

3P118 2成分ボーズ・アインシュタイン凝縮ガスにおけるシュレーディンガーの猫状態の生成・崩壊・復活現象の量子位相ダイナミクス

(阪大院基礎工¹・阪大院理²) ○中野雅由¹, 岸 亮平¹, 新田友茂¹, 山口 兆²

【序】 将来の量子情報デバイスの実現のためには、量子性の顕著な特徴の一つである量子重ね合わせ状態や量子エンタングルメント状態の生成機構の解明と、それらのサイズを大きくし寿命を長くするためにそのダイナミクスを制御する技術の開発が必須である。本研究では、基本物質系として、原子集団の巨視的量子状態を実現するボーズ・アインシュタイン凝縮 (BEC) ガスをとりあげ、その巨視的量子重ね合わせ (シュレーディンガーの猫) 状態の生成と長時間ダイナミクスの特徴を明らかにする。2成分 BEC ガスの成分間構成原子数差に関して、ある条件下でシュレーディンガーの猫状態が生成することが理論的に予測されている。この2成分 BEC では実際にはその超微細構造に関して異なる状態が使われている。これら2つの状態間は多光子遷移による Josephson タイプの結合が可能である。本研究では、Gordon と Savage の方法 (PRA,59,4623(1998)) を用い、生成したシュレーディンガーの猫状態の長時間の振る舞いを量子位相ダイナミクスの見地から検討する。また、最近提案された波動関数に基づく量子緩和過程理論であるモンテカルロ波動関数法[1]を用いて熱雲との相互作用による位相緩和や3体衝突による BEC 消滅の効果も検討する予定である。

【モデル】 成分内 ($W^{AA(BB)}$) および成分間 (W^{AB}) の2体の相互作用と弱い Josephson 結合を持つ系を考える。これらの相互作用の大きさの違いにより通常の時間発展により成分間原子数差分布に関してシュレーディンガーの猫状態が生成する。これは、量子光学における典型的な実験－非線形光学結晶中を通過するコヒーレント光の量子状態が非線形光学(NLO)効果 (原子/分子と光との非線形相互作用に起因) により変化し、入射光のスライジングや高調波発生などが生じる－とアナログ的な現象であり、量子光学で光が NLO 結晶中を通過している時間と BEC ガスにおいて Josephson 結合をオンにしている時間との間に対応が成り立つ。また、シュレーディンガーの猫状態のサイズ (原子数差) は Josephson 結合の強さ λ を変えることで調整できることが知られている。

本研究では、まず緩和がない場合について、Josephson 結合 λ を変化させ、Milburn らの閾値 $\lambda_c = (W_{1111}^{AA(BB)} - W_{1111}^{AB})N/4$ に比べて、大きい場合、等しい場合、小さい場合、に関して成分間原子数差分布のダイナミクスと成分間位相差分布ダイナミクスを検討し、これらの相互関係の解析をもとに、これまで検討されていないシュレーディンガーの猫状態の長時間ダイナミクスの特徴を明らかにする。

1次元2成分 BEC 系のハミルトニアンは、場の演算子を用いて、

$$\hat{H} = \int \left[\hat{\psi}_A^\dagger \hat{H}^A \hat{\psi}_A + \hat{\psi}_B^\dagger \hat{H}^B \hat{\psi}_B + \frac{\lambda}{2} (\hat{\psi}_A^\dagger \hat{\psi}_B + \hat{\psi}_B^\dagger \hat{\psi}_A) + \frac{W^{AA}}{2} \hat{\psi}_A^\dagger \hat{\psi}_A^\dagger \hat{\psi}_A \hat{\psi}_A + \frac{W^{BB}}{2} \hat{\psi}_B^\dagger \hat{\psi}_B^\dagger \hat{\psi}_B \hat{\psi}_B + W^{AB} \hat{\psi}_A^\dagger \hat{\psi}_B^\dagger \hat{\psi}_B \hat{\psi}_A \right] dx \quad (1)$$

とかける。ここで、右辺第一項および第二項は成分 A, B の単一粒子ハミルトニアンに關す

る項、第三項は、成分間のジョセフソン結合（低周波数の遷移により実現）、第四、五項は各々、A、Bの成分内の2体相互作用、最後の項は成分間の2体相互作用である。

成分間位相差が0の原子コヒーレント状態から出発し、成分A,B間の原子数差分布および2成分Pegg-Barnett量子位相演算子を用いた成分間位相差分布のダイナミクスを解析する。構成原子数 $N=30$ 、 $\lambda_{11} = 0.3 \text{ s}^{-1}$ 、 $W_{1111}^{AA(BB)} = 1.2 \text{ s}^{-1}$ 、 $W_{1111}^{AB} = 0.935 \text{ s}^{-1}$ の場合の長時間発展の結果を図1に示す。明らかに $t = 2 \text{ s}$ で生成したシュレーディンガーの猫状態（原子数差 $m = \pm 9$ あたりにピーク）が時間の経過とともに崩壊-復活を繰り返していることがわかる。Josephson 結合の強さと λ_c との相対的大きさを変えることで猫のサイズだけでなく、この崩壊-復活の周期-猫の寿命-も変化することを見い出した。詳細は当日発表する。

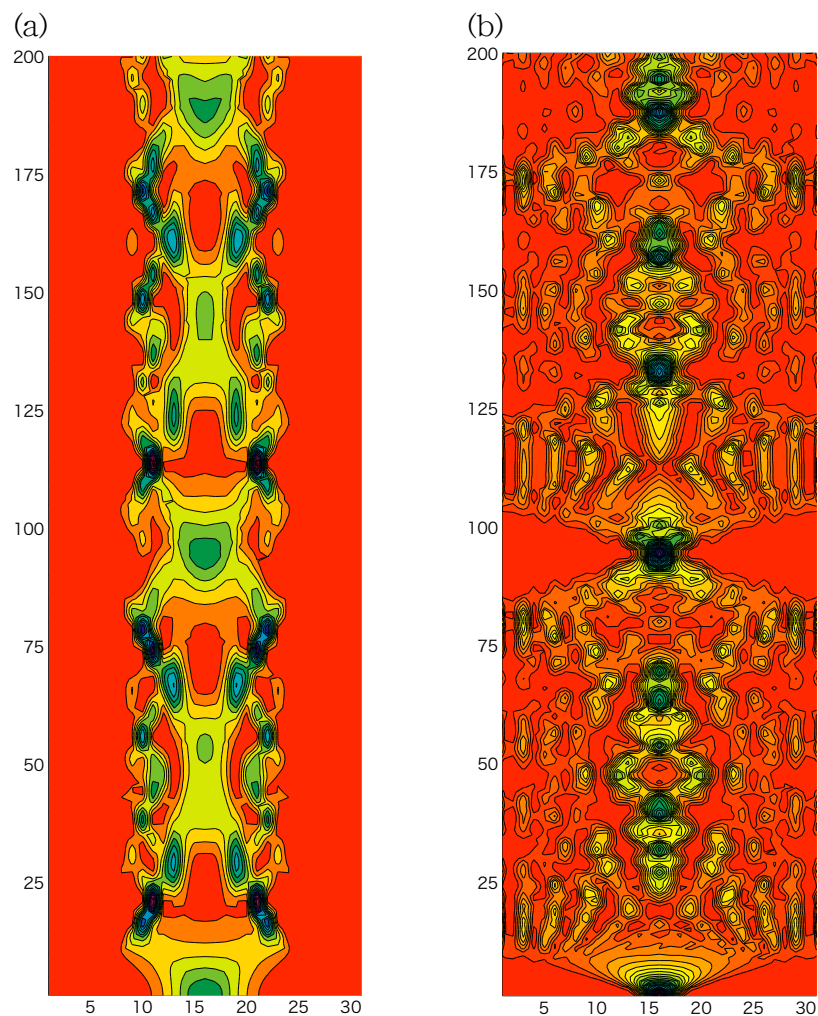


図1. $t = 20 \text{ s}$ までの成分間原子数差分布(a)と位相差分布(b) ($\lambda_{11} = 0.3 \text{ s}^{-1}$)。縦軸1目盛りは 0.1 s 。横軸は原子数差 $(m+32)/2$ 。

【参考文献】

- [1] (a) M. Nakano and K. Yamaguchi, *Int. J. Quantum Chem.* **95**, 461 (2003), (b) M. Nakano, R. Kishi, T. Nitta and K. Yamaguchi, *J. Chem. Phys.* **119**, 23, 12106 (2003), (c) M. Nakano, R. Kishi, T. Nitta and K. Yamaguchi, *Phys. Rev. A*, in press.