



**LPC** Particules  
PLasmas  
Univers  
applications  
Laboratoire de Physique de Clermont

# Comment “voir” les particules ?

---

**Romain Madar (CNRS/IN2P3/LPC)**

**French Teacher Programmes**

CERN – 25/10/2023



Run: 282712  
Event: 1212489545  
2015-10-21 09:39:30 CEST

# Qui suis-je ?

## Parcours:

- 2014 - aujourd'hui: chargé de recherche au LPC (Clermont-Ferrand) - physique du top ATLAS
- 2011 - 2014: postdoc à l'université de Fribourg (Allemagne) - physique du Higgs ATLAS
- 2008 - 2011: doctorat au CEA Saclay - physique du Higgs DØ (Chicago)



## Parcours:

- 2014 - aujourd'hui: chargé de recherche au LPC (Clermont-Ferrand) - physique du top ATLAS
- 2011 - 2014: postdoc à l'université de Fribourg (Allemagne) - physique du Higgs ATLAS
- 2008 - 2011: doctorat au CEA Saclay - physique du Higgs DØ (Chicago)



# Qu'est-ce qu'un détecteur ?

## Définition du Larousse

Tout **appareil** utilisé pour déceler la **présence** d'un corps ou d'un **phénomène** caché ou non apparent immédiatement.

# Qu'est-ce qu'un détecteur ?

## Définition du Larousse

Tout **appareil** utilisé pour déceler la **présence** d'un corps ou d'un **phénomène** caché ou non apparent immédiatement.

Phenomenon

signal

convertir

collector

# Qu'est-ce qu'un détecteur ?

## Définition du Larousse

Tout **appareil** utilisé pour déceler la **présence** d'un corps ou d'un **phénomène** caché ou non apparent immédiatement.

Phenomenon

signal

convertir

collector

## Exemple du microphone

- signal : onde de pression dans l'air
- conv: membrane + aimant (induction)
- collecteur: bobine de fil conducteur

# Qu'est-ce qu'un détecteur ?

## Définition du Larousse

Tout **appareil** utilisé pour déceler la **présence** d'un corps ou d'un **phénomène** caché ou non **apparent immédiatement**.

Phenomenon

signal

convertir

collector

## Exemple du microphone

- signal : onde de pression dans l'air
- conv: membrane + aimant (induction)
- collecteur: bobine de fil conducteur

## Quelques détecteurs bien connus ...

- nos sens !
- appareil photo
- compteur Geiger, etc ...

# Demandez le programme !

Phenomenon

Collisions  
New particle creation  
Cosmic rays  
...

signal

converter

collector

# Demandez le programme !

## Phenomenon

Collisions  
New particle creation  
Cosmic rays  
...

## signal

'stable' particles  
(electron, photon, muons, pions,  
kaons, neutrons and protons)

## converter

## collector

# Demandez le programme !

## Phenomenon

Collisions  
New particle creation  
Cosmic rays

...

## signal

'stable' particles  
(electron, photon, muons, pions,  
kaons, neutrons and protons)

## converter

Interaction particle-matter  
(ionization, nuclear interaction, Compton  
scattering, photoelectric effect, ...)

## collector

# Demandez le programme !

## Phenomenon

Collisions  
New particle creation  
Cosmic rays  
...

## signal

'stable' particles  
(electron, photon, muons, pions,  
kaons, neutrons and protons)

## converter

Interaction particle-matter  
(ionization, nuclear interaction, Compton  
scattering, photoelectric effect, ...)

## collector

Electric signal  
(pulse, spike, light to  
current converter, ...)

# Demandez le programme !

## Phenomenon

Collisions  
New particle creation  
Cosmic rays  
...

## signal

'stable' particles  
(electron, photon, muons, pions,  
kaons, neutrons and protons)

## converter

Interaction particle-matter  
(ionization, nuclear interaction, Compton  
scattering, photoelectric effect, ...)

## collector

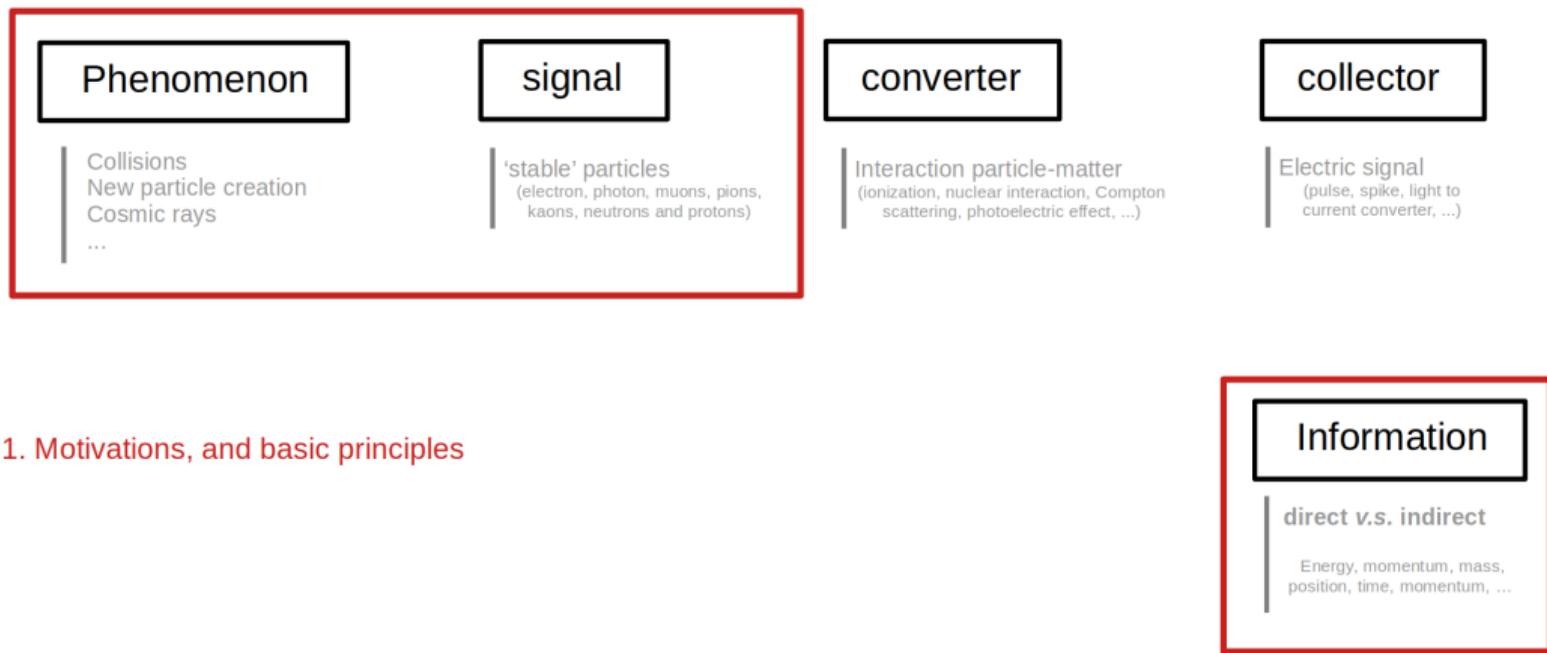
Electric signal  
(pulse, spike, light to  
current converter, ...)

## Information

direct v.s. indirect

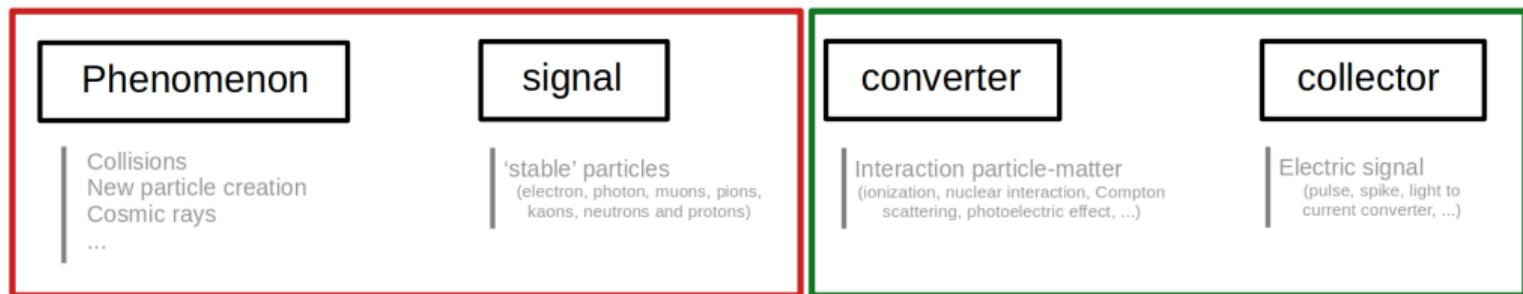
Energy, momentum, mass,  
position, time, momentum, ...

# Demandez le programme !



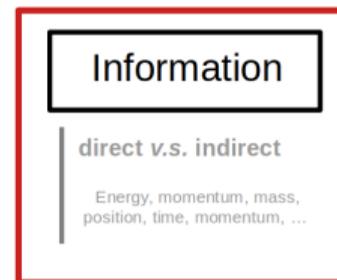
## 1. Motivations, and basic principles

# Demandez le programme !

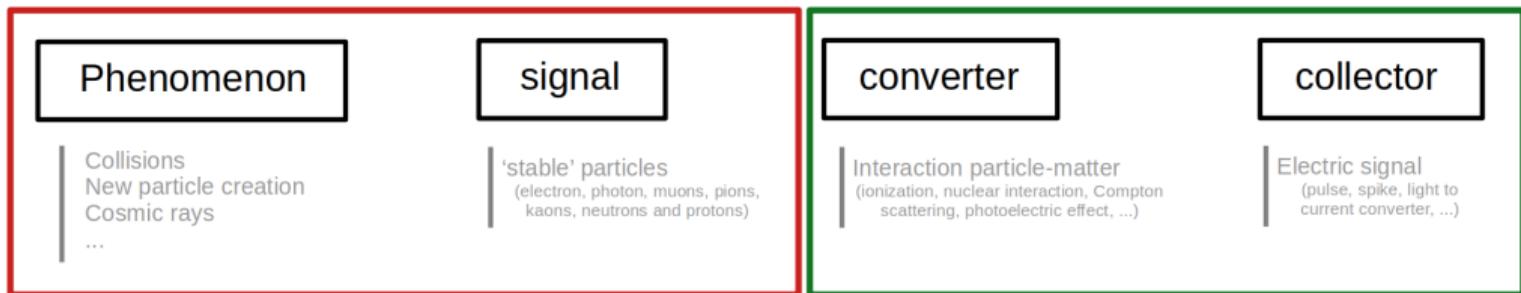


1. Motivations, and basic principles

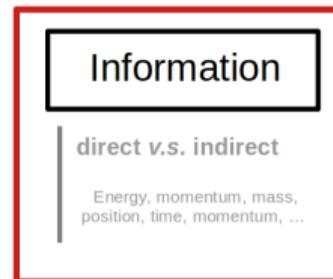
2. From particle-matter interactions to electric signals



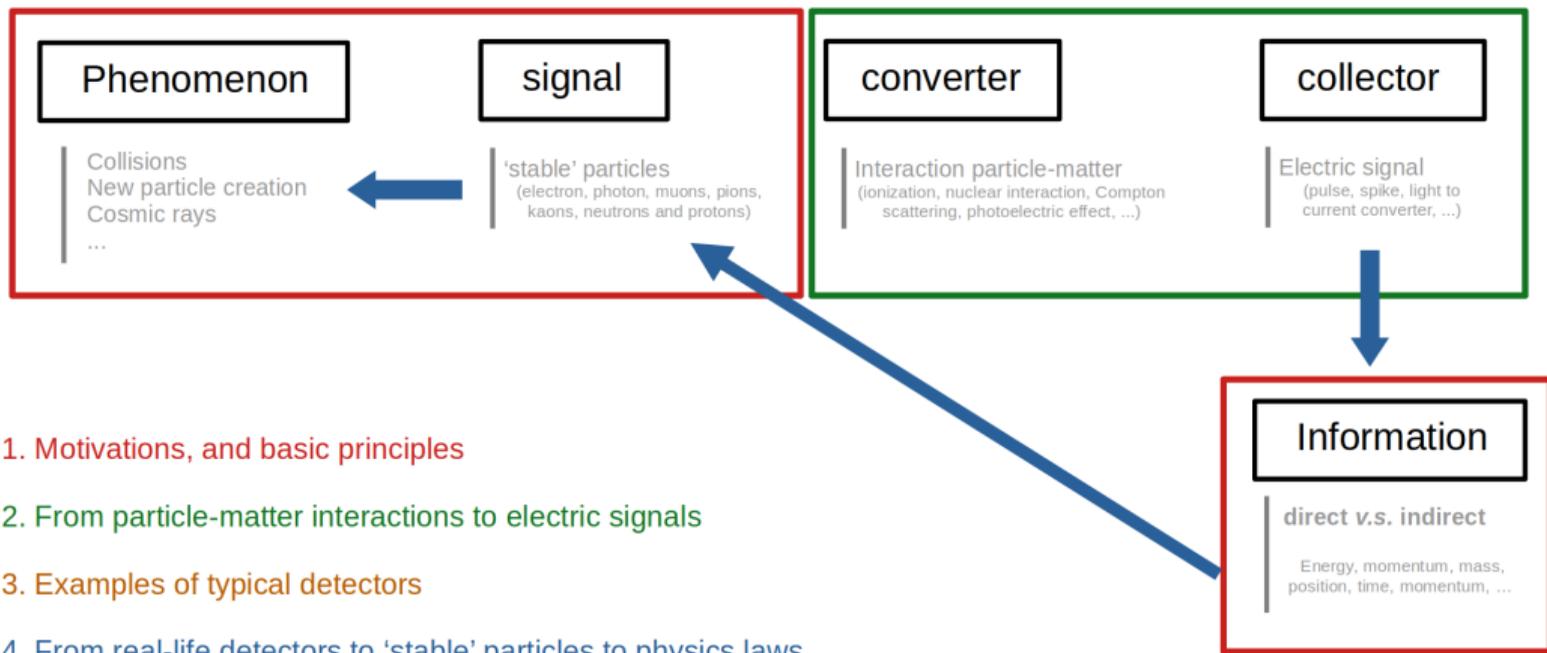
# Demandez le programme !



1. Motivations, and basic principles
2. From particle-matter interactions to electric signals
3. Examples of typical detectors



# Demandez le programme !



1. Motivations, and basic principles
2. From particle-matter interactions to electric signals
3. Examples of typical detectors
4. From real-life detectors to 'stable' particles to physics laws

1. Motivations et principes de base
2. Interaction particule-matière
3. Deux exemples de (sous-)détecteurs
4. Des signaux aux lois physiques
5. Conclusions

## Motivations et principes de base

---

## Commençons avec une petite analogie ...

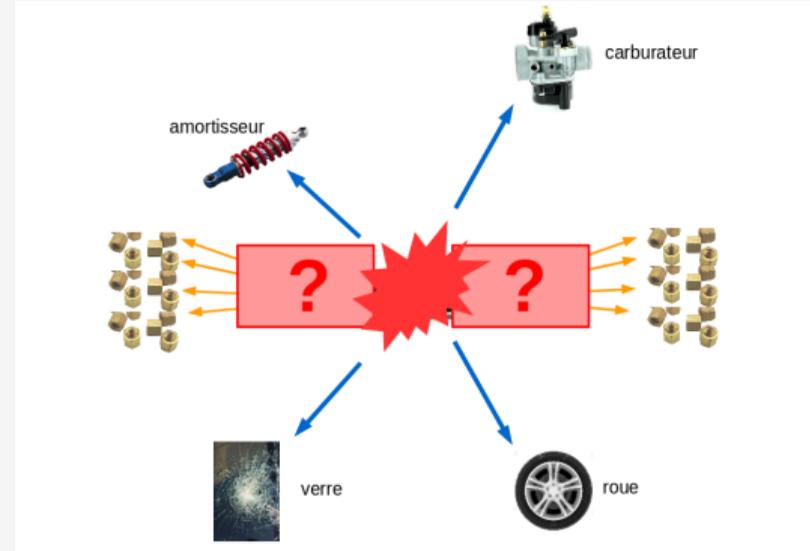
Imaginez deux objets **inconnus** qui  
entre en **collision**



# Commençons avec une petite analogie ...

Imaginez deux objets **inconnus** qui  
entre en **collision**

L'**analyse** des débris ne donne-t-elle pas des **indications**?

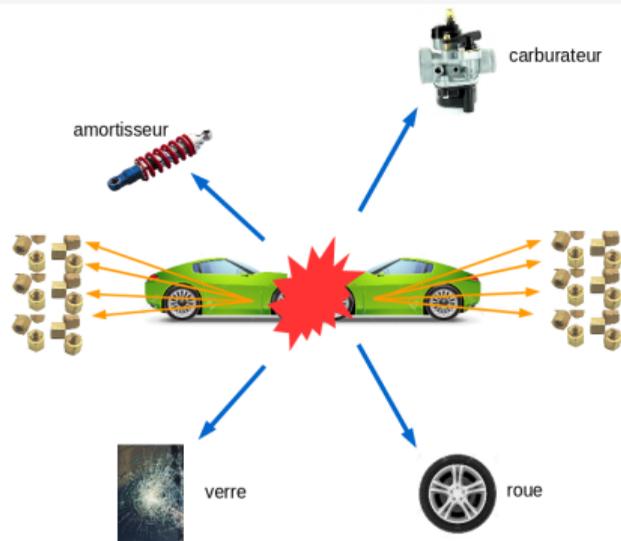


# Commençons avec une petite analogie ...

Imaginez deux objets **inconnus** qui entre en **collision**

L'**analyse** des débris ne donne-t-elle pas des **indications**?

**Oui!** On peut remonter à l'**invisible** grâce aux **objets sortant de la collision**.

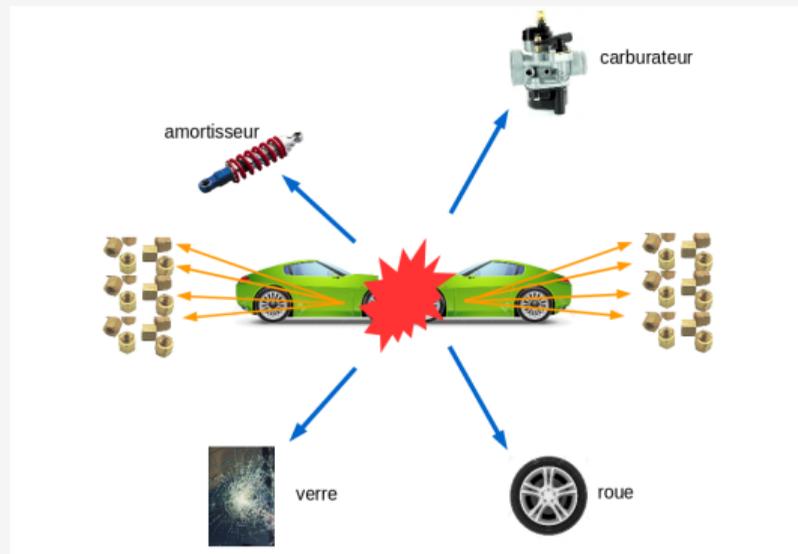


# Commençons avec une petite analogie ...

Imaginez deux objets **inconnus** qui entre en **collision**

L'**analyse** des débris ne donne-t-elle pas des **indications**?

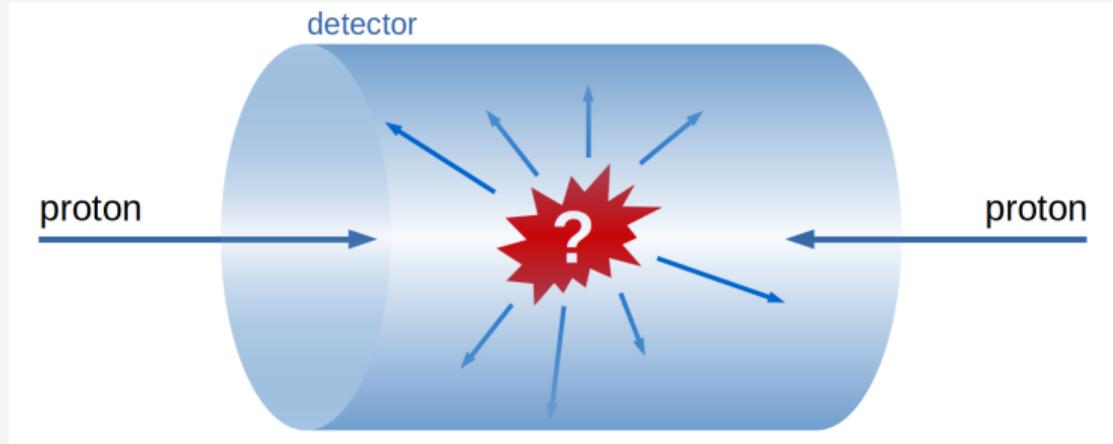
**Oui!** On peut remonter à l'**invisible** grâce aux **objets sortant de la collision**.



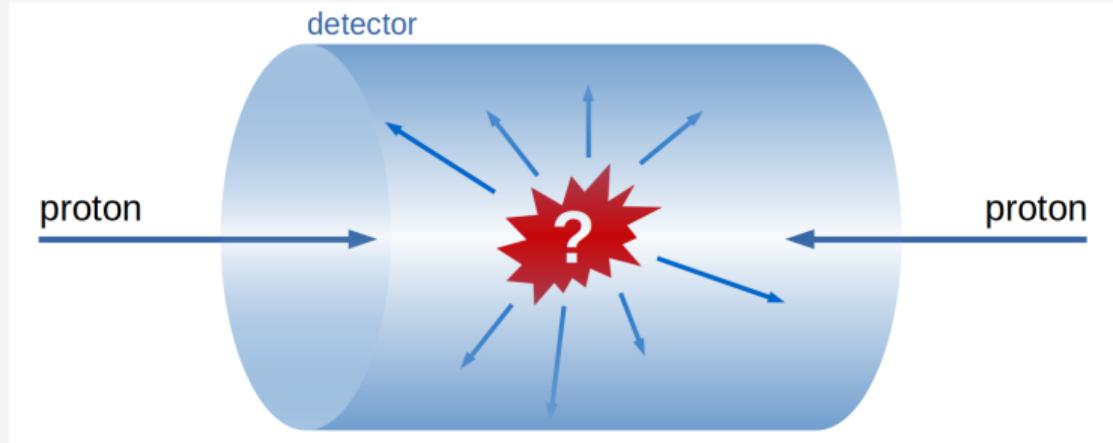
**Cependant, attention avec cette analogie:**

- En réalité, on **connaît** les particules qui collisionnent (au LHC, des protons)
- Ce que l'on ignore, c'est la (ou les) **particules produites** lors de la collision - ex. un **boson de Higgs**
- Les particules sortantes ne sont **pas (que) les débris** des particules entrantes (conversion masse-énergie)

# Du détecteur aux lois physiques

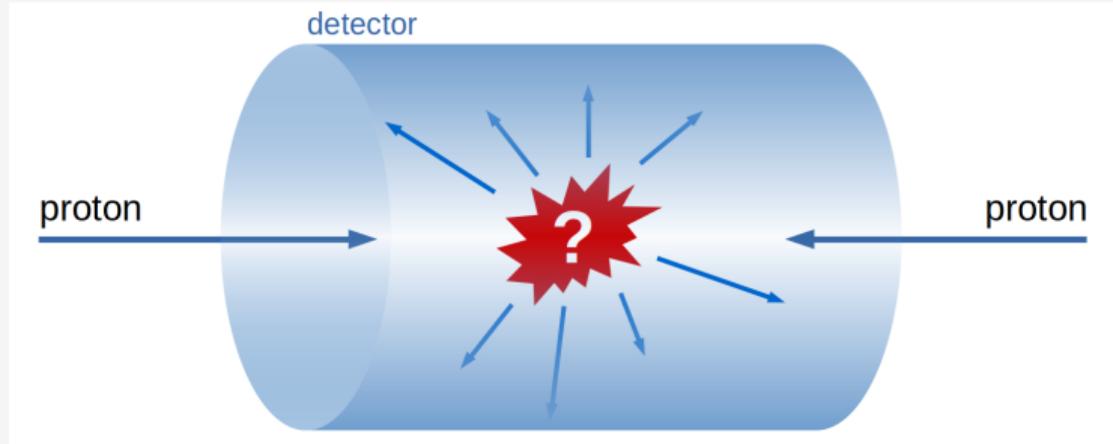


# Du détecteur aux lois physiques



- **on veut:** déterminer les lois de la physique (interaction, quantité conservée, particules)
- **on peut:** mesurer le résultat d'une expérience, ici une collision proton-proton

# Du détecteur aux lois physiques



- **on veut:** déterminer les **lois de la physique** (interaction, quantité conservée, particules)
- **on peut:** mesurer **le résultat d'une expérience**, ici une collision proton-proton

## Démarche expérimentale

signaux électriques → **particules produites** → phénomène subatomique → lois physique

# Que mesure-t-on exactement ?

Toutes les caractéristiques des particules qui vivent assez longtemps pour atteindre le détecteur

## 1. Particules “stables”

# Que mesure-t-on exactement ?

Toutes les caractéristiques des particules qui vivent assez longtemps pour atteindre le détecteur

## 1. Particules “stables”

- contre exemple : le boson  $W$  (il parcourt la taille d'un proton)

# Que mesure-t-on exactement ?

Toutes les caractéristiques des particules qui vivent assez longtemps pour atteindre le détecteur

## 1. Particules “stables”

- contre exemple : le boson  $W$  (il parcourt la taille d'un proton)
- électron, muon et photon
- proton, neutron, pions (chargés), kaons (neutres et chargés)

# Que mesure-t-on exactement ?

Toutes les caractéristiques des particules qui vivent assez longtemps pour atteindre le détecteur

## 1. Particules “stables”

- contre exemple : le boson  $W$  (il parcourt la taille d'un proton)
- électron, muon et photon
- proton, neutron, pions (chargés), kaons (neutres et chargés)

## 2. Caractéristiques

# Que mesure-t-on exactement ?

Toutes les caractéristiques des particules qui vivent assez longtemps pour atteindre le détecteur

## 1. Particules “stables”

- contre exemple : le boson  $W$  (il parcourt la taille d'un proton)
- électron, muon et photon
- proton, neutron, pions (chargés), kaons (neutres et chargés)

## 2. Caractéristiques

- cinématique (énergie, impulsion, trajectoire, temps d'arrivée, ...)
- grandeurs intrinsèques (masse, charge électrique, spin, ...) - souvent de manière indirecte

# Les 13 particules "stables"

Classées par les interactions auxquelles elles sont soumises

Traveling distance for  $E = 100 \text{ GeV}$

$e^\pm$	$m_e = 0.511 \text{ MeV}$	} EM	→ stable
$\mu^\pm$	$m_\mu = 105.7 \text{ MeV} \sim 200 m_e$		→ travels 630 km
$\gamma$	$m_\gamma = 0, Q = 0$		→ stable
$\pi^\pm$	$m_\pi = 139.6 \text{ MeV} \sim 270 m_e$	} EM, Strong ~ 3.5 $m_\pi$	→ travels 5 km
$K^\pm$	$m_K = 493.7 \text{ MeV} \sim 1000 m_e$		→ travels 800 m
$p^\pm$	$m_p = 938.3 \text{ MeV} \sim 2000 m_e$		→ stable
$K^0$	$m_{K^0} = 497.7 \text{ MeV} \quad Q = 0$	} Strong	→ travels 3km
$n$	$m_n = 939.6 \text{ MeV} \quad Q = 0$		→ ~ stable

# Les 13 particules "stables"

Classées par les interactions auxquelles elles sont soumises

Traveling distance for  $E = 100 \text{ GeV}$

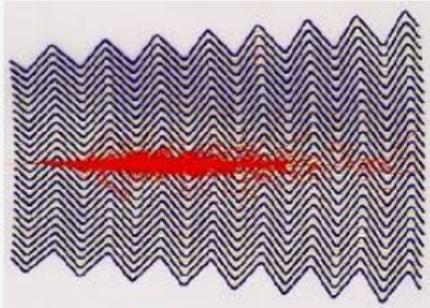
$e^\pm$	$m_e = 0.511 \text{ MeV}$	} EM	→ stable
$\mu^\pm$	$m_\mu = 105.7 \text{ MeV} \sim 200 m_e$		→ travels 630 km
$\gamma$	$m_\gamma = 0, Q = 0$		→ stable
$\pi^\pm$	$m_\pi = 139.6 \text{ MeV} \sim 270 m_e$	} EM, Strong	→ travels 5 km
$K^\pm$	$m_K = 493.7 \text{ MeV} \sim 1000 m_e$		$\sim 3.5 m_\pi$
$p^\pm$	$m_p = 938.3 \text{ MeV} \sim 2000 m_e$		→ stable
$K^0$	$m_{K^0} = 497.7 \text{ MeV} \quad Q=0$	} Strong	→ travels 3km
$n$	$m_n = 939.6 \text{ MeV} \quad Q=0$		→ ~ stable

Les particules stable (presque) indétectables : les neutrinos !

# Quatre grands principes de mesure

## 1. Calorimétrie (énergie)

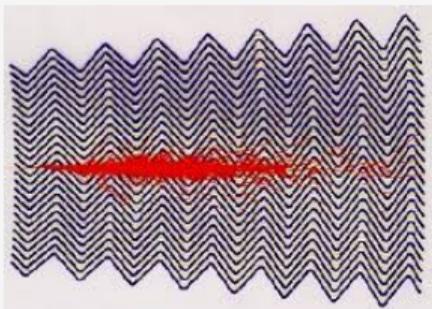
Dissiper toute l'énergie de la particule incidente dans la matière (**beaucoup de matière**).



# Quatre grands principes de mesure

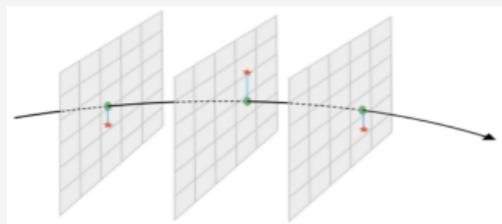
## 1. Calorimetrie (énergie)

Dissiper toute l'énergie de la particule incidente dans la matière (**beaucoup de matière**).



## 2. Trajectographie (impulsion)

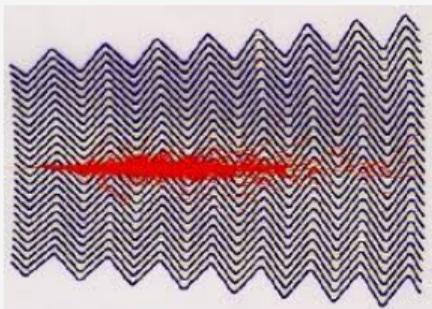
trouver la trajectoire de la particule en la perturbant le moins possible (**peu de matière**).  
courbure dans un champ magnétique connu = mesure de  $\frac{p}{q}$  (particule chargée uniquement)



# Quatre grands principes de mesure

## 1. Calorimétrie (énergie)

Dissiper toute l'énergie de la particule incidente dans la matière (**beaucoup de matière**).

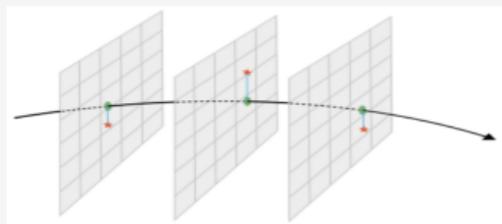


## 3. Masse

Mesure indirecte provenant de la **perte d'énergie par unité de distance**, appelé  $dE/dx$  (particule chargée uniquement)

## 2. Trajectographie (impulsion)

trouver la trajectoire de la particule en la perturbant le moins possible (**peu de matière**).  
courbure dans un champ magnétique connu = mesure de  $\frac{p}{q}$  (particule chargée uniquement)



## 4. Temps

Pourquoi ? Car " $\Delta T + \vec{r}_f \sim \vec{r}_i$ ". Pour que ce soit utile : résolution  $\sim o(30)$  ps (la lumière parcourt 8 mm en 30 ps)

## Quelques relations cinématiques utiles

**Particule massive**  $m > 0$  de vitesse  $\vec{v}$  :

Facteurs relativistes:

$$\vec{\beta} \equiv \frac{\vec{v}}{c} ; |\vec{\beta}| < 1$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \vec{\beta}^2}} ; \gamma \in [1, +\infty[$$

## Quelques relations cinématiques utiles

**Particule massive**  $m > 0$  de vitesse  $\vec{v}$  :

Facteurs relativistes:

$$\vec{\beta} \equiv \frac{\vec{v}}{c} ; |\vec{\beta}| < 1$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \vec{\beta}^2}} ; \gamma \in [1, +\infty[$$

Énergie:

$$E = \sqrt{(mc^2)^2 + (c\vec{p})^2} = \gamma mc^2$$
$$\xrightarrow{v \ll c} mc^2 + \frac{1}{2}m\vec{v}^2$$

## Quelques relations cinématiques utiles

**Particule massive**  $m > 0$  de vitesse  $\vec{v}$  :

Facteurs relativistes:

$$\vec{\beta} \equiv \frac{\vec{v}}{c} ; |\vec{\beta}| < 1$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \vec{\beta}^2}} ; \gamma \in [1, +\infty[$$

Énergie:

$$E = \sqrt{(mc^2)^2 + (c\vec{p})^2} = \gamma mc^2$$
$$\xrightarrow{v \ll c} mc^2 + \frac{1}{2}m\vec{v}^2$$

Impulsion:

$$\vec{p} \equiv \gamma m\vec{v} ; \vec{\beta} = \frac{c\vec{p}}{E} \xrightarrow{v \ll c} \frac{\vec{p}}{mc}$$

## Quelques relations cinématiques utiles

**Particule massive**  $m > 0$  de vitesse  $\vec{v}$  :

Facteurs relativistes:

$$\vec{\beta} \equiv \frac{\vec{v}}{c} ; |\vec{\beta}| < 1$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} ; \gamma \in [1, +\infty[$$

Énergie:

$$E = \sqrt{(mc^2)^2 + (c\vec{p})^2} = \gamma mc^2$$
$$\xrightarrow{v \ll c} mc^2 + \frac{1}{2} m\vec{v}^2$$

Impulsion:

$$\vec{p} \equiv \gamma m\vec{v} ; \vec{\beta} = \frac{c\vec{p}}{E} \xrightarrow{v \ll c} \frac{\vec{p}}{mc}$$

**Particule de masse nulle**  $m = 0$  ou ultra-relativiste ( $v \rightarrow c$ ):

Facteurs relativistes:

$$\vec{\beta} \equiv \vec{c} ; |\vec{\beta}| = 1$$

$$\gamma \rightarrow +\infty$$

# Quelques relations cinématiques utiles

**Particule massive**  $m > 0$  de vitesse  $\vec{v}$  :

Facteurs relativistes:

$$\vec{\beta} \equiv \frac{\vec{v}}{c} ; |\vec{\beta}| < 1$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} ; \gamma \in [1, +\infty[$$

Énergie:

$$E = \sqrt{(mc^2)^2 + (c\vec{p})^2} = \gamma mc^2$$
$$\xrightarrow{v \ll c} mc^2 + \frac{1}{2} m \vec{v}^2$$

Impulsion:

$$\vec{p} \equiv \gamma m \vec{v} ; \vec{\beta} = \frac{c\vec{p}}{E} \xrightarrow{v \ll c} \frac{\vec{p}}{mc}$$

**Particule de masse nulle**  $m = 0$  ou ultra-relativiste ( $v \rightarrow c$ ):

Facteurs relativistes:

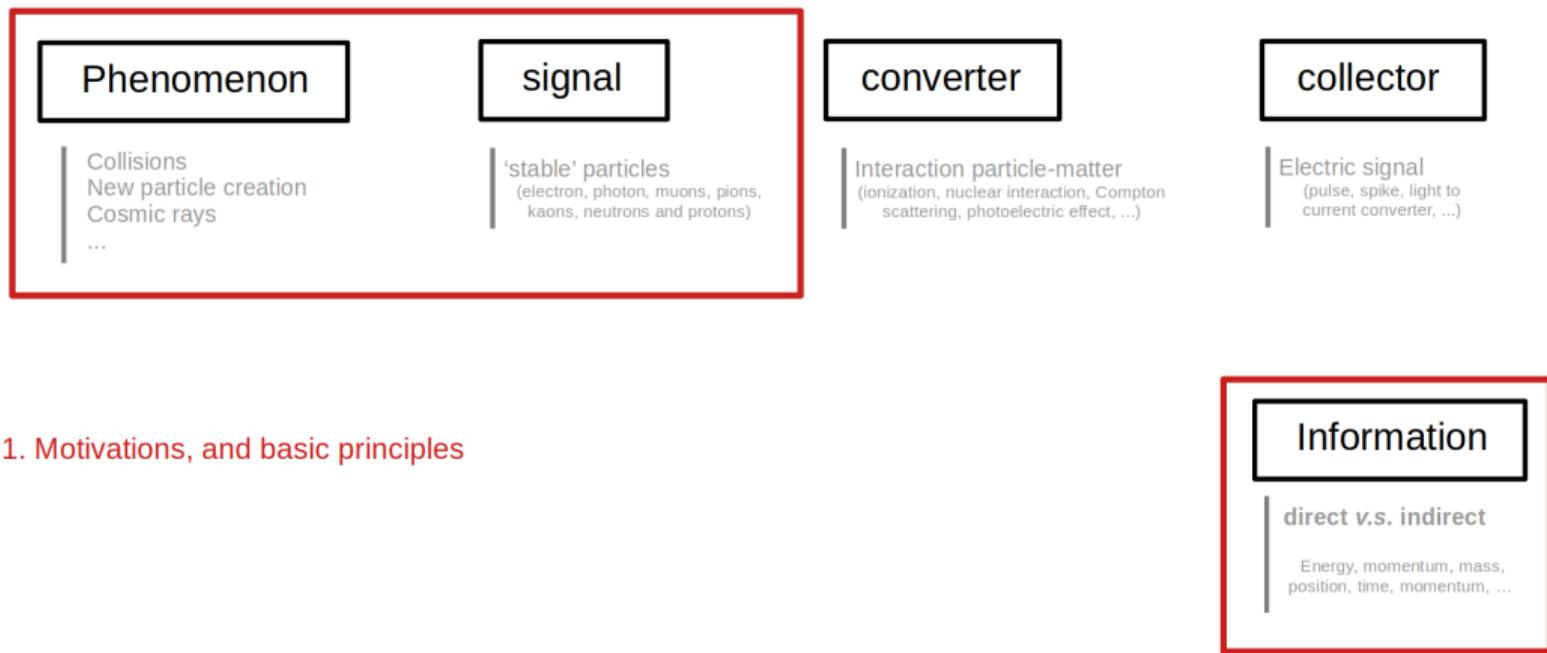
$$\vec{\beta} \equiv \vec{c} ; |\vec{\beta}| = 1$$

$$\gamma \rightarrow +\infty$$

Énergie  $\approx$  impulsion:

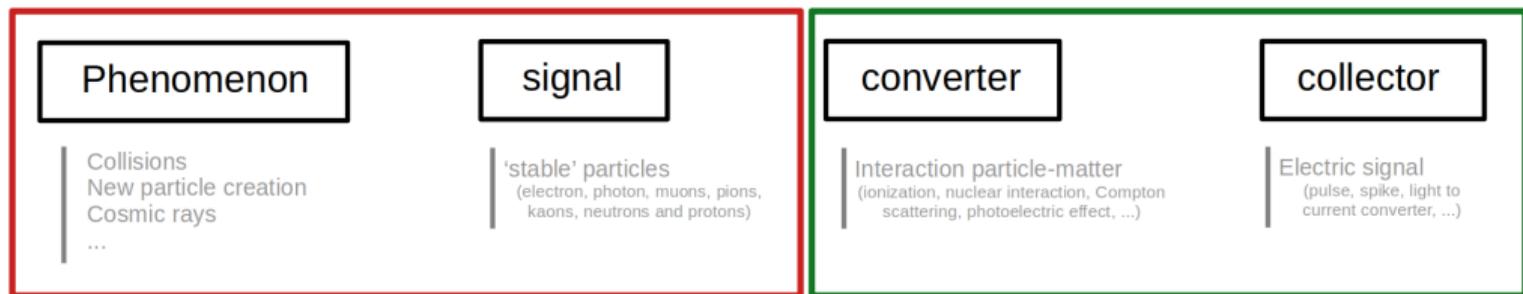
$$E = c|\vec{p}|$$

# Demandez le programme !



## 1. Motivations, and basic principles

# Demandez le programme !



1. Motivations, and basic principles

2. From particle-matter interactions to electric signals



# Interaction particule-matière

---

# Les quatre interactions fondamentales

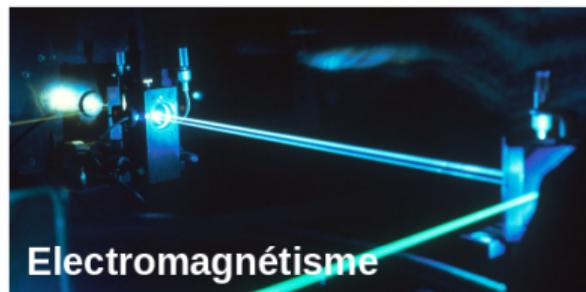
## 1 La gravitation



# Les quatre interactions fondamentales

1 La gravitation

2 La force électromagnétique

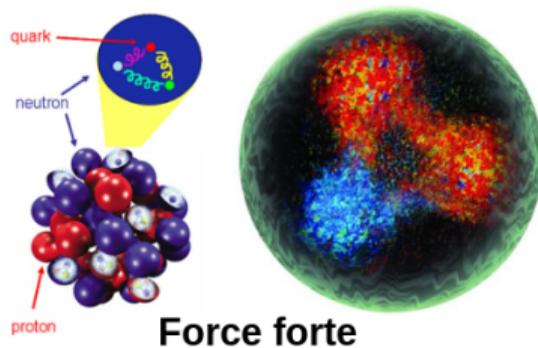
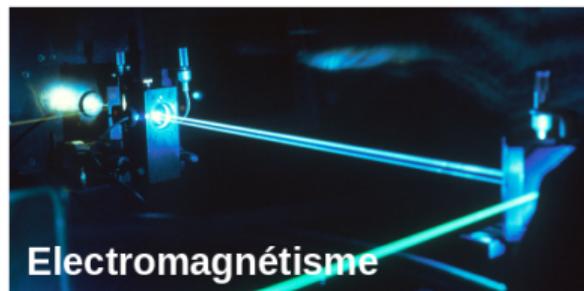


# Les quatre interactions fondamentales

1 La gravitation

2 La force électromagnétique

3 La force forte



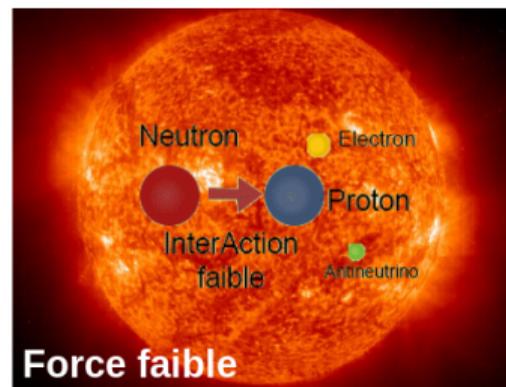
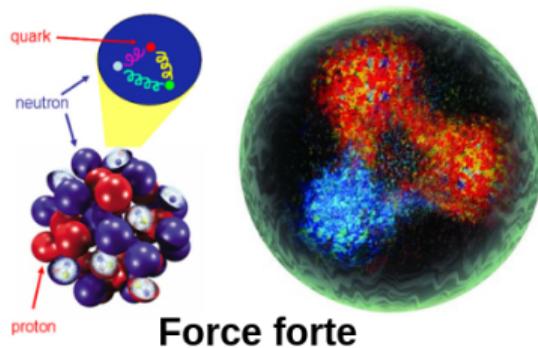
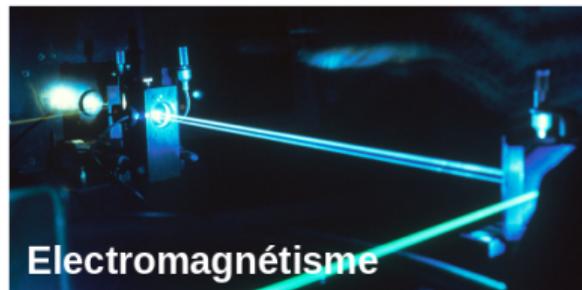
# Les quatre interactions fondamentales

1 La gravitation

2 La force électromagnétique

3 La force forte

4 La force faible



# Interactions particule-matière pour la détection

## 1. EM pour les particules massives

→  $\mu, \pi, K^{\pm}, p$

- électrons atomiques (ionisation, excitation)
- noyaux atomiques (rayonnement de freinage)

$e^{\pm}$	$m_e = 0.511 \text{ MeV}$	} EM
$\mu^{\pm}$	$m_{\mu} = 105.7 \text{ MeV} \sim 200 m_e$	
$\gamma$	$m_{\gamma} = 0, Q = 0$	
$\pi^{\pm}$	$m_{\pi} = 139.6 \text{ MeV} \sim 270 m_e$	} EM, Strong
$K^{\pm}$	$m_K = 493.7 \text{ MeV} \sim 1000 m_e \sim 3.5 m_{\pi}$	
$p^{\pm}$	$m_p = 938.3 \text{ MeV} \sim 2000 m_e$	
$K^0$	$m_{K^0} = 497.7 \text{ MeV} \quad Q=0$	} Strong
$n$	$m_n = 939.6 \text{ MeV} \quad Q=0$	

# Interactions particule-matière pour la détection

$e^\pm$	$m_e = 0.511 \text{ MeV}$	} EM
$\mu^\pm$	$m_\mu = 105.7 \text{ MeV} \sim 200 m_e$	
$\gamma$	$m_\gamma = 0, Q = 0$	
$\pi^\pm$	$m_\pi = 139.6 \text{ MeV} \sim 270 m_e$	} EM, Strong
$K^\pm$	$m_K = 493.7 \text{ MeV} \sim 1000 m_e \sim 3.5 m_\pi$	
$p^\pm$	$m_p = 938.3 \text{ MeV} \sim 2000 m_e$	
$K^0$	$m_{K^0} = 497.7 \text{ MeV} \quad Q=0$	} Strong
$n$	$m_n = 939.6 \text{ MeV} \quad Q=0$	

## 1. EM pour les particules massives

→  $\mu, \pi, K^\pm, p$

- électrons atomiques (ionisation, excitation)
- noyaux atomiques (rayonnement de freinage)

## 2. EM pour les particules de masse nulle

→  $e, \gamma$

- électrons atomiques (ionisation, excitation)
- noyaux atomiques (rayonnement de freinage)

# Interactions particule-matière pour la détection

$e^\pm$	$m_e = 0.511 \text{ MeV}$	} EM
$\mu^\pm$	$m_\mu = 105.7 \text{ MeV} \sim 200 m_e$	
$\gamma$	$m_\gamma = 0, Q = 0$	
$\pi^\pm$	$m_\pi = 139.6 \text{ MeV} \sim 270 m_e$	} EM, Strong $\sim 3.5 m_\pi$
$K^\pm$	$m_K = 493.7 \text{ MeV} \sim 1000 m_e$	
$p^\pm$	$m_p = 938.3 \text{ MeV} \sim 2000 m_e$	
$K^0$	$m_{K^0} = 497.7 \text{ MeV} \quad Q=0$	} Strong
$n$	$m_n = 939.6 \text{ MeV} \quad Q=0$	

## 1. EM pour les particules massives

→  $\mu, \pi, K^\pm, p$

- électrons atomiques (ionisation, excitation)
- noyaux atomiques (rayonnement de freinage)

## 2. EM pour les particules de masse nulle

→  $e, \gamma$

- électrons atomiques (ionisation, excitation)
- noyaux atomiques (rayonnement de freinage)

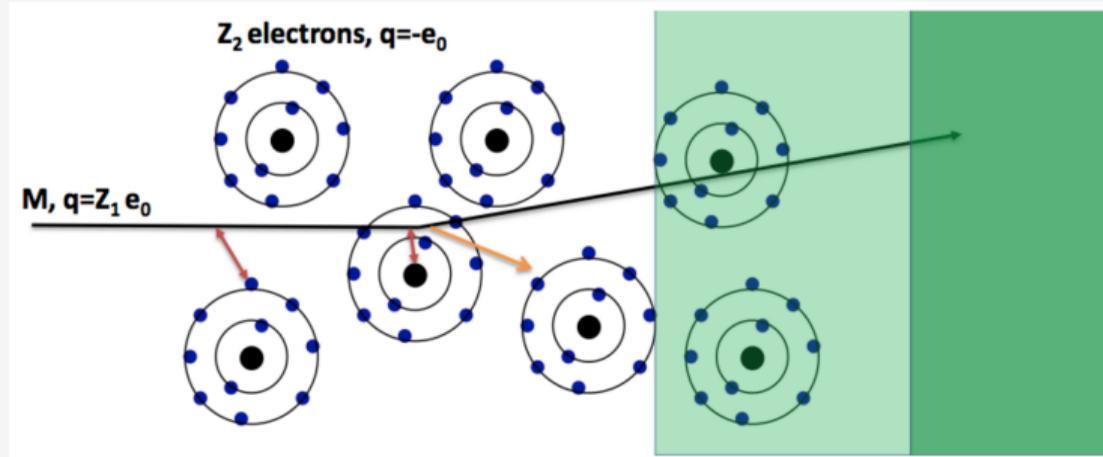
## 3. Forte

→  $n, p, \pi, K^\pm, K^0$

- noyaux atomiques

# Interactions électromagnétiques

1. **excitation atomique** (création de **lumière** !) ... voire **ionisation** (création de **charge**!)
2. déviation dans le champ électrique nucléaire (émission de **photons “bremsstrahlung”** !)
3. **rayonnement de transition** entre deux milieux (émission de **photons** !)



Rayonnement bremsstrahlung  $\propto 1/m^2$  (inertie), typiquement :  $(m_\mu/m_e)^2 \sim 10^6$

$\frac{dE}{dX}$  = énergie perdue par la particule (et donc **cedée au milieu**) par unité de **distance parcourue**

### Quelques remarques:

- $dE/dx$  est aussi appelé **pouvoir d'arrêt** (*stopping power*)

$\frac{dE}{dX}$  = énergie perdue par la particule (et donc **cedée au milieu**) par unité de **distance parcourue**

### Quelques remarques:

- $dE/dx$  est aussi appelé **pouvoir d'arrêt** (*stopping power*)
- plusieurs **mécanismes** peuvent contribuer au  $dE/dx$

$\frac{dE}{dX}$  = énergie perdue par la particule (et donc **cedée au milieu**) par unité de **distance parcourue**

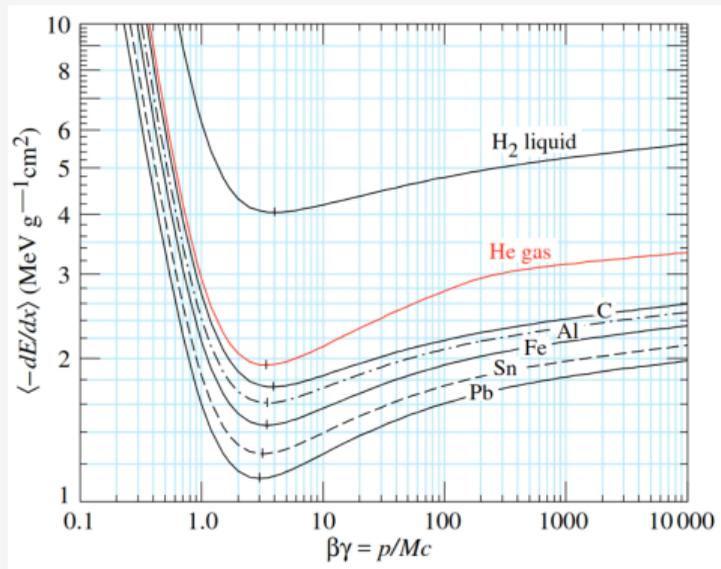
### Quelques remarques:

- $dE/dx$  est aussi appelé **pouvoir d'arrêt** (*stopping power*)
- plusieurs **mécanismes** peuvent contribuer au  $dE/dx$
- dépendance avec les **charges**, la **masse** et la **vitesse** de la particule entrante

$\frac{dE}{dX}$  = énergie perdue par la particule (et donc **cedée au milieu**) par unité de **distance parcourue**

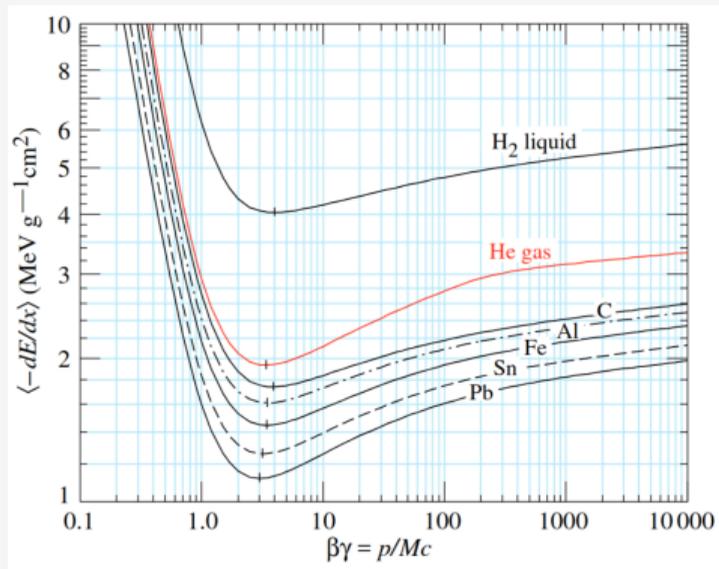
### Quelques remarques:

- $dE/dx$  est aussi appelé **pouvoir d'arrêt** (*stopping power*)
- plusieurs **mécanismes** peuvent contribuer au  $dE/dx$
- dépendance avec les **charges**, la **masse** et la **vitesse** de la particule entrante
- dépendance avec la nature des **matériaux**



## Commentaires

- signification de l'unité ?
- dépend de  $\beta\gamma$  (soit  $v$  pour  $v \ll c$ )
- "depend" du matériaux

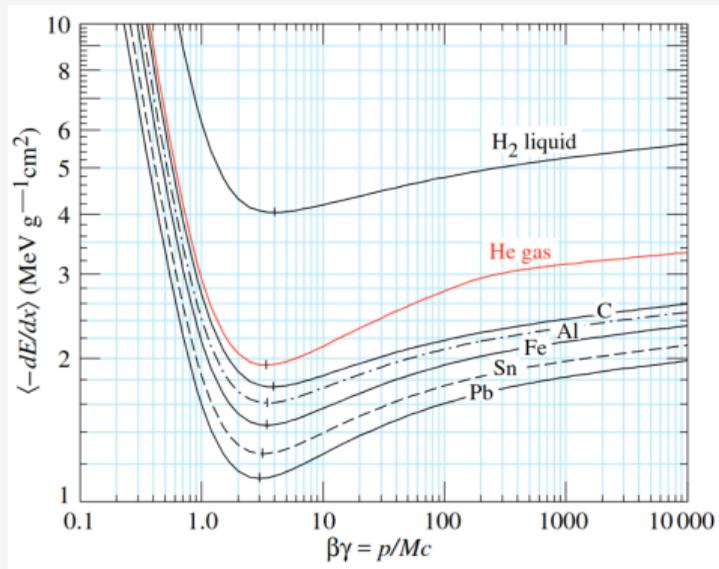


## Commentaires

- signification de l'unité ?
- dépend de  $\beta\gamma$  (soit  $v$  pour  $v \ll c$ )
- "depend" du matériaux

Comportement à faible vitesse:

$$\Delta E = \frac{\Delta p^2}{2m} = \frac{(F\Delta t)^2}{2m} = \frac{(F\Delta x)^2}{2mv^2} \propto 1/\beta^2$$



## Commentaires

- signification de l'unité ?
- dépend de  $\beta\gamma$  (soit  $v$  pour  $v \ll c$ )
- "depend" du matériaux

Comportement à faible vitesse:

$$\Delta E = \frac{\Delta p^2}{2m} = \frac{(F\Delta t)^2}{2m} = \frac{(F\Delta x)^2}{2mv^2} \propto 1/\beta^2$$

- à faible vitesse  $-dE/dx \propto 1/\beta^2$ , à grande vitesse  $-dE/dx \propto \ln(\beta\gamma)$
- entre les deux, **minimum d'ionisation** (MIP) pour  $v \sim 0.96c$  :  $1 - 2 \text{ MeV.cm}^{-1}/(\text{g.cm}^{-3})$
- **linéaire** avec la densité d'électrons dans le milieu :  $\propto Z/A$

**La formule de Bethe-Bloch** décrit les **pertes d'énergie** de particules chargées massive (sauf les électrons) lors de **collisions avec les électrons atomiques** présents dans la matière (phénomène d'ionisation et d'excitation) :

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

Tous les symboles ne sont pas définis ici (discussion qui sort du cadre de cet exposé) mais plus de détails sont donnés dans [Particle Data Group - Passage of Particles Through Matter](#)

Quelle épaisseur de plomb (densité de  $\rho = 11.35 \text{ g/cm}^3$ ) est nécessaire pour arrêter complètement une particule de masse  $m$ , arrivant à  $v \sim 0.96c$  ?

Quelle épaisseur de plomb (densité de  $\rho = 11.35 \text{ g/cm}^3$ ) est nécessaire pour arrêter complètement une particule de masse  $m$ , arrivant à  $v \sim 0.96c$  ?

**1. Énergie incidente**  $E_0 = \gamma m$ ,  $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$ ,  $E_0 = 3.57 m$

Quelle épaisseur de plomb (densité de  $\rho = 11.35 \text{ g/cm}^3$ ) est nécessaire pour arrêter complètement une particule de masse  $m$ , arrivant à  $v \sim 0.96c$  ?

1. **Énergie incidente**  $E_0 = \gamma m$ ,  $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$ ,  $E_0 = 3.57 m$

2. **Pouvoir d'arrêt**  $dE/dx = 1.5 \text{ MeV.cm}^{-1} / (\text{g.cm}^{-3}) \rightarrow \text{PA} = 17 \text{ MeV/cm}$

Quelle épaisseur de plomb (densité de  $\rho = 11.35 \text{ g/cm}^3$ ) est nécessaire pour arrêter complètement une particule de masse  $m$ , arrivant à  $v \sim 0.96c$  ?

1. **Énergie incidente**  $E_0 = \gamma m$ ,  $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$ ,  $E_0 = 3.57 m$

2. **Pouvoir d'arrêt**  $dE/dx = 1.5 \text{ MeV.cm}^{-1} / (\text{g.cm}^{-3}) \rightarrow \text{PA} = 17 \text{ MeV/cm}$

3. **Évolution de l'énergie**  $E_{\text{loss}} = \int_0^L (dE/dx) dx \rightarrow E_{\text{loss}}[\text{MeV}] = L[\text{cm}] \times 17$

Quelle épaisseur de plomb (densité de  $\rho = 11.35 \text{ g/cm}^3$ ) est nécessaire pour arrêter complètement une particule de masse  $m$ , arrivant à  $v \sim 0.96c$  ?

1. **Énergie incidente**  $E_0 = \gamma m$ ,  $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$ ,  $E_0 = 3.57 m$

2. **Pouvoir d'arrêt**  $dE/dx = 1.5 \text{ MeV.cm}^{-1} / (\text{g.cm}^{-3}) \rightarrow \text{PA} = 17 \text{ MeV/cm}$

3. **Évolution de l'énergie**  $E_{\text{loss}} = \int_0^L (dE/dx) dx \rightarrow E_{\text{loss}}[\text{MeV}] = L[\text{cm}] \times 17$

4. **Résultat**  $E_{\text{loss}} = E_0 \rightarrow L[\text{cm}] = \frac{3.57}{17} m[\text{MeV}]$

Quelle épaisseur de plomb (densité de  $\rho = 11.35 \text{ g/cm}^3$ ) est nécessaire pour arrêter complètement une particule de masse  $m$ , arrivant à  $v \sim 0.96c$  ?

1. **Énergie incidente**  $E_0 = \gamma m$ ,  $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$ ,  $E_0 = 3.57 m$

2. **Pouvoir d'arrêt**  $dE/dx = 1.5 \text{ MeV.cm}^{-1} / (\text{g.cm}^{-3}) \rightarrow \text{PA} = 17 \text{ MeV/cm}$

3. **Évolution de l'énergie**  $E_{\text{loss}} = \int_0^L (dE/dx) dx \rightarrow E_{\text{loss}}[\text{MeV}] = L[\text{cm}] \times 17$

4. **Résultat**  $E_{\text{loss}} = E_0 \rightarrow L[\text{cm}] = \frac{3.57}{17} m[\text{MeV}]$

5. **Application numériques:**

- muon ( $m = 105 \text{ MeV}$ ) :  $L_\mu = 22 \text{ cm}$
- pion ( $m = 139 \text{ MeV}$ ) :  $L_\pi = 30 \text{ cm}$
- proton ( $m = 10^3 \text{ MeV}$ ) :  $L_p = 2.1 \text{ m}$

Quelle épaisseur de plomb (densité de  $\rho = 11.35 \text{ g/cm}^3$ ) est nécessaire pour arrêter complètement une particule de masse  $m$ , arrivant à  $v \sim 0.96c$  ?

1. **Énergie incidente**  $E_0 = \gamma m$ ,  $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$ ,  $E_0 = 3.57 m$

2. **Pouvoir d'arrêt**  $dE/dx = 1.5 \text{ MeV.cm}^{-1} / (\text{g.cm}^{-3}) \rightarrow \text{PA} = 17 \text{ MeV/cm}$

3. **Évolution de l'énergie**  $E_{\text{loss}} = \int_0^L (dE/dx) dx \rightarrow E_{\text{loss}}[\text{MeV}] = L[\text{cm}] \times 17$

4. **Résultat**  $E_{\text{loss}} = E_0 \rightarrow L[\text{cm}] = \frac{3.57}{17} m[\text{MeV}]$

5. **Application numériques:**

- muon ( $m = 105 \text{ MeV}$ ) :  $L_\mu = 22 \text{ cm}$
- pion ( $m = 139 \text{ MeV}$ ) :  $L_\pi = 30 \text{ cm}$
- proton ( $m = 10^3 \text{ MeV}$ ) :  $L_p = 2.1 \text{ m}$

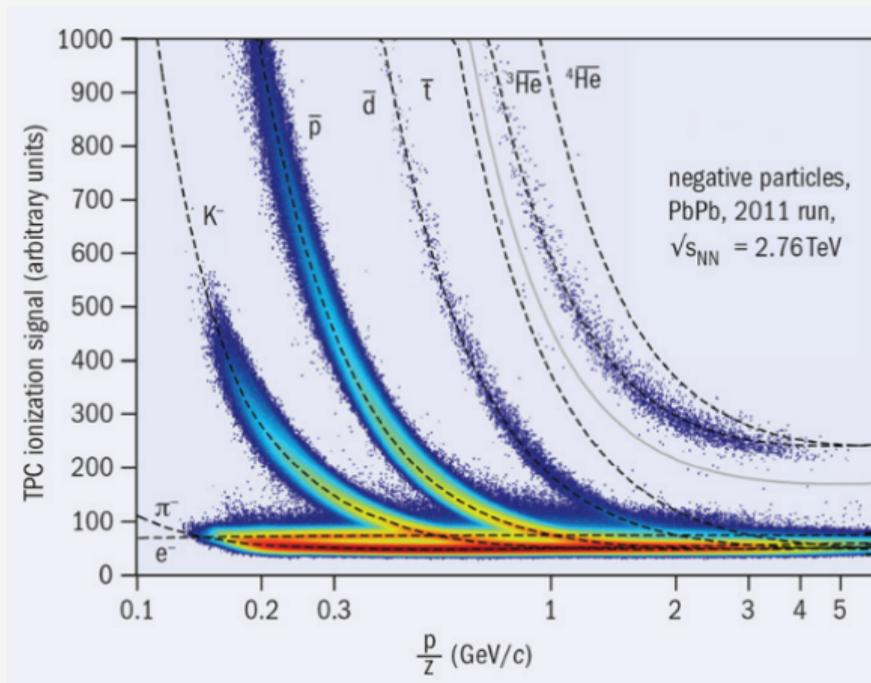
**Attention:** ces raisonnements sont **semi-qualitatifs**, car  $dE/dx$  dépend de  $x$  (via  $\beta$  et donc  $E$ ) et la résolution d'une **équation différentielle** serait en fait nécessaire.

## Identification des particules

Mesure de  $dE/dx \propto 1/\beta^2$  ( $= m^2/p^2$  si  $v \ll c$ ) et de l'impulsion  $p$  permet de déterminer  $m$   
→ identification des particules !

# Identification des particules

Mesure de  $dE/dx \propto 1/\beta^2$  ( $= m^2/p^2$  si  $v \ll c$ ) et de l'impulsion  $p$  permet de déterminer  $m$   
→ identification des particules !



## Rappel et vue d'ensemble des interactions électromagnétiques:

- précédemment : interaction EM avec les électrons du milieu (*collisions*)
- maintenant : interaction EM des noyaux du milieu (déviations → *radiations*)

## Rappel et vue d'ensemble des interactions électromagnétiques:

- précédemment : interaction EM avec les électrons du milieu (**collisions**)
- maintenant : interaction EM des noyaux du milieu (déviation → **radiations**)

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{tot}} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{collisions}} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{radiations}}$$

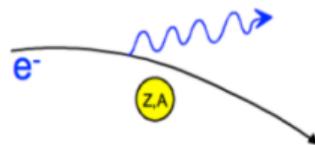
## Rappel et vue d'ensemble des interactions électromagnétiques:

- précédemment : interaction EM avec les électrons du milieu (collisions)
- maintenant : interaction EM des noyaux du milieu (déviations → radiations)

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{tot}} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{collisions}} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{radiations}}$$

## Pertes radiatives:

$$\frac{dE}{dx} = 4\alpha N_A \frac{z^2 Z^2}{A} \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{mc^2}\right)^2 E \ln \frac{183}{Z^{\frac{1}{3}}} \propto \frac{E}{m^2}$$



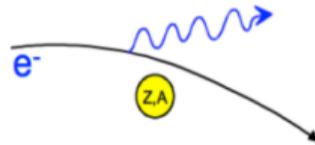
## Rappel et vue d'ensemble des interactions électromagnétiques:

- précédemment : interaction EM avec les électrons du milieu (collisions)
- maintenant : interaction EM des noyaux du milieu (déviation → radiations)

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{tot}} = \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{collisions}} + \left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{radiations}}$$

## Pertes radiatives:

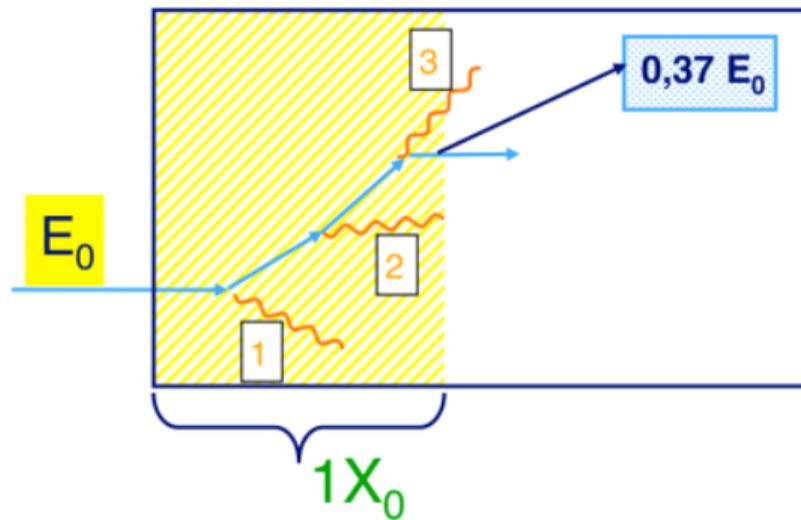
$$\frac{dE}{dx} = 4\alpha N_A \frac{z^2 Z^2}{A} \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{mc^2}\right)^2 E \ln \frac{183}{Z^{\frac{1}{3}}} \propto \frac{E}{m^2}$$



## Deux points importants:

- $\frac{dE}{dx} = \frac{E}{X_0} \rightarrow E(x) = E_0 e^{-x/X_0}$ ,  $X_0$  est la longueur de radiation
- effet  $\propto 1/m^2 \rightarrow$  prédominant pour les électrons et les particules ultra-relativistes

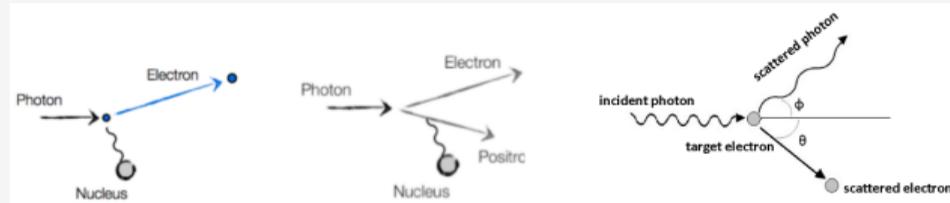
## Longueur de radiation - ordre de grandeur



	Air	Eau	Al	LAr	Fe	Pb	PbWO <sub>4</sub>	LAr/Pb
Z	-	-	13	18	26	82	-	-
X <sub>0</sub> (cm)	30420	36	8,9	14	1,76	0.56	0.89	1.9

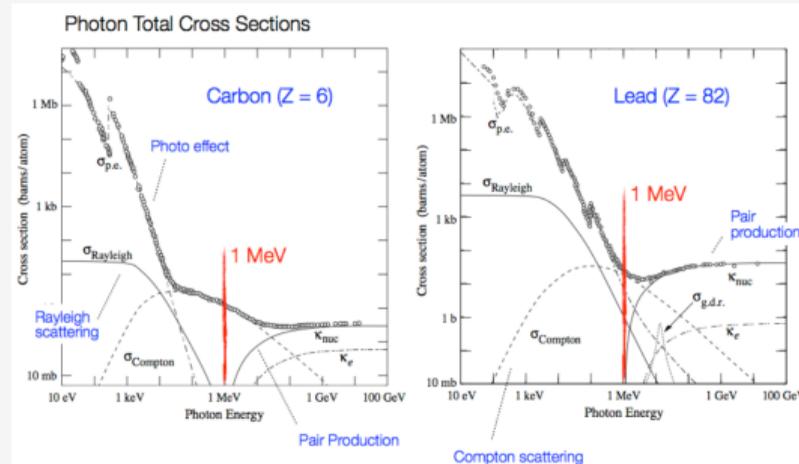
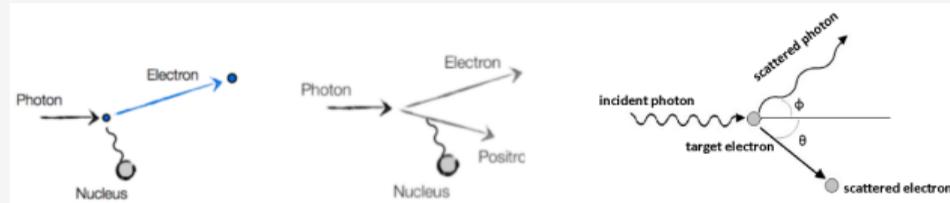
## Exemples de mécanisme d'interaction photon-matière:

(1) effet photo-électrique (2) création de paires  $e^+e^-$  (3) diffusion Compton

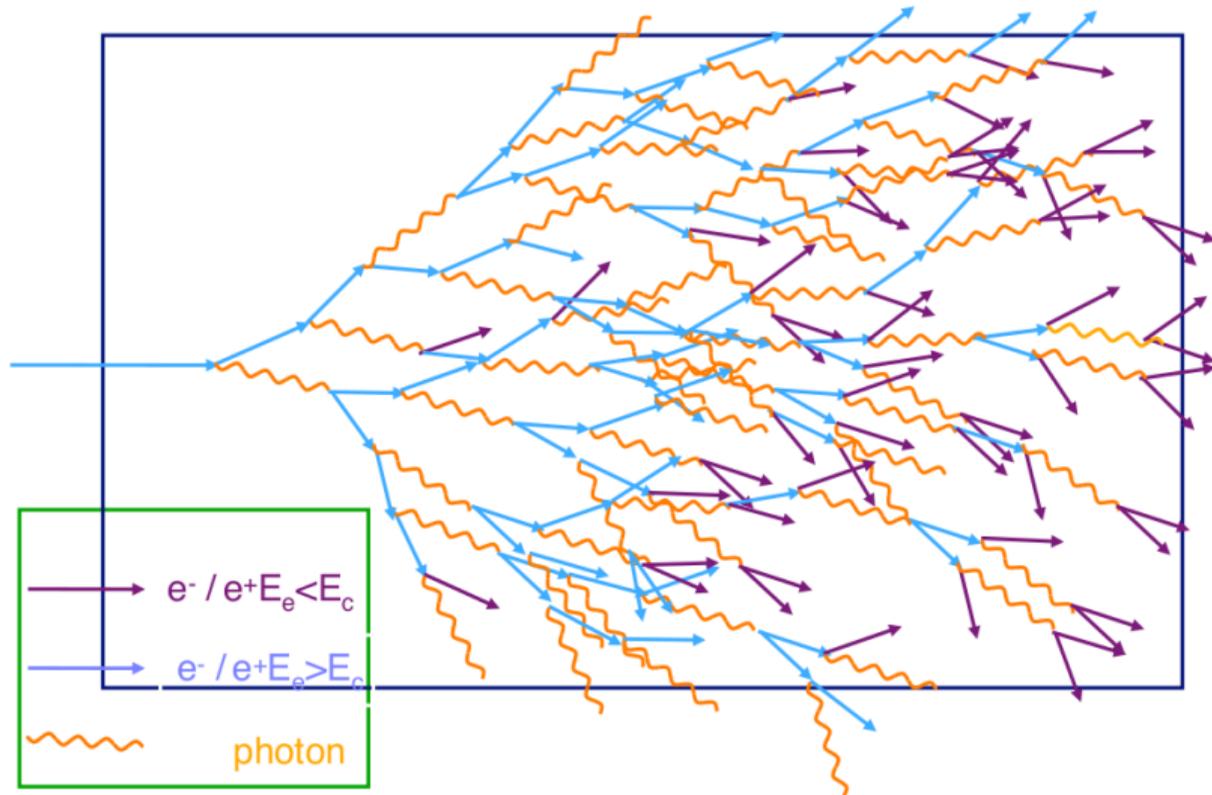


## Exemples de mécanisme d'interaction photon-matière:

(1) effet photo-électrique (2) création de paires  $e^+e^-$  (3) diffusion Compton

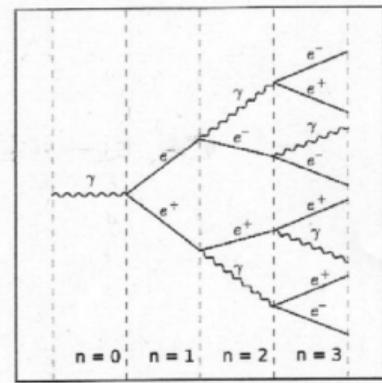


# Évolution des photons et électrons : gerbes électromagnétiques

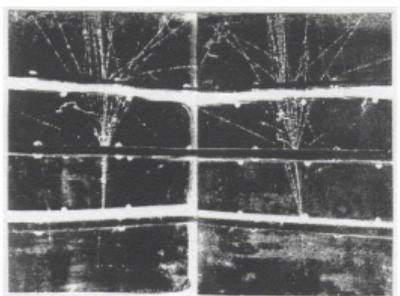


# Gerbes électromagnétiques - ordre de grandeur

material	Z	$X_0$ [ $\text{g cm}^{-2}$ ]	$X_0$ [cm]	$E_c$ [MeV]	$R_M$ [cm]
plastic scint.			34.7	80	9.1
Ar (liquid)	18	19.55	13.9	35	9.5
Fe	26	13.84	1.76	21	1.77
BGO		7.98	1.12	10	2.33
Pb	82	6.37	0.56	7.4	1.60
U	92	6.00	0.32	6.8	1.00
Pb glass (SF5)			2.4	11.8	4.3

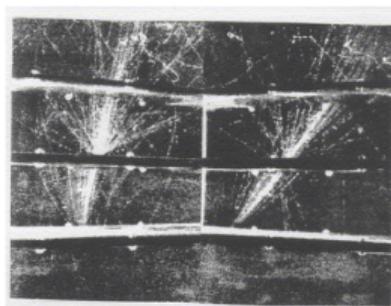


L.Fussel 1939



Electron Shower

L.Fussel 1939



Photon Shower

If energy is equally shared at each step:

- Number of particles :  
 $\rightarrow N = E_0/E_c$
- Depth of the shower :  
 $\rightarrow X_{\max} = X_0 \ln(E_0/E_c) / \ln(2)$

**Example:** 1 GeV photon in Caesium iodide crystal:  
 $E_c \approx 10$  MeV,  $N \approx 100$  particles,  $X_{\max} \approx 6.6 X_0$

# Interactions particule-matière pour la détection

$e^\pm$	$m_e = 0.511 \text{ MeV}$	} EM
$\mu^\pm$	$m_\mu = 105.7 \text{ MeV} \sim 200 m_e$	
$\gamma$	$m_\gamma = 0, Q = 0$	
$\pi^\pm$	$m_\pi = 139.6 \text{ MeV} \sim 270 m_e$	} EM, Strong
$K^\pm$	$m_K = 493.7 \text{ MeV} \sim 1000 m_e \sim 3.5 m_\pi$	
$p^\pm$	$m_p = 938.3 \text{ MeV} \sim 2000 m_e$	
$K^0$	$m_{K^0} = 497.7 \text{ MeV} \quad Q=0$	} Strong
$n$	$m_n = 939.6 \text{ MeV} \quad Q=0$	

## 1. EM pour les particules massives

→  $\mu, \pi, K^\pm, p$

- électrons atomiques (ionisation, excitation)
- noyaux atomiques (rayonnement de freinage)

## 2. EM pour les particules de masse nulle

→  $e, \gamma$

- électrons atomiques (ionisation, excitation)
- noyaux atomiques (rayonnement de freinage)

# Interactions particule-matière pour la détection

$e^\pm$	$m_e = 0.511 \text{ MeV}$	} EM
$\mu^\pm$	$m_\mu = 105.7 \text{ MeV} \sim 200 m_e$	
$\gamma$	$m_\gamma = 0, Q = 0$	
$\pi^\pm$	$m_\pi = 139.6 \text{ MeV} \sim 270 m_e$	} EM, Strong
$K^\pm$	$m_K = 493.7 \text{ MeV} \sim 1000 m_e \sim 3.5 m_\pi$	
$p^\pm$	$m_p = 938.3 \text{ MeV} \sim 2000 m_e$	
$K^0$	$m_{K^0} = 497.7 \text{ MeV} \quad Q=0$	} Strong
$n$	$m_n = 939.6 \text{ MeV} \quad Q=0$	

## 1. EM pour les particules massives

→  $\mu, \pi, K^\pm, p$

- électrons atomiques (ionisation, excitation)
- noyaux atomiques (rayonnement de freinage)

## 2. EM pour les particules de masse nulle

→  $e, \gamma$

- électrons atomiques (ionisation, excitation)
- noyaux atomiques (rayonnement de freinage)

Rappel: il faut 2.1 m de plomb pour arrêter un proton de  $\sim 3 \text{ GeV}$  (au LHC,  $\sqrt{s} = 13000 \text{ GeV}$ )

# Interactions particule-matière pour la détection

$e^\pm$	$m_e = 0.511 \text{ MeV}$	} EM
$\mu^\pm$	$m_\mu = 105.7 \text{ MeV} \sim 200 m_e$	
$\gamma$	$m_\gamma = 0, Q = 0$	
$\pi^\pm$	$m_\pi = 139.6 \text{ MeV} \sim 270 m_e$	} EM, Strong
$K^\pm$	$m_K = 493.7 \text{ MeV} \sim 1000 m_e \sim 3.5 m_\pi$	
$p^\pm$	$m_p = 938.3 \text{ MeV} \sim 2000 m_e$	
$K^0$	$m_{K^0} = 497.7 \text{ MeV} \quad Q=0$	} Strong
$n$	$m_n = 939.6 \text{ MeV} \quad Q=0$	

## 1. EM pour les particules massives

→  $\mu, \pi, K^\pm, p$

- électrons atomiques (ionisation, excitation)
- noyaux atomiques (rayonnement de freinage)

## 2. EM pour les particules de masse nulle

→  $e, \gamma$

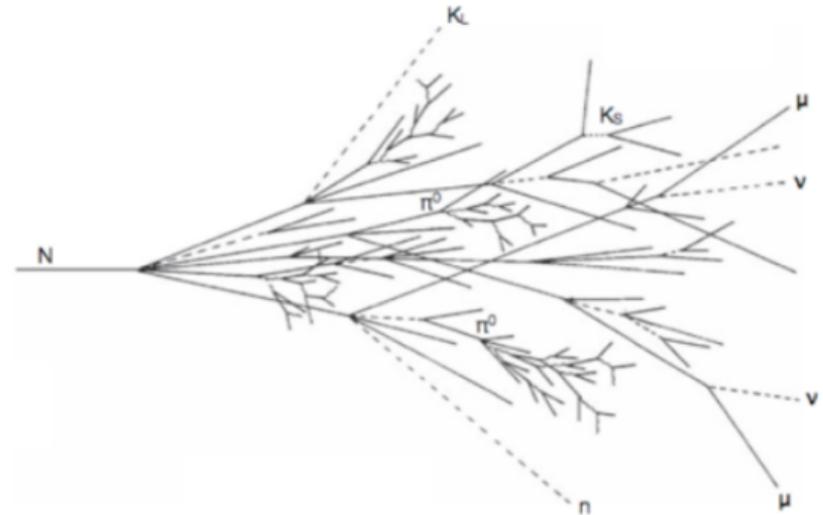
- électrons atomiques (ionisation, excitation)
- noyaux atomiques (rayonnement de freinage)

Rappel: il faut 2.1 m de plomb pour arrêter un proton de  $\sim 3 \text{ GeV}$  (au LHC,  $\sqrt{s} = 13000 \text{ GeV}$ )

## 3. Interaction Forte !

## Shower development:

1.  $p + \text{Nucleus} \rightarrow \text{Pions} + N^* + \dots$
2. Secondary particles ...  
undergo further inelastic collisions until they fall below pion production threshold
3. Sequential decays ...  
 $\pi_0 \rightarrow \gamma\gamma$ : yields electromagnetic shower  
Fission fragments  $\rightarrow \beta$ -decay,  $\gamma$ -decay  
Neutron capture  $\rightarrow$  fission  
Spallation ...



### Cascade energy distribution:

[Example: 5 GeV proton in lead-scintillator calorimeter]

Ionization energy of charged particles ( $p, \pi, \mu$ )	1980 MeV [40%]
Electromagnetic shower ( $\pi^0, \eta^0, e$ )	760 MeV [15%]
Neutrons	520 MeV [10%]
Photons from nuclear de-excitation	310 MeV [ 6%]
Non-detectable energy (nuclear binding, neutrinos)	1430 MeV [29%]
	<hr/>
	5000 MeV [29%]

# Interactions particule-matière pour la détection

$e^\pm$	$m_e = 0.511 \text{ MeV}$	} EM
$\mu^\pm$	$m_\mu = 105.7 \text{ MeV} \sim 200 m_e$	
$\gamma$	$m_\gamma = 0, Q = 0$	
$\pi^\pm$	$m_\pi = 139.6 \text{ MeV} \sim 270 m_e$	} EM, Strong $\sim 3.5 m_\pi$
$K^\pm$	$m_K = 493.7 \text{ MeV} \sim 1000 m_e$	
$p^\pm$	$m_p = 938.3 \text{ MeV} \sim 2000 m_e$	
$K^0$	$m_{K^0} = 497.7 \text{ MeV} \quad Q=0$	} Strong
$n$	$m_n = 939.6 \text{ MeV} \quad Q=0$	

## 1. EM pour les particules massives

→  $\mu, \pi, K^\pm, p$

- électrons atomiques (ionisation, excitation)
- noyaux atomiques (rayonnement de freinage)

## 2. EM pour les particules de masse nulle

→  $e, \gamma$

- électrons atomiques (ionisation, excitation)
- noyaux atomiques (rayonnement de freinage)

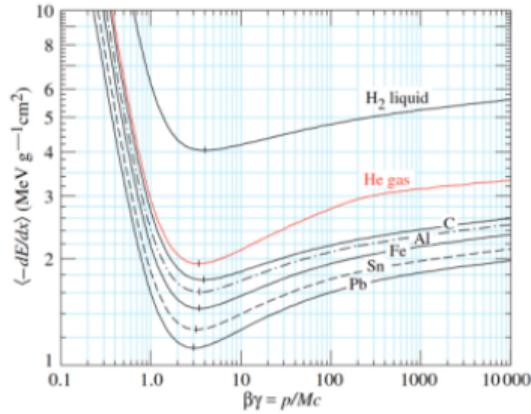
## 3. Forte

→  $n, p, \pi, K^\pm, K^0$

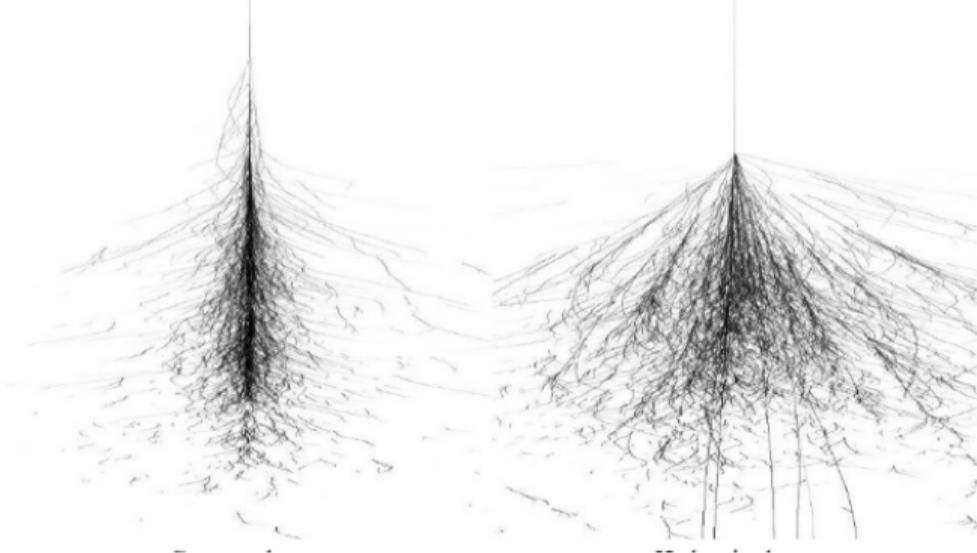
- noyaux atomiques

# À retenir : les 3 grands types d'interaction particule/matière

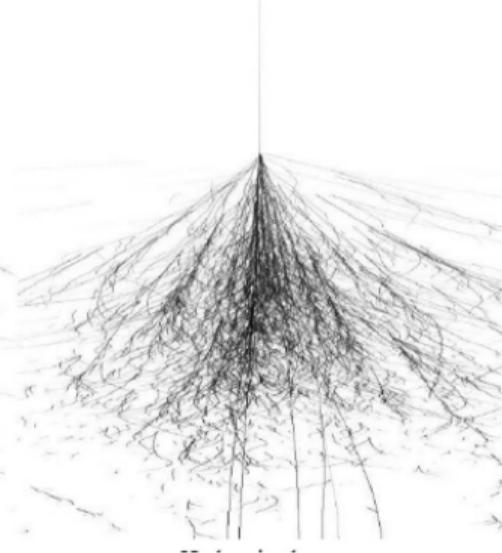
electronic excitation & ionization  
(massive charged particle)



electromagnetic shower  
(electron / photon)



hadronic shower  
(hadrons)



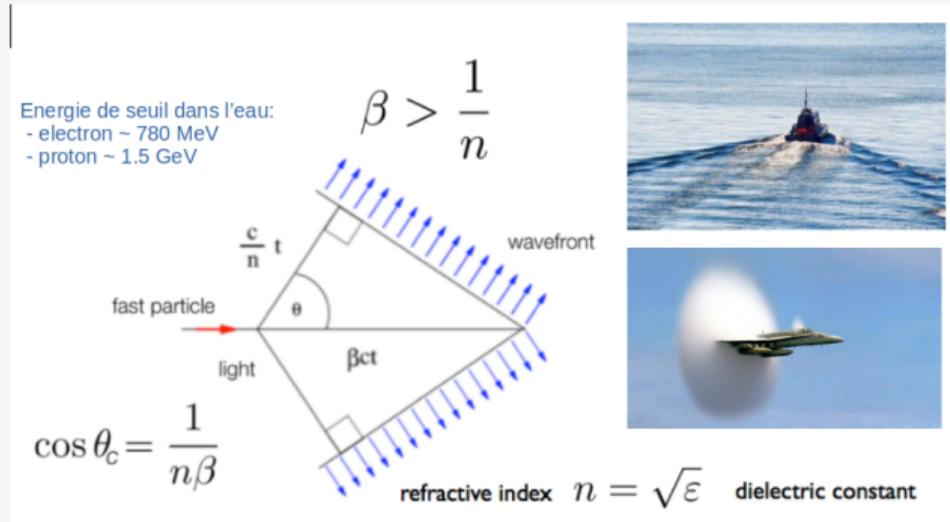
### **Ce qui n'a pas été abordé** (par manque de temps) :

- interaction entre particules neutres non-hadroniques, **les neutrinos**
- **rayonnement de transition** : passage d'une particule entre deux milieux d'indice différent
- **rayonnement Cherenkov** (équivalent du 'bang' du mur du son, pour la lumière)
- ...

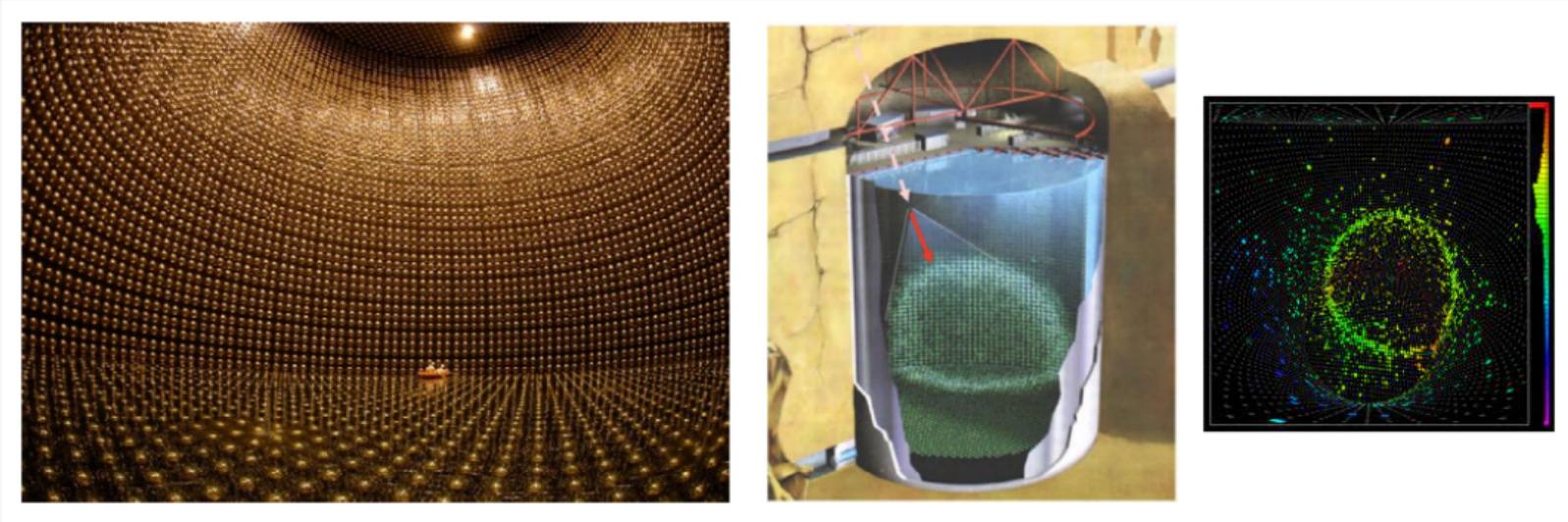
## Il en existe d'autres ...

**Ce qui n'a pas été abordé** (par manque de temps) :

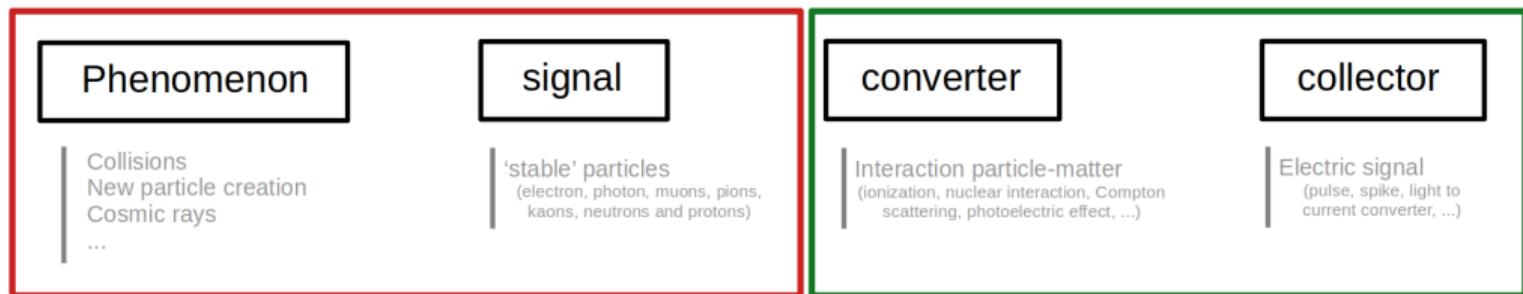
- interaction entre particules neutres non-hadroniques, **les neutrinos**
- **rayonnement de transition** : passage d'une particule entre deux milieux d'indice différent
- **rayonnement Cherenkov** (équivalent du 'bang' du mur du son, pour la lumière)
- ...



# Super Kamiokande et l'effet Cherenkov

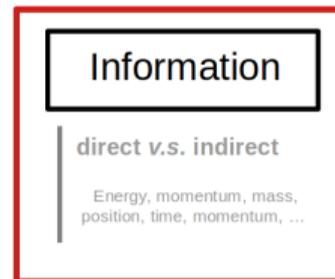


# Demandez le programme !



1. Motivations, and basic principles

2. From particle-matter interactions to electric signals



### Détecteur à ...

(1) ionisation (2) semi-conducteur (3) scintillation (4) Cherenkov

## Détecteur à ...

(1) ionisation (2) semi-conducteur (3) scintillation (4) Cherenkov

(Presque) toujours, le **signal de bout de chaîne** à traiter est un **signal électrique**

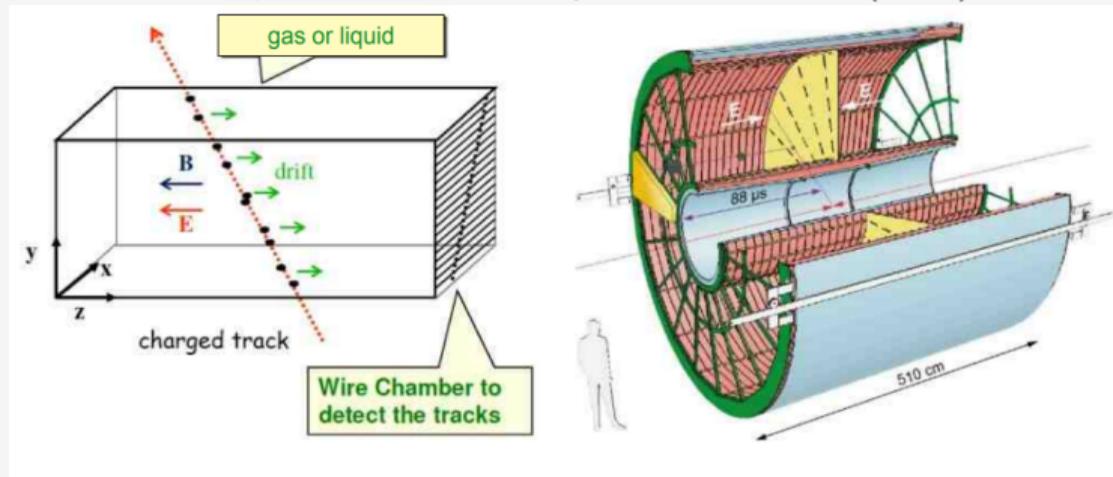
# Collecter le signal

## Détecteur à ...

(1) ionisation (2) semi-conducteur (3) scintillation (4) Cherenkov

(Presque) toujours, le signal de bout de chaîne à traiter est un signal électrique

Exemple d'une *Time Projection Chamber* (TPC)



**Plusieurs types de signaux:** par exemple

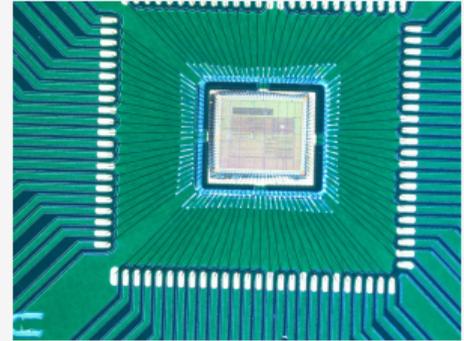
- **impulsion** (échantillonnée et numérisée) → amplitude, phase

**Plusieurs types de signaux:** par exemple

- **impulsion** (échantillonnée et numérisée) → amplitude, phase
- “oui/non” selon que le signal est au dessus d’un seuil

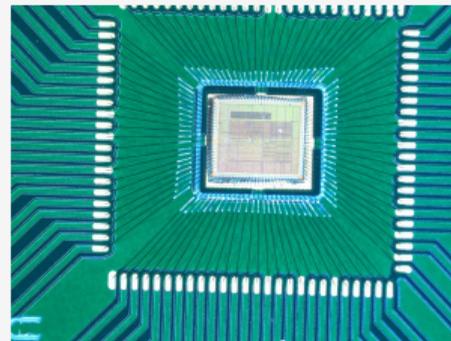
**Plusieurs types de signaux:** par exemple

- **impulsion** (échantillonnée et numérisée) → amplitude, phase
- “oui/non” selon que le signal est au dessus d’un seuil
- électronique de lecture **sur-mesure et sophistiquée**



**Plusieurs types de signaux:** par exemple

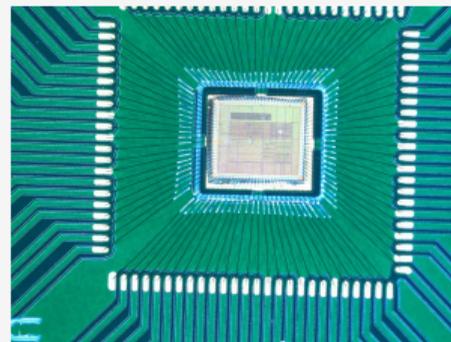
- **impulsion** (échantillonnée et numérisée) → amplitude, phase
- “oui/non” selon que le signal est au dessus d'un seuil
- électronique de lecture **sur-mesure et sophistiquée**



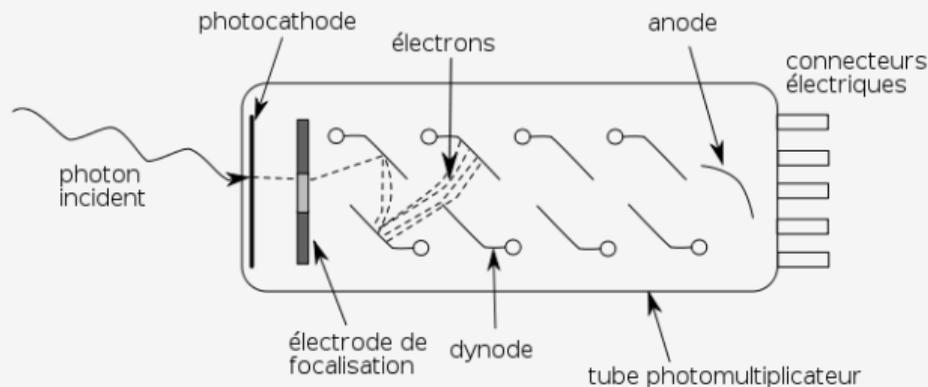
**Convertir la lumière en électricité** (ex. lumière cherenkov, scintillation ...)

**Plusieurs types de signaux:** par exemple

- **impulsion** (échantillonnée et numérisée) → amplitude, phase
- “oui/non” selon que le signal est au dessus d’un seuil
- électronique de lecture **sur-mesure et sophistiquée**

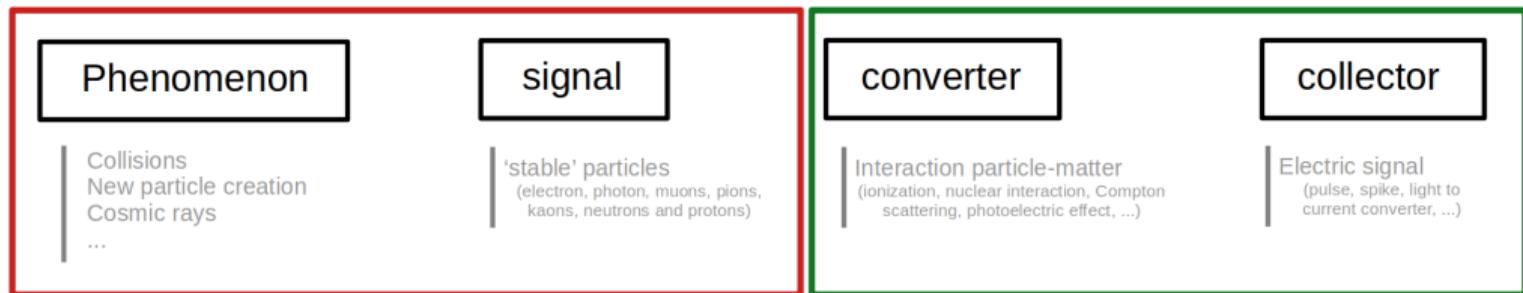


**Convertir la lumière en électricité** (ex. lumière cherenkov, scintillation ...)

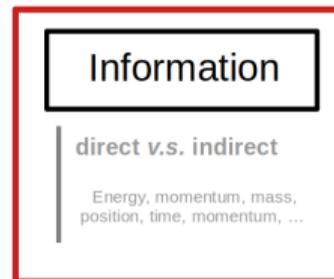


- photo-multiplicateur (à gauche)
- photo-diode
- ...

# Demandez le programme !



1. Motivations, and basic principles
2. From particle-matter interactions to electric signals
3. Examples of typical detectors



## Deux exemples de (sous-)détecteurs

---

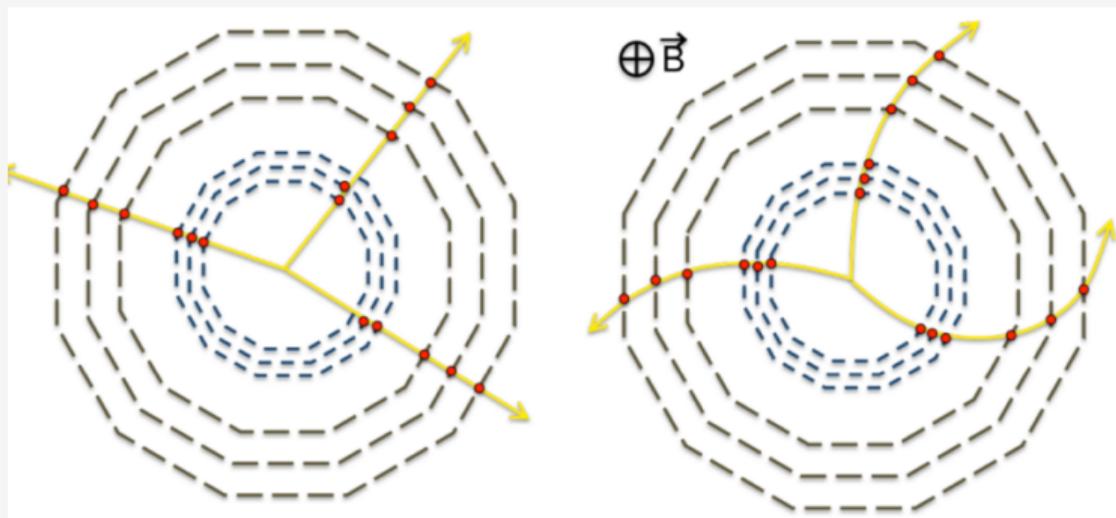
Déterminer la **trajectoire** des particules en les **perturbant le moins possible**

→ analogie: feuille de papiers trouées par le passage d'une bille

# La trajectographie

Déterminer la **trajectoire** des particules en les **perturbant le moins possible**

→ analogie: feuille de papiers trouées par le passage d'une bille



Rayon de courbure  $R$ :

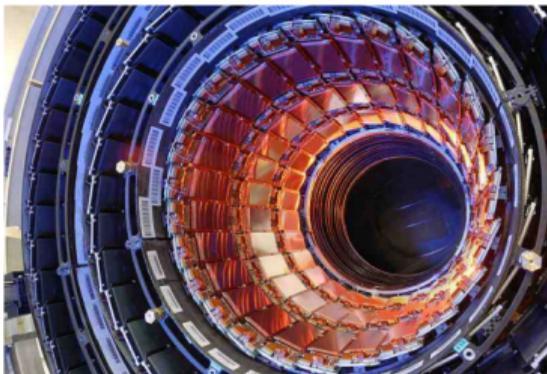
$$R^{-1} = B \frac{Q}{p}$$

## Détecteur à semi-conducteur

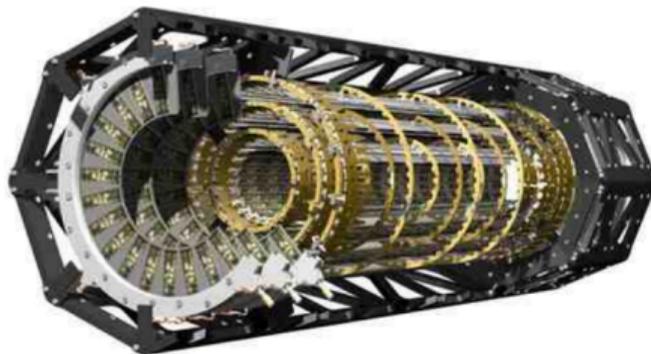
- création de paire electron-trou assez peu couteuse en énergie  $\approx 3 \text{ eV}$
- petite taille de pixels - bonne résolution spatiale  $\approx 20 \mu\text{m}$

## Détecteur à semi-conducteur

- création de paire electron-trou assez peu couteuse en énergie  $\sigma(3 \text{ eV})$
- petite taille de pixels - bonne résolution spatiale  $\sigma(20 \mu\text{m})$



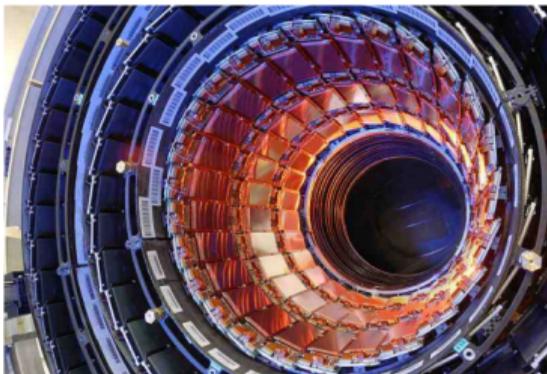
CMS tracker (pixel: 10-20  $\mu\text{m}$ )



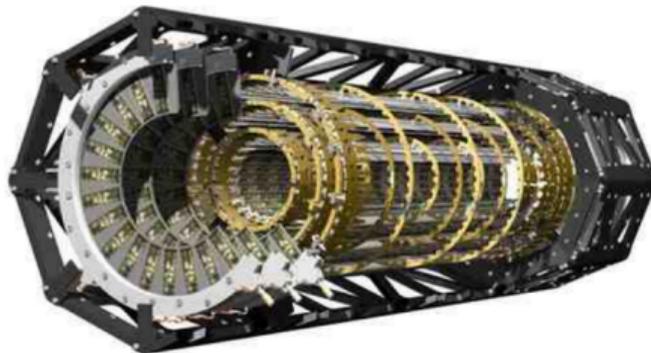
ATLAS pixel (15  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$ )

## Détecteur à semi-conducteur

- création de paire electron-trou assez peu couteuse en énergie  $\sigma(3 \text{ eV})$
- petite taille de pixels - bonne résolution spatiale  $\sigma(20 \mu\text{m})$



CMS tracker (pixel:  $10\text{-}20 \mu\text{m}$ )

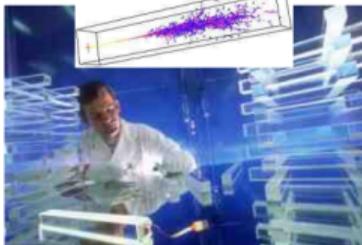
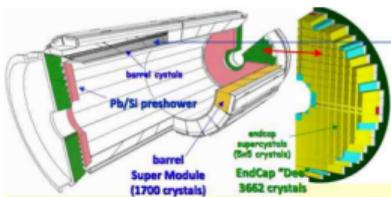


ATLAS pixel ( $15 \mu\text{m}, 100 \mu\text{m}$ )

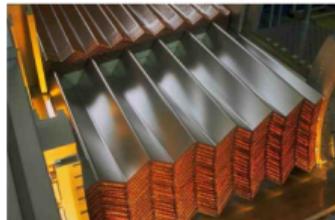
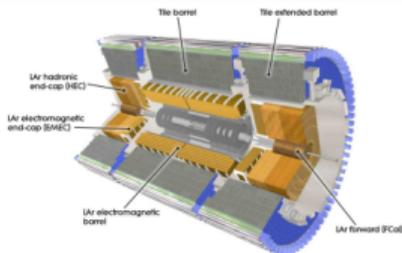
[YouTube Video](#)

Déterminer l'énergie des particules en les **arrêtant totalement**  
→ analogie: tas de sable dans lequel une bille viendrait s'écraser

Déterminer l'énergie des particules en les **arrêtant totalement**  
→ analogie: tas de sable dans lequel une bille viendrait s'écraser



CMS : 76 000 cristaux scintillateurs de  $\text{PbWO}_4$



ATLAS : argon liquide (milieu actif) + plomb (absorbeur)

## Remarques:

- électromag. v.s. hadronique
- calorimétrie à échantillonnage
- résolution typiques :

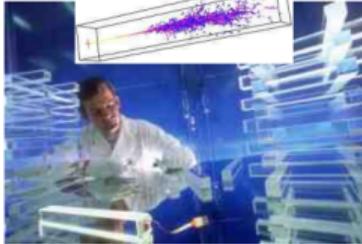
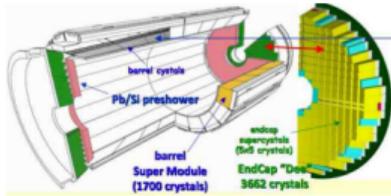
$$\frac{\Delta E}{E} \approx \frac{a}{\sqrt{E}} + \frac{b}{E}$$

$$a \sim o(3 - 10\% \sqrt{\text{GeV}}),$$

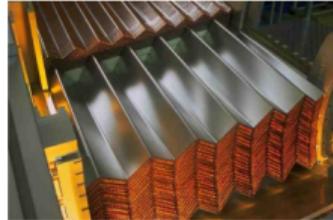
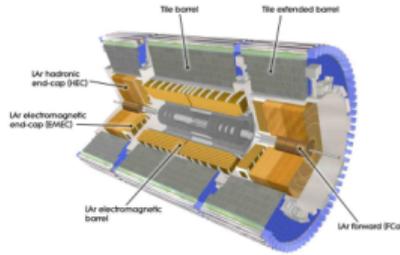
$$b \sim o(0.15 \text{ GeV})$$

- étalonnage nécessaire !

Déterminer l'énergie des particules en les **arrêtant totalement**  
→ analogie: tas de sable dans lequel une bille viendrait s'écraser



CMS : 76 000 cristaux scintillateurs de  $\text{PbWO}_4$



ATLAS : argon liquide (milieu actif) + plomb (absorbeur)

## Remarques:

- électromag. v.s. hadronique
- calorimétrie à échantillonnage
- résolution typiques :

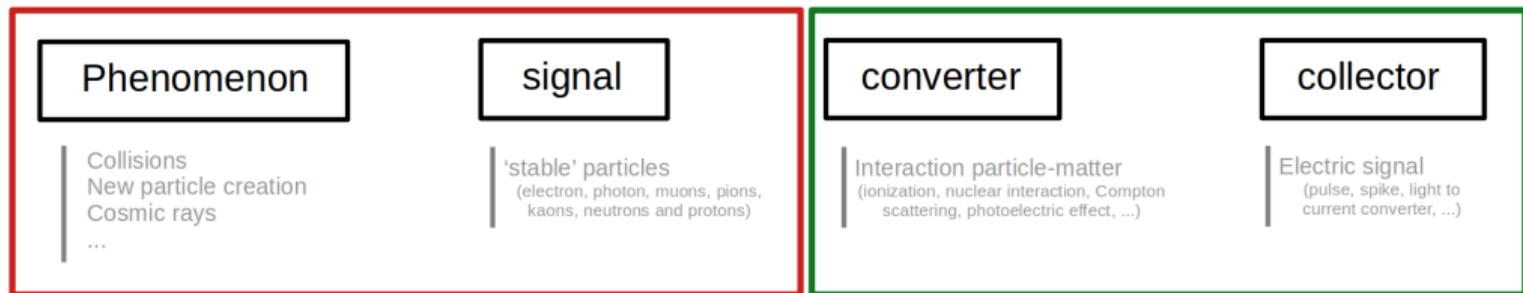
$$\frac{\Delta E}{E} \approx \frac{a}{\sqrt{E}} + \frac{b}{E}$$

$$a \sim o(3 - 10\% \sqrt{\text{GeV}}),$$

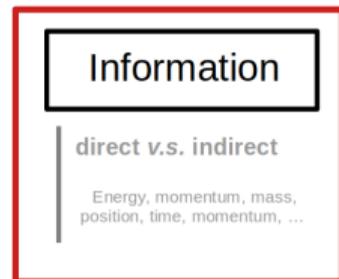
$$b \sim o(0.15 \text{ GeV})$$

- étalonnage nécessaire !

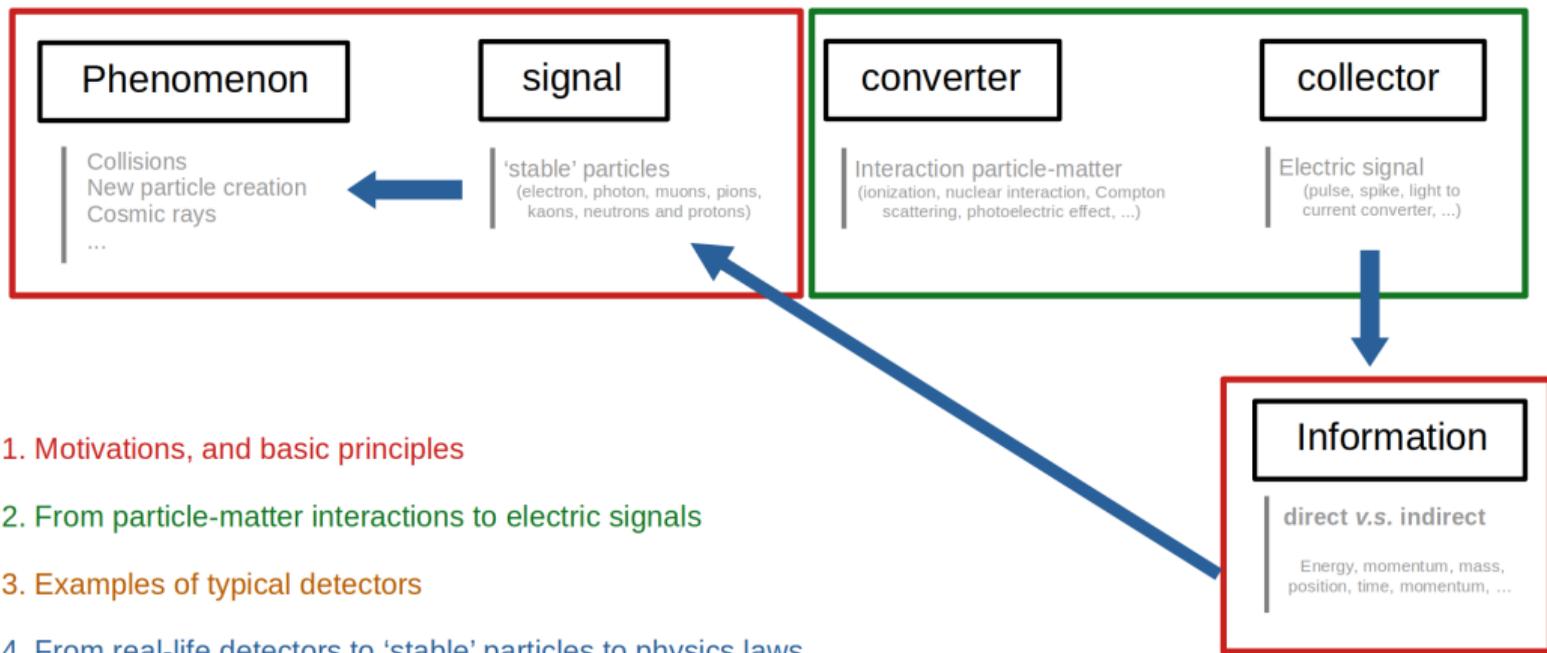
# Demandez le programme !



1. Motivations, and basic principles
2. From particle-matter interactions to electric signals
3. Examples of typical detectors



# Demandez le programme !



1. Motivations, and basic principles
2. From particle-matter interactions to electric signals
3. Examples of typical detectors
4. From real-life detectors to 'stable' particles to physics laws

## Des signaux aux lois physiques

---

But: ne pas être exhaustif, mais “détailler” un exemple réaliste avec tous les maillons de la chaîne.

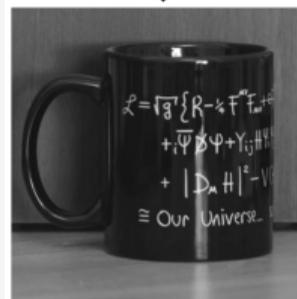
→ exemple des collisions proton-proton du LHC, mesurées par le détecteur ATLAS

But: ne pas être exhaustif, mais “détailler” un exemple réaliste avec tous les maillons de la chaîne.

→ exemple des collisions proton-proton du LHC, mesurées par le détecteur ATLAS

**Des exemples variés** existent et sont tout aussi intéressants

- expérience de physique nucléaire
- recherche de matière noire
- physique des neutrinos
- astro-particules ( $\gamma$ 's, protons, etc ...)
- onde gravitationnelles
- applications (physique médicale, tomographie muonique, ...)
- ...



**LHC** : Large Hadron Collider (hadron  $\equiv$  état lié de l'interaction forte)

- Collisionneur de proton-proton à une énergie de 13 TeV
- la plus grande énergie (courte distance) sondée sur terre ( $E = h/\lambda$ )

## LHC : Large Hadron Collider (hadron $\equiv$ état lié de l'interaction forte)

- Collisionneur de proton-proton à une énergie de 13 TeV
- la plus grande énergie (courte distance) sondée sur terre ( $E = h/\lambda$ )



### Le LHC en chiffres:

- premières idées: 1984 → premières collisions : 2009
- 9.6 milliard d'Euros
- 100 mètre sous terre
- 1500 aimants supraconducteurs (8.4 T, 11 850 A)
- énergie totale d'un faisceau : 350 MJ
  - énergie d'un TGV roulant à 150 km/h

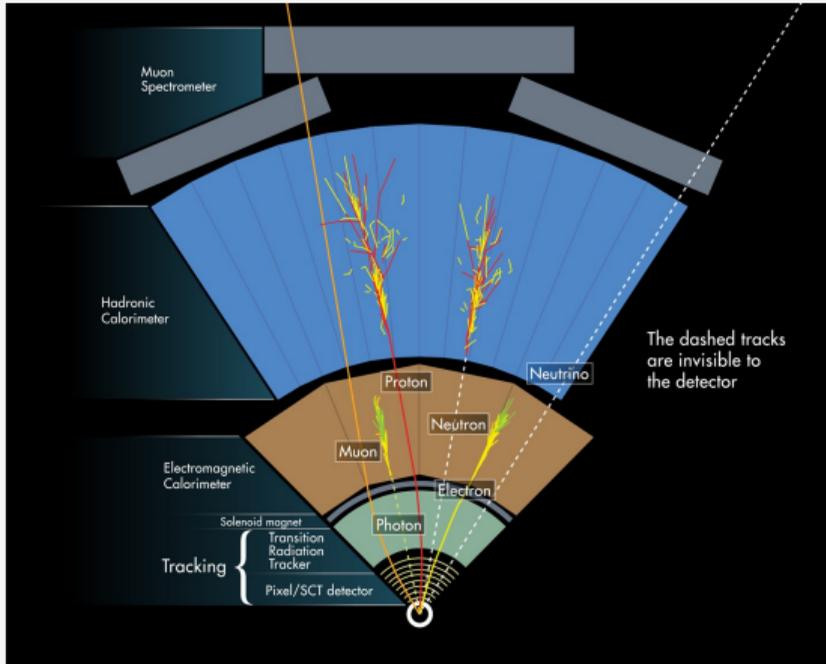
Le LHC est le dernier maillon d'une chaîne complexe d'accélérateurs



Seule l'utilisation conjointe de différents sous-détecteurs permet d'identifier les particules produites dans la collision

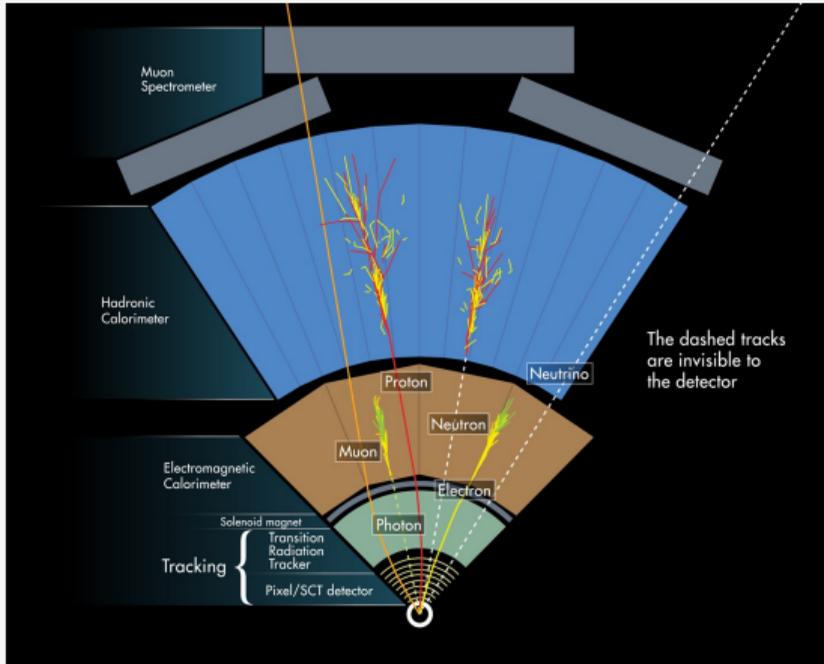
# L'union fait la force ...

Seule l'utilisation conjointe de différents sous-détecteurs permet d'identifier les particules produites dans la collision



# L'union fait la force ...

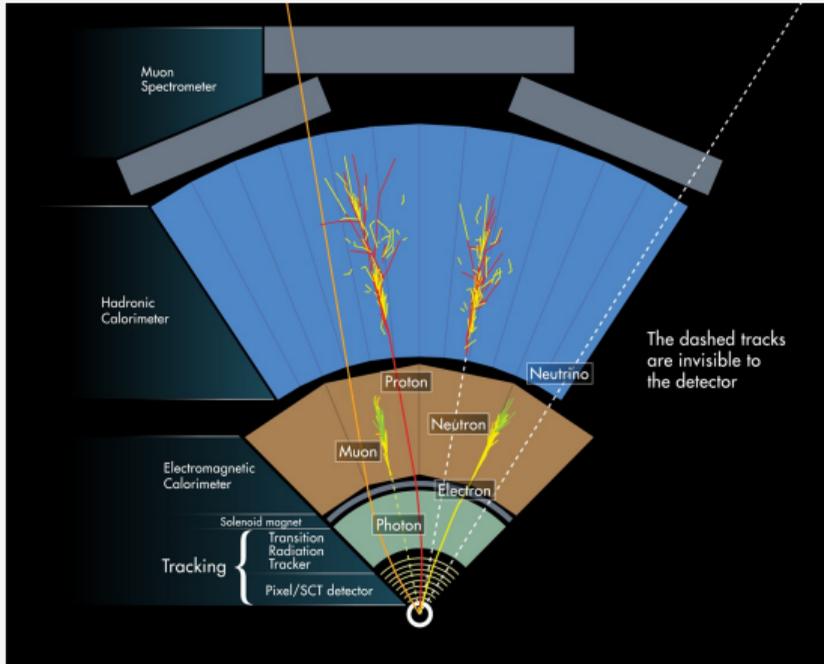
Seule l'utilisation conjointe de différents sous-détecteurs permet d'identifier les particules produites dans la collision



## “Couche d'oignon”

- trajectographe ( $+\vec{B}$ )
- calorimètre
- trajectographe ( $+\vec{B}$ )

Seule l'utilisation conjointe de différents sous-détecteurs permet d'identifier les particules produites dans la collision



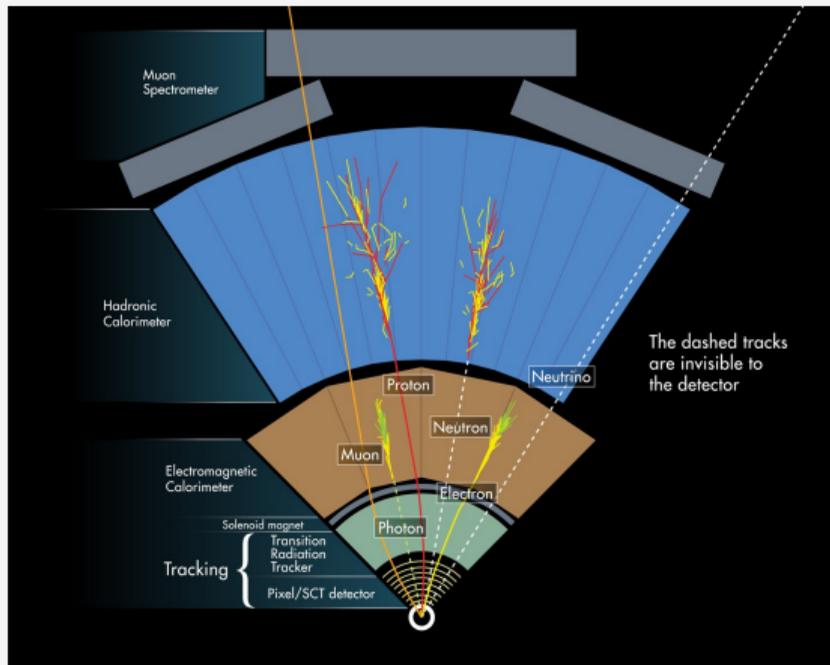
## “Couche d'oignon”

- trajectographe ( $+\vec{B}$ )
- calorimètre
- trajectographe ( $+\vec{B}$ )

## Les neutrinos

Trop peu d'interaction → ce qui manque au bilan d'impulsion

Seule l'utilisation conjointe de différents sous-détecteurs permet d'identifier les particules produites dans la collision



## “Couche d'oignon”

- trajectographe ( $+\vec{B}$ )
- calorimètre
- trajectographe ( $+\vec{B}$ )

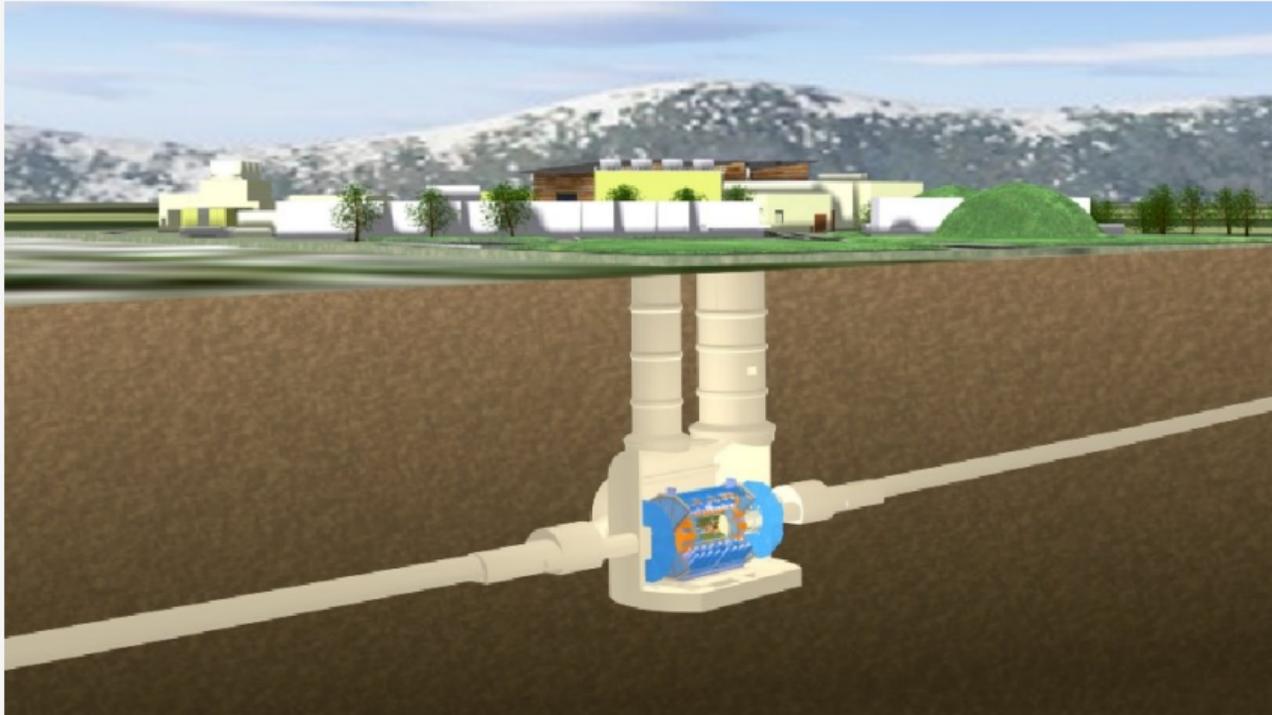
## Les neutrinos

Trop peu d'interaction  $\rightarrow$  ce qui manque au bilan d'impulsion

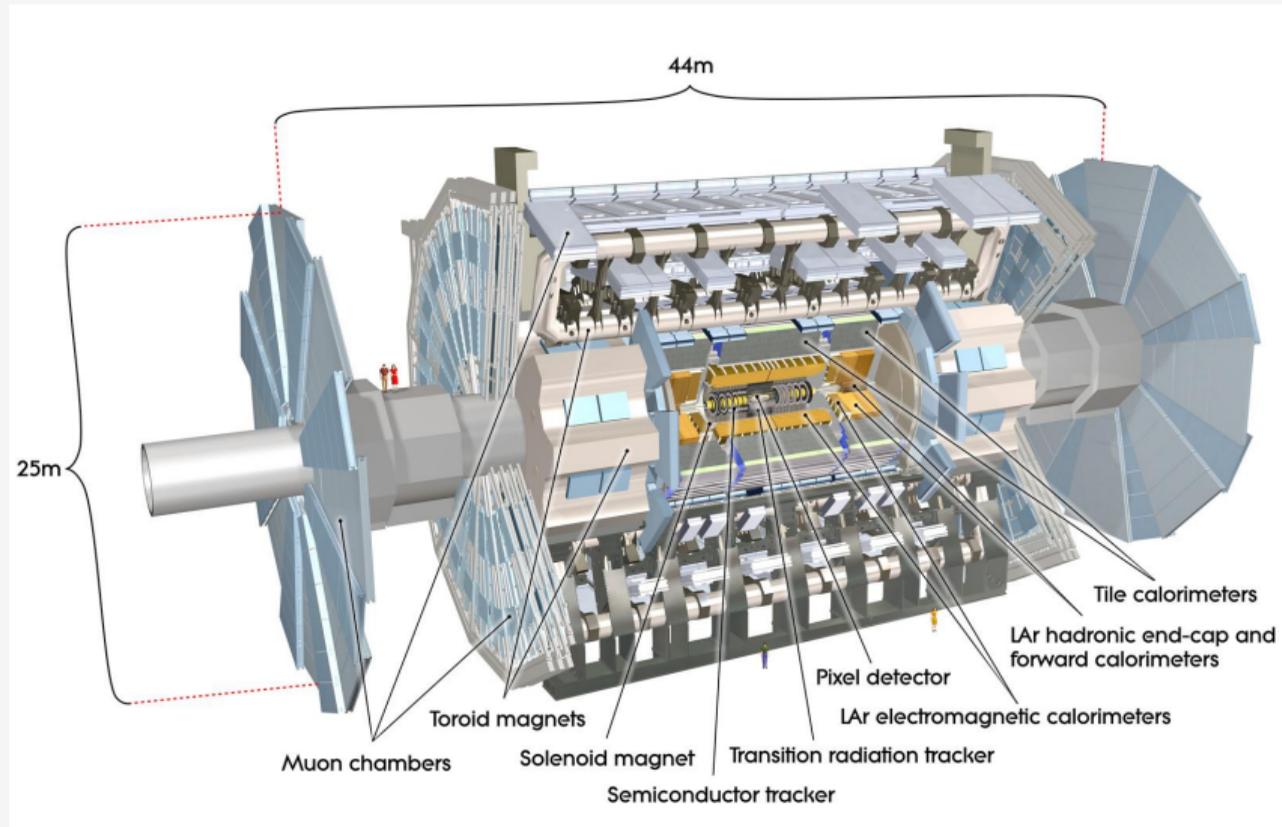
## Les quarks

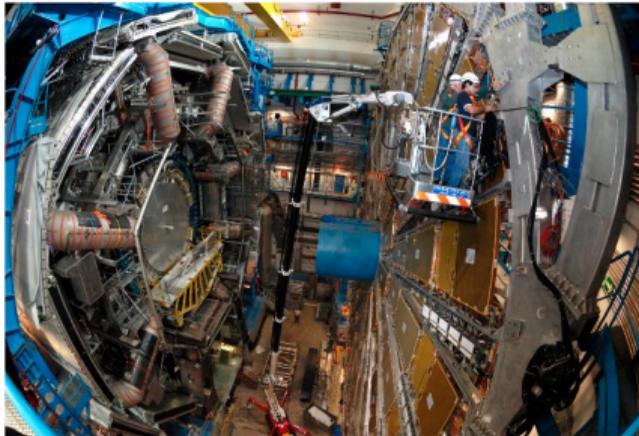
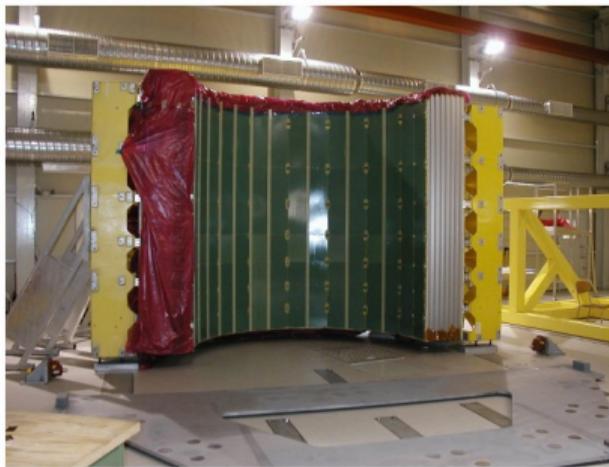
n'existent pas à l'état libre  $\rightarrow$  produit un jet de hadrons

# Le détecteurs ATLAS au complet

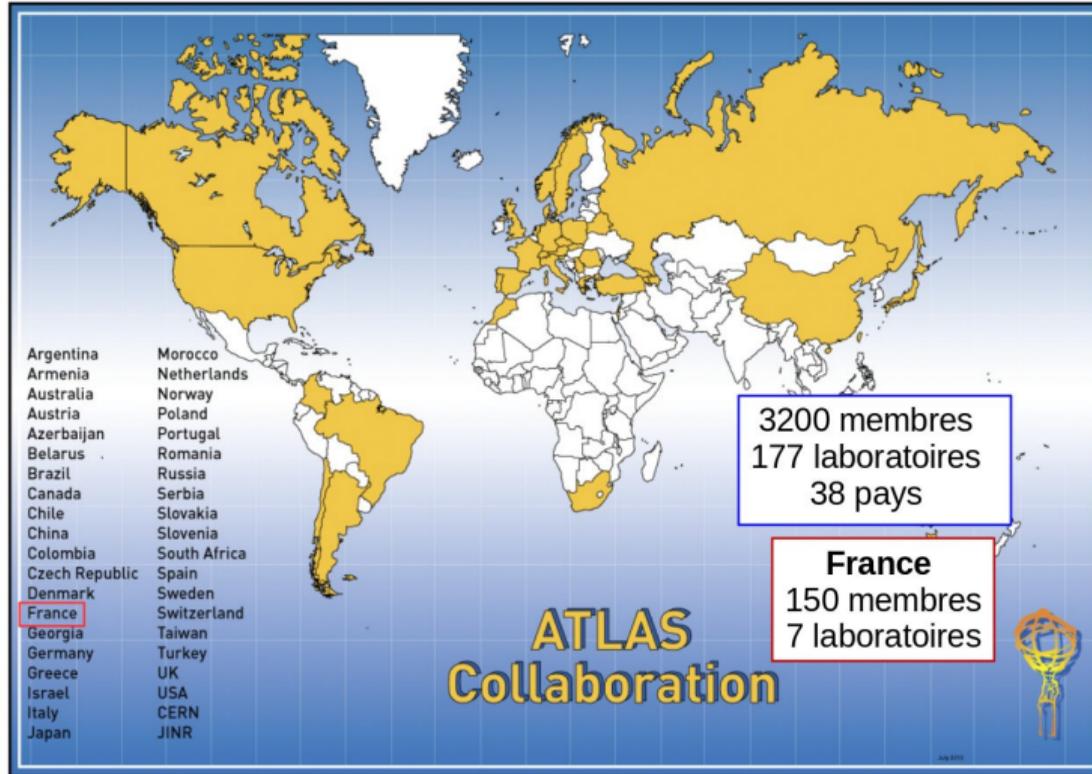


# Le détecteurs ATLAS au complet

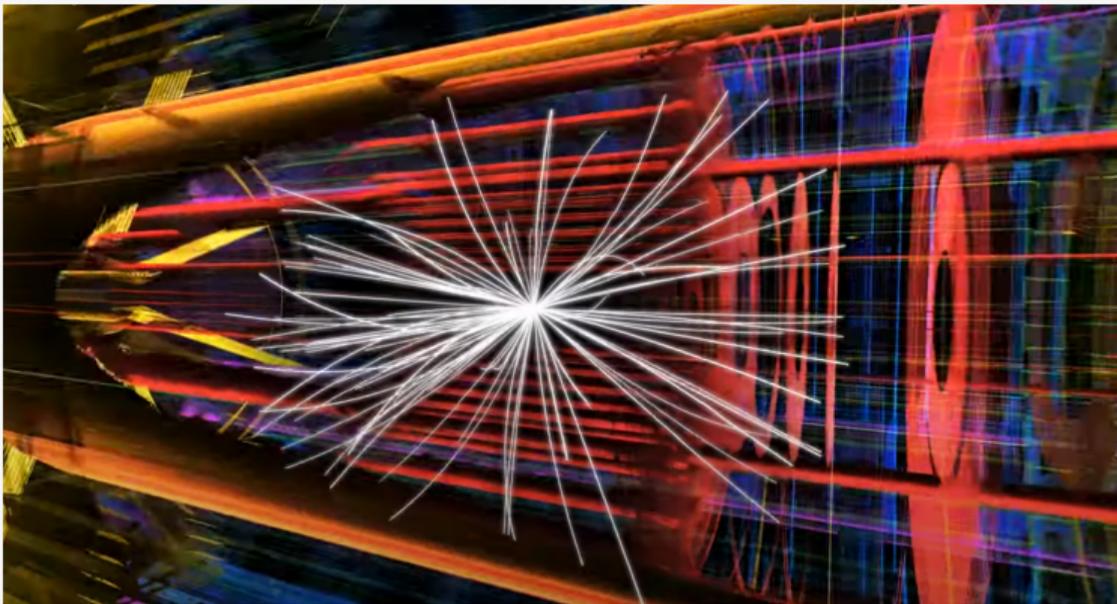




# La collaboration ATLAS



# Simulation animée d'une collision



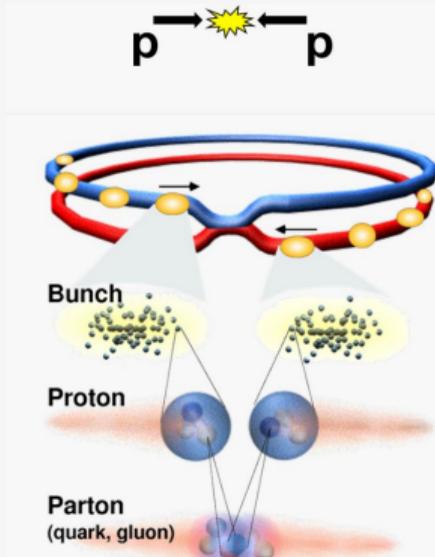
[YouTube Video](#)

### Recherche de phénomènes rares :

- processus *quantique* : collision **unique impossible** à prédire → prédiction des **probabilités**
- **grand nombre de collisions** nécessaire pour tester **la théorie**

## Recherche de phénomènes rares :

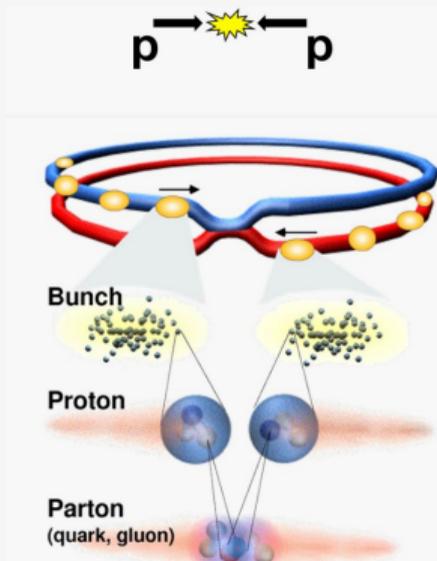
- processus *quantique* : collision **unique impossible** à prédire → prédiction des **probabilités**
- **grand nombre de collisions** nécessaire pour tester **la théorie**



## Recherche de phénomènes rares :

- processus *quantique* : collision **unique impossible** à prédire → prédiction des **probabilités**
- **grand nombre de collisions** nécessaire pour tester **la théorie**

## Contre partie : difficultés expérimentales ...



Fréquence de croisement de paquets : 20 - 40 MHz

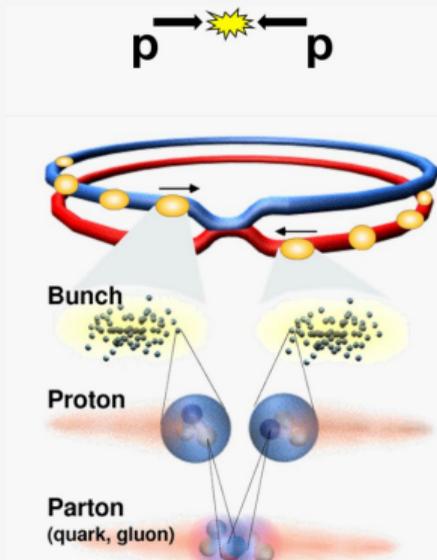
→ capacité de stockage impose l'enregistrement de  
**~1000 collisions / s**

Selection rapide des **collisions intéressantes** basée  
sur une **reconstruction simplifiée**

## Recherche de phénomènes rares :

- processus *quantique* : collision **unique impossible** à prédire → prédiction des **probabilités**
- **grand nombre de collisions** nécessaire pour tester **la théorie**

## Contre partie : difficultés expérimentales ...

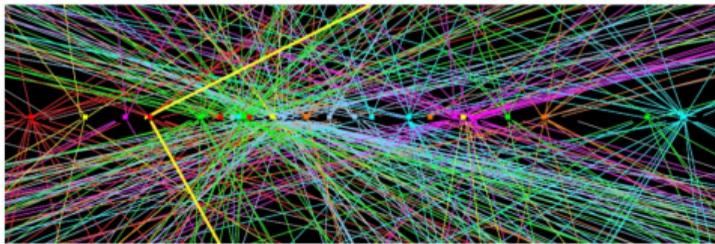


Fréquence de croisement de paquets : **20 - 40 MHz**

→ capacité de stockage impose l'enregistrement de  
**~1000 collisions / s**

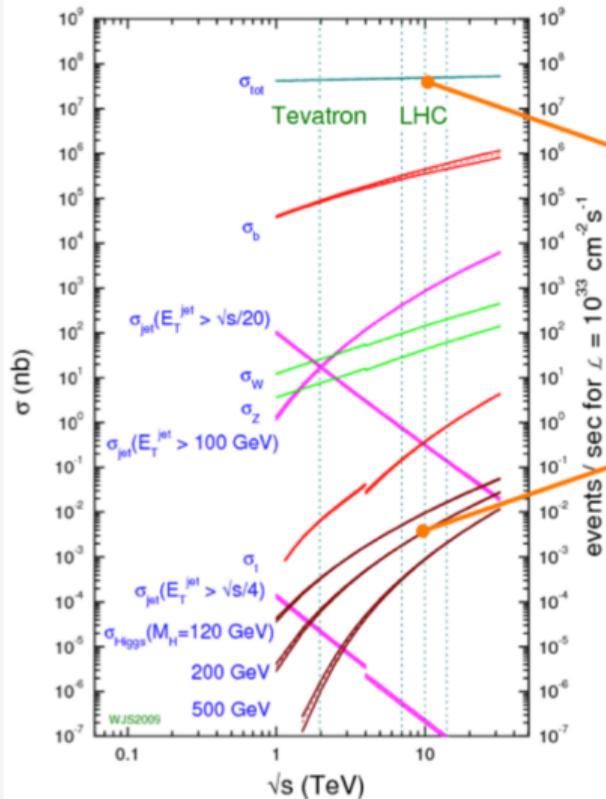
Selection rapide des **collisions intéressantes** basée  
sur une **reconstruction simplifiée**

**20 a 50 interactions p-p** par croisement de paquets



# Section efficaces au LHC

proton - (anti)proton cross sections



$10^8$  events/s

$\sim 10^{10}$

$10^{-2}$  events/s  $\sim$

10 events/min

$[m_H \sim 120 \text{ GeV}]$

0.2%  $H \rightarrow \gamma\gamma$

1.5%  $H \rightarrow ZZ$

**DECLENCHEMENT !  
SELECTION en LIGNE**

## Pourquoi cette étape ?

1. exemple d'une photo : du signal brut à l'identification de l'objet photographié

## Pourquoi cette étape ?

1. exemple d'une photo : du signal brut à l'identification de l'objet photographié
2. les détecteur ne mesurent que des **temps**, des **positions** et des **dépôts d'énergie**
3. **identifier la nature des particules** est indispensable pour **trier les collisions**

## Pourquoi cette étape ?

1. exemple d'une photo : du signal brut à l'identification de l'objet photographié
2. les détecteur ne mesurent que des **temps**, des **positions** et des **dépôts d'énergie**
3. **identifier la nature des particules** est indispensable pour **trier les collisions**

## Les quatre grandes questions:

1. comment trouver les meilleures **trajectoires** possibles à partir d'un nuage de points ?
2. comment identifier les "groupes de dépôt d'énergie" (amas, ou **cluster**) dans le **calorimètre** ?
3. comment **associer les traces aux clusters** pour **identifier la nature** des particules ?
4. comment **mesurer** les **neutrinos** produits dans la collision ?

## Pourquoi cette étape ?

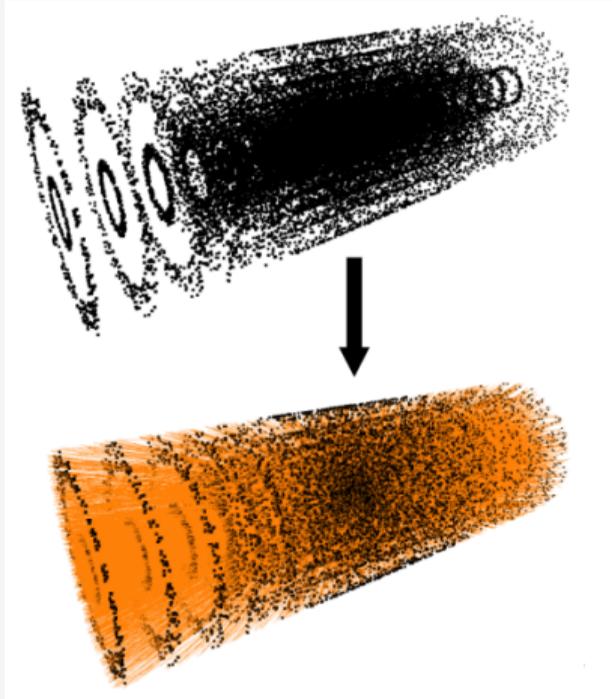
1. exemple d'une photo : du signal brut à l'identification de l'objet photographié
2. les détecteur ne mesurent que des **temps**, des **positions** et des **dépôts d'énergie**
3. **identifier la nature des particules** est indispensable pour **trier les collisions**

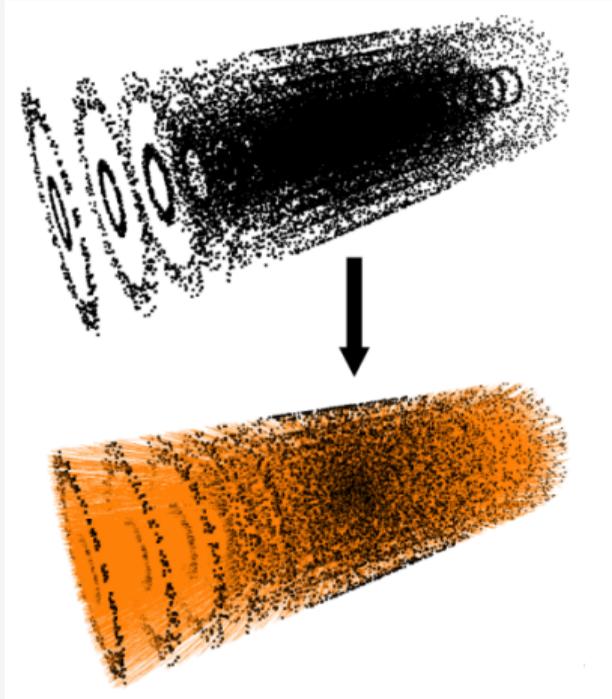
## Les quatre grandes questions:

1. comment trouver les meilleures **trajectoires** possibles à partir d'un nuage de points ?
2. comment identifier les "groupes de dépôt d'énergie" (amas, ou **cluster**) dans le **calorimètre** ?
3. comment **associer les traces aux clusters** pour **identifier la nature** des particules ?
4. comment **mesurer** les **neutrinos** produits dans la collision ?

Techniques d'IA de plus en plus **modernes** → **meilleures performances** (et nouvelles questions)

# Des positions aux trajectoires

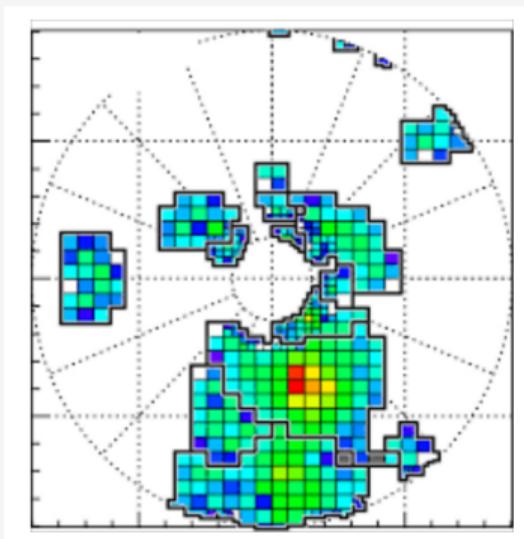




## Plusieurs méthodes possibles:

- ajustement type  $\chi^2$
- filtre de Kalman (approche itérative)
- méthodes de *machine learning*
- ...

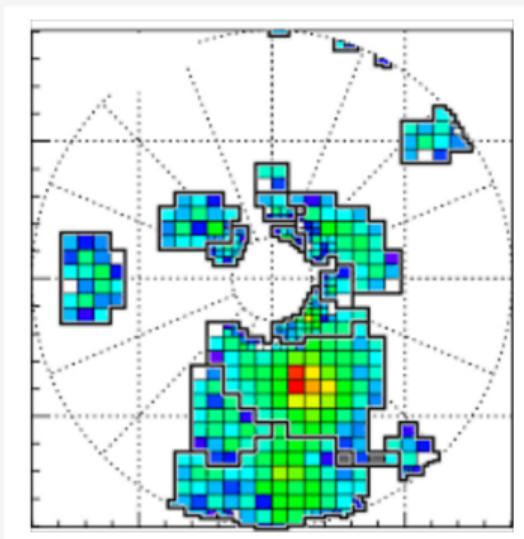
## 1. Trouver les clusters



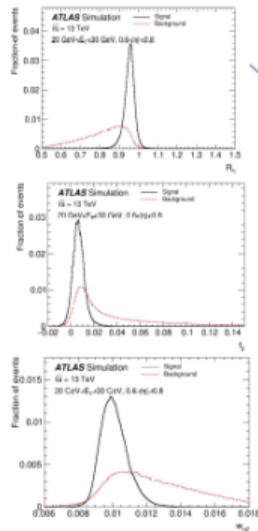
## 2. Identifier les clusters provenant des électrons

(de ceux qui proviennent d'autres particules)

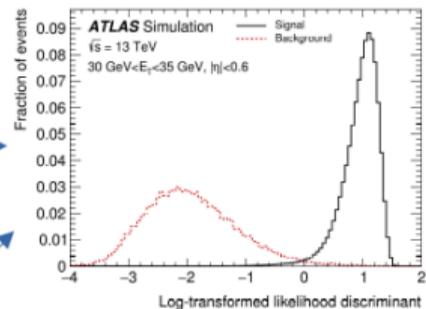
### 1. Trouver les clusters



variables based on calorimeter clusters



— Signal  
- - - Background



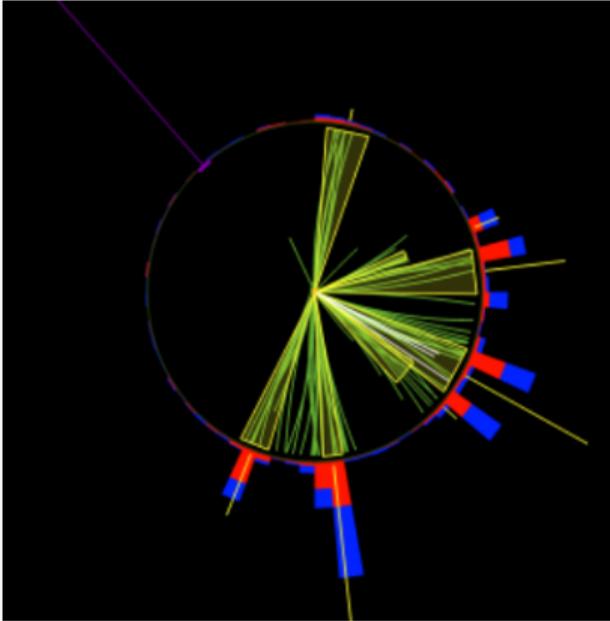






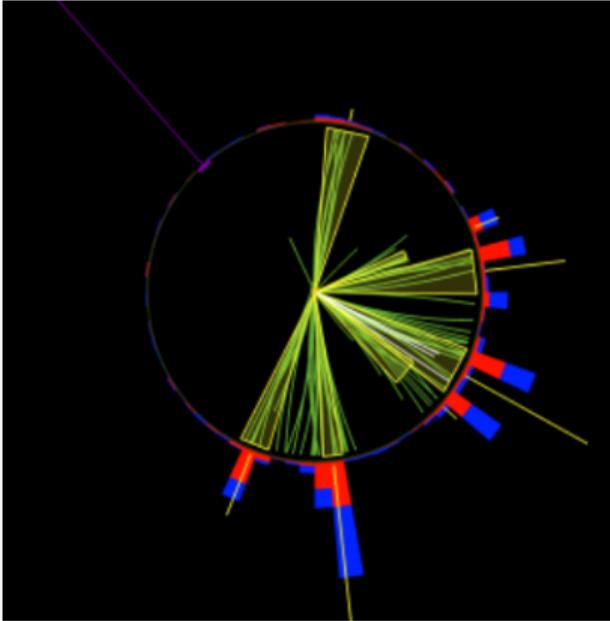
# Comment détecter les neutrinos produits sur collisionneur ?

Neutrinos ( $\nu$ ) = seules particules neutre et non soumises à l'interaction forte.



# Comment détecter les neutrinos produits sur collisionneur ?

Neutrinos ( $\nu$ ) = seules particules neutre et non soumises à l'interaction forte.



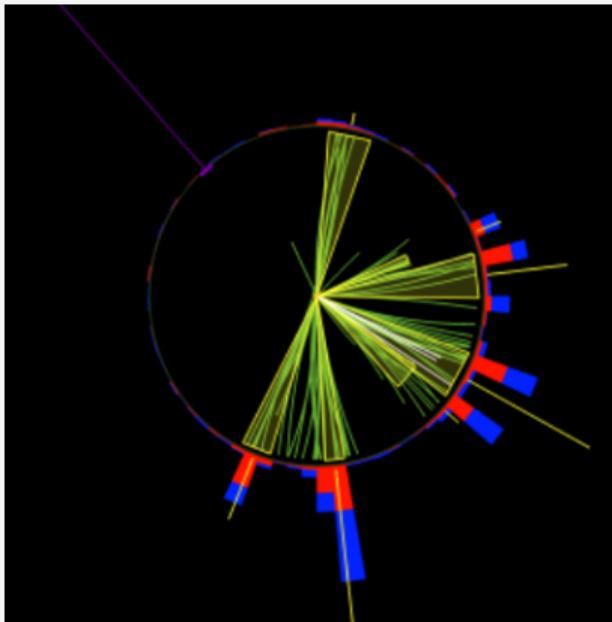
**Conservation de la quantité de mouvement:**

$$\vec{p}_{tot}^{initiale} = \vec{p}_{tot}^{finale} \stackrel{\text{symetric}}{=} \vec{0}$$

$$\vec{p}_{miss} \equiv \sum_{\nu} \vec{p} = - \sum_{\text{detected}} \vec{p}$$

# Comment détecter les neutrinos produits sur collisionneur ?

Neutrinos ( $\nu$ ) = seules particules neutre et non soumises à l'interaction forte.



## Conservation de la quantité de mouvement:

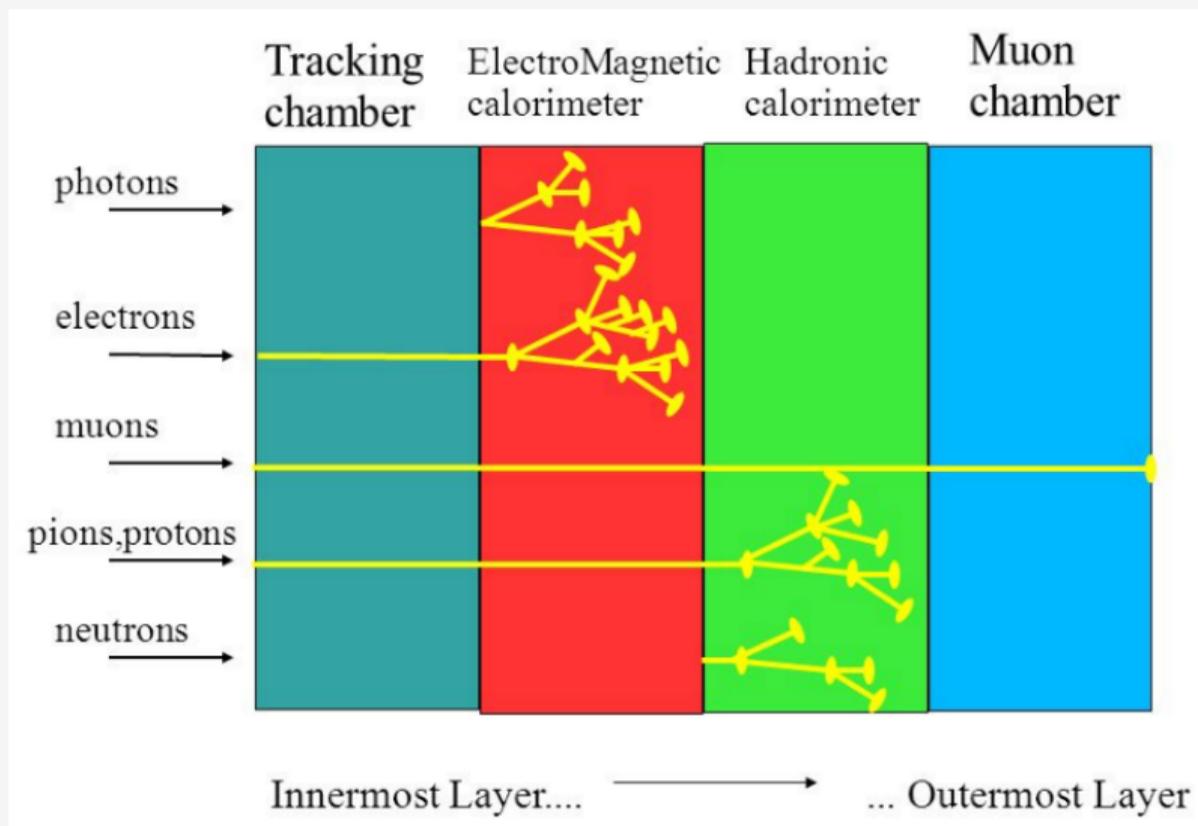
$$\vec{p}_{tot}^{initiale} = \vec{p}_{tot}^{finale} \stackrel{\text{symetric}}{=} \vec{0}$$

$$\vec{p}_{miss} \equiv \sum_{\nu} \vec{p} = - \sum_{\text{detected}} \vec{p}$$

## Difficultés:

- pas de mesure des  $\nu$  individuels !
- sensible à tout le détecteur (résolution !)

## Un schéma à retenir



# Comment “voir” une particule ?

## Selectionner et analyser les collisions

- grand nombres de processus possibles en collisions  $pp$
- identifier les collisions compatibles avec la production de la particule recherchée

# Comment “voir” une particule ?

## Selectionner et analyser les collisions

- grand nombres de processus possibles en collisions  $pp$
- identifier les collisions compatibles avec la production de la particule recherchée

Lien entre la particule **microscopique** et l'aspect **macroscopique** de la collision

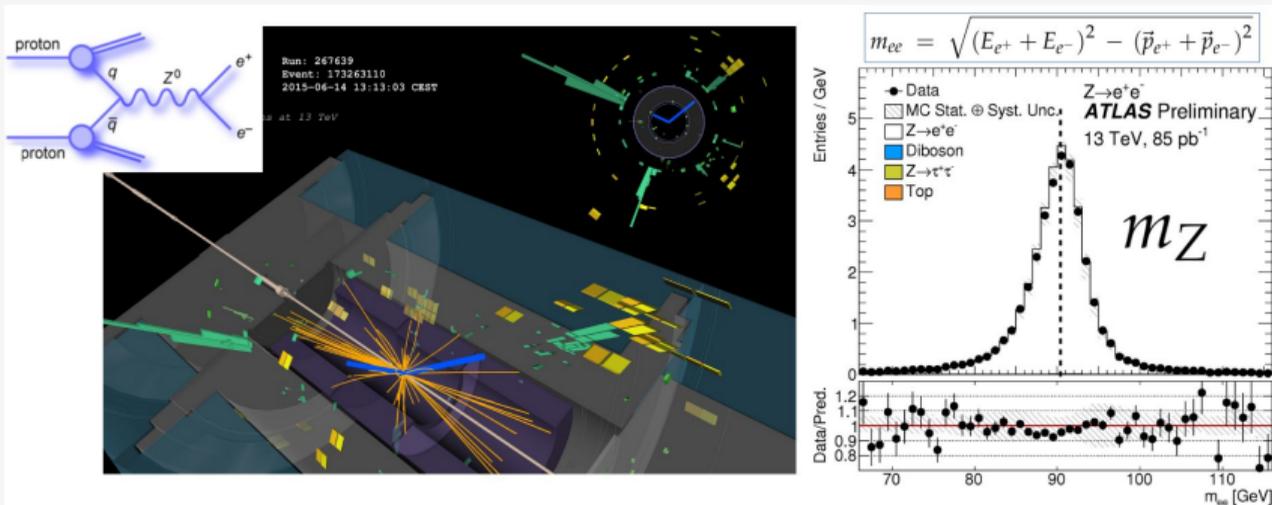
# Comment “voir” une particule ?

## Selectionner et analyser les collisions

- grand nombres de processus possibles en collisions  $pp$
- identifier les collisions compatibles avec la production de la particule recherchée

Lien entre la particule **microscopique** et l'aspect **macroscopique** de la collision

**Exemple:** la production d'un boson  $Z^0 \rightarrow e^+e^-$



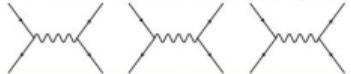
# Comment teste-t-on de nouvelles théories ?

## Nature

**Théorie fondamentale**  
champs, couplages, masses, etc ...

$$H = |\partial_\mu \phi|^2 + m^2 |\phi|^2$$

**Calculs de processus**  
Perturbation, calcul numérique, ...



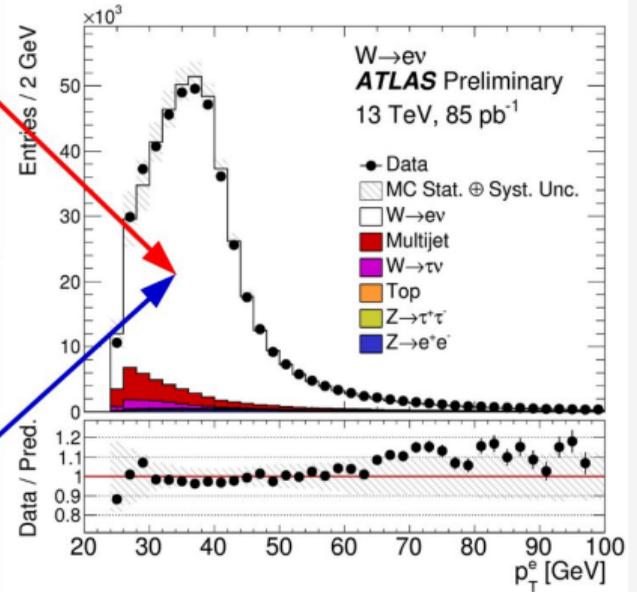
### Détecteur réel

Acquisition de donnée, triage rapide  
avant enregistrement, ...

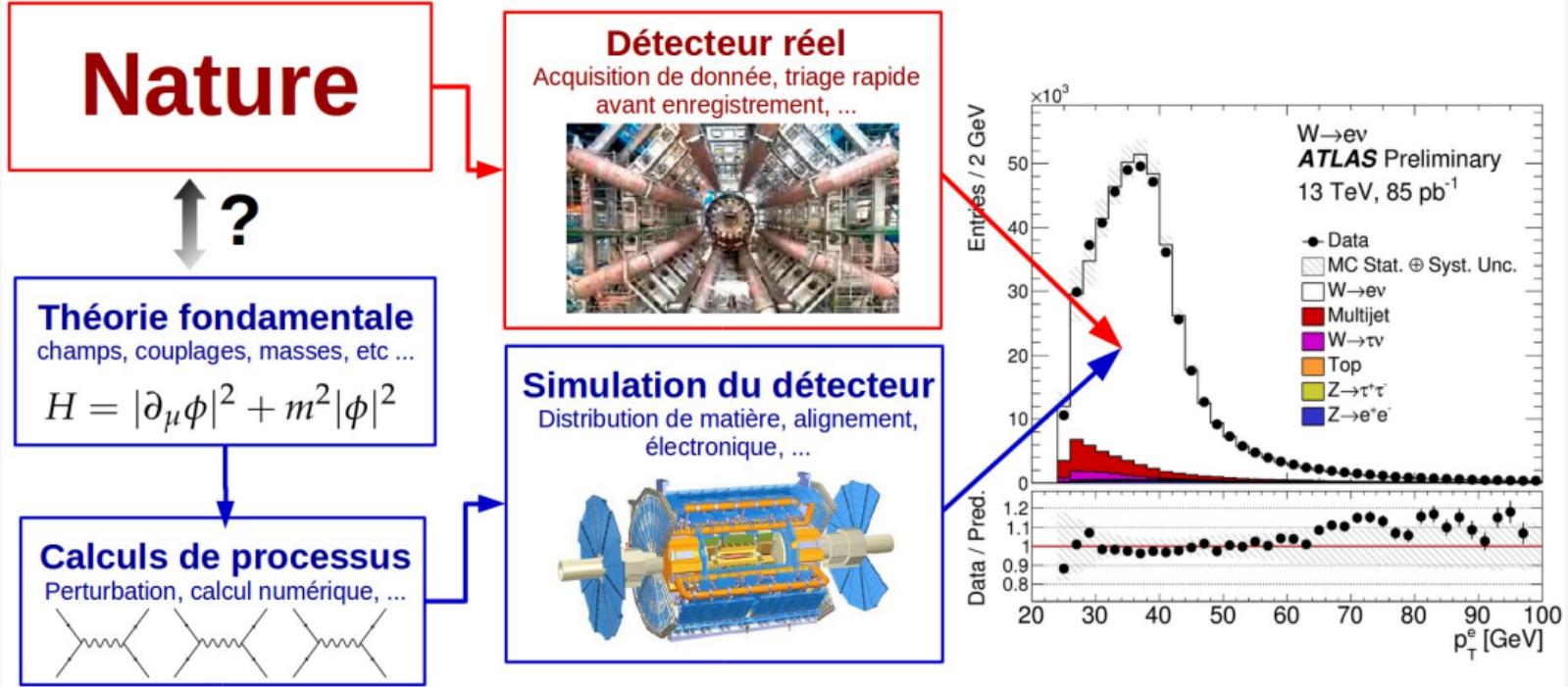


### Simulation du détecteur

Distribution de matière, alignement,  
électronique, ...

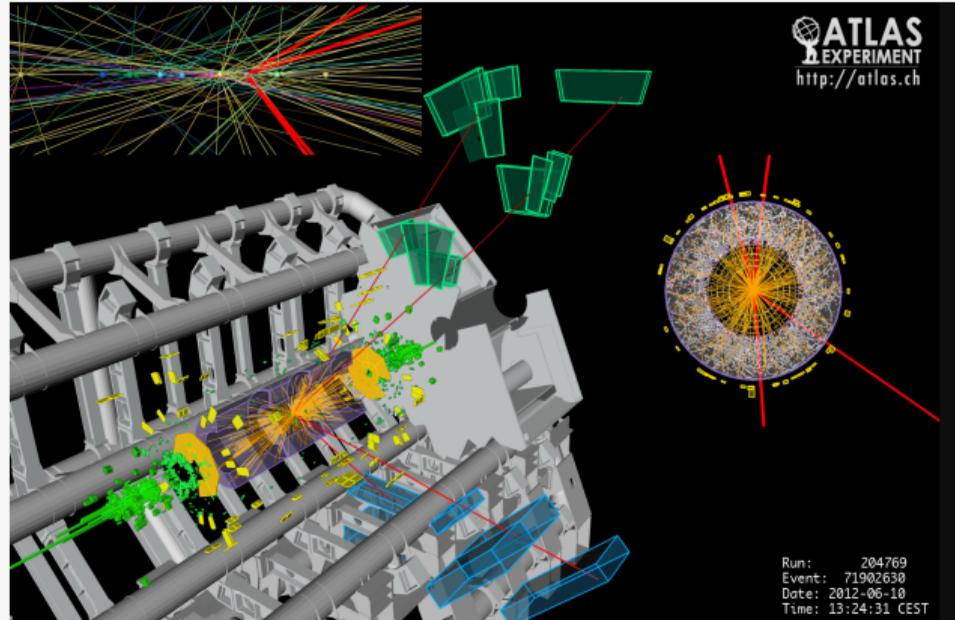


# Comment teste-t-on de nouvelles théories ?



**La question à \$1000 :** notre théorie fondamentale décrit-elle la Nature ?

# Exemple du boson de Higgs



Observation de  $H \rightarrow \gamma\gamma$

Observation de  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$

## Conclusions

---

## Trois messages clés à mettre dans la valise ...

1. La détection de particule se base sur leur **interaction avec la matière**. Ces interactions dépendent de la **masse**, la **vitesse** et la **charge** des particules.

## Trois messages clés à mettre dans la valise ...

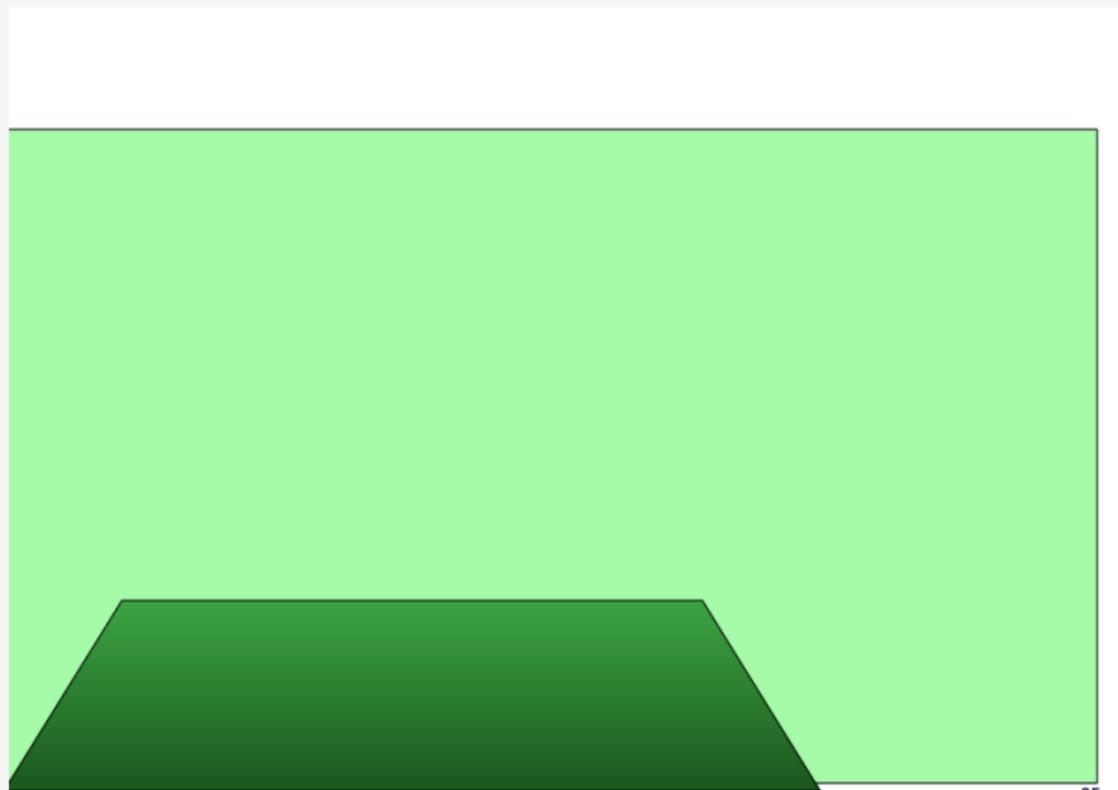
1. La détection de particule se base sur leur **interaction avec la matière**. Ces interactions dépendent de la **masse**, la **vitesse** et la **charge** des particules.
2. Un détecteur réel de physique de particule est souvent **un assemblage de plusieurs détecteurs**. Le **croisement** de ces informations permet d'**identifier et de mesurer les particules**.

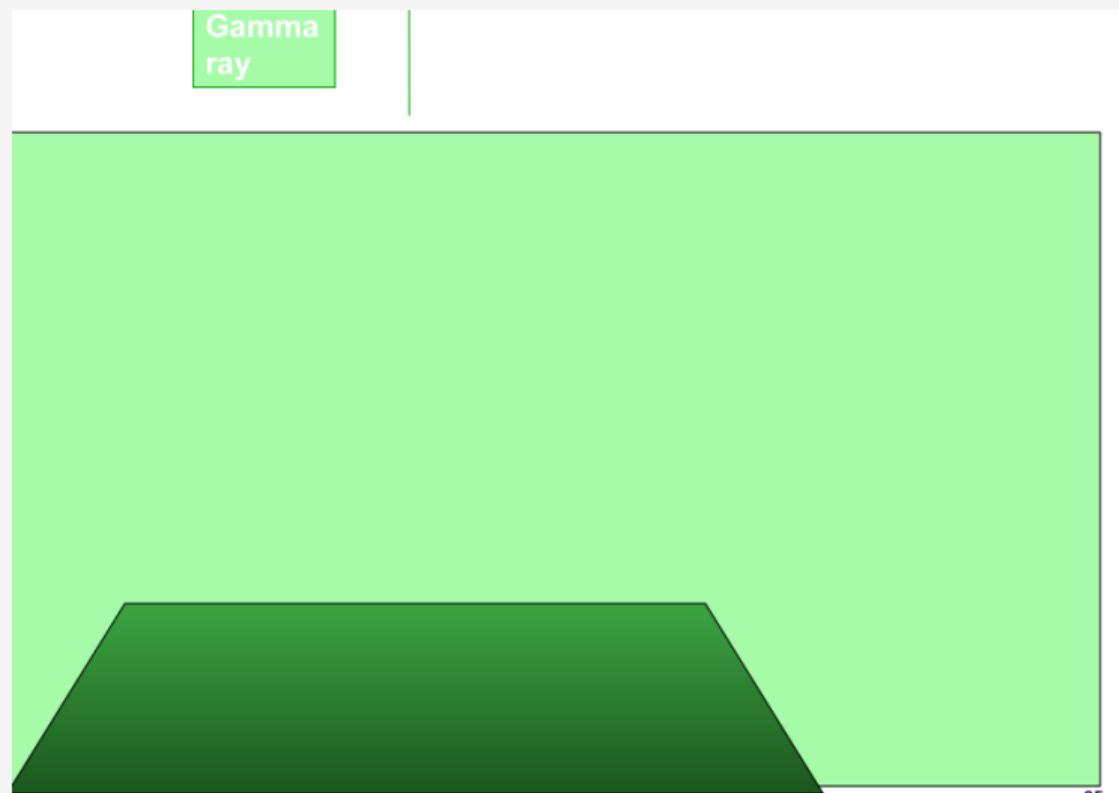
## Trois messages clés à mettre dans la valise ...

1. La détection de particule se base sur leur **interaction avec la matière**. Ces interactions dépendent de la **masse**, la **vitesse** et la **charge** des particules.
2. Un détecteur réel de physique de particule est souvent **un assemblage de plusieurs détecteurs**. Le **croisement** de ces informations permet d'**identifier et de mesurer les particules**.
3. Une étape de **reconstruction** des signaux du détecteur est **nécessaire pour reconstruire les collisions**, pour laquelle des **techniques numériques avancées** sont souvent utilisées.

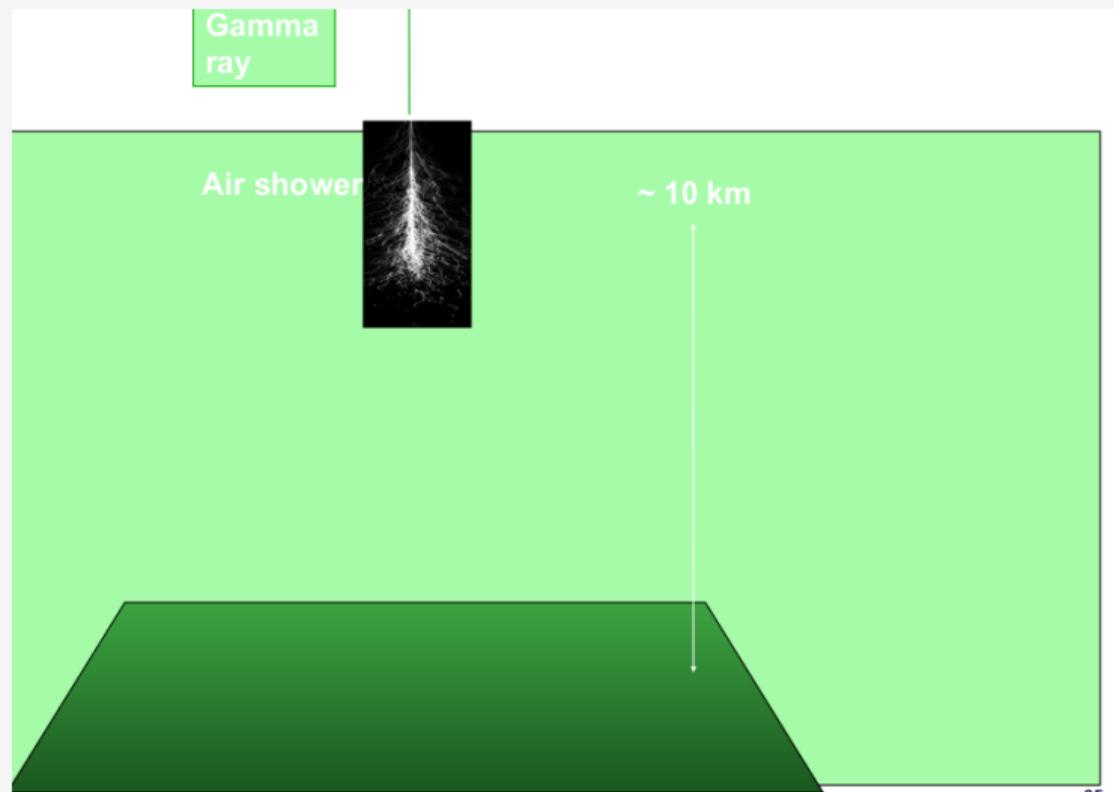
**Merci pour votre attention ! Des questions ?**

## **Matériel supplémentaire**

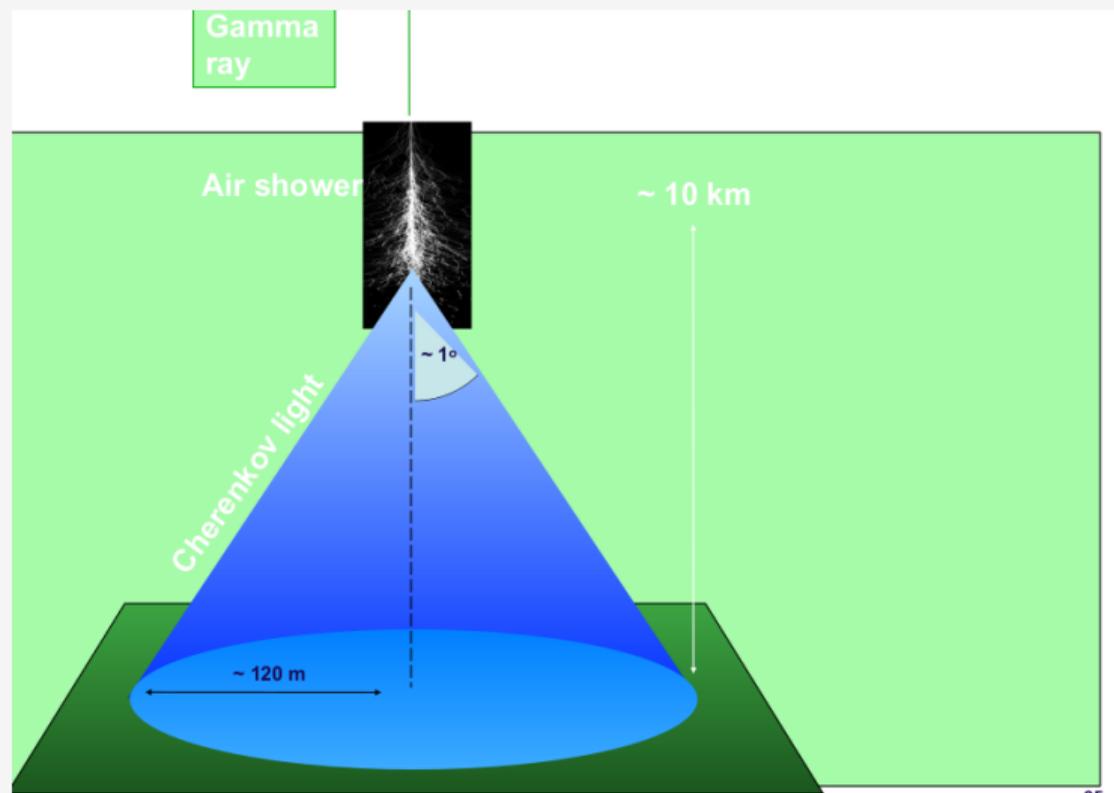




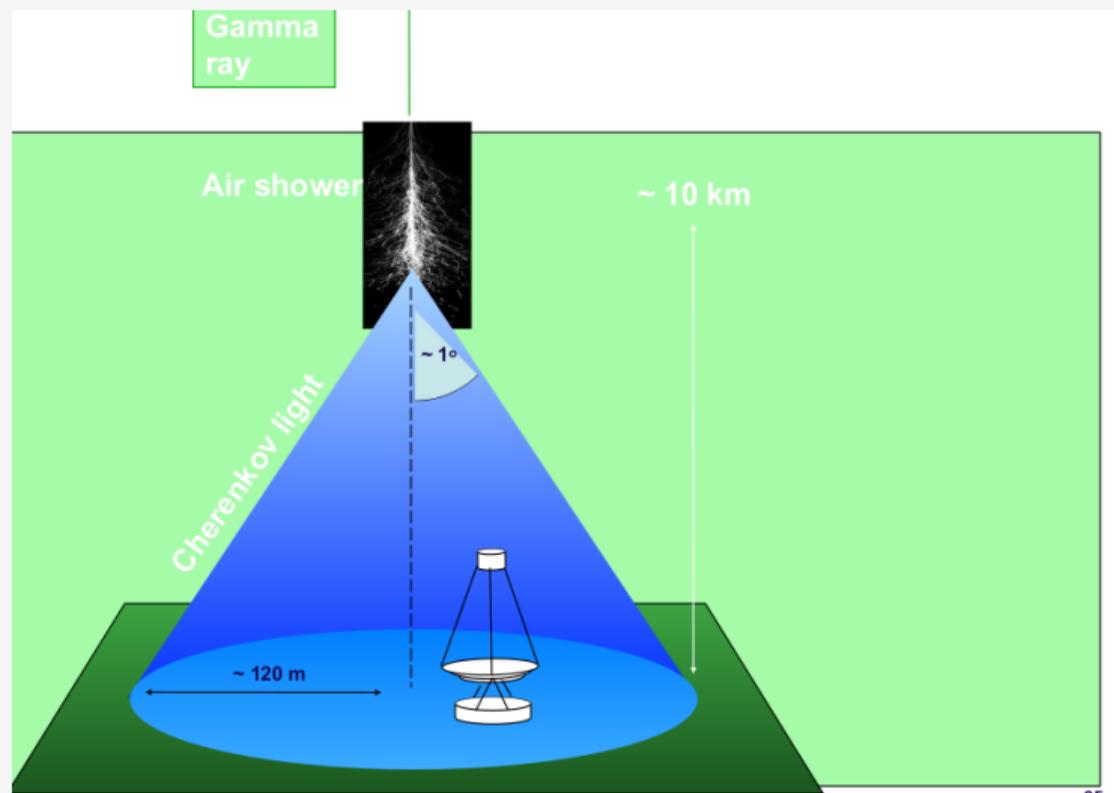
# Expérience HESS et l'effet Cherenkov



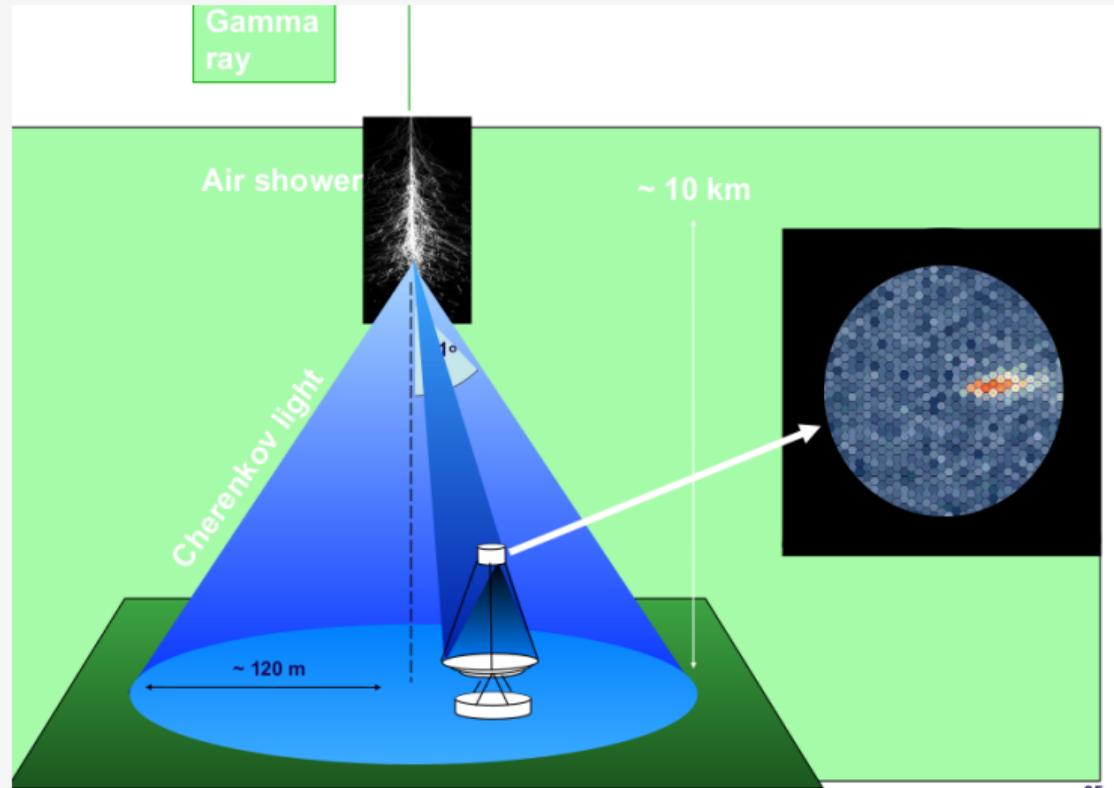
# Expérience HESS et l'effet Cherenkov



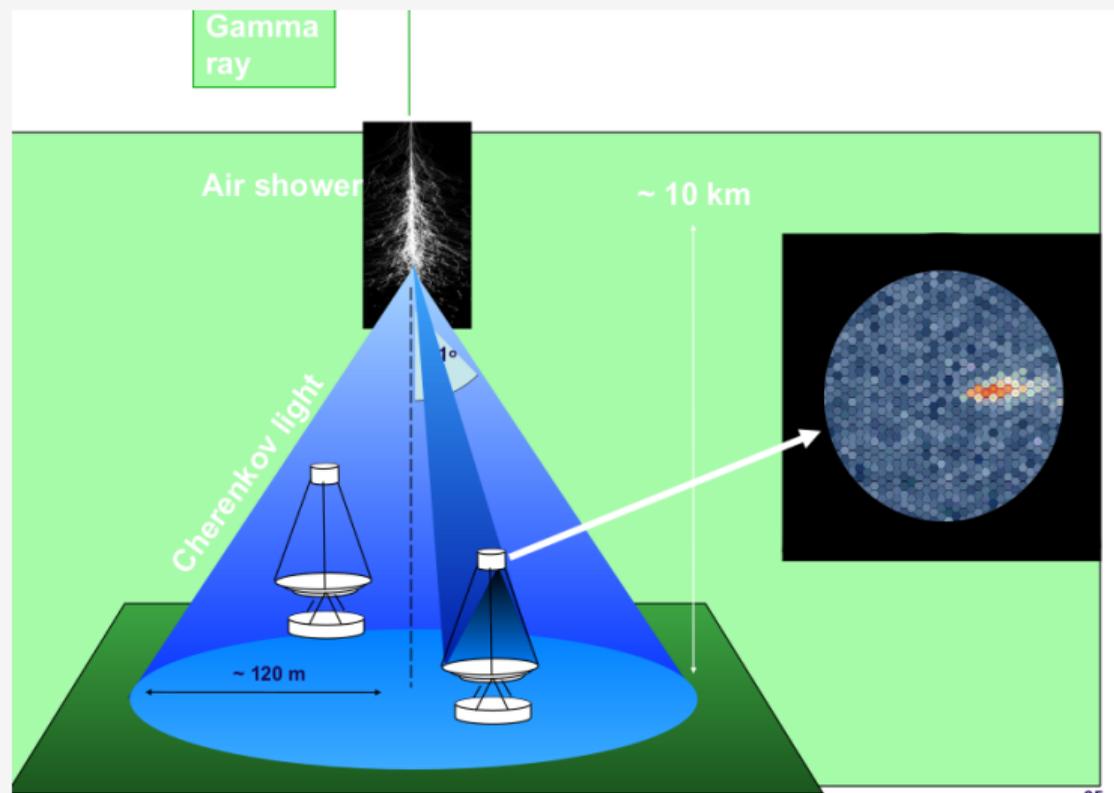
# Expérience HESS et l'effet Cherenkov



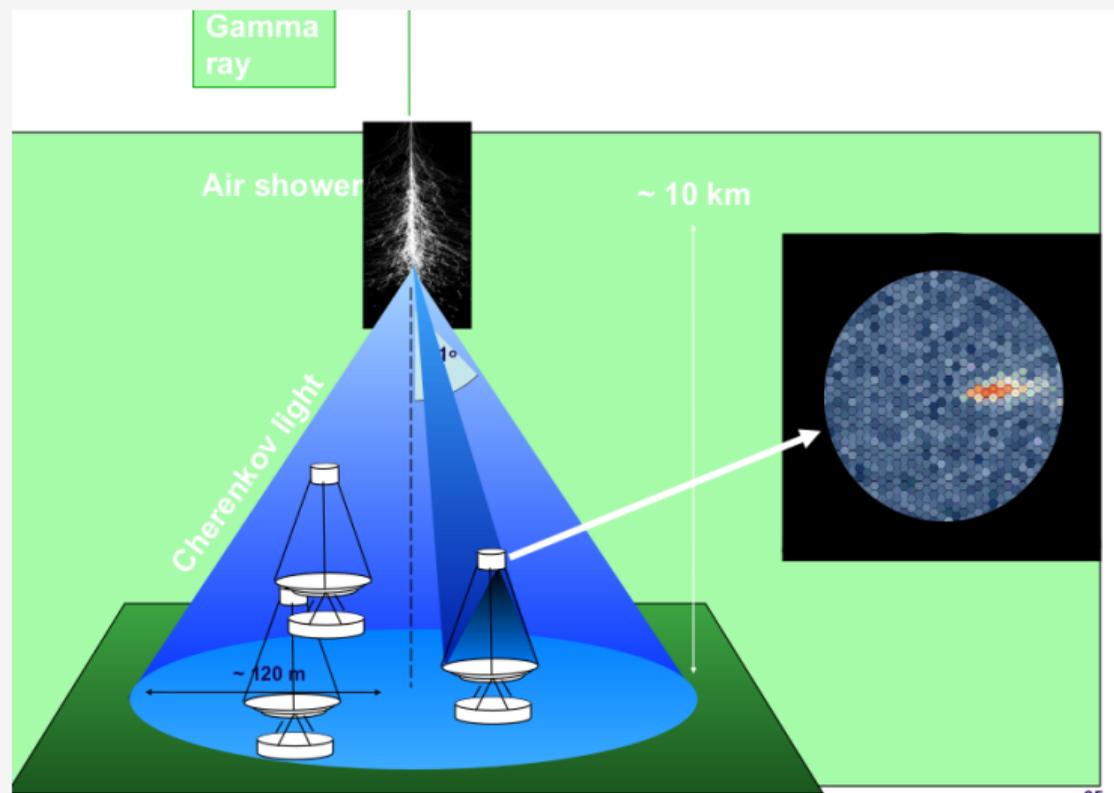
# Expérience HESS et l'effet Cherenkov

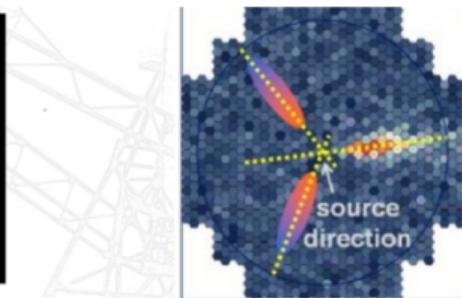
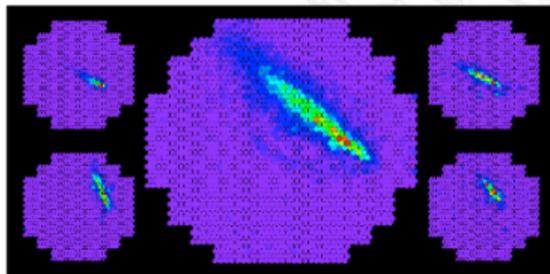


# Expérience HESS et l'effet Cherenkov



# Expérience HESS et l'effet Cherenkov





Reconstruct the shower position in atmosphere  
Estimate the energy from signal in telescopes +  
simulation of air showers

## Analyse Model 3D

