

# Aceleradores

O objectivo dos aceleradores é o estudo da estrutura de núcleos e partículas. Na verdade, cedo se percebeu que projecteis com suficiente energia cinética poderiam cindir núcleos, permitindo o estudo dos seus constituintes.

Com os aceleradores passaram a planejar-se experiências, evitando-se a dependência de interações induzidas por raios cósmicos, muito energéticos embora com valores não controláveis, e de muito baixo fluxo.

Desde 1930, data de construção da primeira máquina, até aos nossos dias, as energias disponíveis cresceram da centena de KeV até alguns TeV, ou seja, um factor  $\sim 10^8$ .

Actualmente usam-se aceleradores dos mais variados tipos noutros ramos, como a Física do Estado Sólido e Física das Superfícies, Electrónica (channeling, implantação de iões, estrutura cristalina), indústria biomédica, agricultura, etc.

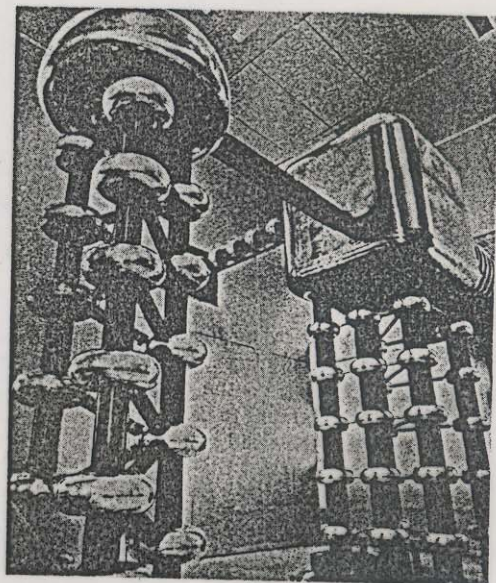
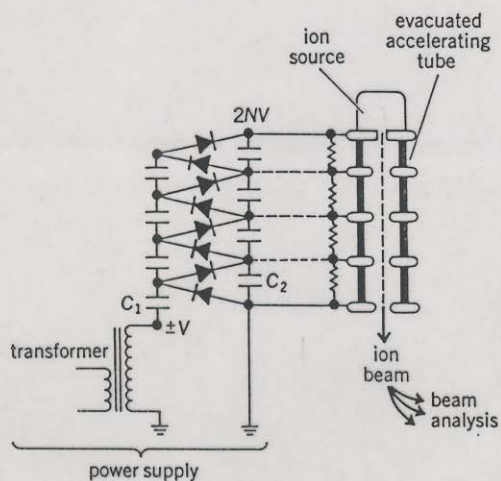


## Aceleradores electrostáticos

As partículas são aceleradas ao passarem por sucessivos eléctrodos alinhados que se encontram a potenciais fixos cada vez mais elevados, adquirindo em cada andar energias cinéticas tais que  $\Delta T = q \Delta V$ .

### ► Acelerador de Cockcroft - Walton

Usa o princípio da rectificação da corrente alternada. Um transformador transforma a tensão da rede numa muito mais elevada; segue-se o circuito de multiplicação: 2 séries de condensadores estão ligados por rectificadores de tensão. Na alternância negativa do ciclo, o condensador da 1ª série carrega-se e na fase positiva, este carrega o condensador vizinho da 2ª série. Assim, o transformador acaba por carregar todos os condensadores, pelo que a tensão máxima, no topo, é de  $2NV$  ( $N = \text{nº de condensadores de cada série}$ ). O seu valor não deve ultrapassar  $\sim 3MV$ , para evitar descargas.

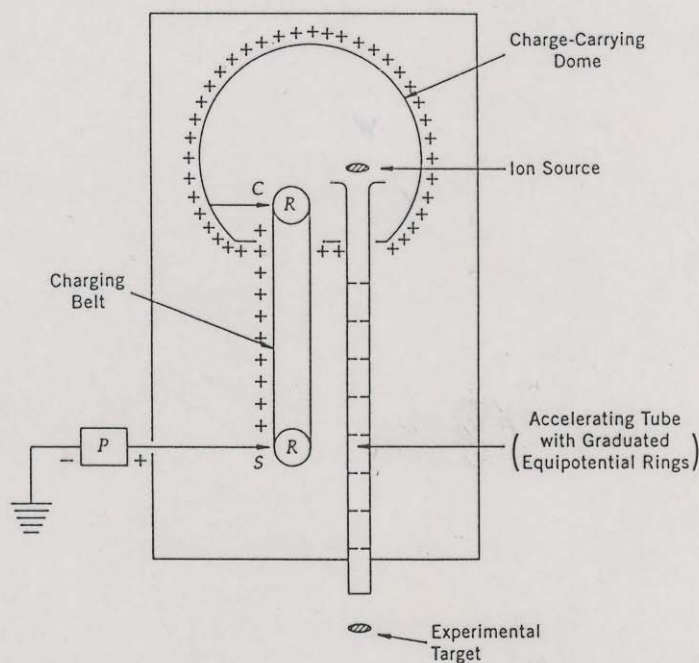




## ► Acelerador Van de Graaff

Usa o princípio de que as cargas se depositam à superfície dos corpos. As cargas são depositadas numa correia isolante e conduzidas para o interior de um condutor côncavo envolvendo o seu terminal, as cargas escoam-se deste por contacto e, ao serem armazenadas no condutor, aumentam o seu potencial.

Este acelerador trabalha com gás pressurizado (em geral  $\text{SF}_6$ , 15 atm) e o seu limite de tensão é de  $\sim 12 \text{ MV}$ , antes da disrupção do gás.



► Tanto o acelerador de Cockcroft-Walton como o acelerador de Van de Graaff são hoje produzidos comercialmente para aplicações. O primeiro é muitas vezes usado como estágio inicial de aceleração nos grandes aceleradores actuais.

# Aceleradores ressonantes

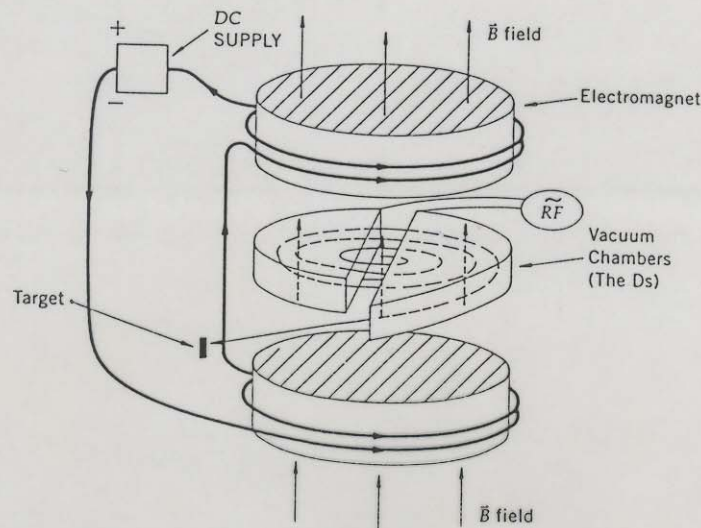
Baseiam-se em correntes alternadas de alta frequência ( $\sim \text{MHz}$ ), de período ajustado à progressão das partículas.

## ► Ciclotrão

O ciclotrão, ou acelerador cíclico (E. Lawrence, 1930) é formado por 2 câmaras metálicas em  $D$ , dispostas de modo a formarem um círculo, com uma abertura entre elas. É nessa abertura que as partículas sentem o campo eléctrico acelerador. Dentro dos  $D$  há blindagem eléctrica e as partículas seguem uma trajectória circular devido a um campo magnético uniforme.

Então, a frequência de ressonância do ciclotrão vale:

$$m \frac{v^2}{r} = q \frac{v B}{c} \Rightarrow \nu_R \equiv \frac{\omega_R}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \frac{v}{R} = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{q}{m} \right) \frac{B}{c}$$

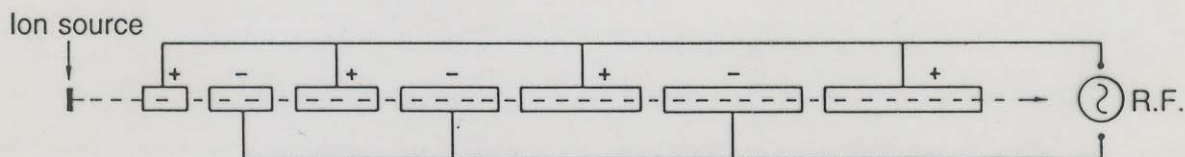




## ► Acelerador linear (LINAC)

formado por um conjunto de tubos metálicos (*tubos de deriva*, onde há ausência de campo eléctrico) sucessivamente ligados aos terminais alternados de um *oscilador de frequência*. À saída de cada tubo as partículas são *aceleradas* pela alternância positiva do campo eléctrico, sendo *protegidas* pelo tubo seguinte, na alternância negativa.

Devido ao *aumento de velocidade*, os tubos de deriva têm *comprimentos crescentes* para que à sua saída as partículas sintam sempre a fase positiva do campo.



## Aceleradores síncronos

À medida que as partículas aceleradas se tornam relativistas ( $v \lesssim c$ ), a sua equação de movimento passa a ser:

$$m \gamma \frac{d\vec{v}}{dt} = m \gamma \vec{v} \times \vec{\omega} = \frac{q}{c} \vec{v} \times \vec{B}.$$

E, com  $|\vec{v}| \approx \text{const.} = c$ , vem:

$$\omega = \frac{q}{m} \frac{B}{\gamma c} \Rightarrow \nu = \frac{1}{2\pi} \frac{q}{m} \sqrt{1 - v^2/c^2} \frac{B}{c}.$$

Portanto, num ciclo de aceleração e de modo a não se perder a sincronização, uma vez que  $\nu$  aumenta, há que diminuir  $\nu$  ou aumentar  $B$ .

► Sincrociclotrões são as máquinas em que  $B$  é mantido constante e se faz variar  $\nu$ . (McMillan, Veksler, 1946)

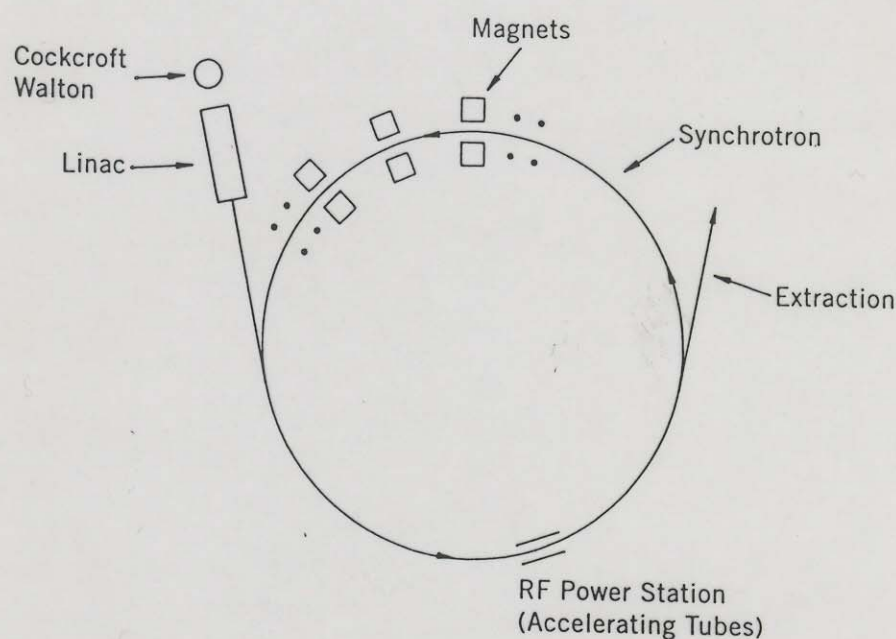
► Sincrotrões são aquelas em que  $B$  varia, independentemente de  $\nu$  variar ou não. Nos sincrotrões de prótons, tanto  $B$  como  $\nu$  variam. Nos sincrotrões de electrões só  $B$  varia, pois  $v \approx c$  praticamente desde o início do processo de aceleração. (L. Thomas, concepção, 1938; realização p/ diversos, 1950)

Uma órbita estável de raio  $R$  (considerando  $v \approx c$  e  $p = m \gamma v \approx m \gamma c$ ) vale:

$$\omega = \frac{v}{R} \approx \frac{c}{R} = \frac{qB}{p} \Rightarrow R = \frac{pc}{qB} \quad \left( \text{ou: } R = \frac{p [\text{GeV}]}{0.3 B [\text{T}]} \right)$$



Sincrotrões que aceleram na ordem dos  $\text{GeV}$  têm magnetes colocados em anel para imporem trajetórias circulares. As partículas, com energias de  $\text{MeV}$  são injectadas e aceleradas por cavidades de radio-frequência ( $\text{RF}$ ) dispostas entre os magnetes. As fases dos campos aceleradores são coordenadas. O campo magnético aumenta de modo a que, à medida que o momento das partículas aumenta, o seu raio se mantenha fixo.



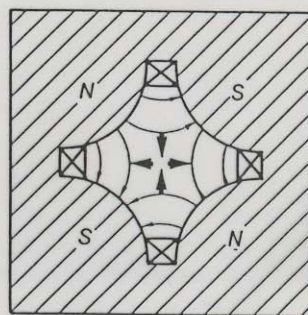
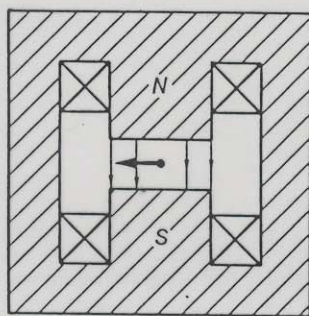
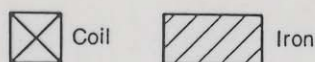
## Estabilidade de trajetórias

Nos aceleradores cíclicos as partículas fazem  $\sim 10^5$  revoluções até atingirem a energia final, pelo que podem facilmente divergir da órbita estável e perder-se.

Devido à divergência não nula quando da injeção do feixe, e de pequenas assimetrias nos campos e imperfeitos alinhamentos de magnetes, as partículas não seguem órbitas circulares ideais.

Por isso, os magnetes focalizadores são de 2 tipos:

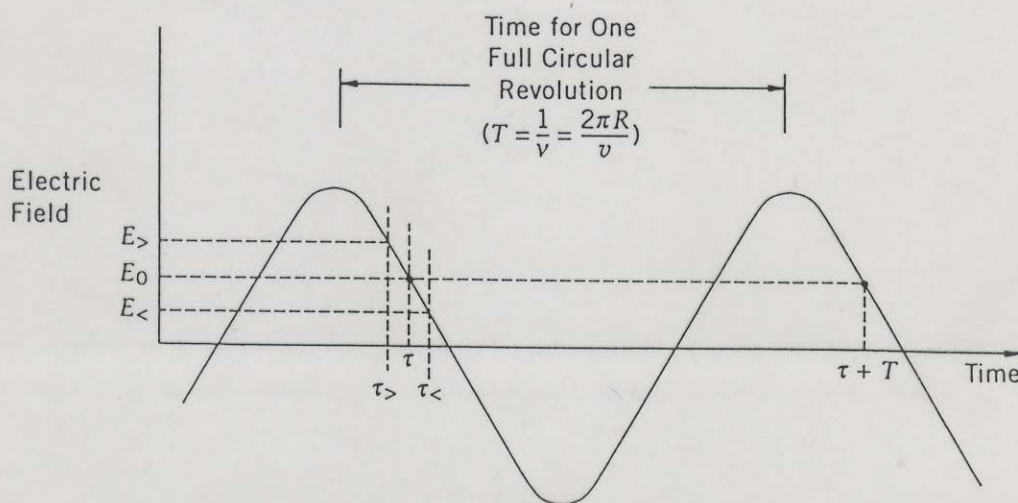
- dipolos: magnetes de campo uniforme, que mantêm as partículas nas trajetórias circulares
- quadrupolos: focam num plano e desfocam no plano perpendicular, pelo que se usam em grupos de 2  $\Rightarrow$  a divergência duma partícula é sempre corrigida.



Como consequência, as partículas adquirem um movimento oscilatório no plano transversal. São as oscilações betatrão, de comprimento de onda controlado pela distância focal dos quadrupolos.



Uma partícula pode também atrasar-se ou adiantar-se ligeiramente em relação à fase ideal (estabilidade de fase). Mas essas situações são corrigidas dado que se, por exemplo, ela se adianta sente um campo mais elevado pelo que passará a uma órbita de maior raio, o que a fará atrasar-se na cavidade RF seguinte, compensando-se assim o seu avanço. É a chamada oscilação sincrotrão.



$E_> \Rightarrow p_{C_>} \Rightarrow R_> \Rightarrow \text{atraso} \Rightarrow \text{compensação}$   
(RF)

$$\left[ R = \frac{pc}{qB} \quad (B = c \cdot t_e) \right]$$

## Colisionadores

Os aceleradores lineares ou cíclicos fornecem, em geral, feixes de prótons que chocam com alvos fixos.

A energia no c.m. vale:

$$E_{cm} = \sqrt{2M^2 + 2ME} \approx \sqrt{2ME} \quad (M \rightarrow \text{massa nucleão})$$

Modernamente desenvolveram-se máquinas que usam 2 feixes circulando em sentidos contrários e que podem chocar frontalmente:

$$E_{cm} = \sqrt{2(E_1 E_2 + p_1 p_2) + 2M^2} \approx \sqrt{4E_1 E_2}$$

Como nestas máquinas o c.m. está em repouso no laboratório,  $E_1 = E_2$ , pelo que  $E_{cm} = 2E$ .

Quer dizer:

- Num colisionador  $E_{cm} \propto E_{\text{incidente}}$
- Num acelerador normal  $E_{cm} \propto \sqrt{E_{\text{incidente}}}$ ,

pelo que a par de máquinas de alvo fixo de 450 GeV  $\Rightarrow E_{cm} \approx 30$  GeV, já existem colisionadores de 2 TeV.

Os colisionadores têm, no entanto, limitações:

- Só partículas estáveis podem ser usadas: iões, prótons, electrões, e suas antipartículas.
- A taxa de reacção é várias ordens de grandeza menor que em alvo fixo, pois a luminosidade  $\mathcal{L}$  é baixa:

$$R = \sigma \cdot \mathcal{L} = \sigma \cdot f \cdot n \cdot \frac{N_1 N_2}{A},$$



$\sigma$  : secção eficaz

$f$  : frequência de revolução

$n$  : nº de pacotes de cada feixe em circulação

$N_i$  : nº partículas do pacote  $i$

$A$  : área transversa dos feixes

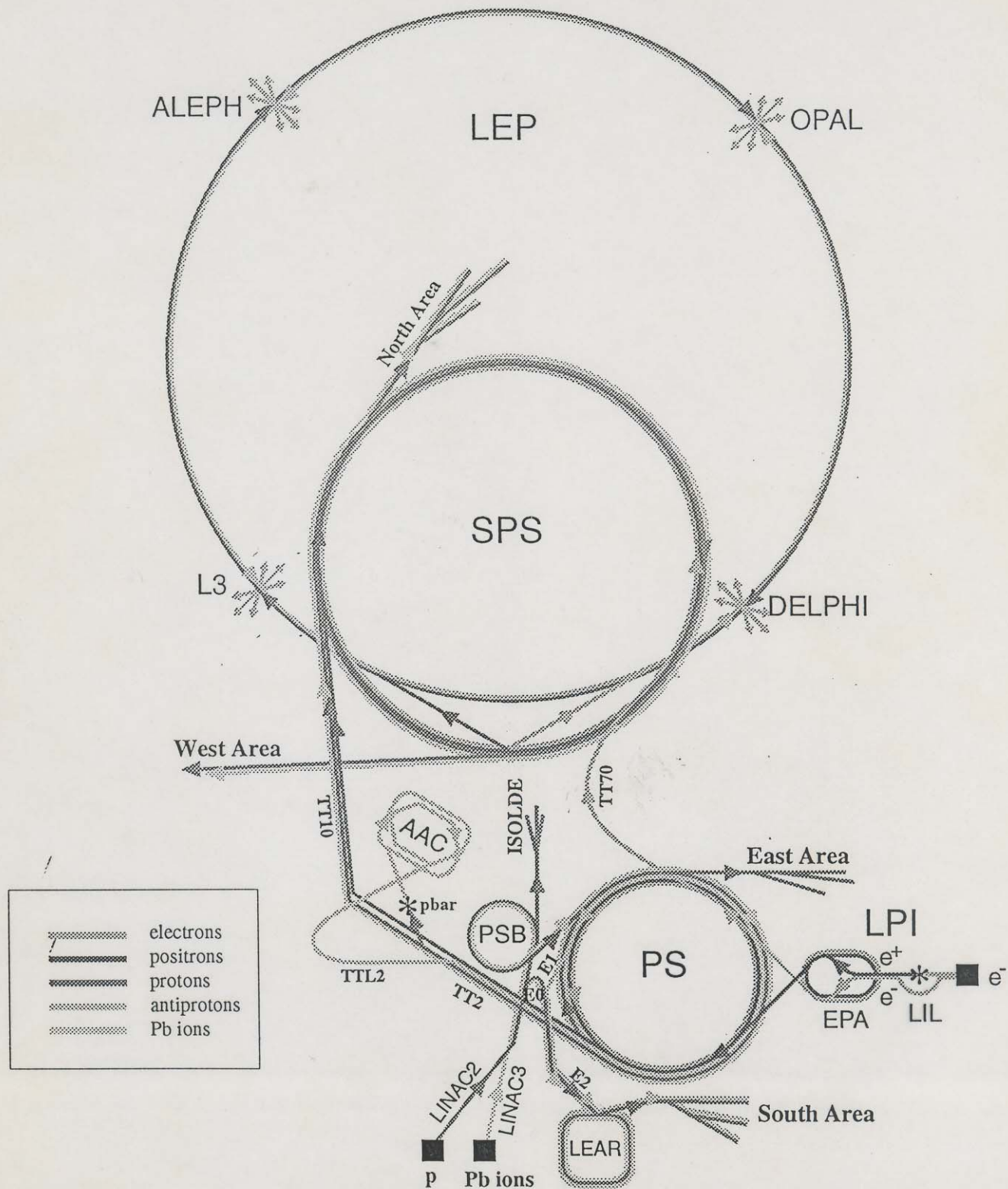
► Os antiprotões, extraídos de colisões primárias, são produzidos aos pares  $\bar{p}p$ , em pouca quantidade e com grande dispersão (de momentos e angular). Um colisionador  $\bar{p}p$ , como o que esteve na base da descoberta dos bósons  $W^\pm$  e  $Z^0$  não seria possível sem uma concentração do feixe de antiprotões, de modo a maximizar a sua luminosidade. A técnica usada é o arrefecimento estocástico: um sensor mede a divergência do feixe num ponto fora da órbita ideal e transmite-a a uma cavidade RF situada mais à frente, que usa a informação de modo a corrigir a trajectória.

► Colisionador de electrões:

Devido à radiação síncrotrão, que é máxima para os electrões e cresce com  $(m_e/m_p)^5$ , só atinge os  $\sim 200 \text{ GeV}$  (LEP).

## Sistemas de aceleradores

No CERN, os aceleradores de menor energia servem de injectores às máquinas seguintes:



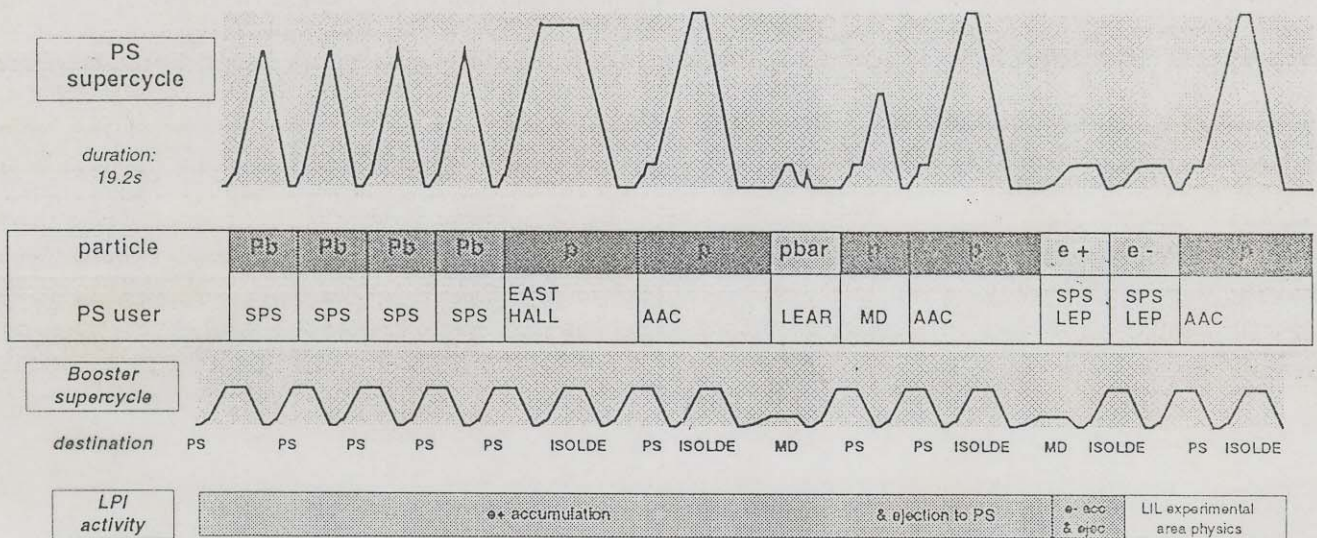
LEP: Large Electron Positron collider  
SPS: Super Proton Synchrotron  
AAC: Antiproton Accumulator Complex  
ISOLDE: Isotope Separator OnLine DEvice  
PSB: Proton Synchrotron Booster

LPI: Lep Pre-Injector  
EPA: Electron Positron Accumulator  
LIL: Lep Injector Linac  
LINAC: LINear ACcelerator  
LEAR: Low Energy Antiproton Ring



## Exemplo de Superciclo no CERN

o PS, sincrotrão de prótons com aceleração máxima a 28 GeV e o seu booster (PSB), aceleram pacotes de diferentes partículas em simultâneo, para experiências independentes, no mesmo Superciclo de 19.2 s.

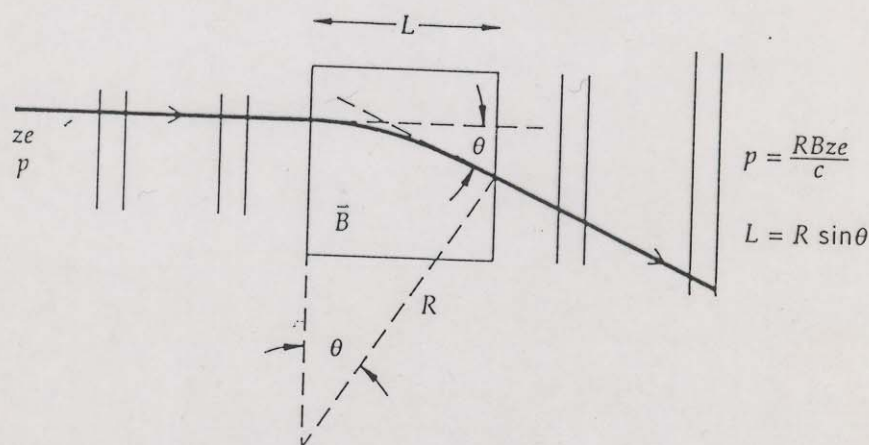


PS COMPLEX - Example of supercycle used in Fall 95



## Telescópios, magnete e extracção de $p$

Conjuntos de MWPCs, dispostos antes e depois do magnete deflector numa experiência (telescópios anterior e posterior) permitem determinar o ângulo  $\theta$  de deflexão duma partícula; tendo ainda em conta os valores de  $L$  (comprimento do íman deflector) e do campo  $B$ , podemos deduzir o momento  $p$ :



$p$  pode ser estimado em tempo real (online) de modo a usar-se a informação para se realizar o trigger, selecção electrónica do evento.

Offline, um programa de reconstrução faz ajustes aos troços rectilíneos em cada telescópio e extrapola-os segmento a segmento (spline fit) usando uma carta de campo detalhada ( $B_x, B_y, B_z$ ) em cada ponto ( $x, y, z$ ), de modo a calcular  $p$  com rigor. Após um último ajuste global do traço, aplica-se-lhe um critério de validação.