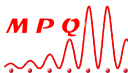


Génération d'états non-classiques de la lumière par mélange à 4 ondes dans une vapeur atomique

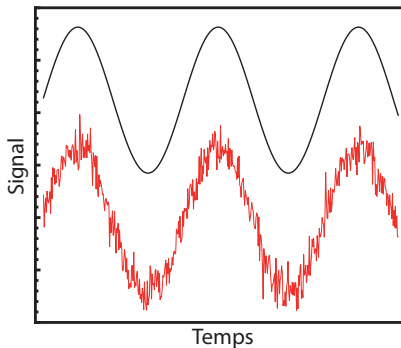
Quentin Glorieux

Laboratoire Matériaux et Phénomènes Quantiques
Université Paris Diderot

19 novembre 2010



Qu'est ce que le bruit ?



Rapport signal sur bruit : RSB.

Exemple : RSB=100, RSB=10, RSB = 1

Le bruit quantique de la lumière

Expériences de détection de la lumière

- Etude du signal
- Etude du bruit

On doit s'affranchir de :

Déterministe :

- signal parasite

Non déterministe :

- indépendant du système de mesure
- lié aux contraintes techniques

Le bruit quantique de la lumière

Expériences de détection de la lumière

- Etude du signal
- Etude du bruit

On doit s'affranchir de :

Déterministe :

- signal parasite

Non déterministe :

- indépendant du système de mesure
- lié aux contraintes techniques

Bruit quantique de la lumière :

- lié à la nature corpusculaire de la lumière (photons)

Frontière classique pour le bruit

Du sable qui tombe sur une plaque de métal

- Son du choc des grains sur la plaque
- "Musique" classique

Les photons d'un laser atténué qui arrivent sur un détecteur

- "Clic" à l'arrivée d'un photon sur le détecteur
- "Musique" quasi-classique



Le bruit de grenaille (ou shot-noise)

Frontière classique pour le bruit

Du sable qui tombe sur une plaque de métal

- Son du choc des grains sur la plaque
- "Musique" classique
- Statistique poissonnienne

Les photons d'un laser atténué qui arrivent sur un détecteur

- "Clic" à l'arrivée d'un photon sur le détecteur
- "Musique" quasi-classique
- Statistique poissonnienne



Le bruit de grenaille (ou shot-noise)

Peut on réduire le bruit de la lumière sous cette frontière ?

Etats non-classiques de la lumière

Etats non-classiques

- Etats non accessibles pour des objets classiques
- Frontière = limite quantique standard

Etats comprimés



- "Clic" à l'arrivée d'un photon sur le détecteur
- Statistique sub-poissonienne
- Musique "quantique"

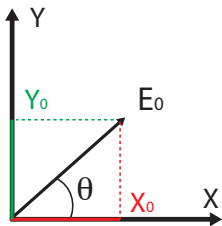
Plan

- L'optique quantique en régime de variables continues
- Étude théorique du mélange à 4 ondes
- Résultats
 - Dispositif expérimental
 - Comparaison théorie/expérience
 - Lame séparatrice quantique
- Perspectives

Variables continues en optique quantique

Champ électrique oscillant
classique monochromatique

$$\begin{aligned} E &= E_0 e^{i(\omega t + \theta)} \\ &= X_0 \cos \omega t + Y_0 \sin \omega t \end{aligned}$$



Variables continues en optique quantique

En optique quantique :
un mode du champ électrique
assimilé à
un oscillateur harmonique

Hamiltonien de l'oscillateur
harmonique

$$\hat{H} = \frac{\hat{p}^2}{2m} + \frac{1}{2}m\omega^2\hat{x}^2$$

Relation de commutation

$$[\hat{x}, \hat{p}] \neq 0$$

Inégalité d'Heisenberg

$$\Delta_{\hat{x}}^2 \Delta_{\hat{p}}^2 \geq 1$$

Variables continues en optique quantique

En optique quantique :
un mode du champ électrique
assimilé à
un oscillateur harmonique

Hamiltonien de l'oscillateur
harmonique

$$\hat{H} = \frac{\hat{p}^2}{2m} + \frac{1}{2}m\omega^2\hat{x}^2$$

Relation de commutation

$$[\hat{x}, \hat{p}] \neq 0$$

Limite quantique standard

$$\Delta_{\hat{x}}^2 = \Delta_{\hat{p}}^2 = 1$$

Représentation d'un mode du champ électrique quantifié

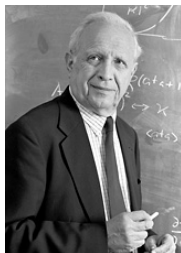
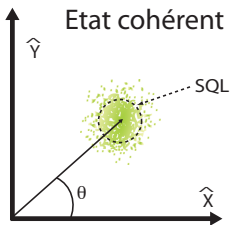
$$\hat{E} = E_0(\hat{X} \cos \omega t + \hat{Y} \sin \omega t)$$

Inégalité d'Heisenberg

$$\Delta_{\hat{X}}^2 \Delta_{\hat{Y}}^2 \geq 1$$

Etat cohérent : laser

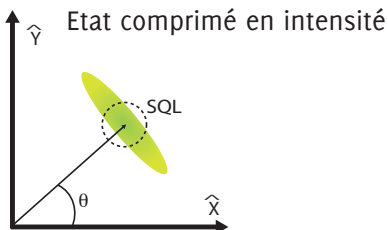
$$\Delta_{\hat{X}}^2 = \Delta_{\hat{Y}}^2 = 1$$



État comprimé à un mode

Représentation de l'état comprimé :

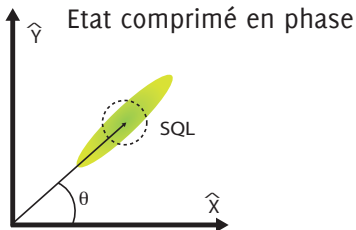
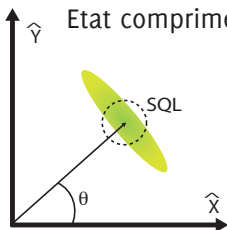
- une quadrature sous la limite quantique standard
- Compression : $S = \frac{\Delta \hat{X}_\theta^2}{\Delta \hat{X}_{SQL}^2}$, $S_{dB} = 10 \log \frac{\Delta \hat{X}_\theta^2}{\Delta \hat{X}_{SQL}^2}$



État comprimé à un mode

Représentation de l'état comprimé :

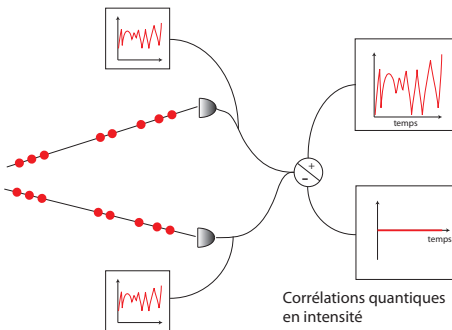
- une quadrature sous la limite quantique standard
- Compression : $S = \frac{\Delta \hat{X}_\theta^2}{\Delta \hat{X}_{SQL}^2}$, $S_{dB} = 10 \log \frac{\Delta \hat{X}_\theta^2}{\Delta \hat{X}_{SQL}^2}$



État comprimé à deux modes:

Corrélations quantiques

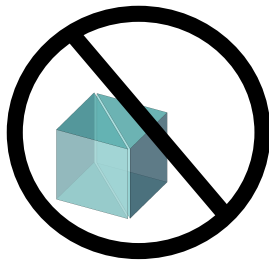
- 2 modes d'un seul objet quantique
- On détecte les fluctuations de la différence des photo-courants



Produire des états non-classiques ?

Génération d'états non-classiques

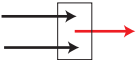
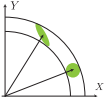
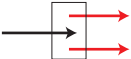
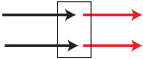
- Composants de l'optique linéaire (cube, lentille, miroir...)



Produire des états non-classiques ?

Génération d'états non-classiques

- Composants de l'optique linéaire (cube, lentille, miroir...)
- Effets non linéaires : $\chi^{(2)}$, $\chi^{(3)}$

	milieu $\chi^{(2)}$	milieu $\chi^{(3)}$
Etat comprimé	Seconde harmonique 	Effet Kerr 
Corrélations	Oscillateur paramétrique 	Mélange à 4 ondes 

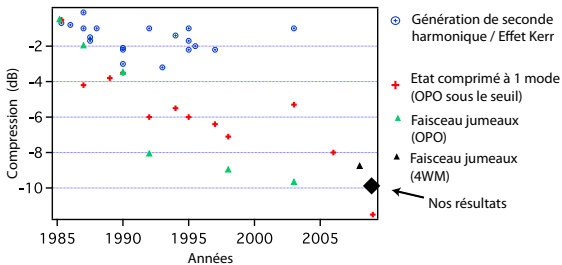
Une brève histoire des états comprimés

| REPORTS

Entangled Images from Four-Wave Mixing

Vincent Boyer,* Alberto M. Marino, Raphael C. Pooser, Paul D. Lett*

Science Vol. 321. no. 5888, 544 - 547 (2008)

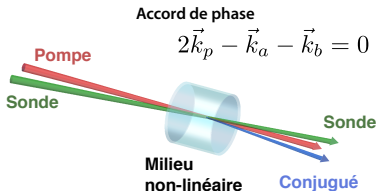
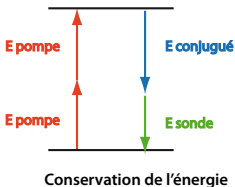


Etude théorique du mélange à 4 ondes

- Optique non linéaire
- Modèle microscopique

Mélange à 4 onde

Effet paramétrique : milieu de susceptibilité non-linéaire $\chi^{(3)}$



Équations de propagation :

$$\frac{\partial \mathcal{E}_a}{\partial z} = \kappa \mathcal{E}_a + \eta \mathcal{E}_b^*$$

$$\frac{\partial \mathcal{E}_b}{\partial z} = \kappa \mathcal{E}_b + \eta \mathcal{E}_a^*$$

Solutions pour $\mathcal{E}_a = \mathcal{E}_{in}$ et $\mathcal{E}_b = 0$

$$|\mathcal{E}_a| = \sqrt{G} \mathcal{E}_{in}$$

$$|\mathcal{E}_b| = \sqrt{G-1} \mathcal{E}_{in}$$

Modèle de l'amplificateur linéaire idéal

Amplificateur linéaire idéal

$$\hat{a}_{out} = \sqrt{G} \hat{a}_{in} + \sqrt{G-1} \hat{b}_{in}^{\dagger}$$

$$\hat{b}_{out}^{\dagger} = \sqrt{G} \hat{b}_{in}^{\dagger} + \sqrt{G-1} \hat{a}_{in}$$

Opérateur nombre : $\hat{N}_a = \hat{a}^{\dagger} \hat{a}$

Différence d'intensité : $\hat{N}_- = \hat{N}_a - \hat{N}_b$

Valeurs moyennes pour

$$\langle N_a, in \rangle = |\alpha|^2 \propto |\mathcal{E}_{in}|^2$$

$$\langle N_a \rangle = G|\alpha|^2, \quad \langle N_b \rangle = (G-1)|\alpha|^2$$

$$\langle N_+ \rangle = (2G-1)|\alpha|^2, \quad \langle N_- \rangle = |\alpha|^2$$

Compression

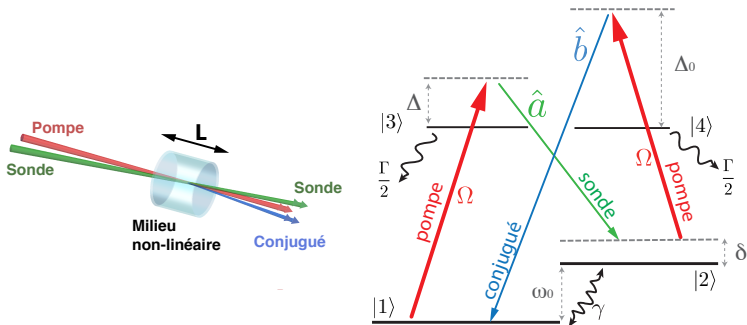
$$S_{N_-} = \frac{1}{2G-1}$$

Etude théorique du mélange à 4 ondes

- Modèle microscopique

Modèle microscopique pour le milieu non-linéaire

Modèle en double- Λ



7 paramètres : Δ , δ , ω_0 , Ω , γ , Γ , αL

Approche de Heisenberg Langevin

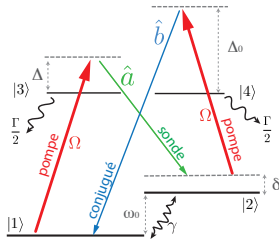
- Energie liée aux populations
- **couplage atomes-pompe**
- **couplage atomes-sonde**
- **couplage atomes-conjugué**

Hamiltonien d'interaction

$$\hat{V} = -\hbar[\Delta_0 \hat{\sigma}_{44} + \Delta \hat{\sigma}_{33} + \delta \hat{\sigma}_{22} +$$

$$(\frac{\Omega}{2}(\hat{\sigma}_{31} + \hat{\sigma}_{42}) + g_a \hat{a} \hat{\sigma}_{32} + g_b \hat{b} \hat{\sigma}_{41} + H.c.)]$$

Q. Glorieux et al. Phys. Rev. A 82, 033819 (2010)

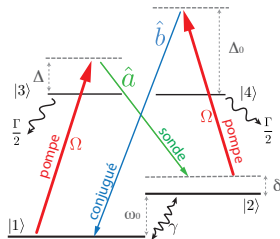


Approche de Heisenberg Langevin

- Evolution Hamiltonienne
- Dissipation (décohérence et émission spontanée)
- Fluctuation

Evolution

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \gamma_{uv}\right)\hat{\sigma}_{uv} = \frac{i}{\hbar}[\hat{V}, \hat{\sigma}_{uv}] + \hat{r}_{uv} + \hat{F}_{uv}$$



Propagation : relations entrée-sortie

Hypothèses pour des atomes immobiles

- Etat stationnaire piloté par la pompe
- Etat cohérent en entrée sur \hat{a}
- Vide en entrée sur \hat{b}

Valeurs moyennes

- Gain individuel sur \hat{a} et \hat{b}
- Différence d'intensité
- Phase

Fluctuations

- Spectres de bruit (\hat{a} et \hat{b})
- Spectres de bruit de la différence d'intensité
- Anti-corrélations de phase

Résultats

Pour des atomes immobiles

- En accord avec le modèle d'amplificateur linéaire idéal
- Corrélations quantiques en intensité à l'aide d'un milieu d'atomes froids
- Intrication en variables continues
- Exploration de l'espace des paramètres

Extension du modèle à une vapeur atomique chaude

Pour des atomes non immobiles

- Quel désaccord est vu par les atomes ?
- Qu'est ce qui fixe le taux de décohérence ?
- L'hypothèse de l'état stationnaire est elle valide ?

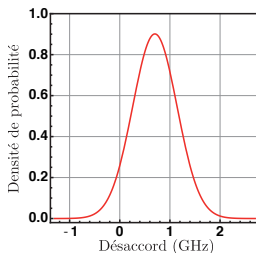
Extension du modèle à une vapeur atomique chaude

Pour des atomes non immobiles

- Quel désaccord est vu par les atomes ?
- Qu'est ce qui fixe le taux de décohérence ?
- L'hypothèse de l'état stationnaire est elle valide ?

Distribution de vitesse des atomes: élargissement inhomogène

- Désaccord à 1 photon
(intégration du profil de vitesse)



Extension du modèle à une vapeur atomique chaude

Pour des atomes non immobiles

- Quel désaccord est vu par les atomes ?
- Qu'est ce qui fixe le taux de décohérence ?
- L'hypothèse de l'état stationnaire est elle valide ?

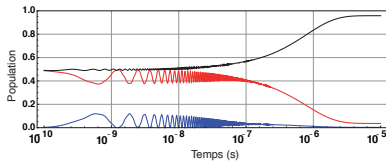
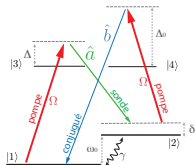
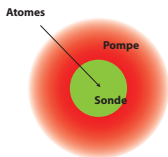
Temps de passage fini des atomes dans le faisceau

- $v = \sqrt{\frac{2k_B T}{m}} \simeq 300 \text{ m.s}^{-1}$
- $R_s = 300 \text{ } \mu\text{m}$
- $\gamma \simeq 1 \text{ MHz}$

Extension du modèle à une vapeur atomique chaude

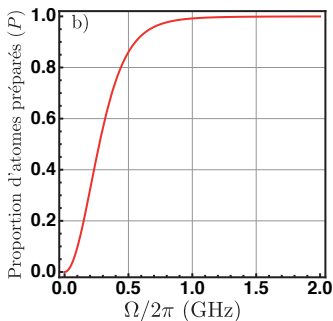
Pour des atomes non immobiles

- Quel désaccord est vu par les atomes ?
- Qu'est ce qui fixe le taux de décohérence ?
- L'hypothèse de l'état stationnaire est elle valide ?



Prise en compte de la préparation des atomes

Part d'atomes dans l'état stationnaire ($\Delta/2\pi = 0.8$ GHz) :



Comment les prendre en compte ?

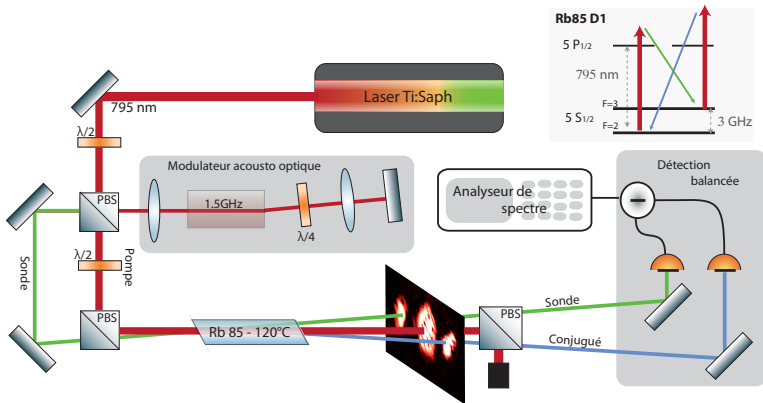
- Absorption linéaire

Résultats

- Dispositif expérimental
- Comparaison avec le modèle théorique
- Un nouveau régime : lame séparatrice quantique

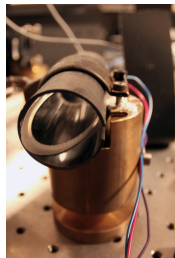
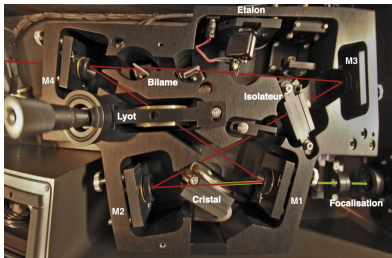
Dispositif expérimental

Schéma du dispositif



Elements utilisés

- Laser Ti:Saph stabilisé sur la raie D1 du ^{85}Rb : $P \leq 1.5\text{W}$
- Cellule de ^{85}Rb chauffée : $90^\circ\text{C} \leq T \leq 140^\circ\text{C}$
- Photodetection balancée : $\eta \approx 0.95 \pm 0.02$



Modulateur acousto-optique

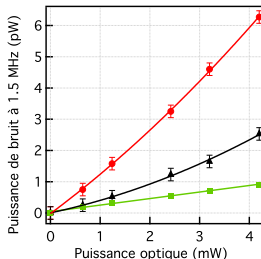
Génération du faisceau sonde

- Modulateur acousto-optique (1.5 GHz)
- Source radio fréquence
 - VCO et amplificateur non saturé
 - Synthétiseur et amplificateur saturé

Influence du bruit

$$S = \frac{1}{2G - 1}$$

$$S' = \frac{S_{\text{sonde}}}{2G - 1}$$

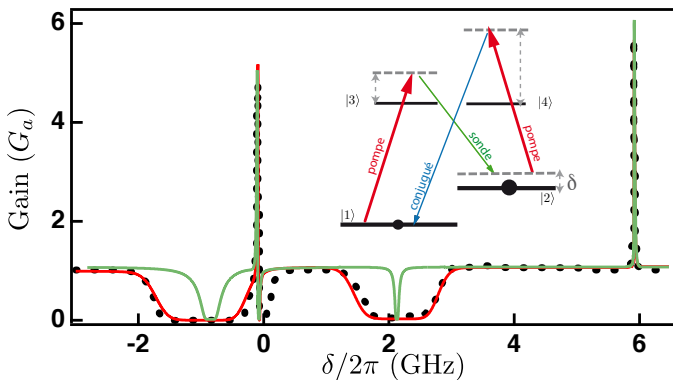


Résultats

- Comparaisons avec le modèle théorique

10 paramètres : Δ , δ , ω_0 , Ω , γ , Γ , αL , ω , T , R_s et R_p

Transmission du faisceau sonde



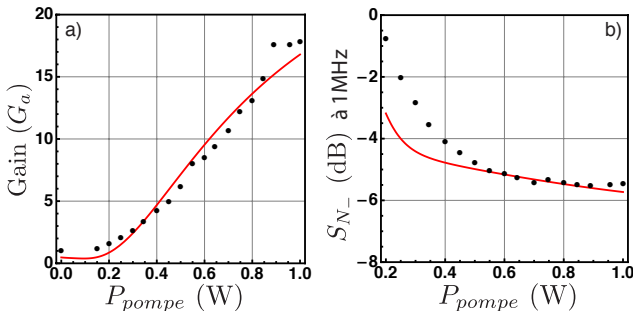
Données mesurées (NIST)

Atomes immobiles

Vapeur atomique

Comparaison théorie - expérience

Puissance du champ pompe.

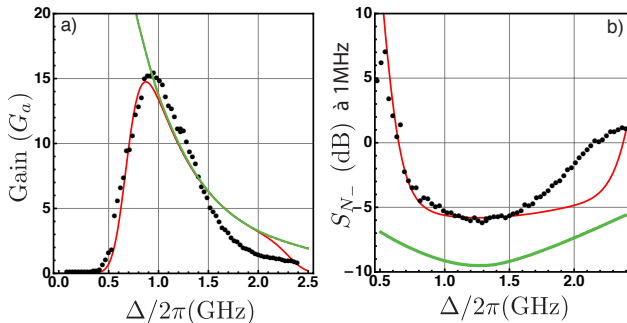


Données mesurées

Vapeur atomique

Comparaison théorie - expérience

Effet du désaccord à 1 photon



Données mesurées

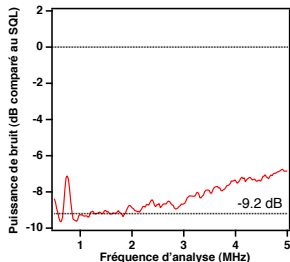
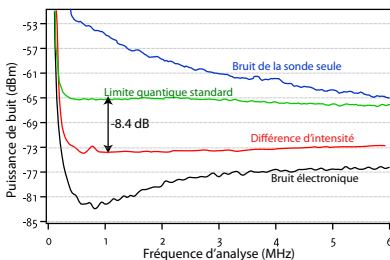
Atomes immobiles

Vapeur atomique

Corrélations quantiques en intensité

Données

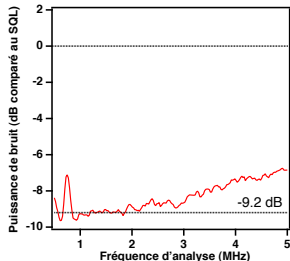
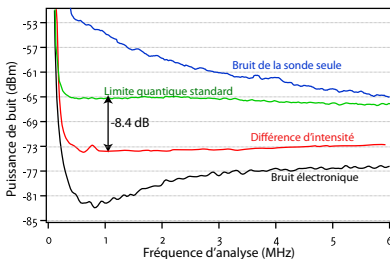
- $\Delta = 0.8$ GHz, $\delta = 6$ MHz, $T = 118^\circ\text{C}$, $P_p = 1$ W
- Gain : $G \approx 12$
- Corrélations mesurées : -8.4 dB.
- Valeur corrigée du bruit électronique: -9.2 dB



Corrélations quantiques en intensité

Données

- $\Delta = 0.8$ GHz, $\delta = 6$ MHz, $T = 118^\circ\text{C}$, $P_p = 1$ W
- **Gain : $G \approx 12$**
- Corrélations mesurées : -8.4 dB.
- Valeur corrigée du bruit électronique: -9.2 dB



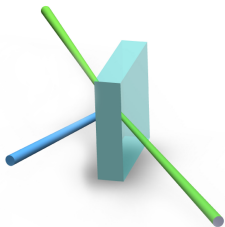
Résultats

- Lame séparatrice quantique

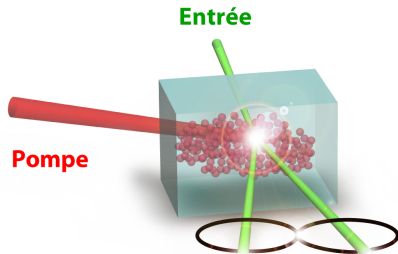
Observation d'un nouveau régime de corrélations

$$G < 1$$

Une *lame séparatrice* "quantique" ?



Corrélations classiques

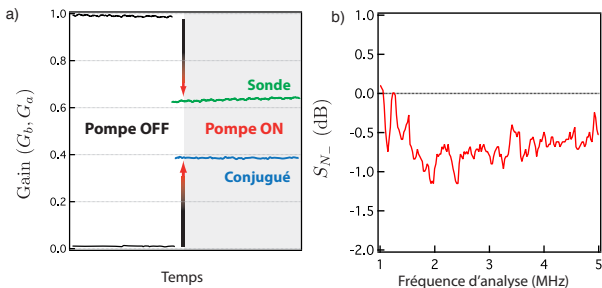


Corrélations quantiques

Démonstration expérimentale

Données

- $\Delta = 1$ GHz, $\delta = -52$ MHz, $T = 90^\circ\text{C}$, $P_p = 0.4\text{W}$
- Gain total : $G_a + G_b \approx 1$
- Corrélations mesurées : -0.8 dB.



Conclusion

Une source de lumière non-classique

- -9.2 dB de corrélations d'intensité à 795 nm
- Compatible avec des mémoires quantiques atomiques
- Potentiellement multimode spatial

Comparaison théorie/expérience

- Excellent accord avec l'expérience sans aucun paramètre ajustable
- Prédiction et vérification expérimentale d'un nouveau régime ($G < 1$)

Perspectives

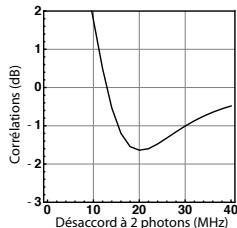
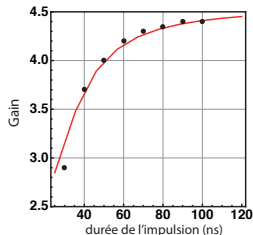
Mélange à 4 ondes dans le régime impulsionnel

Expériences réalisées à l'Institut d'Optique

Observation de -1.3 dB de corrélations dans une vapeur de ^{87}Rb pour des impulsions (sonde) de 50 ns.

Etude théorique

Utilisation de notre modèle moyenné sur la largeur spectrale des impulsions



Démonstration expérimentale avec des atomes froids

Configuration expérimentale

Piège magnéto-optique (épaisseur optique $\alpha L \simeq 150$)

Etude du rôle de la décohérence

Possibilité d'atteindre des valeurs plus faibles

Etude de la transition avec le régime de comptage

PRL 97, 113602 (2006)

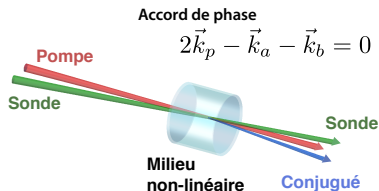
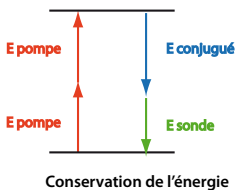
PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
15 SEPTEMBER 2006

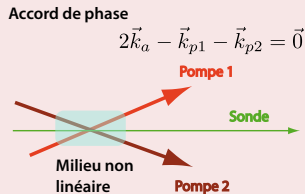
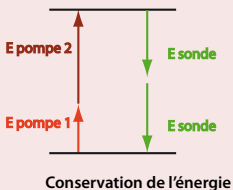
Generation of Narrow-Bandwidth Paired Photons: Use of a Single Driving Laser

Pavel Kolchin,* Shengwang Du, Chinmay Belthangady, G. Y. Yin, and S. E. Harris
Edward L. Ginzton Laboratory, Stanford University, Stanford, California 94305, USA
(Received 9 June 2006; published 12 September 2006)

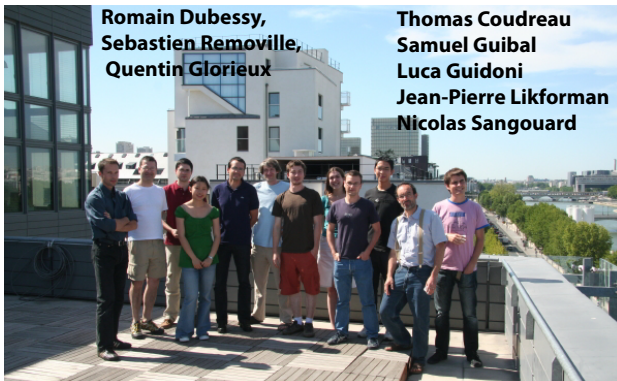
Amplification sensible à la phase



Etat comprimé à 1 mode



Merci pour votre attention



Merci...

- Les membres du jury
- L'équipe IPIQ
- Les membres du labo MPQ/P7
- Les thésards et les stagiaires de MPQ et d'ailleurs
- Elise
- Mes amis
- Ma famille

Merci...

- Les membres du jury
- L'équipe IPIQ
- Les membres du labo MPQ/P7
- Les thésards et les stagiaires de MPQ et d'ailleurs
- Elise
- Mes amis
- Ma famille
- Mozart
- ...

Expériences à 422 nm

Mémoire quantique dans un nuage d'ions $^{88}\text{Sr}^+$

Quasi coïncidence (440 MHz) entre:

- $5S_{1/2} \rightarrow 6P_{1/2}$ du ^{85}Rb
- $5S_{1/2} \rightarrow 5P_{1/2}$ du $^{88}\text{Sr}^+$

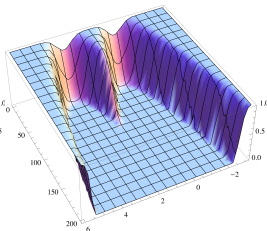
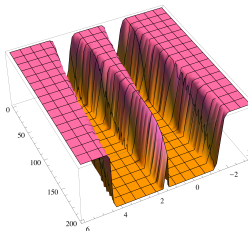
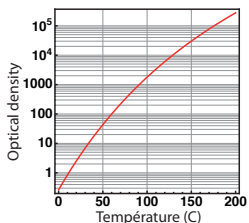


Mélange à 4 ondes à 422 nm

- Prédiction théorique défavorable ($\Gamma_{422} = \frac{1}{20}\Gamma_{795}$)
- Pas d'observation expérimentale de gain
- Observation de la transparence électromagnétiquement induite sur la ligne $5S_{1/2} \rightarrow 6P_{1/2}$ du ^{85}Rb

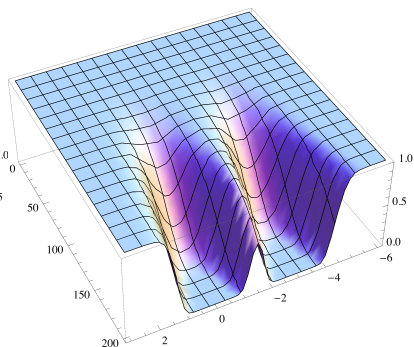
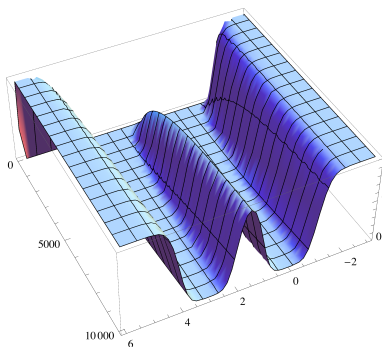
Limitations - Prediction

- $\Gamma_{blue} \simeq \frac{\Gamma_{red}}{20}$
- Increasing optical depth αL 20 times
- Increasing temperature to 170 C

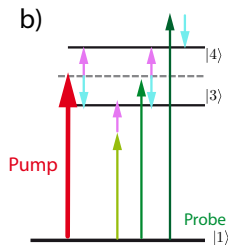
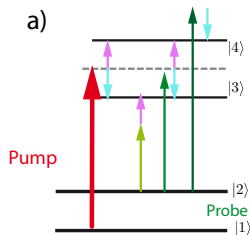
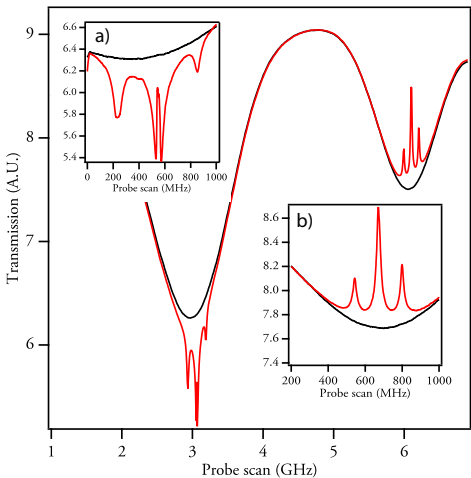


Atoms preparation

- atoms prepared in a coherent superposition by the pump
- pump size limited... (by available power)



EIT observation

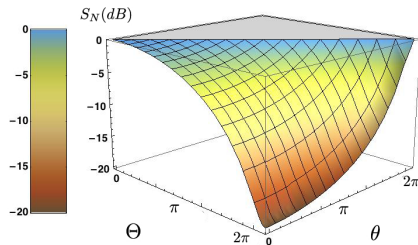
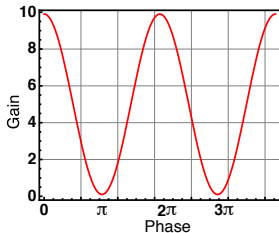


Modèle de l'amplificateur linéaire idéal

Amplificateur linéaire idéal :

$$\hat{a}_{out} = \sqrt{G} e^{i\phi_1} \hat{a}_{in} + \sqrt{G-1} e^{i\phi_2} \hat{a}_{in}^\dagger$$

Etat comprimé à 1 mode :



Amplification sensible à la phase

Expériences en cours au NIST à Gaithersburg

- Deux pompes verrouillées en phase
- Oscillateur local

