

Aceleradores de Partículas

*Thiago Tomei
IFT-UNESP
Março 2009*

Prelúdio

□ *Leis de Maxwell:* $\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$, $\nabla \times \mathbf{B} - \frac{\partial \mathbf{E}}{c^2 \partial t} = \mu_0 \mathbf{J}$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad , \quad \nabla \times \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0$$

□ *Força de Lorentz:* $\frac{d\mathbf{p}}{dt} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$

□ *Para aplicações futuras:*

– *Movimento relativístico em campo \mathbf{B} uniforme: $\mathbf{B} = B \mathbf{e}_3$*

$$\boldsymbol{\omega} = \frac{q \mathbf{B}}{\gamma m} \quad , \quad \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{v} \times \boldsymbol{\omega} \rightarrow \mathbf{v}(t) = v_3 \mathbf{e}_3 + \omega R(\mathbf{e}_1 - i \mathbf{e}_2) e^{-i\omega t}$$

o raio de curvatura: $R = \frac{p_T}{qB}$, $p_T = (p_1^2 + p_2^2)^{1/2}$

Aceleradores Lineares

- ❑ *Partículas aceleradas em trajetórias retas.*
- ❑ *Vantagem: perdas por radiação são desprezíveis.*
- ❑ *Desvantagem: passagem única por setor de aceleração.*
- ❑ *Diferentes propostas:*
 - *Campos eletrostáticos.*
 - Par de eletrodos.
 - Cockroft-Walton.
 - Van de Graaff.
 - *Campos de RF.*
 - Estruturas de Wideroe
 - Estrutura de Alvarez.
 - Cavidades ressonantes.

Stanford Linear Accelerator Center



- ❑ *Comprimento: 3.2 km.*
- ❑ *Energia: elétrons e pósitrons a 50 GeV.*
- ❑ *Luminosidade: $1.2069 \times 10^{34} / \text{cm}^2 \text{ s}$ (PEP-II)*
- ❑ *Fornecimento de feixe:*
 - *SLC (Stanford Linear Collider): colisões e^+/e^- , $E_{CM} = 92 \text{ GeV}$.*
 - *PEP-II: colisões e^+/e^- , $E_{CM} = 10.58 \text{ GeV}$.*

Aceleradores Eletrostáticos

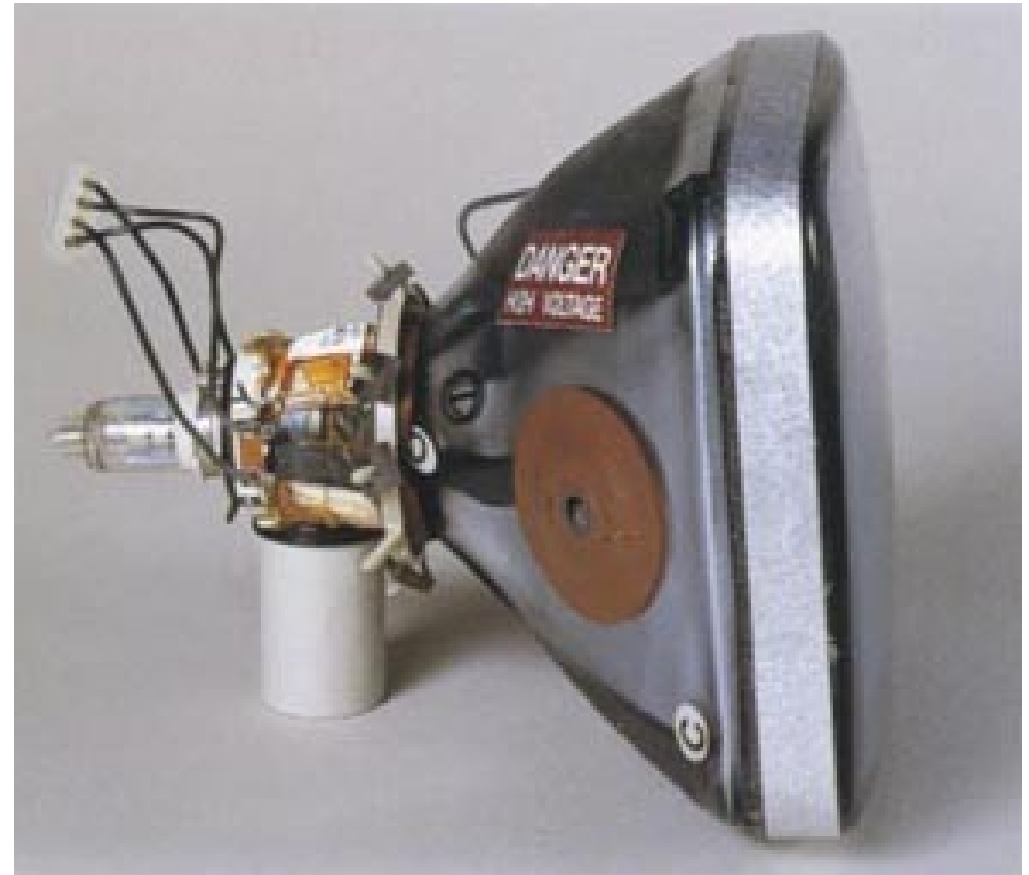
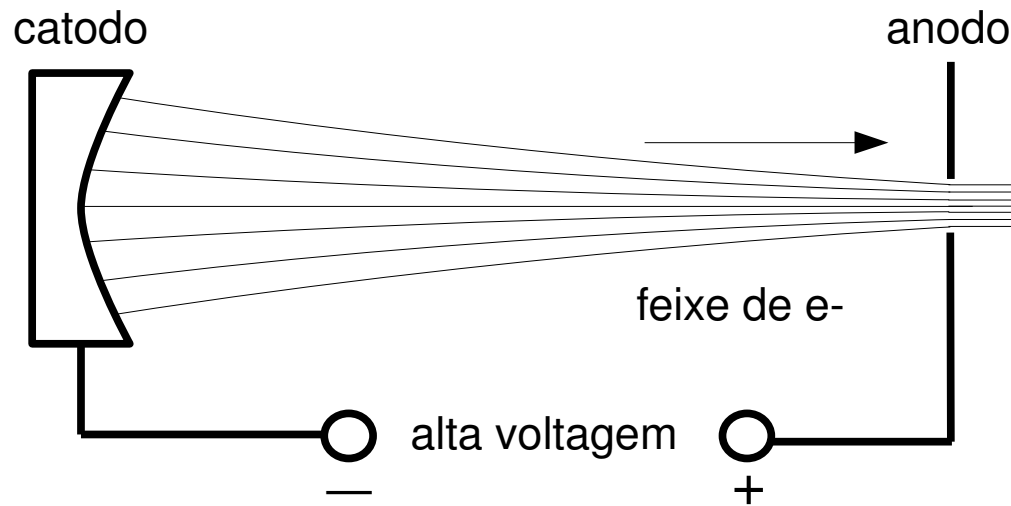
□ Par de eletrodos.

– *Ganho de energia:*

$$\Delta E = ZV$$

– *Ruptura dielétrica a partir de campos da ordem 10 MV/m.*

- Dependente da resistência dielétrica entre os eletrodos.

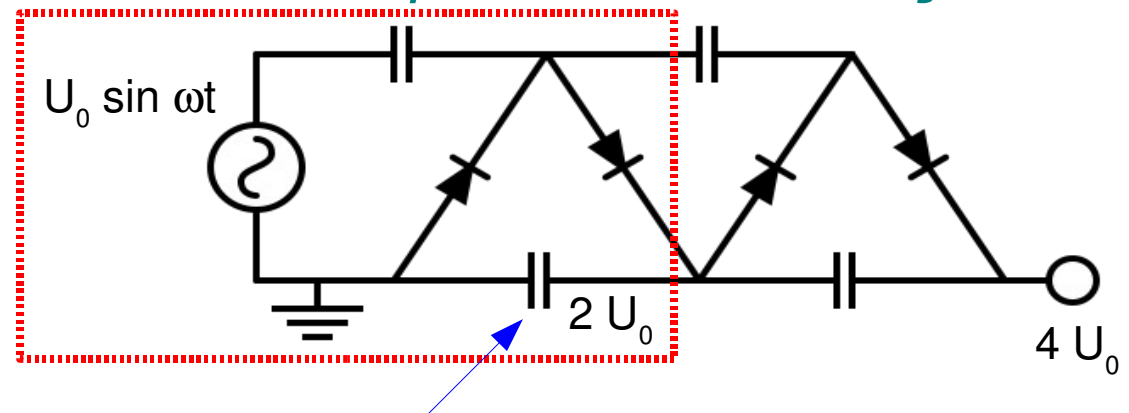


Cockcroft-Walton



❑ *Cockcroft-Walton de 1MV, 1937.
National Science Museum, Londres.*

- *Encadeamento de circuito simples (vermelho).*
 - No circuito simples, o capacitor marcado com a seta carrega até o dobro da tensão de entrada.
- *Encadeamento: $U_{\text{out}} = 2 N U_0$*
- *Ainda suscetível a ruptura dielétrica.*
- *Usado hoje como 1º estágio em complexos de aceleração.*



Van de Graaff

❑ *Eletrodo pontiagudo (2 e 7)*

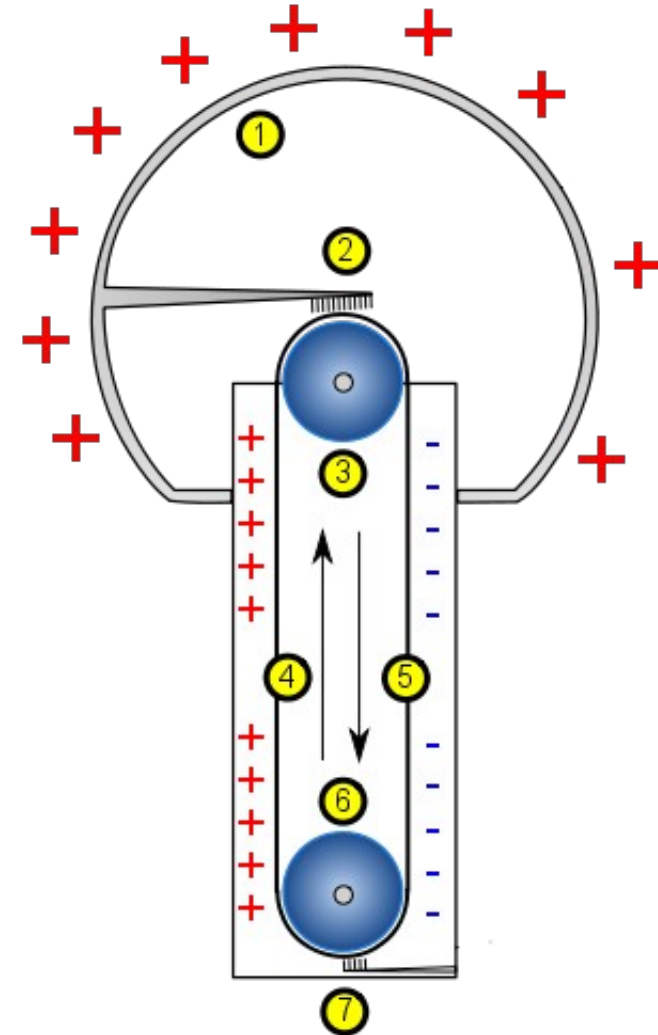
- *Forma de escovas com pontas de metal.*
- *Eletrodo (2) ligado à esfera condutora (1).*
- *Eletrodo (7) ligado a alta tensão DC (+).*

❑ *Esteira rolante (4 e 5)*

- *Feita de material dielétrico.*
- *Movimentação de carga.*

❑ *Esfera condutora oca (1)*

- *Carga acumulada na parte externa.*



Busca por Alternativas

- ❑ *Ruptura dielétrica – fraqueza comum de aceleradores eletrostáticos.*
 - *Paliativo: dielétricos de alta resistência dielétrica*
 - Freon, hexafluoreto de enxofre.
- ❑ *Alternativa: campos não-eletrostáticos.*
- ❑ *Possibilidades:*
 - *Campos de indução.*
 - Exemplos: LINAC de indução, betatron (circular).
 - *Campos RF:*
 - Cavidades ressonantes.
 - Esquemas de tubos de vôo livre.

Aceleradores de RF

□ Prelúdio: Cavity Ressonante

– *Separação entre campos transversos e longitudinais.*

- Basta resolver p/ os campos longitudinais → pode-se mostrar que os campos transversos são obtidos a partir deles.

– *Assumindo-se o campo da forma*

$$\mathbf{E}(x, y, z, t) = \mathbf{E}(x, y) e^{i(\omega t - k z)}$$

introduzindo o laplaciano transverso: $\nabla_t^2 = \nabla^2 - \partial_z^2$

$$(\nabla_t^2 + k_c^2) \mathbf{E} = 0 \quad , \quad k_c^2 = \mu \epsilon \omega^2 - k^2$$

e separando o campo como descrito acima

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_t + E_z \mathbf{z} \quad \rightarrow \quad \nabla_t^2 E_z + k_c^2 E_z = 0$$

Aceleradores de RF

– Assumindo-se:

- simetria azimutal + modo azimutal fundamental.
- condições de contorno.
- modo de frequência mais baixa.

chegamos à solução:

$$E_z = E_0 J_0(k_c r) \cdot e^{i\omega t}$$

$$E_r = -i \frac{k}{k_c} E_0 J_0'(k_c r) \cdot e^{i\omega t}$$

$$B_\phi = \mu \epsilon \omega E_r$$

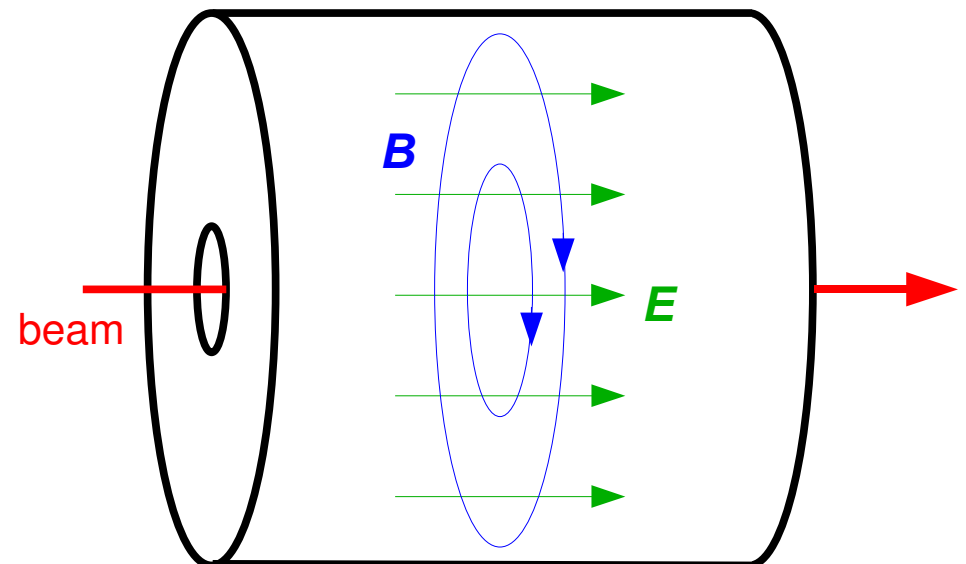
- *Modo TM 010. Os números (mnk) correspondem aos modos azimutal, radial e longitudinal.*

- *Modos TM (transverse magnetic) e TE (transverse electric).*

- Modos TM podem ser usados para aceleração de partículas – campo E longitudinal.

- *Para o modo 010: $\omega_{010} = 2.405 / \sqrt{(\mu \epsilon)} R$*

- *Note que em $r = 0$, o campo é puramente elétrico e longitudinal.*



Estrutura de Wideroe

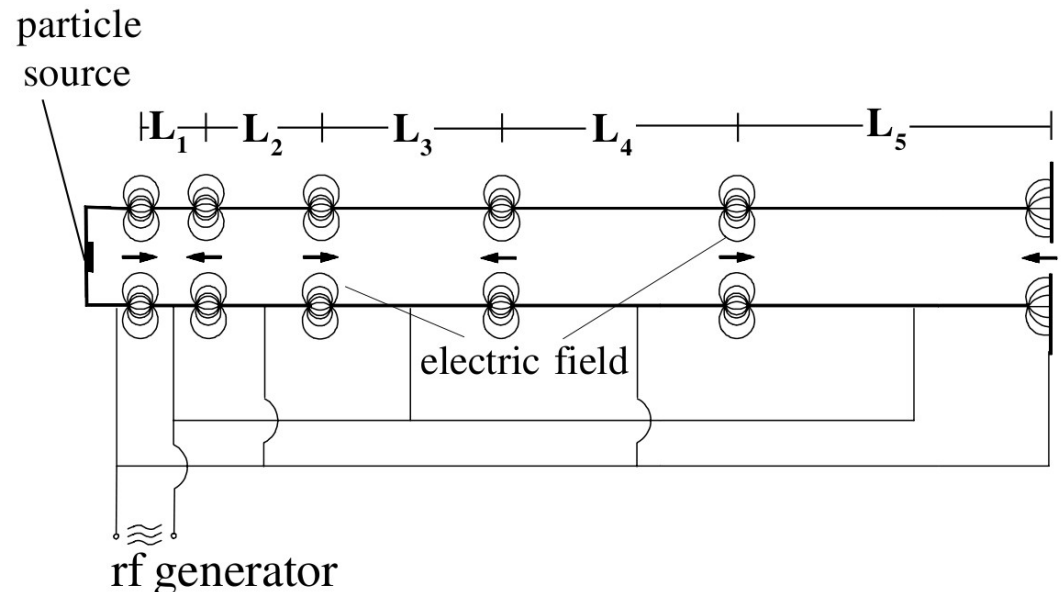
- ❑ *Conjunto de tubos condutores ligados a tensão AC.*
 - *Polaridades + e – para tubos adjacentes.*
 - *Aceleração nas lacunas entre os tubos.*
- ❑ *Exposição apenas a campos de aceleração.*
 - *Campos com sinal errado → partículas devem estar na região sem campo (interior dos tubos).*

- ❑ *Condição de sincronia:*

$$L_i \simeq 0.5 v_i T_{RF}$$

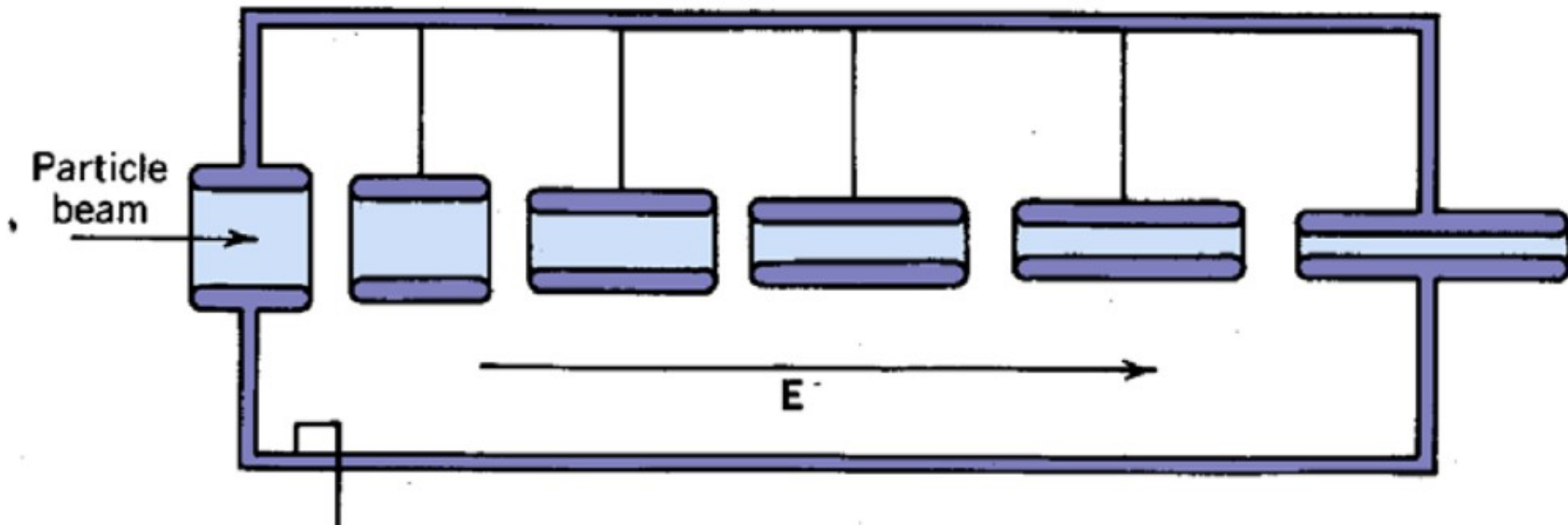
- ❑ *Desvantagens:*

- *Carga no gerador AC.*
- *Perdas por radiação.*



Estrutura de Alvarez

- *Evolução da estrutura de Wideroe.*
 - *Envólucro condutor ao redor da estrutura.*
 - *O conjunto se torna uma cavidade ressonante.*
 - *Estruturas de focalização dentro dos tubos de vôo.*
 - *Típico 2º estágio de aceleração.*



Aceleradores Circulares

- ❑ *Partículas aceleradas em uma trajetória fechada.*
 - *Possibilita repetidas passagens das partículas pelos setores de aceleração.*
- ❑ *Vantagem: altas energias com menor número de setores de aceleração.*
- ❑ *Desvantagem: perda de energia – radiação síncrotron*
 - *Alternativamente, esse pode ser o objetivo (fonte de luz síncrotron).*
- ❑ *Diferentes propostas:*
 - *Cíclotron.*
 - *Sincrocíclotron, cíclotron isócrono.*
 - *Síncrotron.*

Fermi National Accelerator Laboratory



- ❑ *Vista aérea do acelerador Tevatron.*
- ❑ *Energia: feixes de prótons e antiprótons a 980 GeV.*
- ❑ *Luminosidade: $2.86 \times 10^{32} / \text{cm}^2 \text{ s}$.*
- ❑ *Fornecimento de feixe:*
 - *D0 (1.96 TeV no CM)*
 - *CDF (idem)*
- ❑ *Descoberta do top quark (1995)*

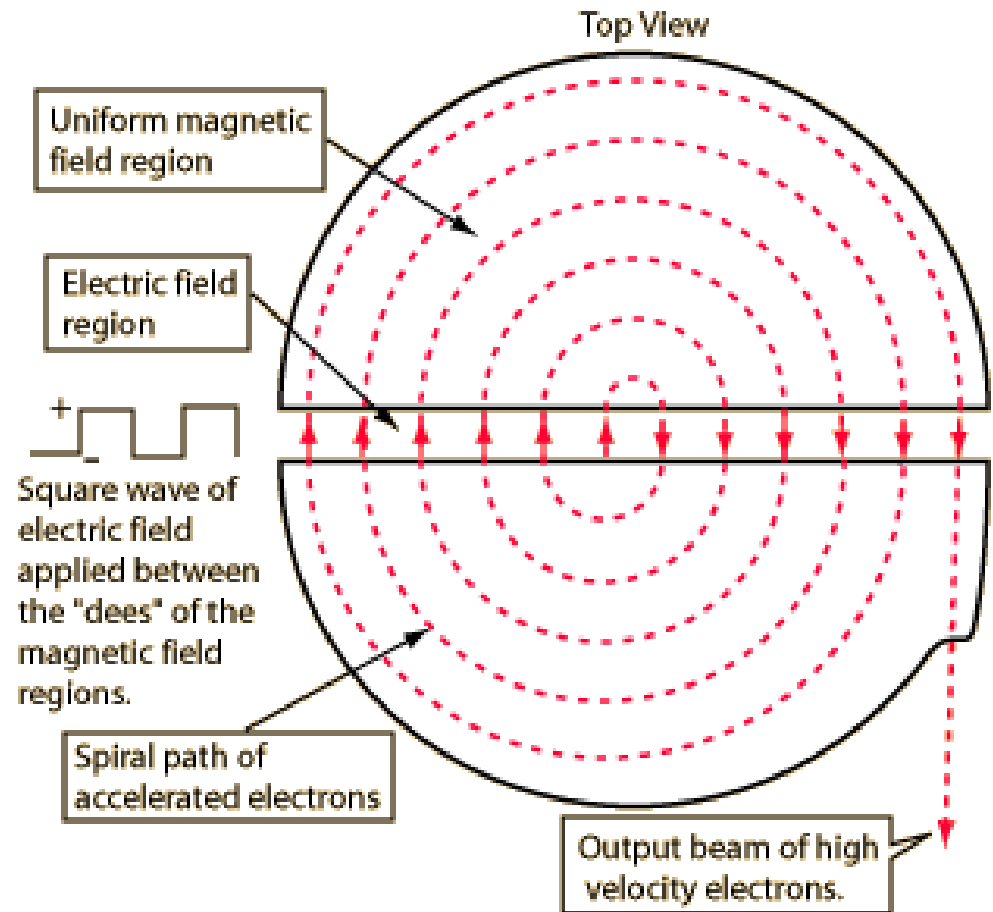
Cíclotron

❑ Estrutura:

- Dois eletrodos ocios sob tensão RF (onda quadrada).
- Eletro-ímã → campo \mathbf{B} axial.

❑ Funcionamento

- Entre os eletrodos:
 - Campo \mathbf{E} → aceleração → entrada no eletrodo.
- Dentro do eletrodo:
 - Partícula isolada de \mathbf{E}
 - Campo \mathbf{B} → trajetória circular → saída do eletrodo.
- Inversão da tensão.
- Trajetória espiral.



Cíclotron

❑ Características

- *Frequência de revolução independente do raio:* $\omega = \frac{q B}{m}$
 - Sincronia: uso da mesma frequência p/ tensão RF.
- *Energia das partículas (para $v \ll c$):* $K = \frac{(q B R)^2}{2 m}$

❑ Limitações

- *Perde sincronia para partículas relativísticas.*
 - Solução A: modulação da frequência → sincrocíclotron.
 - Solução B: modulação do campo magnético → cíclotron isócrono.
- *Para a maior parte das partículas, exige um imã muito grande para energias modestas.*
 - Ex: para acelerar um próton ($m_p = 938 \text{ MeV}$) a 1 GeV, é necessário um imã de fator $BR \sim 4.5$ metros Tesla.

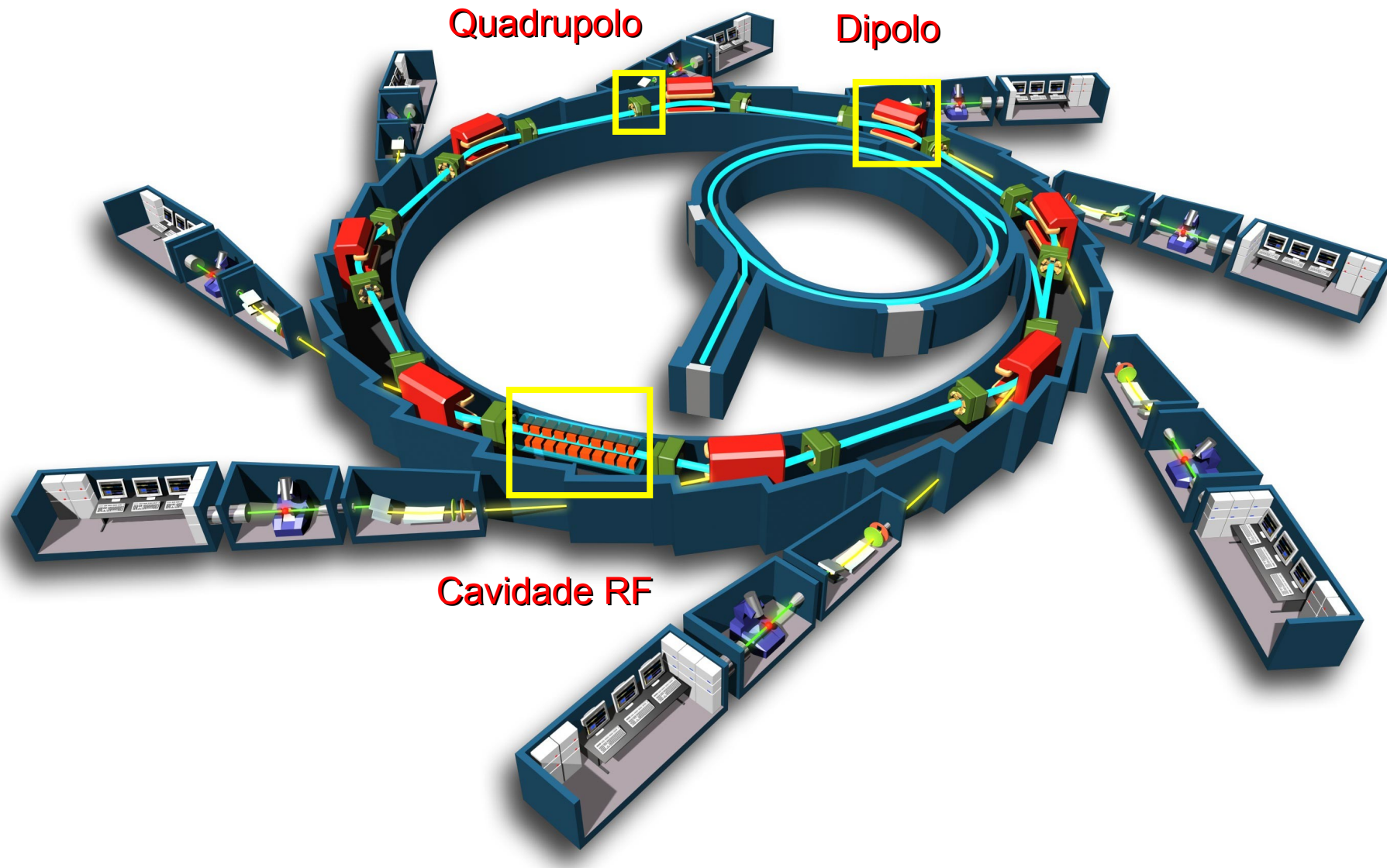
Cíclotron - Correções Relativísticas

- ❑ *Frequência de revolução relativística:* $\omega = \frac{q B}{\gamma m}$
- ❑ *Velocidade da partícula varia com o tempo:* $\gamma = \gamma(t)$
- ❑ *Condição de sincronia:* $f_{RF} = \frac{q B}{2\pi \gamma m}$
 - *Sincrocíclotron: manter **B** constante → variação da frequência.*
 - *Cíclotron isócrona: frequência constante → variação de **B**.*
- ❑ *Ainda devem ser considerados detalhes de focalização.*

Síncrotron

- ❑ *A principal desvantagem do Cíclotron é o fato de que as partículas seguem uma trajetória de raio variável.*
 - *Área da órbita deve estar totalmente imersa no campo magnético.*
 - *Altas energias → alto fator BR → imãs grandes e fortes → \$\$\$.*
- ❑ *Alternativa: sincronia entre campos elétrico e magnético de modo a manter o raio da trajetória constante..*
 - *Aplicação de campo magnético apenas na região da órbita.*
- ❑ *Condições de funcionamento:*
 - *Condição de raio constante: $R = \frac{p}{q B} = \frac{\gamma m \beta c}{q B} = cte.$*
 - *Cond. de sincronia: $f_{RF} = \frac{q B}{2 \pi \gamma m}$*

Síncrotron SOLEIL



Síncroton

□ *Estrutura:*

- *Dipolos: fornecem o campo B axial para curvar o feixe.*
- *Quadrupolos, sextupolos, ...: focalização.*
 - Estrutura FODO – Focalização, (vazio), Desfocalização, (vazio).
- *Cavidades de RF: adicionam energia ao feixe.*

□ *Funcionamento:*

- *Cavidades de RF e dipolos são sincronizados.*
 - O campo do dipolo deve ser proporcional ao momento da partícula para manter o raio da órbita constante.
 - Pela condição de sincronia, isso implica uma condição sobre a frequência RF.
 - Note que, para partículas relativísticas, a frequência RF é constante.

Radiação Síncrotron

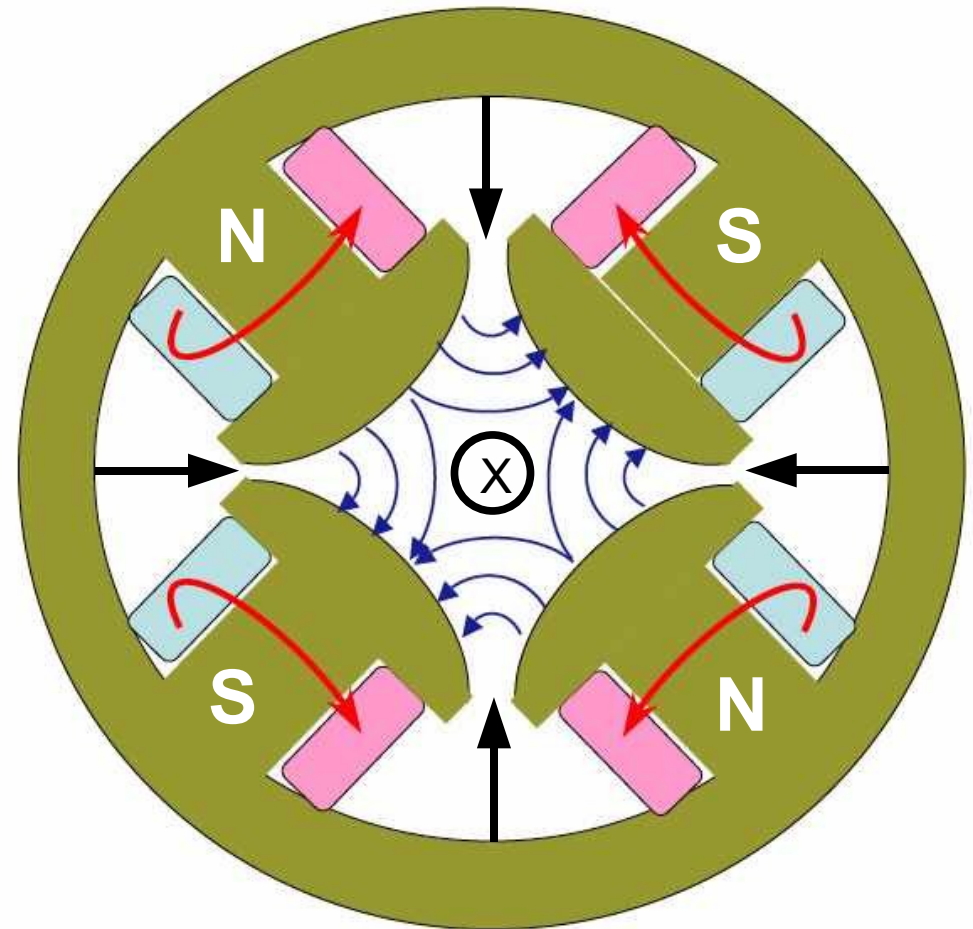
- ❑ *Partículas aceleradas irradiam → perda de energia.*
 - *Radiação muito mais intensa quando a aceleração é perpendicular à velocidade.*
- ❑ *Potência irradiada é inversamente proporcional à quarta potência da massa da partícula.*

$$P = \frac{c q^2 \beta^4 \gamma^4}{6 \pi \epsilon_0 R^2} = \frac{c q^2}{6 \pi \epsilon_0} \cdot \frac{\beta^4 E^4}{R} \cdot \frac{1}{m^4}$$

- *Elétrons irradiam muito mais do que prótons. Esse é o principal motivo pelo qual, após o LEP (Large Electron-Positron Collider), os próximos aceleradores de elétrons projetados são lineares.*
- ❑ *Potência irradiada é inversamente proporcional ao raio do síncroton – motivo pelo qual eles são tão grandes!*

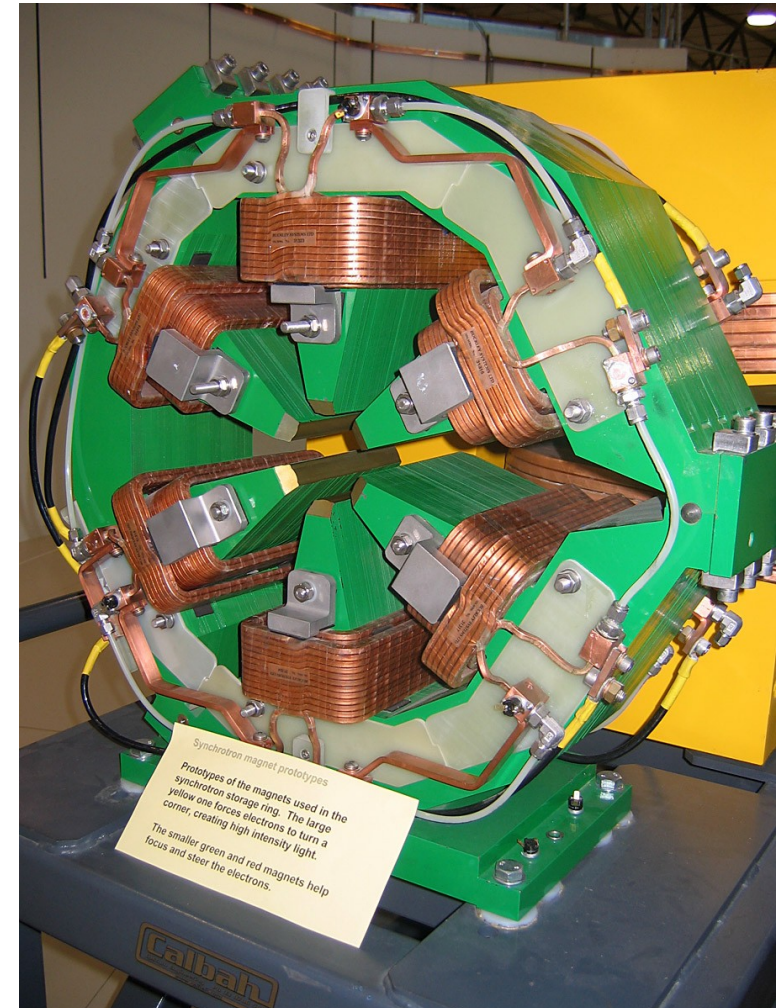
Focalização

- ❑ *Mecanismos de correção do feixe.*
- ❑ *Partículas a altas velocidades → força magnética é muito mais efetiva.*
- ❑ *Primariamente: campos de quadrupolo.*
 - *Também sextupolo, octopolo, ...*
- ❑ *Quadrupolo magnético: focaliza o feixe em uma direção e desfocaliza na outra.*
- ❑ *Dois quadrupolos intercalados pelo vazio têm efeito combinado de focalização – rede FODO.*



- ❑ *Esquema de funcionamento de um ímã de quadrupolo*

Focalização



- ❑ *Imãs de quadrupolo (esquerda) e sextupolo (direita). Quadrupolos corrigem a dispersão do feixe, enquanto sextupolos corrigem a cromaticidade.*

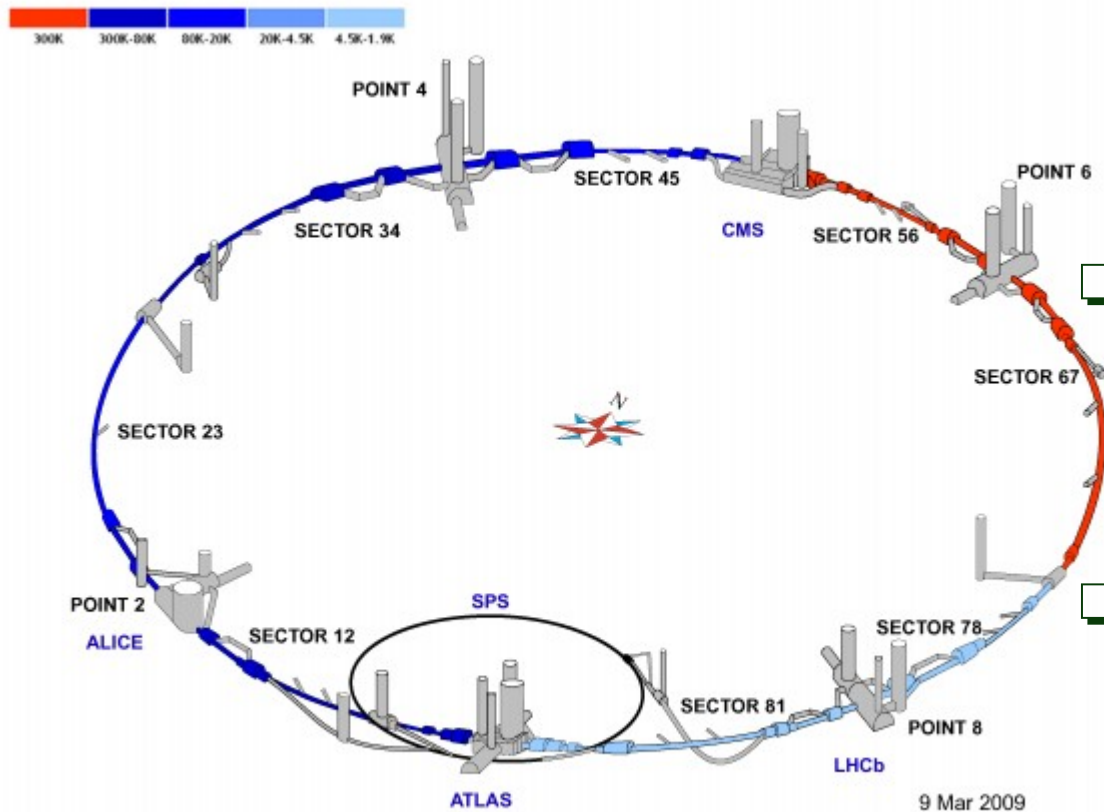
Aceleradores Leptônicos - LEP

- ❑ *Energia: feixes de elétrons e pósitrons até 104.6 GeV.*
- ❑ *Luminosidade:
(24 a 100) $\times 10^{30}$ / $\text{cm}^2 \text{ s}$.*
- ❑ *Fornecimento de feixe:*
 - *ALEPH, JADE,
OPAL, DELPHI*
- ❑ *Medidas de precisão do LEP constituem um dos testes mais rigorosos do Modelo Padrão até hoje.*



- ❑ *Cavidade de RF utilizada no Large Electron-Positron Collider – LEP (2005). O LEP funcionou de 1989 a 2000, quando foi desmantelado para a construção do LHC.*

Aceleradores Hadrônicos - LHC



- Ilustração do Large Hadron Collider – LHC. Note as cores para os diferentes setores, de acordo com a temperatura ambiente.

□ Energia:

- Prótons a 7000 GeV.
- Íons Pb a 2.76 TeV / n.

□ Luminosidade:

- p-p: $1.0 \times 10^{34} / \text{cm}^2 \text{ s}$.
- Pb-Pb: $1.0 \times 10^{27} / \text{cm}^2 \text{ s}$

□ Fornecimento de feixe:

- ATLAS, CMS: detectores de propósito geral.
- LHCb: assimetria matéria-antimatéria.
- ALICE: física nuclear a alta densidade de energia.

Aceleradores Hadrônicos - LHC

- ❑ *Construído a 100 metros de profundidade no Túnel do antigo LEP (Large Electron-Positron Collider).*
- ❑ *Circunferência de ~ 27 km (76% do território toda USP).*
- ❑ *Acelerador do tipo síncroton*
 - *1232 dipolos, comprimento 14.3 m, massa 35 toneladas.*
 - *Campo do dipolo: de 0.535 a 8.33 T (200000 vezes o campo magnético terrestre).*
 - *Raio efetivo de curvatura: 2804 m.*
- ❑ *Frequência de revolução do feixe: 11.425 kHz*
- ❑ *Frequência RF: 400.8 MHz*
- ❑ *Um bilhão de colisões próton-próton por segundo.*

LHC Visto Do Espaço

