

Aceleradores de Partículas

*Thiago Tomei
IFT-UNESP
Março 2009*

Sumário

❑ *Introdução*

- *Por que Aceleradores?*
- *Características de Aceleradores: Energia e Luminosidade. Alvo Fixo X Colisão de Feixe.*
- *Complexo de Aceleração.*
- *Fonte de Partículas. Outros Componentes*

❑ *Aceleradores Lineares*

- *Aceleradores Eletrostáticos*
- *Aceleradores de Radiofrequência*
- *Cavidades Ressonantes*

❑ *Aceleradores Circulares*

- *Cíclotron, Síncrotron*
- *Síncrotron. Radiação Síncrotron*
- *Aceleradores $e^+ e^-$: LEP*
- *Aceleradores Hadrônicos: Tevatron, LHC*

Introdução

Por que Aceleradores?

□ *De Broglie:*

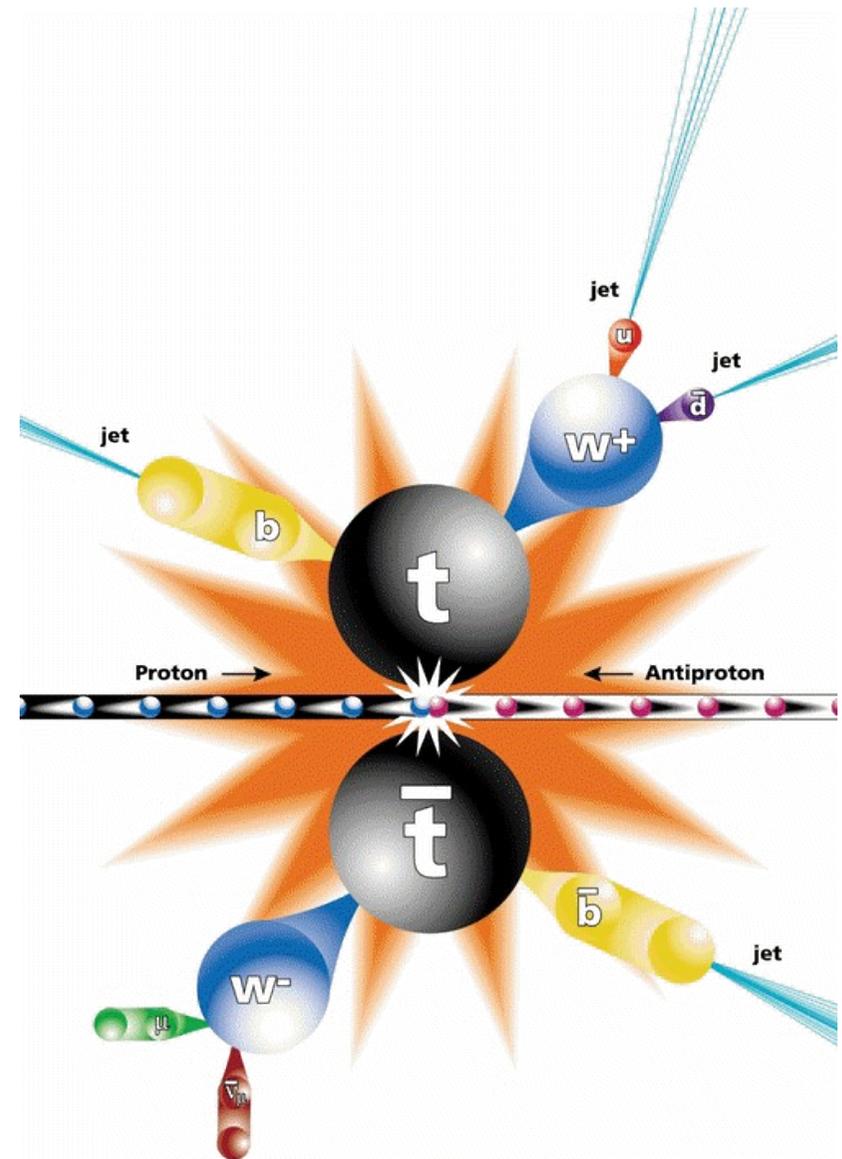
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{1.2 \text{ fm}}{p[\text{GeV}]}$$

□ *Einstein:*

$$E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$$

– *Aceleradores de partículas a altas energias:*

- Pequenas distâncias são exploradas.
- Novas partículas são produzidas.



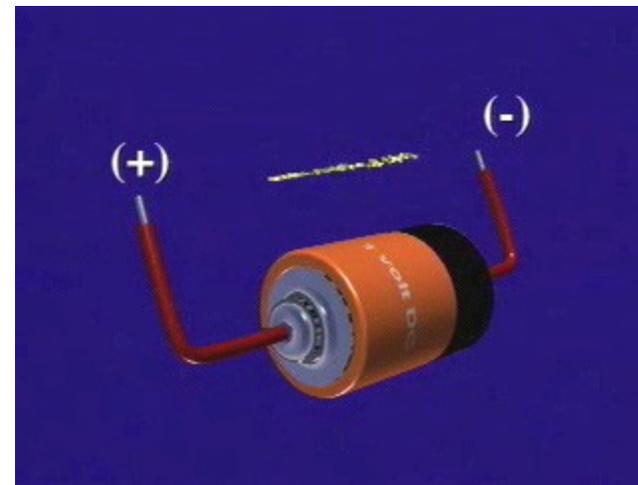
Energia

□ 1 elétron-volt (eV): $1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$

- Energia adquirida por uma partícula de carga elementar (e) ao atravessar um potencial de 1 V.

□ Ordens de grandeza:

- 30 KeV: tubo CRT (TV a cores)
- 9 MeV: acelerador Pelletron (USP)
- 9 GeV: acelerador PEP-II (SLAC) (elétrons)
- 14 TeV: acelerador LHC (CERN) (energia CM)
- Massa e^- : $0.51 \text{ MeV} / c^2$
- Massa p : $938.2 \text{ MeV} / c^2$



Luminosidade

□ Grandeza que mede a "taxa de colisões" de um acelerador.

– Exemplo: considere uma reação $X: pp \rightarrow X$

• Tempo $t \rightarrow N$ reações \rightarrow taxa de reação $R = N / t$

• Seção de choque $\sigma_X \rightarrow$ prob. de ocorrência de X

• *Em princípio, calculável da teoria.*

• R é proporcional a $\sigma_X \rightarrow$ const. de proporcionalidade $L \rightarrow$

$$R = L \sigma_X, [L] = \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$$

– Luminosidade é uma característica intrínseca do acelerador.

• Depende da geometria dos feixes e da frequência de cruzamento dos bunches.

Luminosidade

$$L = f \frac{n_1 n_2}{4\pi \sigma_x \sigma_y}$$

- n_1, n_2 : número de partículas nos bunches
- σ_x, σ_y : perfil gaussiano transverso do feixe
- f : frequência de colisão dos bunches

HIGH-ENERGY COLLIDER PARAMETERS: e^+e^- Colliders (II)

Updated in early 2008 with numbers received from representatives of the colliders (contact J. Beringer, LBNL). For existing (future) colliders the latest achieved (design) values are given. Quantities are, where appropriate, r.m.s.; H and V indicate horizontal and vertical directions; s.c. stands for superconducting.

	CESR (Cornell)	CESR-C (Cornell)	KEKB (KEK)	PEP-II (SLAC)	LEP (CERN)	ILC (TBD)
Physics start date	1979	2002	1999	1999	1989	TBD
Physics end date	2002	2008	—	2008	2000	—
Maximum beam energy (GeV)	6	6	$e^- \times e^+ : 8 \times 3.5$	$e^- : 7-12$ (9.0 nominal) $e^+ : 2.5-4$ (3.1 nominal) (nominal $E_{cm} = 10.5$ GeV)	100 - 104.6	250 (upgrade-able to 500)
Luminosity ($10^{30} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	1280 at 5.3 GeV/beam	76 at 2.08 GeV/beam	17120	12069 (design: 3000)	24 at Z^0 100 at > 90 GeV	2×10^4
Time between collisions (μs)	0.014 to 0.22	0.014 to 0.22	0.00590 or 0.00786	0.0042	22	0.3^\ddagger

Luminosidade

HIGH-ENERGY COLLIDER PARAMETERS: ep , $p\bar{p}$, pp , and Heavy Ion Colliders

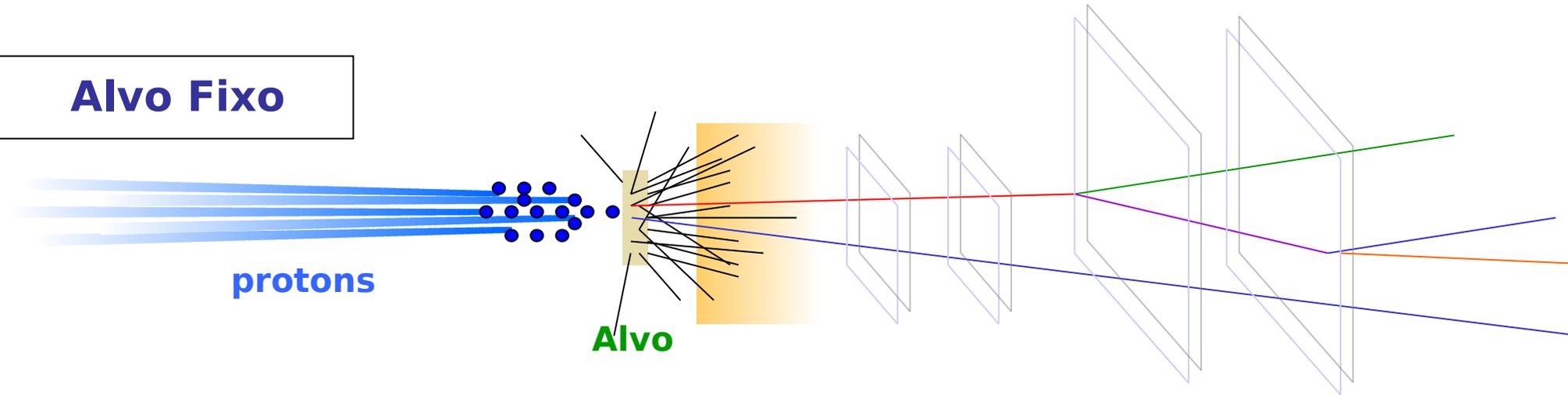
Updated in early 2008 with numbers received from representatives of the colliders (contact J. Beringer, LBNL). For existing (future) colliders the latest achieved (design) values are given. Quantities are, where appropriate, r.m.s.; H and V indicate horizontal and vertical directions; s.c. stands for superconducting; pk and ave denote peak and average values.

	HERA (DESY)	TEVATRON* (Fermilab)	RHIC (Brookhaven)				LHC (CERN)	
			2001	2000	2004	2002	2008	2009
Physics start date	1992	1987						
Physics end date	2007	—	—				—	
Particles collided	ep	$p\bar{p}$	pp (pol.)	Au Au	Cu Cu	d Au	pp	Pb Pb
Maximum beam energy (TeV)	e : 0.030 p : 0.92	0.980	0.1 60% pol	0.1 TeV/n	0.1 TeV/n	0.1 TeV/n	7.0	2.76 TeV/n
Luminosity ($10^{30} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	75	286	35 (pk) 20 (ave)	0.0030 (pk) 0.0012 (ave)	0.020 (pk) 0.0008 (ave)	0.23 (pk) 0.11 (ave)	1.0×10^4	1.0×10^{-3} (5.4×10^{-5}) [†]
Time between collisions (ns)	96	396	107	107	321	107	24.95	99.8 (1347) [†]

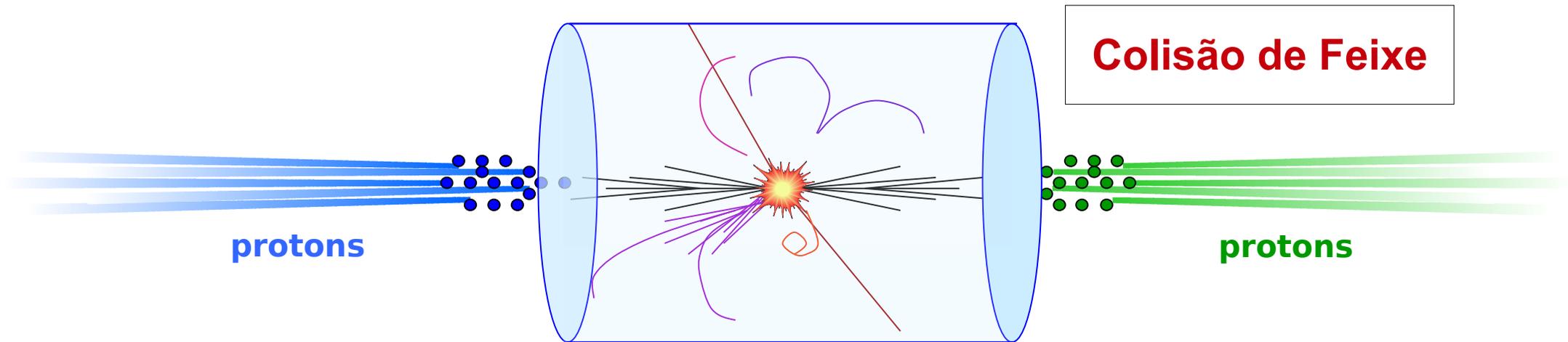
- *A transição Tevatron → LHC representa um aumento de 35 vezes na luminosidade, além de 7 vezes na energia. É um regime de densidade de energia totalmente inexplorado.*

Alvo Fixo X Colisão de Feixe

Alvo Fixo



Colisão de Feixe



Alvo Fixo X Colisão de Feixe

□ Alvo Fixo

– Vantagens:

- Simplicidade técnica.
- Alvo denso:
(10^{22} átomos / cm^3)
 - *Alta taxa de reação.*
- Aproveitamento das partículas espalhadas para criação de feixes secundários.

– Desvantagens:

- $E_{\text{CM}} \sim E_{\text{F}}^{1/2}$

□ Colisão de Feixe

– Vantagens:

- $E_{\text{CM}} \sim E_{\text{F}}$

– Desvantagens:

- Dificuldade técnica.
- "Alvo" diáfano:
(10^{14} átomos / cm^3)
 - *Menor taxa de reação.*
- Impossibilidade de criação de feixes secundários.

Alvo Fixo X Colisão de Feixe

□ Energia Relativística (\sim TeV)

$$E = \sqrt{m_1^2 c^4 + m_2^2 c^4 + 2(E_1 E_2 + p_1 p_2 c^2)}$$

– *Alvo Fixo:* (altas energias)

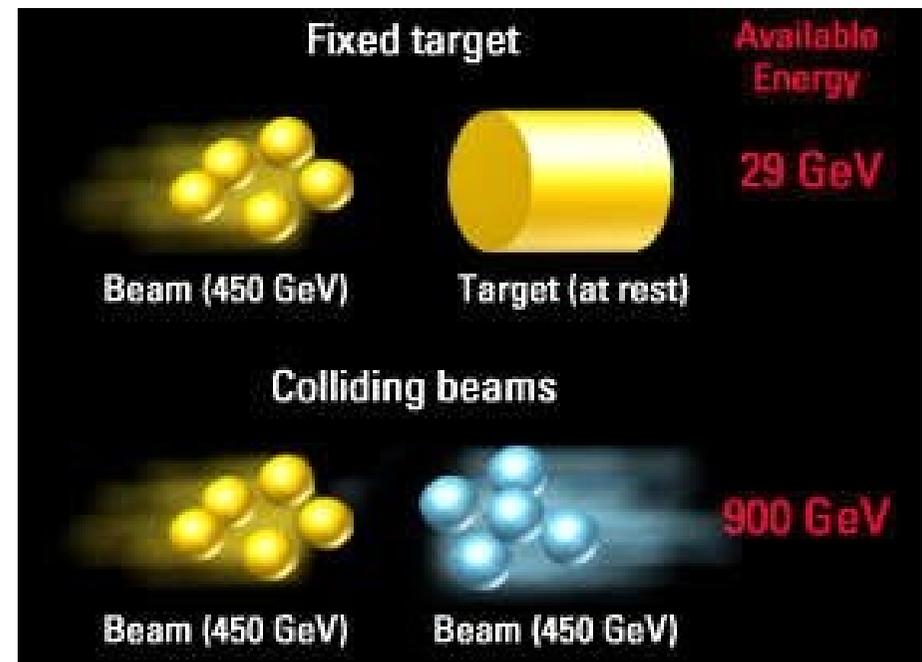
$$\bullet E_1 = E_F, E_2 = m_A c^2, p_2 = 0$$

$$E = \sqrt{2(E_F m_A c^2)}$$

– *Anel de Colisão:*

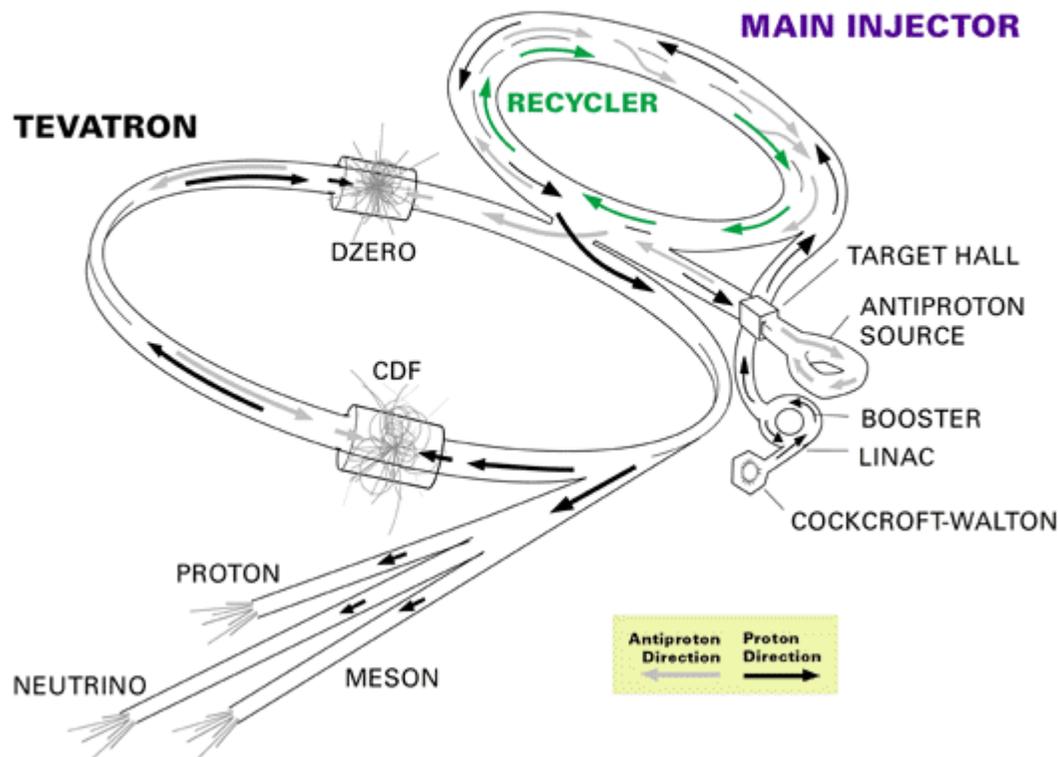
$$\bullet E_1 = E_2 = E_F, p_1 = p_2 = E_F/c$$

$$E = 2 E_F$$

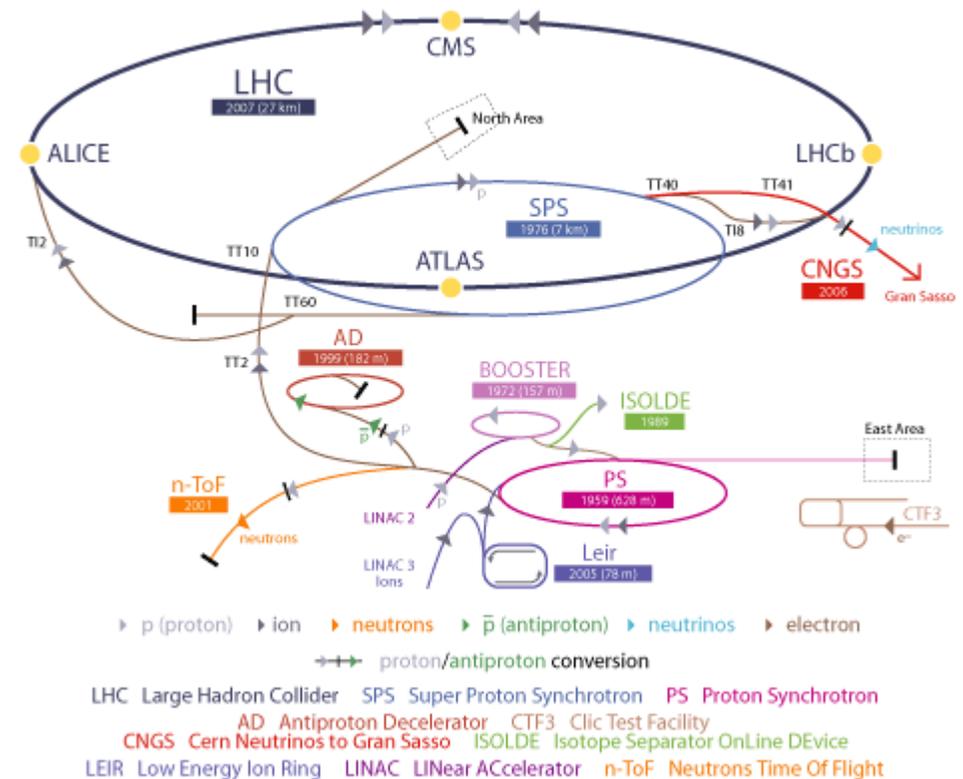


Complexo de Aceleração

FERMILAB'S ACCELERATOR CHAIN



CERN Accelerator Complex



- Um acelerador moderno é composto de diversos componentes em cadeia. Geração de partículas / anti-partículas, estruturação do feixe (contínuo / pulsado), focalização e os diversos estágios de aceleração são processos desenvolvidos em componentes separados.

Fonte de Partículas

❑ *Objetivo: gerar partículas para aceleração.*

❑ *Geração de elétrons.*

– *Emissão termiônica.*

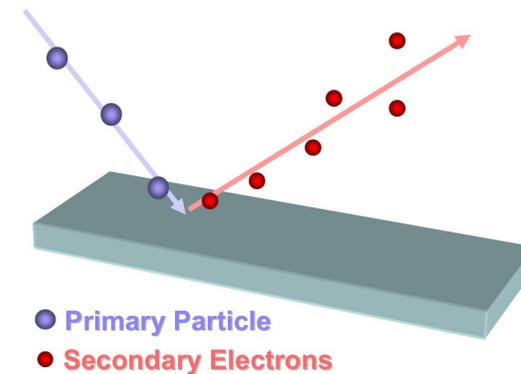
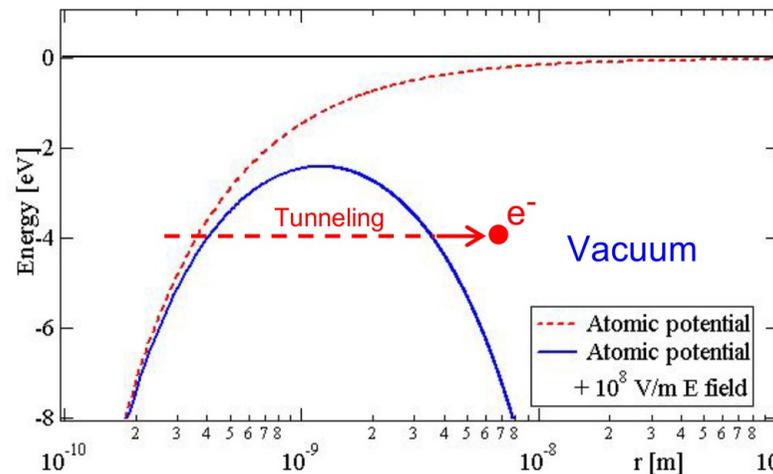
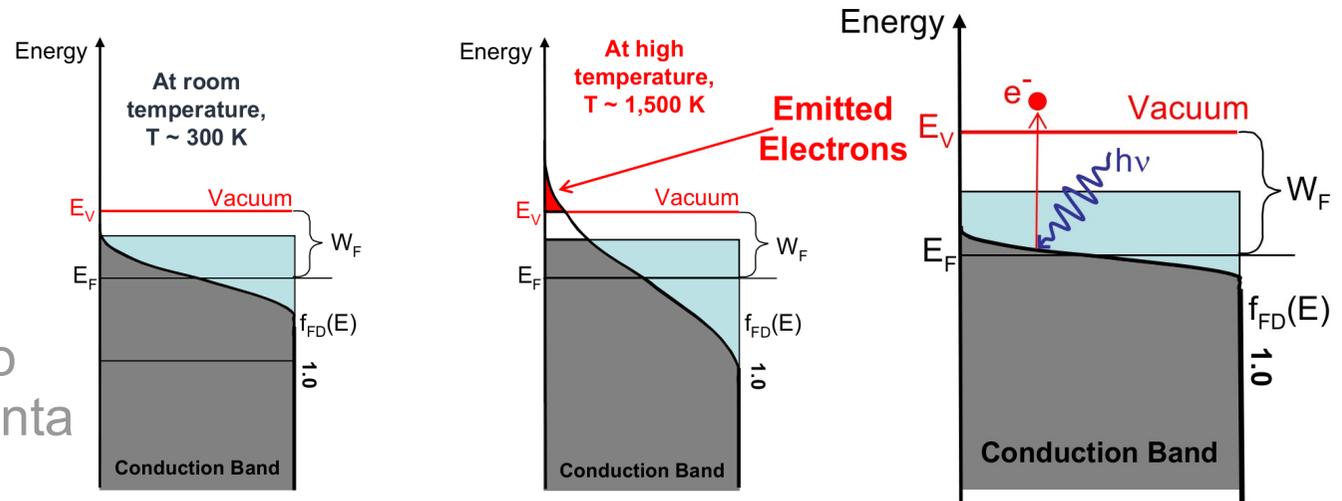
- A $T > 0K$, a distribuição de Fermi-Dirac apresenta uma região acima da energia de escape.

– *Efeito fotoelétrico.*

– *Emissão de campo.*

- O elétron escapa da barreira de potencial do sólido através de tunelamento.

– *Emissões secundárias.*



Fonte de Partículas

□ *Geração de prótons.*

– *Dispositivos de plasma de hidrogênio.*

- Ionização de gás → plasma
- Campo eletrostático → separação elétron / próton → feixe de prótons.
- Exemplo: duoplasmatron.

□ *Geração de íons pesados.*

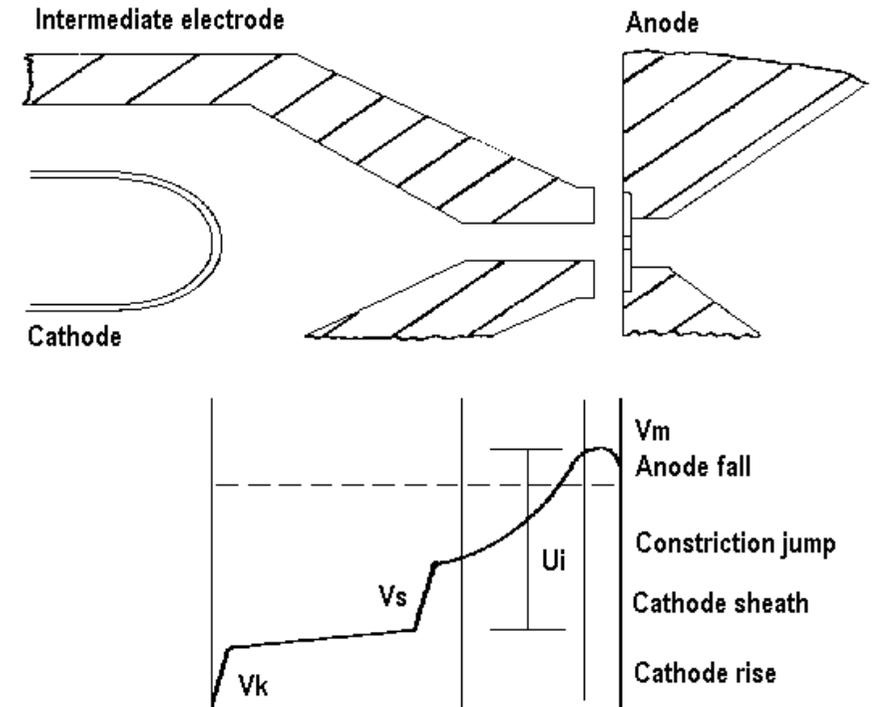
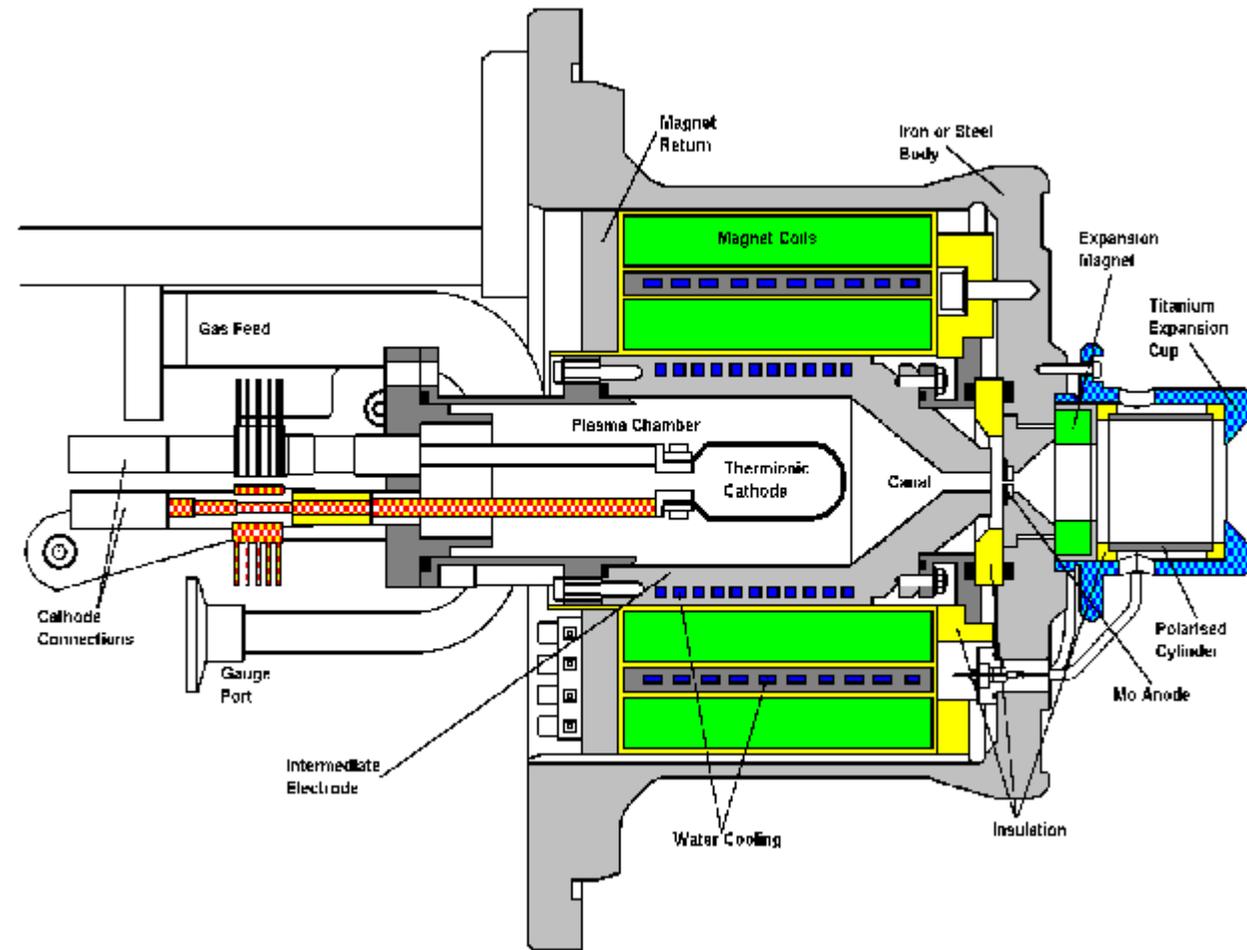
– *Dispositivos de plasma.*

- Fontes ECR (Electron Cyclotron Resonance).

– *Dispositivos de desorção.*

- Fontes SNICS (Source of Negative Ions by Cesium Sputtering).

Fonte Duoplasmatron



❑ Ilustração do duoplasmatron utilizado no Linac2, a fonte de prótons do LHC. Note a geometria e o uso de imãs para restringir a descarga próxima ao anodo.

❑ Potencial elétrico em um plasmatron (idealizado). Os elétrons se concentram próximos ao anodo, ionizam o hidrogênio através de colisões, e a tensão separa o elétron do próton.

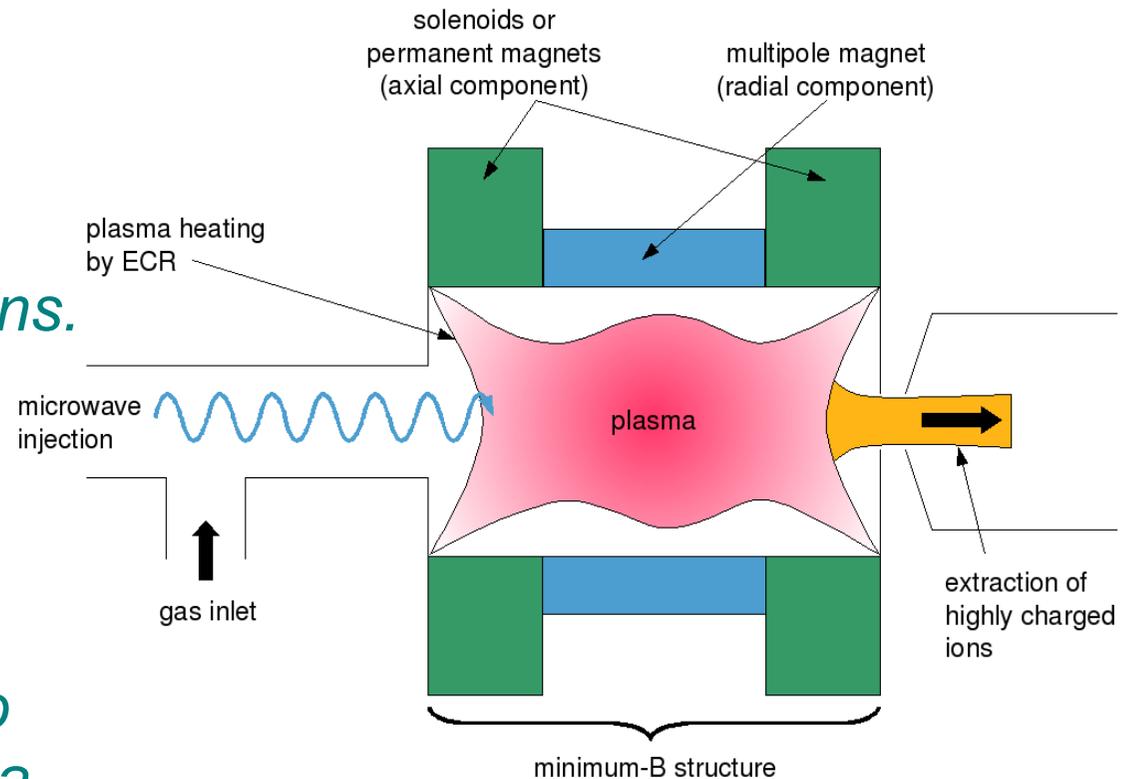
Fonte Duoplasmatron



- ❑ *Duoplasmatron utilizado no Linac2 (à direita).*
- ❑ *Favor não esquecer de encher a garrafa de hidrogênio (à esquerda) – como aconteceu em 2002.*

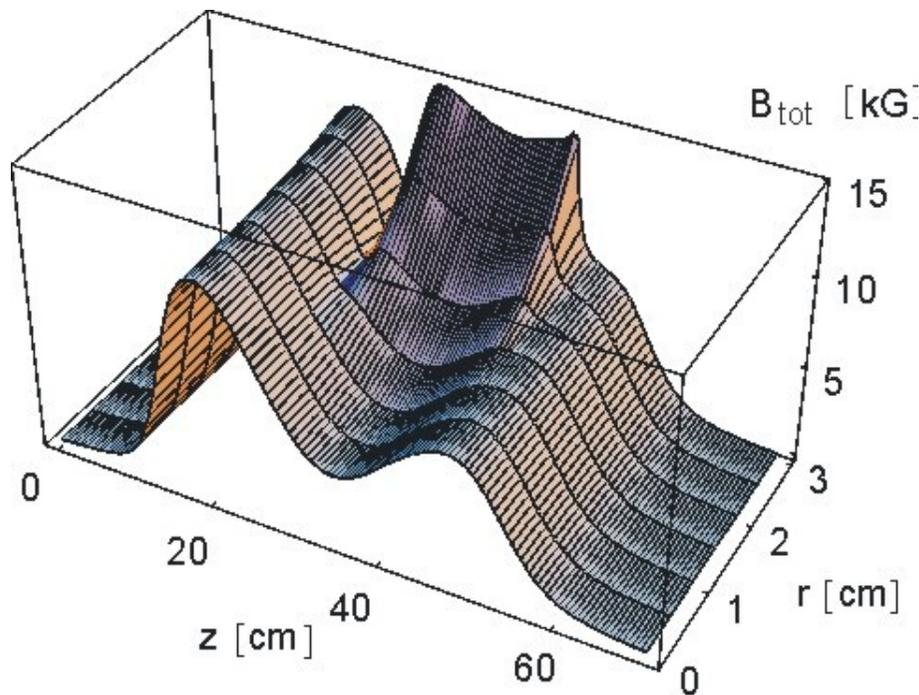
Fonte ECR

- ❑ *Campos magnéticos:*
 - Axial → movimento ciclotron.
 - Radial → armadilha de íons.
- ❑ *Injeção de microondas.*
 - Libera elétrons do gás.
 - Frequência = frequência ciclotron dos e- no campo → e- se mantém em órbita.
- ❑ *Colisões elétron-átomo.*
 - Formação de plasma.
- ❑ *Extração dos íons positivos*

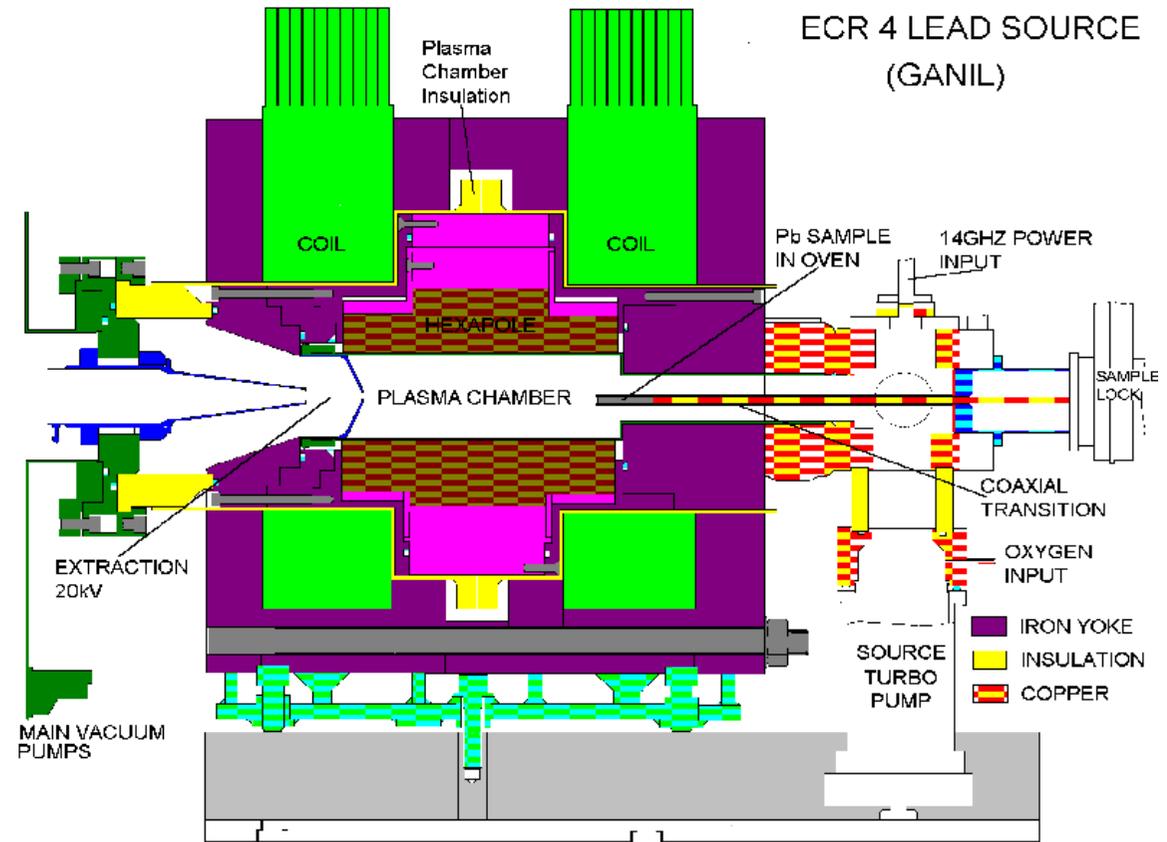


- ❑ *Esquema de funcionamento de uma fonte ECR. A chamada "estrutura de **B** mínimo" é a armadilha magnética que mantém os íons dentro da fonte.*

Fonte ECR

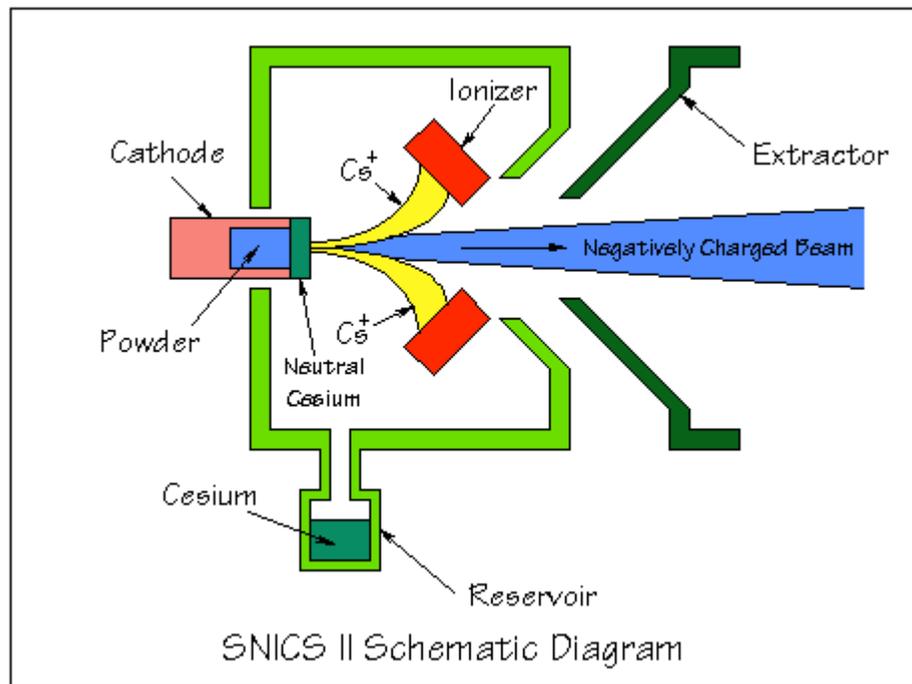


- ❑ *Simulação do campo magnético no interior da fonte ECR.*



- ❑ *Ilustração da fonte ECR utilizada no Linac3, o fonte de íons pesados do LHC para colisões Pb-Pb.*

Fonte SNICS



- ❑ *Esquema de funcionamento de uma fonte SNICS. Uma fonte deste tipo é utilizada no acelerador Pelletron da USP.*
- ❑ *Método Tandem – inverter a polaridade do íon após e acelerá-lo novamente com a mesma tensão.*
- ❑ *Feixe primário de íons positivos de Cs (césio).*
- ❑ *Alvo de material condensado no catodo + camada de Cs sobreposta.*
- ❑ *Íons de Cs golpeiam o alvo.*
 - *Átomos do alvo são ejetados.*
 - *Cs é pouco eletronegativo → perde elétrons para os átomos do alvo com facilidade.*
- ❑ *Resultado: feixe de íons negativos.*

Outros Componentes

❑ *Fonte de anti-partículas.*

– *Anti-prótons*

- Reações hadrônicas entre prótons de alta energia e alvos de metal pesado.

– *Pósitrons*

- Chuveiros eletromagnéticos + produção de pares.

❑ *Chopper: dispositivo para agrupamento das partículas do feixe em bunches.*

- *Deflexão do feixe para uma fenda através de campo magnético pulsado.*

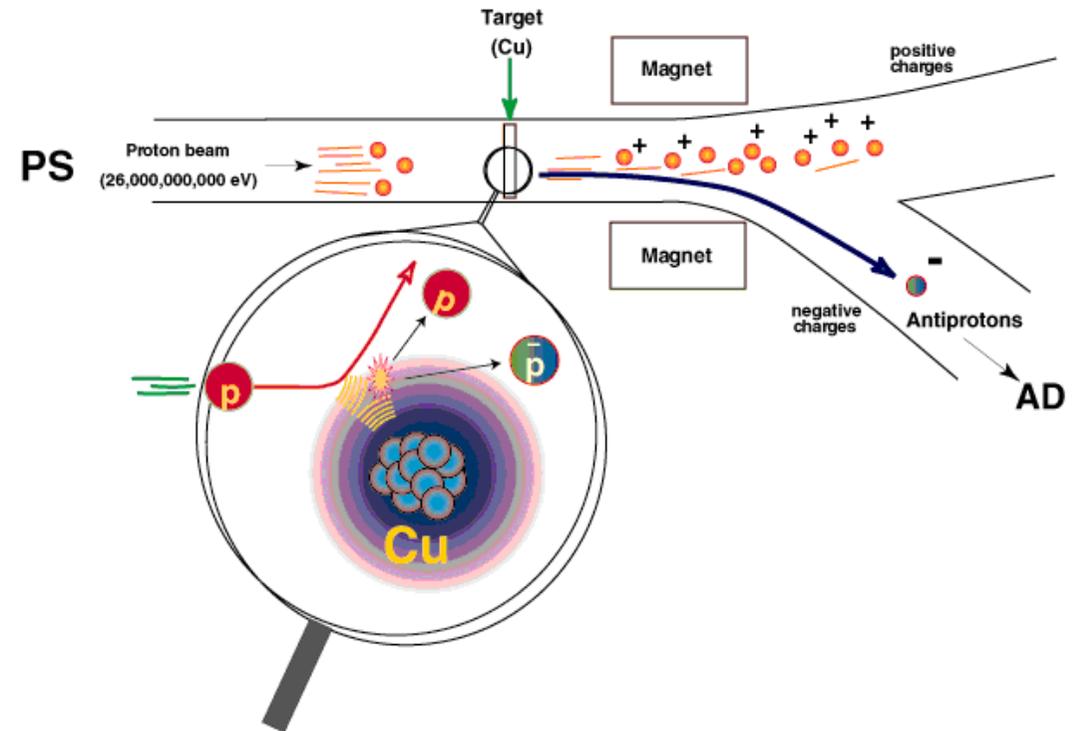
❑ *Anel de armazenamento: "acelerador" circular desenhado para manter partículas em órbitas estáveis durante horas.*

Fonte de Anti-Partículas



- ❑ Fonte de anti-prótons para o Tevatron, Fermilab.

Principle of Antiproton Production



© R. Landua

- ❑ Princípio de produção de anti-prótons no Proton Synchrotron (PS) do CERN.