

Une petite promenade dans le monde fascinant de la physique des particules

Guy Wormser
Laboratoire Irène Joliot-Curie
IN2P3/CNRS et Université Paris-Saclay

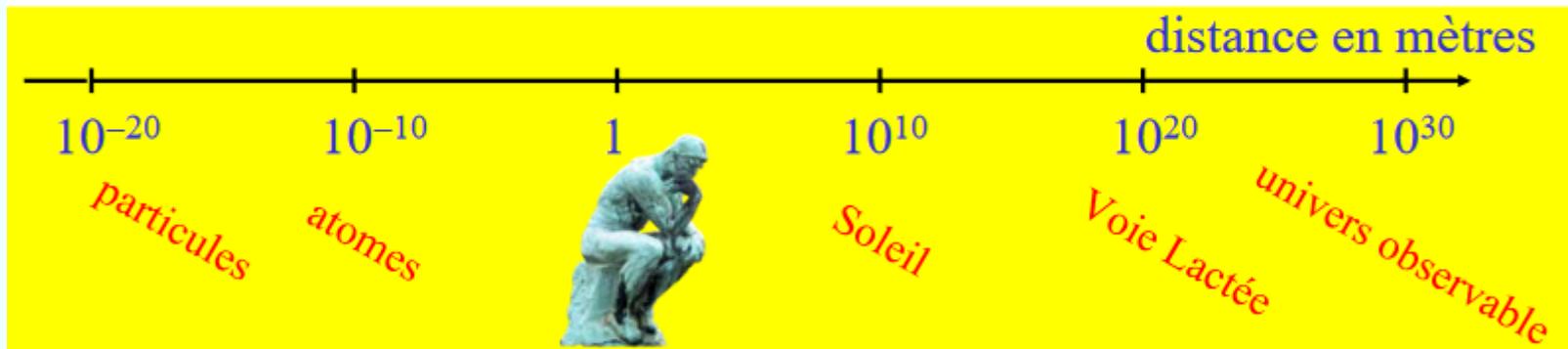
Voyage aux deux infinis

Deux mondes extrêmes dont l'Homme explore les frontières avec des instruments de plus en plus puissants

astres visibles les plus lointains à 10^{25} m

matière microscopique explorée jusqu'à 10^{-18} m

Notation: $10^3 = 10 \times 10 \times 10$ $10^{-3} = 1 : (10 \times 10 \times 10)$



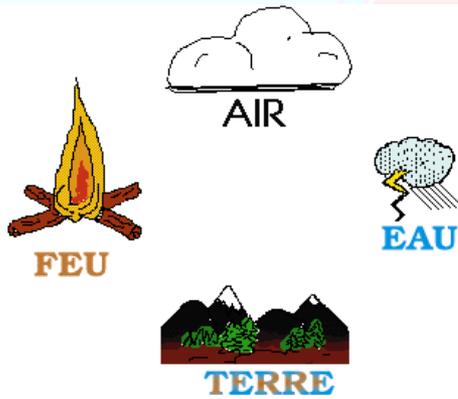
Cet exposé: (1) l'exploration du cosmos
(2) l'infiniment petit
(3) liens puissants entre ces 2 domaines
⇒ compréhension de l'Univers dans son ensemble

3

Plan de l'exposé

- Composants élémentaires et leurs interactions
- Les mystères subsistant
- Le processus de recherche et les outils
- Le LHC
- La découverte du boson de Higgs
- Conclusion

La compréhension de l'infiniment petit



Dans les temps anciens!

1850

1911

1968

Composants élémentaires de la matière

Il s'agit des particules associées aux interactions fondamentales pour former leur propagation.

	1 ^{re} famille	2 ^e famille	3 ^e famille
LEPTONS	e neutrino	μ neutrino	τ neutrino
QUARKS	u neutrino	c neutrino	t neutrino
	d neutrino	s neutrino	b neutrino

Les interactions fondamentales

- Gravitation**
Distances astronomiques.
 γ , W , Z
- Interaction faible**
Distances subatomiques.
 Z^0 , W^+ , W^-
- Interaction électromagnétique**
Distances atomiques.
Photon
- Interaction forte**
Distances nucléaires.
Gluon

1^{re} famille
L'interaction de la gravitation agit sur toutes les masses.
L'interaction électromagnétique agit sur toutes les charges.
L'interaction faible agit sur les leptons et les quarks.

2^e famille
L'interaction de la gravitation agit sur toutes les masses.
L'interaction électromagnétique agit sur toutes les charges.
L'interaction faible agit sur les leptons et les quarks.

3^e famille
L'interaction de la gravitation agit sur toutes les masses.
L'interaction électromagnétique agit sur toutes les charges.
L'interaction faible agit sur les leptons et les quarks.

LEPTONS
L'interaction de la gravitation agit sur toutes les masses.
L'interaction électromagnétique agit sur toutes les charges.
L'interaction faible agit sur les leptons et les quarks.

QUARKS
L'interaction de la gravitation agit sur toutes les masses.
L'interaction électromagnétique agit sur toutes les charges.
L'interaction forte agit sur les quarks.
L'interaction faible agit sur les leptons et les quarks.

APPLIQUÉES
L'interaction de la gravitation agit sur toutes les masses.
L'interaction électromagnétique agit sur toutes les charges.
L'interaction forte agit sur les quarks.
L'interaction faible agit sur les leptons et les quarks.

Composants élémentaires de la matière

Les interactions fondamentales

Il existe des **PARTICULES ASSOCIÉES** aux interactions fondamentales permettant leur propagation.



	1 ^{re} famille	2 ^e famille	3 ^e famille
LEPTONS Particules insensibles à l'interaction forte.	e électron	μ muon	τ tau
	ν_e neutrino e	ν_μ neutrino muon	ν_τ neutrino tau
QUARKS S'assemblent en triplets ou en paires quasi-affinités pour former les nombreuses particules subatomiques.	u haut / up	c charm / charme	t top
	d bas / down	s strange / étrange	b beau / beauty / bottom

Gravitation Attraction universelle, planètes, galaxies. GRAVITON ?
Interaction faible Désintégrations radioactives. Z⁰, W⁺, W⁻
Interaction électromagnétique Électricité, magnétisme, cohésion de l'atome et du cristal, chimie. PHOTON
Interaction forte Cohésion des protons et des neutrons. GLUON

Les 4 forces fondamentales sont indépendantes du fonctionnement du soleil (et des étoiles) :

- formation de l'étoile causée par la gravitation ;
- réaction de fusion nucléaire avec l'interaction faible et forte ;
- production de lumière : interaction électromagnétique.

Les 4 particules de la première famille sont présentes dans le soleil qui émette sur la terre un flux intense de photons et de neutrinos.

À chaque particule correspond une antiparticule aux propriétés quasi-identiques. Le charge électrique d'une antiparticule est l'opposé de la particule correspondante.

<http://arxiv.org/abs/hep-ph/0303055>



Quarks et leptons

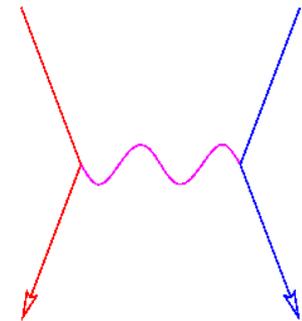
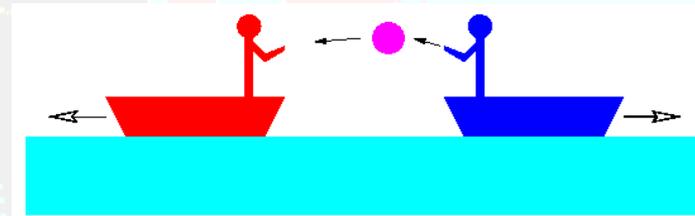
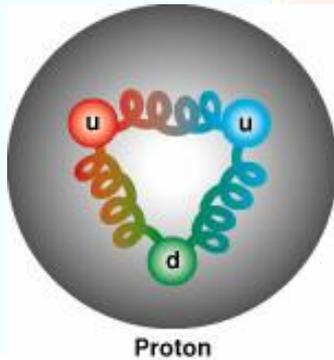
- Quarks : les « Legos » élémentaires des particules

A chaque assemblage de trois quarks ou d'une paire « quark-antiquark » correspond une particule existant dans la nature (stable ou instable)

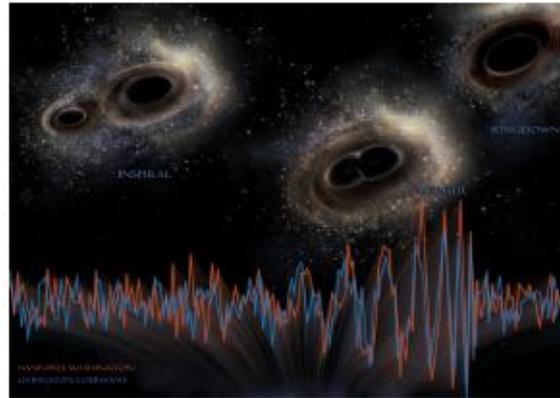
- Leptons : particules élémentaires (ie sans structure et ponctuelles) qui ne sont pas sensibles à l'interaction forte

Le ciment de l'Univers

- Les quatre forces fondamentales
 - Gravité, Interaction forte, électromagnétisme, interaction faible
- Les messagers de ces forces
 - *Graviton*, gluon, photon, W/Z^0
- L'unification de ces forces



Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger In LIGO Hanford and Livingston detectors



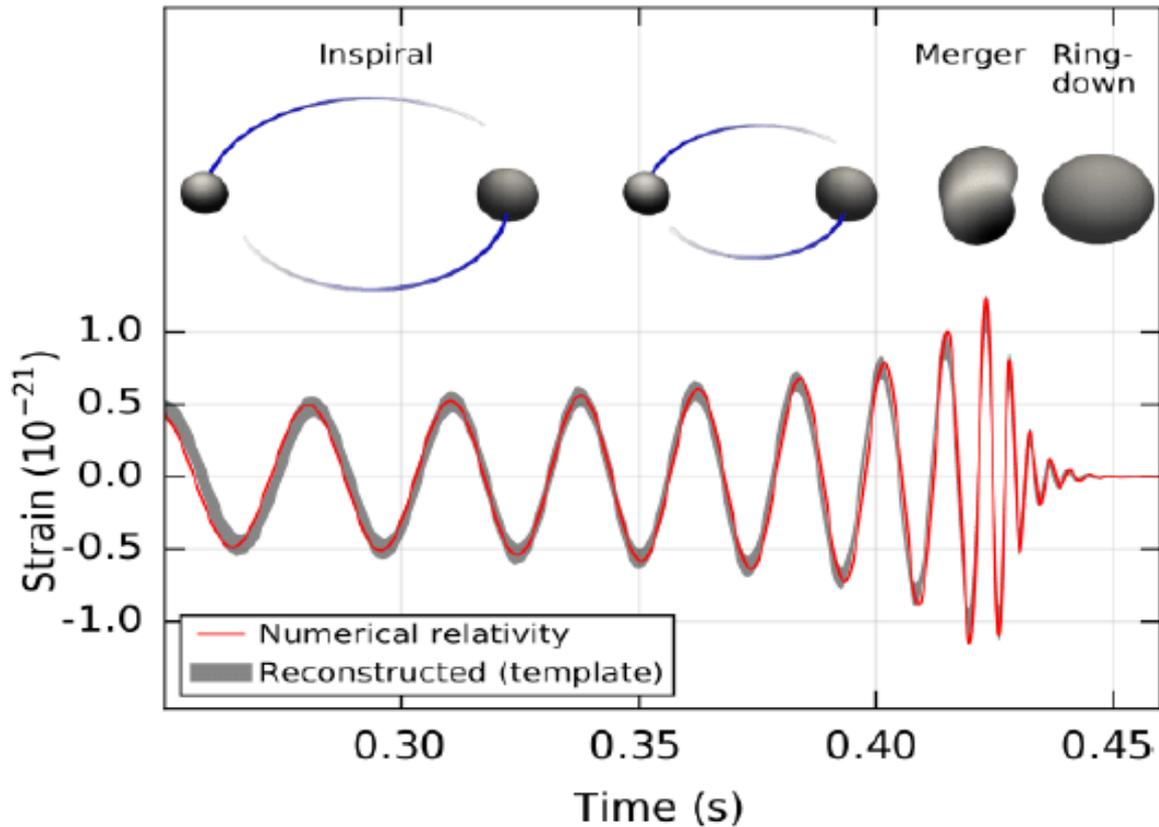
PRL 116, 061102 (2016)

link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.116.061102

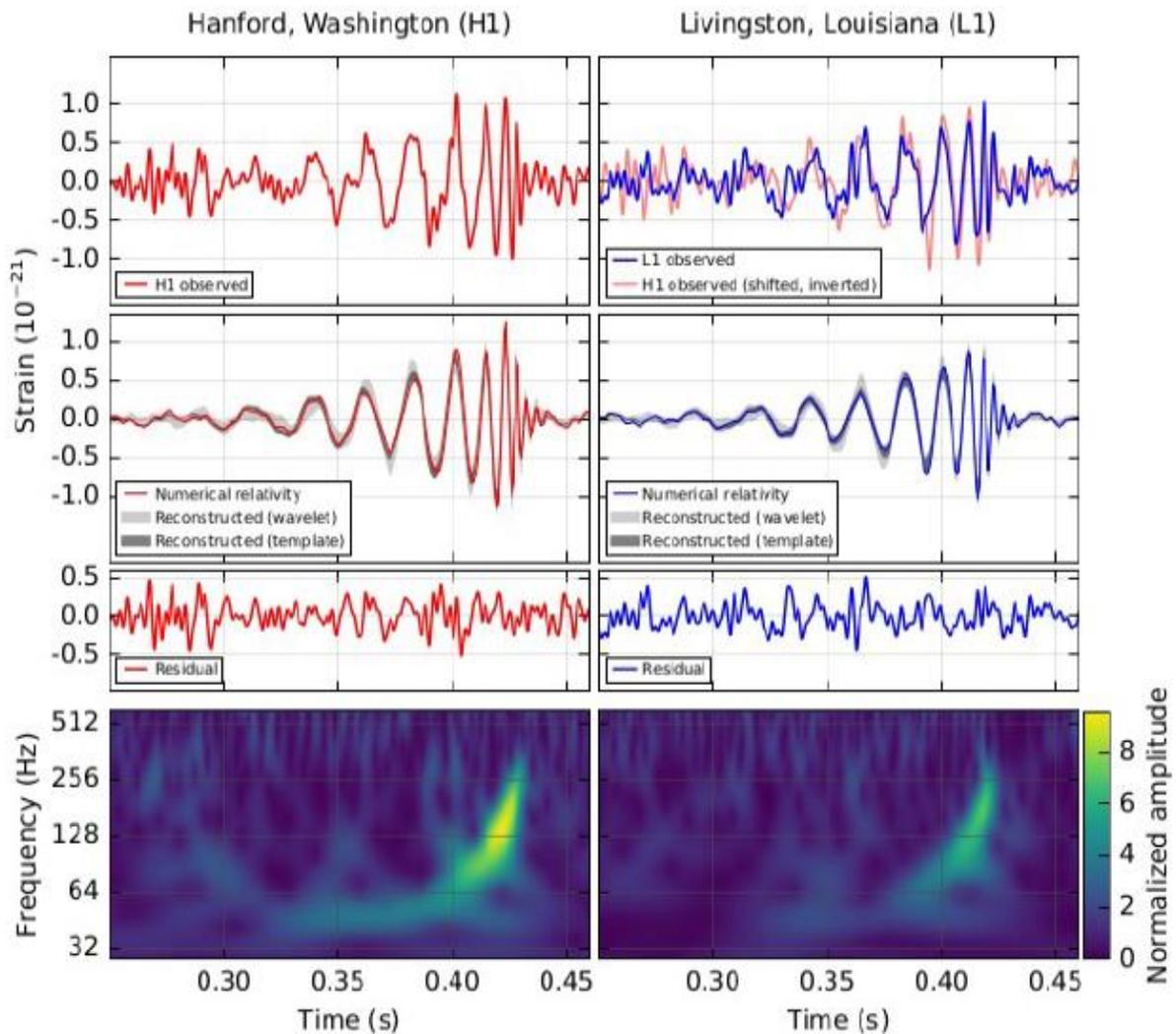
The LIGO Scientific Collaboration & the Virgo Collaboration

What has been observed?

The final plunge of a 29+36 Msun binary black hole system forming a fast rotating (Kerr) black hole of 62 Msun.



Signal reconstruction

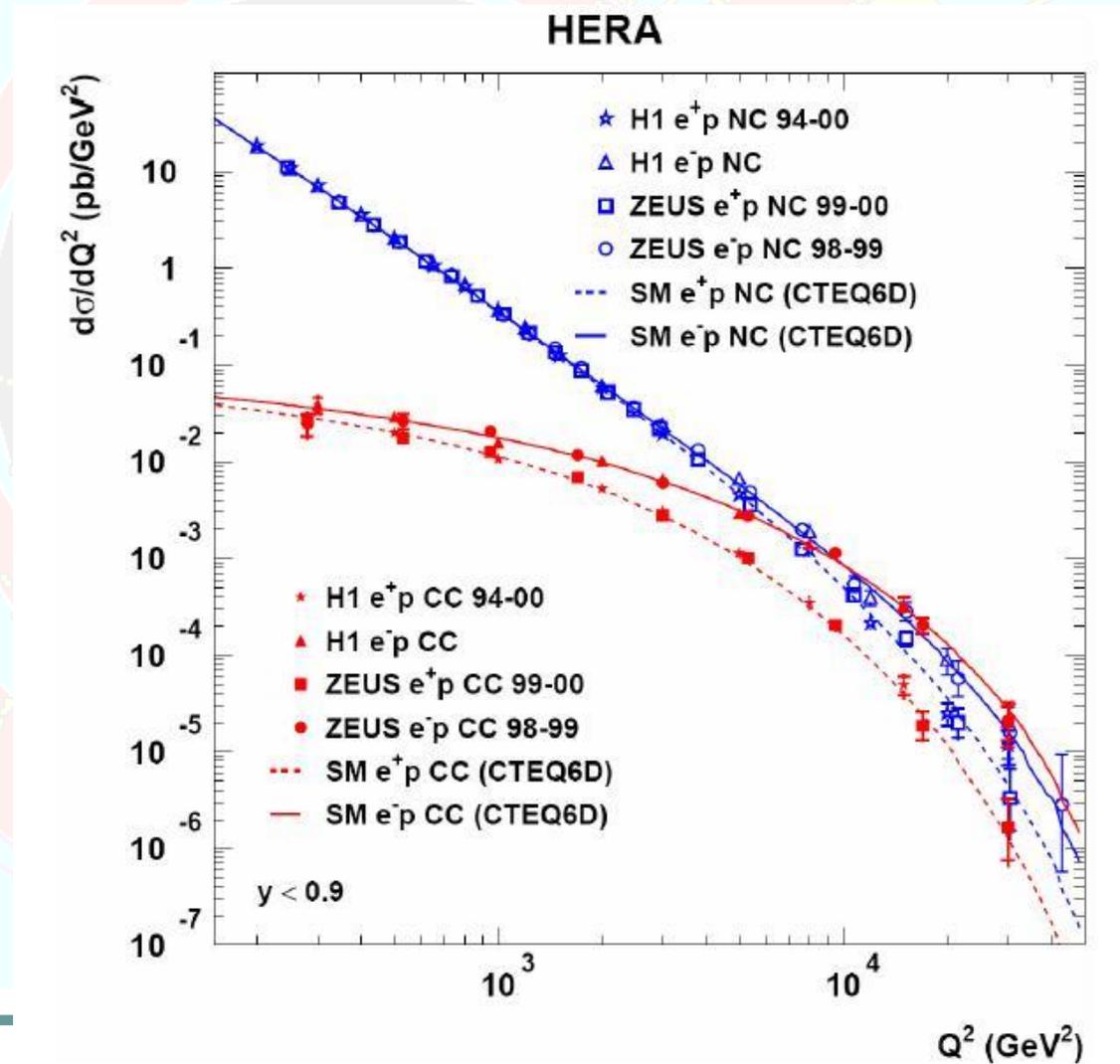


20

L'unification de la force faible et électromagnétique

electron-proton->electron
(electromagnetique)

electron-proton->neutrino
(force faible)



L'antimatière

- A chaque particule, correspond une antiparticule avec presque les mêmes propriétés, comme une image dans un miroir. La charge électrique d'une antiparticule est l'opposée de celle de la particule correspondante
- Quand une particule rencontre son antiparticule, elles s'annihilent et libèrent de l'énergie. Cette énergie peut donner naissance à de nouvelles particules.
- Quand l'univers a été créé, il contenait autant de particules que d'antiparticules, mais maintenant ce n'est plus du tout le cas : que des particules autour de nous!!
- Les antiparticules sont faciles à créer dans les rayons cosmiques ou les accélérateurs

Comment marche le soleil !

- Les 4 particules de la première famille et les 4 interactions sont nécessaires pour le fonctionnement du soleil !
- La formation et l'allumage de l'étoile sont causées par la gravité

La réaction de fusion nucléaire dans le soleil avec les interactions fortes et faibles

- Production de lumière par interaction électromagnétique

Les réactions de fusion nucléaire dans le soleil

Transformation de l'hydrogène en hélium dans le Soleil

Étape n° 1



Étape n° 2



Étape n° 3



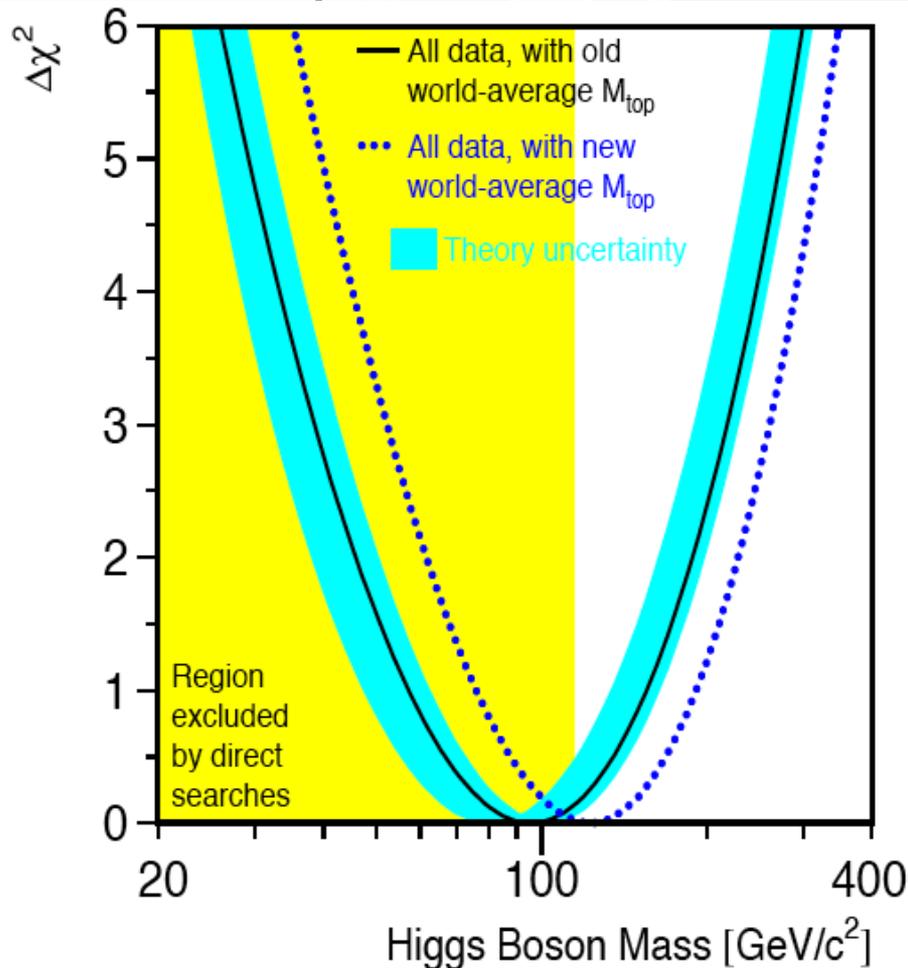
Le Modèle Standard

Superbe construction théorique , la plus complexe jamais réalisée

- Basée sur deux théories de jauge $SU(2) \times U(1)$ pour la force électrofaible et $SU(3)$ pour la force forte
- Ce modèle a un pouvoir prédictif incroyable. Testé au millième près dans certaines prédictions clé
- Mais ne peut pas être la solution complète:
 - Ne contient pas la gravité, beaucoup de paramètres ad-hoc
 - Ne répond pas à certaines observations
- Quelle est la bonne théorie qui englobe le modèle Standard ???

Les succès du modèle standard

- A prédit toutes les propriétés du boson de Higgs y compris sa masse



[LEPEWWG '04]

Assume Standard Model, global fit

$$\Rightarrow M_H = 117^{+67}_{-45} \text{ GeV}$$

Les problèmes expérimentaux du modèle standard

- Le rapport matière/antimatière dans l'Univers
- Pas de particule de matière noire dans le modèle Standard
- Les masses des neutrinos et leurs mélanges
- L'énergie noire

Le boson de Higgs

- La pierre de voûte du Modèle Standard
 - Directement lié à la brisure de la symétrie électrofaible
 - Donne une masse aux particules élémentaires: il ralentit les particules en interagissant avec elles. Ceci crée un lien entre Higgs et gravité
 - Particule scalaire associée à un champ scalaire qui remplit tout l'espace de façon isotrope et homogène

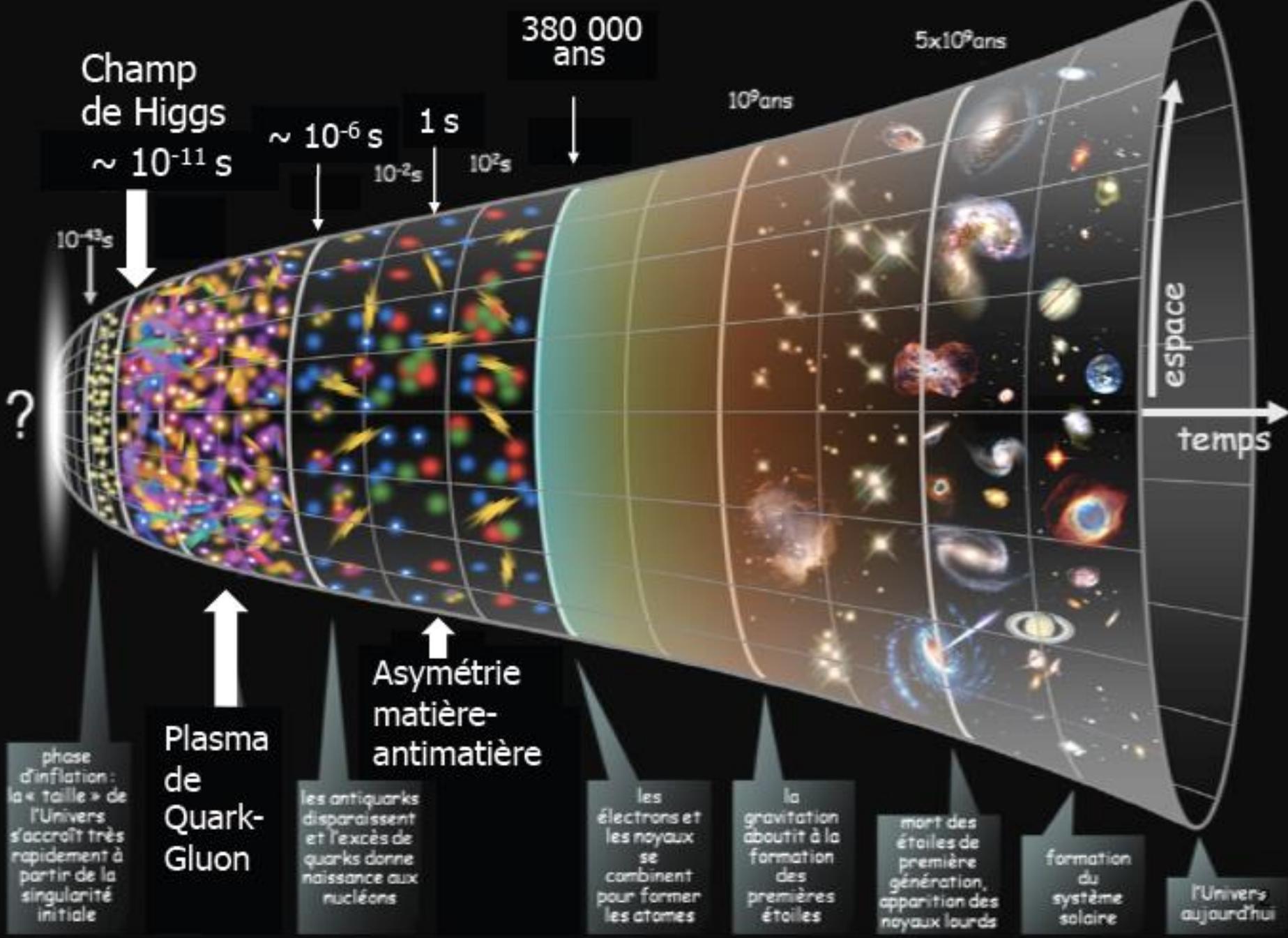
Quelques mots sur la masse

- La masse est une notion complexe parce que le même nombre se rapporte à trois entités a priori déconnectées :
 - « Charge » de l'interaction gravitationnelle
 - Résistance au mouvement (masse inertielle)
 - Couplage au boson de Higgs
- Cela signifie qu'il existe des liens étroits entre les 3
 - La théorie de la relativité générale d'Einstein établit le lien entre les 2 premiers (principe d'équivalence)
 - Le lien entre le boson de Higgs et la gravité est inconnu

Comprendre notre Univers



- Reconstruire l'histoire de notre Univers
 - Le Big Bang
 - Le bruit de fond cosmologique (Satellite Planck)
- La matière noire
- Les nouveaux messagers !
 - photons de haute énergie, protons, neutrinos, **ondes gravitationnelles**

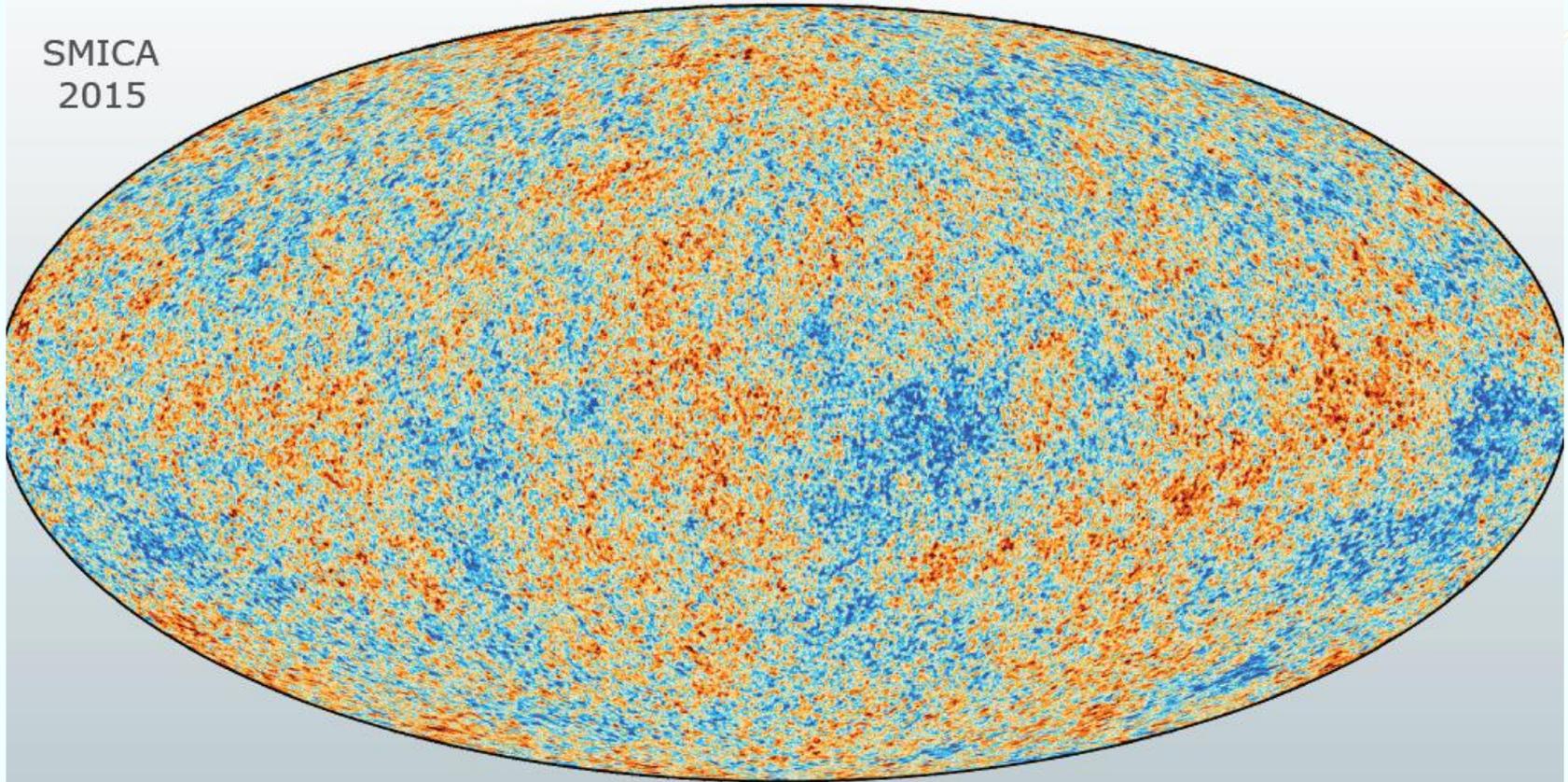




Planck 2015 T anisotropies map



SMICA
2015



-300

μK

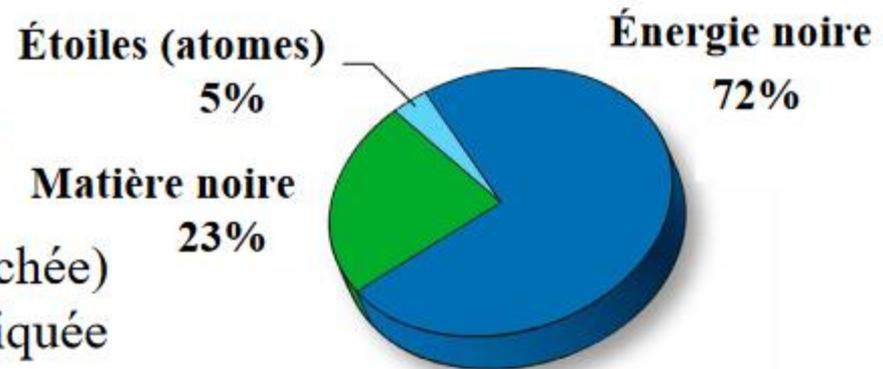
300

La masse et l'énergie cachées

- masse des objets visibles seulement 5% de l'énergie dans l'Univers
- origine possible: particules lourdes (halos)
- prédites par une extension du MS (supersymétrie)
- dans ce cas elles seront découvertes au LHC



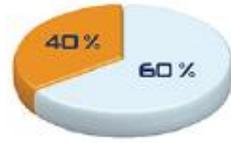
- observation: accélération de l'expansion de l'Univers
- équivalent à une énergie (cachée)
- origine pour l'instant inexpliquée un grand défi!



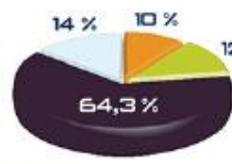
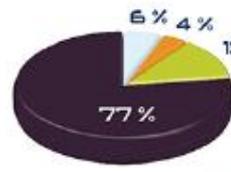
Inflation
(pendant le Big-Bang) ▶



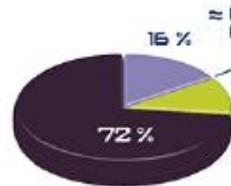
3 minutes après le Big-Bang ▶



400 000 ans après le Big-Bang ▶



2 milliards d'années après le Big-Bang ▶



≈ 0,1 % DE RAYONNEMENT
0,1 % DE NEUTRINOS



Aujourd'hui ▶



Dans 10 milliards d'années ▶



■ Inflation
 ■ Rayonnement
 ■ Neutrinos
 ■ Matière ordinaire
 ■ Matière sombre
 ■ Energie sombre

La démarche expérimentale et les outils

● Comment étudier l'infiniment petit

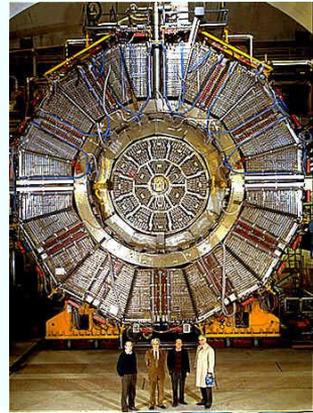
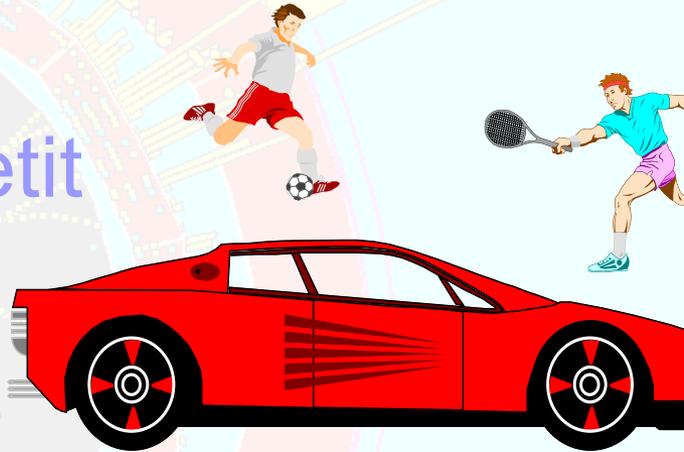
● La méthode de la sonde:

● petite distance → grande énergie

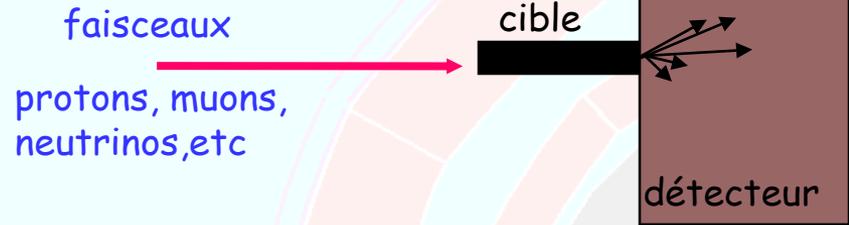
● Annihilation et création dans un accélérateur

● La nature va produire tout ce qui est possible !

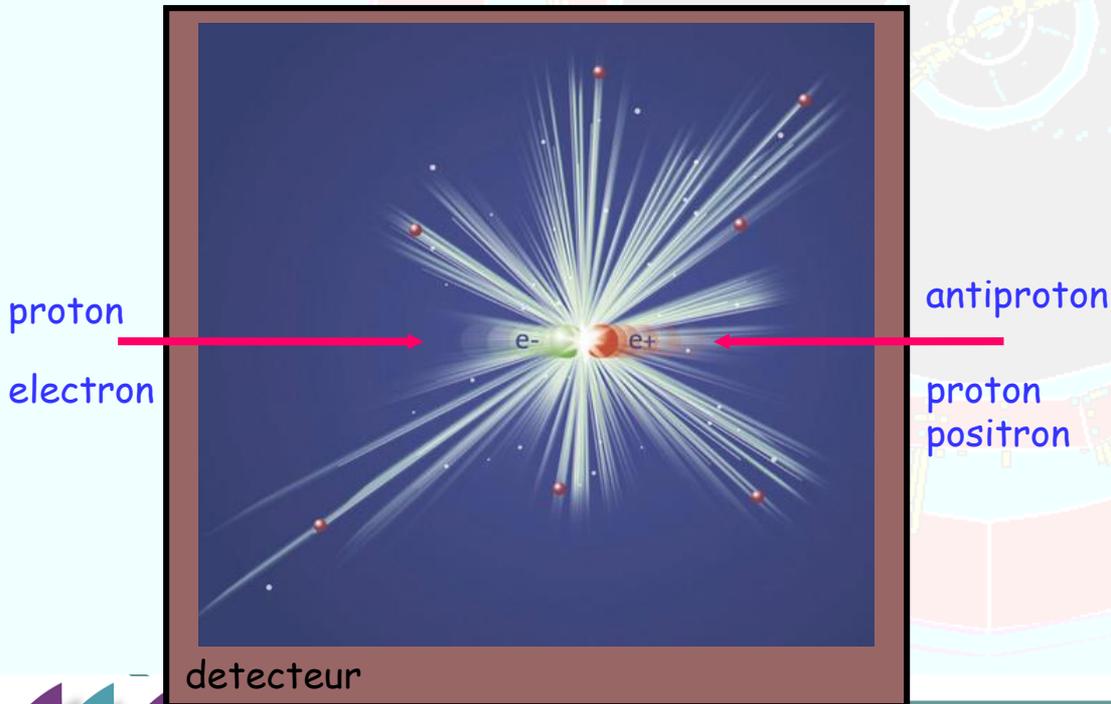
● Etudier les fragments pour remonter aux interactions fondamentales qui ont eu lieu

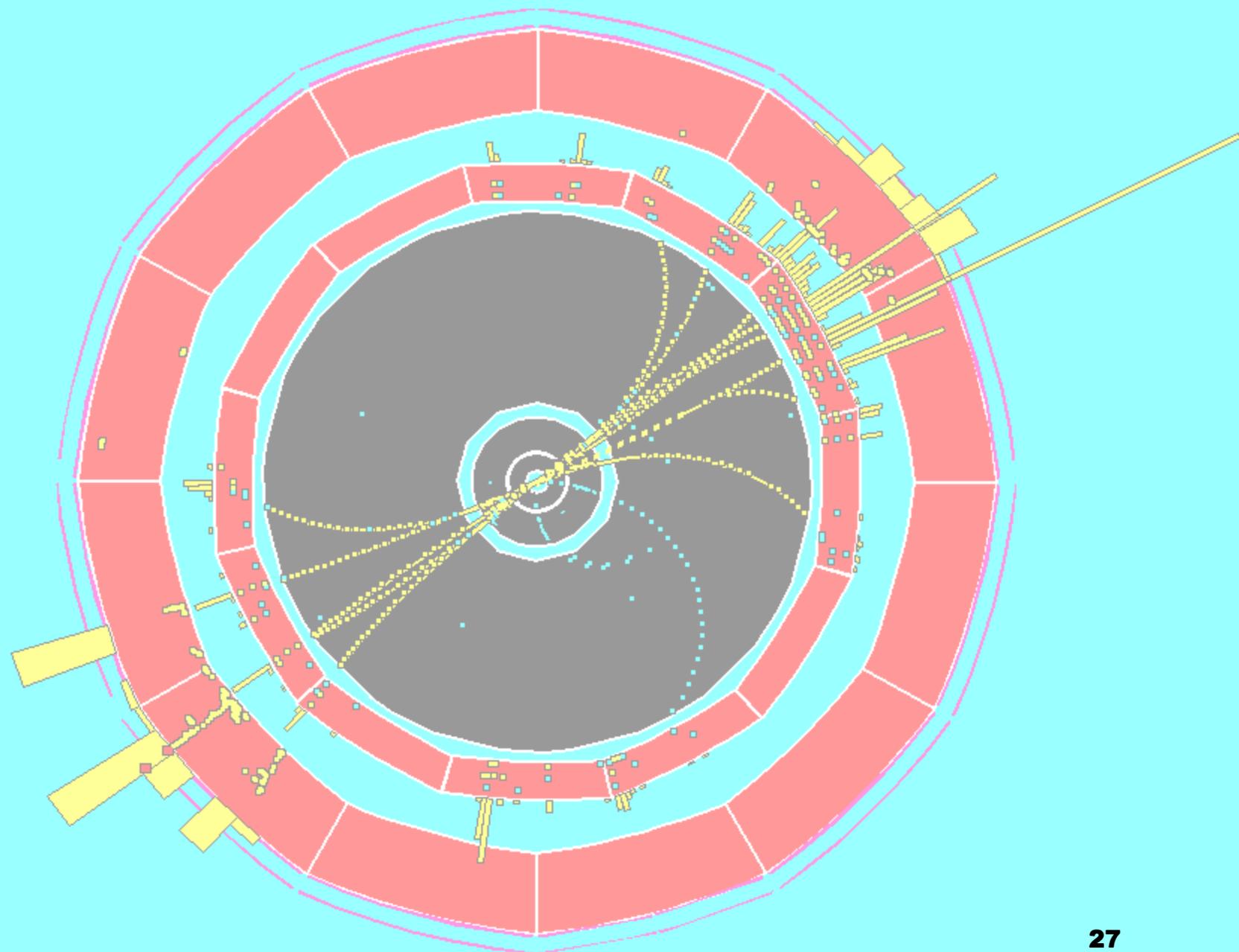


① Cible fixe



② Faisceaux en collision





Le cycle scientifique: peut durer 10 à 20 ans

Une question fondamentale

- Une prédiction théorique
- Un projet de détecteur
- Un projet d'accélérateur
- Simulation et R&D
- La construction de l'expérience
- L'analyse des données
- La publication des résultats

Tous les talents sont nécessaires

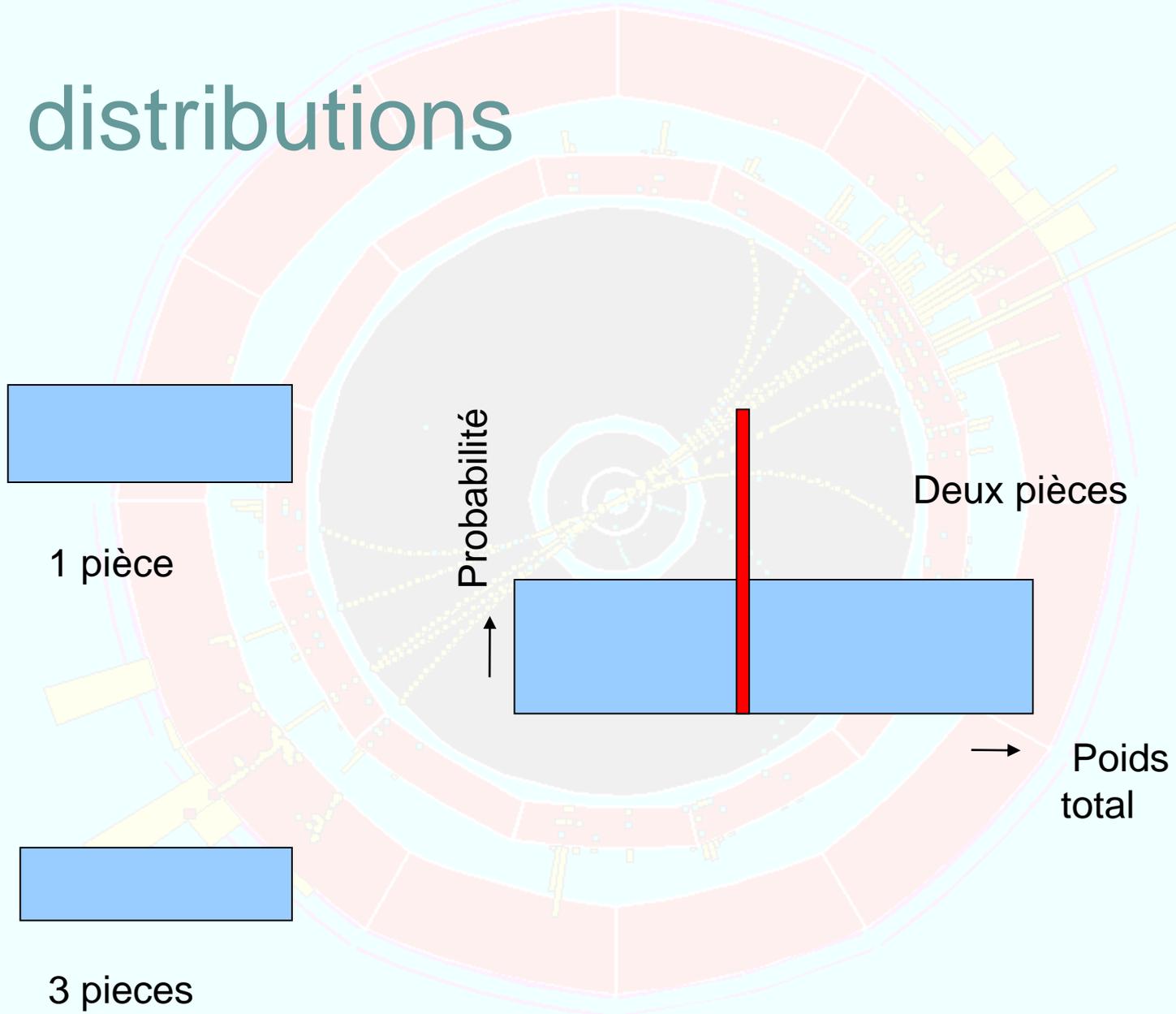
- Ingénierie
- Electronique
- Informatique
- Théorie
- Management et planning
- Administration
- Sciences des matériaux
-

Comment savoir ce qui a été produit

Prenez 10 barres de chocolat de 50 grammes

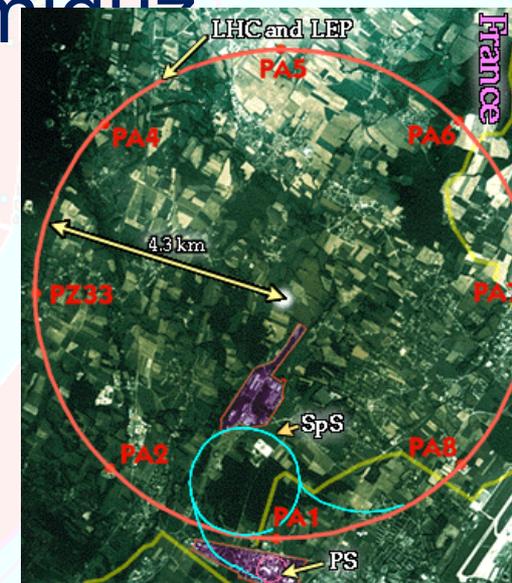
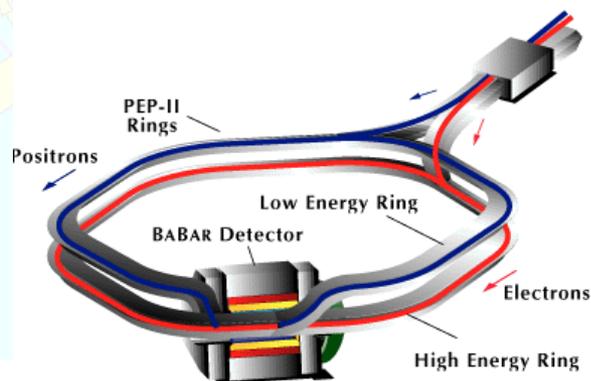
- Coupez les chacune en deux comme vous voulez
- Prendre chaque bout de chocolat et pesez-le. Observez la distribution des poids obtenus
- Prenez maintenant les pièces deux par deux et répétez l'exercice. Vous observez maintenant une plus grande fréquence pour le poids de la barre initiale
- Vous avez pu ainsi déduire qu'il existait un objet « barre de chocolat » de poids total 50 grammes qui se casse en deux

Les distributions



Les accélérateurs

- Les machines nécessaires pour l'exploration du monde subatomique
 - Linéaires
 - circulaires
 - Ou même cosmiques !



Le LHC , une extraordinaire aventure

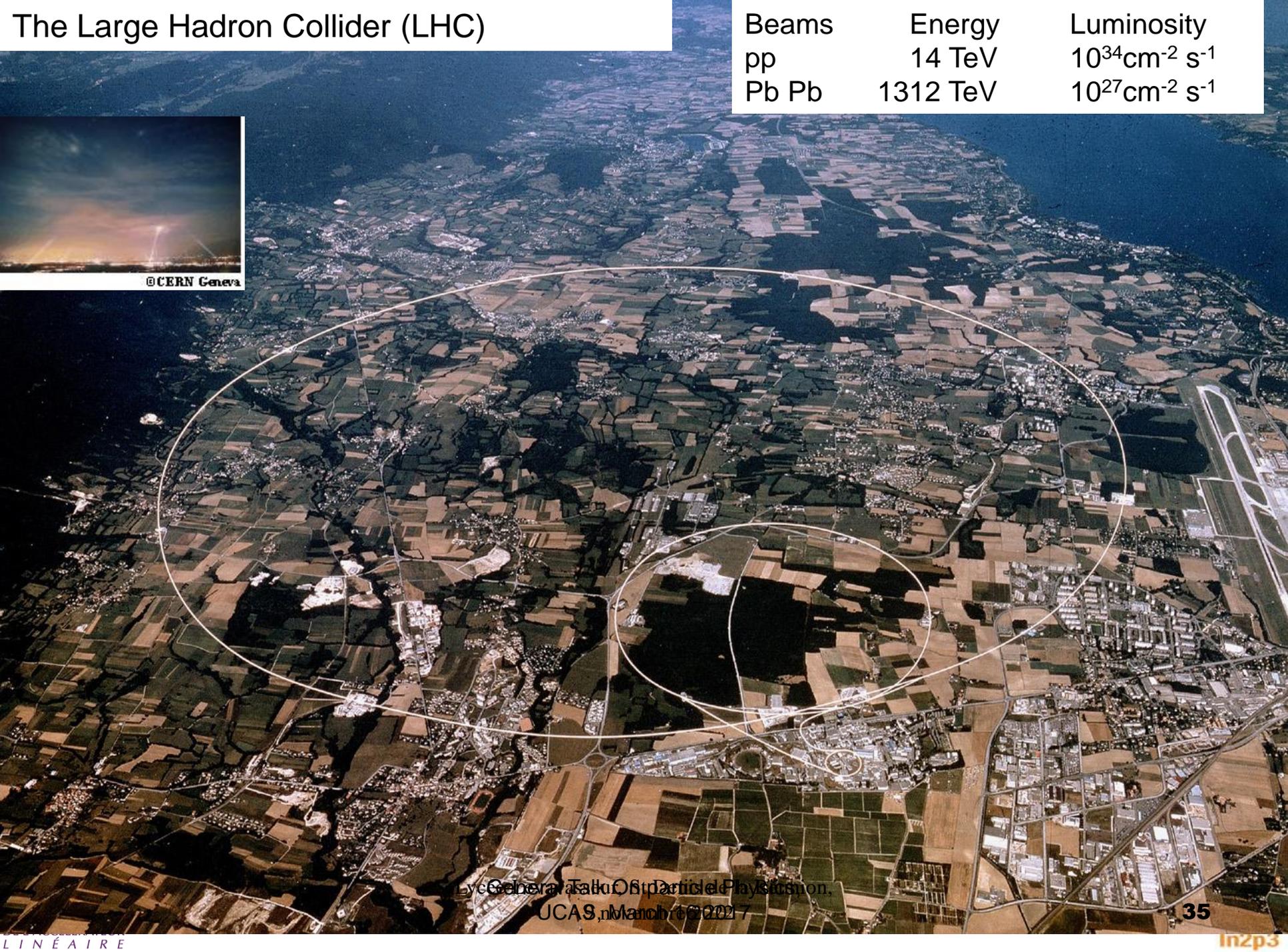
- Une **aventure scientifique** pour essayer de répondre aux questions les plus fondamentales sur les particules élémentaires et leurs interactions
- Une **aventure technologique** où des progrès spectaculaires ont été fait pour rendre tout cela possible
- Une **aventure humaine** concernant plus de 10000 chercheurs et ingénieurs du monde entier depuis plus de 30 ans et pour les 20 prochaines années

Le potentiel scientifique du LHC

- Découvrir le boson de Higgs (Fait en July 2012!!!)
- Etudier en detail toutes les propriétés du boson de Higgs
- Etudier l'”universalité des leptons”
- Découvrir la particule de matière noire
- Comprendre l'origine de l'asymetrie entre matière et antimatière
- Etudier les propriétés de la matière nucléaire chaude comme aux premiers instants de l'Univers

The Large Hadron Collider (LHC)

Beams	Energy	Luminosity
pp	14 TeV	$10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
Pb Pb	1312 TeV	$10^{27} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$



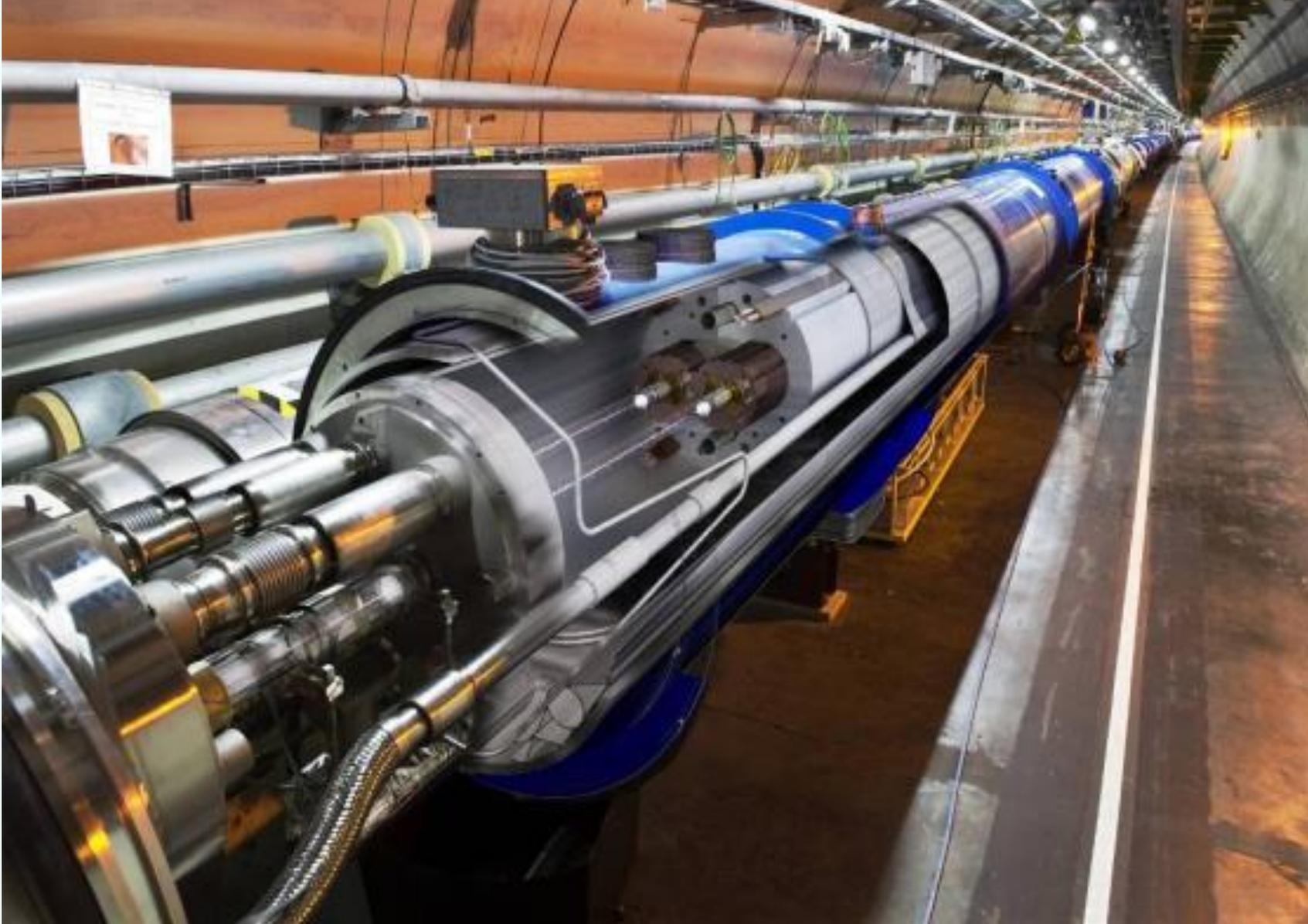
Lyce General Talk On Particle Physics,
UCAS, March 16 2007

Les dipôles du LHC

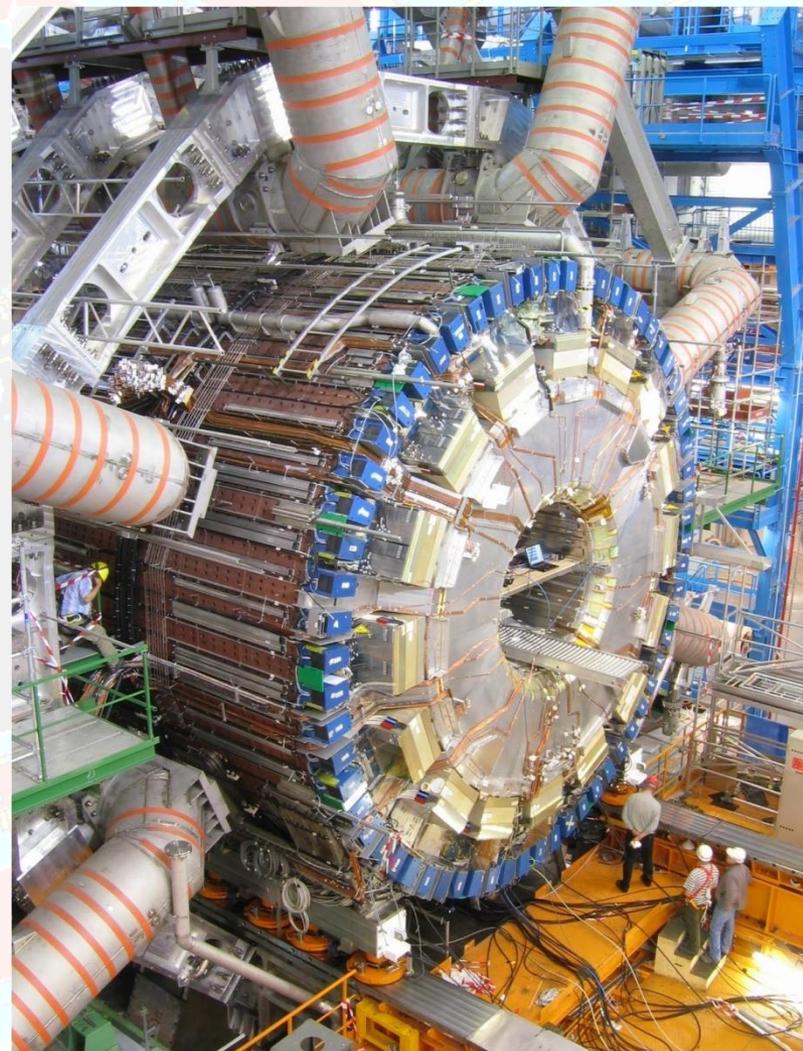


@CERN Geneva

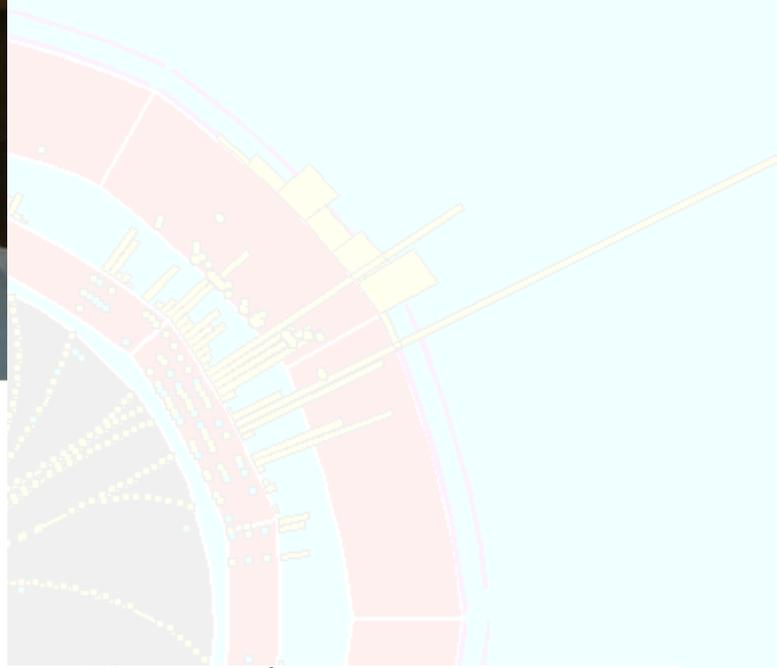
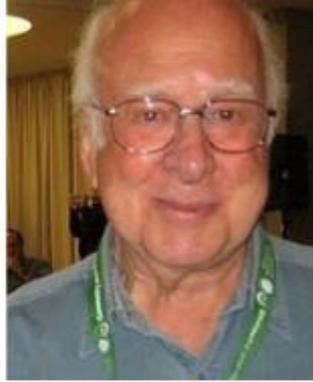
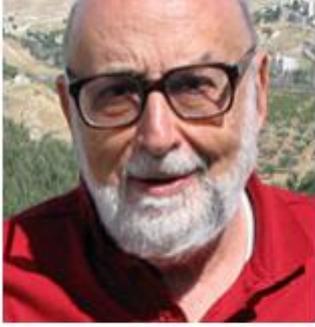




Le calorimètre électromagnétique d'ATLAS







BROKEN SYMMETRY AND THE MASS OF GAUGE VECTOR MESONS*

F. Englert and R. Brout

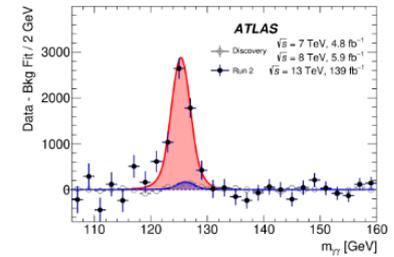
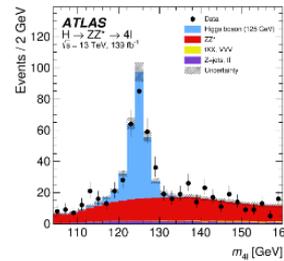
Faculté des Sciences, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgium

(Received 26 June 1964)



2013

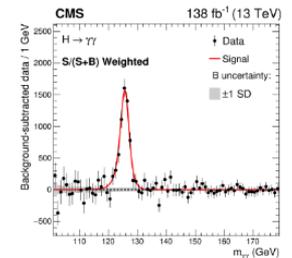
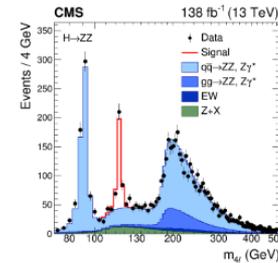
10 years later



30 times more Higgs bosons

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

[Nature 607 \(2022\) 60-68](#)

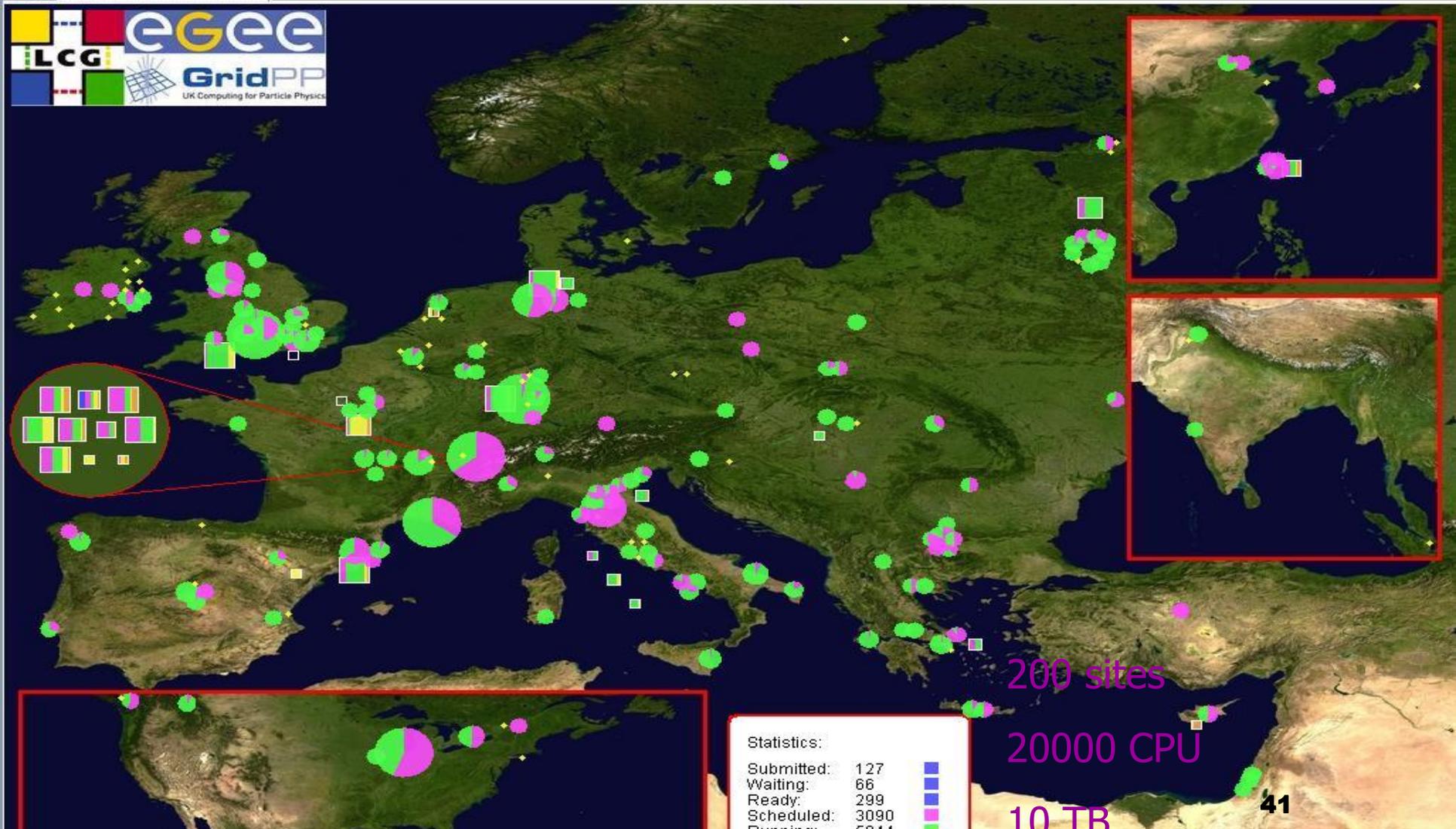


n 7 Nov 2022

P.Azzurri - Review of Higgs Boson Results

La grille de calcul distribuée travaillant dans le monde entier 24h/24h

Tasks LCG World Real Time Monitor



Conclusion

- La physique des particules est l'exploration de l'infiniment petit.
- C'est la clé pour la compréhension de notre Univers et de son évolution
- Une aventure fantaisique , à la pointe de la technologie dans beaucoup de domaines
- Ouverte à tous les types de talents!