

## STUDIUL PROCESELOR ATOMICE ÎN CAMERA WILSON

### A) Urmele particulelor ionizante în diferite medii.

Urmărirea traiectoriilor particulelor încărcate a fost posibilă pe baza *efectului fotografic* al acestor particule. Sursa inițială de radiații de mare energie folosită a fost radiația cosmică descoperită de către V. H. Hess (1911-1913). Plăci fotografice special făcute pentru a înregistra trecerea particulelor componente ale radiației cosmice au fost ridicate cu baloane sondă la mari înălțimi, unde au înregistrat trecerea acestora. Caracteristic acestor particule de mare energie este ciocnirea lor cu particulele și atomii (nucleele) din mediul pe care-l străbat dând naștere unor adevărate transformări “catastrofice”, marcate prin “explozia” acestora, denumite “stele”.

În figura 1 se poate vedea o astfel de stea produsă de radiații cosmice și immortalizată pe o placă fotografică.

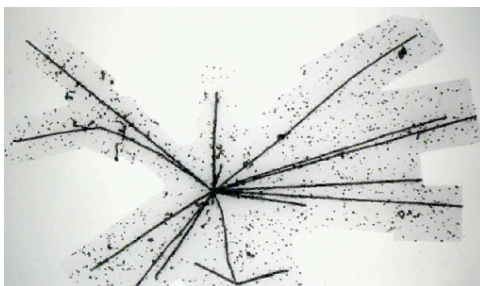


figura 1.

Trajectoriile particulelor încărcate apar în *camera cu ceață* (C.T.R. Wilson - Univ. Cambridge, Anglia)<sup>1</sup> sau în *camera cu bule* (C. Glasser - 1952)<sup>2</sup> sub forma unor urme vizibile la o iluminare laterală și pot fi fotografiate. Trajectoriile particulelor alfa apar în majoritatea cazurilor practic rectilinii (figura 2.). Trajectoriile se caracterizează prin grosimea și continuitatea lor, care se datorează puternicei ionizări specifice, adică a numărului mare de perechi de ioni formați pe unitate de lungime de drum. Pe fotografii mărite se pot vedea amănunte importante: multe trajectorii se pot termina printr-o cotitură brusca (“cârlig”), în alte cazuri se văd deviații sub unghi mic în puncte mai mult sau mai puțin depărtate de capătul trajectoriei. Foarte rar, unghiul de deviație este mai mare; mai rar, încă, trajectoria se termină printr-o furcă.

În figura 2 se prezintă o fotografie a particulelor  $\alpha$  provenite de la o sursă radioactivă, așa cum se văd ele în camera cu ceață.

În fotografia următoare (figura 3) se văd traseele unor particule în camera cu bule. Camera cu bule este plasată într-un câmp magnetic omogen și perpendicular pe figură, astfel încât trajectoriile apar curbate ca urmare a forței Lorentz ce acționează asupra lor. Traseele care parcurg camera orizontal și sunt puțin curbate în sus, aparțin unui fascicul de protoni. Traseele spirale (în sus și în jos) aparțin unui electron și unui pozitron, produși ca pereche sub influența unei radiații  $\gamma$  care nu este vizibilă în imagine. Din motive fotografice, traseul spiralei inferioare este mult mai slab evidențiat pe fotografie.

O pereche de electron-pozitron formată printr-un fenomen de generare de perechi este prezentată în figura 4. În câmpul magnetic perpendicular pe figură, cele două particule de sarcini opuse sunt curbate în sens invers una față de alta. Se observă egalitatea razelor de curbură ceea ce confirmă cele spuse mai sus.

<sup>1</sup> C.T.R. Wilson, *Proceedings of the Royal Society*, **A85**, 1911, p.285, **A87**, 1912, p.277, **A104**, 1923, p.1.

<sup>2</sup> C.Glasser, *Physical Review*, **87**, 1952, p.665; *Scientific American*, **192**, No.2, 1955, p.46.

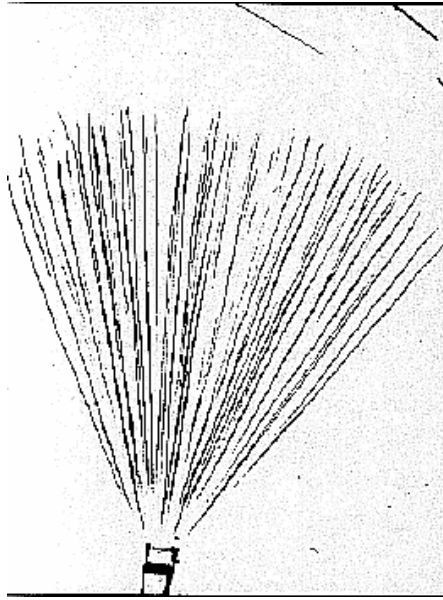


figura 2

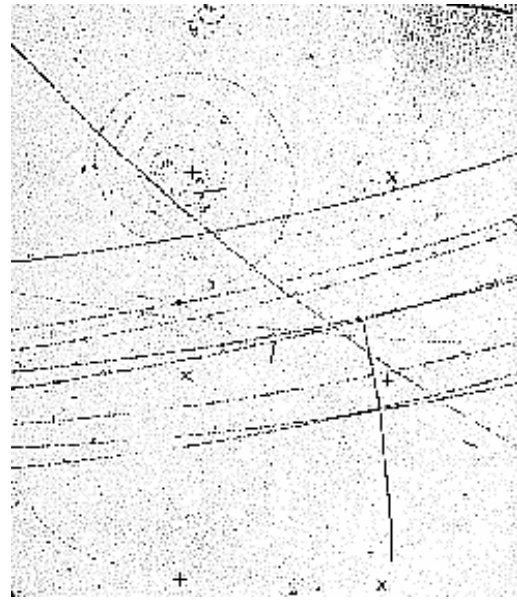


figura 3

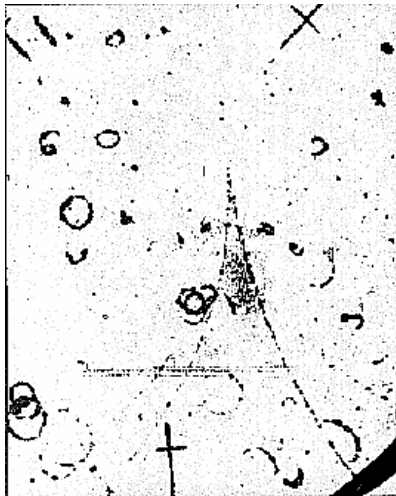


figura 4

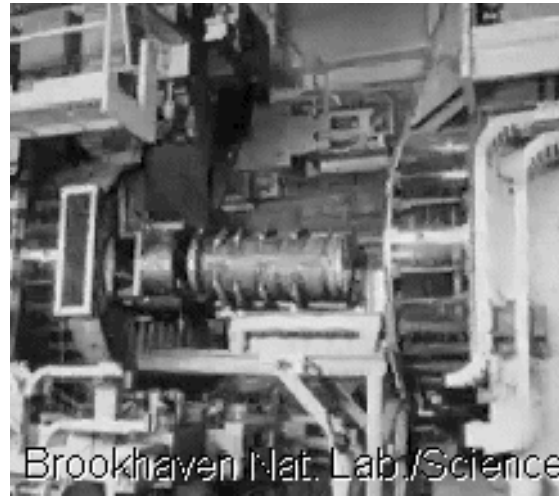


figura 5

O cameră cu bule este o instalație mult mai complexă ca cea a camerei cu ceață. În figura 5 se prezintă o astfel de cameră a Laboratorului Național din Brookhaven, SUA. În partea stângă se vede ieșirea de la acceleratorul de particule care injectează particule în camera cu bule aflată în partea dreaptă a figurii. Particulele sunt “conduse” la cameră printr-o zonă cu câmpuri magnetice (în distribuție cuadrupolară).

Camera cu ceață (Wilson) se bazează pe fenomenul de condensare a vaporilor de apă sau alt lichid, vapori suprasaturați aflați într-o incintă închisă, condensare în jurul perechilor de ioni produși de radiațiile ionizante pe traiectoria lor. Cantitatea de vapori necesari pentru a produce saturația scade cu micșorarea temperaturii. De aceea, atingerea saturației se face printr-o mărire bruscă (adiabatică) a volumului camerei ce conține acești vapori. Prin acest proces se realizează o scădere bruscă a temperaturii și se inițiază condiția de vapori saturați.

Dacă acum în cameră se trimite un fascicul de radiații ionizante, cum ar fi radiațiile alfa, ionii formați pe traiectorie vor acționa ca centrii de condensare, iar la o iluminare laterală și o privire perpendiculară, traiectoriile vor apărea ca dăre fine de ceață (figura 6).

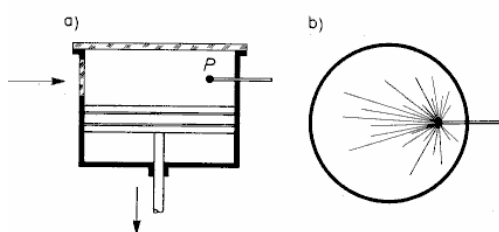
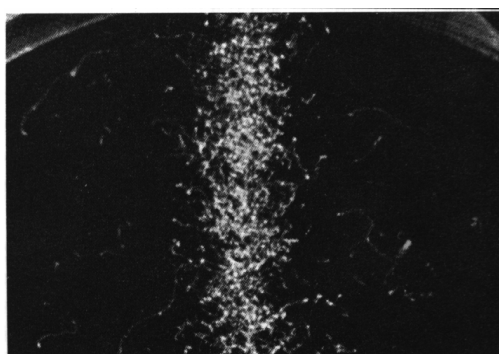
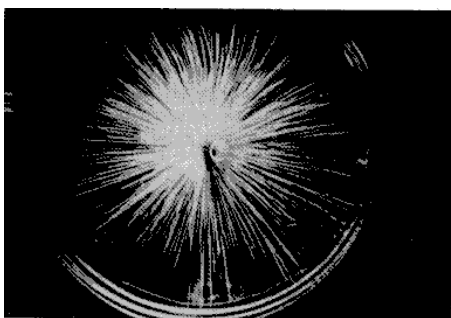


Figura 6

Dacă radiația care intră în cameră este radiație X sau gama, ea nu produce ionizări în mod direct ci produce efect fotoelectric sau Compton care la rândul lor produc electroni care fiind încărcăți produc la rândul lor ionizări așa cum se vede în imagine

Figura 7

## B) Determinarea energiei electronilor utilizând fotografiile urmelor în camera Wilson în câmp magnetic

**Scopul lucrării** este de a pune la punct o metodă de determinare a energiei particulelor din curbarea traiectoriei lor în câmpul magnetic în care este plasată camera cu ceață sau camera cu bule. În acest scop se utilizează relația între energia (viteza) particulei și raza de curbură a traiectoriei într-un câmp magnetic de inducție cunoscută **B**.

Se vor utiliza imagini fotografiate de la camere Wilson și camere cu bule de la marile laboratoare.

### Modul de lucru

Se va prelucra imaginea dată în fig. 8 și anume urma care prezintă o spirală bine evidențiată. Se copiază fotografia pe o hârtie milimetrică sau se introduce într-un calculator și se prelucrează. Se definește un sistem de coordonate rectangular arbitrar (suprapus imaginii) care va fi folosit pentru prelucrare.

Se urmărește pe fotografie traiectoria particulei pe care dorim să o măsurăm, definind niște puncte care vor fi măsurate direct pe fotografie (de exemplu ca în fig. 8). Se măsoară coordonatele unor puncte succesive, după care se calculează pe rând:

- raza de curbura a porțiunii de traiectorie,  $R(s)$ ,  $s$ - fiind un parametru de poziție pe traiectorie, cu originea în punctul de intrare pe fotografie (distanța parcursă de particulă și vizibilă pe fotografie)
- lungimea arcului subîntins, între punctele alese,  $l(s)$ ,
- lungimea totală a drumului particulei de la intrare în cameră până în punctul respectiv,  $L(s)$ .

Determinarea razei de curbură se poate face în mai multe feluri:

- *metoda algebrică*: prin scrierea sistemului de ecuații ale cercului care trece prin trei puncte consecutive, introducându-se coordonatele locale ale centrului cercului  $(x_0, y_0)$  ca necunoscute și raza cercului  $R$ , tot necunoscută și rezolvând sistemul față de  $R$ . Această metodă poate să fie realizată prin rezolvarea directă a sistemului sau prin realizarea unui program de calcul special pentru acest caz.

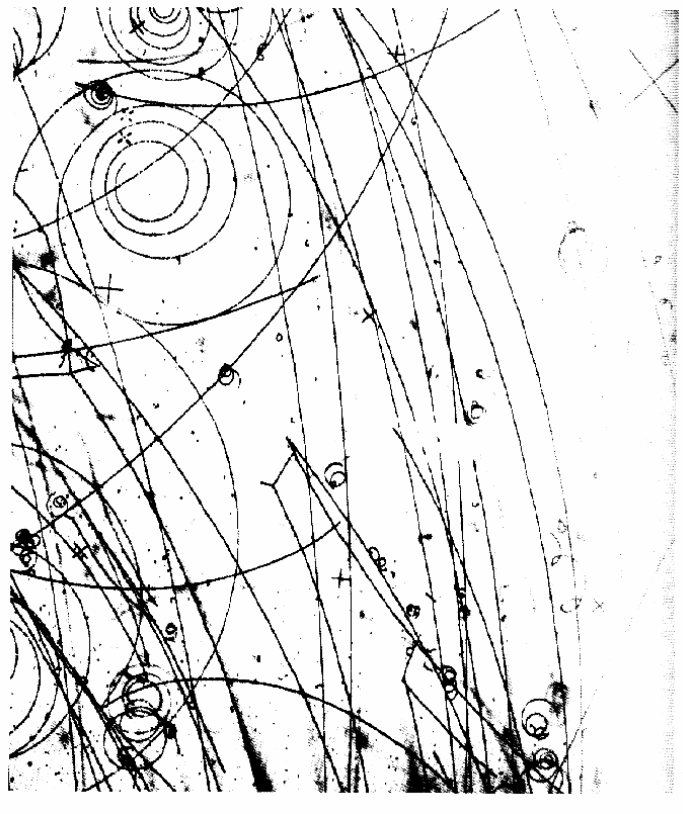


figura 8

- *metoda grafică*: se alege cu compasul o deschidere convenabilă și se marchează întregul traseu cu aceeași deschidere. Dacă deschiderea este mică se poate considera că arcurile de cerc consecutive sunt de egală lungime și se poate utiliza setul de relații din cerc (în acest caz punctul median trebuie să fie echidistant față de punctele adiacente)

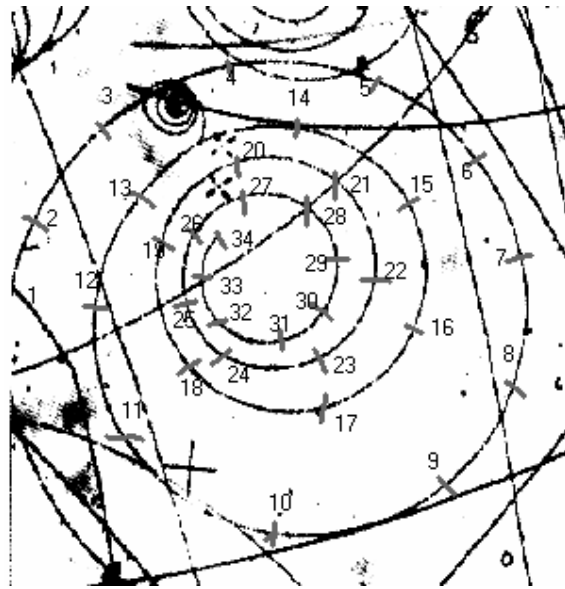


figura 8

Punctele măsurate, în coordonate relative ale figurii, sunt trecute într-un tabel (în cazul prezentat s-au ales puncte neechidistante astfel încât trebuie utilizată o metoda algebrică.

Tabelul 1 (coordonate față de un sistem de coordonate ales arbitrar)

| Punctul nr. | $x$ | $y$ | $s$ | $l(s)$ | $R(s)$ | $L(s)$ |
|-------------|-----|-----|-----|--------|--------|--------|
| 1           | 3   | 149 |     |        |        |        |
| 2           | 15  | 114 |     |        |        |        |
| 3           |     |     |     |        |        |        |
| 4           |     |     |     |        |        |        |
| 5           |     |     |     |        |        |        |
| .....       |     |     |     |        |        |        |
| .....       |     |     |     |        |        |        |

Dacă punctele alese sunt echidistante se poate folosi metoda grafică.

O primă observație asupra imaginii ne permite recunoașterea *tipului de particulă* pe care o analizăm. Traectoria spiralată aflată printre alte traectorii foarte slab curbate este a unui electron de energie destul de mare. Traectoriile mai puțin curbate, aproape rectilinii, sunt ale protonilor care au pătruns în camera cu bule. Diferența de masă între aceste două particule face ca traectoriile să aibă curburi diferite, știind că ambele posedă aceeași sarcină elementară  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  C. Dacă se observă curburi în sens opus la două traectorii atunci vom ști că cele două particule au sarcini de semn opus.

Pentru lucrare vom discuta urma cea mai interesantă și anume aceea a electronului. Pe lângă faptul că se poate determina energia electronului intrat în cameră, cunoscând inducția magnetică  $B$  a câmpului (omogen) prezent în zona camerei, se poate studia și pierderea de energie a electronului în lungul parcursului până la oprire.

Pentru a efectua aceste calcule se folosește relația care leagă impulsul unei particule încărcate de raza traectoriei și de valoarea inducției magnetice în care ea se mișcă.

Determinând, de pe fotografie, raza de curbură în punctele digitizate și urmărind variația energiei în lungul traiectoriei, vom putea compara rezultatul cu cel obținut teoretic din relația lui Bethe pentru pierderea specifică de energie.

În acest scop se urmează un algoritm ce cuprinde mai multe etape:

a) *calculul razei de curbură pentru porțiunea de traiectorie luată în considerație*

Pentru determinarea razei de curbură (aproximativă) pe porțiunea aleasă se vor folosi relațiile geometrice într-un cerc între arc, coardă și rază.

În acest scop se presupune că pentru arce de traiectorie nu prea lungi, traiectoria poate fi aproximată cu un cerc (în realitate ea este o spirală). Se consideră trei puncte (echidistante) de pe arcul considerat, două definesc arcul iar al treilea se ia la jumătatea distanței dintre cele două. Folosind notațiile:  $R$  - raza,  $l$  - lungimea arcului,  $a$  - coarda,  $\theta$  - unghiul central,  $h$  - săgeata, relațiile de calcul sunt:

$$h = R - \sqrt{R^2 - \frac{a^2}{4}}$$

sau aproximativ:  $l = \frac{8b - a}{3}$  sau  $l = \sqrt{a^2 + \frac{16}{3}h^2}$ .

coordonatele xy ale punctelor de pe traiectorie, alese pentru digitizare.

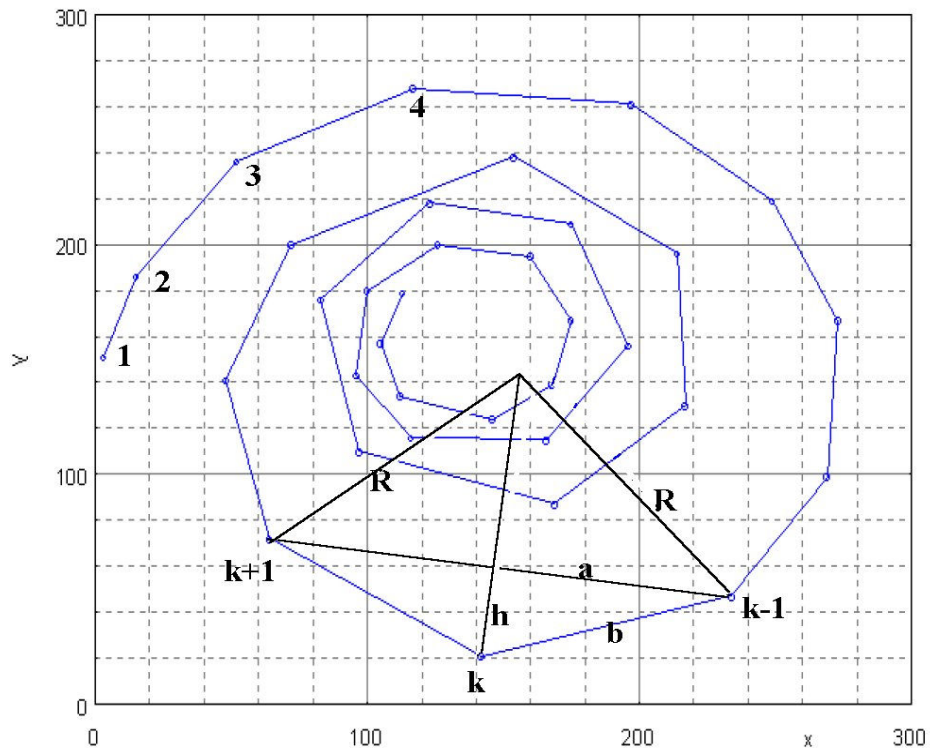


Figura 10

Datele experimentale obținute se trec într-un tabel:

Tabelul 2.

| Arcul | Lungimea arcului (mm) | Raza de curbură calculată, R (mm) |
|-------|-----------------------|-----------------------------------|
| 1-2   | 29,29                 | 33.63                             |
| 2-3   | 66,12                 | 29,25                             |
| 3-4   | .....                 |                                   |

Lungimea arcurilor cumulate (L) reprezintă distanța în lungul traiectoriei particulei. Calculul dependenței razei de curbură funcție de distanța parcursă cu ajutorul unui program de fitare duce la o curbă polinomială, care cu bună aproximație poate fi descrisă de o ecuația de gradul doi, de forma:

$$R = a (L)^2 + b (L) + c,$$

cu R și L exprimați în mm.

*b) Calculul energiei*

Deoarece energia particulei se calculează dintr-o expresie ce conține pătratul razei de curbură, dependența ei de distanța parcursă în lungul traiectoriei (L) se poate calcula ușor.

$$R = \frac{mv}{eB} = \frac{p}{eB}$$

$$E_c = \frac{mv^2}{2} = \frac{p^2}{2m} = \frac{(eRB)^2}{2m}$$

În tabelul următor se dau aceste calcule.

Tabelul 3.

| L     | R <sup>2</sup> | E <sub>c</sub> |
|-------|----------------|----------------|
| 29.29 | 1130.977       | .....          |
| 66,12 | 855.562        |                |
| ..... | .....          |                |
|       |                |                |

*c) Pierderea de energie în lungul traiectoriei*

Deoarece la fiecare ionizare particula pierde energie, se ajunge la un moment dat ca energia particulei să nu mai fie suficientă pentru o nouă ionizare și ca urmare traiectoria particulei nu mai este vizibilă. Se poate aprecia pierderea de energie pe care electronul o suferă în lungul traiectoriei exprimând energia electronului în funcție de lungimea totală a traiectoriei calculată ca sumă a arcelor de cerc până la punctul dat. Se va calcula și se va reprezenta energia funcție de această lungime cumulată L.

Datele pot fi fitate cel mai bine cu un polinom de gradul doi, care are forma:

$$y = 0,00545x^2 - 5,13x + 1271$$

unde x este distanța parcursă, L, iar y este R<sup>2</sup>.

Din aceste date se poate calcula pierderea de energie specifică ( $dE/dx \propto d(R^2)/dx$ ), funcție de distanța de la intrarea în câmp (L).

Tabelul 4

| R     | $d(R^2)/dx$ |
|-------|-------------|
| 35,5  | -0,085      |
| 30    | - 0,08      |
| ..... | .....       |

Cea mai bună fitare conduce la ecuația de forma liniară:

$$d(R^2)/dx = -0,00117 L - 0,00444$$

Dacă se calculează dependența pierderii de energie  $d(R^2)/dx$  funcție de energie ( $R^2$ ), se obțin datele următoare (date obținute dintr-o alta fitare; tabelul este dat ca exemplu):

Tabelul 5

| $d(R^2)/dx$ | $R^2$ |
|-------------|-------|
| 1040        | 4.6   |
| 770         | 4     |
| 625         | 3.5   |
| 430         | 2.9   |
| .....       | ..... |

Cea mai bună fitare a datelor o realizează curba dată de ecuația de forma (formula lui Bethe):

$$y = \frac{a}{(1 + bx)} \cdot \ln(cx) ,$$

cu notațiile:

$$y = -d(R^2)/dx, \quad x = R^2,$$

și în care coeficienții determinați pentru un caz particular sunt:

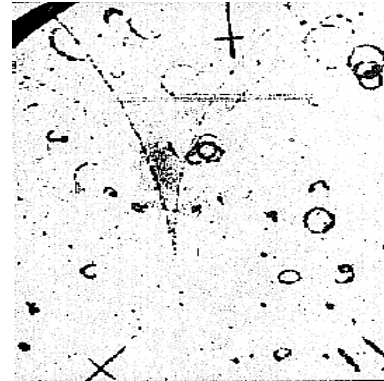
$$a=1,168, \quad b=-0,000250, \quad c=0,0172.$$



## Camera Wilson - probleme

75. Într-o cameră Wilson cu câmp magnetic s-a observat un fenomen de producere a unei perechi electron-pozitron. Trajectoriile circulare ale celor două particule sunt curbate în sensuri contrare, raza de curbură fiind egală cu 2,5 cm, iar câmpul magnetic transversal pe planul traiectoriilor fiind de 0,2 T. Care a fost energia și lungimea de undă a fotonului care a produs perechea?

100. În figură se prezintă un eveniment la scară atomică care are ca rezultat apariția dintr-un singur punct a două traiectorii. Să se explice fenomenul și să se arate cum pot fi determinate caracteristicile și parametrii particulelor implicate în procesul prezentat în figură.  
(fotografie în camera cu ceață, în câmp magnetic omogen, perpendicular pe figură).



101. Încercați să descrieți cum ar arăta în camera cu ceață fotografiile traiectoriilor unor particule de natură diferită: electron, proton, pozitron, neutron, particulă alfa, foton X, mezon pi, radiație gama, ioni grei (cum ar fi  $C^{+5}$ ), etc.

102. Fotografia prezintă urma în spirală a unei particule într-o cameră cu bule plasată în câmp magnetic omogen. Să se explice calitativ cauzele mișcării în spirală. În fotografie se mai văd și fragmente din alte traiectorii. Care sunt motivele posibile care fac ca aceste traiectorii să aibă raze de curbură și alură diferită una față de alta?



103. În figură se prezintă o ciocnire surprinsă pe o fotografie într-o cameră cu bule plasată în câmp magnetic omogen. Să se identifice ciocnirea și să se explice cum anume se pot verifica legile ciocnirii utilizând această imagine. Ce parametrii ar trebui să mai cunoașteți pentru a putea rezolva complet problema?



104. În figură se prezintă o serie de evenimente la scară atomică care au fost surprinse într-o cameră cu bule. Să se explice natura evenimentului care s-a produs în punctul încercuit. Argumentați răspunsul și explicați cum s-ar putea determina parametrii particulelor observate?

