

ЛЕКЦИЯ 11

Когерентность лазерных ИСТОЧНИКОВ

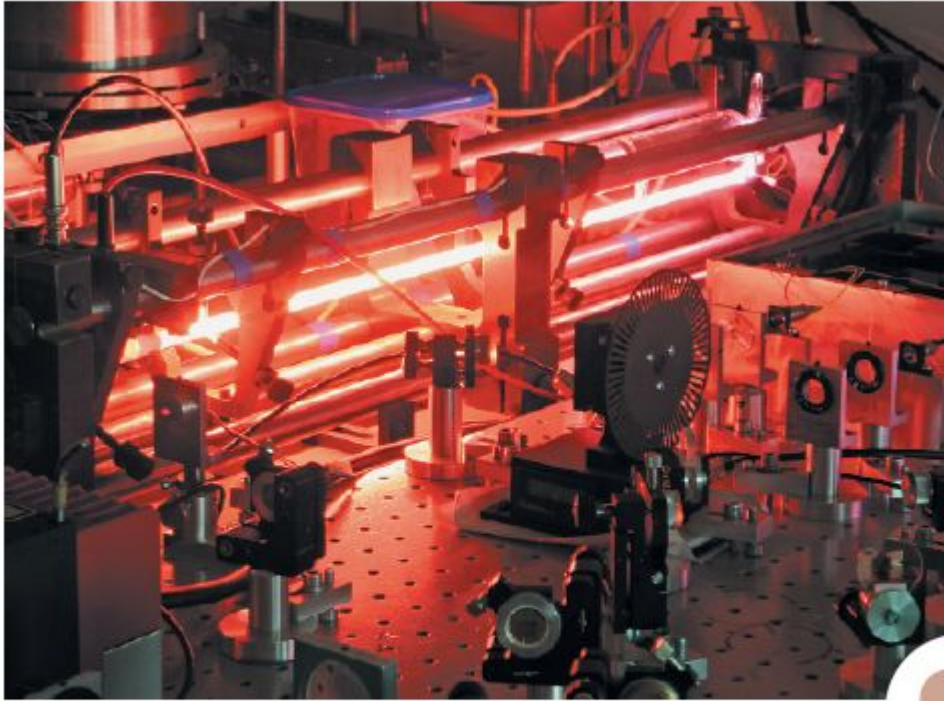
Ты - музыка, но звукам музыкальным
Ты внемлешь с непонятною тоской.

.....

Не потому ли грустью ты объят,
Что стройно согласованные звуки
Упреком одиночеству звучат?
У.Шекспир. Сонет 8 (пер. С.Маршака)

Монохроматичность

$$\Delta t \Delta \nu \sim 1.$$



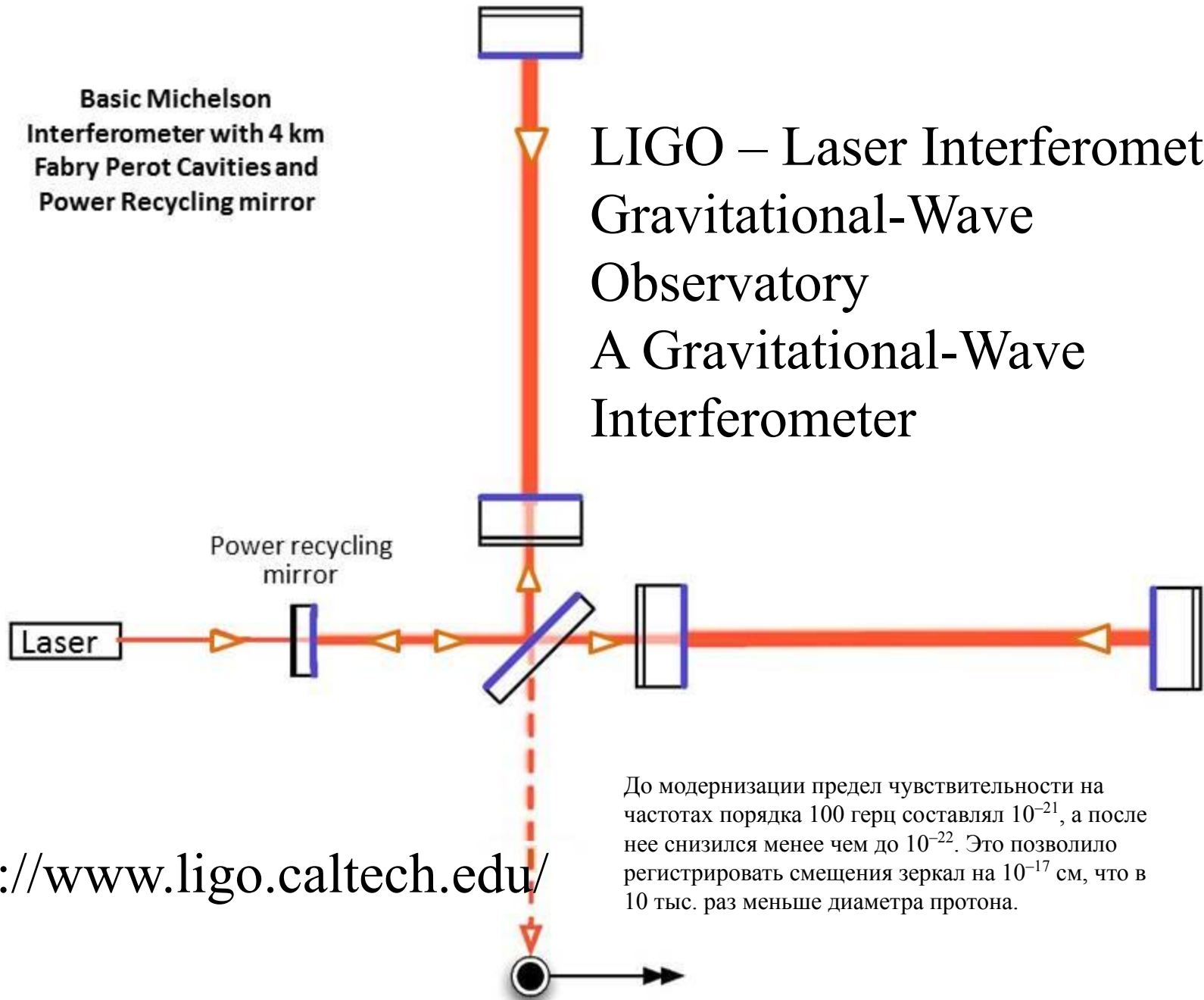
Моноблочный He-Ne/CH₄ лазер –
«оптический стандарт частоты»
($\lambda=3392$ нм)

стабильность частоты от
времени усреднения:
 $F = 10^{14}$ Гц

- 1×10^{-14} (1 сек);
- 3×10^{-15} (10 сек);
- 1×10^{-15} (100 сек);
- 1×10^{-15} (1000 сек)

Basic Michelson
Interferometer with 4 km
Fabry Perot Cavities and
Power Recycling mirror

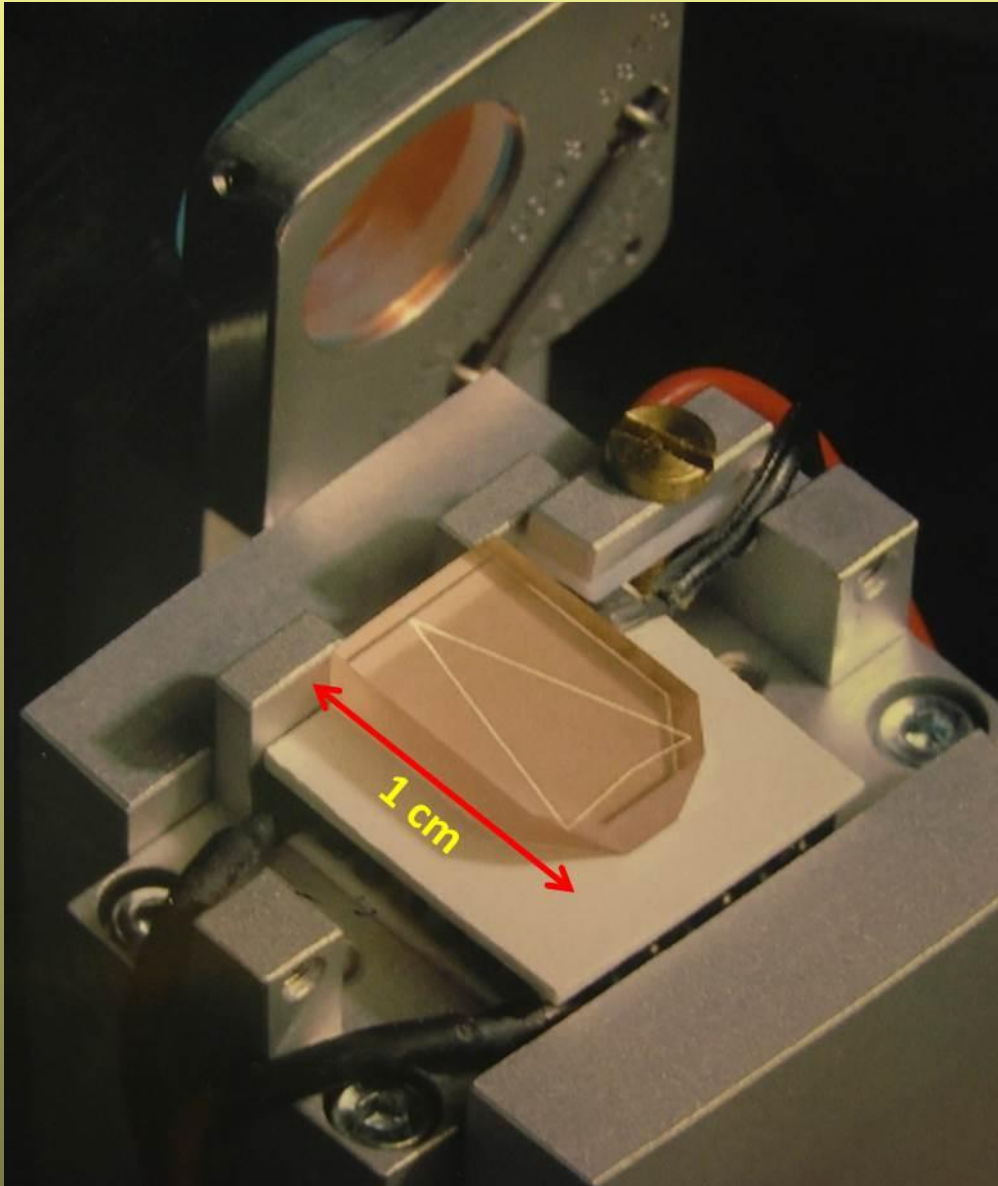
LIGO – Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory A Gravitational-Wave Interferometer



До модернизации предел чувствительности на частотах порядка 100 герц составлял 10^{-21} , а после нее снизился менее чем до 10^{-22} . Это позволило регистрировать смещения зеркал на 10^{-17} см, что в 10 тыс. раз меньше диаметра протона.

<https://www.ligo.caltech.edu/>

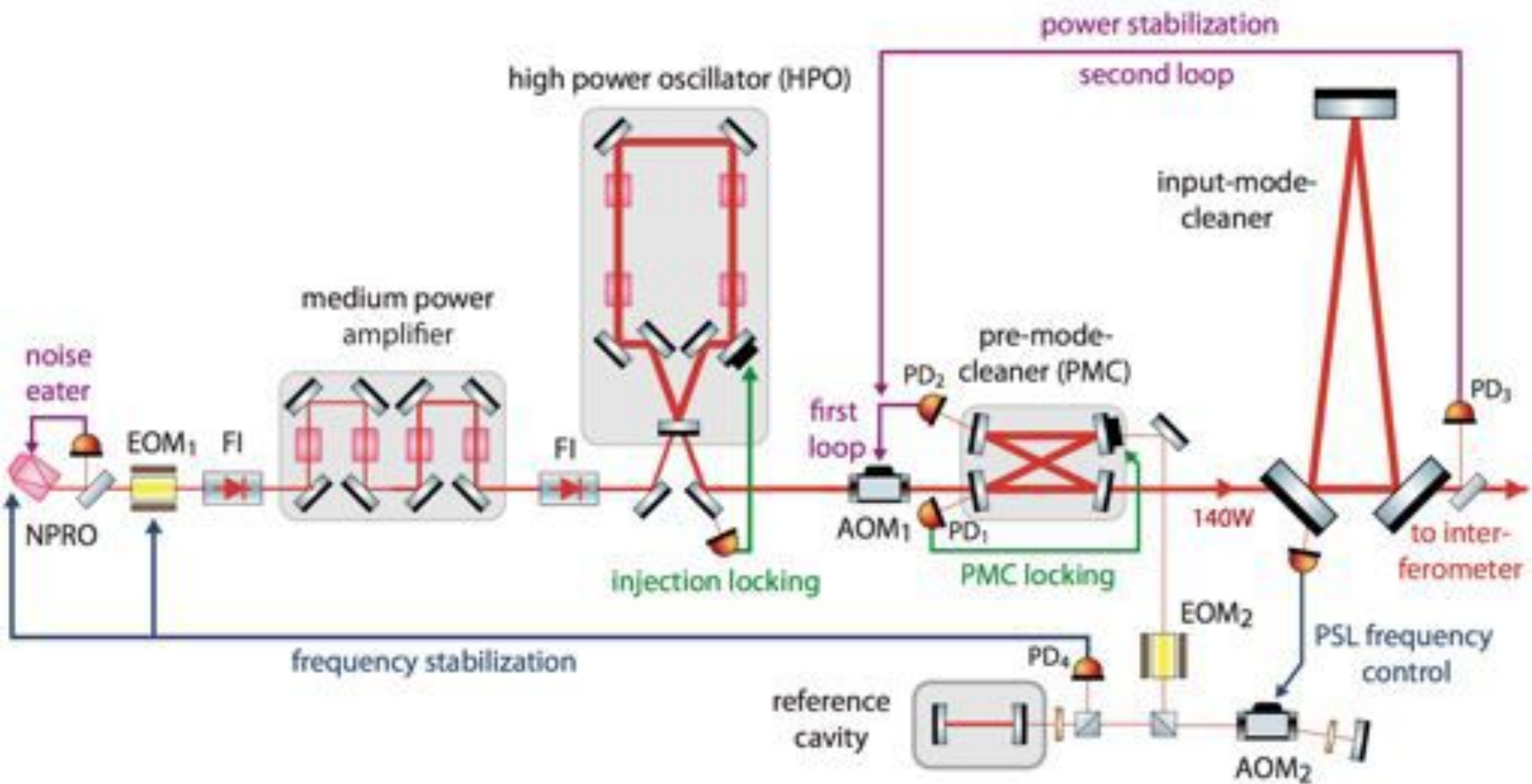
LIGO's Non-Planar Ring Oscillator



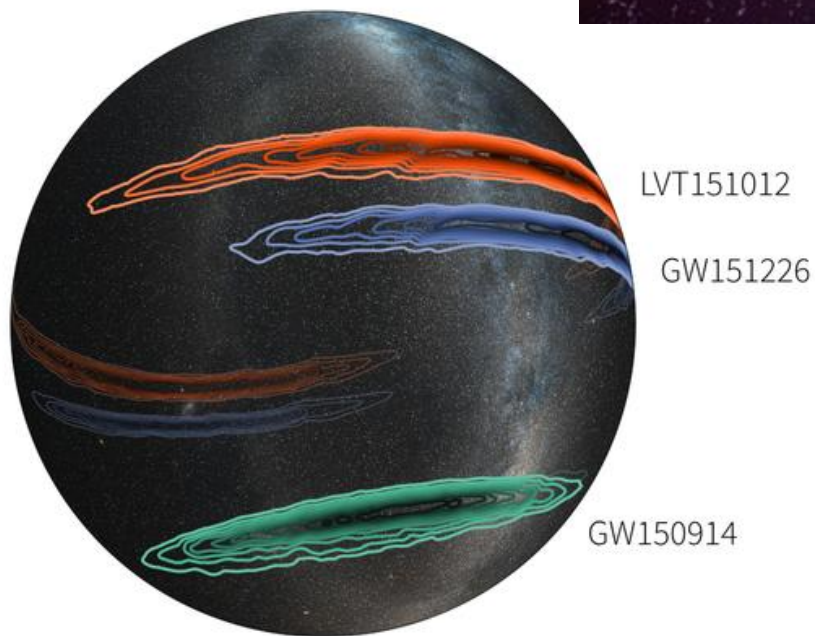
<https://www.ligo.caltech.edu/>

Стабильность 10^{-17}
1000 сек
1064 нм $\sim 3 \cdot 10^{14}$ Гц
0,001 Гц

Схема стабилизированной лазерной системы LIGO

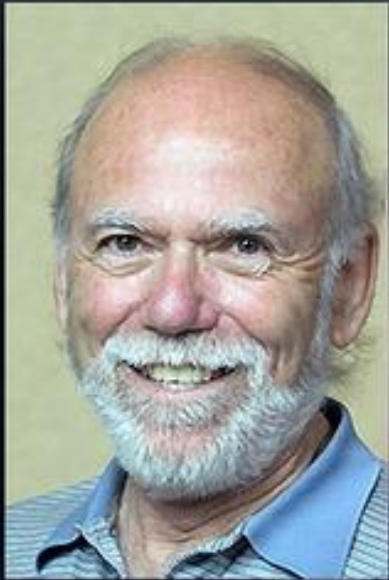


Mapping LIGO's Detections During First Observing Run



This three-dimensional projection of the Milky Way onto a transparent globe shows the probable locations of all three LIGO events detected during the first observing run. Two are confirmed detections: GW150914 (green), and GW151226 (blue), while the third is a possible detection at lower significance (LVT151012, in red). The outer contour for each represents the 90 percent confidence region; the innermost contour signifies the 10 percent confidence region.

<https://www.ligo.caltech.edu/>



Barry C. Barish (Caltech)



Kip S. Thorne (Caltech)



Rainer Weiss (MIT)



2017 Nobel Prize in Physics

Комплексное представление полихроматических световых полей

Аналитический сигнал Габора

Сложную световую волну можно описать одной вещественной скалярной величиной $V^{(r)}(\mathbf{r}, t)$ (например, величинами $|E|$ и $|H|$ или модулем векторного потенциала $|A|$).

$$V^{(r)}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} V(\mathbf{r}, \omega) \exp(-i\omega t) d\omega$$

$$V(\mathbf{r}, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} V^{(r)}(\mathbf{r}, t) \exp(i\omega t) dt$$

$$V^{(r)} = 2 \operatorname{Re}(V)$$

$$V(\mathbf{r}, -\omega) = V^*(\mathbf{r}, \omega)$$

Комплексный аналитический сигнал

$$V(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} V(\mathbf{r}, \omega) \exp(-i\omega t) d\omega$$

$$I(\mathbf{r}, t) = V(\mathbf{r}, t) V^*(\mathbf{r}, t)$$

$$V(t) = E(t) \exp\{i[\phi(t) - \langle\omega\rangle t]\},$$

Для медленно меняющихся амплитуд и фаз

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АМПЛИТУДЫ, ФАЗЫ И ЧАСТОТЫ С ПОМОЩЬЮ АНАЛИТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

Строго гармоническое колебание частоты ω задается при $-\infty < t < \infty$ выражениями

$$u(t) = \underline{x} \cos \omega t - y \sin \omega t = a \cos(\omega t + \Phi) = a \cos \varphi,$$

где x , y , a , Φ , ω — вещественные постоянные, связанные между собой соотношениями

$$x = a \cos \Phi, \quad y = a \sin \Phi, \quad a = \sqrt{x^2 + y^2}, \\ \Phi = \arccos(x/a) - \arcsin(y/a).$$

Принято называть a амплитудой, φ — фазой, ω — частотой, x и y (квадратурными) компонентами амплитуды. Комплексная запись колебания

$$\underline{w}(t) = a \exp[i(\omega t + \Phi)] \text{ получается при}$$

дополнении колебания $u(t)$ мнимой частью

$$\underline{v}(t) = a \sin(\omega t + \Phi)$$

отличающейся от $u(t)$ поворотом фазы на $-\pi/2$.

Преобразование Гильберта обобщает это правило на произвольные функции: если $u(t)$ есть суперпозиция гармонических колебаний, то функция $v(t)$, сопряженная ей по Гильберту, есть суперпозиция тех же колебаний, сдвинутых по фазе на $-\pi/2$.

Когерентность

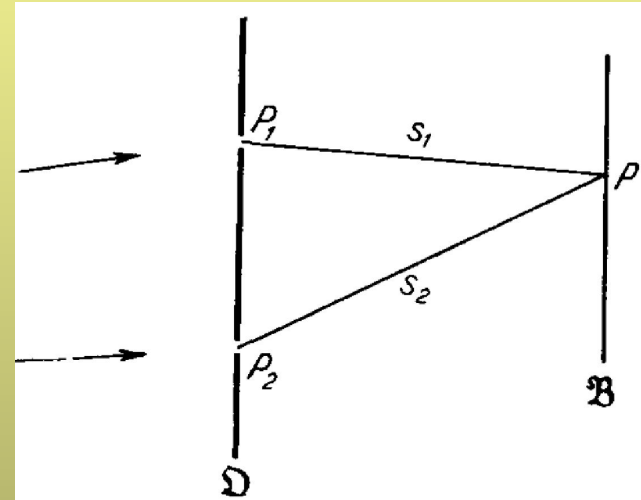
$$V(\mathbf{r}, t) = K_1 V(\mathbf{r}_1, t - t_1) + K_2 V(\mathbf{r}_2, t - t_2)$$

$$I(\mathbf{r}, t) = |K_1|^2 I_1(\mathbf{r}_1, t - t_1) + |K_2|^2 I_2(\mathbf{r}_2, t - t_2) + 2\text{Re} \{ K_1^* K_2 V^*(\mathbf{r}_1, t - t_1) V(\mathbf{r}_2, t - t_2) \}$$

$$\langle I(\mathbf{r}, t) \rangle_e = |K_1|^2 \langle I(\mathbf{r}_1, t - t_1) \rangle_e + |K_2|^2 \langle I(\mathbf{r}_2, t - t_2) \rangle_e + 2\text{Re} \{ K_1^* K_2 \Gamma(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, t - t_1, t - t_2) \}$$

$$\Gamma(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, t_1, t_2) = \langle V^*(\mathbf{r}_1, t_1) V(\mathbf{r}_2, t_2) \rangle_e$$

$$\langle I(\mathbf{r}_j, t_j) \rangle_e = \langle V^*(\mathbf{r}_j, t_j) V(\mathbf{r}_j, t_j) \rangle_e = \Gamma(\mathbf{r}_j, \mathbf{r}_j, t_j, t_j)$$



Когерентность лазерных пучков

$$\Gamma^{(1)}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_1, t_1, t_2) = \langle V(\mathbf{r}_1, t_1) V^*(\mathbf{r}_1, t_2) \rangle$$

Обычно нас интересуют *стационарные поля*, для которых все средние по ансамблю не зависят от выбора начала отсчета времени; более того, как правило, поля являются также и *эргодическими*.

$$\Gamma^{(1)}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_1, t_1, t_2) = \Gamma^{(1)}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_1, \tau) = \langle V(\mathbf{r}_1, t + \tau) V^*(\mathbf{r}_1, t) \rangle$$

$$\Gamma^{(1)}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_1, \tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T V(\mathbf{r}_1, t + \tau) V^*(\mathbf{r}_1, t) dt$$

Комплексная степень временной когерентности

$$\gamma^{(1)} = \frac{\langle V(\mathbf{r}_1, t + \tau) V^*(\mathbf{r}_1, t) \rangle}{\langle V(\mathbf{r}_1, t) V^*(\mathbf{r}_1, t) \rangle^{1/2} \langle V(\mathbf{r}_1, t + \tau) V^*(\mathbf{r}_1, t + \tau) \rangle^{1/2}}$$

$$\Gamma^{(1)}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, 0) = \langle V(\mathbf{r}_1, t) V^*(\mathbf{r}_2, t) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T V(\mathbf{r}_1, t) V^*(\mathbf{r}_2, t) dt$$

Компл. степень простр. ког.

$$\gamma^{(1)} = \frac{\langle V(\mathbf{r}_1, t) V^*(\mathbf{r}_2, t) \rangle}{\langle V(\mathbf{r}_1, t) V^*(\mathbf{r}_1, t) \rangle^{1/2} \langle V(\mathbf{r}_2, t) V^*(\mathbf{r}_2, t) \rangle^{1/2}}$$

Соотношение между временной когерентностью и монохроматичностью

$$(\tau_{\text{когер}})^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (\tau - \langle \tau \rangle)^2 |\Gamma(\tau)|^2 d\tau / \int_{-\infty}^{+\infty} |\Gamma(\tau)|^2 d\tau$$

$$(\tau_{\text{когер}})^2 = \langle (\tau - \langle \tau \rangle)^2 \rangle$$

$$(\tau_{\text{когер}})^2 = \langle \tau^2 \rangle$$

$$(\Delta \nu_{\text{ген}})^2 = \langle (\nu - \langle \nu \rangle)^2 \rangle$$

$$\langle \nu \rangle = \int \nu W^2 d\nu / \int W^2 d\nu$$

$$\tau_{\text{когер}} \Delta \nu_{\text{ген}} \geq 1/4\pi$$

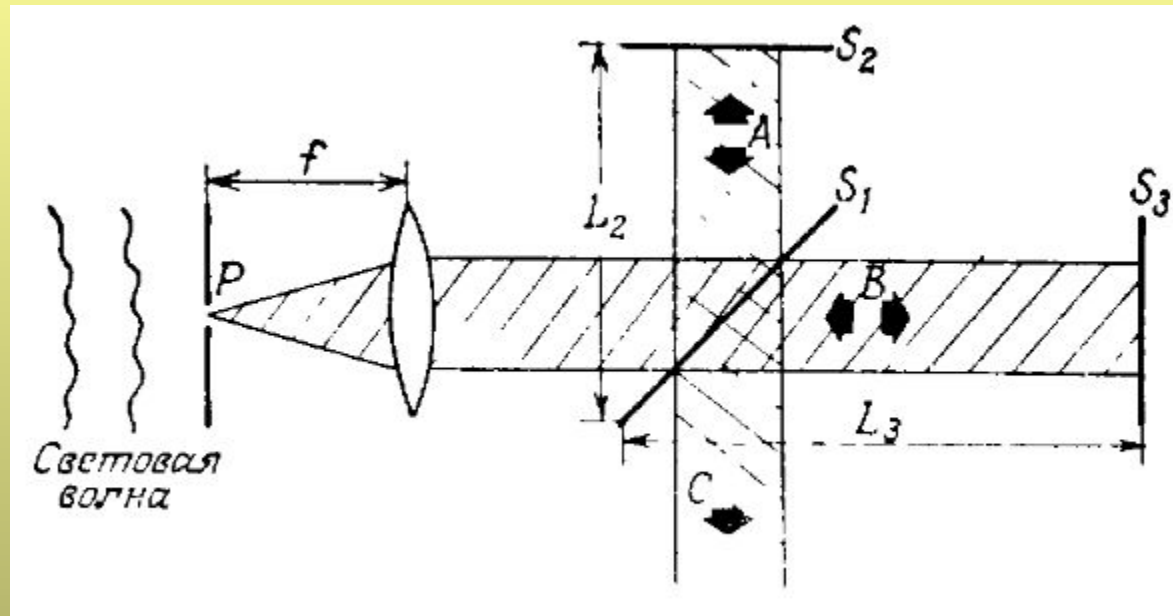
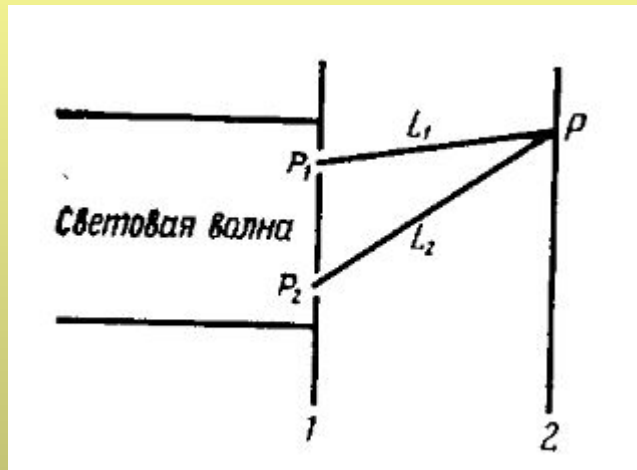
Аналитический сигнал многомодового лазера

$$V(\mathbf{r}_1, t) = \sum_k a_k U_k(\mathbf{r}_1) \exp \{ i [\phi_k(t) - \omega_k t] \}$$

$$V(\mathbf{r}_2, t) = \sum_k a_k U_k(\mathbf{r}_2) \exp \{ i [\phi_k(t) - \omega_k t] \}$$

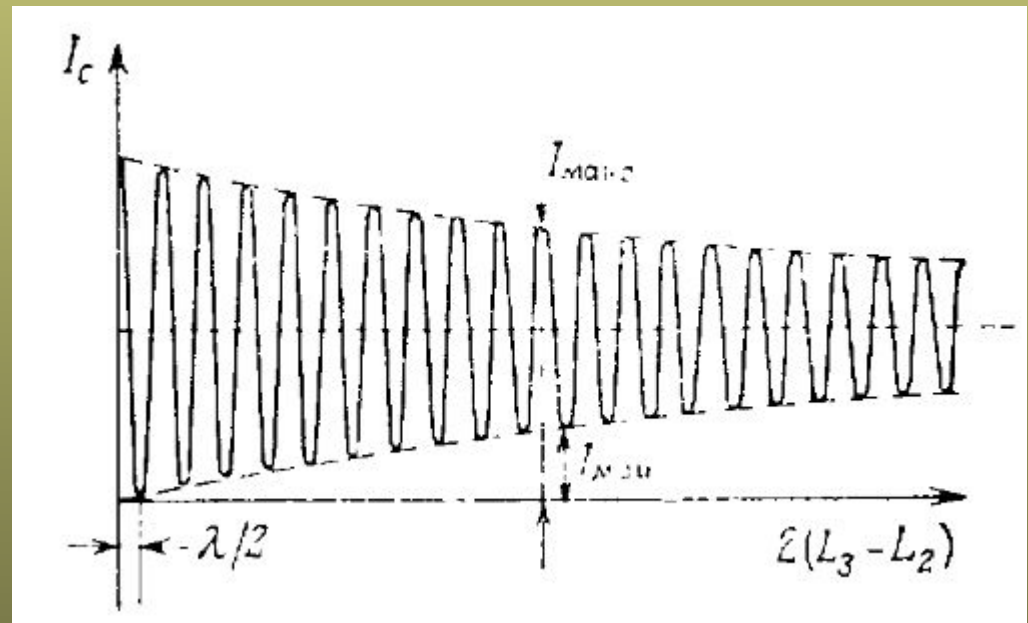
$$|V| \sim 1/\sqrt{N_M}$$

Измерения когерентности

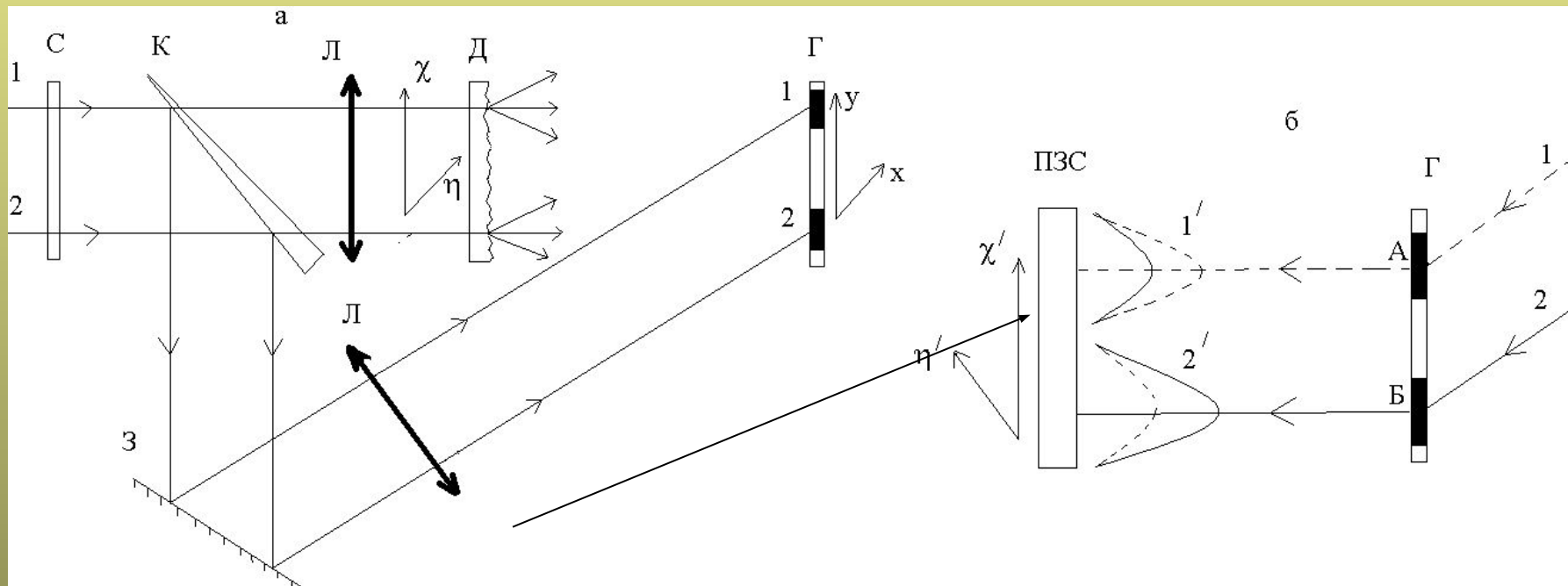


$$V_{(P)} = \frac{I_{\text{макс}} - I_{\text{мин}}}{I_{\text{макс}} + I_{\text{мин}}}$$

$$V_{(P)}(\tau) = |\gamma^{(1)}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \tau)|$$



Голографический метод исследования когерентности



а) Схема записи исходной голограммы (1,2 – исследуемые пучки, С - реперная сетка). б) Схема восстановления голограммы и измерения распределений интенсивности (1' и 2') в плоскости изображения.

$$|\gamma| = \sqrt[4]{\frac{I_1^2 \cdot I_2^1}{I_1^1 \cdot I_2^2}}$$

Связь тонкой структуры спектров с пространственной когерентностью излучения

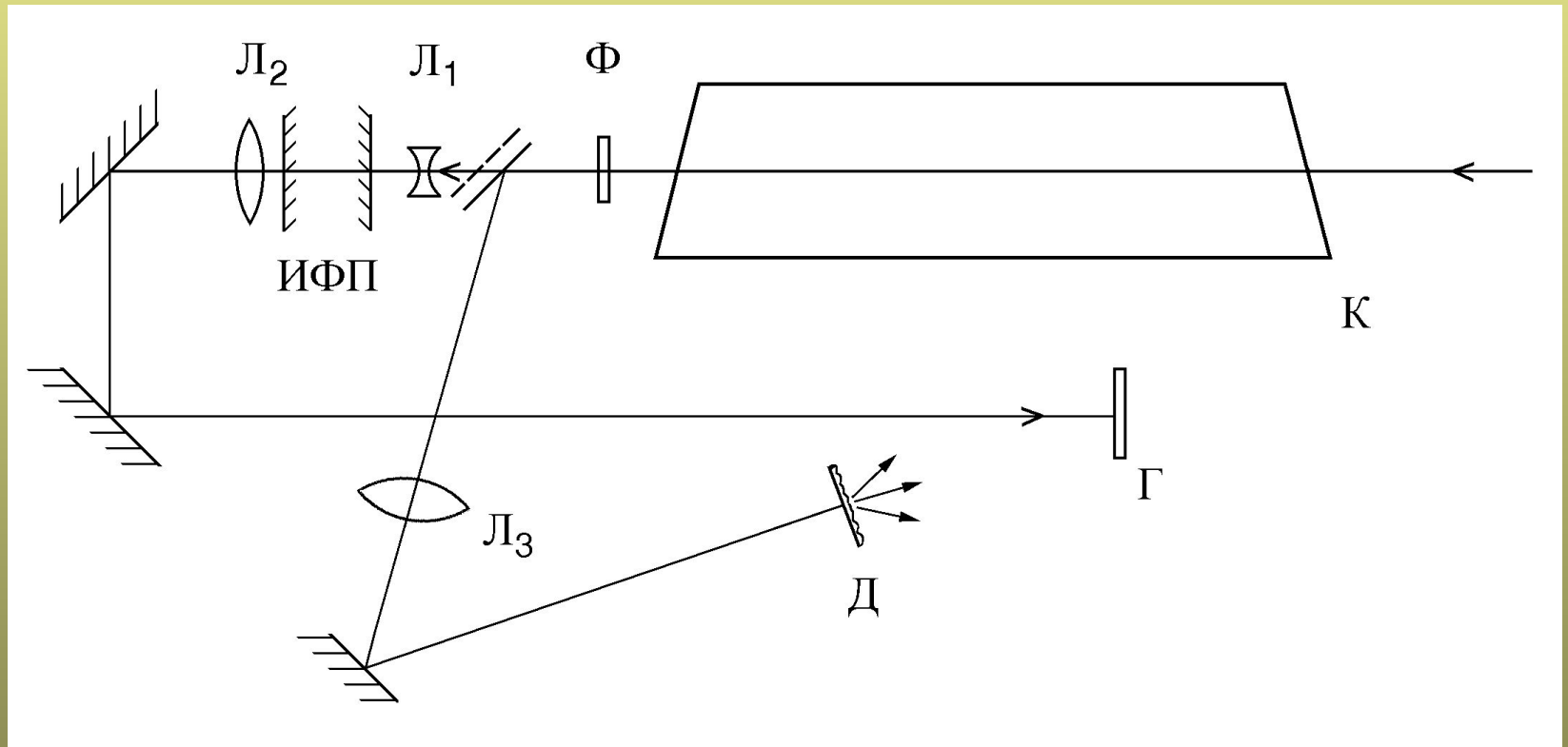
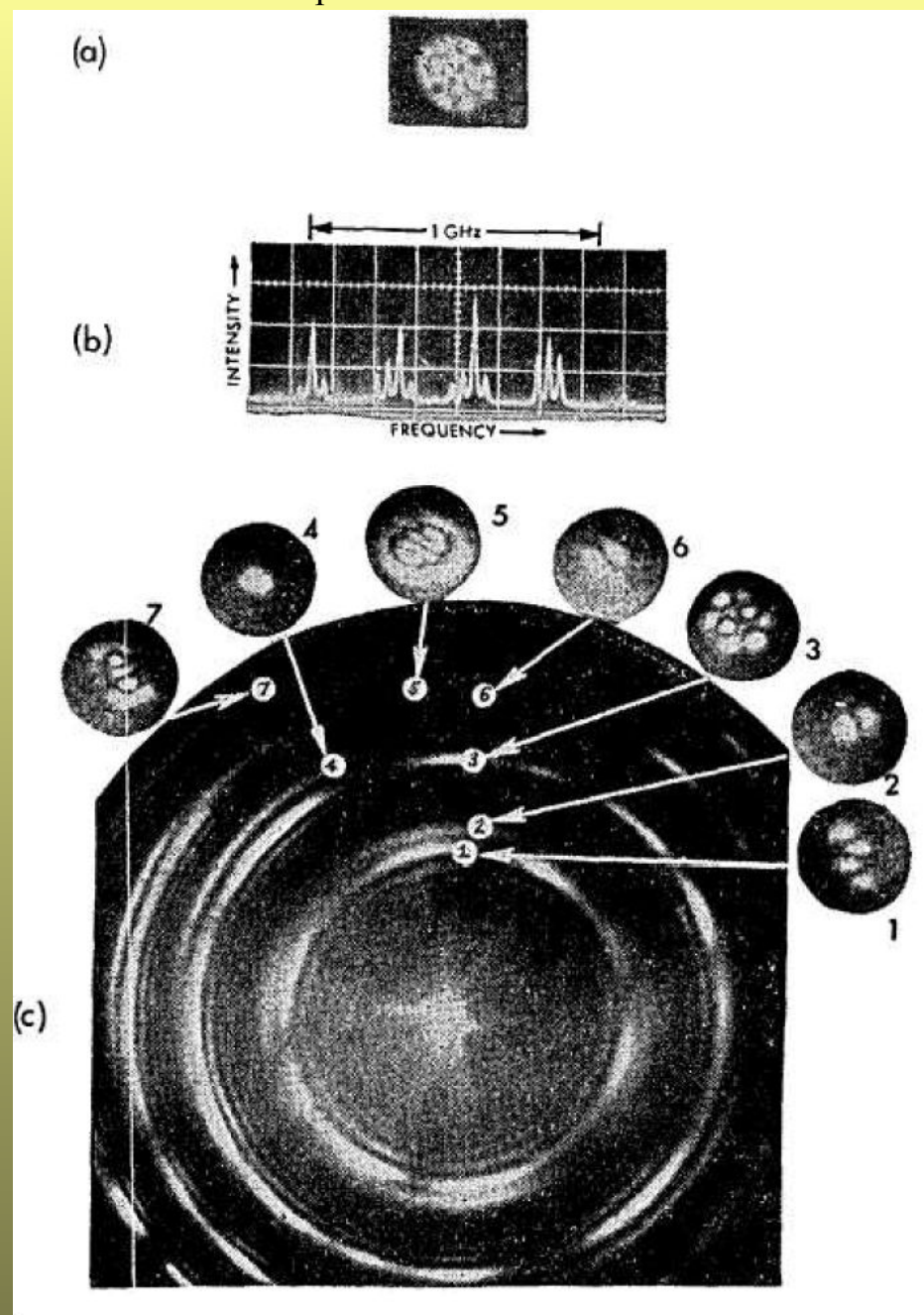


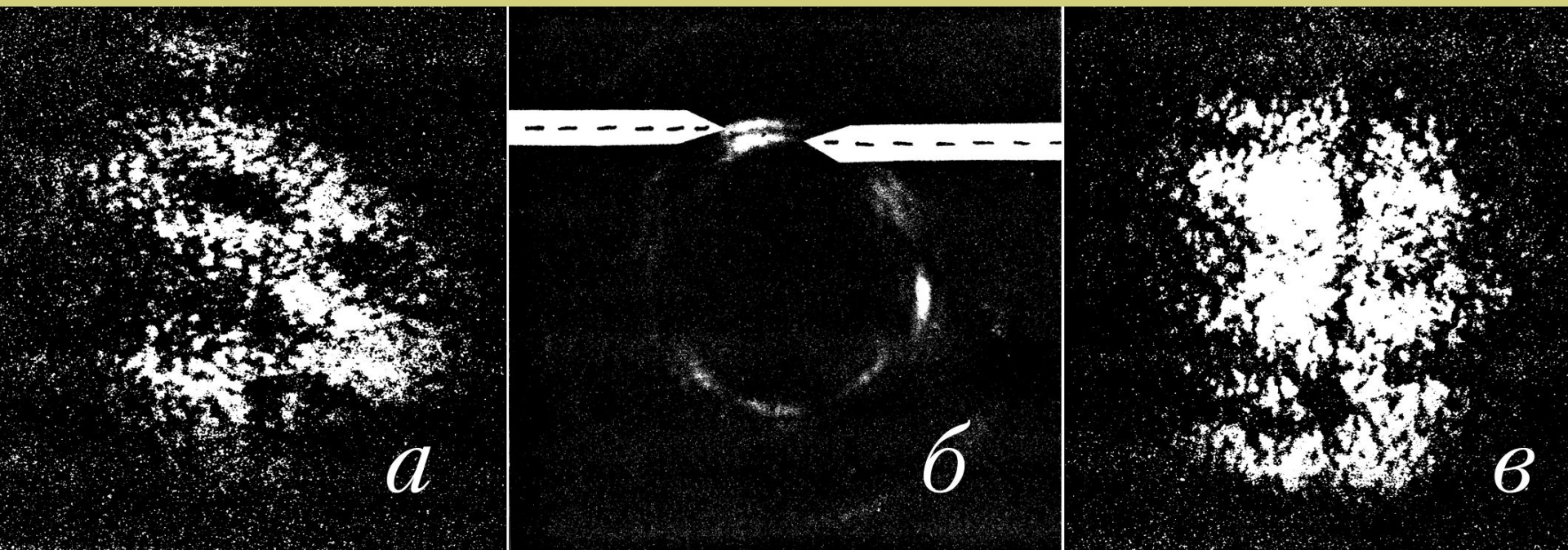
Схема эксперимента по исследованию взаимосвязи пространственной когерентности и спектра

Поперечные моды He-Ne лазера



Наблюдение квантово-флуктуационных пространственно-временных мод ВКР

$$D = 8 \text{ мм} \quad N_F = 100 \quad p = 20 \text{ атм} \quad \tau_p = 10 \text{ нс} \quad N = 3$$



Изображения пространственно-временных стохастических мод стоксового излучения ВКР (а, в) и интерферограмма Фабри-Перо, зарегистрированная на голограмме (б).

ДРОБОВОЙ ШУМ ЛАЗЕРА

Свет - поток фотонов, и флуктуации интенсивности и мощности все же имеют место. Если во временном интервале T отсчитывается среднее число фотонов N , то среднее статистическое отклонение ΔN выражено через:

$$\Delta N = \text{sqrt}(N)$$

$$\Delta N/N = 1/\text{sqrt}(N)$$

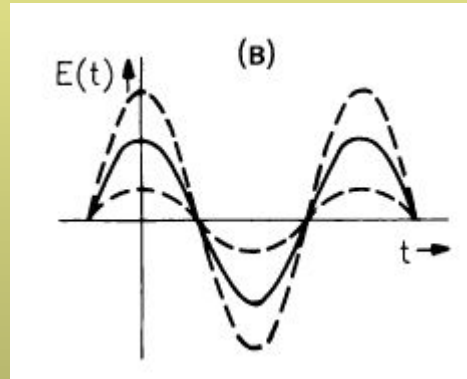
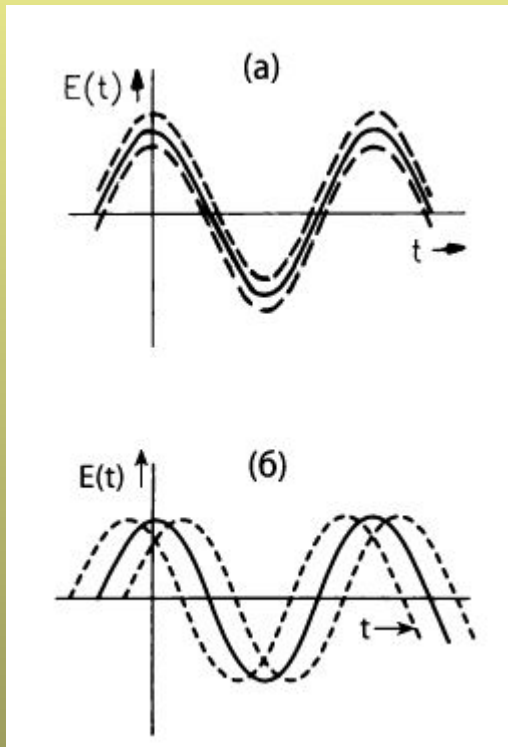
При большом числе фотонов относительное отклонение невелико, более значительные относительные отклонения появляются при малом числе фотонов.

Если вместо числа фотонов измеряется средняя мощность P — с помощью детектора, имеющего ширину полосы частот Δf , то выходной сигнал детектора обнаруживает в данной временной области флуктуацию с характерным периодом времени $T = \Delta f/2$.

Такого рода флуктуации мощности именуется «дробовым шумом», поскольку они возникают в силу квантованного, или «дробленого» характера потока фотонов.

СЖАТЫЕ СОСТОЯНИЯ (squeezed states)

$$\Delta N < \text{sqrt}(N)$$



Напряженность электрического поля для трех разных состояний, (а) Нормальное когерентное состояние с флуктуациями интенсивности и фазы, (б) Сжатое состояние со стабилизацией амплитуды, (в) Сжатое состояние со стабилизацией по фазе. Средняя напряженность поля показана в виде сплошной линии. Пунктирные линии обозначают область флуктуации

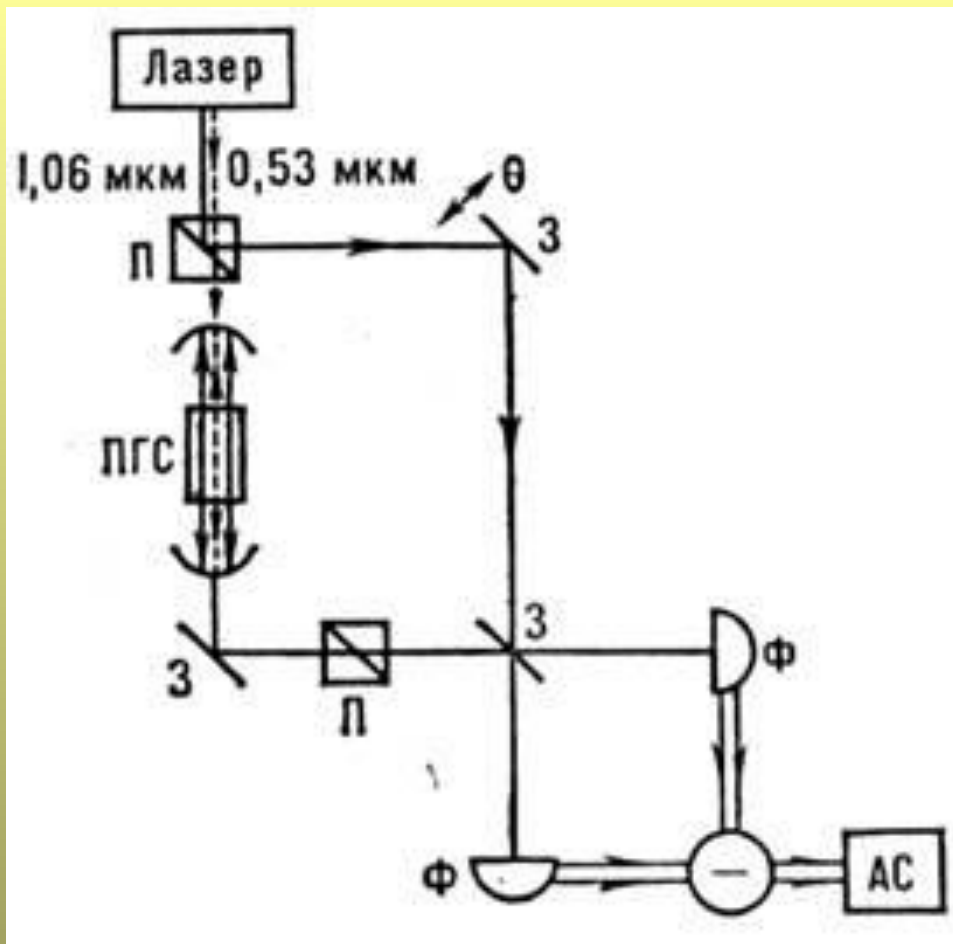


Схема эксперимента по генерации сжатых состояний: задающий лазер генерирует излучение на длине волны $\lambda = 1,06$ мкм (сплошные линии) и на $\lambda = 0,53$ мкм (штриховая линия); перемещением одного из плоских зеркал вносится фазовая задержка ;

П - поляризатор; З - зеркало; Ф - фотодиод; АС - анализатор спектра; ПГС - параметрический генератор света.

W u L. u др., Generation of squeezed states by parametric down conversion, «Phys. Rev. Lett.», 1986, у. 57, р. 2520

ЛИТЕРАТУРА

1. О. Звелто. Принципы лазеров. М. Мир. 1984
2. Н.В. Карлов. Лекции по квантовой электронике. М. Наука. 1983
3. А. Ярив. Введение в оптическую электронику. М. Высшая школа. 1983.
4. Оптоинформатика. Часть 1. Учебно-методическое пособие.

Контрольные вопросы.

1. Расшифровка слова «лазер».
2. Два сектора рынка лазеров, какого типа лазеров больше всего.
3. Кто внес наибольший вклад в становление лазерной физики.
4. Три фундаментальных положения лазерной физики.
5. Три типа переходов между энергетическими состояниями, общая характеристика.
6. Основное состояние квантовой системы, поглощение из основного состояния.
7. Спонтанное излучение в квантовой системе.
8. Вынужденное излучение, основные свойства.
9. Вывод соотношений между коэффициентами Эйнштейна, их физический смысл.
10. Усиление (поглощение) излучения в квантовой системе.
11. Три условия лазерной генерации, критическая инверсия, условие генерации в резонаторе Фабри-Перо (потери только на зеркалах).
12. Трех- и четырехуровневая схемы накачки и лазерной генерации.
13. Методы создания инверсной заселенности. Типы активных сред.
14. Сколько недиодных лазеров выпускается в мире, основные типы, области применения..
15. Схема возбуждения гелия и неона в электрическом разряде.
16. Упрощенная схема уровней в неодимовых лазерах.
17. Оптическая схема лазера с диодной накачкой.