Перспективы экспериментальной проверки многомировой интерпретации квантовой механики

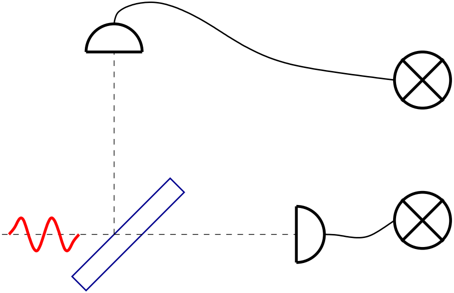
Ф.Я.Халили

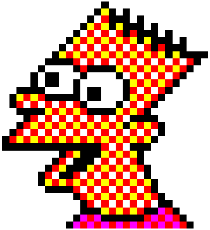
20 мая 2009г.

1. Краткое введение в многомировую интерпретацию
2. Как насчет экспериментальной проверки?
3. Приготовление негауссовского квантового состояния

1. Краткое введение в многомировую интерпретацию
2. Как насчет экспериментальной проверки?
3. Приготовление негауссовского квантового состояния

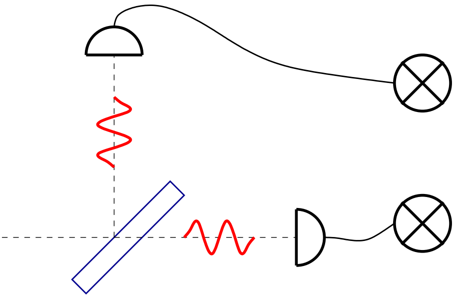
Копенгагенская интерпретация

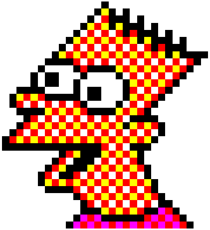




$$|\mathrm{in}\rangle_{\hbar\omega}|\mathrm{in}\rangle_{\mathrm{detector}}$$

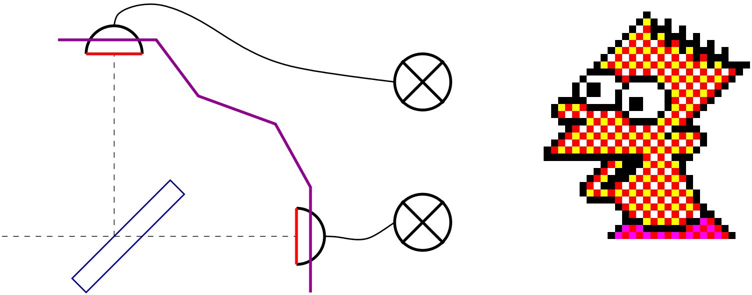
Копенгагенская интерпретация





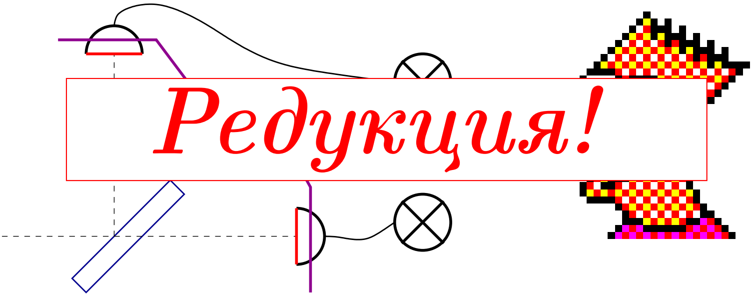
$$\frac{|\uparrow\rangle_{\hbar\omega} + |\downarrow\rangle_{\hbar\omega}}{\sqrt{2}}\,|\mathrm{in}\rangle_{\mathrm{detector}}$$

Копенгагенская интерпретация



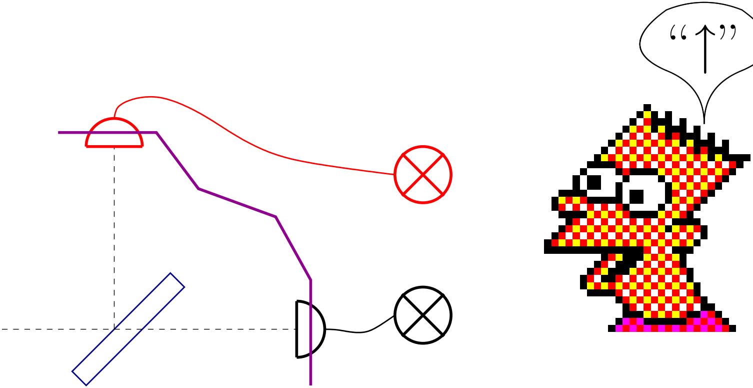
$$\frac{|\uparrow\rangle_{\hbar\omega}|\uparrow\rangle_{\text{detector}} + |\downarrow\rangle_{\hbar\omega}|\downarrow\rangle_{\text{detector}}}{\sqrt{2}}$$

Копенгагенская интерпретация



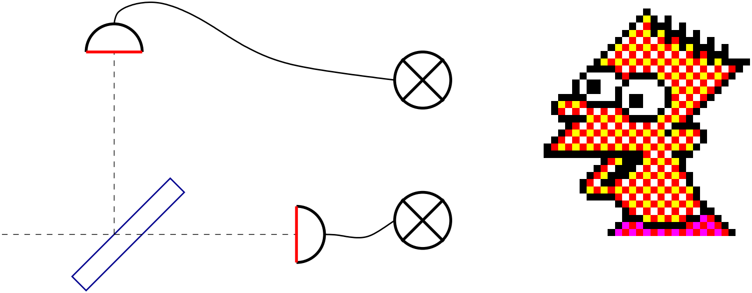
$$\frac{|\uparrow\rangle_{\hbar\omega}|\uparrow\rangle_{\mathrm{detector}} + |\downarrow\rangle_{\hbar\omega}|\downarrow\rangle_{\mathrm{detector}}}{\sqrt{2}}$$

Копенгагенская интерпретация



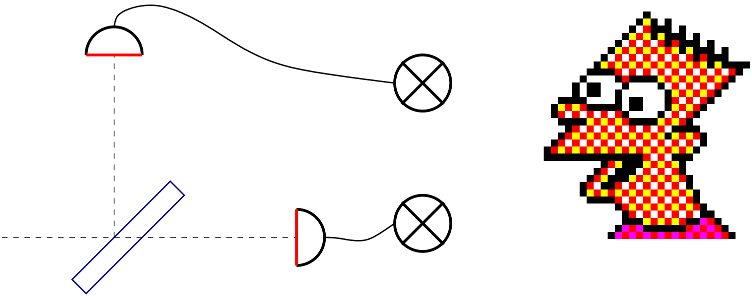
$$|\uparrow\rangle_{\hbar\omega}|\uparrow\rangle_{\text{detector}}$$

Многомировая интерпретация



$$\frac{|\uparrow\rangle_{\hbar\omega}|\uparrow\rangle_{\text{detector}} + |\downarrow\rangle_{\hbar\omega}|\downarrow\rangle_{\text{detector}}}{\sqrt{2}}$$

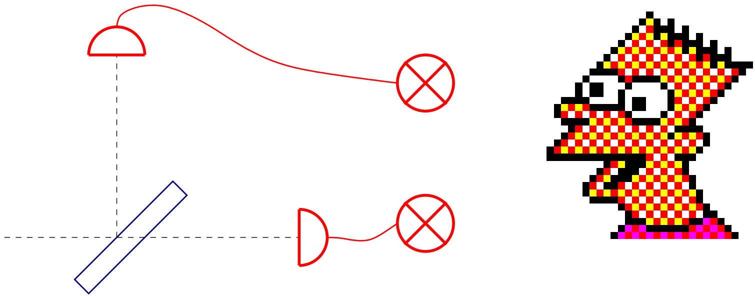
Многомировая интерпретация



$$\frac{|\uparrow\rangle_{\hbar\omega}|\uparrow\rangle_{\text{detector}} + |\downarrow\rangle_{\hbar\omega}|\downarrow\rangle_{\text{detector}}}{\sqrt{2}}$$

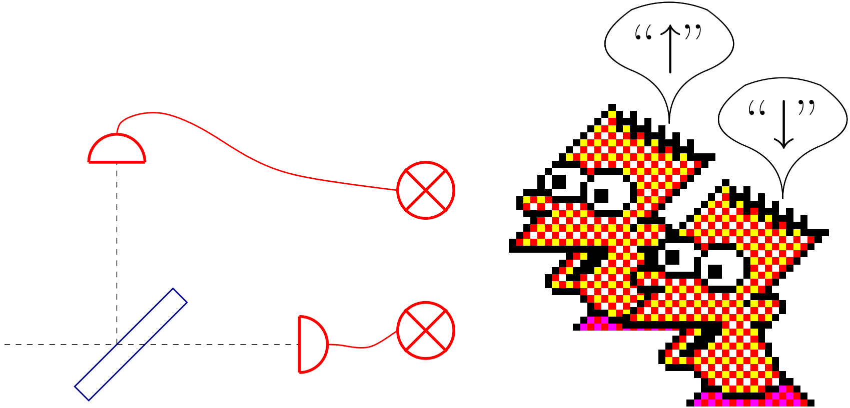
"Обычная" эволюция продолжается...

Многомировая интерпретация



$$\frac{|\uparrow\rangle_{\hbar\omega}|\uparrow\rangle_{\text{detector}} + |\downarrow\rangle_{\hbar\omega}|\downarrow\rangle_{\text{detector}}}{\sqrt{2}}|\text{in}\rangle_{\text{observer}}$$

Многомировая интерпретация



$$\frac{|\uparrow\rangle_{\hbar\omega}|\uparrow\rangle_{\text{detector}}|\uparrow\rangle_{\text{observer}} + |\downarrow\rangle_{\hbar\omega}|\downarrow\rangle_{\text{detector}}|\downarrow\rangle_{\text{observer}}}{\sqrt{2}}$$

Многомировая интерпретация

$$\rightarrow \frac{|\uparrow\rangle_{\mathrm{UNIVERSE}} + |\downarrow\rangle_{\mathrm{UNIVERSE}}}{\sqrt{2}}$$

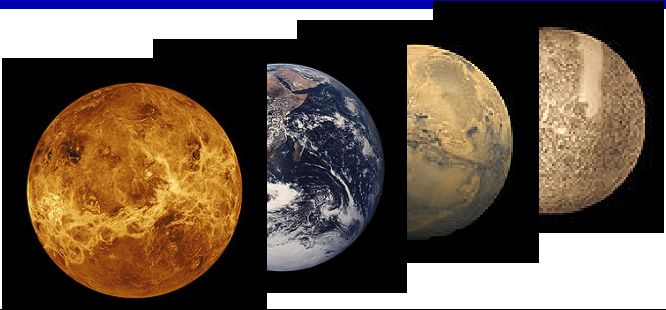
H.Everett, Rev.Mod.Phys. **29**, 454 (1957)

Многомировая интерпретация

- Состояние Вселенной описывается огромной многомерной волновой функцией.
- Редукция происходит лишь в представлении наблюдателя.
- Вселенная полностью детерминирована — все возможные исходы “случайных” событий сосуществуют в параллельных ветвях мировой волновой функции.

L.Vaidman, arXiv:quant-ph/9609006;
plato.stanford.edu/entries/qm-manyworlds/

Многомировая интерпретация



$\dots$

$$\cdots + |\psi_{n-1}\rangle + |\psi_n\rangle + |\psi_{n+1}\rangle + |\psi_{n+2}\rangle + \cdots$$

“Эта точка зрения была впервые открыто выдвинута Хью Эвереттом в 1957 году (однако я подозреваю, что многие ... приватно придерживались подобных взглядов и раньше — как и я сам в середине 50-х — не решаясь открыто высказать их”).

R.Penrose, “The Road to Reality”

1. Краткое введение в многомировую интерпретацию
2. Как насчет экспериментальной проверки?
3. Приготовление негауссовского квантового состояния

Метафизика — проверке не подлежит

Копенгагенская интерпретация. Редукция — удобное средство описания процесса измерения; где, когда и как именно она происходит, и происходит ли вообще — нас не волнует, так как результаты измерений от этого не зависят.

Нелокальные скрытые переменные. Квантовые неопределенности — это проявление *нелокальных* классических скрытых переменных. Например, наш квантовый мир — это симуляция, выполняемая на очень мощном, но геометрически маленьком классическом компьютере (см. фильм “Матрица”).

Что можно проверять

Спонтанная редукция. Где-то между микро- и макро-, находится мезо-уровень, где, по каким-то неизвестным причинам, происходит редукция. “Ниже” этого уровня мир квантовый, выше — классический.

Многомировая интерпретация. Никакой редукции не происходит. Весь мир квантовый.

kg Люди

Зеркала лазерных детекторов грав. волн

10^{0}

Планируемые “настольные” МКМ-эксперименты

10^{-5}

Классический мир - или мир, который выглядит как классический?

10^{-10}

10^{-15}

10^{-20}

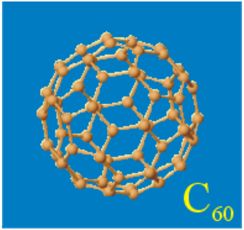
10^{-25} Молекулы — Интерференция фуллеренов (C_{60})

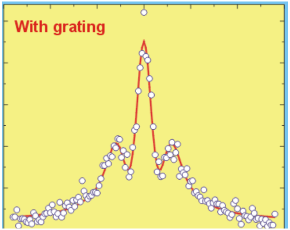
Атомы

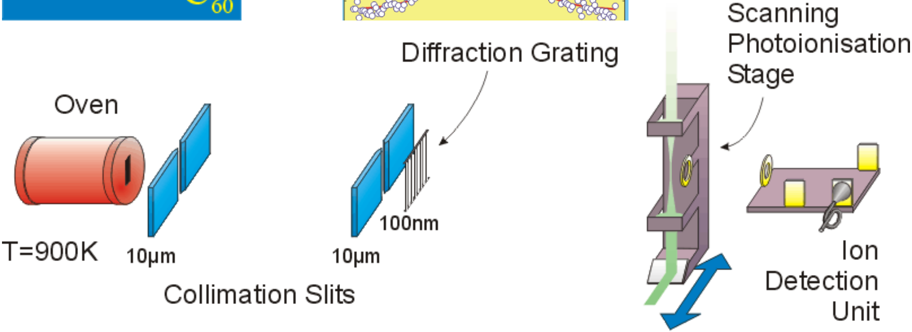
Квантовый мир

10^{-30} Частицы

Интерференция фуллеренов







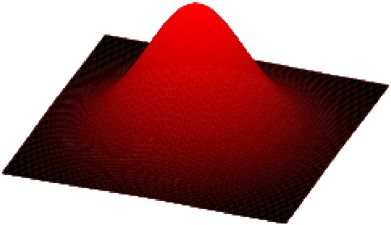
www.univie.ac.at/qfp/research/matterwave/c60/

Общая идея эксперимента

- Приготовить механический объект в ИСТИННО неклассическом состоянии.
- Подождать некоторое время.
- Проверить, используя квантовую томографию, сохранилось ли состояние или спонтанная редукция испортила его.

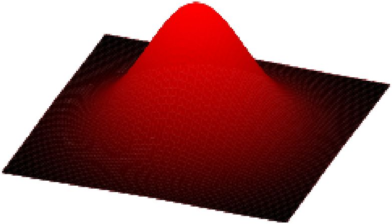
Проблема гауссовости

Найдите хоть одно отличие:



$$W_0 \exp\left(-\frac{p^2/m + kx^2}{\hbar\omega_o}\right)$$

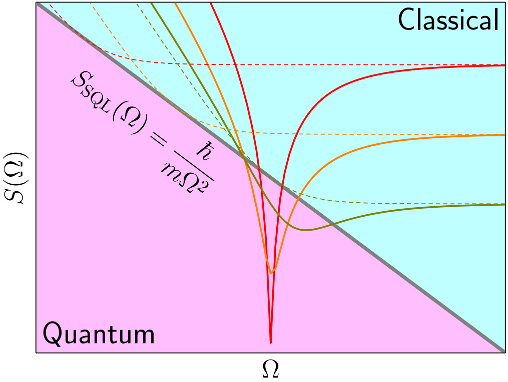
Равновесное состояние классического осциллятора с $T = \hbar\omega_o/2$

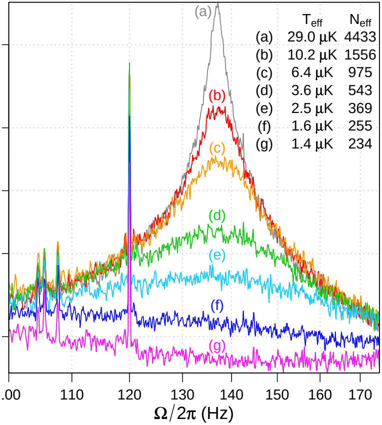


$$W_0 \exp\left(-\frac{p^2/m + kx^2}{\hbar\omega_o}\right)$$

Нулевое состояние квантового осциллятора

Проблема гауссовости

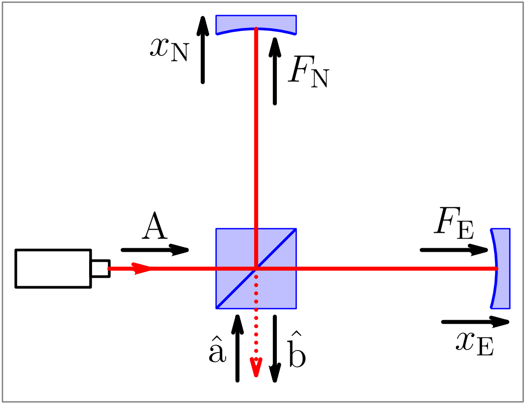




Преодоление СКП и достижение нулевого состояния будут огромными достижениями для прецизионных измерений — но не доказательствами квантовости макрообъектов.

1. Краткое введение в многомировую интерпретацию
2. Как насчет экспериментальной проверки?
3. Приготовление негауссовского квантового состояния

Схема



Измеряется координата разностной моды:

$\delta\hat{b} \propto A x_- = A(x_E - x_N)$

Возмущается импульс этой моды:

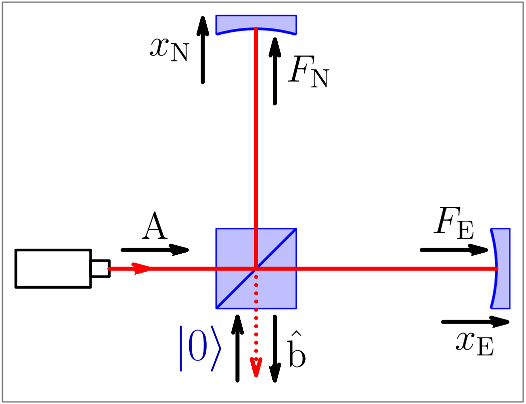
$$F_E \propto (A + \hat{a})^2$$

$$F_N \propto (A - \hat{a})^2$$

$$F_- = F_E - F_N \propto A\hat{a}$$

Величины ошибки измерения и возмущения определяются классической накачкой A.
Их форма определяется квантовым полем â.

Схема



Измеряется координата разностной моды:

$\delta\hat{b} \propto A x_- = A(x_E - x_N)$

Возмущается импульс этой моды:

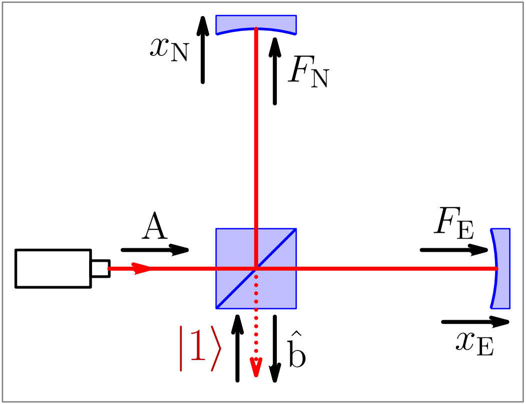
$$F_E \propto (A + \hat{a})^2$$

$$F_N \propto (A - \hat{a})^2$$

$$F_- = F_E - F_N \propto A\hat{a}$$

Гауссовское состояние на входе: $|0\rangle$ дает гауссовское состояние механической системы — масштабированное множителем A!

Схема



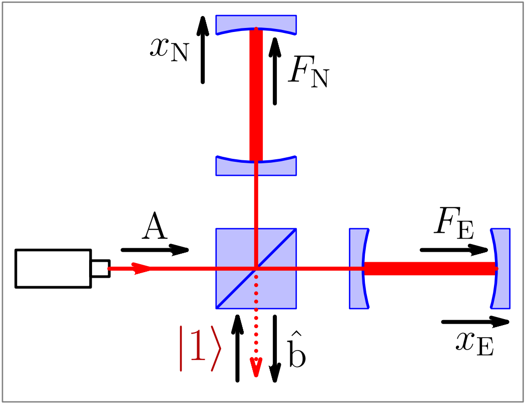
Измеряется координата разностной моды:
$\delta\hat{\mathrm{b}} \propto \mathrm{A}x_- = \mathrm{A}(x_\mathrm{E} - x_\mathrm{N})$

Возмущается импульс этой моды:

$$F_\mathrm{E} \propto (\mathrm{A} + \hat{a})^2$$
$$F_\mathrm{N} \propto (\mathrm{A} - \hat{a})^2$$
$$F_- = F_\mathrm{E} - F_\mathrm{N} \propto \mathrm{A}\hat{\mathrm{a}}$$

Негауссовское состояние на входе: $|1\rangle$ дает негауссовское состояние механической системы — тоже масштабированное множителем A!

Схема



Резонаторы в плечах увеличивают оптико-механическое взаимодействие (как в гравитационных детекторах)

Негауссовское состояние на входе: $|1\rangle$ дает негауссовское состояние механической системы — тоже масштабированное множителем A!

Процедура

- Механическая степень свободы готовится в гауссовсском состоянии с хорошо определенным импульсом:

$$W(x,p) = \frac{\exp\left[-\frac{x^2}{2(\Delta x_{\mathrm{init}})^2} - \frac{p^2}{2(\Delta p_{\mathrm{init}})^2}\right]}{2\pi \Delta x_{\mathrm{init}} \Delta p_{\mathrm{init}}}$$

Процедура

- Механическая степень свободы готовится в гауссовсском состоянии с хорошо определенным импульсом:

$$W(x,p) = \frac{\exp\left[-\frac{x^2}{2(\Delta x_{\text{init}})^2} - \frac{p^2}{2(\Delta p_{\text{init}})^2}\right]}{2\pi \Delta x_{\text{init}} \Delta p_{\text{init}}}$$

- В темный порт интерферометра инжектируется одиночный квант. Распределение вероятности для p становится негауссовским.

Процедура

- Механическая степень свободы готовится в гауссовсском состоянии с хорошо определенным импульсом:

$$W(x,p) = \frac{\exp\left[-\frac{x^2}{2(\Delta x_{\text{init}})^2} - \frac{p^2}{2(\Delta p_{\text{init}})^2}\right]}{2\pi \Delta x_{\text{init}} \Delta p_{\text{init}}}$$

- В темный порт интерферометра инжектируется одиночный квант. Распределение вероятности для p становится негауссовским.
- Регистрируется фазовая квадратура выходящего света. Распределение вероятности для x также становится негауссовким.

Результат

$$W[x,p;y(t)] = W[y(t)] \times \left\{ \frac{(x-x_0)^2}{(\Delta x_{\text{meas}})^2} + \frac{(\Delta p_{\text{pert}})^2}{(\Delta p_{\text{fin}})^2} \left[\frac{p^2}{(\Delta p_{\text{fin}})^2} - 1 \right] \right\} \times \exp\left\{ -\frac{(x-x_0)^2}{2(\Delta x_{\text{meas}})^2} - \frac{p^2}{2(\Delta p_{\text{fin}})^2} \right\}$$

$$(\Delta p_{\text{fin}})^2 = (\Delta p_{\text{init}})^2 + (\Delta p_{\text{pert}})^2\,,$$

$$(\Delta x_{\text{meas}})^2 = \frac{1}{2k^2\tau}\,, \qquad (\Delta p_{\text{pert}})^2 = \frac{\hbar^2 k^2 \tau}{2}\,,$$

$$k = \frac{2\omega_o}{L}\sqrt{\frac{n_{\text{pump}}}{\gamma}}$$

Результат

$$W[x,p;y(t)] = W[y(t)] \times \left\{ \frac{(x-x_0)^2}{(\Delta x_{\mathrm{meas}})^2} + \frac{(\Delta p_{\mathrm{pert}})^2}{(\Delta p_{\mathrm{fin}})^2} \left[\frac{p^2}{(\Delta p_{\mathrm{fin}})^2} - 1 \right] \right\} \times \exp\left\{ -\frac{(x-x_0)^2}{2(\Delta x_{\mathrm{meas}})^2} - \frac{p^2}{2(\Delta p_{\mathrm{fin}})^2} \right\}$$

Для сравнения - одноквантовое состояние:

$$W_1(x,p) = \frac{1}{2\pi\hbar} \left[\frac{x^2}{(\Delta x)^2} + \frac{p^2}{(\Delta p)^2} - 1 \right] \times \exp\left[-\frac{x^2}{2(\Delta x)^2} - \frac{p^2}{2(\Delta p)^2} \right]$$

$$\left(\Delta x = \sqrt{\frac{\hbar}{2\rho}}, \quad \Delta p = \sqrt{\frac{\hbar\rho}{2}} \right).$$

Результат