

# L'origine de la masse et la découverte du boson de Higgs

---

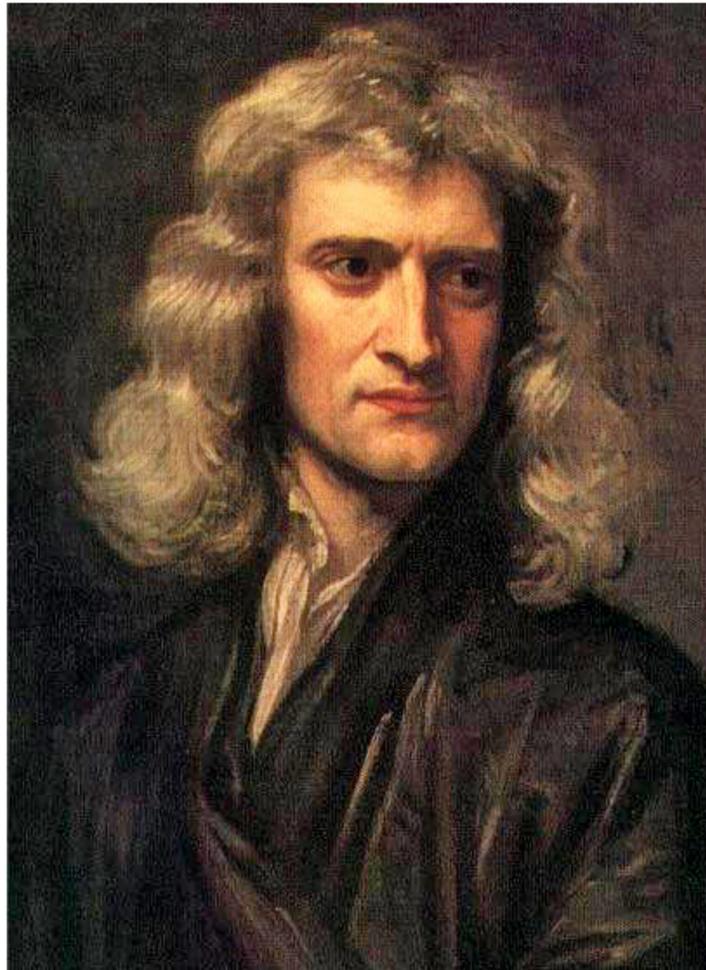
Giovanni Marchiori  
([giovanni.marchiori@apc.in2p3.fr](mailto:giovanni.marchiori@apc.in2p3.fr))  
APC

20 janvier 2023



# Qu'est-ce que la masse?

- Définition intuitive: “**quantité de matière**” d'un objet
- **Isaac Newton** (~1686):

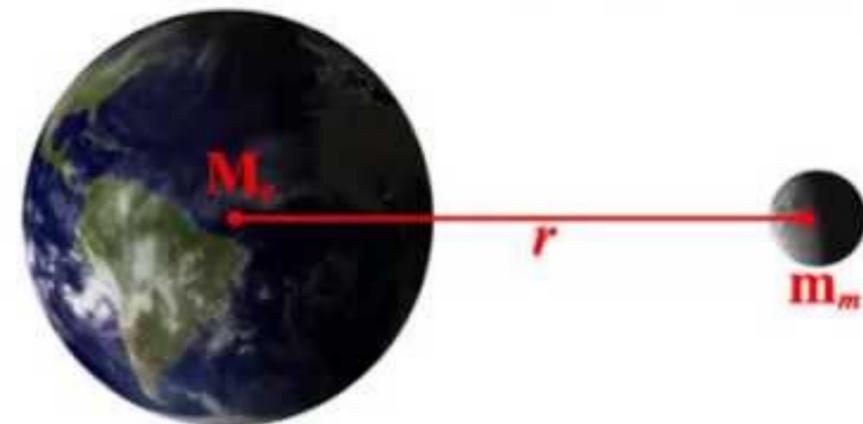


- **masse inertielle**:  $a = F / m$



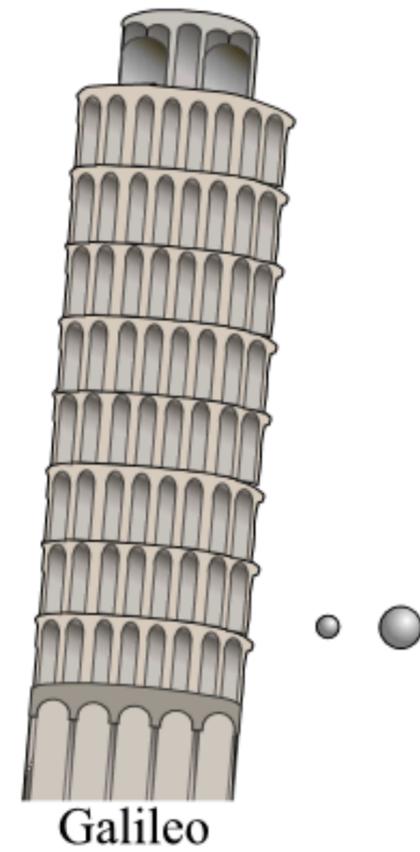
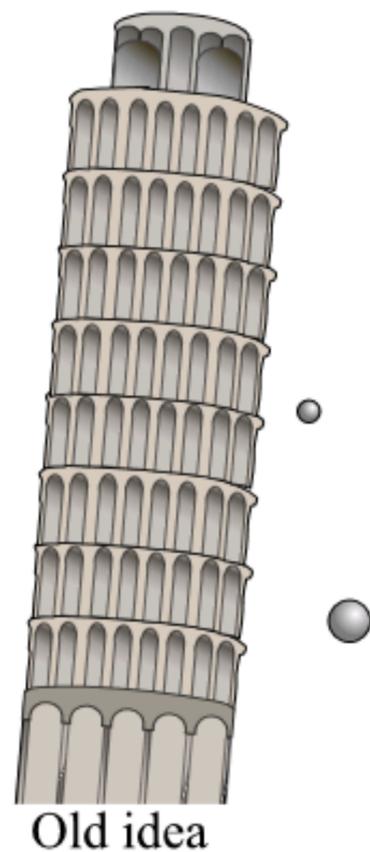
$m$

- **masse gravitationnelle**:  $F_{12} = G m_1 m_2 / r^2$

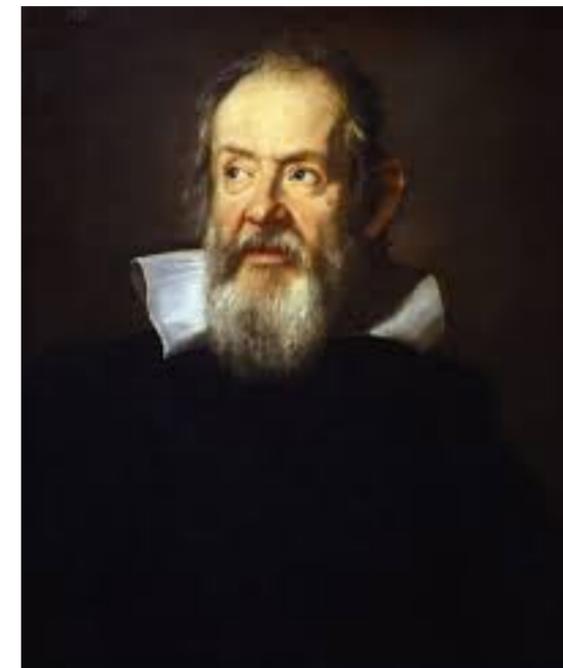


# Masse inertielle = masse gravitationnelle

- Acceleration d'un objet de masse  $m$  à la surface de la Terre:
  - $m_2 = m_T, r = R_T \Rightarrow F = m (G m_T / R_T^2) = m g, g = 9,81 \text{ m/s}^2$   
 $\Rightarrow a = F/m = g * m/m$
- Si masse inertielle ( $m$ ) = masse gravitationnelle ( $m$ ):  $a = g$

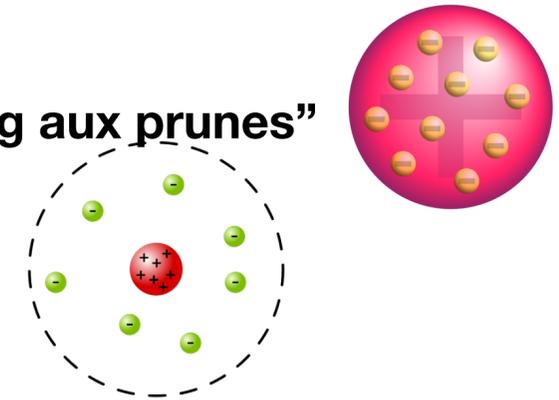


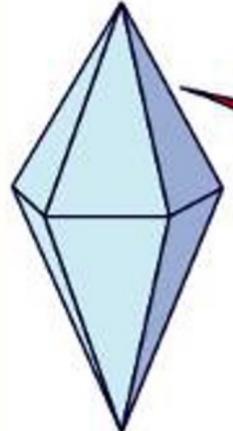
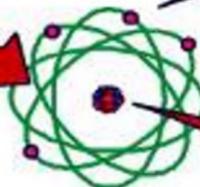
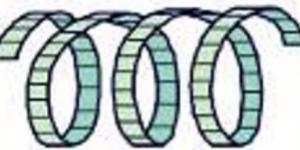
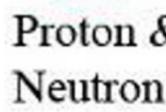
Galileo Galilei (~1638)



# Les constituants de la matière

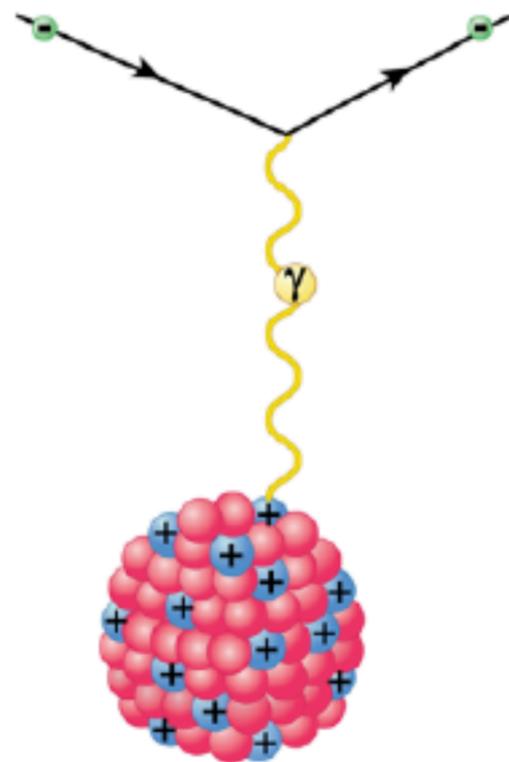
- Anciens philosophes grecs (Démocrite, ~400 av. J.C.): théorie atomique
- 1808: Dalton: atomes = particules élémentaires indivisibles; les atomes d'un même élément sont tous les mêmes et ont la même masse. Les réactions chimiques se produisent entre des atomes entiers.
- 1897: découverte de l'**électron** (J.J. Thomson) => W. Thomson (1900): **modèle atomique de "pudding aux prunes"**
- 1909-1911: expérience de Rutherford => évidence du noyau (**proton**) => **modèle atomique planétaire**
- 1968: expériences à SLAC => découverte des **quarks** dans les protons et neutrons



Crystal Molecule	Atom	Atomic Nucleus		Elementary Particles
				 electron
				 up & down
1 cm	$10^{-8}$ cm	$10^{-12}$ cm	$10^{-13}$ cm	?

# Interactions entre les particules élémentaires

- **Toute la matière ordinaire est composée par des électrons et des quarks “up” et “down” qui forment les protons et les neutrons**
- **Ils existent aussi d'autres particules élémentaires** (quarks et leptons) mais qui forment de particules instables qui ont tendance à se désintégrer rapidement une fois produites ou qui interagissent avec très peu avec le reste de la matière
- **Ces particules interagissent en échangeant entre eux d'autres particules “médiatrices”** comme le photon ( $\gamma$ )



## matter fermions

	1 <sup>st</sup> generation	2 <sup>nd</sup> generation	3 <sup>rd</sup> generation
Quarks	up	charm	top
	down	strange	bottom
Leptons	e neutrino	$\mu$ neutrino	$\tau$ neutrino
	electron	muon	tau

Higgs particles associated with Higgs field



## gauge bosons

Strong force	gluons
Electro-magnetic force	photon
Weak force	W bosons  Z boson

# Masse de la matière et de ses composants

---

- Si nous divisons notre corps en morceaux de plus en plus petits et nous avons une balance pour les peser, nous observerions qu'à chaque étape la somme des masses de ces parties est égale à la masse du corps entier
- Mais, une fois atteint le niveau atomique, on observerait une différence minuscule mais notable: **la somme des masses des protons, des neutrons et des électrons du corps humain diffère du total d'environ 1%**
- Si on coupait en morceaux encore plus petits, on verrait que **seulement 0,2% de la masse du proton et du neutron est égale à la somme des masses des quarks qui les composent**
- D'ou vient donc la masse manquante??



# Un deuxième acteur sur scene: l'énergie

- Energie: **capacité d'un système de produire du travail**
- Elle existe en **plusieurs formes qui peuvent se transformer l'une dans l'autre**, tout conservant le montant total
  - Energie cinétique:  $E_K = m v^2 / 2$
  - Energie potentielle gravitationnelle près de la surface terrestre:  $m g h$



- Energie de liaison atomique / nucléaire

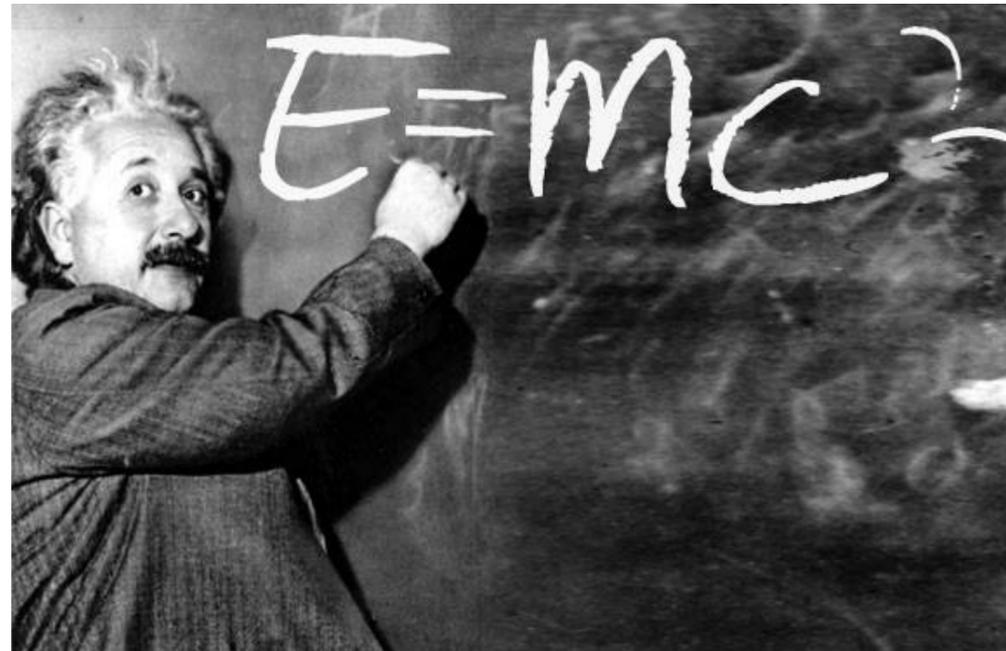


- Chaleur, ..

# Masse de la matière et de ses composants

---

- **Albert Einstein** (1905): équivalence masse-énergie



➔ L'énergie a une masse  $m = E/c^2$

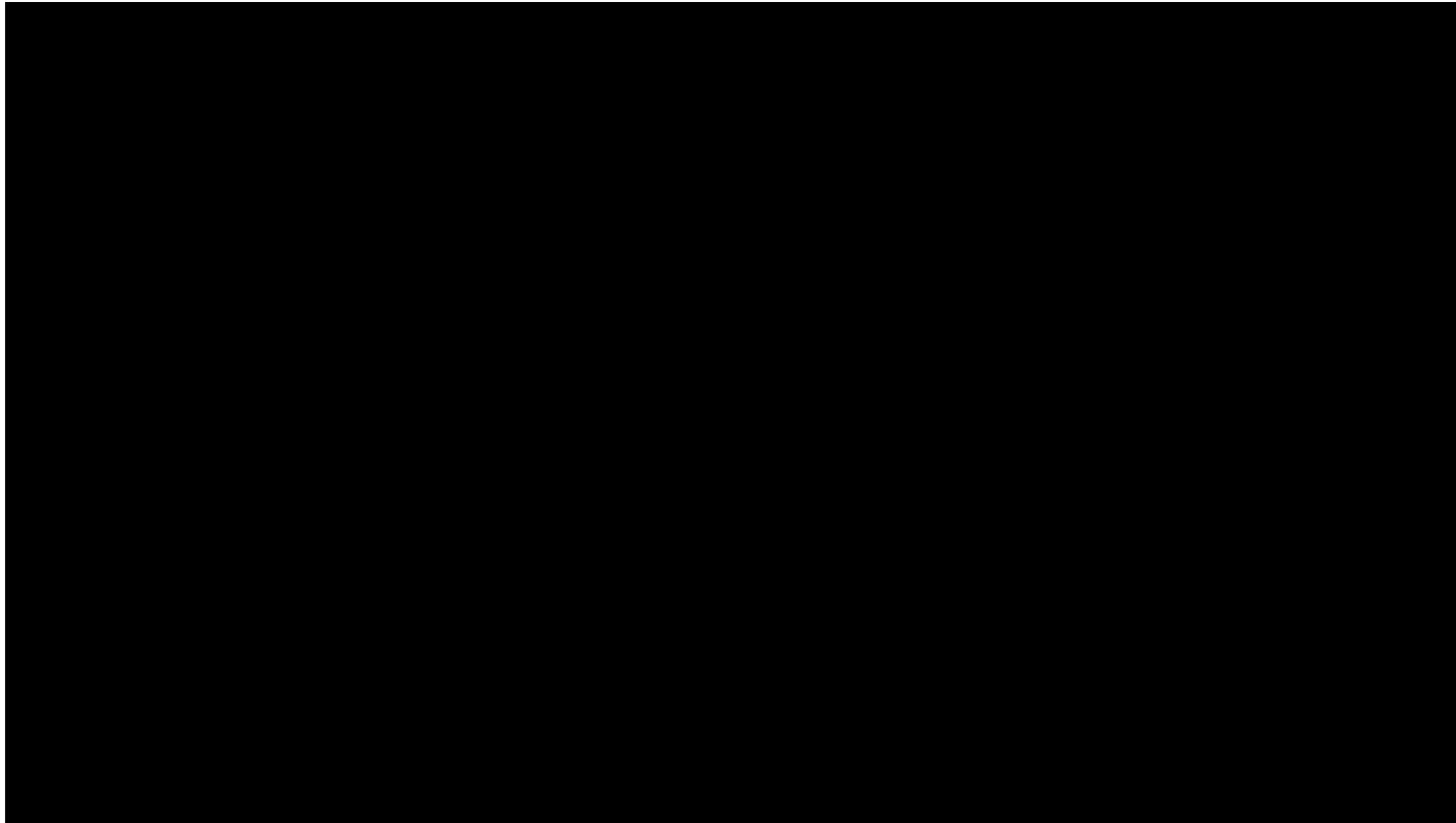
➔ C'est l'énergie potentielle liée à la force d'attraction entre protons et neutrons qui est responsable du 1% de notre masse,

➔ Et celle d'attraction entre les quarks qui est responsable de 99,8% de la masse du proton et du neutron et donc de presque 99% de notre masse (les électrons étant 2000x plus légers que les neutrons et les protons)

- D'où vient la masse des particules élémentaire (quarks, leptons)?
- Etant donné que notre masse est à 99% due à l'énergie de liaison des ces particules, est-ce que ça changerait quelque chose si quarks et leptons n'avaient pas de masse?

# La vie dans un monde de particules sans masse

---

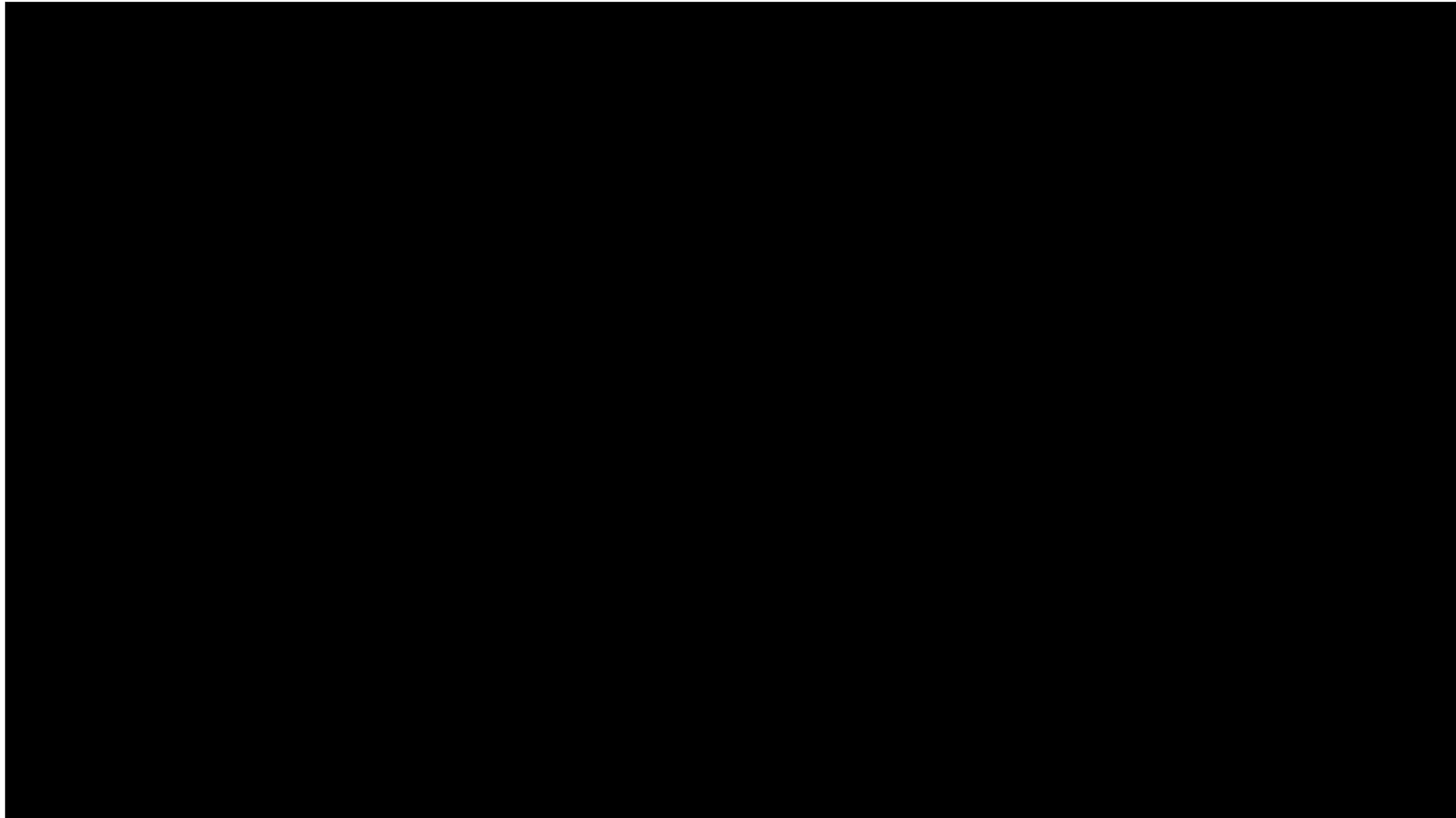


[https://  
videos.cern.ch/  
record/2757407](https://videos.cern.ch/record/2757407)

- Est-ce que ça changerait quelque chose si quarks et leptons n'avaient pas de masse? **OUI!!!!**

# Le boson de Higgs et la masse des particules élémentaires

---



[https://  
videos.cern.ch/  
record/2757407](https://videos.cern.ch/record/2757407)

- D'où vient la masse des particules élémentaire? De leurs interactions avec le champ de Higgs

# De la prediction à l'observation

- **Prédit en 1964** par Brout, Englert et Higgs, le boson de Higgs a enfin été **découvert en 2012** au LHC du CERN par les collaborations ATLAS et CMS, ce qui a valu en 2013 le **prix Nobel** à Englert et Higgs (Brout étant entretemps décédé)

ATLAS Preliminary

Events/10 GeV

Background ZZ

Background Z+bb, tt

Signal (m = 125 GeV)

Signal (m = 190 GeV)

Signal (m = 360 GeV)

Syst.UNC

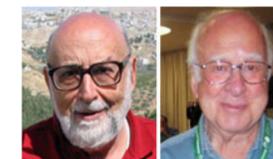
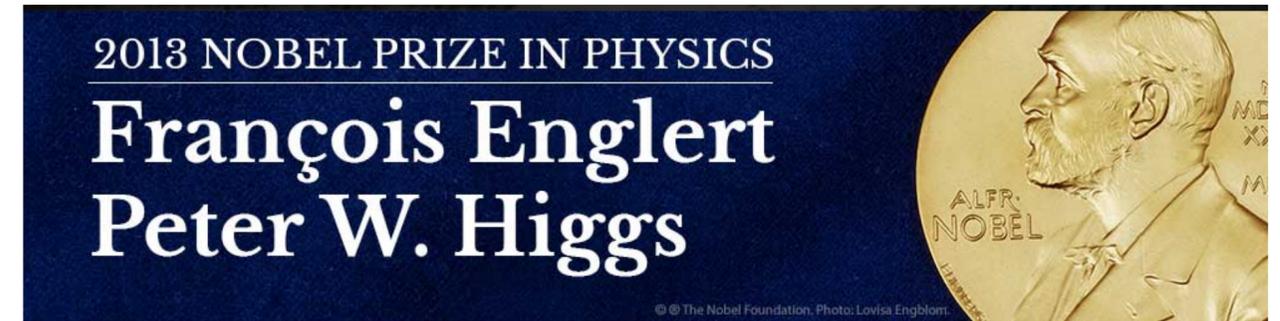
$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$

$\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}, \mathcal{L}_{\text{int}} = 4.8 \text{ fb}^{-1}$

$\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}, \mathcal{L}_{\text{int}} = 5.8 \text{ fb}^{-1}$

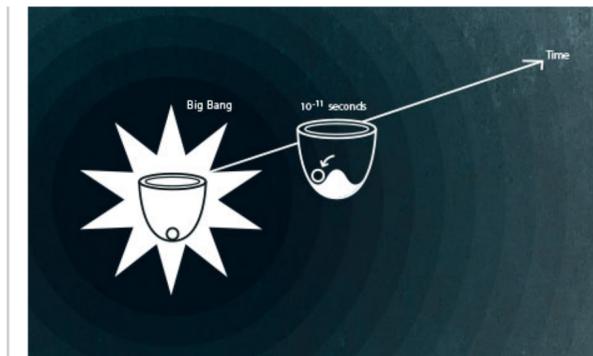
Fabiola Gianotti  
ATLAS Spokesperson 2010-2012

Joe Incandela  
CMS Spokesperson 2012-2013



## 2013 Nobel Prize in Physics

The Nobel Prize in Physics 2013 was awarded jointly to François Englert and Peter W. Higgs "for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our



## Announcements of the 2013 Nobel Prizes

Physiology or Medicine:  
Announced Monday 7 October

Physics:  
Tuesday 8 October, 11:45 a.m. CET at the earliest

Chemistry:  
Wednesday 9 October, 11:45 a.m. CET at the earliest

Literature:  
Thursday 10 October 1.00 p.m. CET

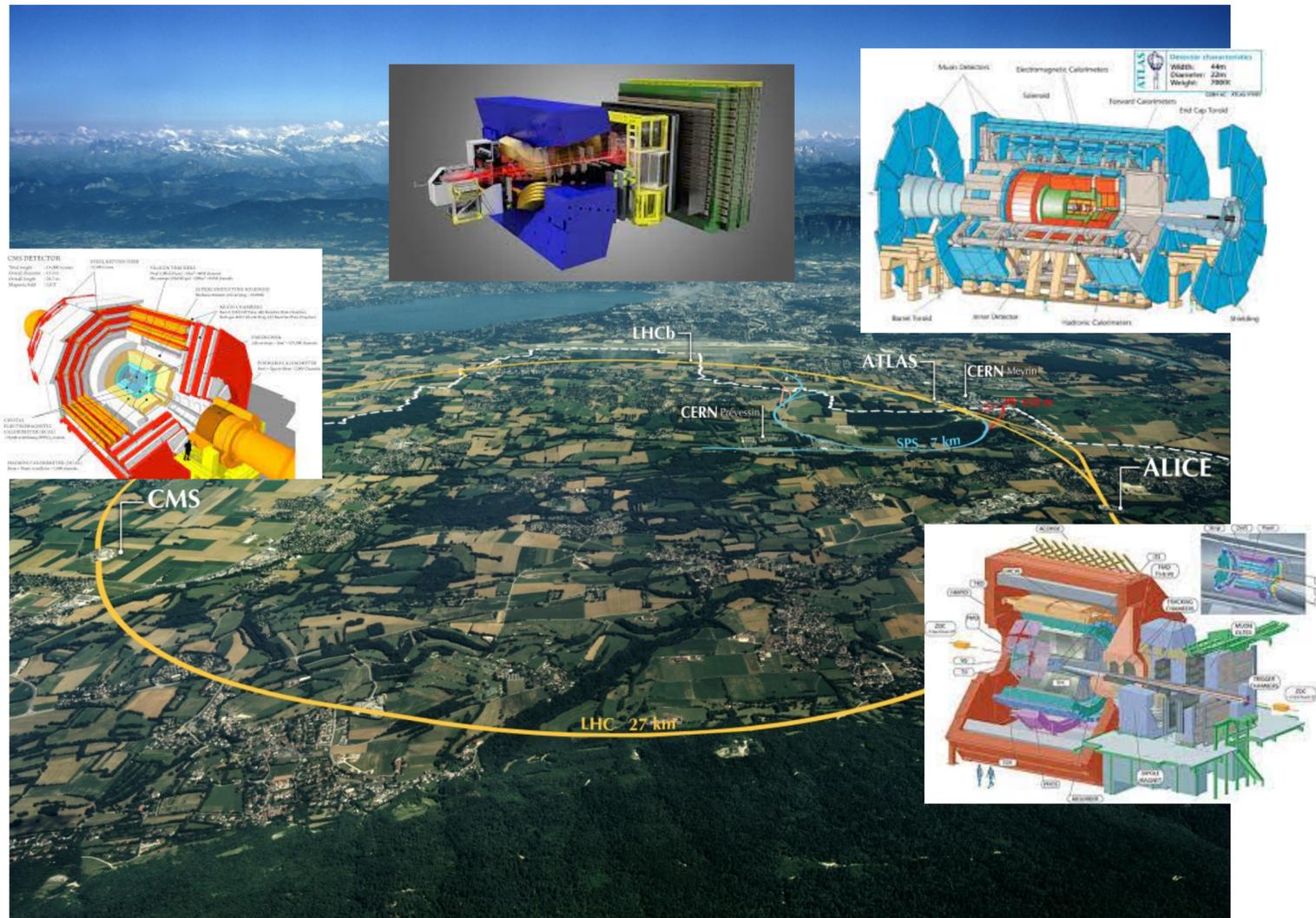
Peace:

- **Trois étapes** essentielles pour la découverte du boson de Higgs:
  - *Production*
  - *Détection*
  - *Analyse*



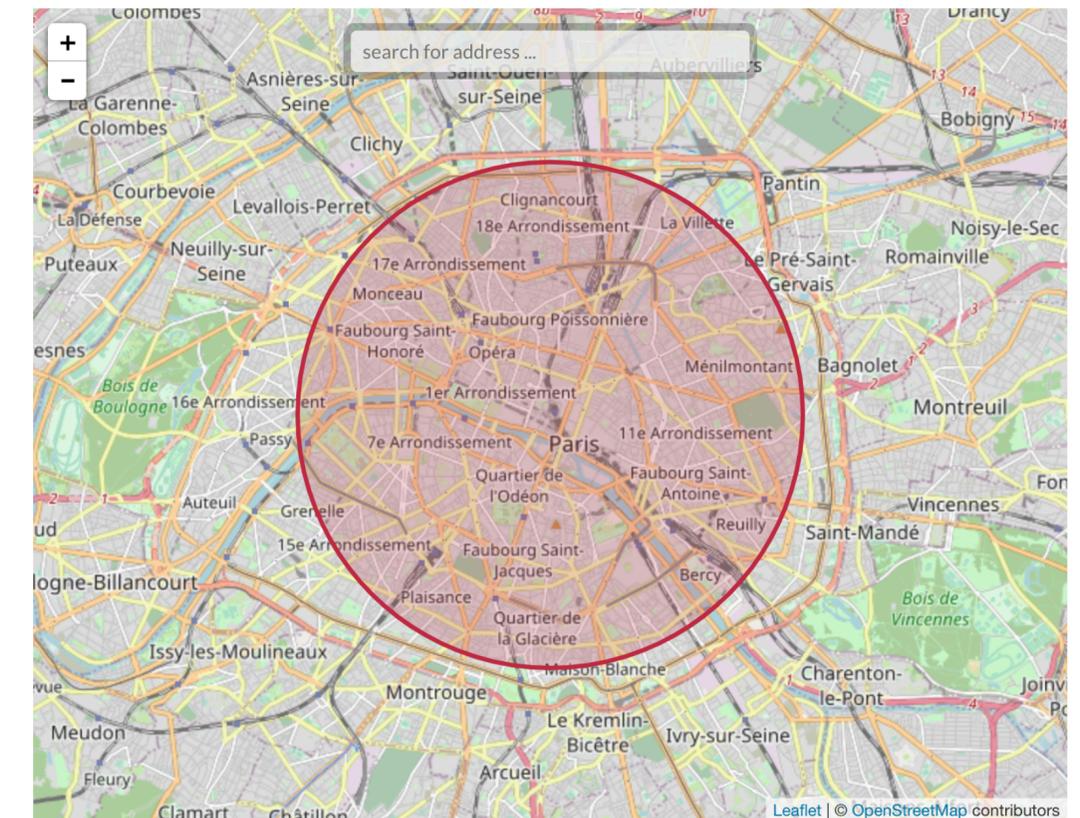
# Le seigneur des anneaux: le LHC (Large Hadron Collider)

- LHC: accélérateur et collisionneur de protons (ou de ions) au CERN (à la frontière Franco-Suisse) - 27 km de circonférence, 100 m sous sol, construit par le CERN (~3000 personnes)



## LHC In Your Neighborhood

How big is the **Large Hadron Collider**? Move the map around to put an LHC sized circle around your hometown. Compare other colliders to see how they size up.



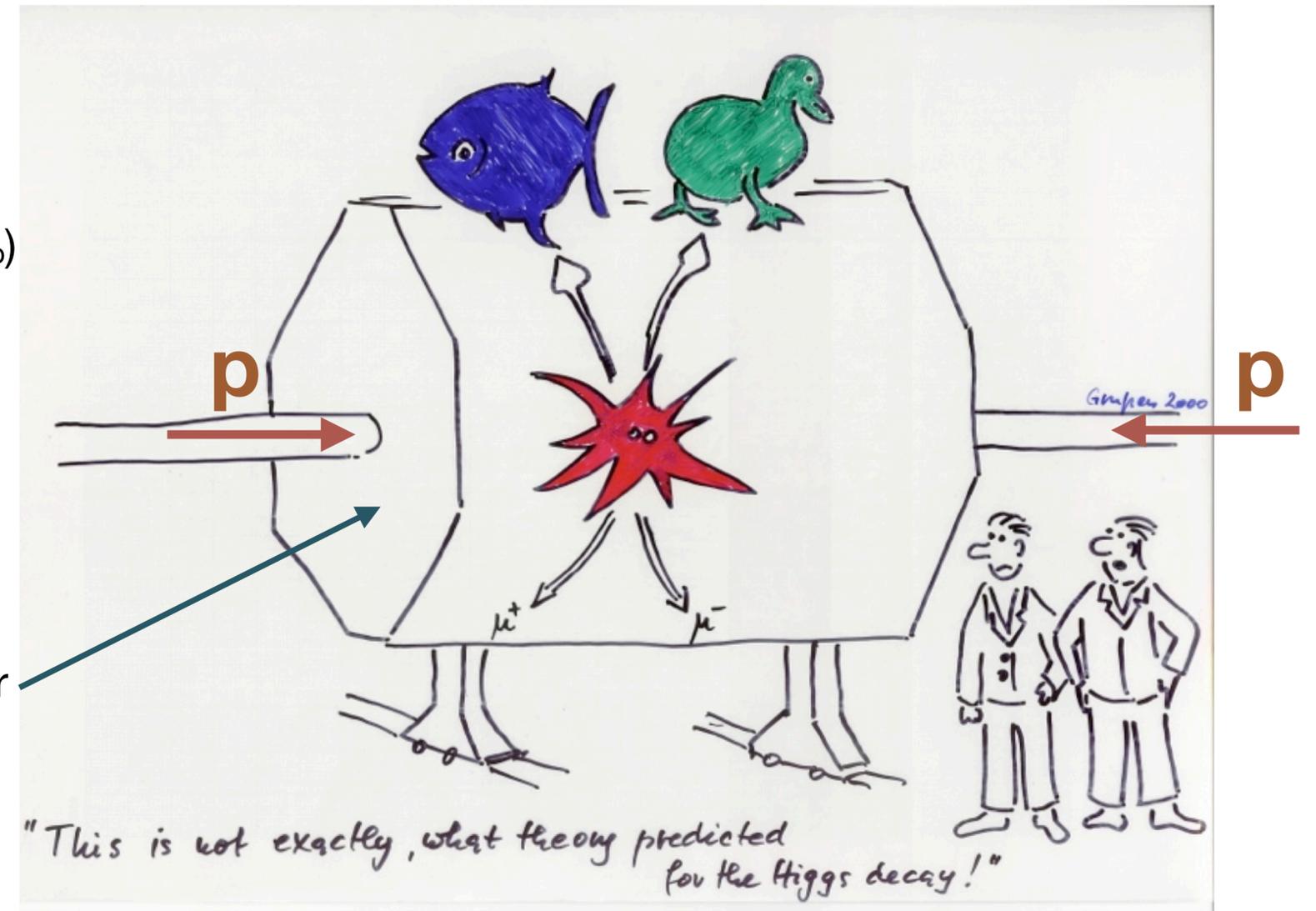
●LHC (Geneva, Switzerland)

<http://natronics.github.io/science-hack-day-2014/lhc-map/>

- Energie cinétique de protons = 7 TeV ( $\sim 7000 \cdot m_p$ ):  $\sim$  énergie d'une moustique en vol, concentrée dans une particule qui est un millième de milliardième plus petite et qui voyage presque à la vitesse de la lumière

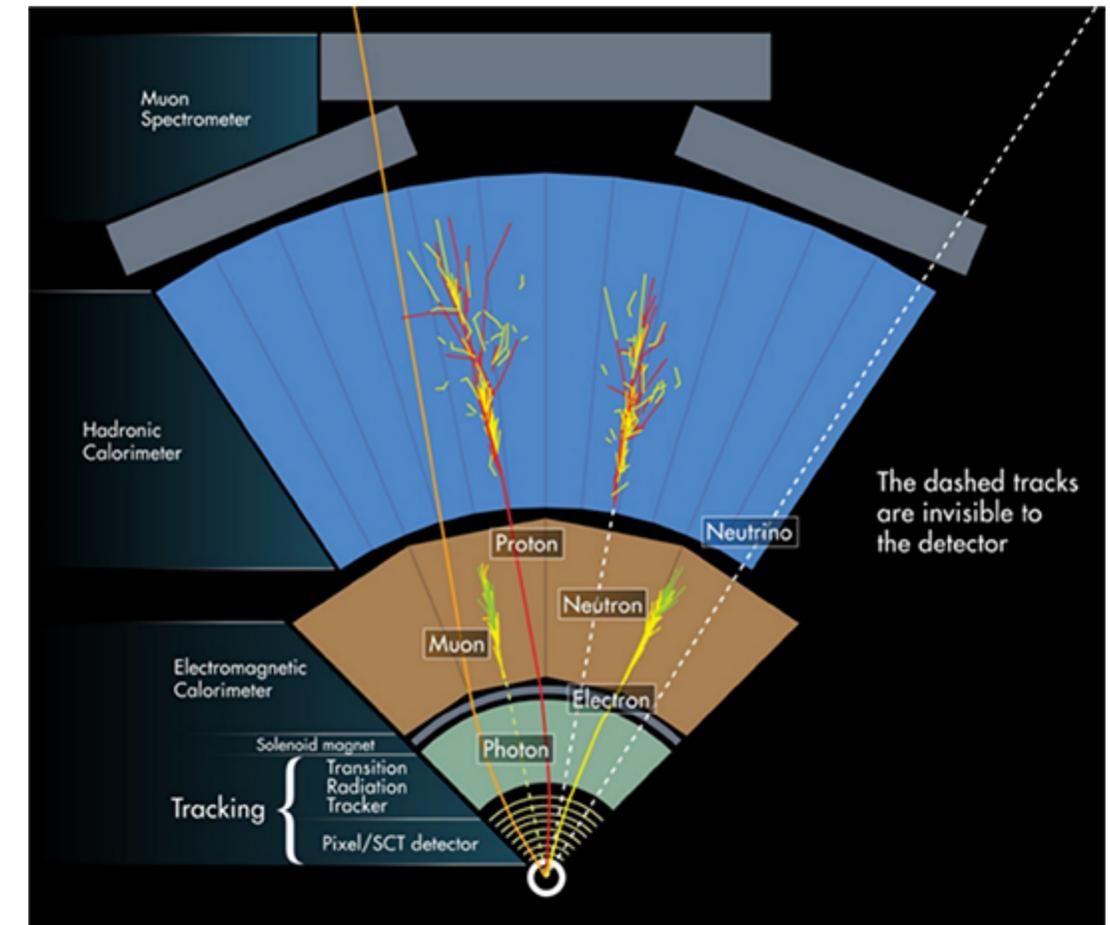
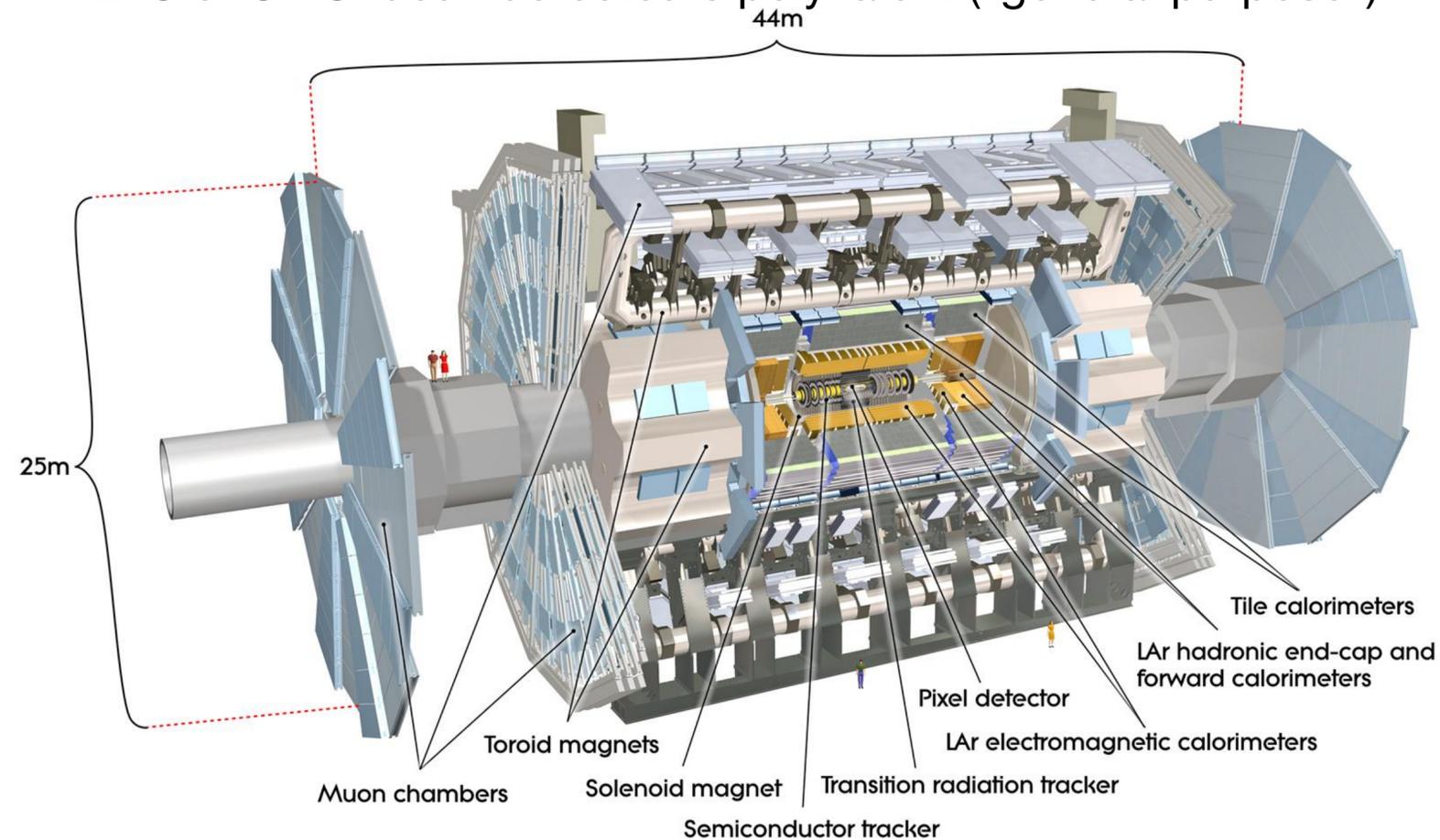
# Production du boson de Higgs au LHC

- Dans le LHC ~1 million de milliards de protons ( $E \sim \text{TGV}$ ) tourne dans les 2 directions, produisant des milliards de collisions par second dans les “points d’interaction” au centre des détecteurs
- En moyenne une de ces collisions par seconde produit un boson de Higgs
  - $m_H = 125 \text{ GeV}/c^2 \sim 125 m_p \gg 2 m_p$
  - $E = mc^2 \rightarrow$  l’énergie cinétique des protons ( $\sim 7000 m_p$ ) est utilisée pour créer des particules plus lourdes
- Ensuite, le boson de Higgs se désintègre presque instantanément ( $1.6 \cdot 10^{-22} \text{ s}$ )...
  - Il nous faut donc
    - un grand appareil photographique (“détecteur”) pour identifier les produits de ses désintégrations
    - une analyse statistique de données pour distinguer notre signal d’autres signaux similaires produits par les multiples processus qui ont lieu dans les autres collisions entre protons



# Detection du boson de Higgs au LHC

- 4 grands détecteurs au LHC: appareils photographiques grands comme des cathédrales construits par ~12000 personnes du monde entier
- ATLAS et CMS: deux détecteurs polyvalent (“general purpose”)



- plusieurs couches de detection pour identifier différents types de particules produites (electrons, photons, protons, ..)
- chaque couche, comme l’objectif d’une camera, a plusieurs “pixels” pour voir où les particules produites sont passées
  - 100 Mpixel pour le sous détecteur plus interne d’ATLAS (Pixel detector)
- combinant l’information de différents sous-détecteurs on reconstruit l’énergie et la direction de ces particules

# Chasse au boson de Higgs

- Deux modes de désintégration du boson de Higgs sont relativement "faciles" à observer et distinguer du bruit de fond, même si plutôt rares:

- $H \rightarrow 4$  leptons (electrons ou muons)
- $H \rightarrow 2$  photons ( $\gamma\gamma$ )

- Dans une désintégration  $H \rightarrow \gamma\gamma$ , l'énergie du boson de Higgs est convertie en énergie des photons

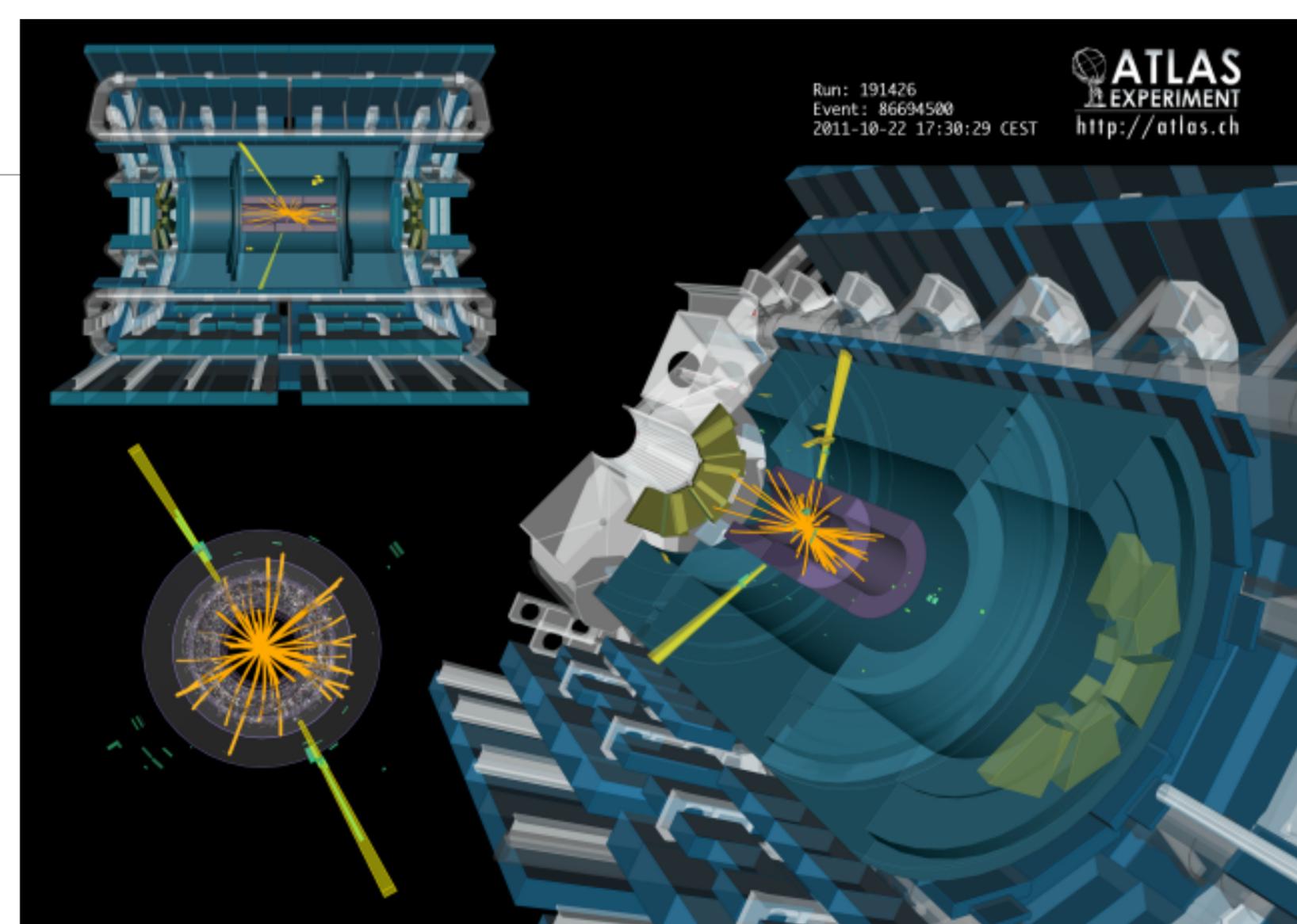
- Si le boson de Higgs était à repos :  $m_H c^2 = E_{\gamma 1} + E_{\gamma 2}$

- La plupart du temps le Higgs bouge :  $m_H c^2 + E_K^H = E_{\gamma 1} + E_{\gamma 2}$

- Si les 2 photons sont produits par le Higgs, on peut calculer  $E_K^H$  à partir des énergies et directions des photons:

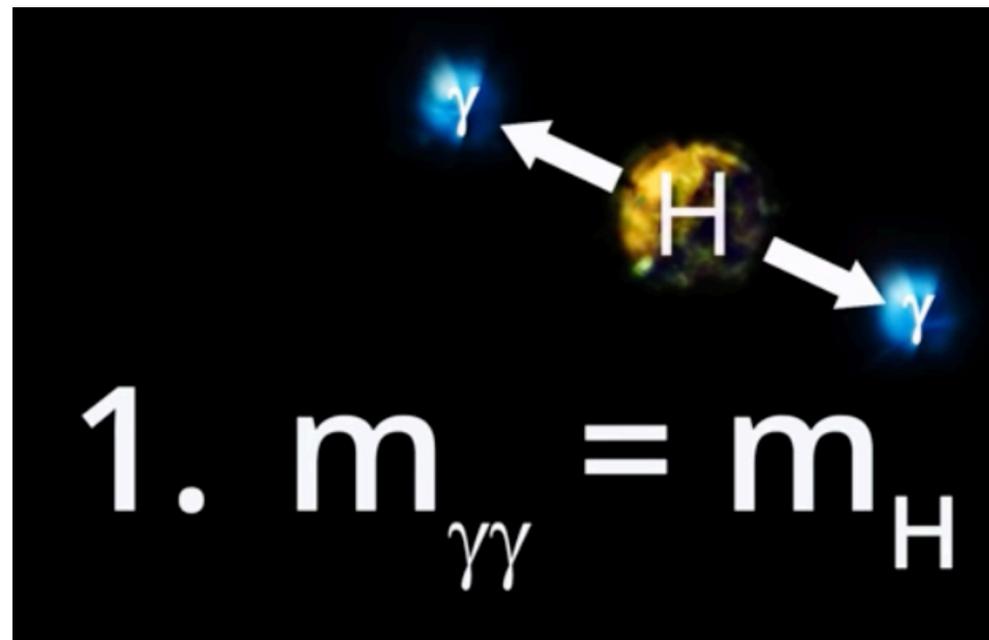
$$m_H c^2 = E_{\gamma 1} + E_{\gamma 2} - E_K^H(E_{\gamma 1}, E_{\gamma 2}, \theta_{\gamma 1}, \theta_{\gamma 2}) = m_{\gamma\gamma} c^2$$

- La quantité à droite de cette equation s'appelle la **masse invariante** de 2 photons et dépende seulement des énergies et directions des photons

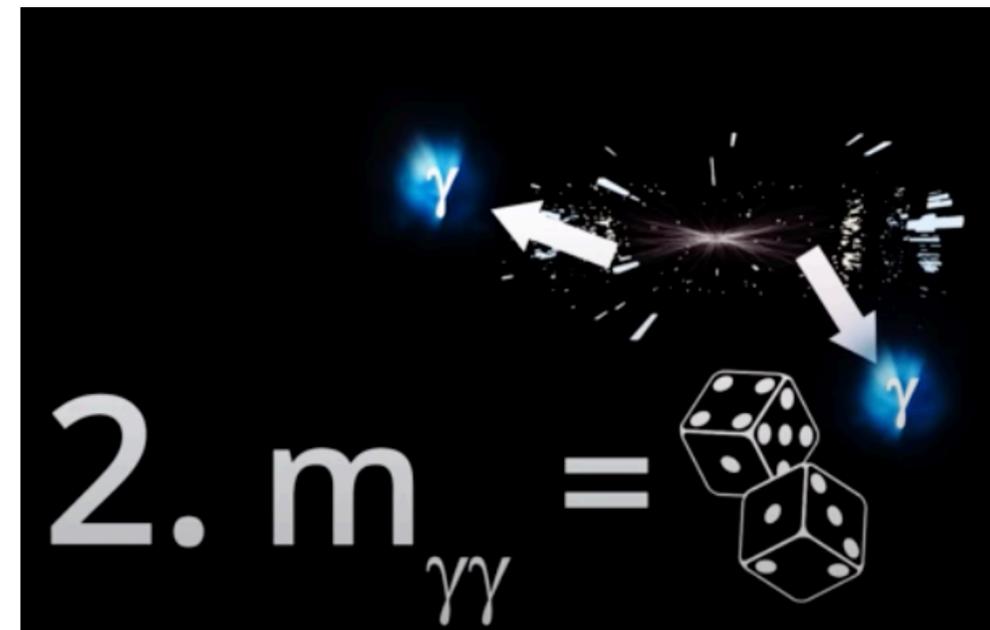


# Analyse statistique: Higgs ou pas de Higgs?

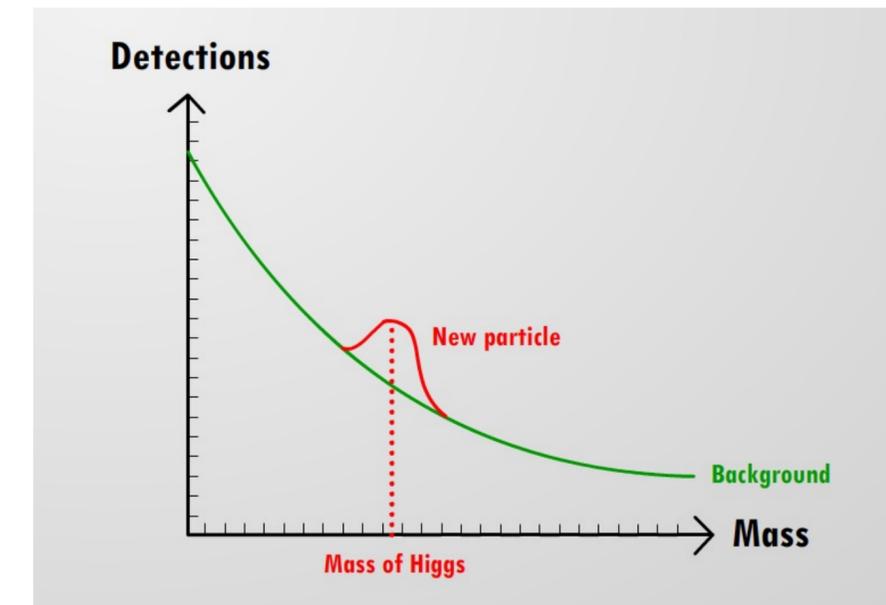
- Au LHC deux photons peuvent être produits aussi par d'autres processus qui ne relèvent pas de la désintégration d'une particule - c'est le "**bruit de fond**" au dessus duquel nous cherchons notre signal



+



=



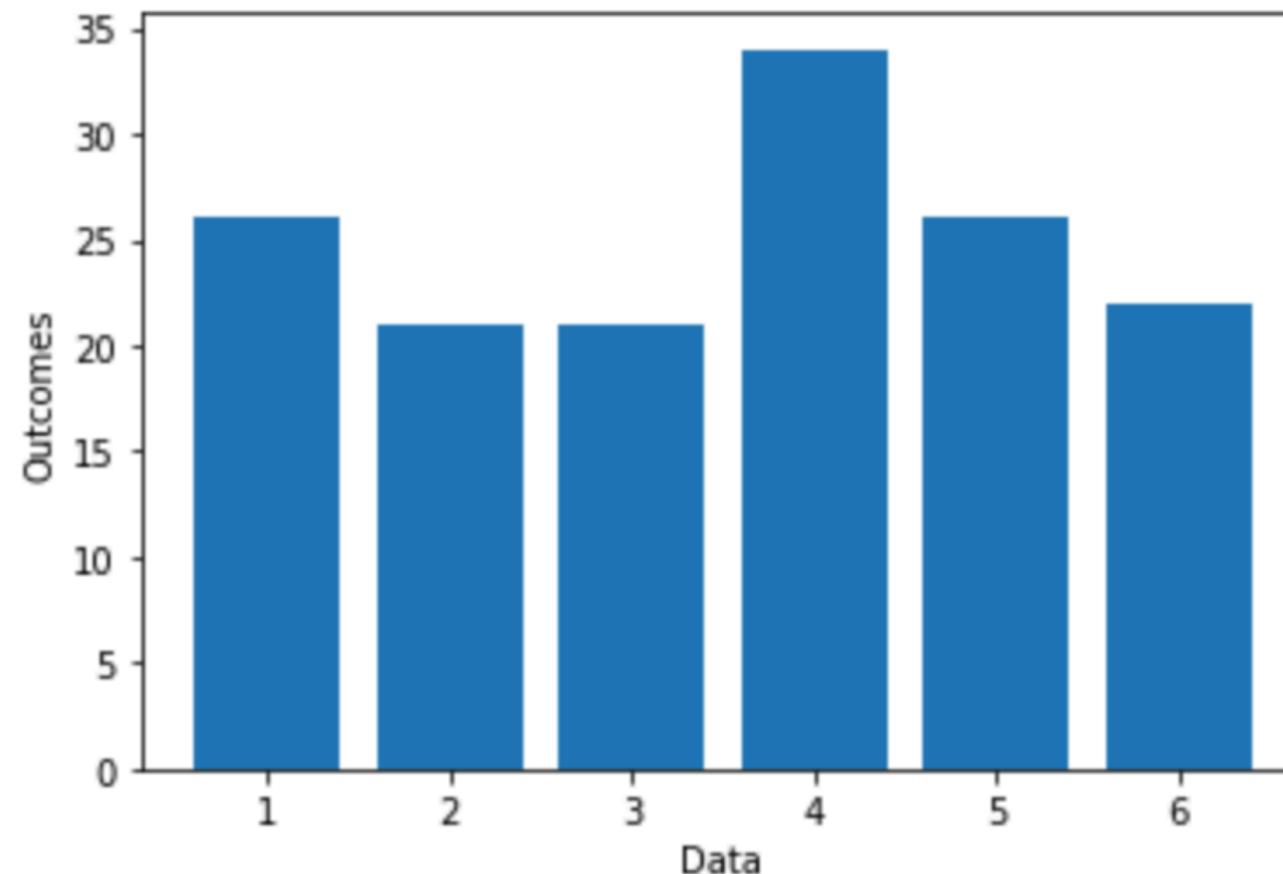
- Comment savoir si une bosse dans la distribution de  $m_{\gamma\gamma}$  est due a la désintégration de la particule que l'on cherche ou est juste une "**fluctuation statistique**" liée à la nature aléatoire du bruit de fond?

➔ Analyse statistique!

# Fluctuations statistiques

---

- Prenons un dé et jetons-le plusieurs fois.
- Cela peut être un dé normal (chaque nombre entre 1 et 6 sort en moyenne  $1/6$  des fois) ou un dé pipé dans lequel un nombre sort plus souvent que les autres.
- Nous obtenons la distribution suivante. Pouvons-nous dire si le dé est pipé ou pas?

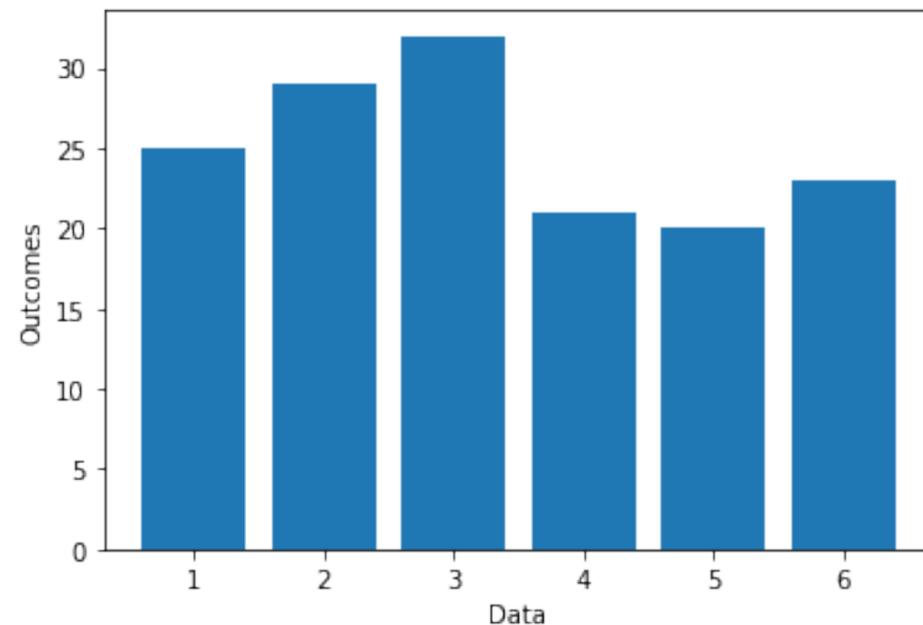


- Pour savoir la réponse, nous allons faire une petite manip en ligne

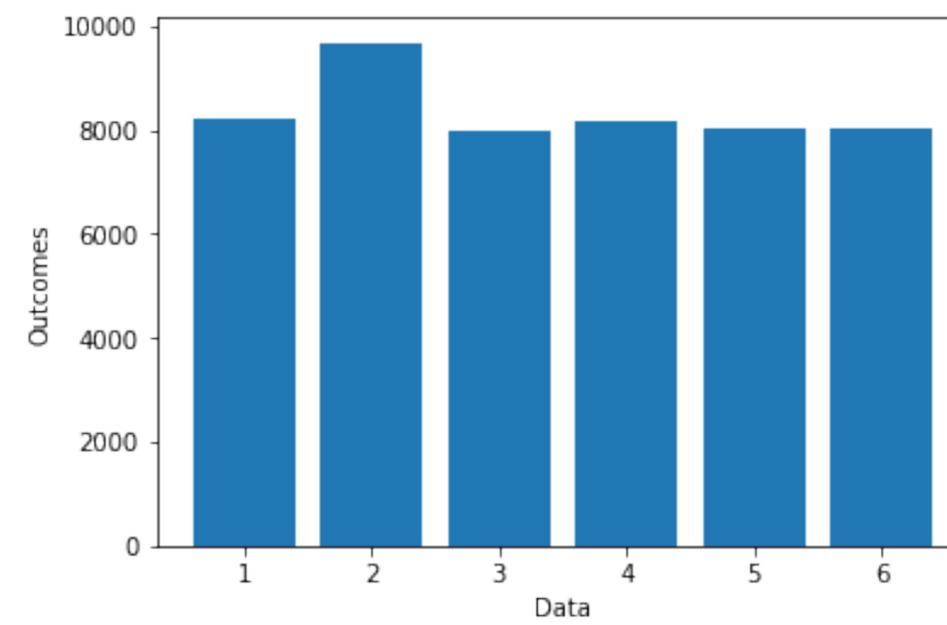
# Signification statistique d'un signal

- Pour être (presque) sur qu'il y ait un vrai signal il faut donc calculer quelle est la probabilité qu'en absence du signal (dans l'exemple du dé, dans l'hypothèse que le dé ne soit pas pipé) les variations aléatoires du bruit de fond produisent la distribution de résultats que nous avons mesuré => **signification statistique**
  - En physique de particule, on considère qu'on a un signal au-delà de tout doute raisonnable quand cette probabilité est inférieure à environ une chance sur un million ("**5 sigma**")
- Dans le cas de notre dé pipé, pour connaître la réponse il faut jeter le dé plusieurs fois:

150 fois

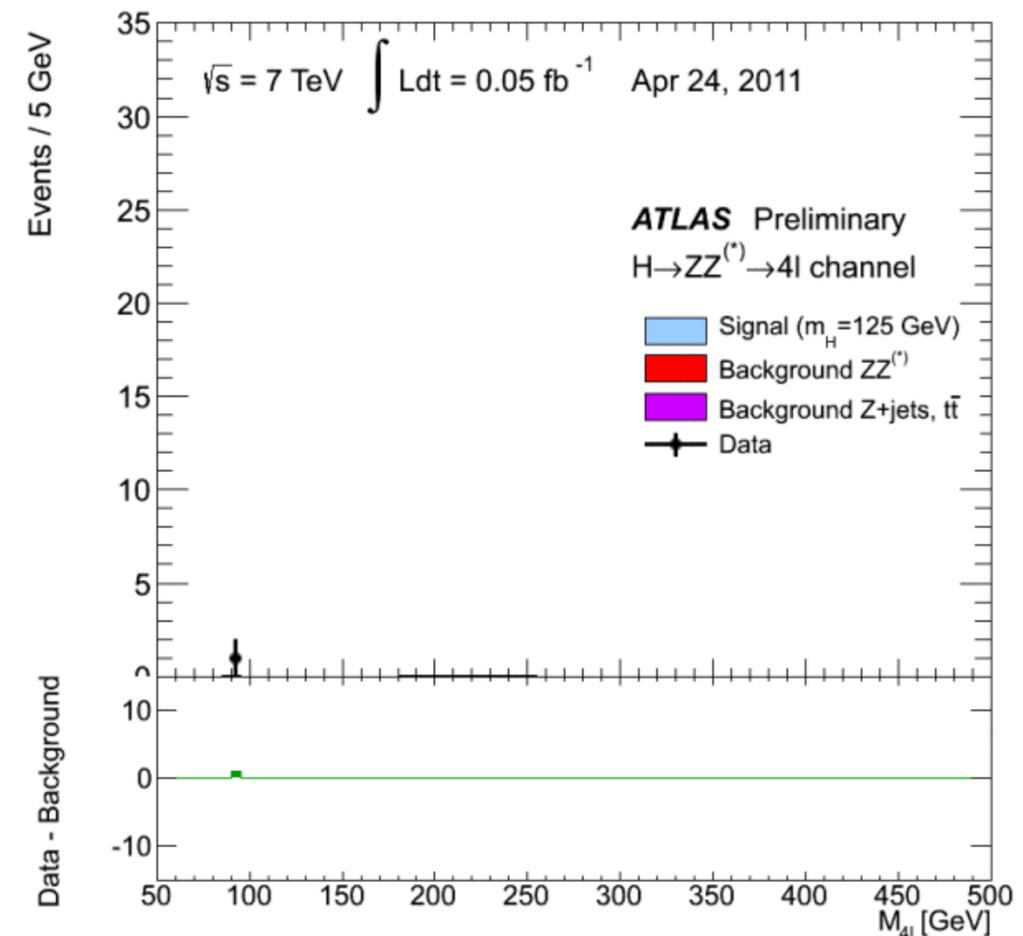
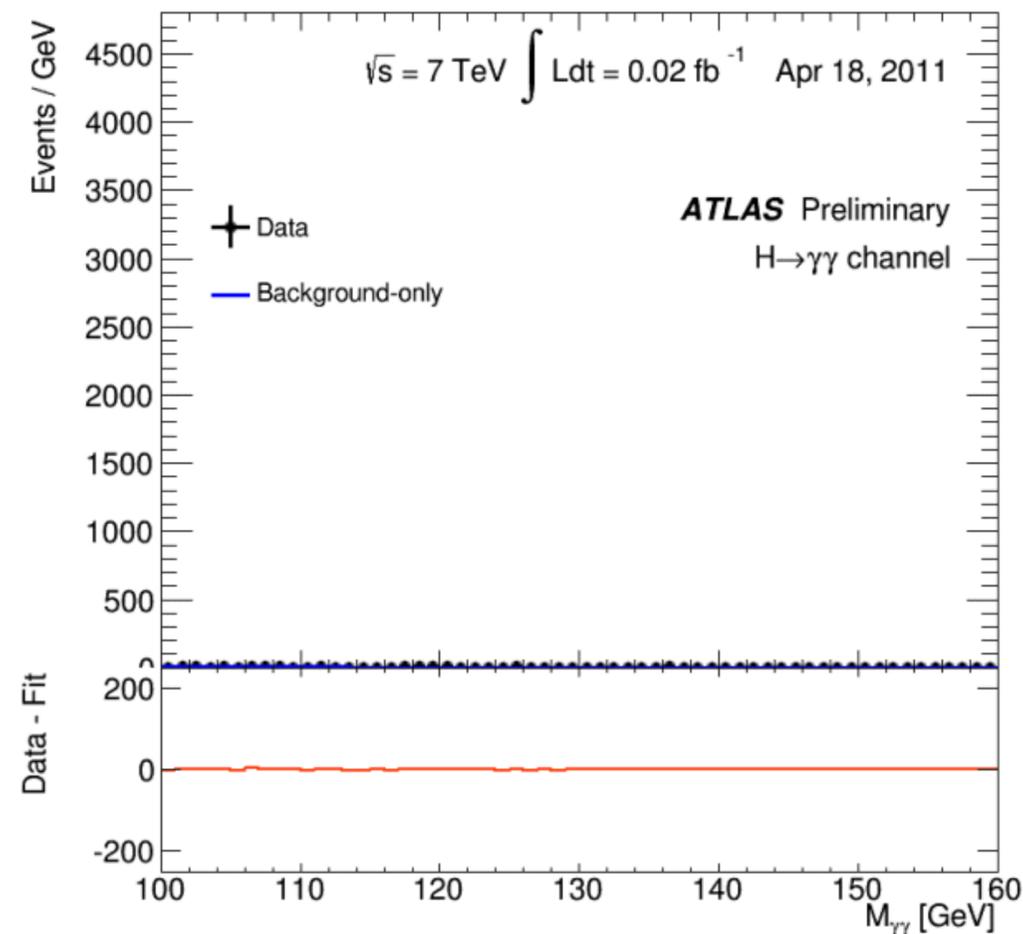


50000 fois



# Découverte du boson de Higgs

- Pour resumer, pour découvrir le boson de Higgs nous avons donc:
  - reconstruit ses désintégration en 2 photons ou en 4 leptons
  - calculé leur masses invariantes et tracé la distribution après plusieurs mesures
  - calculé la probabilité que la distribution obtenue soit compatible avec l'hypothèse qu'il n'y ait pas de boson de Higgs
- Pour y arriver il nous a fallu lancer le dé pendant un peu plus d'un an:

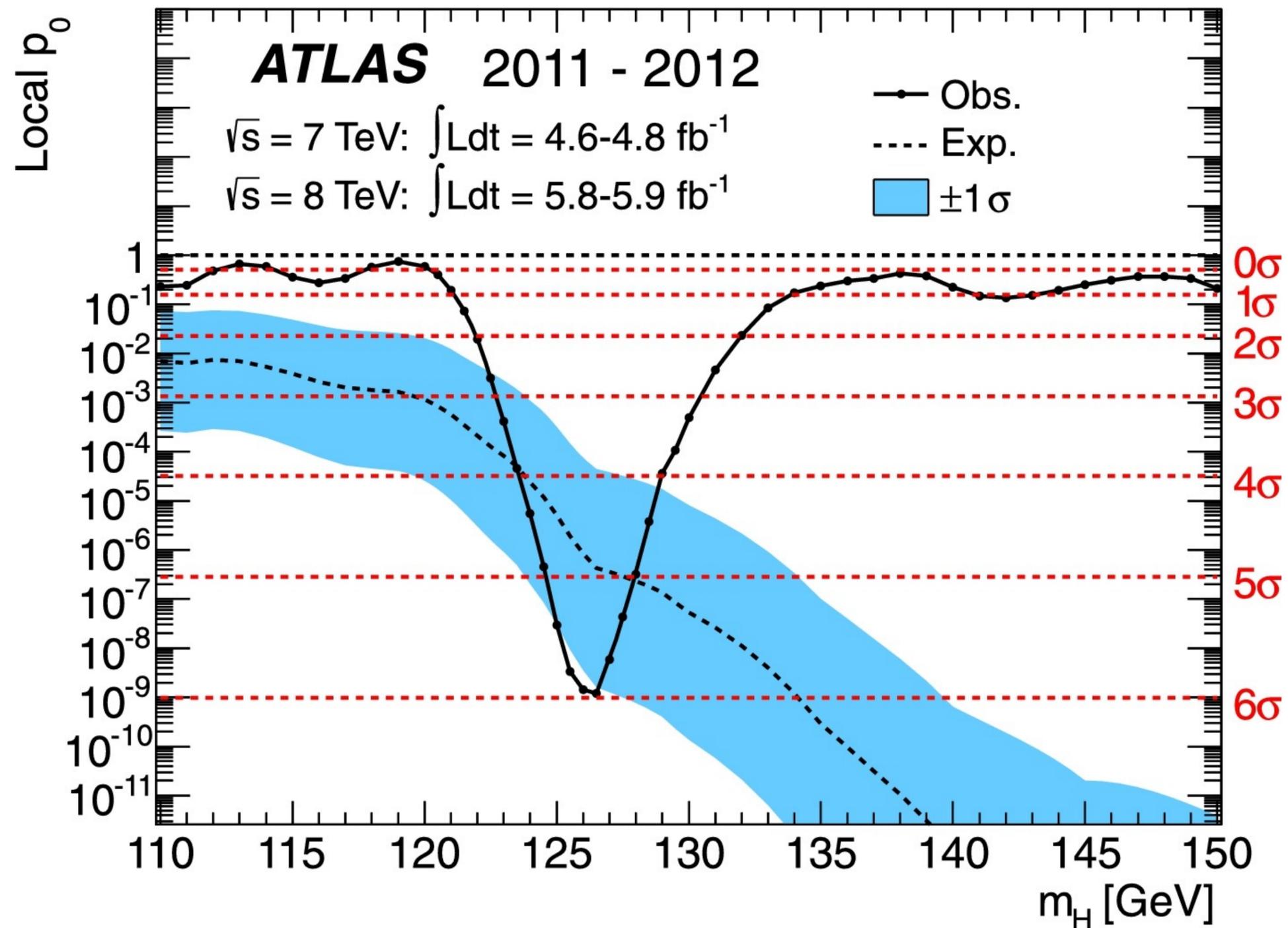


<https://cds.cern.ch/record/2230893>

# Découverte du boson de Higgs

$p_0$  :

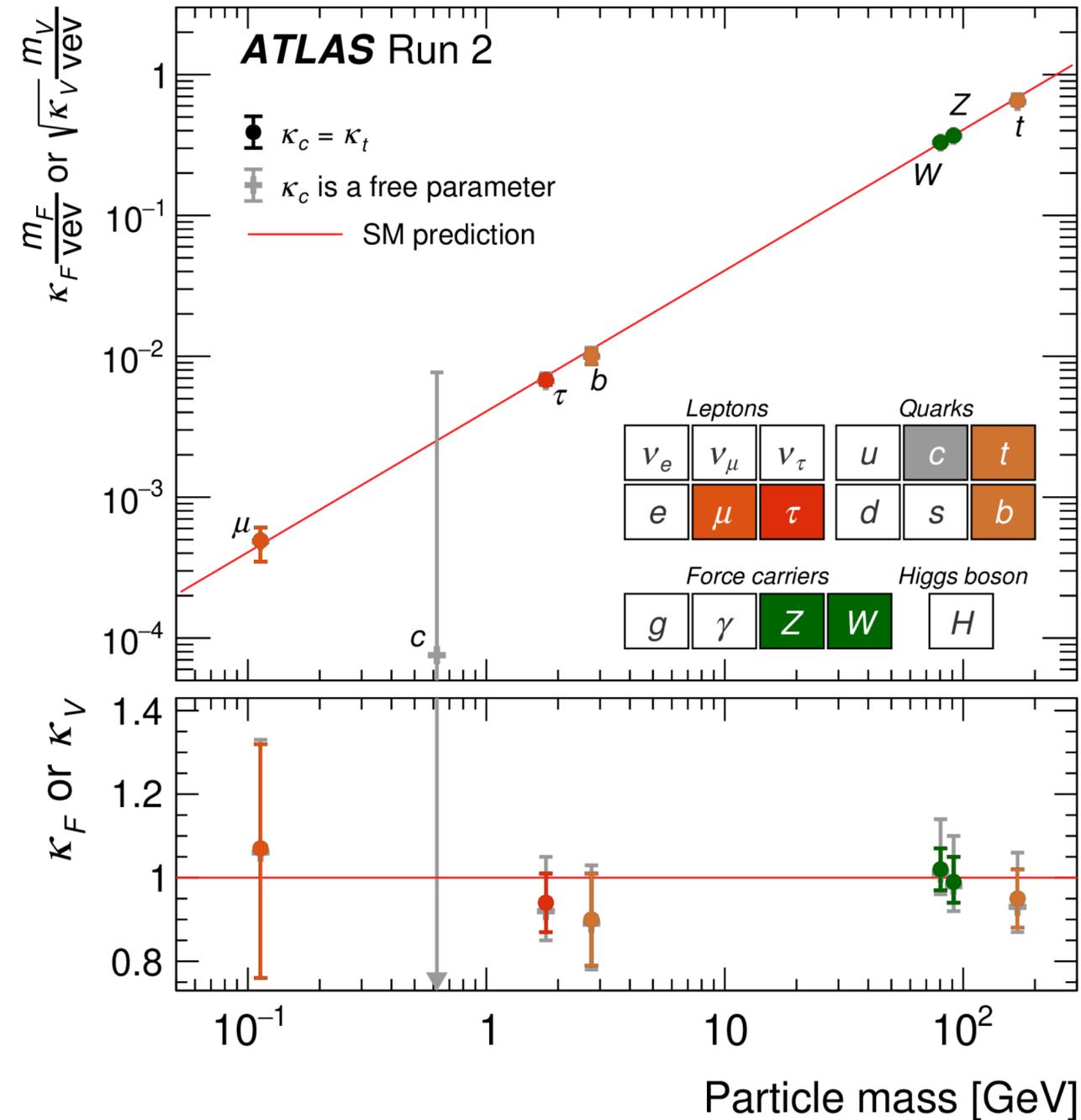
probabilité que l'excès d'événements observés dans les données soit dû à une fluctuation statistique du bruit de fond



[Phys.Lett. B716 \(2012\) 1-29](#)

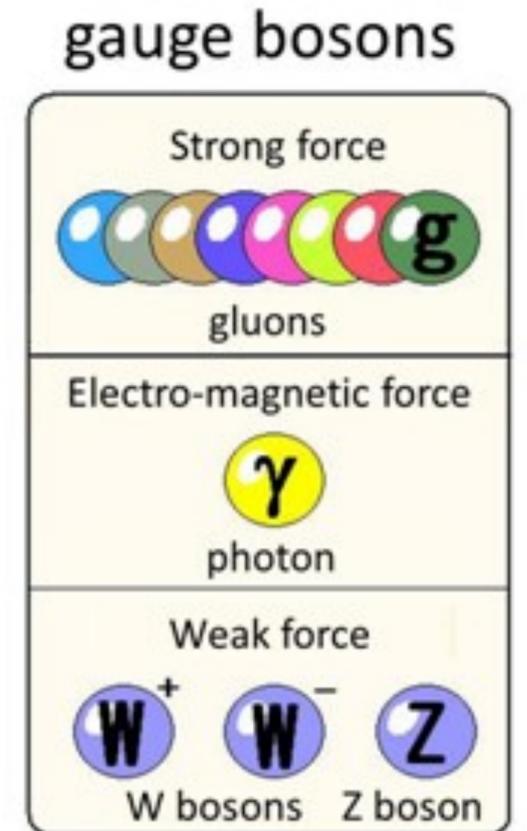
# Higgs: couplages aux particules vs masses

[Nature 607, pages 52-59 \(2022\)](#)



**matter fermions**

	1 <sup>st</sup> generation	2 <sup>nd</sup> generation	3 <sup>rd</sup> generation
<b>Quarks</b>	 up  down	 charm  strange	 top  bottom
<b>Leptons</b>	 e neutrino  electron	 μ neutrino  muon	 τ neutrino  tau



# Ressources en ligne

---

- Beaucoup de matériel existe, la plupart en anglais. Voici quelque lien:
  - ATLAS Resources: <https://atlas.cern/resources>
  - CERN educational programmes (pour étudiants et pour les enseignants): <https://home.cern/about/what-we-do/our-educational-programmes>
  - The International Particle Physics Outreach Group: <https://ippog.org>
  - Presentations et videos sur YouTube:
    - <https://cds.cern.ch/record/2629301> (EN)
    - <https://ippog-static.web.cern.ch/ippog-static/sites/ippog.web.cern.ch/files/GoldfarbHiggs-20120801.pptx> (EN)
    - <https://www.youtube.com/watch?v=gY0Ea9VZwJ4> (FR)
    - <https://www.youtube.com/watch?v=so2nCu2Jkbc> (EN, 3 episodes)
- Des visites du CERN et des détecteurs sont possibles (<https://visit.cern/fr/>), ainsi que de visites virtuelles (<https://atlas.cern/discover/visit/virtual-visit>)
- Des “masterclasses” internationales sont organisées tous les ans en février/mars:
  - <http://www.physicsmasterclasses.org/index.php> (page principale, EN)
  - <https://atlas.physicsmasterclasses.org/fr/index.htm> (exemple d’activités proposées sur ATLAS)

# ATLAS resources



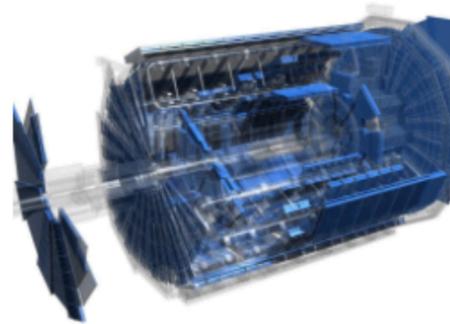
## ATLAS on Flickr

Image | Anyone  
Tags: photos, gifs, images



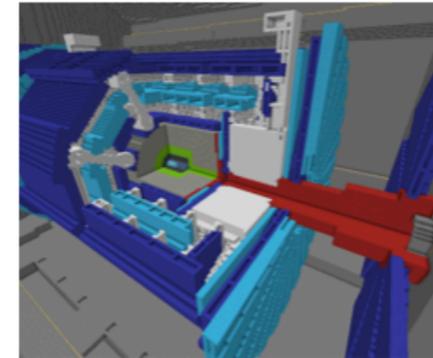
## ATLAS on YouTube

Video | Anyone  
Tags: videos, animations



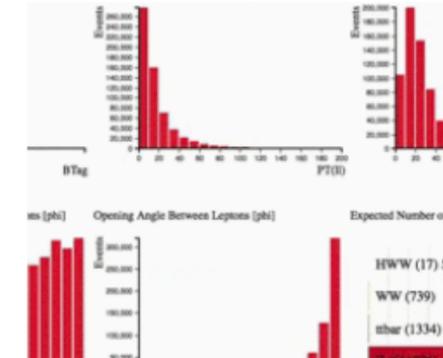
## ATLAS Schematics

Image | Anyone  
Tags: Schematics, videos, images, animations



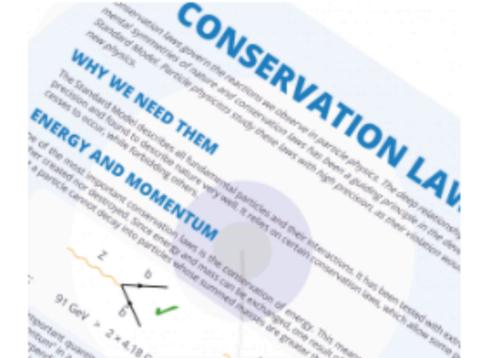
## ATLAScraft

Game | Primary Students, Secondary Students, Teachers  
Tags: multiplayer, detector



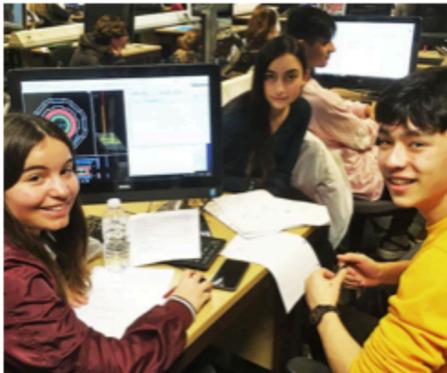
## ATLAS Open Data

Activity | Secondary Students, University Students, Citizen Scientists  
Tags: open data



## Cheat Sheets

Brochure | Secondary Students, University Students, Teachers  
Tags: fact sheets, printables



## Particle Physics Masterclasses

Activity | Secondary Students  
Tags: masterclasses



## Seasonal Activities

Activity | Anyone  
Tags: education, outreach, Stencils, activities



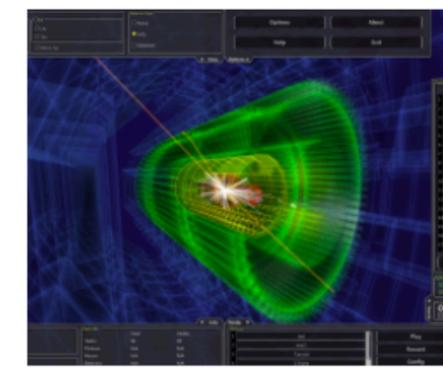
## ATLAS Virtual Visits

Activity | Secondary Students, Teachers  
Tags: virtual visits, classroom



## Fact Sheets

Brochure | Secondary Students, University Students, Teachers, Anyone  
Tags: fact sheets, printables



## Event Analysis Tools

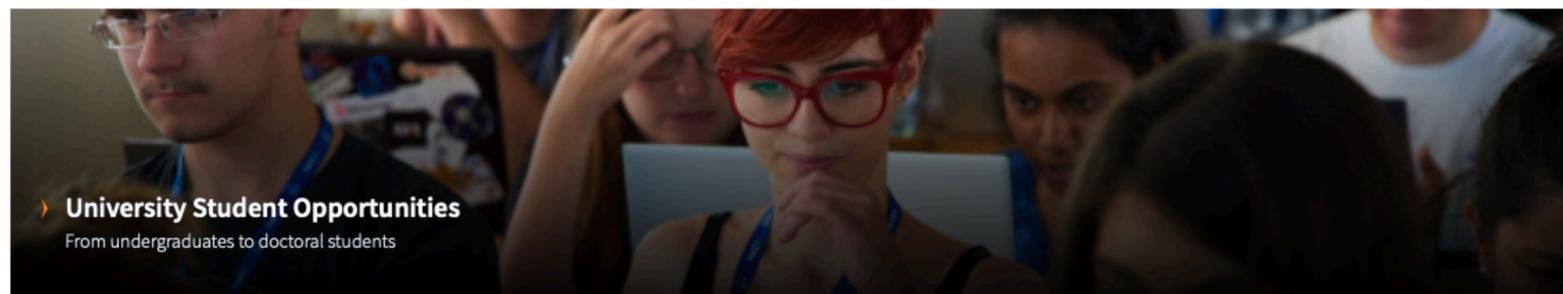
Activity | Secondary Students  
Tags: event displays, classroom, masterclasses



## External Resources for Secondary Students

Links | Secondary Students  
Tags: games, activities

# CERN resources



## French Teacher Programmes

### NATIONAL COORDINATORS

NICOLAS ARNAUD

NICOLAS COUCHOUD

### UPCOMING PROGRAMMES

22-27 OCTOBER 2023

L'Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules du CNRS (IN2P3) et le dispositif ministériel «Sciences à l'Ecole» organisent chaque année en partenariat avec le CERN un stage d'une semaine sur la physique des particules. Ce stage combine cours d'introduction (particules élémentaires et interactions, accélérateurs de particules, méthodes de détection, etc.), conférences thématiques (le boson de Higgs, les résultats du satellite Planck, les neutrinos, etc.), activités pédagogiques (par exemple la réalisation d'une chambre à brouillard) et visites d'installations du CERN. Il s'adresse aux enseignants en physique et chimie du secondaire.

Depuis 2012, ce stage a lieu la première semaine des vacances de la Toussaint. L'appel à candidatures est ouvert au printemps ; il est diffusé sur le site de «Sciences à l'Ecole» et relayé dans les académies par les correspondants académiques. Entre 30 et 35 professeurs sont retenus chaque année pour ce stage; les critères de sélection mettent l'accent sur la motivation du candidat et sur ses projets pédagogiques, actuels ou futurs, en lien avec la thématique de cette formation.

Ce stage est notamment un prérequis pour participer au programme «Cosmos à l'Ecole» de prêts longue durée de détecteurs de rayons cosmiques dans les établissements scolaires. Cet instrument permet de réaliser de nombreuses séances d'enseignement avec les élèves, en lien avec les programmes de physique actuels. L'IN2P3 propose également de nombreuses activités en direction des scolaires et du grand public, rassemblées sous l'appellation de «l'Ecole des deux infinis».

<https://indico.cern.ch/event/1092644/>

# Visiting CERN and the LHC experiments

- Visites virtuelles:

## ATLAS Virtual Visits

A Virtual Visit is a live video connection by a group (typically a classroom) to the ATLAS Experiment at CERN. A guide, who is a scientist or an engineer working on the experiment, meets visitors from the control room or (during planned LHC shutdowns) from the detector underground.

During a Virtual Visit, guides will

- Introduce themselves and describe their work in particle physics.
- Present CERN, the Large Hadron Collider (LHC), and the ATLAS experiment, including its goals and accomplishments.
- Invite questions from the audience.

We recommend audiences prepare questions ahead of time. This can be facilitated by viewing this [introductory video](#).

### Group Virtual Visits

Groups of at least 10 visitors (such as classrooms) can schedule their own visit by completing [this form](#).

[Schedule a Group Virtual Visit](#)

### Open Virtual Visits

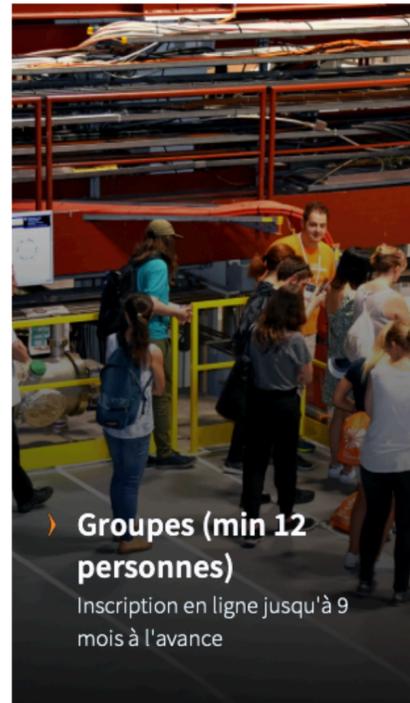
We also schedule periodic open visits that can be joined by individuals or small groups. You can find them in the list on this page. Select the **Open Virtual Visit** of the date/time/language that best fits, click on it and register.



# Visiting CERN and the LHC experiments

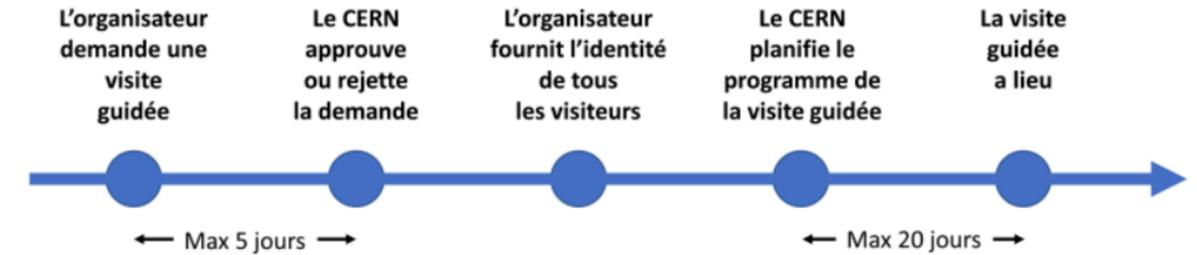
- Visites en presentiel:

## VISITES GUIDÉES



Toutes nos visites guidées sont gratuites  
La réservation est obligatoire  
L'offre est limitée  
Les visites souterraines des détecteurs sont extrêmement limitées  
Le tunnel du LHC ne peut pas être visité

### Procédure de demande d'une visite guidée pour un groupe



1. Cliquez sur le bouton ci-dessous pour accéder au formulaire
2. Définissez le profil de votre groupe (catégorie, nombre de visiteurs, langue, pays, transport etc.).
3. Choisissez une date disponible. Si aucune date n'est disponible, veuillez essayer à nouveau un autre jour.
4. Fournissez les informations de contact de votre groupe et soumettez votre demande.
5. Votre demande de visite sera approuvée ou rejetée par le Service des visites dans les cinq jours ouvrables. Veuillez attendre que votre demande de visite guidée soit approuvée avant de prendre des engagements fermes pour votre voyage et votre logement.
6. Une fois votre demande de visite acceptée, vous devez fournir l'identité complète de tous les visiteurs (nom, prénom, date et lieu de naissance, nationalité) au plus tard 21 jours avant votre visite, sous peine de voir votre visite annulée ([plus d'informations - en anglais - sur ce que nous faisons des données recueillies](#)). Pour fournir l'identité de tous les visiteurs, il vous faut un compte. Vous pouvez utiliser un compte CERN, EduGAIN, Google, LinkedIn, GitHub ou Facebook. Assurez-vous d'utiliser un compte qui utilise **le même compte mail** que celui que vous avez utilisé pour créer votre demande.

[Demander une visite guidée pour un groupe](#)

La visite comprend un film d'introduction au CERN, suivi de la visite d'un ou deux points de visite sur le site du laboratoire: salles de contrôle, lieux de recherche ou d'ingénierie etc. Les visites guidées ont lieu en intérieur et extérieur.

**Veillez noter que les visites souterraines sont très rares et uniquement possibles quand les accélérateurs ne fonctionnent pas. Le tunnel du LHC ne se visite pas.**

=> *janvier-mars chaque année*

# Masterclasses: demonstration pratique

- Objectif: analyser des événements reconstruits par le détecteur ATLAS (mélange de données reels et simulations), identifier des photons / electrons / muons et ainsi “découvrir” dans les distributions des masses invariantes le boson de Higgs, le boson Z mais aussi d’autres particules (du modele standard ou pas) qui se désintègrent dans ses particules
- <https://atlas.physicsmasterclasses.org/fr/zpath.htm>

**International Masterclasses Hands on Particle Physics**

Page d'accueil | Le parcours W | **Le parcours Z**

## Le parcours Z

*Bienvenue sur le parcours Z! Dans la suite, vous allez découvrir des particules comme le boson Z et le boson de Higgs et comprendre leur importance pour notre compréhension de la Nature. Dans cette quête, vous allez utiliser de vraies données d'ATLAS, une expérience du Grand Collisionneur de Hadrons (LHC) au CERN.*

*Avant de s'atteler à ce travail, nous allons vous emmener en voyage aux confins des structures les plus minuscules connues de l'homme : les particules élémentaires. Vous allez voir comment elles peuvent être produites dans les collisions proton-proton au LHC, et vous allez apprendre comment les identifier dans le détecteur ATLAS. Finalement vous réaliserez une véritable mesure physique sur des données récentes du détecteur ATLAS : l'identification du boson Z et d'autres particules légères ainsi que la mesure de leurs propriétés ! Vous aurez également l'opportunité de chercher le boson de Higgs en suivant une méthode similaire à celle utilisée par les physiciens d'ATLAS. Vous vous rendrez compte alors que vous venez juste d'acquérir la maîtrise d'un puissant outil pour la découverte de l'inconnu.*

Présentation du boson Z
Présentation du boson de Higgs
Nouvelle Physique
Identification des particules
Identification des événements
Utiliser la masse pour chercher et découvrir des particules
Au travail !

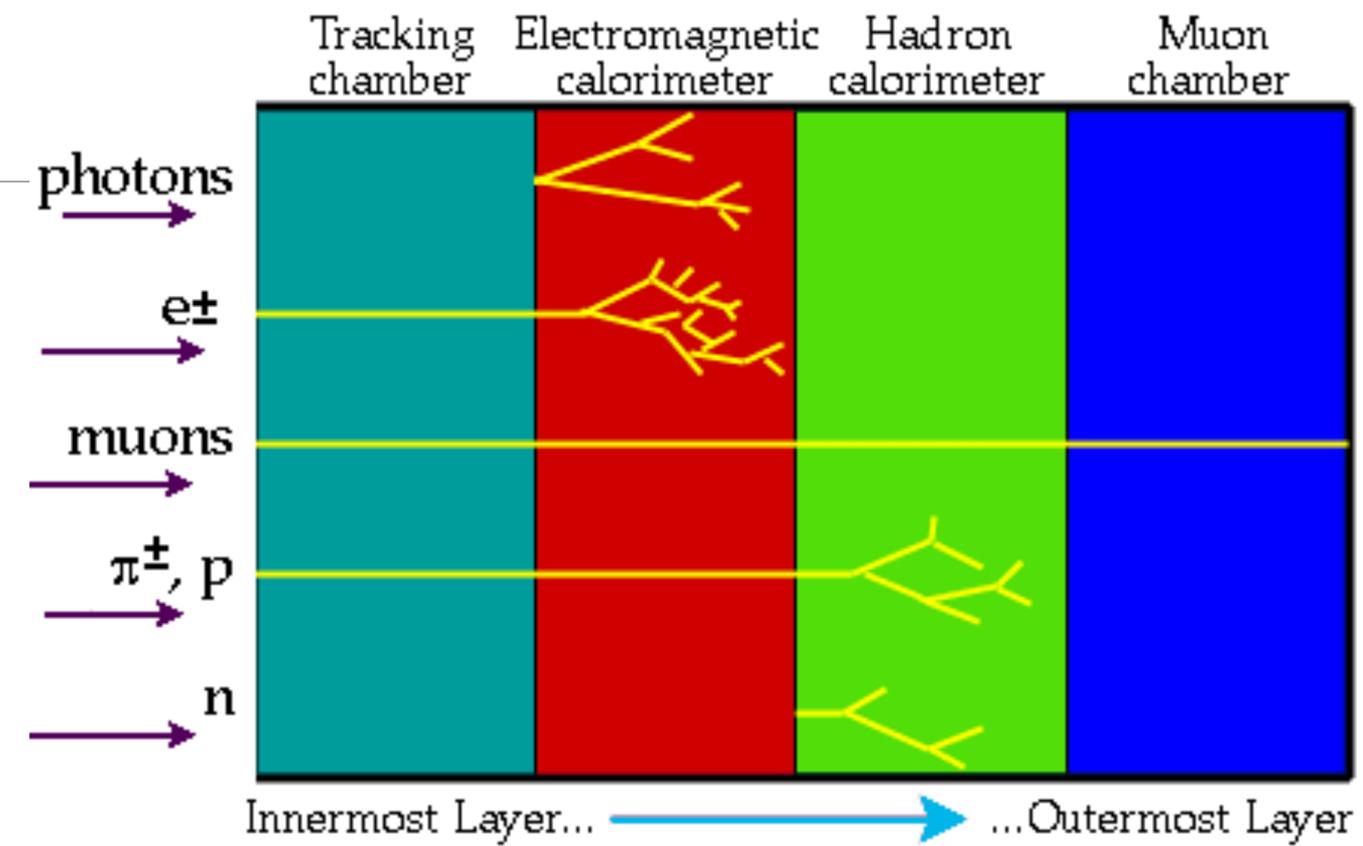
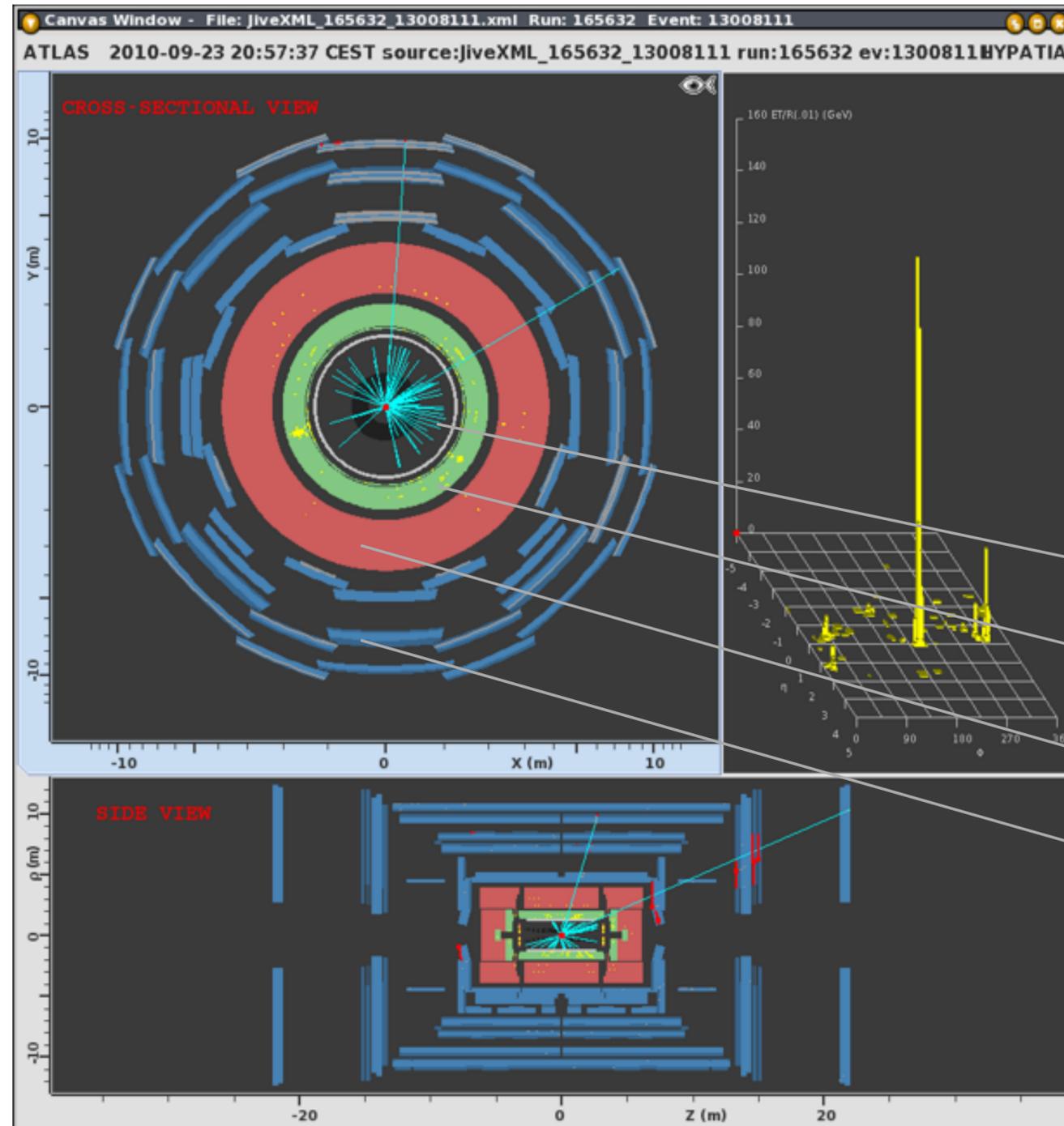
## Ressources

La recherche au LHC
Le Modèle Standard
En savoir plus sur le boson Z
Dimensions supplémentaires et Gravité
La supersymétrie
Impulsion (ou quantité de mouvement)
Le spin
Unités d'énergie



# Masterclasses: démonstration pratique

- Visualisation d'événements dans ATLAS avec Hypathia



**Trajectographe**

**Calorimètre électromagnétique**

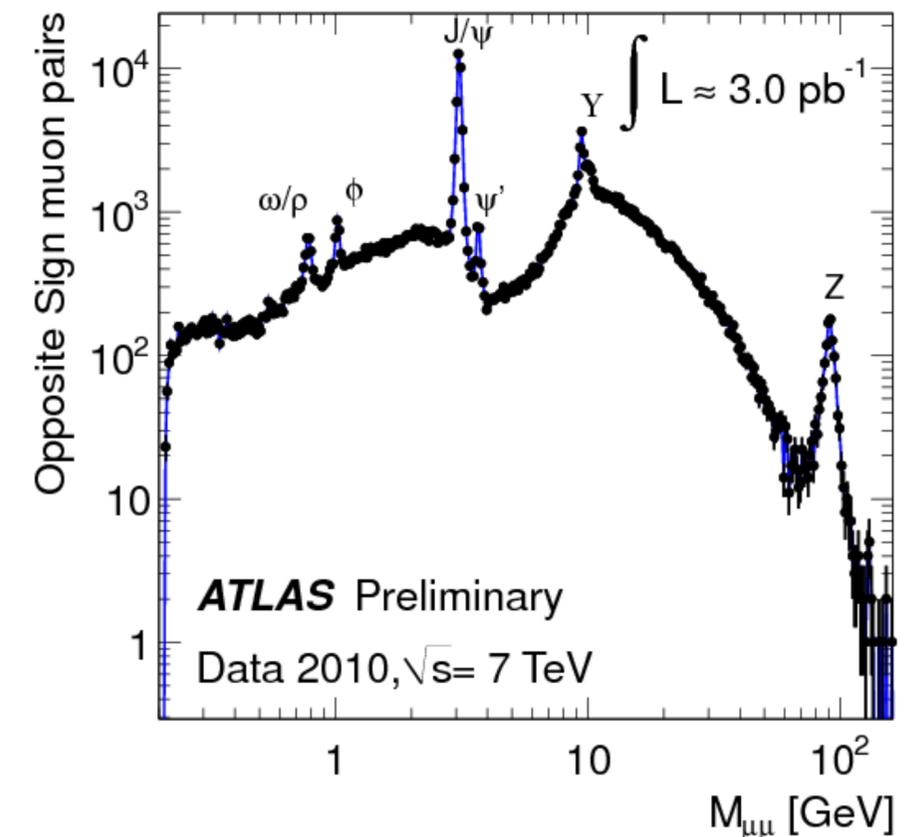
**Calorimètre hadronique**

**Chambres à muons**

[https://atlas.physicsmasterclasses.org/fr/zpath\\_exercise1.htm](https://atlas.physicsmasterclasses.org/fr/zpath_exercise1.htm)

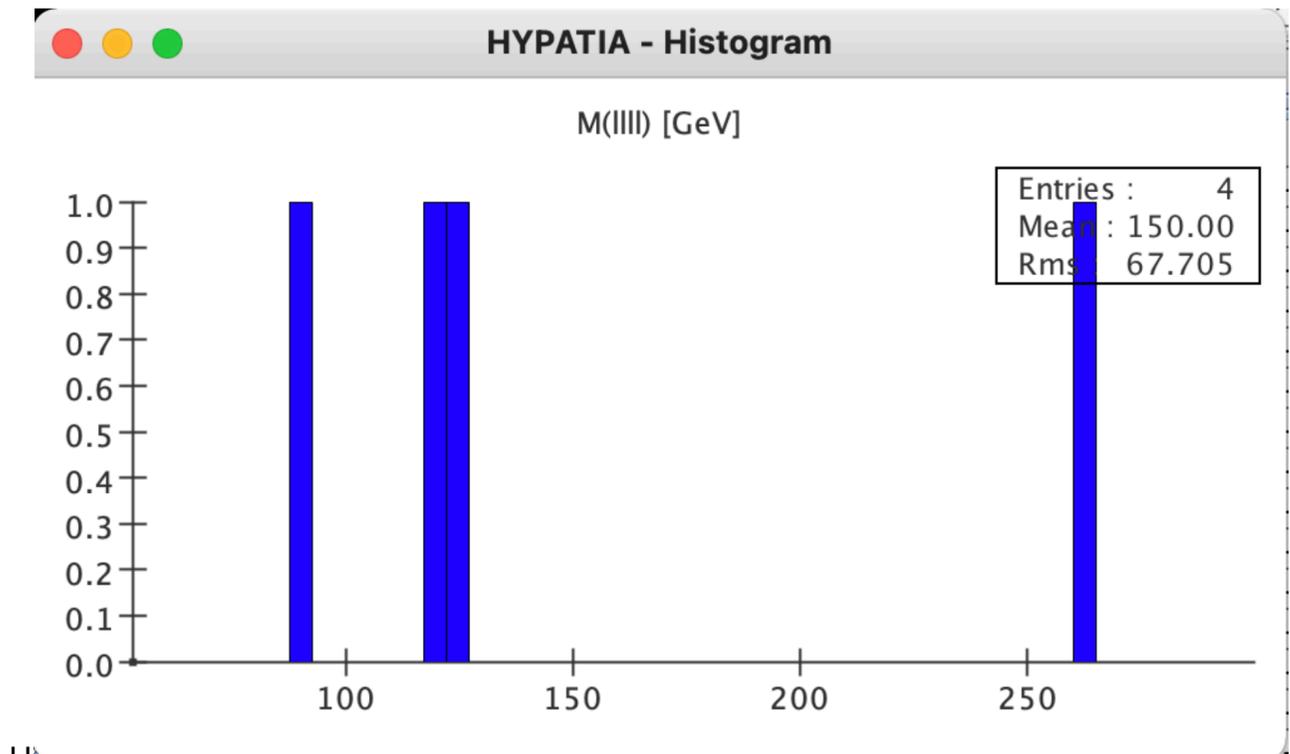
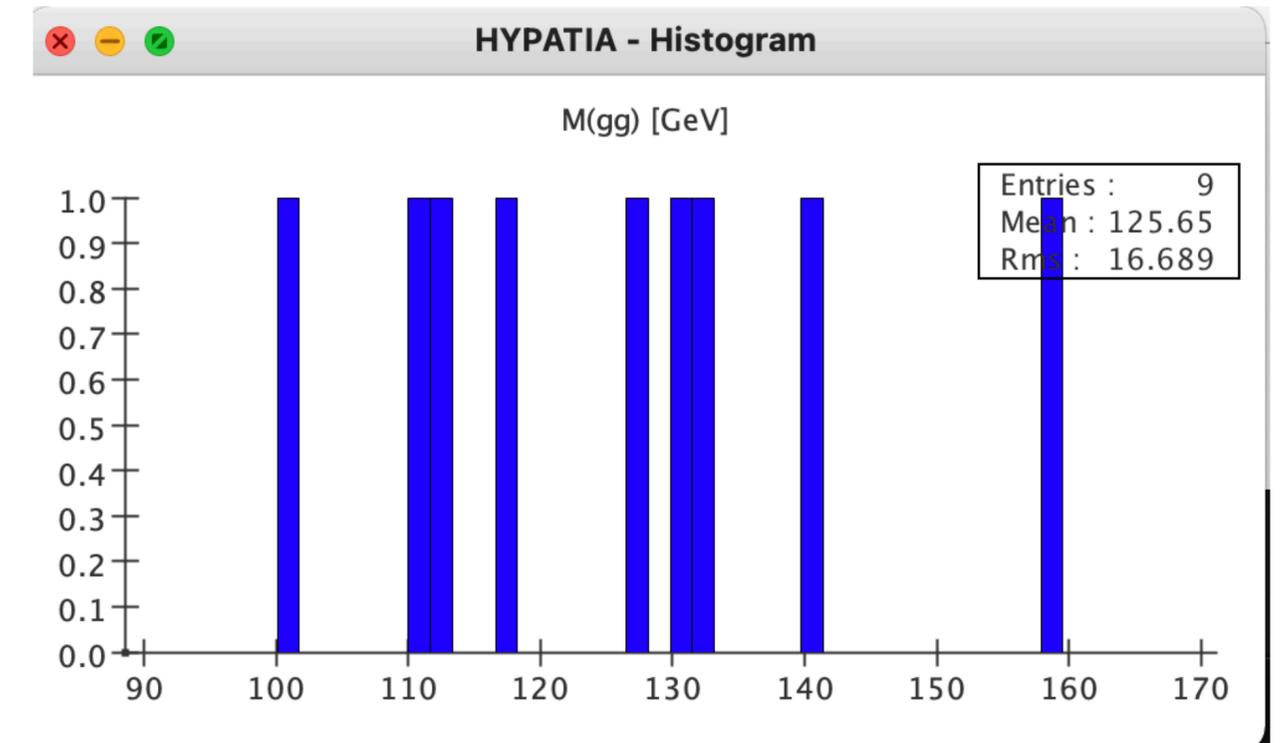
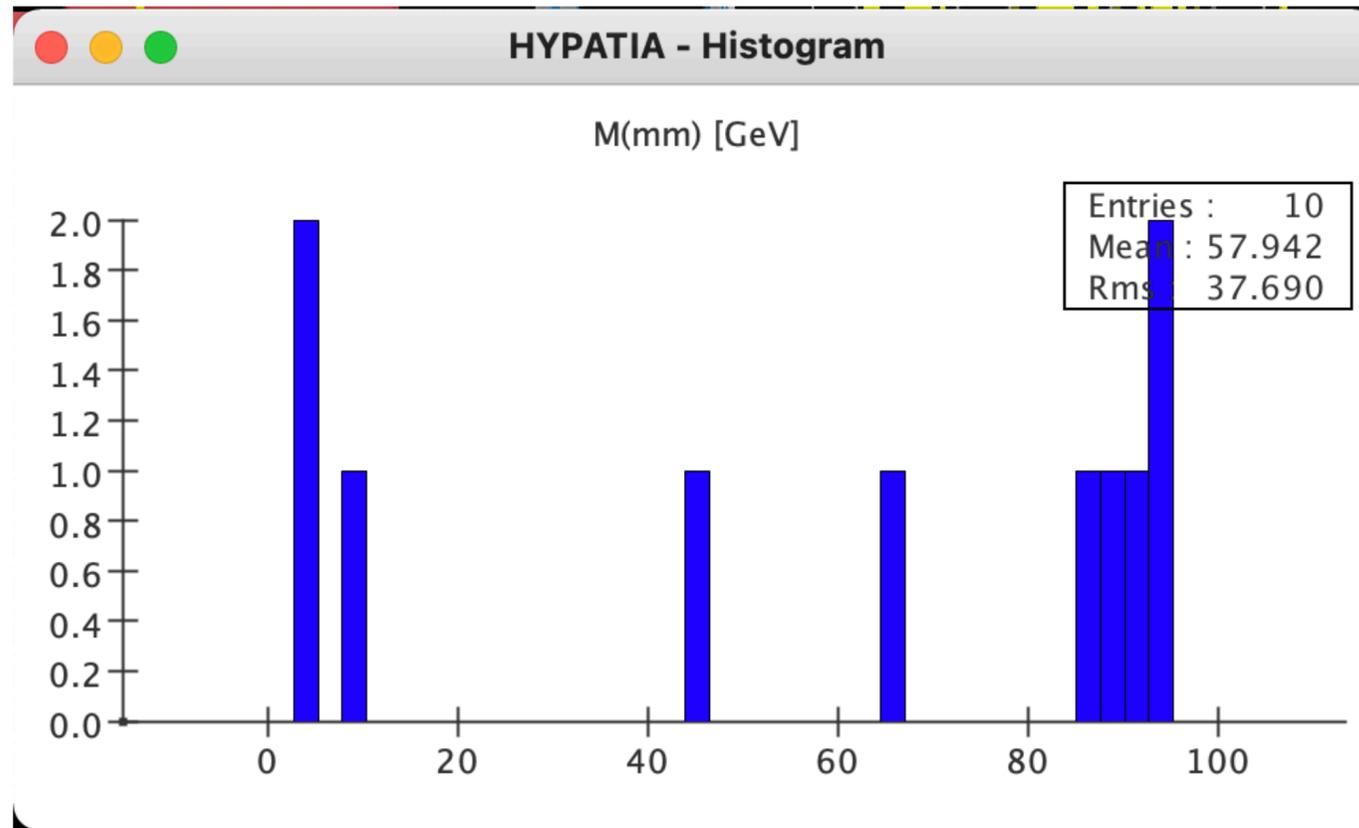
# Au boulot!

- Télécharger Hypathia pour visualiser les événements reconstruits: [http://hypatia.phys.uoa.gr/Downloads/HYPATIA/Hypatia\\_7.4\\_Masterclass.zip](http://hypatia.phys.uoa.gr/Downloads/HYPATIA/Hypatia_7.4_Masterclass.zip)
- Télécharger les événements à analyser:
  - 10 évènements pour s'entraîner: [https://atlas.physicsmasterclasses.org/fr/zpath\\_exercise2.htm](https://atlas.physicsmasterclasses.org/fr/zpath_exercise2.htm), fichier [https://atlas.physicsmasterclasses.org/downloads/exercise2\\_Z.zip](https://atlas.physicsmasterclasses.org/downloads/exercise2_Z.zip)
  - Pour aller plus loin et chercher de déterminer la masse du boson de Higgs, Z, et d'autres resonances  $\gamma\gamma$ ,  $ee$ ,  $\mu\mu$ , 4 leptons: <https://cernmasterclass.uio.no/datasets/allSets/>
    - Par exemple: <https://cernmasterclass.uio.no/datasets/allSets/dir01/groupA.zip>
- Démarrer Hypathia (installation de java nécessaire): source HYPATIA\_for\_Linux.sh
- Charger le premier des événements d'entraînement à analyser (File / Read Event Locally)
- Analyser les évènements: on est prêt pour se lancer à la recherche du boson de Higgs ou d'autres particules se désintégrant en photons ou leptons !
- NB: il y a aussi une version simplifiée et en ligne d'HYPATIA qui peut être utilisée sans rien télécharger: <https://hypatia.iasa.gr/fr/index.html> (plein écran: <https://hypatia-app.iasa.gr/Hypatia/?lang=fr>)



# Après environ 25 évènements analysés (+ le 10 d'entraînement)

- Visualisation d'évènements dans ATLAS avec Hypathia



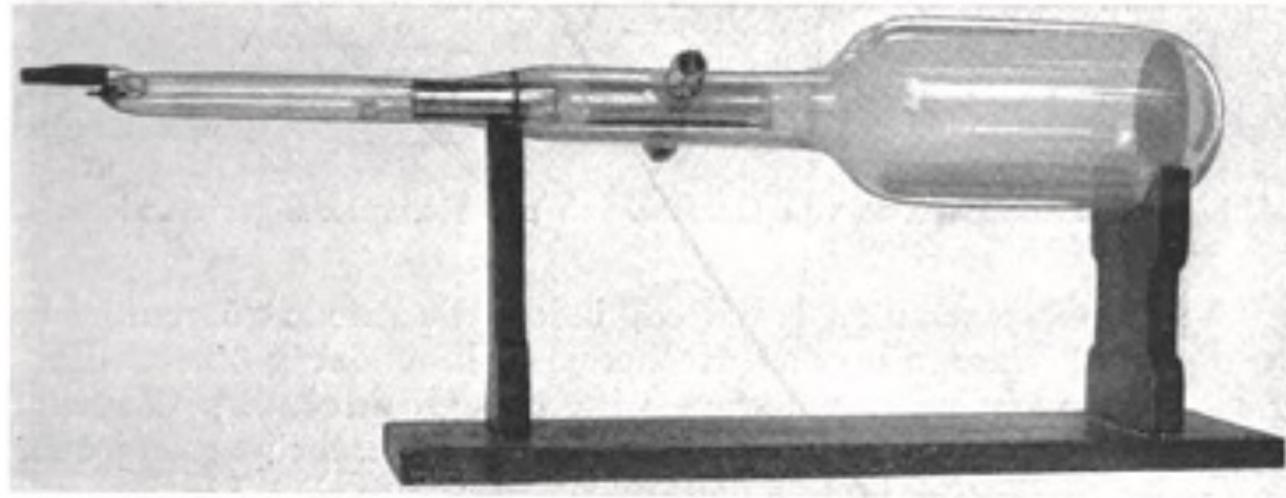
# Questions?

[giovanni.marchiori@apc.in2p3.fr](mailto:giovanni.marchiori@apc.in2p3.fr)

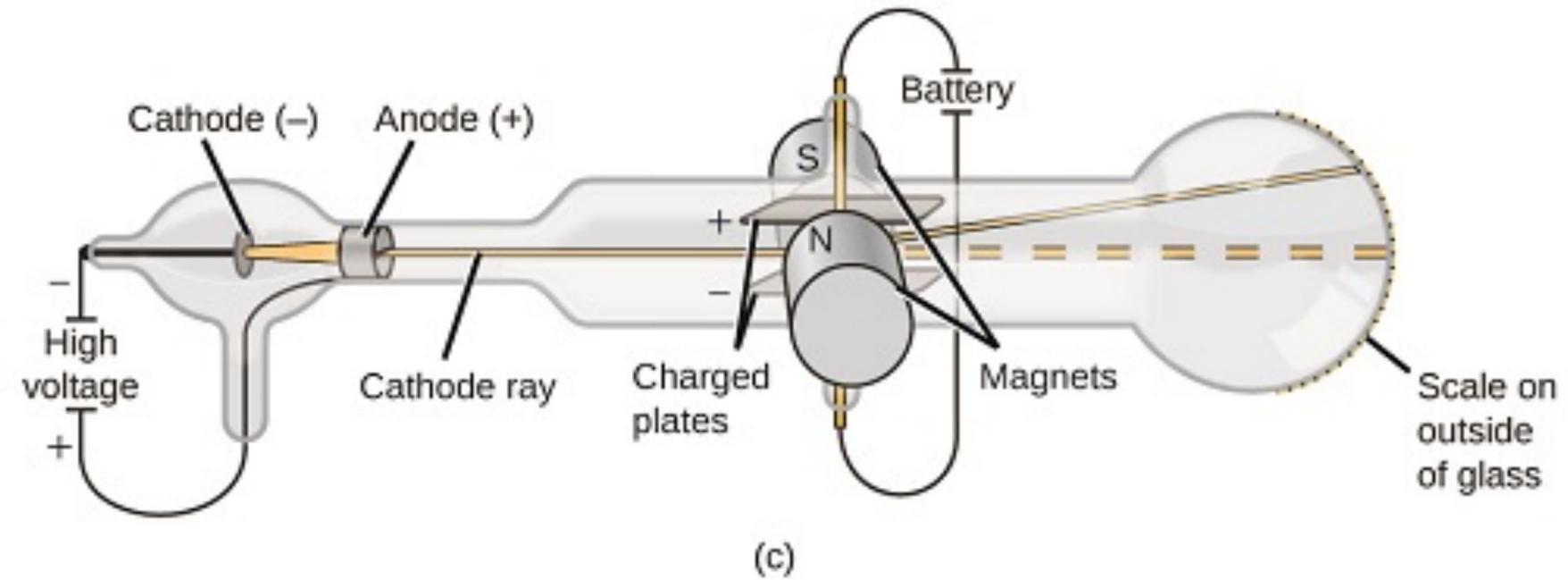
# L'expérience de J. J. Thompson



(a)

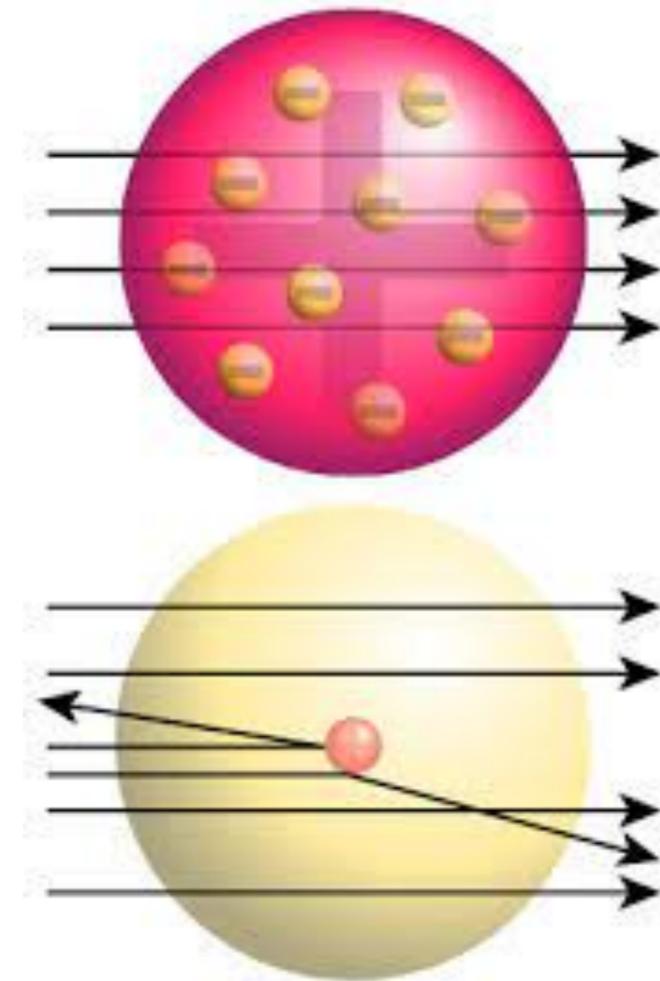
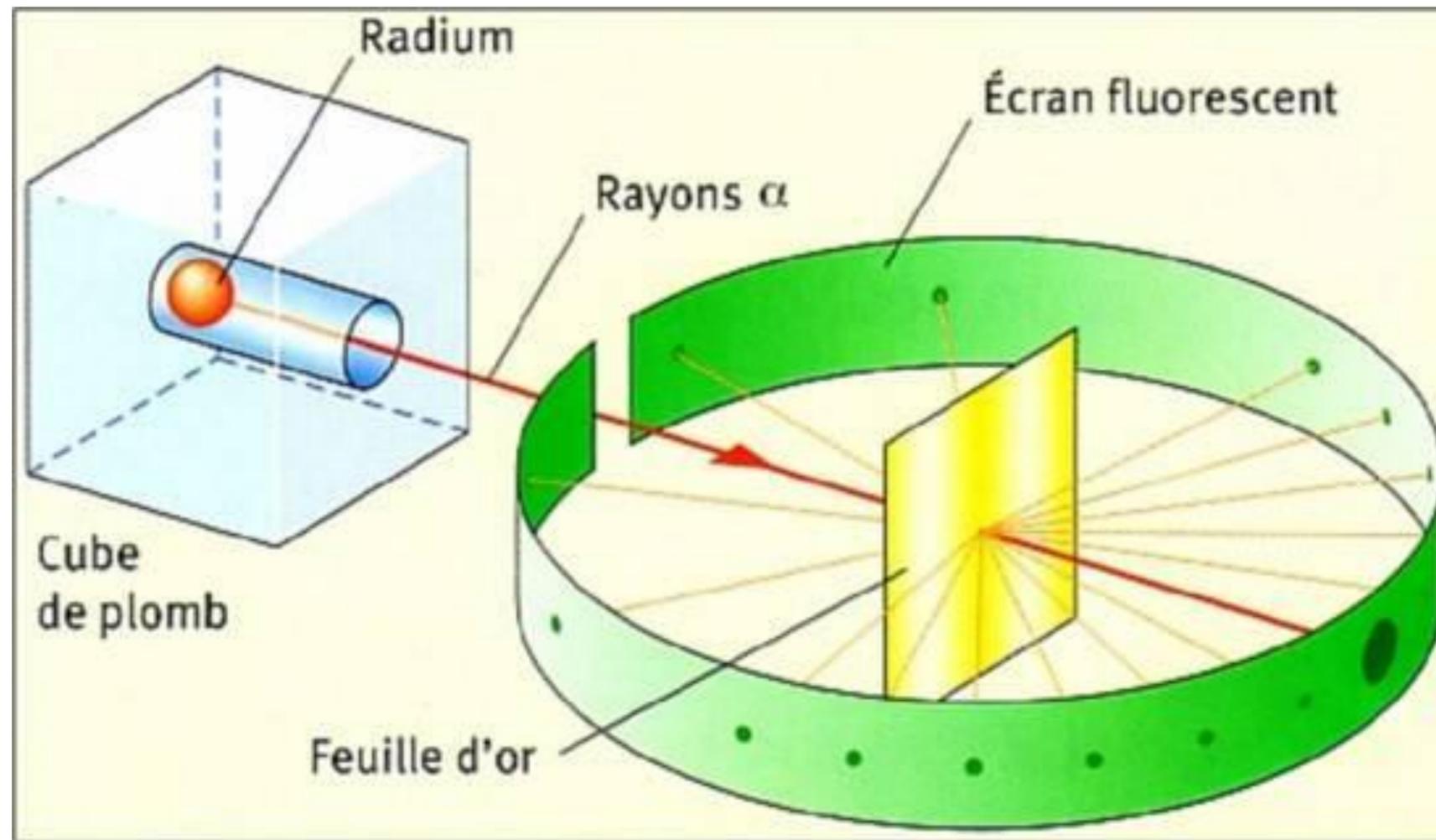


(b)



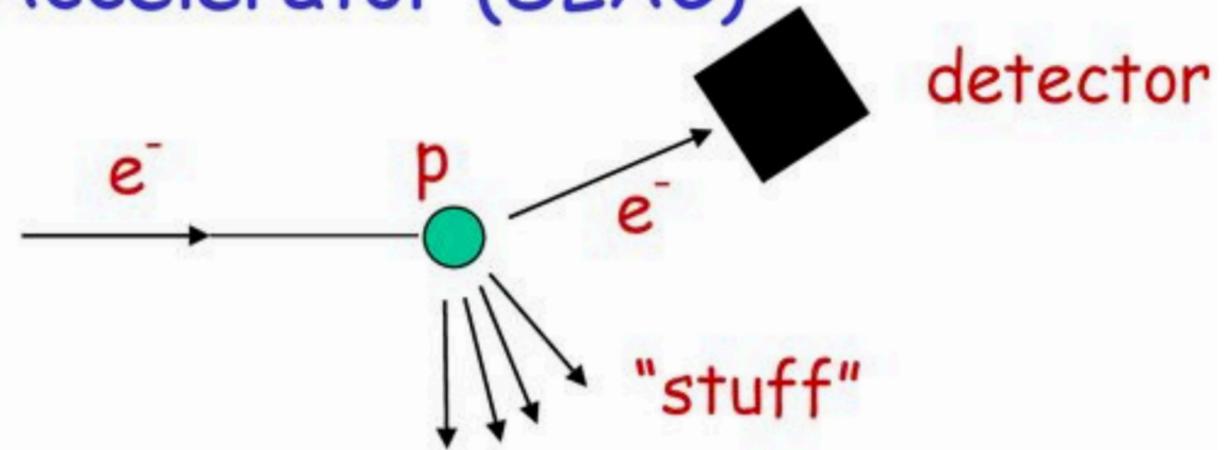
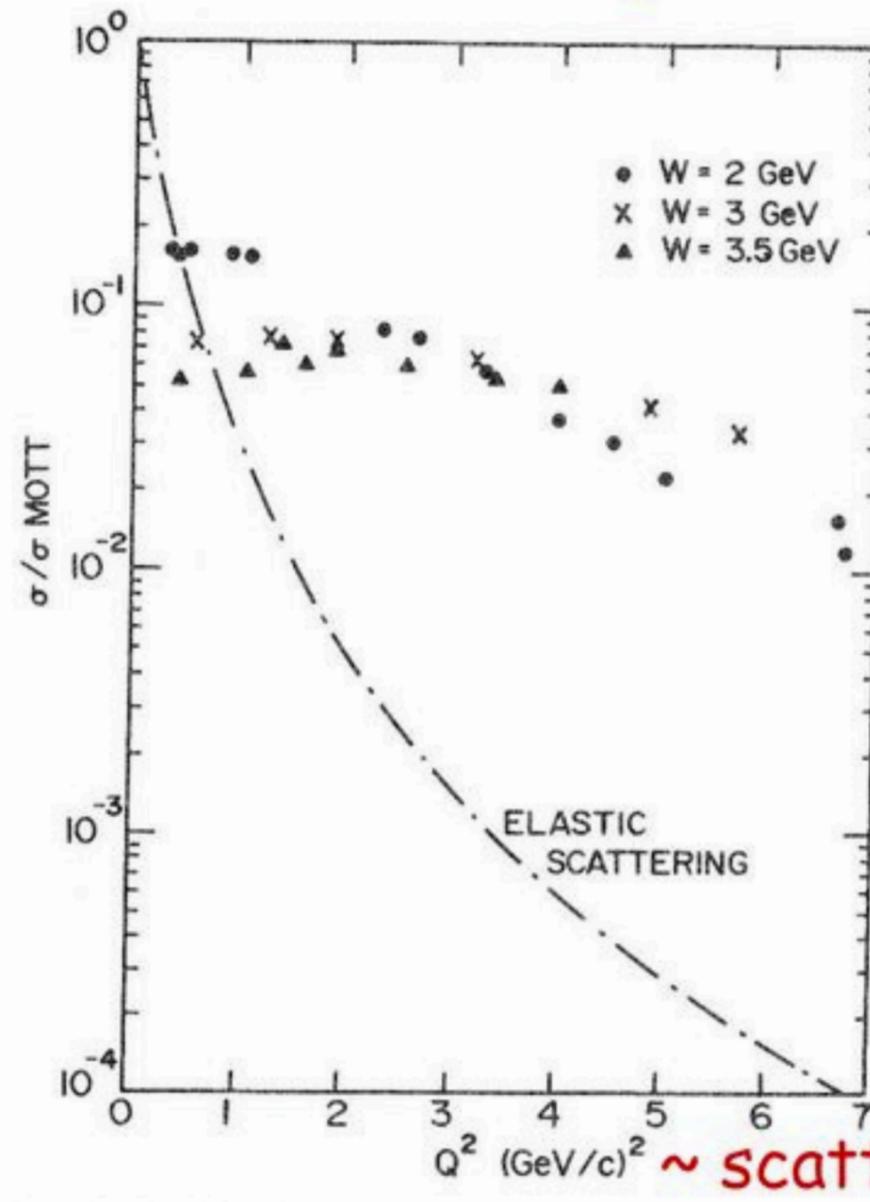
(c)

# L'expérience de Rutherford



# La découverte des quarks: a modern Rutherford experiment

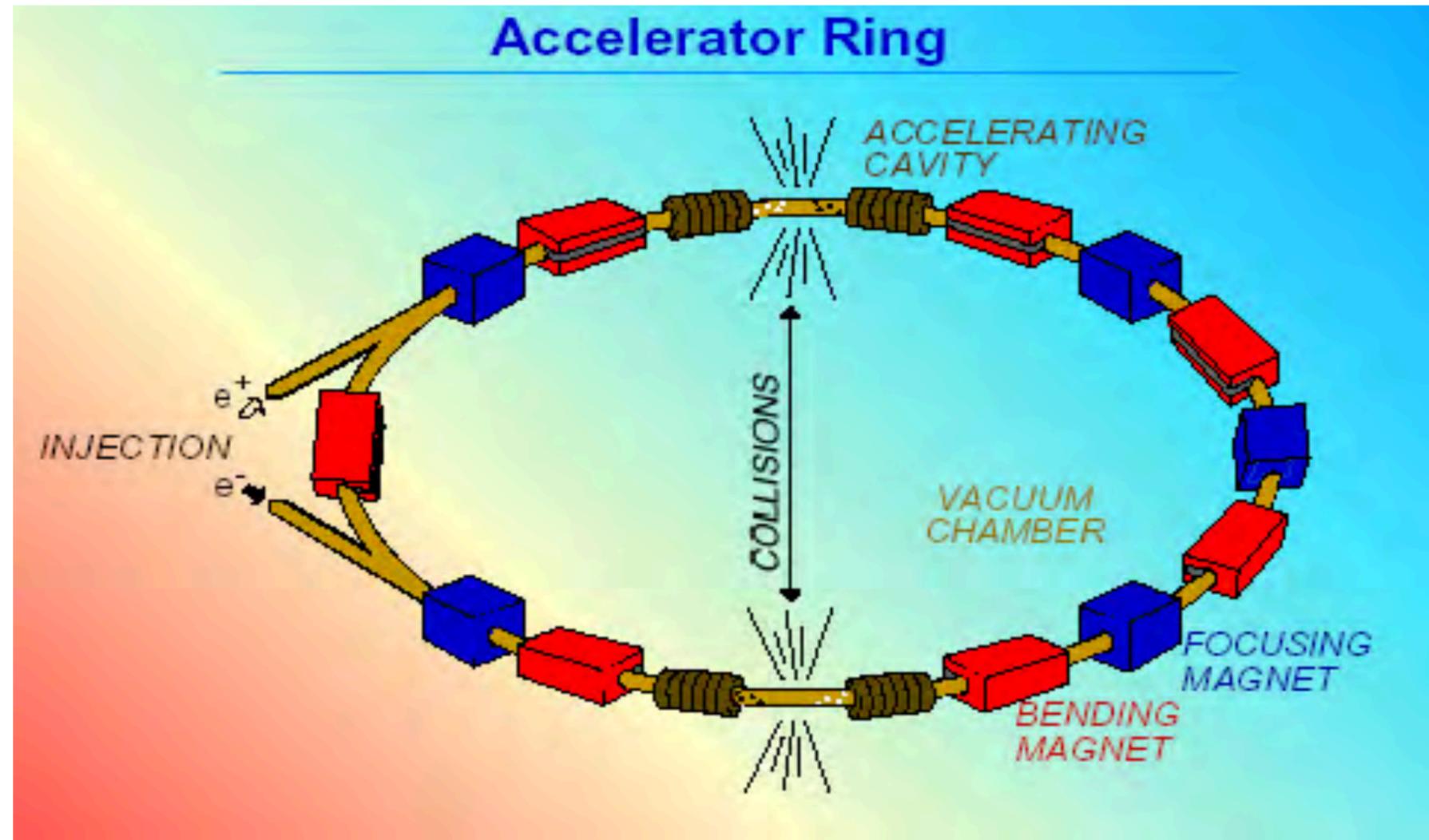
## Evidence for Quarks from 1968 Experiment at Stanford 2-mile Long Linear Accelerator (SLAC)



← Many more events seen at large angle than expected:

Indirect evidence for the existence of quarks

# Fonctionnement d'un accélérateur

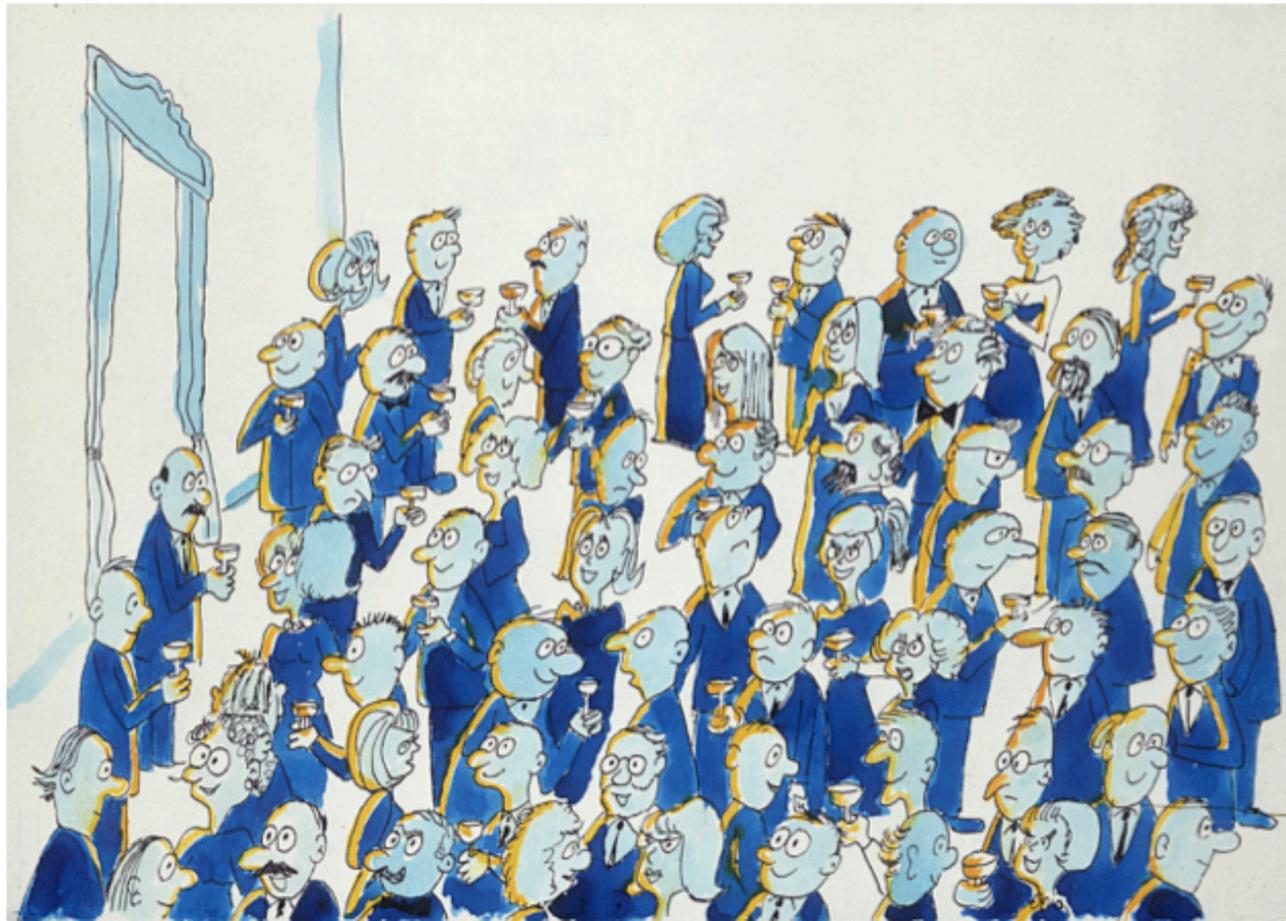


Courbure  
Aimants supraconducteurs

Accélération  
Cavités à radiofréquence

# Le mécanisme de Higgs

1. Physicists (representing the Higgs field evenly distributed throughout space) are at a conference reception; all free to move around the room.



2. In comes a noble prize winner; everyone wants to speak to him. Physicists crowd around him. The noble laureate is not free to move around; he has gained inertia by interacting with the crowd.



**This is analogous to how the particles acquire mass: by interacting with the Higgs field. Laureates of different popularity gain different masses.**