

## Acceleratoare de particule

Realizarea și studiul reacțiilor nucleare nu pot fi făcute decât dacă particula-proiectil va primi o energie cinetică suficientă pentru a iniția reacția. Ca urmare, se construiesc acceleratoare de particule capabile să furnizeze energia necesară. Pot fi accelerate în mod direct doar particule cu sarcină, în acest scop utilizându-se diverse combinații de câmpuri electrice și magnetice, statice sau variabile, omogene sau neomogene. Dezvoltarea acceleratoarelor începe după 1962, ca urmare directă a descoperirii reacțiilor nucleare. În tab.1 sunt cuprinse principalele date privind acceleratoarele de particule.

Primul tip de accelerator este cel *electrostatic* sau *direct*. El se compune dintr-un generator de înaltă tensiune (continuu), o sursă de particule, un tub de accelerare și o țintă. Aceste părți componente pot fi găsite, cu mici modificări, la toate tipurile de acceleratoare. Generatorul de înaltă tensiune, poate fi o *mașină electrostatică*, un *transformator* ridicător de tensiune urmat de un grup de redresoare, sau instalații speciale construite, cum ar fi *generatorul Van de Graaff* sau *generatorul de cascada*, de tipul Cockroft-Walton. Tensiunea înaltă pe care o furnizează generatorul se aplică unor electrozi ce formează un condensator. Unul dintre electrozi conține sursa de particule, iar pe celălalt se pune ținta formată din nucleele pe care dorim să le bombardăm. În cursul accelerării particulele trec printr-un tub vidat, numit *tub de accelerare*. Tubul este astfel construit, încât particulele să formeze un fascicul convergent pe țintă. Dacă tensiunea înaltă aplicată este  $V$ , atunci energia pe care o va castiga o particulă în acceleratorul direct va fi  $E=qV$ , unde  $q$  este sarcina electrică pe care o posedă particula. Se vede că pentru aceeași tensiune de accelerare, energia particulei este cu atât mai mare, cu cât sarcina  $q$  este mai mare. Ca atare, accelerarea directă este convenabilă mai ales pentru particulele grele, cu sarcină mare (ioni multiplu ionizați). Intensitatea fascicului de particule accelerate se măsoară de obicei prin curentul electric corespunzător. Spre exemplu, un curent de protoni de 1 mA corespunde unui flux de  $6 \cdot 10^{16}$  particule pe secundă.

Tipul	Denumirea	Construit in...de...	Camp magnetic	Frecventa campului electric	Raza de rotatie	Particulele accelerate	Performante in prezent
Acceleratori electrostatici (directi)	Transformator de inalta tensiune	1926 G.Breit	--	--	liniar	Orice particula incarcata cu sarcina	5 MeV
	Tip Cockroft-Walton	1932 J.D. Cockroft E.I.S. Walton	--	--	liniar		~ 18 MeV
	Tip Van de Graaff	1929 Van de Graaff	--	--	liniar		
Acceleratori liniari	liniar	1931 D.H. Sloane	--	const	liniar	Particule grele	20 GeV
Acceleratori de rezonanta	ciclotronul	1934 E.O. Lawrence	const	const	variabil	$p, d, \alpha$ ioni	~ 20 MeV
	sincrociclotron (fazatron)	1946 J.R. Richardson	const	variabil	variabil	$p, d, \alpha$	~ 10 GeV
	sincrotron	1946 F.K. Goward, D.E.Barnes	variabil	const	const	$e$	~ 680 MeV
	Sincrofazon (cosmotron) (sincrotron de protoni)	1947 M.L. Oliphant	variabil	variabil	const	$p, d$	10 GeV protoni
Acceleratori prin inductie	betatronul	1945 M.Kerst	variabil	--	const.	$e$	~ 300 MeV

**a) Generatorul Van de Graaff** este o masina electrostatica prin influenta, care permite producerea a milioane de volti. In fig 1 se poate vedea schema unui astfel de generator. El este format dintr-o sfera metalica, goala in interior, de raza  $R$ , ce formeaza o cutie Faraday si care prin intermediul colectorului (B) culege sarcinile de pe banda transportoare (C). Banda transportoare primeste, la randul ei, sarcina de la un generator obisnuit, de inalta tensiune (10 – 20 kV), prin intermediul unor varfuri ascutite (a). Pentru realizarea transportului, banda se confectioneaza din cauciuc sau un alt material izolant si este pusa in miscare de catre un motor electric, in sensul indicat in figura, cu viteza constanta  $v$ . Sursa de inalta tensiune se aplica (borna pozitiva) unui sistem de varfuri ascutite, plasate in fata benzii transportoare, care, pe partea cealalta, are un electrod la borna negativa. In jurul varfurilor se produce un fenomen de ionizare

intens, datorita campului electric foarte mare ce exista in preajma lor. Ca urmare, pe banda transportoare se vor proiecta ionii pozitivi respinsi de varfurile ascutite (efect Corona), fiind astfel antrenate cu viteza uniforma  $v$ , si dusa in interiorul sferei. Ajungand in punctul B din interior, sarcina va fi colectata de catre sfera, prin intermediul sistemelor de perii legate electric de ea. Datorita efectului de cutie Faraday, sarcina se va raspandi pe suprafata sferei, de unde nu mai poate reveni. Sfera, avand o capacitate  $C (=4 \pi \epsilon_0 R$  fata de Pamant), pe masura ce se va incarca cu sarcina electrica, isi va ridica tensiunea conform relatiei  $U=Q/C$ . Limita superioara pe care poate sa o atinga tensiunea este data pe deoarte de raza sferei, pe de alta parte de rigiditatea dielectrica a mediului in care este plasata sfera (limita de strapungere prin scanteie a mediului dielectric). Pentru aer, valoarea maxima a campului electric, in conditii normale, este de  $E_d=30\text{kV/cm}$ . Deoarece intensitatea campului la suprafata sferei va fi  $E=U/R$ , valoarea maxima a tensiunii ce poate fi atinsa este:

$$U_{max} = R \cdot E_d$$

se vede ca tensiunea maxima creste cu cresterea razei sferei.

Pentru a mari tensiunea acceleratoare, se poate cupla doua generatoare Van de Graaff, incarcate cu sarcini opuse, dublandu-se astfel tensiunea. Acest ansamblu se numeste *tandem*. Un generator Van de Graaff cu raza sferei de 1 m, cu o banda de 50 cm latime, antrenata cu o viteza de 20 m/s va produce o tensiune maxima (teoretica) de 3 MV si un curent maxim de 0,5 mA.

**b) Acceleratorul liniar** face parte din grupul de *acceleratori de rezonanta* sau *ciclici*, deoarece accelerarea se face prin trecerea repetata a particulelor printr-o zona acceleratoare. Existenta unui astfel de ciclu va cere, dupa cum se va vedea, respectarea unei conditii de sincronism. Acceleratorul liniar este construit (fig 2) dintr-o incinta vidata, in care este plasata o *sursa de ioni* si o serie de cilindri metalici (*tuburi de fuga*), asezati unul dupa altul, centrati si de lungime crescanda. La capatul lor se aseaza tinta ce va fi bombardata. Alimentarea tuburilor se face de la o sursa de inalta frecventa si inalta tensiune. Accelerarea se petrece in zona dintre tuburi, iar in interiorul tuburilor particulele se misca liber (inertial). *Conditia de sincronism* (de *rezonante* sau de *ciclitare*) se pune astfel: pentru a fi accelerata, particula trebuie sa gaseasca la iesirea din tub un potential accelerator (tubul sa aiba o polaritate inversa semnului sarcinii acceleratoare). Cum viteza va creste la fiecare treapta de accelerare, rezulta ca lungimea acestor tuburi va trebui sa creasca in mod proportional, deoarece frecventa tensiunii aplicate este constanta (f). Daca tensiunea generatorului este  $U_0$ , la fiecare regiune de accelerare, energia particulei va creste cu  $qU_0$ , iar daca  $n$  este numarul de astfel de tuburi, energia totala va fi:

$$E = n * q * U_0 ,$$

$q$  fiind sarcina particulei accelerate. La prima accelerare particula isi va creste energia de la zero la  $qU_0$  . In mod corespunzator, viteza particulei va fi data de legea de conservare a energiei care, in limita nerelativista ( $E < mc^2$ ) , este

$$v_1 = \left( \frac{2 * q * U_0}{m} \right)^{1/2}$$

In intervalul de timp  $T/2 = 1/(2*f)$  particula va trebui sa se miste in interiorul tubului, timp in care se va petrece schimbarea polaritatii tubului astfel ca la iesirea din primul tub sa-l gaseasca pe cel de-al doilea cu o polaritate convenabila pentru accelerare. De aici rezulta:

$$l_1 = v_1 * \frac{T}{2} = \frac{1}{2 * f} \left( \frac{2 * q * U_0}{m} \right)^{1/2}$$

In urmatoarea zona accelerare, particula isi va creste energia de la  $q * U_0$  la  $2 * q * U_0$  , iar viteza ei va deveni:

$$q * U_0 + \frac{m * v_1^2}{2} = \frac{m * v_2^2}{2} ; \quad v_2 = \left( v_1^2 + 2 * \frac{q * U_0}{m} \right)^{1/2} = \left( 4 * \frac{q * U_0}{m} \right)^{1/2}$$

Generalizand aceasta relatie, vedem ca la iesirea din cel de-al  $n$ -lea tub, particula va avea viteza  $v_n = \left( 2 * \frac{n * q * U_0}{m} \right)^{1/2}$  , de unde relatia ce ne da lungimea celui de al  $n$ -lea tub,

$$l_n = \left( \frac{2 * n * q * U_0}{m} \right)^{1/2} * \frac{1}{2 * f} = l_1 * (n)^{1/2}$$

In acest fel se vede ca lungimea tuburilor creste cu  $(n)^{1/2}$  din care cauza obtinerea energiilor mari necesita lungimi de kilometri. Relatia dintre parametrii geometrici (constructivi) ai acceleratorului si frecventa tensiunii de alimentare. Pentru o energie data, lungimea tuburilor scade cu cresterea frecventei tensiunii de accelerare, motiv pentru care ele se alimenteaza cu tensiuni ce au frecvente de ordinul a 1000 – 10000 MHz.

Daca particula accelerata este electronul, atunci ea devine repede relativista si conditia de sincronism nu mai este indeplinita. Variatia masei cu viteza arata ca un electron de 1 MeV (cu viteza de  $v = 0.93 * c$ ) are o masa de aproape patru ori mai mare ca masa de repaus.

c) **Ciclotronul** este tot un accelerator ciclic, de rezonanta in care particulele nu se misca rectiliniu, ci circular, folosindu-se in acest scop campuri magnetice omogene. Ca urmare, dimensiunea ciclotronului este mult mai mica ca a unui accelerator liniar. In centrul sistemului si in camp magnetic se gaseste o sursa de particule. Tot in acest camp se gasesc si doi electrozi de o forma speciala, numiti *duanti* (au forma asemanatoare literei D). Particulele sunt accelerate la trecerea intre duanti, iar in interiorul lor se misca liber, ca si in tuburile de fuga ale acceleratorului liniar. Conditia de sincronism va cere ca intotdeauna la iesirea din duant, particula sa aiba in fata polaritatea acceleratoare. Miscarea unei particule de masa  $m$ , sarcina  $q$  si viteza  $v$ , intr-un camp de intensitate  $B$ , se va face pe o traiectorie circulara de raza  $r$ , perioada  $T$  si pulsatia  $\omega$  dete de relatiile

$$r = m*v/(q*B); T=2*\pi*m/(q*B); \omega = q*B/m$$

Deoarece perioada de rotatie nu depinde de energia particulei (in limite nerelativiste), conditia de sincronism va fi data de  $f=2/T$ ,  $f$  fiind frecventa tensiunii alternative, aplicata pe duanti. Traiectoria particulei va fi o succesiune de semicercuri cu raze treptat crescatoare. In momentul in care particula atinge raza maxima de rotatie, un electrod special asigura scoaterea ei de pe traiectorie si din ciclotron si o indreapta catre tinta. Energia maxima va fi data de raza maxima  $R$ ,

$$E_c = p^2/(2*m) = (q*B*R)^2/(2*m),$$

Energia maxima atinsa in mod obisnuit este de 20-30 MeV.

Conditia de sincronism contine masa particulei; deci, pentru particule ce devin rapid relativiste, ciclotronul nu va fi un accelerator potrivit. Ca atare, el va fi bun pentru accelerarea particulelor grele (particule alfa, protoni, deutroni ioni grei) dar nu si pentru electroni.

Pentru a accelera electroni, va trebui sa variem fie frecventa, fie campul magnetic, fie ambele, pe masura ce particula isi creste energia. Corespunzator celor trei situatii, vor exista trei tipuri de acceleratori:

- *sincrotronul* , la care campul magnetic variaza, astfel incat raportul  $m*v/B$  sa fie constant;
- *sincrociclotronul (fazotronul)*, la care frecventa variaza, astfel incat produsul  $m*v*f$  sa fie constant;
- *sincrotronul de protoni (sincrofazotronul)*, la care se produce atat variatia frecventei, cat si variatia campului magnetic, astfel incat  $m*f/B$  sa fie constant.