

Accelerators beyond HEP

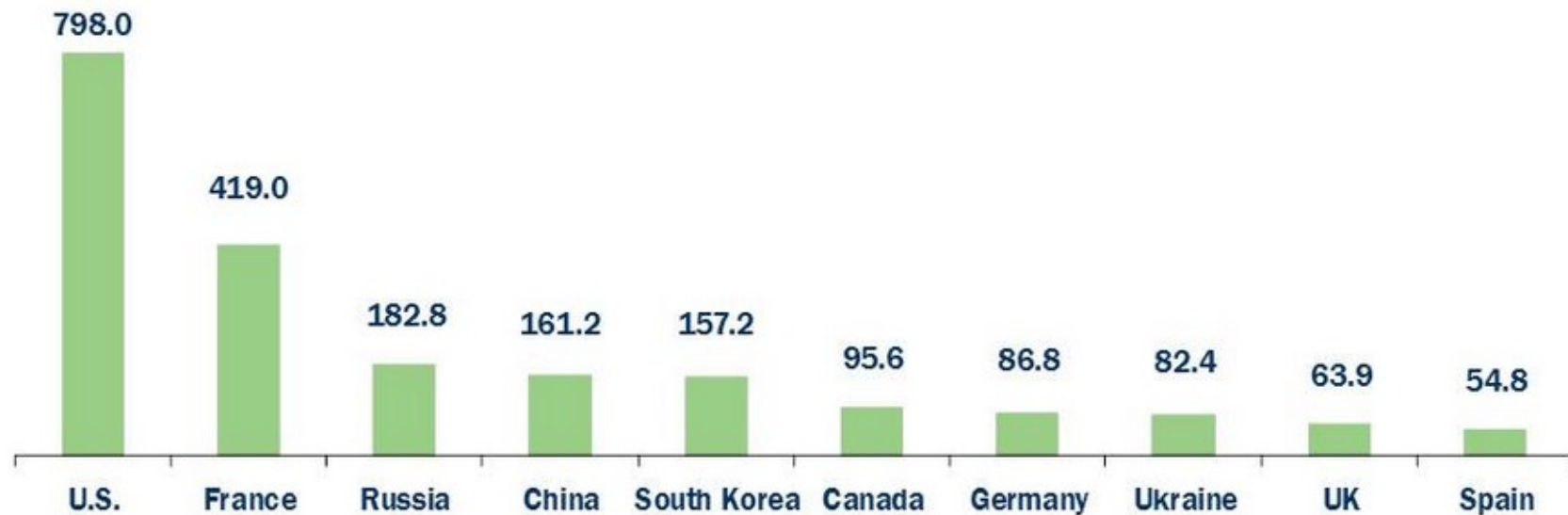
And back to HEP ...

Обзор актуальных работ в ускорительной
отрасли

Nuclear Reactor

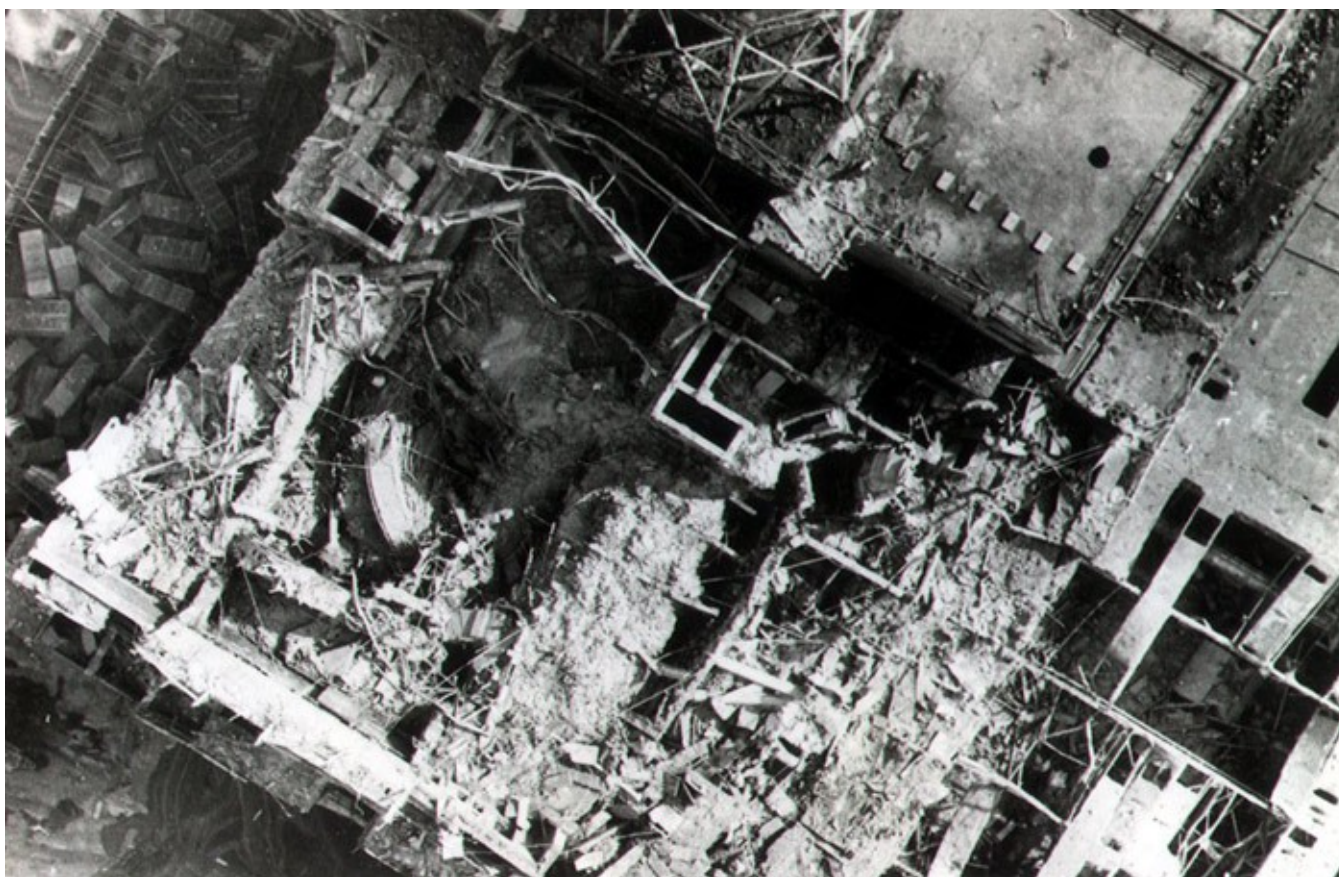
- Украина в топ 10 производителей ЯЭЭ

Top 10 Nuclear Generating Countries
2015, Billion kWh



Чернобыльская катастрофа

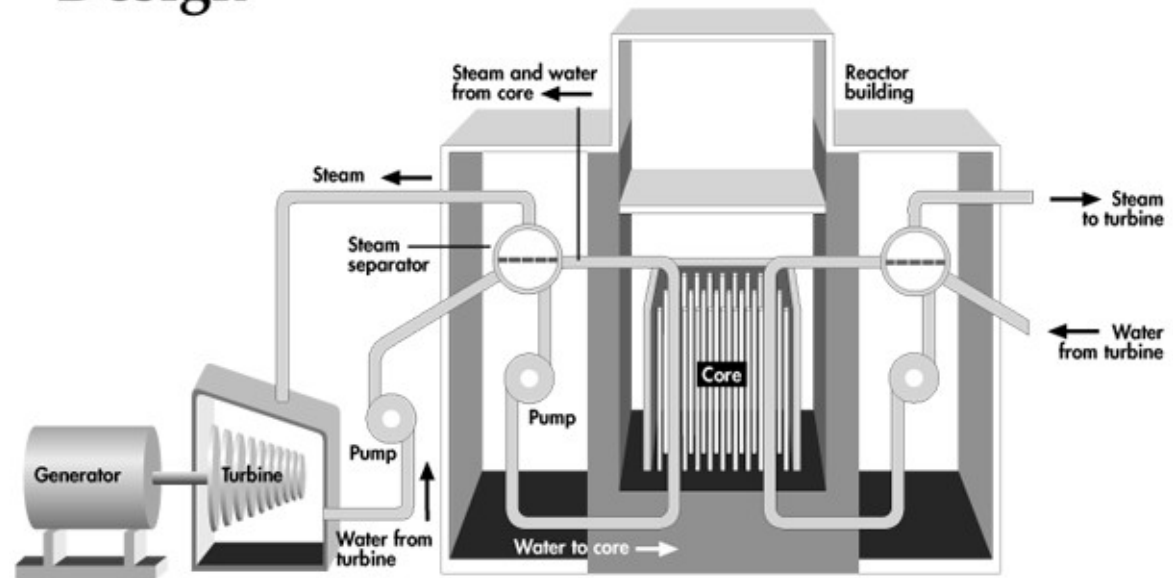
- 1986, 26 апреля



РБМК-1000

- U235
 - $U235 + n \rightarrow \text{frag} + 2.4 n$
- Уран 235 может поддерживать цепную реакцию на медленных нейтронах
- Продукты распада в отработанном топливе в том числе включают в себя боевой плутоний

RBMK Reactor Design



Source: Nuclear Energy Institute

Ториевый реактор

- $\text{Th232} + n \rightarrow \text{Th233} \rightarrow \text{U233}$ (Breeding)
 - Топливо **не является** материалом поддерживающим цепную реакцию
 - U233 может поддерживать цепную реакцию, но не самопроизводство, **реактор подкритический**
 - Для горения требуется “ведущее” топливо (уран или плутоний)
ИЛИ
 - внешний источник нейтронов
 - **Accelerator driven system (ADS)**

Neutron spallation source

- Конвертация высоко-энергетичных протонов в быстрые нейтроны
- Какой ток требуется для поддержания горения Th232
 - 10 МВт протонного пучка на 600 МВт выхода электрической мощности. При энергии в 1 ГэВ это непрерывный ток 10 мА. **Много ли это?**

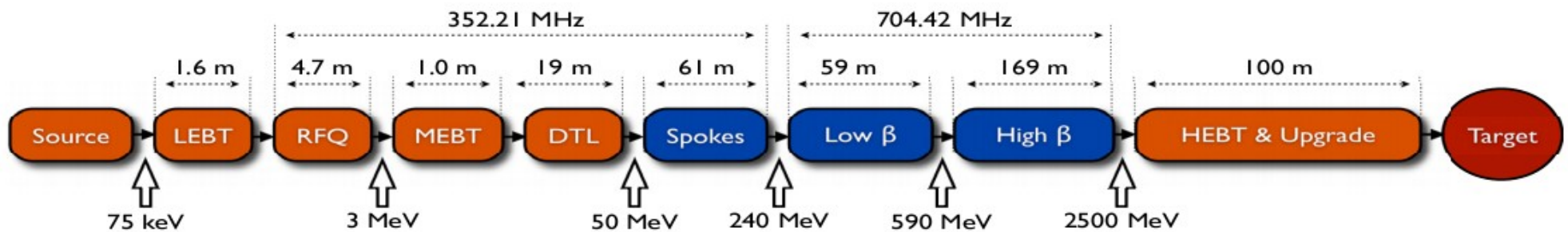


Spallation

- no chain reaction
- pulsed operation
- 30 neutrons/proton
- Time resolved exp.

ESS

- Самый мощный в мире источник нейтронов основан на линейном протонном ускорителе
 - Строится в Лунде, Швеция
 - Первые нейтроны в 2019
 - 5 МВт импульсный пучок, ~40 МВт потребление
 - Энергия пучка 2.5 ГэВ, 50 мА
 - 1.8 миллиарда евро, 140 миллионов евро/год
 - 650 миллионов: ускоритель и мишень
 - Надежность пучка 95%




ADS Reactor



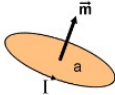

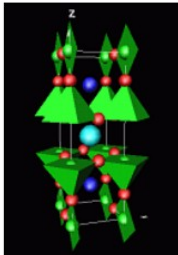
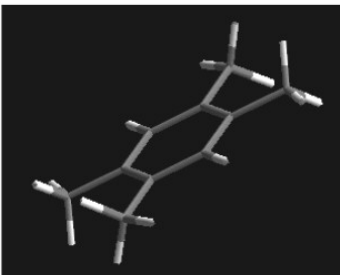
- Стоимость энергии:
 - Капитальные вложения
 - Реактор $1e9$ евро
 - Ускоритель $1e9$ евро
 - Годовой бюджет
 - $1e8$ евро
 - 500 МВт чистого выхода эл энергии (95% up time)
 - 20 евроцентов кВт ч \rightarrow 100 кЕвро/ч \rightarrow $0.83e9$ евро/год

ESS

- Ядерный микроскоп
 - Структура и динамика материи

 EUROPEAN SPALLATION SOURCE

Neutrons are beautiful!

Wave	Particle	Magnetic moment	Neutral
			
Diffractometers - Measure structures - Where atoms and molecules are 1 - 10 Ångström			
Spectrometers - Measure dynamics - What atoms and molecules do 1 - 80 meV			

Ускоритель в медицине

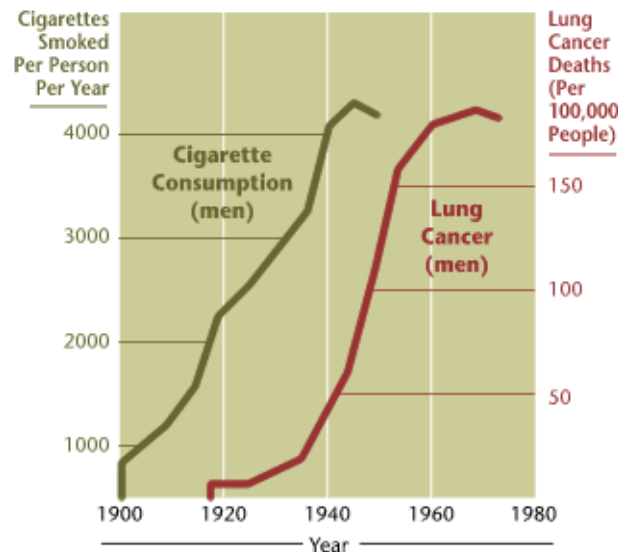
- Производство радиоизотопов
- Радиационная терапия злокачественных опухолей
 - Рентген
 - Электроны
 - Протоны
 - Ионы



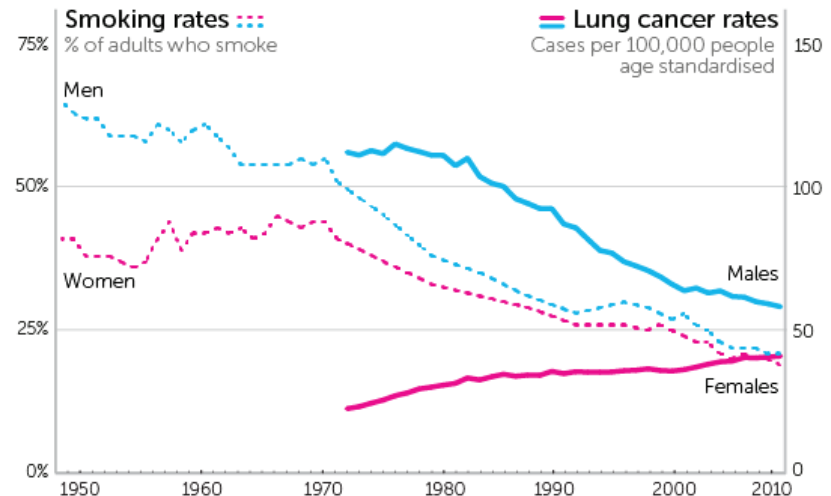
Статистика

- Число диагнозов раковых заболеваний растёт с каждым годом
 - Это из-за окружающей среды?
 - Или по причине усовершенствования диагностики?

20-Year Lag Time Between Smoking and Lung Cancer



SMOKING RATES AND LUNG CANCER RATES IN THE UK

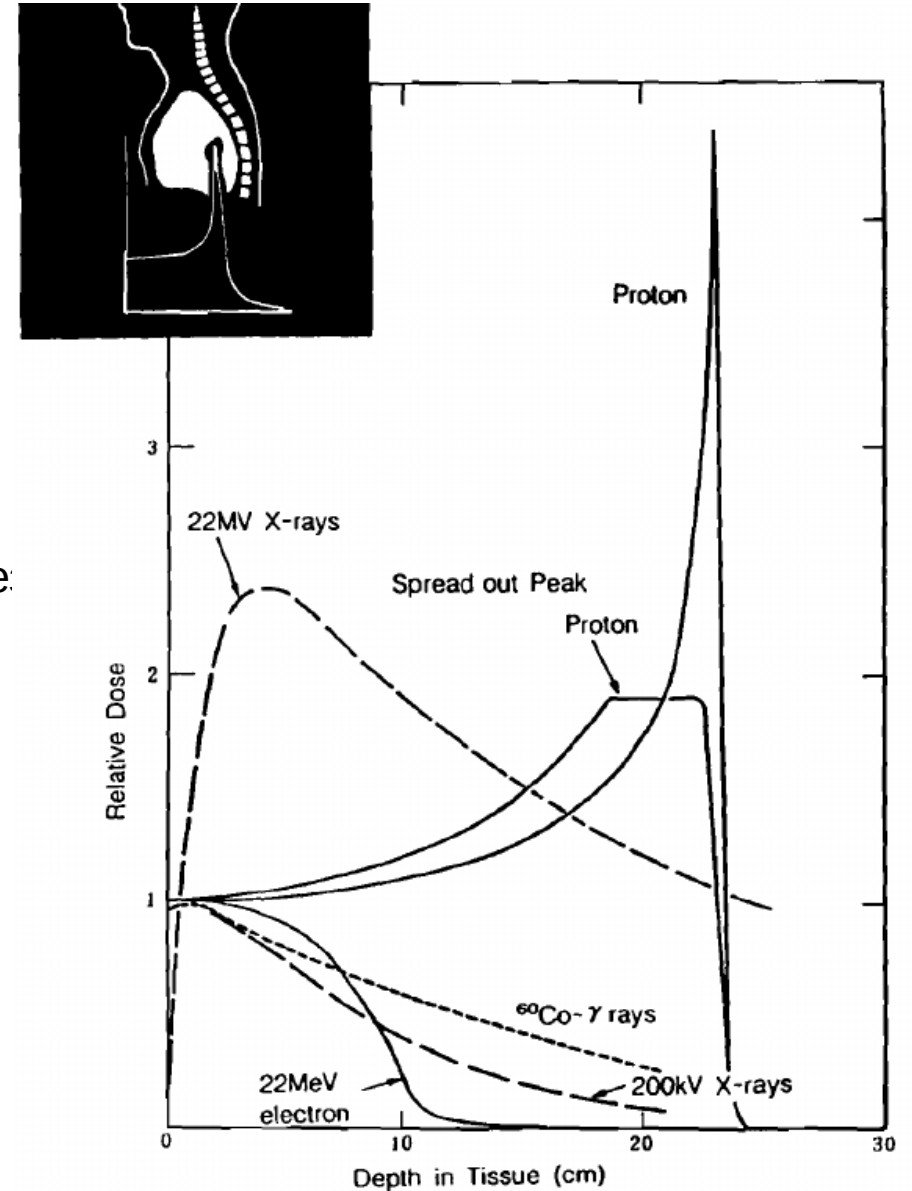
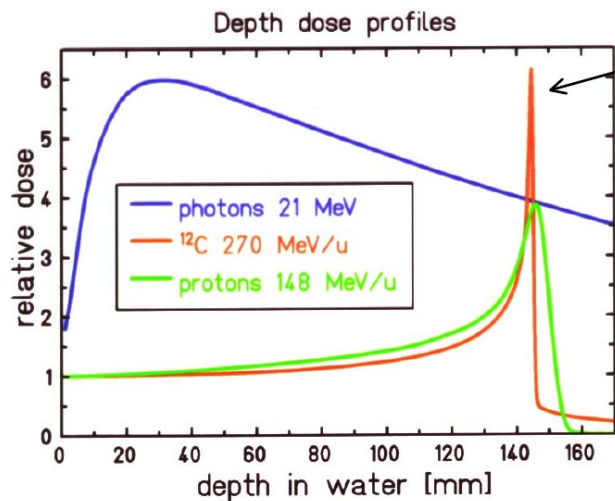


Методы лечения

- Злокачественная опухоль - это очень широкий спектр диагнозов
- Методы лечения
 - хирургия
 - Химиотерапия
 - Радиотерапия
- Ни один из методов в одиночку не сможет покрыть весь спектр разновидностей

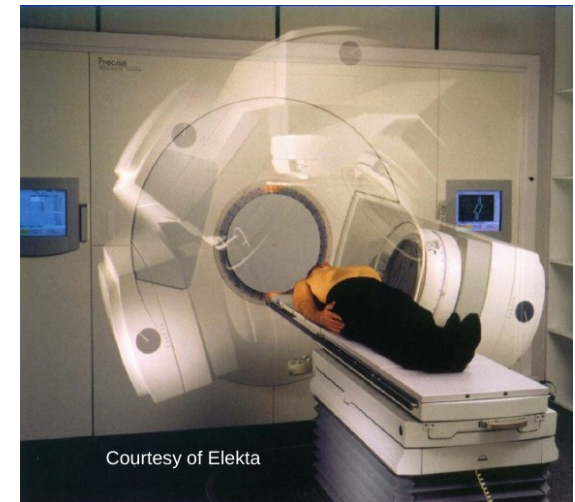
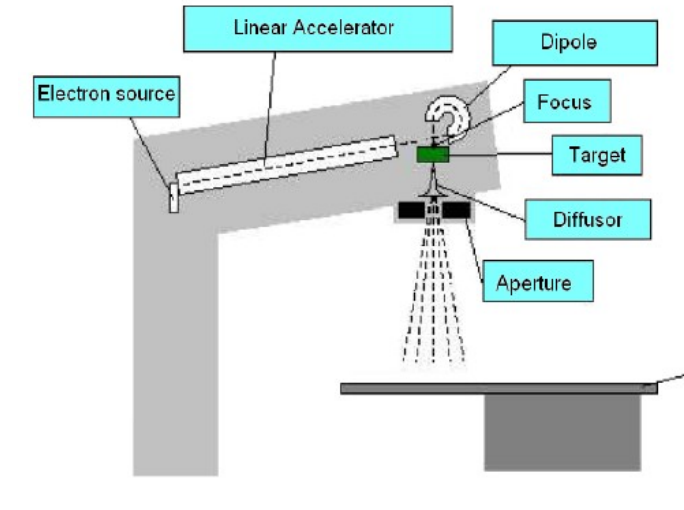
Потеря энергии в тканях

- Электроны в основном взаимодействуют на поверхности
- Рентген взаимодействует у поверхности и прошивает тело насквозь, нанося повреждение всем тканям на пути
- Протон имеет ярко выраженный пик (пик Брэгга), глубина которого зависит от энергии пучка, пораженные здоровые клетки имеют значительный шанс на восстановление
- Ионы – пик Брэгга еще уже, разрушает клетку без шансов на восстановление.



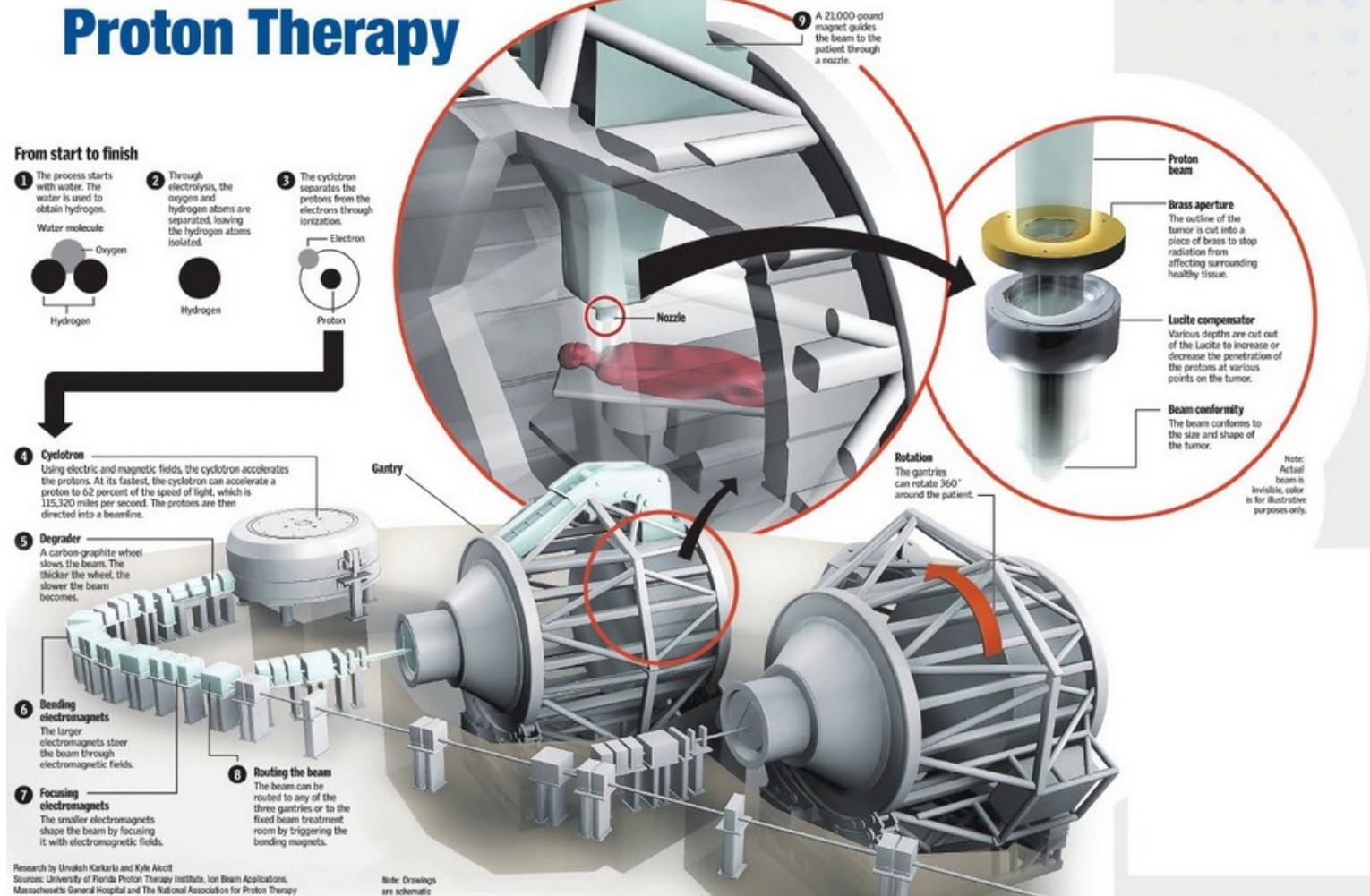
Электронный линак

- Высоко-энергетичный рентген и электроны получают с помощью электронного ускорителя
 - Компактность
 - Относительная доступность



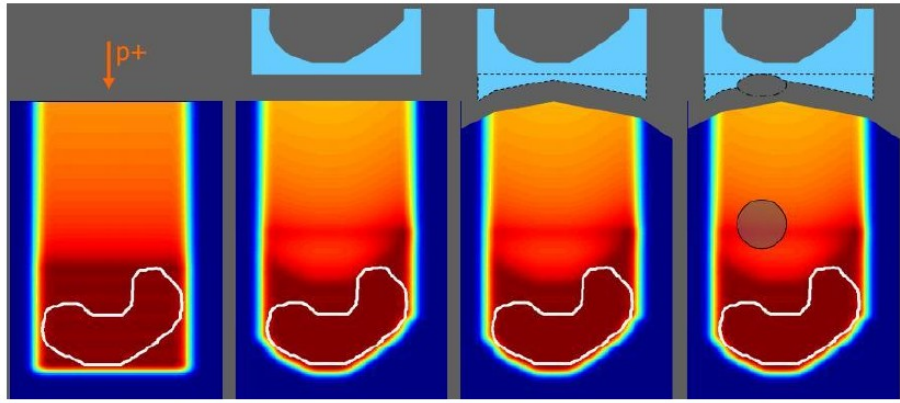
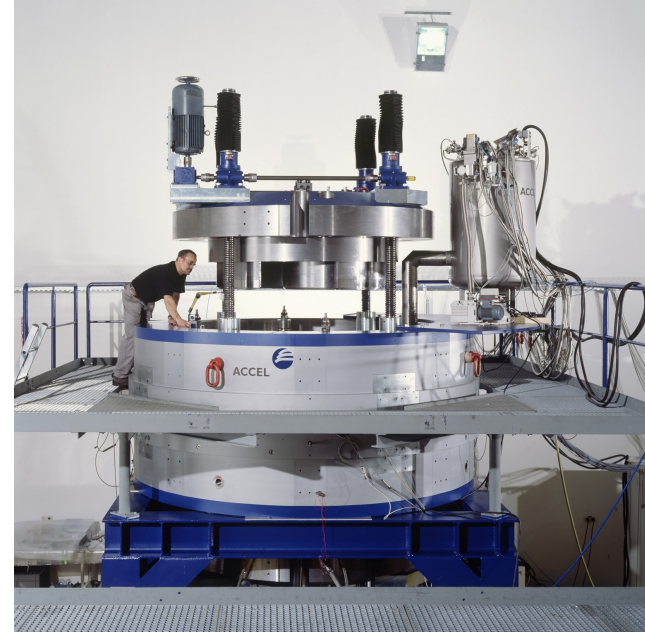
2000 пациентов в год на миллион людей

Proton therapy



Proton Cyclotron

- Стоимость системы ~ 100M\$, 20M\$/год
- Недостатки
 - Энергия постоянна
 - Дегрейдер, модулятор
 - Ток постоянный
- Достоинства
 - Стабильность
 - Непрерывный пучок

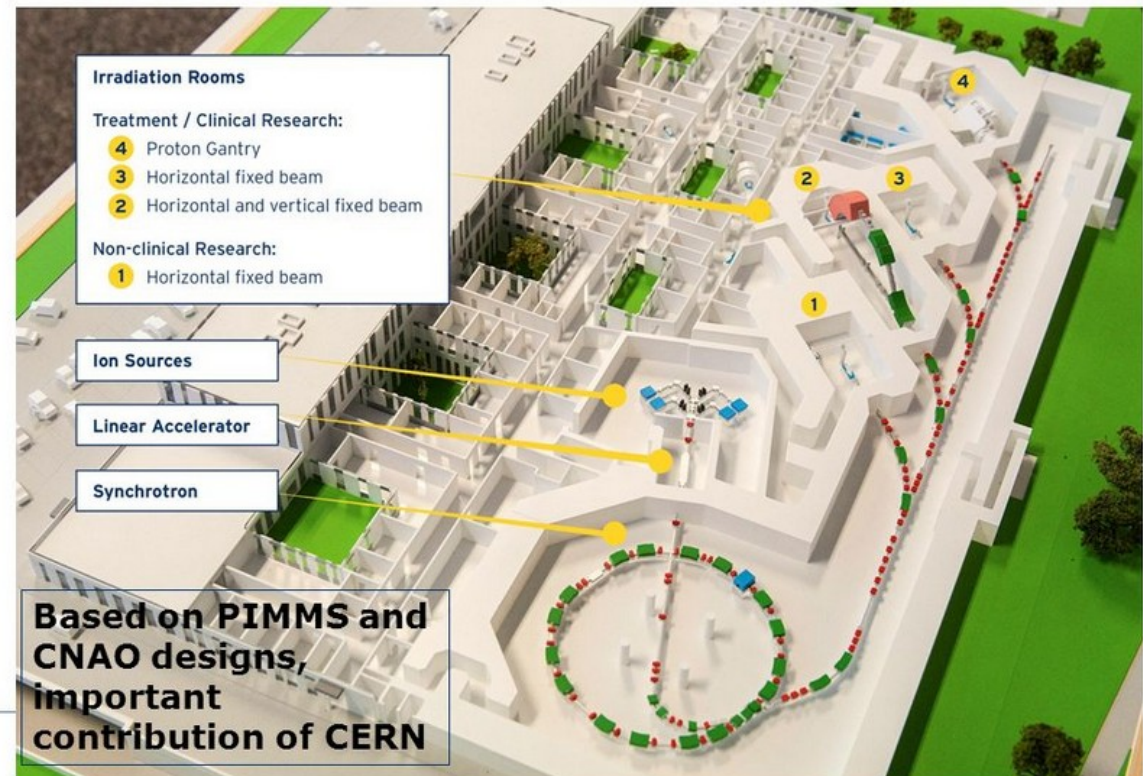


Synchrotron, Вена, Австрия

-
- Коммерчески не доступна на данный момент
- Инвестиции в проект ~ 200M\$
- Разработка совместно с ЦЕРН
- Достоинства
 - Протоны и ионы С
 - Медленная вариация энергии
 - Регулируемый заряд
- Недостатки
 - Стабильность
 - Размер
 - Стоимость
 - 1 Гц

MedAustron Layout

MedAustron 



Hadron-therapy in Europe

○ in operation
 ◇ in construction
 △ planned

Yellow = p only
 Orange = p and C

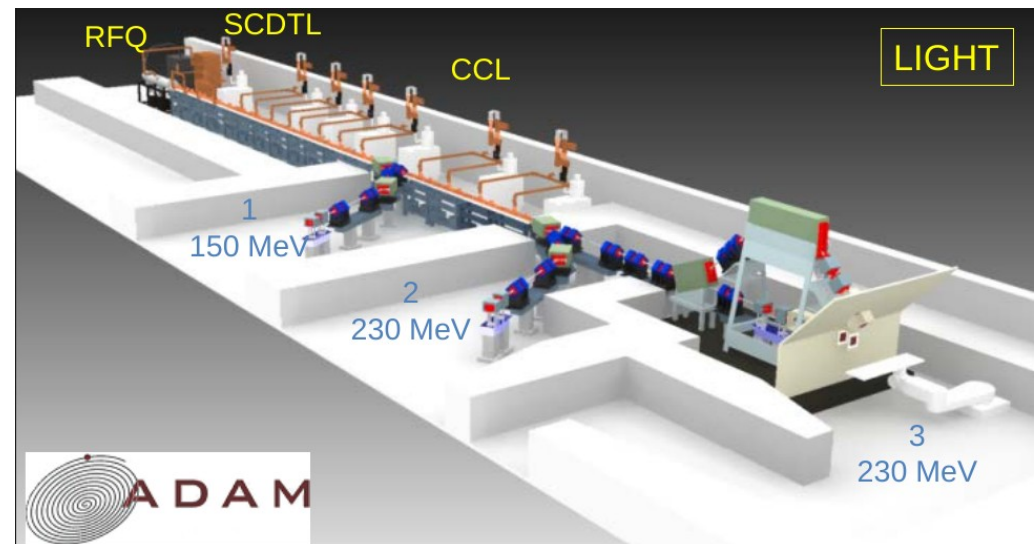
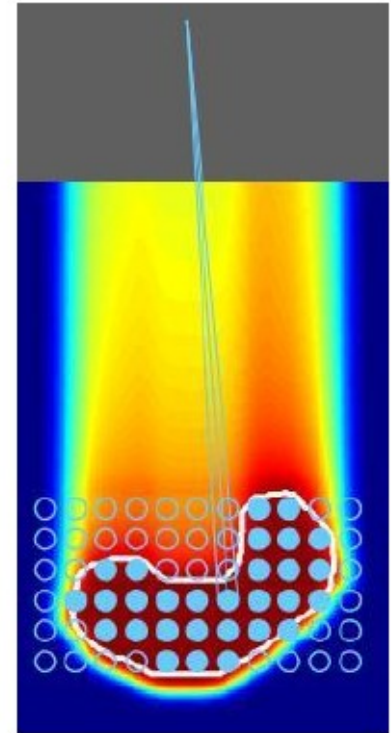


FIGURE 1. Map of Europe showing the present status of the ion beam therapy. The status of different projects is given by the symbols: in operation ○; under construction ◇; planned △
 The type of the facilities is indicated by the colors: yellow – proton only; orange – Carbon and protons.

G. Kraft, Proc. of CAARI 2008, AIP, p. 429

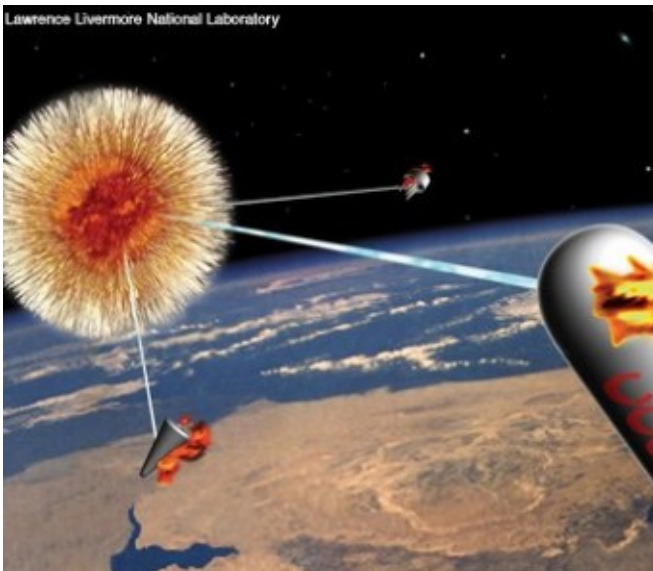
Протон линак

- АДАМ - Спин-офф ЦЕРНа
- Протонный ускоритель
- Пучок 200 Гц
- Преимущества
 - Быстрая вариация энергии и заряда
 - растровое заполнение доз произвольно поперек и по глубине объёма
 - 200 Гц
 - ~40 M\$
 - Модульная конструкция
- Недостатки
 - ...



Star wars

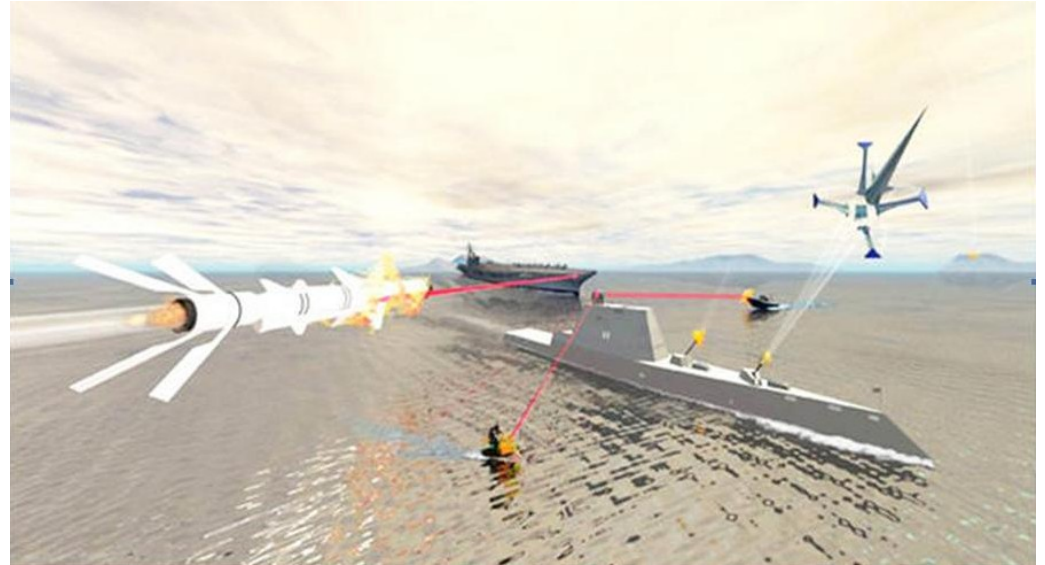
- Звездные войны 80ых
 - США: программа защиты от баллистических ракет по средствам сверх интенсивного рентгеновского лазера
 - СССР знал и предпринимал встречные шаги, известны программы по выводу ускорителей на орбиту



1971 Предложена концепция лазера на свободных электронах
1977 Первый эксперимент
2010 Рентгеновский лазер на свободных электронах

Ускоритель в океане

- Идею подхватили в Navy
- Симметричный ответ на действия Архимеда против римских кораблей



Free electron laser

- Назад на землю

A STAR WARS LASER COMES TO EARTH

Originally designed to shoot down missiles, the free-electron laser has the potential to revolutionize medicine, microelectronics, and chemical manufacture.

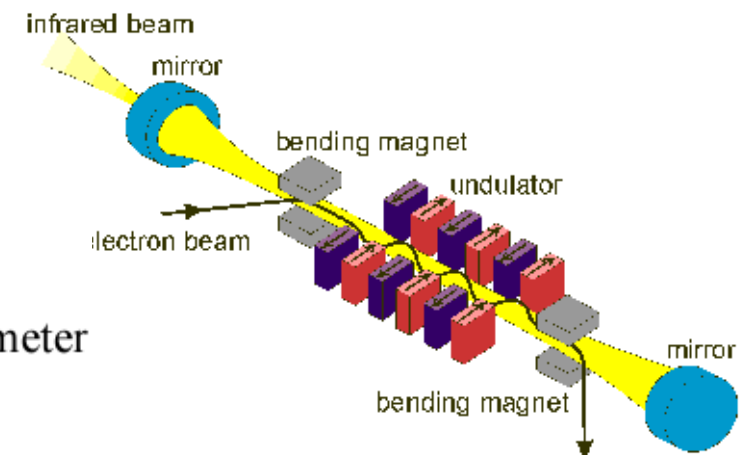
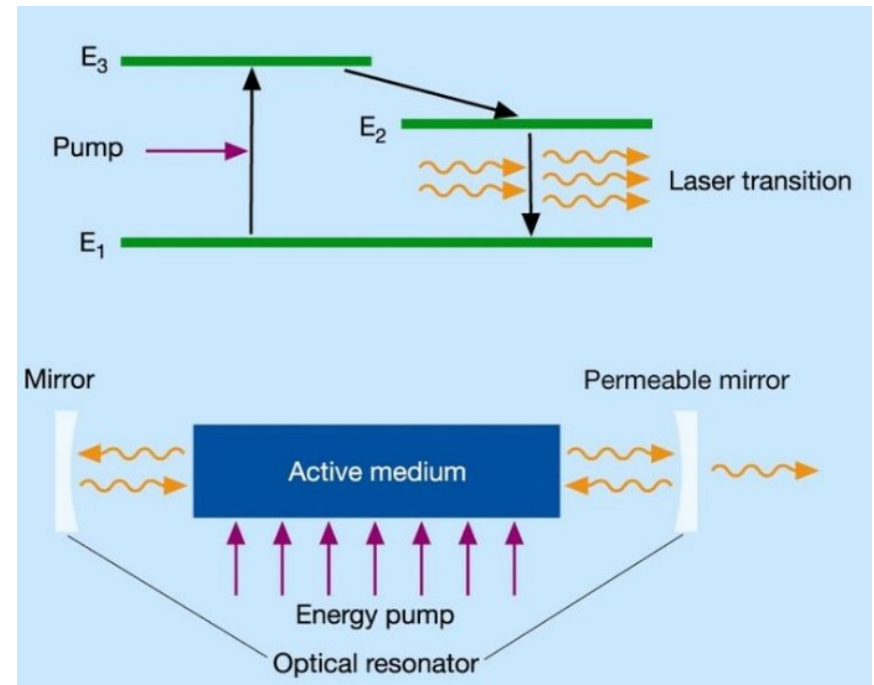
By Anthony Ramirez REPORTER ASSOCIATE **Alicia Hills Moore**

August 15, 1988

(FORTUNE Magazine) – SCIENCE HAS CREATED few things with as many potential

Лазер на свободных электронах

- Conventional laser
 - Когерентное излучение
 - Одна длина волны
 - Оптический осциллятор
- Free electron laser
 - Электронный ускоритель
 - Синхротронное излучение в периодической магнитной структуре
 - Длина волны излучения изменяется энергией электронного пучка

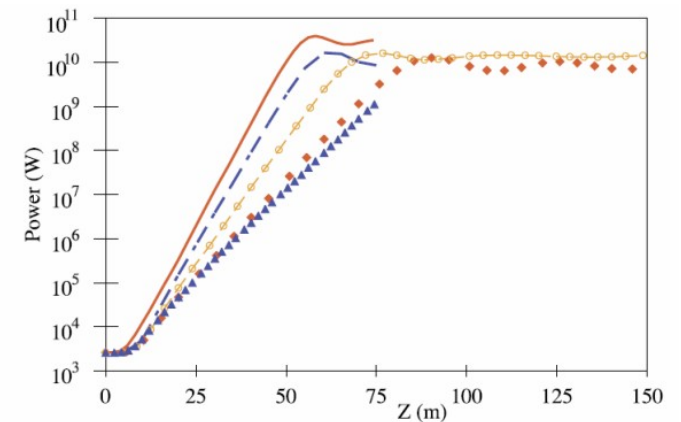
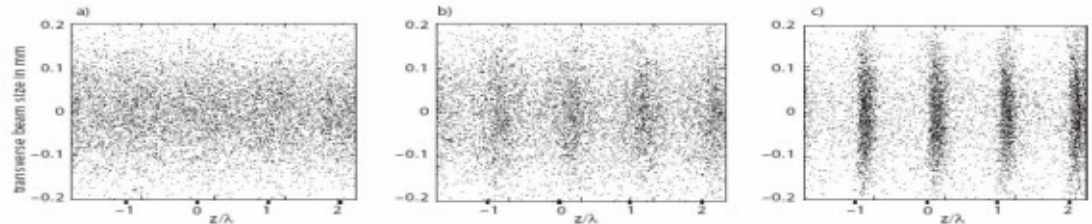
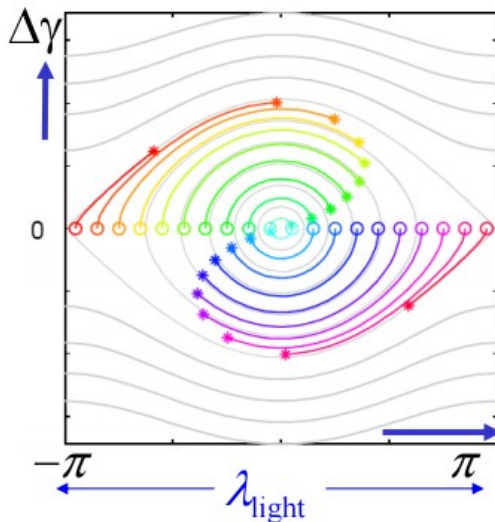


$$\lambda_{lab} = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + K^2/2\right) \quad K = \frac{e\lambda_u B}{2\pi m_0 c} \approx 1 : \text{undulator parameter}$$

High gain FEL

- Эффективных зеркал <100 nm нет
 - Self amplified spontaneous emission (SASE)

$$P = \frac{Q^2 a^2}{4\pi\epsilon_0 3c^3} \gamma^4 \omega^4 \text{ assumes point-like charge } Q!$$



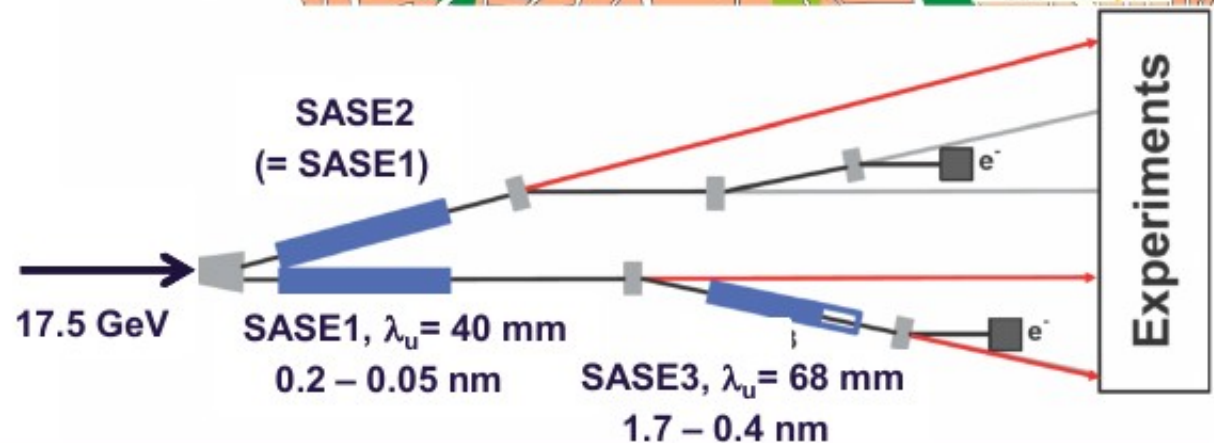
The European XFEL

Built by Research Institutes from 12 European Nations

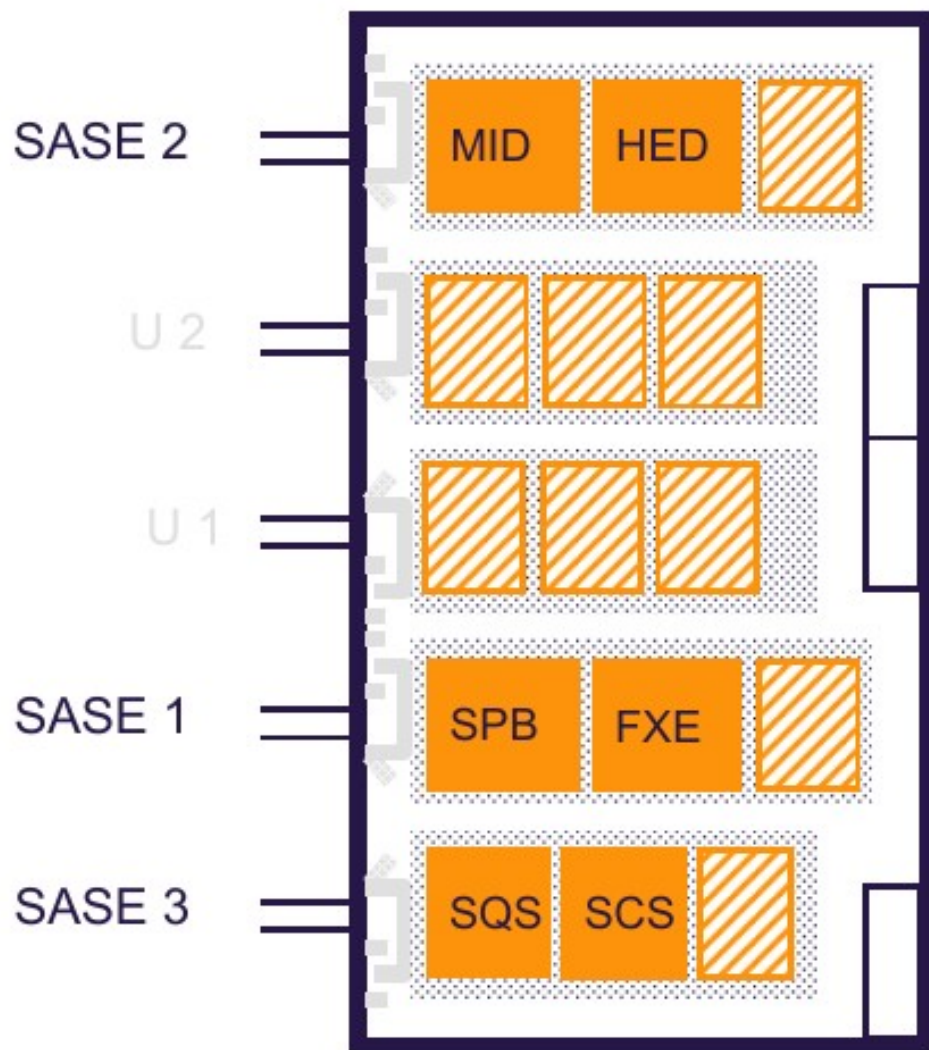


Some specifications

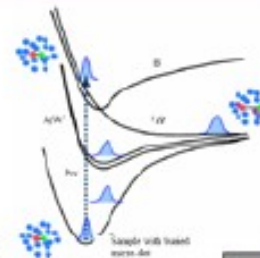
- Photon energy 0.3 - 24 keV
- Pulse duration ~ 10 - 100 fs
- Pulse energy few mJ
- Superconducting linac 17.5 GeV
- 10 Hz (27 000 b/s)
- 5 beam lines / 10 instruments
 - Start version with 3 beam lines and 6 instruments
- Several extensions possible:
 - More undulators
 - More instruments
 -
 - Variable polarization
 - Self-Seeding
 - CW operation



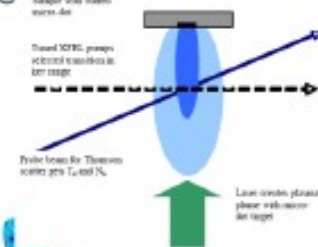
The Suite of Instruments



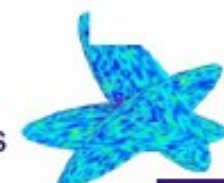
FXE Femtosecond
X-ray
Experiments



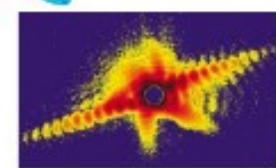
HED High Energy
Density Science



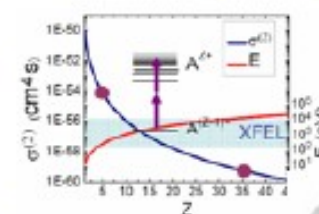
SPB Single Particle &
Biomolecules



MID Materials Imaging &
Dynamics



SQS Small Quantum
Systems



SCS Spectroscopy &
Coherent Scattering



More about experiments: <http://www.xfel.eu>

Wavelength	0.05 to 4.7 nanometres	The wavelengths of the X-ray flashes of the European XFEL are so short that even atomic details become discernible.
Duration	less than 100 quadrillionth of a second (less than 100 femtoseconds)	Thanks to this extremely short pulse duration, scientists will be able to film e.g. the formation of molecules or the reversal of magnetization.
Brilliance (peak value)	$5 \cdot 10^{33}$ (photons / s / mm ² / mrad ² / 0,1% bandwidth)	The peak brilliance is a billion times higher than that of the best conventional X-ray sources. The brilliance describes the number of photons of a given energy that are emitted per second, area, and angle within a small energy interval.
Brilliance (average value)	$1,6 \cdot 10^{25}$ (photons / s / mm ² / mrad ² / 0,1% bandwidth)	The average brilliance is 10 000 times higher than that of the best conventional X-ray sources.
Coherence	yes	The X-ray flashes have the characteristics of laser light. This makes it possible to take 3D images at the atomic level.

ЛНС в школьной лаборатории

ЛНС в школьной лаборатории

- Простое решение
 - Школьная лаборатория диаметром 8 километров

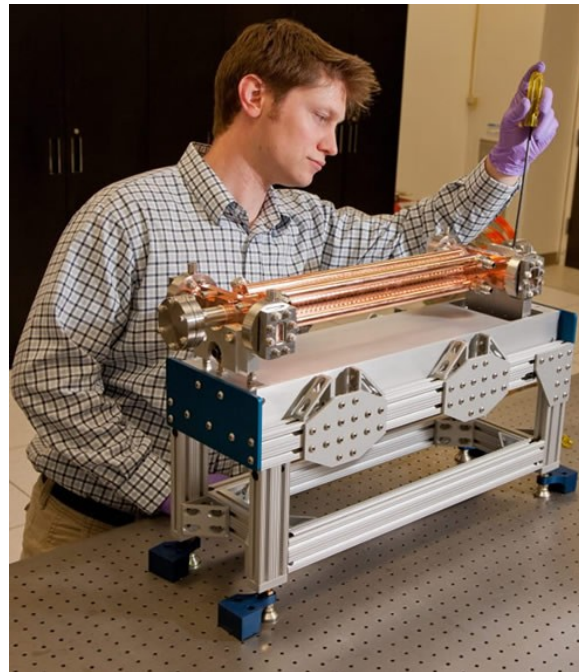
LHC в школьной лаборатории

- Сверх-компактные ускорители

Band Designator	Frequency [GHz]	Gradient [MV/m]	Cell length [cm]	Comments
L band	1 to 2	24	15 – 7.5	This band is used by super-conducting RF technology. The dimensions are large, accelerating gradients are lower and disturbing wakefields are weak.
S band	2 to 4	21	7.5 – 3.8	Technology of the SLAC linac that was completed in 1966. This is still the technology behind many accelerators.
C band	4 to 8	35	3.8 – 1.9	Newer technology developed in Japan and used for the construction of the SACLA linac in Japan.
X band	8 to 12	70 – 100	1.9 – 1.3	Technology developed from the 1990's onwards for linear collider designs, like NLC and CLIC. The cell length is up to a factor 10 shorter than in L band.
Ku band	12 to 18	n/a	1.3 – 0.8	
K band	18 to 27	n/a	0.8 – 0.6	
Ka band	27 to 40	70	0.6 – 0.4	Investigated for a possible CLIC linear collider technology at 30 GHz but abandoned after damage problems.
V band	40 to 75	n/a	0.4 – 0.2	
W band	75 to 110	> 1000	0.2 – 0.1	Advanced acceleration schemes with ultra high gradients and very short cell lengths.

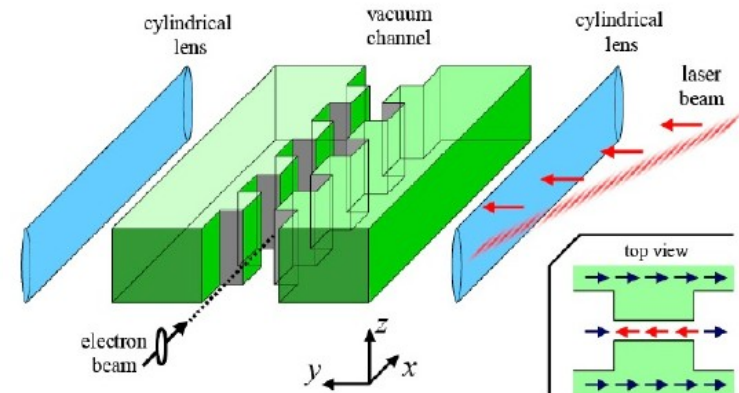
Рабочая частота СВЧ

- DC, 42m high, 20 MeV \Rightarrow 0.5 MV/m
- X-band, 100 MV/m
- SLC
 - 3.2 km at 20 MV/m \Rightarrow X-band \Rightarrow 600 m



Laser Dielectric accelerator

- Диэлектрические ускорительные структуры
 - Accelerator on a chip
 - Laser driven
 - 1 GV/m
 - SLC => 60m



T. Plettner, et al. PRST-AB 9, 111301 (2006).

Goal: lower cost, more compact, higher gradient



laser-driven microstructures

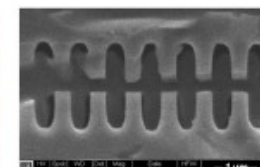
- **lasers:** high rep rates, strong field gradients, commercial support
- **dielectrics:** higher breakdown threshold → higher gradients (1-5 GV/m), leverage industrial fabrication processes



1-2 GV/m

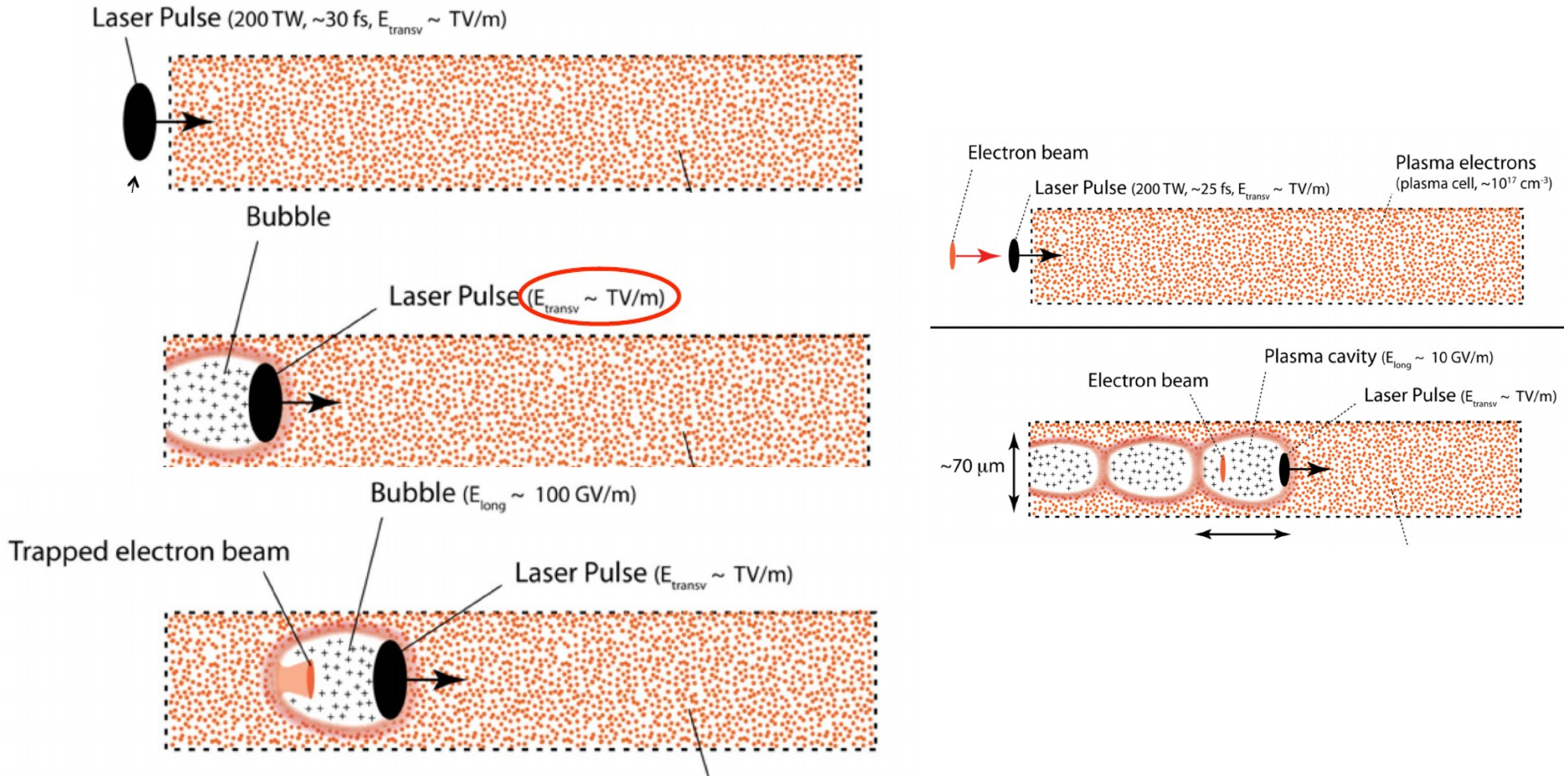


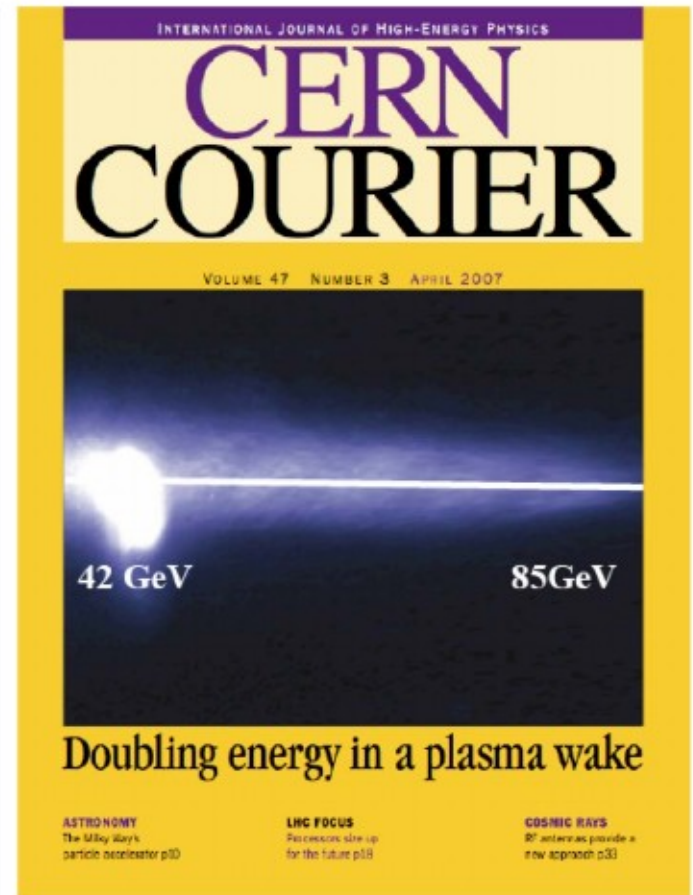
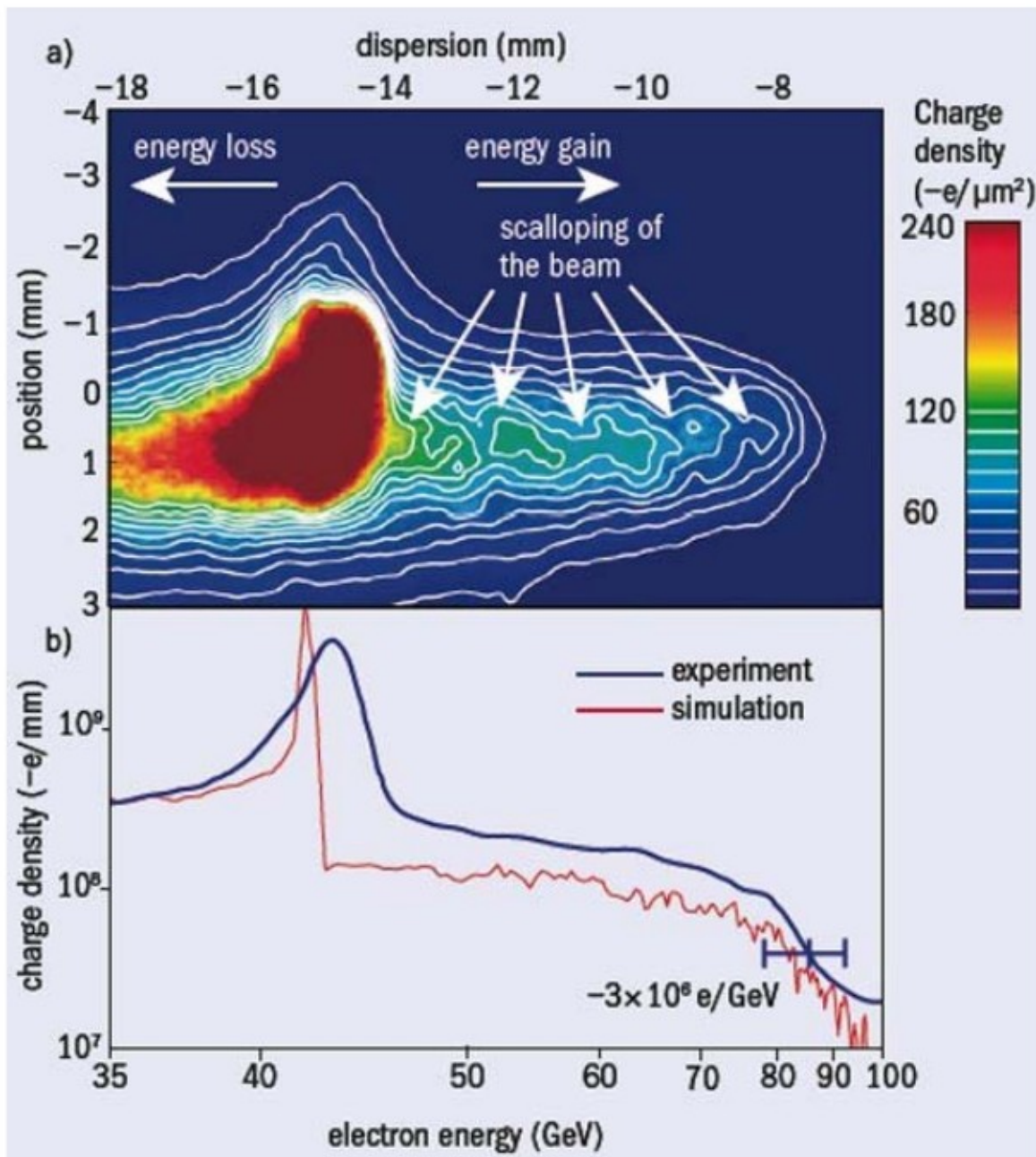
$\lambda = 1-10 \mu\text{m}$



PWFA

- Кильваторное ускорение в плазме

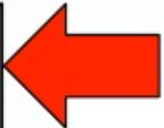
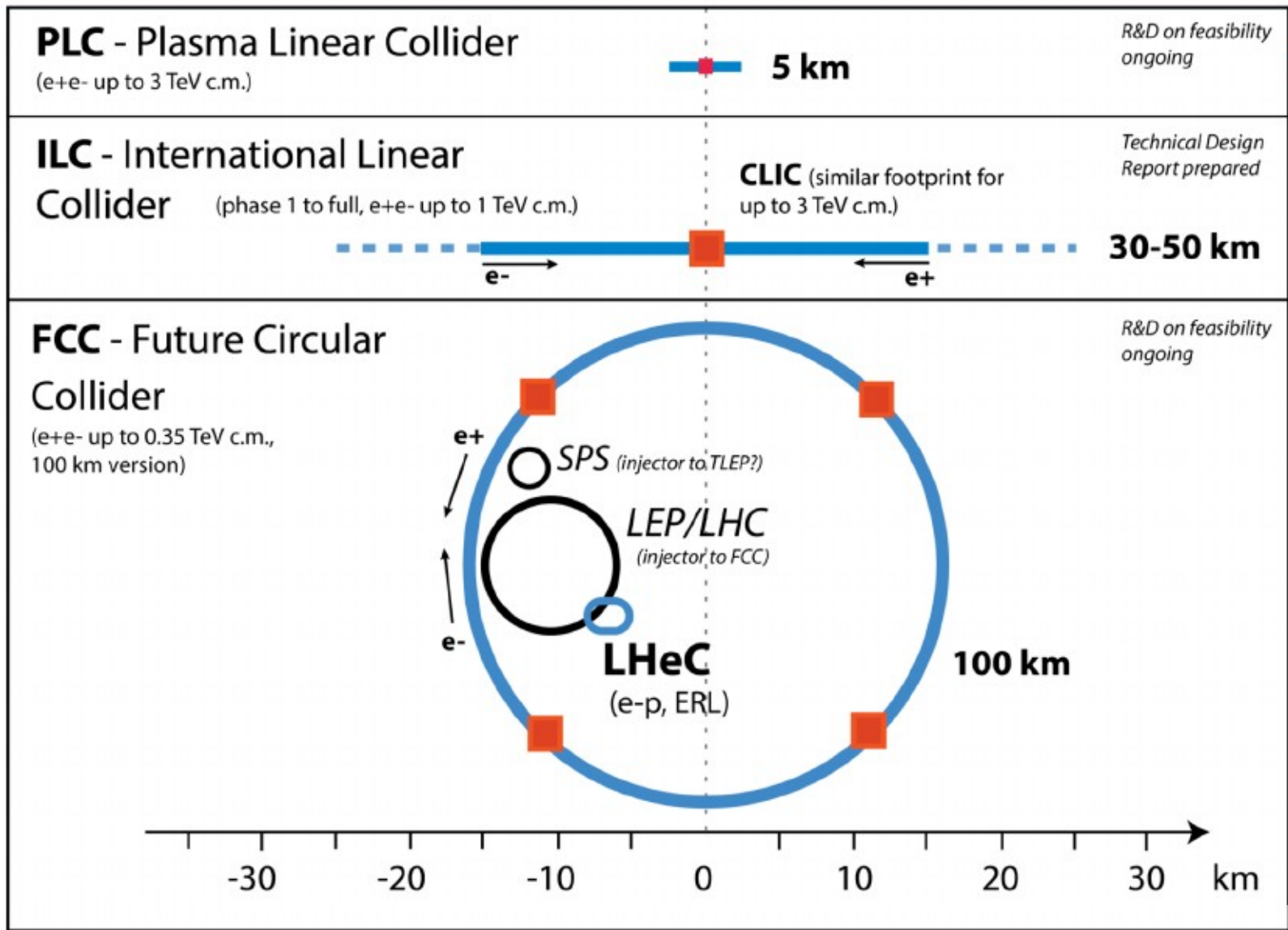




E167 collaboration
SLAC, UCLA, USC

I. Blumenfeld et al, Nature 445,
p. 741 (2007)





Дополнительные темы

Sailing Before the Light:
Laser-Plasma Acceleration
Driven by Radiation Pressure

Andrea Macchi

Energy Recovery Linacs

Virtual beam power for a multitude of applications

Andreas Jankowiak
Helmholtz-Zentrum Berlin and
Humboldt-Universität zu Berlin

Спасибо за внимание