

Accélérateurs et détecteurs

Centre de physique des particules de Marseille

INTERNATIONAL
MASTERCLASSES

hands on particle physics



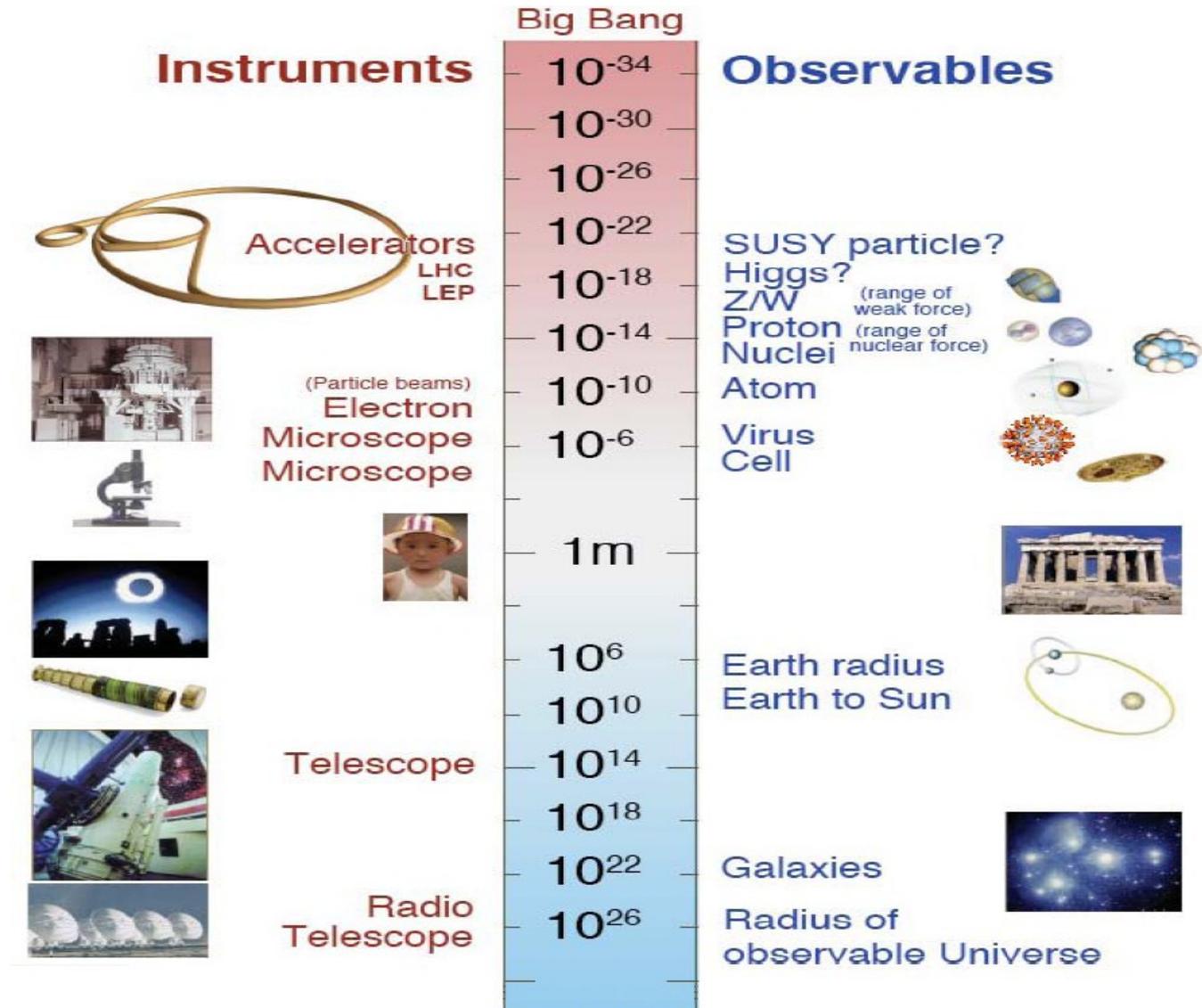
Pourquoi des accélérateurs de particules ?

- Pour voir des objets plus petits, il faut une énergie plus élevée :

- ▶ longueur d'onde associée $\lambda = h/p$

- Pour créer des particules plus lourdes

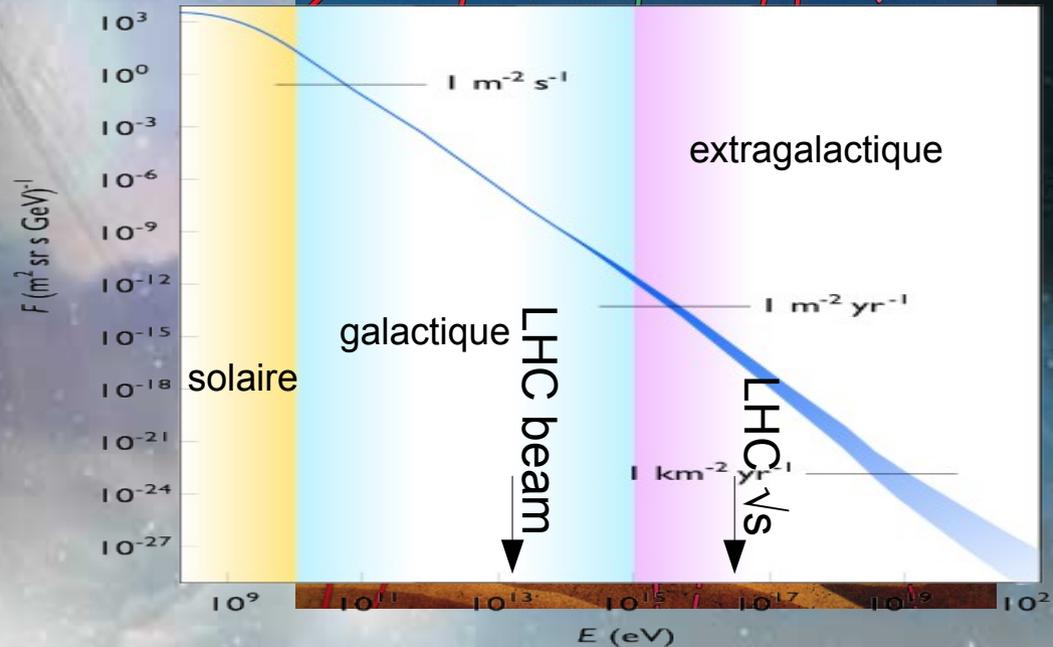
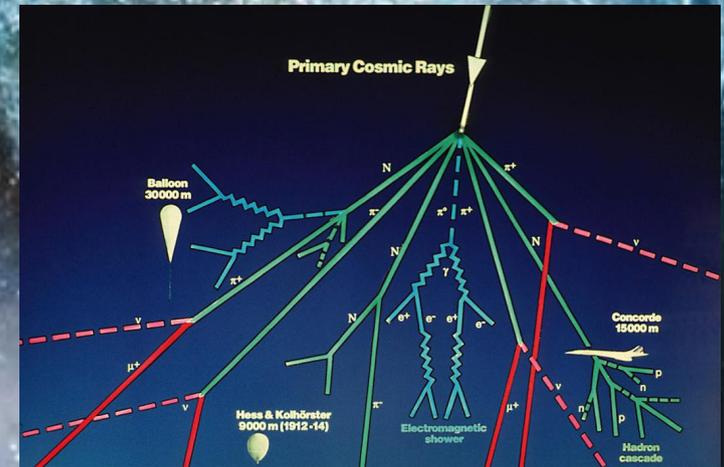
- ▶ $E = mc^2$



Sources de particules

L'Univers et les rayons cosmiques

Les accélérateurs de particules (protons, photons, électrons, muons, pions, kaons, etc)



Quelques accélérateurs récents

- Le LEP

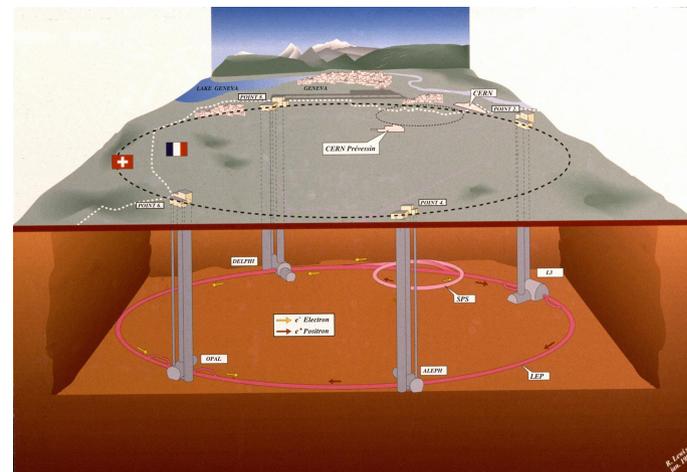
- ▶ Au CERN, Genève
- ▶ Collisions e^+e^-
- ▶ 1989-2000

- Le Tevatron

- ▶ Fermilab, Chicago
- ▶ Collisions proton-antiproton
- ▶ 1983-2011

- Le LHC

- ▶ Au CERN
- ▶ Collisions proton-proton
- ▶ Depuis 2009



Le LHC

(grand collisionneur de hadrons)



Le LHC : la machine à superlatifs

Longueur des câbles supraconducteurs : 130 km
assez pour 5 aller-retours Terre-soleil

1232 dipôles.

Vide presque parfait (10^{-13} atm) :
pression 10 fois plus faible
que celle sur la Lune

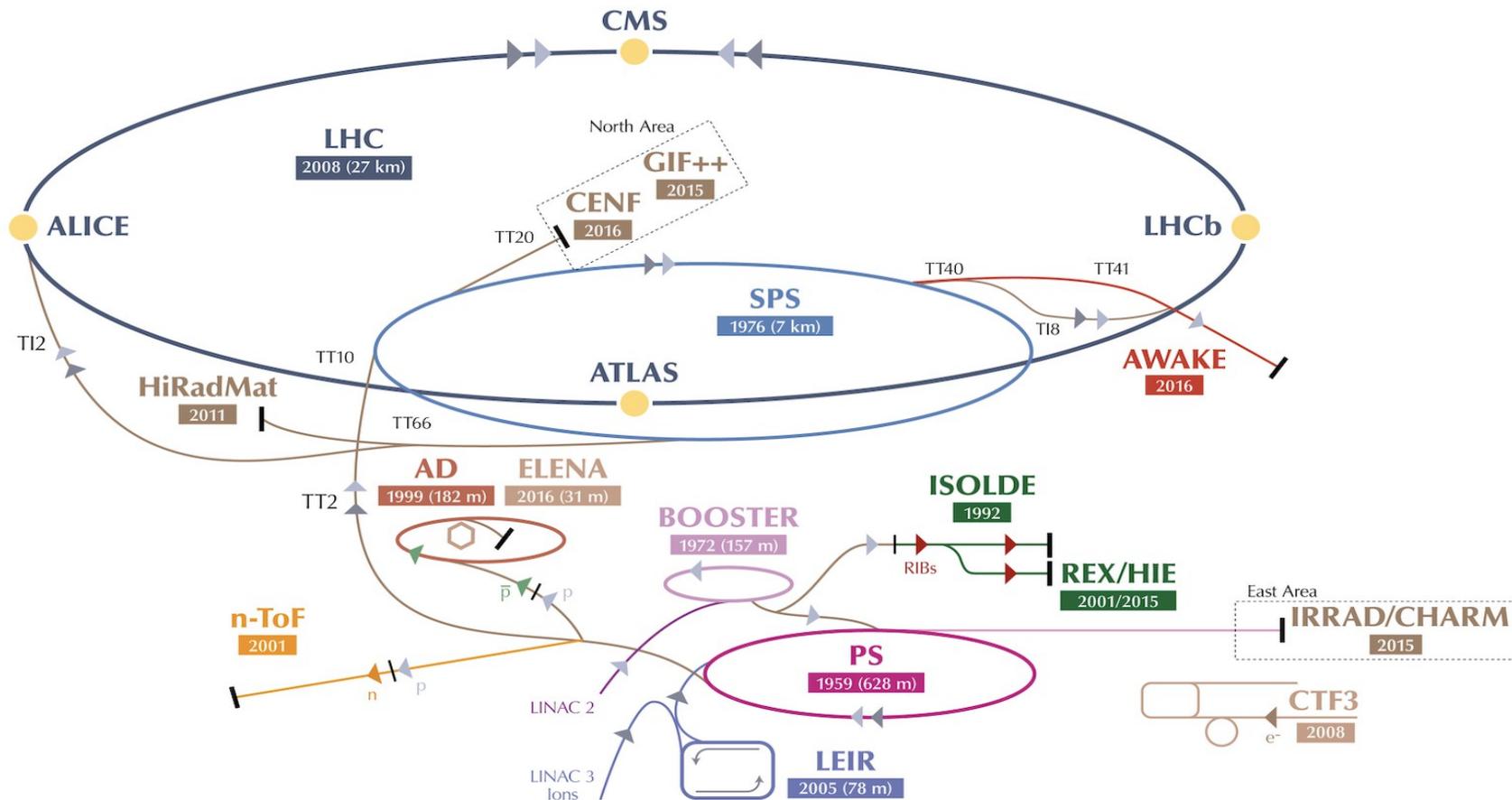
Consommation électrique :
Tous les foyers du canton de Genève

Le plus grand condélateur : 1,9 K (-271 °C),
le plus froid de la Terre (-273 K).

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

► Énergie du faisceau : TGV à 150 km/h.

Le CERN : les accélérateurs



▶ p (protons)
 ▶ ions
 ▶ RIBs (Radioactive Ion Beams)
 ▶ n (neutrons)
 ▶ \bar{p} (antiprotons)
 ▶ e^- (electrons)

LHC Large Hadron Collider
 SPS Super Proton Synchrotron
 PS Proton Synchrotron
 AD Antiproton Decelerator
 CTF3 Clic Test Facility

AWAKE Advanced WAKEfield Experiment
 ISOLDE Isotope Separator OnLine
 REX/HIE Radioactive EXperiment/High Intensity and Energy ISOLDE

LEIR Low Energy Ion Ring
 LINAC LINear ACcelerator
 n-ToF Neutrons Time Of Flight
 HiRadMat High-Radiation to Materials

CHARM Cern High energy AccelRator Mixed field facility
 IRRAD proton IRRADIation facility
 GIF++ Gamma Irradiation Facility

CENF CERN Neutrino platform



Le LHC en action



Bottle to bang



Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

25 ans de préparation

1984

Études préliminaires

1992

Création de la collaboration ATLAS

1994

Approbation par le conseil du CERN

1996-1998

Approbation des États-Unis

1998-2008

Construction du LHC

Septembre 2008

Mise en service, première collision

Octobre 2009

Redémarrage

Mars 2010

Premières collisions à 7 TeV

Fin 2012

Fin des collisions à 8 TeV

Printemps 2015

Redémarrage à 13 TeV

2023

Fin des collisions à luminosité nominale

2025-2035

Phase à haute luminosité (10 fois plus de données)



25 ans d'exploitation



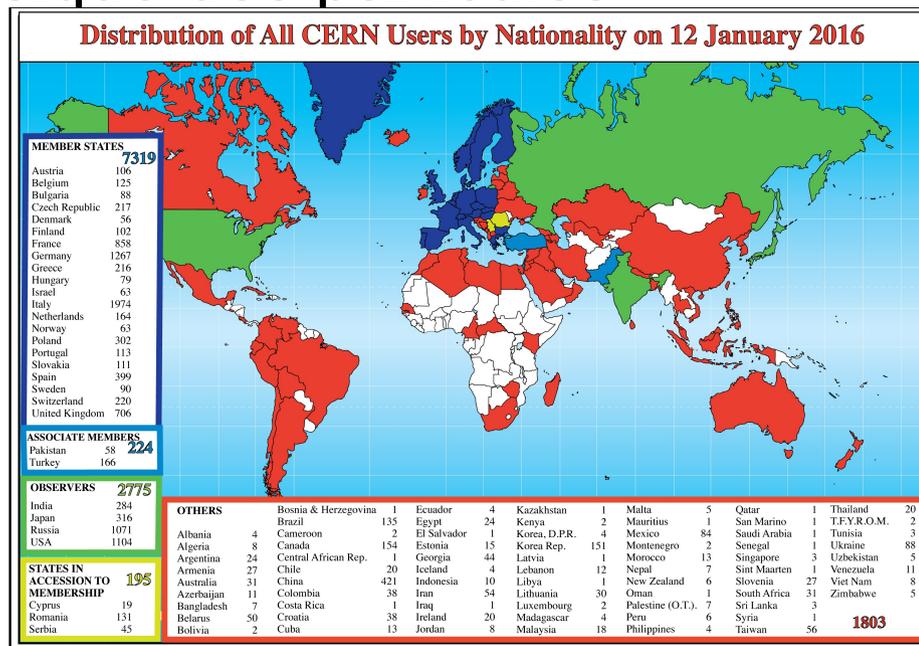
Le CERN



Organisation européenne pour la recherche nucléaire

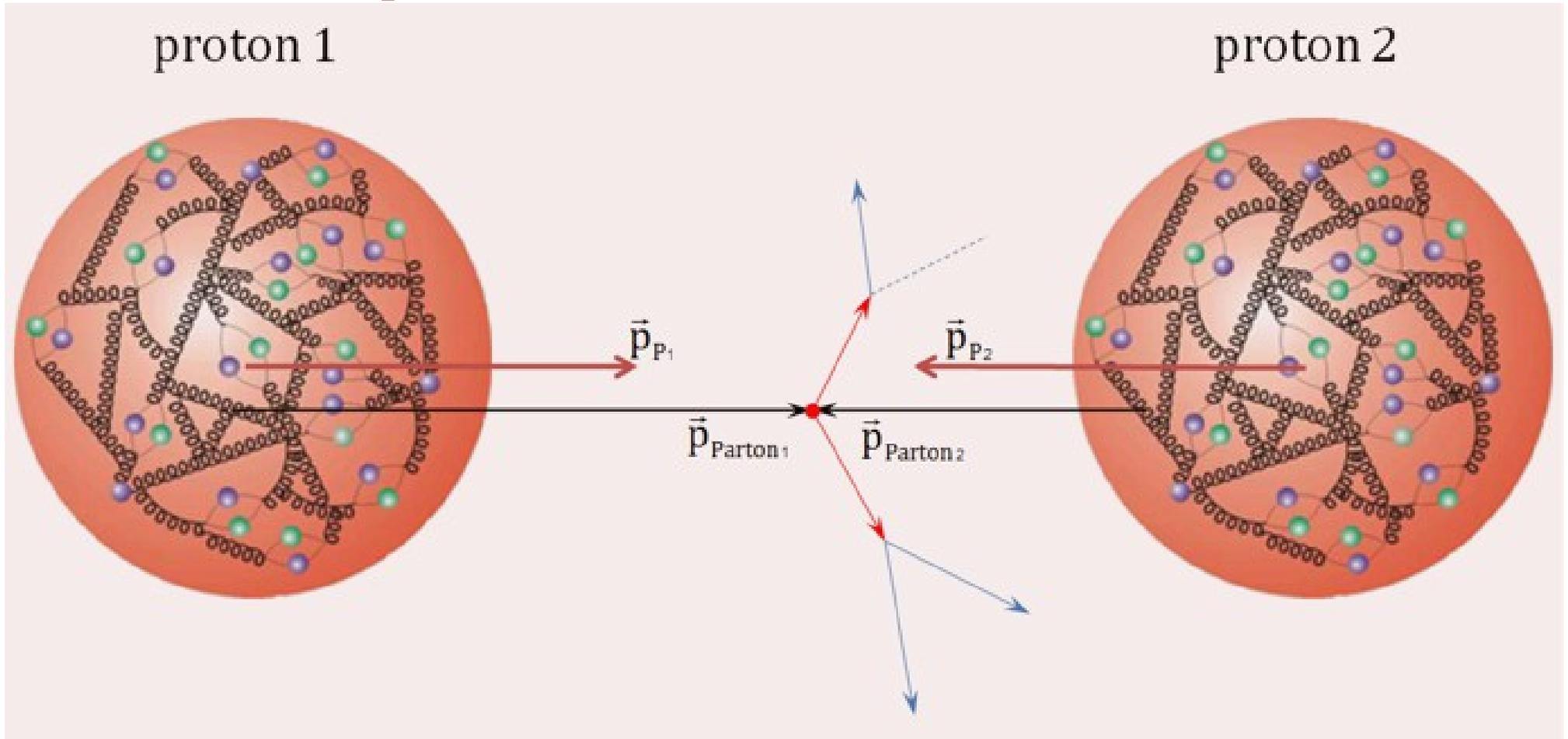
Le laboratoire européen pour la physique des particules

- organisation internationale
- créé en 1954
- 22 état membres
- Emploie ~2500
- ~10000 utilisateurs
- 500 instituts, 80 pays



- Nombreuses découvertes scientifiques et techniques / Plusieurs prix Nobel
- Formidable lieu de collaboration internationale
- Programme d'étudiant d'été

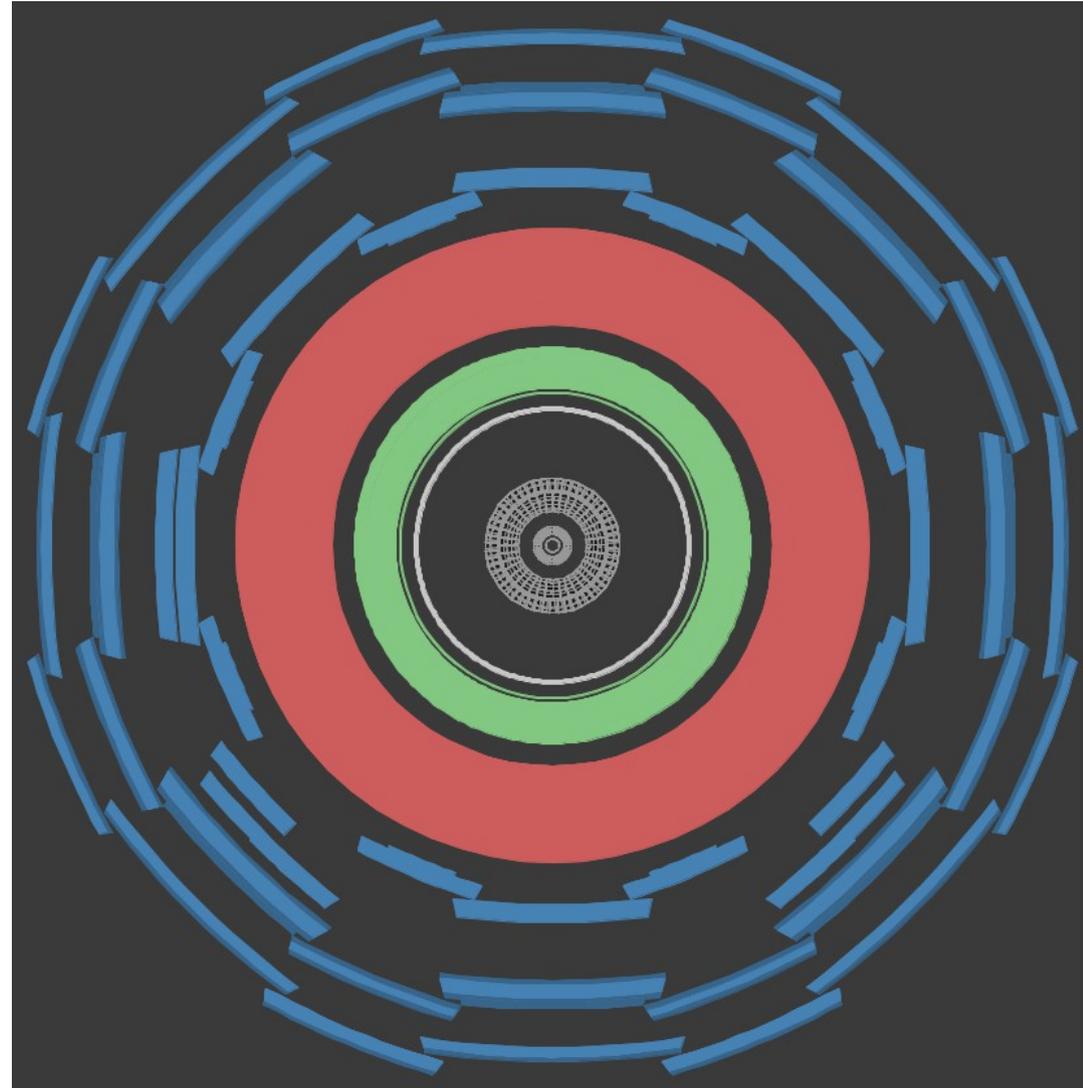
Deux protons se rencontrent...



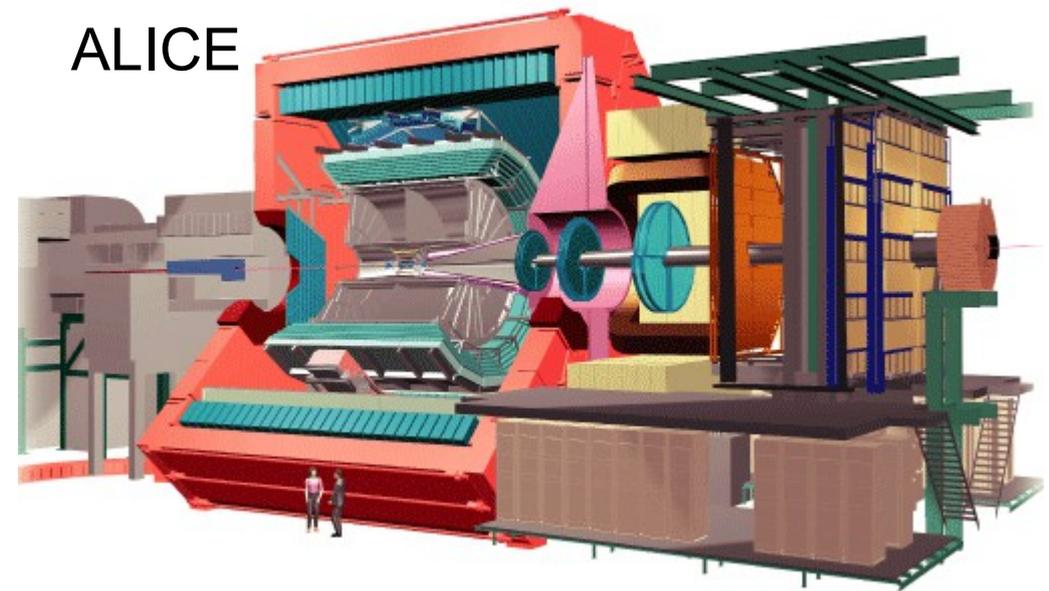
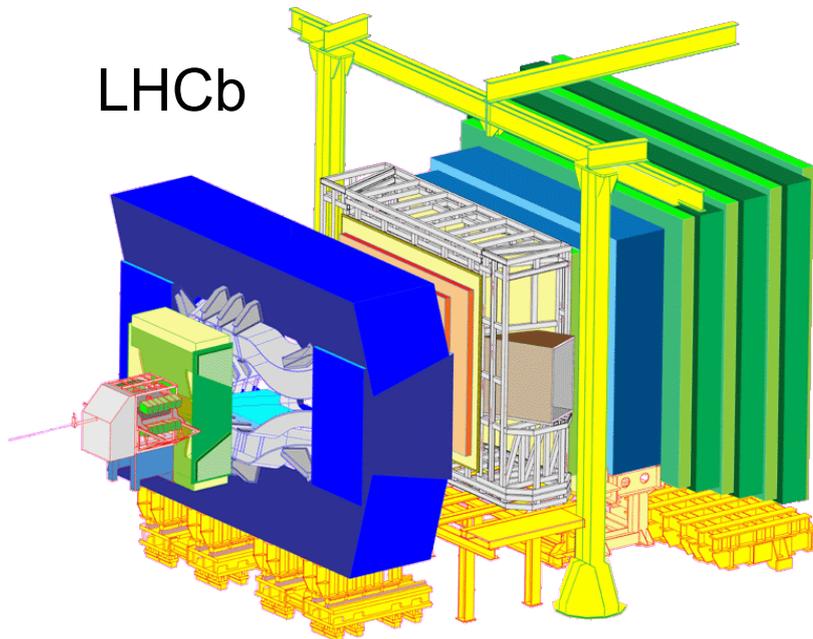
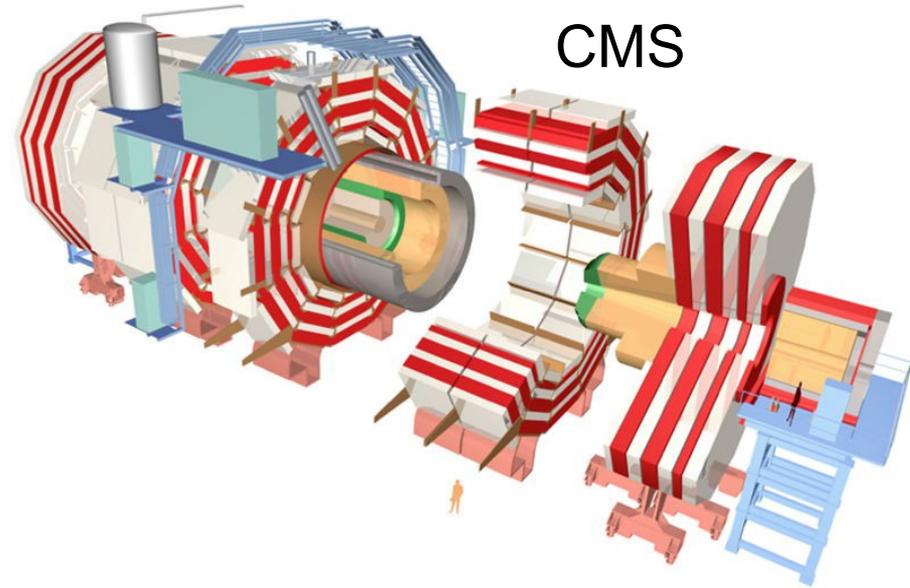
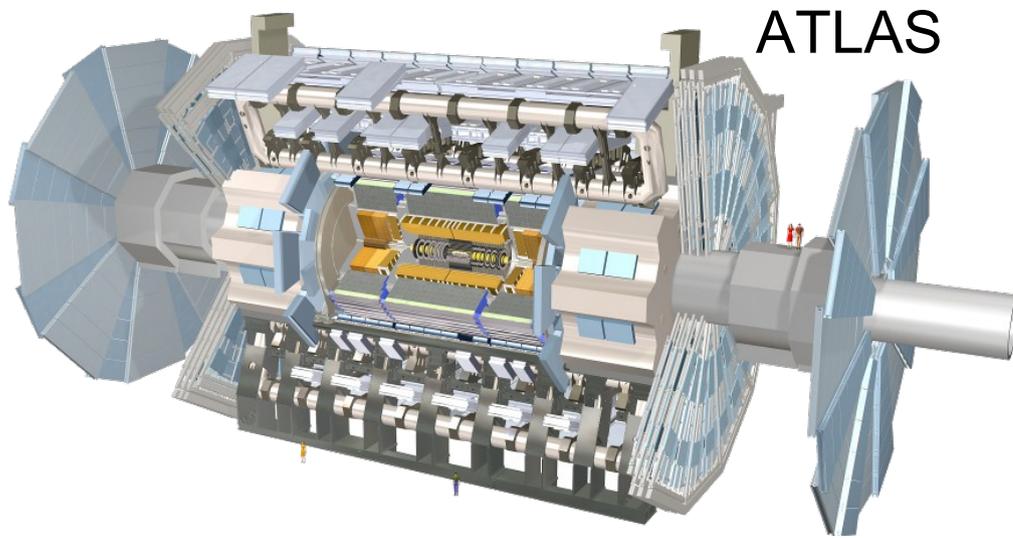
- Collision proton-proton = collision entre constituants (quarks et/ou gluons)
- Jamais deux fois la même collision → mesures statistiques
- Traces de la collision mesurées dans des détecteurs autour du point d'interaction

Un détecteur, qu'est-ce que c'est ?

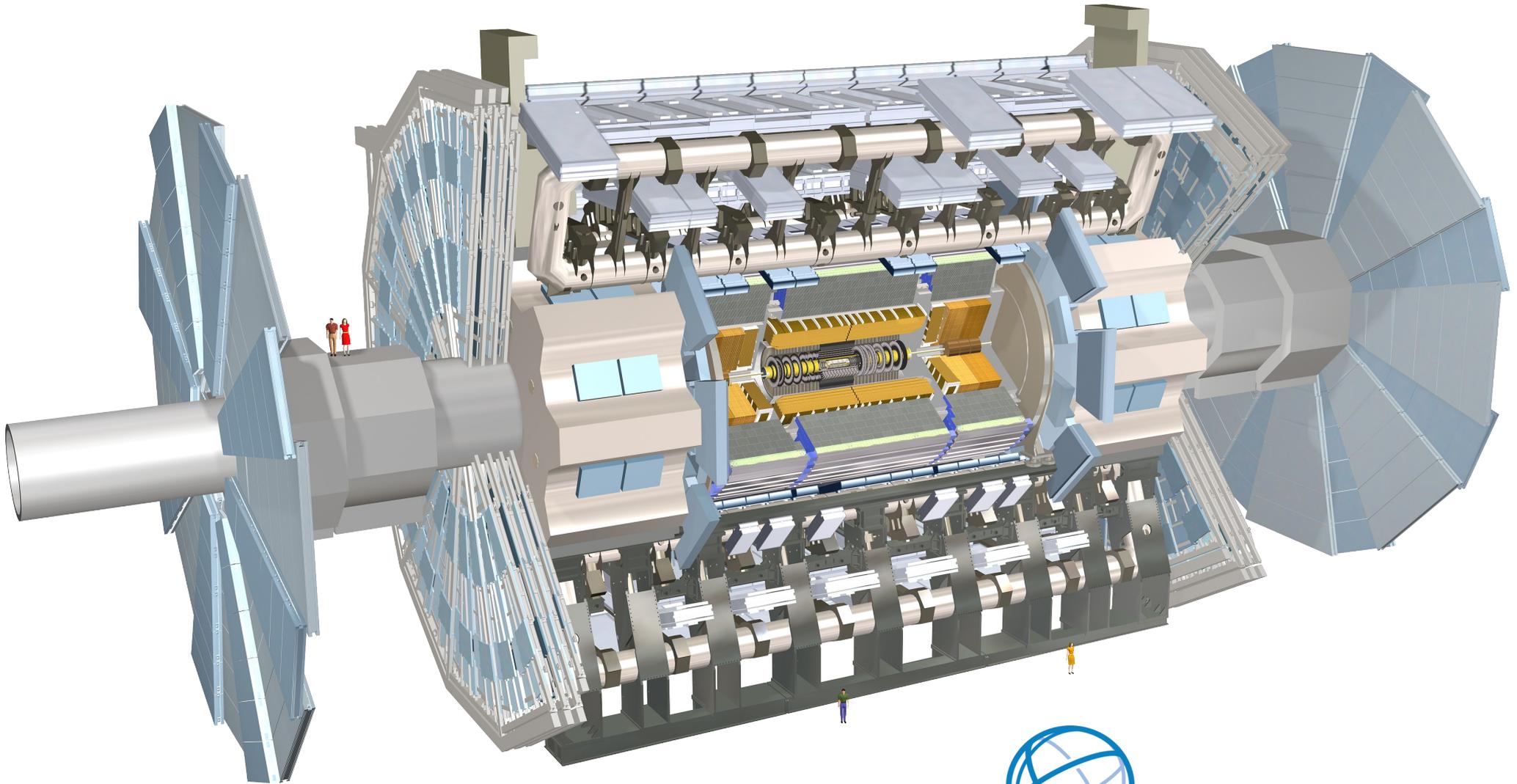
- Détecteur interne (trajectographe)
 - ▶ Mesure charge et impulsion des particules chargées, dans un champ magnétique
- Calorimètre électromagnétique
 - ▶ Mesure l'énergie des électrons, positrons et photons
- Calorimètre hadronique
 - ▶ Mesure l'énergie des hadrons (particules contenant des quarks), comme les protons, neutrons, pions, etc.
- Détecteur à muons
 - ▶ Mesure la charge et l'impulsion des muons



Les détecteurs géants du LHC



Le détecteur ATLAS



ATLAS
EXPERIMENT

Le détecteur ATLAS



25 m de diamètre, 44 m de long

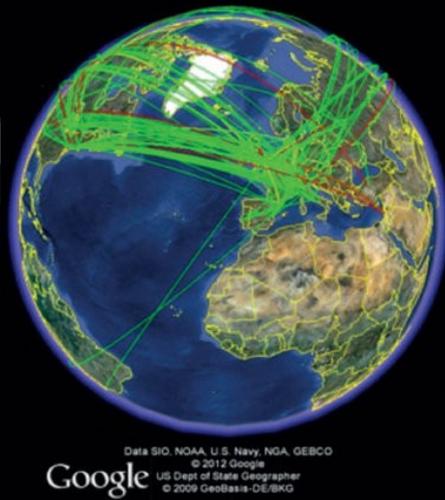
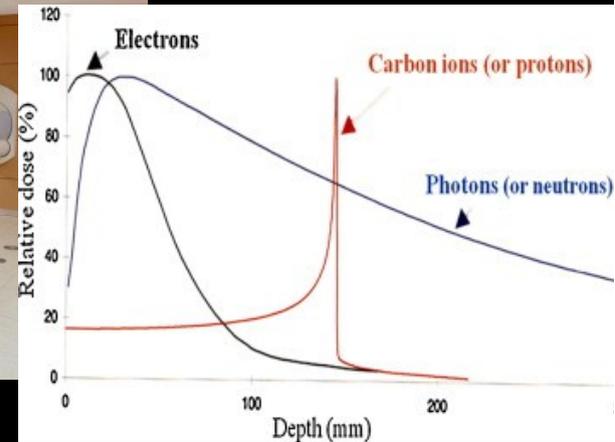
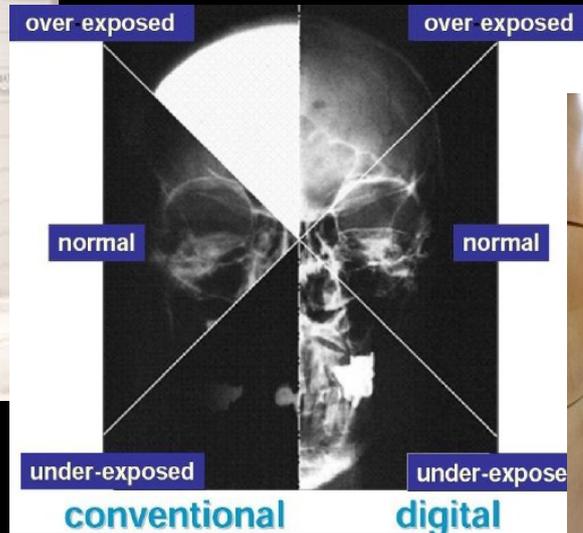
En France :
6 laboratoires CNRS,
1 CEA, 400 personnes
(physiciens, ingénieurs,
étudiants)

7000 tonnes
(comme la tour Eiffel)

Observe 20 collisions
simultanées, 40 millions
de fois par seconde !

3000 km de câbles
100 millions de canaux

A quoi sert la recherche fondamentale en physique des particules ?



► Le Web a été inventé au CERN !

Le détecteur ATLAS avec des explications



Interaction des particules avec le détecteur

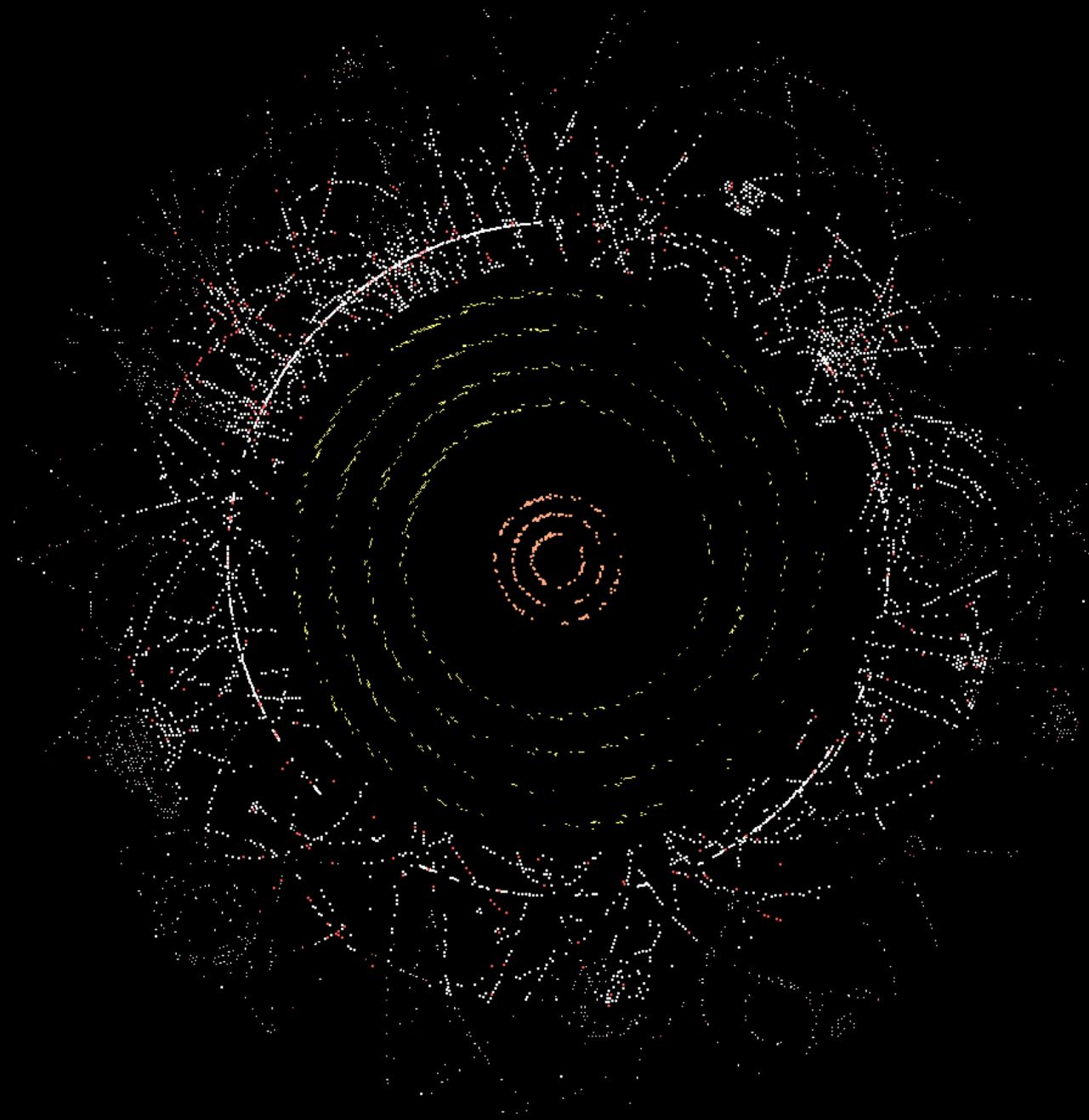


Mesurer le passage des particules dans le détecteur à pixels



- 80 Mégapixels
- 40 millions d'images par seconde
- 1,7 m² de silicium

Passage des particules



Reconstruction des trajectoires

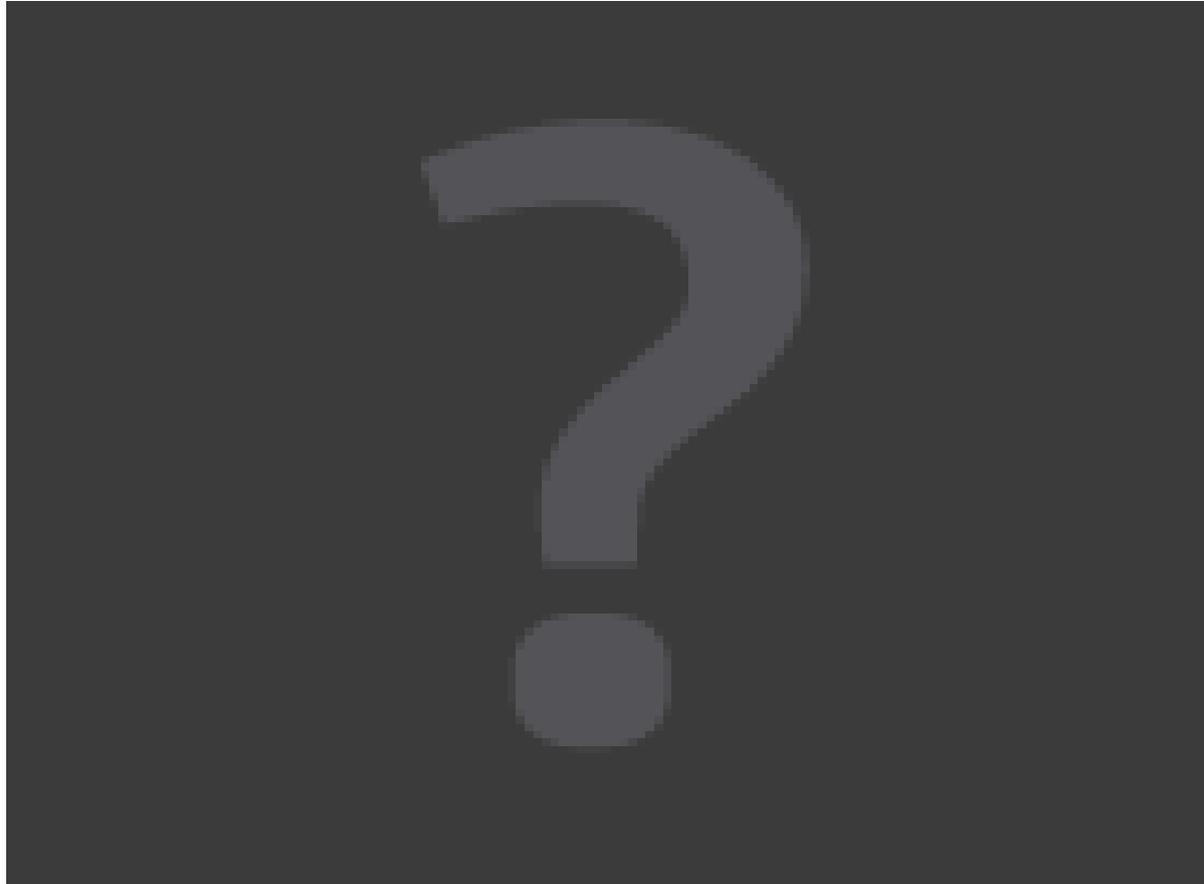


Mesurer l'énergie des particules dans le calorimètre électromagnétique



- Argon liquide à -183°C

Mesurer l'énergie des particules dans le calorimètre hadronique



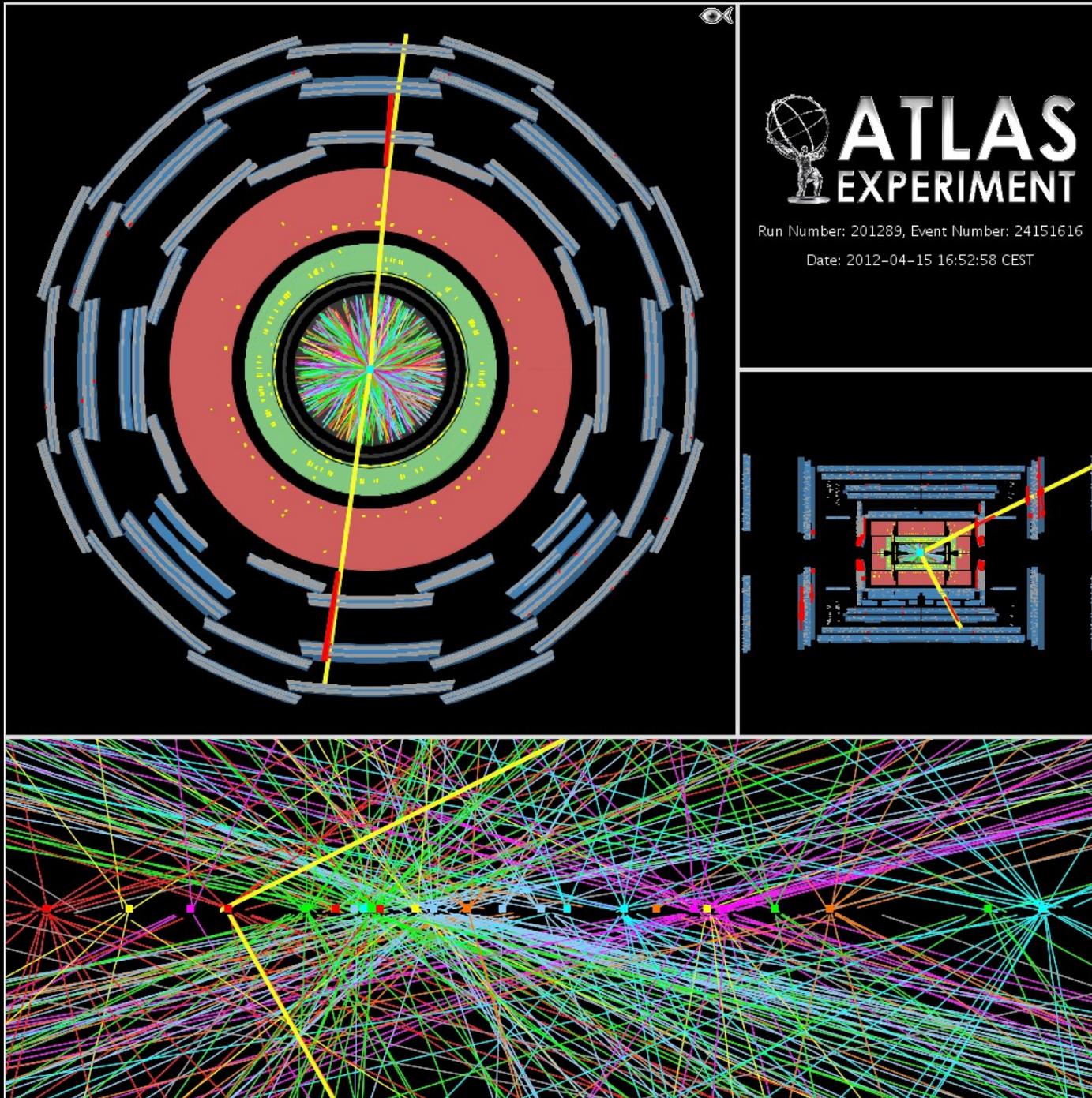
- 500 000 tuiles de plastique scintillant

Mesurer le passage des particules dans le système à muons



- Champ électrique de 5000 V/mm
- Alignement par faisceaux laser
- Précision de l'ordre de l'épaisseur d'un cheveu sur 25 m de distance

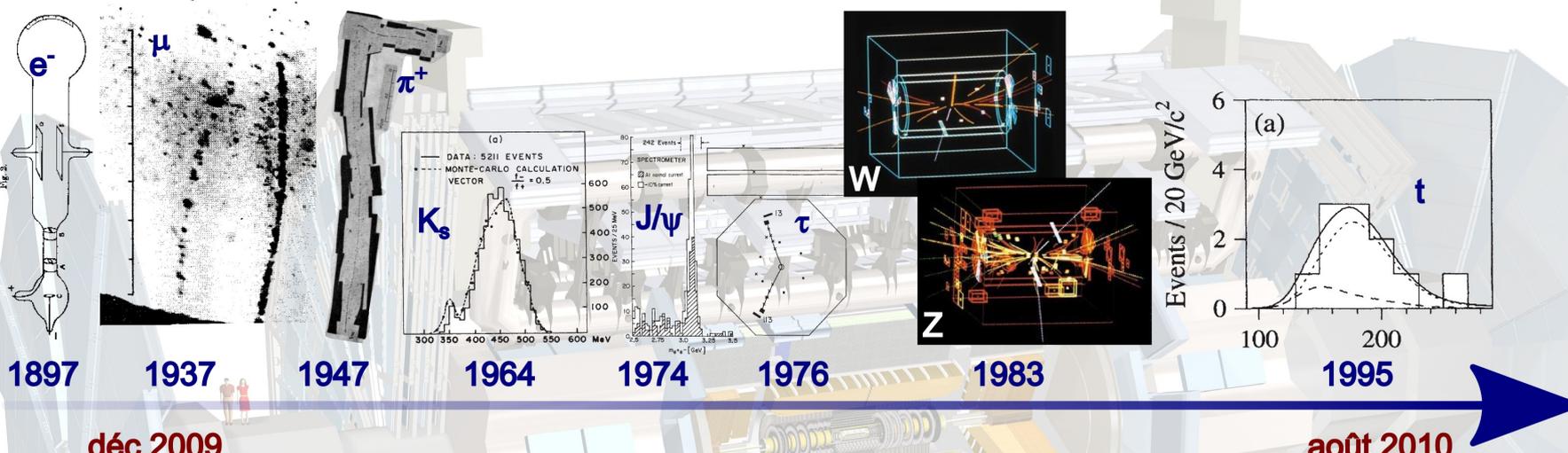
Extraction de mesure physique



Le modèle standard redécouvert

LHC 2010 : un siècle en un an

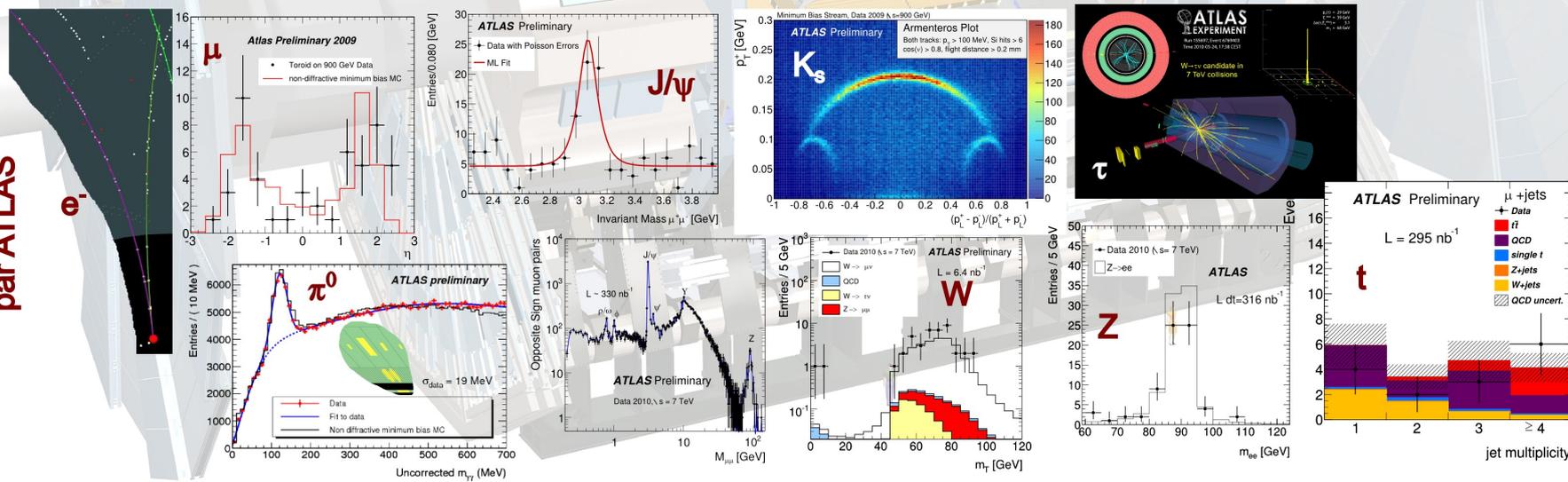
Découverte historique



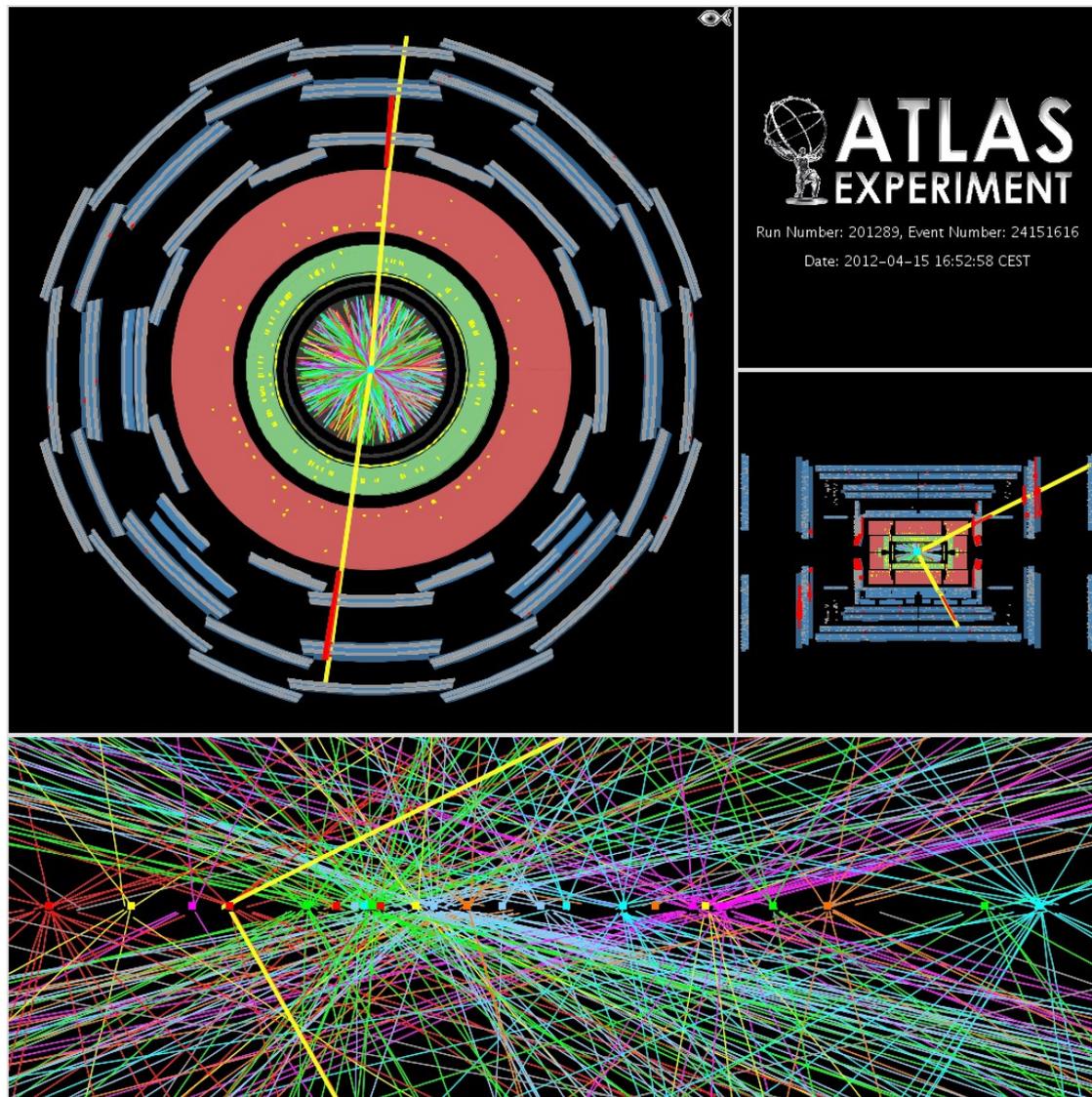
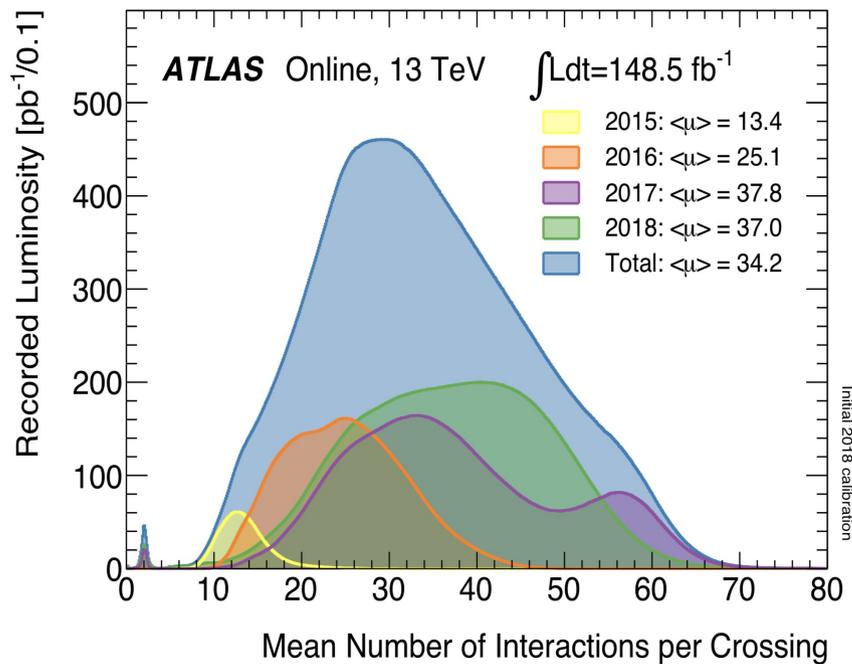
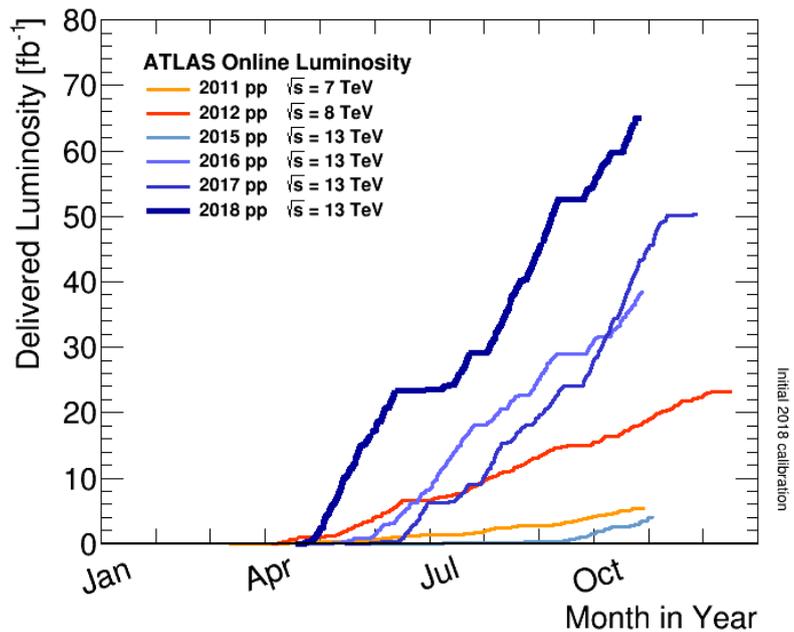
déc 2009

août 2010

Redécouverte par ATLAS



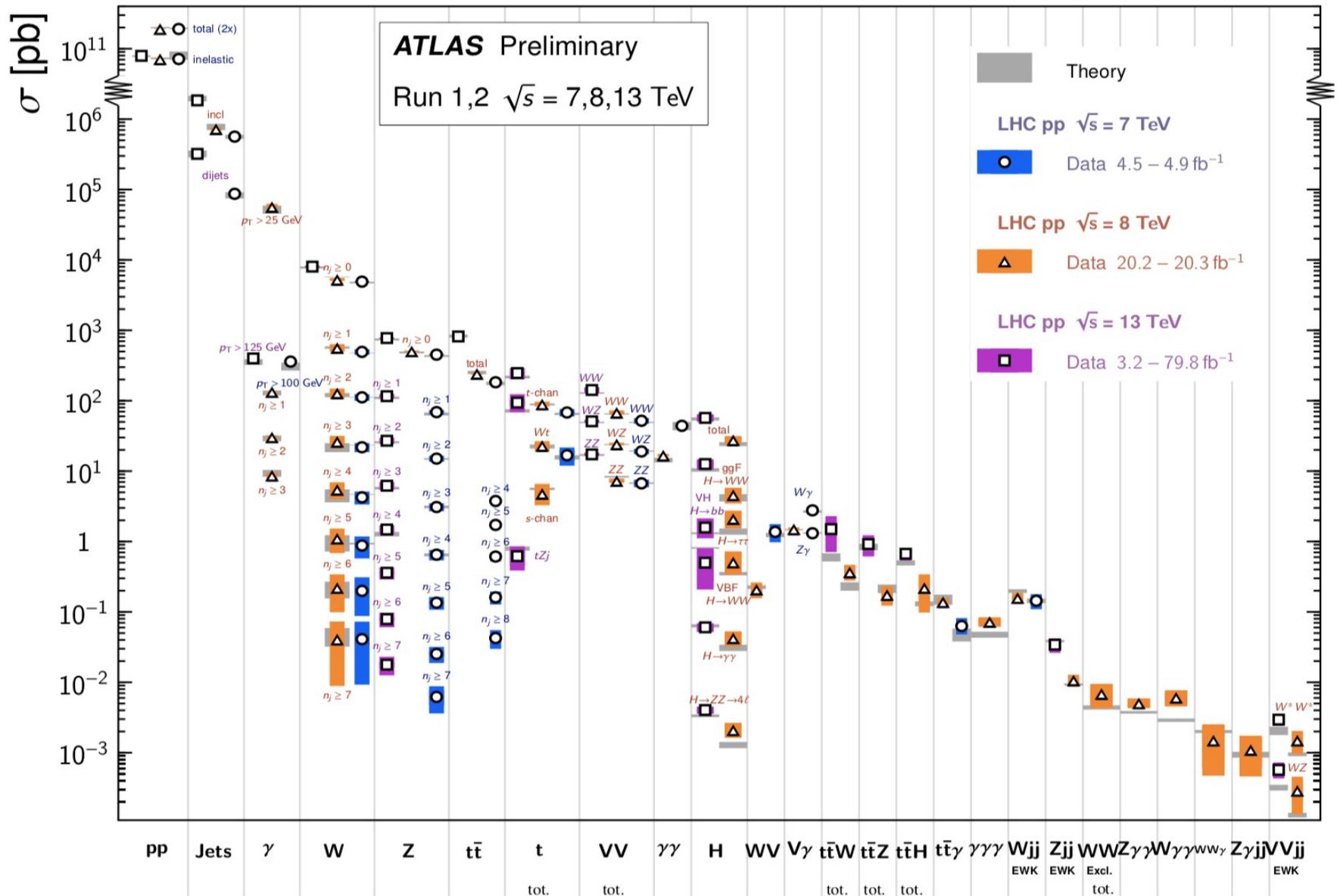
Accumulation des données



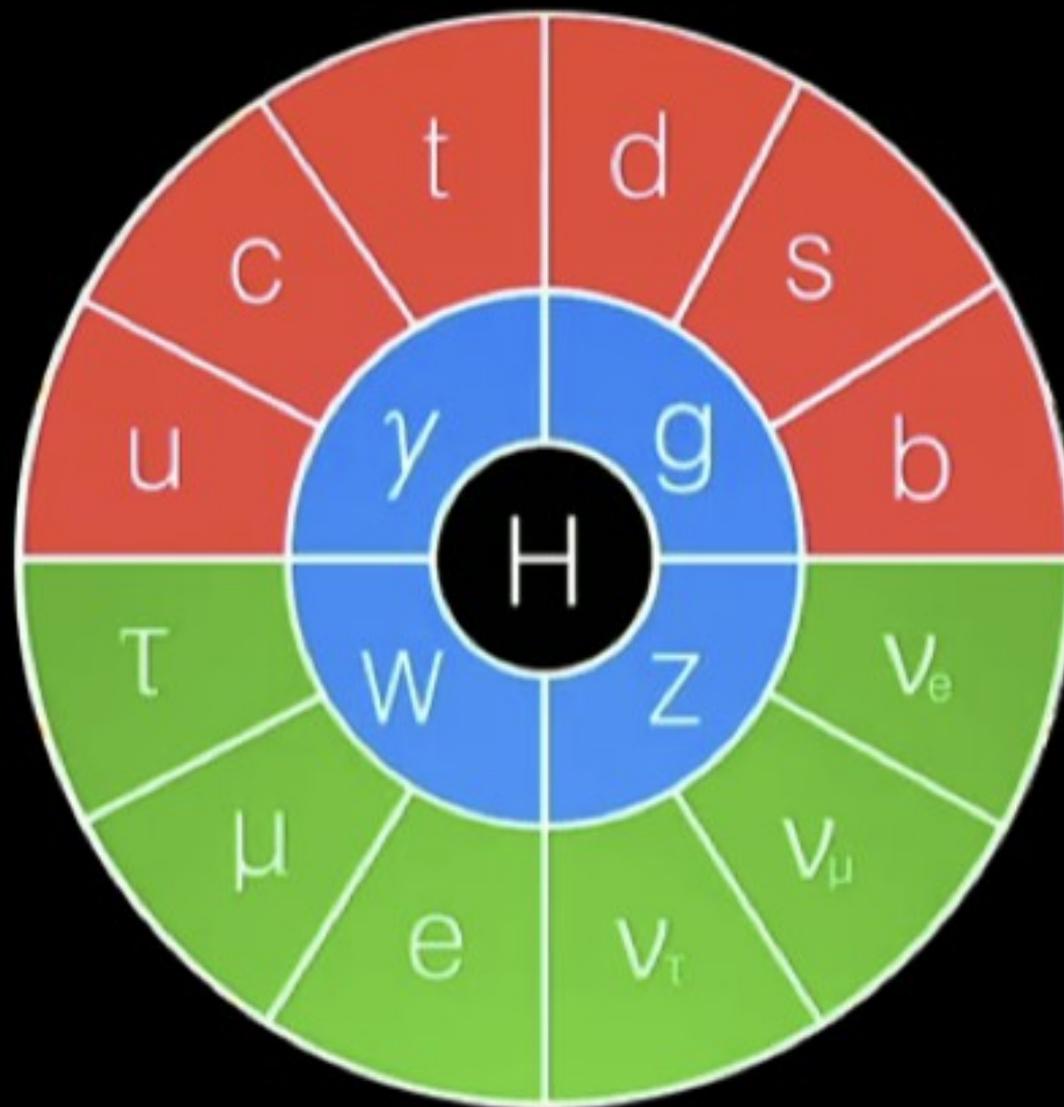
Modèle standard : état des lieux

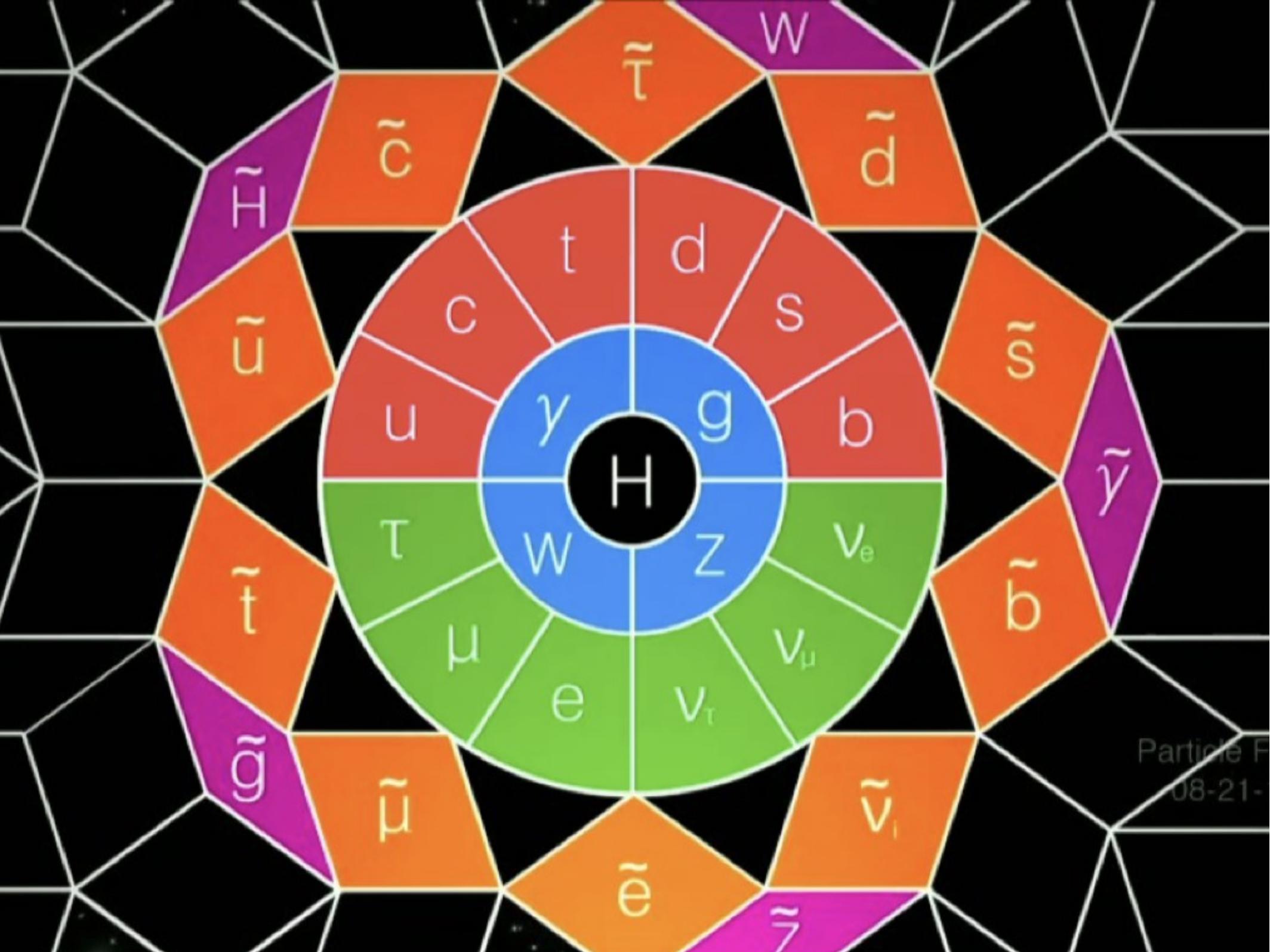
Standard Model Production Cross Section Measurements

Status: July 2018



- Très bon accord avec les prédictions théoriques !





Supersymétrie : état des lieux

ATLAS SUSY Searches* - 95% CL Lower Limits
July 2018

ATLAS Preliminary
 $\sqrt{s} = 7, 8, 13$ TeV

Model	e, μ, τ, γ	Jets	E_T^{miss}	$\int \mathcal{L} dt [\text{fb}^{-1}]$	Mass limit	$\sqrt{s} = 7, 8$ TeV	$\sqrt{s} = 13$ TeV	Reference	
Inclusive Searches	$\tilde{q}\tilde{q}, \tilde{q} \rightarrow q\tilde{\chi}_1^0$	0	2-6 jets	Yes	36.1	\tilde{q} [2x, 8x Degen.]	0.9	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 100$ GeV	1712.02332
		mono-jet	1-3 jets	Yes	36.1	\tilde{q} [1x, 8x Degen.]	0.43	$m(\tilde{q}) - m(\tilde{\chi}_1^0) = 5$ GeV	1711.03301
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}\tilde{\chi}_1^0$	0	2-6 jets	Yes	36.1	\tilde{g}	2.0	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 200$ GeV	1712.02332
						Forbidden	0.95-1.6	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 900$ GeV	1712.02332
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}(\ell\ell)\tilde{\chi}_1^0$	3 e, μ	4 jets	-	36.1	\tilde{g}	1.85	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 800$ GeV	1706.03731
		$ee, \mu\mu$	2 jets	Yes	36.1	\tilde{g}	1.2	$m(\tilde{g}) - m(\tilde{\chi}_1^0) = 50$ GeV	1805.11381
$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow qqWZ\tilde{\chi}_1^0$	0	7-11 jets	Yes	36.1	\tilde{g}	1.8	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 400$ GeV	1708.02794	
	3 e, μ	4 jets	-	36.1	\tilde{g}	0.98	$m(\tilde{g}) - m(\tilde{\chi}_1^0) = 200$ GeV	1706.03731	
$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow t\tilde{t}\tilde{\chi}_1^0$	0-1 e, μ	3 b	Yes	36.1	\tilde{g}	2.0	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 200$ GeV	1711.01901	
	3 e, μ	4 jets	-	36.1	\tilde{g}	1.25	$m(\tilde{g}) - m(\tilde{\chi}_1^0) = 300$ GeV	1706.03731	
3 rd gen. squarks direct production	$\tilde{b}_1\tilde{b}_1, \tilde{b}_1 \rightarrow b\tilde{\chi}_1^0/\tilde{\chi}_1^{\pm*}$	Multiple	Multiple	Yes	36.1	Forbidden	0.9	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 300$ GeV, $BR(\tilde{b}\tilde{\chi}_1^0) = 1$	1708.09266, 1711.03301
		Multiple	Multiple	Yes	36.1	Forbidden	0.58-0.82	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 300$ GeV, $BR(\tilde{b}\tilde{\chi}_1^0) = BR(\tilde{t}\tilde{\chi}_1^0) = 0.5$	1708.09266
		Multiple	Multiple	Yes	36.1	Forbidden	0.7	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 200$ GeV, $m(\tilde{\chi}_1^{\pm}) = 300$ GeV, $BR(\tilde{t}\tilde{\chi}_1^0) = 1$	1706.03731
	$\tilde{b}_1\tilde{b}_1, \tilde{t}_1\tilde{t}_1, M_2 = 2 \times M_1$	Multiple	Multiple	Yes	36.1	\tilde{t}_1	0.7	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 60$ GeV	1709.04183, 1711.11520, 1708.03247
		Multiple	Multiple	Yes	36.1	\tilde{t}_1	0.9	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 200$ GeV	1709.04183, 1711.11520, 1708.03247
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow Wb\tilde{\chi}_1^0$ or $\tilde{\chi}_1^0$	0-2 e, μ	0-2 jets/1-2 b	Yes	36.1	\tilde{t}_1	1.0	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 1$ GeV	1506.08616, 1709.04183, 1711.11520
		Multiple	Multiple	Yes	36.1	Forbidden	0.4-0.9	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 150$ GeV, $m(\tilde{\chi}_1^{\pm}) - m(\tilde{\chi}_1^0) = 5$ GeV, $\tilde{t}_1 \approx \tilde{t}_L$	1709.04183, 1711.11520
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{H}$ LSP	Multiple	Multiple	Yes	36.1	Forbidden	0.6-0.8	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 300$ GeV, $m(\tilde{\chi}_1^{\pm}) - m(\tilde{\chi}_1^0) = 5$ GeV, $\tilde{t}_1 \approx \tilde{t}_L$	1709.04183, 1711.11520
		Multiple	Multiple	Yes	36.1	\tilde{t}_1	0.48-0.84	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 150$ GeV, $m(\tilde{\chi}_1^{\pm}) - m(\tilde{\chi}_1^0) = 5$ GeV, $\tilde{t}_1 \approx \tilde{t}_L$	1709.04183, 1711.11520
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \text{Well-Tempered LSP}$	Multiple	Multiple	Yes	36.1	\tilde{t}_1	0.85	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 0$ GeV	1805.01649
0		2c	Yes	36.1	\tilde{t}_1	0.46	$m(\tilde{t}_1, \tilde{c}) - m(\tilde{\chi}_1^0) = 50$ GeV	1805.01649	
$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow c\tilde{\chi}_1^0/\tilde{c}\tilde{c}, \tilde{c} \rightarrow c\tilde{\chi}_1^0$	0	mono-jet	Yes	36.1	\tilde{t}_1	0.43	$m(\tilde{t}_1, \tilde{c}) - m(\tilde{\chi}_1^0) = 5$ GeV	1711.03301	
	0	mono-jet	Yes	36.1	\tilde{t}_1	0.46	$m(\tilde{t}_1, \tilde{c}) - m(\tilde{\chi}_1^0) = 5$ GeV	1711.03301	
$\tilde{t}_2\tilde{t}_2, \tilde{t}_2 \rightarrow \tilde{t}_1 + h$	1-2 e, μ	4 b	Yes	36.1	\tilde{t}_2	0.32-0.88	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 0$ GeV, $m(\tilde{t}_1) - m(\tilde{\chi}_1^0) = 180$ GeV	1706.03986	
EW direct	$\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_2^0$ via WZ	2-3 e, μ	-	Yes	36.1	$\tilde{\chi}_1^{\pm}/\tilde{\chi}_2^0$	0.6	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 0$	1403.5294, 1806.02293
		$ee, \mu\mu$	≥ 1	Yes	36.1	$\tilde{\chi}_1^{\pm}/\tilde{\chi}_2^0$	0.17	$m(\tilde{\chi}_1^{\pm}) - m(\tilde{\chi}_1^0) = 10$ GeV	1712.08119
	$\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_2^0$ via Wh	$\ell\ell(\gamma\gamma)/\ell b b$	-	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^{\pm}/\tilde{\chi}_2^0$	0.26	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 0$	1501.07110
		2τ	-	Yes	36.1	$\tilde{\chi}_1^{\pm}/\tilde{\chi}_2^0$	0.76	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 0, m(\tilde{\tau}, \tilde{\nu}) = 0.5(m(\tilde{\chi}_1^{\pm}) + m(\tilde{\chi}_1^0))$	1708.07875
	$\tilde{L}_{L,R}\tilde{L}_{L,R}, \tilde{L} \rightarrow \ell\tilde{\chi}_1^0$	2 e, μ	0	Yes	36.1	\tilde{L}	0.5	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 100$ GeV, $m(\tilde{\tau}, \tilde{\nu}) = 0.5(m(\tilde{\chi}_1^{\pm}) + m(\tilde{\chi}_1^0))$	1708.07875
2 e, μ		≥ 1	Yes	36.1	\tilde{L}	0.18	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 0$	1803.02762	
$\tilde{H}\tilde{H}, \tilde{H} \rightarrow h\tilde{G}/Z\tilde{G}$	0	$\geq 3b$	Yes	36.1	\tilde{H}	0.13-0.23	$m(\tilde{L}) - m(\tilde{\chi}_1^0) = 5$ GeV	1712.08119	
	4 e, μ	0	Yes	36.1	\tilde{H}	0.3	$BR(\tilde{H}^0 \rightarrow h\tilde{G}) = 1$	1806.04030	
Long-lived particles	Direct $\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_1^{\mp}$ prod., long-lived $\tilde{\chi}_1^{\pm}$	Disapp. trk	1 jet	Yes	36.1	$\tilde{\chi}_1^{\pm}$	0.46	Pure Wino	1712.02118
						$\tilde{\chi}_1^{\pm}$	0.15	Pure Higgsino	ATL-PHYS-PUB-2017-019
	Stable \tilde{g} R-hadron	SMP	-	-	3.2	\tilde{g}	1.6		1606.05129
		Metastable \tilde{g} R-hadron, $\tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}\tilde{\chi}_1^0$	Multiple	Multiple	32.8	\tilde{g} [$\tau(\tilde{g}) = 100$ ns, 0.2 ns]	1.6	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 100$ GeV	1710.04901, 1604.04520
GMSB, $\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \gamma\tilde{G}$, long-lived $\tilde{\chi}_1^0$	2 γ	-	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^0$	0.44	$1 < \tau(\tilde{\chi}_1^0) < 3$ ns, SPS8 model	1409.5542	
	displ. $ee/\mu\mu/\mu\mu$	-	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^0$	1.3	$6 < c\tau(\tilde{\chi}_1^0) < 1000$ mm, $m(\tilde{\chi}_1^0) = 1$ TeV	1504.05162	
RPV	LFV $pp \rightarrow \tilde{\nu}_\tau + X, \tilde{\nu}_\tau \rightarrow e\mu/\tau\mu/\mu\tau$	$e\mu, \tau\mu, \mu\tau$	-	-	3.2	$\tilde{\nu}_\tau$	1.9	$A'_{311} = 0.11, A_{132/133} = 0.07$	1607.08079
		4 e, μ	0	Yes	36.1	$\tilde{\chi}_1^{\pm}/\tilde{\chi}_2^0$ [$A_{333} \neq 0, A_{1324} \neq 0$]	0.82	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 100$ GeV	1804.03602
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow qq\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow qq\tilde{\chi}_1^0$	0	4-5 large-R jets	-	36.1	\tilde{g} [$m(\tilde{\chi}_1^0) = 200$ GeV, 1100 GeV]	1.3	Large A'_{112}	1804.03568
		Multiple	Multiple	-	36.1	\tilde{g} [$A'_{112} = 2e-4, 2e-5$]	1.05	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 200$ GeV, bino-like	ATLAS-CONF-2018-003
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow tbs/\tilde{g} \rightarrow t\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow tbs$	Multiple	Multiple	-	36.1	\tilde{g} [$A'_{333} = 1, 1e-2$]	1.8	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 200$ GeV, bino-like	ATLAS-CONF-2018-003
		Multiple	Multiple	-	36.1	\tilde{g} [$A'_{323} = 2e-4, 1e-2$]	0.55	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 200$ GeV, bino-like	ATLAS-CONF-2018-003
$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow tbs$	0	2 jets + 2 b	-	36.7	\tilde{t}_1 [qq, bs]	0.42	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 200$ GeV, bino-like	1710.07171	
	2 e, μ	2 b	-	36.1	\tilde{t}_1	0.4-1.45	$BR(\tilde{t}_1 \rightarrow b\ell/\mu\mu) > 20\%$	1710.05544	

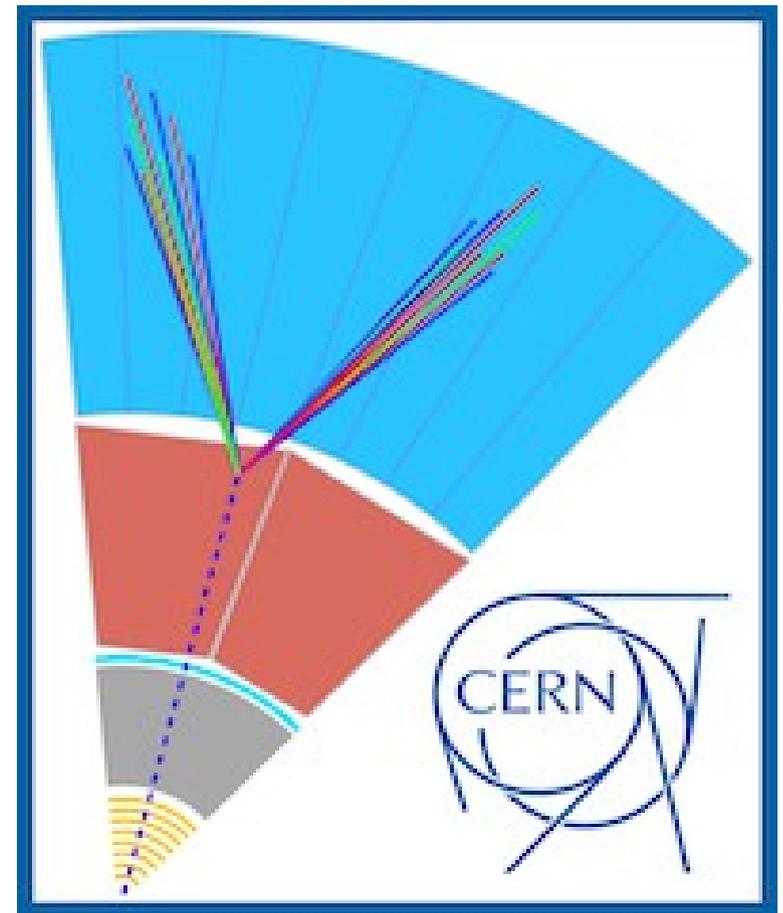
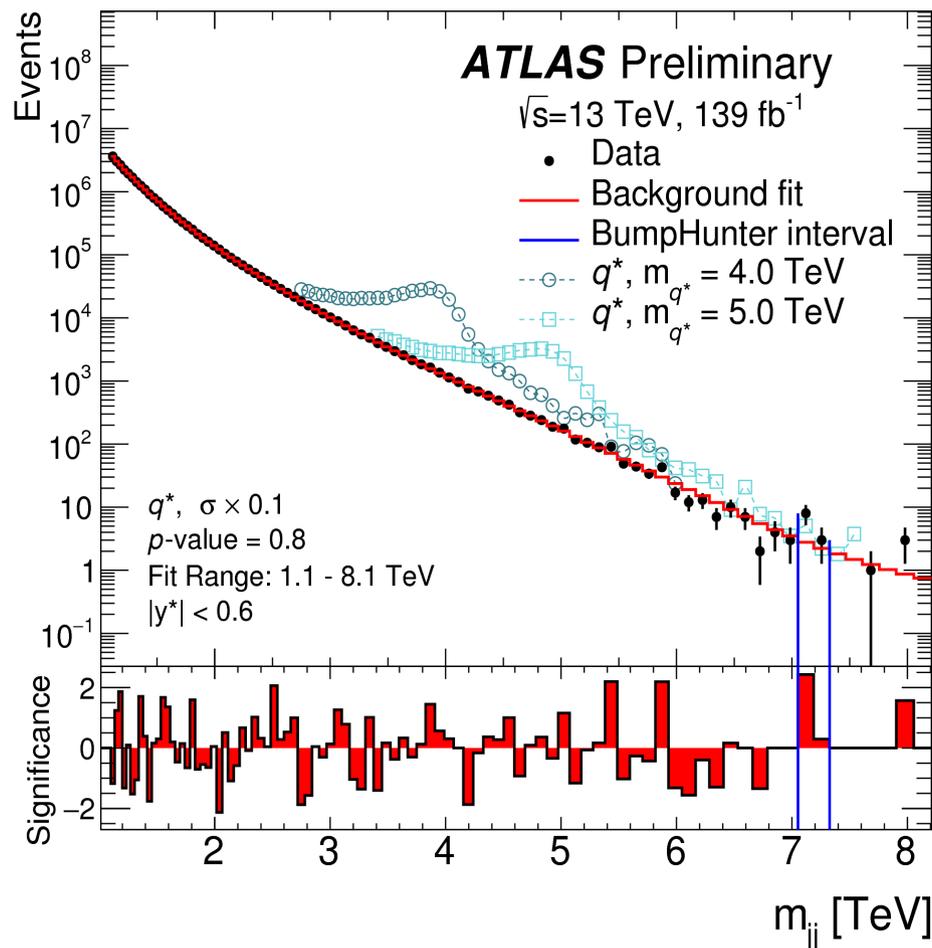
*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown. Many of the limits are based on simplified models, c.f. refs. for the assumptions made.

10⁻¹ 1 Mass scale [TeV]

- On n'a rien trouvé, et pourtant on cherche !

Exotiques : état des lieux

- On cherche la signature de particules nouvelles
- Désintégrations en paires de jets, électrons ou muons...
- Particules à longue durée de vie



Exotiques : état des lieux

ATLAS Exotics Searches* - 95% CL Upper Exclusion Limits

Status: July 2018

ATLAS Preliminary

$\int \mathcal{L} dt = (3.2 - 79.8) \text{ fb}^{-1}$

$\sqrt{s} = 8, 13 \text{ TeV}$

Model	ℓ, γ	Jets [†]	E_T^{miss}	$\int \mathcal{L} dt [\text{fb}^{-1}]$	Limit	Reference	
Extra dimensions	ADD $G_{KK} + g/q$	0 e, μ	1-4 j	Yes	36.1	M_D 7.7 TeV	$n = 2$
	ADD non-resonant $\gamma\gamma$	2 γ	-	-	36.7	M_S 8.6 TeV	$n = 3$ HLZ NLO
	ADD QBH	-	2 j	-	37.0	M_{th} 8.9 TeV	$n = 6$
	ADD BH high Σp_T	$\geq 1 e, \mu$	$\geq 2 j$	-	3.2	M_{th} 8.2 TeV	$n = 6, M_D = 3 \text{ TeV}$, rot BH
	ADD BH multijet	-	$\geq 3 j$	-	3.6	M_{th} 9.55 TeV	$n = 6, M_D = 3 \text{ TeV}$, rot BH
	RS1 $G_{KK} \rightarrow \gamma\gamma$	2 γ	-	-	36.7	G_{KK} mass 4.1 TeV	$k/\overline{M}_{Pl} = 0.1$
	Bulk RS $G_{KK} \rightarrow WW/ZZ$	multi-channel	-	-	36.1	G_{KK} mass 2.3 TeV	$k/\overline{M}_{Pl} = 1.0$
	Bulk RS $G_{KK} \rightarrow tt$	1 e, μ	$\geq 1 b, \geq 1J/2j$	Yes	36.1	G_{KK} mass 3.8 TeV	$\Gamma/m = 15\%$
2UED / RPP	1 e, μ	$\geq 2 b, \geq 3 j$	Yes	36.1	KK mass 1.8 TeV	Tier (1,1), $\mathcal{B}(A^{(1,1)} \rightarrow tt) = 1$	
Gauge bosons	SSM $Z' \rightarrow \ell\ell$	2 e, μ	-	-	36.1	Z' mass 4.5 TeV	
	SSM $Z' \rightarrow \tau\tau$	2 τ	-	-	36.1	Z' mass 2.42 TeV	
	Leptophobic $Z' \rightarrow bb$	-	2 b	-	36.1	Z' mass 2.1 TeV	
	Leptophobic $Z' \rightarrow tt$	1 e, μ	$\geq 1 b, \geq 1J/2j$	Yes	36.1	Z' mass 3.0 TeV	$\Gamma/m = 1\%$
	SSM $W' \rightarrow \ell\nu$	1 e, μ	-	Yes	79.8	W' mass 5.6 TeV	
	SSM $W' \rightarrow \tau\nu$	1 τ	-	Yes	36.1	W' mass 3.7 TeV	
	HVT $V' \rightarrow WV \rightarrow qq\bar{q}\bar{q}$ model B	0 e, μ	2 J	-	79.8	V' mass 4.15 TeV	$g_V = 3$
	HVT $V' \rightarrow WH/ZH$ model B	multi-channel	-	-	36.1	V' mass 2.93 TeV	$g_V = 3$
LRSM $W'_R \rightarrow tb$	multi-channel	-	-	36.1	W'_R mass 3.25 TeV		
CI	CI $qq\bar{q}\bar{q}$	-	2 j	-	37.0	Λ 21.8 TeV	η_{LL}
	CI $\ell\ell q\bar{q}$	2 e, μ	-	-	36.1	Λ 40.0 TeV	η_{LL}
	CI $t\bar{t}t\bar{t}$	$\geq 1 e, \mu$	$\geq 1 b, \geq 1 j$	Yes	36.1	Λ 2.57 TeV	$ C_{4t} = 4\pi$
DM	Axial-vector mediator (Dirac DM)	0 e, μ	1-4 j	Yes	36.1	m_{med} 1.55 TeV	$g_q = 0.25, g_\ell = 1.0, m(\chi) = 1 \text{ GeV}$
	Colored scalar mediator (Dirac DM)	0 e, μ	1-4 j	Yes	36.1	m_{med} 1.67 TeV	$g = 1.0, m(\chi) = 1 \text{ GeV}$
	$VV_{\chi\chi}$ EFT (Dirac DM)	0 e, μ	1 J, $\leq 1 j$	Yes	3.2	M_* 700 GeV	$m(\chi) < 150 \text{ GeV}$
LQ	Scalar LQ 1 st gen	2 e	$\geq 2 j$	-	3.2	LQ mass 1.1 TeV	$\beta = 1$
	Scalar LQ 2 nd gen	2 μ	$\geq 2 j$	-	3.2	LQ mass 1.05 TeV	$\beta = 1$
	Scalar LQ 3 rd gen	1 e, μ	$\geq 1 b, \geq 3 j$	Yes	20.3	LQ mass 640 GeV	$\beta = 0$
Heavy quarks	VLQ $TT \rightarrow Ht/Zt/Wb + X$	multi-channel	-	-	36.1	T mass 1.37 TeV	SU(2) doublet
	VLQ $BB \rightarrow Wt/Zb + X$	multi-channel	-	-	36.1	B mass 1.34 TeV	SU(2) doublet
	VLQ $T_{5/3} T_{5/3} T_{5/3} \rightarrow Wt + X$	2(SS) $\geq 3 e, \mu \geq 1 b, \geq 1 j$	Yes	36.1	$T_{5/3}$ mass 1.64 TeV	$\mathcal{B}(T_{5/3} \rightarrow Wt) = 1, c(T_{5/3} Wt) = 1$	
	VLQ $Y \rightarrow Wb + X$	1 e, μ	$\geq 1 b, \geq 1 j$	Yes	3.2	Y mass 1.44 TeV	$\mathcal{B}(Y \rightarrow Wb) = 1, c(YWb) = 1/\sqrt{2}$
	VLQ $B \rightarrow Hb + X$	0 $e, \mu, 2 \gamma$	$\geq 1 b, \geq 1 j$	Yes	79.8	B mass 1.21 TeV	$\kappa_B = 0.5$
	VLQ $QQ \rightarrow WqWq$	1 e, μ	$\geq 4 j$	Yes	20.3	Q mass 690 GeV	
Excited fermions	Excited quark $q^* \rightarrow qg$	-	2 j	-	37.0	q^* mass 6.0 TeV	only u^* and d^* , $\Lambda = m(q^*)$
	Excited quark $q^* \rightarrow q\gamma$	1 γ	1 j	-	36.7	q^* mass 5.3 TeV	only u^* and d^* , $\Lambda = m(q^*)$
	Excited quark $b^* \rightarrow bg$	-	1 b, 1 j	-	36.1	b^* mass 2.6 TeV	
	Excited lepton ℓ^*	3 e, μ	-	-	20.3	ℓ^* mass 3.0 TeV	$\Lambda = 3.0 \text{ TeV}$
	Excited lepton ν^*	3 e, μ, τ	-	-	20.3	ν^* mass 1.6 TeV	$\Lambda = 1.6 \text{ TeV}$
Other	Type III Seesaw	1 e, μ	$\geq 2 j$	Yes	79.8	N^0 mass 560 GeV	
	LRSM Majorana ν	2 e, μ	2 j	-	20.3	N^0 mass 2.0 TeV	$m(W_R) = 2.4 \text{ TeV}$, no mixing
	Higgs triplet $H^{\pm\pm} \rightarrow \ell\ell$	2,3,4 e, μ (SS)	-	-	36.1	$H^{\pm\pm}$ mass 870 GeV	DY production
	Higgs triplet $H^{\pm\pm} \rightarrow \ell\tau$	3 e, μ, τ	-	-	20.3	$H^{\pm\pm}$ mass 400 GeV	DY production, $\mathcal{B}(H_L^{\pm\pm} \rightarrow \ell\tau) = 1$
	Monotop (non-res prod)	1 e, μ	1 b	Yes	20.3	spin-1 invisible particle mass 657 GeV	$a_{\text{non-res}} = 0.2$
	Multi-charged particles	-	-	-	20.3	multi-charged particle mass 785 GeV	DY production, $ q = 5e$
	Magnetic monopoles	-	-	-	7.0	monopole mass 1.34 TeV	DY production, $ g = 1g_D$, spin 1/2

*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown.

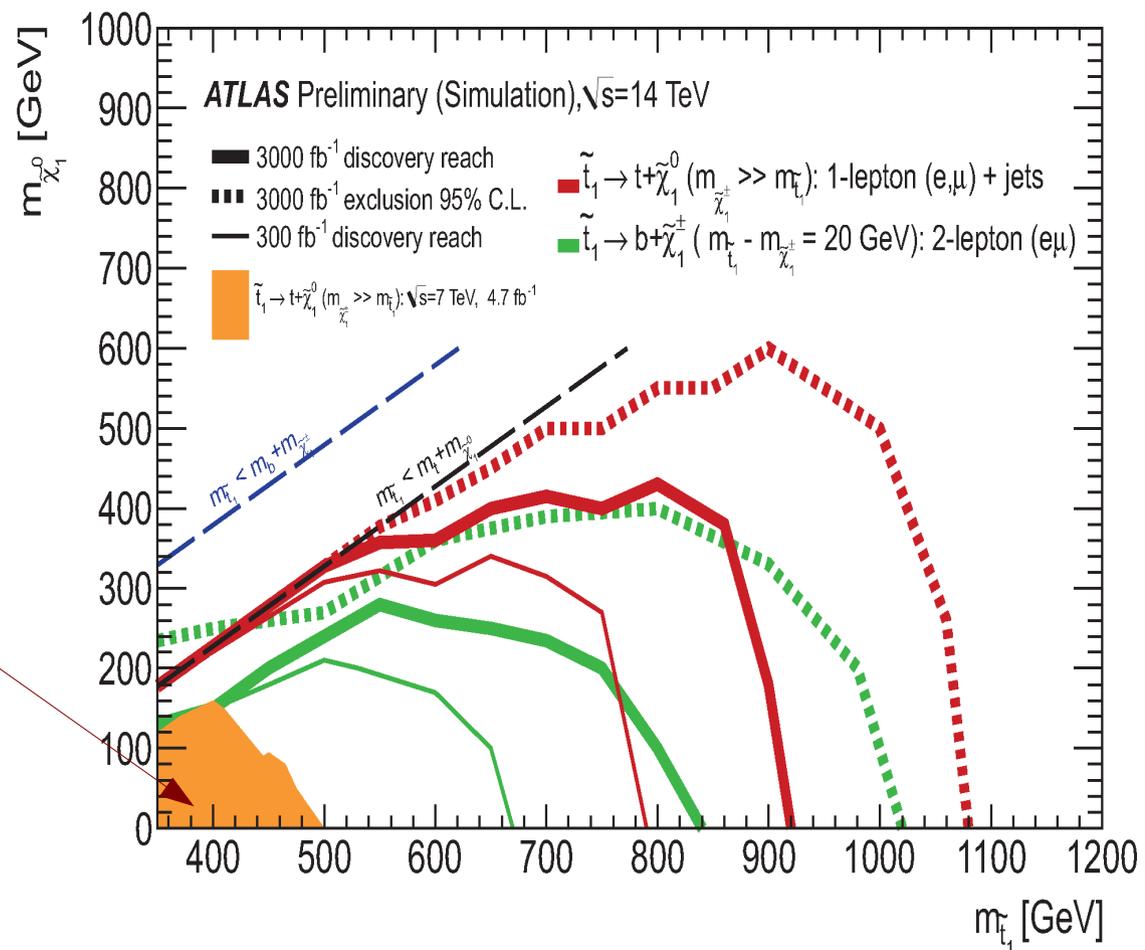
†Small-radius (large-radius) jets are denoted by the letter j (J).

- On n'a rien trouvé non plus, mais on continue de chercher !

SUSY et exotiques : le futur

- Pour l'instant, 25 fb⁻¹ collectés jusqu'en 2012 (7-8 TeV), 35 fb⁻¹ depuis juin 2015 (13 TeV)
- On envisage 300 fb⁻¹ d'ici 2021-2022
- puis 3000 fb⁻¹ pour 2030-2035

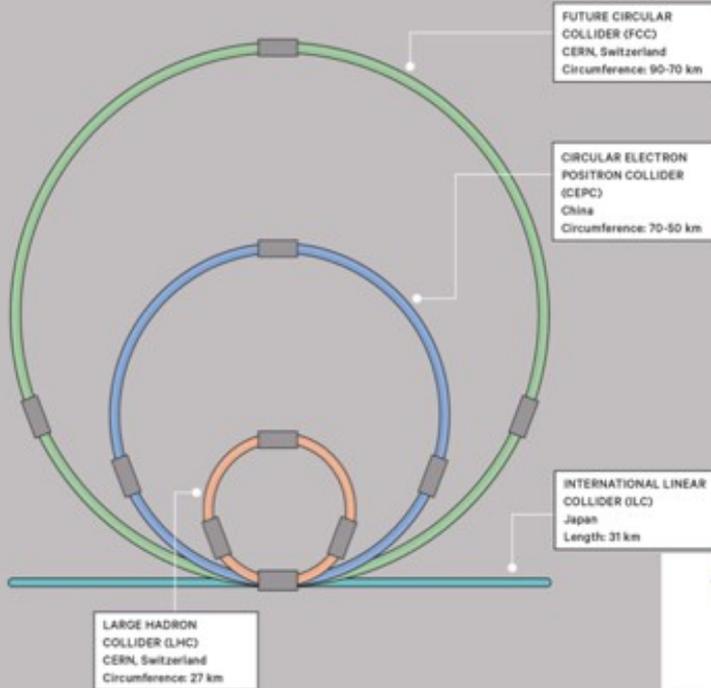
Exclus actuellement



Et après ?

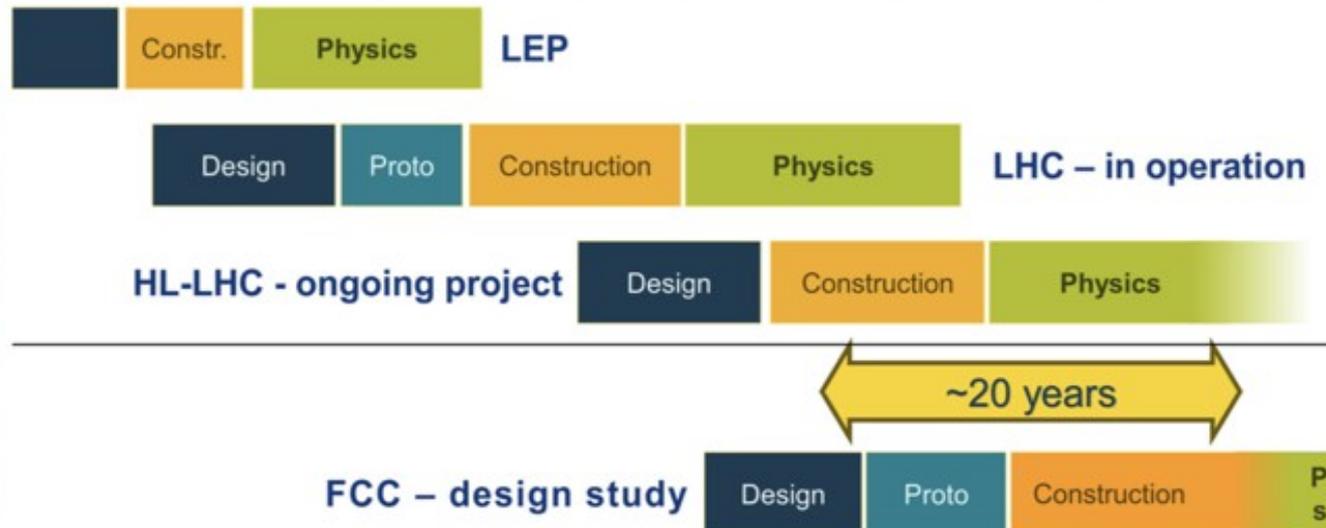
A
CLOSER
LOOK

FUTURE COLLIDERS



CREDIT: COSMOS MAGAZINE

1980 1985 1990 1995 2000 2005 2010 2015 2020 2025 2030 2035 2040



Conclusion

- Vous savez maintenant comment fonctionne un détecteur de particules
- Il est temps d'apprendre à s'en servir
- Prochaine présentation :

**Comment détecter
« pour de vrai »
des particules avec
l'expérience ATLAS**

Nos présentations

Les Masterclasses

ATLAS grand public

ATLAS en direct

ATLAS sur 

ATLAS sur 

ATLAS sur 

ATLAS sur 

Site français du 

Le CPPM

Le CERN 

Le CERN sur 

Nouvelle affiche du SM



Liens

www.cppm.in2p3.fr/Masterclasses

physicsmasterclasses.org

atlas.ch

atlas-live.cern.ch

twitter.com/ATLASexperiment

www.facebook.com/ATLASexperiment

www.google.com/+ATLASexperiment

www.youtube.com/theATLASExperiment

www.lhc-france.fr

www.cppm.in2p3.fr

cern.ch

twitter.com/cern <http://atlasathome.cern.ch>

www.particuleselementaires.fr

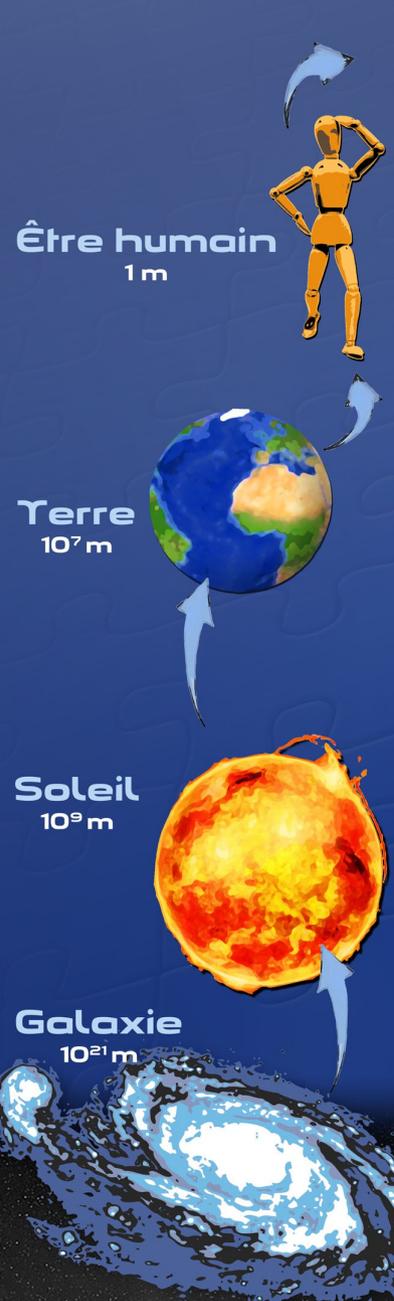
Twitter :

#LHCIMC17

@physicsIMC



Composants élémentaires de la matière



	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
1^{re} famille Constituants de la matière usuelle	ν_e neutrino électron	e électron	u haut / up	d bas / down	$t = 1,6 \cdot 10^{-12}$ s, $Q = 0$, $m = 125$ GeV/c ²
2^e famille Réplique plus massive de la 1 ^{re} famille	ν_μ neutrino muon	μ muon	c charme / charm	s étrange / strange	Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il provoque aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.
3^e famille Réplique plus massive des 1 ^{re} et 2 ^e familles	ν_τ neutrino tau	τ tau	t top	b beau / beauty / bottom	



INTERACTIONS FONDAMENTALES

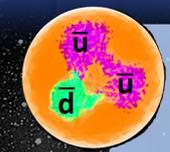
Portée	Interaction
10^{-17} m	Interaction faible
infinie	Interaction électromagnétique
10^{-15} m	Interaction forte
infinie	Gravitation

Bosons Z, W [±]	Désintégrations radioactives β^+ et β^- de certains noyaux instables
Photon γ	Electricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie
Gluons g	Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire
Graviton (?)	Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.



Antiproton

ANTIMATIÈRE

À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

Films utilisés

- Zoom de l'infiniment grand à l'infiniment petit

<http://www.science-et-vie.com/le-grand-zoom-de-l-u>

- Chaîne d'accélération du LHC

<http://cds.cern.ch/record/2020780>

- Détection des particules dans ATLAS

<http://cds.cern.ch/record/1458883>

- ATLAS : un nouvel espoir (épisode I)

<https://cds.cern.ch/record/1458001>

- Le détecteur à pixels

<http://atlas.web.cern.ch/Atlas/Visits/resources/smartl>

- Le calorimètre électromagnétique

Coût du LHC

	Coût en milliards d'€	Nombre de LHC
L'accélérateur seul	~ 3,5	1/3
Ensemble du programme LHC	~10	1
Dissuasion nucléaire française (par an)	~3,5	1/3 par an
Développement de l'Airbus A380	~11	1
JO d'été 2012 de Londres	~11	1
Profits 2012 de Total SA	~11	1 par an
Budget 2013 de l'armée française	~39	4 par an
JO d'hiver 2014 de Sotchi	~37	4
Évasion et fraude fiscale en France (par an)	~70	7 par an
Guerre en Afghanistan pour le budget américain, depuis 2001	~530	53

- Budget annuel du CERN : 1 milliard de francs suisses (800 millions d'€)
- Part de la France : 15 %
- 1 € investi par la France au CERN ► 3 € en retour pour la France