

Collisions dans un gaz d'hélium métastable au voisinage de la dégénérescence quantique

Signe Louise Seidelin

Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique

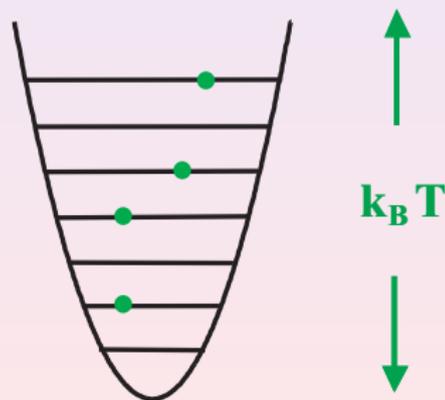
Groupe Optique Atomique

Soutenance de thèse, 3 novembre 2004

Condensation de Bose-Einstein

2

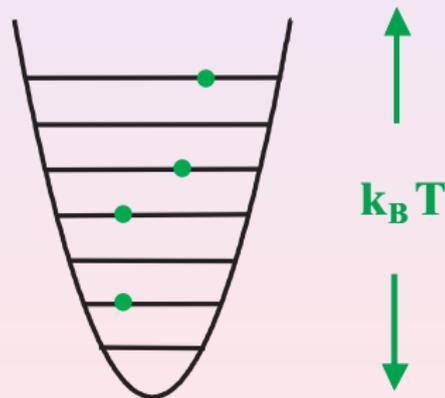
- Distribution de Maxwell-Boltzmann



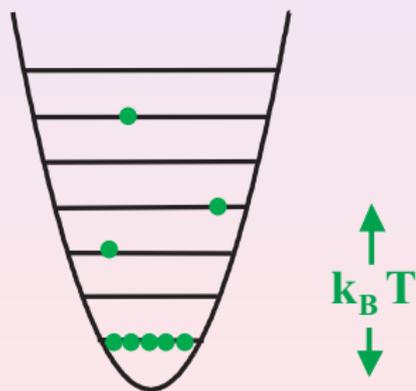
Condensation de Bose-Einstein

2

- Distribution de Maxwell-Boltzmann

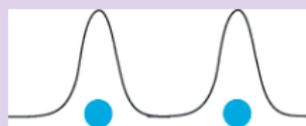


- Condensation de Bose-Einstein (bosons)



Seuil de Condensation de Bose-Einstein

3



d

λ

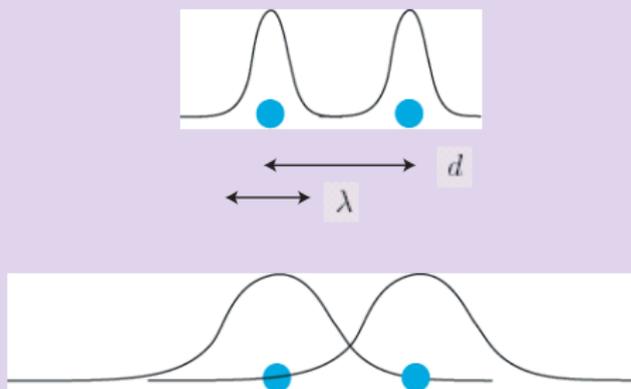


Deux tailles caractéristiques:

$$d = n^{-1/3}$$

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2\pi m k_B T}}$$

Seuil de Condensation de Bose-Einstein



Deux tailles caractéristiques:

$$d = n^{-1/3}$$

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2\pi m k_B T}}$$

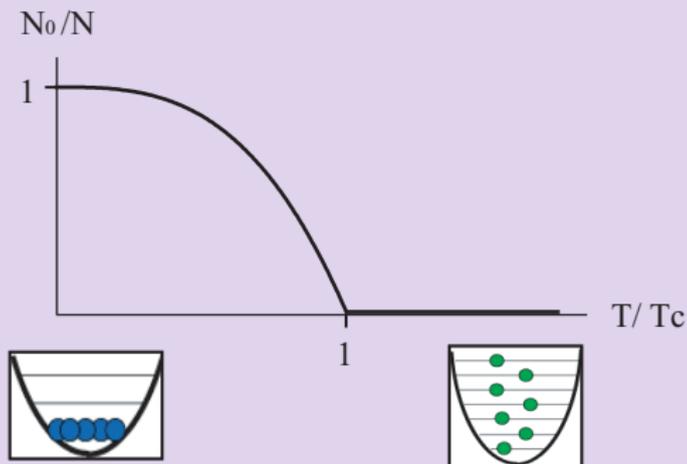
Seuil de condensation:

$$d \sim \lambda$$

$$n\lambda^3 = 2.612$$

Fraction condensée pour un gaz idéal

4



Au seuil :

$$N = 1.202 \left(\frac{k_B T_c}{\hbar \omega} \right)^3$$

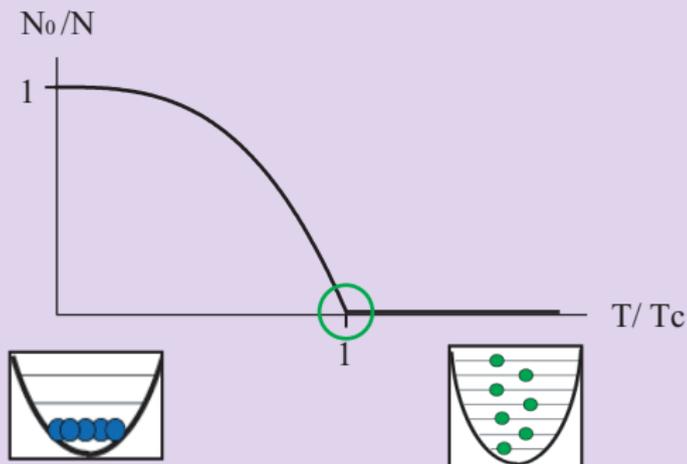
avec ω fréquence
d'oscillation

Chez nous :

$$T_c \sim 2 \mu\text{K}$$

Fraction condensée pour un gaz idéal

4



Au seuil :

$$N = 1.202 \left(\frac{k_B T_c}{\hbar \omega} \right)^3$$

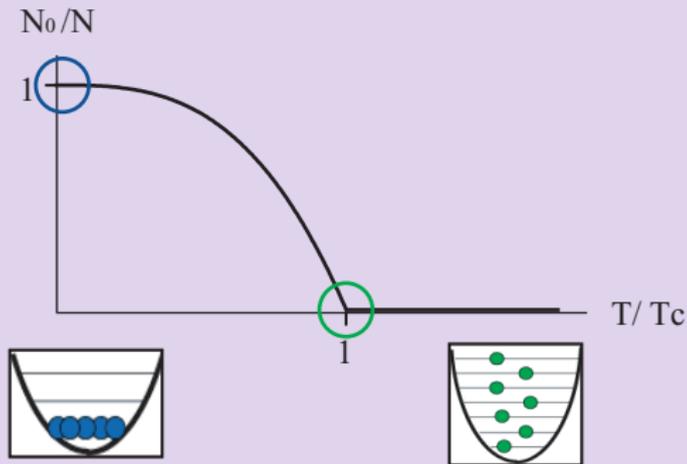
avec ω fréquence
d'oscillation

Chez nous :

$$T_c \sim 2 \mu\text{K}$$

Fraction condensée pour un gaz idéal

4



Au seuil :

$$N = 1.202 \left(\frac{k_B T_c}{\hbar \omega} \right)^3$$

avec ω fréquence
d'oscillation

Chez nous :

$$T_c \sim 2 \mu\text{K}$$

Comment parvenir à des températures aussi basses ?

5

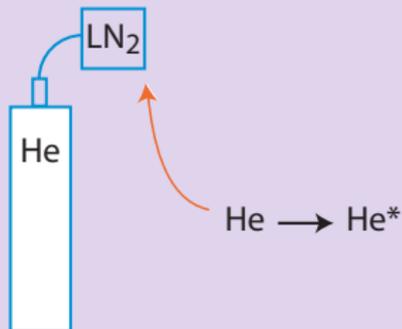
~300 K



Comment parvenir à des températures aussi basses ?

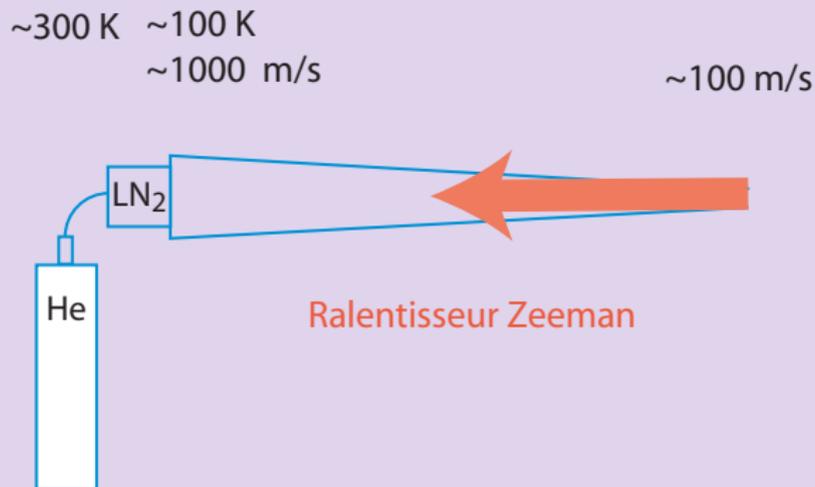
5

$\sim 300\text{ K}$ $\sim 100\text{ K}$
 $\sim 1000\text{ m/s}$



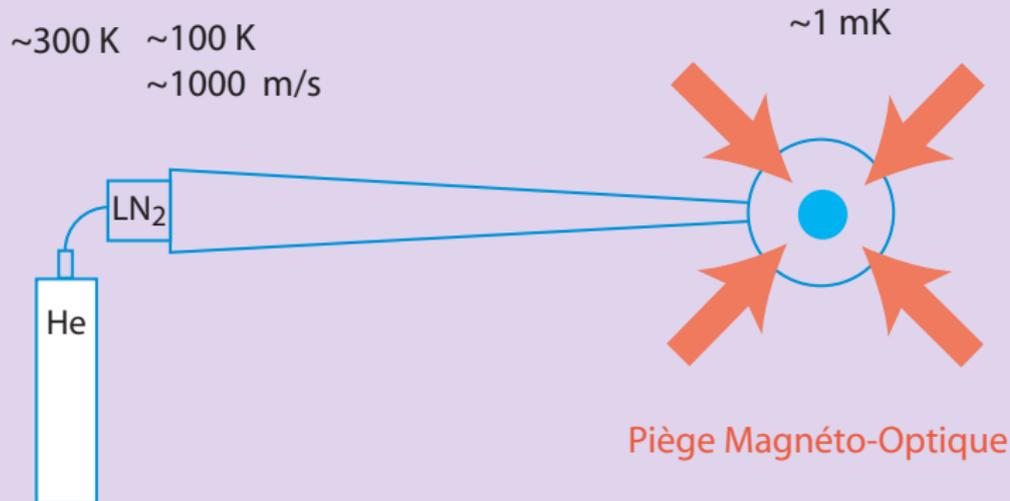
Comment parvenir à des températures aussi basses ?

5



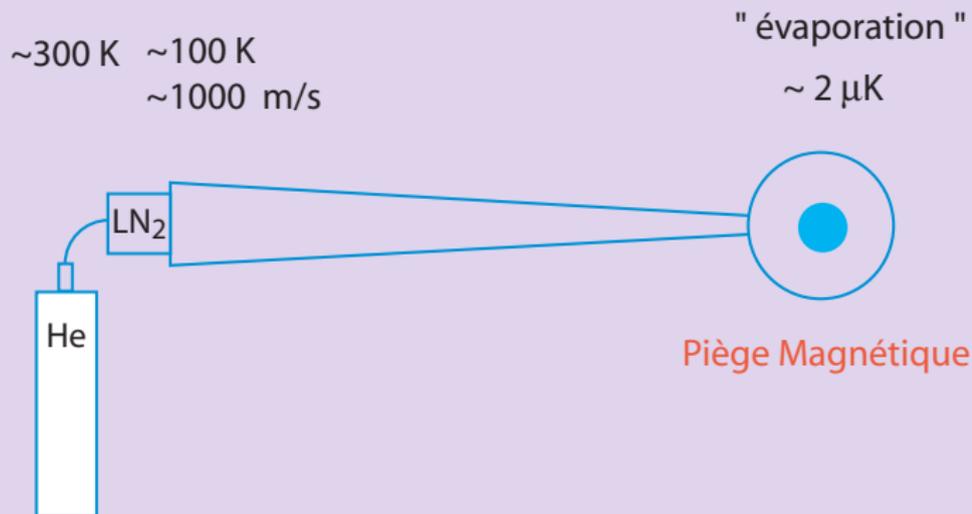
Comment parvenir à des températures aussi basses ?

5



Comment parvenir à des températures aussi basses ?

5



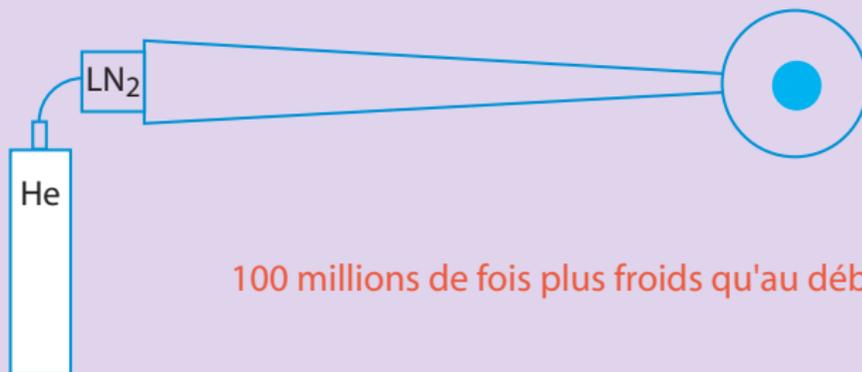
Comment parvenir à des températures aussi basses ?

5

~ 300 K ~ 100 K
 ~ 1000 m/s

" évaporation "

~ 2 μ K



100 millions de fois plus froids qu'au début !

Plan de l'exposé

- 1 Collisions dans un gaz d'hélium métastable
 - Collisions élastiques et longueur de diffusion
 - Collisions inélastiques et constantes de collisions ionisantes
- 2 Méthodes de détection d'un nuage froid d'hélium métastable
 - La galette de micro-canaux
 - Détection des atomes neutres
 - Observation des ions : détection non-perturbante
- 3 Mesure de constantes de collisions et longueur de diffusion
 - Principe des mesures : scénario du gaz idéal
 - Corrections à l'approche simple
 - Stratégie expérimentale et données obtenues
 - Résultats des mesures
- 4 Conclusion et perspectives

Plan de l'exposé

- 1 Collisions dans un gaz d'hélium métastable
 - Collisions élastiques et longueur de diffusion
 - Collisions inélastiques et constantes de collisions ionisantes
- 2 Méthodes de détection d'un nuage froid d'hélium métastable
 - La galette de micro-canaux
 - Détection des atomes neutres
 - Observation des ions : détection non-perturbante
- 3 Mesure de constantes de collisions et longueur de diffusion
 - Principe des mesures : scénario du gaz idéal
 - Corrections à l'approche simple
 - Stratégie expérimentale et données obtenues
 - Résultats des mesures
- 4 Conclusion et perspectives

Collisions élastiques et longueur de diffusion

7

Taille caractéristique : la longueur de diffusion a

- **Collisions élastiques :**

Température $< \text{mK}$ $\Rightarrow \sigma = 8\pi a^2$

- **Champ moyen**

$$V(\mathbf{r}) = \frac{4\pi\hbar^2 a}{m} \times n(\mathbf{r})$$

Potentiel chimique du condensat :

$$\mu = \frac{4\pi\hbar^2 a}{m} \times n_{\text{cbe}}$$

avec n_{cbe} la densité du condensat au centre

$$\sigma \sim 8\pi a^2$$



Collisions élastiques et longueur de diffusion

7

Taille caractéristique : la longueur de diffusion a

- **Collisions élastiques :**

$$\text{Température} < \text{mK} \Rightarrow \sigma = 8\pi a^2$$

- **Champ moyen**

$$V(\mathbf{r}) = \frac{4\pi\hbar^2 a}{m} \times n(\mathbf{r})$$

Potentiel chimique du condensat :

$$\mu = \frac{4\pi\hbar^2 a}{m} \times n_{\text{cbe}}$$

avec n_{cbe} la densité du condensat au centre

$$\sigma \sim 8\pi a^2$$



Collisions élastiques et longueur de diffusion

Connaissance de $a \rightarrow$ déviations au modèle du gaz idéal

Champ moyen
 Au-delà du champ moyen } corrections $\propto n a^3$

- Spectre d'excitations
- Décalage de la température critique
- Déplétion quantique (atomes dans états excités à $T = 0$)
- ...

Connaissance de a importante !

Collisions élastiques et longueur de diffusion

Connaissance de $a \rightarrow$ déviations au modèle du gaz idéal

Champ moyen
 Au-delà du champ moyen

} corrections $\propto n a^3$

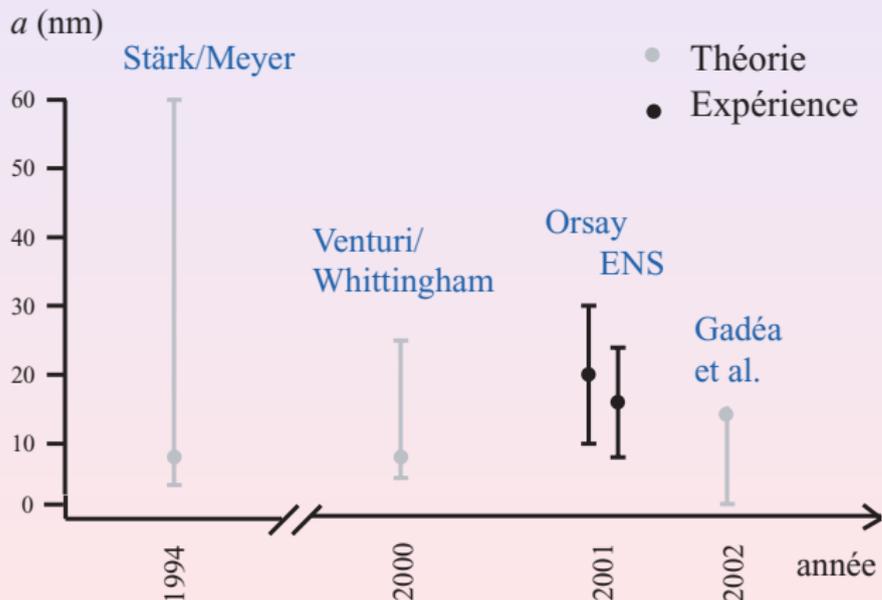
- Spectre d'excitations
- Décalage de la température critique
- Déplétion quantique (atomes dans états excités à $T = 0$)
- ...

Connaissance de a importante !

Longueur de diffusion pour l'hélium métastable

9

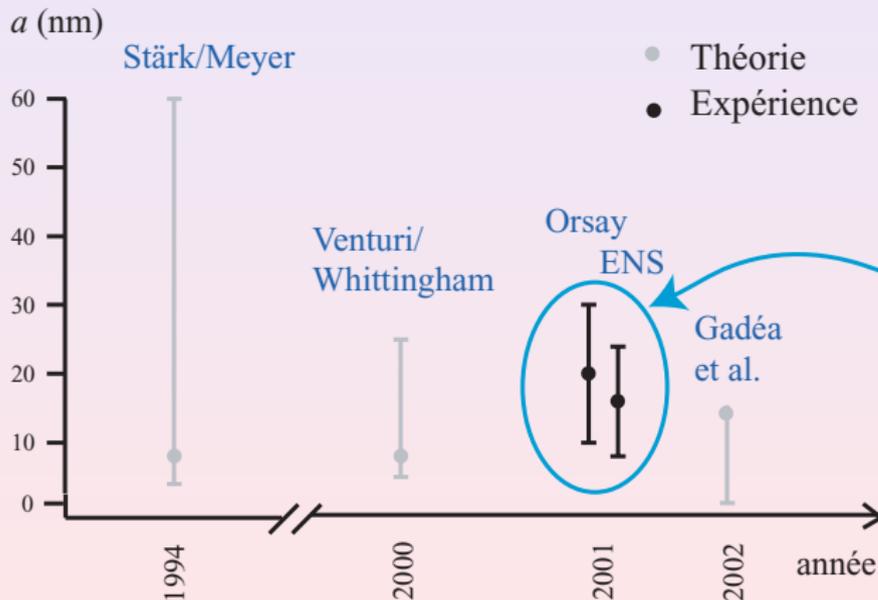
Avant 2004 : longueur de diffusion \rightarrow mal connue !



Longueur de diffusion pour l'hélium métastable

9

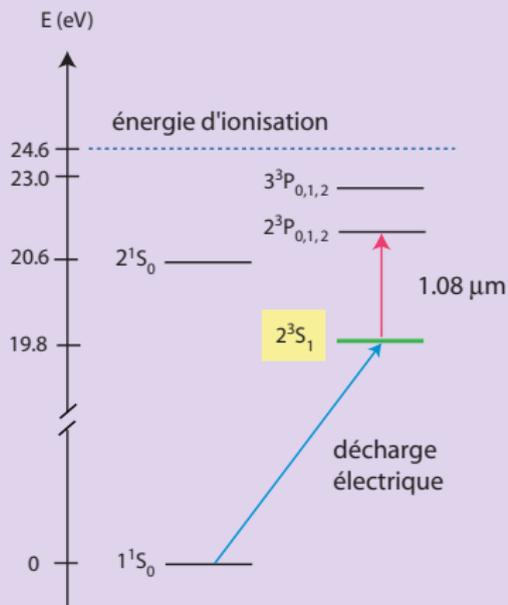
Avant 2004 : longueur de diffusion → mal connue !



$$\mu = \frac{4\pi\hbar^2 a}{m} \times n_{cbe}$$

Collisions ionisantes

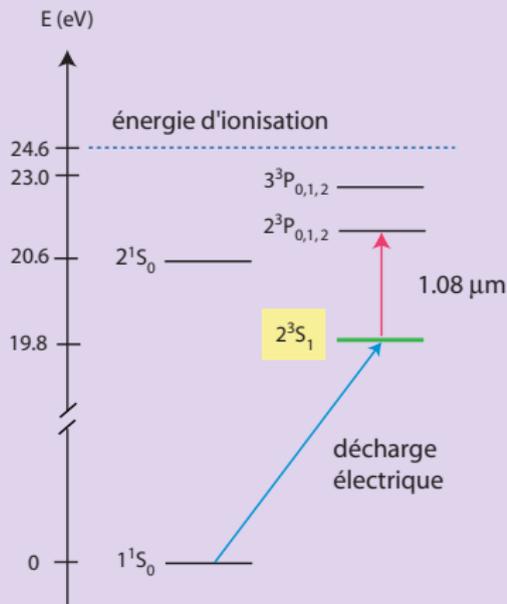
10



Collisions inélastiques \rightarrow
structure interne importante

Collisions ionisantes

10



Collisions inélastiques →
structure interne importante

énergie interne ~ 20 eV

énergie d'ionisation ~ 5 eV

→ possibilité de collisions
ionisantes

Collisions ionisantes

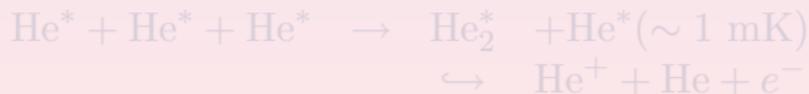
- Gaz résiduel

Négligeable près du seuil de condensation

- Deux corps



- Trois corps

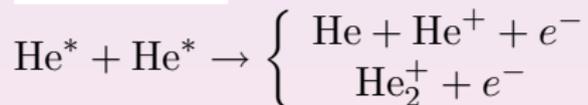


Collisions ionisantes

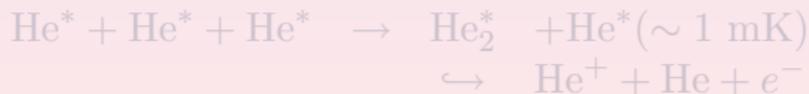
- Gaz résiduel

Négligeable près du seuil de condensation

- Deux corps



- Trois corps

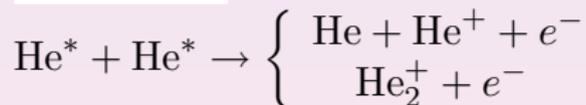


Collisions ionisantes

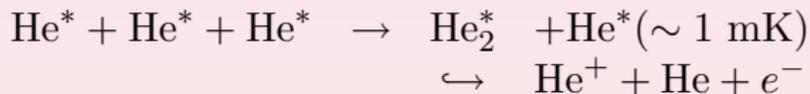
- Gaz résiduel

Négligeable près du seuil de condensation

- Deux corps



- Trois corps



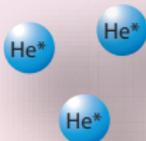
Collisions ionisantes

12

Nuage thermique



- $\dot{n} = -\beta n^2$



- $\dot{n} = -L n^3$

Collisions ionisantes

12

Condensat pur



- $\dot{n} = -\frac{1}{2!} \beta n^2$



- $\dot{n} = -\frac{1}{3!} L n^3$

Collisions ionisantes

12

Taux d'ions (nuage thermique)



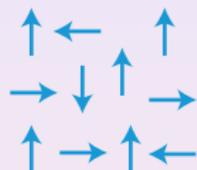
$$\bullet \dot{n} = -\beta n^2 \rightarrow \Phi = \frac{1}{2} \beta \int n^2 d\mathbf{r}$$



$$\bullet \dot{n} = -L n^3 \rightarrow \Phi = \frac{1}{3} L \int n^3 d\mathbf{r}$$

Ordre de grandeur du taux de collisions

13

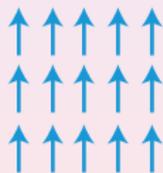


- Nuage non-polarisé

$$\beta_{\text{non-pol}} \sim 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}$$

Mesuré par H.C. Mastwijk *et al.*, P. Tol *et al.*

Au seuil : $\tau = \frac{1}{\beta n} \sim \text{ms} \rightarrow \text{CBE impossible !}$



- Nuage polarisé (piège magnétique)

$$\beta \sim \beta_{\text{non-pol}} \times 10^{-5}$$

Théorie par G. Shlyapnikov *et al.*

$\tau = \frac{1}{\beta n} \sim \text{dizaines de secondes} \rightarrow \text{CBE possible !}$

La suite...

Mesures

- de la longueur de diffusion a
- des constantes de collisions β et L

Utilisant

- un condensat de Bose-Einstein
- un nuage thermique exactement au seuil

Basées sur

- une méthode d'observation unique liée à la métastabilité de l'atome.

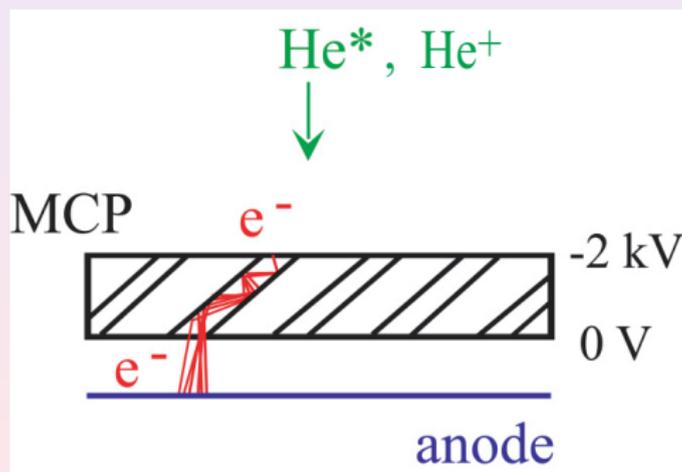
Plan de l'exposé

- 1 Collisions dans un gaz d'hélium métastable
 - Collisions élastiques et longueur de diffusion
 - Collisions inélastiques et constantes de collisions ionisantes
- 2 Méthodes détection d'un nuage froid d'hélium métastable
 - La galette de micro-canaux
 - Détection des atomes neutres
 - Observation des ions : détection non-perturbante
- 3 Mesure de constantes de collisions et longueur de diffusion
 - Principe des mesures : scénario du gaz idéal
 - Corrections à l'approche simple
 - Stratégie expérimentale et données obtenues
 - Resultats des mesures
- 4 Conclusion et perspectives

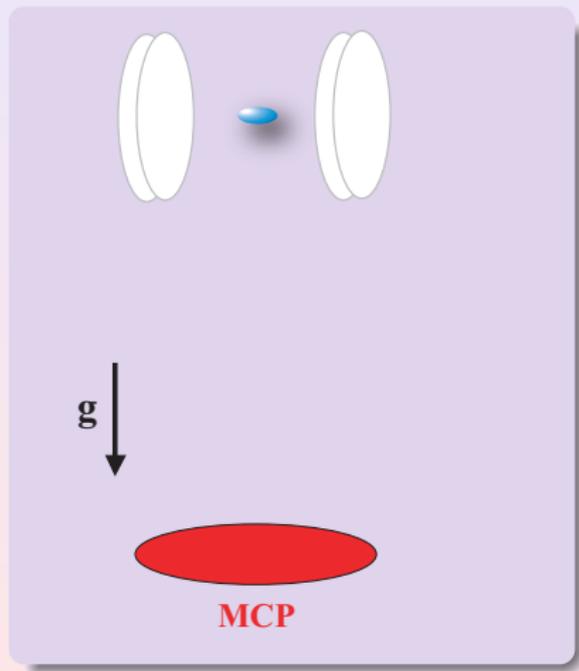
La galette de micro-canaux

16

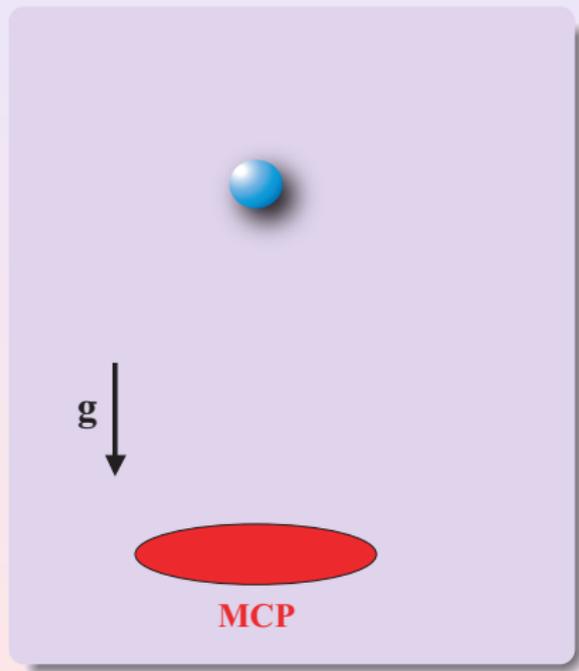
Détection atypique des atomes et des ions
→ galette de micro-canaux



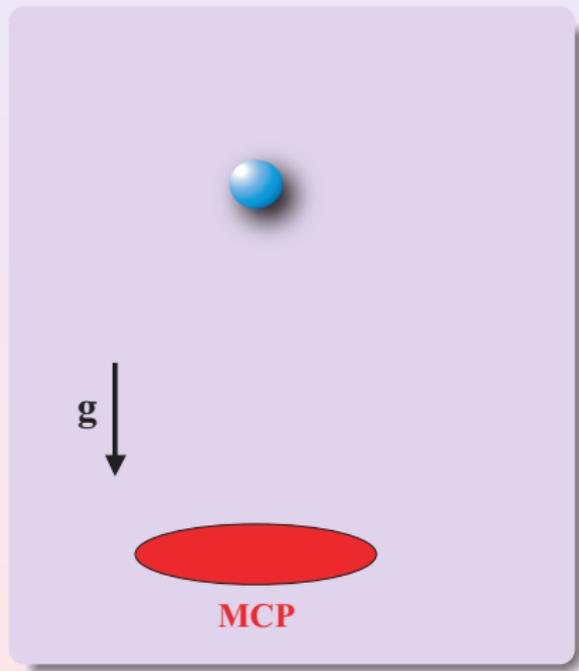
Détection des atomes neutres



Détection des atomes neutres

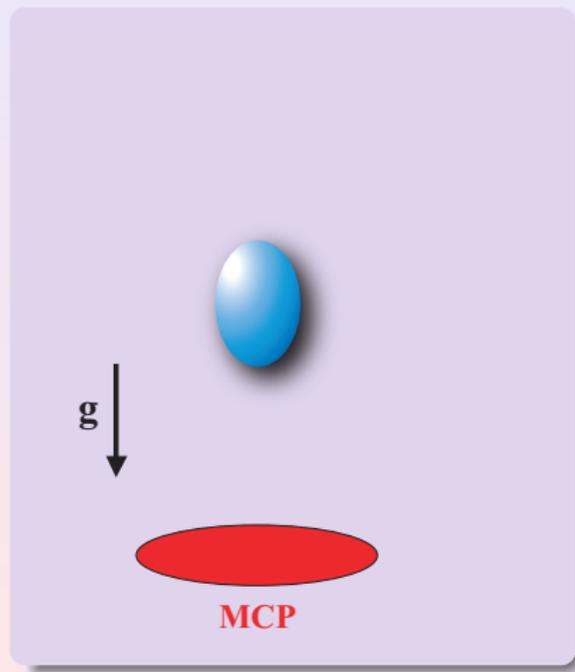


Détection des atomes neutres

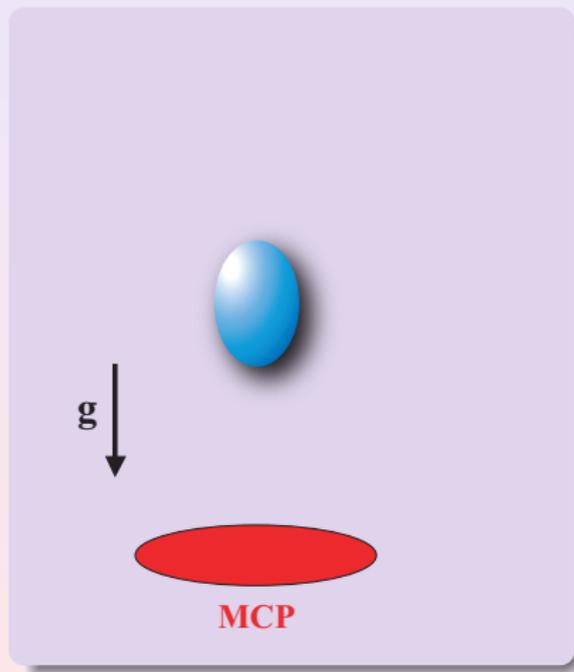


Détection des atomes neutres

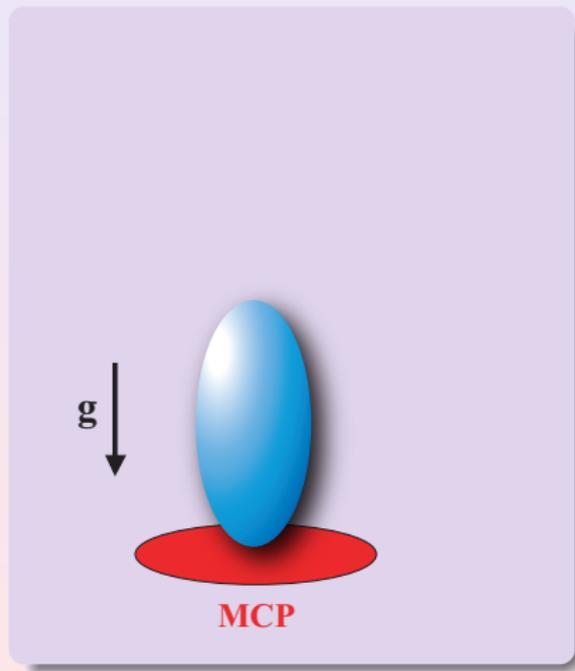
17



Détection des atomes neutres

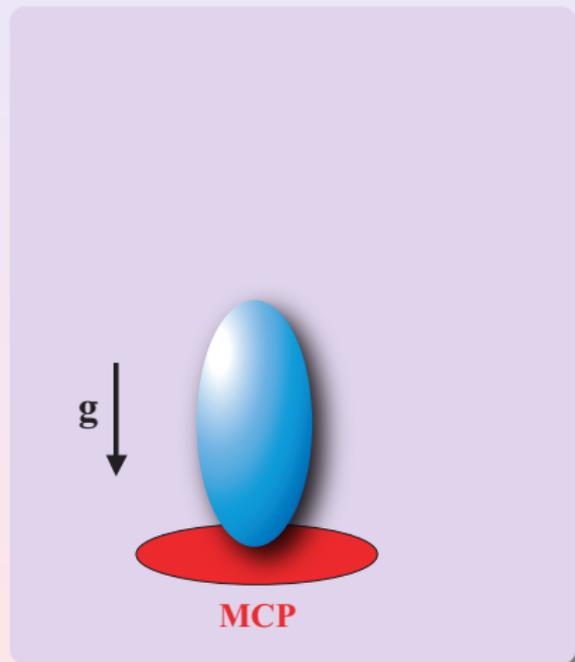


Détection des atomes neutres



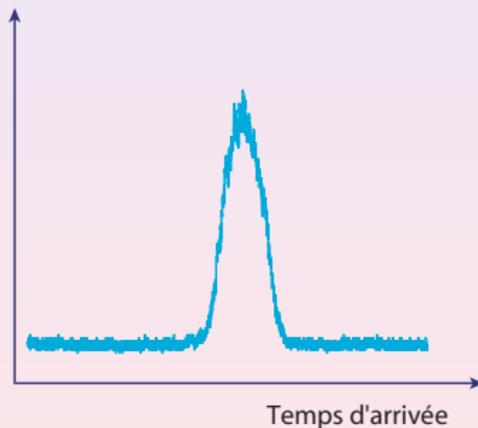
Détection des atomes neutres

18



“Temps de Vol” (TdV)

Signal MCP



Détection des atomes neutres

19

Largeur du TdV →

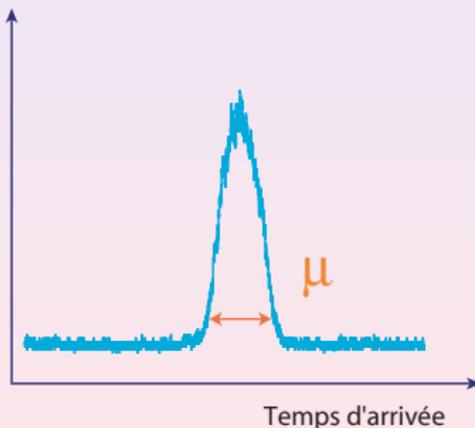
- Condensat :
(interactions)
le potentiel chimique μ
- Nuage thermique :
(énergie cinétique)
la température T

L'aire du TdV →

Idéalement : N ($\rightarrow n$)

“Temps de Vol” (TdV)

Signal MCP



Détection des atomes neutres

19

Largeur du TdV \rightarrow

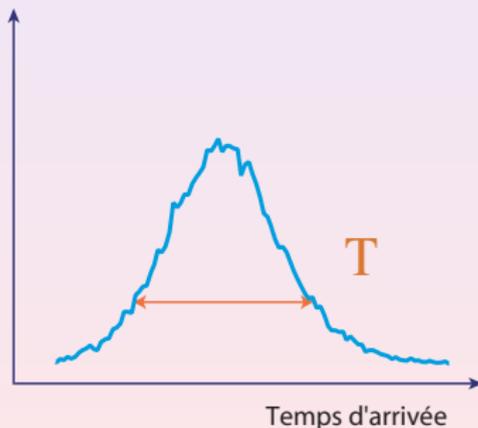
- Condensat :
(interactions)
le potentiel chimique μ
- Nuage thermique :
(énergie cinétique)
la température T

L'aire du TdV \rightarrow

Idéalement : N ($\rightarrow n$)

"Temps de Vol" (TdV)

Signal MCP



Détection des atomes neutres

20

Problème :

Seule une petite partie des atomes arrive sur le détecteur

→ extrêmement difficile de mesurer N d'une manière directe

Mettre en œuvre une technique pour obtenir N et n

Détection des atomes neutres

Technique : utiliser la **largeur** du TdV pour en déduire n

→ possible dans deux cas particuliers:

- Le condensat pur

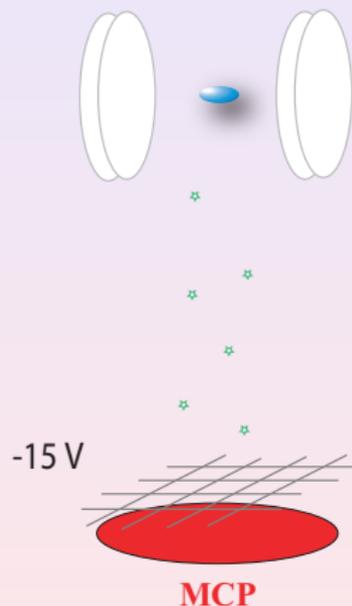
$$n_{\text{cbe}} = \frac{m}{4\pi\hbar^2} \times \frac{\mu}{a}$$

- Nuage thermique au seuil de condensation

$$n_c \lambda^3(T_c) = 2.612 \quad \text{où} \quad \lambda(T_c) \equiv \lambda_c = h / \sqrt{2\pi m k_B T_c}$$

Observation des ions : détection non-perturbante

22



Détection des ions en gardant
le potentiel de piégeage

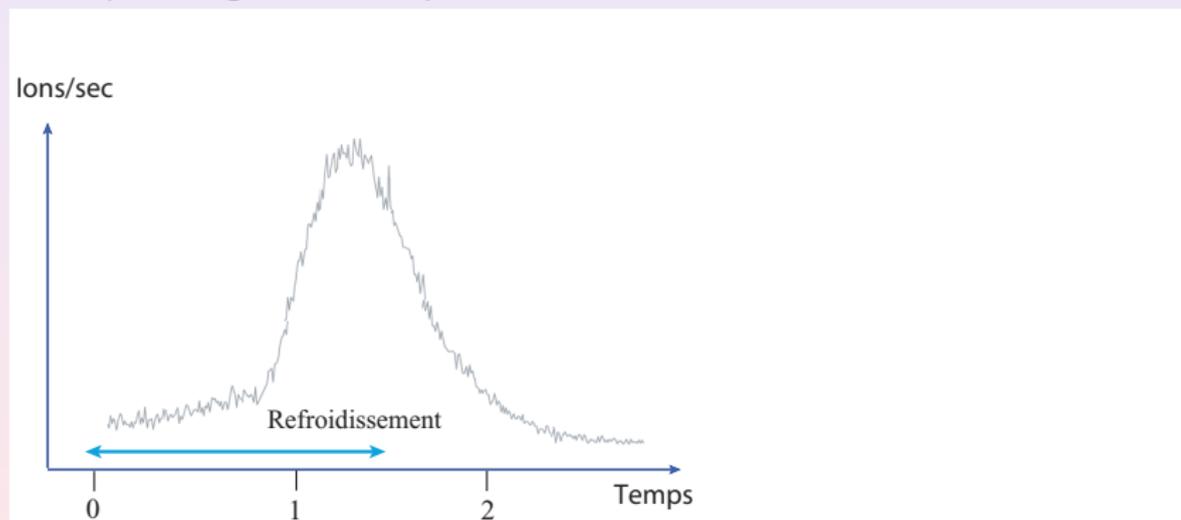
→ observation sans perturbations
extérieures du nuage

Outil de détection *non-perturbant*
et en temps réel

Observation des ions : détection non-perturbante

23

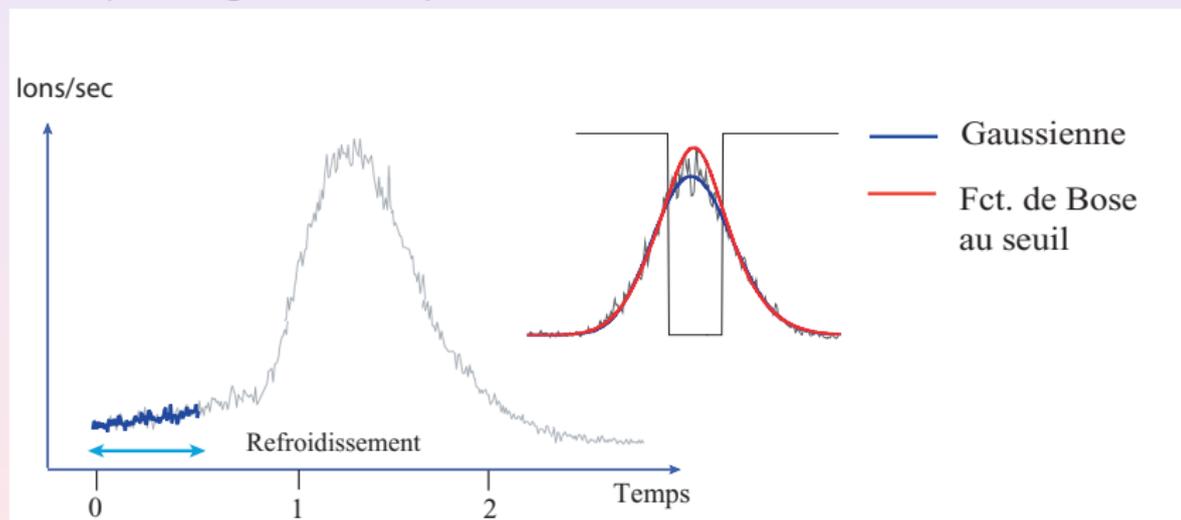
Exemple : signal d'ions pendant la formation d'un condensat



Observation des ions : détection non-perturbante

23

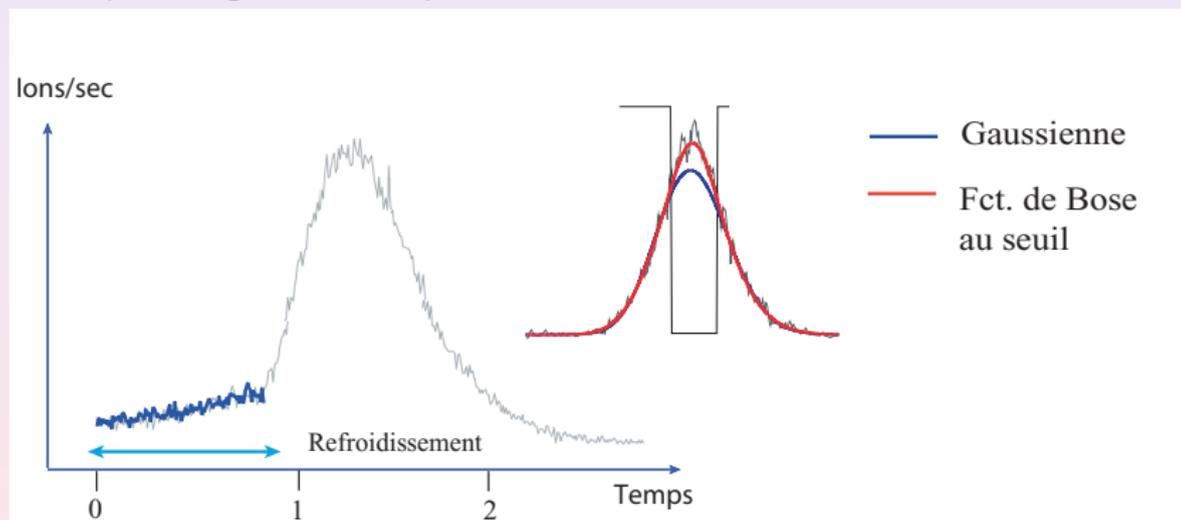
Exemple : signal d'ions pendant la formation d'un condensat



Observation des ions : détection non-perturbante

23

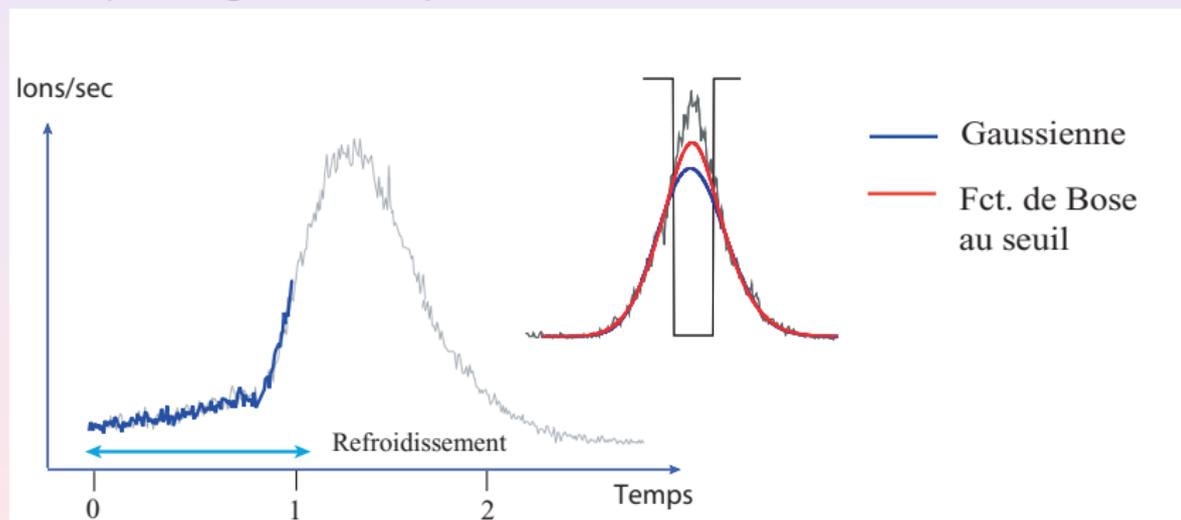
Exemple : signal d'ions pendant la formation d'un condensat



Observation des ions : détection non-perturbante

23

Exemple : signal d'ions pendant la formation d'un condensat



Observation des ions : détection non-perturbante

24

Signal d'ions comme outil d'observation

- La forme

Rupture de pente → seuil de condensation

- Valeur absolue → en déduire la densité du nuage ?

⇒ constantes de collisions ionisantes nécessaires

Plan de l'exposé

25

- 1 Collisions dans un gaz d'hélium métastable
 - Collisions élastiques et longueur de diffusion
 - Collisions inélastiques et constantes de collisions ionisantes
- 2 Méthodes de détection d'un nuage froid d'hélium métastable
 - La galette de micro-canaux
 - Détection des atomes neutres
 - Observation des ions : détection non-perturbante
- 3 Mesure de constantes de collisions et longueur de diffusion
 - Principe des mesures : scénario du gaz idéal
 - Corrections à l'approche simple
 - Stratégie expérimentale et données obtenues
 - Résultats des mesures
- 4 Conclusion et perspectives

Problématique

26

Mesurer les constantes de collisions β et L
et la longueur de diffusion a

$$\text{Méthode "logique" : } \begin{cases} \Phi = \frac{1}{2} \beta \int n^2 d\mathbf{r} + \frac{1}{3} L \int n^3 d\mathbf{r} & \rightarrow \beta, L \\ \mu = \frac{4\pi\hbar^2 a}{m} \times n_{\text{cbe}} & \rightarrow a \end{cases}$$

Rappel de la problématique :

Nous ne pouvons mesurer directement le nombre d'atomes !

⇒ Stratégie plus complexe

Scénario du gaz idéal, homogène et seulement 2 corps

27

- Nuage thermique – paramètres mesurables : Φ_{th} et T

$$\Phi_{\text{th}} = \frac{1}{2} \beta n_{\text{th}}^2 V$$

Au seuil $n_{\text{th}} \lambda_c^3 = 2.612 \rightarrow n_{\text{th}} = \alpha_1 T^{3/2}$

$$\Phi_c = \frac{1}{2} \beta \alpha_1^2 T_c^3 V \rightarrow \beta$$

- Condensat – paramètres mesurables : Φ_{cbe} et μ

$$\Phi_{\text{cbe}} = \frac{1}{2} \frac{1}{2!} \beta n_{\text{cbe}}^2 V$$

$$\mu = \frac{4\pi\hbar^2}{m} a \times n_{\text{cbe}} \quad n_{\text{cbe}} = \alpha_2 \mu \frac{1}{a}$$

$$\Phi_{\text{cbe}} = \frac{1}{2} \frac{1}{2!} \beta \alpha_2^2 \mu^2 \frac{1}{a^2} V \rightarrow a$$

Scénario du gaz idéal, homogène et seulement 2 corps

27

- Nuage thermique – paramètres mesurables : Φ_{th} et T

$$\Phi_{\text{th}} = \frac{1}{2} \beta n_{\text{th}}^2 V$$

$$\text{Au seuil } n_{\text{th}} \lambda_c^3 = 2.612 \quad \rightarrow \quad n_{\text{th}} = \alpha_1 T^{3/2}$$

$$\Phi_c = \frac{1}{2} \beta \alpha_1^2 T_c^3 V \quad \rightarrow \quad \boxed{\beta}$$

- Condensat – paramètres mesurables : Φ_{cbe} et μ

$$\Phi_{\text{cbe}} = \frac{1}{2} \frac{1}{2!} \beta n_{\text{cbe}}^2 V$$

$$\mu = \frac{4\pi\hbar^2}{m} a \times n_{\text{cbe}} \quad n_{\text{cbe}} = \alpha_2 \mu \frac{1}{a}$$

$$\Phi_{\text{cbe}} = \frac{1}{2} \frac{1}{2!} \beta \alpha_2^2 \mu^2 \frac{1}{a^2} V \quad \rightarrow \quad \boxed{a}$$

Scénario du gaz idéal, homogène et seulement 2 corps

27

- Nuage thermique – paramètres mesurables : Φ_{th} et T

$$\Phi_{\text{th}} = \frac{1}{2} \beta n_{\text{th}}^2 V$$

$$\text{Au seuil } n_{\text{th}} \lambda_c^3 = 2.612 \quad \rightarrow \quad n_{\text{th}} = \alpha_1 T^{3/2}$$

$$\Phi_c = \frac{1}{2} \beta \alpha_1^2 T_c^3 V \quad \rightarrow \quad \boxed{\beta}$$

- Condensat – paramètres mesurables : Φ_{cbe} et μ

$$\Phi_{\text{cbe}} = \frac{1}{2} \frac{1}{2!} \beta n_{\text{cbe}}^2 V$$

$$\mu = \frac{4\pi\hbar^2}{m} a \times n_{\text{cbe}} \quad n_{\text{cbe}} = \alpha_2 \mu \frac{1}{a}$$

$$\Phi_{\text{cbe}} = \frac{1}{2} \frac{1}{2!} \beta \alpha_2^2 \mu^2 \frac{1}{a^2} V \quad \rightarrow \quad \boxed{a}$$

Scénario du gaz idéal, homogène et seulement 2 corps

27

- Nuage thermique – paramètres mesurables : Φ_{th} et T

$$\Phi_{\text{th}} = \frac{1}{2} \beta n_{\text{th}}^2 V$$

$$\text{Au seuil } n_{\text{th}} \lambda_c^3 = 2.612 \quad \rightarrow \quad n_{\text{th}} = \alpha_1 T^{3/2}$$

$$\Phi_c = \frac{1}{2} \beta \alpha_1^2 T_c^3 V \quad \rightarrow \quad \boxed{\beta}$$

- Condensat – paramètres mesurables : Φ_{cbe} et μ

$$\Phi_{\text{cbe}} = \frac{1}{2} \frac{1}{2!} \beta n_{\text{cbe}}^2 V$$

$$\mu = \frac{4\pi\hbar^2}{m} a \times n_{\text{cbe}} \quad n_{\text{cbe}} = \alpha_2 \mu \frac{1}{a}$$

$$\Phi_{\text{cbe}} = \frac{1}{2} \frac{1}{2!} \beta \alpha_2^2 \mu^2 \frac{1}{a^2} V \quad \rightarrow \quad \boxed{a}$$

Corrections à l'approche simple

28

- Interactions entre atomes : $T_c(a) \rightarrow \Phi_c(T_c, a)$

L'approche simple ne marche plus \rightarrow stratégie modifiée :

Corrections à l'approche simple

28

- Interactions entre atomes : $T_c(a) \rightarrow \Phi_c(T_c, a)$

L'approche simple ne marche plus \rightarrow stratégie modifiée :

1. Considérer d'abord un condensat

$$\Phi_{cbe}(\mu, \beta, a) \rightarrow \text{trouver d'abord } \beta(a)$$

2. Ensuite un nuage au seuil

$$\Phi_c(T_c, a, \beta(a)) \rightarrow \text{ajustement} \rightarrow a \quad (\text{et } \beta)$$

Corrections à l'approche simple

- Interactions entre atomes : $T_c(a) \rightarrow \Phi_c(T_c, a)$

L'approche simple ne marche plus \rightarrow stratégie modifiée :

1. Considérer d'abord un condensat

$$\Phi_{cbe}(\mu, \beta, a) \rightarrow \text{trouver d'abord } \beta(a)$$

2. Ensuite un nuage au seuil

$$\Phi_c(T_c, a, \beta(a)) \rightarrow \text{ajustement} \rightarrow a \quad (\text{et } \beta)$$

Potentiel harmonique et collisions à 3 corps : ne change en rien la stratégie

Corrections : le condensat

Taux d'ions d'un condensat

$$\Phi_{\text{cbe}} = \frac{1}{2!} \frac{1}{2} \beta c_2 n_{\text{cbe}} N + \frac{1}{3!} \frac{1}{3} L c_3 n_{\text{cbe}}^2 N$$

Corrections dues à la déplétion quantique :

$$\left. \begin{array}{l} \frac{1}{2!} \rightarrow \frac{1}{2!} \times (1 + \epsilon_2) \\ \frac{1}{3!} \rightarrow \frac{1}{3!} \times (1 + \epsilon_3) \end{array} \right\} \epsilon_i \propto \sqrt{n_{\text{cbe}} a^3} \quad (\text{G. Shlyapnikov})$$

Ordre de grandeur : $\epsilon_2 \sim 10\%$ et $\epsilon_3 \sim 25\%$

Corrections : le nuage thermique

30

Taux d'ions d'un nuage au seuil

Sans interactions : $n_c \lambda_c^3 = 2.612 \rightarrow n_c(T_c)$

$$\Phi_c = \frac{1}{2} \beta(a) \int n^2(T_c) d\mathbf{r} + \frac{1}{3} L(a) \int n^3(T_c) d\mathbf{r}$$

Champ moyen : $n_c(a) \lambda_c^3 = 2.612 \rightarrow n_c(T_c, a)$

$$\rightarrow \Phi_c(T_c, a, \beta(a), L(a))$$

Corrections $\sim 60\%$

Plan de l'exposé

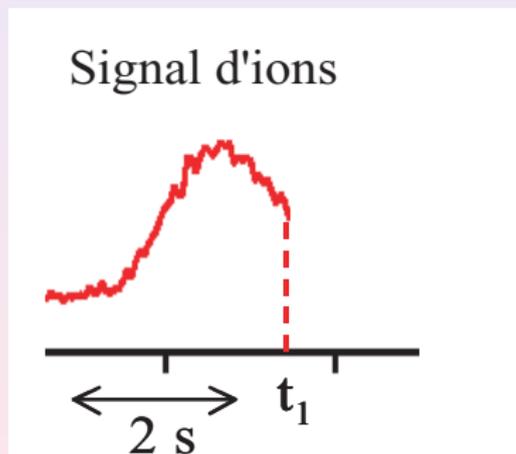
31

- 1 Collisions dans un gaz d'hélium métastable
 - Collisions élastiques et longueur de diffusion
 - Collisions inélastiques et constantes de collisions ionisantes
- 2 Méthodes de détection d'un nuage froid d'hélium métastable
 - La galette de micro-canaux
 - Détection des atomes neutres
 - Observation des ions : détection non-perturbante
- 3 Mesure de constantes de collisions et longueur de diffusion
 - Principe des mesures : scénario du gaz idéal
 - Corrections à l'approche simple
 - Stratégie expérimentale et données obtenues
 - Résultats des mesures
- 4 Conclusion et perspectives

Expérience : mesure de β et L avec un condensat

32

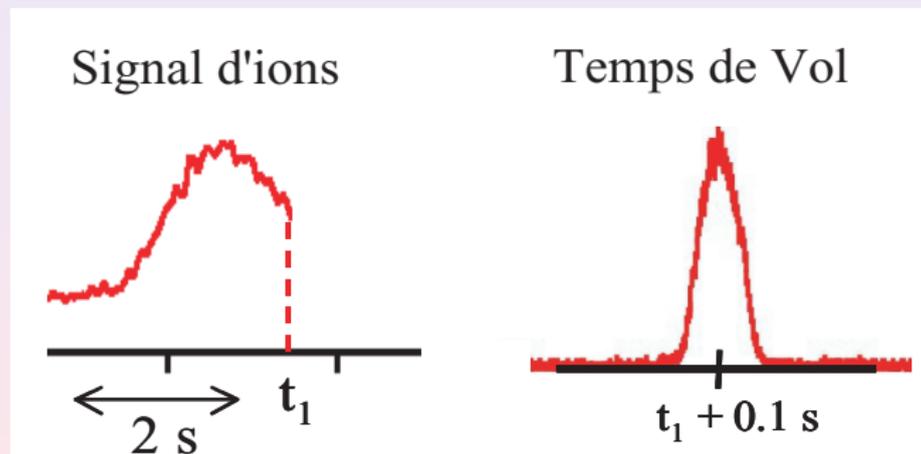
Condensat – mesures simultanées de Φ_{cbe} et μ



Expérience : mesure de β et L avec un condensat

32

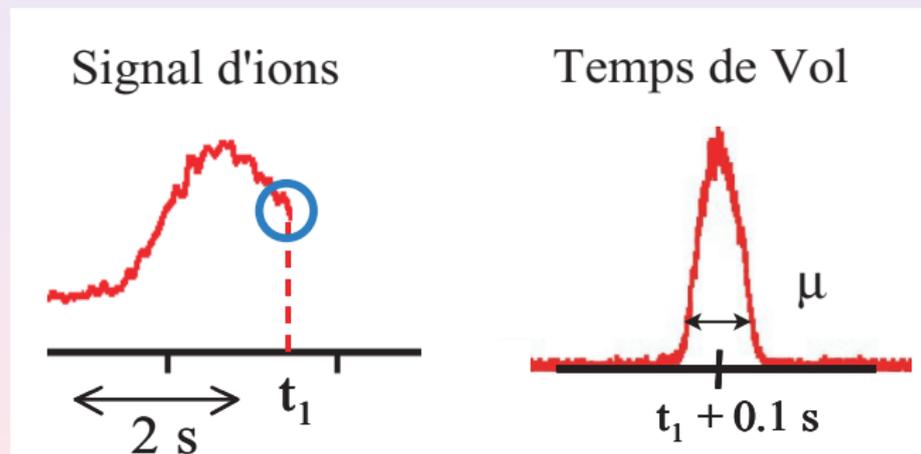
Condensat – mesures simultanées de Φ_{cbe} et μ



Expérience : mesure de β et L avec un condensat

32

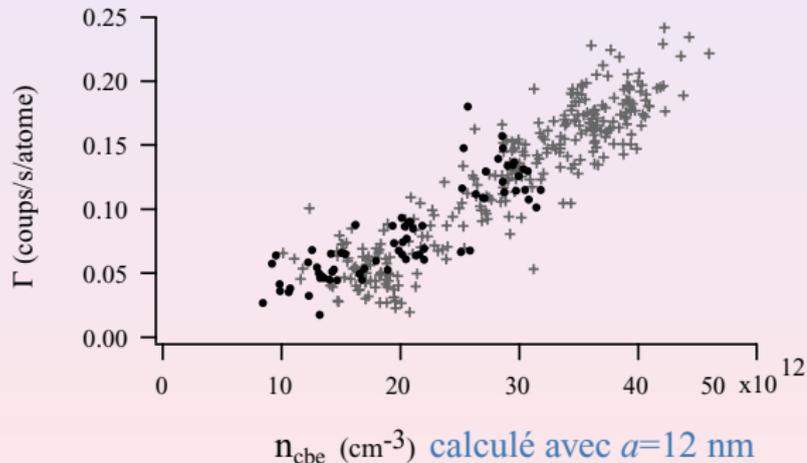
Condensat – mesures simultanées de Φ_{cbe} et μ



Données : mesure de β et L avec un condensat

33

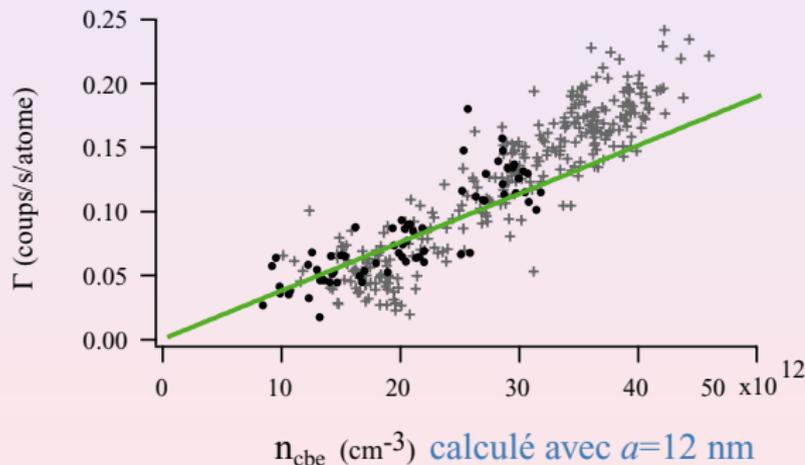
$$\Gamma_{\text{cbe}} = \Phi_{\text{cbe}}/N = c'_2 \beta n_{\text{cbe}} + c'_3 L n_{\text{cbe}}^2$$



Données : mesure de β et L avec un condensat

33

$$\Gamma_{\text{cbe}} = \Phi_{\text{cbe}}/N = c'_2 \beta n_{\text{cbe}} + c'_3 L n_{\text{cbe}}^2$$

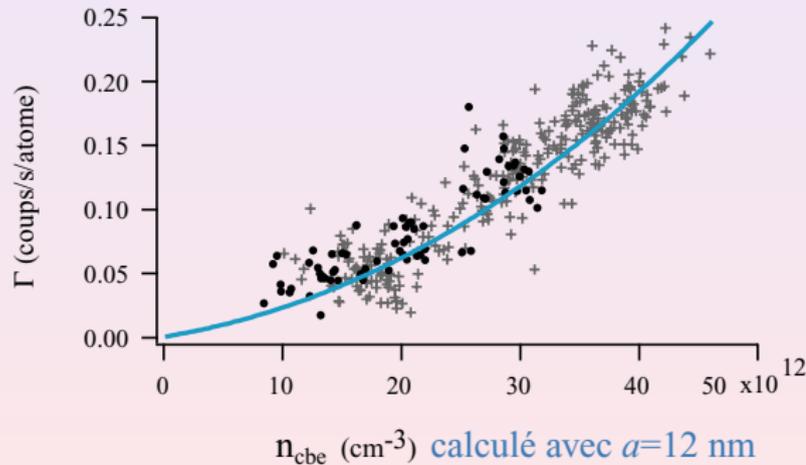


$$\chi^2 \sim 1.4$$

Données : mesure de β et L avec un condensat

33

$$\Gamma_{\text{cbe}} = \Phi_{\text{cbe}}/N = c'_2 \beta n_{\text{cbe}} + c'_3 L n_{\text{cbe}}^2$$

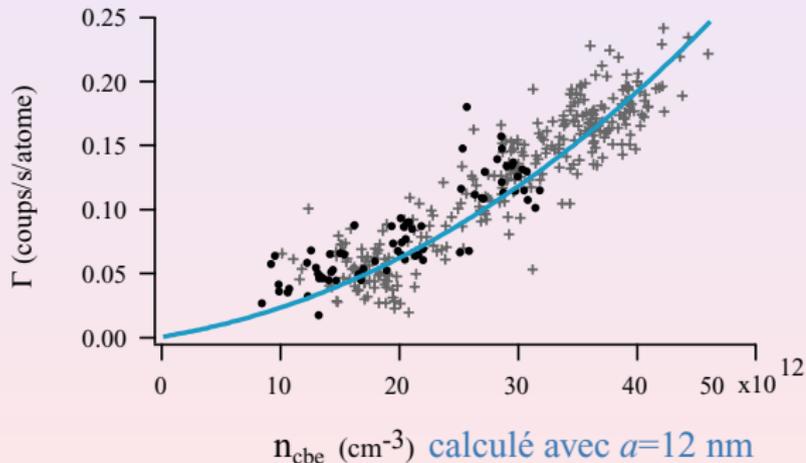


$$\chi^2 \sim 1.0$$

Données : mesure de β et L avec un condensat

33

$$\Gamma_{\text{cbe}} = \Phi_{\text{cbe}}/N = c'_2 \beta n_{\text{cbe}} + c'_3 L n_{\text{cbe}}^2$$

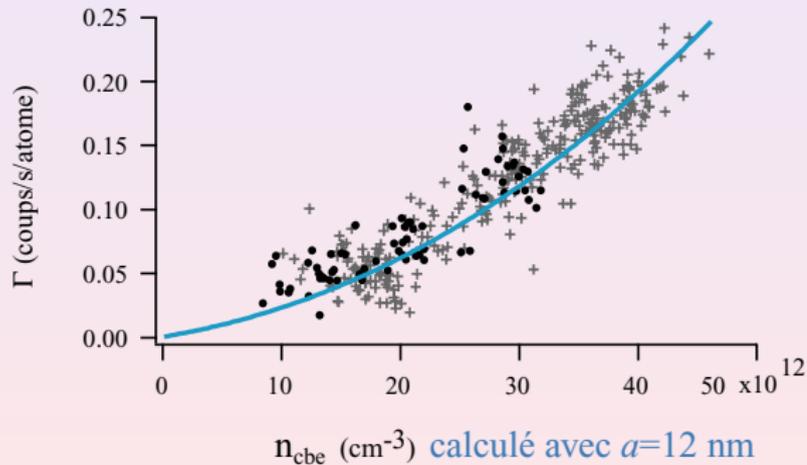


Collisions à
2- et 3 corps
présentes

Données : mesure de β et L avec un condensat

33

$$\Gamma_{\text{cbe}} = \Phi_{\text{cbe}}/N = c'_2 \beta n_{\text{cbe}} + c'_3 L n_{\text{cbe}}^2$$



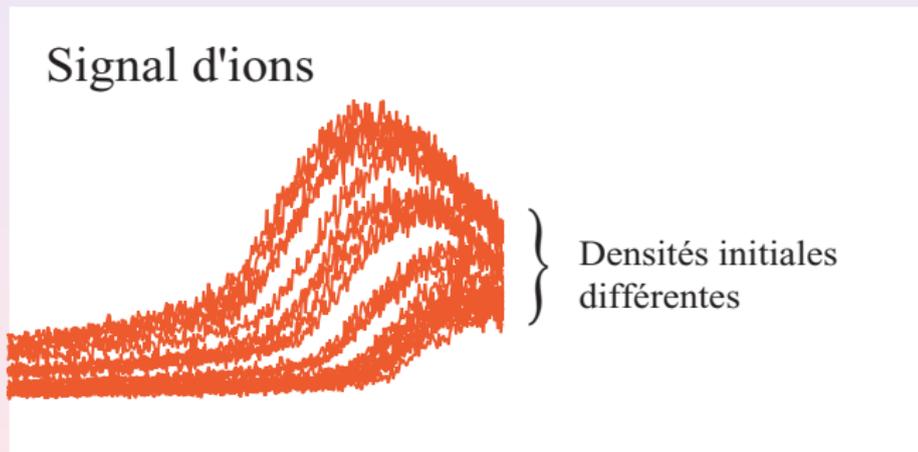
Collisions à
2- et 3 corps
présentes

$\beta(a)$ et $L(a)$

Expérience : mesure de a avec un nuage au seuil

34

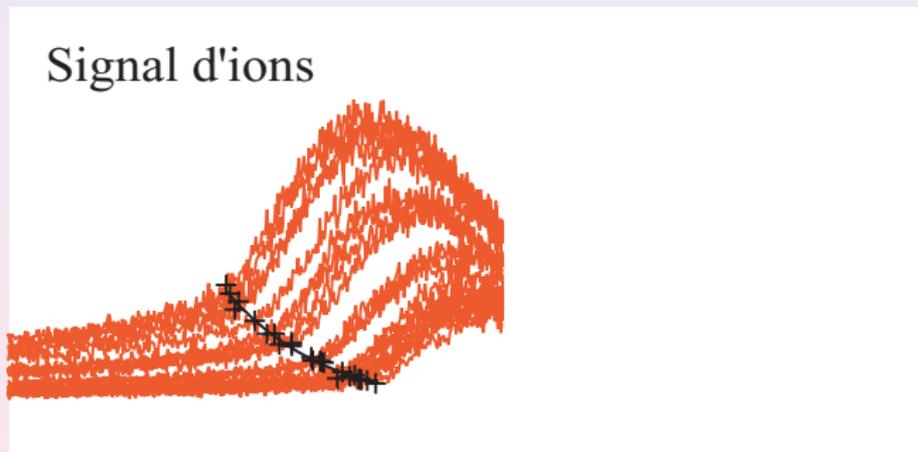
Nuage au seuil – mesures simultanées de Φ_c et T_c



Expérience : mesure de a avec un nuage au seuil

34

Nuage au seuil – mesures simultanées de Φ_c et T_c

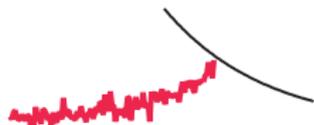


Expérience : mesure de a avec un nuage au seuil

34

Nuage au seuil – mesures simultanées de Φ_c et T_c

Signal d'ions

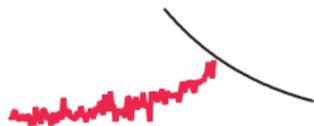


Expérience : mesure de a avec un nuage au seuil

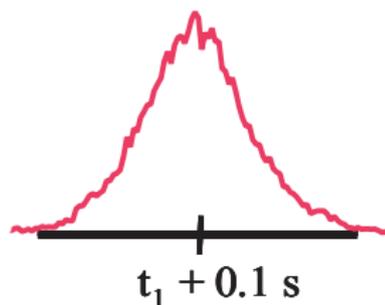
34

Nuage au seuil – mesures simultanées de Φ_c et T_c

Signal d'ions



Temps de Vol



Expérience : mesure de a avec un nuage au seuil

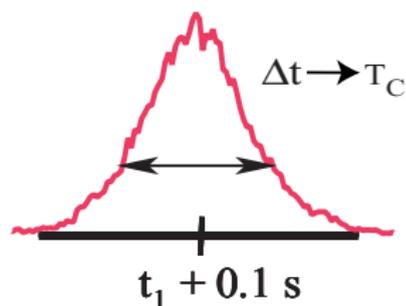
34

Nuage au seuil – mesures simultanées de Φ_c et T_c

Signal d'ions

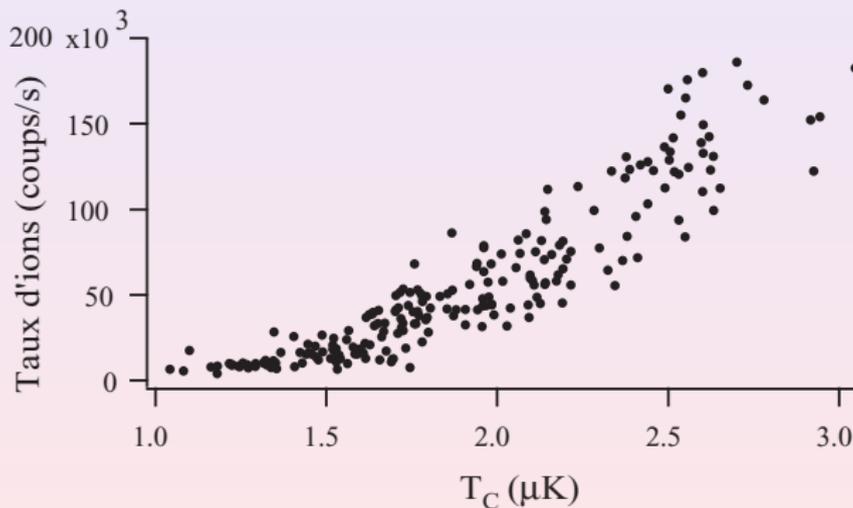


Temps de Vol



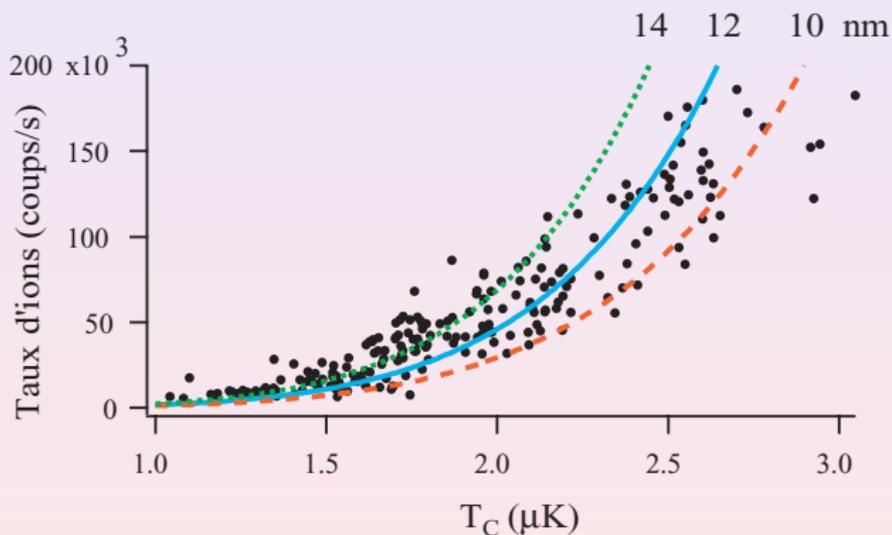
Données : mesure de a avec un nuage au seuil

35



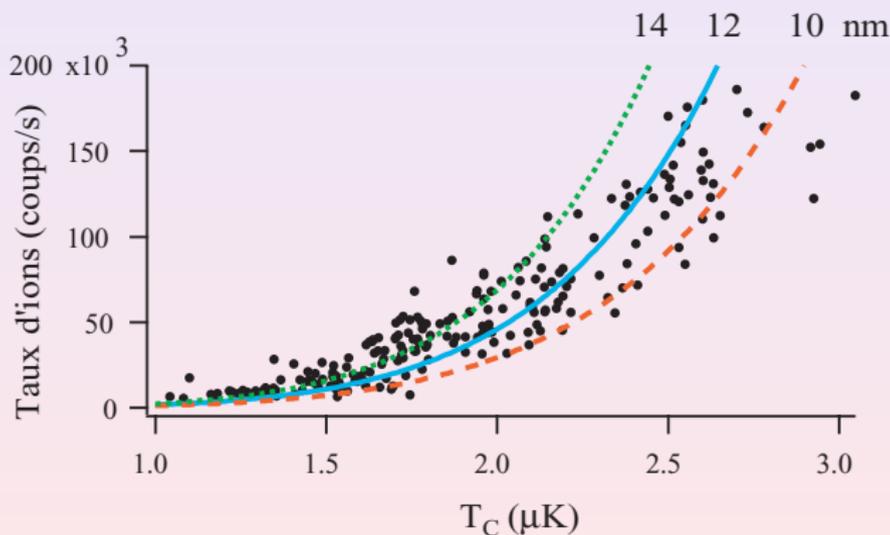
Données : mesure de a avec un nuage au seuil

36

Rappel : $\Phi_c(T_c, a, \beta(a), L(a))$ 

Données : mesure de a avec un nuage au seuil

36

Rappel : $\Phi_c(T_c, a, \beta(a), L(a))$ 

Tendance étrange → nuages pas au seuil ?

Qualité de l'ajustement

37

Le TdV : fonction d'ajustement valable uniquement au seuil

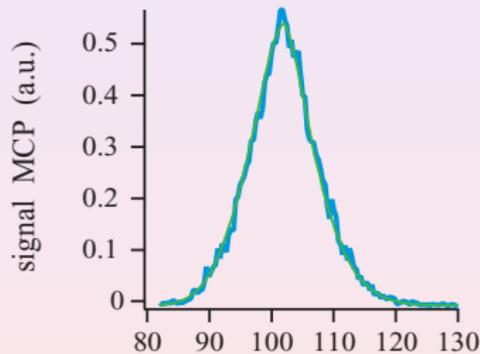
→ qualité de l'ajustement du TdV → proximité du seuil

Qualité de l'ajustement

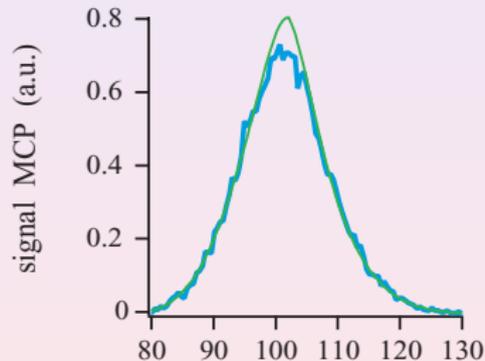
37

Le TdV : fonction d'ajustement valable uniquement au seuil

→ qualité de l'ajustement du TdV → proximité du seuil



$$\chi^2 = 1.0$$



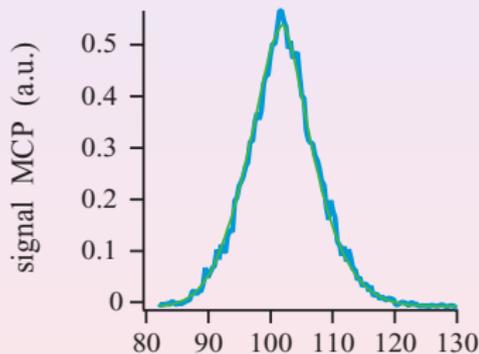
$$\chi^2 = 3.6$$

Qualité de l'ajustement

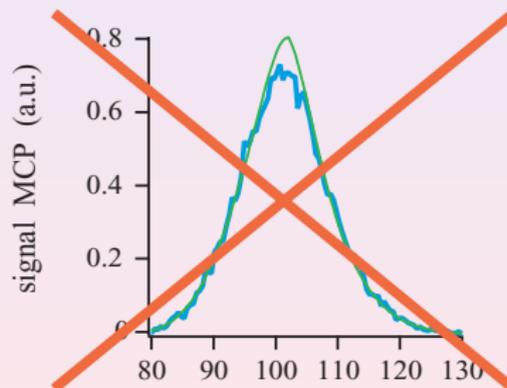
37

Le TdV : fonction d'ajustement valable uniquement au seuil

→ qualité de l'ajustement du TdV → proximité du seuil



$$\chi^2 = 1.0$$

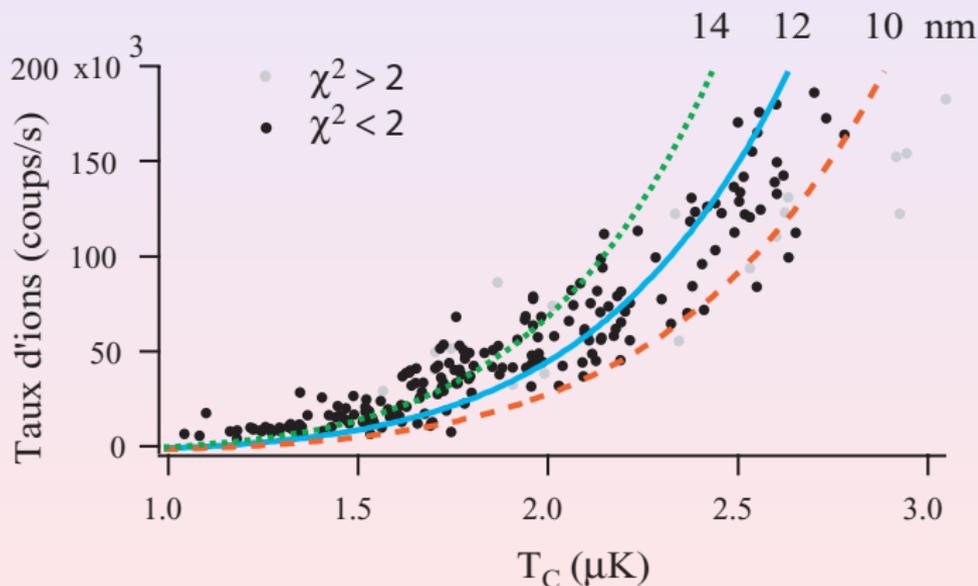


$$\chi^2 = 3.6$$

Données : mesure de a avec un nuage au seuil

38

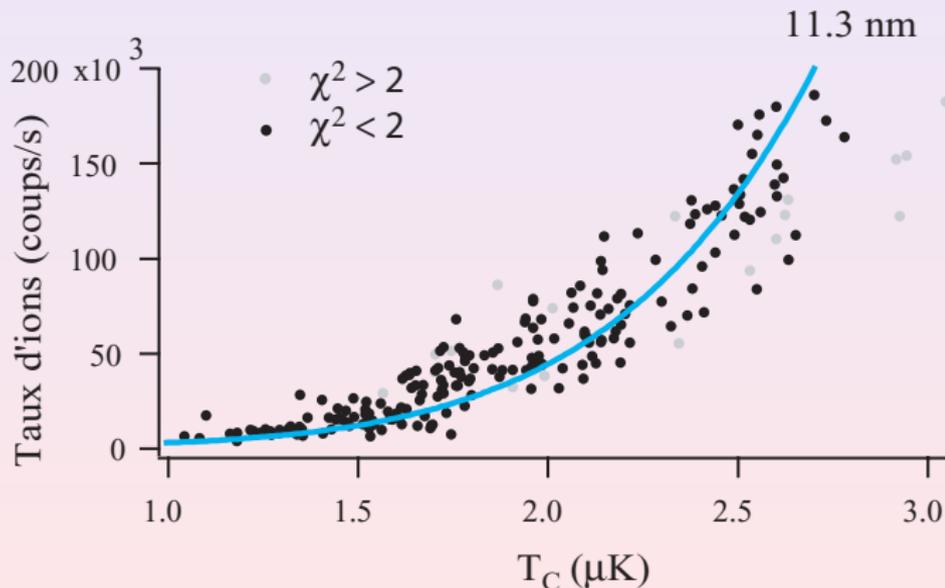
Deux classes de données selon signal de TdV



Données : mesure de a avec un nuage au seuil

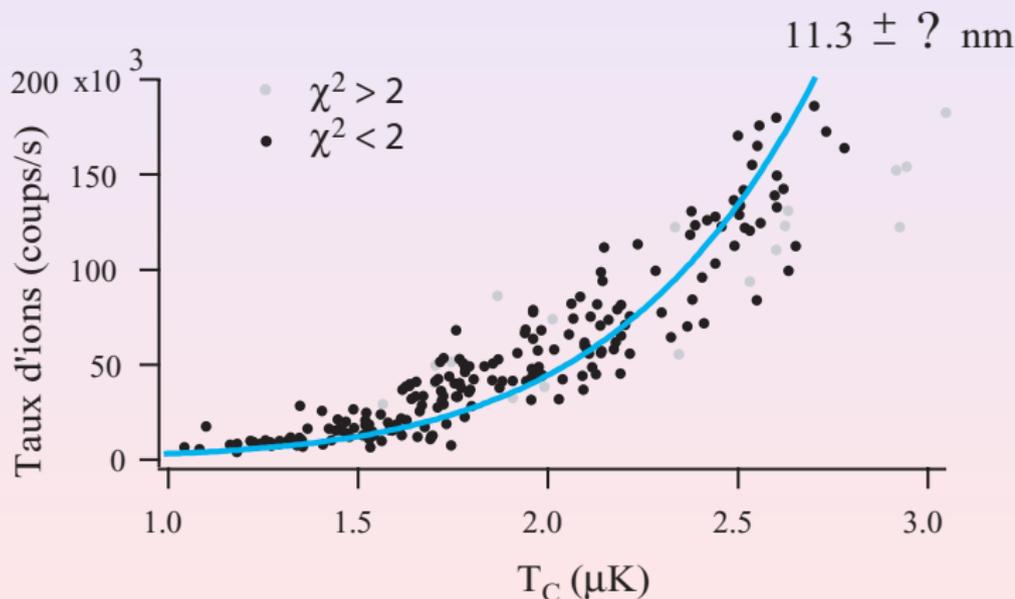
39

Ajustement avec $\Phi_c(T_c, a, \beta(a), L(a))$ pour obtenir a



Données : mesure de a avec un nuage au seuil

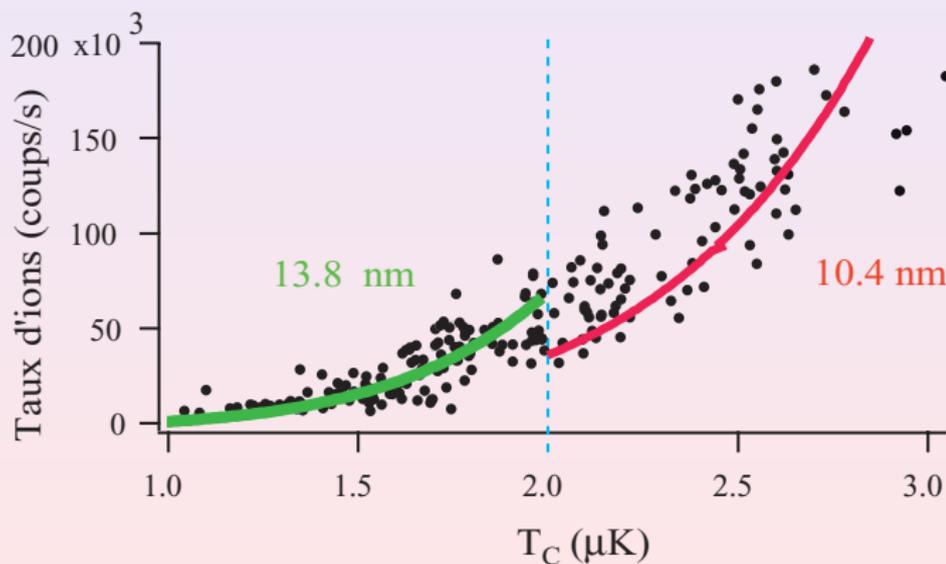
39

Ajustement avec $\Phi_c(T_c, a, \beta(a), L(a))$ pour obtenir a 

Données : mesure de a avec un nuage au seuil

40

Une erreur systématique ?



La longueur de diffusion et constantes des collisions

41

Résultat final sur la mesure de la longueur de diffusion

$$a = 11.3^{+2.5}_{-1.0} \text{ nm}$$

La longueur de diffusion et constantes des collisions

41

Résultat final sur la mesure de la longueur de diffusion

$$a = 11.3^{+2.5}_{-1.0} \text{ nm}$$

Mesure de a sans faire aucune mesure directe de N !

La longueur de diffusion et constantes des collisions

41

Résultat final sur la mesure de la longueur de diffusion

$$a = 11.3^{+2.5}_{-1.0} \text{ nm}$$

Mesure de a indépendante de la détectivité α des ions !

La longueur de diffusion et constantes des collisions

Résultat final sur la mesure de la longueur de diffusion

$$a = 11.3^{+2.5}_{-1.0} \text{ nm}$$

Mesure de a indépendante de la détectivité α des ions !

$$\Phi_c = \beta(a) \times f(T_c, a) + L(a) \times g(T_c, a)$$

La longueur de diffusion et constantes des collisions

41

Résultat final sur la mesure de la longueur de diffusion

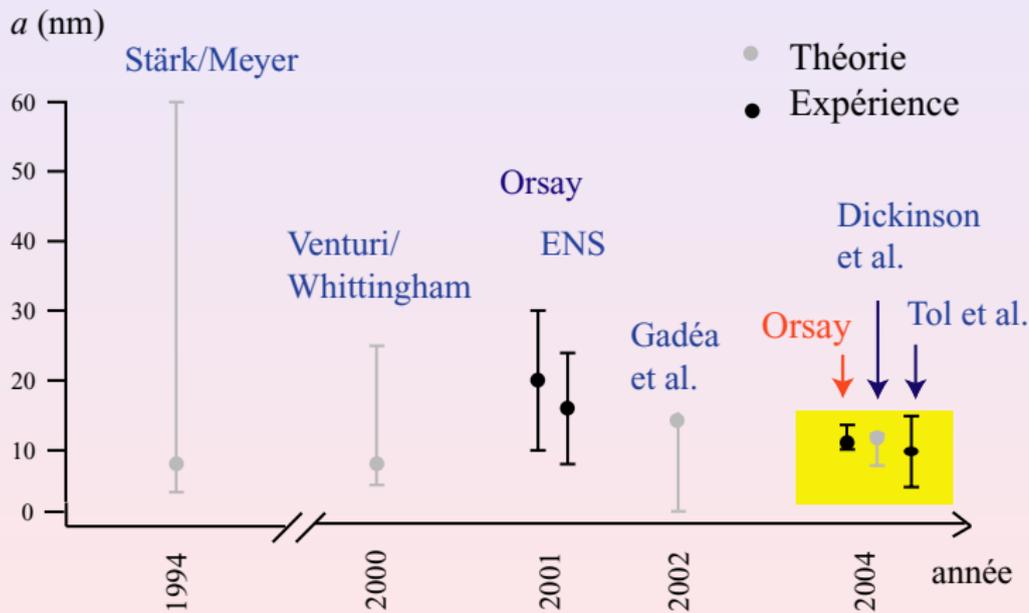
$$a = 11.3_{-1.0}^{+2.5} \text{ nm}$$

Mesure de a indépendante de la détectivité α des ions !

$$\Phi_c / \alpha = \beta(a) / \alpha \times f(T_c) + L(a) / \alpha \times g(T_c)$$

Résultats : la longueur de diffusion

42



Les constantes des collisions

Résultat final sur les constantes de collisions

$$\beta = 0.9_{-0.8}^{+2.0} \times 10^{-14} \text{ cm}^3/\text{s}$$

$$L = 2.5_{-1.7}^{+5.3} \times 10^{-27} \text{ cm}^6/\text{s}$$

$\beta \sim 10^{-4} \times \beta_{\text{non-pol}}$ (confirme prédiction par G. Shlyapnikov *et al.*)

Théorie

$$\beta \sim 10^{-14} \text{ cm}^3/\text{s}$$

P. O. Fedichev *et al.* Phys. Rev. A **53** 1447 (1996)

P. J. Leo *et al.* Phys. Rev. A **64** 42710 (2002)

$$L = 11.7 \hbar a^4/m \sim 3 \times 10^{-27} \text{ cm}^6/\text{s}$$

P. O. Fedichev *et al.* Phys. Rev. Lett. **77** 2921 (1996)

Plan de l'exposé

- 1 Collisions dans un gaz d'hélium métastable
 - Collisions élastiques et longueur de diffusion
 - Collisions inélastiques et constantes de collisions ionisantes
- 2 Méthodes de détection d'un nuage froid d'hélium métastable
 - La galette de micro-canaux
 - Détection des atomes neutres
 - Observation des ions : détection non-perturbante
- 3 Mesure de constantes de collisions et longueur de diffusion
 - Principe des mesures : scénario du gaz idéal
 - Corrections à l'approche simple
 - Stratégie expérimentale et données obtenues
 - Résultats des mesures
- 4 Conclusion et perspectives

Conclusion

Caractérisation d'un outil "non-perturbant" d'observation :
le signal d'ions

- Rupture de pente → seuil de la condensation
- Mise en évidence la présence des collisions à 3 corps
- Mesure des constantes de collisions β et L

Application du signal d'ions

- Production d'un nuage exactement au seuil
→ mesure de la longueur de diffusion

Perspectives

1. Expériences envisageables suite aux résultats obtenus

Notre analyse : corrections imposées selon théorie pour déduire a .

- déplétion quantique
- décalage température critique
- ...

Quand une mesure *indépendante* de a disponible (ENS)

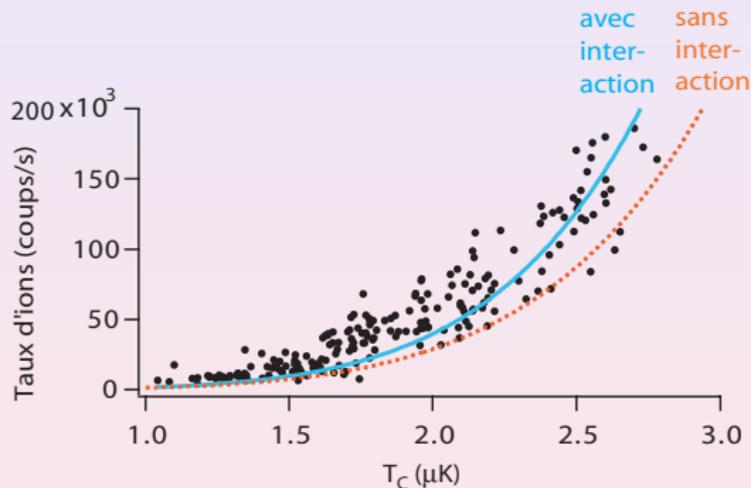
→ fixer a dans les expressions pour le taux d'ions

⇒ **Tester expérimentalement** corrections dues aux interactions

Perspectives

47

Exemple : décalage de la température critique



Augmenter la précision \Rightarrow comprendre et réduire la dispersion

2. Expériences envisageables suite aux résultats obtenus

Le taux d'ions \rightarrow étude de la formation d'un condensat

- évolution de densité
valeur du signal d'ions $\rightarrow \beta, L \rightarrow$ densité
- évolution des fonctions de corrélations $g^{(2)}$ (par TdV)
rupture de pente : localiser le nuage par rapport au seuil

Perspectives

D'abord : étude des fonctions de corrélations

Double utilité de la métastabilité :

1. Taux d'ions : localiser le nuage par rapport au seuil
2. Détection des atomes neutres "un par un"
→ étude *microscopique* des corrélations

Nouvelle galette de micro-canaux nécessaire

- installée
- testée

Merci à mon équipe

Je voudrais remercier l'équipe He*

- **Anciens thésards**

A. Browaeys et O. Sirjean

- **Thésards et nouveaux thésards**

J. Gomes, R. Hoppeler, M. Schellekens et A. Perrin

- **Permanents**

D. Boiron, C.I. Westbrook et A. Aspect

Ainsi que

- Tous les membres du groupe optique atomique
- K. Mølmer de m'avoir mise en relation avec ce groupe
- Le personnel de l'Institut d'Optique....

Merci



Corrections dues aux interactions et point zéro

Corrections : le nuage thermique

$$\Phi_c = \left(\frac{\omega_c}{\bar{\omega}}\right)^3 \times \left[c'_1 + \beta(a) c'_2 \frac{1}{\lambda_c^3} + L(a) c'_3 \frac{1}{\lambda_c^6} \right] \begin{cases} \omega_c = k_B T_c / \hbar \\ \bar{\omega} = (\omega_{\parallel} \omega_{\perp}^2)^{1/3} \end{cases}$$

Corrections dues à l'énergie du point zéro et interactions

$$c'_i \rightarrow c'_i + \underbrace{p_i \times \frac{\tilde{\omega}}{\omega_c}}_{\text{Point zéro}} + \underbrace{q_i \times (n_c a^3)^{1/3}}_{\text{Interactions}}$$

Point zéro $\sim 20\%$

Interactions $\sim 60\%$