

SOUTENANCE DE THÈSE

13 décembre 2022

OPTIQUE ATOMIQUE QUANTIQUE

L'HÉLIUM MÉTASTABLE AU SERVICE
DE L'INTERFÉROMÉTRIE ATOMIQUE

Quentin Marolleau

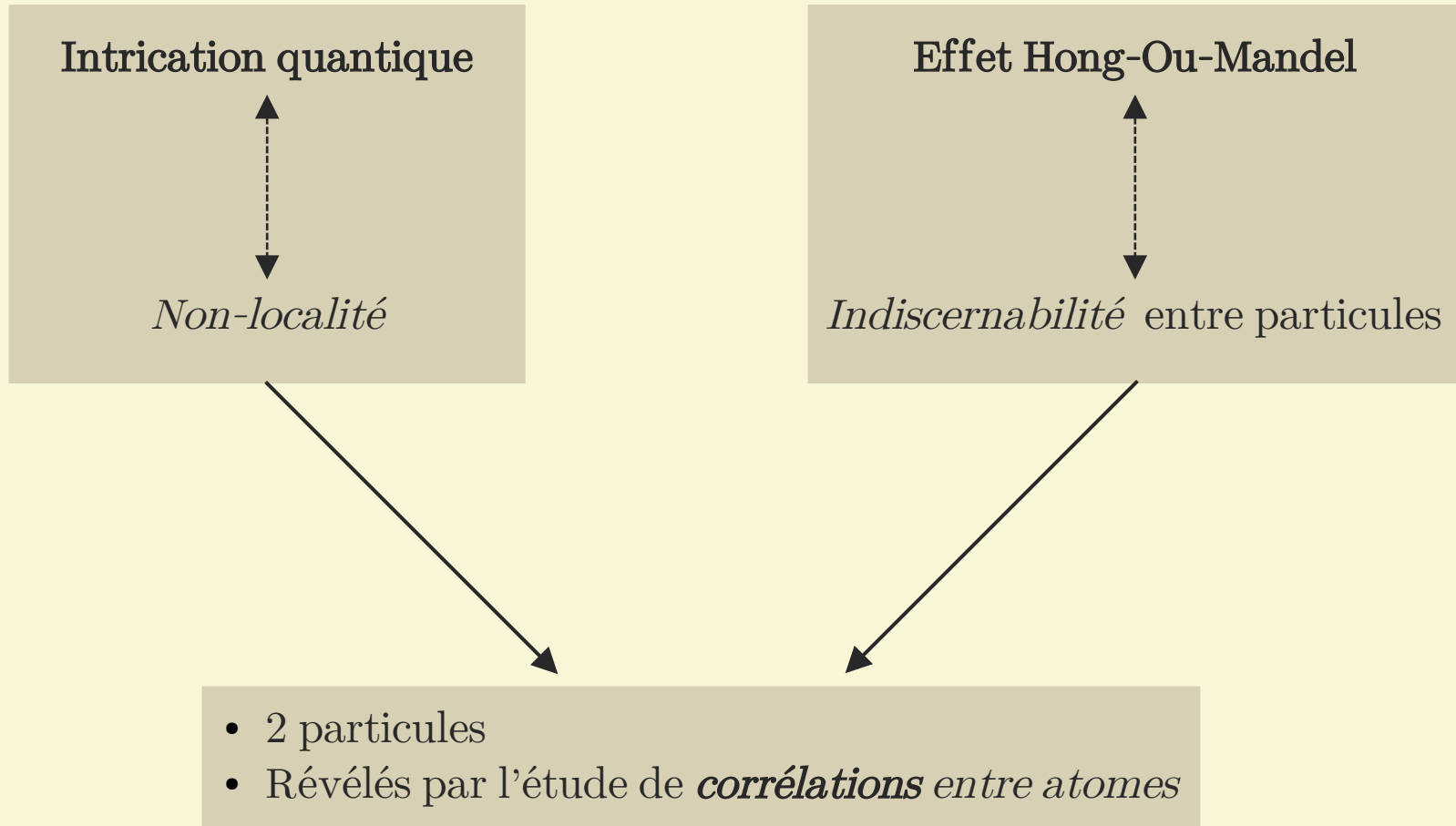
directeur de thèse : Denis Boiron

co-encadrant : Christoph Westbrook

Membres du jury

Alberto Bramati	<i>examineur</i>
Rosa Tualle-Brouri	<i>examinatrice</i>
William Guerin	<i>rapporteur</i>
Laurent Vernac	<i>rapporteur</i>

Étrangeté quantique -----> En considérant **2 particules**

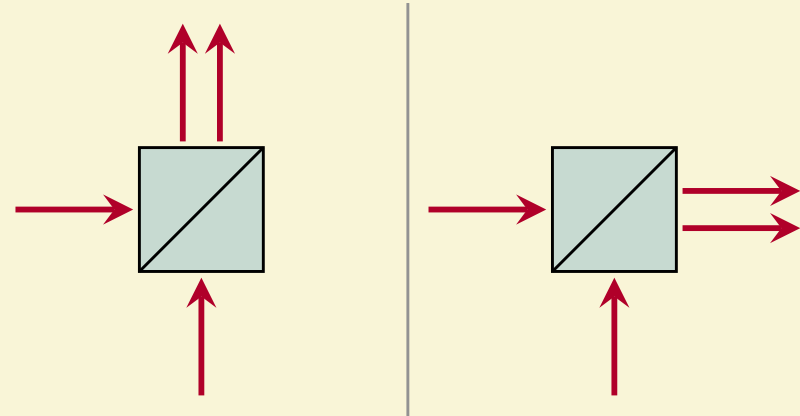


Étrangeté quantique -----> En considérant **2 particules**

Effet HOM (1987)

Résultat quantique :

2 issues équiprobables
(si particules = **bosons indiscernables**)



Aucune détection coïncidente !

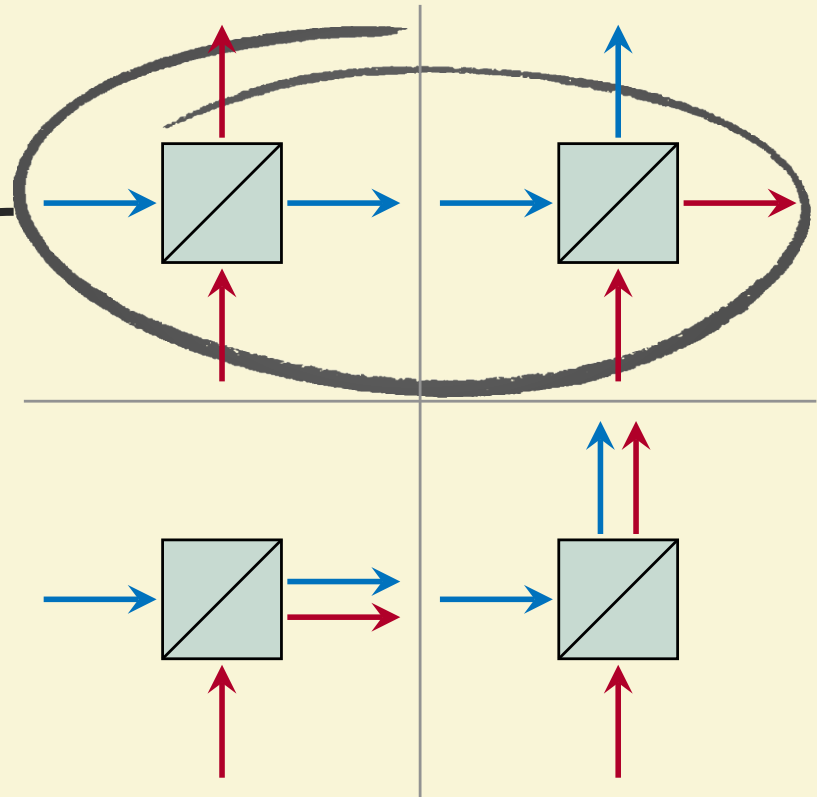
Étrangeté quantique -----> En considérant **2 particules**

Effet HOM (1987)

Résultat classique :

4 issues équiprobables

Détections coïncidentes
dans 50 % des cas



Étrangeté quantique -----> En considérant **2 particules**

État intriqué à deux particules

« Paradoxe » EPR (1935)

$$|\Psi_{\text{EPR}}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} [|\uparrow\rangle_A \otimes |\downarrow\rangle_B + |\downarrow\rangle_A \otimes |\uparrow\rangle_B]$$

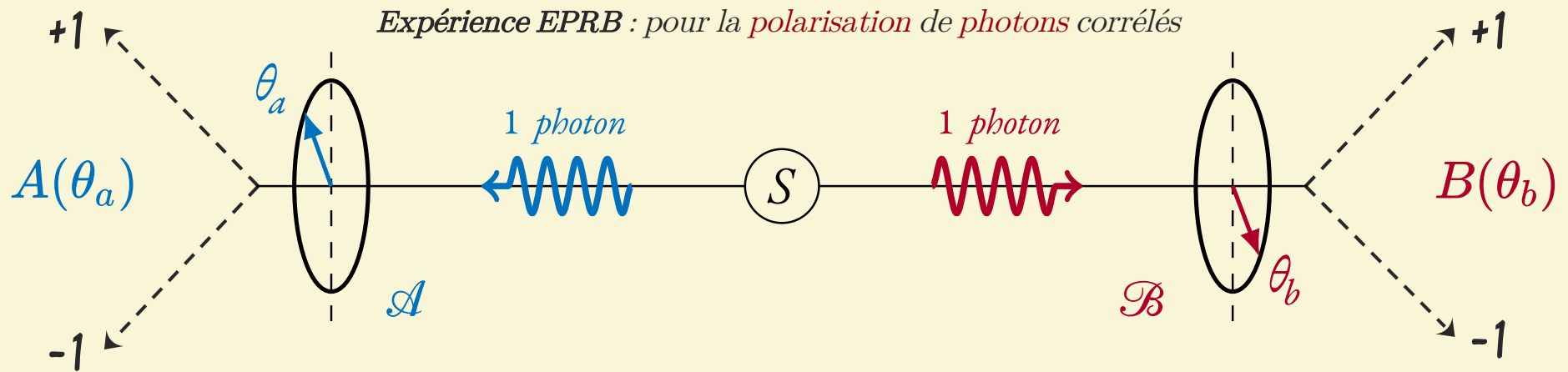
CONTREVIENT AU PRINCIPE DE **RÉALISME LOCAL**

Réalisme : Résultat certain $\Rightarrow$ quantité physique

Localité : Dynamique gouvernée par des quantités locales



Contribution de J.S. Bell (1964)



$$E(\theta_a, \theta_b) = \langle A(\theta_a) \cdot B(\theta_b) \rangle$$

$$S = E(\theta_a, \theta_b) - E(\theta_a, \theta'_b) + E(\theta'_a, \theta'_b) + E(\theta'_a, \theta_b)$$

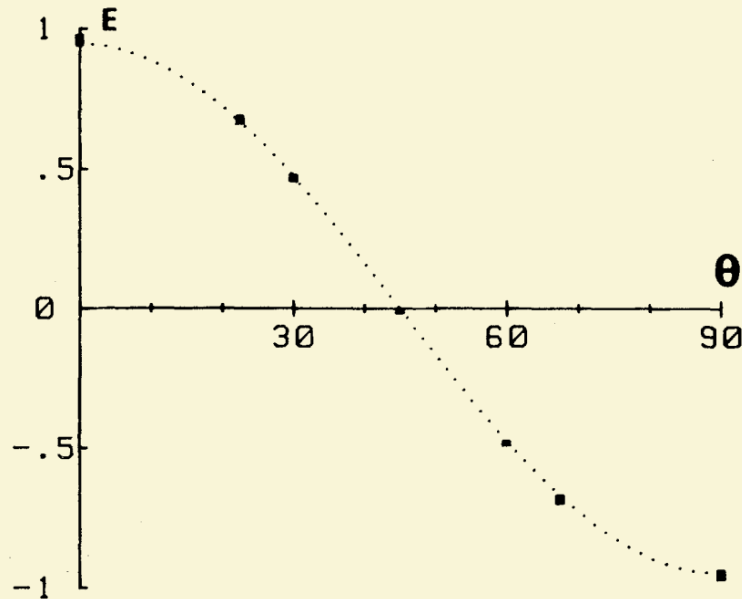
$$|S_{\text{classique}}| \leq 2$$

$$|S_{\text{quantique}}| \leq 2\sqrt{2}$$



Expérience de Aspect et. al (1982)

État intriqué $\Rightarrow E(\theta_a, \theta_b) = \pm \cos \underbrace{(2[\theta_a - \theta_b])}_{\theta}$



$$S_{\text{mesuré}} = 2.697 \pm 0.015$$

Alain Aspect, Philippe Grangier, et Gérard Roger. « *Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A New Violation of Bell's Inequalities* ».

Physical Review Letters **49**, no 2 (12 juillet 1982): 91-94.

Fin de l'histoire pour la non-localité?

2015 : expériences sans « échappatoire classique »

Giustina, et al. « *Significant-Loophole-Free Test of Bell's Theorem with Entangled Photons* ». Physical Review Letters 115, **25** (2015)

S. Blok, et al. « *Loophole-Free Bell Inequality Violation Using Electron Spins Separated by 1.3 Kilometres* ». Nature 526, **7575** (2015)

Bierhorst, et al. « *Strong Loophole-Free Test of Local Realism* ». Physical Review Letters 115, **25** (2015)

1972 → *mesure du corrélateur* (Clauser et al.)

1982 → ~~conspiration des analyseurs~~ (Aspect et al.)

2015 → ~~conspiration des analyseurs~~ + ~~défectivité finie~~

Fin de l'histoire pour la non-localité?

Pistes restant à explorer :

- *plus* de 2 particules
- *plus* de modes intriqués
- **Intriquer états externes de particules massives**

Crucial en **information**
quantique

	PHOTONS	ATOMES
États internes	FAIT	FAIT
États externes	FAIT	À FAIRE

extension des expériences d'**optique quantique**
au domaine des **atomes**,
en considérant leur **impulsion**.

Nos deux thématiques d'études

THÈMES

« Indiscernabilité entre atomes »

« Violation des inégalités de Bell »

FAIT

Effet HOM

Lopes et al. « *Atomic Hong–Ou–Mandel Experiment* ». *Nature* 520, **7545** (2015): 66-68.

Résultat préliminaire

Dussarrat et al.
« *Two-Particle Four-Mode Interferometer for Atoms* ». *Physical Review Letters* 119, **17** (2017): 173202.

À FAIRE

Traiter la physique à
plus de 2 particules

Mesurer la violation
des inégalités

- dispositif **sensible aux corrélations**
- **source** de paires d'atomes corrélés

Plan de la suite de la présentation

I – Dispositif expérimental et source atomique

- 1 – Choix de l'hélium et détection
- 2 – Source d'atomes corrélés

II – Interféromètre à deux particules

- 1 – Topologie de type Rarity-Tapster
- 2 – Calcul du paramètre de Bell

III – Effet HOM à multiples particules

Conclusion et perspectives

I.1 – Choix de l'hélium et détection

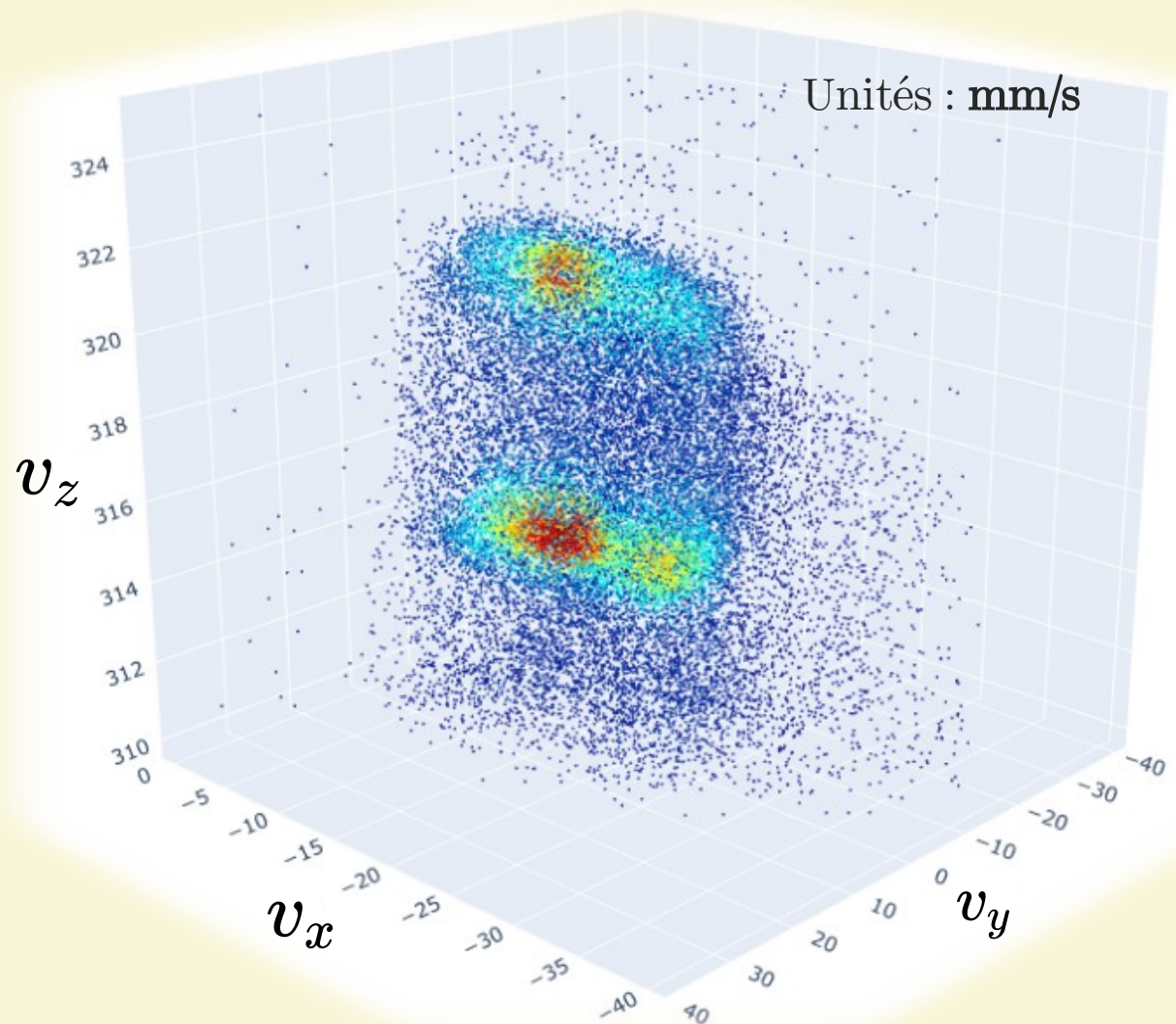
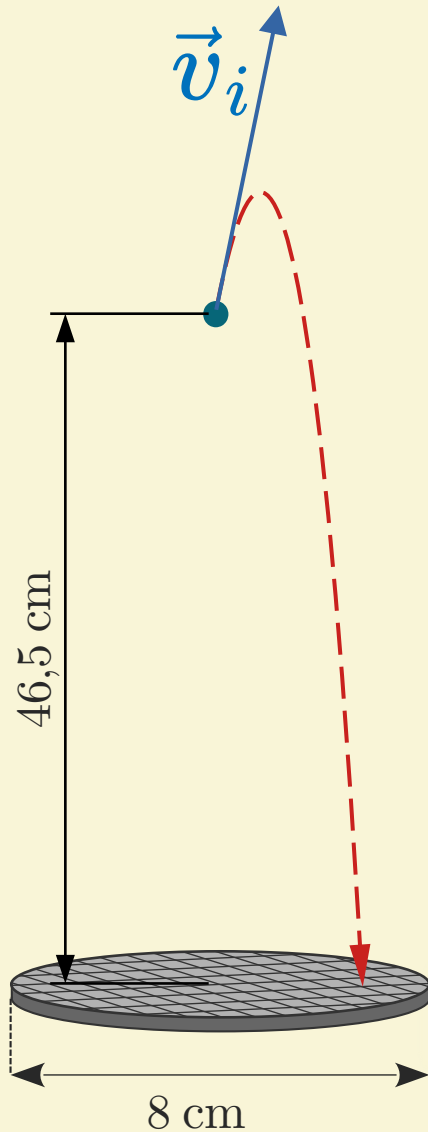
Détecteur:

- Sensible à l'**atome unique**
- **3D**
- Rendement quantique : **~50 %**

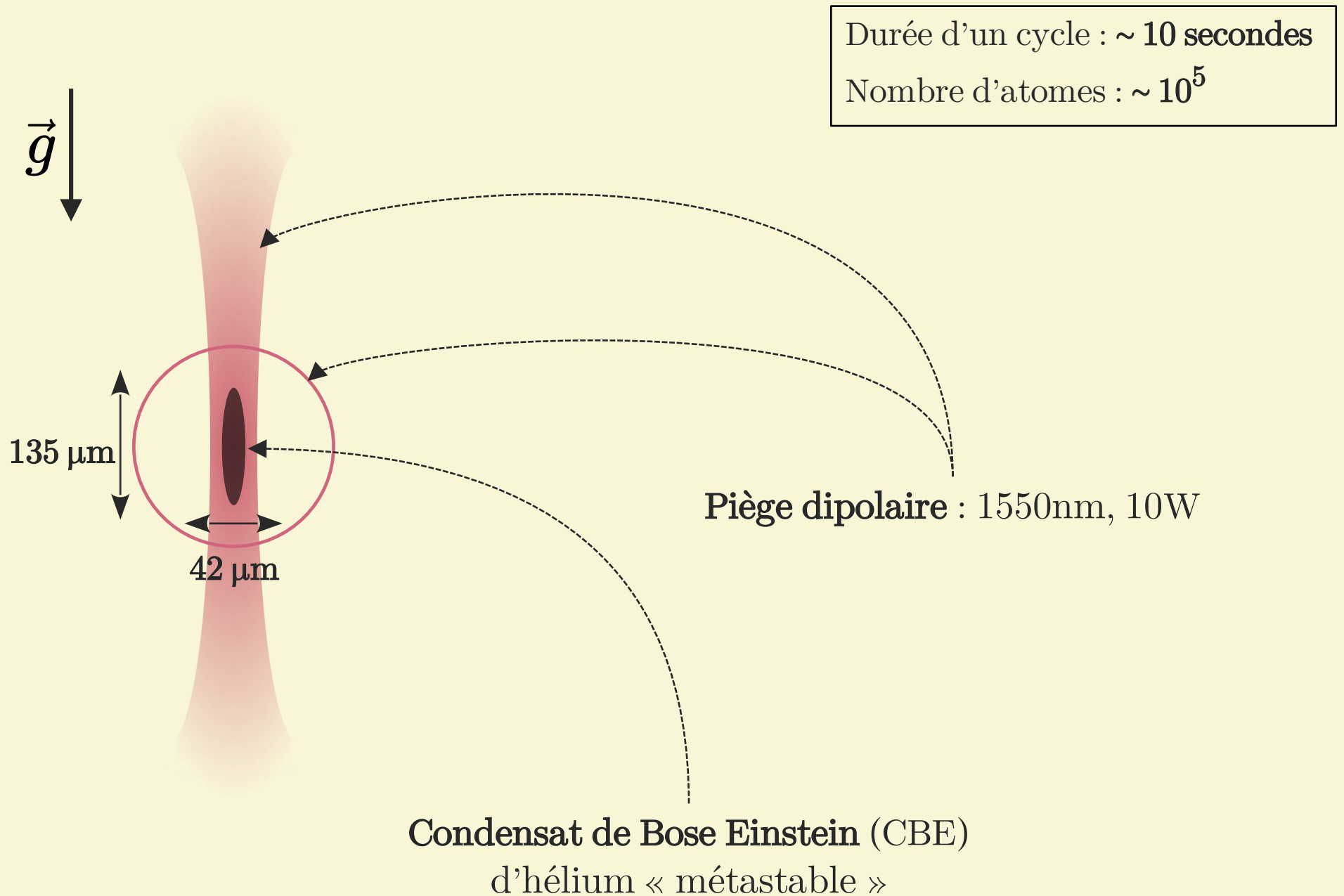
Premier état excité de l'hélium :

Énergie	19,8 eV (<i>très élevé</i>)
---------	-------------------------------

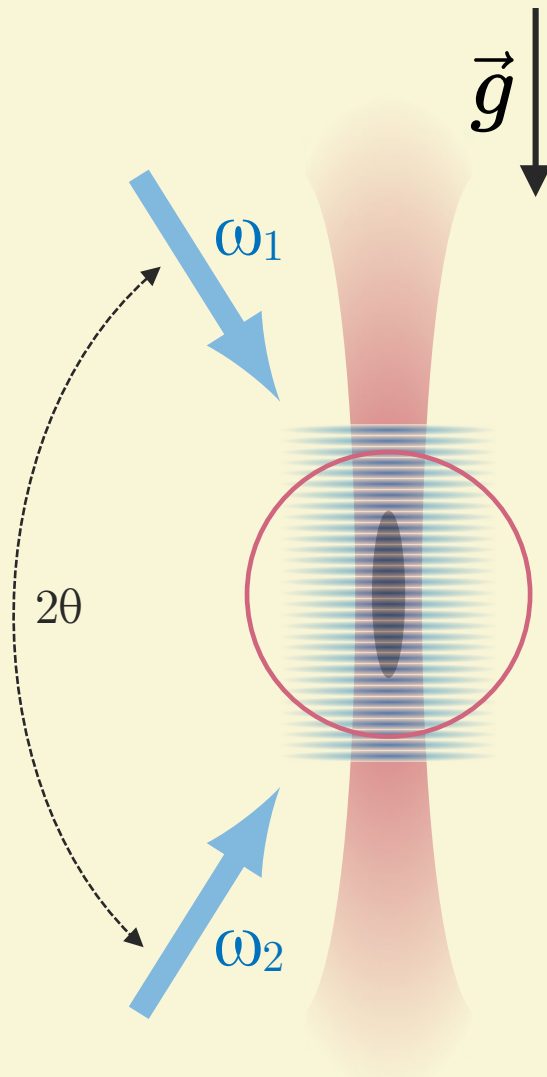
Demi-vie	2h (<i>métastable</i>)
----------	--------------------------



I.2 – Source d'atomes corrélés

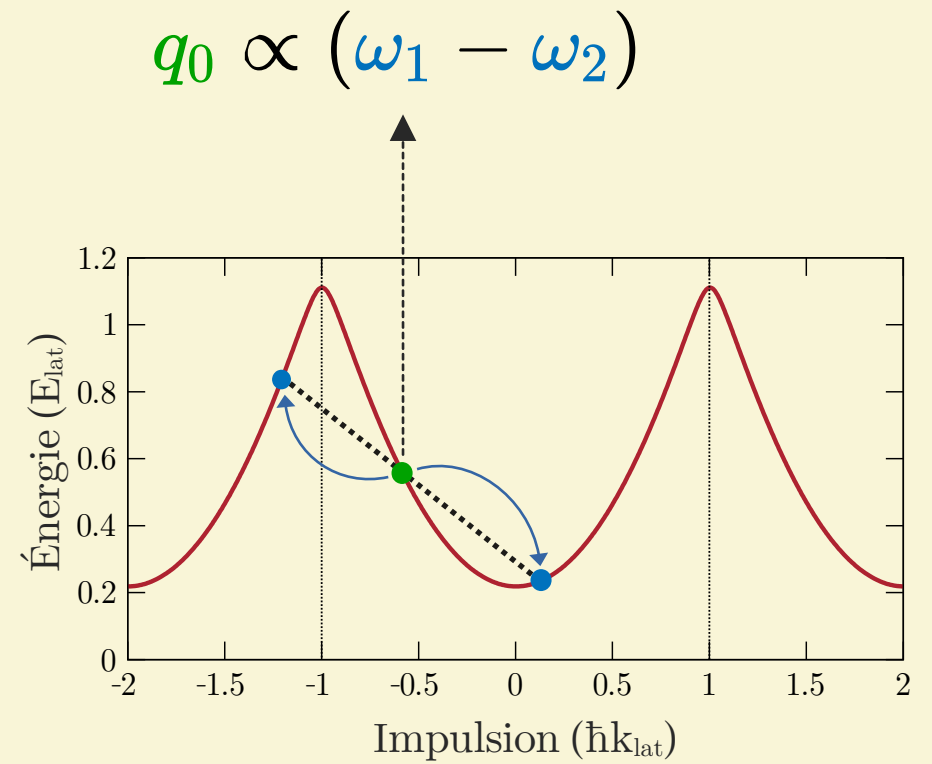


I.2 – Source d'atomes corrélés

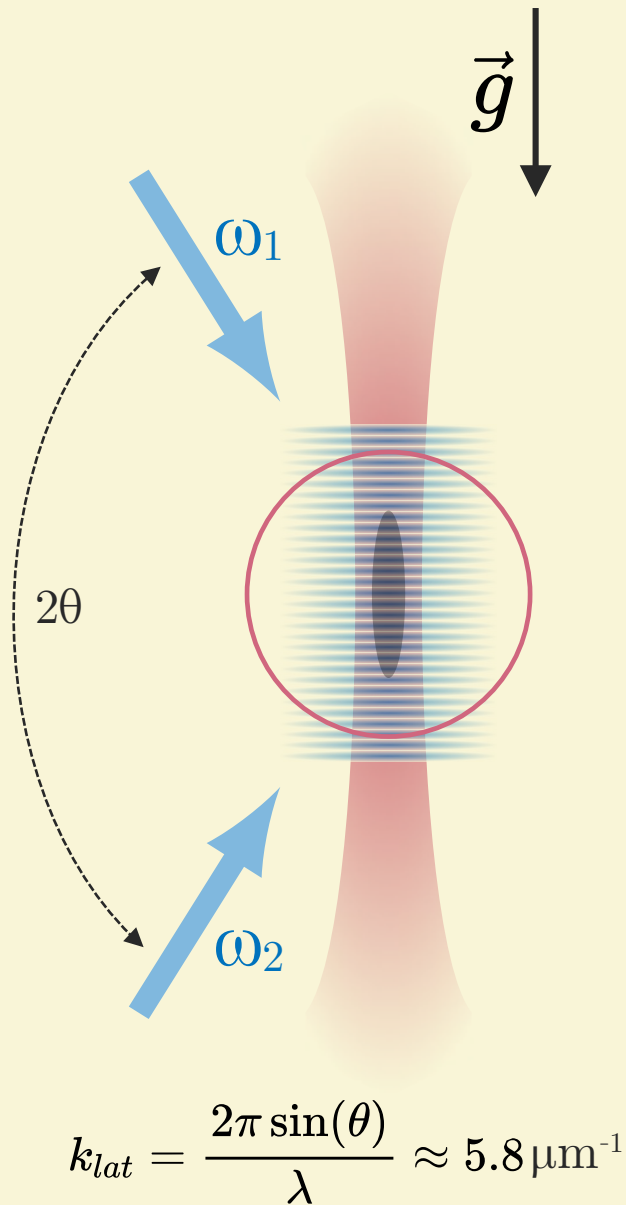


Dans référentiel
du réseau :

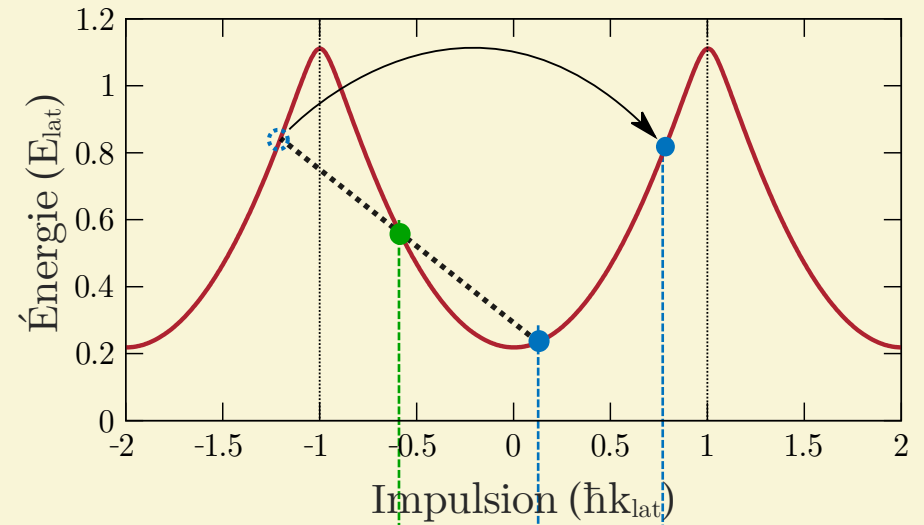
$$k_{lat} = \frac{2\pi \sin(\theta)}{\lambda} \approx 5.8 \mu\text{m}^{-1}$$



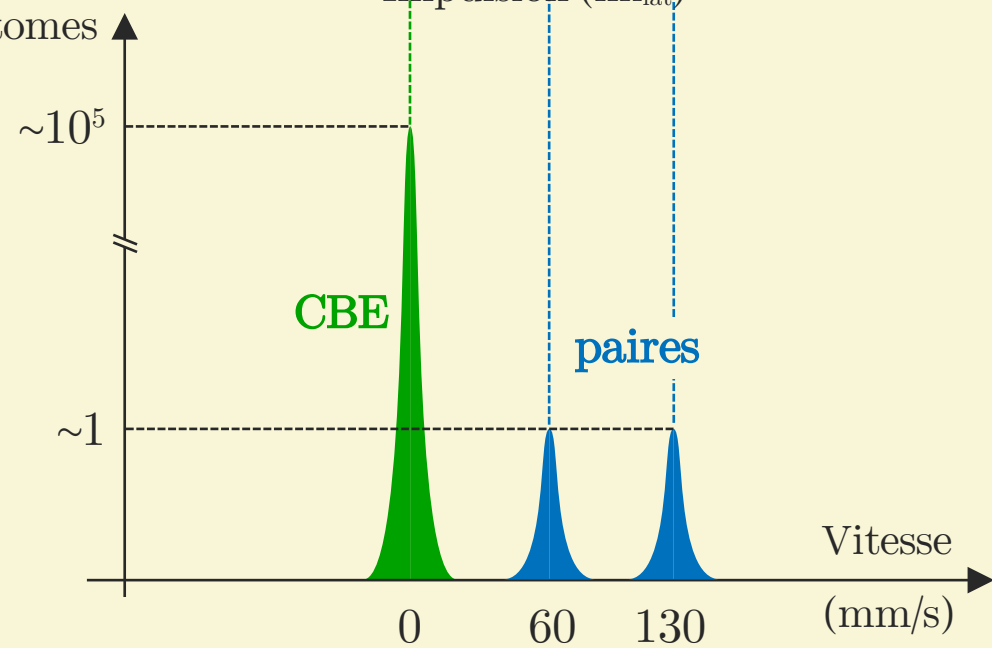
I.2 – Source d'atomes corrélés



Dans référentiel
du réseau :



Dans référentiel
du laboratoire :



I.2 – Source d'atomes corrélés → états comprimés à deux modes

Création de paires :

- Processus spontané
- qui part du vide

$$\hat{H} \propto n_0 g (\hat{a}_p^\dagger \hat{a}_{-p}^\dagger + \hat{a}_p \hat{a}_{-p})$$

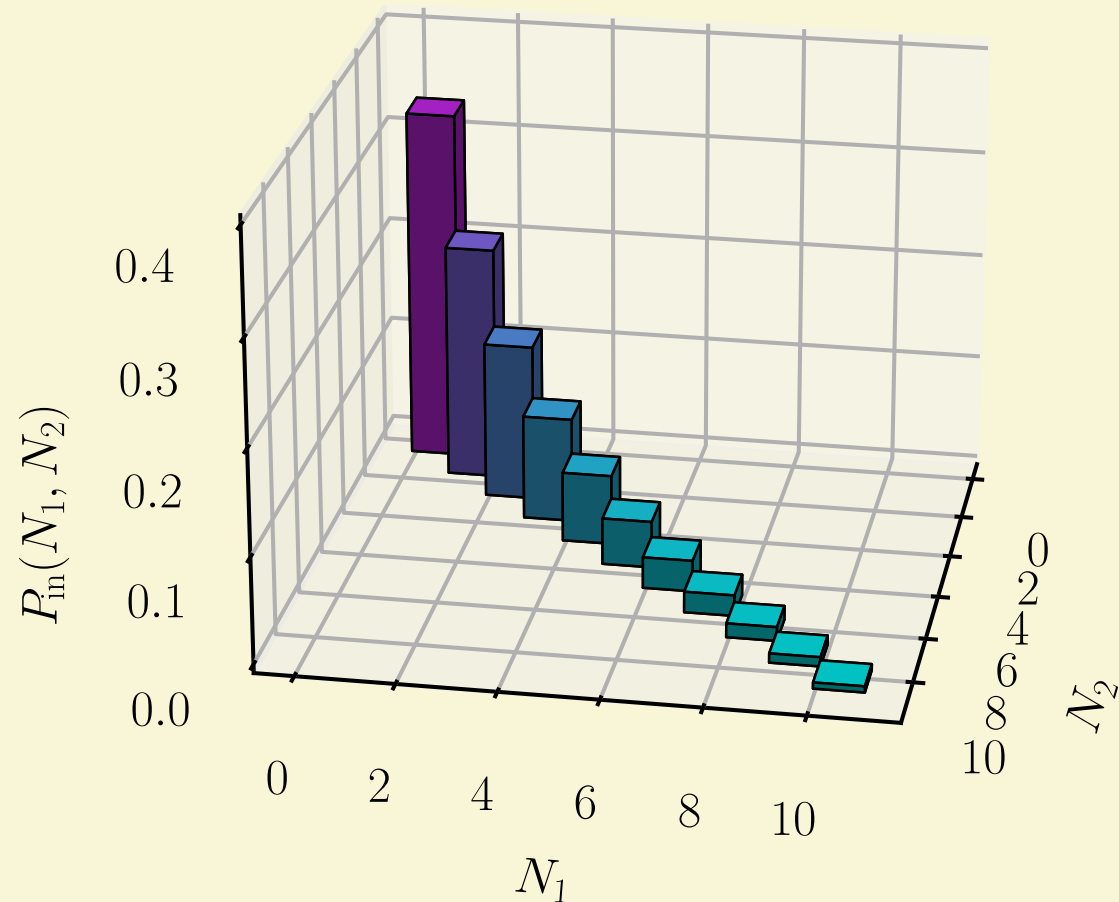
- 2 modes intriqués
- « multiples » particules

$$|TMS\rangle_p = \sqrt{1 - |\alpha|^2} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n |n\rangle_p |n\rangle_{-p}$$

Population moyenne par mode : $\nu = \frac{|\alpha|^2}{1 - |\alpha|^2} \sim 1$

I.2 – Source d'atomes corrélés → états comprimés à deux modes

$$|TMS\rangle_p = \sqrt{1 - |\alpha|^2} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n |n\rangle_p |\mathbf{n}\rangle_{-p}$$

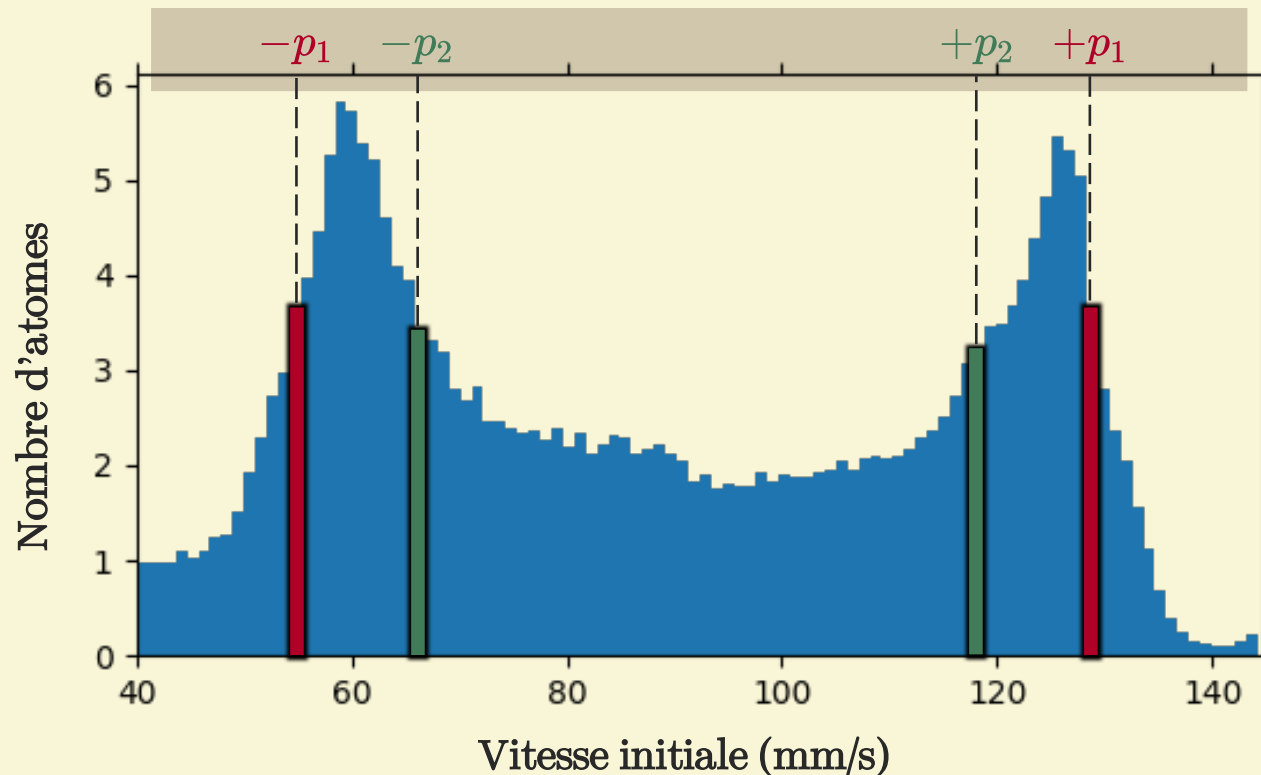


I.2 – Source d'atomes corrélés → états comprimés à deux modes

Source
atomique

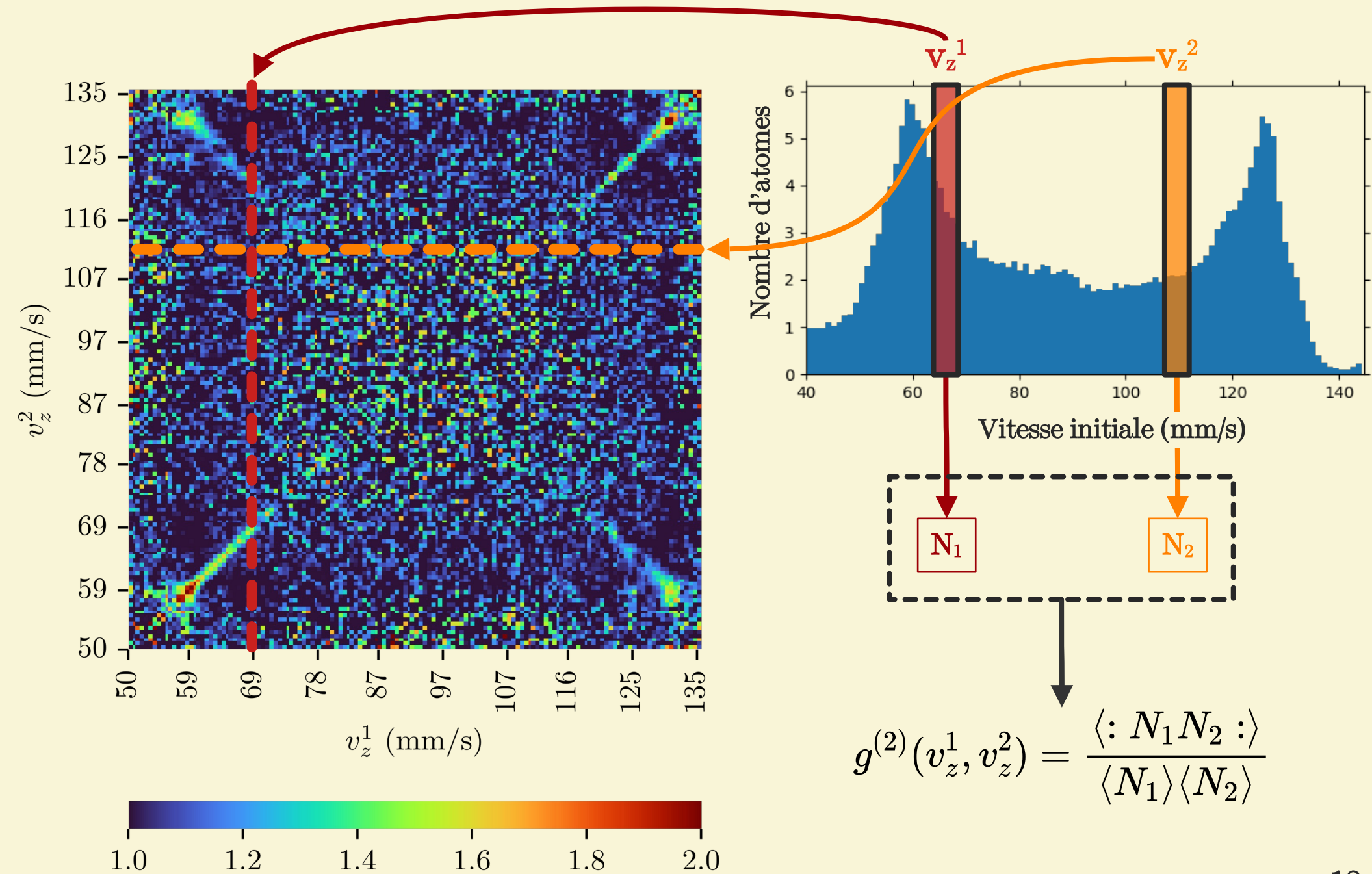
$$|TMS\rangle_p = \sqrt{1 - |\alpha|^2} \sum_{n=0}^{\infty} \alpha^n |n\rangle_p |n\rangle_{-p}$$

$$|\psi\rangle = |TMS\rangle_{p_1} \otimes |TMS\rangle_{p_2} \otimes \dots$$

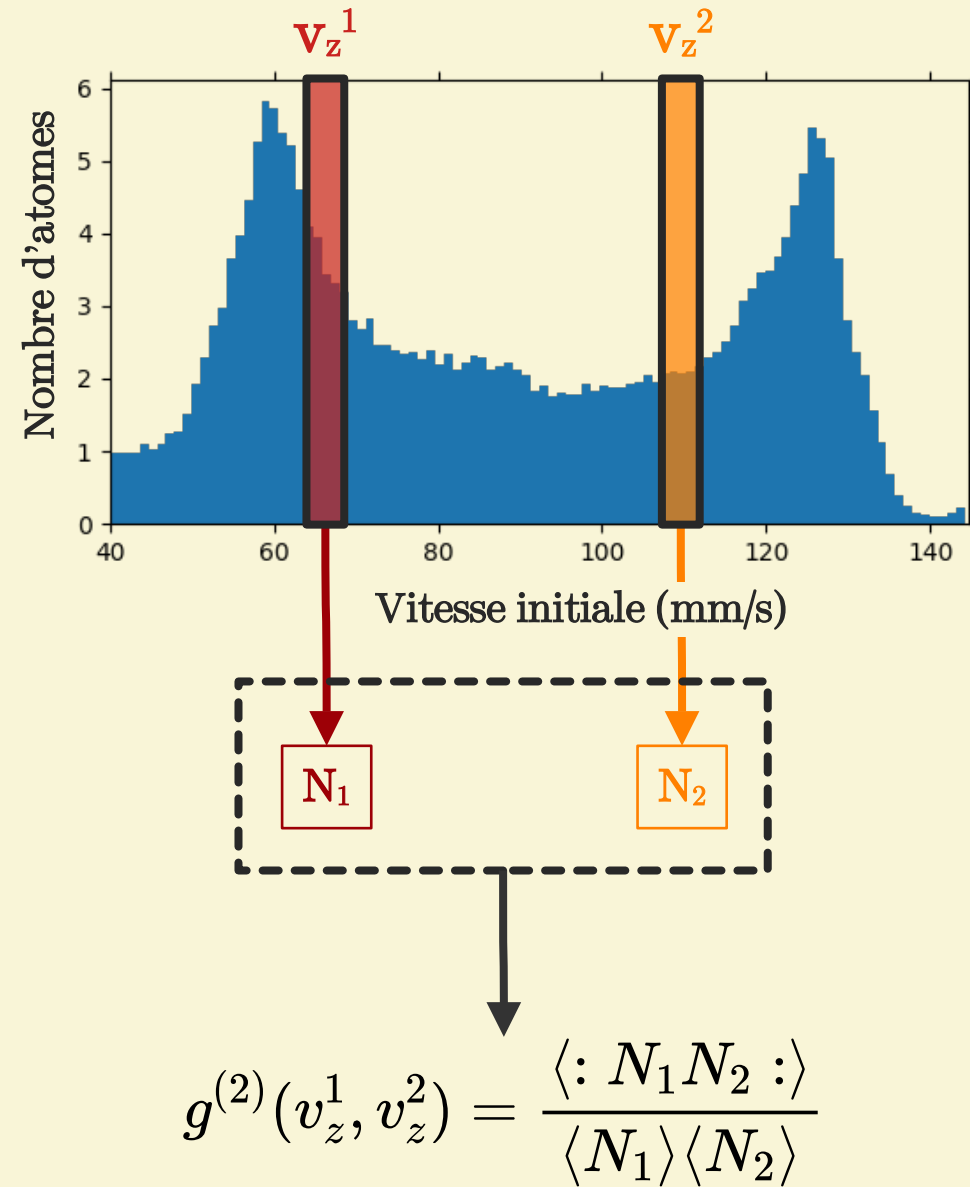
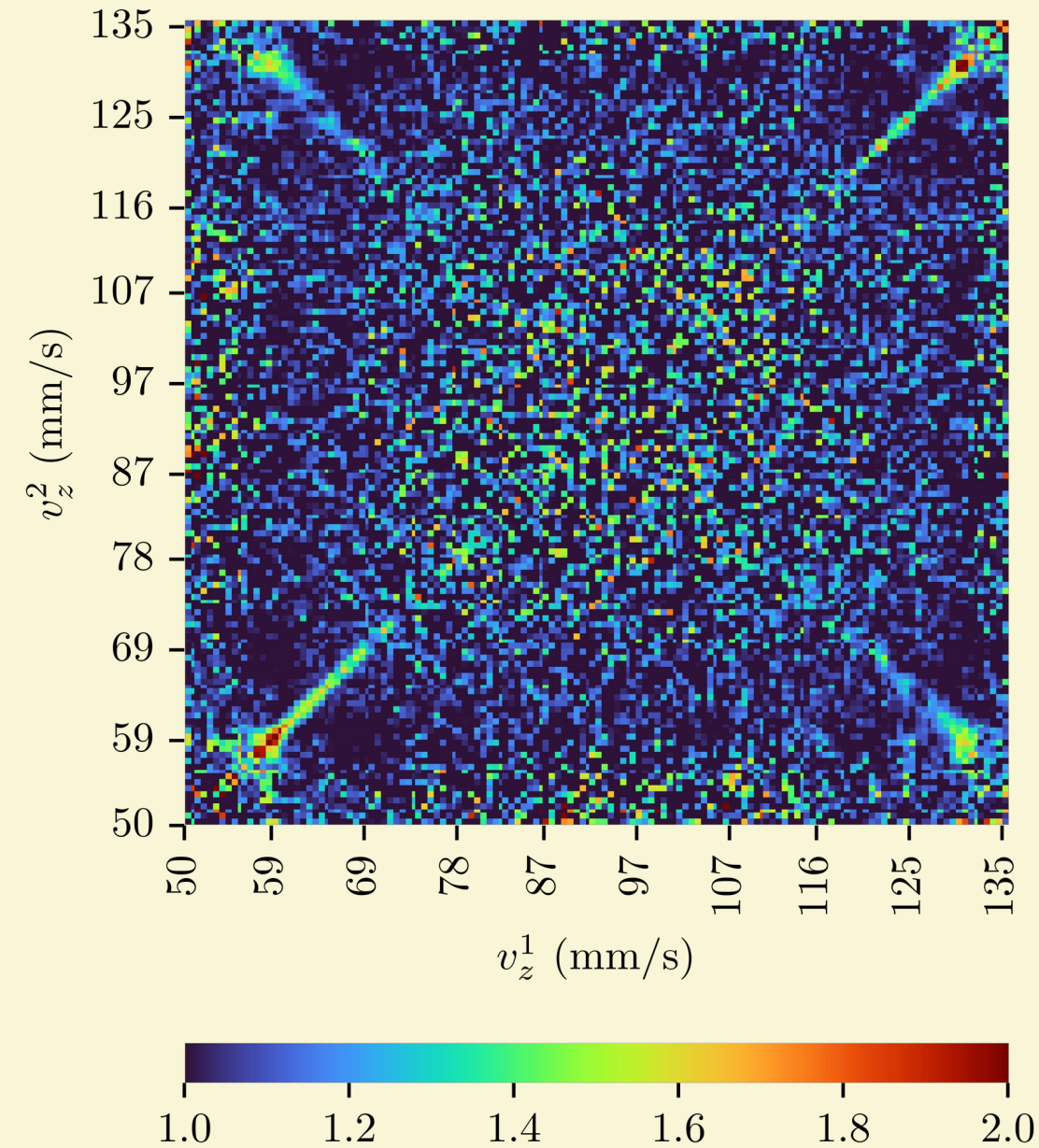


Dans référentiel
du CBE, quand le
réseau est présent

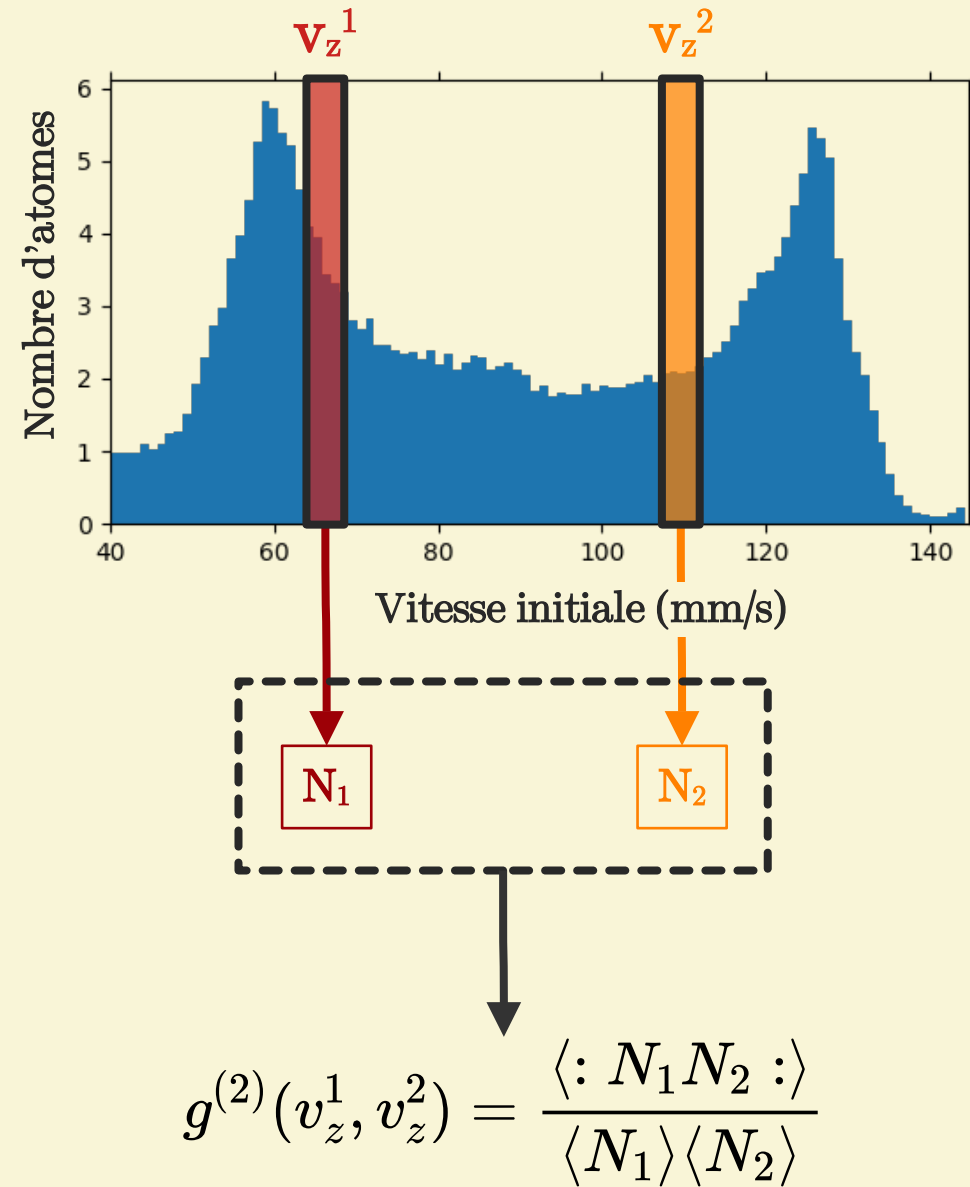
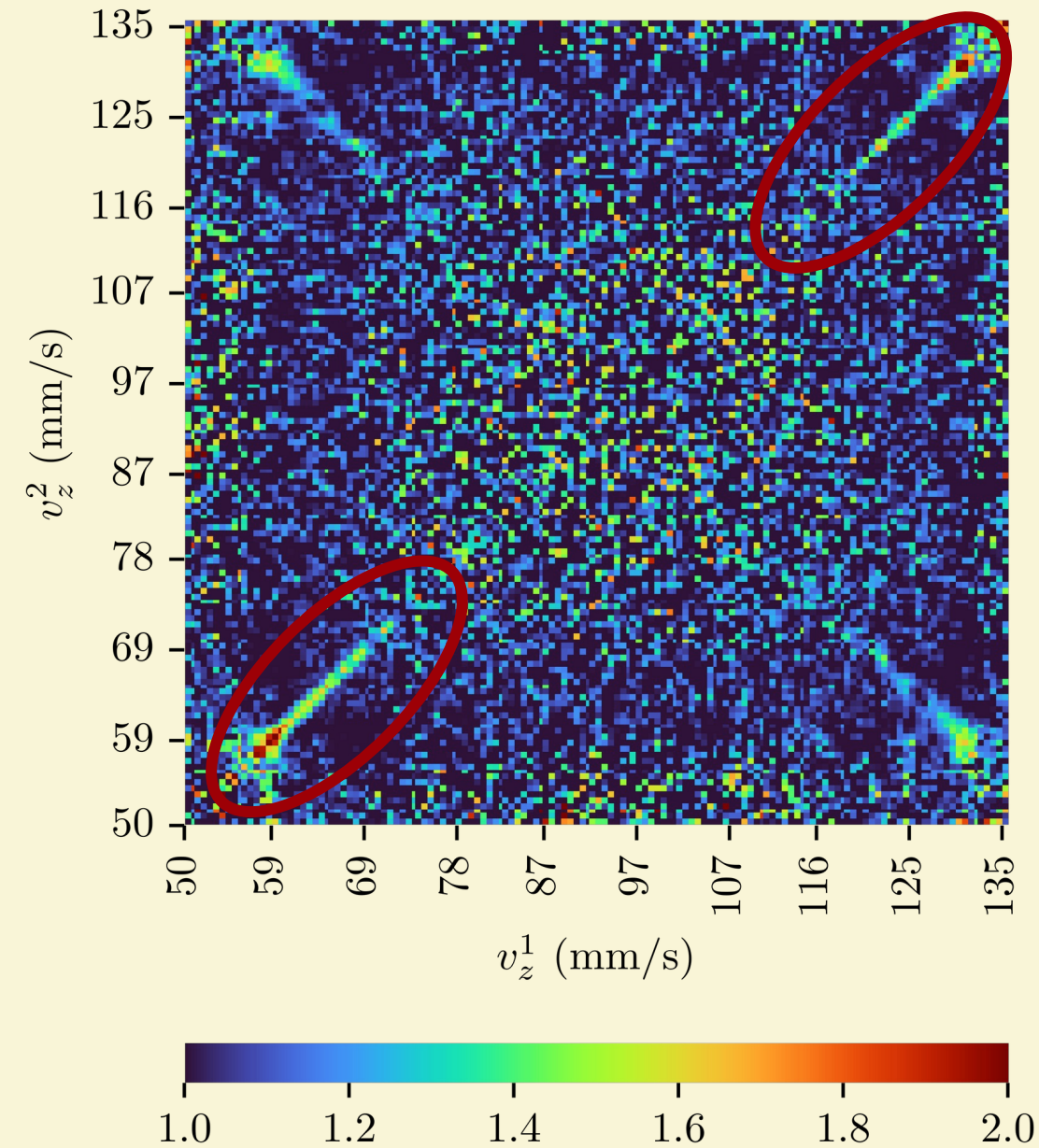
I.2 – Source d'atomes corrélés



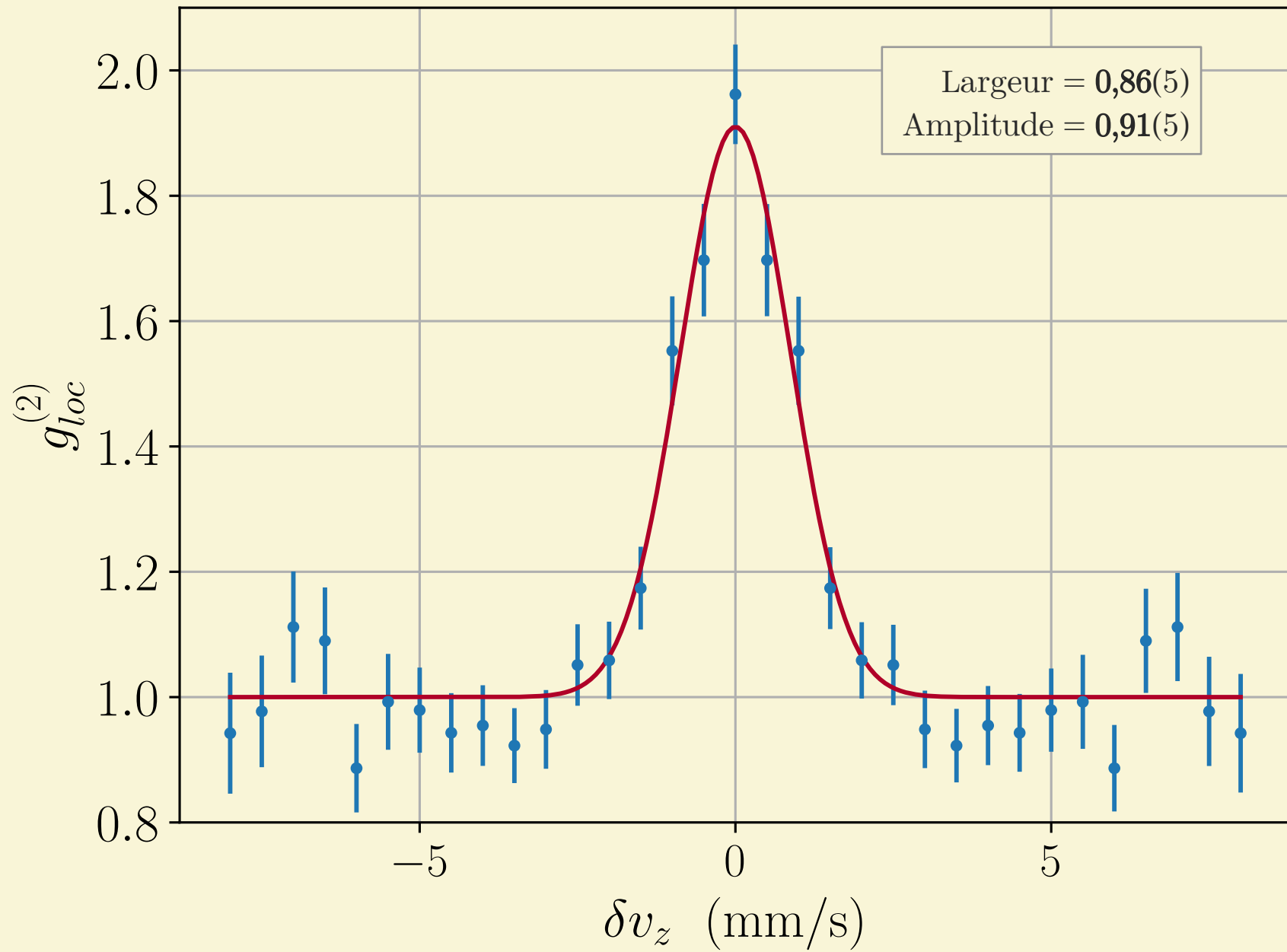
I.2 – Source d'atomes corrélés



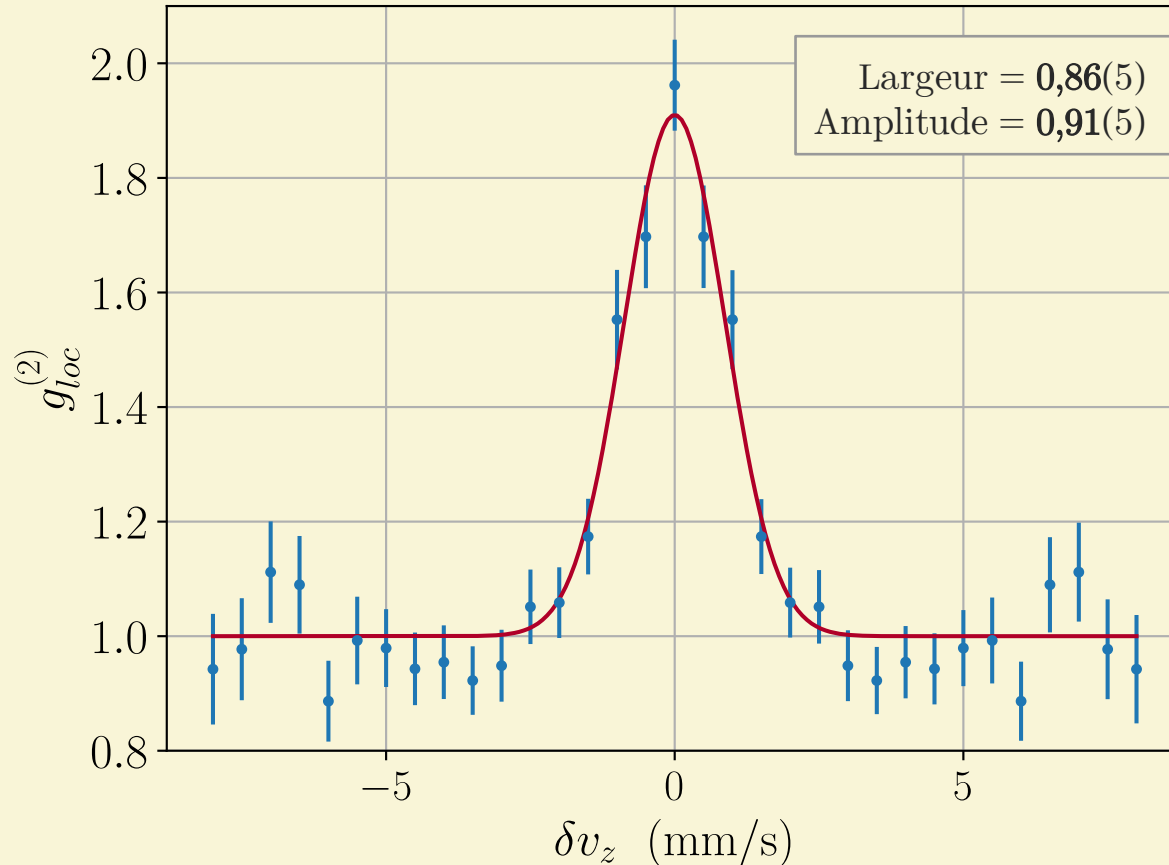
I.2 – Source d'atomes corrélés → CORRÉLATIONS LOCALES



I.2 – Source d'atomes corrélés $\longrightarrow$ CORRÉLATIONS LOCALES



I.2 – Source d'atomes corrélés → CORRÉLATIONS LOCALES

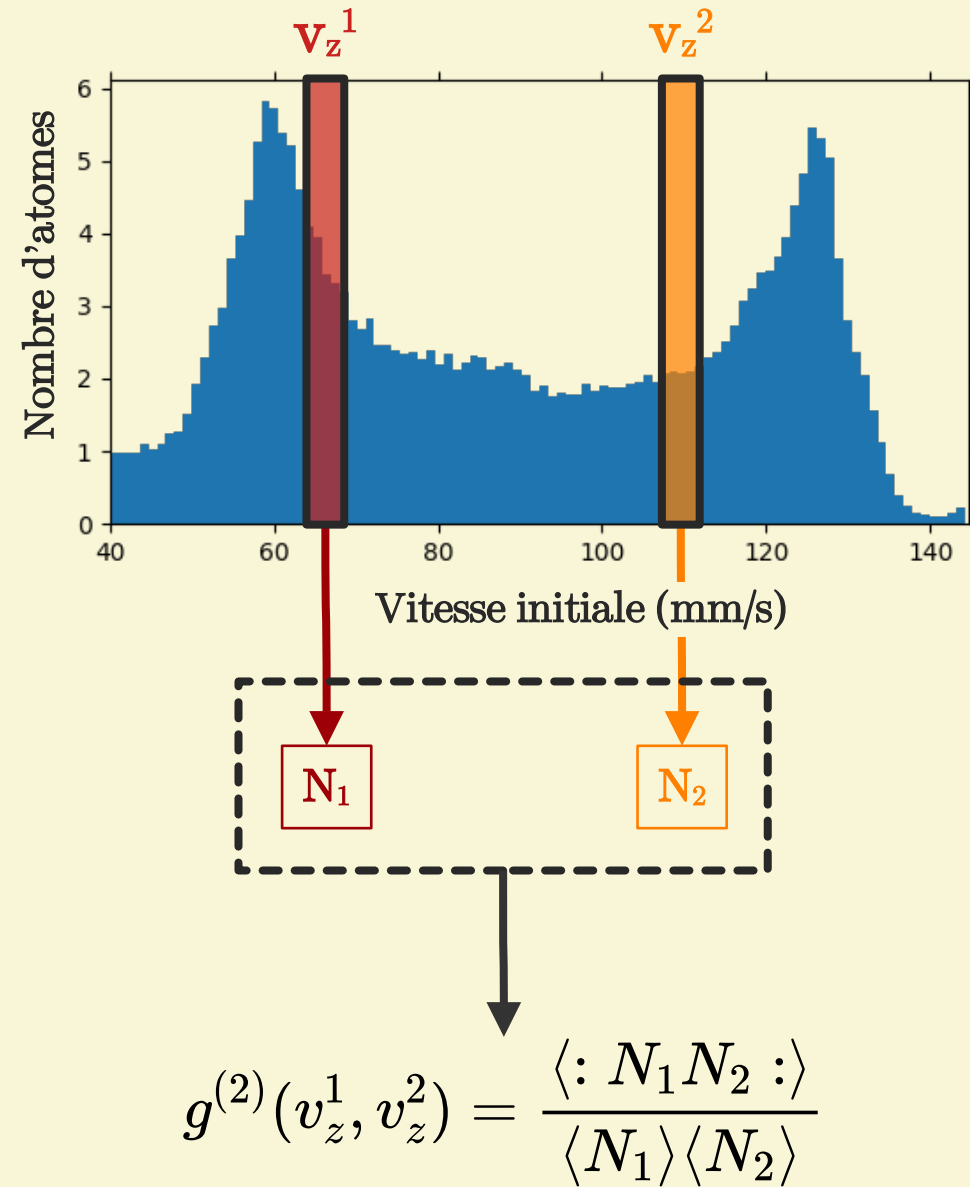
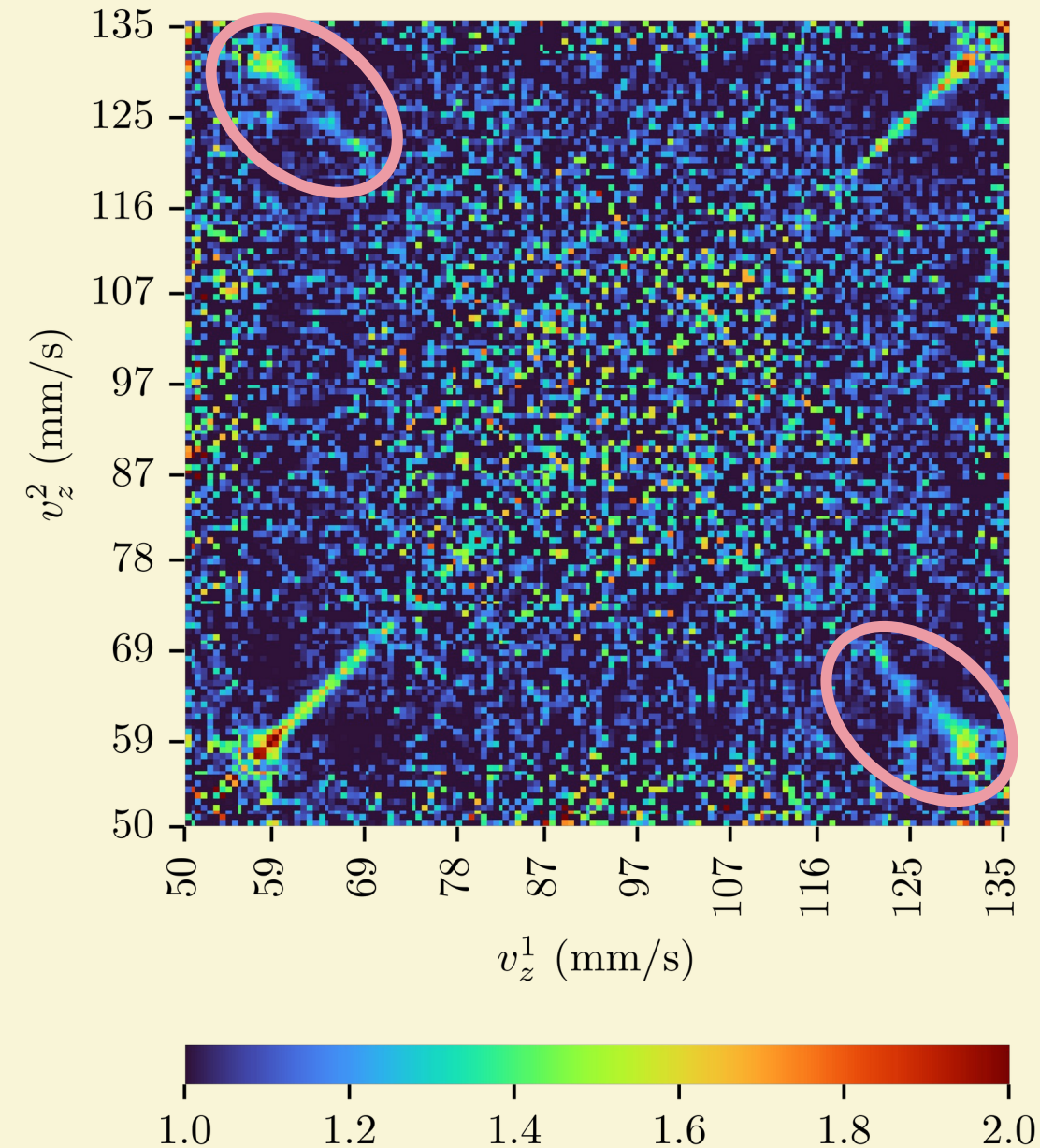


Caractéristique d'une
source chaotique

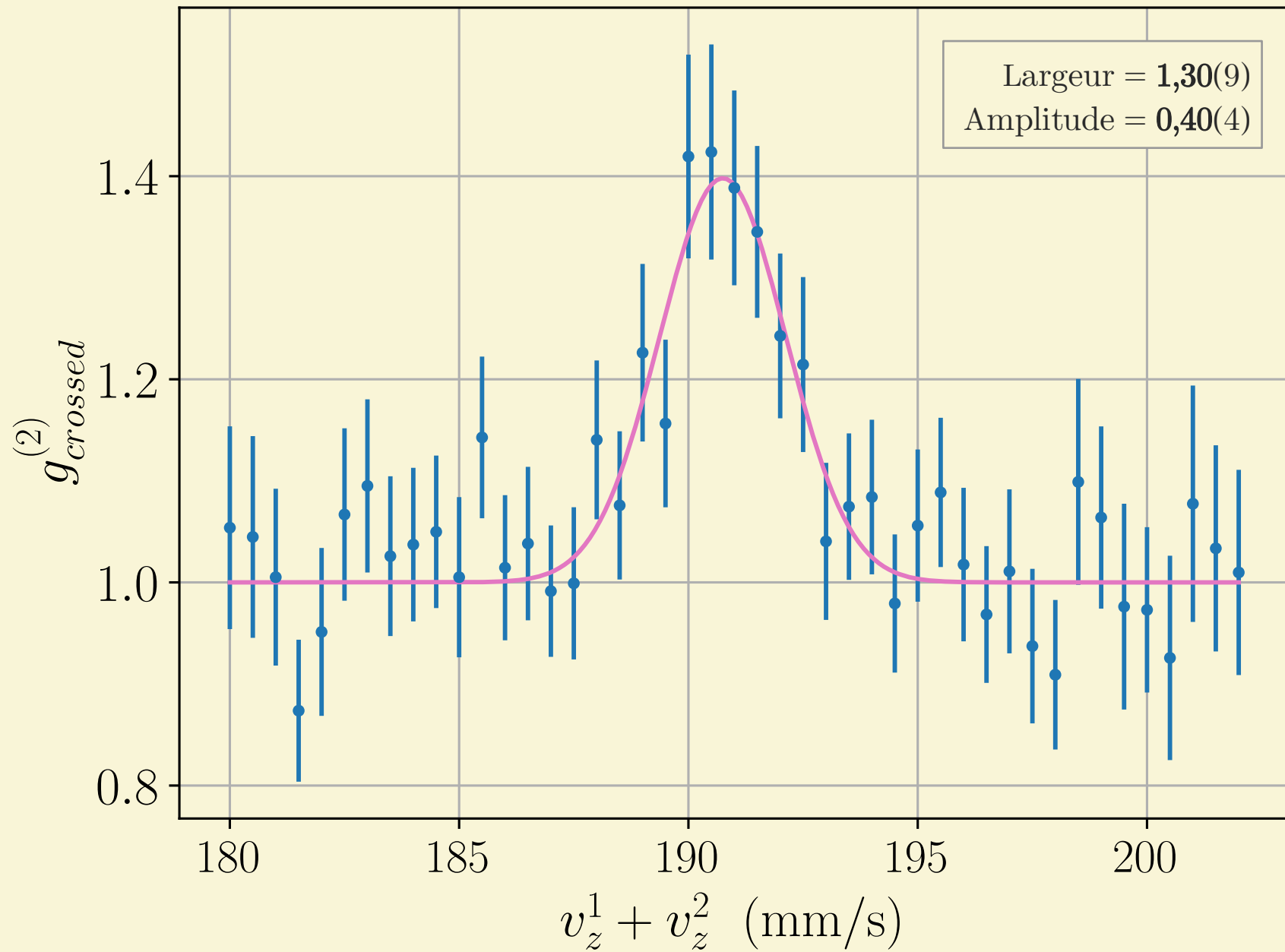
Émission localement
thermique $\Rightarrow g^{(2)}(0) = 2$

Effet Hanbury Brown et Twiss

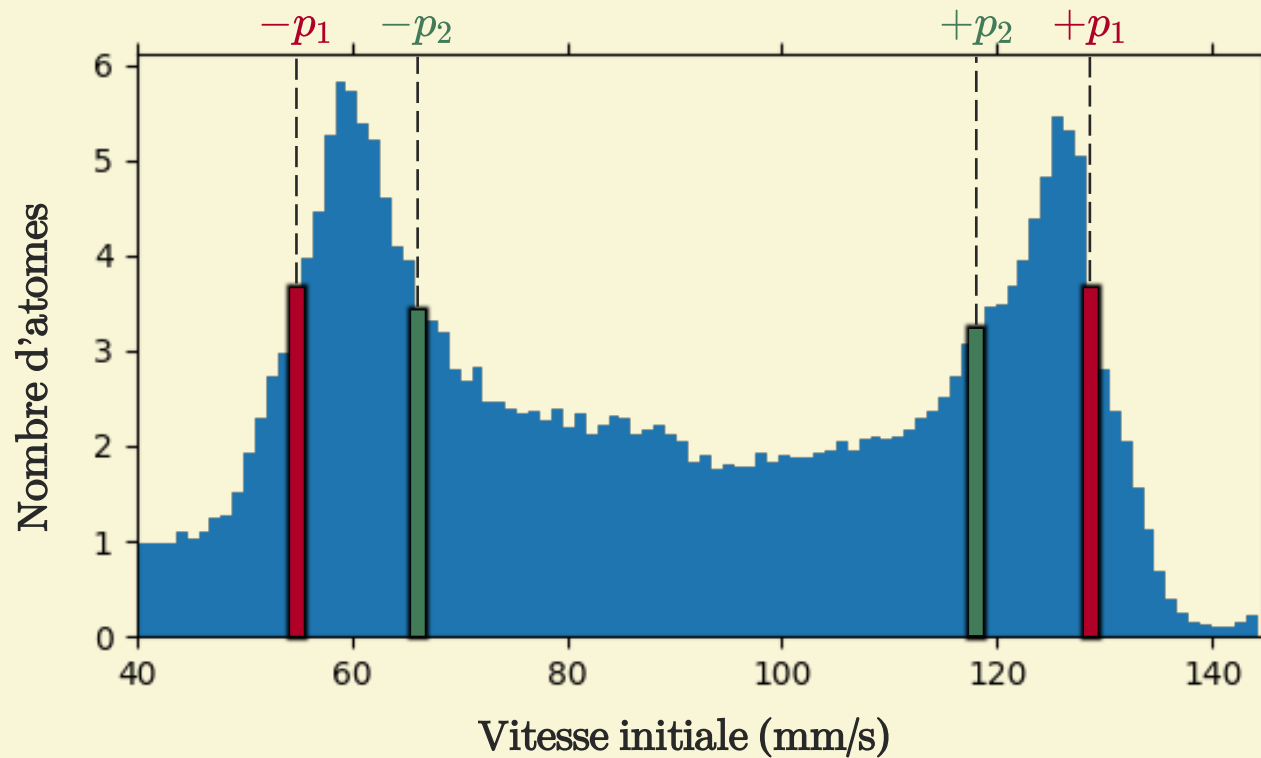
I.2 – Source d'atomes corrélés → CORRÉLATIONS NON-LOCALES



I.2 – Source d'atomes corrélés $\longrightarrow$ CORRÉLATIONS NON-LOCALES



I.2 – Source d'atomes corrélés $\longrightarrow$ CARACTÈRE MULTIMODE

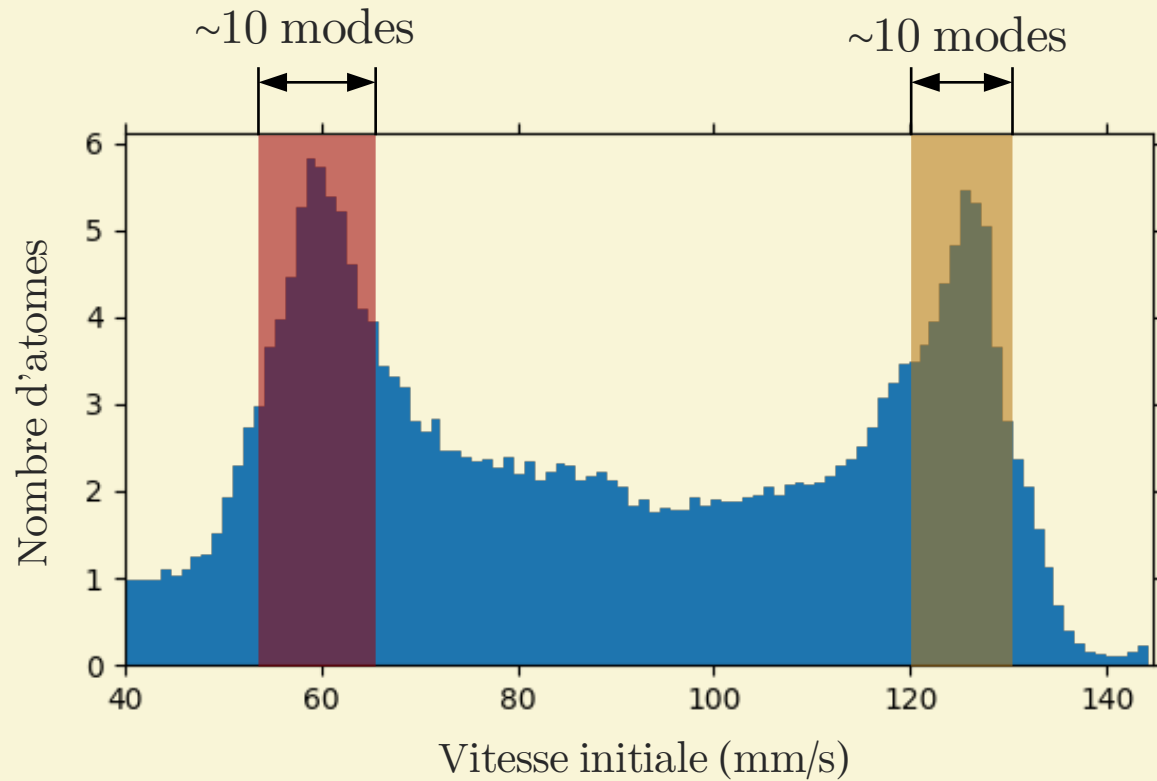


Question : taille naturelle d'un mode ?



Réponse : donnée par les largeurs de corrélation précédente.

I.2 – Source d'atomes corrélés $\longrightarrow$ CARACTÈRE MULTIMODE



↓
Émission multimode

$3 \lesssim \nu \lesssim 4$
↓
Émission à « grand »
nombre d'atomes

I.2 – Source d'atomes corrélés

«faible» nombre d'atomes

$$\nu \ll 1$$

$$|TMS\rangle \approx |vide\rangle + \alpha |1, 1\rangle$$

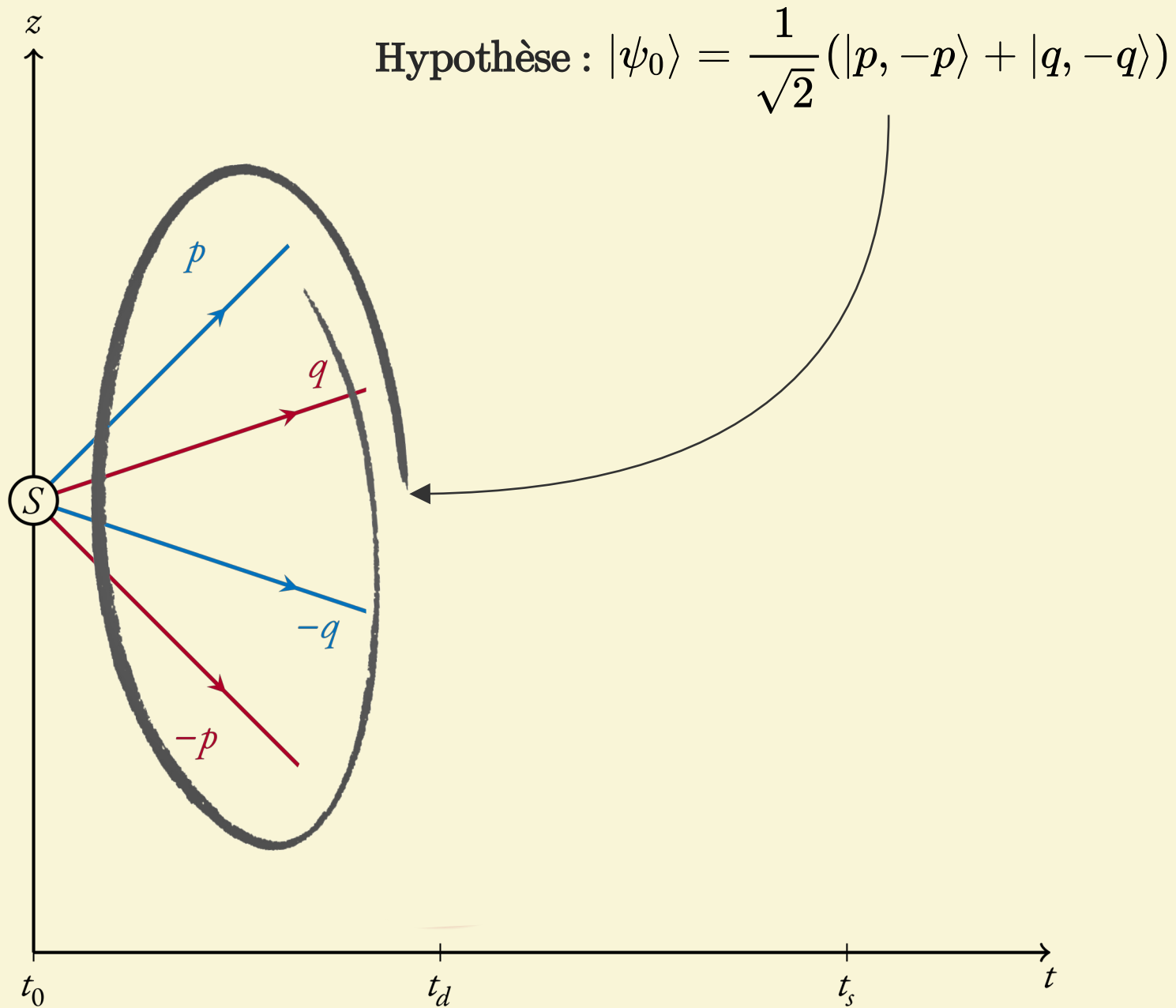
- Post-sélection du vide $\Rightarrow$ 2 particules
- Durées d'acquisition TRÈS longues

«grand» nombre d'atomes

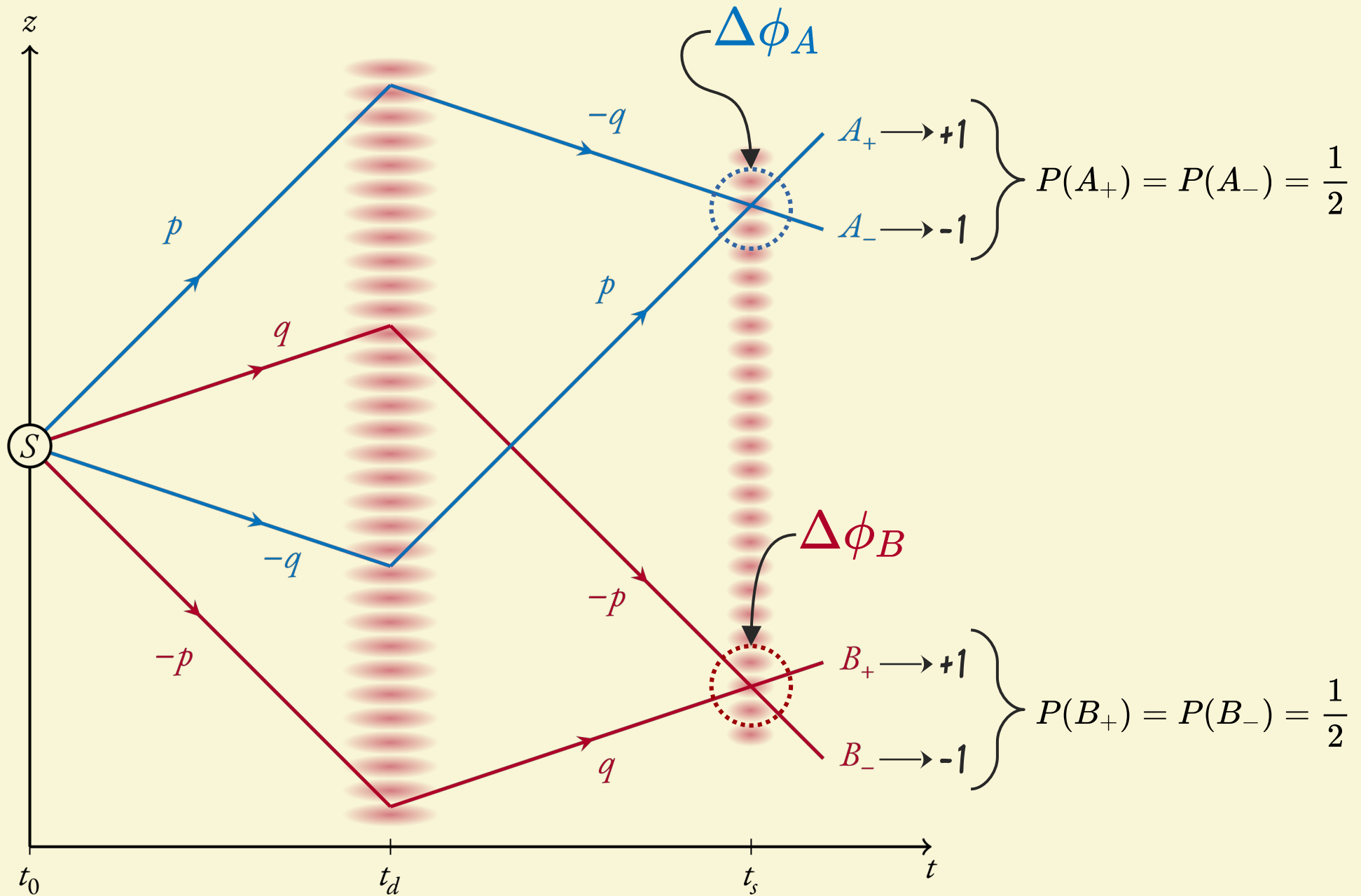
$$(Ici\ 3 \lesssim \nu \lesssim 4)$$

- Signal beaucoup plus fort
- Nécessite une étude dédiée

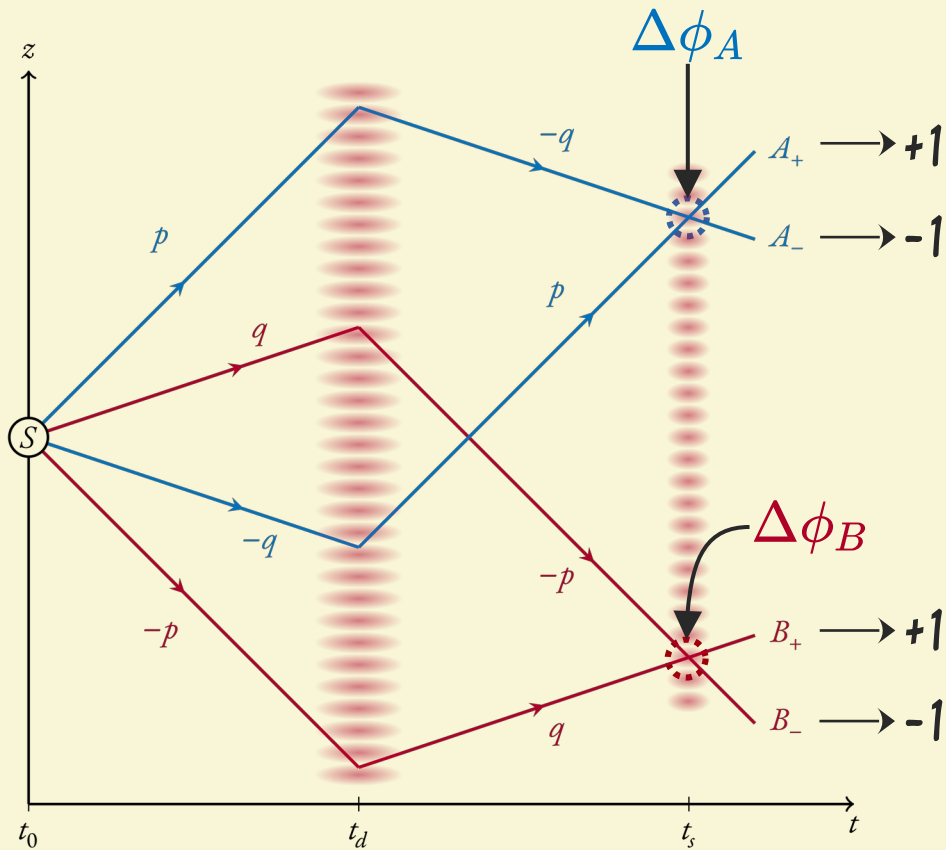
II.1 – Topologie de type Rarity-Tapster



II.1 – Topologie de type Rarity-Tapster



II.1 – Topologie de type Rarity-Tapster

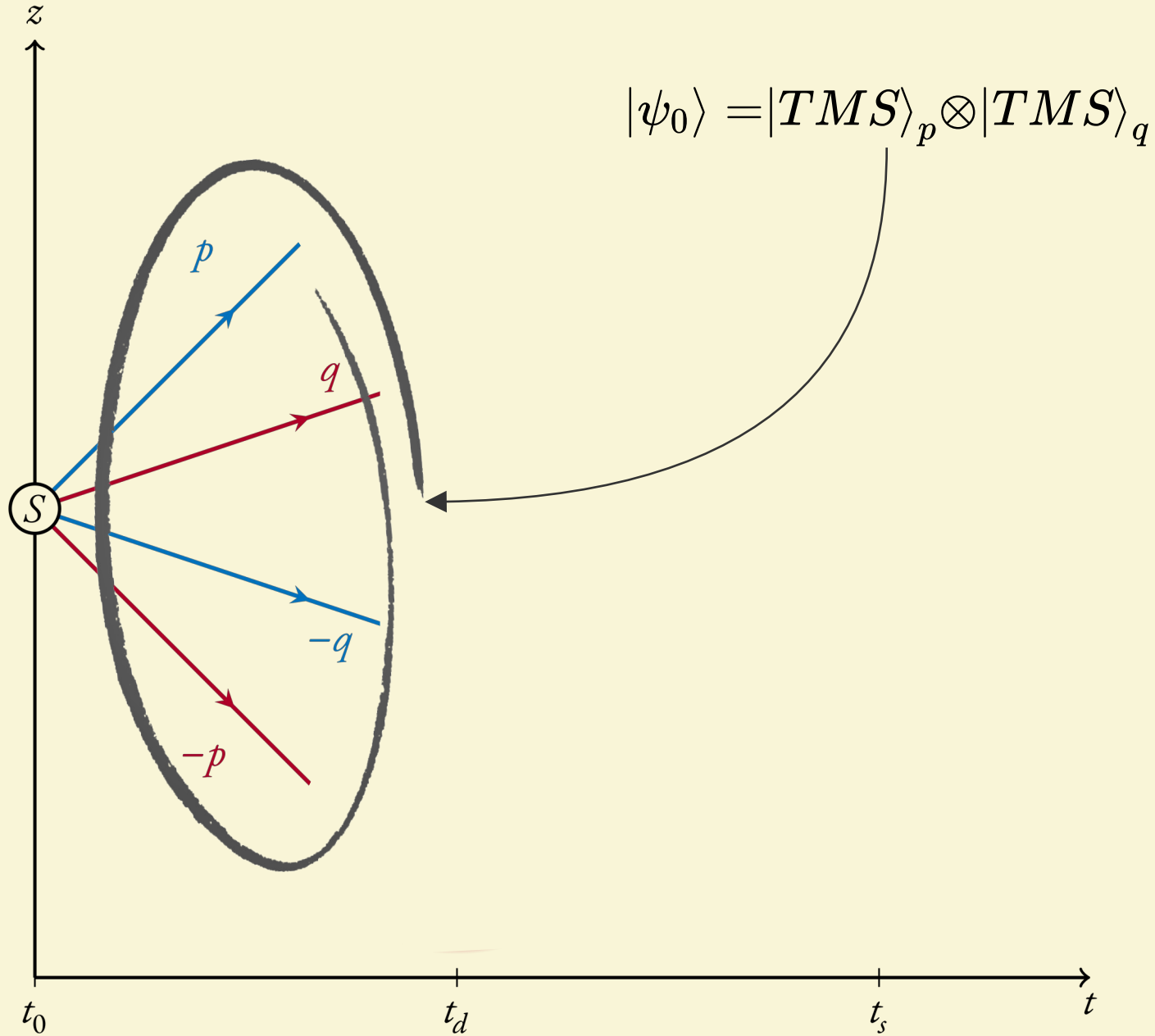


$$E(\Delta\phi_A, \Delta\phi_B) = \langle A(\Delta\phi_A) \cdot B(\Delta\phi_B) \rangle \\ = \cos(2[\Delta\phi_A - \Delta\phi_B])$$

Expérimentalement : Nous souhaitons contrôler $(\Delta\phi_A - \Delta\phi_B)$

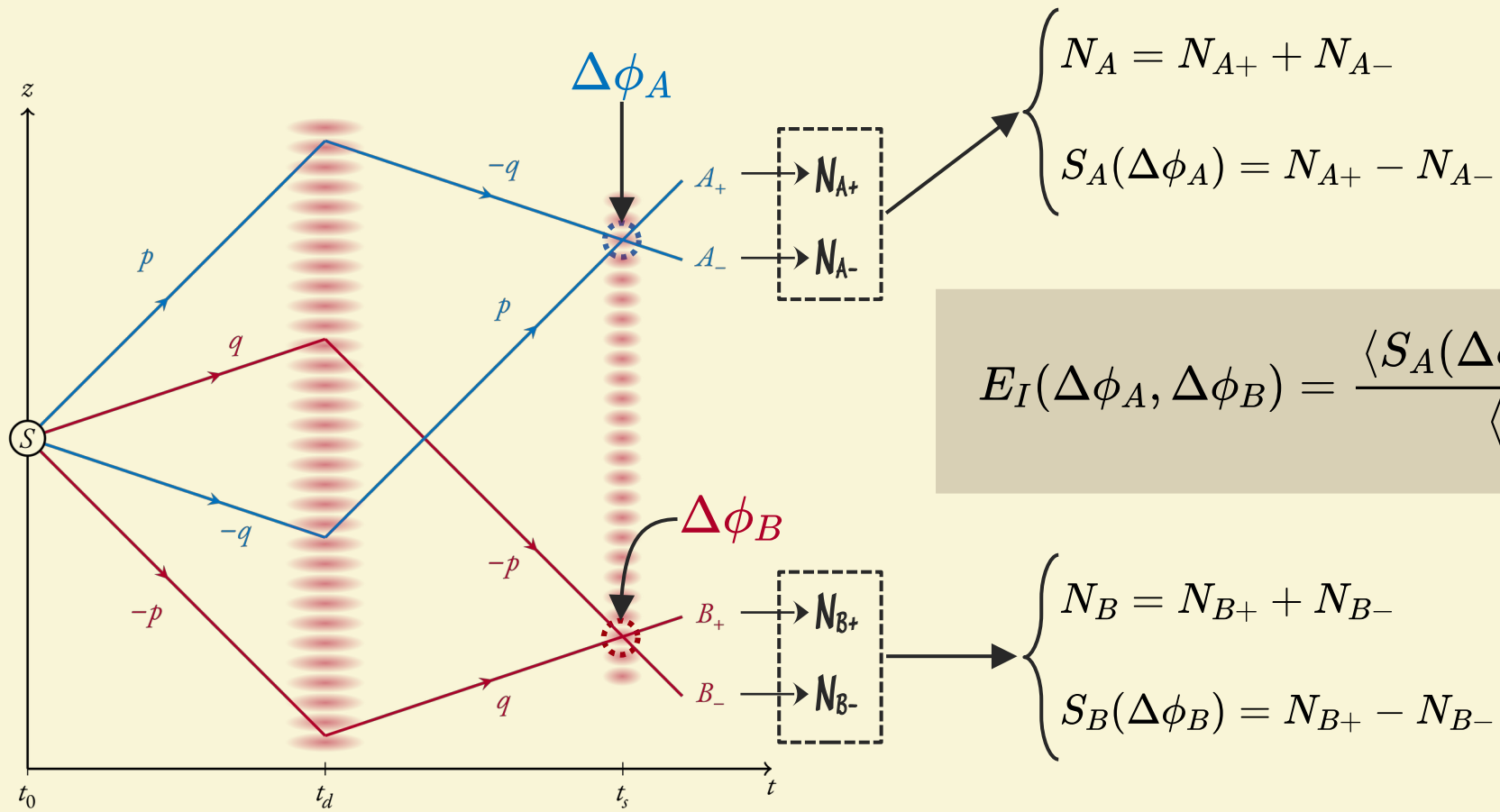
Objectif : • Voir cette oscillation
• Violier l'inégalité

II.3 – Calcul du paramètre de Bell



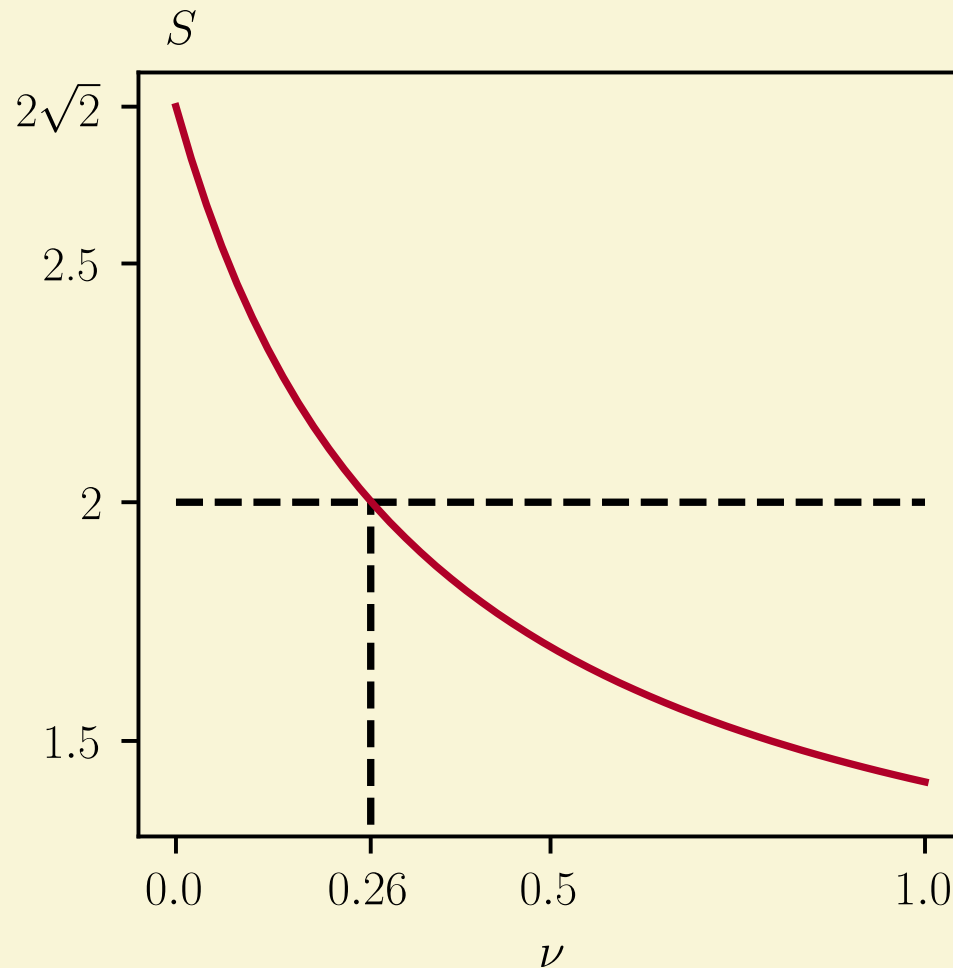
II.3 – Calcul du paramètre de Bell

$$|\psi_0\rangle = |TMS\rangle_p \otimes |TMS\rangle_q$$



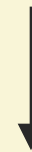
$$E_I(\Delta\phi_A, \Delta\phi_B) = \frac{\langle S_A(\Delta\phi_A) \cdot S_B(\Delta\phi_B) \rangle}{\langle N_A \cdot N_B \rangle}$$

II.3 – Calcul du paramètre de Bell



Paramètre de Bell en fonction de la population moyenne par mode

- Inégalité de Bell peut être violée
- Indépendant de l'efficacité quantique du détecteur
- **S décroît rapidement avec la population**



(contribution des termes à
« grand » nombre de particules)

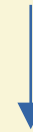
II.3 – Calcul du paramètre de Bell

Autre approche suggérée par :

Kitzinger, et . al. « *Bell Correlations in a Split Two-Mode-Squeezed Bose-Einstein Condensate* ». Physical Review A **104**, no 4 (2021): 043323.

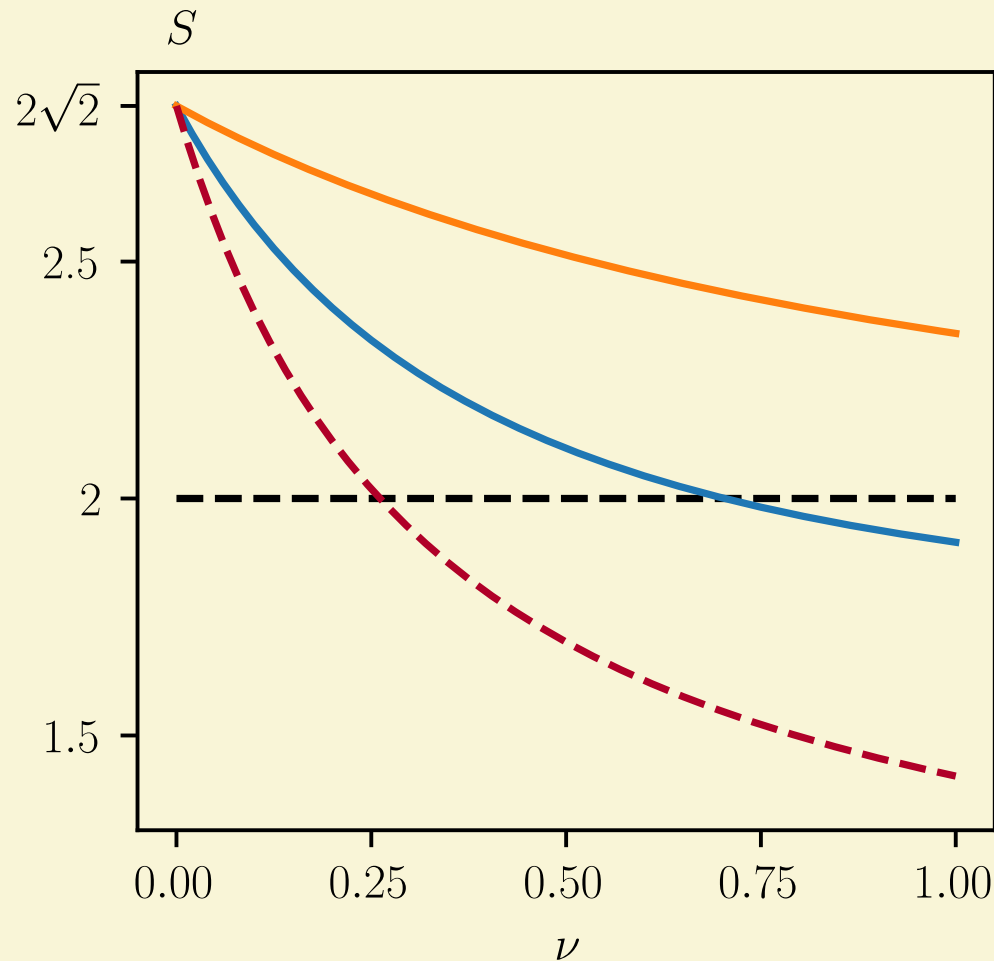
- Imposer la **post-sélection**
- Considérer le corrélateur $E_{II}(\Delta\phi_A, \Delta\phi_B) = \langle \underbrace{\text{sgn}[S_A(\Delta\phi_A)]}_{\text{Projection sur } \{-1,1\} \text{ de } S_A} \cdot \underbrace{\text{sgn}[S_B(\Delta\phi_B)]}_{\text{Projection sur } \{-1,1\} \text{ de } S_B} \rangle$

Projection sur $\{-1,1\}$ de S_A et S_B



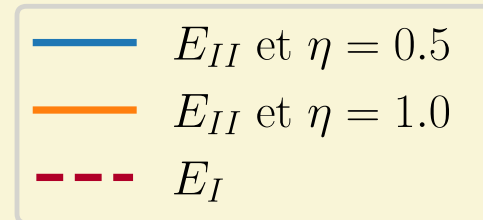
Réduit l'effet néfaste des ordres supérieurs des états TMS.

II.3 – Calcul du paramètre de Bell



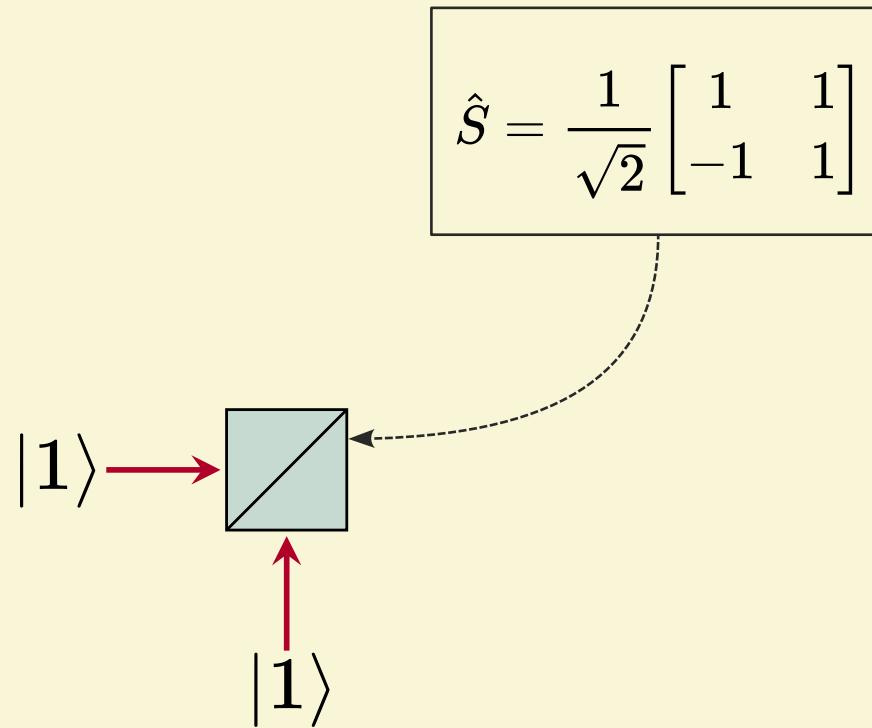
Violation pour $\nu < 0.7$

Gain d'un facteur ~ 2 par rapport à la 1^{ère} approche



Paramètre de Bell en fonction de la population moyenne par mode

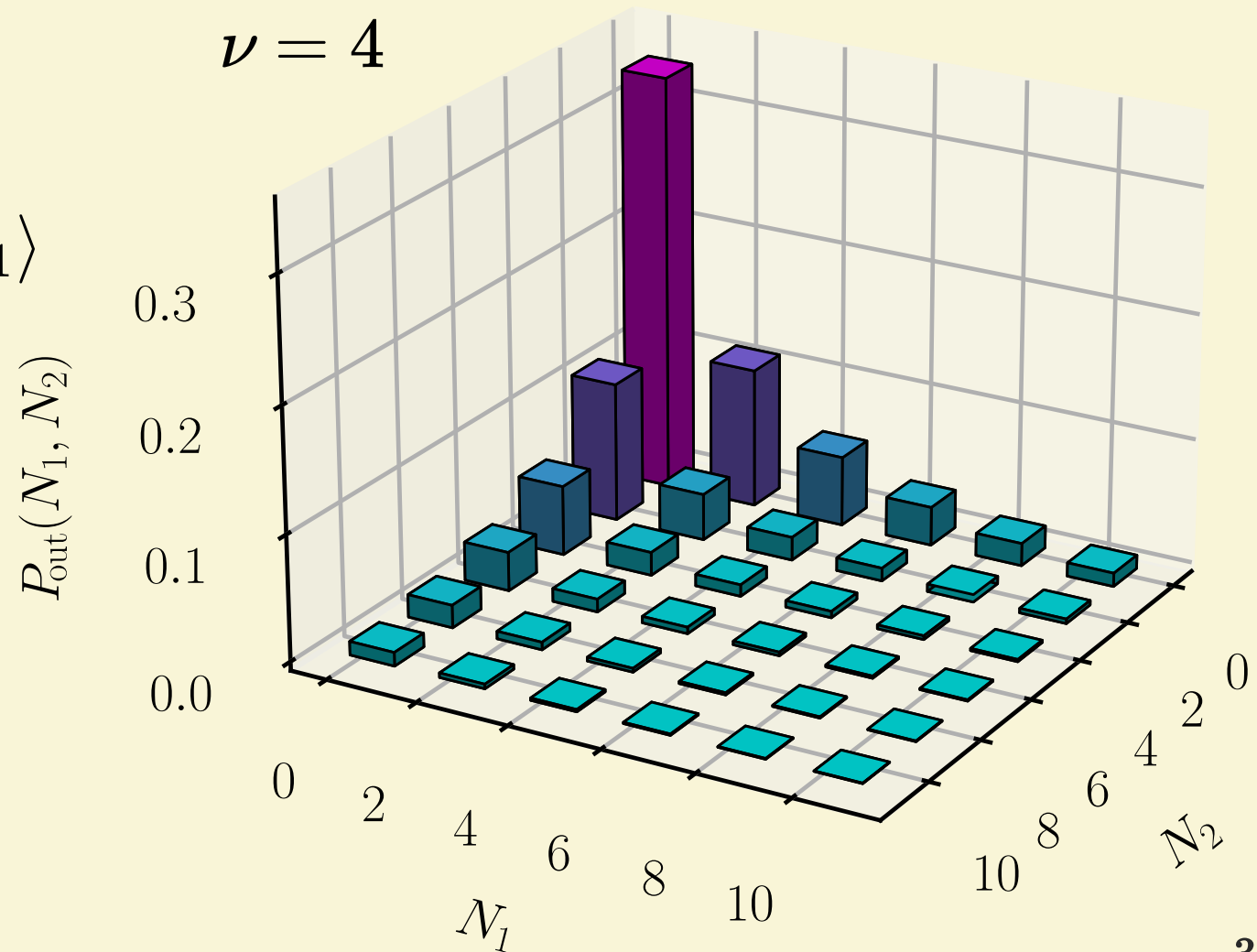
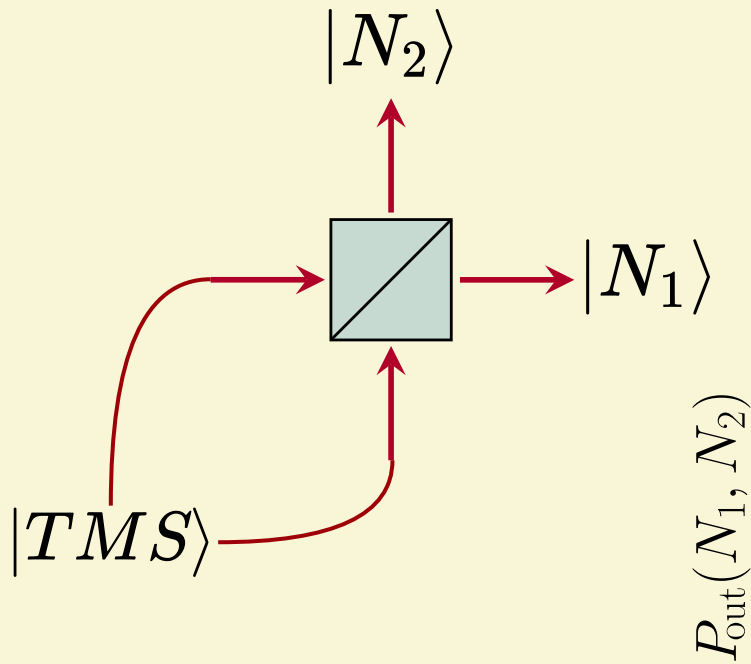
III – Effet HOM à multiples particules



$$|1, 1\rangle \xrightarrow{\hat{S}} \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|0, 2\rangle + |2, 0\rangle \right)$$

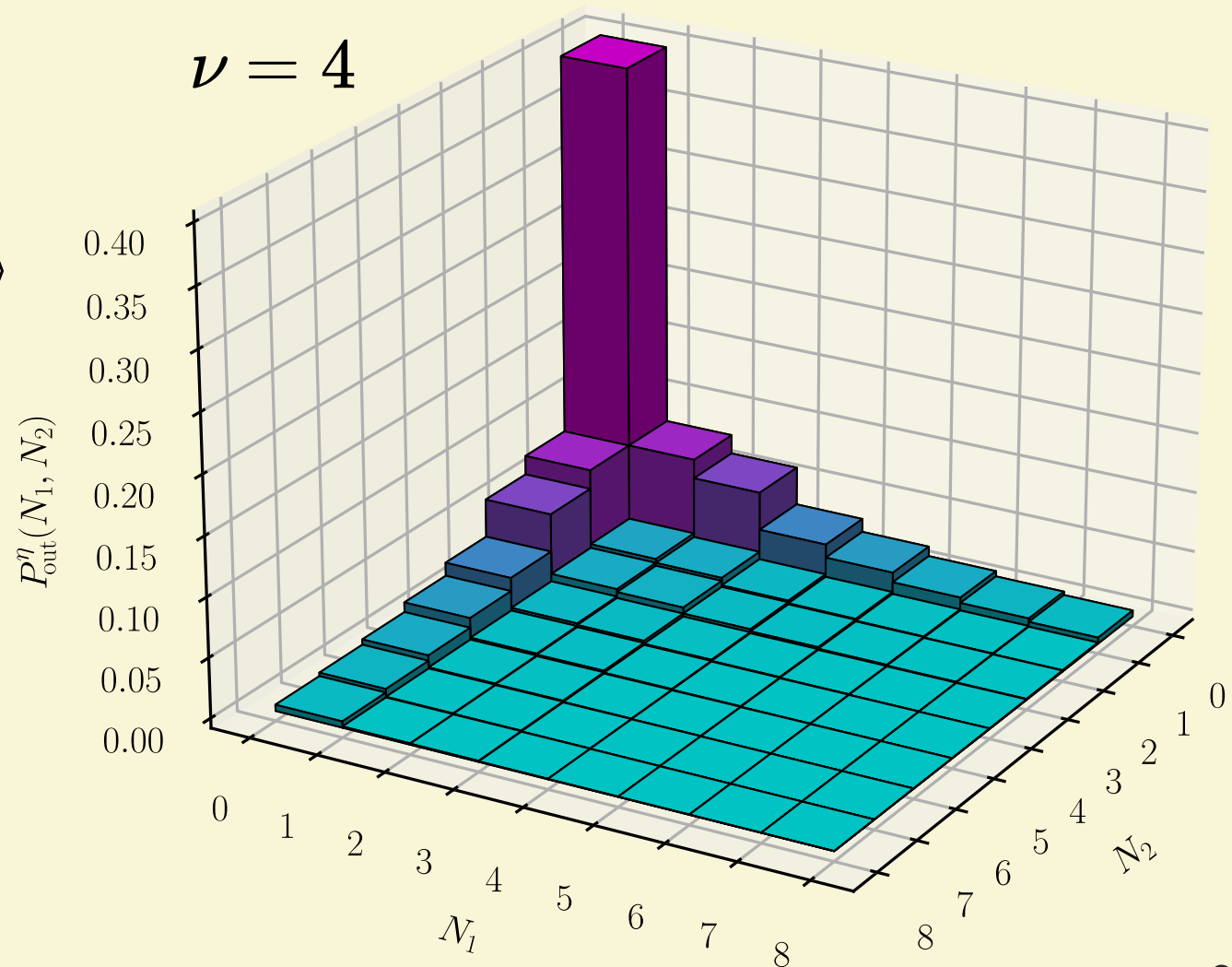
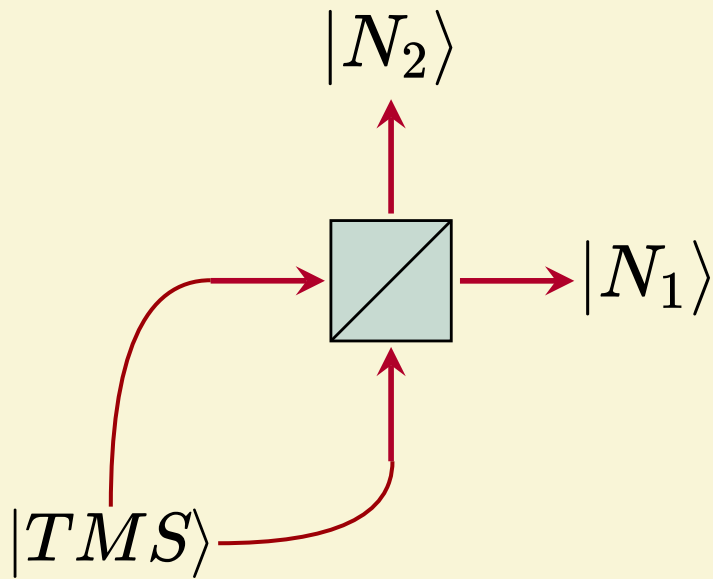
III – Effet HOM à multiples particules

Avec une efficacité quantique parfaite



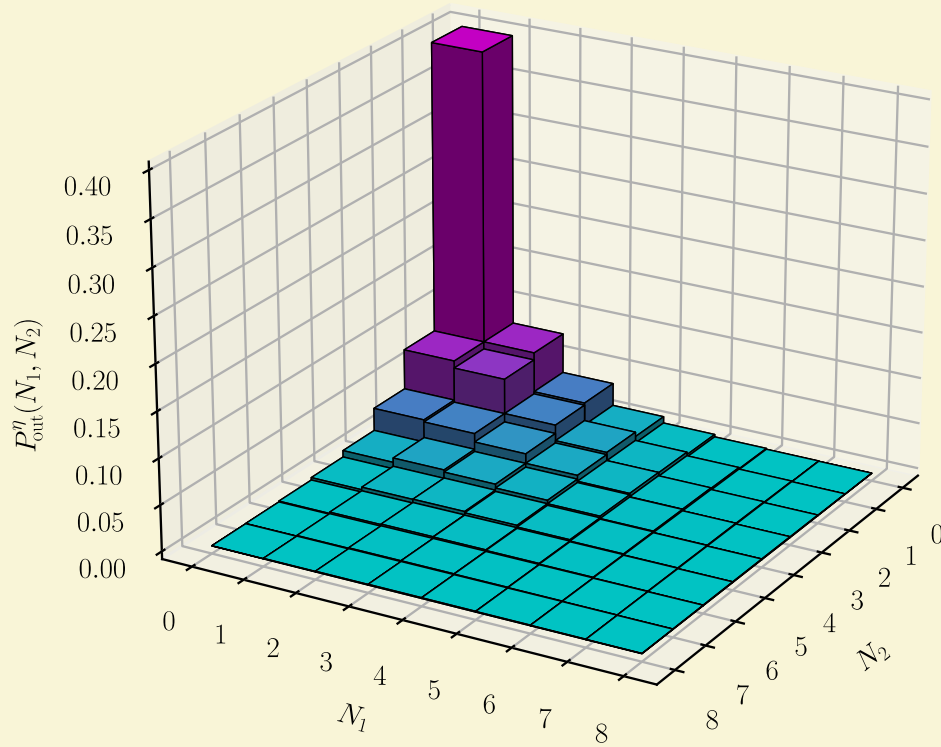
III – Effet HOM à multiples particules

Avec 50 % d'efficacité quantique

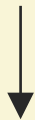


III – Effet HOM à multiples particules

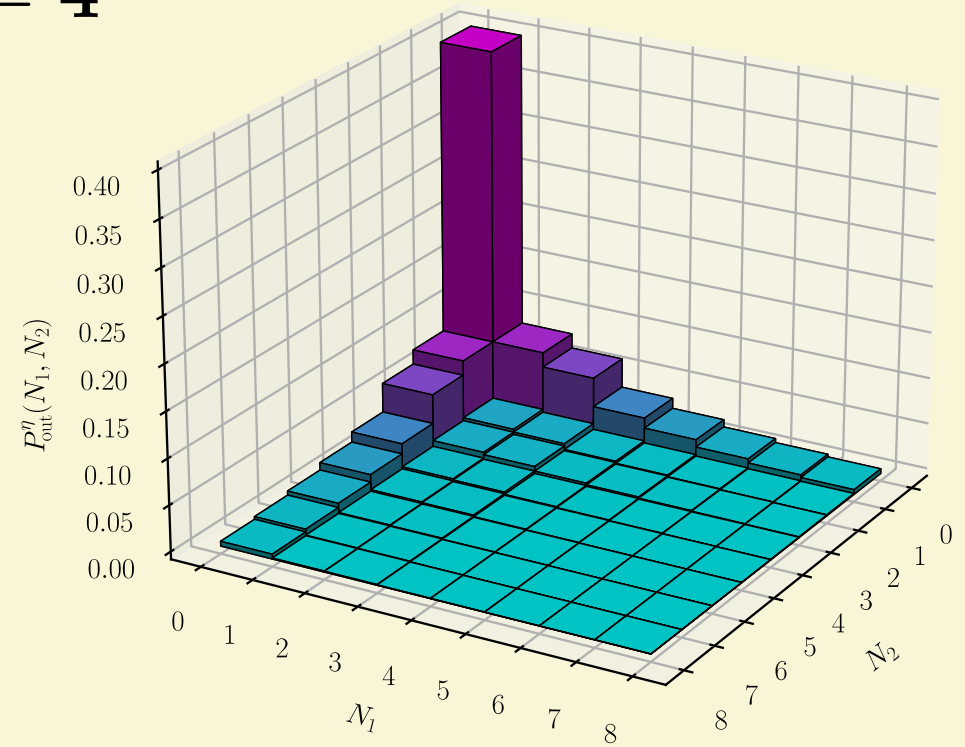
$$\nu = 4$$



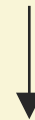
Cas «discernable »



Les deux modes interagissent
successivement avec la séparatrice



Cas « indiscernable »

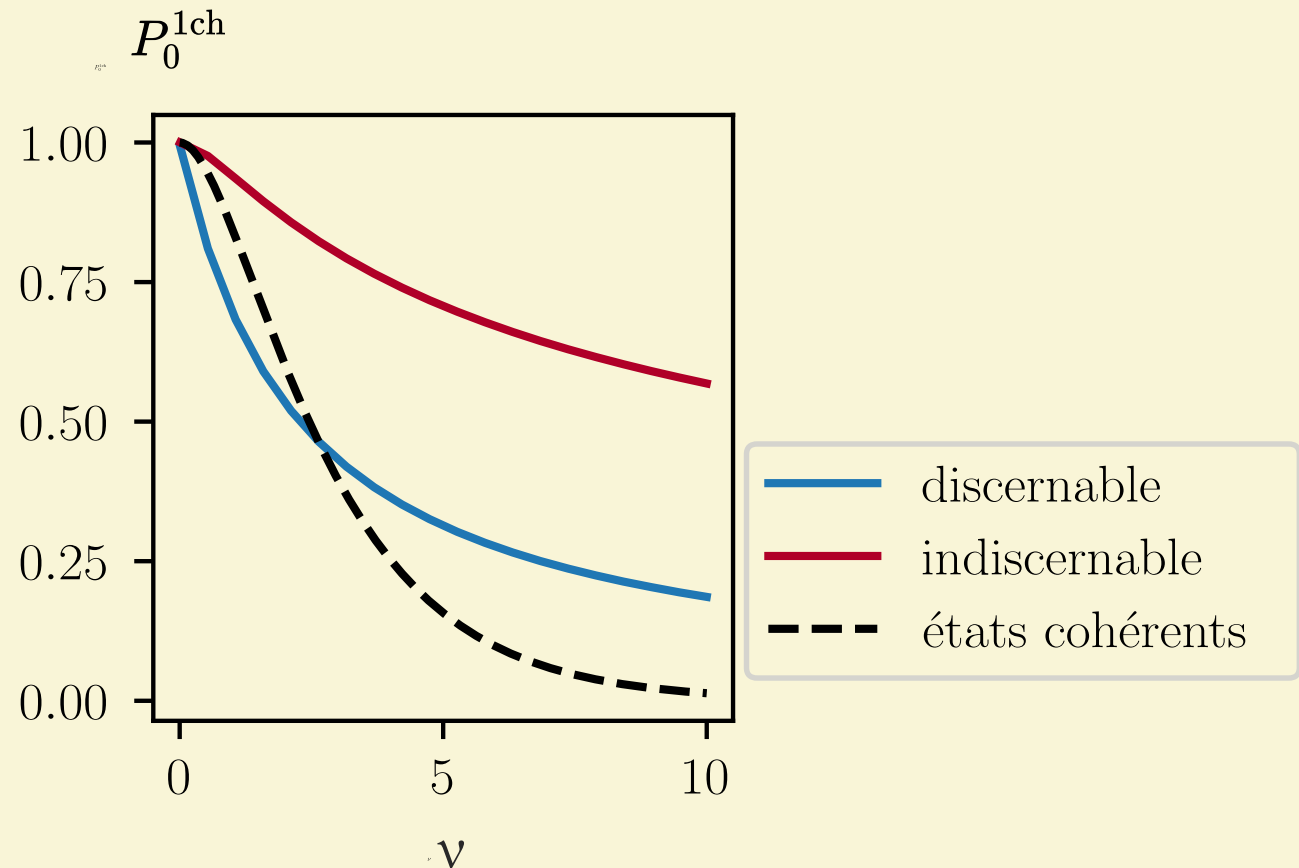


Les deux modes interagissent
simultanément avec la séparatrice

Observable d'intérêt potentiel : $P_0^{1\text{ch}}$ $\longrightarrow$ probabilité de mesurer 0 particule d'un côté

III – Effet HOM à multiples particules

Observable d'intérêt potentiel : $P_0^{1\text{ch}} \longrightarrow$ probabilité de mesurer 0 particule d'un côté



Conclusion

- **Expérience à nouveau fonctionnelle**
 - Durée des cycles = 10 secondes (**gain d'un facteur 3**)
 - Gain d'efficacité de détection d'un facteur 2 $\Rightarrow$ **facteur 4** pour la détection de paires
 - $\Rightarrow$ **gain d'un facteur 12 pour le rapport signal/bruit**
- **Source caractérisée** $\rightarrow$ émission par paires observée + **ν grand possible**
- **Travaux préparatoires théoriques effectués**
 - Pour les inégalités de Bell $\rightarrow$ gain d'un facteur 2 sur ν

taux de détection
de paires

$$\gamma = \nu \frac{\eta^2}{T_{exp}}$$

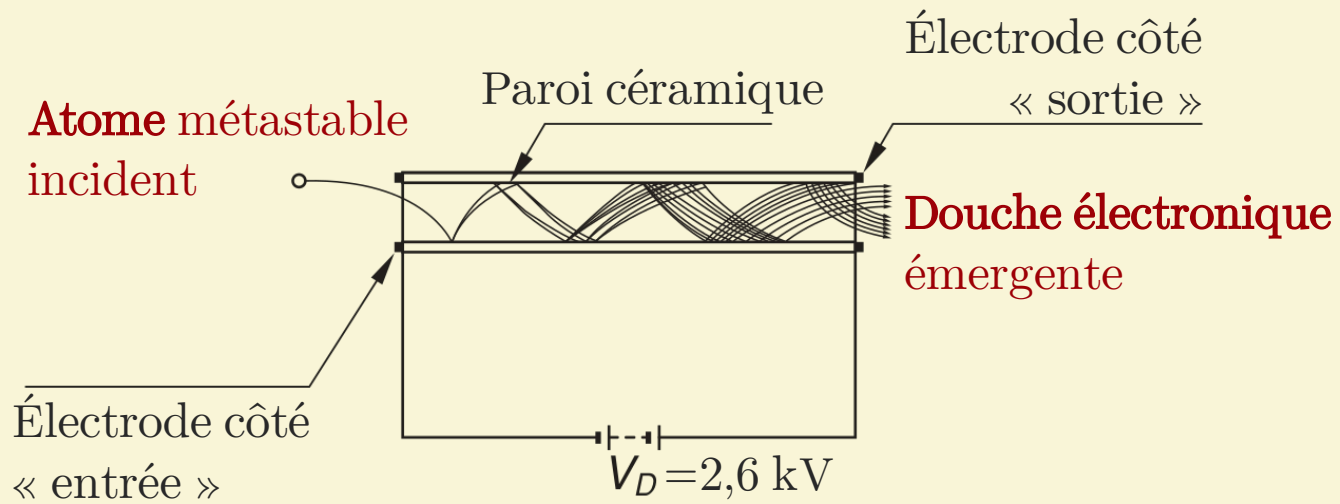
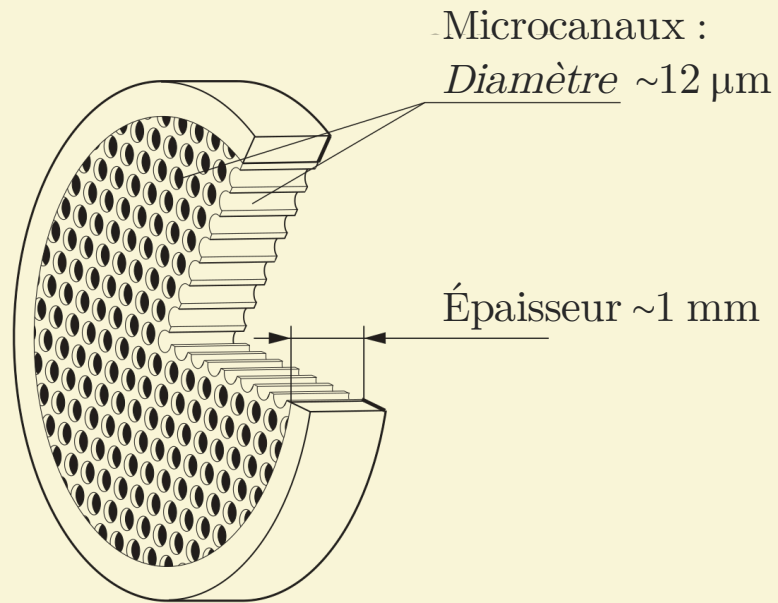
Durée pour détecter UNE paire d'atomes	
Avant	2h
Maintenant	<5 mins

- Pour une généralisation de l'effet HOM

ACTUELLEMENT: Les impulsions lasers Bragg sont en cours d'implémentation

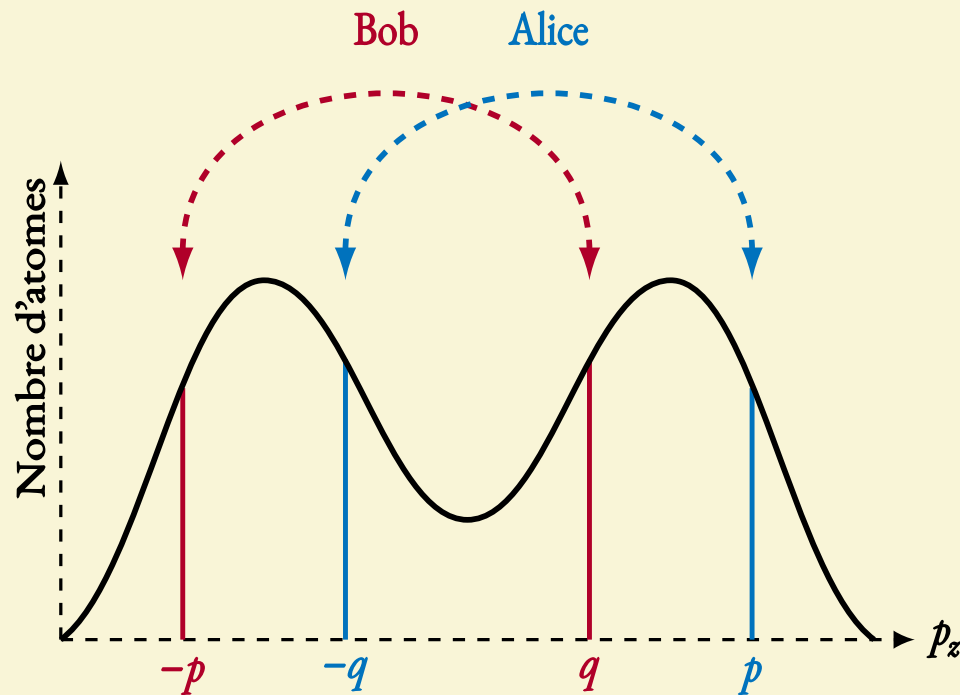
$\hookrightarrow$ Travail sur le contrôle des phases

ANNEXES



$$\eta \approx 0,5$$

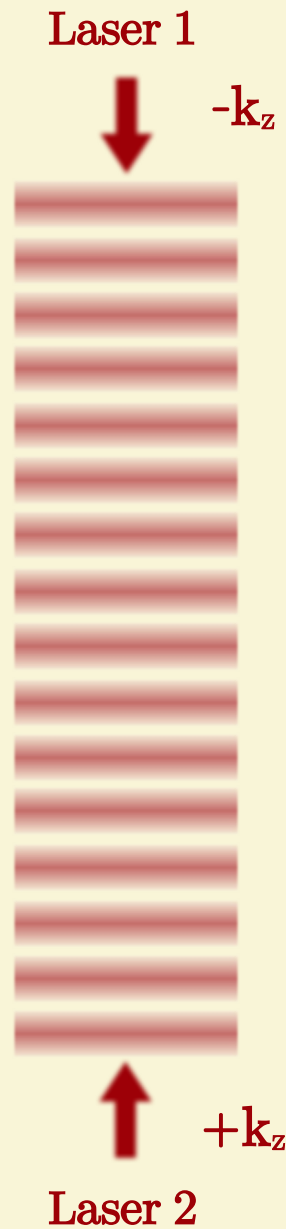
II.1 – Topologie de l'interféromètre de Rarity-Tapster



Couplage réalisé avec un
réseau optique résonnant

$$|-p\rangle \longmapsto \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|-p\rangle + e^{i\Delta\phi} |q\rangle \right)$$

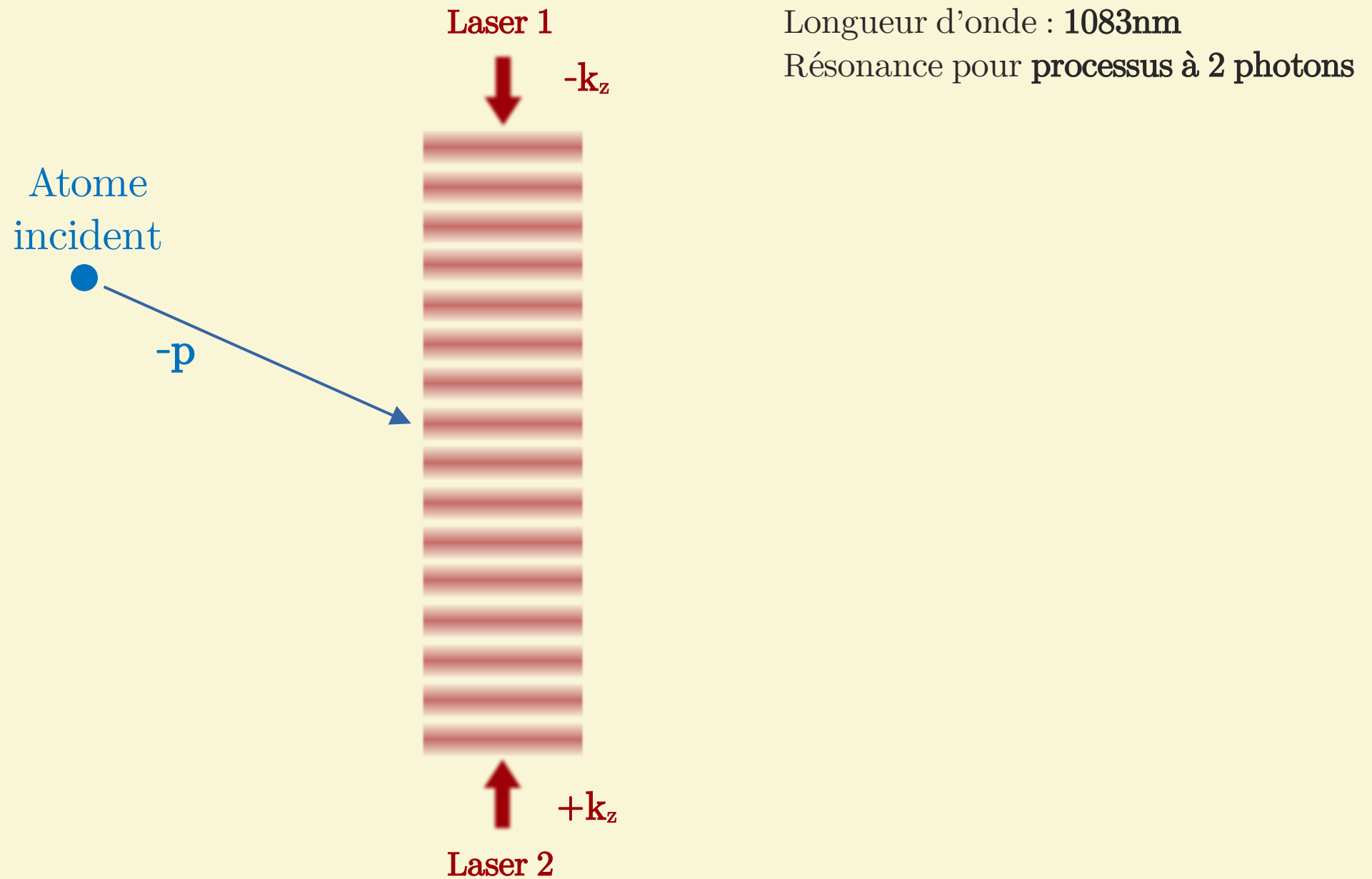
II.2 – Miroirs et séparatrices de Bragg



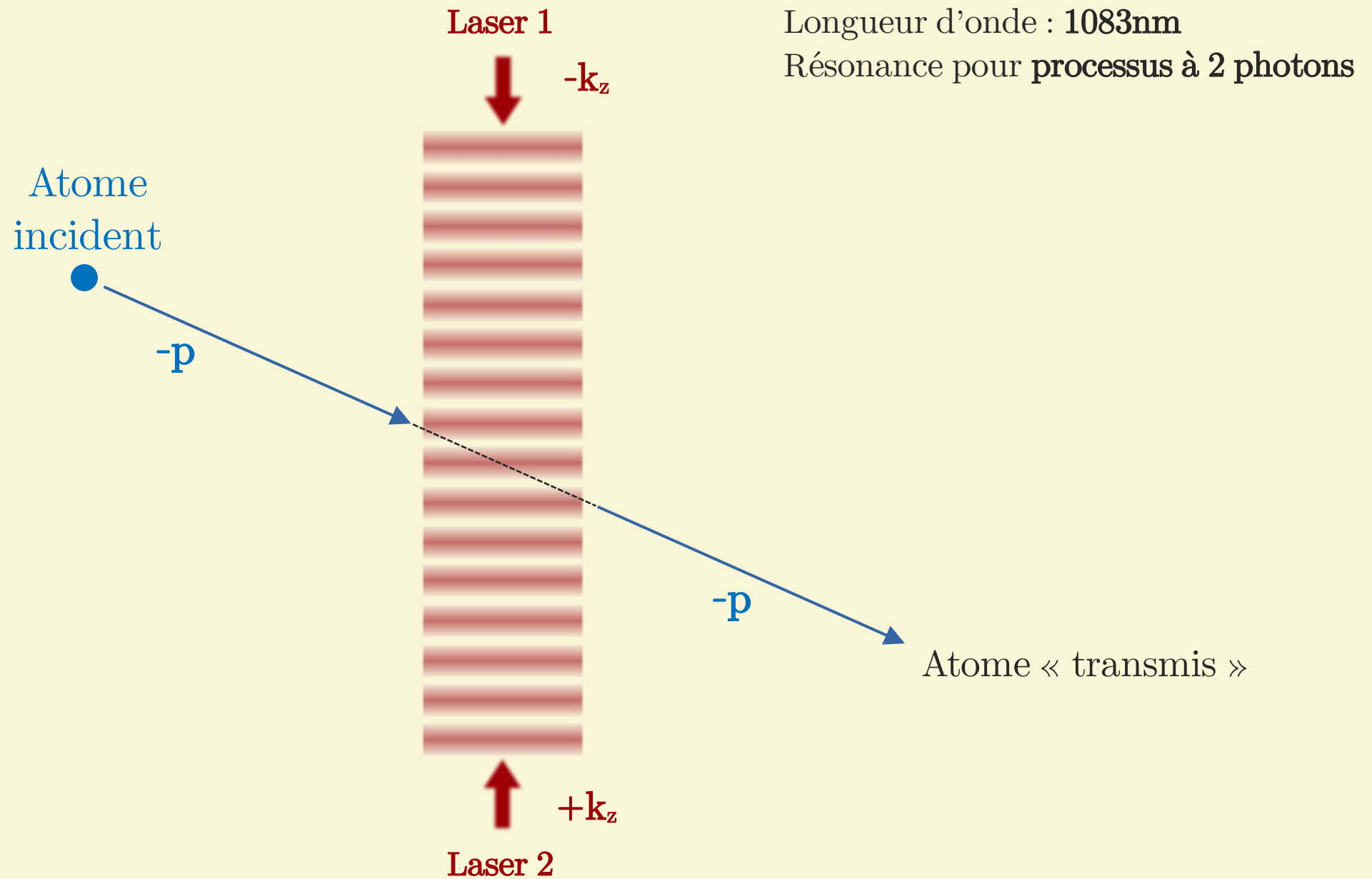
Longueur d'onde : 1083nm

Résonance pour processus à 2 photons

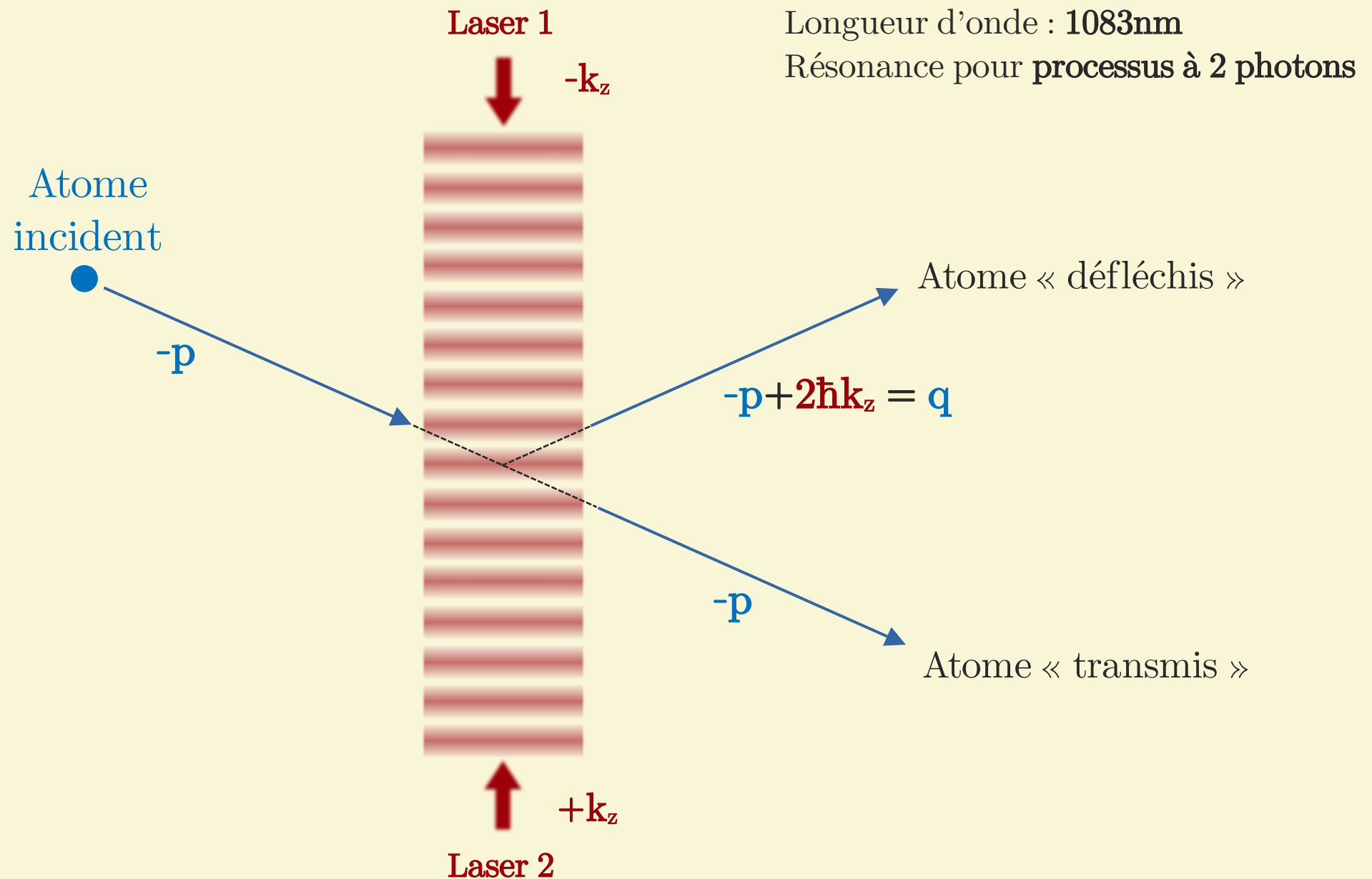
II.2 – Miroirs et séparatrices de Bragg



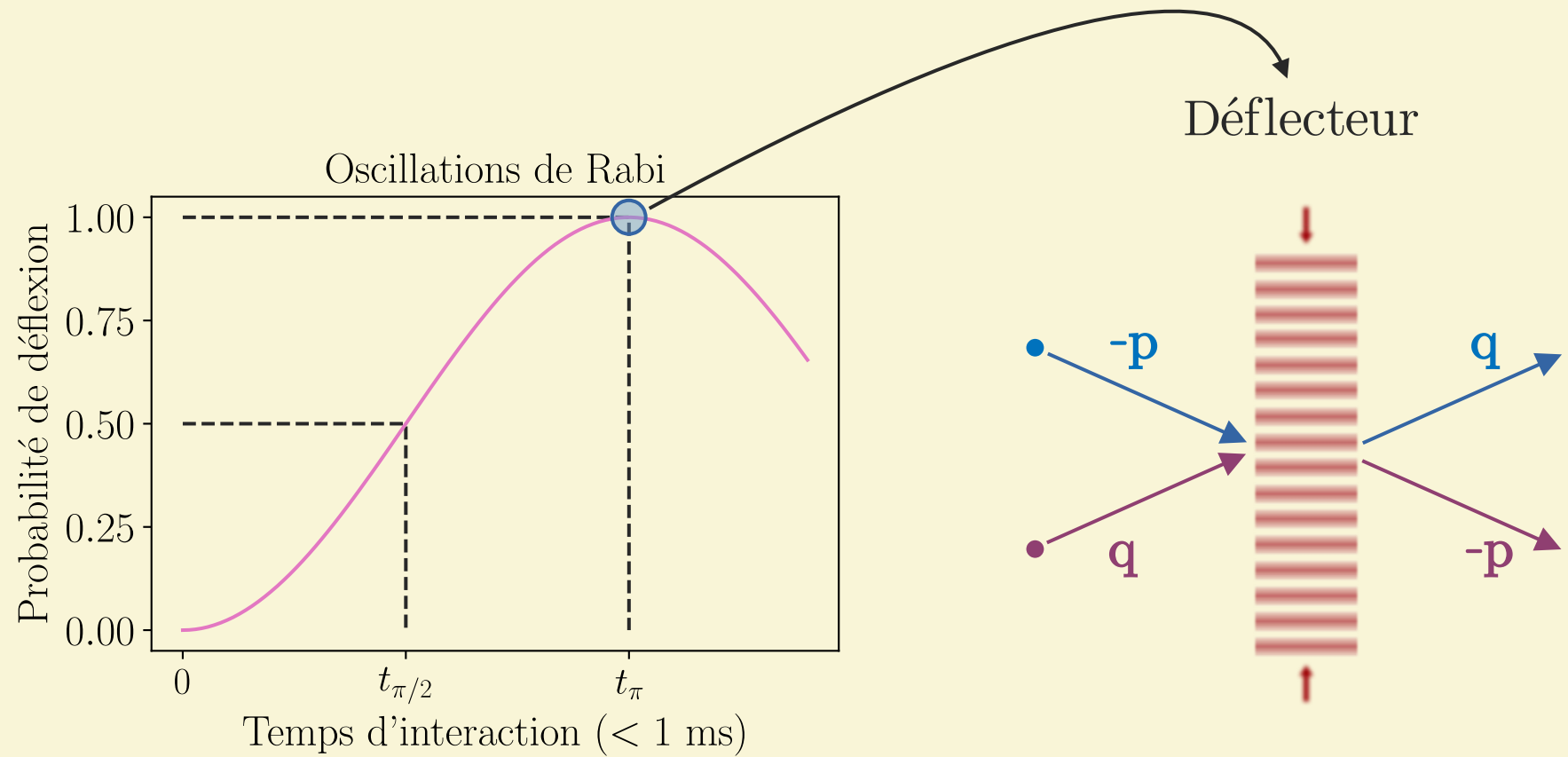
II.2 – Miroirs et séparatrices de Bragg



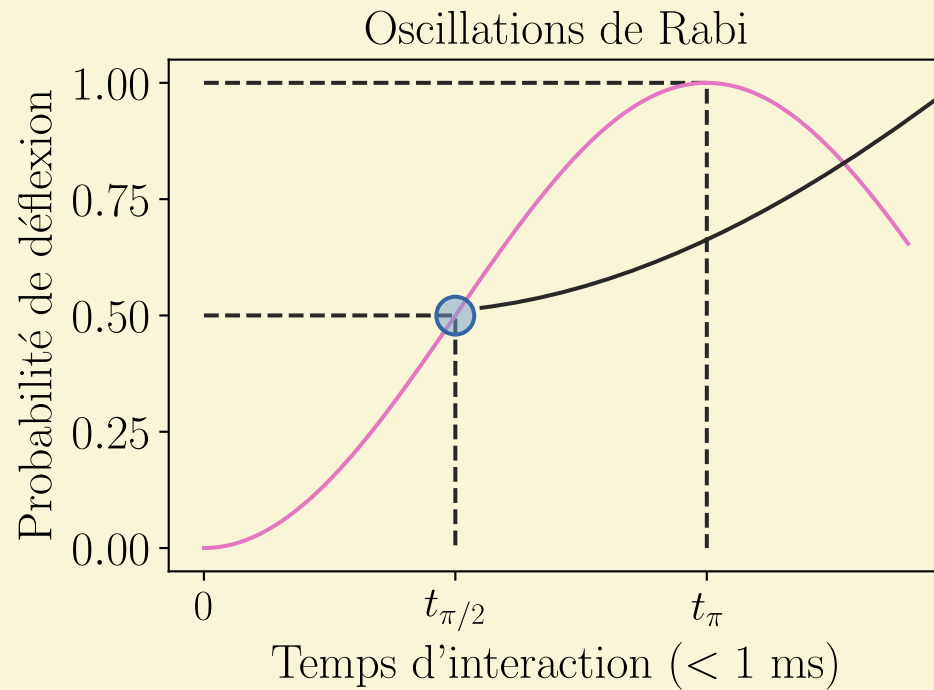
II.2 – Miroirs et séparatrices de Bragg



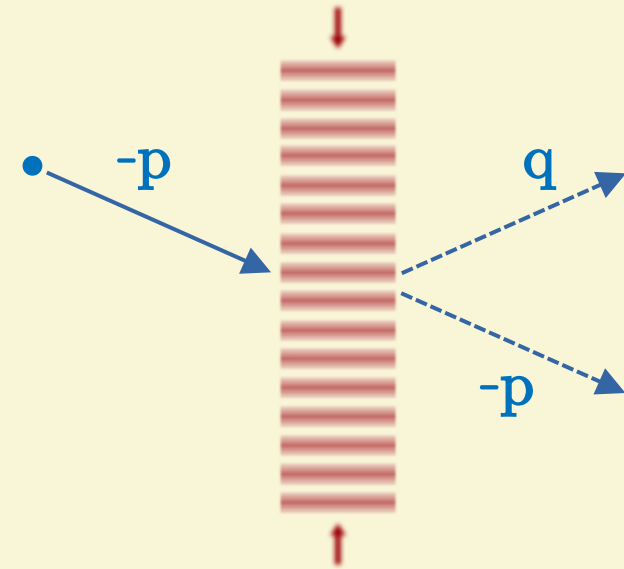
II.2 – Miroirs et séparatrices de Bragg



II.2 – Miroirs et séparatrices de Bragg

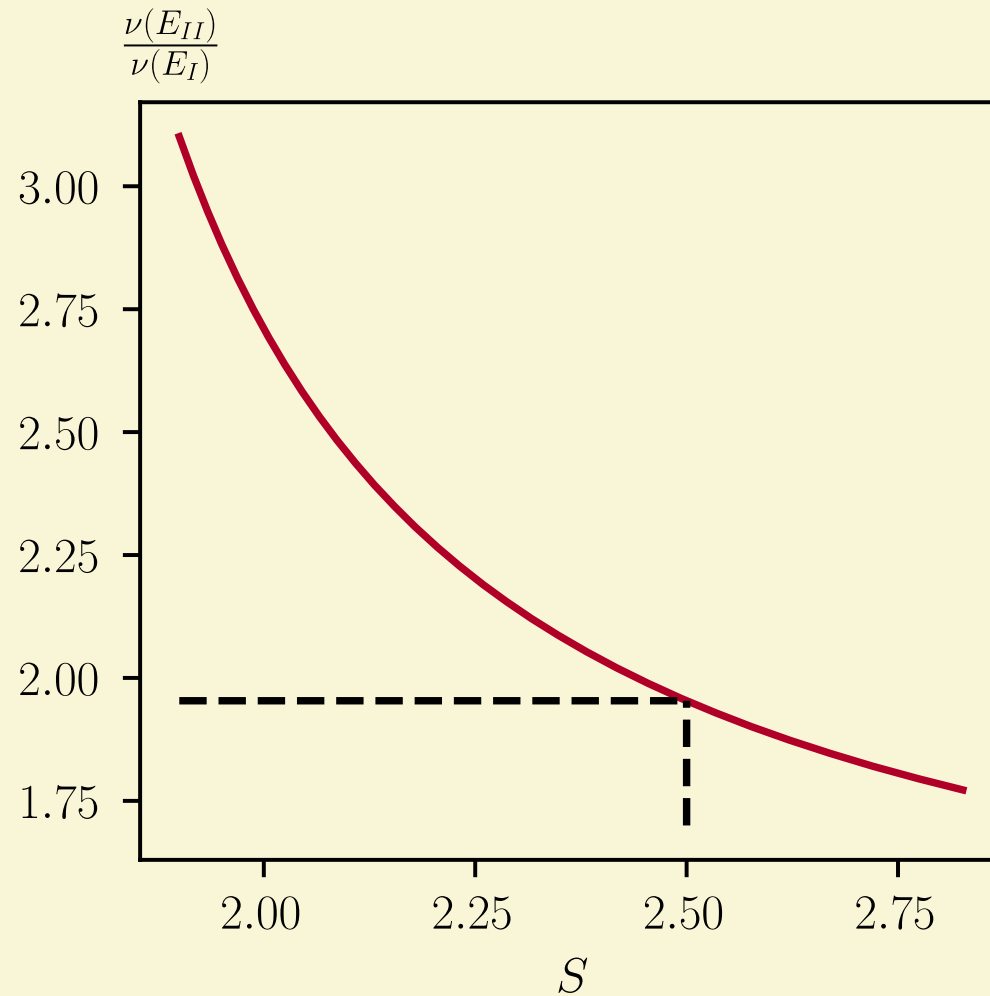


Séparatrice 50:50



$$|-p\rangle \mapsto \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|-p\rangle + e^{i\Delta\phi} |q\rangle \right)$$

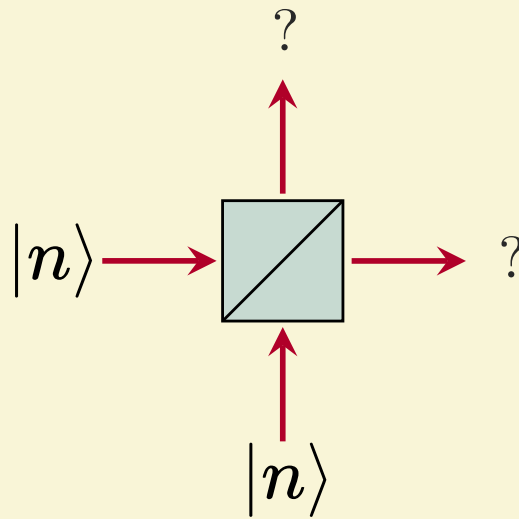
II.3 – Calcul du paramètre de Bell



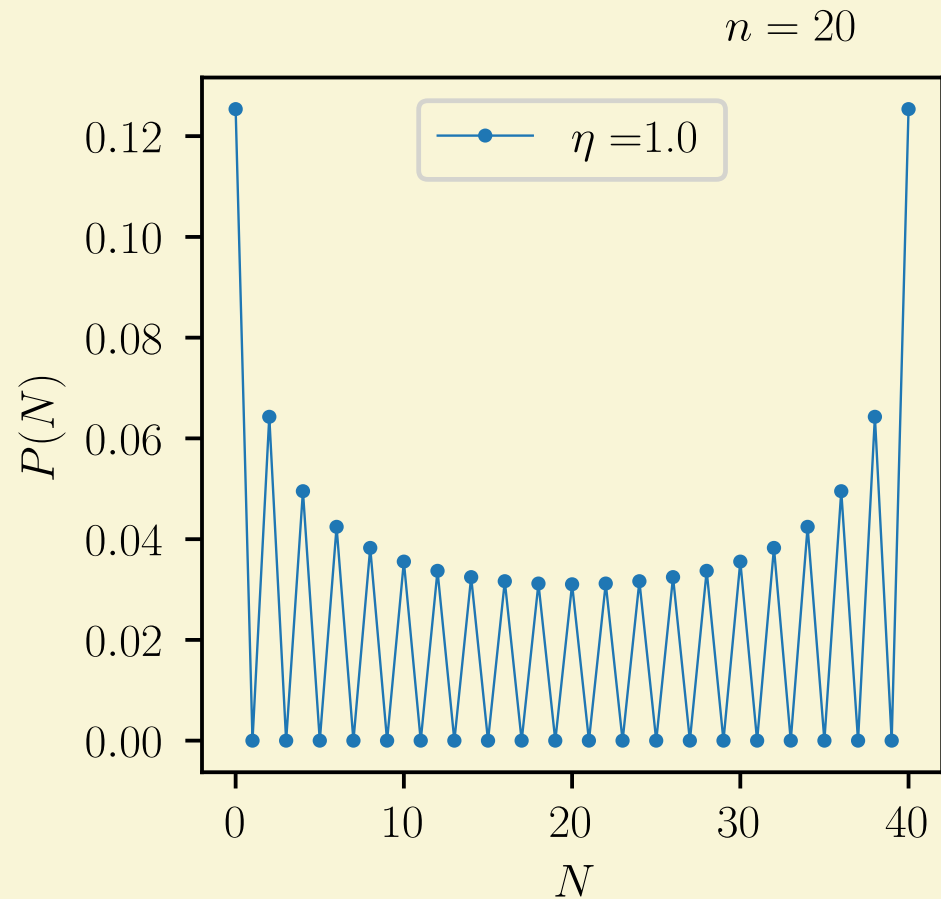
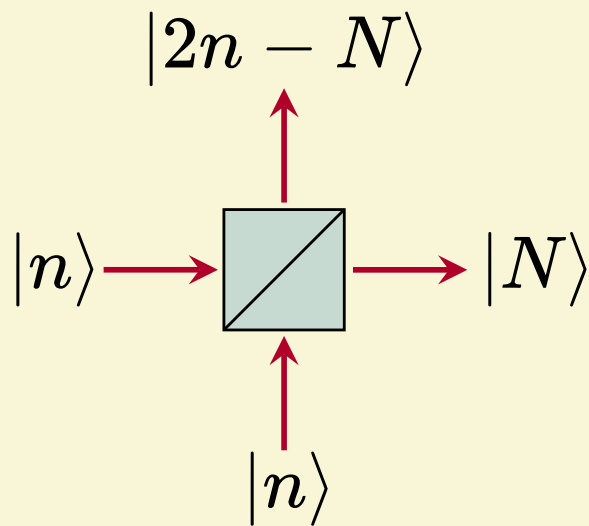
Gain d'un facteur ~ 2 par rapport à la 1^{ère} approche

Rapport de populations entre les deux approches, pour un paramètre de Bell donné

III – Effet HOM à multiples particules



III – Effet HOM à multiples particules



Nombres pairs de particules sur chaque canal de sortie !