

Thème : OBSERVER – Ondes et matière (Sous-thème : Détecteurs d'ondes et de particules)
Type de ressources : Pistes d'activités et documents illustrant des notions du programme. Prolongements et approfondissements des notions au programme. Références bibliographiques et sitographie.
Notions et contenus : Détecteurs d'ondes (mécaniques et électromagnétiques) et de particules (photons, particules élémentaires ou non)
Compétence travaillée ou évaluée : Extraire et exploiter les informations
Nature de l'activité : Activité documentaire
Résumé : Une démarche d'investigation est proposée pour associer les particules citées qui ont traversé le détecteur spatial AMS (Alpha Magnetic Spectrometer) aux enregistrements envoyés par l'IN2P3 (Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules). Les élèves disposent de documents expliquant le fonctionnement d'une partie des détecteurs d'AMS, ils doivent sélectionner ceux qui sont pertinents pour réussir dans leur démarche. Une idée de prolongement expérimental est proposée pour différencier les notions d'onde électromagnétique et de particule (photon).
Mots clefs : particules, dispositif de détection, champ magnétique
Académie où a été produite la ressource : Académie d'Orléans-Tours http://physique.ac-orleans-tours.fr/

Remerciements adressés à : Mme Rosier-Lees (Directeur du projet AMS-France LAPP-IN2P3)
M Vialle (Directeur de Recherche émérite LAPP-IN2P3)
M Bradu (ingénieur au CERN)
M Bolmont (maître de conférences LPNHE - UPMC/IN2P3/CNRS)

Pour leur aide et l'autorisation d'utiliser des documents qu'ils avaient produits.

Identifier des particules

Conditions de mise en œuvre :

Découverte d'un détecteur de particules ; activité de 2h en classe entière ou demi-classe par groupes de 4. (Le travail par groupes permettrait aux élèves d'accéder aux TIC et de rendre, par exemple, un travail rédigé via l'ENT où ils pourraient inclure, dans leur production numérique, les documents sur lesquels s'appuie leur raisonnement). L'activité nécessite de pouvoir lire une vidéo (ordinateur équipé de haut-parleurs ou casque).

Extrait du BO :

Notions et contenu	Compétences exigibles
Détecteurs d'ondes (mécaniques et électromagnétiques) et de particules (photons, particules élémentaires ou non).	Extraire et exploiter des informations sur : - un dispositif de détection <i>Pratiquer une démarche expérimentale mettant en œuvre un capteur ou un dispositif de détection.</i>

Compétences travaillées :

- **Compétences du préambule du cycle terminal** : Rechercher, extraire et organiser l'information utile ; Pratiquer une démarche scientifique (identifier un problème, formuler des hypothèses pertinentes, confronter des hypothèses à des résultats expérimentaux, exercer son esprit critique, mobiliser ses connaissances, présenter la démarche suivie, présenter les résultats obtenus, communiquer à l'écrit, maîtriser les compétences langagières (français, anglais), travailler en équipe).

- **Compétences « extraire et exploiter » :**

Extraire : S'interroger de manière critique sur la pertinence de la prise en compte des informations, choisir de manière argumentée ce qui est à retenir dans des ensembles.

Exploiter : Identification des grandeurs physiques, exploitation qualitative, communication en tant que scientifique.

Pré-requis :

Numéro atomique Z, champ magnétique, structure de l'atome, indice n de réfraction d'un milieu.

Chercheur en physique des particules, ça vous tente ?



1. Présentation du projet

Vous avez été retenus pour participer aux recherches du nouveau détecteur AMS-2 (poursuite du projet AMS) aux côtés de Samuel Ting (prix Nobel de physique en 1976) qui est le scientifique à l'origine de ce projet.

Des particules ont traversé le détecteur : un électron, un noyau d'hélium, un photon gamma et un noyau de carbone.

Votre équipe doit rédiger un rapport structuré et argumenté dans lequel vous devrez attribuer les événements aux différentes particules détectées. Vous devrez appuyer votre réflexion sur les informations fournies par les documents en citant à chaque fois le document référent. Pour conclure, vous devrez expliquer si la mise en évidence de ces particules permet à l'AMS de remplir son rôle.

2. Liste des documents à votre disposition

Un dossier complet vous est fourni pour vous aider dans vos recherches, il comporte différents documents :

- Un lien pour expliquer ce qu'est le projet AMS (vidéo de 4'43 en anglais) :
<http://multimedia.esa.int/Videos/2010/07/AMS-searching-the-unknown>
- Un document illustrant le principe de fonctionnement d'AMS doc 1
- Un document présentant certaines des grandeurs qui permettent d'identifier une particule doc 2
- Un document illustrant le comportement d'une particule dans un champ magnétique doc 3
- La présentation d'une expérience : déviation d'un faisceau d'électrons par les bobines de Helmholtz ; photos et explications jointes..... doc 4
- Un document illustrant le principe de l'effet Cherenkov doc 5
- Un document présentant le fonctionnement d'un calorimètre électromagnétique ... doc 6
- Un document présentant les caractéristiques d'AMS (signal obtenu pour les différentes particules) doc 7
- Des résultats d'évènements correspondant aux particules à identifier (obtenus le 22 mai 2011).

La mesure répétée et redondante des propriétés des particules qui traversent l'instrument permet d'atteindre une capacité d'identification des particules exceptionnelle.

Si malgré tous les documents fournis vous n'arrivez pas à démarrer, demandez le coup de pouce n°1.

Si vous rencontrez des difficultés lors de l'étude des documents, vous pouvez demander une fiche « coup de pouce » à votre professeur.

3. Vos documents

Doc 1 : Principe de fonctionnement du détecteur AMS

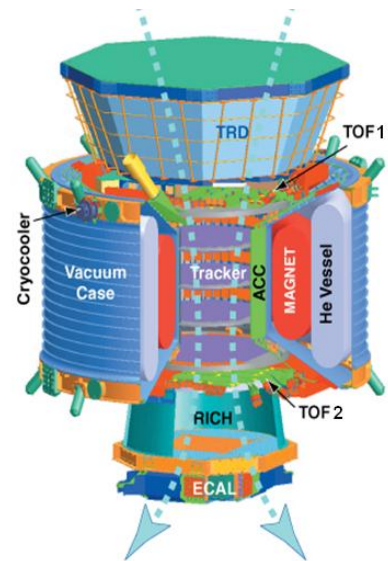
(Extrait d'un diaporama de Sylvie Rosier-Lees directeur de projet AMS France)

A l'intérieur du détecteur AMS, les particules traversent plusieurs détecteurs en pénétrant par le haut : TRD, TOF1, TRACKER (trajectomètre), TOF2, RICH détecteur à effet Cherenkov, ECAL (calorimètre électromagnétique).

Principales étapes :

Les particules interagissent avec la matière traversée :

- A) Le trajectomètre : il permet d'enregistrer la trajectoire en créant un courant lors de la traversée de détecteurs en silicium. Un aimant qui entoure ce TRACKER courbe la trajectoire.
- B) Le détecteur Cherenkov (RICH) : il fournit des renseignements lors du passage dans le milieu sur Z^2 et sur la vitesse.
- C) Déclenchement au passage des TOF : cela permet de mesurer la durée entre ces détecteurs et donc d'obtenir la vitesse.
- D) Identification des particules dans les différents détecteurs : on accède ainsi à Z , m , v et E .



Doc 2 : Quelques grandeurs mesurées pour les particules

grandeur	symbole
numéro atomique	Z
charge de la particule	q
masse de la particule	m
vitesse de la particule	v
énergie	E

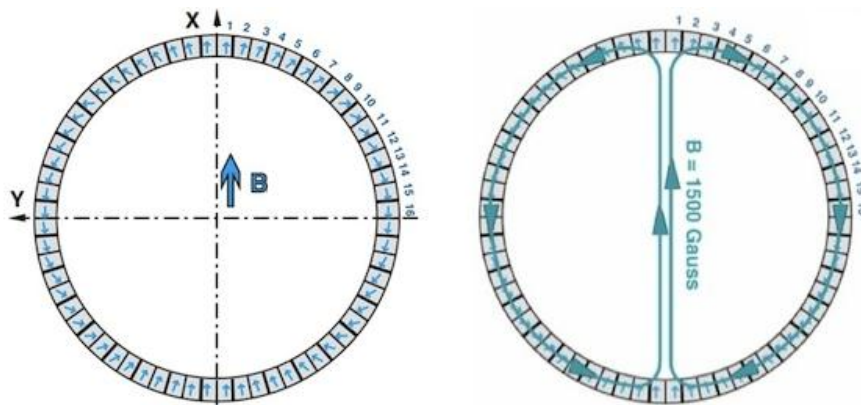
Doc. 3 : L'aimant et son rôle dans le détecteur TRACKER (Coup de pouce possible)

L'aimant permanent (extrait du site <http://lapp.in2p3.fr/spip.php?rubrique589> lundi 21 juin 2010 / Jean-Pierre Vialle / Physicien (IN2P3)

L'aimant permanent forme un cylindre de 1,114 mètre de diamètre intérieur et de 83 cm de haut, d'une masse de 2 tonnes. Son matériau est un composé de néodymium, de bore et de fer. La configuration des éléments magnétisés de l'aimant est faite de manière à donner, à l'intérieur, un champ dipolaire de 0,15 T en moyenne, perpendiculaire à l'axe du cylindre.

Le rôle de l'aimant est de courber la trajectoire des particules chargées qui le traversent afin que l'on puisse mesurer l'impulsion de la particule par le rayon de courbure de sa trajectoire et le signe de la charge électrique par le sens de courbure (deux particules de charges opposées voient leur trajectoire courbées en sens inverse). Le signe de la charge électrique est très important pour identifier les particules, mais aussi pour reconnaître l'antimatière : un noyau atomique d'antimatière porte une charge électrique négative, contrairement à son homologue fait de matière.

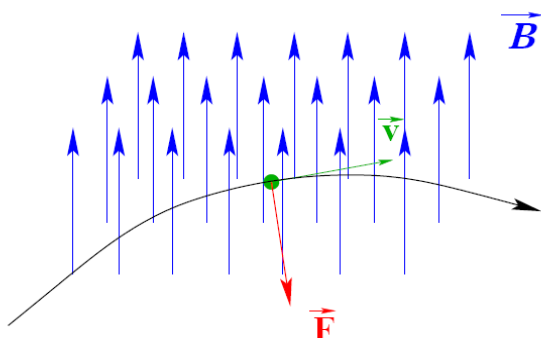
Le champ magnétique produit par l'aimant à l'intérieur de son volume utile est très élevé, environ 4000 fois le champ magnétique terrestre, mais à l'extérieur le champ ne doit pas avoir de composante dipolaire et tomber très rapidement à zéro. Si l'aimant donnait un champ avec une composante dipolaire à l'extérieur, alors le déplacement avec la station dans le champ magnétique terrestre induirait une force de rotation sur l'aimant, qui se mettrait à tourner sur lui-même en entraînant dans cette rotation la station spatiale ISS (station spatiale internationale). La présence d'un champ magnétique important à l'extérieur de l'aimant pourrait aussi être dommageable pour les autres expériences très sensibles qui seront installées sur la station, mais encore plus pour les spationautes qui devront sortir dans leur combinaison spatiale pour travailler sur la station et dont certains éléments de l'habillement sont sensibles au champ magnétique.



$$1 \text{ Gauss} = 10^{-4} \text{ Tesla}$$

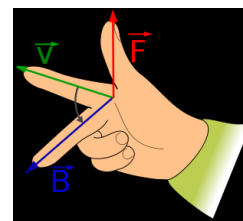
On voit sur l'image ci-dessus comment les barreaux sont fabriqués chacun avec une direction de l'aimantation différente, de manière à ce que leurs effets se combinent à l'intérieur du cylindre, mais qu'au contraire à l'extérieur ils se compensent deux à deux pour former au total un champ quasiment nul.

Extrait du diaporama CERN (programme enseignants Juillet 2007 par Elena Wildner)



Règle de la main droite (D'après Wikiversité)

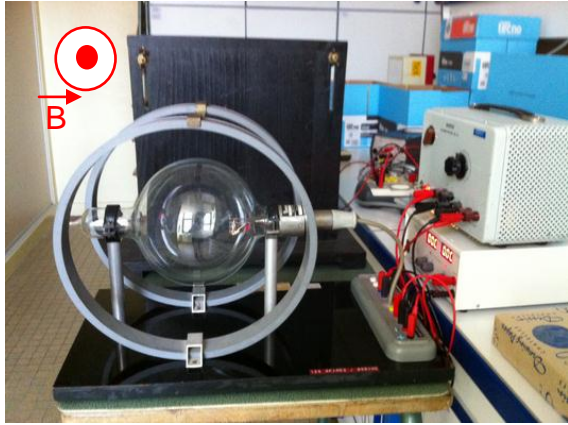
Une particule chargée + placée dans le champ magnétique \vec{B} vertical subit une force \vec{F} qui incurve sa trajectoire selon :



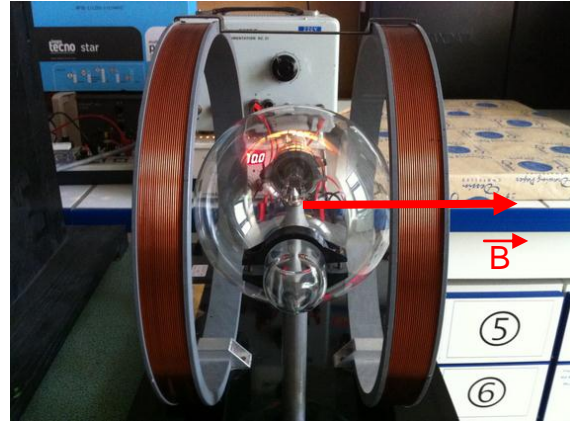
Doc 4 : Déviation d'un faisceau d'électrons par les bobines de Helmholtz (expérience)

Le faisceau d'électrons, produit en allumant le premier générateur, est vertical : le vecteur vitesse de chaque électron l'est donc aussi et est dirigé vers le haut. Mais, il s'agit d'une particule chargée négativement ; il faut donc orienter l'index dans l'autre sens.

Le faisceau est soumis à un champ magnétique dû à des bobines parcourues par un courant. S'aider du dispositif pour vérifier la règle de la main droite proposée dans le doc. 3.



Vue de face



Vue de côté



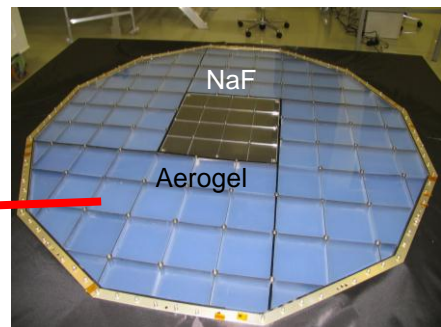
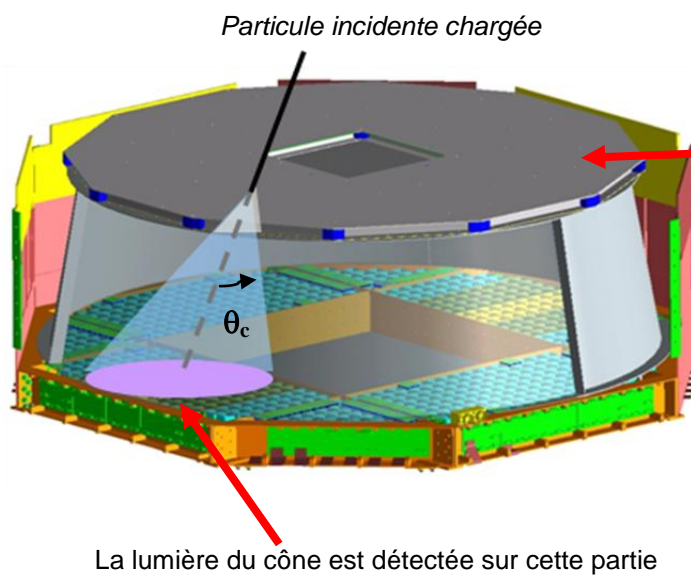
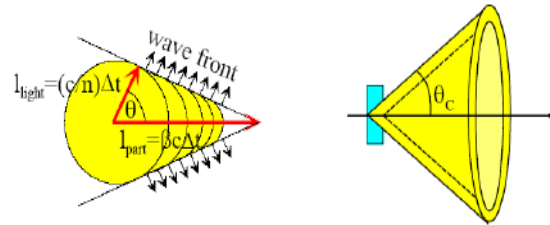
Vue de face



Vue de face lorsque le courant circule dans les bobines, donc en présence du champ magnétique

Doc 5 : Effet Cherenkov utilisé dans le détecteur RICH (extrait d'un diaporama de Sylvie Rosier-Lees directeur de projet AMS-France) (Coup de pouce possible)

- Un rayonnement Cherenkov est émis quand une particule chargée traverse un milieu diélectrique avec une vitesse b supérieure à la vitesse de la lumière dans le milieu : $\frac{v}{c} > \frac{1}{n} \Rightarrow \beta > \beta_{\text{seuil}} = \frac{1}{n}$, avec n indice du milieu ($n > 1$)
- L'émission a lieu sur un cône d'angle au sommet θ_c tel que : $\cos(\theta_c) = \frac{1}{n\beta}$
- Se produit dans tous les milieux transparents, y compris les scintillateurs, mais 100 fois plus faible que la scintillation.



	Aerogel	NaF
Refraction Index	1.05	1.33
Opening angle (deg)	17.8	41.5
Velocity threshold	0.952	0.752

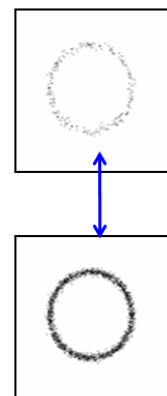
Mesure de la vitesse de la particule chargée grâce à l'angle θ_c ($\beta \times n \times \cos \theta_c = 1$)

Comment varie la vitesse si θ_c augmente ?

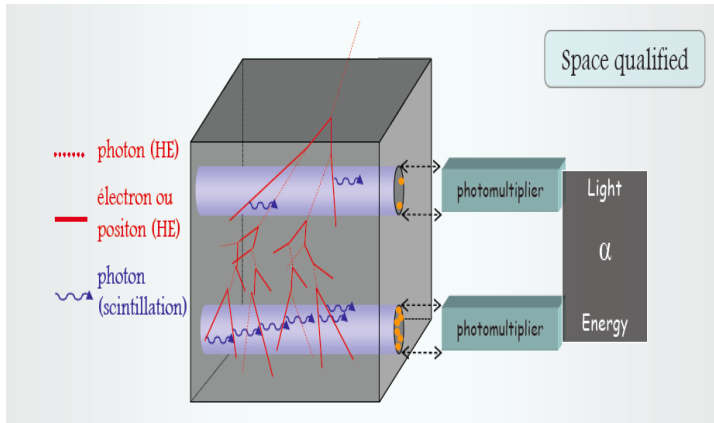


Mesure de Z et de la charge électrique car le signal est proportionnel à Z^2

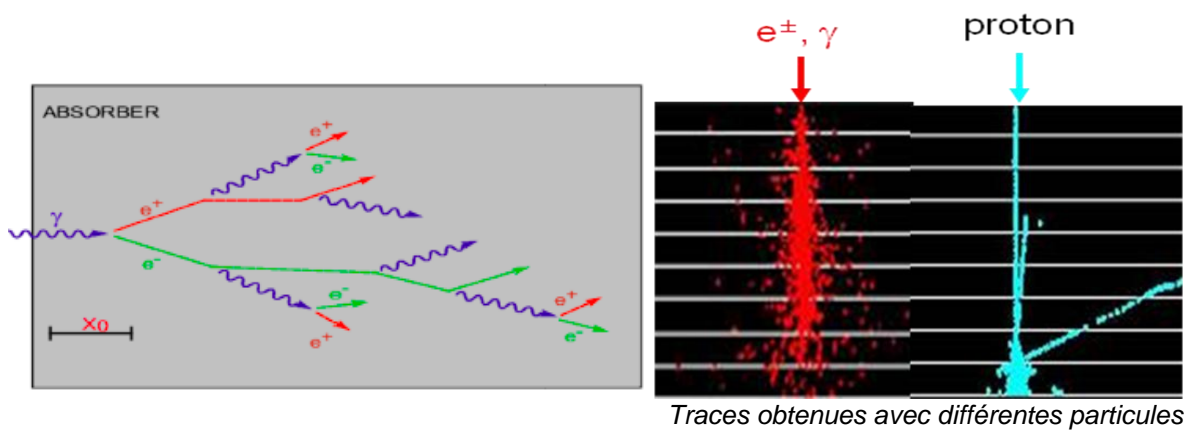
Comment varie Z si l'épaisseur de la trace augmente ?



Doc 6 : Calorimètre électromagnétique ECAL (coup de pouce possible)



- Méthode destructive de mesure de l'énergie totale par absorption de la particule incidente à travers une suite de collisions inélastiques qui vont dégrader son énergie
 - ⇒ formation de **gerbes électromagnétiques** ou **hadroniques**
 - L'énergie est convertie en excitation de la matière ou ionisation
 - Réponse du détecteur liée à l'énergie E
- On appellera **absorbeur** le milieu qui déclenche la gerbe



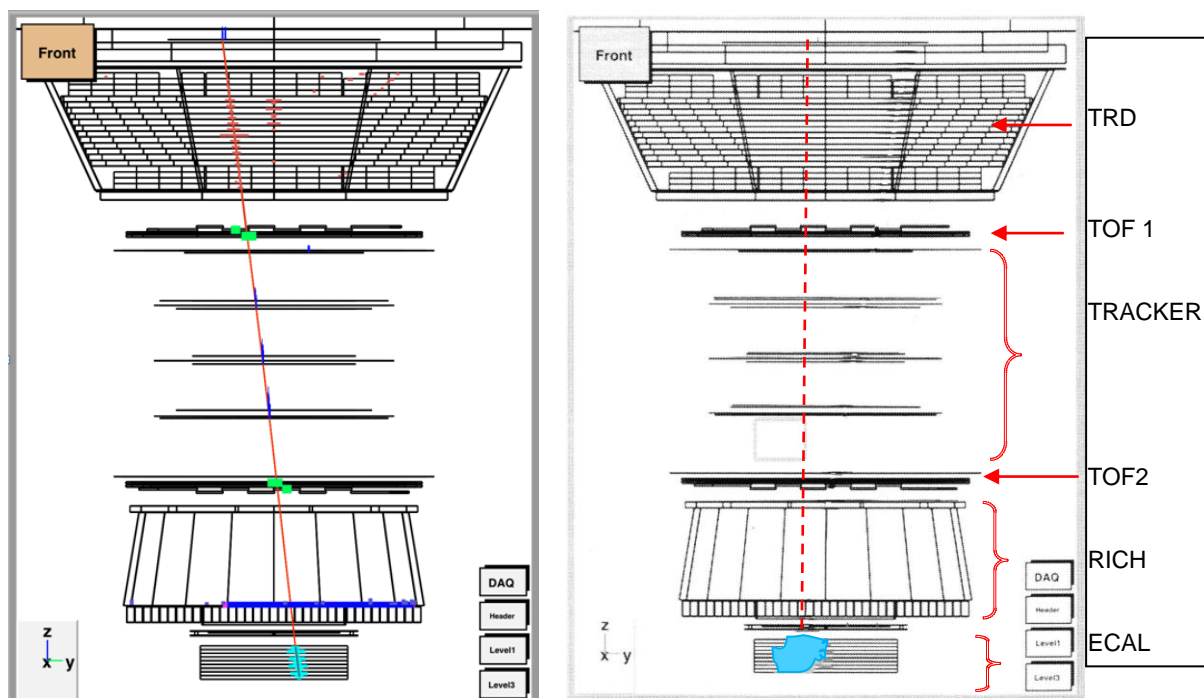
Doc 7 : Comment interpréter les signaux électriques observés par AMS ? (coup de pouce possible)

Les particules qui comportent un trait au dessus de leur symbole sont des antiparticules. La première colonne indique le détecteur et les colonnes suivantes montrent l'allure des signaux observés quand la particule traverse le détecteur concerné.

	e^-	P	He, Li, Be, ... Fe	γ	e^+	\bar{P}, \bar{D}	\bar{He}, \bar{C}
TRD							
TOF							
Tracker							
RICH							
ECAL							
Physics example	Cosmic Ray Physics				Dark matter		Antimatter

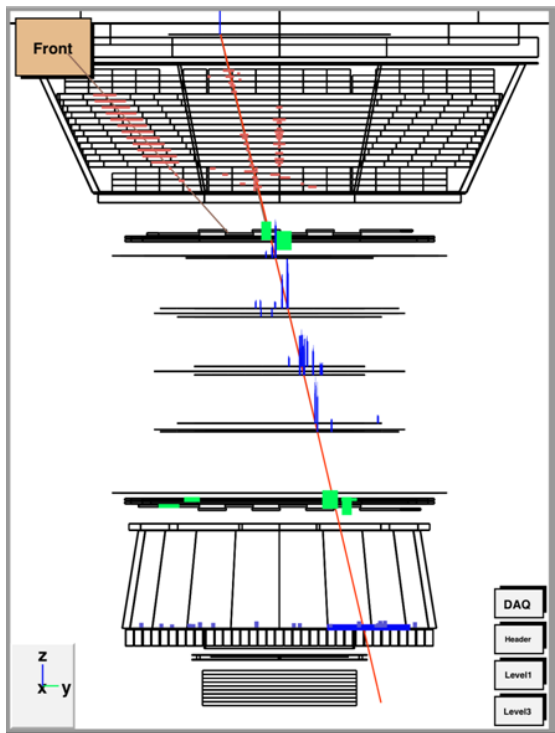
4. Evènements à analyser (relevés en mai 2011)

Voici une coupe du détecteur AMS ; quatre particules l'ont traversé de haut en bas.

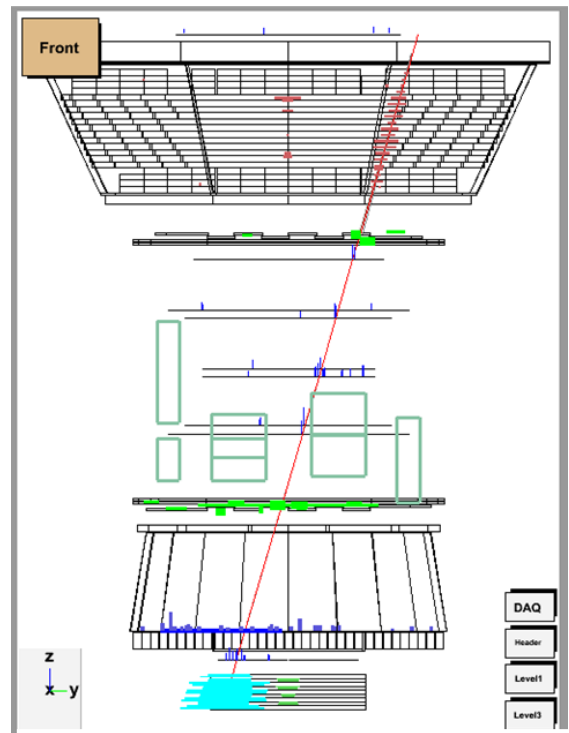


Particule n°1

Particule n°2

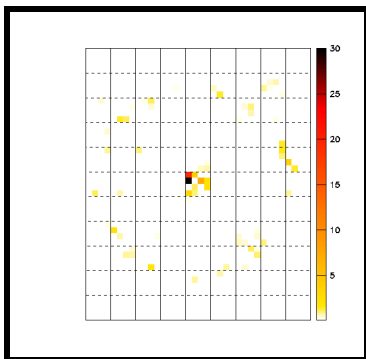


Particule n°3

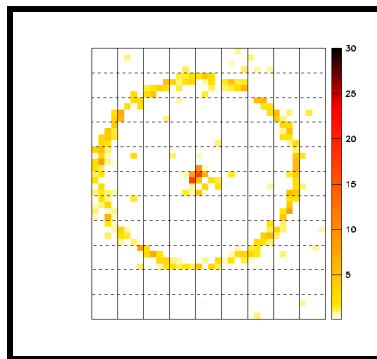


Particule n° 4

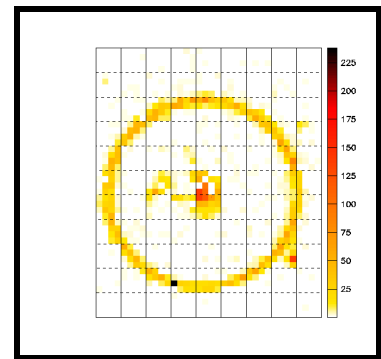
Clichés obtenus au niveau du RICH :



Particule n° 4



Particule n°1



Particule n° 3

5. Aides à fournir aux groupes si nécessaire

Coup de pouce n°1 :

Quelles sont les caractéristiques des quatre particules à identifier ? Les répertoire.

Coup de pouce n°2 :

Le document concernant l'aimant (doc. 3) vous indique la direction et le sens du champ magnétique à l'intérieur du détecteur. Pouvez-vous en déduire quel sera le sens de déviation d'une particule chargée positivement entrant par le haut du détecteur ?

Coup de pouce n°3 :

Comment Z influence-t-il sur l'épaisseur de la trace obtenue dans le détecteur à effet Cherenkov (RICH) (doc. 5) ?

Coup de pouce n°4 :

Dans le calorimètre (doc. 6), seuls les électrons, les positrons et les photons interagissent en donnant des gerbes intenses avec l'absorbeur. Les autres signaux sont plus faibles.

Coup de pouce n°5 :

Plus les traces sont épaisses (caractéristiques d'AMS, doc. 7), plus elles correspondent à des signaux électriques intenses (documents des événements)

6. Sitographie

<http://multimedia.esa.int/Videos/2010/07/AMS-searching-the-unknown> lien direct pour la vidéo mais d'autres vidéos sont accessibles sur ce site multimedia de l'ESA (agence spatiale européenne)

<http://www.ams02.org/> site officiel **en anglais** du détecteur sur lequel vous trouverez des renseignements sur chaque partie du détecteur. Il comprend également des vidéos.

<http://public.web.cern.ch/public/en/About/About-en.html> sites concernant le CERN

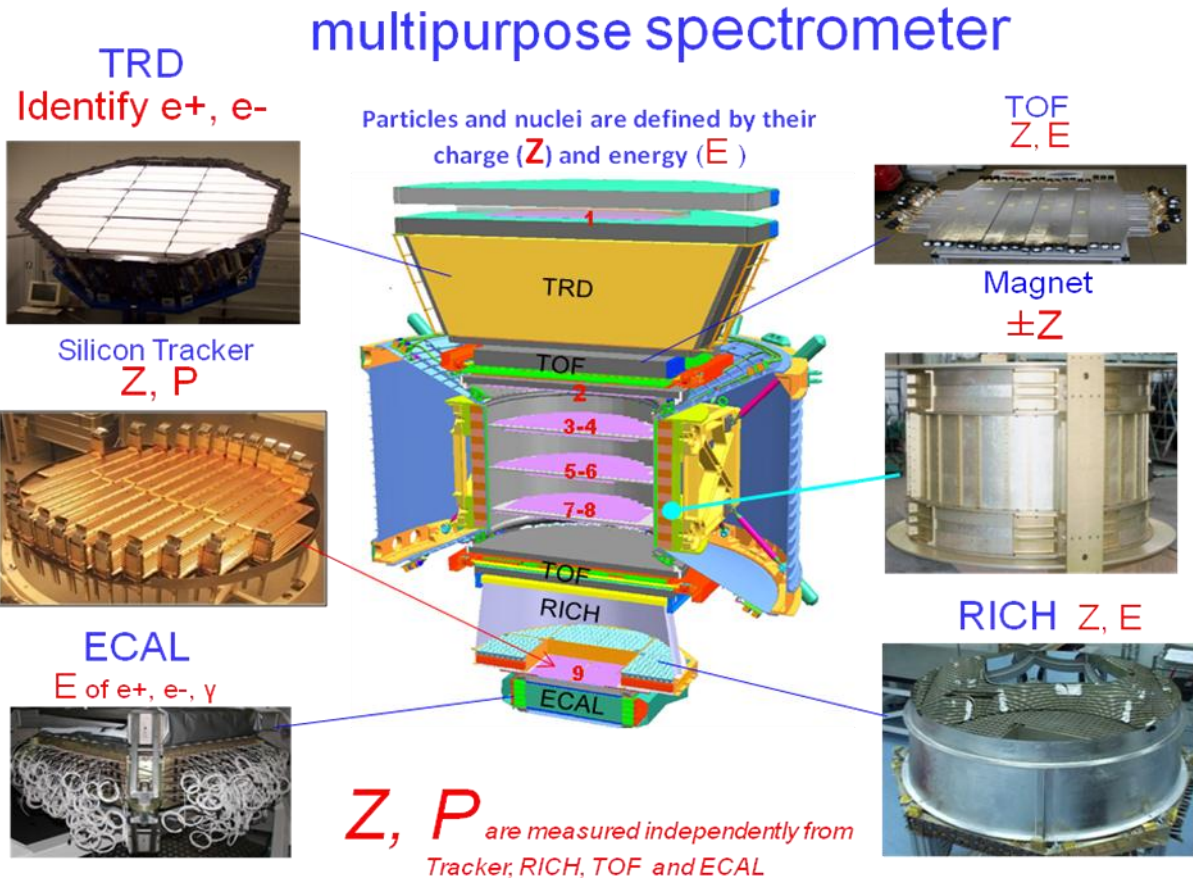
<http://education.web.cern.ch/education/> teachers programs (on trouve des diaporamas et documents qui ont été présentés lors des formations annuelles pour les enseignants de différents pays)

<http://www.in2p3.fr/> institut national de physique nucléaire et physique des particules

<http://lapp.in2p3.fr/> laboratoire d'Annecy en physique des particules

<http://informatique.in2p3.fr/li/spip.php?article192> : interview de Sylvie Rosier-Lees

7. Pour les enseignants

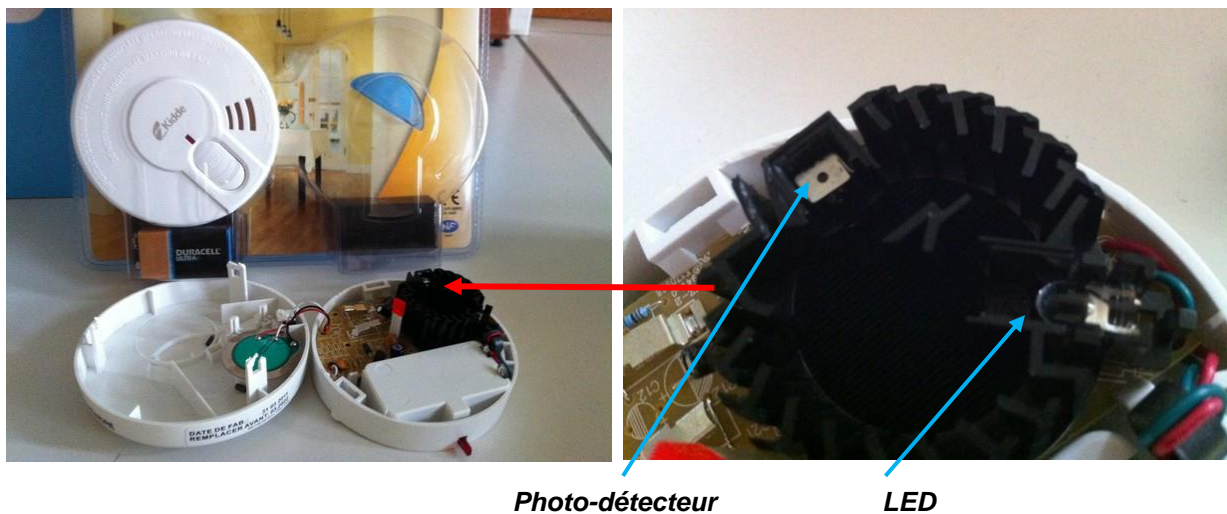


8. Quelques idées pour le détecteur d'ondes

Dans l'AMS, c'est un photon qui est détecté, alors que dans un détecteur de fumée c'est l'onde lumineuse qui est détectée.

Les photons de cette onde lumineuse ont une énergie beaucoup plus faible que les photons gamma qui eux peuvent être détectés séparément dans un détecteur de particules.

Détecteur de fumée (utilisé chez les particuliers : moins de 30 euros les deux) :



La fumée entre par les fentes situées autour du photo-détecteur et de la LED.

Principe du détecteur de fumée (utilisé chez les particuliers) : une LED blanche (lampe de poche) émet de la lumière qui ne peut pas être captée par le photo-détecteur. Un cache noir empêche la lumière de parvenir jusqu'à lui.

En cas d'incendie, la fumée (particules en suspension dans l'air) va diffuser la lumière dans toutes les directions et en particulier vers le photo-détecteur qui va alors détecter le faisceau lumineux.

Via un circuit électronique, un signal sonore va être émis.

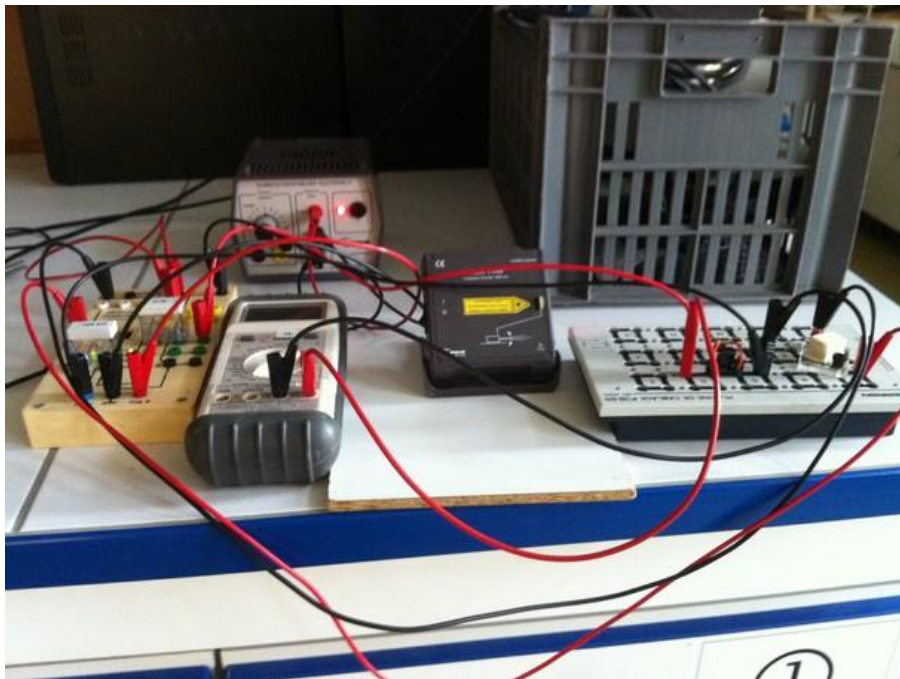
Situation déclenchante :

Montrer un dispositif fermé qui fonctionne et au bureau le déclencher avec de la fumée (papier qui brûle) et un récipient rempli d'eau à côté pour éteindre rapidement le papier et ne pas déranger les classes voisines !

Faire émerger les idées. Puis leur montrer le dispositif ouvert.

Montage :

Il est possible de réaliser un montage simulant ce dispositif en utilisant : une photodiode, une LED ou une diode LASER, un miroir qui va réfléchir la lumière vers la photodiode (ce n'est pas une diffusion mais difficile de mettre de la fumée ou de la poussière qui va tout de suite se déposer sur la photodiode).



Donner des fiches (distribuées au départ) ou des aides (selon les besoins) :

- Pour mesurer une tension (déjà vu en première).
- Pour amplifier la tension aux bornes de la photodiode. (circuit amplificateur inverseur ou non inverseur, le donner monté ou non) ; on peut faire mesurer la tension à l'entrée et à la sortie.
- Pour utiliser le buzzer dont il faut respecter les bornes.
- ...

A essayer avec le matériel dont dispose chaque établissement ...