



Le LHC: Accélérateur de Science

Sandrine Laplace

LAPP (Université de Savoie, IN2P3/CNRS)

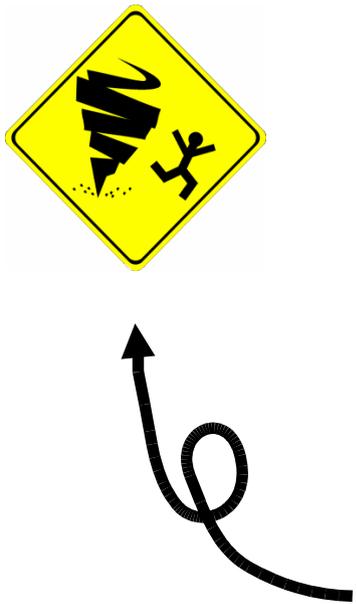


Plan:

- Les accélérateurs de particules: pourquoi ?
- La physique des particules
- Le LHC: comment ça marche ?

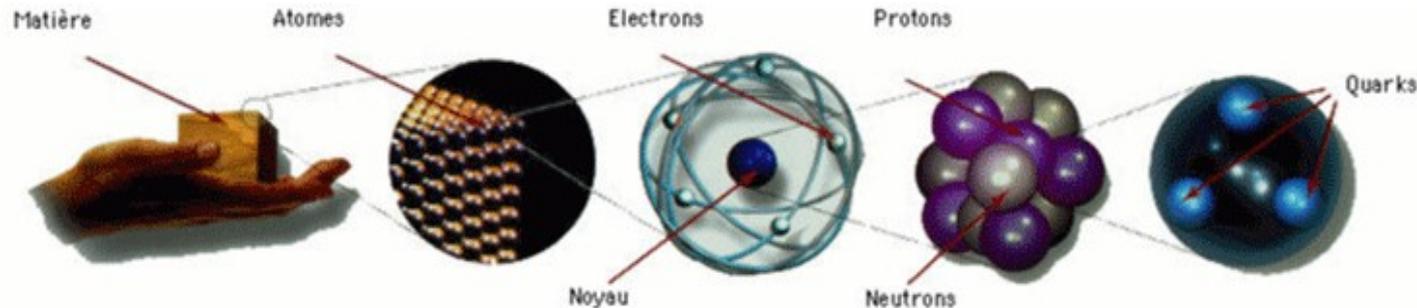
Mise En Garde

- **Mots entre guillemets (***)**:
 - Ce sont des termes techniques: ne pas s'affoler !
- **La 1ère partie (sur la physique) est plus compliquée que la 2ème partie (sur le LHC)**:
 - Si vous êtes un peu perdus au début, restez quand même jusqu'à la 2ème partie !
 - Passages particulièrement ardues seront marqués de ce panneau: serrez les dents, ce ne sera pas long



Les Accélérateurs de Particules: Pourquoi ? (1/2)

- Pour comprendre la matière:



- **Matière ordinaire**, la plus légère, stable, (protons, électrons...) nous entoure
- **Matière non-ordinaire**, plus lourde, instable, est liée à des phénomènes énergétiques (premiers instants après Big Bang, ou encore aujourd'hui dans l'univers)
 - (historiquement) découverte via rayons cosmiques
 - Puis re-crée en laboratoire grâce à accélérateurs

→ **Reproduire en laboratoire des phénomènes naturels se produisant dans l'univers**

Les Accélérateurs de Particules: Pourquoi ? (2/2)

- Pour répondre à de grandes questions:

- D'où vient la masse des particules ?

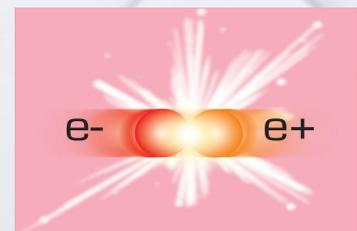
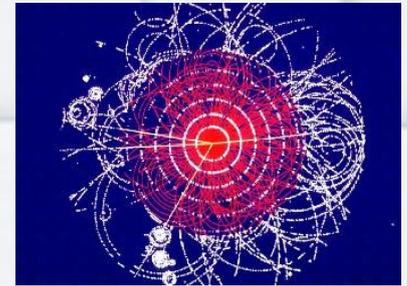
- Boson de Higgs

- De quoi est composé 95% de l'univers ?

- Matière Noire et Énergie Noire

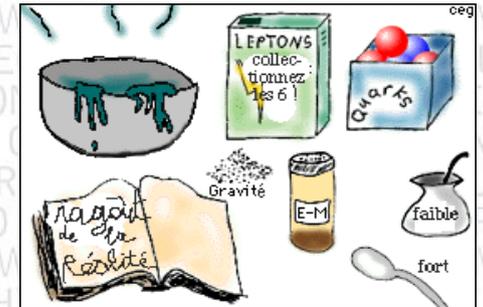
- Pourquoi n'y a-t-il plus d'anti-matière dans l'univers ?

- ...



La Physique des Particules

- **Théorie et Expérimentation**
- **Le Modèle Standard**
- **Le Boson de Higgs**
- **Au Delà du Modèle Standard**
- ***[L'Anti-Matière]***
- ***[Le Plasma de Quarks et Gluons]***



Théorie et Expérimentation

- **Théorie (modèles):**
 - Effort de rationalisation du réel
 - Regroupe différents phénomènes sous des lois communes: lois explicatives, voire prédictives
- **Démarche Expérimentale:**
 - Expérimentation permet de prouver qu'une théorie est fausse (jamais qu'une théorie est vraie !)
 - Bonne théorie: résiste à toutes les tentatives de réfutation...

Théorie actuelle de la physique des particules: le Modèle Standard

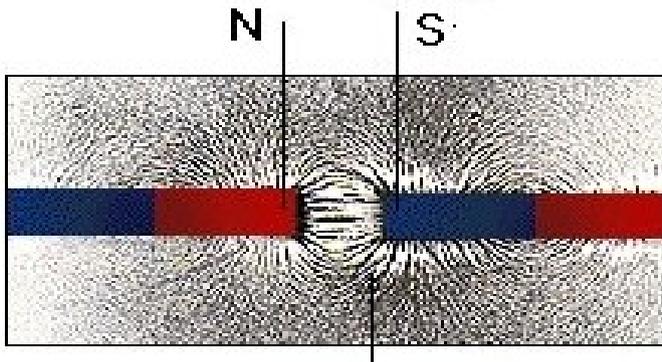
Le Modèle Standard: Les Bases

Infiniment petit

Mécanique quantique

Notion de « champ »

Ex: champ magnétique



particule = « excitation » d'un champ

Hautes énergies

Grande vitesse (proche de celle de la lumière)

Domaine « relativiste »

Relativité restreinte

$$E=mc^2$$

énergie équivalent à masse



Modèle Standard =
«théorie quantique relativiste des champs»

Aparté: À Propos d'Énergie

- **Énergie (masse) exprimée en Electron-Volt [eV]:**
 - Énergie d'un électron accéléré par 1 Volt (10^{-19} Joules)
 - Unités typiques: MeV = 10^6 eV, GeV = 10^9 eV, TeV = 10^{12} eV
 - Ordres de grandeur:
 - 10^6 eV : masse au repos de l'électron
 - 10^9 eV : masse au repos du proton
 - 10^{13} eV : énergie d'un proton au LHC (14 TeV)
= énergie d'un moustique en vol
 - 10^{19} eV : énergie libérée par 1 kg tombant d'1 mètre
 - 10^{27} eV : énergie d'un faisceau de protons au LHC !
= énergie d'un boeing 747 au décollage...



Le Modèle Standard: Les Interactions (Forces)



Quatre interactions, véhiculées par
des **particules de force**

Gravité



J.S.

Électro-
magnétique



J.S.

Faible



J.S.

Forte



J.S.

- Pesanteur, marée, trajectoire des planètes
- (Portée infinie, \searrow , 10^{-36}) Non incluse dans MS
- Électricité, magnétisme, lumière...
- **photon** (portée infinie, \searrow , 10^{-2})
- Radioactivité, combustion du soleil
- **bosons vecteurs (W^+ , W^- , Z^0)**
(Portée très courte, \searrow , 10^{-7})
- Liaison des quarks dans les noyaux
- **gluon** (portée courte, \nearrow , 1)

Electro-faible

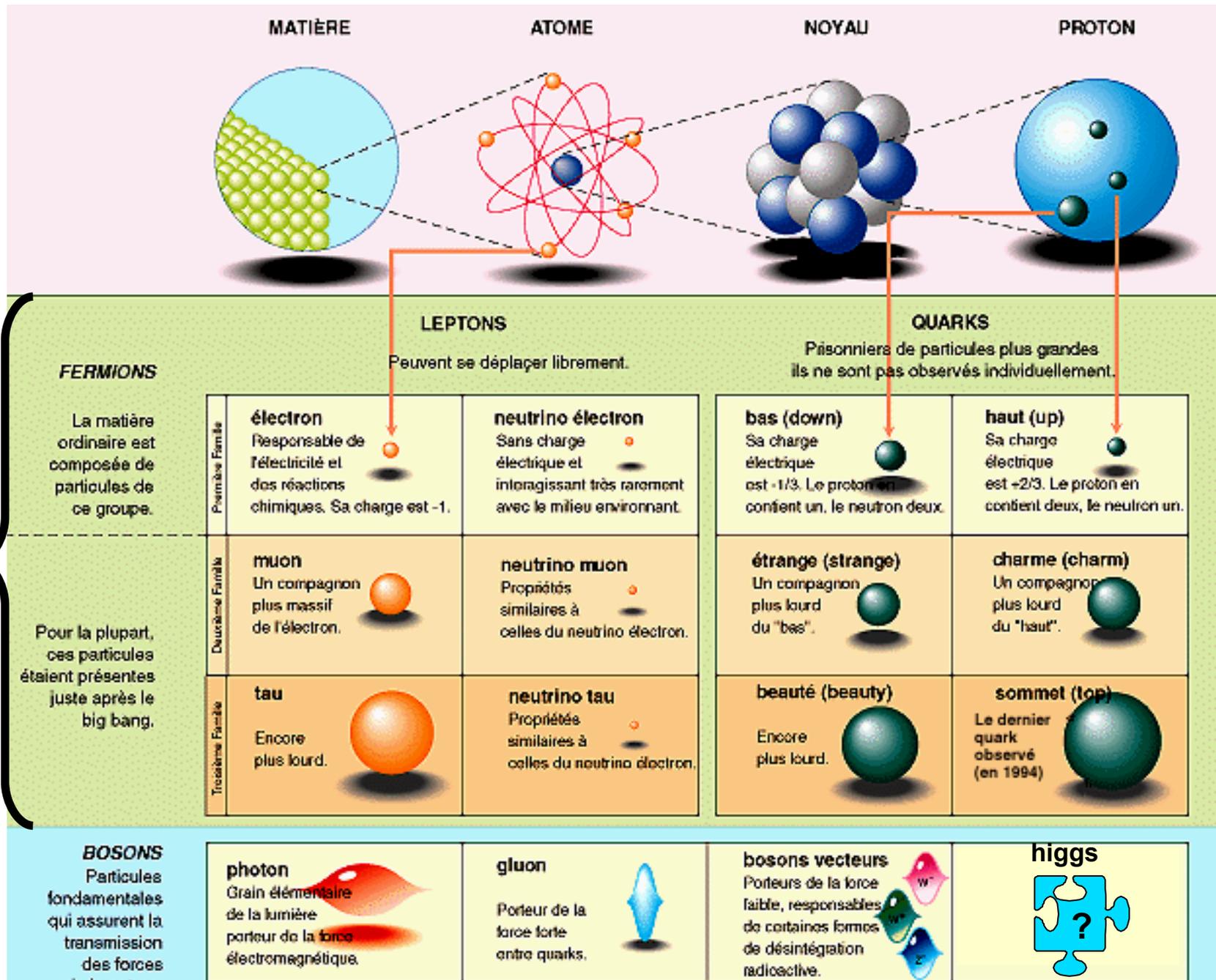


Le Modèle Standard: Les Symétries



- **Lois de la nature possèdent des symétries**
 - Ex.: symétrie par rapport à l'espace => lois de la nature indépendantes de la position de l'observateur
- **Modèle Standard basé sur un type spécial de symétries, dites «de jauge»**
 - Théorie basée sur symétrie de jauge = « théorie de jauge »
 - Les interactions naissent à partir des symétries de jauge !
 - **Théories de jauge du Modèle Standard:**
 - « L'électro-dynamique quantique (QED) » : force électro-faible
 - « La chromo-dynamique quantique (QCD) » : force forte

Le Modèle Standard



Particules de matière

Particules de force

Le Boson de Higgs (1/2)

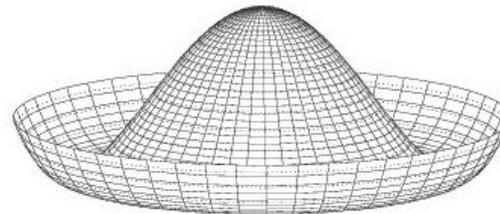


- **Le problème:**

- Symétrie de jauge interdit aux particules de force d'avoir une masse: c'est contraire aux observations !

- **La solution:**

- « Brisure spontanée de la symétrie de jauge » : équations respectent la symétrie, mais solutions des équations ne la respectent pas (oui, c'est possible)



- Symétrie brisée grâce au « **champ de Higgs** » avec lequel les particules interagissent (« viscosité du vide »)



Le Boson de Higgs (2/2)

- **La quête du boson de Higgs:**



- A commencé il y a bien longtemps ! En particulier:

- Au LEP, CERN (collisionneur e^+e^-) jusqu'en 2000: quelques événements ressemblant à la désintégration d'un boson de Higgs auraient été vu, mais pas décisif...
- À Tevatron, Fermilab (collisionneur p-anti p à 2 TeV): concurrent actuel du LHC !



- Arguments théoriques et expérimentaux: on pense que la masse du boson de Higgs est comprise entre **115 et 160 GeV (1 GeV = masse proton)**



Au Delà du Modèle Standard



- **Modèle Standard encore jamais contredit par l'expérience, mais comporte des défauts**
 - **Problèmes fondamentaux:** n'incorpore pas la gravitation; n'explique pas la matière/énergie noire, etc...
 - **Problèmes théoriques:**
 - Peu explicatif (Pourquoi 3 familles ? Pourquoi ces symétries de jauge ? Pourquoi ces masses ? ...)
 - Très « inesthétique » à haute énergie
 - Aimerait unifier toutes les forces dans une force unique
- **Théoriciens ont imaginé de nouveaux modèles**
 - Supersymétrie, dimensions supplémentaires, théorie des cordes, ...



La Supersymétrie (SUSY)

- Existe-t-il une symétrie entre les particules de matière [fermions] et de force [bosons] ?
 - Pas facile à faire avec les seules particules connues
 - Postule un « **double supersymétrique** » de toutes les particules connues:

Constituants de la matière				Bosons de jauge		
	1 ^{ère} famille	2 ^{ème} famille	3 ^{ème} famille	Interaction forte	Interaction électro-magnétique	Interaction faible
Quarks	Up (u)	Charm (c)	Top (t)	Gluons (g)	Photon (γ)	Bosons W ⁺ W ⁻ Z ⁰
	Down (d)	Strange (s)	Bottom (b)			
Leptons	Electron (e ⁻)	Muon (μ^-)	Tau (τ^-)			Bosons de Higgs H ⁺ H ⁻ H, h, A
	Neutrino (v _e) électronique	Neutrino (v _{μ}) muonique	Neutrino (v _{τ}) tauique			

Particules supersymétriques							
sQuarks	sUp (ÿ)	sCharm (ÿ)	sTop (ÿ)	Gluinos (ÿ)	Photino (ÿ)	Jauginos Winos (ÿ ⁺) (ÿ ⁻) Zino (ÿ ⁰)	Higgsinos ÿ ⁺ ÿ ⁻ ÿ ₁ ⁰ , ÿ ₂ ⁰
	sDown (ÿ)	sStrange (ÿ)	sBottom (ÿ)				
sLeptons	sElectron (ÿ ⁻)	sMuon (ÿ ⁻)	sTau (ÿ ⁻)				
	sNeutrino (ÿ _e) électronique	sNeutrino (ÿ _{μ}) muonique	sNeutrino (ÿ _{τ}) tauique				

Résout plusieurs problèmes:

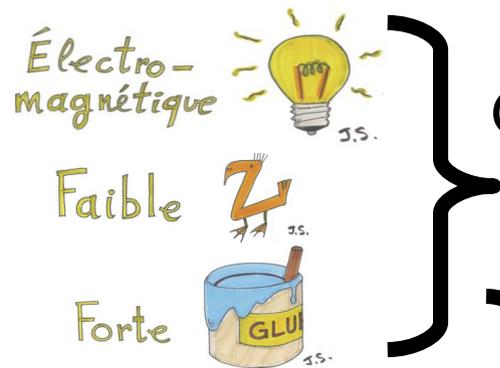
- Le modèle se comporte mieux à haute énergie
- **Matière noire:** la particule SUSY neutre la plus légère (neutralino) est un bon candidat !

[Amène aussi des problèmes...]

Vers Une Unification des Forces ?

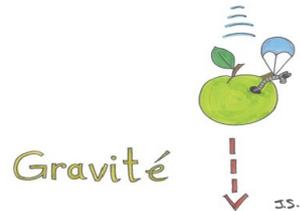
Histoire de la physique: tendance à unifier ! 

Deux étapes logiques: unification des théories quantiques des champs entre elles (QED et QCD), puis unification avec gravitation

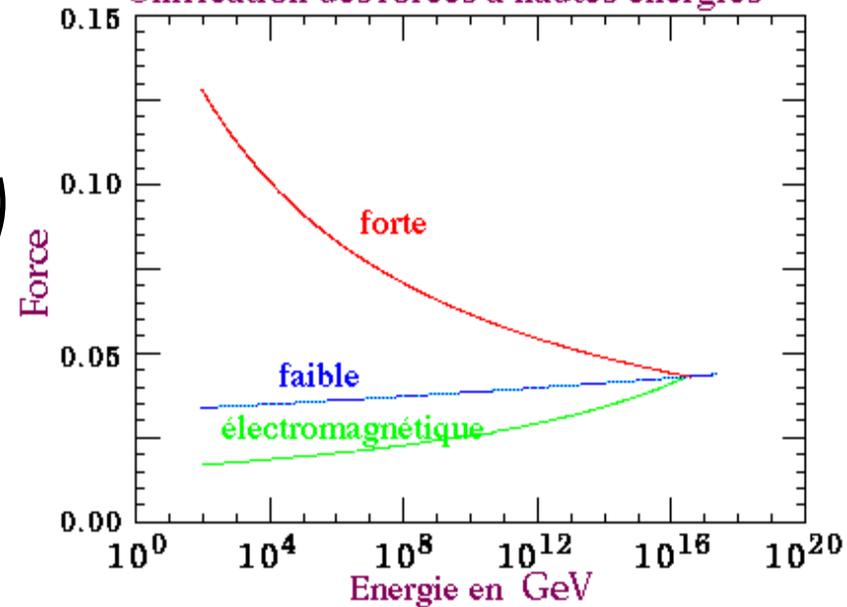


Grande Unification (GUT)
(à 10^{16} GeV)

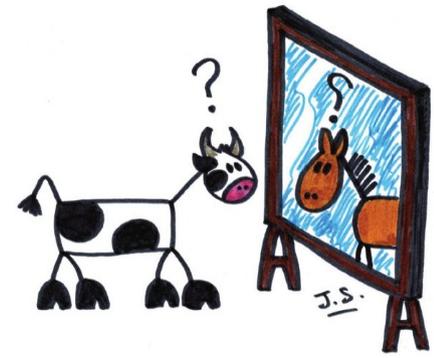
Super-Unification à 10^{19} GeV
gravité quantique
« Super-cordes » ?
(dimensions supplémentaires)



Unification des forces à hautes énergies



L'Anti-Matière

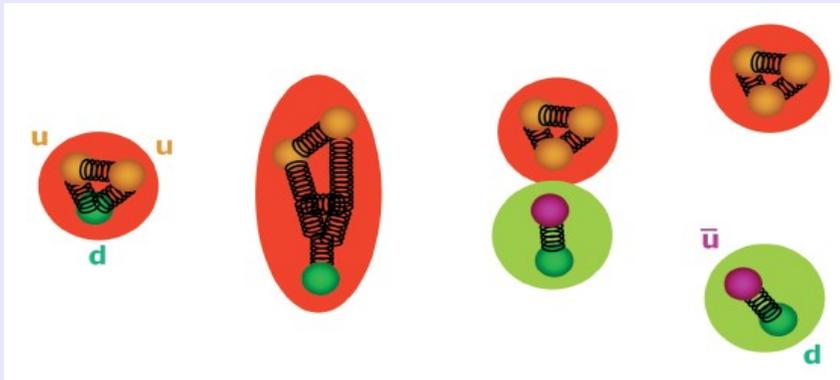


- **Disparition de l'anti-matière ?**
 - Big Bang: **autant de matière que d'anti-matière**
 - Matière et anti-matière se sont annihilées, laissant néanmoins **subsister un milliardième de matière qui compose notre univers actuel** ! Pourquoi ?
 - (une partie de la réponse): l'interaction faible agit différemment sur la matière et l'antimatière !
Il s'agit de la « **violation de CP** »
- **Système des mésons B (contenant quark b)**
 - Les effets de la violation de CP y sont particulièrement grands: particules idéales pour étudier ce phénomène
 - « usines à B » (BABAR et Belle); au LHC: expérience LHCb

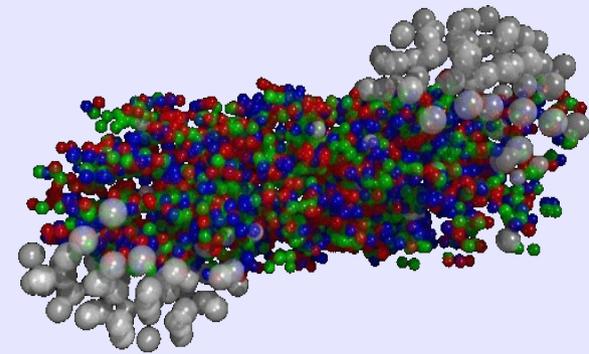
Le Plasma de Quarks et Gluons

- Une soupe primordiale:

- Juste après le big bang: soupe de quarks et gluons libres, alors qu'ils sont habituellement confinés dans la matière. Cet état de la matière est un plasma.



Quarks confinés dans la matière



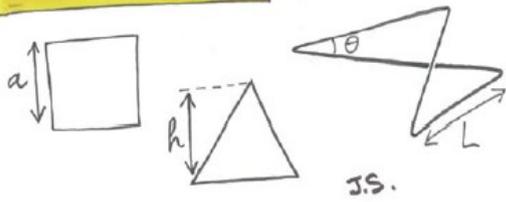
Plasma de quarks et gluons

- Plasma se produit à grande température, pression et densité d'énergie : collisions non plus de protons mais de noyaux lourds (plomb, or...)

Le LHC: Comment Ça Marche ?

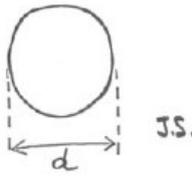


Archives du CERN : projets rejetés



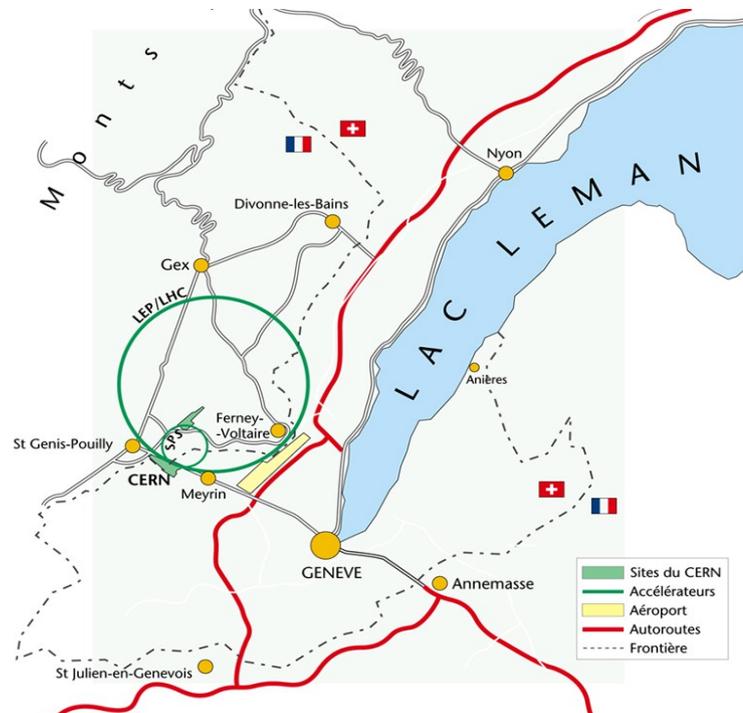
Le LHC

Archives du CERN : projet retenu

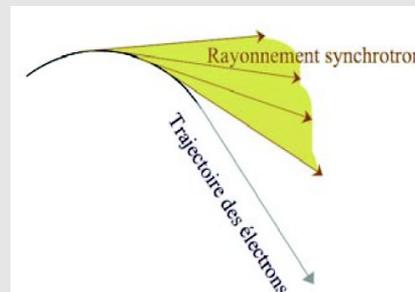


Large Hadron Collider = Grand Collisionneur de Hadrons:

- **Grand**: tunnel de 27 km (réutilise tunnel du LEP)
- **Collisionneur**: deux faisceaux circulent en sens inverse et entrent en collision en 4 points où se situent les détecteurs
- **Hadrons**: particules composées de quarks (protons, ions de plomb)

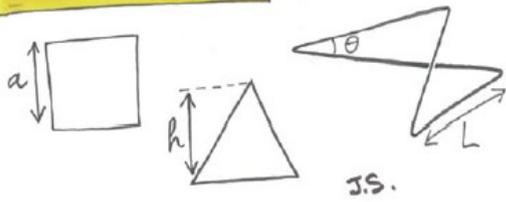


Choix du « grand » et « hadrons » dictés par le **rayonnement synchrotron**: énergie perdue par particule chargée dans un champ magnétique



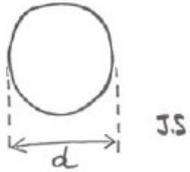
$$\Delta E \propto \frac{E^4}{m^4 R}$$

Archives du CERN : projets rejetés



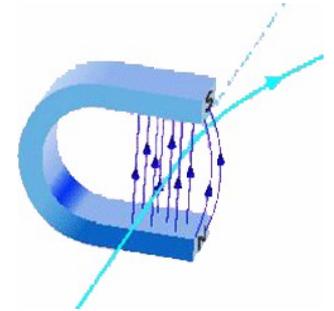
Les Défis

Archives du CERN : projet retenu



- **La plus haute énergie possible:**

- Limitation: capacité à maintenir les particules sur l'orbite du LHC => à **courber leurs trajectoires avec des aimants**



- Protons de 7 TeV dans anneau de 27 km: $B = 8.3 \text{ T}$ (12000 A)
- Nécessite des **aimants (dipôles) supraconducteurs**

- **Le maximum de collisions (haute luminosité):**

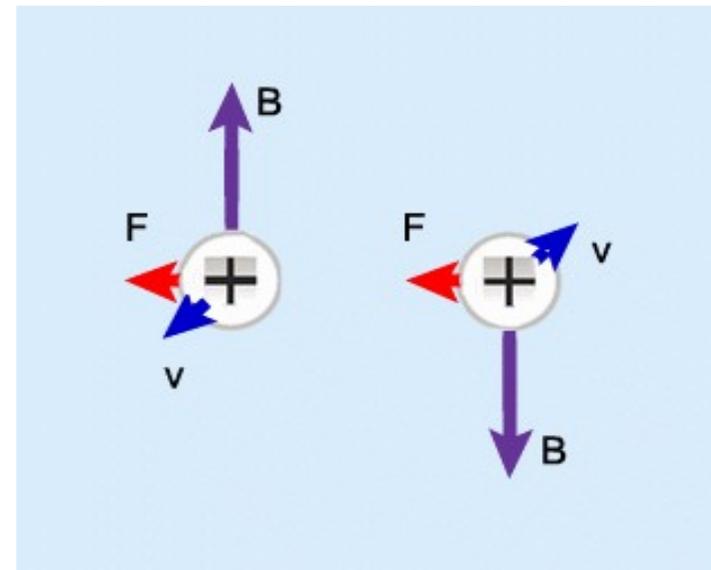
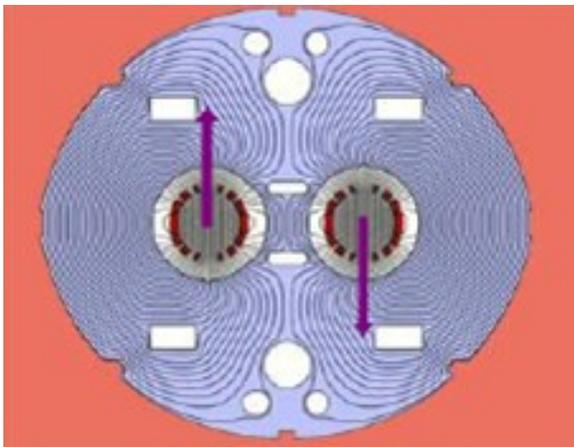
- 2808 paquets de 100 000 millions de protons chacun:

- 1 paquet fait 11000 fois le tour du LHC en 1 seconde
- Environ 20 collisions à chaque croisement de paquet
- Au total: **600 millions de collisions par seconde !**

- Nécessite des détecteurs rapides et une informatique capable de traiter un énorme flot de données

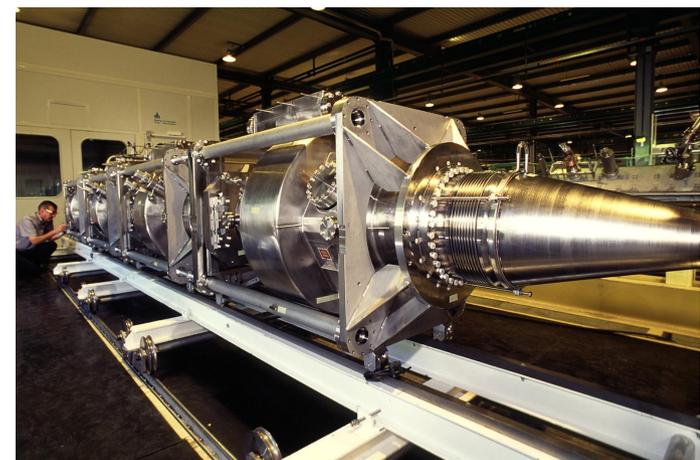
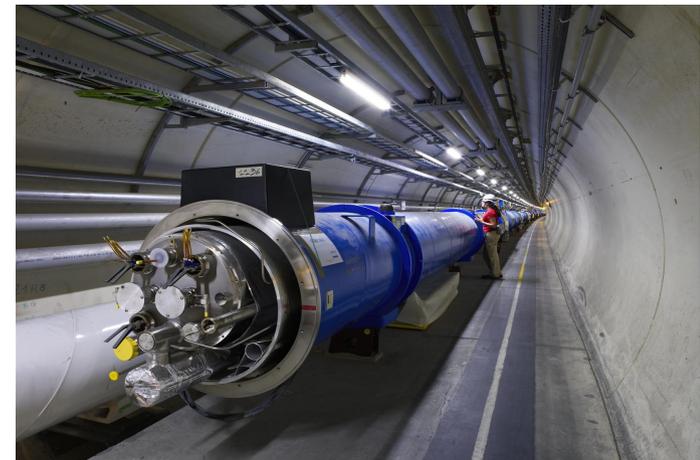
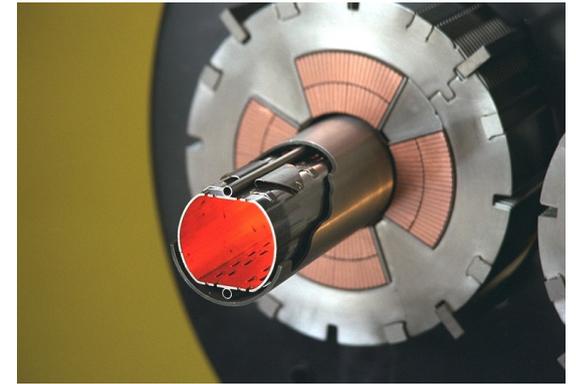
Deux Faisceaux dans Un Dipôle

- **Aimants supraconducteurs (donc refroidis): trop cher/gros de faire deux systèmes d'aimants séparés pour deux faisceaux !**
 - Les deux faisceaux sont donc dans le même aimant
 - Les champs magnétiques sont de direction opposée: permet de courber protons circulant en sens inverse vers l'intérieur de l'anneau



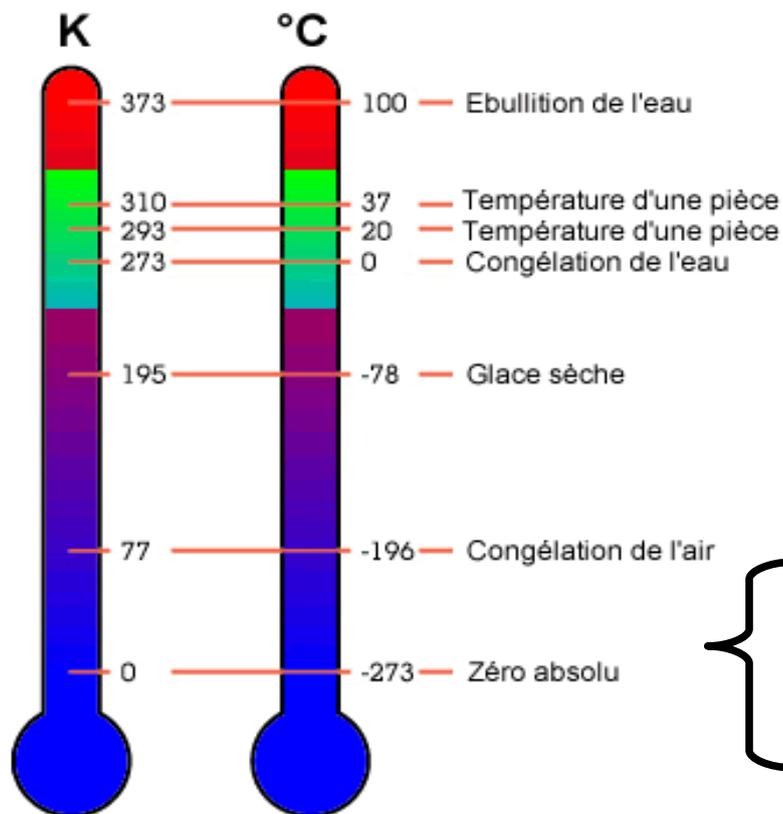
Ingrédients de l'Accélérateur

- 2 tubes à vide (10^{-13} atmosphères)
- 9600 aimants:
 - 1232 dipôles (courbent trajectoire)
 - 392 quadrupôles (focalisent le faisceau)
 - aimants correcteurs (sextupôles et autres multipôles)
- 16 cavités accélératrices radio-fréquence:
 - accélèrent particules puis compensent les pertes par rayonnement synchrotron
 - gardent les paquets bien groupés



Aparté sur la Température

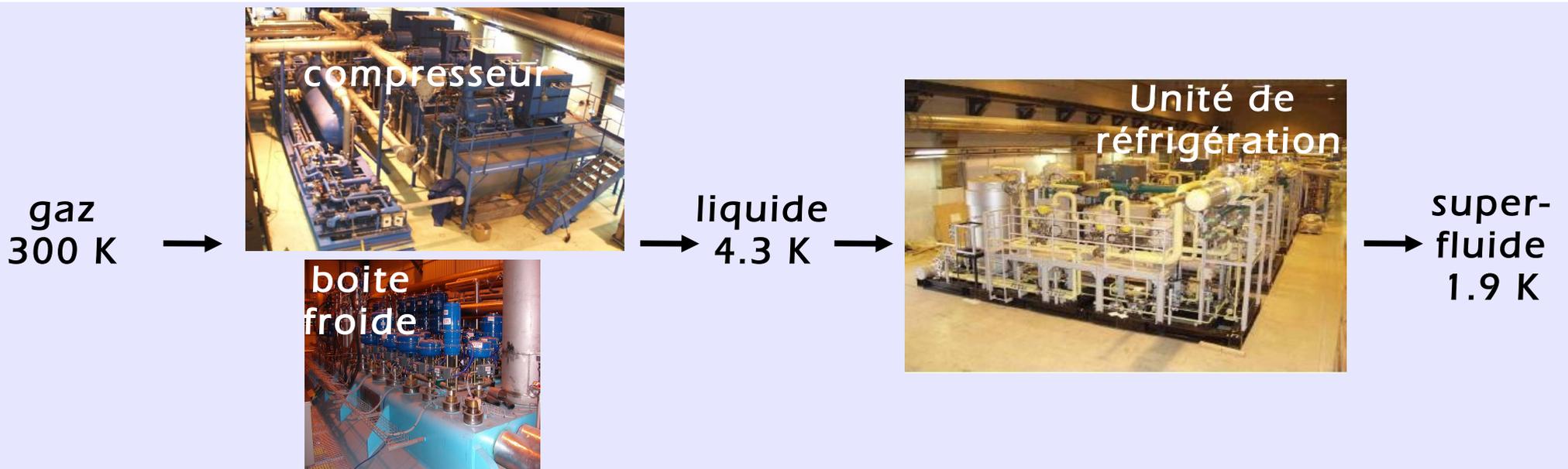
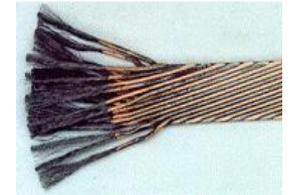
- **Le zéro absolu et l'échelle de Kelvin (K)**
 - Température minimale absolue: $0 \text{ K} = -273,15 \text{ °C}$



- 4.3 K (-268,8) : helium liquide
- 2.7 K (-270,4) : température de l'univers
- 1.9 K (-271,1) : aimants du LHC !

Les Aimants Supraconducteurs

- **Supraconductivité**: plus de résistance au passage de l'électricité, plus de pertes d'énergie par « effet Joule »
- **Dipôles**: 15 m de long, 35 tonnes
 - filaments de Niobium-Titane (NbTi) devenant supraconducteurs à 10K (-263,1 °C)
 - **Fonctionnent à 1.9K (-271,2 °C)**
- Pour refroidir dipôles, système cryogénique à l'hélium:



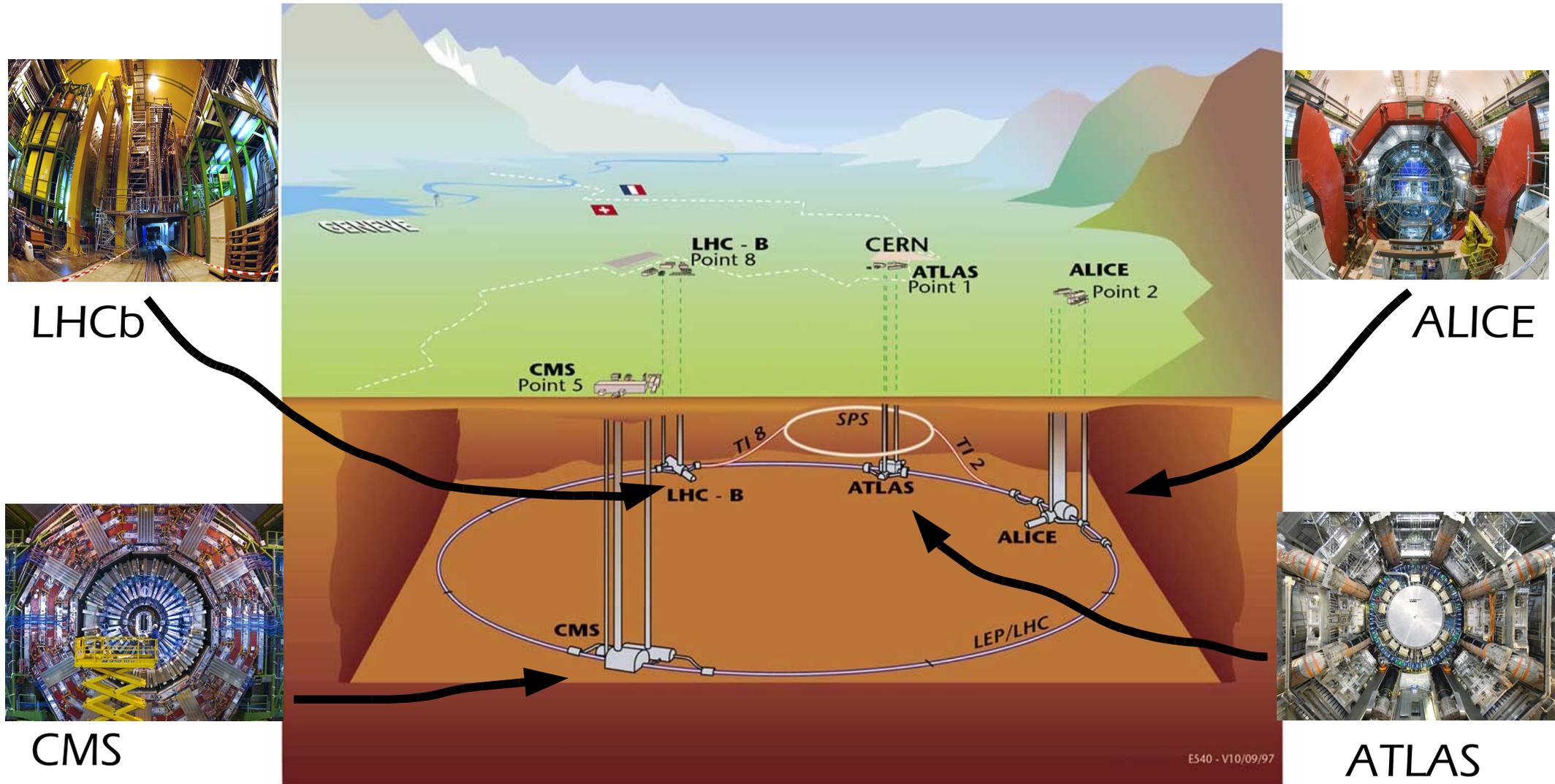
Un aperçu du Tunnel





Les Expériences

Quatre expériences: ATLAS, CMS, LHCb, ALICE



LHCb

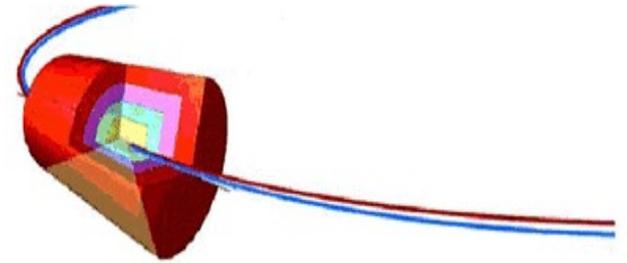
ALICE

CMS

ATLAS

ES40 - V10/09/97

Spécificités des Expériences



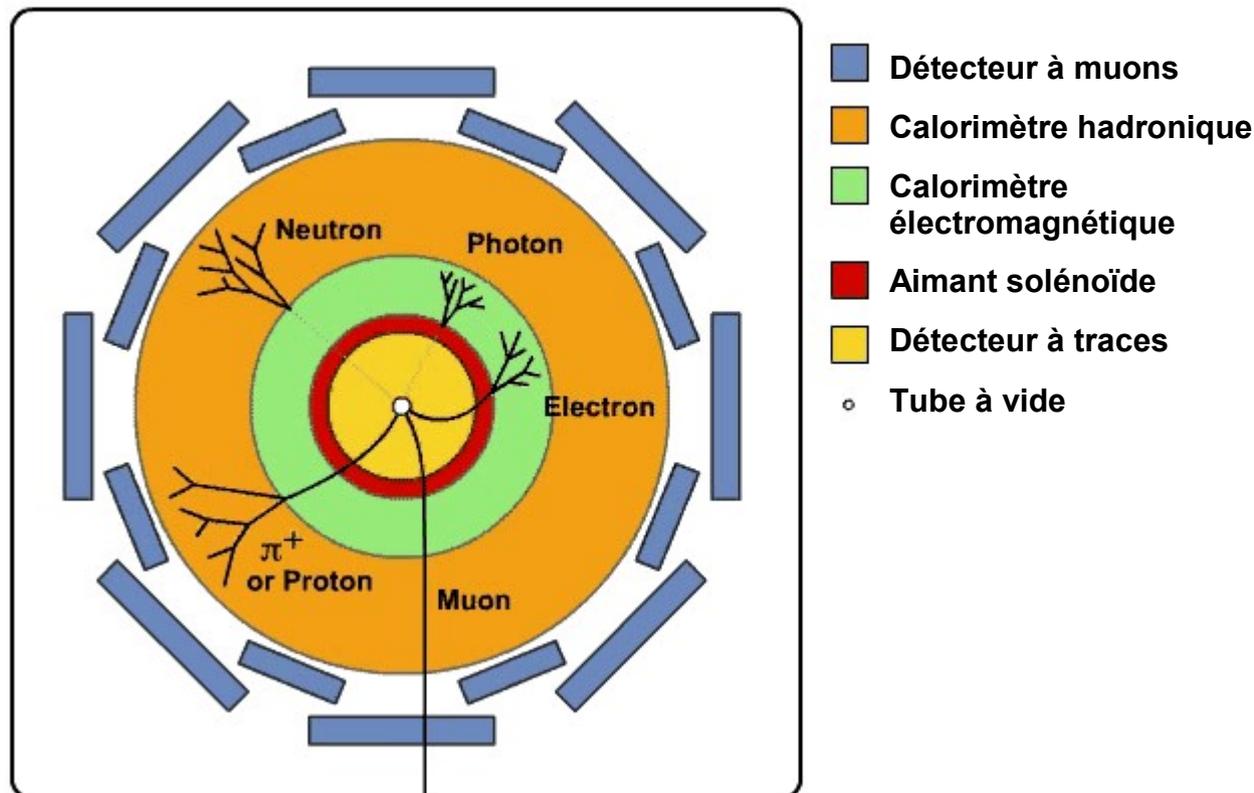
- **ATLAS et CMS :**
 - Expériences généralistes (Higgs, SUSY, ...)
 - Pourquoi 2 expériences ? Accumulation de plus d'événements, et comparaison des résultats
- **LHCb :**
 - Étudie asymétrie matière-antimatière dans le système des mésons B
- **ALICE :**
 - Étudie le plasma de quarks-gluons

Que se Passe-t-il dans une Expérience ?

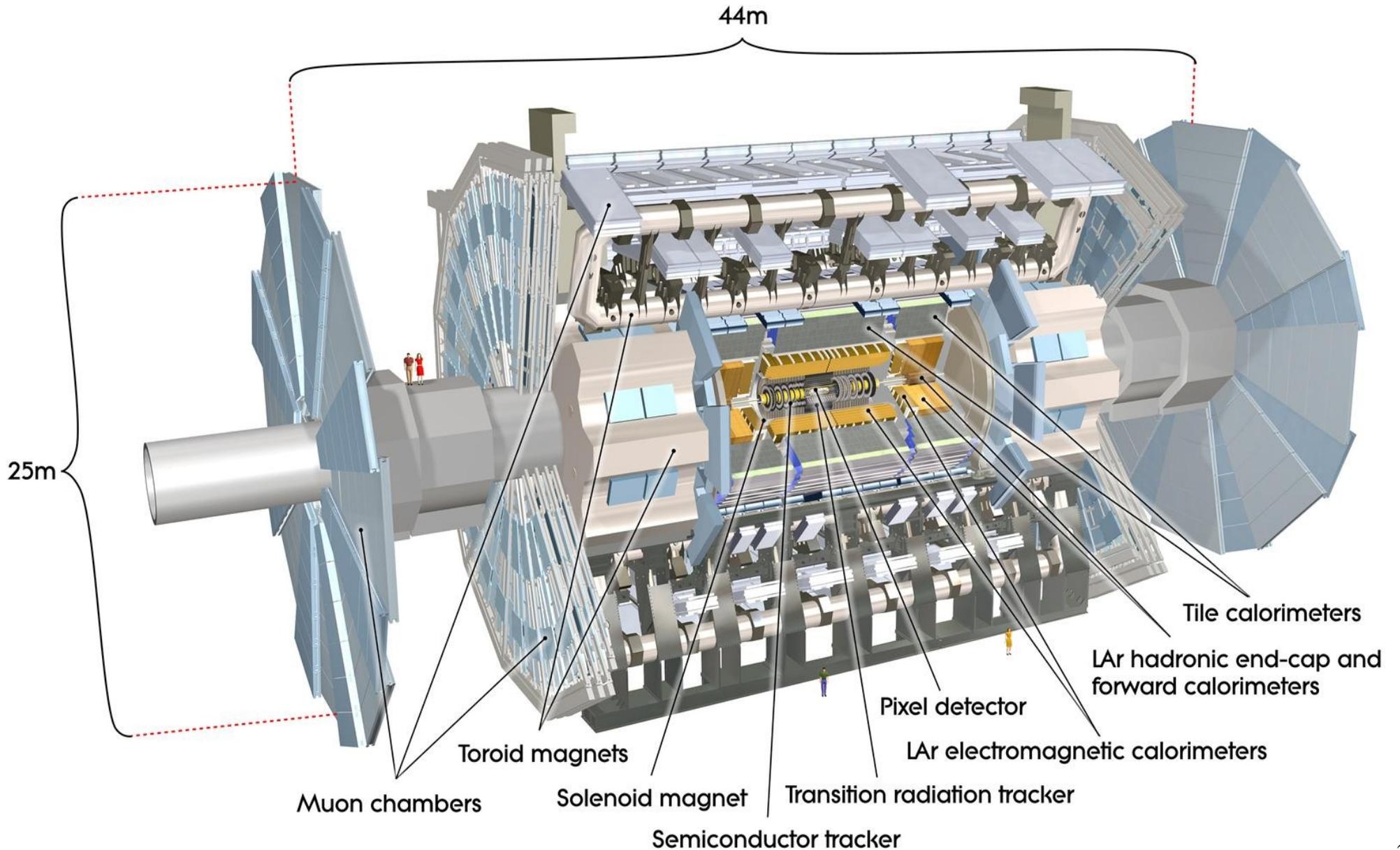


Que se Passe-t-il dans une Expérience ?

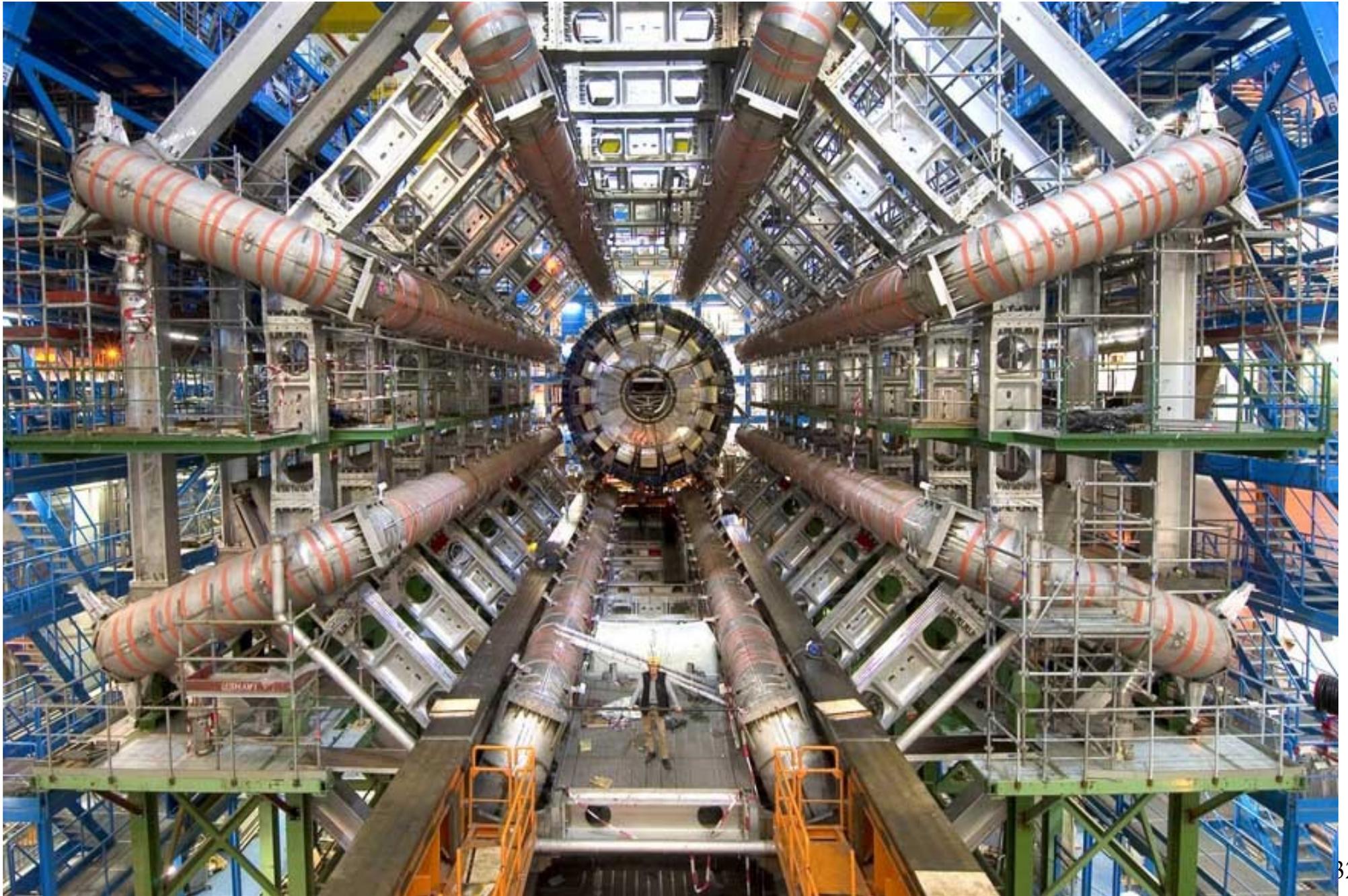
- **Exemple: production d'un boson de Higgs**
 - Le boson est instable: il se désintègre immédiatement en particules stables (photons, électrons, ...)
 - Ces particules stables sont éjectées du point de collision et sont détectées par un ensemble de sous-détecteurs:

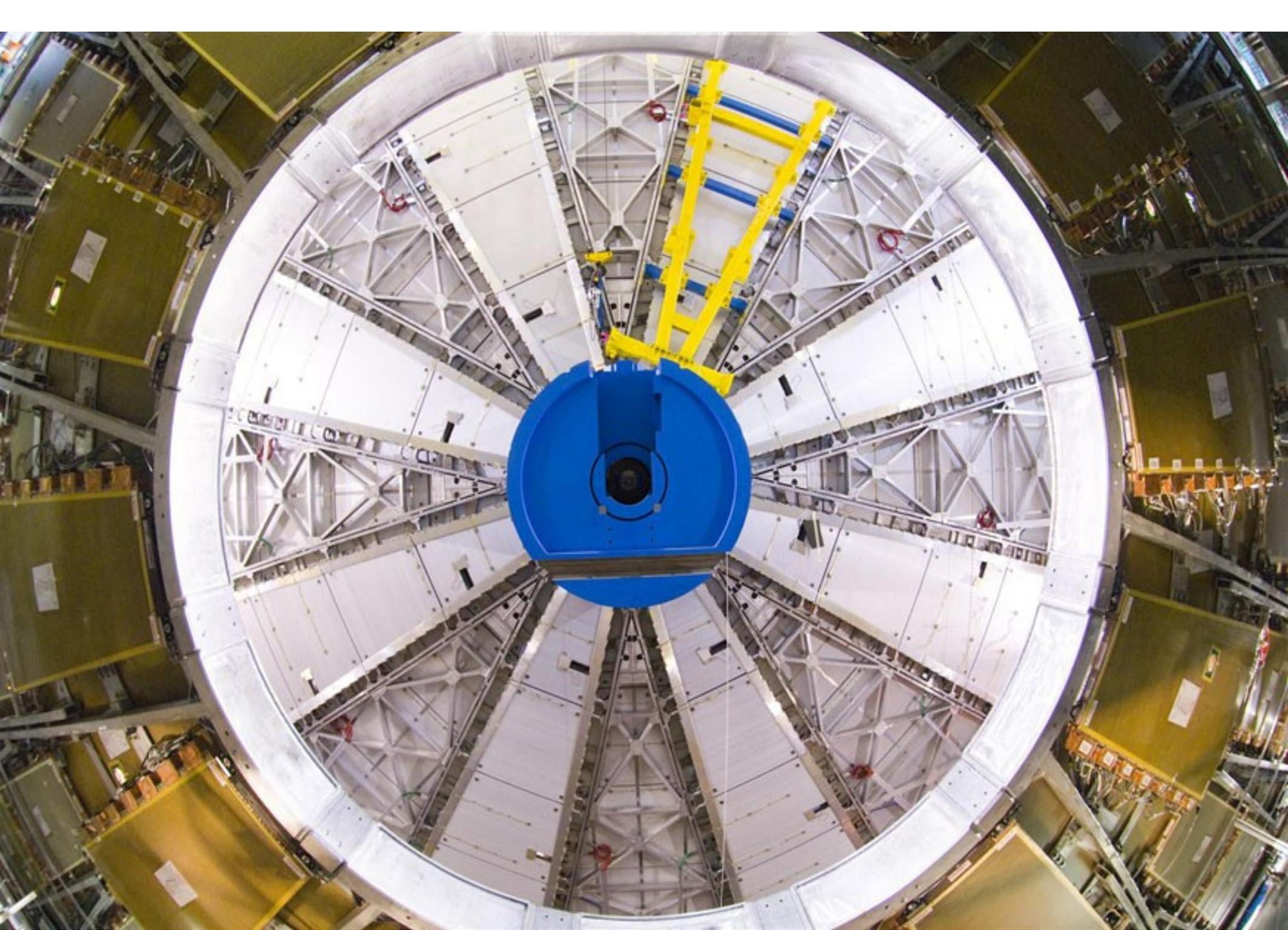


L'Exemple d'ATLAS

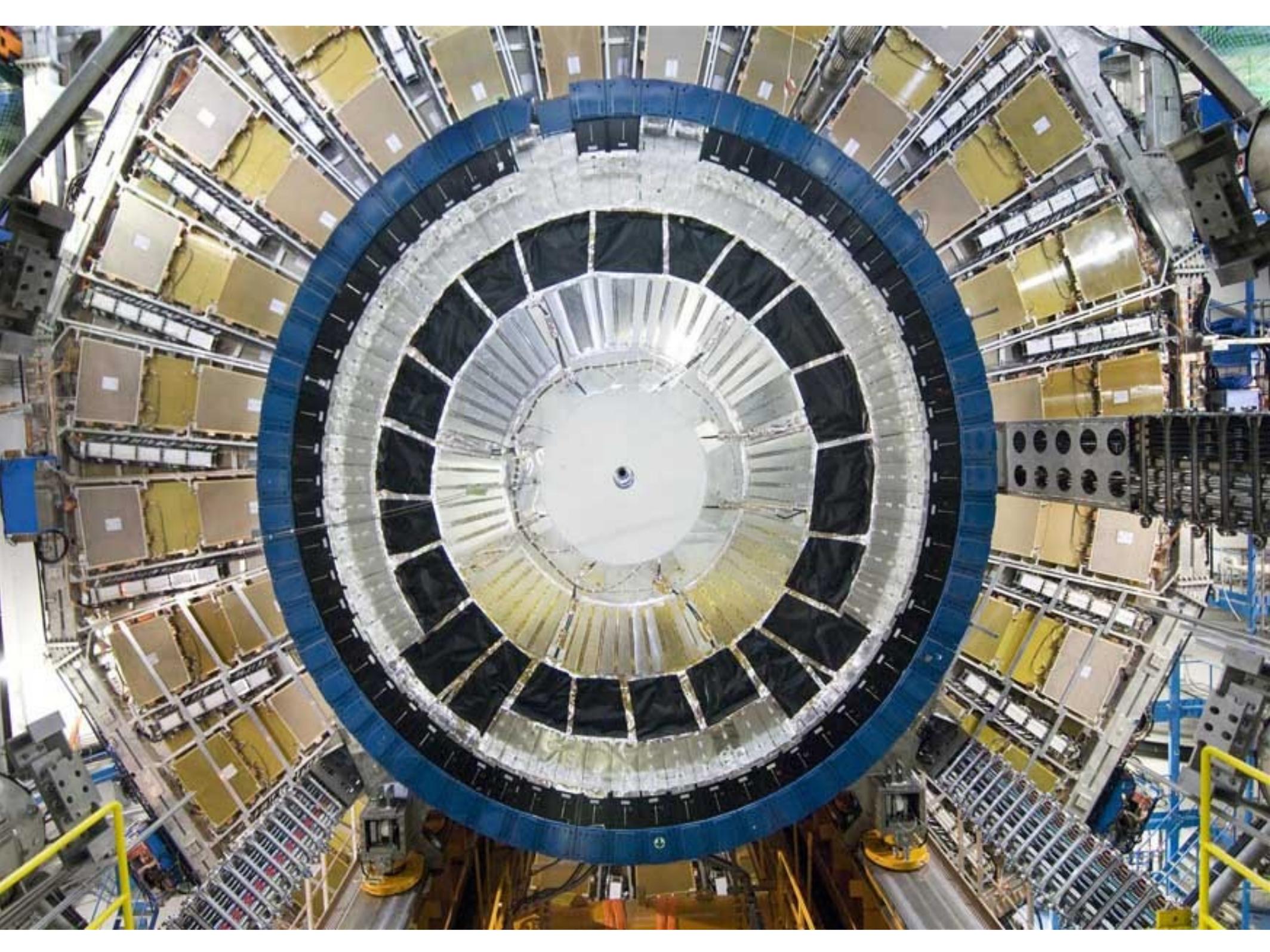


ATLAS en Images

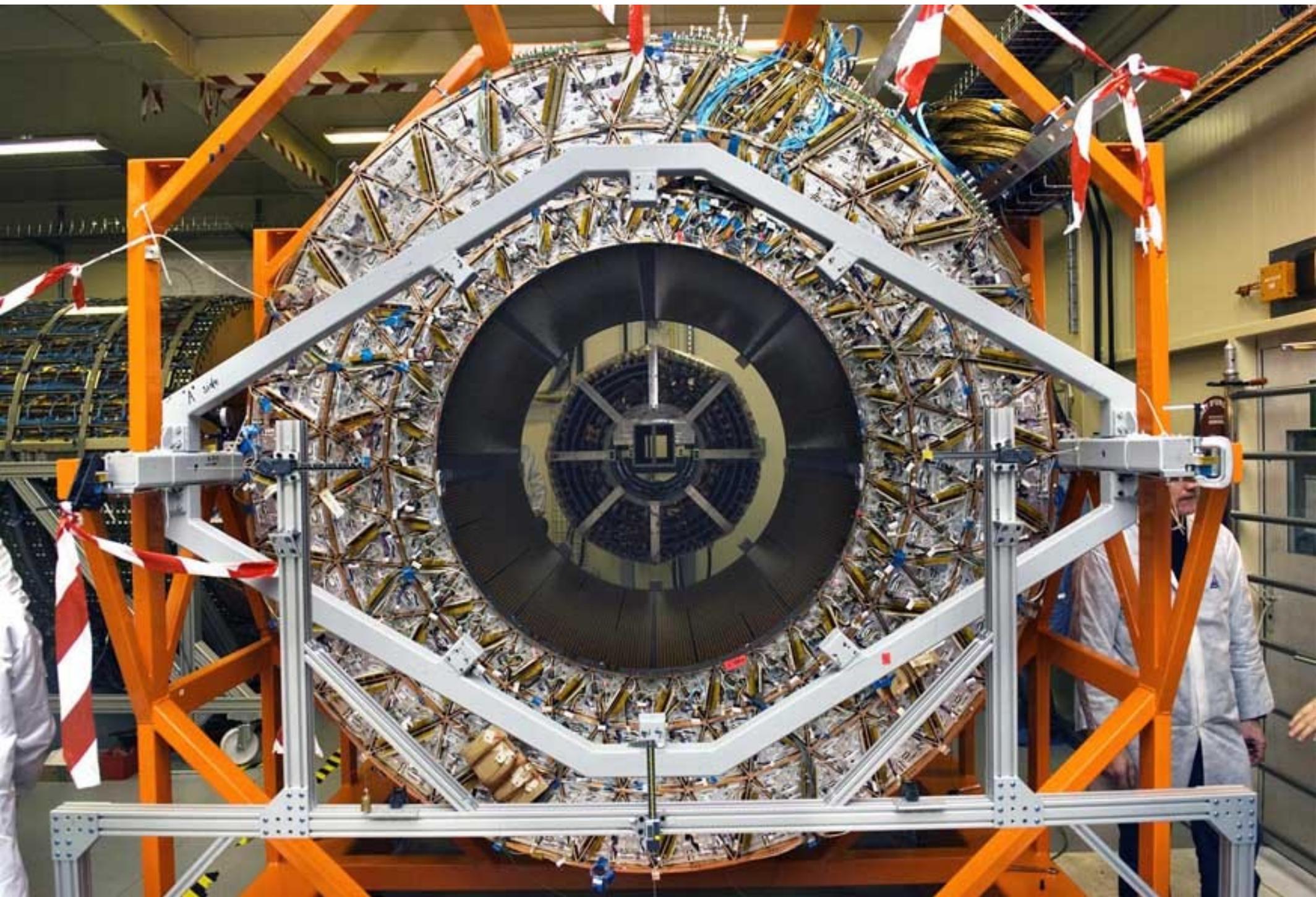


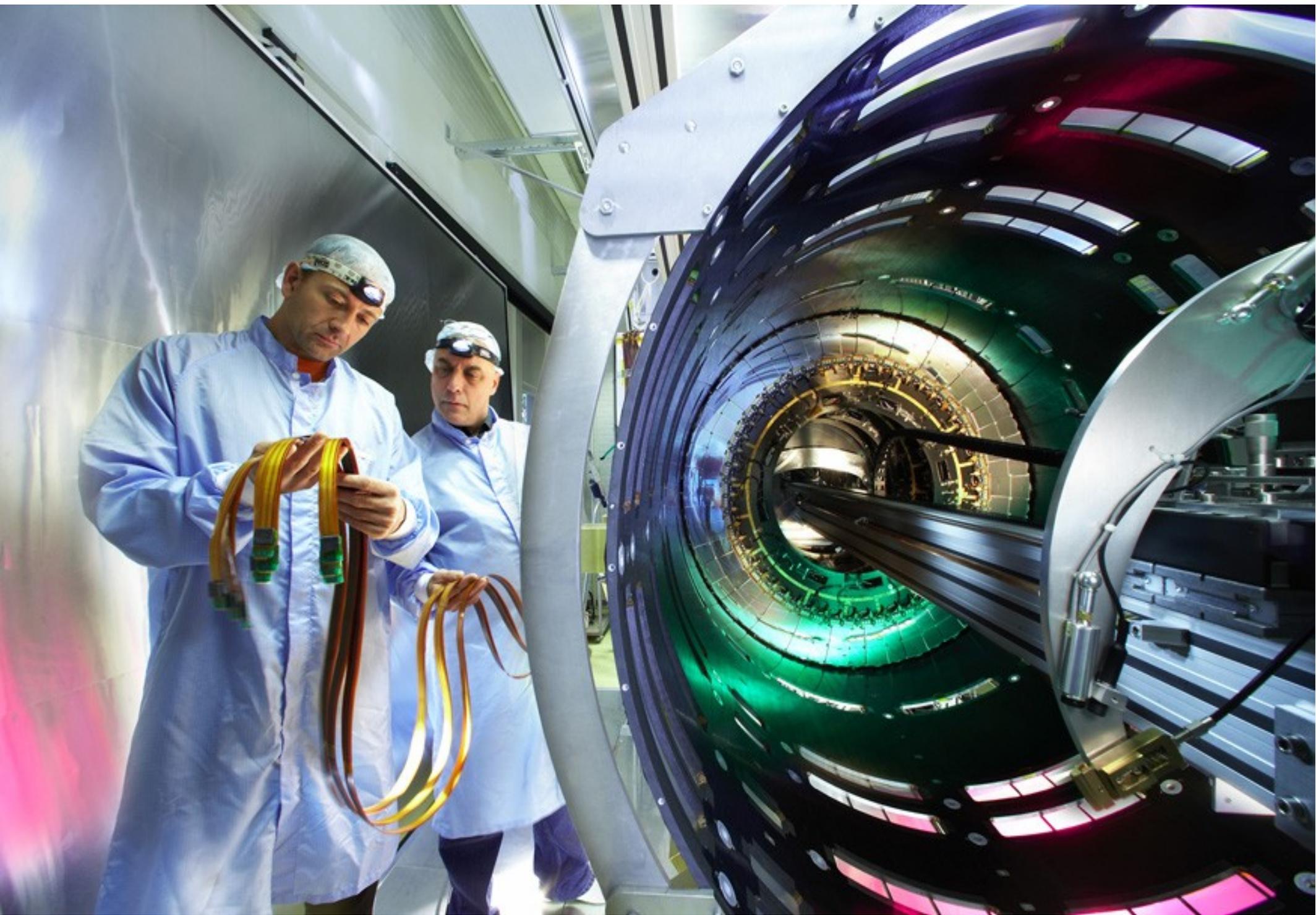


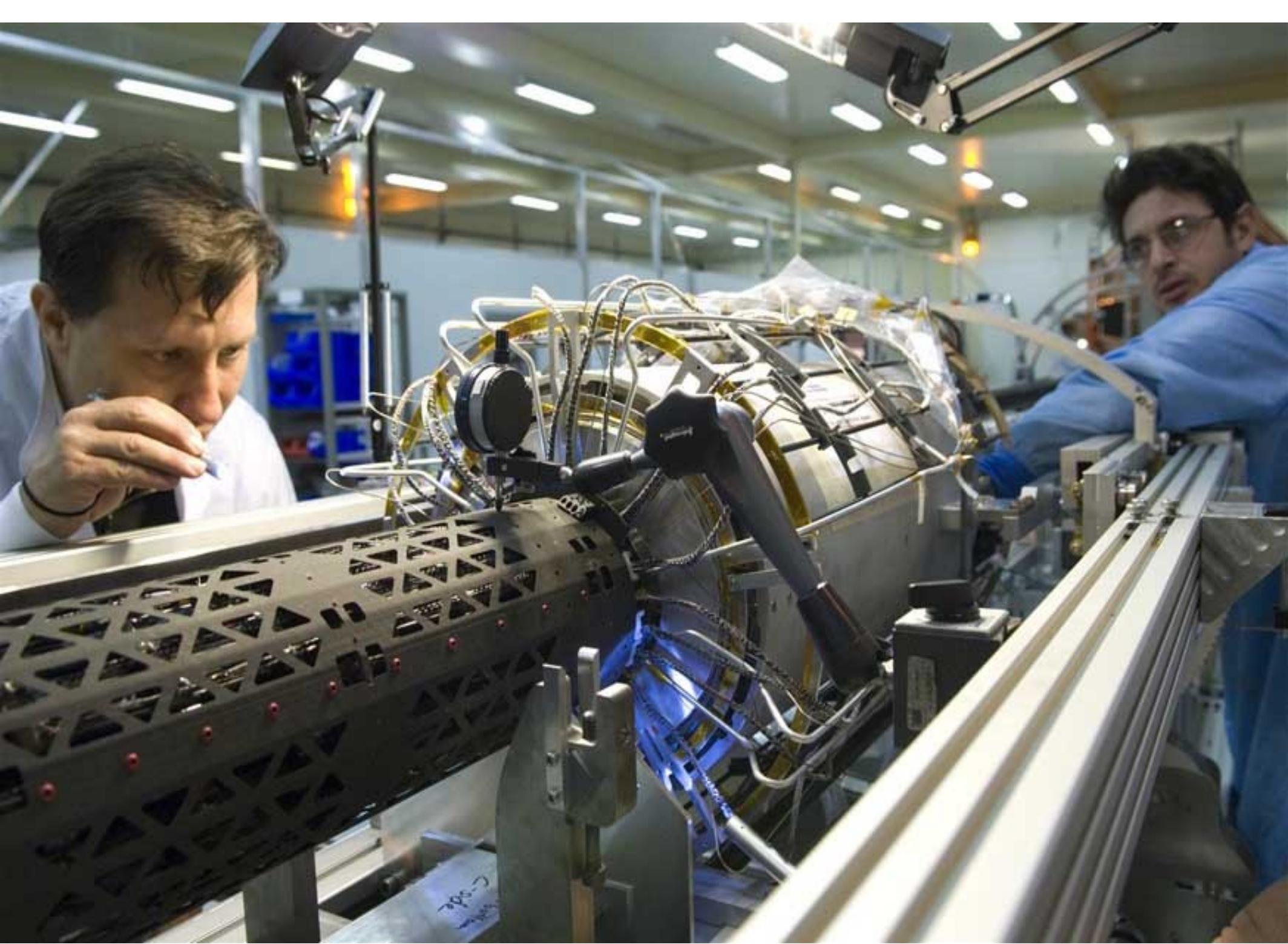






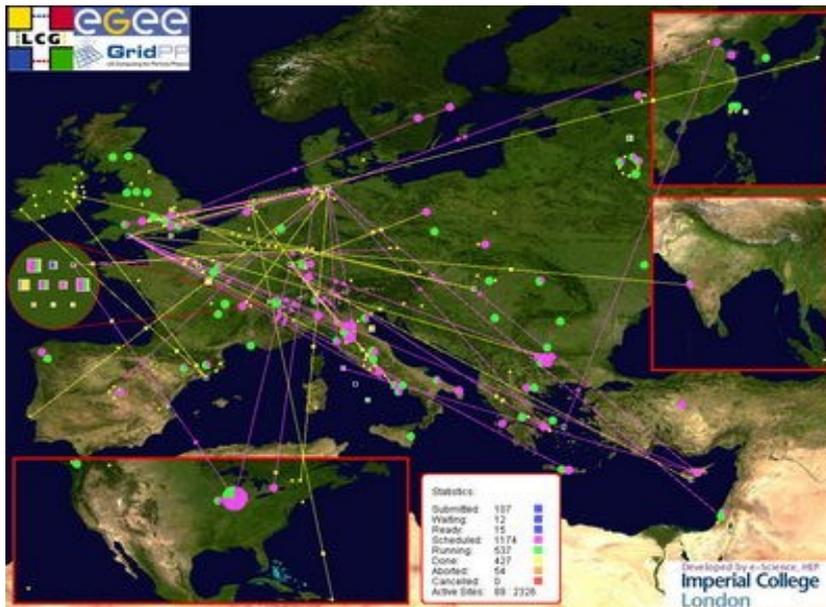
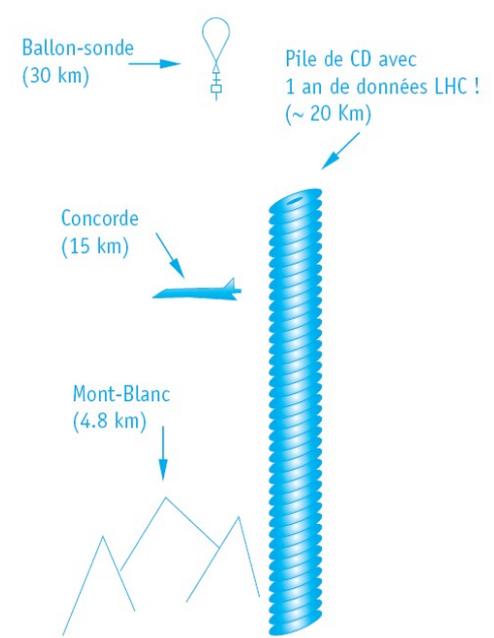




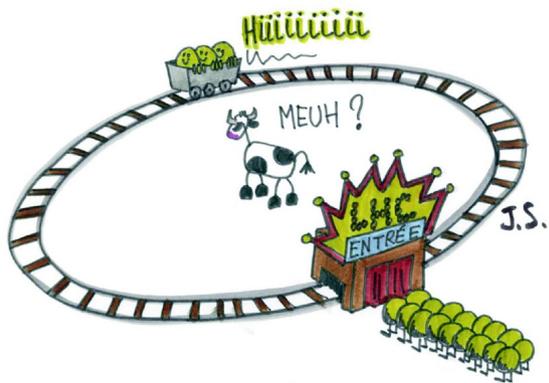


L'Informatique: La Grille

- Flot de données par année:
15 Po (15 millions de Go)
 - 1000 fois tous les livres de la terre !
 - Besoin de capacité de stockage et calcul hors norme
 - Mise en place d'une grille de calcul mondiale



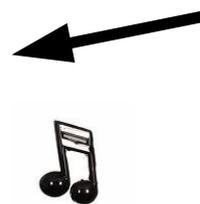
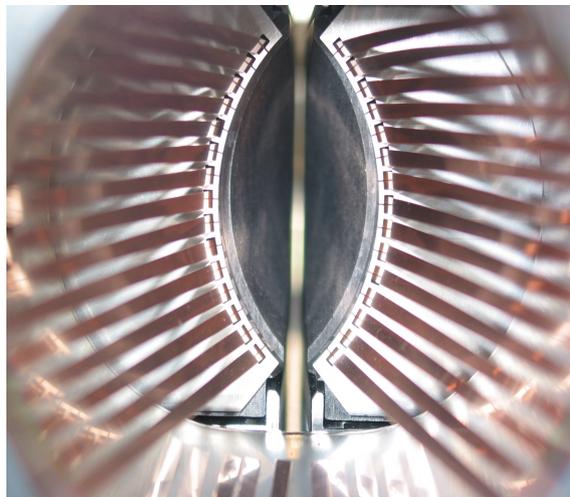
Grille interdisciplinaire:
biologie, astrophysique, etc...



Le Démarrage

10 septembre 2008

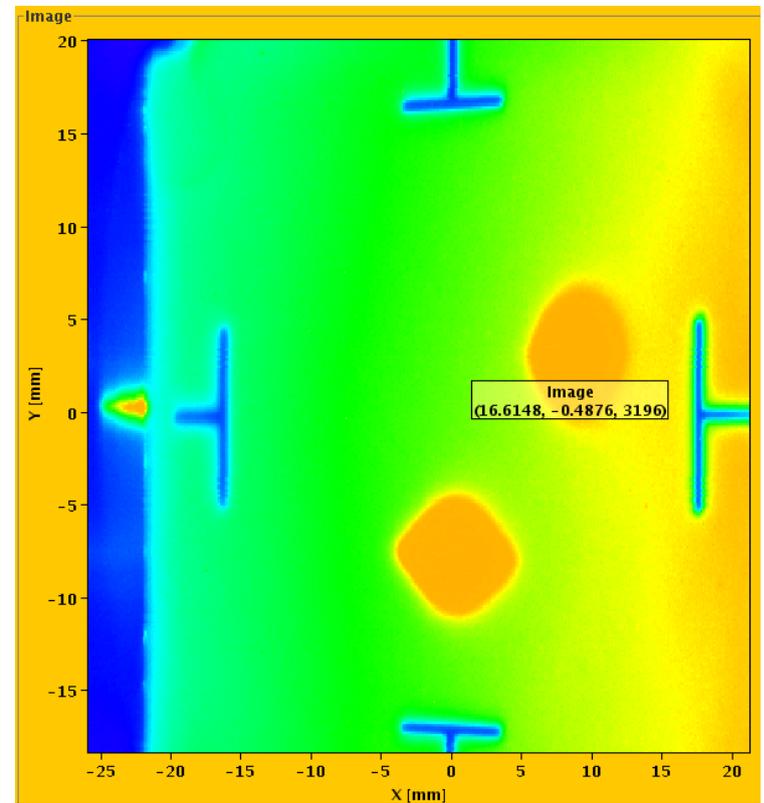
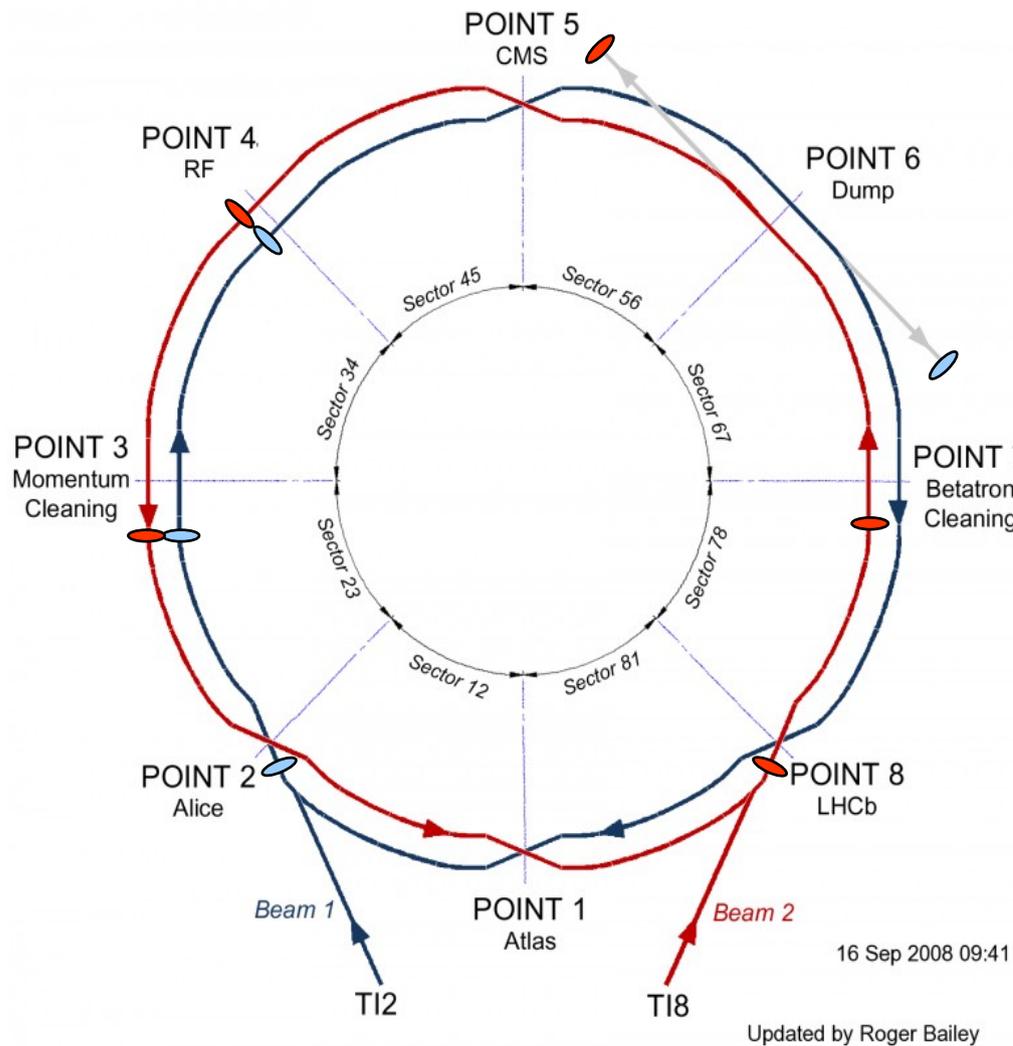
Première fois qu'un paquet de protons fait un tour complet de l'anneau !



- Énergie de 450 GeV
- D'abord un faisceau (sens aiguilles d'une montre) puis l'autre [pas de collisions !]
- **Avancée graduelle dans l'anneau:** collimateurs (sortes de rideaux en carbone) en amont des expériences:
 - Fermés lors de la première approche
 - Ouverts lorsque le faisceau est sous contrôle

L'Image d'une Révolution Complète

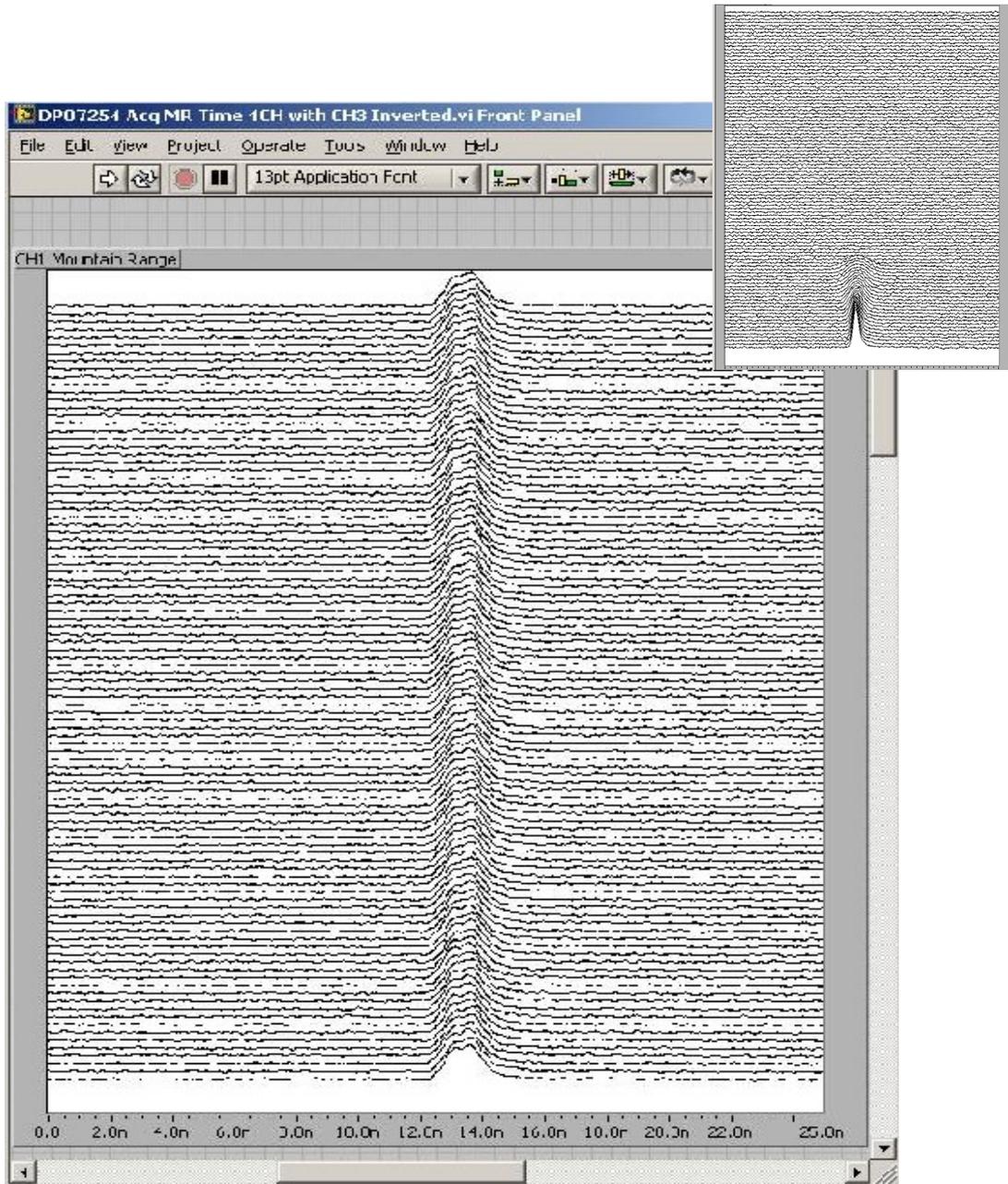
10 septembre 2008



Visualisation du faisceau 1 juste avant et juste après le premier tour

La Capture du Faisceau

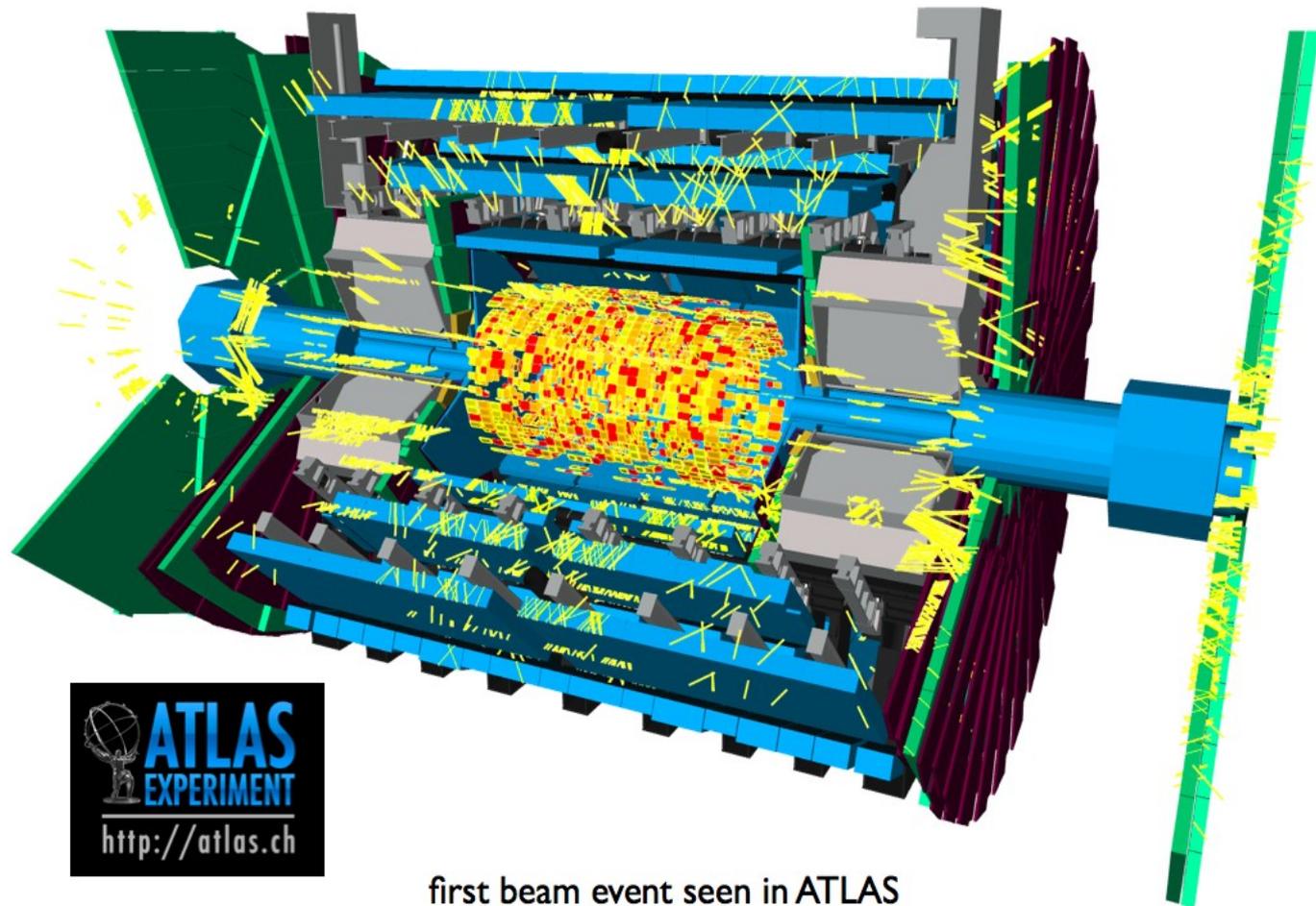
11 septembre 2008



- **10 septembre:**
 - Paquet de protons non « capturés » par cavités radiofréquence: les protons s'étaient dans le tube jusqu'à disparaître
- **11 septembre:**
 - Capture du paquet: reste stable tour après tour

Ce que les Expériences ont vu

Un grand nombre de particules créées quand le faisceau passe à travers un collimateur:

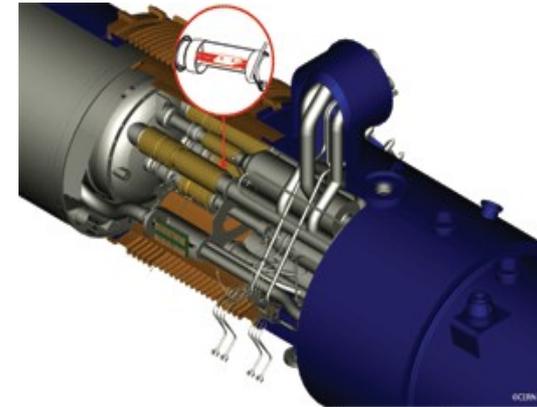


first beam event seen in ATLAS

Pourquoi le LHC s'est-il arrêté ?

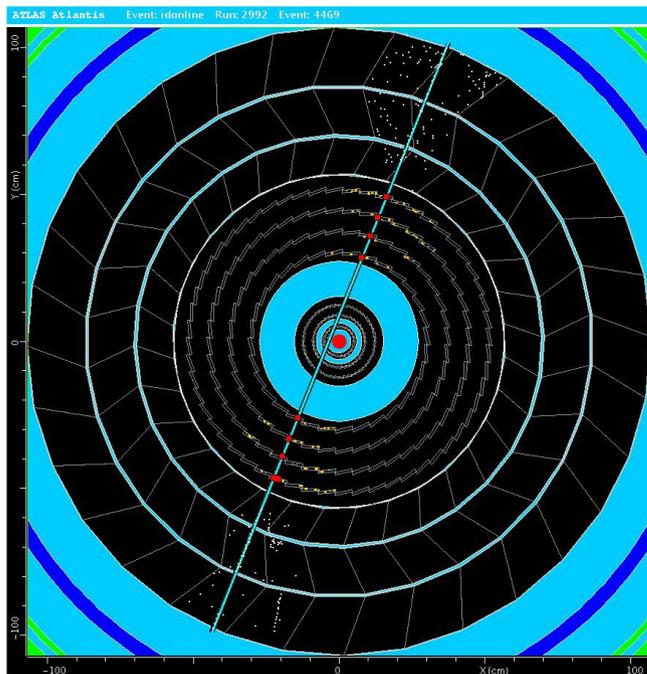
19 septembre 2008

- **LHC = un prototype complexe !**
 - Problème électrique dans une connexion inter-aimant lors d'un test à haute-énergie d'un secteur
 - Arc électrique a perforé l'enveloppe de l'aimant:
 - fuite d'hélium: décompression de l'hélium liquide en gaz
 - onde de choc a endommagé les aimants alentours
 - Réparations prendront quelques mois
 - Ajout de nouveaux appareils de mesure pour que cet incident ne se reproduise pas



Et en Attendant, que Faisons ?

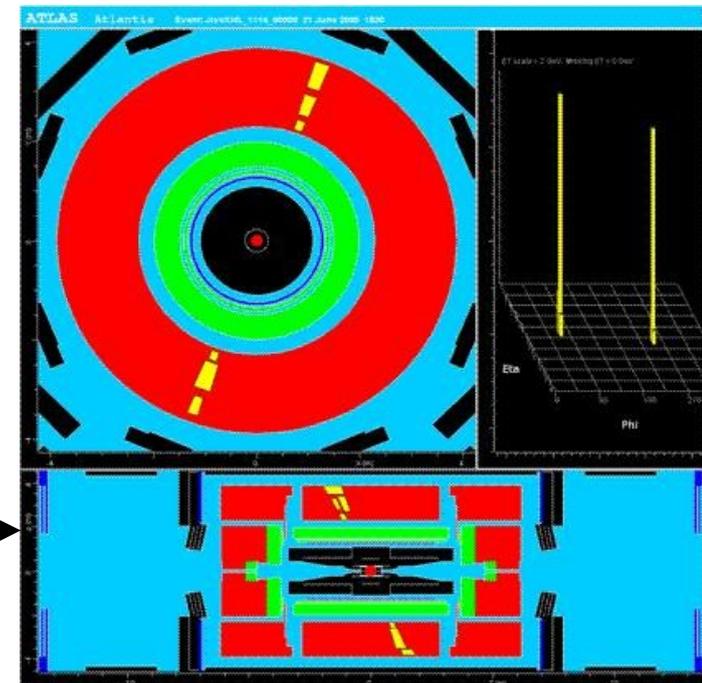
- **La même chose que ces derniers mois**
 - Préparation et compréhension de nos détecteurs (oui ! Il y a encore du travail...)
 - Utilisation des milliers de rayons cosmiques qui traversent nos détecteurs chaque jour



Détection d'un muon
issu d'un rayon
cosmique dans ATLAS:

← détecteurs à trace

calorimètre hadronique →



Conclusion

- Chaque nouvel accélérateur a toujours amené son lot de découvertes (et de prix Nobel)...
- Le LHC n'est pas seulement un **accélérateur de sciences** pour la physique fondamentale:
 - Utilise les toutes dernières technologies maîtrisées par l'homme (supraconductivité, superfluidité,) à une échelle industrielle
 - Retombées technologiques immenses: solutions en imagerie médicale, cryogénie, télécommunication, informatique, génie civile,...
 - Et avant tout: une belle aventure humaine !

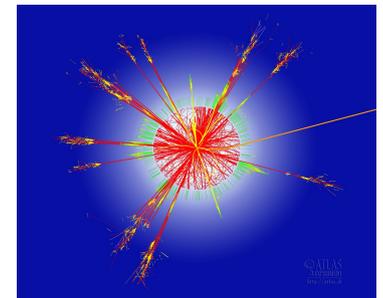
La Vraie Raison de l'Arrêt du LHC



Appendix

La Création de Trous Noirs au LHC (1/2)

- **Création d'un trou noir: est-ce possible ?**
 - Dans l'univers: objets de masse >> celle du soleil
 - LHC: collisions de deux moustiques en vol: la relativité générale ne permet pas de créer un trou noir dans ce cas (force gravitationnelle trop faible)
 - Théories au delà du Modèle Standard: **dimensions supplémentaires**
 - => gravitation devient forte entre deux particules
 - => création d'un **trou noir microscopique** possible
 - Relativité générale: ce trou noir « s'évapore » (Hawking)
 - Mécanique quantique: se désintègre en particules stables
 - Des événements intéressants à étudier au LHC ! 



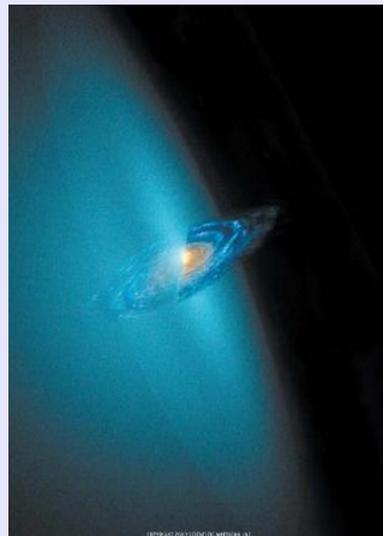
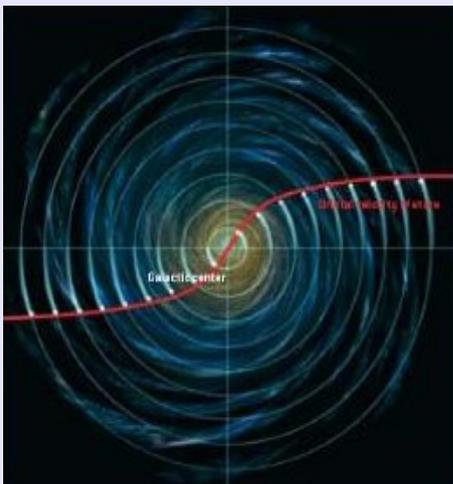
La Création de Trous Noirs au LHC (2/2)

- **Collisions de protons à 14 TeV sont communes dans les rayons cosmiques:**
 - Collision frontale de 14 TeV (10^{13} eV) correspond à des rayons cosmiques de 10^{17} eV
 - On a détecté à la surface de la terre des rayons cosmiques de plus de 10^{20} eV !
 - Depuis l'existence de la Terre: **l'équivalent de 100 000 expériences LHC se sont produites**
 - Si des trous noirs ont été créés dans ces collisions, il n'ont eu **aucun effet visible** !

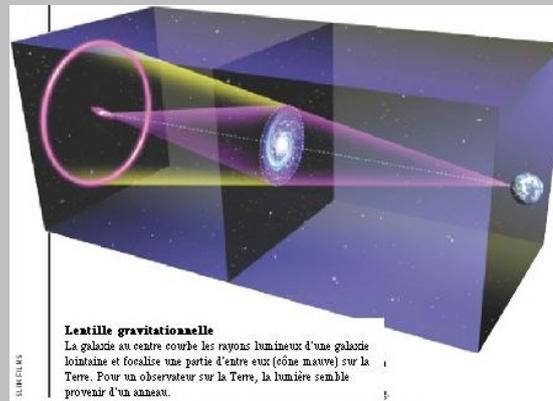


Matière Noire

- **Matière noire = invisible**
 - mais détectable grâce à ses **effets gravitationnels**:
 - dispersion amas galaxies, rotation des galaxies, lentilles gravitationnelles, ...
 - **composée de matière « exotique »** (WIMP: Particule Massive Interagissant Faiblement) qui reste à découvrir !



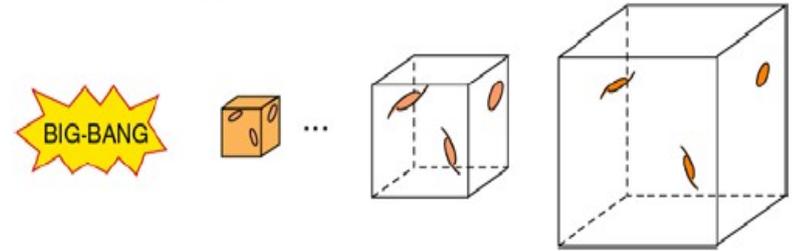
Vitesse de rotation des galaxies



Lentilles gravitationnelles

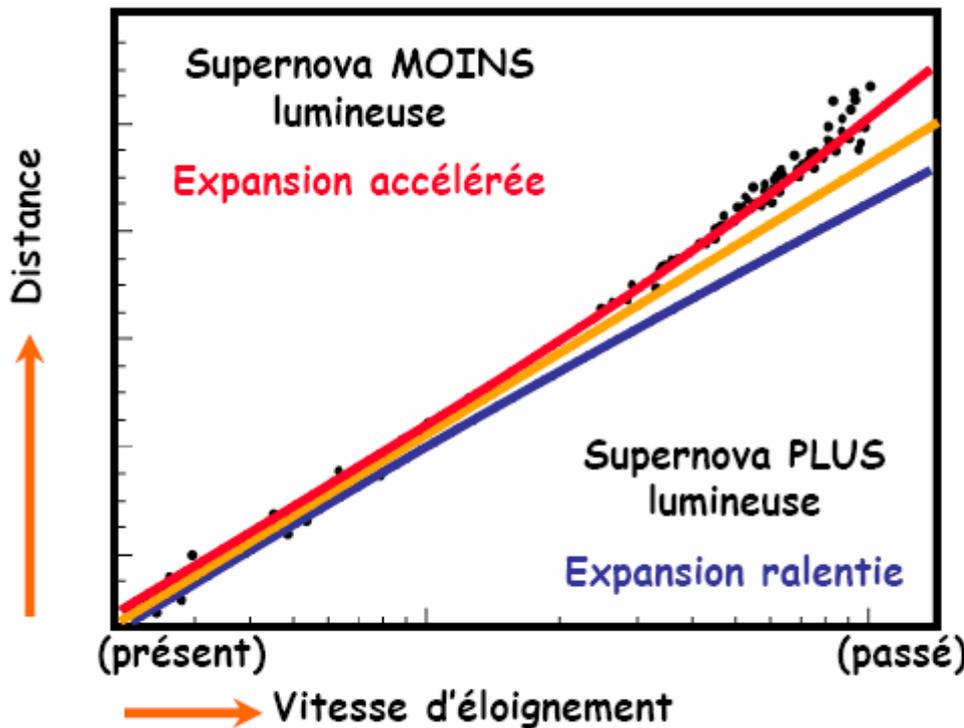


Énergie Noire



- **Expansion de l'univers:**

- Devrait ralentir à cause de l'effet de la gravité entre objets massifs
- Observations montrent que **l'expansion de l'univers accélère !**
- **Nouvelle forme d'énergie** de « pression négative »... compose 70% de notre univers !



Taux d'expansion constant



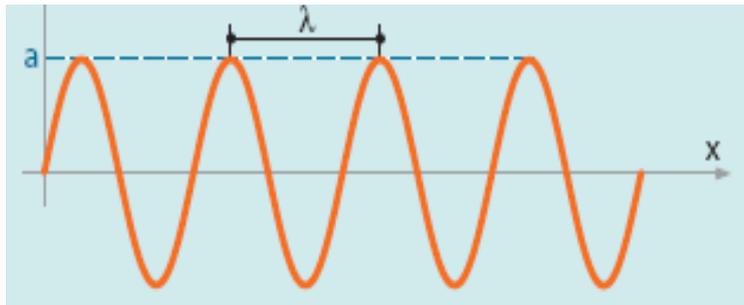
L'Intérêt d'Accélérer les Particules

Accélérer particules = leur donner de l'énergie

Effet "Microscope"



Particule = onde



Petite longueur d'onde λ =
grande énergie

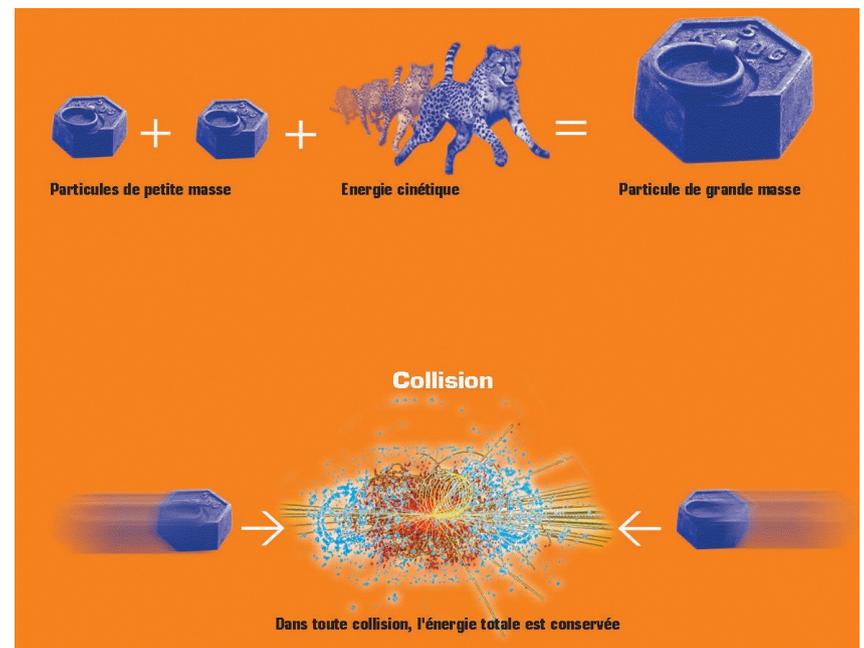
Collision de deux objets de
grande énergie permet de
sonder la sous-structure de
l'objet



Effet "Nouvelles Particules"

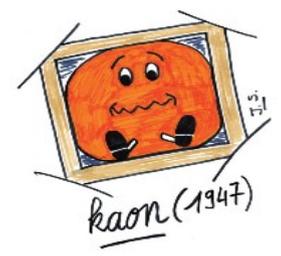
$$E=mc^2$$

Collision d'objets de petite masse
lancés à grande vitesse permet
de créer des objets plus massifs

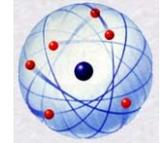




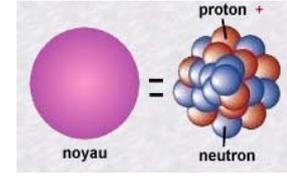
(Très Bref) Historique



- **Structure de l'atome, début du 20e siècle:**

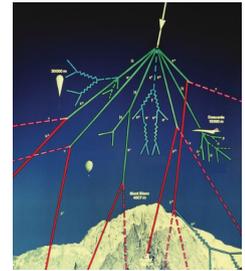


- Électrons (1897) gravitent autour du noyau (1911) composé de protons (1914) et de neutrons (1932)



- **Observations rayons cosmiques (1930/1950):**

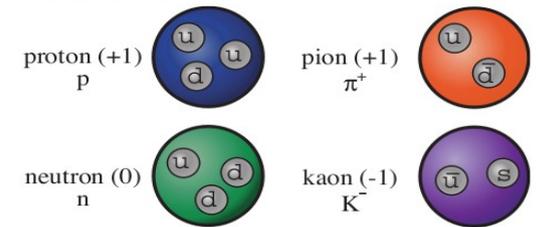
- Découverte de nouvelles particules: positron (1932), muon (1936), kaon (1947), pion (1947), ...



- **Physique sur accélérateurs: après-guerre**

- Explosion du nombre de particules ! Classification...

- 1964: quarks = composants élémentaires de toutes ces particules (3 quarks: u, d, s)



- 60-aujourd'hui: élaboration puis confirmation du Modèle Standard. Seule particule manquante: Boson de Higgs

Puissances de 10

Puissances de dix	Nombre	Symbole
10^{-12}	0.000000000001	p (pico)
10^{-9}	0.000000001	n (nano)
10^{-6}	0.000001	μ (micro)
10^{-3}	0.001	m (milli)
10^{-2}	0.01	
10^{-1}	0.1	
10^0	1	
10^1	10	
10^2	100	
10^3	1000	k (kilo)
10^6	1 000 000	M (mega)
10^9	1 000 000 000	G (giga)
10^{12}	1 000 000 000 000	T (tera)
10^{15}	1 000 000 000 000 000	P (peta)