

# Conception d'un détecteur

23-25 Novembre 2025, Roscoff

laurent chevalier

Local de l'étape

CEA Saclay DRF/irfu/DPhP

[laurent.chevalier@cea.fr](mailto:laurent.chevalier@cea.fr)



# Conception d'un détecteur

23-25 Novembre 2025, Roscoff

## 1/ Introduction

- références, vocabulaire, unités

## 2/ Détecter quoi ↔ pourquoi

- remarques liminaires
- modélisation
- détecteur : ckoï ?

## 3/ Interaction particules matière

- rapide aperçu

## 4/ Généralités sur les détecteurs

## 5/ Exemples

- D0 (Fermilab)
- ATLAS (CERN)




# 1/ Introduction

**6 PDG** particle data group  
1957 2017  
<http://pdg.lbl.gov>

About PDG | PDG Authors | PDG Citation | News

## The Review of Particle Physics (2018)

M. Tanabashi et al. (Particle Data Group), Phys. Rev. D **98**, 030001 (2018).



- pdgLive - Interactive Listings
- Summary Tables
- Reviews, Tables, Plots
- Particle Listings
- Search

**ORDER:** Book & Booklet

**DOWNLOAD:** Book, Booklet, more

Previous Editions (& Errata) 1957-2017	Physical Constants
Errata in current edition	Astrophysical Constants
Figures in reviews	Atomic & Nuclear Properties
Mirror Sites	Astrophysics & Cosmology

# Références



**WIKIPÉDIA**  
L'encyclopédie libre

# 1/ Introduction

CERN (CH)	LEP	DELPHI	1988-1992
Mesures paramètres modèle standard			
FERMILAB (USA)	TeVatron	D0	1991-1995
première observation du quark top			
CERN (CH)	LHC	ATLAS	1994-2025
première observation du boson de Higgs			
Saclay (FR)		G-LEAD	2017-2025
recherche matière sombre (DM) sous forme d'Axion <sub>QCD</sub>			
Mainz (DE)		P2	2023-2025
mesure de $\sin^2(\theta) \sim 100 \text{ MeV}$			

# 1/ Introduction

CERN (CH)	LEP	DELPHI	1988-1992
identification des particules avec une TPC			
FERMILAB (USA)	TeVatron	D0	1991-1995
identification des électrons/positons avec un TRD			
CERN (CH)	LHC	ATLAS	1994-2025
dessin, simulation, construction et analyse du Spectro à Muons			
Saclay (FR)		G-LEAD	2017-2025
développement et construction d'un radiomètre			
Mainz (DE)		P2	2023-2025
développement d'un MicroMegs « transparent »			

# 1/ Introduction

## Biais

### détecteurs

- physique des particules
- collisionneurs / cible fixe

### pas abordé

- radar d'autoroute
- détecteur de métaux
- et autres milliers d'autres type de détecteurs.



## Équivalence entre Énergie

Fréquence (longueur d'onde)  $\rightarrow E=h\nu=hc/\lambda$

Température  $\rightarrow E=k_B T$  (x1/2 par degré de liberté)

Masse  $\rightarrow E=mc^2$

Énergies sont exprimées en électron-volts : MeV, GeV, TeV...

$$1\text{eV}=1.610^{-19}\text{J}$$

$$h\sim 4.10^{-24}\text{ GeV.s constante de Planck}$$

Les masses sont en  $\text{MeV}/c^2$ ,  $\text{GeV}/c^2$ ... (*souvent on oublie le  $c^2$ !*)

$$\text{proton} = 0,938... \text{ GeV}/c^2 = 1,67... 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\text{électron} = 511.....\text{keV}/c^2 = 1.11... 10^{-31} \text{ kg}$$

Les températures sont exprimées en énergie...

$$1 \text{ eV} = 11627 \text{ K}$$

$$k_B = 1,380\ 649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1} \text{ constante de Boltzman}$$

## Équivalence entre Énergie

Fréquence (longueur d'onde)  $\rightarrow E=h\nu=hc/\lambda$

Température  $\rightarrow E=k_B T$  (x1/2 par degré de liberté)

Masse  $\rightarrow E=mc^2$

Énergies sont exprimées en électron-volts : MeV, GeV, TeV...

$$1\text{eV}=1.610^{-19}\text{J}$$

$$h\sim 4.10^{-24}\text{ GeV.s constante de Planck}$$

Les masses sont en  $\text{MeV}/c^2$ ,  $\text{GeV}/c^2$ ... (*souvent on oublie le  $c^2$ !*)

$$\text{proton} = 0,938... \text{ GeV}/c^2 = 1,67... 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\text{électron} = 511.....\text{keV}/c^2 = 1.11... 10^{-31} \text{ kg}$$

Les températures sont exprimées en énergie...

$$1 \text{ eV} = 11627 \text{ K}$$

$$k_B = 1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1} \text{ constante de Boltzman}$$



## Équivalence entre Énergie

Fréquence (longueur d'onde)  $\rightarrow E=h\nu=hc/\lambda$

Température  $\rightarrow E=k_B T$  (x1/2 par degré de liberté)

Masse  $\rightarrow E=mc^2$

Énergies sont exprimées en électron-volts : MeV, GeV, TeV...

$$1\text{eV}=1.610^{-19}\text{J}$$

$$h\sim 4.10^{-24}\text{ GeV.s constante de Planck}$$

Les masses sont en  $\text{MeV}/c^2$ ,  $\text{GeV}/c^2$ ... (*souvent on oublie le  $c^2$ !*)

$$\text{proton} = 0,938... \text{ GeV}/c^2 = 1,67... 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\text{électron} = 511.....\text{keV}/c^2 = 1.11... 10^{-31} \text{ kg}$$

Les températures sont exprimées en énergie...

$$1 \text{ eV} = 11627 \text{ K}$$

$$k_B = 1,380\ 649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1} \text{ constante de Boltzman}$$

## Équivalence entre Énergie

Fréquence (longueur d'onde)  $\rightarrow E=h\nu=hc/\lambda$

Température  $\rightarrow E=k_B T$  (x1/2 par degré de liberté)

Masse  $\rightarrow E=mc^2$

Énergies sont exprimées en électron-volts : MeV, GeV, TeV...

$$1\text{eV}=1.610^{-19}\text{J}$$

$$h\sim 4.10^{-24}\text{ GeV.s constante de Planck}$$

Les masses sont en  $\text{MeV}/c^2$ ,  $\text{GeV}/c^2$ ... (*souvent on oublie le  $c^2$ !*)

$$\text{proton} = 0,938... \text{ GeV}/c^2 = 1,67... 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\text{électron} = 511.....\text{keV}/c^2 = 1.11... 10^{-31} \text{ kg}$$

Les températures sont exprimées en énergie...

$$1 \text{ eV} = 11627 \text{ K}$$

$$k_B = 1,380\ 649 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1} \text{ constante de Boltzman}$$

## Anthropomorphisme

$C = 299\,792\,458\text{ m/s}$



unités naturelles



## Anthropomorphisme

$$C=299\,792\,458\text{ m/s}$$



unités naturelles



$$c = \hbar = k_B = \varepsilon_0 = 1$$

$$[E] = [P] = [M] = [\Theta] = [L]^{-1} = [T]^{-1}$$





# Conception d'un détecteur

23-25 Novembre 2025, Roscoff

## 1/ Introduction

- références, vocabulaire, unités

## 2/ Détecter quoi ↔ pourquoi

- remarques liminaires
- modélisation
- détecteur : ckoï ?

## 3/ Interaction particules matière

- rapide aperçu

## 4/ Généralités sur les détecteurs

## 5/ Exemples

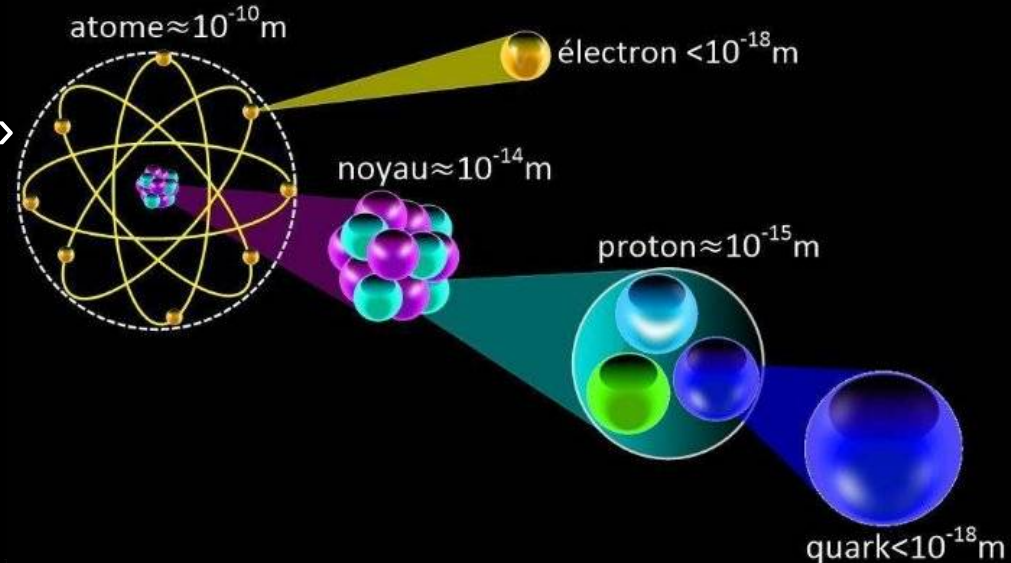
- D0 (Fermilab)
- ATLAS (CERN)

# Remarques liminaires

- Quoi
  - ce qui est détectable ;-)
  - avec quoi ?
  - dépend de l'échelle d'énergie

$$E = hc / \lambda$$

- Pourquoi
  - comprendre
  - d'autres « Pourquoi »
  - connaissances



# Remarques liminaires

## étude de la nature & mesures

### 1. Observation (mesures: construction d'un détecteur)

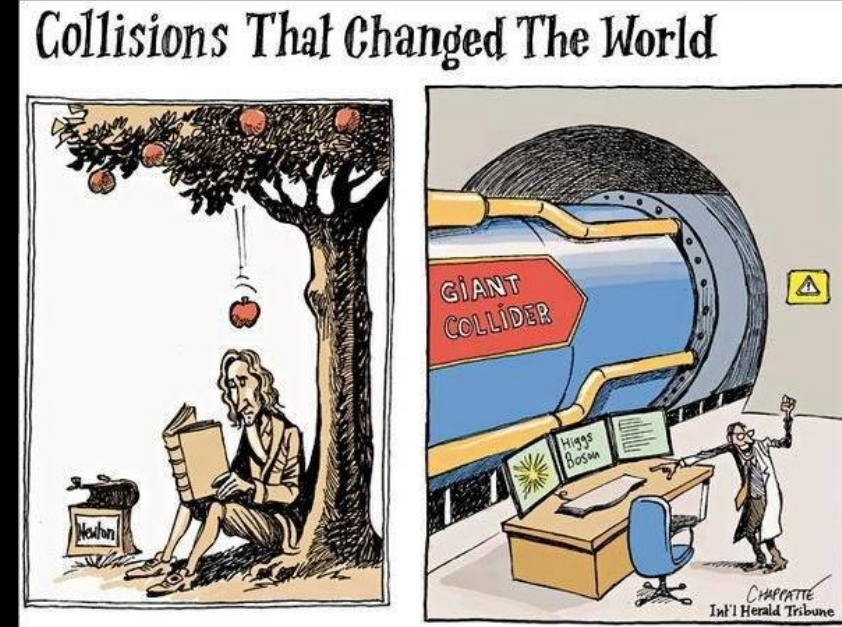
1. Chute d'une Pomme d'un arbre
2. **matière** + **forces**

### 2. Modélisation (simulations)

1.  $P = GmM/R^2$
2. **Modèle standard**

### 3. Prédiction

1. La position des planètes dans le ciel d'été
2. **Observation du boson de Higgs**



## étude de la nature & mesures

- outils
  - mathématique
  - champ: particules  $\leftrightarrow$  ondes
- mesures & erreurs de mesures
  - échelle d'observation
  - dimension  $\rightarrow$  extension spatiale
- détection



# Remarques liminaires

Particules



élémentaires

pas de structure interne détectable

# Remarques liminaires

Particules



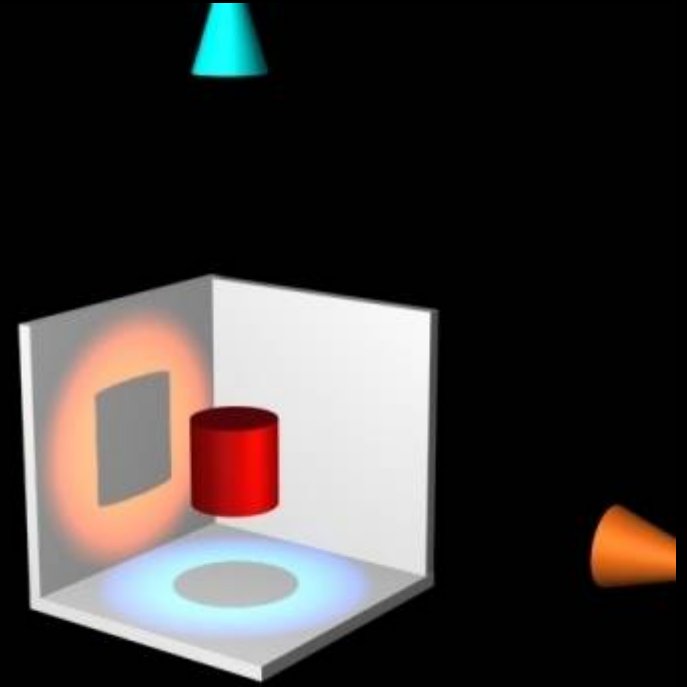
Dualité ondes/particules

Ondes



Description mathématique

Champs



# Remarques liminaires

Particules



Dualité ondes/particules → fentes de Young

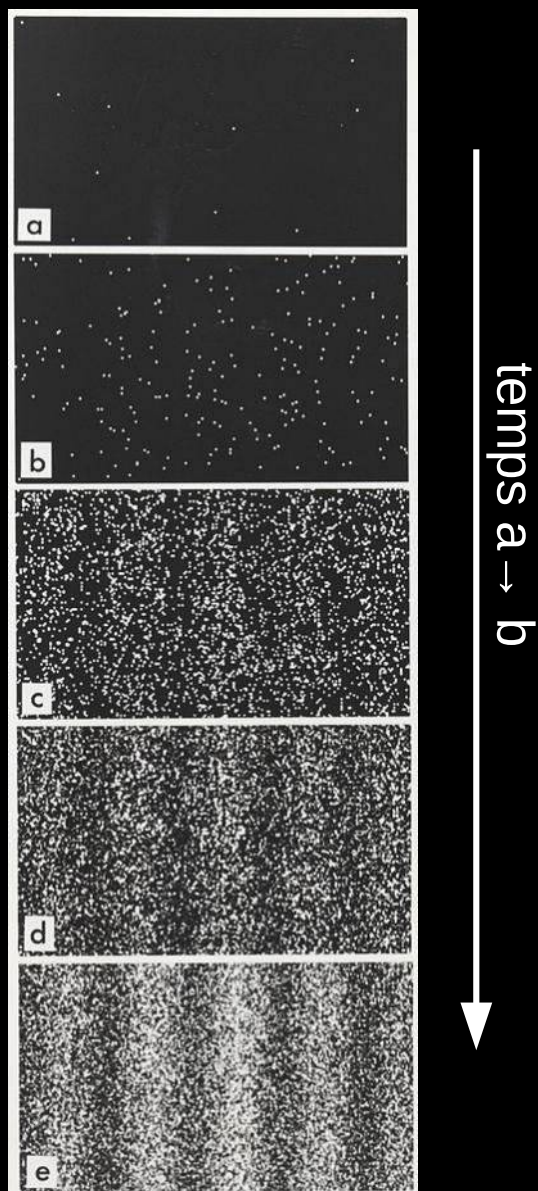
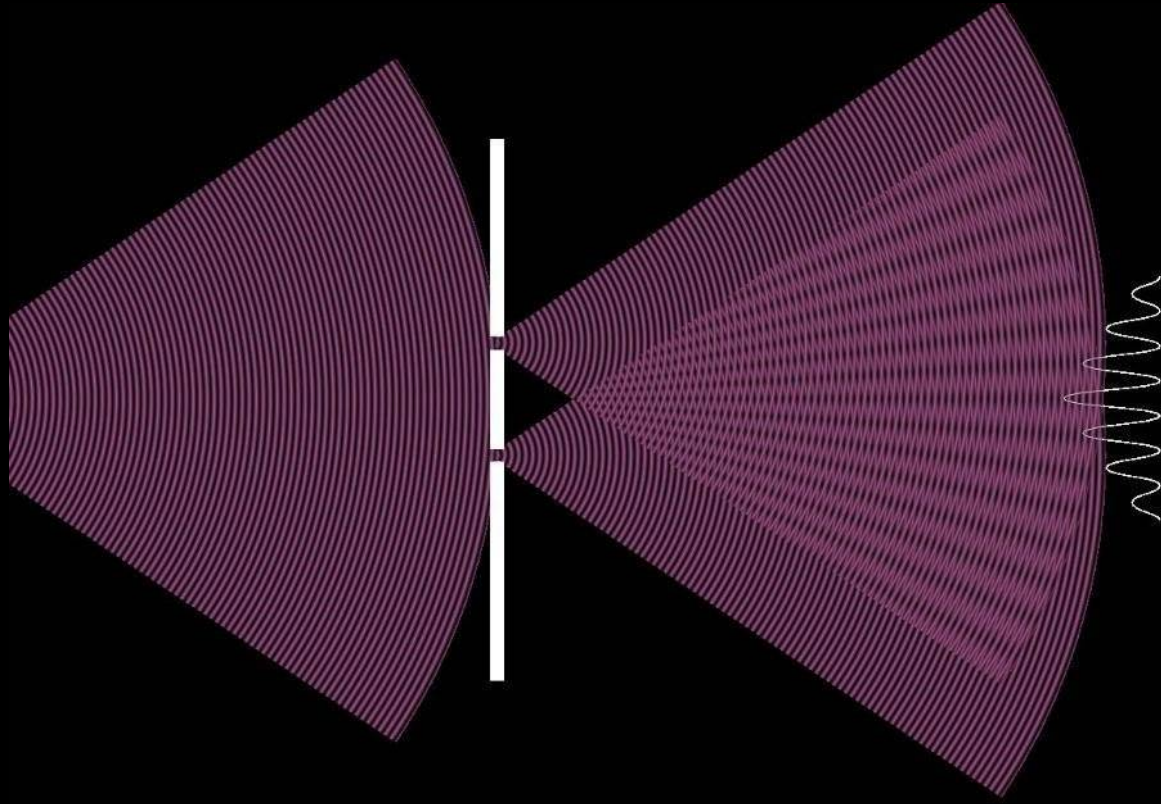
Ondes



Description mathématique

Champs

# Fentes de Young





# Remarques liminaires

## Particules



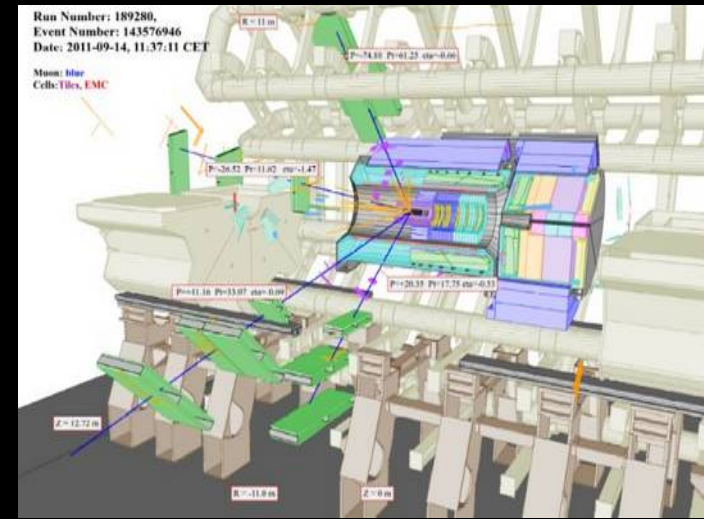
Delphi, D0, ATLAS...

## Ondes

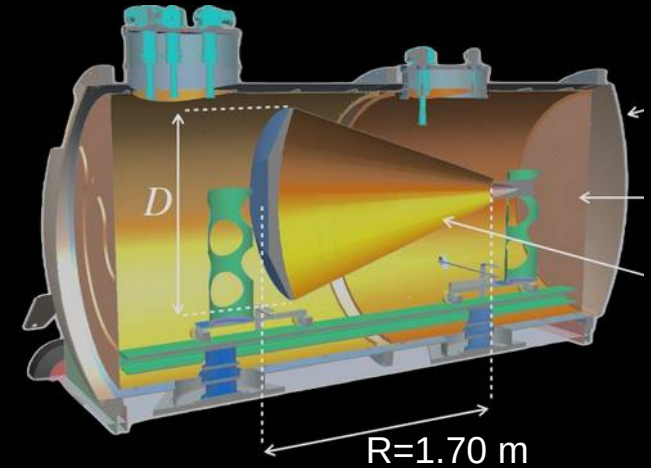


G-LEAD DAWA  
(Dark matter Axion Wide-band Approach)

## Champs



25 m



# Remarques liminaires

Particules



Dualité ondes/particules → fentes de Young

Ondes



Description mathématique

Champs

# Remarques liminaires

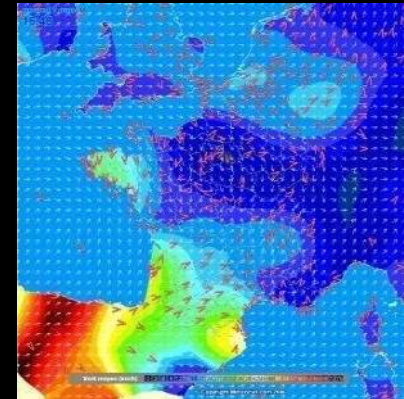
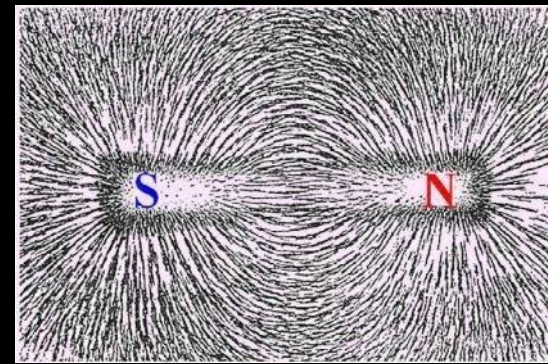
## notion de champ

Champ électrique  
Champ magnétique  
Champ de gravitation  
Champ de température  
Champ de vitesse de vent  
...

scalaire (spin 0)

vecteur (spin 1)

Le **champ** est un objet mathématique  
qui associe aux points de l'espace des valeurs  
(température, direction et sens du vent,...)  
→ champ électromagnétique



# Remarques liminaires

## étude de la nature & mesures

- outils
  - mathématique
  - champ: particules  $\leftrightarrow$  ondes
- mesures & erreurs de mesures
  - échelle d'observation
  - dimension  $\rightarrow$  extension spatiale
- détection



# Remarques liminaires

mesures



erreurs de mesures

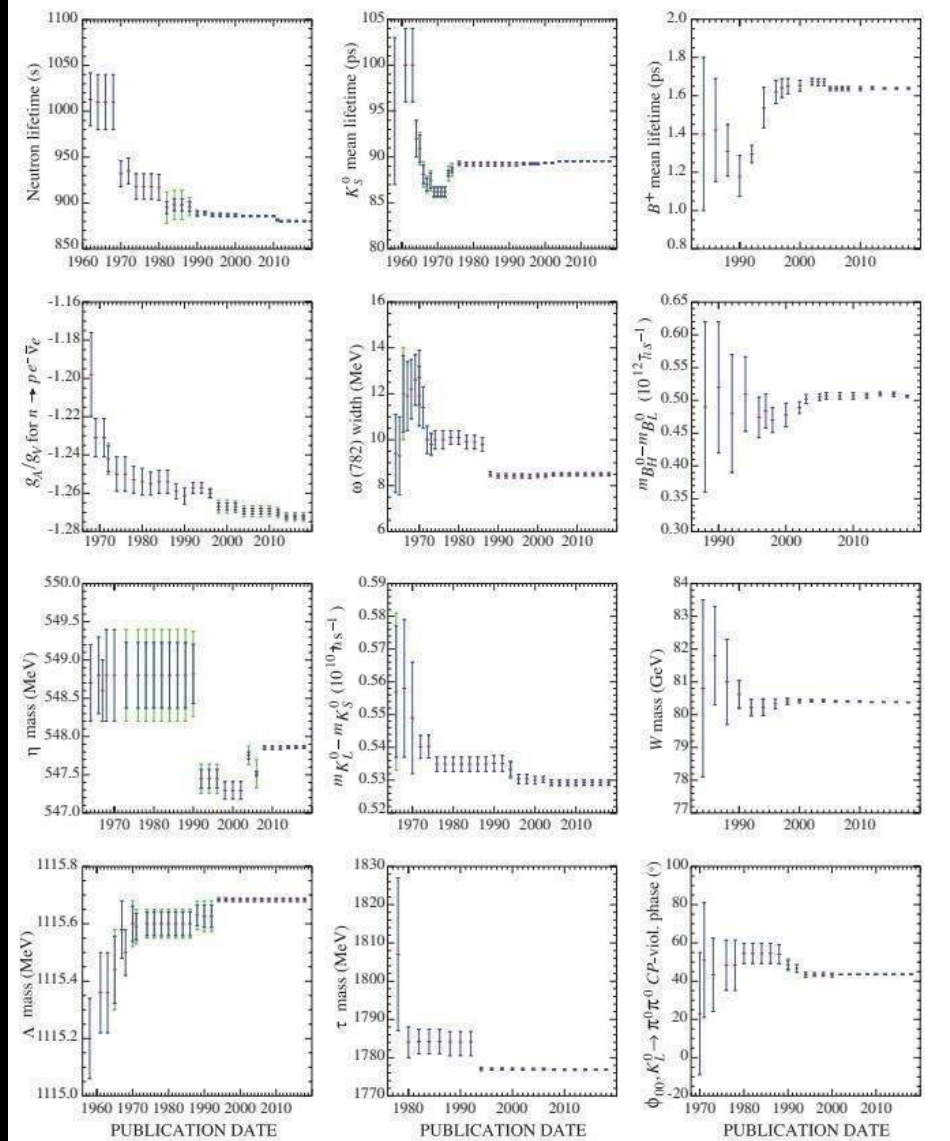


incertitudes de mesures

remarque :

relation d'incertitude d'Heisenberg

relation d'indétermination d'Heisenberg

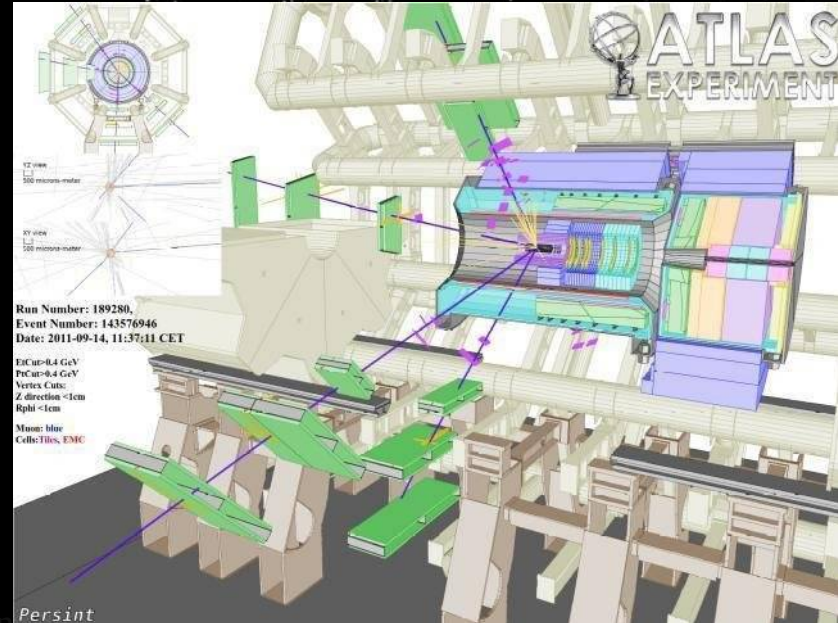
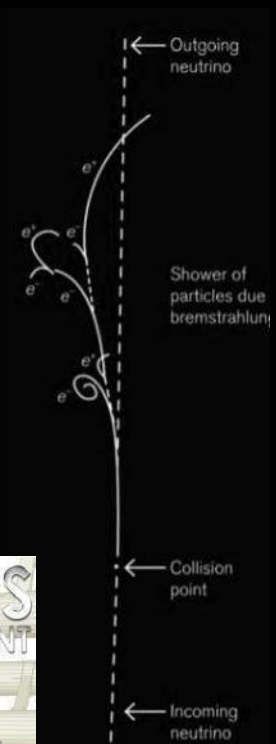
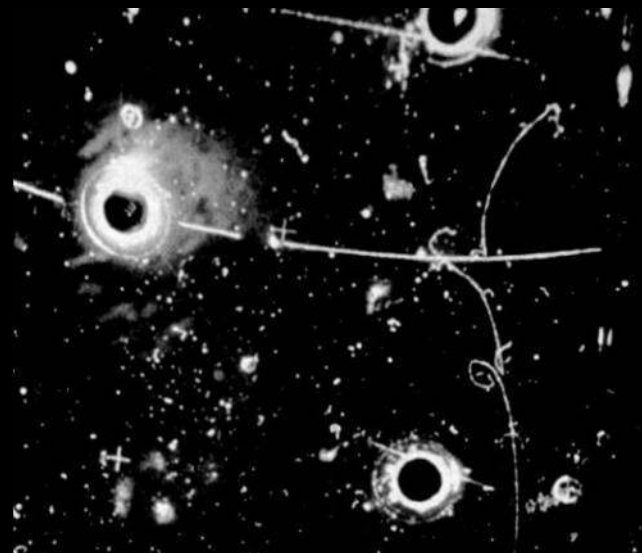


# Remarques liminaires

## étude de la nature & mesures

- outils
  - mathématique
  - champ: particules  $\leftrightarrow$  ondes
- mesures & erreurs de mesures
  - échelle d'observation
  - dimension  $\rightarrow$  extension spatiale
- détection

# Remarques liminaires



# Conception d'un détecteur

23-25 Novembre 2025, Roscoff

## 1/ Introduction

- références, vocabulaire, unités

## 2/ Détecter quoi ↔ pourquoi

- remarques liminaires
- modélisation
- détecteur : ckoï ?

## 3/ Interaction particules matière

- rapide aperçu

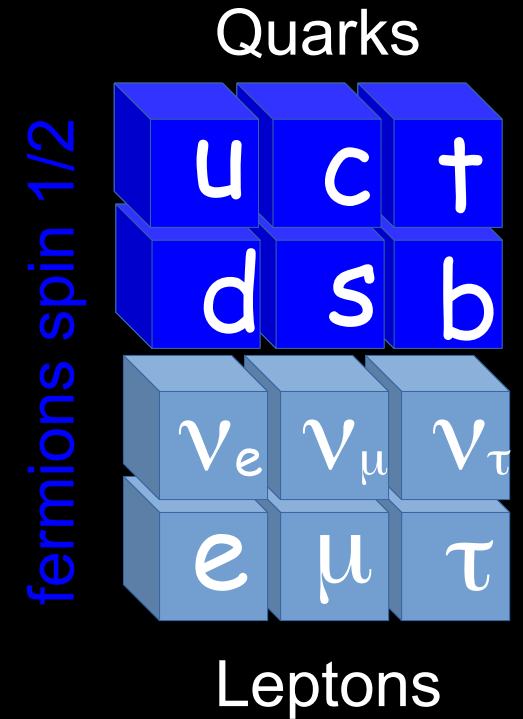
## 4/ Généralités sur les détecteurs

## 5/ Exemples

- D0 (Fermilab)
- ATLAS (CERN)

# modélisation

Matière



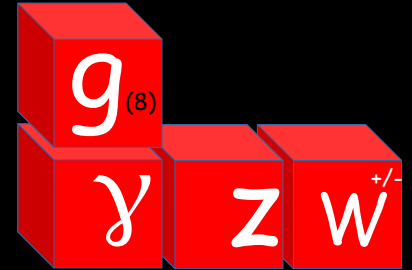


# modélisation

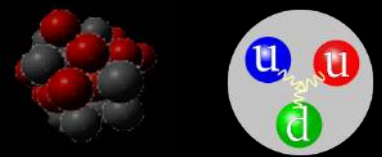






Interaction  
(force)



bosons Spin 1

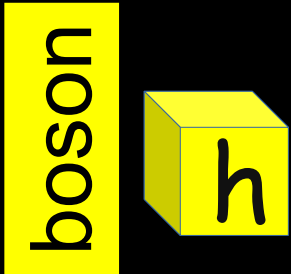


# modélisation

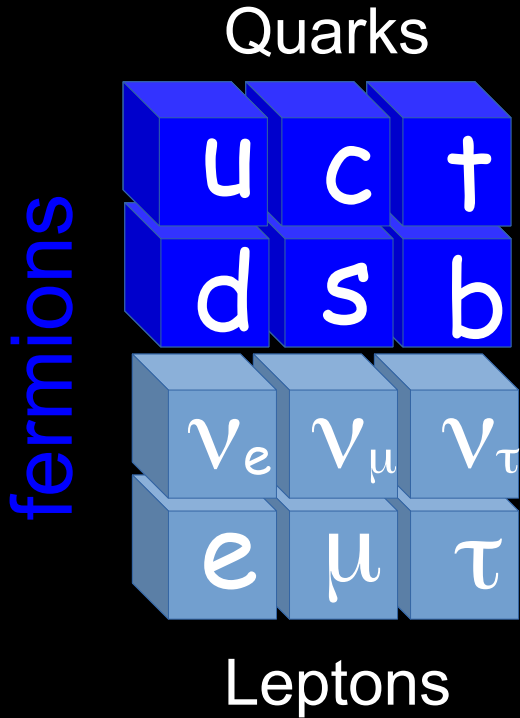
	<h2>Interaction Forte</h2>		messenger <b>Gluons</b> (8)
	<h2>Électromagnétisme</h2> <p>Électricité, magnétisme, optique</p>		<b>Photon</b> lumière
	<h2>Interaction Faible</h2> <p><math>n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e</math></p>		<b><math>W^+</math>, <math>W^-</math>, <math>Z</math></b>
	<h2>Gravitation</h2>		<b>Graviton</b> (?)

# modélisation

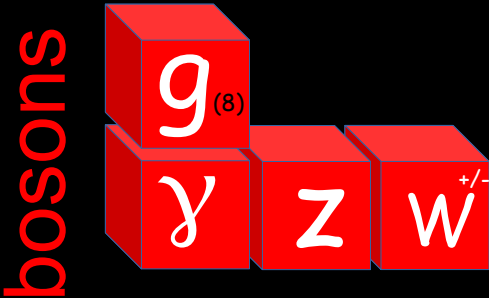
# Modèle Standard



Spin 0

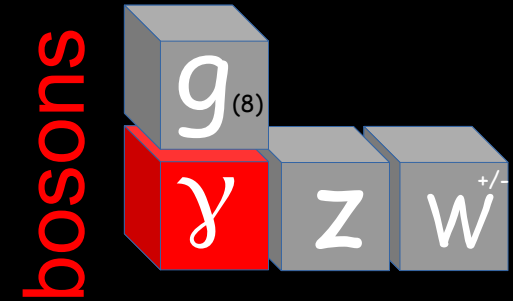
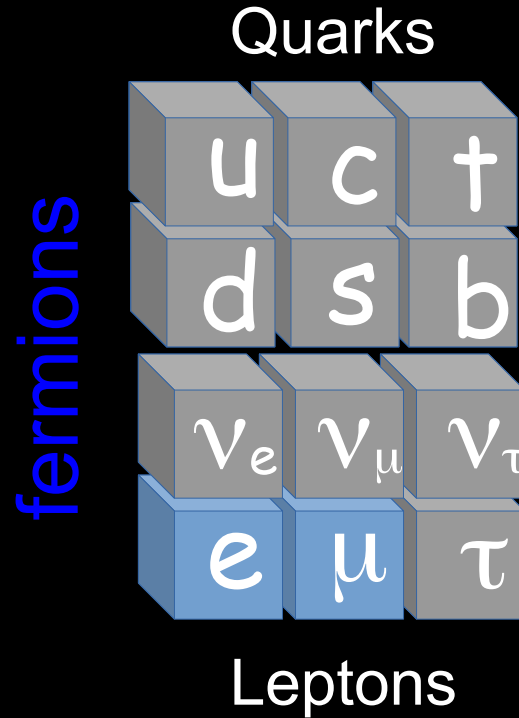


spin 1/2



spin 1

# directement



# Spin 1

# Conception d'un détecteur

23-25 Novembre 2025, Roscoff

## 1/ Introduction

- références, vocabulaire, unités

## 2/ Détecter quoi ↔ pourquoi

- remarques liminaires
- modélisation
- détecteur : ckoï ?

## 3/ Interaction particules matière

- rapide aperçu

## 4/ Généralités sur les détecteurs

## 5/ Exemples

- D0 (Fermilab)
- ATLAS (CERN)



détecteur : ckoï ?



# Détecter quoi ?

Particules élémentaires



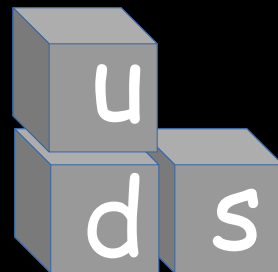
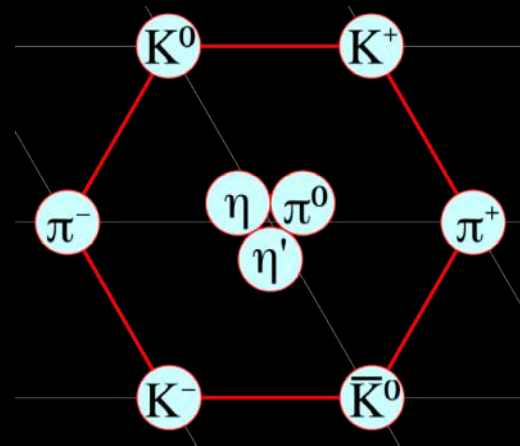
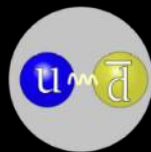
Particules pas élémentaires  
**hadrons** (mésons & baryons)

$J/\psi$	$c\bar{c}$
$\Upsilon$	$b\bar{b}$
$\pi$	$u\bar{d}, d\bar{u}, \frac{u\bar{u}-d\bar{d}}{\sqrt{2}}$
$K$	$u\bar{s}, d\bar{s}, s\bar{u}, s\bar{d}$
$D$	$c\bar{d}, c\bar{u}, d\bar{c}, u\bar{c}$
$B$	$u\bar{b}, d\bar{b}, s\bar{b}, b\bar{u}, b\bar{d}$

États liés Pions :  $u\bar{d}, d\bar{u}, (u\bar{u}-d\bar{d})$

$\rho, \pi^\pm, K^\pm \dots$

$n, \pi^0, \lambda \dots$



# Détecter quoi ?

## Durée de vie

élémentaires	{	électron	$e$	$\tau > 10^{36} \text{ s}$	$c\tau \sim 660\text{m}$
		muon	$\mu$	$\tau \sim 2.2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$	
hadrons	{	pion	$\pi^\pm$	$\tau \sim 2.6 \cdot 10^{-8} \text{ s}$	
			$\pi^0$	$\tau \sim 8.5 \cdot 10^{-17} \text{ s}$	
	{	neutron	$n$	$\tau \sim 880 \text{ s}$	
		proton	$p$	$\tau > 10^{41} \text{ s}$	

# détecteur

Si, O, C, Al, Au/Cu, N...

Ar,Xe,CO....

# Calorimeters

Pb, C, H, O, Fe, Ar, W, Ur...

## Gaseous detectors

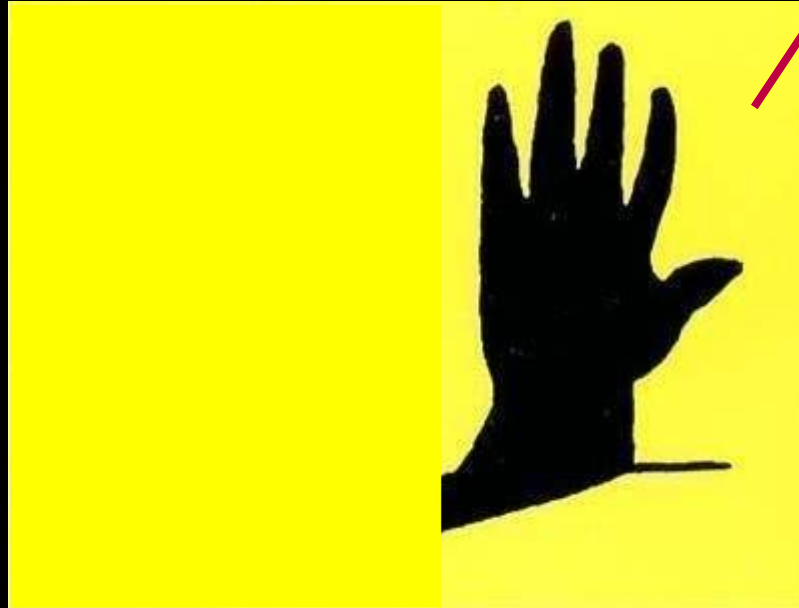
Al, Ar, CO<sub>2</sub>, Cu, Fe, C...

100794																		1002602																	
H Hydrogene																		He Helium																	
6.941 3 9.012182 4																		10.811 5 12.0107 6 14.0067 7 15.9994 8 18.998403 9 20.1797 1																	
Li Lithium Be Beryllium																		B Boron C Carbone N Azote O Oxygene F Fluor Ne Neon																	
22.98976 11 24.3050 12																		26.98153 13 28.0855 14 30.97396 15 32.065 16 35.453 17 39.948 1																	
Na Sodium Mg Magnesium																		Al Aluminium Si Silicium P Phosphore S Soufre Cl Chlore Ar Argon																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
K Potassium Ca Calcium Sc Scandium Ti Titane V Vanadium Cr Chrome Mn Manganese Fe Fer Co Cobalt Ni Nickel Cu Cuivre Zn Zinc																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.723 31 72.64 32 74.92160 33 78.96 34 79.904 35 83.796 3																		Ga Gallium Ge Germanium As Arsenic Se Selenium Br Brome Kr Krypton																	
39.0983 19 40.078 20 44.95591 21 47.867 22 50.9415 23 51.9962 24 54.93804 25 55.845 26 58.93319 27 58.9334 28 63.546 29 65.38 30 69.72																																			

[illegible]

Détecteur

Vous mesurez cela





Détecteur

Vous mesurez cela



Mais la réalité est comme cela !!!

# Conception d'un détecteur

23-25 Novembre 2025, Roscoff

## 1/ Introduction

- références, vocabulaire, unités

## 2/ Détecter quoi ↔ pourquoi

- remarques liminaires
- modélisation
- détecteur : ckoï ?

## 3/ Interaction particules matière

- rapide aperçu

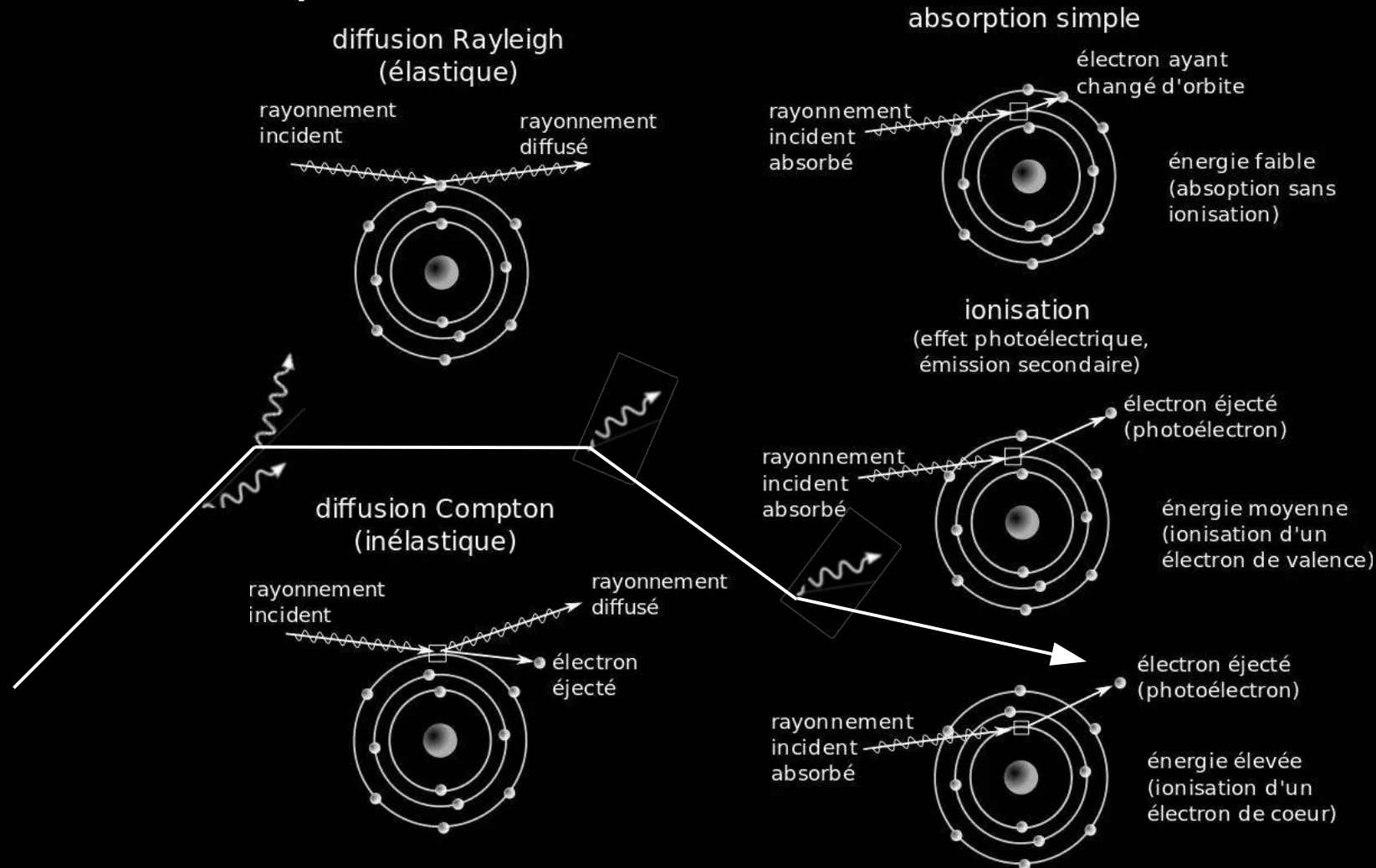
## 4/ Généralités sur les détecteurs

## 5/ Exemples

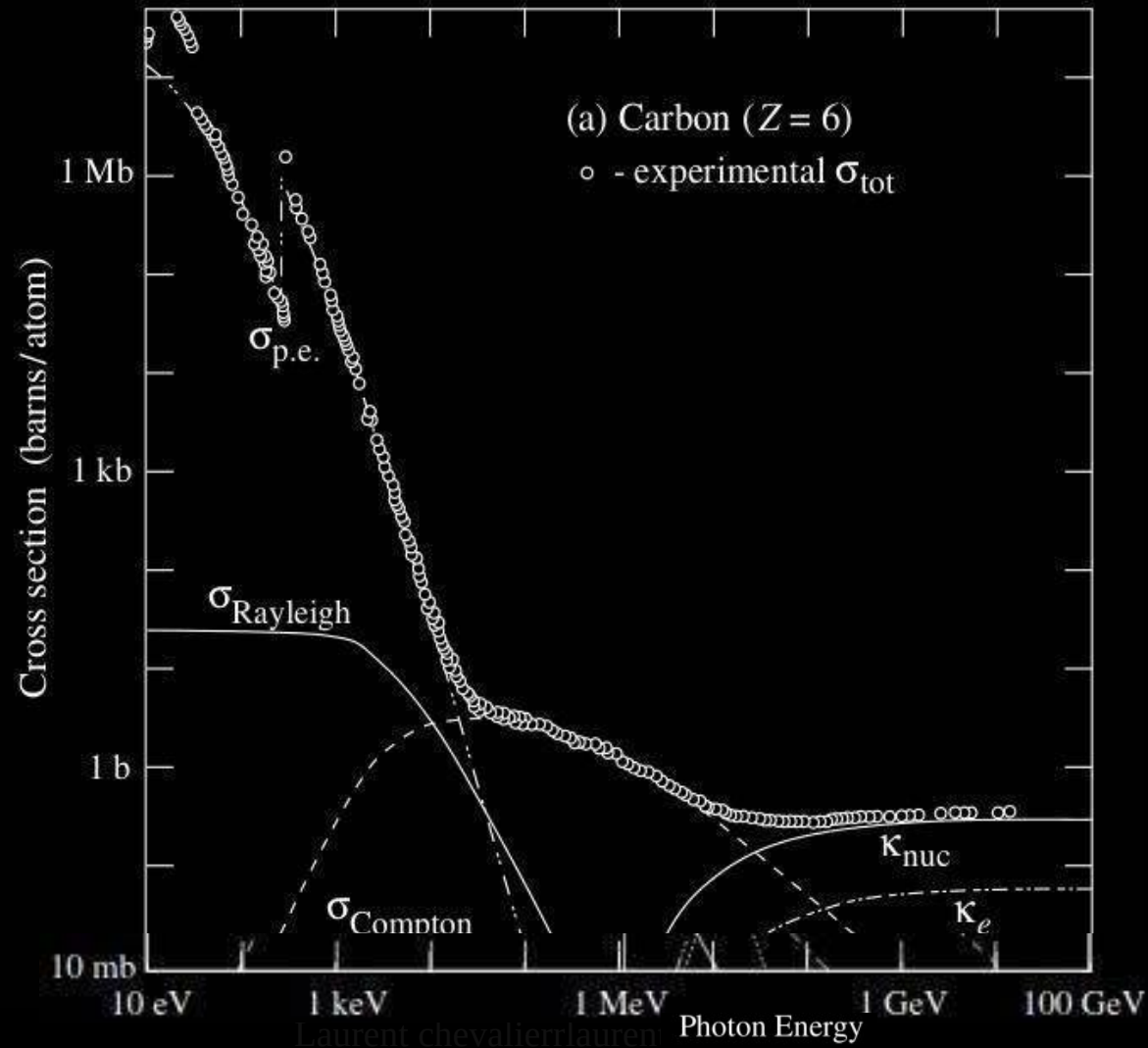
- D0 (Fermilab)
- ATLAS (CERN)

# 3/ Interaction particules / matière

Pas très réaliste !!!

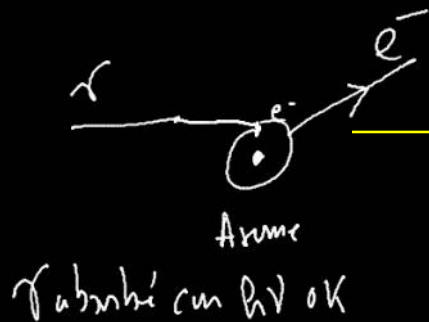


# Interaction particules / matière

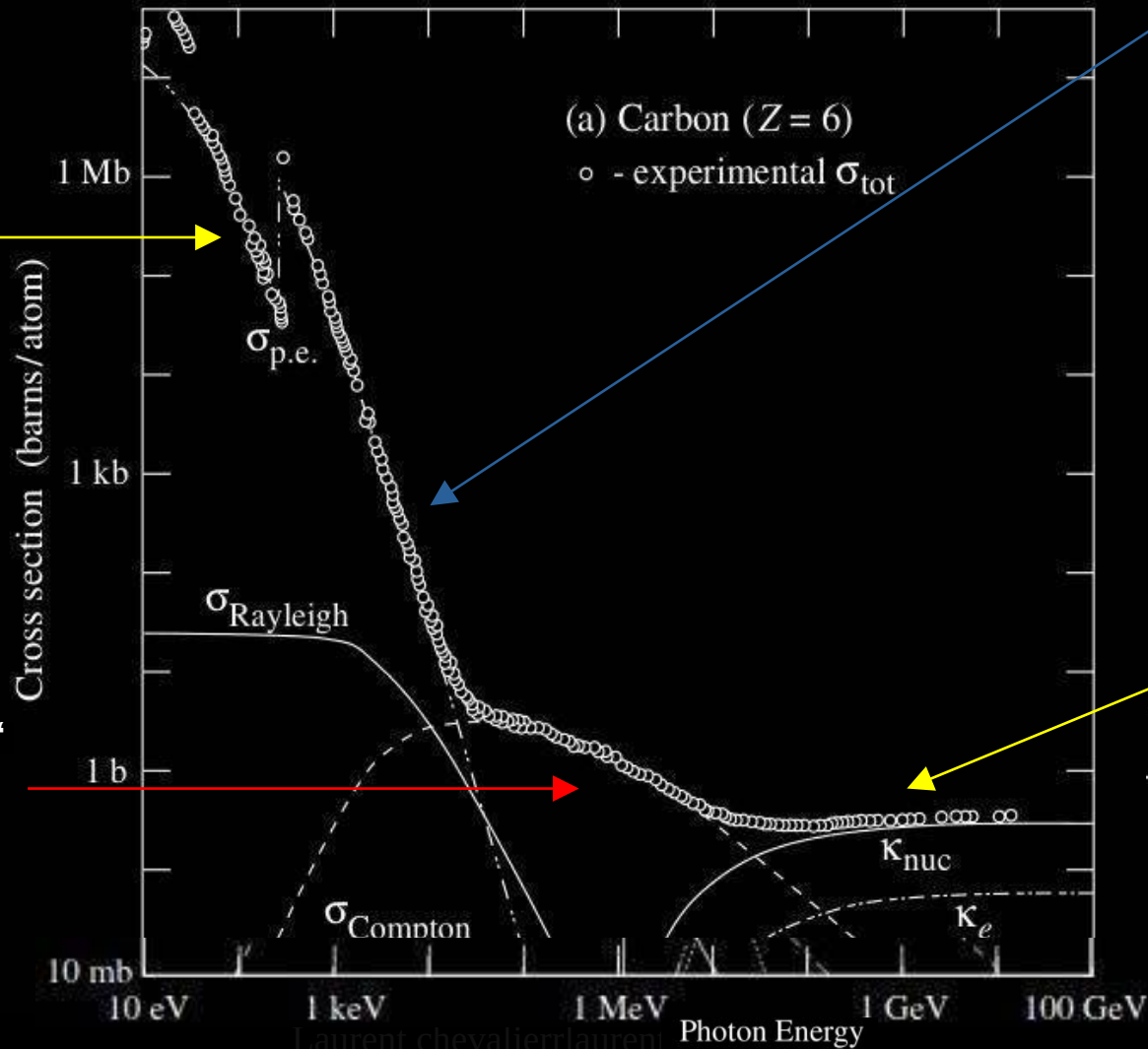
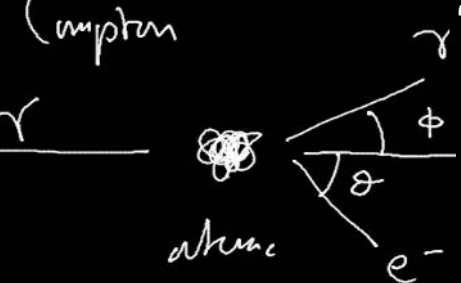


# Interaction particules / matière

Photoélectrique



Compton



Rayleigh  $\gamma$

atome

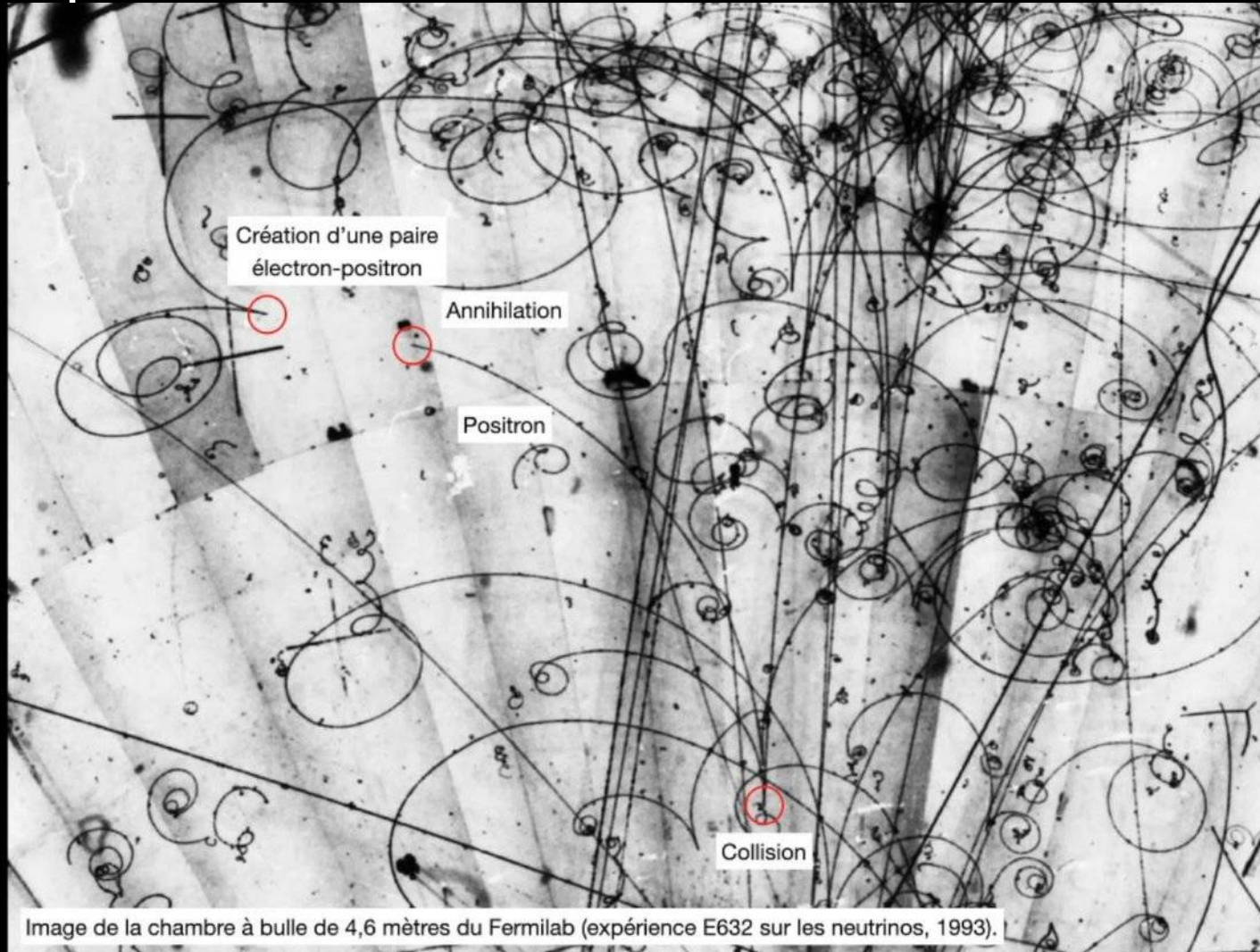
Création de paires

$e^+$

$e^-$

atome

# Interaction particules / matière





# Interaction particules / matière

## Particules détectables directement

- Photon, électron, muon
- Hadrons (quarks) → jets

## Matière du détecteur

- Atome → noyau & électron

## Interaction fonction de

- Charge, masse, énergie, impulsion de la particule
- A, Z des noyaux de la matière

# Interaction particules / matière

## Particules détectées par leur interaction avec la matière

- électromagnétique →  $> \text{keV}$  → interaction avec le cortège électronique de l'atome
- forte →  $> \text{GeV}$  → interaction avec le noyau atomique
- faible →  $> \text{MeV}$  → W,Z

# Interaction particules / matière

## Particules détectées par leur interaction avec la matière

- électromagnétique →  $> \text{keV}$  → interaction avec le cortège électronique de l'atome
- forte →  $> \text{GeV}$  → interaction avec le noyau atomique
- faible →  $> \text{MeV}$  →  $W, Z$

## Principalement par des mécanismes électromagnétiques

- Ionisation, excitation
- rayonnement
  - Transition
  - Cherenkov
  - Bremsstrahlung (synchrotron)

# Interaction particules / matière

## Particules détectées par leur interaction avec la matière

- électromagnétique →  $> \text{keV}$  → interaction avec le cortège électronique de l'atome
- forte →  $> \text{GeV}$  → interaction avec le noyau atomique
- faible →  $> \text{MeV}$  →  $W, Z$

## Principalement par des mécanismes électromagnétiques

- Ionisation, excitation
- rayonnement
  - Transition
  - Cherenkov
  - Bremsstrahlung (synchrotron)

## Perturbations

- fluctuations de Landau
- diffusion multiple → dû aux diffusions élastiques et inélastiques
- création de paires ( $e^+/e^-$ )

# Interaction particules / matière

## Particules détectées par leur interaction avec la matière

- électromagnétique  
forte  $\rightarrow > \text{GeV} \rightarrow$  interaction avec le noyau atomique  
faible  $\rightarrow > \text{MeV} \rightarrow W, Z$

## Principalement par des mécanismes électromagnétiques

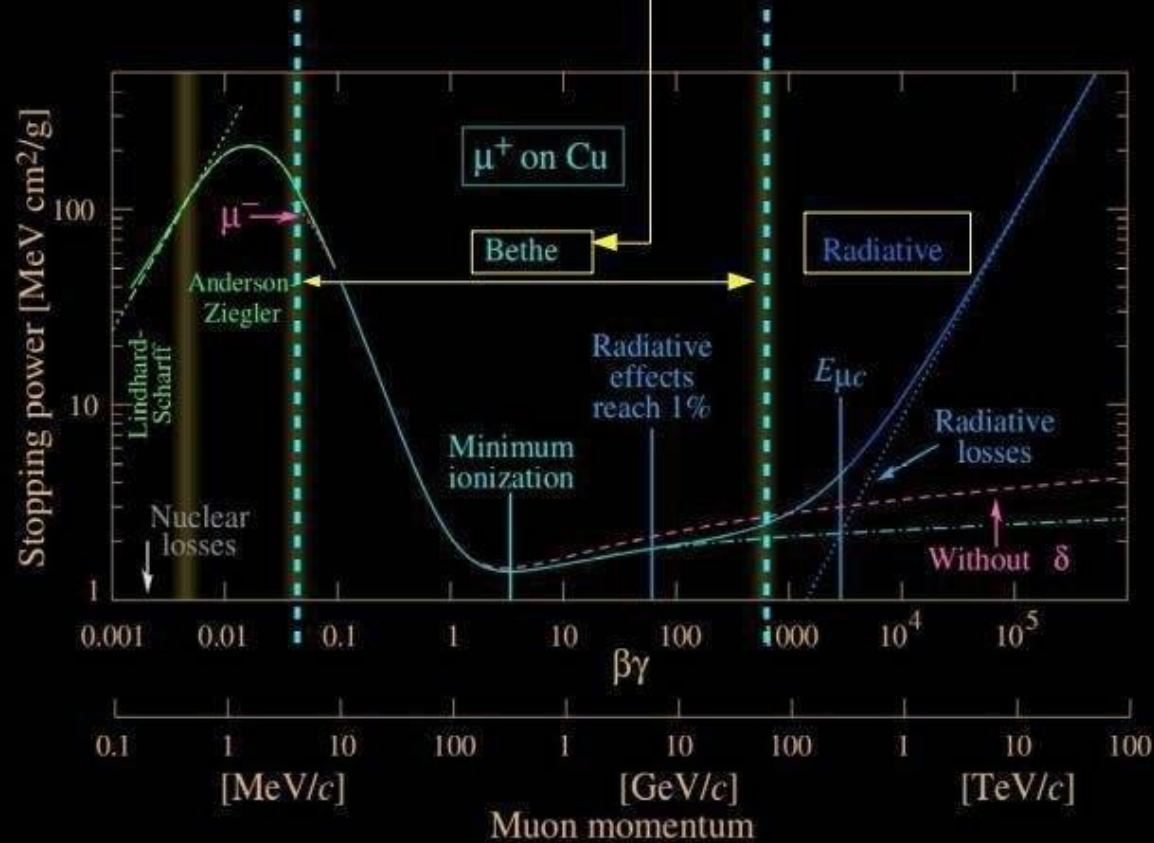
- Ionisation, excitation
- rayonnement
  - Transition
  - Cherenkov
  - Bremsstrahlung (synchrotron)

## Perturbations

- fluctuations de Landau
- diffusion multiple  $\rightarrow$  dû aux diffusions élastiques et inélastiques
- création de paires ( $e^+/e^-$ )

# Interaction particules / matière

$$-\frac{dE}{dx} = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$





# Interaction particules / matière

$$-\frac{dE}{dx} = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

Remarques: **Hans Bethe**  
**Félix Bloch**  
**Enrico Fermi**

calcul (non- et relativiste) LO  
corrections d'ordre supérieur  
écranage

Formule ok  $\sim \text{MeV} \rightarrow \sim \text{TeV}$ , [entre crochet] légèrement différente pour les  $e^+/e^-$

# Interaction particules / matière

$$-\frac{dE}{dx} = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

Remarks:

$$\frac{dE}{dx} \propto \frac{1}{\beta^2} \ln(\beta^2 \gamma^2)$$

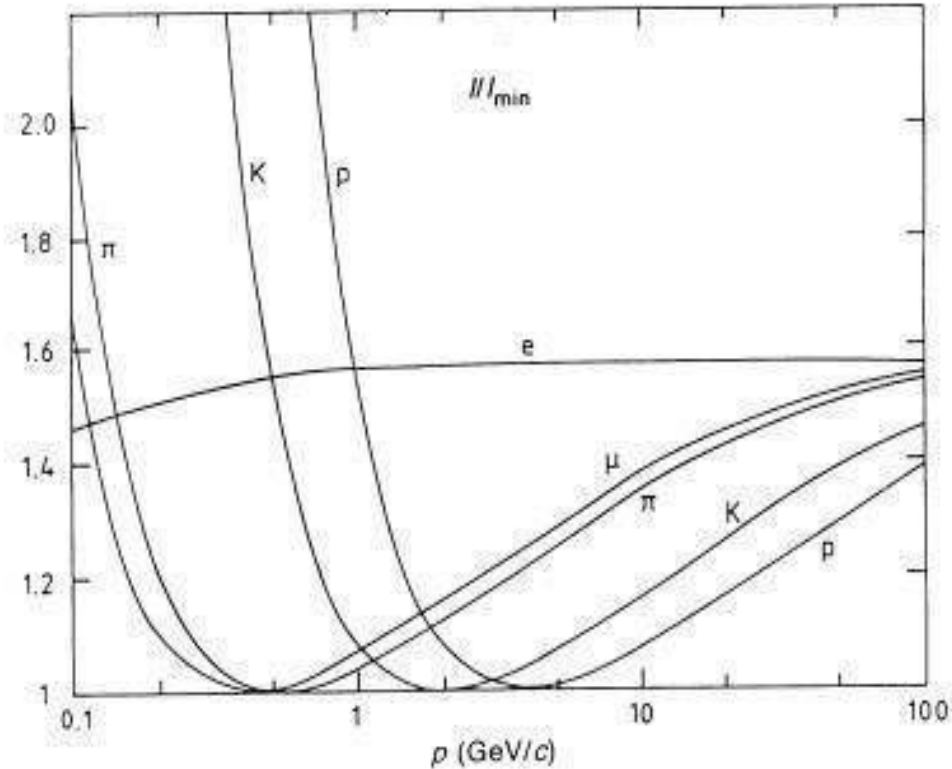
$$\beta\gamma = \frac{P}{m}$$




$$\frac{P}{m_\mu} * 207 = \frac{P}{m_e}$$

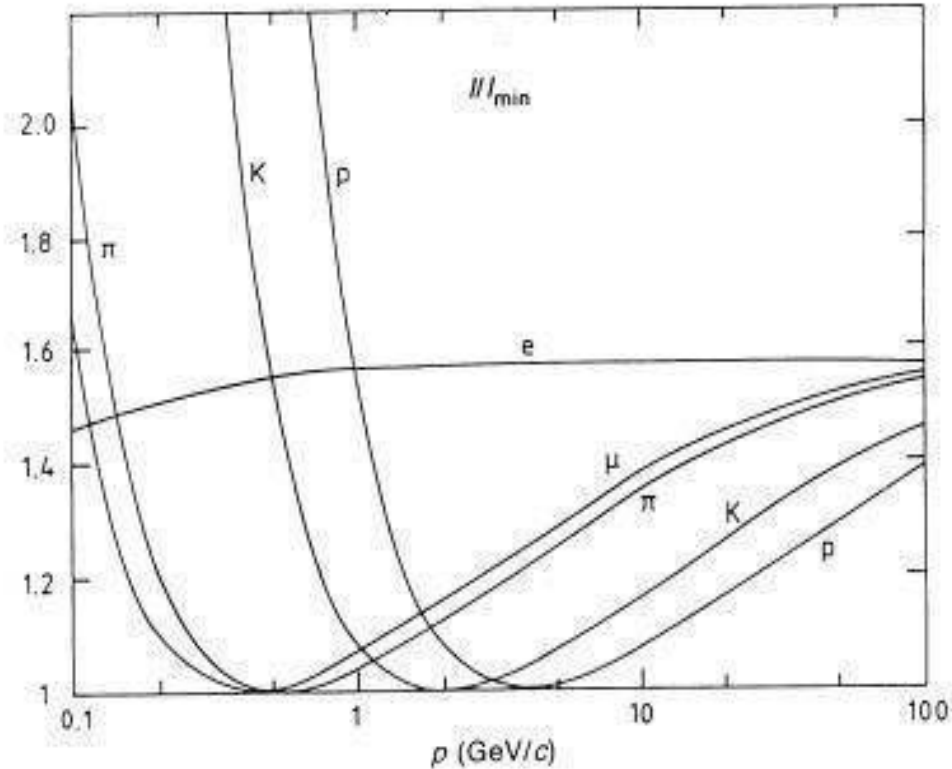
# Interaction particules / matière

## Calcul

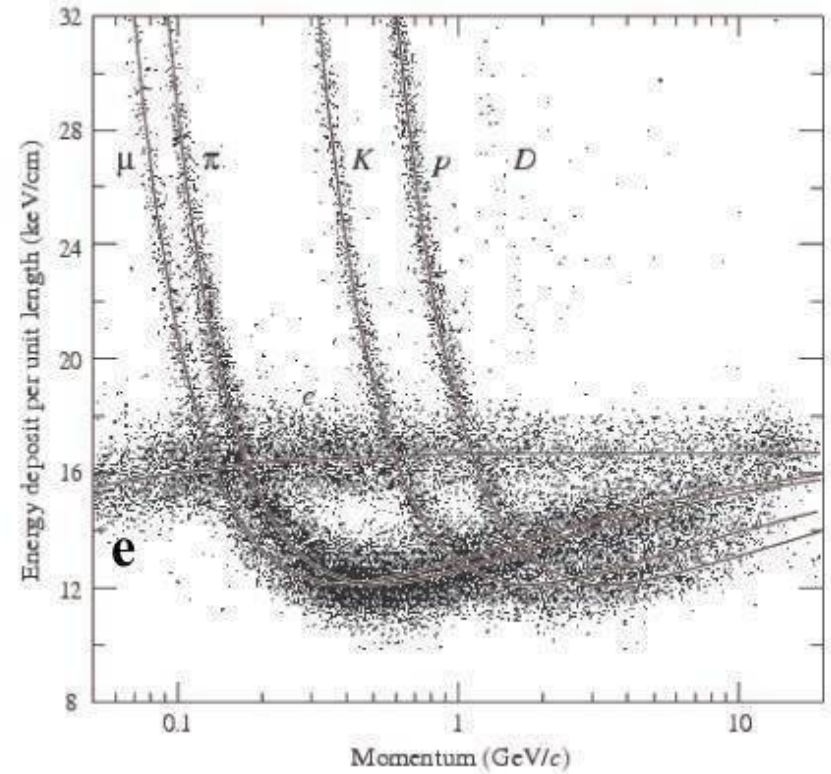


# Interaction particules / matière

## Calcul



## Mesures



échelle d'énergie :  $\sim 0.1 \rightarrow \sim 10$  GeV

# Interaction particules / matière

## Particules détectées par leur interaction avec la matière

- électromagnétique →  $> \text{KeV}$  → interaction avec le cortège électronique de l'atome
- forte →  $> \text{GeV}$  → interaction avec le noyau atomique
- faible →  $> \text{MeV}$  → W,Z

## Principalement par des mécanismes électromagnétiques

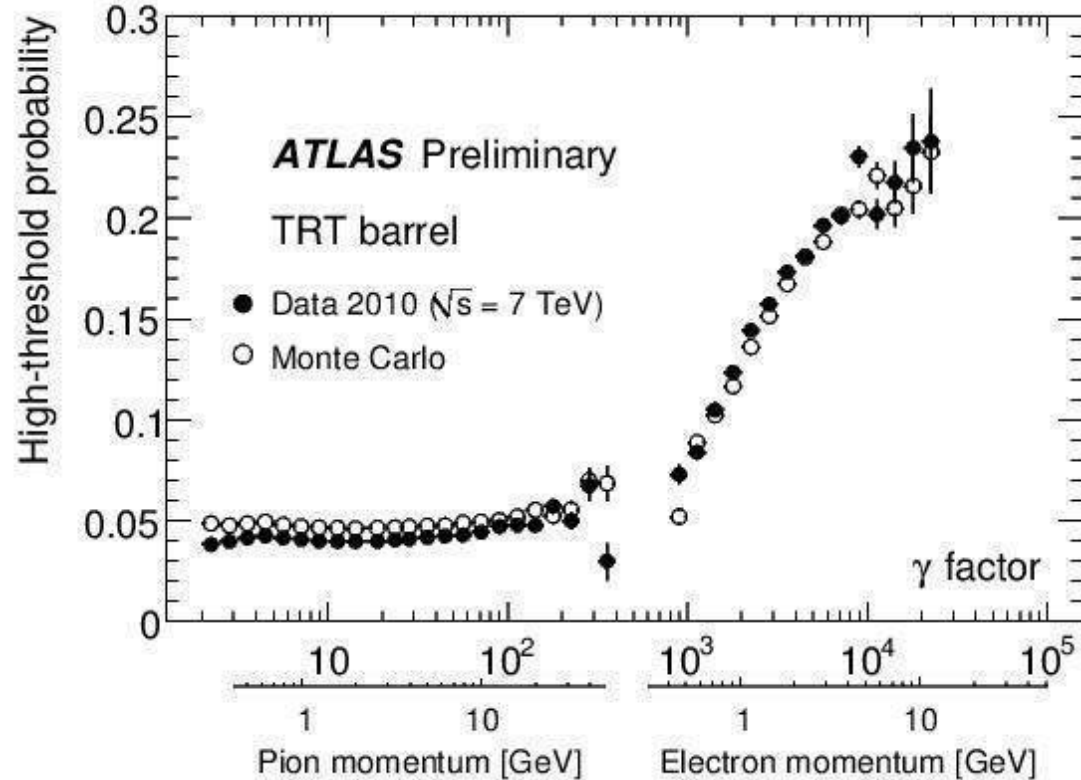
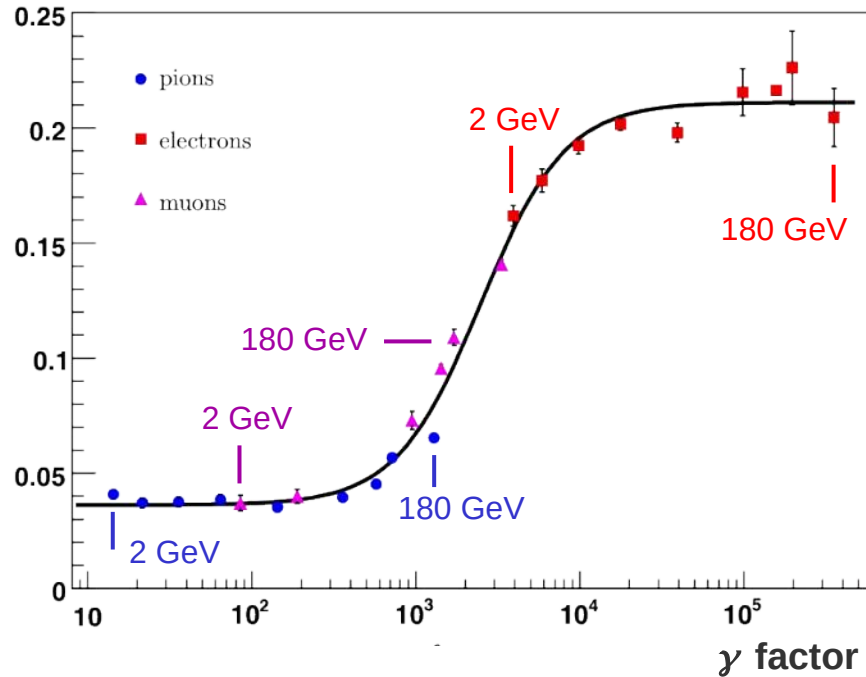
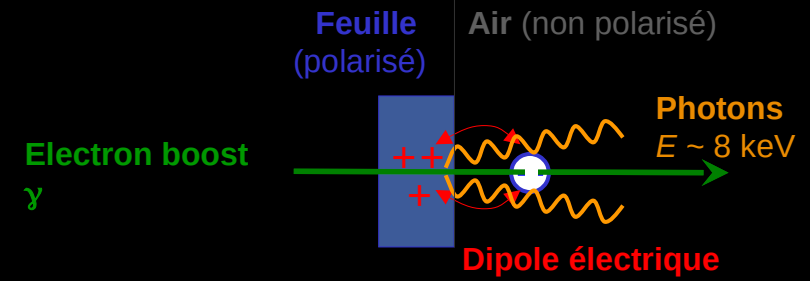
- Ionisation, excitation
- rayonnement
  - Transition
  - Cherenkov
  - Bremsstrahlung (synchrotron)

## Perturbations

- fluctuations de Landau
- diffusion multiple → dû aux diffusions élastiques et inélastiques
- création de paires ( $e^+/e^-$ )

# Interaction particules / matière

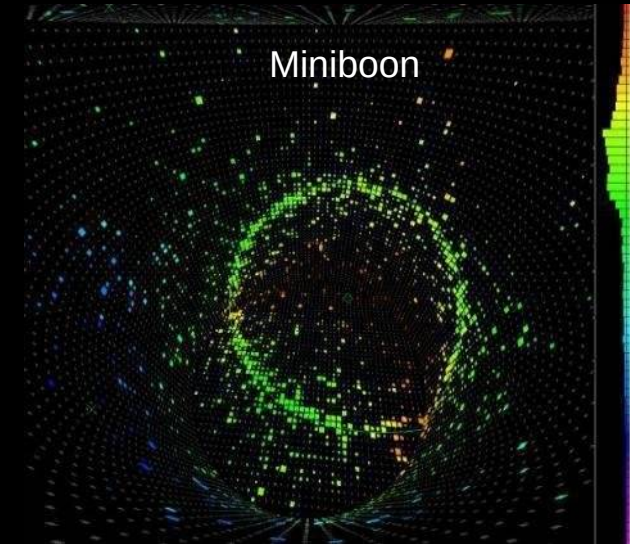
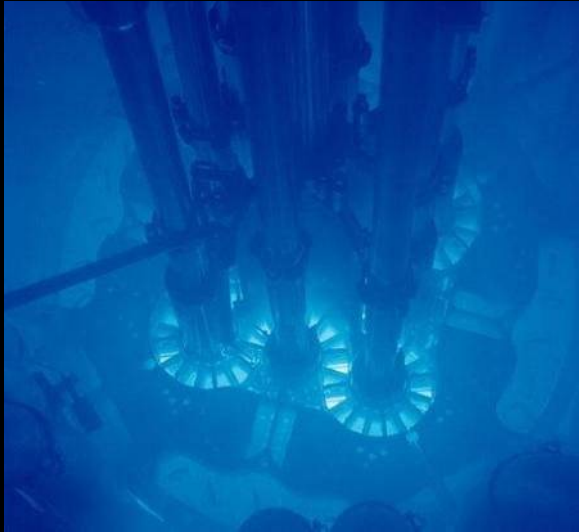
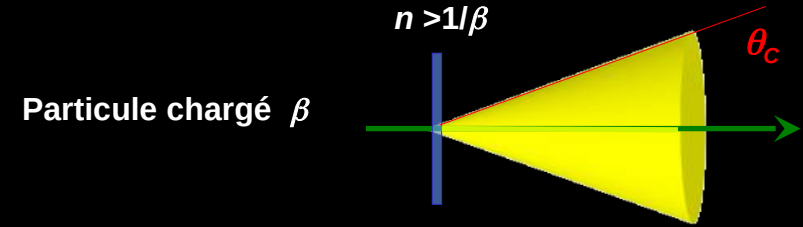
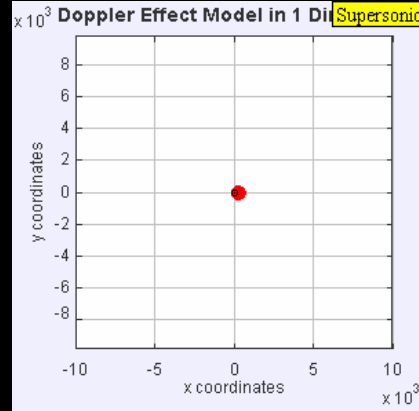
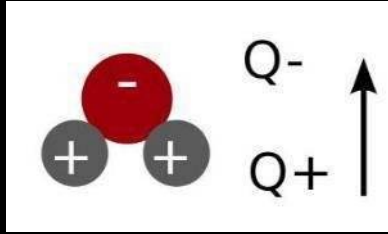
## Rayonnement de transition





# Interaction particules / matière

## Cherenkov



# Interaction particules / matière

## Particules détectées par leur interaction avec la matière

- électromagnétique →  $> \text{KeV}$  → interaction avec le cortège électronique de l'atome
- forte →  $> \text{GeV}$  → interaction avec le noyau atomique
- Faible →  $> \text{MeV}$  → W,Z

## Principalement par des mécanismes électromagnétiques

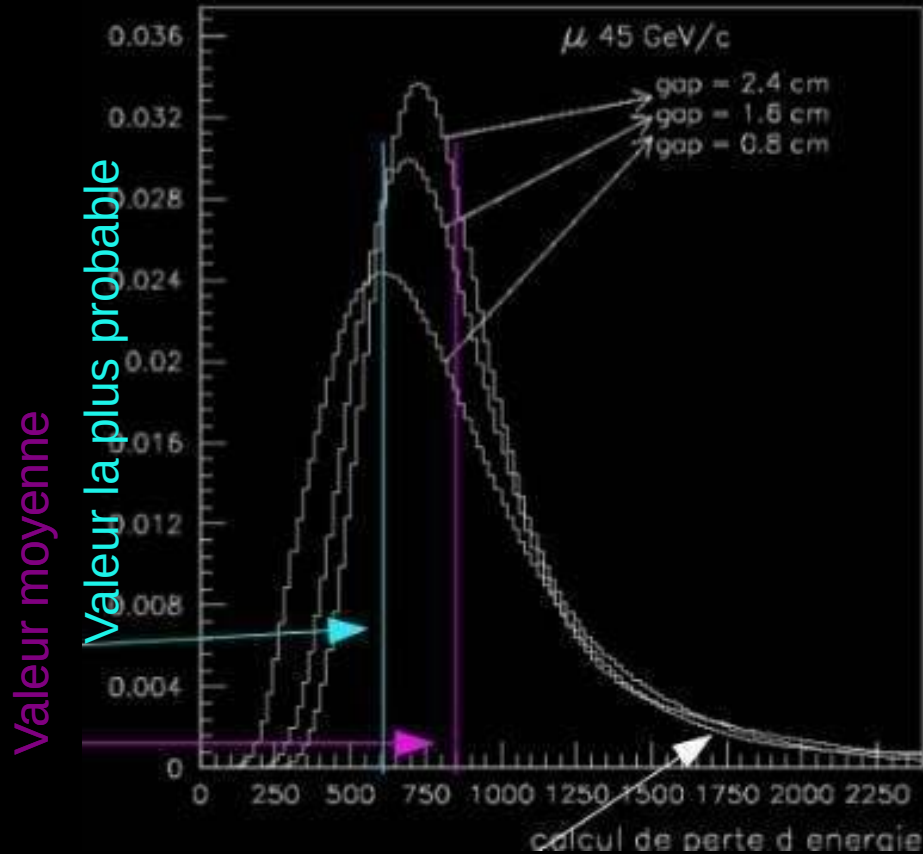
- Ionisation, excitation
- rayonnement
  - Transition
  - Cherenkov
  - Bremsstrahlung (synchrotron)

## Perturbations

- fluctuations de Landau
- diffusion multiple → dû aux diffusions élastiques et inélastiques
- création de paires ( $e^+/e^-$ )

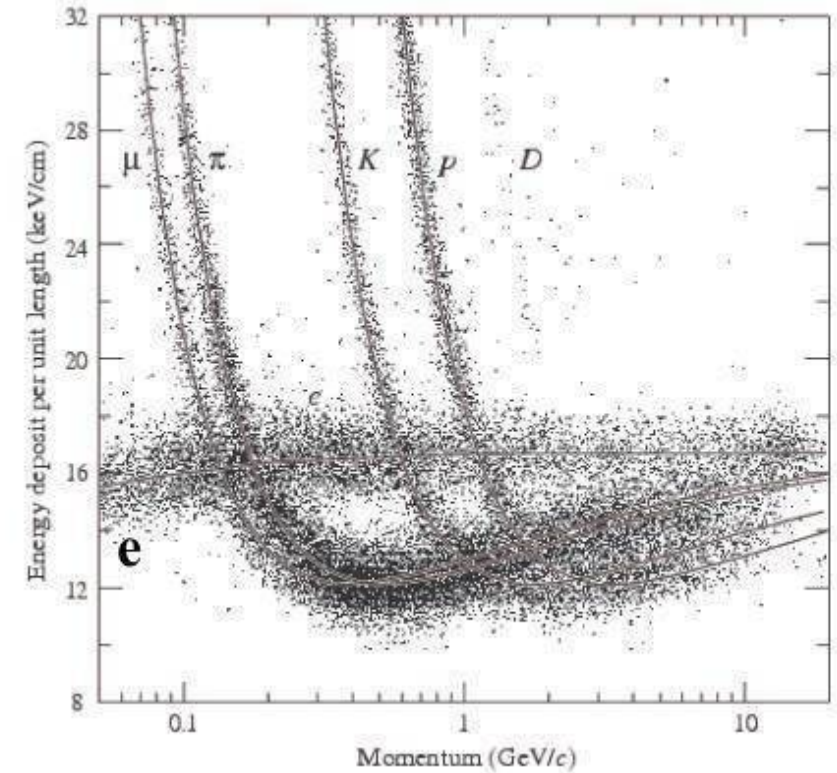
# Interaction particules / matière

## Fluctuations de Landau



$\delta$  ray grandes fluctuations

## Mesures



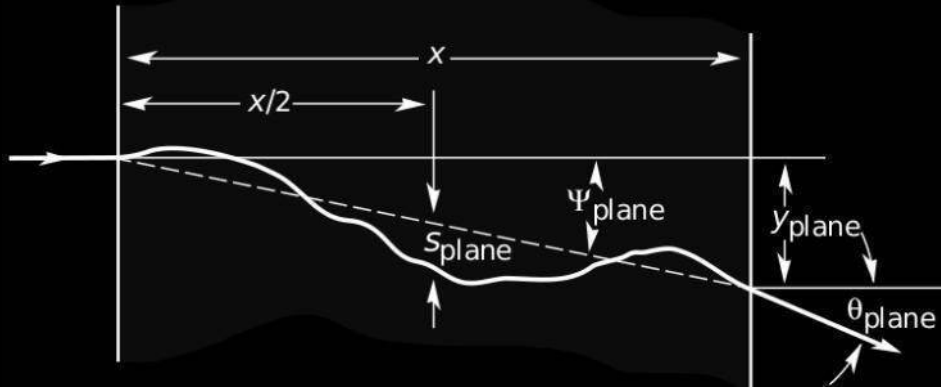
Gamme d'énergie :  $\sim 0.1 \rightarrow \sim 10 \text{ GeV}$

# Interaction particules / matière

## Diffusion multiple : perturbation de la détection

- diffusion Coulombienne
- Déflexion de la trajectoire de la particule par le milieu
- Minimiser la matière pour le trajectographe

$$\theta_0 = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta_{cp}} z \sqrt{x/X_0} \left[ 1 + 0.038 \ln(x/X_0) \right]$$



# Interaction particules / matière

## Création de paires

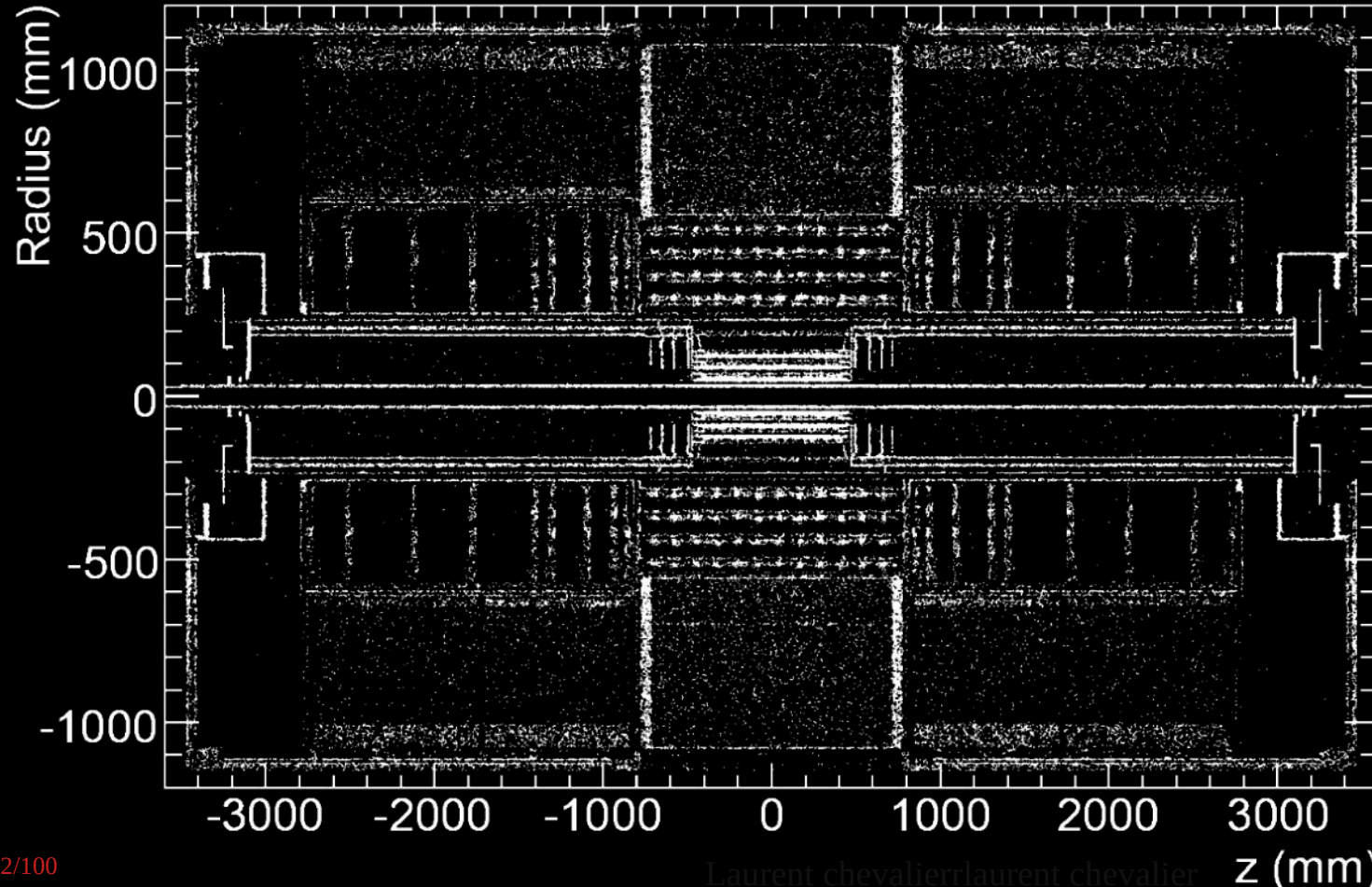
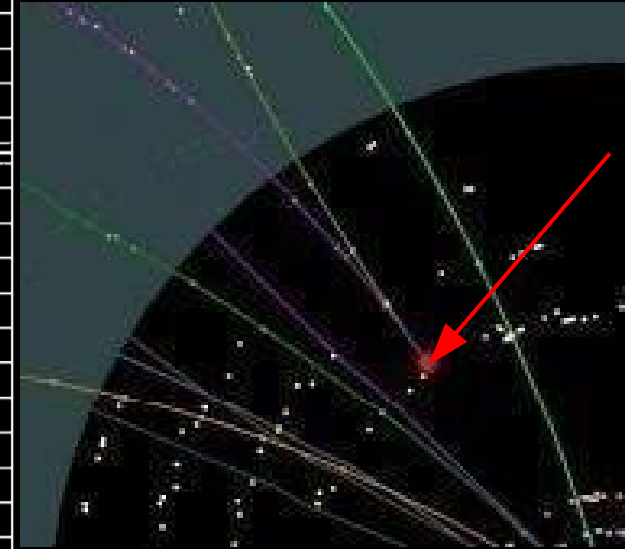
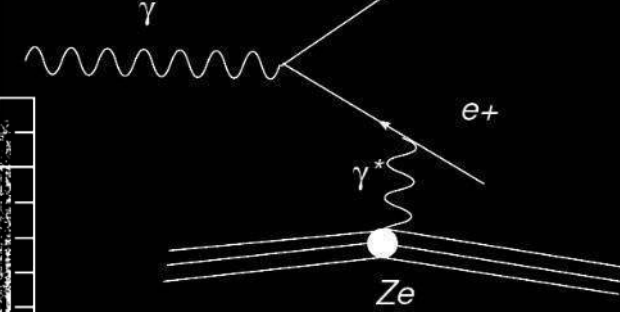


diagramme de Feynman  
conversion de photon  $e^-$



# Conception d'un détecteur

23-25 Novembre 2025, Roscoff

## 1/ Introduction

- références, vocabulaire, unités

## 2/ Détecter quoi ↔ pourquoi

- remarques liminaires
- modélisation
- détecteur : ckoï ?

## 3/ Interaction particules matière

- rapide aperçu

## 4/ Généralités sur les détecteurs

## 5/ Exemples

- D0 (Fermilab)
- ATLAS (CERN)



# 4/ Généralités sur les détecteurs

Réponse schématique d'un détecteur  
mesures partielles & destructives (collisionneur/cible fixe)

Mesure impulsion muons :  
« transparent » ex : Aluminium/gaz

**Chambres à muons**

Mesure energie hadrons :  
« dense » ex : plomb

**Calorimètre hadronique**

Mesure energie électron/photon :  
« dense » ex : plomb

**Calorimètre électromagnétique**

Traces chargées :  
« transparent » ex : gaz

**Chambre à traces**

Interaction

# 4/ Généralités sur les détecteurs

Paramètres significatifs (?) pour la détection

- Interactions particules-matière

# 4/ Généralités sur les détecteurs

Paramètres significatifs (?) pour la détection

- Interactions particules-matière

Mesures partielles et/ou destructives (pour parties)

- Spécifiques à certaines particules (sous-détecteurs)

# 4/ Généralités sur les détecteurs

Paramètres significatifs (?) pour la détection

- Interactions particules-matière

Mesures partielles et/ou destructives (pour parties)

- Spécifiques à certaines particules (sous-détecteurs)

Séparation de charge : champ magnétique

- Mesure de l'impulsion pour les particules chargées
- +/- séparation / focalisation / nettoyage

# 4/ Généralités sur les détecteurs

Paramètres significatifs (?) pour la détection

- Interactions particules-matière

Mesures partielles et/ou destructives (pour parties)

- Spécifiques à certaines particules (sous-détecteurs)

Séparation de charge : champ magnétique

- Mesure de l'impulsion pour les particules chargées
- +/- séparation / focalisation / nettoyage

Herméticité

- $W \rightarrow \mu \nu$  :  $\nu$  (neutrino), contrôle énergie manquante ( $E_{\text{t\_miss}}$ )
- Moins vrai pour SK (mesure spécifique aux neutrinos)

# 4/ Généralités sur les détecteurs

Paramètres significatifs (?) pour la détection

- Interactions particules-matière

Mesures partielles et/ou destructives (pour parties)

- Spécifiques à certaines particules (sous-détecteurs)

Séparation de charge : **champ magnétique**

- Mesure de l'impulsion pour les particules chargées
- +/- séparation / focalisation / nettoyage

Herméticité

- $W \rightarrow \mu \nu$  :  $\nu$  (neutrino), contrôle énergie manquante ( $E_{\text{t\_miss}}$ )
- Moins vrai pour SK (mesure spécifique aux neutrinos)