Témoignage d'un professeur qui a suivi une précédente édition du stage au CERN

Morgan PIEZEL
Lycée Camille Claudel
TROYES
Université de Technologie de Troyes

Le Mondial de la physique des particules

« La coupe du monde de foot 2010 ? Je n'ai regardé aucun match de la phase de groupe ! Cette semaine-là, j'étais en formation au Cern et la découverte de ce monde de la physique avec ces expériences fantastiques a été un tel choc, que j'en ai oublié d'allumer ma télévision. Je suis devenu supporter passionné du Cern, et je suis maintenant impliqué dans de nombreux projets pédagogiques notamment à travers l'opération Cosmos à l'École et, avec le laboratoire LAL (Orsay), les Masterclasses Internationales. »

Morgan Piezel, professeur agrégé de physique-chimie à Troyes

À gauche : Morgan Piezel, professeur agrégé de physique-chimie à Troyes.
©Patrick Dumas/CNRS/CEA

À droite : Le Cosmodétecteur, un détecteur de muons cosmiques, est prêté à des enseignants du secondaire du dispositif ministériel « Cosmos à l'École » en partenariat avec le CNRS/IN2P3.
©Patrick Dumas/CNRS/CEA

http://experience-cern360.fr

utt
université de technologie
Troyes

COLLOQUE SUR L'ENSEIGNEMENT DE LA PHYSIQUE SUBATOMIQUE

Organisé par la Société Française de Physique:

Division Physique Nucléaire • Division Champs et Particules
Interdivision Physique des Accélérateurs et Technologies Associées
Commmission Enseignement

18-19 Novembre 2010, Cnam Paris

La physique subatomique

- *au lycée, à l'université et dans les Ecoles d'Ingénieurs*
- *au coeur de la recherche fondamentale et moteur de développement*
- *éducation et transmission des connaissances vers la société*

Comité d'organisation:

- Patrick Ausset *(IPN Orsay)*
- Gérard Bonneaud *(LPNHE Paris)*
- Brigitte Cros *(LPGP Paris XI)*
- Emmanuelle Galichet *(Cnam Paris, IPN Orsay)*
- Arnaud Le Padellec *(CESR Toulouse)*
- Elsa Merle Lucotte *(LPSC Grenoble)*
- Stefano Panebianco *(Irfu Saclay)*
- Gérard Sajot *(LPSC Grenoble)*
- Jean-Luc Sida *(Irfu Saclay)*

http://indico.in2p3.fr/conferenceDisplay.py?confId=4133

cnrs IN2P3 Les deux infinis — irfu — cea — le cnam — saclay

Retrouvez le programme complet et inscrivez-vous sur notre site web

Secrétariat:
Isabelle Cossin (LPNHE)
IN2P3-CNRS-Université Paris VI et VII
4 place Jussieu
75252 Paris Cedex 05
+33 1 44 27 68 95
isabelle.cossin@lpnhe.in2p3.fr

Utilisation des heures A.P. en 1S Atelier Scientifique

COMPRENDRE

Lois et modèles

Quelles sont les causes physiques à l'œuvre dans l'Univers ? Quelles interactions expliquent à la fois les stabilités et les évolutions physiques et chimiques de la matière ?

Quels modèles utilise-t-on pour les décrire ? Quelles énergies leur sont associées ?

- La matière à différentes échelles : du noyau à la galaxie.
- Particules élémentaires : électrons, neutrons, protons.
- Interactions fondamentales : interactions forte et faible, électromagnétique, gravitationnelle.
- Cohésion du noyau, stabilité.
- Radioactivité naturelle et artificielle.
- Défaut de masse, énergie libérée.
- Ordre de grandeur des énergies mises en jeu.
- Associer, à chaque édifice organisé, la ou les interactions fondamentales prédominantes.
- Utiliser les lois de conservation pour écrire l'équation d'une réaction nucléaire.
- Utiliser la relation $E_{\text{libérée}} = |\Delta m| c^2$.

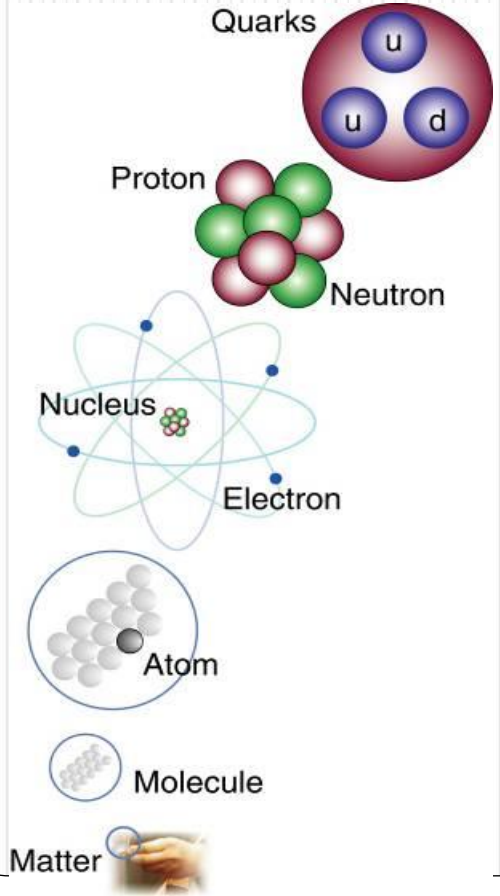
AGIR

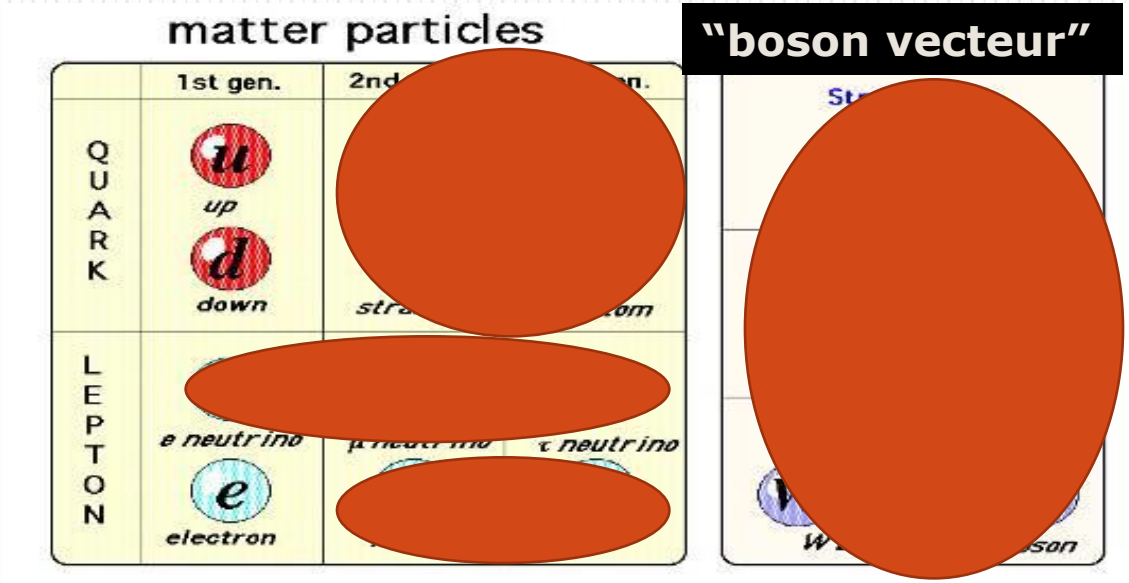
Créer et innover

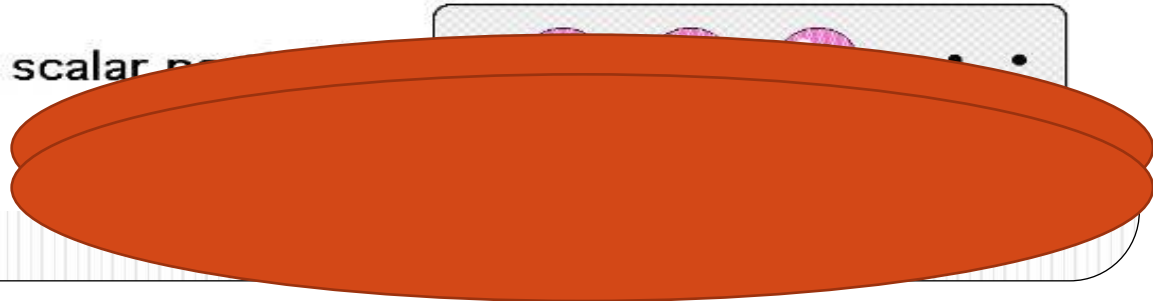
- Culture scientifique et technique ; relation science-société.
- Métiers de l'activité scientifique (partenariat avec une institution de recherche, une entreprise, etc.).
- Réinvestir la démarche scientifique sur des projets de classe ou de groupes.
- Comprendre les interactions entre la science et la société sur quelques exemples.
- Communiquer sur la science par exemple en participant à des actions de promotion de la culture scientifique et technique.
- Recueillir et exploiter des informations sur l'actualité scientifique et technologique, sur des métiers ou des formations scientifiques et techniques en lien avec des ressources locales.

« Zoologie »

La matière à différentes échelles : du noyau à la galaxie.
Particules élémentaires : électrons, neutrons, protons.
Interactions fondamentales

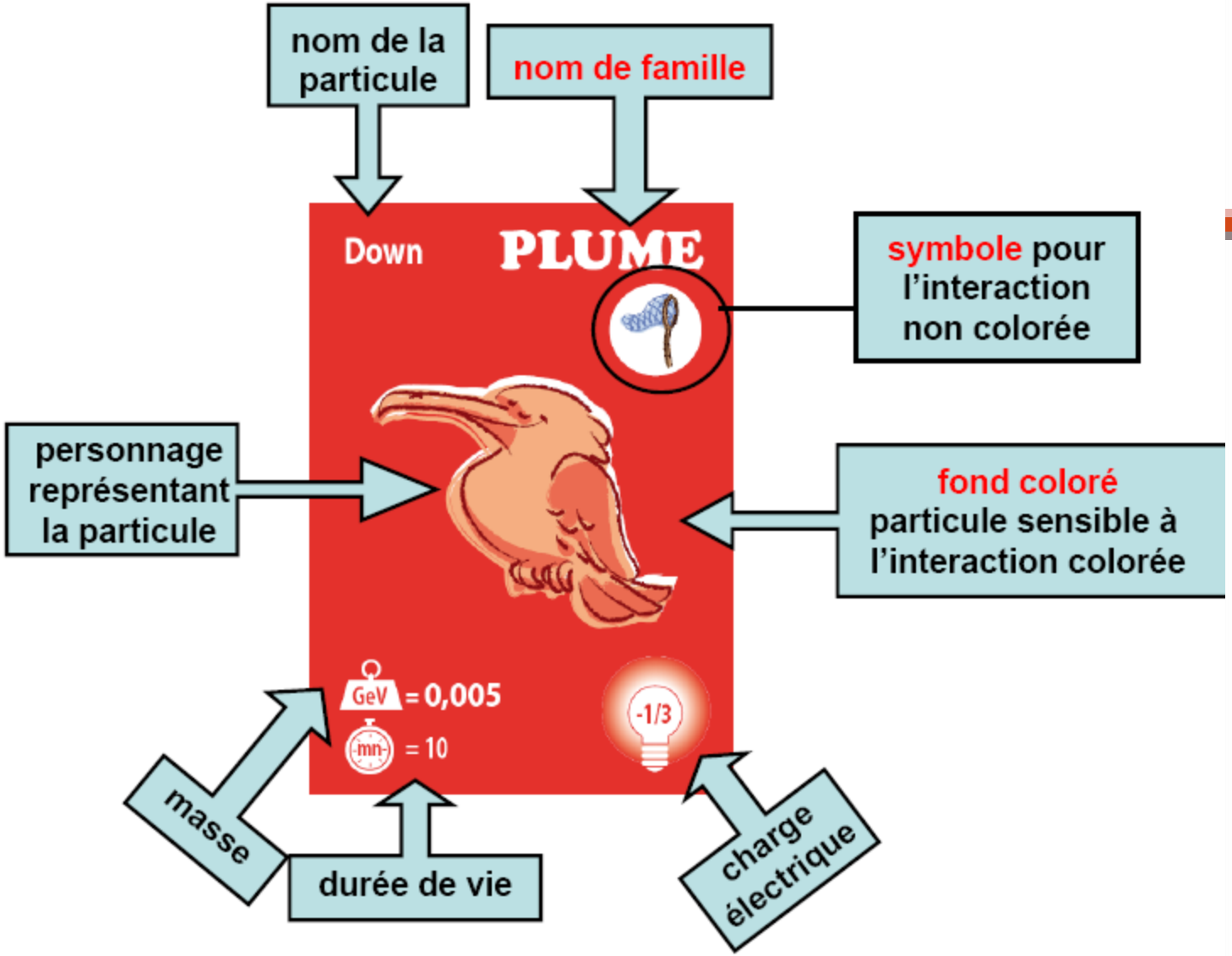






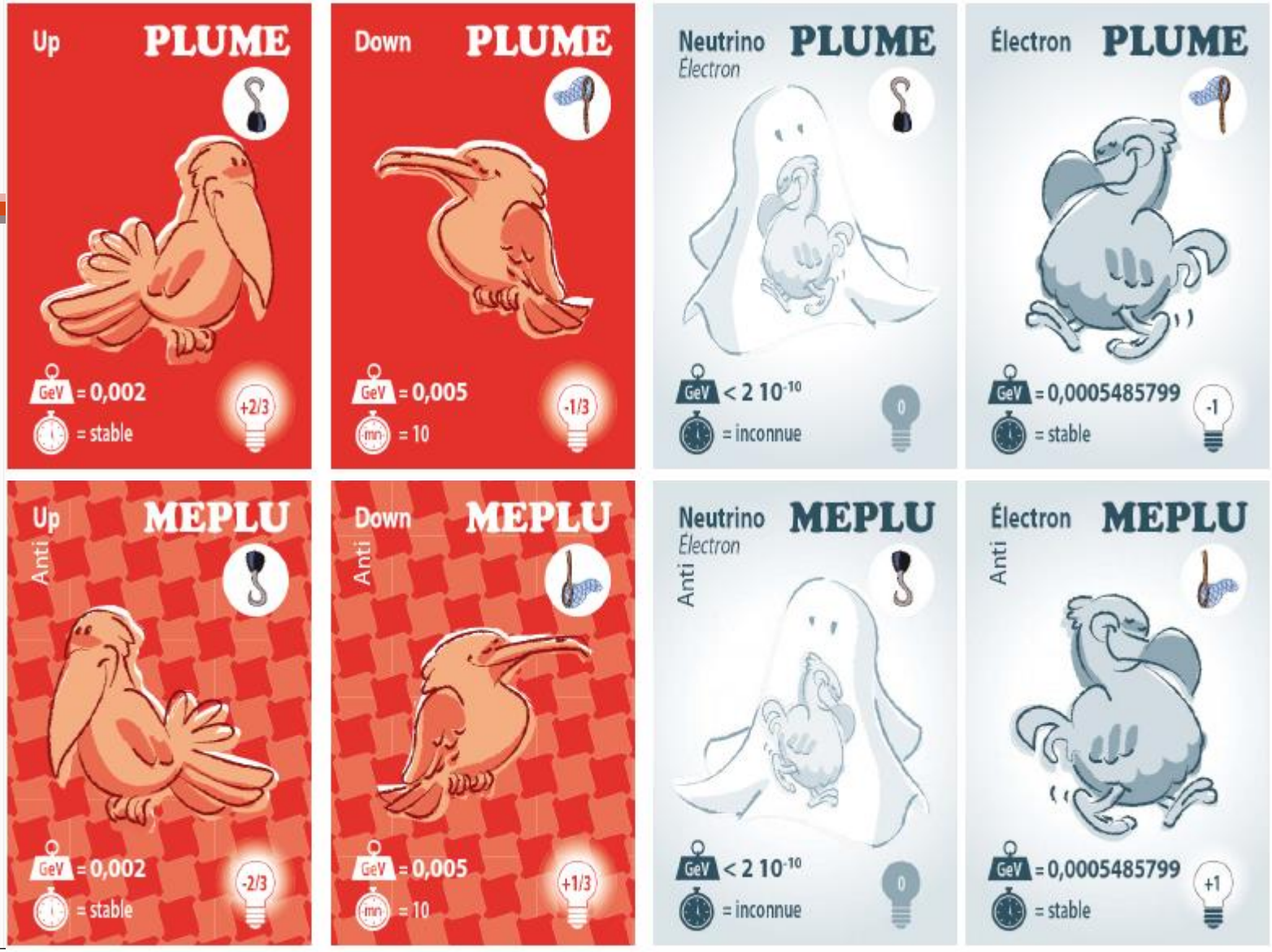
QUARK POKER:

Jouer aux cartes avec des particules



QUARK POKER:

Jouer aux cartes avec des particules

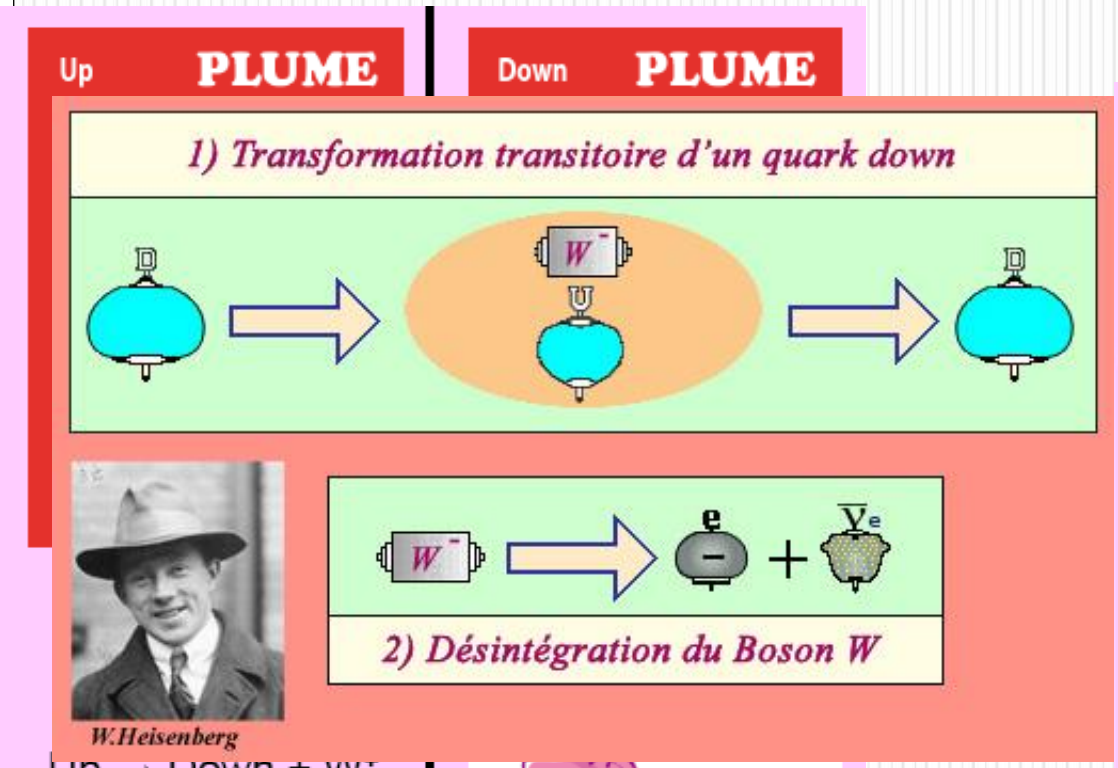


QUARK POKER:

Jouer aux cartes avec des particules

QUARK POKER:

Jouer aux cartes avec des particules

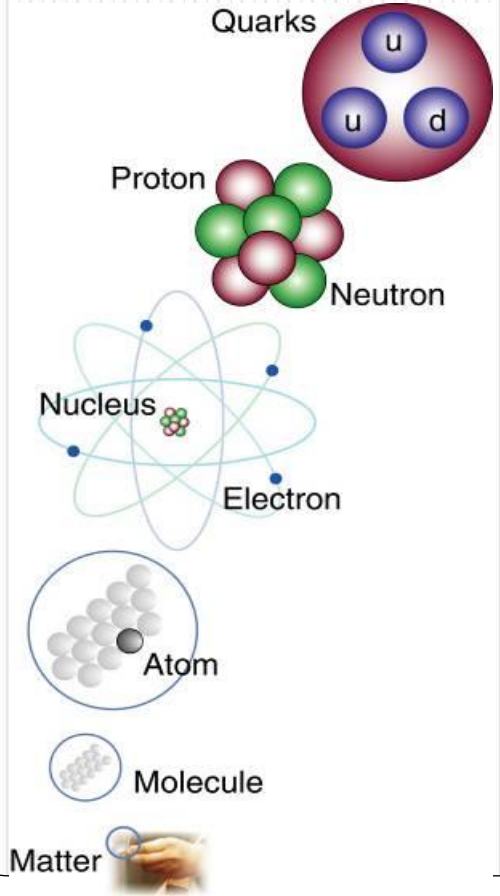


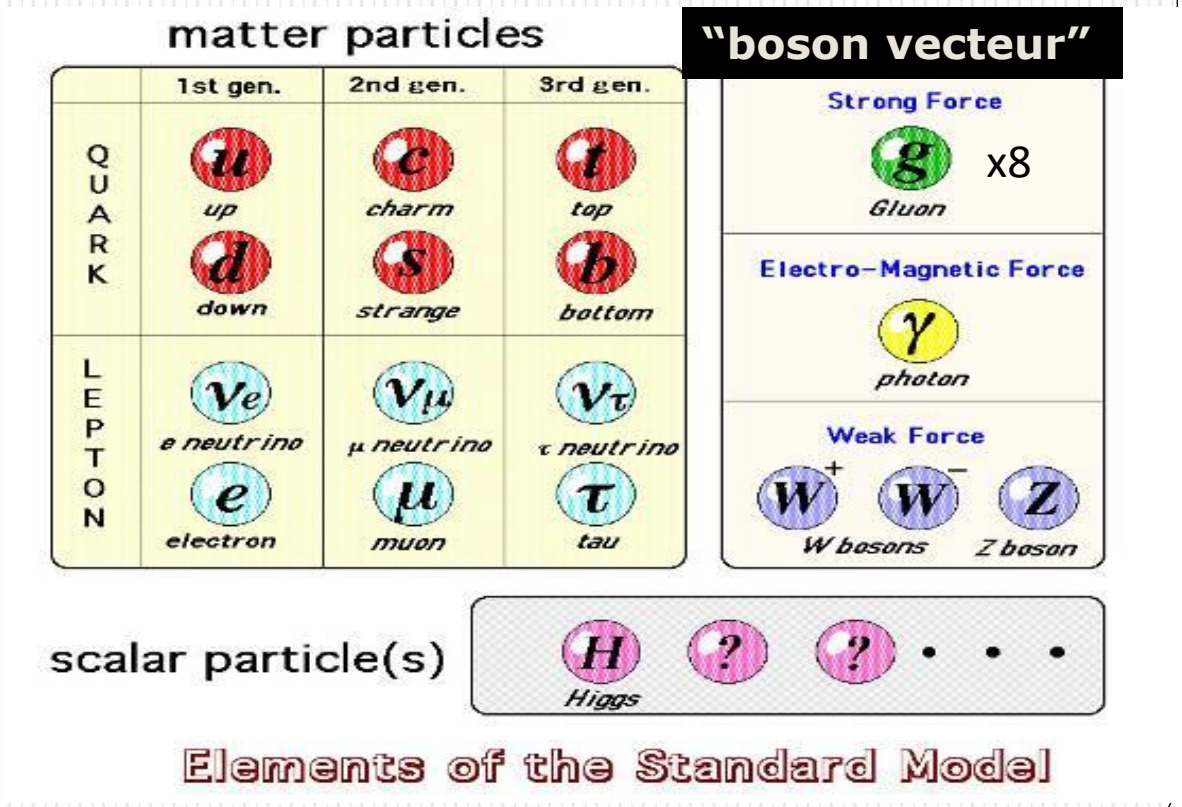
Up → Down + W⁻

$W^+ \rightarrow e^+ + \nu_e$

« Zoologie »

Particules élémentaires : électrons, neutrons, protons????
Intéractions fondamentales et bosons





CERN et LHC

Relation Masse-Energie:

Défaut de masse, énergie libérée.

Vidéo ***E=mC2 Relation Masse Energie.doc***

Applications Collisions LHC :

Radioactivité:

naturelle : particules α et β , antimatière …

artificielle : bombardement cible par particule

Exemples:

Radioactivité β+ :

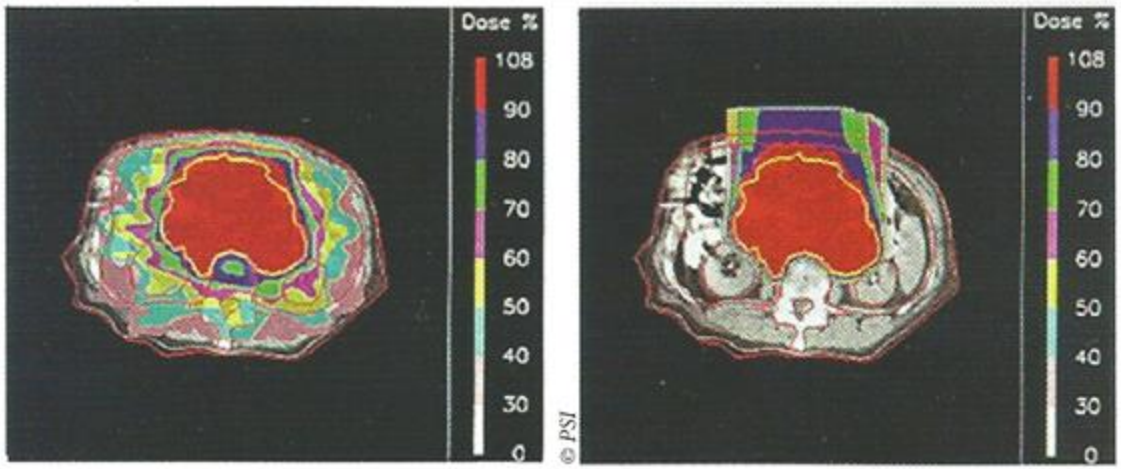
Annihilation électr

-Tomographie-.doc

Fusion

Fission

……..



Coupes de cerveaux qui indiquent les doses de rayonnement reçues par un traitement avec des rayons X, à gauche, par une protonthérapie à droite (Paul Scherrer Institute, Suisse). Les codes de couleur indiquent que, dans le premier cas, une vaste zone entourant celle qui est traitée (en rouge) reçoit plus de 40% de la dose maximale. Dans le second cas les tissus extérieurs à la zone traitée ne sont pratiquement pas irradiés, sauf ceux situés vers le haut de la photo par lequel le faisceau arrive.

Principe de conservation de l'énergie.

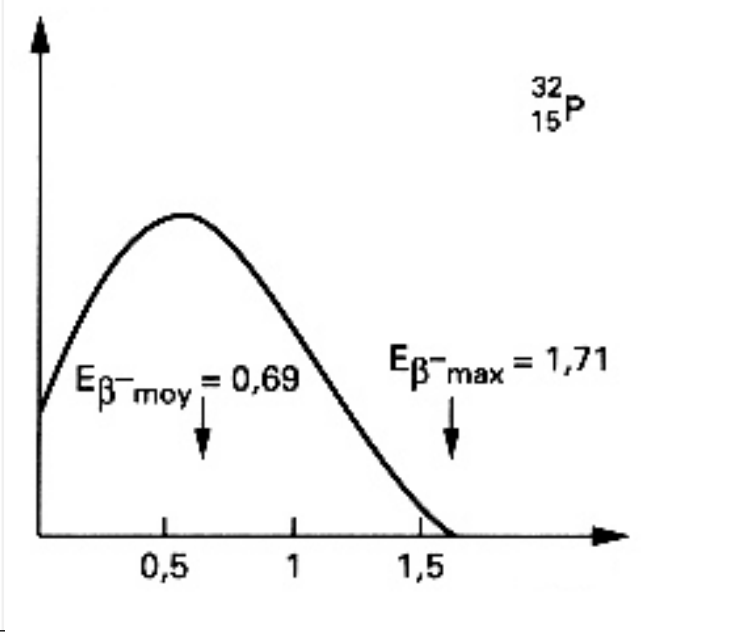
Utiliser les lois de conservation pour écrire l'équation d'une réaction nucléaire.

Application à la découverte du neutrino dans la désintégration , « énergie manquante ».

contradiction entre la loi de conservation de l'énergie et le spectre continu de la désintégration bêta

Le noyau de phosphore

émetteur bêta moins.



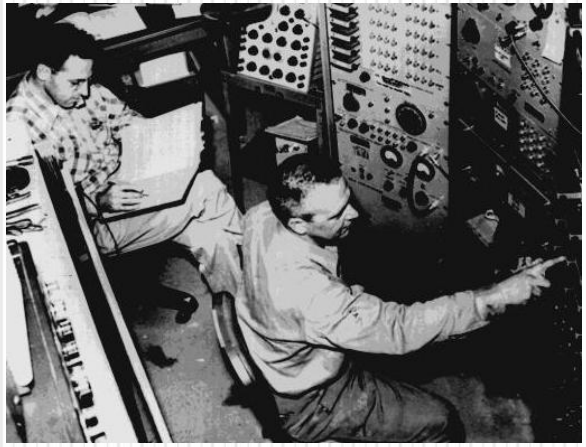
Principe de conservation de l'énergie.

Utiliser les lois de conservation pour écrire l'équation d'une réaction nucléaire.

Application à la découverte du neutrino dans la désintégration , « énergie manquante ».

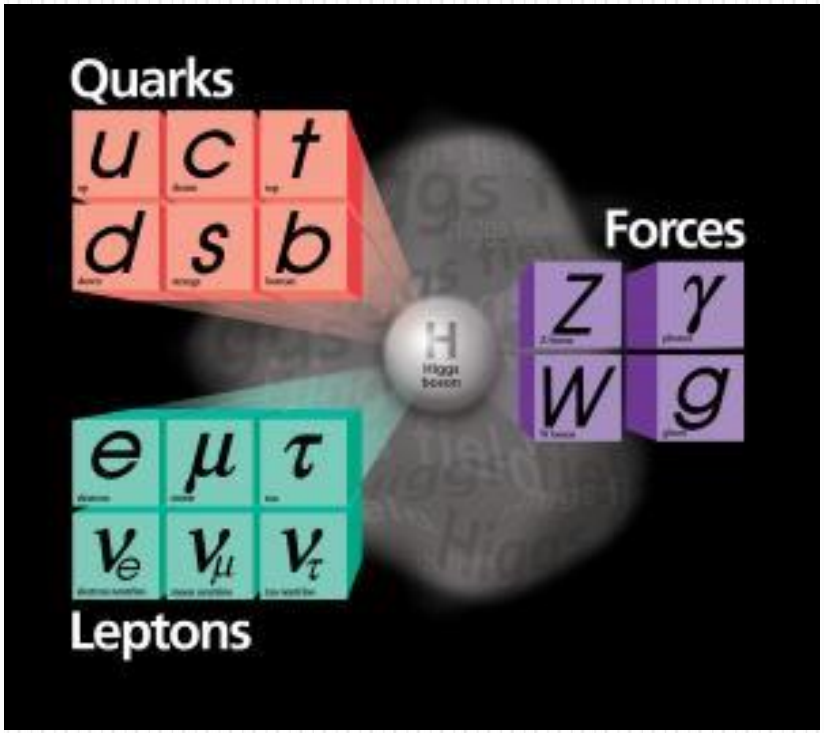
Neutrino_bel.pdf

Fred Reines and Clyde Cowan (1956)



BOSON de HIGGS

Bosonde Higgs 1 présentation.doc



Peter Higgs – CERN, Avril 2008

Les rayons cosmiques

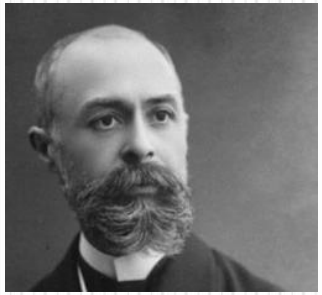
Texte introductif *(D'après I. Berkès « La physique du quotidien »)* « formation » Carbone 14 dans la haute atmosphère.

Cours exo DATATION AU C14.doc

Conférences sur l'historique des rayons cosmiques :

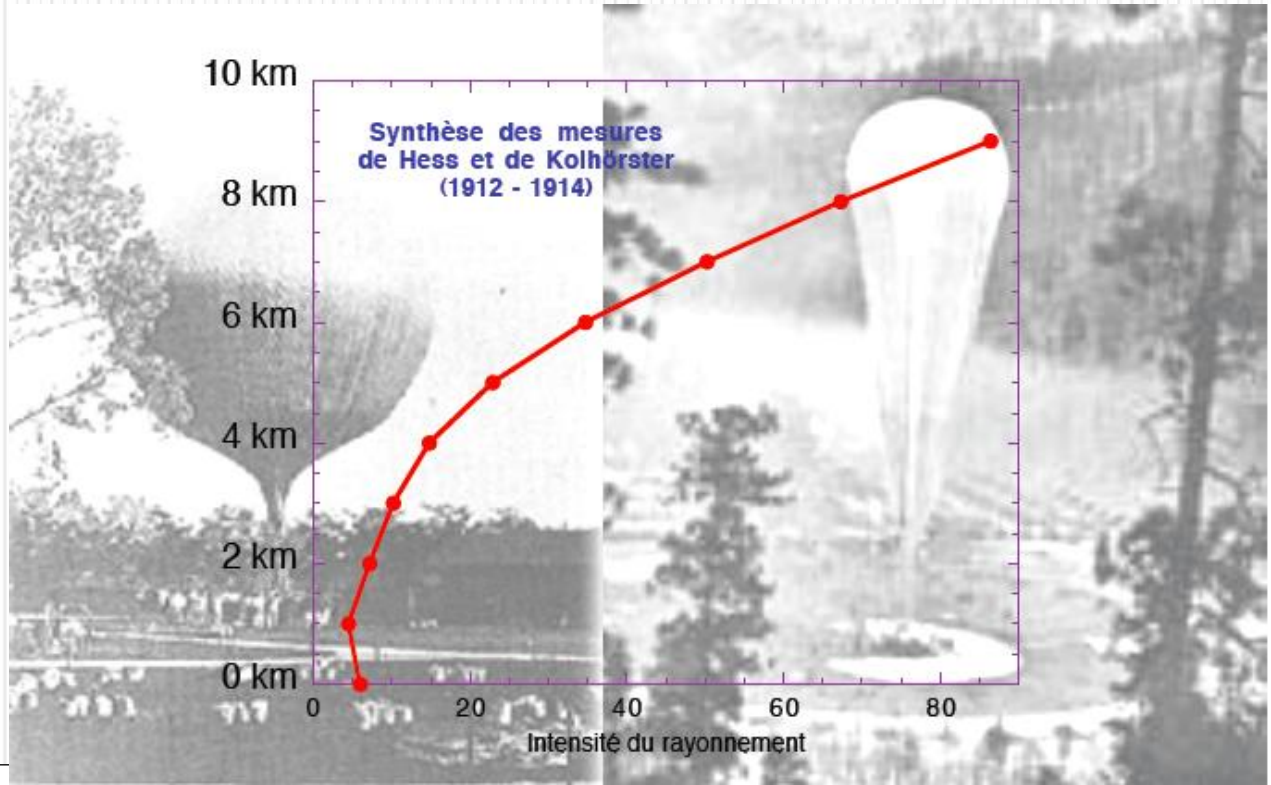
Fin du XIXe siècle :

découverte de nouveaux rayonnements «invisibles»



L'énigme des électromètres

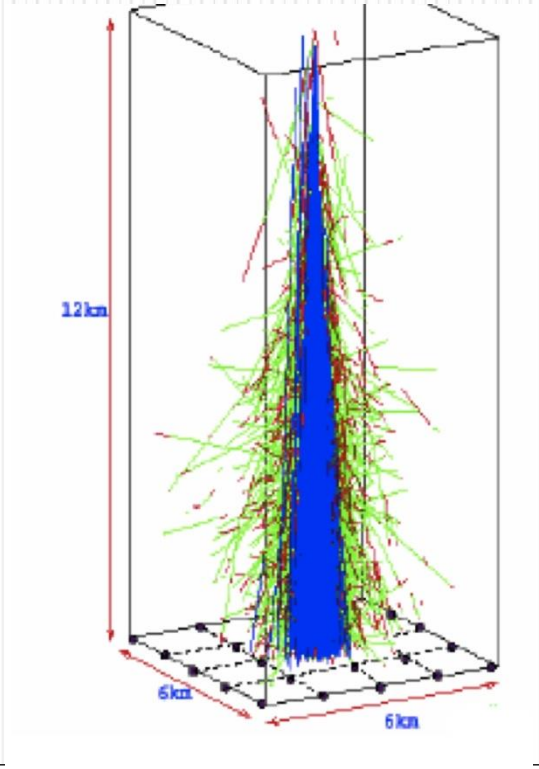
Découverte de Victor Hess :



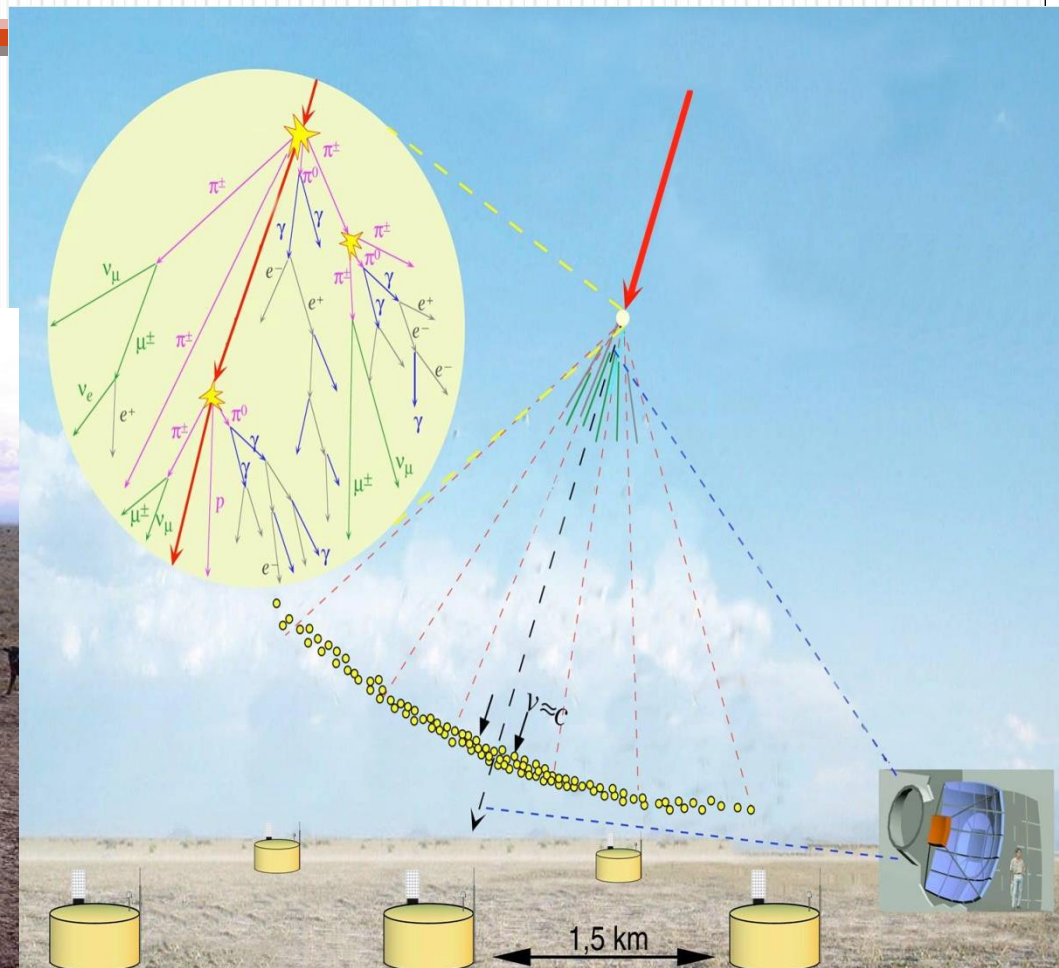
1936: découverte du muon dans le rayonnement cosmique

Carl Anderson et Seth Neddermeyer

1938 :Pierre Auger découvre les grandes gerbes atmosphériques



Recherches actuelles : Expérience Auger



Astrophysique et cosmologie

Rayonnement dans l'Univers :

Partenariat Observatoire

de Paris

EUHOU

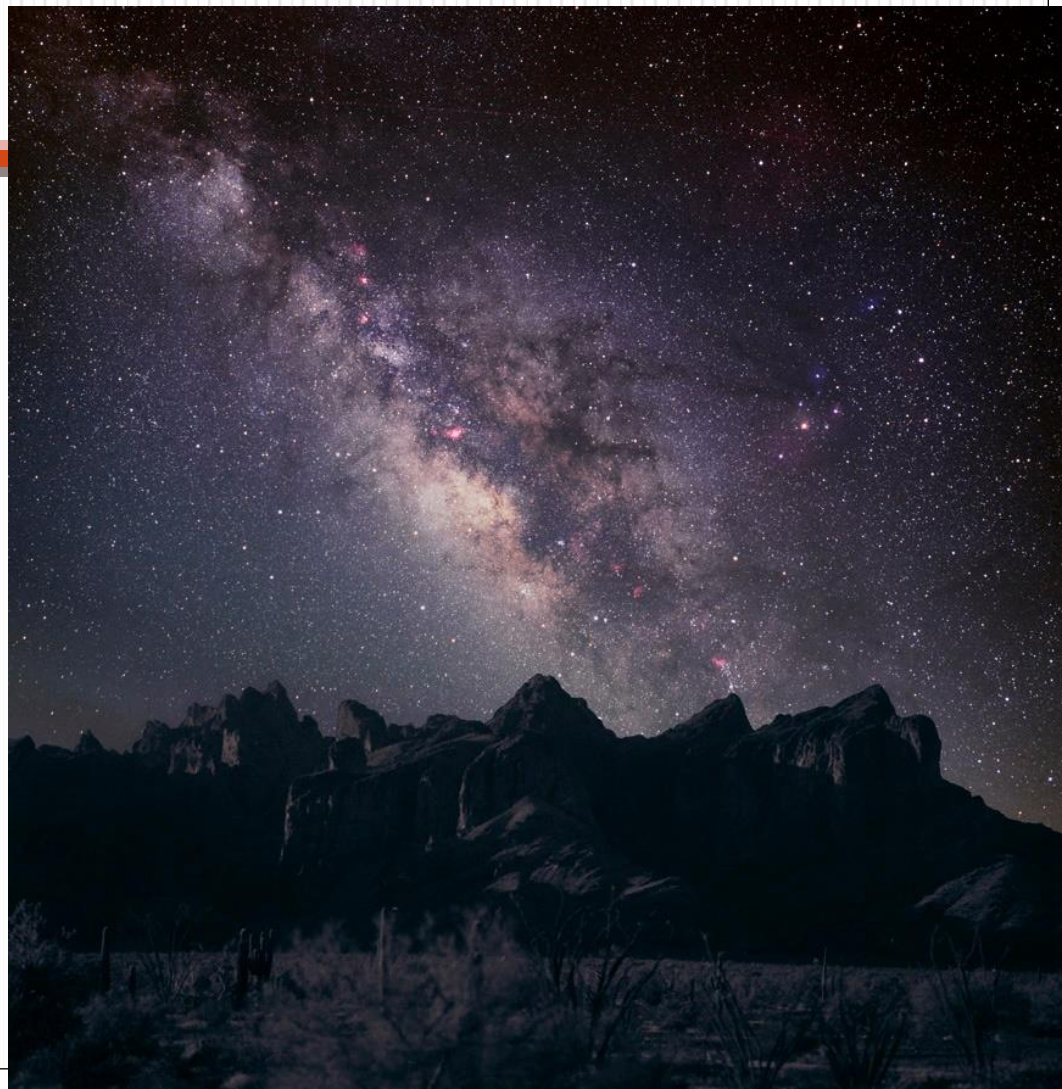
Ressources :

Expansion Univers

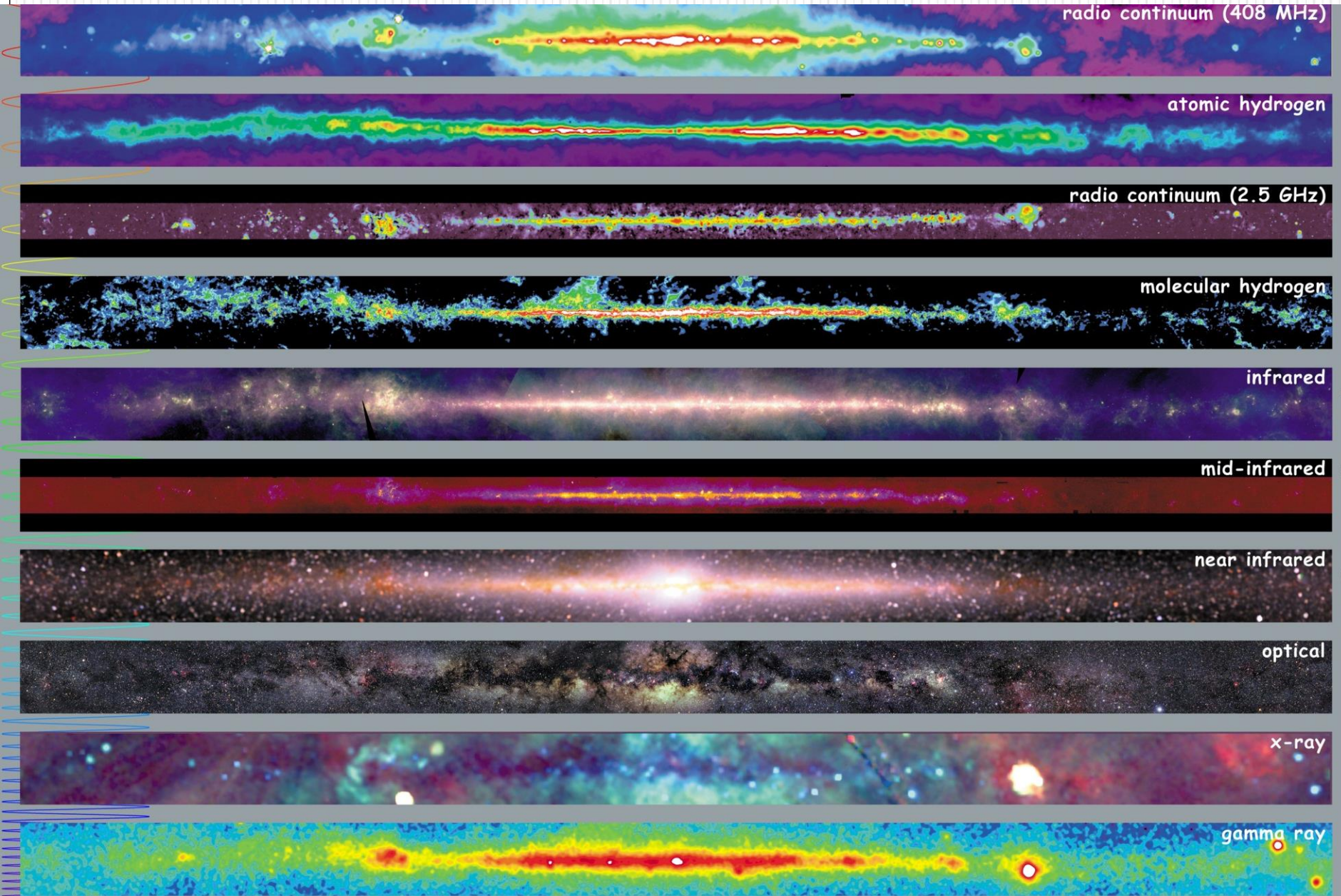
Vitesse de certaines étoiles

Voie Lactée

Détection exo planètes



Rayonnement dans l'Univers



Rayonnement dans l'Univers

rayonnement de fond diffus cosmologique.

TS annales zéro 2013 - mission Planck.doc

CERN et LHC

CERN et LHC

Exemple (Exercice 1 bac 2014 métropole):

Exemple d'accélérateur de particules.

Mouvements particules dans champ électrique.

Relation Masse-Energie:

Défaut de masse, énergie libérée.

Relation Masse-Energie:

Applications Collisions LHC :

Expériences « Historiques »

Mouvements particules dans champ électrique.

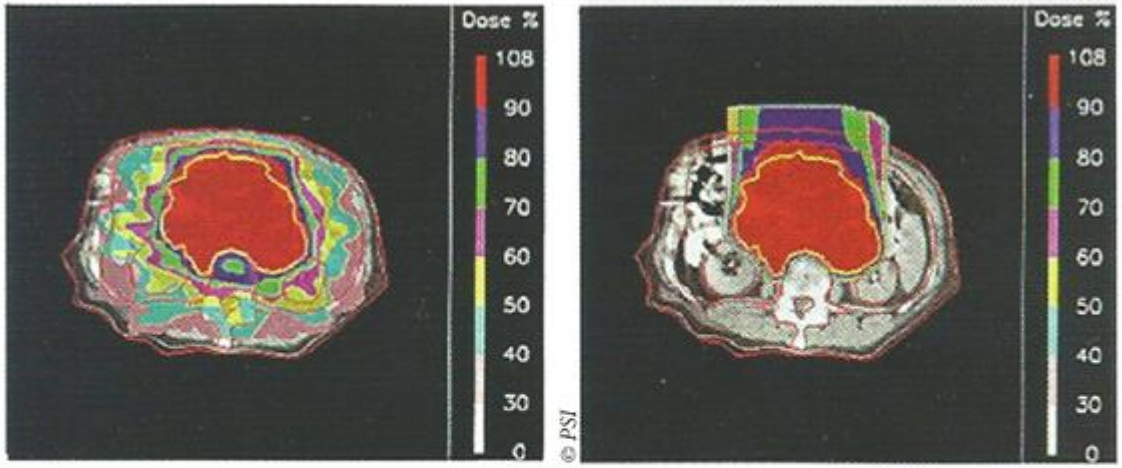
Exemple :2014-Liban-Exo2-Sujet-MvtElectron-9pts.doc

L'expérience de J.J.Thomson

L'expérience de Millikan

CERN-MOVIE-Le Grand collisionneur de hadronsaccélérateur 6min.mpg

Protonthérapie

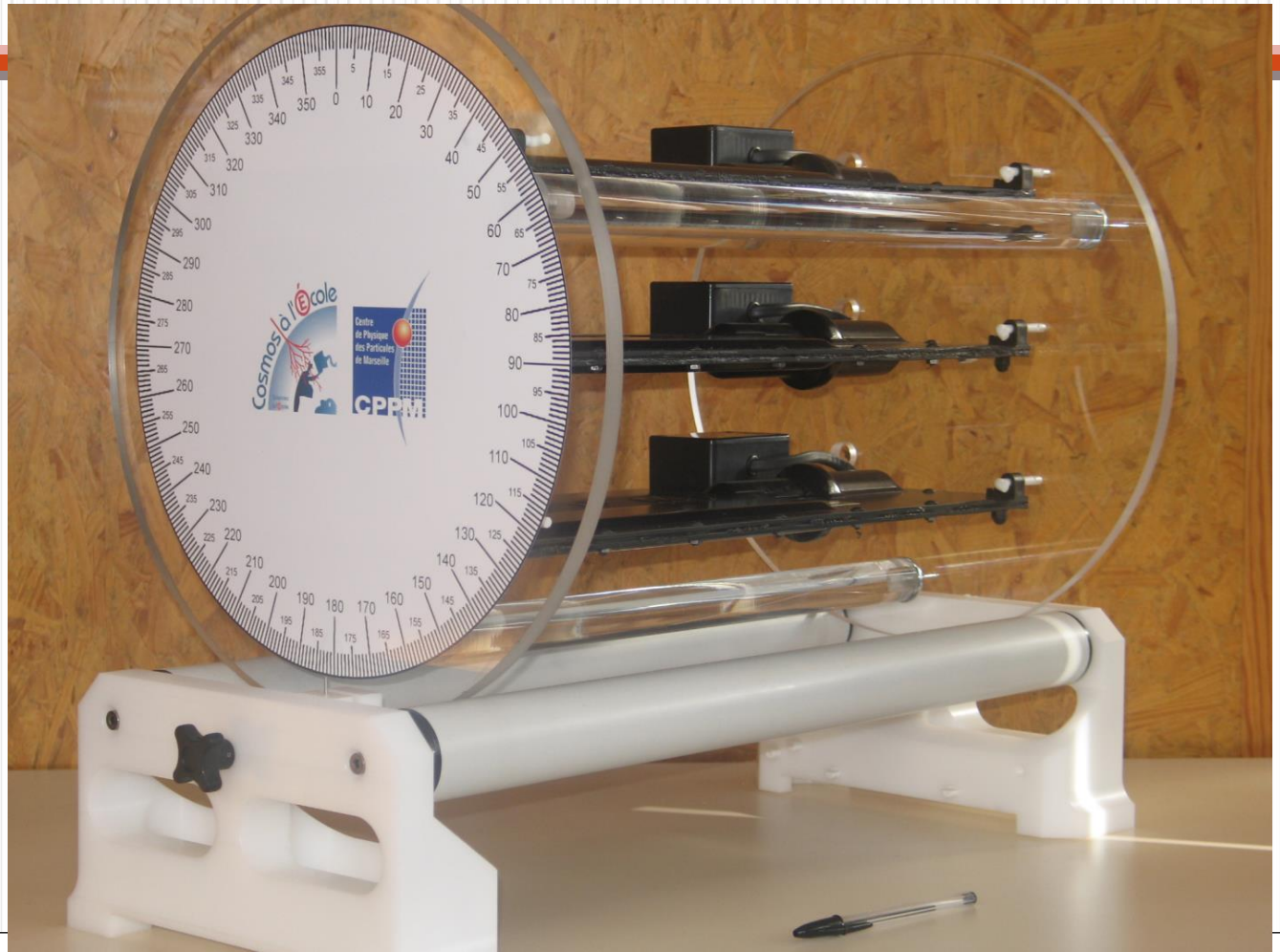


Coupes de cerveaux qui indiquent les doses de rayonnement reçues par un traitement avec des rayons X, à gauche, par une protonthérapie à droite (Paul Scherrer Institute, Suisse). Les codes de couleur indiquent que, dans le premier cas, une vaste zone entourant celle qui est traitée (en rouge) reçoit plus de 40% de la dose maximale. Dans le second cas les tissus extérieurs à la zone traitée ne sont pratiquement pas irradiés, sauf ceux situés vers le haut de la photo par lequel le faisceau arrive.

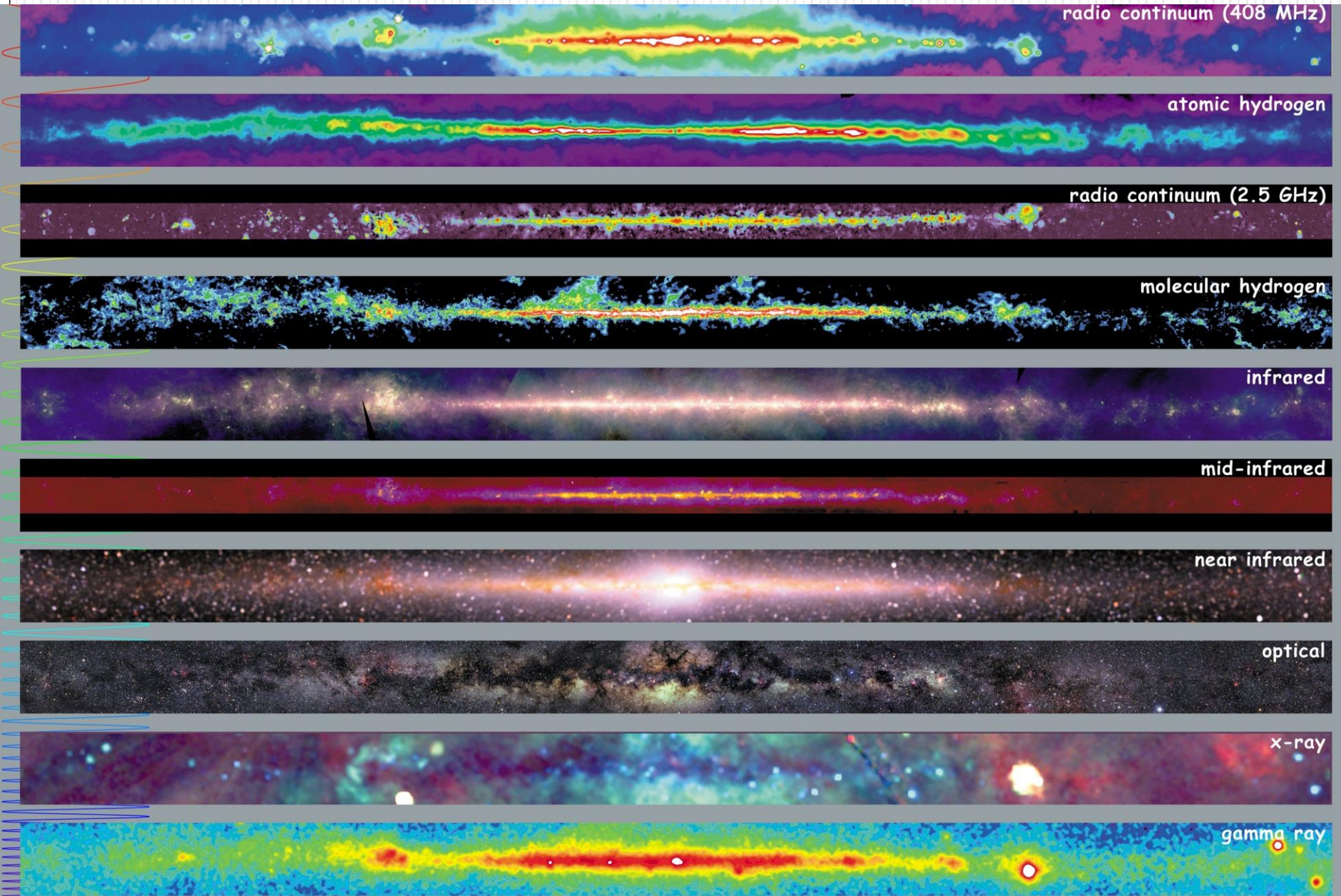
Stage 2012
Cosmos à l'École
Centre de Physique des Particules de Marseille
CPPM

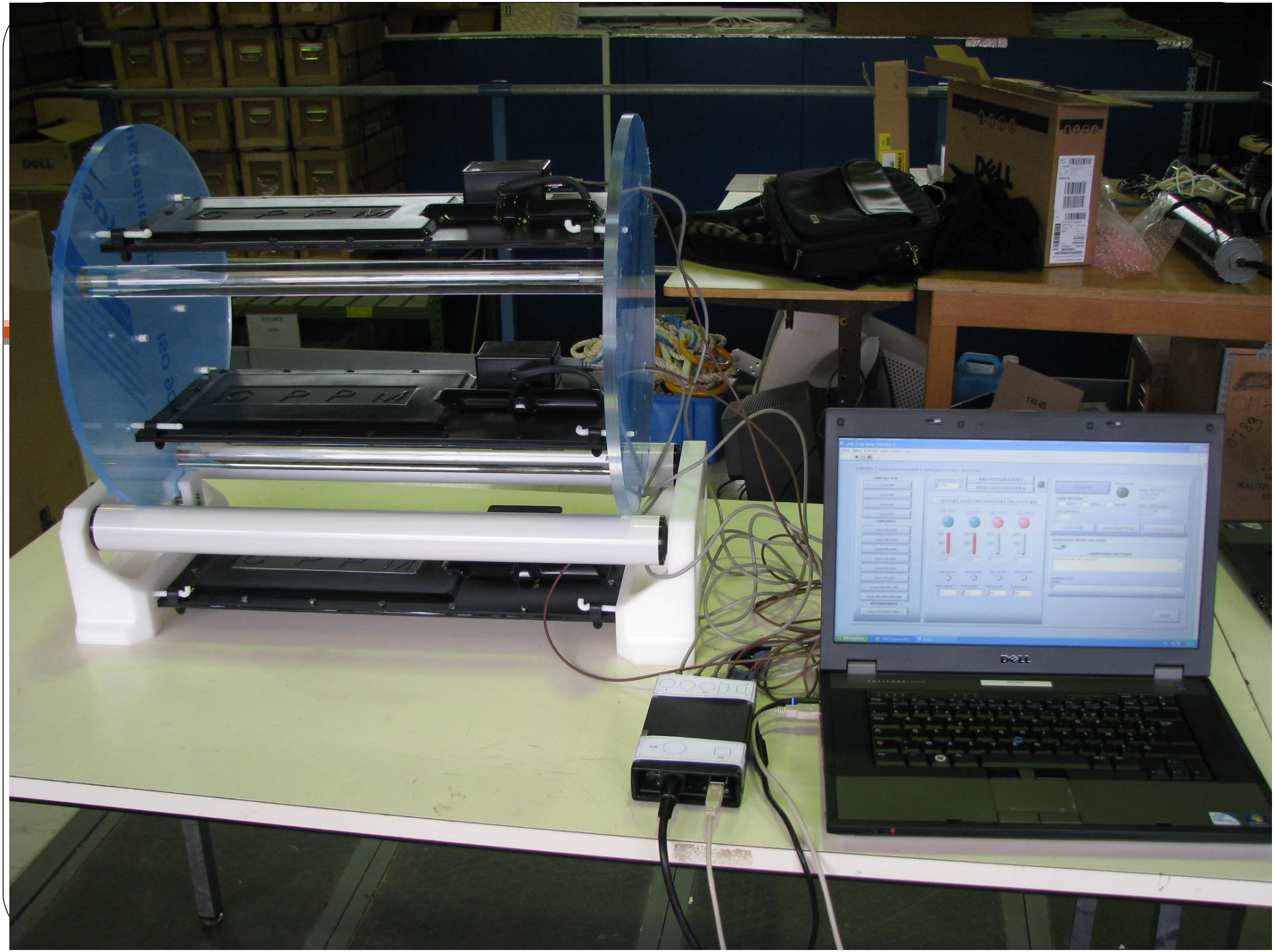
Utilisation du cosmodétecteur en filières générales

Le Cosmodétecteur de Sciences à l'École



Rayonnement dans l'Univers




DELL

Réglage du cosmodétecteur:

Tension de seuil

Tension alimentation des P.M.

- **Comment mesurer le flux de muons au sol** ?

(mis en ligne par un(e) ? collègue) TP 2 réglages cosmodétecteur\TP1 flux de muons cosmiques élèves.pdf

Puis en classe (TP) :Présentation du fonctionnement du détecteur avec les documents du cahier pédagogique .

TP 2 réglages cosmodétecteur\TP 1 réglages du détecteur def.doc

- Les élèves effectuent les mesures , chacun leur tour

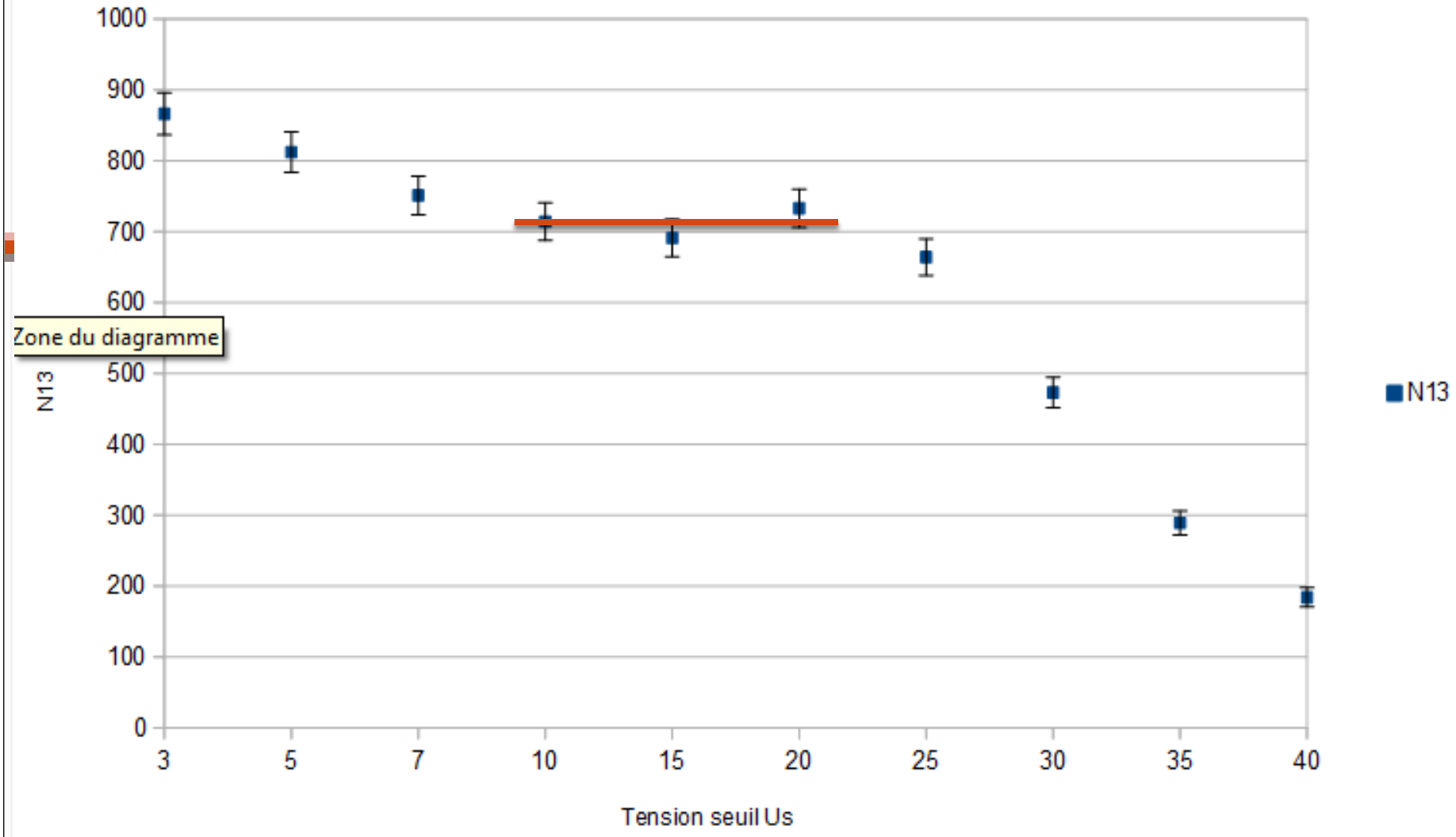
(tension seuil) et représentent la courbe N en fonction de Useuil (sur tableur)et réfléchissent aux réglages de la tension de seuil optimale.

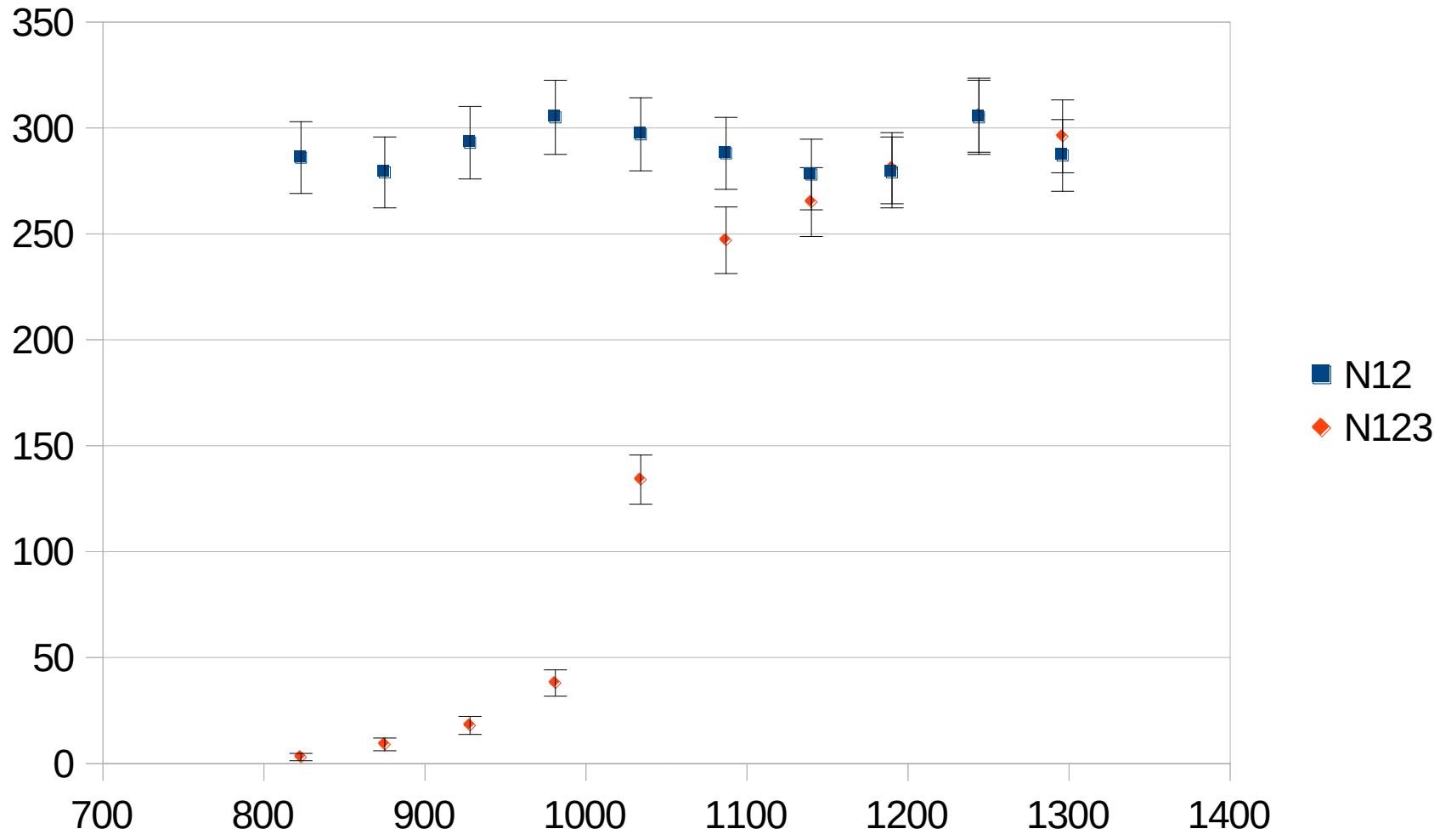
Réglage du cosmodétecteur:

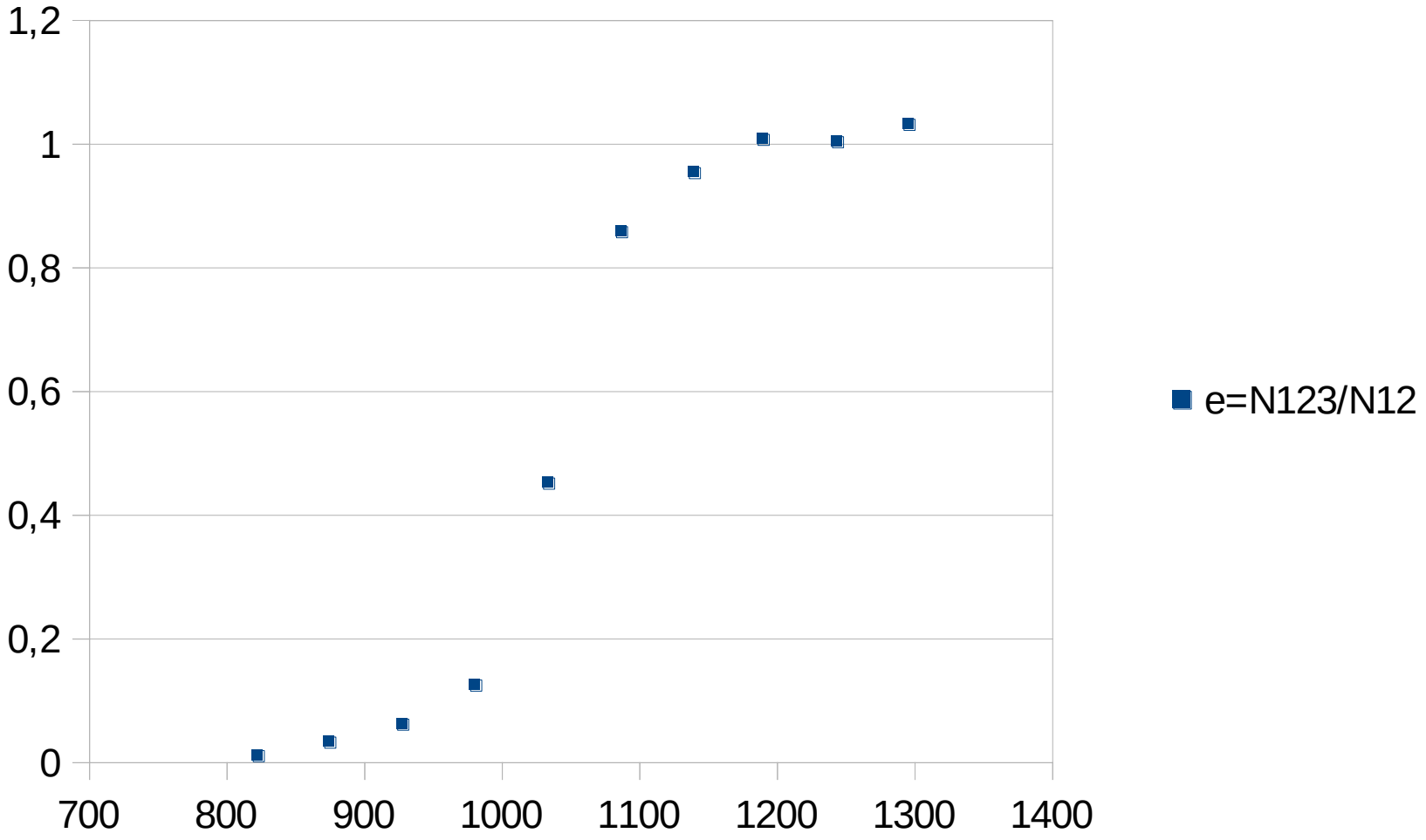
Tension de seuil
Tension alimentation des P.M.

- Puis , nous avons réglé le cosmodétecteur sur cette valeur et ils sont venus chacun leur tour effectuer 2 mesures de UPM1 pour déterminer la tension d'alimentation .
- En même temps (pendant les mesures) , je leur ai donné les mesures pour les PM2 et PM3 et ils devaient effectuer les courbes N en fonction UPM et e en fonction UPM pour justifier les tensions d'alimentation choisies pour

UPM2 et UPM3 .


1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
N13
Zone du diagramme
3
5
7
10
15
20
25
30
35
40
Tension seuil Us
N13


350
300
250
200
150
100
50
0
700
800
900
1000
1100
1200
1300
1400
N12
N123


1,2
1
0,8
0,6
0,4
0,2
0
700
800
900
1000
1100
1200
1300
1400
e=N123/N12

Utilisationdu cosmodétecteur: Nombre de muons détectés en 5 s.

- Nous avons effectué quelques mesures en classe sur 10 comptages (50 s) pour introduire le caractère aléatoire du nombre de muons détectés.
- Présentation aux élèves la notion d'erreur puis incertitude .
- Rappels sur les formules : valeur moyenne et écart type (connues en math) et sens en physique.

Tableau à remplir.Stat formules.pdf

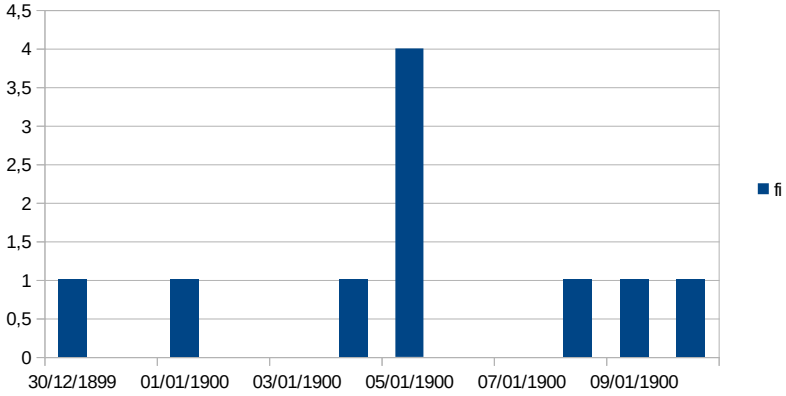
Cosmodétecteur 10 mesures élèves exemple.ods

Utilisation du cosmodétecteur: Nombre de muons détectés en 5s.

- Chaque groupe est venu mesurer le nombre muons détectés sur 10 comptages de 5s.
- Je leur ai donné des mesures sur 100 puis 1000 comptages (de 5s).

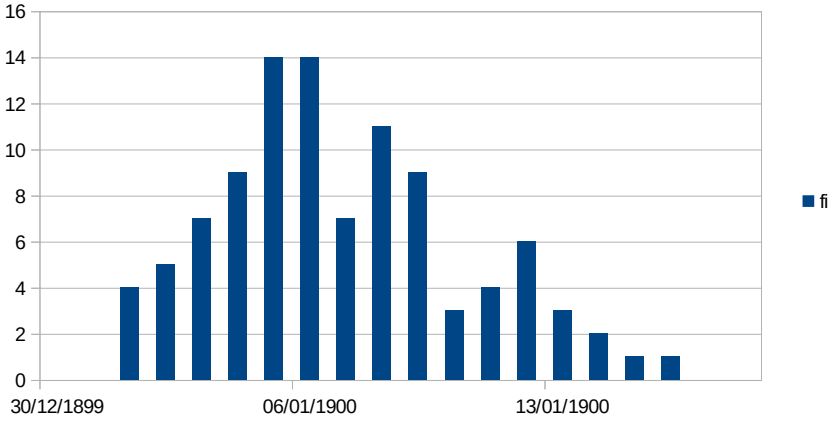
A faire : diagrammes bâton , réfléchir sur fluctuations de la distribution pour ces comptages , valeur moyenne et écart type à déterminer à l'aide d'un Tableur .

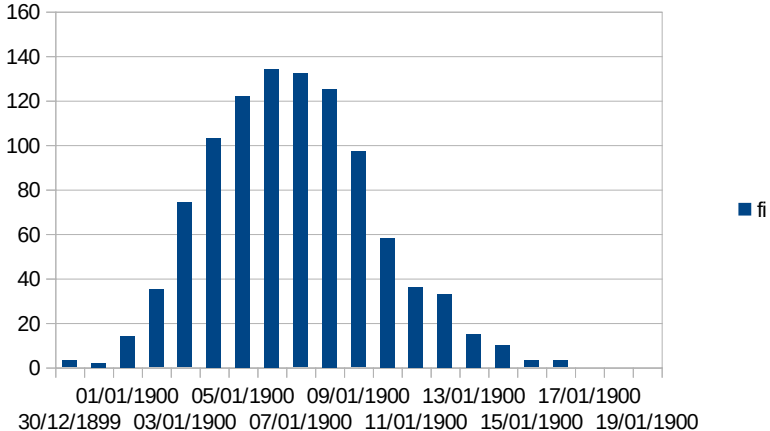
Utilisatic eur: Nombre s en 5s.



Exemple pour 1

Cosmodétecteu





Utilisation du cosmodétecteur: Nombre de muons détectés en 5s.

- Puis chaque groupe est venu inscrire valeur moyenne et écart type pour 10 comptages : valeur moyenne de la moyenne et écart-type expérimental de la moyenne (*utilisé comme estimation de l'incertitude de la* moyenne) incertitude-type

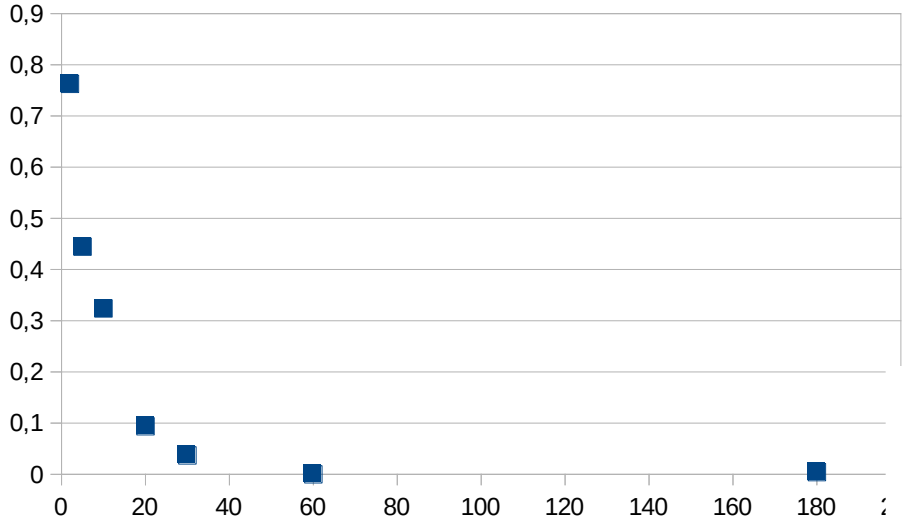
Incertitude type A 1.pdf

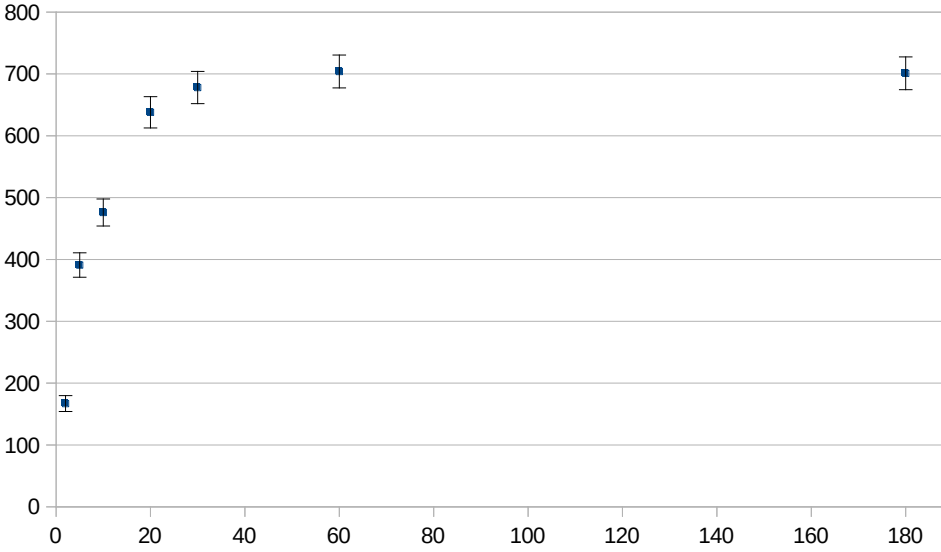
- Chaque grandeur mesurée a été estimée avec un intervalle de confiance de 95 % en tenant compte de la loi de Student.

Utilisation du cosmodétecteur: Erreur systématique.

- Choix de différents intervalles de temps pour une même durée de mesures.

Utilisation du cosmodétecteur: Erreur systématique.





Utilisation du cosmodétecteur: Durée de vie du muon.

Temps et relativité restreinte

Invariance de la vitesse de la lumière et caractère relatif du temps.

Notion d'événement. Temps propre. Dilatation des durées.

Preuves expérimentales.

Définir la notion de temps propre.

Exploiter la relation entre durée propre et durée mesurée.

Extraire et exploiter des informations relatives à une situation concrète où le caractère relatif du temps est à prendre en compte.

Utilisation du cosmodétecteur: Durée de vie du muon.

« Naissance » et « durée de vie » des muons

Les rayons cosmiques sont composés de particules énergétiques provenant de l'espace produisant des particules dites secondaires à leur entrée dans l'atmosphère : elles forment alors une gerbe de particules.

Image muons.docx

Ces muons sont produits à environ 15 km d'altitude et possèdent une vitesse proche de la célérité de la lumière dans le vide.

Utilisation du cosmodétecteur: Durée de vie du muon.

Principe de la mesure

TP 3 Durée de vie muon.doc

Mesures effectuées sur 17h00 , manip lancée devant les élèves le lundi à 16h00 et retour en TP le lendemain à 9h00.

Traiter le fichier Texte de mesures en utilisant un tableur (Open Office) pour représenter le nombre de muons détectés en fonction du temps t (sur Généris).

Utilisation du cosmodétecteur: Durée de vie du muon.

<u>Modélisation :</u> la courbe à modéliser est de la forme :

$N(t) = N_0 \ exp\ (- t / \tau)$

Déterminer la durée de vie τ des muons.

Déterminer $N(6\tau)$ *, conclusions* **.**

Commenter ce résultat , vous paraît-il « cohérent » avec vos connaissances sur les muons ?

En les guidant oralement : déterminer la durée parcours muons (si produit à 15 km et vitesse :c) , hypothèse….Vont-ils plus vite que C ?

(J'avais donné en activité avant la séance l'expérience de Michelson et Morley).

Utilisation du cosmodétecteur: Durée de vie du muon.

Doc vidéo sur Einstein et rappel sur formule étudiée en 1S , $E=mc^2$ conséquence de la théorie relativité restreinte.

Postulat de la relativité restreinte , notion de temps propre , exemples : séance suivante (horloge de lumière pour « démontrer » relations et γ , GPS)…

puis retour sur temps propre du muons .

Utilisation du cosmodétecteur: Durée de vie du muon.

Exemple (Exercice 1 bac 2013 Pondichéry):

Expliquer par un raisonnement quantitatif pourquoi des muons issus des rayons cosmiques peuvent être observés au niveau du sol terrestre.

Ex1 bac 2013 doc muons.doc

Muons et énergie cinétique : l'énergie totale et l'énergie de masse au repos sont liées par la relation $E = \gamma . E_0$. Ex1 bac 2014 Métropole.

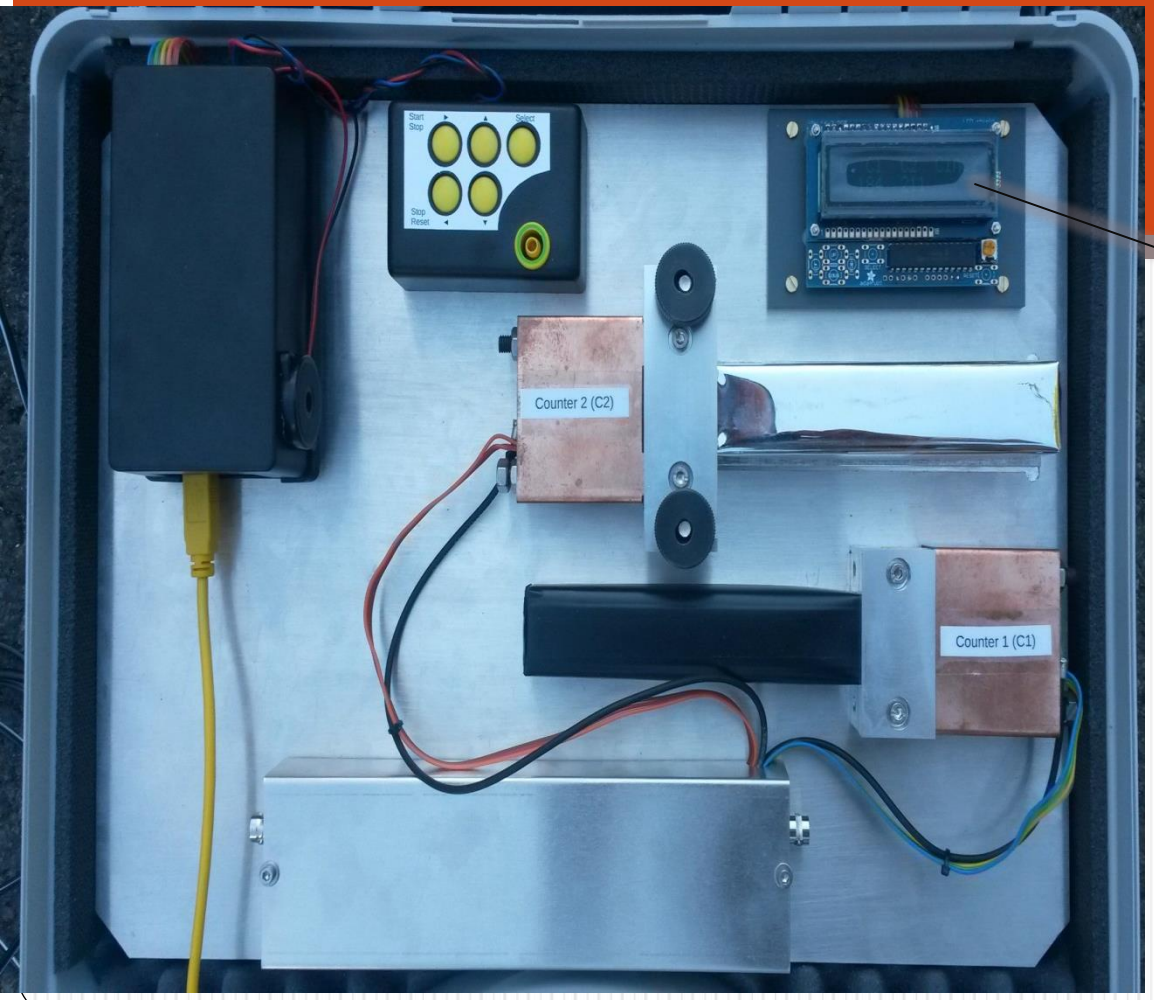
COSMIX

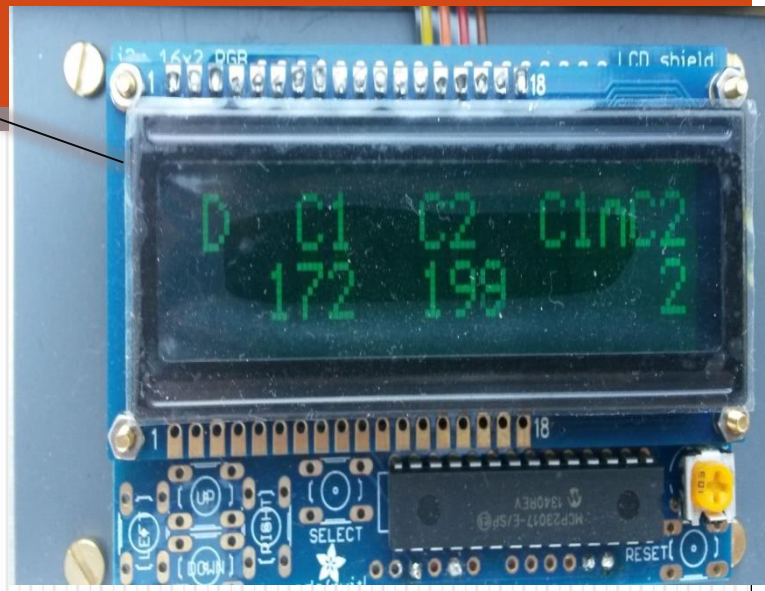
French detector : COSMIX

HST

CERN

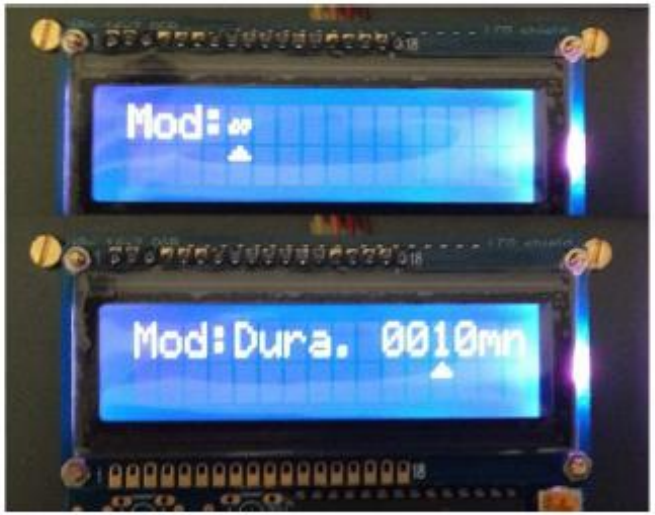
2015





Menu

Nominal counting



Setting the run duration

Temperature
Pressure data

GPS data

Date

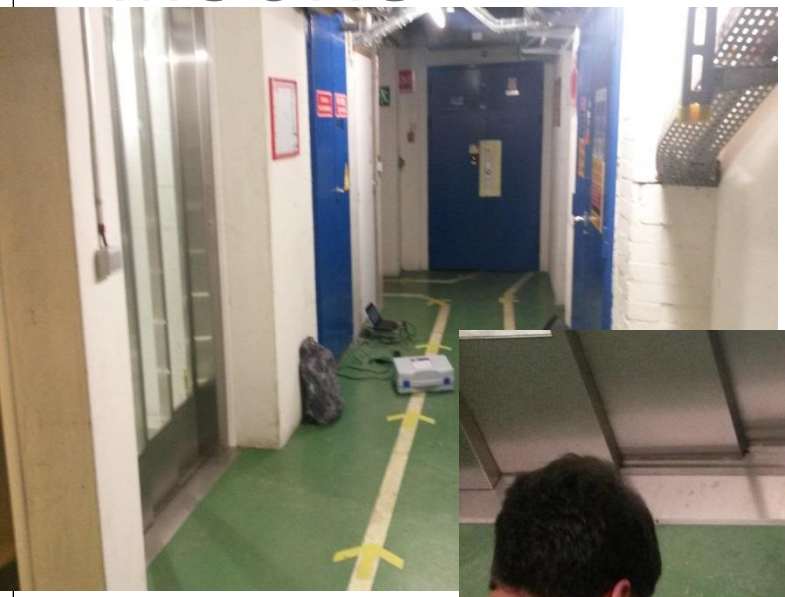
Turning
Buzzer ON/OFF

A mixed bunch

with two honorary members: Gurpreet and Patrick

MEASUREMENTS OF FLUXES OF MUONS

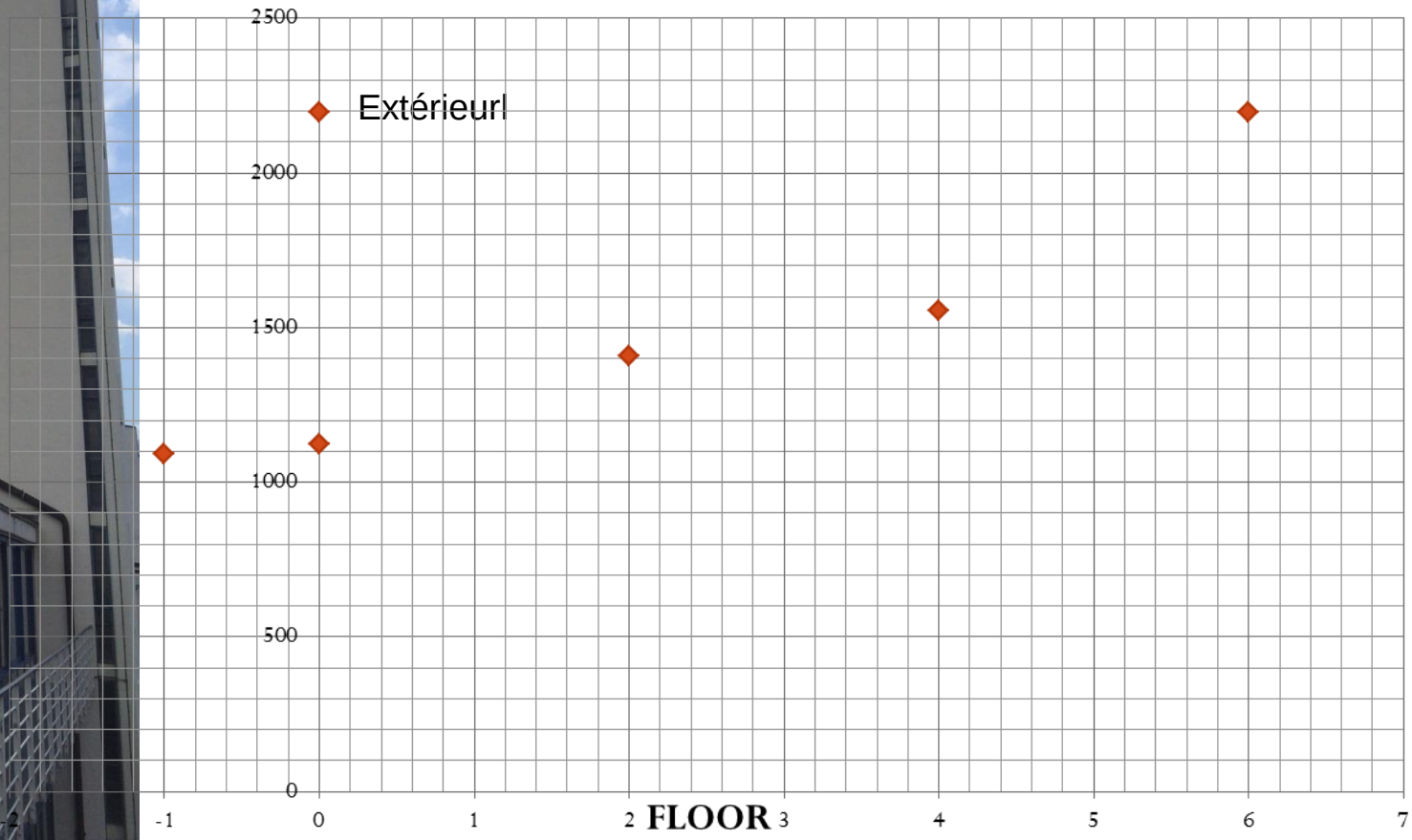
HST 2015



COSMIX

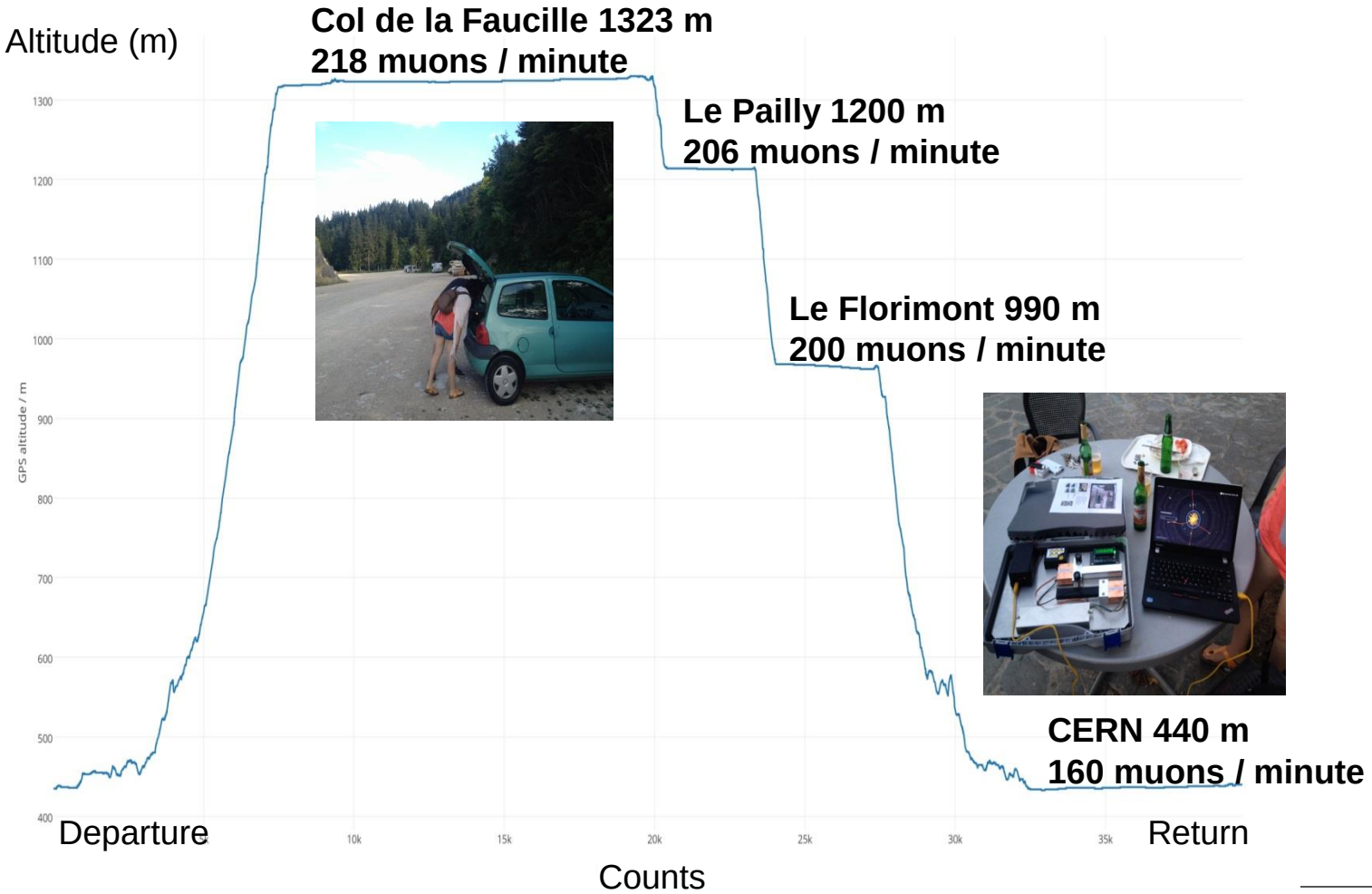
In the Building 60

From Basement to 6th Floor



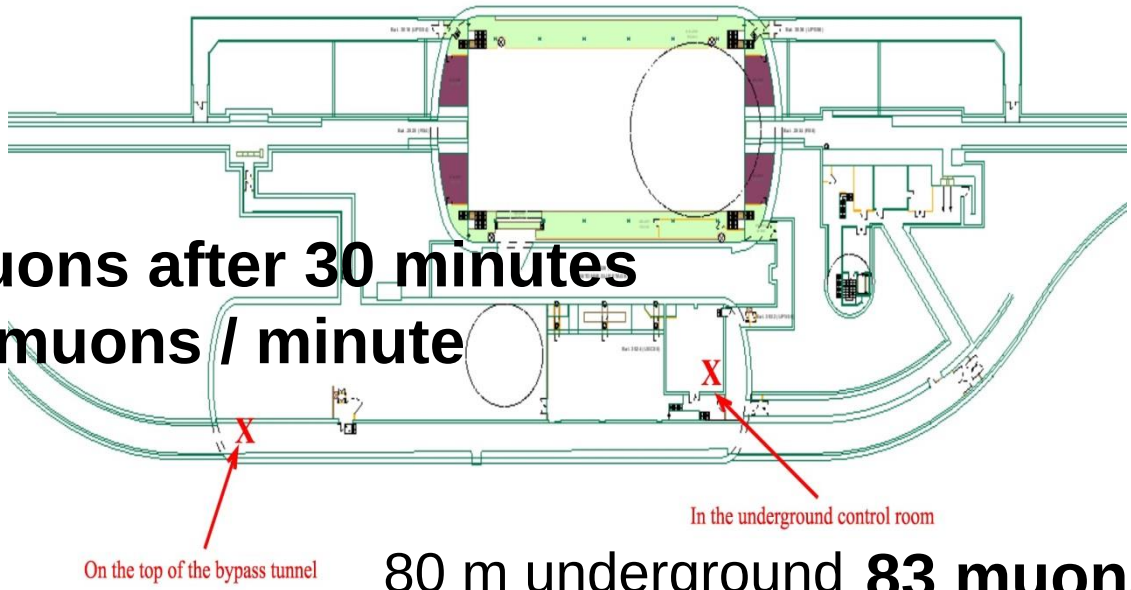
HST 2015

A trip to Col de la Faucille...



At CMS with COSMIX

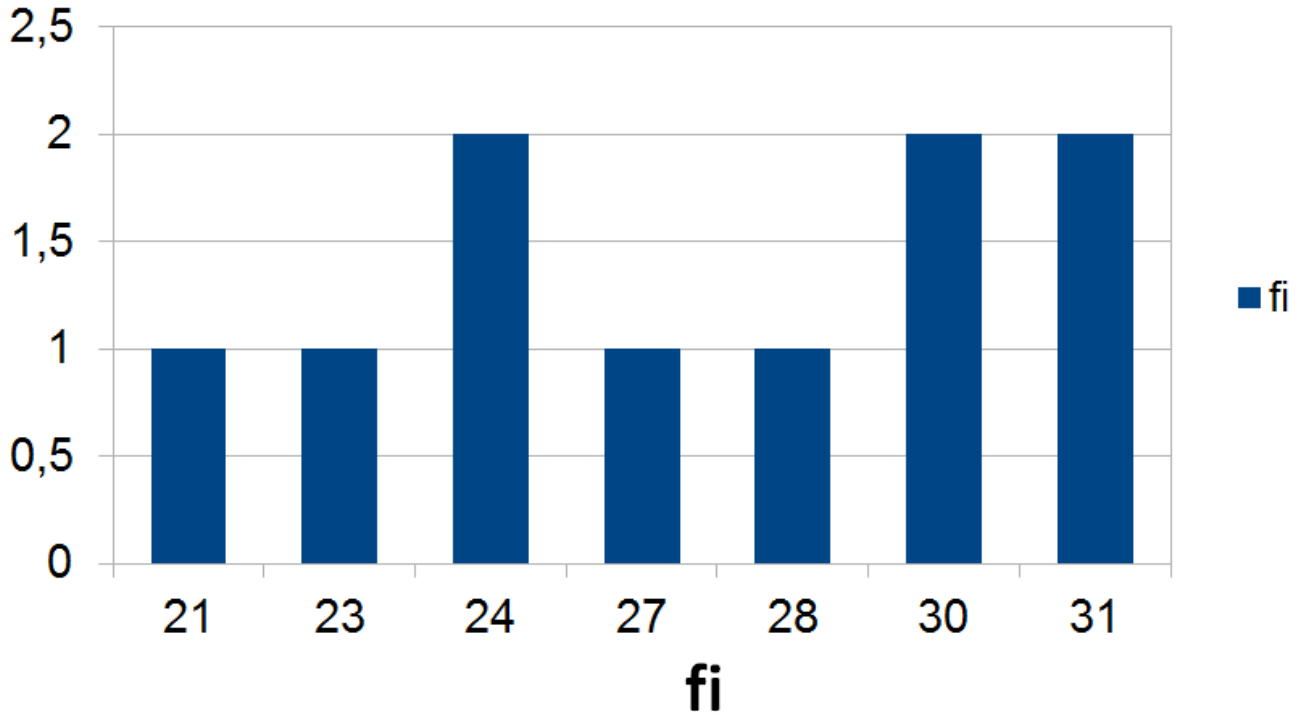
HST 2015

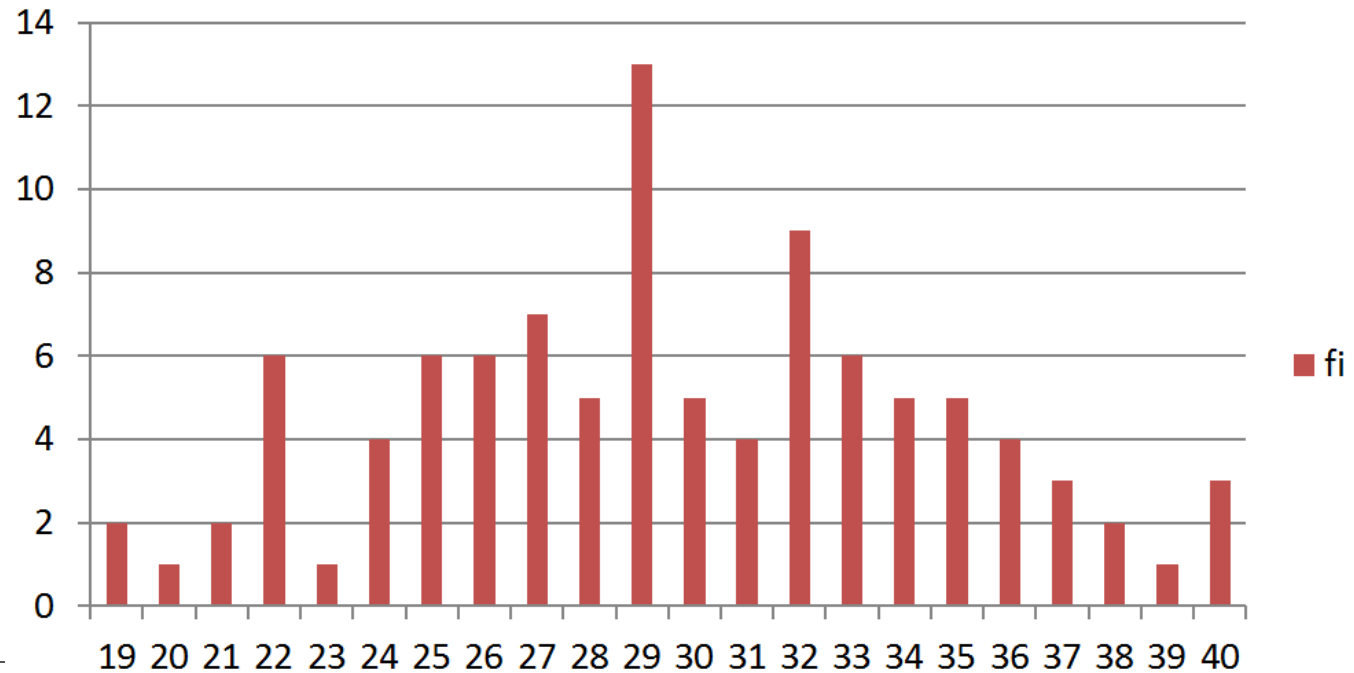


92 muons after 30 minutes
~ 3.1 muons / minute

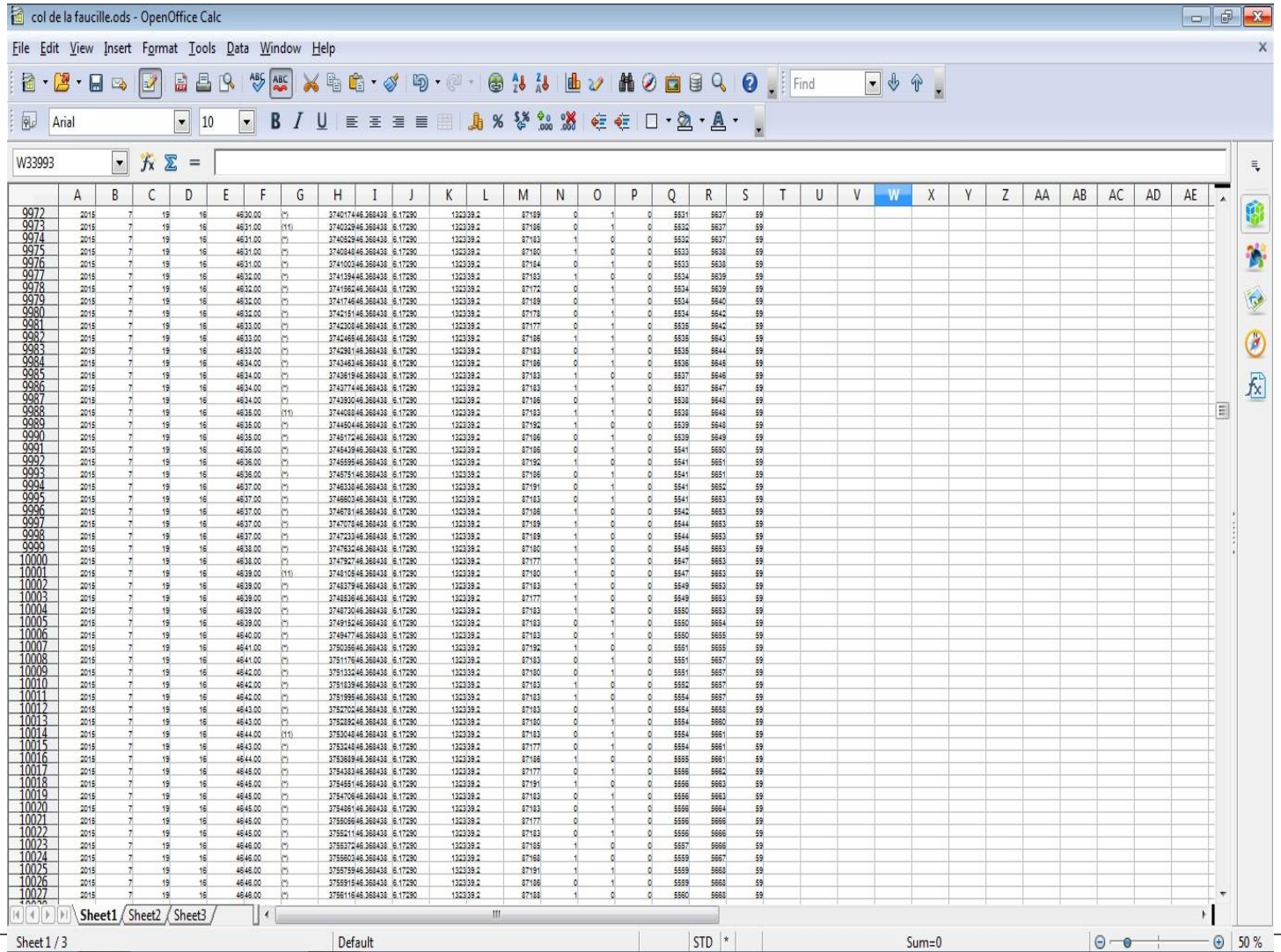
80 m underground **83 muons after 30 minutes**
~ 2.8 muons / minute

Compared with…
3162 muons after 30 minutes near the CMS control room!!!
~ 105 muons / minute


2,5
2
1,5
1
0,5
0
21
23
24
27
28
30
31
fi
fi


14
12
10
8
6
4
2
0
19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40
fi

Not enough data...
only 34,023 lines
for that one!!!



Ordinateur ▸ Disque amovible (E:)

Rechercher dans : Disque amovible (E:)

Organiser ▾ Partager avec ▾ Nouveau dossier

Favoris
Bureau
Emplacements récer

Nom	Modifié le	Type	Taille
COSMIX	01/01/2000 00:00	Document texte	3 658 Ko
GPS	01/01/2000 00:00	Document texte	19 448 Ko

COSMIX - Bloc-notes

Fichier Edition Format Affichage ?

```
2015,07,14,14,07,57.00,(*),110540,46.230419,6.55180,515,28.7,96749,0,1,0,104,88,0
2015,07,14,14,08,00.00,(8),112125,46.230380,6.55160,510,28.7,96743,0,1,0,104,89,0
================ New Run ==============
Mod: continuous              Clock System : UTC
2015,07,15,07,15,10.00,(*),7294,-999.0,-999.0,-999,27.6,96947,0,1,0,1,1,0
2015,07,15,07,15,10.00,(*),7500,-999.0,-999.0,-999,27.6,96938,1,0,0,1,1,0
2015,07,15,07,15,12.00,(*),9054,-999.0,-999.0,-999,27.7,96938,0,1,0,1,2,0
2015,07,15,07,15,12.00,(*),9445,-999.0,-999.0,-999,27.6,96944,0,1,0,1,3,0
2015,07,15,07,15,12.00,(*),9908,-999.0,-999.0,-999,27.7,96941,1,0,0,2,3,0
2015,07,15,07,15,14.00,(*),11808,-999.0,-999.0,-999,27.7,96949,0,1,0,2,4,0
2015,07,15,07,15,15.00,(*),12018,-999.0,-999.0,-999,27.7,96944,0,1,0,2,5,0
2015,07,15,07,15,16.00,(*),13331,-999.0,-999.0,-999,27.7,96944,0,1,0,2,6,0
2015,07,15,07,15,16.00,(*),13742,-999.0,-999.0,-999,27.7,96944,1,0,0,3,6,0
2015,07,15,07,15,17.00,(*),14005,-999.0,-999.0,-999,27.7,96944,0,1,0,3,7,0
2015,07,15,07,15,17.00,(*),14756,-999.0,-999.0,-999,27.7,96938,0,1,0,3,8,0
2015,07,15,07,15,18.00,(*),15179,-999.0,-999.0,-999,27.7,96941,0,1,0,4,9,0
2015,07,15,07,15,18.00,(*),15346,-999.0,-999.0,-999,27.7,96944,1,0,0,4,9,0
2015,07,15,07,15,18.00,(*),15859,-999.0,-999.0,-999,27.7,96944,1,0,0,5,9,0
2015,07,15,07,15,19.00,(*),16924,-999.0,-999.0,-999,27.7,96941,0,1,0,6,10,0
2015,07,15,07,15,20.00,(*),17080,-999.0,-999.0,-999,27.7,96932,1,0,0,6,10,0
2015,07,15,07,15,21.00,(*),18565,-999.0,-999.0,-999,27.7,96938,1,0,0,7,10,0
2015,07,15,07,15,22.00,(*),19296,-999.0,-999.0,-999,27.7,96938,1,0,0,8,10,0
2015,07,15,07,15,22.00,(*),19450,-999.0,-999.0,-999,27.7,96932,1,0,0,9,10,0
2015,07,15,07,15,22.00,(*),19917,-999.0,-999.0,-999,27.7,96946,1,0,0,10,10,0
2015,07,15,07,15,23.00,(*),20695,-999.0,-999.0,-999,27.7,96935,0,1,0,11,11,0
2015,07,15,07,15,23.00,(*),20849,-999.0,-999.0,-999,27.7,96941,1,1,0,11,12,0
2015,07,15,07,15,24.00,(*),21651,-999.0,-999.0,-999,27.7,96941,1,0,0,12,12,0
2015,07,15,07,15,24.00,(*),21920,-999.0,-999.0,-999,27.7,96943,0,1,0,12,13,0
2015,07,15,07,15,25.00,(*),22187,-999.0,-999.0,-999,27.7,96946,0,1,0,12,14,0
2015,07,15,07,15,25.00,(*),22391,-999.0,-999.0,-999,27.7,96938,1,0,0,13,14,0
2015,07,15,07,15,26.00,(*),23149,-999.0,-999.0,-999,27.7,96938,0,1,0,13,15,0
Clock Adjustment 1 seconds
2015,07,15,07,15,27.00,(*),24128,46.228740,6.55210,-5,27.7,96943,0,1,0,13,16,0
2015,07,15,07,15,28.00,(*),24941,46.228691,6.55129,8,27.7,96940,0,1,0,13,17,0
2015,07,15,07,15,28.00,(*),25235,46.228691,6.55129,8,27.7,96937,0,1,0,13,18,0
2015,07,15,07,15,30.00,(*),26956,46.228721,6.55319,-18,27.7,96940,0,1,0,13,19,0
2015,07,15,07,15,31.00,(*),27961,46.228729,6.55300,-17,27.7,96937,0,1,0,13,20,0
2015,07,15,07,15,31.00,(*),28534,46.229621,6.54790,379,27.7,96949,0,1,0,13,21,0
2015,07,15,07,15,32.00,(*),29016,46.229621,6.54790,379,27.7,96932,1,0,0,14,21,0
2015,07,15,07,15,32.00,(*),29456,46.229640,6.54689,389,27.7,96937,0,1,0,14,23,0
2015,07,15,07,15,33.89,(5),29612,46.229640,6.54689,389,27.7,96943,0,1,0,14,23,0
```

GPS - Bloc-notes

Fichier Edition Format Affichage ?

```
2015,07,15,07,49,00.00,(9),2037445,46.229759,6.54490,448,30.8,96929
2015,07,15,07,49,00.00,(9),2037741,46.229759,6.54490,448,30.8,96929
2015,07,15,07,49,01.00,(8),2038443,46.229759,6.54490,448,30.8,96929
2015,07,15,07,49,01.00,(8),2038733,46.229759,6.54490,448,30.8,96929
2015,07,15,07,49,02.00,(7),2039399,46.229759,6.54490,448,30.8,96929
2015,07,15,07,49,02.00,(7),2039686,46.229759,6.54490,448,30.8,96929
2015,07,15,07,49,03.00,(7),2040399,46.229759,6.54480,448,30.8,96929
2015,07,15,07,49,03.00,(7),2040686,46.229759,6.54480,448,30.8,96929
2015,07,15,07,49,04.00,(7),2041399,46.229770,6.54490,448,30.8,96929
2015,07,15,07,49,04.00,(7),2042132,46.229770,6.54490,448,30.8,96929
2015,07,15,07,49,05.00,(7),2042399,46.229770,6.54490,448,30.8,96929
2015,07,15,07,49,05.00,(7),2042686,46.229770,6.54490,448,30.8,96929
2015,07,15,07,49,06.00,(7),2043399,46.229770,6.54490,448,30.8,96929
2015,07,15,07,49,06.00,(7),2043686,46.229770,6.54490,448,30.8,96929
2015,07,15,07,49,07.00,(7),2044402,46.229759,6.54490,448,30.8,96929
2015,07,15,07,49,07.00,(7),2044689,46.229759,6.54490,448,30.8,96929
2015,07,15,07,49,08.00,(7),2045400,46.229759,6.54490,448,30.8,96929
2015,07,15,07,49,08.00,(7),2045687,46.229759,6.54490,448,30.8,96929
2015,07,15,07,49,09.00,(7),2046400,46.229759,6.54490,448,30.8,96929
2015,07,15,07,49,09.00,(7),2047135,46.229759,6.54490,448,30.8,96929
2015,07,15,07,49,10.00,(7),2047444,46.229751,6.54490,448,30.8,96929
2015,07,15,07,49,10.00,(7),2047731,46.229751,6.54490,448,30.8,96929
```

y, mo, d, hr, min, s, 1/100 s, (GPS sat.), long, lat, alt (m), T(°C), P(Pa)

y, mo, d, hr, min, s, 1/100 s, (GPS sat.), long, lat, alt (m), T(°C), P(Pa), Tr1, Tr2, Tr1∩Tr2, C1, C2, C1∩C2

Composants élémentaires de la matière

Cellule 10^{-6} m — Molécule 10^{-9} m — Atome 10^{-10} m — Noyau 10^{-14} m — Proton — Neutron 10^{-15} m

Être humain 1 m

Terre 10^{6} m

Soleil 10^{9} m

Galaxie 10^{21} m

	LEPTONS		QUARKS	
1ère famille Constituants de la matière usuelle	ν_e neutrino e $m < 2\cdot10^{-10}$ GeV Q = 0 t = ?	e électron m = 0,00055 GeV Q = -1 t = ∞	u haut / up m = 0,002 GeV Q = 2/3 t = ∞	d bas / down m = 0,005 GeV Q = -1/3 t = 10 min
2ème famille Copie plus massive de la 1ère famille	ν_μ neutrino mu $m < 2\cdot10^{-10}$ GeV Q = 0 t = ?	μ muon m = 0,106 GeV Q = -1 $t = 2{,}2\cdot10^{-6}$ s	c charme / charm m = 1,3 GeV Q = 2/3 $t = 10^{-12}$ s	s étrange / strange m = 0,1 GeV Q = -1/3 $t = 10^{-10}$ s
3ème famille Copie plus massive des 1ère et 2ème familles	ν_τ neutrino tau $m < 2\cdot10^{-10}$ GeV Q = 0 t = ?	τ tau m = 1,78 GeV Q = -1 $t = 2{,}9\cdot10^{-13}$ s	t top m = 173 GeV Q = 2/3 $t = 4\cdot10^{-25}$ s	b beau / beauty / bottom m = 4,2 GeV Q = -1/3 $t = 1{,}5\cdot10^{-12}$ s

BOSON DE HIGGS H

m = 126 GeV Q = 0 $t = 1{,}5\cdot10^{-22}$ s

Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, il est responsable de leurs masses.

Il provoque la séparation entre interactions électromagnétique et faible.

Champ de Higgs

INTERACTIONS FONDAMENTALES

	Portée	Bosons	Désintégrations radioactives β⁺ et β⁻ de certains noyaux instables
Interaction faible	10^{-17} m	Z^0, W^+, W^-	
Interaction électromagnétique	infinie	Photon γ	Electricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie
Interaction forte	10^{-15} m	Gluons g	Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire
Gravitation	infinie	Graviton (?)	Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

Chaque interaction est transmise par des particules associées

Les quatre interactions fondamentales sont indispensables au fonctionnement du soleil et des étoiles

- formation des étoiles sous l'effet de la gravitation
- réactions de fusion nucléaire grâce aux interactions forte et faible
- production de lumière par interaction électromagnétique

ANTIMATIÈRE

À chaque particule correspond une antiparticule aux propriétés quasi-identiques. Elles ont la même masse, mais des charges opposées.