

MP113 – Noyaux et particules

Partie « physique des particules » : Bibliographie

Les bases

Mécanique quantique tomes 1 et 2

Auteur(s) : Cohen-Tannoudji C., Diu B., Laloe F.

Éditeur(s) : Hermann

Année d'édition : 1992

Numéro d'édition : 4. ED.

Langue : Français

ISBN : 2705660747 et 2705661212

*** Bible de la mécanique quantique. Très complet. A avoir sous le coude

Relativité

Auteur(s) : Boratav M., Kerner R.

Éditeur(s) : Ellipses, Edition Marketing

Année d'édition : 1991

Langue : Français

ISBN : 2729891455

*** Va des bases de la relativité restreinte jusqu'à l'introduction de la relativité générale. Basique, léger et facile à lire. Donne des exemples pratiques de la physique de particules.

Relativistic kinematics

Auteur(s) : Hagedorn R.

Éditeur(s) : Benjamin, Cummings Publishing Company

Année d'édition : 1980

Langue : Anglais

*** Compacte. Convenable à un physicien des particules. Aborde des problèmes utiles qui sont spécifiques au domaine, tel que l'espace de phase et les plots de Dalitz.

Introduction to special relativity

Auteur(s) : Rindler W.

Éditeur(s) : Oxford University Press

Année d'édition : 1991

Numéro d'édition : 2. ED.

Langue : Anglais

ISBN : 0198539525pbk, 0198539533

*** Classique. Fait moins référence à la physique de particules.

La physique des particules

The particle Odyssey

A journey to the heart of matter

Auteur(s) : Close F., Marten M., Sutton C.

Éditeur(s) : Oxford University Press

Année d'édition : 2002

Langue : Anglais

ISBN : 0198504861

*** Vulgarisation. Bonne vue globale de ce qui se fait dans le monde à l'heure actuelle en physique de particules, astroparticules et neutrinos. Introduction historique assez complète. A lire avant de s'endormir.

Introduction to high energy physics

Auteur(s) : Perkins D.H.

Éditeur(s) : Cambridge University Press

Année d'édition : 2000

Langue : Anglais

ISBN : 0521621968

*** Certaines parties donnent une bonne introduction au domaine. D'autres parties sont un peu anciennes et inutilement compliquées.

Introduction à la physique subatomique

Auteur(s) : Rouge A.

Éditeur(s) : Ellipses

Année d'édition : 1997

Langue : Français

ISBN : 2729857133

*** Explication claire et exemples qui correspondent à une partie du cours. Contient les bases en mécanique quantique et relativité restreinte.

Quarks and leptons: an introductory course in modern particle physics

Auteur(s) : Halzen F., Martin A.D.

Éditeur(s) : John Wiley & Sons

Année d'édition : 1984

Langue : Anglais

ISBN : 0471811874

*** Seulement les premiers chapitres s'appliquent au cours. Permet l'aller au-delà du cours.

Energie cinétique seuil
(def. dans le labo)

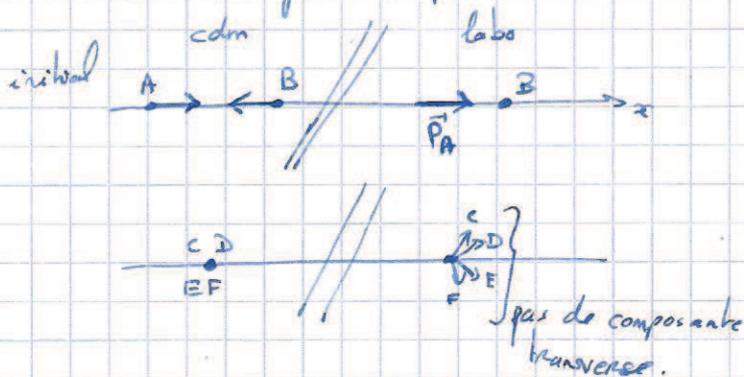


avec $Q = m_A + m_B - m_C - m_D - m_E - m_F$

Si $Q < 0$, et sur cible



Si je donne juste l'énergie cinétique seuil pour q la réaction ait lieu, je fabrique ds le cdn des particules sans énergie cinétique.



$$s = (P_A + P_B)^2 = (P_C + P_D + P_E + P_F)^2$$

$$\begin{pmatrix} E_A + m_B \\ \vec{p}_A \end{pmatrix}^2 = \begin{pmatrix} \sum m_{final} \\ 0 \end{pmatrix}^2$$

$$(E_A + m_B)^2 - \vec{p}_A^2 = (\sum m_{fin})^2$$

$$\underbrace{E_A^2 - p_A^2}_{m_A^2} + 2m_B E_A + m_B^2 \quad \text{avec} \quad E_A = m_A + T_{seuil}$$

$$\Rightarrow 2m_B T_{seuil} = (\sum m_{final})^2 - (m_A + m_B)^2$$

$$T_{seuil} = \frac{(\sum m_f)^2 - (\sum m_i)^2}{2m_B} = \frac{-Q + \sum m}{2m_B} \quad \text{car} \quad \sum m_f - \sum m_i = -Q$$

pour cible fixe

IV a) $-Q = m_{\pi^0} \approx 135 \text{ MeV}$
 $\sum m_{if} = 4m_p + m_{\pi^0} = 3885,2 \text{ MeV}$

$T_{seuil} = 279,7 \text{ MeV} > -Q$

l'énergie supplémentaire sert à mettre en mov le cdn

b) $-Q = 2m_p$
 $\sum m_{if} = 6m_p \Rightarrow T_{seuil} = 6m_p (= 3 \times (2m_p))$

↑
3x la masse créée

c) $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$ $m_W = 80,1 \text{ GeV}$
 $m_e = 511 \text{ keV}$



1) $2E_e = 2m_W$

$T_e = E_e - m_e \approx m_W$

2) cible fixe

$-Q = 2m_W - 2m_e \approx 2m_W$

$\Sigma m_{\text{fg}} \approx 2m_W$

$T_{\text{seuil}} = \frac{4m_W^2}{2m_e} = 10^{16} \text{ eV}$

Au CERN en déc 2012
 $\rightarrow 10^{12} \text{ eV} = \text{TeV}$

V $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$

a) \vec{P}_π : $\begin{pmatrix} E_\pi \\ \vec{P}_\pi \end{pmatrix}$
uniaxial

\vec{P}_{γ_1} : $\begin{pmatrix} p_1 \\ \vec{P}_1 \end{pmatrix}$

\vec{P}_{γ_2} : $\begin{pmatrix} p_2 \\ \vec{P}_2 \end{pmatrix}$

R) $p_1^2 - P_1^2 = 0$ ($m_\gamma = 0$)

$\vec{P}_\pi^2 = (\vec{P}_{\gamma_1} + \vec{P}_{\gamma_2})^2$

$m_\pi^2 = \underbrace{2m_\gamma^2}_{=0} + 2\vec{P}_{\gamma_1} \cdot \vec{P}_{\gamma_2} = 2p_1 p_2 - \underbrace{2\vec{P}_1 \cdot \vec{P}_2}_{p_1 p_2 \cos(\theta)}$

$\Rightarrow \sin^2(\theta/2) = \frac{m_\pi^2}{4p_1 p_2}$

$\theta = 2 \arcsin \left(\frac{m_\pi}{2\sqrt{p_1 p_2}} \right)$

θ min pour $p_1 p_2$ min

$p_2 = E_\pi - p_1$

$f(p_1) = p_1 p_2 = p_1 (E_\pi - p_1)$

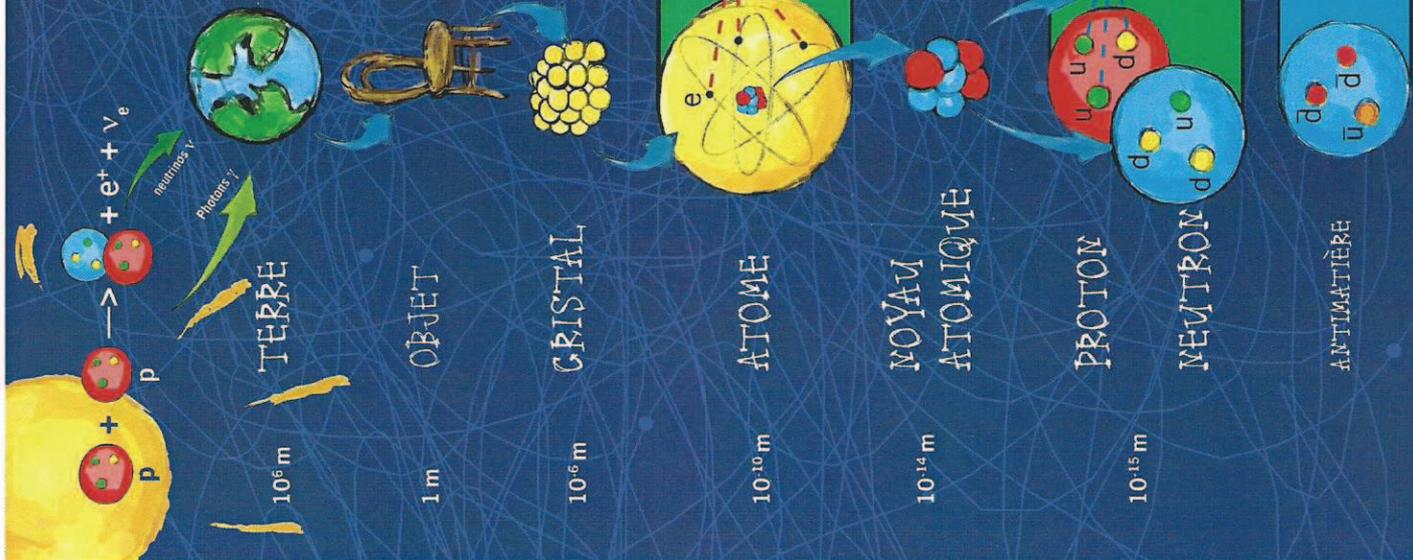
$f'(p_1) = E_\pi - 2p_1 = 0 \Rightarrow p_1 = p_2 = \frac{E_\pi}{2}$

$$\underline{b)} \quad \theta_{\min} = 2 \arcsin \left(\frac{m_{\pi}}{E_{\pi}} \right)$$

$$E_{\pi} = \gamma m_{\pi}$$

$$\theta_{\min} = 2 \arcsin \left(\frac{1}{\gamma} \right)$$

- Si $\gamma \gg 1$, $\theta_{\min} \approx 2/\gamma$
- Au repos $\gamma = 1$, $\theta_{\min} = 2 \times \frac{\pi}{2} = \pi$
- $E_{\pi} = 2m_{\pi}$, $\theta_{\min} = 2 \arcsin \left(\frac{1}{2} \right) = 60^{\circ}$



Composants élémentaires de la matière

Les interactions fondamentales

Il existe des **PARTICULES ASSOCIÉES** aux interactions fondamentales permettant leur propagation.

Gravitation Attraction universelle, planètes, galaxies. GRAVITON ?
Interaction faible Désintégrations radioactives. Z^0, W^+, W^-
Interaction électromagnétique Électricité, magnétisme, cohésion de l'atome et du cristal, chimie. PHOTON
Interaction forte Cohésion des protons et des noyaux. GLUON

Les 4 forces fondamentales sont indispensables au fonctionnement du soleil (et des étoiles) :

- formation de l'étoile causée par la gravitation;
- réactions de fusion nucléaire avec l'interaction faible et forte;
- production de lumière: interaction électromagnétique.

Les 4 particules de la première famille sont présentes dans le soleil qui envoie sur la terre un flux intense de photons et de neutrinos.

1 ^{re} famille	2 ^e famille	3 ^e famille
<p>Les membres de la 1^{re} famille composent l'ensemble de la matière ordinaire (protons, neutrons, atomes...).</p> <p>e électron $m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ $q = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$</p> <p>$\nu_e$ neutrino e $m = 0$</p>	<p>Réplique plus massive et instable de la 1^{re} famille. La muon est 200 fois plus lourd que l'électron.</p> <p>μ muon $m = 1,9 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$</p> <p>$\nu_\mu$ neutrino muon $m = 0$</p>	<p>Réplique encore plus massive et instable de la 1^{re} famille. Le topion est 170 fois plus lourd que l'électron.</p> <p>τ tau $m = 1,77 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$</p> <p>$\nu_\tau$ neutrino tau $m = 0$</p>
<p>u haut / up $m = 2,3 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$</p> <p>d bas / down $m = 1,9 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$</p>	<p>c charme / charm $m = 1,27 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$</p> <p>s étrange / strange $m = 9,3 \cdot 10^{-28} \text{ kg}$</p>	<p>t top $m = 173 \text{ GeV}$</p> <p>b beau / beauty / bottom $m = 4,18 \text{ GeV}$</p>

LEPTONS
Particules "insensibles" à l'interaction forte.

QUARKS
S'assemblent en triplets ou en paires quark-antiquark pour former les nombreux particules subatomiques.

A chaque particule correspond une antiparticule aux propriétés quasi-identiques. La charge électrique d'une antiparticule est l'opposé de la particule correspondante.



<http://sp.in2p3.fr/affiche>

de physique des particules pour les nuls

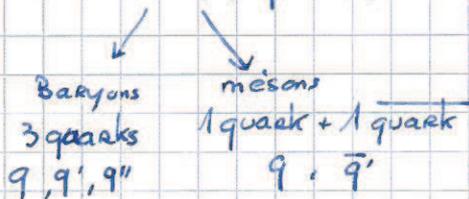
1930 : postulat de ν_e pour sauver la conservation de l'énergie par Pauli

Bohr : postule que l'énergie ne se conserve pas

Particules de 2^{ème} et 3^{ème} familles de masse bcp plus élevées qui se désintègrent donc en éléments de la 1^{ère} famille, stables dans ce monde.

Définitions :

• Hadrons : particules composées de quarks



* le méson de charge +1 le plus léger :

$$\begin{matrix} u & \bar{d} \\ \uparrow & \uparrow \\ q = \frac{2}{3} & q = -\frac{1}{3} \end{matrix} \equiv \pi^+$$

-1

$$\bar{u} d \equiv \pi^-$$

0

$$u\bar{u} \text{ ou } d\bar{d} \equiv \pi^0$$

$$|\pi^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|u\bar{u}\rangle + |d\bar{d}\rangle)$$

* l'anti-proton : $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$
(q = -1)

* l'anti-neutron : $\bar{d}\bar{d}\bar{u}$
(q = 0)

* π^0 est sa propre anti-particule

* le méson étrange (contient un quark s) le plus léger avec une charge +1 :

$$\bar{s}u \equiv K^+$$

* Méson neutre contenant du charme : $c\bar{c} \equiv J/\psi$

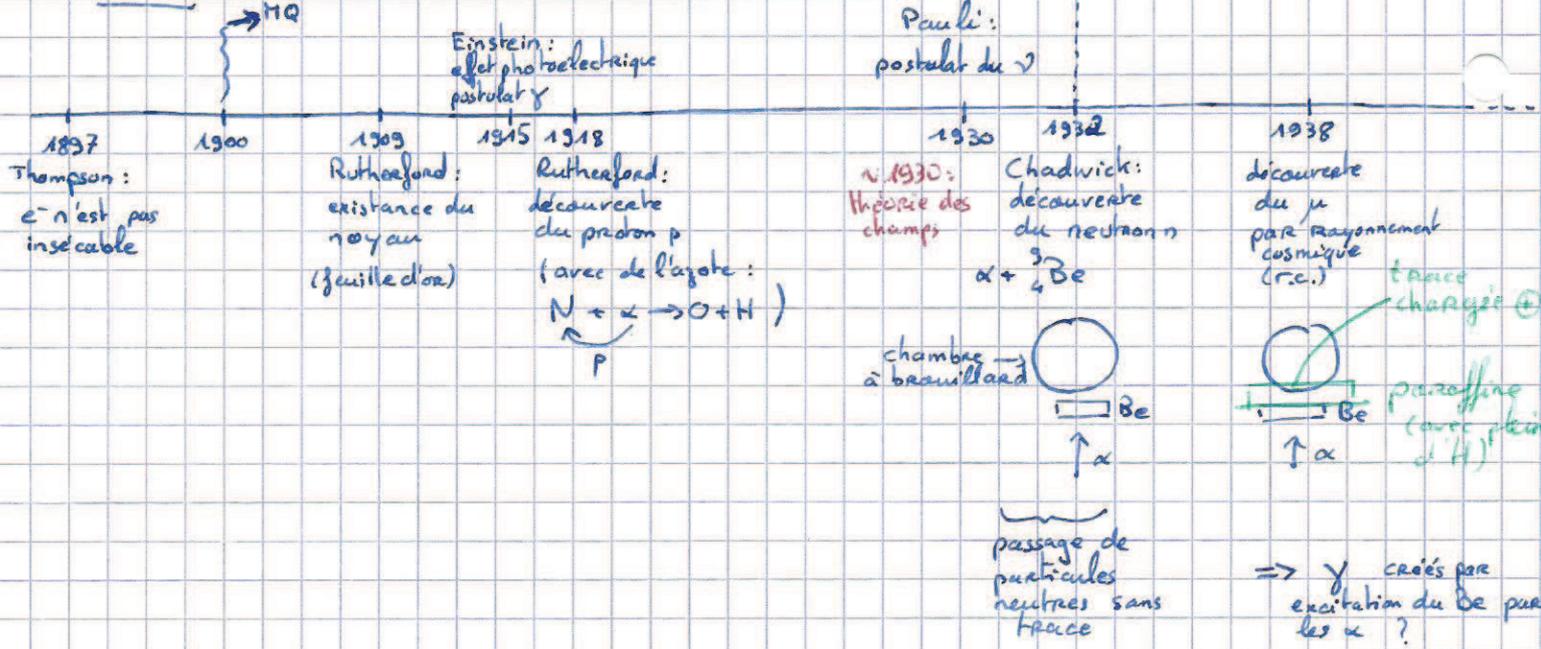
les leptons ne sont pas concernés par l'interaction forte
 le neutrino n'est l'interaction em (pas de charge)

Intensité relative des interactions

Int	Int-Rel
IF	1
EM	10^{-2}
Faible	10^{-5}
Gravitation	10^{-40}

Chambre à brouillard: espace métastable qui devient instable par passage de particules (espace ionisé)

Histoire:



postulat de Joliot-Curie

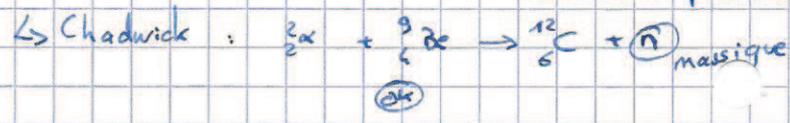
$$\vec{p}_i = \begin{pmatrix} E_i \\ p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} \quad \vec{p}_f = \begin{pmatrix} E_f \\ p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix}$$

E_γ min pour $\cos(\theta) = 1$

$$p_f^2 = (\vec{p}_i^p + \vec{p}_i^\nu - \vec{p}_f) \Rightarrow 0 = 0 + 0 + M + \dots$$

$$\Rightarrow E_\gamma^{\text{min}} = \frac{M(E_p - M)}{M - E_p + p_p} \sim 10^6 \text{ MeV}$$

trappé par la radioactivité possible

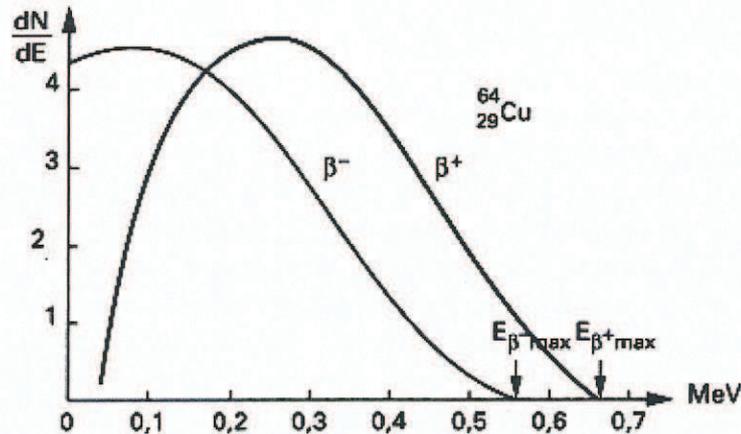


TD n° 2

Introduction à la physique des particules

I. La désintégration β et le neutrino

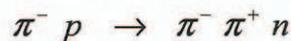
- On sait que la désintégration du neutron est décrite par la réaction $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$. De quelle interaction s'agit-il ? Rappeler quel est le temps de vie du neutron (voir PDG), et comparer aux temps caractéristiques de désintégrations par autres interactions. Rappeler le lien entre ce temps et l'intensité de l'interaction.
- Avec le spectre β^- de la figure ci-dessous, expliquer pourquoi les physiciens aux années 1930 ont trouvé nécessaire d'introduire l'anti-neutrino.
- La réaction β^+ correspond à la réaction $p \rightarrow n e^+ \nu_e$. Expliquer pourquoi cette interaction n'est pas possible pour un proton libre, mais uniquement au sein d'un noyau.
- Interpréter qualitativement les deux spectres et justifier le fait qu'ils s'arrêtent à droite.
- On donne les excès de masses en MeV : $\Delta(^{64}\text{Zn}) = -66.0030$, $\Delta(^{64}\text{Cu}) = -65.4240$, $\Delta(^{64}\text{Ni}) = -67.0990$
Trouver les valeurs approximatives de $E_{\beta^- \text{max}}$ et $E_{\beta^+ \text{max}}$.



Spectre d'émission $\beta^- - \beta^+$, cas du $^{64}_{29}\text{Cu}$

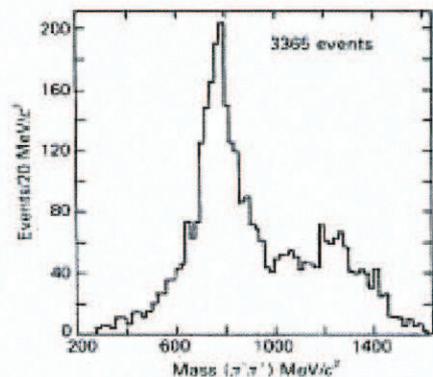
II. Masse invariante

La figure ci-dessous représente un histogramme du nombre de détections des produits de la réaction :



en fonction de la masse invariante des deux pions finaux (π^- , π^+).

- Définir la masse invariante des deux pions en fonction de leurs énergies et impulsions (leurs modules et l'angle entre elles). Montrer qu'il s'agit de l'énergie du système des deux pions dans leur centre de masse (comme toujours avec ce type d'invariant relativiste).
- Comment interprète-t-on le pic principal de cet histogramme ?



III. Diagrammes, interactions

- a) Tracer tous les diagrammes qui décrivent les interactions du boson W avec des fermions. On raisonnera en termes de quark de type « up » et de type « down » sans expliciter leurs saveurs (étrange, charmé etc.).
- b) Donner le diagramme qui permet la stabilité des atomes et des molécules.
- c) Donner le diagramme qui permet au pion d'exister.
- d) Tracer le diagramme des désintégrations β et β^+ .
- e) Tracer le diagramme correspondant au processus dominant de désintégration du méson pi chargé (voir PDG). Il s'agit du processus qui est responsable de la création des muons cosmiques.
- f) Même question pour le méson pi neutre.
- g) Tracer le diagramme qui correspond à la désintégration du muon. Pourquoi on n'observe pas un processus similaire qui permettrait la désintégration de l'électron ?
- h) Tracer les diagrammes des trois processus suivants dans le cadre de la QED : la diffusion élastique entre deux électrons, le rayonnement de freinage d'un électron et la création d'une paire e^+e^- lors du passage d'un photon dans un milieu matériel. A l'aide de ces diagrammes, comment peut-on comparer les probabilités des trois processus ?

IV. Découverte de l'anti-électron

(Voir article)

L'anti-électron fut découvert en 1932 par Anderson, dans une chambre à brouillard¹. Un événement qui a permis cette découverte est montré dans le cliché de la Figure 1 de l'article.

1. La chambre à brouillard est soumise à un champ magnétique perpendiculaire à l'image et orienté vers la feuille. Rappeler la formule classique qui donne la relation entre le champ magnétique (B), l'impulsion de la particule (p), sa charge électrique (q) et le rayon de courbure (R).
2. L'objet visible dans le centre de la chambre est une plaque de plomb. Les caractéristiques des traces en haut et en bas de la plaque permettent de déterminer qu'il s'agit d'une même particule, dont la masse est très inférieure à celle du proton. Par où la particule est entrée dans la chambre ?
3. Quel est le signe de la charge de la particule qui a laissé une trace dans la chambre ?

Etudier ensuite l'article, afin de comprendre comment on a pu conclure qu'il s'agissait de « l'électron positif ».

¹ Inventé en 1912 par le physicien écossais Wilson et utilisé jusque dans les années 1950, ce type de détecteur a été supplanté par la chambre à bulles, plus performante.



July 2012

PARTICLE PHYSICS BOOKLET

Extracted from the *Review of Particle Physics*
J. Beringer et al. (Particle Data Group),
Phys. Rev. D **86**, 010001 (2012)

See <http://pdg.lbl.gov/> for Particle Listings, complete
reviews and pdgLive (our interactive database)



Available from PDG at LBNL and CERN