

Détection de particules chargées dans un modèle simplifié de chambre à bulles

Decan de Chatouville R. et Garnier M.

Janvier 2023

PARTICLE PHYSICS WITH BUBBLE CHAMBER PHOTOGRAPHS

L. Bettelli*^o, M. Bianchi-Streit* and G. Giacomelli*^o

Abstract

A few bubble chambers photographs for illustration of high-energy physics *events* at the high school level are here presented after briefly recalling some basic concepts of particle accelerators, bubble chambers and conservation laws in particle physics. Each photograph has a relevance for the understanding of particle physics concepts and of the methods used for analysis.

Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Fonctionnement d'une chambre à bulles
- 3 Détection de particules : modélisation de trajectoire
- 4 Analyse des résultats
- 5 Limites et conclusion

Trois questions vont guider cet exposé :

- **À quoi bon détecter des particules ?** (Introduction.)
- **Comment détecter des particules ?** (En particulier, dans une chambre à bulle.)
- **Comment avons-nous fait ?** (Notre méthode.)

Mission : recherche de particules !

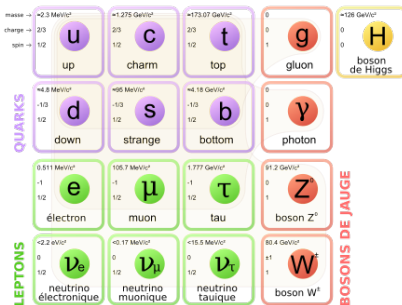


Figure – Particules élémentaires du modèle standard
(source : Wikipédia)

Expectations vs Reality

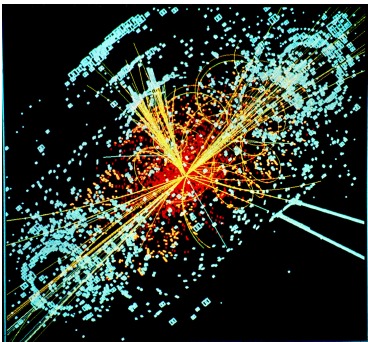


Figure – Ce que l'on voulait étudier... (une triple dés-intégration et des collisions dans tous les sens avec simulation numérique)
(source : CERN)

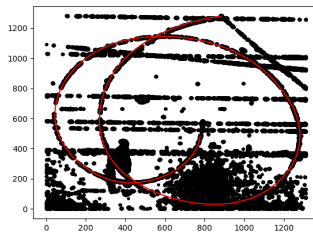


Figure – Ce que l'on a fait ! (C'est bien aussi !)

Problématique

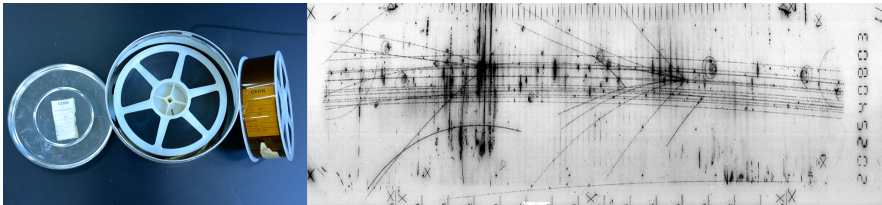


Figure – Pellicule et photographies de particules en chambre à bulles
(source : CERN)



Quelles particules voit-on ?

Méthode pour détecter la particule (différente de celle de l'article et dans la continuité du programme du S1) ?

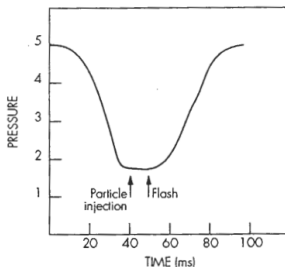
II – Fonctionnement d'une chambre à bulles



Figure – Chambre à bulles aux États-Unis, Illinois
(source : *Fermilab*)

Configuration initiale et cycle de fonctionnement

- chambre à bulles remplie d'hydrogène liquide (ou néon, CF_3I ...),
- champ magnétique (≈ 1 Tesla),
- particules accélérées (≈ 1 GeV) envoyés dans la chambre à bulles.



↑ Fig. 4

Pressure cycle in a bubble chamber exposed to a particle beam at an accelerator. The chamber becomes sensitive after reducing the pressure. About 10 ms after reducing the pressure, the particle beam is sent to the chamber. The flash is activated about 10 ms later and the cycle is terminated about 20 ms later when the bubble chamber pressure is increased.

Figure – Évolution de la pression en fonction du temps dans l'enceinte de la chambre à bulles
(source : l'article)

Métastabilité des liquides en surébullition

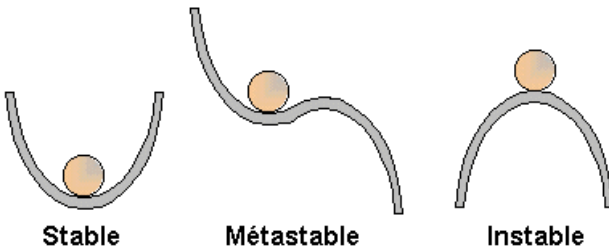


Figure – (source : CEA)

Formation de bulles le long de la trajectoire



Figure – (source : *Will cook for friends*)

Acquisition de données

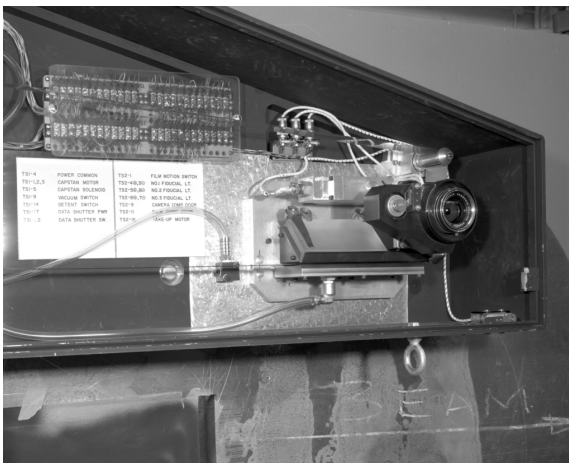


Figure – Exemple d'appareil photographique
Brookhaven National Laboratory, 6 décembre 1965

III - Détection de particules : modélisation de trajectoire

Deux approches !

Physique classique

Physique (un peu) relativiste

Système (chambre à bulles) : zone de l'espace dans lequel règne un **champ magnétique constant** et dans laquelle existe des **frottements fluides**.

Problèmes : caractères métastable, chimique du fluide écartés, aucun effets quantiques ou (vraiment) relativiste, aucune influence de la pression ou température dans le modèle...

On se place dans un référentiel $\mathcal{R}(O; \vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z)$ supposé galiléen.

Mécanique classique

Force de Laplace : $F_m = q \vec{v} \wedge \vec{B}$.

Force de frottement fluide : $F_f = -\alpha \vec{v}$.

Poids négligé.

Mécanique classique

Force de Laplace : $F_m = q \vec{v} \wedge \vec{B}$.

Force de frottement fluide : $F_f = -\alpha \vec{v}$.

Poids négligé.

Principe fondamental de la dynamique :

$$m \begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{pmatrix}_{M/\mathcal{R}} = q \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{pmatrix}_{M/\mathcal{R}} \wedge \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ B \end{pmatrix} - \alpha \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{pmatrix}_{M/\mathcal{R}}$$

$$m \begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{pmatrix}_{M/\mathcal{R}} = q \begin{pmatrix} \dot{y}B \\ -\dot{x}B \\ 0 \end{pmatrix}_{M/\mathcal{R}} - \alpha \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{pmatrix}_{M/\mathcal{R}}$$

Alors :

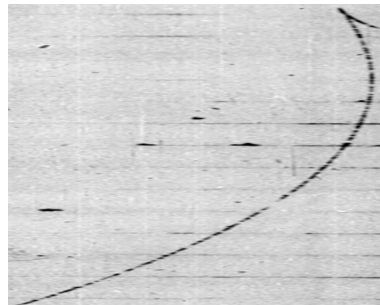
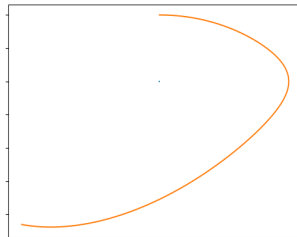
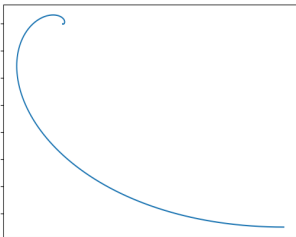
$$\begin{cases} \ddot{x} = \frac{qB}{m} \dot{y} - \frac{\dot{x}}{\tau} \\ \ddot{y} = -\frac{qB}{m} \dot{x} - \frac{\dot{y}}{\tau} \end{cases}$$

avec $\tau = \frac{m}{\alpha}$.

On utilise, comme habituellement, la **méthode des complexes** pour résoudre (avec la vitesse initiale $\vec{v}_0 = v_0 \cos(\theta) \vec{e}_x + v_0 \sin(\theta) \vec{e}_y$). On trouve :

$$\begin{cases} x(t) &= -e^{-\frac{t}{\tau}} v_0 \omega_c \sin(\theta + \omega_c t) - \frac{1}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} v_0 \cos(\theta + \omega_c t) \\ y(t) &= e^{-\frac{t}{\tau}} v_0 \omega_c \cos(\theta + \omega_c t) - \frac{1}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} v_0 \sin(\theta + \omega_c t) \end{cases}$$

avec $\omega_c = \frac{qB}{m}$.



Mécanique (un peu) relativiste

Forme générale du PFD :

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \sum_i \vec{F}_i$$

avec $\vec{p} = m\vec{v}$ (en **classique**) ou $\vec{p} = m\vec{v}\gamma$ (en **relativiste**).



Mécanique (un peu) relativiste

Forme générale du PFD :

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \sum_i \vec{F}_i$$

avec $\vec{p} = m\vec{v}$ (en **classique**) ou $\vec{p} = m\vec{v}\gamma$ (en **relativiste**).

On a :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\|\vec{v}\|^2}{c^2}}}$$

Ainsi : $[\gamma] = 1$.



Mécanique (un peu) relativiste

Forme générale du PFD :

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \sum_i \vec{F}_i$$

avec $\vec{p} = m\vec{v}$ (en **classique**) ou $\vec{p} = m\vec{v}\gamma$ (en **relativiste**).

On a :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\|\vec{v}\|^2}{c^2}}}$$

Ainsi : $[\gamma] = 1$.

Calculons :

$$\frac{d\vec{p}}{dt} := \frac{d}{dt} \{ m\vec{v}\gamma \} \tag{1}$$



$$\begin{aligned}\frac{d\vec{p}}{dt} &= \frac{d}{dt} \left\{ m \vec{v} \gamma \right\} \\ &= m \gamma \vec{a} + m \vec{v} \frac{d}{dt} \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right\} \\ &= m \gamma \vec{a} - \frac{1}{2} m \vec{v} \left(\frac{-2\dot{v}v}{c^2} \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-3/2} \right) \\ &= m \gamma \vec{a} + m \vec{v} \frac{v\dot{v}}{c^2} \gamma^3\end{aligned}$$

L'équation est homogène (ouf!).

$$\begin{aligned}
 \frac{d\vec{p}}{dt} &= \frac{d}{dt} \left\{ m \vec{v} \gamma \right\} \\
 &= m \gamma \vec{a} + m \vec{v} \frac{d}{dt} \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right\} \\
 &= m \gamma \vec{a} - \frac{1}{2} m \vec{v} \left(\frac{-2\dot{v}v}{c^2} \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-3/2} \right) \\
 &= m \gamma \vec{a} + m \vec{v} \frac{v\dot{v}}{c^2} \gamma^3
 \end{aligned}$$

L'équation est homogène (ouf!).

Le PFD nous donne donc :

$$\begin{aligned}
 m \gamma \vec{a} + m \vec{v} \frac{v\dot{v}}{c^2} \gamma^3 &= q \vec{v} \wedge \vec{B} - \alpha \vec{v} \\
 m \gamma \begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{pmatrix} + m \frac{\gamma^3}{c^2} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2} \frac{2\ddot{x}\dot{x} + 2\ddot{y}\dot{y}}{2\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}} &= qB \begin{pmatrix} \dot{y} \\ -\dot{x} \end{pmatrix} - \alpha \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

En conclusion, on a, dans le cas **relativiste** :

$$\begin{cases} m\gamma\ddot{x} + m\frac{\gamma^3}{c^2}\dot{x}(\ddot{x}\dot{x} + \ddot{y}\dot{y}) = qB\dot{y} - \alpha\dot{x} \\ m\gamma\ddot{y} + m\frac{\gamma^3}{c^2}\dot{y}(\ddot{x}\dot{x} + \ddot{y}\dot{y}) = -qB\dot{x} - \alpha\dot{y} \end{cases}$$

Python et ses erreurs...

SystemError : excessive stack use : stack is 3285 deep.

IV - Méthode et résultats

Méthode :



Figure – Image brute d'une trajectoire dans une chambre à bulles
(source : *Département de physique de Toronto*)

IV - Méthode et résultats

Méthode :

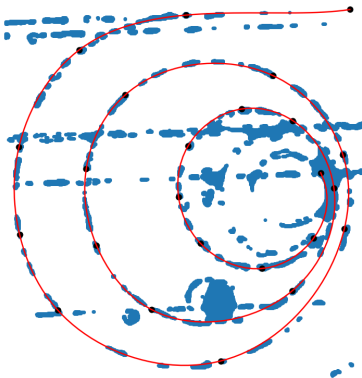
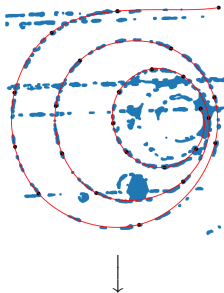


Figure – Trajectoire interpolée

IV - Méthode et résultats

Méthode :



Trouver une relation entre la masse, la charge et les équations du mouvement.
Injecter les valeurs interpolées (x, y) dans la relation obtenue.

Déterminer la relation :

On reprend les équations du mouvement (un peu) relativiste en ayant fait le changement de variable $X = \dot{x}$ et $Y = \dot{y}$:

$$m\gamma\dot{X} + m\frac{\gamma^3}{c^2}X(\dot{X}X + \dot{Y}Y) = qBY - \alpha X$$

$$m\gamma\dot{Y} + m\frac{\gamma^3}{c^2}Y(\dot{X}X + \dot{Y}Y) = -qBX - \alpha Y$$

Déterminer la relation :

On reprend les équations du mouvement (un peu) relativiste en ayant fait le changement de variable $X = \dot{x}$ et $Y = \dot{y}$:

$$m\gamma\dot{X} + m\frac{\gamma^3}{c^2}X(\dot{X}X + \dot{Y}Y) = qBY - \alpha X$$

$$m\gamma\dot{Y} + m\frac{\gamma^3}{c^2}Y(\dot{X}X + \dot{Y}Y) = -qBX - \alpha Y$$

On multiplie l'équation du haut par Y et l'équation du bas par X , puis on en prend la différence :

$$m\gamma(\dot{X}Y - \dot{Y}X) = qB(Y^2 + X^2)$$

Déterminer la relation :

On reprend les équations du mouvement (un peu) relativiste en ayant fait le changement de variable $X = \dot{x}$ et $Y = \dot{y}$:

$$m\gamma\dot{X} + m\frac{\gamma^3}{c^2}X(\dot{X}X + \dot{Y}Y) = qBY - \alpha X$$

$$m\gamma\dot{Y} + m\frac{\gamma^3}{c^2}Y(\dot{X}X + \dot{Y}Y) = -qBX - \alpha Y$$

On multiplie l'équation du haut par Y et l'équation du bas par X , puis on en prend la différence :

$$m\gamma(\dot{X}Y - \dot{Y}X) = qB(Y^2 + X^2)$$

On divise par Y^2 et l'on reconnaît une identité :

$$m\gamma\left(\underbrace{\frac{\dot{X}Y - \dot{Y}X}{Y^2}}_{= \left(\frac{X}{Y}\right)'}\right) = qB\left(\underbrace{\frac{Y^2 + X^2}{Y^2}}_{= 1 + \frac{X^2}{Y^2}}\right)$$

Donc :

$$m\gamma\left(\frac{X}{Y}\right)' = qB\left(1 + \left(\frac{X}{Y}\right)^2\right)$$

Donc :

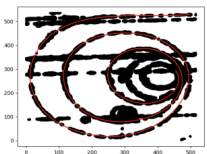
$$m\gamma\left(\frac{X}{Y}\right)' = qB\left(1 + \left(\frac{X}{Y}\right)^2\right)$$

On pose $Z(t) = \frac{X(t)}{Y(t)}$, et l'on obtient :

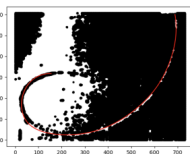
$$\boxed{\frac{m}{q} = \frac{B}{\gamma} \left(\frac{1 + Z^2}{\dot{Z}} \right)}$$

(Raisonnement absolument identique dans le cas classique mais sans le γ .)

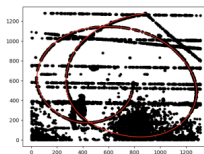
Analyse des résultats



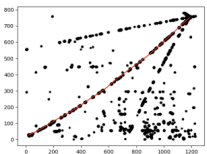
(a)



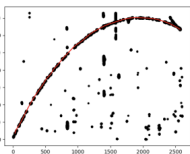
(b)



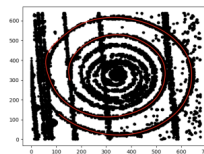
(c)



(d)



(e)



(f)

	classique	relativiste (0.1c, 0.99c)	relativiste (modèle)
(a)	-9.792067046685643	-9.792067046651212, -1.381341045227812	-5.021604589136478
(b)	80.3631584770906	79.9603330909135, 11.33661859128366	4.423352083858184
(c)	2230.186782338283	2219.0078308278285, 314.60656123786777	1784.1494258706275
(d)	-38.276352540036996	-38.08448991560071, -5.399543995469133	-4.186670170354276
(e)	-242.13455453110188	-240.9208398478542, -34.15728232324268	-2.421315278299895
(f)	6810.573755099996	6776.435325812552, 960.7496583323733	992.1361626538778

Électron

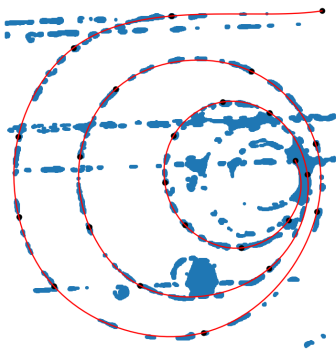


Table 1. Mass in MeV/c^2 for all fundamental elementary particles (modified from [6]). The particle variant with the longest lifetime is printed in bold.

Particle	charged	neutral	
LEPTONS			
Electron	0.511 (-)		
Muon	105.66 (-)		
Tau	1776.99 (-)		
MESONS			
Pion	139.57 (+/-)	134.98	
Kaon	493.68 (+/-)	497.65	K_S^0 and K_L^0
Eta		547.75	
Rho		775.8	
Omega		782.59	
D Meson	1869.4 (+/-)		
Ds Meson	1968.3 (+/-)		
B Meson	5279.0 (+/-)	5279.4	
Bs Meson		5369.6	
BARYONS			
	positive	neutral	negative
Nucleon	938.27	939.56	
Lambda		1116.68	
Sigma	1189.37	1192.64	1197.45

Figure – source : Karl Greulich. Calculation of the masses of all fundamental elementary particles with an accuracy of approx. 1. *J. Mod. Phys*, 1 :300–302, 01 2010.

	classique	relativiste (0.1c, 0.99c)	relativiste (modèle)
(a)	-9.792067046685643	-9.792067046651212, -1.381341045227812	-5.021604589136478

Méson

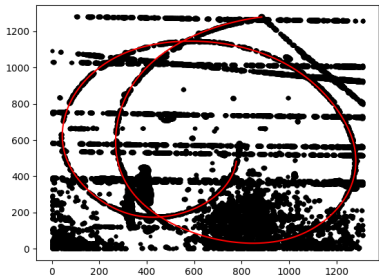


Table 1. Mass in MeV/c² for all fundamental elementary particles (modified from [6]). The particle variant with the longest lifetime is printed in bold.

Particle	charged	neutral	
LEPTONS			
Electron	0.511 (-)		
Muon	105.66 (-)		
Tau	1776.99 (-)		
MESONS			
Pion	139.57 (+/-)	134.98	
Kaon	493.68 (+/-)	497.65	Ks ⁰ and K _L ⁰
Eta		547.75	
Rho		775.8	
Omega		782.59	
D Meson	1869.4 (+/-)		
Ds Meson	1968.3 (+/-)		
B Meson	5279.0 (+/-)	5279.4	
Bs Meson		5369.6	
BARYONS			
	positive	neutral	negative
Nucleon	938.27	939.56	
Lambda		1116.68	
Sigma	1189.37	1192.64	1197.45

Figure – source : Karl Greulich. Calculation of the masses of all fundamental elementary particles with an accuracy of approx. 1. J. Mod. Phys, 1 :300–302, 01 2010.

	classique	relativiste (0.1c, 0.99c)	relativiste (modèle)
(c)	2230.186782338283	2219.0078308278285, 314.60656123786777	1784.1494258706275

V – Limites et conclusion

