

## Acceleratoare de particule

### Problema energiilor mari

O data cu patrunderea in lumea microcosmosului, cercetatorii au avut de intampinat o situatie cu totul neobisnuita. Daca in lumea macroscopica, multe din informatiile asupra structurii obiectelor erau obtinute direct, prin observatii cu ochiul liber, explorarea structurii intime a materiei nu se putea face nici cu cele mai puternice microscopice. Ochiul nu poate distinge obiecte mai mici de 6-7 miimi de milimetru, iar microscopicele, nu pot permite observarea dimensiunilor mai mici de 0,5 miimi de milimetru, adica detalii de cca. 5.000 ori mai mari decat diametrul unui atom si de  $500 \times 10^6$  ori mai mari decat diametrul unui nucleu atomic...

Pentru studierea particulelor subnucleare, pentru investigarea proprietatilor fortelor nucleare, metodele care se folosesc si in prezent constau in principal din procese de ciocnire, prin bombardarea nucleelor cu particule dotate cu energii suficient de mari pentru a putea patrunde nucleele atomice. in acest fel studiind modalitatile in care are loc o interactie, in urma ciocnirii, se pot determina caracteristicile corpurilor care au luat parte, precum si a fortelor care intervin.

Energiile care se imprima particulelor-proiectil, sunt diferite. Energia necesara pentru a "patrunde" in dimensiunea de  $10^{-10}$  m este de 0,002 MeV, dar pentru a patrunde pana la nucleu ( $10^{-14}$  m) este nevoie de o energie de 10.000 de ori mai mare (20 MeV). In ce priveste patrunderea in intimitatea nucleului, la dimensiuni de  $10^{-16}$  m, este nevoie de o energie de 2000 MeV (adica 2 GeV), iar pentru a ajunge in "interiorul" nucleonilor ( $10^{-18}$  m) este nevoie de energii de peste 200 GeV.

---

Desigur, pentru a putea efectua experiente in lumea subatomica sunt necesare instalatii in care sa fie produse particule-proiectil, apoi aceste particule sa fie organizate in fascicule de energii mari (adica sa fie accelerate) si, in fine, sa aiba o posibilitate de a pune in evidenta rezultatele interactiilor (detectoare de particule). Aceste instalatii numite *acceleratoare*, au insotit cu mult succes pe fizicieni in cercetarile lor, ramanand si in prezent principalul instrument de lucru in lumea microcosmosului.

Astfel a aparut o noua ramura a fizicii nucleare, cea a acceleratoarelor, in care tehnicienii, pentru a asigura un singur deziderat principal - fascicule de energii din ce in ce mai mari - au avut de invins obstacole deosebite.

Particulele care sunt accelerate in aceste instalatii pot fi, dupa caz : electroni, pozitroni, protoni, antiprotoni, deutoni, precum si nuclee ale unor elemente usoare sau medii. Totdeauna insa este vorba de particule ce poseda sarcini electrice, asupra carora pot actiona oportunitate forte electrice si magnetice, astfel incat sa le aduca la un nivel energetic ridicat. Neutronii, in schimb, sunt totdeauna produsii fie prin intermediul unor anumite reactii nucleare, fie prin bombardarea unor nuclee special alese cu proiectile convenabile.

Energiile la care s-a ajuns in zilele noastre, cu acceleratoare moderne, sunt de ordinul zecilor si sutelor de miliarde de electron-volti. De la instalatiile simple de accelerare, care puteau fi asezate pe o masa de laborator, s-a ajuns in zilele noastre la instalatii complexe uriase, extrem de costisitoare, care se intind pe zeci de hectare.

Din conditiile de realizare a reactiilor termonucleare rezulta ca este absolut necesar sa se evite pierderile de energie prin radiatie si prin scapari de particule accelerate, pentru a se putea acumula in masa de reactie energia calorica necesara "aprinderii" reactiei termonucleare. De la inceput trebuie sa constatam ca pierderile prin radiatie nu pot fi reduse prin metode electrice sau magnetice, deoarece fotonii, odata emisi, nu sunt influentatii de asemenea

---

campuri de forta. Mai mult chiar, utilizarea ingradirii magnetice a plasmelor termonucleare duce la o "hemoragie" radianta suplimentara a reactorului termonuclear prin radiatia ciclotronica si sincrotronica ce ia nastere in aceste cazuri. Ramane deci numai posibilitatea de a reduce pierderile prin scapari de particule.

Utilizarea campurilor electrice pentru eliminarea pierderilor de particule, deci pentru ingradirea plasmei, nu este aplicabila din urmatoarele motive :

- din electostatica clasica se stie (teorema lui Earnshaw) ca nu se poate realiza o configuratie de conductori electrici al caror camp electrostatic sa creeze o pozitie de echilibru stabil, nici chiar pentru o singura particula incarcata. Lucrul acesta ar fi mult mai greu pentru un sistem de mai multe particule ce interactioneaza nu numai cu campul exterior, ci si intre ele ;

- particulele din plasma (ionii si electronii) avand sarcini electrice contrare, inseamna ca o configuratie a conductorilor externi care ar reusi sa creeze o groapa de potential pentru particule de un semn, ar crea in acelasi timp un maxim de potential pentru particulele de semn contrar, astfel ca s-ar ajunge doar la o polarizare a plasmei ;

- chiar daca particulele de un anumit semn (spre exemplu ionii) ar fi ingradite, din cauza respingerii electrostatice reciproce ar apare presiuni electrostatice mult mai mari decat cele controlabile prin electrotehnica secolului nostru.

Metodele magnetice promit rezultate mi spectaculoase date fiind particularitatile comportarii particulelor electrizate in campul magnetic. Totusi, sperantele initiale au fost satisfacute numai partial deoarece au iesit la iveala noi fenomene : derive ale particulelor, oscilatiile plasmei si diferite instabilitati, care compromit posibilitatea de a ingradi plasma chiar pentru intervale de timp de ordinul fractiunilor de secunda.

---

Intrucat campul magnetic este produs prin curenti electrici, iar variatia campului magnetic va induce campuri electrice in plasma, cercetarea devine destul de complicata si de aceea a fost necesara crearea magnetohidrodinamicii, ca noua disciplina stiintifica ce se ocupa cu aceste aspecte ale problemei plasmelor.

### **Efectul de strictiune (pinch)**

Sa ne inchipuim ca avem o descarcare intre doi electrozi, intr-o plasma rarefiata astfel ca lungimea tubului de descarcare sa fie mare in raport cu diametrul sau. Electronii se vor scurge de la catod la anod iar ionii pozitivi invers. La egalitate de sarcini pozitive si negative, pe unitatea de volum, intre elementele tubului de descarcare nu vor exista forte de respingere. Tuburile de curent de electroni se vor atrage conform legilor lui Ampere, intrucat reprezinta curenti paraleli. Acelasi lucru este valabil si pentru tuburile de curent de electroni. Mai mult chiar, tuburile de curent de semne opuse se vor atrage intre ele, deoarece. Desi au sensuri de circulatie opuse, semnul electric fiind si el opus, cimpurile magnetice rezultante vor fi de acelasi sens.

Bennet (1934) a dat formula:

$$I_0 = 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot T \cdot V^{-1/2}$$

Pentru curentul critic  $i_0$  (in amperi) peste care se poate observa efectul de autofocalizare la temperatura  $T$  (grade absolute) si la tensiune de accelerare  $V$ . Curentul necesar va fi proportional cu temperatura, deoarece agitatie termica tinde sa indeparteze particulele incarcate din tubul de curent strictionat.

Acest efect, numit apoi *efect pinch*, a servit ca punct de plecare in constructia unor masini termionice si pentru dezvoltarea unor noi tehnici magnetohidrodinamice bazate pe particularitatile acestui fenomen.

---

Fara a intra in detalii teoretice, putem sintetiza efectului de pinch in faptul ca frontul presiunii magnetice actioneaza ca un piston asupra intregului gaz din coloana de descarcare. Viteza de avansare a acestui piston magnetic este mai mare decat viteza sunetului in gazul central, rece. La aceasta miscare supersonica apare unda de soc in frontul careia densitatea si temperatura prezinta un salt spectaculos.

Pe masura ce inelul de plasma se stringe, presiunea plasmei creste din cauza cresterii densitatii si temperaturii. Din aceasta cauza ar fi de asteptat ca la un moment dat transferul de energie de la cimpul magnetic la plasma sa inceteze. Dar spre surprinderea cercetatorilor, s-a constatat ca dupa aparitia undei de soc transferurile de energie sunt mai complete. Efectul acesta este similar concentrarii de energie prin implozie si poate duce la rezultate spectaculoase atunci cind rata cresterii curentului este mare si viteza ionilor permite crearea unui piston magnetic foarte rapid si eficient. Particulele impinse de acest piston vor primi o viteza egala cu de doua ori viteza pistonului si in acest fel se ajunge la un randament foarte bun in transmiterea energiei.

Intrucit acest efect se produce cu mai mare eficacitate la descarcările rapide, era nevoie de mari tensiuni pe tuburile de descarcare, lucru care nu se putea realiza atat de usor pe torurile cu descarcare cu inductie in gaz. De aici a rezultat un interes reînnoit pentru descarcările pe tuburi drepte. Tuburile drepte au dezavantajul ca prezinta riscul pierderilor de particule pe la capete, deoarece ionii si electronii sunt accelerati axial de catre tensiunea aplicata. Daca dorim sa obtinem o descarcare eficienta si rapida intr- un tub drept cu electrozi la capatul tubului va trebui sa aplicam o tensiune foarte mare, daca vrem ca tubul sa nu fie prea lung (lungimea fiind ceruta de conditia ca energia magnetica sa fie transferata ionilor inainte ca acestia sa ajunga la electrozi). Pe de alta parte, cand potentialul electric in interiorul tubului este obtinut prin inductie cu ajutorul unor infasurari exterioare, atunci va rezulta un camp magnetic axial si

---

pierderile de particule electrizate in directia liniilor de forta ale campului magnetic – deci in lungul tubului – vor fi de  $(\omega\tau)^2$  ori mai mare decat in directii perpendiculare pe liniile de forta ale campului magnetic, deci radial fata de tub. Pe de alta parte, timpul de difuzie si pierderile de caldura variaza cu distanta la patrat. De aici rezulta ca lungimea tubului in care pierderile axiale nu intrec pe cele radiale va fi :

$$l = (\omega\tau)^2 \cdot r$$

in care  $\omega$  este frecventa ciclotronoica a electronilor, iar  $\tau$  timpul mediu intre ciocnirile ion-electron. Considerand un camp magnetic de 20 kGs,  $\omega\tau \approx 8 \cdot 10^6$ . La o raza a tubului de 5 cm ar rezulta o lungime a tubului de 400 km.

### **Descarcari toroidale**

Dat fiind pericolul topirii electrozilor intr- un tub de descarcare drept, precum si acela al canalizarii campurilor electrice si magnetice spre electrozii solizi in loc de a le retine in plasma, s-a vazut ca s-a recurs la descarcari toroidale. In asemenea geometrii campul magnetic variaza invers proportional cu distanta fata de axa de revolutie a torului

### **Stellaratorul**

O geometrie care cauta sa anuleze genul de deriva descris mai sus este geometria in “opt” cunoscuta in literatura de specialitate ca “Stellaratorul”, nume ce i-a fost dat de Spitzer (1951). El a propus o metoda de ingradire a plamei cu un camp magnetic exterior intr-o geometrie care sa impiedice separarea de sarcina si deriva din geometriile toroidale simple. Adoptand geometria in “opt” el a avansat urmatoarele idei.

In primul rand particula intra in campul magnetic din directii exact opuse in cele doua ramuri ale stellaratorului derivate produse succesiv intr-o ramura vor fi compensate (cel putin partial) de derivate din cea de a doua.

---

Apoi, se stie ca in geometria toroidala simpla liniile de forta ale campului magnetic axial se inchid prin ele insele, adica sunt “degenerate”.