



Instituto de Física – USP

Escola de Verão 2015

Curso 2

Aceleradores de Partículas: Princípios e Aplicações

Aulas

1 – Aceleradores: fundamentos e história

Marcos Nogueira Martins

2 – Aceleradores de íons

Nemitala Added

3 – Aceleradores de elétrons

Tiago Fiorini da Silva

4 – Aplicações de aceleradores de íons

Manfredo Harri Tabacniks

5 – Aplicações de aceleradores de elétrons

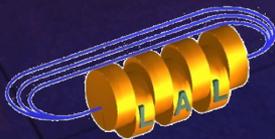
Vito Roberto Vanin

Aceleradores: Fundamentos e História

Marcos Nogueira Martins

*Laboratório do Acelerador Linear, Departamento de Física Experimental
Instituto de Física da Universidade de São Paulo*

- **Introdução**
 - Necessidade
 - Aplicações
- **História**
 - Primeiras tentativas
 - aceleradores eletrostáticos
 - aceleradores circulares
- **Estabilidade de fase e aceleração por RF**
 - microtrons
 - síncrotrons
- **Aceleradores no IFUSP**
 - Pelletron
 - LAMFI
 - Microtron

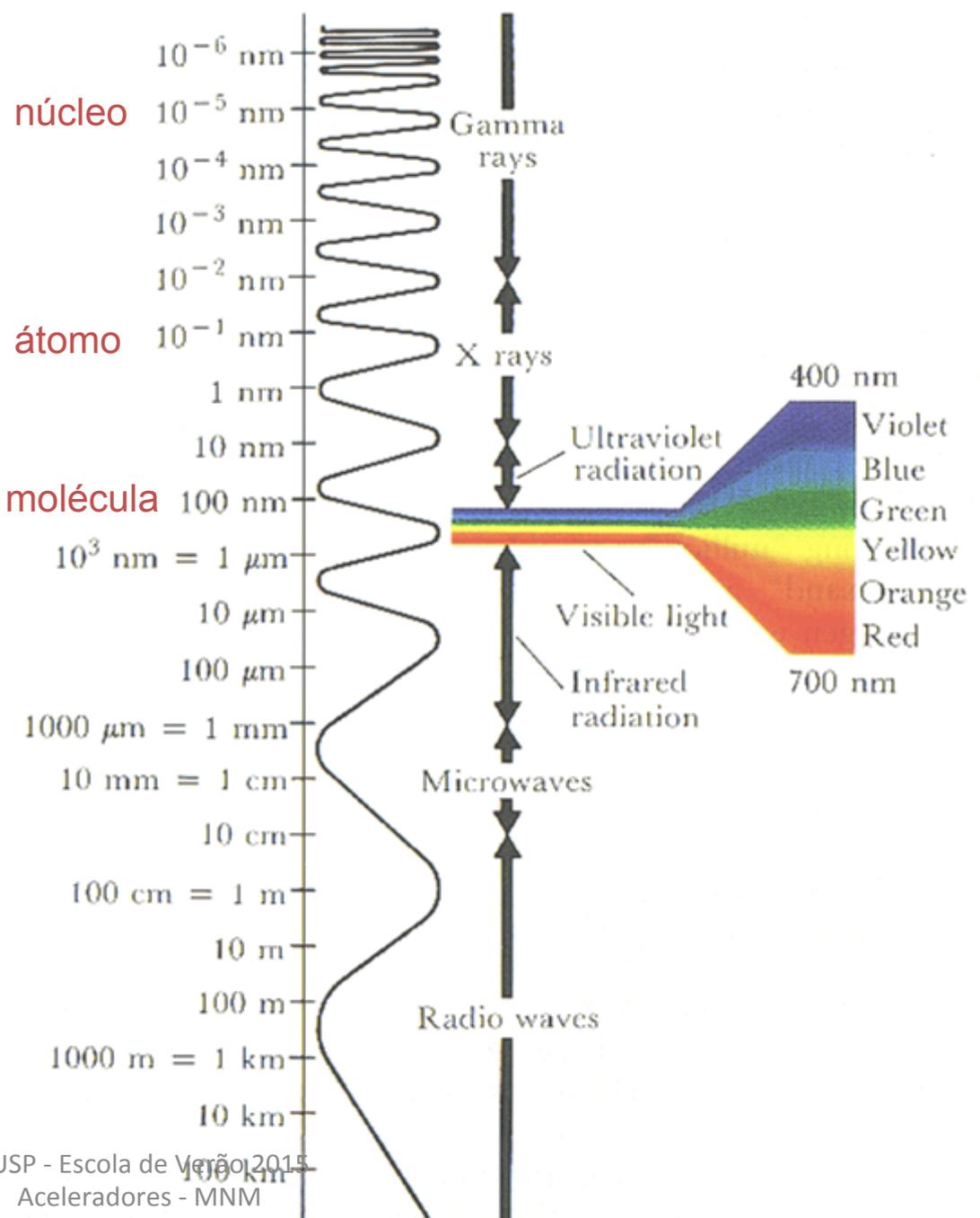


Introdução

**Necessidade:
estudo da estrutura da matéria
e do espaço-tempo**

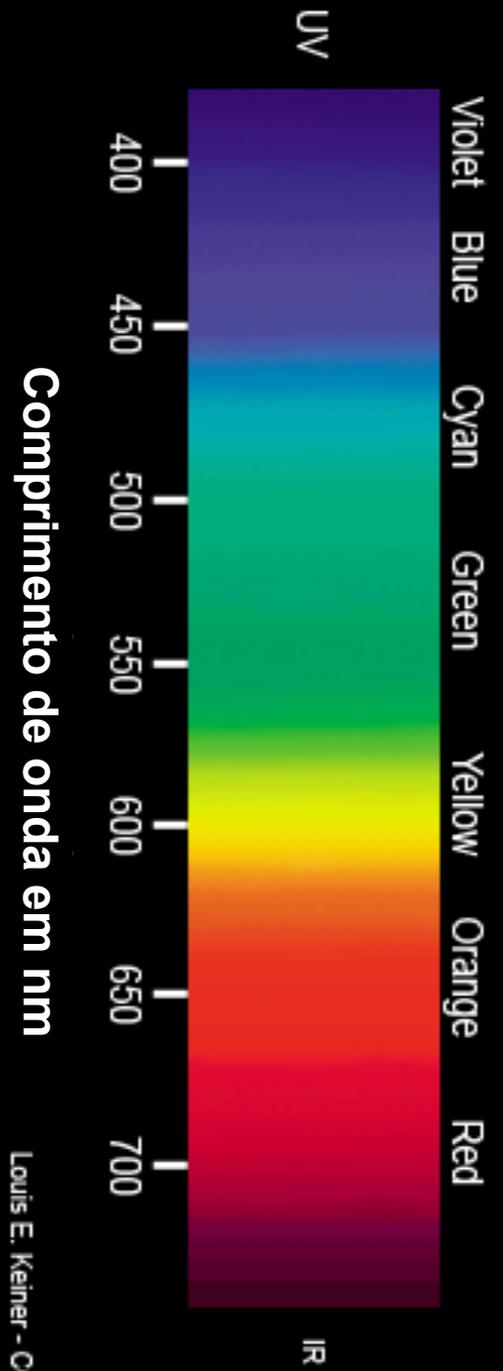
**“Enxergar” \leftrightarrow interagir $\Rightarrow \lambda, E$
de Broglie \Rightarrow partículas: $\lambda = h/p$**

Einstein \Rightarrow $E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4$



IFUSP - Escola de Verão 2015
 Aceleradores - MNM

O espectro visível



Comprimento de onda em nm

Louis E. Keiner - CCU

Introdução

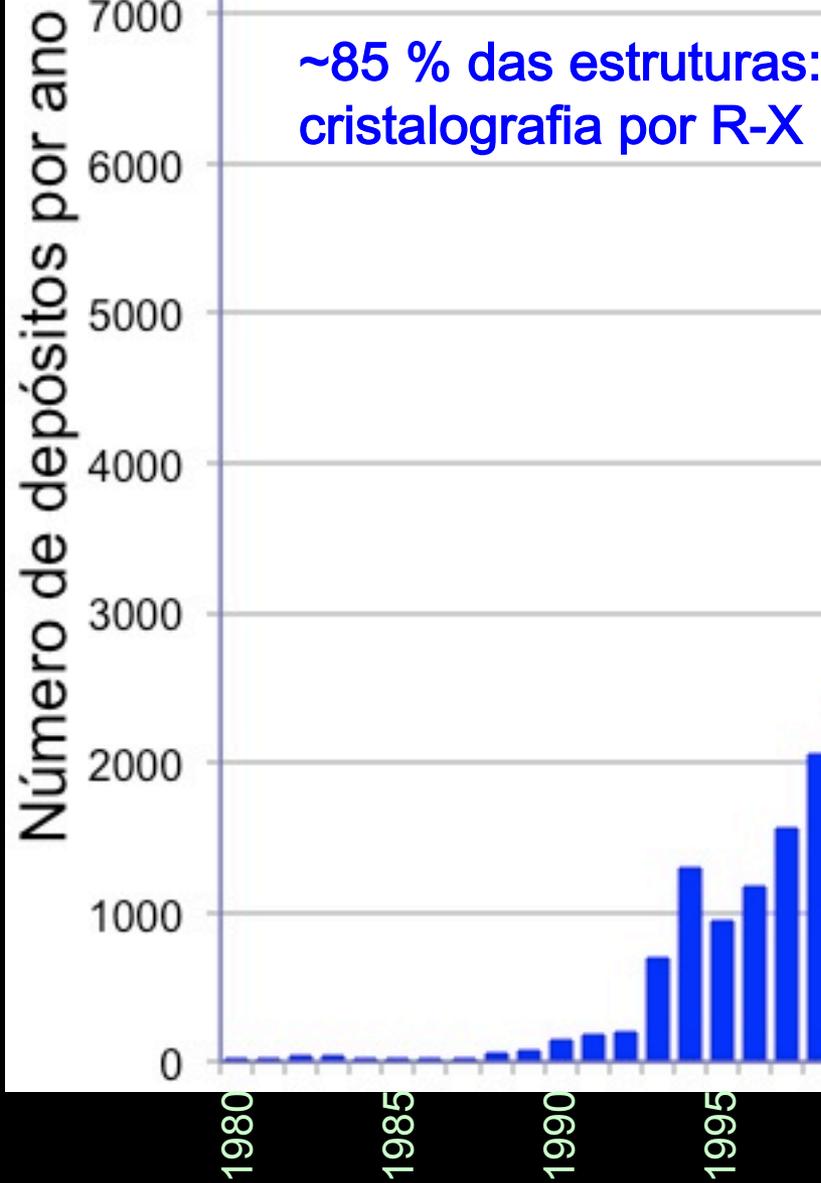
Aplicações

Pesquisa {
Partículas elementares
Nuclear
Atômica e molecular {
Matéria condensada
Microbiologia
Morfologia molecular

Saúde {
Radiodiagnóstico
Medicina Nuclear
Imagem Molecular

Indústria {
Polimerização e reticulação {
Embalagens
Elétrica
Pneus
Tintas e vernizes
Implantação iônica
Modificação de semicondutores
Análise elementar e estrutural
Esterilização {
Alimentos
Embalagens
Equipamento hospitalar

Protein Data Bank



Representação da
estrutura da enzima
bothropstoxin-I, presente
no veneno da jararacussu
(LNL5)

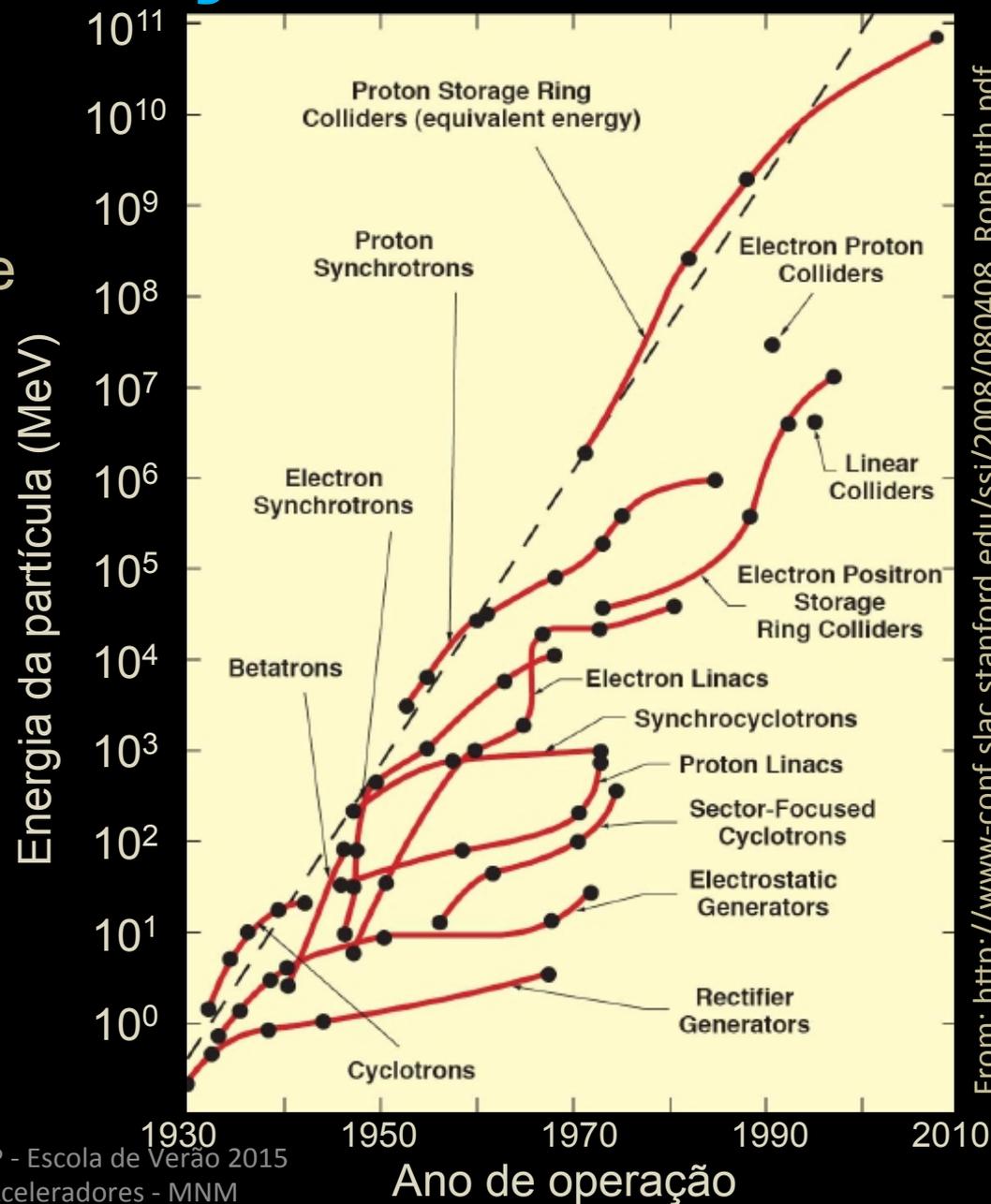
Introdução

Livingston Plot

Criado por M. S. Livingston e J. P. Blewett em 1962.

Energia equivalente: a energia de colisores é dada em termos da energia de laboratório que o feixe deveria ter para colidir com um próton em repouso com a mesma energia no CM.

$$E_{\text{colisor}} \rightarrow E_{\text{alvo fixo}}$$



História

Aceleradores \Rightarrow \$\$\$\$

Motivação científica forte.

Em 1927, como Presidente da Royal Society, Ernest Rutherford pediu:

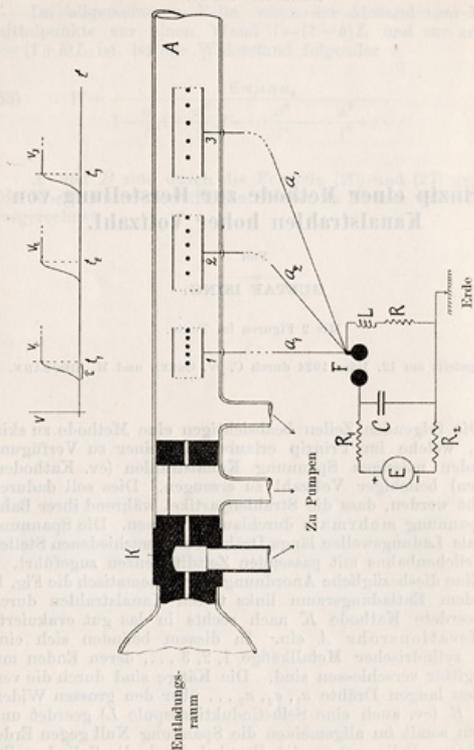
“It has long been my ambition to have available for study a copious supply of atoms and electrons which have individual energy far transcending that of the α and β -particles from radioactive bodies. I am hopeful that I may yet have my wish fulfilled, ...”



História

Nessa época havia duas idéias disponíveis: o linear de Ising ...

Em 1924 ...



nach den Zylindern; die Längen der Drähte (und der Zylinder) sind so bemessen, dass diejenigen Teilchen, welche bei Ankunft der Welle an den Zylinder 1 sich in diesem befinden, gerade Zeit genug haben in den Käfig 2 zu schlüpfen, bevor die Ladungswelle an diesen anlangt u. s. w.

Betrachten wir den Vorgang etwas näher an Hand der oberen Figur, welche die Spannung V der Käfige als Funktionen der Zeit schematisch angibt: Zur Zeit t_1 ist gerade die volle Spannung des Käfigs 1 erreicht worden. Diejenigen Strahlenpartikel, welche vor dem Anstieg der Spannung in den Zylinder eingedrungen waren, sind durch Punkte angedeutet; der Abstand vom linken Zylinderende zu dem nächsten Punkte bezeichnet den Weg, den die Partikel in der Zeit τ zurücklegen, welche zur Ausbildung der vollen Spannung am Zylinder nötig ist. — Die Wellenfront ist nicht ganz steil sondern etwas geneigt; nach P. O. PEDERSEN¹ scheint τ von der Grössenordnung 10^{-9} Sek. zu sein. — Bei der späteren Zeit t_2 ist die Spannung des Käfigs 2 gerade voll ausgebildet; die Partikel, welche zu der Zeit t_1 im Zylinder 1 eingeschlossen waren, befinden sich jetzt in 2 in der durch Punkte angedeuteten Lage, u. s. w. Bei jedem Entladungsschlag der Funkenstrecke F wird ein Schwarm von Partikeln diesen successiven Accelerationen unterworfen.²

Fig. 1.

Ein mechanisches Analogon dieses Vorgangs hat man, wenn das Problem vorliegt, einer Kugel durch Fallen längs geneigten Ebenen eine grosse horizontale Geschwindigkeit zu geben, und dabei die Höhe H der Fallstrecke aus praktischen Gründen begrenzt ist. Das Problem mag in der unten in Fig. 2 gezeichneten Weise gelöst werden:

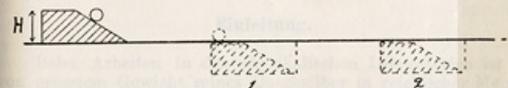


Fig. 2.

Unter dem horizontalen Bahn der Kugel befinden sich Klötze 1, 2, 3 ... von der Höhe H , welche in dem Augenblicke, wo sie von der Kugel betreten werden, durch äussere Kräfte die Strecke H gehoben werden. Diese Hebung (Erhöhen des Schwerepotentials der Kugel) entspricht genau die Aufladung der Zylinder mit den darin eingedrungenen Partikel. —

¹ On the Lichtenberg Figures, Part II, S. 32 (Math.-Fys. Medd. utg. af Kgl. Danske Vidensk. Selskab IV, 1922).

² Man könnte natürlich auch daran denken, denselben Zweck durch regelmäßige elektrische Schwingungen zu gewinnen, welche mit passenden Phasendifferenzen den Zylindern 1, 2, 3 ... zugeführt werden. Aber es dürfte, bei der notwendigerweise sehr geringen Wellenlänge dieser Schwingungen, schwierig sein denselben die gewünschte grosse Intensität zu geben. Auch die zu erwartenden Oberschwingungen machen wohl diesen Weg weniger aussichtsvoll.

from The Bancroft Library, UC Berkeley

História

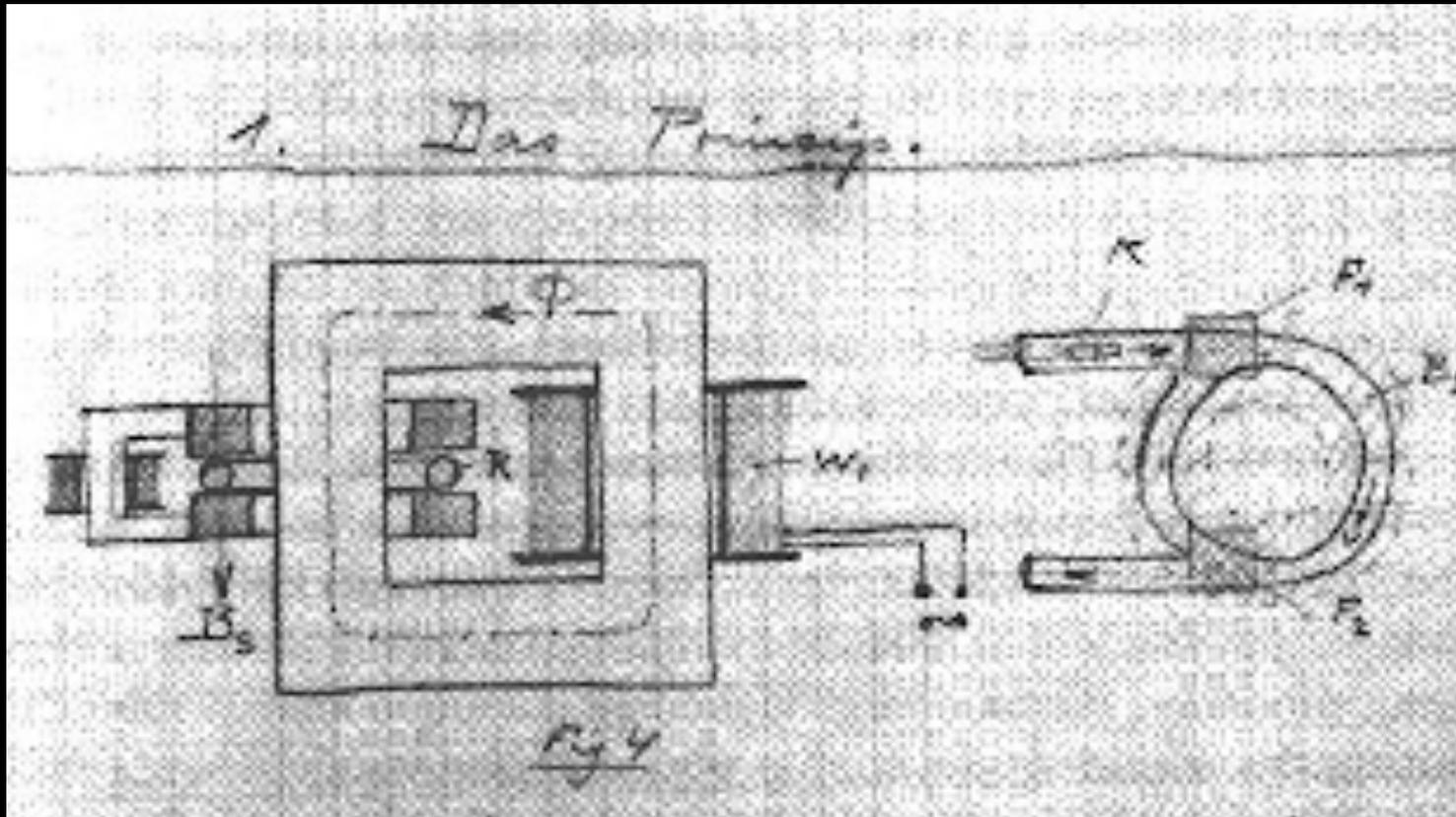
Rolf Wideröe, engenheiro norueguês estudando na Alemanha



From <http://www.aip.org/history>

História – primeiras tentativas

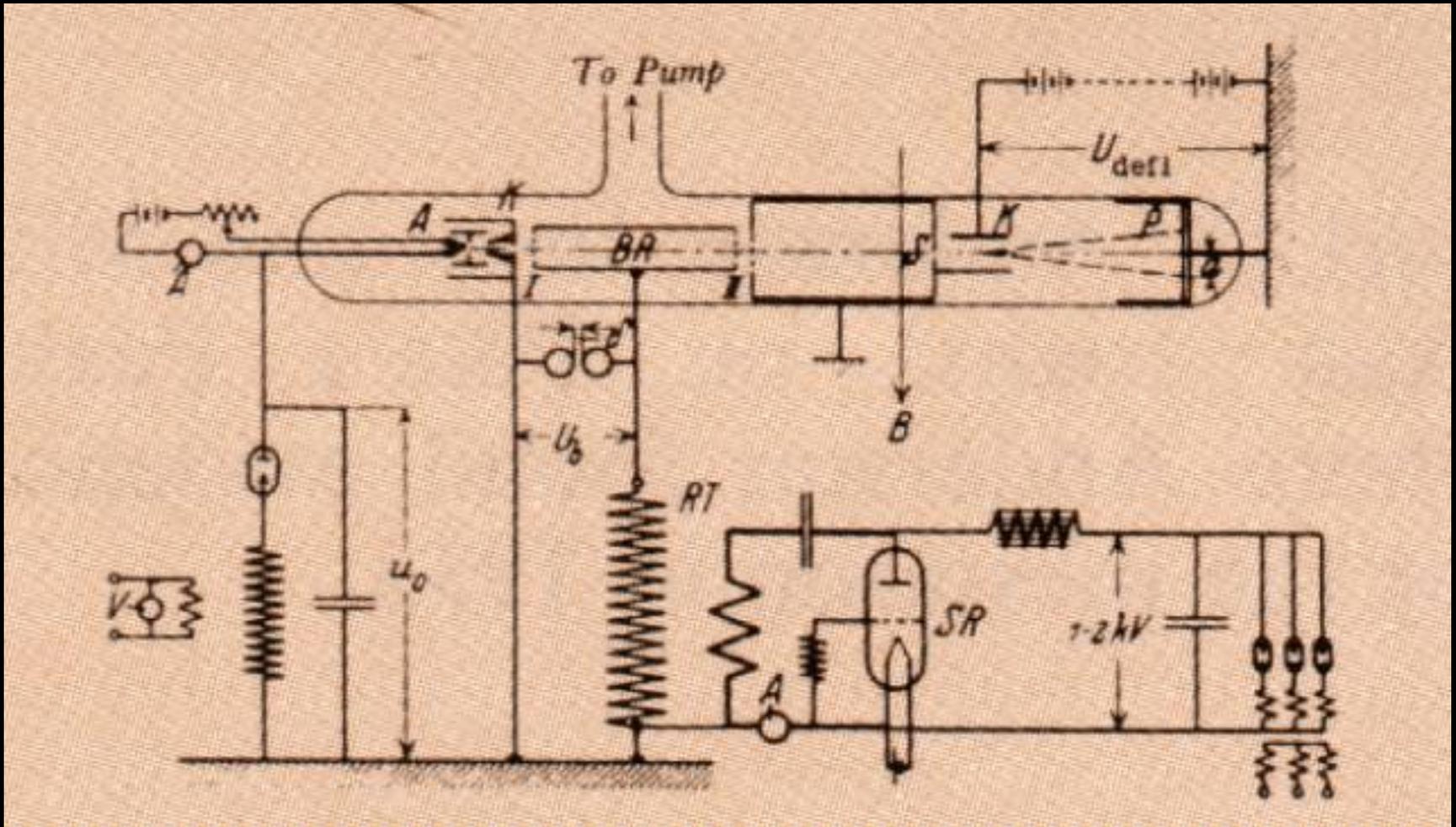
Wideröe: “ray transformer” (depois chamado de betatron)



From <http://www-library.desy.de/elbooks/wideroe>

História – primeiras tentativas

1928: Wideröe constrói linac que acelera íons de Hg a 50 keV



From <http://imglib.lbl.gov/ImgLib/COLLECTIONS/BERKELEY-LAB/images/>

Aceleradores Eletrostáticos

Essas duas idéias tiveram que esperar ~ 15 anos até serem implementadas.

Interação eletromagnética é a base para aceleração e desvio em todos os aceleradores de partículas.

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Idéia mais simples: usar um potencial (AT) para produzir o campo elétrico e acelerar as partículas.

Rutherford havia usado partículas α para estudar o átomo.

$E_\alpha \approx 10 \text{ MeV} \Rightarrow \Delta V \sim \text{MV}$, impossível para a época.

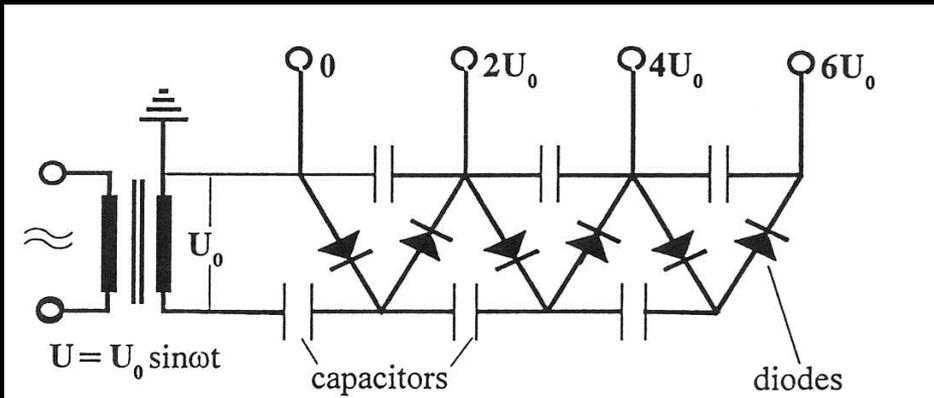
Mas a mecânica quântica estava em construção e ...

Aceleradores Eletrostáticos

George Gamow explica o decaimento α por tunelamento. Então ...

prótons de ~ 300 keV deveriam alcançar o núcleo.

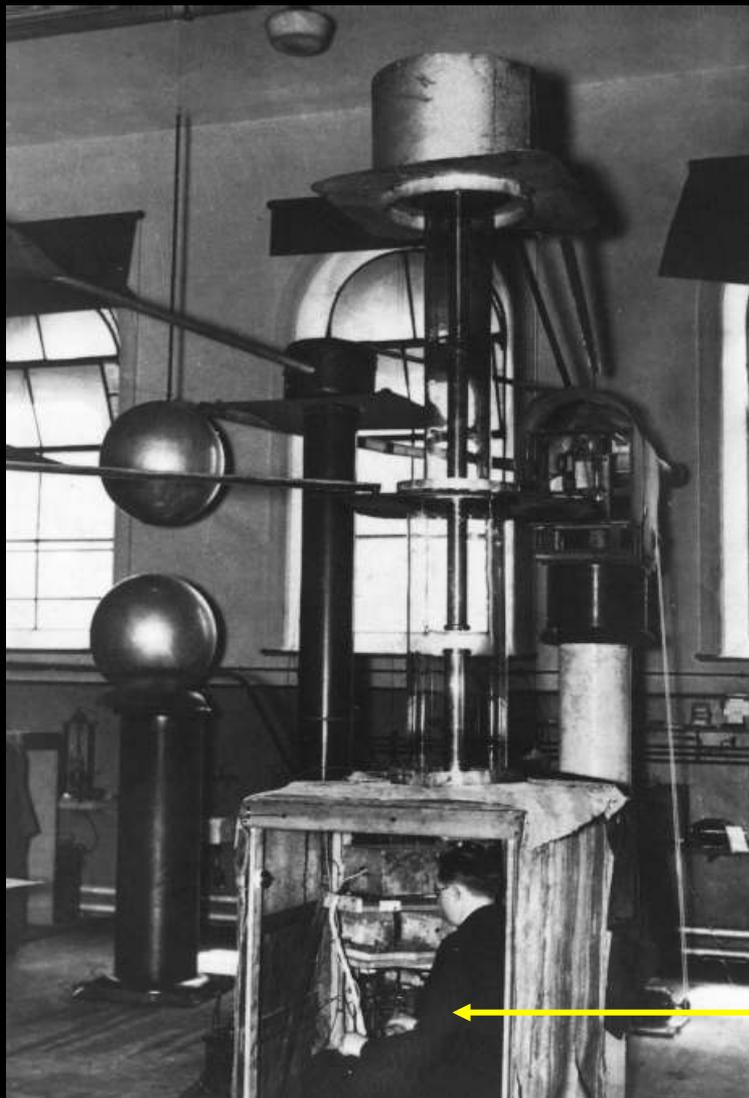
J. D. Cockcroft e E. T. S. Walton desenvolvem um multiplicador de tensão que alcança algumas centenas de kV.



Eles então desenham um acelerador eletrostático.

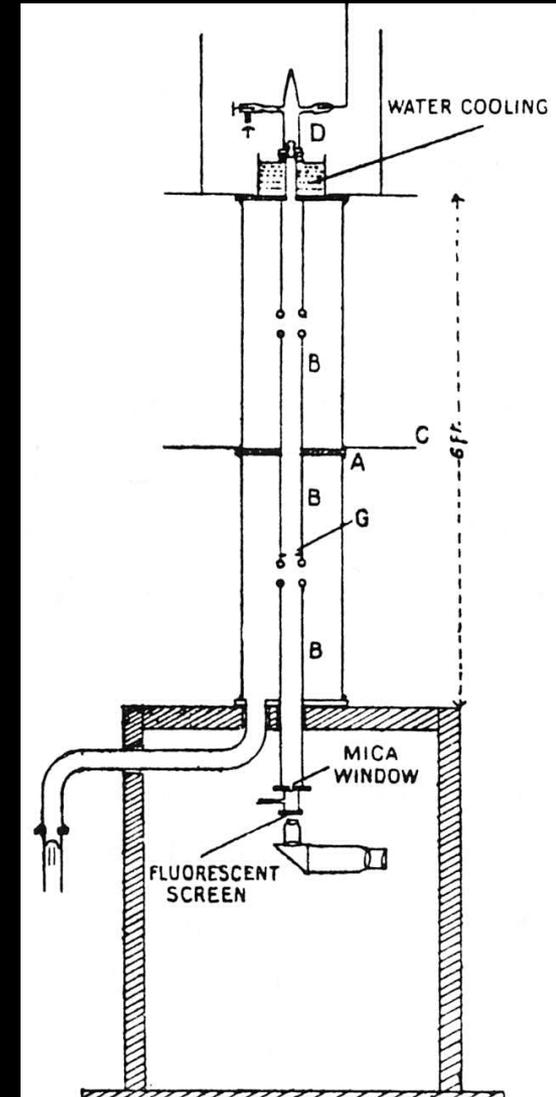
Aceleradores Eletrostáticos

1932: primeira reação nuclear produzida por um instrumento de construção humana: ${}^7\text{Li} + p \rightarrow {}^8\text{Be} \rightarrow \alpha + \alpha$.



Walton

IFUSP - Escola de Verão 2015
Aceleradores - MNM



Aceleradores Eletrostáticos

O chamado de Rutherford fora ouvido, a era dos aceleradores de partículas havia se iniciado.



Cockcroft Rutherford Walton
1932, no Cavendish Lab.

Mas geradores de AT têm seus problemas ...

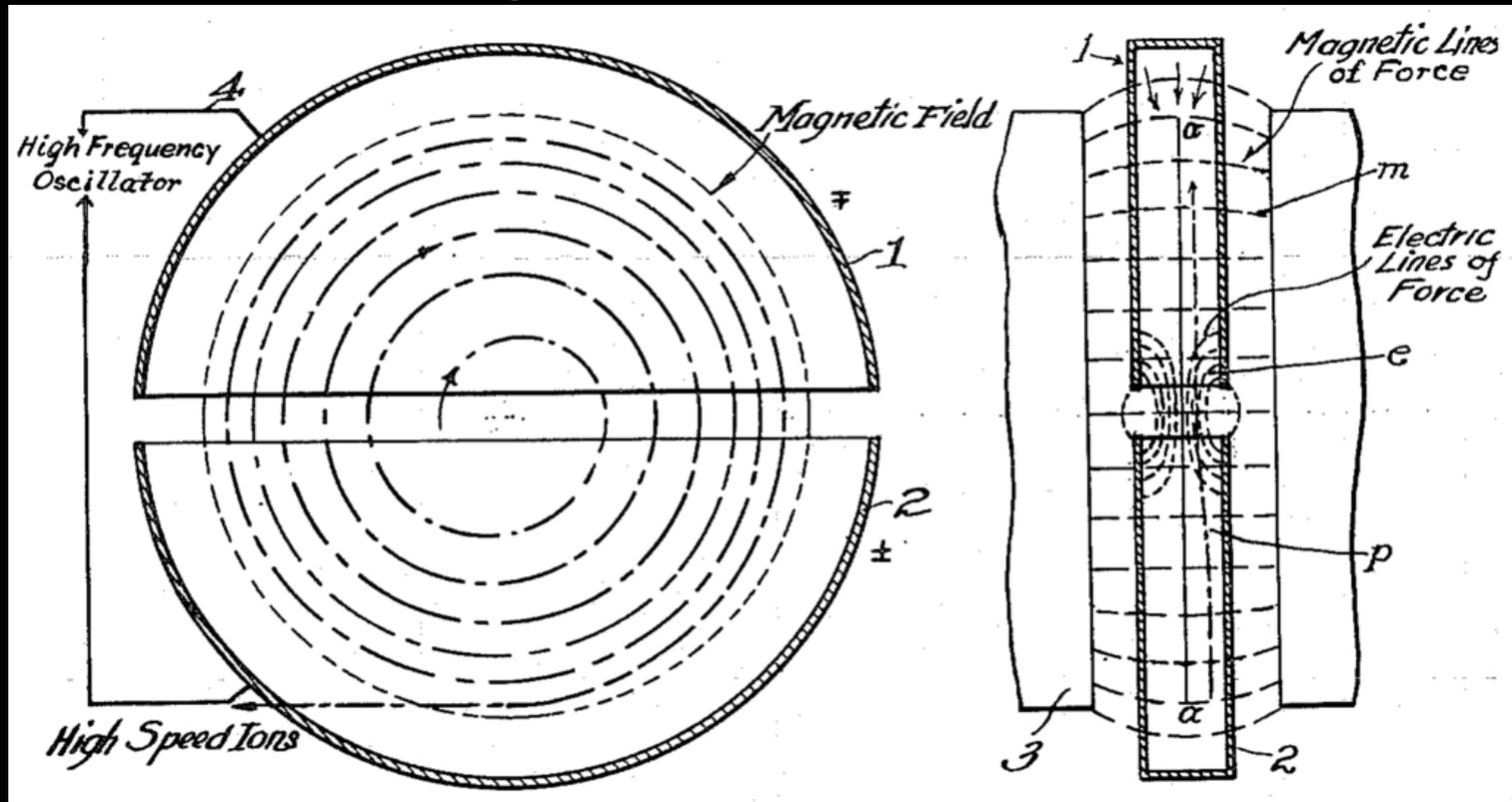
Gerador VDG de 5 MV, com 12 m de altura, no hangar de Round Hill, do MIT, em 1933.

From <http://libraries.mit.edu/archives/exhibits/van-de-graaff/>

Primeiros Aceleradores Circulares

O Cíclotron e o “Ray Transformer”

Ambos são relacionados a Wideröe. Depois de ler o artigo de Wideröe sobre o linac, Ernest Lawrence criou o cíclotron, que evita o problema de longos tubos de movimento.



From U.S. Patent 1,948,384, Ernest O. Lawrence, “Method and apparatus for the acceleration of ions”

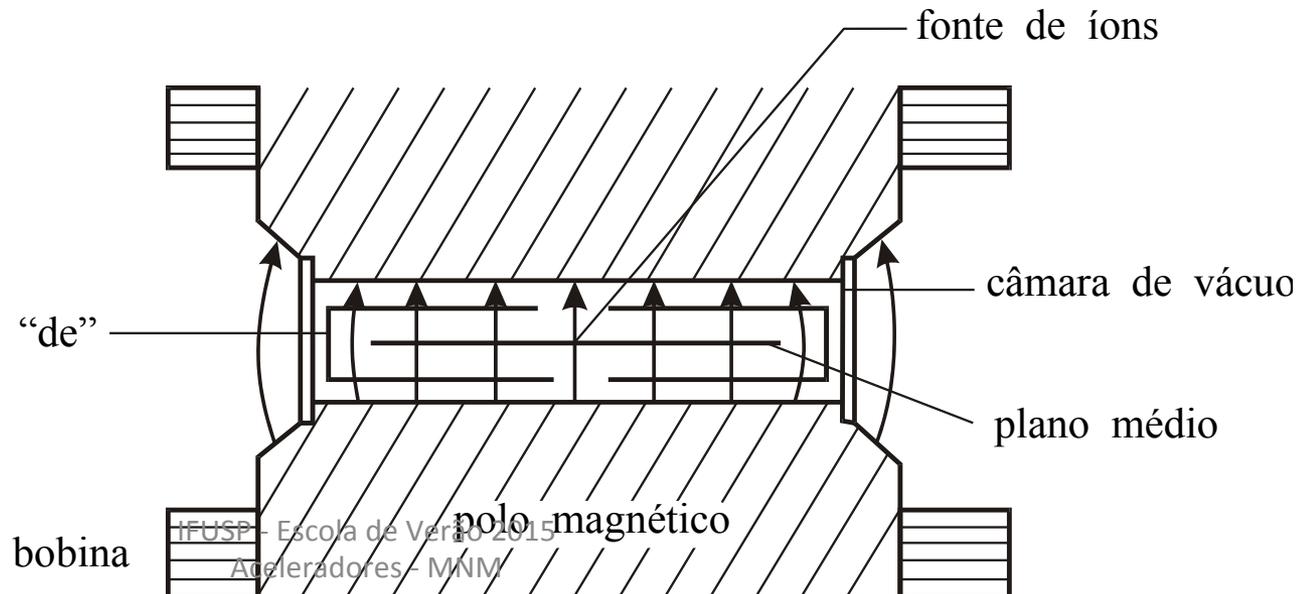
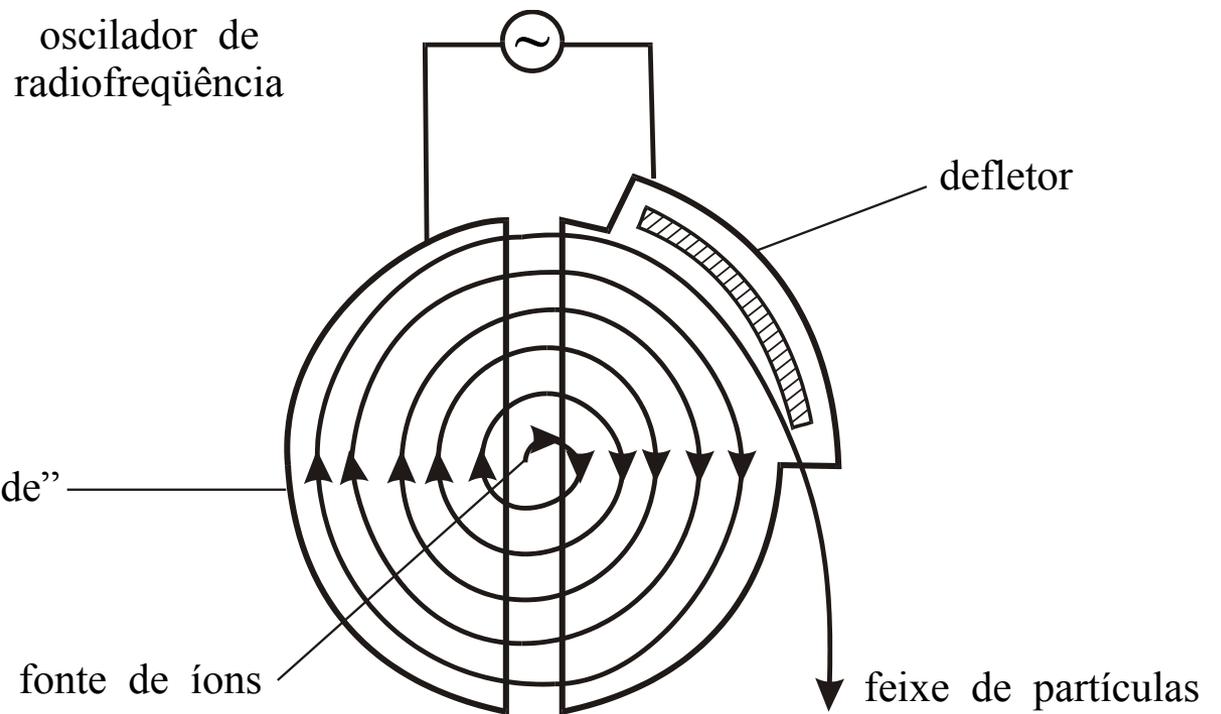
IFUSP - Escola de Verão 2015

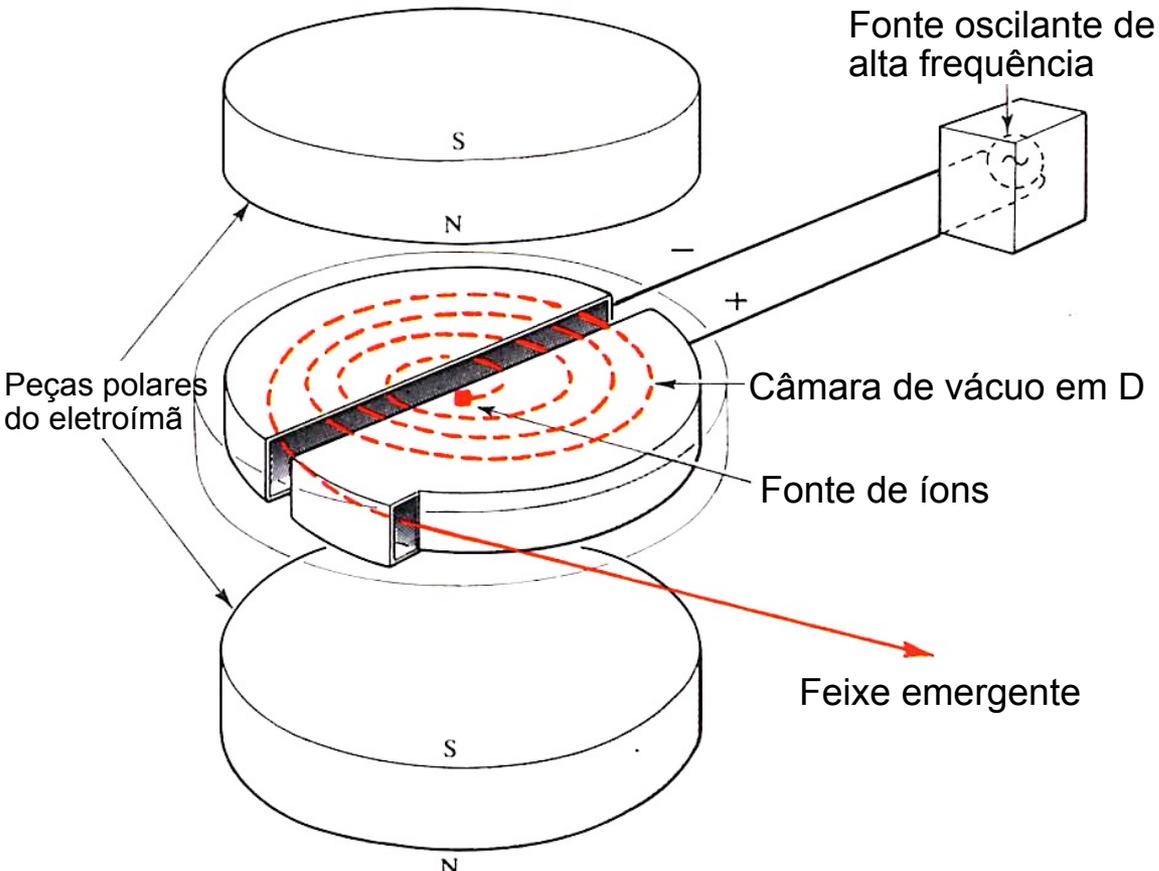
Aceleradores - MNM

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{e}{m} B$$

Força de Lorentz:

$$\vec{F} = e\vec{v} \times \vec{B}$$



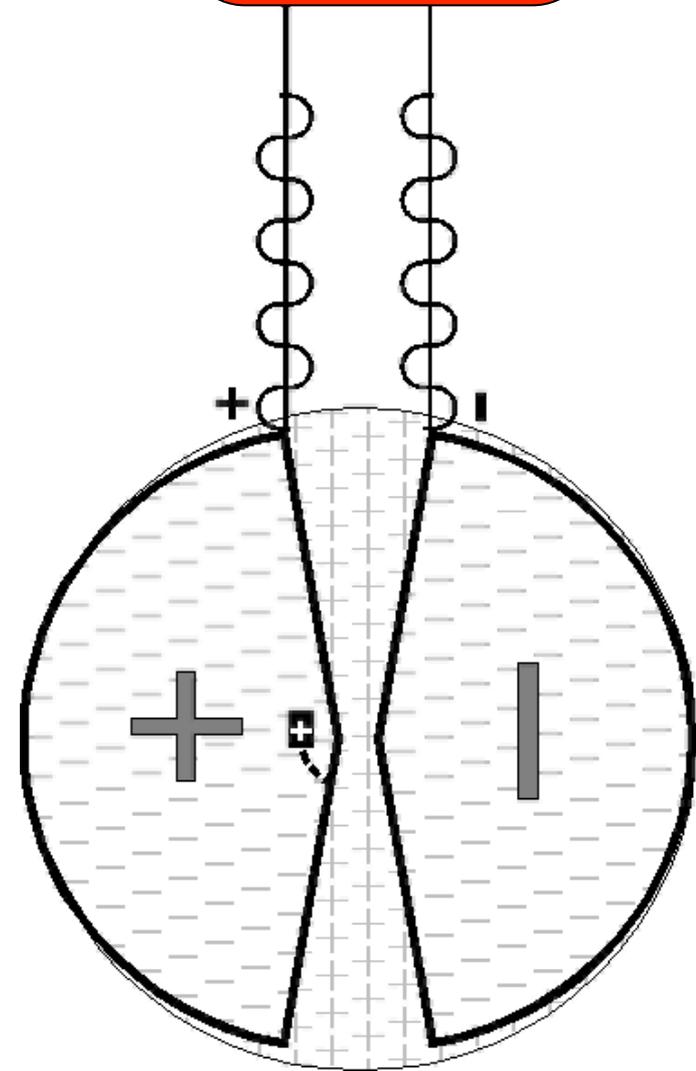


$T > \approx 50 \text{ MeV} \Rightarrow$ Sincro-cíclotron

$$f_{\text{RF}} = \frac{1}{2\pi} \frac{eB}{\gamma m} \Rightarrow f_{\text{RF}} \propto \frac{1}{\gamma}$$

E. O. Lawrence and M. S. Livingstone,
*The production of high speed light ions without
 the use of high voltages*, Phys. Rev. **40**(1932)19.

Fonte de tensão em alta frequência



Primeiros Aceleradores Circulares

O Cíclotron e o “Ray Transformer”

Wideröe tinha companhia. Vários cientistas contribuíram no desenvolvimento do betatron. Em 1940 D. Kerst teve sucesso e um feixe de 2,3 MeV foi produzido num betatron de 7,5 cm de raio.



From <http://physics.illinois.edu/images/history/Kerst>

IFUSP - Escola de Verão 2015

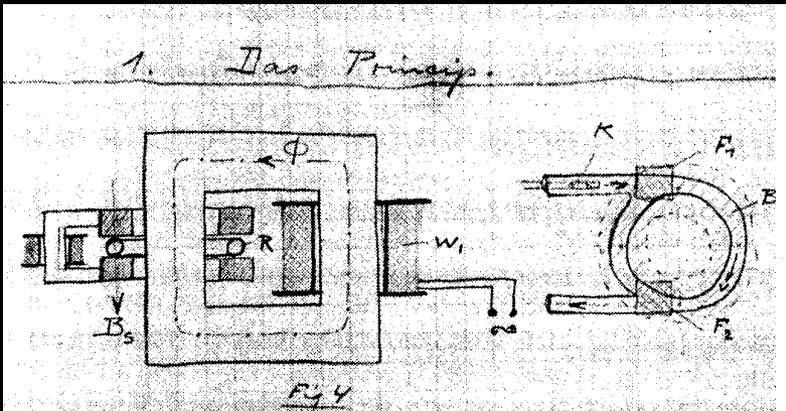
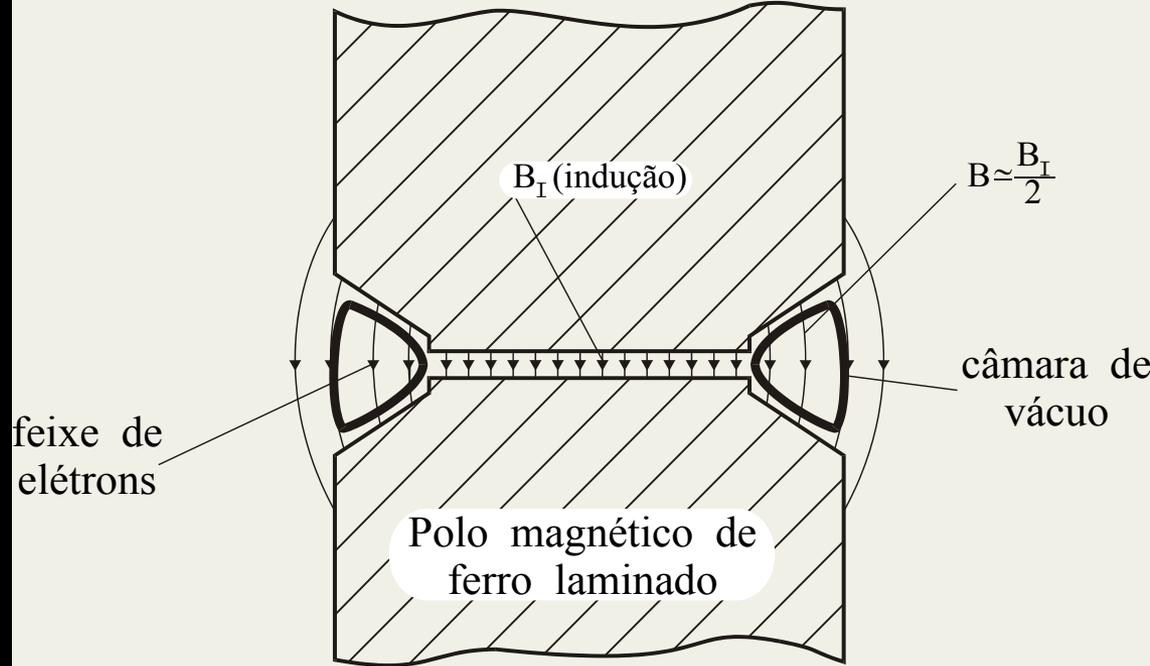
Aceleradores - MNM

Betatron

Lei de Faraday:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

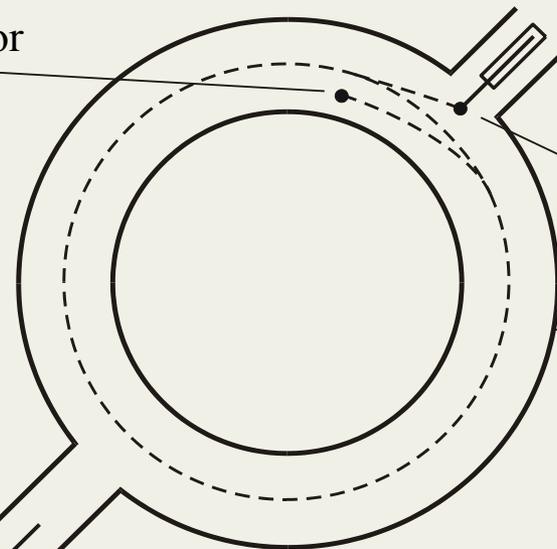
Wideröe, 1924



D. W. Kerst, *The acceleration of electrons by magnetic induction*, Phys. Rev. **60**(1941)47.

alvo produtor de raios-X

bomba de vácuo



fonte de elétrons

câmara de vácuo

Estabilidade de Fase e Aceleração por RF

Betatrões e cíclotrons: limitação em energia:

$$R_{\text{órbita}} = \frac{p}{eB}$$

B limitado \Rightarrow se $E \uparrow \Rightarrow R \uparrow$ também.

Betatrões: vida curta.

1944-45 novo princípio:

Veksler, na União Soviética, ao final de 1944; e

McMillan, nos EUA, ao final de 1945,

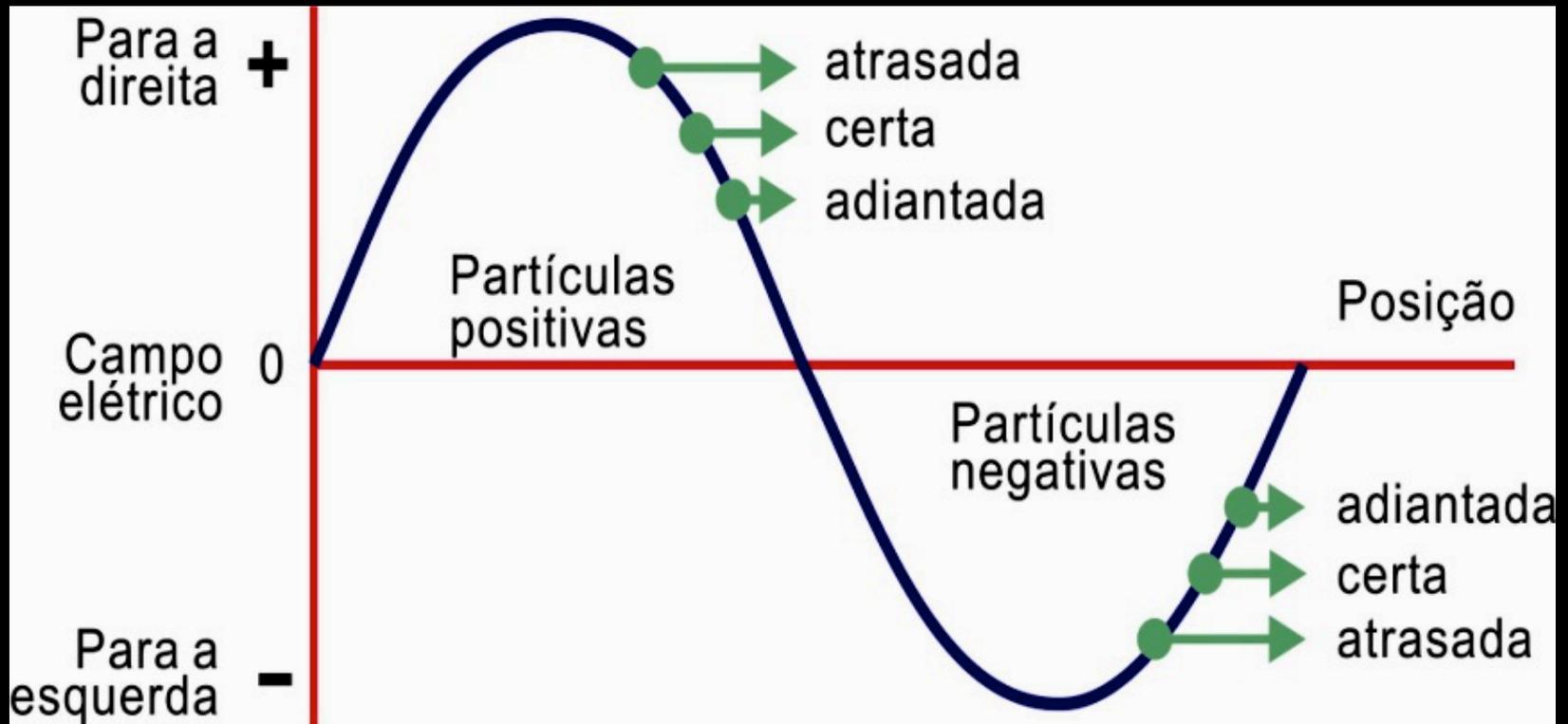
expressaram independentemente o Princípio de Estabilidade de Fase, que abriu as portas para novos aceleradores: o microtron (Veksler), o síncrotron (Oliphant e McMillan), e os sincro-cíclotrons.

Estabilidade de Fase e Aceleração por RF

A estabilidade de fase ligada à microestrutura do feixe.

Partículas sujeitas a oscilações estáveis em energia e em fase em torno da partícula guia.

A partícula guia define a trajetória e a fase de referência.



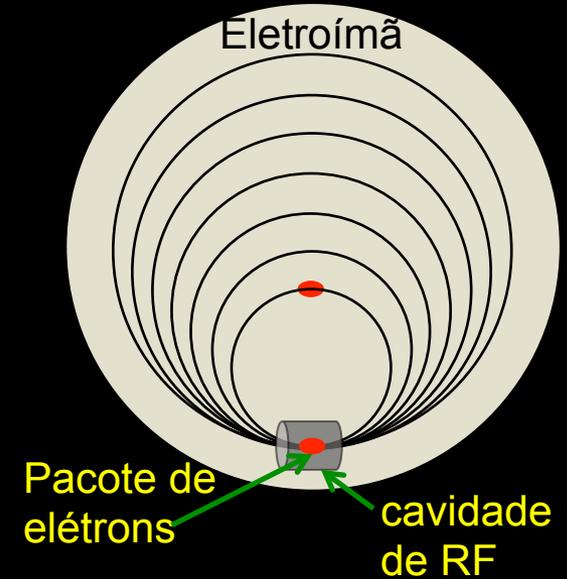
Estabilidade de Fase e Aceleração por RF

No microtron clássico, a aceleração síncrona requer duas condições:

$$T_1 = aT_{RF}$$

$$\Delta T = T_{n+1} - T_n = bT_{RF}$$

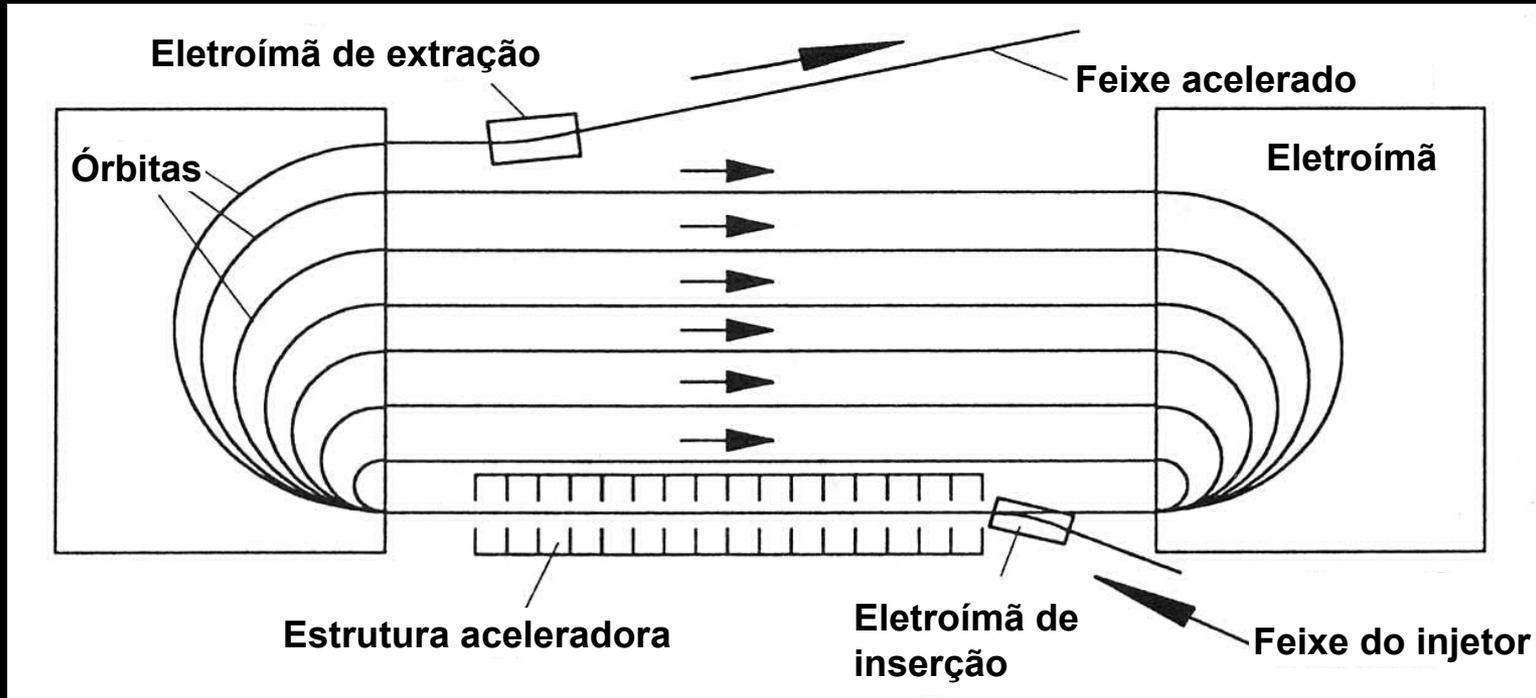
para que os pacotes de elétrons cheguem à cavidade aceleradora na fase correta em relação à RF.



Veksler



Microtron tipo *racetrack*



Síncrotrons

Em 1945, McMillan, em carta ao editor do Phys. Rev., propõe uma máquina na qual tanto a frequência quanto o campo magnético variam, cunhando os termos “síncrotron” e “estabilidade de fase”.

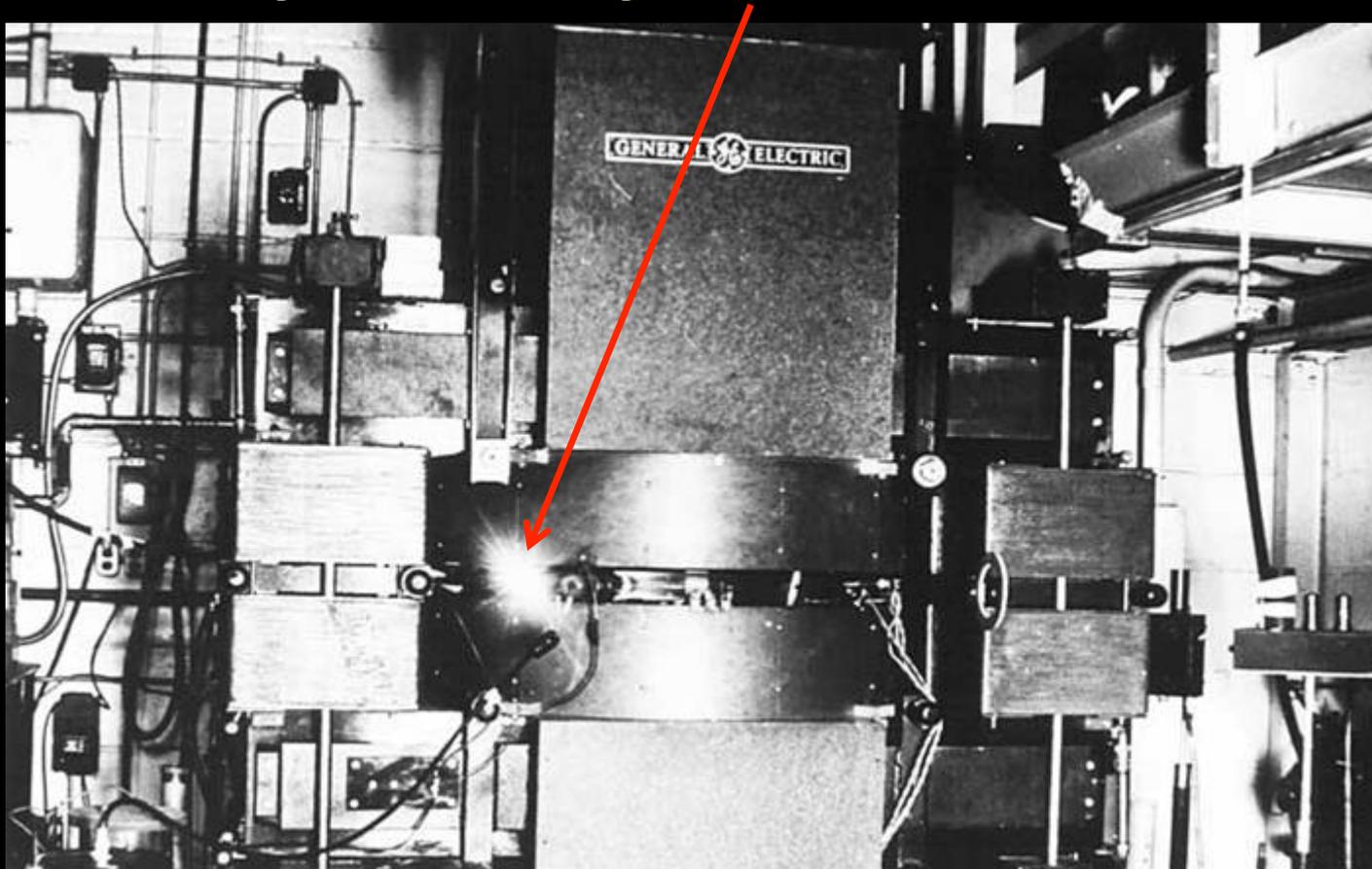


Esse artigo gerou uma corrida para a construção do primeiro síncrotron.

Síncrotrons

O 1º síncrotron foi uma máquina de 70 MeV, de elétrons, finalizada em 1947 pela General Electric, nos EUA.

Primeira observação de radiação síncrotron no visível.



From: A. L. Robinson, in X-ray Data Booklet: "History of synchrotron radiation sources"

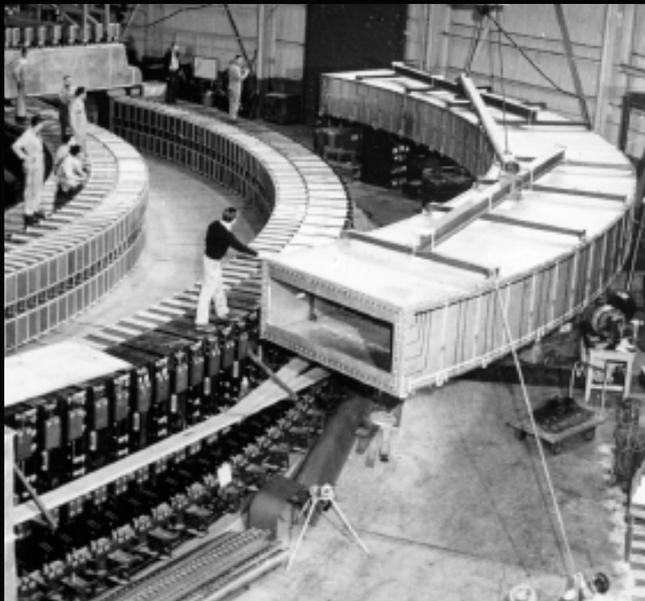
Síncrotrons

As primeiras máquinas usavam o conceito de “weak focusing”.
 $B(r)$ com um gradiente negativo para focalização vertical.

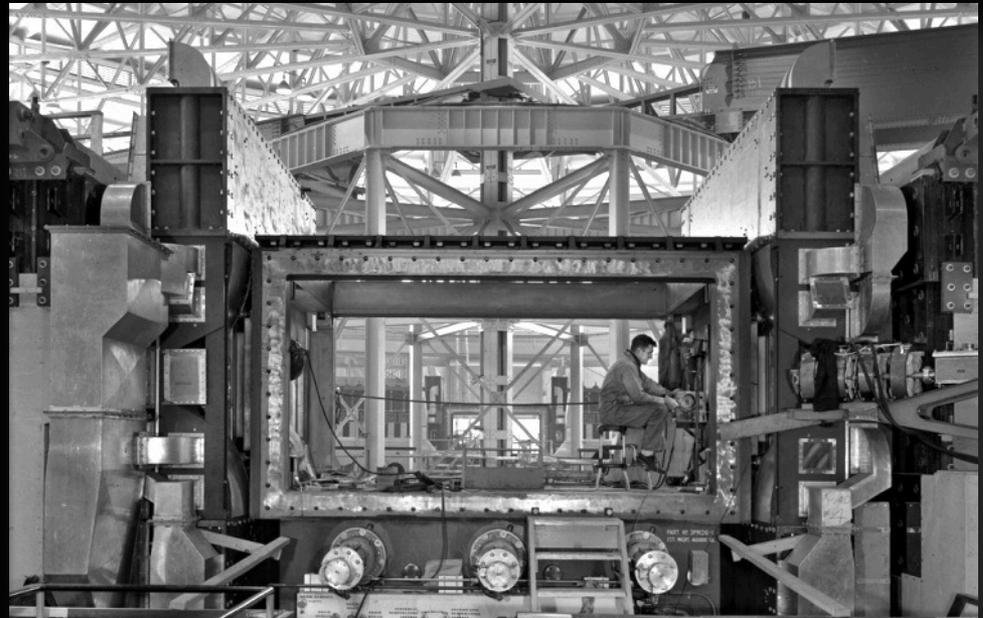


Qual seria o tamanho do *gap* para dar conta das imperfeições dos eletroímãs e da eventual má injeção das partículas?

O Bevatron, um síncrotron de 6 GeV construído em Berkeley em 1954, tinha abertura dos magnetos de $4,3 \times 1,2 \text{ m}^2$!



From: E. Lofgren, “The Bevatron”,
Antiproton Symposium, 2005.



IFUSP - Escola de Verão 2015
Aceleradores - MNM

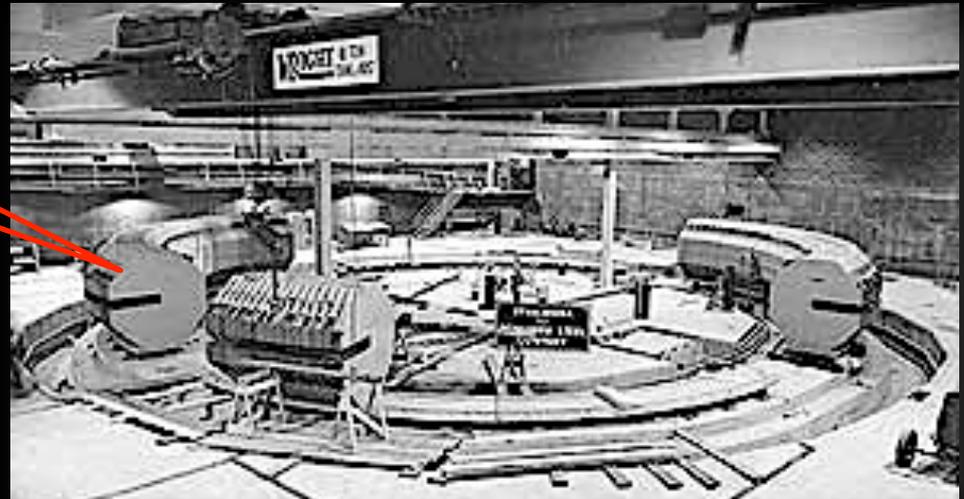
From: <http://imglib.lbl.gov>

Síncrotrons

O p-síncrotron de 3 GeV, construído em 1952 em Brookhaven, o Cosmotron, era mais modesto, com abertura de $1,20 \times 0,22 \text{ m}^2$.

Magneto em C,
abrindo para fora

Os eletroímãs
apresentaram saturação,
que prejudicou o gradiente
previsto.



From: <http://bnl.gov>

A energia final foi limitada por esse efeito.

Livingston sugeriu a instalação de alguns dos magnetos com a abertura para dentro, apesar de preocupado com a focalização em baixas energias.

O resultado foi ótimo e assim nasceu o conceito de “gradiente alternado”.

Síncrotrons

Em 1952, Livingston, Courant e Snyder publicaram um artigo descrevendo o conceito de gradiente alternado.

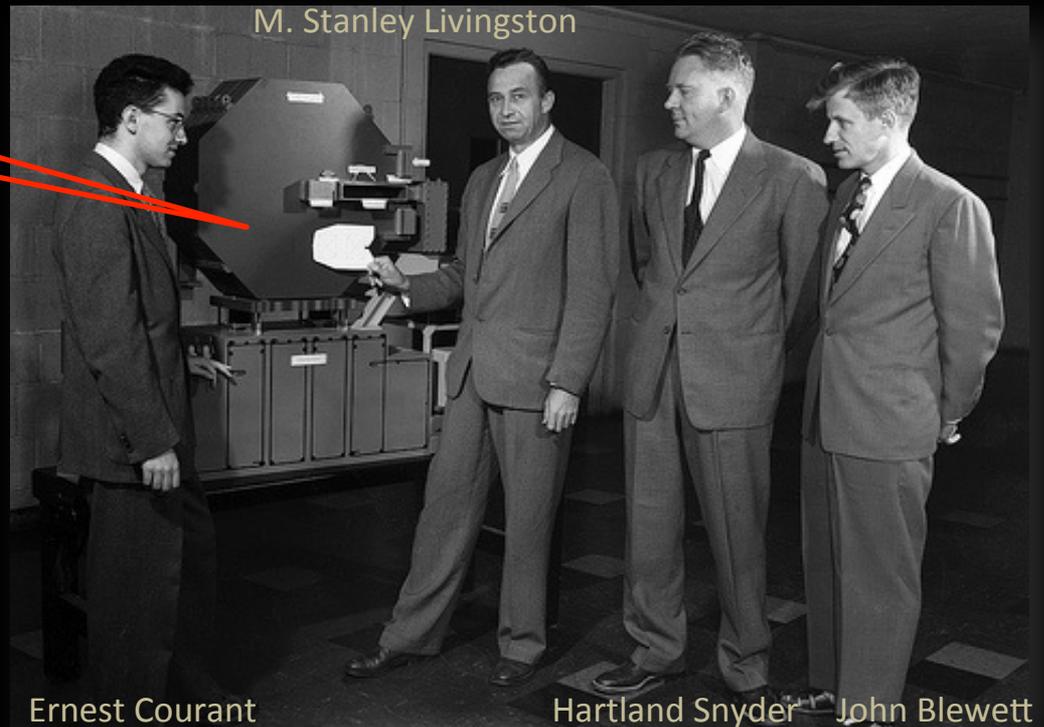
Descobriram, então, que ele havia sido patenteado 2 anos antes por Nick Christofilos, um engenheiro grego.

Modelo em escala 4:1
do eletroímã em C

O AG foi uma revolução.

Redução nos eletroímãs,
nas fontes de corrente,
câmaras de vácuo, etc.

Em resumo, mais energia
pelo mesmo \$.



From: <http://scienceblogs.com>

Síncrotrons de Elétrons

O que é Luz Síncrotron ?



Propriedades:

Espectro amplo

Alta intensidade/brilho

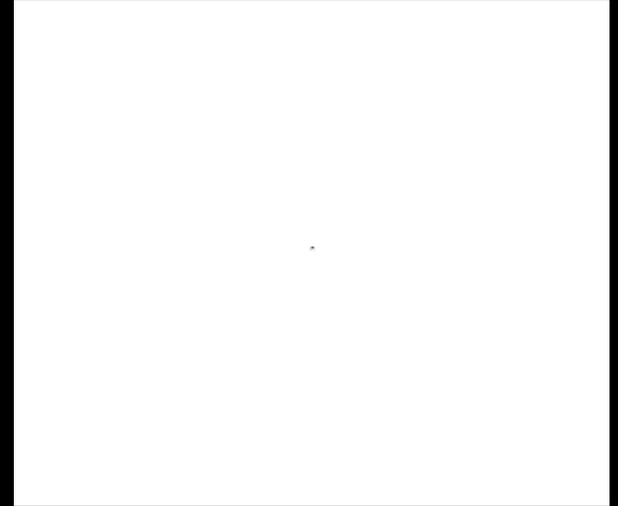
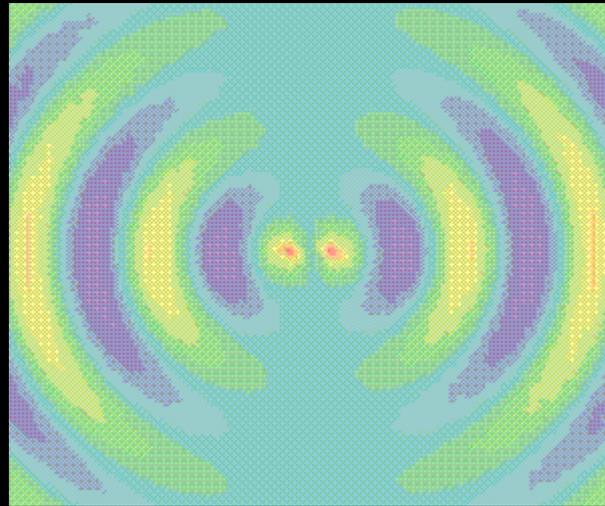
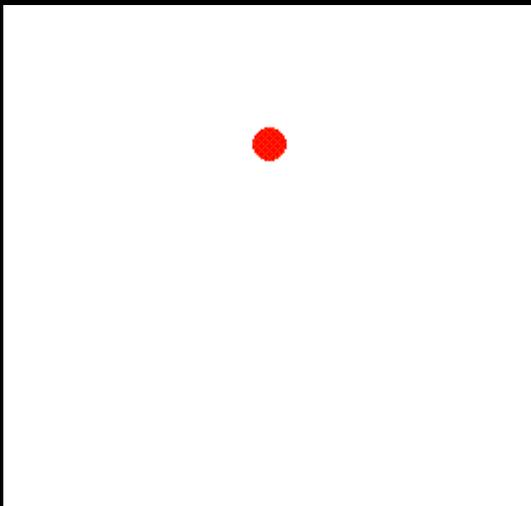
Polarização

A Luz Síncrotron é emitida nas partes curvas da trajetória dos elétrons

P. Tavares, LNLS

Síncrotrons de Elétrons

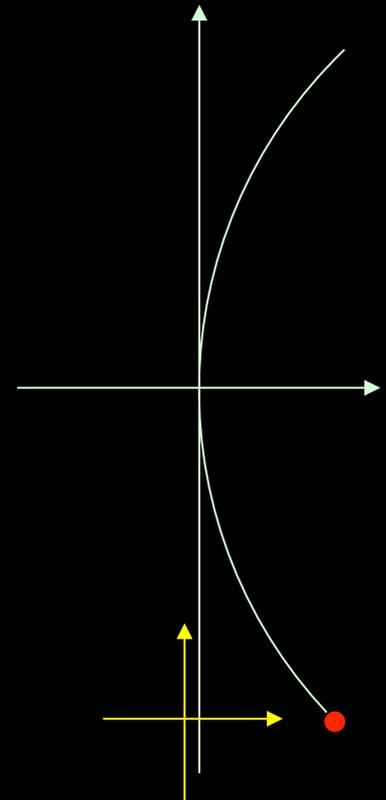
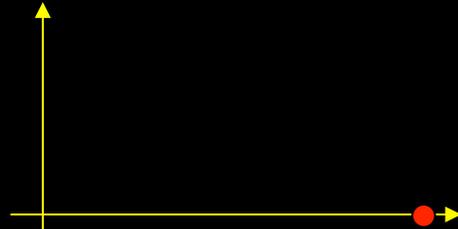
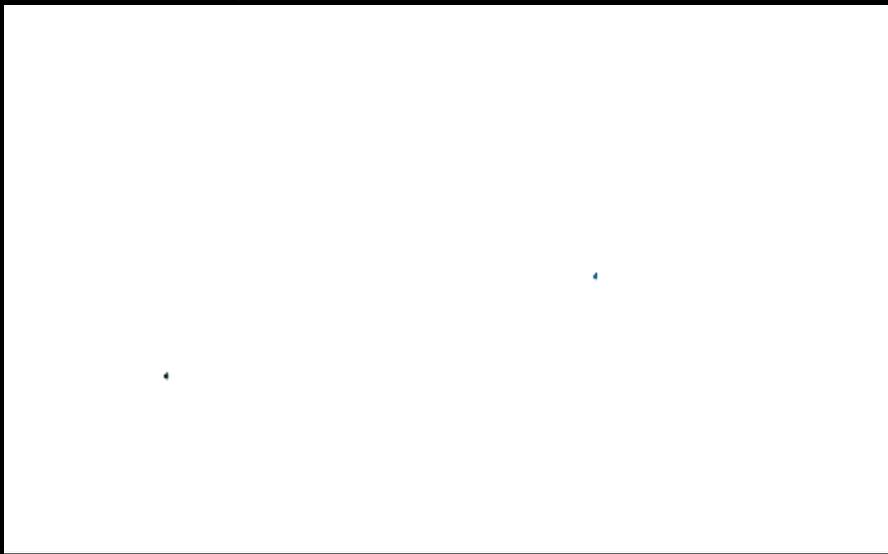
Emissão de radiação por uma carga acelerada



P. Tavares, LNLS

Síncrotrons de Elétrons

Emissão de radiação por uma partícula carregada em movimento circular uniforme



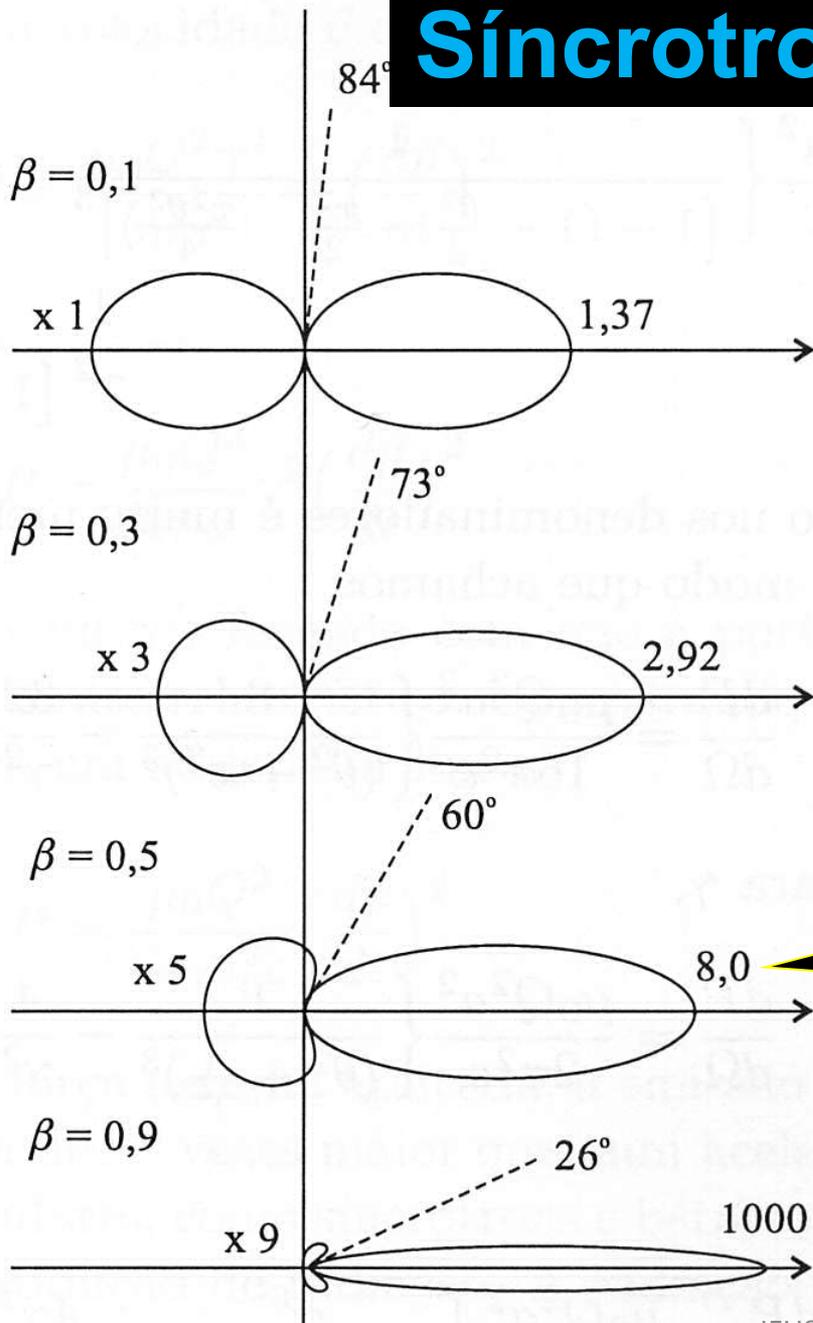
$$v = 0,7c$$

$$\text{Potência} \propto \gamma^4$$

$$v \ll c$$



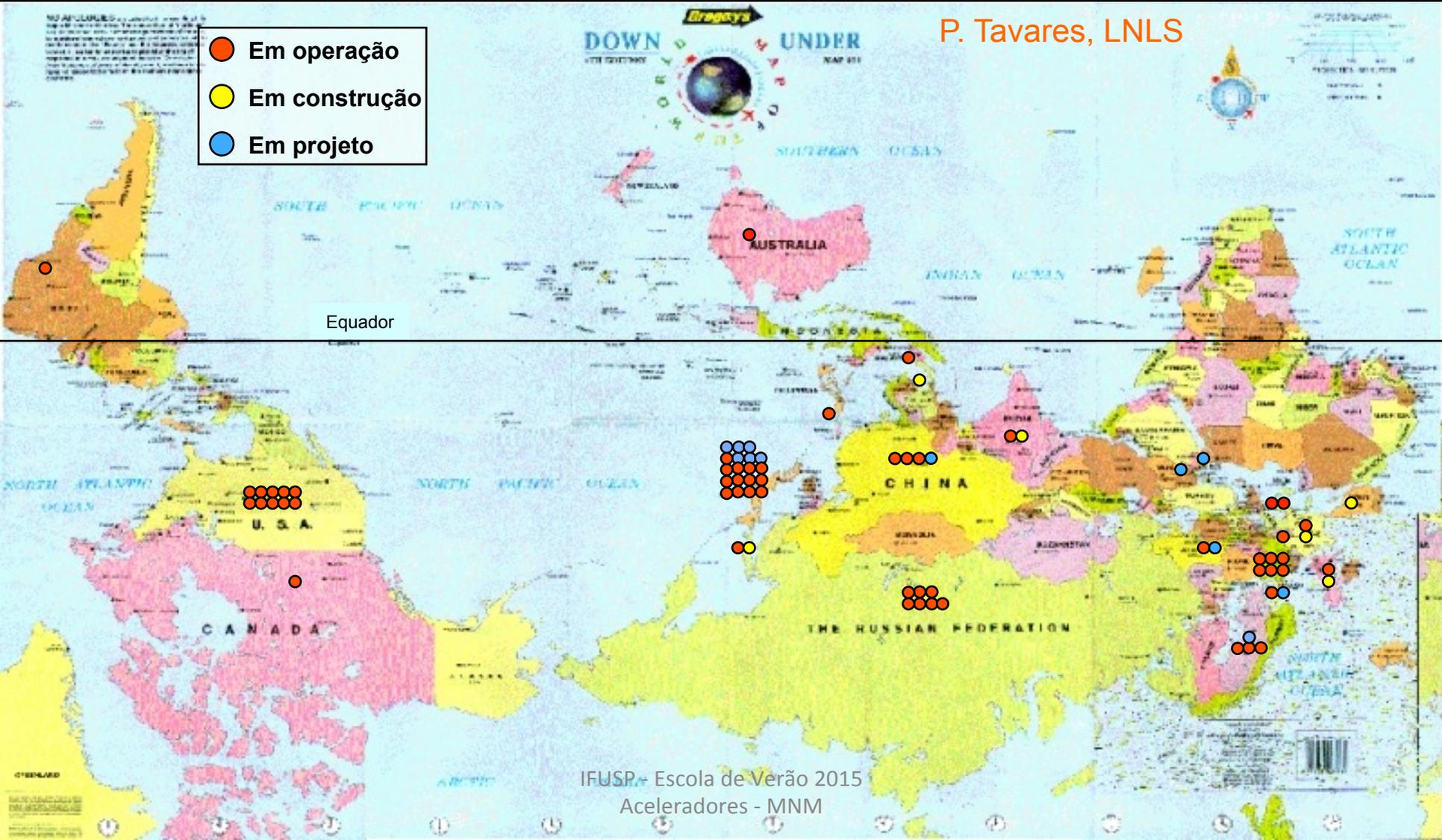
Síncrotrons de Elétrons



Razão entre a energia emitida pelos lobos frontal/traseiro

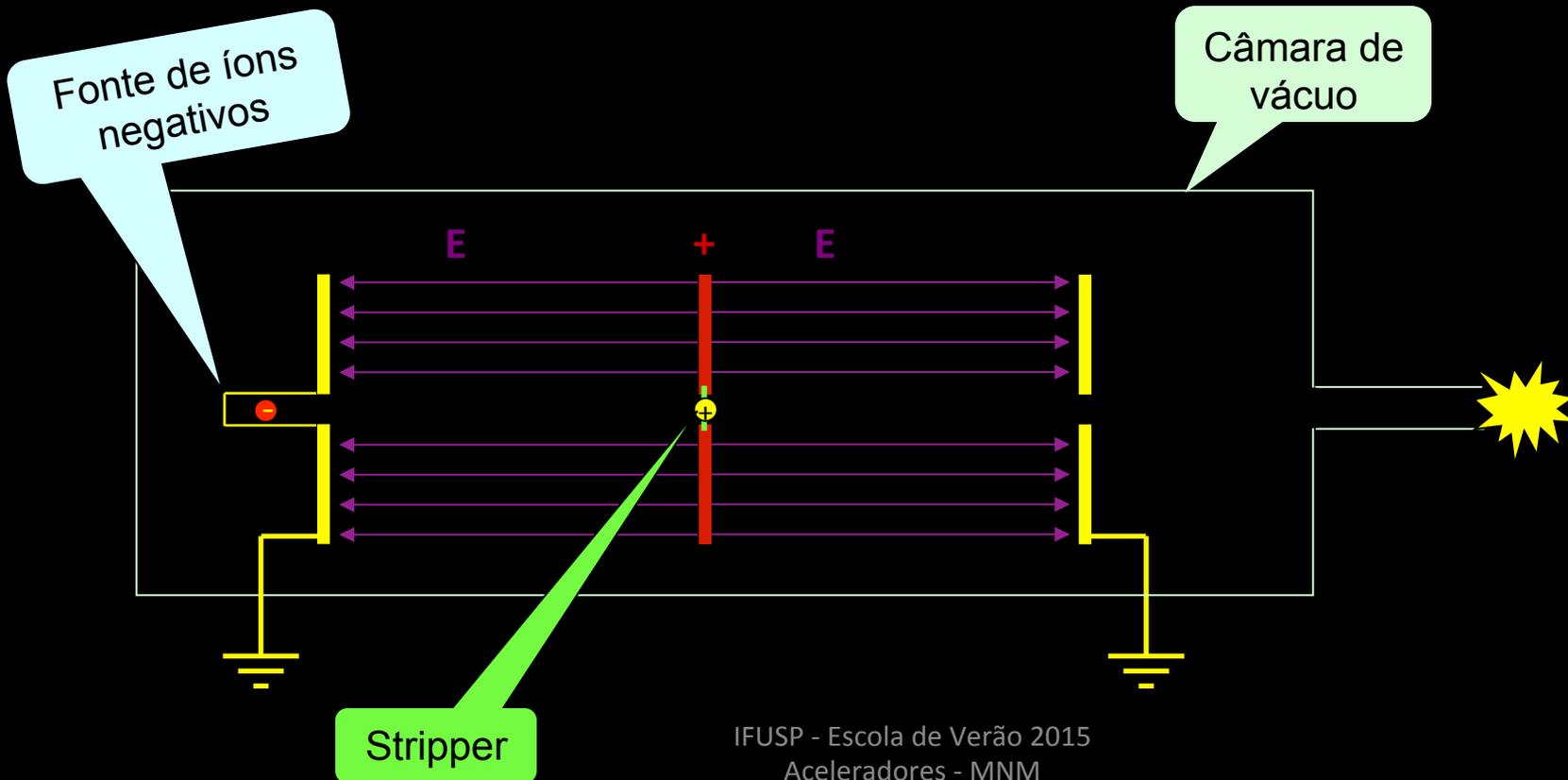
Síncrotrons de Elétrons

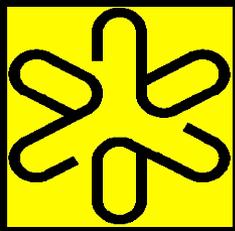
Distribuição atual de fontes de luz síncrotron baseadas em anéis em todo o mundo



Aceleradores no IFUSP

Eletrstáticos Tandem



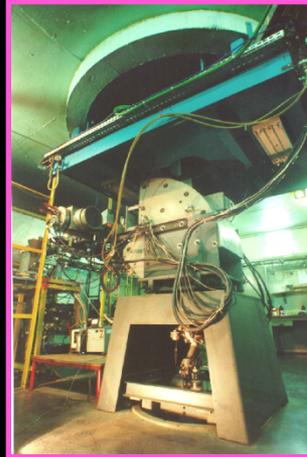


IFUSP

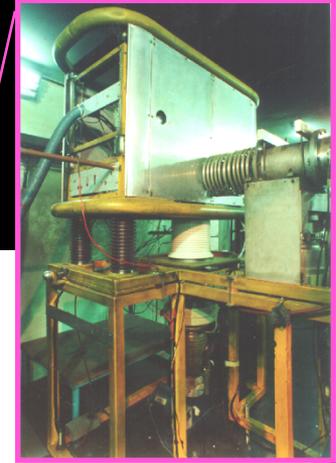
Aceleradores no IFUSP

Laboratório Aberto de Física Nuclear

Acelerador Pelletron,
tandem, $V_{\max} = 8 \text{ MV}$, com
stripper de carbono



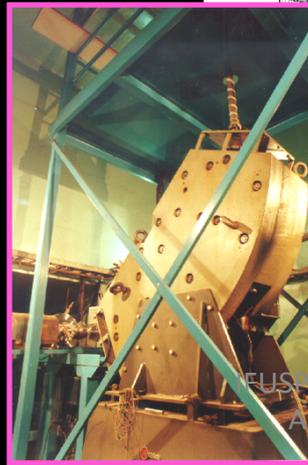
Seleção de massa

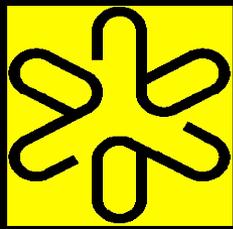


Fonte de íons
sputtering de Cs,
para feixes de H,
B, C, O, Cl, Si...



Seleção de energia





IFUSP

Aceleradores no IFUSP

Laboratório de Análises de Materiais por Feixes Iônicos - LAMFI

www.if.usp.br/lamfi

Câmara PIXE para análises ambientais



Câmara Multiuso RBS, PIXE, ERDA



Feixe externo RBS, PIXE, PIGE



LAMFI: Pelletron tandem NEC-5SDH, de 1,7 MV, com stripper gasoso

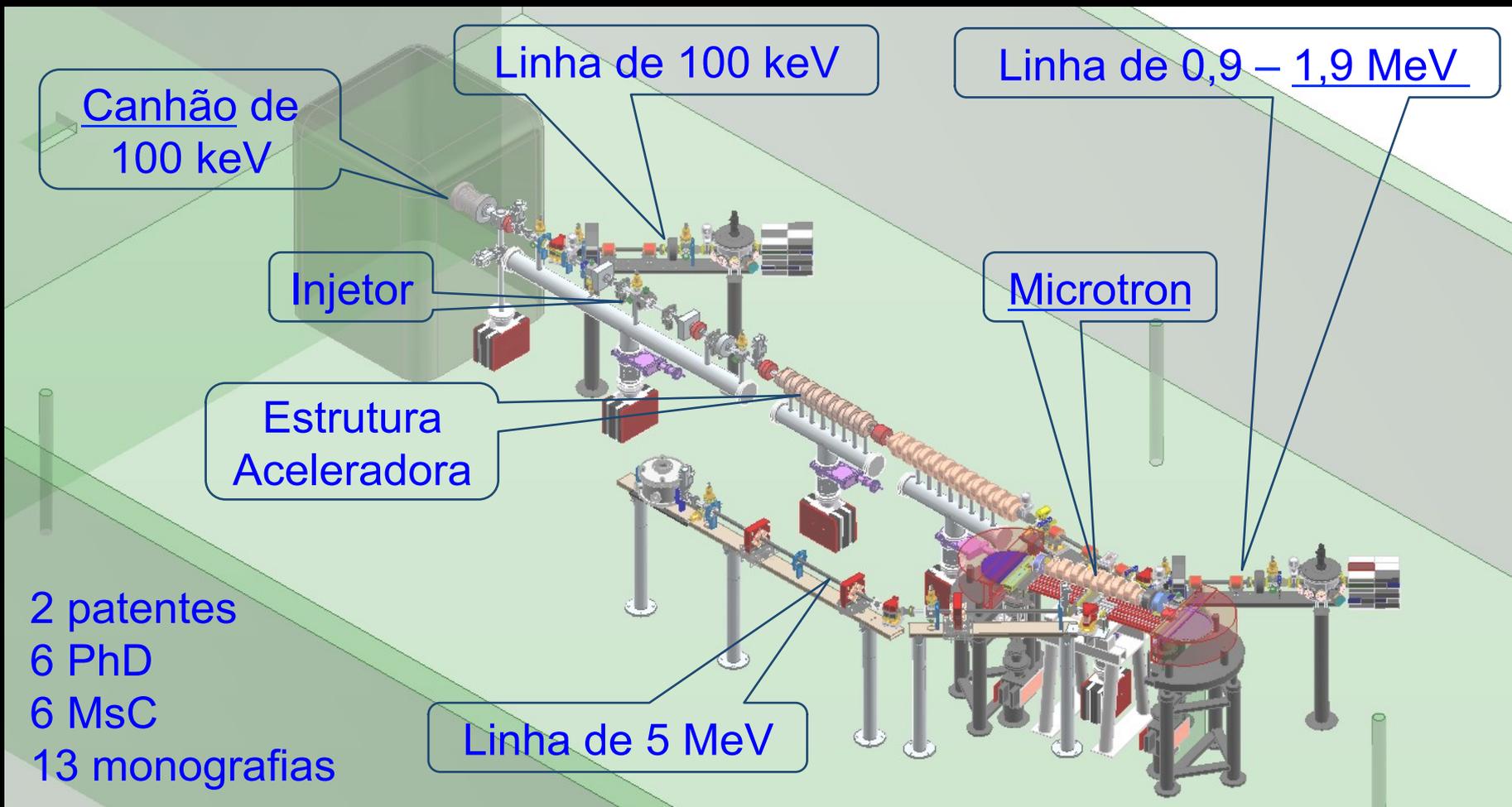
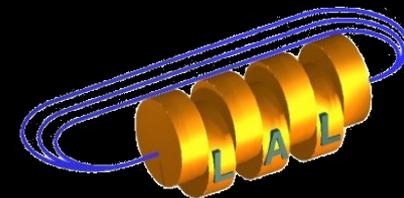




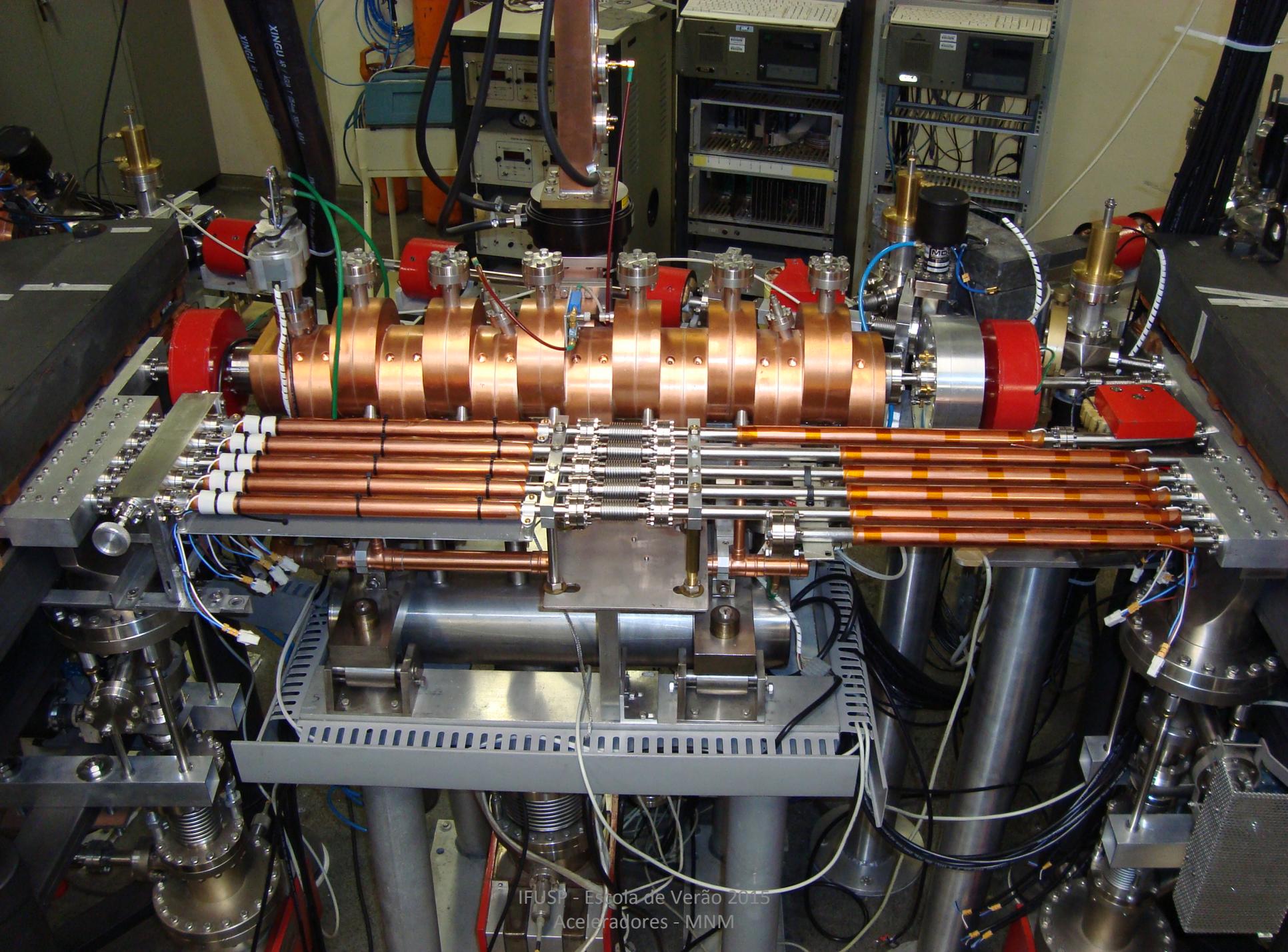
Aceleradores no IFUSP

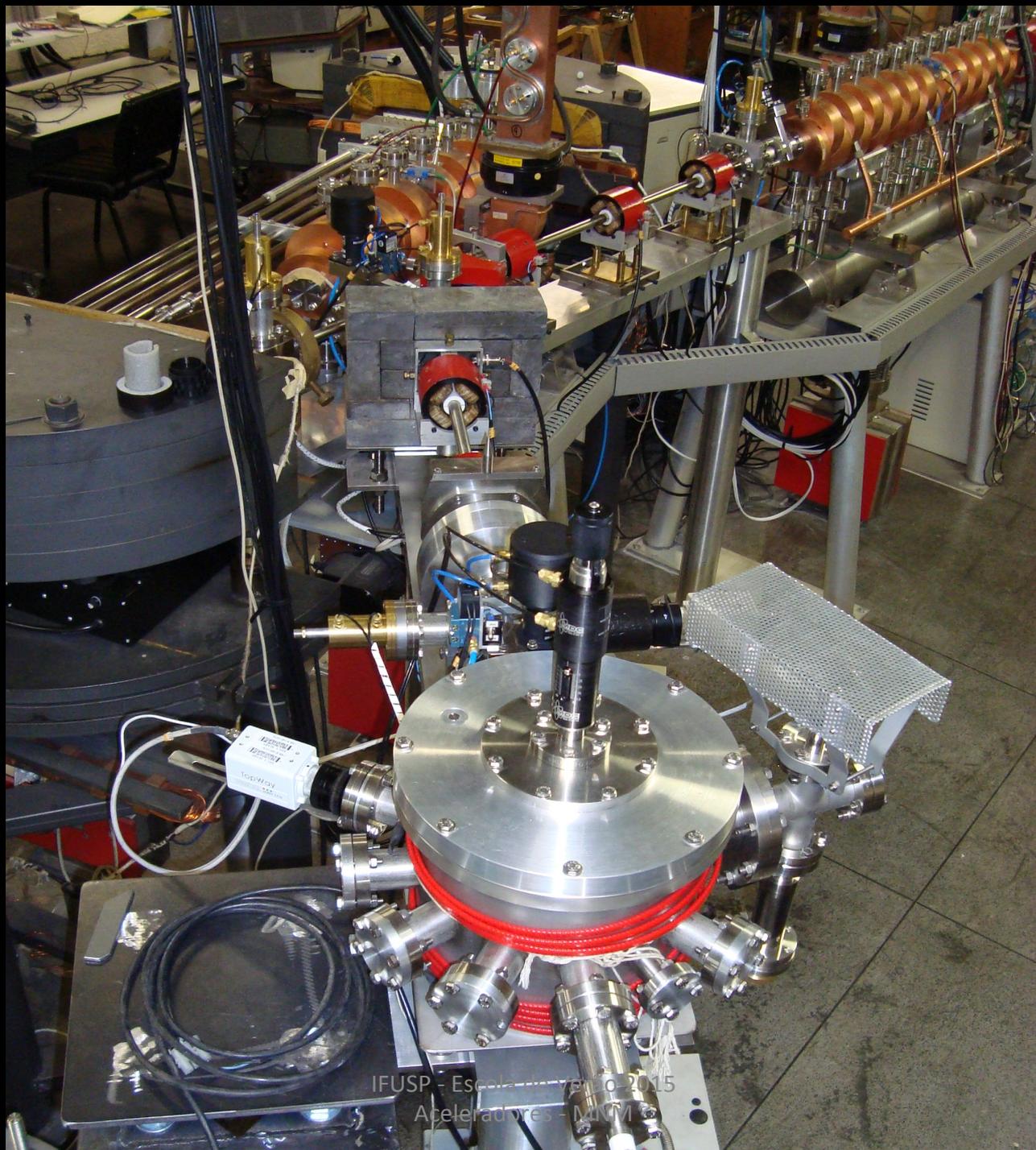
Microtron

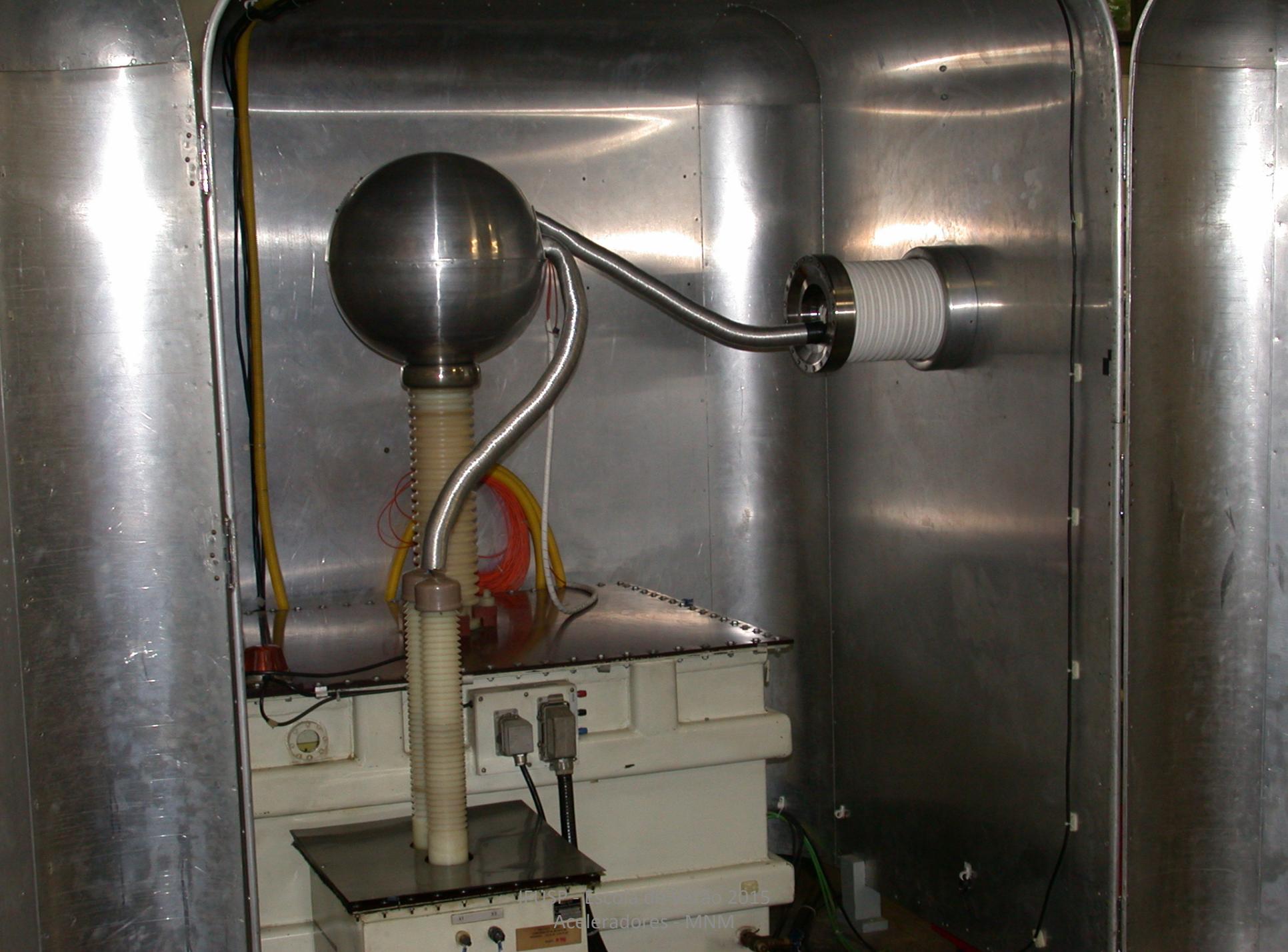
www.if.usp.br/microtron



2 patentes
6 PhD
6 MsC
13 monografias

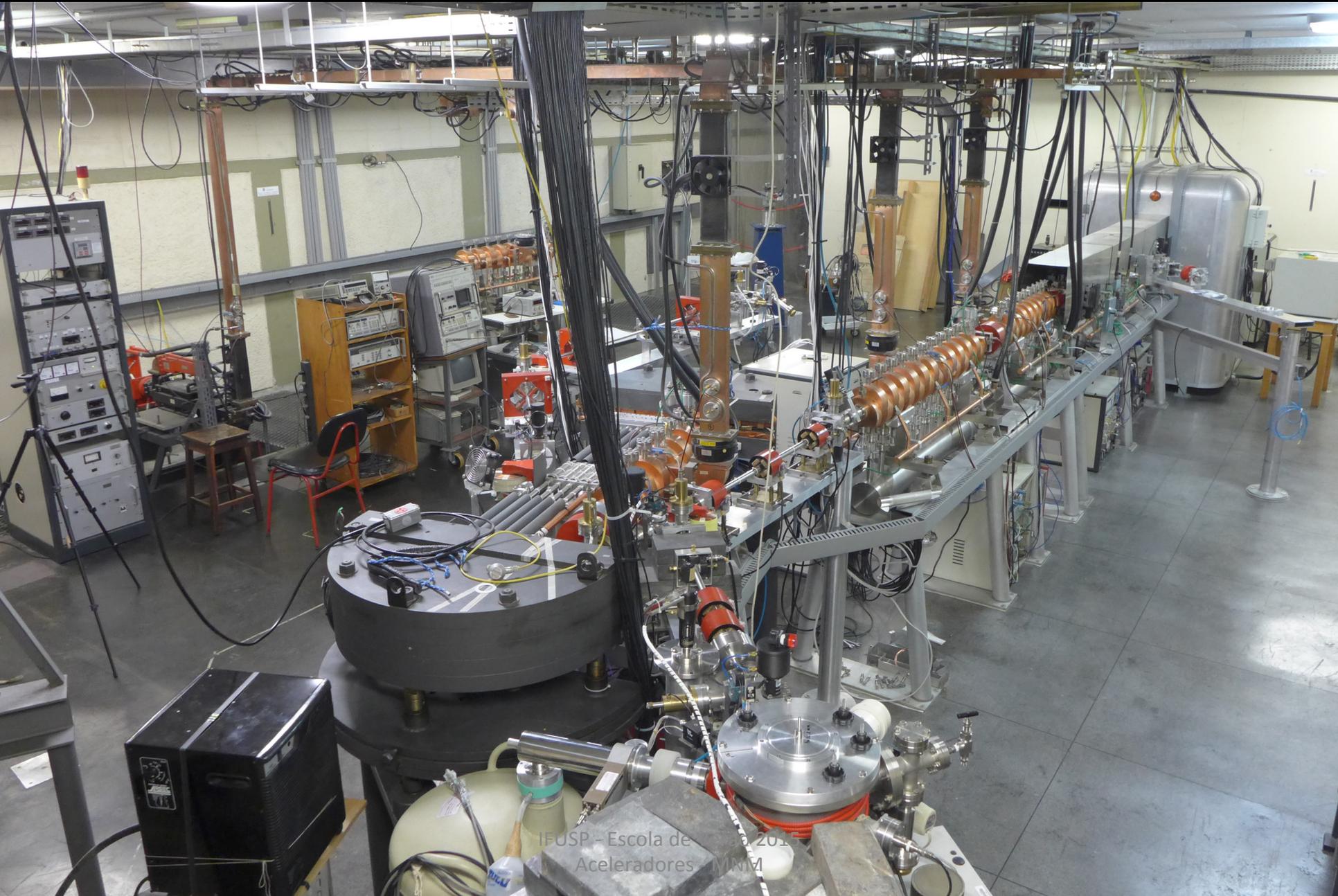






FEUSP - Escola de Verão 2015
Aceleradores - MNM

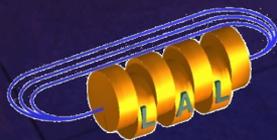
Aceleradores no IFUSP



Obrigado

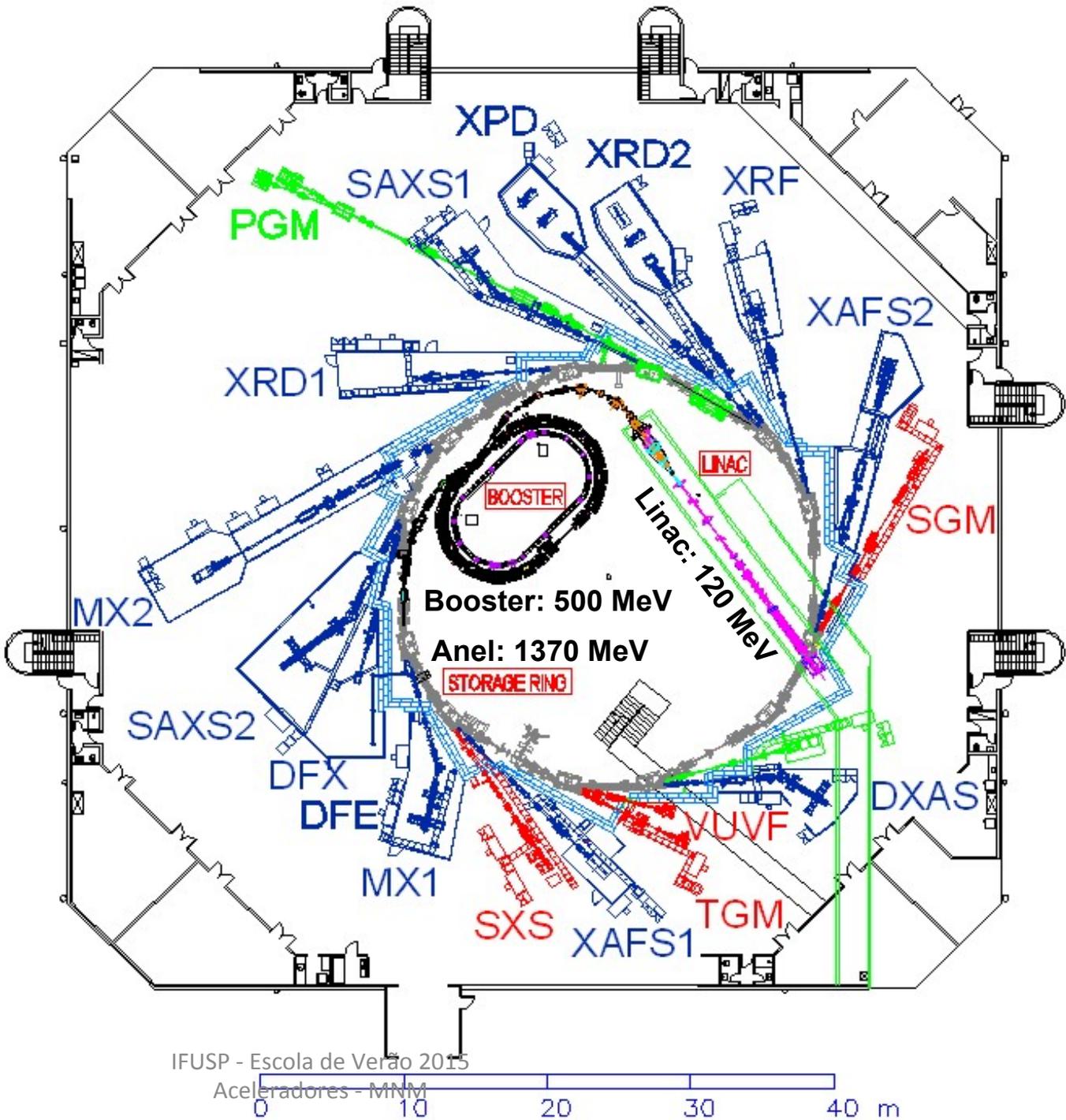
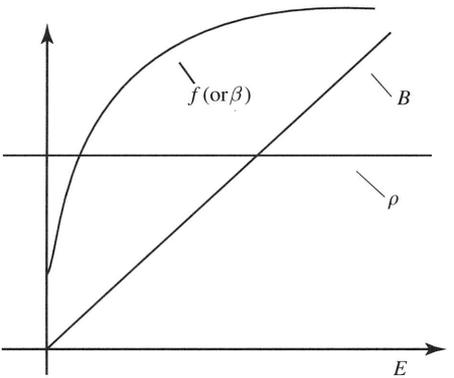
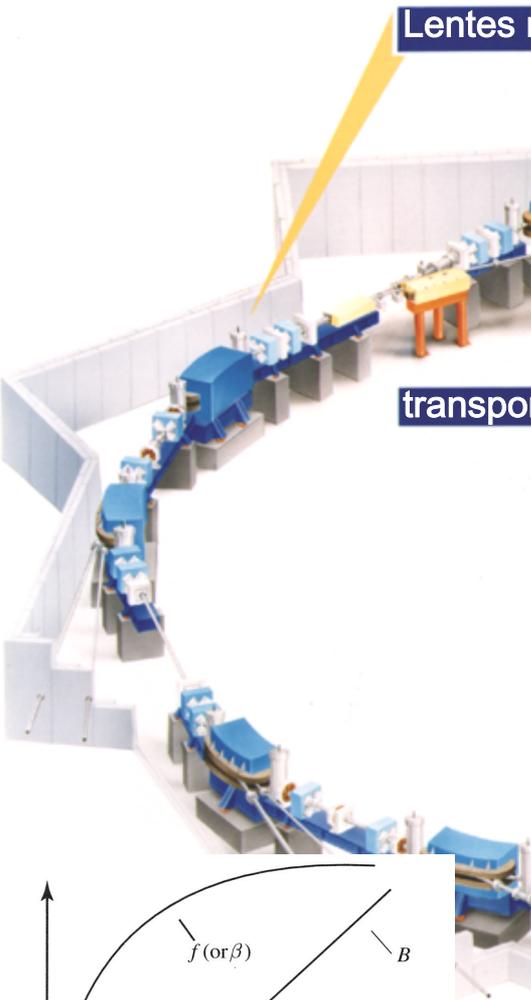
martins@if.usp.br

www.if.usp.br/microtron



IFUSP - Escola de Verão 2015
Aceleradores - MNM

Síncrotron





IFUSP - Escola de Verão 2015
Aceleradores - MNM

Escola de Verão - 2015

Aceleradores de íons

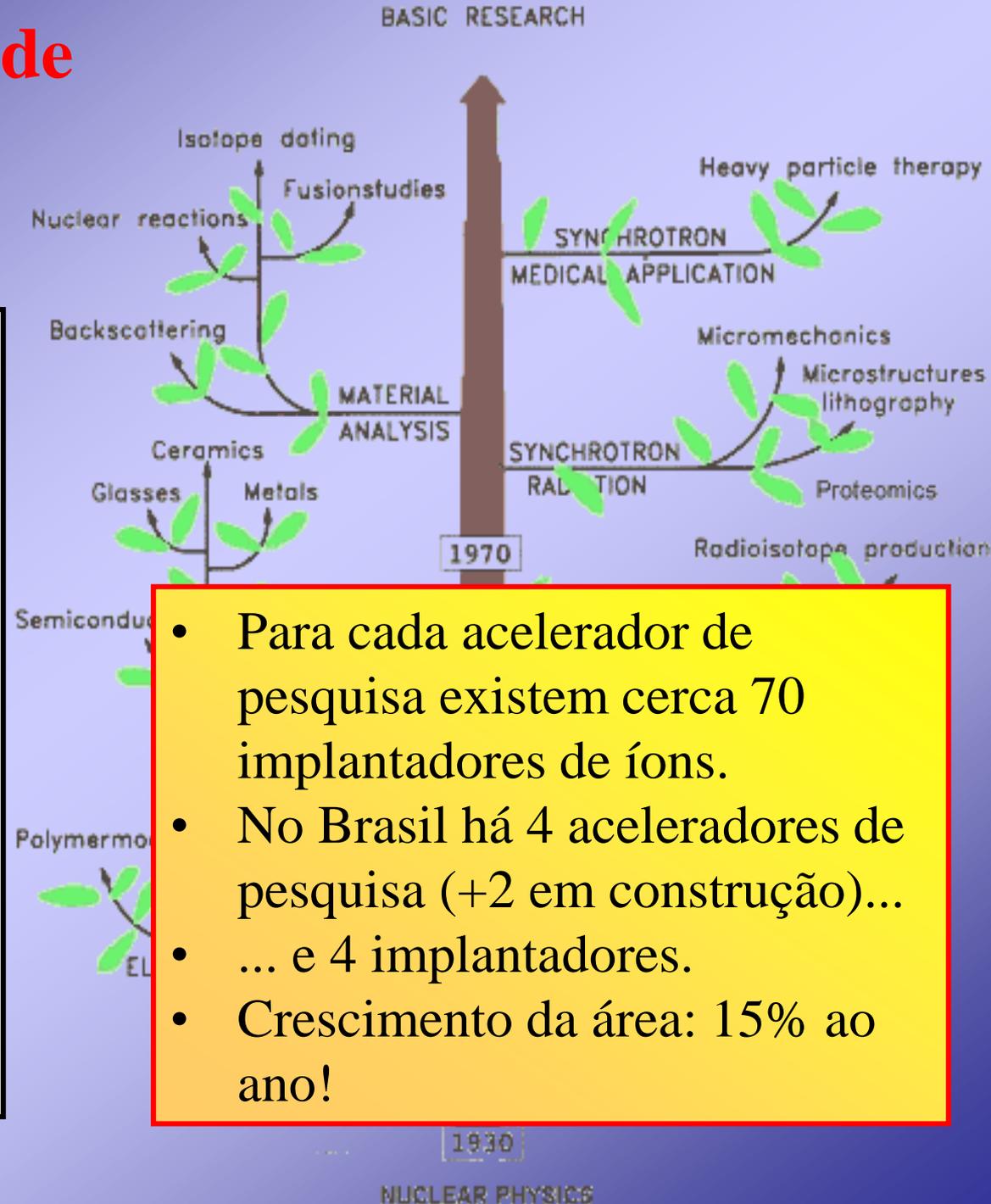
Nemitala Added

03/02/2015

Inventário mundial de aceleradores (2000)

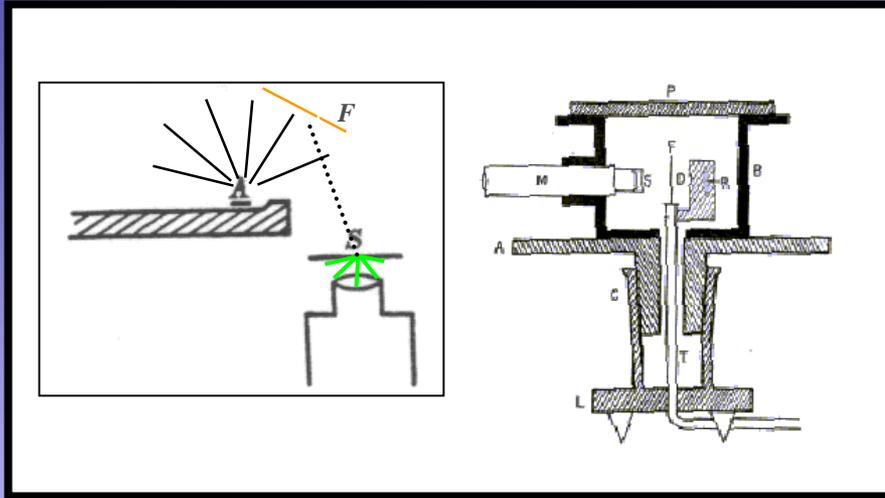
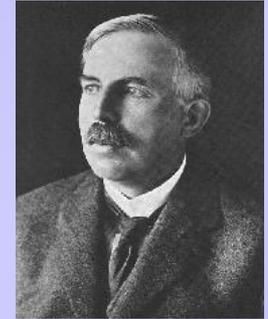
(+15% /ano)

Categoria	Número
Implantadores de íons e modificação de superfícies	7000
Esterilização e polimerização	1500
Aceleradores em pesquisa não nuclear	1000
Radioterapia	5000
Produção de Radioisótopos	200
Terapia com Hadrons	20
Fontes Síncrotron	70
Pesquisa em FN e partículas	110
total	14900



- Para cada acelerador de pesquisa existem cerca 70 implantadores de íons.
- No Brasil há 4 aceleradores de pesquisa (+2 em construção)...
- ... e 4 implantadores.
- Crescimento da área: 15% ao ano!

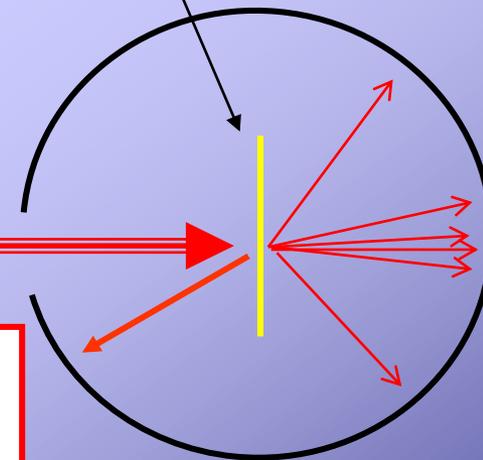
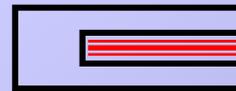
A experiência de Rutherford (1909) Atirando alfas em finas folhas de ouro ($0,086 \mu\text{m}$)



<http://dbhs.wvusd.k12.ca.us/AtomicStructure/Rutherford-Model.html>

folha de ouro
muito fina

fonte colimada de
partículas α



A maioria
das
partículas
atravessa
a folha,
como se
ela não
existisse...

..mas algumas poucas (1:8000) ricocheteiam e retornam em direção à fonte . (Marsden e Geiger, 1909)

É como se um tiro de canhão contra uma folha de jornal, retornasse.

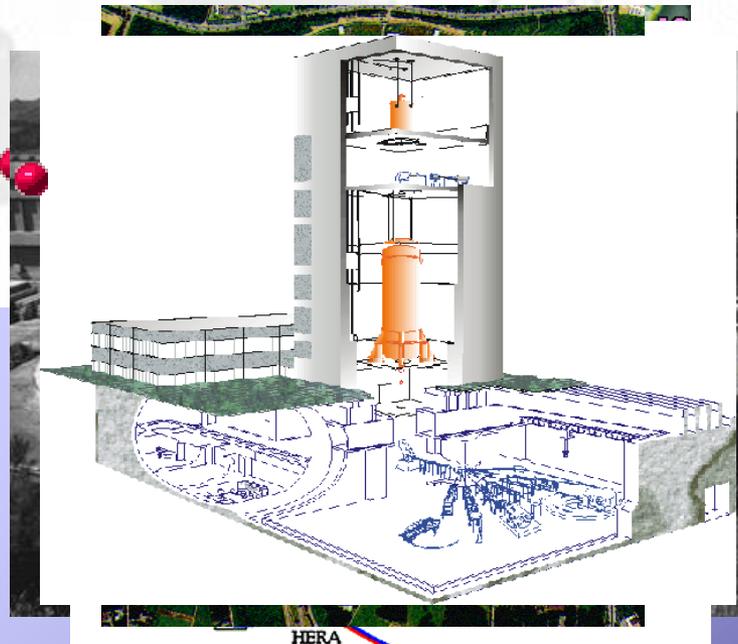
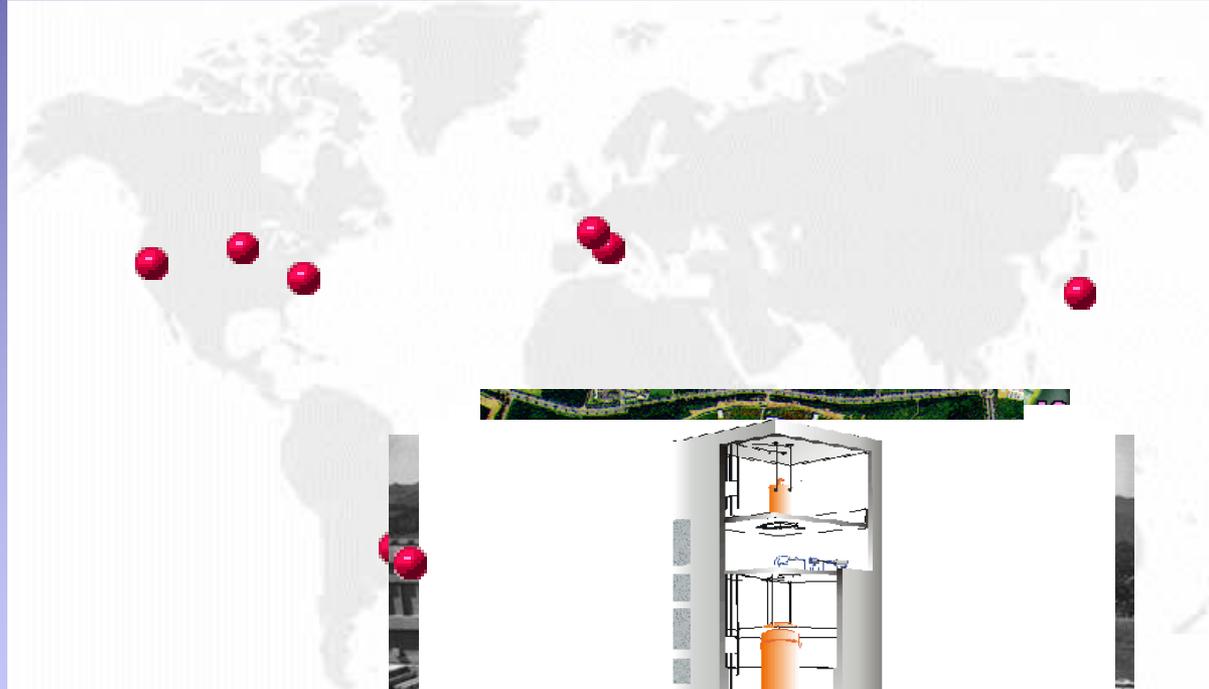
1911 a 2011: A Evolução desses estudos

Mesmo princípio continuou sendo usado

Evolução tecnológica: os aceleradores de partículas

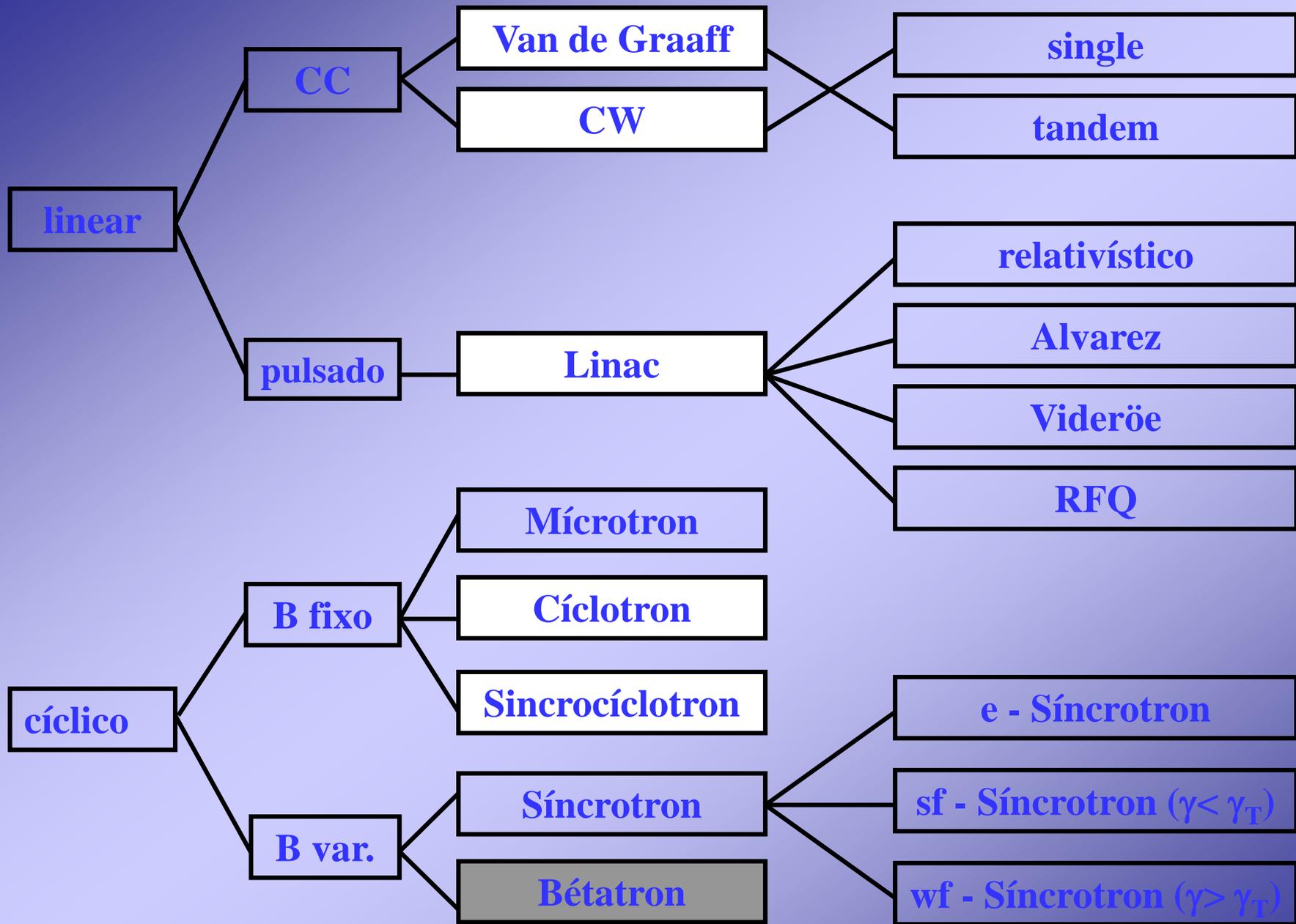


2011 - Alguns dos principais aceleradores do mundo



LAFN

Laboratório Aberto de Física Nuclear-IF/USP.
Tandem de 8MeV + Linac.
Importantes estudos nas áreas de física nuclear de baixa e média energia.



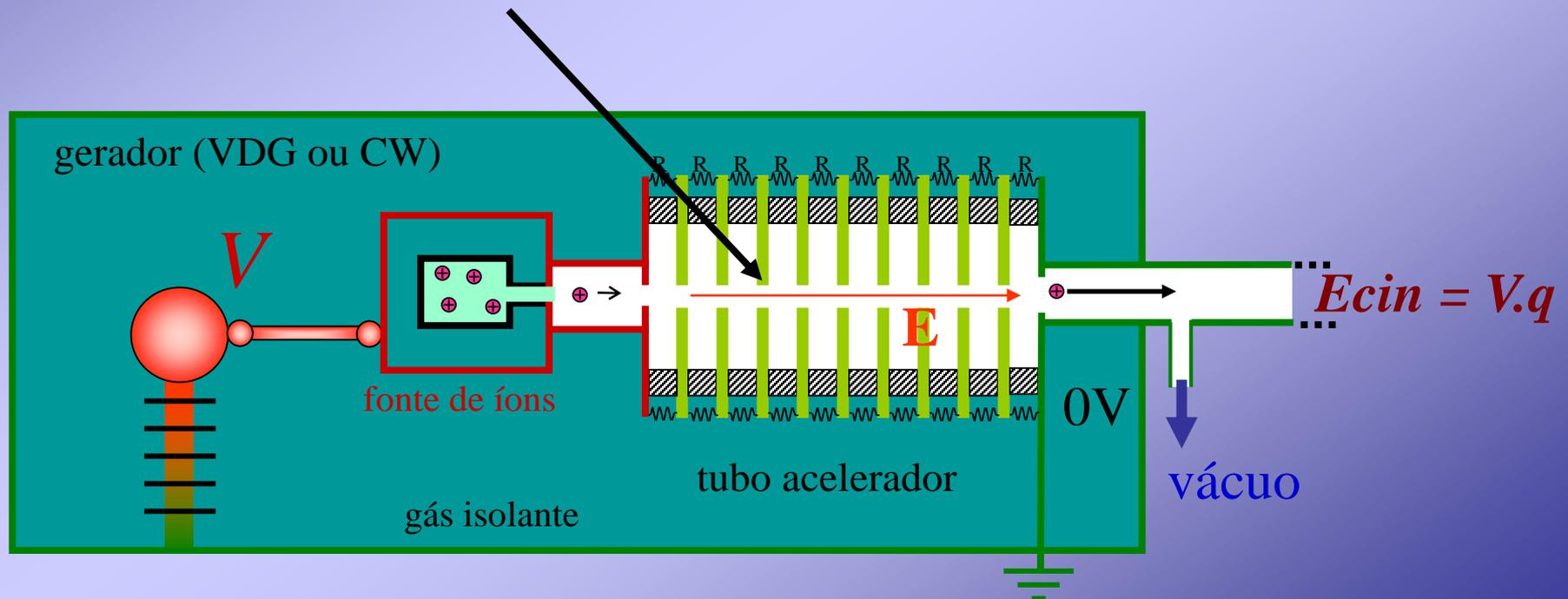
Um acelerador eletrostático

Um ou dois estágios de aceleração

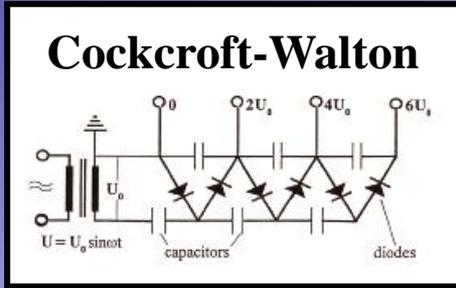
Fonte de íons (ou de elétrons)

Fonte de alta tensão (VDG ou CW)

Estrutura em vácuo para transporte do feixe (íons ou elétrons)

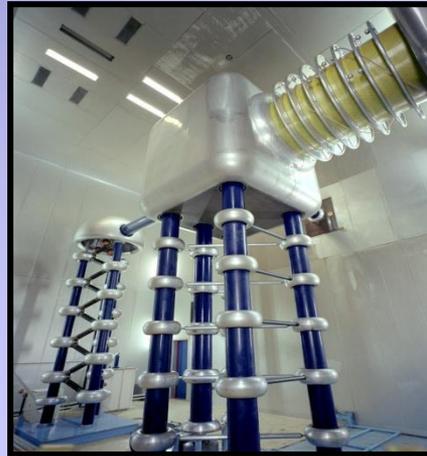


CW



Um estágio de aceleração

- Carrega em paralelo CA e descarrega em série
- É a fonte em qualquer televisão
- V x I hiperbólica: baixa corrente em alta tensão
- Ripple alto ($\propto I/f$) => f alta
- Oferece tensões intermediárias. (polarização de dinodos, fotomultiplicadoras, etc.)



Injetor de prótons do Fermilab (750kV)



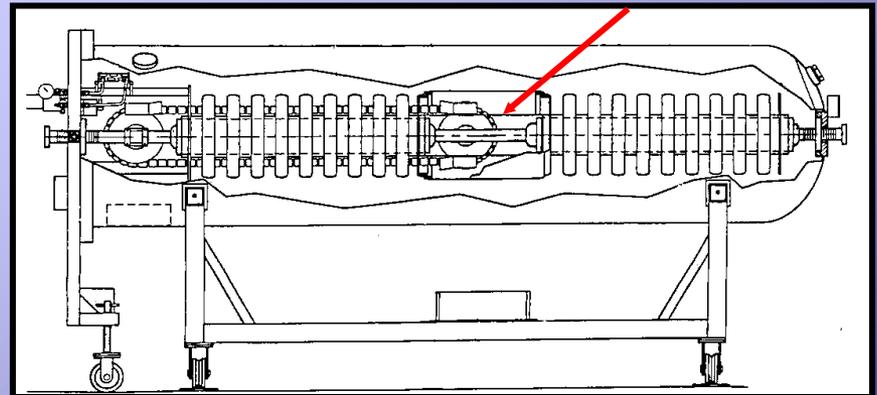
Fonte de AT do implantador de íons do IFUSP (400 kV)

Van de Graaff

Dois estágios de aceleração

Tensão máxima 25MV (tandem)

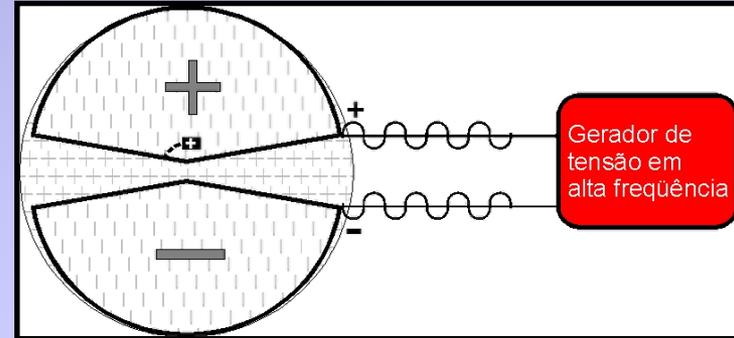
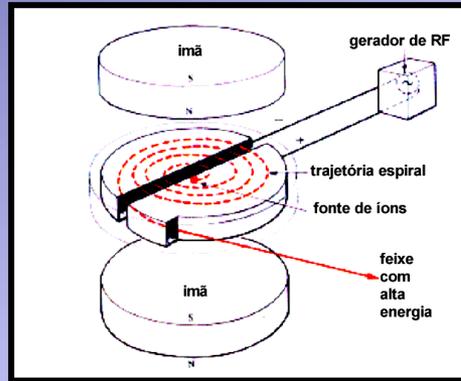
Acelerador Pelletron tipo tandem com stripper gasoso



Aceleradores cíclicos

Cíclotron

$$r = \frac{m v}{q B} \quad f = \frac{1}{2\pi} \frac{q B}{m}$$



Frequência ciclotrônica constante

Limite - 10 MeV de prótons devido ao incremento de massa (γm)

“sector focused cyclotron” - variação dos gaps para manter frequência

Vancouver – prótons de 600 MeV

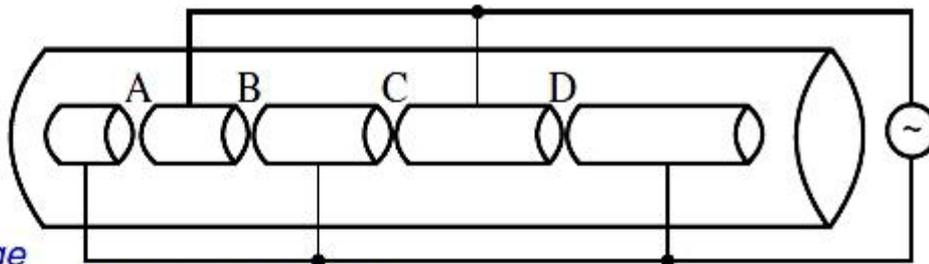
Sincrocíclotron

$$f_{RF} = \frac{1}{2\pi} \frac{q B}{\gamma m}$$

O maior sincrocíclotron em operação (Gatchina, St. Petesburgo) acelera prótons até 1 GeV. Pesa 10000 t. As peças polares têm 6 m de diâmetro.

Linear

G. Ising, 1924, *The principle of a method for the production of canal rays of high voltage*



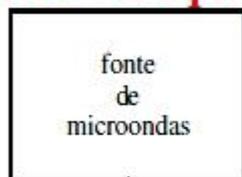
R. Wideröe, 1928

Altas frequências \Rightarrow microondas

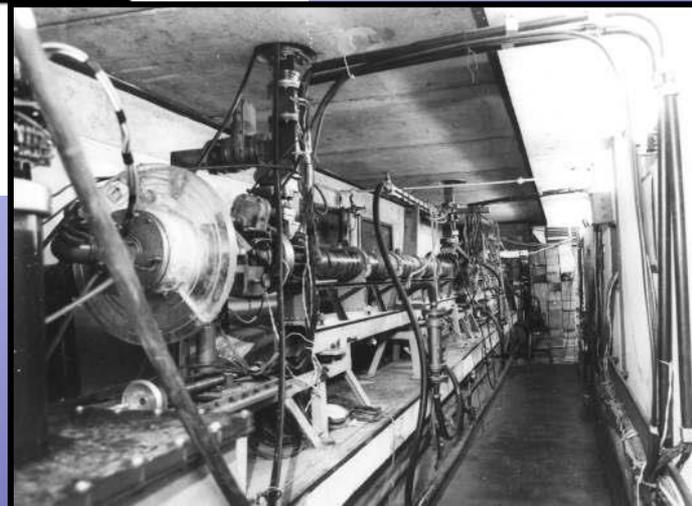
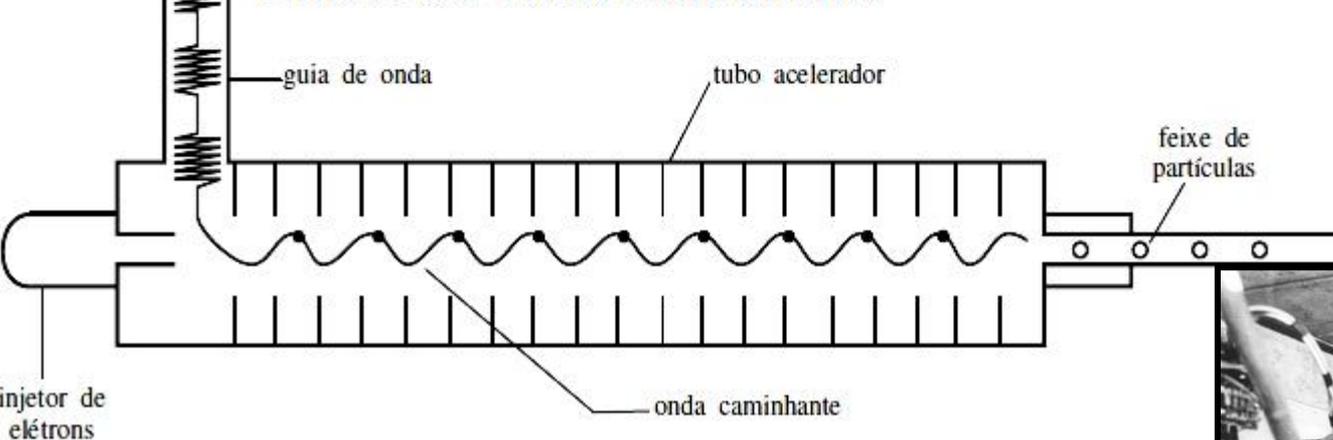
L. W. Alvarez, *Phys. Rev.* 70(1946)799

Estabilidade de fase

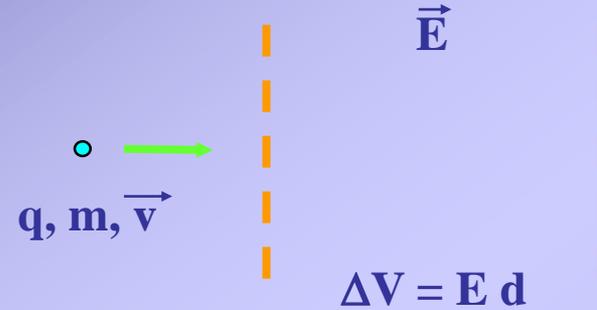
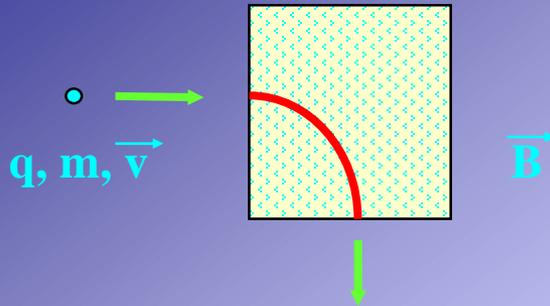
E. M. McMillan, *Phys. Rev.* 68(1945)143



Linear de onda caminhante



Acelerador linear de elétrons, de 70MeV instalado em 1967 pelo Prof. Goldemberg no IFUSP. Doado pela U. de Stanford, funcionou até meados de 1980. No canto à esquerda vê-se o injetor de elétrons.



Magnético

$$|q \vec{v} \times \vec{B}| = \frac{m v^2}{r}$$

$$(B r)^2 = \frac{m (m v^2)}{q^2}$$

ME indica limite máximo

Para r e q cte

ME prop B_{\max}

Elétrico

$$\vec{F}_{elet} = q \vec{E}$$

$$\Delta E n = q \Delta V$$

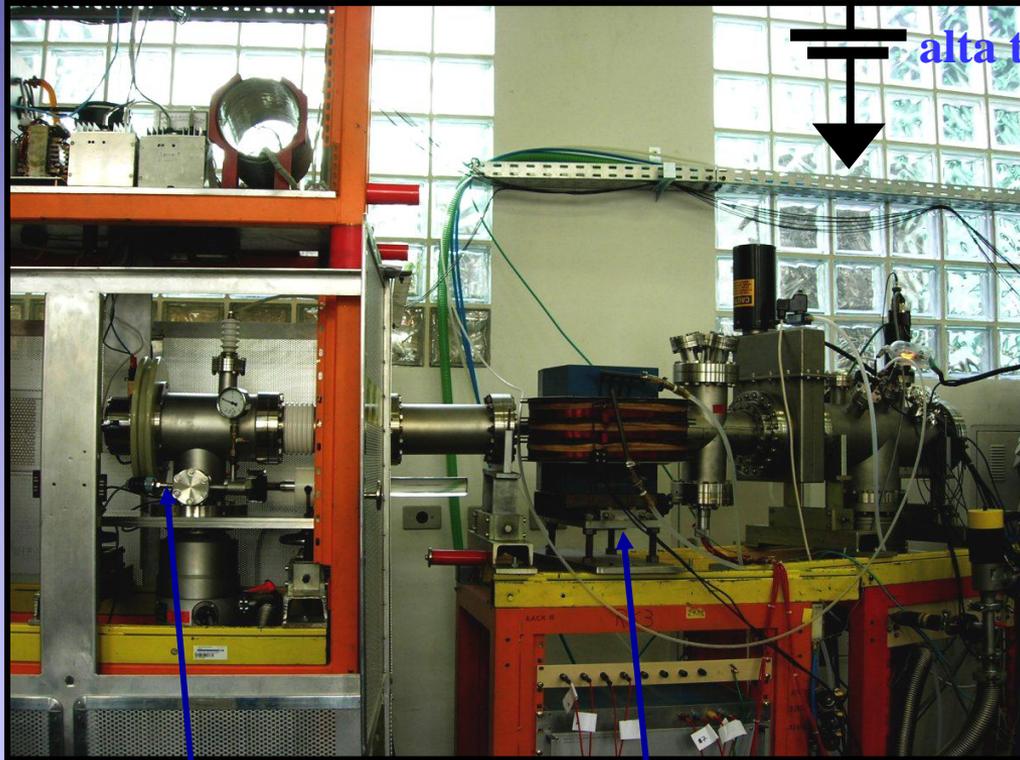
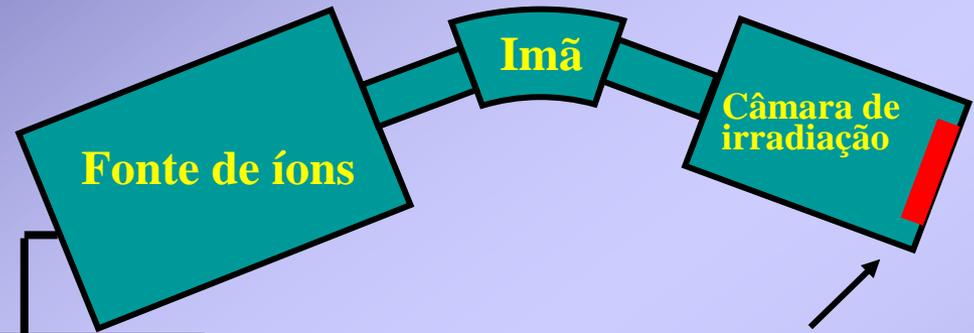
$$^{16}\text{O}^- \quad 100 \text{ kV} - E_n = 100 \text{ keV}$$

$$^{16}\text{O}^{5+} \quad 2 \text{ MV} - E_n = 10 \text{ MeV}$$

$$1 \text{ eV} = \text{carga 1 elétron} * 1 \text{ V}$$

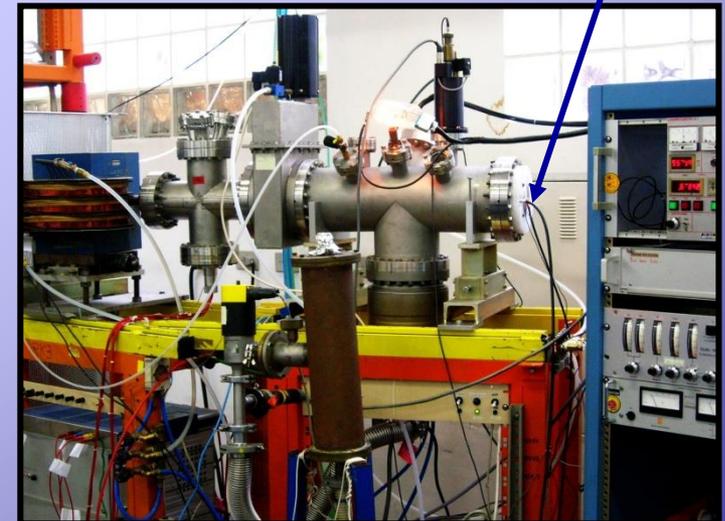
$$= 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Implantador de íons 70kV IFUSP



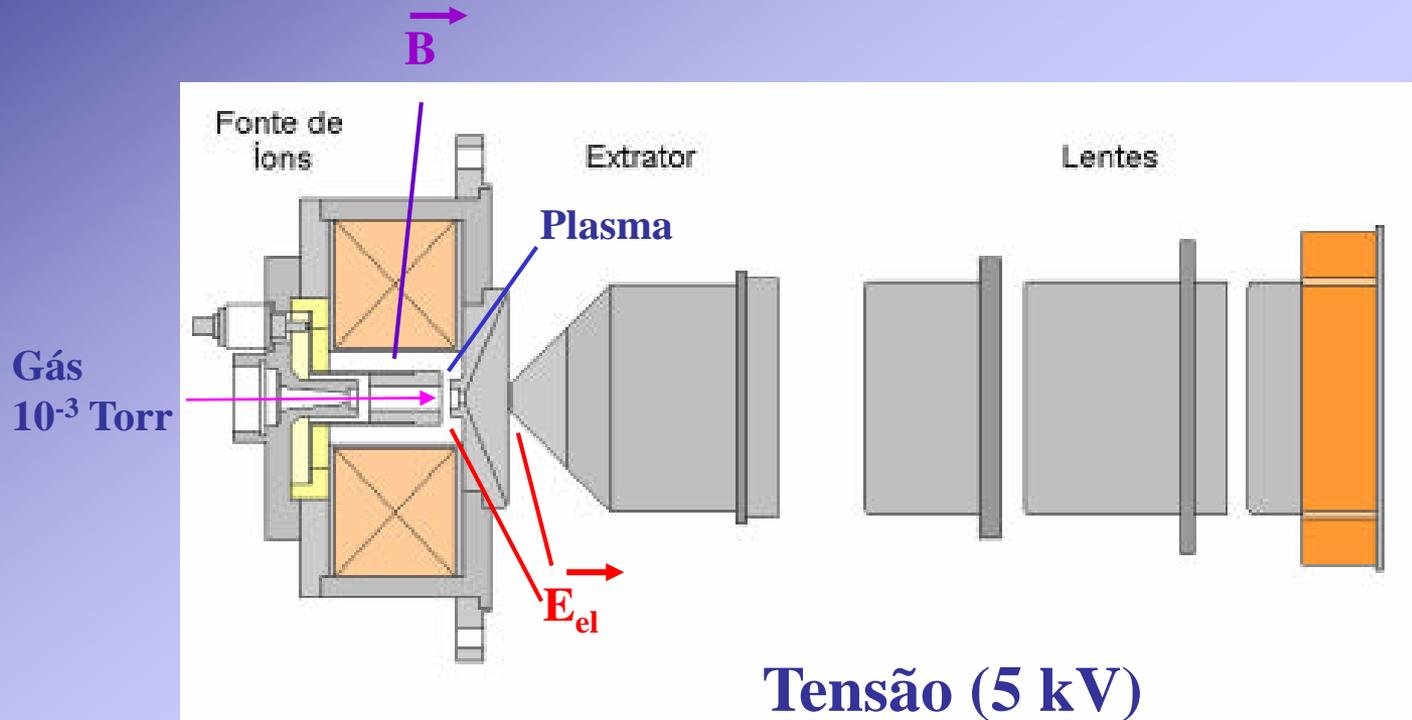
Fonte de íons
e plataforma de 70kV

Imã analisador



Porta amostras

LIO



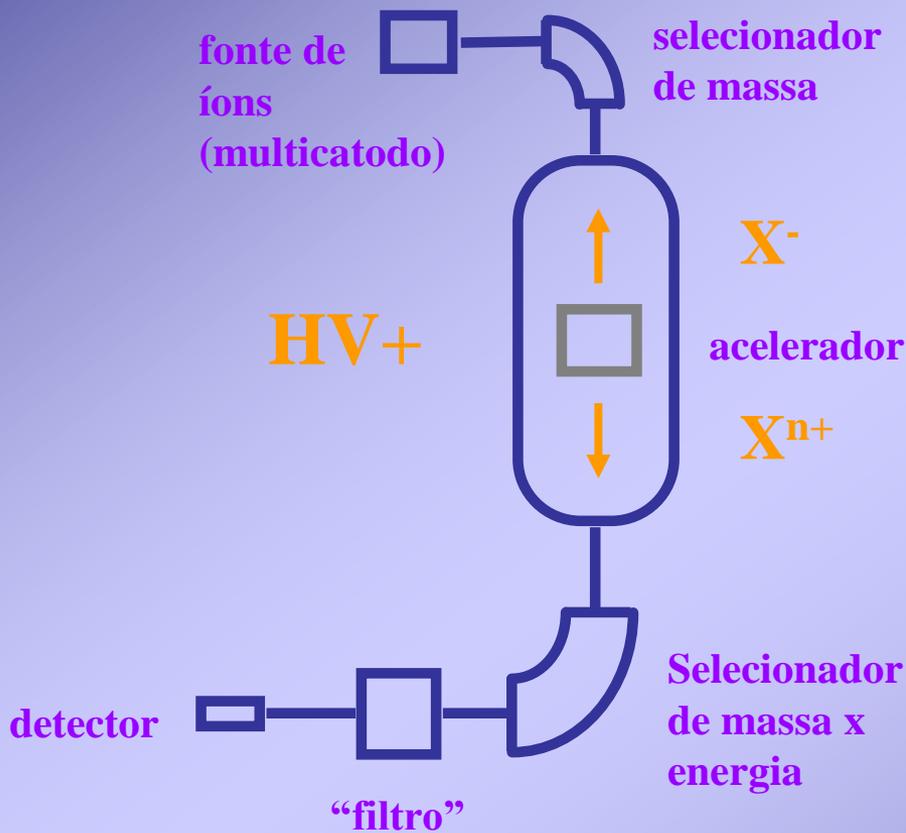
Feixe positivo (múltiplos estados de carga)

Penning

Gás – fonte de partículas

Alta intensidade (mA)

Esquema de um acelerador



Tandem

Tensão positiva

Campo eléct cte

Fonte íons

Negativa

Stripper

Gasoso ou sólido

Campos elet/mag

Transporte/seleção

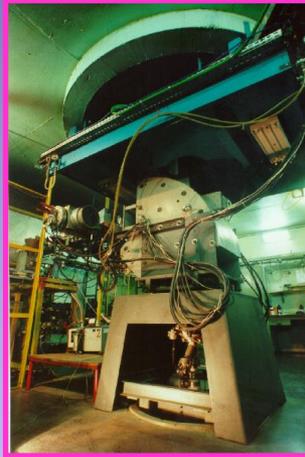


Instituto de Física da USP
Laboratório Aberto de Física Nuclear

ME 20

$p/q = 1$ e $E_{inj} = 0,1 \text{ MeV}$
 $m E_c = Br$; $m_{max} \approx 200$

**Seleção de
massa**

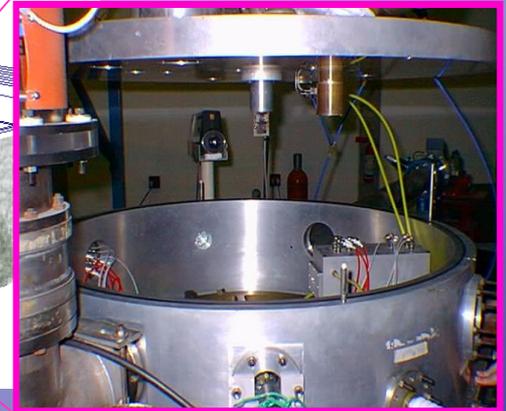
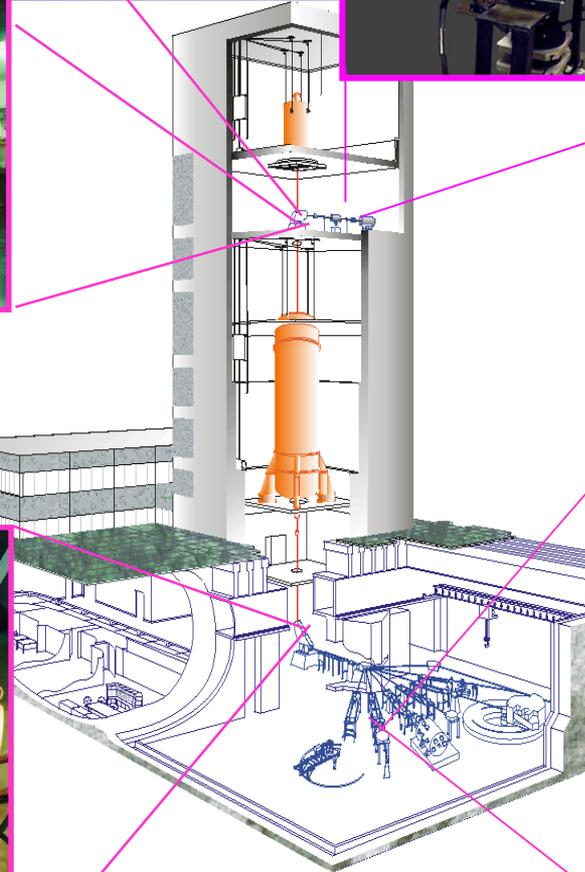
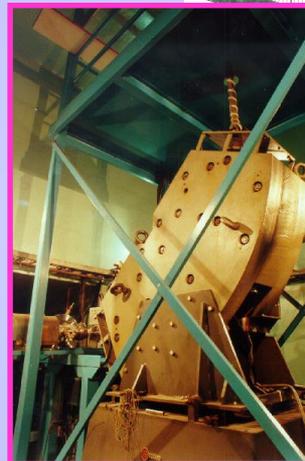


**Fonte de íons
sputtering de
Césio, para
feixes de H, B,
C, O, Cl, Si...**

**Seleção de
energia**

ME 200

Fixam
 $\frac{m E_c}{q^2} = Br$



Câmara de espalhamento

Acelerador Pelletron, tandem, $V_{max} = 8 \text{ MV}$ com *stripper* de carbono

Snics

Source of negative ions by Cs sputtering

Sem plasma

Catodo – material para feixe

Feixe de qq material pastilhável
(sólido ou adsorvido)

Ambiente de Cs

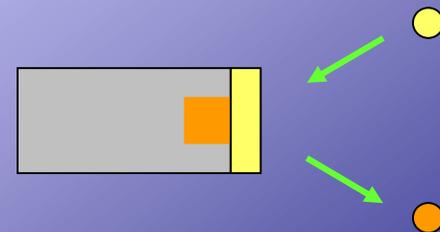
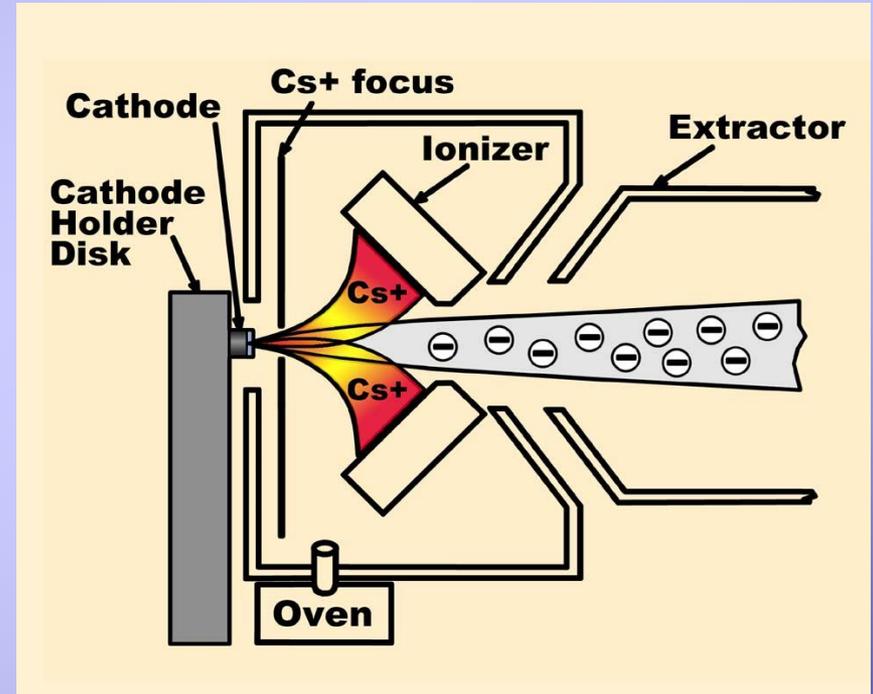
Ionizar Cs – ef termoiônico
(positivo)

Deposição de Cs na pastilha
(resfriamento)

Doar elétron a partícula “sputterada”

Campo magnético

Eliminar elétrons

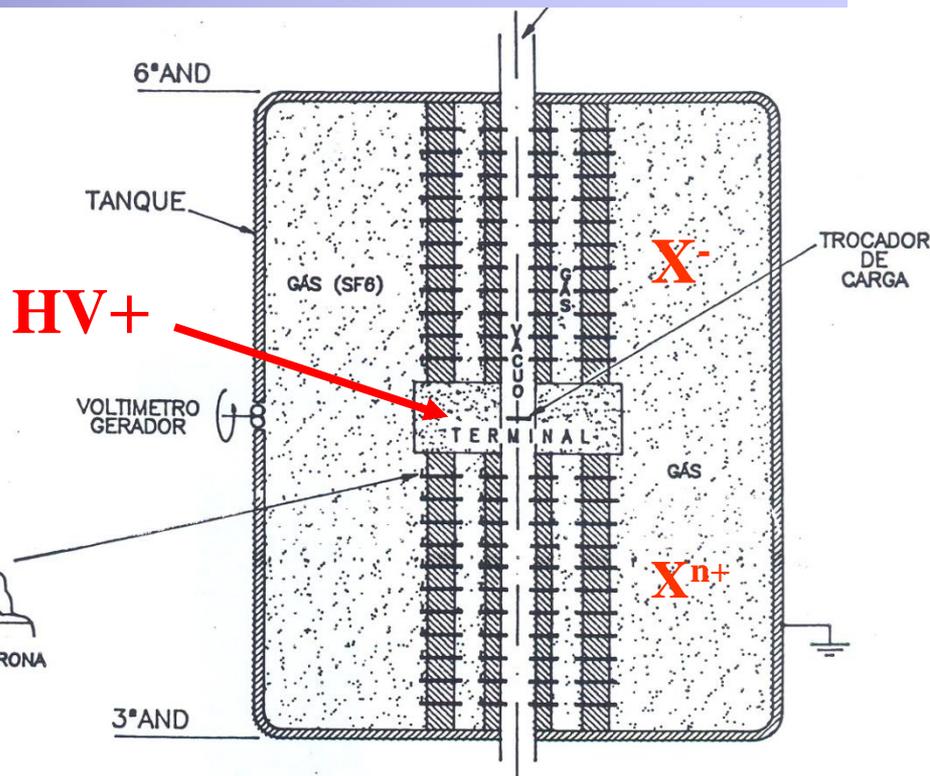
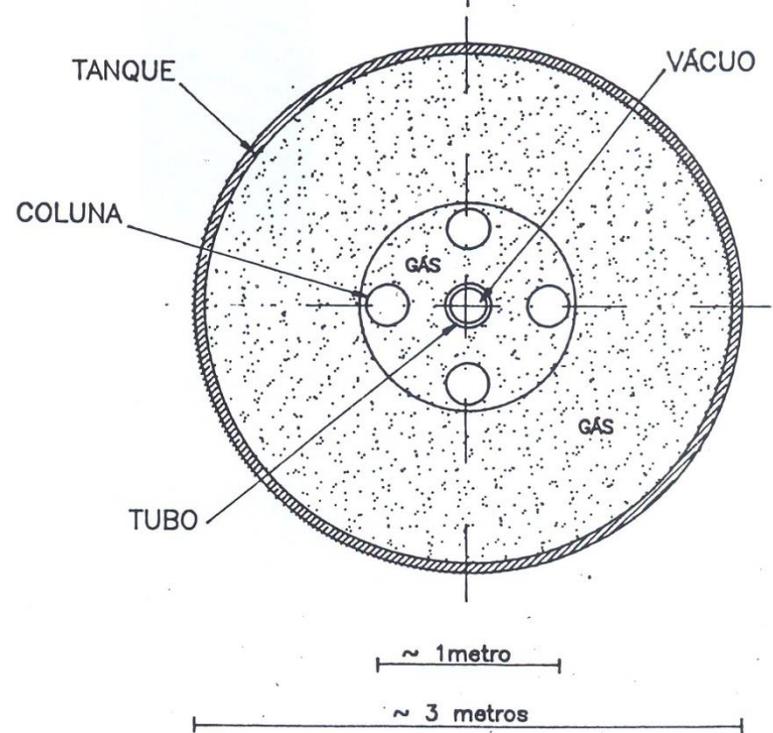


Tandem

Alta tensão (MV)

Stripper (sólido ou gás)

E_{inj}



$$\Delta E_1 = 1 * \Delta V$$

$$\Delta E_2 = N * \Delta V$$

$$E_f = (1+N) * \Delta V + E_{inj}$$

Estrutura do acelerador

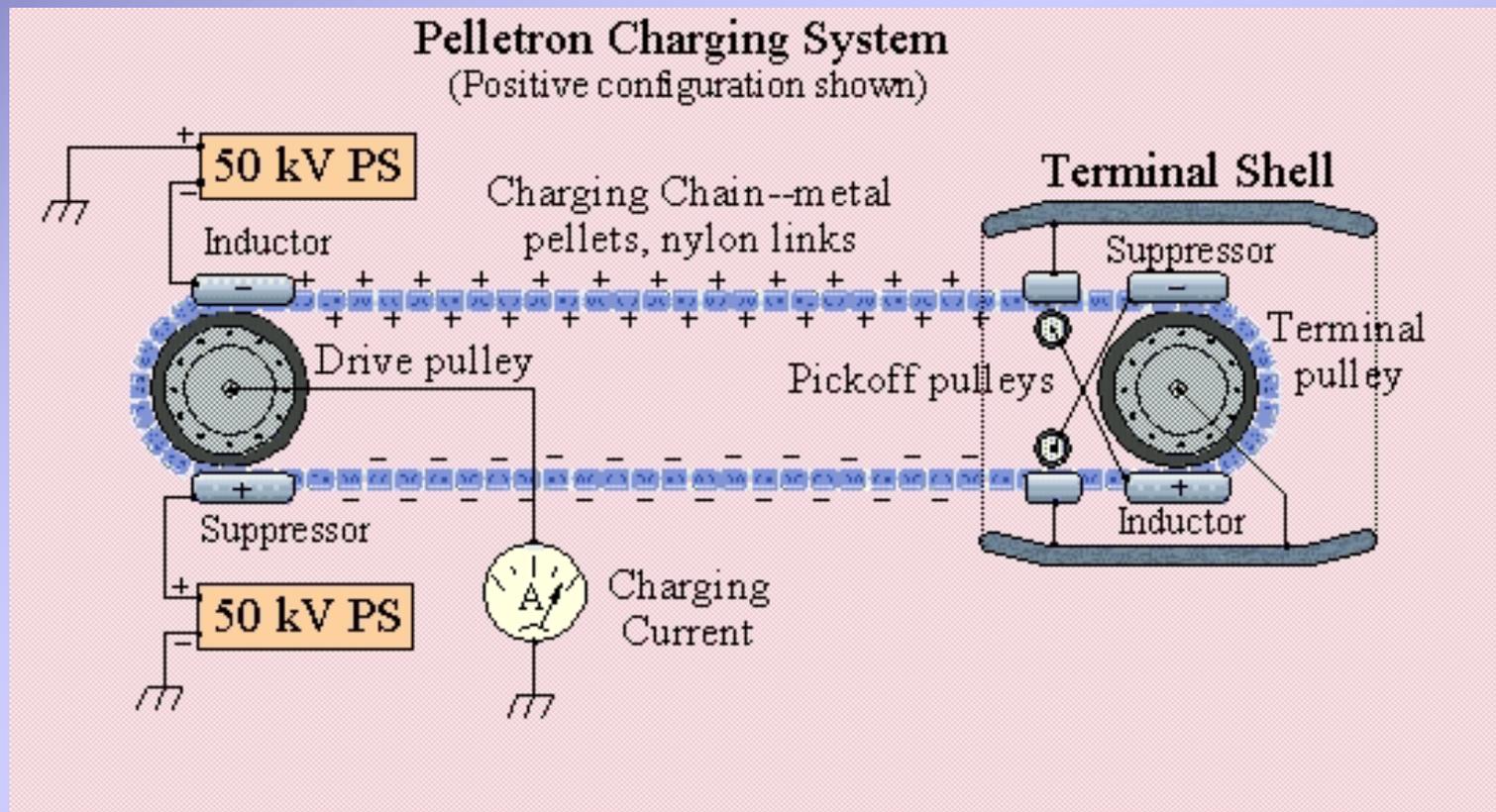
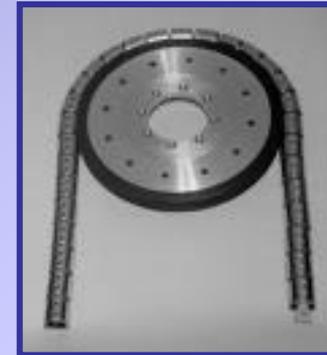


Anéis



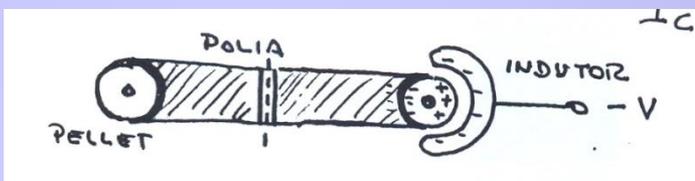
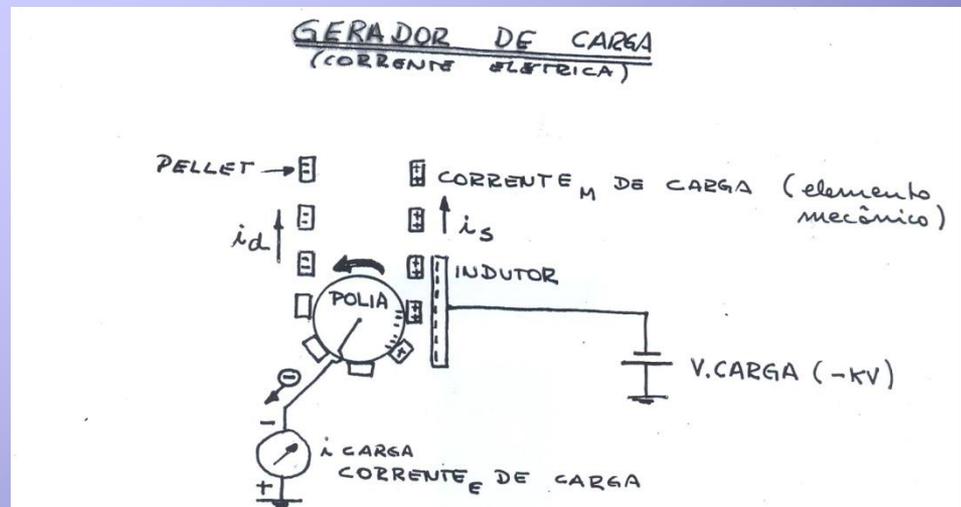
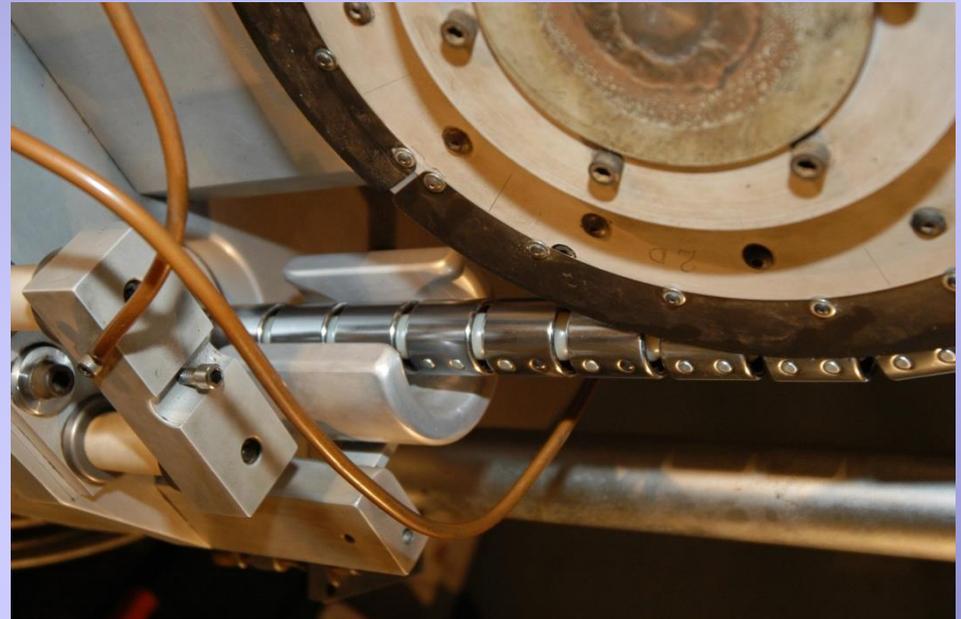
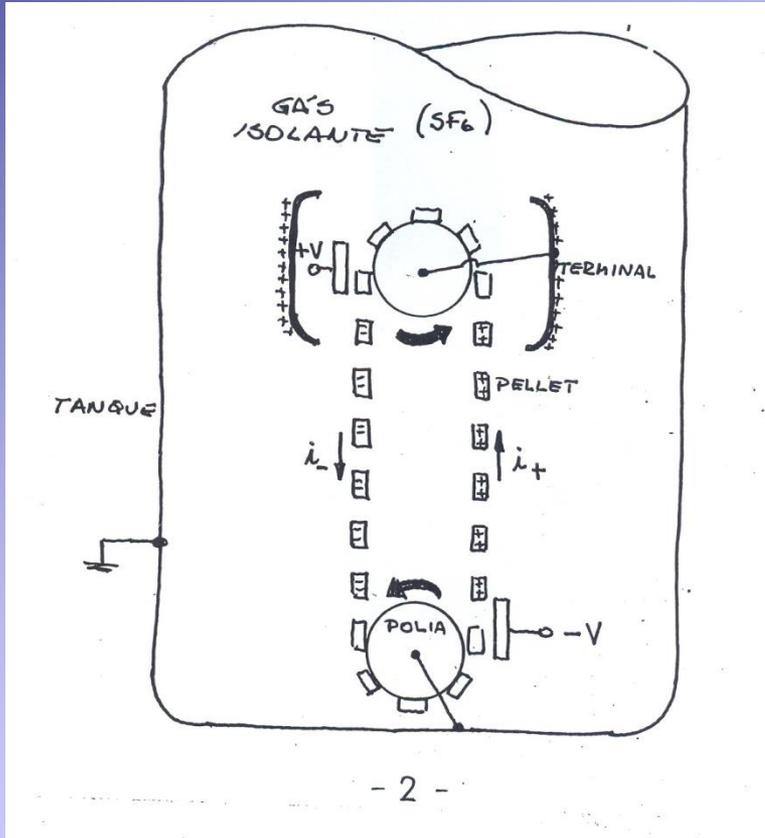
Agulhas

Corrente de pelotas (pellets)

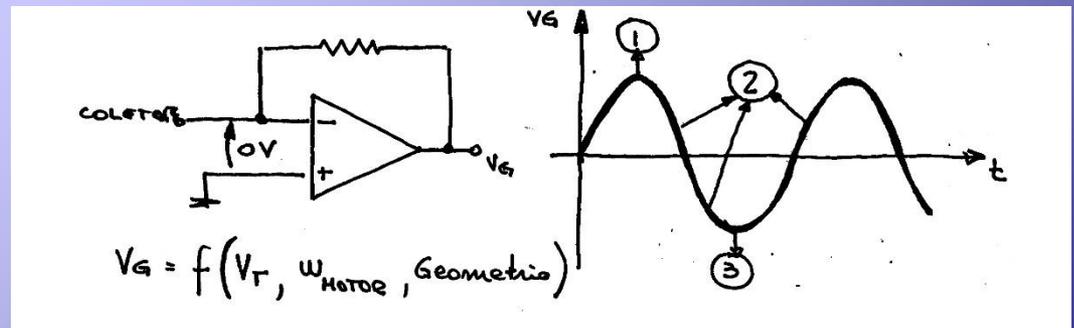
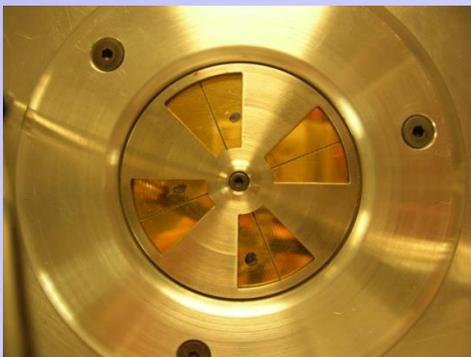
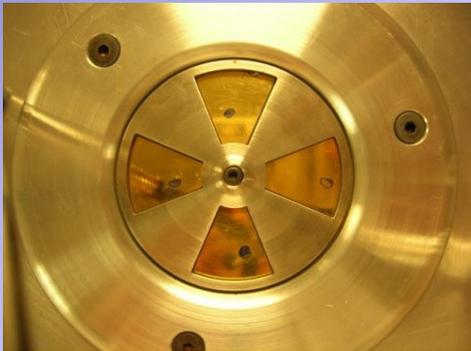
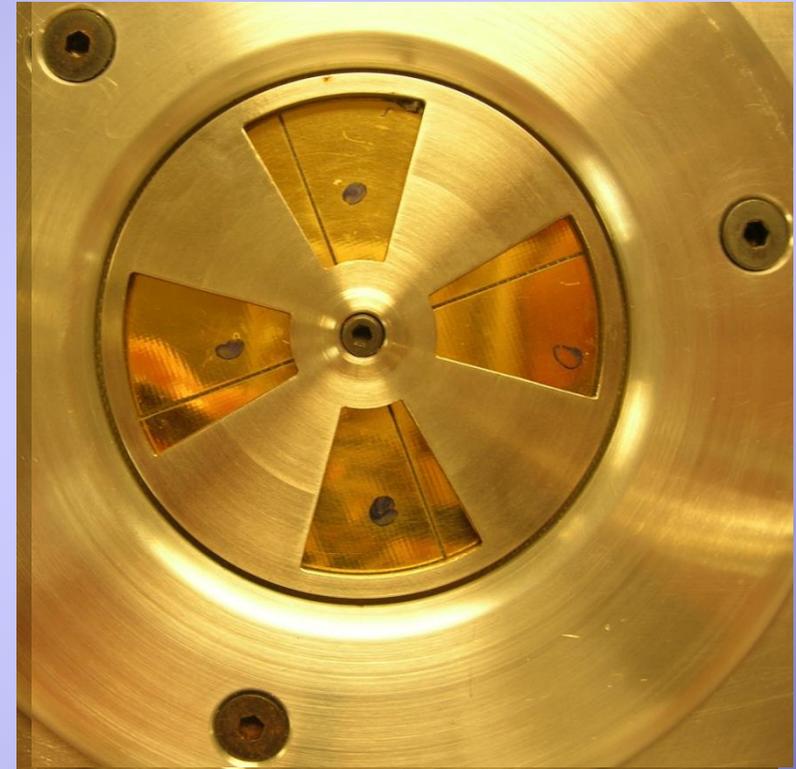
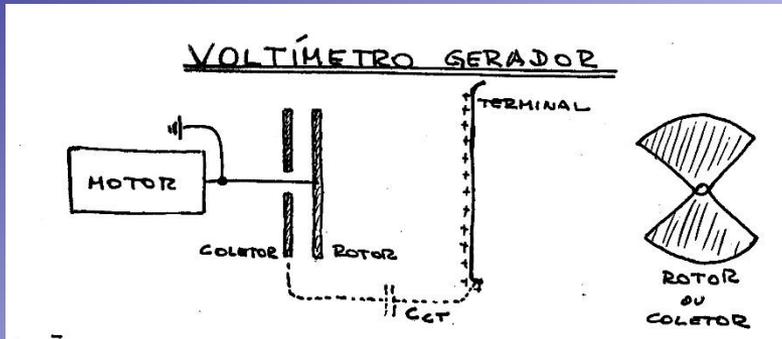


Corrente de carga

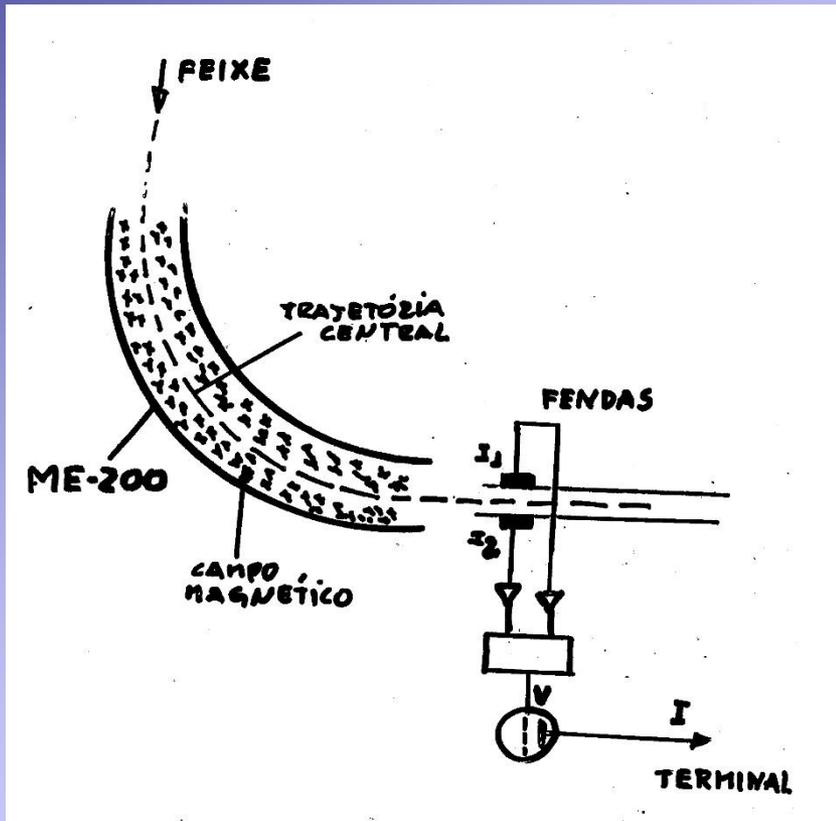
Várias etapas de indução



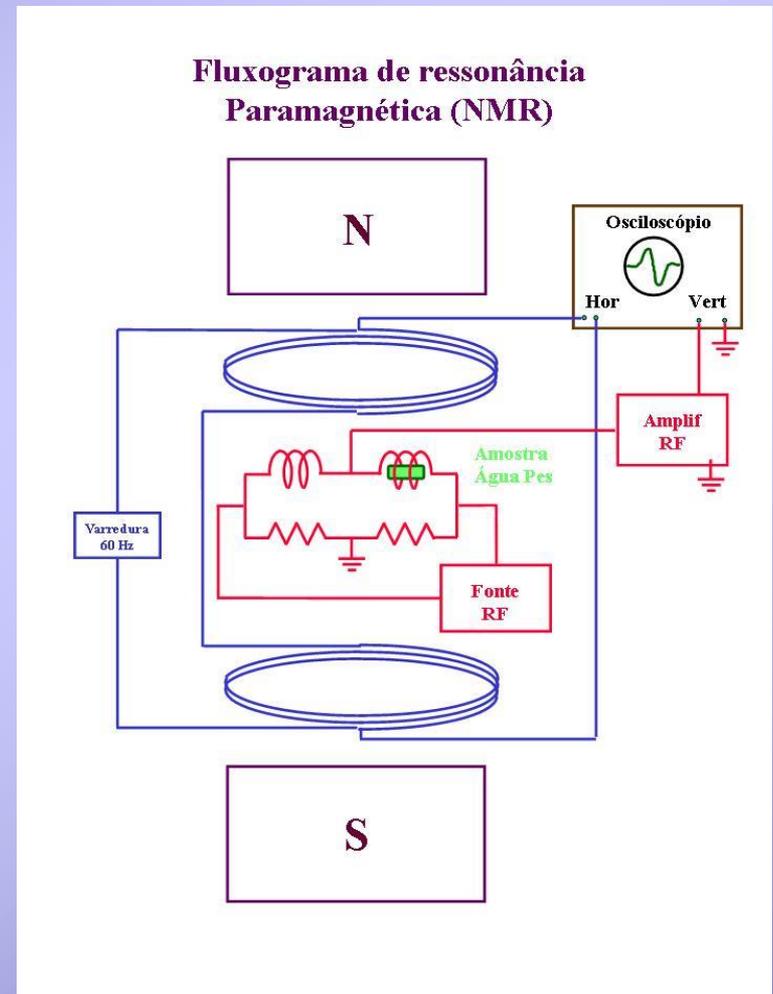
Controle de tensão (grosso)



Controle de tensão (fino)



Triodo

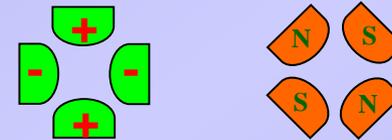
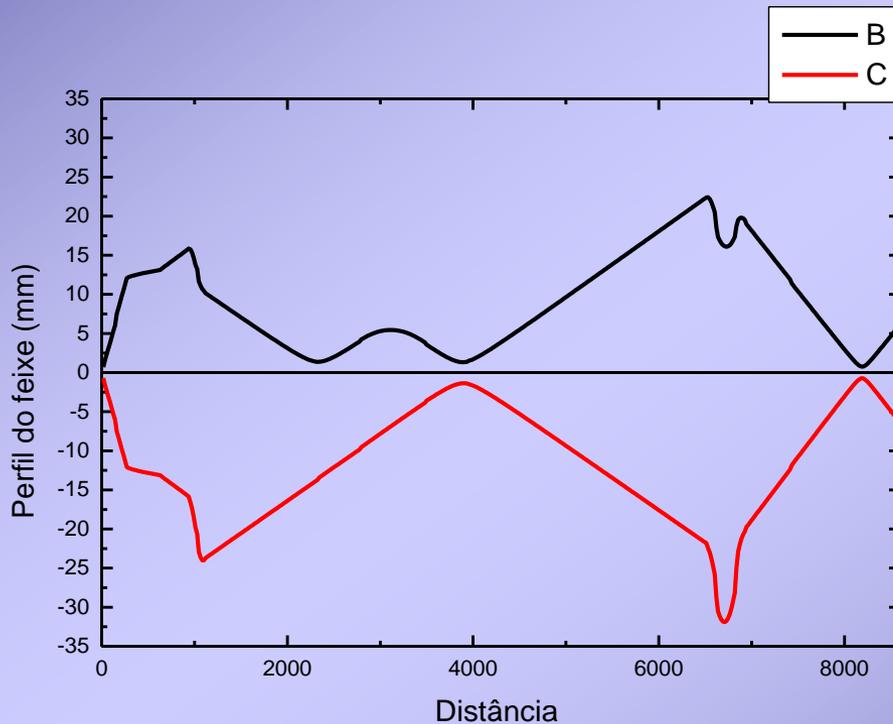


Transporte de feixe

Controle da trajetória das partículas

Elementos óticos

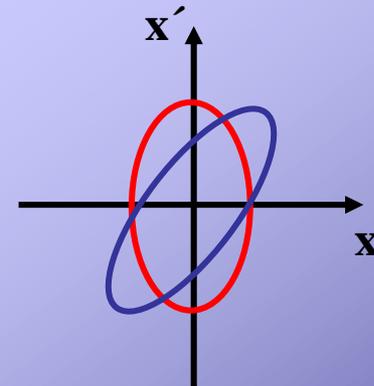
Quadrupolos elétricos, magnéticos,
lentes einzel



Forças efeitos opostos

Eixo x – converge

Eixo y – diverge



Emitância

Espaço de fase - partículas
feixe

Posição e direção do vetor
velocidade

Diagnóstico de feixe

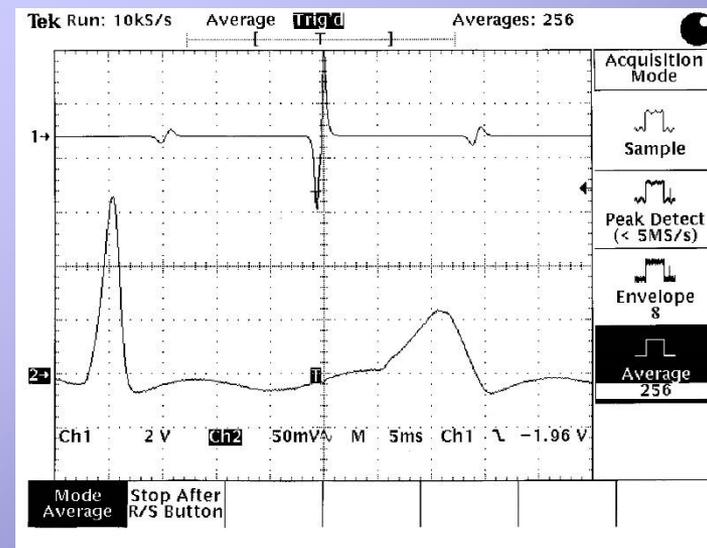
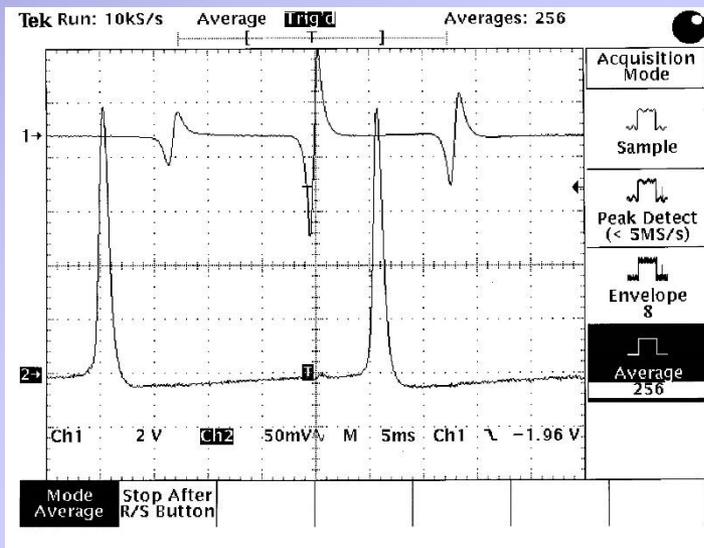
Transporte de feixe

Copo de Faraday

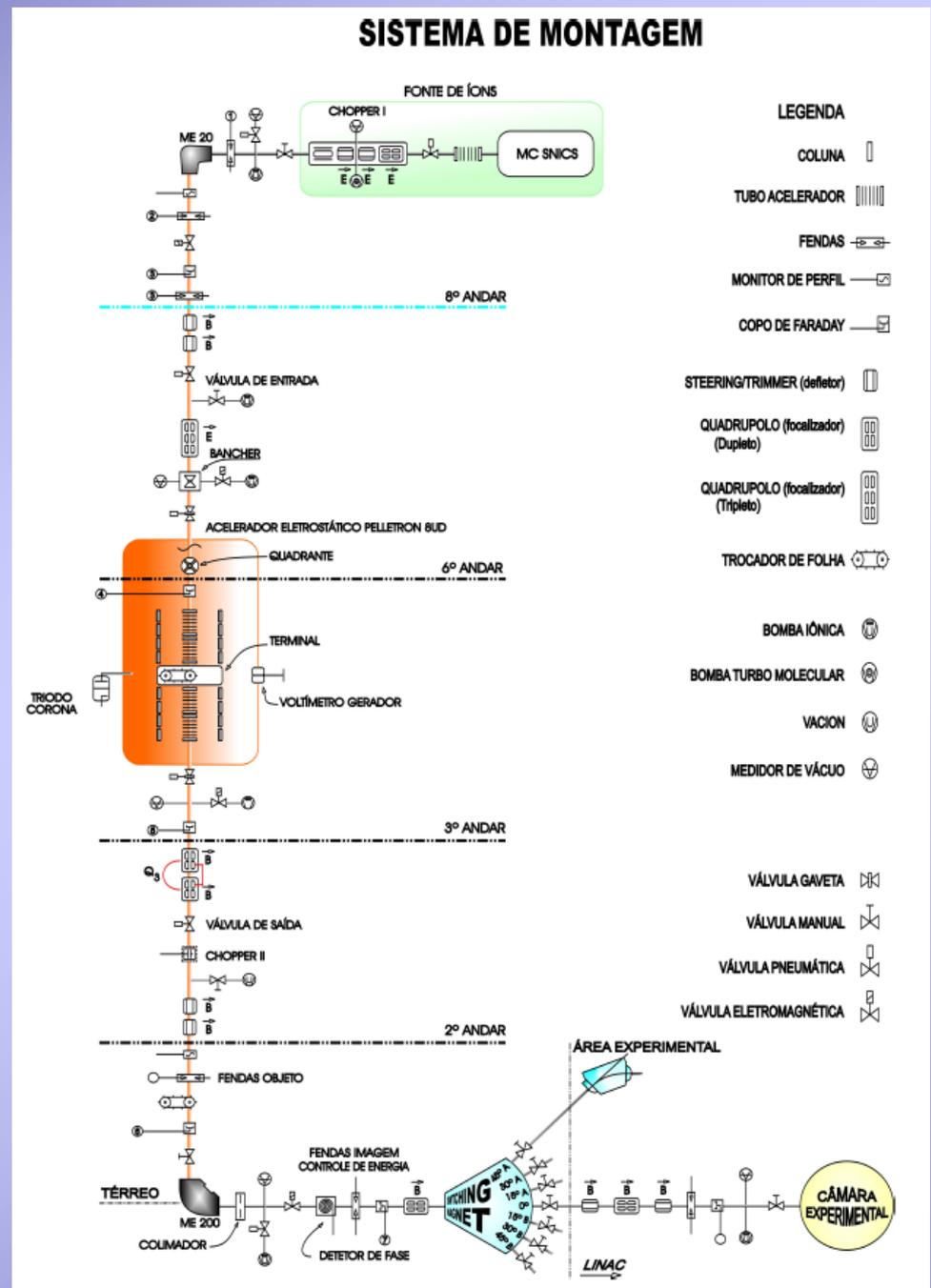
Intensidade do feixe

“Beam Scanner”

Forma do feixe



Esquema geral do acelerador



Futuro - Linac

Características do acelerador

Configuração, óptica, sintonia

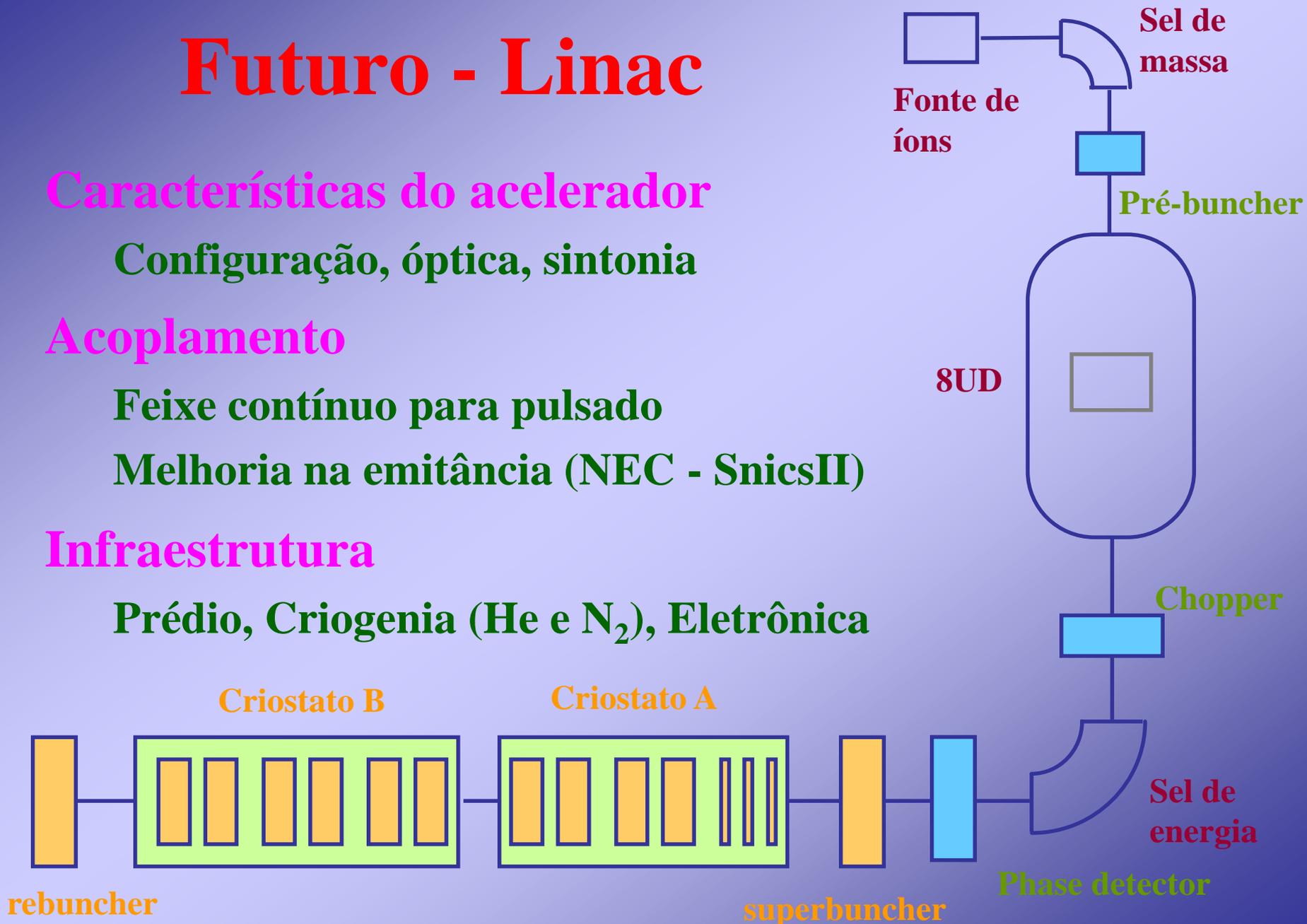
Acoplamento

Feixe contínuo para pulsado

Melhoria na emitância (NEC - SnicsII)

Infraestrutura

Prédio, Criogenia (He e N₂), Eletrônica



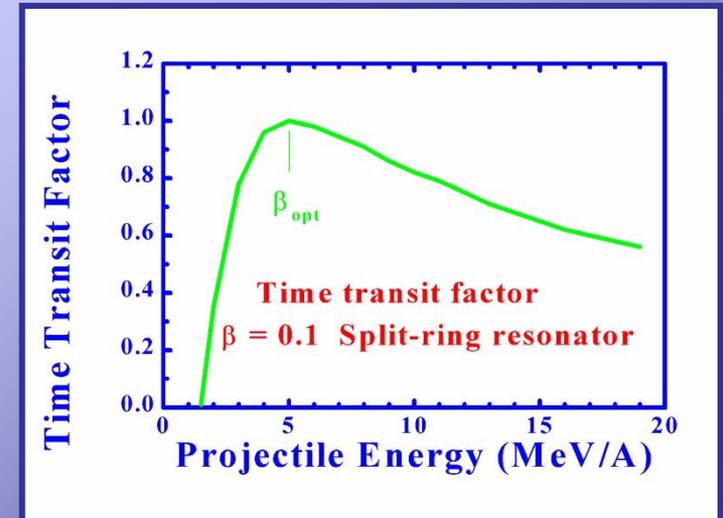
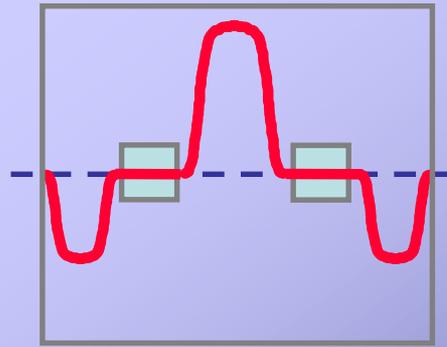
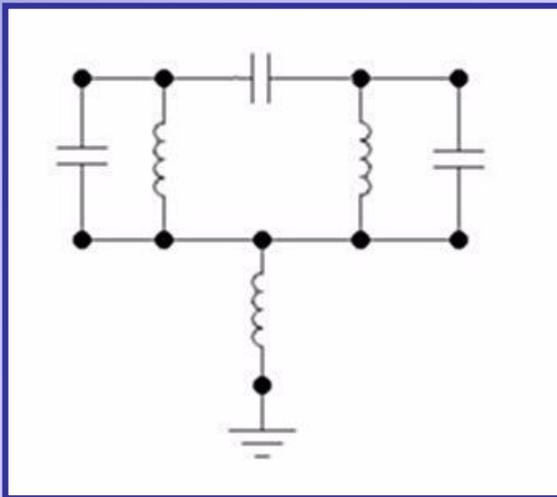
Ressonadores

“Split-ring” - Nb

supercond ($< 9\text{K}$)

97 MHz

Alto/baixo beta



Feixe Pulsado

Pré-buncher

Empacotamento (70%)

Tensão Dente de Serra

3 harm - fund 12.125 MHz

Chopper

Limpeza entre pacotes

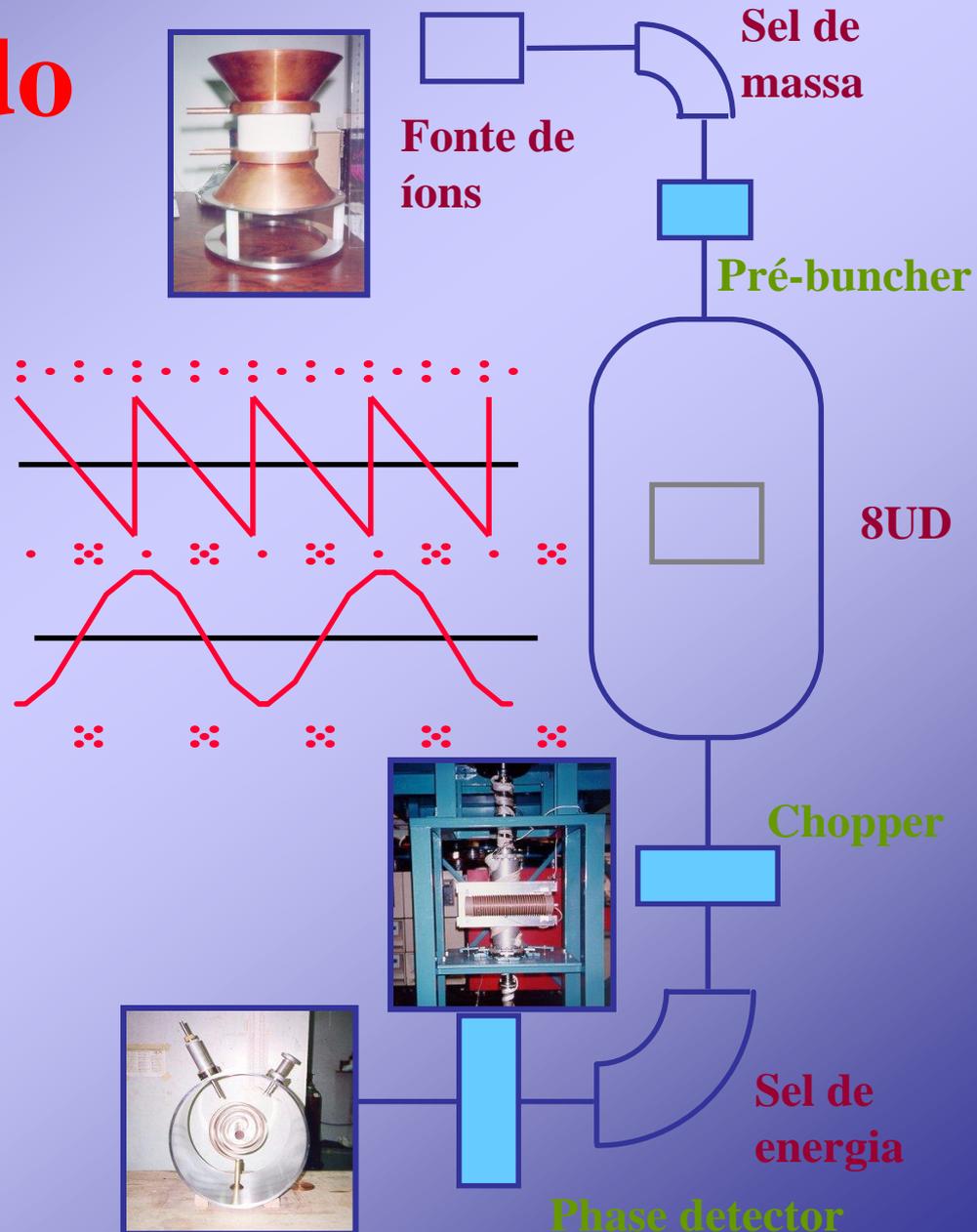
1 harm - 6.0625 MHz

Phase detector

Sincronia entre pacotes

Sinal induzido pelo feixe

48.5 MHz - referência



Infraestrutura - Criogenia

Operação a 4 K

Nb supercondutor < 9 K

Minimizar perdas

Condução

isolante térmico

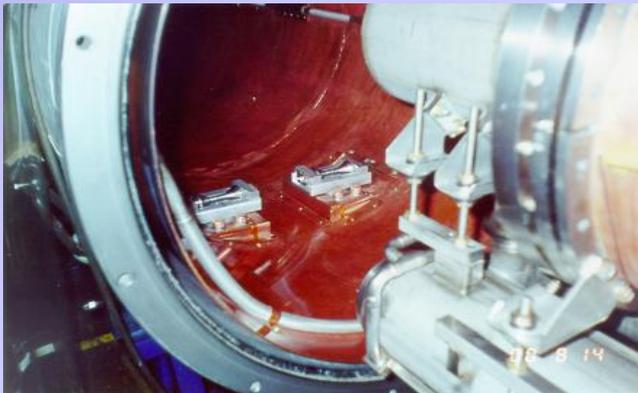
Convecção

vácuo

Irradiação

interface térmica (77 K)

folhas refletoras



Criostatos

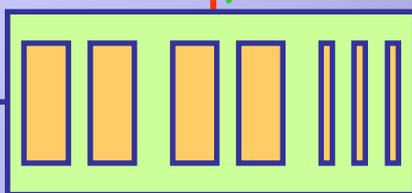
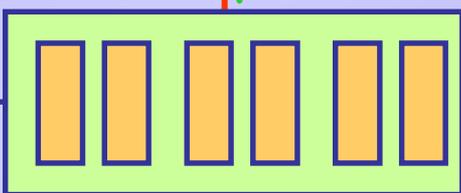
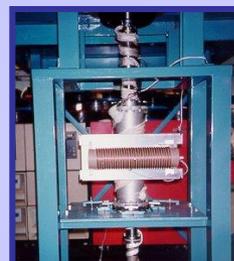
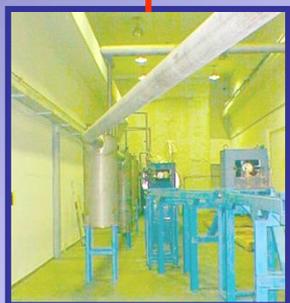
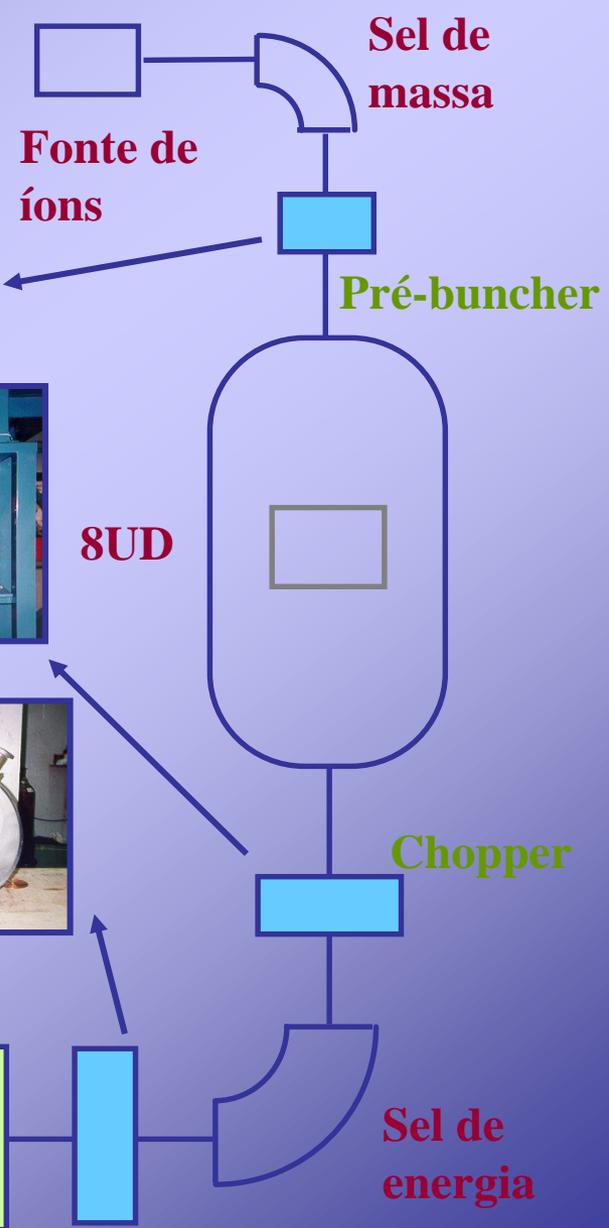
2 Pequenos (1 res)

2 Grandes:

A (3 baixo + 4 alto)

B (6 alto)





rebuncher

Criostato B

Criostato A

superbuncher

Phase detector

LAMFI - Laboratório de Análise de Materiais por Feixes Iônicos

**Acelerador, Pelletron
tipo tandem, 1.7MeV.
feixes de H^+ , He^+ , He^{++} ,
 Li^+ e outros.
Análises PIXE, RBS,
NRA e ERDA**



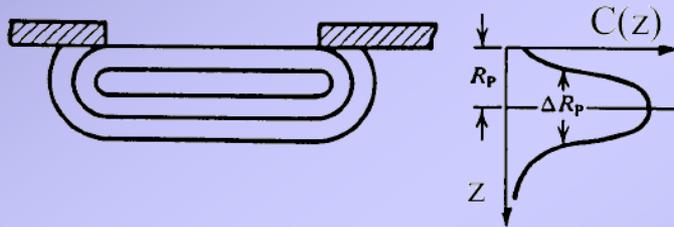
FIM

- **Permite misturas sólidas fora do equilíbrio químico;**
- **Usado desde 1970 na indústria de semicondutores;**
- **Controle preciso de dose e profundidade do átomo implantado (muito superior que na difusão química);**
- **Danos cristalinos podem ser recuperados via recozimento;**
- **Método promissor para biocompatibilização de materiais;**
- **e muito mais...**

Implantação Iônica

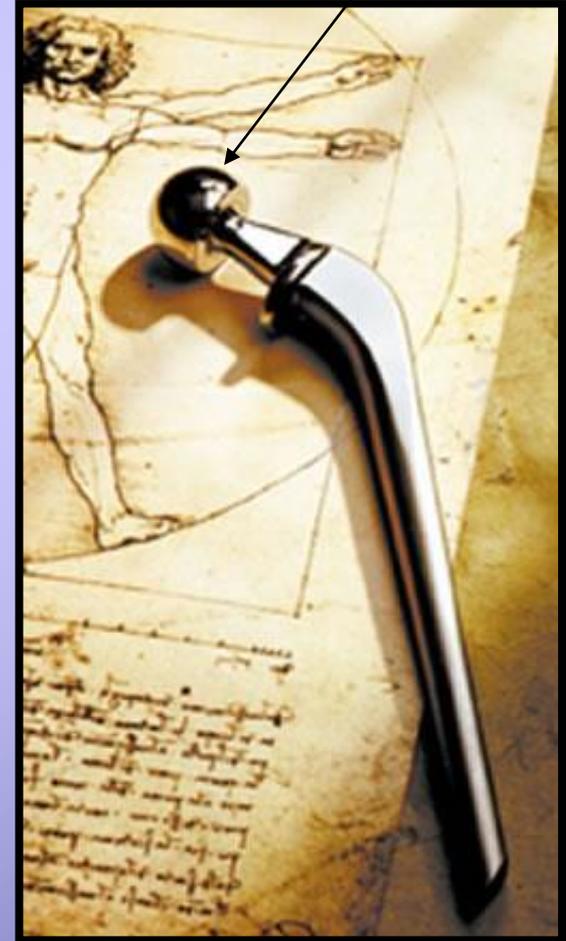


**Difusão química:
Máximo na Superfície**



**Implantação Iônica:
Não há limites de
quanto nem onde...**

Superfície dura de TiN
criada via implantação
iônica em plasma de
nitrogênio.



<http://www.ornl.gov/info>

Sistema de nitrogênio líquido



Liquefator

2 x Linde 45 l/h

Reservatório - 3000 l

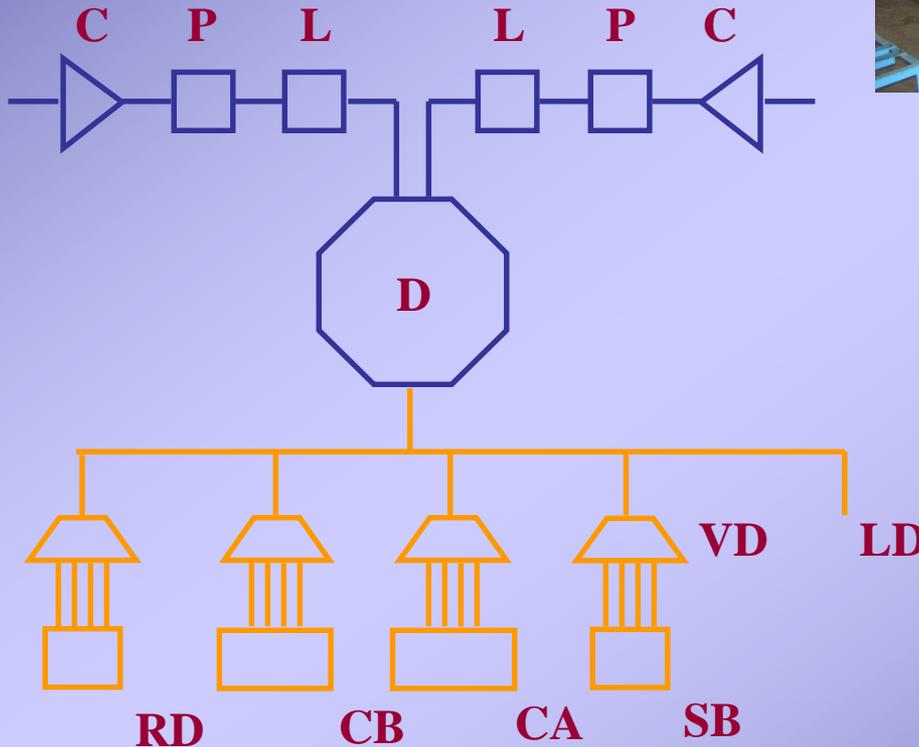
Linha de distribuição

Interface térmica

criostatos, distr de He

Refrigeração

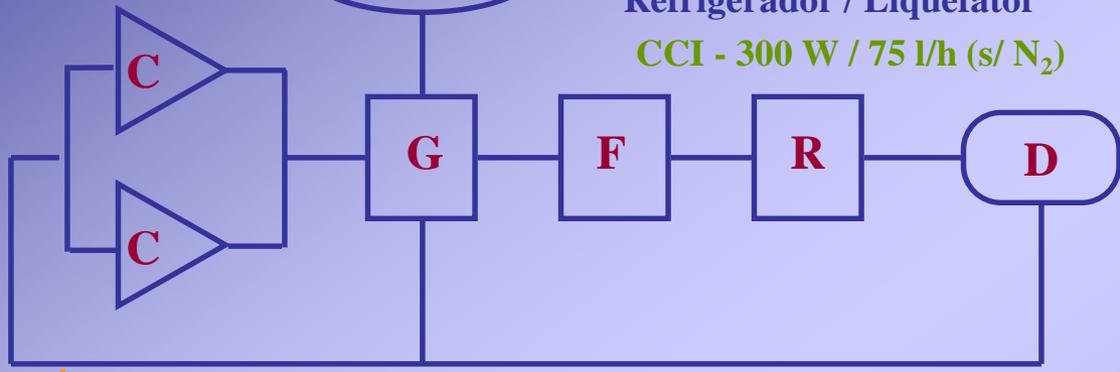
Simtonia fina, Pré-resfr



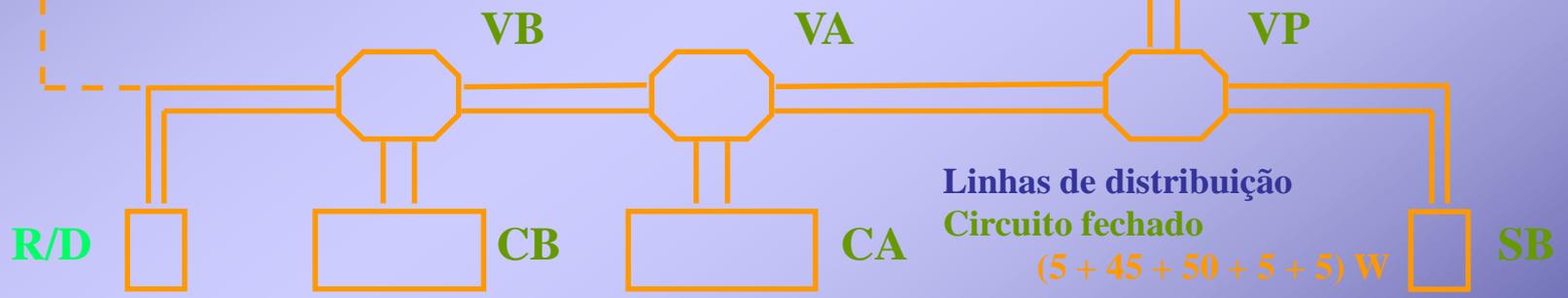


P

Refrigerador / Liquefator
CCI - 300 W / 75 l/h (s/ N₂)



Sistema de
hélio
líquido



Caracterização

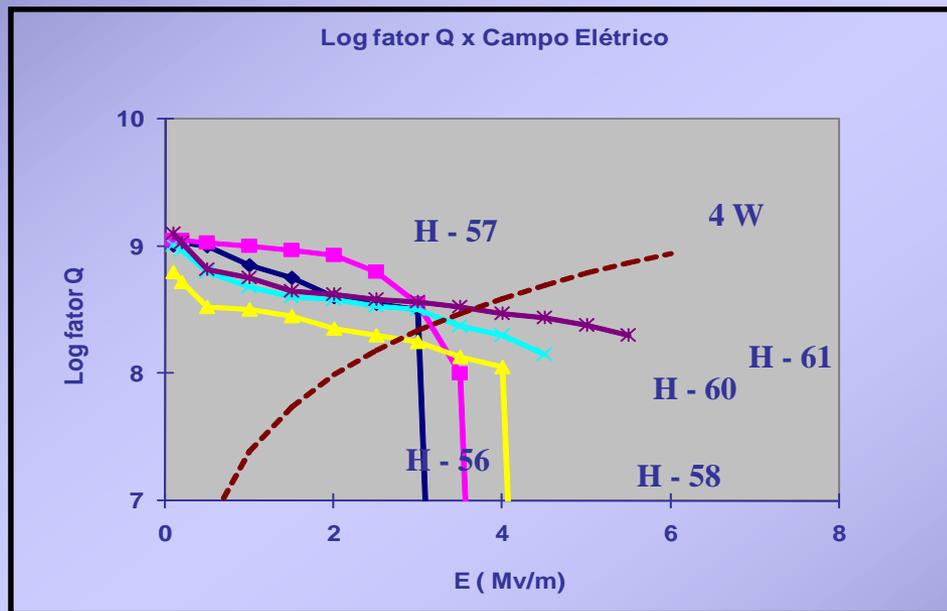
Teste frio (4 K)

3 MV/m @ 4 W

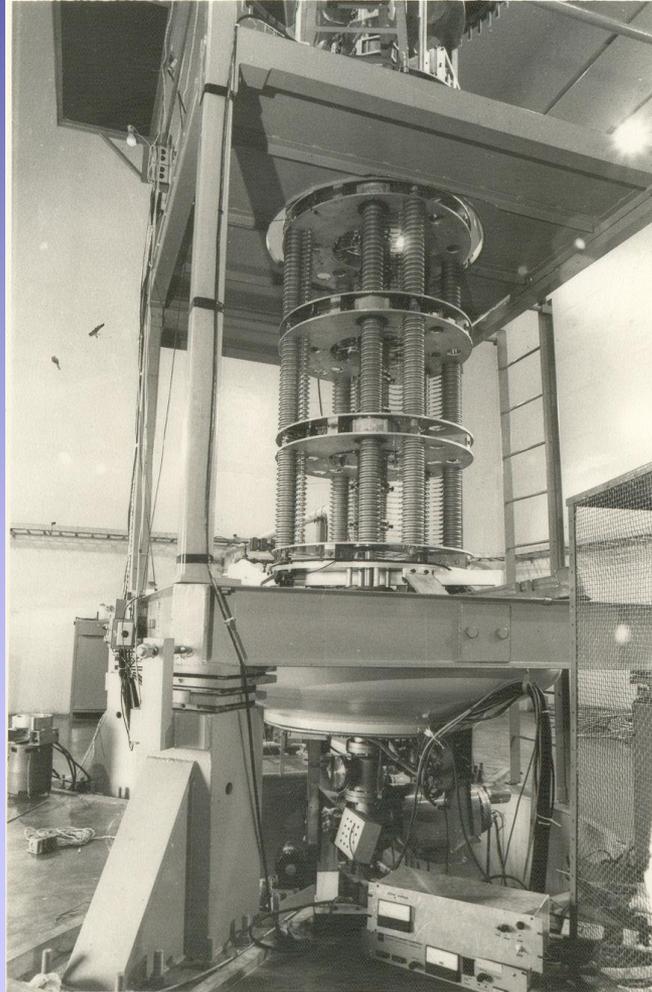
Fator Q - 10^9

$$P Q = \omega W$$

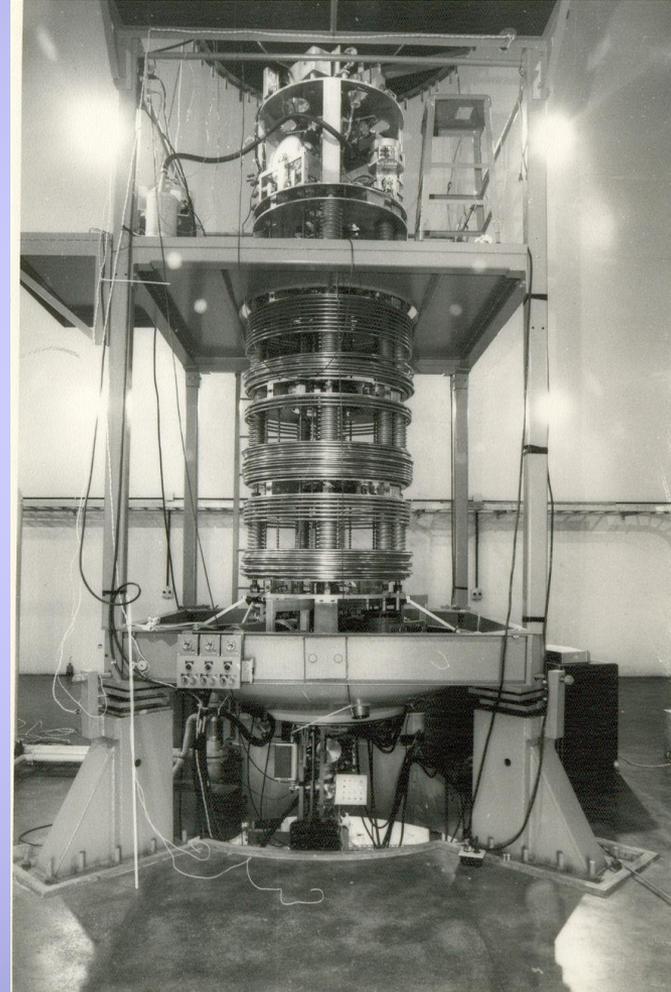
L-24	5 MV/m
L-25	5 MV/m
L-26	4.5 MV/m
L-27	3.2 MV/m
H-56	3 MV/m
H-57	3.5 MV/m
H-58	4.3 MV/m
H-59	1 MV/m
H-60	4.5 MV/m
H-61	5.6 MV/m
H-62	1 MV/m
H-63	3.5 MV/m
H-64	3.5 MV/m
H-65	4 MV/m



Estrutura do acelerador

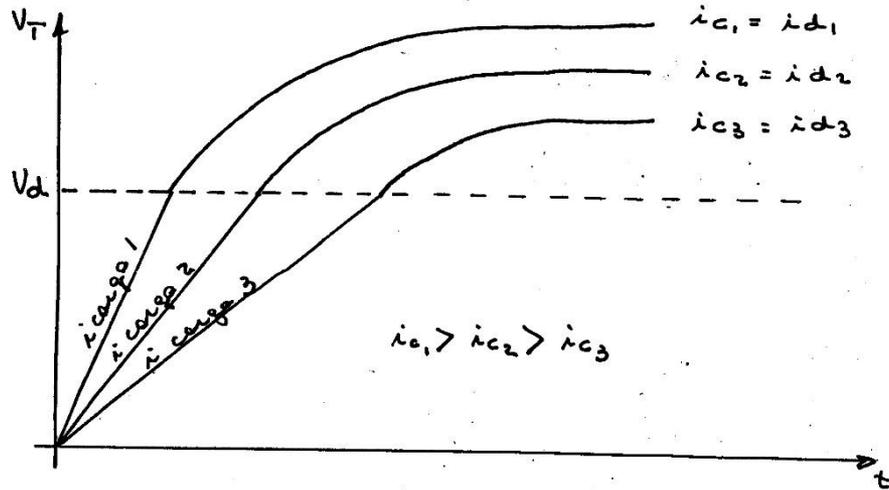


Mecânica



Anéis

TENSÃO NO TERMINAL

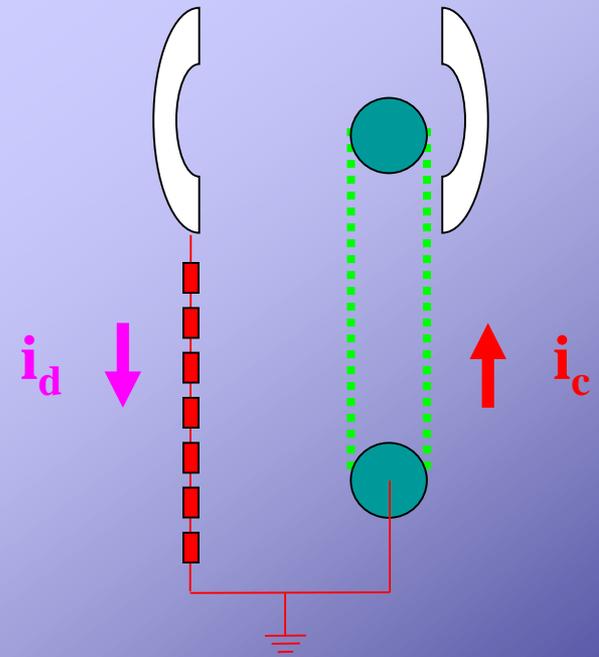
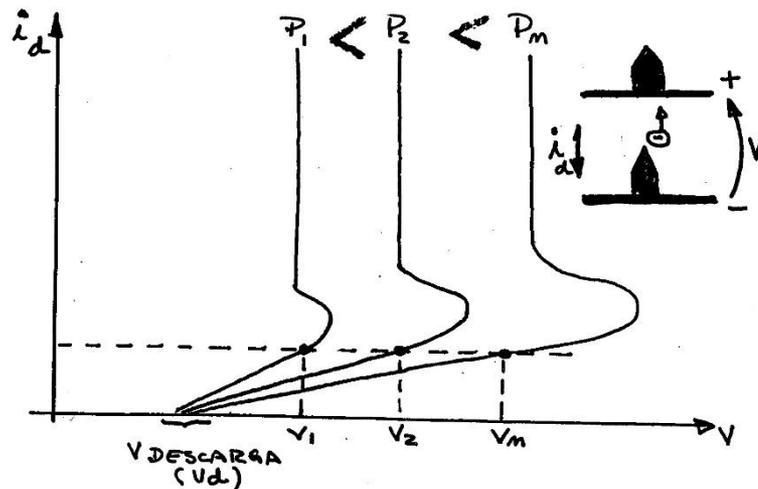


Intervalo da tensão
de trabalho

Tensão de carga

Pressão do gás

DESCARGA NO SF₆



Aceleradores de elétrons

Dr. Tiago Fiorini da Silva

**Curso de verão – IFUSP
Fev. 2015**

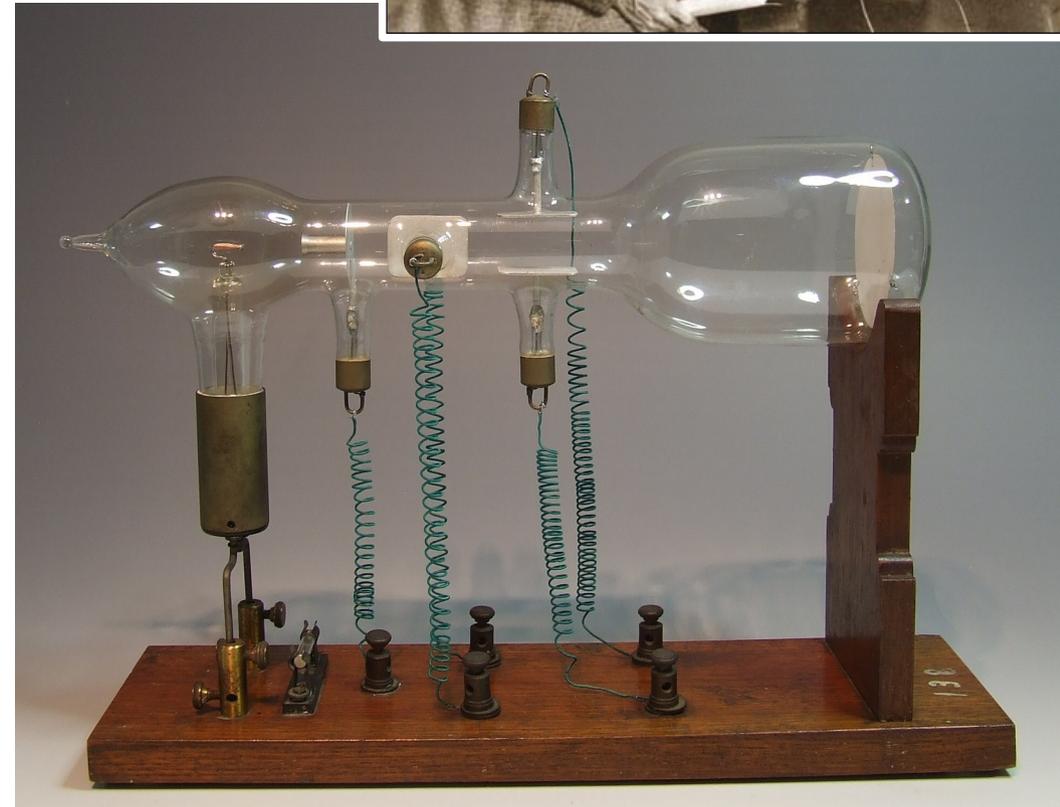
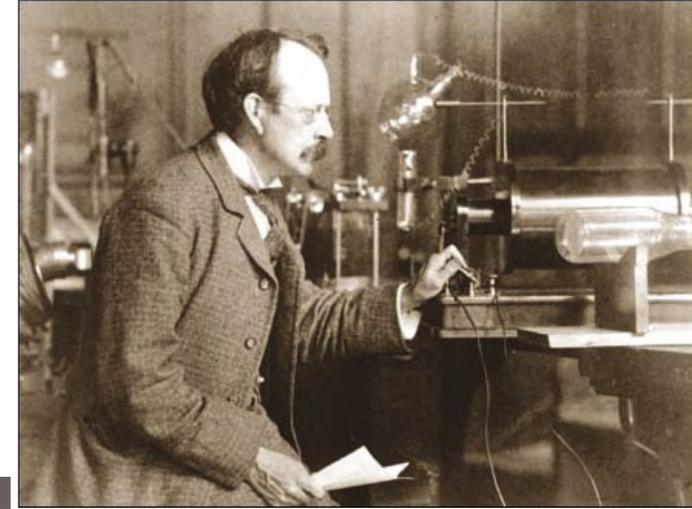
Sumário

- Introdução;
- Geração de feixes de elétrons;
- Aceleradores;
 - Bétatron
 - Linear
 - Microtron
 - Síncrotron e fontes e luz
- Futuro dos aceleradores de elétrons;

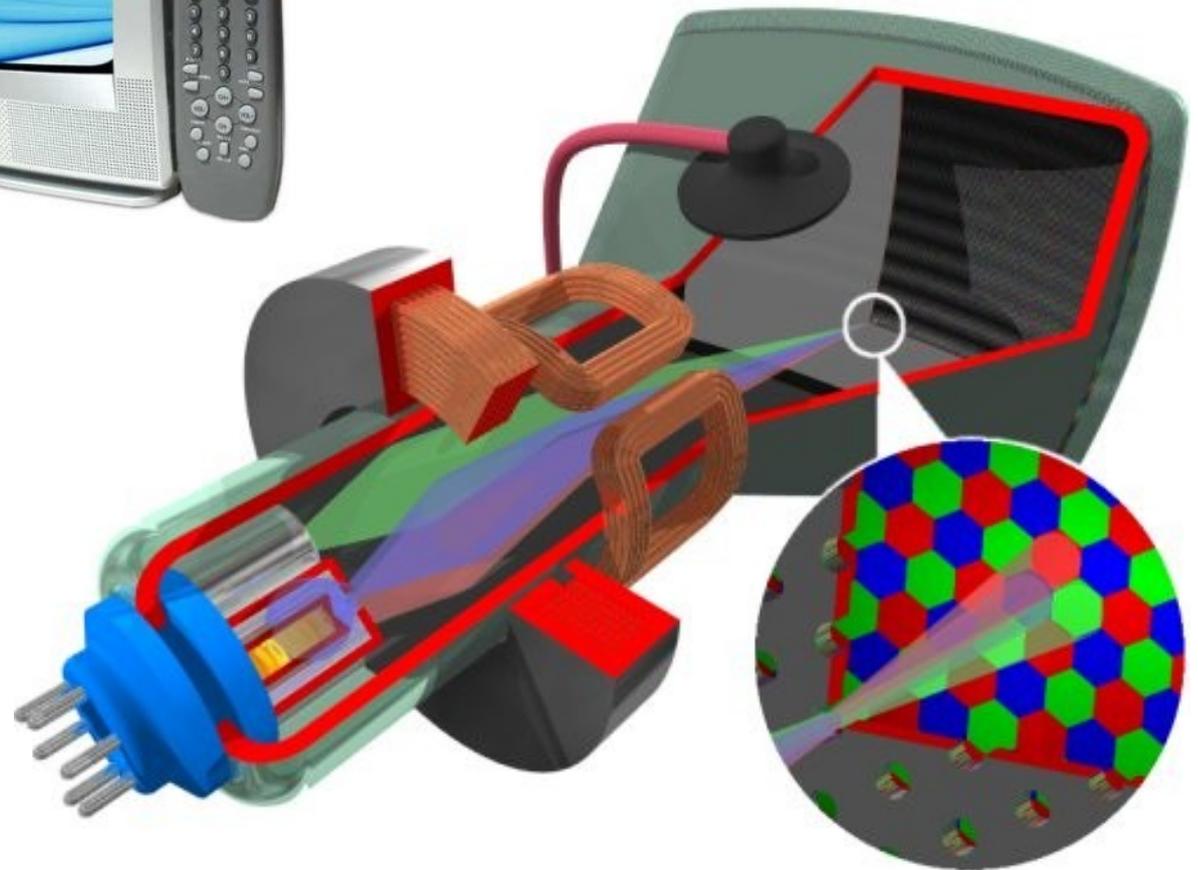
A descoberta do elétron

O **elétron** foi descoberto em 1897 por J. J. Thomson durante seus estudos com **tubos de raios catódicos**.

- Em seu primeiro experimento, Thomson usou um tubo de raios catódicos com um eletrômetro no final, e provou que aplicando um campo magnético cruzando o tubo não havia contagens de cargas no eletrômetro. Isso provou que os raios catódicos e as cargas eram inseparáveis.
- Em seu segundo experimento, Thomson provou que os raios carregavam cargas negativas ao defletir os raios com campos elétricos.
- E em seu terceiro experimento, Thomson mediu a razão q/m ao combinar as deflexões de um campo elétrico com a de um magnético cruzados.



Tubo de raios catódicos



Por que elétrons são interessantes?

O espalhamento de elétrons energéticos produzidos em um linac foi usado para medir a densidade de carga elétrica do núcleo.

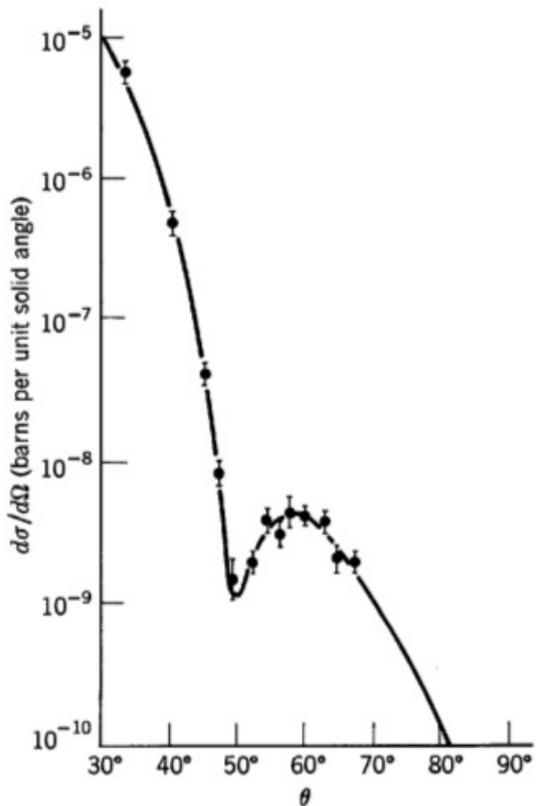


Figure 15-5 A measure of the number of electrons scattered from ${}^6\text{C}$ as a function of the scattering angle for 420 MeV incident electrons. The differential scattering cross section $d\sigma/d\Omega$ is the measure used. It is evaluated in terms of the area unit commonly employed in nuclear physics, called the *barn*; $1 \text{ bn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$. The curve is the fit to the data points obtained from the scattering analysis described in the text.

High-Energy Electron Scattering and Nuclear Structure Determinations*†‡

R. HOFSTADTER, H. R. FECHTER, AND J. A. MCINTYRE

Department of Physics and W. W. Hansen Laboratories, Stanford University, Stanford, California

(Received June 26, 1953)

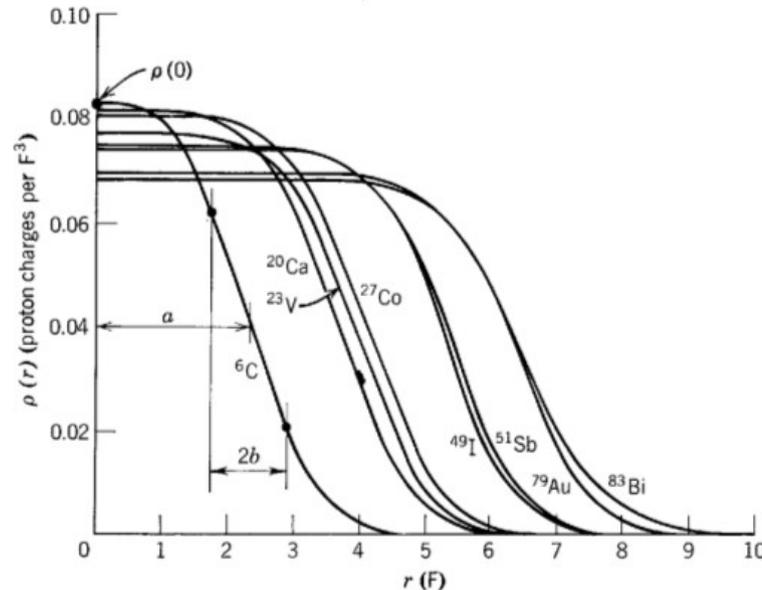


Figure 15-6 The charge densities of a number of nuclei. The charge density labeled ${}^6\text{C}$ produced the fit to the scattering data shown in Figure 15-5. The half-value radius parameter a , surface thickness $2b$, and interior charge density $\rho(0)$, are shown for ${}^6\text{C}$.

Testando o átomo:

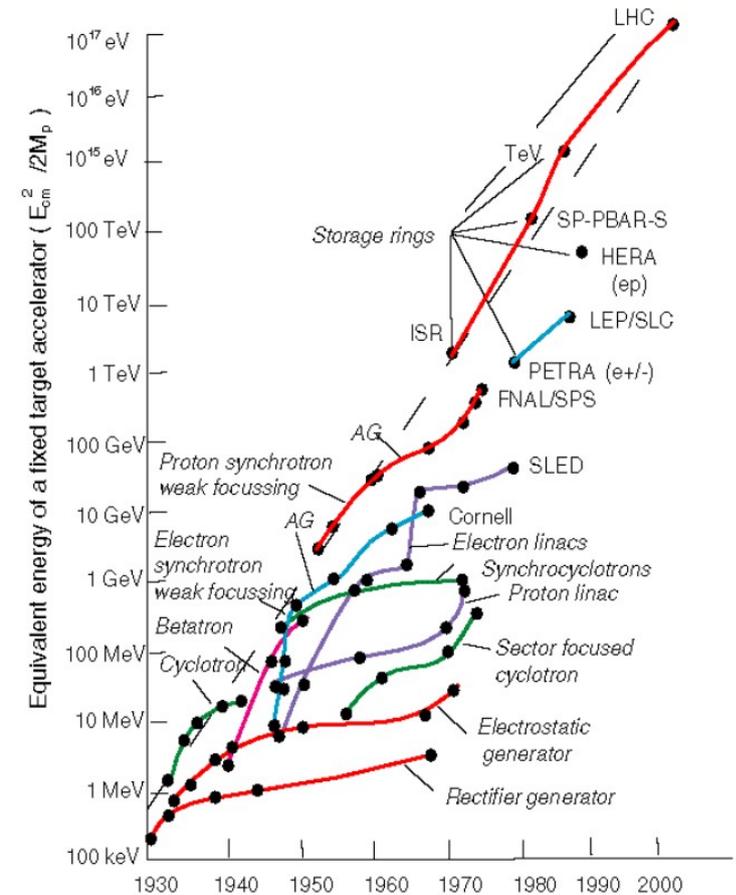
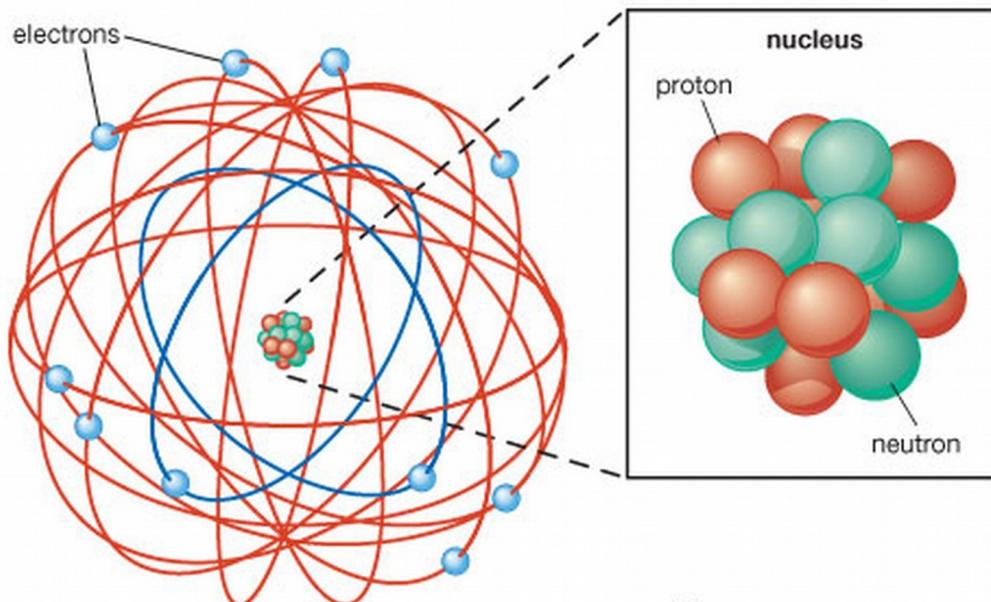
Elétrons – sonda coulombiana;

Íons – sonda coulombiana/força forte;

Nêutrons – sonda de força forte;

O modelo moderno do átomo

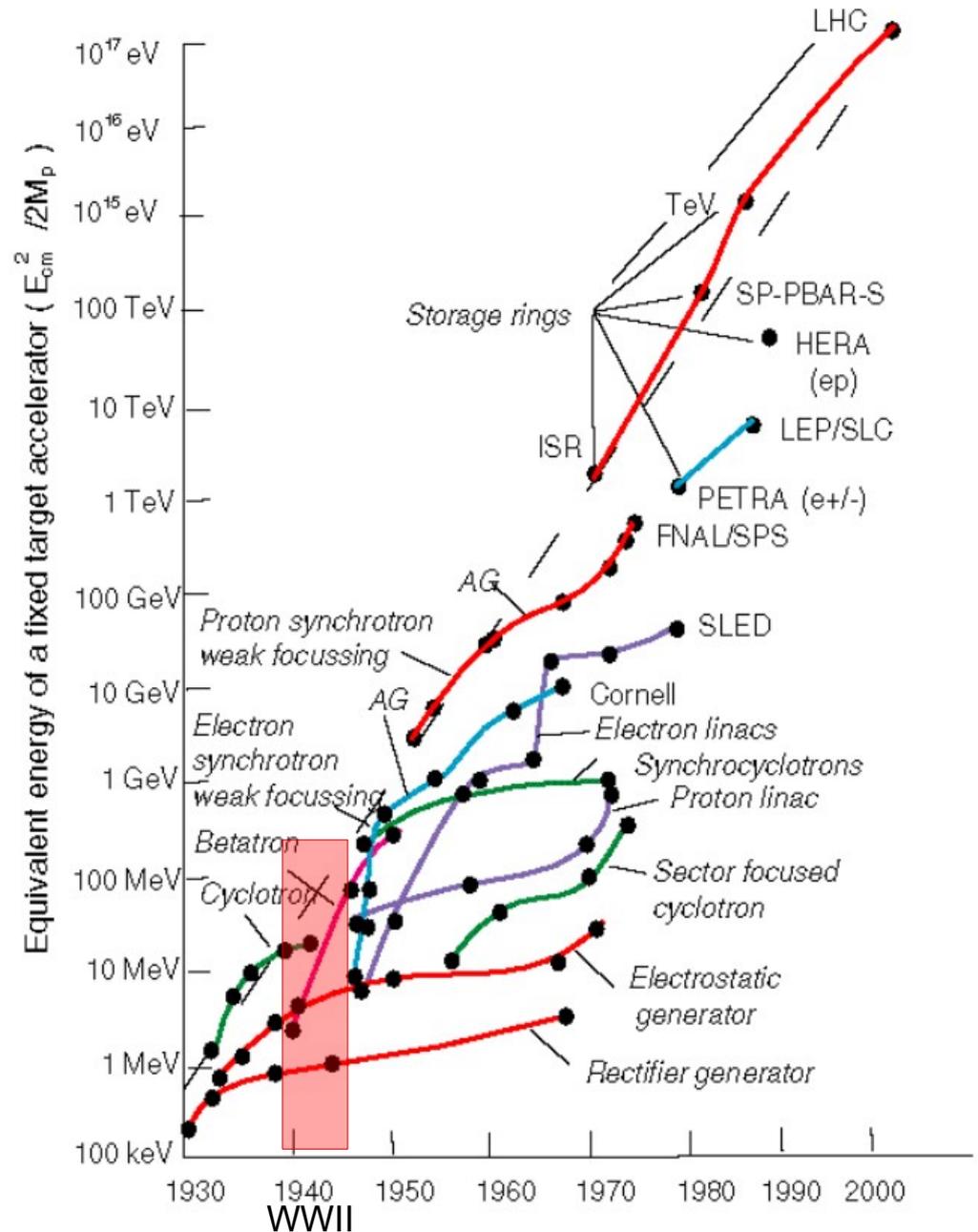
- 1913 – Postulados de Bohr;
- 1913 – Lei de Mosley;
- 1926 – Equação de Schrödinger;
- 1930 – Modelo de nuvem de elétrons;
- 1932 – Descoberta do nêutron por Chadwick;



O início de uma nova era no estudo do átomo e dos constituintes do núcleo

O gráfico de Livingston

- O gráfico de **Livingston** está para os físicos de aceleradores de partículas assim como a Lei de Moore está para a indústria de computadores;
- Cada desenvolvimento (seja **experimental ou teórico**) cria uma ramificação no gráfico, em um grande esforço para atender as requisições de físicos nucleares e de partículas;



Sumário

- Introdução;
- Geração de feixes de elétrons;
- Aceleradores;
 - Bétatron
 - Linear
 - Microtron
 - Síncrotron e fontes de luz
- Futuro dos aceleradores de elétrons;

Geração de feixes de elétrons

Feixes de elétrons podem ser gerados por três processos básicos:

- Termoiônico → Elétrons são emitidos em um processo induzido por calor;

Usado mais frequentemente

- Emissão de campo → Um campo elétrico intenso promove a emissão de elétrons por efeito de tunelamento;

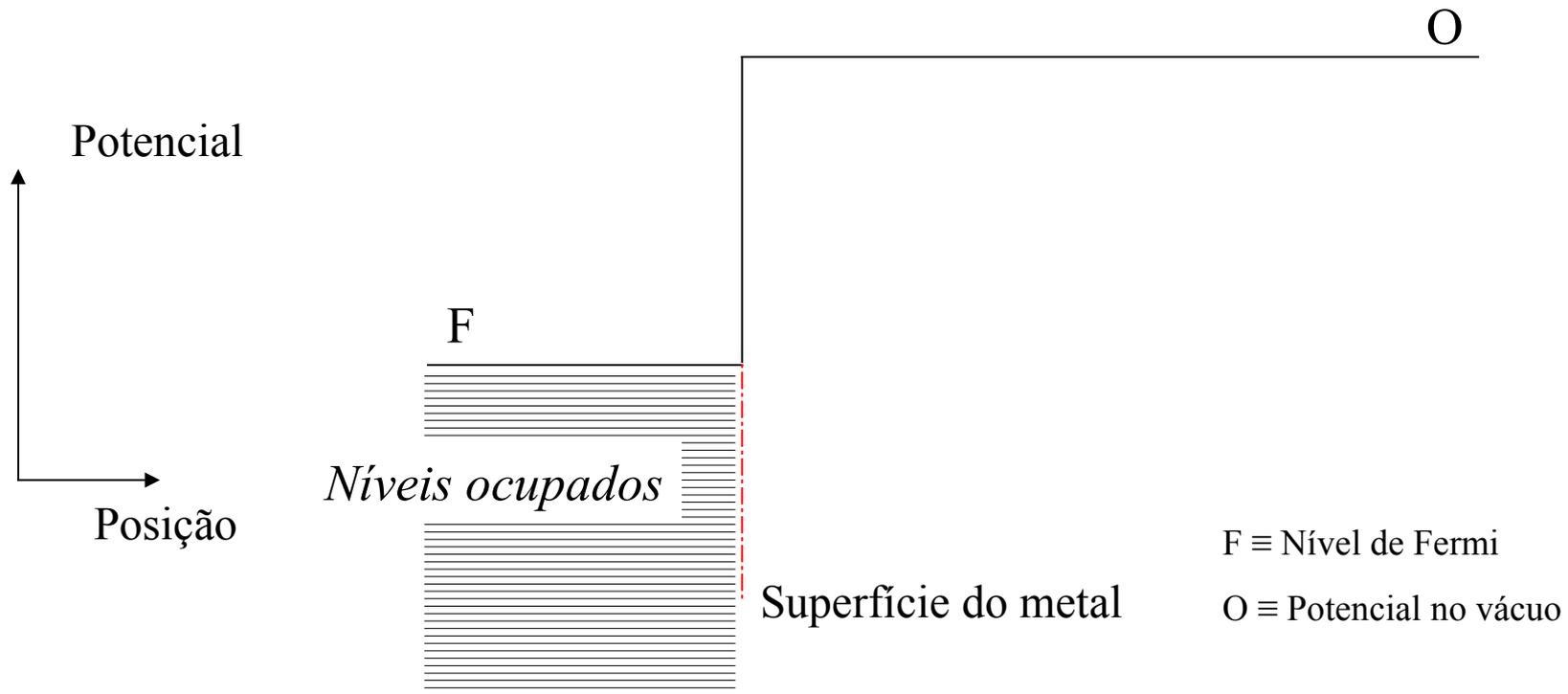
Usado como complemento da emissão termoiônica

- Fotoelétrico → Feixe formado por elétrons ejetados devido à incidência de luz;

Usado em aplicações específicas (brevemente comentado)

Elétrons em um metal

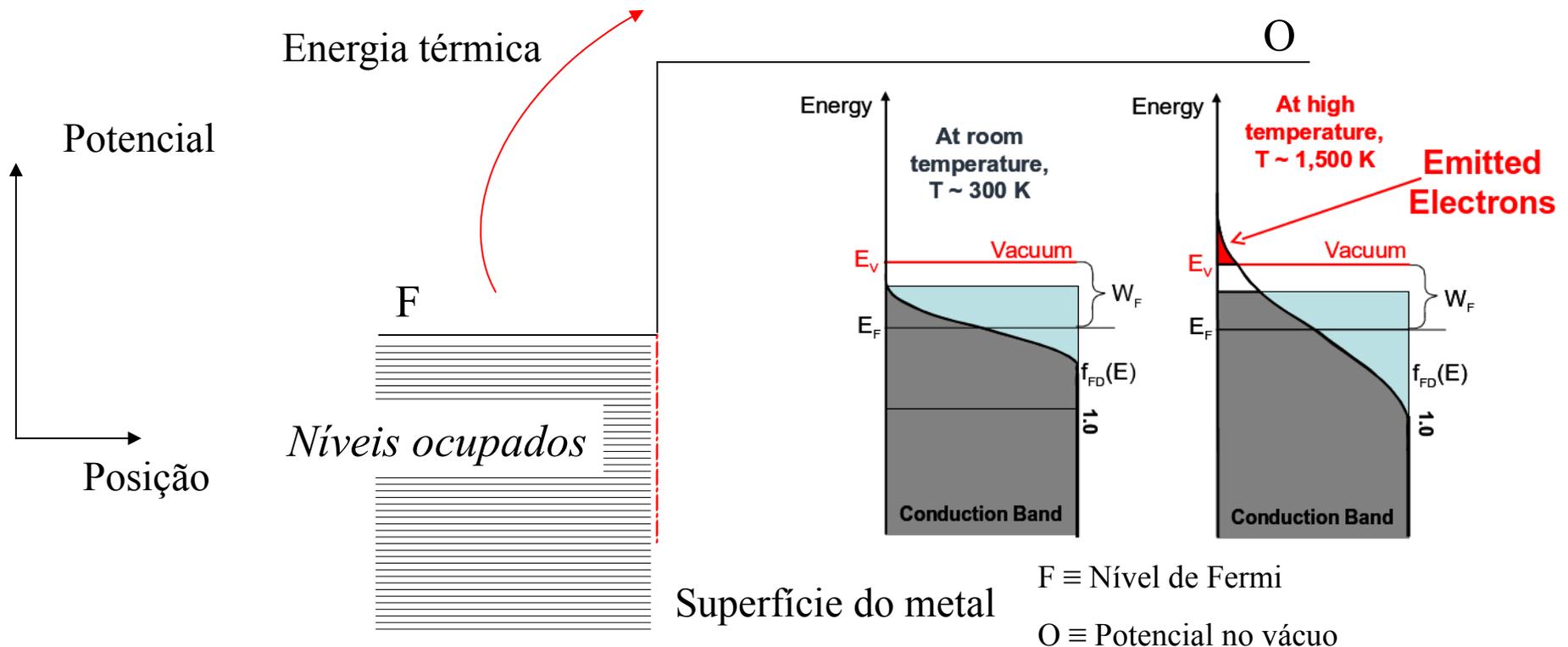
Em uma rede metálica, os elétrons da banda de condução podem ser considerados como elétrons “aprisionados” em um potencial “caixa”, com a maior energia de estado ocupado dada pela energia de Fermi (quando em 0K). A diferença de energia entre a altura da barreira da “caixa” e a energia de Fermi é chamada de função trabalho do material.



Emissão por efeito termoiônico

Efeito Termoiônico:

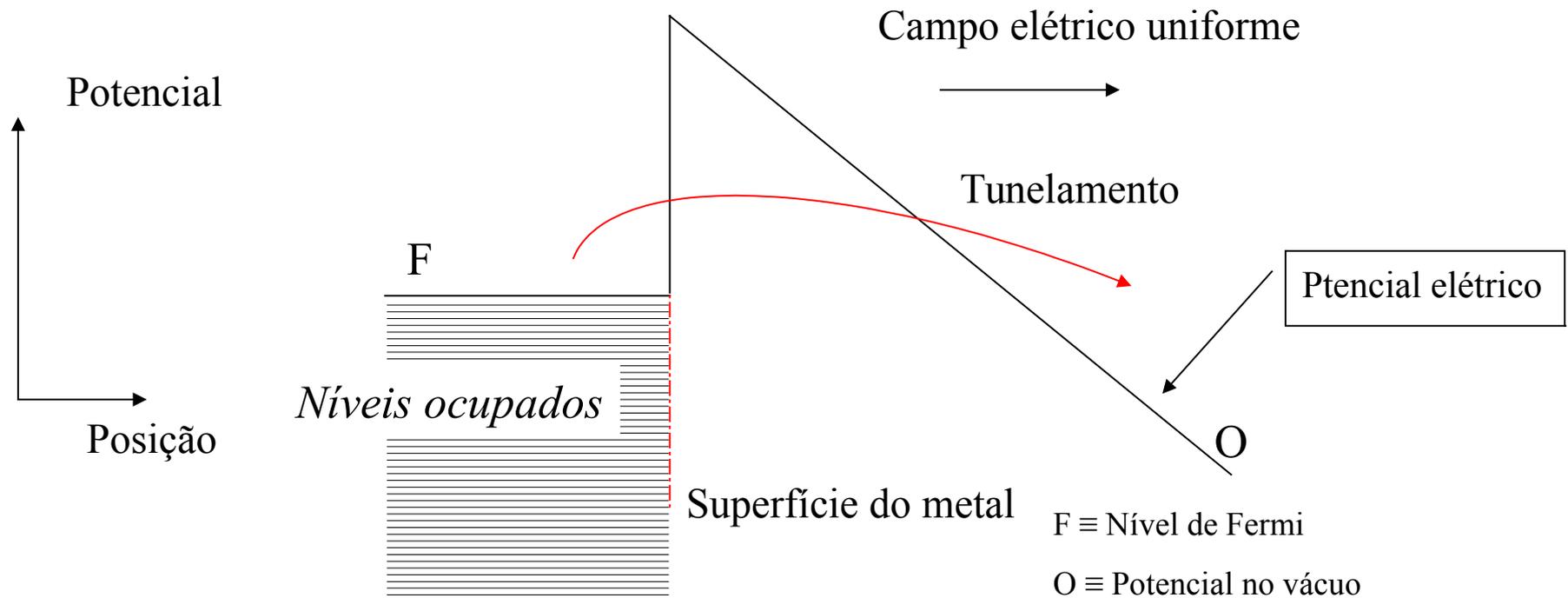
Estatisticamente (de acordo com a estatística da distribuição de Fermi-Dirac), uma fração pequena de elétrons podem ter energia maior que a função trabalho e escapar do material. Essa probabilidade é tão maior quanto maior a temperatura do material.



Emissão por efeito de campo

Efeito de campo:

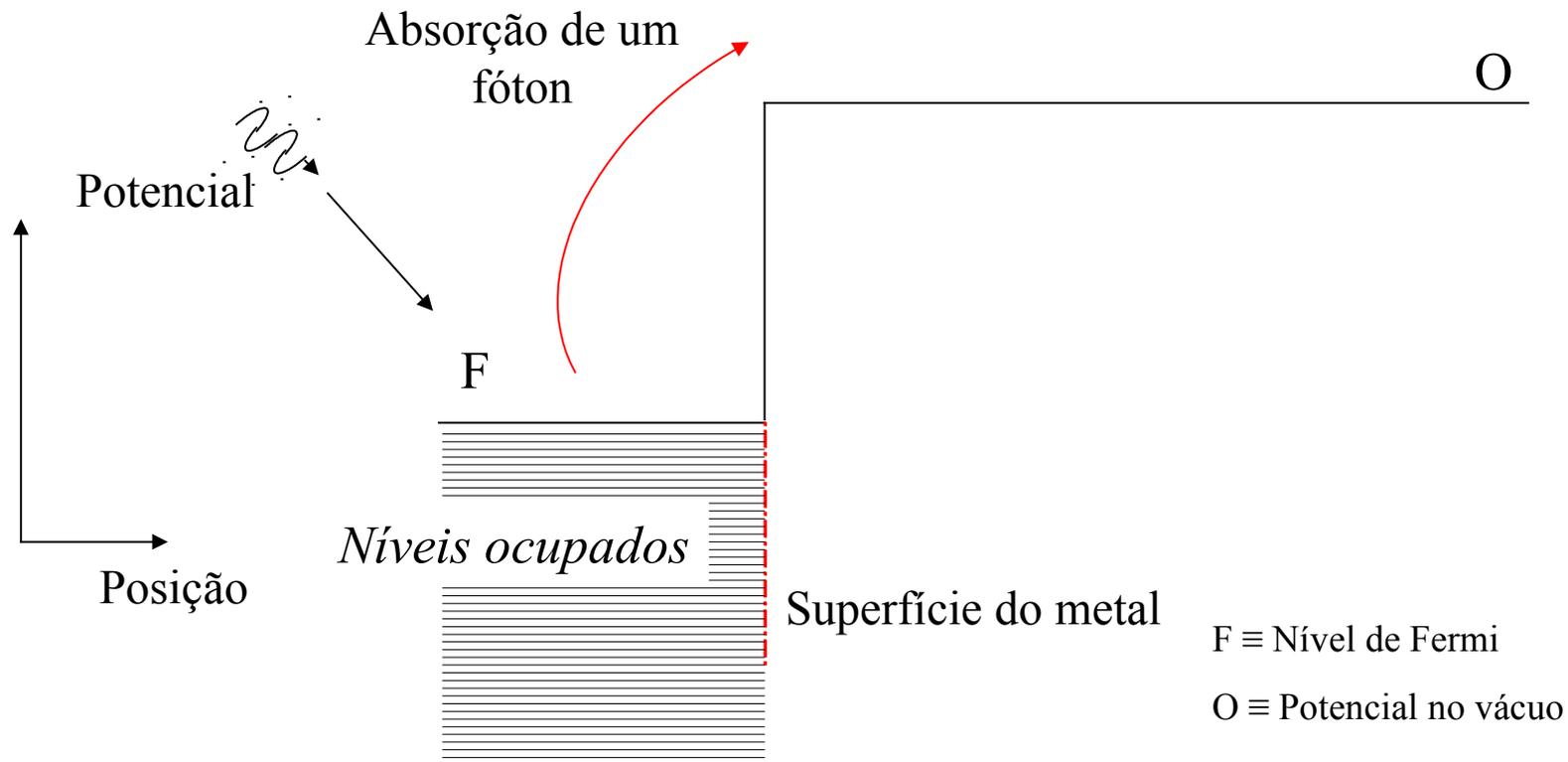
Um campo elétrico intenso produz uma barreira de potencial. Os elétrons tem uma probabilidade não nula de transpor a barreira pelo processo de tunelamento.



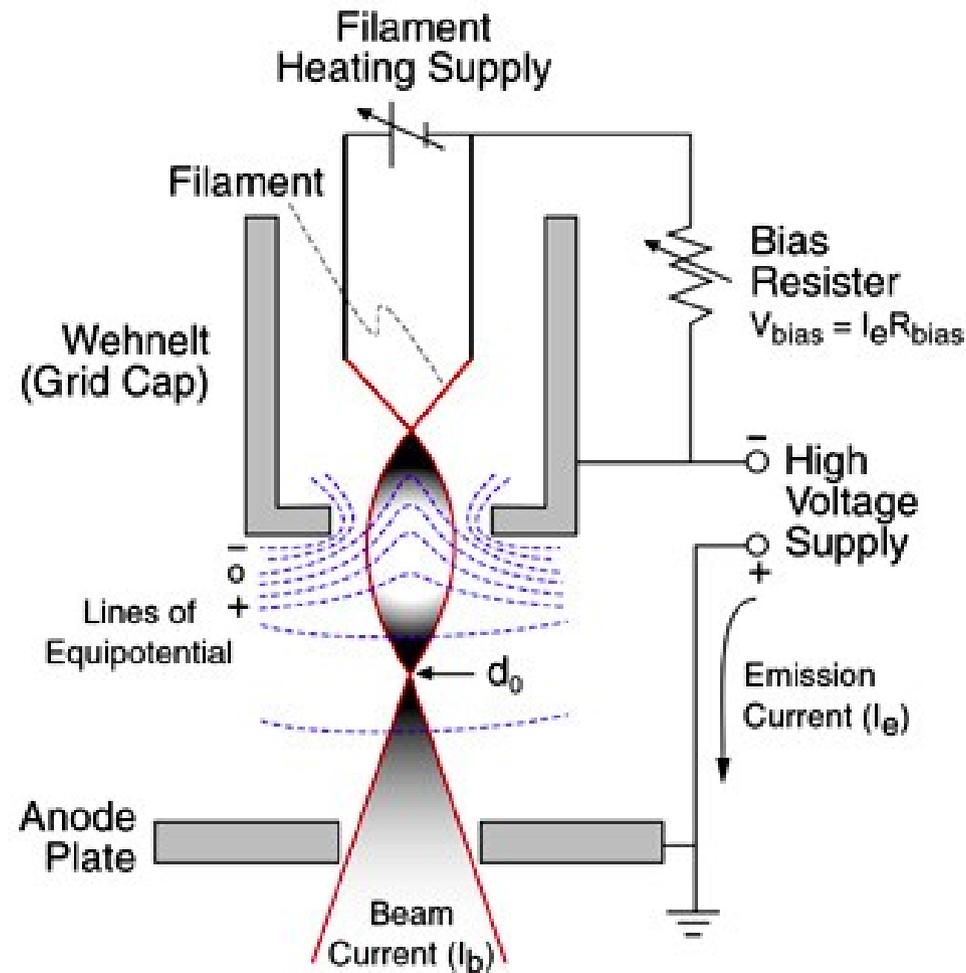
Emissão por efeito fotoelétrico

Efeito fotoelétrico:

Um elétron pode absorver um fóton com energia suficiente para exceder a função trabalho e ser ejetado do material.



Canhão de elétrons – Esquema básico



<http://www4.nau.edu/microanalysis/microprobe-sem/instrumentation.html>

Lei de Richardson

Lei de Richardson

$$j_{es} = AT^2 \exp(-e\Phi/kT)$$

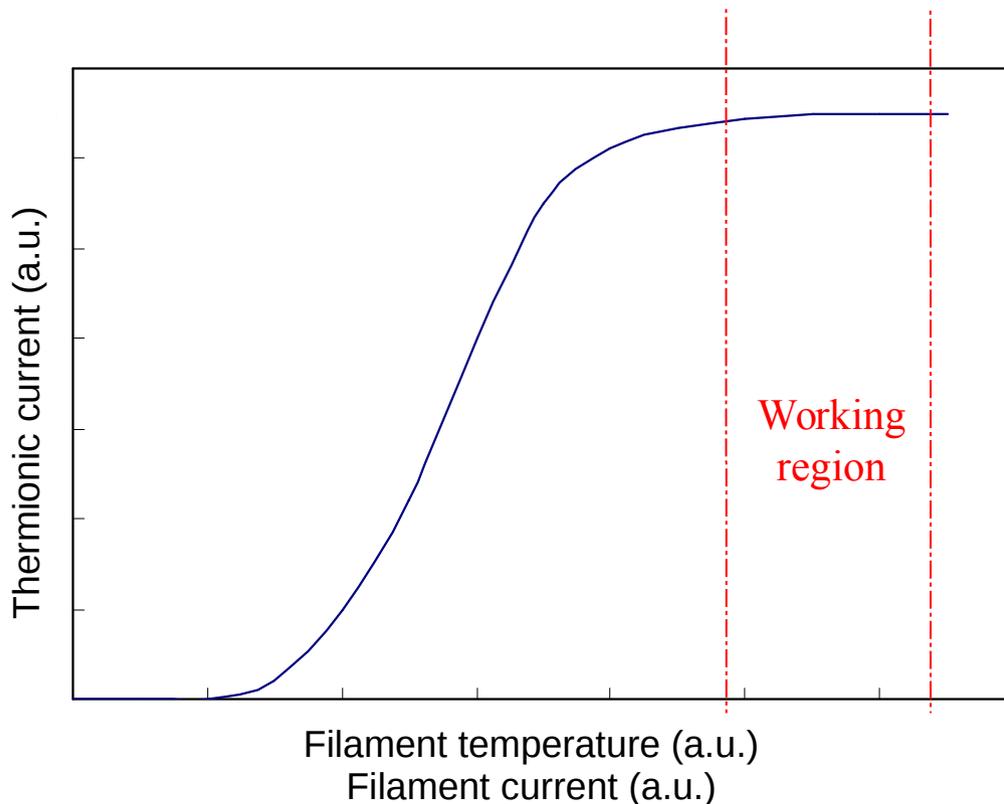
$j_{es} \equiv$ Densidade de corrente ($A.cm^{-2}$)

$T \equiv$ temperatura (K)

$\Phi \equiv$ função trabalho (eV)

$A \equiv$ Constante de Richardson ($A.cm^{-2}.K^{-2}$)

$k \equiv$ Constante de Bolzman



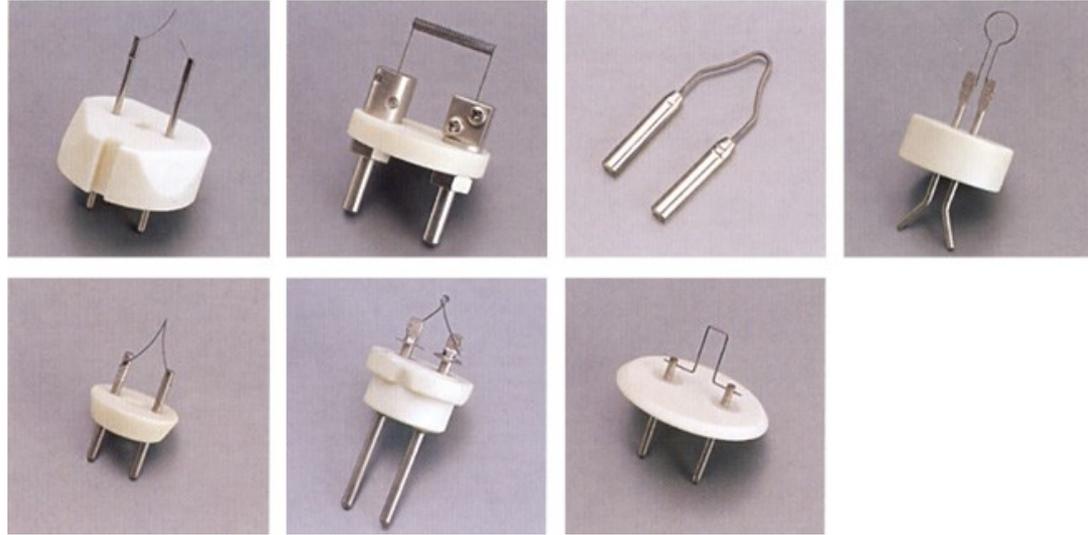
material	Φ [V]	A [$A.cm^{-2}.K^{-2}$]
molybdenum	4.15	55
nickel	4.61	30
tantalum	4.12	60
tungsten	4.54	60
barium	2.11	60
cesium	1.81	160
iridium	5.40	170

CAS 2005 – Beam Formation (Peter Spädtke)

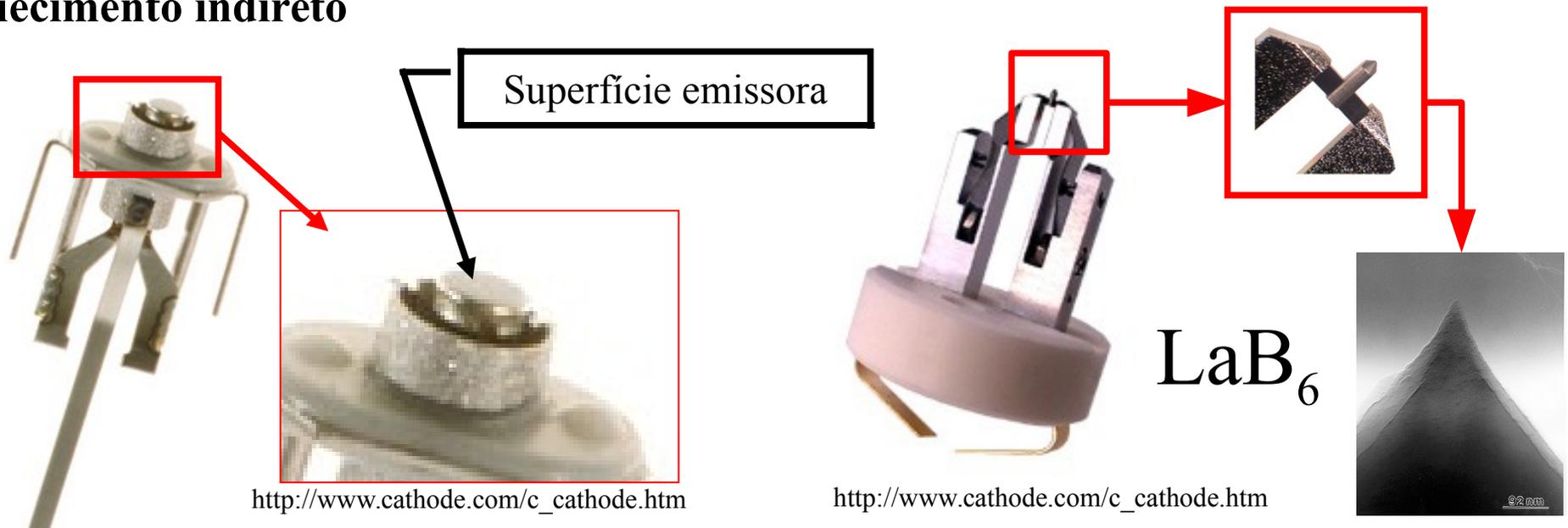
Catodos termoiônicos

Aquecimento direto

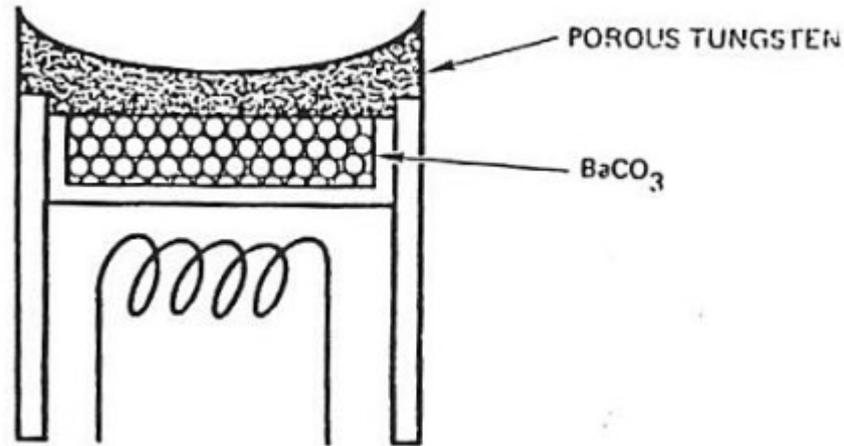
<http://www.fullam.com/Filament.htm>



Aquecimento indireto



Catodo dispenser

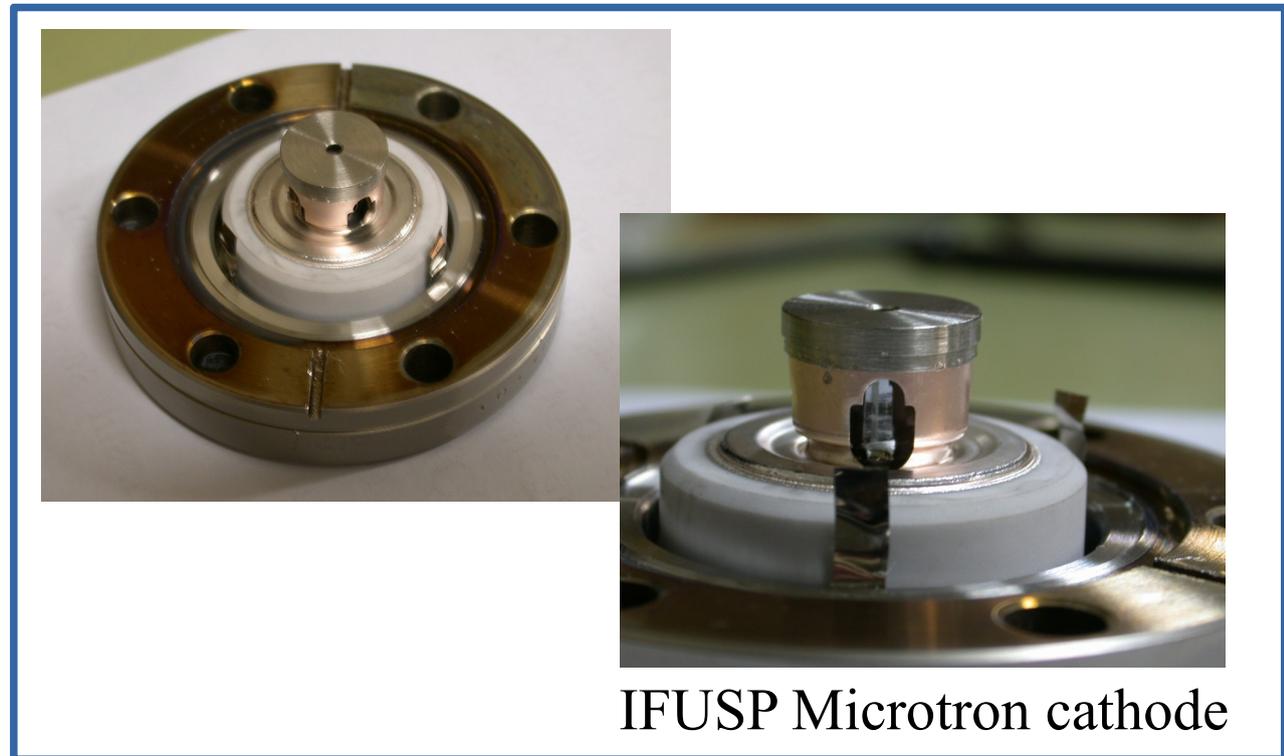
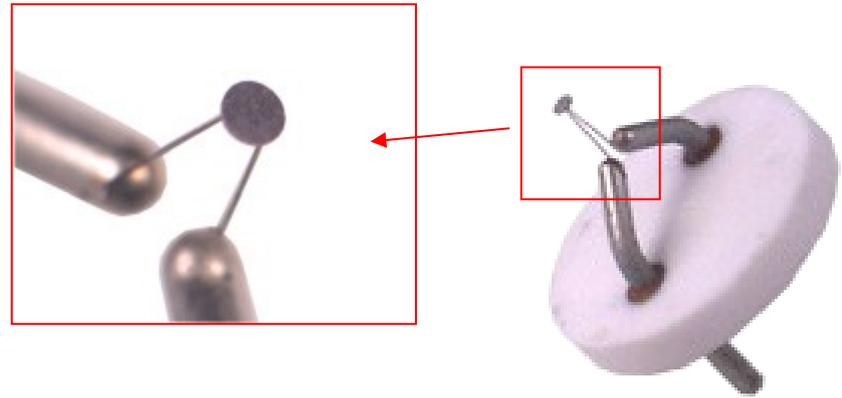


Cavity Reservoir Dispenser Cathode

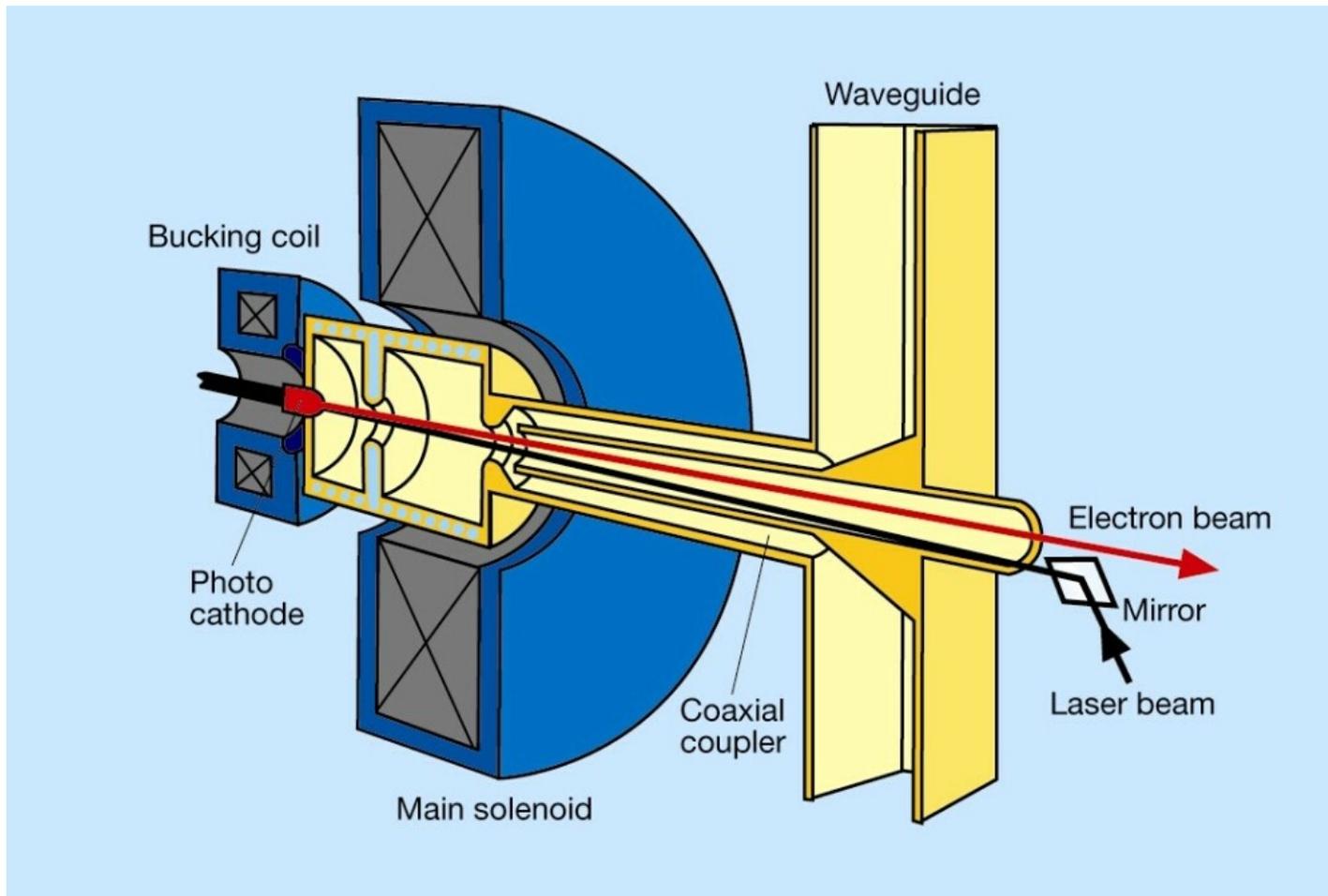
Consiste em uma camada porosa de tungstênio que cobre um reservatório de Carbonato de Bário (BaCO_3). O objetivo é fazer o Ba migrar por difusão por meio dos poros do tungstênio até a superfície emissora. Para gerar uma camada de Ba na superfície é necessária a conversão liberando CO_2 , que limpa os poros da camada de tungstênio. A função trabalho resultante é de ~ 2.0 eV.

Catodo dispenser

http://www.cathode.com/c_cathode.htm



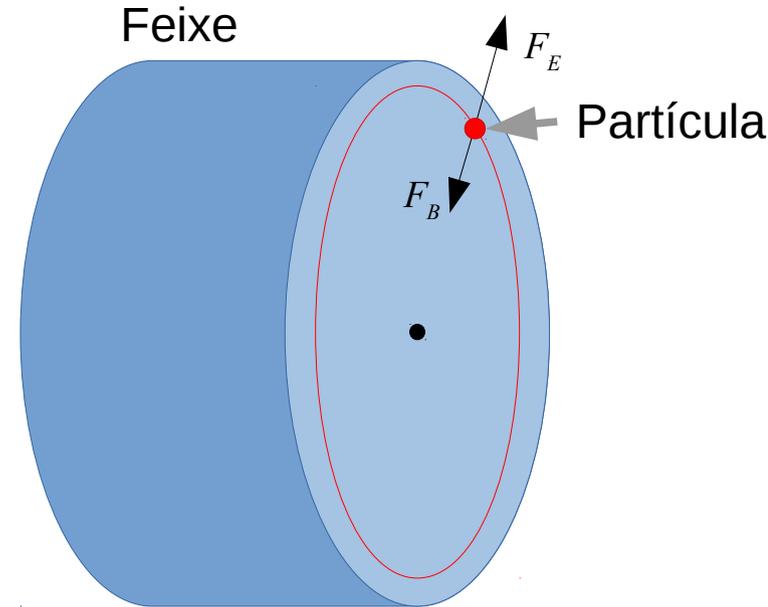
Canhão de elétrons de fotocátodo



- Altas correntes;
- Produção de feixes polarizados (spins alinhados);
 - Resolução extremamente alta;
- Modo de funcionamento em altas frequências;

Efeitos de interações internas

- Efeitos de interação interna são chamados de efeitos de carga espacial.
- O estudo das interações internas é um campo de estudo por si só, e tem muito em comum com a física de plasma.
- Entretanto, este é um assunto de interesse para **feixes de densidade de carga extremamente altas e energias baixas**;



Lei de Gauss

$$E = \left(\frac{\rho}{2\epsilon_0} \right) \cdot r$$

Lei de Ampere

$$B = \frac{\mu_0}{2} \cdot J \cdot r$$

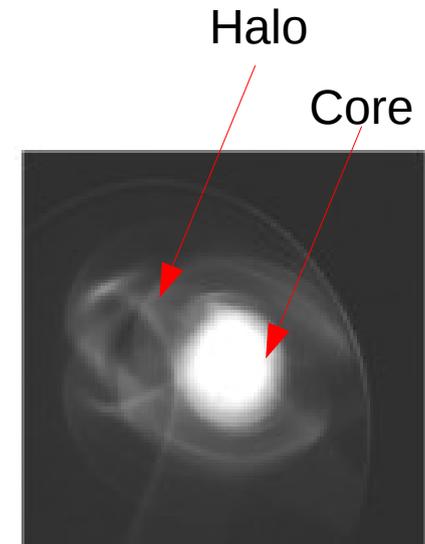
$$\left\{ \begin{array}{l} J = \rho \cdot v \\ c^2 = \frac{1}{\mu_0 \epsilon_0} \end{array} \right.$$

$$B = \left(\frac{\rho}{2\epsilon_0} \right) \cdot \frac{v}{c^2} \cdot r$$

$$F_{SC} = q \cdot [E + v \cdot B]$$

$$F_{SC} = \left(\frac{e\rho}{2\epsilon} \right) \cdot r \cdot \left[1 - \frac{v^2}{c^2} \right]$$

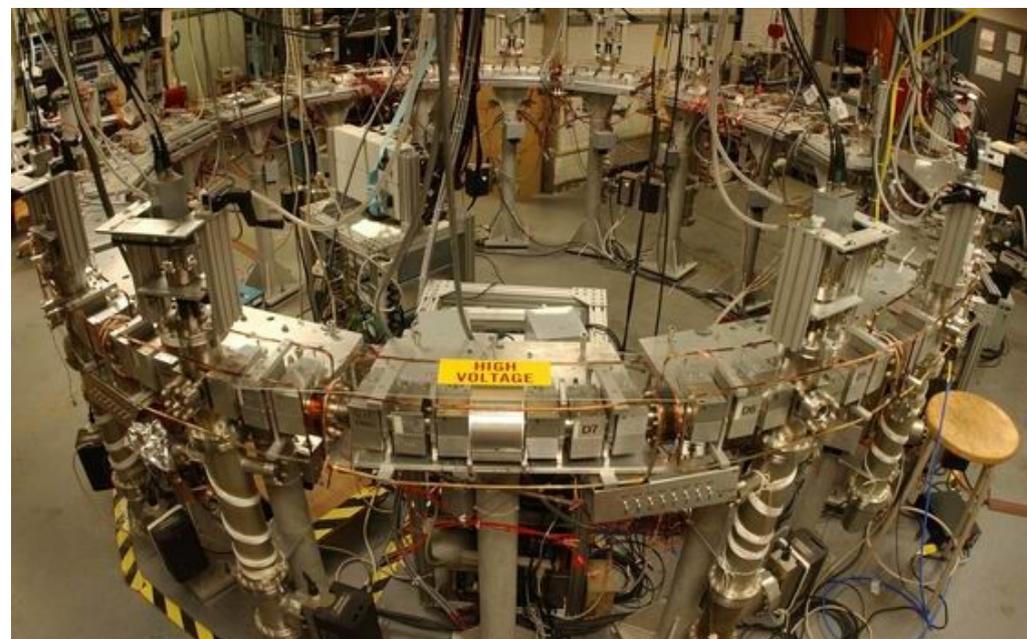
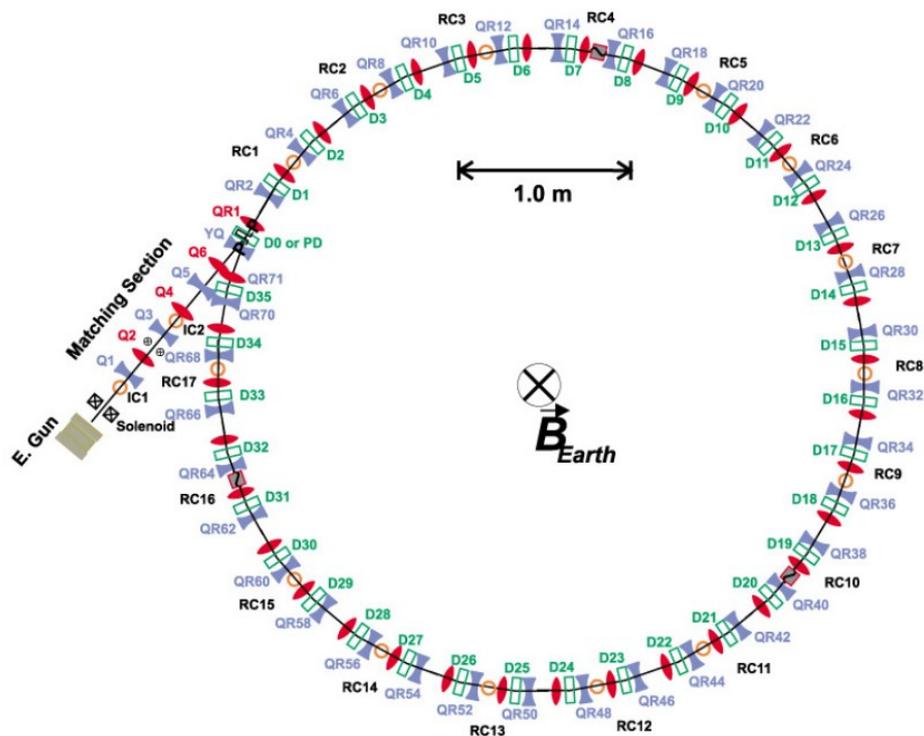
Decresce com a energia!!



Física de plasma com feixes intensos

O University of Maryland Electron Ring (UMER) é um storage ring criado para estudar efeitos de carga espacial nos movimentos transversais e longitudinais do feixe.

Beam Energy	10 keV ($\gamma=1.02$)
β (= beam velocity/speed of light)	0.2
FODO Period	0.32 m
Circulation time	197 ns
Pulse length	120-5 ns
Beam current	0.55 - 100 mA
Circumference	11.52 m



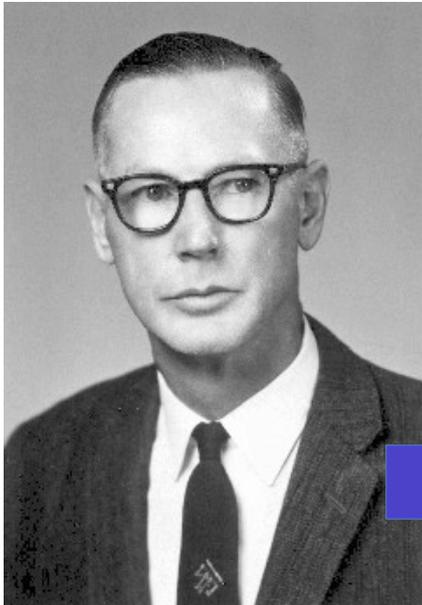
Sumário

- Introdução;
- Geração de feixes de elétrons;
- Aceleradores;
 - Bétatron
 - Microtron
 - Linear
 - Síncrotron e fontes de luz
- Futuro dos aceleradores de elétrons;

O betatron



<http://physics.illinois.edu>



Donald Kerst

Inventor do Betatron

<http://www.nap.edu>



<http://physics.illinois.edu>

Por que o bétatron é tão importante?

Motivo 1:

A condição de estabilidade

Campo elétrico induzido:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

$$\Rightarrow E = -\frac{1}{2\pi R} \frac{d\Phi}{dt}$$

Campo magnético na trajetória do feixe:

$$B = \frac{p}{qr}$$

$$\Rightarrow \dot{B}(r, t) = \frac{\dot{p}}{qr} = -\frac{E}{r} = \frac{1}{2\pi r^2} \frac{d\varphi}{dt}$$

$$\Rightarrow B(r, t) = \frac{1}{2\pi R^2} \int B \cdot dS$$

$$\Rightarrow B(r, t) = \bar{B} \quad \leftarrow \text{Condição de estabilidade!}$$

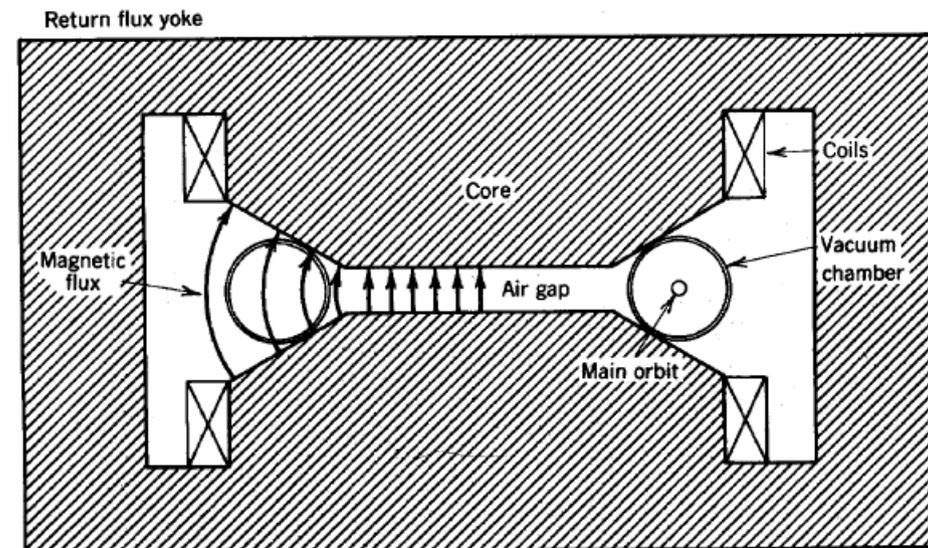
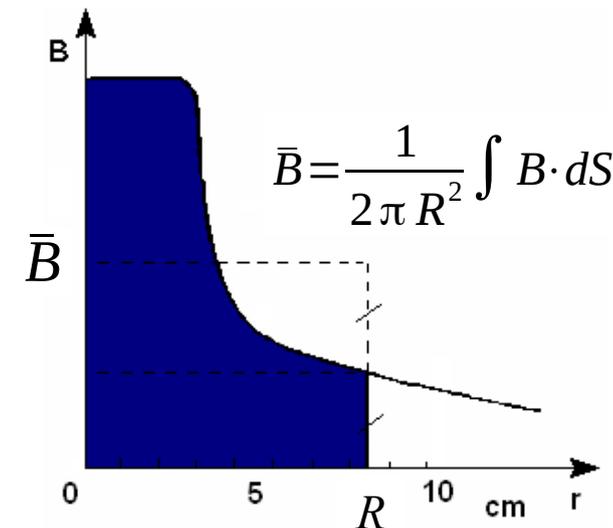
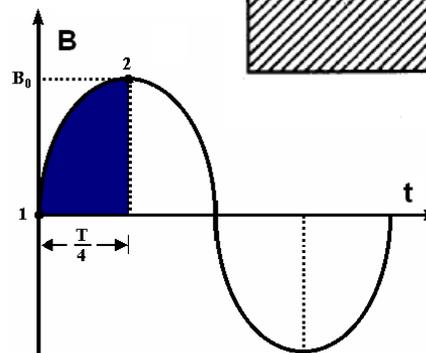


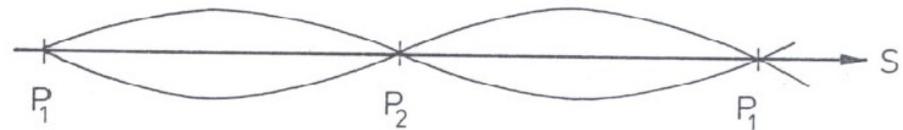
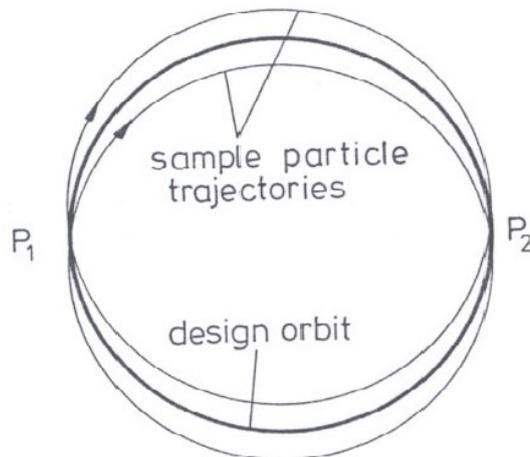
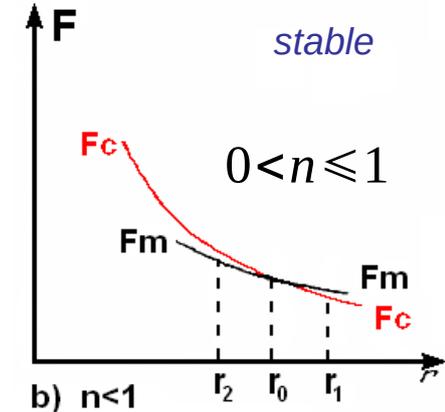
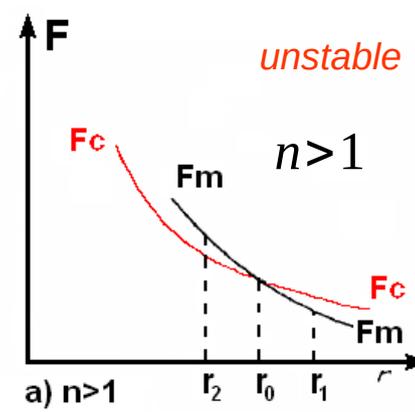
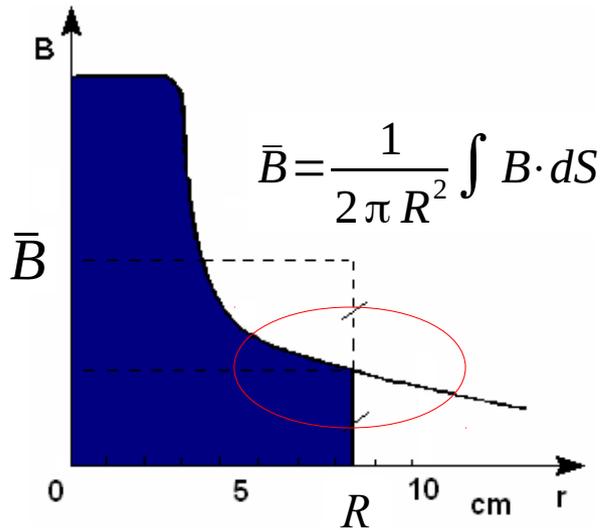
Figure 11.1 Schematic diagram of betatron with air gap.



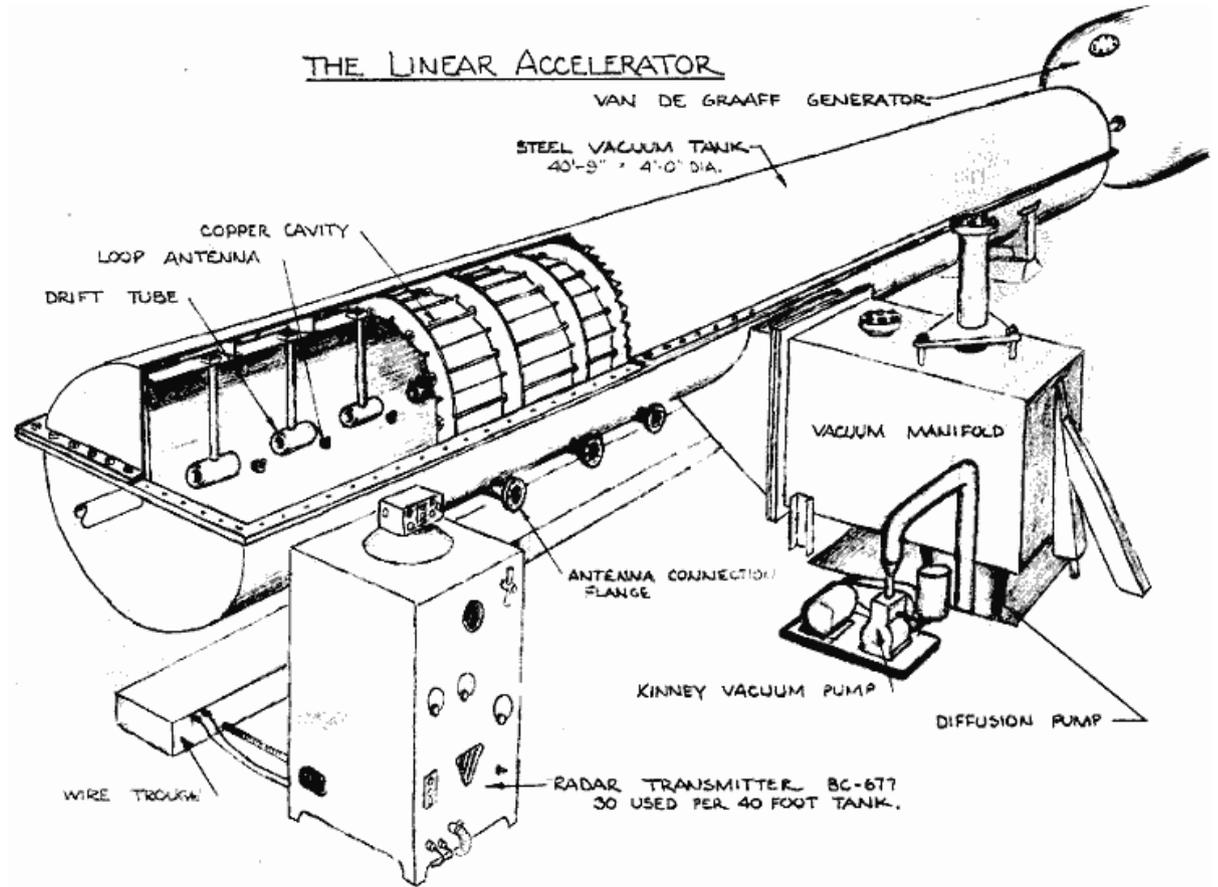
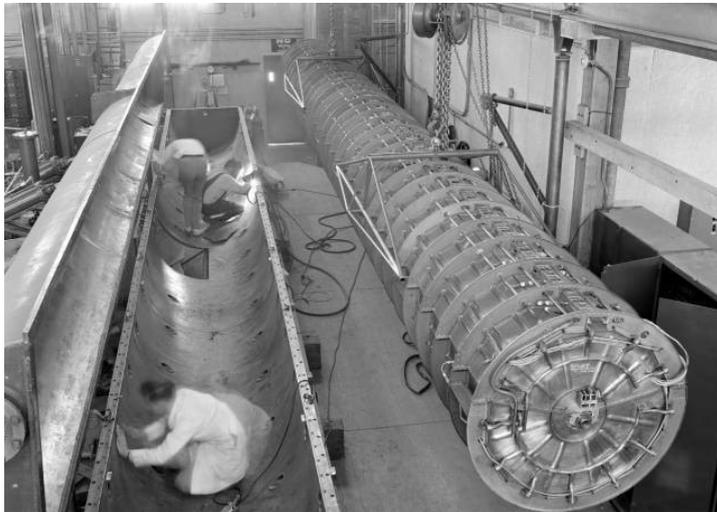
Por que o bétatron é tão importante?

Motivo 2:

As oscilações bétatron e o princípio da weak focusing

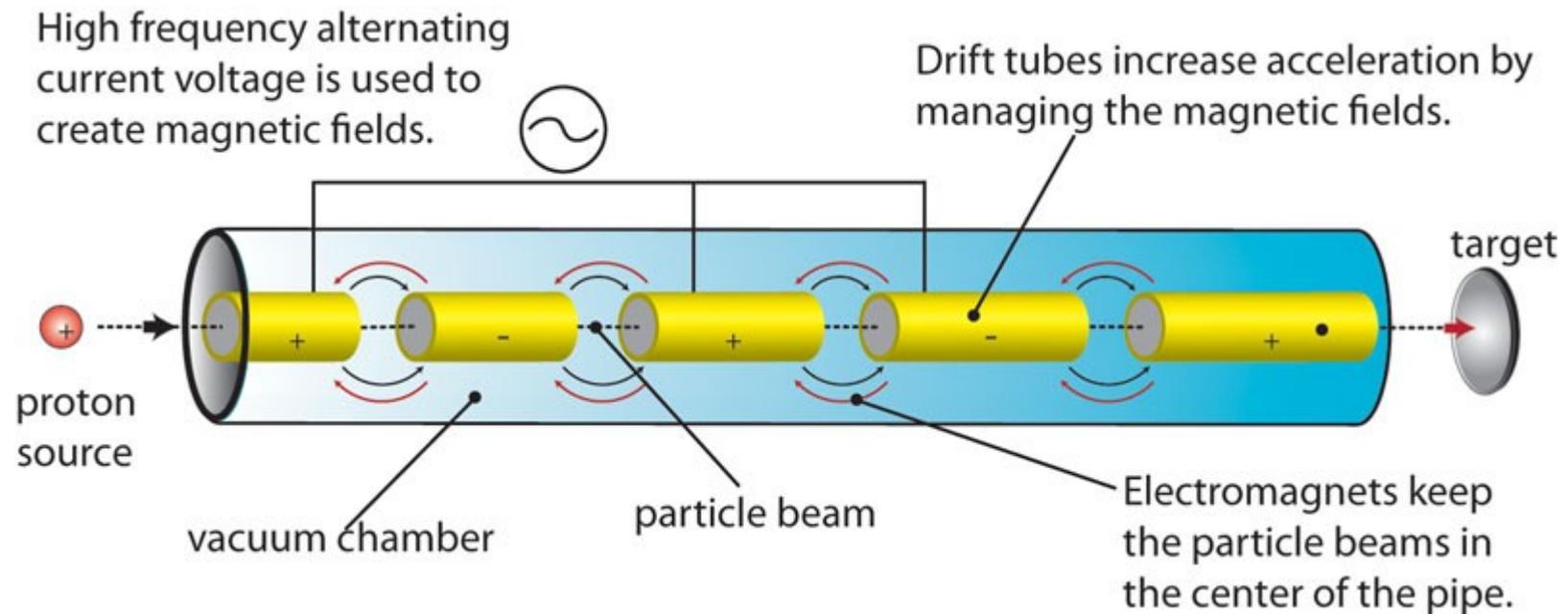


Primeiro linear construído – Rolf Wideröe

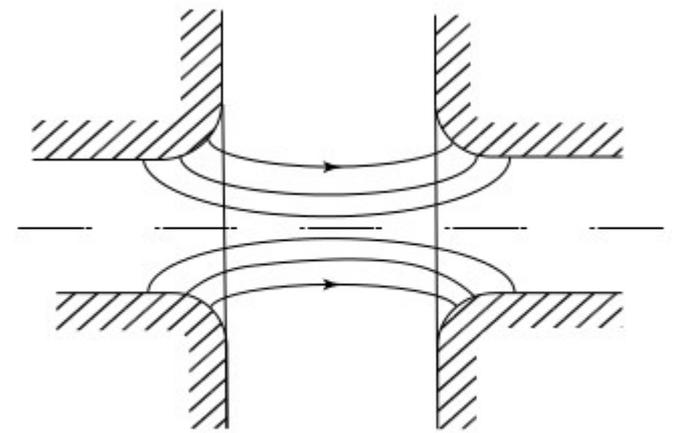
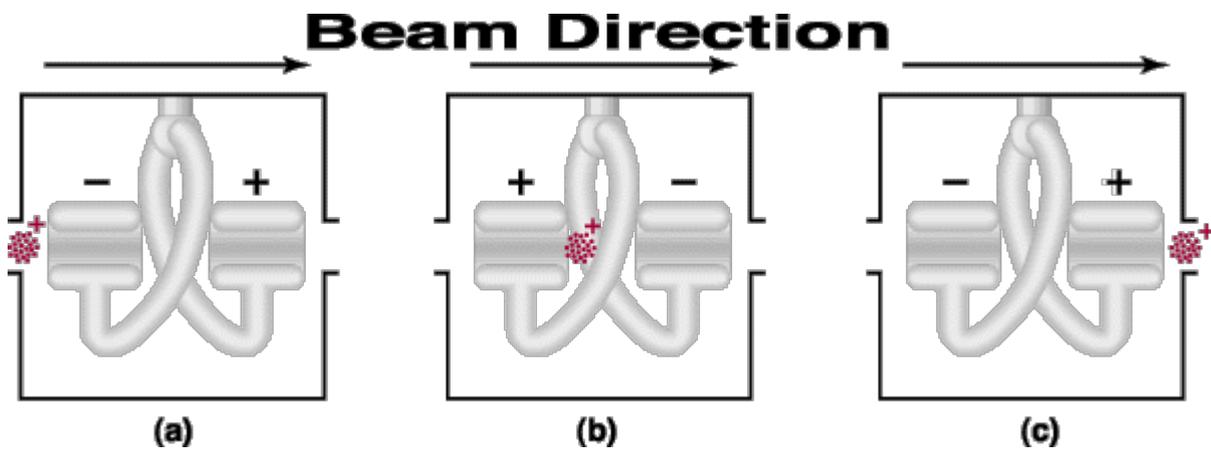
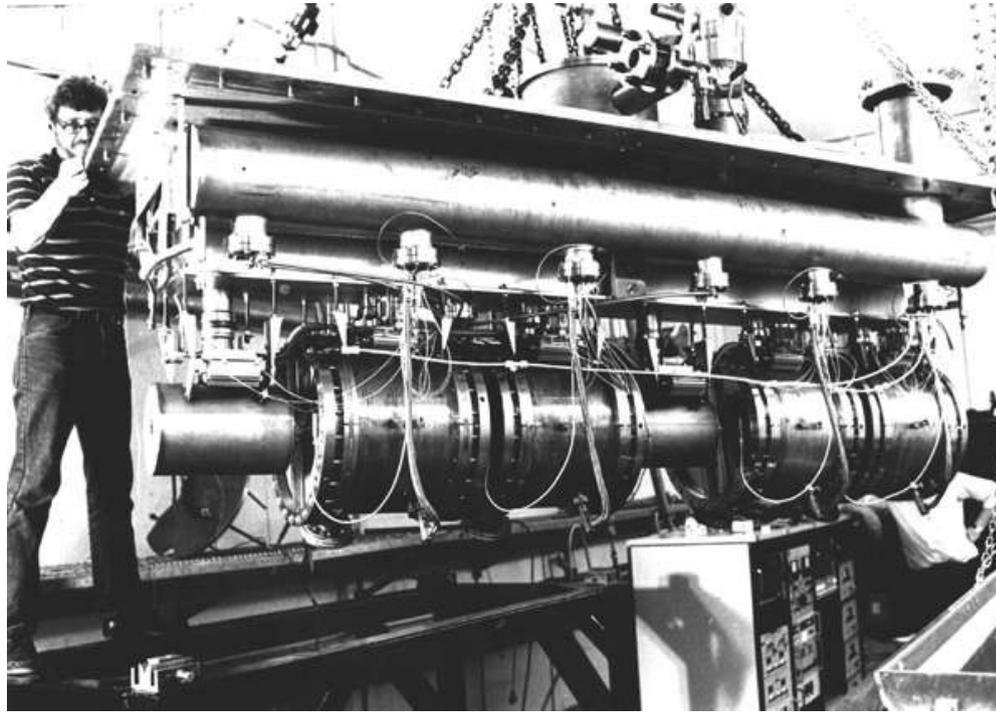


Conceito do Linac

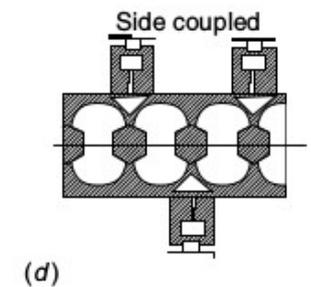
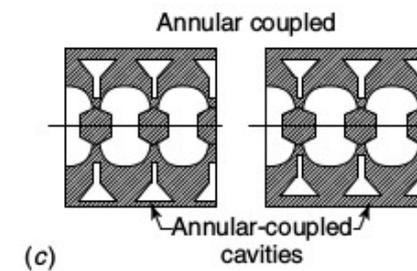
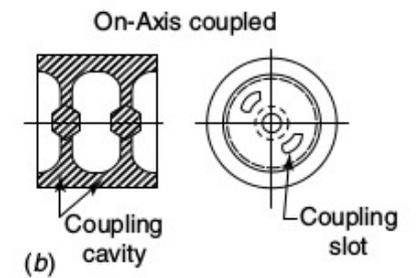
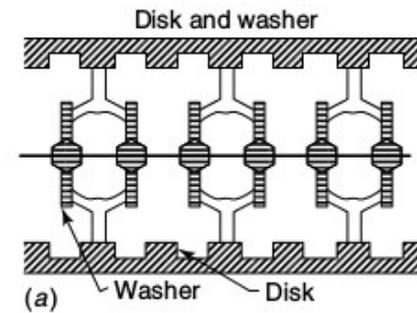
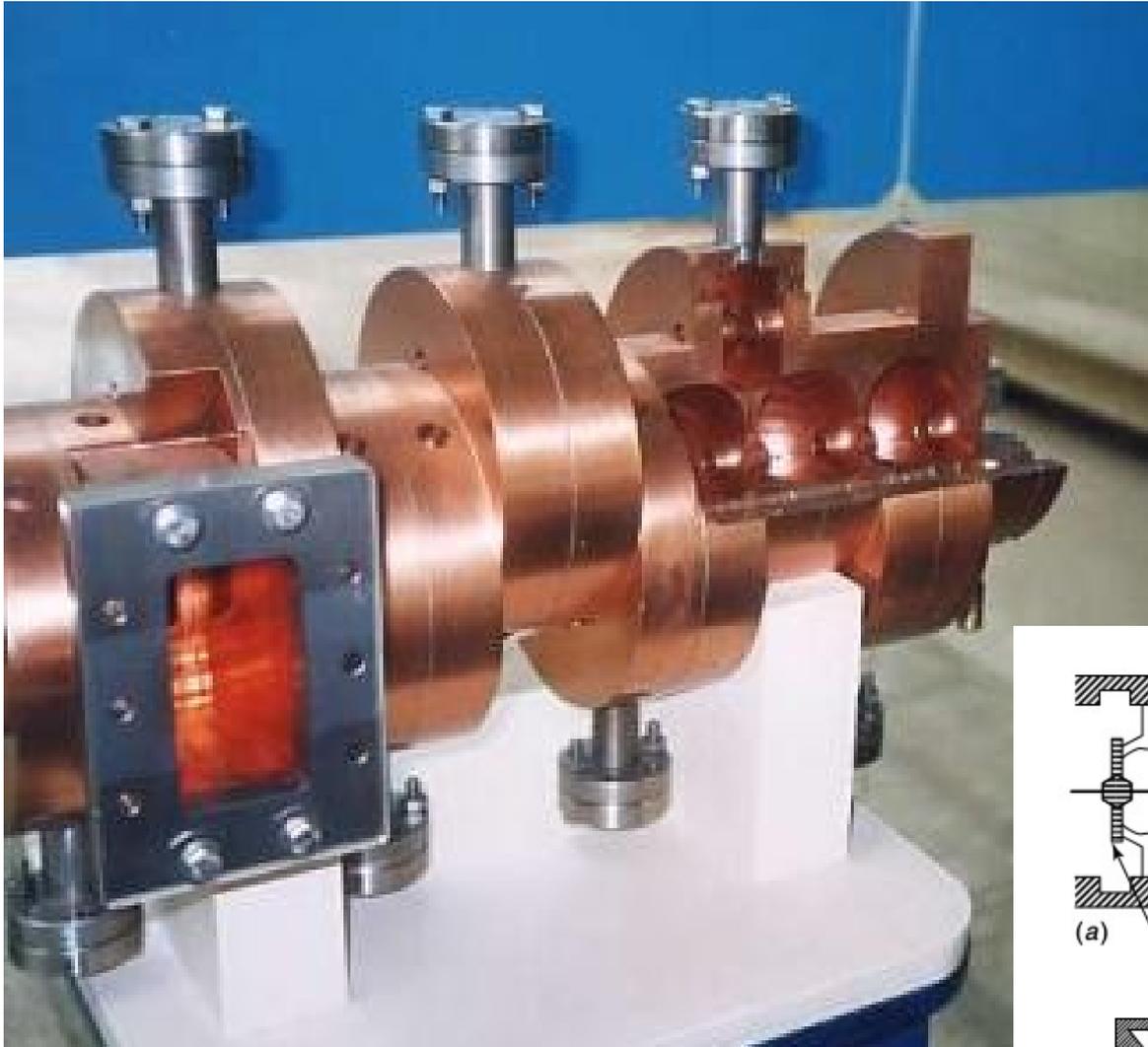
Um acelerador linear aumenta a energia das partículas ao submetê-las a uma série de potenciais oscilantes ao longo de uma linha reta; este método foi inventado por Leó Szilárd, mas foi patenteado em 1928 por Rolf Wideröe, que foi também quem construiu o primeiro dispositivo operacional, baseando-se em uma publicação de Gustav Ising.



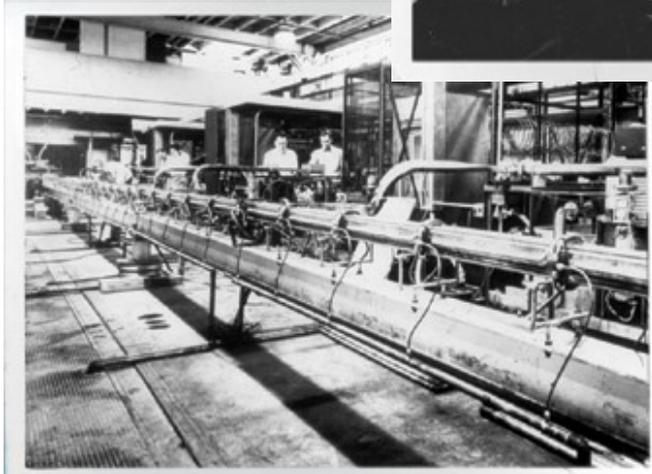
Ressonadores



Cavidades ressonantes



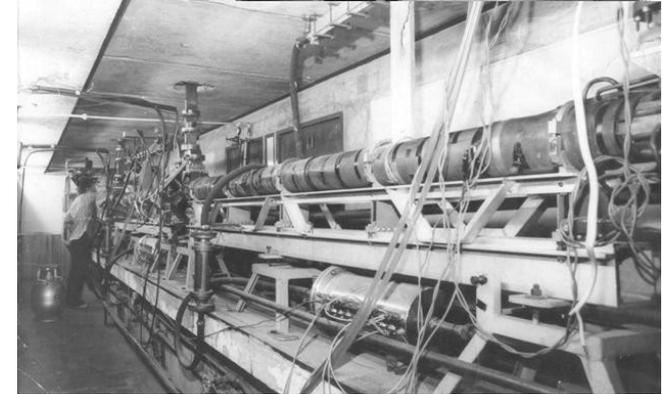
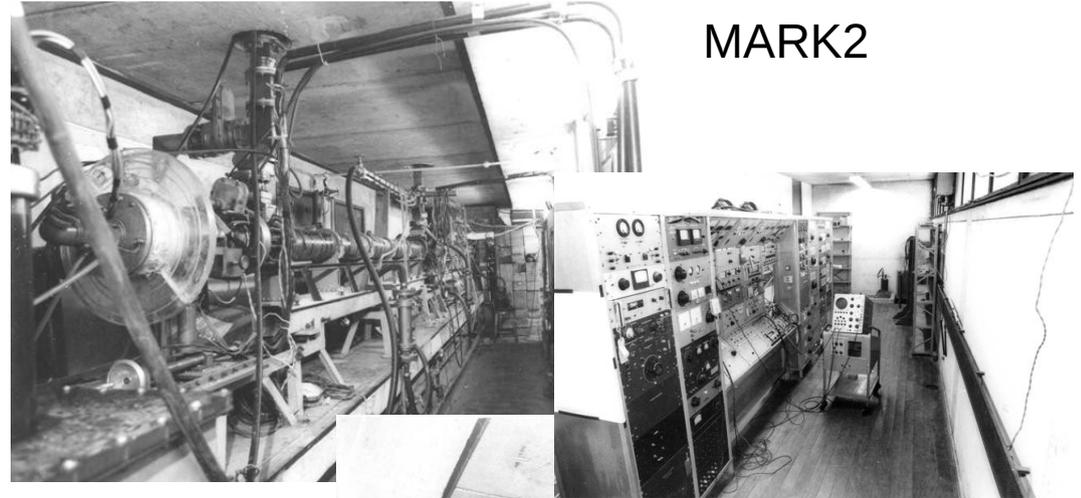
Stanford Linear Accelerator Center



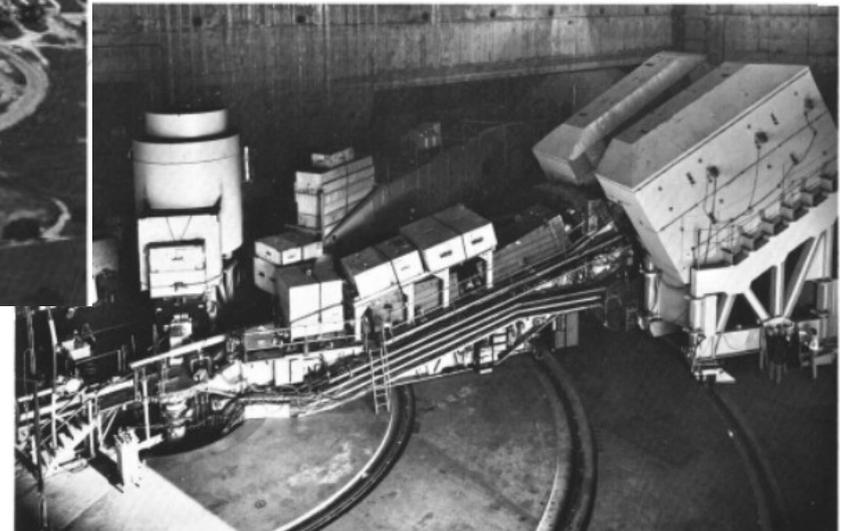
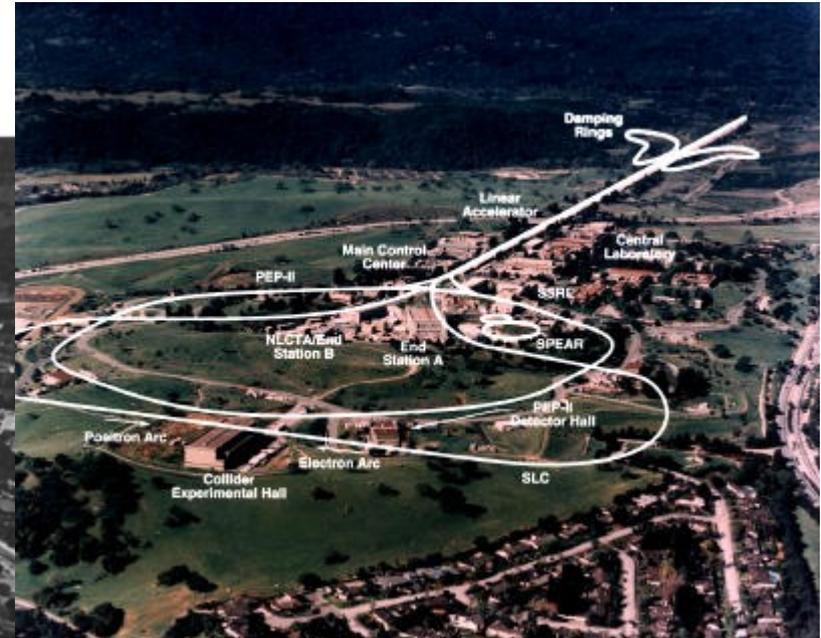
<http://www.symmetrymagazine.org/article/august-2005/gallery-early-linacs>

IFUSP - LAL

<http://www.if.usp.br/microtron>

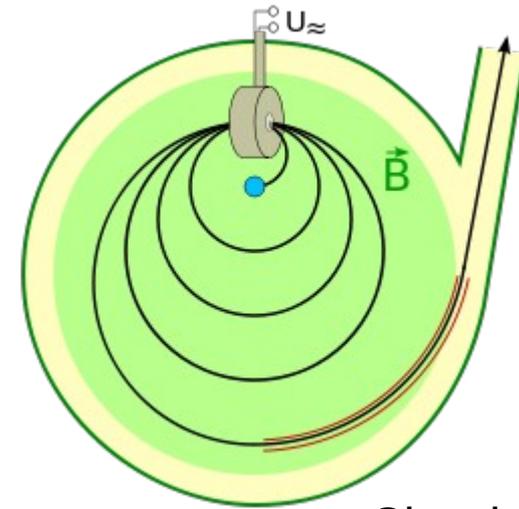


Stanford Linear Accelerator Center



O Mícrotron

O mícrotron é um acelerador de partículas originado no **conceito do acelerador cíclotron**, mas ao invés do campo acelerador ser aplicado entre os eletrodos em forma de D, **são usadas cavidades ressonantes**. O mícrotron clássico foi inventado por Vladimir Veksler em 1944. O mícrotron foi pensado para operar com frequência **da cavidade constante e com campo magnético constante**, assim, é um acelerador que trabalha no **limite ultra-relativístico** e por isso, mais adequado para partículas leves.

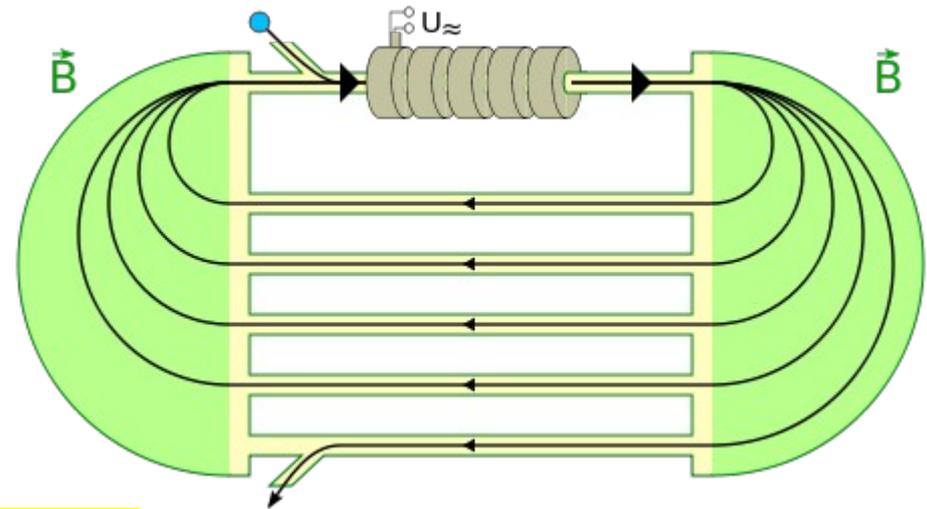


Classic Microtron



Vladimir I. Veksler

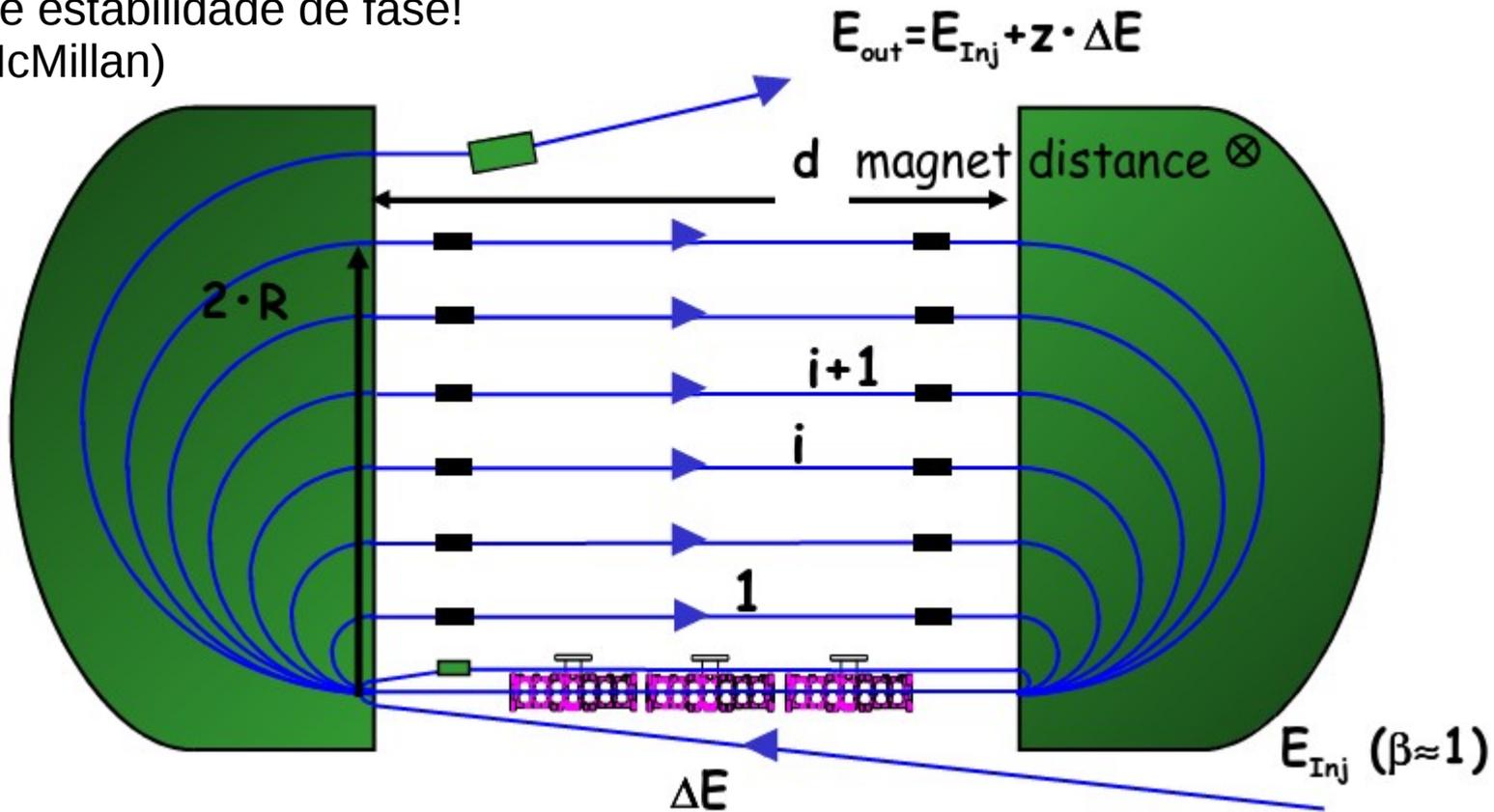
The cyclotron for electrons



Racetrack Microtron

Por que o microtron é tão importante?

Conceito de estabilidade de fase!
(Veksler, McMillan)



Condição de coerência estática:

$$L_1 = k \cdot \lambda_{rf}$$

$$\frac{2\pi \cdot (E_{Inj} + \Delta E)}{e \cdot c \cdot B} + 2 \cdot d = k \cdot \lambda_{rf}$$

Condição de coerência dinâmica:

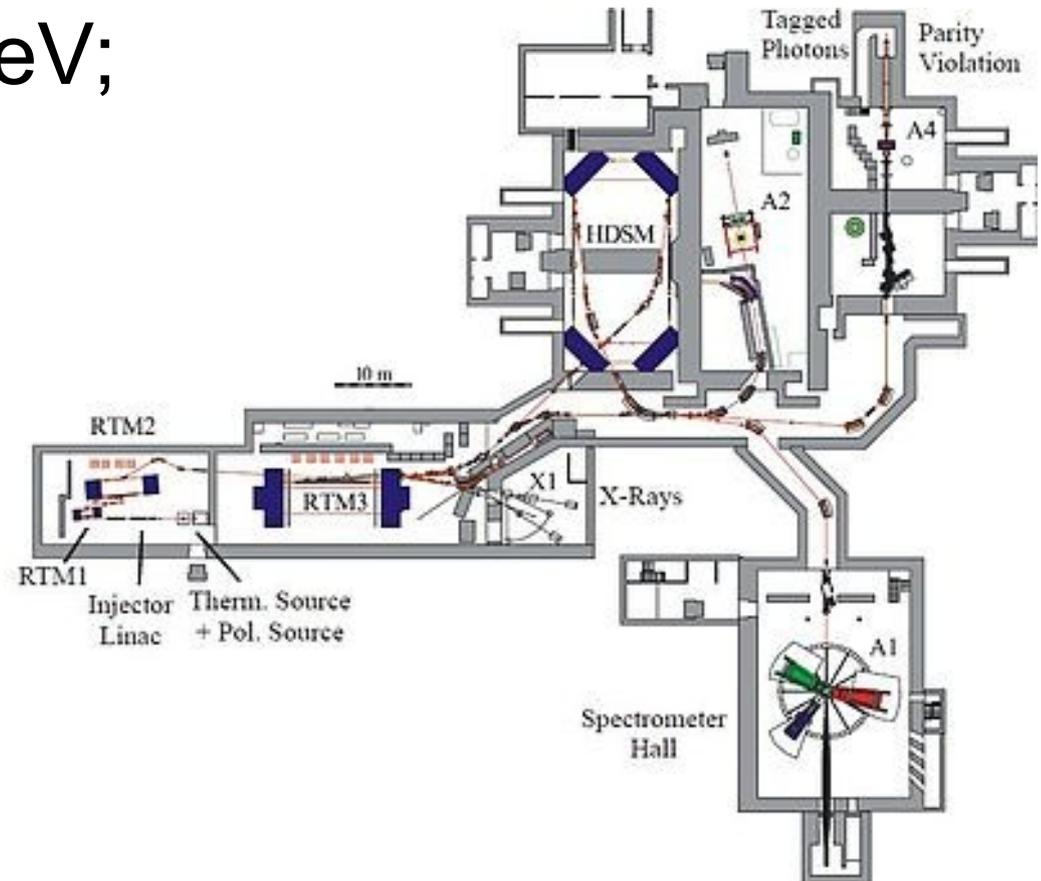
$$L_{i+1} - L_i = n \cdot \lambda_{rf} \quad (= 2\pi \cdot \Delta R)$$

$$\Delta E = \frac{e \cdot c \cdot B}{2\pi} \cdot n \cdot \lambda_{rf}$$

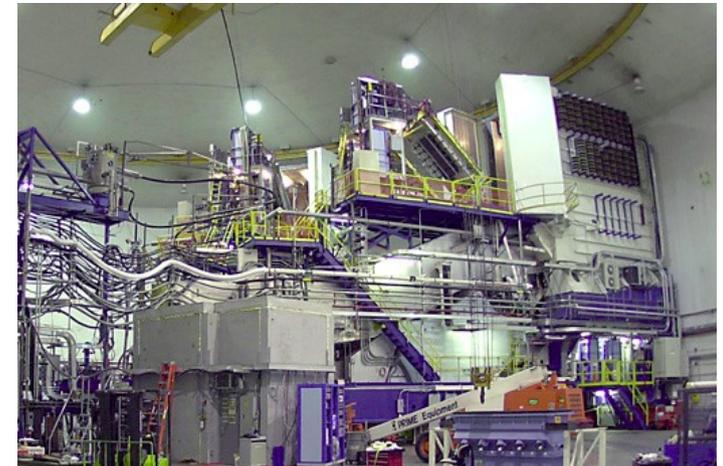
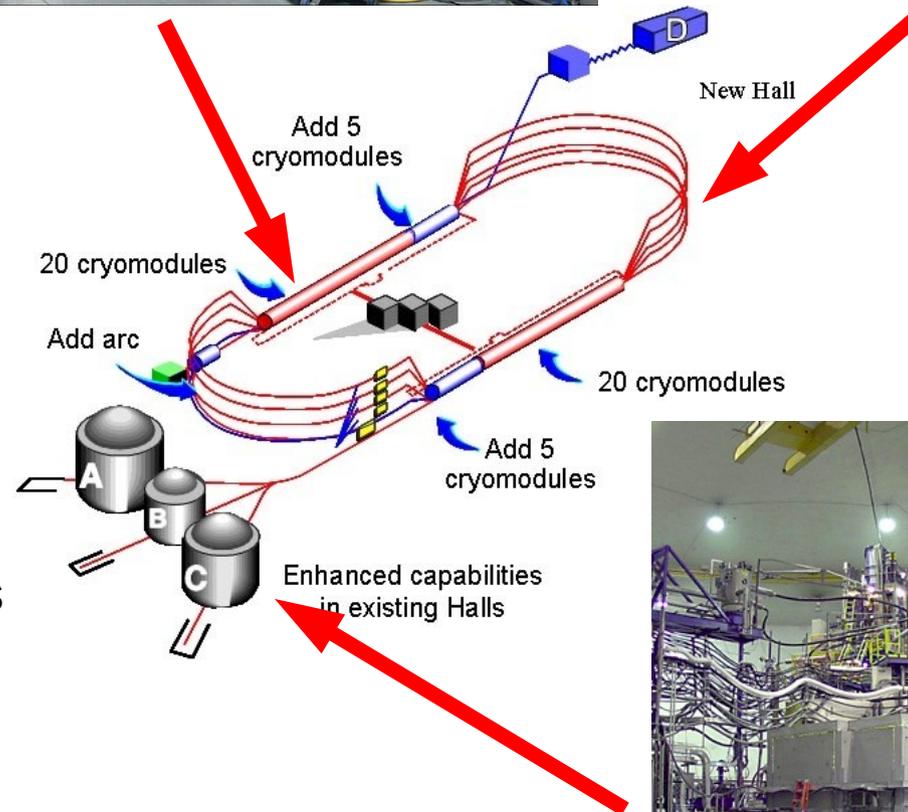
k, n: integer numbers

O maior Microtron do mundo

- Cascata de microtrons;
- Feixe usado para pesquisas em física nuclear;
- Feixe final em 1.6 GeV;



Recirculadores



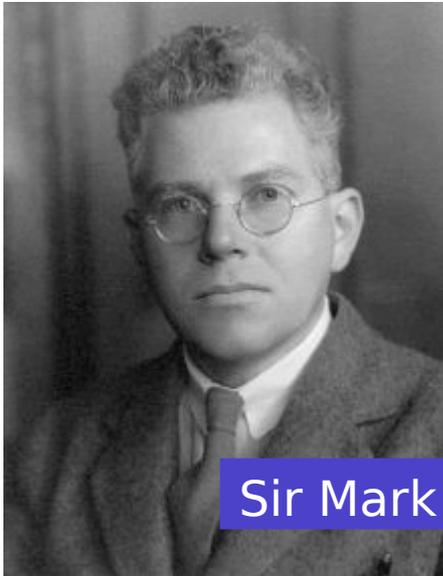
O CEBAF é o principal acelerador do JLab, e consiste de uma fonte de elétrons polarizados e um recirculador com dois aceleradores lineares de 1,4 Km. A energia final é de 6 GeV e um upgrade levará a energia máxima para 12 GeV.

O síncrotron

Um síncrotron é um tipo especial de acelerador de partículas onde os campos magnéticos dos eletroímãs são aumentados de acordo com o ganho de energia nas cavidades ressonantes de forma a manter o raio da órbita circular constante. O conceito foi proposto por Sir Mark Oliphant e baseado nos estudos de Veksler sobre estabilidade de fase publicados.

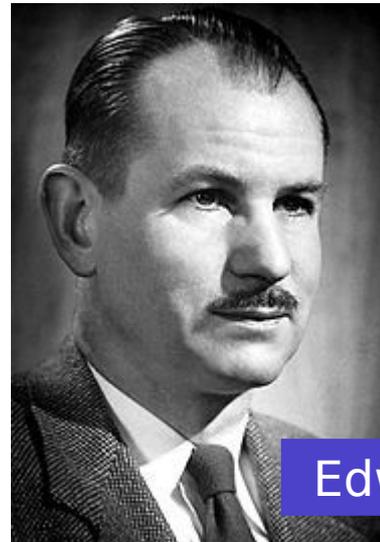
Edwin McMillan construiu o primeiro síncrotron de elétrons em 1945 convertendo um betatron em um síncrotron. O primeiro síncrotron de prótons foi construído por Oliphant em 1952.

Um storage ring é um tipo especial de síncrotron onde a energia do feixe é mantida constante (ganho de energia por volta apenas compensa as perdas por emissão de radiação síncrotron). E foi inventado por Rolf Wideröe...

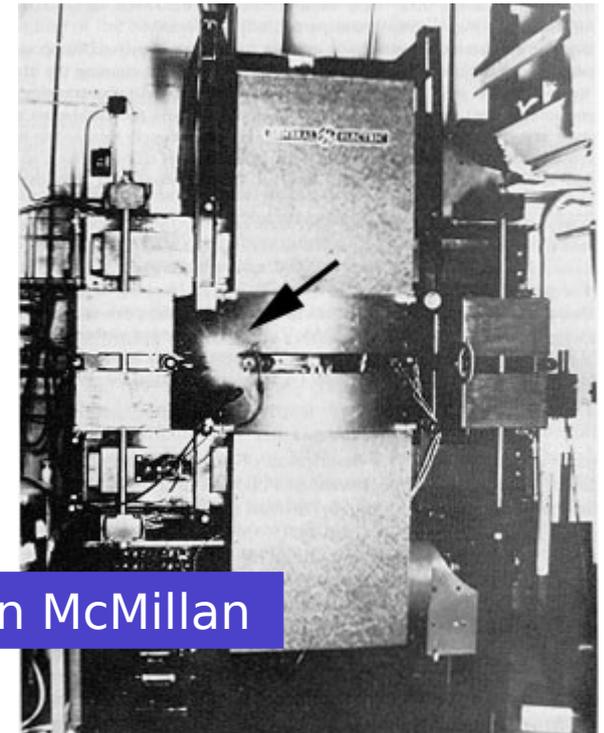


Sir Mark Oliphant

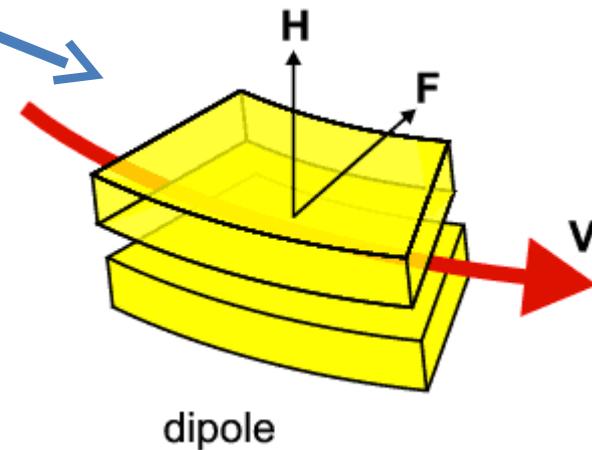
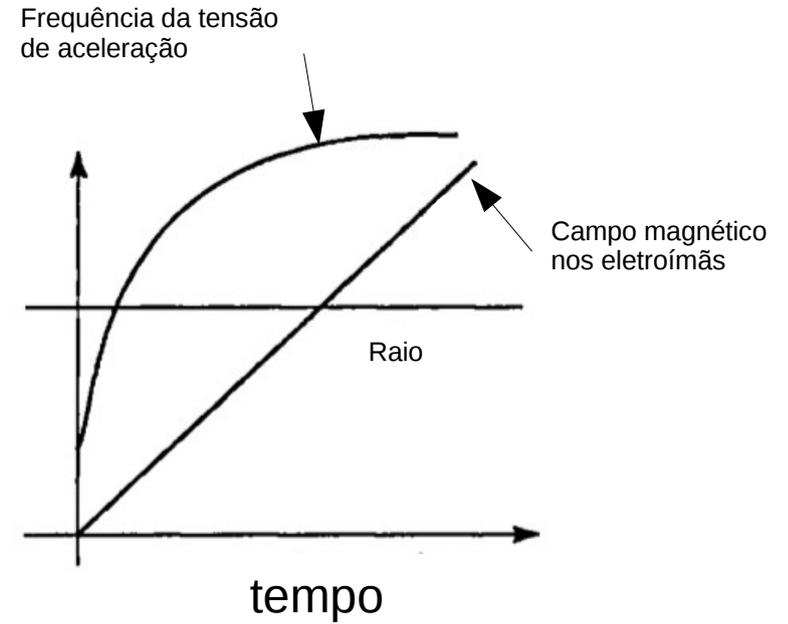
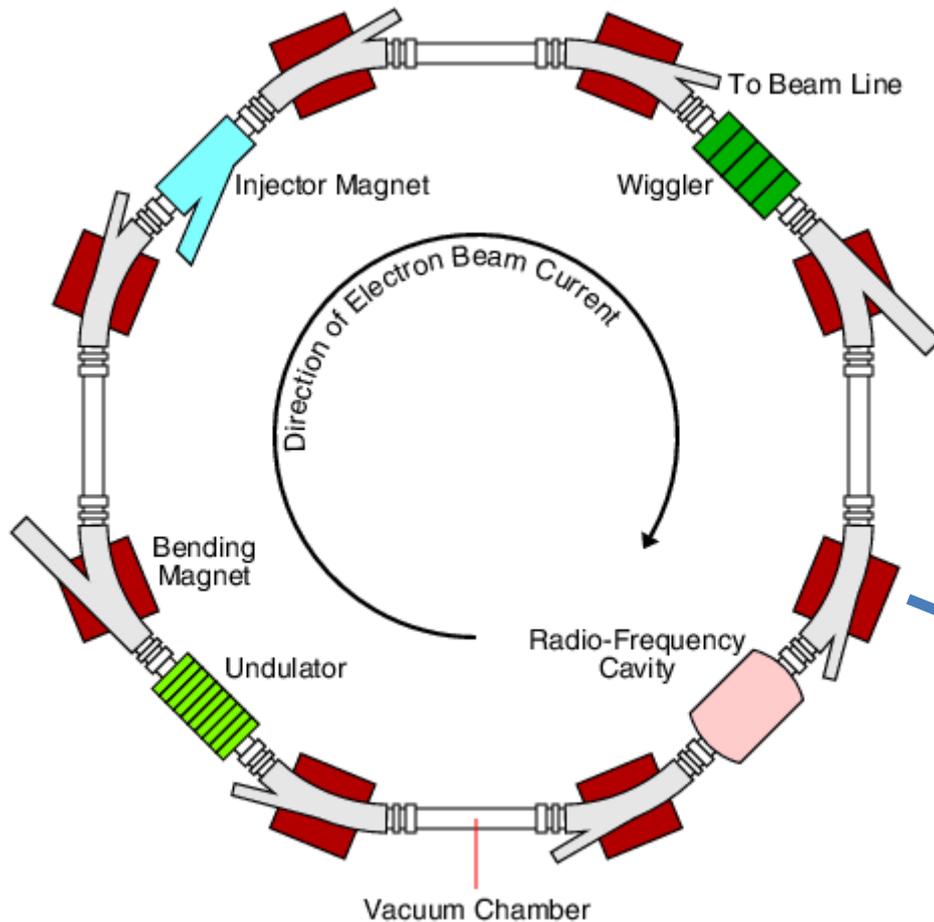
Morreu em 14 de julho de 2000, e foi o último aluno de Rutherford



Edwin McMillan

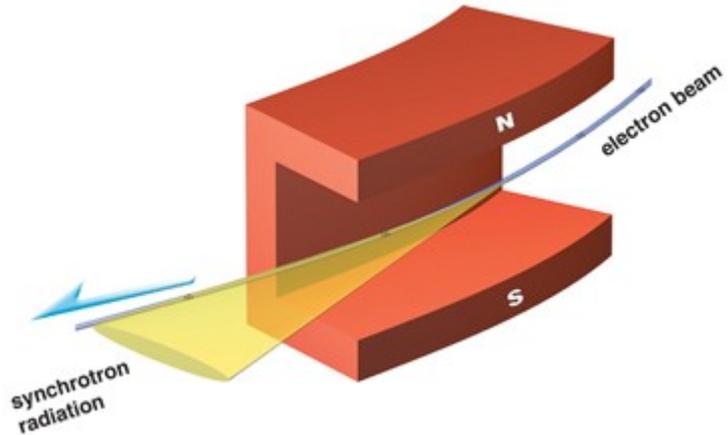


O processo de rampeamento



Lightsources

Radiação síncrotron é a radiação produzida por uma carga acelerada quando a aceleração é perpendicular à sua velocidade.



A **primeira geração** de fontes de luz síncrotron foram os aceleradores utilizados para física nuclear.

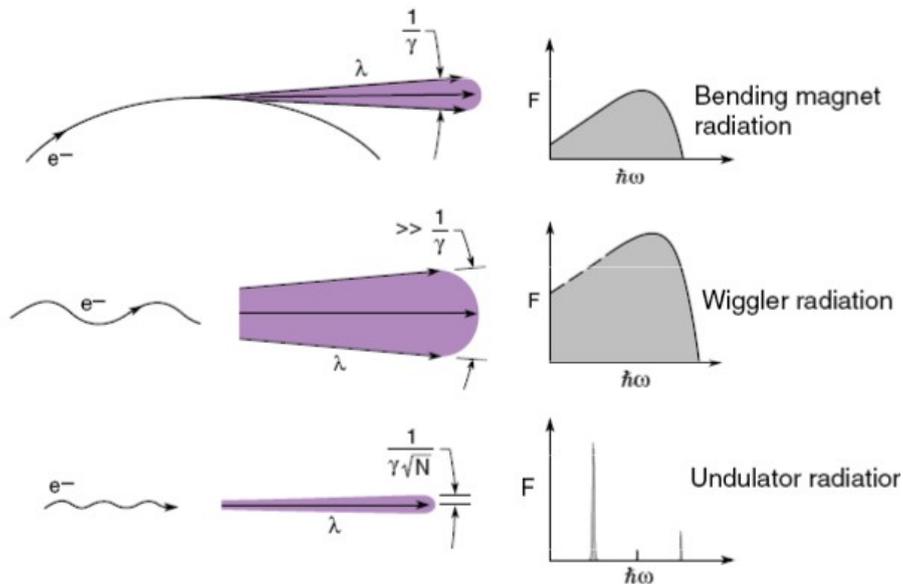
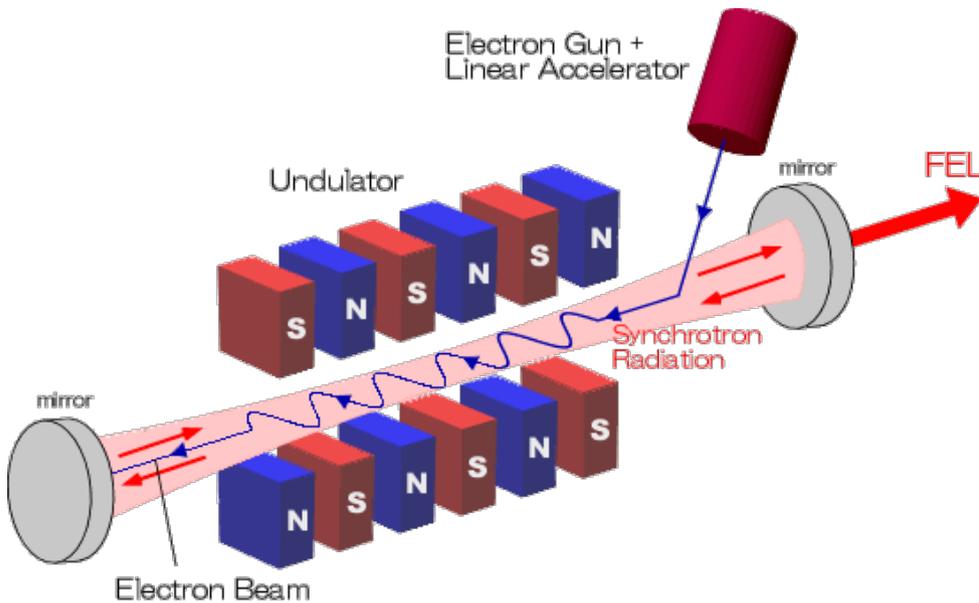


A **segunda geração** de fontes de luz síncrotron foram os síncrotrons dedicados à produção de radiação e sem extração do feixe.

LNLS



Terceira geração de fontes de luz



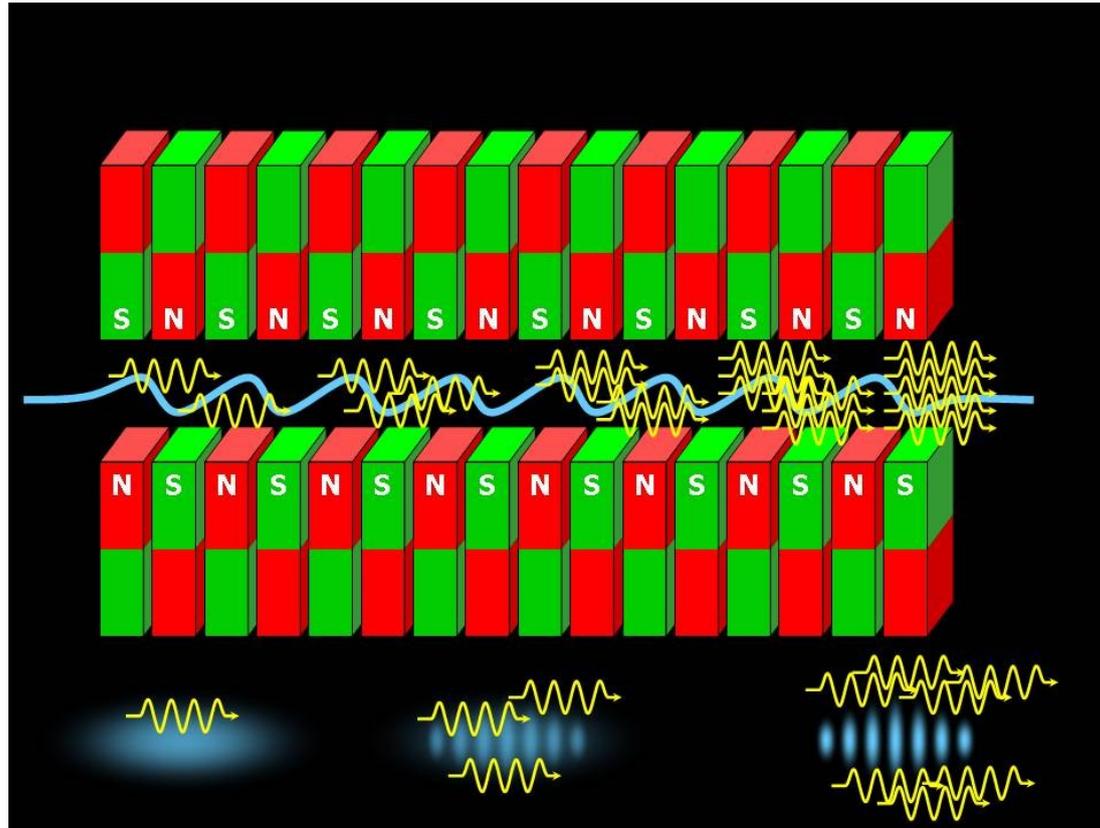
$$K = \frac{e B \lambda_u}{2 \pi m_e c}$$

Para $K \ll 1$ (ondulador) a amplitude da oscilação é pequena e a radiação apresenta um padrão de interferência que gera um espectro de emissão bem estreito.

Se $K \gg 1$ (wigler) a amplitude de oscilação é maior e a contribuição de cada campo se soma independentemente, gerando um espectro mais largo.

Ondulador em modo SASE

Lasers de raios-X usam **onduladores longos**. O princípio de produzir um pulso intenso de raios-X é baseado no princípio de **self-amplified stimulated emission (SASE)**. Inicialmente todos os elétrons estão distribuídos igualmente no pacote de feixe e emitem espontaneamente ao passar pelo ondulador. Então a interação desta radiação com os outros pacotes de elétrons produz uma micro-estruturação dos pacotes com período igual ao da radiação. Esta estrutura, ao passar pelo ondulador gera um padrão de interferência coerente que amplifica a intensidade da radiação.

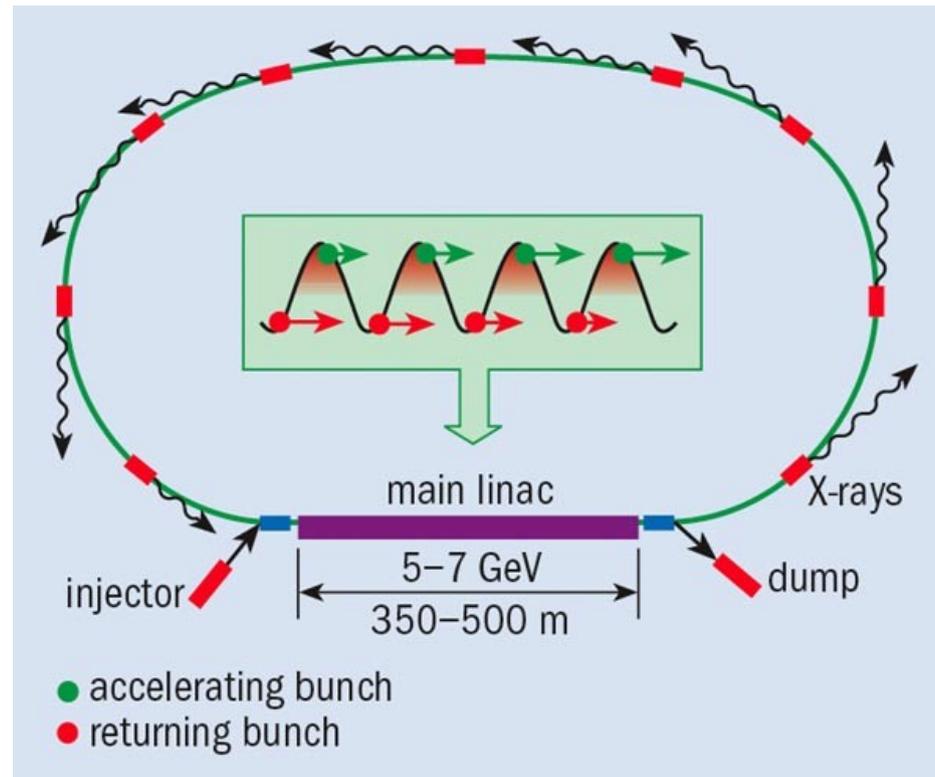


Sumário

- Introdução;
- Geração de feixes de elétrons;
- Aceleradores;
 - Bétatron
 - Linear
 - Microtron
 - Síncrotron e fontes de luz
- Futuro dos aceleradores de elétrons;

O futuro dos aceleradores de elétrons

Energy Recovery Linac (ERL)



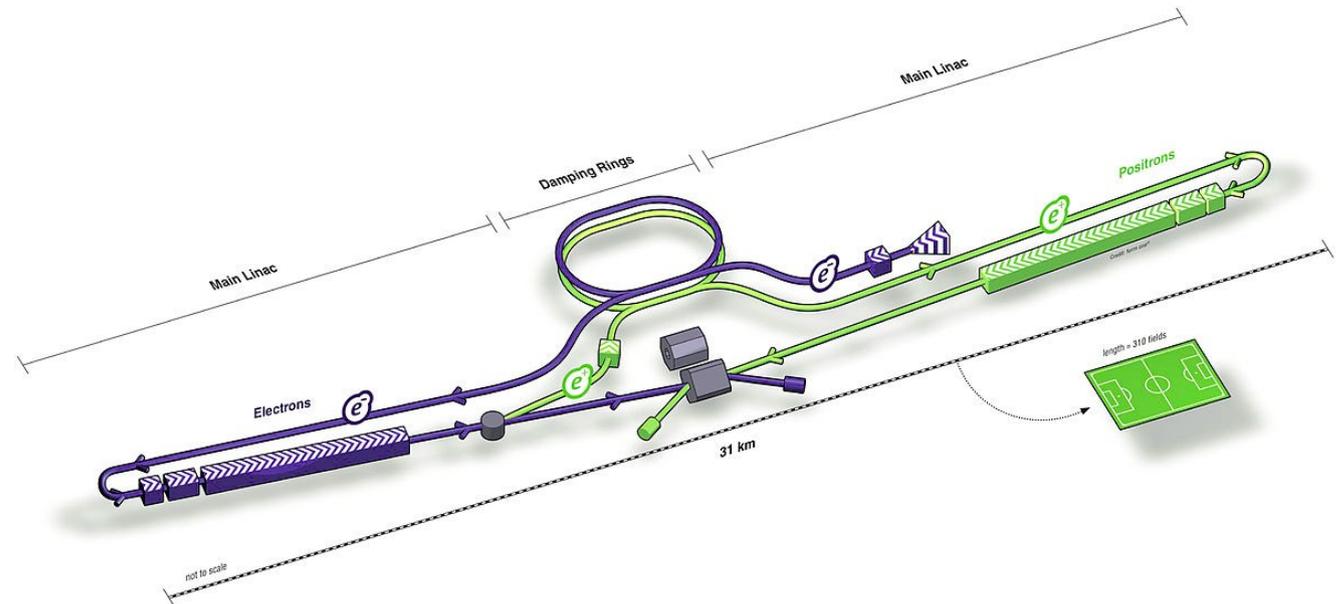
- Partículas são inseridas em um acelerador linear onde são acelerados pela onda eletromagnética;
- O feixe é acelerado e recirculado de volta ao linear.
- O comprimento da trajetória é tal que ao retornar o feixe encontra a onda defasada de 180° .
- Quando a partícula entra no linear nesta fase, ela é desacelerada, simultaneamente com um novo pacote sendo inserido no linear. A perda de energia da primeira partícula se dá pela geração da onda eletromagnética que acelera a segunda.

O International Linear Collider

A perda de energia através de radiação síncrotron depende inversamente da quarta potência da massa da partícula. É por isso que aceleradores circulares são mais adequados para acelerar íons que elétrons. Um colisor elétron-pósitron do mesmo tamanho nunca atingiri a mesma energia de colisão. As energias do LEP, que ocupava o túnel que agora fica o LHC tinha a energia limite em 209GeV, enquanto o LHC está funcionando com 8TeV.

Objetivos:

- Medir a massa, spin e força de interação do bóson de Higgs
- Investigar a lightest supersymmetric particle, possível candidata à matéria escura



Conclusões

- Aceleradores de elétrons são usados para produzir sondas coulombianas;
- Por serem muito mais leves que os prótons, são mais sensíveis a perturbações;
- Aceleradores circulares apresentam limites devido à perdas por emissão de radiação síncrotron;
- Os feixes de elétrons são os mais adequados para se produzir radiação;

Instituto de Física da USP
Curso de Verão, 2015

Curso 2
Aceleradores de Partículas: princípios e aplicações

Aula 4
Aplicações 1 - íons

Manfredo H. Tabacniks
5 de fevereiro de 2015

roteiro

- Aceleradores em usos não nucleares
- Métodos analíticos (PIXE, RBS, ERDA, etc..)
- Exemplos ciência dos materiais
- Arteometria
- Análises em feixe externo (Ion Beam Luinescence)
- Conclusão

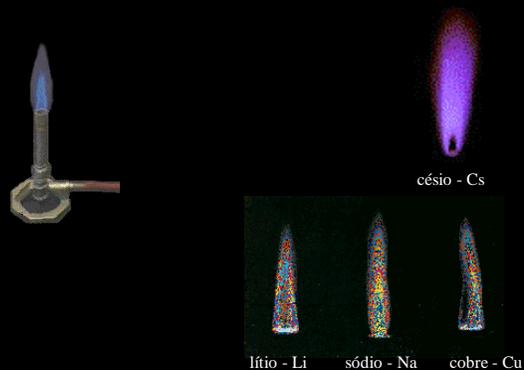
O homem sempre buscou a origem das coisas: Na Grécia antiga, Empédocles (~492 - 432 AC) classificou a matéria em quatro elementos:

terra, água, ar e fogo

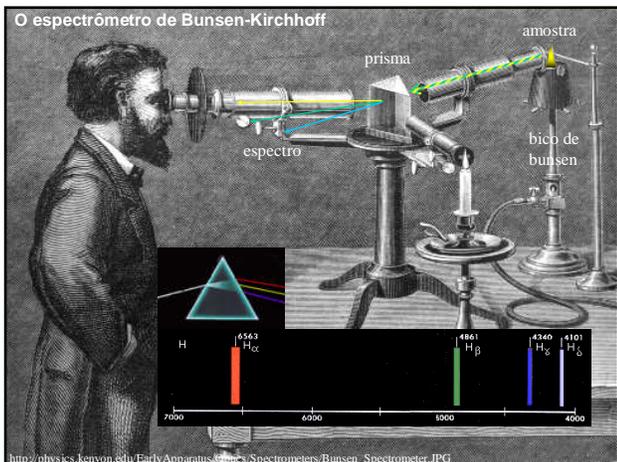
Esses 4 elementos eram envolvidos por: amor e ódio. O amor une os elementos. O ódio os separa. A mistura dos elementos cria todas as coisas.



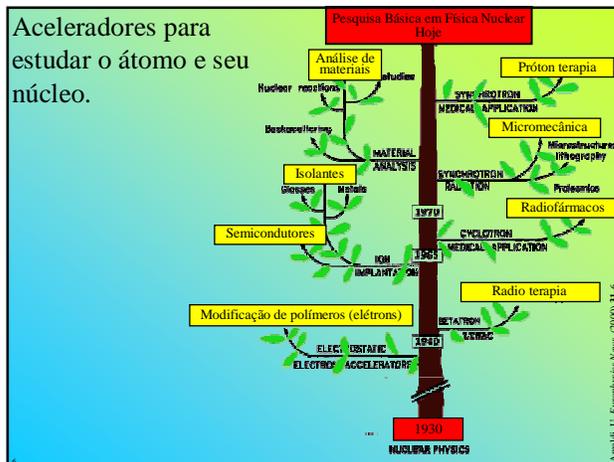
No século 18, a cor da chama dos materiais indicava os elementos.



O espectrômetro de Bunsen-Kirchhoff



Aceleradores para estudar o átomo e seu núcleo.



Laboratório para Análise de Materiais com Feixes Iônicos - LAMFI

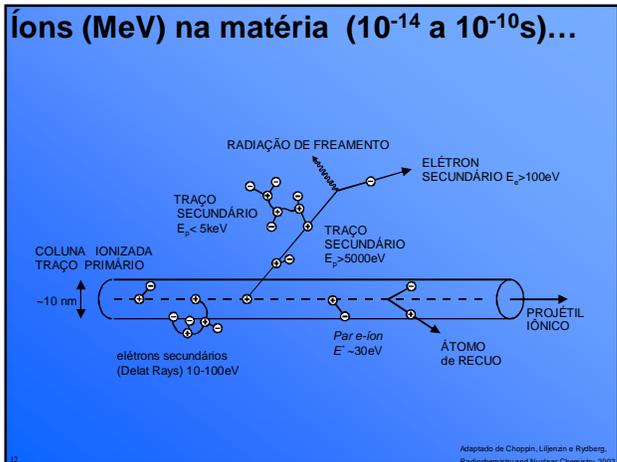
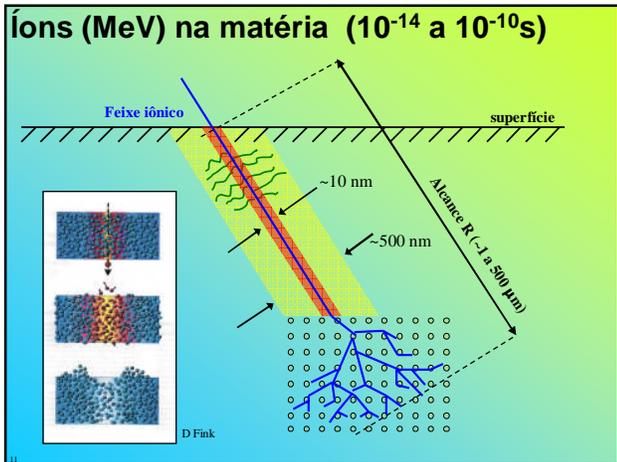
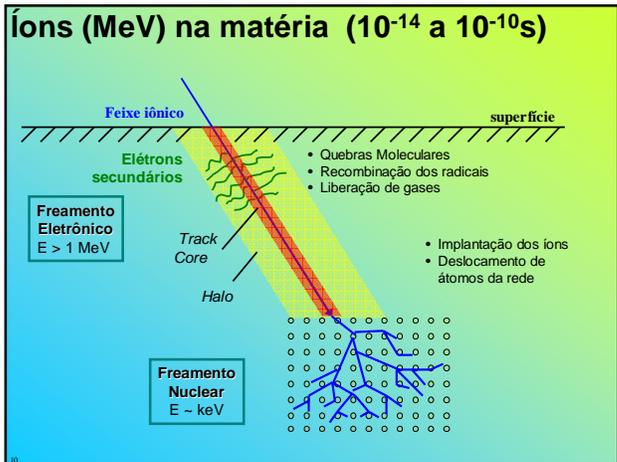


LAMFI Laboratório para Análise de Materiais por Feixes Iônicos

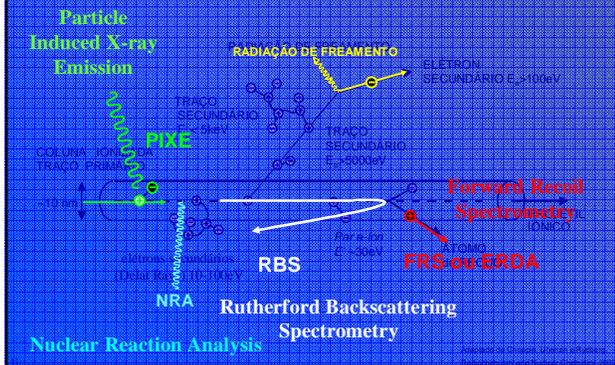


Aceleradores em ciência tecnologia

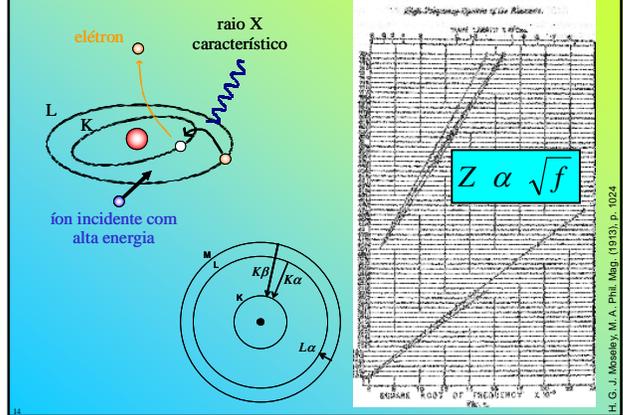
- **Militar**
 - Armas, segurança, inspeção (γ e neutrons)
- **Pesquisa e Análise de Materiais**
 - Análise de materiais com feixes iônicos (RBS, PIXE, PIGE, NRA, ERDA, AMS, MALDI...)
 - Datação
 - Luz Síncrotron
 - Matéria Condensada, Microbiologia, Proteômica, Morfologia Molecular
 - Implantação de íons, Quantum dots,
 - Micro e nano feixes
- **Tratamento e diagnóstico médico**
 - Radioterapia (e^- , H, γ , X...), dosimetria, dano em DNA...
 - Radiofármacos, marcadores isotópicos
 - Radiodiagnóstico - tomografia
- **Aplicações Tecnológicas**
 - Polimerização e reticulação (embalagens, isolantes, pneus, tintas...)
 - Implantação de íons (semicondutores, superfícies biologicamente ativas...)
 - Análises estruturais, μ Litografia, micromecânica
 - Esterilização (alimentos, embalagens, eq. médico)
- **Geração de energia**
 - Reatores nucleares, ADS...



... e seu uso para análise de materiais



O método PIXE e a Lei de Moseley (1913)



Henry G. J. Moseley (26) era professor assistente de Sir Ernest Rutherford (Química 1908) na Universidade de Manchester em 1913.



Anteriormente trabalhou com espectrômetros de raios X, na Universidade de Leeds, com William Henry Bragg and William Lawrence Bragg (Física 1915)

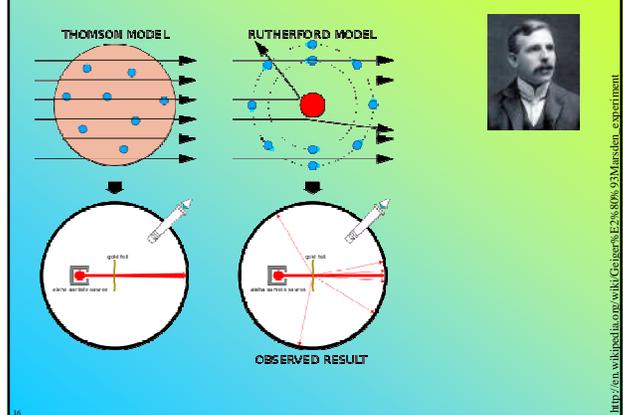
Em 1913, Moseley mediu por difração de raios X os espectros de vários elementos químicos (maioria metais).

Na época, o número atômico era uma sequência semi-arbitrária baseada nas massas atômicas. Moseley ordenou os elementos 27 (Co) e 28 (Ni). Também previu a existência dos elementos 43 (Tc), 61 (Pm), 72 (Hf), e 75 (Re)

Em 1914 se alistou no exército britânico para servir na 1ª guerra. Em 1915 foi morto em ação na Turquia.

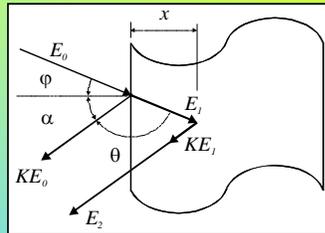
http://en.wikipedia.org/wiki/Henry_Moseley

O átomo nucleado de Rutherford (1911)



http://en.wikipedia.org/wiki/Geiger%27s%20Marsden_experiment

O espalhamento Rutherford



Fator cinemático

$$K_{1,2} \equiv \frac{E_1}{E_0} = \left[\frac{(1 - (M_1/M_2)^2) \cdot \sin^2 \theta}{1 + (M_1/M_2)} + (M_1/M_2) \cdot \cos \theta \right]^2$$

Medindo $E_1 = KE_0$ ou E_2 pode-se determinar M_2 .

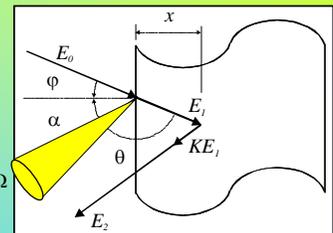
O espalhamento Rutherford

probabilidade do evento

$$N_{\text{eventos}} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \Delta\Omega \right) N_{\text{incidentes}}$$

Seção de choque Rutherford (CM)

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(E_c, \theta_c) = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \left(\frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot e^2}{4 \cdot E_c} \right)^2 \frac{1}{\sin^4(\theta_c/2)}$$

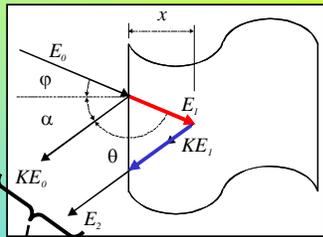


O espalhamento Rutherford

Fator de Freamento

$$E_1 = E_o - \frac{x}{\cos \varphi} \frac{dE}{dx}_e$$

$$E_2 = KE_1 - \frac{x}{\cos \alpha} \frac{dE}{dx}_s$$



$$\Delta E_d = KE_o - E_2 = [S]x$$

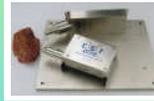
relação linear entre ΔE e x

19

Detetores



Detetor de raios-X tipo Si PIN



Detetores de partículas

Detetor de RX Tipo Si(Li)



Detetor de RX Tipo Si-PIN

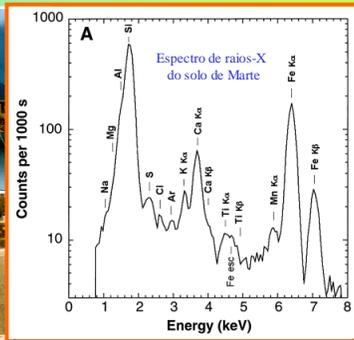


Espectrômetro XRF portátil www.metorex.com

M.H. Tabacniks, IFUSP/PGF5207/2010

<http://www.camberra.com>

O "laboratório" da Mars Pathfinder (1997)

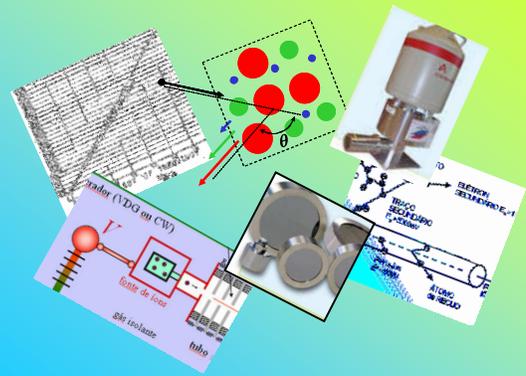


detetor de raios X

JPL, 2005

JPL, 2005

Juntando as peças...

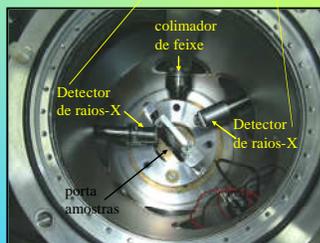


22

PIXE no LAMFI



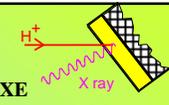
PIXE porta amostras



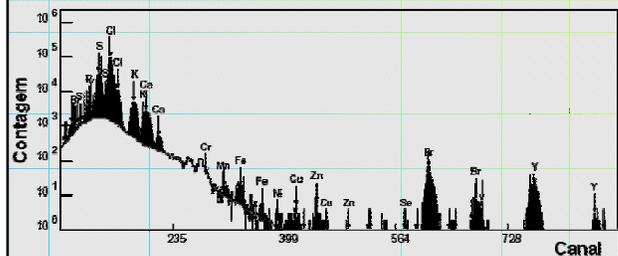
colimador de feixe
Detector de raios-X
Detector de raios-X
porta amostras

23

PIXE - Análise de uma amostra de soro sanguíneo



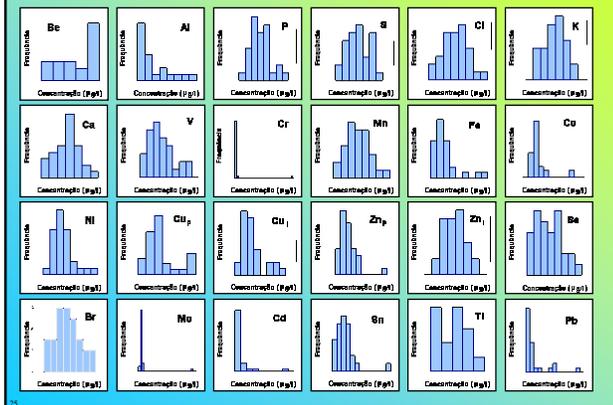
PIXE Particle Induced X ray Emission



S Bernardes, Dissertação de mestrado, IFUSP, maio 2007

24

Elementos traço em soro – distribuições elementares



Análise PIXE de anéis de árvore

Metodologia

PIXE
RBS
X-Ray densitometry

Martins, J.V. et al. NIM - B150 (1999) 240-247

Análise PIXE de anéis de árvore

Analysis: Statistical correlations and time series analysis

↑ ↑ ↑ ↑ ↑

Rubber extraction (1827-1920) Beginning of intense shipping (1908)
 Krakatoa eruption (Indonesia 1883) Manaus harbor construction (1901)
 Drought (1911, 1926)

Medida de temperatura usando a Razão Sr/Ca

Relacionar a proporção de estrôncio e cálcio em ossos e dentes com a temperatura local ou corporal

MOTIVAÇÃO:

J. Warren Beck et. al., Science 257, 644 (1992)

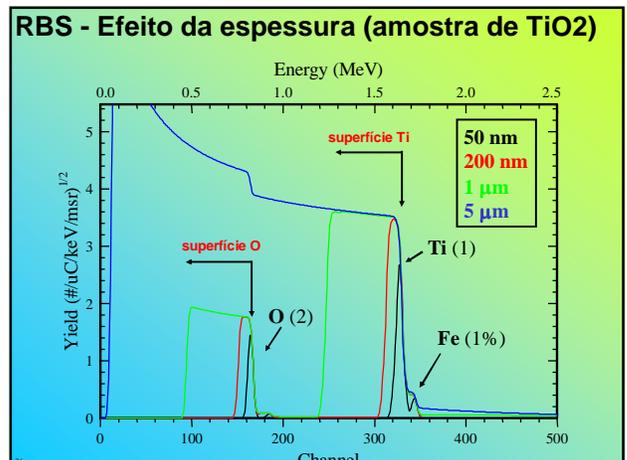
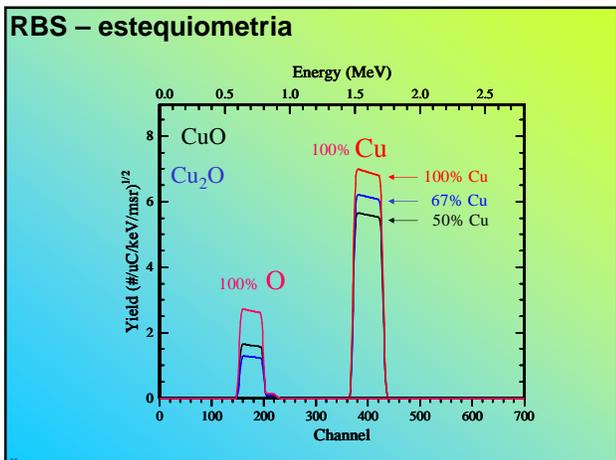
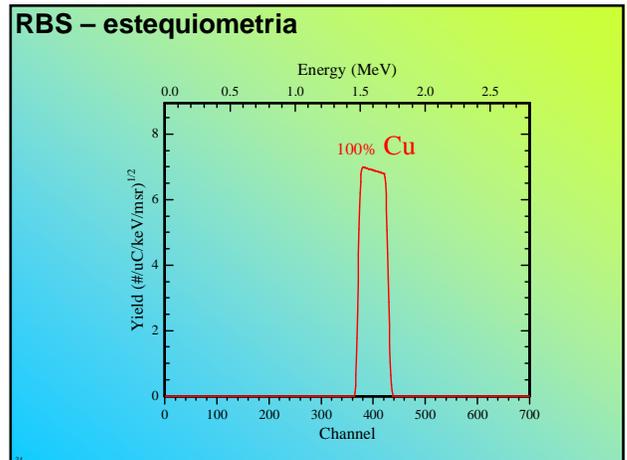
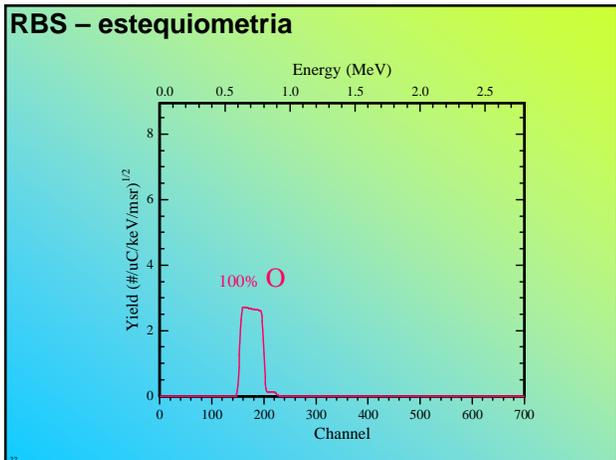
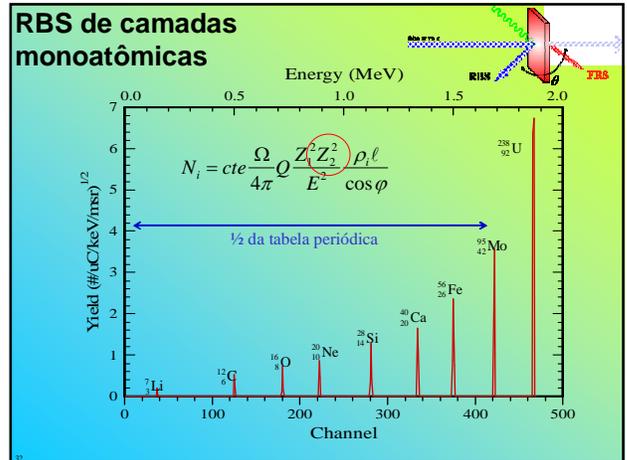
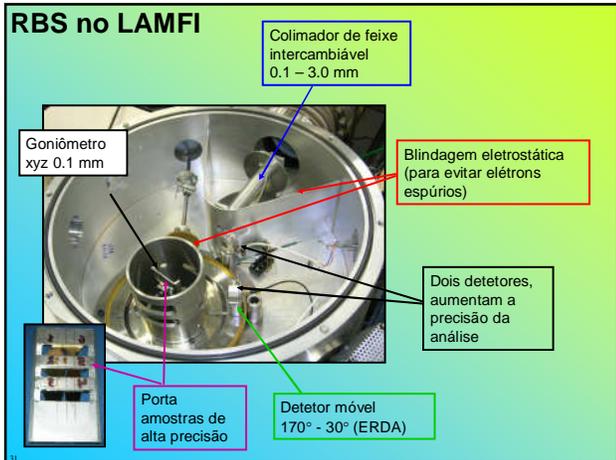
Sr/Ca em Hidroxiapatita como sensor de temperatura

Priscila R. Santos, Nemitala Added

Sr/Ca varia conforme o local no corpo. Gradiente térmico?

$$\frac{Sr}{Ca} = f\left(\frac{1}{T}\right)$$

RBS no LAMFI



RBS - Efeito da espessura

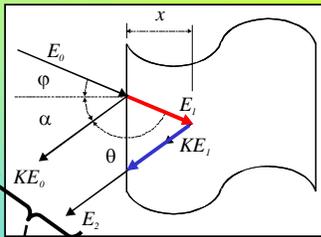
Fator de Freamento

$$E_1 = E_o - \frac{x}{\cos \varphi} \frac{dE}{dx}_e$$

$$E_2 = KE_1 - \frac{x}{\cos \alpha} \frac{dE}{dx}_s$$

$$\Delta E_d = KE_o - E_2 = [S]x$$

relação linear entre ΔE e x



37

RBS - Reações em interfaces

CONDIÇÃO INICIAL

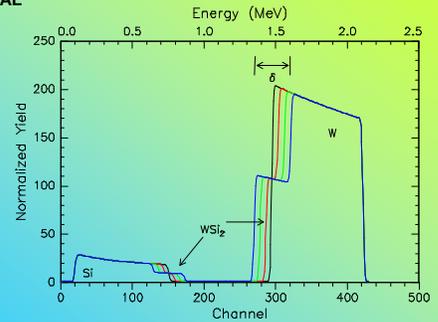


AMOSTRA RECOZIDA

$\Delta t = 2,4,16h$

$T = 500^\circ$

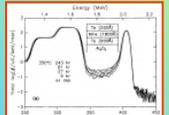
Atmosfera



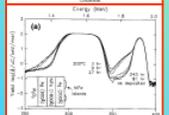
38

Transporte de massa em filmes finos

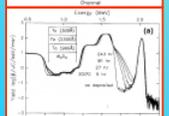
RBS, He⁺, 2.3MeV@170°



Ta/ Ni₈₀Fe₂₀/Ta/Al₂O₃ - 350°C, 0-243h
grain boundary assisted diffusion



Ag/Ni₈₀Fe₂₀/Ag/Al₂O₃ - 300°C, 0-243h
NiFe nucleation with diffusion



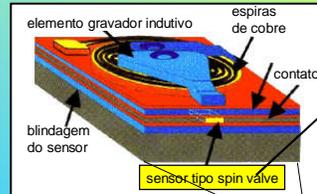
Ta/Fe/Ta/Al₂O₃ - 300°C, 0-243h
Fe nucleation without diffusion

Baglin, J.E.E., Tabacniks, M.H. & Kellock, A.J. RBS as a tool for topographic modelling of polycrystalline thin film interactions. *Nuc. Instrum. Phys. Res.* **B136** (1998) 136-138.

39

Combinando análises PIXE+RBS

Análise de um sensor tipo spin-valve



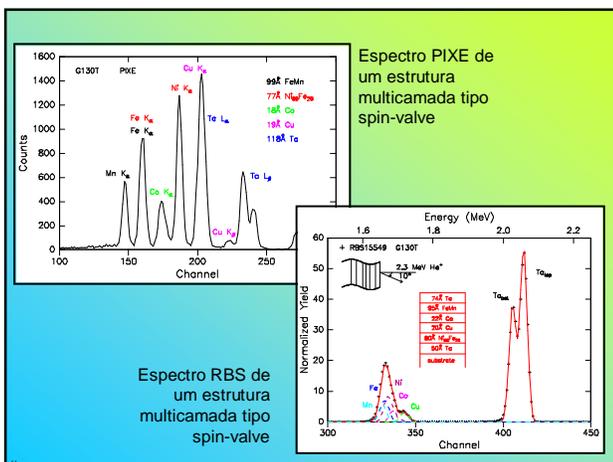
50Å Ta
100Å FeMn
50Å NiFe
22Å Cu
75Å NiFe
50Å Ta
substrato



<http://mirror.hut.com/the-starman/asm/mbr/cuhds.gif>

Estrutura totalmente determinada através dos métodos PIXE e RBS
IBM-ARC 1995

40



Espectro PIXE de um estrutura multicamada tipo spin-valve

Espectro RBS de um estrutura multicamada tipo spin-valve

41

Análise de um artefato arqueológico

A cultura Mochica

- Civilização Pré-Inca que viveu na costa norte do Peru 100AC-700DC.
- Dominavam metalurgia e douração do cobre.
- Tumba do Rey de Sipán descoberta em 1987 por Walter Alva e colaboradores



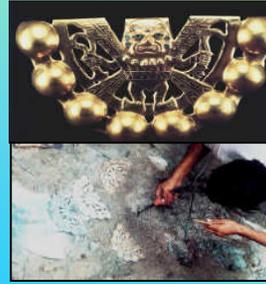
Saettoni, E; Matta, J A Sevidanes; Alva, W; Chubaci, J D D; Fantini, M C A; Galvão, R M O; Kiyohara, P; Tabacniks, M. H. Plasma cleaning and analysis of archeological artifacts from Sipán. *Journal of Physics - D (Applied Physics)*, USA, v. 36, p. 842-848, 2003

42



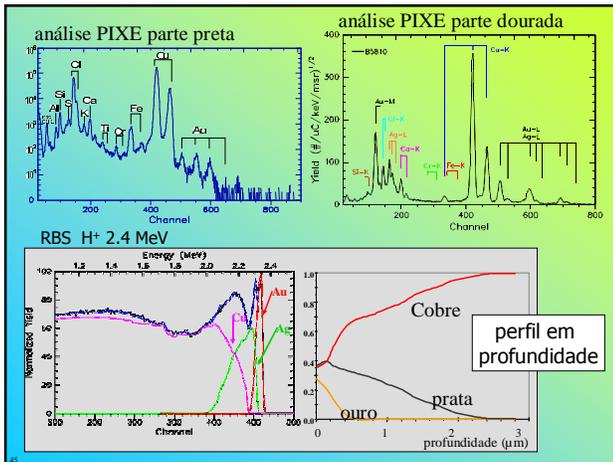
PIXE+RBS em pesquisas arqueológicas

Chocalho Mochica (100AC-700DC)

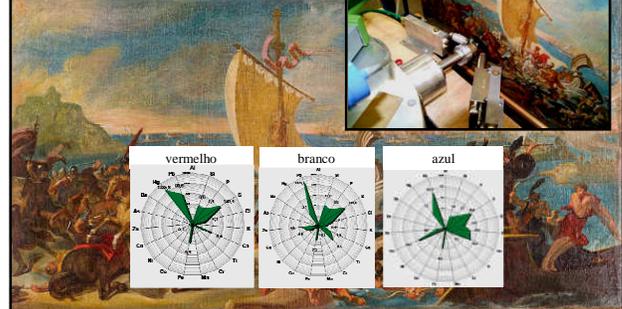


1987 peça encontrada na *Tumba do Rei de Sipan* (Walter Alva) e cedida para análise. (limpa em plasma)

Saetone, E; Matta, JA Sevidanes; Alva, W; Chubaci JDD; Fantini, MCA; Galvão, RMO; Kiyohara, P; Tabacniks, MH. Journal of Physics - D (Applied Physics) 36 (2003) 842-848.

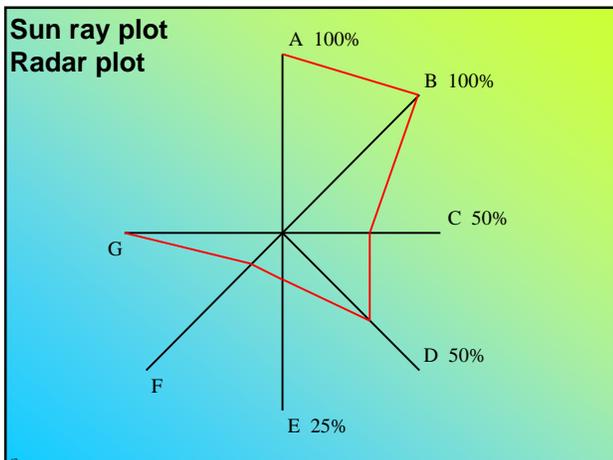


Análise PIXE de bens culturais

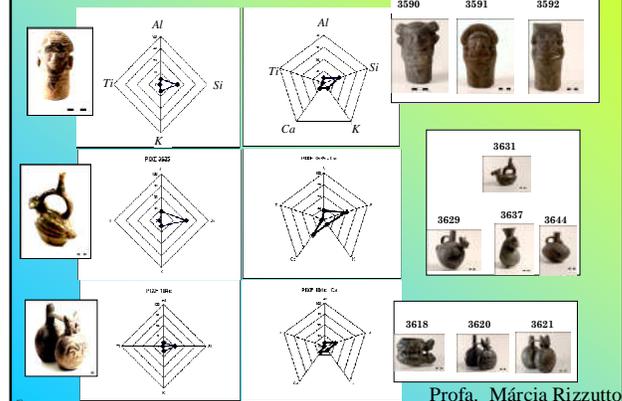


Desembarque e combate, Brasil, autor desconhecido, fim sec XVIII

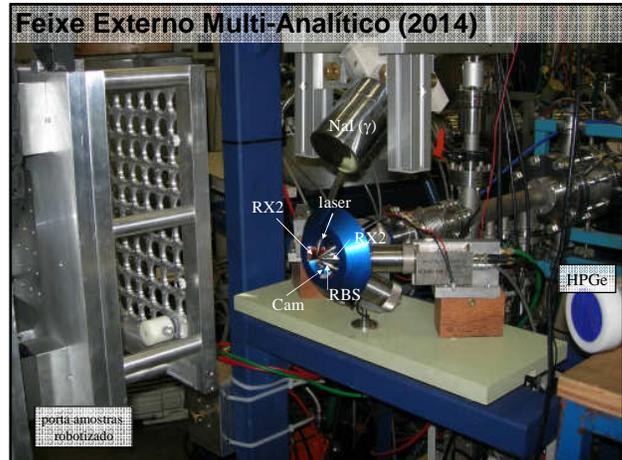
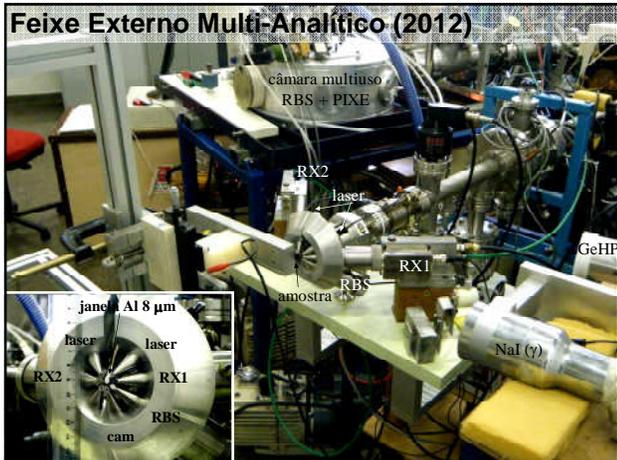
A Painting Studied with Integrated PIXE and Image Analysis, E. Kajiyal, M. A. Rizzutto, V. Pagliaro, S.I. Finazzo, P. R. Pascholati



Análises PIXE de bens culturais



Profª. Márcia Rizzutto



Análise em ar (sem necessidade de vácuo);
 Foco = 5 mm, volume sensível 0,5x0,5x0,5 mm³
 Autofoco para tratar amostras rugosas;
 Aquisição multi-paramétrica:
 (luz, raios X, raios gama, prótons, alfas, colorimetria)
 Mesa XYZ amplo alcance (60cm) e alta precisão (± 5µm)

X-ray detector
 Amptek XPS-100CR
 12,5-µm Be window
 4,4-mm² x 500-µm detection volume
 145-eV resolution @ FeKα

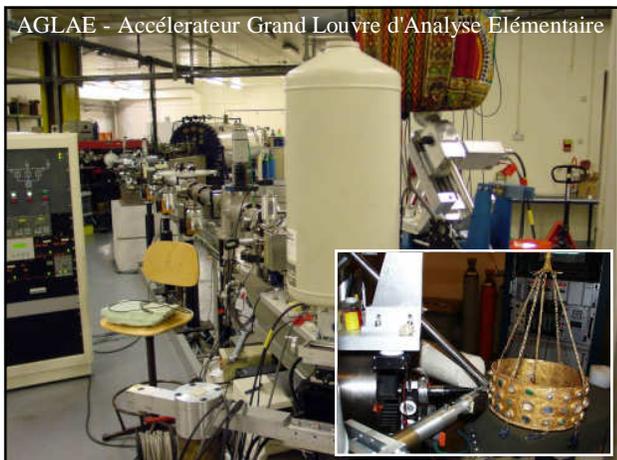
Light spectrophotometer
 Ocean Optics USB4000
 200-1100nm Optical range
 10nm FWHM resolution
 3648 pixels/16 bits ADC
 1000-µm aperture

Particle detector
 Camberra
 60-mm² active area
 100-mm depletion depth
 12-keV resolution
 (7-mm air12-µm kapton foil)
 ~70-keV final resolution

HP-Ge planar detector
 Ortec GLP-1018017P4
 130-mm Be window
 80-mm² x 7-mm detection volume
 185-eV resolution @ 5,9-keV

Projeto e construído no IFUSP com recursos do NAP-NAFNA

5 espectros simultâneos



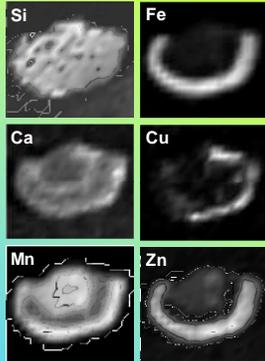
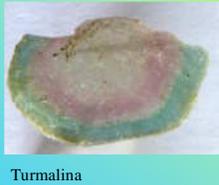
Mapeamento de elementos químicos numa turmalina

Estudo prospectivo de mapeamento de uma **Tourmalina (melancia)** no arranjo de feixe externo do LAMFI.

Em colaboração com o Instituto de geociências da USP.

GEOCIÊNCIAS USP

Mapas elementares (ϕ 0,7 mm)

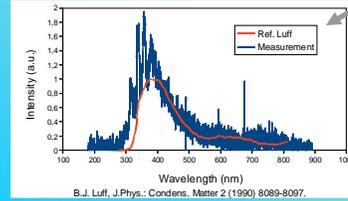


5mm

55

Ion Beam Luminescence

Um espectrômetro ótico permite extrair o espectro visível em cada pixel



A região azul foi identificada como quartzo puro. (SiO_2) [Luff-1990].

56

Ion Beam Luminescence

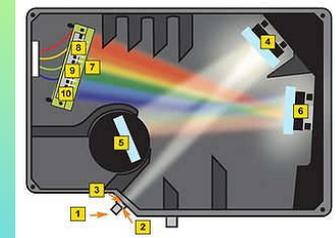


ecampus.com

57

Espectrômetro ótico "on chip"

- (2) Lente de entrada e acoplamento ótico;
- (4) Espelho focalizador e colimador;
- (5) Rede de difração;
- (6) Espelho
- (7) CCD linear (512 pixels, 250 nm por pixel);



~ 7 cm

ecampus.com

58

Análise PIXE de um fóssil em feixe externo

O modelo de fossilização supõe a ação de micro-organismos que substituem a matriz orgânica do fóssil e depositam Fe, Cu e Zn. A rocha em que o fóssil foi fixado é calcita. A análise confirmou o modelo proposto.

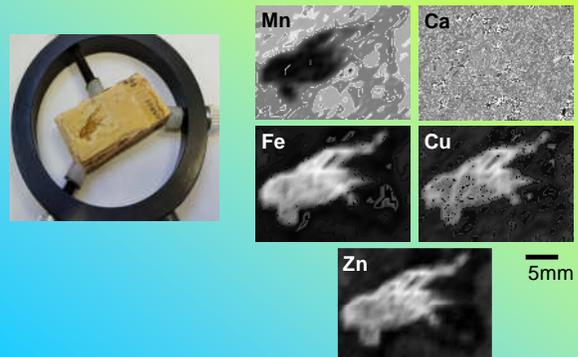
Trabalho em colaboração com o grupo de Paleontologia da USP.



Gabriel Osés
Prof. Setembrino Petri
Prof. Mirian Liza Alves Forancelli Pacheco

59

Análise PIXE de um fóssil em feixe externo



60

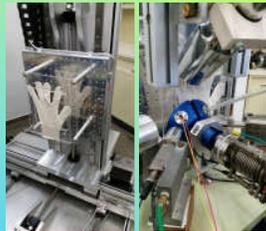
Resíduos de pólvora (Pb) de arma de fogo

Imagens do Fantástico 19/10/14

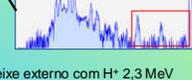
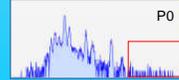
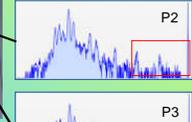
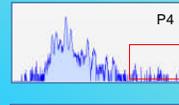
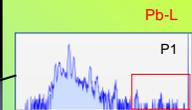
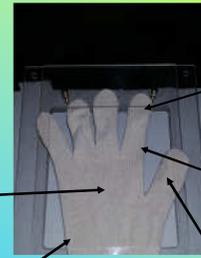


Análise de resíduos de pólvora nas mãos após execução de tiro com arma de fogo calibre 38.

Análise realizada no LAMFI para o Fantástico em 17/10/14.



Resíduos de pólvora (Pb) de arma de fogo



Espectros PIXE (det. alta) em feixe externo com H^+ 2,3 MeV

Desenvolvimento de Plataforma de Testes de Eletrônica Resistente à Radiação – RadHard

- Tecnologia em microeletrônica em constante evolução:
 - maior densidade
 - maior velocidade
 - menor consumo



- Maior vulnerabilidade
- Agências espaciais (CAMPINAS) e em fabricação em São Paulo
- Tecnologias nanométricas são extremamente sensíveis a efeitos de radiação (protons, elétrons).

Projeto CITAR
coordenado pelo CTI
(Campinas) e em
colaboração com a FEI
São Paulo

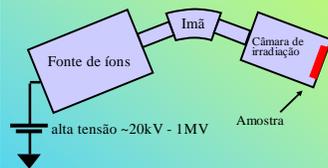
Arranjo experimental para SEE



Dois relógios em paralelo..

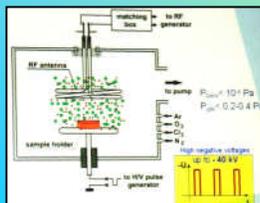
..um deles com IC aberto e exposto ao feixe.

Implantação de íons



Implantação com Feixe

Alto vácuo
Qualquer íon (fonte)
Qualquer energia (tensão)
Lento (feixe < 100 μ A)
Qualquer amostra.
Alto controle de dose e posição (plana)
Processo caro. Limpo. Pesquisa.

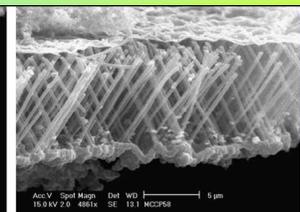
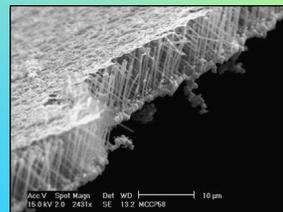


Implantação em Plasma

Pulsos alta voltagem $f=100$ a 600 Hz, $\tau = 5\mu$ s
em atmosfera gasosa de baixa pressão;
20 a 40 keV
 1 a 10×10^{17} /cm²
 $T = 50$ a 250 °C
Limitações: Tipo de gás e amostra.
~qualquer geometria
Processo barato. Sujo. Aplicação industrial

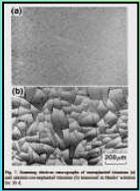
Implantação Iônica: Aplicações (Novos dispositivos eletrônicos)

Nano fios cruzados
(+30° e -30°)



T. Berthelot et al, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 265 (2007) 320-324.

Implantação de íons



Titânio não tratado

Titânio implantado com Ca
Aceleração de biocompatibilidade

Hanawa, 1999

Superfície dura de TiN criada via implantação iônica em plasma de nitrogênio.

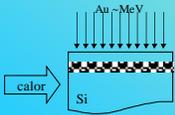


<http://www.ornl.gov/info>

Soluções sólidas além do equilíbrio precipitam...
Quantum Dots

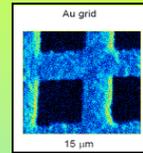
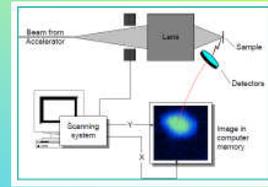


<http://www.nrc.gov/stm/res/news/2005>



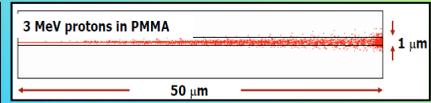
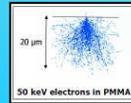
07

Micro e nano feixes



F. Watt et al, NIM B210, 2003, pp 14-20

Proton beam writing - Ion Beam Lithography



PMMA - polimetil metacrilato

08

Geoff Grimes, ICTP, Miranage-Treeck, 17 March 2006

Micro e nano feixes

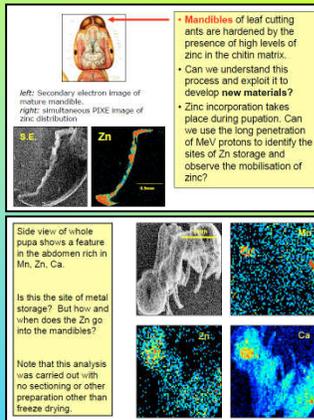
Comparado com elétrons, o maior poder de penetração de feixes iônicos e sua menor dispersão permite análises com maior resolução espacial.

Feixes MeV ~ 100 nm
Feixes de íon único! ~10 nm

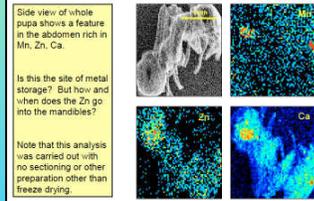
Feixes keV ~10 nm

UFRGS (2007) está instalando um microfioxe...

microanálise elemental de uma pupa de formiga



Mandibles of leaf cutting ants are hardened by the presence of high levels of zinc in the chitin matrix.
Can we understand this process and exploit it to develop new materials?
Zinc incorporation takes place during pupation. Can we use the long penetration of MeV protons to identify the sites of Zn storage and observe the mobilisation of zinc?



Is this the site of metal storage? But how and when does the Zn go into the mandibles?
Note that this analysis was carried out with no sectioning or other preparation other than freeze drying.

Geoff Grimes, ICTP, Miranage-Treeck, 17 March 2006

09

IPEN - Centro Tecnológico das Radiações

- Irradiação de polímeros para reação de reticulação "crosslinking"
- Tratamento de efluentes (plata piloto 3 m³/h)
- Esterilização de produtos biomédicos
- Cura de madeiras e lâminas por radiação
- Indução de cor em pedras preciosas
- Modificação de tiristores (Semikron)
- Desinfestação de obras de arte e livros
- Desinfestação de flores
- Preservação de alimentos



Adaptado de Calvo, W.A.P Workshop Sobre Estratégias para o Controle de Alimentos Irradiados - ANVISA, 15-16 agosto/2002

10

O Laboratório para Análise de Materiais com Feixes Iônicos LAMFI-USP

mais informações
www.if.usp.br/lamfi

www.youtube.com/watch?v=FqRJjMpy18c

www.youtube.com/watch?v=Sb_jZmmyoLM

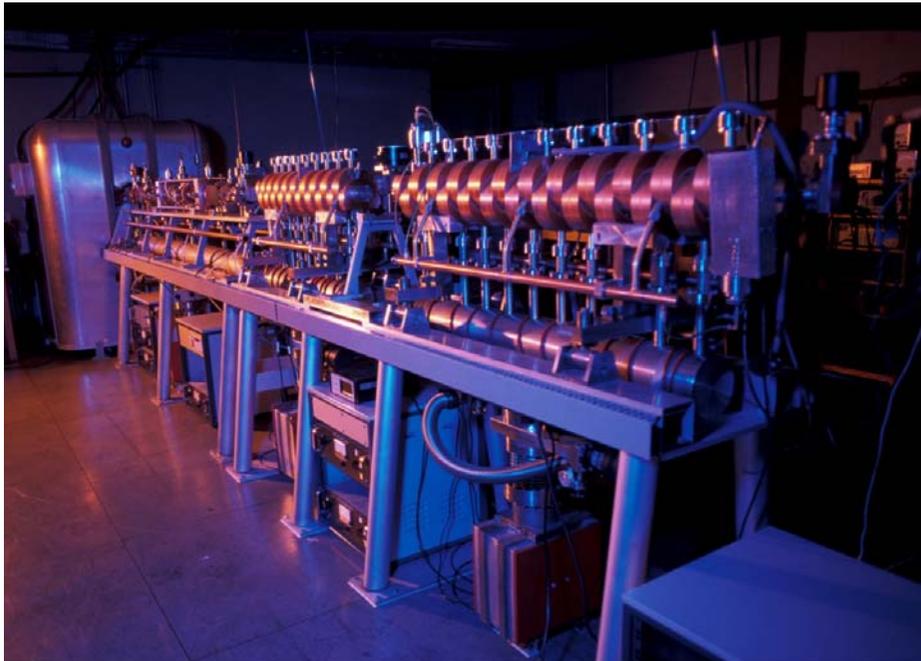
tabacniks@if.usp.br
web/if.usp.br/gfaa

11

Escola experimental de Física Nuclear 2016

Microtron de São Paulo, São Paulo Brasil

11 a 22 de janeiro de 2016



Programa preliminar

Medidas:

- Secção de choque de ionização K e L por impacto de elétrons.
- Bremsstrahlung de elétrons: espectro e distribuição angular.
- Dispersão de elétrons em materiais
- Fluorescência de raios-x
- Dosimetria da radiação