เครื่องเร่งอนุภาคและการประยุกต์

สาคร ริมแจ่ม

ภาควิชาฟิสิกส์และวัสดุศาสตร์

คณะวิทยาศาสตร์

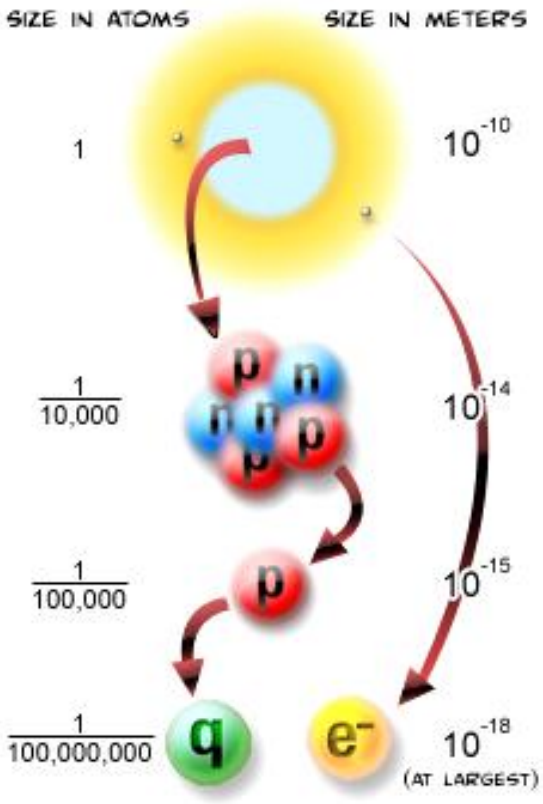
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

6 กรกฎาคม 2562

โครงการอบรมฟิสิกส์อนุภาคพื้นฐาน (ภูมิภาค) ประจำปี 2562

A Particle Accelerator as A Tool Probe

เครื่องมือที่จะนำมาศึกษาโครงสร้างที่มีขนาดเล็ก ต้องมีขนาดใกล้เคียง หรือเล็กกว่า



➢ พิจารณาการใช้แสงหรือโฟตอนที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่า 10^{-15} เมตร มาเป็นเครื่องมือวัด จะหาพลังงานของแสงจาก

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

แสงที่มีความยาวคลื่น 10^{-15} เมตร จะมีพลังงานประมาณ 1 GeV ซึ่งแสงที่มีพลังงานสูงขนาดนี้ไม่สามารถสร้างได้จริงในทางปฏิบัติ

➢ พิจารณาการใช้ลำอนุภาคพลังงานสูงมาเป็นเครื่องมือ โดยใช้หลักการทางควอนตัมเรื่องทวิภาคของอนุภาคและคลื่น (Wave-particle duality) ซึ่งอนุภาคที่มีโมเมนตัมสามารถแสดงสมบัติของคลื่นสสาร

$$\lambda = \frac{hc}{pc} = \frac{hc}{\beta E}$$

เครื่องเร่งอนุภาค (particle accelerator)

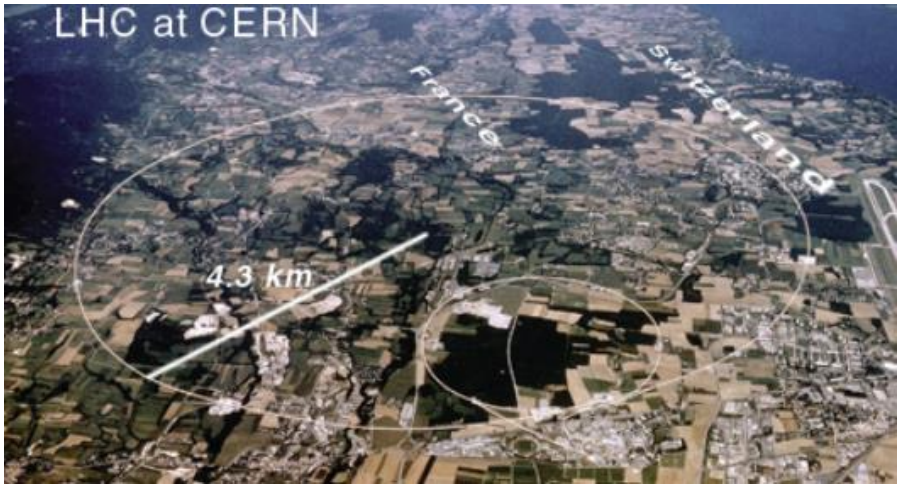
เครื่องเร่งอนุภาค (particle accelerator) คือ เครื่องมือที่ใช้ในการผลิตและเร่งอนุภาคมีประจุ เช่น อิเล็กตรอน (electron) โปรตอน (proton) โพซิตรอน (positron) หรือไอออน (ion) ให้มีพลังงานจลน์เพิ่มสูงขึ้นโดยอาศัยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

สสาร / อนุภาคมูลฐาน	ขนาด (m)	พลังงาน	วิธีศึกษา
เซลล์ เช่น แบคทีเรีย	10^{-5} - 10^{-7}	0.1-10 eV	กล้องจุลทรรศน์แสง (optical microscope)
โมเลกุล	$\sim 10^{-9}$	$\sim$1 keV	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (electron microscope)
อะตอม	$\sim 10^{-10}$	$\sim$10 keV	รังสีซินโครตรอน (synchrotron radiation)
นิวเคลียส	$\sim 10^{-14}$	>100 MeV	เครื่องเร่งอิเล็กตรอนหรือโปรตอนพลังงานต่ำ
อนุภาคเฮดรอน (hadron)	$\sim 10^{-15}$	>1 GeV	เครื่องเร่งโปรตอนพลังงานสูง
ควาก (quark) และอนุภาคเลปตอน (lepton)	$<10^{-18}$	>1 TeV	เครื่องเร่งอิเล็กตรอนหรือโปรตอนพลังงานสูง

Particles accelerators : different shapes, different sizes and different applications

Electron Microscope
(with a length of meter scale)

Large Hadron Collider (LHC) @ CERN
(27 km circumference)

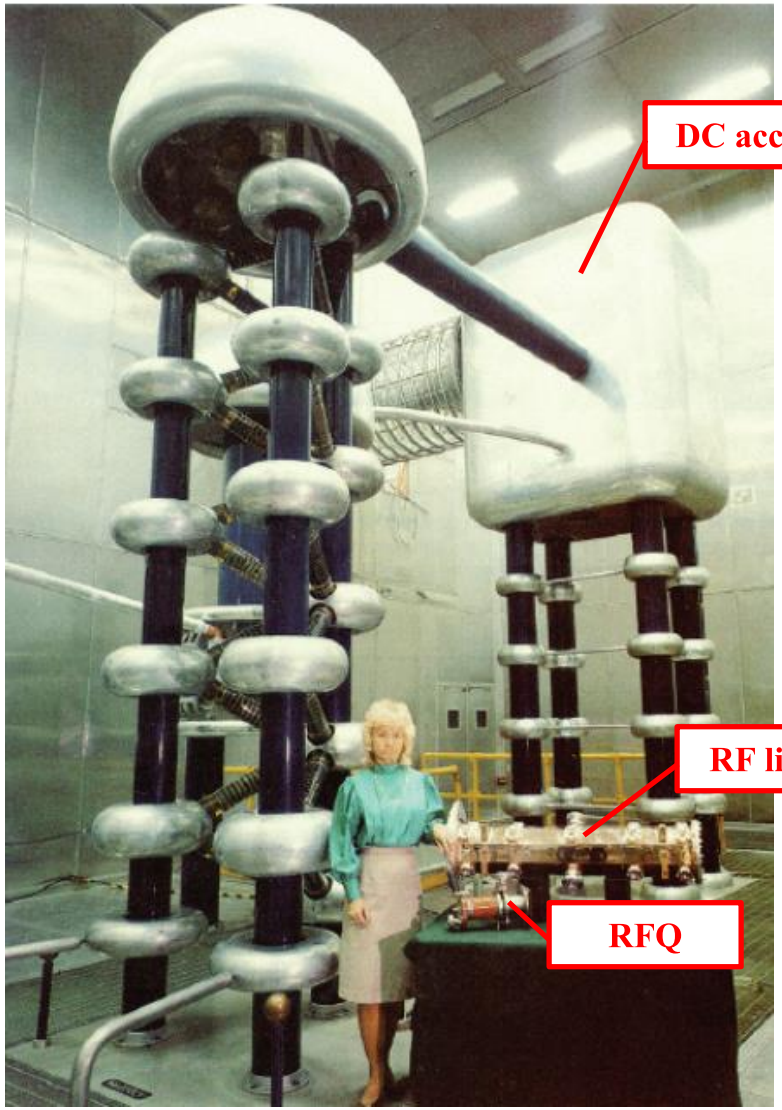


3-miles Stanford Linear Accelerator
Laboratory (SLAC), USA

Fermilab Cockcroft Walton pre-accelerator

ส่วนประกอบหลักของเครื่องเร่งอนุภาค

1. แหล่งกำเนิดอนุภาคมีประจุ
2. ระบบเร่ง
3. ระบบจ่ายกำลัง
4. ระบบแม่เหล็ก
5. เป้าชนหรืออุปกรณ์เพิ่มเติม
   เพื่อผลิตรังสีและหัววัด
6. ระบบสุญญากาศ
7. ระบบควบคุม



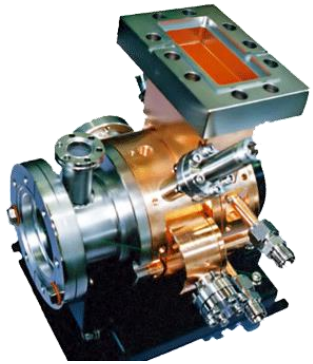
(G. Hoffstaetter, USPAS, June 2010)

1. แหล่งกำเนิดอนุภาคมีประจุ (Charged Particle Source)

แหล่งกำเนิดอนุภาคมีประจุ: อิเล็กตรอน โปรตอน โพซิตรอน และไอออนของธาตุเสถียรเกือบทุกตัวตั้งแต่ไฮโดรเจนจนถึงยูเรเนียม

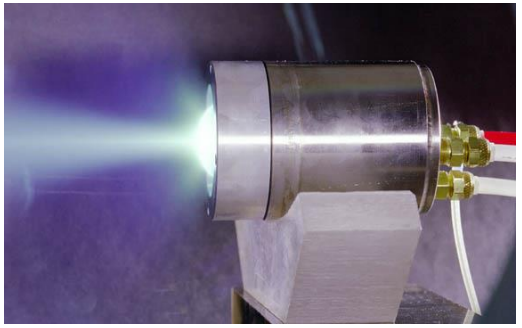
มีชิ้นส่วน 2 ส่วน: ส่วนปล่อยประจุ (charged particle emitter) และ ระบบดึง (extraction system) ซึ่งทำให้อนุภาคมีความเร็วเพิ่มขึ้น และดึงให้ลำอนุภาคที่ผลิตได้เคลื่อนที่ออกจากแหล่งกำเนิด

DC electron source



RF electron source

Ion source

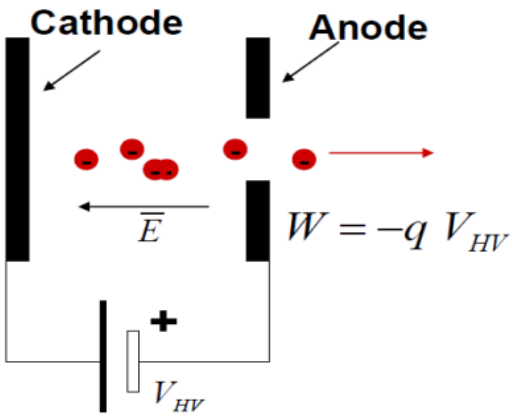


Plasma source

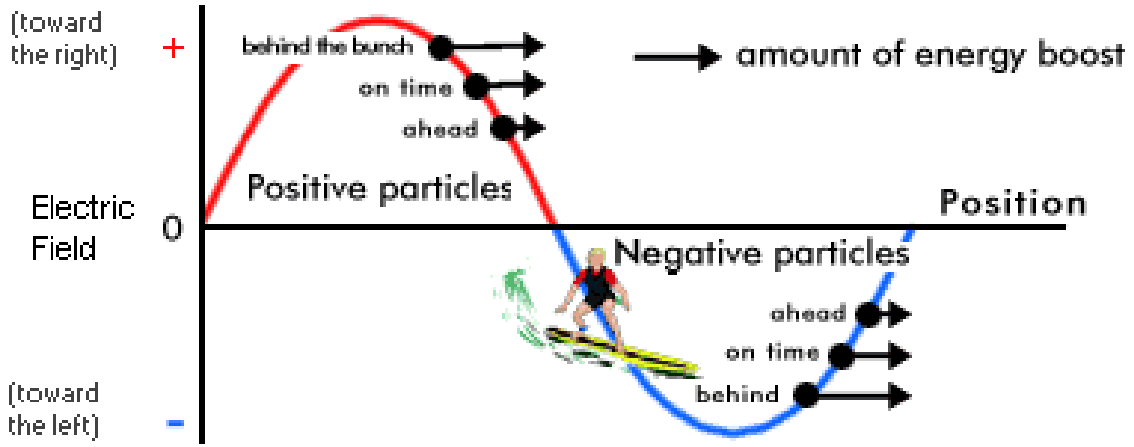
2. ระบบเร่ง (Accelerating system)

ระบบเร่งอนุภาคให้มีความเร็วสูงขึ้น ขึ้นอยู่กับชนิดของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ใช้ในการเร่งอนุภาค เช่น

- ระบบเร่งโดยใช้สนามไฟฟ้าสถิต (static electric field)
- ระบบเร่งโดยใช้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบสนามที่มีค่าเปลี่ยนไปตามเวลาหรือสนามอาร์เอฟ (radio-frequency field หรือ RF field) ที่มีย่านความถี่ Hz ไปจนถึง GHz
- ระบบเร่งโดยใช้อันตรกิริยาระหว่างสนาม เช่น การเร่งโดยใช้เลเซอร์และพลาสมา (laser-plasma acceleration)



Static electric field acceleration

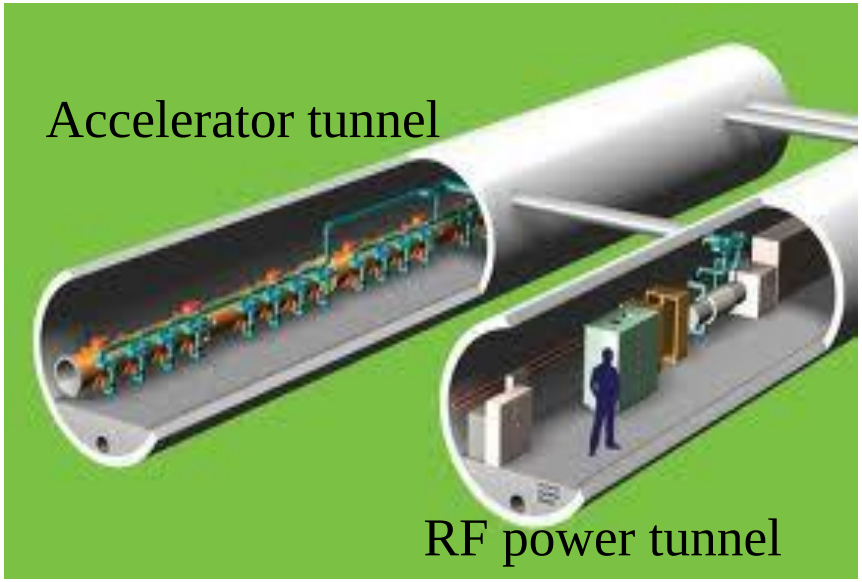


RF field acceleration

3. ระบบจ่ายกำลัง (Power supply system)

สำหรับสร้างไฟฟ้าศักย์สูง หรือระบบสร้างสนามไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับใช้เร่งอนุภาคให้มีความเร็วสูงขึ้น

- ระบบจ่ายกำลังมีขนาดแตกต่างกันไปตามส่วนประกอบต่างๆ ตั้งแต่ kW จนถึง MW
- ระบบจ่ายกำลังมีรูปแบบต่างๆ เช่น ไฟฟ้ากระแสตรง ไฟฟ้ากระแสสลับ หรือระบบสร้างสนามไฟฟ้าความถี่สูงสำหรับผลิตสนามอาร์เอฟ

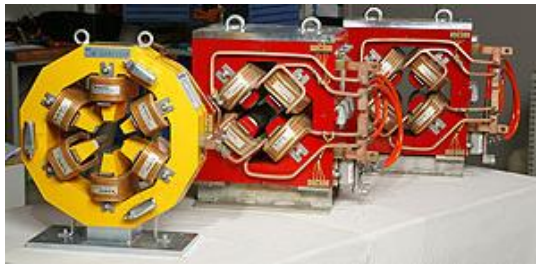


4. ระบบแม่เหล็ก (Magnet system)

ระบบแม่เหล็กใช้ในการลำเลียงอนุภาค โดยใช้ควบคุมทิศทางและขนาดของลำอนุภาค ซึ่งแยกประเภทของแม่เหล็กและการนำไปประยุกต์ใช้ดังนี้

- แม่เหล็กสองขั้ว (dipole magnet): เบนและควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของลำอนุภาค
- แม่เหล็กสี่ขั้ว (quadrupole magnet): ควบคุมขนาดตามขวางโดยการบีบหรือการกระจายลำอนุภาค
- แม่เหล็กหลายขั้ว (multipole magnet): เช่น แม่เหล็กหกขั้ว (sextupole magnet) แม่เหล็กแปดขั้ว (octupole magnet)

Dipole magnet

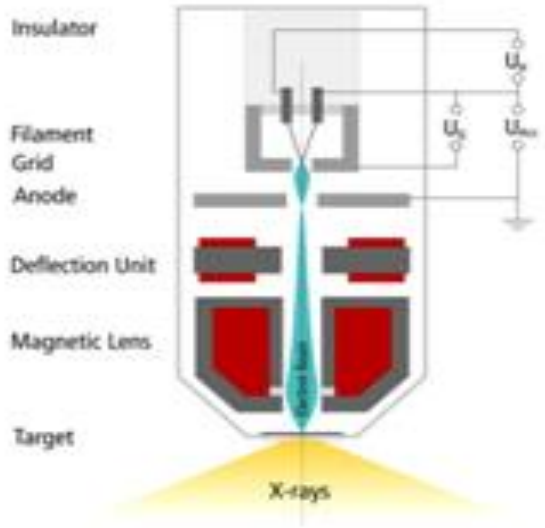


Quadrupole and sextupole magnet

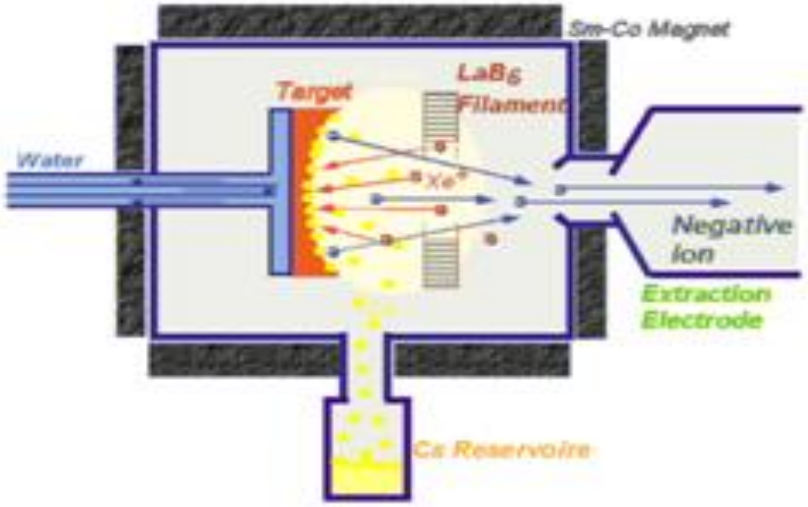
Octupole magnet

ระบบแม่เหล็กในเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นและเชิงวง

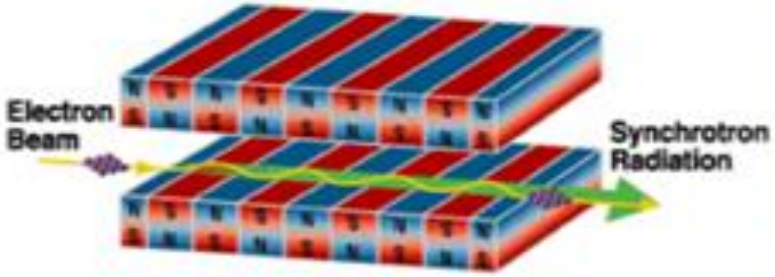
5. Target, Insertion devices, Detector



X-ray target



Ion source target

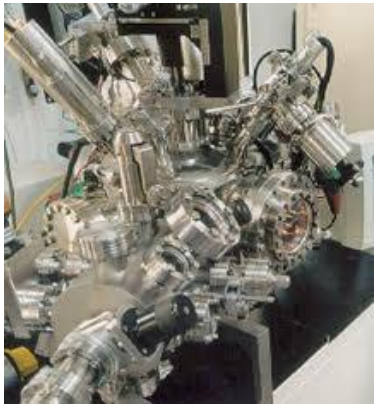


Undulator radiation

Detector

6. ระบบสุญญากาศ (Vacuum system)

อนุภาคมีประจุที่ผลิตและเร่งในเครื่องเร่งอนุภาคทุกชนิดนั้นมีขนาดเล็ก ดังนั้น ภายในระบบเครื่องเร่งอนุภาคต้องอยู่ในสภาวะที่เป็นสุญญากาศ โดยมีระดับความดันที่ต่ำมากเพียงพอที่จะไม่ทำให้เกิดการชนหรือการกระเจิงของอนุภาค อันเนื่องมาจากอากาศหรือก๊าซที่หลงเหลืออยู่ภายในระบบเครื่องเร่ง



ปั้มสุญญากาศ (Vacuum pump) แบ่งเป็น 3 ช่วง

1. ช่วงความเป็นสุญญกาศต่ำที่มีความดันอยู่ในช่วง 10^{-3}-10^{-6} torr
2. ช่วงความเป็นสุญญากาศสูง (high vacuum) ที่มีความดันอยู่ในช่วง 10^{-6}-10^{-9} torr
3. ช่วงความเป็นสุญญากาศสูงมาก (ultrahigh vacuum หรือ UHV) ที่มีความดันต่ำกว่า 10^{-9} torr

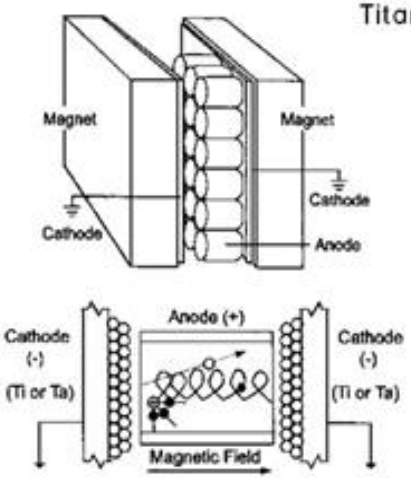
Turbo molecular pump

Rotary pump

Titanium sublimation pump

Diffusion pump

Sputter ion pump



Cryogenic pump

7. ระบบควบคุม (Control System)

ระบบควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ได้ถูกนำมาใช้ในการควบคุมการทำงานของเครื่องเร่งอนุภาคเพื่อ

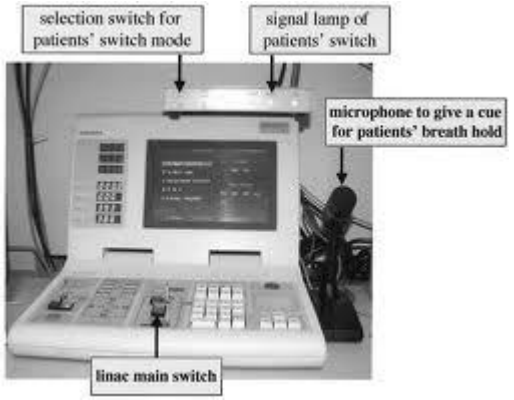
- ควบคุมการทำงาน
- ตรวจสอบสมบัติที่สำคัญของระบบแลพลำอนุภาค

Tevatron's control room (USA)

LHC's control room (CERN)

DESY's control room (Germany)

Ion beam control system



Medical linac control switch

Types of Particle Accelerator

1. Electrostatic field-based accelerators: direct voltage (DC), pulsed voltage

- Cathode ray tube (late 1800s)
- Van-de-Graff (~1929-1930)
- Cockcroft Walton (1932)

2. Resonant accelerators: time varying field-based accelerators)

- Linear accelerator (linac) - Ising (1924) & Wideroe (1928)
- Cyclotron – Lowrence (1930)
- Synchrotron - Oliphant (1943)
- Synchrotron & Betatron – McMillan (1943)
- Alvarez linac – McMillan (1946)
- Strong focusing – Courant & Snyder (1952)

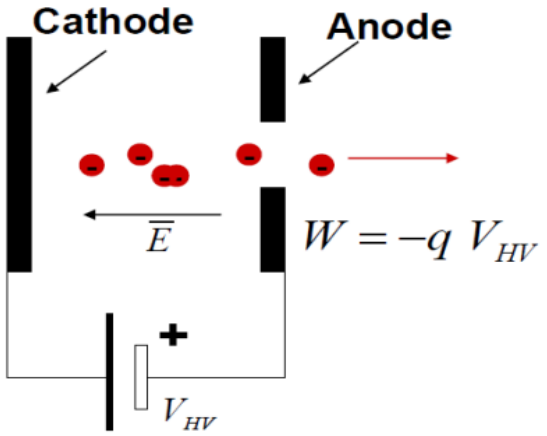
3. Other types of accelerator:

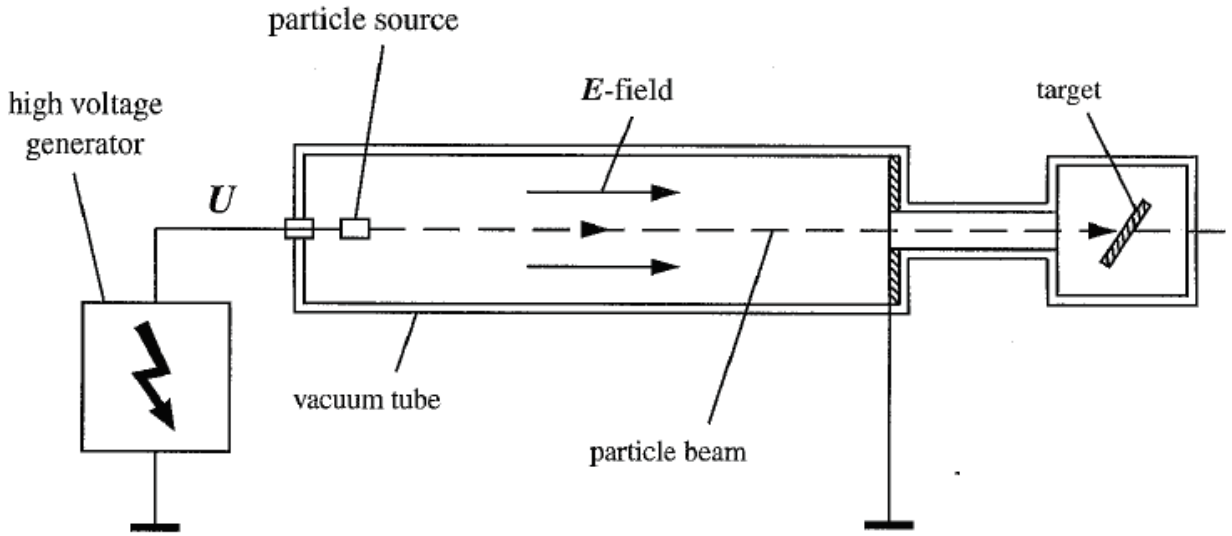
e.g. linear induction accelerator, transformer accelerator, plasma-laser acceleration

1. Electrostatic Field-based Accelerators

ใช้หลักการเร่งอนุภาคมีประจุให้มีพลังงานสูงขึ้นโดยให้อนุภาคเคลื่อนที่ผ่านความต่างศักย์ในสนามไฟฟ้าคงที่

- มีพลังงานค่อนข้างต่ำอยู่ในช่วง keV ถึง MeV
- ใช้ในเครื่องเร่งขนาดเล็ก
- ใช้สำหรับเร่งอนุภาคในช่วงต้น เพื่อทำให้อนุภาคมีพลังงานที่เหมาะสม ก่อนที่จะส่งเข้าไปเร่งในเครื่องเร่งชนิดอื่นให้มีพลังงานสูงขึ้น





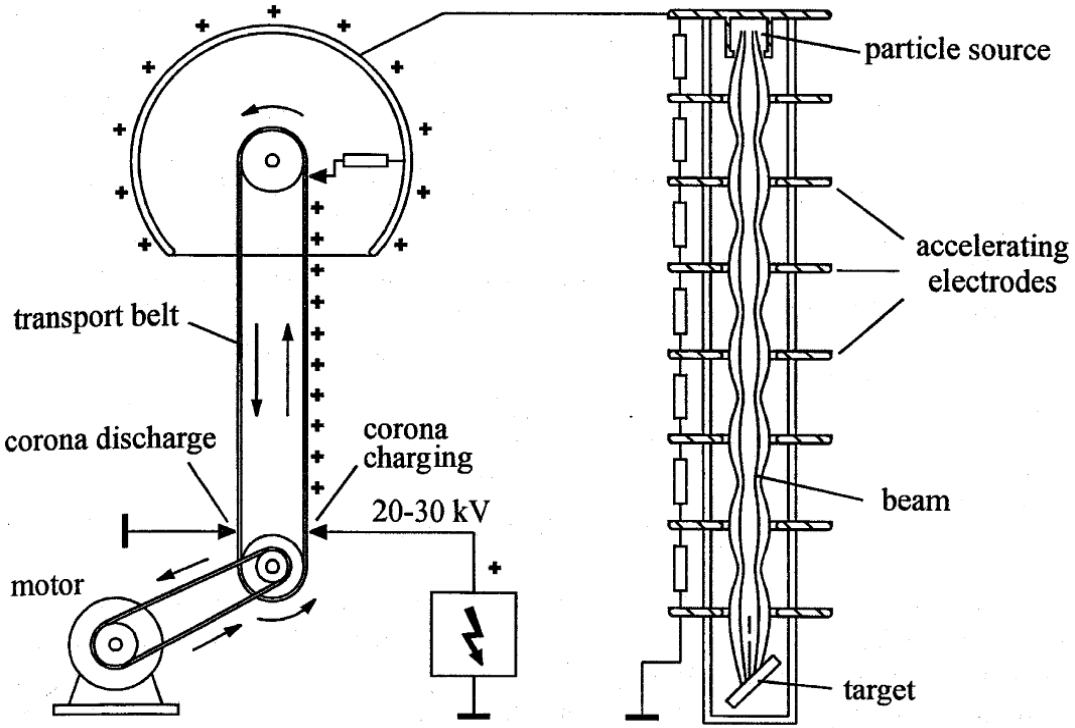
Voltage 1MV
Charge Ze
Energy Z MeV

$$W = qV$$

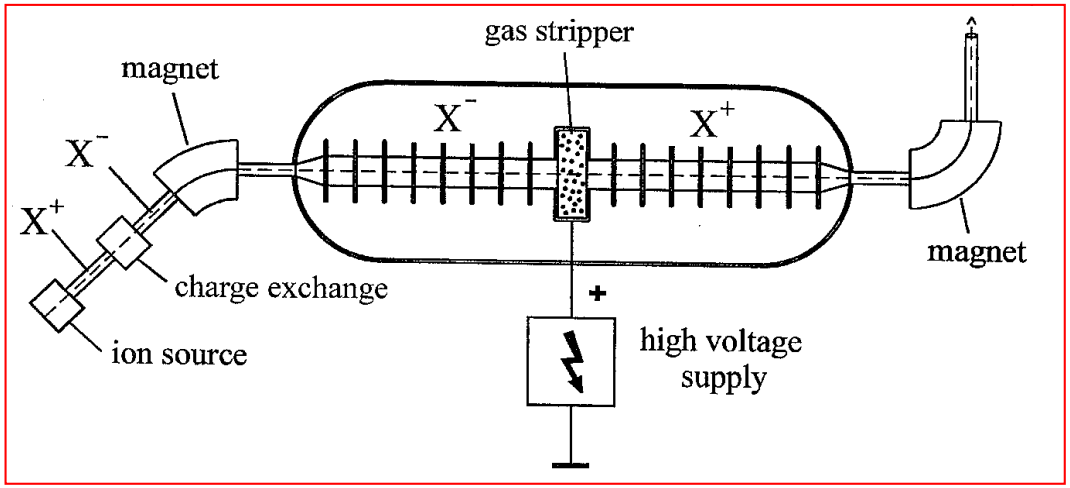
เครื่องเร่งแวน เดอ กราฟฟ์

(Van de Graaff)

~1929-1930 Robert Van de Graaff developed the first 1.5 MV high voltage electrostatic accelerator



Tamdam accelerators use the high voltage generated by two Van-de-Graaff accelerators (one +, one -) to accelerate charged ions

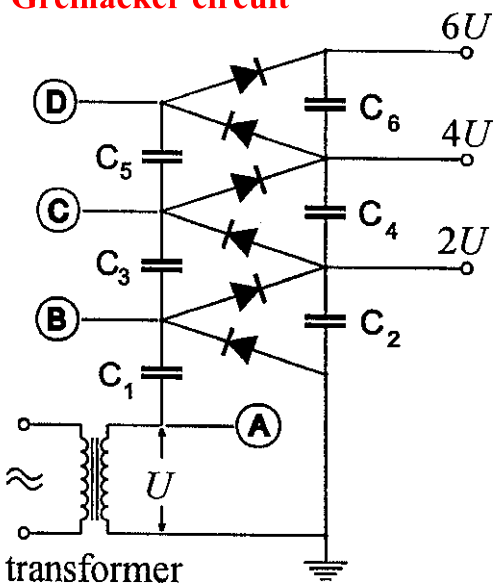


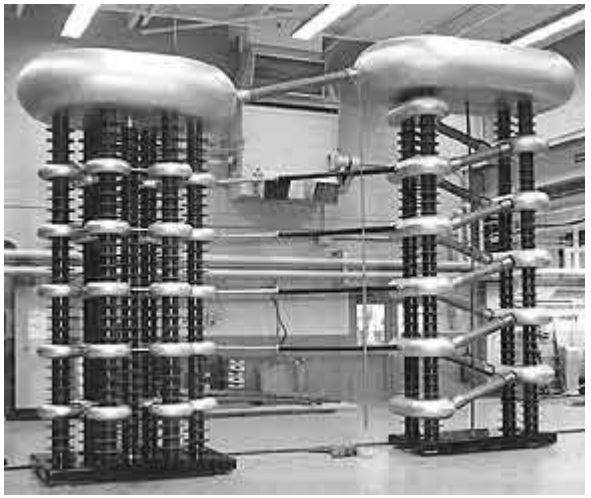
เครื่องเร่งคอคครอฟต์-วอลตัน

(Cockcroft-Walton accelerator)

In 1932 J. D. Cockcrof and E.T.S. Walton developed the first 700 keV cascade generator

Greinacker circuit





(G. Hoffstaetter, USPAS, June 2010)

Types of Particle Accelerator

1. Electrostatic field-based accelerators: direct voltage (DC), pulsed voltage

- Cathode ray tube (late 1800s)
- Van-de-Graff (~1929-1930)
- Cockcroft Walton (1932)

2. Resonant accelerators: time varying field-based accelerators)

- Linear accelerator (linac) - Ising (1924) & Wideroe (1928)
- Cyclotron – Lowrence (1930)
- Synchrotron - Oliphant (1943)
- Synchrotron & Betatron – McMillan (1943)
- Alvarez linac – McMillan (1946)
- Strong focusing – Courant & Snyder (1952)

3. Other types of accelerator:

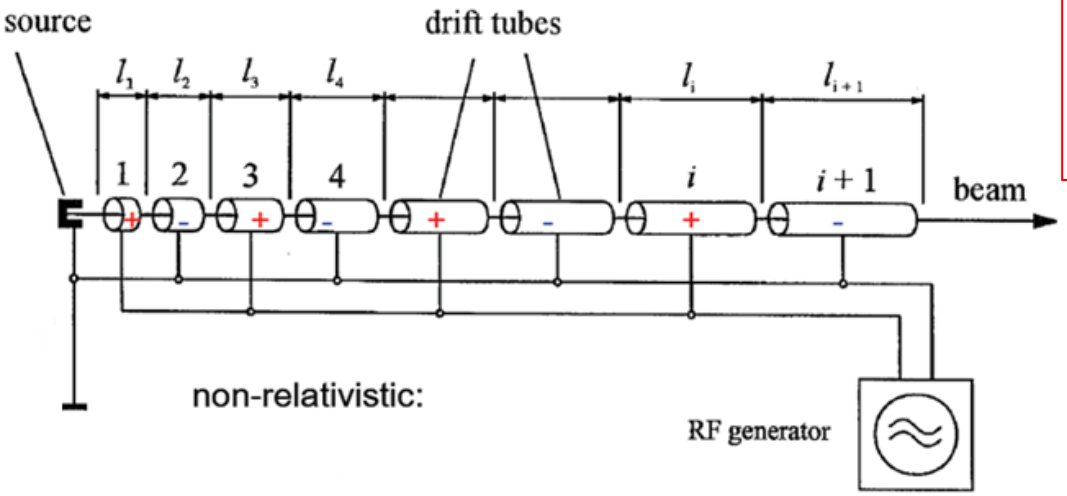
e.g. linear induction accelerator, transformer accelerator, plasma-laser acceleration

2. Resonant Accelerators: Time Varying Field-based Accelerators

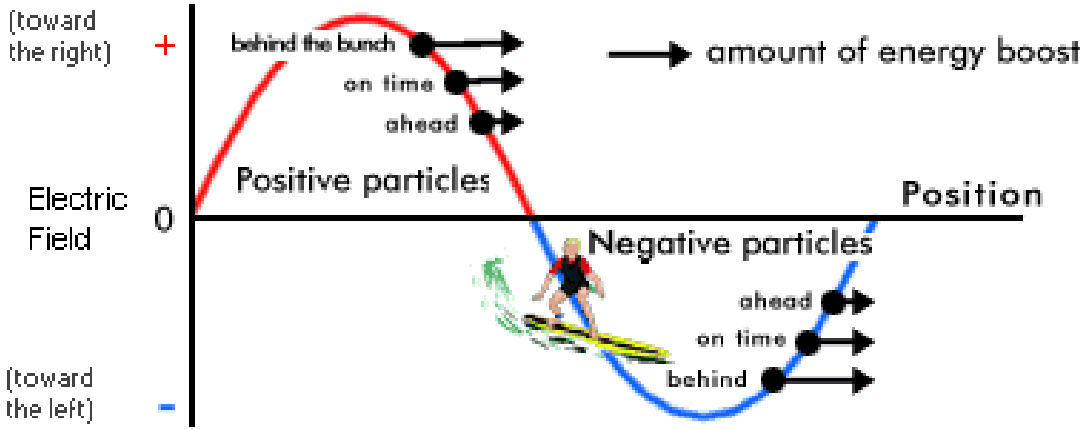
1930 Invention of the first linear accelerator (linac) by Rolf Wideroe

1949 Invention of the first linac for therapy in England by Newberry

1950s Development of compact linacs by e.g. Varian, Siemens, GE, Philipps and others



Wideroe linac (1930)



Particles must have the correct phase relative to the accelerating voltage

Accelerating field

$$E_z = E_{zo}\cos(\omega t)$$

Accelerating voltage

$$V_{rf} = \int E_s(s,t)\,ds$$

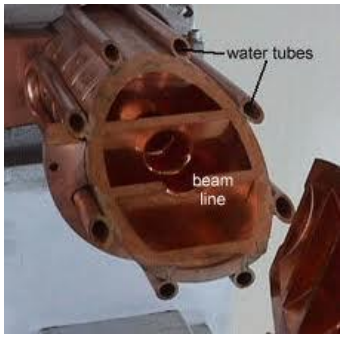
Energy gain

$$W = qV = q\int E_o e^{i(\omega t - ks)}\,ds$$

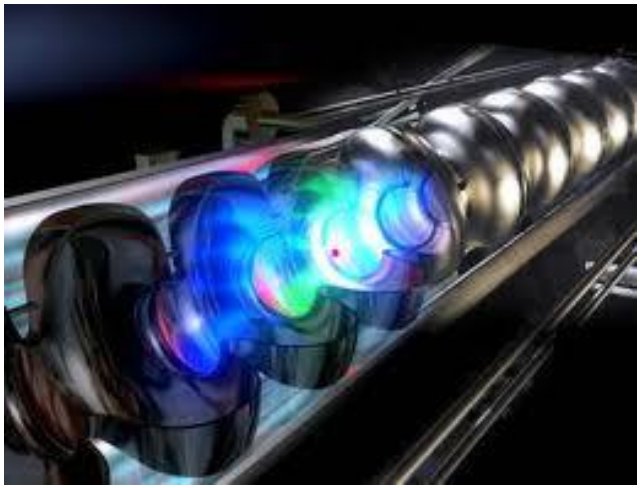
(G. Hoffstaetter, USPAS, June 2010)

Radio-frequency (RF) Linear Accelerators

Normal conducting linac



Superconducting linac



(G. Hoffstaetter, USPAS, June 2010)

Examples of Resonant Accelerators: RF Linacs

เครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นที่ Stanford Linear Accelerator Laboratory (SLAC) ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งมีความยาว 3 ไมล์และสามารถเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงขึ้นถึง ~10 GeV

European X-ray Free-Electron Laser (European XFEL) มีความยาว 3.4 km และเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงขึ้นถึง ~17 GeV

Examples of Resonant Accelerators: Cyclotron

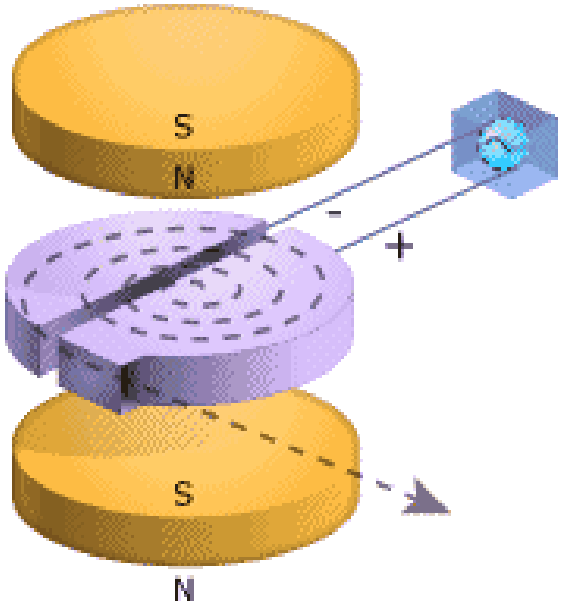
(G. Hoffstaetter, USPAS, June 2010)

E. O. Lawrence

&

M S. Livingston

First Medical Applications (1939)

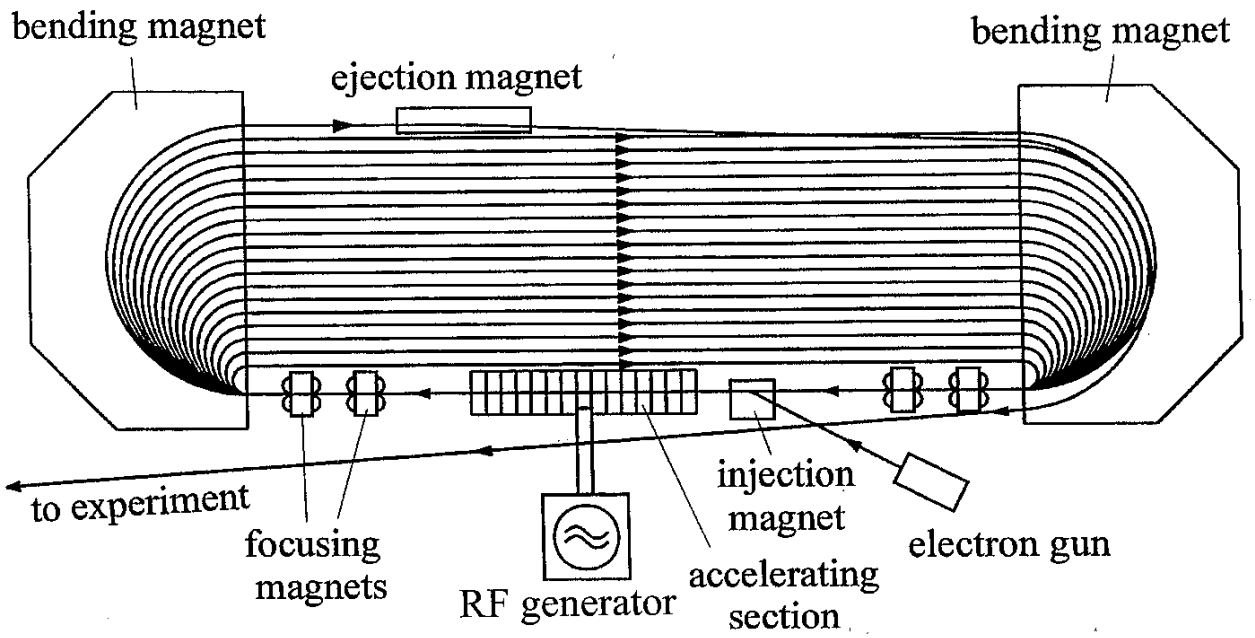


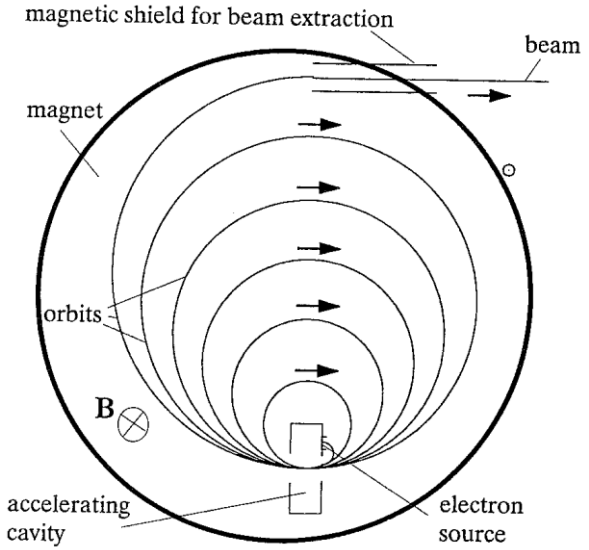
- 1930: Lawrence proposed the Cyclotron
- 1932: Lawrence and Livingston used a cyclotron for 1.25 MeV protons
- 1939: Lawrence used the cyclotron in the first tests of tumor therapy with neutrons via a process

$$ {}^{2}_{1}D + {}^{3}_{1}T \rightarrow {}^{4}_{2}He + n $$

Examples of Resonant Accelerators: Microtron

- Electrons are quickly relativistic and cannot be accelerated in a cyclotron.
- In a microtron, trajectory length increases to gain the extra time that each turn takes must be a multiple of the RF period
- Today: microtrons are used for medical applications with one magnet and 20 MeV



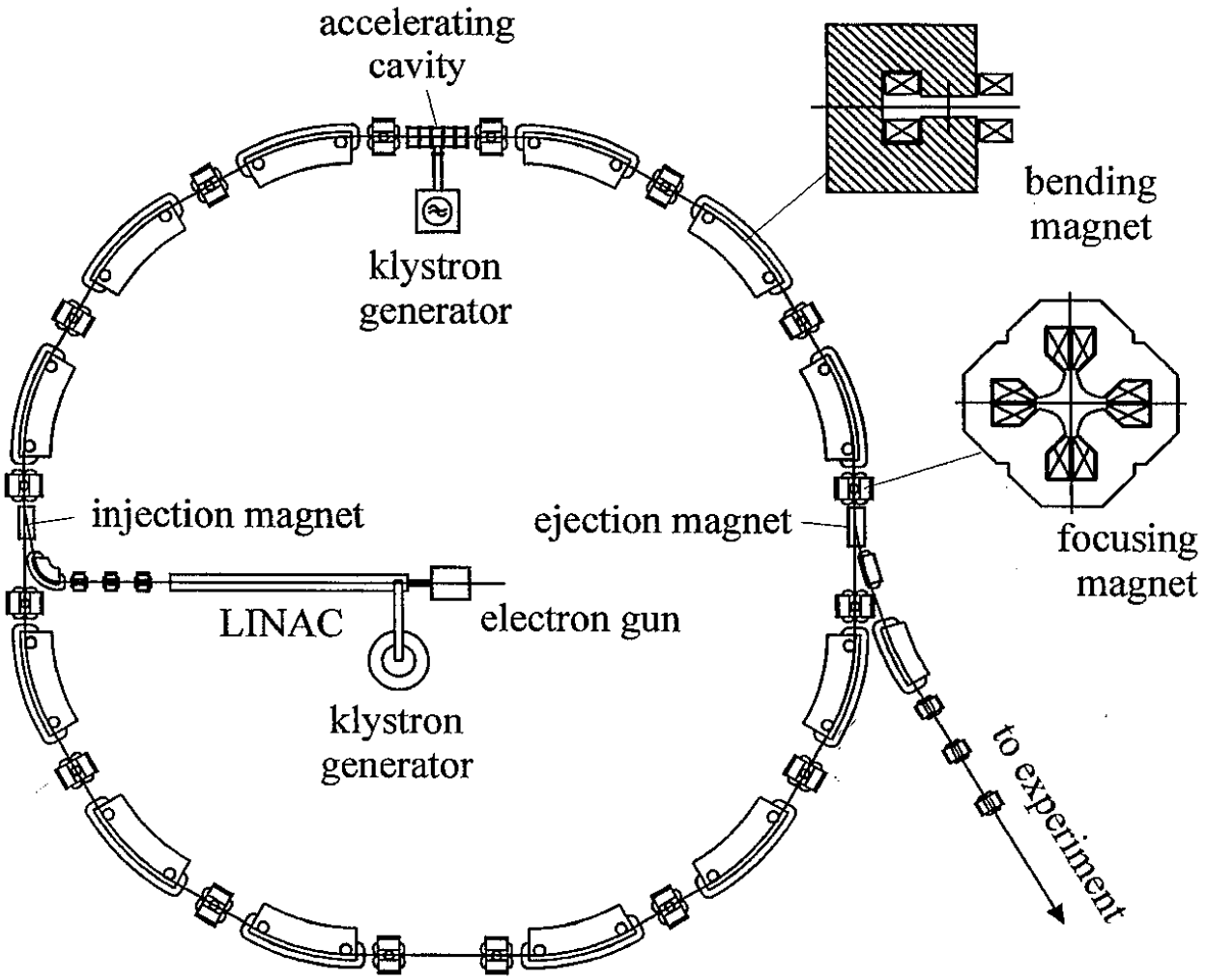


(G. Hoffstaetter, USPAS, June 2010)

Examples of Resonant Accelerators: Synchrotron

- 1945: Veksler (UDSSR) and McMillan (USA) invented the synchrotron
- 1946: Goward and Barnes built the first synchrotron (using a betatron magnet)
- 1949: Wilson et al. at Cornell were the first team to store beam in a synchrotron

1949: McMillan built a 320 MeV electron synchrotron



(G. Hoffstaetter, USPAS, June 2010)

Types of Particle Accelerator

1. Electrostatic field-based accelerators: direct voltage (DC), pulsed voltage

- Cathode ray tube (late 1800s)
- Van-de-Graff (~1929-1930)
- Cockcroft Walton (1932)

2. Resonant accelerators: time varying field-based accelerators)

- Linear accelerator (linac) - Ising (1924) & Wideroe (1928)
- Cyclotron – Lowrence (1930)
- Synchrotron - Oliphant (1943)
- Synchrotron & Betatron – McMillan (1943)
- Alvarez linac – McMillan (1946)
- Strong focusing – Courant & Snyder (1952)

3. Other types of accelerator:

e.g. linear induction accelerator, transformer accelerator, plasma-laser acceleration

Examples: Betatron

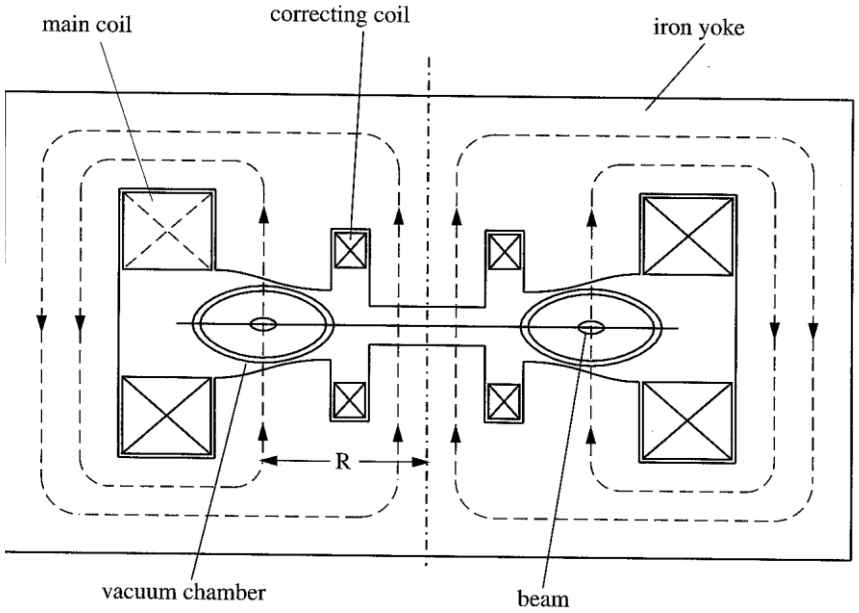
Transformer accelerator e.g. betatron

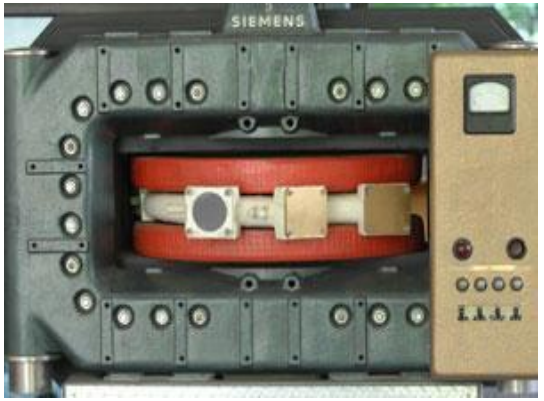
- 1924: Wideroe invented the betatron
- 1940: Kerst and Serber built a betatron for 2.3 MeV electrons

Betatron:
R=const, B=B(t)
Whereas for a cyclotron:
R(t), B=const

No acceleration section is needed since

$$\oint_{\partial A} \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\int_{A} \int \frac{d}{dt} \vec{B} \cdot d\vec{a}$$





(G. Hoffstaetter, USPAS, June 2010)

Examples: Spallation Neutron Sources (SNS)

- Today: 1 GeV proton accelerator with an average current of 1 mA giving the power of 1.4 MW in 0.7 microsecond burst

Spallation Neutron Source (SNS) site at Oak Ridge National Laboratory

(A. Sessler and E. Wilson, Engines of Discovery: A Century of Particle Accelerators)

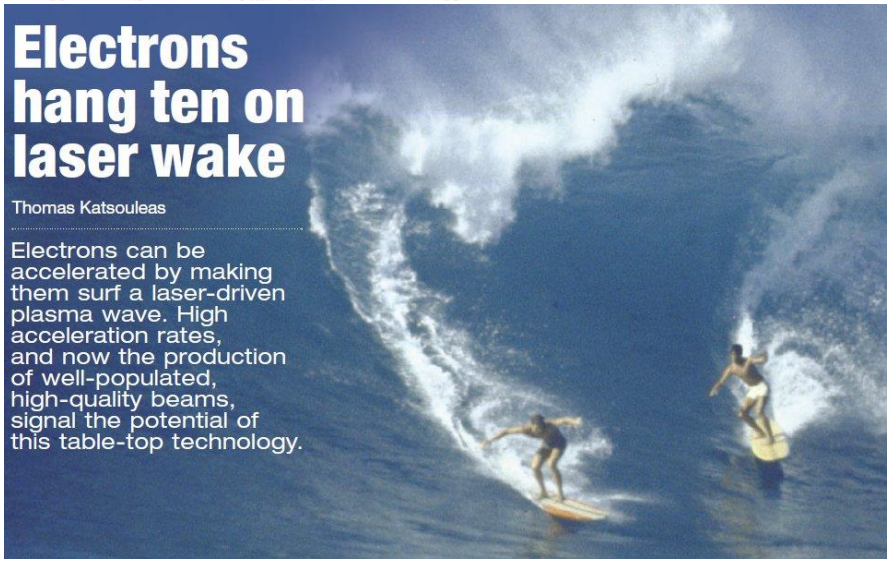
Examples: Laser-plasma acceleration (LWA)

(Credit: J. Benlliure)

highlights

Dream beam

Good news for physicists — particle accelerators are set to become much cheaper and smaller. Using ultrashort and ultra-intense lasers to generate extreme electric fields in plasmas, three groups have been able to produce high quality electron beams. These relativistic beams will have many applications, compact table-top particle accelerators included. The cover simulation (from Geddes *et al.*, p. 538) shows a plasma density variation driven by the radiation pressure of a laser pulse guided by a preformed plasma



Motivation for Developing Plasma Acceleration

- Why novel accelerators? – we are already very good in accelerator technology!

- Conventional accelerators work well but they are very large

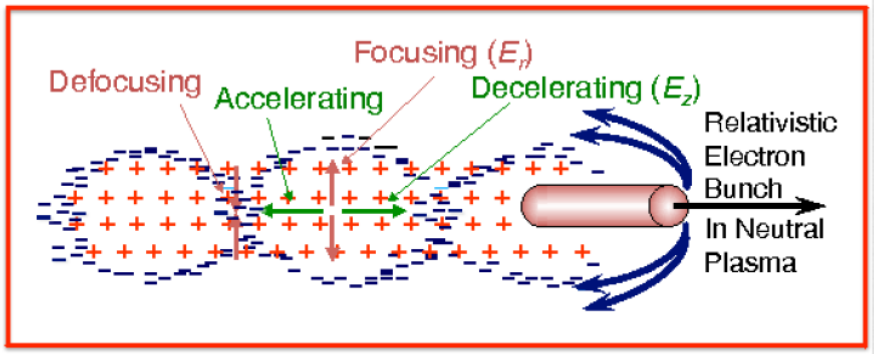
Name	Final energy	Size
HERA	27.5 GeV	6 km length
SLAC (SLC linac)	50 GeV	3.2 km length
European XFEL (linac)	17.5 GeV	2.1 km length

- Conventional accelerator cavities: about 100 MV/m
- Possible with plasma acceleration: larger than 100 GV/m !!!

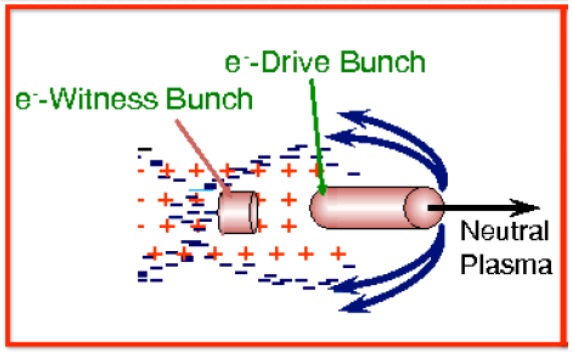
} **1000x**

Plasma Acceleration: Basic Principle

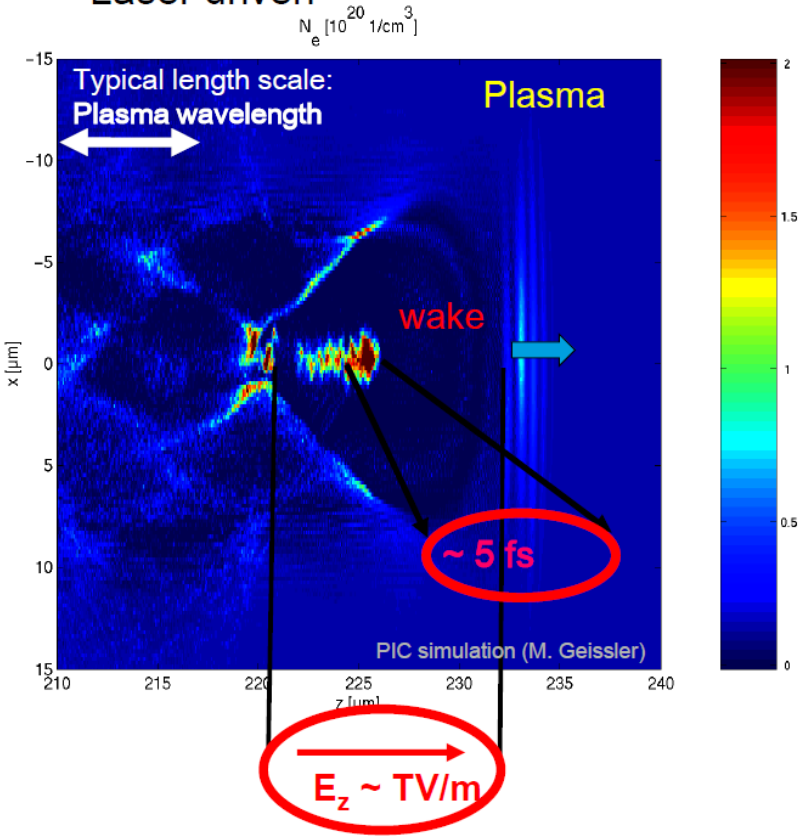
- Beam driven



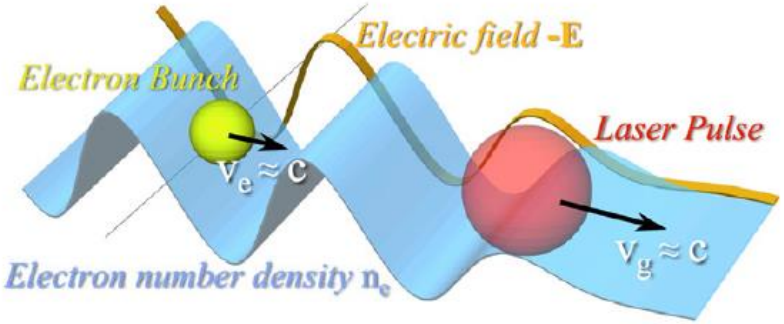
Courtesy:
Patric Muggli

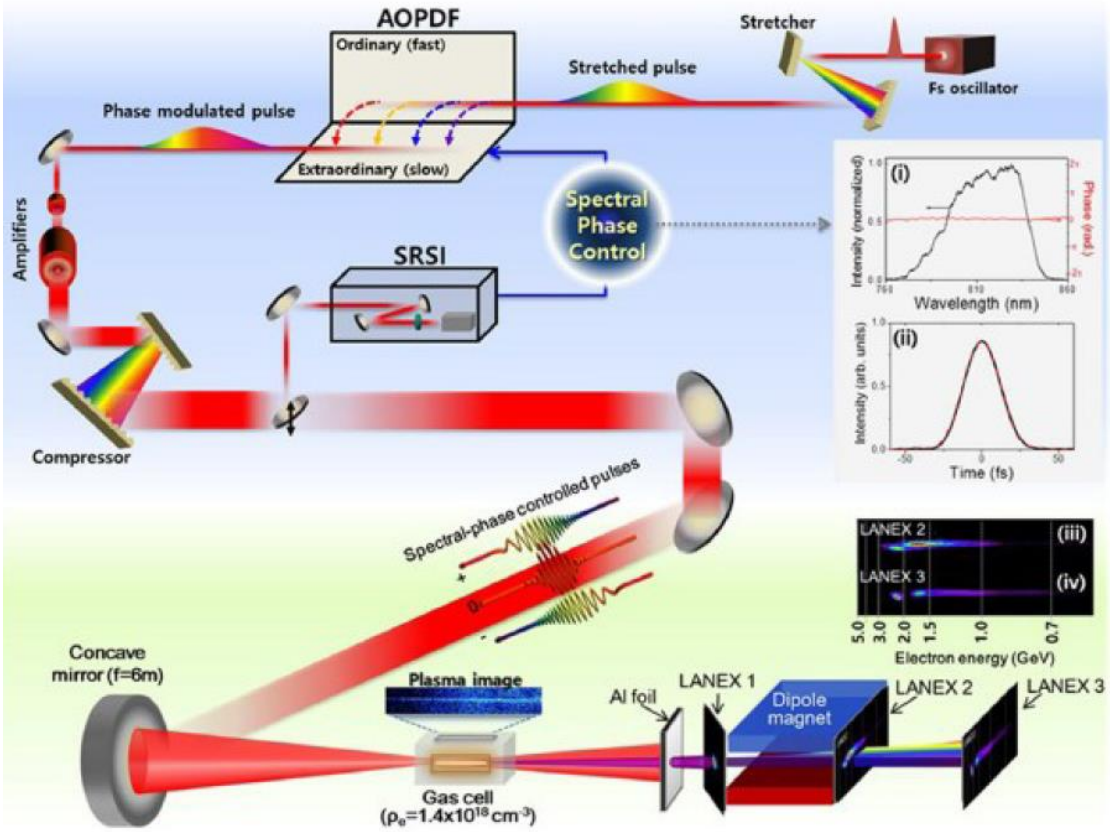


- Laser driven



- LWA Requires laser peak power on the order of $P_{\text{peak}} \sim 10^{12}$ W





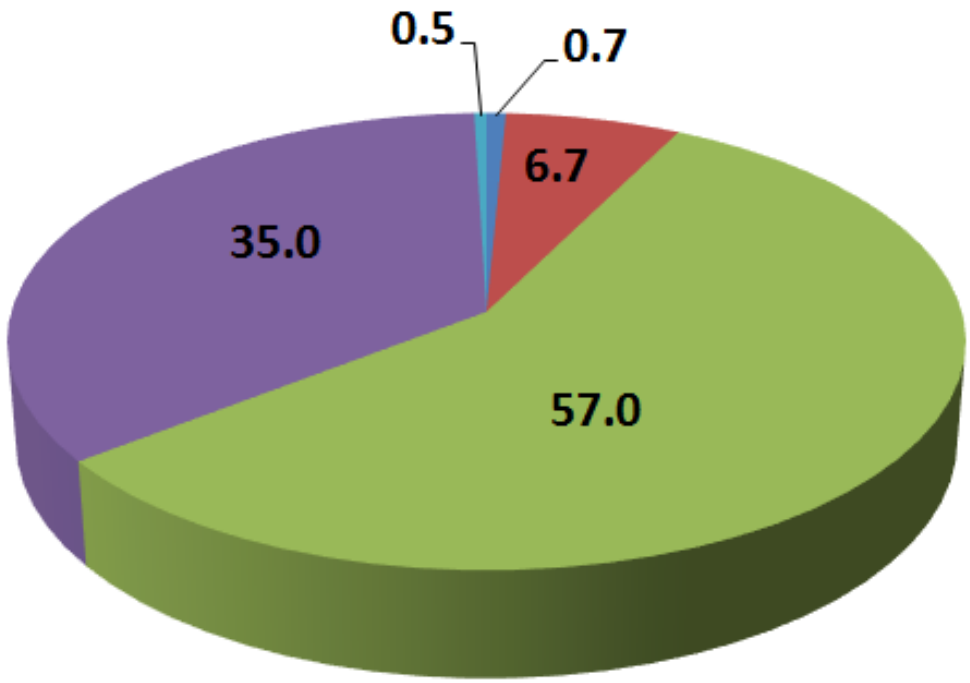
From: Kim et al., DOI:10.1038/s41598-017-09267-1

F Albert *et al* (2014), Plasma Phys. Control. Fusion **56,** 084015

การประยุกต์ใช้เครื่องเร่งอนุภาค

- เครื่องเร่งอนุภาคเพื่อการศึกษาฟิสิกส์พลังงานสูงและฟิสิกส์อนุภาค
- เครื่องเร่งอนุภาคเพื่อการผลิตรังสี
- การประยุกต์ใช้เครื่องเร่งอนุภาคทางด้านการแพทย์
- การประยุกต์ใช้เครื่องเร่งอนุภาคทางด้านวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม

Particle Accelerators Worldwide

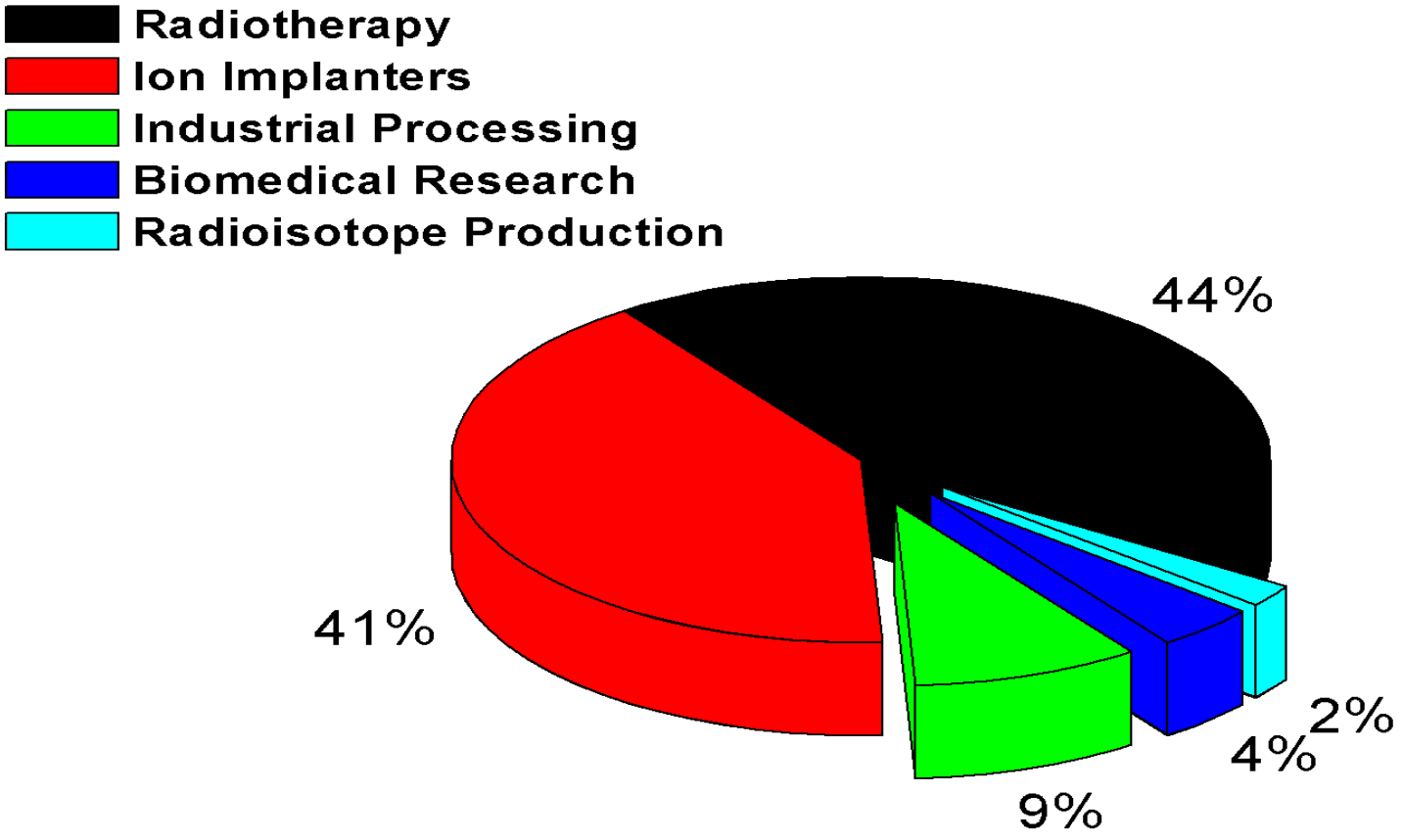


(total 100%)

- Nuclear and particle physics researches
- Non-nuclear researches
- Industrial applications
- Medical and biomedical applications
- Synchrotron light sources

Accelerators in Medical and Industrial Applications

Total ~26,000 units

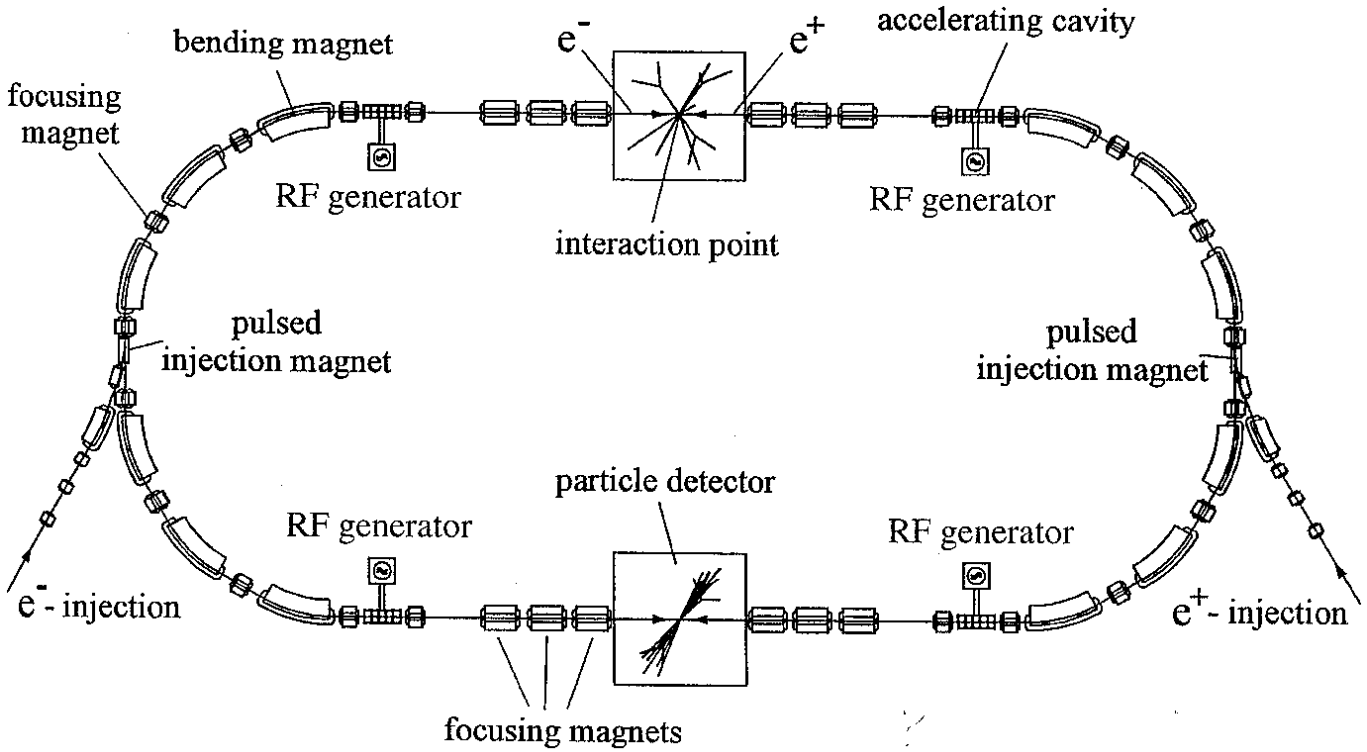


เครื่องเร่งอนุภาคเพื่อการศึกษาฟิสิกส์พลังงานสูงและฟิสิกส์อนุภาค

Large Linear Accelerators (Linacs) for High Energy Physics

เครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นที่ Stanford Linear Accelerator Laboratory (SLAC) ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งมีความยาว 3 ไมล์ และสามารถเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงขึ้นถึง 10 GeV

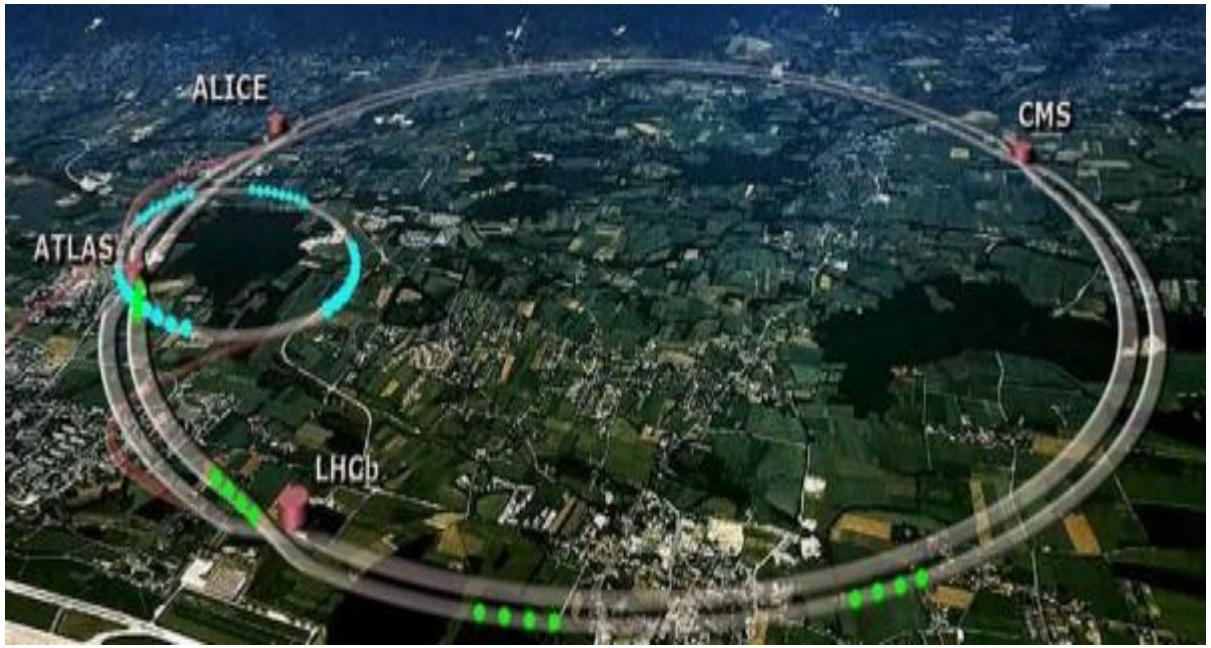
Synchrotron Accelerators for High Energy Physics: Colliders

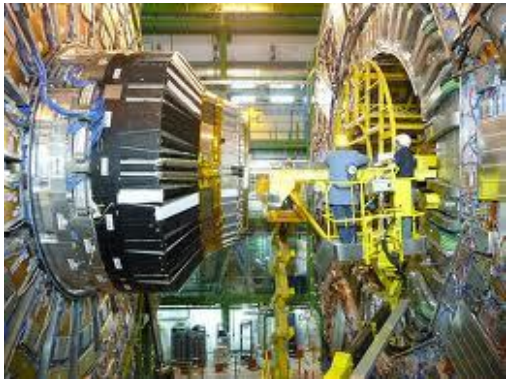


- 1961: First storage ring for electrons and positrons (AdA) in Frascati for 250 MeV
- 1972: SPEAR electron positron collider at 4GeV for study of quark model and quantum chromodynamics
- 1979: 5GeV electron positron collider (CESR)
- Today: 14 TeV Large Hadron Collider (LHC) at CERN

(G. Hoffstaetter, USPAS, June 2010)

LHC @ CERN

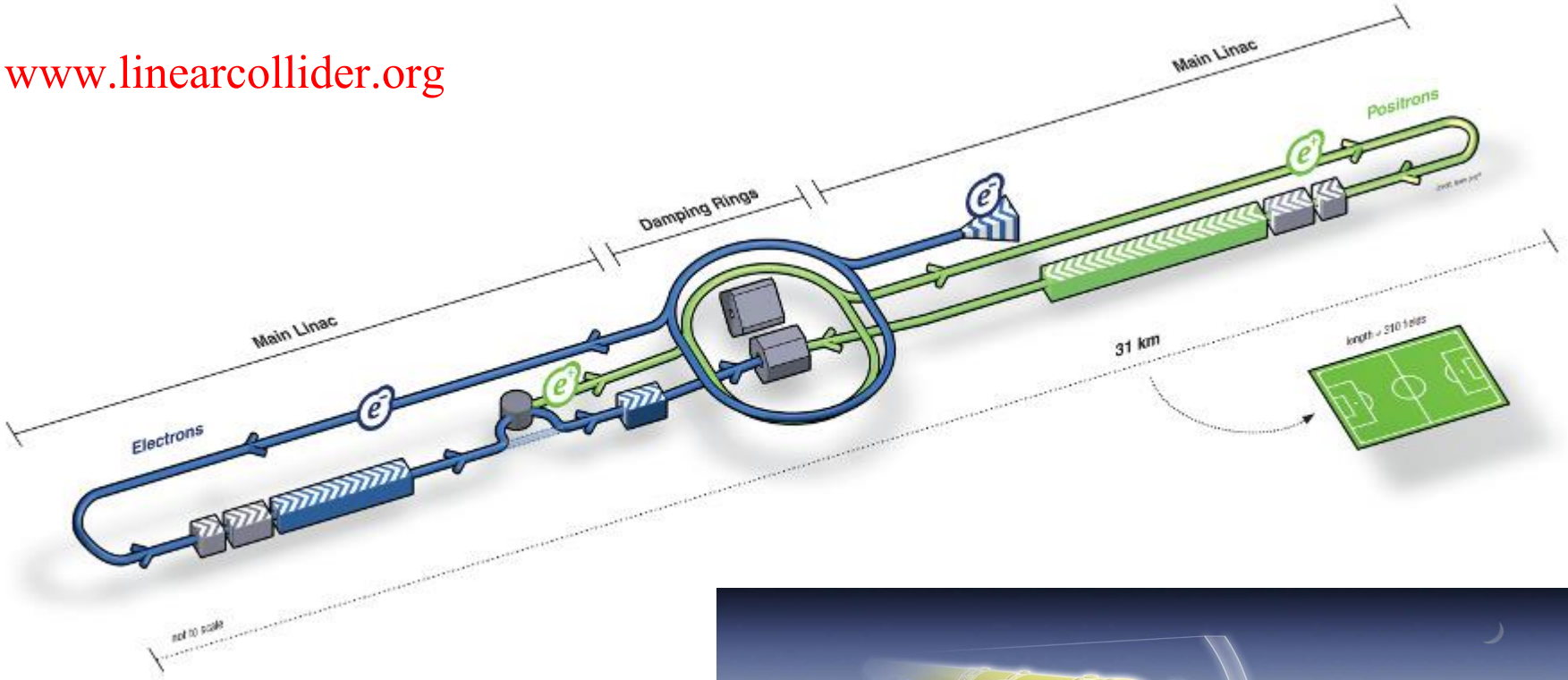




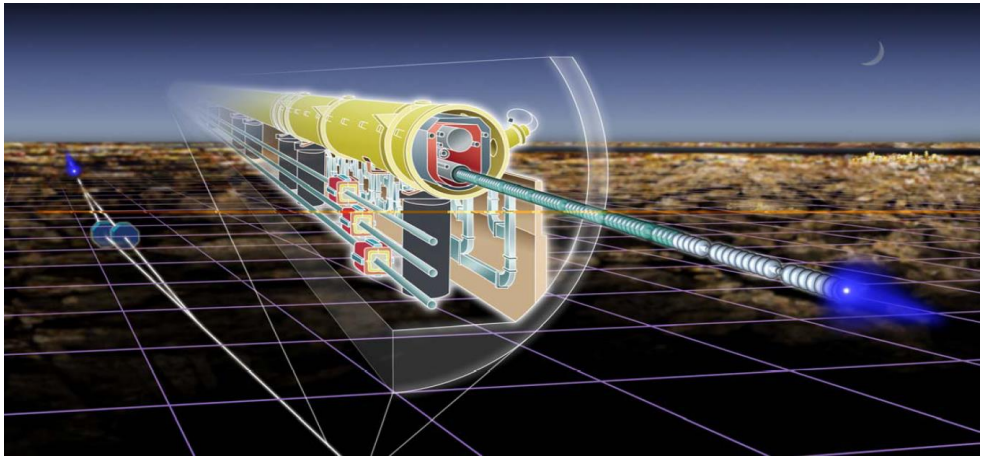
European & International collaborations

International Linear Collider (ILC)

www.linearcollider.org



It is initially planned to have a collision Energy of 500 GeV, with the possibility for a later upgrade to 1000 GeV (1 TeV).



(A. Sessler and E. Wilson, Engines of Discovery: A Century of Particle Accelerators)

เครื่องเร่งอนุภาคเพื่อการผลิตรังสี

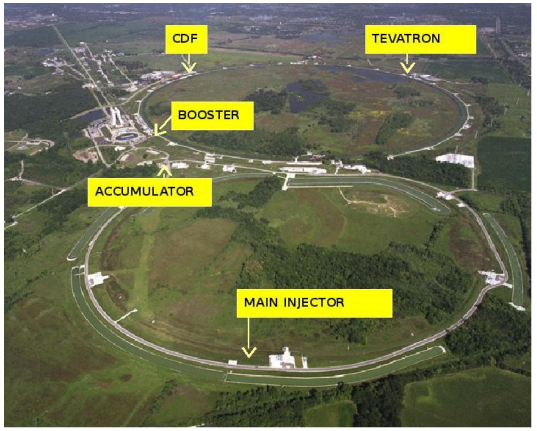
Accelerators for High Energy Physics → Accelerator-based Light Sources

HERA @ DESY, Germany

End: June 30, 2007 after 15 years of operation

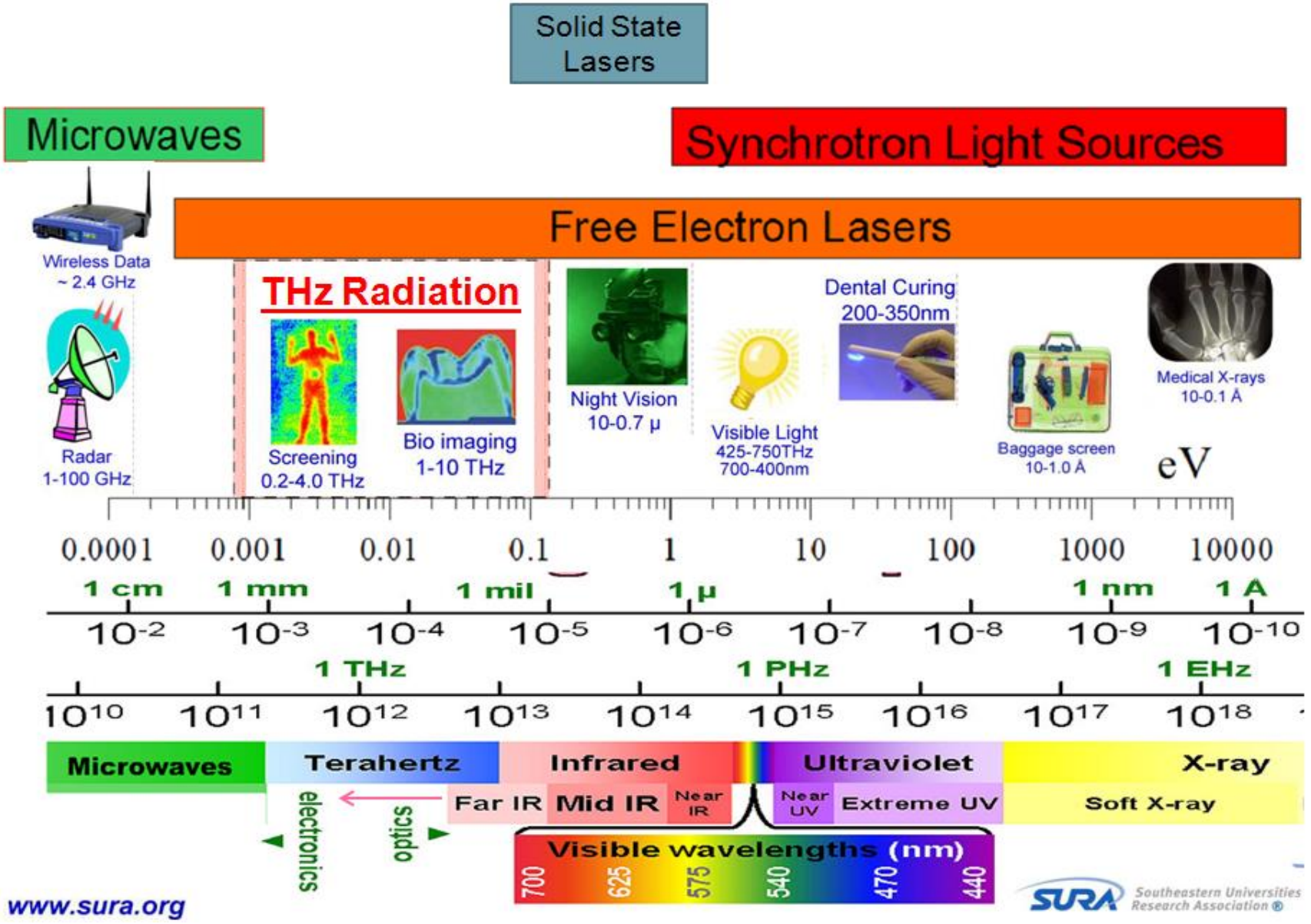
Tevatron accelerator @ Fermilab, USA

End: September 30, 2011 after 20 years of operation



Several accelerators for high energy physics have been stopped or conversed to be the accelerator-based light sources

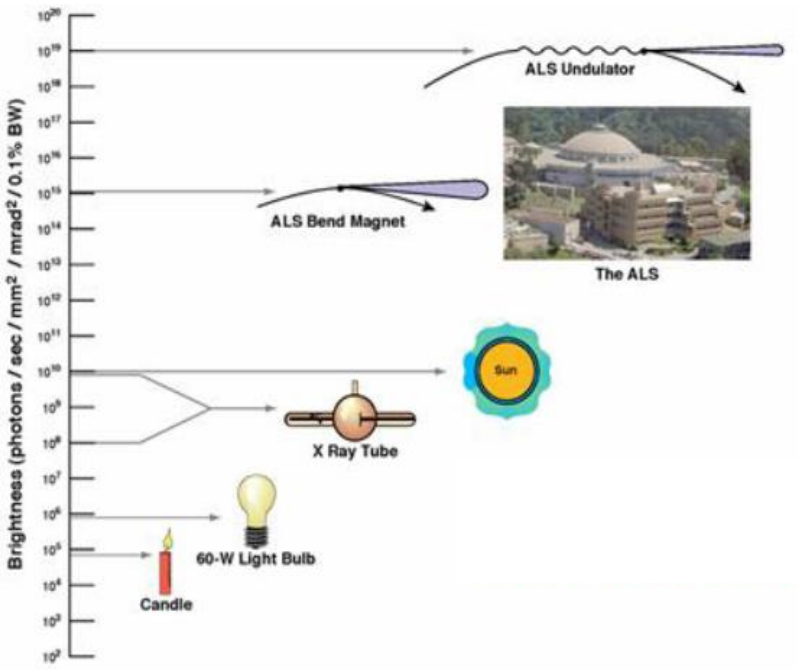
Electromagnetic Waves and Applications

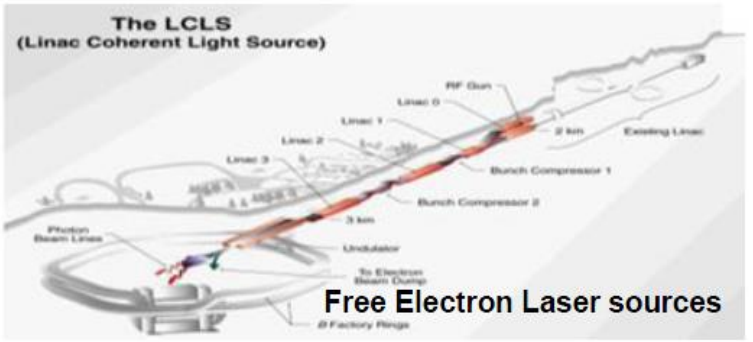


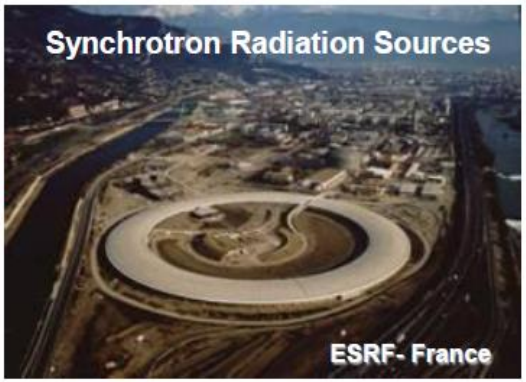
Accelerator-based Light Sources

A charged particle when accelerated radiates energy in the shape of electromagnetic waves. (synchrotron radiation)

$$P_{\perp} = \frac{q^2}{6\pi\varepsilon_0 m_0^2 c^3}\gamma^2\left(\frac{d\mathbf{p}_{\perp}}{dt}\right)^2$$

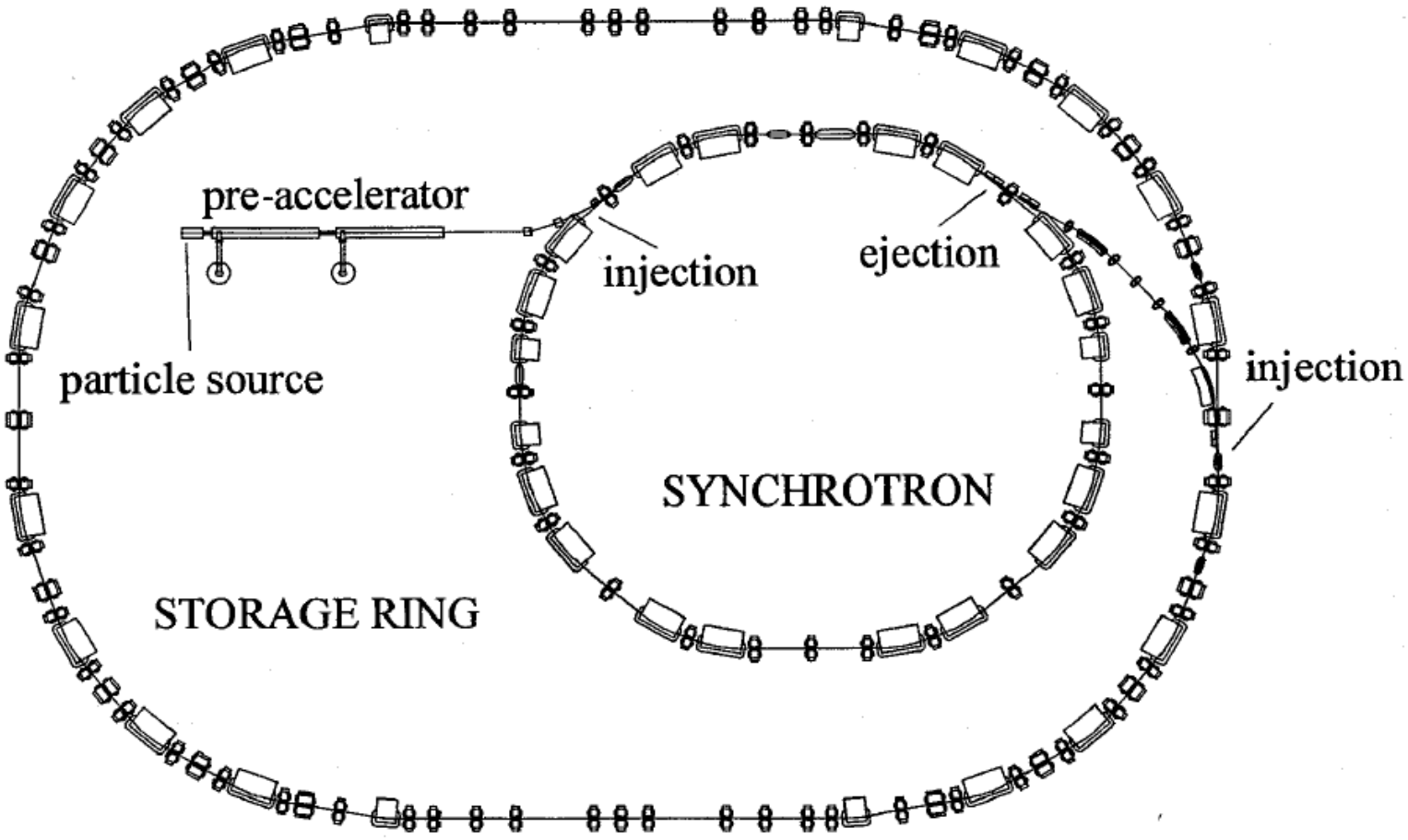




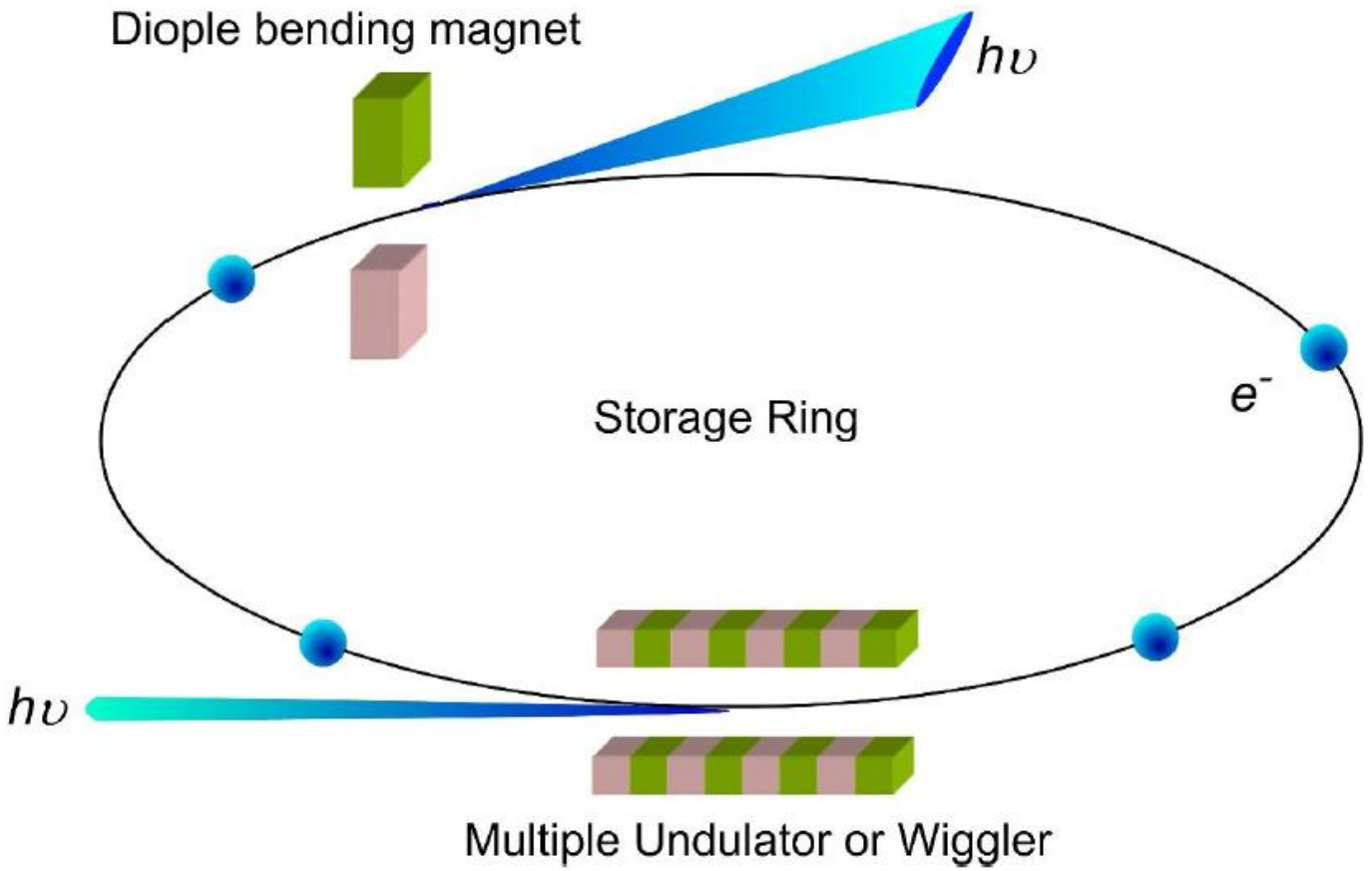


Modern light sources are accelerators optimized for the production of electromagnetic waves from the far-IR to the hard x-rays.

Main Components of Synchrotron Light Source

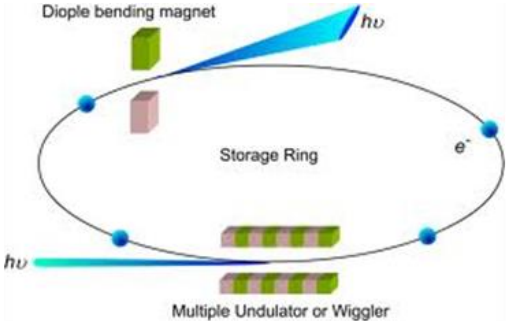


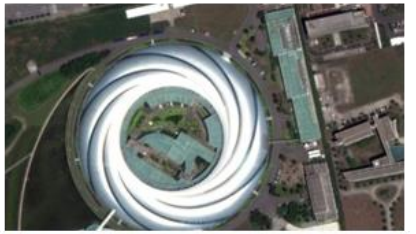
Generation of Synchrotron Radiation



- 1st Generation (1970s): HEP rings are used for x-ray production
- 2nd Generation (1980s): Radiation from dipole bending magnet
- 3rd Generation (1990s): Radiation from wigglers and undulator magnets
- 4th Generation (today): Free Electron Lasers (FELs)

Synchrotron Light Source Worldwide





Shanghai light source (China)

Spring 8 (Japan)

Siam Photon (Thailand)

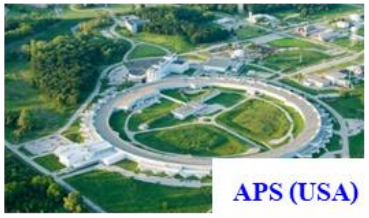
PETRAIII @ DESY (Germany)

Diamond (UK)

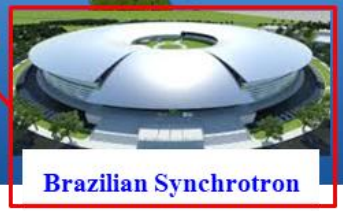
ALBA, Spain

ESRF, France

NSLS (USA)



APS (USA)



Brazilian Synchrotron

Australia light source (Australia)

Siam Photon Source (SPS) @ SLRI

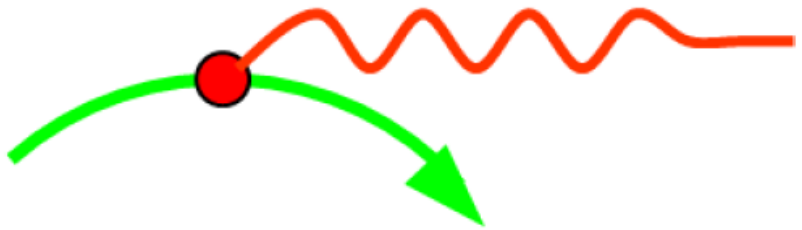
SPS storage ring specifications

Parameter	Value
Energy	1.2 GeV
Stored current	150 mA
Emittance	41 nm-rad
Lifetime @ 100 mA	12 hours
Circumference	81.3 m
Injection energy	1.0 GeV

http://www.slri.or.th

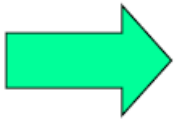
What is Synchrotron Radiation?

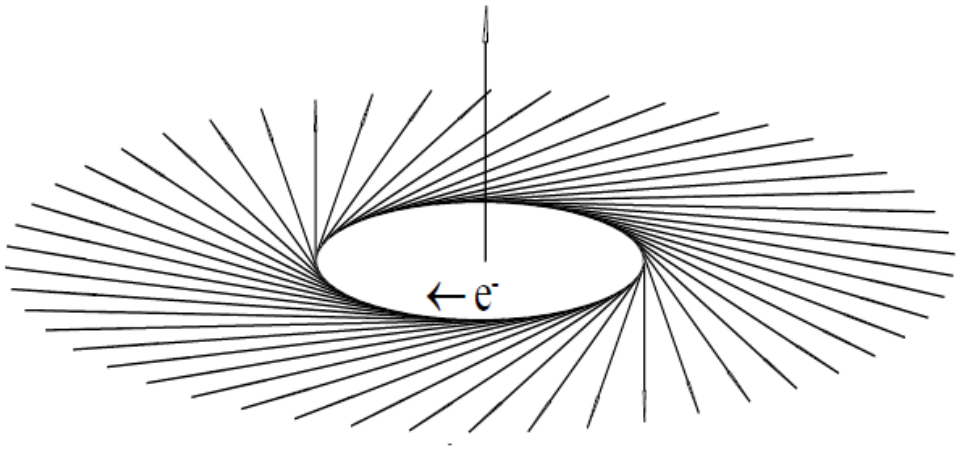
Synchrotron Radiation is an electromagnetic radiation, which is emitted when charged particles travel in curved path.



broadband, intense, collimated

Circulating beam

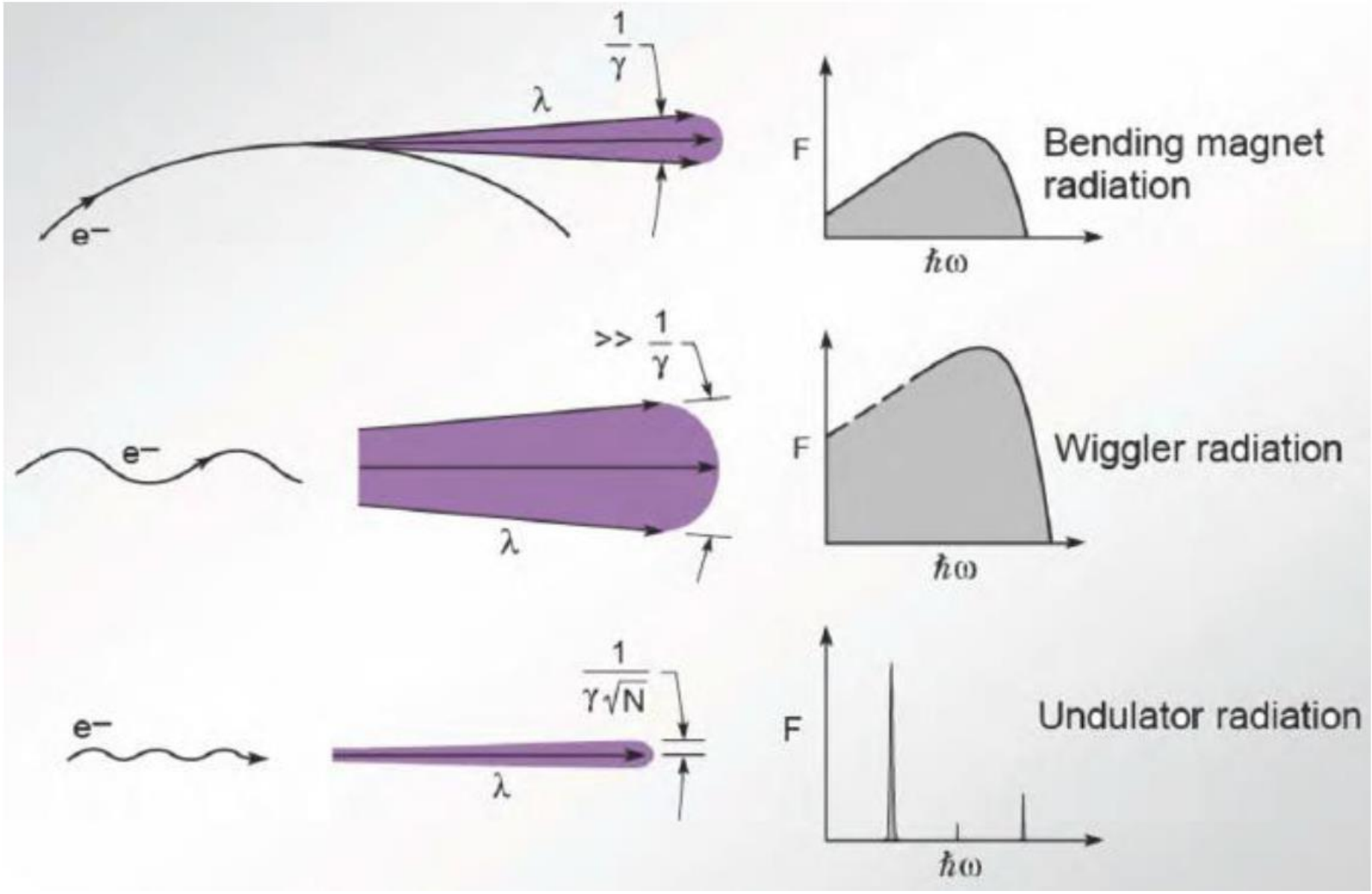




Characteristics of Synchrotron Radiation

1. **Broad spectrum**
   - SR has a broad continuous spectrum, covering from IR to x-ray regimes.
   - Flexibility in choosing suitable photon energy for particular experiments.
2. **High brightness**
   - SR is extremely bright, which can be used to study extremely diluted samples with low concentration of atoms, or weakly scattering crystals, with sufficient signal-to-noise ratio.
3. **High degree of collimation**
   - SR has a very narrow cone, enabling full use of the available photon flux.
4. **Well-defined polarization**
   - SR from bending magnets and planar insertion devices is linearly polarized.
   - Circularly or elliptically polarized SR can be generated from specially designed insertion devices e.g. helical undulator.
5. **Pulsed time structure**
   - SR is emitted from electron bunches of sub-nanosecond time scale, thus it has similar pulsed time structure. It can be used to study the mechanism of a process with a sub-nanosecond time scale resolution.

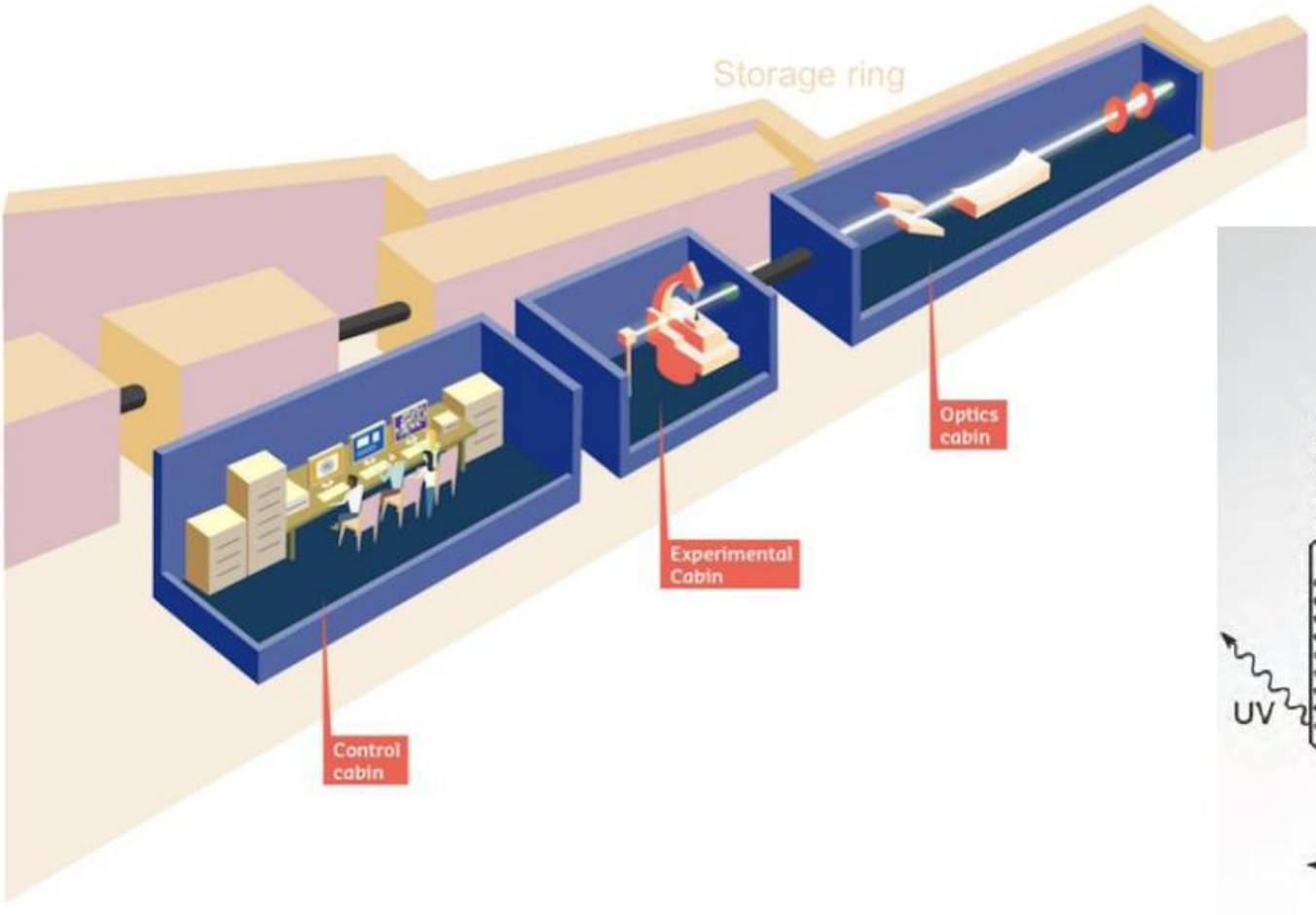
Light Sources Provide 3 Types of Synchrotron Radiation

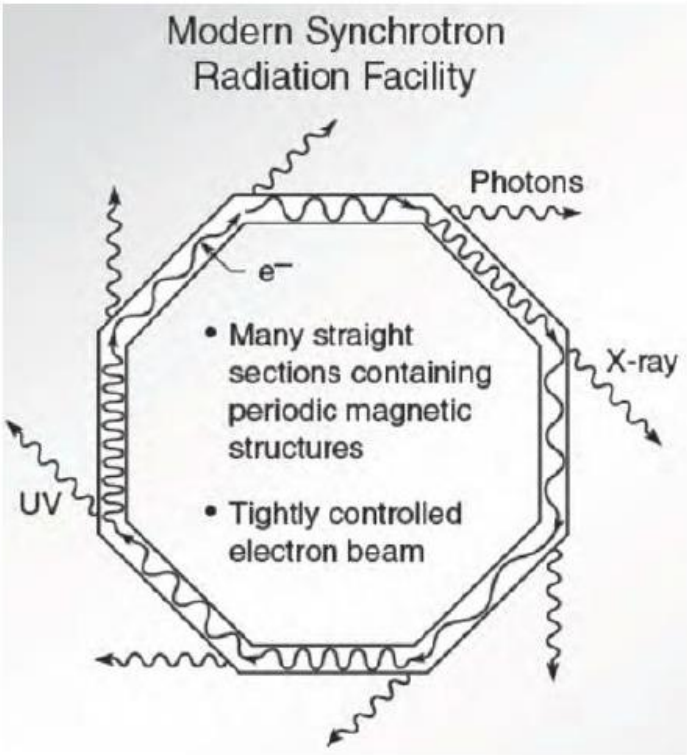


Courtesy: W. A. Barletta, Fundamentals of Accelerators, US Particle Accelerator School 2012

Synchrotron Beamline

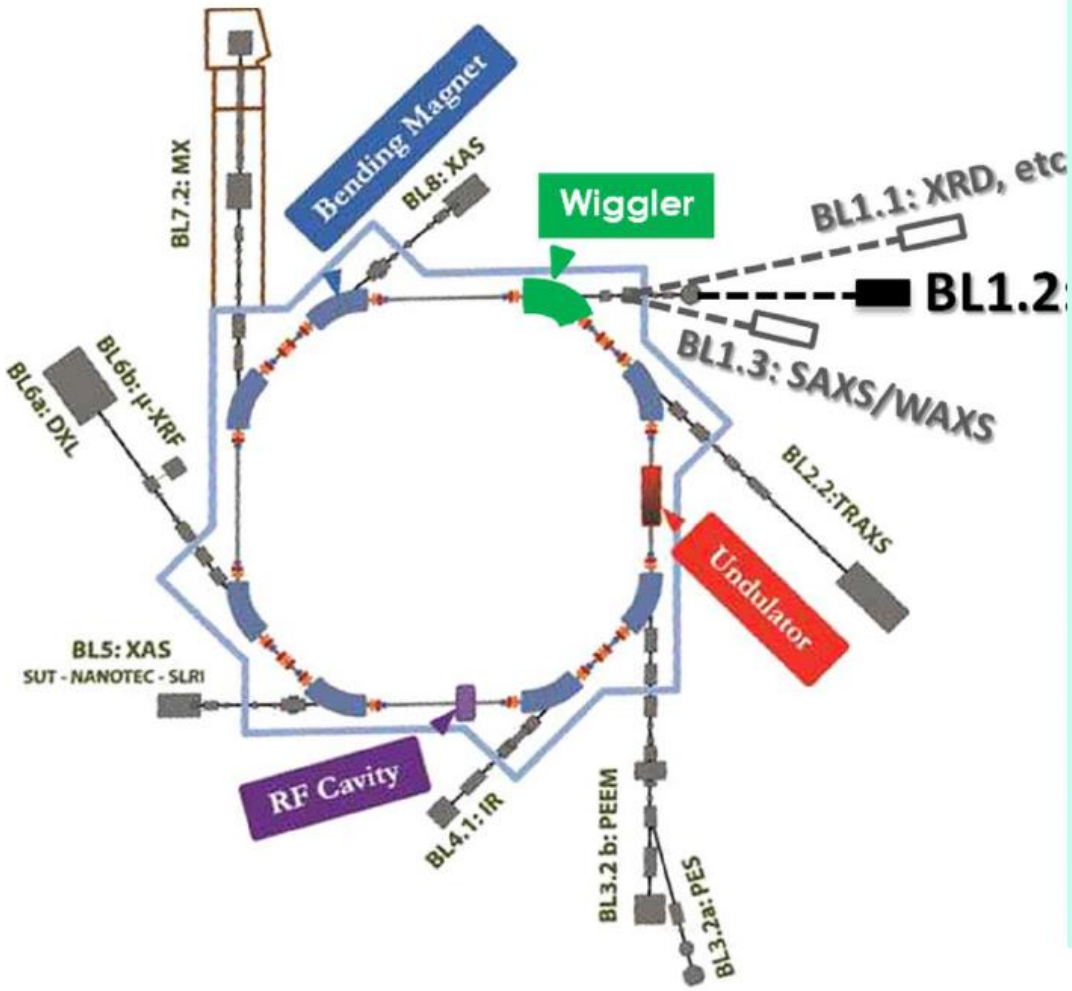
Within the experimental hall, a beamline consists of an optics cabin, a experimental cabin, and a control cabin.





http://www.esrf.eu/about/synchrotron-science/beamline

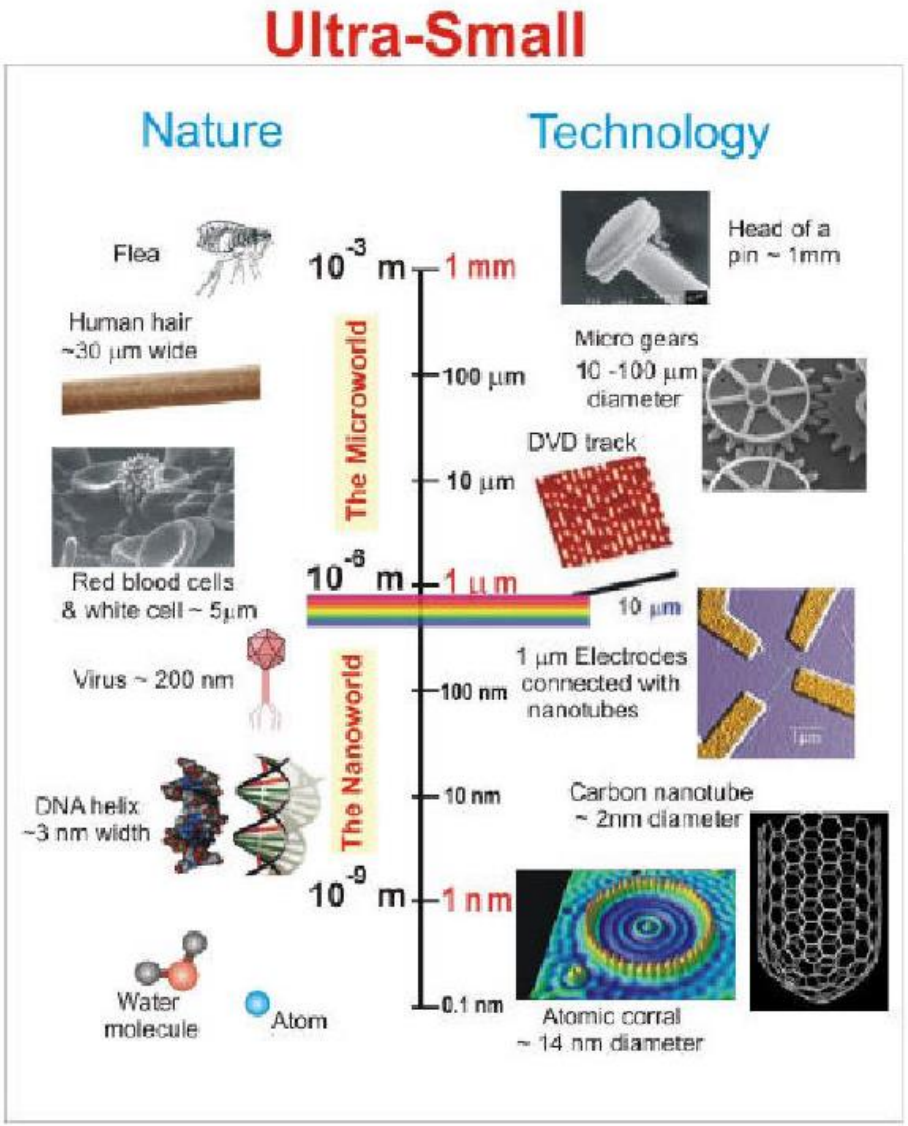
How to Choose Beamline Locations?

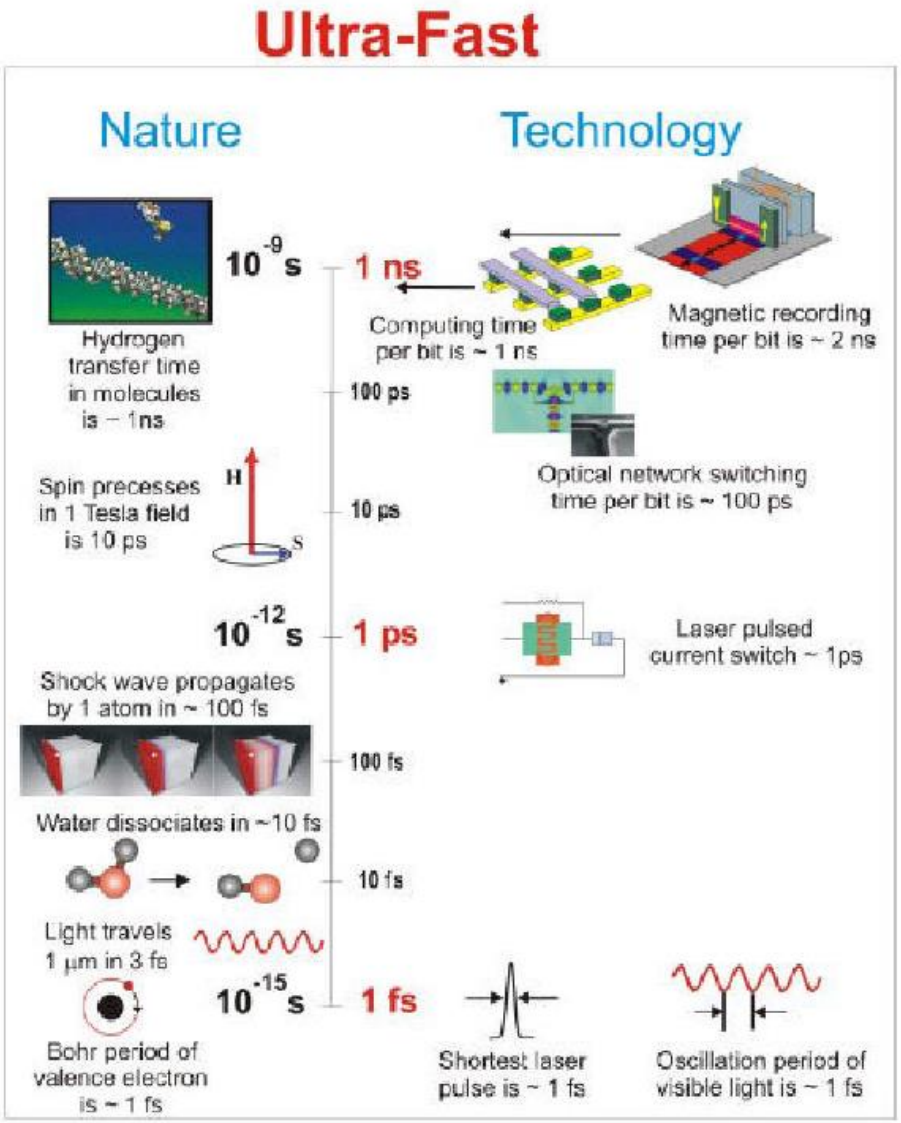


Example: SLRI beamlines

- BL1.1W: Multiple X-ray Techniques
- BL1.2W: X-ray Imaging & X-ray Tomographic Microscopy (XTM)
- BL1.3W : SAXS (Small Angle X-ray Scattering)
- BL2.2: Time-resolved X-ray Absorption Spectroscopy (TRXAS)
- BL3.2Ua: PES (Photoelectron Emission Spectroscopy)
- BL3.2Ub: PEEM (Photoelectron Emission Microscopy)
- BL4.1: Infrared Spectroscopy and Imaging (ISI)
- BL5.2: X-ray Absorption Spectroscopy (XAS), SUT-NANOTEC-SLRI
- BL6a: DXL (Deep X-ray Lithography)
- BL6b: Micro-XRF (Micro-X-ray Fluorescence)
- BL7.2W: Macromolecular Crystallography (MX)
- BL8: X-ray Absorption Spectroscopy (XAS)

Applications of Synchrotron Radiation

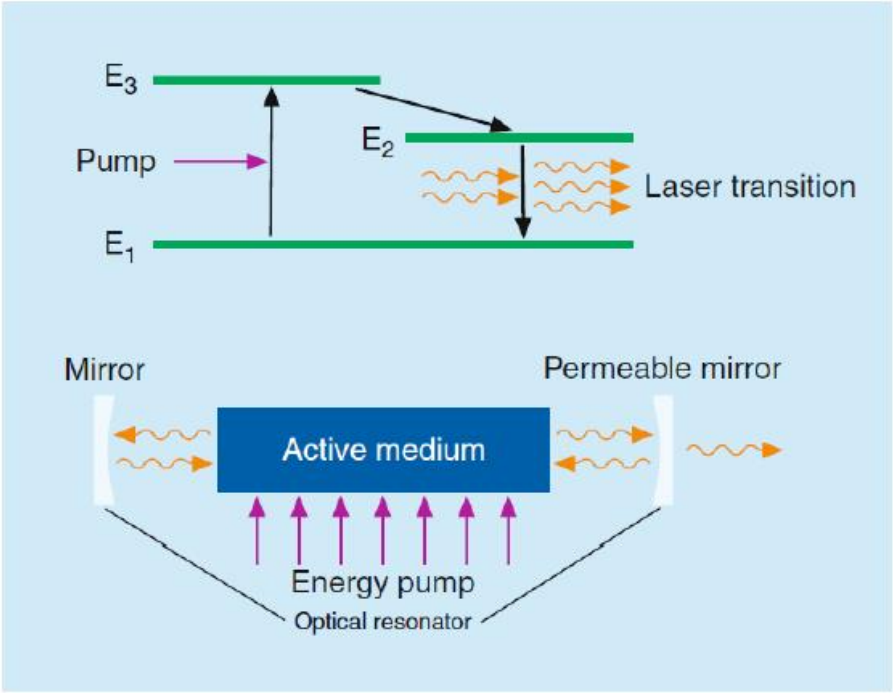




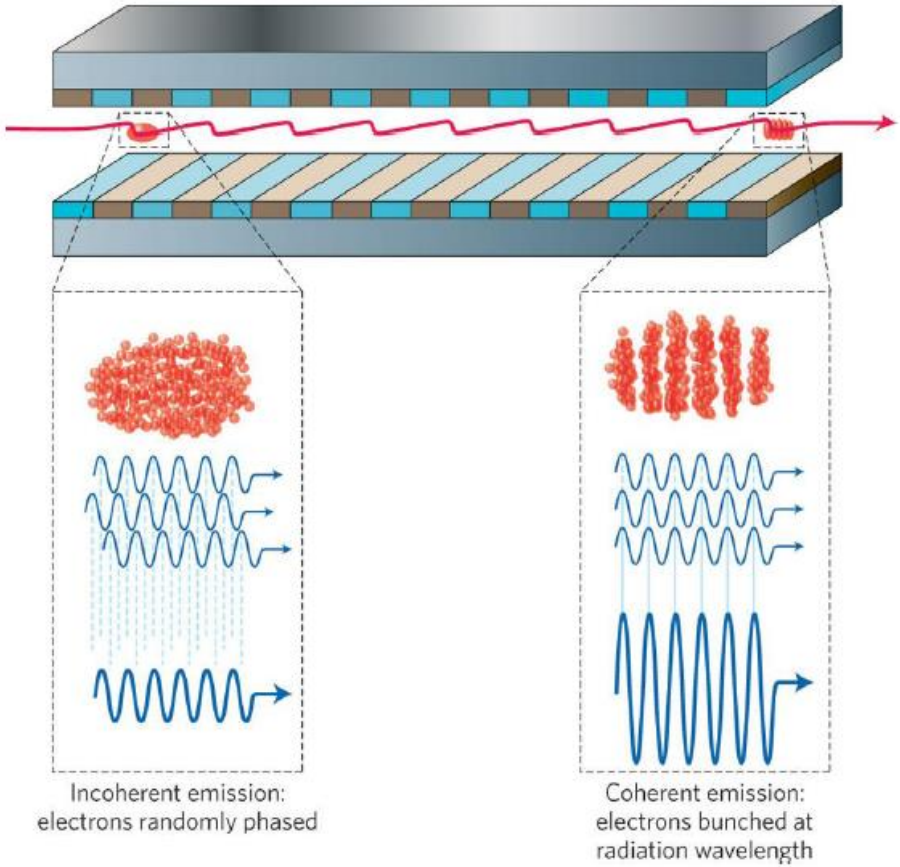
Courtesy: J. Stöhr, Stanford Synchrotron Radiation Laboratory

Coherent Emission → Free Electron Lasers (FEL)

Bound-electron laser e.g solid state lasers



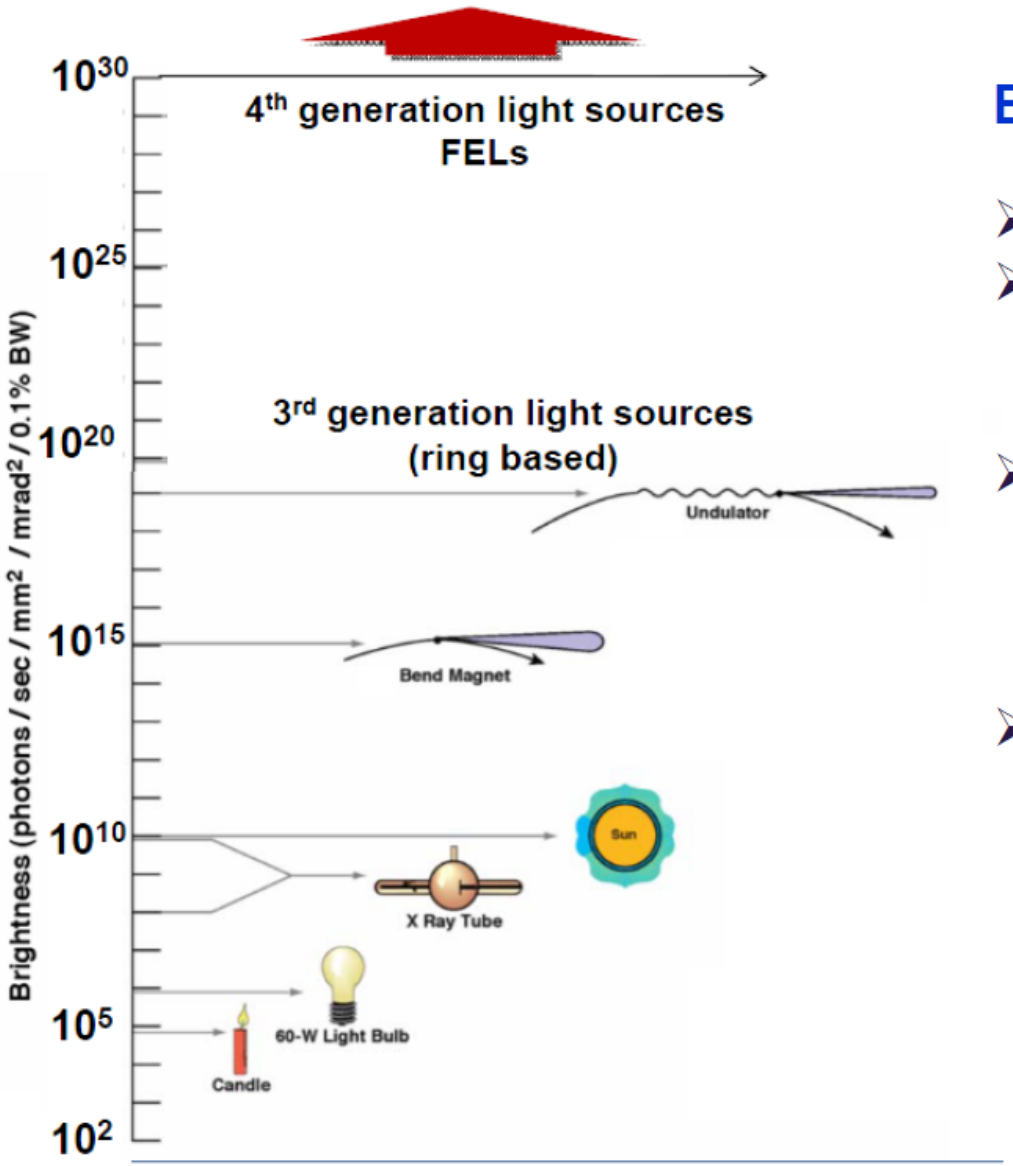
Free-electron laser: single pass, oscillator



$$\lambda = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2}\left(1 + \frac{K^2}{2} + \gamma^2\theta^2\right)$$

$$K = \frac{eB_0\lambda_u}{2\pi m_0 c}$$

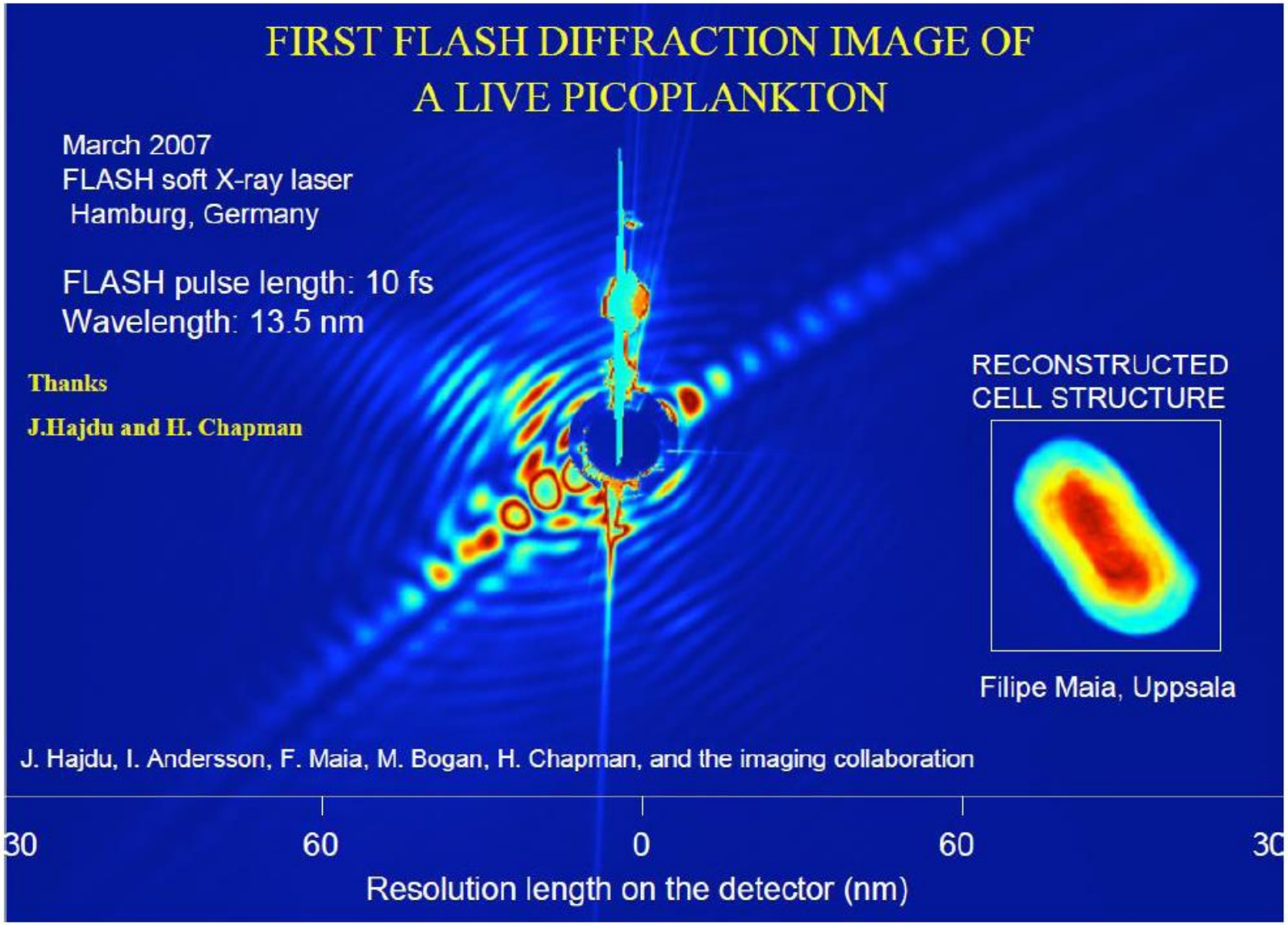
How bright is a synchrotron light source and FELs?



Essential features of X-ray FELs

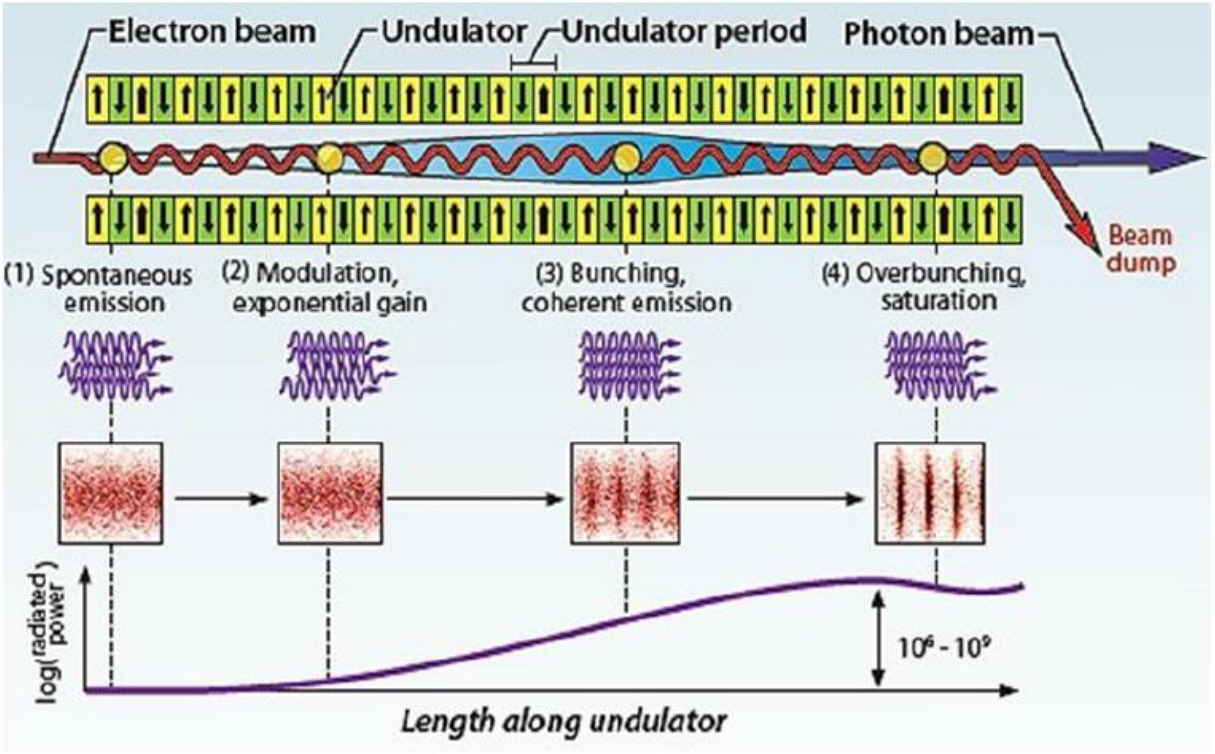
- Short wavelength (down to 0.1 nm)
- High peak and average brilliance
  Investigations of matter under extreme conditions.
- Ultra-short pulses (≤ 100 fs)
  High temporal resolution to study ultra-fast dynamics e.g. molecular movies.
- Transverse spatial coherence
  Imaging study of single nano-scale objects (no crystallization needed).

Incoherent X-ray from SR → Coherent X-ray FELs

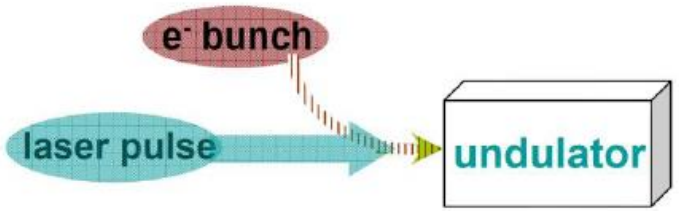


Generation of Accelerator-Based FELs: Single Pass FELs

SASE FELs (Self-Amplified Spontaneous Emission)



Seeded FELs



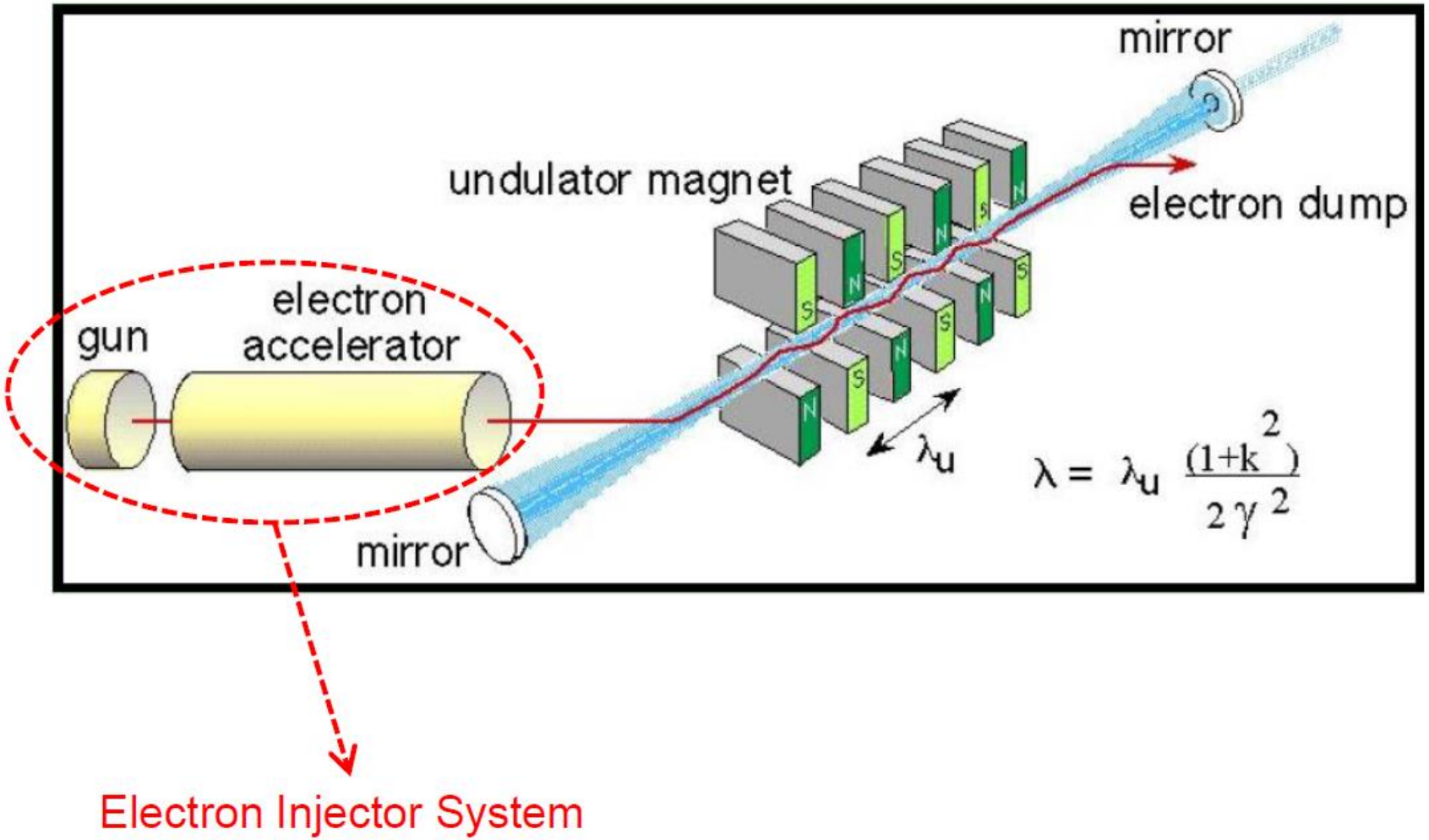
XFELs Around the World

- European XFEL. Germany (λ ~ 0.1-1.6 nm)
- FLASH @ DESY, Germany (λ ~ 0.1-7 nm)
- SPARC, Italy (λ ~ 0.6-40 nm)
- FERMI @ Elettra, Italy (λ ~ 1 0-100 nm)
- SwissFEL, Switzerland (λ ~ 0.1-7 nm)

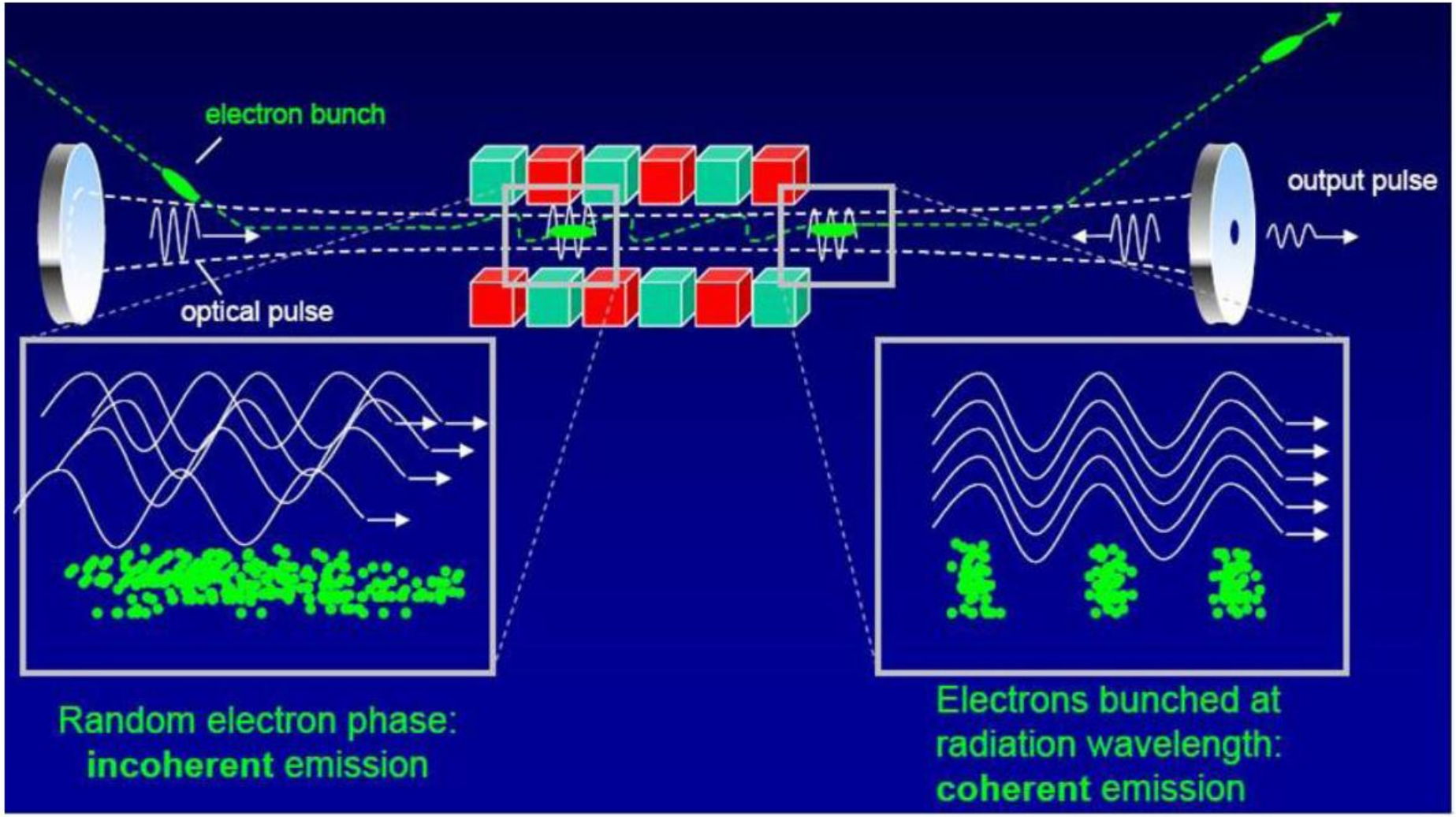
- LCLS FEL @ SLAC, USA
  (λ ~ 0.15-1.5 nm)
- HGHG FEL @ NSLS, BNL, USA
  (λ ~ 193 nm)

- SACLA XFEL @ Spring-8, Japan
  (λ > 0.1 nm)
- Shanghai FEL
- Pohang XFEL

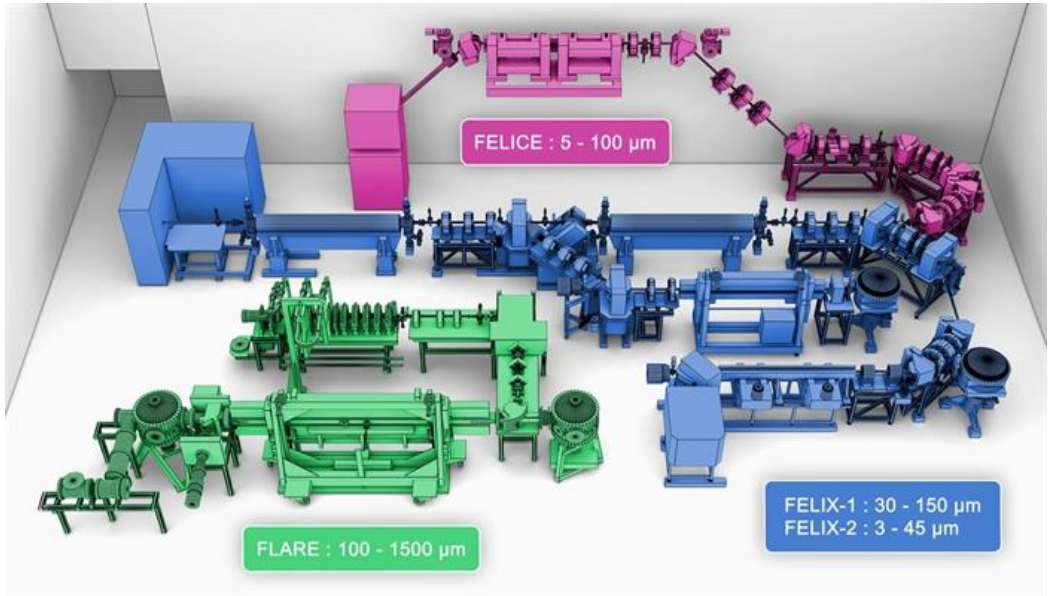
Generation of Accelerator-Based FELs: Oscillator FELs



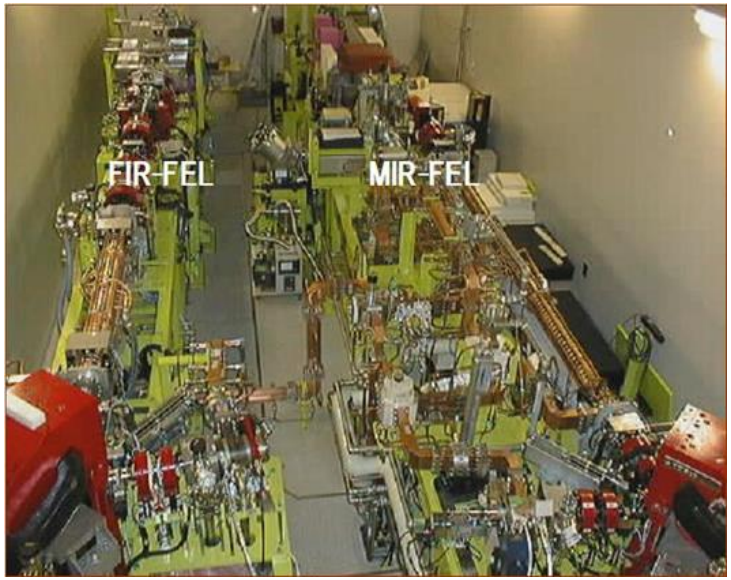
Principle of Oscillator FELs



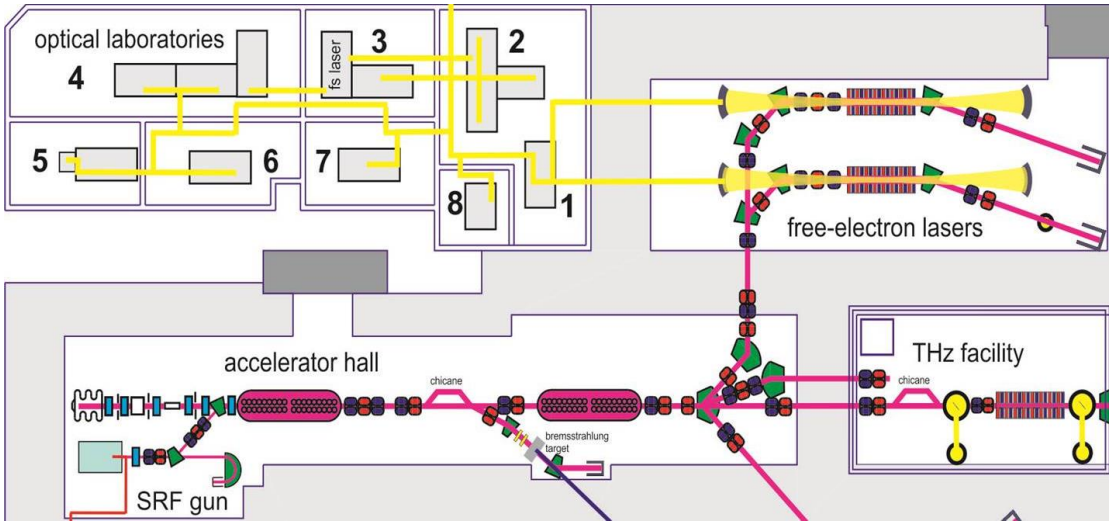
Examples of Accelerator-based MIR-THz Facility Worldwide



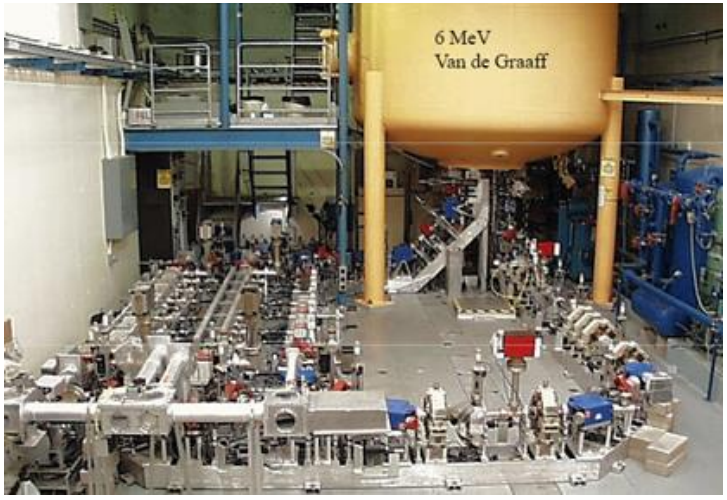
FELIX Laboratory, Radboud University, Netherlands



Tokyo University of Science, Japan



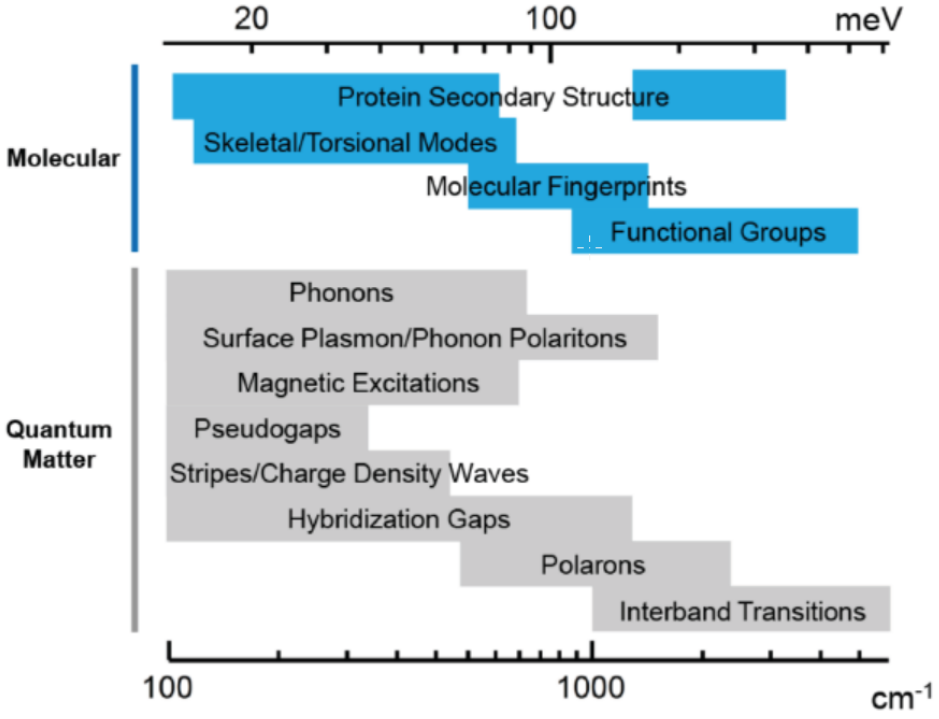
Fritz Haber Institute (FHI), Germany

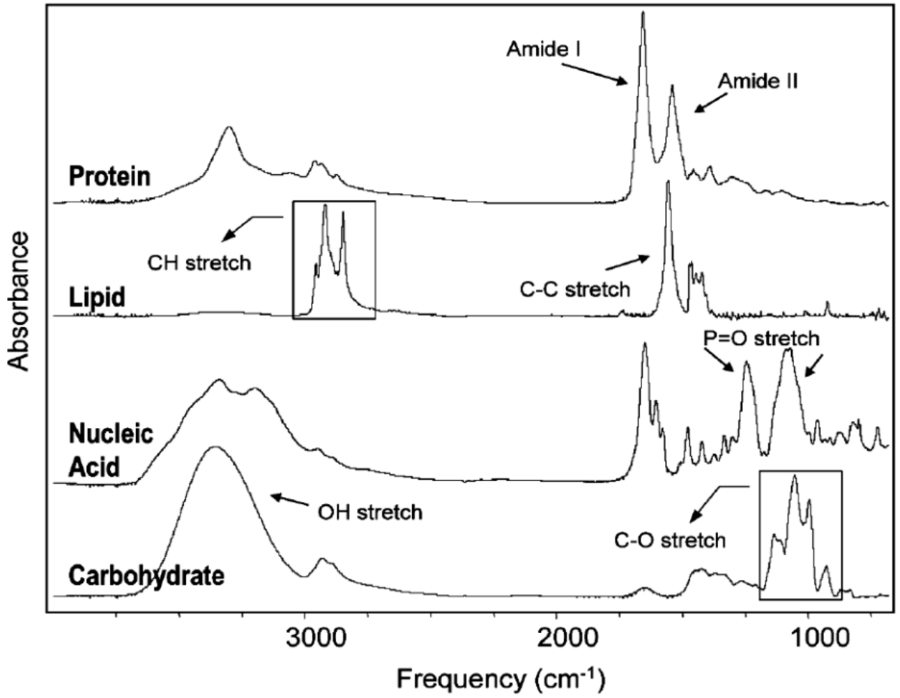


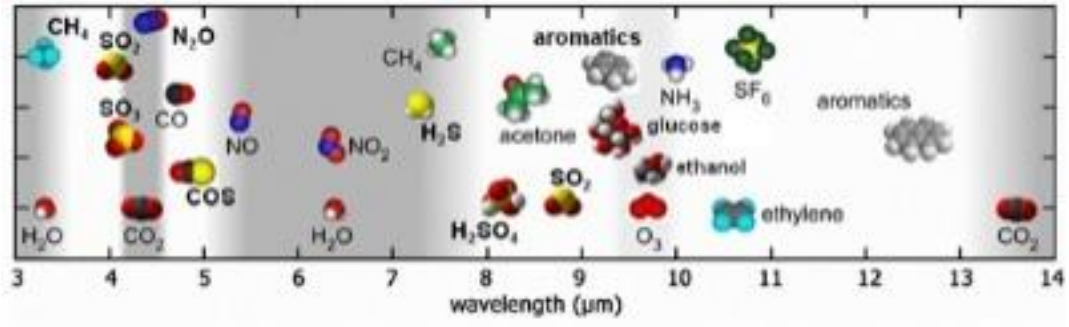
UCSB FEL, Santa Barbara, USA

Applications

การตอบสนองของสารชีวโมเลกุลในช่วงอินฟราเรดในลักษณะการสั่นพันธะ และสเปคตรัมย่าน MIR



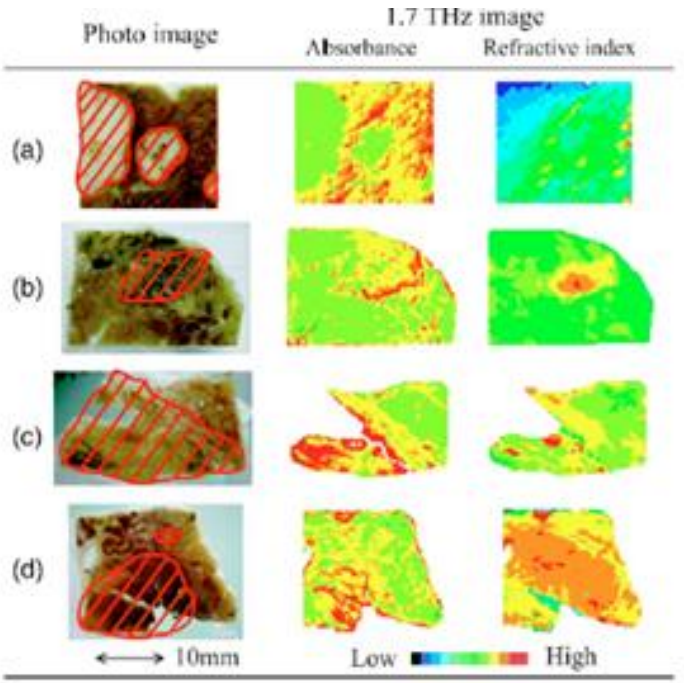




W. Petrich, Appl. Spectrosc. Rev. 36:2-3 (2001) & L.M. Miller, G.D. Smith, G.L. Carr, J. Biol. Phys. 29: 2-3 (2003) 219.

Applications (cont.)

THz imaging diagnostic of cancer tissues — Nakagima et al. [APL **90** 041102(2007)]

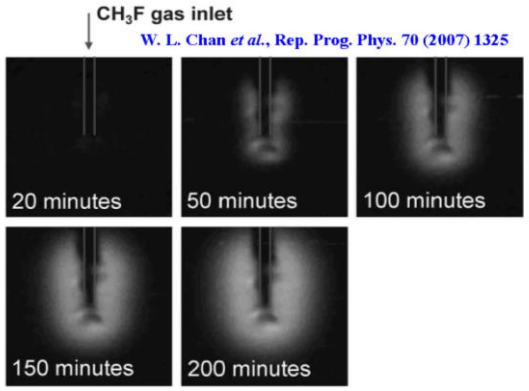


THz radiation properties:

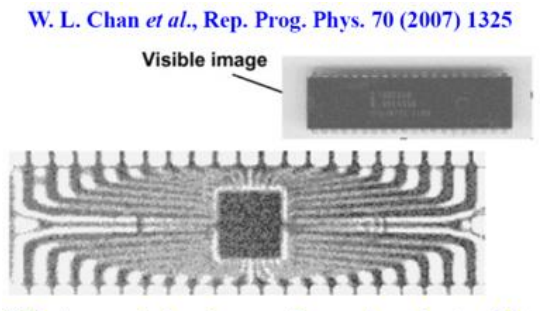
- penetrate non-conducting materials e.g. wood, plastic, paper.
- blocked by metals absorbed by water or liquid

Examples of applications:

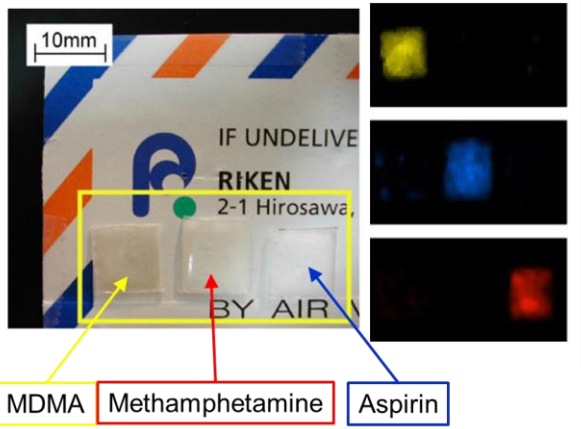
- quality inspection, security screening, medical applications, etc.
- Non-destructive THz imaging and spectroscopy of drugs using spectral fingerprints
- Fingerprints of hydrogen bonds revealed by mid- and far-IR spectroscopy
- Pump-probe experiments e.g. Study dynamics of biomolecule.

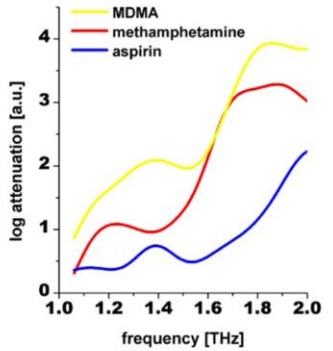


THz images of a polar gas injected in a polystyrene form block



THz transmission image of a semiconductor IC

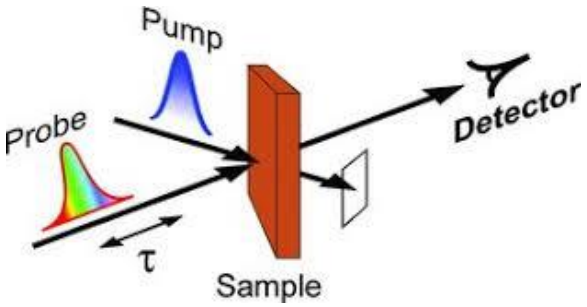


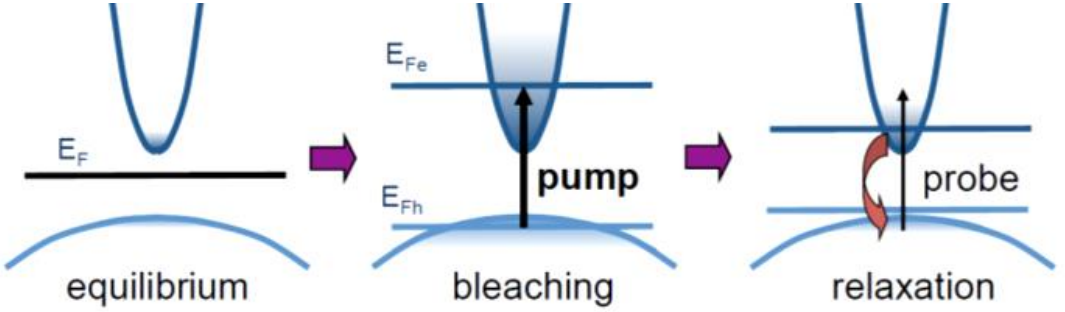


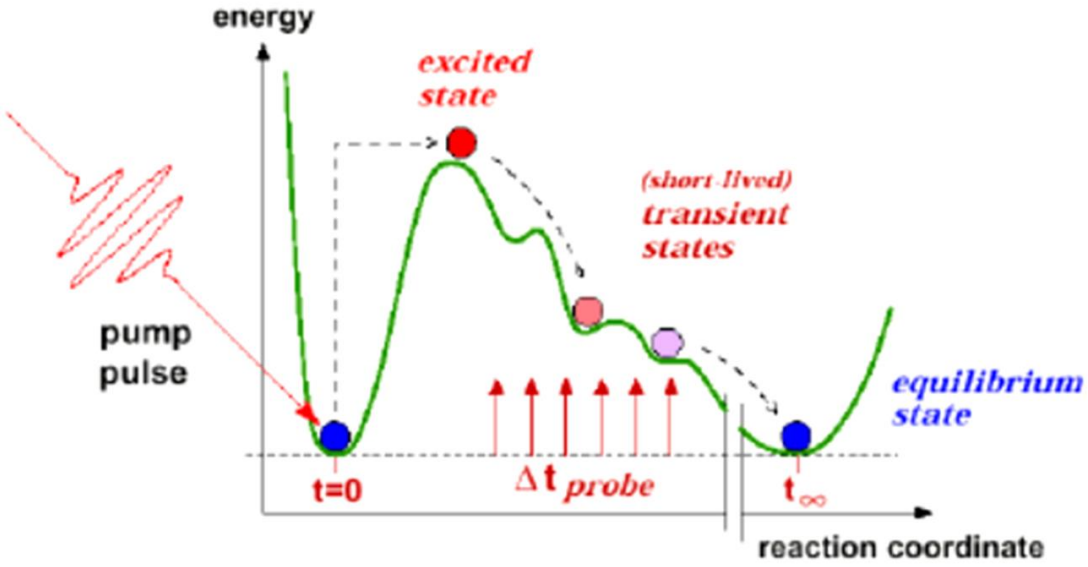
K.K awase, Y. Ogawa, Y. Watanabe, Opt. Express 11 (2003) 2549.

Applications (cont.)

Two colors time-resolved pump probe experiments: IR FEL & Ti:Sapphire Laser



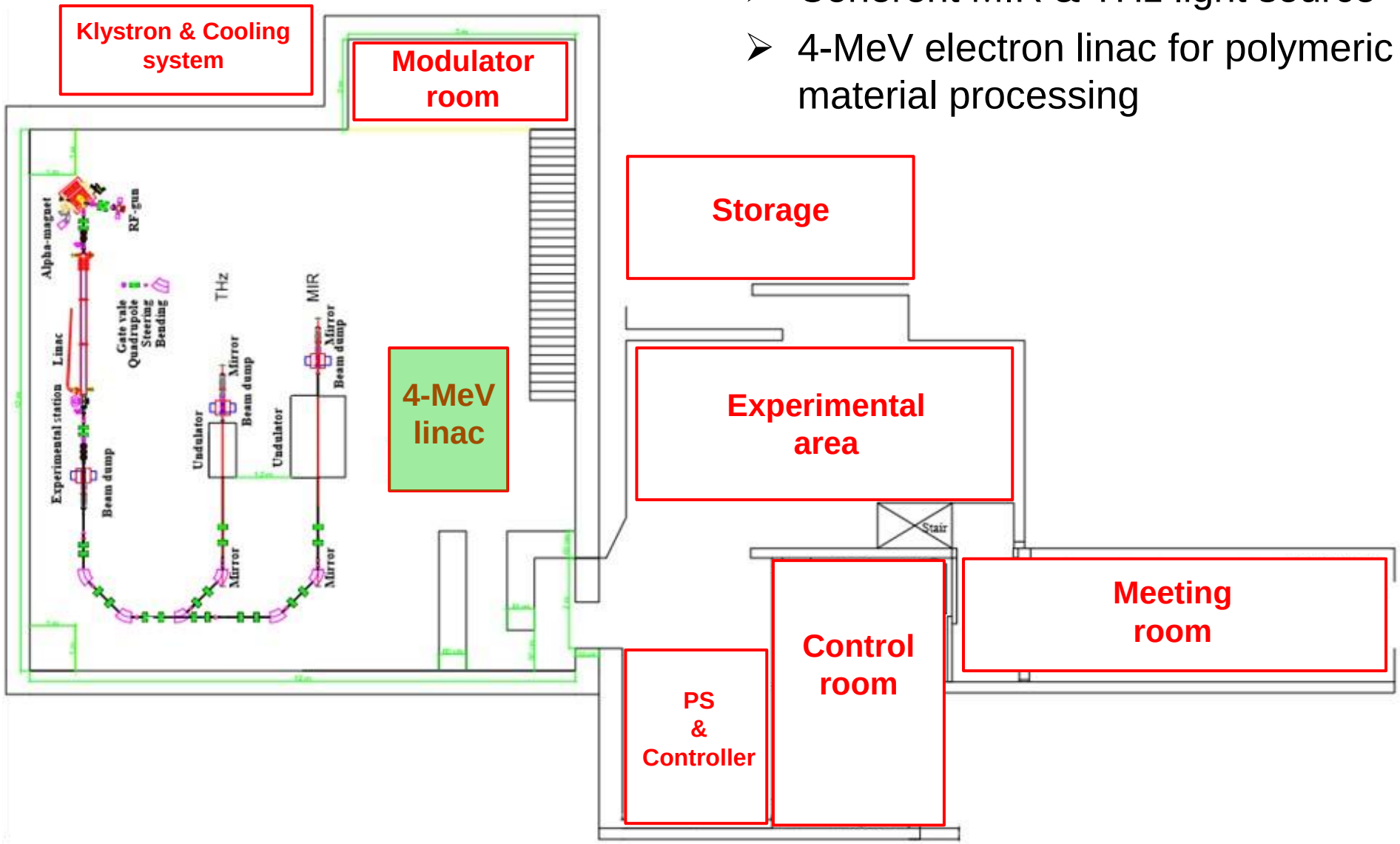




PBP-CMU IR-FEL (future)

Research activities:

- Coherent MIR & THz light source
- 4-MeV electron linac for polymeric material processing



Electron Injector System

Medical Applications

- Diagnostics
  - Isotope production
  - PET Scan, SPECT, CT Scan, MRI
- Treatments
  - X-ray, γ-ray radiotherapy
  - Photon/Electron beam therapy
  - Hadron therapy
    - Proton / Ion beam therapy
    - Neutron Therapy
  - Possible Future Applications
- Equipment sterilization

Medical Applications

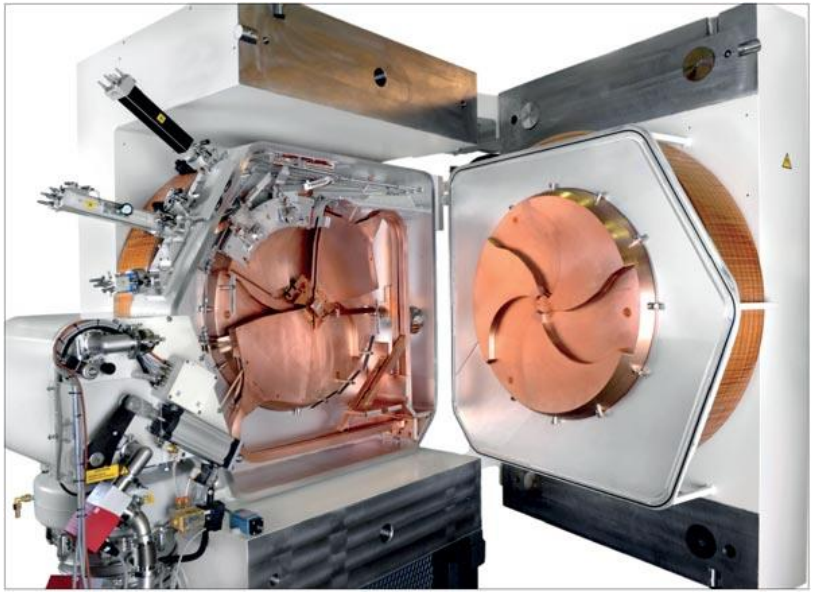
- Diagnostics
  - Isotope production
  - PET Scan, SPECT, CT Scan, MRI
- Treatments
  - X-ray, γ-ray radiotherapy
  - Photon/Electron beam therapy
  - Hadron therapy
    - Proton / Ion beam therapy
    - Neutron Therapy
  - Possible Future Applications
- Equipment sterilization

Applications of Isotopes

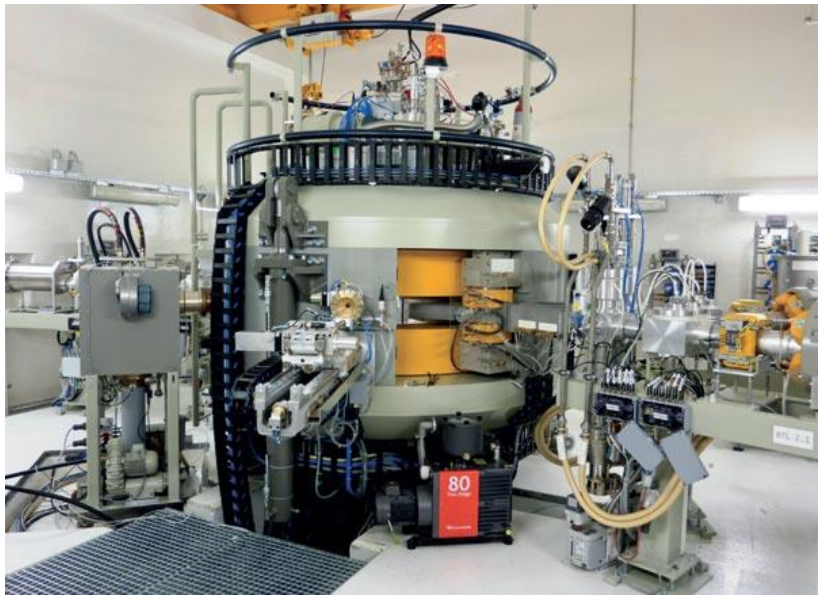
- Industrial – Gauging & calibration
- Medical – Diagnostics & treatments
  - PET
  - SPECT
  - Brachytherapy
- Accelerators: Linacs & Cyclotrons (protons or deuterons)
  - PET – 7 to 20 MeV with current less than 200 μA
  - SPECT – 22 to 70 MeV with current up to 2 mA

Isotope Production Using Cyclotrons

- Low energy (7 - 20 MeV) cyclotrons are used for production of short-lived isotopes
- Medium to high energy (20 - 70 MeV) cyclotrons are used for production of long-lived isotopes



1.2 m × 1.3 m 17 MeV PETTRACE cyclotron with a height of 1.9 m



30 isotope-producing cyclotron with 2.7 m in diameter and 2.8 m high

[http://cerncourier.com/cws/article/cern/49056]

Isotope Production Using Linear Accelerators

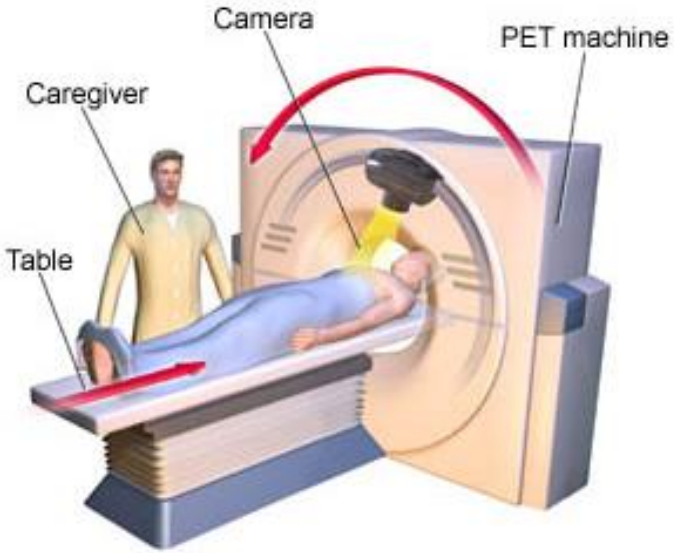
- Low energy (7 - 70 MeV) proton linacs are used for production of short-lived isotopes
- Medium to high energy (70 - 100 MeV) proton linacs are used for production of long-lived isotopes

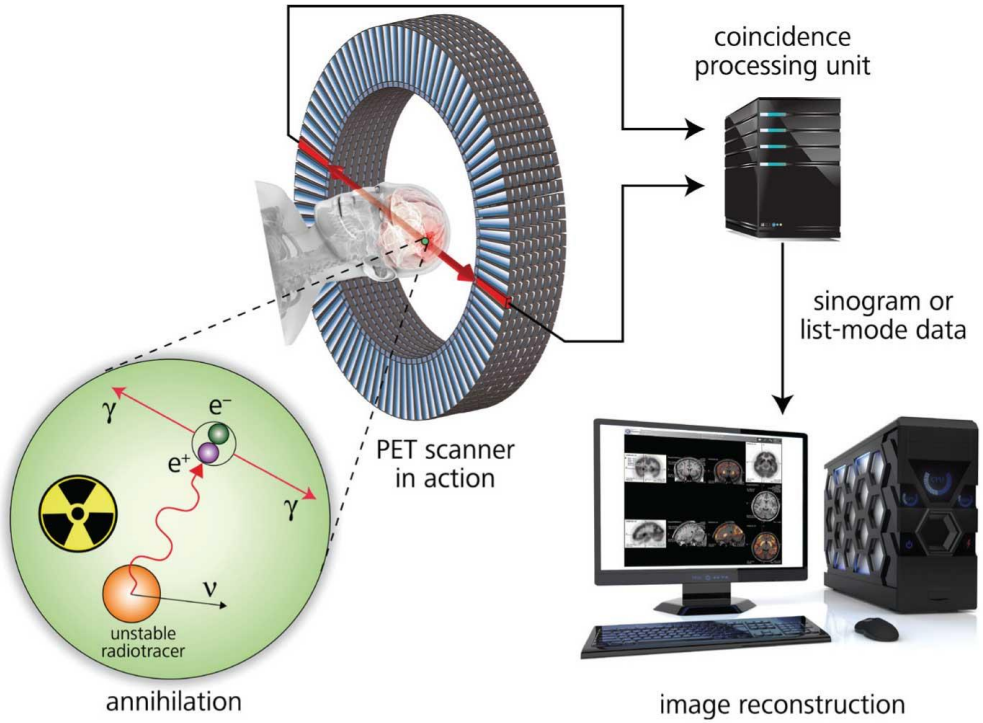
7 MeV proton linac, AccSys Technology

100 MeV proton beam from the 0.5 mile linac of Isotope Production Facility (IPF), Los Alamos

[D. R. Fisher, Medical Isotope Production and Use]

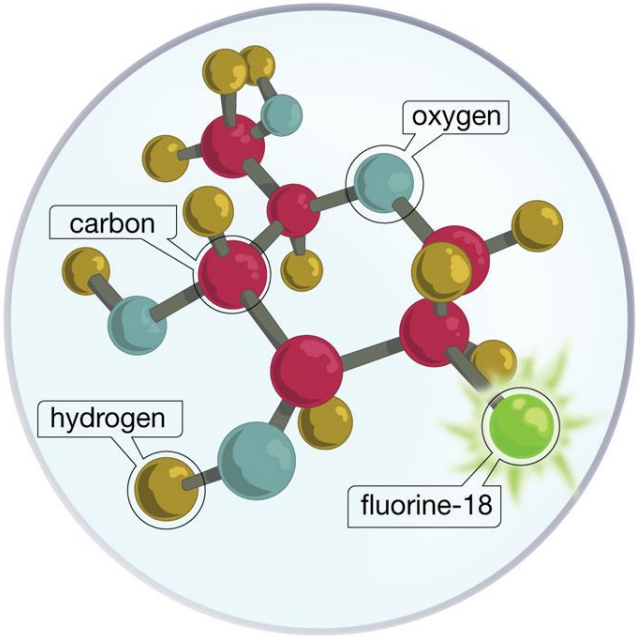
Positron Emission Tomography (PET)





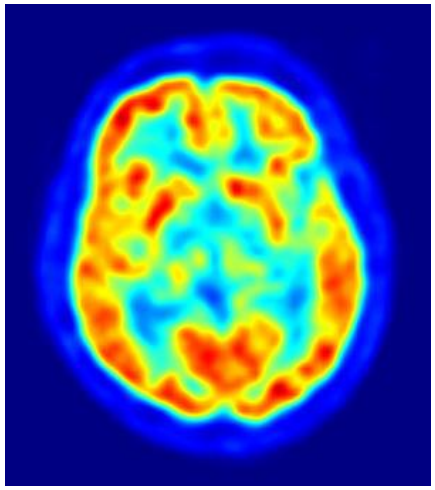
[www.sepscience.com/Sectors/Pharma/Articles/429-/Radio-IC-for-Quality-Control-in-PET-Diagnostics]

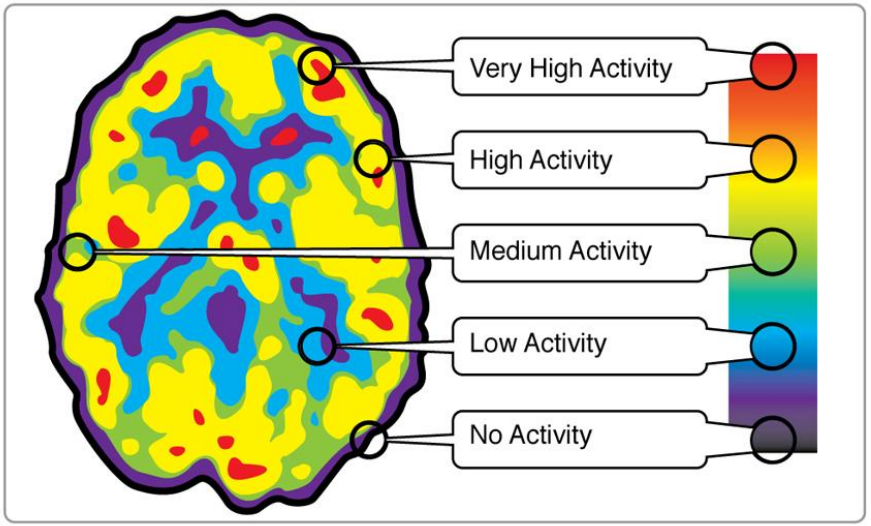
PET Imaging



Positron-emitting radionuclide and half-life

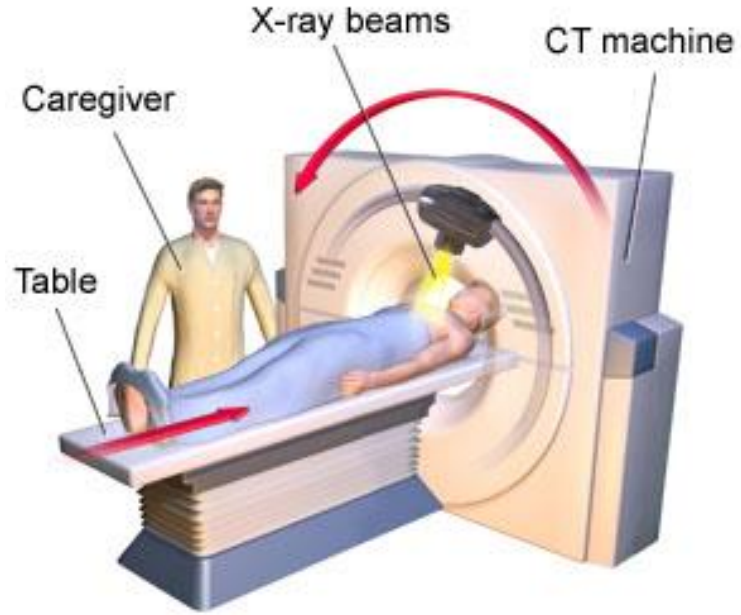
Nuclide	Half-life
^{11}C (carbon-11)	20 min
^{13}N (nitrogen-13)	10 min
^{15}O (oxygen-15)	2 min
^{18}F (florine-18)	110 min

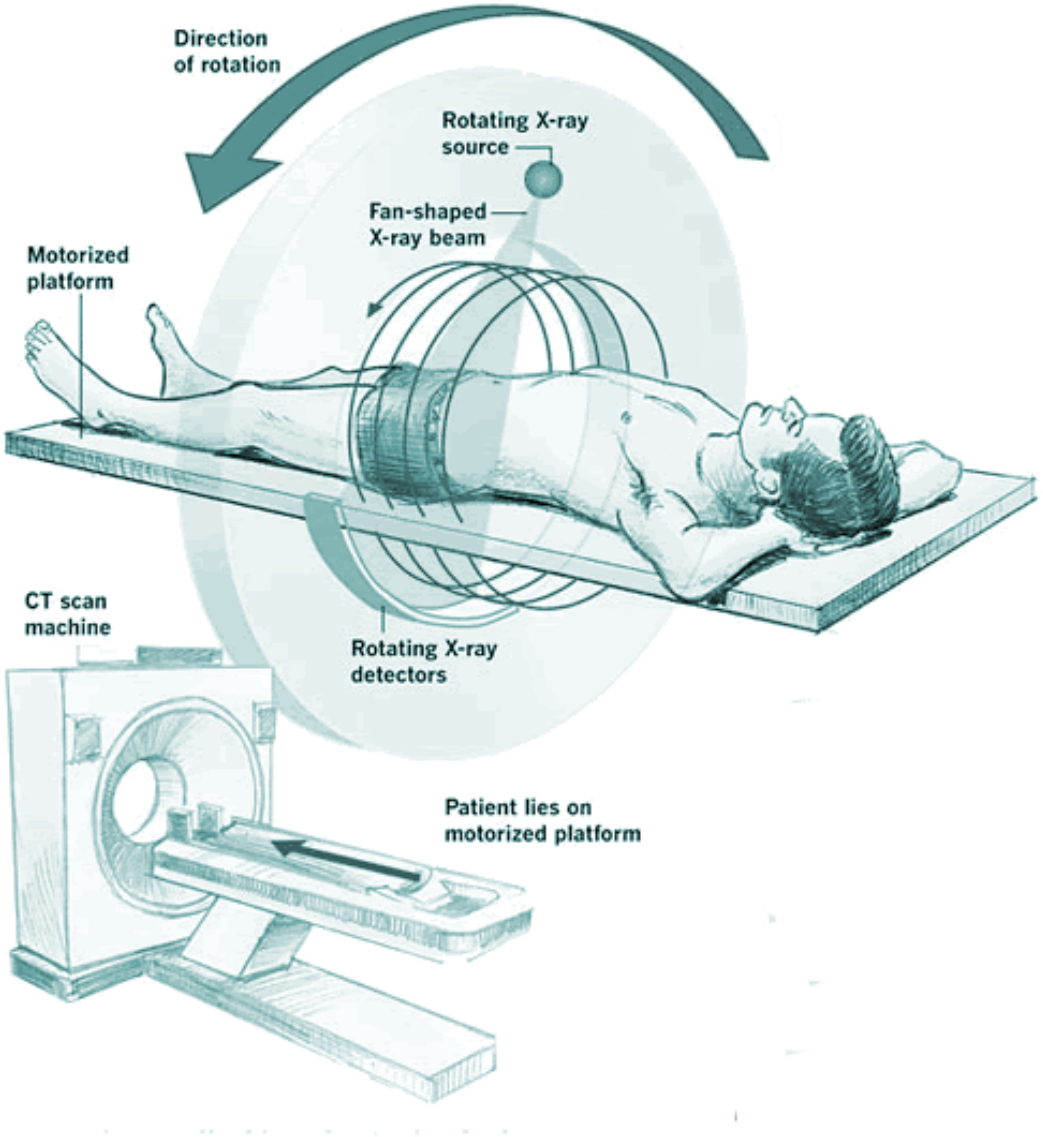




[http://learn.genetics.utah.edu/content/addiction/brainimaging/]

Computed Tomography (CT scan)

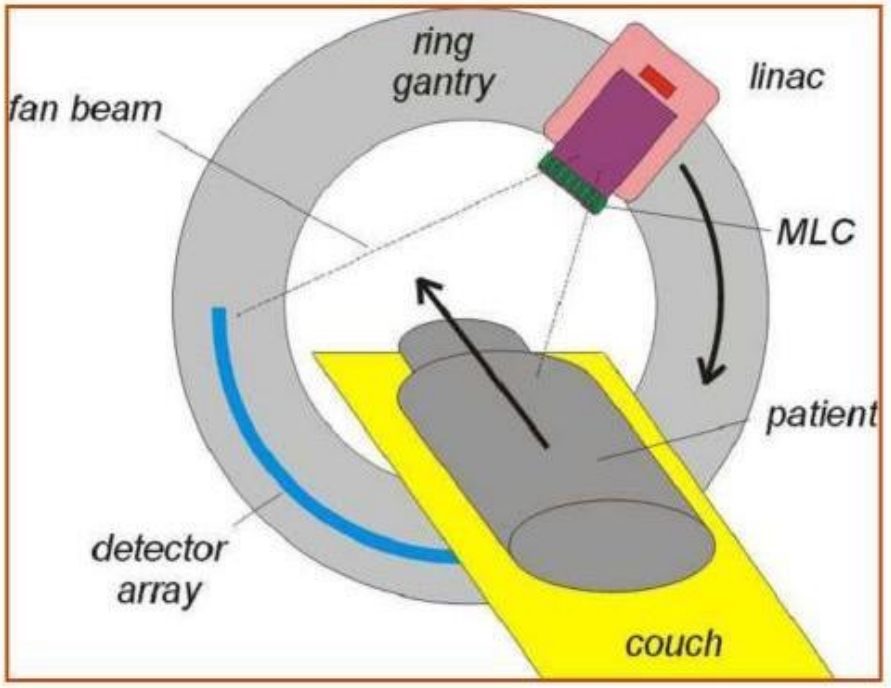




[http://cardiaccare.info/ct-scan/, www.drugs.com/cg/pelvic-and-abdominal-computerized-axial-tomography.html]

Integration of Imaging and Treatment

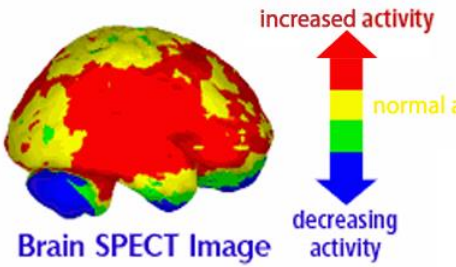
- TomoTherapy: combination of CT scanner and linac
  - 6 MV linac mounted on a CT type ring gantry
  - Megavoltage CT (~3-3.5 MV)

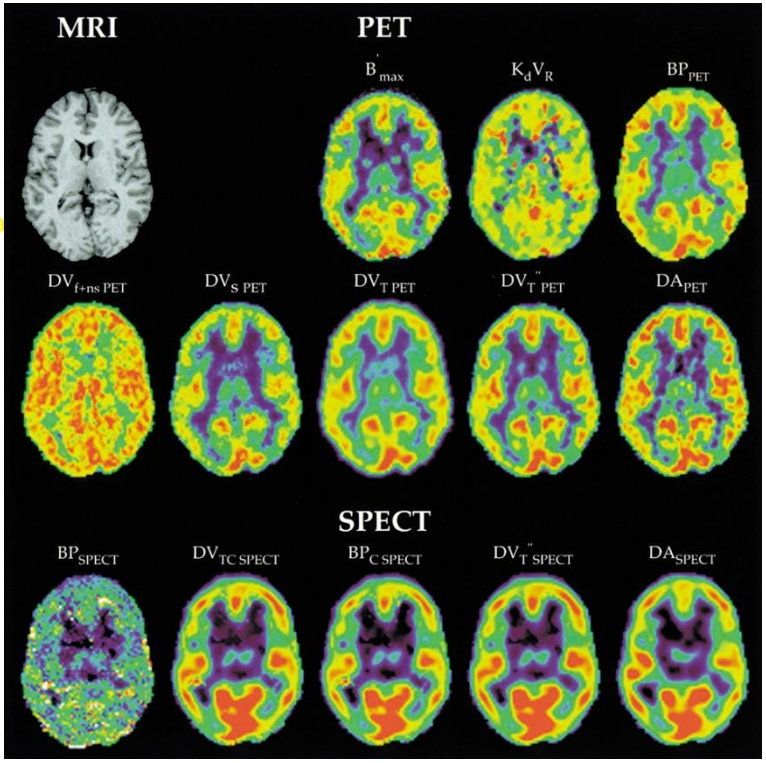


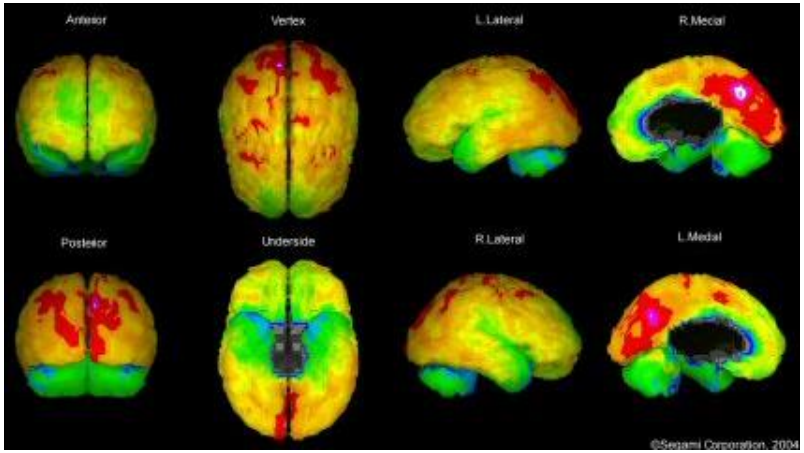
[http://ogdenregional.com/service/why-tomotherapy, http://openi.nlm.nih.gov]

Single Photon Emission Computed Tomography (SPECT Scan)

- SPECT scan uses a radioactive substance and a special camera to create 3-D pictures by integrating two technologies to view your body: computed tomography (CT) & radioactive material



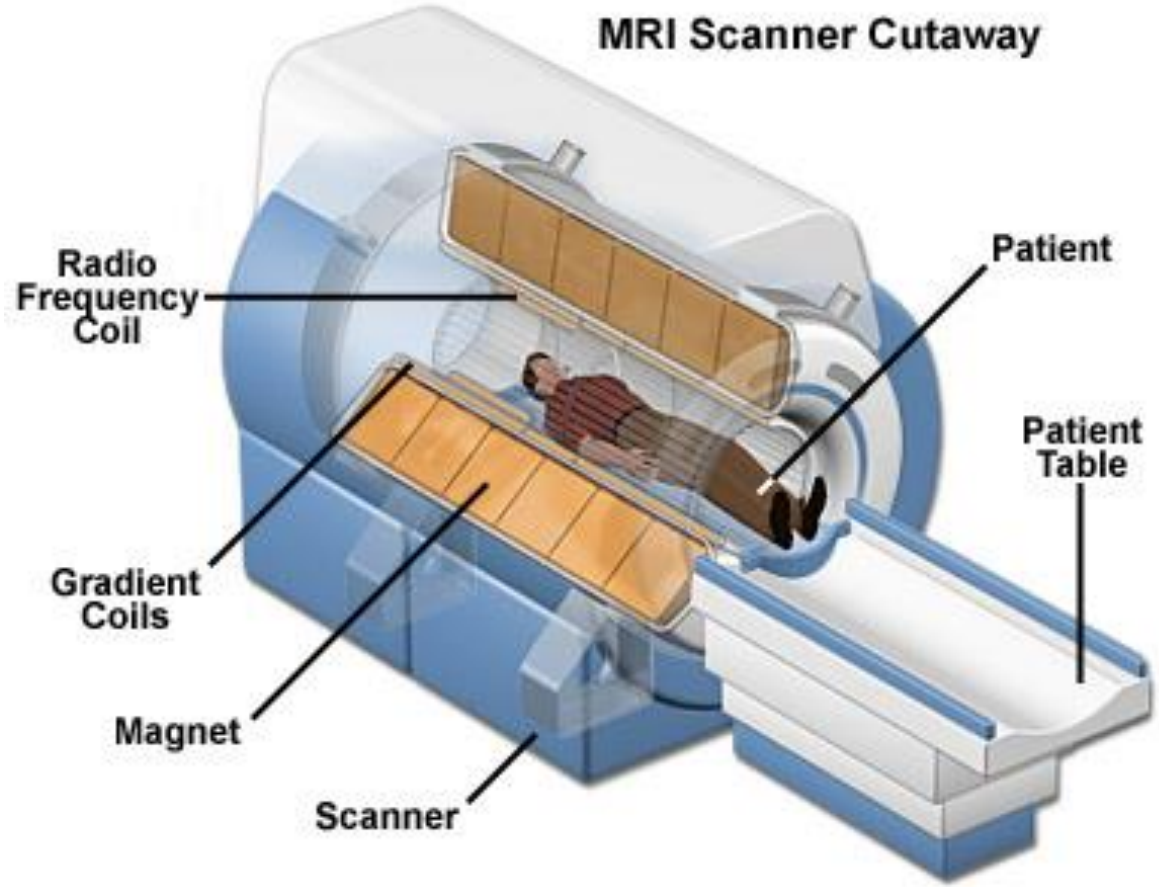




[www.nature.com/jcbfm/journal/v20/n11/fig_tab/9591014f9.html;http://www.mindspect.com/spec%20scan.html]

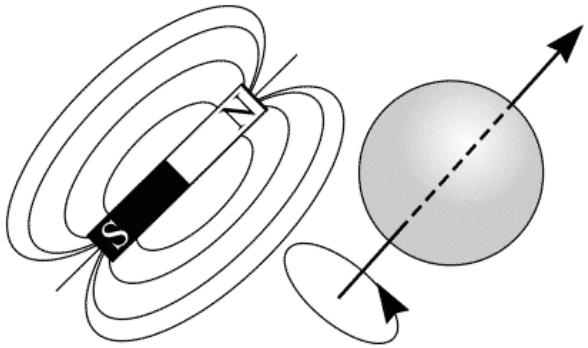
Magnetic Resonance Imaging (MRI)

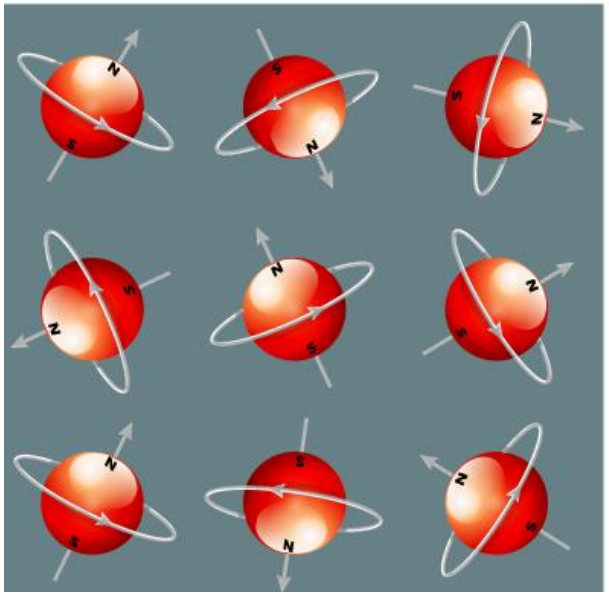
Medical application of nuclear magnetic resonance spectroscopy



https://nationalmaglab.org/education/magnet-academy/learn-the-basics/stories/mri-a-guided-tour

Spin Precession in Magnetic Field

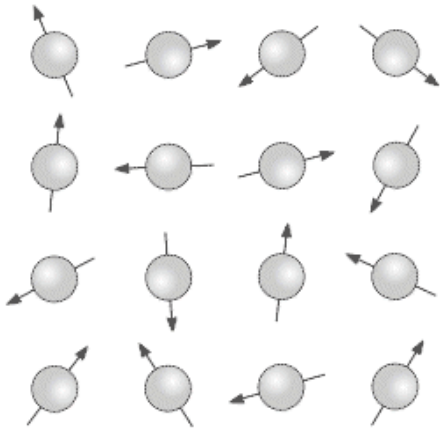


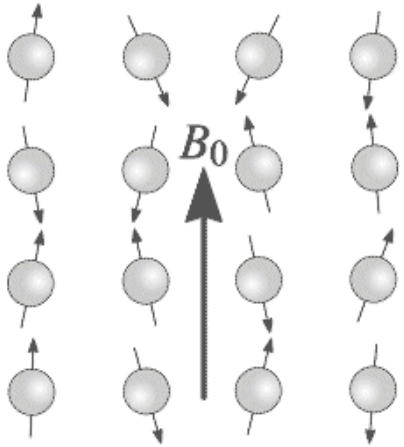


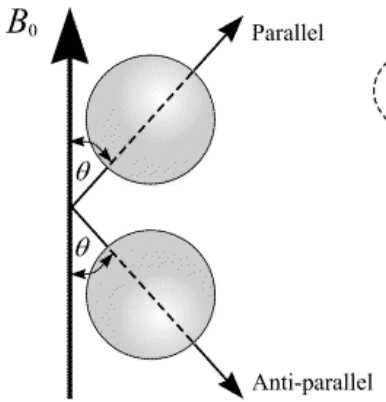
Hydrogen atoms in your body

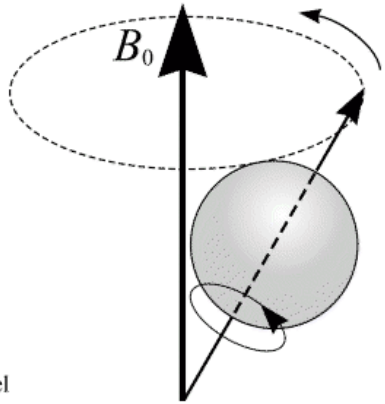
There are billions of hydrogen atoms in your body.

Usually the atoms are randomly aligned



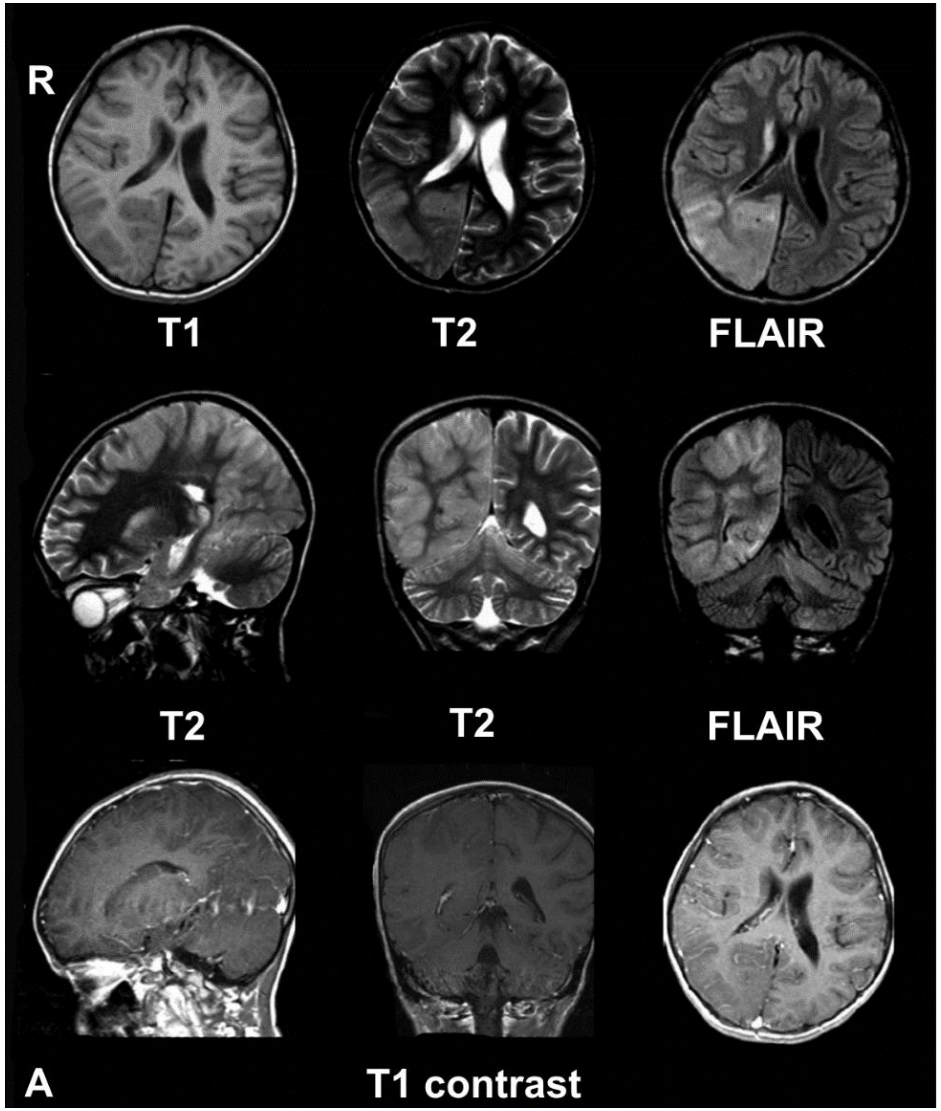


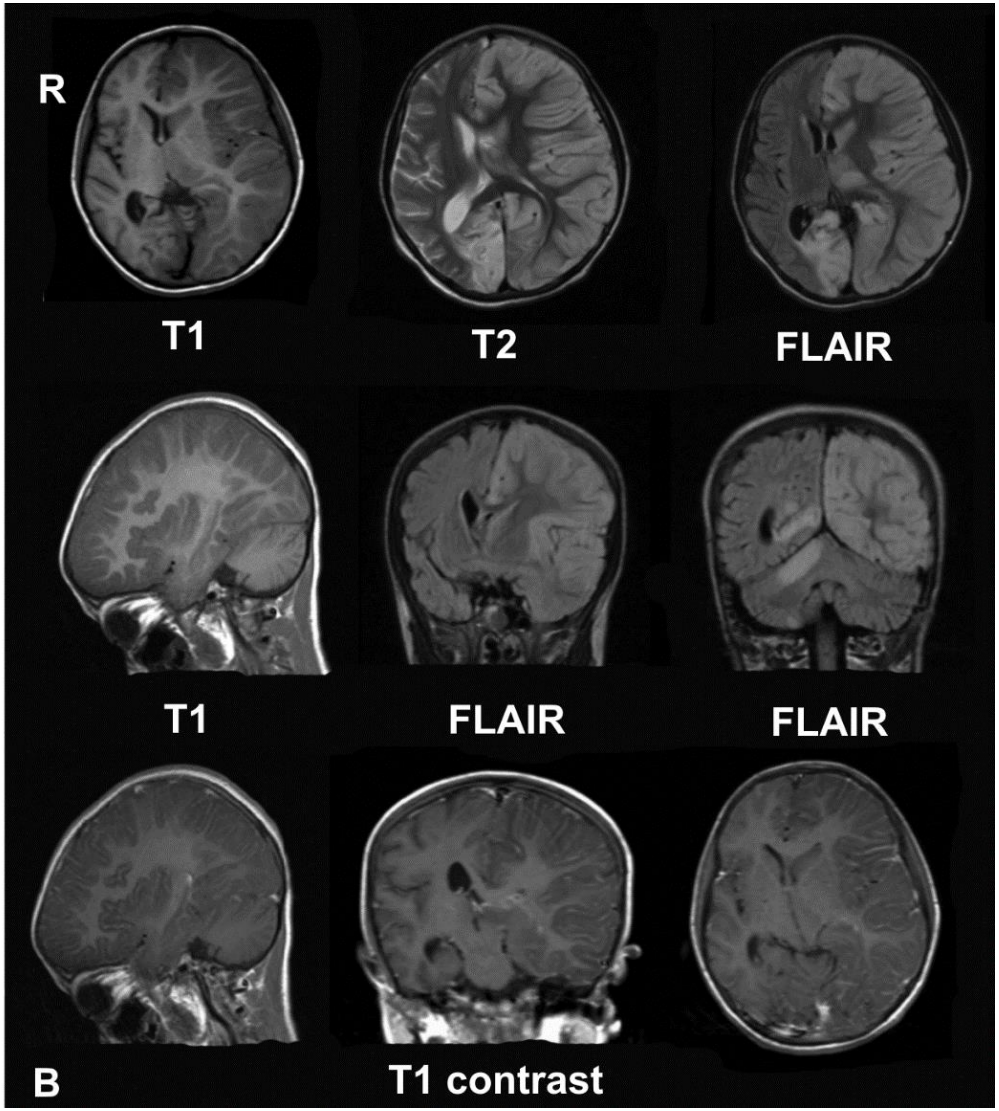




http://wikidoc.org/index.php/Basic_MRI_Physics

MRI Images





https://en.wikipedia.org/wiki/Rasmussen%27s_encephalitis

Medical Applications

- Diagnostics
  - Isotope production
  - PET Scan, SPECT, CT Scan, MRI
- Treatments
  - X-ray, γ-ray radiotherapy
  - Photon/Electron beam therapy
  - Hadron therapy
    - Proton / Ion beam therapy
    - Neutron Therapy
  - Possible Future Applications
- Equipment sterilization

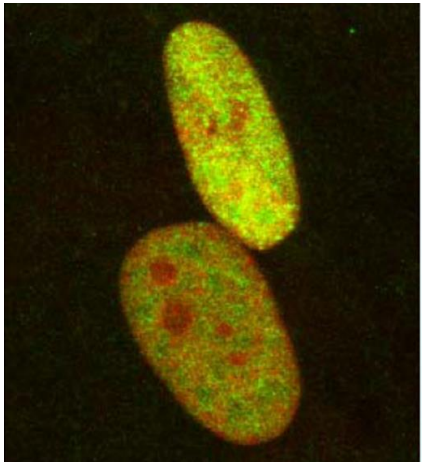
Treatments of Cancer

[http://aboutbrachytherapy.com/about-brachytherapy/]

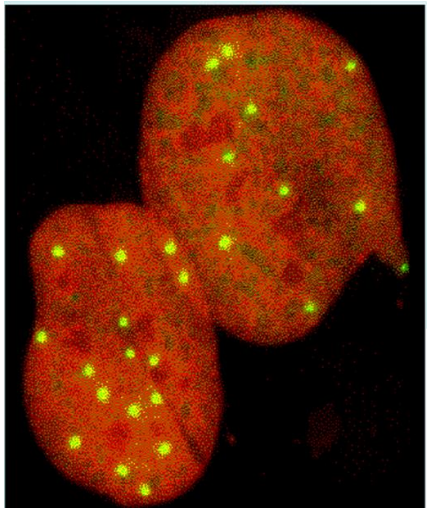
External Beam Radiotherapy (Radiation Therapy)

The goal of radiation therapy is to use the radiation to kill cancer tumor tissues while minimizing the damage to healthy tissues.

- Low linear-energy-transfer (low LET) radiation:
  - Electron, photon, proton
  - The damage is done by primarily activated radicals produced from atomic interactions.
  - Homogenous deposition of radiation dose.
  - The damaged tumor cell has a good chance to repair itself and continue to grow.



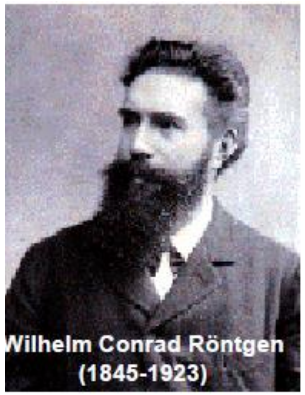
- High linear-energy-transfer (high LET) radiation:
  - Ion beam / neutron
  - The damage is done by is done primarily by nuclear interactions.
  - Local deposition of high dose.
  - The chance for a damaged tumor cell to repair itself is very small.

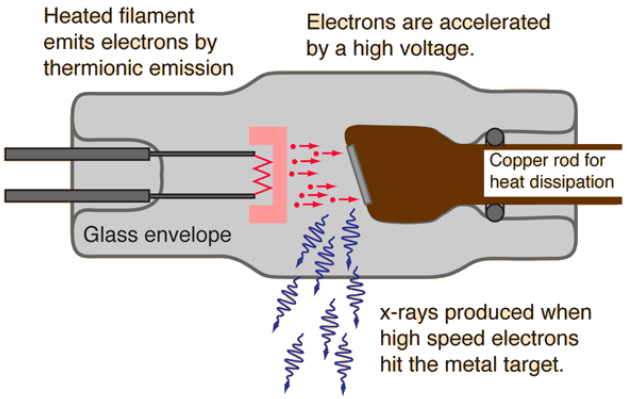


[J. Debus, Accelerators for Medicine: Achievements, Challenges, Opportunities]

Photon/Electron Radiation Therapy (DC X-ray Apparatus)

1895 Wilhelm Conrad Röntgen discovered the X-rays on November 8th at the University in Würzburg by using a cathode ray tube





[D. Robin, UPAS, UC Santa Cruz, January 2010]

1896 Röntgen announced his discovery on January 23rd

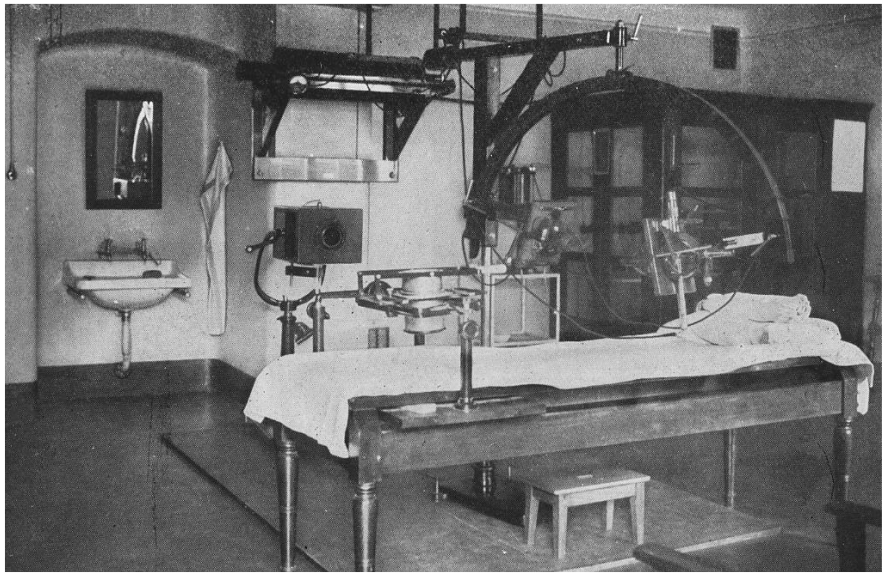
1897 Leopold Freund used X-rays for first treatments of tissue at University in Vienna

1901 Physics Nobel price was awarded to Röntgen

Photon/Electron Radiation Therapy (DC X-ray Apparatus)

1899	First X-ray treatment in Sweden by Stenbeck and Sjögren
1906	Vinzenz Czerny founded the first "Institute for Experimental Cancer Research" in Heidelberg
1913/4	Invention of part- and full-rotation radiation instrumentation
1920s	Industrially manufactured X-ray apparatus with high voltage (e.g. 150 kV X-ray apparatus by Reiniger-Gebbert & Schall AG or later called Siemens)

Cancer therapy apparatus in Heidelberg (1913)



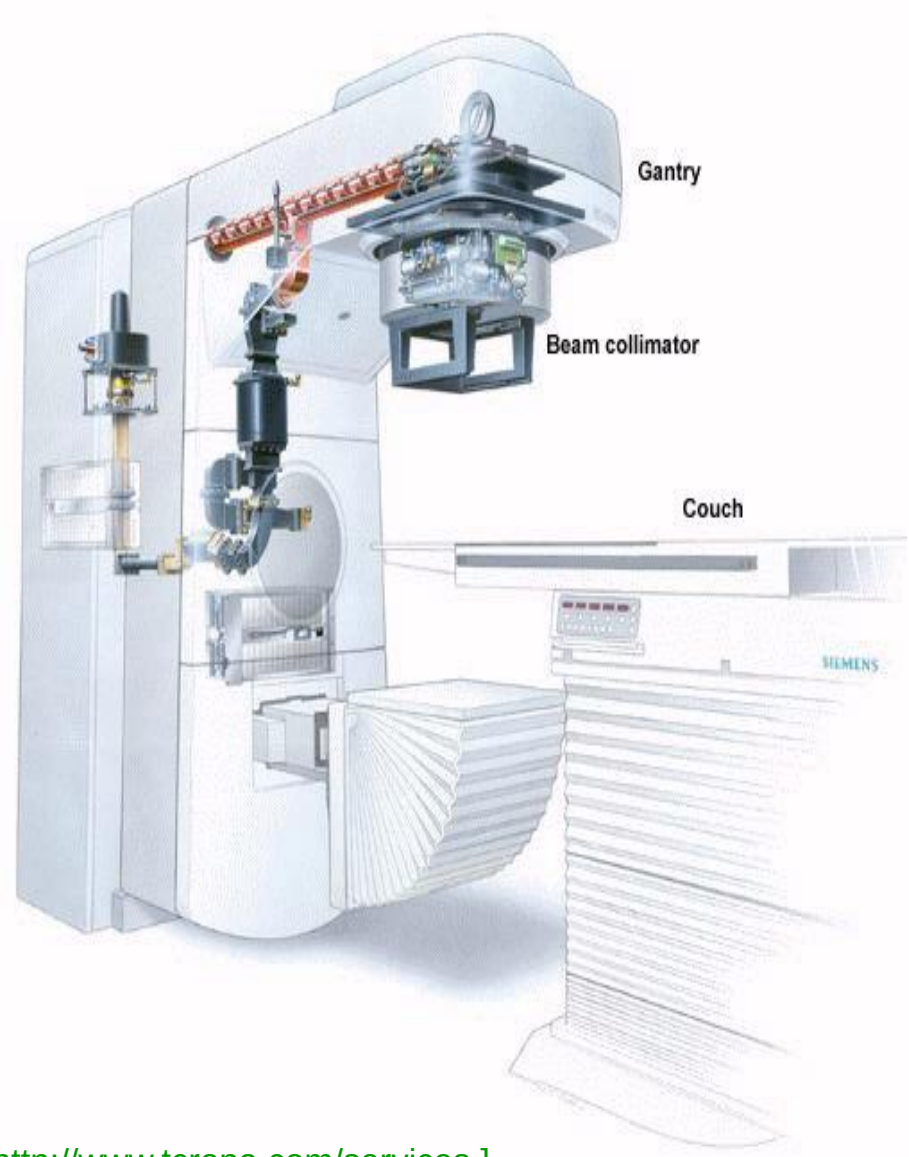
[DOE Workshop, October 26, 2009]

Present dental x-ray apparatus

http://www.medicalexpo.com/prod/villa-sistemi-medicali-70463.html

Medical Electron Linacs (developed 1930 →)

4-25 MeV Linacs use microwave RF fields in the S-band frequency range.

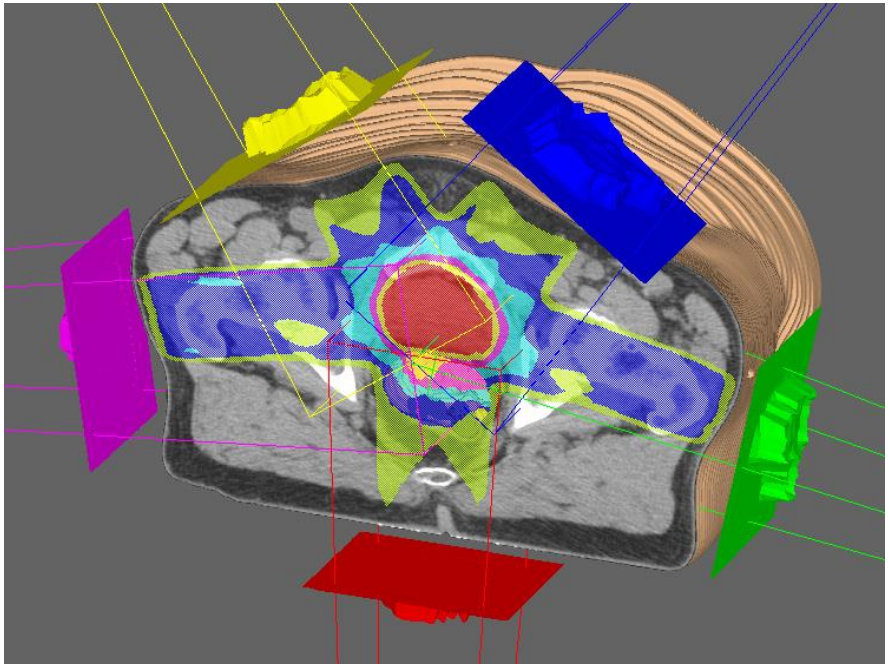


[http://www.tcropa.com/services.]

- Accelerator systems for treating a patient with high energy electron beams or x-rays.
- The whole accelerator (except controller and power supplies) is mounted on a gantry, which can be rotated around the patient.
- The radiation can be delivered to the tumor from all directions with precise control for positioning and dose.

RF Linacs & Intensity Modulated Radiation Therapy (IMRT)

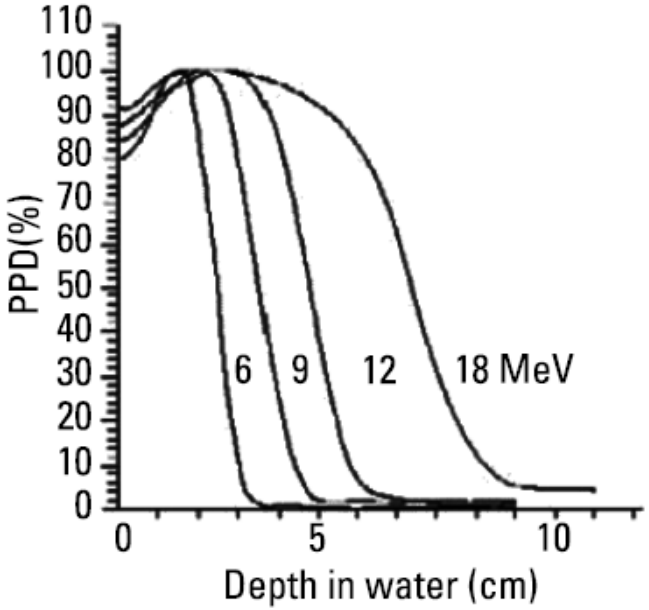
[www.upmcwhitfieldcancercentre.ie/IMRT.htm]



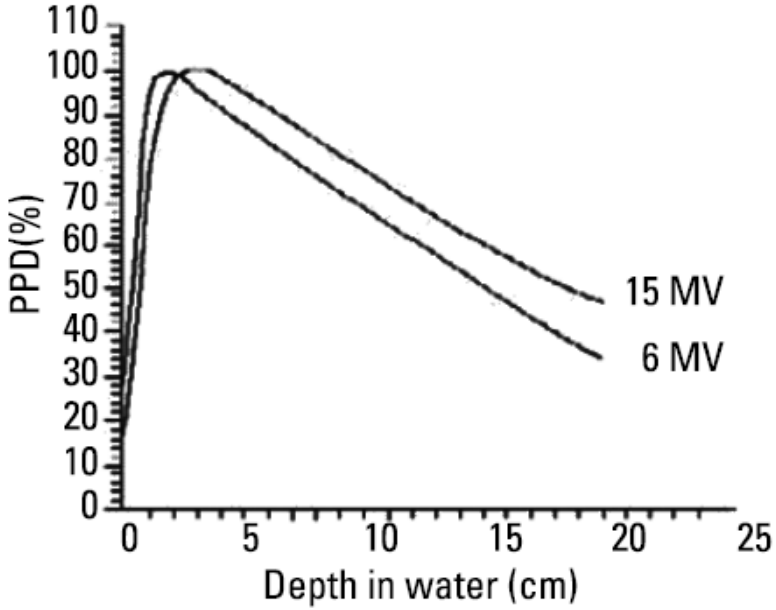
[www.vmoc.com/services/radiation-oncology/imrtigrt/]

Usage of Photon / Electron Beams

- Medical linacs are used for external beam radiation treatment for
  - Photon therapy (hard or soft X-rays)
  - Electron therapy
- **Aim of Radiotherapy :** to deliver maximum dose to tumor while minimizing dose to adjacent normal tissues



electron beams with energies 6, 9, 12, 18 MeV

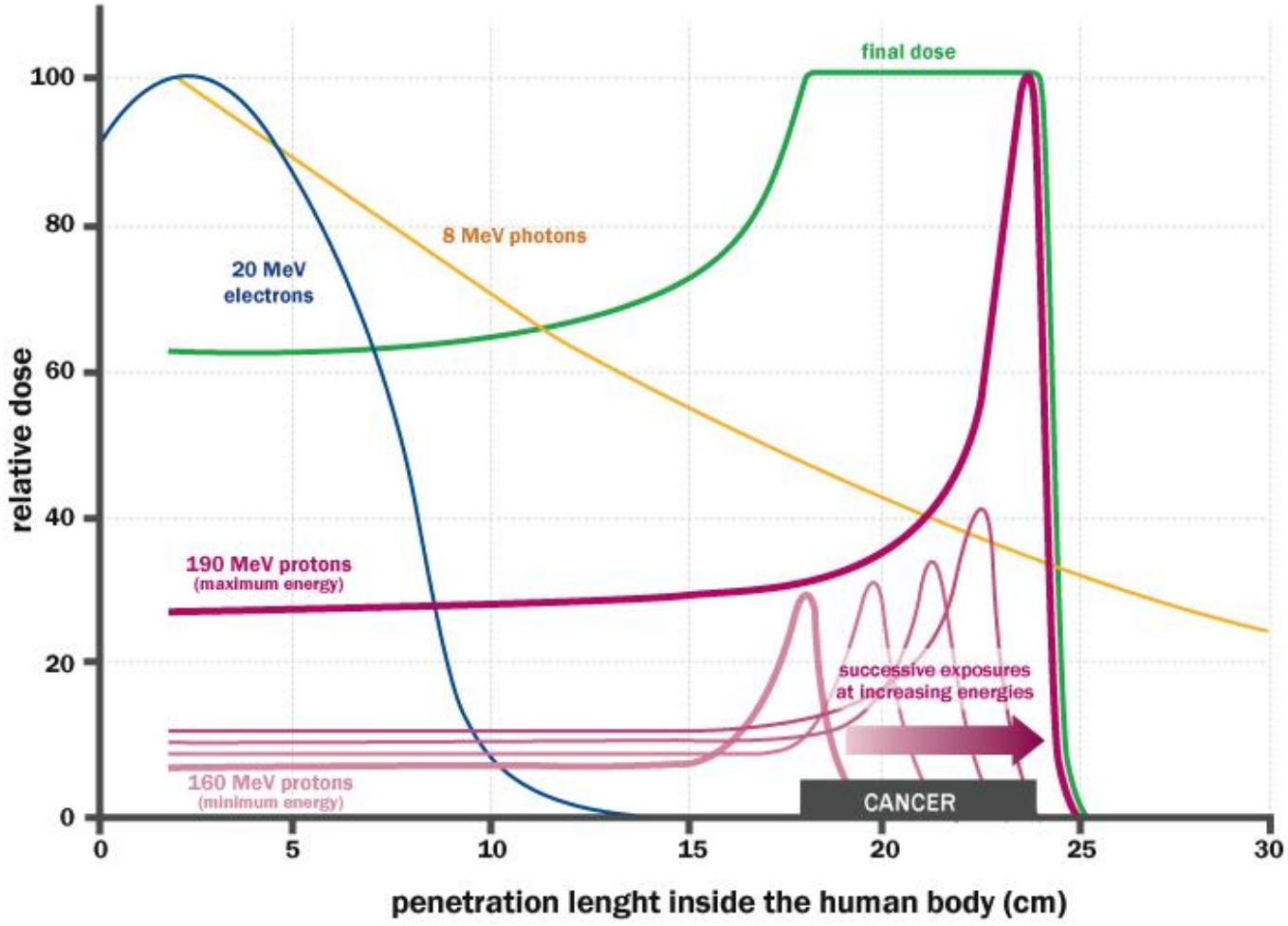


photon beams with 6 and 15 MV

[S. Hanna, RF Linear Accelerators for Medical and Industrial Applications]

Limitations of Photon/Electron Therapy

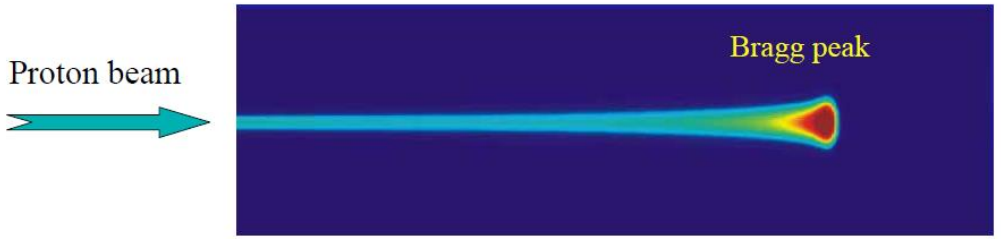
- Charged particle beams slow down and stop inside the human body
- X-rays keep going inside the human body at the speed of light

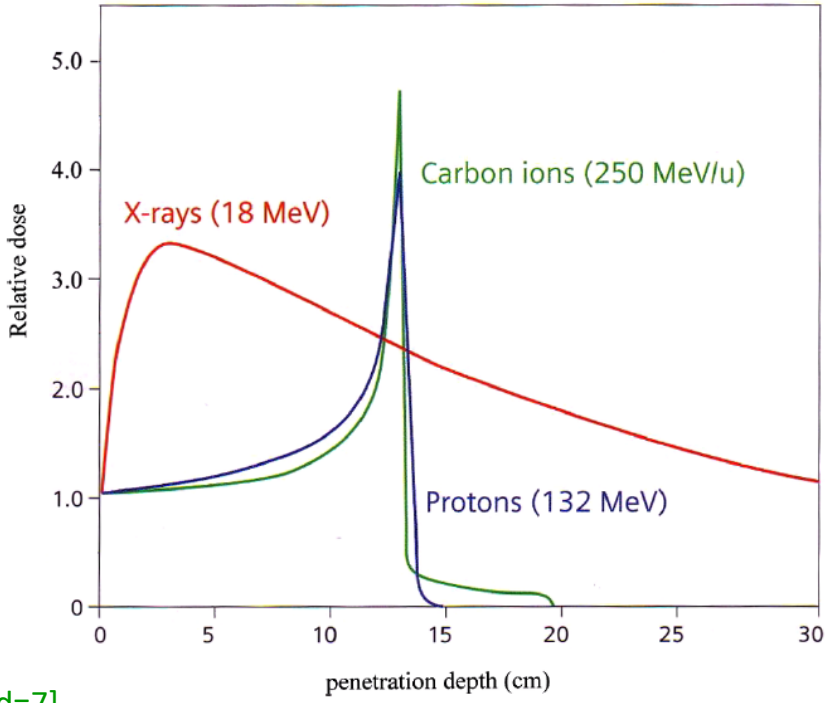


[http://www.accelerators-for-society.org/health/index.php?id=7]

Hadron Therapy

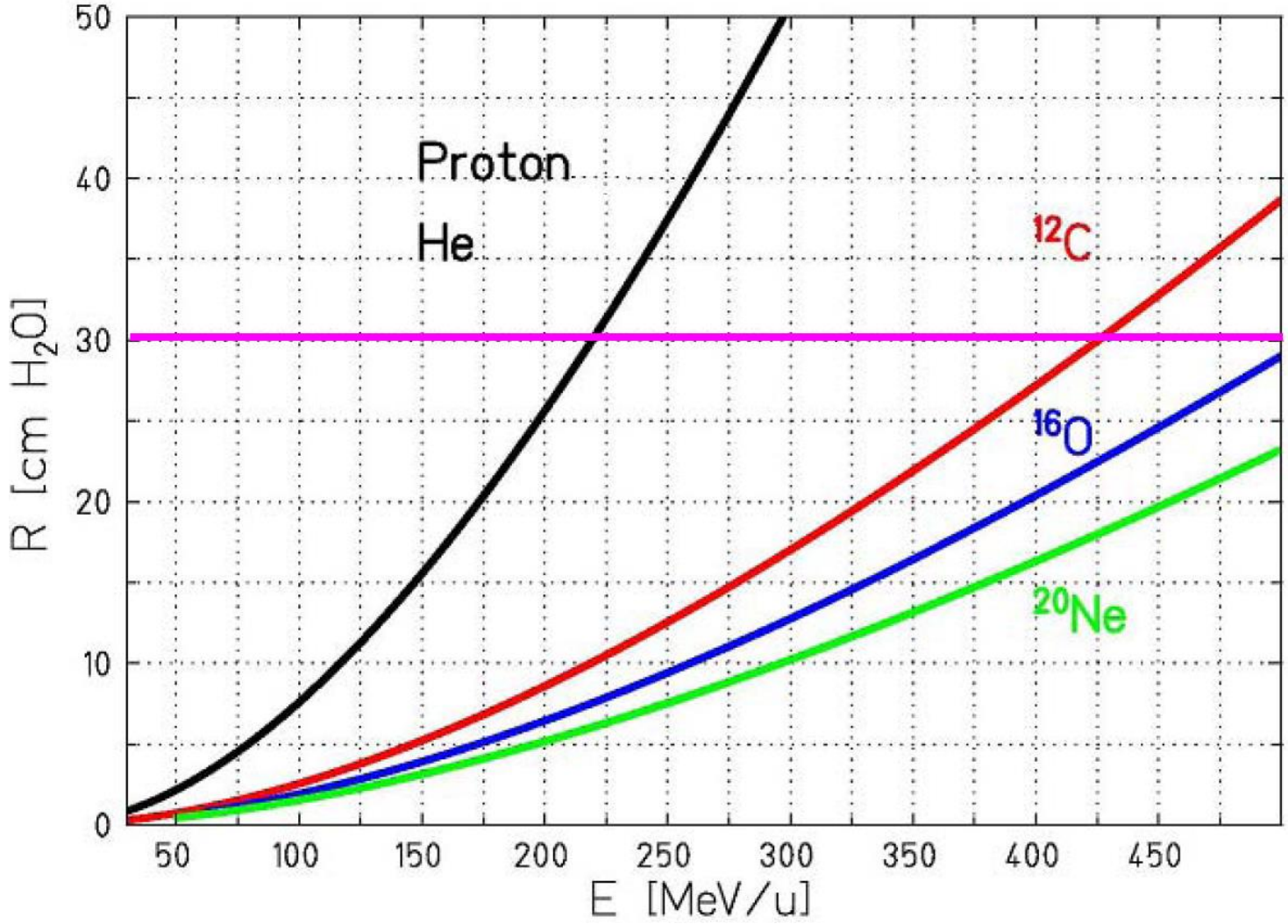
- Hadron therapy (proton / ion / neutron) allows for the treatments with deep tumors with minimized dose to heavy tissues
- It was proposed by Robert Wilson to take advantage of the Bragg Peak





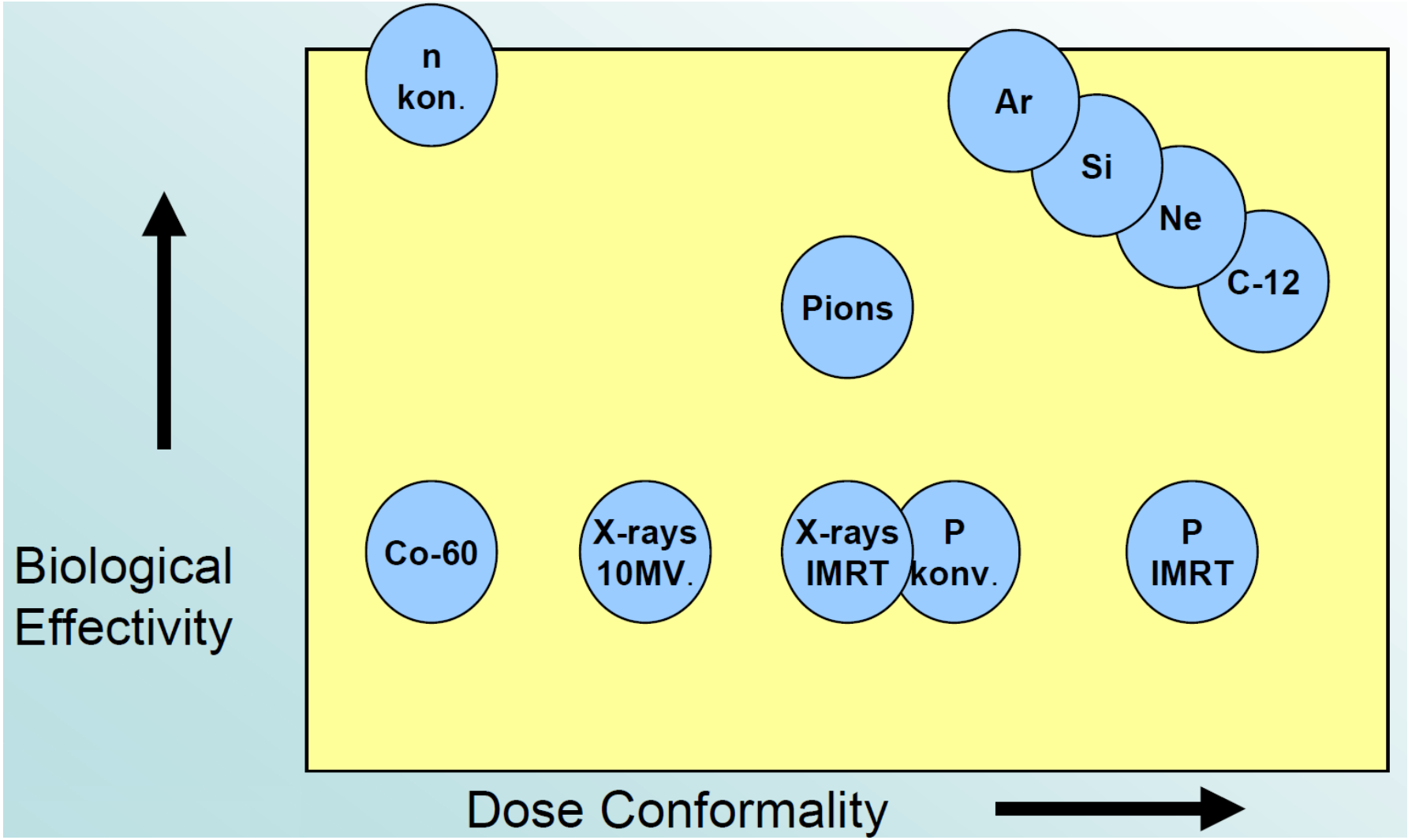
[http://www.accelerators-for-ociety.org/health/index.php?id=7]

Range of Different Proton / Ion Beams in Water



[J. Debus, Accelerators for Medicine: Achievements, Challenges, Opportunities]

Comparison of Protons, Neutrons, Pions, Ions, Photons



[J. Debus, Accelerators for Medicine: Achievements, Challenges, Opportunities]

Proton Radiation Therapy

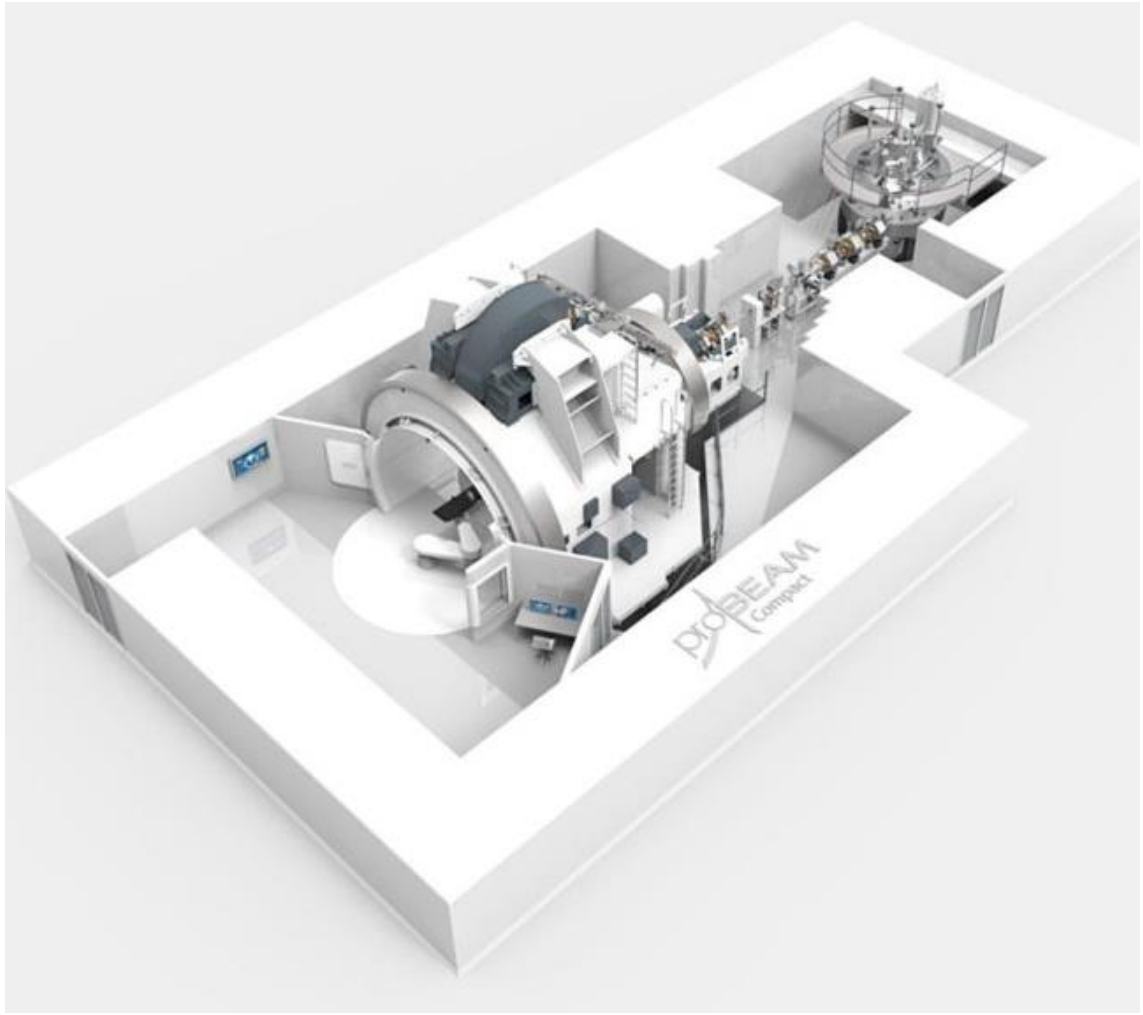
Center for Proton Therapy (CPT) at PSI

Compact French 65 MeV cyclotron
for proton and neutron therapy

[http://lpap.epfl.ch/page-59250-en.html; D. R. Fisher, Medical Isotope Production and Use]

250-MeV Cyclotron Proton Therapy Chulalongkorn Hospital

23 **มิถุนายน** 2562 การติดตั้งเครื่องไซโคลตรอน ศูนย์โปรตอนสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ

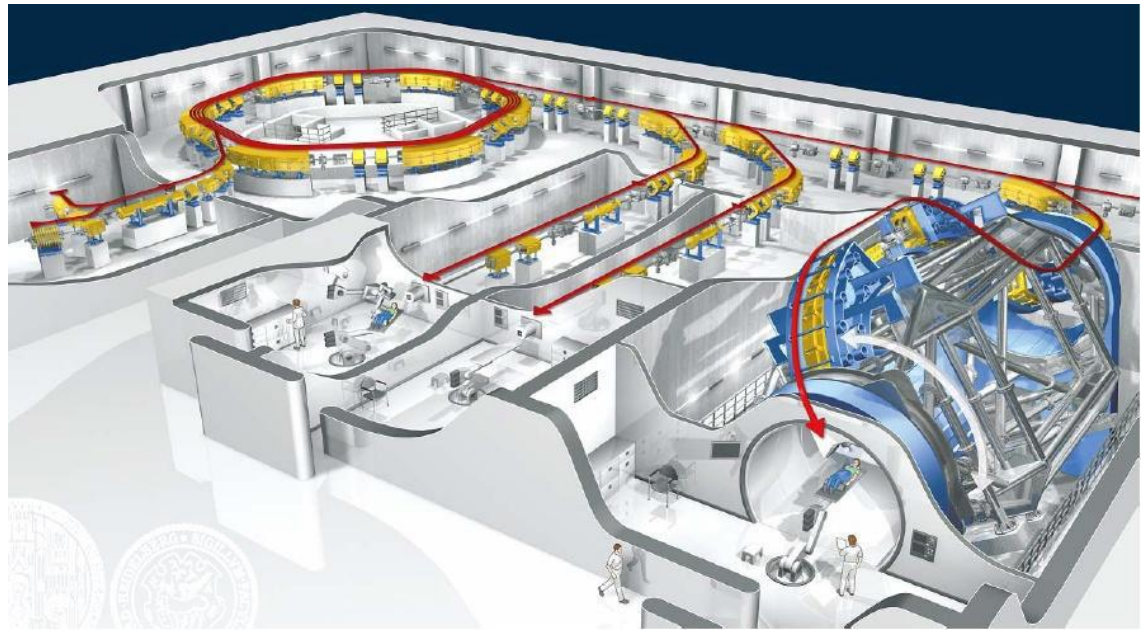


Varian ProBeam Compact system with fully rotational intensity modulated proton therapy (IMPT).

Synchrotron Proton/Ion Beam Therapy Facility

Proton Therapy Synchrotron at Fermilab, USA

Ion beam cancer therapy at Heidelberg

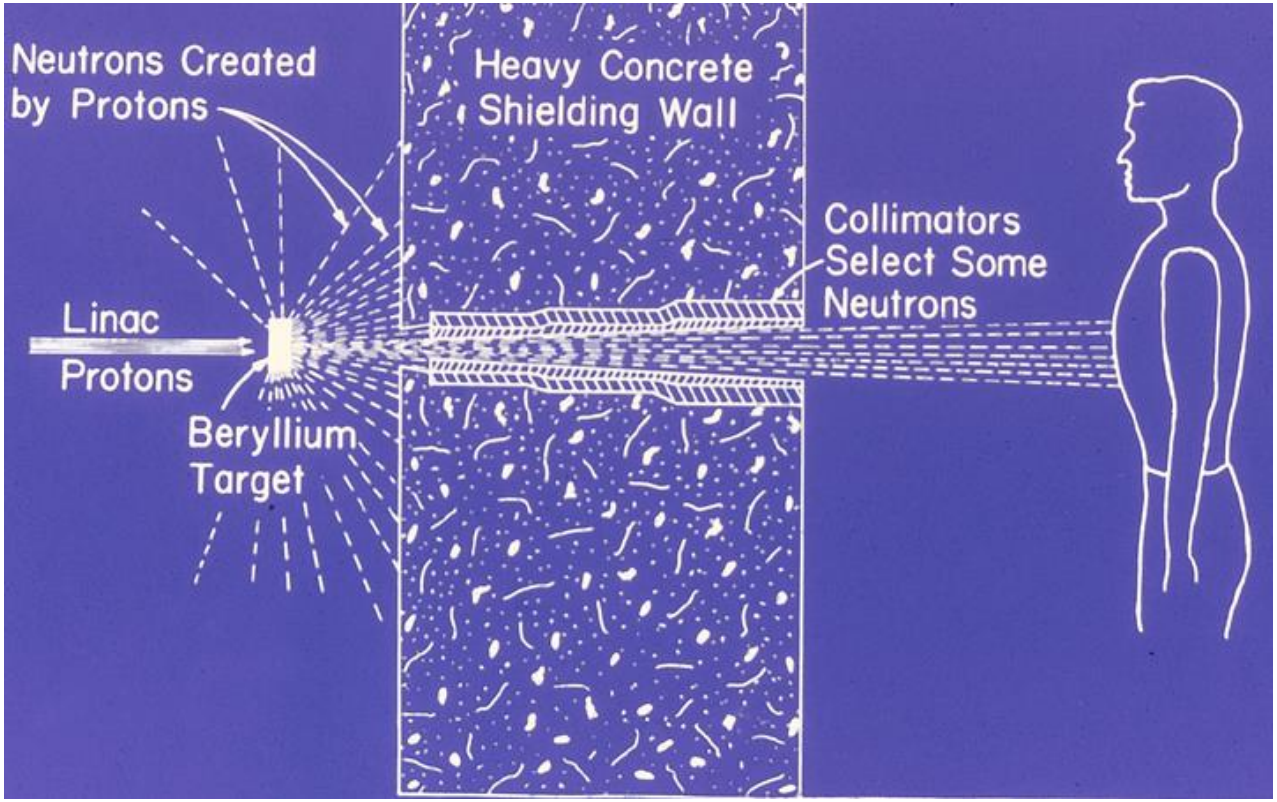


[H. Eickholf and U. Linz, Medical Applications of Accelerators]

Neutron Therapy

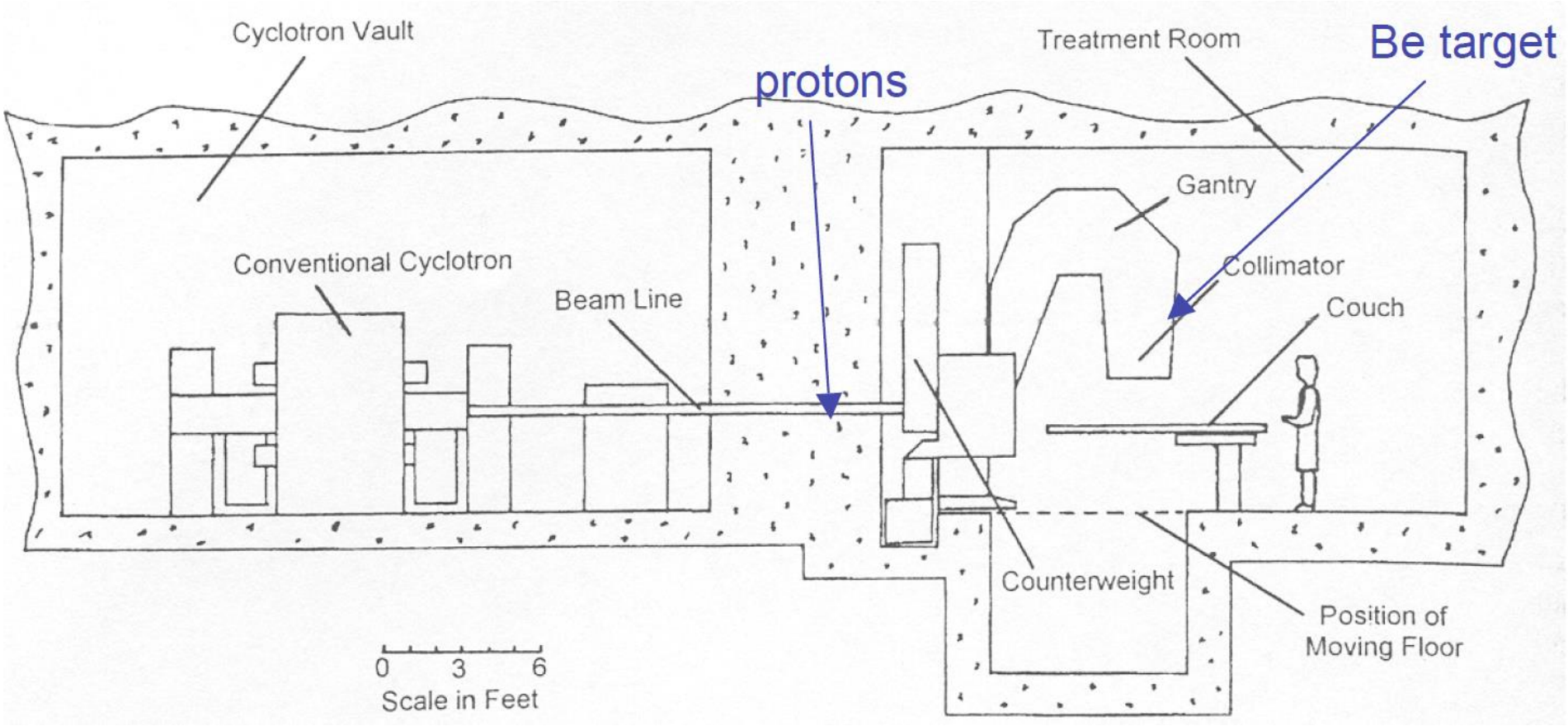
- Neutrons have a greater biologic impact on cells than other types of radiation, which do not damage all cells to the same extent.
- For the same amount of radiation, a lethal dose can be delivered to the cancer cells, while a sub-lethal dose is delivered to the healthy tissue surrounding the cancer.

p(66)Be(49) produces neutrons



[A. J. Lennox, Medical Applications of Accelerators, Sacramento AAPT/APS 2004]

Proton Accelerator for Neutron Therapy



Possible Future Applications

- Plasma Therapy
  - Assoc. Prof. Dr. Dheerawan BOONYAWAN
- Laser Wakefield Plasma Acceleration (LWPA)
  - LWPA combined with electrons or protons is possible to increase the effectiveness of irradiation on tumors and reduce side effects .
- Dielectric wall accelerators
  - Smaller high energy proton machine with pulse-to-pulse energy and intensity variation
- THz (T-ray) imaging & MIR/FIR/THz spectroscopy
  - Alternative technique for medical imaging and analysis

Medical Applications

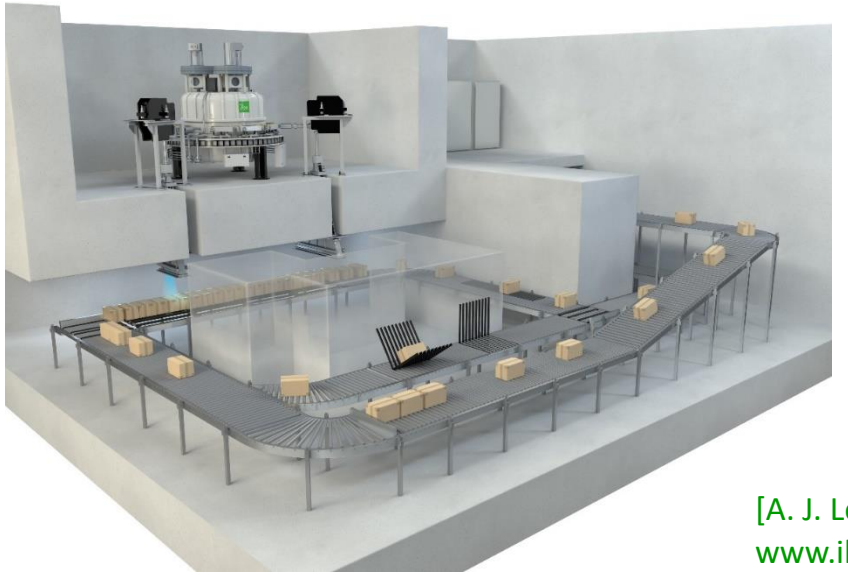
- Diagnostics
  - Isotope production
  - PET Scan, SPECT, CT Scan, MRI
- Treatments
  - X-ray, γ-ray radiotherapy
  - Photon/Electron beam therapy
  - Hadron therapy
    - Proton / Ion beam therapy
    - Neutron Therapy
  - Possible Future Applications
- Equipment sterilization

Medical Equipment Sterilization

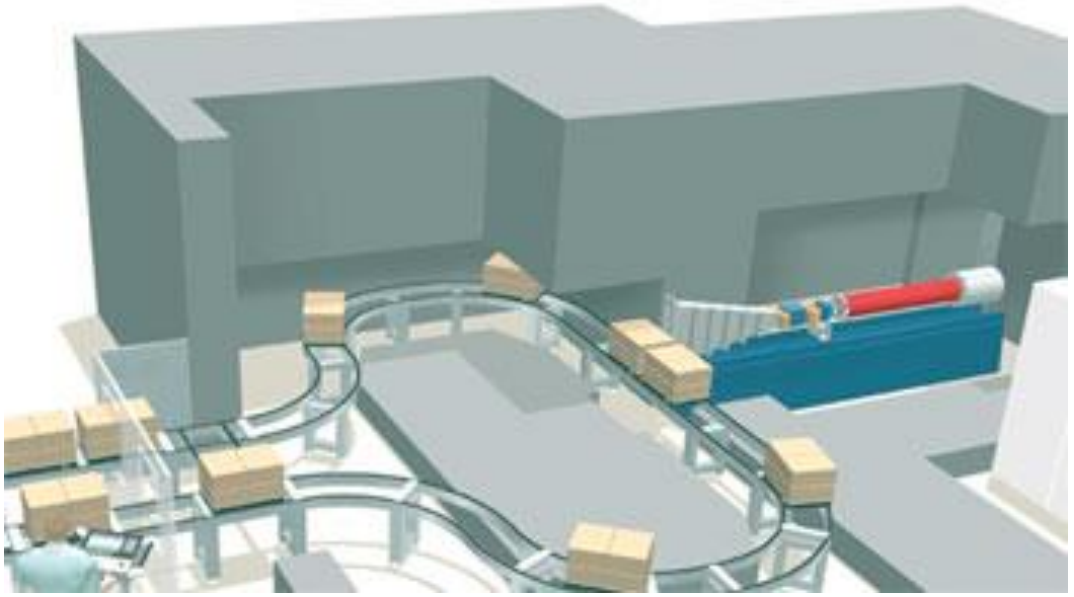
[www.ichtj.waw.pl/ichtj/market/m-eng/dep_07/medster.htm; www.dasheng.com/en/rhodotron-center.html]

X-ray Sterilization Using Electron Accelerators

DC accelerator



RF Linacs

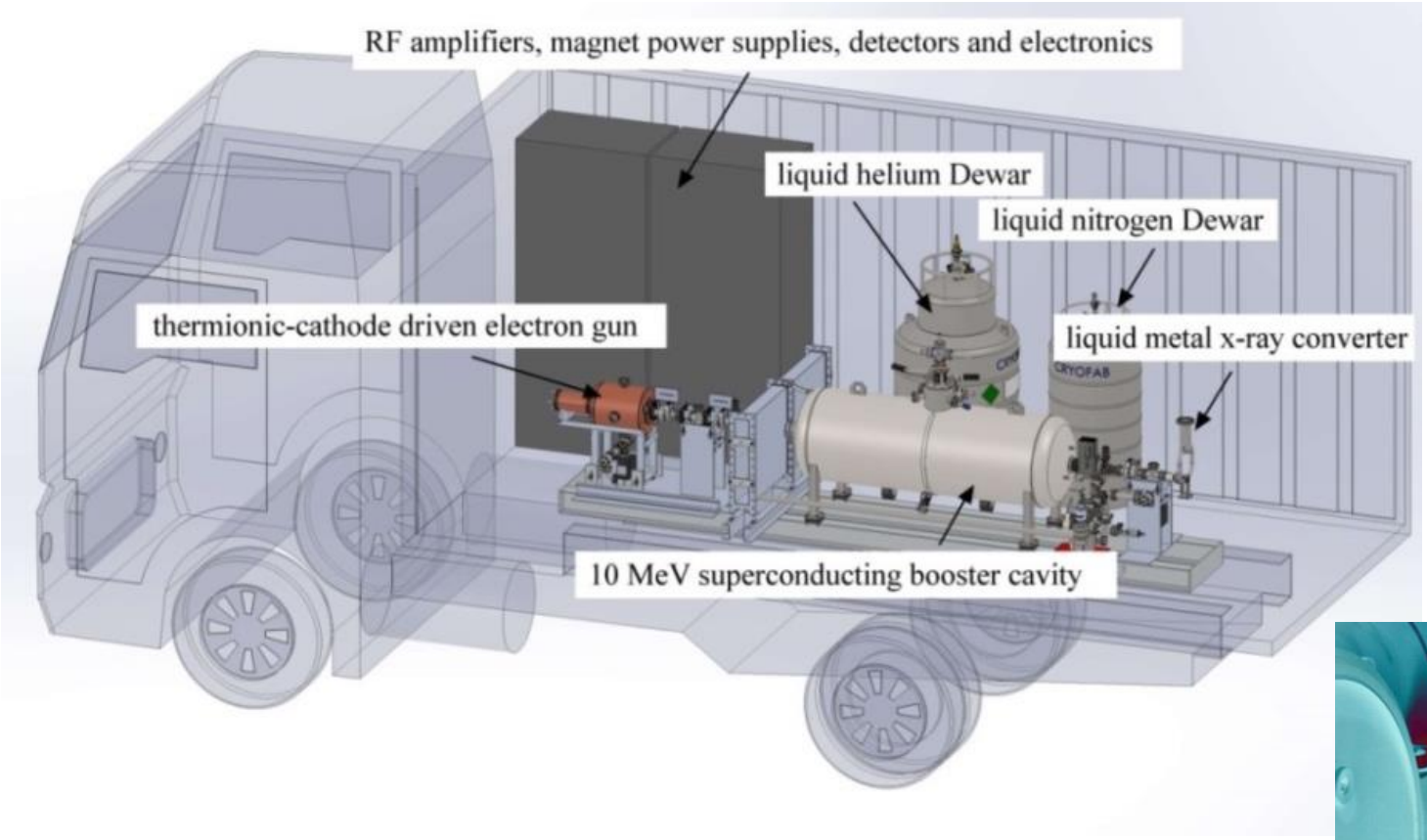


[A. J. Lennox, Medical Applications of Accelerators, Sacramento AAPT/APS 2004; www.iba-industrial.com/downloads/sterilization-of-medical-devices/17]

[http://medicaldesign.com/contract-manufacturing/electron-beam-sterilization-more-versatile-you-think]

Mobile Sterilization System

Compact portable scanning system based on a superconducting CW electron linac.



[http://www.niowaveinc.com/index.php/products/x-ray-sources/]

การประยุกต์ใช้เครื่องเร่งอนุภาคทางด้านวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม

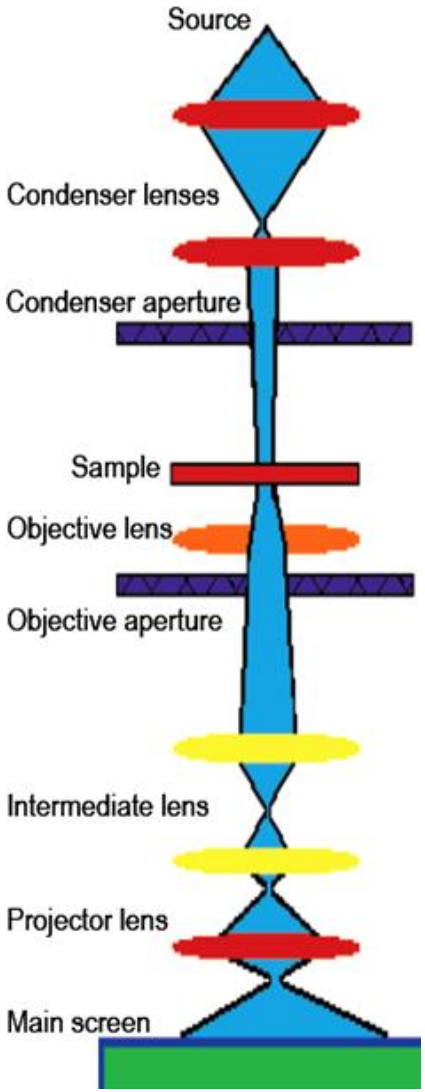
- Electron microscope
- Ion implantation
- Electron beam irradiators
- Ion beam analysis
- High energy x-ray inspection
- Neutron generators
- Synchrotron radiation

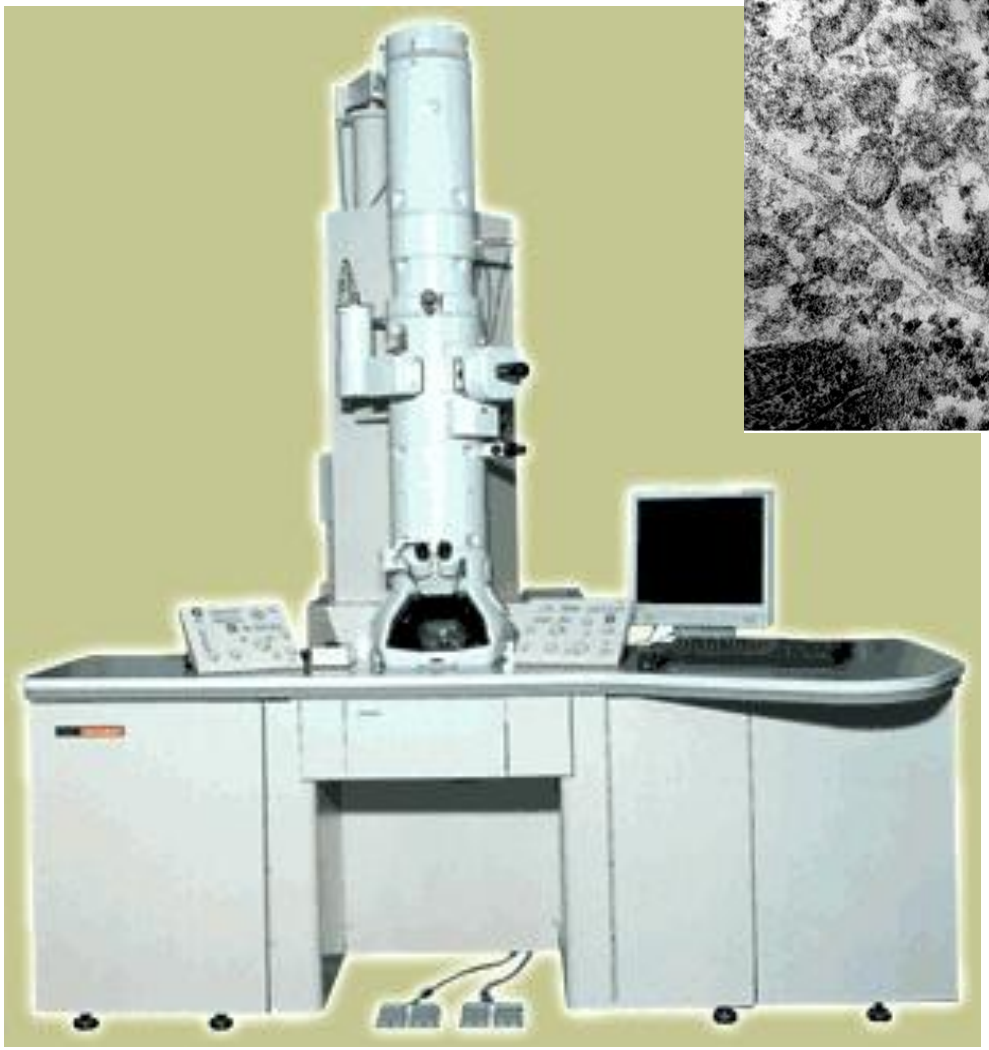
เครื่องเร่งขนาดเล็ก

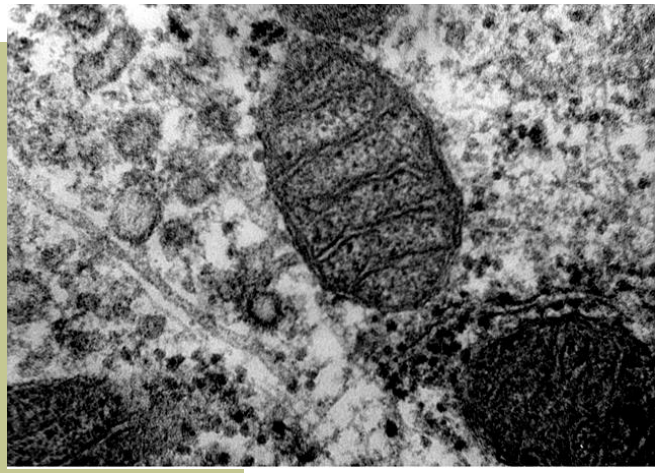
เครื่องเร่งขนาดใหญ่

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron microscope)

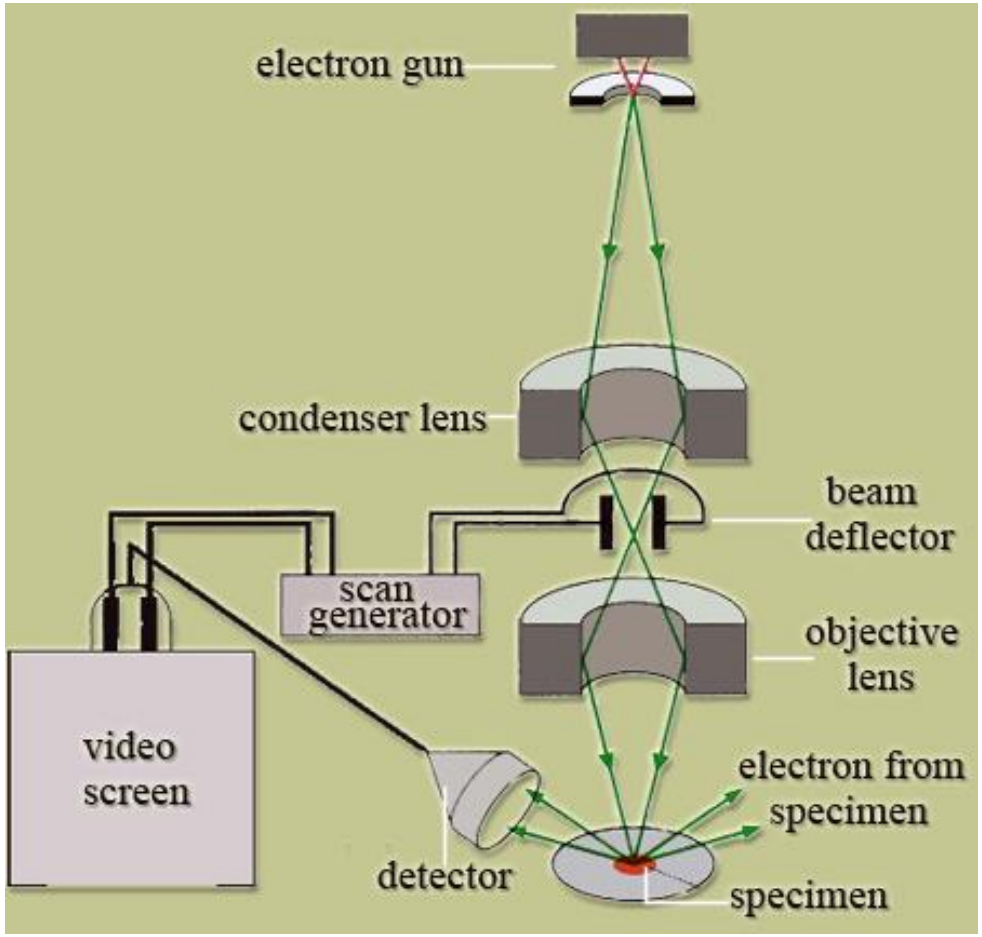
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope หรือ TEM)

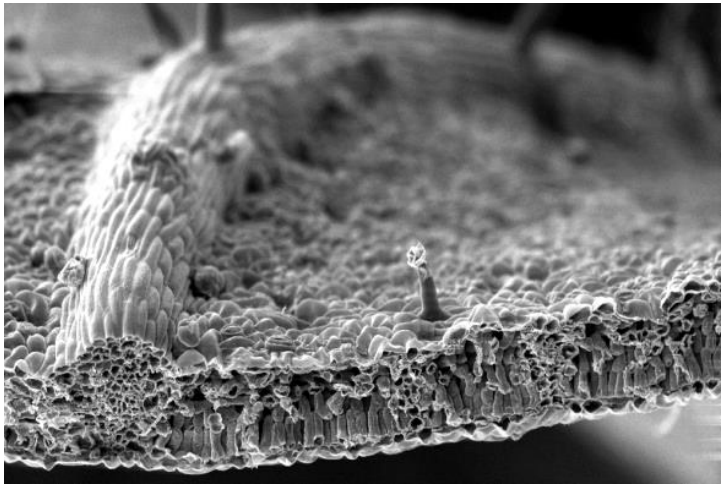






กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (Scanning Electron Microscope หรือ SEM)





การฝังไอออน (Ion implantation)

การฝังไอออน คือกระบวนการฝังไอออนลงบนผิววัสดุ เพื่อเป็นการปรับปรุงให้ผิววัสดุมีสมบัติกายภาพดีขึ้น

Semiconductors

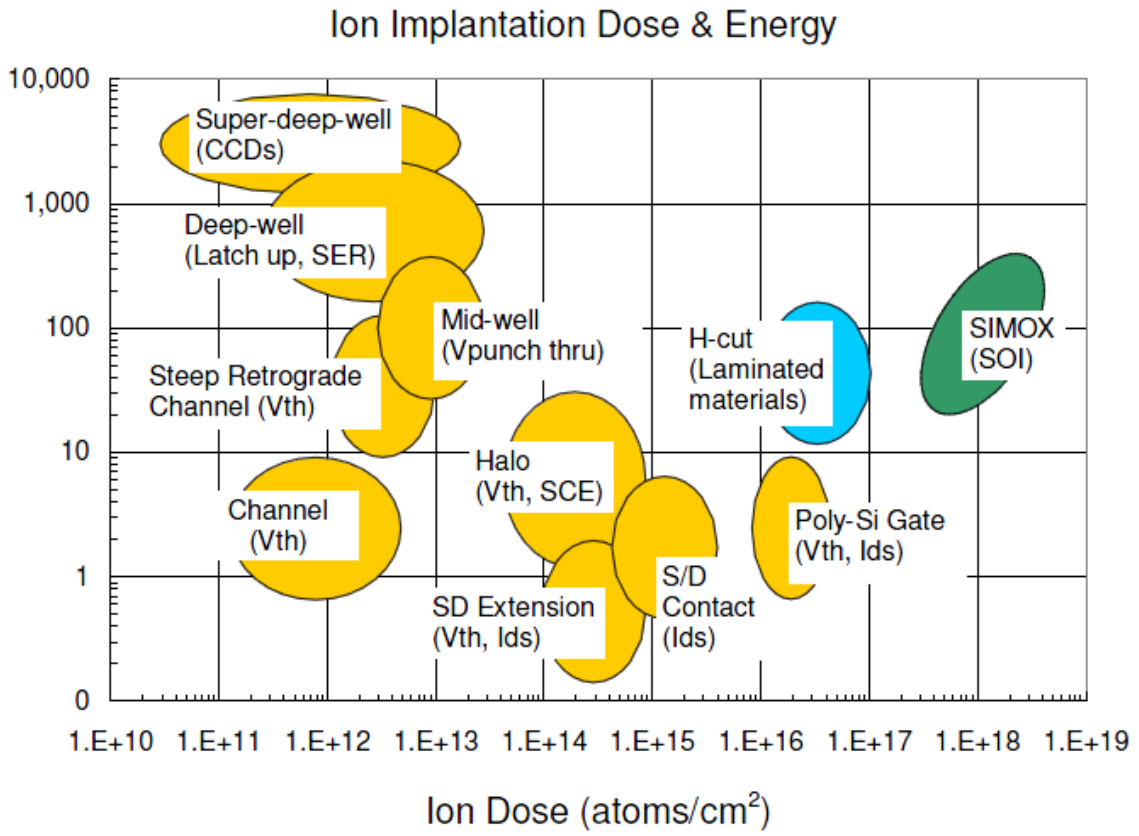
- CMOS fabrication
- SIMOX
- Cleaving silicon
- MEMS

Metals

- Harden cutting tools
- Artificial human joints

Ceramics & glasses

- Harden surfaces
- Modify optics



CMU Nitrogen Ion Implanter

Varian Ion Implanter

ตารางที่ 7.2 ผลของการเคลือบฝังไอออนไนโตรเจนที่มีต่ออายุการใช้งานของชิ้นส่วน

งาน	วัสดุ	อายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้นและผลประโยชน์ด้านอื่น
แม่พิมพ์สำหรับตอก	D2 เหล็กกล้าทำเครื่องมือ	3 เท่า
เครื่องตัดกระดาษ	1.6%Cr,1%Cเหล็กกล้า	2 เท่า
เครื่องตัดยางสังเคราะห์	WC-6% Co	12 เท่า
เครื่องมือสำหรับขึ้นรูป	12% Cr, 2% เหล็กกล้า	ลดการสึกหรอ
เครื่องตัดพลาสติก	เครื่องตัดหัวเพชร	2-4 เท่า
สว่านเจาะฟัน	WC-Co	2-7 เท่า,ลดแรงที่ใช้ในการตัด
เครื่องตอกและเครื่องเจาะชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์	WC-15% Co	มากกว่า 2 เท่า
แม่พิมพ์สำหรับเครื่องอัดและเครื่องฉีดพลาสติก	P-20เหล็กกล้าทำเครื่องมือ	4 เท่า
แม่พิมพ์เครื่องตัดด้าย	M2 เหล็กกล้าพิเศษ	5 เท่า
ใบมีดตัดแผ่นเหล็ก	WC-Co	มากกว่า 3 เท่า, ลดการบิ่น

การวิเคราะห์ด้วยลำไอออน(Ion beam analysis)

- **Techniques**
  - Rutherford Back Scattering (RBS)
  - Elastic Recoil Detection Analysis (ERDA)
  - Nuclear Reaction Analysis (NRA)
  - Particle Induced X-ray Emission (PIXE)
  - Particle Induced Gamma ray Emission (PIGE)
  - Nuclear Resonance Reaction Analysis (NRRA)
  - Resonant Scattering Analysis (RSA)
  - Charged Particle Activation Analysis (CPAA)
  - **Accelerator Mass Spectrometry (AMS)**

- **Vendors**
  - National Electrostatic Corp. (USA)
  - High Voltage Engineering Europa (Netherlands)

Applications

- Semiconductor quality
- Environmental monitoring
- Geological studies
- Oceanography studies
- Biomedical science

เครื่องเร่งแทนแดม (Tandem accelerator) @ CMU

เครื่อง 1.7 MV Tandem " Tandetron " Accelerator ของศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมาและลำอนุภาค มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

- Rutherford Backscattering Spectrometry (RBS)
- Proton Induced X-ray Emission (PIXE)

การอาบด้วยลำอิเล็กตรอน / รังสีจากอิเล็กตรอน ในภาคอุตสาหกรรม

- การฆ่าเชื้อ (Sterilization) ในผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ เช่น เข็มฉีดยา ถุงมือ
- การอาบรังสีจากลำอิเล็กตรอนบนอาหารและผักผลไม้เพื่อถนอมอายุ หรือกำจัดแมลง
- การอาบรังสีจากลำอิเล็กตรอนบนพลอยเพื่อเปลี่ยนสีของพลอย
- กระบวนการเชื่อมปฏิพันธ์ (cross-linking) ในวัสดุ โดยการใช้ลำอิเล็กตรอนอาบทำยางหรือโพลิเมอร์โดยไม่ต้องใส่กำมะถัน

Cross linking applications

Product	Applications
Cross-linked polyethylene(PE) and PVC	Heat and chemical-resistant wire insulation; pipes for heating systems
Cross-linked foam polyethylene	Insulation, packing and flotation material
Cross-linked rubber sheet	High quality automobile tires
Cross-linked polyurethane	Cable insulation
Cross-linked nylon	Heat and chemical resistant auto parts
Heat resistant SiC fibers	Metal and ceramic composites
Vulcanized rubber latex	Surgical gloves and finger cots
Cross-linked hydrogel	Wound dressings
Acrylic acid grafted PE film	Battery separators
Grafted polyethylene fiber	Deodorants
Curing of paints and inks	Surface coating and printing

Natural Rubber Vulcanization with Electron Beam @ CMU