

# Como se fazem e para que servem os aceleradores de partículas?

RUI ALVES PIRES e RUI DILÃO

(Departamento de Física do Instituto Superior Técnico)

## 1. Introdução

Os aceleradores são instrumentos experimentais desenvolvidos com a finalidade de acumular e acelerar controladamente feixes de partículas carregadas. Estes feixes podem então ser utilizados em experiências de física das altas energias para o estudo da estrutura interna do núcleo atómico e das interacções entre partículas elementares, ou como fonte de radiação de sincrotrão.

Nestas máquinas, introduzem-se partículas carregadas, electrões ou prótons, produzidas externamente por uma fonte, sendo depois aceleradas até atingirem grandes velocidades, nalguns casos muito próximas da velocidade da luz. Alcançada a velocidade máxima para a qual o acelerador foi construído pode-se, por exemplo, forçar a colisão com um alvo ou favorecer a colisão frontal de partícula contra partícula.

Para além do interesse em estudar a estrutura interna da matéria, cedo se percebeu que os aceleradores poderiam ser usados para a produção de feixes muito colimados de radiação visível, X e  $\gamma$  com frequências na banda dos  $10^{16}$  a  $10^{19}$  Hertz. Recentemente, entraram em funcionamento pequenos aceleradores para a produção de feixes muito colimados de luz (radiação de sincrotrão) com fins industriais e hospitalares.

Os primeiros aceleradores foram construídos por volta de 1928 por Van der Graaf, Cockroft e Walton e baseavam-se num princípio de aceleração electrostática. Eram máquinas para produzir feixes de partículas de baixa energia e que serviram para a produção artificial de reacções nucleares, como por exemplo, a cisão do átomo de Lítio-7 em

duas partículas  $\alpha$  devido à colisão de um próton ( $p + Li^7 \rightarrow \alpha + \alpha + \text{Energia Cinética de } 17 \text{ MeV}$ ). Estes aceleradores, em funcionamento em alguns laboratórios, são utilizados essencialmente como máquinas de pré-aceleração associadas a aceleradores maiores e mais eficientes.

Depois do aparecimento dos primeiros aceleradores electrostáticos foram surgindo novas máquinas, baseadas em princípios físicos bem conhecidos e correspondendo a avanços tecnológicos importantes. Foi a geração dos ciclotrões e dos betatrões. Com estas máquinas foram-se desenvolvendo as tecnologias dos grandes electroímans e das cavidades de radiofrequência; começou o desenvolvimento de sistemas de ultra-vácuo e o aperfeiçoamento de sistemas de medição de grande precisão (quadro 1).

Famílias de Aceleradores de Partículas

Aceleradores lineares (1928)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aceleradores electrostáticos de Van der Graaf e Cockroft-Walton.</li> <li>Aceleradores ressonantes de Wideroe e Lawrence-Stoan.</li> </ul>	Baixas energias
Ciclotrão (1931) (Lawrence)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aceleração por campo eléctrico variável.</li> <li>Partículas guiadas por campos magnéticos.</li> </ul>	Energias intermédias
Betrão (1940) (Kerst)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Partículas guiadas e aceleradas por campos magnéticos variáveis.</li> </ul>	Energias intermédias
Sincrotrão (1944 ...) (Veksler e McMillan)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aceleração por campos eléctricos variáveis; cavidades de radiofrequência.</li> <li>Partículas guiadas por campos magnéticos dipolares.</li> <li>Focagem forte: pares de quadrupolos e de sextupolos de gradiente alternado (1954).</li> </ul>	Altas energias
Grandes Aceleradores Lineares (1987 ...)		
Aceleradores Circulares Gigantes (1989 ...)		
Máquinas de Luz Sincrotrão (anos 80)		

Quadro 1

Nos finais da década de 50 apareceram os primeiros grandes aceleradores, os sincrotrões, capazes de acelerar partículas a velocidades muito próximas da velocidade da luz. No quadro 2 apresenta-se uma lista de grandes aceleradores sincrotrões com alguns dos parâmetros característicos mais relevantes.

Grandes Sincrotrões

Máquina	Partículas	Energia (GeV)	Luminosidade* (cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	Círcumf. (km)	Ano de funcion.	País Laboratório
CERN PS	p, p̄, e <sup>+</sup> , e <sup>-</sup> , α, D, O, S	26 (p)	---	0,626	1959	Europa CERN
AGS	p	33	---	0,807	1960	EUA Brookhaven
U-10	p	9,3	---	0,251	1961	URSS Moscovo
IHEP PS	p	70	---	1,48	1967	URSS Serpukhov
SPEAR**	e <sup>+</sup> e <sup>-</sup>	4 x 4 a 7,6 x 7,6	10 <sup>28</sup> -10 <sup>31</sup>	0,234	1972	EUA Stanford
ISR	pp, p̄p, ep, eα, αD, pD	11 x 11 a 31 x 31	10 <sup>27</sup>	0,960	1973-83	Europa CERN
DORIS	e <sup>+</sup> e <sup>-</sup>	4x4	10 <sup>27</sup>	2,304	1974	RFA Hamburgo
PETRA	e <sup>+</sup> e <sup>-</sup>	19 x 19	10 <sup>28</sup>	2,3	1978	RFA Hamburgo
SATURNE II	H <sup>+</sup> , D <sup>+</sup> , He <sup>+</sup>	2,55	---	0,105	1978	França Saclay
SPS***	p̄p	270 x 270 (450 x 450)	10 <sup>28</sup>	6,9	1981 (1985)	Europa CERN
TEVATRON	p̄p	900 x 900	10 <sup>28</sup>	6,3	1985	EUA Fermilab
TRISTAN	e <sup>+</sup> e <sup>-</sup>	32 x 32	8 x 10 <sup>31</sup>		1986	Japão KEK
SLC	e <sup>+</sup> e <sup>-</sup>	50 x 50	6 x 10 <sup>30</sup>	(Linear) 3,226	1987	EUA Stanford
LEP	e <sup>+</sup> e <sup>-</sup>	50 x 50	10 <sup>31</sup>	26,7	1989	Europa CERN
HERA	e <sup>+</sup> p	30 x 820 (314 c.m.)	10 <sup>31</sup>	6,34	1991	RFA Hamburgo
UNK	p	400	---			Em Projecto URSS
LHC	pp	7.700 x 7.700	10 <sup>34</sup>	26,7		Em Projecto Europa CERN
SSC	pp, p̄p	40.000 x 40.000	10 <sup>32</sup>	84		Em Projecto EUA Texas

\* O número de interações por segundo numa colisão frontal de dois feixes de partículas é proporcional à luminosidade. Por outro lado, a luminosidade é proporcional ao produto dos números de partículas em cada feixe, a dividir pela dimensão plana dos feixes.

\*\* Tingt (em simultâneo com Richter, BNL) recebe o Nobel pela descoberta do J/ψ.

\*\*\* Rubia e van der Meer recebem o Nobel pela descoberta do Z<sup>0</sup> e do W.

Quadro 2

A construção dos aceleradores sincrotrões é baseada em princípios físicos muito simples que se podem resumir às funções de confinar, acelerar e focar os feixes de partículas. Nos parágrafos seguintes vamos analisar brevemente os vários princípios físicos de uma máquina deste tipo, até chegarmos aos planos de um pequeno acelerador. Vamos começar pela des-

crição da relação entre massa e energia, descoberta por Einstein, indispensável na obtenção das dimensões das grandes máquinas.

Os dois últimos parágrafos destas notas são dedicados ao mecanismo de produção de feixes de radiação de sincrotrão e às suas aplicações tecnológicas.

## 2. Como chegar próximo da velocidade da luz

A teoria da relatividade restrita de Einstein é a consequência do facto experimental de que a velocidade da luz no vazio não depende do estado de movimento da fonte emissora. Assim, é possível mostrar que a velocidade da luz é a velocidade limite de todas as velocidades observadas no universo. Nos aceleradores, a velocidade das partículas é muito próxima da velocidade da luz no vazio, sendo portanto, a física dos aceleradores, uma teoria relativista.

Uma das consequências da teoria da relatividade restrita é de que a inércia de uma partícula depende do seu conteúdo energético. Isto é expresso pela fórmula de Einstein que relaciona a massa de uma partícula com a sua energia de repouso através da fórmula,

$$E_{\text{repouso}} = mc^2 \quad (1)$$

em que  $c$  é a velocidade da luz no vazio ( $c = 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ ). É possível mostrar ainda que a energia total de uma partícula livre é

$$E_T^2 = \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} m^2 c^2 v^2 + m^2 c^4 \quad (2)$$

e portanto, para alcançar a velocidade da luz, uma partícula teria que adquirir uma energia infinita.

Da fórmula (1) para a energia de repouso de uma partícula conclui-se que massa e energia diferem por um factor multiplicativo  $- c^2 -$  cujo valor numérico não depende do referencial de observação. Assim, é equivalente

dizer que a massa de uma partícula, por exemplo do electrão, é de

$$511 \text{ keV}/c^2 \text{ (kilo electrão Volt}/c^2)$$

ou que a sua energia de repouso é de

$$511 \text{ keV}$$

em que 1 electrão Volt é a energia adquirida por um electrão ao atravessar a diferença de potencial de 1 Volt. (\*).

As unidades de energia e massa convertem-se facilmente através da relação  $1 \text{ eV} = 1,60219 \times 10^{-19} \text{ Joule}$ . Assim,

$$\frac{1 \text{ eV}}{c^2} = \frac{1,60219 \times 10^{-19} \text{ Joule}}{c^2 \cdot 9 \times 10^{16} \text{ m}^2\text{s}^{-2}} =$$

$$= 1,7802 \times 10^{-36} \text{ kg}$$

ou seja,

$$\text{electrão: } 511 \text{ keV}/c^2 = 9,097 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$\text{protão: } 938 \text{ MeV}/c^2 = 1,670 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

Para velocidades muito próximas da velocidade da luz, a energia total  $E_T$  é muito maior que a energia de repouso  $E_{\text{repouso}} = mc^2$  e portanto, desprezando o segundo termo do segundo membro da expressão (2), tem-se que,

$$E_T \approx \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} mvc = pc$$

em que  $p$  é o momento linear da partícula. Assim, a muito altas energias, o valor numérico do momento linear a dividir pela velocidade da luz é igual ao valor numérico da energia.

Vejamos agora alguns exemplos do cálculo de energias e velocidades. Um electrão com a energia total de 511 keV tem, por (2), veloci-

dade nula. Para um electrão com a energia de 1000 keV = 1 MeV tem-se

$$(1000 [\text{keV}])^2 = (511 [\text{keV}])^2 \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \frac{v^2}{c^2} +$$

$$+ (511 [\text{keV}])^2$$

e a sua velocidade é de

$$v = 0,859 c = 2,577 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$$

ou seja, o electrão viaja a 86% da velocidade da luz. Por um cálculo análogo, um electrão com a energia total de 10 MeV viaja à velocidade de  $v = 0,9987c$ .

Podemos agora analisar um pouco melhor os números do quadro 2 que caracterizam os aceleradores em energia. Fixemo-nos, por exemplo, no LEP. Esta máquina acelera electrões até à energia de  $50 \text{ GeV} = 50 \times 1000 \text{ MeV} = 5 \times 10^7 \text{ keV}$ . Ou seja, fazendo as contas, acelera electrões até atingirem a velocidade  $v = 0,999999998c$ , que é muito próximo da velocidade da luz no vazio. Para o SPS, que acelera protões até atingirem a energia de  $450 \text{ GeV}$ , a velocidade final das partículas é de  $v = 0,9999978c$ . A máquina de protões CERN PS acelera até se atingir a velocidade  $v = 0,9993c$ , a que corresponde a energia de  $26 \text{ GeV}$ .

Destes números conclui-se que, quando as velocidades são próximas da velocidade da luz, é muito difícil acelerar uma partícula carregada e com massa. No caso dos aceleradores de protões SPS e CERN PS, um aumento de energia de 1630% corresponde a um aumento na velocidade de apenas 0,07%. Assim, quanto mais nos aproximamos da velocidade da luz, mais difícil é acelerar uma partícula.

A necessidade experimental de atingir velocidades muito, muito próximas da velocidade da luz foi suscitada pela análise da

(\*) Usam-se as abreviaturas  $k$ ,  $M$  e  $G$  para as palavras kilo, mega e giga, respectivamente.

estrutura interna de algumas partículas, pois só assim se torna possível *forçar* nas colisões, interações a distâncias muito pequenas e durante intervalos de tempo grandes. É assim necessário chegar tão próximo quanto possível da velocidade máxima observada no Universo — a velocidade da luz.

Nos aceleradores de partículas, está-se mais uma vez a verificar experimentalmente os princípios da teoria da relatividade restrita que podem parecer pouco naturais quando comparados com a observação quotidiana, onde as velocidades com que lidamos são muito inferiores à da luz.

### 3. Como se faz um acelerador

Os princípios físicos para a construção dos aceleradores do tipo sincrotrão são muito simples e têm a finalidade de confinar, acelerar e focar os feixes de partículas. Nos parágrafos seguintes vamos descrever as três fases da construção de um acelerador do tipo sincrotrão.

#### 3.1. Confinamento

Uma partícula carregada de carga  $q$  sob a acção de um campo magnético constante tem uma trajectória circular inscrita no plano perpendicular às linhas de campo, figura 1. O raio da trajectória é proporcional à energia e inversamente proporcional à intensidade do campo magnético:

$$r [m] = \frac{mv}{qB} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} [SI] = \frac{E [GeV]}{B [Tesla]} \quad (3)$$

( $r$  = raio de ciclotrão)

em que  $E$  é a energia total da partícula e  $B$  é a intensidade do fluxo do campo magnético de confinamento. (Os parêntesis rectos na fórmula (3) indicam o sistema de unidades em que os cálculos são efectuados e a abreviatura SI

significa que a expressão é calculada no sistema internacional de unidades).

Para confinar uma partícula carregada numa certa região do espaço basta mantê-la sob a acção de um campo magnético constante em que o raio da trajectória circular da partícula é dado pela expressão (3) — raio de ciclotrão. Este campo de confinamento pode ser obtido entre os polos paralelos de um electroímã (dipolo).

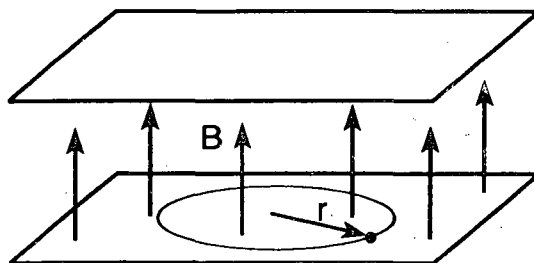


Figura 1 — Trajectória circular de uma partícula carregada sob a acção de um campo magnético de fluxo constante  $B$ . A trajectória circular situa-se no plano perpendicular às linhas de força do campo e o raio da órbita ou raio de ciclotrão é dado pela fórmula (3) do texto.

Aumentando simultaneamente a energia cinética das partículas e a intensidade do fluxo magnético  $B$ , pode-se manter constante o raio de circulação  $r$ . Assim, é possível obter, em regiões limitadas do espaço, partículas com velocidades arbitrariamente próximas da velocidade da luz, enquanto for possível aumentar simultaneamente a energia cinética  $E$  e o campo magnético  $B$ .

Nos aceleradores sincrotrões, o electroímã — dipolo — que produz o campo magnético de confinamento é constituído por vários electroímãs mais pequenos em forma de semi-coroa circular que, justapostos, formam uma coroa circular fechada de raio  $r$ . Na figura 2a) está representado um electroímã em forma de coroa circular, e que produz um campo magnético vertical de fluxo constante. Neste exemplo, o grande electroímã de raio  $r$  é constituído por seis pequenos electroímãs de comprimentos iguais. Como é necessário intro-

duzir equipamento ao longo da trajectória circular das partículas, por exemplo, para as acelerar, deslocam-se radialmente os electroímans para uma distância  $R$ , figura 2b). À distância  $R > r$  os electroímans são ligados por tubos ocos — câmaras de vácuo. No interior dos pequenos electroímans as partículas têm uma trajectória curvilínea inscrita num arco de circunferência de raio igual ao raio de ciclotrão  $r$ . Nas secções rectas a trajectória das partículas é rectilínea.

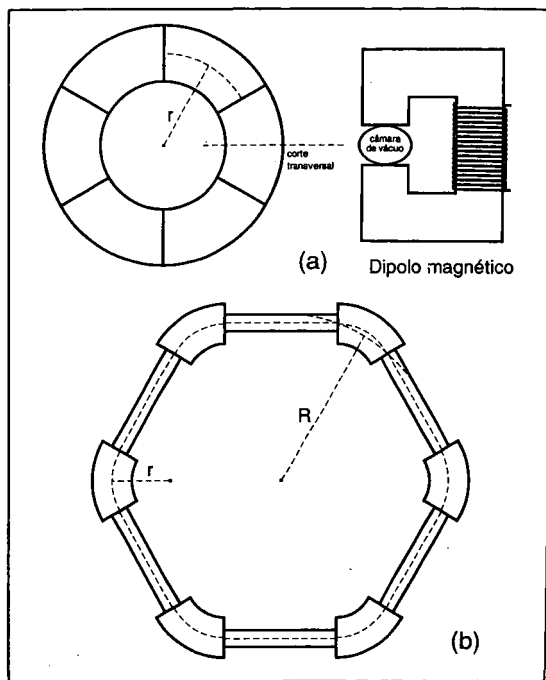


Figura 2 — (a) Electroímã em forma de coroa circular e de raio de curvatura igual ao raio de ciclotrão  $r$ . As partículas carregadas são confinadas pelo campo magnético produzido entre os pólos do electroímã.

(b) O electroímã em forma de coroa circular foi seleccionado em seis electroímãs mais pequenos que são afastados radialmente para uma distância média  $R$ . Os pequenos electroímãs são ligados por tubos ocos — câmaras de vácuo — por onde circulam as partículas ao longo da órbita de referência, indicada a tracejado na figura.

O raio médio de um acelerador ( $R$ ) é agora bastante maior que o raio de ciclotrão ( $r$ ) pois é necessário afastar os electroímãs mais pequenos para a introdução de outro equipamento, figura 2. Por exemplo, o raio

médio do SPS é de  $1100\text{ m}$  enquanto que o seu raio de ciclotrão é de  $225\text{ m}$ , para campos magnéticos nos dipolos de  $2\text{ Tesla}$  e protões com a energia de  $450\text{ GeV}$ . No acelerador HERA, em que se utilizam magnetos supercondutores, o campo dos dipolos atinge os  $4,7\text{ Tesla}$  e, para aproximadamente a mesma circunferência que o SPS, atinge-se o dobro da energia.

A estrutura de base de um acelerador sincrotrão é a indicada na figura 2b), em que as secções rectas são usadas para a introdução de outro equipamento como sejam bombas de vácuo, estruturas de aceleração (cavidades de radiofrequência), magnetos de focagem, detectores, etc..

Nos grandes aceleradores o número de magnetos que justapostos formam uma coroa circular pode ser muito grande. O SPS tem  $744$  magnetos dipolares, cada um com  $6,26\text{ metro}$  de comprimento, correspondendo a um ângulo de deflexão de  $0,48\text{ grau}$  por magneto. No LHC (em projecto), utilizam-se  $1760$  dipolos magnéticos supercondutores com  $9,9\text{ metro}$  de comprimento, o que corresponde a um ângulo de deflexão de aproximadamente  $0,2\text{ grau}$  por magneto. Têm-se assim, no LHC,  $17,5\text{ quilómetros}$  de dipolos magnéticos e  $10\text{ quilómetros}$  de secções rectas.

### 3.2. Aceleração

Uma partícula ao atravessar uma região em que se estabelece um campo eléctrico uniforme é acelerada proporcionalmente à intensidade do campo e no sentido das suas linhas de força.

Um campo eléctrico uniforme pode ser gerado usando um condensador. Aplicando uma diferença de potencial entre duas placas paralelas de um material condutor gera-se um campo eléctrico na direcção perpendicular às placas, figura 3a). O processo mais simples de acelerar uma partícula é então forçá-la a atravessar

o condensador no sentido perpendicular às placas. Ora isto consegue-se facilmente fazendo dois pequenos orifícios na região central das duas placas, obtendo-se assim uma cavidade de radiofrequência, figura 3b).

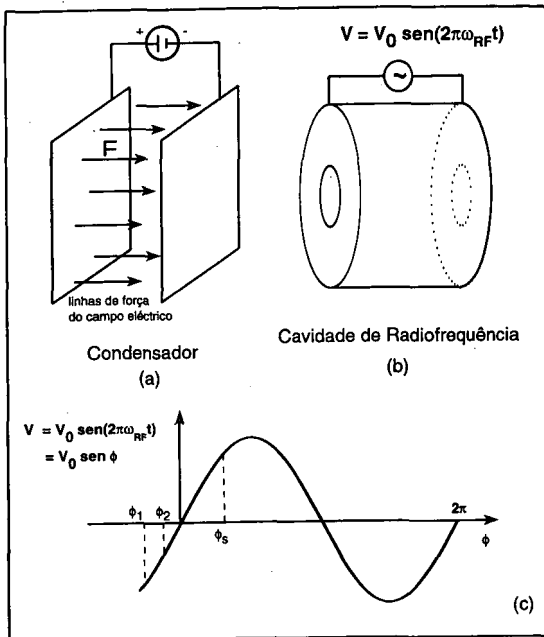


Figura 3 — (a) Campo eléctrico entre as placas de um condensador.

(b) Cavidade de radiofrequência obtida através da abertura de orifícios nas placas de um condensador. Na região central da cavidade o campo eléctrico é estacionário e perpendicular aos electrodos.

(c) Variação da tensão aos terminais da cavidade de radiofrequência em função da fase  $\phi = 2\pi\omega_{RF}t$ . Para haver aceleração efectiva do aglomerado de partículas, a partícula síncrona tem de entrar na cavidade de radiofrequência na fase  $\phi = \phi_s$ .

Para velocidades relativistas, uma partícula percorre o trajecto fechado de um acelerador no tempo  $T = Lv \approx L/c$ , em que  $L$  é o comprimento do acelerador e  $v$  a sua velocidade. A este período está associada a frequência de revolução  $\omega \approx c/L$  Hertz. As partículas circulam na câmara de vácuo do acelerador em aglomerados compactos («bunches»), a uma certa distância uns dos outros. Para acelerar cada um dos aglomerados de partículas pode-se introduzir numa das secções rectas da máquina uma cavidade de radiofrequência em que se

estabelece uma diferença de potencial de frequência  $\omega_{RF} = hc/L$  Hertz, em que  $h$ , o número harmónico, é um múltiplo inteiro do número de aglomerados de partículas presentes na câmara de vácuo do acelerador.

Fornecendo às partículas uma certa quantidade de energia  $\Delta E$  por cada passagem na cavidade de radiofrequência, conseguem-se acelerações para energias muito elevadas. Desde que, claro está, se consiga manter o sincronismo entre o acréscimo de energia por volta e a variação do campo magnético de confinamento  $B$ , de maneira a manter o raio de ciclotrão constante. Por isso se diz que estes aceleradores são *síncronos* ou do tipo *sincrotrão*.

Para o LEP, o número harmónico é  $h = 31320$  e a frequência da tensão de aceleração na cavidade de radiofrequência é de  $\omega_{RF} = 352$  MHz; para o SPS o número harmónico é  $h = 4620$  e  $\omega_{RF} = 200$  MHz.

Cada aglomerado de partículas pode ser representado por uma partícula na sua posição média — partícula síncrona. Se a variação ao longo do tempo da tensão aos terminais da cavidade de radiofrequência é dada por

$$V(t) = V_0 \sin 2\pi\omega_{RF} t = V_0 \sin \phi$$

— figura 3c) —, quando a partícula síncrona chega à cavidade na fase  $\phi = 0$ , não existe nenhum efeito de aceleração. As partículas do aglomerado que chegam primeiro à cavidade, portanto numa fase  $\phi_1 < 0$ , encontram uma tensão negativa e são desaceleradas (estamos a pensar em partículas de carga positiva). Assim, a energia das partículas adiantadas baixa, e o raio de ciclotrão para estas partículas baixa também. Na próxima volta ao acelerador estas partículas chegam à cavidade com uma fase  $\phi_2 > \phi_1$  (figura 3c)), e ao fim de várias voltas ao aglomerado de partículas está mais compacto em relação à partícula síncrona. Para partículas que chegam à cavidade depois da partícula síncrona tiram-se exactamente as mesmas conclusões e isto significa simplesmente que o aglomerado de partículas é estável em relação à acção da cavidade de radiofrequência (oscilações longitudinais).

Para acelerar a partícula síncrona basta então sincronizar a sua chegada à cavidade com uma fase  $\phi_s$ , de maneira que  $\phi_s > 0$  e  $\phi_s < \pi$ . Por cada passagem pela cavidade de radiofrequência, o ganho em energia do aglomerado de partículas é de  $\Delta E = qV_0 \sin \phi_s$ , em que  $\phi_s$  é a fase de entrada da partícula síncrona na cavidade.

Nos grandes aceleradores utilizam-se várias cavidades que são introduzidas ao longo das secções rectas. O SPS, por exemplo, tem apenas três cavidades de radiofrequência, enquanto que o LEP tem 32.

Além da finalidade óbvia que é acelerar as partículas, a energia fornecida pelas cavidades de radiofrequência vai compensar a energia perdida pelas partículas nos dipolos, pois uma partícula relativista ao percorrer uma trajectória circular perde energia por radiação. Por exemplo, electrões com a energia de 1 GeV, ao circularem num acelerador com um campo de confinamento nos dipolos de 1 Tesla, perdem, por radiação de sincrotrão, a energia de 10 MeV por volta completa, a que corresponde um decréscimo do raio de ciclotrão de 1 milímetro por volta completa. Este efeito será analisado em mais detalhe na secção 4.1.

### 3.3. Focagem

Ao circularem na rede de dipolos, secções rectas e cavidades de radiofrequência de um acelerador, as partículas carregadas desviam-se da órbita central dando origem, ao fim de algumas voltas, à colisão do feixe de partículas com a parede da câmara de vácuo. Para evitar a destruição do feixe ou dos aglomerados de partículas é necessário introduzir um mecanismo de focagem, à semelhança do que acontece com os feixes de luz nos sistemas ópticos.

Como se sabe, a maneira mais eficaz de focar um feixe de luz é através de uma sequência alternada de lentes convergentes e divergentes, figura 4a). Cada par de lentes convergente-divergente é mais efectivo no mecanismo de focagem do que sequências de lentes convergentes. Da mesma maneira, o processo mais eficaz de focar um feixe de partículas carregadas é através de uma sucessão alternada de lentes magnéticas convergentes e divergentes — focagem por gradiente alternado. Nos aceleradores circulares, pode-se corrigir a órbita das partículas que se desviam da trajectória de referências através de sequências de pares de magnetos quadrupolares, figura 4b).

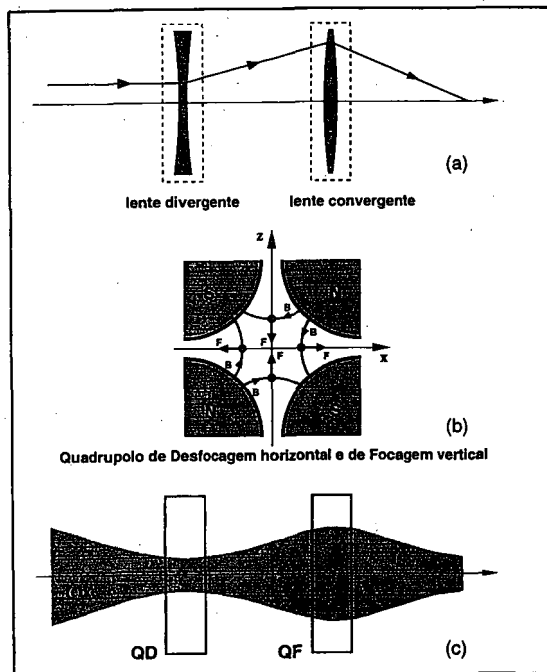


Figura 4 — (a) Princípio óptico da focagem por gradiente alternado.

(b) Esquema dos pólos magnéticos de um quadrupolo de desfocagem horizontal (ou de focagem vertical).

(c) Focagem de um feixe de partículas pelo método do gradiente alternado. Com esta técnica conseguem-se focagens mais efectivas em regiões muito pequenas.

Representa-se esquematicamente na figura 4c) o efeito combinado de gradiente alternado. Mais uma vez, os pares de quadrupolos de gradiente alternado são introduzidos nas secções rectas.

Se uma partícula se afasta da trajectória de referência, ao passar por um quadrupolo de desfocagem horizontal ela é acelerada transversalmente na direcção horizontal contrária à da órbita de referência. Em seguida, se a partícula encontra um quadrupolo de focagem horizontal, ela é focada mais fortemente na direcção da órbita de referência, pois a força quadrupolar é proporcional ao desvio em relação à órbita central. Como os quadrupolos de focagem horizontal são também quadrupolos de desfocagem vertical e vice versa, um par de focagem horizontal de gradiente alternado funciona como par de focagem vertical de gradiente alternado, figura 4b).

Num aglomerado de partículas que circula ao longo da estrutura de lentes magnéticas de

um acelerador, nem todas as partículas têm o mesmo momento linear, sendo necessário focar também em momento. Isto consegue-se com pares de sextupolos de gradiente alternado que são colocados ao longo das secções rectas.

Podemos agora juntar toda os efeitos discutidos até aqui, obtendo-se a figura 5 onde se representa o diagrama esquemático de um acelerador sincrotrão. As várias estimativas que temos vindo a fazer sobre os aceleradores sincrotrões estão condensadas na tabela 1.

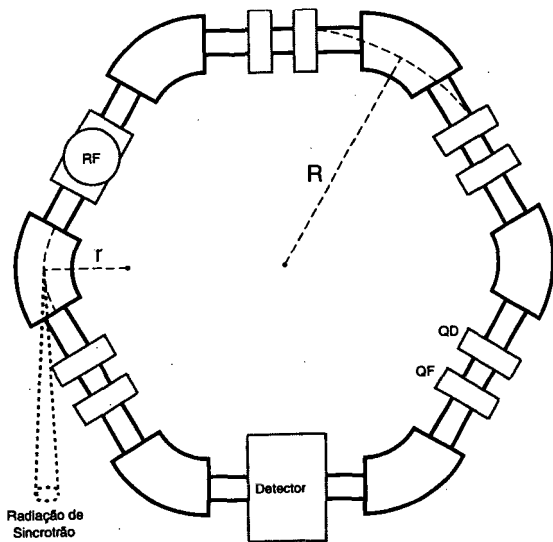


Figura 5 — Componentes principais de um acelerador sincrotrão de gradiente alternado incluindo: seis dipolos, uma cavidade de radiofrequência, pares de magnetos quadrupolares de gradiente alternado e um detector. Está ainda indicada uma linha para extração de um feixe de radiação de sincrotrão.

#### 4. Para que servem os aceleradores

Os aceleradores de partículas estão a ser utilizados cada vez mais como fontes de radiação de sincrotrão, devido às vastas aplicações que têm vindo a ser descobertas, nos últimos trinta anos, para este tipo de radiação.

No próximo parágrafo faremos uma pequena descrição sobre os mecanismos de produção da radiação de sincrotrão e dão-se seguidamente alguns exemplos das suas aplicações.

Acelerador	SPS	LEP
Partículas	$p\bar{p}$	$e^+e^-$
Energia	450 x 450 GeV	50 x 50 GeV
Velocidade das partículas	$2,9999934 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$	$2,99999997 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$
Circunferência	6,9 km	26,7 km
Raio de ciclotrão	225 m	3100 m
Raio médio	1100 m	4250 m
Número de dipolos	744	488
Comprimento dos dipolos	6,26 m	35,01 m
Campo nos dipolos	2 Tesla	0,135 Tesla
Ângulo de deflexão nos dipolos	0,48°	0,74°
Número de quadrupolos	216	488
Número de cavidades de radiofrequência	3	32
Frequência da partícula síncrona	43,3 kHz	11,24 kHz
Frequência da cavidade de radiofrequência	200 MHz	352 MHz
Energia radiada por volta (radiação de sincrotrão)	$0,39 \times 10^{-10} \text{ GeV}$	0,18 GeV

Tabela 1

#### 4.1. Radiação de Sincrotrão

Como resultado da aceleração radial a que estão sujeitas as partículas ao passarem nos dipolos que as força a seguir uma trajetória curvilínea, os electrões e os positrões emitem radiação electromagnética (feixes de luz). Essa radiação, designada por radiação de sincrotrão, por ter sido detectada pela primeira vez neste tipo de aceleradores, só é observável se a velocidade da partícula ou a curvatura da sua trajetória é suficientemente elevada.

Cada partícula, ao radiar, perde uma quantidade de energia que, ao fim de uma volta no acelerador, é dada por

$$\Delta E [\text{GeV}] \approx \frac{6.034 \times 10^{-18}}{r [\text{m}]} \left( \frac{E [\text{GeV}]}{m [\text{GeV}/c^2]} \right)^4 \quad (4)$$



Como a massa do próton é muito maior que a massa do electrão ( $m_p = 1836 m_e$ ), a energia radiada por feixes de electrões, para a mesma energia e o mesmo raio de curvatura. Assim, a luz emitida pelos prótons só é observável quando estes têm energias bastante elevadas.

Nos aceleradores de electrões, a forte dependência da energia radiada por volta na energia da partícula faz com que as perdas por radiação tenham que ser compensadas pelo sistema de aceleração. Como há um limite tecnológico na energia máxima  $\Delta E_{M\acute{a}x}$  que pode ser fornecida pelas cavidades de radiofrequência, há também um limite superior para a energia que um feixe de electrões pode atingir num determinado acelerador, limite esse que é dado por:

$$E_{M\acute{a}x} [GeV] \approx 10 \sqrt[4]{r[m] \Delta E_{M\acute{a}x} [GeV]}.$$

O único processo que se conhece para ultrapassar este limite é através do aumento do raio de ciclotrão, e essa é a razão pela qual os aceleradores de electrões e positrões projectados para funcionarem a muito altas energias têm dimensões gigantescas. Por exemplo no LEP, onde se fazem colidir electrões e positrões de  $50 GeV$ , o raio de curvatura é de cerca de 3100 metros, o que faz com que a sua circunferência seja de aproximadamente 27 quilómetros e as perdas por radiação de sincrotrão de  $0,18 GeV$  por volta e por partícula. Se a energia perdida não fosse repostada através das cavidades de radiofrequência, ao fim de 277 voltas (cerca de 25 milissegundos) as partículas que circulam na máquina perderiam toda a sua energia. Assim, não é previsível que alguma vez venha a ser construído um sincrotrão de electrões maior que o LEP, devido aos elevados custos que isso envolveria. De acordo com a fórmula (4), a construção de um acelerador de electrões com o dobro da energia que o LEP, mantendo as mesmas perdas, implicaria um aumento de 16 vezes no raio de ciclotrão, o que torna os custos financeiros inportáveis.

Estas limitações podem no entanto ser aproveitadas com outros fins. Os electrões em trajectória circular radiam frontalmente, na direcção da tangente à sua trajectória e segundo um cone cujo ângulo  $\theta$  é inversamente proporcional à energia (figura 6):

$$\theta \approx 1 - \left(\frac{v^2}{c^2}\right)^2 = \frac{mc^2}{E} = \frac{511}{E [keV]}$$

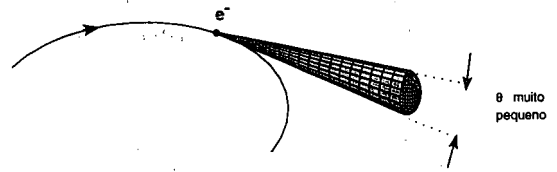


Figura 6 — Feixe de radiação de sincrotrão emitido por um electrão relativista com velocidade próxima da velocidade da luz no vazio,  $v \sim c$ .

Assim, com electrões de energias moderadamente altas, é possível obter feixes de radiação muito colimados. Podem-se obter facilmente ângulos de  $\theta = 0,1$  a  $\theta = 1$  miliradianos, ou seja, de 0,01 a 0,1 milésimos de grau, o que mostra que estes feixes de luz podem ser apontados para um alvo com elevada precisão, formando uma espécie de ponteiro extremamente fino. Com a ajuda de alguma aparelhagem adicional, podem-se obter resoluções espaciais da ordem das centésimas do milímetro. É esta propriedade que está na base das aplicações industriais da radiação de sincrotrão.

Seria de esperar que a radiação de sincrotrão fosse emitida com uma frequência igual à frequência  $\omega_0$  de circulação dos electrões. No entanto, devido a um efeito relativista, surgem um grande número de frequências múltiplas de  $\omega_0$  (harmónicas) que tomam o espectro da radiação de sincrotrão semelhante a um espectro contínuo. Normalmente, a gama de frequências que é observada estende-se por uma região do espectro electromagnético que vai dos raios X até à zona do infravermelho, passando pelas regiões da luz visível e dos raios ultravioletas. Este largo espectro, bem como a elevada colimação e intensidade dos feixes de luz assim obtidos, fazem com que a utilização

de aceleradores que produzem radiação de sincrotrão seja um dos campos de aplicação que mais rapidamente se tem desenvolvido.

#### 4.2. *Aceleradores na Medicina e na Indústria*

Para se construírem e se manterem em operação aceleradores cada vez maiores e mais sofisticados, foi necessário desenvolver e aperfeiçoar várias tecnologias que têm vindo a ser aproveitadas para outras aplicações além da investigação fundamental em física nuclear e física de partículas. O grau de desenvolvimento tecnológico entretanto atingido permitiu aumentar a sua fiabilidade e eficiência, ao mesmo tempo que o seu custo foi significativamente reduzido. Este facto possibilitou estender a sua utilização a outros campos. É assim que, hoje em dia, estão em funcionamento, em construção ou em projecto um grande número de aceleradores dedicados exclusivamente a fins industriais e hospitalares. A par destas utilizações, há ainda a assinalar o uso de aceleradores noutros ramos da ciência como a astrofísica, a física dos materiais e da matéria condensada, a química e a biologia. Muitas novas áreas de utilização têm sido propostas ou estão já a ser testadas.

Os aceleradores industriais e hospitalares podem ser divididos em dois grandes grupos, conforme o uso que se faz as partículas por eles produzidas. Num primeiro grupo, as partículas são utilizadas directamente para bombardear alvos, alterando-lhes assim algumas das suas propriedades físicas e químicas, nomeadamente a sua radioactividade, rigidez, resistência à corrosão e ao atrito, condutividade eléctrica, comportamento catalítico, etc.. Num segundo grupo, as partículas, electrões ou positrões, são usadas indirectamente, como fonte de radiação de sincrotrão. Em ambos os casos, os aceleradores utilizados são de dimensões bastante reduzidas quando comparadas com os grandes sincrotrões usados para a investigação em física de partículas.

Os primeiros aceleradores usados na indústria inserem-se no primeiro destes grupos. Entre as suas principais aplicações incluem-se as que usam a técnica de implantação iónica através da qual determinadas espécies de iões são acelerados para serem introduzidas a uma profundidade específica no material bombardeado. Deste modo, é possível, por exemplo, dopar com grande precisão um substrato semiconductor. Esta é uma das técnicas mais usadas para fabricar circuitos integrados, embora ultimamente tenha vindo a ser substituída pelo uso da radiação de sincrotrão. A implantação iónica é também utilizada para aumentar a rigidez e a resistência de elementos sujeitos a grande esforço mecânico, como os rotores de máquinas e as juntas de algumas próteses artificiais.

Outra utilização directa dos feixes de partículas é o bombardeamento de materiais cujas moléculas se pretende ionizar ou fragmentar, de modo a que se recombinem para obter novos materiais com diferentes características, nomeadamente maior insolubilidade em reagentes orgânicos, maior resistência ao calor, ao fogo, à fadiga ou à deformação e maior resistência biológica. Usando este processo, fabricam-se produtos tais como tubagens, materiais têxteis, revestimentos de tinta e de verniz e isolamentos para cabos eléctricos, capazes de suportar condições bastante adversas: radiação intensa, humidade elevada, altas temperaturas, meios químicos de elevada reactividade, etc..

Os feixes de partículas podem ainda ser usados para ajudar a eliminar produtos quimicamente estáveis como os detergentes; ajudar a purificar gases industriais, por aceleração de reacções químicas com outros produtos (por exemplo, enxofre ou azoto, aos quais se adicionou amónia antes de serem irradiados); ajudar a preservar e esterilizar uma grande variedade de produtos, como os esgotos, os produtos médicos (seringas, luvas, etc.) e a comida (fresca ou já confeccionada), evitando os produtos químicos e praticamente não causando danos aos produtos tratados; incinerar os

resíduos radioactivos das centrais nucleares (existem vários projectos neste sentido); analisar e datar amostras biológicas, arqueológicas e de arte (caso do Sudário de Turim); pesquisar petróleo e recursos minerais do subsolo; detectar explosivos. Finalmente, são de referir as aplicações no campo da medicina, onde para além da esterilização, os aceleradores estão na base de várias técnicas de diagnóstico (produção de rádio-isótopos para a Tomografia por Emissão de Positrões, PET), de terapia (tratamento de tumores por irradiação, onde se destaca o uso recente de partículas pesadas como os piões, para minimizar os danos nos tecidos humanos saudáveis) e de cirurgia (radiocirurgia).

A radiação de sincrotrão, cuja presença nos aceleradores usados em física de altas energias era vista como algo a evitar, veio a revelar-se como um instrumento de elevada utilidade e qualidade quando utilizada noutros campos. Inicialmente, a sua aplicação estava limitada ao aproveitamento da radiação parasita produzida nos laboratórios de Física de Partículas. No entanto, cedo se projectaram e construíram aceleradores dedicados exclusivamente à produção da luz de sincrotrão. Actualmente, estão em construção algumas máquinas (ditas de terceira geração) em que se introduziram significativos avanços tecnológicos que permitem armazenar feixes de partículas bastante intensos e fazê-los passar por estruturas magnéticas periódicas (onduladores) que obrigam as partículas a oscilar a frequências elevadas. Produzem-se assim feixes de luz significativamente mais intensos e colimados, além de se obter uma completa separação entre as diversas frequências do espectro da radiação. As máquinas deste tipo actualmente em construção são o APS (Argonne, EUA), o ALS (Berkeley, EUA), o BESSY II (Berlim), o ESRF (Grenoble), o ELETTRA (Trieste) e o STA (Japão).

A radiação de sincrotrão foi inicialmente usada apenas na física atómica e na espectroscopia. Mais tarde, puderam ser realizadas experiências sobre a absorção, reflexão, lumi-

nescência e fotoemissão de diversos materiais, na região dos raios ultravioleta, e na cristalografia de proteínas e espectroscopia de absorção por estruturas finas (EXAFS), na zona dos raios X. Actualmente, a radiação de sincrotrão constitui por si só um domínio especializado da ciência e da tecnologia, tendo sido desenvolvidas várias técnicas baseadas na sua utilização.

Outras técnicas desenvolvidas e envolvendo a luz de sincrotrão, incluem a espectroscopia com resolução temporal, a espectroscopia fotoelectrónica, a espectroscopia por absorção de raios X (EXAFS, etc.), a difração de raios X a pequeno e a grande ângulo, a topografia e a microscopia por raios X, a microtomografia e a calibração radiométrica de instrumentos ópticos de precisão (é o caso dos mais recentes telescópios espaciais). Estas técnicas são já utilizadas em campos tão diversos como a aeronáutica, a medicina, a cerâmica, a farmacologia, a produção de aço, a protecção ambiental, a holografia, o tratamento de resíduos industriais e domésticos, a produção de materiais sintéticos e as indústrias química, automóvel, petrolífera e espacial.

A litografia por raios X é hoje a única técnica conhecida capaz de produzir semicondutores com pormenores de dimensões inferiores a 0,5 microns, prevendo-se que venha a substituir todas as outras técnicas de fabricação de circuitos integrados, dada a tendência para a compactificação destes. As fontes de luz de sincrotrão são as únicas fontes de raios X suficientemente colimadas para tornar esta técnica viável. A litografia permitiu também desenvolver a micromecânica: aproveitando o elevado poder penetrante e a elevada resolução da radiação de sincrotrão e, usando máscaras apropriadas, é hoje possível fabricar estruturas metálicas como turbinas e rodas dentadas com dimensões entre 1 e 100 microns, e capazes de ser montadas e postas em movimento. Espera-se que um dia seja possível vir a construir assim motores e máquinas verdadeiramente microscópicos!