

(courte introduction à la...)

Détection de particules avec ATLAS!

→ Pourquoi?

→ Comment?

17/12/2025

Marlon Barbero - barbero@cppm.in2p3.fr -

Plan général

- Quelle physique avec ATLAS?
- La détection des particules.

Modèle standard

- 3 familles de particules & des médiateurs des interactions.

	masse → charge → spin →	2.3 MeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ u up	1.275 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ c charmé	173 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ t top	0 0 1 gluon g	126 GeV 0 0 H Higgs
QUARKS		4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	95 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s étrange	4.18 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 γ photon	
		0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e électron	105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ muon	1.777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ tau	91.2 GeV 0 1 Z boson Z	
LEPTONS		< 2.2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e neutrino électronique	< 0.17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ neutrino muonique	< 15.5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ neutrino tau	80.4 GeV ±1 1 W boson W	BOSONS

Cette organisation théorique (et les maths qui la sous-tende) s'appelle le **modèle standard des particules** → Problème : **des particules sans masse!** jusqu'en 1964 (théorie de P. Higgs et al)

A-t-on tout compris de notre univers?

Nous et l'Univers visible

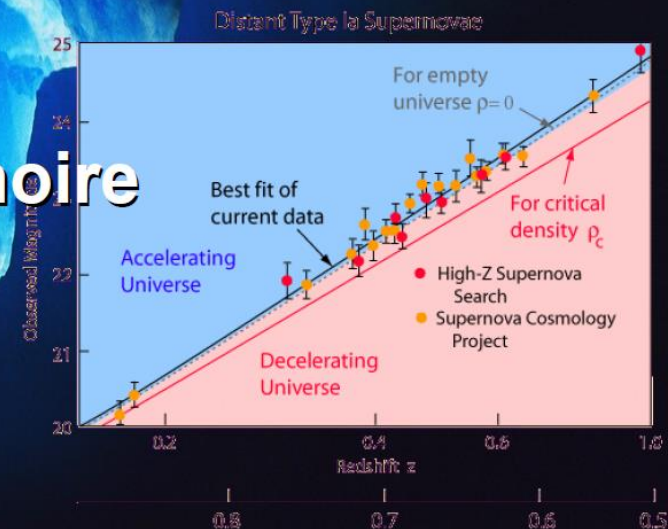
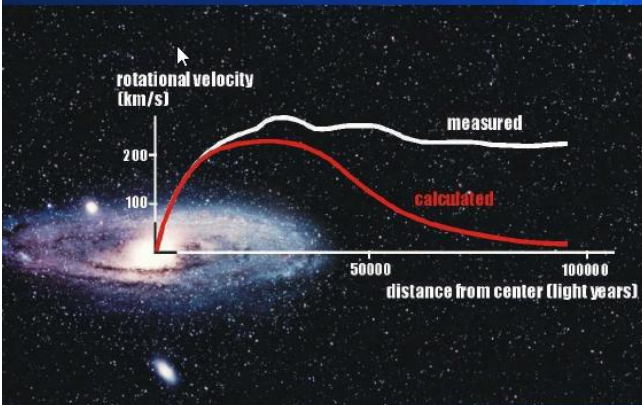
5% Modèle standard

27% Matière noire

68% Énergie noire

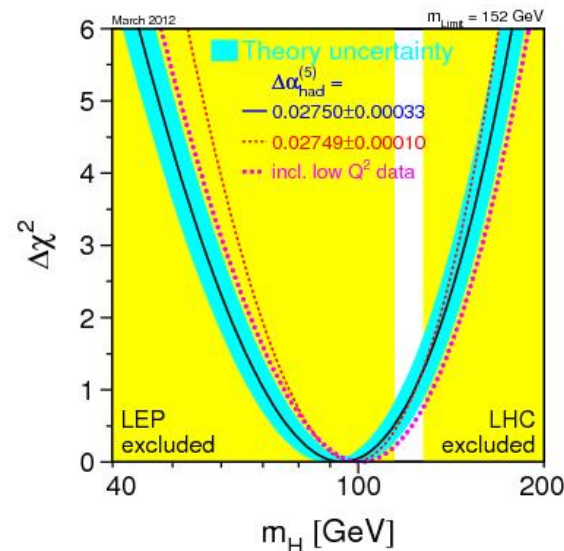
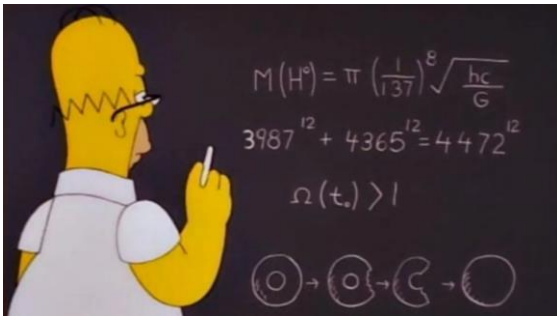
Pas la moindre idée de son origine !

- On ne sait pas ce que c'est mais on croit savoir que c'est là
- Candidats observables au LHC (supersymétrie, ...) ?



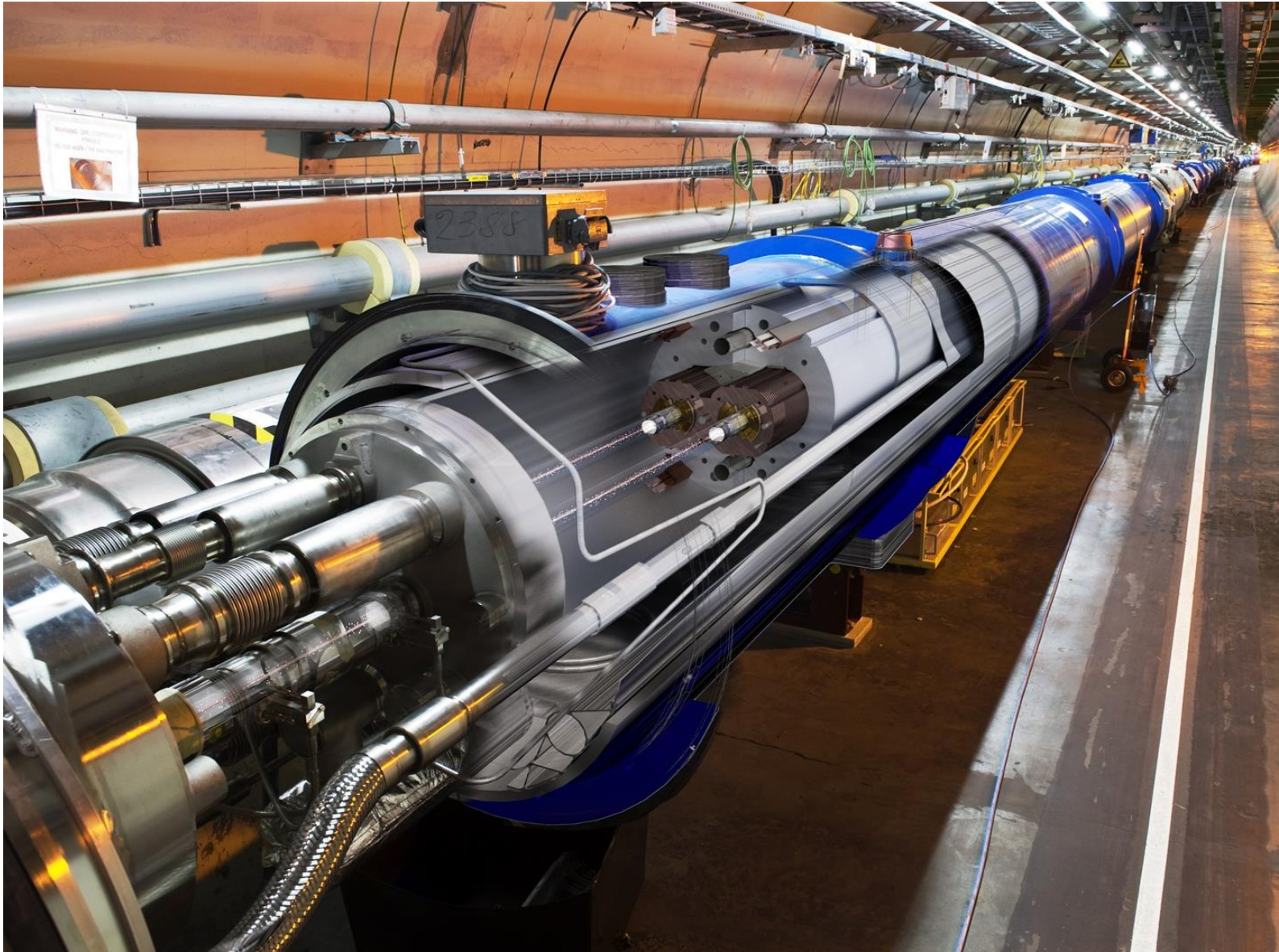
Quelle physique avec ATLAS?

- Le projet ATLAS auprès du Large Hadron Collider (LHC)
 - Construit en visant deux buts :
 - Prouver (ou éliminer) l'existence d'un boson de Higgs → compréhension du mécanisme fondamental responsable de l'existence de la masse.
 - Chercher des extensions du Modèle Standard des particules



Contrainte sur la masse
du Higgs en 2011

LHC: la machine à superlatifs!



LHC: la machine à superlatifs!

Plus grand et plus complexe machine jamais construite par l'homme

1232 dipôles.
Un dipôle:
15 m long
35 tonnes

27 km de circonférence
100 m sous terre

Les protons voyagent
à 99,99999991%
la vitesse de la lumière,
plus de 11000
tours par seconde

Un vide presque parfait (10^{-13} atm):
10 fois moins de pression que
sur la Lune

LHC: la machine à superlatifs!

Plus grand et plus complexe machine jamais construite par l'homme

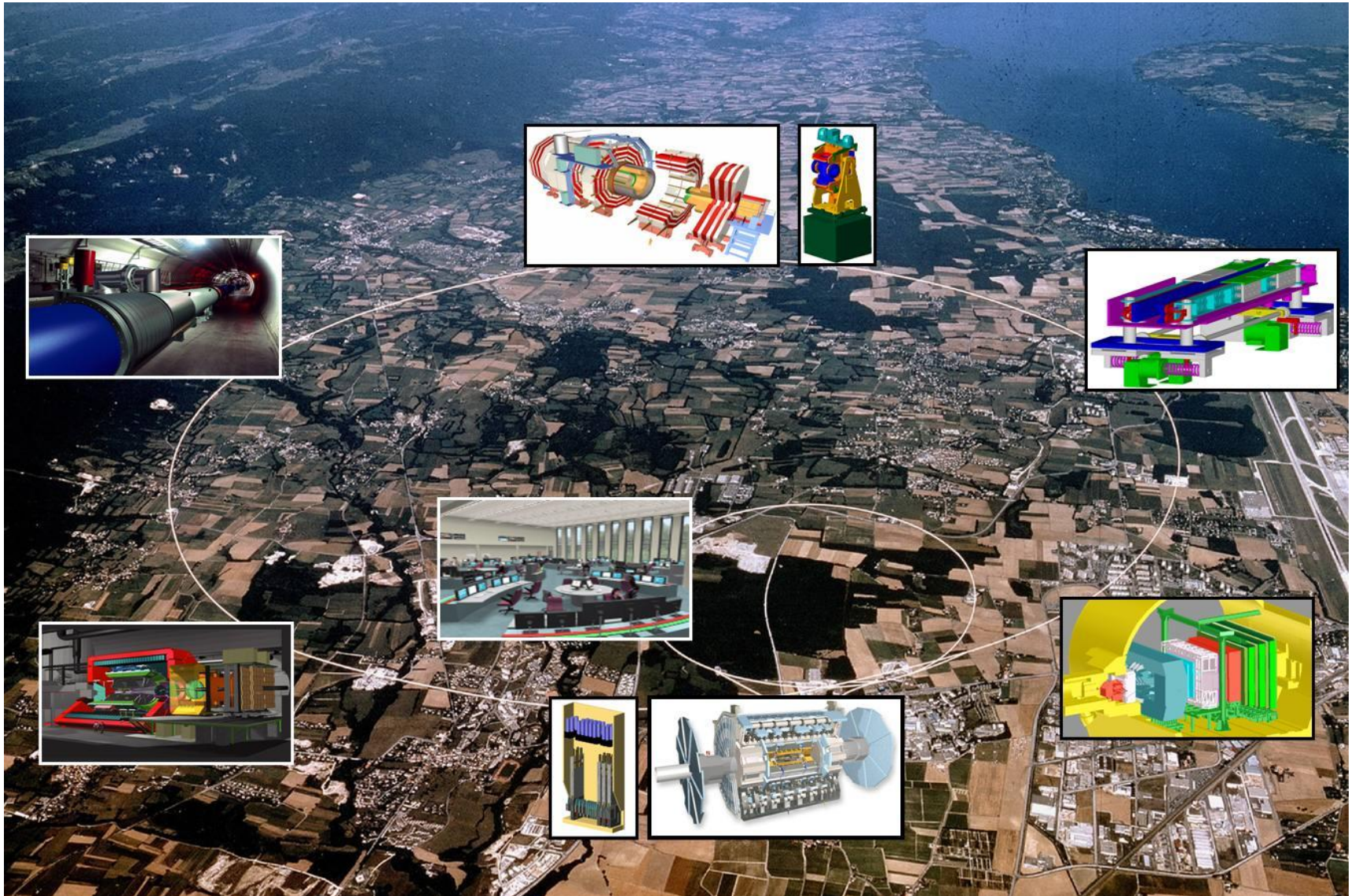
Longueur de cables superconducteurs,
5 aller-retour Terre-Soleil

Chaque proton a l'énergie d'un moustique en vol,
mais 2800 paquets de 100 milliards de protons!

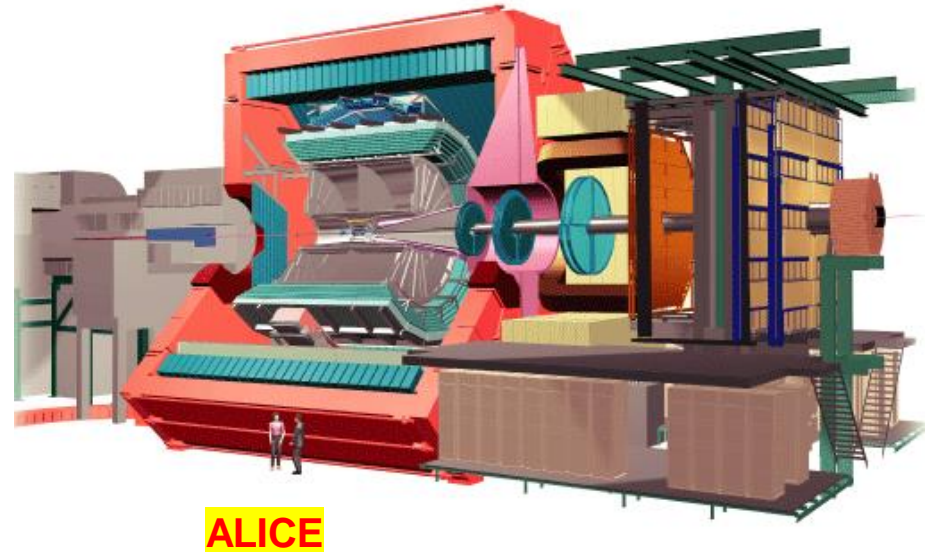
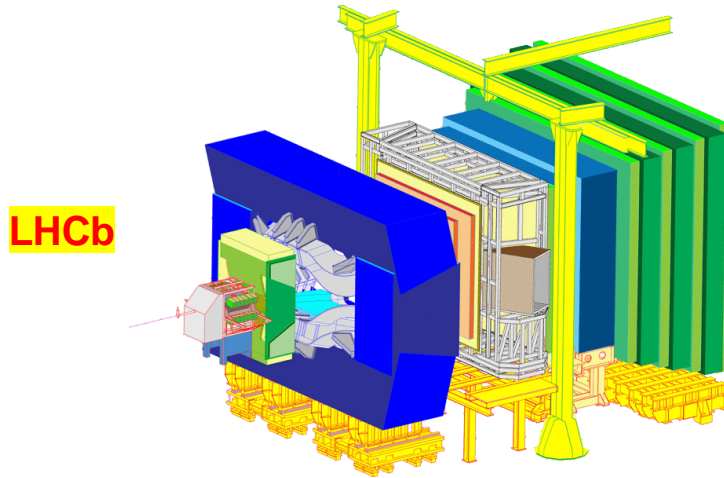
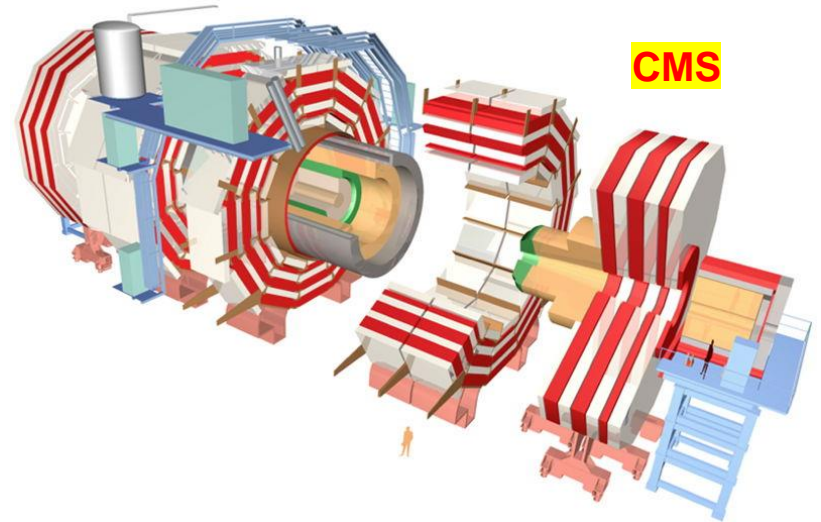
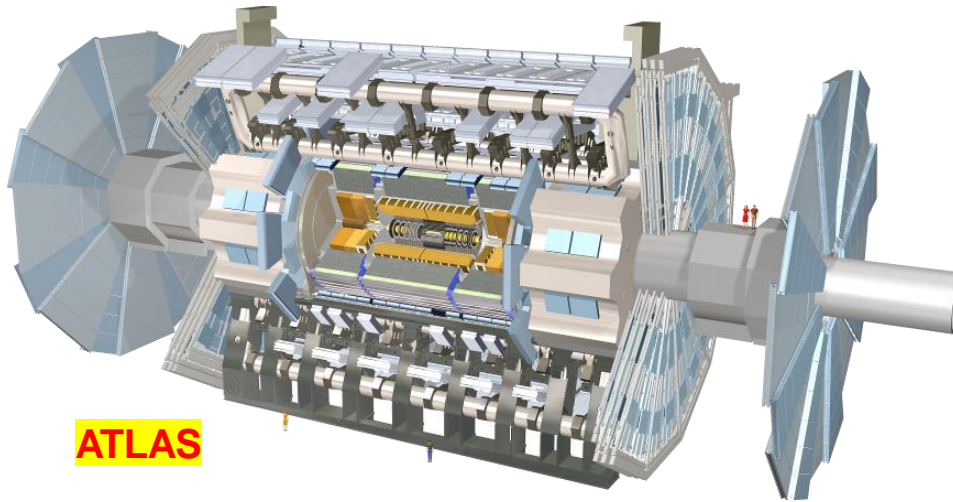
► L'énergie d'un TGV à 150 km/h.

Un grand frigidaire: 1.9 K (-271°C),
plus froid que l'espace intersidéral (2.7 K),
de l'hélium superfluide rend les câbles
supraconducteurs → génèrent un champs
magnétique de 8.3 T (200 000 fois
le champs magnétique terrestre)

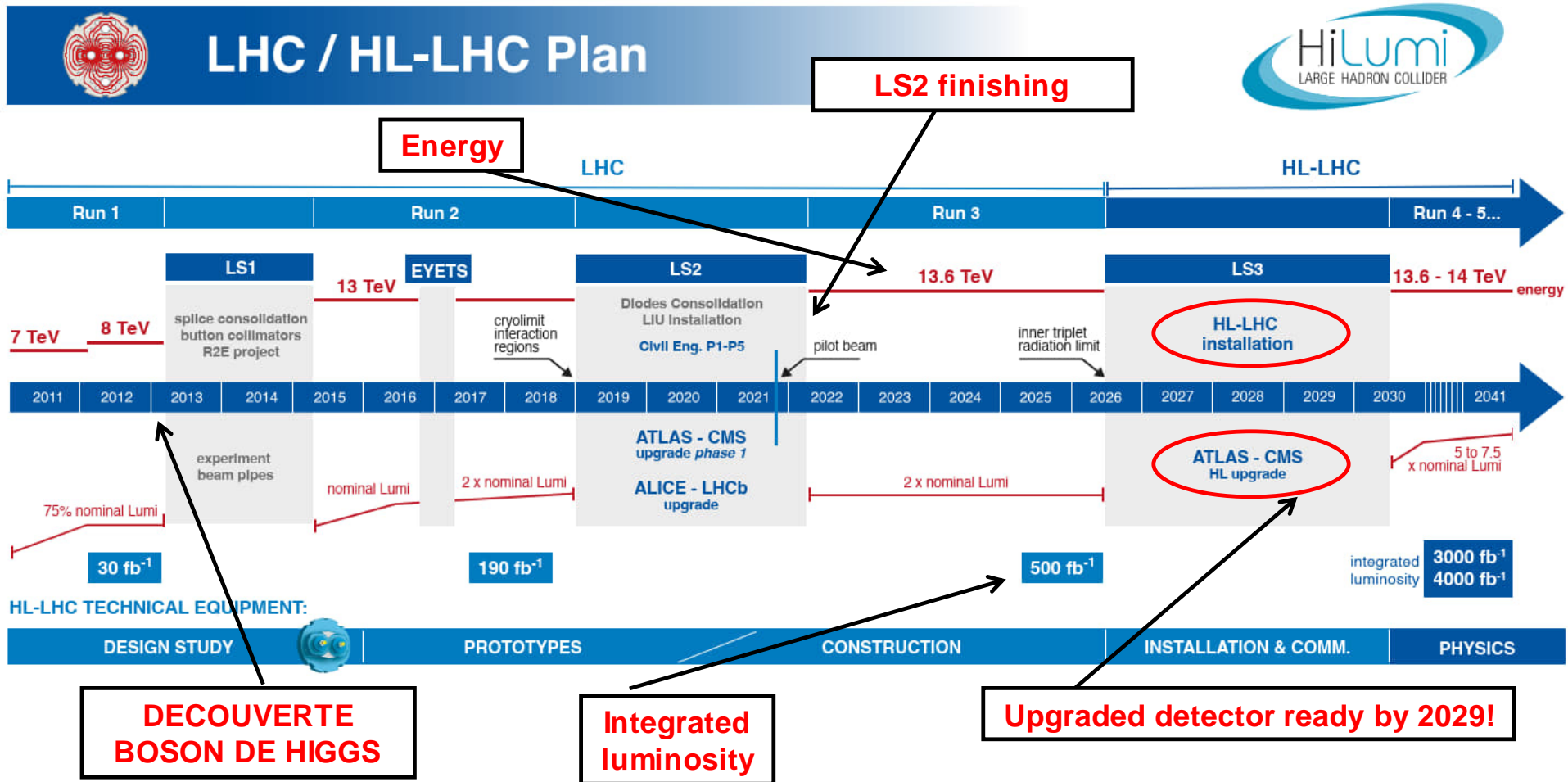
LHC et expériences



Les détecteurs géants du LHC



Durée du projet HL-LHC? 1/2 siècle!



La collaboration ATLAS

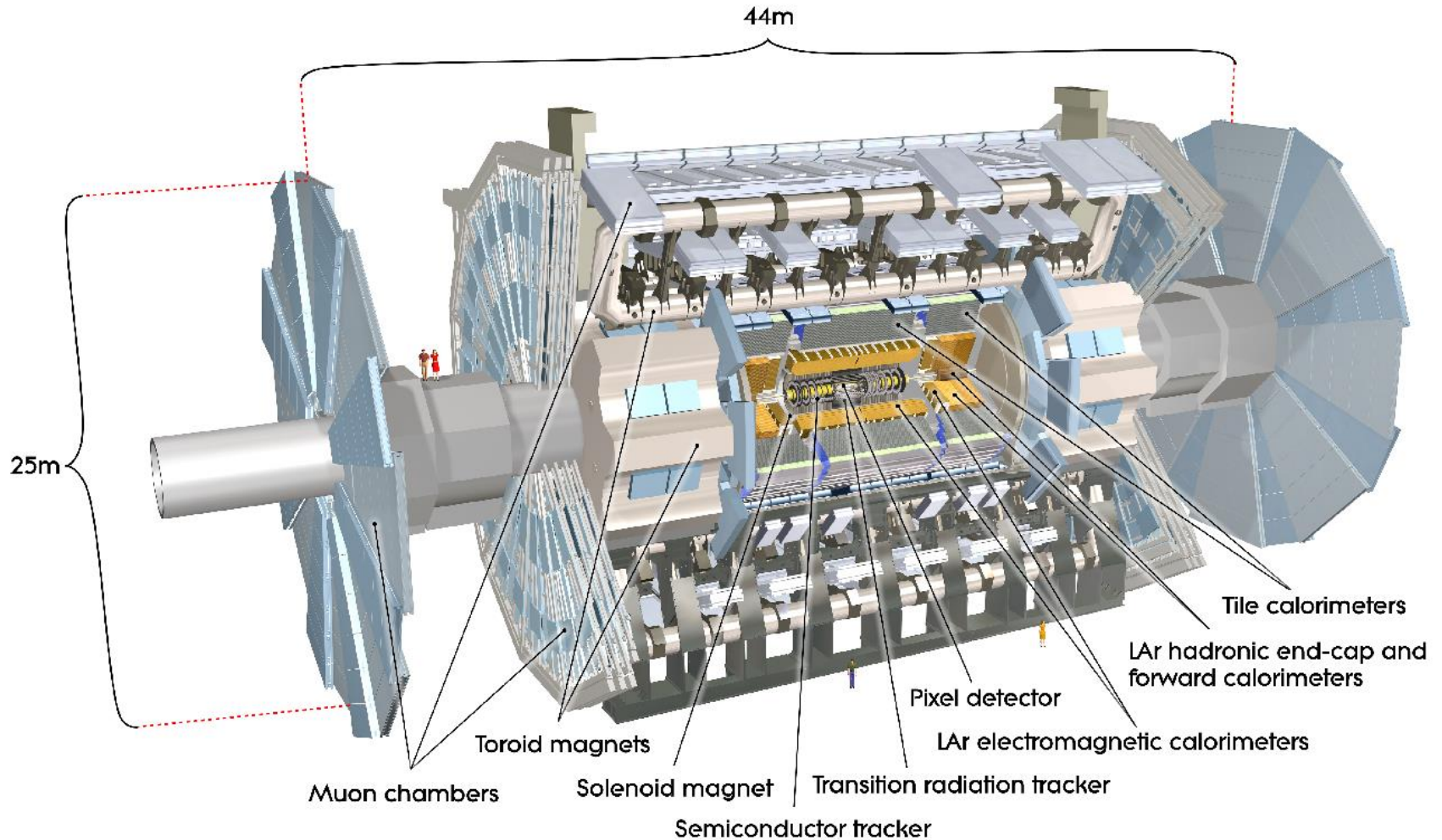
Status: March 2022



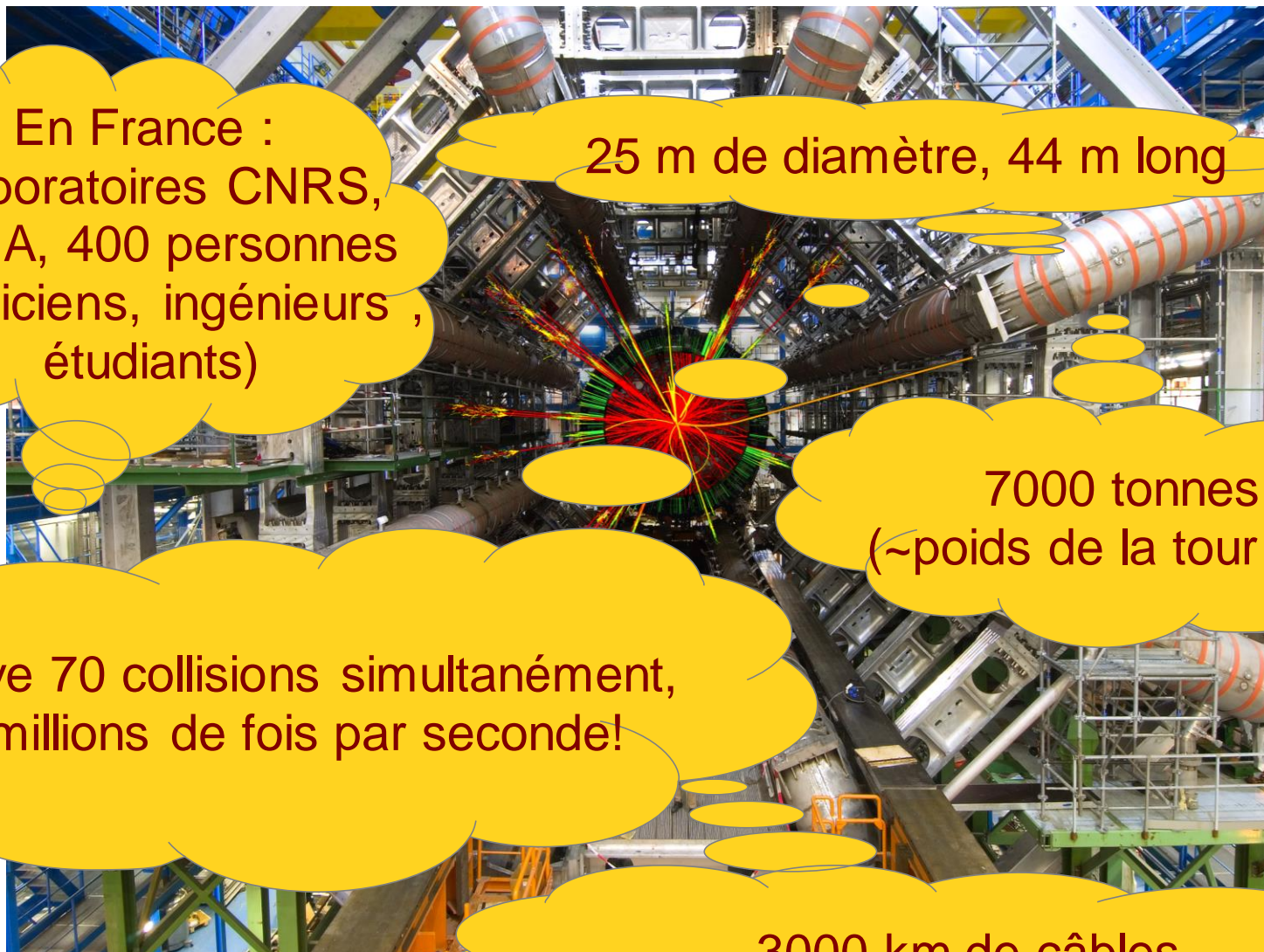
Nationalités des membres d'ATLAS



Le détecteur ATLAS



Le détecteur ATLAS



En France :
6 laboratoires CNRS,
1 CEA, 400 personnes
(physiciens, ingénieurs ,
étudiants)

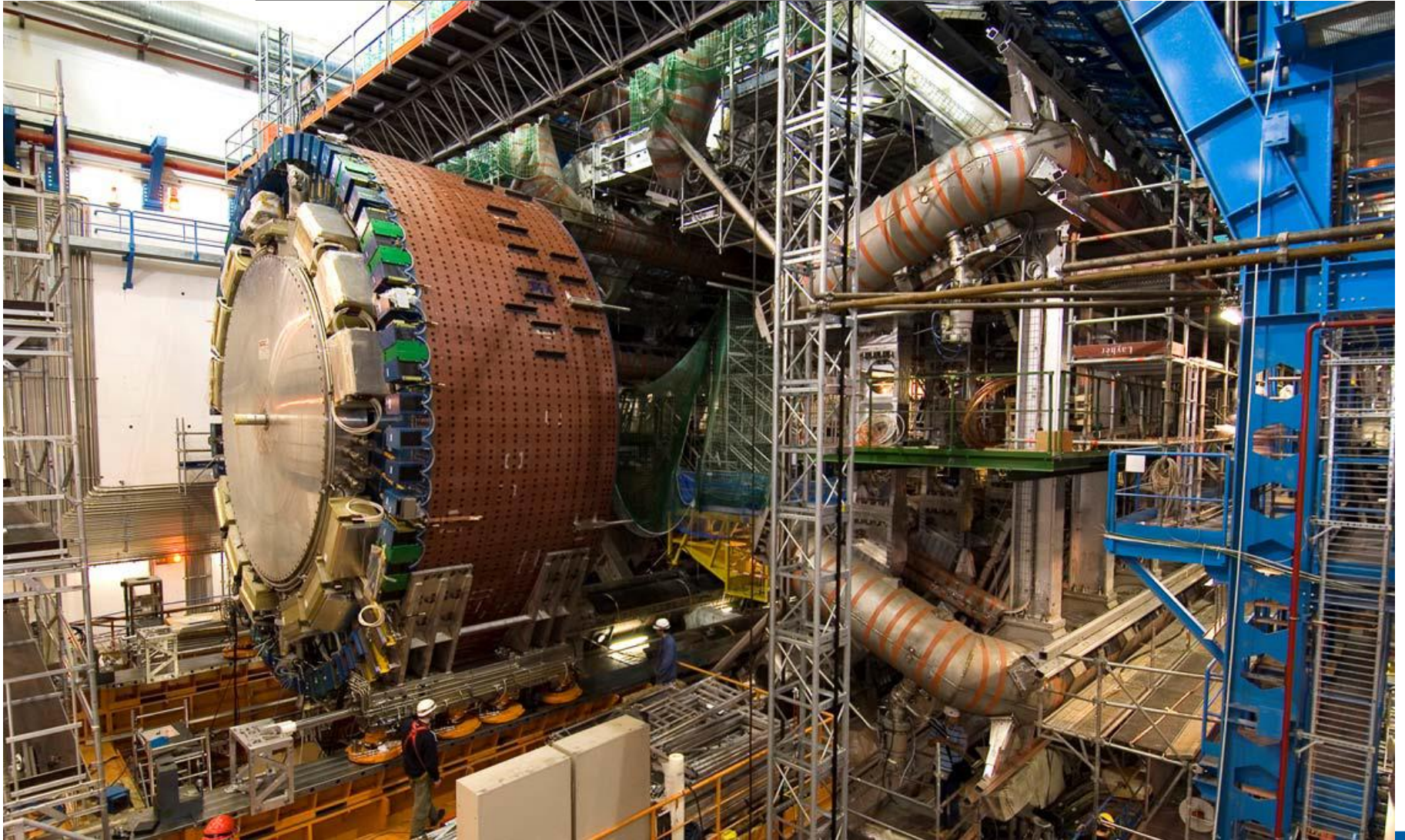
25 m de diamètre, 44 m long

7000 tonnes
(~poids de la tour Eiffel)

Observe 70 collisions simultanément,
40 millions de fois par seconde!

3000 km de câbles
100 million de canaux de détection

ATLAS



Détection de particules avec ATLAS, 17 décembre 2025

CERN

- Interlude film

La physique avec ATLAS

VOLUME 13, NUMBER 16 PHYSICAL REVIEW LETTERS 19 OCTOBER 1964

BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS

Peter W. Higgs
Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland
(Received 31 August 1964)

In a recent note¹ it was shown that the Goldstone theorem,² that Lorentz-covariant field theories in which spontaneous breakdown of symmetry under an internal Lie group occurs contain zero-mass particles, fails if and only if the conserved currents associated with the internal group are coupled to gauge fields. The purpose of the present note is to report that, as a consequence of this coupling, the spin-one quanta of some of the gauge fields acquire mass; the longitudinal degrees of freedom of these particles (which would be absent if their mass were zero) go over into the Goldstone bosons when the coupling tends to zero. This phenomenon is just the relativistic analog of the plasmon phenomenon to which Anderson³ has drawn attention: that the scalar zero-mass excitations of a superconducting neutral Fermi gas become longitudinal plasmon modes of finite mass when the gas is charged.

The simplest theory which exhibits this behavior is a gauge-invariant version of a model used by Goldstone⁴ himself. Two real scalar fields φ_1, φ_2 and a real vector field A_μ interact through the Lagrangian density

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{2}(\nabla\varphi_1)^2 - \frac{1}{2}(\nabla\varphi_2)^2 - \frac{1}{2}F_{\mu\nu}^2 - V(\varphi_1^2 + \varphi_2^2) - \frac{1}{2}e\varphi_1^2 A_\mu^2 - \frac{1}{2}e\varphi_2^2 A_\mu^2, \quad (1)$$

where

$$\nabla_\mu \varphi_1 = \partial_\mu \varphi_1 - eA_\mu \varphi_2,$$

$$\nabla_\mu \varphi_2 = \partial_\mu \varphi_2 + eA_\mu \varphi_1,$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu.$$

e is a dimensionless coupling constant, and the metric is taken as $-\dots+$. \mathcal{L} is invariant under simultaneous gauge transformations of the first kind on $\varphi_1 + i\varphi_2$ and of the second kind on A_μ . Let us suppose that $V(\varphi_1^2 + \varphi_2^2) > 0$; then spontaneous breakdown of U(1) symmetry occurs. Consider the equations [derived from (1) by treating $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2$ and A_μ as small quantities] governing the propagation of small oscillations

about the "vacuum" solution $\varphi_1(x) = 0, \varphi_2(x) = \varphi_0$:

$$\partial^2 [\partial_\mu (\Delta\varphi_1) - e\varphi_0 A_\mu] = 0, \quad (2a)$$

$$[\partial^2 - 4e^2\varphi_0^2] \Delta\varphi_2 = 0, \quad (2b)$$

$$e\varphi_0 \partial^\mu \partial_\nu (\Delta\varphi_1) - e\varphi_0 \partial^\mu A_\nu = 0. \quad (2c)$$

Equation (2b) describes waves whose quanta have (bare) mass $2e\varphi_0$ [$V''(\varphi_0^2)/2$]; Eqs. (2a) and (2c) may be transformed, by the introduction of new variables

$$B_\mu = A_\mu - (\partial_\mu \varphi_0)^{-1} \partial_\mu (\Delta\varphi_1),$$

$$G_{\mu\nu} = \partial_\mu B_\nu - \partial_\nu B_\mu = F_{\mu\nu}, \quad (3)$$

into the form

$$\partial_\mu B^\mu = 0, \quad \partial_\nu G^{\mu\nu} + e^2 \varphi_0^2 B^\mu = 0, \quad (4)$$

Equation (4) describes vector waves whose quanta have (bare) mass $e\varphi_0$. In the absence of the gauge field coupling ($e=0$) the situation is quite different: Equations (2a) and (2c) describe zero-mass scalar and vector bosons, respectively. In passing, we note that the right-hand side of (2c) is just the linear approximation to the conserved current. It is linear in the vector potential, gauge invariance being maintained by the presence of the gradient term.⁵

When one considers theoretical models in which spontaneous breakdown of symmetry under a semisimple group occurs, one encounters a variety of possible situations corresponding to the various distinct irreducible representations to which the scalar fields may belong; the gauge field always belongs to the adjoint representation.⁶ The model of the most immediate interest is that in which the scalar fields form an octet under SU(3). Here one finds the possibility of two nonvanishing vacuum expectation values, which may be chosen to be the two $Y=0, I_3=0$ members of the octet.⁷ There are two massive scalar bosons with just these quantum numbers; the remaining six components of the scalar octet combine with the corresponding components of the gauge-field octet to describe

VOLUME 13, NUMBER 16 PHYSICAL REVIEW LETTERS 19 OCTOBER 1964

massive vector bosons. There are two $I=\frac{1}{2}$ octet doublets, degenerate in mass between ± 1 but with an electromagnetic mass splitting between $I_3 = \pm \frac{1}{2}$, and the $I_3 = \pm 1$ components a $Y=0, I=1$ triplet whose mass is entirely electromagnetic. The two $Y=0, I=0$ gauge elds remain massless: This is associated with the residual unbroken symmetry under the bellow group generated by Y and I_3 . It may be expected that when a further mechanism (presumably related to the weak interactions) is introduced in order to break Y conservation, one these gauge fields will acquire mass, leaving a photon as the only massless vector particle. Detailed discussion of these questions will be presented elsewhere. It is worth noting that an essential feature of e type of theory which has been described in is note is the prediction of incomplete multiplets of scalar and vector bosons.⁸ It is to be expected that this feature will appear also in theories in which the symmetry-breaking scalar elds are not elementary dynamic variables but linear combinations of Fermi fields.⁹

¹P. W. Higgs, to be published.

²J. Goldstone, Nuovo Cimento **19**, 154 (1961);

Goldstone, A. Salam, and S. Weinberg, Phys. Rev. **127**, 965 (1962).

³P. W. Anderson, Phys. Rev. **130**, 439 (1963).

⁴In the present note the model is discussed mainly in classical terms; nothing is proved about the quantized theory. It should be understood, therefore, that the conclusions which are presented concerning the masses of particles are conjectures based on the quantization of linearized classical field equations. However, essentially the same conclusions have been reached independently by F. Englert and R. Brout, Phys. Rev. Letters **13**, 321 (1964). These authors discuss the same model quantum mechanically in lowest order perturbation theory about the self-consistent vacuum.

⁵In the theory of superconductivity such a term arises from collective excitations of the Fermi gas.

⁶See, for example, S. L. Glashow and M. Gell-Mann, Am. Phys. (N. Y.) **15**, 437 (1961).

⁷These are just the parameters which, if the scalar octet interacts with baryons and mesons, lead to the Gell-Mann-Okubo and electromagnetic mass splittings: See S. Coleman and S. L. Glashow, Phys. Rev. **134**, B671 (1964).

⁸Tentative proposals that incomplete SU(3) octets of scalar particles exist have been made by a number of people. Such a rôle, as an isolated $Y=+1, I=\frac{1}{2}$ state, was proposed for the κ meson (725 MeV) by Y. Nambu and J. J. Sakurai, Phys. Rev. Letters **11**, 42 (1963). More recently the possibility that the σ meson (385 MeV) may be the $Y=I=0$ member of an incomplete octet has been considered by L. M. Brown, Phys. Rev. Letters **13**, 42 (1964).

⁹In the theory of superconductivity the scalar fields are associated with fermion pairs; the doubly charged excitation responsible for the quantization of magnetic flux is then the surviving member of a U(1) doublet.



Kibble, Guralnik, Hagen, Englert, et Brout (2010)

Article de Peter Higgs, octobre 1964



Annonce au CERN juillet 2012 par ATLAS et CMS

Détection de particules avec ATLAS, 17 décembre 2025

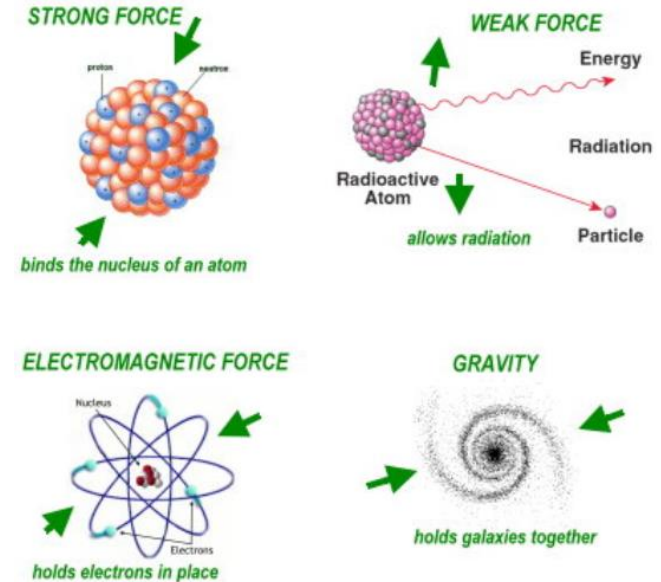


Prix Nobel Higgs / Englert 2013

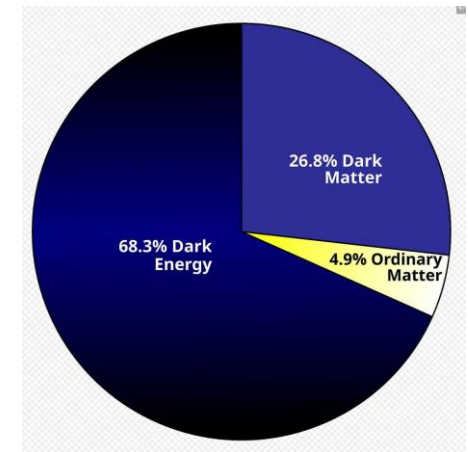
La physique avec ATLAS

Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
I	II	III		
mass charge spin	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	$\approx 125.09 \text{ GeV}/c^2$ 0 0
u up	c charm	t top	g gluon	H higgs
d down	s strange	b bottom	γ photon	
e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	

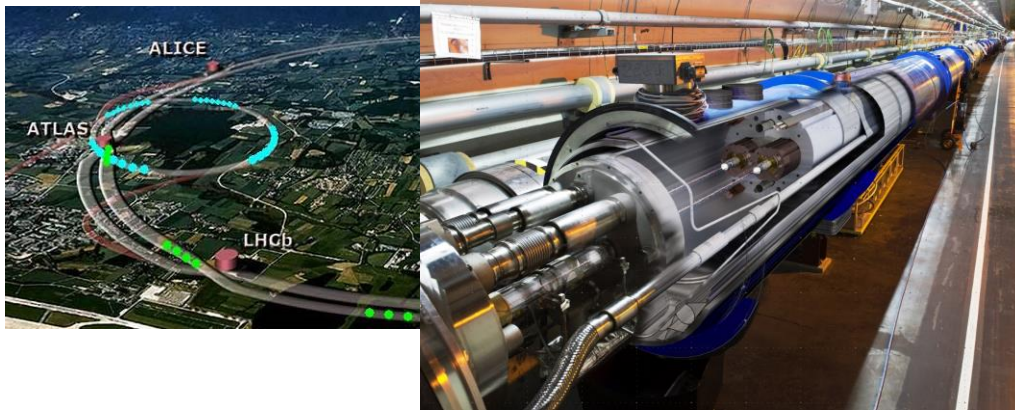


- Le « **Boson de Higgs** » :
 - Une particule découverte en 2012 (Nobel 2013)
 - Une nouvelle physique à explorer
- Le **modèle standard n'explique pas tout** :
 - Contenu énergétique de l'univers?
 - Pourquoi trois familles élémentaires?
 - Pourquoi ces masses pour les particules élémentaires?

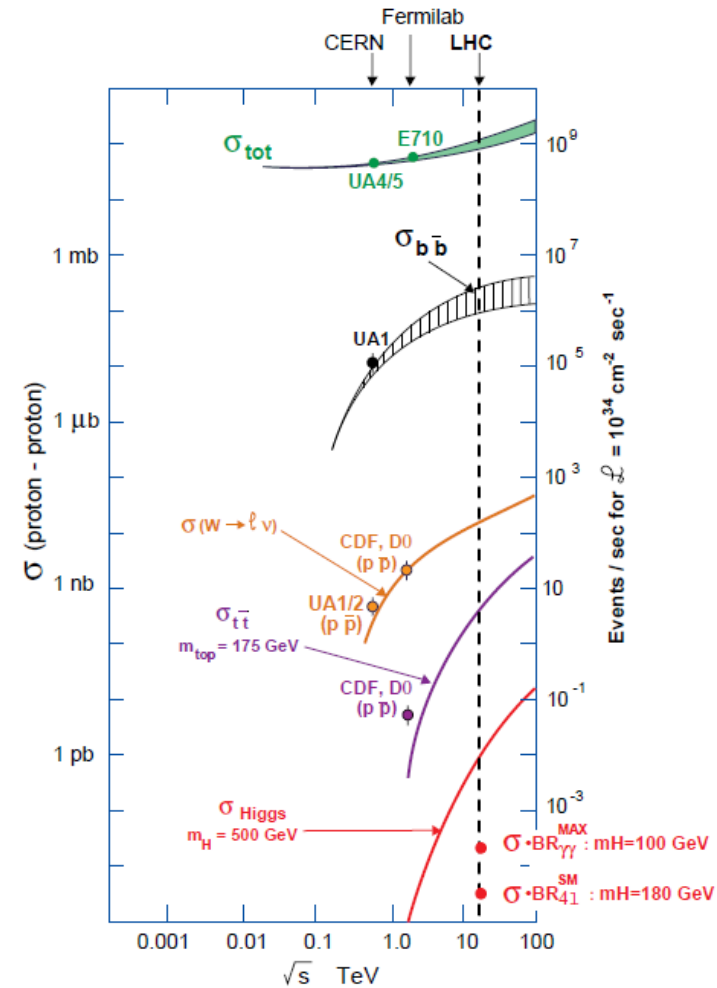
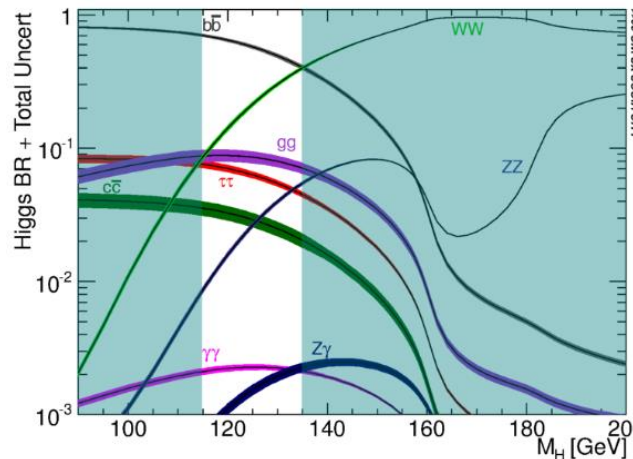


La physique avec ATLAS

- Pour trouver ces nouvelles particules:
 - Il faut (re)créer ces particules massives: Il « suffit » d'avoir de l'énergie! ($E=mc^2$)



- Mais ces objets massifs / ces processus sont rares

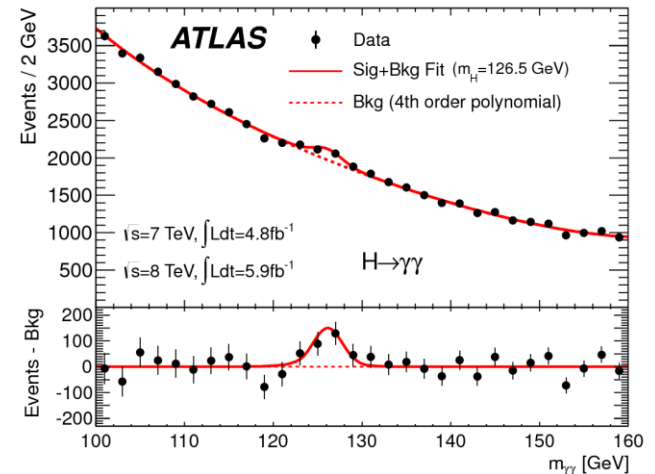
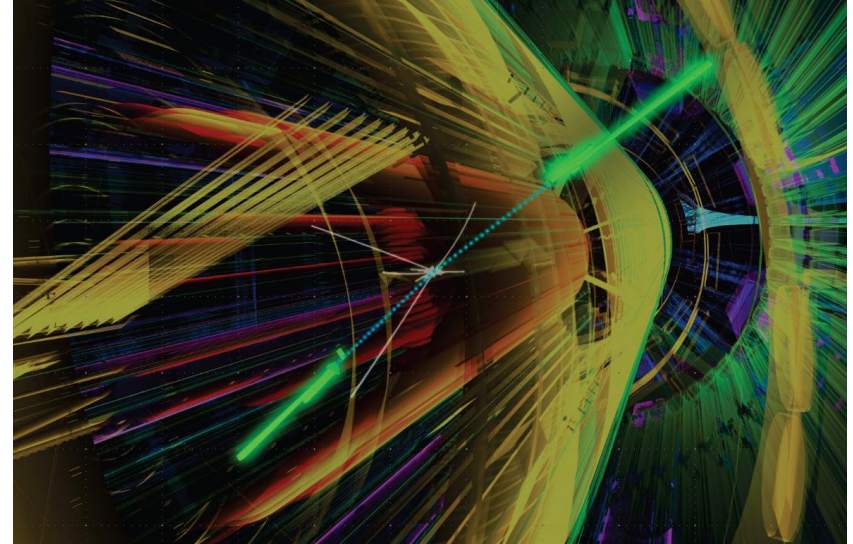
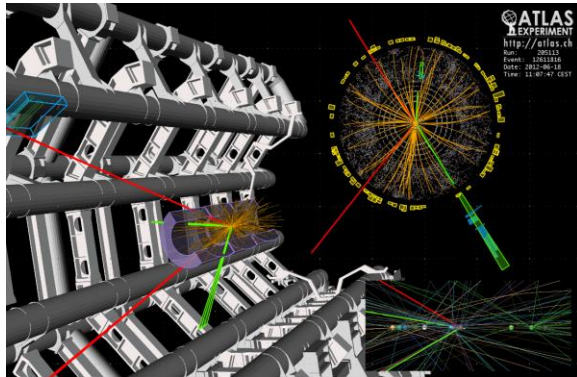
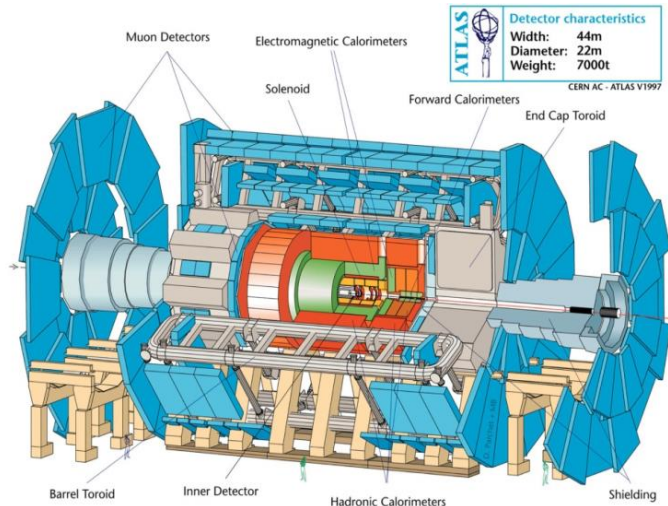


(de l'ordre de 1/10 milliards!)

La physique avec ATLAS

Processus rares → 40 million de collisions
par seconde (×70)!!!

Détection et reconstruction

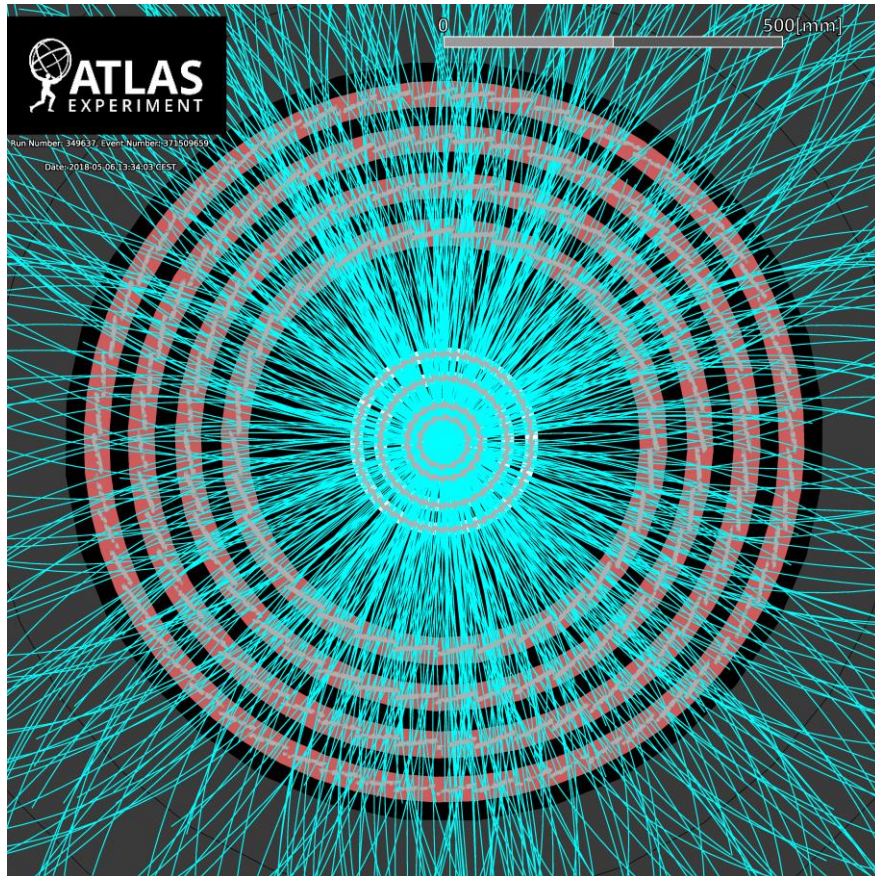


Détection de particules avec ATLAS, 17 décembre 2025

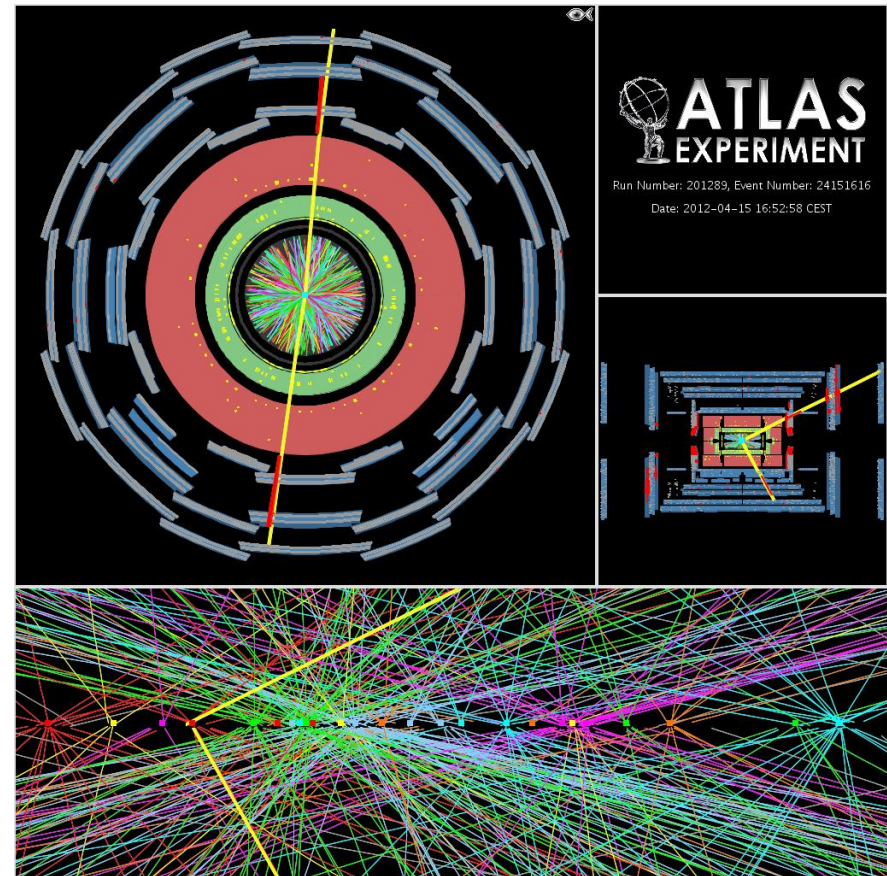
21

Aix-Marseille
université

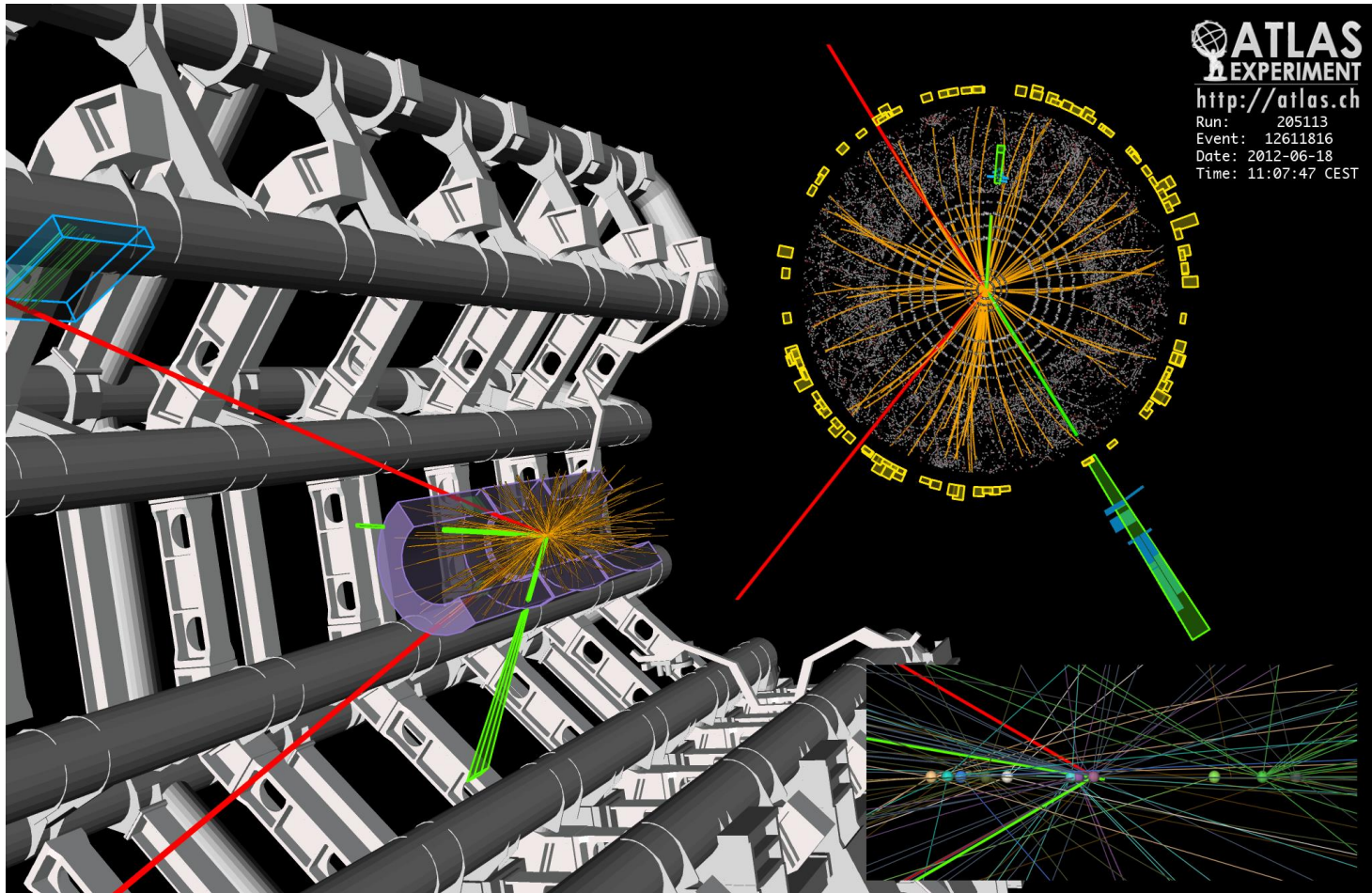
Event with 60 p p collisions



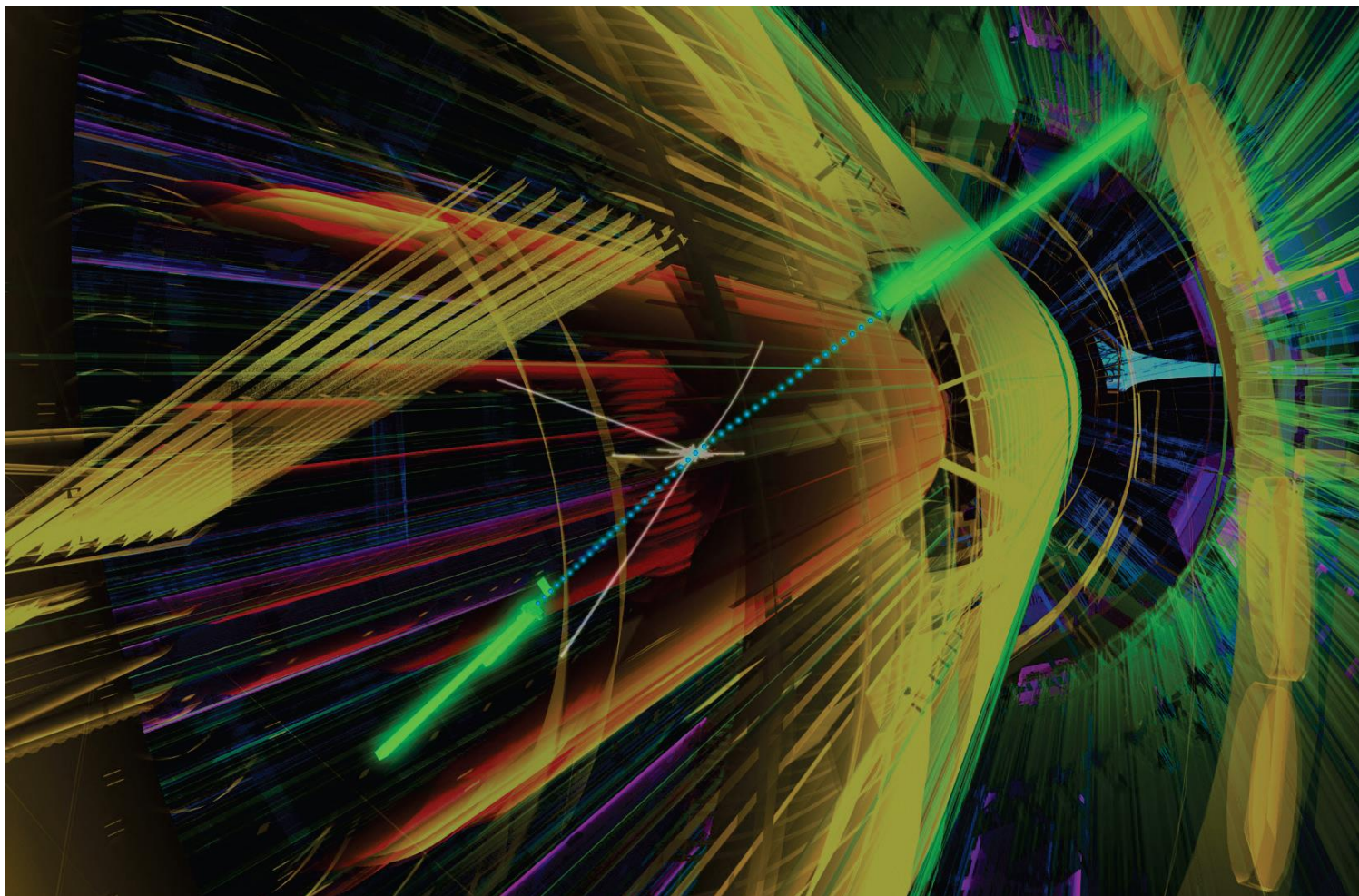
Event with 25 reconstructed vertices



Candidate $H \rightarrow Z Z^* \rightarrow e^+ e^- \mu^+ \mu^-$

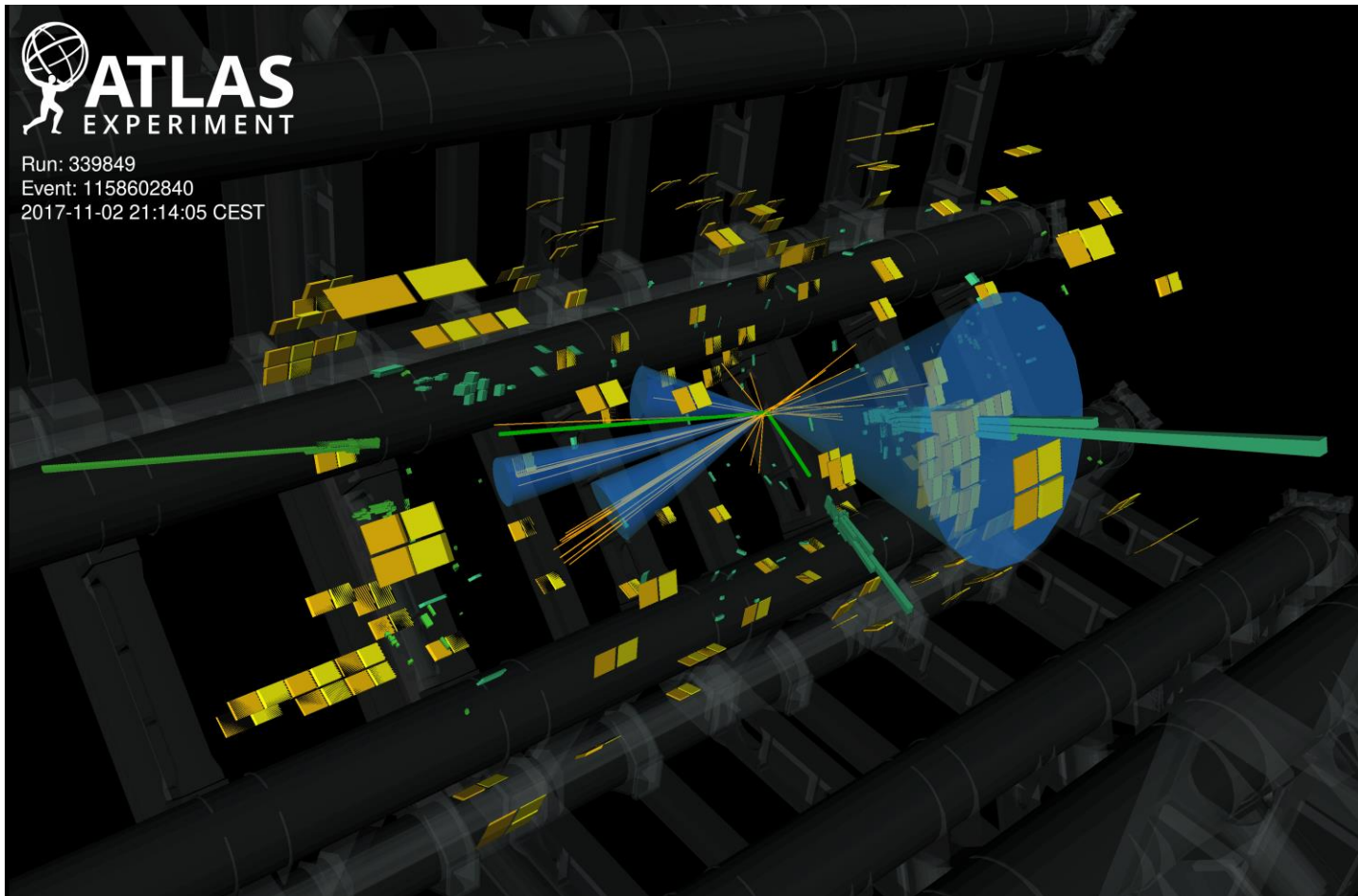


Candidate $H \rightarrow \gamma\gamma$



Candidate ttH event

$$p p \rightarrow t \bar{t} H \rightarrow W^+ b W^- \bar{b} b \bar{b} \rightarrow e^+ \nu_e b e^- \bar{\nu}_e \bar{b} b \bar{b}$$



Intermezzo

- Films sur la détection du Boson Higgs ...

Détection des particules avec ATLAS

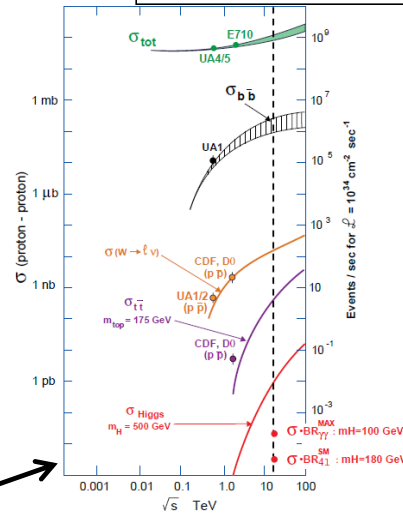
- Détection de particules ...

Production

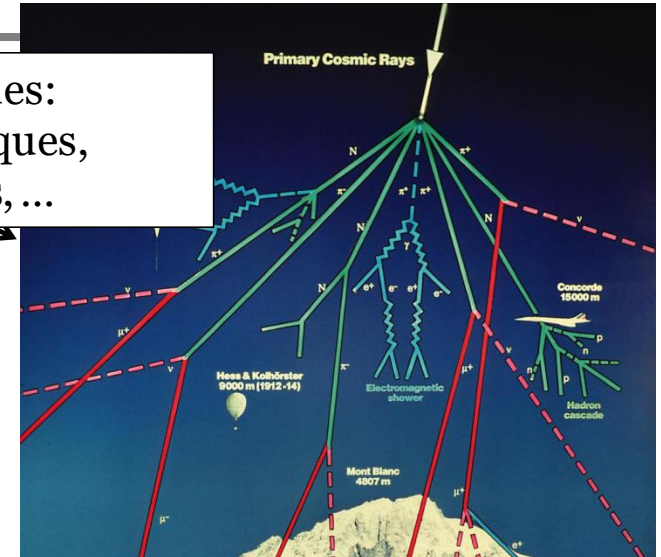


Tevatron, FNAL, Chicago
(1983-2011)

Section efficace / énergie

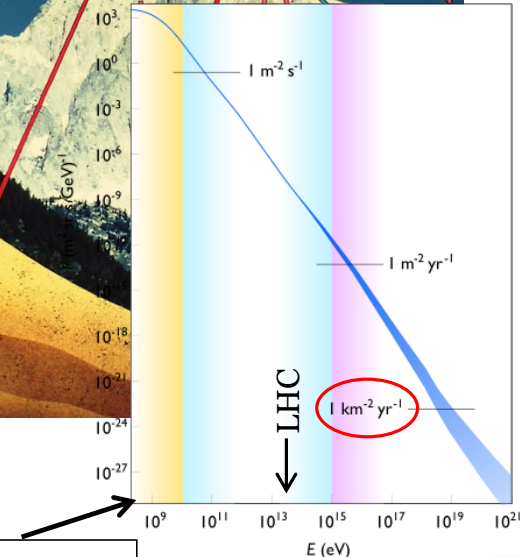


Rayons cosmiques:
Solaires, galactiques,
extragalactiques, ...



LHC, CERN, Genève
(mise en service 2009-...)

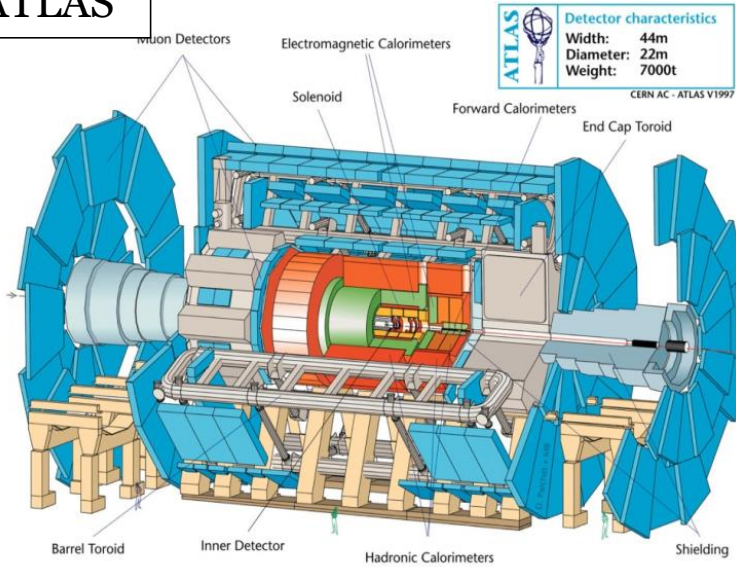
Rayons cosmiques / énergie



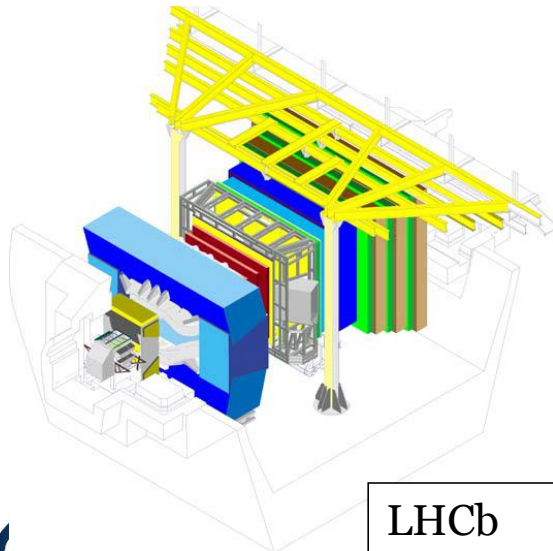
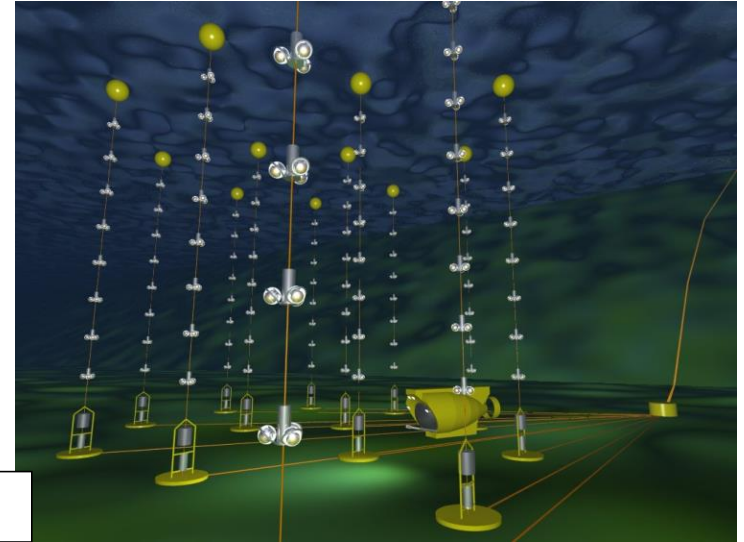
Production de particules avec ATLAS, 17 décembre 2025

Différents type de détecteurs (CPPM)

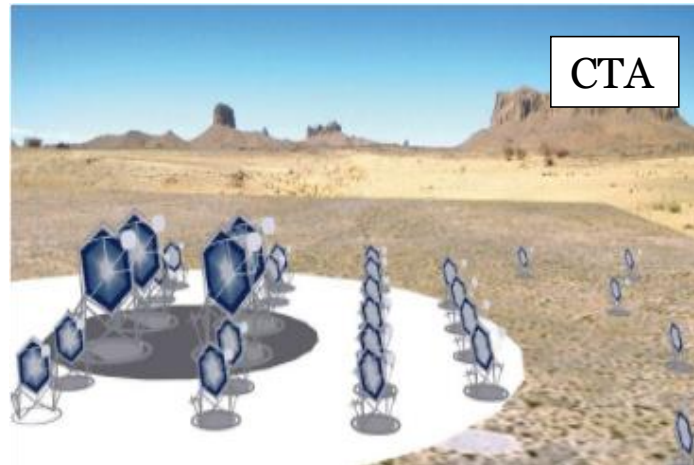
ATLAS



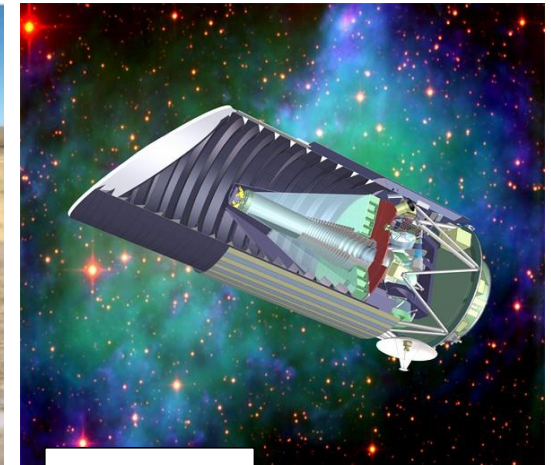
KM₃NET



LHCb



CTA

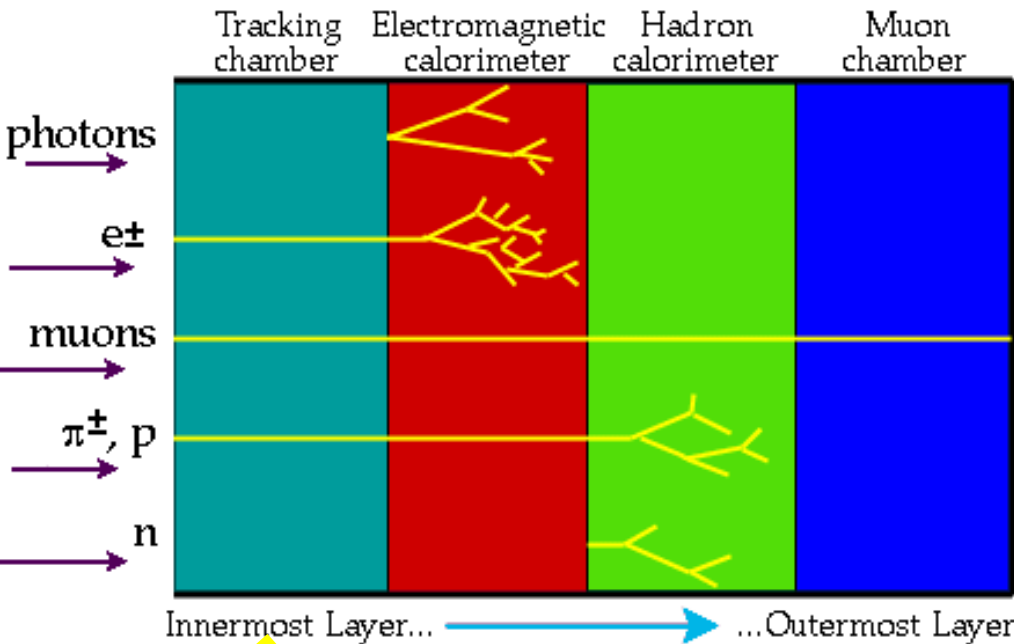


EUCLID

Détection de particules avec ATLAS, 17 décembre 2025

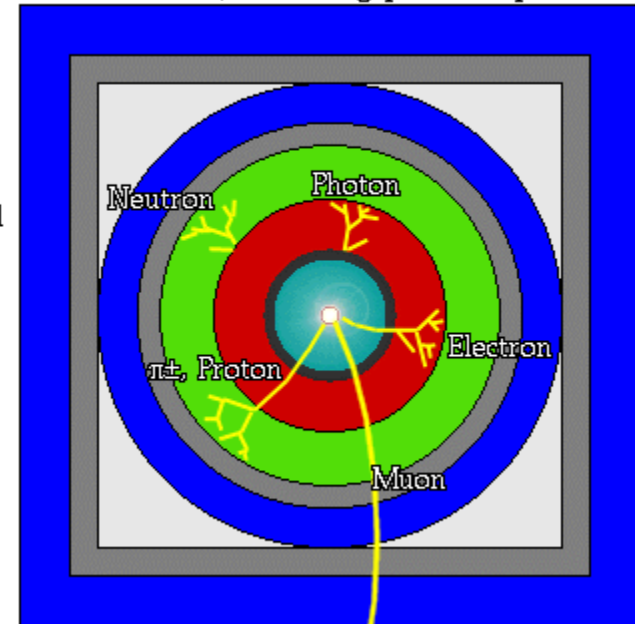
Détection de particules

... un arrangement typique dans une expérience auprès d'un collisionneur:



A detector cross-section, showing particle paths

- Beam Pipe (center)
- Tracking Chamber
- Magnet Coil
- E-M Calorimeter
- Hadron Calorimeter
- Magnetized Iron
- Muon Chambers



Reconstruire
la trace des
particules

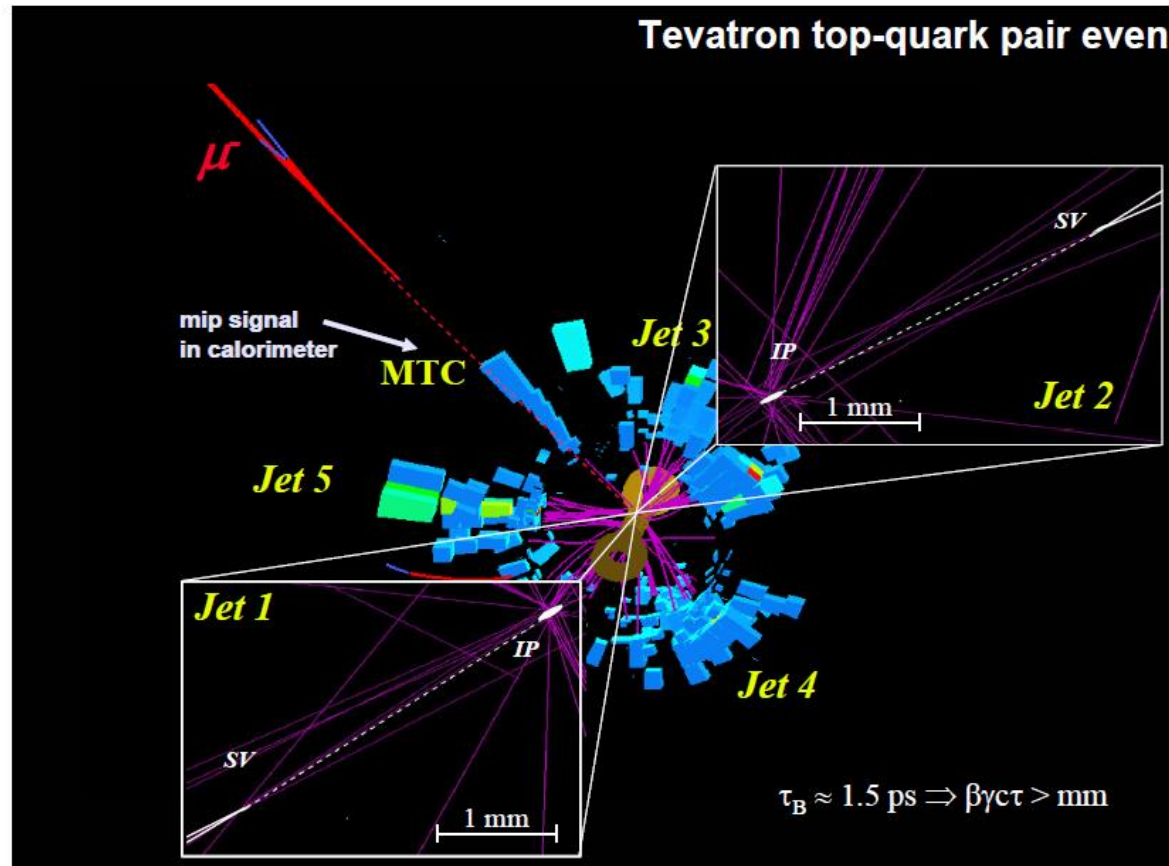
Mesurer
l'énergie des
particules

Détecter les
muons

1^{er} exemple: reconstruire des traces

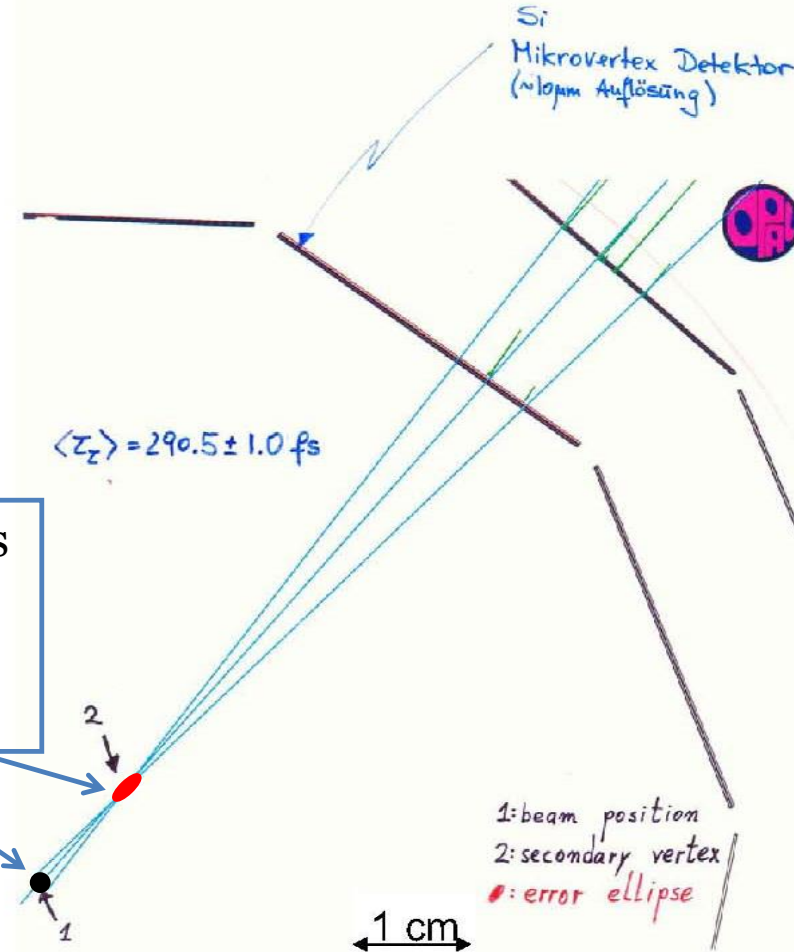
Pourquoi des détecteurs de traces précis?

- Exemple:
 - B meson boost relativiste!
 - Voir des vertex déplacés (SV) du point d'interaction central = identifier les quarks b (“b-tagging”).



Identifier des τ (OPAL -LEP-)

large
ZOOM



L'extrapolation « arrière » des traces permet de distinguer vertex secondaire du point de collision central.

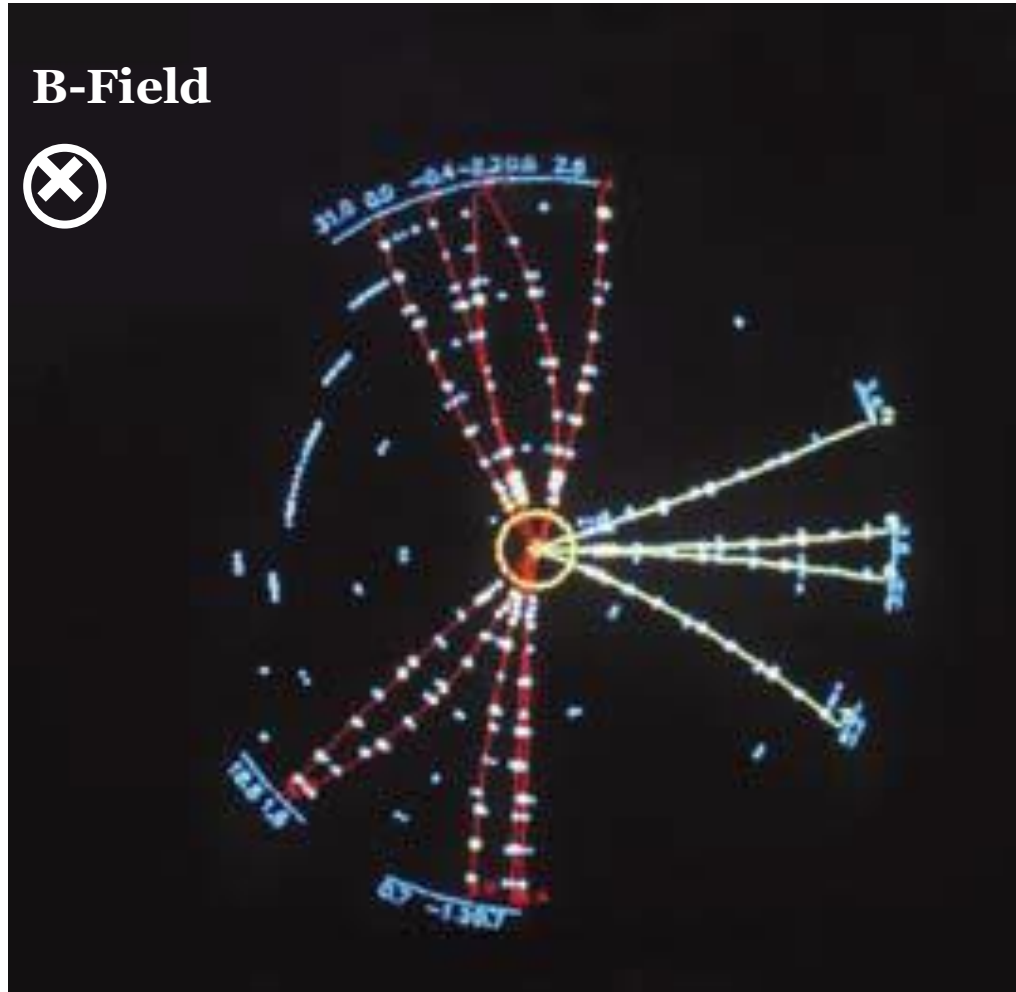
La quantité de mouvement: \vec{p}

$$\vec{p} = m\vec{v}$$

- Utilisation d'un champs magnétique ?

$$p = 0.3 \text{ Br}$$

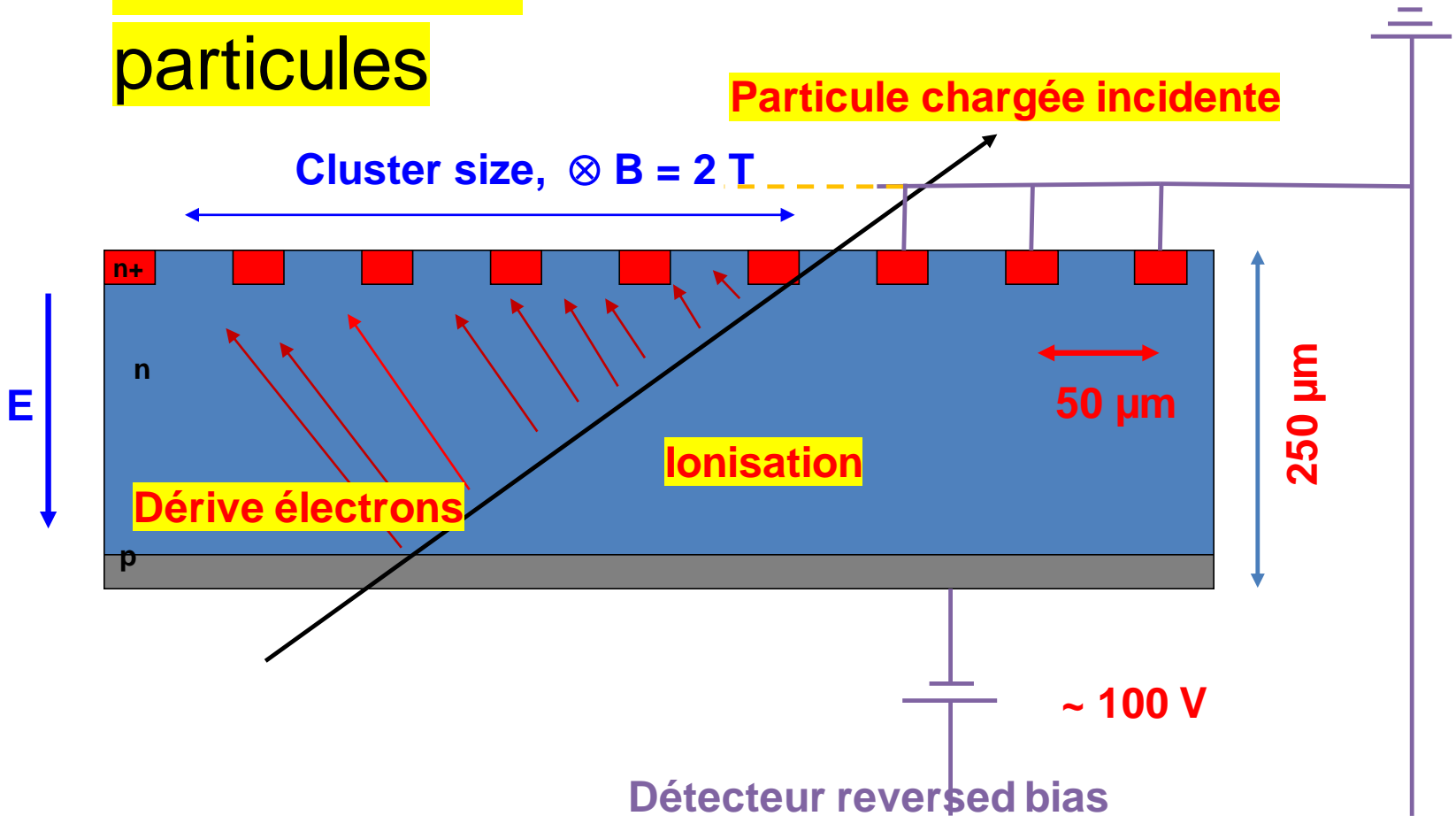
TASSO Experiment
@ DESY, Hamburg



Détecteur silicium pixel

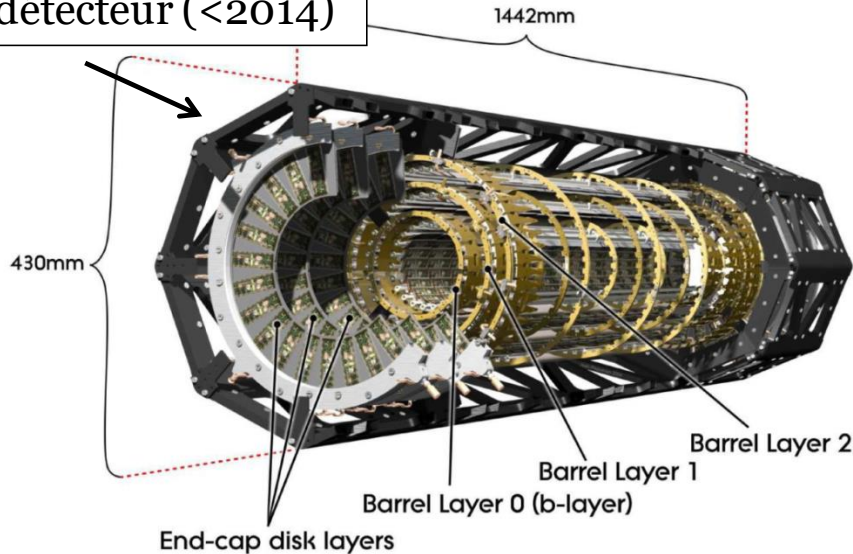
Reconstruire
la trace des
particules

Champs électrique de la jonction pn

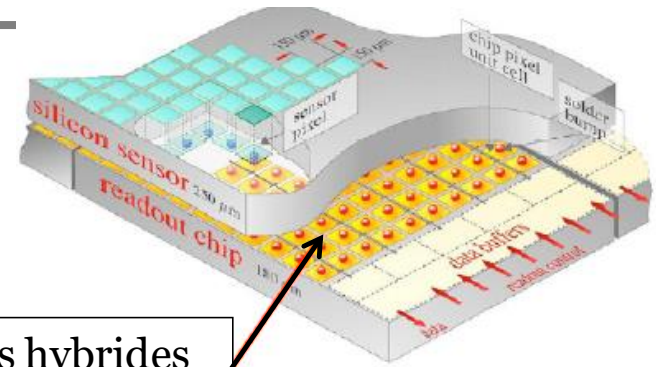


Détecteur central ATLAS pixel

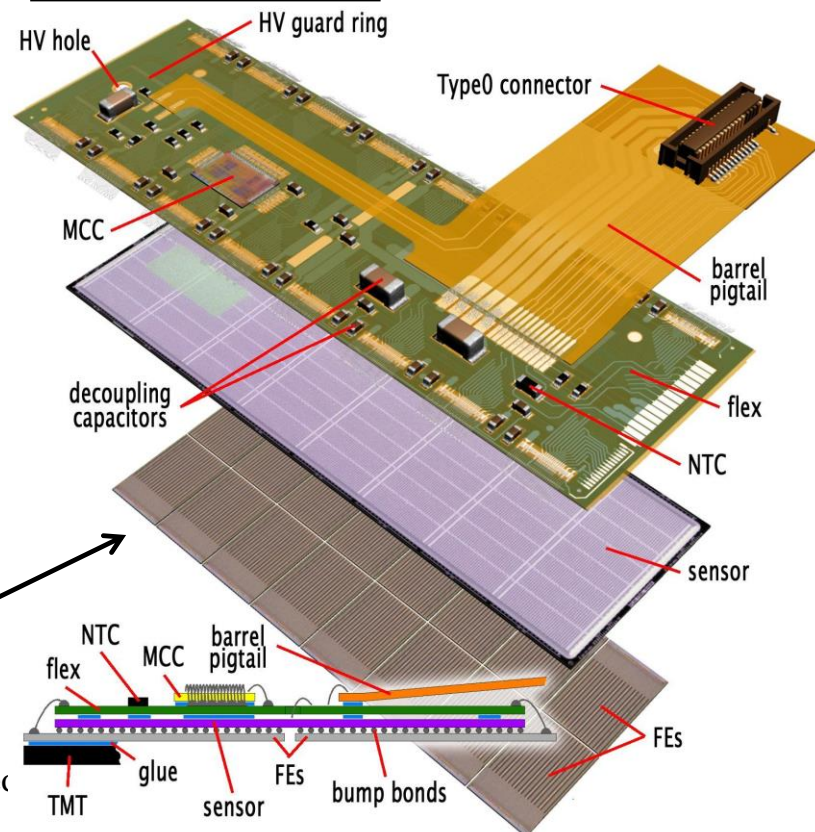
ATLAS Pixel
détecteur (<2014)



Le détecteur pixel initialement: **87 millions de pixels**, taille **$50 \times 400 \mu\text{m}^2$** , arrangement en 3 cylindres à -15°C ...



Pixels hybrides

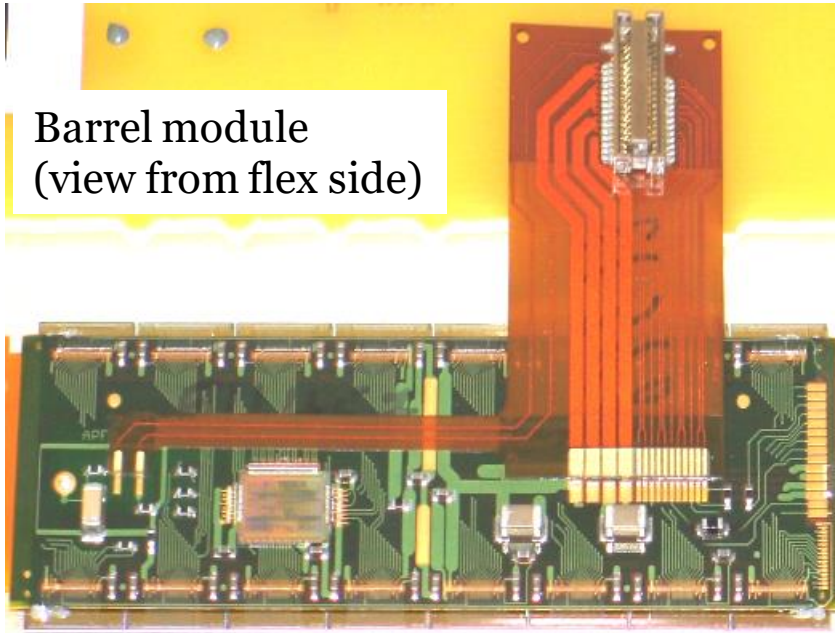


Module pixel hybride

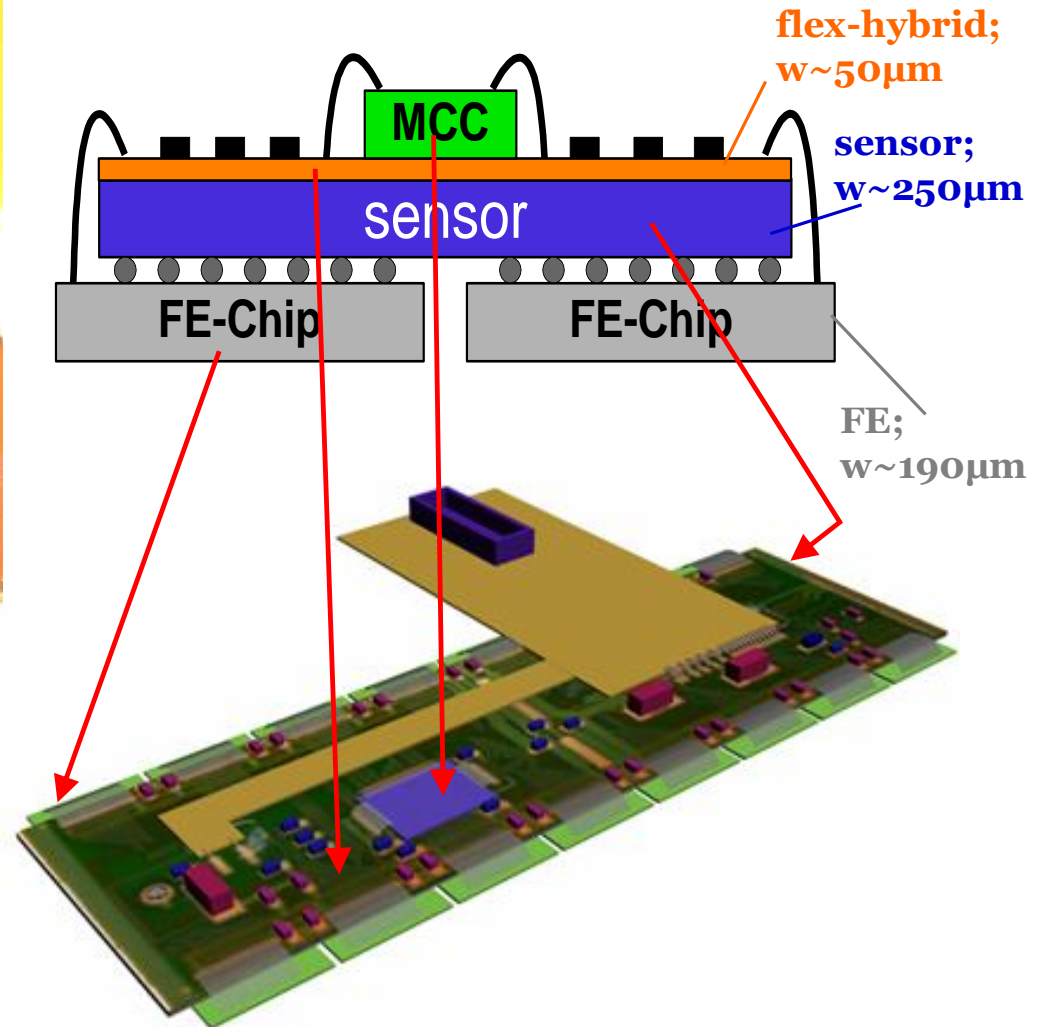
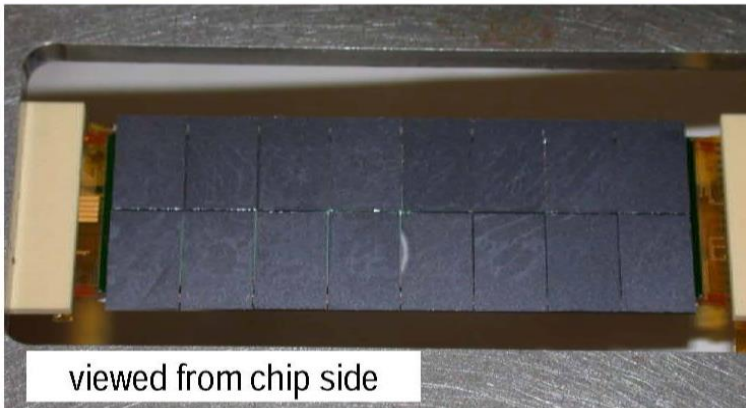
Détection de particules avec ATLAS, 17 déc

FE-I3 ATLAS pixel module

Barrel module
(view from flex side)



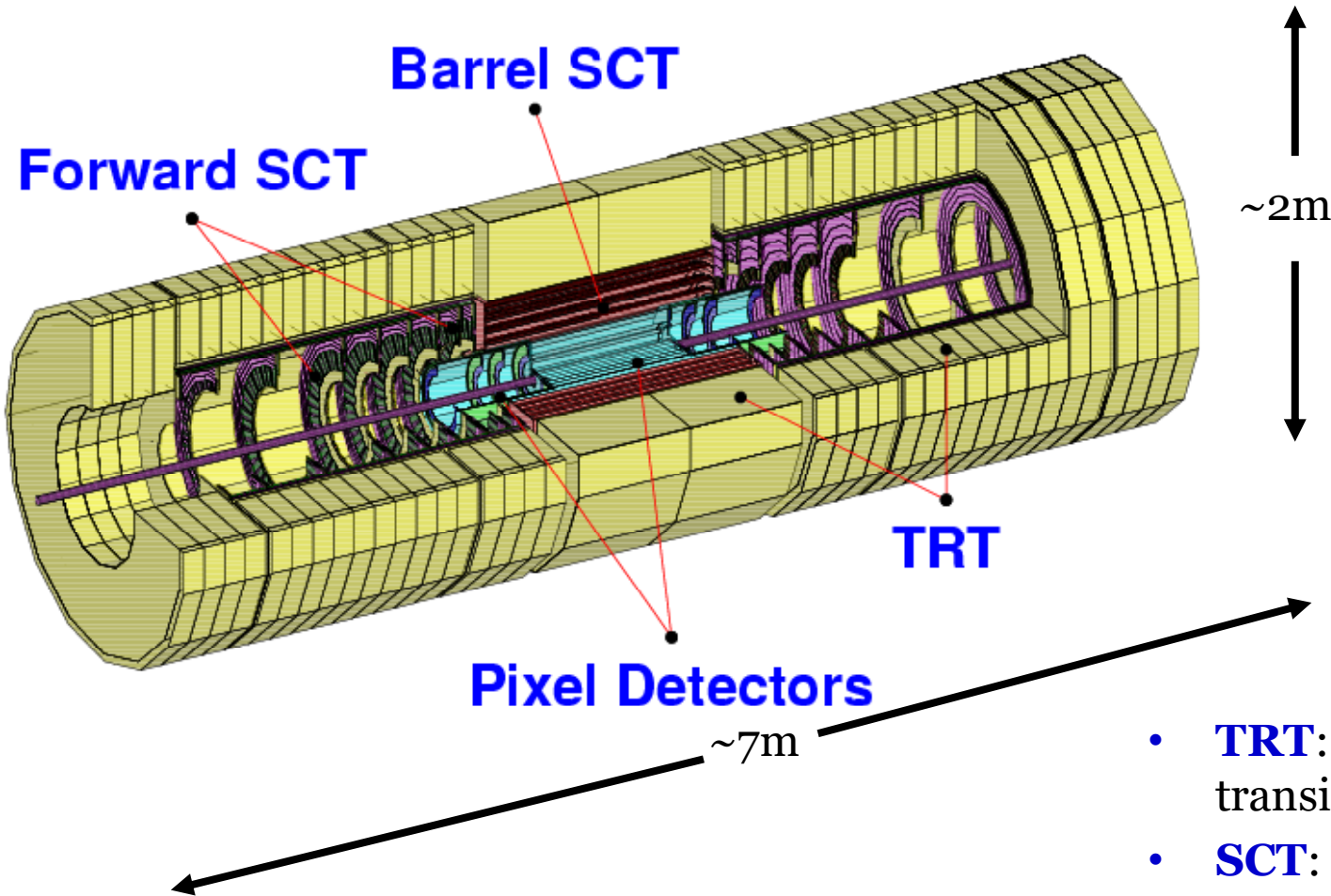
viewed from chip side



Intermezzo

- Film pixel ATLAS

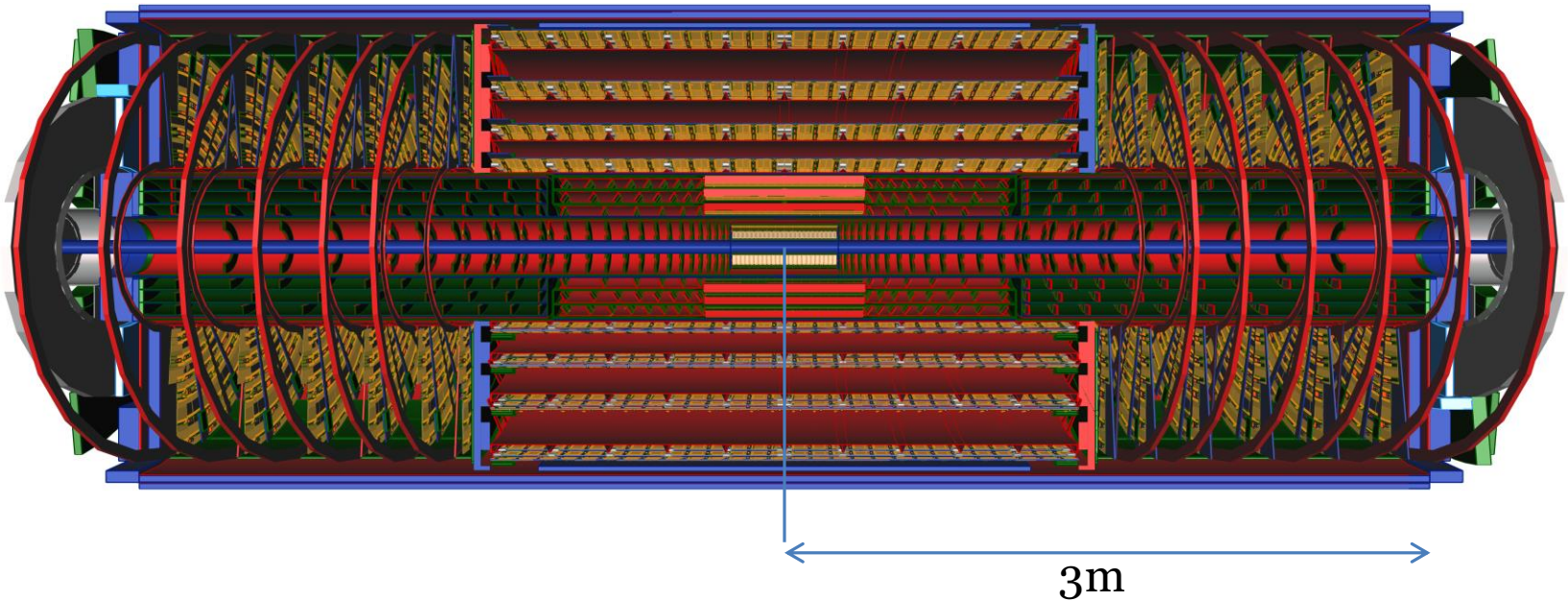
Atlas inner detector



- **TRT**: straw tube tracker + transition radiation
- **SCT**: silicon strip detect.
- **Pixel**: vertex detector

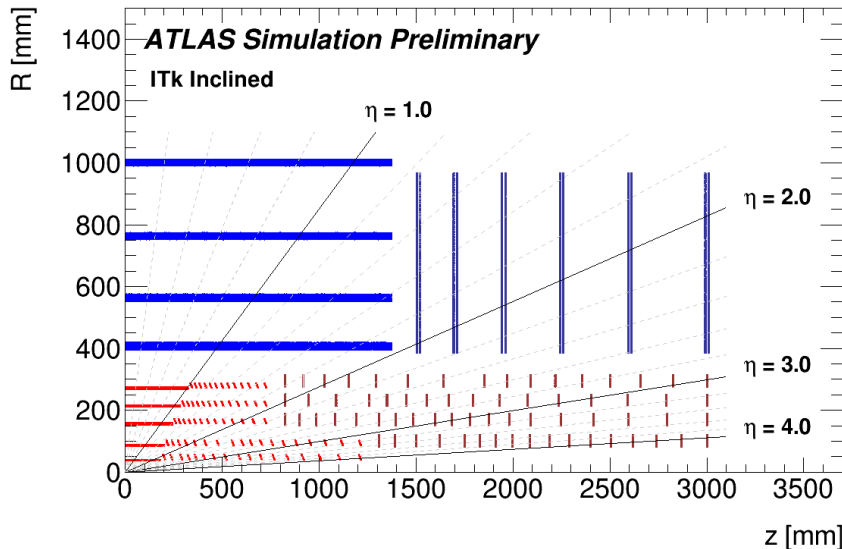
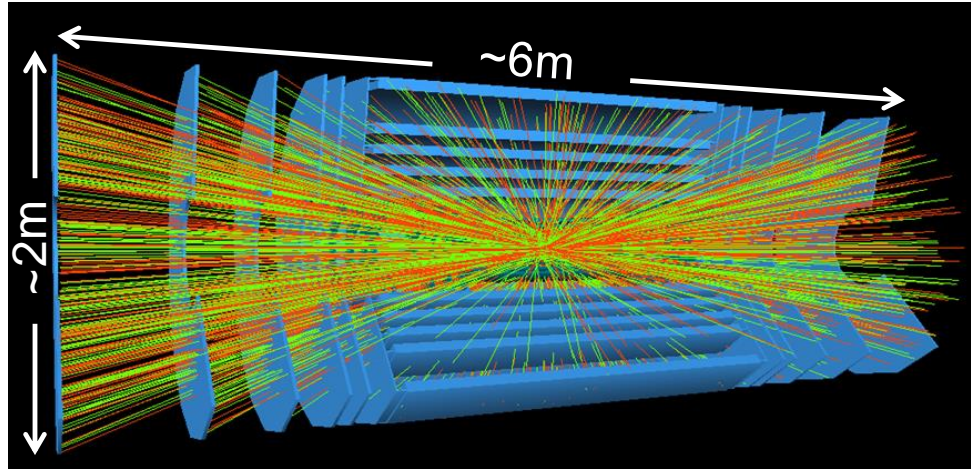
ATLAS Inner Tracker (ITk)

- **ATLAS ITk tout en silicium** pour remplacer le détecteur actuel (Pixel + Strip+ TRT)!!!



- **Un détecteur $\sim 13 \text{ m}^2$** ... (& 170 m^2 détecteur micro-strip) qui est assemblé dans divers laboratoires pour prendre des données en 2030...
- ... Après la phase de design ($\sim 2014\text{-}2024$), commence à être assemblé → phase de production!!! ... **(ce que vous verrez cet après-midi à 15h30!!!)**

Le nouveau ITk

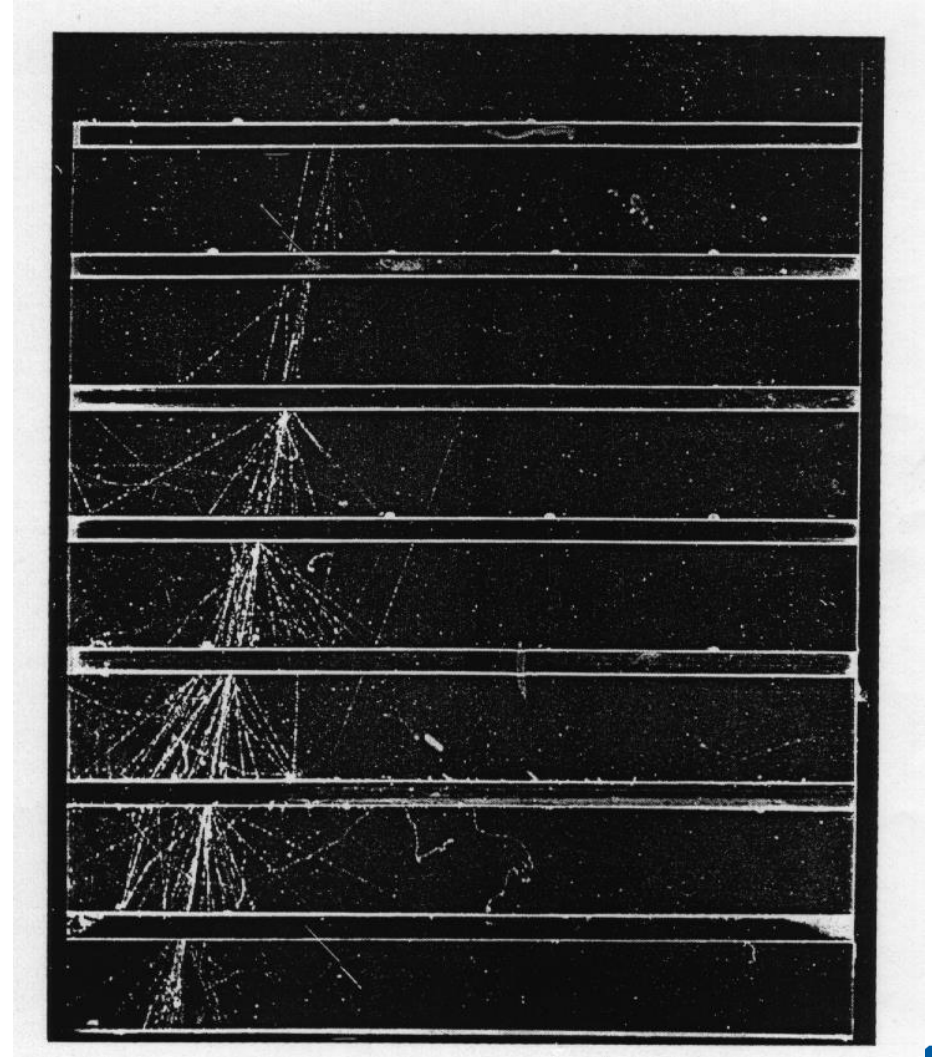


- **Pixel: ($R < 35\text{cm}$)**
 - 5 cylindres
 - 2 internes: 3D/planar → “remplacables”
 - 3 externes: planar/CMOS → “fixed”
- 13m² pixel silicium
- **Strip Trajectographe:**
 - 4 cylindres
 - Double-sided Si-strips.
- ~200 m² silicium
- 2300 10 Gb/s links

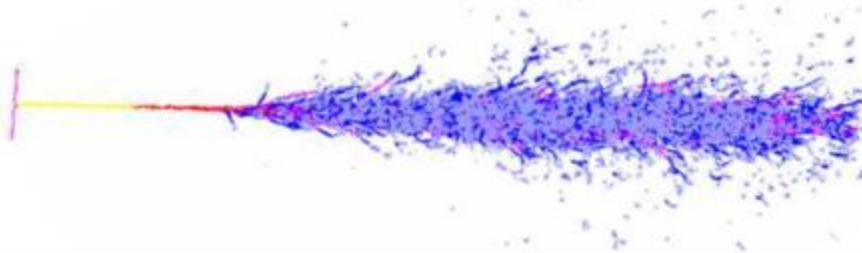
2^{ème} exemple: mesurer l'énergie

Cascade électromagnétique

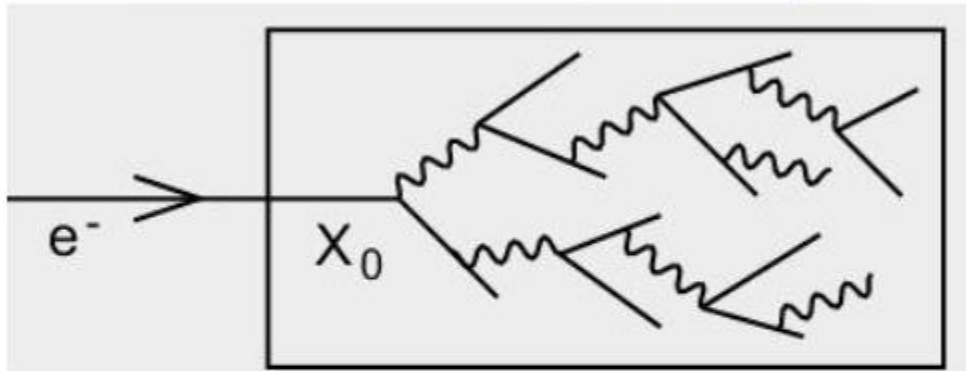
- Photo d'une chambre à brouillard: une cascade électromagnétique se développe le long d'un sandwich de plaques de plombs et de détecteurs.



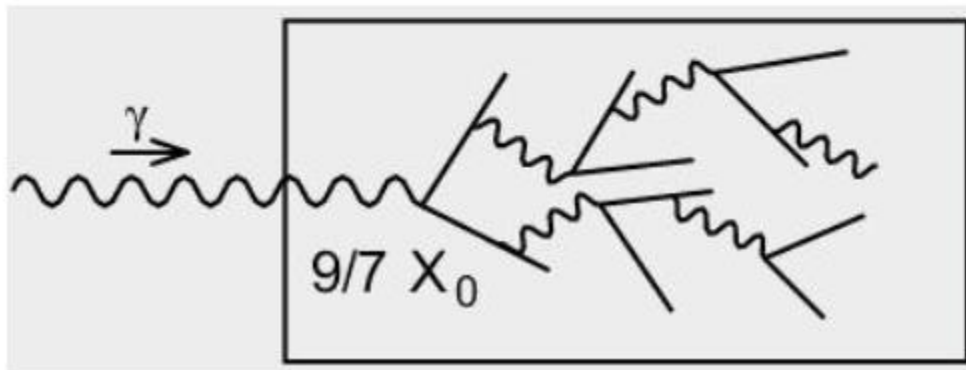
Cascade initiée par électrons ou photons



2 phénomènes physiques:



- Rayonnement de freinage (radiation d'un photon par un électron)



- Emission paire electron / positron

Développement de la cascade de particules

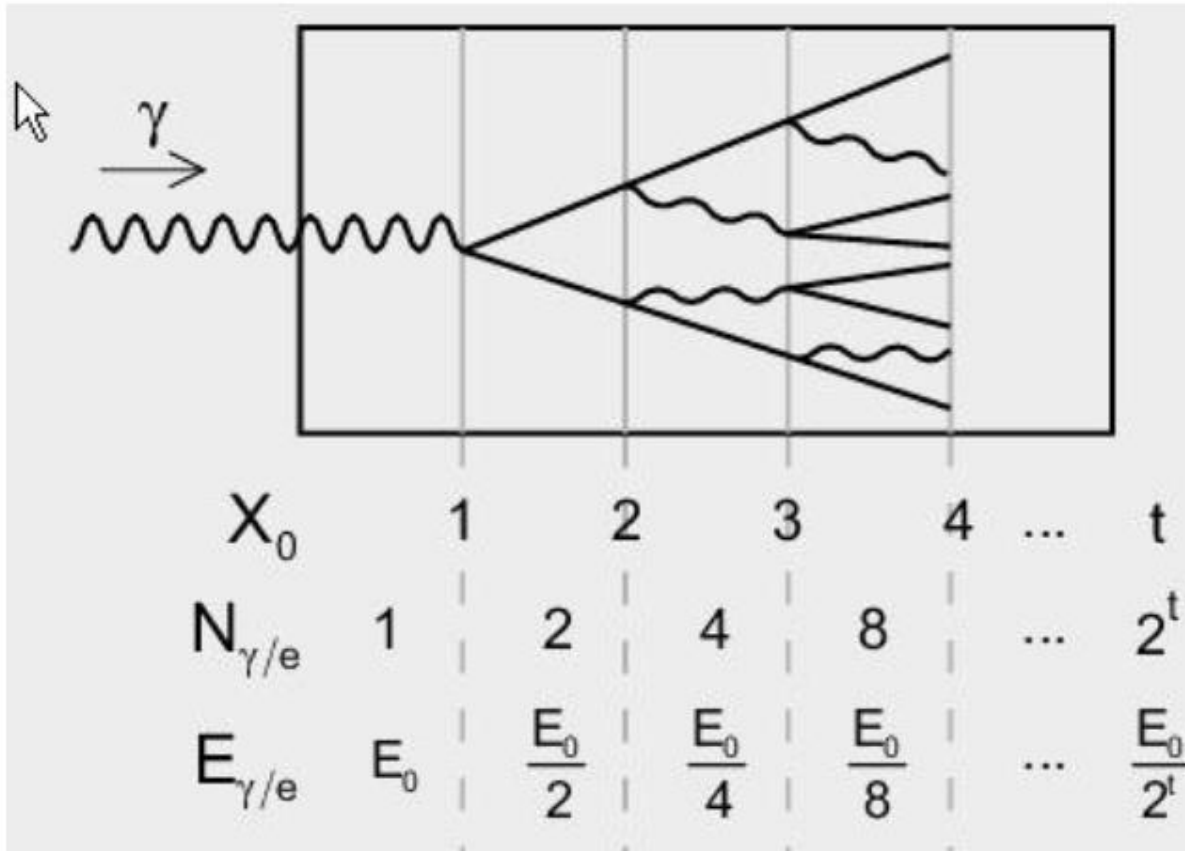
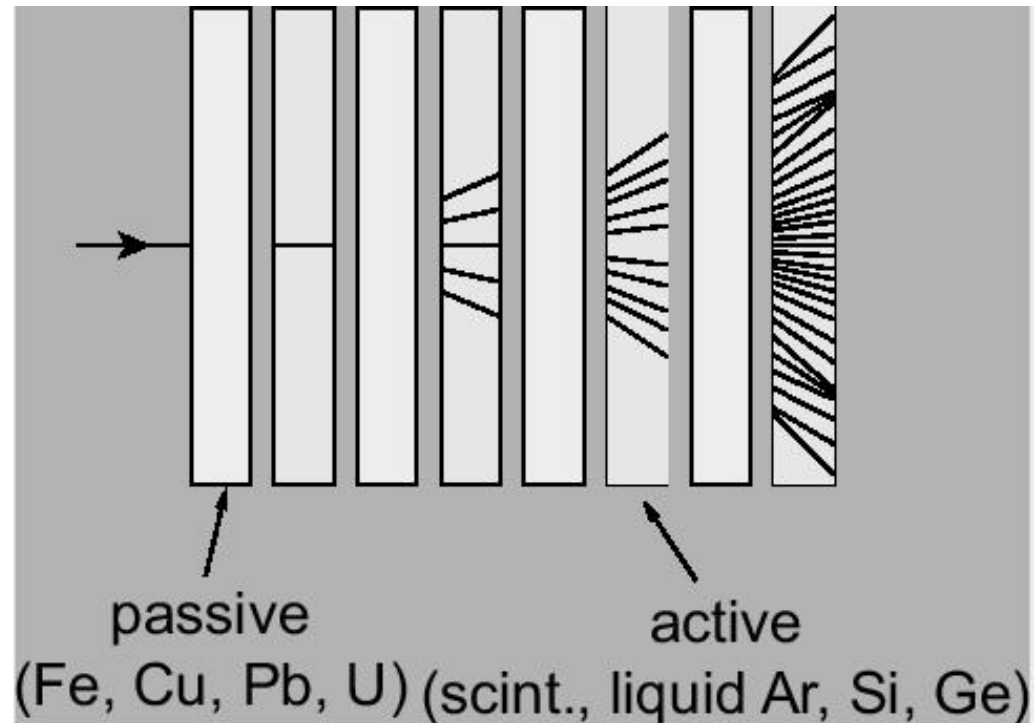
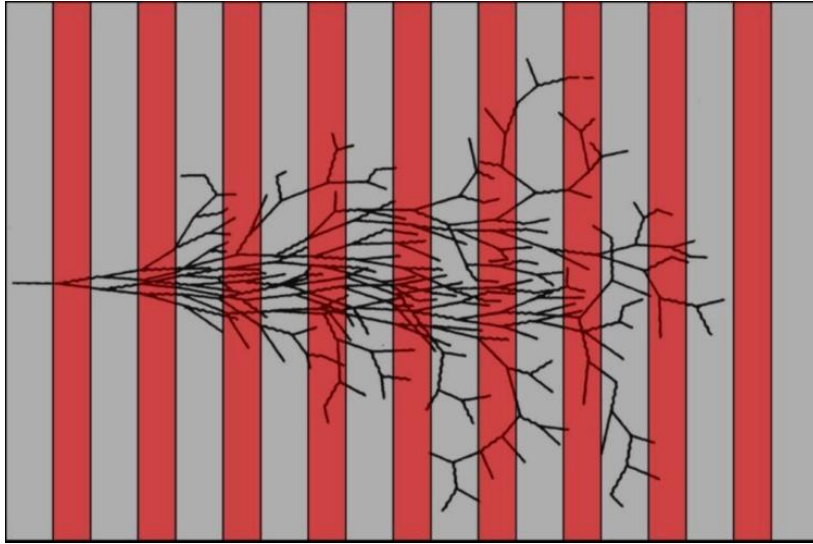


Abbildung 2.12: Schematische Darstellung einer Schauerentwicklung.

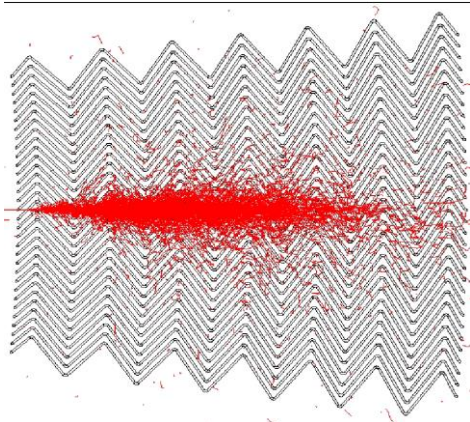
Proportionnalité entre le nombre de particules générées et l'énergie initiale de la particule incidente!

On mesure le nombre de particules \rightarrow on remonte à l'énergie!

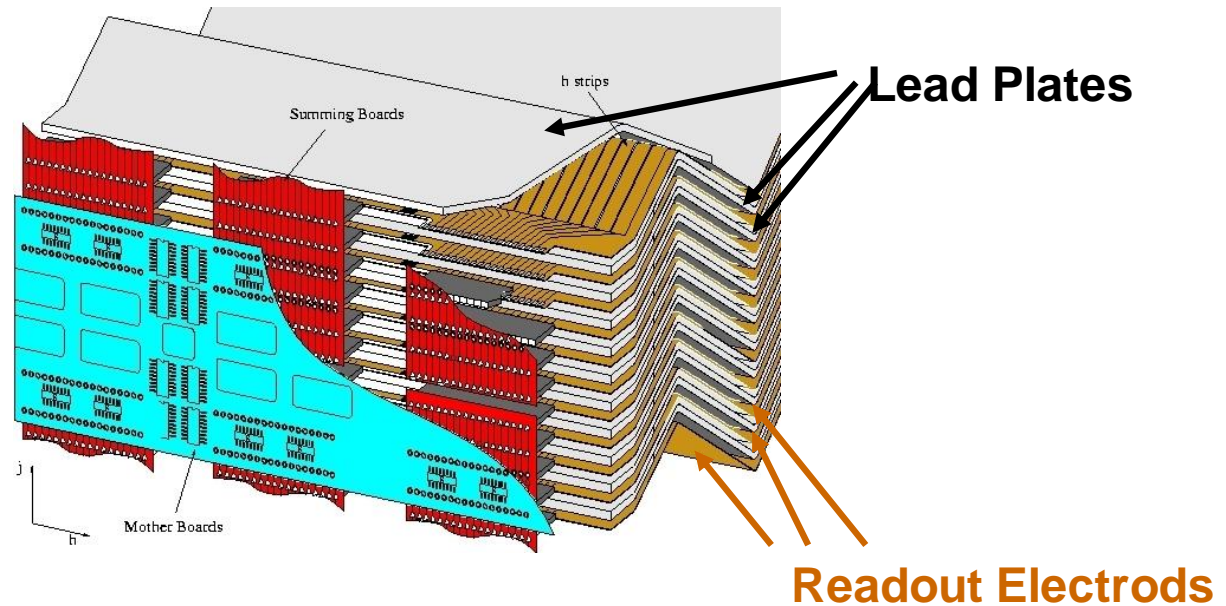
Des techniques



Calorimètre à Argon liquide d'ATLAS



Simulation d'une cascade électromagnétique initiée par un électron de 50 GeV dans l'ECAL d'ATLAS

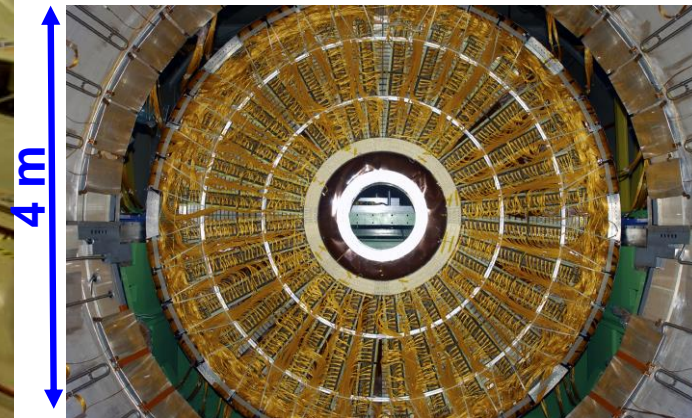
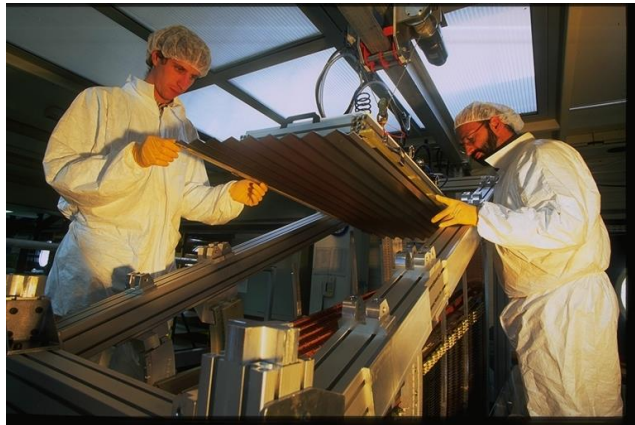
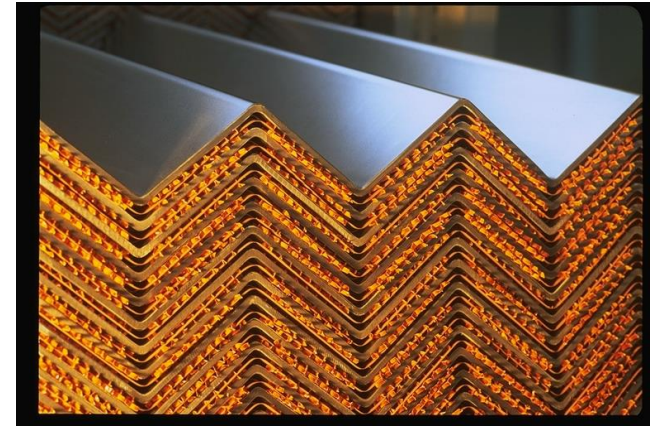
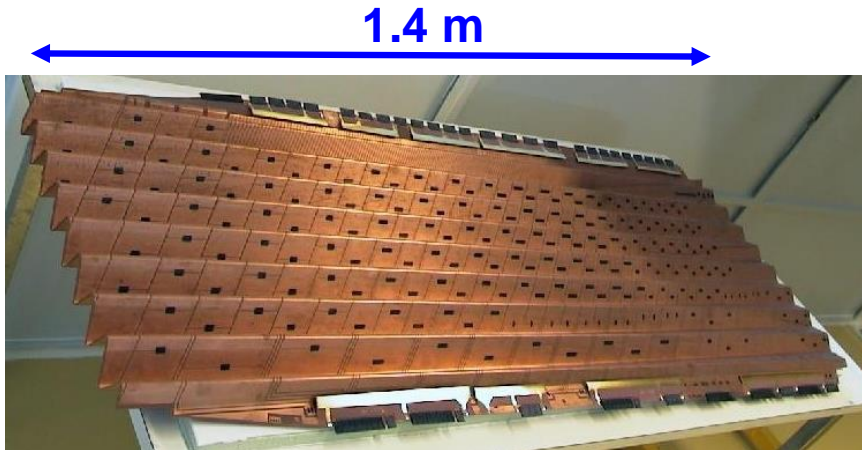


- Des plaques de Plomb et des électrodes Gaps remplies d'Argon liquide à $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Le plomb freine les particules incidentes.
- L'argon liquide s'ionise et des électrons sont générés.
- Les électrons dérivent vers les électrodes et le signal est extrait.
- On calcule l'énergie initiale grâce à la somme des signaux.

Intermezzo

- Film ECAL ATLAS

Construction du calorimètre à Argon liquide d'ATLAS



Conclusion et résumé

- Le modèle standard des particules est une théorie vérifiée avec une précision extrême. Nous comprenons l'agencement de la matière aux plus petites dimensions et les forces fondamentales de la nature.
- Pourtant cette théorie ne peut être la théorie ultime et des questions fondamentales demeurent.
- La compréhension de cette physique peut passer par plusieurs biais: cosmologie, astroparticules, physique des particules... des voies sur lesquelles le CPPM est engagé.
- Des détecteurs géants sont construits pour observer ces phénomènes.
- Répondre à ces questions fondamentales nécessite de développer des technologies de pointe dans de multiples domaines.
- En regard des multiples compétences nécessaires au sein de nos expériences!
- Cet après-midi, vous verrez la salle de montage d'une partie des structures pour le futur ITk d'ATLAS.