

Современные источники рентгеновского излучения и что нового они привнесли в науку

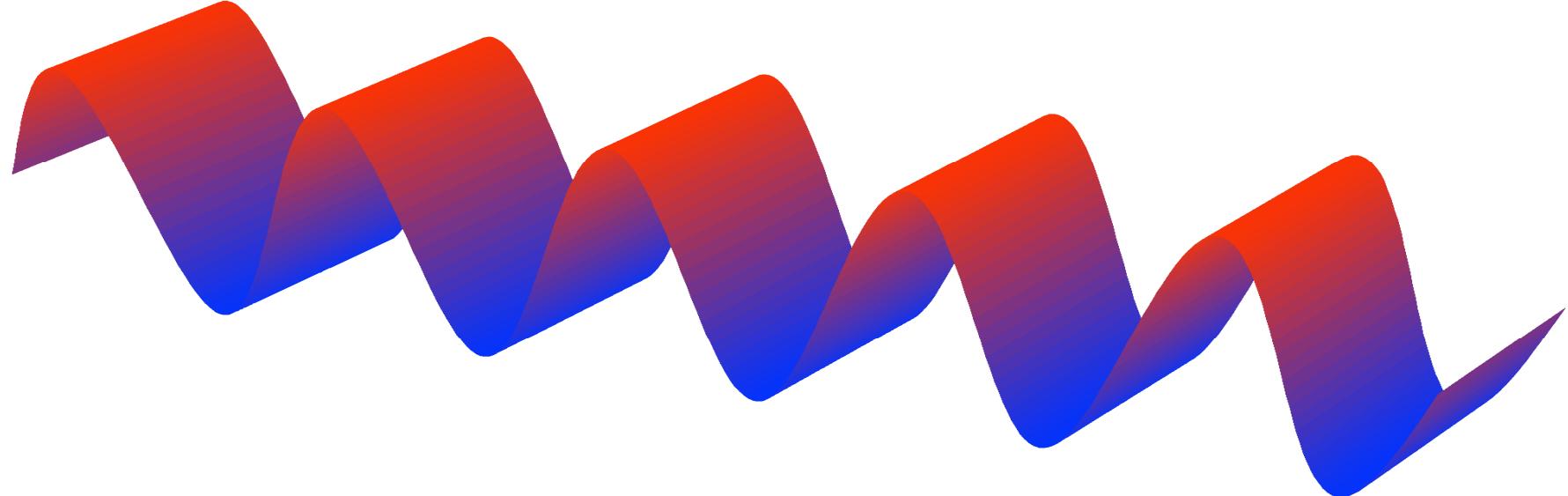
Грызлова Елена Владимировна

**Кандидат физико-математических наук
Старший научный сотрудник
НИИ ядерной физики имени Д.В. Скobelцына
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова**

**Университетские субботы
18 апреля 2015 года, МГУ, Москва**

Рентгеновские

лазеры



Шкала длин электромагнитных волн



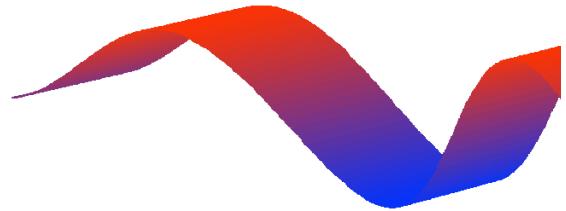
100 км

1мм

радио



Шкала длин электромагнитных волн



100 км

1мм

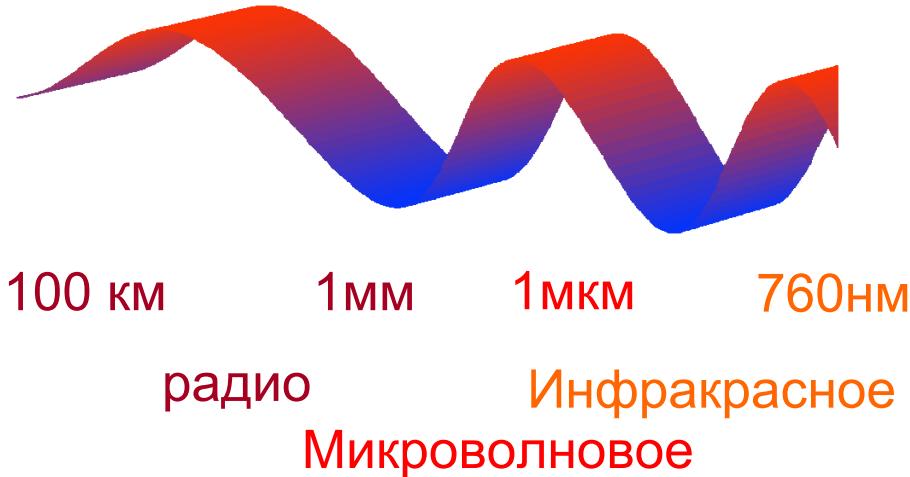
1мкм

радио

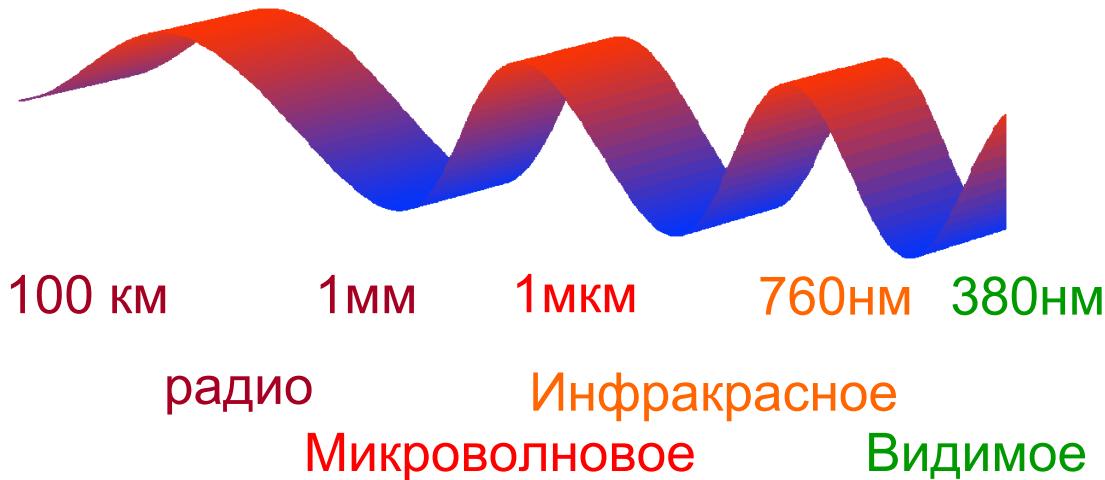
Микроволновое



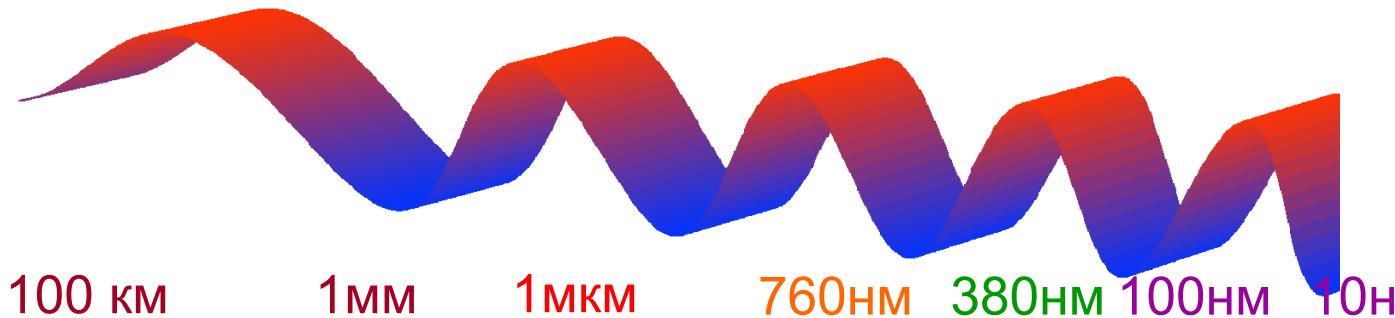
Шкала длин электромагнитных волн



Шкала длин электромагнитных волн



Шкала длин электромагнитных волн



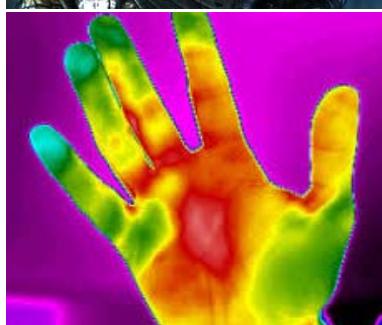
радио

Инфракрасное

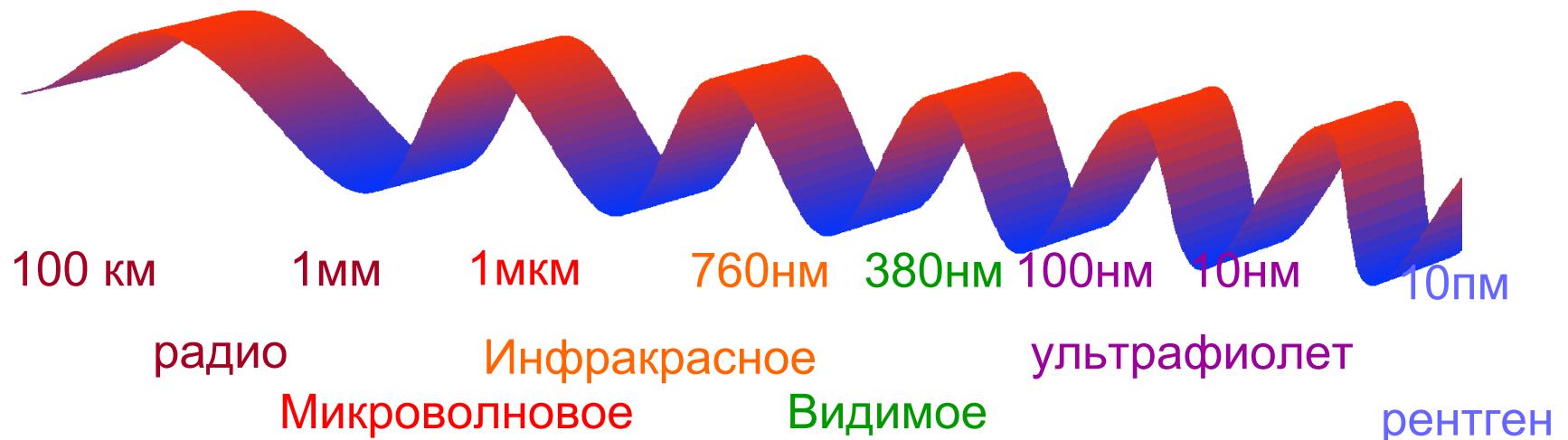
Микроволновое

Видимое

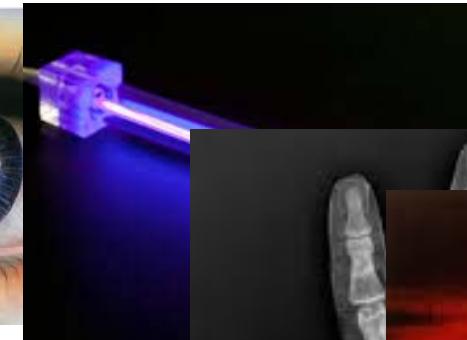
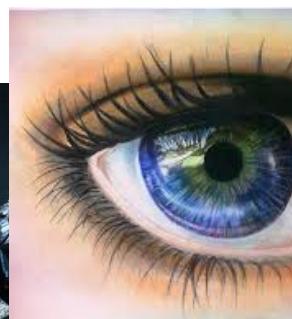
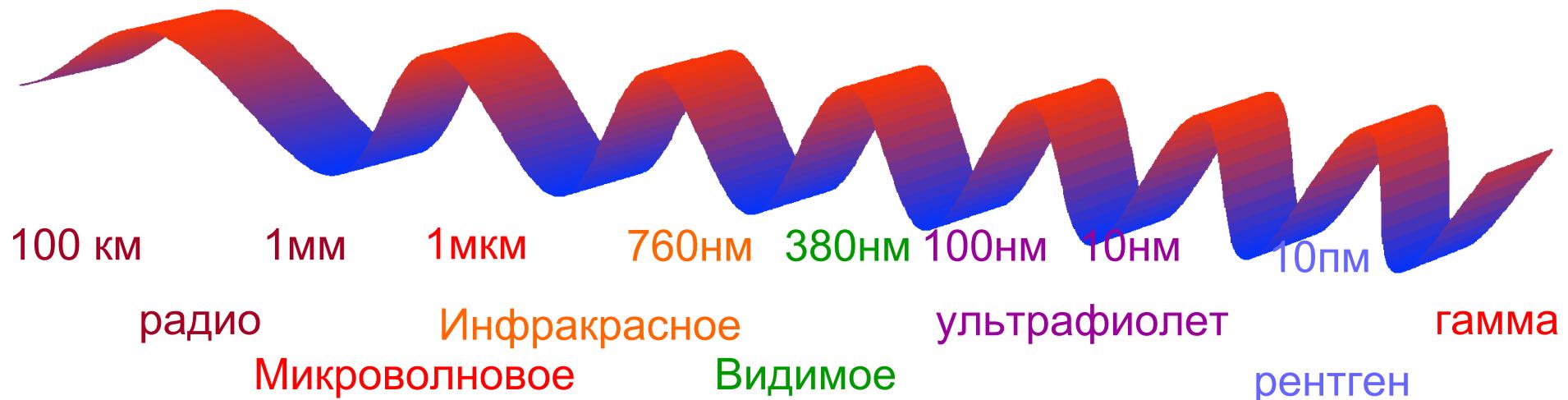
ультрафиолет

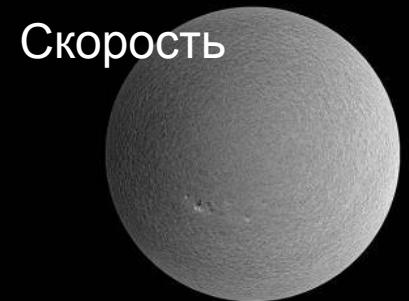


Шкала длин электромагнитных волн

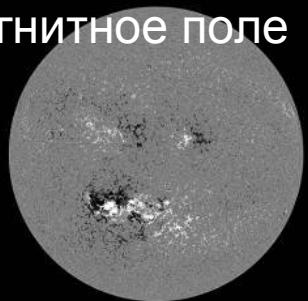


Шкала длин электромагнитных волн





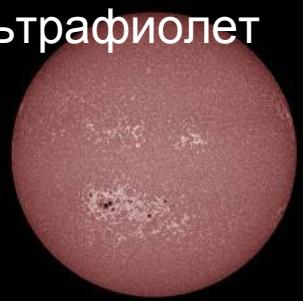
Скорость
HMI Dopplergram
Surface movement
Photosphere



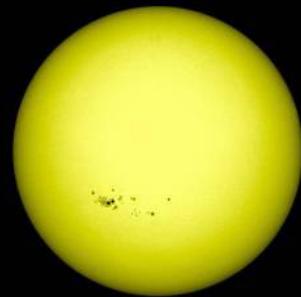
Магнитное поле
HMI Magnetogram
Magnetic field polarity
Photosphere



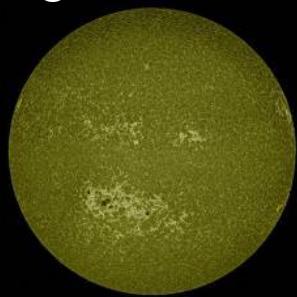
Видимый диапазон
HMI Continuum
Matches visible light
Photosphere



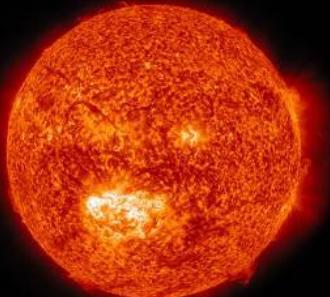
Ультрафиолет
AIA 1700 Å
4500 Kelvin
Photosphere



C
AIA 4500 Å
6000 Kelvin
Photosphere



He
AIA 1600 Å
10,000 Kelvin
Upper photosphere/
Transition region



F
AIA 304 Å
50,000 Kelvin
Transition region/
Chromosphere



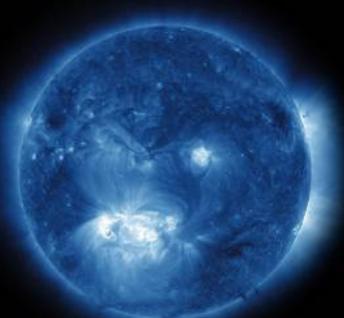
AIA 171 Å
600,000 Kelvin
Upper transition
Region/quiet corona



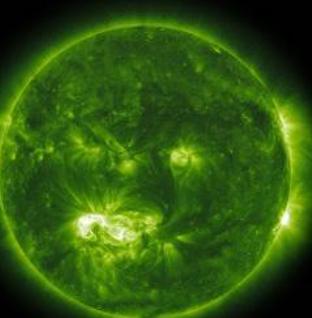
AIA 193 Å
1 million Kelvin
Corona/flare plasma



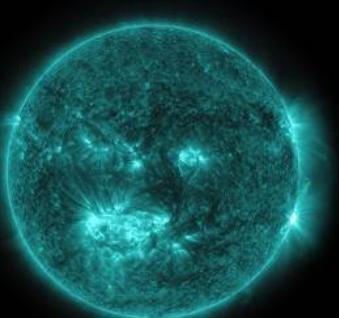
AIA 211 Å
2 million Kelvin
Active regions



AIA 335 Å
2.5 million Kelvin
Active regions

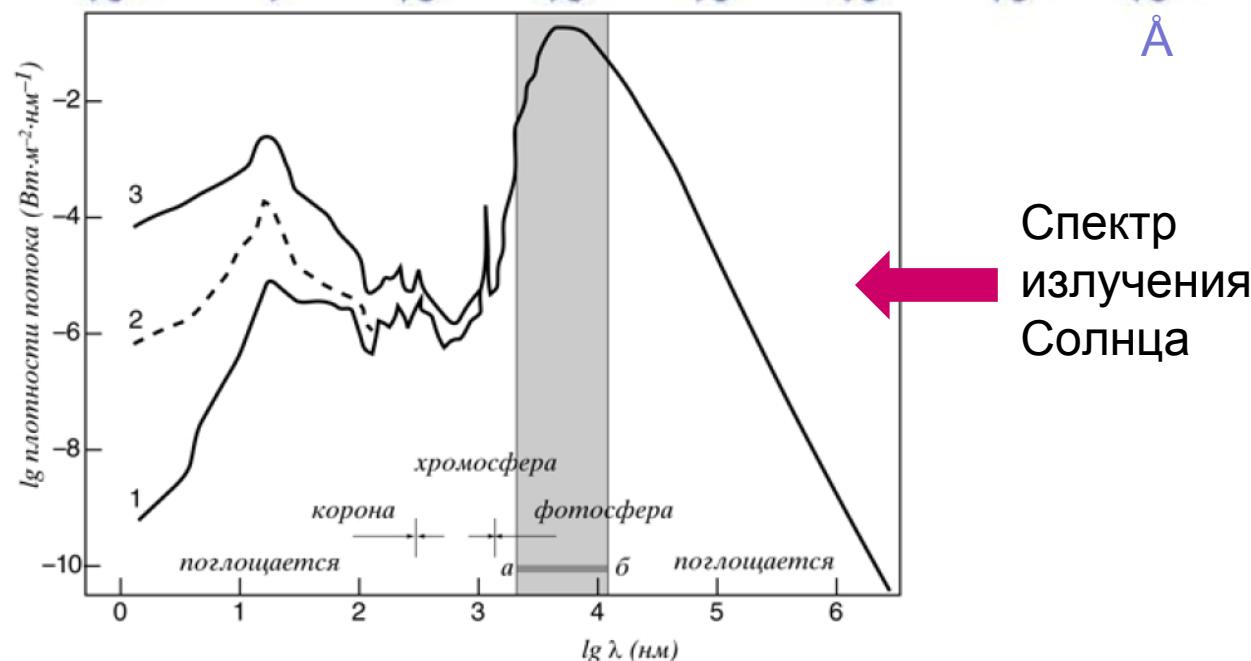
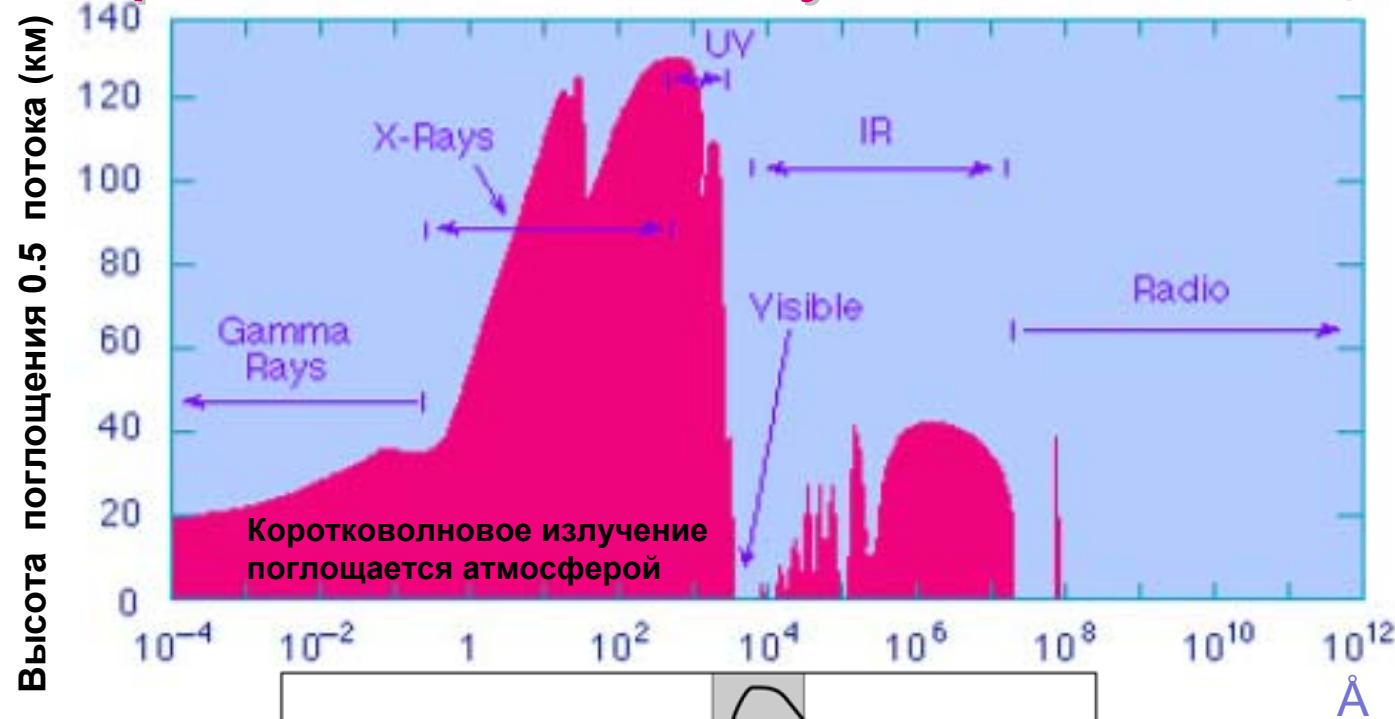


AIA 094 Å
6 million Kelvin
Flaring regions

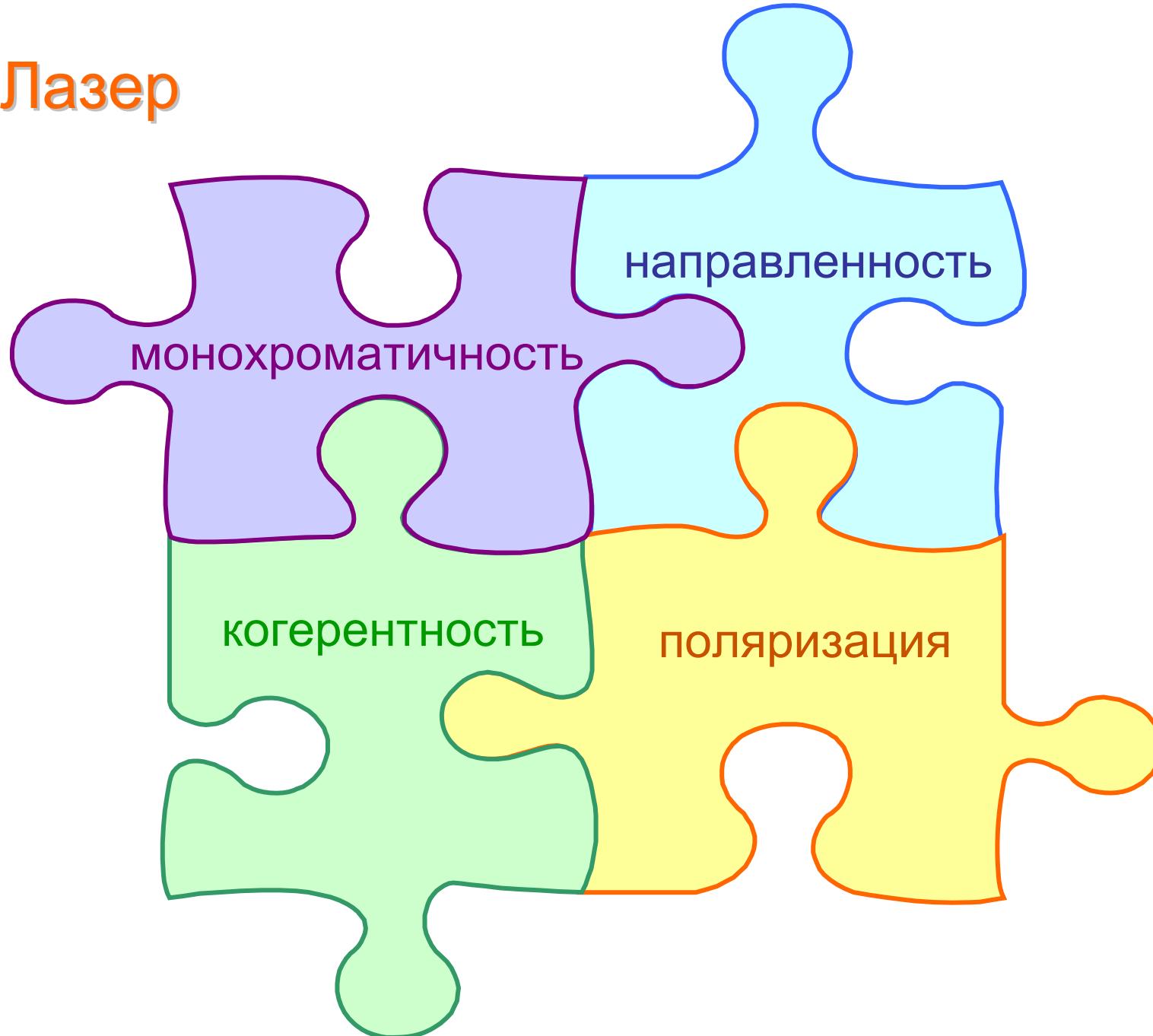


AIA 131 Å
10 million Kelvin
Flaring regions

Электромагнитное излучение Солнца на Земле



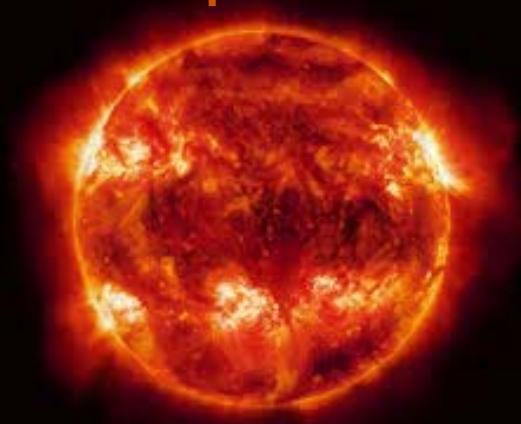
Лазер



Лазер



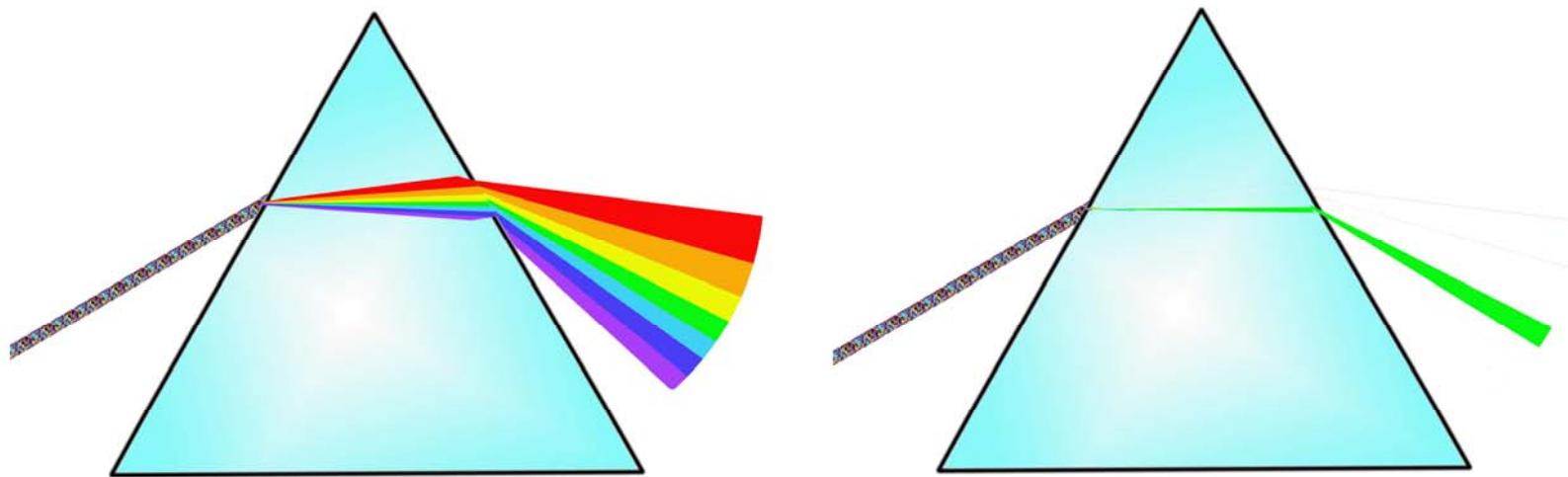
Солнце



Пульсар



Лазер



Лазер



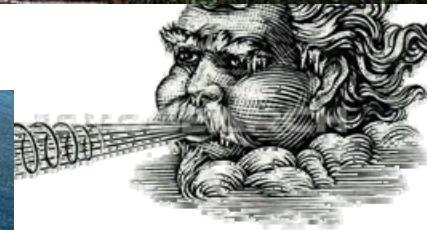
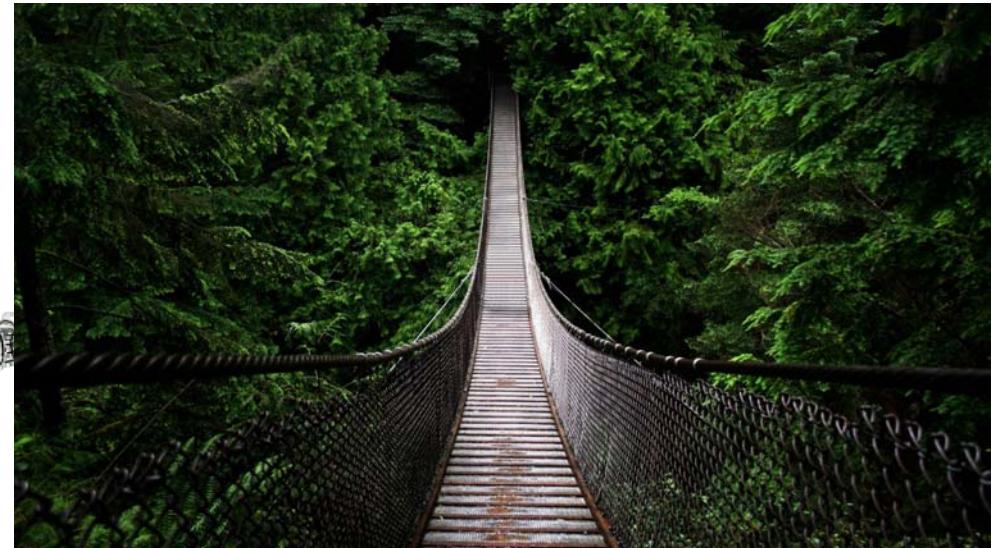
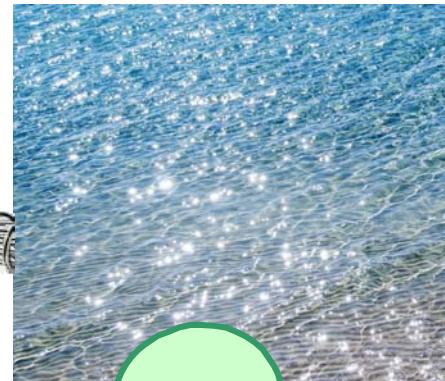
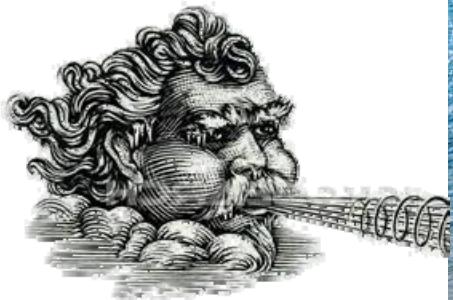
$$\alpha \cos(\omega t) + \beta \cos(\omega t + \varphi)$$

Лазер



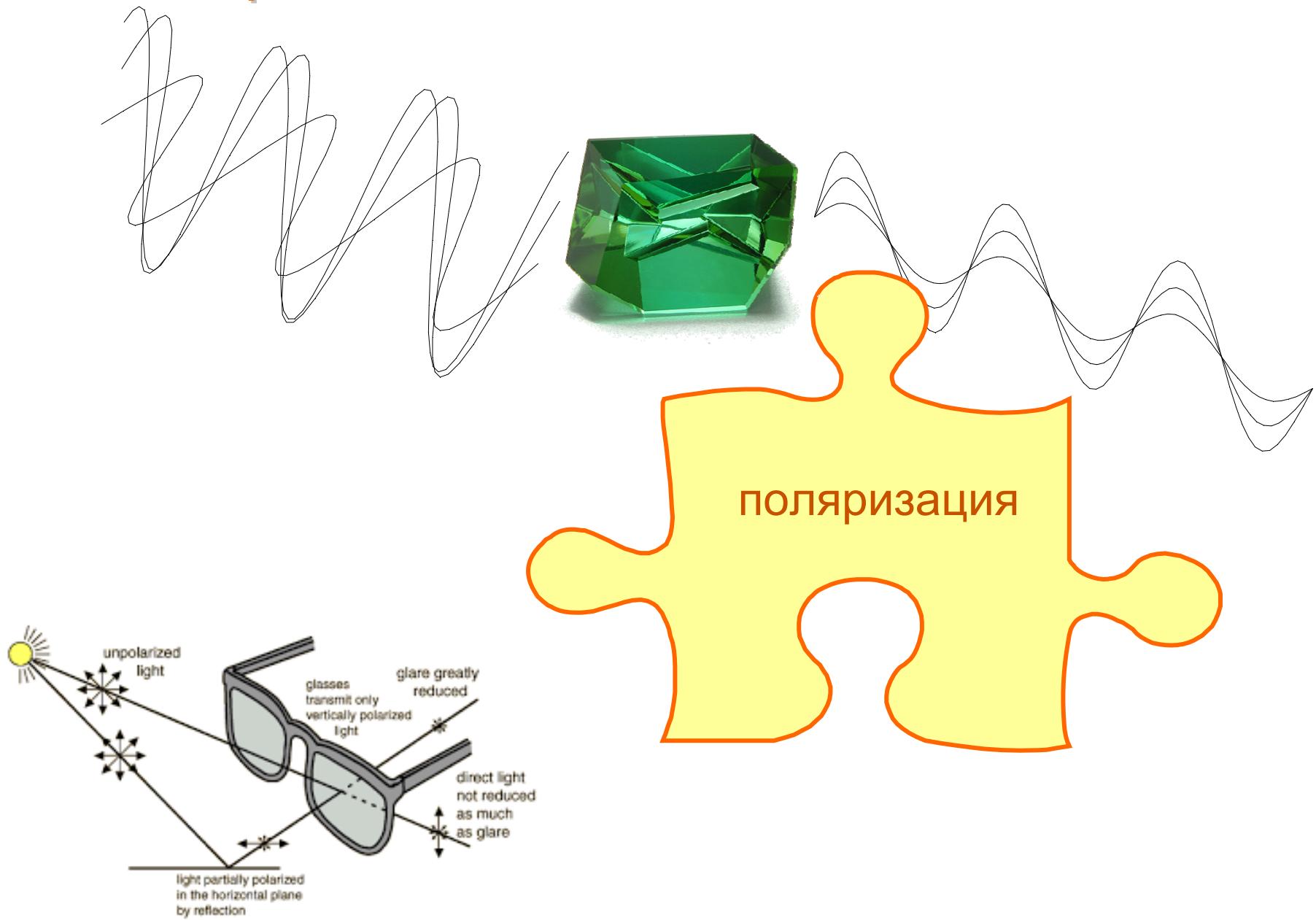
$$\alpha \cos(\omega t) + \beta \cos(\omega t + \varphi)$$

Лазер



$$\alpha \cos(\omega t) + \beta \cos(\omega t + \varphi)$$

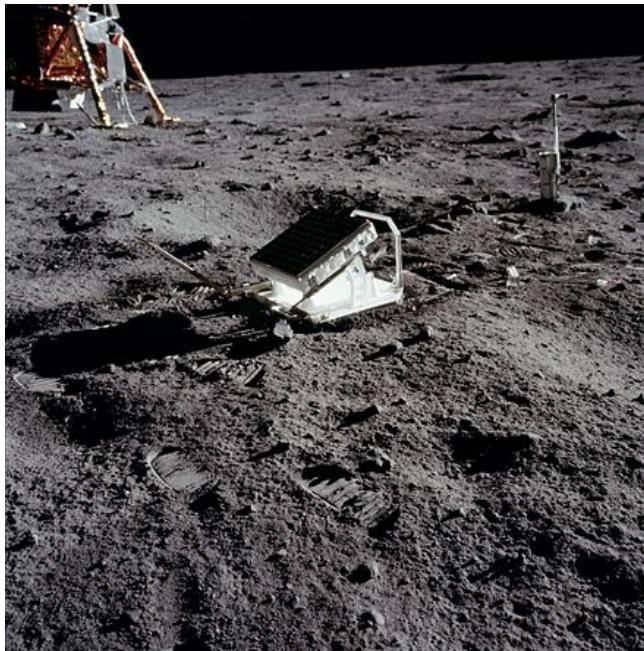
Лазер



Лазер



Измерение расстояния до луны



Углковый отражатель,
установленный на луне
Apollo 11



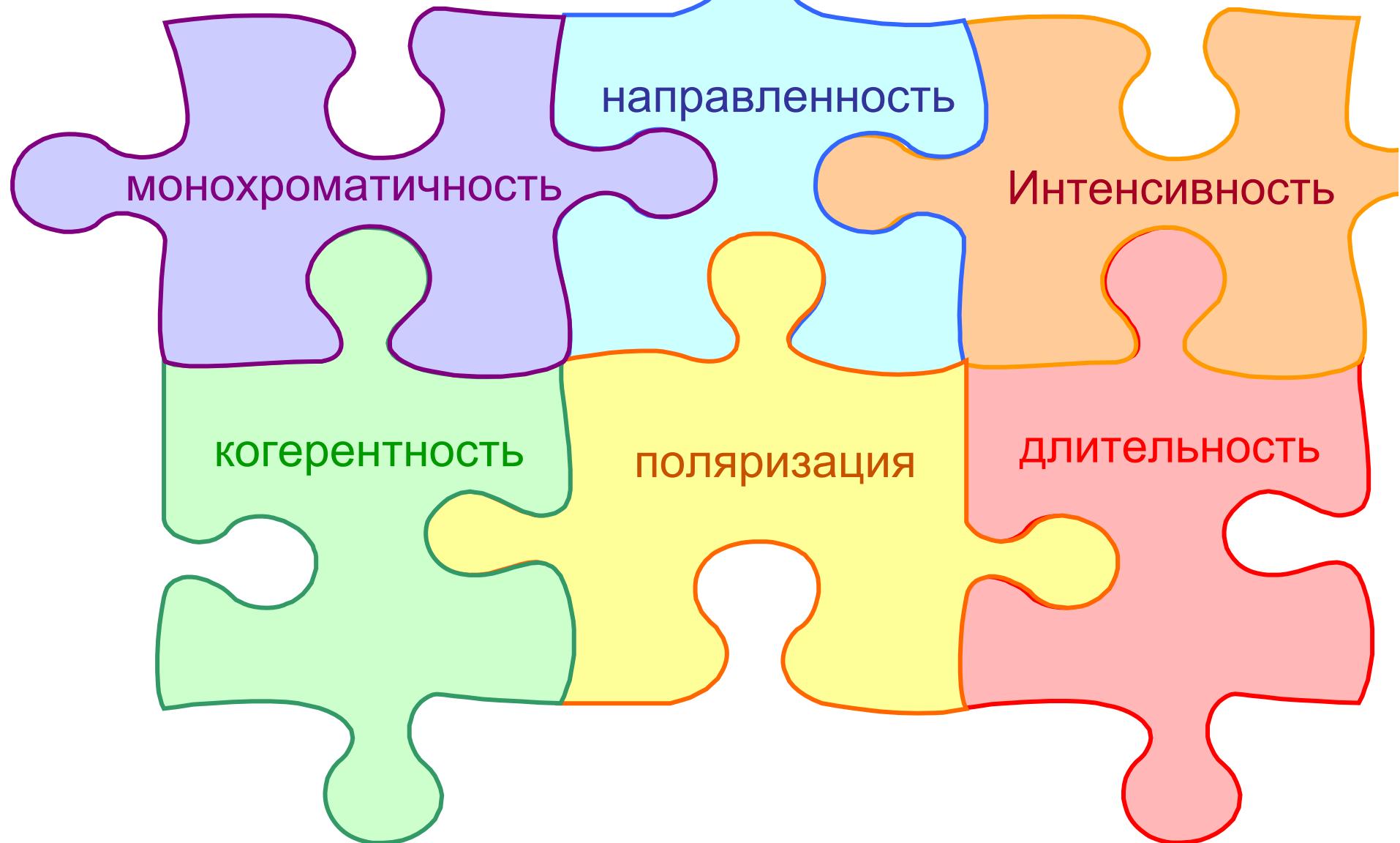
В 1962 году одновременно МТИ и Крымской
астрономической обсерватории измерили
расстояние до луны, используя лазер

384 000 км ~ $5 \cdot 10^{14}$ длин волн

Лазер на свободных электронах



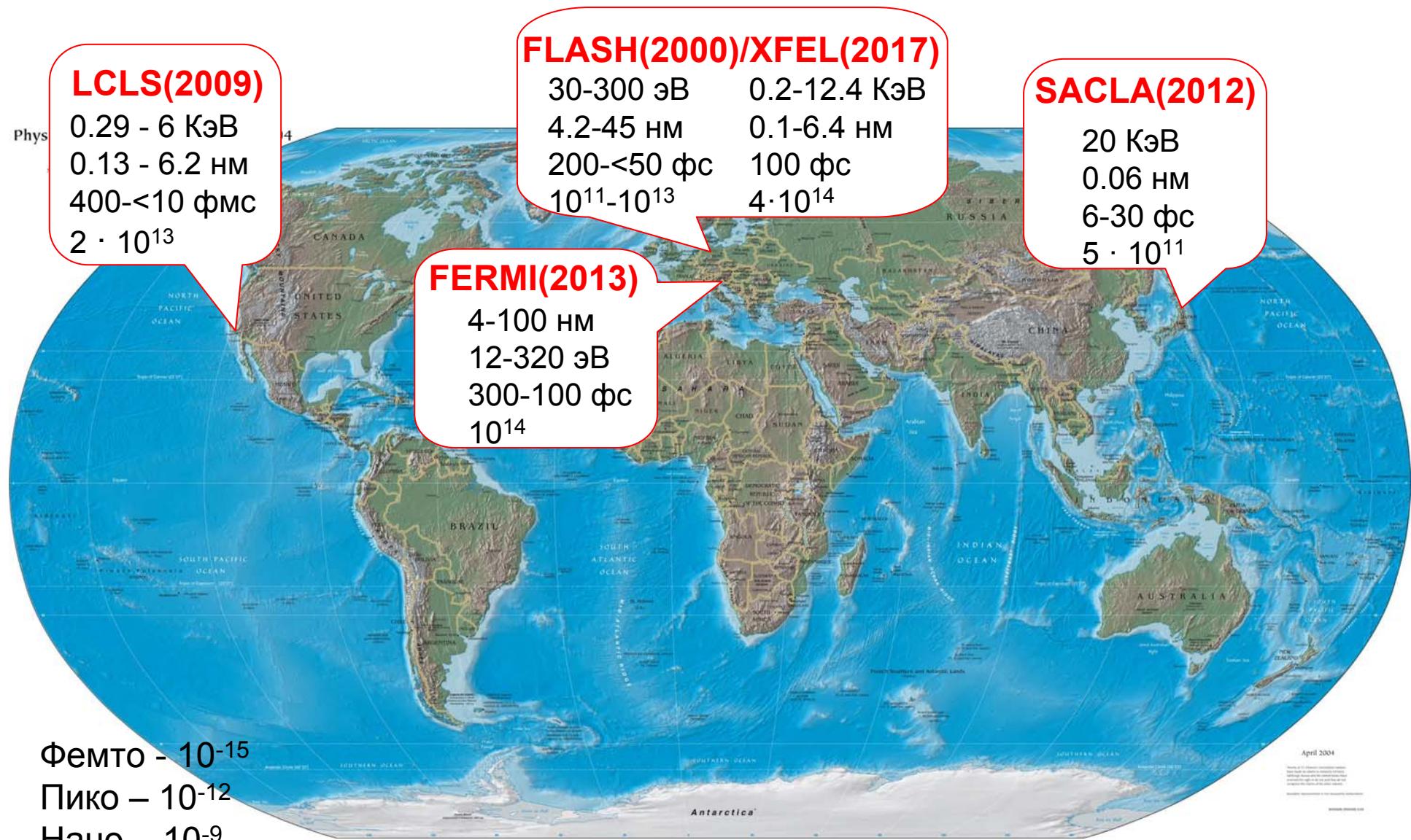
Лазер на свободных электронах



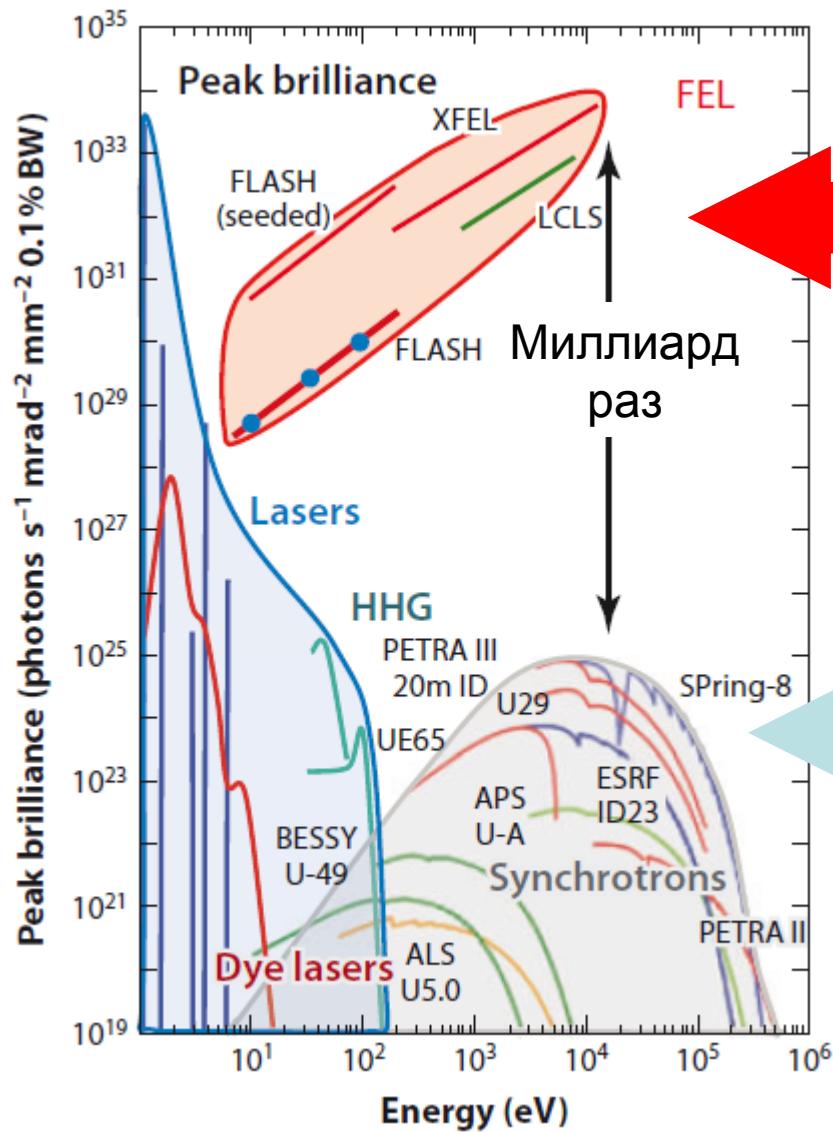
Лазер на свободных электронах



Рентгеновские лазеры



Сравнение источников излучения



Солнце

0.14 Вт/см^2

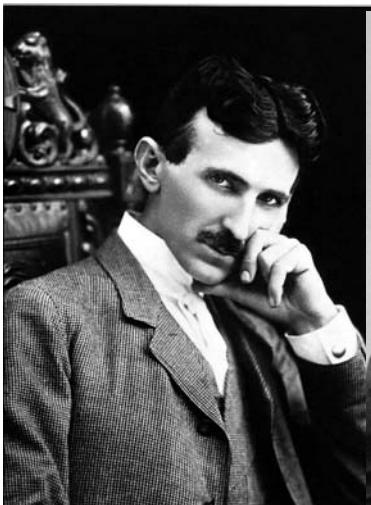
Лазерная указка

0.03 Вт/см^2

Лазерная хирургия

10^{12} Вт/см^2

Генерация излучения



Н. Тесла



В.К. Рентген



Д. Д. Иваненко



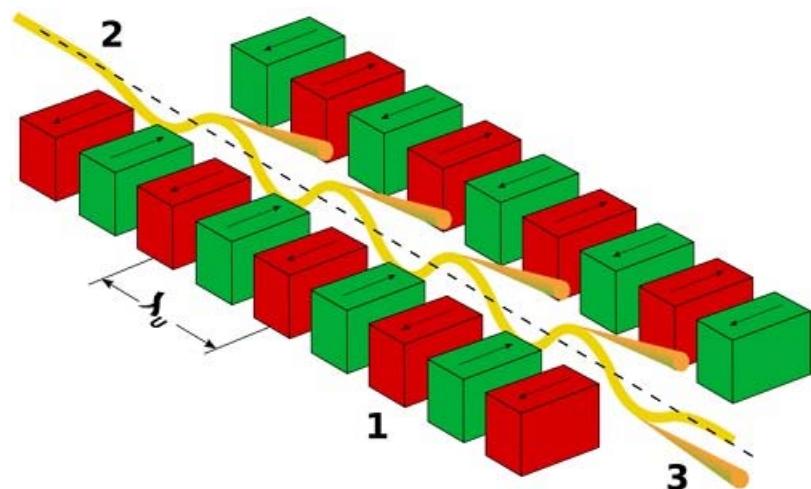
И. Я. Померанчук



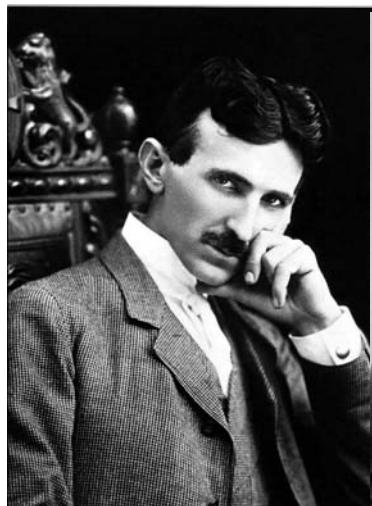
J. S. Schwinger

1985-86 описали существование
тормозного излучения

1944-1946 Разработали теорию синхротронного
излучения для кольцевых ускорителей частиц



Генерация излучения



Н. Тесла



В.К. Рентген



Д. Д. Иваненко

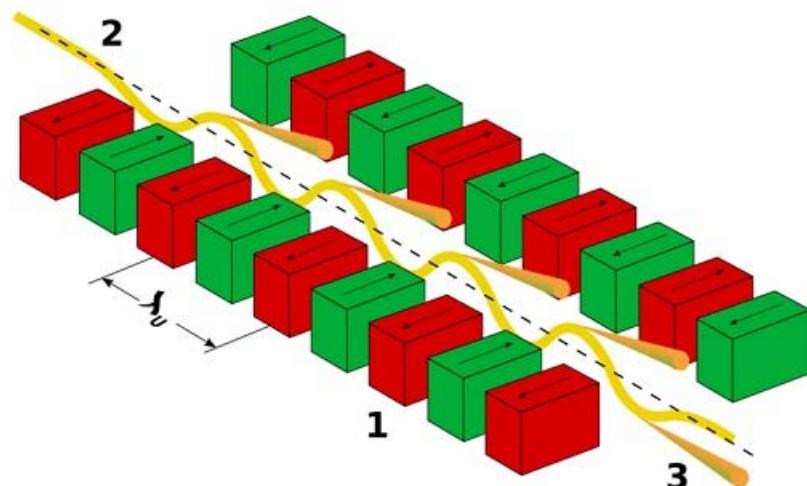


И. Я. Померанчук



J. S. Schwinger

1985-86 описали существование тормозного излучения



Н.А. Винокуров



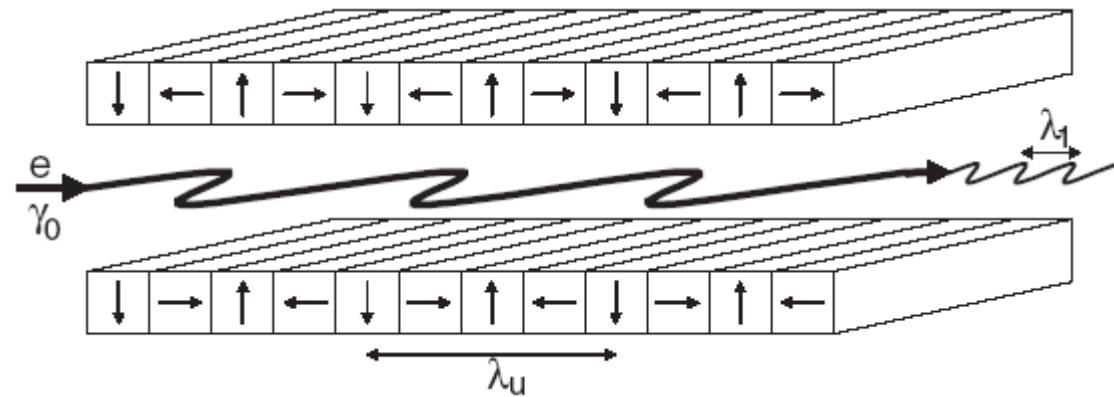
А.Н. Скринский

1977 – Создали модификацию клистрона – лазер на свободных электронах

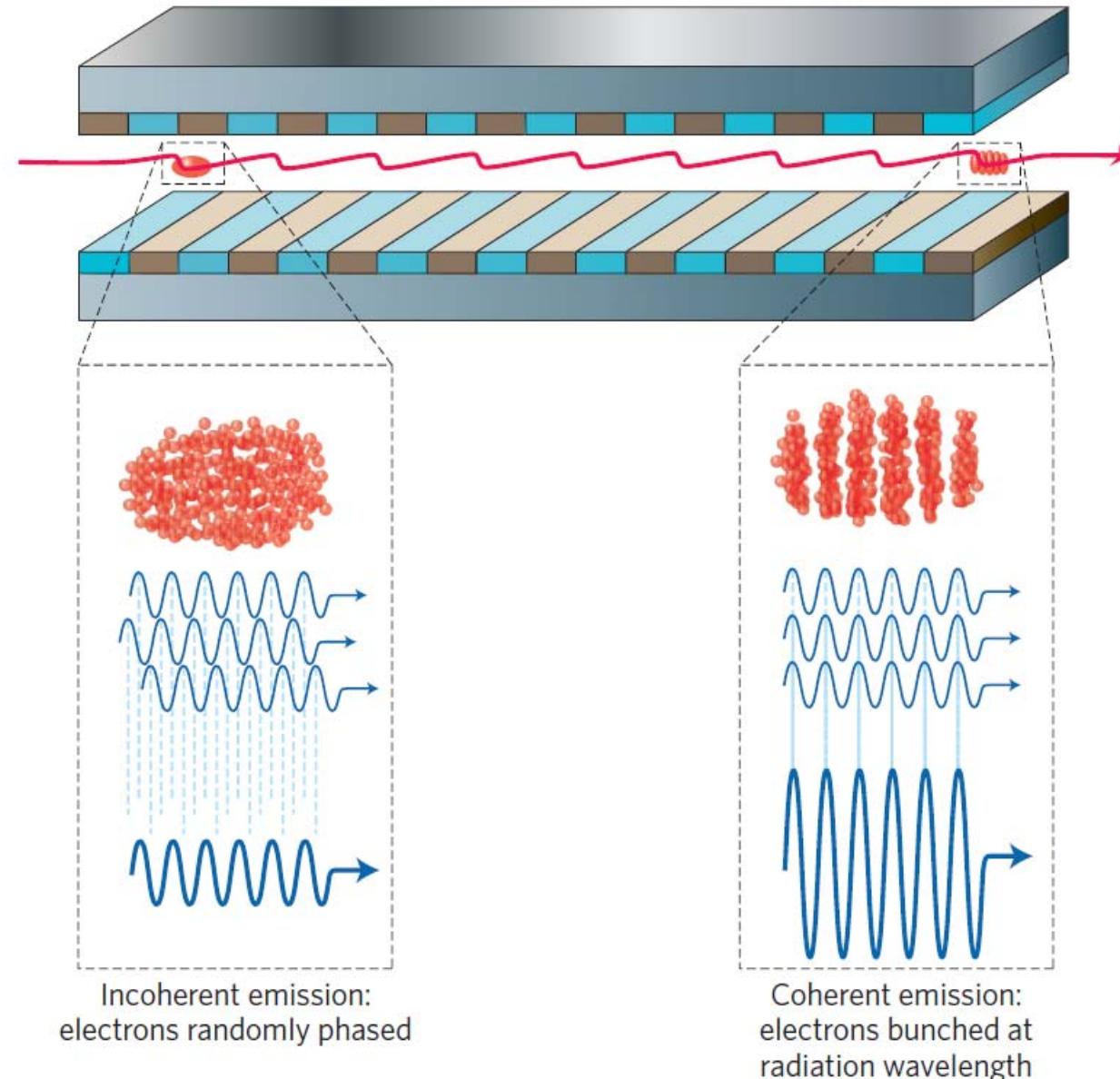
Генерация излучения



The undulator section in the FLASH tunnel



Формирование сгустков электронов



Интенсивность $\sim n$

Интенсивность $\sim n^2$











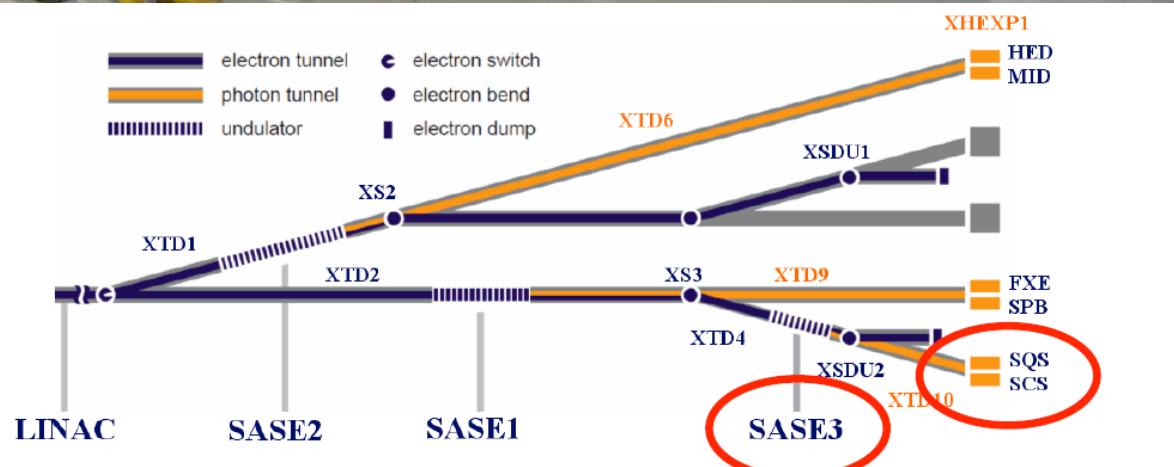


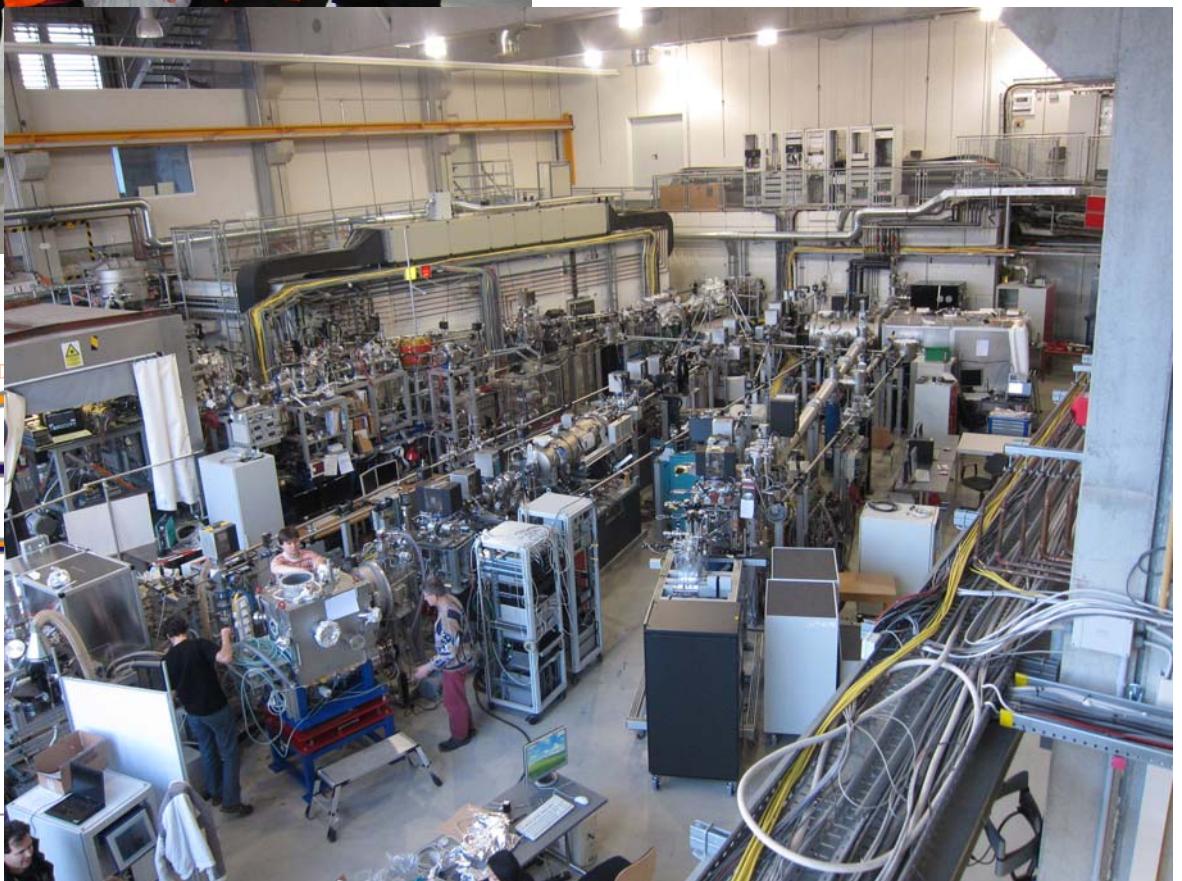
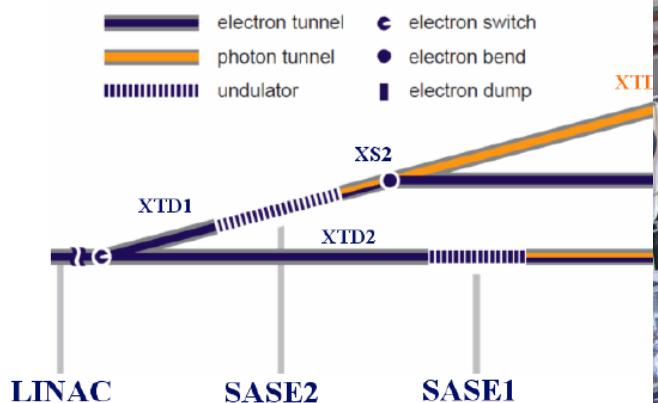




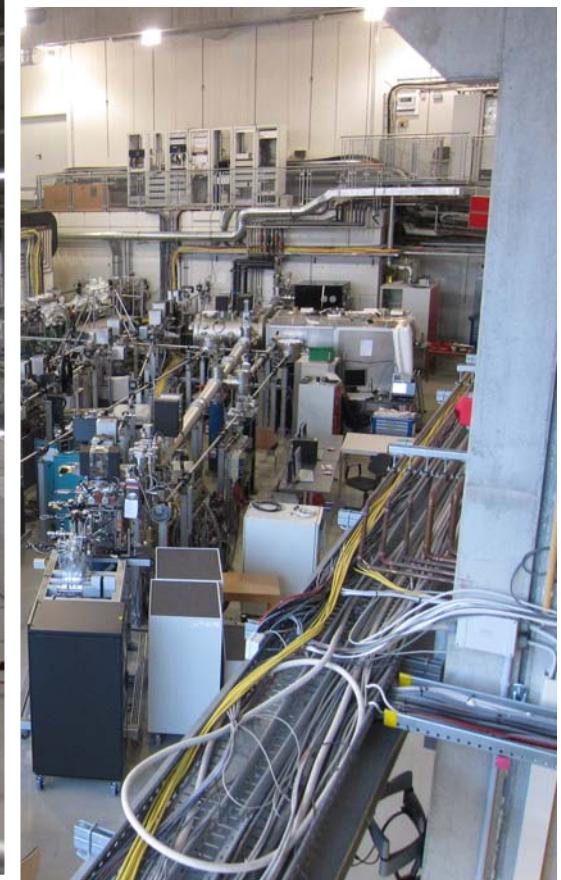
European XFEL

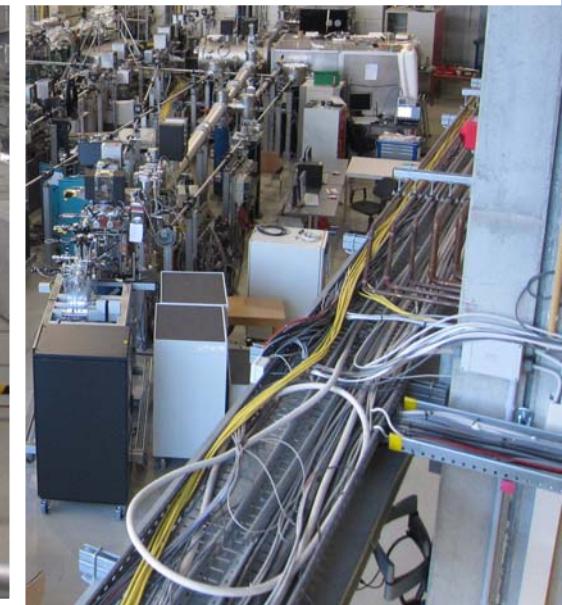




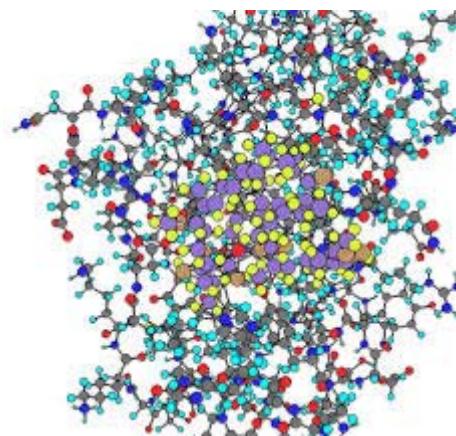


M. Meyer, XFEL UM2015



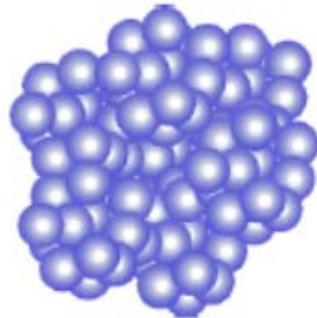


Размеры микрообъектов



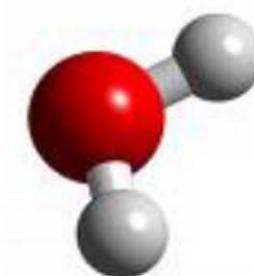
биомолекула

10^{-7} м



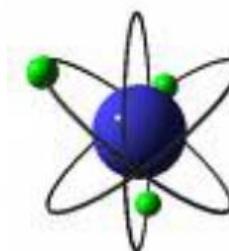
кластер

10^{-9} м



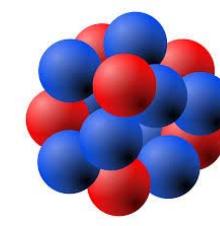
молекула

$\sim 10^{-10}$ м
Воды $3 \cdot 10^{-10}$ м



атом

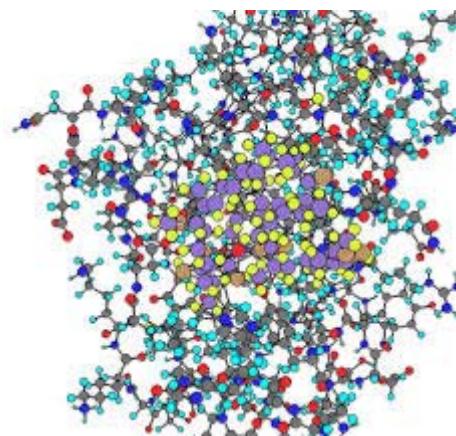
10^{-10} м



ядро

10^{-15} м

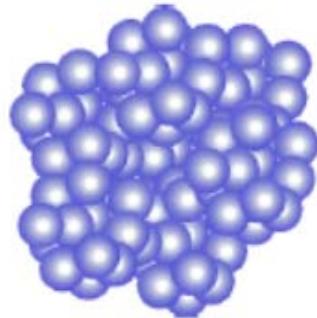
Размеры микрообъектов



биомолекула

10^{-7} м

Длина волны
красного света в
два раза больше
чем длина ДНК



клuster

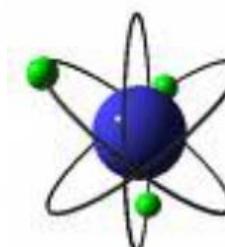
10^{-9} м



молекула

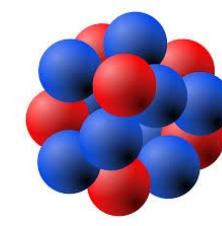
$\sim 10^{-10}$ м

Воды $3 \cdot 10^{-10}$ м



атом

10^{-10} м



ядро

10^{-15} м

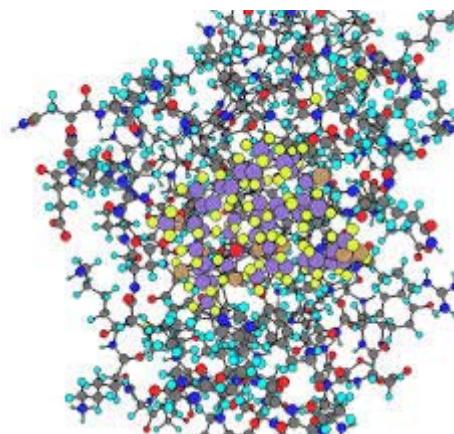
Небольшие квантовые системы

Размеры микрообъектов

Получение изображений

Изучение динамики

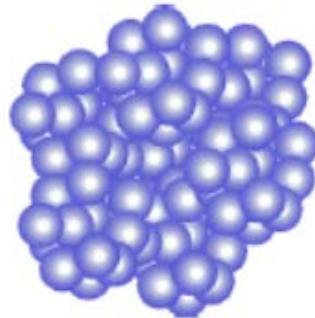
Нелинейные явления



биомолекула

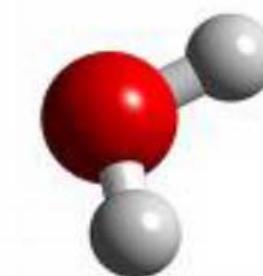
10^{-7} м

Длина волны
красного света в
два раза больше
чем длина ДНК



клuster

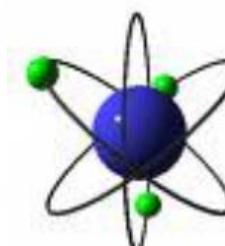
10^{-9} м



молекула

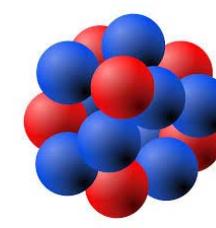
$\sim 10^{-10}$ м

Воды $3 \cdot 10^{-10}$ м



атом

10^{-10} м

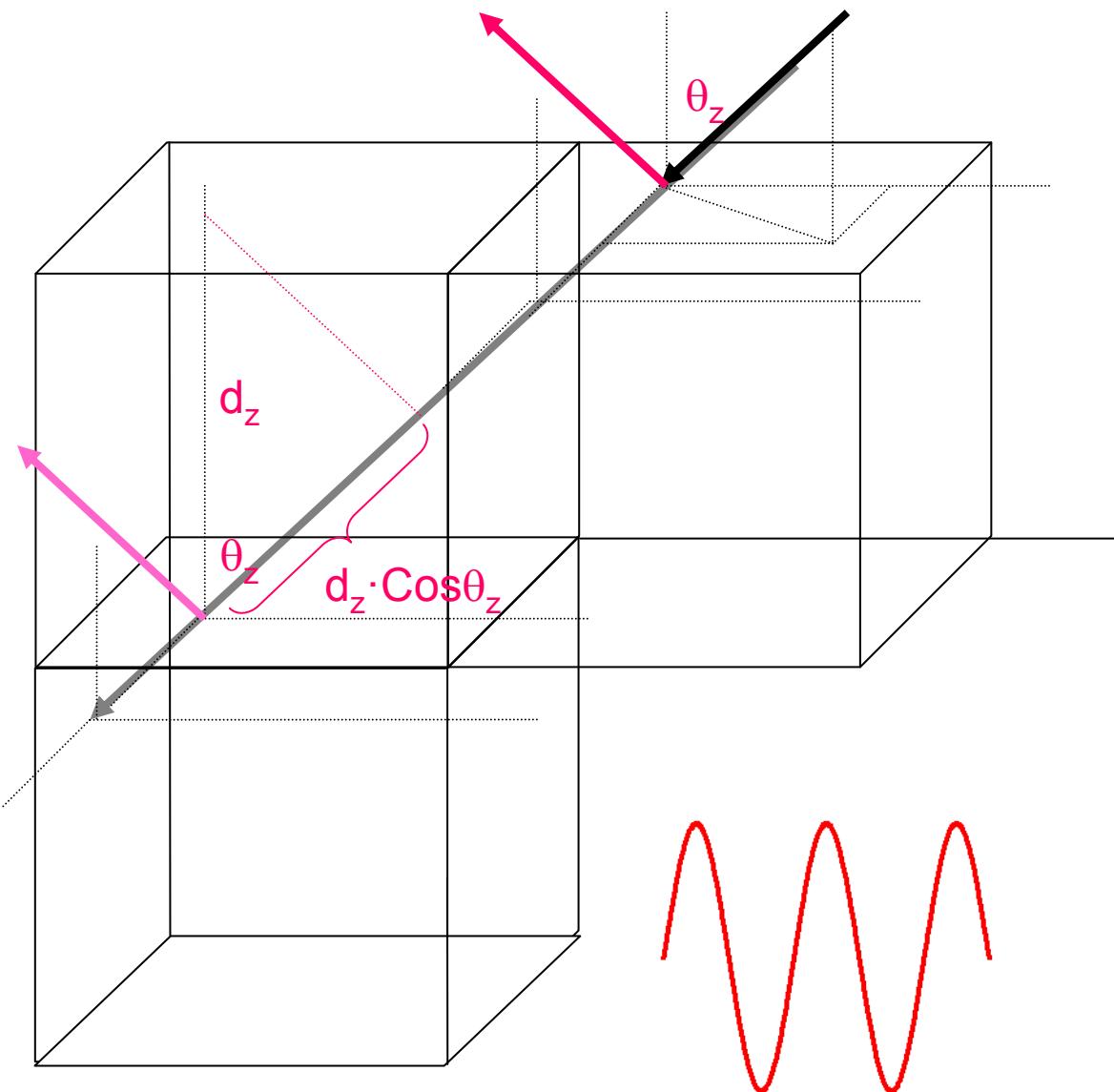


ядро

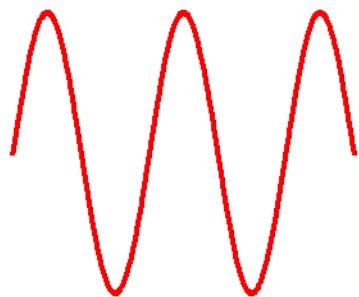
10^{-15} м

Небольшие квантовые системы

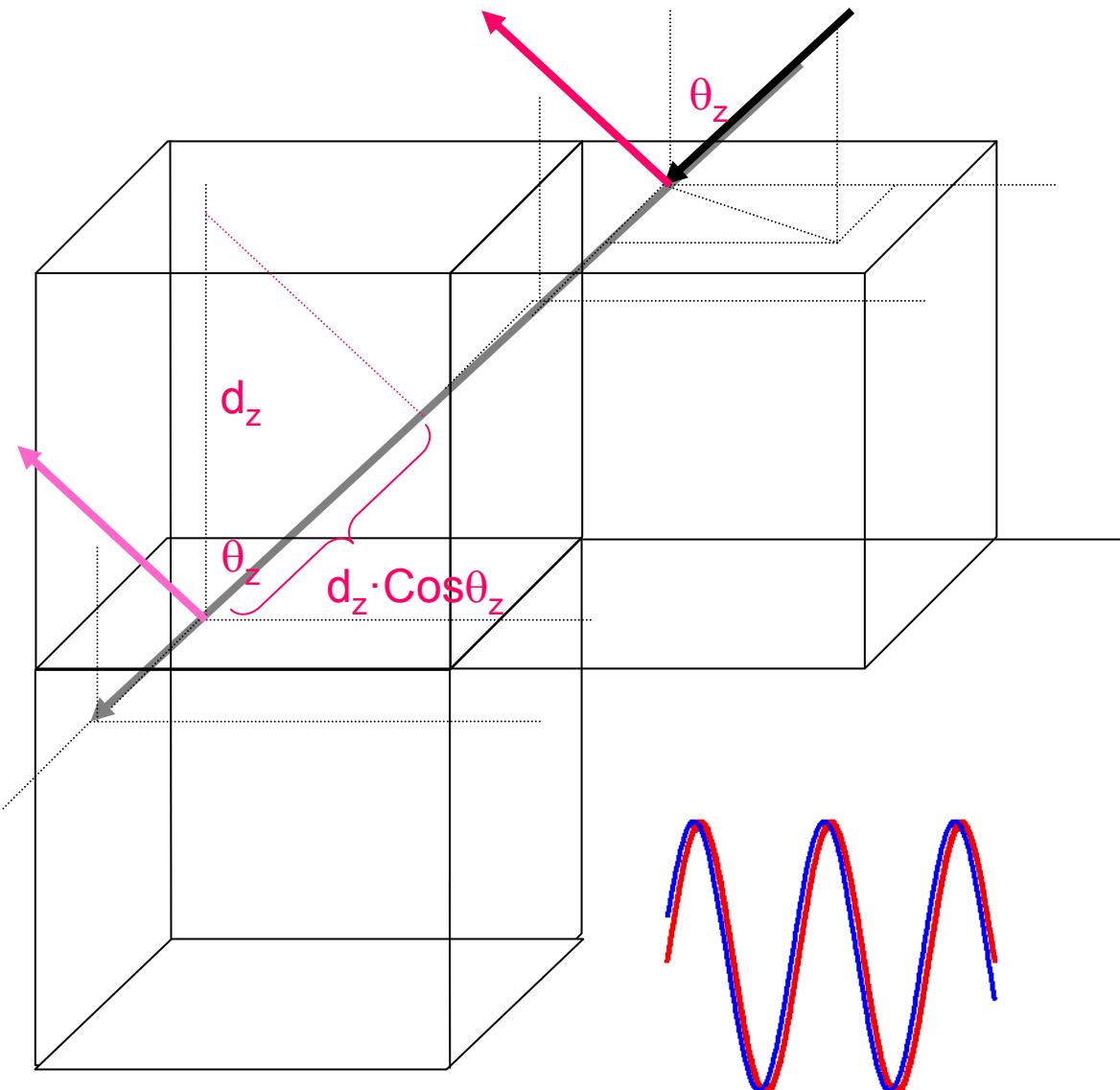
Дифракция рентгеновских лучей



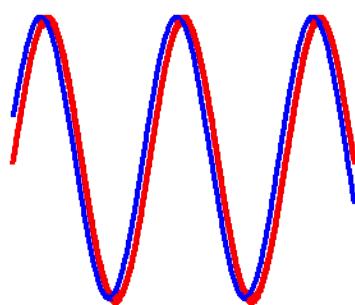
$$2d_z \cos\theta_z = n\lambda;$$



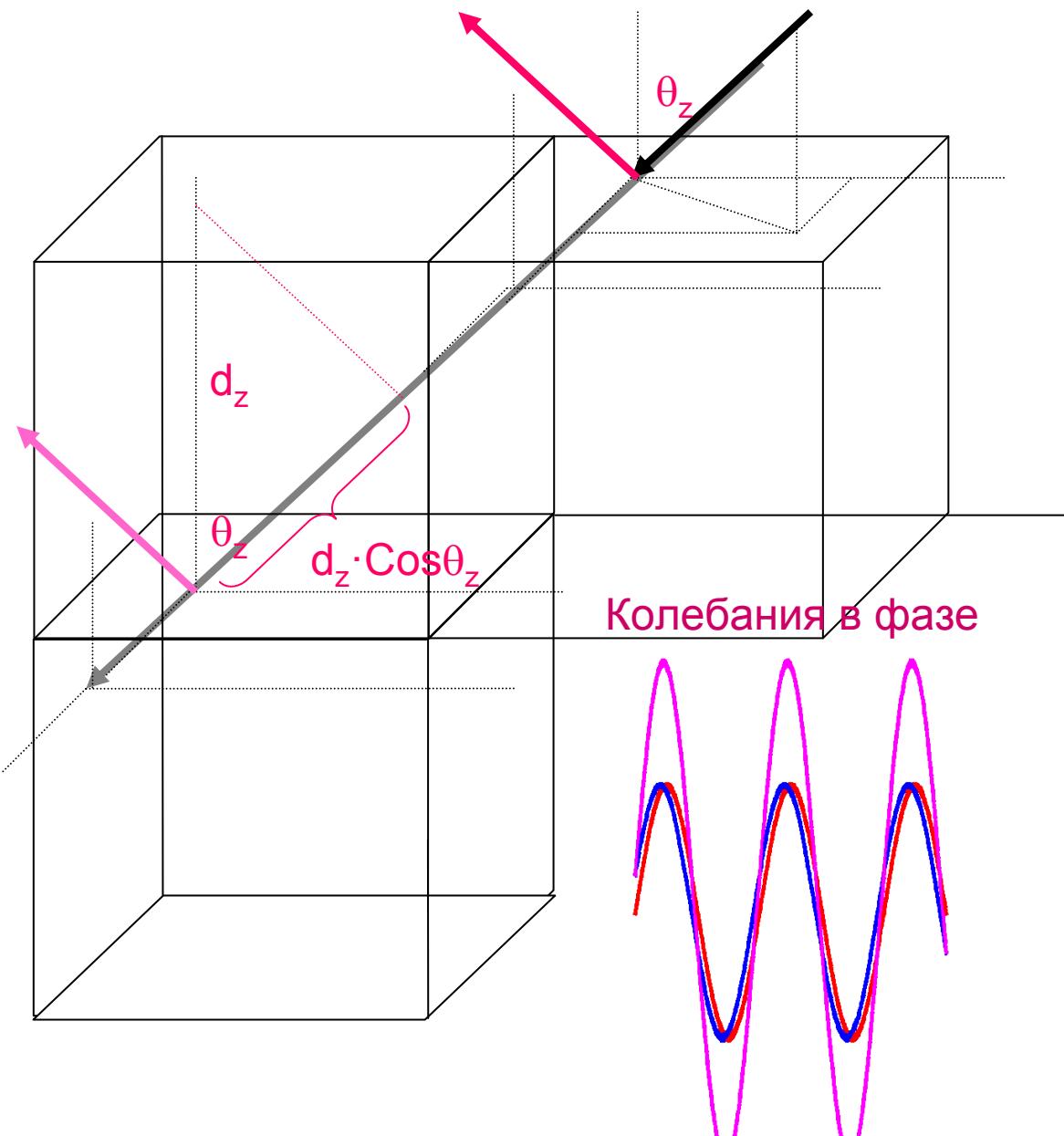
Дифракция рентгеновских лучей



$$2d_z \cos\theta_z = n\lambda;$$

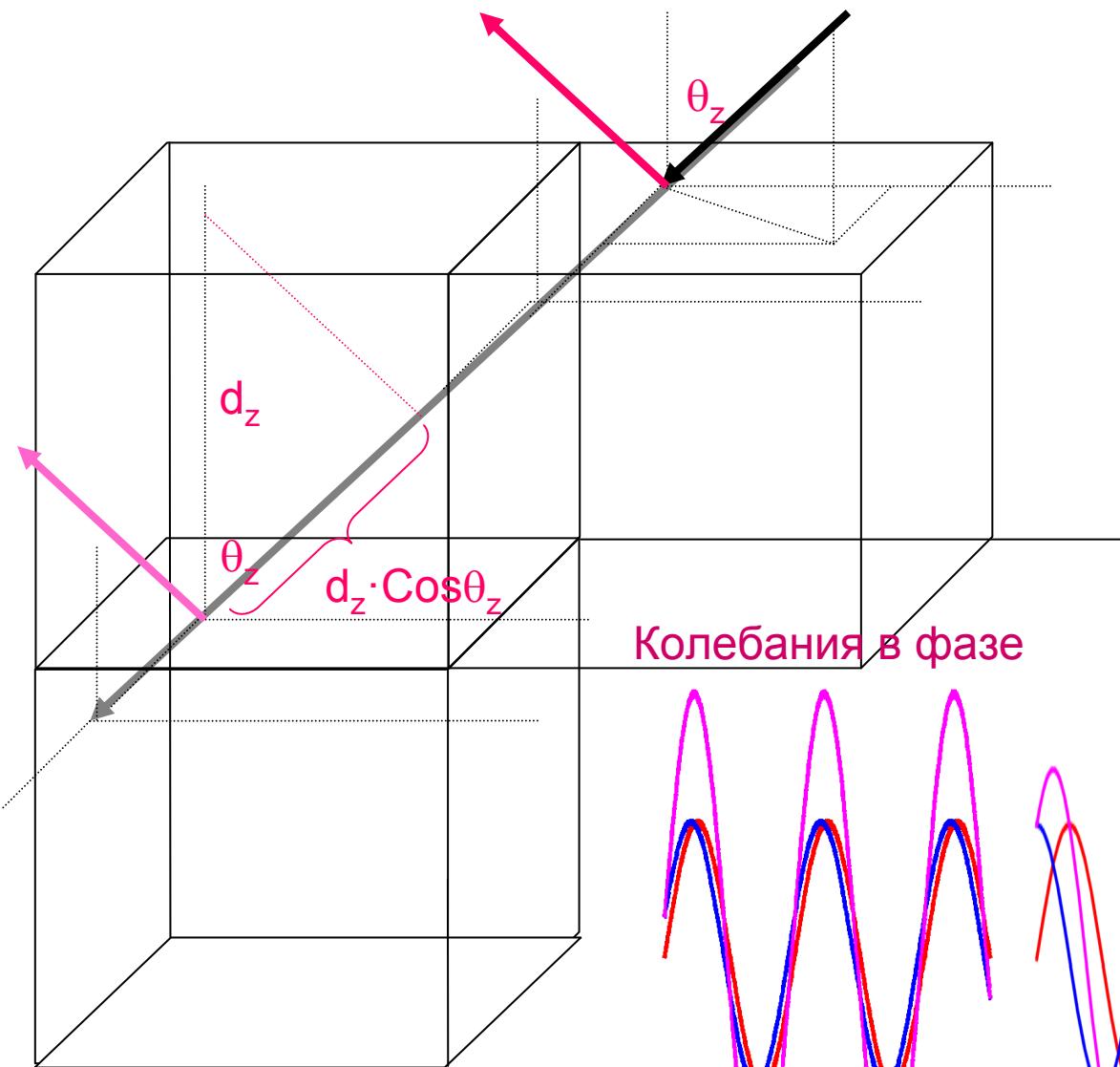


Дифракция рентгеновских лучей

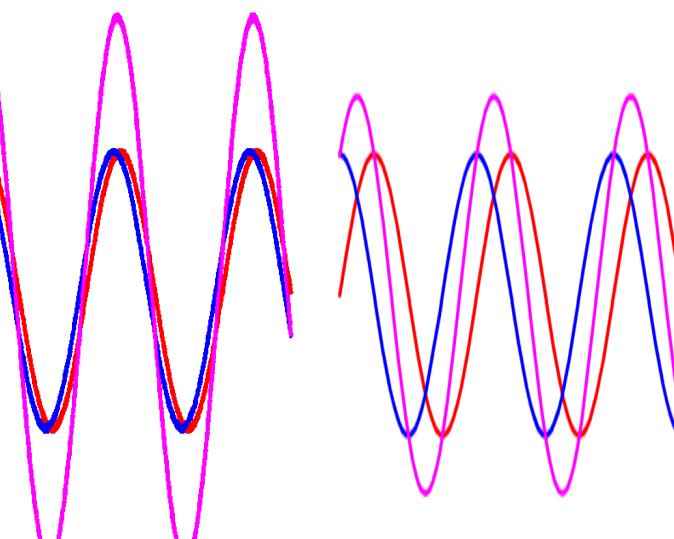


$$2d_z \cos \theta_z = n\lambda;$$

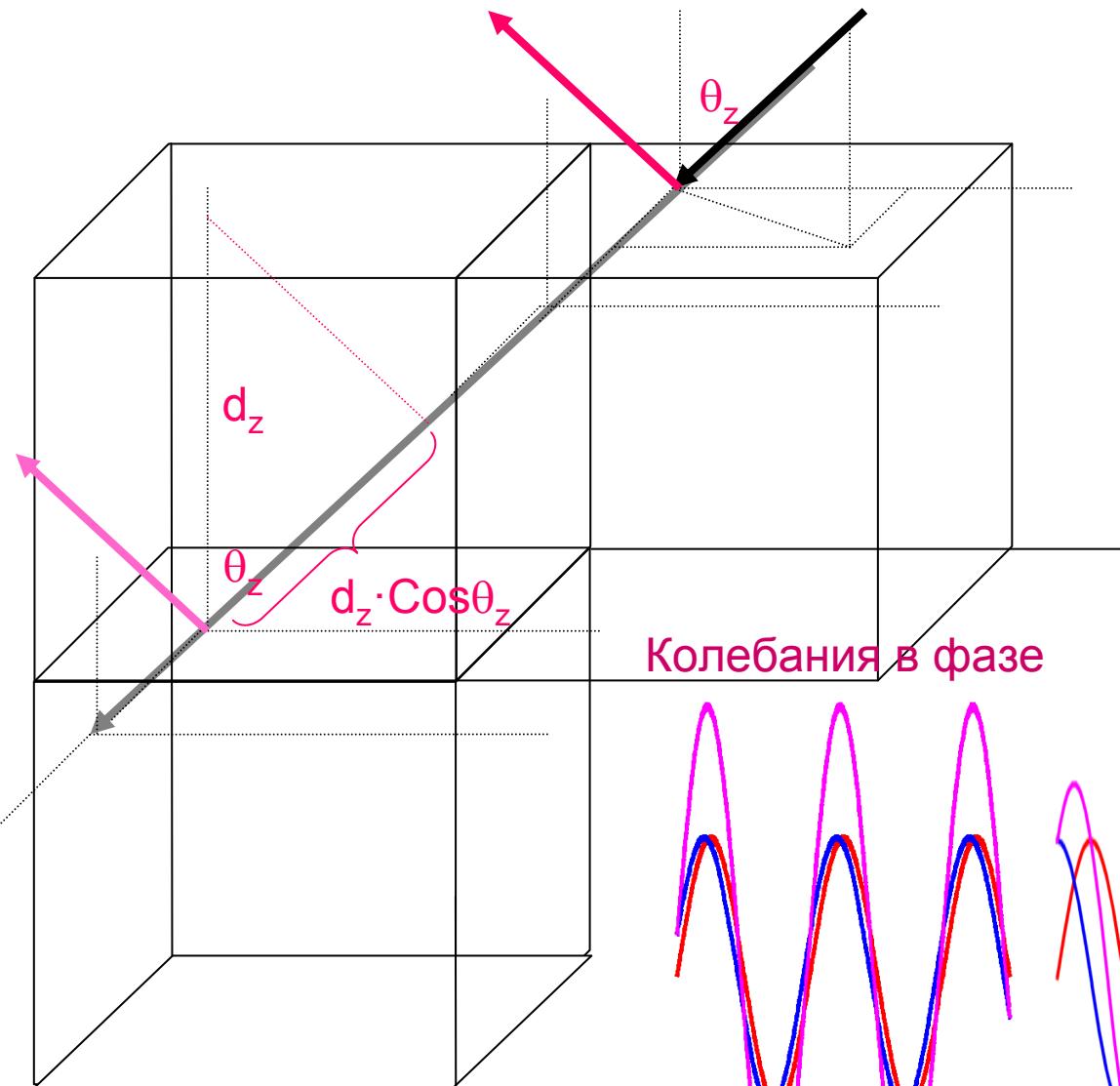
Дифракция рентгеновских лучей



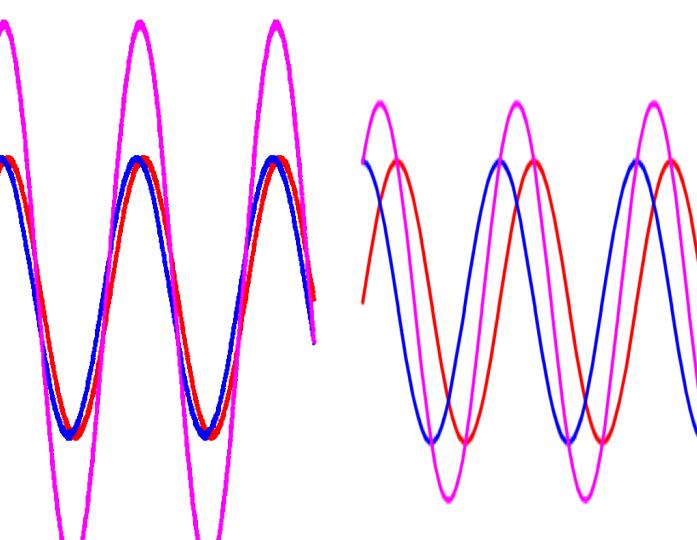
$$2d_z \cos\theta_z = n\lambda;$$



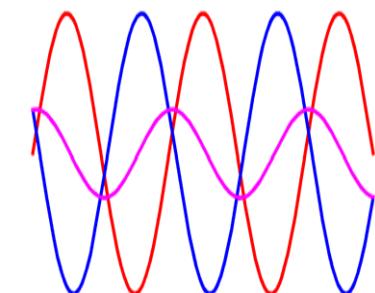
Дифракция рентгеновских лучей



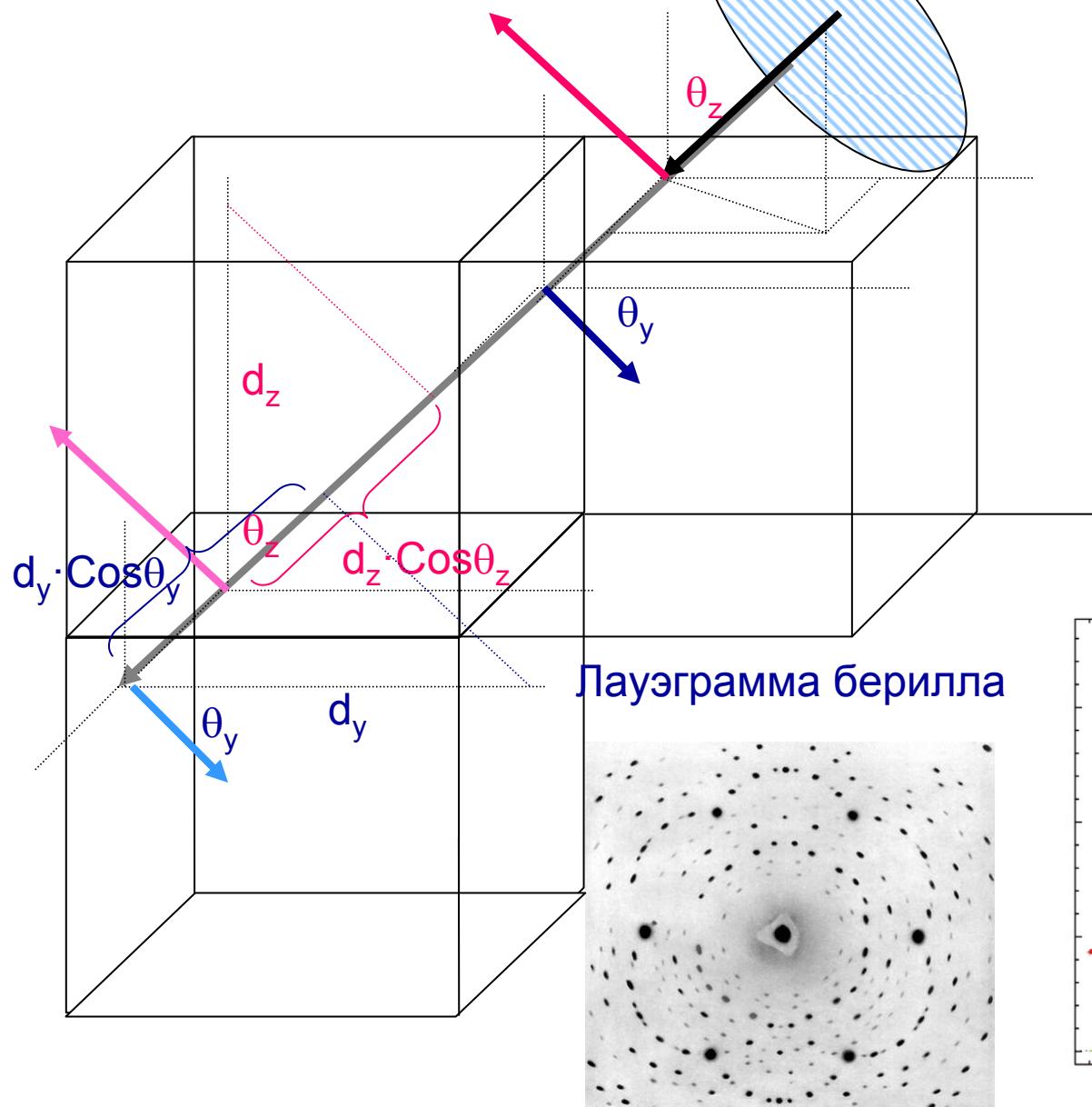
$$2d_z \cos\theta_z = n\lambda;$$



Колебания в
противофазе



Дифракция рентгеновских лучей



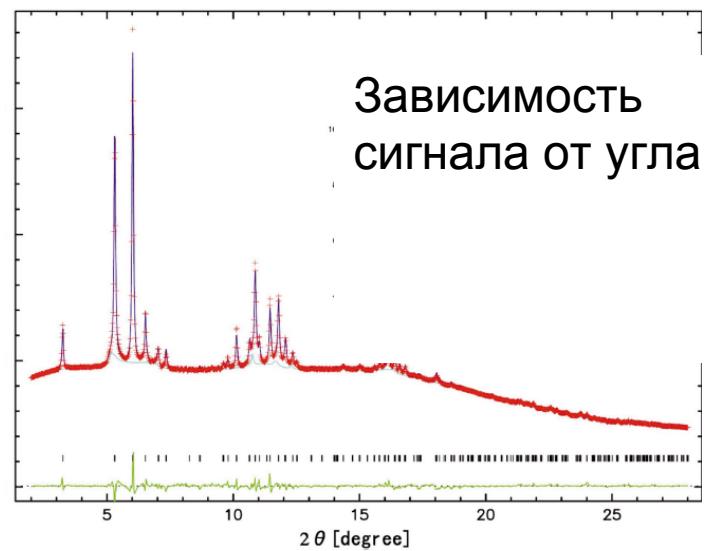
Уравнения Лауэ

$$2d_z \cos \theta_z = n\lambda;$$

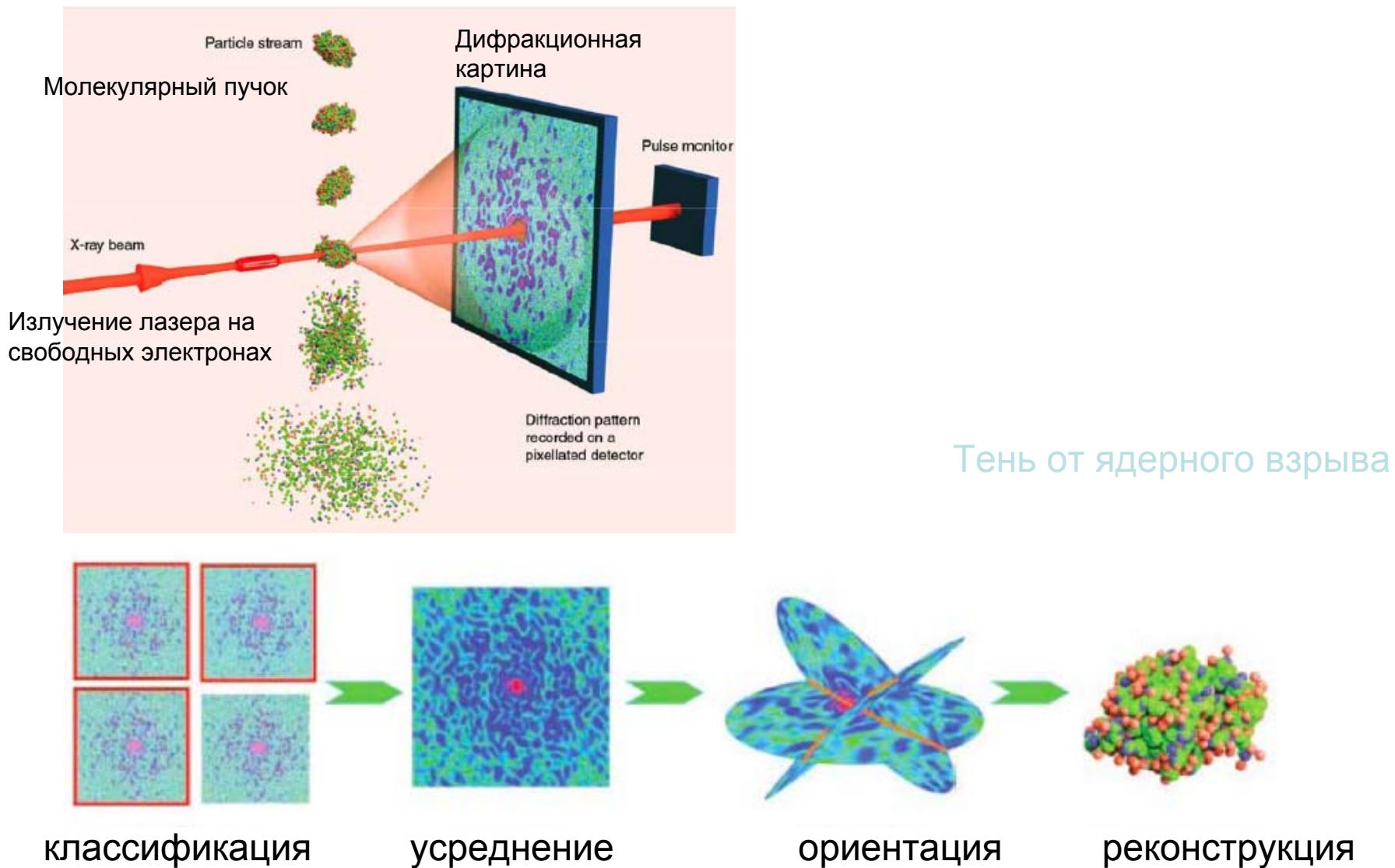
$$2d_y \cos \theta_y = m\lambda;$$

$$2d_x \cos \theta_x = k\lambda;$$

Зависимость
сигнала от угла



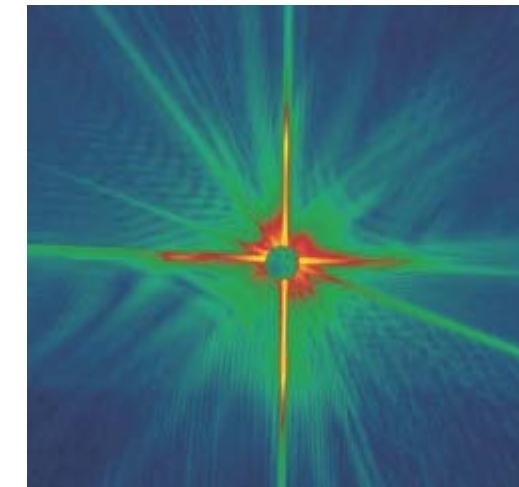
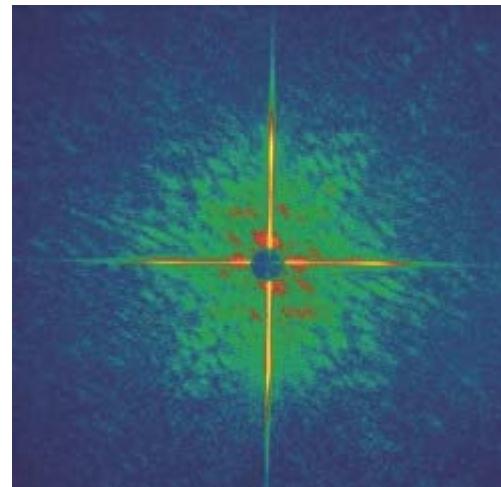
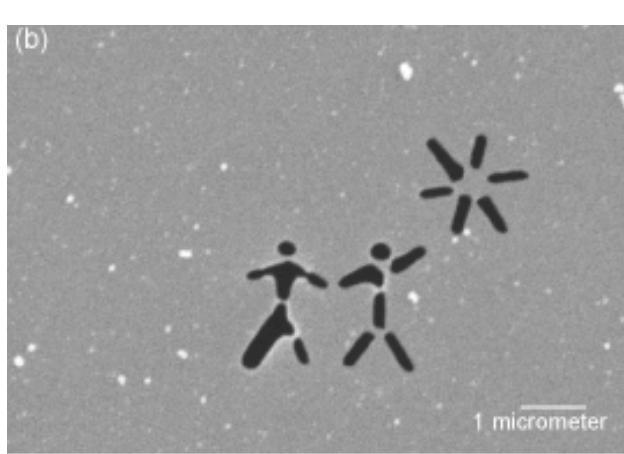
Восстановление трехмерной структуры молекулы



K. J. Gaffney, H. N. Chapman

Imaging Atomic Structure and Dynamics with Ultrafast X-ray Scattering
Science, 316, 1444 (2007).

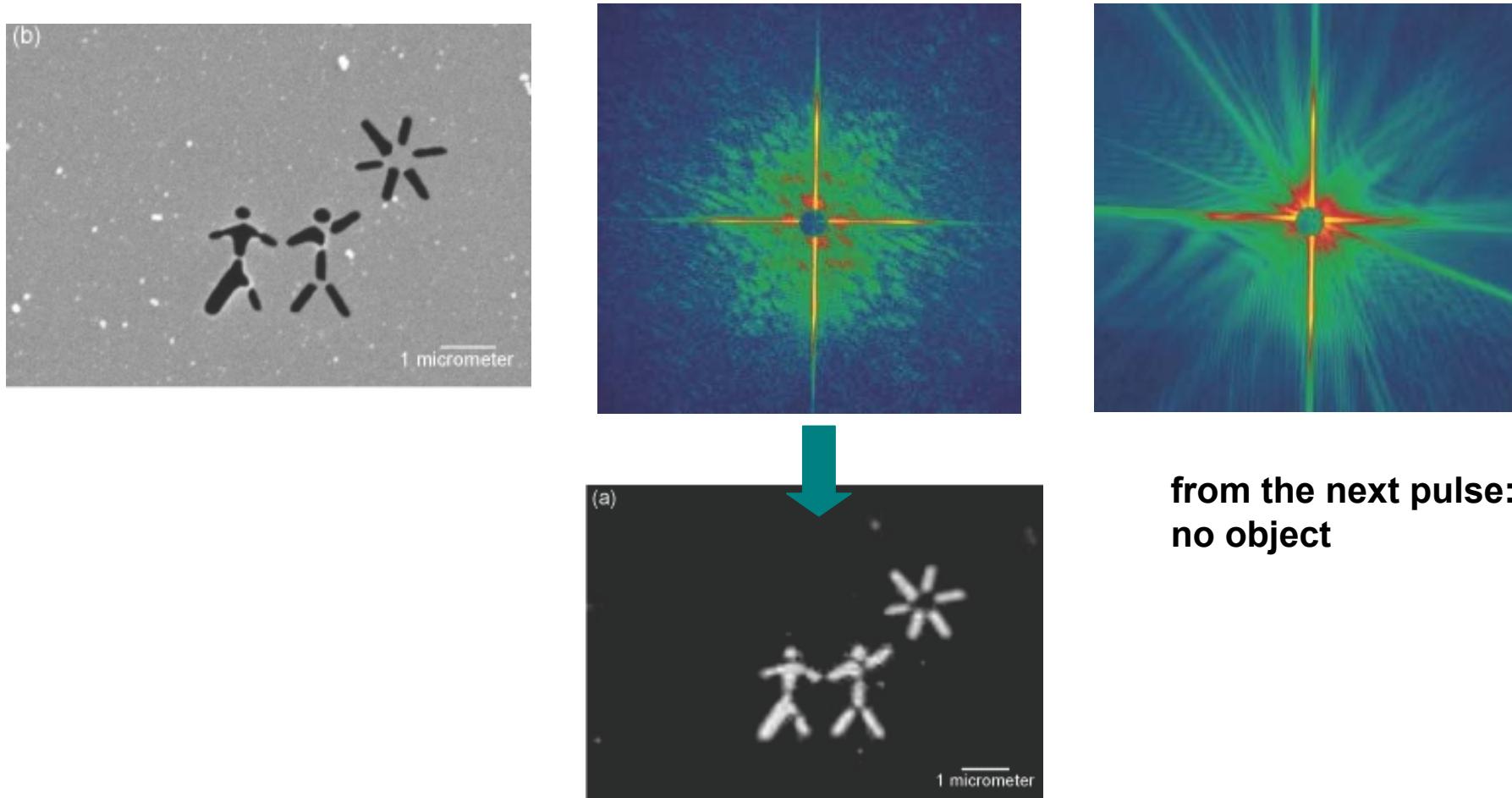
Модельный эксперимент на FLASH:



**from the next pulse:
no object**

Фемто - 10^{-15}
Пико – 10^{-12}
Нано – 10^{-9}

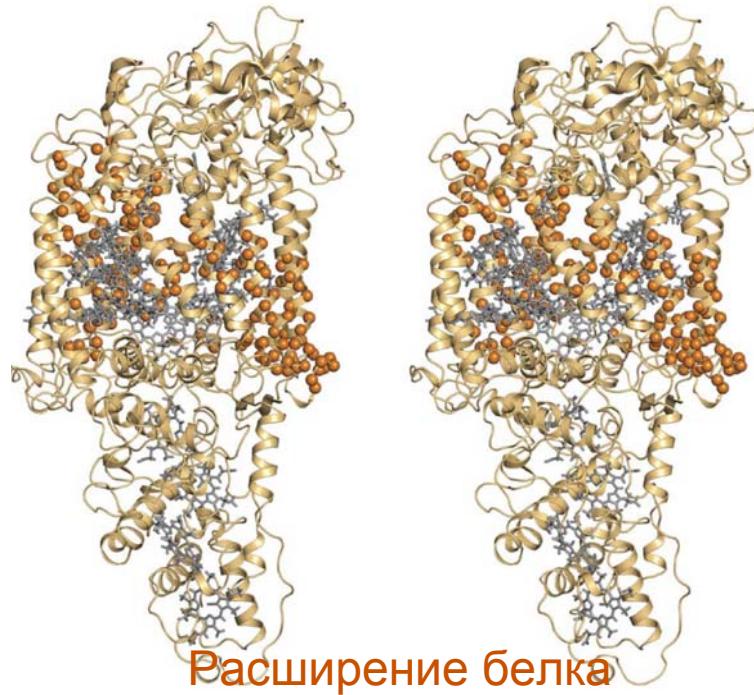
Модельный эксперимент на FLASH:



Отображение и голограмия наноструктур с
временным разрешением до 10 фс.

Фемто - 10^{-15}
Пико – 10^{-12}
Нано – 10^{-9}

Гипотеза о дрожании белка ‘protein quake’

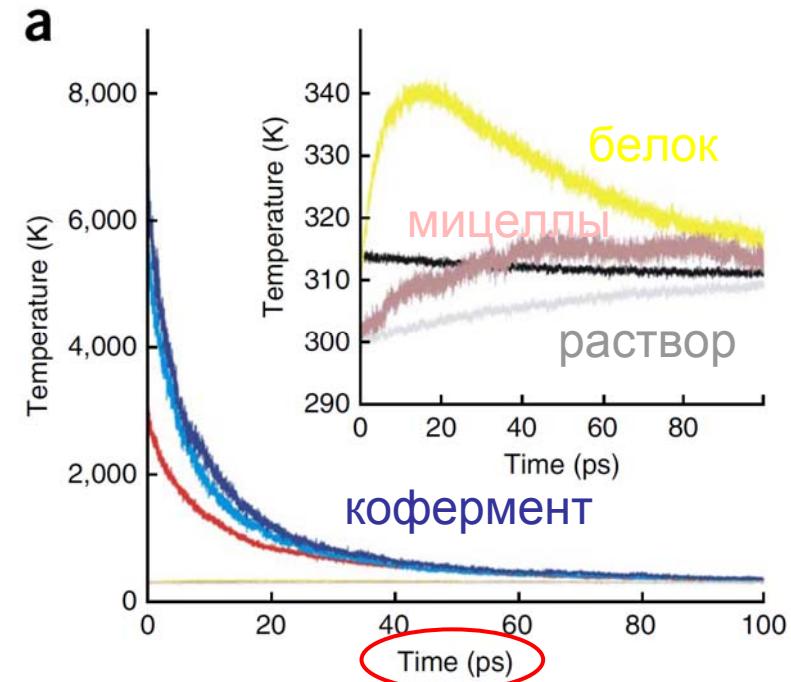
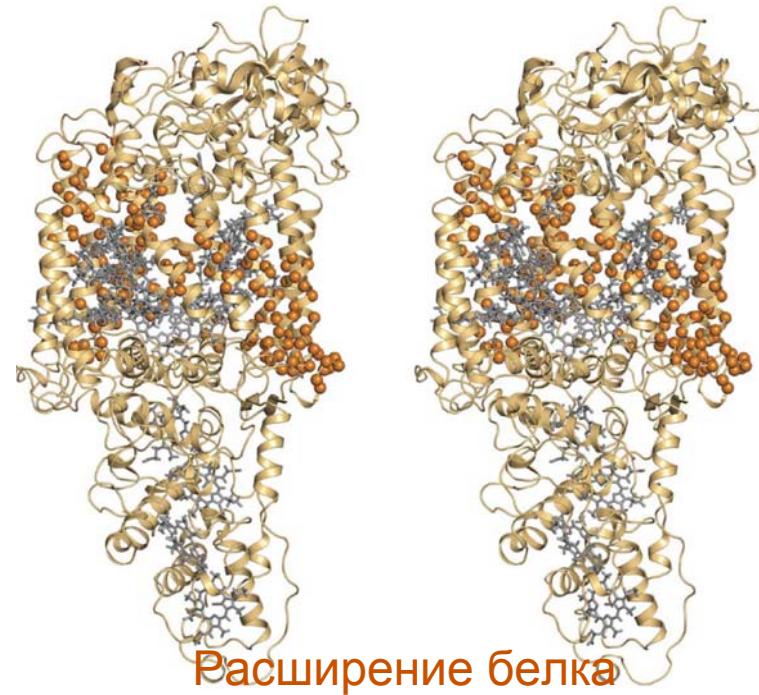


Многофотонное возбуждение центра фотосинтеза *Blastochloris viridis* позволило наблюдать изменение формы, возникающие на временах порядка пикосекунды (10^{-12}) и предшествующие распространению тепла через белок

Окно прозрачности воды

Эксперимент выполнен на LCLS
40-fs X-ray, 2.6×10^{12} фотонов на импульс, сфокусированы на $10\text{-}\mu\text{m}^2$.

Гипотеза о дрожании белка ‘protein quake’



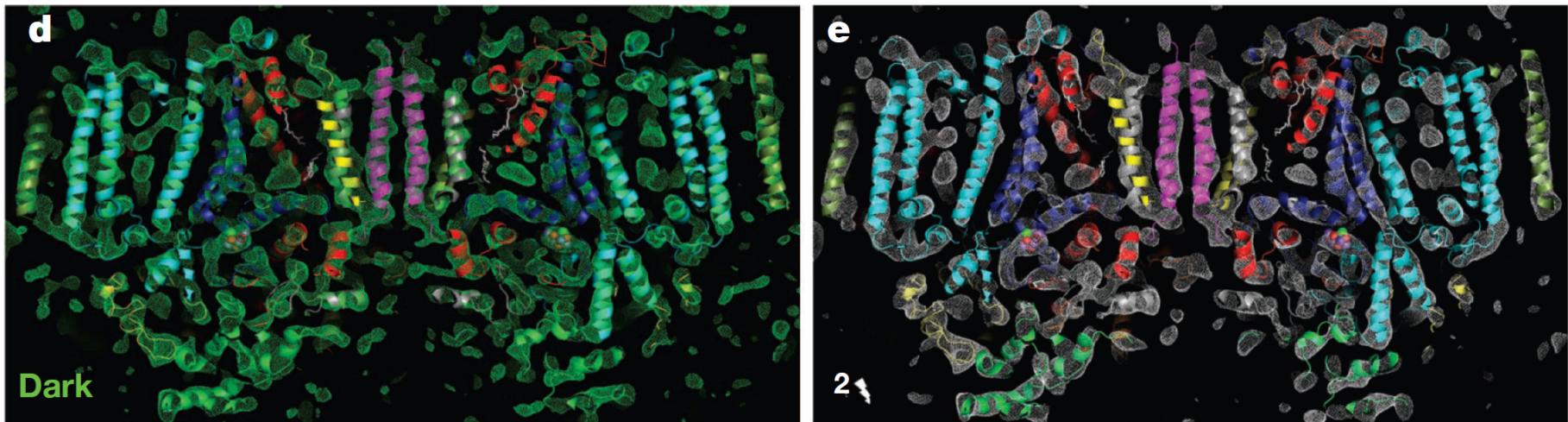
Многофотонное возбуждение центра фотосинтеза *Blastochloris viridis* позволило наблюдать изменение формы, возникающие на временах порядка пикосекунды (10^{-12}) и предшествующие распространению тепла через белок

Окно прозрачности воды

Эксперимент выполнен на LCLS

40-fs X-ray, 2.6×10^{12} фотонов на импульс, сфокусированы на $10\text{-}\mu\text{m}^2$.

Наблюдение фотосинтеза



Карта электронной плотности фотосистемы II (H_2O -пластохиноноксидоредуктаза) до и после поглощения двух фотонов

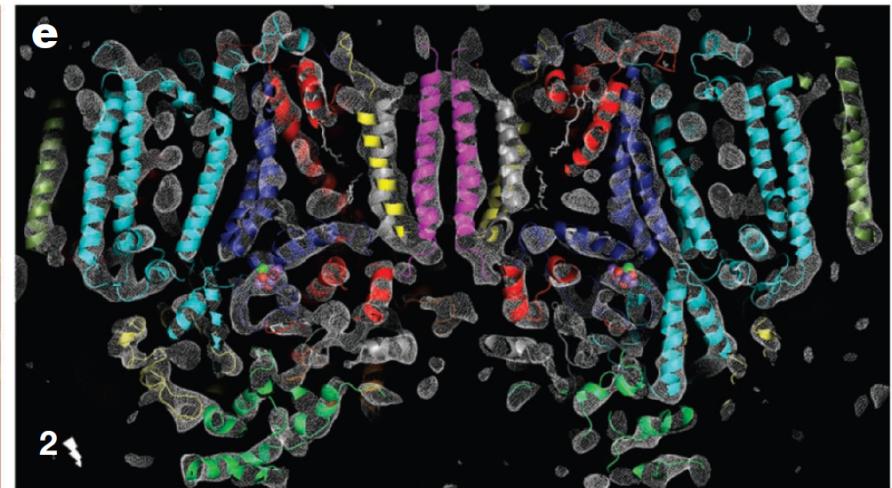
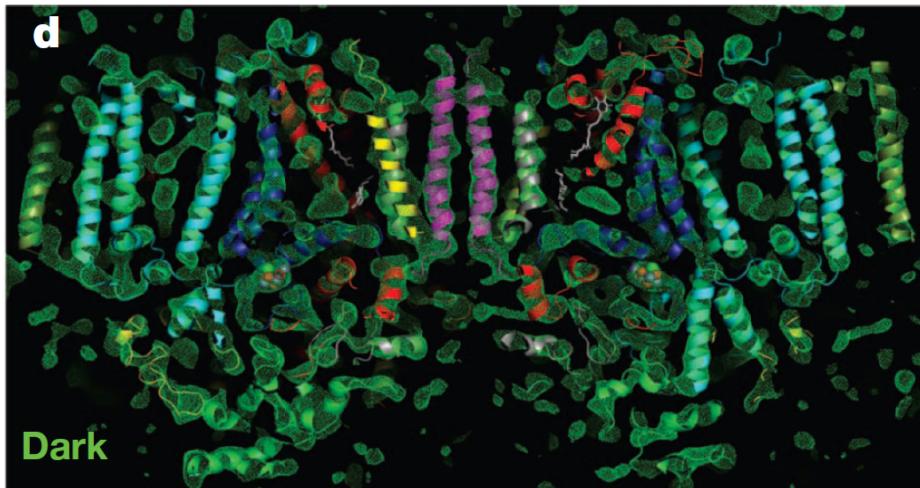
Наблюдение биохимического процесса в режиме реального времени

C. Kupitz et al; Serial time-resolved crystallography of photosystem II using a femtosecond X-ray laser, Nature 513, 261 (2014).

Наблюдение фотосинтеза

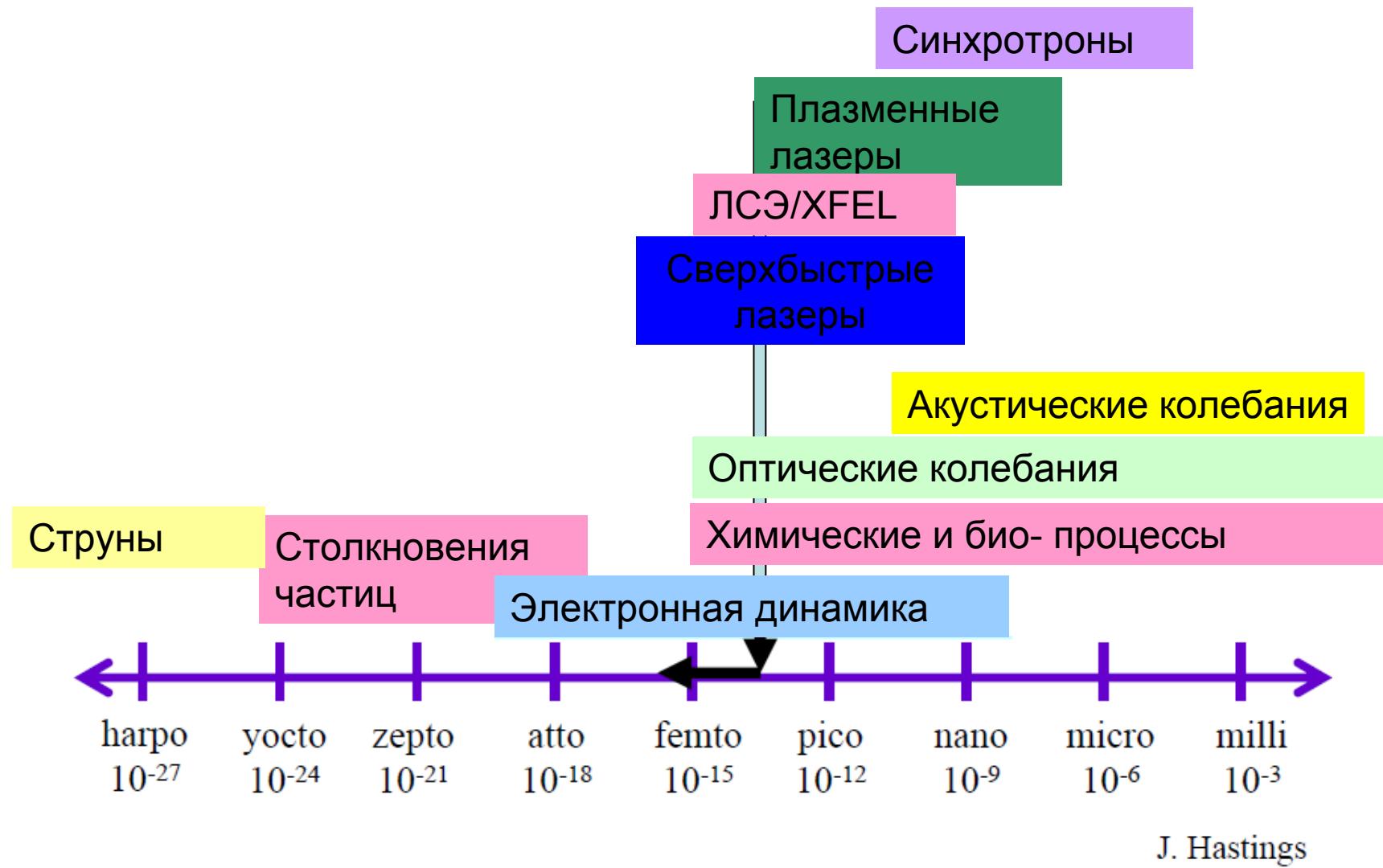


0:0 → 3:2



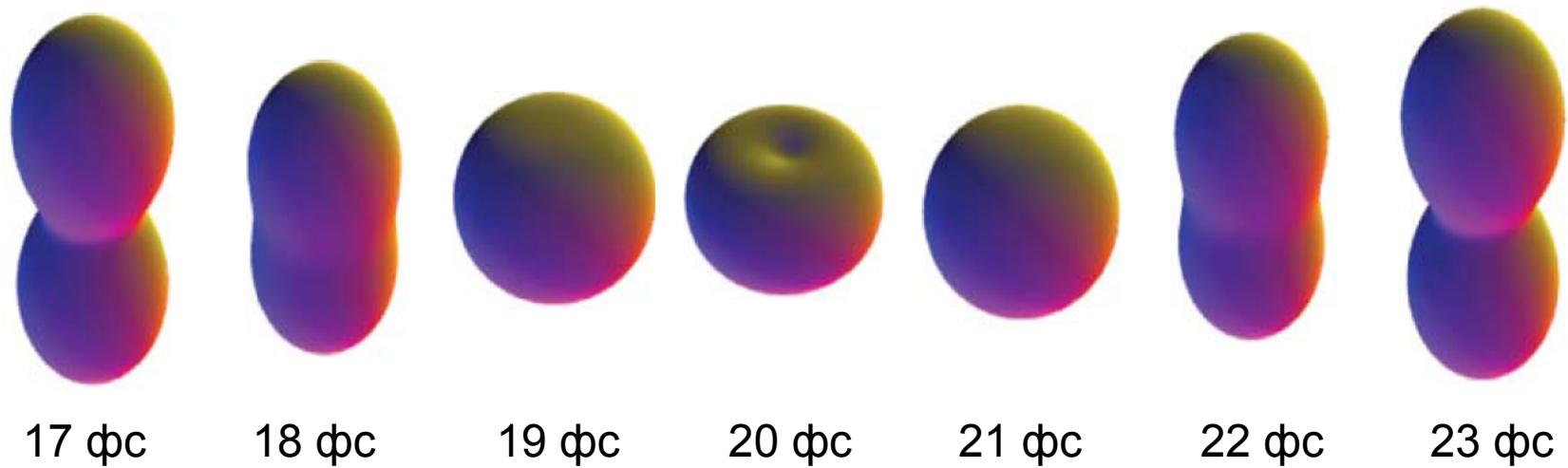
C. Kupitz et al; Serial time-resolved crystallography of photosystem II using a femtosecond X-ray laser, Nature 513, 261 (2014).

Шкала времен для быстрых процессов



Наблюдение эволюции электронной плотности

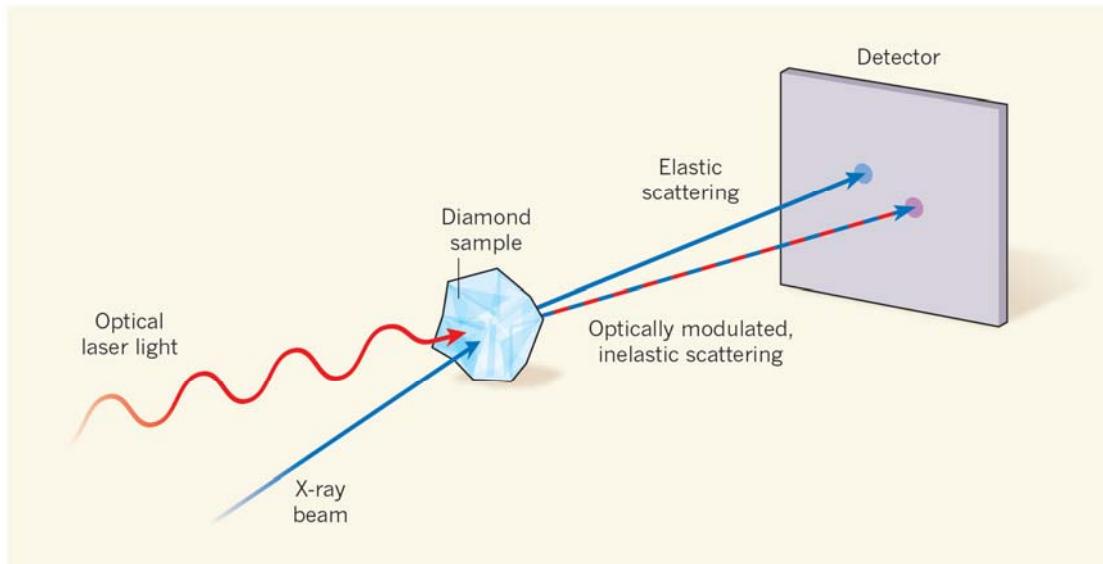
Облучение атома криптона электромагнитным импульсом



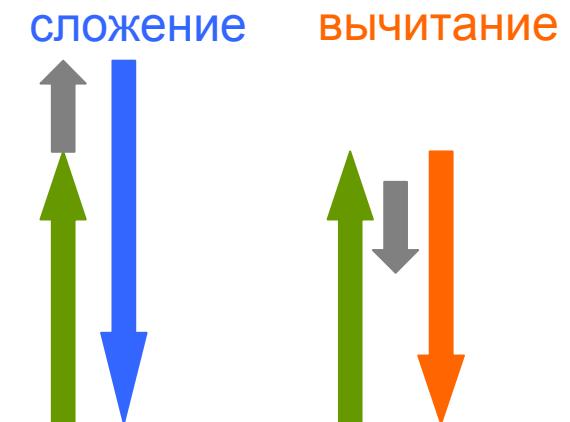
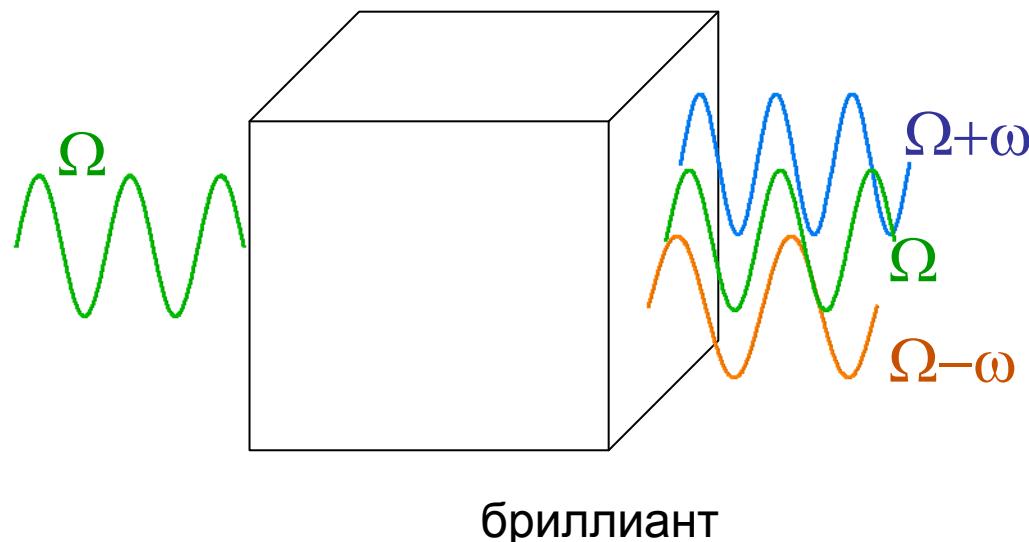
Плотность 4р оболочки как функция времени

E. Goulielmakis et al Real-time observation of valence electron motion, *Nature*, **465**, 769 (2010).

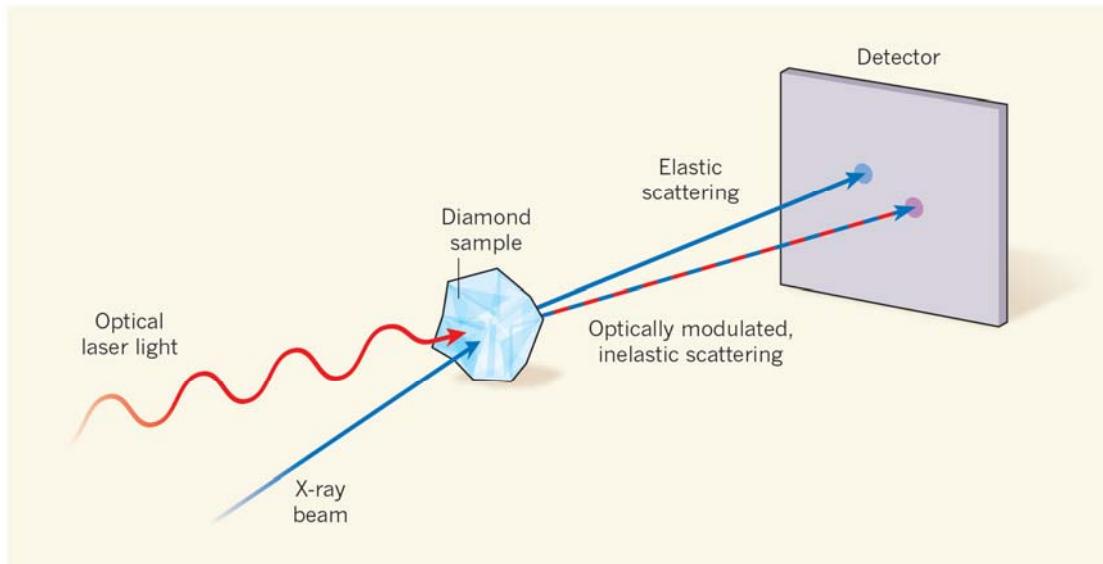
Сложение (вычитание) частот



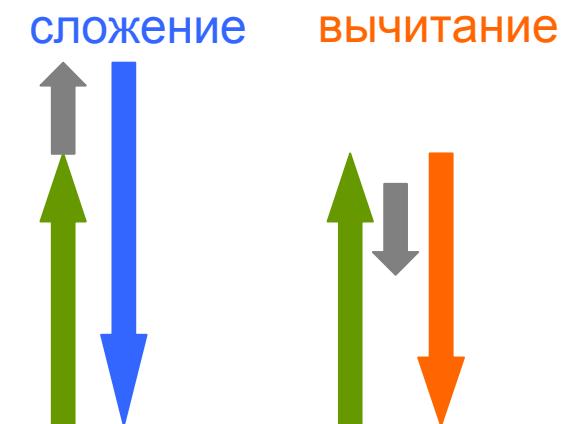
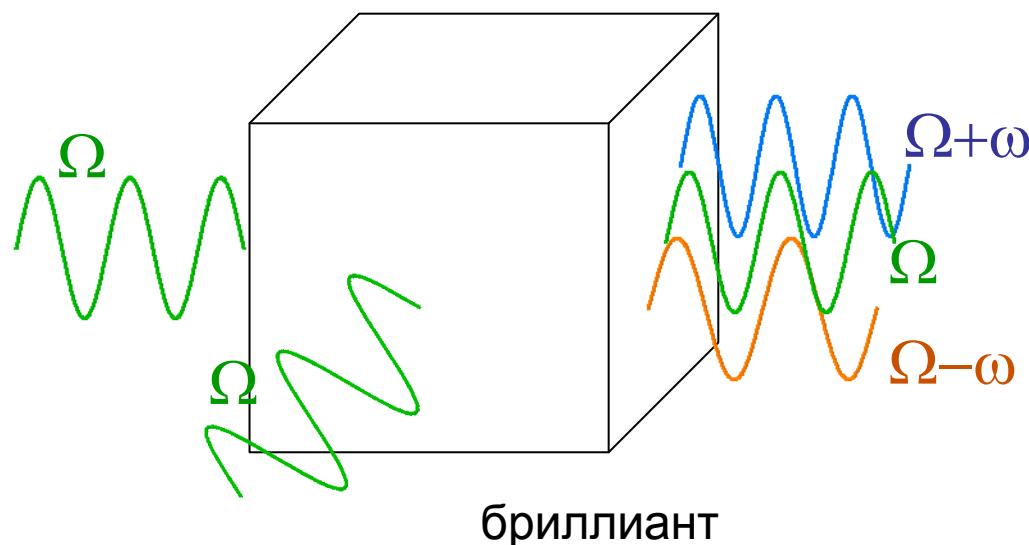
Сравнение теории с экспериментом позволило утверждать, что оптический лазер динамически изменил ковалентные связи в алмазе.



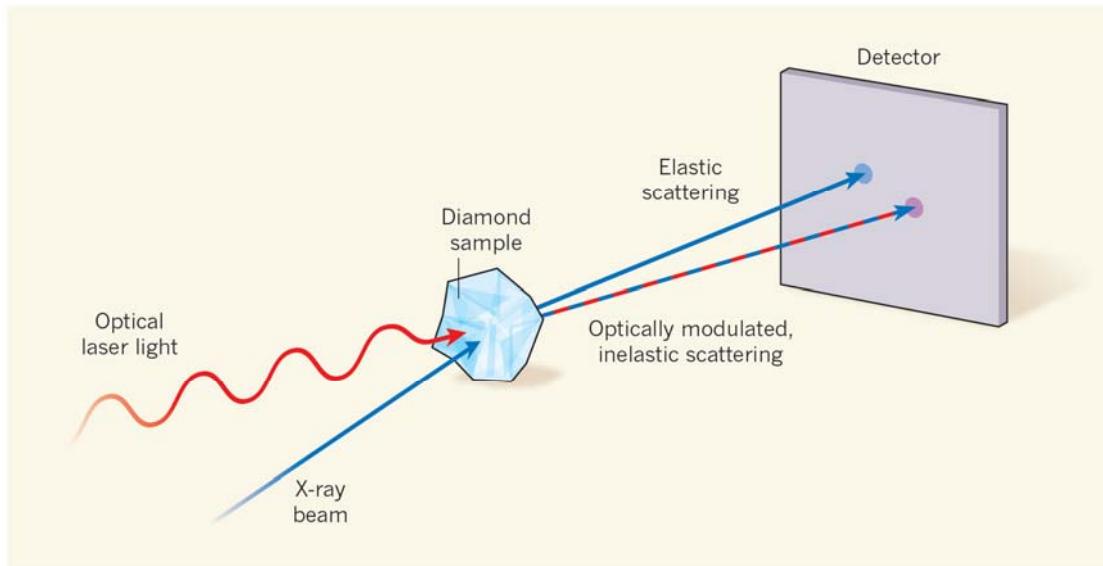
Сложение (вычитание) частот



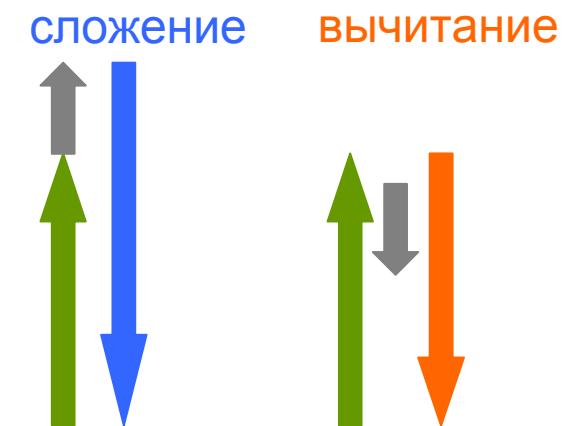
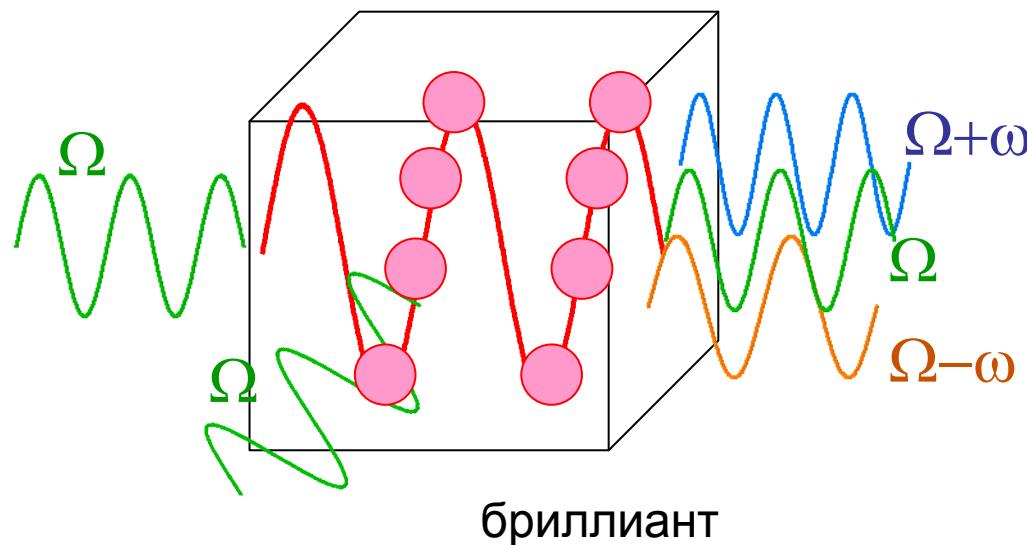
Сравнение теории с экспериментом позволило утверждать, что оптический лазер динамически изменил ковалентные связи в алмазе.



Сложение (вычитание) частот

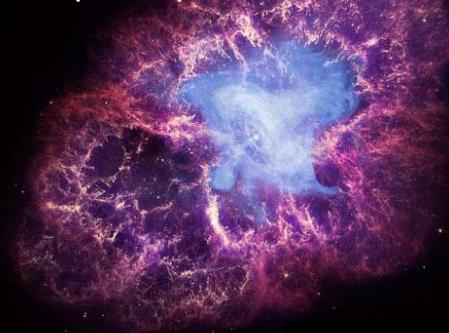


Сравнение теории с экспериментом позволило утверждать, что оптический лазер динамически изменил ковалентные связи в алмазе.



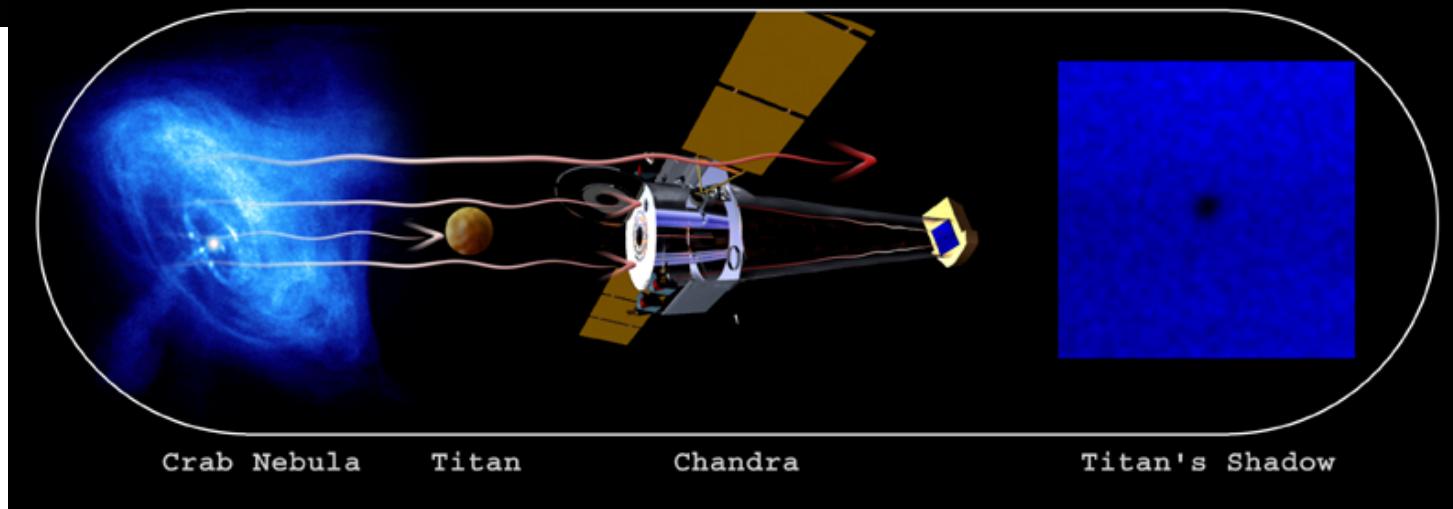
Космическая рентгенография

Крабовидная туманнос в
рентгеновском Диапазоне
(сверхновая 1054 г.) В центре –
пульсар с периодом 0.033 сек.



Тень от Титана (спутника Сатурна) снятая в
рентгеновском диапазоне в январе 2003 года,
когда Титан проходил перед Крабовидной
туманностью. Используя эти данные
астрономы впервые смогли определить
протяженность атмосферы Титана.

HOW THE CRAB X-RAYED TITAN



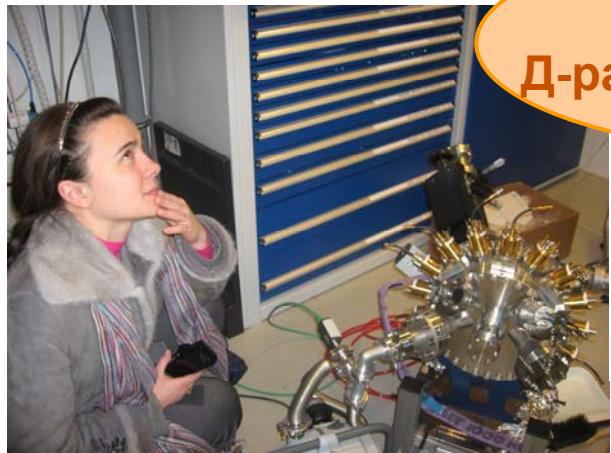
Военное применение



В 2010 году в США стартовала программа по развитию системы обороны морских сил, основанная на лазерах на свободных электронах, базирующихся на авианосцах

«The Free Electron Laser (FEL) provides naval platforms with a highly effective and affordable defense capability against surface and air threats, future antiship cruise missiles and swarms of small boats. Utilization of FEL also allows an unlimited magazine with speed-of-light delivery».

Как к нам попасть?



Отдел электромагнитных процессов и взаимодействия атомных ядер
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скobelцына
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

gryzlova@gmail.com

