



Некоторые особенности
процесса четырех-волнового
смещения в среде $\chi^{(3)}$

РАНДЖИТ СИНГХ

1. Об избранных четырех-волновых процессах в среде χ^3
2. Предложенная схема формирования квантового фантомного изображения
3. Некоторые особенности четырех-волнового процесса
4. Некоторые фазовые портреты предложенной схемы
5. Выводы

Об избранных четырех-волновых процессах в среде χ^3

Встречное

ЧЕТЫРЕХФОТОННОЕ СМЕШЕНИЕ (КУБИЧЕСКАЯ НЕЛИНЕЙНОСТЬ)
- ВЫРОЖДЕННОЕ ВСТРЕЧНОЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Закон сохранения энергии и импульса:

$$\omega_p + \omega_q = \omega_s + \omega_i,$$

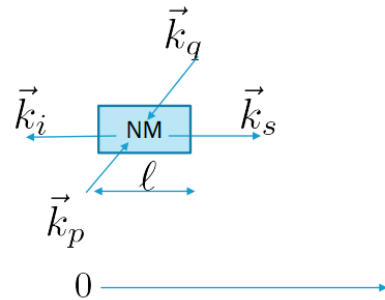
$$\vec{k}_p + \vec{k}_q = \vec{k}_s + \vec{k}_i.$$

Вырожденность по частоте:

$$\omega_{p,q,s,i} = \omega.$$

Моды, которые распространяются/взаимодействуют в кристалле:

$$\hat{A}_T(x, y, z, t) = \{ \hat{A}_p(x, y, z) e^{i(\omega t - \vec{k}_p \cdot \vec{r})}, \hat{A}_q(x, y, z) e^{i(\omega t + \vec{k}_q \cdot \vec{r})}, \hat{A}_s(x, y, z) e^{i(\omega t - k_z z)}, \hat{A}_i(x, y, z) e^{i(\omega t + k_z z)} \}.$$



Попутное

ЧЕТЫРЕХ-ВОЛНОВОЕ СМЕШЕНИЕ (КУБИЧЕСКАЯ НЕЛИНЕЙНОСТЬ)-
ПОПУТНОЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Закон сохранения энергии и импульса:

$$\hbar\omega_3 + \hbar\omega_3 = \hbar\omega_1 + \hbar\omega_2,$$

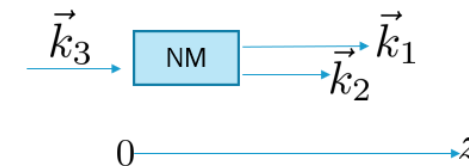
$$\hbar\vec{k}_3 + \hbar\vec{k}_3 = \hbar\vec{k}_1 + \hbar\vec{k}_2.$$

Невырожденность по частоте:





$$\omega_1 \neq \omega_2 \neq \omega_3.$$

Моды, которые распространяются/взаимодействуют в кристалле:

$$\hat{A}_T(z, t) = \{ \hat{A}_1(z) e^{i(\omega_1 t - k_{1z} z)}, \hat{A}_2(z) e^{i(\omega_2 t + k_{2z} z)}, \hat{A}_3(z) e^{i(\omega_3 t - k_{3z} z)} \}.$$



КЛЮЧЕВЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА ФОРМИРОВАНИЯ ФИ В СРЕДАХ

№	$\chi^{(2)}$	$\chi^{(3)}$
1	Восстановление изображения с минимальным количеством фотонов.	Тоже самое.
2	Отсутствие пространственного синхронизма и проявление дифракции внутри кристалла. Оба эффекта негативно воздействуют на формирование пространственного ФИ. 	Улучшение пространственного разрешения за счет смягчения дифракционных ограничений внутри кристалла. 
3	Улучшение соотношения сигнал-шума по сравнению с классическим светом.	Тоже самое.
4	Использование разных длин коррелированных мод (невидимого света – для излучения объекта, видимого света – для восстановления изображения объекта).	Можно рассмотреть синхронизм, когда $\omega_p + \omega_q = \omega_1 + \omega_2$, $\omega_{p,q} = \omega, \omega_1 \neq \omega_2 \neq \omega$.
5	Необходимо выполнение фазового синхронизма или <u>квазисинхронизма</u> по определенному объему кристалла. 	Существует гибкая возможность выполнения фазового синхронизма. 

А.В. Белинский, Р. Сингх. Встречное четырехфотонное смешение в формировании фантомных изображений. Журнал экспериментальной и теоретической физики, том 159, № 2, с. 258-261 (2021).

Предложенная схема формирования квантового фантомного изображения

Встречное

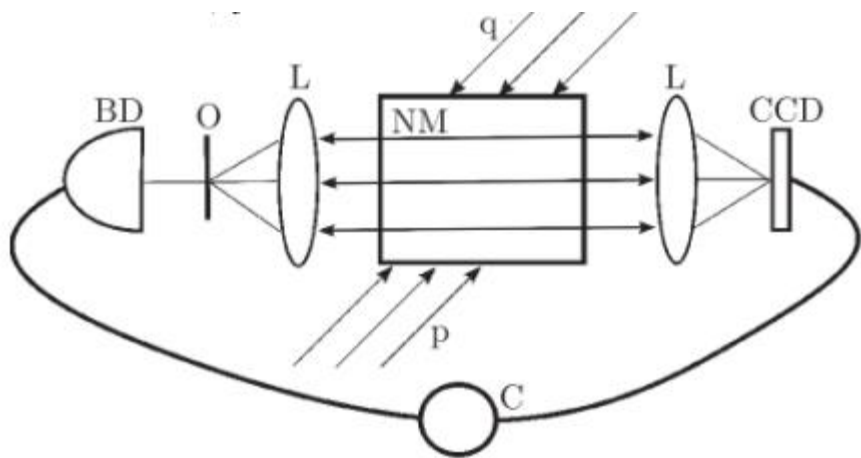


Рис. 2. Схема формирования фантомного изображения при встречном четырехфотонном смешивании с параллельным ходом лучей между объективами L и нелинейной средой NM с кубической нелинейностью; в прозрачном нелинейном кристалле с кубической нелинейностью $\chi^{(3)}$ пары фотонов накачки преобразуются в пару сигнального и холостого фотонов, p, q — встречные пучки накачки; пучки запутанных пар фотонов освещают объект O и матрицу фотодетекторов CCD в восстанавливающем канале, причем и тот и другая находятся в фокальных плоскостях оптических объективов L; BD — интегрирующий детектор в объектном канале; C — коррелятор интенсивностей (схема совпадений)

Попутное

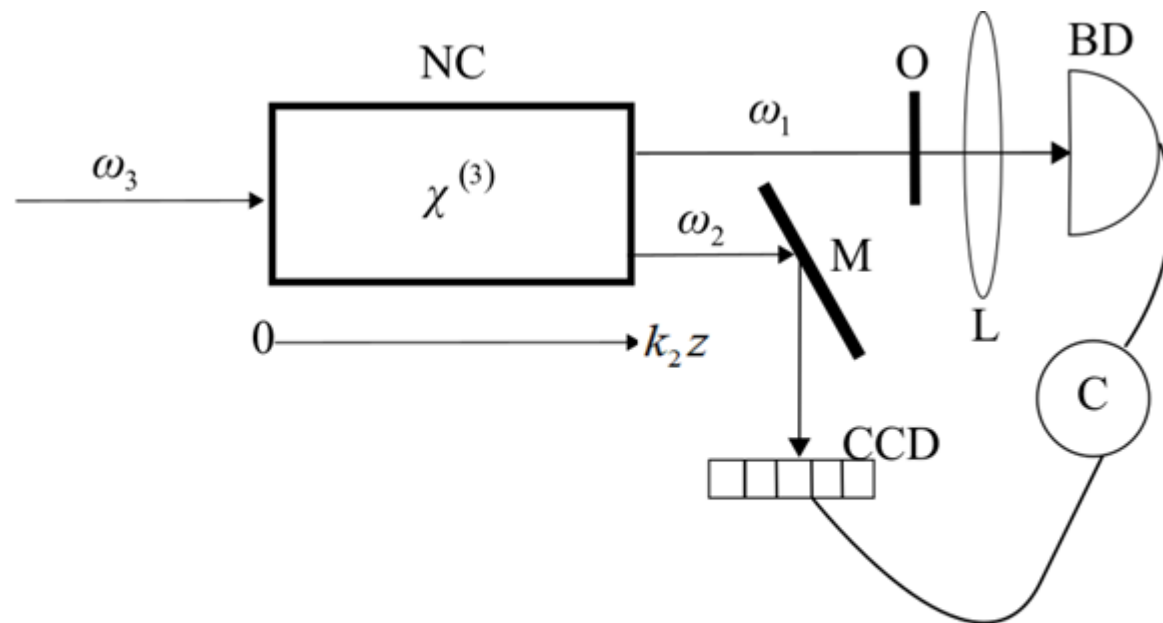


Рис.1. Схема формирования квантовых фантомных изображений: NC — нелинейный кристалл; ω_3 — накачка; ω_1 и ω_2 — моды запутанных пар фотонов; O — прозрачный объект; M — зеркало; BD — интегрирующий детектор в объектном канале; L — оптический объектив; CCD — матрица фотодетекторов в восстанавливающем канале; C — коррелятор интенсивностей (схема совпадений).

Предложенная схема формирования квантового фантомного изображения

Встречное

СРЕДНИЕ ЗНАЧЕНИЯ ФОТОНОВ В МОДАХ (S, I)
И КОЭФФИЦИЕНТЫ КОРРЕЛЯЦИИ МЕЖДУ НИМИ

$$N_s(\vec{\kappa}, \ell) = \langle \hat{a}_s^+(\vec{\kappa}, \ell) \hat{a}_s(\vec{\kappa}, \ell) \rangle = \tan^2(\chi^{(3)} \ell),$$
$$N_i(\vec{\kappa}, 0) = \langle \hat{a}_i^+(\vec{\kappa}, 0) \hat{a}_i(\vec{\kappa}, 0) \rangle = \tan^2(\chi^{(3)} \ell),$$
$$g_{si}^{(2)} = 1 + \csc^2(\chi^{(3)} \ell).$$

Начальные условия:

В нелинейной кубической среде распространяются 4 моды:

- Встречные моды p и q неистоимые;
- Встречные моды s и i находятся в вакуумном состоянии.

Примечание: Корректность расчетов проверялась с помощью выполнения коммутационного соотношения.

Коэффициент корреляции зависит от косеканса:

$$\csc \theta = \sec\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) = \frac{1}{\sin \theta}$$

Попутное

$$\frac{d\hat{A}_1}{d\zeta} = -i\gamma\zeta^2 \hat{A}_2^* - i\left(E - \frac{\Delta k}{2\gamma_2}\right) \hat{A}_1, \quad q = \sqrt{|\zeta|^4 \gamma^2 - \tilde{E}^2},$$
$$\frac{d\hat{A}_2}{d\zeta} = -i\gamma\zeta^2 \hat{A}_1^* - i\left(E - \frac{\Delta k}{2\gamma_2}\right) \hat{A}_2, \quad \tilde{E} = E - \frac{\Delta k}{2\gamma_2},$$

$$\langle a_1^+ a_1 \rangle = \langle a_2^+ a_2 \rangle = \frac{|\zeta|^4 \gamma^2}{q^2} \sinh^2(q\zeta)$$

Корреляционная функция между модами a_1 и a_2 имеет следующий вид:

$$g^{(2)}(\zeta) = \frac{\langle a_1^+ a_1 a_2^+ a_2 \rangle}{\langle a_1^+ a_1 \rangle \langle a_2^+ a_2 \rangle} = 2 + \left(1 - \frac{\tilde{E}^2}{|\zeta|^4 \gamma^2}\right) \operatorname{csch}^2\left[\left(|A_3|^4 \gamma^2 - \tilde{E}^2\right) \zeta\right],$$

Автокорреляционная функция = кросс-корреляционная функция

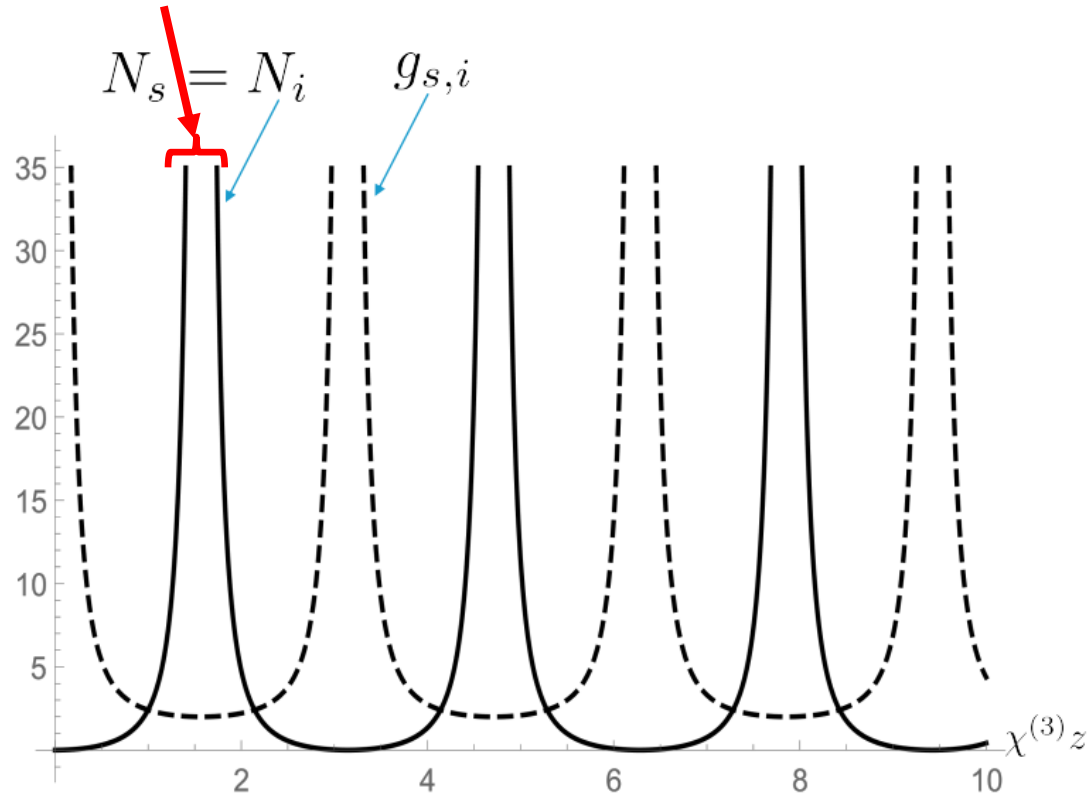
Коэффициент корреляции зависит от гиперболического косеканса:

$$\operatorname{csch} x = \frac{1}{\operatorname{sh} x} = \frac{2}{e^x - e^{-x}}$$

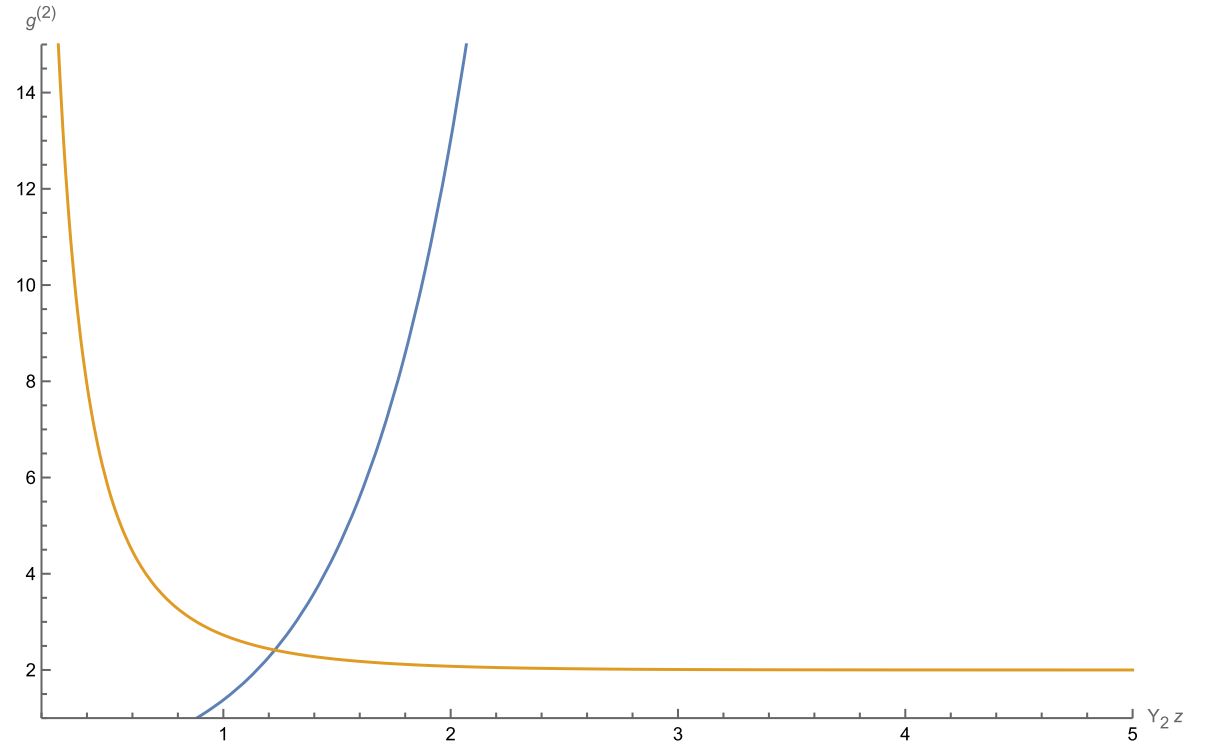
Некоторые особенности четырех-волнового процесса

Встречное

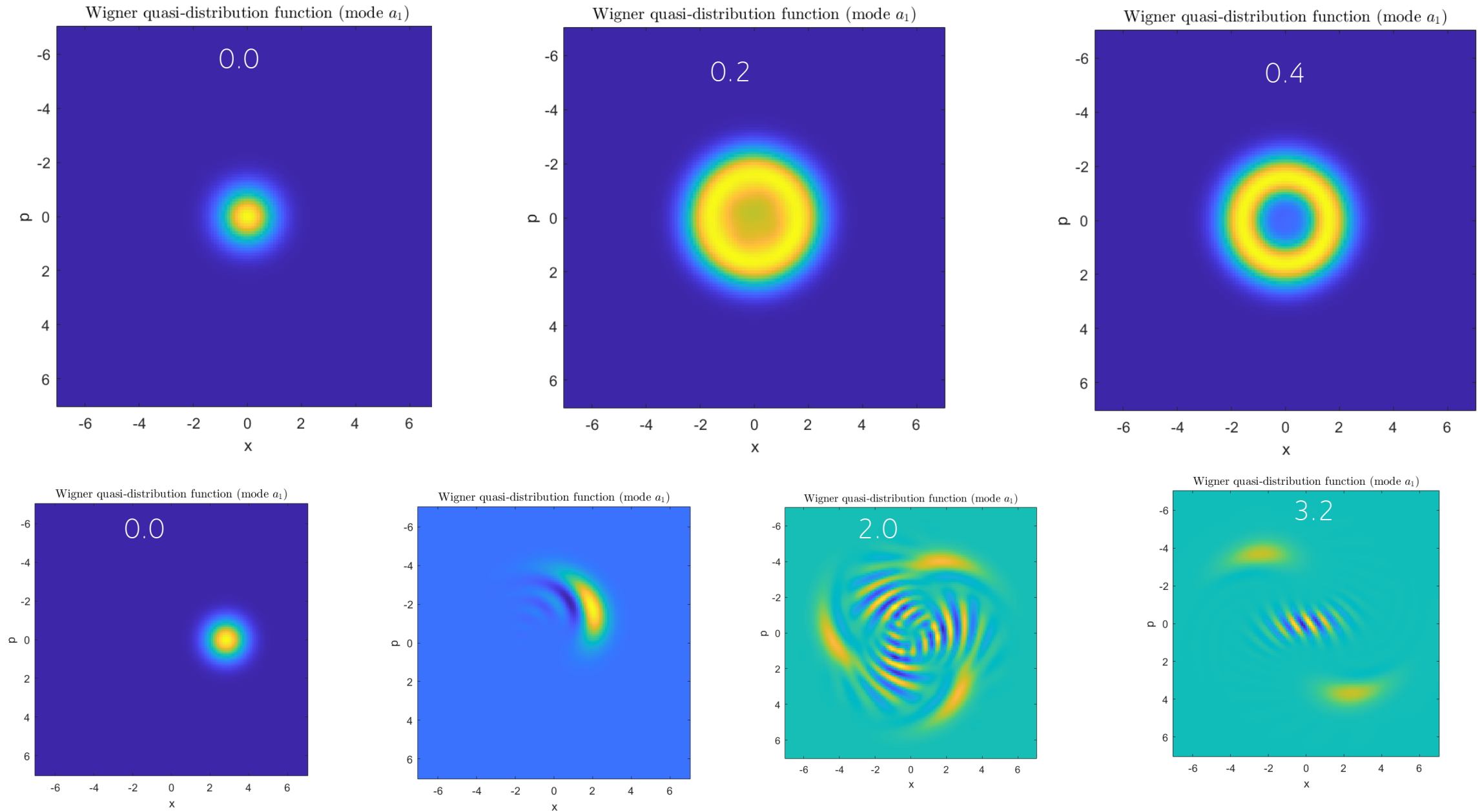
Сингулярность



Попутное



Некоторые фазовые портреты предложенной схемы



Выводы

1. Предложена еще одна возможность формирования квантовых фантомных изображений на основе коллинеарного попутного четырех-волнового смешения;
2. Предложенный процесс попутного четырех-волнового смешения не зависит от сингулярных точек;
3. Автокорреляционная и кросс-корреляционная функции имеют одно и то же значение, $g(2) \geq 2$;
4. Получен источник генерации фоковского состояния и шредингерских котов;
5. Предположение:
В случае, когда рассматривается четырех-волновое смешение, то возникает сингулярность;
Для ухода от сингулярности необходимо решать полную систему операторных уравнений, без использования приближения заданного поля.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!