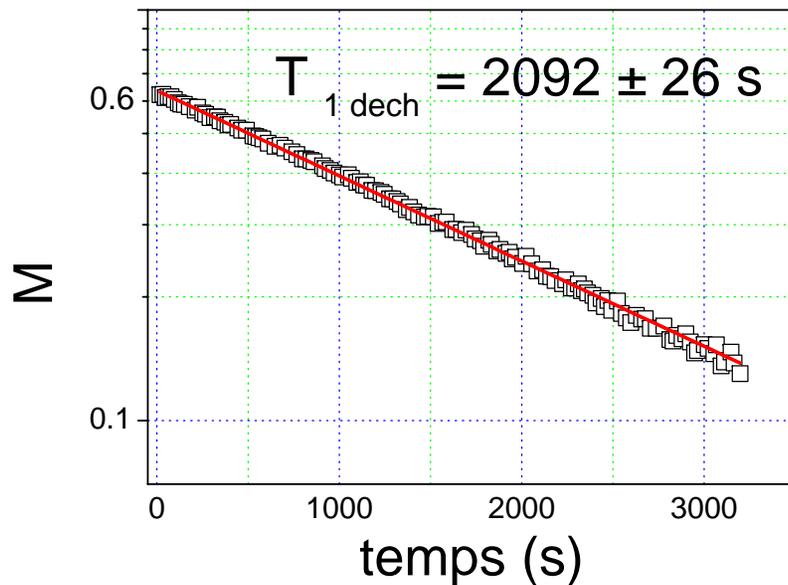
$$\langle \Delta(N_{\uparrow} - N_{\downarrow}) \rangle = -2$$

pour la raie f_{4m} $\eta_{f_{4m}} = 1$

Mesures effectuées à M_{stat}

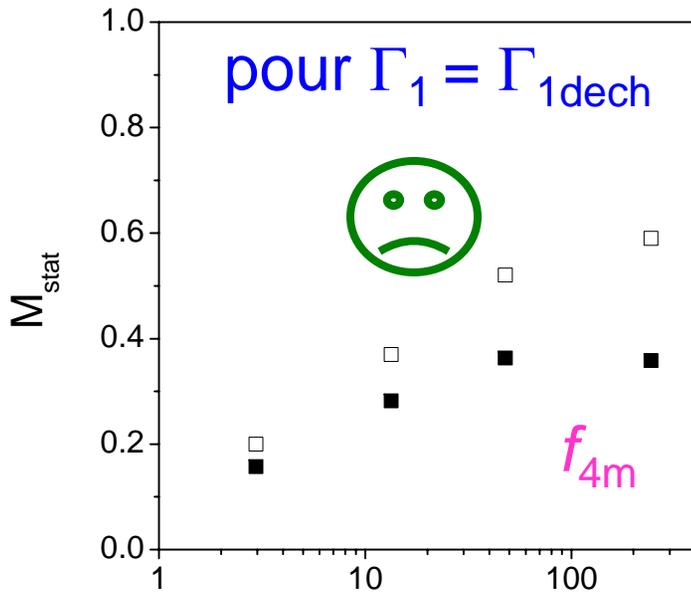
A l'état stationnaire

$$M_{\text{stat}} = \frac{\Gamma_e}{\Gamma_e + \Gamma_1} M^*$$



$\Gamma_{1 \text{ dech}}$

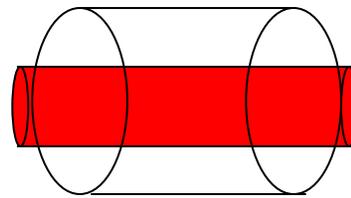
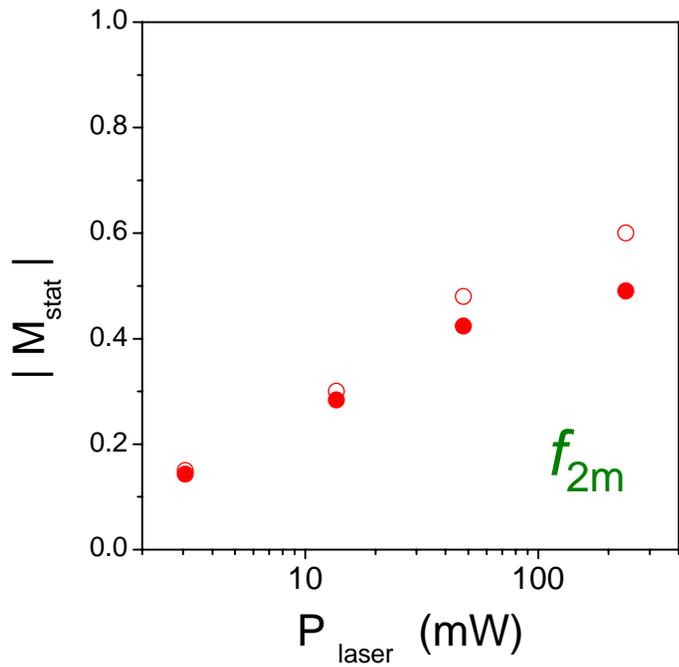
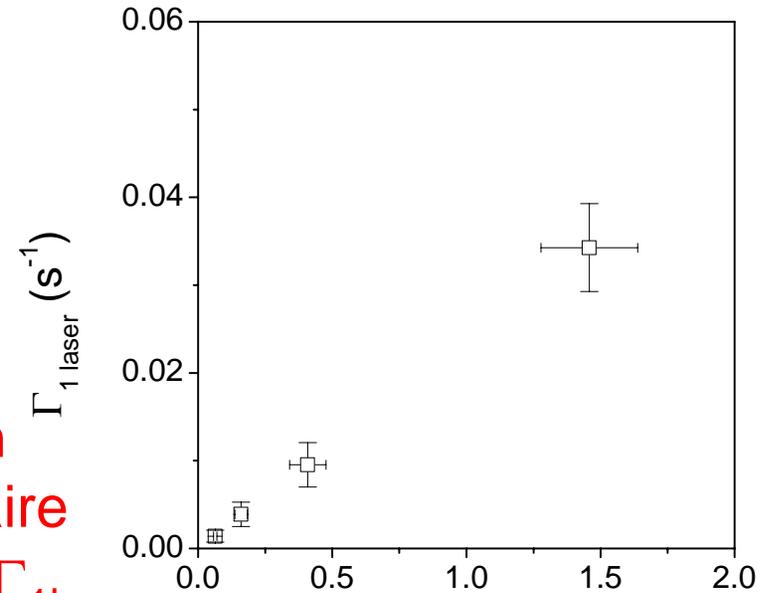
Interprétation des valeurs de M_{stat}



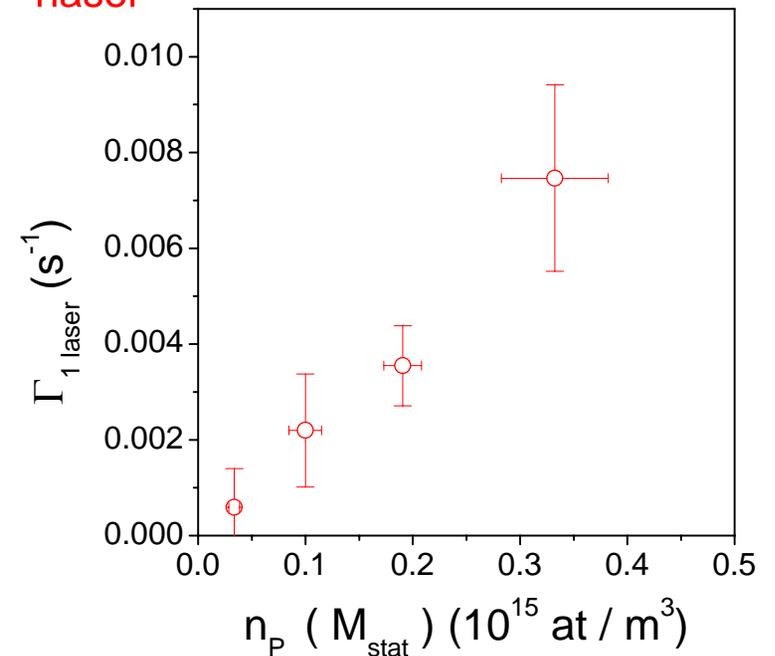
32 mbar

Relaxation
supplémentaire

$$\Gamma_1 = \Gamma_{1\text{dech}} + c\Gamma_{1\text{laser}}$$



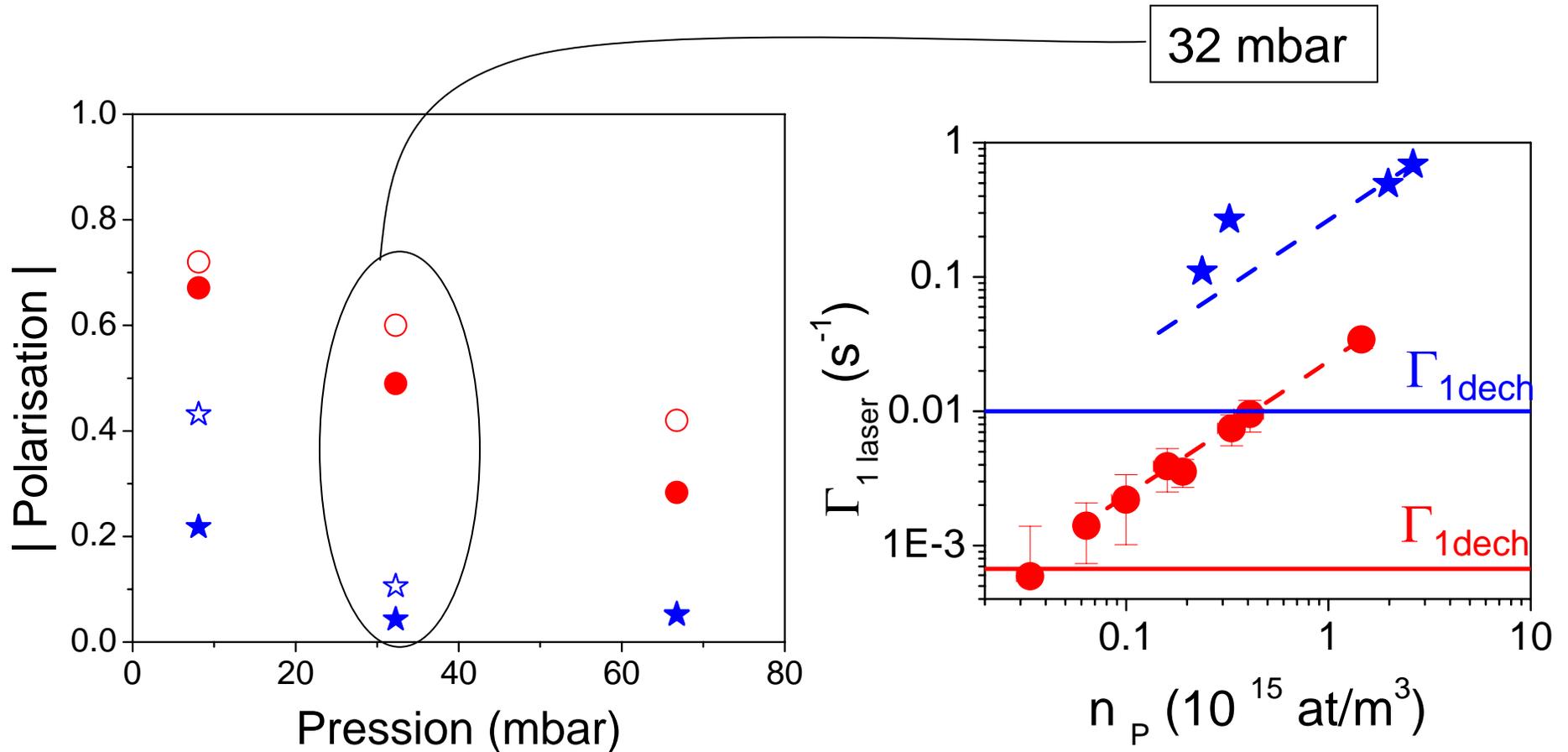
$$c = \frac{S_{\text{laser}}}{S_{\text{cell}}}$$



Relaxation : dépendance avec B

1.5 T vs B ~ mTesla

● ★ Expérience
○ ☆ Modèle



Relaxation

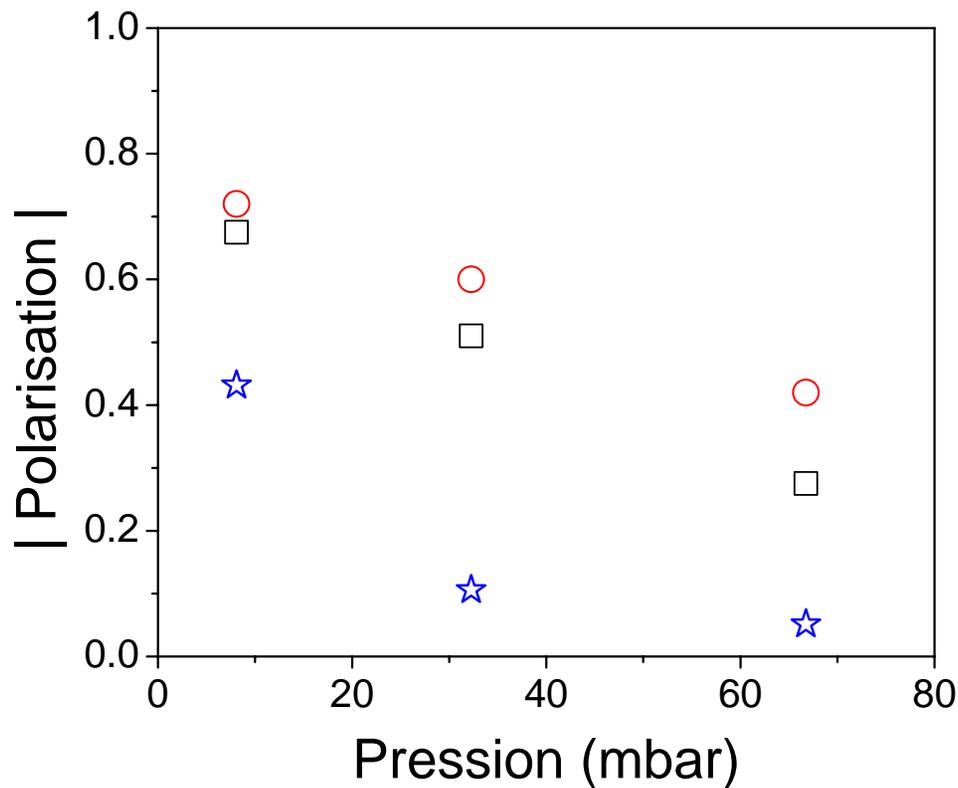
moins importante à 1.5 Tesla qu'en faible champ magnétique

Relaxation : dépendance avec B

1.5 T vs B~mTesla

sans $\Gamma_{1\text{laser}}$

○ ☆ Modèle



□ Modèle à B~mTesla
 $T_{1\text{dech}}$ et n_m à B = 1.5 Tesla

Origine de $\Gamma_{1\text{laser}}$?

Molécules métastables He_2^* ?



- Taux de création $\propto n_P$

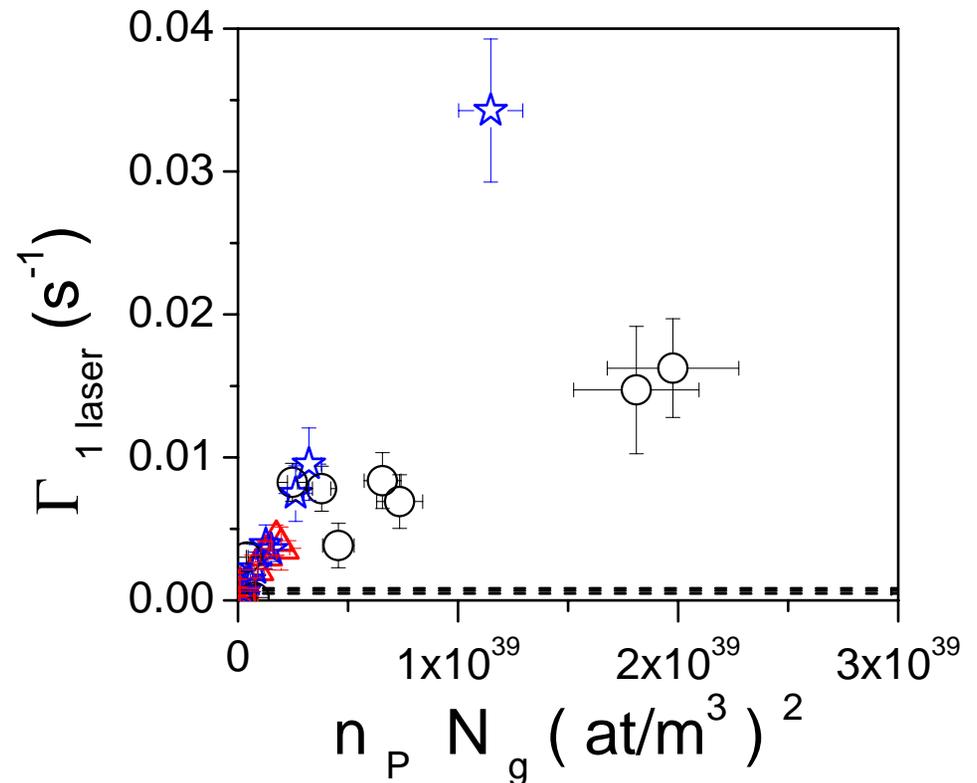
$$\Gamma_{1\text{laser}} \propto n_P$$

- Taux de création $\propto N_g^2$

& Taux de relaxation

nucléaire moléculaire $\propto 1/N_g$

$$\Gamma_{1\text{laser}} \propto N_g$$



Expériences en cours 0 – 2 Tesla
(Pr. T. Dohnalik - Cracovie)

Plan

- Introduction
- Mécanisme du pompage optique à 1.5 Tesla
- Étude expérimentale à 1.5 Tesla
- Conclusion

Conclusion

Nouveau schéma pour polariser l'hélium-3 à 1.5 Tesla

- **Malgré un découplage hyperfin important:**
 - **Polarisations nucléaires élevées**
 - **Taux de production compétitifs**
 - **Hauts rendements quantiques**
- **Domaine d'applicabilité du pompage optique par échange de métastabilité étendu aux pressions élevées**
- **Relaxation plus faible à 1.5 Tesla qu'en faible champ magnétique**

Intérêt pour l'IRM des poumons



Taux de production de la polarisation compétitifs

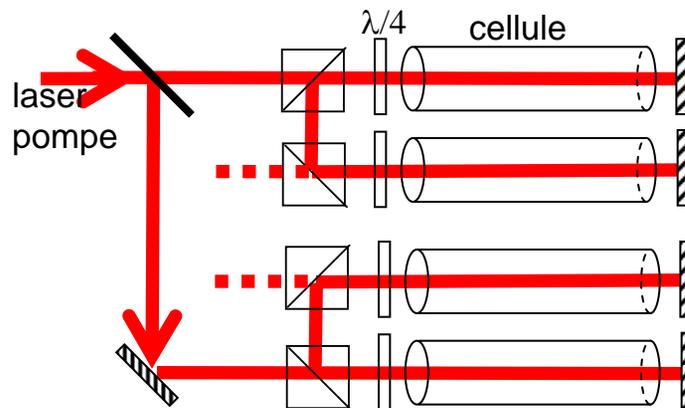
Polariseur opérant à 1.5 Tesla &

***par ex.* à 32 mbar + compression 1:30**

- Préparation en ligne de petites doses de gaz
300 cm³ à 32 mbar \Leftrightarrow 10 cm³ à 1 bar, M=0.5 en 5 min



- Accumulation du gaz pour l'IRM des poumons humains



300 cm³ à 1 bar et M=0.5 en 45 min avec un laser 2W