

**Современные источники рентгеновского
излучения
и что нового они привнесли в науку**

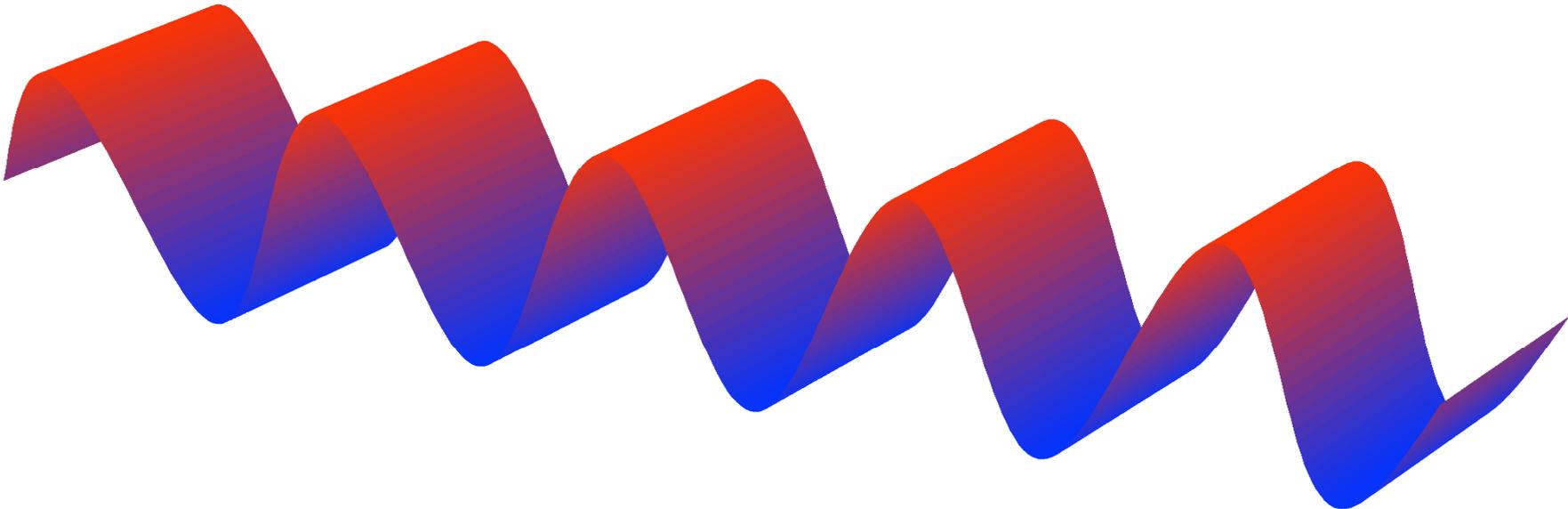
Грызлова Елена Владимировна

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

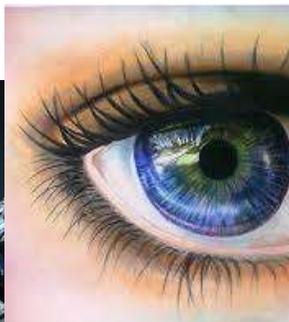
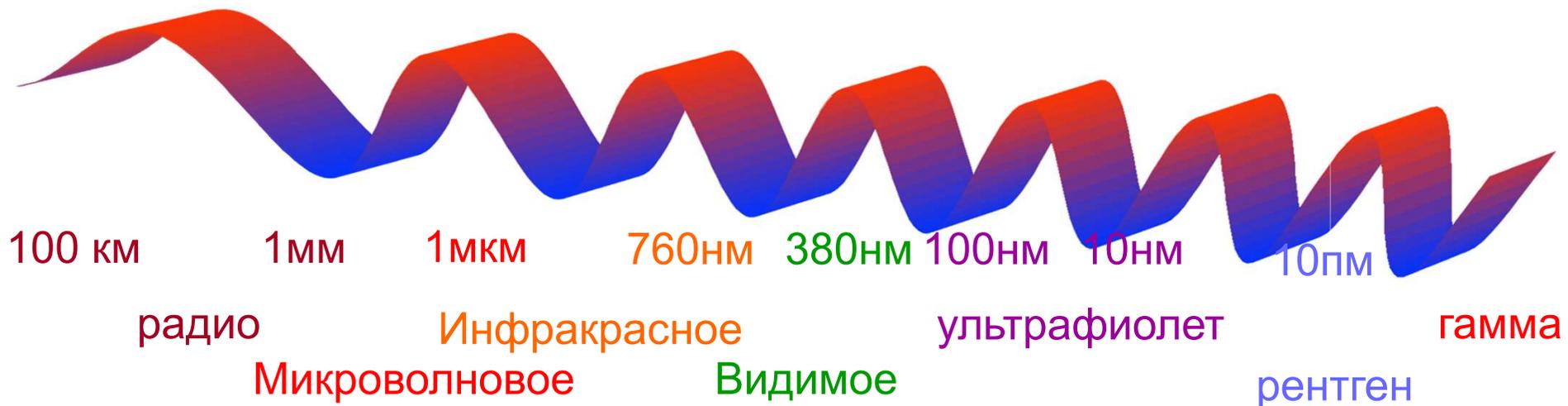
**Университетские субботы
18 апреля 2015 года, МГУ, Москва**

Рентгеновские

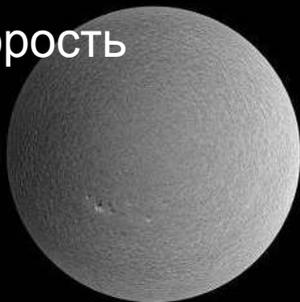
лазеры



Шкала длин электромагнитных волн

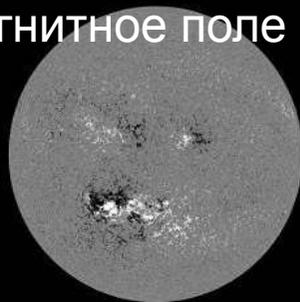


Скорость



HMI Dopplergram
Surface movement
Photosphere

Магнитное поле



HMI Magnetogram
Magnetic field polarity
Photosphere

Видимый диапазон



HMI Continuum
Matches visible light
Photosphere

Ультрафиолет



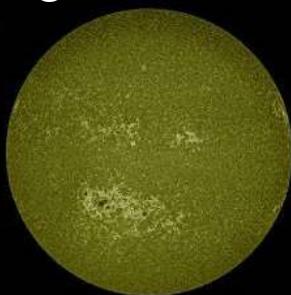
AIA 1700 Å
4500 Kelvin
Photosphere

C



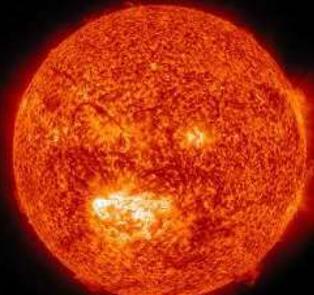
AIA 4500 Å
6000 Kelvin
Photosphere

He

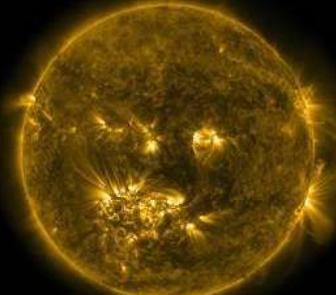


AIA 1600 Å
10,000 Kelvin
Upper photosphere/
Transition region

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



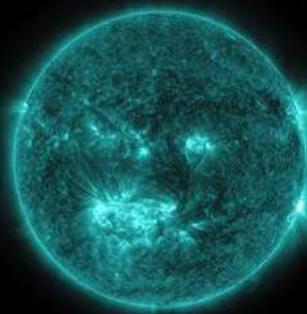
AIA 211 Å
2 million Kelvin
Active regions



AIA 335 Å
2.5 million Kelvin
Active regions

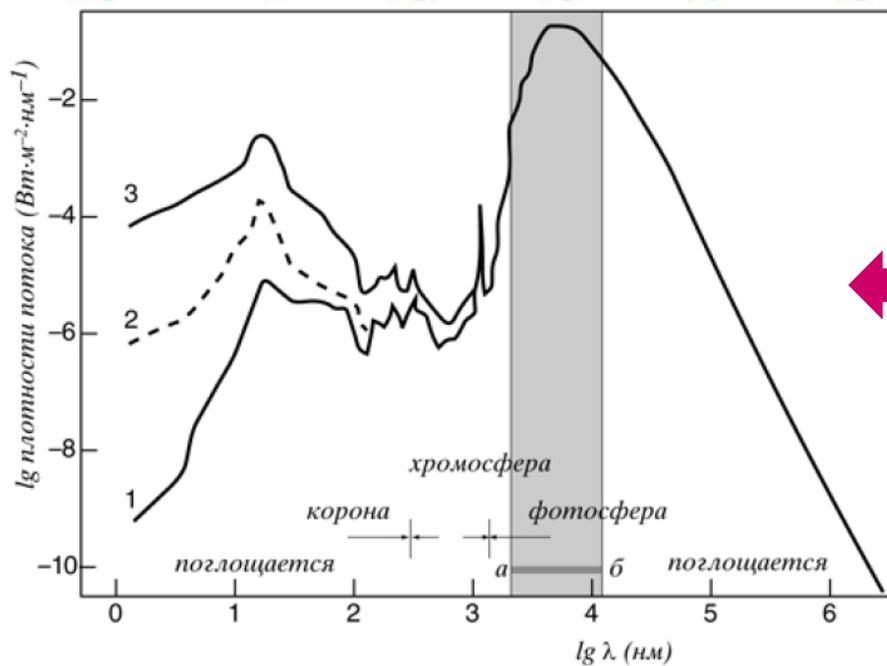
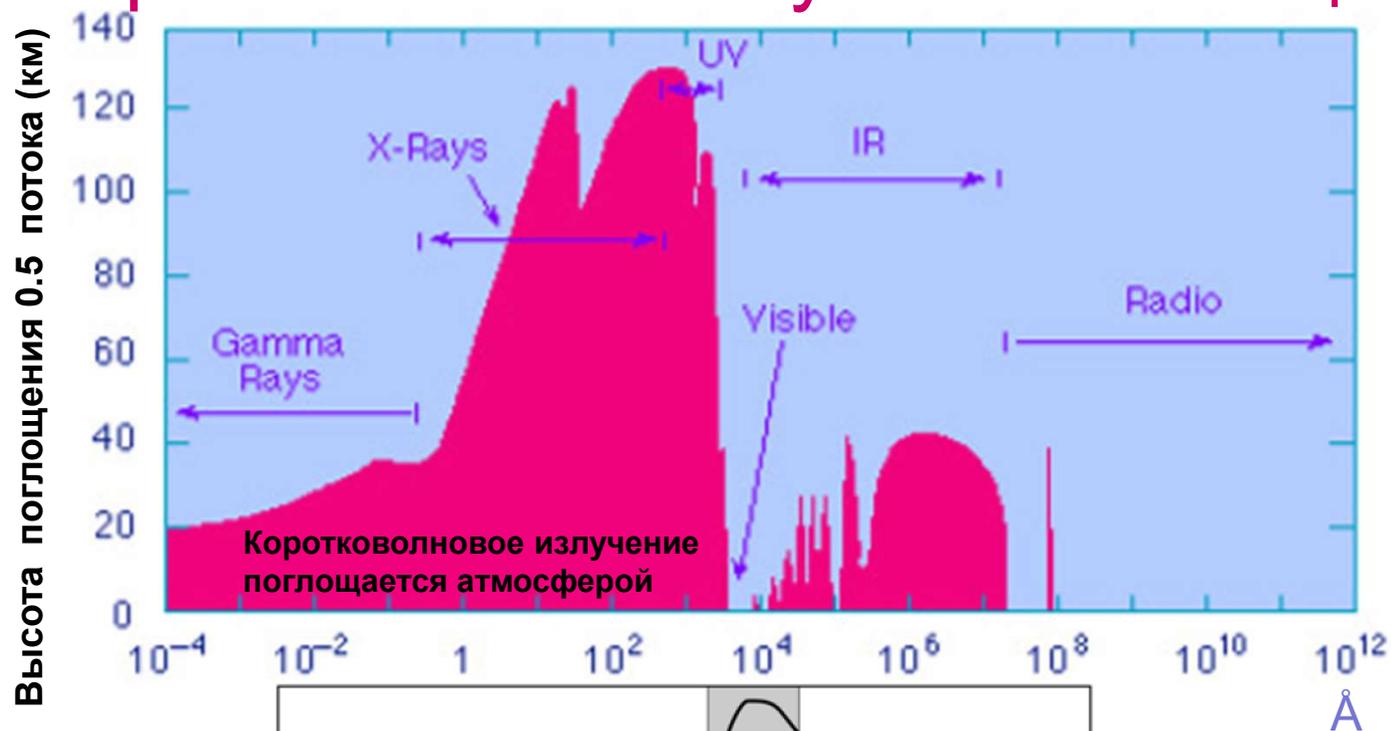


AIA 094 Å
6 million Kelvin
Flaring regions



AIA 131 Å
10 million Kelvin
Flaring regions

Электромагнитное излучение Солнца на Земле



Спектр излучения Солнца

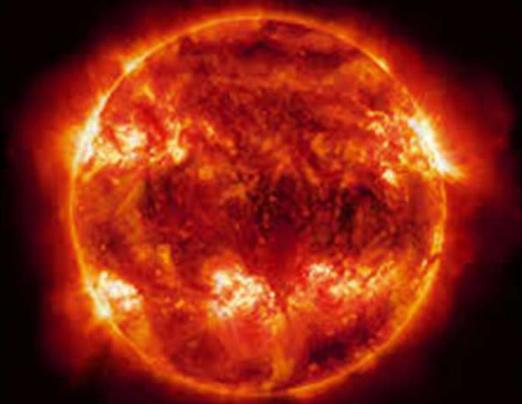
Лазер



Лазер



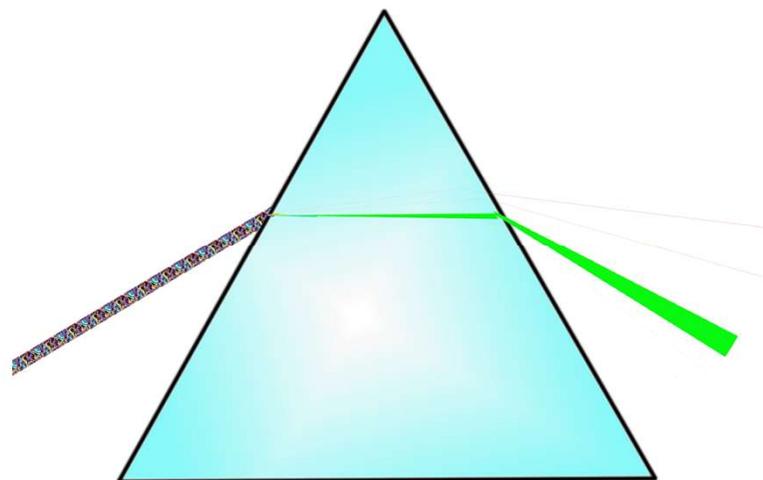
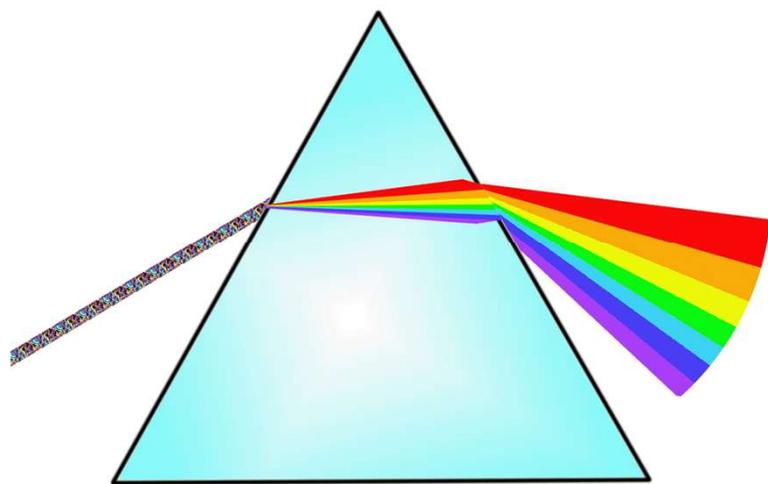
Солнце



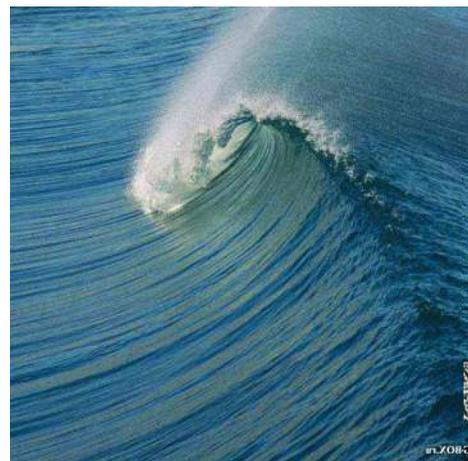
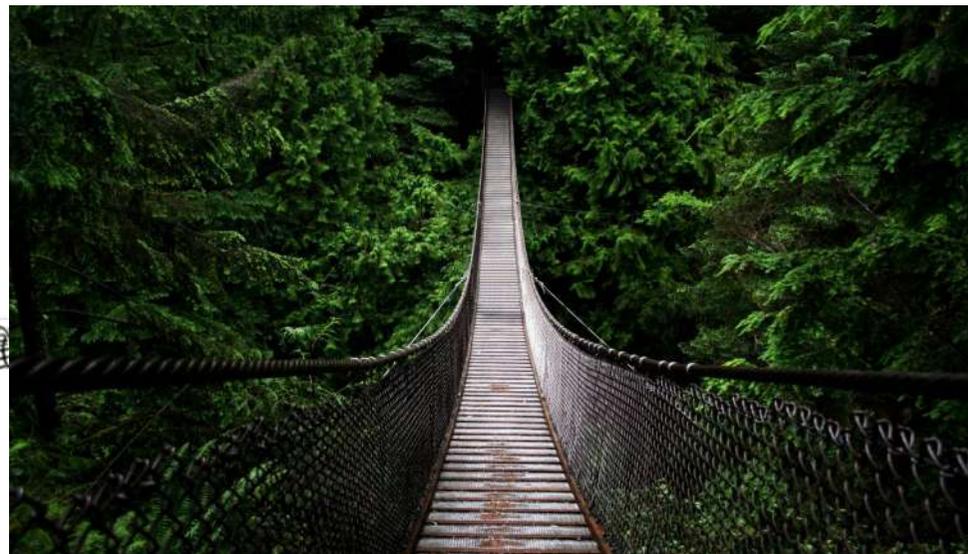
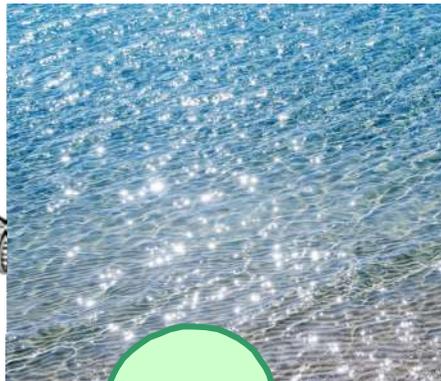
Пульсар



Лазер

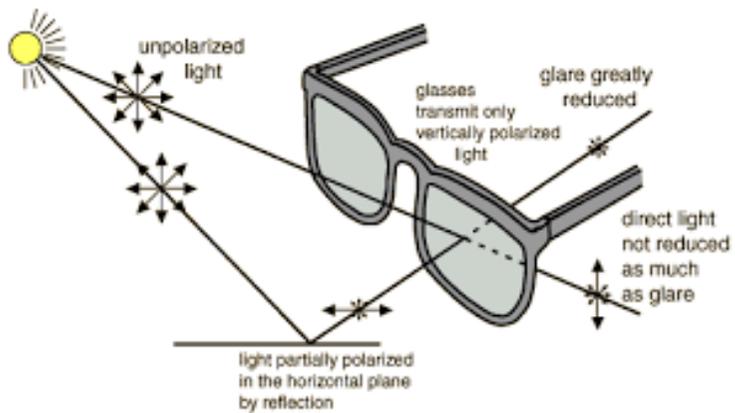
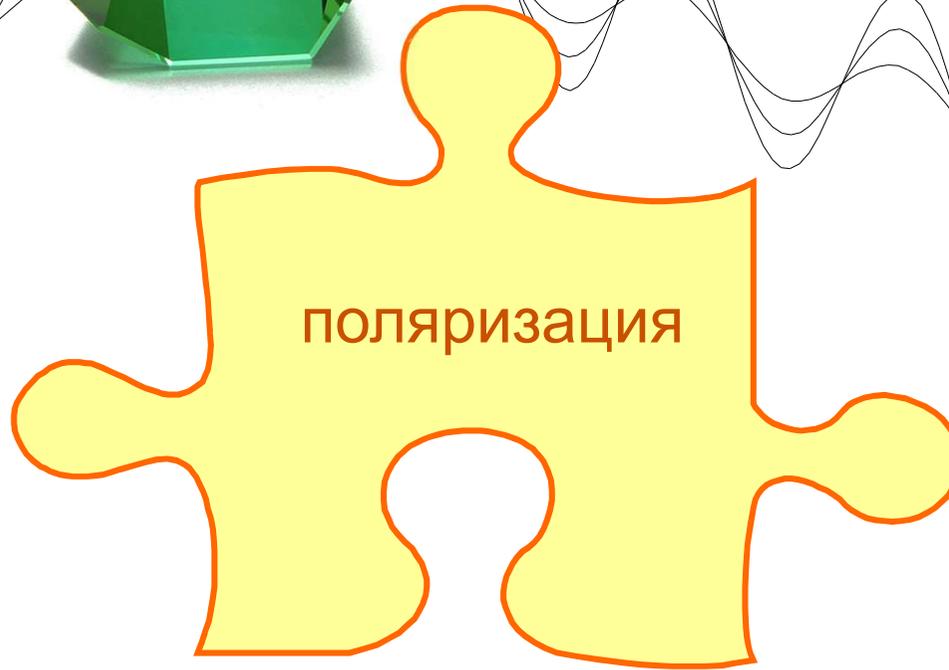
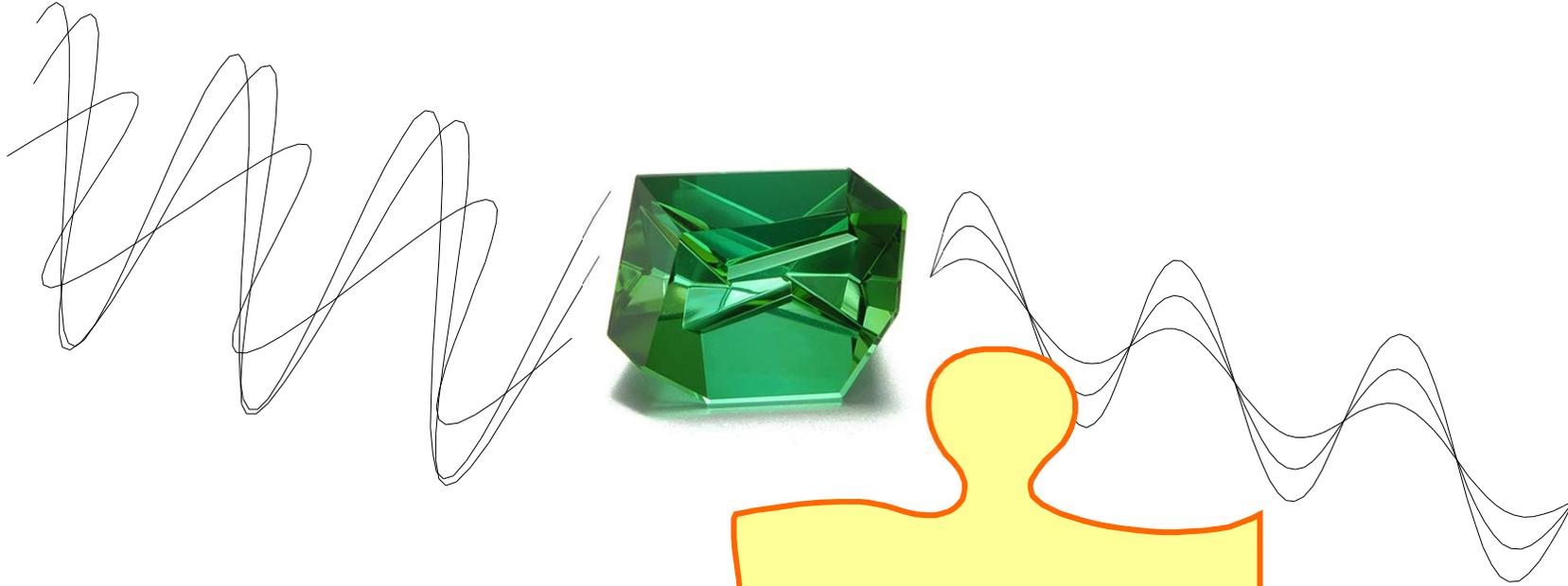


Лазер



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

Лазер



Лазер



Измерение расстояния до луны



Уголковый отражатель,
установленный на луне
Apollo11



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



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} | $4 \cdot 10^{14}$ |

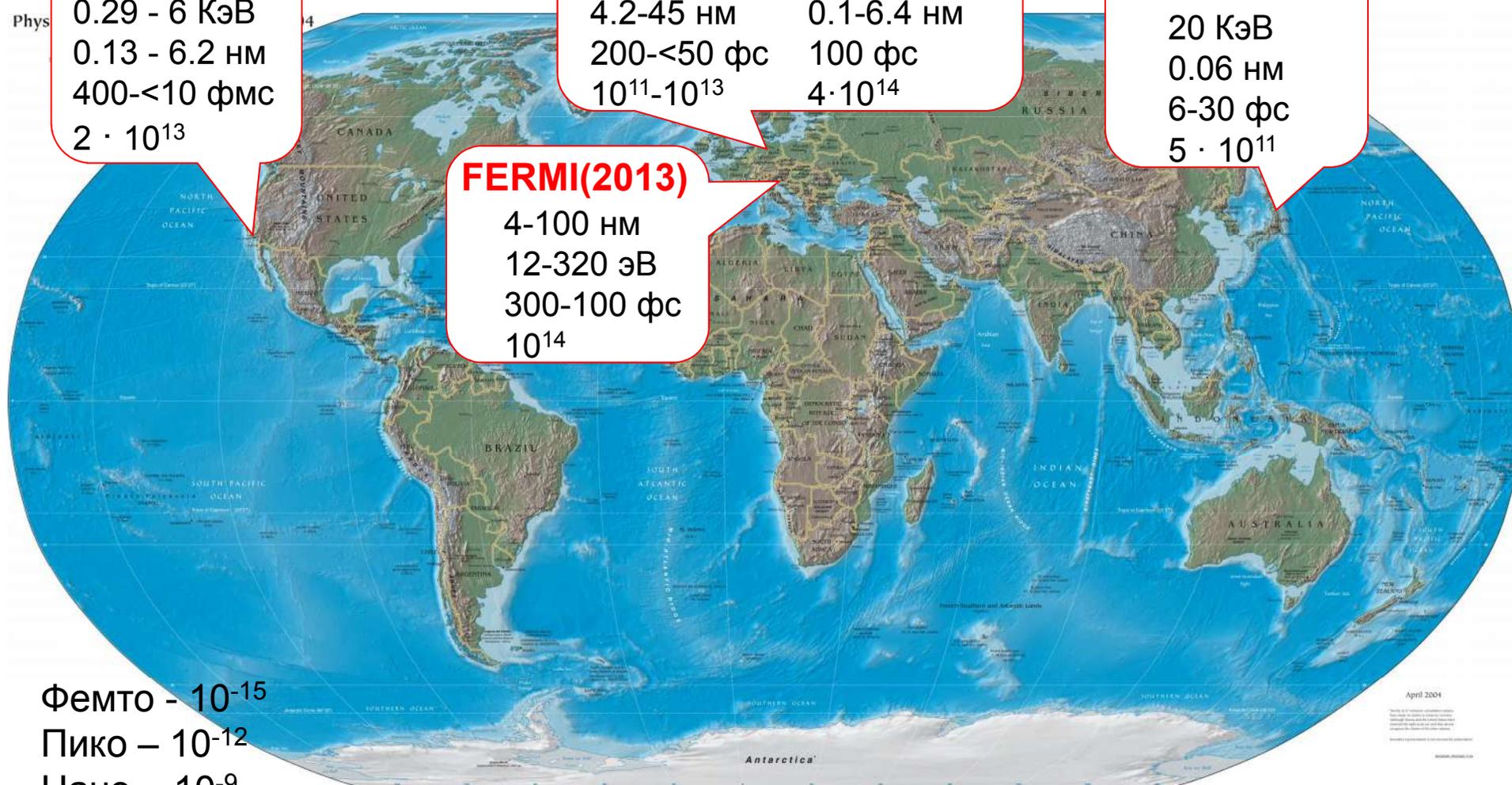
SACLA(2012)

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

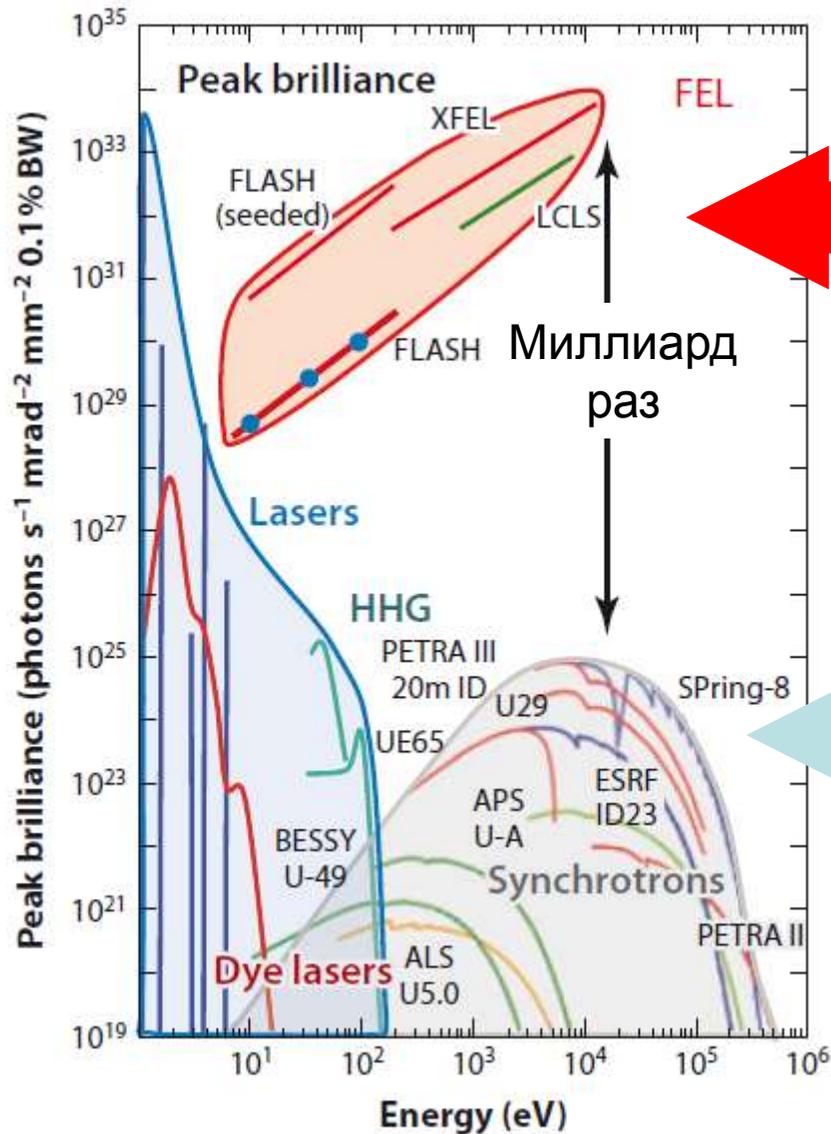
FERMI(2013)

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

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



Сравнение источников излучения



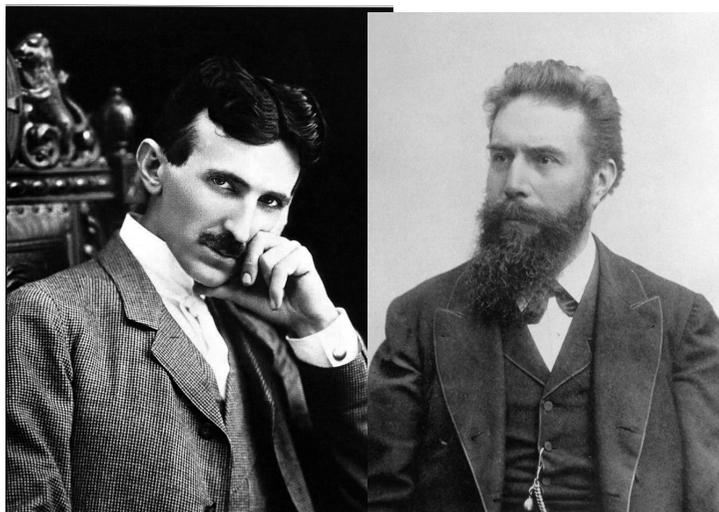
Источники синхротронного излучения 4-го поколения (рентгеновские лазеры на свободных электронах)

Источники синхротронного излучения 3-го поколения

Пиковая мощность 10^{22} Вт/см 2

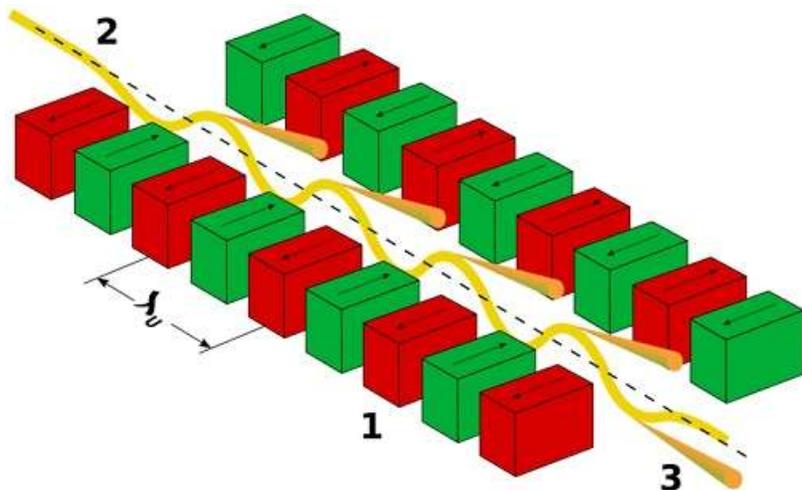
| | | |
|-----------------|-----------------|----------------------|
| Солнце | Лазерная указка | Лазерная хирургия |
| 0.14 Вт/см 2 | 0.03 Вт/см 2 | 10^{12} Вт/см 2 |

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 в ускорителях

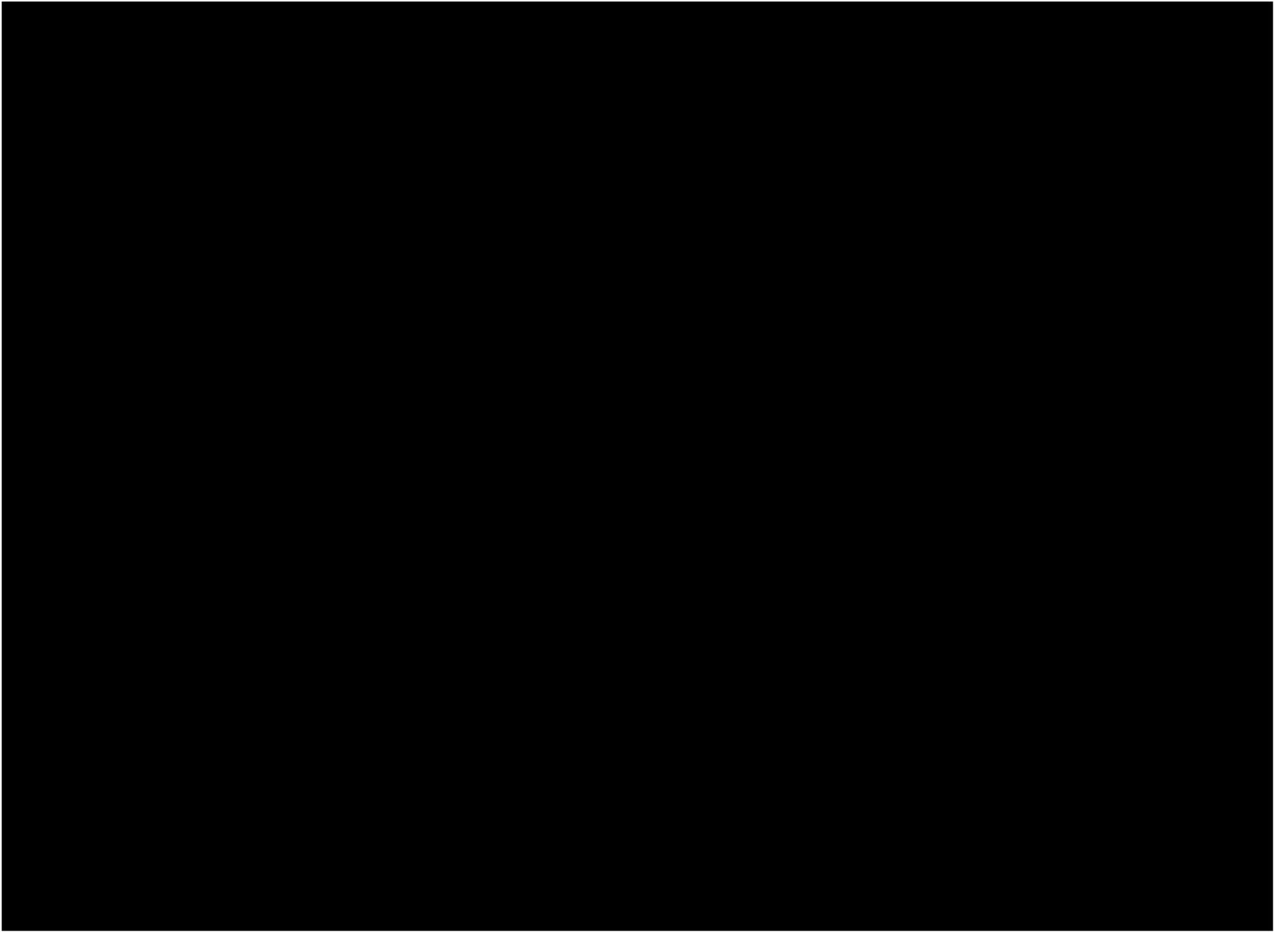


Н.А. Винокуров



А.Н. Скринский

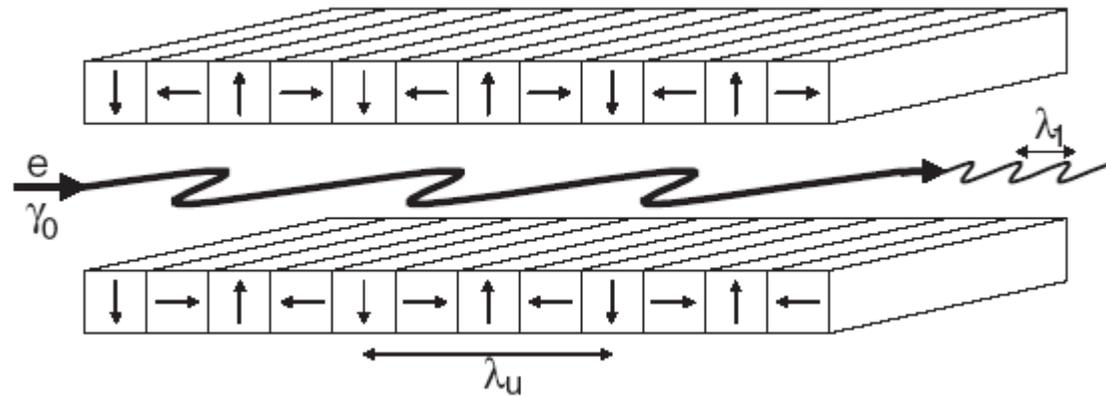
1977 – Создали модификацию клистрона –
лазер на свободных электронах



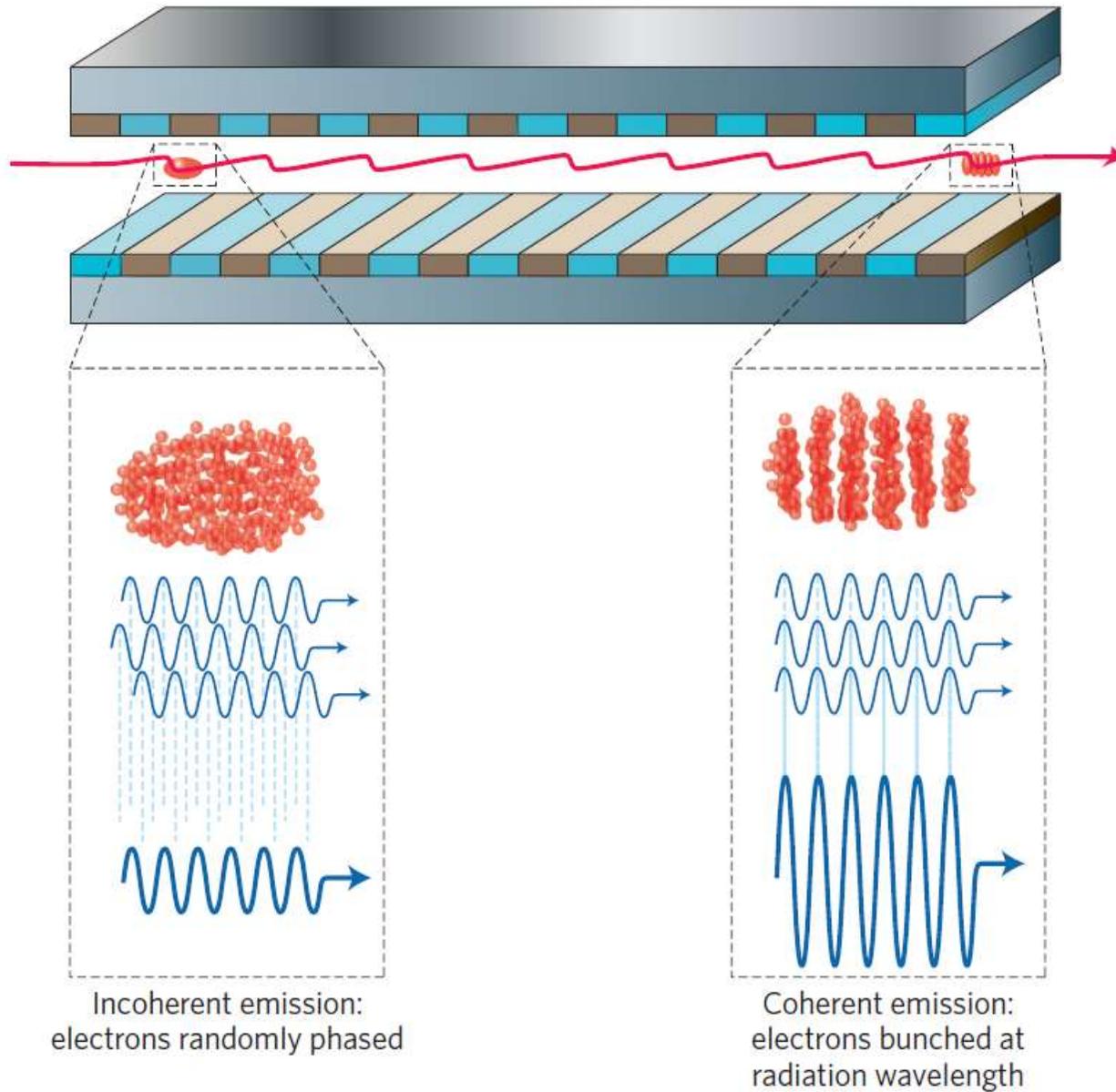
Генерация излучения



The undulator section in the FLASH tunnel



Формирование сгустков электронов



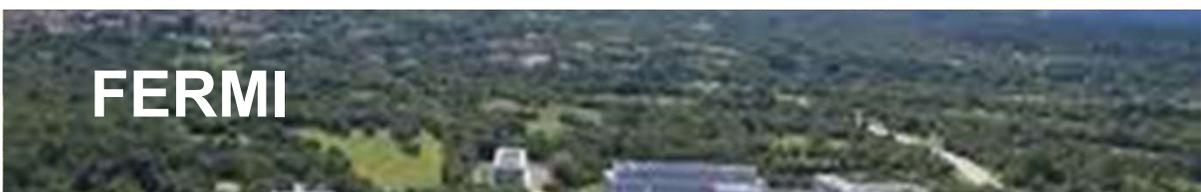
Интенсивность $\sim n$

Интенсивность $\sim n^2$

SACLA



FERMI



XFEL





European XFEL



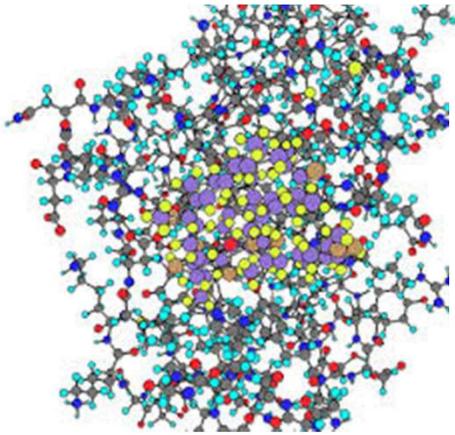


Размеры микробиъектов

Получение изображений

Изучение динамики

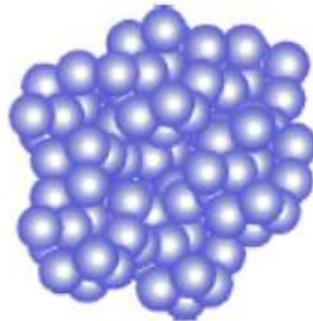
Нелинейные явления



биомолекула

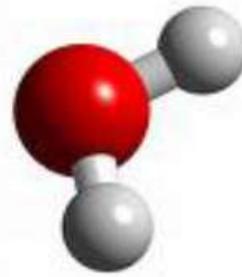
10^{-7} м

Длина волны
красного света в
два раза больше
чем длина ДНК



кластер

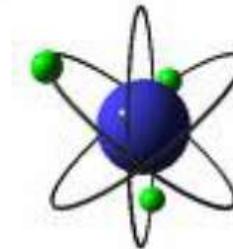
10^{-9} м



молекула

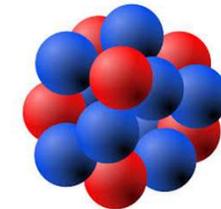
$\sim 10^{-10}$ м

Воды $3 \cdot 10^{-10}$ м



атом

10^{-10} м

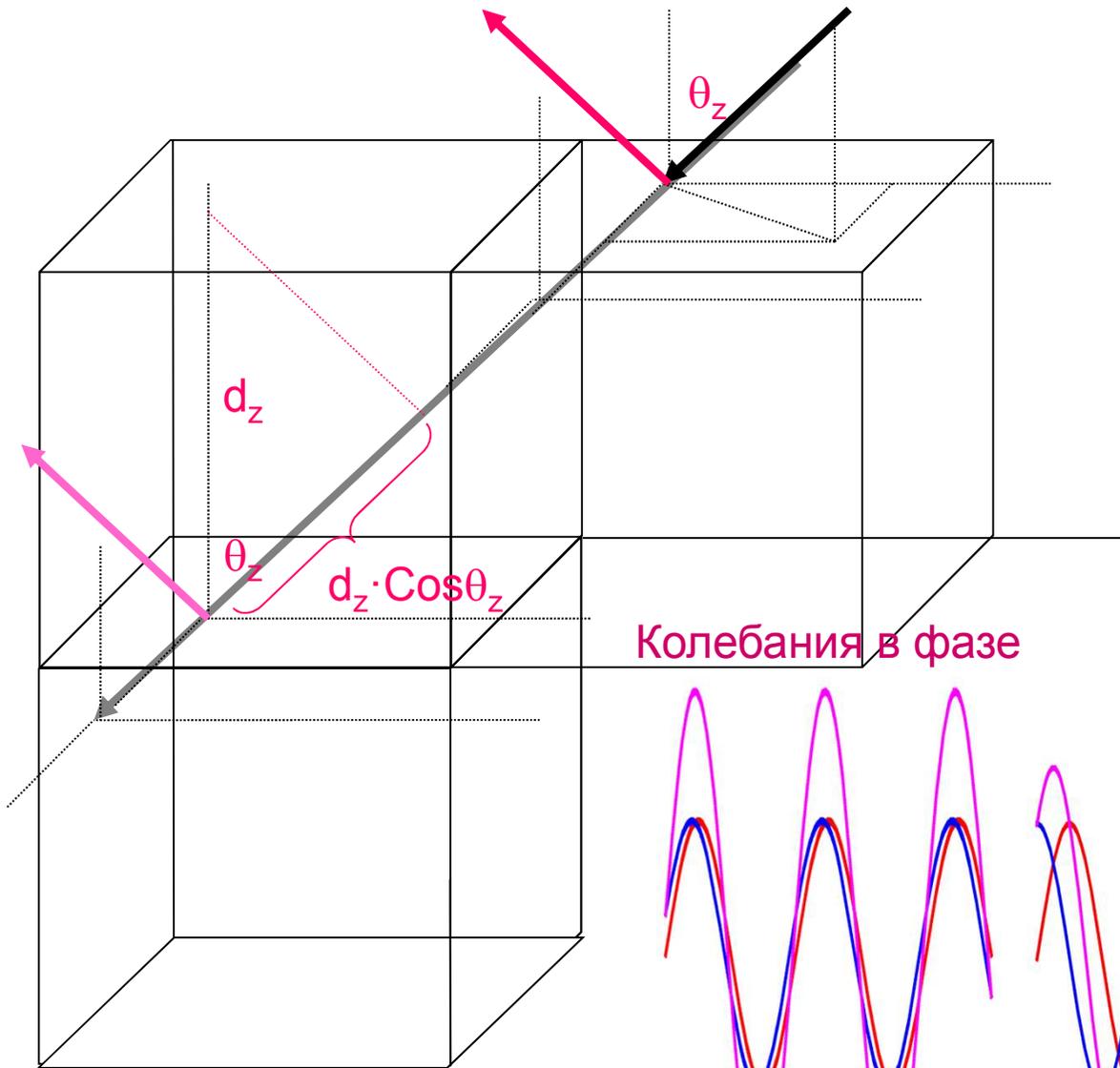


ядро

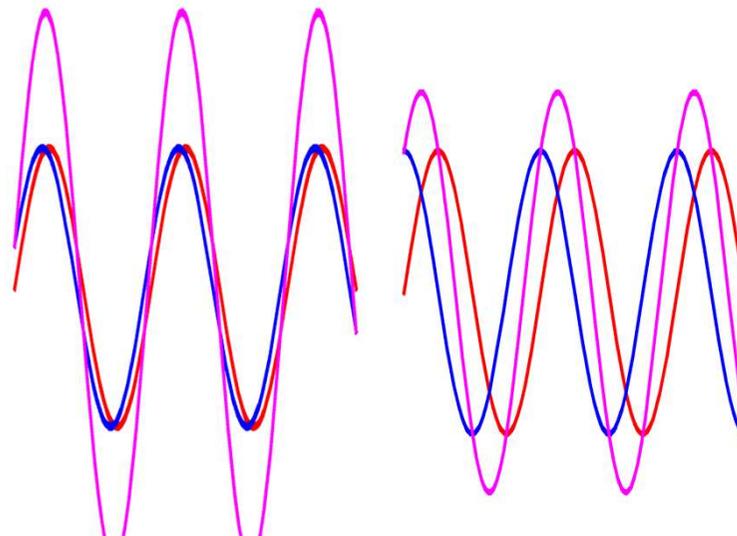
10^{-15} м

Небольшие квантовые системы

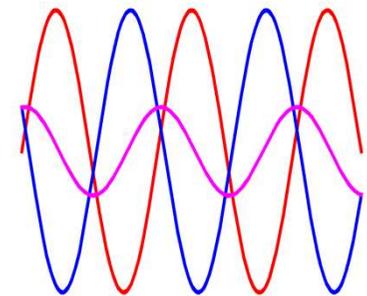
Дифракция рентгеновских лучей



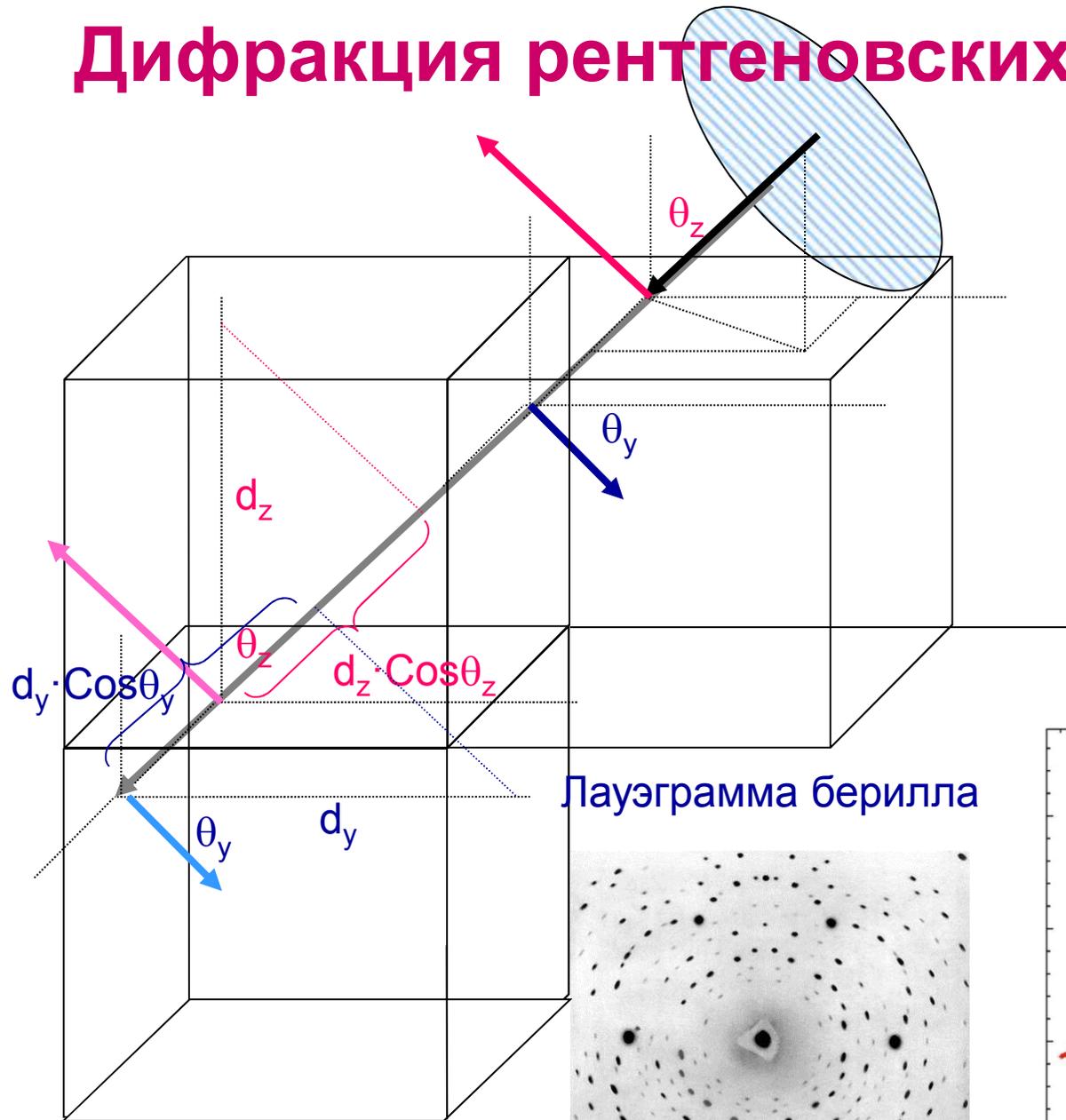
$$2d_z \cos \theta_z = n\lambda;$$



Колебания в противофазе



Дифракция рентгеновских лучей



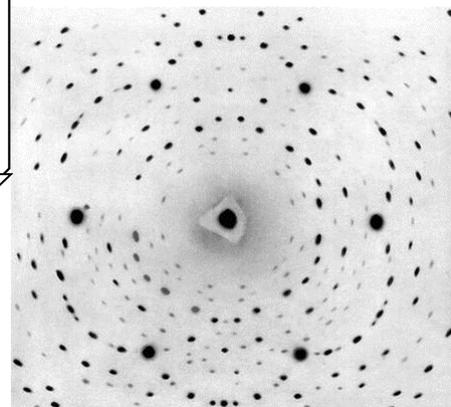
Уравнения Лауэ

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

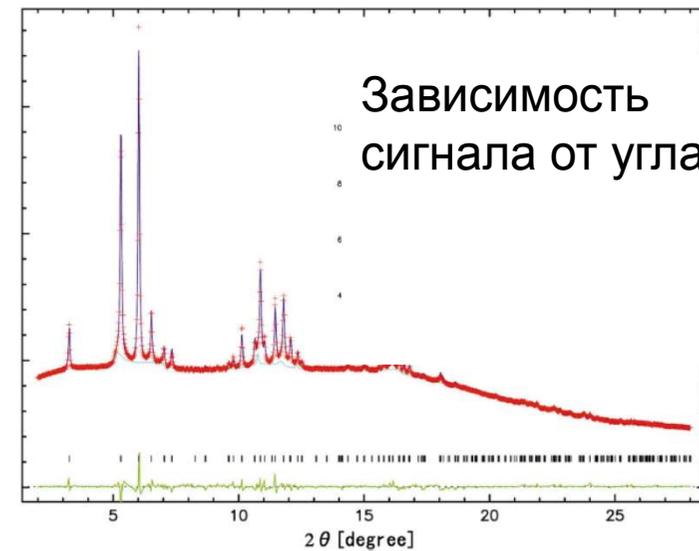
$$2d_y \cos \theta_y = m\lambda;$$

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

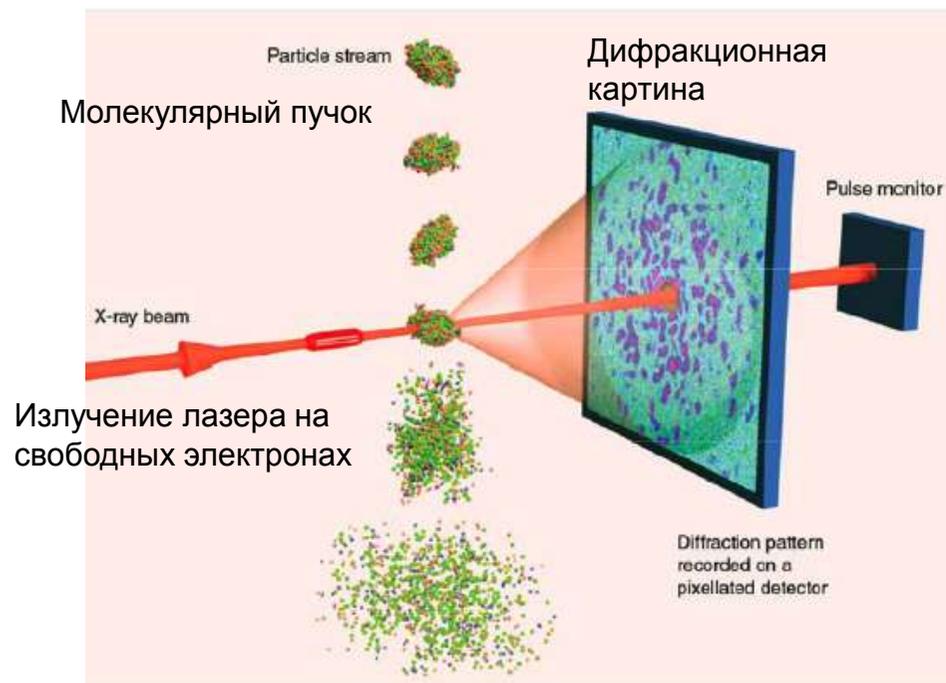
Лауэграмма берилла



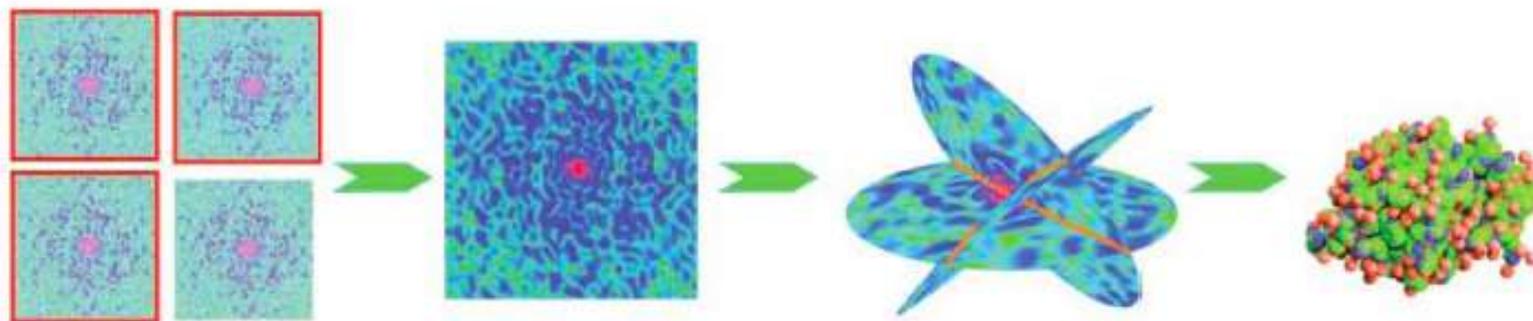
Зависимость сигнала от угла



Восстановление трехмерной структуры молекулы



Тень от ядерного взрыва



классификация

усреднение

ориентация

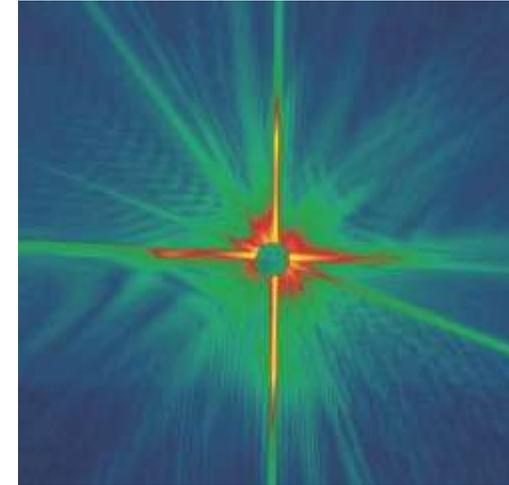
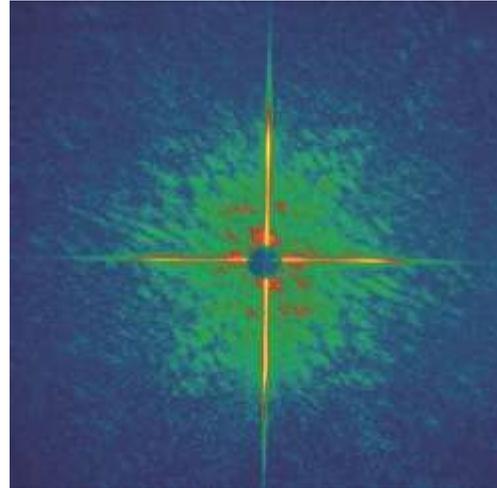
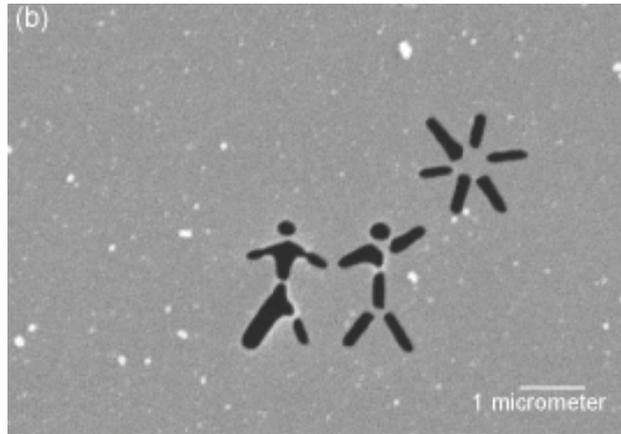
реконструкция

K. J. Gaffney, H. N. Chapman

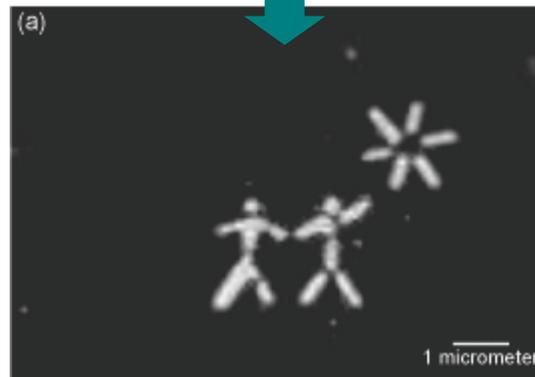
Imaging Atomic Structure and Dynamics with Ultrafast X-ray Scattering

Science, 316, 1444 (2007).

Модельный эксперимент на FLASH:



**from the next pulse:
no object**



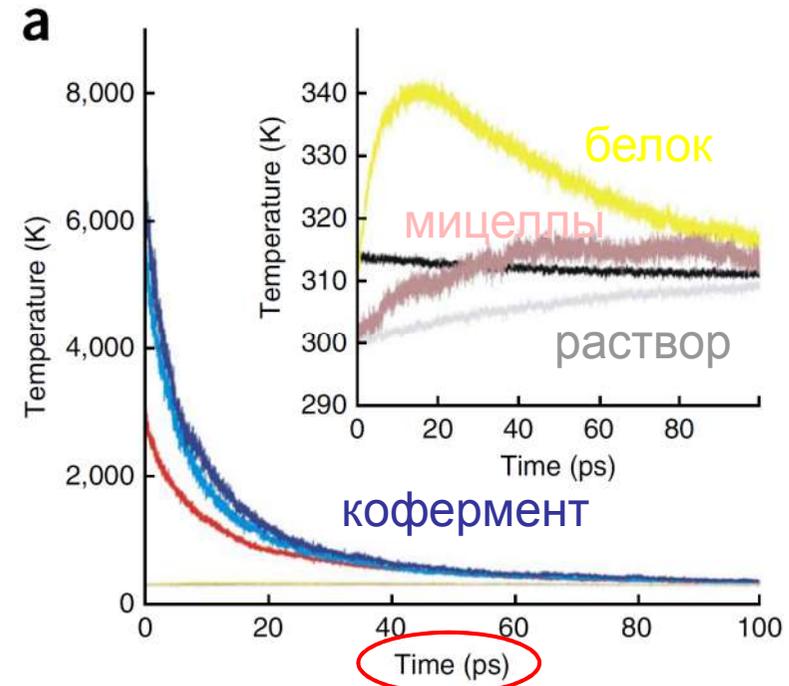
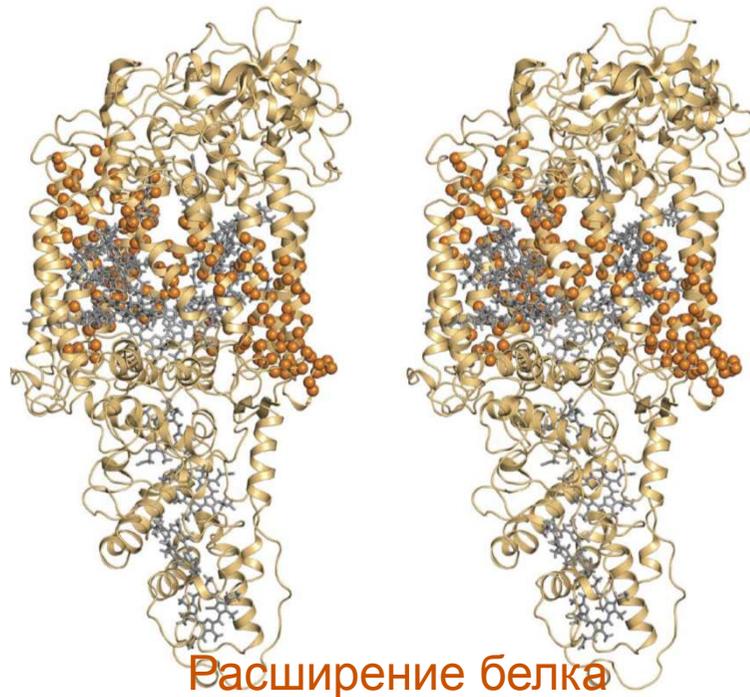
Отображение и голография наноструктур с временным разрешением до 10 фс.

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

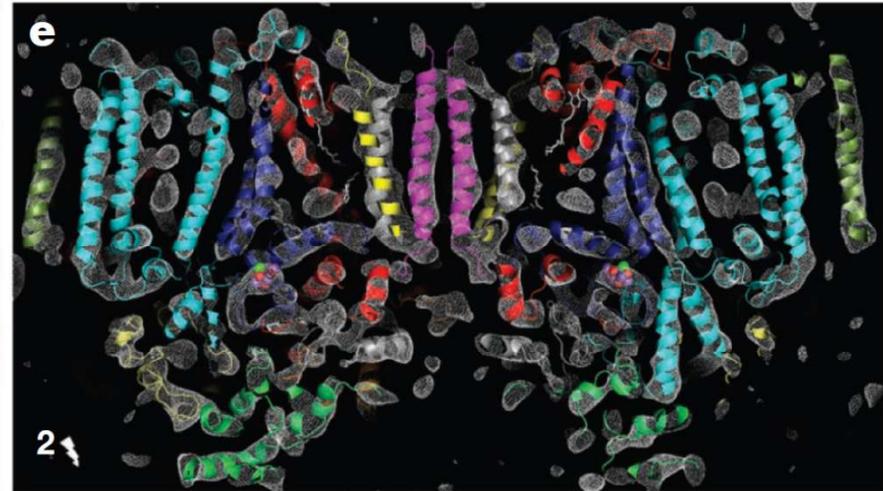
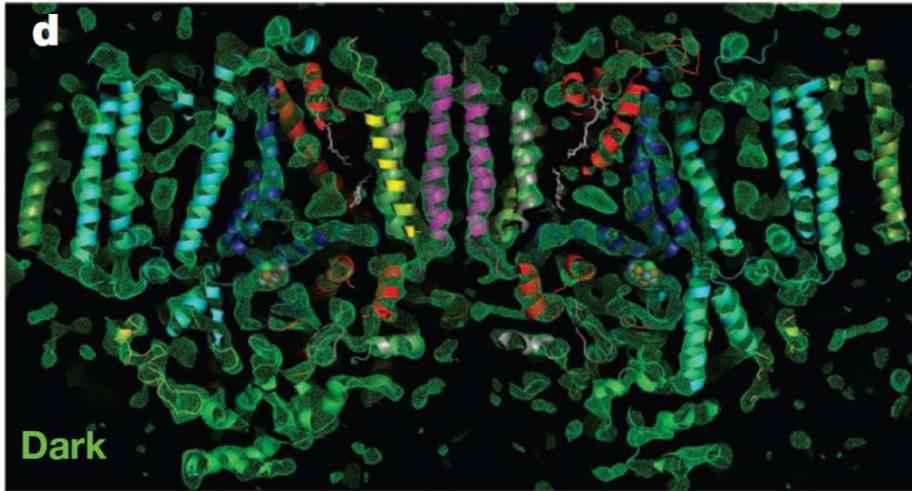
Эксперимент выполнен на LCLS

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

Наблюдение фотосинтеза



0:0 → 3:2



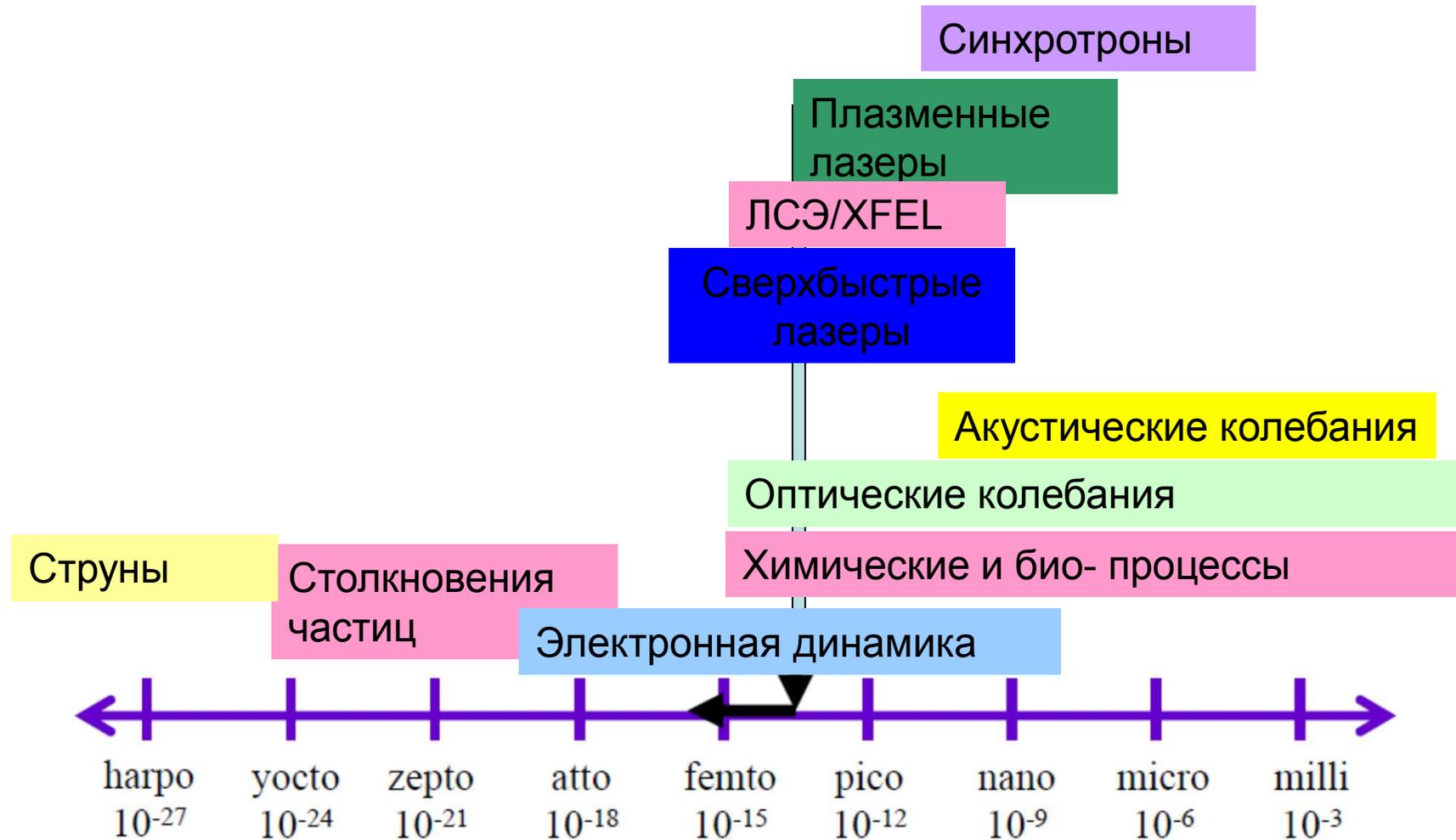
Карта электронной плотности
после поглощения двух фотонов
Наблюдение биохимического



оксидоредуктаза) до и
ального времени

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

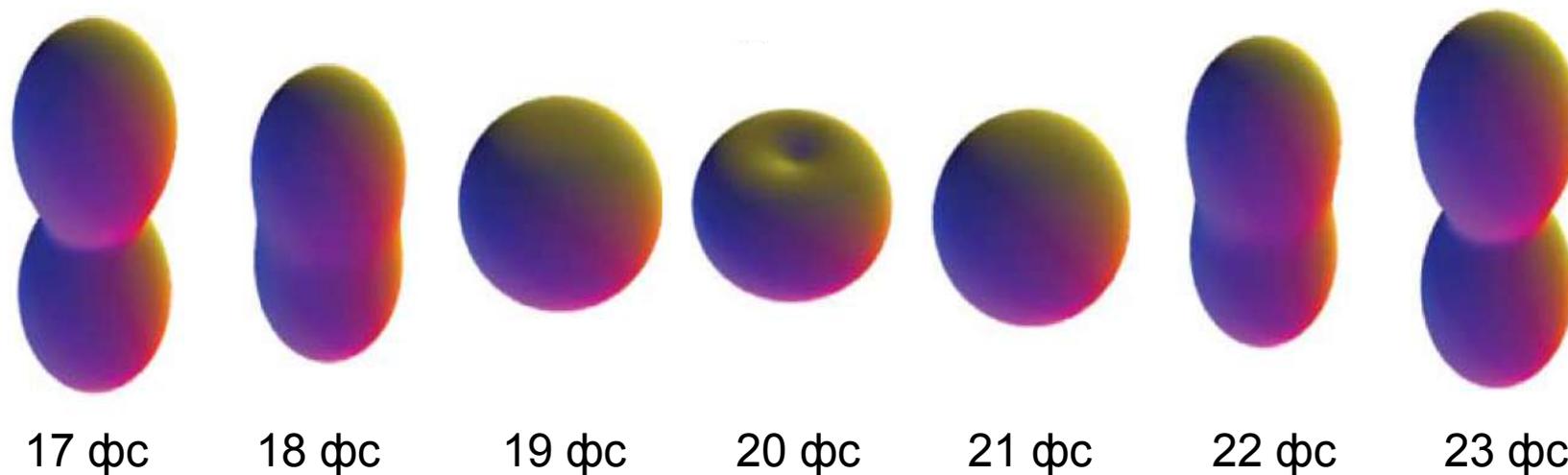
Шкала времен для быстрых процессов



J. Hastings

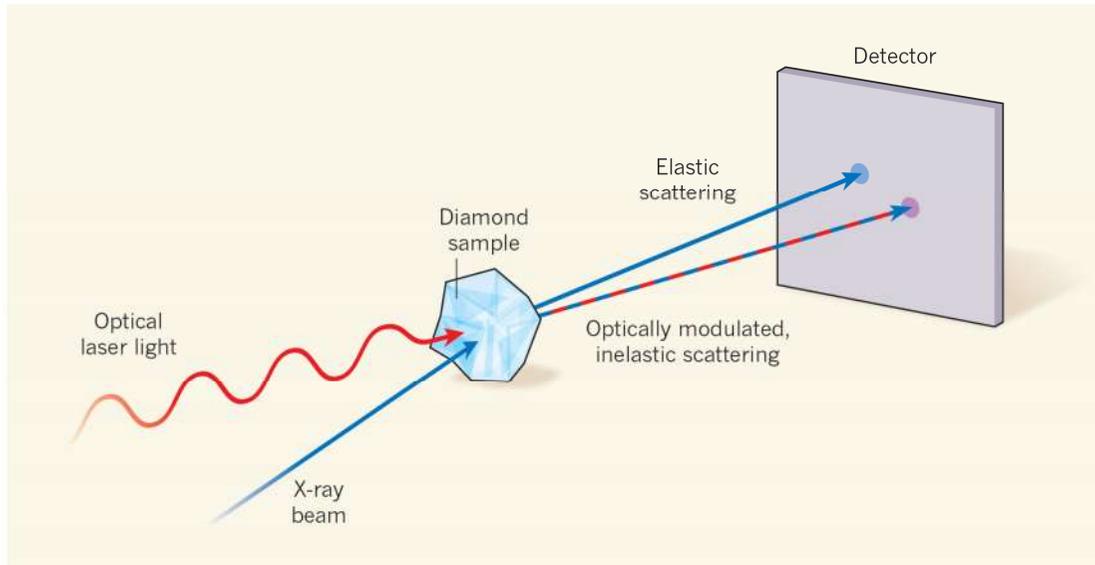
Наблюдение эволюции электронной плотности

Облучение атома криптона электромагнитным импульсом

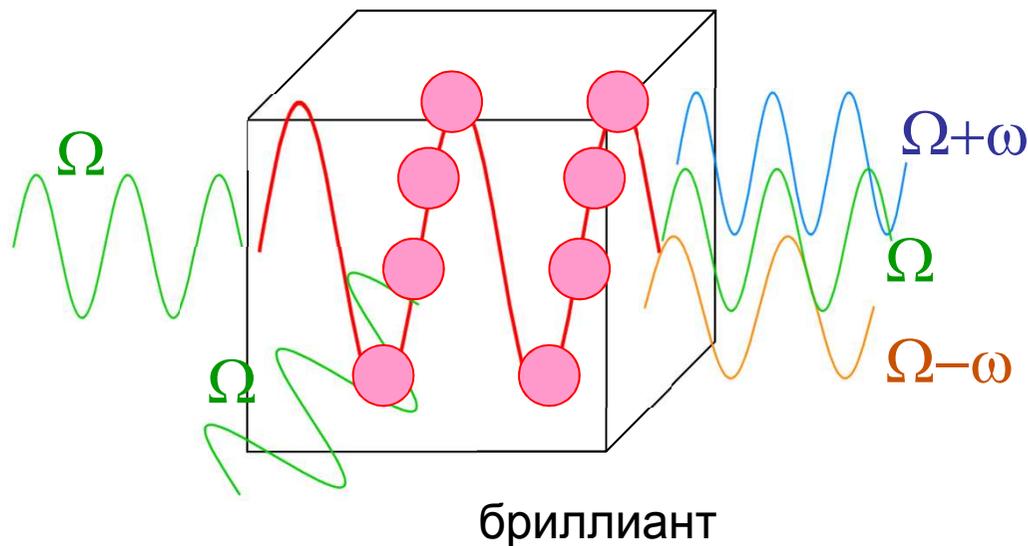


Плотность 4p оболочки как функция времени

Сложение (вычитание) частот



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



сложение



вычитание



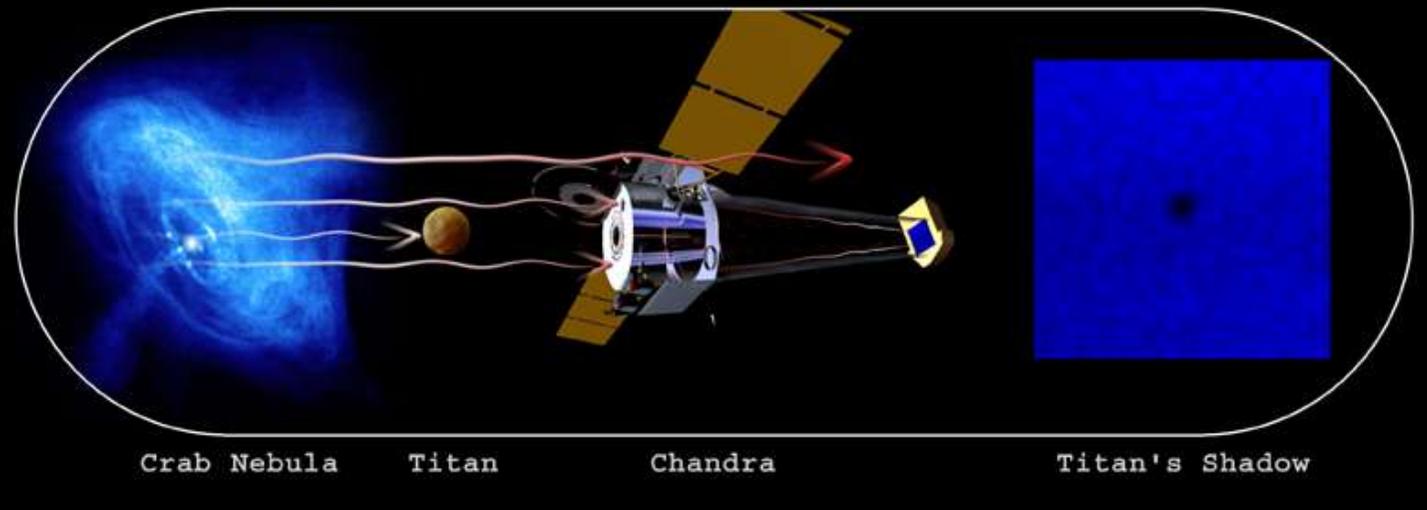
Космическая рентгенография

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>

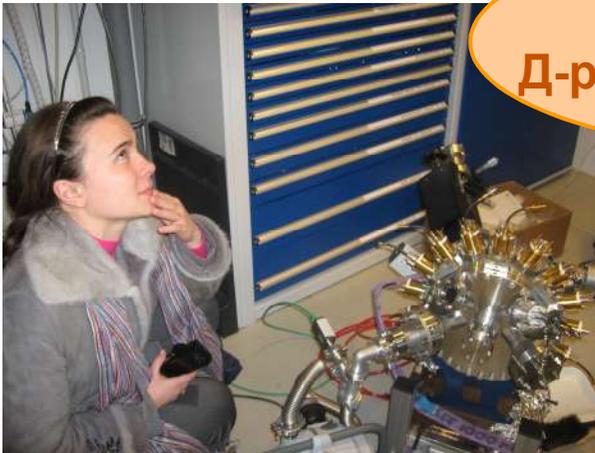


Как к нам попасть?

Физический факультет МГУ

Кафедра общей ядерной физики

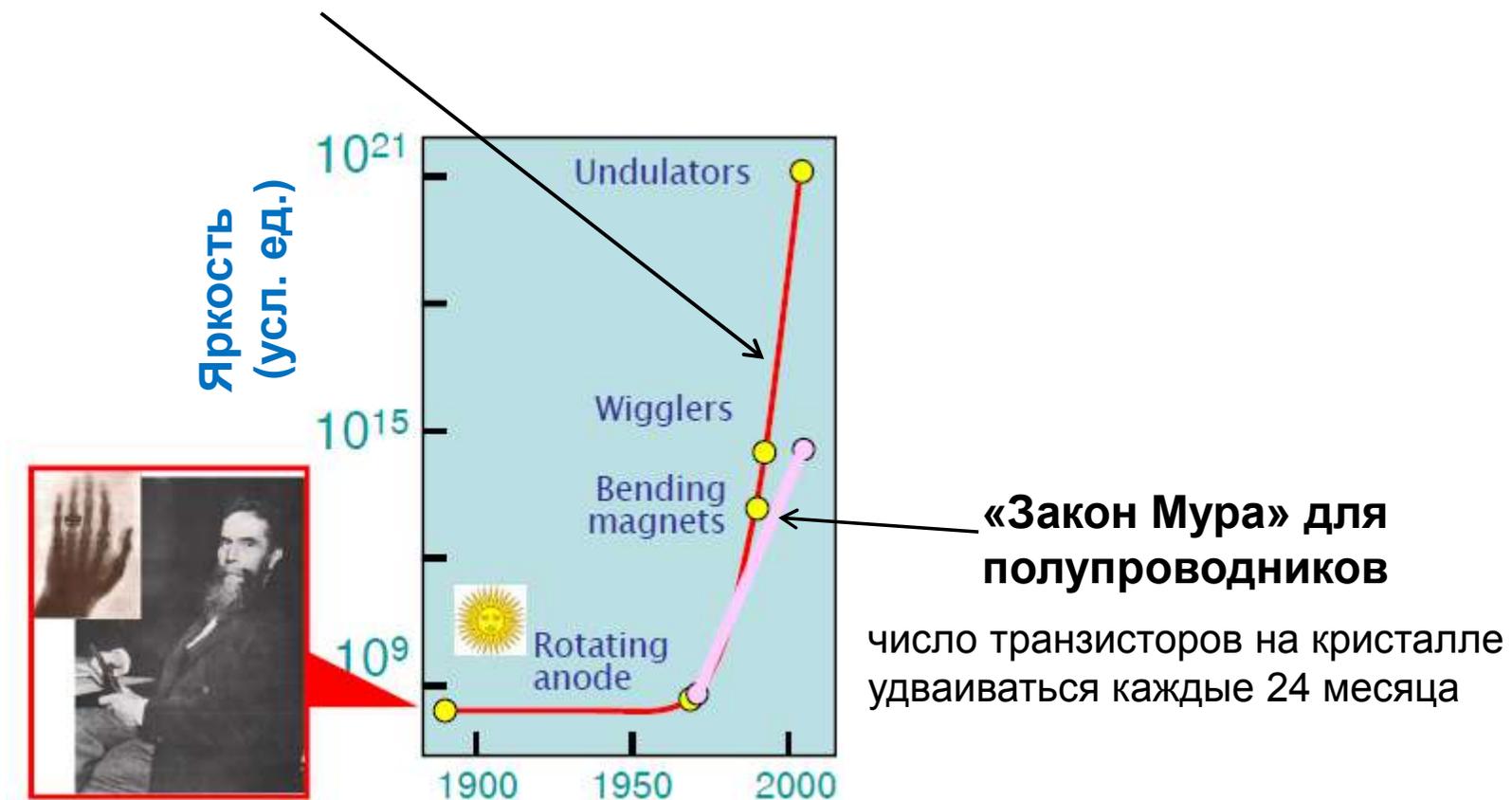
Лаборатория
Д-ра А.Н. Грум-Гржимайло



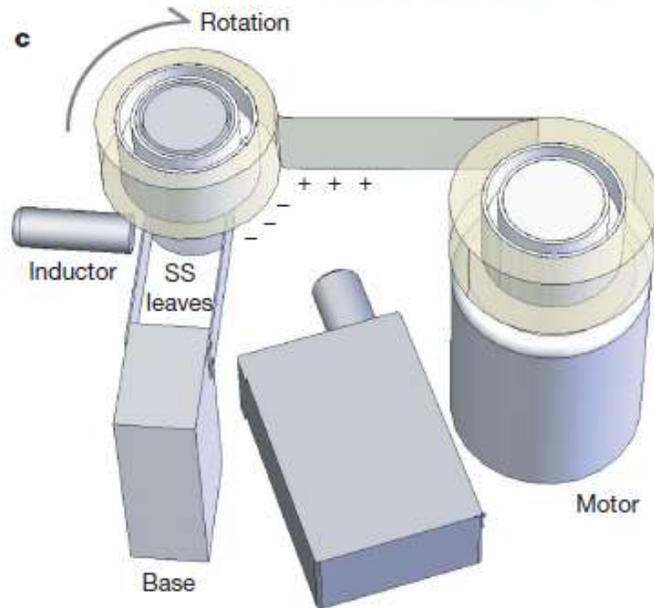
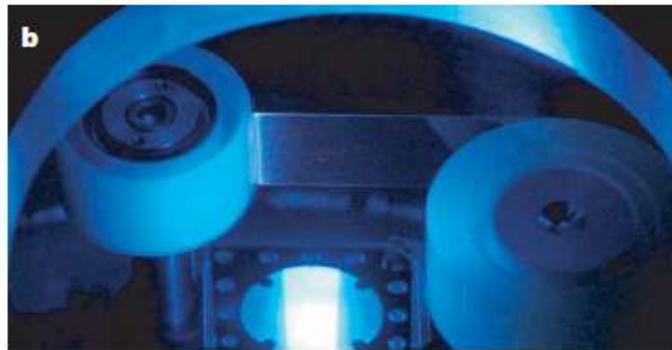
Отдел электромагнитных процессов и взаимодействия атомных ядер
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

gryzlova@gmail.com

Яркость искусственных источников излучения рентгеновского и ВУФ диапазона



C. Camara et al. Nature, **455** 1089 (2008)



Apparatus for studying high-energy emission from peeling tape.

b, Photograph of the apparatus (under a pressure of 10^{-3} torr) illuminated entirely by scintillations. **c**, Diagram of the apparatus used to measure peeling force; SS, spring steel (Methods).

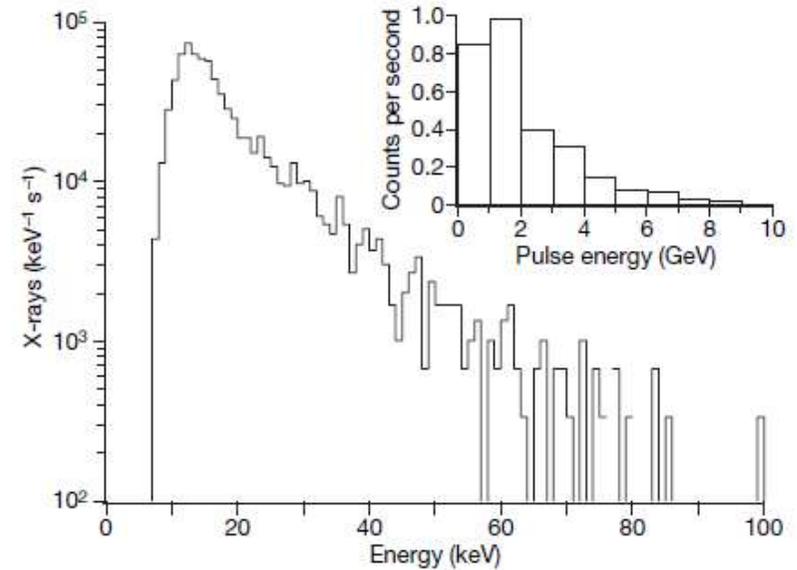


Figure 3 | Spectrum of X-ray energies from peeling one roll of tape. The peel speed was between 3 and 3.6 cm s^{-1} at 10^{-3} torr of air. Data were acquired with the Amptek CdTe detector. Inset: energies for nanosecond pulses out to 10 GeV for the same run taken with the Amptek 3-Stack detector (Methods).



Польза исследований на FEL (научный выход):

Короткие длины волн позволят выяснить, каким образом скомпонованы, в атомном масштабе, сложные биомолекулы или материалы; достичь лучшего понимания структуры биологических клеток, создавать материалы с заданными свойствами.

Короткое время вспышек позволят создавать фильмы ультрабыстрых процессов, таких как формирование и разрыв химических связей, т.е. лучше понять химические процессы, например, с целью развить более эффективные производственные процессы. Эти исследования создадут также базу для развития новой медицины.

Интенсивность вспышек можно будет использовать для создания и изучения материи в экстремальных условиях, таких, как например внутри звезд и планет. Кроме того, исследования поведения отдельных атомов под действием интенсивных световых вспышек приведут к новым методам в рентгеновской физике.

<http://www.wired.com/2011/02/une\expectedly-navys-superlaser-blasts-away-a-record/>

<http://www.youtube.com/watch?v=fWdGkb7r1iA>

Процессы с малым сечением
Дифракция на молекуле(Уве)

Квантовая природа атома

