

**Ecole IN2P3**  
**Technique de base des Détecteurs**  
**Cargèse , 8 au 12 Avril 2013**

**Principes & Techniques  
de la détection**

**Joël Pouthas    LPC-ENSICAEN**  
**(Anciennement IPN Orsay et GANIL)**  
[pouthas@lpccaen.in2p3.fr](mailto:pouthas@lpccaen.in2p3.fr)

- 1 - Détecteurs : éléments de définition
- 2 - Détecteurs : interaction particule matière
- 3 - Détecteurs : principes de fonctionnement

Cours de **Bernard Tamain**, LPC - ENSICAEN

Détecter : Quoi ?  
Pourquoi ?

Détecter = Interagir

Identifier. Mesurer  
l'énergie. Localiser

- 4 - Détecteurs gazeux à ionisation
- 5 - Détecteurs semi-conducteurs
- 6 - Détecteurs à émission de lumière
- 7 - Détecteurs : exemples

# 1895 Rayons de Röntgen (Rayons X)



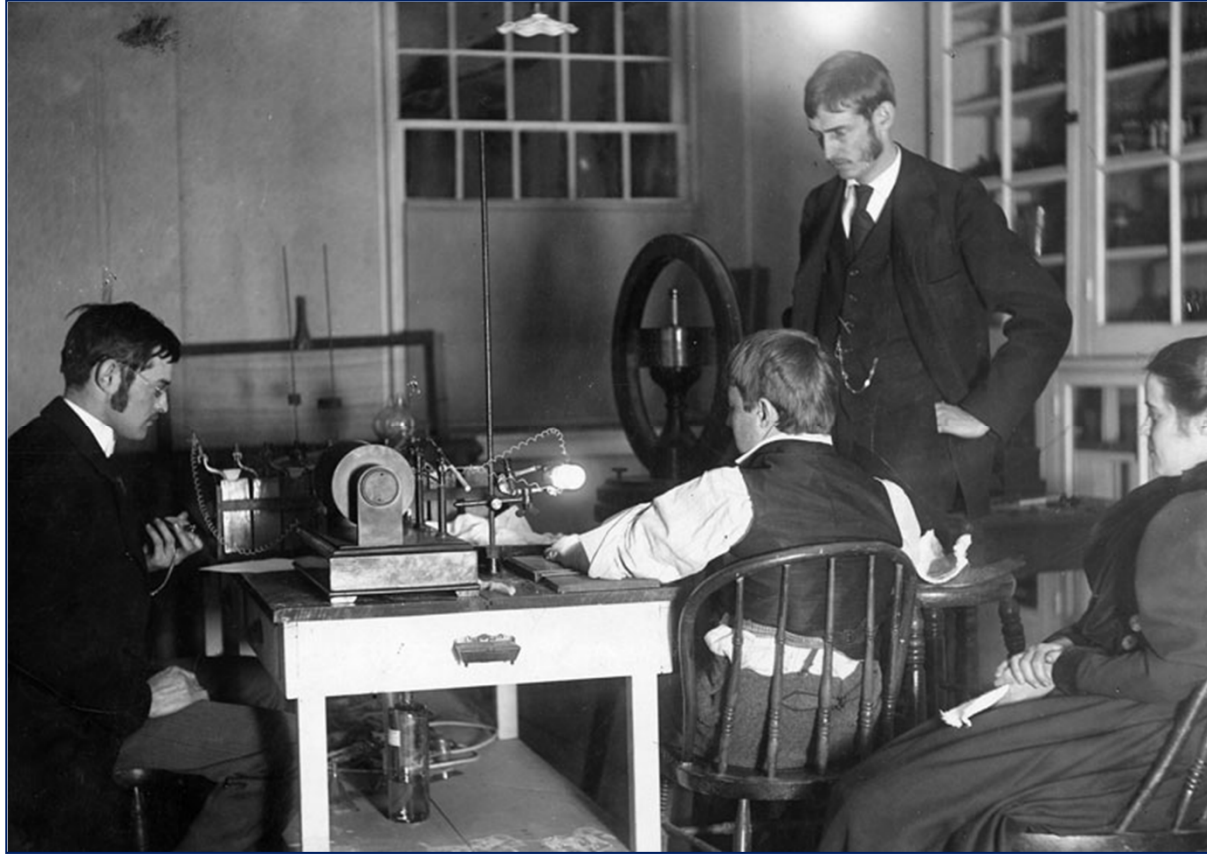
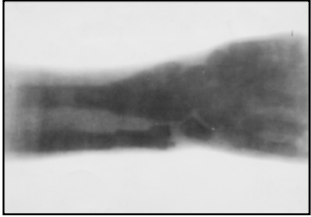
Würzburg

23 janvier 1896



Rudolf von Köhler

# Utilisation des rayons X

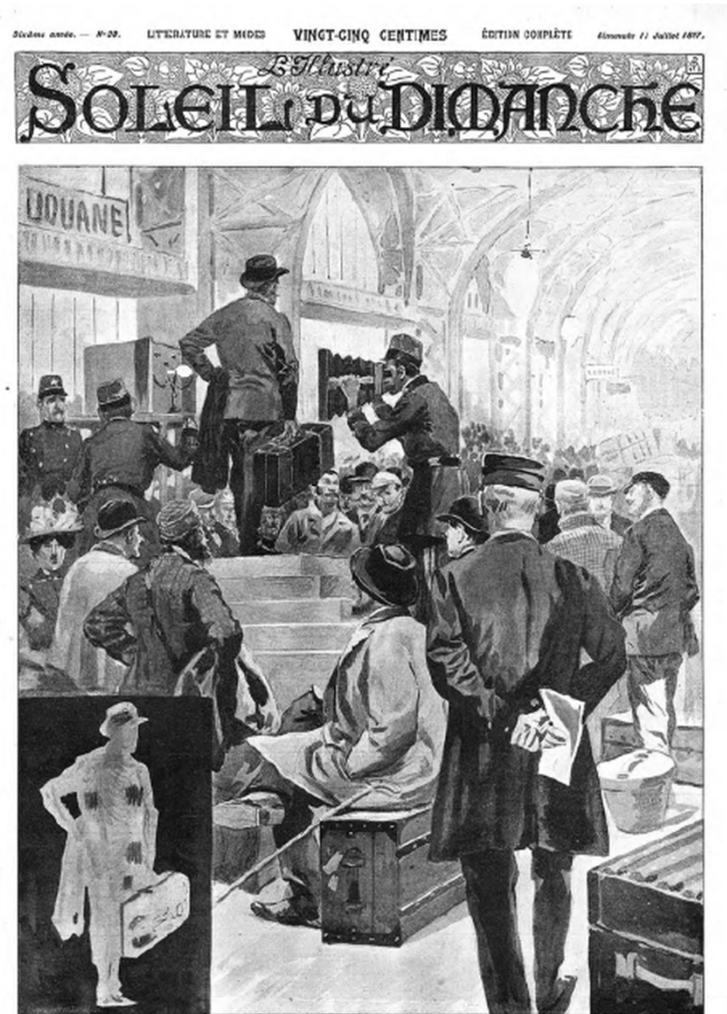


Rudolf von Köhler

Edwin Frost (physicien) et Gilman Frost (médecin)  
Radiographie de l'avant bras  
Darmouth, USA  
3 février 1896

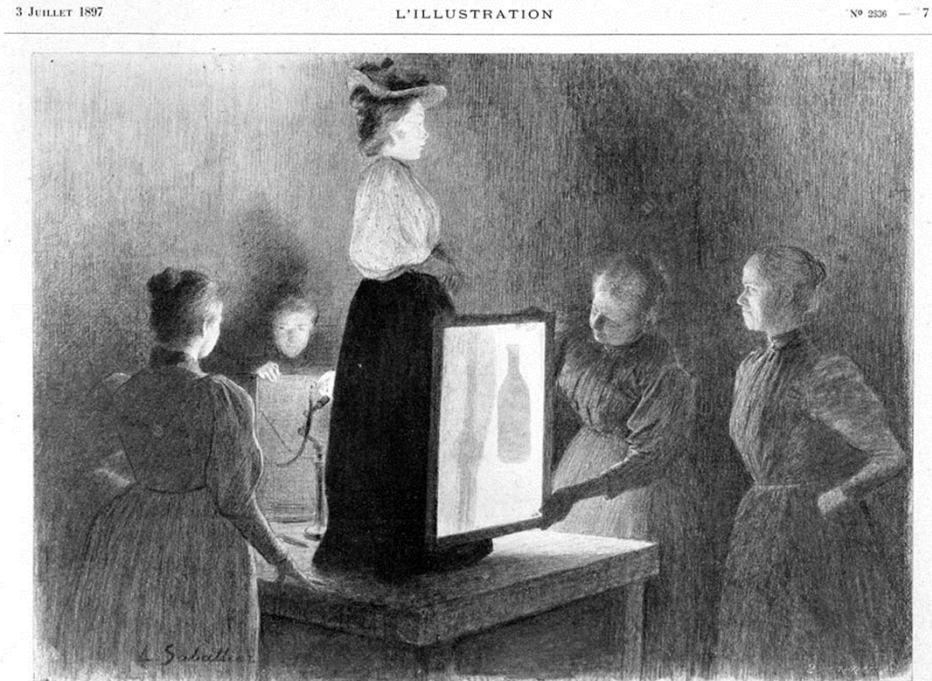


# Utilisation des rayons X



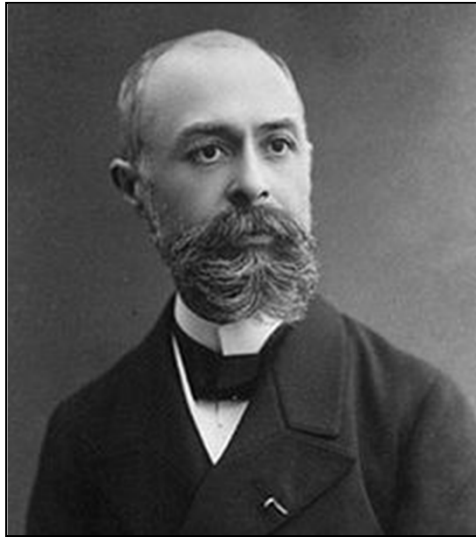
Visite des voyageurs et des bagages au moyen des rayons X. (voir notre correspondance page 43)  
Le Rayon à gauche représente ce que l'on aperçoit au radiogramme.

## Douanes

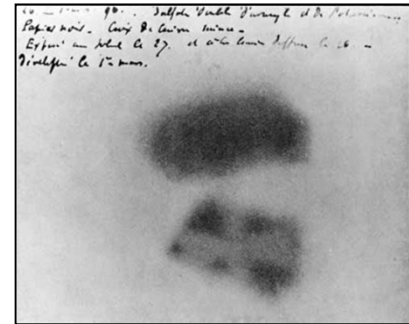


Fraudeuse dénoncée par les rayons X.

# 1896 - Rayons uraniques de Becquerel

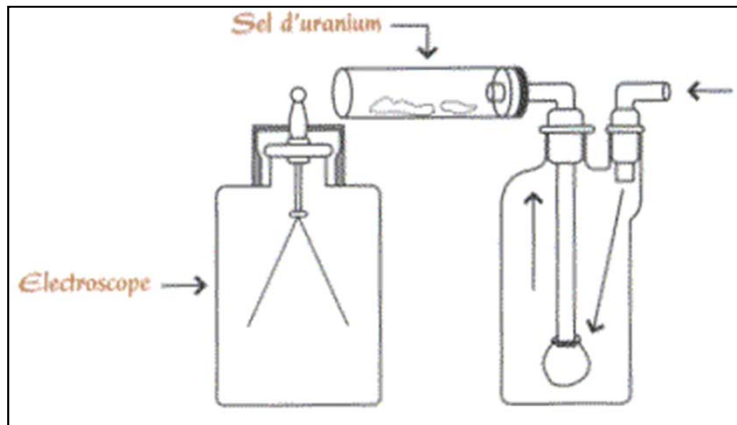


## Découverte De la Radioactivité

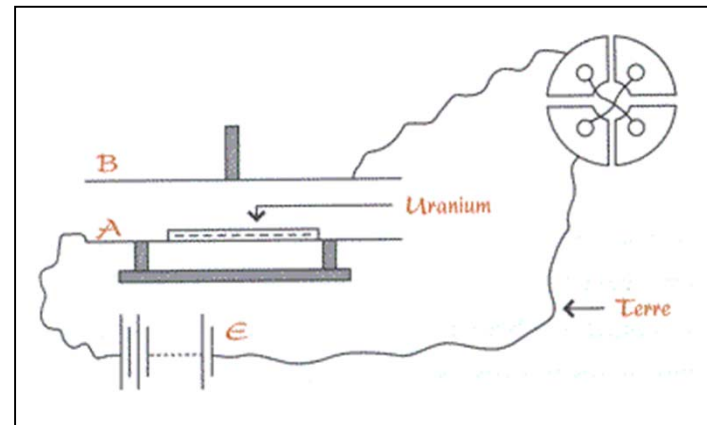


P. Curie

E. Rutherford

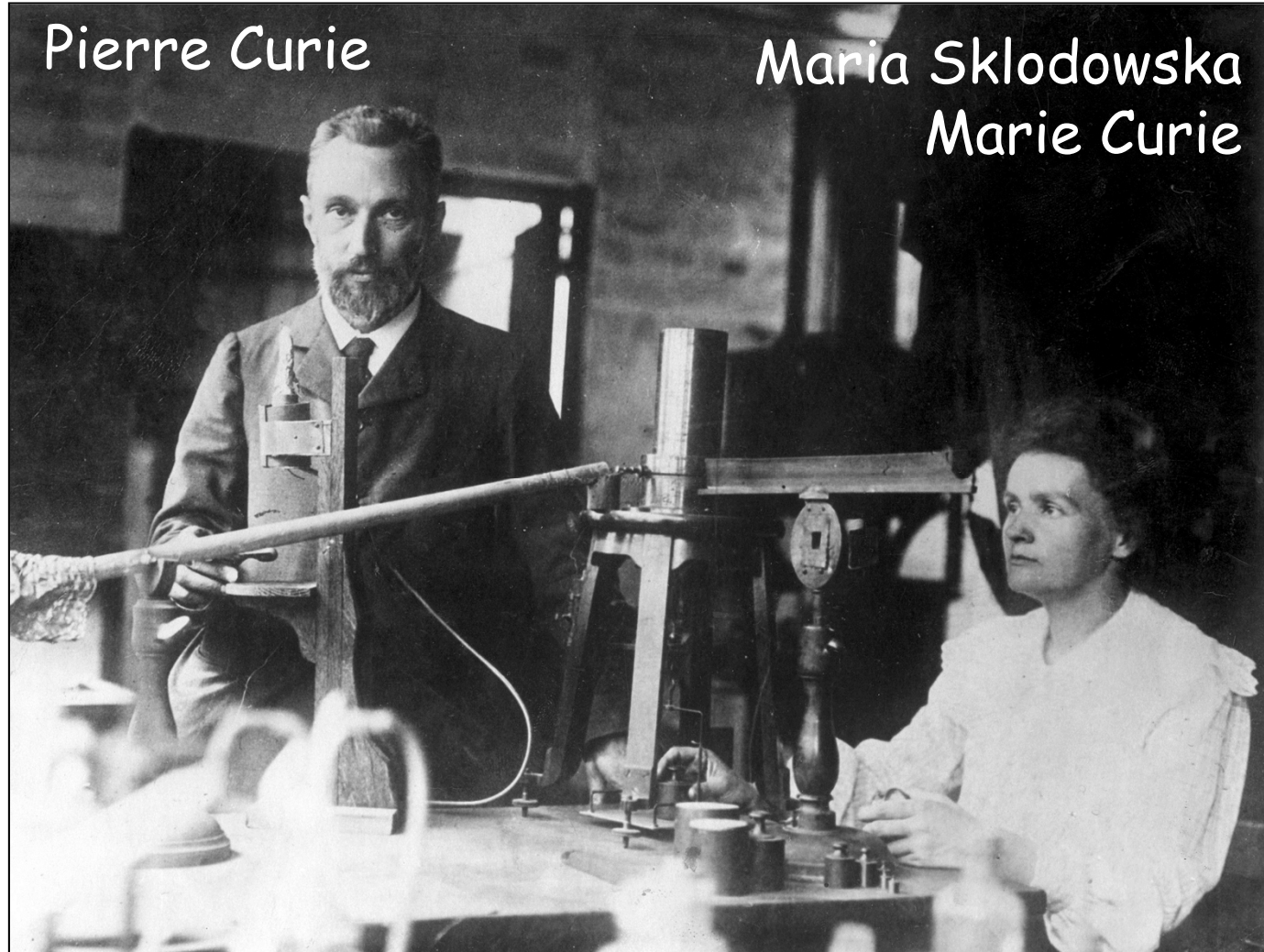


Electroscope à feuilles d'or



Electromètre à quadrants

# Radioactivité



Pierre Curie

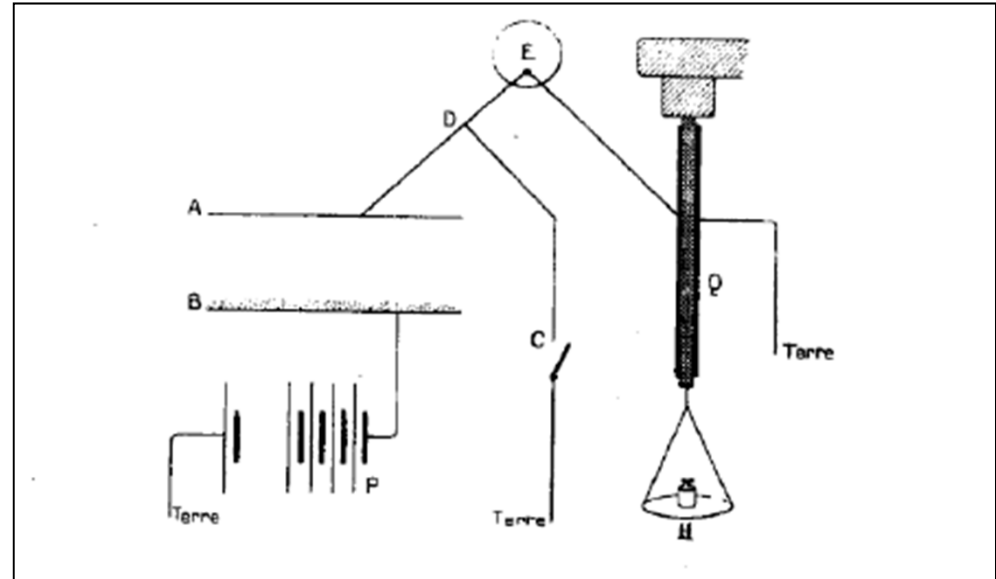
Maria Sklodowska  
Marie Curie

Polonium

1898

Radium

# Dispositif expérimental de Pierre et Marie Curie



LES  
NOUVELLES SUBSTANCES RADIOACTIVES  
ET LES  
RAYONS QU'ELLES ÉMETTENT,  
PAR P. CURIE ET M<sup>me</sup> CURIE.

## Méthode de mesure

Congrès international de physique - Paris - 1900



# Détecter

## Quoi ?

## Pourquoi ?

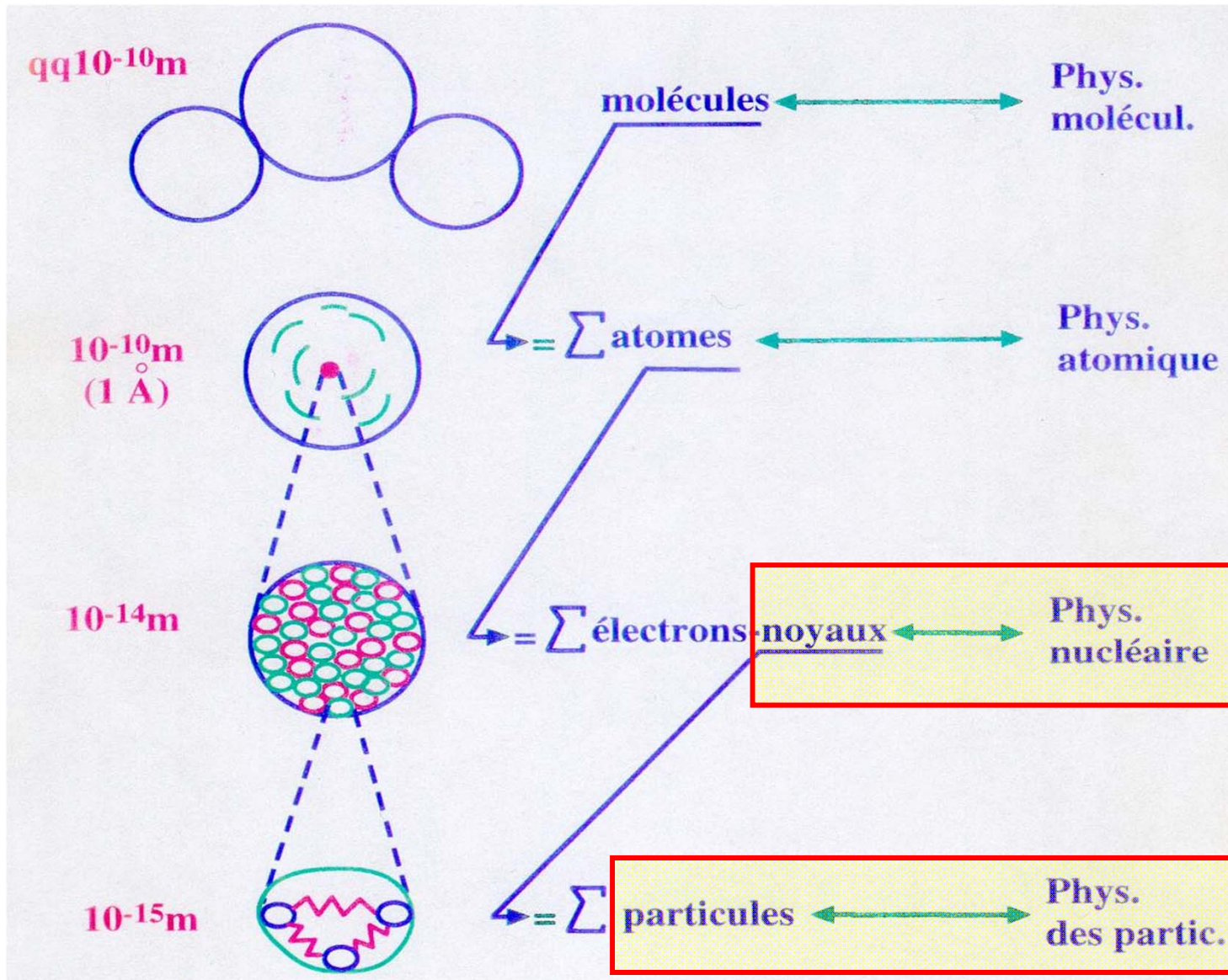
Ecole de Cargèse

Mars 2011

**Bernard Tamain**

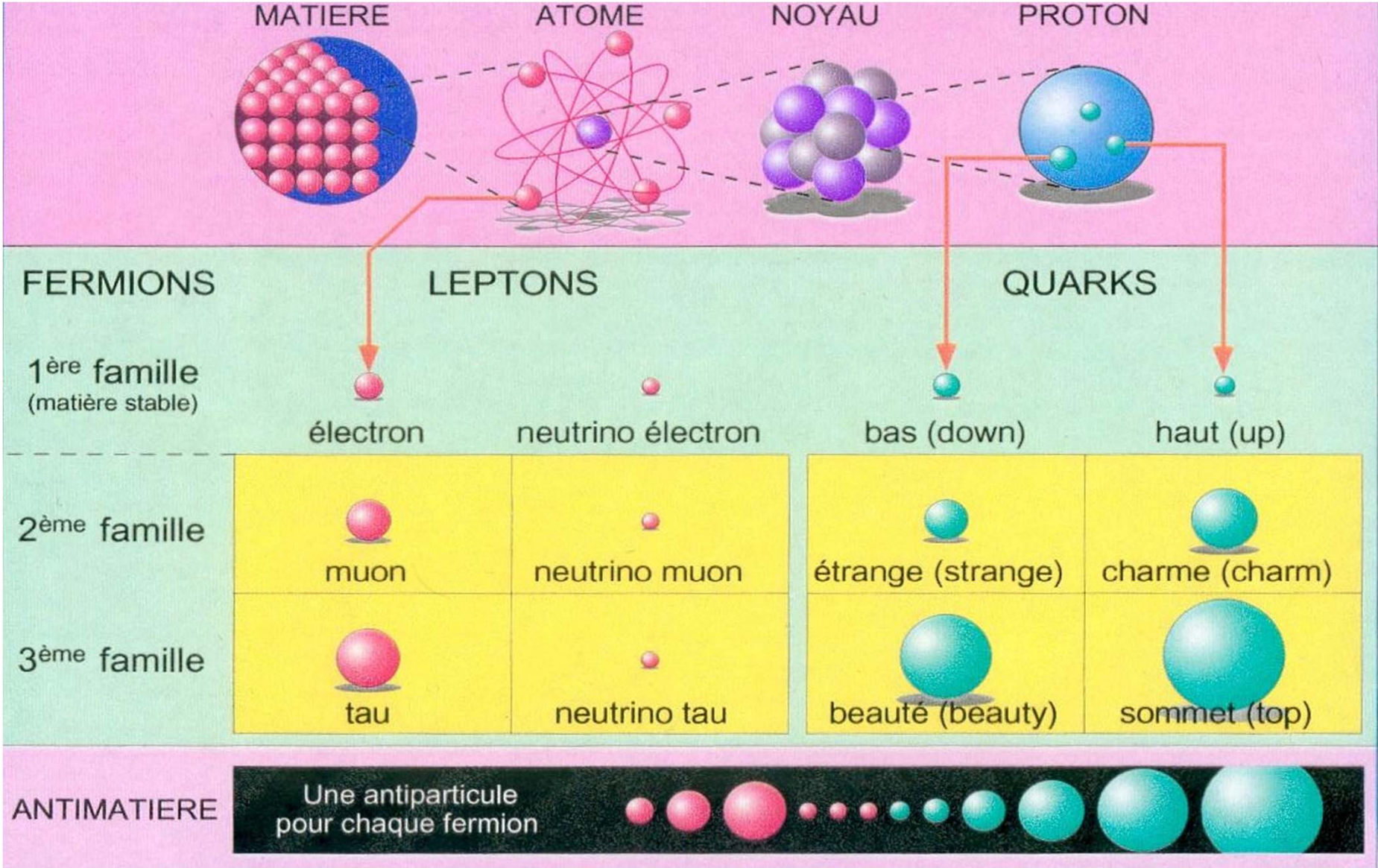
# Introduction : physique générale

## La matière... c'est





# ....ou encore...

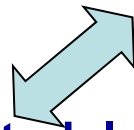


# Principe d'étude

## 2 cas

### – Objet stable

- Il faut "éclairer" l'objet → diffusion
- Il faut "perturber" l'objet → retour à l'équilibre



### – Objet instable

- On étudie sa désintégration

Exemples:

- radioactivité
- structure en spin du nucléon
- noyaux chauds
- plasma de quarks et de gluons
- état intermédiaire dans les collisions  $e^+e^-$  ou  $pp$  ou  $pp$

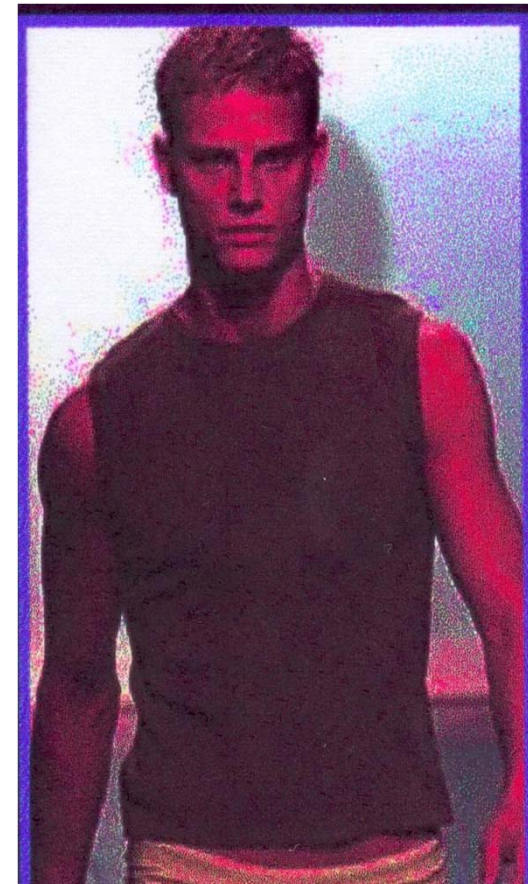
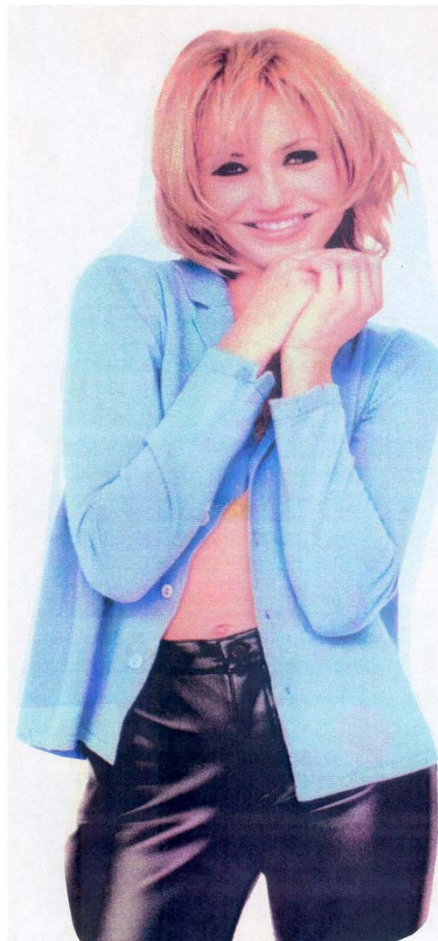
**Dans tous les cas, il faut détecter:**

- soit la projectile diffusé
- soit les émissions de retour à l'équilibre ou de désintégration

**particules**



# La méthodologie précédente est très générale



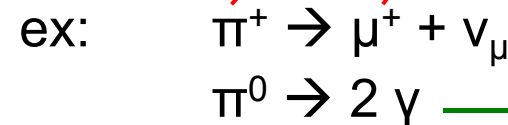
# Quelles sont les particules (ou rayonnements) à détecter?

- **Particules chargées**
- **Particules neutres**

ex: électrons, protons, noyaux  
ex: neutrons, neutrinos

- Cas particulier des **photons** (« grains » d'énergie électromagnétique)
  - Ondes radio
  - Infra rouges
  - Visible
  - Ultraviolet
  - Rayons X
  - Rayons  $\gamma$  (gamma)

- **Particules ou noyaux instables**



En général, ces « **particules** » sont **en mouvement** et on peut donc les envoyer dans un détecteur pour les détecter, c'est-à-dire **y provoquer une ou des interactions.**

- **Détecter =**

- **Identifier**

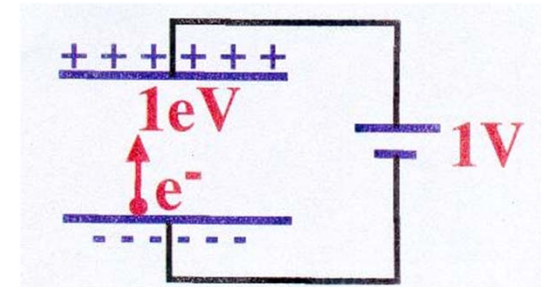
- **Caractériser** → en énergie

- en quantité de mouvement

- en vitesse

- en position

## Ordres de grandeur



- On exprime les énergies en ...

eV	keV	MeV	GeV	TeV
	$10^3$	$10^6$	$10^9$	$10^{12}$

- Les vitesses sont souvent grandes :  $v \sim c$
- Energies cinétiques non relativistes :  $E_{\text{cin}} = \frac{1}{2} mv^2$
- Les énergies cinétiques sont relativistes si  $E_{\text{cin}} > E_{\text{masse}} = m_0 c^2$ 
  - Exemples:
    - Électron:  $E_{\text{masse}} = 0,511 \text{ MeV}$
    - Proton:  $E_{\text{masse}} = 938 \text{ MeV}$
- Si  $E_{\text{cin}}$  non relativiste :  
 mesure de  $E_{\text{cin}}$  et de  $v$   $\longrightarrow$  on déduit  $m$



## Quelques exemples

- **LEP:**
  - Projectile: **électron**;
  - $E_{\text{cin}} = 100 \text{ GeV} = 100\,000 \text{ MeV}$  à comparer à  $E_{\text{masse}} = 0,511 \text{ MeV}$
  - Projectile ultra-relativiste
- **LHC:**
  - Projectile : **proton**;
  - $E_{\text{cin}} = 7 \text{ TeV} = 7\,000 \text{ GeV}$  à comparer à  $E_{\text{masse}} = 0,938 \text{ GeV}$
  - Projectile ultra-relativiste
- **GANIL:**
  - Exemple de projectile : **noyau de  $^{40}\text{Ar}$** ;
  - $E_{\text{cin}} = 50 \text{ MeV/nuc} = 40 \cdot 50 = 2000 \text{ MeV}$   
à comparer à  $E_{\text{masse}} = 40 \cdot 938 \approx 40\,000 \text{ MeV}$
  - Projectile peu relativiste :  $v = 140\,000 \text{ km/s} = 14 \text{ cm/ns}$
  - Temps de vol : 7 ns sur 1 mètre.
- **Dans (presque) tous les cas, les détecteurs doivent être rapides**

Détecter

=

Interagir

## Principe numéro 1

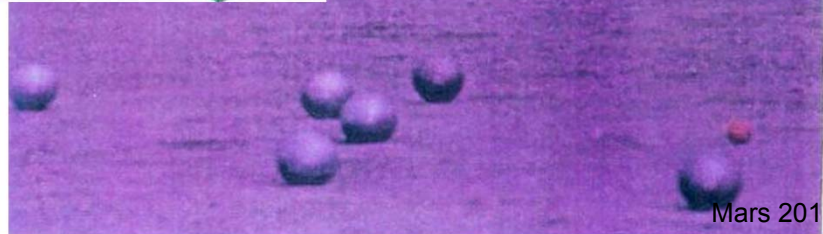
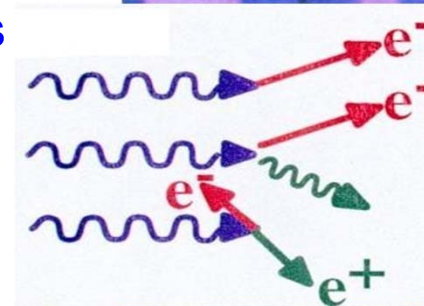
Une particule ne peut être détectée que si elle est chargée ou si elle met en mouvement des particules chargées

- Cas des particules chargées :
- Cas des particules neutres :
  - Mise en mouvement d'un noyau (chargé) par collision ou par réaction
  - Exemples : neutrons rapides :  
 $n + A \rightarrow n + A$   
efficacité meilleure si masse  $m_{projet}$   
 $n + p \rightarrow n + p$

trivial



- Cas des photons
  - Mise en mouvement d'électrons
    - Effet photoélectrique
    - Effet Compton
    - Création de paires
- Cas des particules instables
  - Elles sont détectées soit directement soit par les produits de désintégration
    - Exemples:  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$



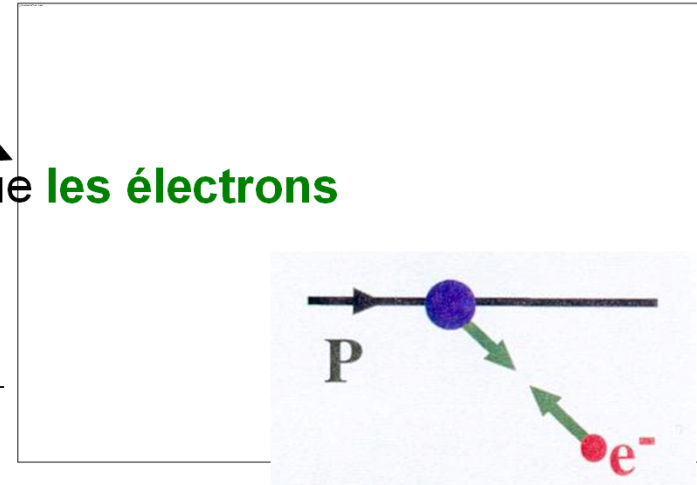
# Principe numéro 2

## Les particules chargées ionisent les atomes

- Remarque

matière = noyau + électrons

tout petit → on ne voit (presque) que les électrons



- Force de Coulomb

$$F = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \frac{q q'}{r^2}$$

Mise en mouvement de l'électron

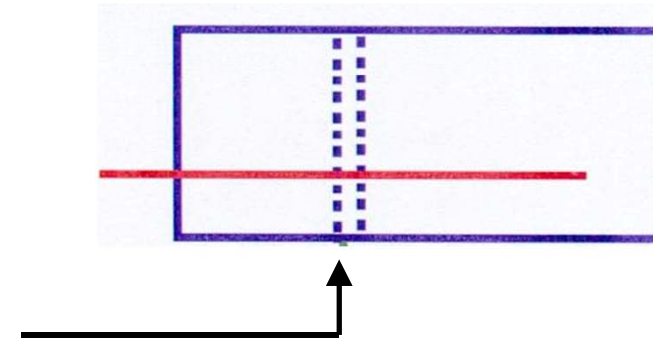
→ ionisation ou excitation

ralentissement du projectile

notions de parcours de dE/dx

- Formule de Bethe

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{z^2 m}{E} f(E)$$





## Remarque essentielle

- L'ionisation est un phénomène linéaire :

$$\text{nombre d'électrons arrachés} = \frac{\text{énergie perdue}}{\text{const.}}$$

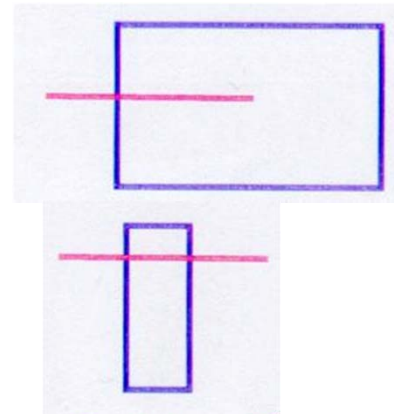
- Exemples:

- Arrêt total dans le détecteur

$$n = \frac{E_{cin}}{\text{const.}}$$

- Ralentissement

$$n = \frac{\Delta E_{cin}}{\text{const.}}$$



- Valeur de la constante: gaz: **30 eV**; Solides (Silicium) : **3 eV**

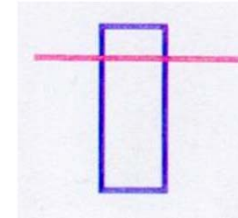
- Ordres de grandeur

- arrêt d'une particule  $\alpha$  de 5 MeV :

- Gaz :  $n = 5.10^6 / 30 \sim 1,7 \cdot 10^5$  électrons ionisés
- Silicium :  $n = 5.10^6 / 3 \sim 1,7 \cdot 10^6$  électrons ionisés

# Retour sur la formule de Bethe

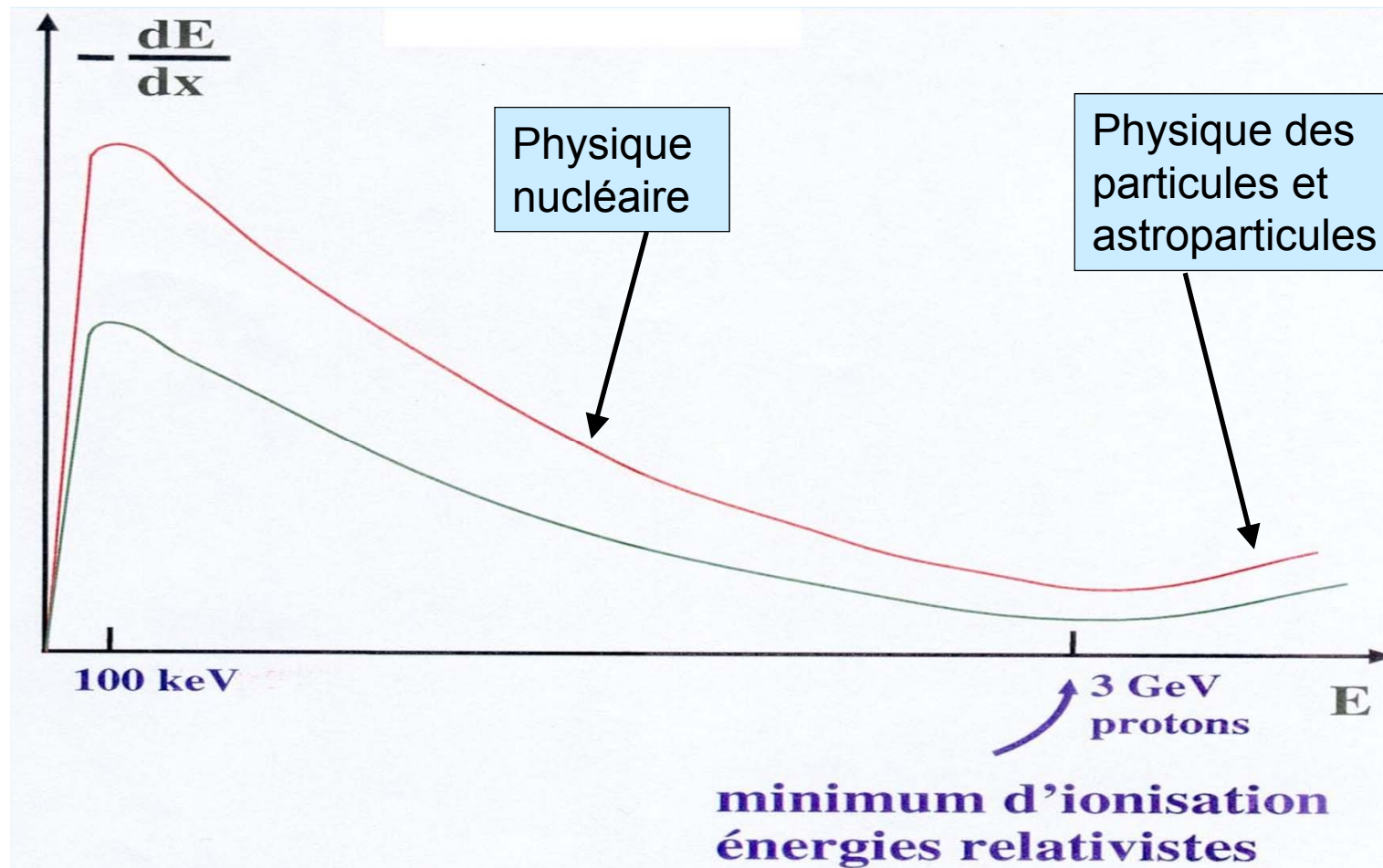
$$-\frac{dE}{dx} = \frac{z^2 m}{E} f(E)$$



Effet de  $z$  et  $m$



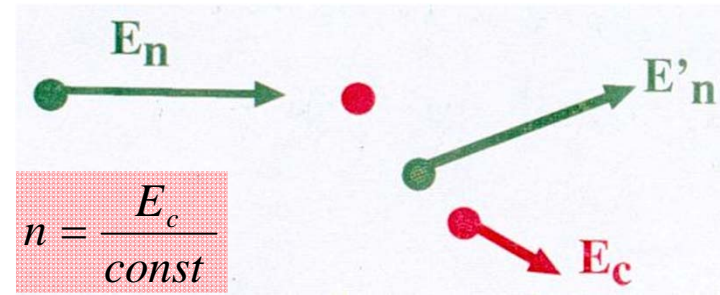
identification possible



# Retour sur la détection de particules non chargées

## • Cas des neutrons:

- rappel du principe:
- seule l'énergie transférée à la particule chargée sera « vue » par le détecteur
- $n$  est variable d'un évènement à l'autre:



## • Cas des photons:

3 cas de figure:

a) effet photoélectrique

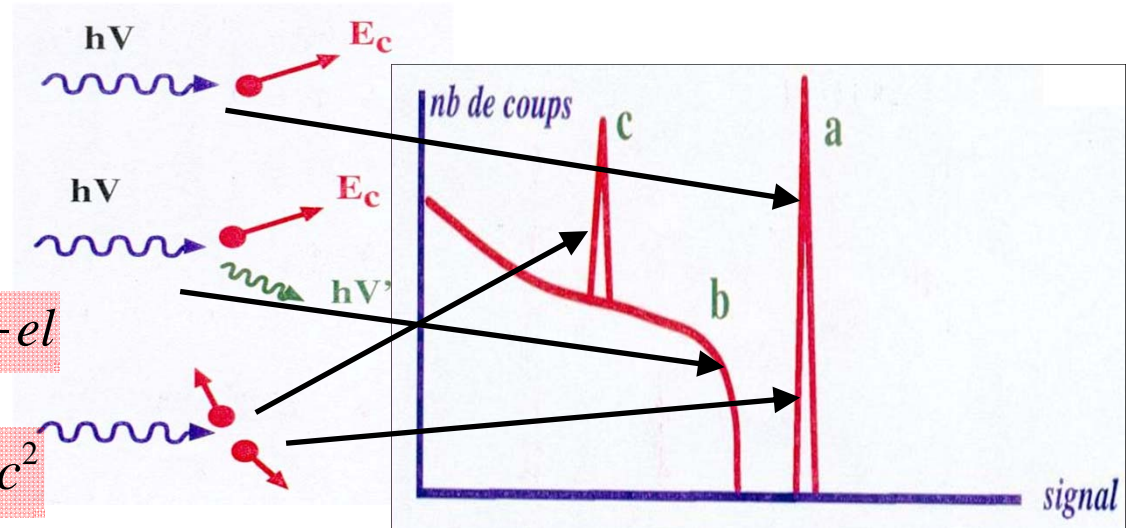
$$E_c = h\nu - el$$

b) effet Compton

$$E_c = h\nu - h\nu' - el$$

c) création de paires

$$E_c = h\nu - 2m_e c^2$$



## • Cas des neutrinos

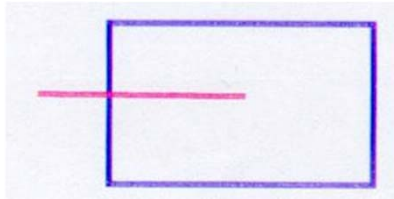
- là aussi, seule l'énergie de la particule chargée est vue par le détecteur

## Remarques essentielles

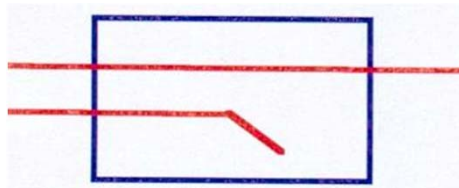
- Les particules chargées interagissent de façon continue dans la matière
- Les particules non chargées interagissent rarement mais de façon violente

## Conséquences

### - protection



Il est facile de se protéger contre les particules chargées si  
épaisseur > parcours



Il est impossible de parfaitement arrêter des particules non chargées

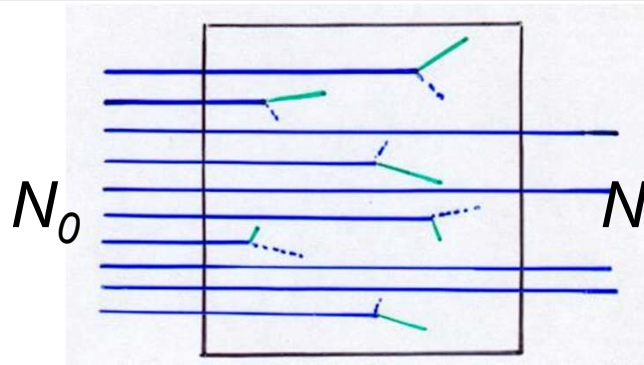
### - détection

Il est facile de détecter une particule chargée  
(interactions multiples dans le détecteur)

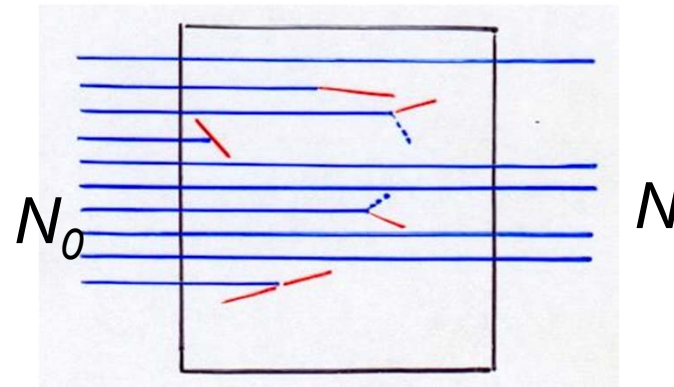
**Notion d'efficacité de détection**

Il est impossible de détecter toutes les particules non chargées qui atteignent un détecteur

# Efficacité de détection



Exemple des neutrons



Exemple des photons

Loi générale :

$$N = N_0 e^{-\mu x}$$

Ce qui a interagi dans le détecteur:

$$N_0 - N = N_0 (1 - e^{-\mu x})$$

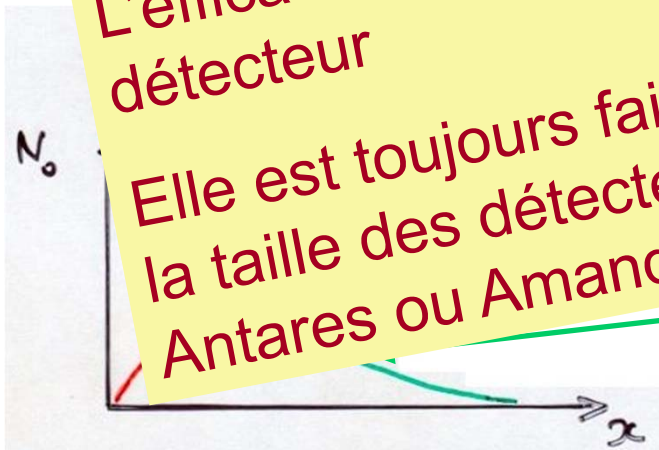
Efficacité de

$$1 - e^{-\mu x}$$

L'efficacité de détection croit avec la taille du détecteur

Elle est toujours faible pour les neutrinos: d'où la taille des détecteurs (Superkamiokande ou Antares ou Amanda)

Ce qui reste :  $N$





## Principe numéro 3

### Les particules chargées ont aussi d'autres modes d'interaction quand elles sont relativistes

- Rayonnement de freinage

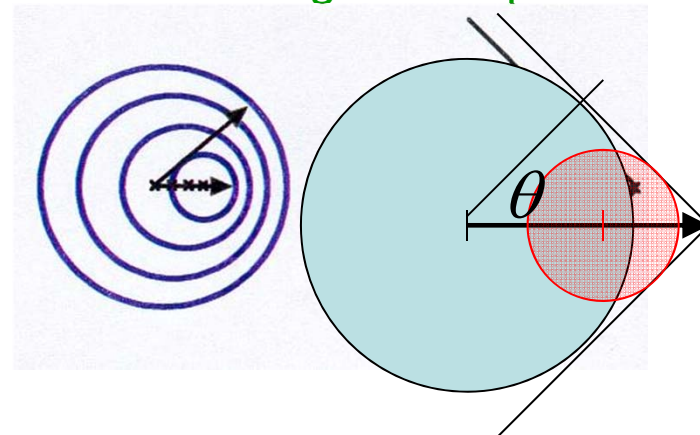
- Significatif seulement pour les électrons rapides ( $E > 10 \text{ MeV}$ )
- Remarque: c'est l'origine du rayonnement synchrotron  
c'est la façon de créer des faisceaux intenses de photons

- Effet Cerenkov

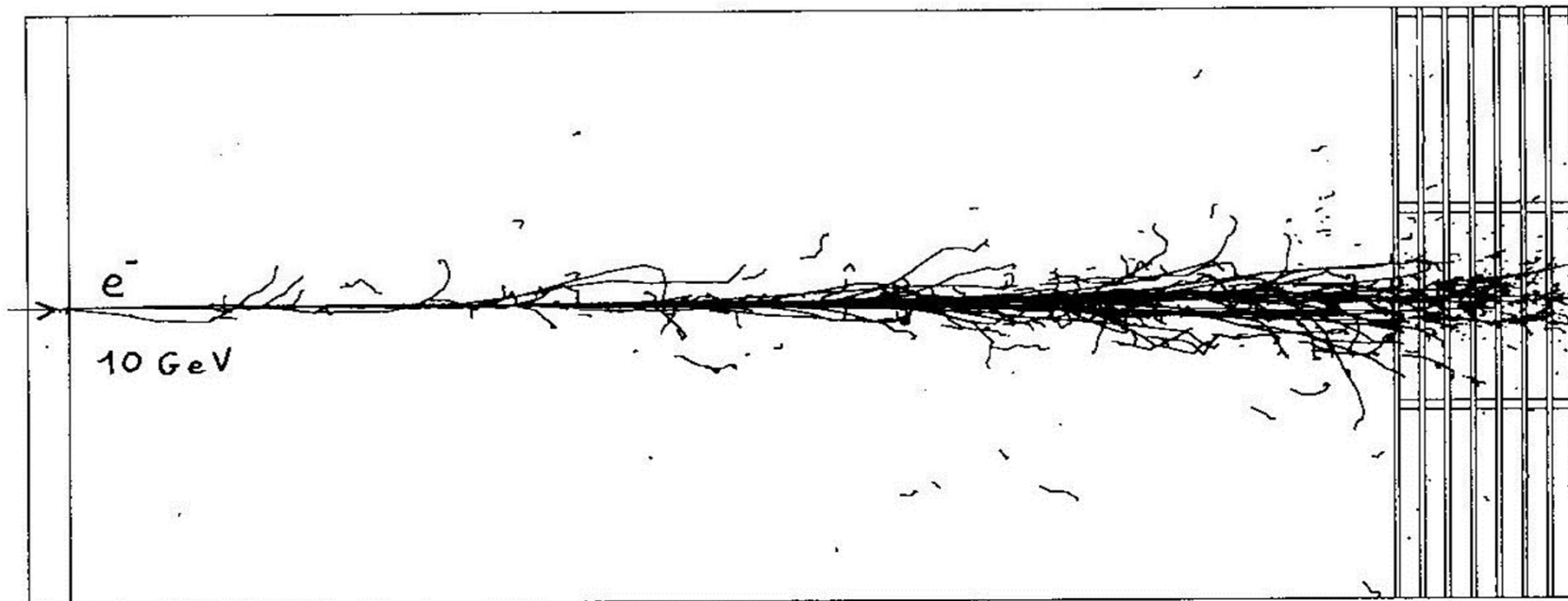
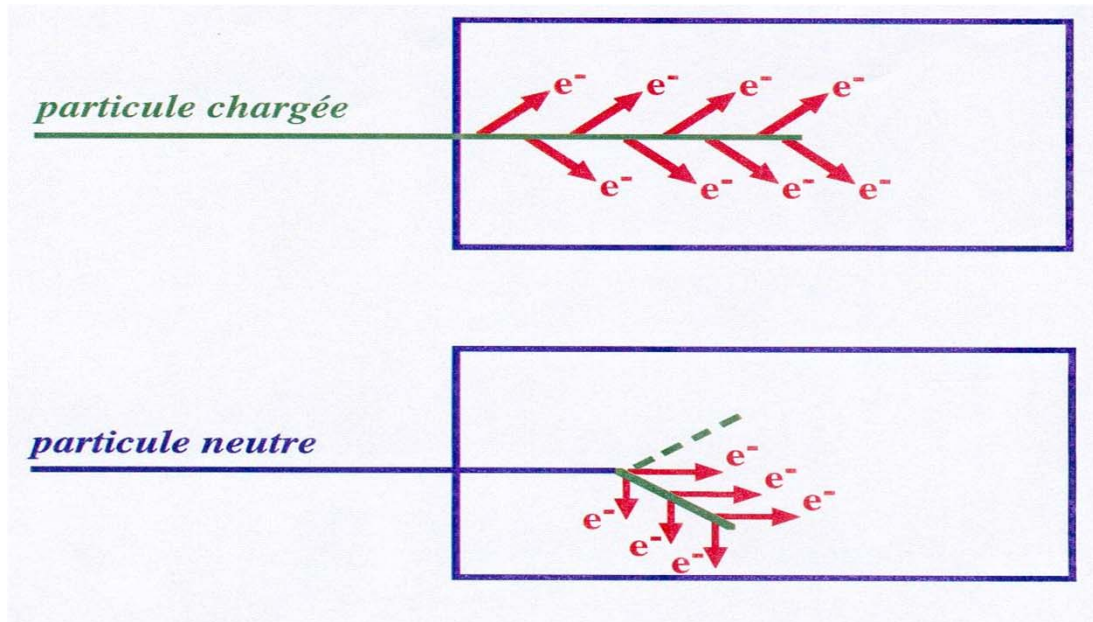
- Vitesse de la lumière dans un milieu d'indice  $n$ :  $c/n$
- Il y a effet Cerenkov si :  $vitesse > c/n$
- *Phénomène analogue au « passage du mur du son ».*
- La lumière est émise suivant un cône de demi-angle  $\theta$  tel que :  $\cos \theta = \frac{c}{v n}$

#### Conséquences:

- Phénomène à seuil
- Permet de mesurer une vitesse (détecteurs RICH)



# En résumé



## Principe numéro 4

La matière ionisée est « mal dans sa peau ».

- Tentative de retour à l'équilibre
- 2 familles de détecteurs
  - On empêche le retour à l'équilibre et on détecte les électrons : *détecteurs d'ionisation*
  - On observe le retour à l'équilibre : *scintillation*

### Une petite loupe sur la scintillation

- Il y a plusieurs sortes de scintillation
  - fluorescence : rapide (ns)
  - fluorescence retardée ( $\approx 500$  ns)
  - phosphorescence : lent (ms)
- La proportion de ces mécanismes dépend des particules chargées détectées

Identification possible

# Résumé

- **Principe n°1**  
On ne détecte que les particules chargées. Si la particule initiale n'est pas chargée, on ne la détecte que si elle met en mouvement une particule chargée
- **Principe n°2**  
Une particule chargée ionise (mécanisme principal).  
Ce mécanisme est linéaire
- **Principe n°3**  
mécanismes additionnels
  - rayonnement de freinage
  - effet Cerenkov
- **Principe n°4**  
Les atomes ionisés « veulent » revenir à l'équilibre (recombinaison, scintillation)
- **Conséquences**  
Il y a deux sortes de détecteur :
  - détecteurs de l'ionisation
  - détecteurs de la scintillation

Un contre-exemple :  
les bolomètres  
exemple : Edelweiss

