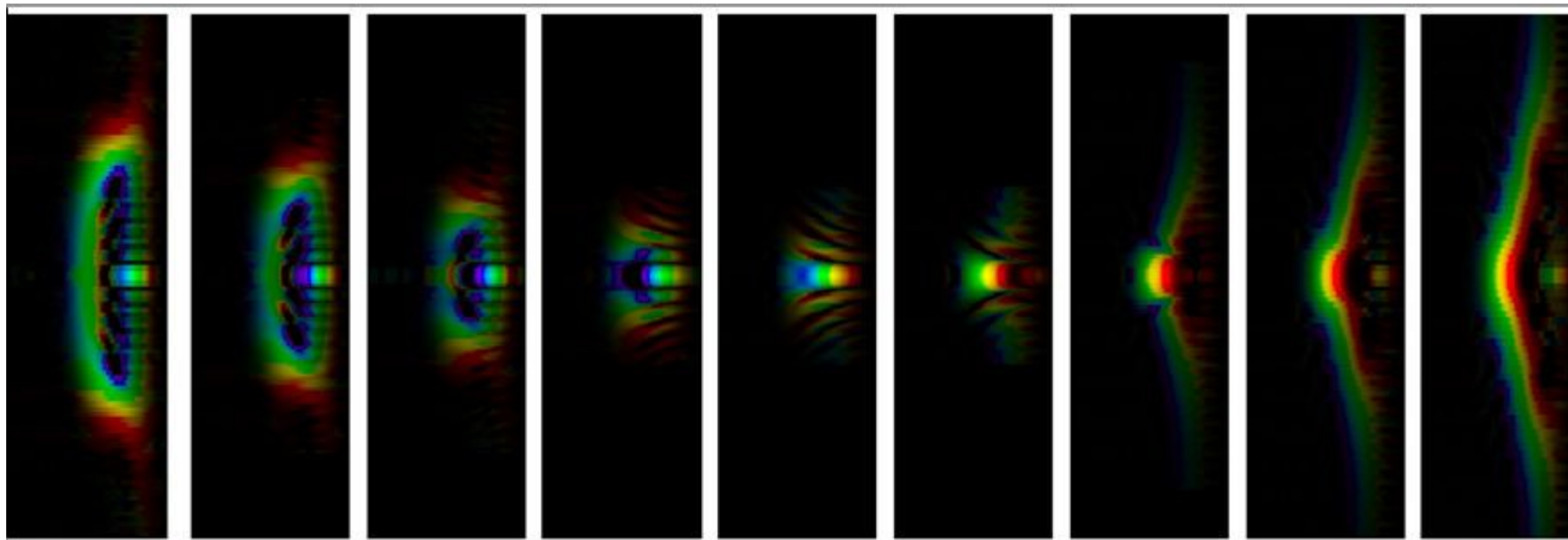


# Нелинейно-оптические методы измерений в фемтосекундной оптике

# О важности измерения временного профиля оптических импульсов



развертка фокусировки импульса

# О важности измерения временного профиля оптических импульсов

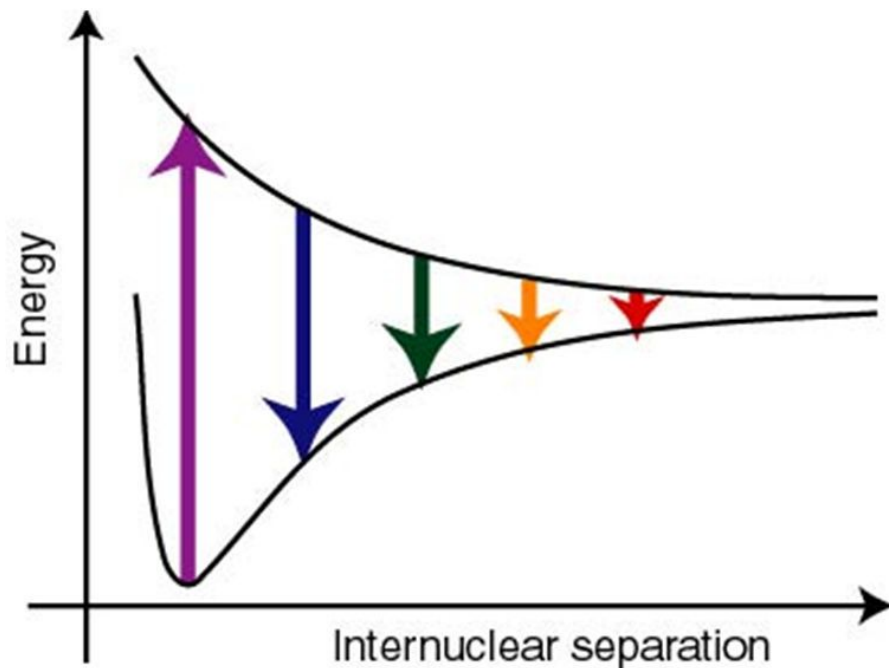


схема изменения свечения  
(люминесценции) молекулы  
при ее фотодиссоциации  
□ временная развертка дает  
информацию о  
молекулярной динамике

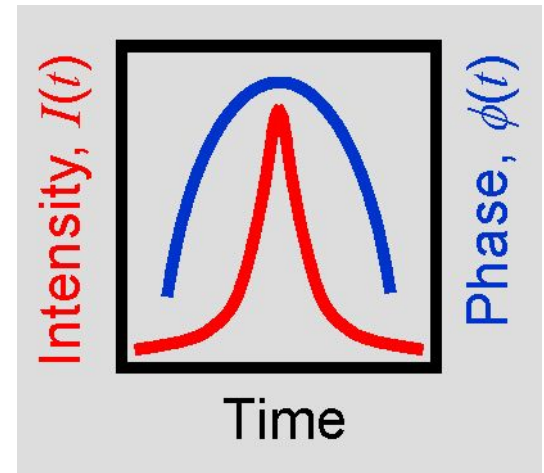
## Приложения:

- сверхбыстрая спектроскопия
- лазерноиндуцированная химия
- лазерная метрология
- сверхбыстрое электрооптическое тестирование микросхем
- лазерноиндуцированная плазма
- генерация высших гармоник
- аттосекундная оптика
- оптические коммуникации
- биомедицинские приложения

# Об интенсивности и фазе в импульсе

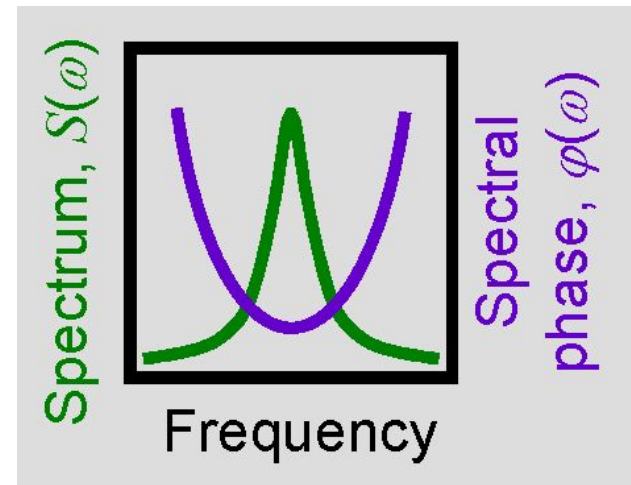
временное представление импульса

$$E(t) = \text{Re} \left[ \sqrt{I(t)} \exp(i\omega_0 t - i\phi(t)) \right]$$



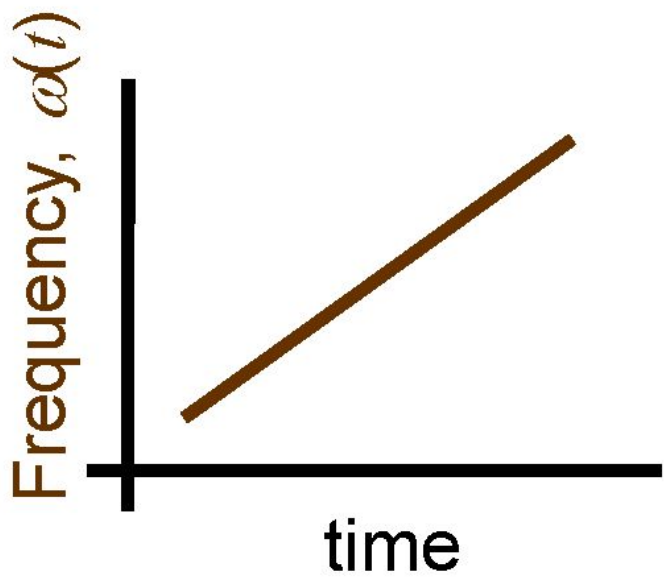
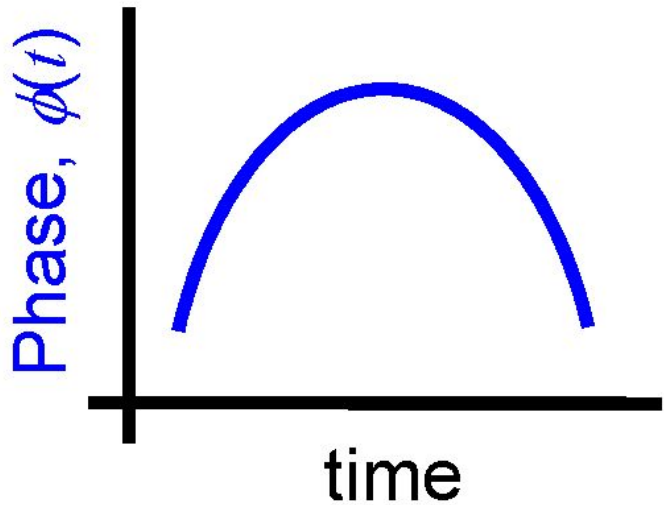
спектральное представление импульса

$$E(\omega) = \sqrt{S(\omega)} \exp(i\varphi(\omega)t)$$

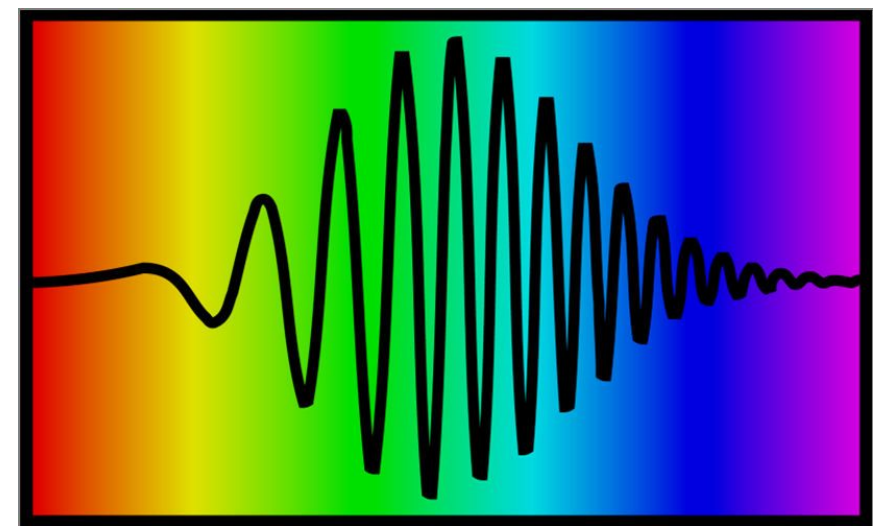


$$\varphi(\omega) = \varphi_0 + \left. \frac{d\varphi}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_0} (\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \left. \frac{d^2\varphi}{d\omega^2} \right|_{\omega=\omega_0} (\omega - \omega_0)^2 + \dots$$

# Об интенсивности и фазе в импульсе: линейный чирп (временное представление)



Фаза импульса определяет  
мгновенную частоту (цвет)  
импульса

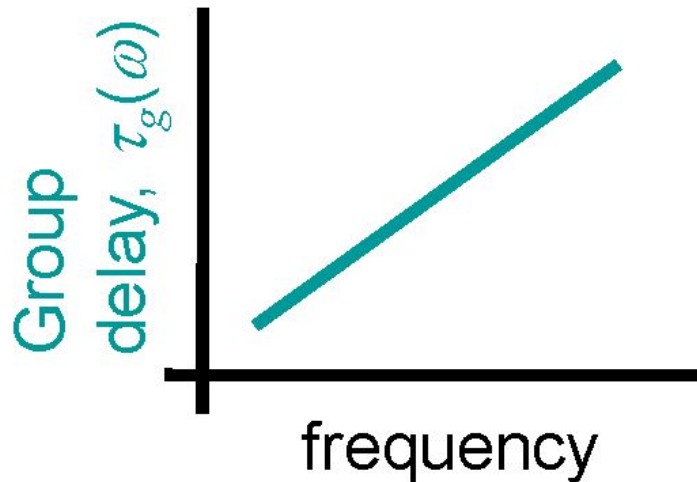
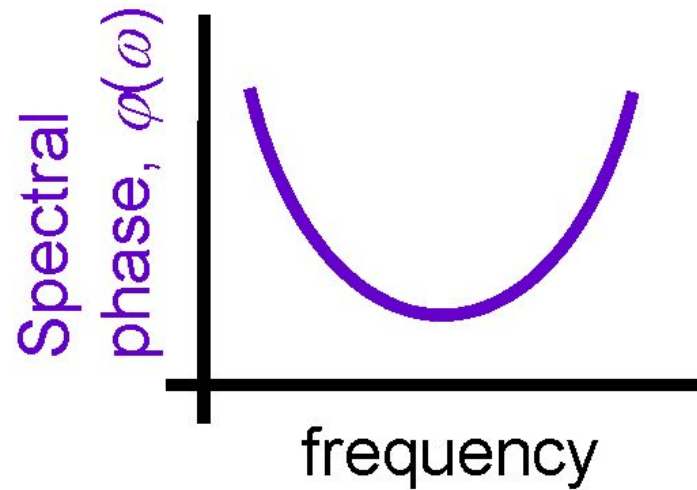


$$E(t) = \text{Re} \left[ \sqrt{I(t)} \exp(i\omega_0 t - i\phi(t)) \right]$$

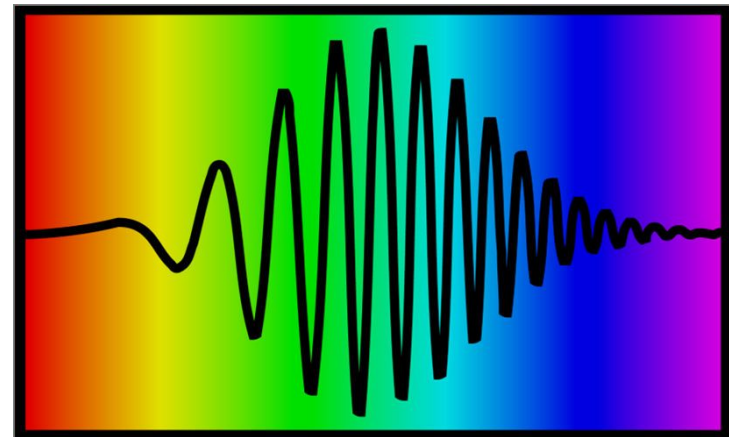
если  $\phi(t) = -\alpha t^2$ , то

$$\omega(t) = \omega_0 - \frac{d\phi}{dt} = \omega_0 + 2\alpha t$$

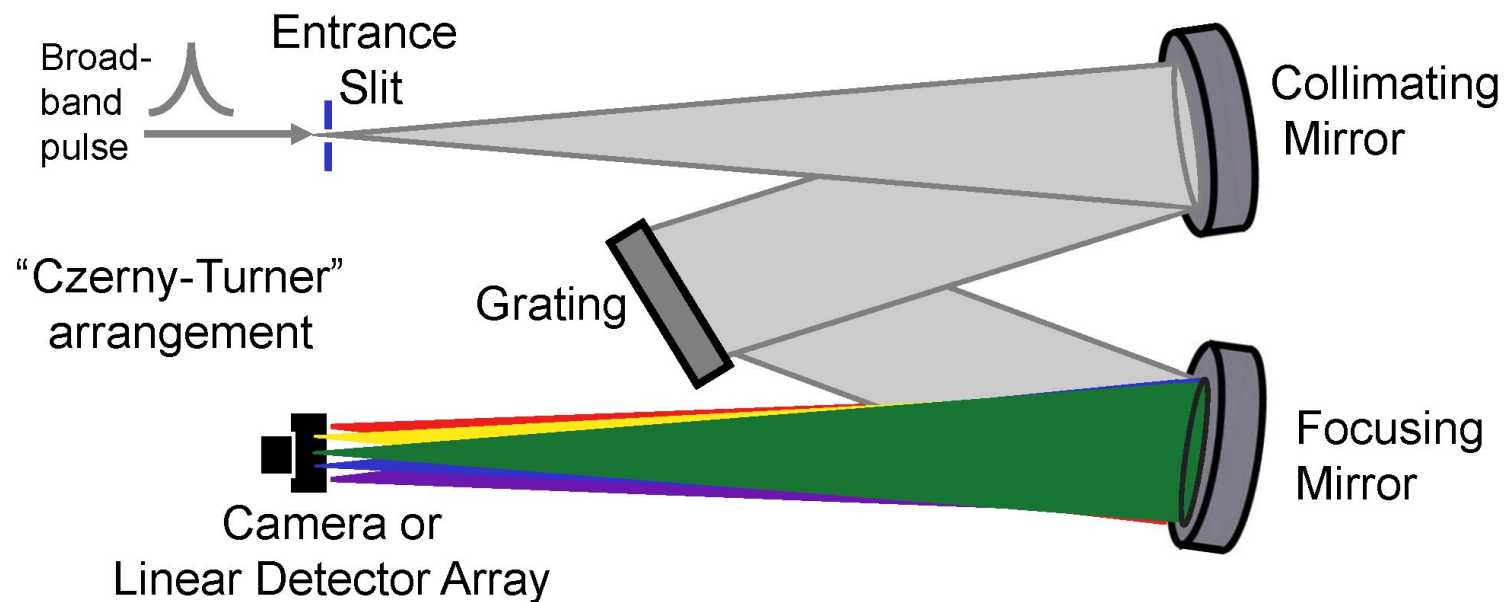
# Об интенсивности и фазе в импульсе: линейный чирп (спектральное представление)



Фаза импульса определяет  
мгновенную частоту (цвет)  
импульса

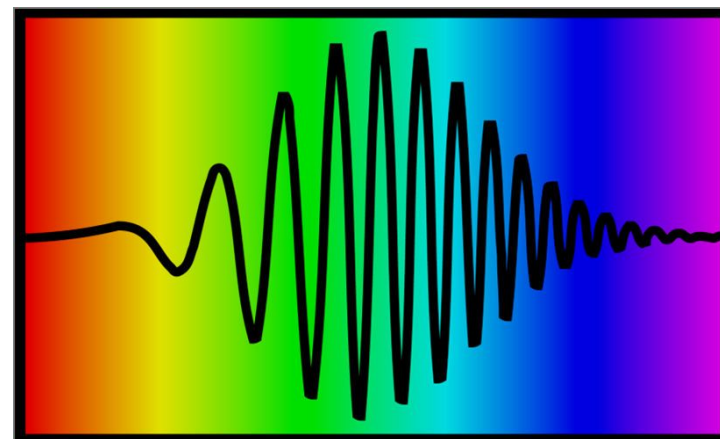


# Потеря информации о фазе в спектральных измерениях



$$E(\omega) = \sqrt{S(\omega)} \exp(i\varphi(\omega)t)$$

Измеряется  $S(\omega)$ , а не  $\varphi(\omega)$



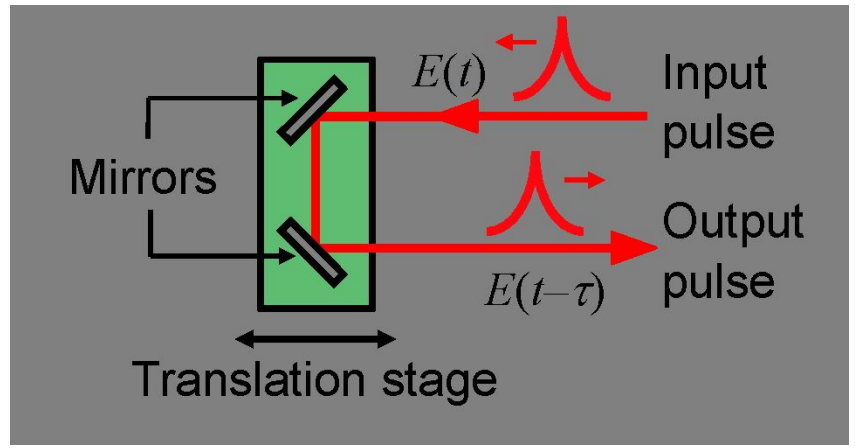
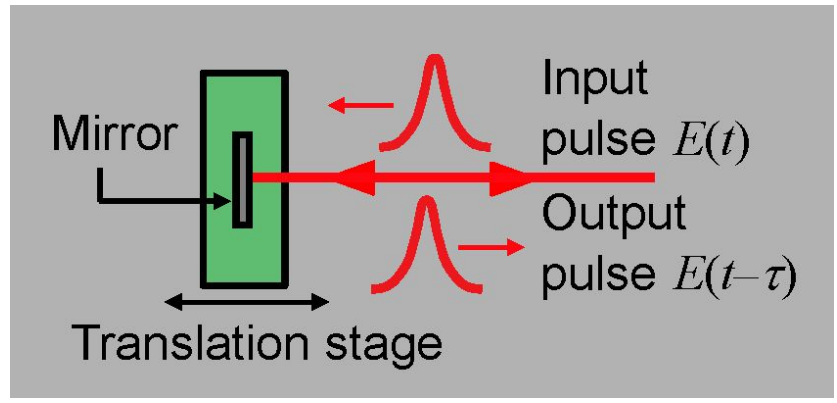
# Временные измерения: как достигнуть фемтосекундного разрешения?

Все детекторы медленные (не быстрее 1 нс)  
(самые быстрые - стрик-камеры)

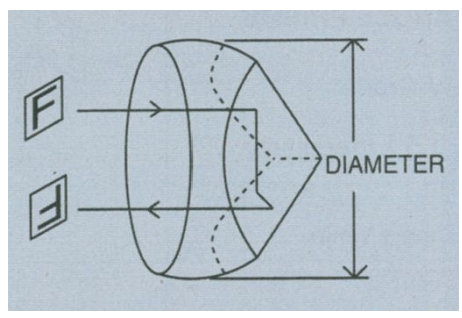
но можно создать оптическую задержку

$$\tau = 2L/c$$

300 мкм  $\square$  2 пс



тройное отражение  
сохраняет параллельность  
входного и выходного  
импульсов

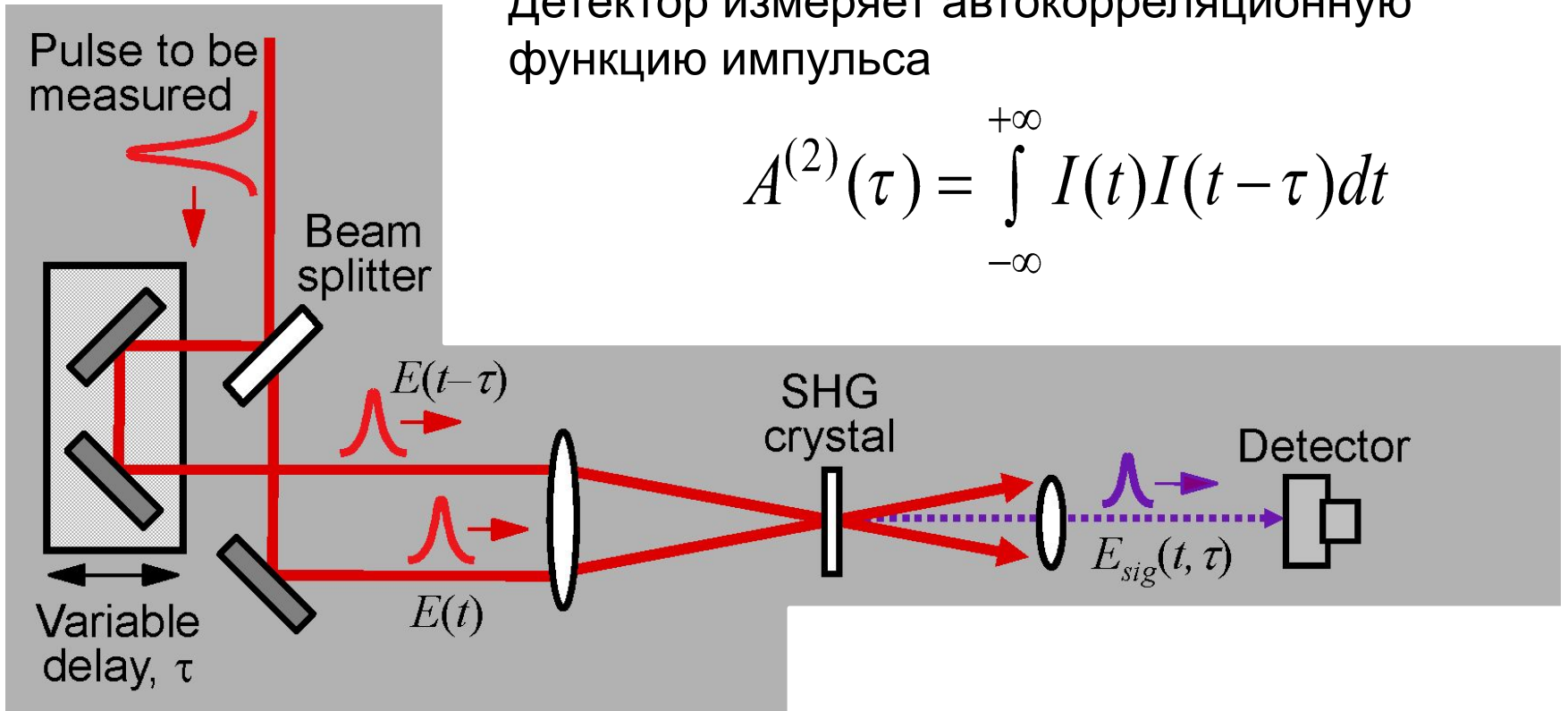




# Автокорреляционные измерения

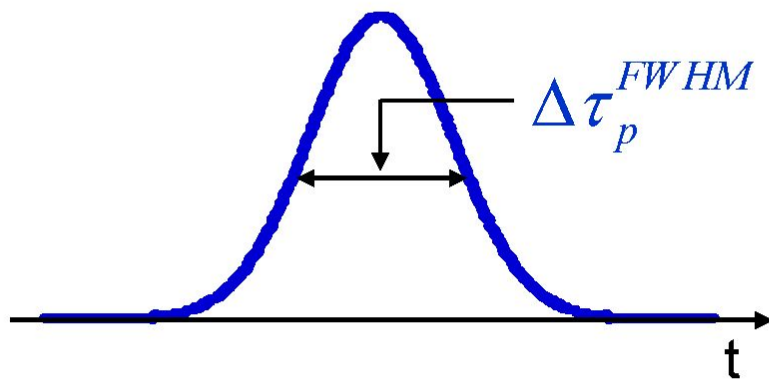
Детектор измеряет автокорреляционную функцию импульса

$$A^{(2)}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(t)I(t-\tau)dt$$

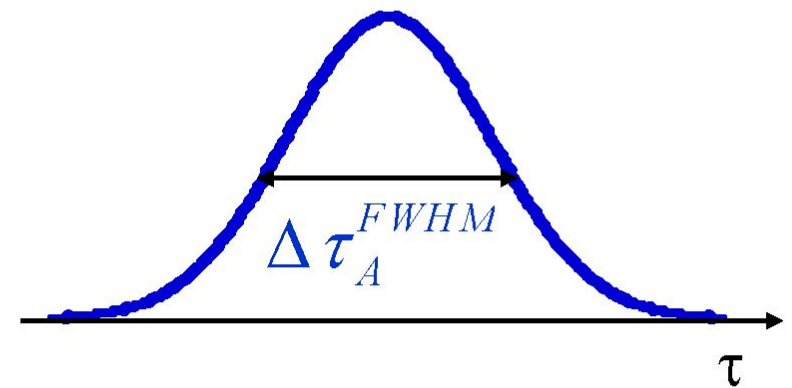


# Автокорреляционные измерения гауссовых импульсов

$$I(t) = \exp\left[-\left(\frac{2\sqrt{\ln 2}t}{\Delta\tau_p^{FWHM}}\right)^2\right]$$



$$A^{(2)}(\tau) = \exp\left[-\left(\frac{2\sqrt{\ln 2}\tau}{\Delta\tau_A^{FWHM}}\right)^2\right]$$

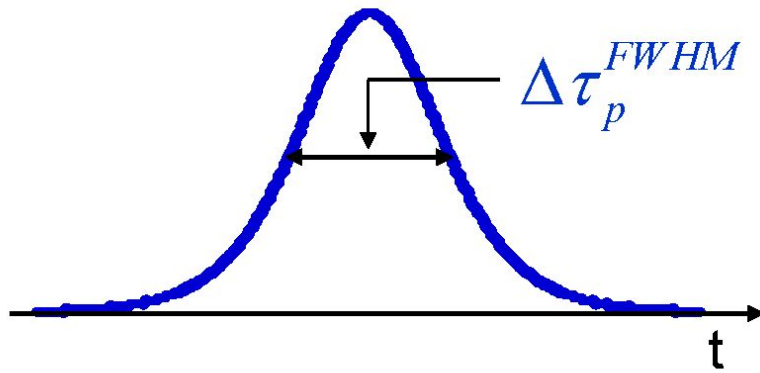


$$1.41 \Delta\tau_p^{FWHM} = \Delta\tau_A^{FWHM}$$

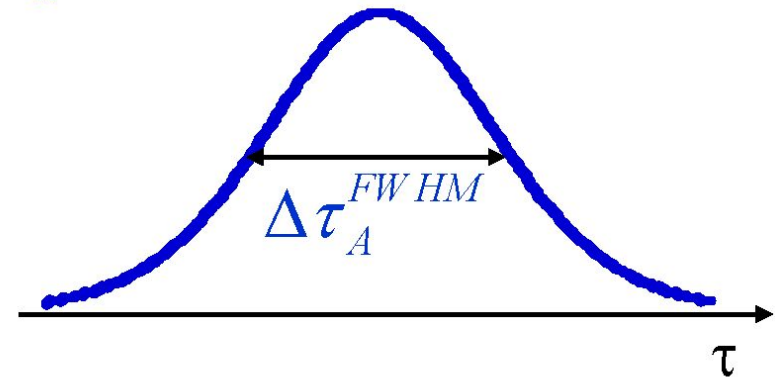
# Автокорреляционные измерения sech-импульсов

$$I(t) = \operatorname{sech}^2 \left[ \frac{1.7627t}{\Delta t_p^{FWHM}} \right]$$

$$A^{(2)}(\tau) = \frac{3}{\sinh^2 \left( \frac{2.7196\tau}{\Delta \tau_A^{FWHM}} \right)} \left[ \frac{2.7196\tau}{\Delta \tau_A^{FWHM}} \coth \left( \frac{2.7196\tau}{\Delta \tau_A^{FWHM}} \right) - 1 \right]$$



$$1.54 \Delta \tau_p^{FWHM}$$



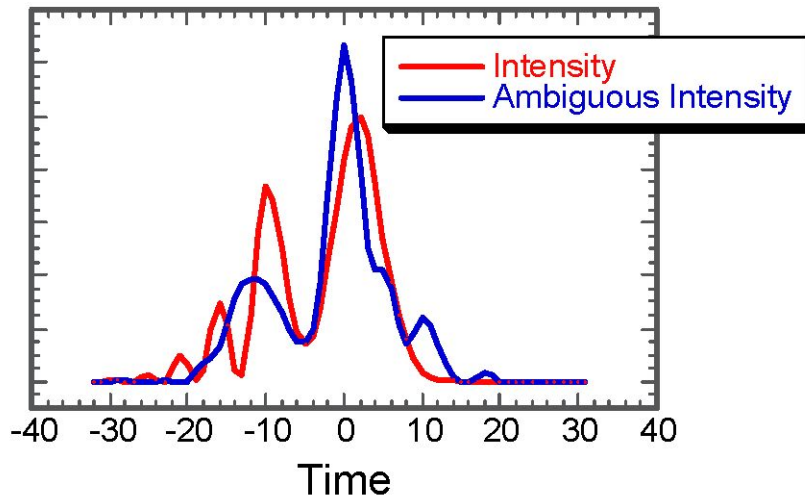
$$= \Delta \tau_A^{FWHM}$$

# Недостатки автокорреляционных измерений

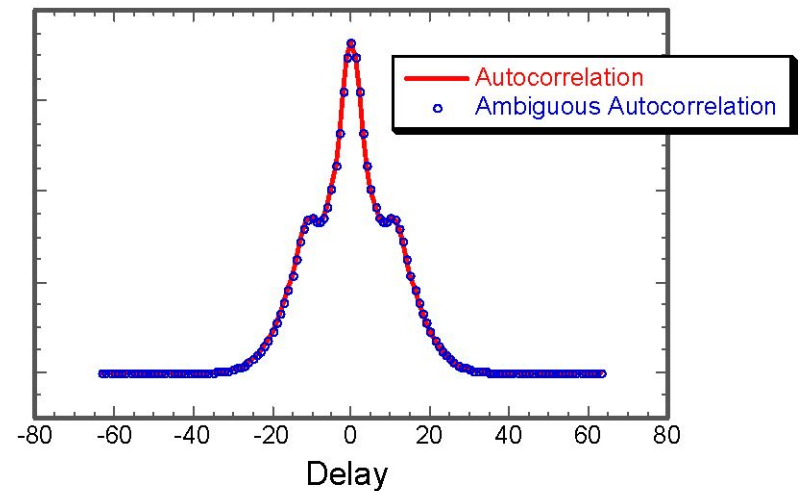
автокорреляционная функция симметрична

$$A^{(2)}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(t)I(t-\tau)dt = [t_1 = t - \tau] = \int_{-\infty}^{+\infty} I(t_1 + \tau)I(t_1)dt_1 = A^{(2)}(-\tau)$$

## Intensity



## Autocorrelation

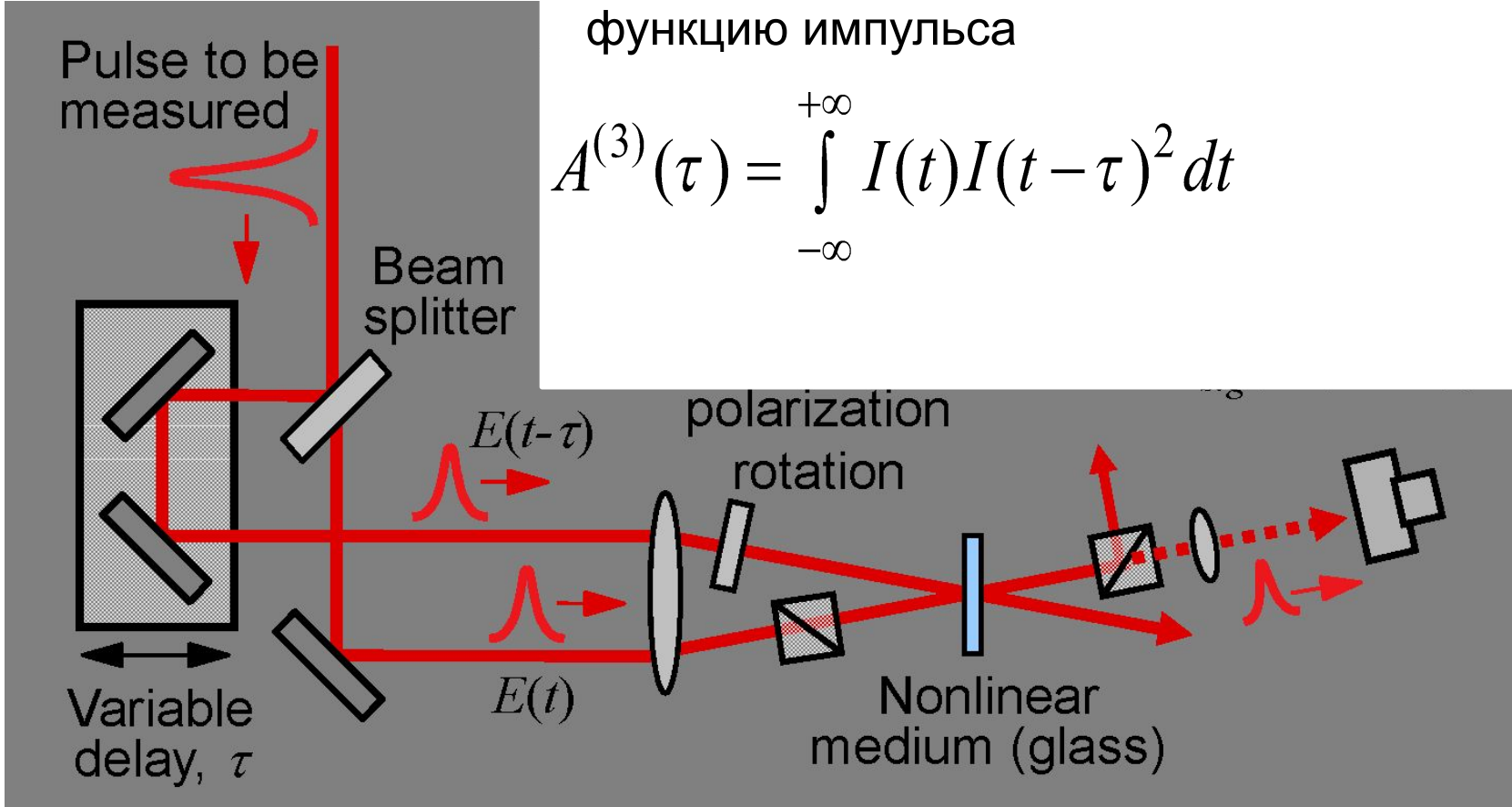


□ неоднозначность в восстановлении импульса

# Вариант решения - кубичные автокорреляционные измерения

Детектор измеряет автокорреляционную функцию импульса

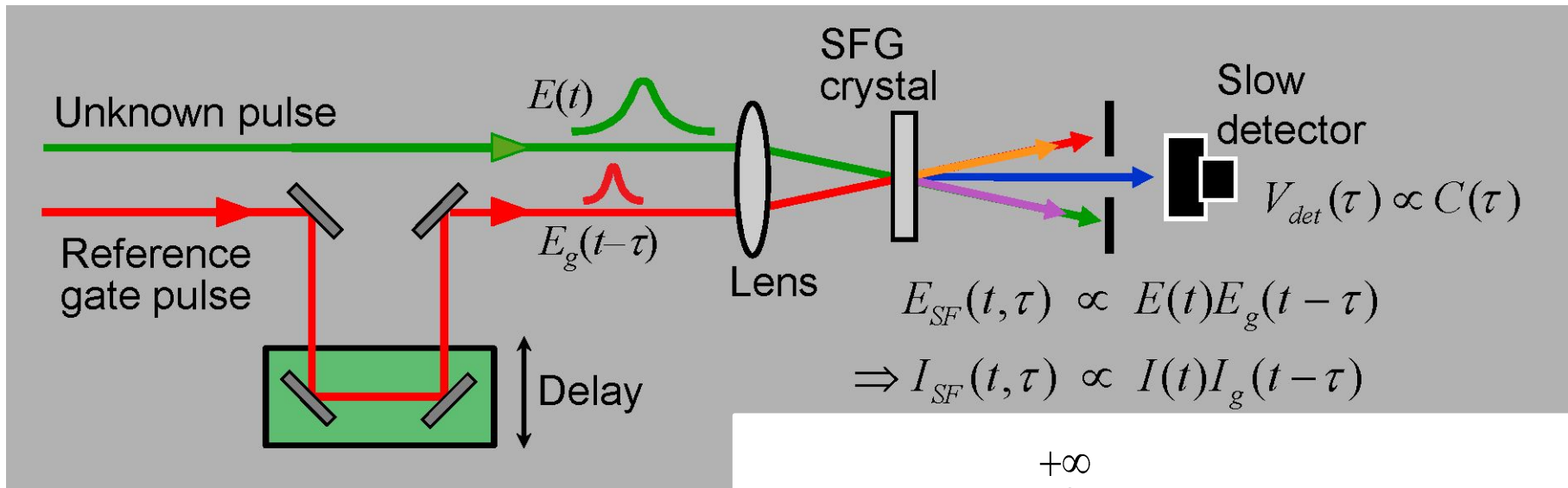
$$A^{(3)}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(t)I(t-\tau)^2 dt$$



автокорреляционная функция несимметрична, но информация о фазе по-прежнему утеряна

# Другой вариант – использование стробирования коротким импульсом

Детектор измеряет кросс-корреляционную функцию импульсов



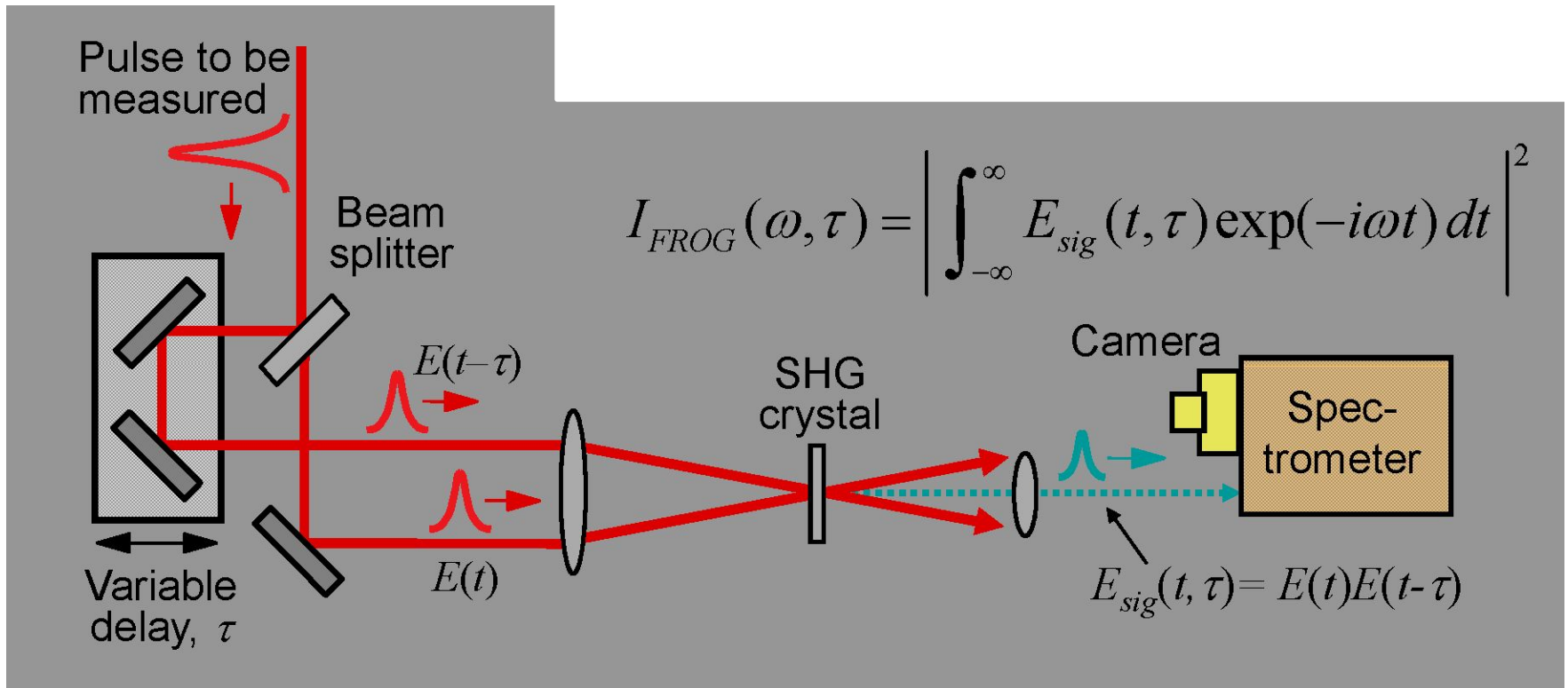
$$C(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(t)I_g(t-\tau)dt$$

требуется референсный импульс, короче измеряемого

# Последний вариант – поставить спектрометр

## Frequency-Resolved Optical Gating (FROG)

детектор после спектрометра измеряет спектрограмму



проблема – решение обратной задачи восстановления импульса