

Comment “voir” les particules ?

Romain Madar (CNRS/IN2P3/LPC)

French Teacher Programmes

CERN – 21/10/2024

Qui suis-je ?

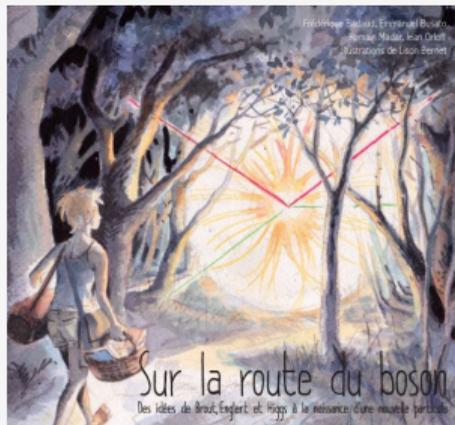
Parcours:

- 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

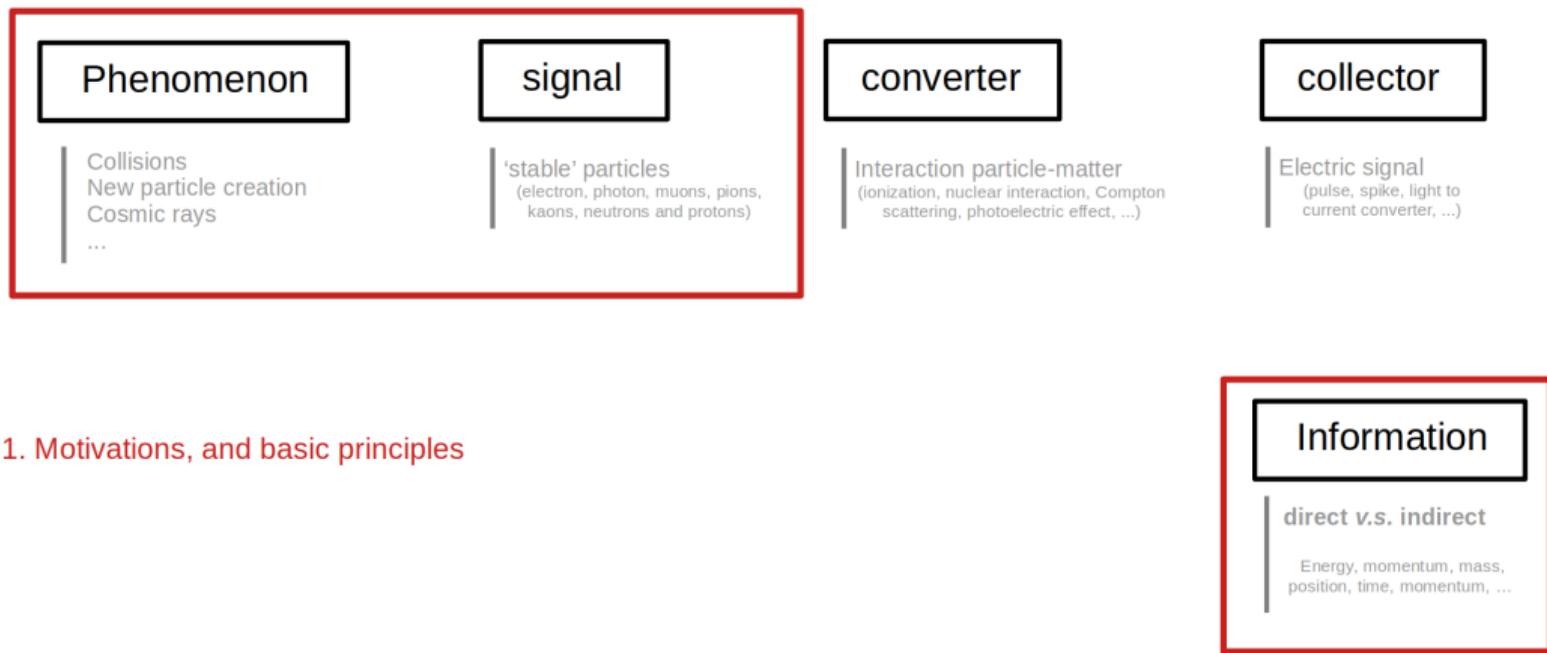
Electric signal
(pulse, spike, light to
current converter, ...)

Information

direct v.s. indirect

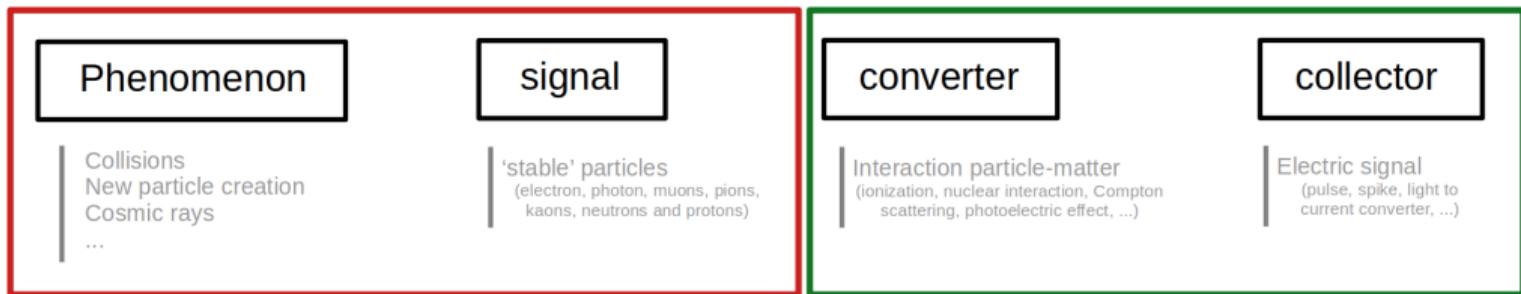
Energy, momentum, mass,
position, time, momentum, ...

Demandez le programme !



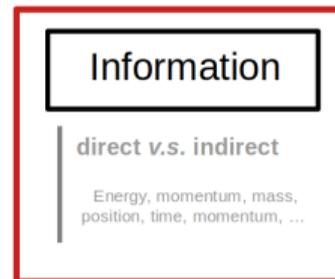
1. Motivations, and basic principles

Demandez le programme !

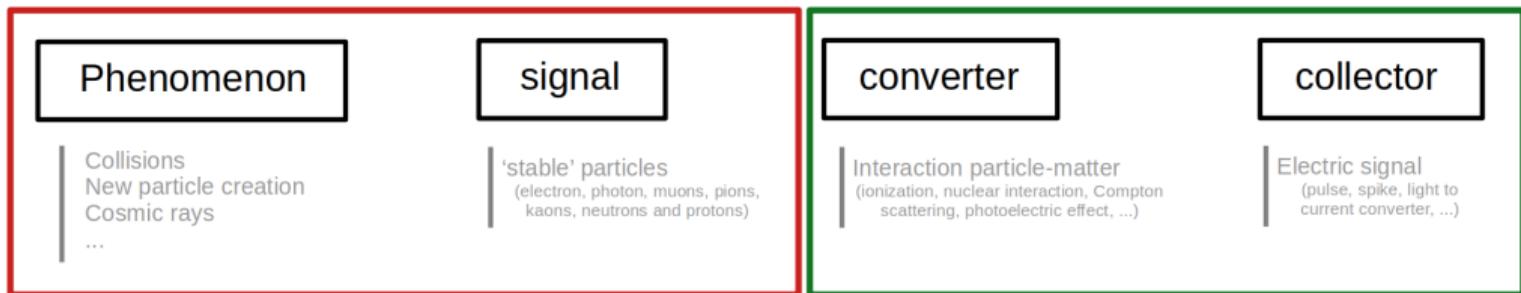


1. Motivations, and basic principles

2. From particle-matter interactions to electric signals



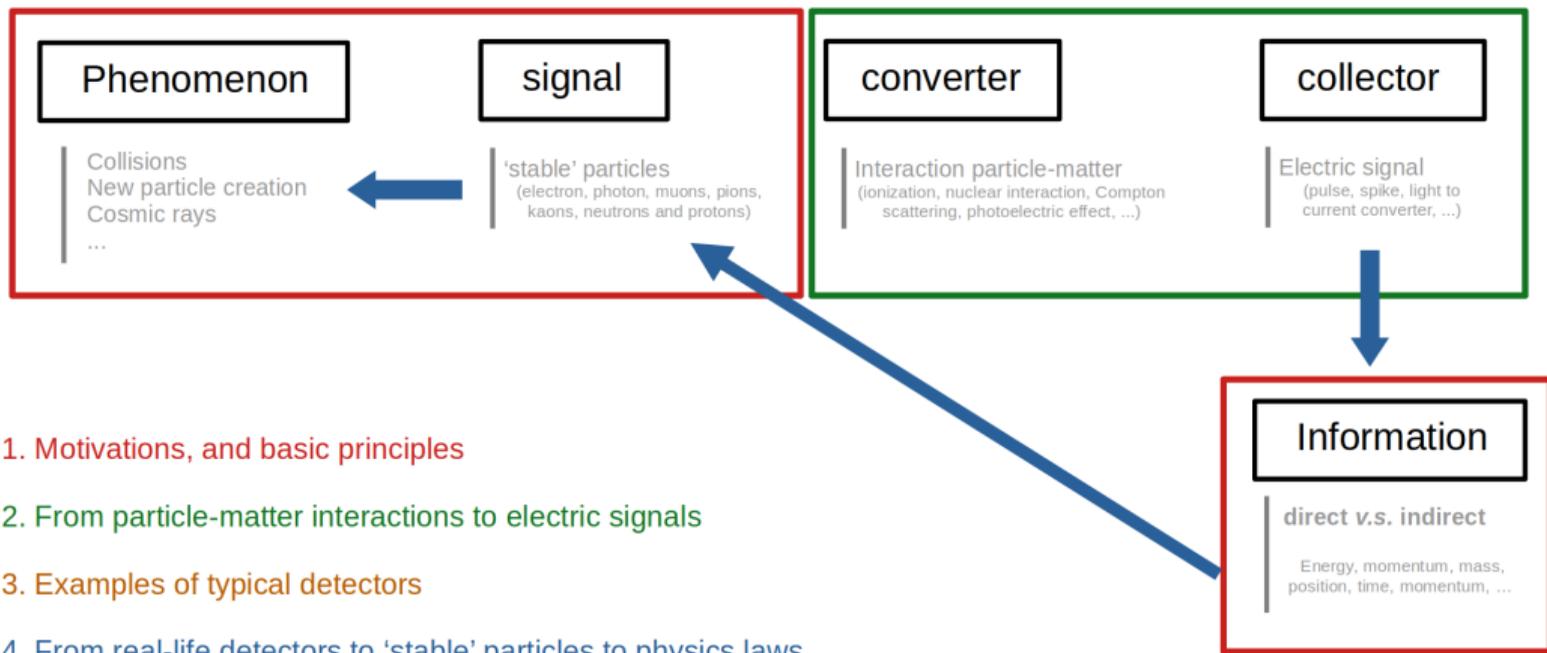
Demandez le programme !



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

Motivations et principes de base

Commençons avec une petite analogie ...

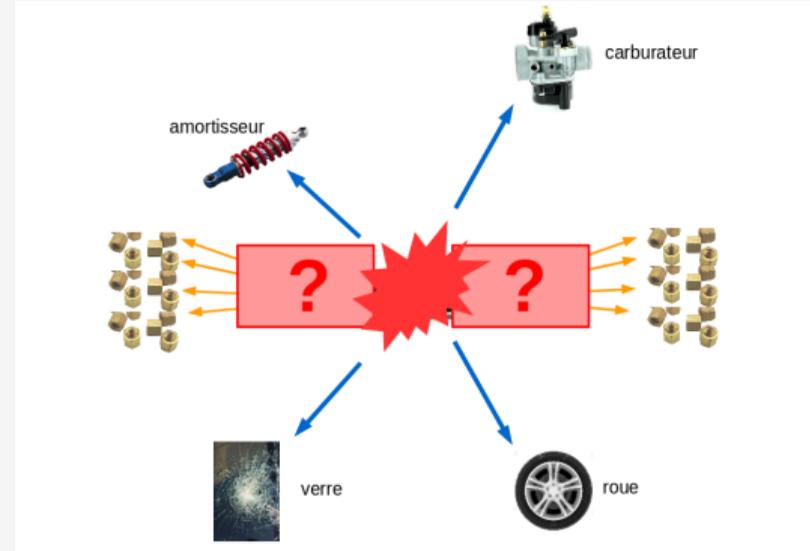
Imaginez deux objets **inconnus** qui
entre en **collision**



Commençons avec une petite analogie ...

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

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

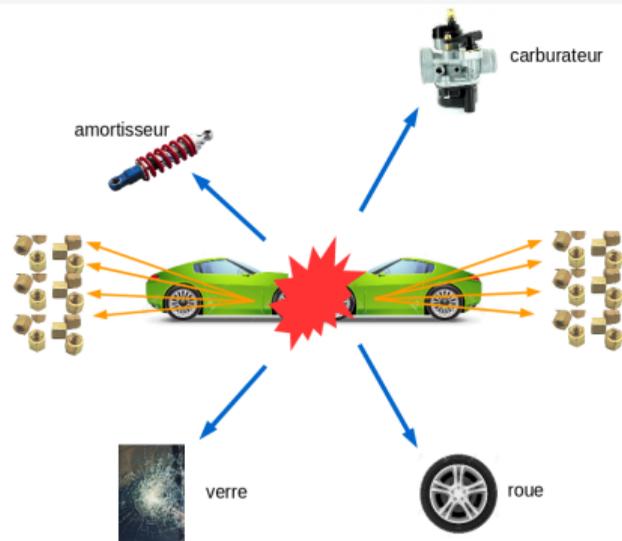


Commençons avec une petite analogie ...

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**.

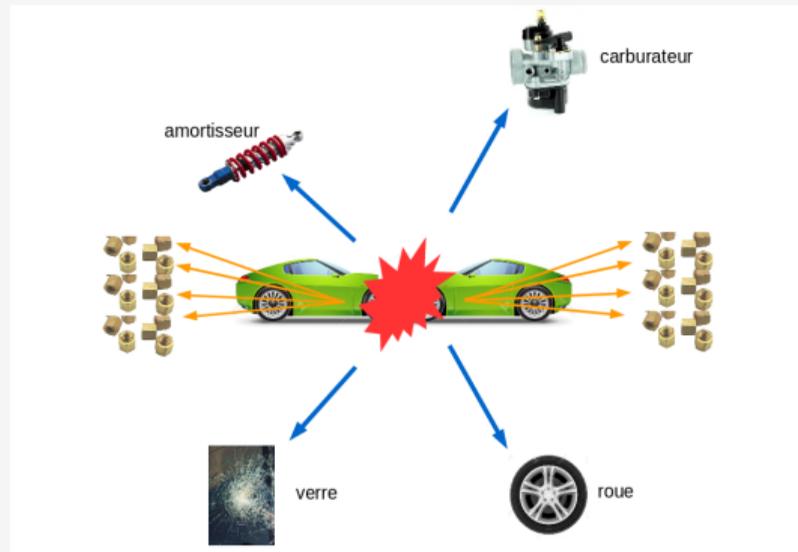


Commençons avec une petite analogie ...

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

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

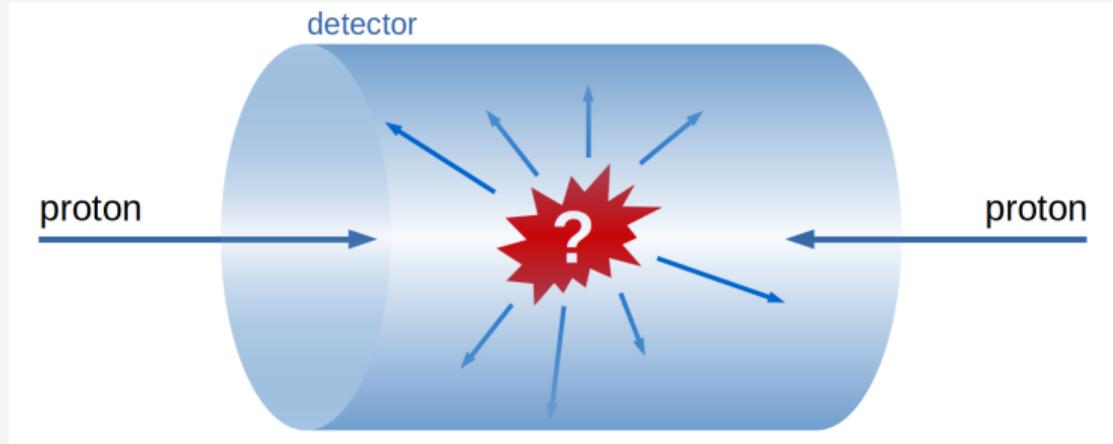
Oui! On peut remonter à l'**invisible** grâce aux **objets sortant de la collision**.



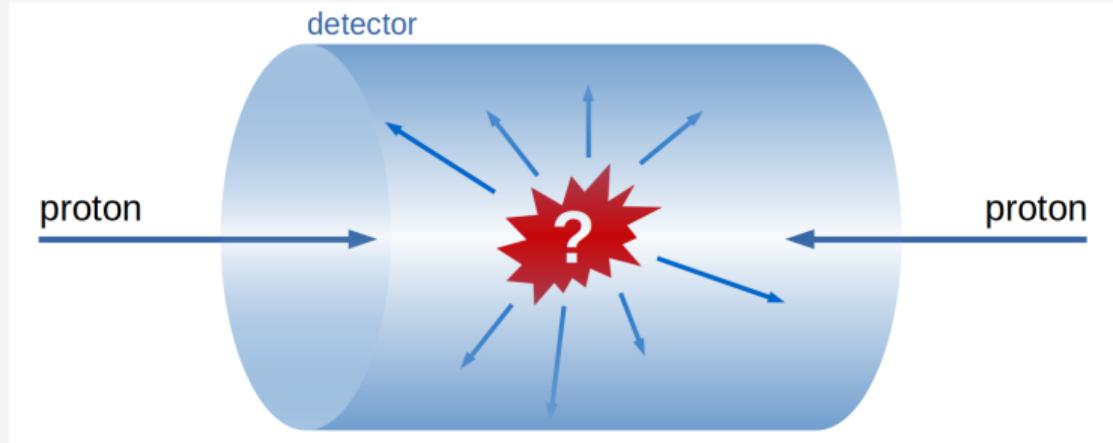
Cependant, attention avec cette analogie:

- 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

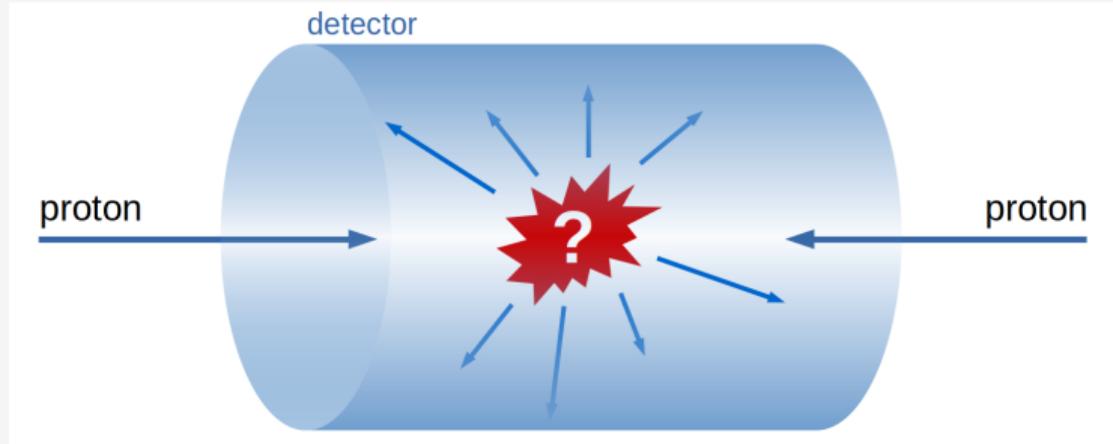


Du détecteur aux lois physiques



- **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
μ^\pm	$m_\mu = 105.7 \text{ MeV} \sim 200 m_e$		→ travels 630 km
γ	$m_\gamma = 0, Q = 0$		→ stable
π^\pm	$m_\pi = 139.6 \text{ MeV} \sim 270 m_e$	} EM, Strong ~ 3.5 m_π	→ 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 $E = 100 \text{ GeV}$

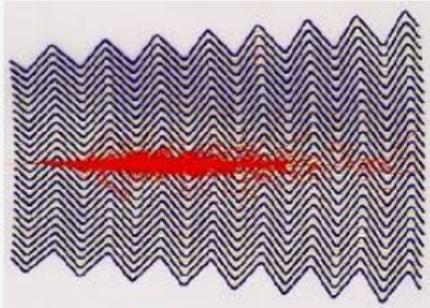
e^\pm	$m_e = 0.511 \text{ MeV}$	} EM	→ stable
μ^\pm	$m_\mu = 105.7 \text{ MeV} \sim 200 m_e$		→ travels 630 km
γ	$m_\gamma = 0, Q = 0$		→ stable
π^\pm	$m_\pi = 139.6 \text{ MeV} \sim 270 m_e$	} EM, Strong ~ 3.5 m_π	→ travels 5 km
K^\pm	$m_K = 493.7 \text{ MeV} \sim 1000 m_e$		→ travels 800 m
p^\pm	$m_p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

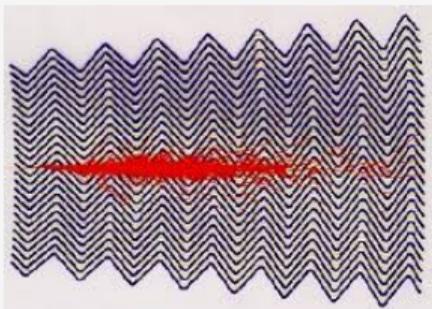
Dissiper toute l'énergie de la particule incidente dans la matière (**beaucoup de matière**).



Quatre grands principes de mesure

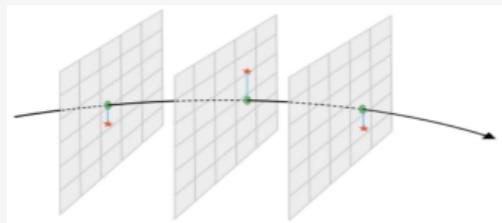
1. Calorimétrie (énergie)

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



2. Trajectographie (impulsion)

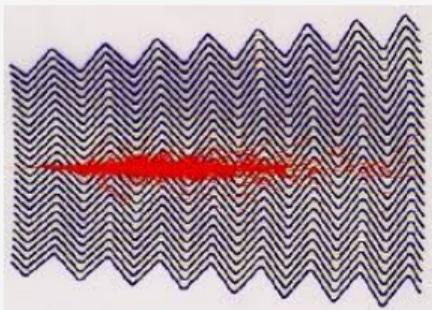
trouver la trajectoire de la particule en la perturbant le moins possible (**peu de matière**).
courbure dans un champ magnétique connu = mesure de $\frac{p}{q}$ (particule chargée uniquement)



Quatre grands principes de mesure

1. Calorimetrie (énergie)

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

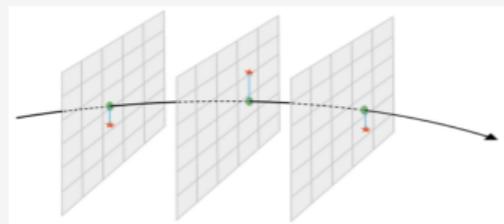


3. Masse

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:

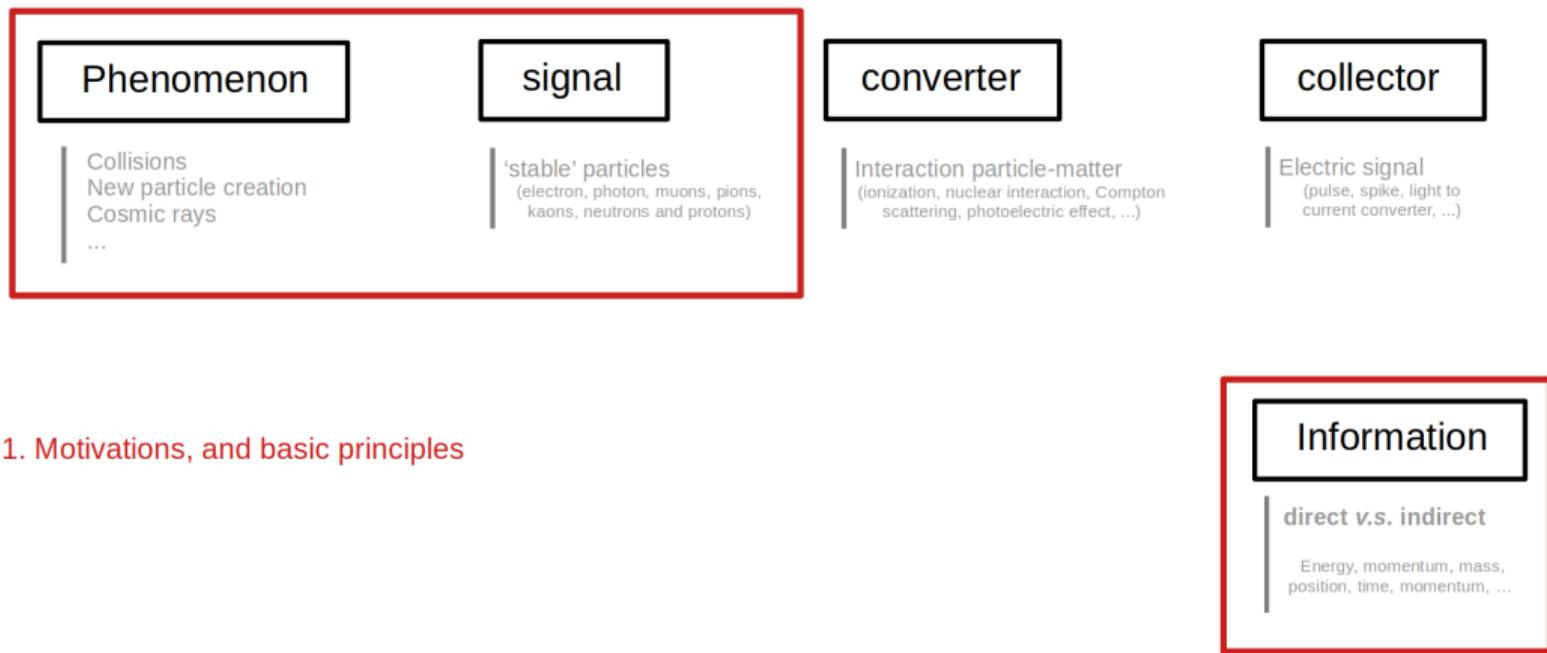
$$\vec{\beta} \equiv \vec{c} ; |\vec{\beta}| = 1$$

$$\gamma \rightarrow +\infty$$

Énergie \approx impulsion:

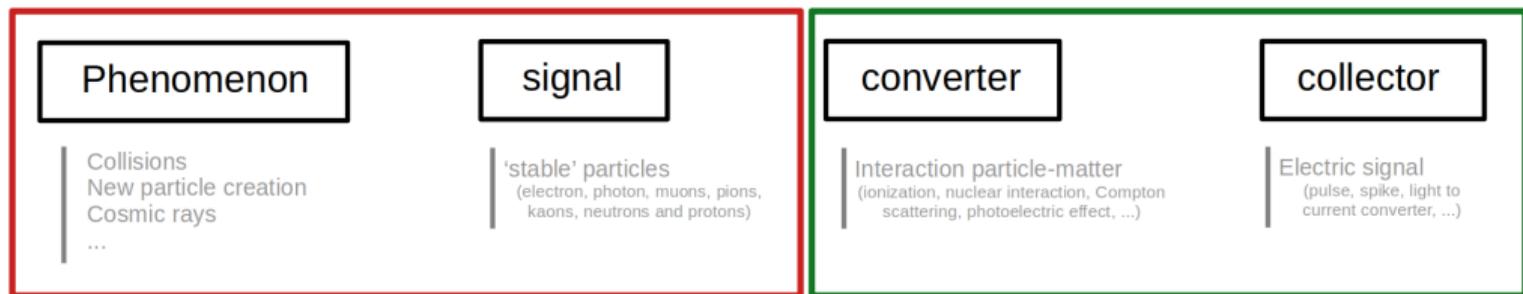
$$E = c|\vec{p}|$$

Demandez le programme !



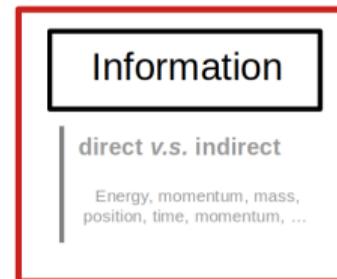
1. Motivations, and basic principles

Demandez le programme !



1. Motivations, and basic principles

2. From particle-matter interactions to electric signals



Interaction particule-matière

Les quatre interactions fondamentales

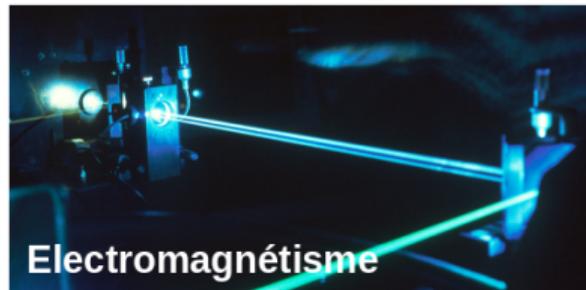
1 La gravitation



Les quatre interactions fondamentales

1 La gravitation

2 La force électromagnétique

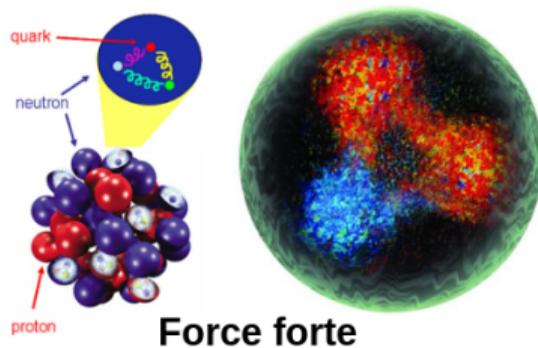
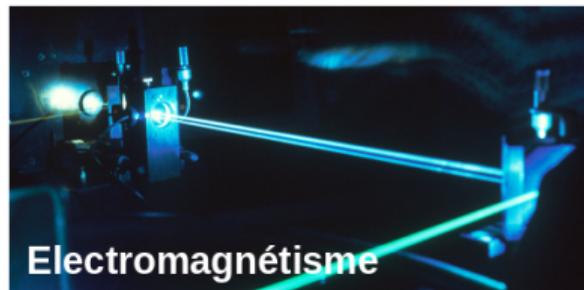


Les quatre interactions fondamentales

1 La gravitation

2 La force électromagnétique

3 La force forte



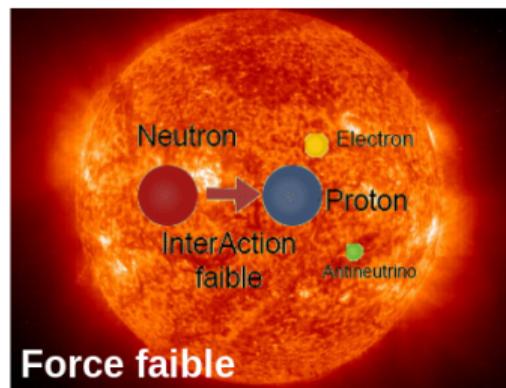
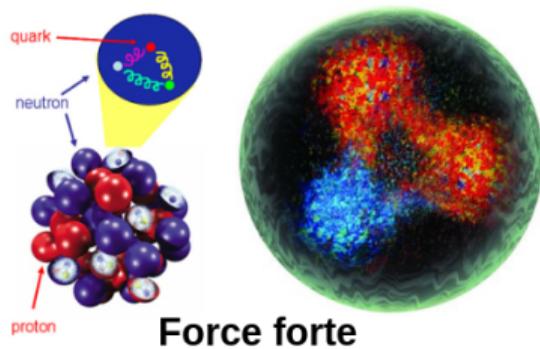
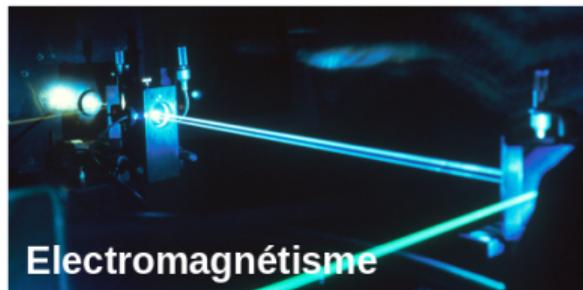
Les quatre interactions fondamentales

1 La gravitation

2 La force électromagnétique

3 La force forte

4 La force faible



1. EM pour les particules massives

→ μ, π, K^{\pm}, p

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

e^{\pm}	$m_e = 0.511 \text{ MeV}$	} EM
μ^{\pm}	$m_{\mu} = 105.7 \text{ MeV} \sim 200 m_e$	
γ	$m_{\gamma} = 0, Q = 0$	
π^{\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
μ^\pm	$m_\mu = 105.7 \text{ MeV} \sim 200 m_e$	
γ	$m_\gamma = 0, Q = 0$	
π^\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

→ μ, π, K^\pm, p

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

2. EM pour les particules de masse nulle

→ e, γ

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

Interactions particule-matière pour la détection

e^\pm	$m_e = 0.511 \text{ MeV}$	}	EM
μ^\pm	$m_\mu = 105.7 \text{ MeV} \sim 200 m_e$		
γ	$m_\gamma = 0, Q = 0$		
π^\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

→ μ, π, K^\pm, p

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

2. EM pour les particules de masse nulle

→ e, γ

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

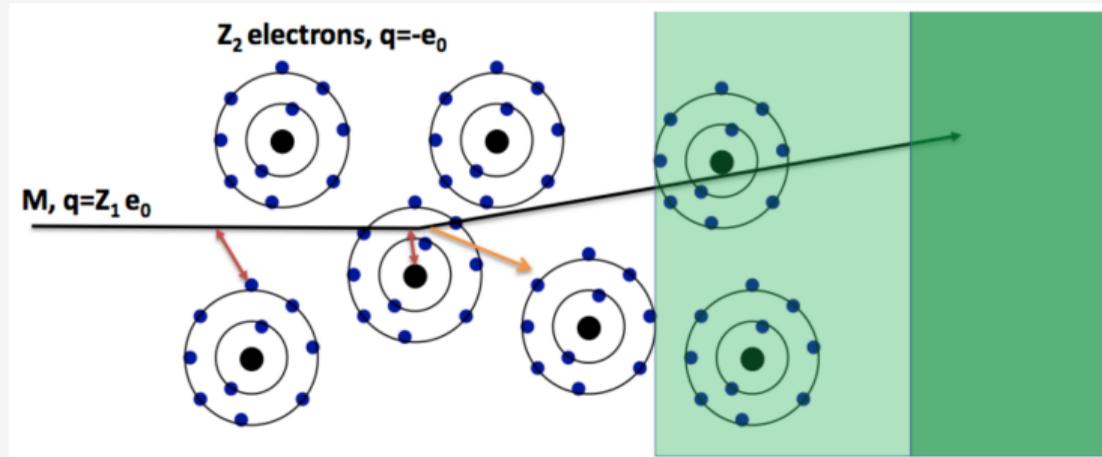
3. Forte

→ n, p, π, 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:

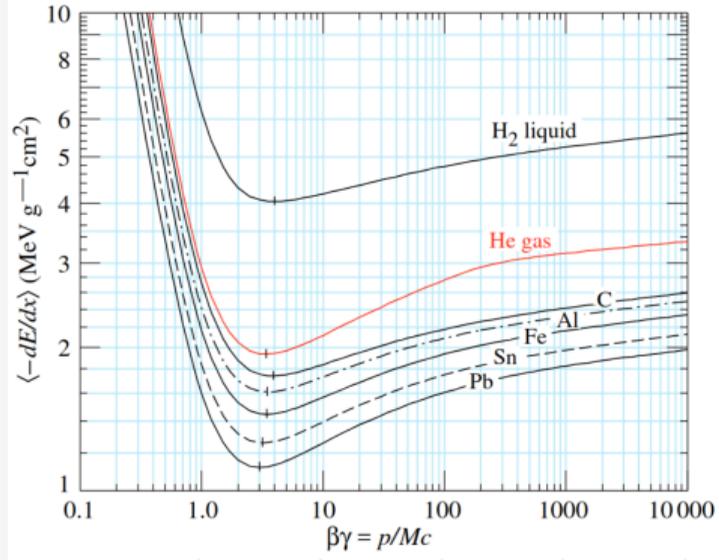
- dE/dx est aussi appelé **pouvoir d'arrêt** (*stopping power*)
- plusieurs **mécanismes** peuvent contribuer au dE/dx
- dépendance avec les **charges**, la **masse** et la **vitesse** de la particule entrante

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

Quelques remarques:

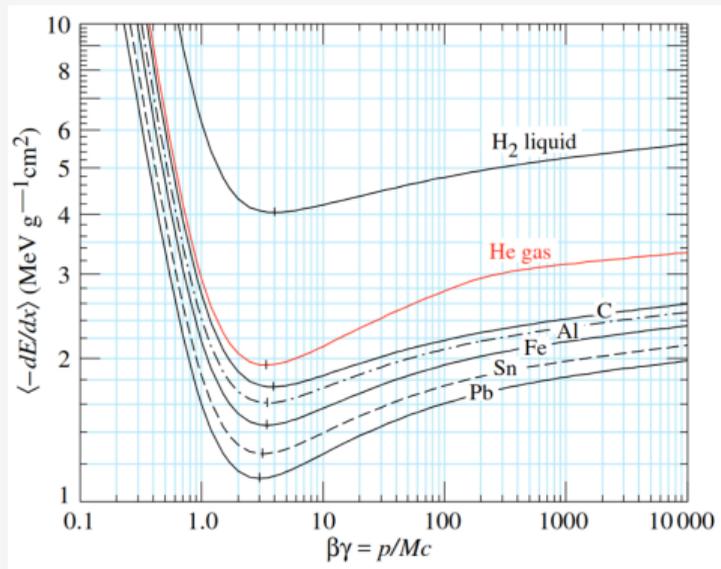
- dE/dx est aussi appelé **pouvoir d'arrêt** (*stopping power*)
- plusieurs **mécanismes** peuvent contribuer au dE/dx
- dépendance avec les **charges**, la **masse** et la **vitesse** de la particule entrante
- dépendance avec la nature des **matériaux**

Interaction avec les électrons du milieu



Commentaires

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

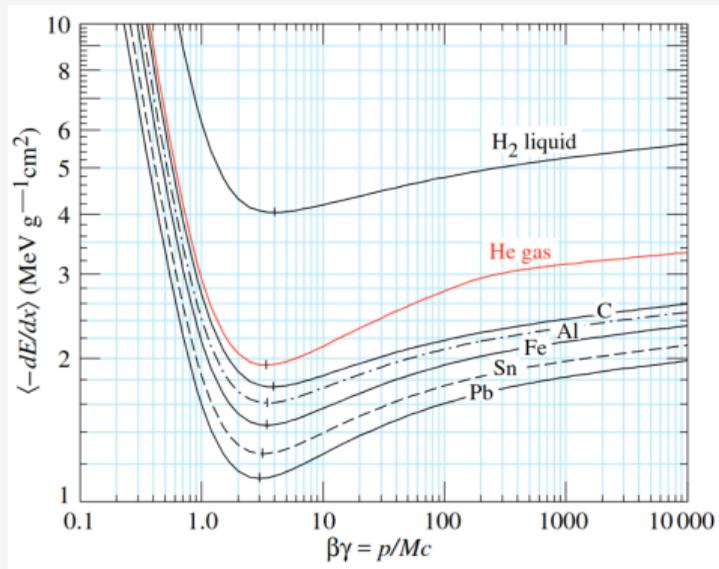


Commentaires

- 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 ($m = 10^3 \text{ MeV}$) : $L_p = 2.1 \text{ m}$

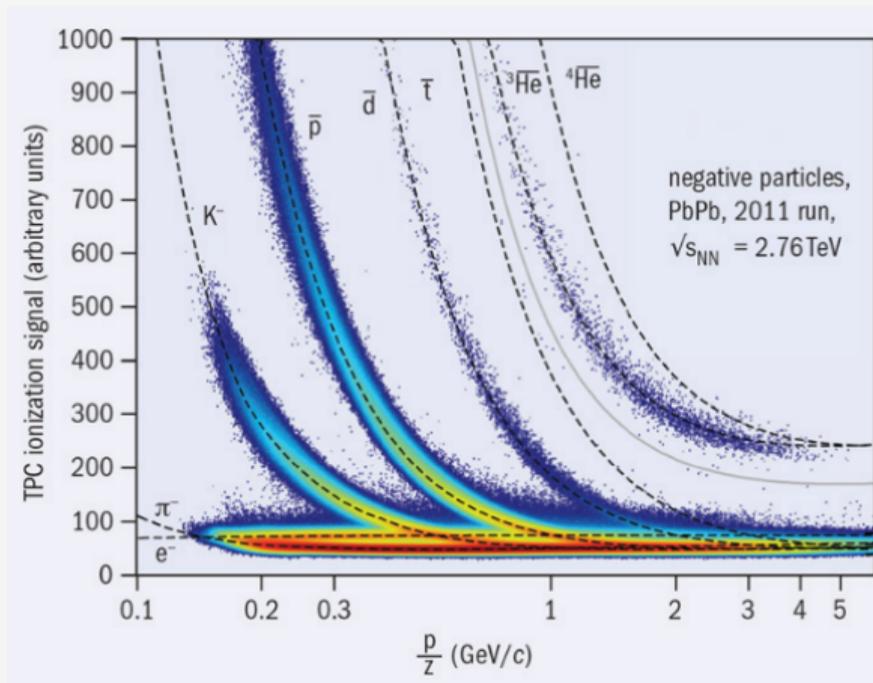
Attention: ces raisonnements sont **semi-qualitatifs**, car dE/dx dépend de x (via β et donc E) et la résolution d'une **équation différentielle** serait en fait nécessaire.

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 (déviations → **radiations**)

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

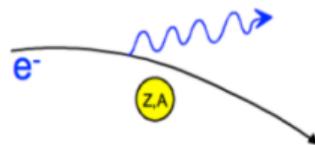
Rappel et vue d'ensemble des interactions électromagnétiques:

- 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:

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



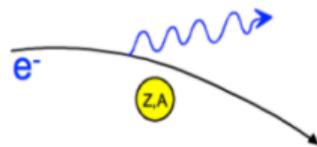
Rappel et vue d'ensemble des interactions électromagnétiques:

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

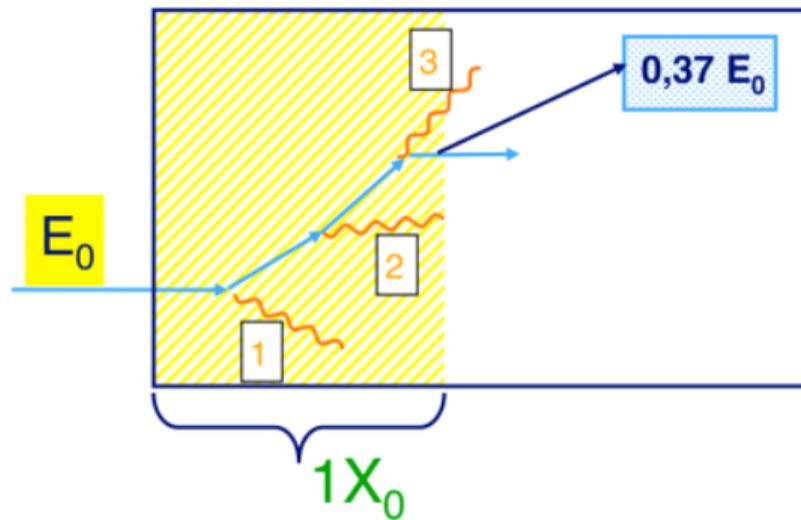
$$\frac{dE}{dx} = 4\alpha N_A \frac{z^2 Z^2}{A} \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{mc^2}\right)^2 E \ln \frac{183}{Z^{1/3}} \propto \frac{E}{m^2}$$



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

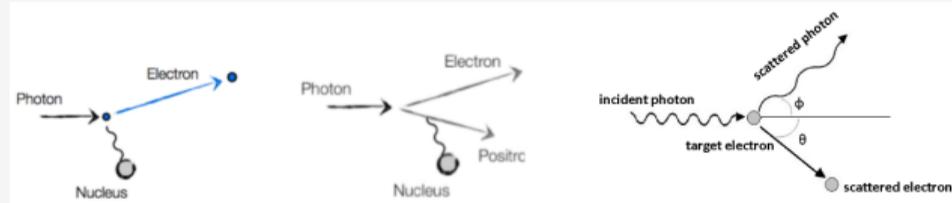
Longueur de radiation - ordre de grandeur



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

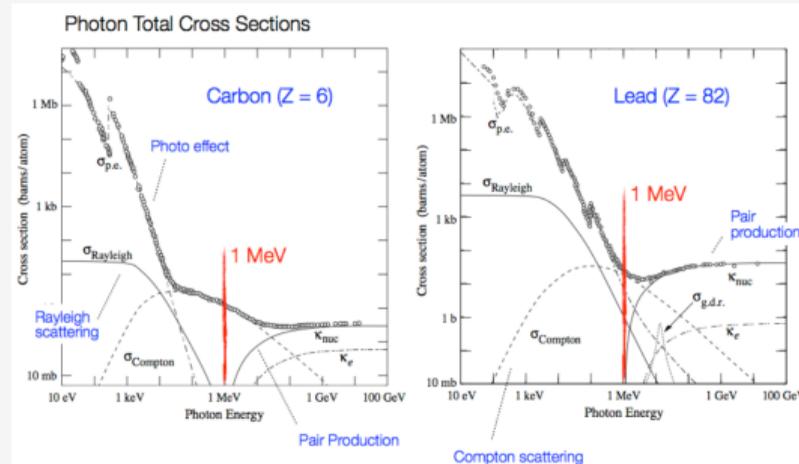
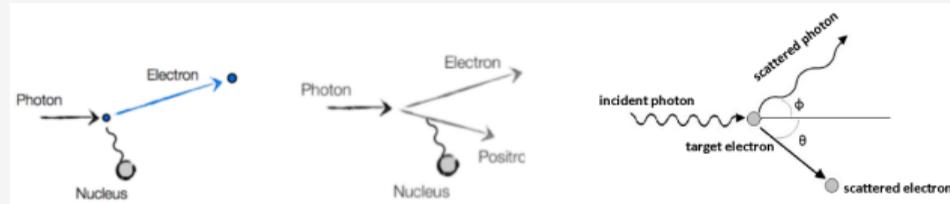
Exemples de mécanisme d'interaction photon-matière:

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

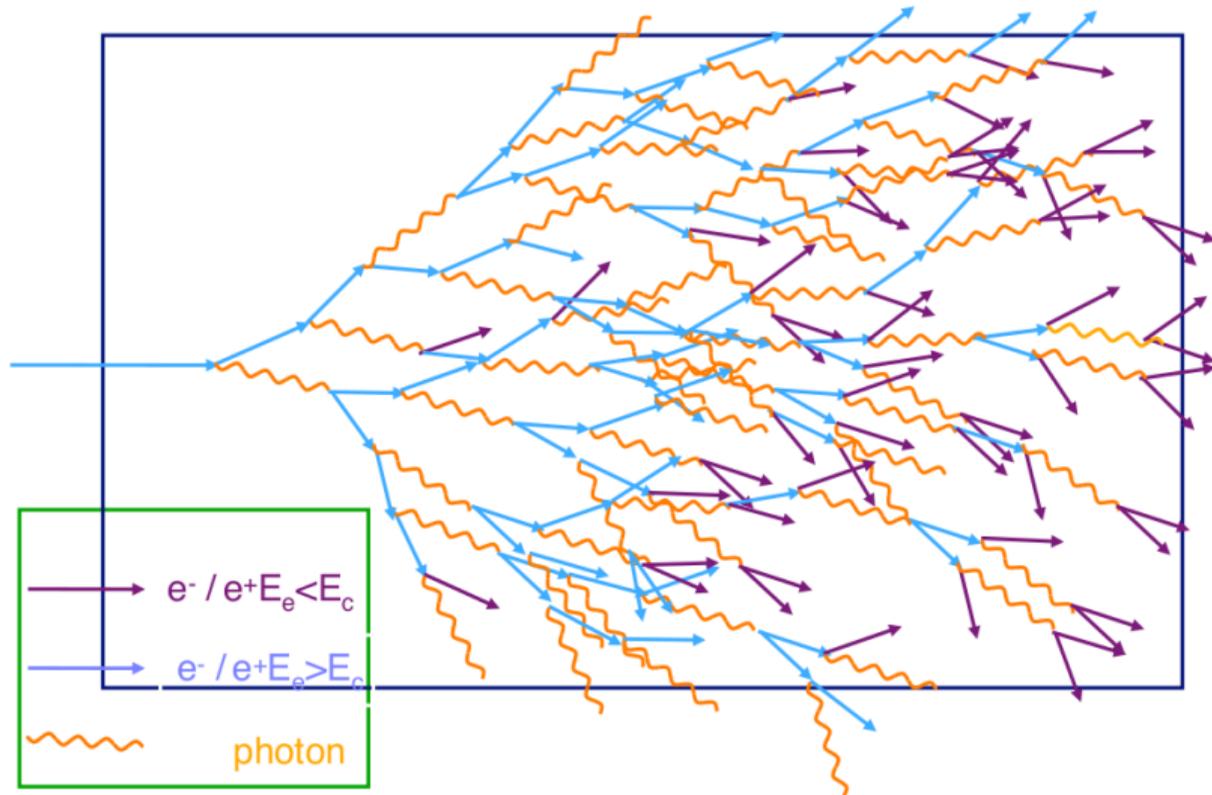


Exemples de mécanisme d'interaction photon-matière:

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

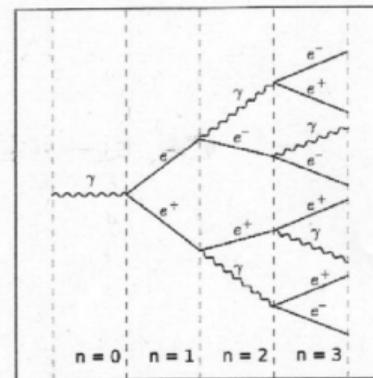


Évolution des photons et électrons : gerbes électromagnétiques

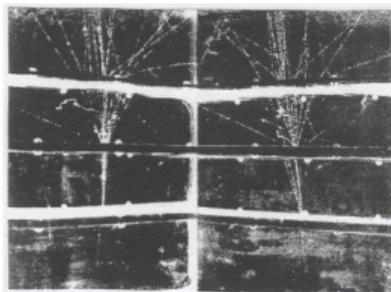


Gerbes électromagnétiques - ordre de grandeur

material	Z	X_0 [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

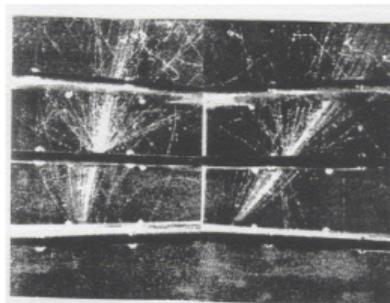


L.Fussel 1939



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:

$$E_c \approx 10 \text{ MeV}, N \approx 100 \text{ particles}, X_{\max} \approx 6.6 X_0$$

Interactions particule-matière pour la détection

e^\pm	$m_e = 0.511 \text{ MeV}$	} EM
μ^\pm	$m_\mu = 105.7 \text{ MeV} \sim 200 m_e$	
γ	$m_\gamma = 0, Q = 0$	
π^\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

→ μ, π, K^\pm, p

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

2. EM pour les particules de masse nulle

→ e, γ

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

Interactions particule-matière pour la détection

e^\pm	$m_e = 0.511 \text{ MeV}$	} EM
μ^\pm	$m_\mu = 105.7 \text{ MeV} \sim 200 m_e$	
γ	$m_\gamma = 0, Q = 0$	
π^\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

→ μ, π, K^\pm, p

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

2. EM pour les particules de masse nulle

→ e, γ

- 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
μ^\pm	$m_\mu = 105.7 \text{ MeV} \sim 200 m_e$	
γ	$m_\gamma = 0, Q = 0$	
π^\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

→ μ, π, K^\pm, p

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

2. EM pour les particules de masse nulle

→ e, γ

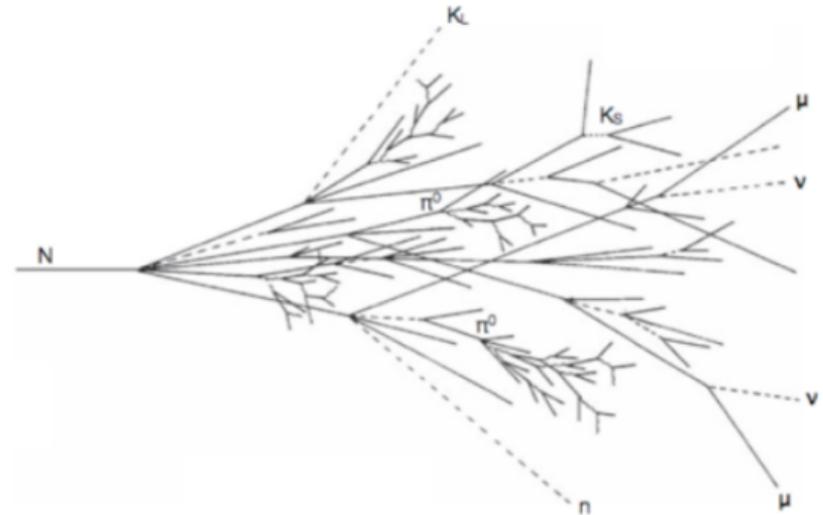
- électrons atomiques (ionisation, excitation)
- noyaux atomiques (rayonnement de freinage)

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, γ -decay
Neutron capture \rightarrow fission
Spallation ...



Cascade energy distribution:

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

Ionization energy of charged particles (p, π, μ)	1980 MeV [40%]
Electromagnetic shower (π^0, η^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
μ^\pm	$m_\mu = 105.7 \text{ MeV} \sim 200 m_e$		
γ	$m_\gamma = 0, Q = 0$		
π^\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

→ μ, π, K^\pm, p

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

2. EM pour les particules de masse nulle

→ e, γ

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

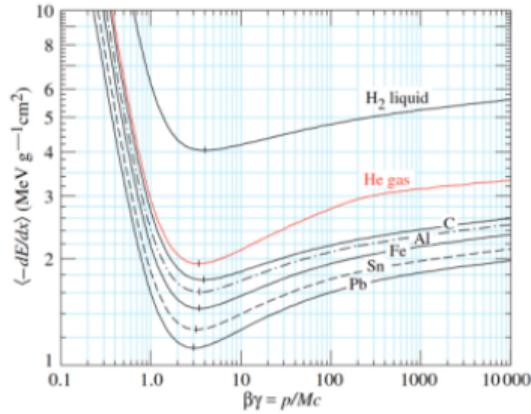
3. Forte

→ n, p, π, K^\pm, K^0

- noyaux atomiques

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

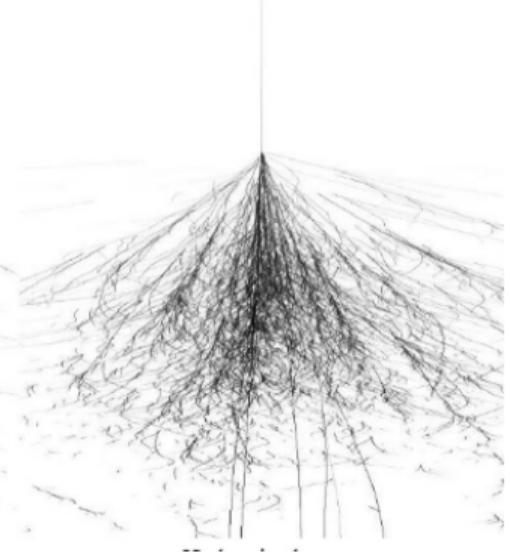
electronic excitation & ionization
(massive charged particle)



electromagnetic shower
(electron / photon)



hadronic shower
(hadrons)



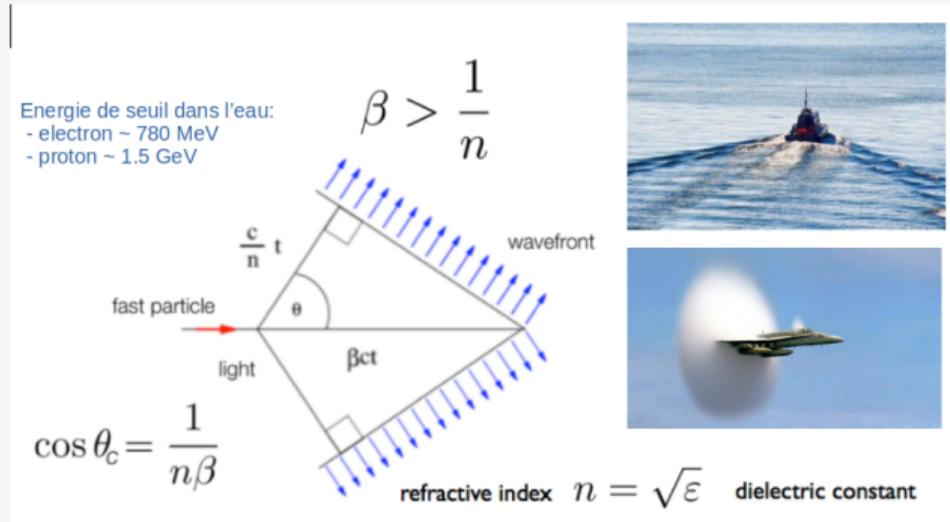
Ce qui n'a pas été abordé (par manque de temps) :

- 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)
- ...

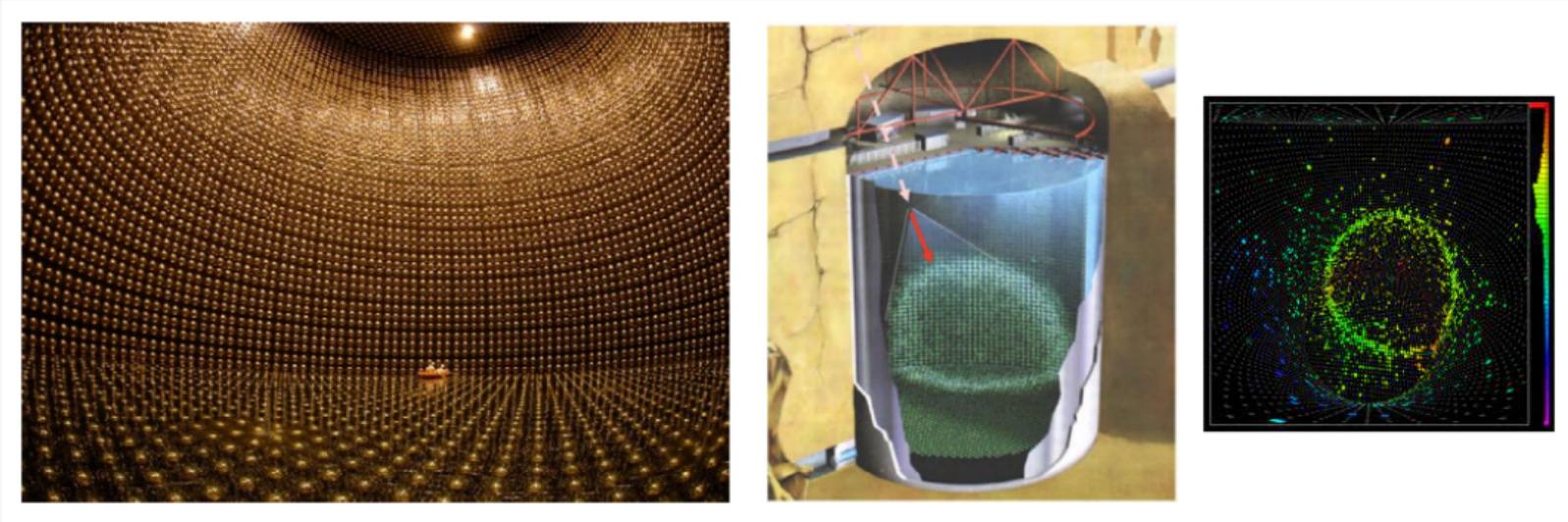
Il en existe d'autres ...

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

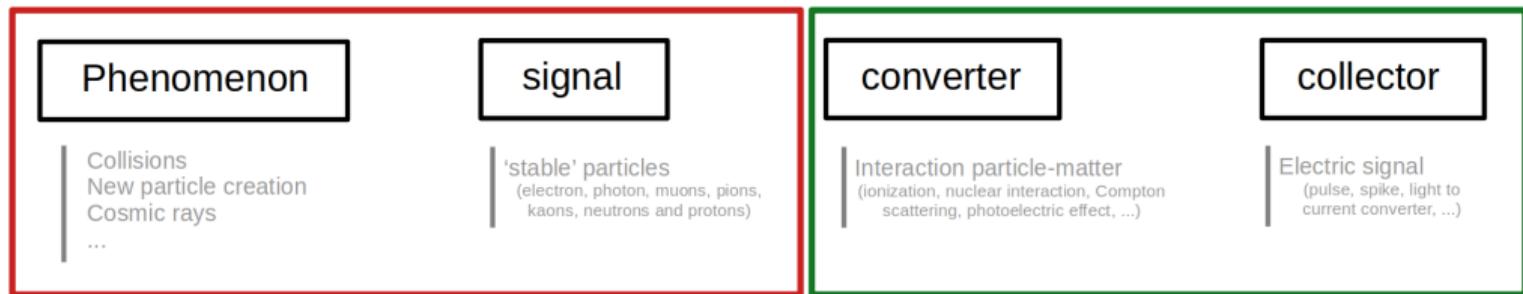
- interaction entre particules neutres non-hadroniques, **les neutrinos**
- **rayonnement de transition** : passage d'une particule entre deux milieux d'indice différent
- **rayonnement Cherenkov** (équivalent du 'bang' du mur du son, pour la lumière)
- ...



Super Kamiokande et l'effet Cherenkov

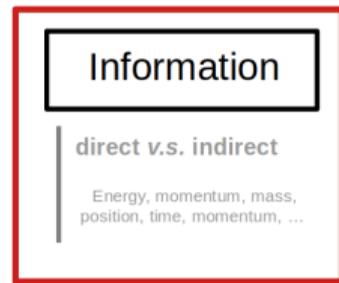


Demandez le programme !



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**

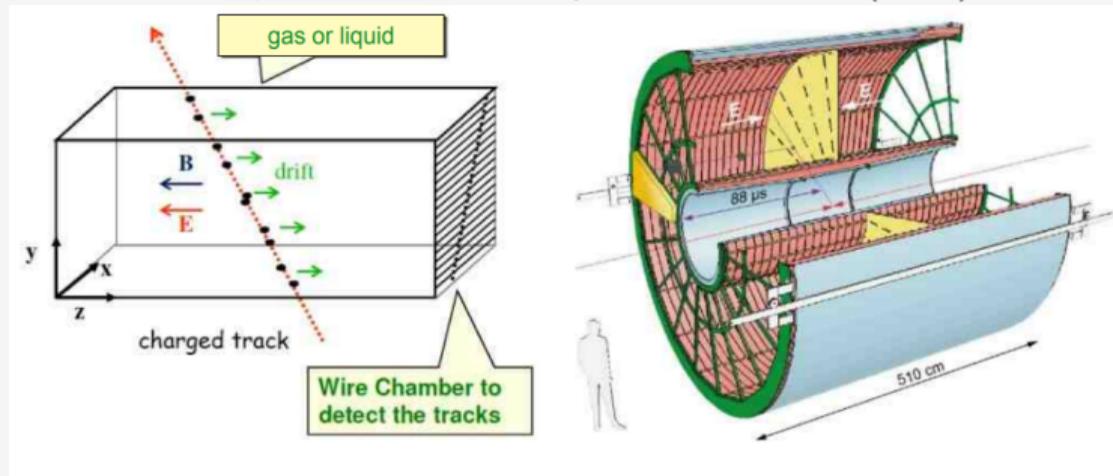
Collecter le signal

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

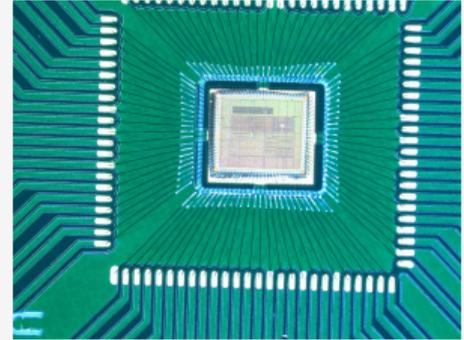
- **impulsion** (échantillonnée et numérisée) → amplitude, phase

Plusieurs types de signaux: par exemple

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

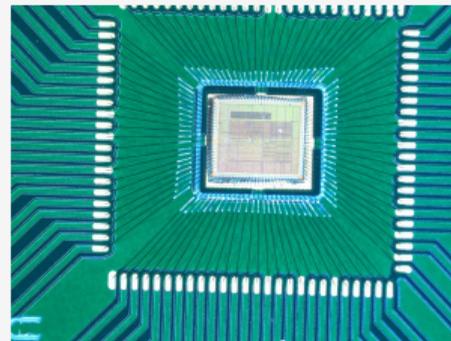
Plusieurs types de signaux: par exemple

- **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

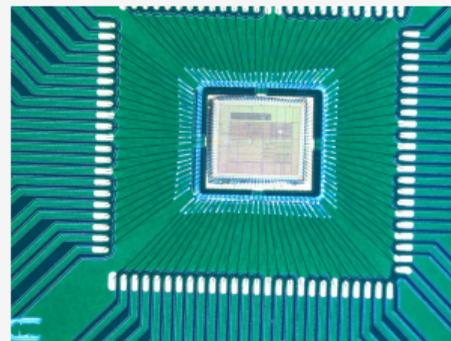
- **impulsion** (échantillonnée et numérisée) → amplitude, phase
- “oui/non” selon que le signal est au dessus d'un seuil
- électronique de lecture **sur-mesure et sophistiquée**



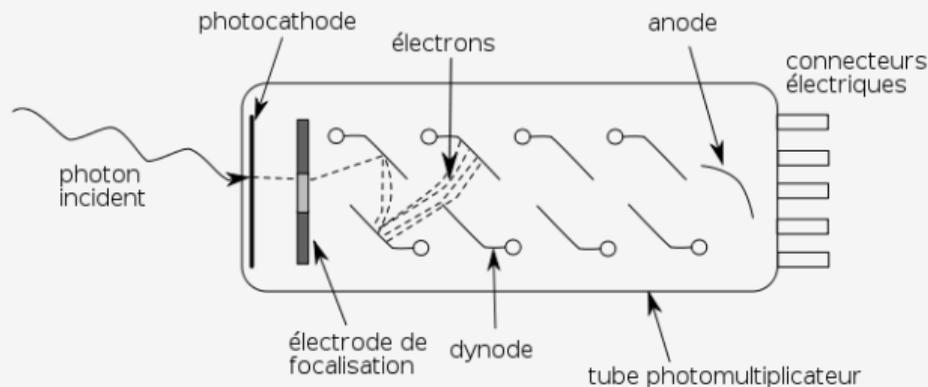
Convertir la lumière en électricité (ex. lumière cherenkov, scintillation ...)

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**

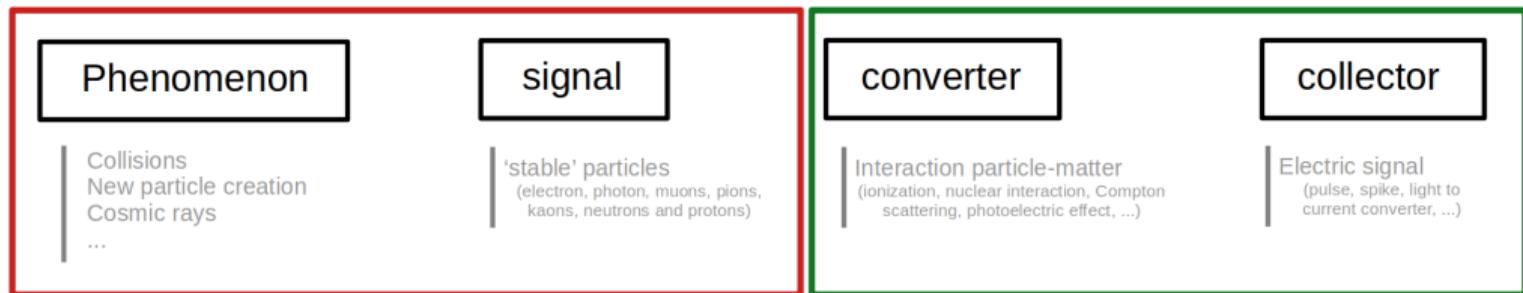


Convertir la lumière en électricité (ex. lumière cherenkov, scintillation ...)

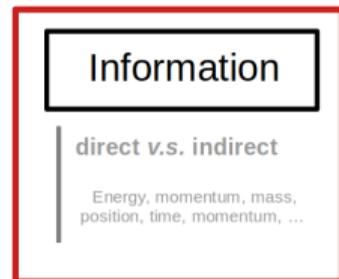


- photo-multiplicateur (à gauche)
- photo-diode
- ...

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

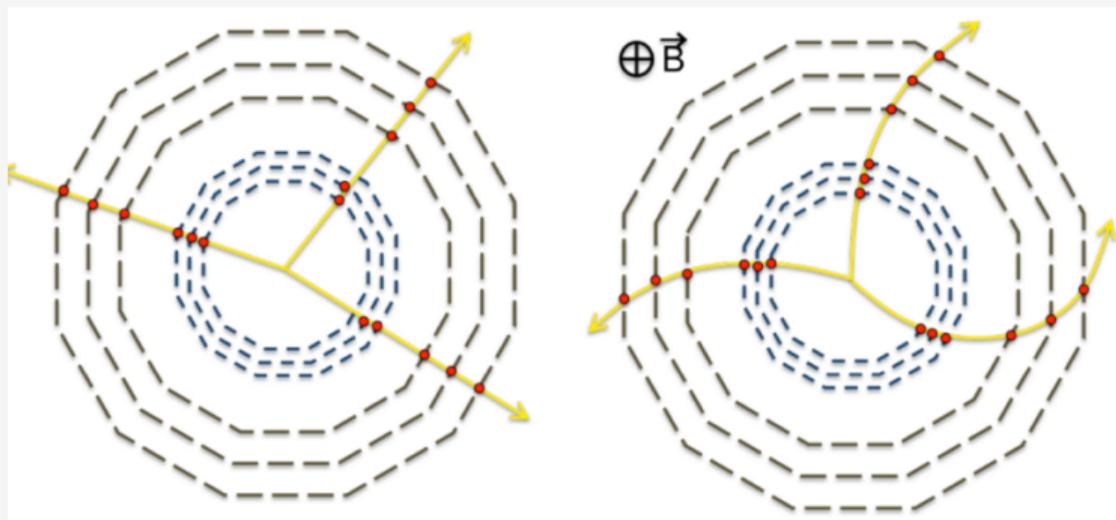
Déterminer la **trajectoire** des particules en les **perturbant le moins possible**

→ 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 :

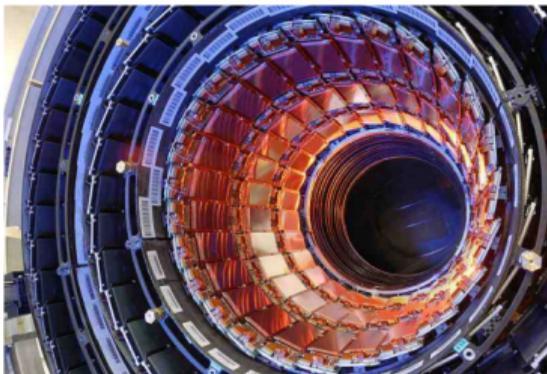
$$R^{-1} = B \frac{Q}{p}$$

Détecteur à semi-conducteur

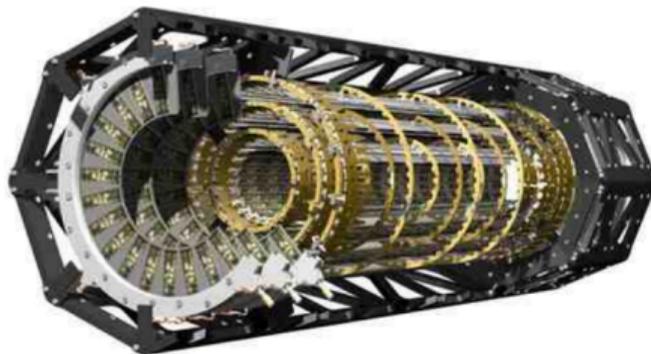
- création de paire electron-trou assez peu couteuse en énergie $\sigma(3 \text{ eV})$
- petite taille de pixels - bonne résolution spatiale $\sigma(20 \mu\text{m})$

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 $\sigma(20 \mu\text{m})$



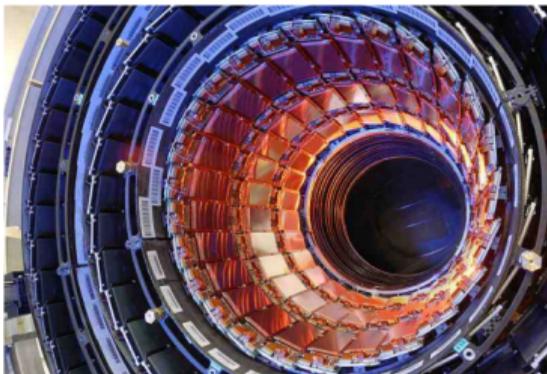
CMS tracker (pixel: $10\text{-}20 \mu\text{m}$)



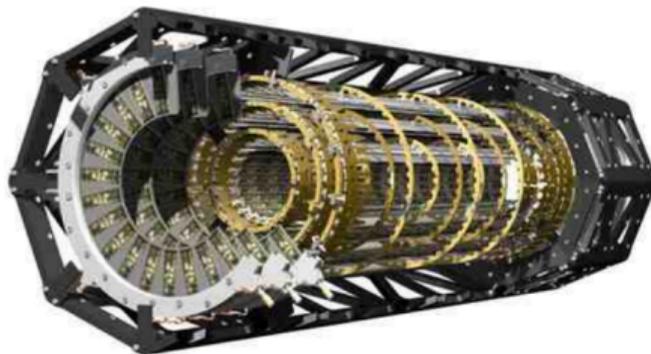
ATLAS pixel ($15 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$)

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: $10\text{-}20 \mu\text{m}$)

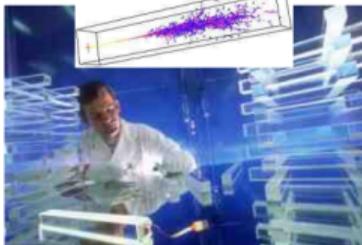
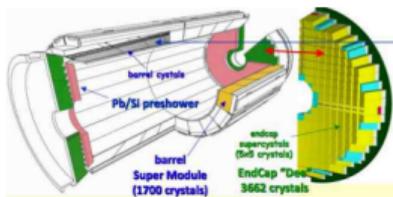


ATLAS pixel ($15 \mu\text{m}, 100 \mu\text{m}$)

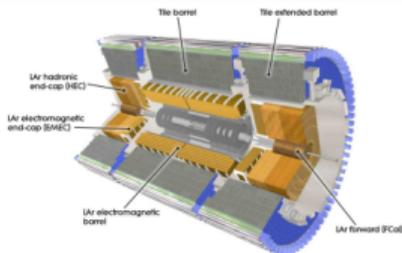
[YouTube Video](#)

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 PbWO₄



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

Remarques:

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

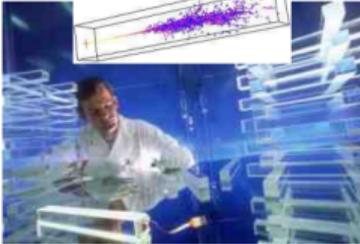
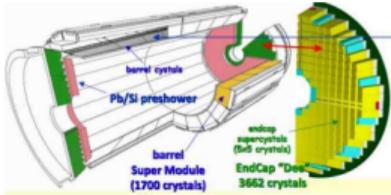
$$\frac{\Delta E}{E} \approx \frac{a}{\sqrt{E}} + \frac{b}{E}$$

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

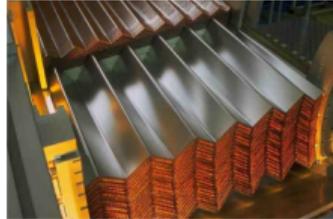
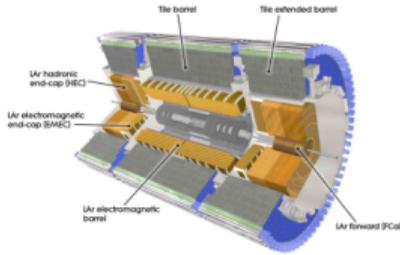
$$b \sim o(0.15 \text{ GeV})$$

- **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 PbWO_4



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

Remarques:

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

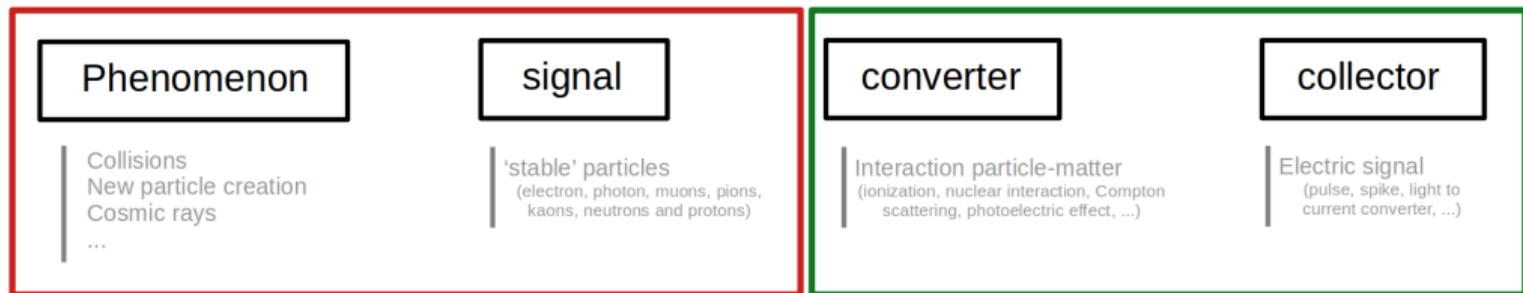
$$\frac{\Delta E}{E} \approx \frac{a}{\sqrt{E}} + \frac{b}{E}$$

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

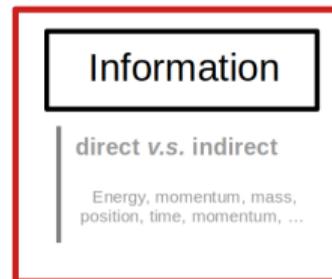
$$b \sim o(0.15 \text{ GeV})$$

- étalonnage nécessaire !

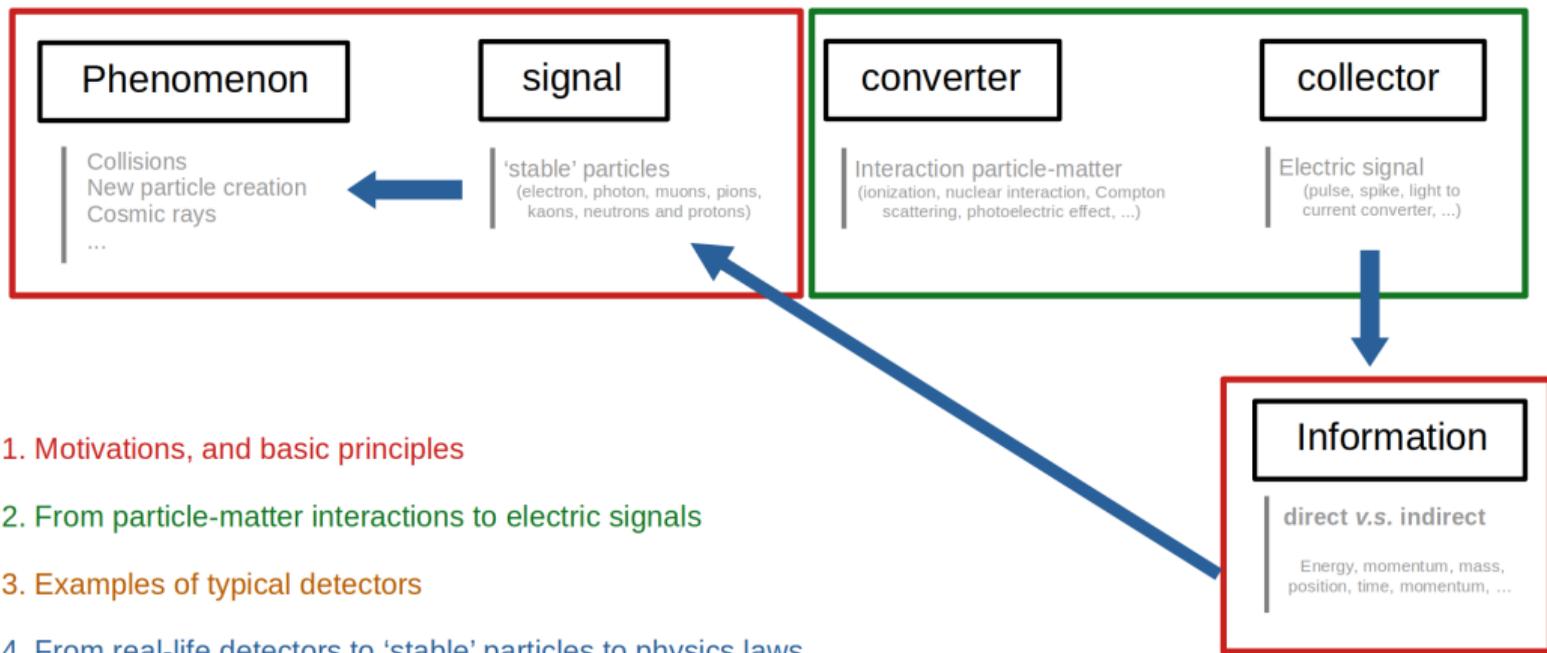
Demandez le programme !



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.

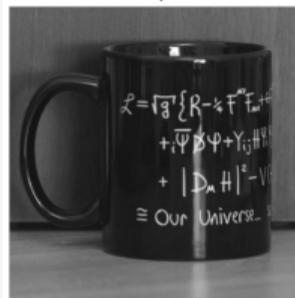
→ exemple des collisions proton-proton du LHC, mesurées par le détecteur ATLAS

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 (γ '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

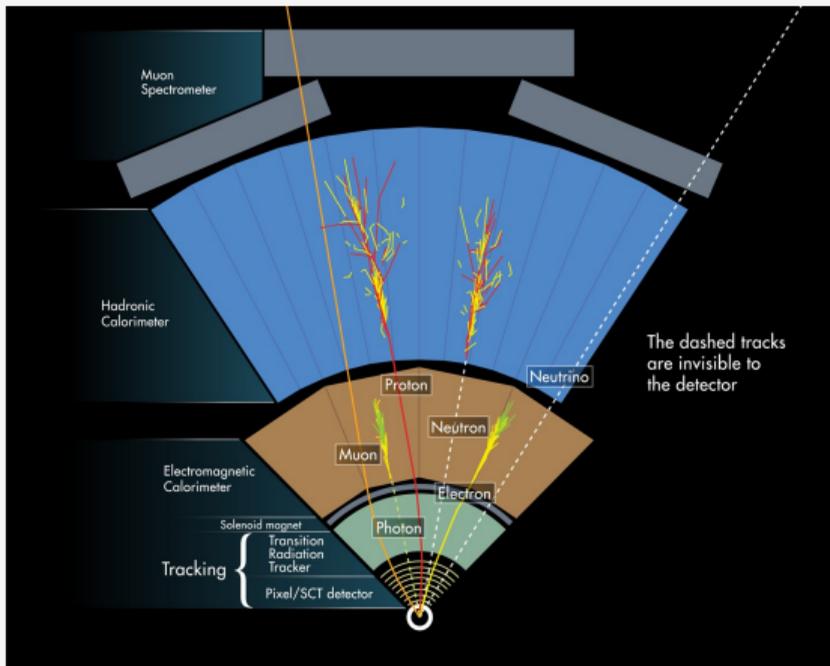
Le LHC est le dernier maillon d'une chaîne complexe d'accélérateurs



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

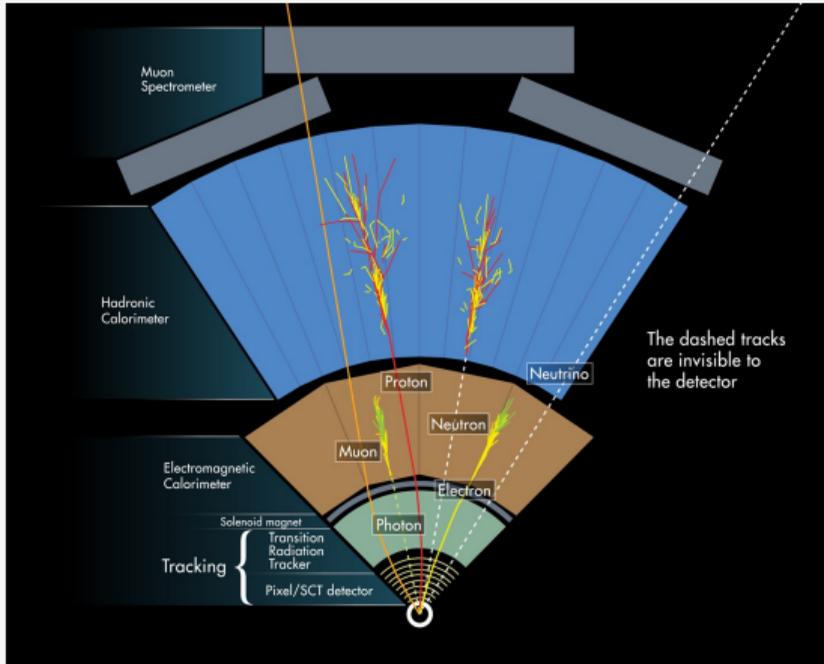
L'union fait la force ...

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



L'union fait la force ...

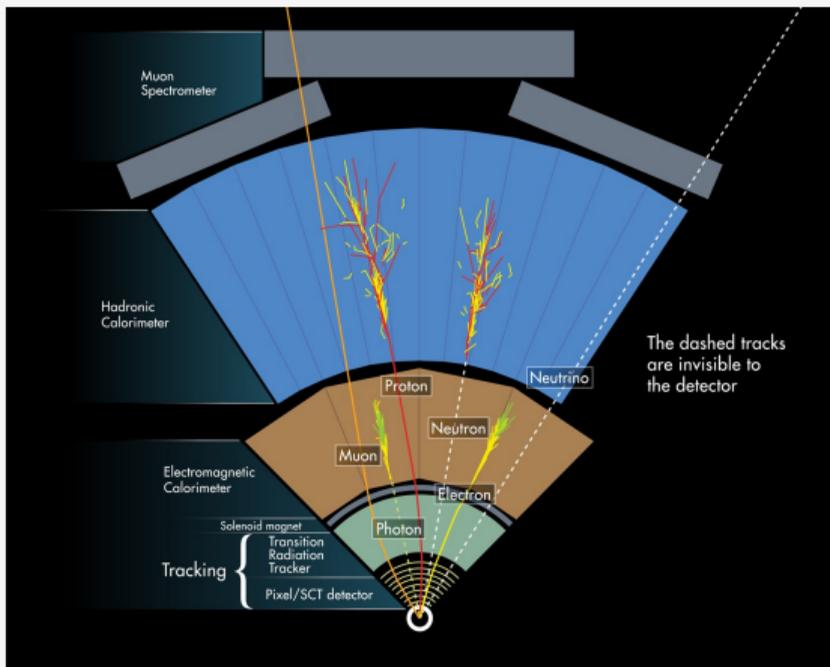
Seule l'utilisation conjointe de différents sous-détecteurs permet d'identifier les particules produites dans la collision



“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



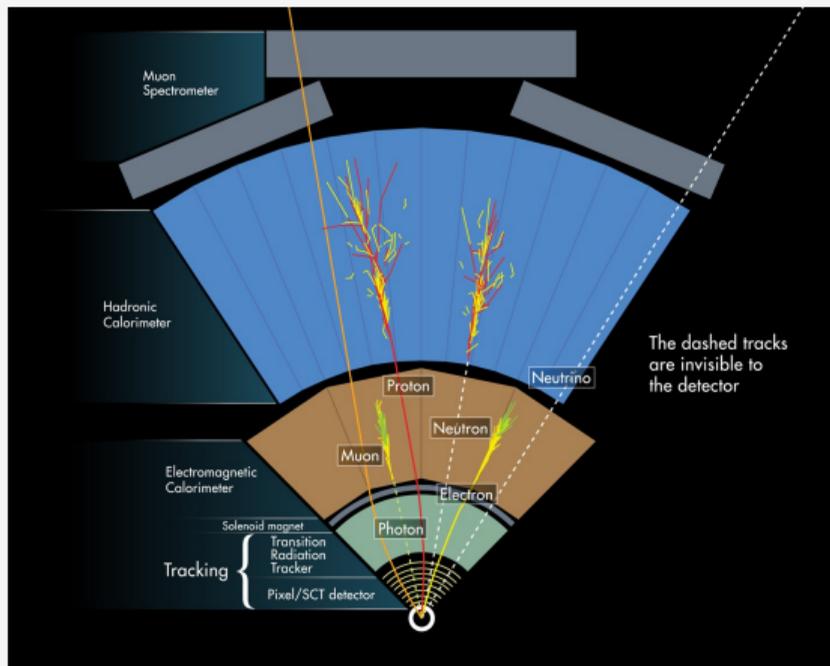
“Couche d'oignon”

- 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 ($+\vec{B}$)

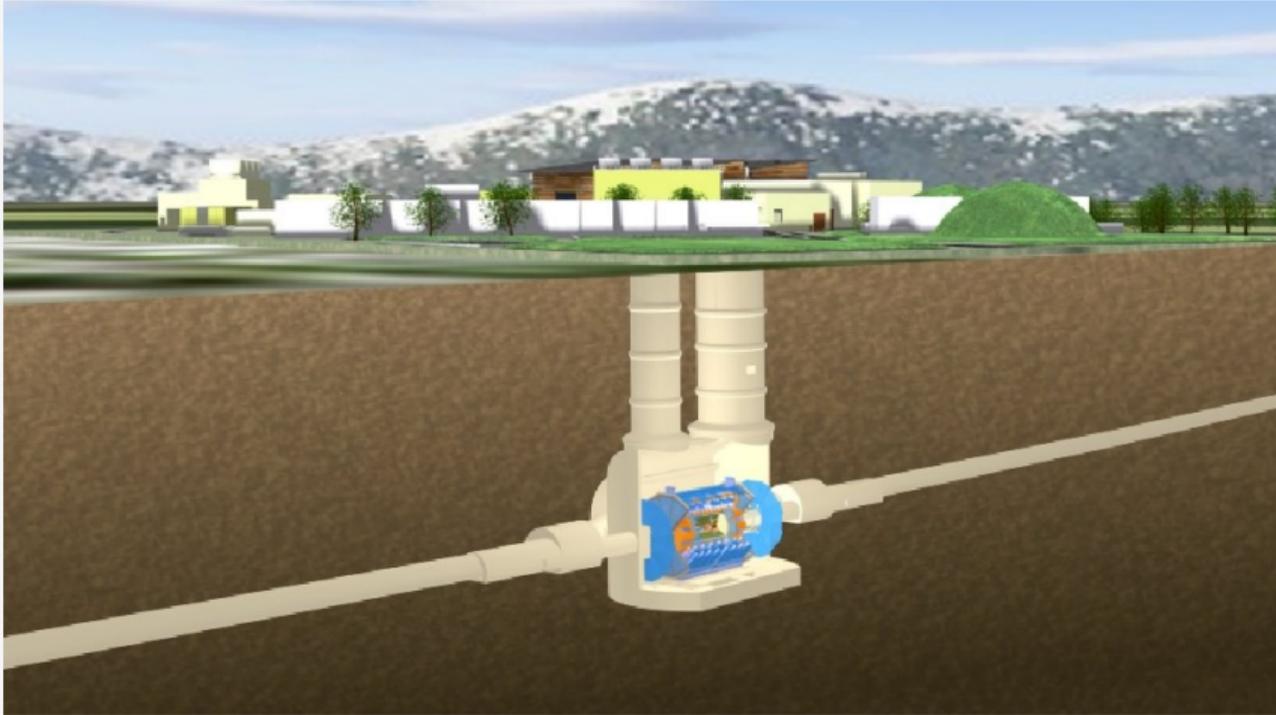
Les neutrinos

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

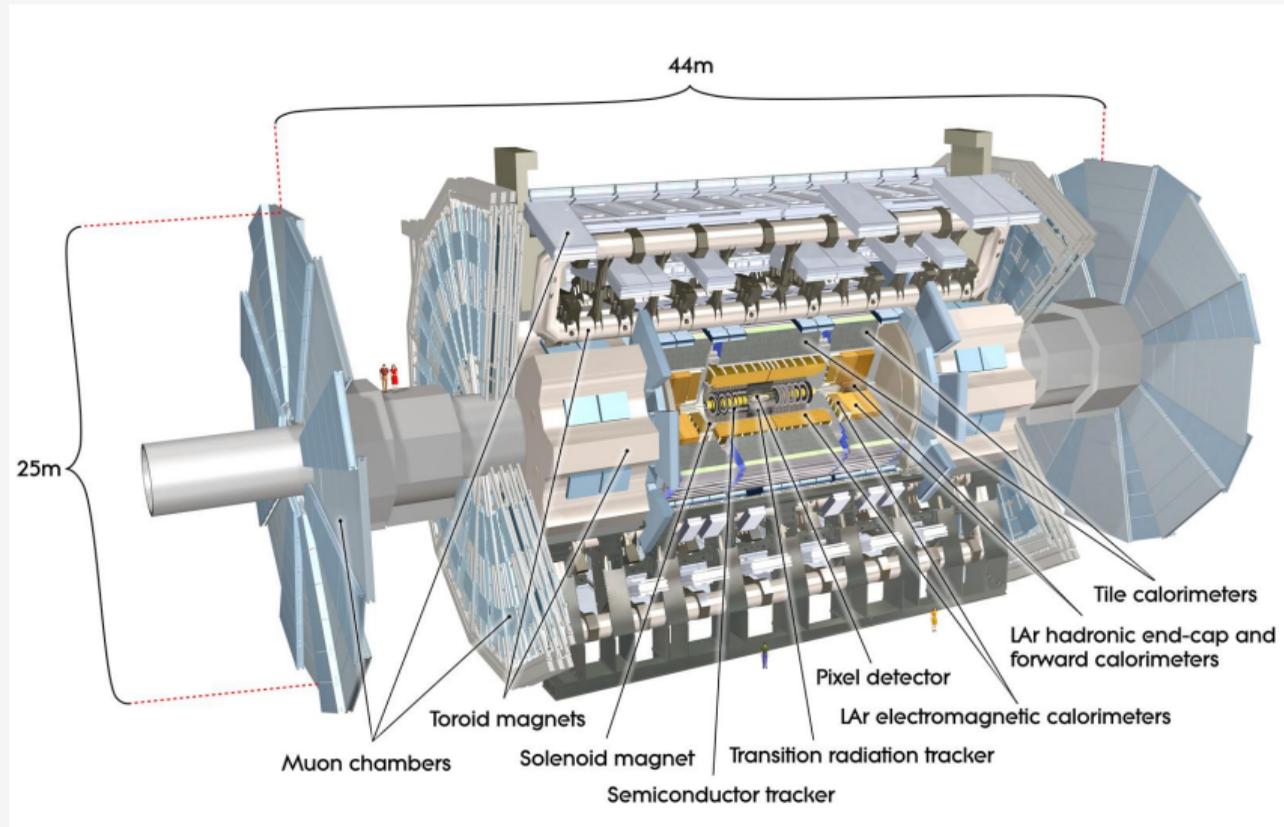
Les quarks

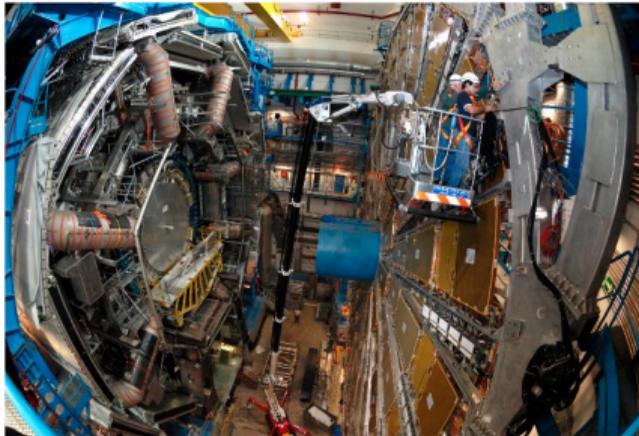
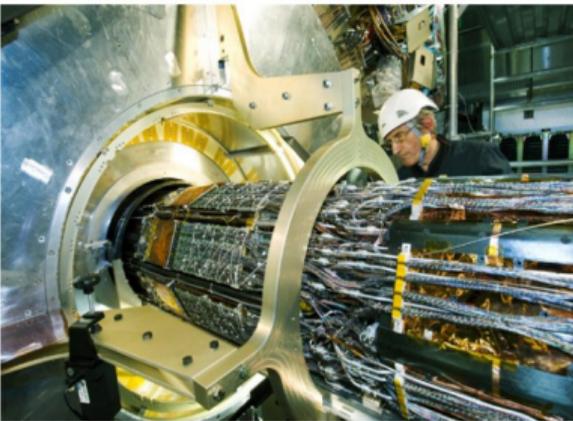
n'existent pas à l'état libre \rightarrow produit un jet de hadrons

Le détecteurs ATLAS au complet

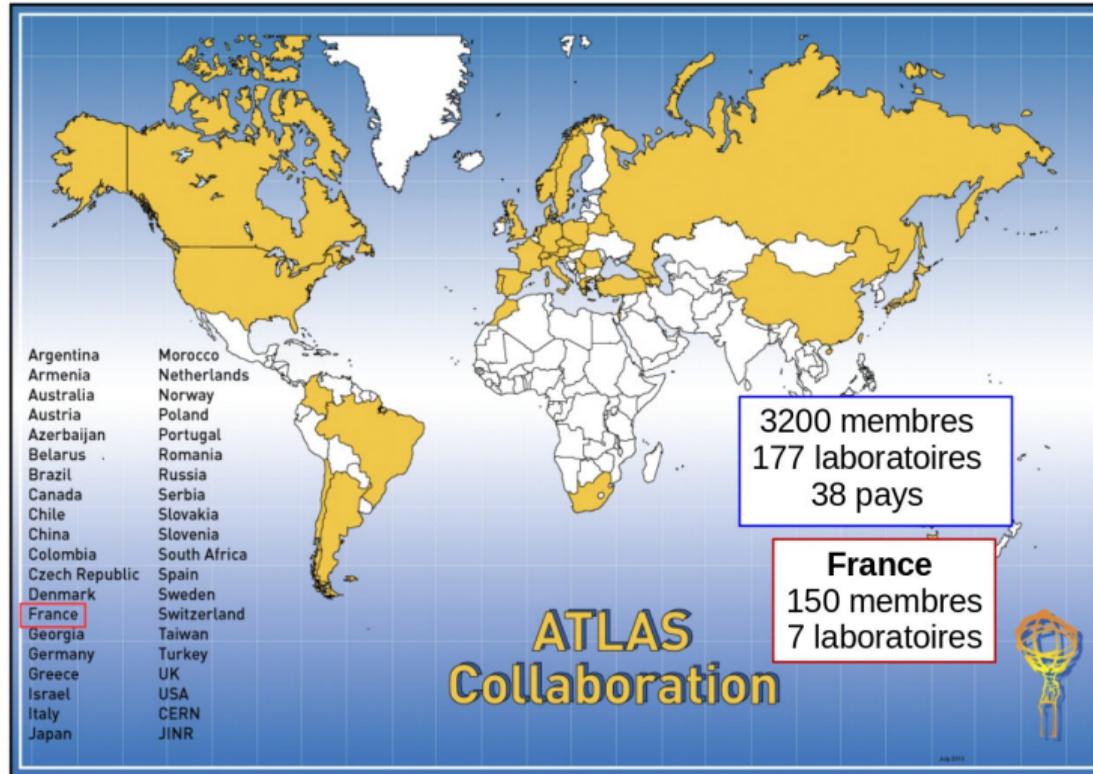


Le détecteurs ATLAS au complet

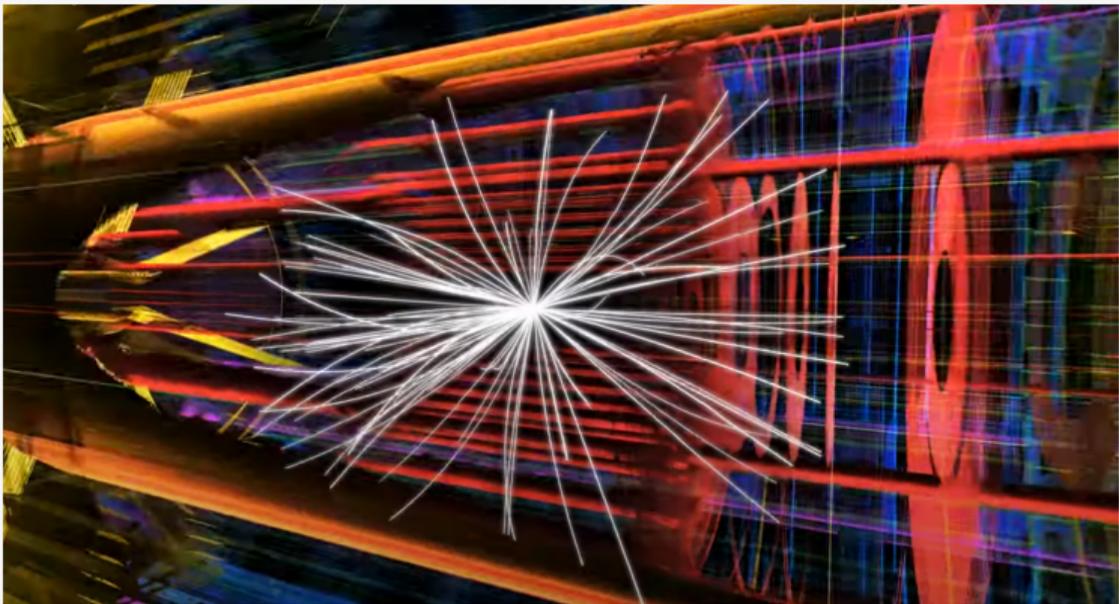




La collaboration ATLAS



Simulation animée d'une collision



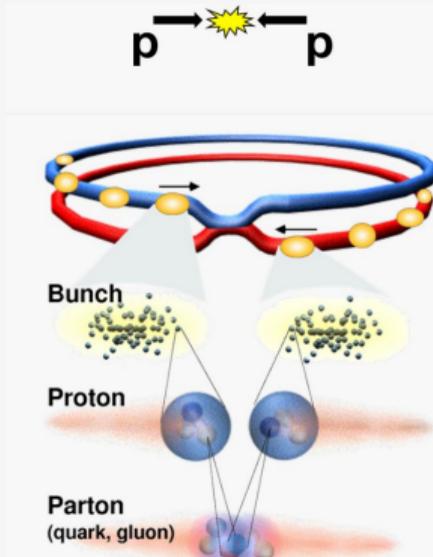
[YouTube Video](#)

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 :

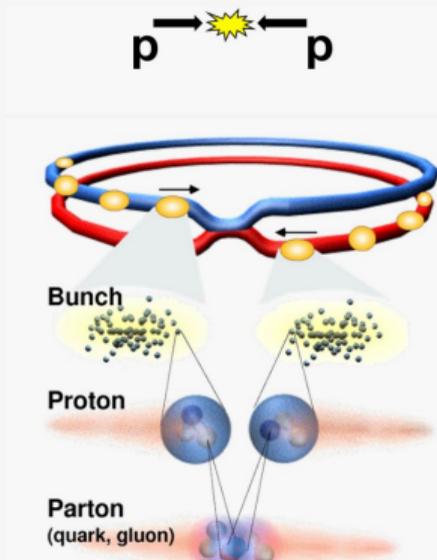
- processus *quantique* : collision **unique impossible** à prédire → prédiction des **probabilités**
- **grand nombre de collisions** nécessaire pour tester **la théorie**



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

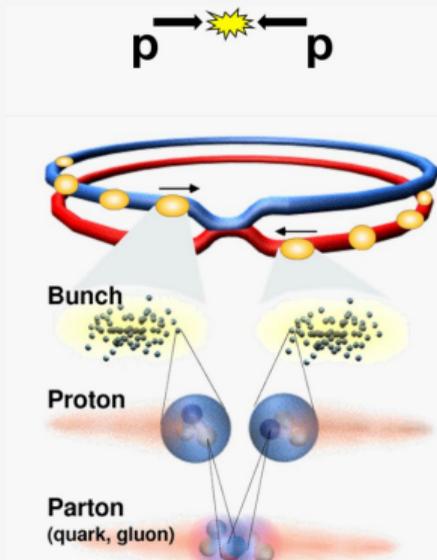
→ capacité de stockage impose l'enregistrement de
~1000 collisions / s

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 ...

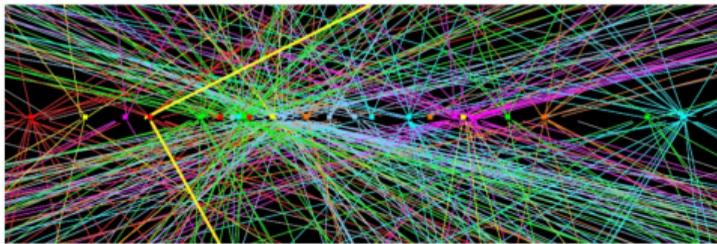


Fréquence de croisement de paquets : 20 - 40 MHz

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

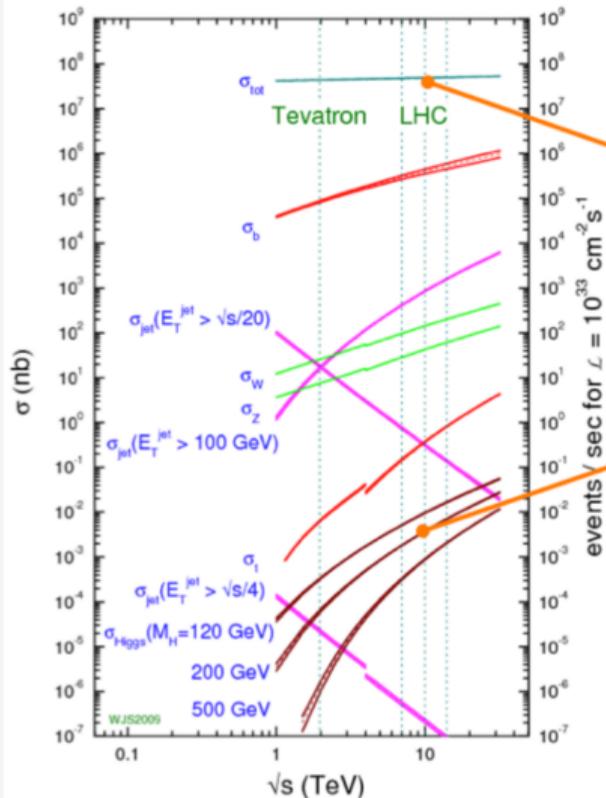
Selection rapide des **collisions intéressantes** basée
sur une **reconstruction simplifiée**

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 ?

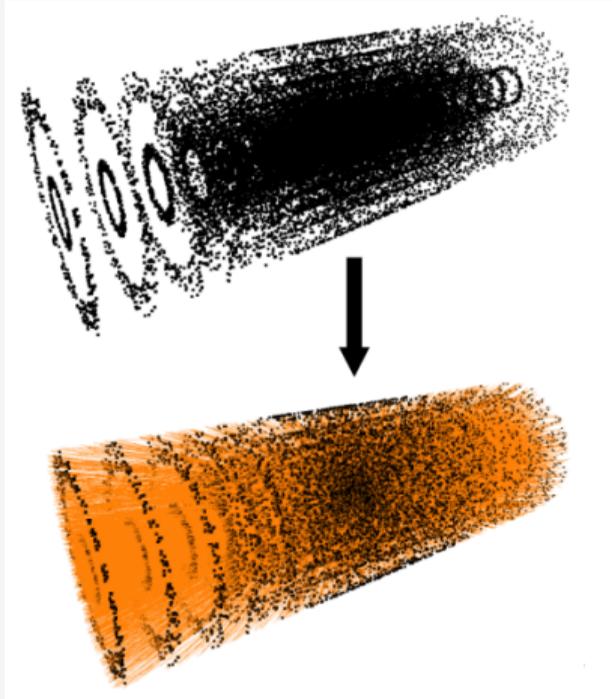
1. exemple d'une photo : du signal brut à l'identification de l'objet photographié
2. les détecteur ne mesurent que des **temps**, des **positions** et des **dépôts d'énergie**
3. **identifier la nature des particules** est indispensable pour **trier les collisions**

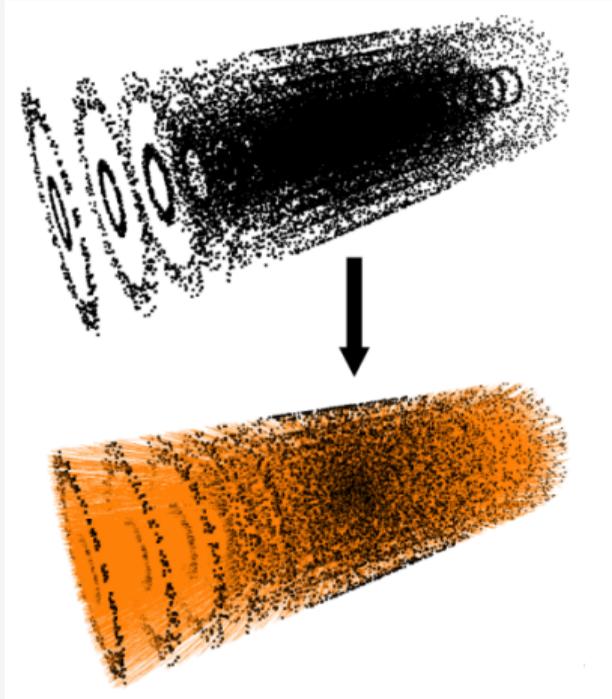
Les quatre grandes questions:

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

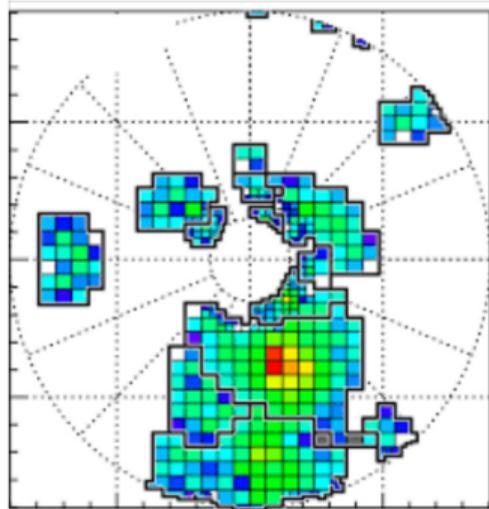




Plusieurs méthodes possibles:

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

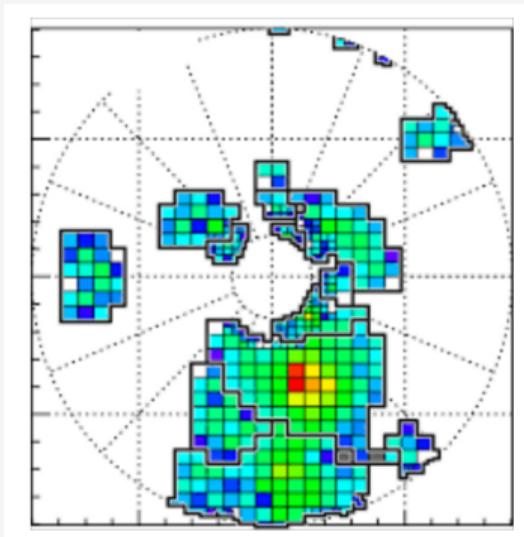
1. Trouver les clusters



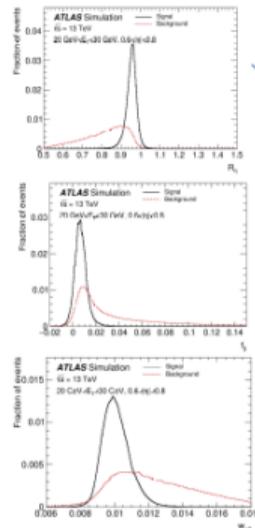
2. Identifier les clusters provenant des électrons

(de ceux qui proviennent d'autres particules)

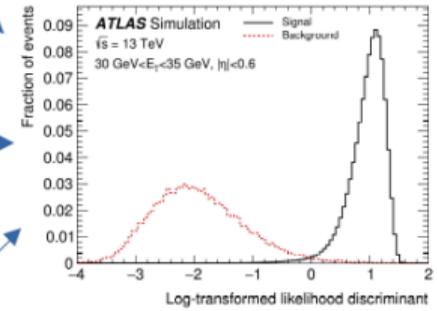
1. Trouver les clusters



variables based on calorimeter clusters

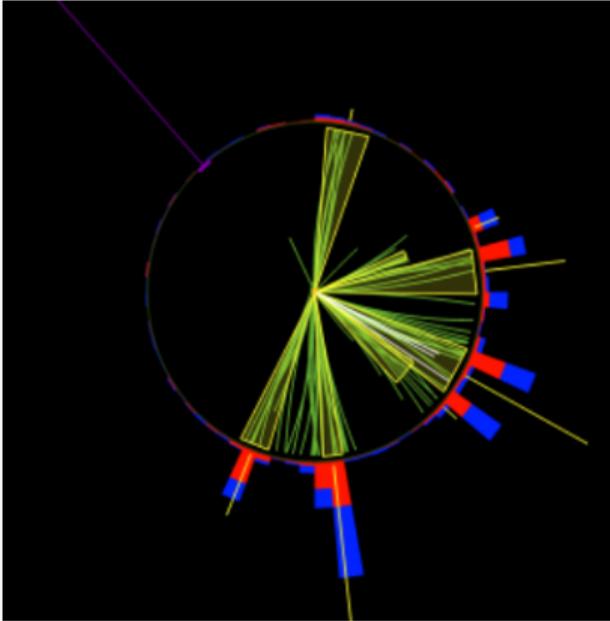


— Signal
- - - Background



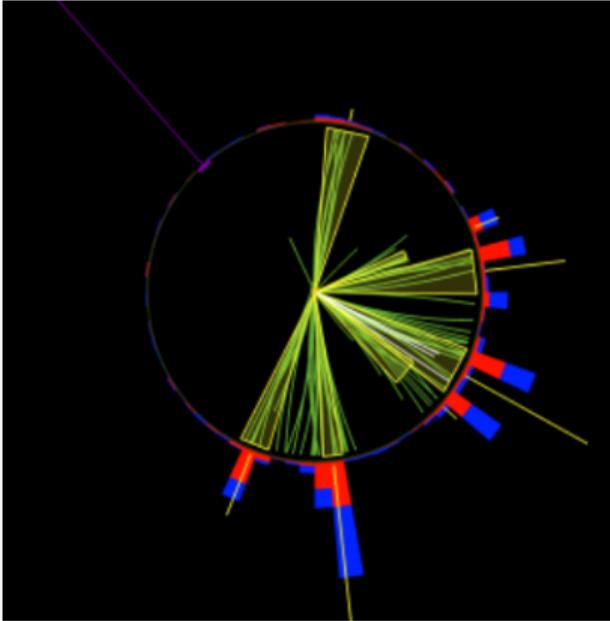
Comment détecter les neutrinos produits sur collisionneur ?

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



Comment détecter les neutrinos produits sur collisionneur ?

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



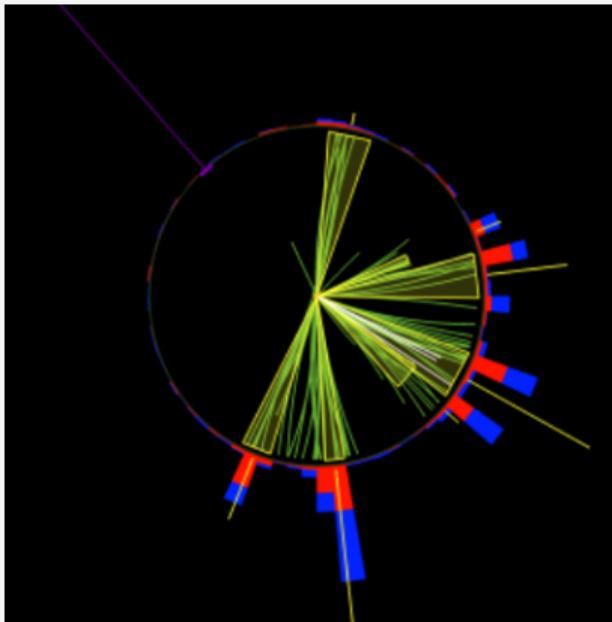
Conservation de la quantité de mouvement:

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

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

Comment détecter les neutrinos produits sur collisionneur ?

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



Conservation de la quantité de mouvement:

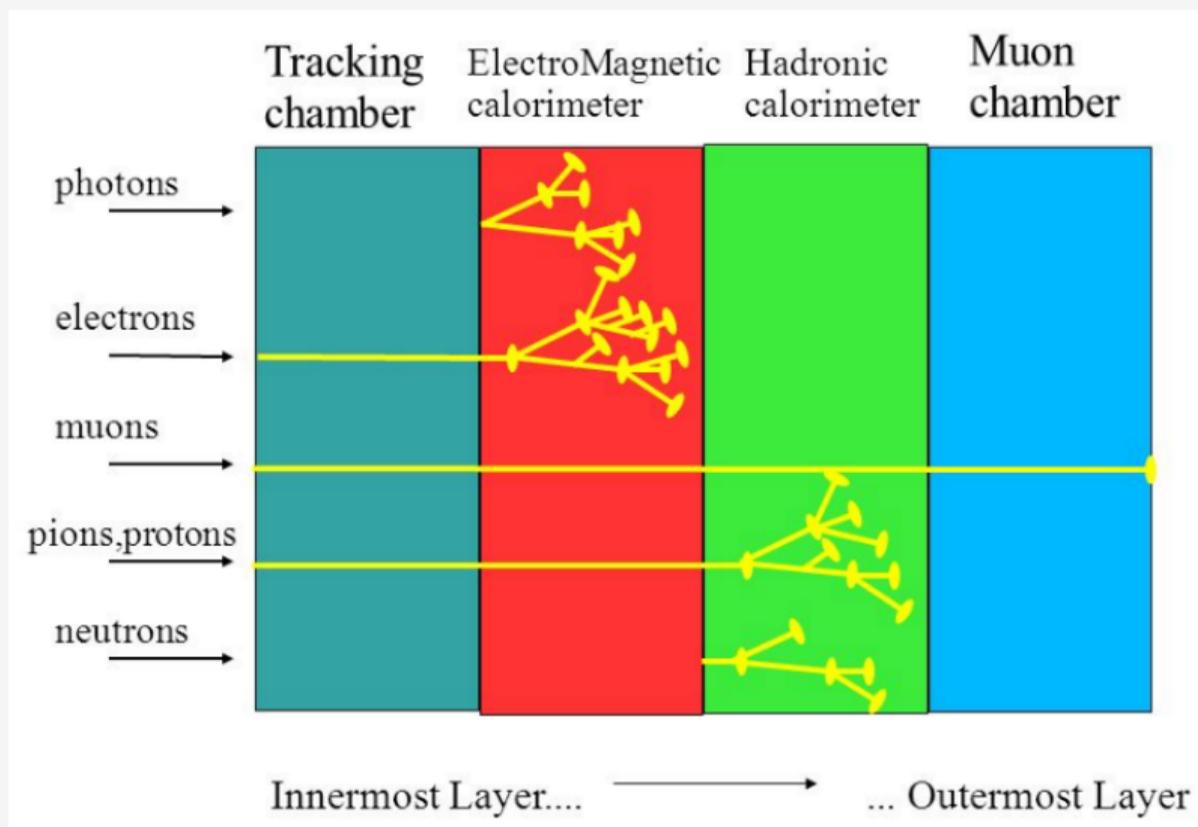
$$\vec{p}_{tot}^{initiale} = \vec{p}_{tot}^{finale} \stackrel{\text{symetric}}{=} \vec{0}$$

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

Difficultés:

- pas de mesure des ν 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

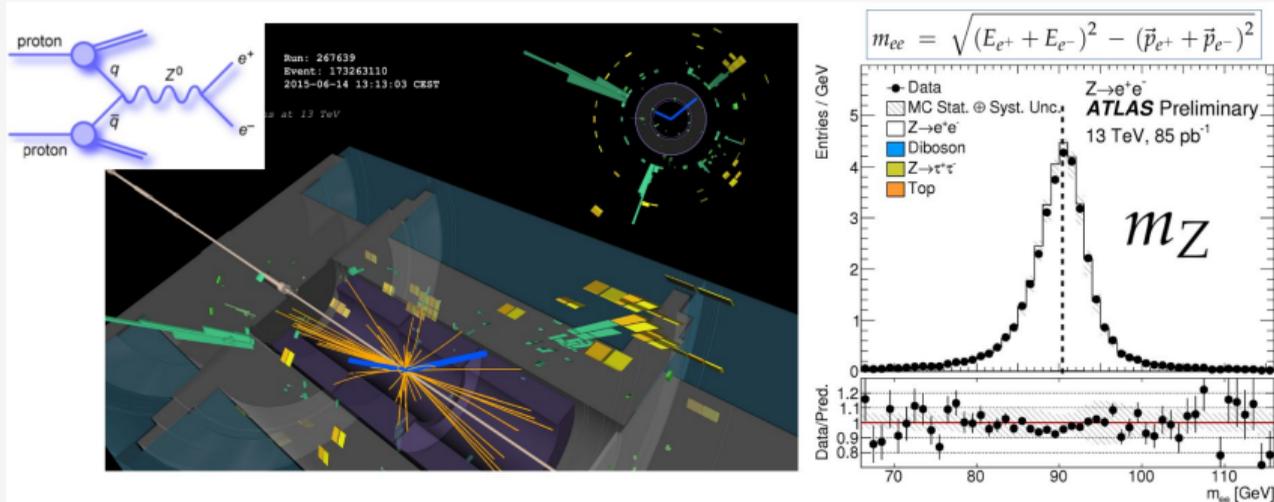
Comment “voir” une particule ?

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 $Z^0 \rightarrow e^+e^-$



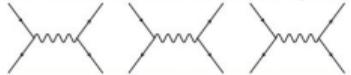
Comment teste-t-on de nouvelles théories ?

Nature

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

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

Calculs de processus
Perturbation, calcul numérique, ...



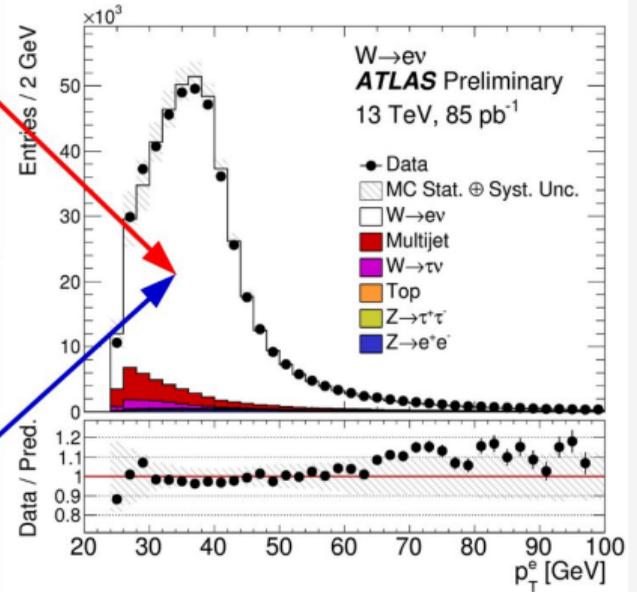
Détecteur réel

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

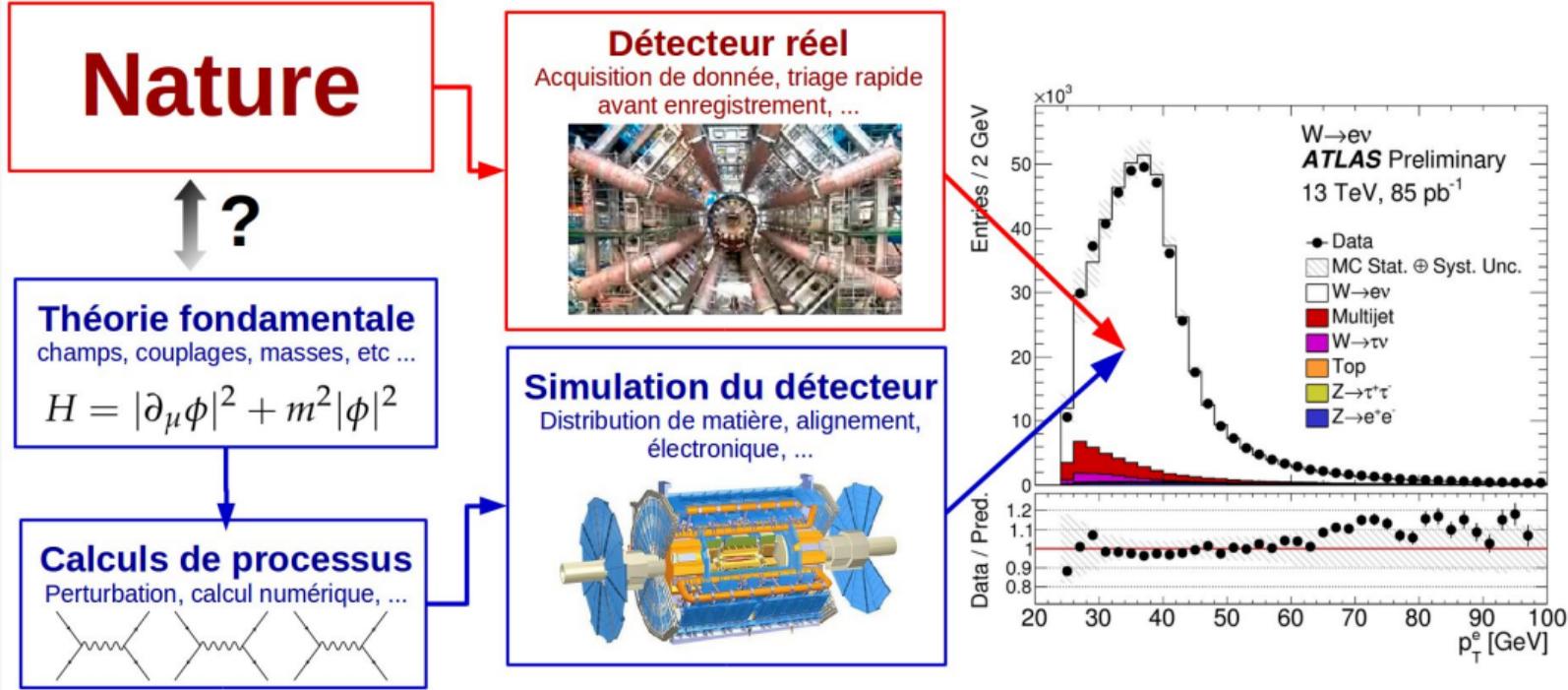


Simulation du détecteur

Distribution de matière, alignement,
électronique, ...

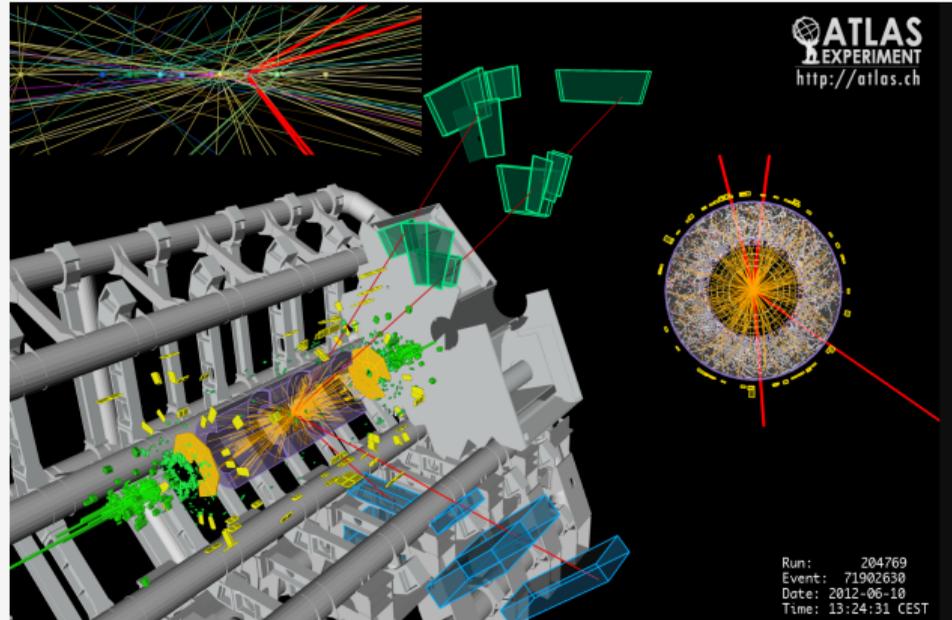


Comment teste-t-on de nouvelles théories ?



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

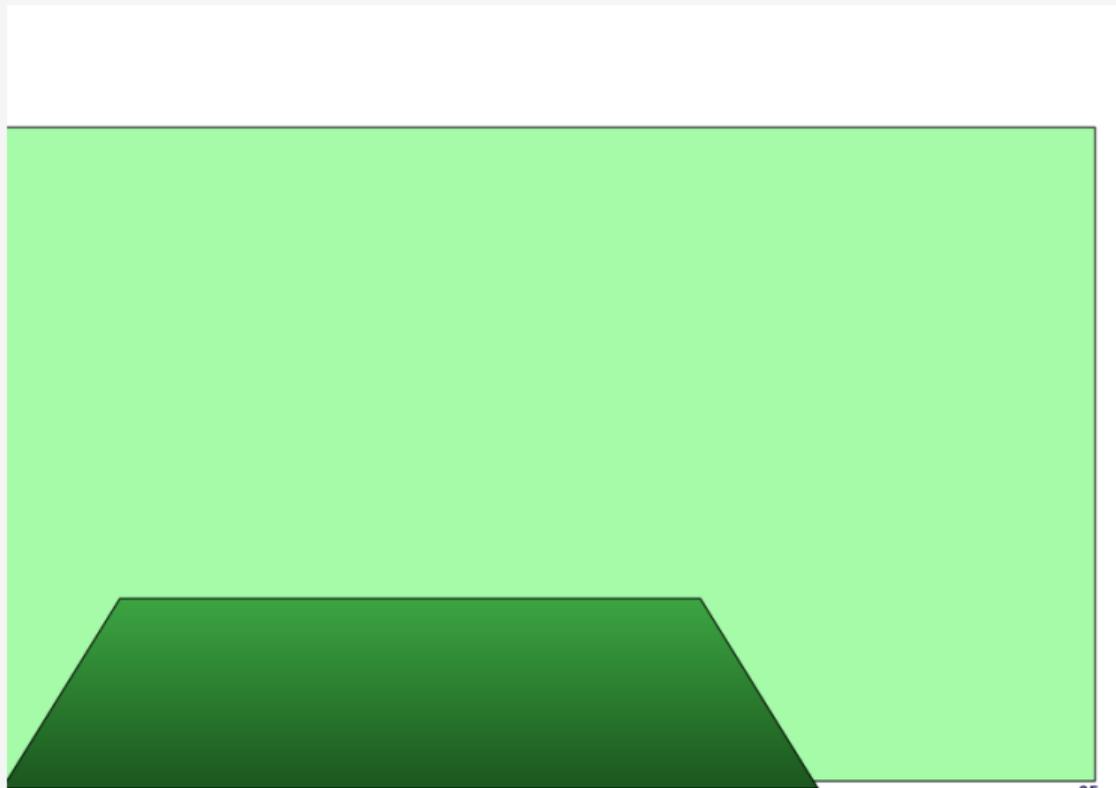
1. La détection de particule se base sur leur **interaction avec la matière**. Ces interactions dépendent de la **masse**, la **vitesse** et la **charge** des particules.

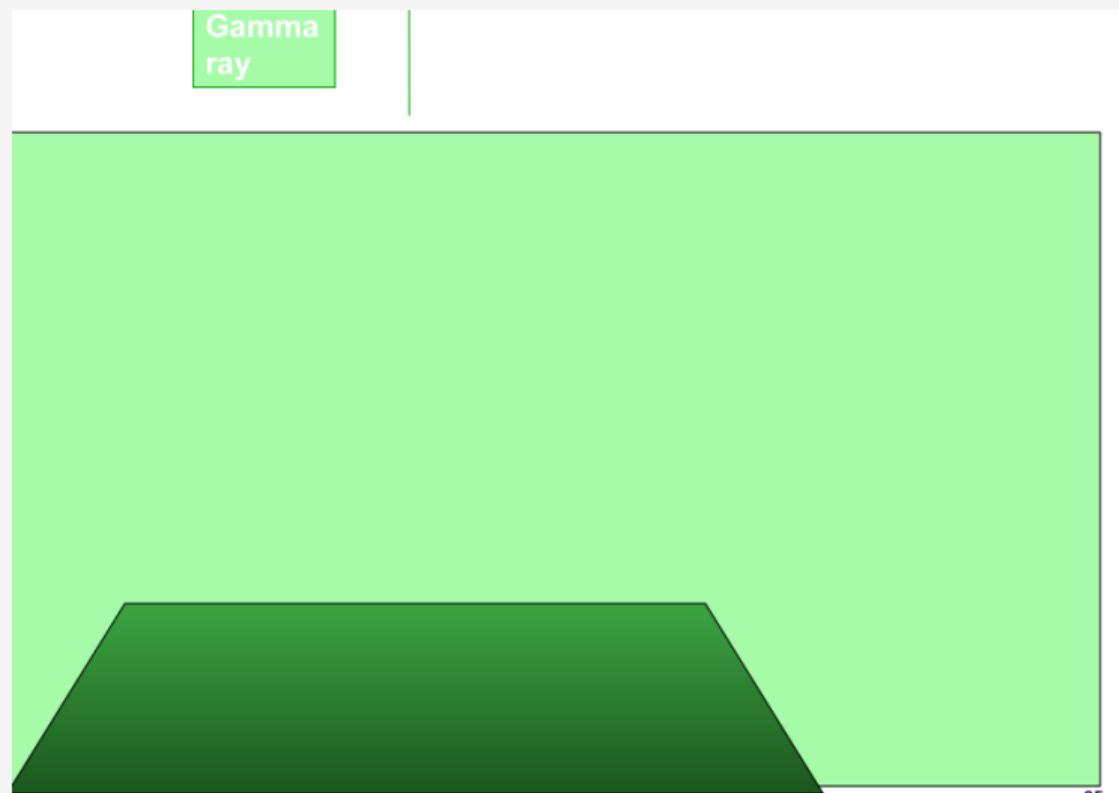
1. La détection de particule se base sur leur **interaction avec la matière**. Ces interactions dépendent de la **masse**, la **vitesse** et la **charge** des particules.
2. Un détecteur réel de physique de particule est souvent **un assemblage de plusieurs détecteurs**. Le **croisement** de ces informations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

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.

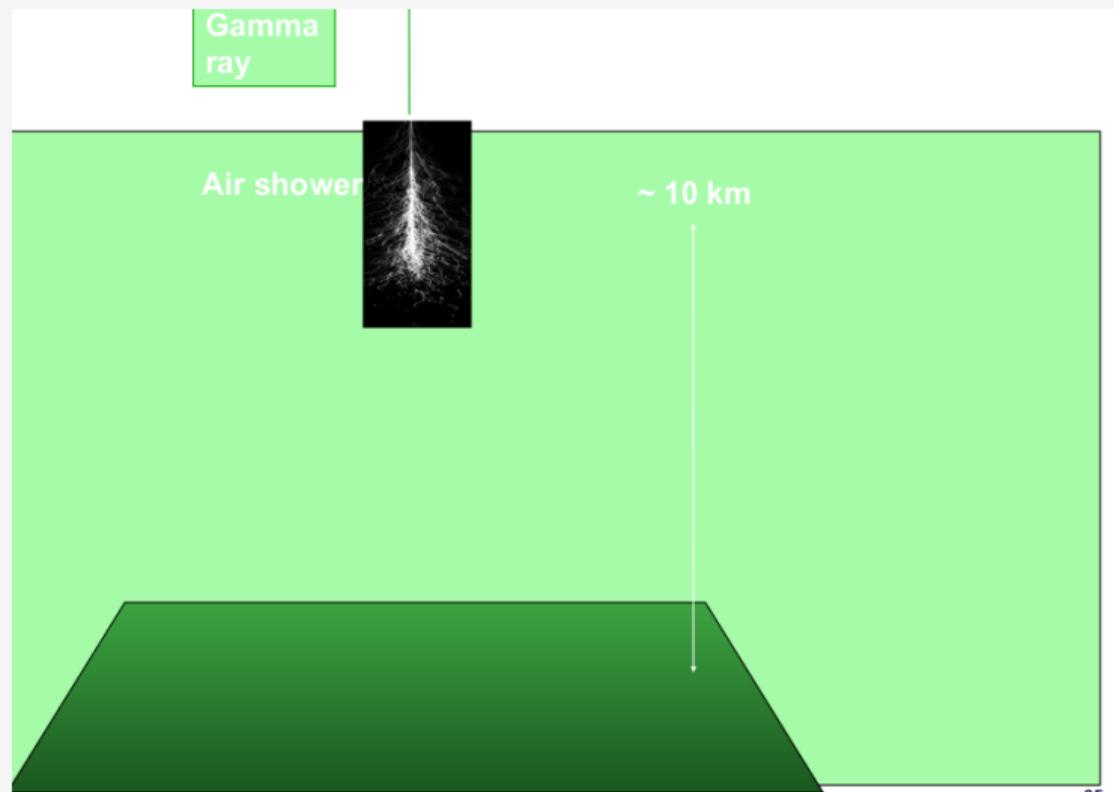
Merci pour votre attention ! Des questions ?

Matériel supplémentaire

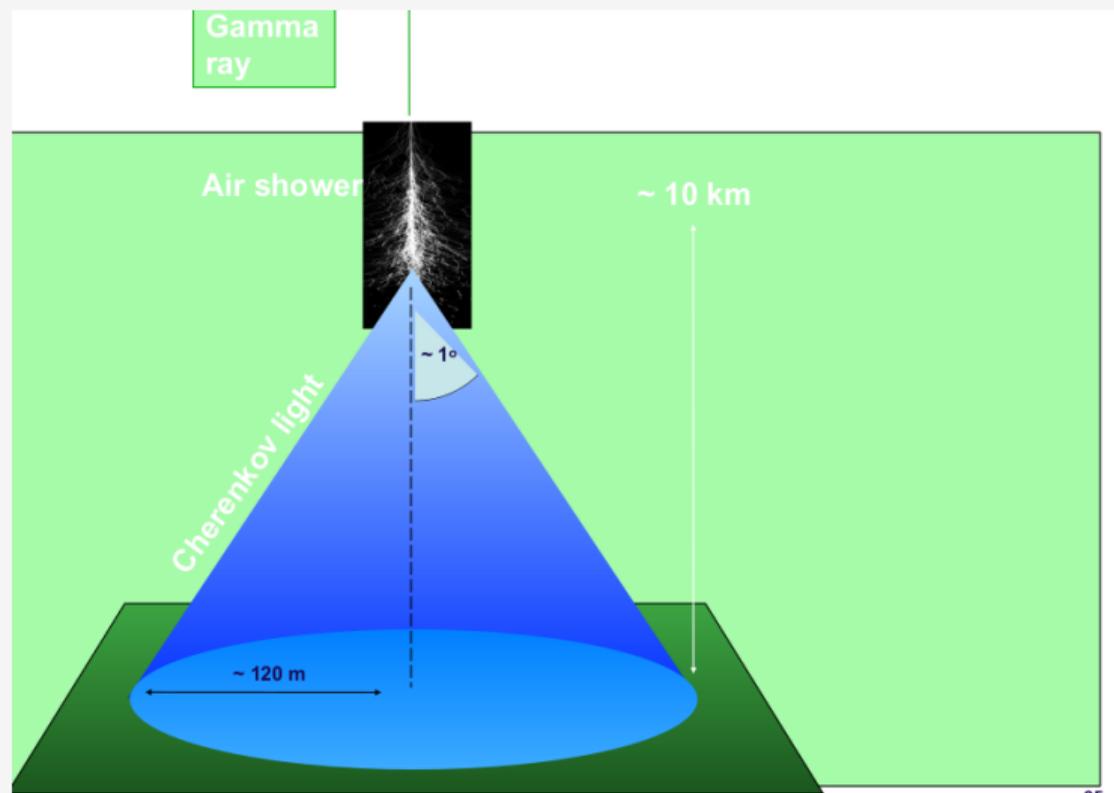




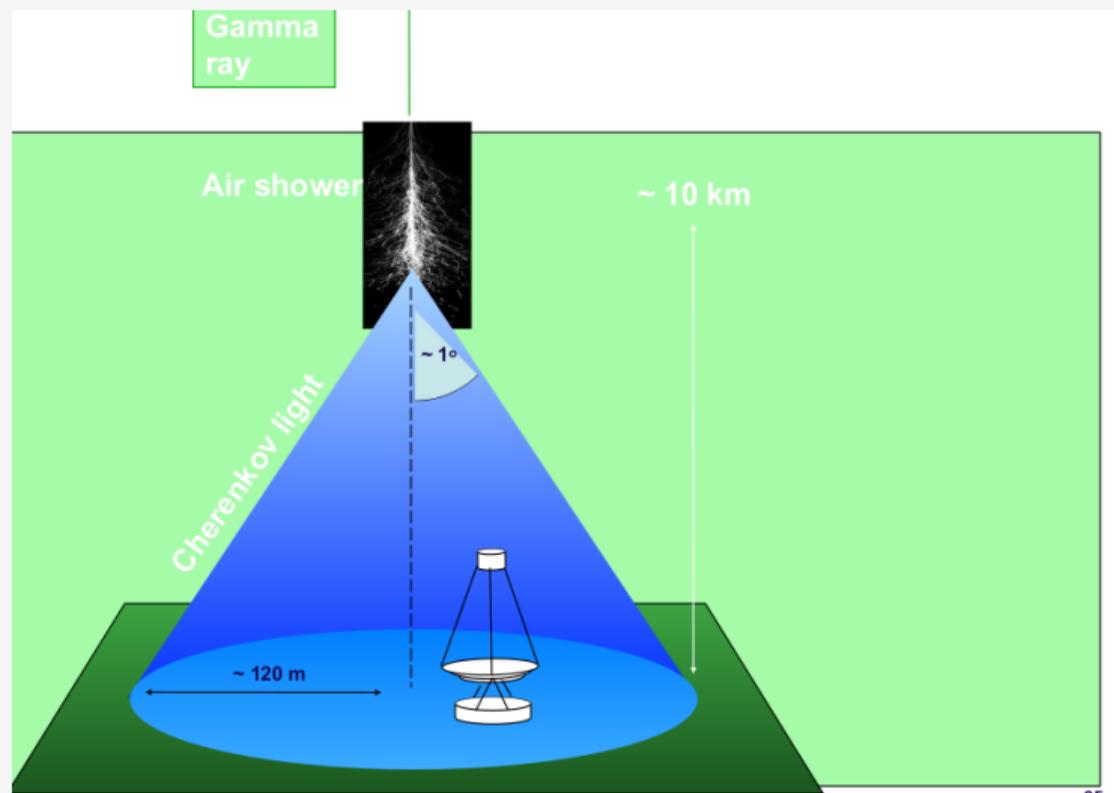
Expérience HESS et l'effet Cherenkov



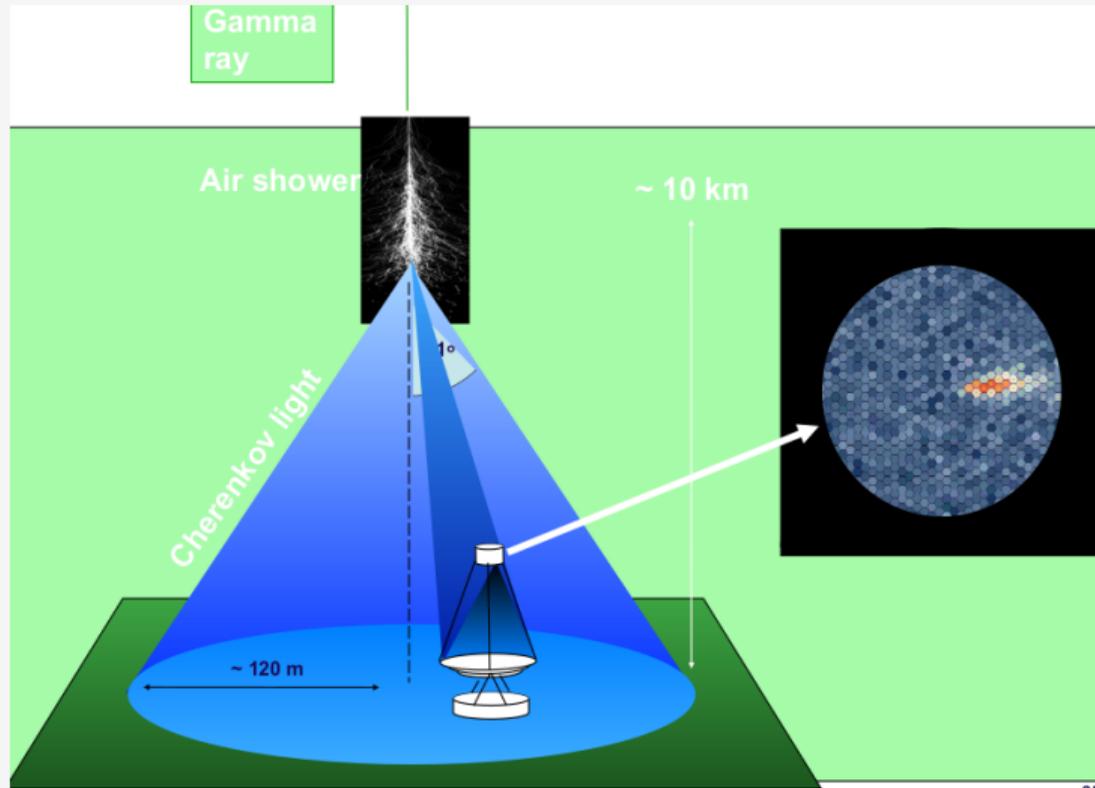
Expérience HESS et l'effet Cherenkov



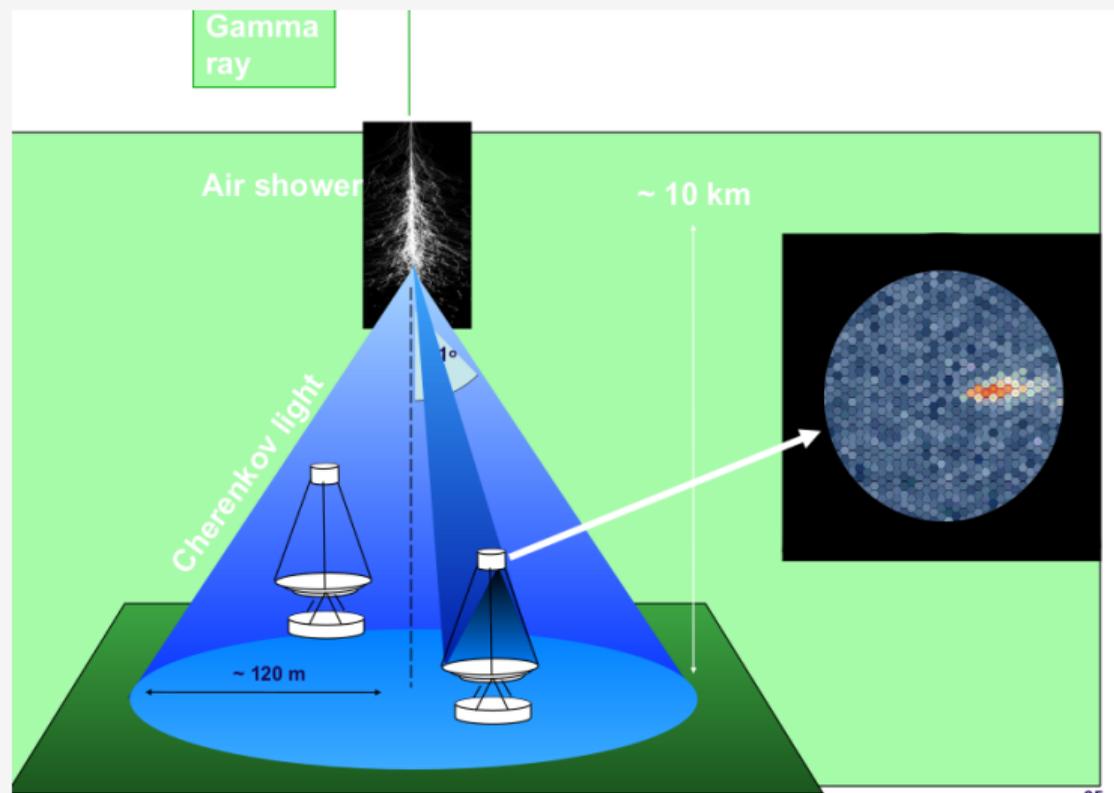
Expérience HESS et l'effet Cherenkov



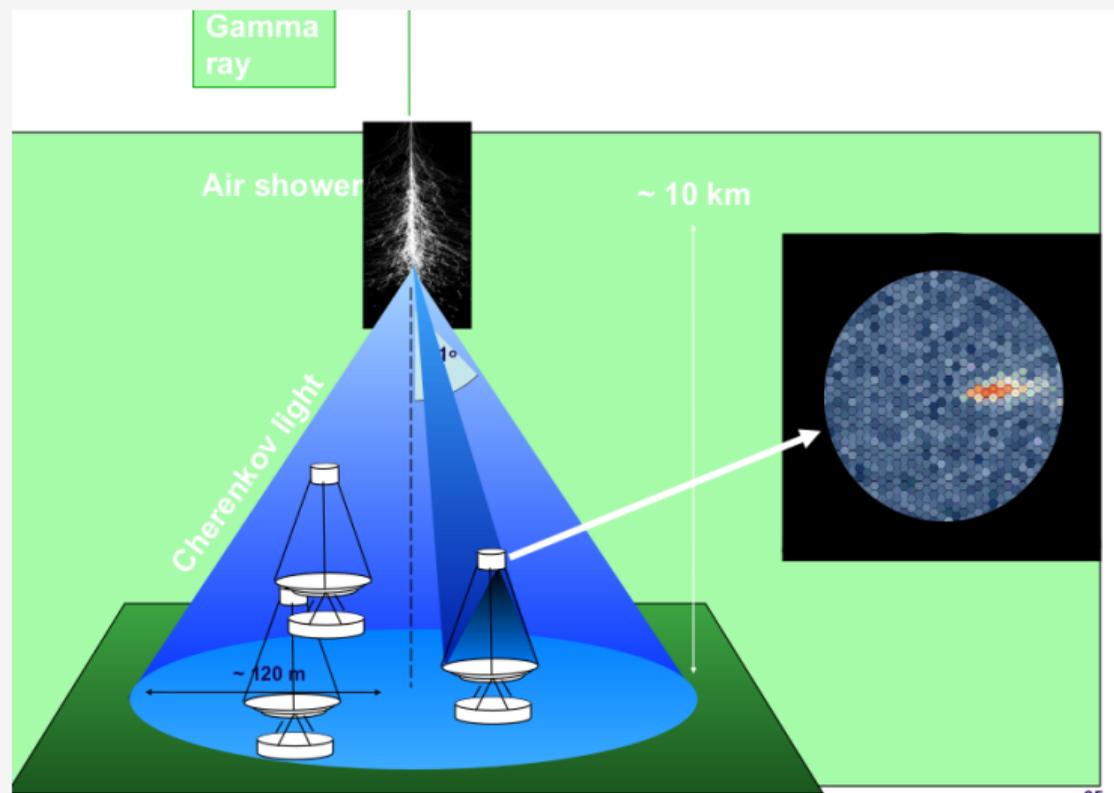
Expérience HESS et l'effet Cherenkov

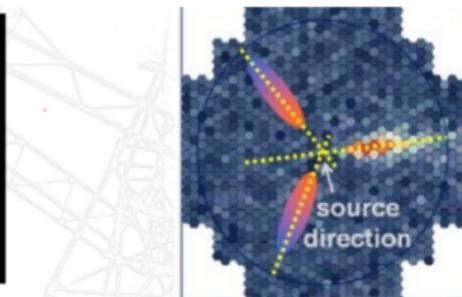
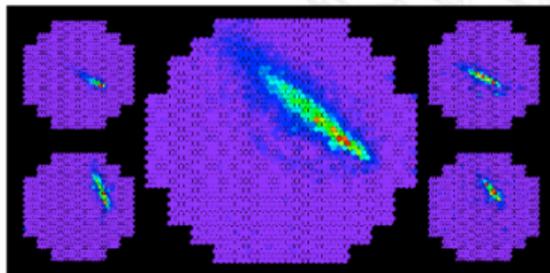


Expérience HESS et l'effet Cherenkov



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

