

MÁY GIA TỐC

GIỚI THIỆU



PHƯƠNG THỨC HỌC

- ➡ BÀI TẬP : 20%
- ➡ BÁO CÁO: 30%
- ➡ CUỐI KỲ : 50%

GIỚI THIỆU

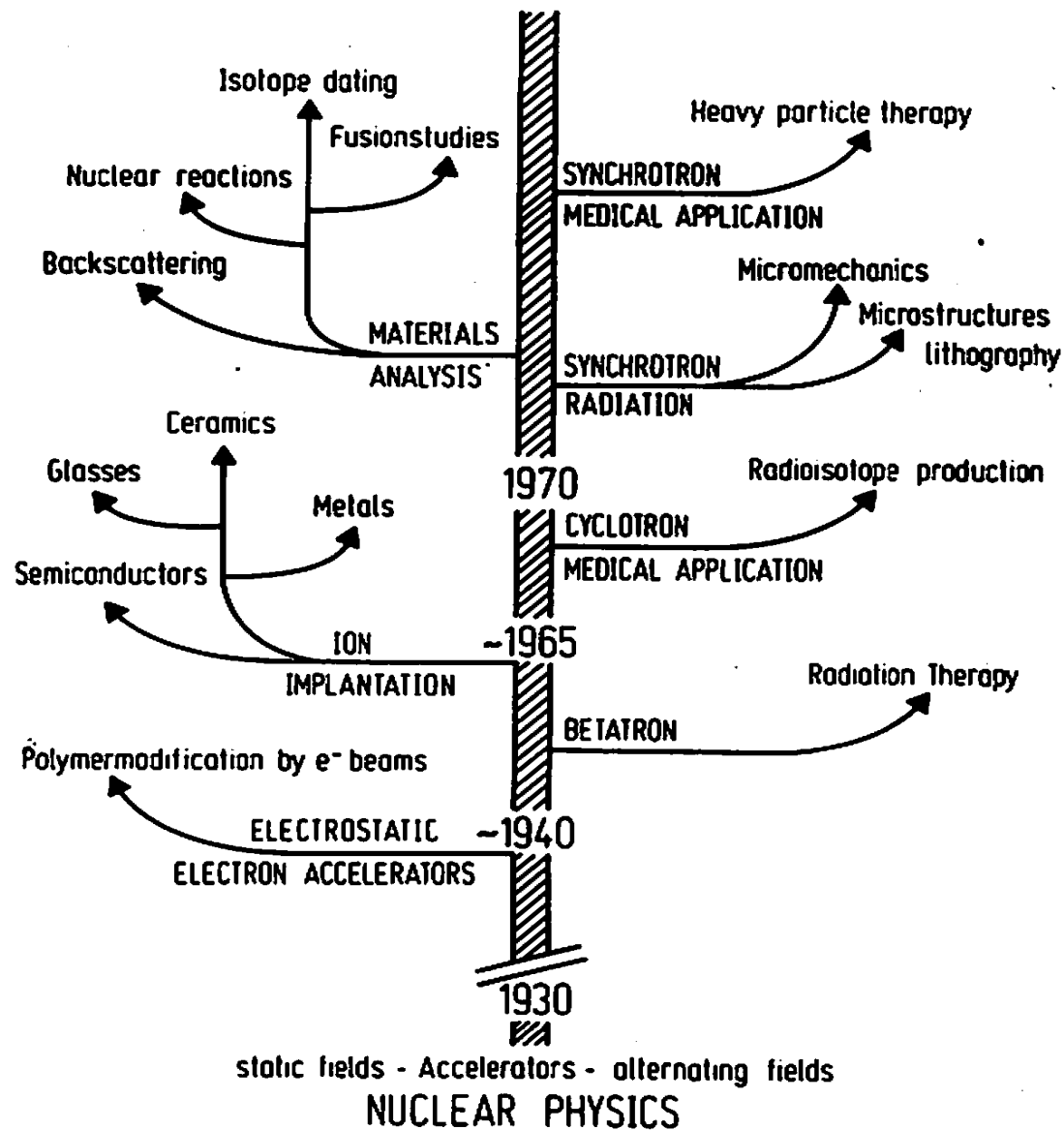


Fig. 1 The branching of accelerators into applications

GIỚI THIỆU

Chùm hạt năng lượng cao không những được sử dụng trong những nghiên cứu cơ bản và ứng dụng mà còn được sử dụng trong những lĩnh vực kỹ thuật và công nghệ khác.

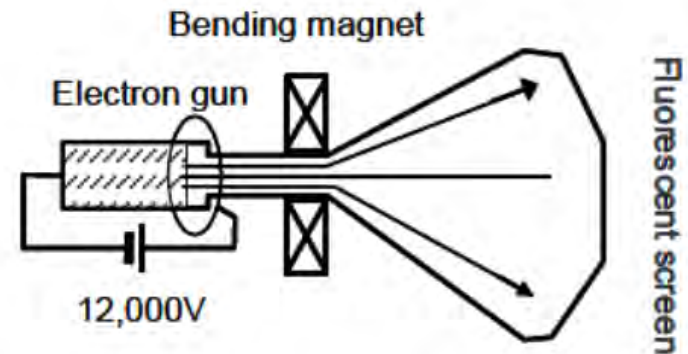
Trên thế giới có khoảng 26.000 máy gia tốc. Trong các máy này chỉ có **1% máy** có năng lượng **trên 1GeV** dùng trong các nghiên cứu, khoảng 44% máy gia tốc dùng trong điều trị, khoảng 41% máy dùng trong việc cấy ion, khoảng 9% máy dùng trong các quy trình công nghiệp và nghiên cứu, và khoảng 4% máy dùng cho y sinh và các nghiên cứu năng lượng thấp

PHÂN LOẠI MÁY GIA TỐC

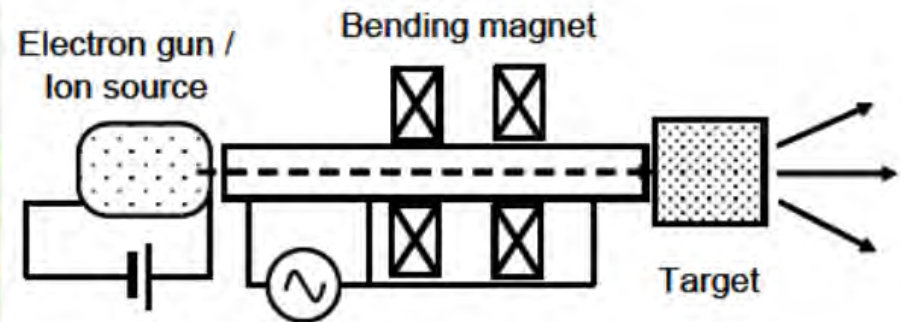
Theo cơ chế gia tốc:
có hai loại

- **Gia tốc tĩnh điện** (dùng trong các nghiên cứu năng lượng thấp khoảng 30MV).

- **Gia tốc bởi trường dao động** (rf, sóng điện từ). Trong gia tốc tĩnh điện, khi tăng điện thế đến một giá trị nào đó sẽ tạo ra sự phóng điện nên để gia tốc hạt đạt đến một năng lượng cao hơn chúng ta cần phải dùng đến kỹ thuật gia tốc dùng trường dao động rf. Cơ chế gia tốc rf được dùng cho gia tốc tuyến tính lẫn gia tốc vòng.



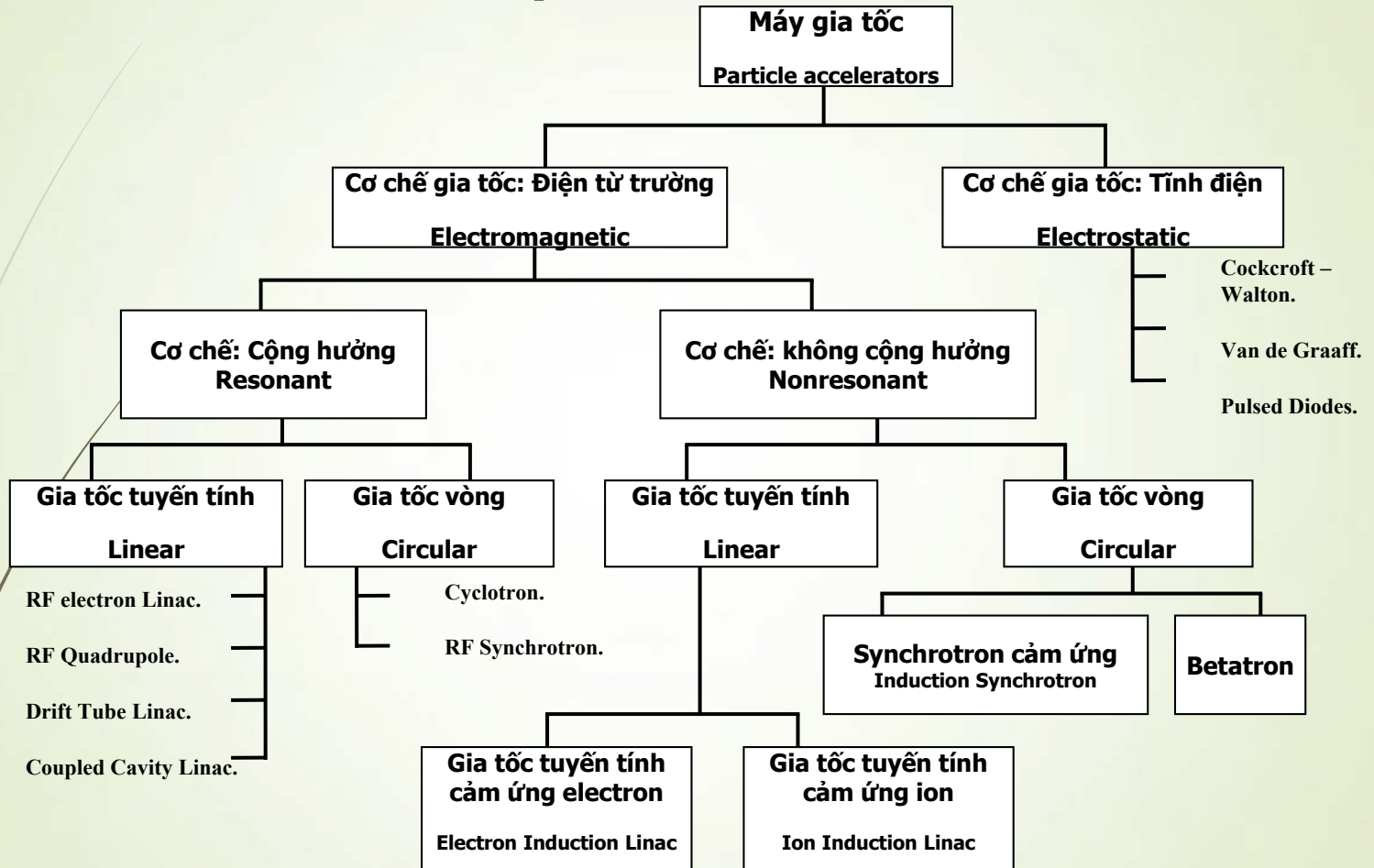
(a) Cathode ray tube (TV set)



(b) Accelerator

Thuật ngữ máy gia tốc hạt thường dùng cho các máy gia tốc hạt có năng lượng trên 1MeV

CÁC LOẠI MÁY GIA TỐC



**MÁY GIA TỐC
TUYẾN TÍNH**

MÁY GIA TỐC TĨNH ĐIỆN

1. Cockcroft Walton
2. Van de Graaff
3. Tandem

**MÁY GIA TỐC
VÒNG**

MÁY GIA TỐC RF

4. Linac
5. Cyclotron
6. Betatron
7. Synchrotron
8. Synchrocyclotron
9. Storage ring (VÒNG LƯU TRỮ)
10. Fixed-Field Alternating Gradient accelerator (FFAG)
11. Microtron

1- Máy gia tốc Cockcroft Walton (gia tốc DC).

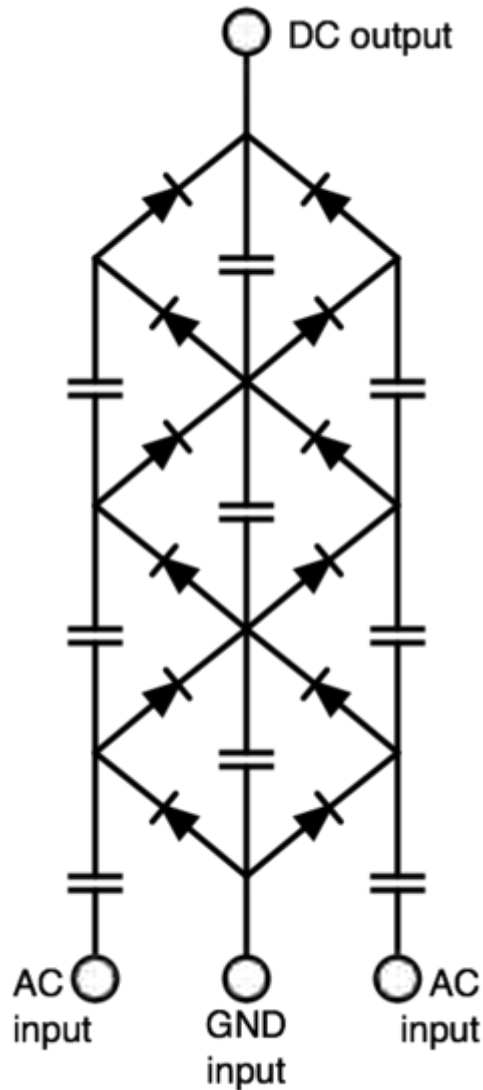
The Cockcroft–Walton (CW) generator, or multiplier, is an electric circuit which generates a high DC voltage from a low voltage AC or pulsing DC input. It was named after British physicists John Douglas Cockcroft and Ernest Thomas Sinton Walton, who in 1932 used this circuit design to power their particle accelerator, performing the first artificial nuclear disintegration in history. They used this voltage multiplier cascade for most of their research, which in 1951 won them the Nobel Prize in Physics for "Transmutation of atomic nuclei by artificially accelerated atomic particles". Less well known is the fact that the circuit was discovered much earlier, in 1919, by Heinrich Greinacher, a Swiss physicist. For this reason, this doubler cascade is sometimes also referred to as the **Greinacher multiplier**. Today Cockcroft-Walton circuits are still used in particle accelerators, but also in many everyday electronic devices that require high voltages, such as x-ray machines, television sets, and photocopiers.

Máy gia tốc CW hay máy phát CW là mạch điện khuếch đại cao thế một chiều DC từ nguồn điện thế xoay chiều thấp. Máy được đặt tên theo hai nhà vật lý người Anh, John Douglas Cockcroft và Ernest Thomas Sinton Walton. Vào năm 1932 hai nhà vật lý này đã tạo ra nguồn cấp cao thế cho máy gia tốc của họ trong thí nghiệm bắn phá hạt nhân nhân tạo đầu tiên trong lịch sử.



This Cockcroft–Walton voltage multiplier was part of one of the early particle accelerators responsible for development of the atomic bomb. Built in 1937 by Philips of Eindhoven it currently resides in the National Science Museum in London, England

Design



Cấu tạo của CW

CW được cấu tạo từ các tụ điện và diod theo sơ đồ như hình bên. Điện thế qua mỗi tầng sẽ tăng theo chu kỳ chỉnh lưu dòng điện. Nếu muốn có điện thế đầu ra cao thì cần phải tăng số tầng khuếch đại lên

MÁY GIA TỐC VAN DE GRAAFF LÀ GÌ?

- ✗ Là máy có thể gia tốc cả hạt nặng lẫn nhẹ (ion, proton, e, ...).
- ✗ Gia tốc tuyến tính (hạt chuyển động theo quỹ đạo thẳng).
- ✗ Gia tốc tĩnh điện.
- ✗ Máy gia tốc không tương đối tính (vận tốc của hạt gia tốc nhỏ hơn so với vận tốc ánh sáng).



Máy gia tốc Van de Graaff tại JRC-IRMM

- ✗ Máy gia tốc Van de Graaff được phát triển vào đầu những năm 1930 .
- ✗ Máy gia tốc hoạt động dựa trên nguyên tắc máy phát điện Van de Graaff được phát minh vào 1929 bởi nhà vật lý người Mỹ Robert J Van de Graaff.



Robert J Van de
Graaff (1901-1967)

Feb. 12, 1935.

R. J. VAN DE GRAAFF

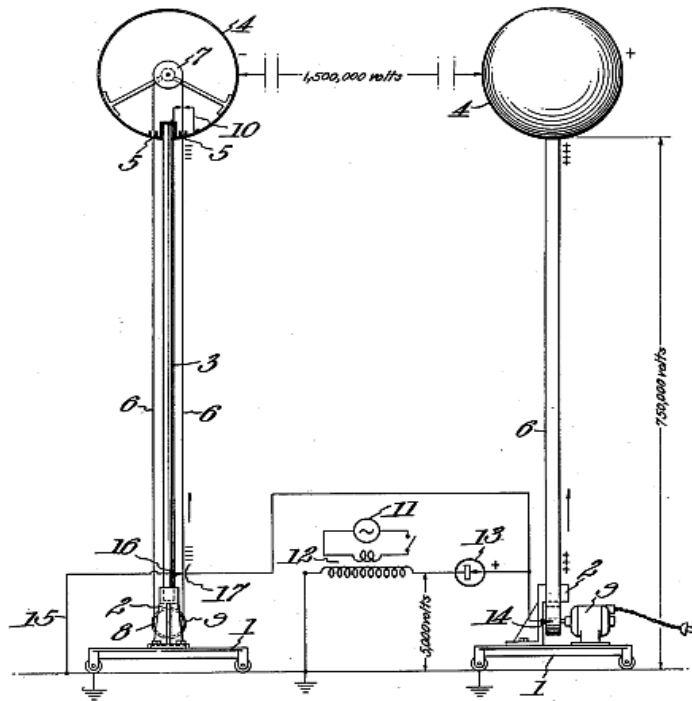
1,991,236

ELECTROSTATIC GENERATOR

Filed Dec. 16, 1931

4 Sheets-Sheet 1

Fig. 1.



Inventor:

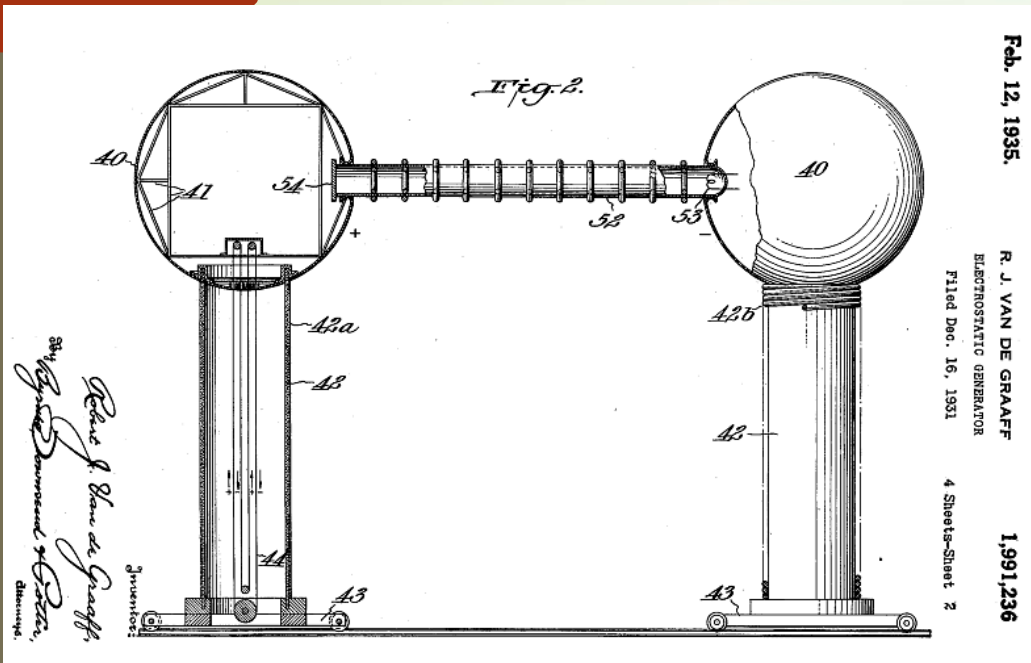
Robert J. Van de Graaff,

By Cyrus D. Dornand & Co.,
Attorneys.

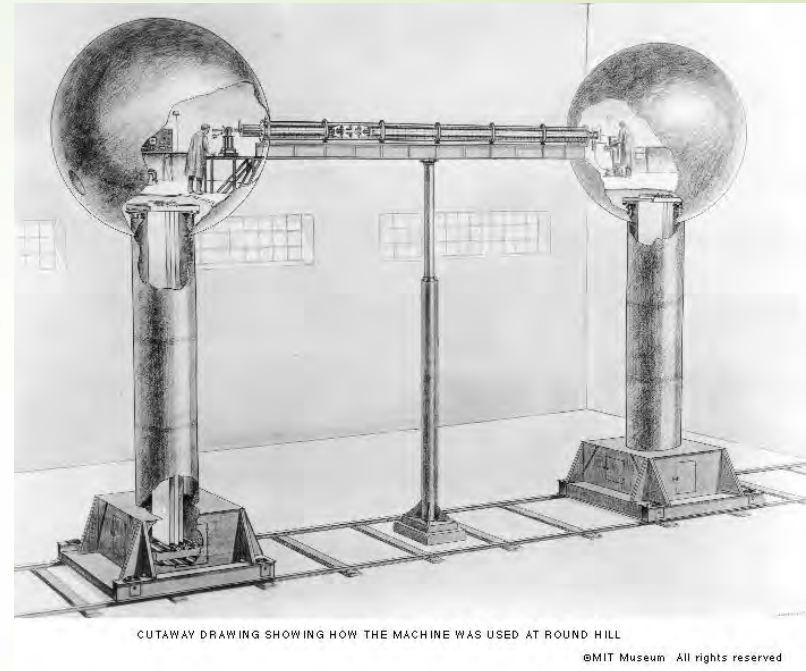


Mô hình máy phát Van de Graaff được xây dựng tại MIT

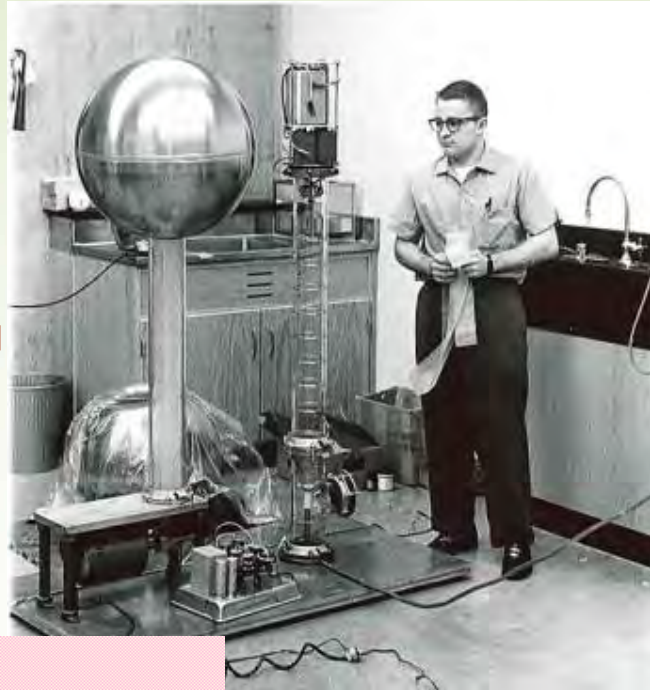
Bản vẽ máy phát Van de Graaff vào năm 1929



Bản thảo đầu tiên về máy gia tốc Van de Graaff trong bằng sáng chế của Robert J Van de Graaff vào năm 1931



Bản vẽ máy gia tốc Van de Graaff có hai quả cầu được xây dựng tại Round Hill năm 12/12/1933

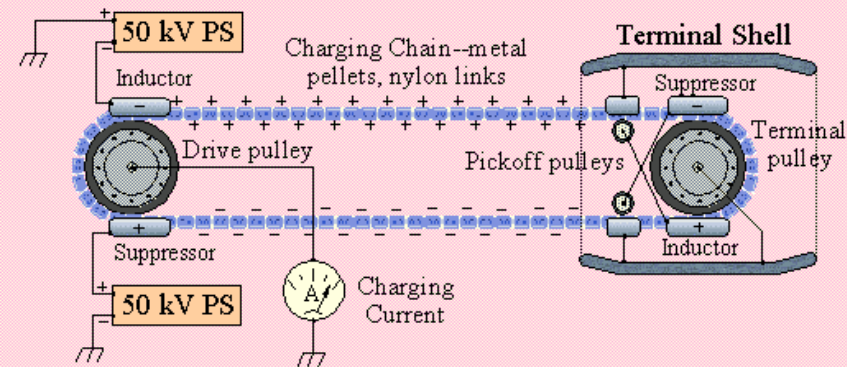


Máy gia tốc Van de Graaff dùng gia tốc proton tại đại học Western Washington, Bellingham.

Cải tiến dây đai

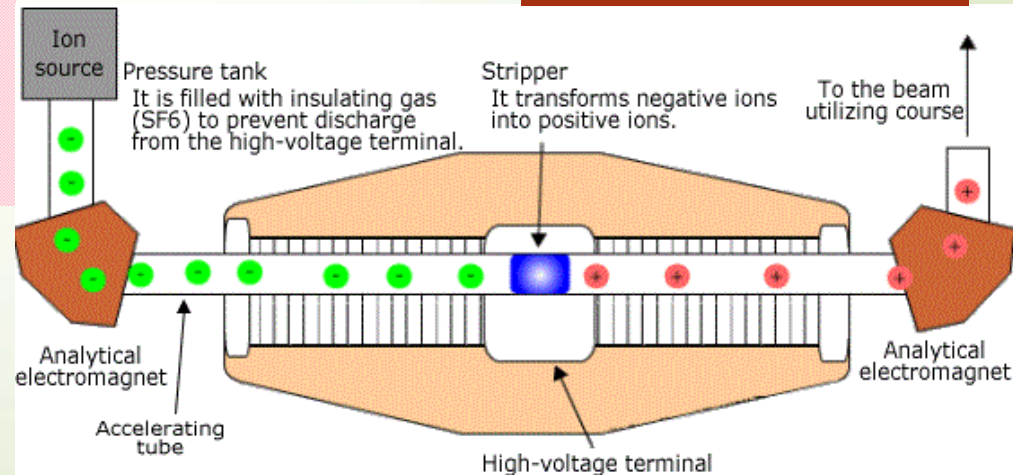
Máy gia tốc Pelletron

Pelletron Charging System
(Positive configuration shown)

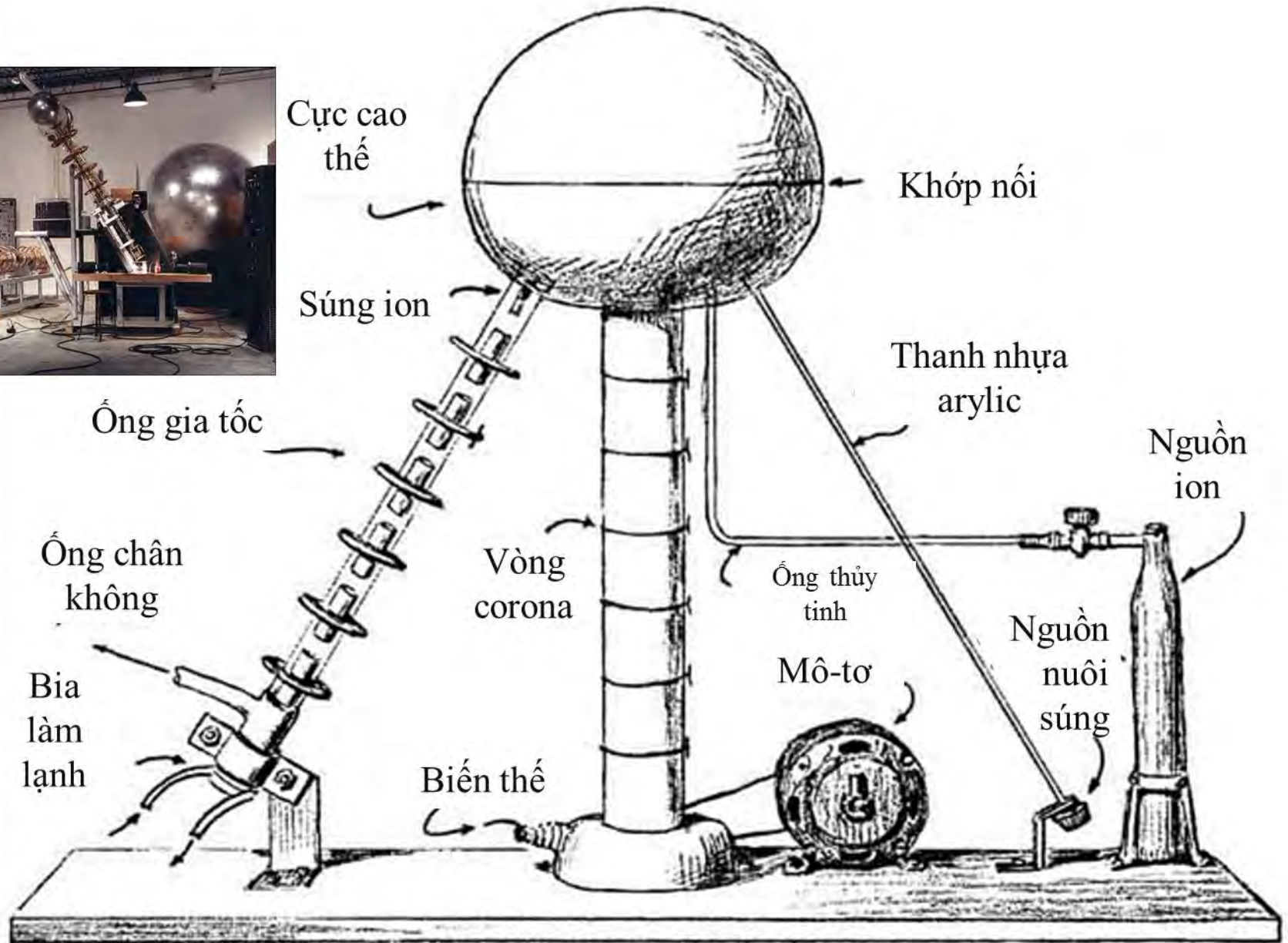


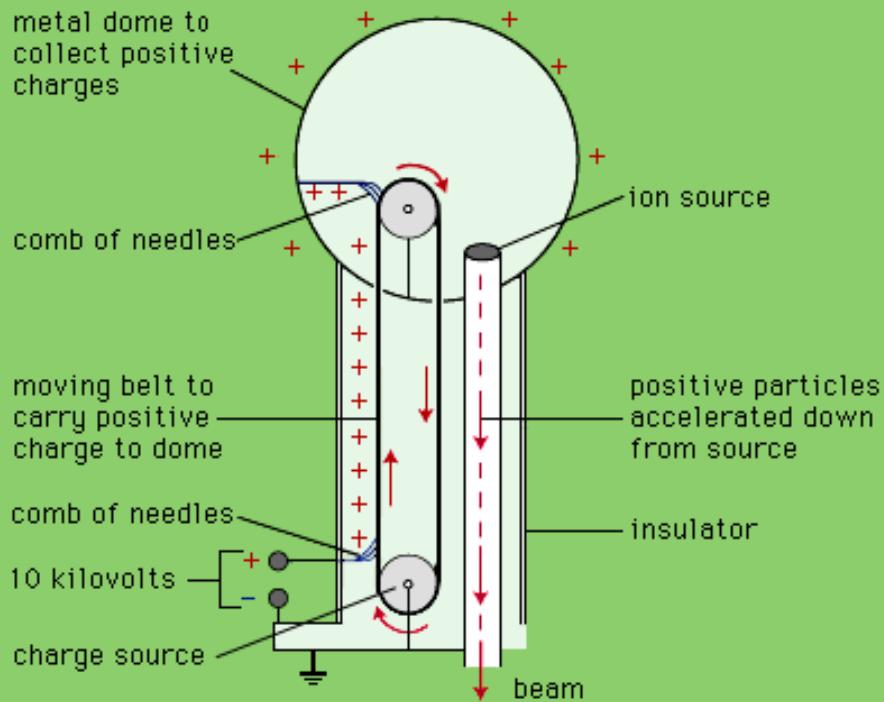
Có thêm bộ lọc

Máy gia tốc Tandem



2.SƠ ĐỒ NGUYÊN LÝ THIẾT KẾ

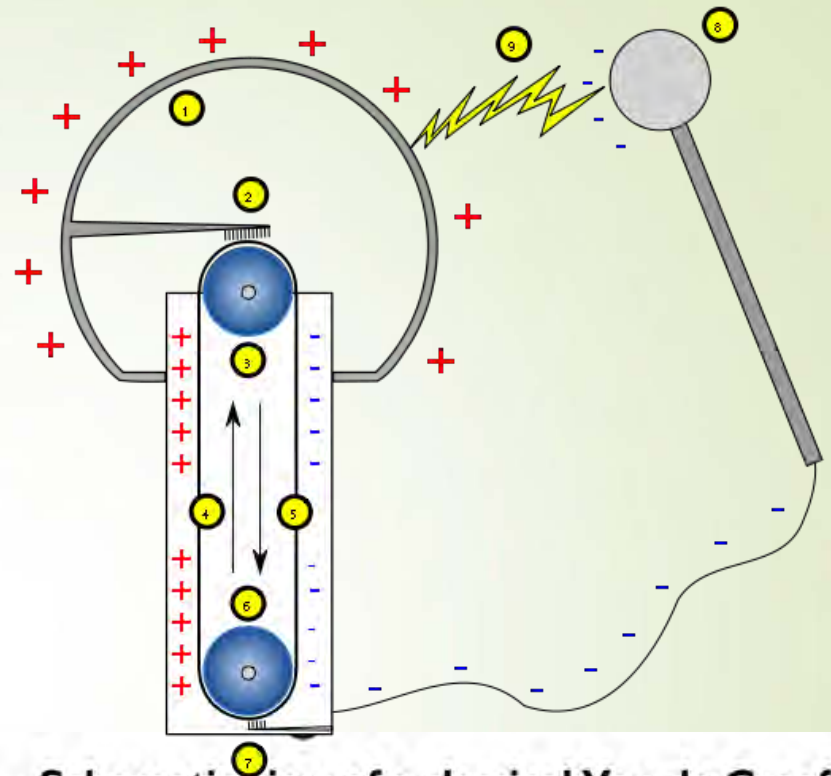




©1995 Encyclopaedia Britannica, Inc.

Sơ đồ máy phát Van de Graaff-generator.

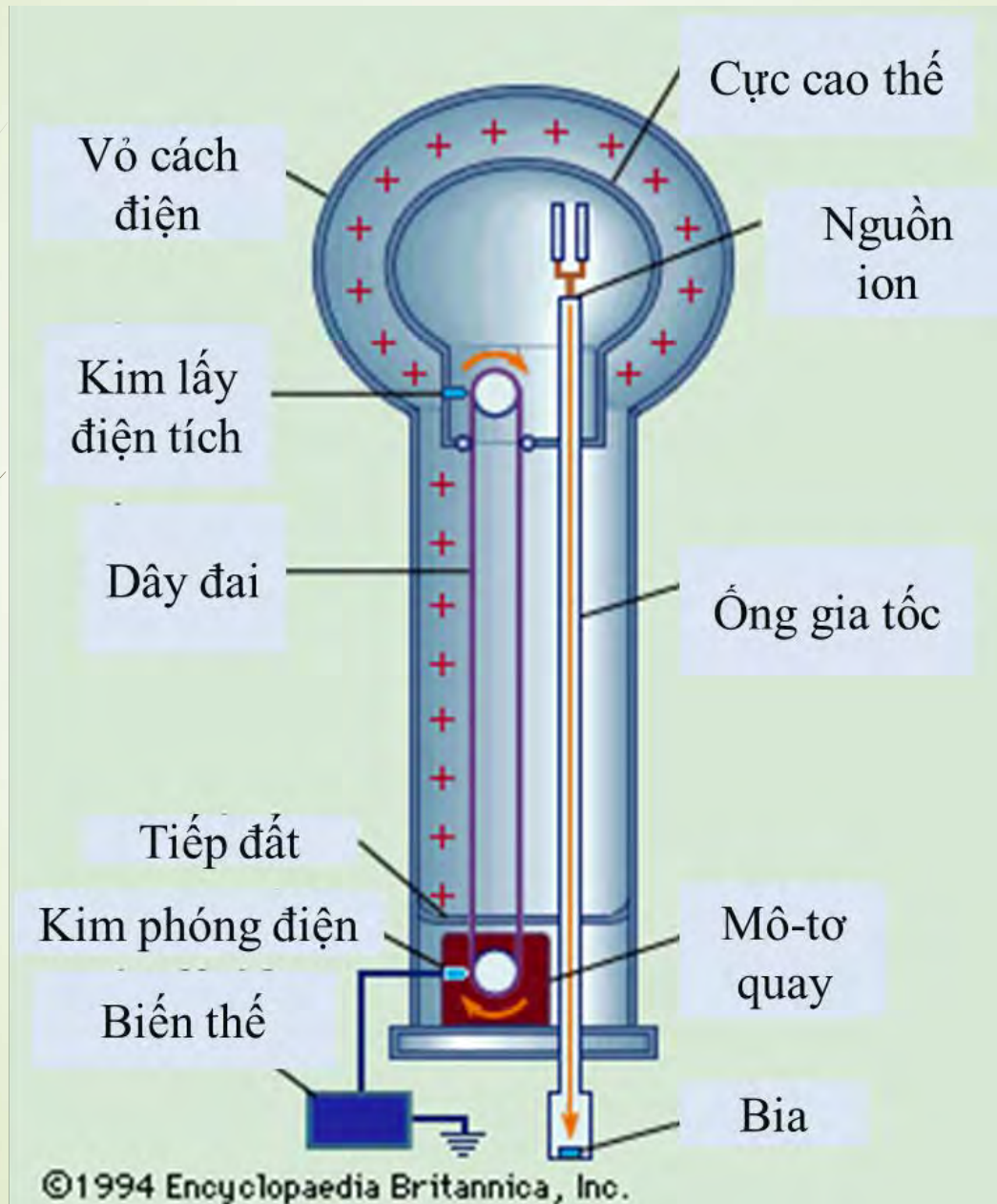
- 1) Quả cầu kim loại rỗng
- 2) Điện cực trên
- 3) Trục lăn trên (chất liệu kim loại)
- 4) Mặt dây đai tích điện dương
- 5) Mặt dây đai tích điện âm
- 6) Trục lăn dưới (chất liệu kính acrylic)
- 7) Điện cực dưới (nối đất)
- 8) Thiết bị hình cầu mang điện tích âm dùng để xả điện cho quả cầu kim loại
- 9) Sự phóng điện do sự chênh lệch điện thế.



Schematic view of a classical Van de Graaff-generator.

- 1) hollow metal sphere
- 2) upper electrode
- 3) upper roller (metal)
- 4) side of the belt with positive charges
- 5) opposite side of the belt with negative charges
- 6) lower roller (for example an acrylic glass)
- 7) lower electrode (ground)
- 8) spherical device with negative charges, used to discharge the main sphere
- 9) spark produced by the difference of potentials

✖ Bộ phận tạo cao thế để dùng gia tốc hạt:

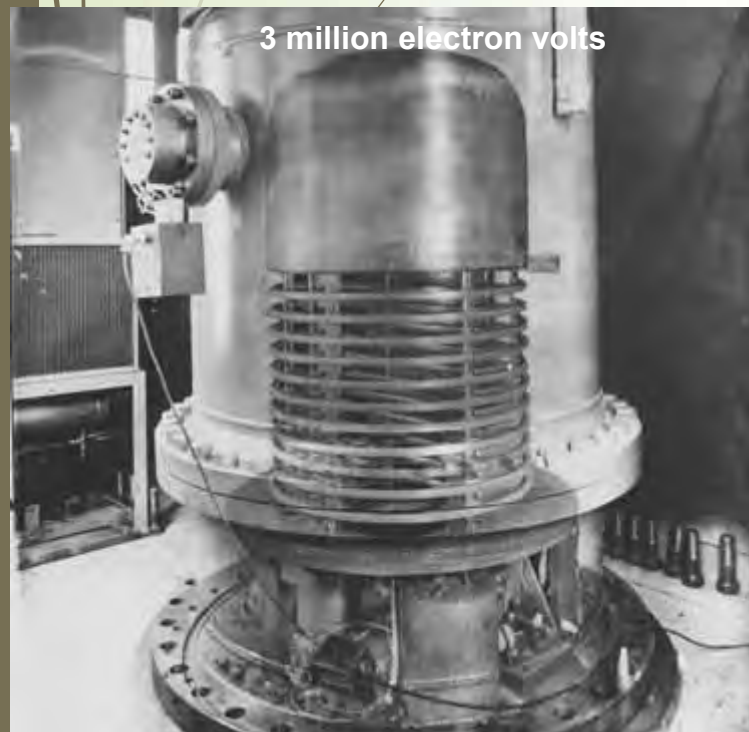


Hạn chế của quá trình tích điện ở quả cầu.





A 1960s single stage 2 MeV linear Van de Graaff accelerator, here opened for maintenance

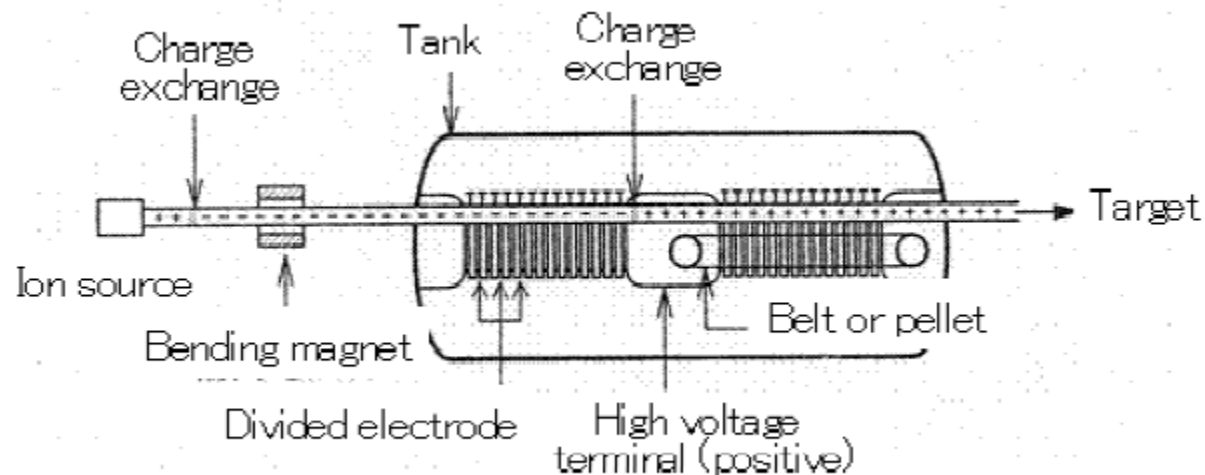


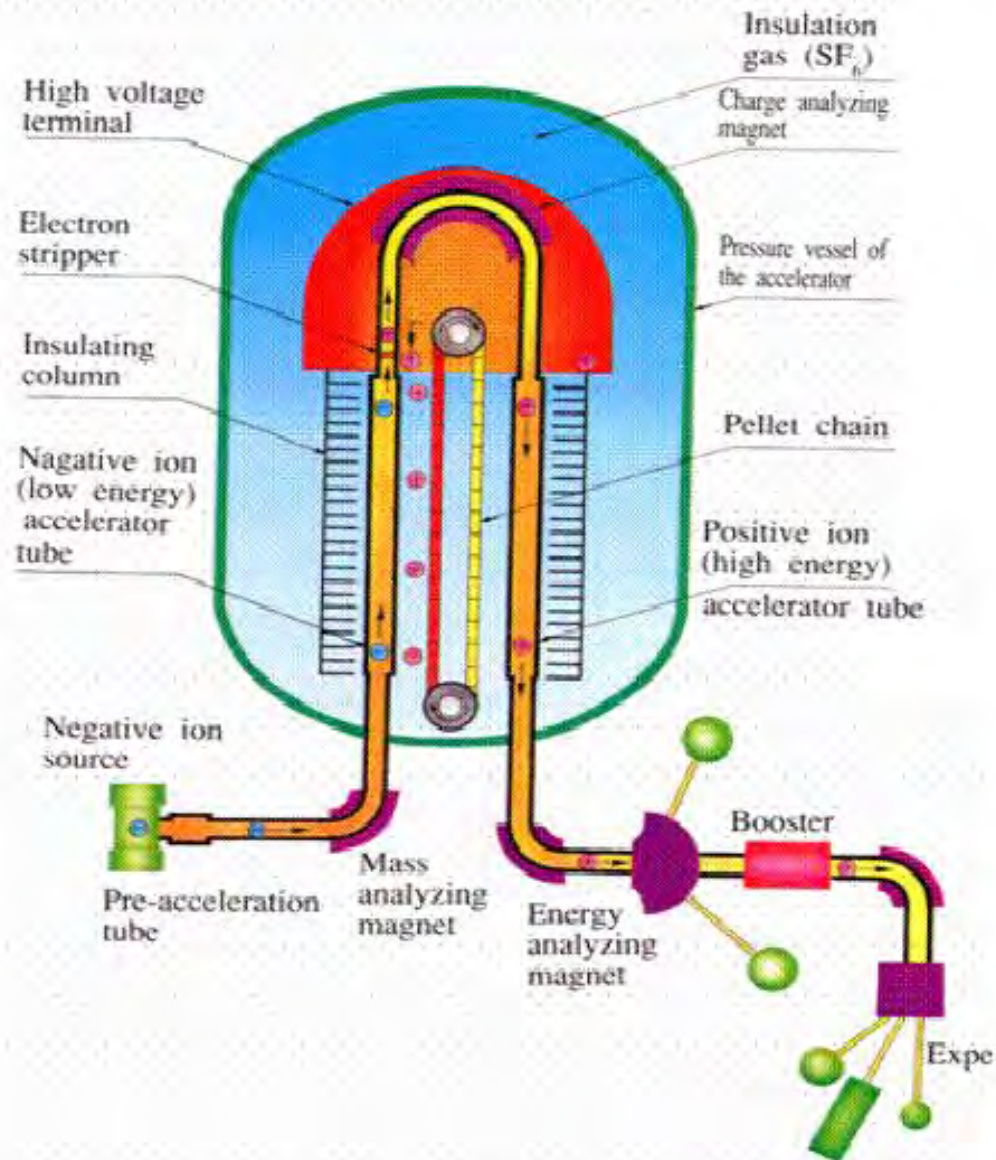
3- Máy gia tốc Tandem (gia tốc DC).

Cơ chế hoạt động giống như máy gia tốc Van de Graaff

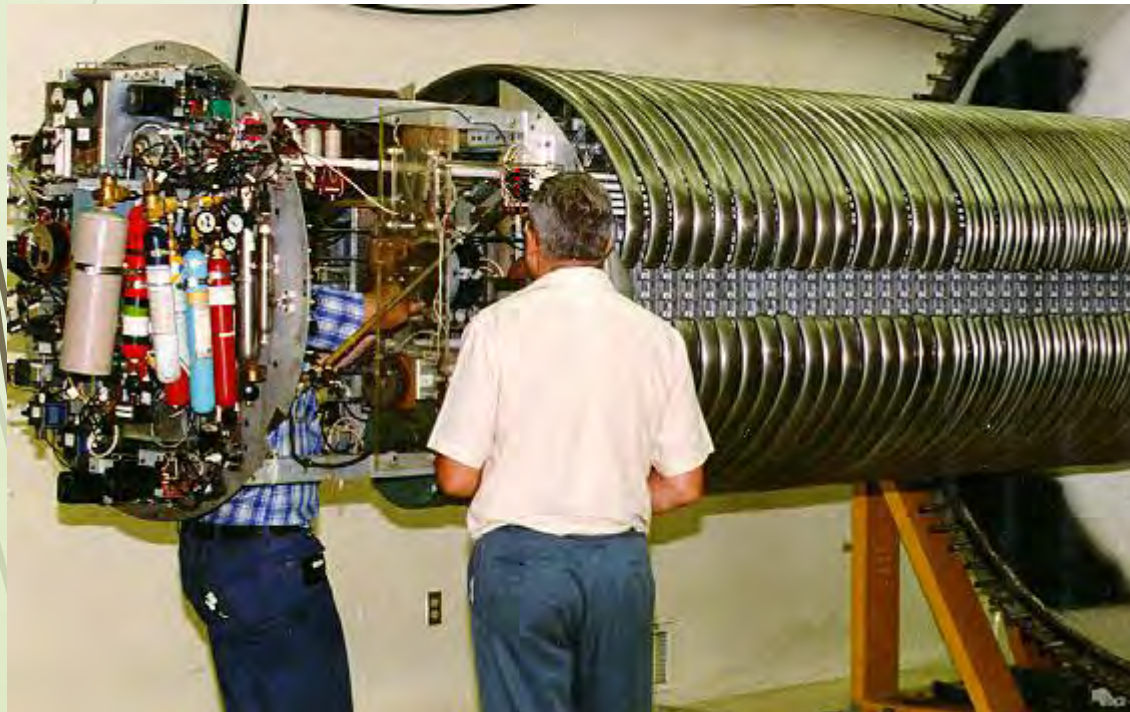
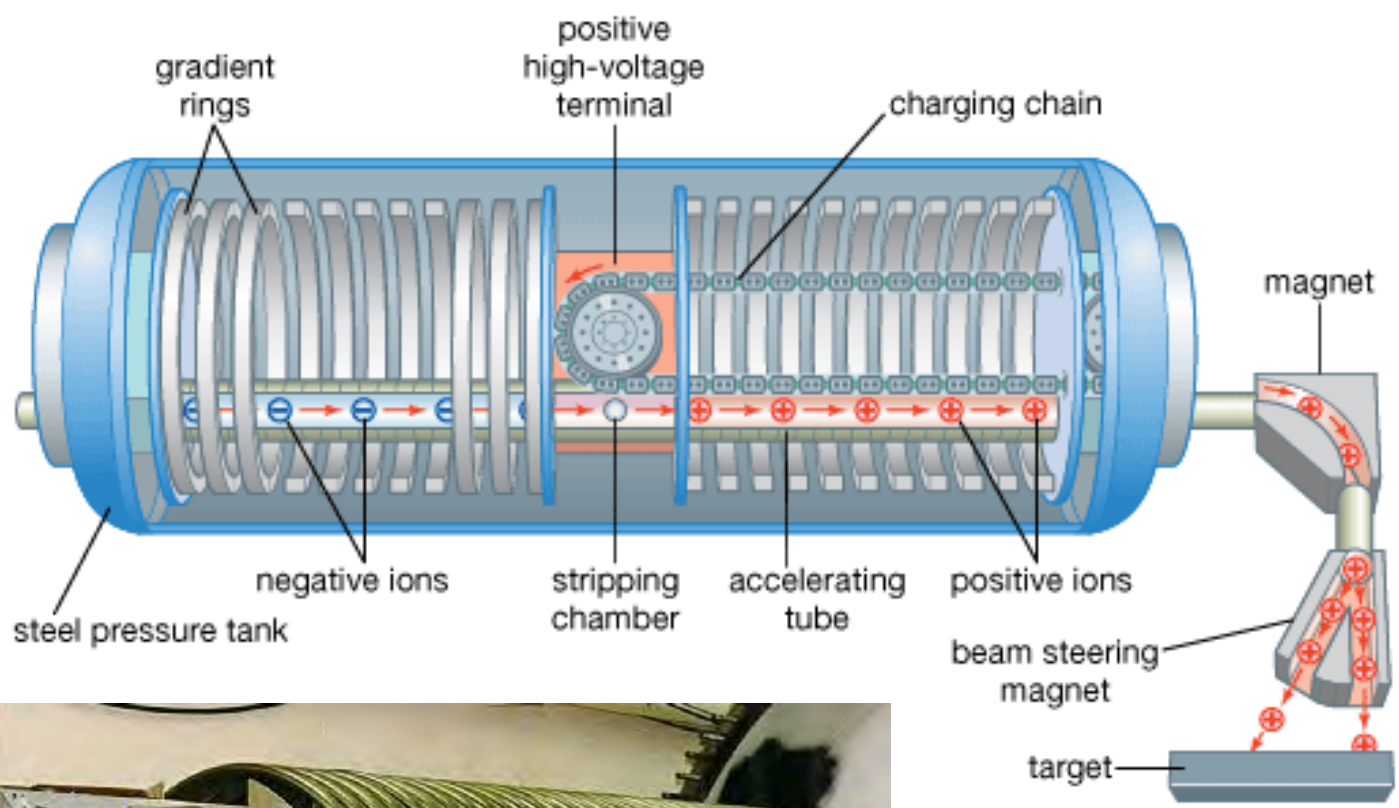
In the Tandem accelerator, the **high voltage generating system** is the same as **Van de Graaff device**, but at first negative ion is accelerated from the ground potential side to the high voltage terminal, and electric charges are stripped off with charge exchanger of carbon or gas stripper foil at the terminal, then become positive ions and are accelerated again to the ground potential level as shown in Fig

The acceleration voltage becomes possible to **be 2 times of the terminal voltage**. The Van de Graaff generator and the Tandem can provide beams of stable energy and small energy spread, but they are **unable to provide as high currents** as the **Cockcroft-Walton generator**.

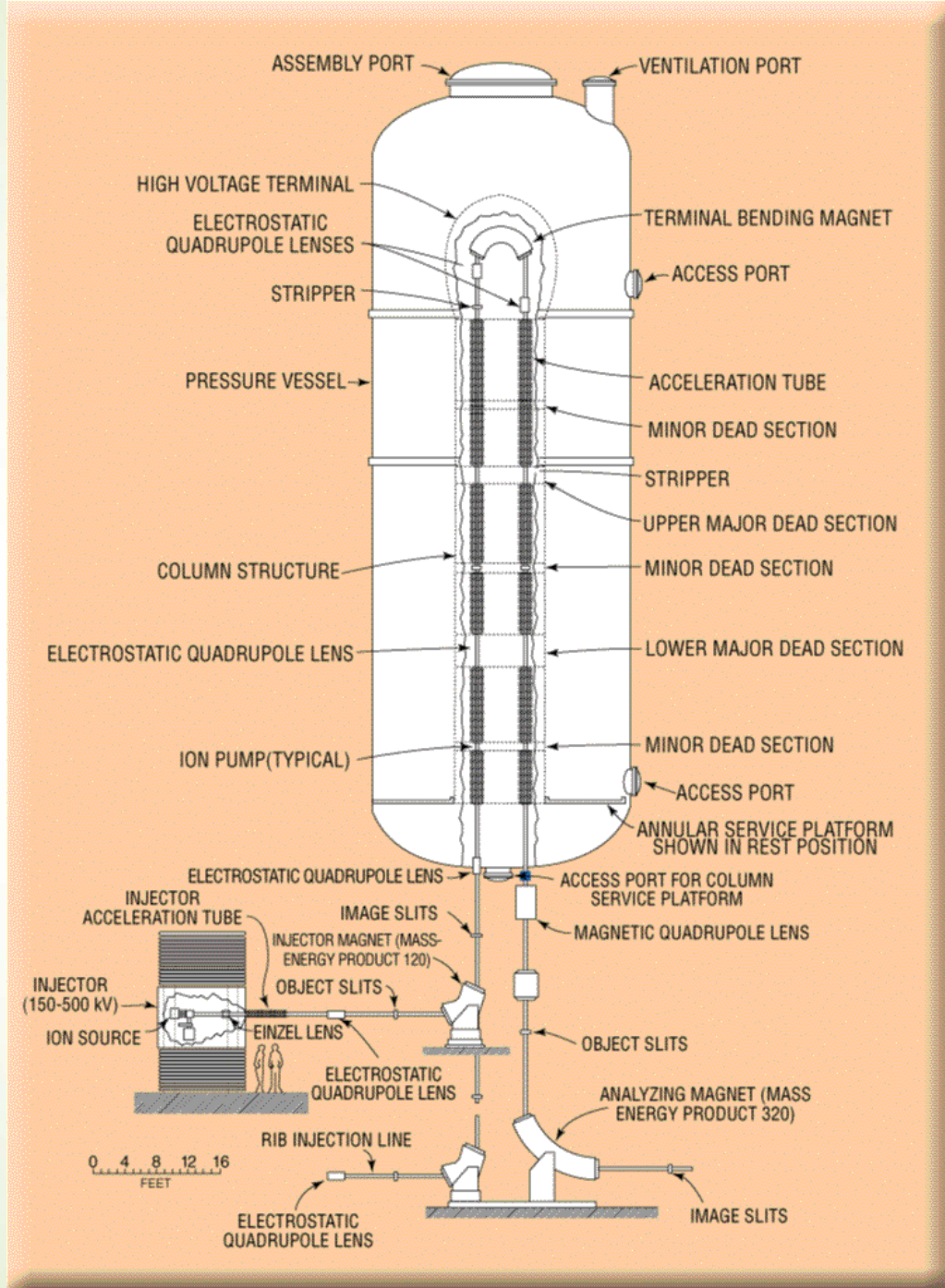




JAERI Tandem(Pelletron: pellet is used for charge delivering. NEC: National Electrostatic Corporation manufactures)



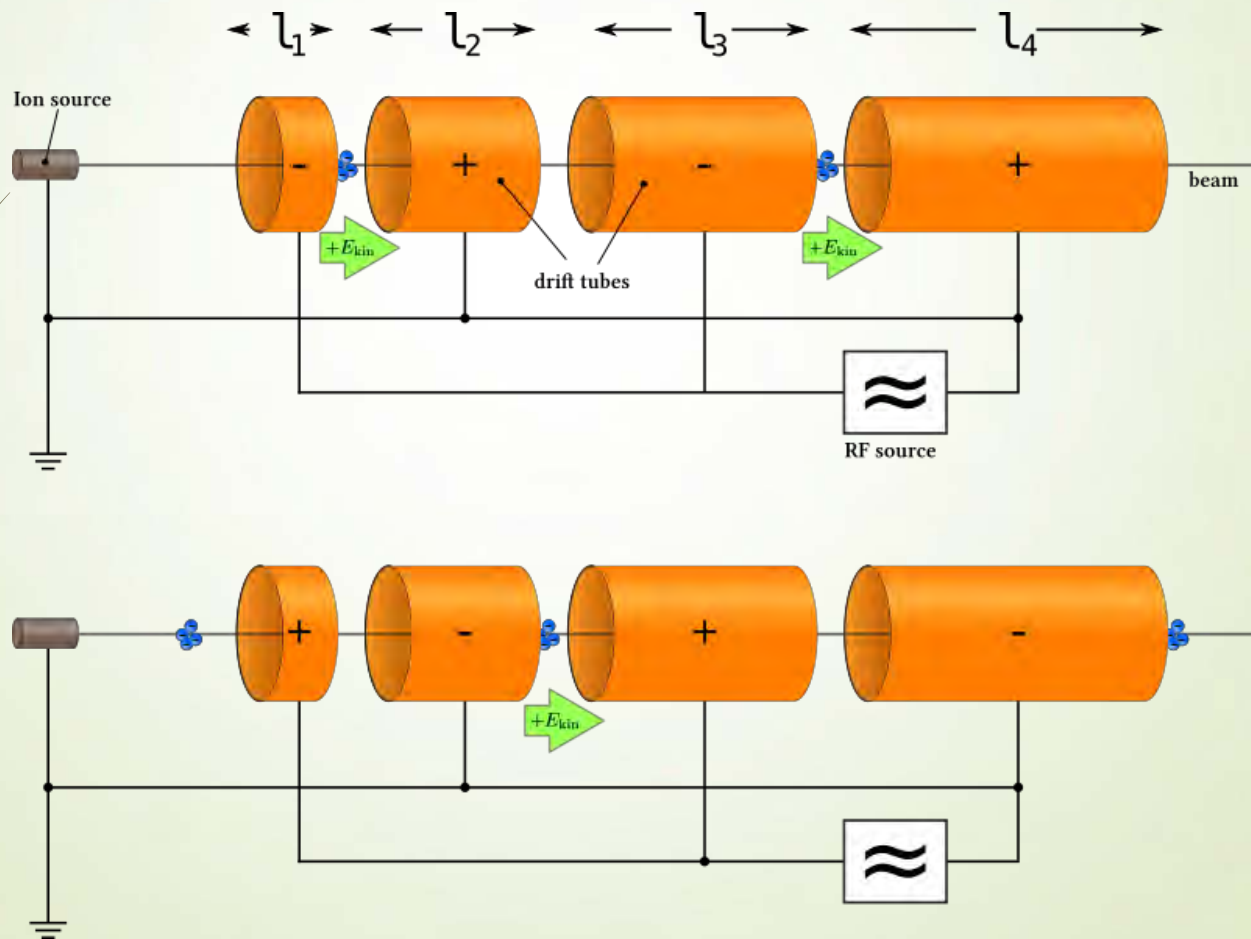
It is located at Oak Ridge National Laboratory (ORNL). The tandem accelerator is a model 25 URC accelerator built to ORNL specifications by the National Electrostatics Corporation (NEC). The high-voltage generator, located inside a 100-ft-high, 33-ft-diameter pressure vessel, has been built in a folded configuration with both low- and high-energy acceleration tubes contained within the same column structure. Reversal of ion direction in the high-voltage terminal is provided by a 180 degree magnet which also serves to prevent ions of unwanted charge state from being introduced into the high-energy acceleration tube. The insulating gas used for the tandem is pure SF₆. Typical operating pressure is between 65 and 80 psig. Today, the tandem accelerator provides acceleration for radioactive ion beams (RIBs) produced from the RIB injector.

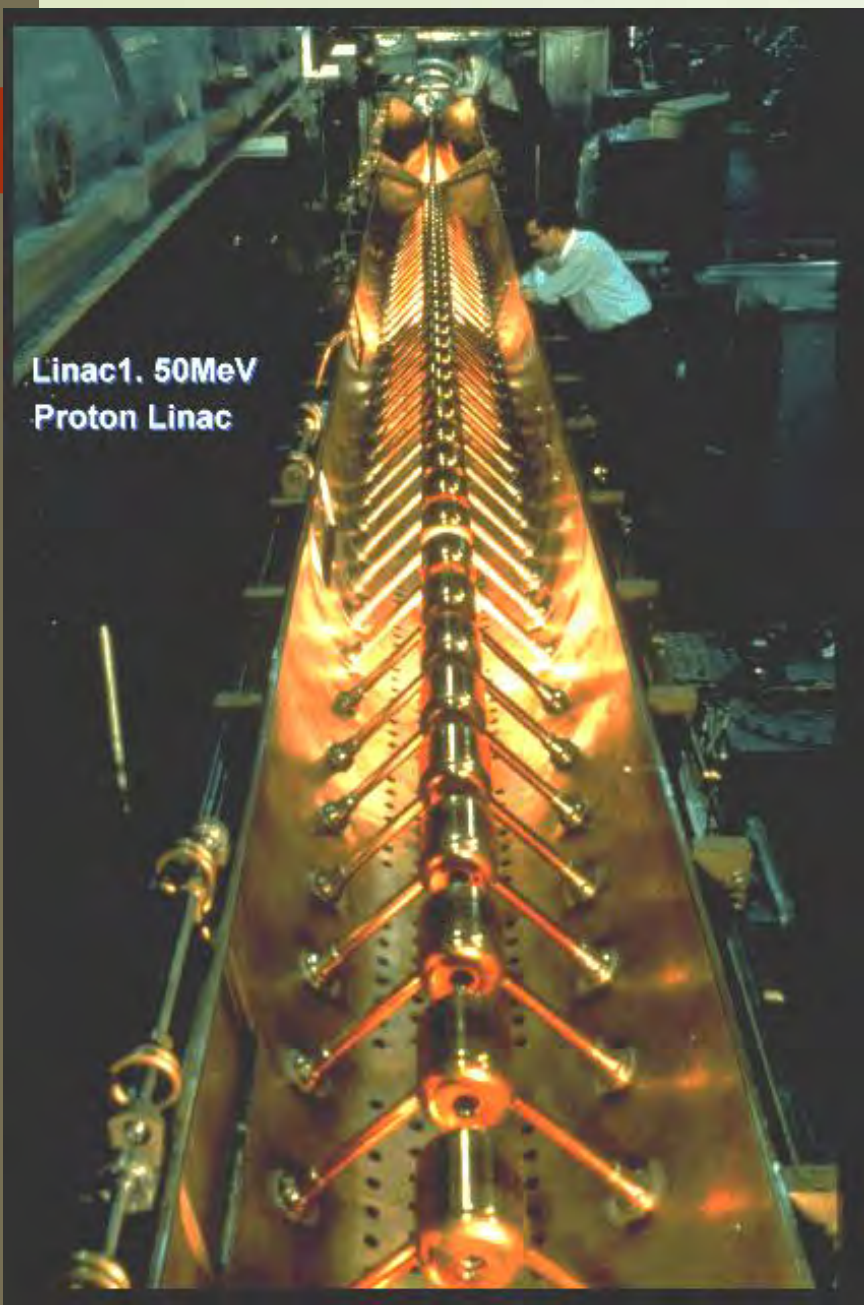




4- Máy gia tốc Tuyến Tính linac (gia tốc bởi rf).

In 1924, G. Ising suggested the particles accelerating principle with a linear series of conducting drift tubes and R. Wideru actually built a 'proof-of-principle' linear accelerator in 1928. For the linear accelerator, alternate drift tubes are connected to the same terminal of an rf generator as shown in Fig

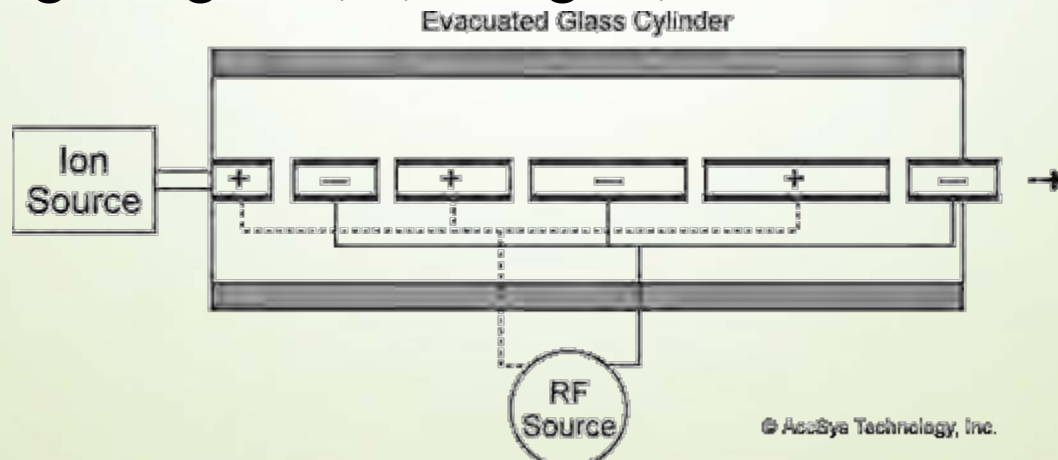




Lịch sử của máy gia tốc hạt thường được mô tả gắn liền với sự phát triển của cyclotrons. Tuy nhiên, đa số không thừa nhận việc Linacs đã được phát triển song song với Cyclotron và các loại máy gia tốc tròn khác.

Trong khi Lawrence và Livingston thiết kế các cyclotron nhỏ đầu tiên vào năm 1930, R. Wideröe đã xuất bản một bài báo năm 1928 về kết quả của mình về một máy gia tốc tuyến tính RF cho các ion.

Trước đó là một đề xuất năm 1925 bởi G. Ising. Nó bao gồm một loạt các ống hình trụ, đặt dọc trong ống thủy tinh dọc theo trục ống. Các ống được kết nối với một máy phát điện RF. Bằng cách chọn tần số và điện áp RF thích hợp, một loạt các ion nặng có thể được tăng tốc qua các khoảng trống và tụ lại cùng một lúc.



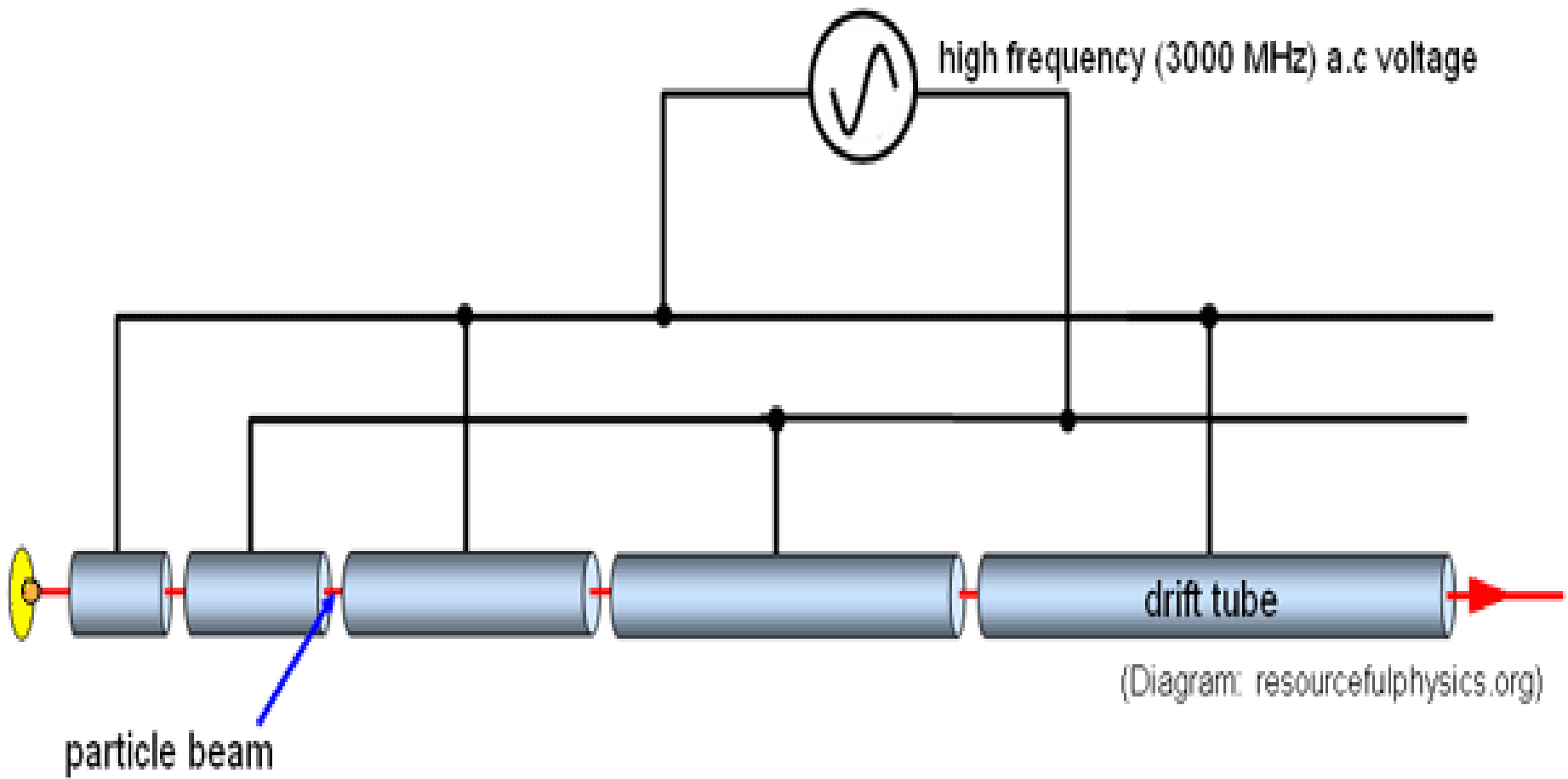
- Sau Thế chiến II, năm 1946, nhà vật lý người Mỹ Luis Alvarez, đã đưa ra một thiết kế linac cải thiện, được biết đến như một "linac ống trôi (DTL)". Các DTL có một cấu hình chung như linac ban đầu, với một ống có chứa một tập hợp các điện cực có chiều dài tăng lên, nhưng DTL đã có một ống kim loại bọc bên ngoài và các ống hình trụ đặt trong ống kim loại thì không có kết nối điện trực tiếp đến các điện cực, được gọi là "ống trôi". Các DTL được cung cấp năng lượng bởi một máy phát vô tuyến điện có năng lượng cao với tần số 200 MHz. Các sóng vô tuyến gây ra điện áp xoay chiều trong ống trôi để tăng tốc một hạt tích điện.
- Một loạt các Linacs RF công suất cao cho các proton và deuterons được xây dựng và thử nghiệm bắt đầu vào năm 1950 tại Phòng thí nghiệm Quốc gia Lawrence Livermore.
- Hiện nay hầu hết các linacs hiện đại được dựa trên thiết kế nguyên bản 200 MHz của L. Alvarez





CẤU TẠO MÁY LINAC





Một hệ LINAC gồm có:

Nguồn ion: thiết kế của nguồn dựa trên tính chất của hạt được gia tốc.

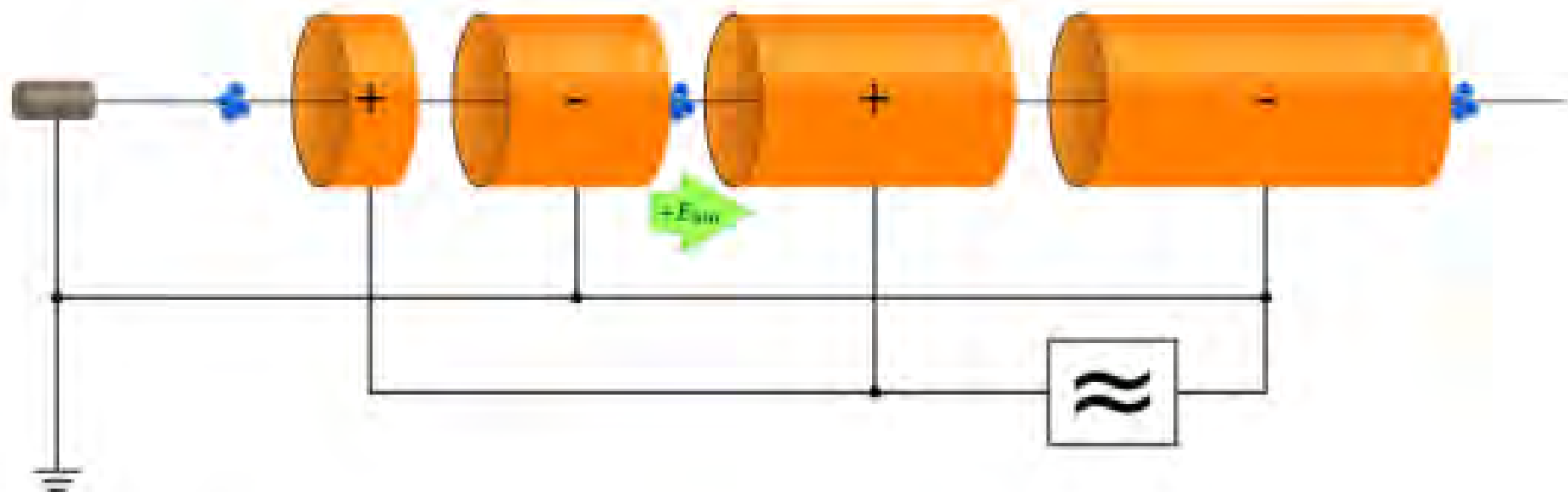
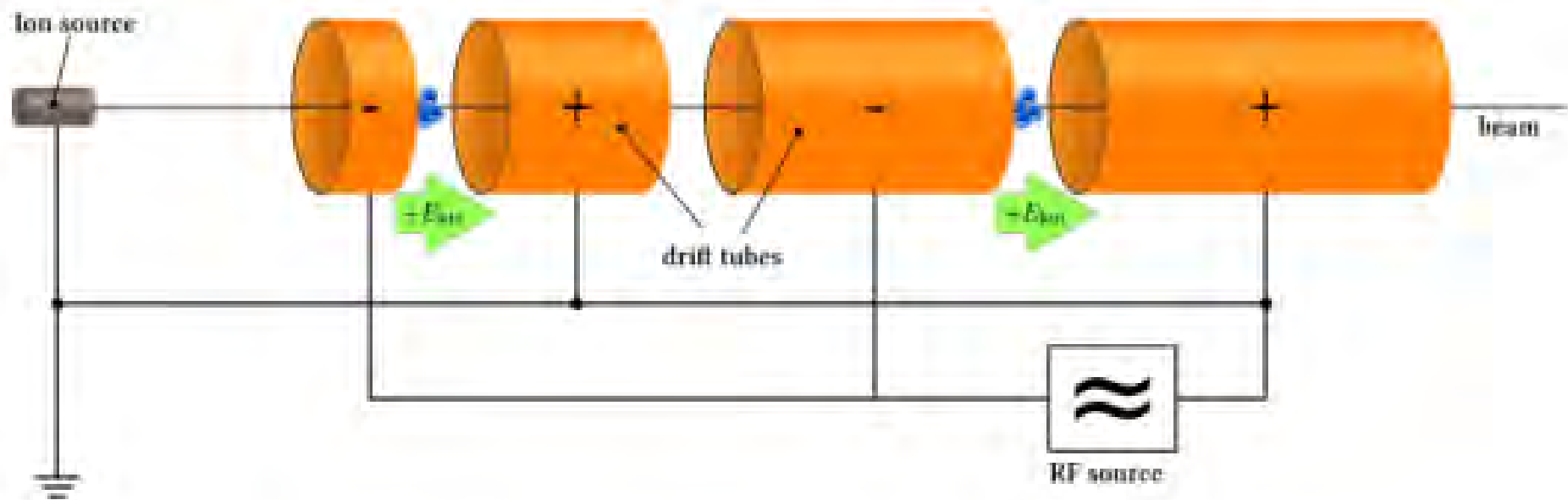
- **Nguồn cao thế:** gia tốc hạt lúc ban đầu.
- **Buồng chân không:** bao bọc toàn bộ hệ thống. Dùng ống chân không để hạn chế các va chạm của hạt trên đường đi giúp việc gia tốc hiệu quả hơn. Kích thước thay đổi tùy theo mục đích ứng dụng.
- **Electrodes:** các cực điện có độ dài tỉ lệ với nhau, cách nhau bởi những khe có khoảng cách không đổi.
- **Nguồn Radio Frequency:** nguồn phát sóng điện trường với tần số microwave.
- **Mục tiêu cuối:** có 2 ứng dụng thông dụng nhất là tạo tia X trong các **máy Linac Y học** và gia tốc hạt lúc đầu trước khi cho vào các **máy gia tốc vòng** hoặc **vòng lưu trữ**.

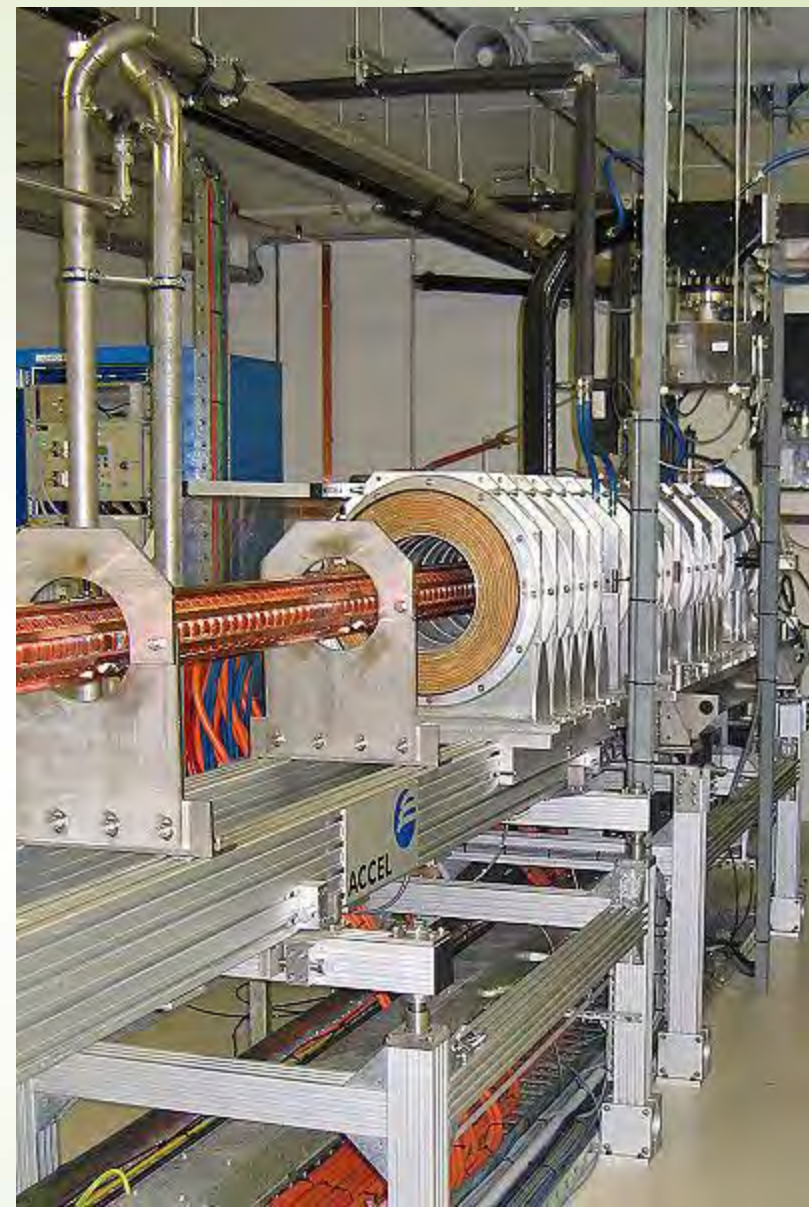
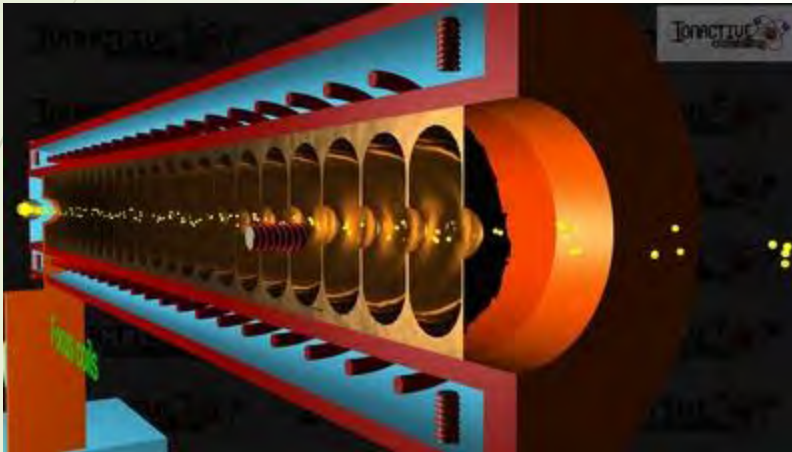


NGUYÊN TẮC HOẠT ĐỘNG LINAC

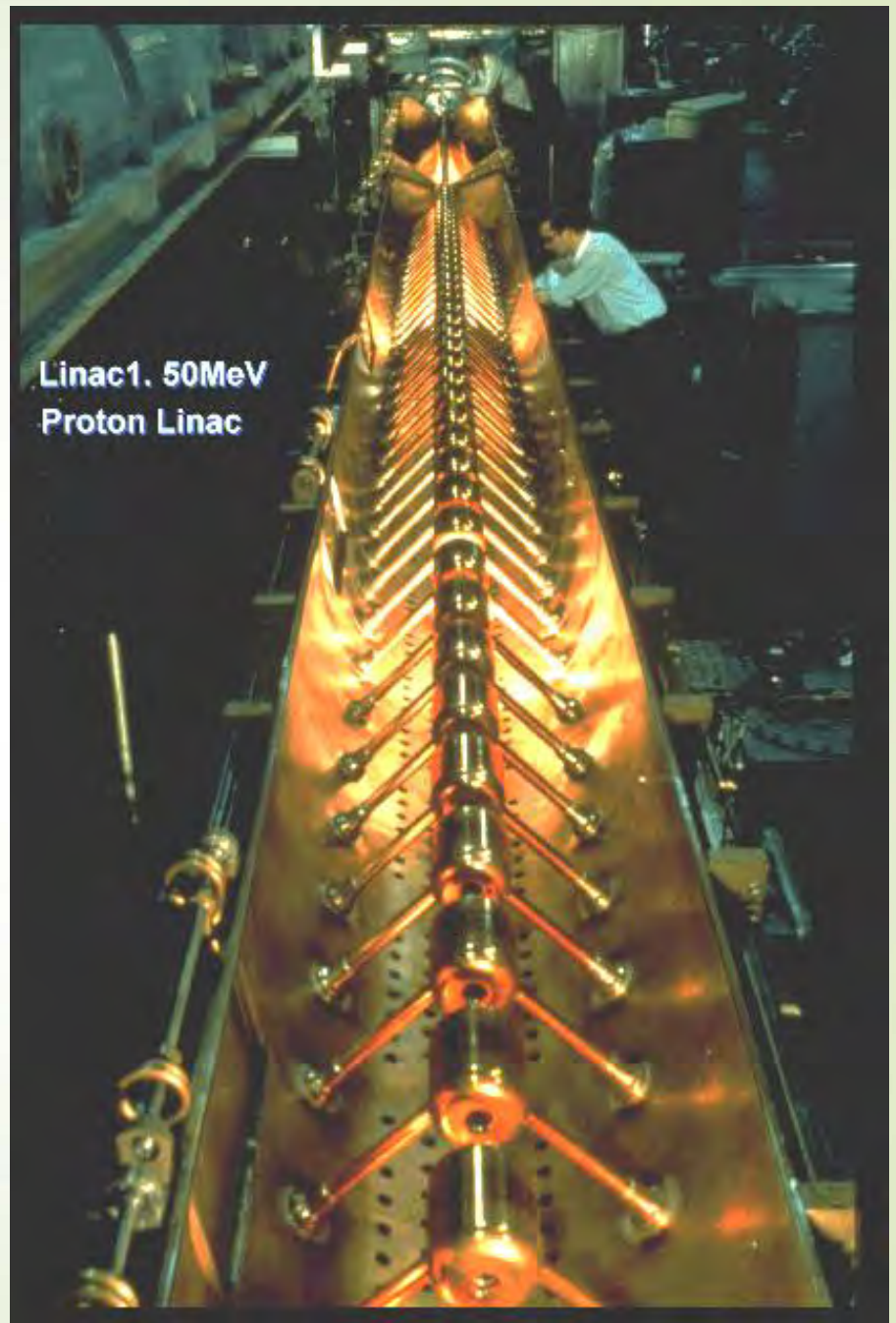
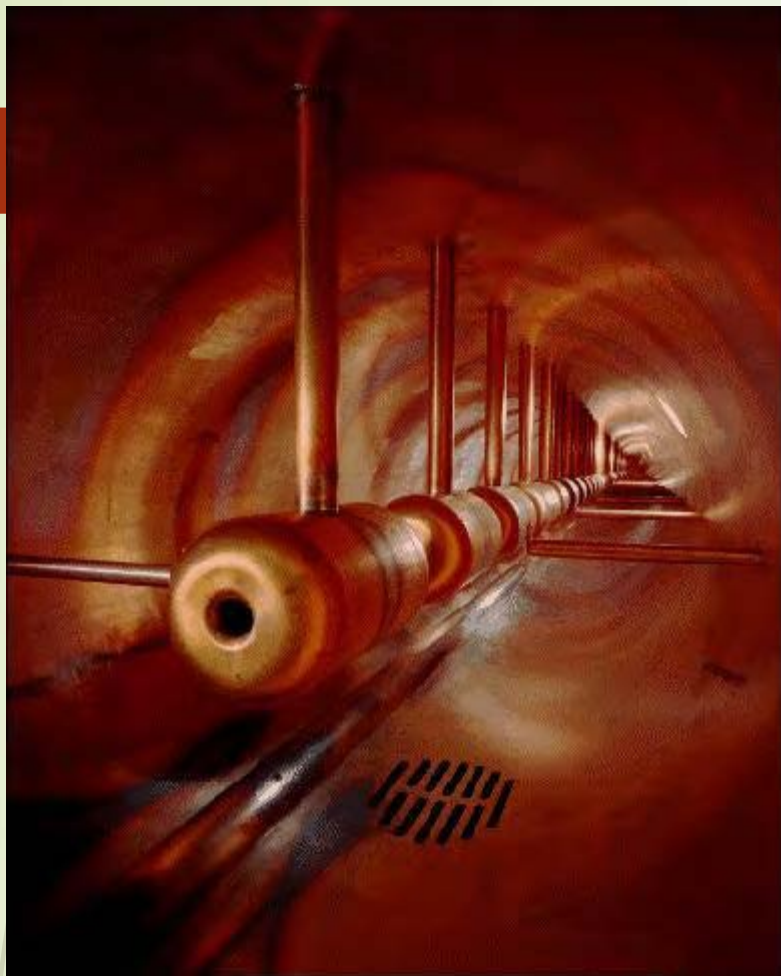


$\leftarrow l_1 \rightarrow \quad \leftarrow l_2 \rightarrow \quad \leftarrow l_3 \rightarrow \quad \leftarrow l_4 \rightarrow$





The linac within the [Australian Synchrotron](#) uses [radio waves](#) from a series of [RF cavities](#) at the start of the linac to accelerate the electron beam in bunches to energies of 100 MeV

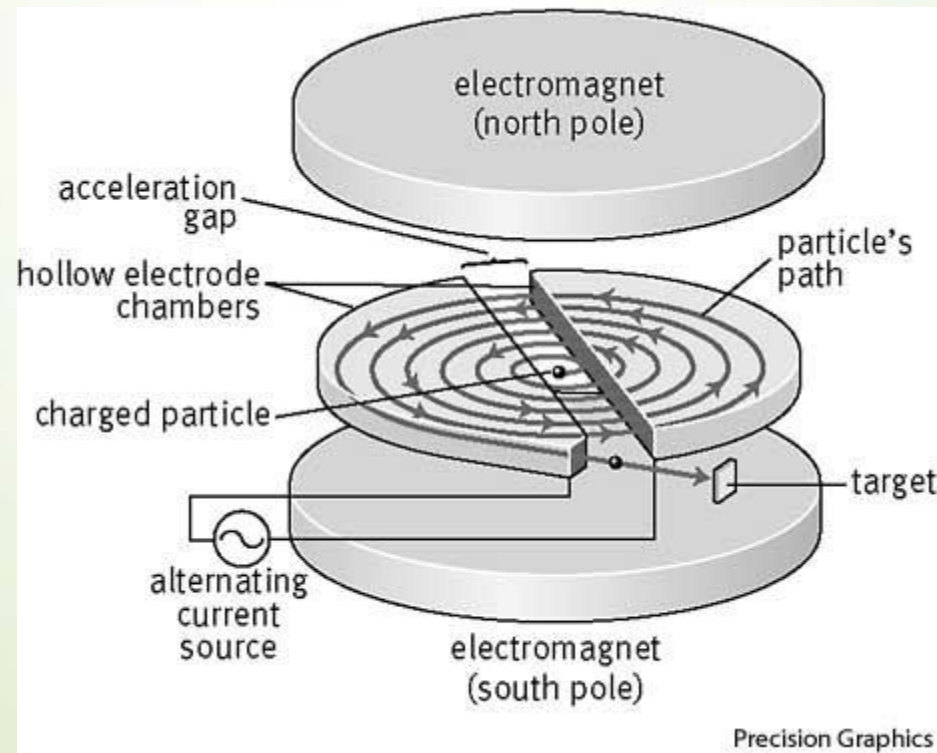


Linac1. 50MeV
Proton Linac

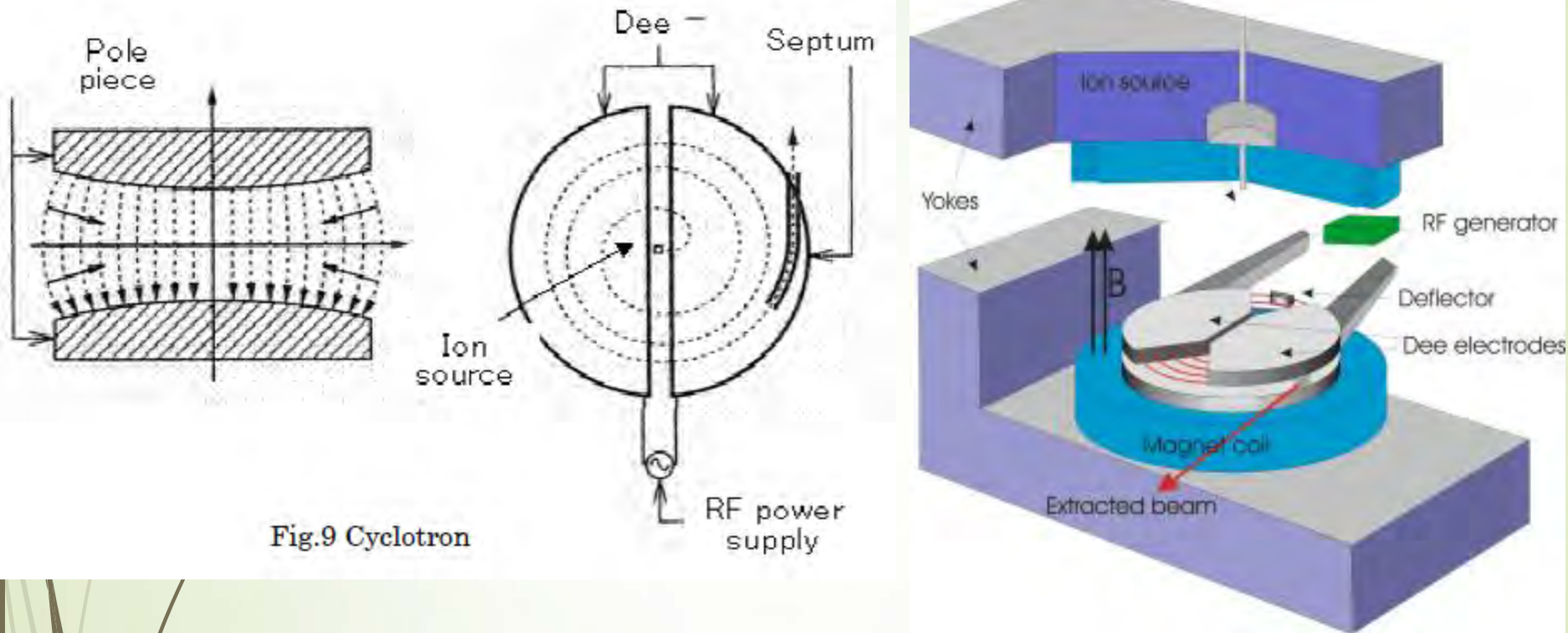
5- Máy gia tốc VÒNG CYCLOTRON.

Do Ernest Lawrence đưa ra vào năm 1929. Ý tưởng xuất phát từ công trình về máy gia tốc tuyến tính được công bố bởi Widerue. Lawrence chế tạo thành công máy gia tốc vòng đầu tiên vào năm 1932. Máy có đường kính cỡ 30cm và máy có thể gia tốc proton đến năng lượng 1,25MeV.

This machine split the atom only weeks after Cockcroft and Walton. For this achievement on the invention of cyclotron and the study of various artificial radio isotopes produced with cyclotron, Lawrence received the Nobel Prize in 1939.



Trong máy gia tốc vòng, chùm hạt được gia tốc bởi điện trường giữa hai khe (hai điện cực) được tạo ra từ sóng vô tuyến RF. Từ trường chỉ đóng vai trò định hướng làm cho chùm hạt gia tốc chuyển động trên các quỹ đạo tròn.



By this method, **the total distance** for acceleration **can be reduced** and the machines are possible to build as compact device. Together with the Tandem accelerators, the cyclotrons have been used for studies of nuclear physics. They are used also for medical applications (for isotope production with several to several tens of MeV proton and for radiation therapy to 250 MeV proton).

As the large scale machines, there are a 590 MeV proton cyclotron of Paul Sherrer Institute (Switzerland), a 200 MeV / nucleon superconducting heavy ion cyclotron of National Superconducting Cyclotron Laboratory (USA), a 135 MeV / nucleon heavy ion ring cyclotron of Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN, Japan).

Ưu điểm của máy gia tốc vòng

- Tạo ra chùm hạt liên tục tại bia nên công suất trung bình của máy cao.
- Kích thước nhỏ nên giảm đáng kể các chi phí xây dựng cũng các chi phí cho các vật liệu che chắn phóng xạ.

Những hạn chế của máy gia tốc vòng

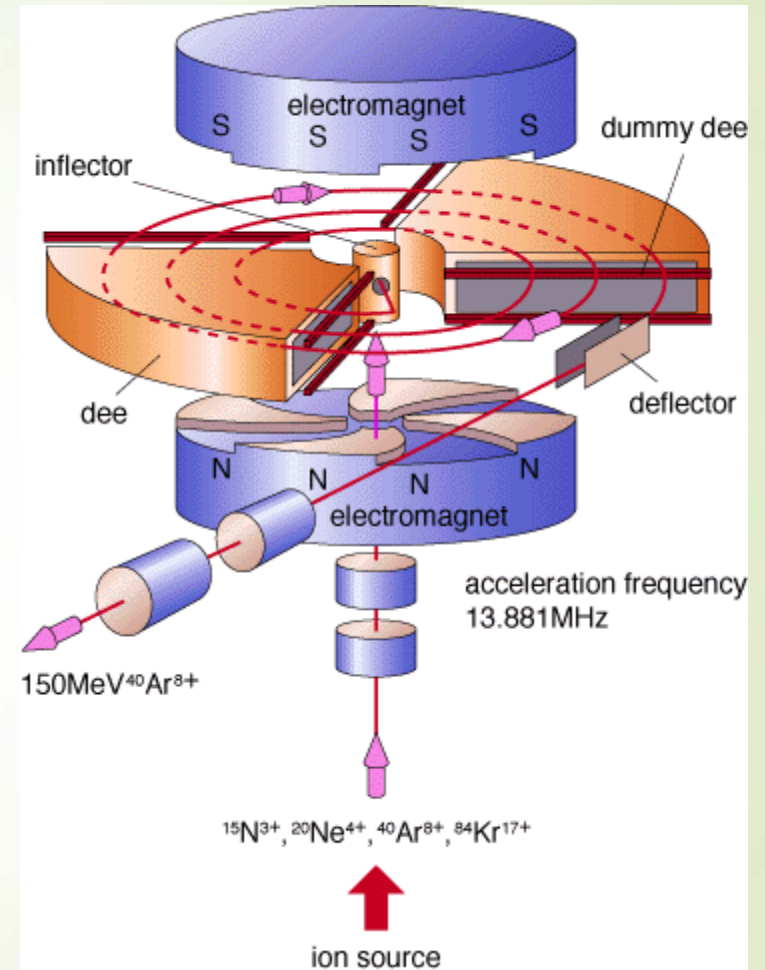
The spiral path of the cyclotron beam can only "sync up" with klystron-type (constant frequency) voltage sources if the accelerated particles are approximately obeying Newton's Laws of Motion.

If the particles become fast enough that relativistic effects become important, the beam gets out of phase with the oscillating electric field, and cannot receive any additional acceleration.

The cyclotron is therefore only capable of accelerating particles up to a few percent of the speed of light.

To accommodate increased mass the magnetic field may be modified by appropriately shaping the pole pieces as in the isochronous cyclotrons, operating in a pulsed mode and changing the frequency applied to the dees as in the synchrocyclotrons, either of which is limited by the diminishing cost effectiveness of making larger machines.

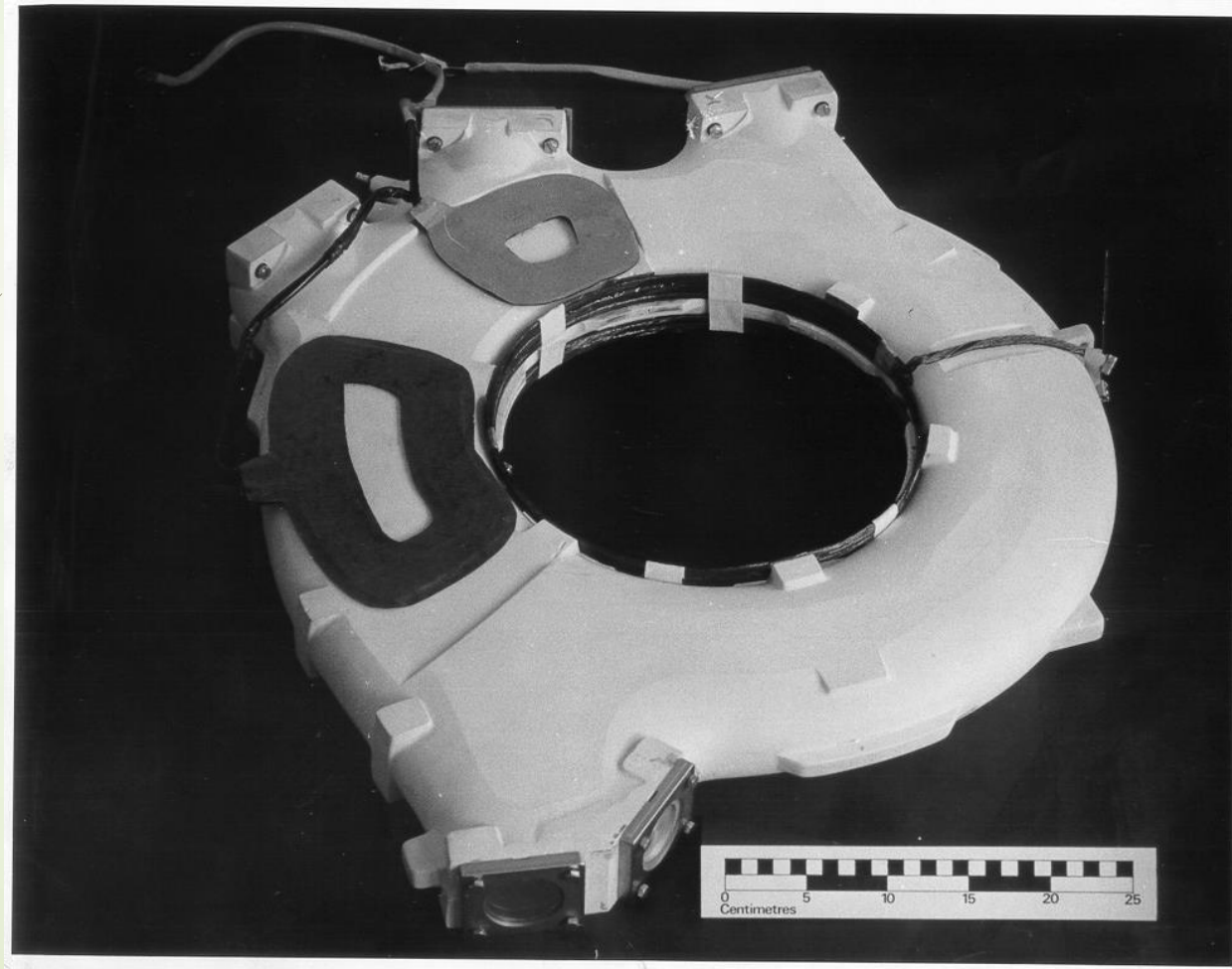
Cost limitations have been overcome by employing the more complex synchrotron or linear accelerator, both of which have the advantage of scalability, offering more power within an improved cost structure as the machines are made larger.



A French cyclotron, produced in [Zurich](#), [Switzerland](#) in 1937

6- Máy gia tốc BETATRON.

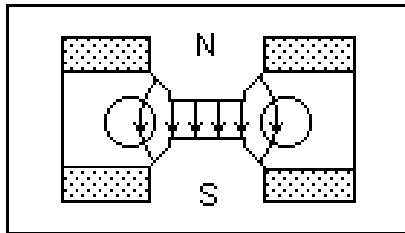
Là máy gia tốc vòng được phát triển bởi Donald Kerst ở Đại học Illinois vào năm 1940 để gia tốc electron.



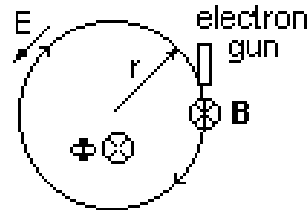
Hạt được gia tốc bởi thông lượng từ trường biến thiên, chỉ thích hợp trong gia tốc hạt nhẹ là electron.

The magnet structure of a betatron resembles that of a cyclotron. The major difference is the shape of the core part with the pole shoes as shown in Fig. The orbit radius of the circulating electron beam is kept constant through out the acceleration process.

Applications



Betatron



Betatrons were historically employed in [particle physics](#) experiments to provide high energy beams of electrons—up to about 300 [MeV](#). If the electron beam is directed at a metal plate, the betatron can be used as a source of energetic [x-rays](#) or [gamma rays](#); these x-rays may be used in industrial and medical applications (historically in [radiation oncology](#)). A small version of a Betatron was also used to provide [electrons](#) converted into [neutrons](#) by a target to provide prompt initiation of some [nuclear weapons](#).^{[2][3]}

The Radiation Center, the first private medical center to treat cancer patients with a betatron was opened by Dr. [O. Arthur Stiennon](#), in a suburb of [Madison, Wisconsin](#) in the late 1950s

7- Máy gia tốc .SYNCHROTRON.

A **synchrotron** is a particular type of cyclic **particle accelerator** in which the magnetic field (to turn the particles so they circulate) and the electric field (to accelerate the particles) are carefully synchronised with the travelling particle beam. The proton synchrotron was originally conceived by **Sir Marcus Oliphant**^[1]. The honour of being the first to publish the idea went to **Vladimir Veksler**, and the first electron synchrotron was constructed by **Edwin McMillan**.

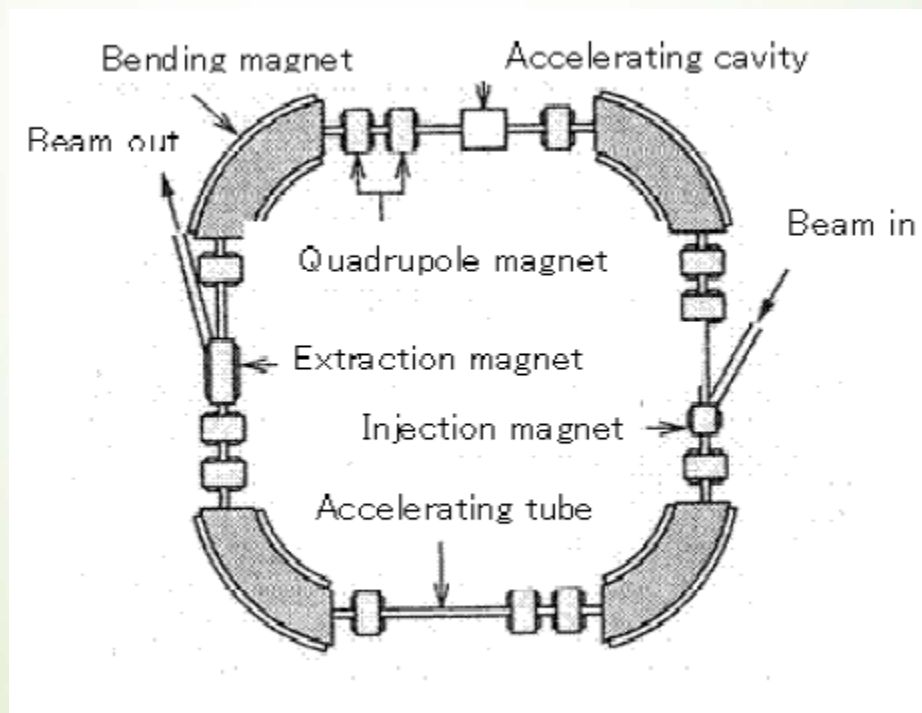
Diamond Light Source Ltd., is a new third generation (3GeV) **synchrotron** in the UK. It started operations in January 2007 and will provide x-ray, infrared and ultraviolet beams of exceptional brightness. These will be used by scientists and engineers for research and development in many fields including biomedical science, medical research, environmental sciences and physical sciences.





Modern industrial-scale synchrotrons can be very large (here, [Soleil](#) near [Paris](#))

In the synchrotron, either the magnetic field or the frequency of the oscillator is varied to keep the beam trajectory constant and to maintain the time between accelerations synchronized with the radio frequency. Magnets are arranged in circumference, and ions are run around the fixed orbit by increasing both magnetic field and radio-frequency according to their acceleration energies as shown in Fig. In order to accelerate particles to very high energies, it is also necessary to have focusing mechanisms in the transverse and longitudinal (energy) planes based on the weak/strong focusing principle and phase stability.



Design and operation

Particles are injected into the main ring at substantial energies by either a linear accelerator or by an intermediate synchrotron which is in turn fed by a linear accelerator. The "linac" is in turn fed by particles accelerated to intermediate energy by a simple high voltage power supply, typically a Cockcroft-Walton generator.

Starting from an appropriate initial value determined by the injection velocity the magnetic field is then increased. The particles pass through an electrostatic accelerator driven by a high alternating voltage. At particle speeds not close to the speed of light the frequency of the accelerating voltage can be made roughly proportional to the current in the bending magnets.

A finer control of the frequency is performed by a servo loop which responds to the detection of the passing of the traveling group of particles. At particle speeds approaching light speed the frequency becomes more nearly constant, while the current in the bending magnets continues to increase.



The maximum energy that can be applied to the particles (for a given ring size and magnet count) is determined by the saturation of the cores of the bending magnets (the point at which increasing current does not produce additional magnetic field). One way to obtain additional power is to make the torus larger and add additional bending magnets. This allows the amount of particle redirection at saturation to be less and so the particles can be more energetic. Another means of obtaining higher power is to use superconducting magnets, these not being limited by core saturation

The synchrotron is mainly used for the study of elementary particle physics in order to achieve the highest energy. As the large machines, there are a 500 GeV proton synchrotron of Fermi National Accelerator Laboratory (USA), a 100 GeV /nucleon x 100 GeV / nucleon heavy ion collider of Brookhaven National. Laboratory (USA). For medical use, a 250 MeV proton synchrotron and a 800 MeV / nucleon heavy ion synchrotron (National Institute of Radiological Science.) are used.

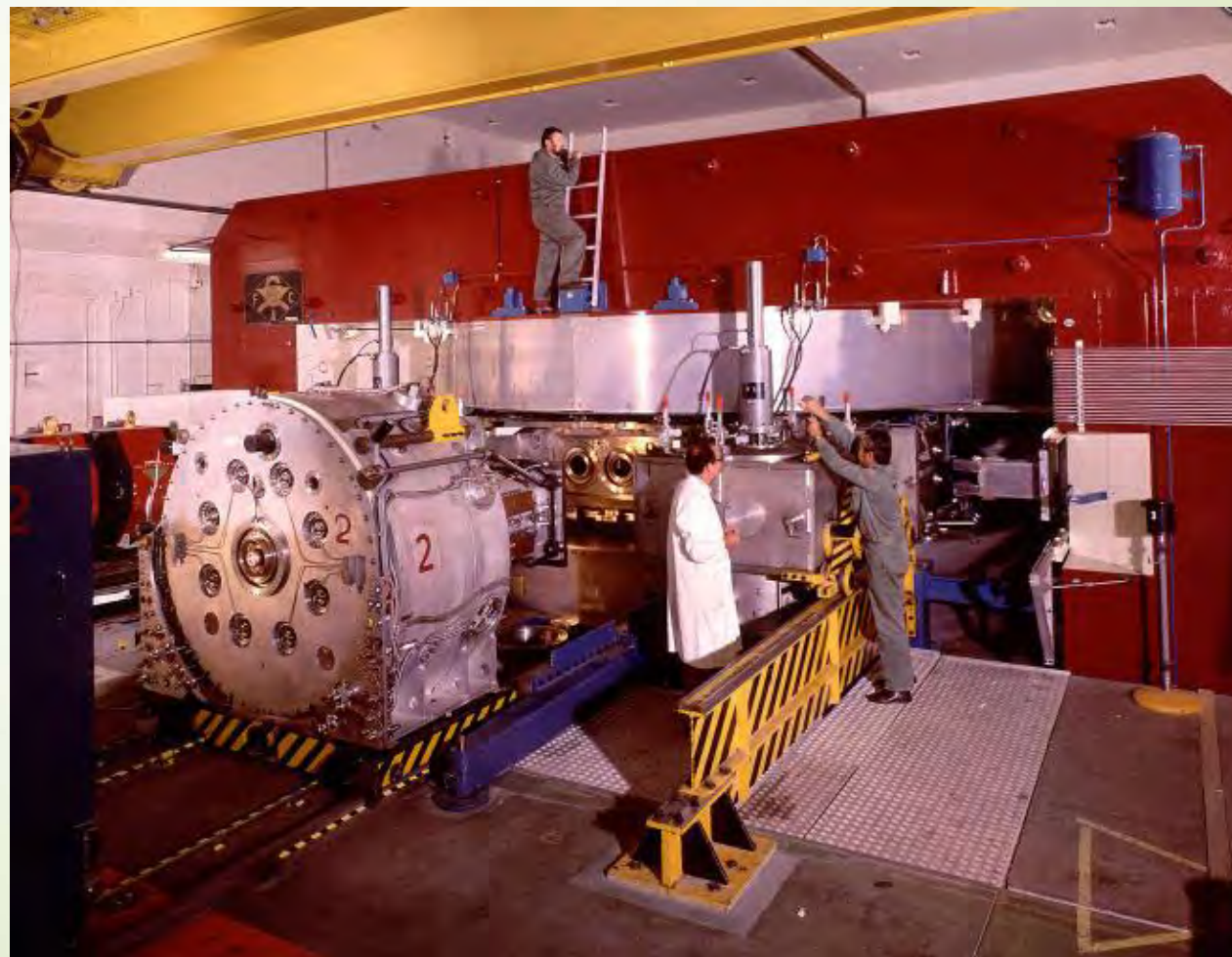


Spring-8 Synchrotron 8GeV
Diameter 87m for SR

8- Máy gia tốc .SYNCHROCYCLOTRON.

A synchrocyclotron is a cyclotron in which the frequency of the driving RF electric field is varied to compensate for relativistic effects as the particles' velocity begins to approach the speed of light. This is in contrast to the classical cyclotron, where the frequency was held constant

The 600 MeV Synchro-Cyclotron (1957) was CERN's first accelerator

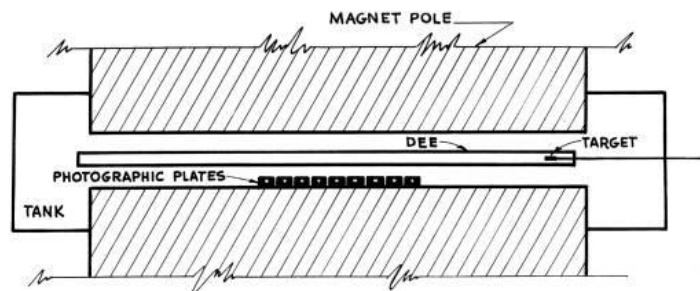
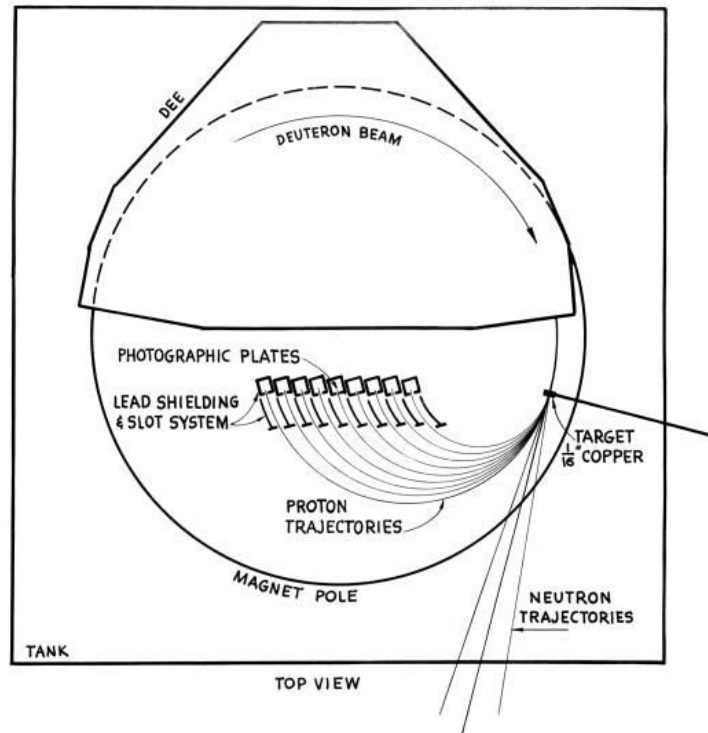


The two fundamental differences between this machine and the orthodox cyclotron are that

1. in this machine, only one dee is used instead of two
2. the frequency of oscillating electric field is made to decrease continuously instead of keeping it constant so as to maintain the resonance with ion frequency. One terminal of the oscillating electric potential varying periodically is applied to the dee and the other terminal is earthed. The proton or deuterons to be accelerated are made to move in circles of increasing radii. The acceleration of particles takes place as they enter or leave D. at the outer edge, the ion beam can be removed with the aid of electrostatic deflector. It was possible to produce 200MeV deuterons and 400MeV α -particle with the first synchrocyclotron

Synchrocyclotrons have not been built since the isochronous cyclotron was developed.

Isochronous cyclotrons maintain a constant RF driving frequency and compensate for relativistic effects by increasing the magnetic field with radius. Isochronous cyclotrons are capable of producing much greater beam current than synchrocyclotrons



LOCATION OF PHOTOGRAPHIC PLATES FOR STUDY OF PROTONS FROM THE TARGET

Ưu điểm

The chief advantage of the synchrocyclotron is that there is no need to restrict the number of revolutions executed by the ion before its exit. As such, the potential difference supplied between the dees can be much smaller.

The smaller potential difference needed across the gap has the following uses:

1. There is no need for a narrow gap between the dees as in the case of convention cyclotron, because strong electric fields for producing large acceleration are not required. Thus only one dee can be used instead of two, the other end of the oscillating voltage supply being connected to earth.
2. The magnetic pole pieces can be brought closer, thus making it possible to increase greatly the magnetic flux density.
3. The frequency valve oscillator is able to function with much greater efficiency.

Hạn chế

The main drawback of this device is that, as a result of the variation in the frequency of the oscillating voltage supply, only a very small fraction of the ions leaving the source are captured in phase-stable orbits of maximum radius and energy so that the output beam current is rendered weak. Thus the machine produces high energy ions, though of small intensity

9- Storage ring – Vòng lưu trữ.

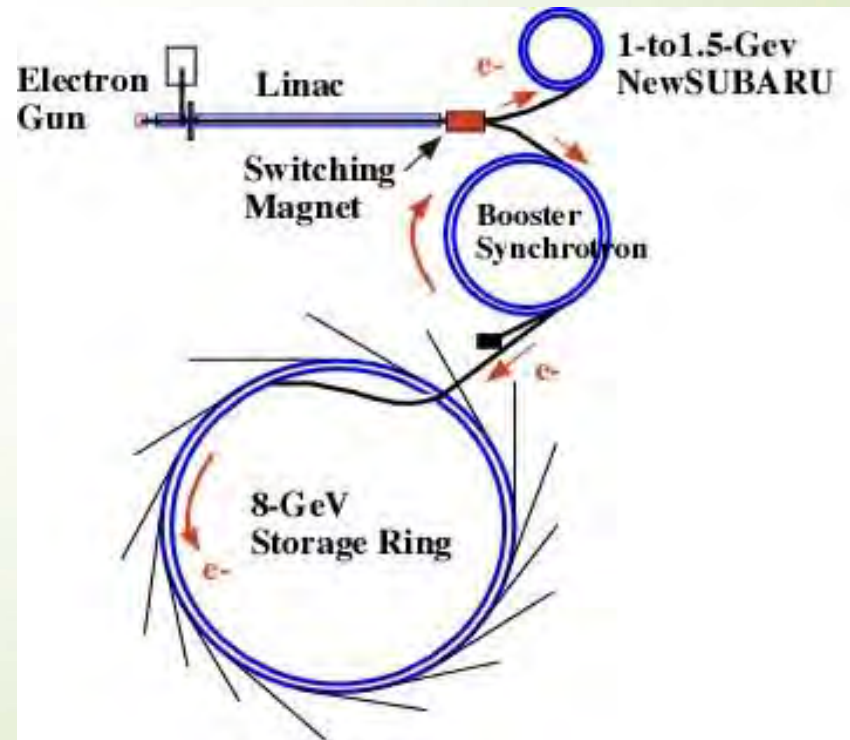
A storage ring is a type of circular particle accelerator in which a continuous or pulsed particle beam may be kept circulating for a long period of time, up to many hours. Storage of a particular particle depends upon the mass, energy and usually charge of the particle being stored. Most commonly, storage rings are to store electrons, positrons, or protons

The most common application of storage rings is to store electrons which then radiate synchrotron radiation. There are over 50 facilities based on electron storage rings in the world today, used for a variety of studies in chemistry and biology. Storage rings are used to produce polarized high-energy electron beams through the Sokolov-Ternov effect. Arguably the best known application of storage rings is their use in particle accelerators and in particle colliders, in which two counter-rotating beams of stored particles are brought into collision at discrete locations, the results of the subatomic interactions being studied in a surrounding particle detector. Examples of such facilities are LHC, LEP, PEP-II, KEKB, RHIC, Tevatron and HERA.

Arguably: Người ta có thể cho rằng

Technically speaking, a storage ring is a type of synchrotron. However, a conventional synchrotron serves to accelerate particles from a low to a high energy with the aid of radio-frequency accelerating cavities; a storage ring, as the name suggests, **keeps particles stored at a constant energy**, and **radio-frequency cavities are only used to replace energy lost through synchrotron radiation and other processes**.

Gerard K. O'Neill proposed the use of storage rings as building blocks for a collider in 1956. A key benefit of storage rings in this context is that the storage ring can accumulate a high beam flux from an injection accelerator that achieves a much lower flux.^[1]





The 7-GeV electrons are injected into the 1104-m-circumference storage ring, a circle of more than 1,000 electromagnets and associated equipment, located in a radiation-proof concrete enclosure inside the experiment hall, which is large enough to encircle Chicago's U.S. Cellular Field. A powerful electromagnetic field focuses the electrons into a narrow beam that is bent on a circular path as it orbits within aluminum-alloy vacuum chambers running through the centers of the electromagnets



The first storage ring consisted of a hexapole bent into a torus

Torus : Hình xuyên

10- FFAG accelerator(Fixed-Field Alternating Gradient accelerator).

A **Fixed-Field Alternating Gradient accelerator (FFAG)** is a type of circular particle accelerator being developed for potential applications in physics, medicine, national security, and energy production, that has features of cyclotrons and synchrotrons.^[1] FFAG accelerators combine the cyclotron's advantage of continuous, unpulsed operation, with the synchrotron's relatively inexpensive small magnet ring, of narrow bore.

This is achieved by using magnets with strong focusing alternating-gradient quadrupole fields to confine the beam, accompanied by a dipole bending magnetic field which bends the beam to close the orbital ring. By the use of a strong radial magnetic field gradient in the dipole component, yet with a time-constant "fixed field" as the particles are accelerated, particles with larger energies move successively to slightly larger orbits, where the bending field is larger. The beam thus remains confined to a narrow ring, as in a synchrotron, yet without the synchrotron's requirement that the machine be operated in pulsed acceleration cycles.

FFAG complex at KURRI





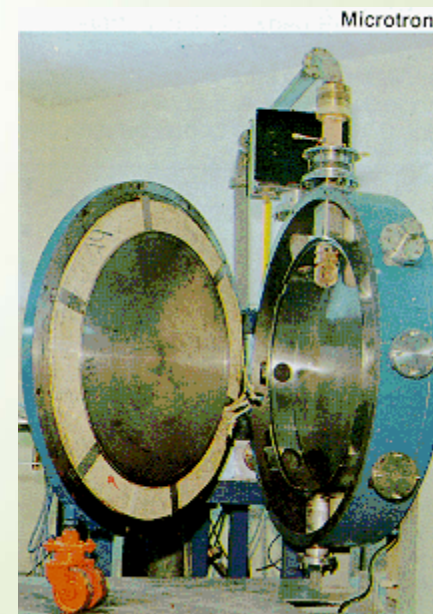
Top view of KURRI-FFAG accelerator complex IN OSAKA JAPAN.

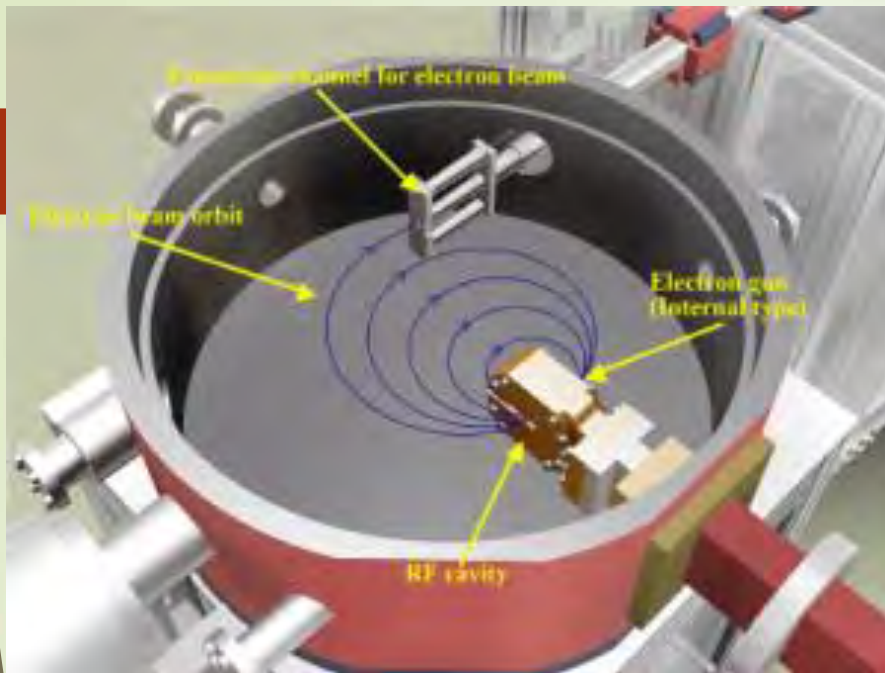
11- Microtron.

A **microtron** is a cyclotron in which the kinetic energy of electrons is increased by a constant amount per field change (one half or a whole revolution). They are designed to operate at constant field frequency and magnetic field strength despite notable relativistic effects at higher energies. Thus, power consumption can be much reduced.

In a microtron due to their different relativistic mass the electrons in different passes of the acceleration fly on different paths through the bending magnet dees. The time needed for that is proportional to the pass number. The slow electrons need one electric field oscillation, the faster electrons an integer multiple of this oscillation.

A 20 MeV , 30 mA microtron is used as an injector to the booster. This microtron is fully designed at RRCAT and has been fabricated locally. The main feature of this microtron is that it is mounted in vertical orientation to match the emittance of the electron beam from it with the acceptance of the booster in the horizontal and vertical planes. Microwave system consisting of a microwave source, a transmission line and a radio frequency (RF) cavity has been also fabricated. Microwave source consists of a 5 MW pulsed klystron and a solid state synthesizer. The components of microwave transmission line are made in S-band WR784 waveguide section. The transmission line is pressurized to 2.5 Kg/sq.cm. with dry nitrogen. RF cavity is a cylindrical cavity resonant in TEM 010 mode. A cylindrical pin of Lanthanum hexaboride is mounted on this cavity as an electron emitter.





A microtron type accelerator is a machine which circulate electrons in constant magnetic field, and accelerates electrons by an RF cavity electric field. Typical microtrons have an external electron gun. The Photon Production Laboratory MICROTRON, includes an internal electron gun in the RF cavity. This results in the 20 MeV MICROTRON having a 1.3m diameter, and the smaller 6 MeV an 10 MeV products both having a 0.65m diameter.

The constant magnetic field environment of the microtron causes the electrons to circulate in ever larger orbits as they repeatedly pass through the RF cavity and are accelerated. Once the electrons reach the design level of the microtron, which of course corresponds to the largest orbit made by the electrons, they enter an extraction channel and leave the MICROTRON.

Whereas a LINAC requires a pre-buncher and α -magnet for $<1\%$ electron energy distribution, the internal electron gun inside the RF cavity gives MICROTRON an inherently low electron energy distribution and does not require a pre-buncher.