

Современные источники рентгеновского излучения и что нового они привнесли в науку

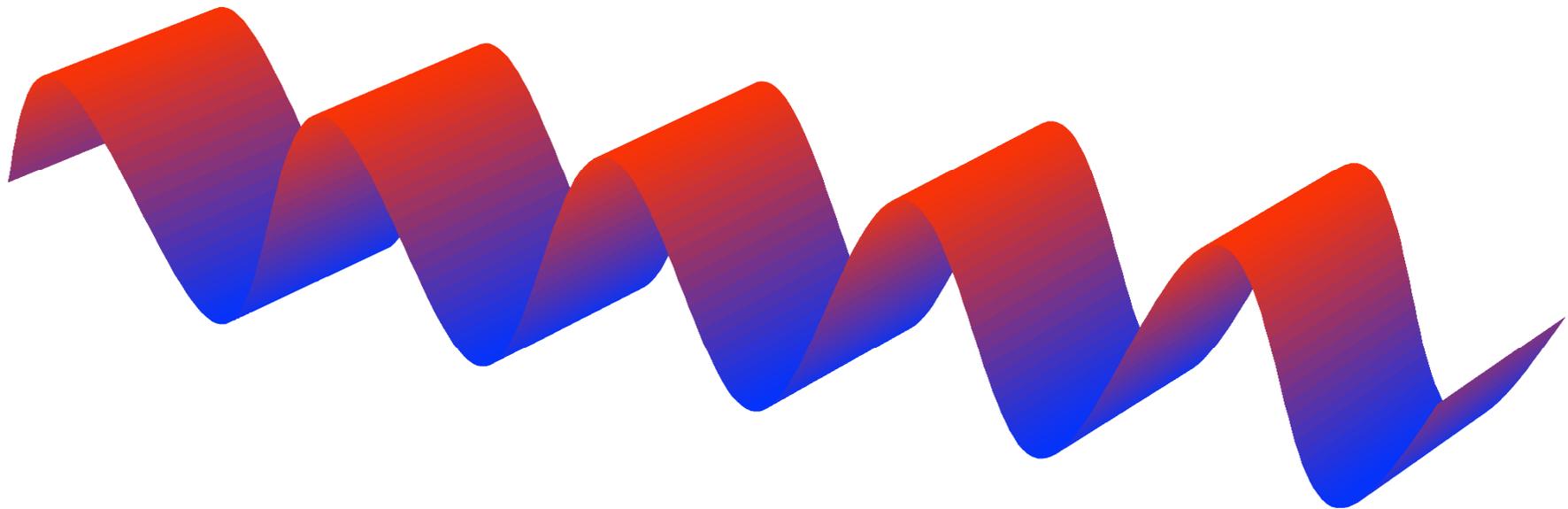
Грызлова Елена Владимировна

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

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

Рентгеновские

лазеры



Шкала длин электромагнитных волн



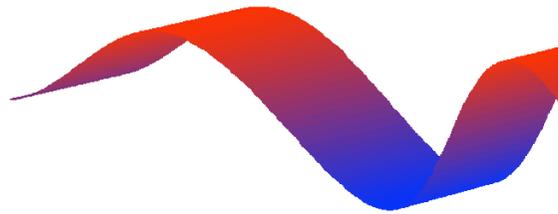
100 км

1 мм

радио



Шкала длин электромагнитных волн



100 км

1 мм

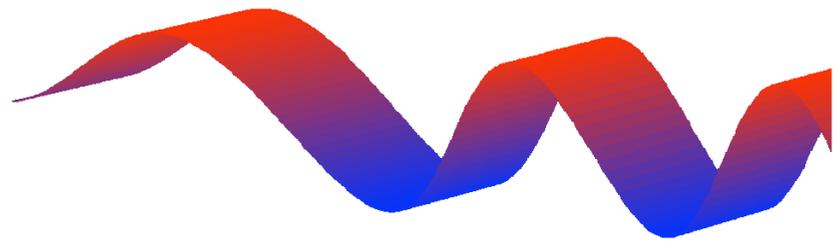
1 мкм

радио

Микроволновое



Шкала длин электромагнитных волн



100 км 1мм 1мкм 760нм

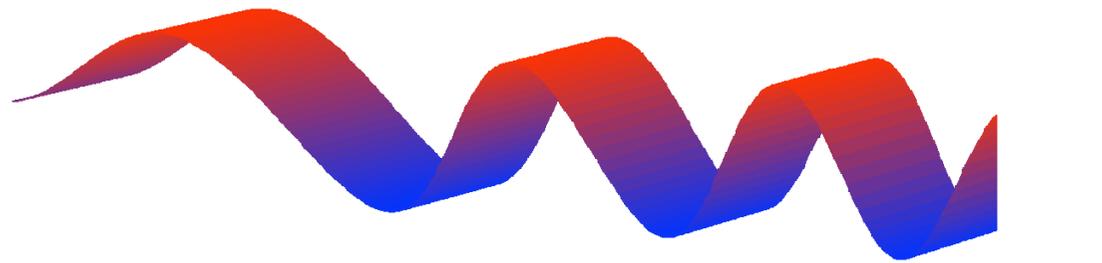
радио

Инфракрасное

Микроволновое



Шкала длин электромагнитных волн



100 км 1мм 1мкм 760нм 380нм

радио

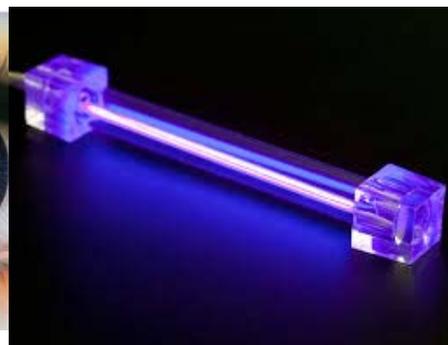
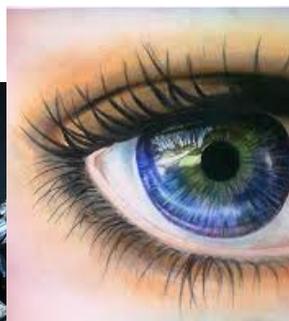
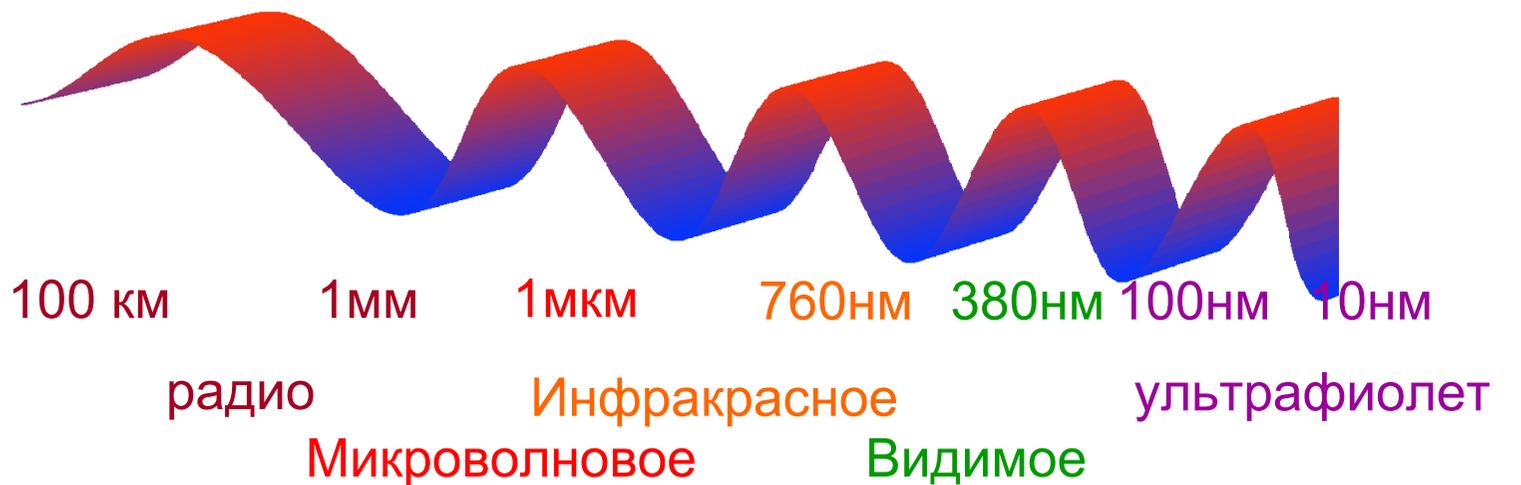
Микроволновое

Инфракрасное

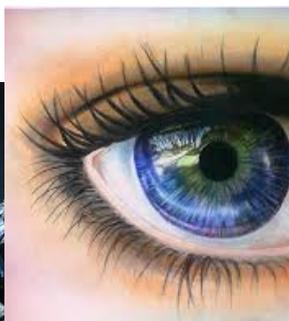
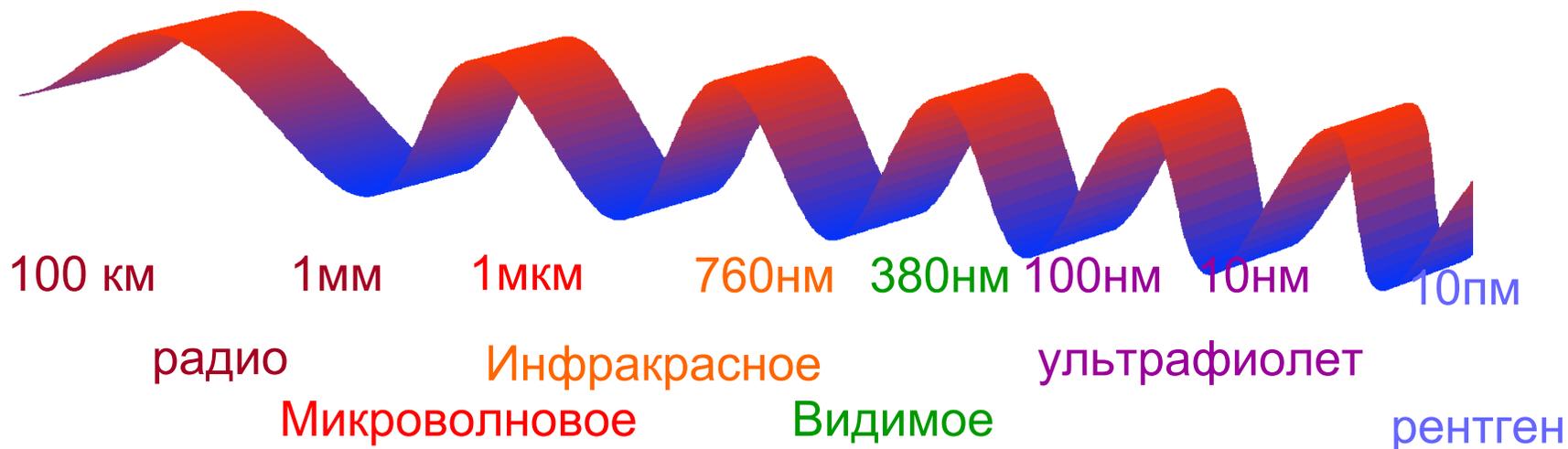
Видимое



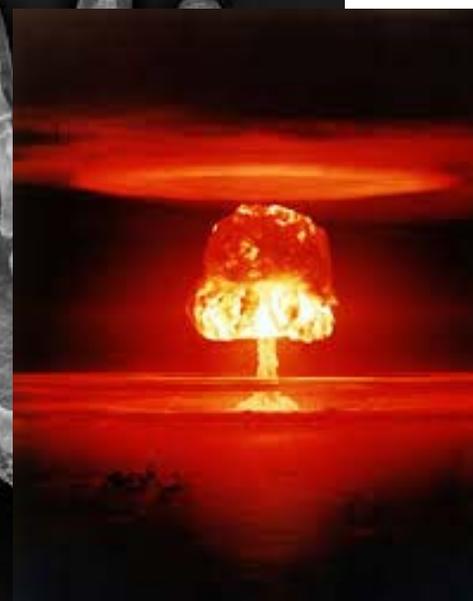
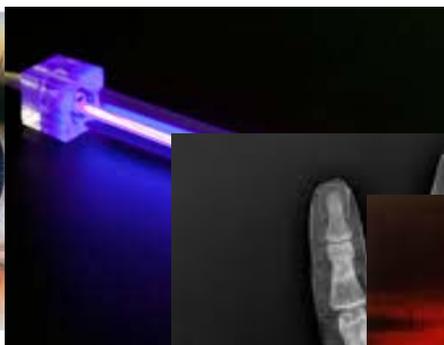
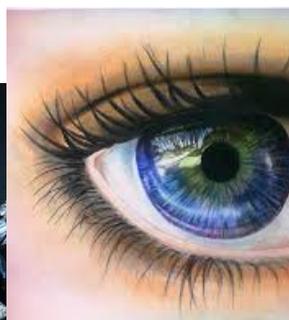
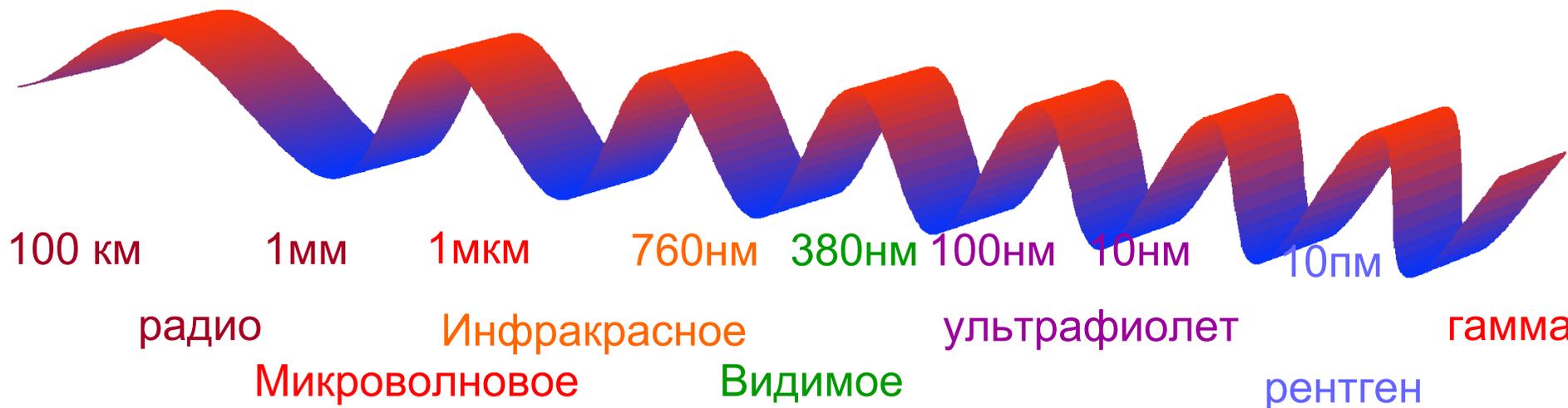
Шкала длин электромагнитных волн



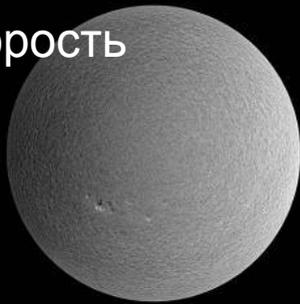
Шкала длин электромагнитных волн



Шкала длин электромагнитных волн

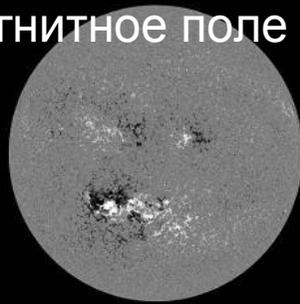


Скорость



HMI Dopplergram
Surface movement
Photosphere

Магнитное поле



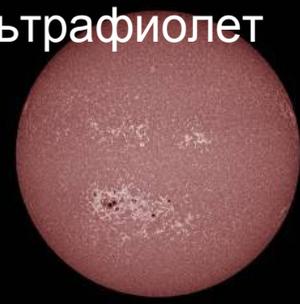
HMI Magnetogram
Magnetic field polarity
Photosphere

Видимый диапазон



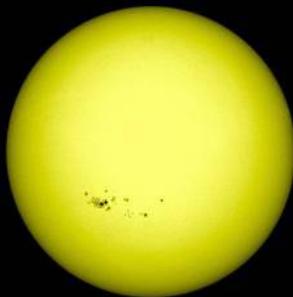
HMI Continuum
Matches visible light
Photosphere

Ультрафиолет



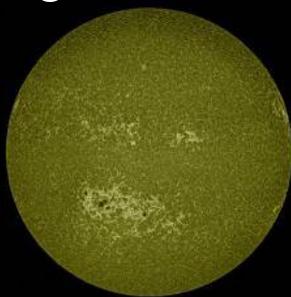
AIA 1700 Å
4500 Kelvin
Photosphere

C



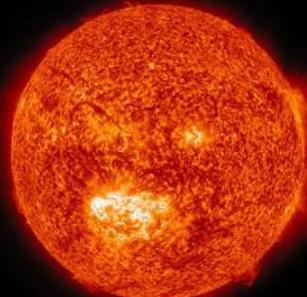
AIA 4500 Å
6000 Kelvin
Photosphere

He

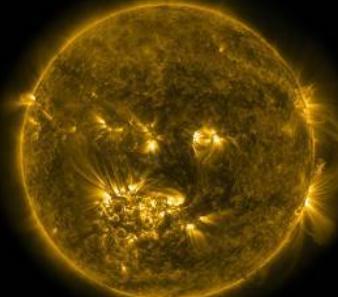


AIA 1600 Å
10,000 Kelvin
Upper photosphere/
Transition region

F



AIA 304 Å
50,000 Kelvin
Transition region/
Chromosphere



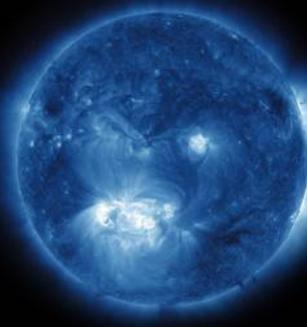
AIA 171 Å
600,000 Kelvin
Upper transition
Region/quiet corona



AIA 193 Å
1 million Kelvin
Corona/flare plasma



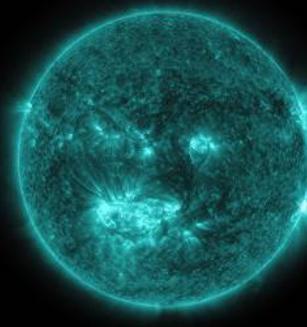
AIA 211 Å
2 million Kelvin
Active regions



AIA 335 Å
2.5 million Kelvin
Active regions

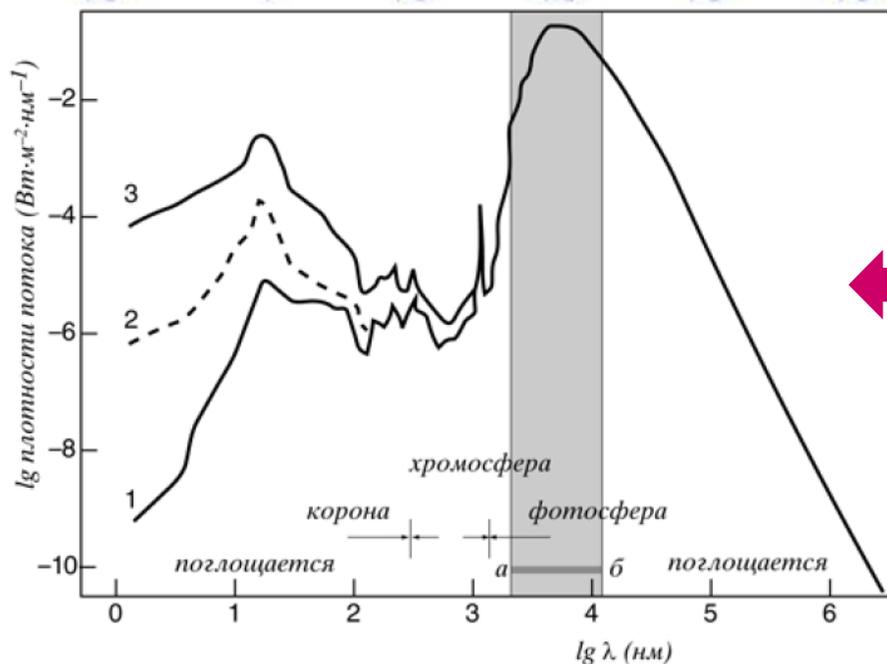
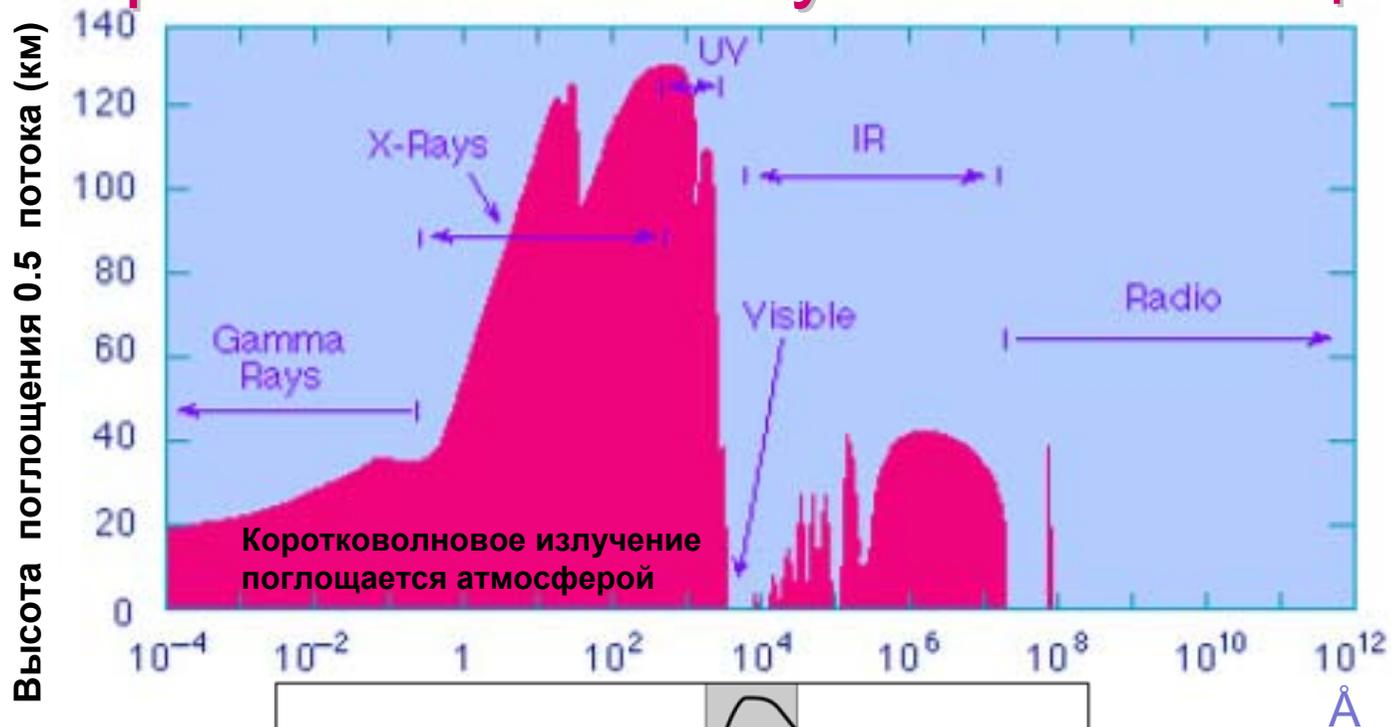


AIA 094 Å
6 million Kelvin
Flaring regions



AIA 131 Å
10 million Kelvin
Flaring regions

Электромагнитное излучение Солнца на Земле

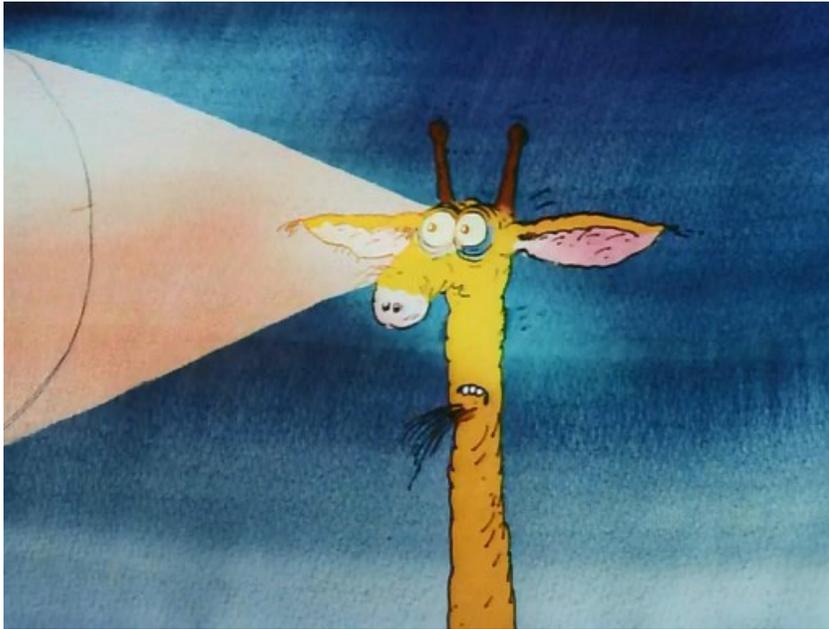


Спектр
излучения
Солнца

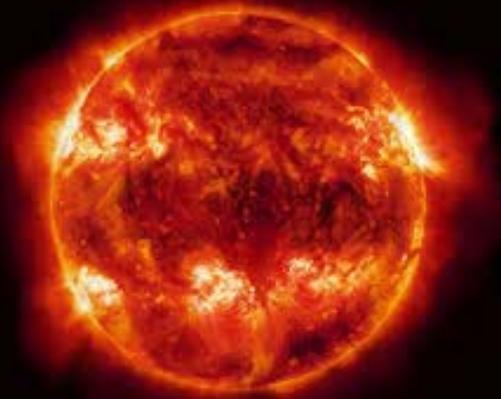
Лазер



Лазер



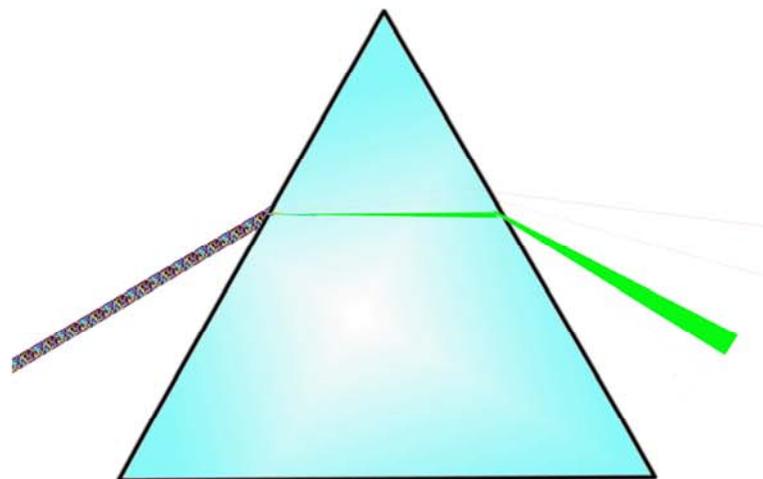
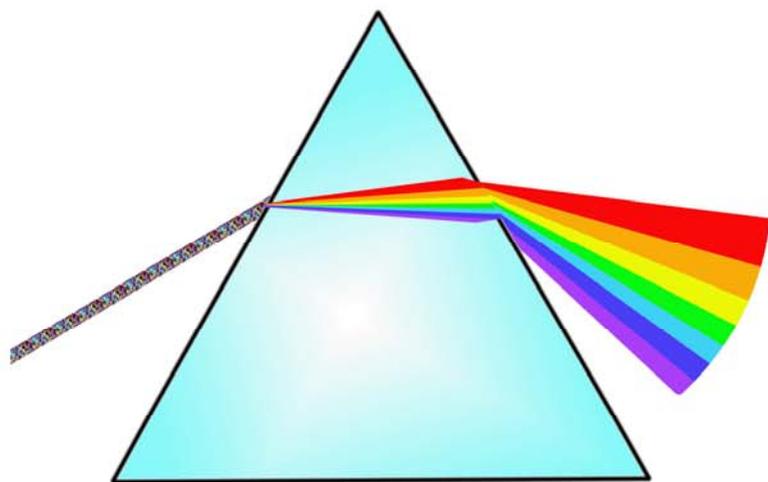
Солнце



Пульсар



Лазер



Лазер



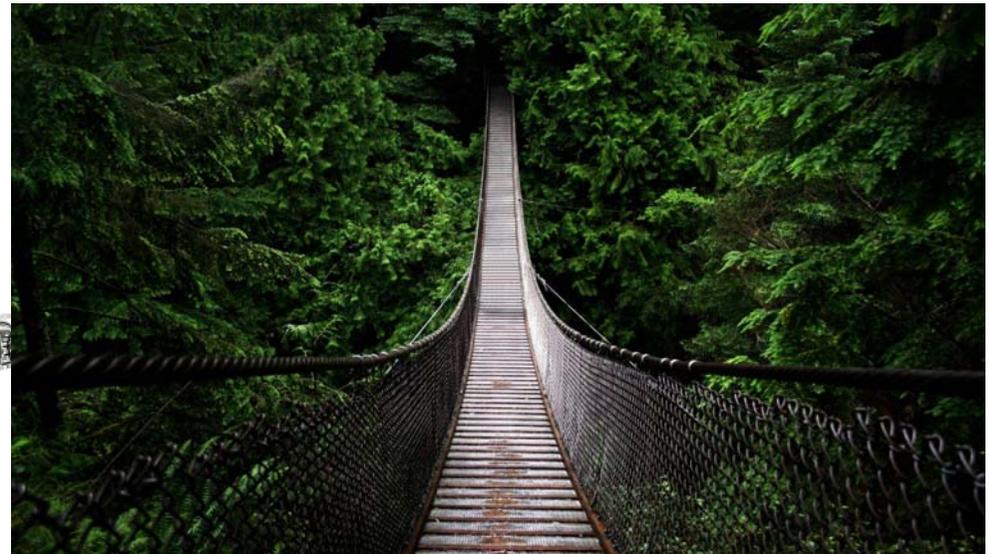
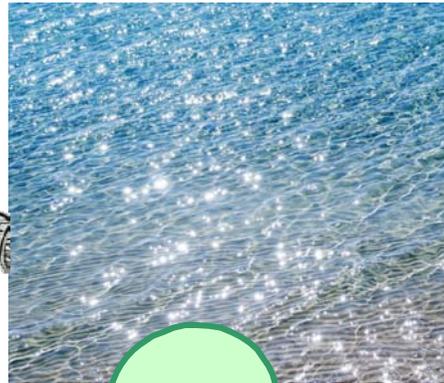
$$\alpha \cos(\omega t) + \beta \cos(\omega t + \varphi)$$

Лазер



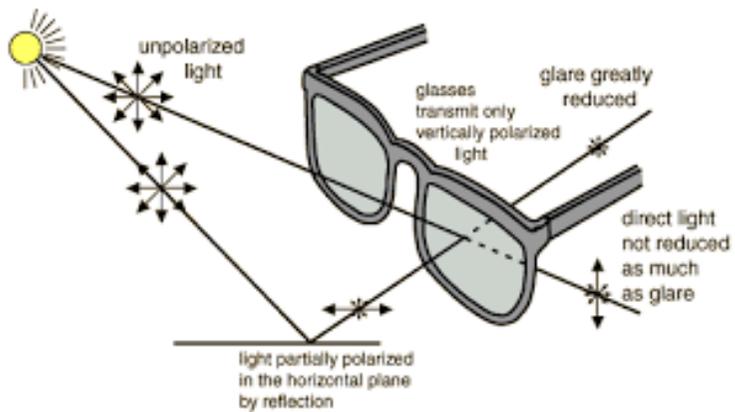
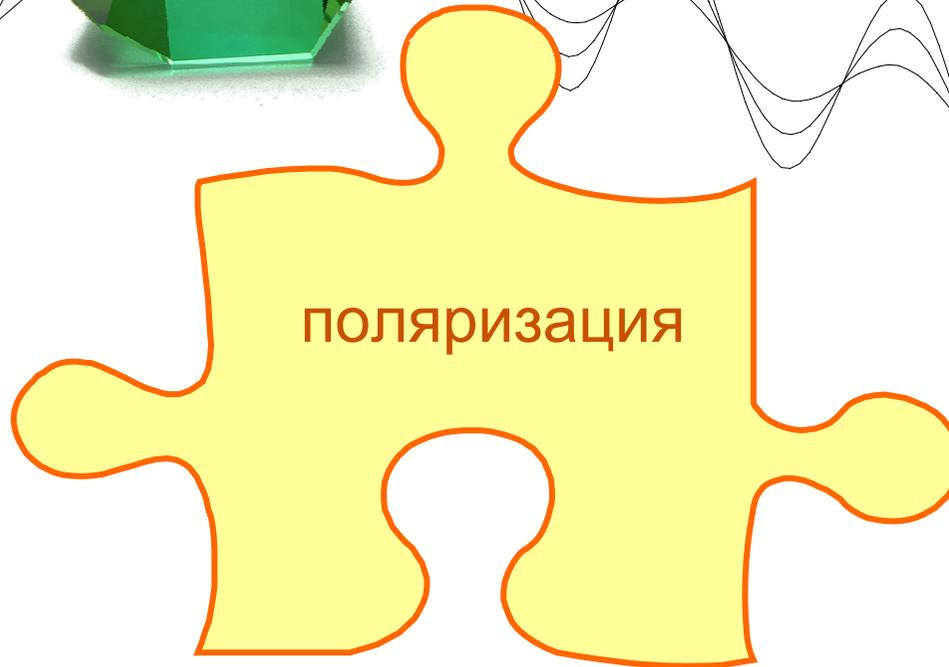
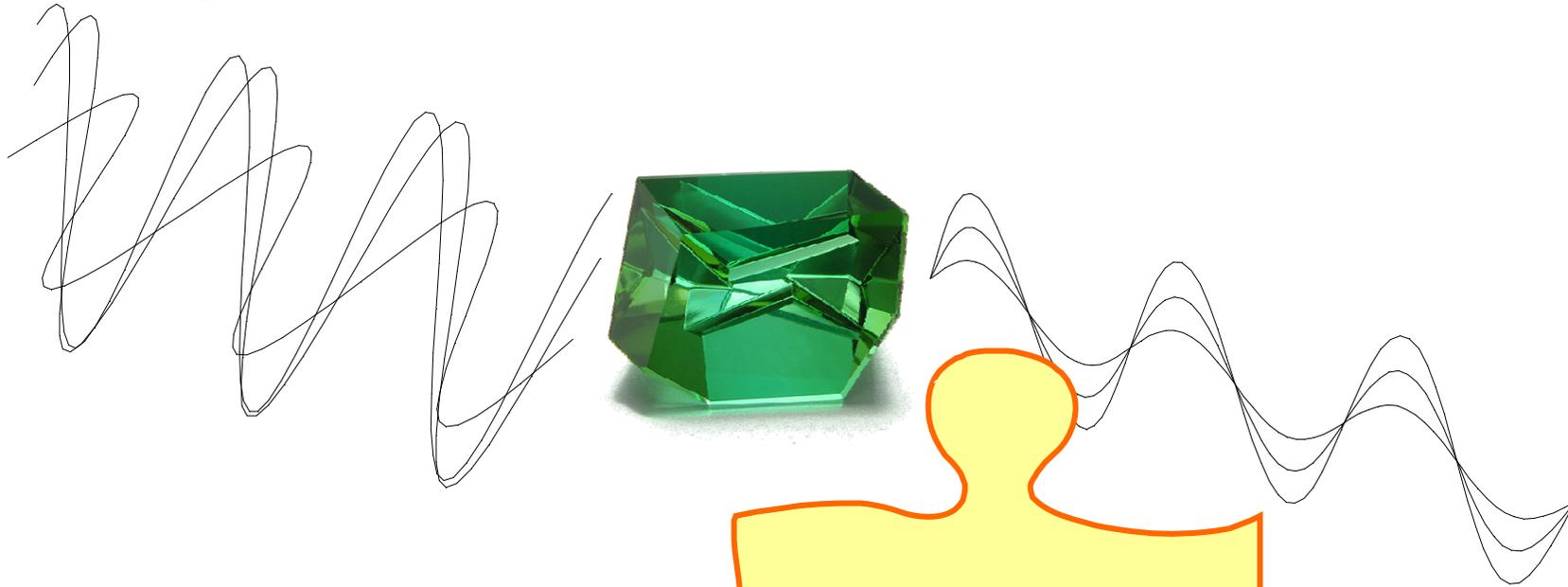
$$\alpha \cos(\omega t) + \beta \cos(\omega t + \varphi)$$

Лазер



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

Лазер



Лазер



Измерение расстояния до луны



Уголковый 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

LCLS(2009)

0.29 - 6 КэВ
0.13 - 6.2 нм
400-<10 фмс
 $2 \cdot 10^{13}$

FLASH(2000)/XFEL(2017)

30-300 эВ	0.2-12.4 КэВ
4.2-45 нм	0.1-6.4 нм
200-<50 фс	100 фс
10^{11} - 10^{13}	$4 \cdot 10^{14}$

SACLA(2012)

20 КэВ
0.06 нм
6-30 фс
 $5 \cdot 10^{11}$

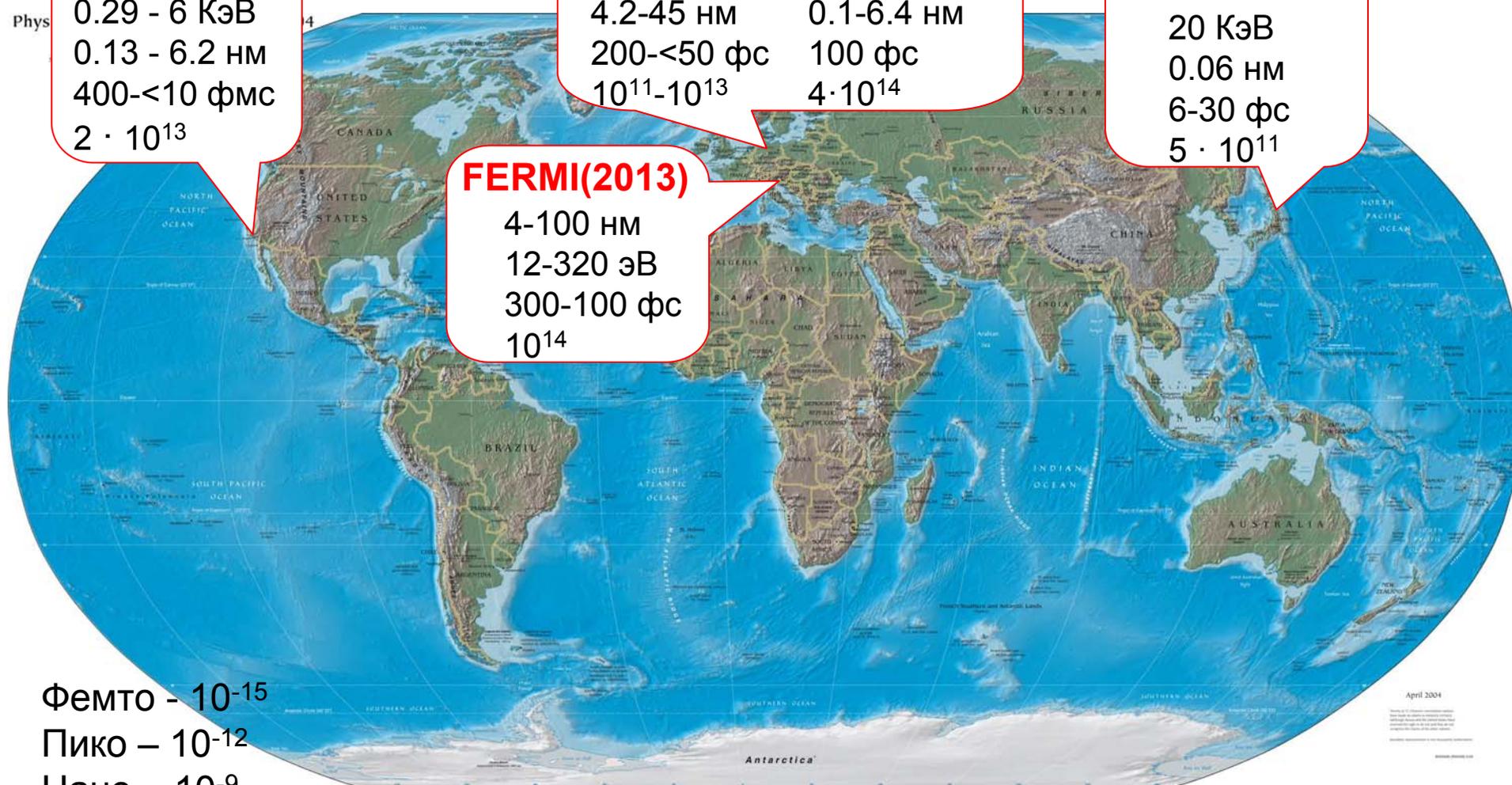
FERMI(2013)

4-100 нм
12-320 эВ
300-100 фс
 10^{14}

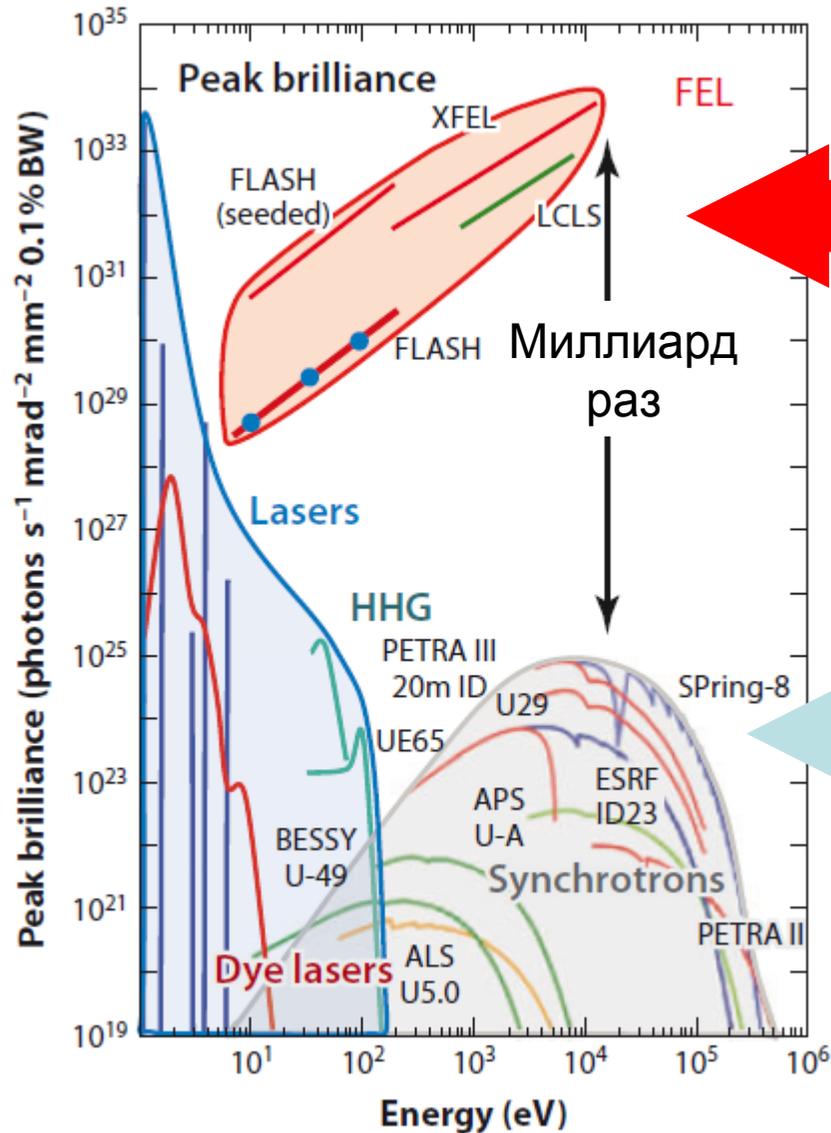
Фемто - 10^{-15}

Пико - 10^{-12}

Нано - 10^{-9}



Сравнение источников излучения



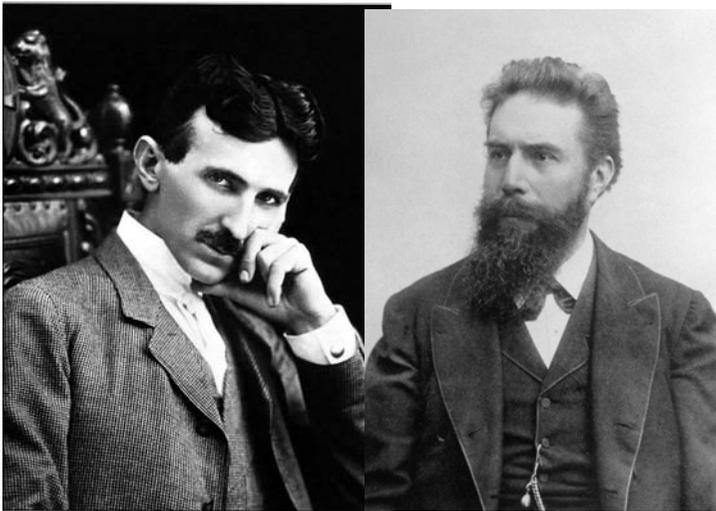
Источники синхротронного излучения 4-го поколения (рентгеновские лазеры на свободных электронах)

Источники синхротронного излучения 3-го поколения

Пиковая мощность
 10^{22} Вт/см²

- | | | |
|---------------------------|---------------------------|------------------------------|
| Солнце | Лазерная указка | Лазерная хирургия |
| 0.14 Вт/см ² | 0.03 Вт/см ² | 10^{12} Вт/см ² |

Генерация излучения



Н. Тесла В.К. Рентген

1985-86 описали существование
тормозного излучения



Д. Д. Иваненко

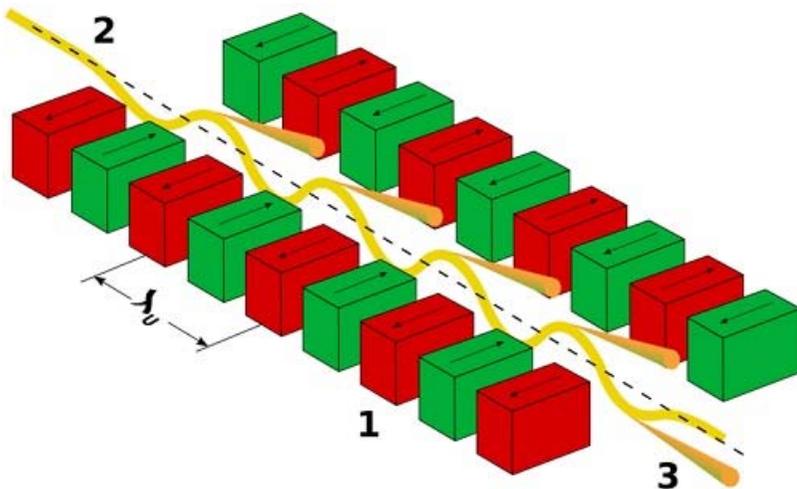


И. Я. Померанчук

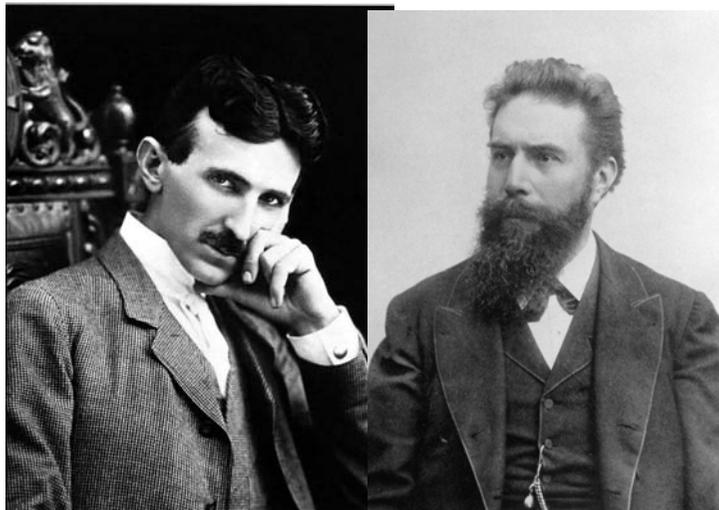


J. S. Schwinger

1944-1946 Разработали теорию синхротронного
излучения для кольцевых ускорителей частиц



Генерация излучения



Н. Тесла В.К. Рентген



Д. Д. Иваненко

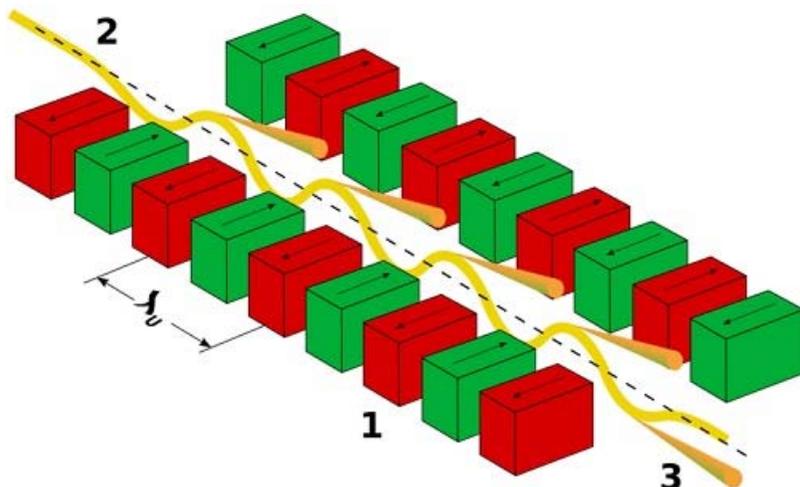


И. Я. Померанчук



J. S. Schwinger

1985-86 описали существование
тормозного излучения

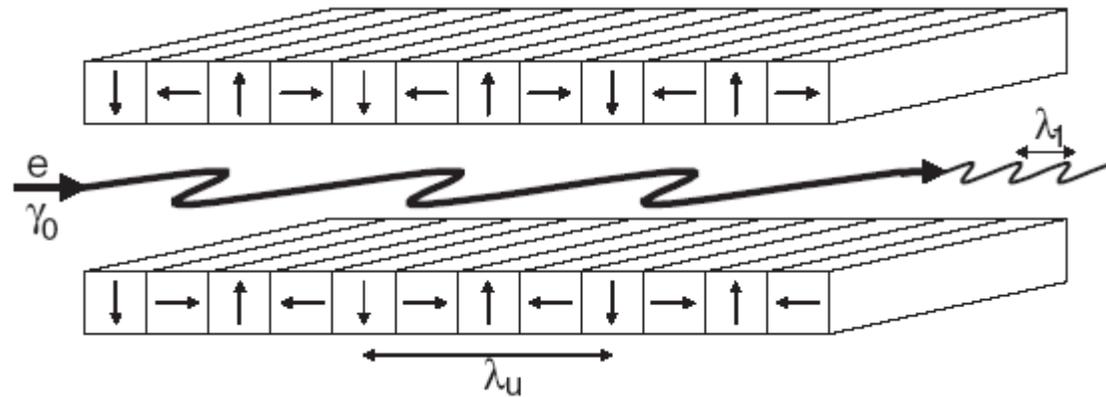


Н.А. Винокуров А.Н. Скринский
1977 – Создали модификацию клистрона –
лазер на свободных электронах

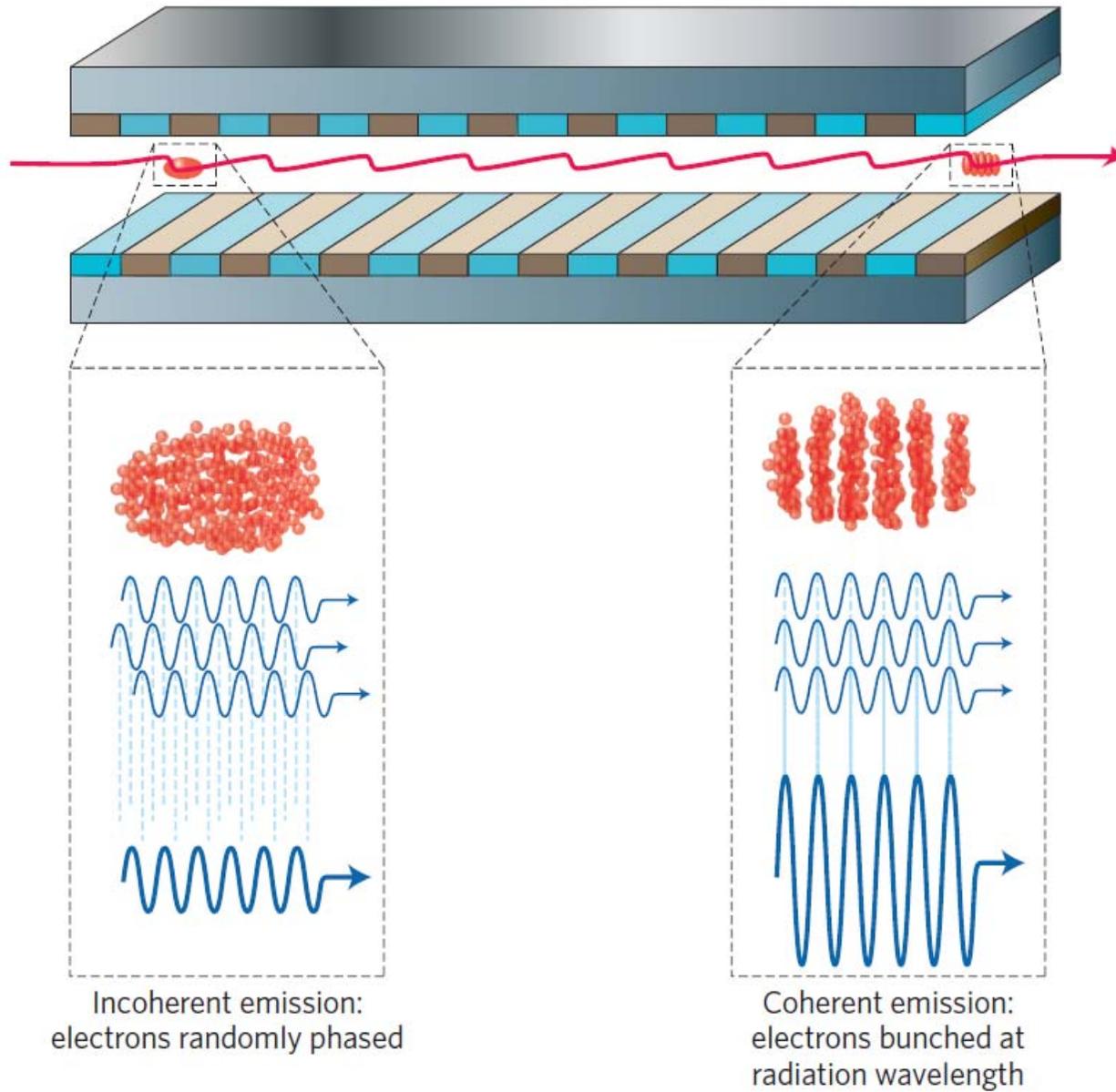
Генерация излучения



The undulator section in the FLASH tunnel



Формирование сгустков электронов



Интенсивность $\sim n$

Интенсивность $\sim n^2$



SACLA

FERMI

XFFI









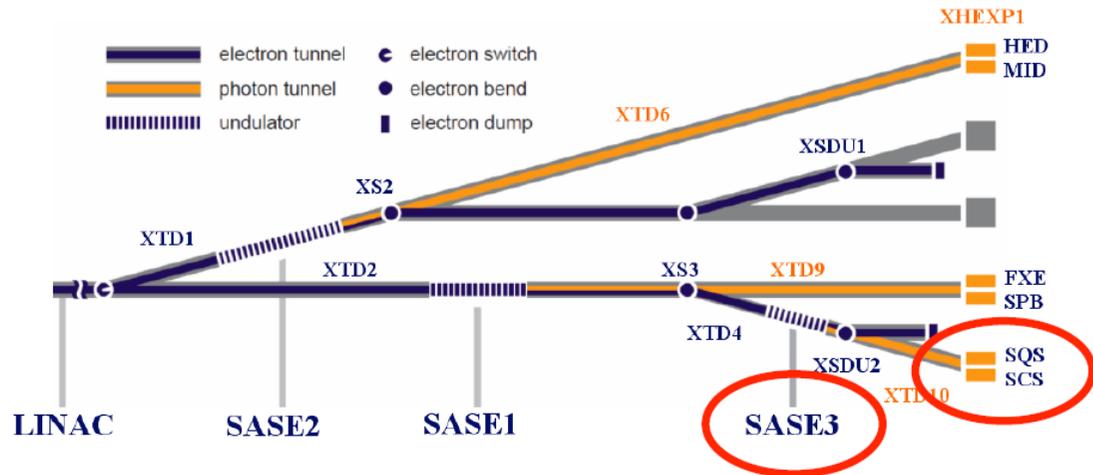


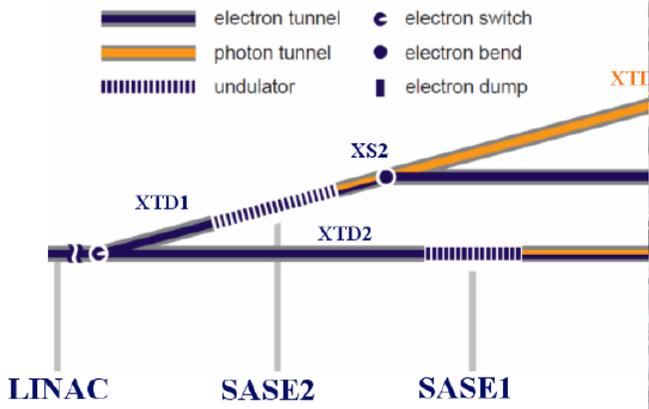
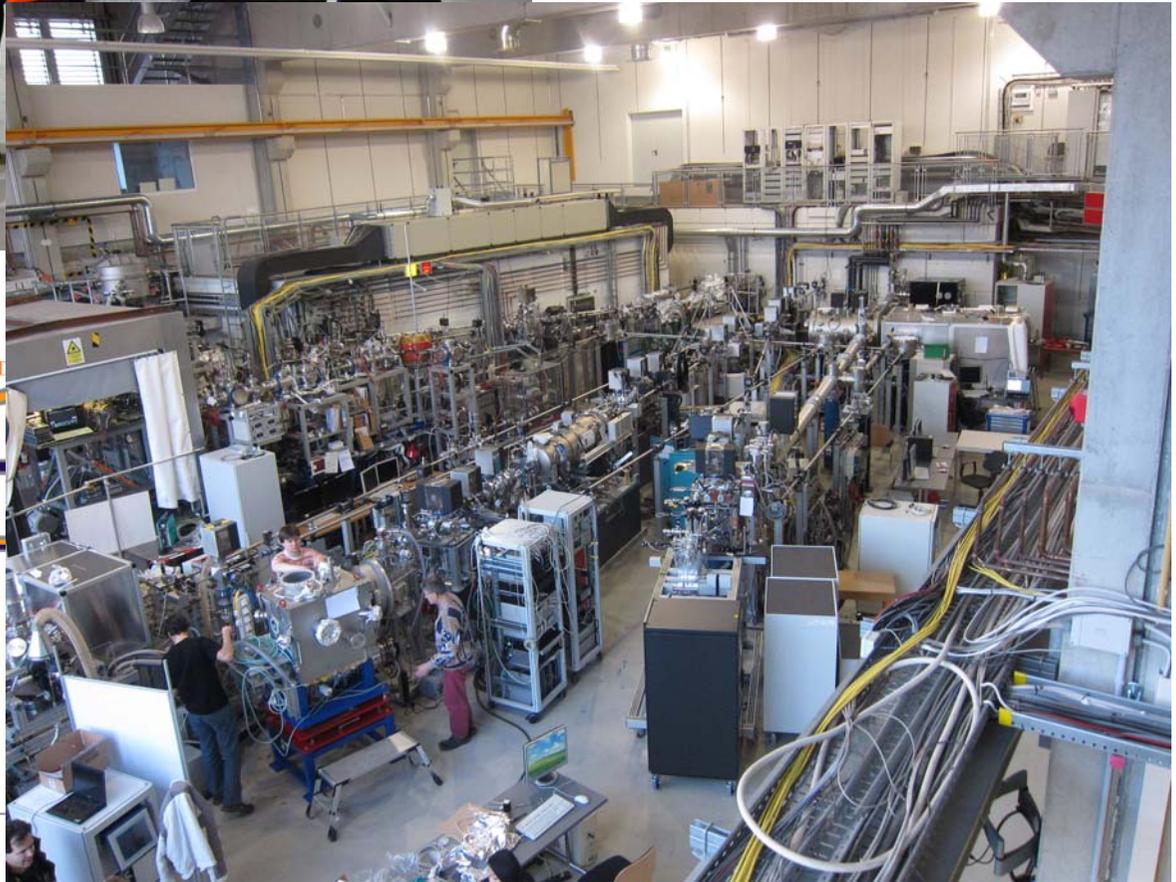


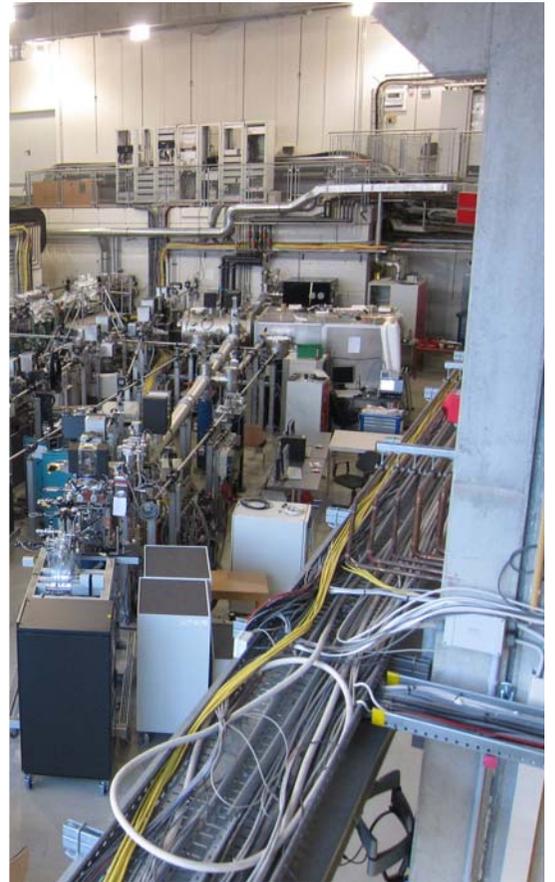


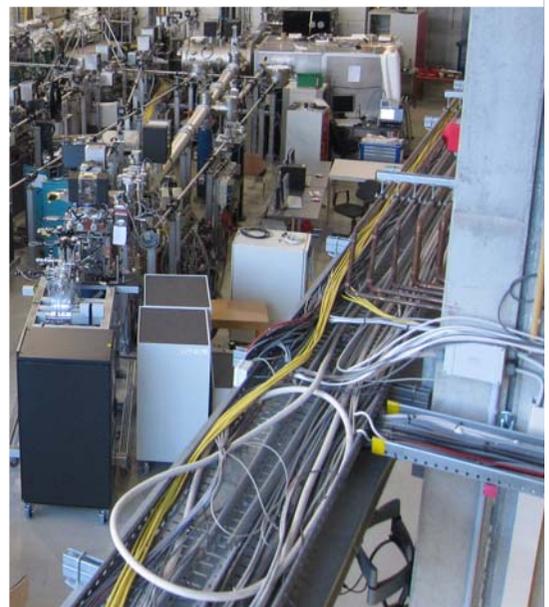
European XFEL



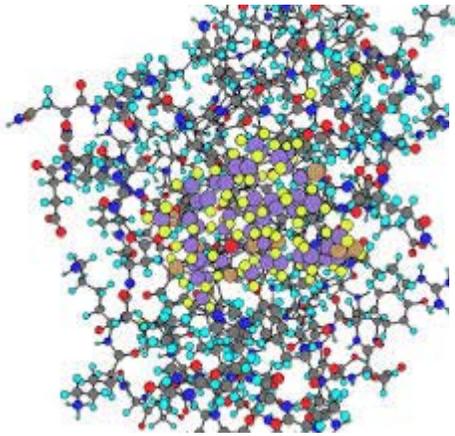






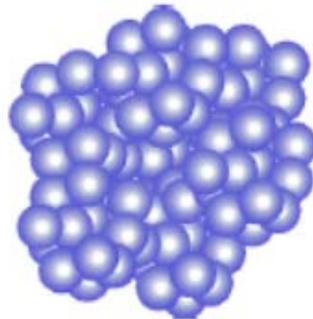


Размеры микробиъектов



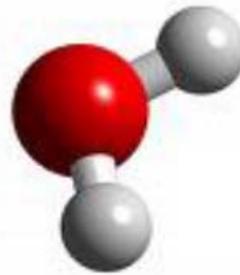
биомолекула

10^{-7} м



кластер

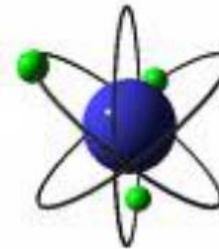
10^{-9} м



молекула

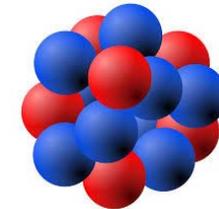
$\sim 10^{-10}$ м

Воды $3 \cdot 10^{-10}$ м



атом

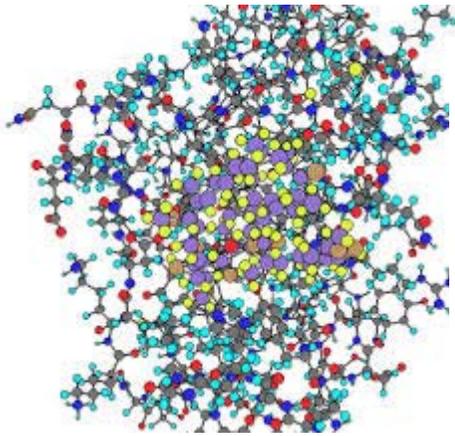
10^{-10} м



ядро

10^{-15} м

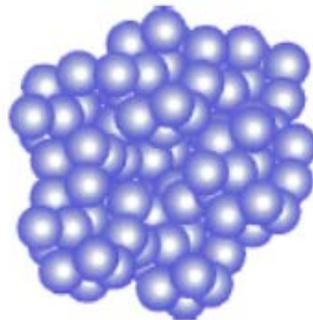
Размеры микробиъектов



биомолекула

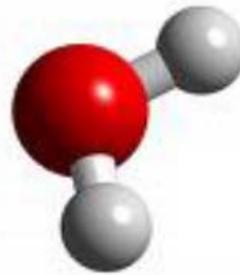
10^{-7} м

Длина волны
красного света в
два раза больше
чем длина ДНК



кластер

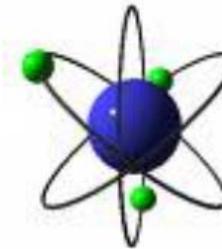
10^{-9} м



молекула

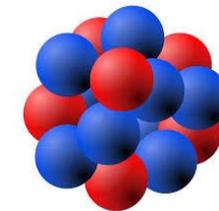
$\sim 10^{-10}$ м

Воды $3 \cdot 10^{-10}$ м



атом

10^{-10} м



ядро

10^{-15} м

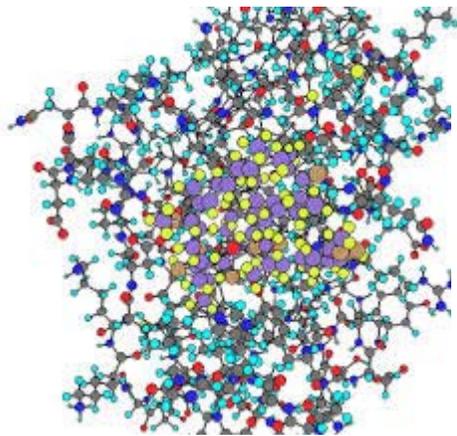
Небольшие квантовые системы

Размеры микробиъектов

Получение изображений

Изучение динамики

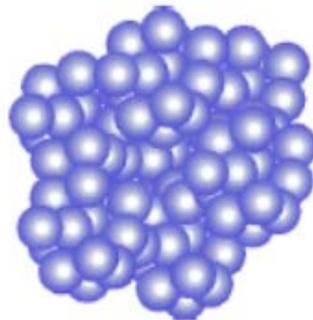
Нелинейные явления



биомолекула

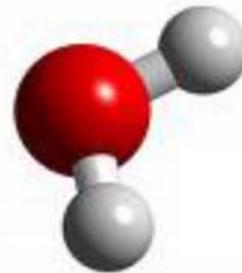
10^{-7} м

Длина волны
красного света в
два раза больше
чем длина ДНК



кластер

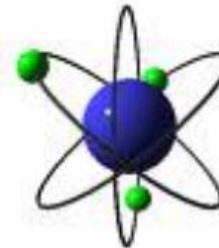
10^{-9} м



молекула

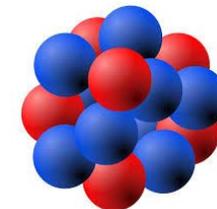
$\sim 10^{-10}$ м

Воды $3 \cdot 10^{-10}$ м



атом

10^{-10} м

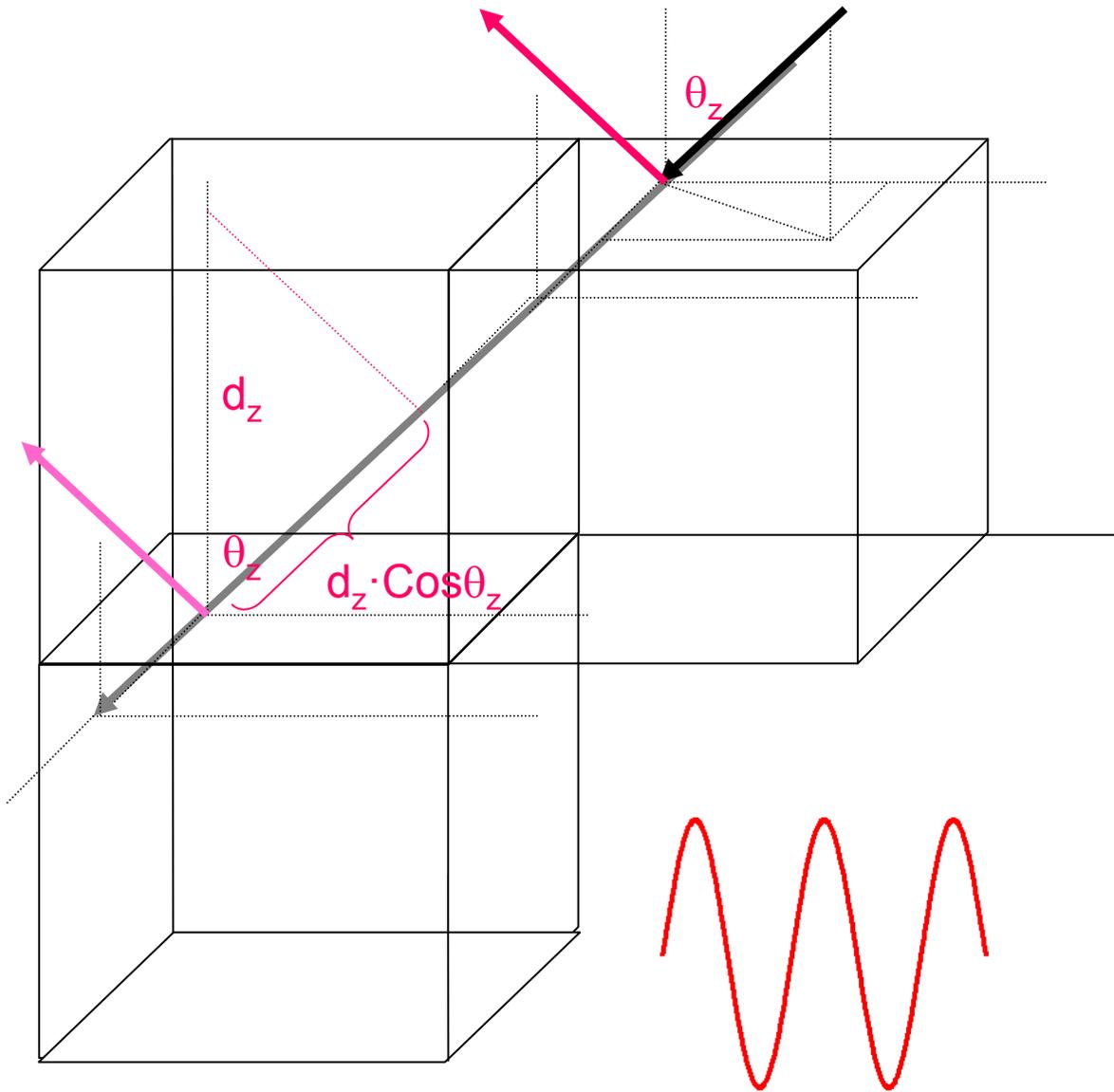


ядро

10^{-15} м

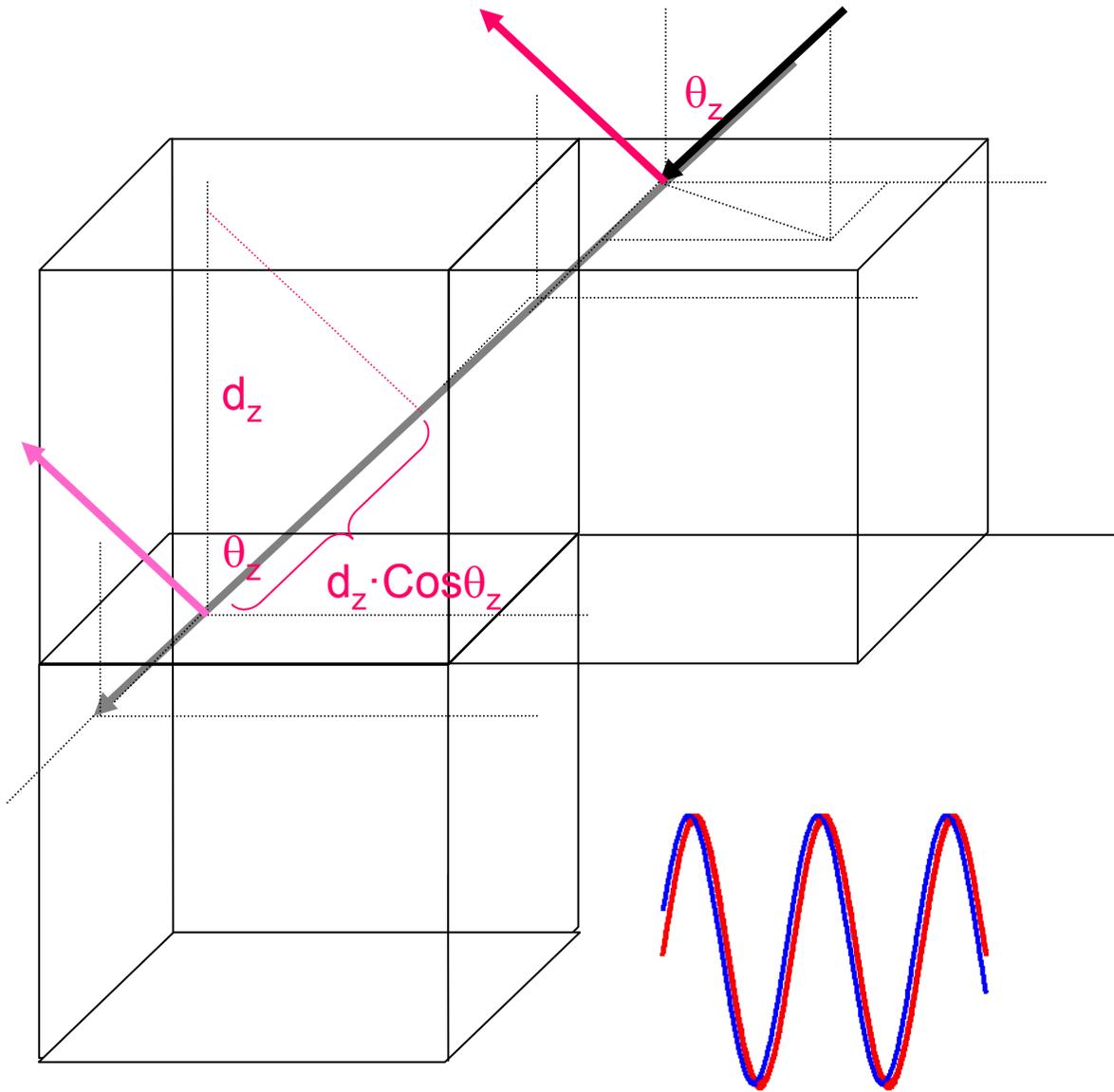
Небольшие квантовые системы

Дифракция рентгеновских лучей



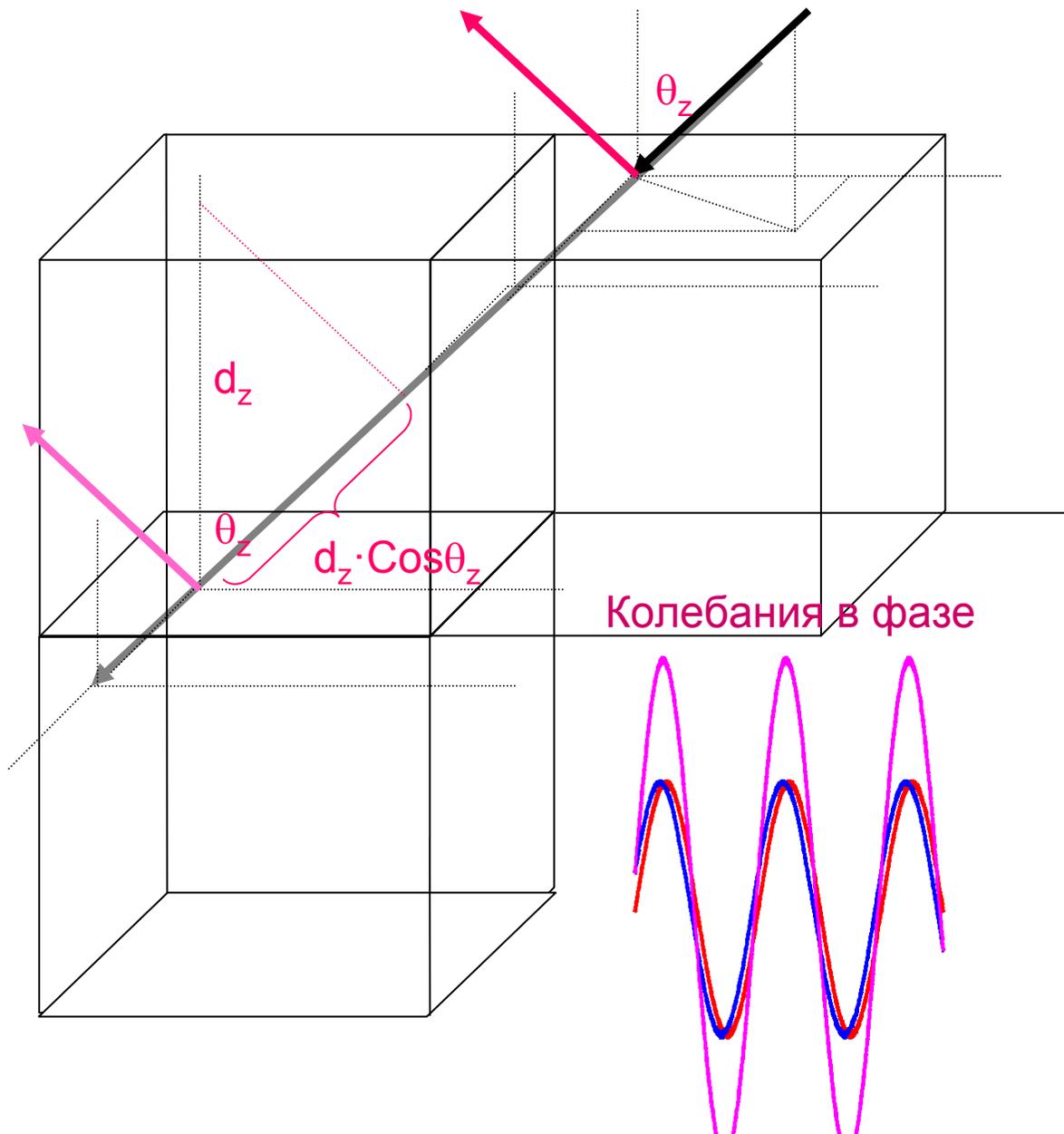
$$2d_z \cos \theta_z = n\lambda;$$

Дифракция рентгеновских лучей



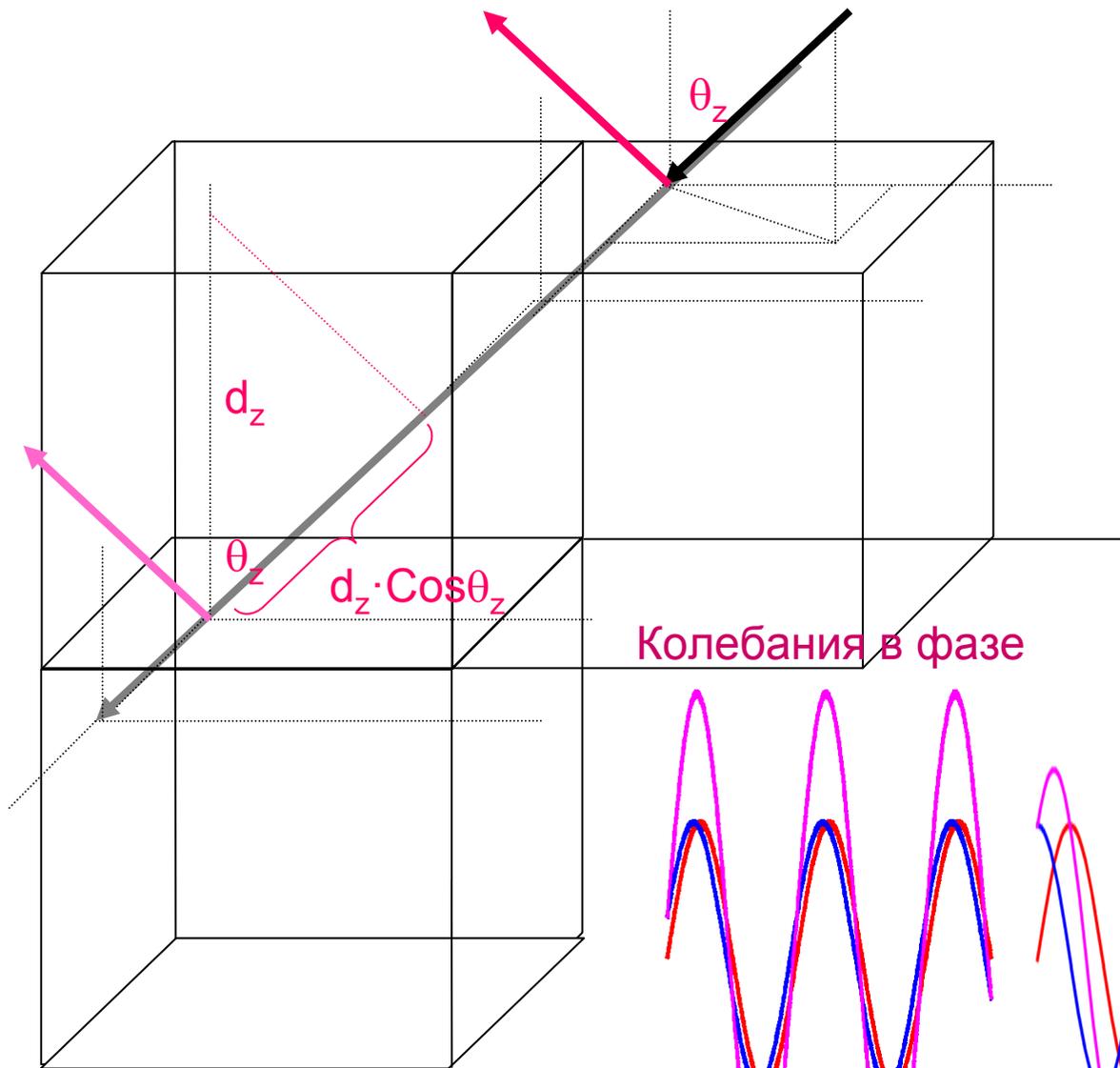
$$2d_z \cos \theta_z = n\lambda;$$

Дифракция рентгеновских лучей



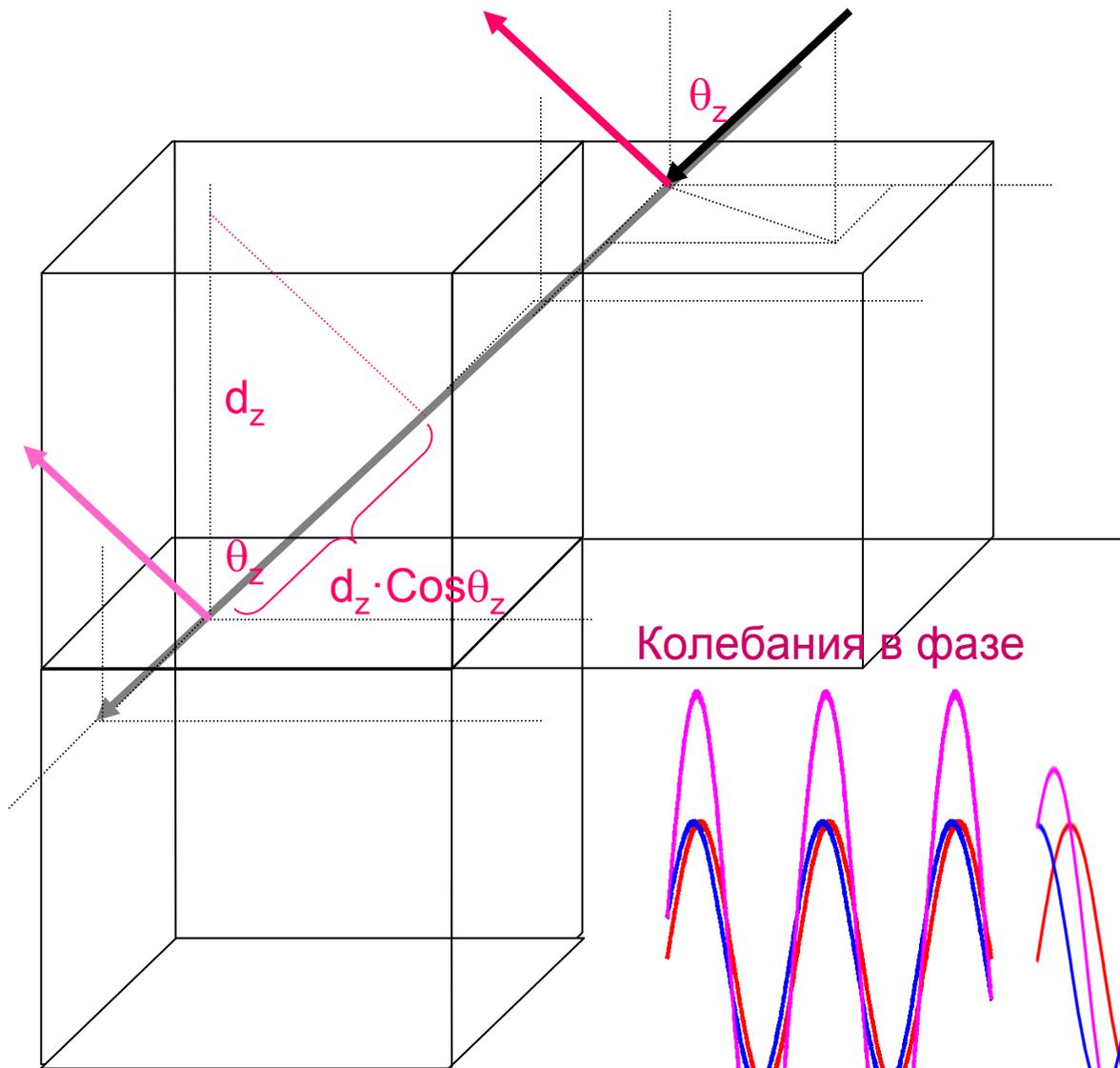
$$2d_z \cos \theta_z = n\lambda;$$

Дифракция рентгеновских лучей



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

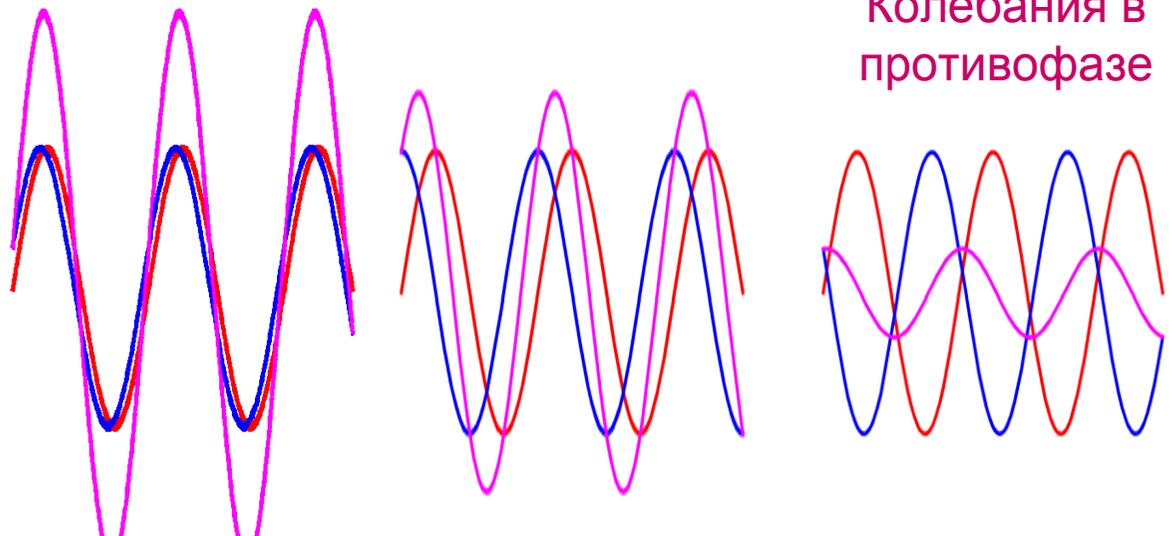
Дифракция рентгеновских лучей



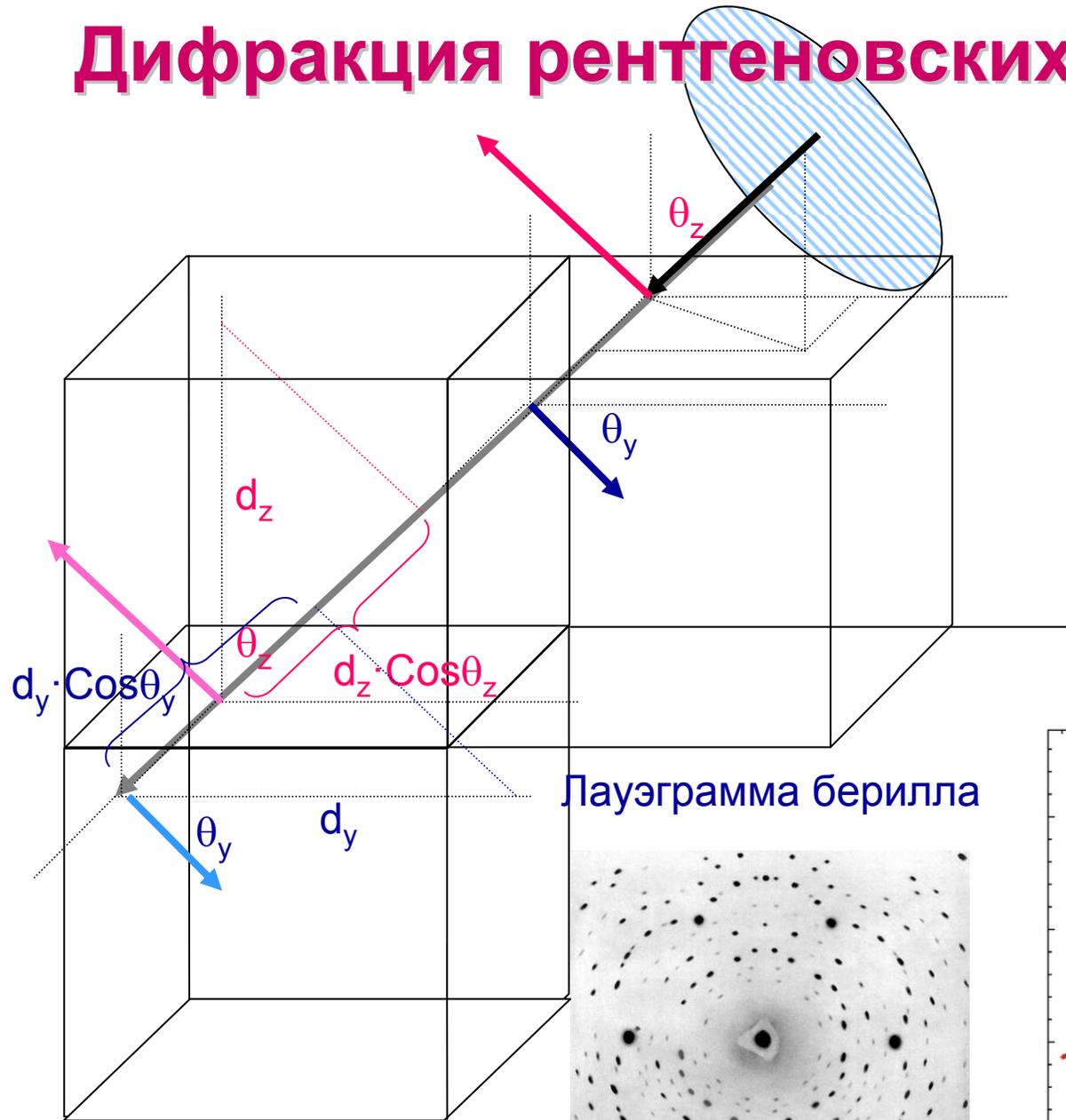
$$2d_z \cos \theta_z = n\lambda;$$

Колебания в фазе

Колебания в противофазе



Дифракция рентгеновских лучей



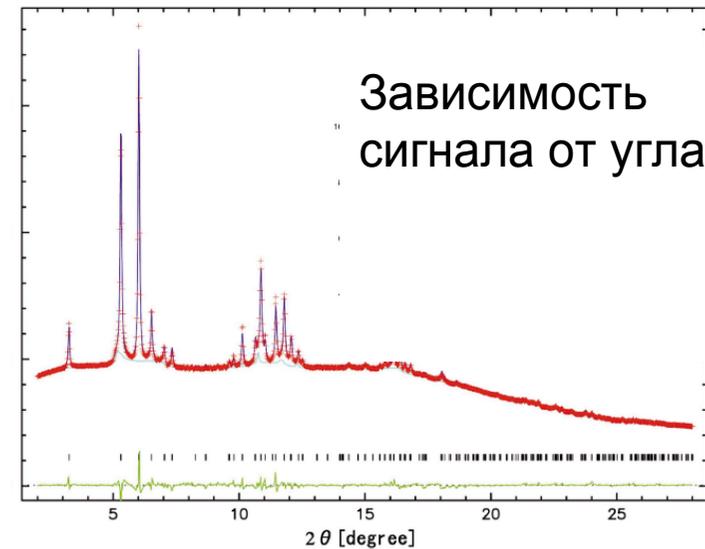
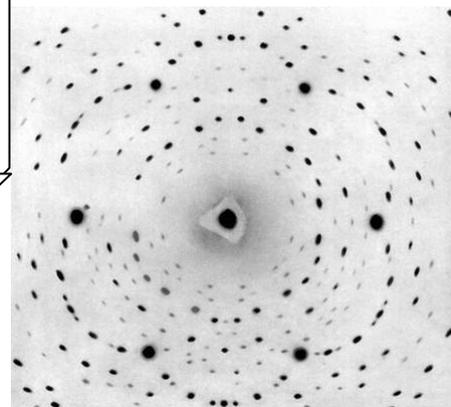
Уравнения Лауэ

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

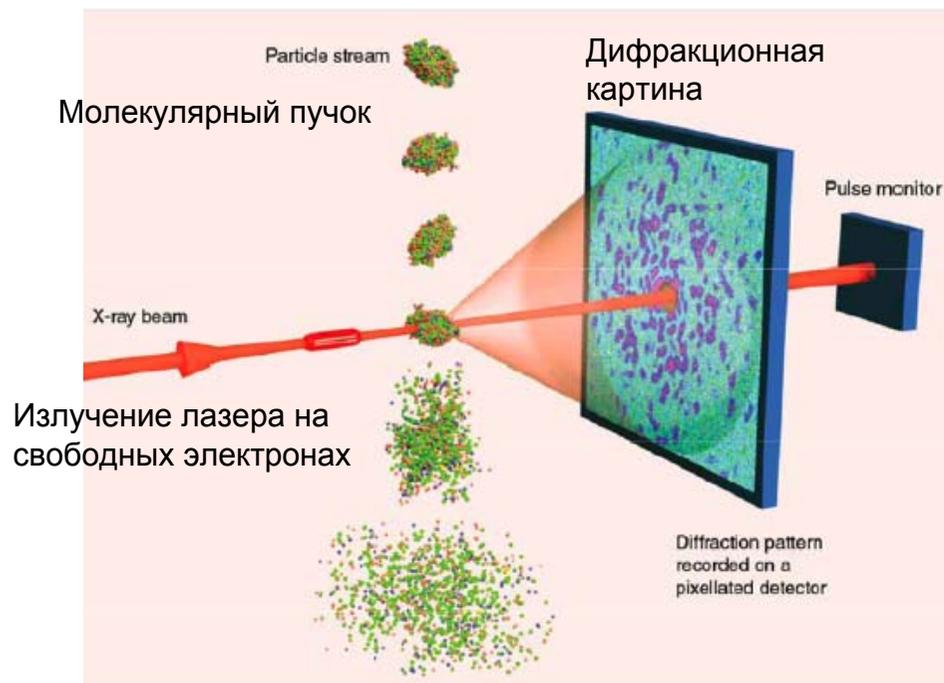
$$2d_y \cos \theta_y = m\lambda;$$

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

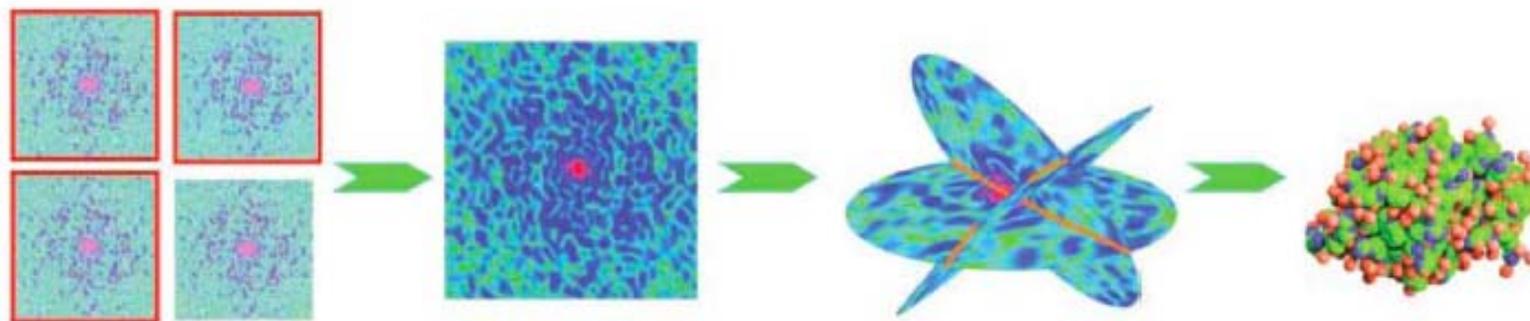
Лауэграмма берилла



Восстановление трехмерной структуры молекулы



Тень от ядерного взрыва



классификация

усреднение

ориентация

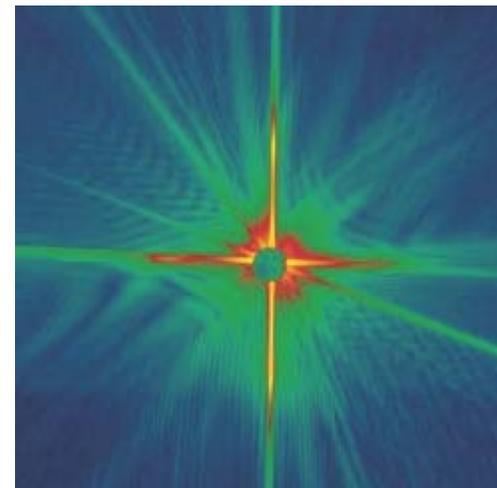
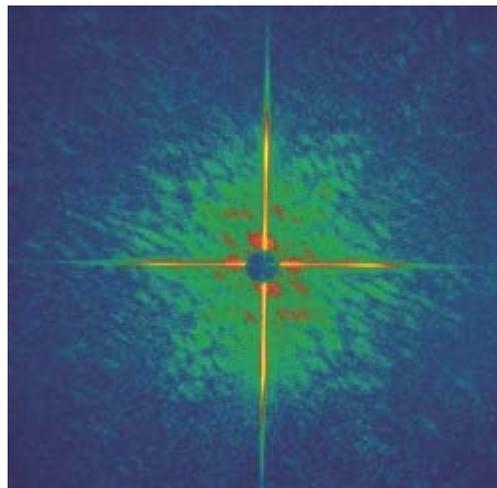
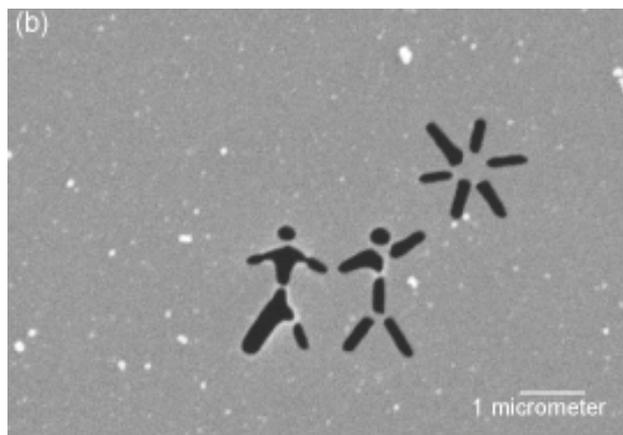
реконструкция

K. J. Gaffney, H. N. Chapman

Imaging Atomic Structure and Dynamics with Ultrafast X-ray Scattering

Science, 316, 1444 (2007).

Модельный эксперимент на FLASH:



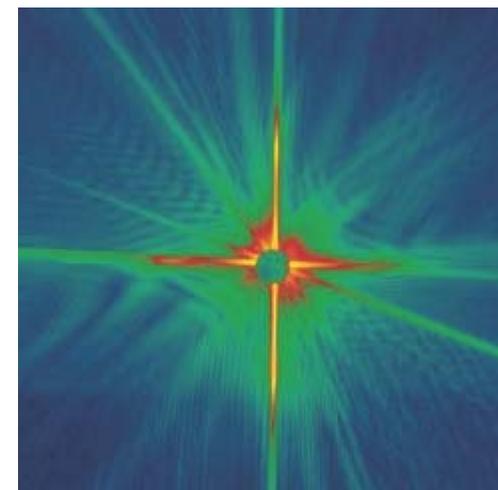
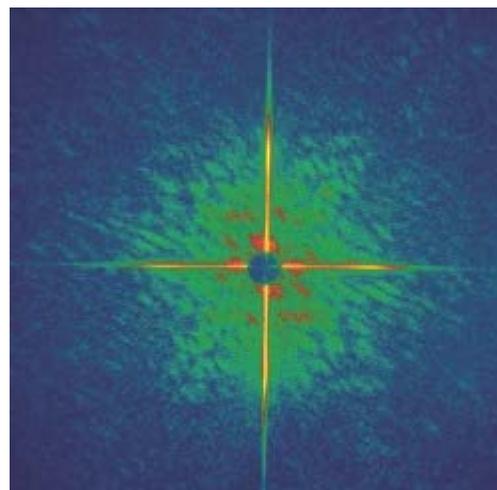
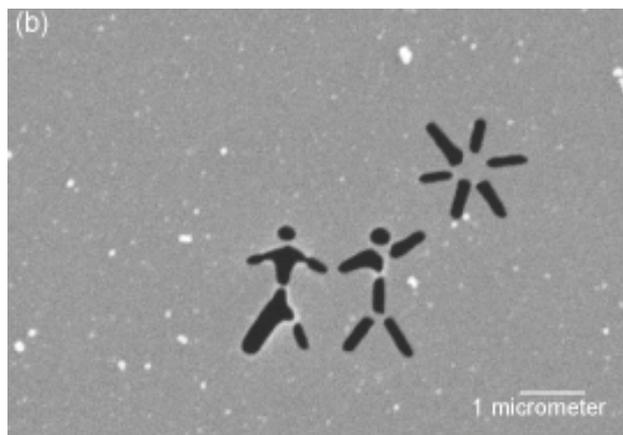
**from the next pulse:
no object**

Фемто - 10^{-15}

Пико - 10^{-12}

Нано - 10^{-9}

Модельный эксперимент на FLASH:



from the next pulse:
no object

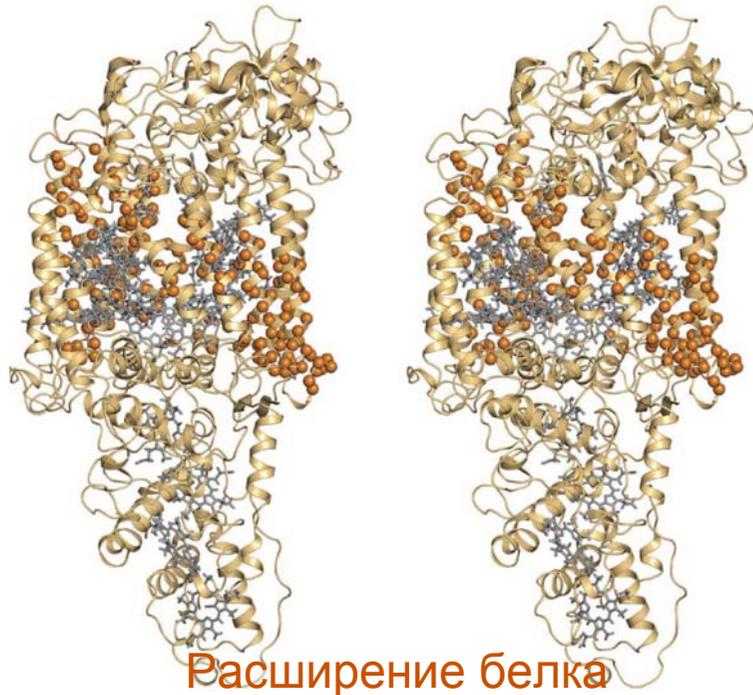
Отображение и голография наноструктур с временным разрешением до 10 фс.

Фемто - 10^{-15}

Пико - 10^{-12}

Нано - 10^{-9}

Гипотеза о дрожании белка 'protein quake'



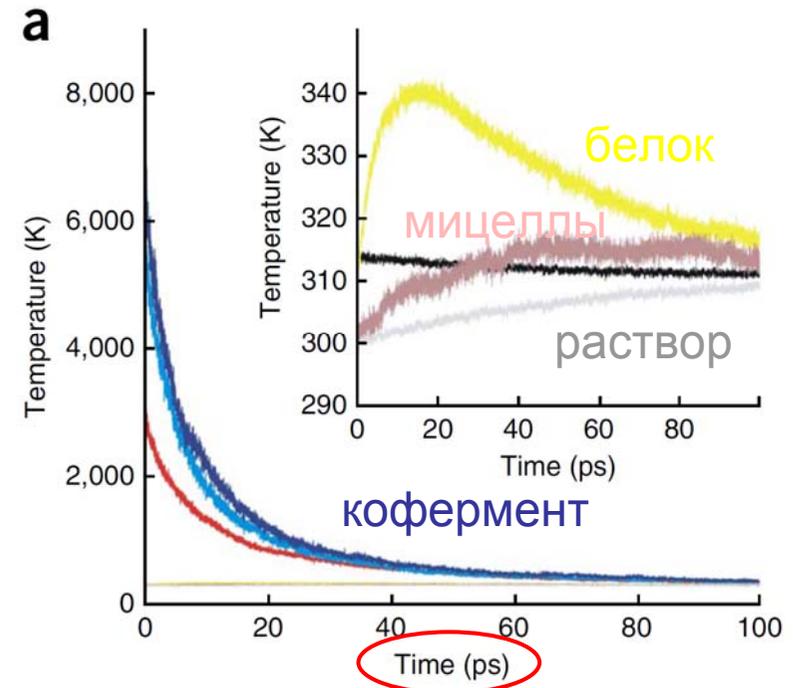
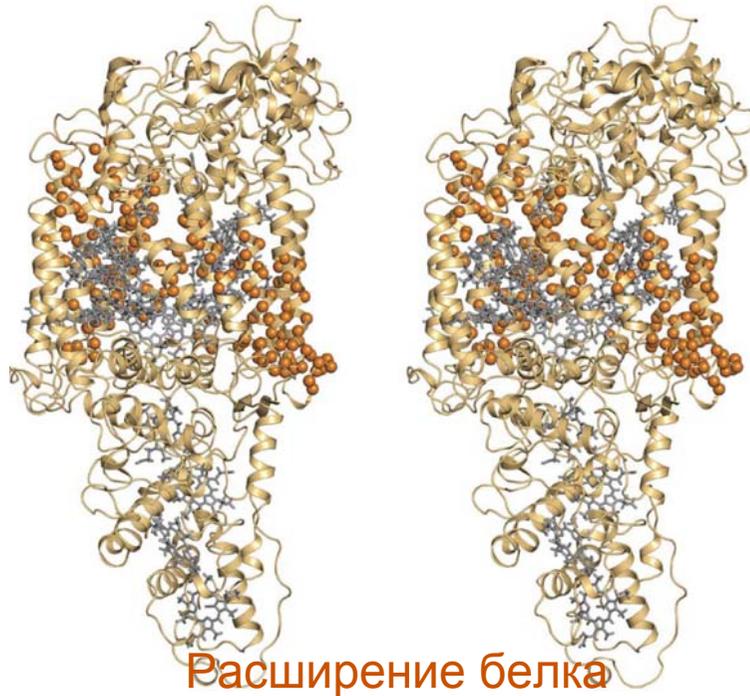
Многофотонное возбуждение центра фотосинтеза *Blastochloris viridis* позволило наблюдать изменение формы, возникающие на временах порядка пикосекунды (10^{-12}) и предшествующие распространению тепла через белок

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'



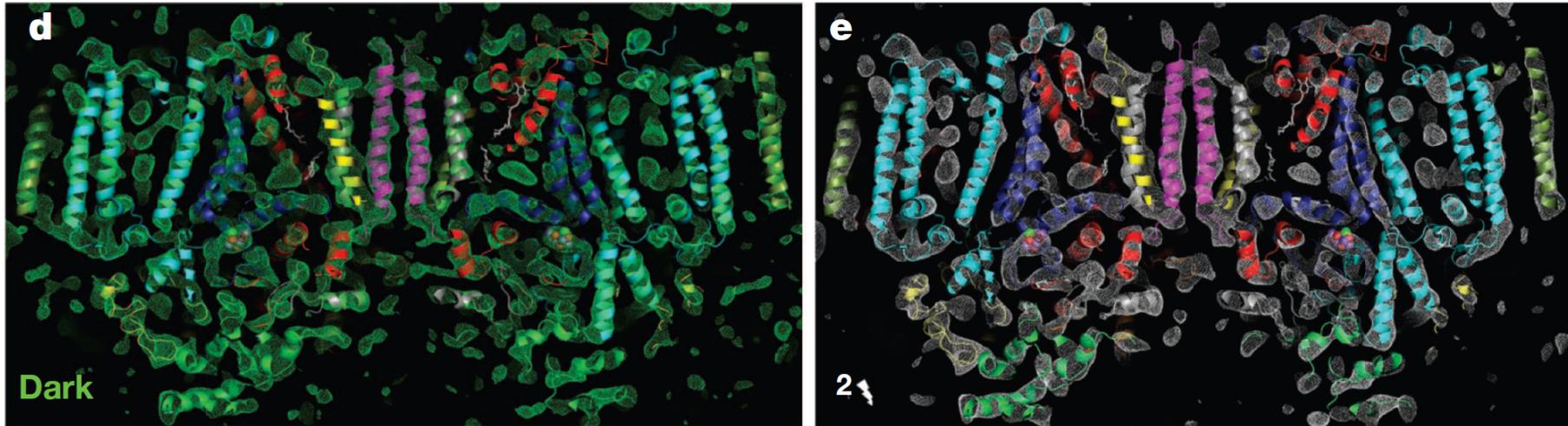
Многофотонное возбуждение центра фотосинтеза *Blastochloris viridis* позволило наблюдать изменение формы, возникающие на временах порядка пикосекунды (10^{-12}) и предшествующие распространению тепла через белок

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



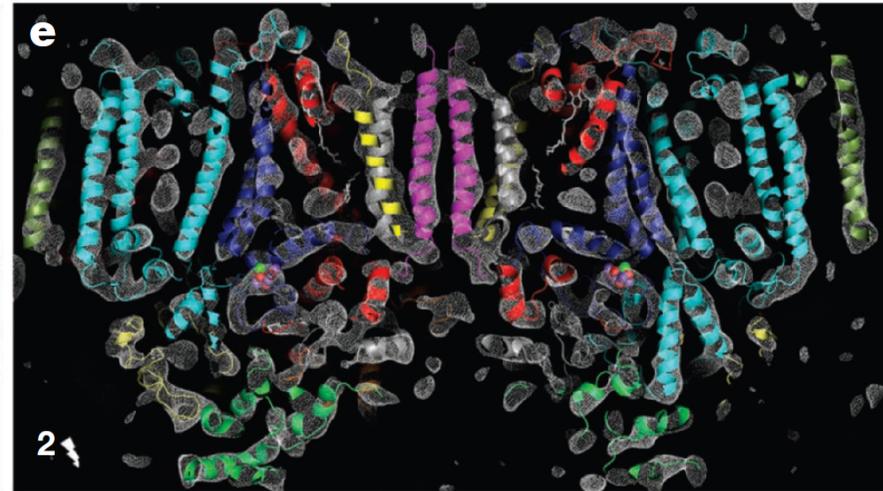
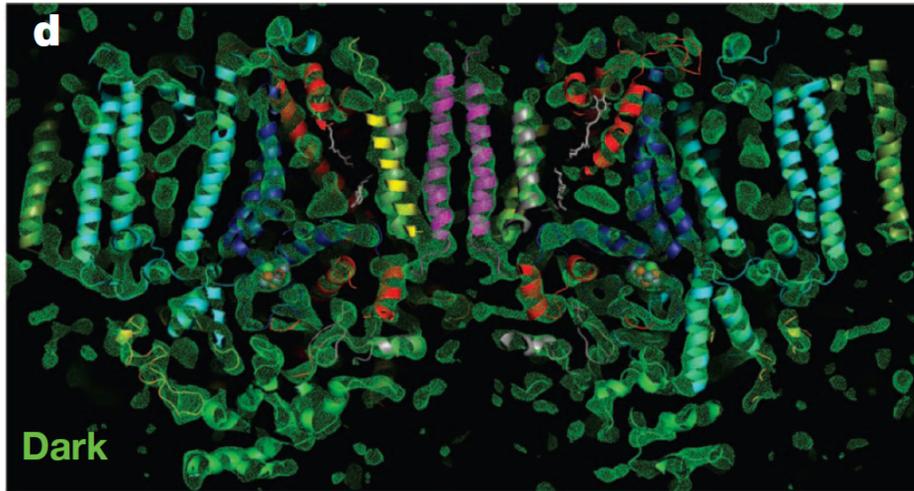
Карта электронной плотности фотосистемы II (H_2O -пластохиноноксидоредуктаза) до и после поглощения двух фотонов

Наблюдение биохимического процесса в режиме реального времени

Наблюдение фотосинтеза

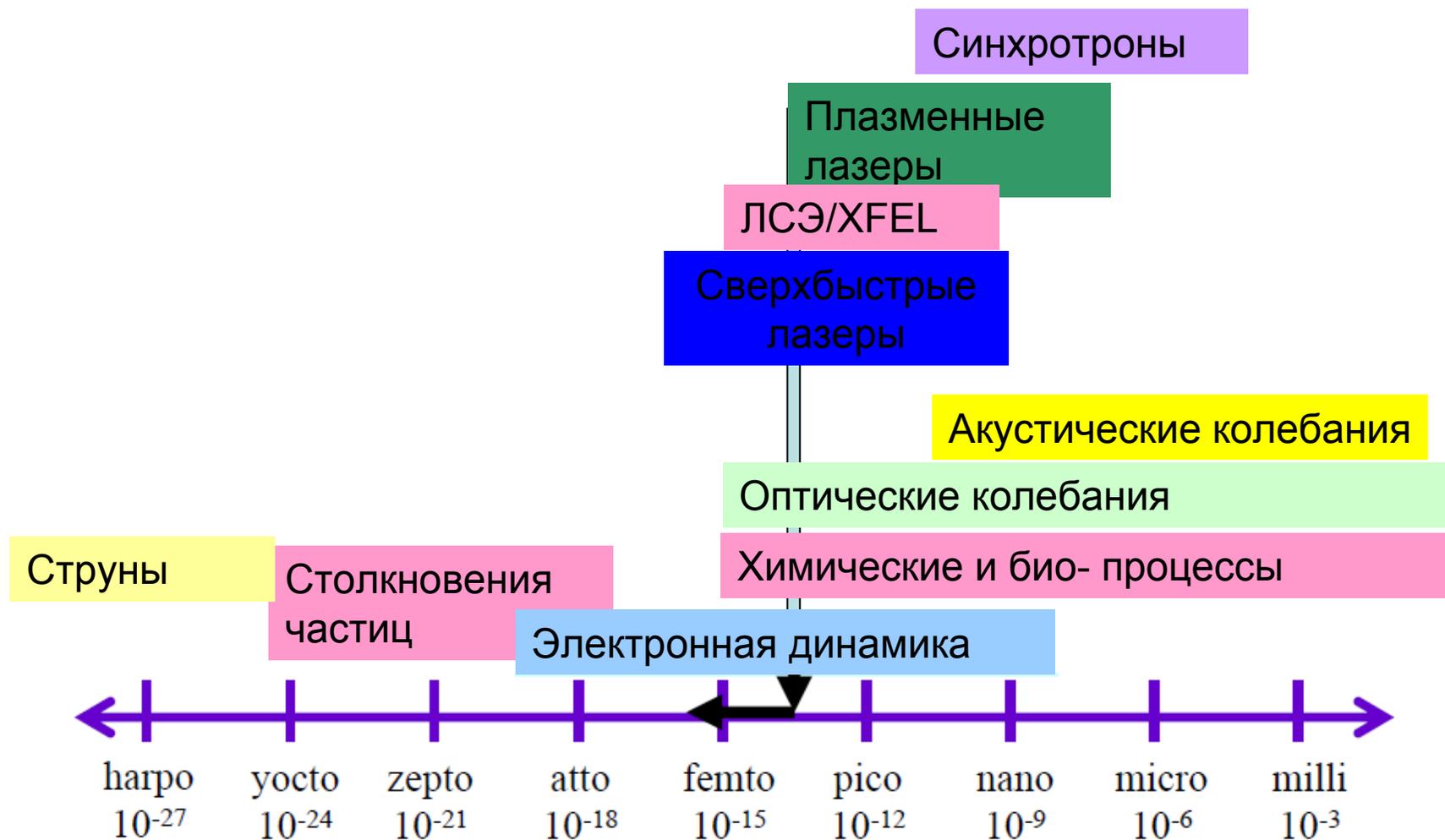


0:0 → 3:2



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

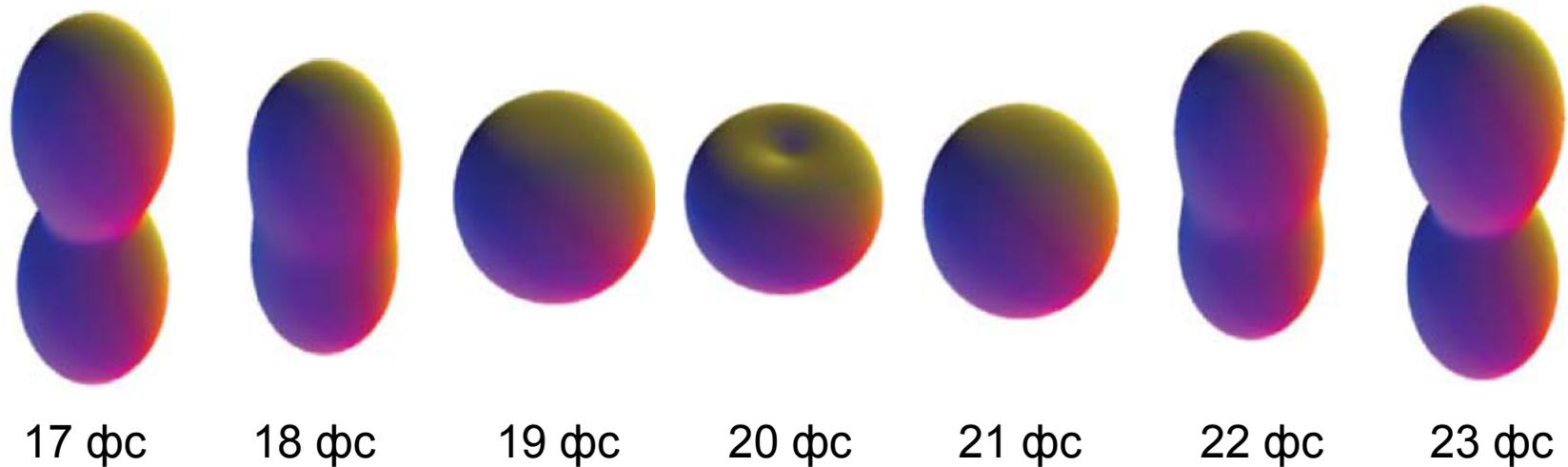
Шкала времен для быстрых процессов



J. Hastings

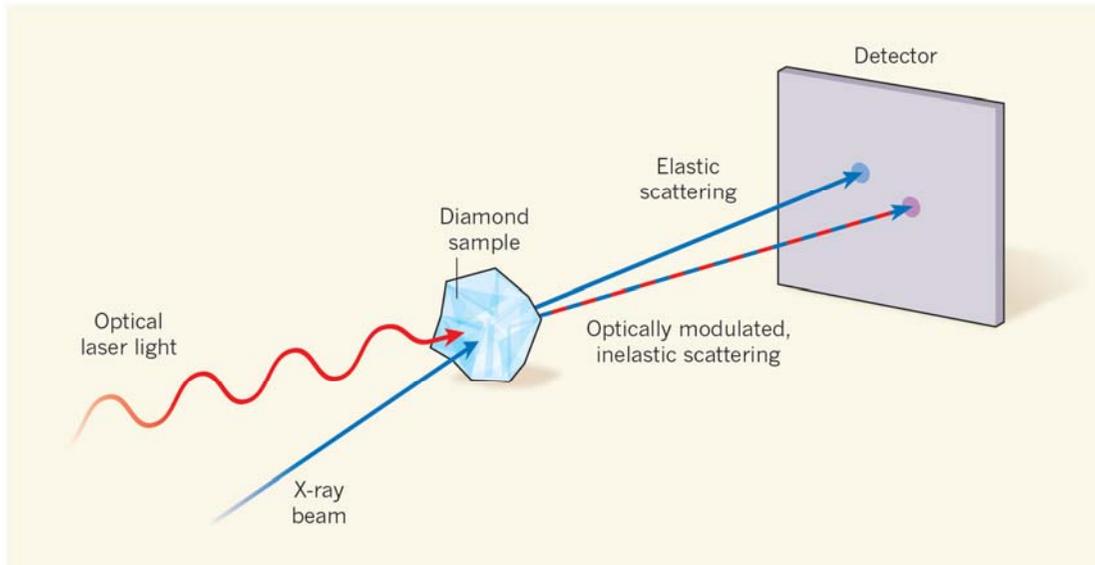
Наблюдение эволюции электронной плотности

Облучение атома криптона электромагнитным импульсом

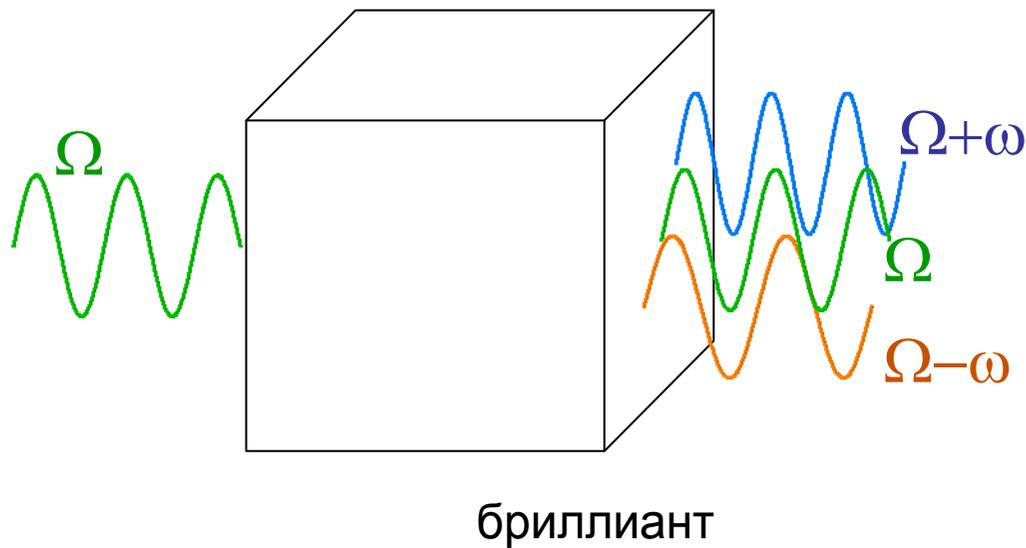


Плотность 4p оболочки как функция времени

Сложение (вычитание) частот



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



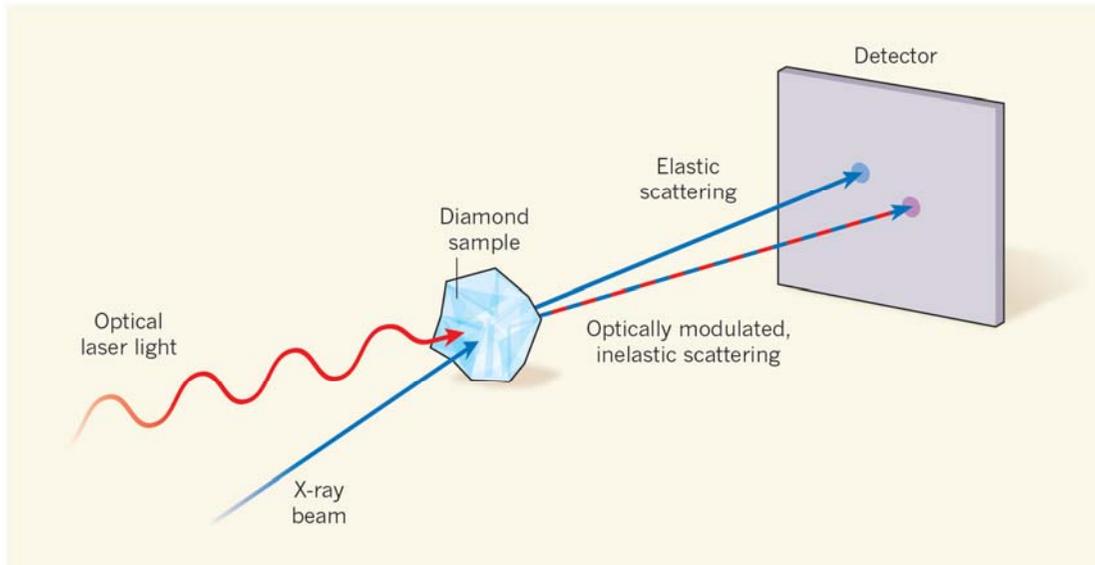
сложение



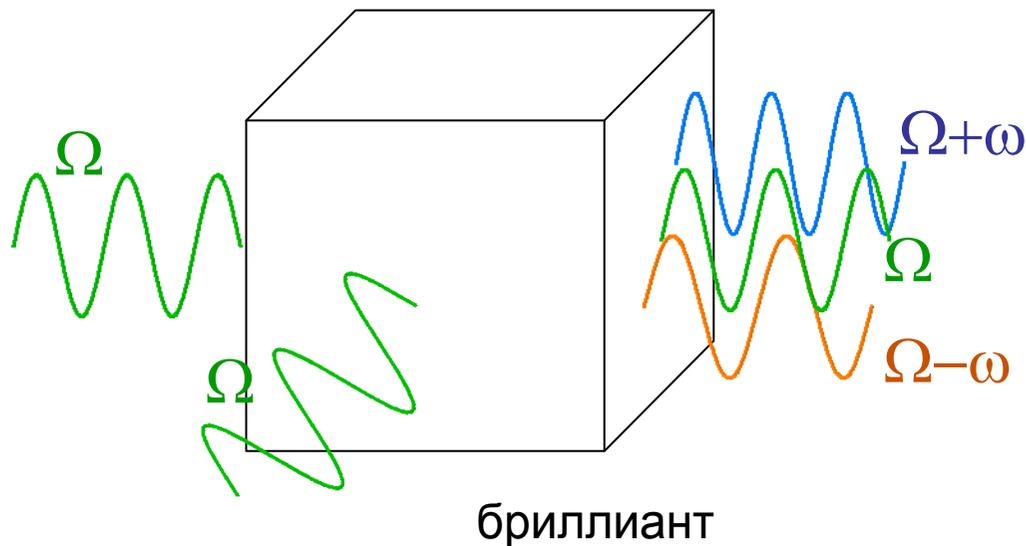
вычитание



Сложение (вычитание) частот



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



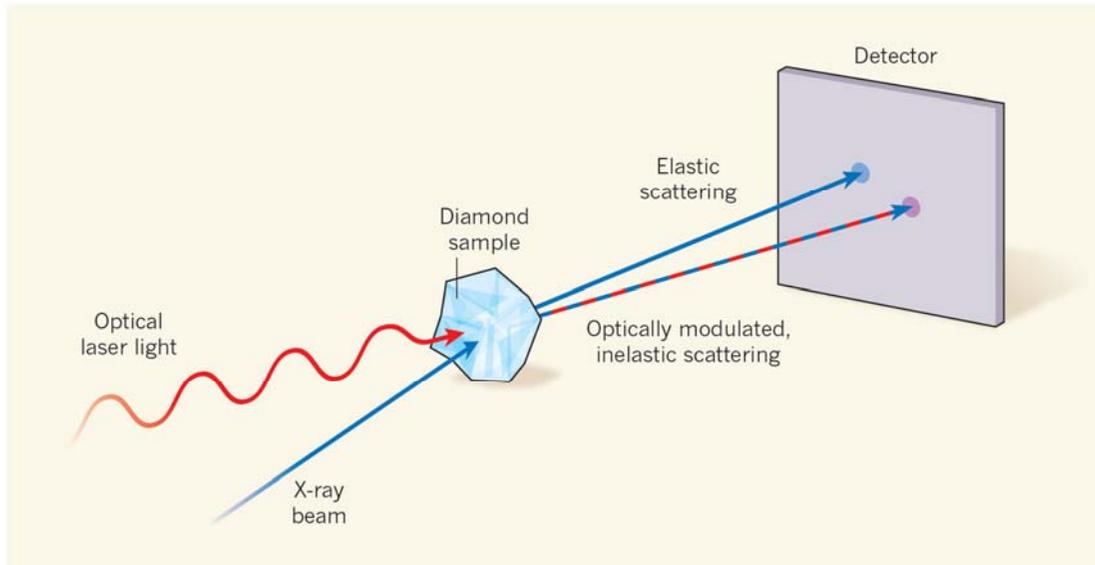
сложение



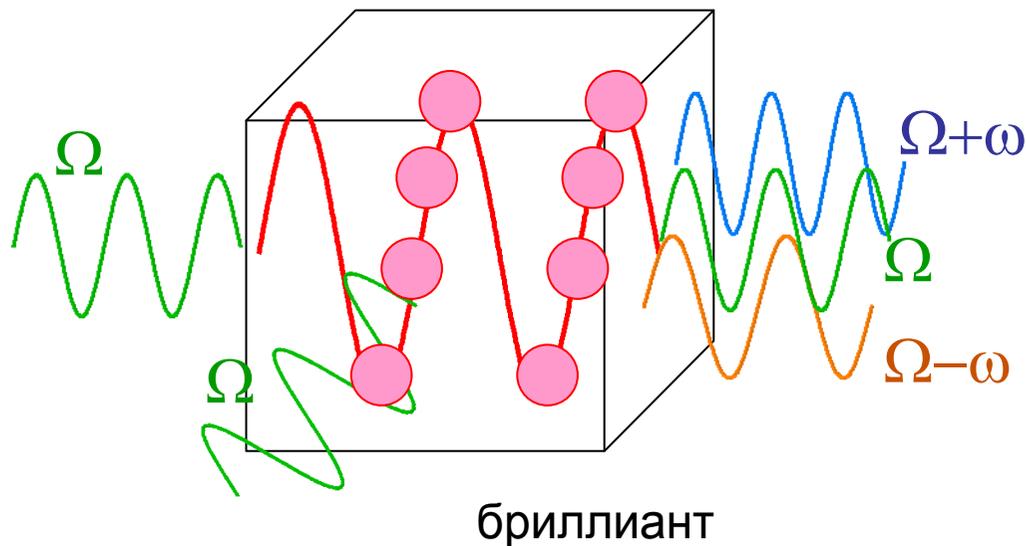
вычитание



Сложение (вычитание) частот



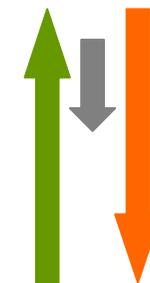
Сравнение теории с экспериментом позволило утверждать, что оптический лазер динамически изменил ковалентные связи в алмазе.



сложение

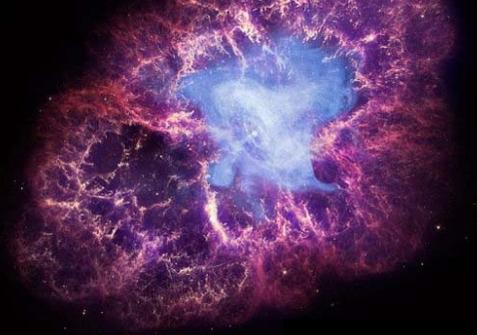


вычитание



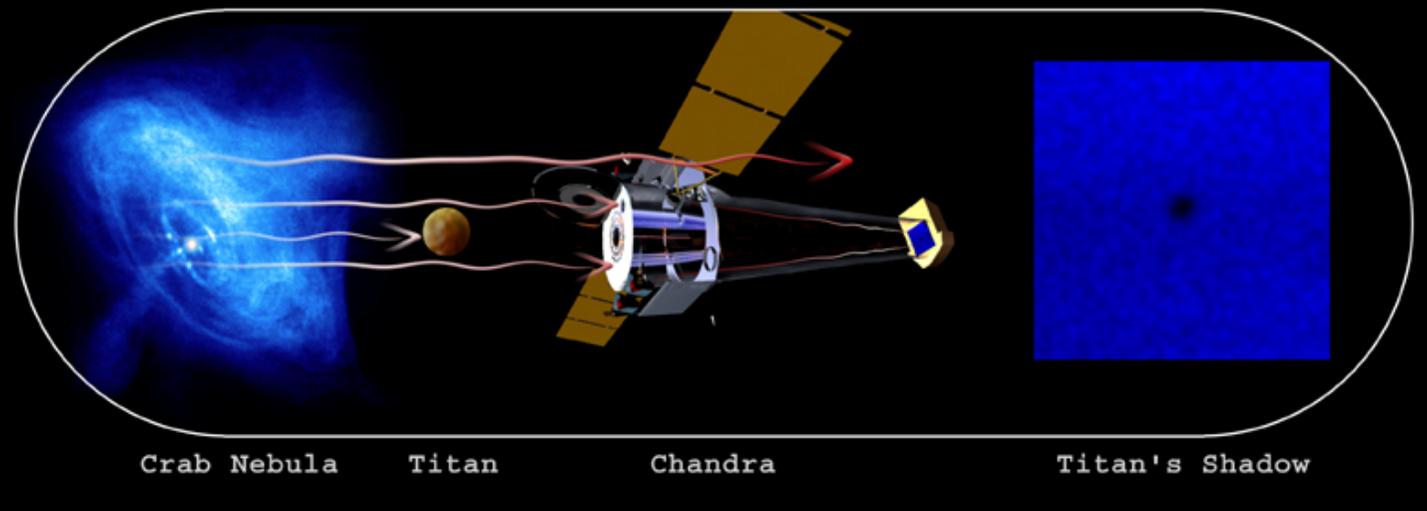
Космическая рентгенография

Крабовидная туманность 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».

<http://www.onr.navy.mil/Media-Center/Fact-Sheets/Free-Electron-Laser.aspx>

Как к нам попасть?

Физический факультет МГУ

Кафедра общей ядерной физики

Лаборатория
Д-ра А.Н. Грум-Гржимайло



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

gryzlova@gmail.com