

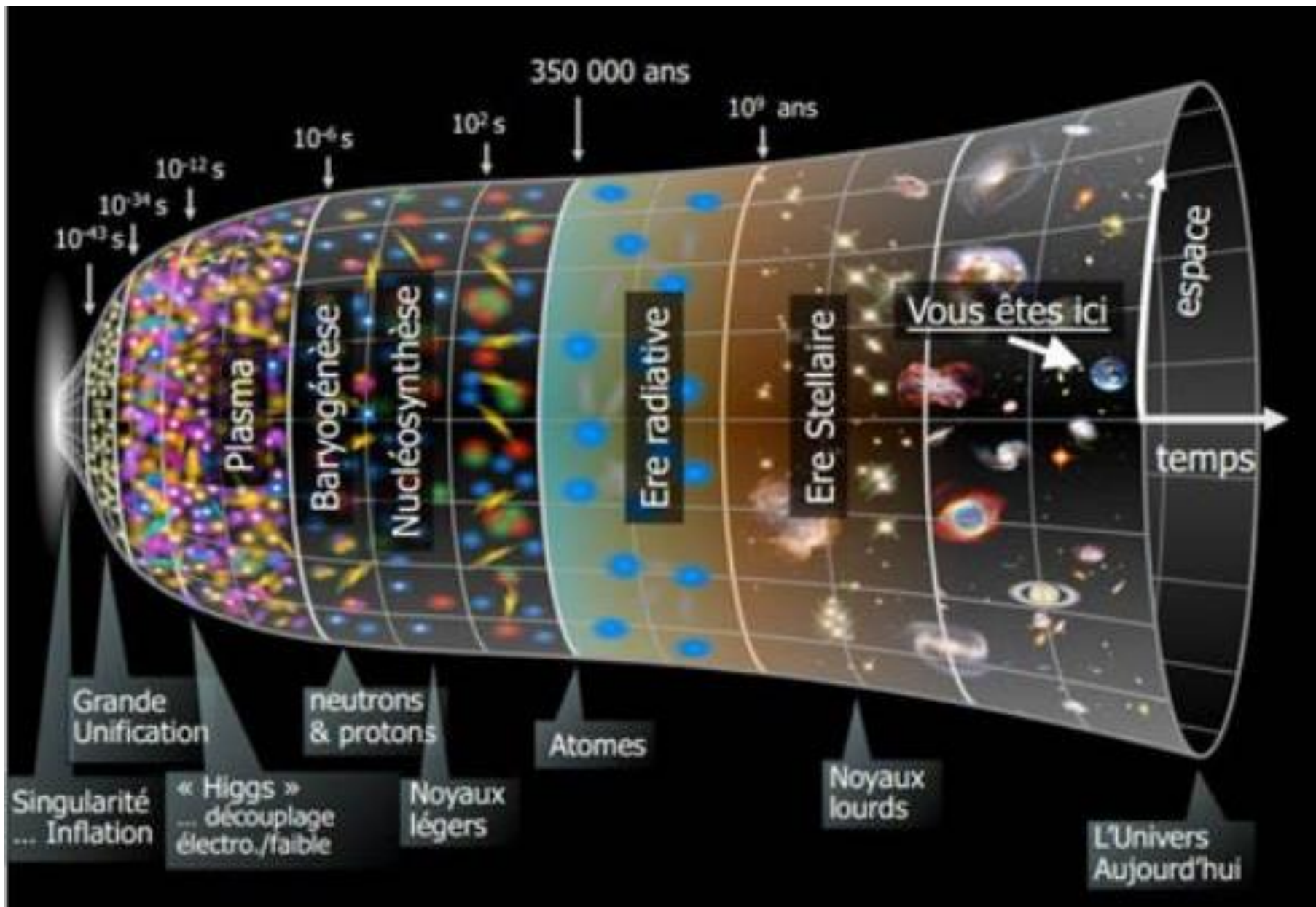


Une histoire courte (donc fausse) de l'Univers

Que cherche-t-on au CERN?

Stefano Matthias Panebianco (CEA, Université Paris Saclay - CERN)

2 Mars 2022



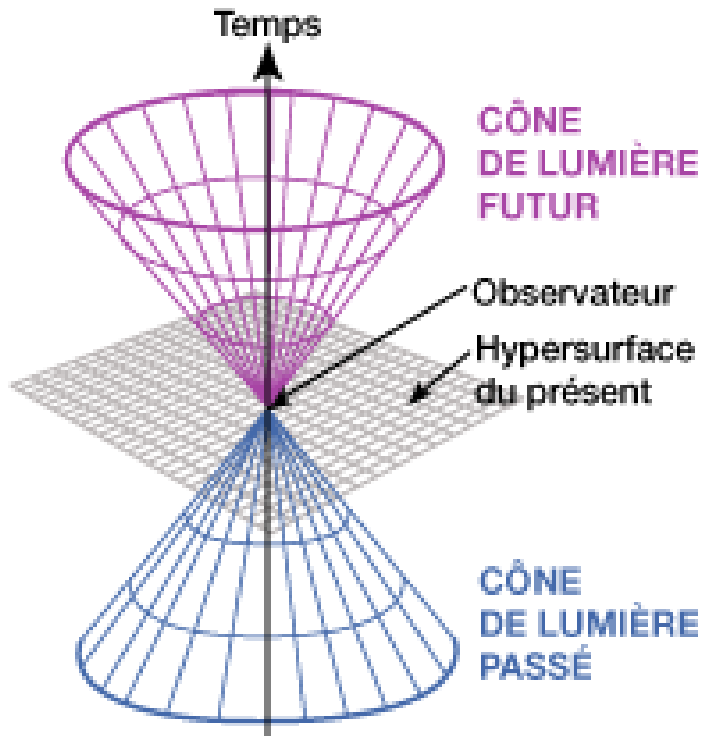
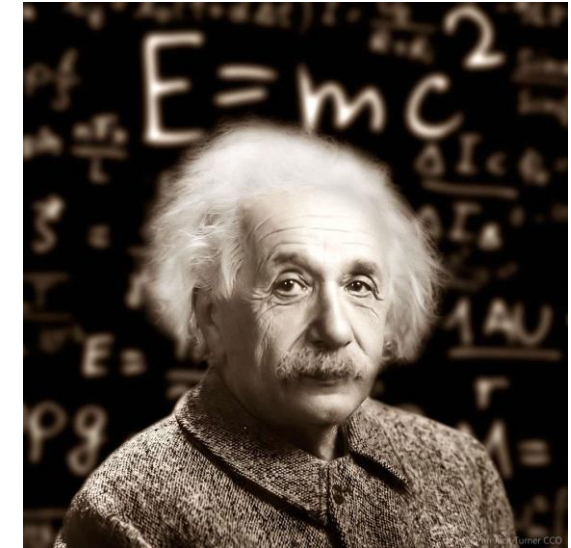
Les outils : la théorie restreinte de la relativité

$$\begin{cases} x' = \gamma(x - \beta ct) \\ y' = y \\ z' = z \\ ct' = \gamma(ct - \beta x) \end{cases} \quad \text{où} \quad \begin{cases} \beta = \frac{v}{c} \\ \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{cases}$$

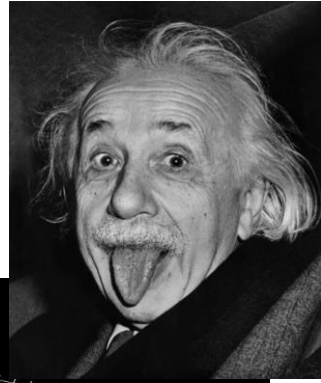
$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

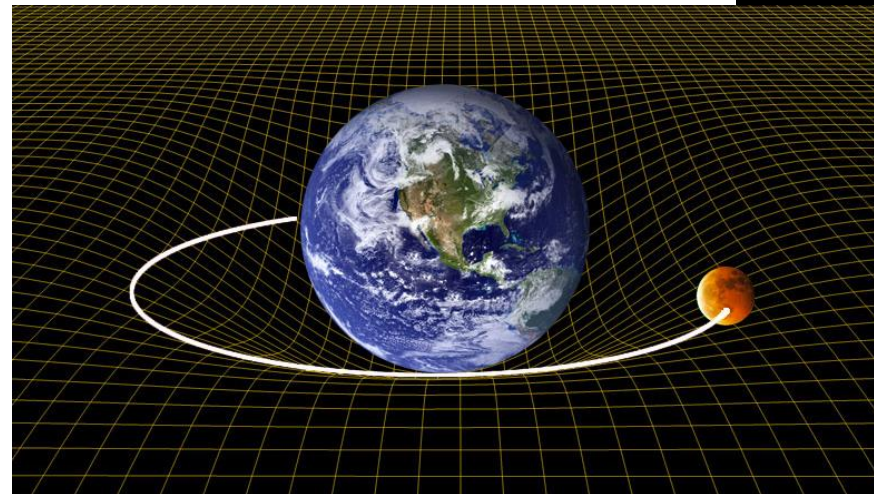
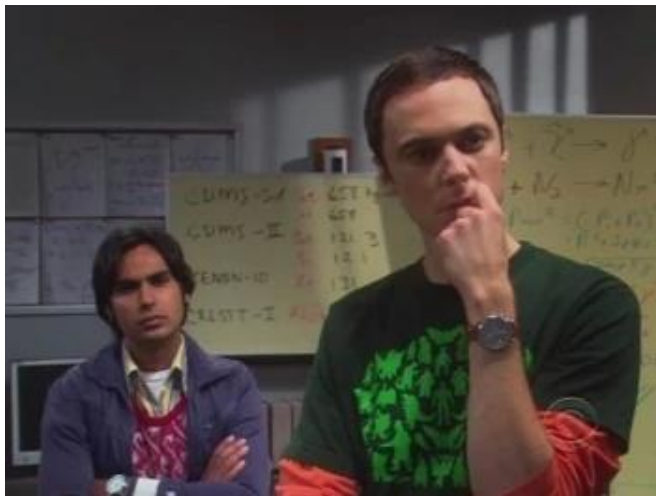
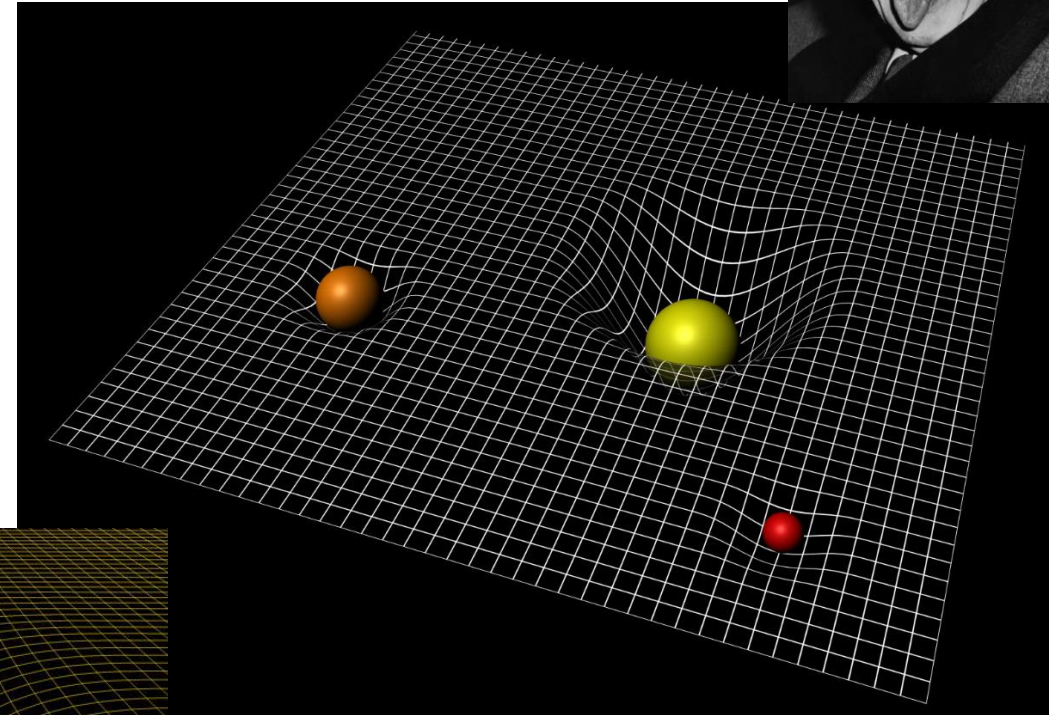
$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$



Les outils : la théorie générale de la relativité

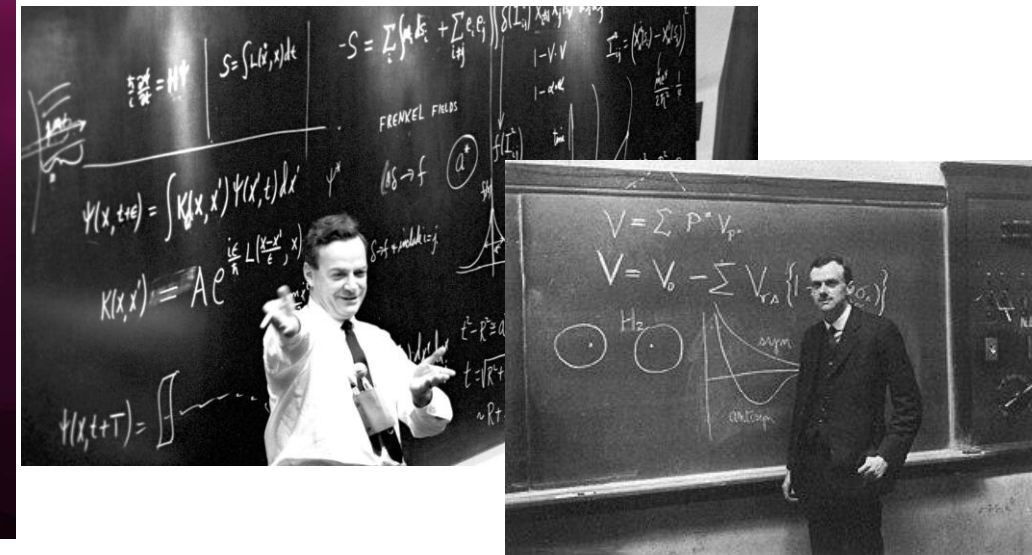


$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$













Les outils : la théorie quantique des champs

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{SM} = & \underbrace{\frac{1}{4} \mathbf{W}_{\mu\nu} \cdot \mathbf{W}^{\mu\nu} - \frac{1}{4} B_{\mu\nu} B^{\mu\nu} - \frac{1}{4} G_{\mu\nu}^a G_a^{\mu\nu}}_{\text{Energies cinétiques et auto-interactions des bosons de jauge}} \\
 & + \underbrace{\bar{L} \gamma^\mu (i\partial_\mu - \frac{1}{2} g\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{W}_\mu - \frac{1}{2} g' Y B_\mu) L + \bar{R} \gamma^\mu (i\partial_\mu - \frac{1}{2} g' Y B_\mu) R}_{\text{Energies cinétiques et interactions électrofaibles des fermions}} \\
 & + \underbrace{\frac{1}{2} |(i\partial_\mu - \frac{1}{2} g\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{W}_\mu - \frac{1}{2} g' Y B_\mu) \phi|^2 - V(\phi)}_{\text{W}^+, \text{W}^0, \gamma, \text{ particules de Higgs et couplages}} \\
 & + \underbrace{g'' (\bar{q} \gamma^\mu T_a q) G_\mu^a}_{\text{Interactions entre quarks et gluons}} + \underbrace{(G_1 \bar{L} \phi R + G_2 \bar{L} \phi_c R + h.c.)}_{\text{Masses des fermions, couplages aux Higgs}}
 \end{aligned}$$

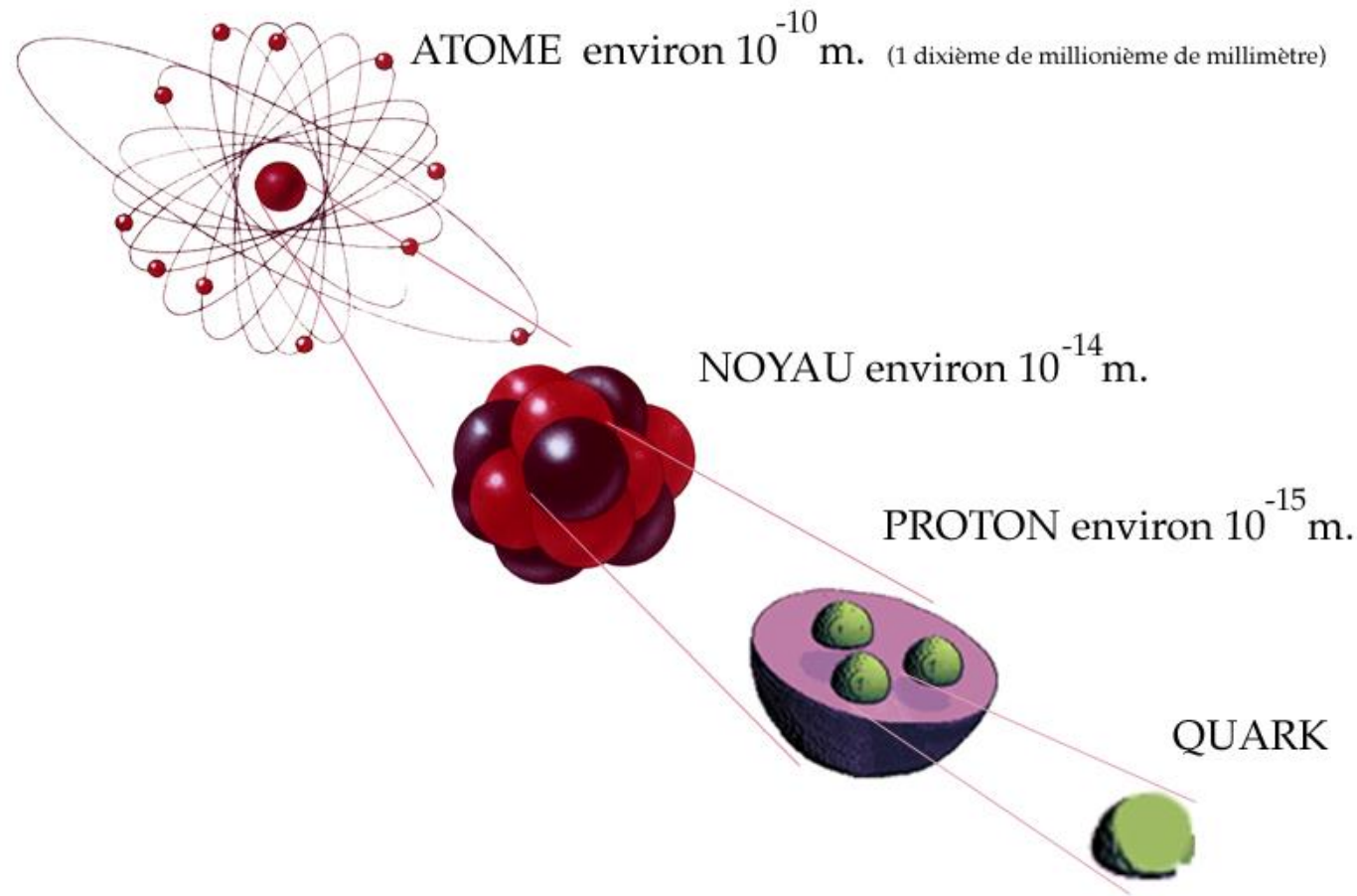


Notre paradigme : le « modèle standard » de la physique des particules

- La nature peut être décrite par un petit nombre de briques fondamentales
- Dans la matière stable, il n'y a que les particules élémentaires de première génération
- Celles de 2^e et 3^e génération se désintègrent mais nous pouvons les produire dans les accélérateurs
- Toutes les particules ont leur antiparticules, avec une charge électrique opposée
- Les bosons de Gauge portent la « charge » de chaque interaction fondamentale
- Le boson de Higgs confère une masse aux particules

Fermions			Bosons			
Q u a r k s	Masse	$\approx 2,3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1275 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 173210 \text{ MeV}/c^2$	0	$\approx 126000 \text{ MeV}/c^2$
	Charge	2/3	2/3	2/3	0	0
	Spin	1/2	1/2	1/2	1	0
						
		up	charm	top	gluon	boson Higgs
		$\approx 4,8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4180 \text{ MeV}/c^2$	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0		
	1/2	1/2	1/2	1		
						
	down	strange	bottom	photon	graviton	
L e p t o n s	Masse	$0,511 \text{ MeV}/c^2$	$105 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1777 \text{ MeV}/c^2$	$91200 \text{ MeV}/c^2$	
	Charge	-1	-1	-1	0	
	Spin	1/2	1/2	1/2	1	
						
		électron	muon	tauon	boson Z	
		$< 0,0000022 \text{ MeV}/c^2$	$< 0,17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15,5 \text{ MeV}/c^2$	$80400 \text{ MeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1		
	1/2	1/2	1/2	1		
						
	neutrino élect.	neutrino muon.	neutrino tauique	boson W		
	1 ^{ère}	2 ^{ème}	3 ^{ème}	← générations		

Le but ultime : étudier la structure de la matière à toutes les échelles...





Et le CERN dans tout ça?

Le CERN : où



**CERN : Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire
(Laboratoire Européen de Physique des Particules)**

Le CERN : quoi

~2300 staff
~1620 collaborateurs non staff
~11000 utilisateurs
Budget annuel ~1000 MCHF



- Le CERN a été fondé en 1954 par 12 pays européens et compte aujourd'hui 23 Etats membres
- Depuis les débuts du CERN, notre activité principale est la **physique fondamentale**. Notre travail ici vise à mieux comprendre de quoi est fait l'Univers et comment il fonctionne.
- **La science au service de la paix** : aux termes de la Convention du CERN, « *[l']Organisation s'abstient de toute activité à fins militaires et les résultats de ses travaux expérimentaux et théoriques sont publiés ou de toute autre façon rendus généralement accessibles.* »

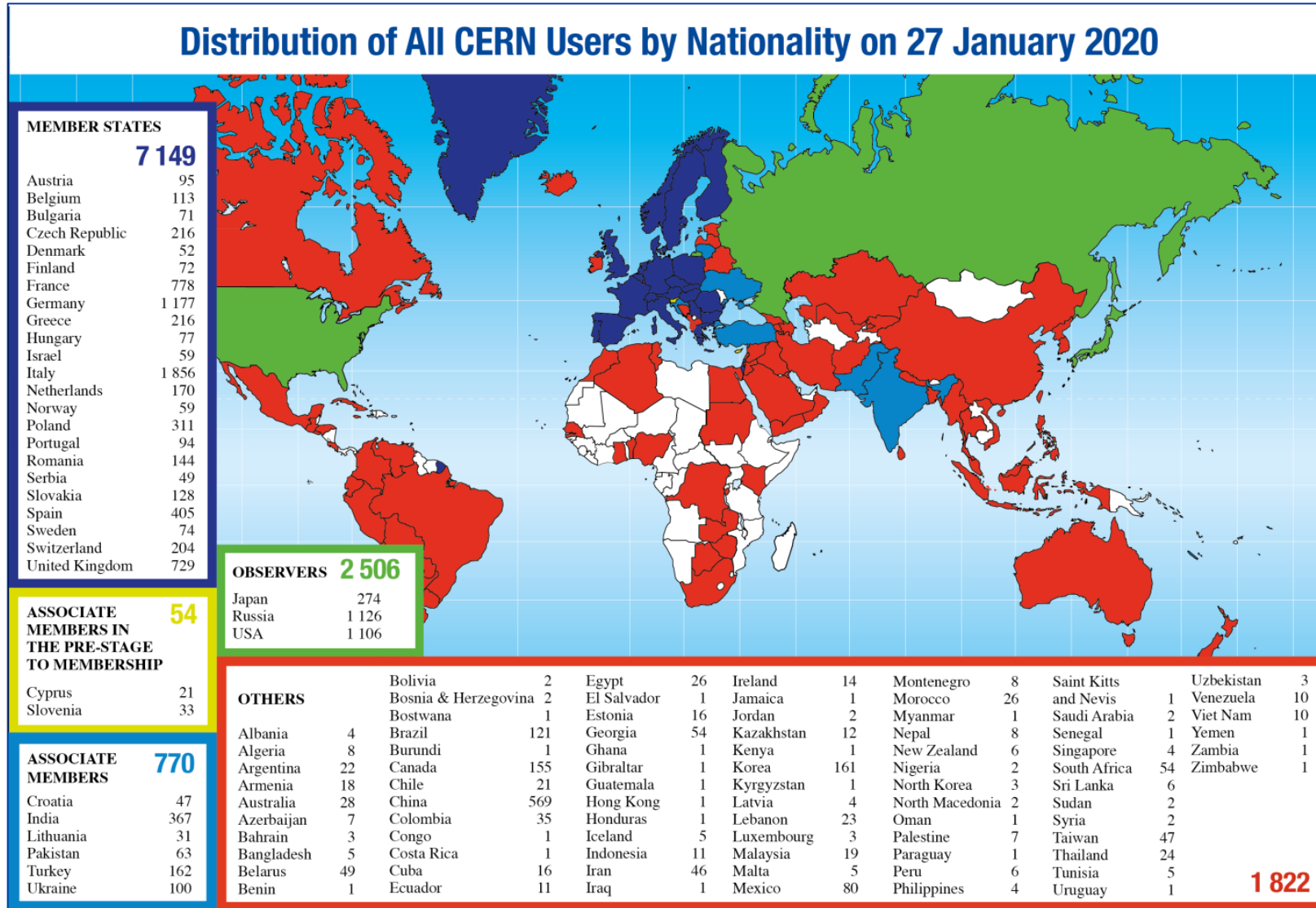
États membres : Allemagne, Autriche, Belgique, Bulgarie, Danemark, Espagne, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Israël, Italie, Norvège, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République tchèque, Roumanie, Royaume-Uni, Serbie, Slovaquie, Suède, Suisse

États membres associés : Croatie, Inde, Lettonie, Lituanie, Pakistan, Turquie, Ukraine

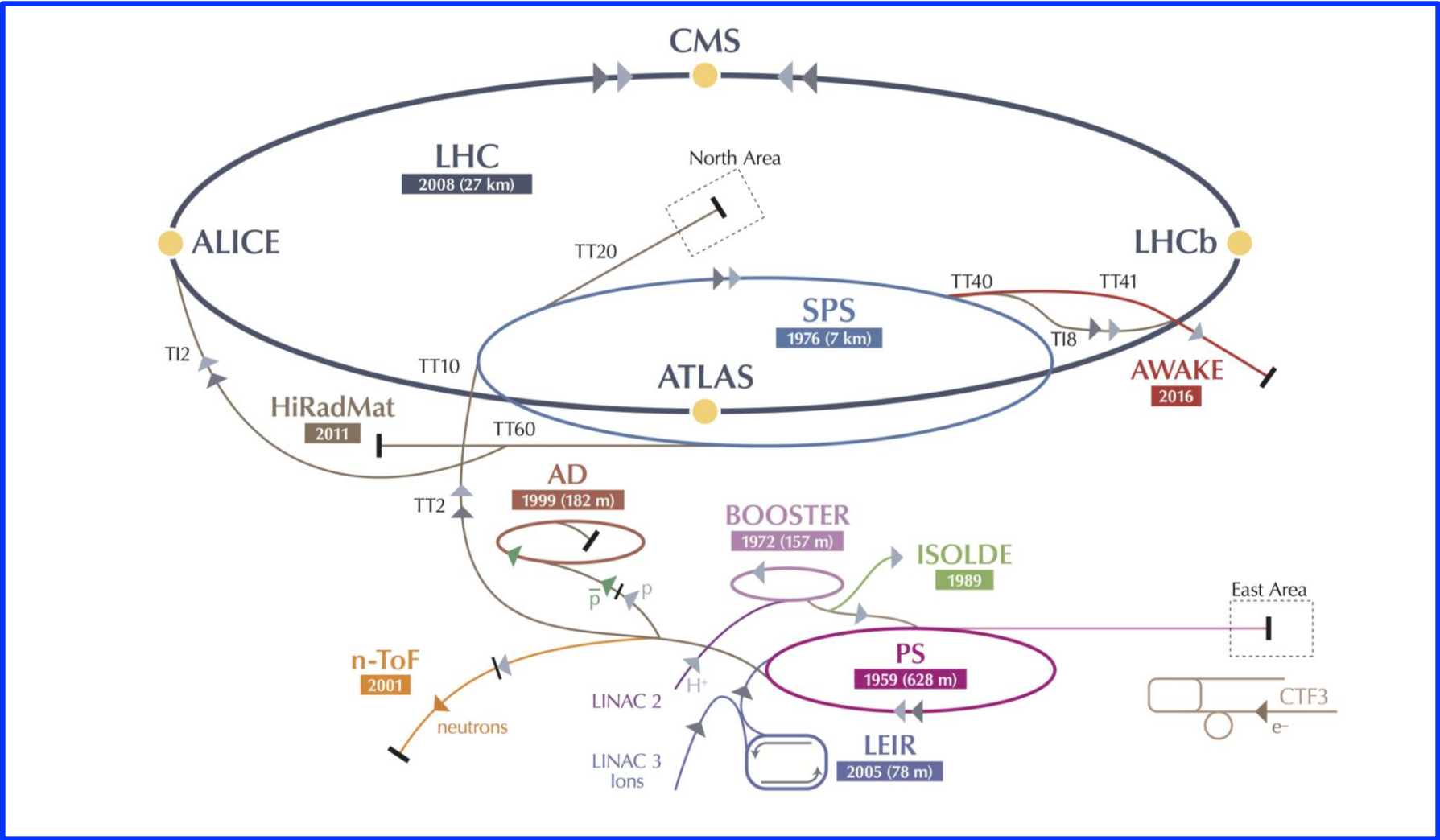
États membres associés en phase préalable à l'adhésion : Chypre, Estonie, Slovénie

Observateurs au Conseil : États-Unis, Japon, Fédération de Russie, Union européenne, JINR et UNESCO

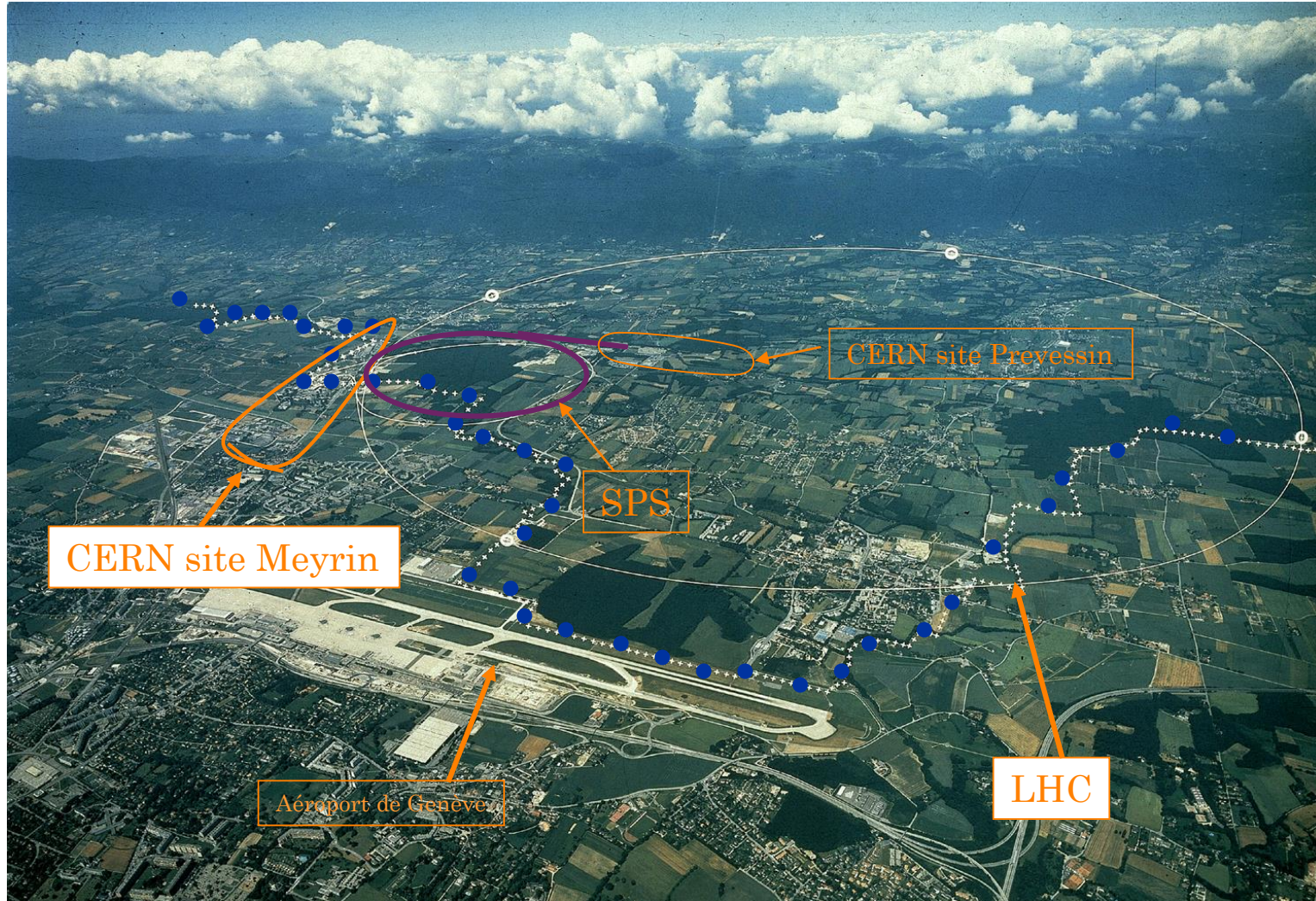
Le CERN : qui



Le CERN : comment



Le CERN : comment



Pourquoi des accélérateurs

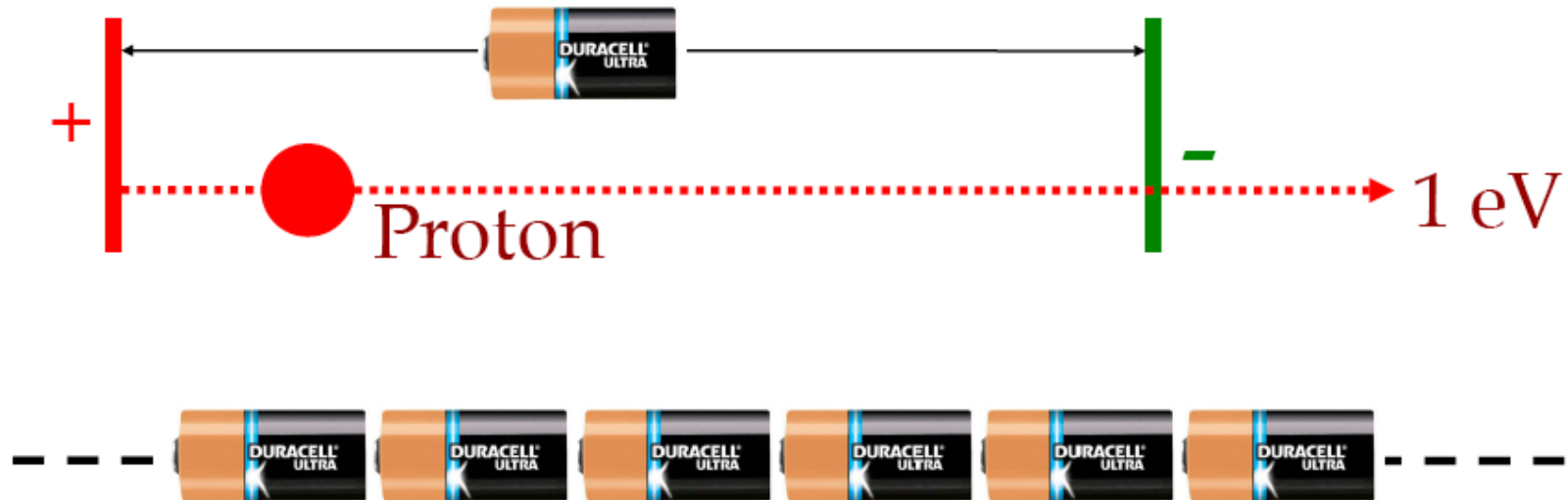
- Reproduire en laboratoire les conditions expérimentales de l'Univers primordial
- Produire et étudier les briques fondamentales du modèle standard
- Comment faire cela?
 - Les particules élémentaires peuplent le vide quantique à l'état « virtuel » (hors de leur couche de masse)
 - Déposer dans le vide quantique une quantité d'énergie suffisante pour exciter les particules virtuelles pour qu'elle deviennent réelles (sur couche de masse)

$$E^2 - |\vec{p}|^2 c^2 = m_0^2 c^4$$

Fermions			Bosons		
Q u a r k s	Masse = 2,3 MeV/c ² Charge 2/3 Spin 1/2  up	Masse = 1275 MeV/c ² Charge 2/3 Spin 1/2  charm	Masse = 173210 MeV/c ² Charge 2/3 Spin 1/2  top	0 0 1  gluon	= 126000 MeV/c ² 0 0  boson Higgs
	= 4,8 MeV/c ² -1/3 1/2  down	= 95 MeV/c ² -1/3 1/2  strange	= 4180 MeV/c ² -1/3 1/2  bottom	0 0 1  photon	 graviton
	Masse 0,511 MeV/c ² Charge -1 Spin 1/2  électron	105 MeV/c ² -1 1/2  muon	= 1777 MeV/c ² -1 1/2  tauon	91200 MeV/c ² 0 1  boson Z	B o s o n s d e J a c q u e
< 0,0000022 MeV/c ² 0 1/2  neutrino élect.	< 0,17 MeV/c ² 0 1/2  neutrino muon.	< 15,5 MeV/c ² 0 1/2  neutrino tauique	80400 MeV/c ² ±1 1  boson W		
1 ^{ère}	2 ^{ème}	3 ^{ème}	← générations		

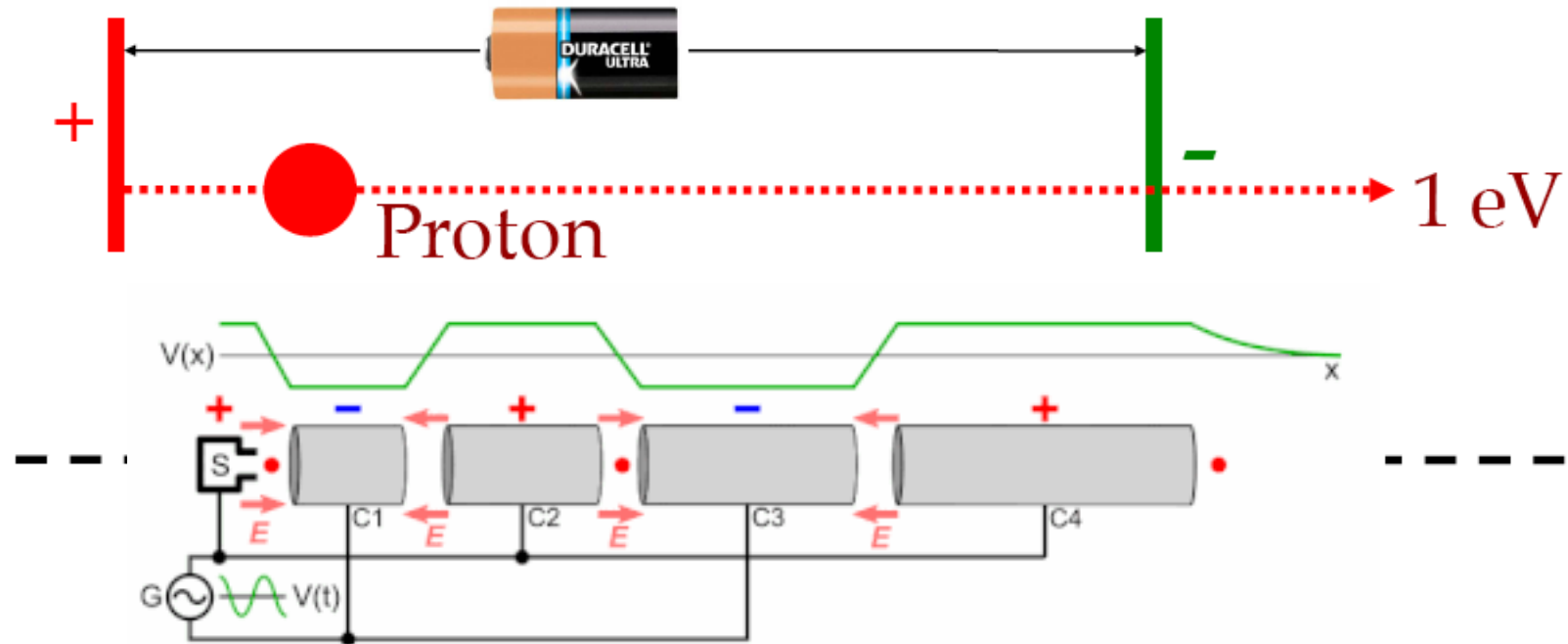
Pourquoi des accélérateurs

L'énergie d'une charge q dans un potentiel U : $E = qU$

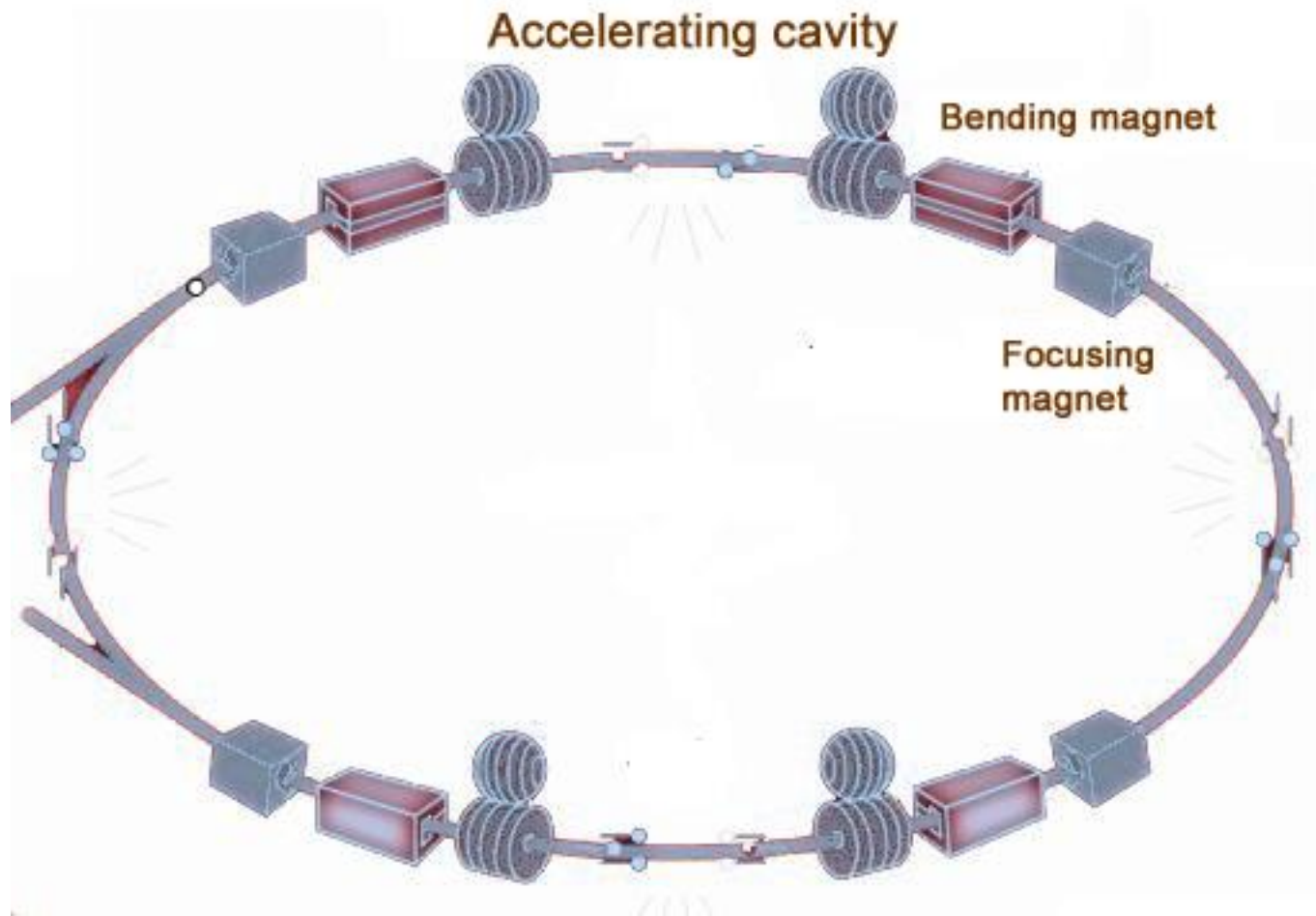


Pourquoi des accélérateurs

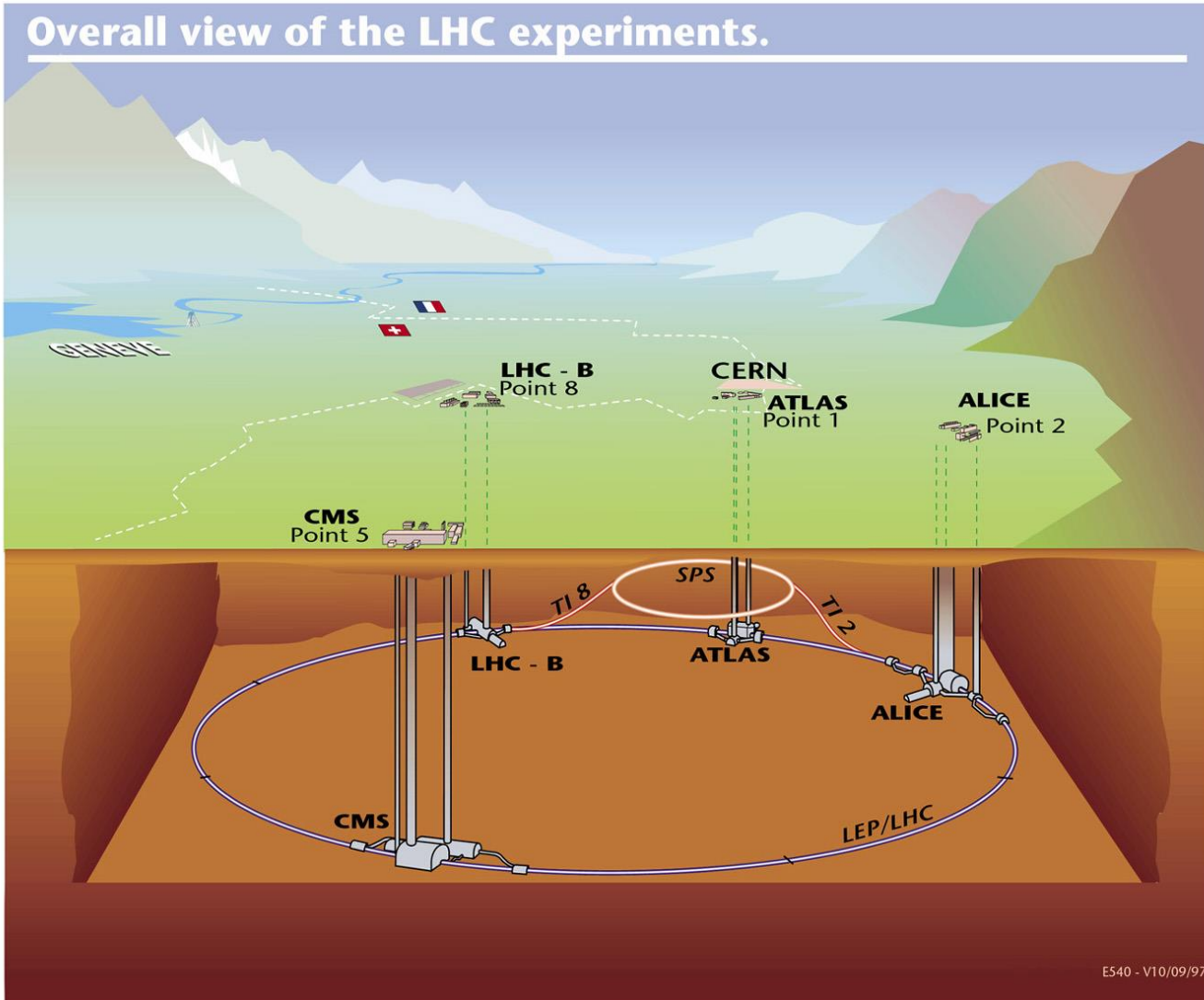
L'énergie d'une charge q dans un potentiel U : $E = qU$



Pourquoi des accélérateurs



Le LHC : grand accélérateur de hadrons



Large Hadron Collider

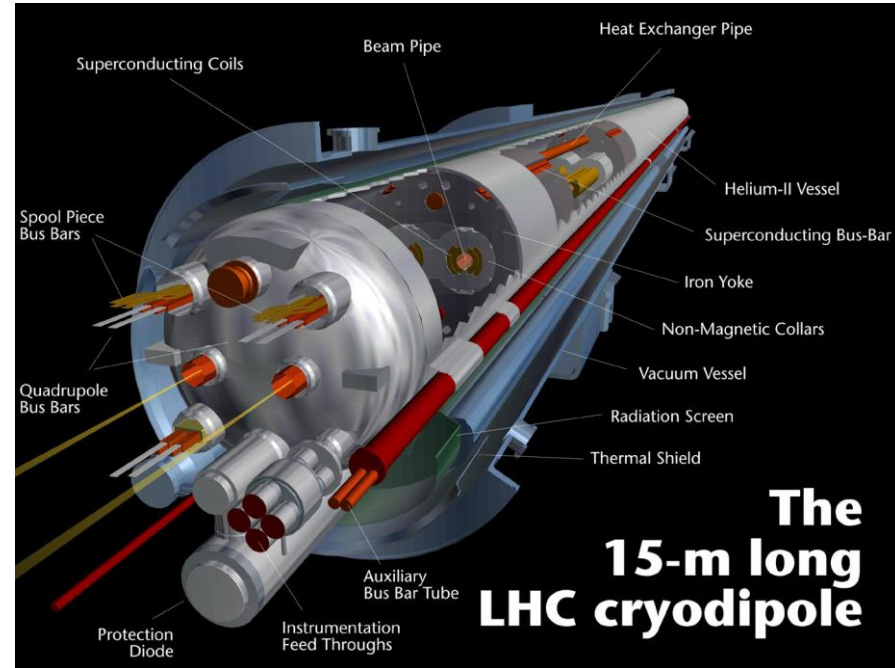
- Le plus grand accélérateur du monde
 - Anneau de 27 km de circonférence, installé entre 60 et 100 m sous terre
- Dans le LHC, deux faisceaux de protons entrent en collision à très haute énergie (7 TeV par faisceau, c'est à dire 14 TeV dans le centre de masse)
- Le LHC est l'installation la plus froide de l'Univers
 - Les aimants supraconducteurs fonctionnent à une température de 1.9 K (hélium liquide)

Le LHC : grand accélérateur de hadrons

8 cavités à fréquence radiofréquence pour chaque faisceau, assemblées par 4 dans un cryomodule, accélèrent les faisceaux



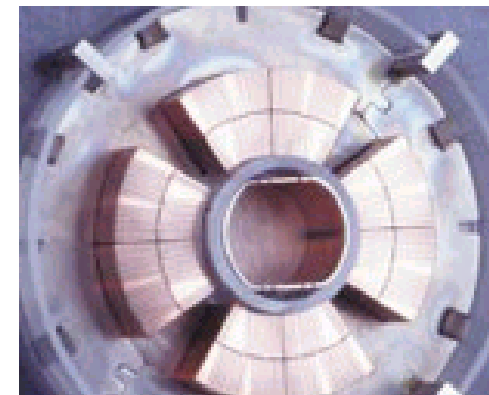
Les faisceaux circulent dans des tuyaux à très haut vide (10^{-13} atm)



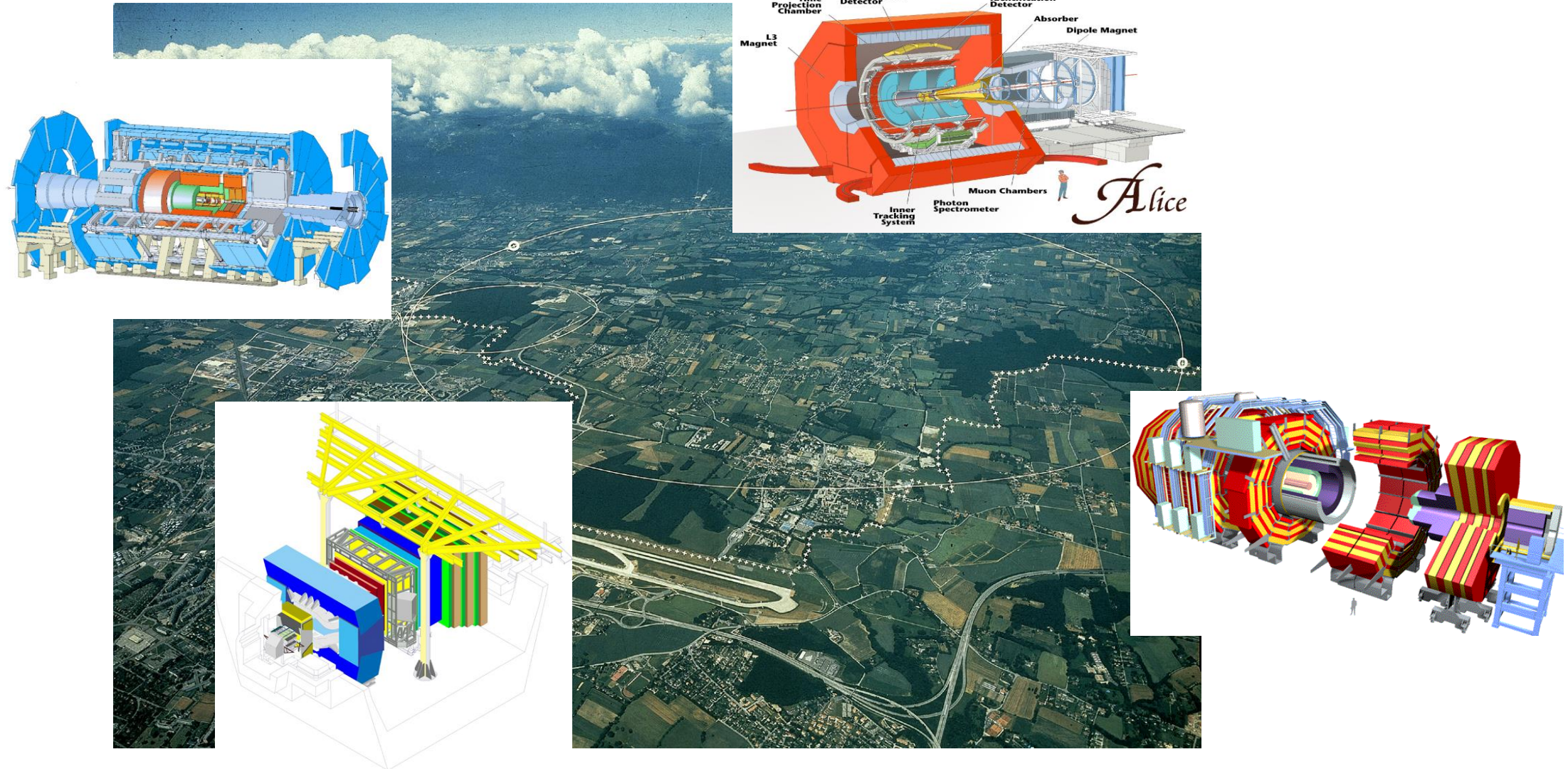
1232 aimants dipolaires courbent les faisceaux



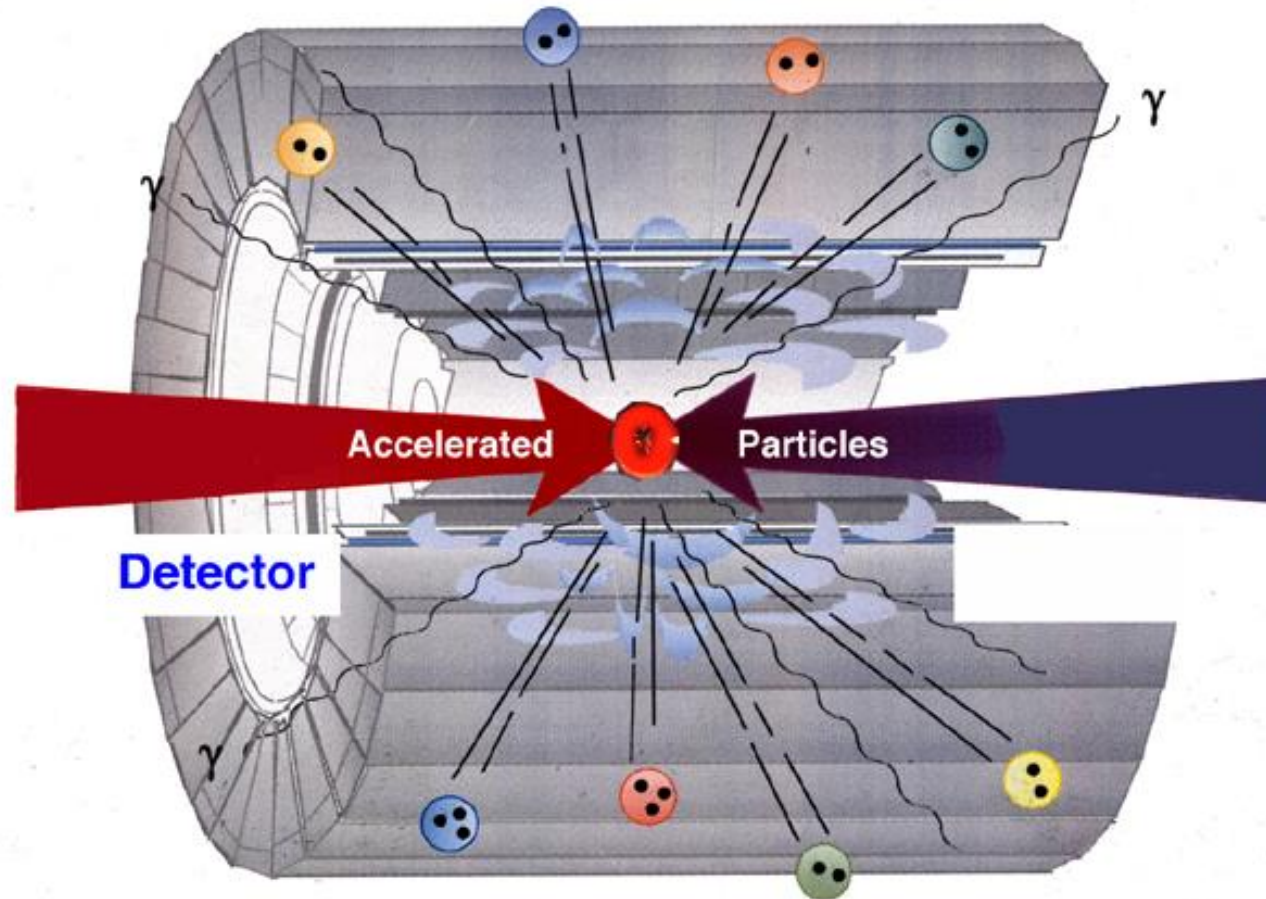
393 aimants quadripolaires focalisent les faisceaux



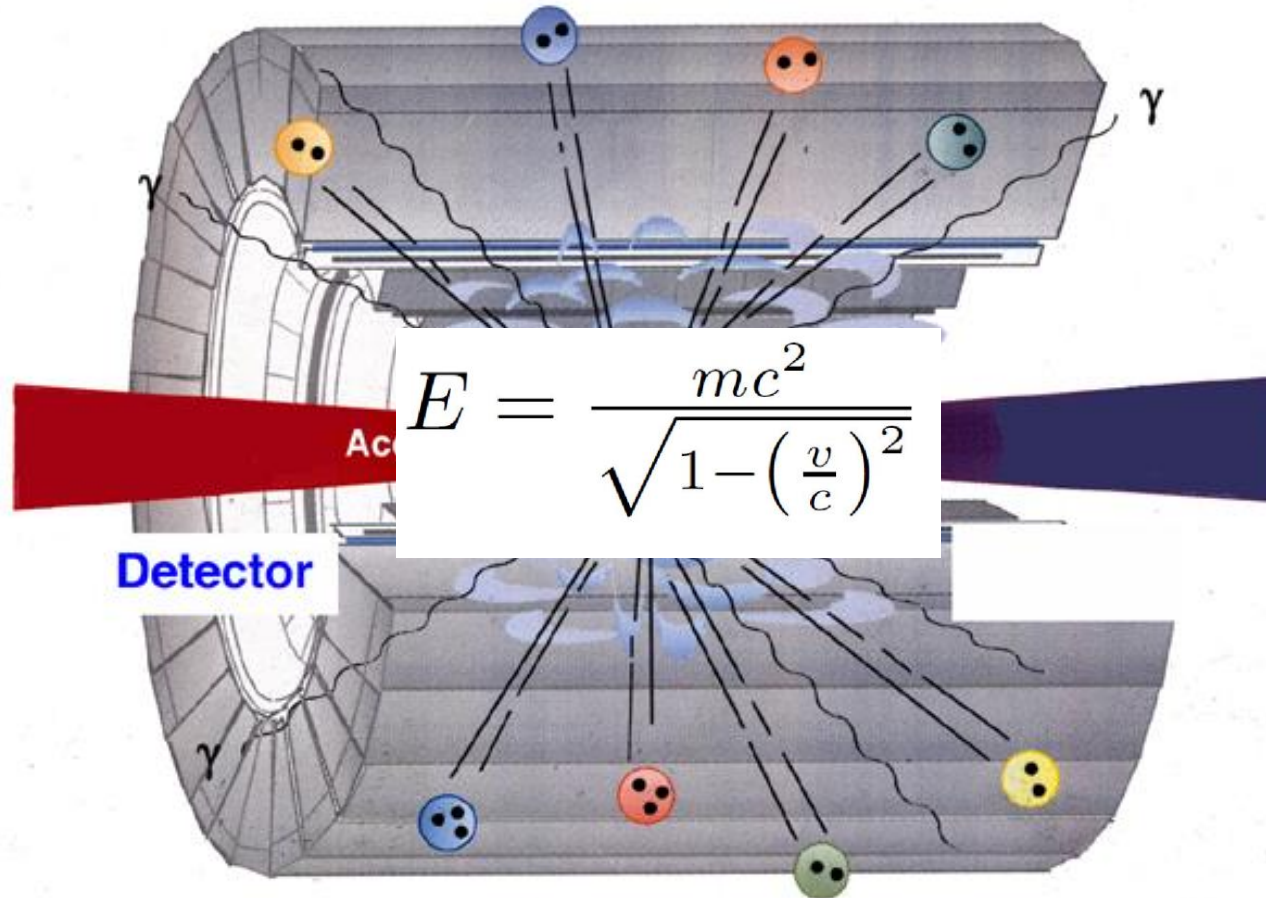
4 immenses caméras pour « voir » les particules



Ce que voit chaque « caméra »



Ce que voit chaque « caméra »



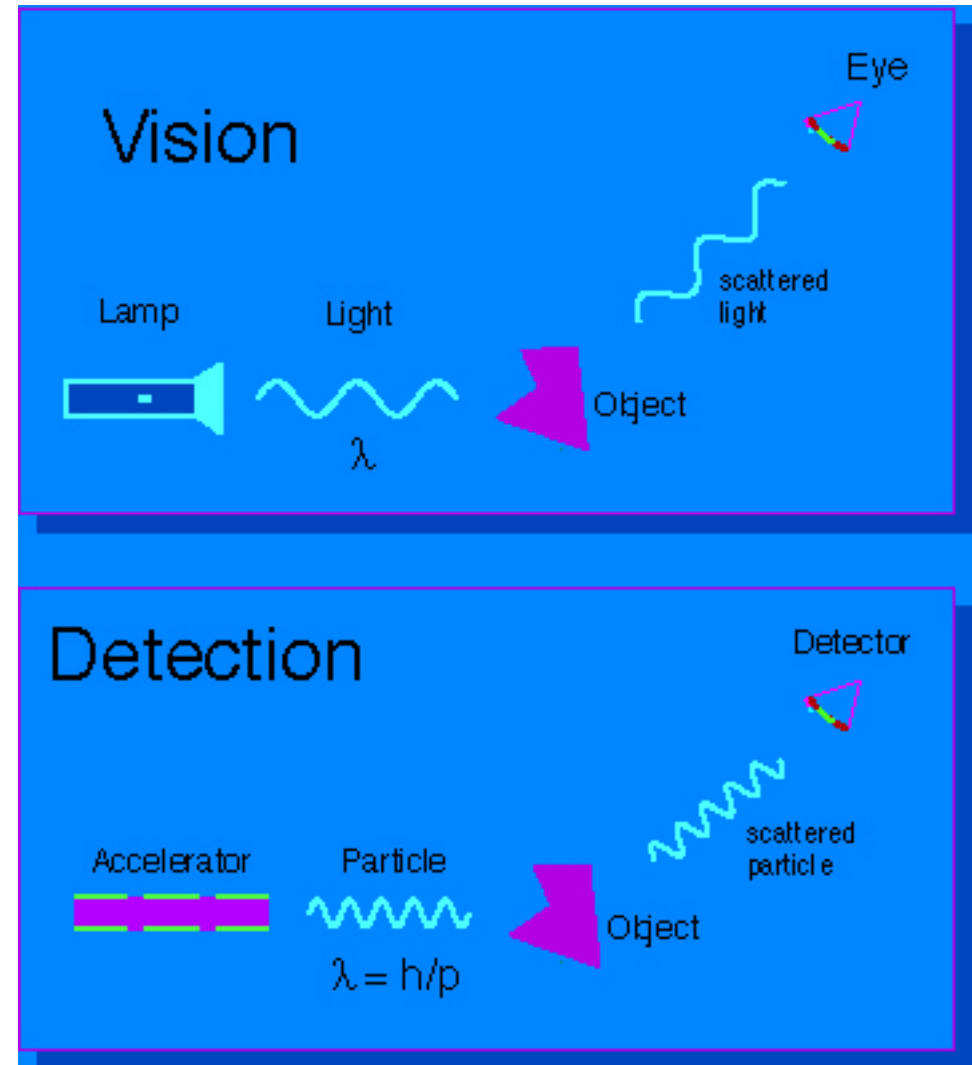
Comment « voir » les particules

Nous voyons les objets dans nos échelles par diffusion de la lumière visible

$$\lambda = 400-700 \text{ nm}$$

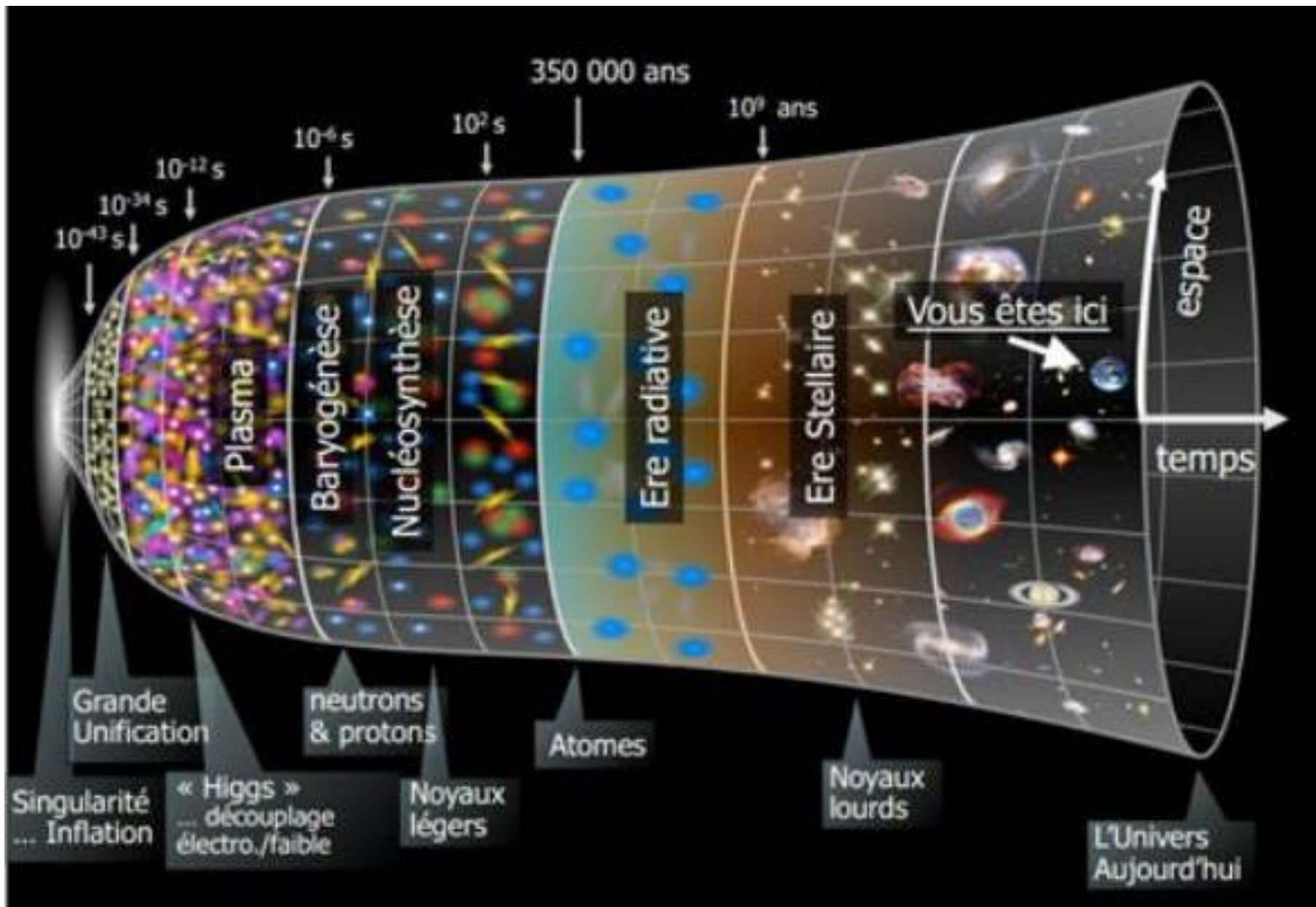
Nous détectons les objets plus petits en diffusant des particules (dont la longueur d'onde est compatible avec leur échelle)

$$\lambda = h/p$$





Voilà à quoi sert le CERN
entre autres...

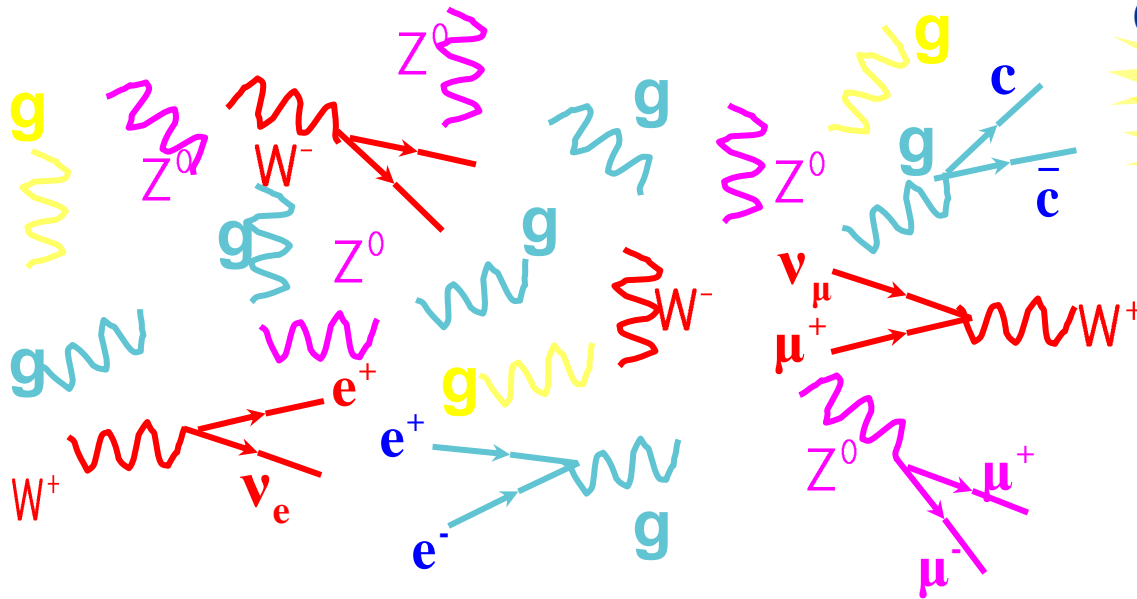


Evolution de l'univers : l'inflation

t_0 : singularité (fluctuation quantique) à l'échelle de Planck

Inflation : l'univers augmente de 10^{30} en 10^{-35} s

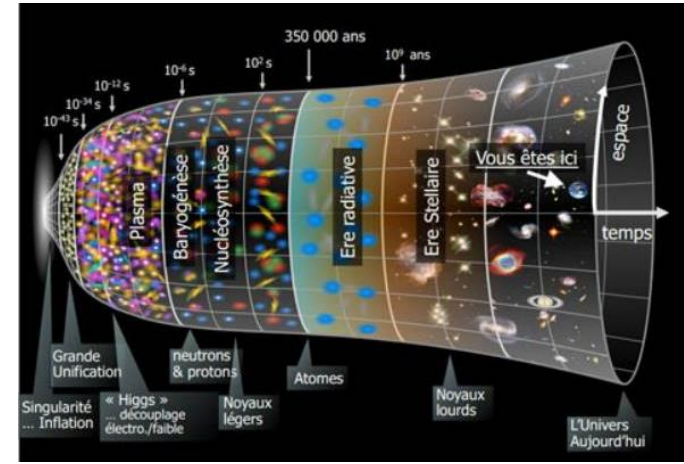
$t_0 + 10^{-12}$ s: échelle d'énergie 1000 GeV



Création par paires
 énergie $\rightarrow e^+ + e^-$
 énergie $\rightarrow q + \bar{q}$

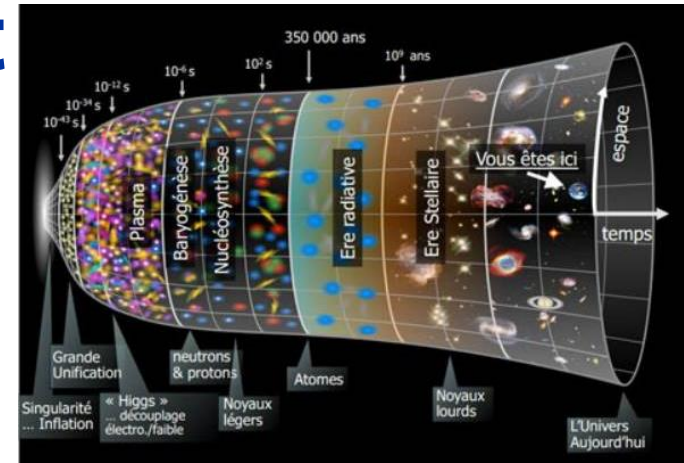
$$E = mc^2$$

Annihilations:
 $e^+ + e^- \rightarrow$ énergie
 $q + \bar{q} \rightarrow$ énergie

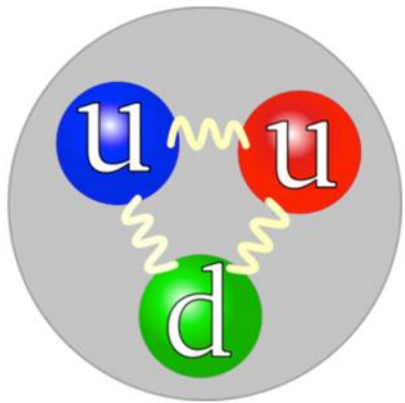


Evolution de l'univers : le confinement

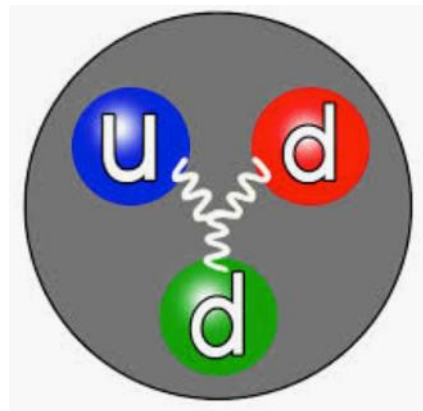
- Les quarks ne peuvent pas rester libre longtemps et forment les hadrons en échangeant des gluons (interaction forte, charge de « couleur »)



Proton

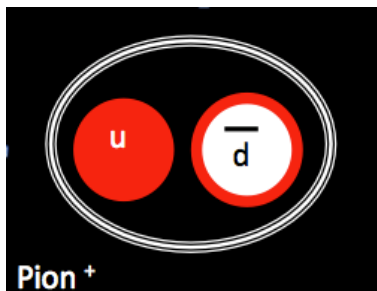


Neutron



Particule	Quark	Charge	Spin	Parité	Isospin	Hypercharge	Nombre baryonique	Nombre leptonique
u	u	2/3	1/2	+	1/2	1/6	1/3	0
d	d	1/3	1/2	+	-1/2	1/6	1/3	0
u	u	2/3	1/2	-	1/2	1/6	1/3	0
d	d	1/3	1/2	-	-1/2	1/6	1/3	0
e	e	-1	1/2	+	0	-1/2	0	1
nu_e	nu_e	0	1/2	+	0	1/2	0	1
nu_mu	nu_mu	0	1/2	+	0	1/2	0	0
nu_tau	nu_tau	0	1/2	+	0	1/2	0	0
W+	u, d	1	0	-	0	0	0	0
W0	u, d	0	0	+	0	0	0	0
W-	d, u	-1	0	-	0	0	0	0
Z0	u, d	0	0	+	0	0	0	0
gamma	u, d	0	0	+	0	0	0	0
g	u, d	0	0	+	0	0	0	0

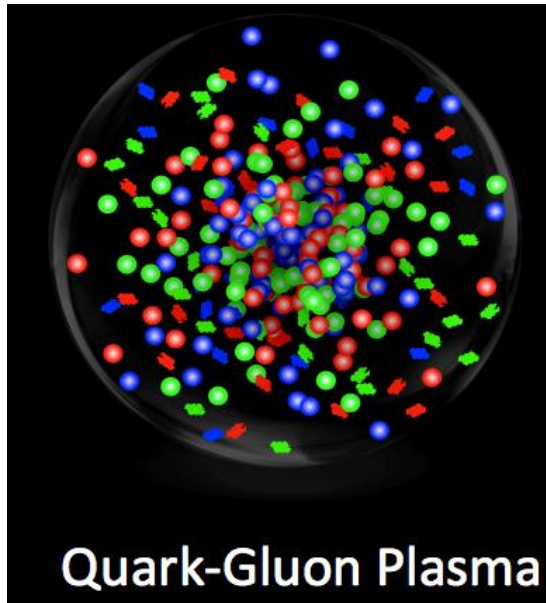
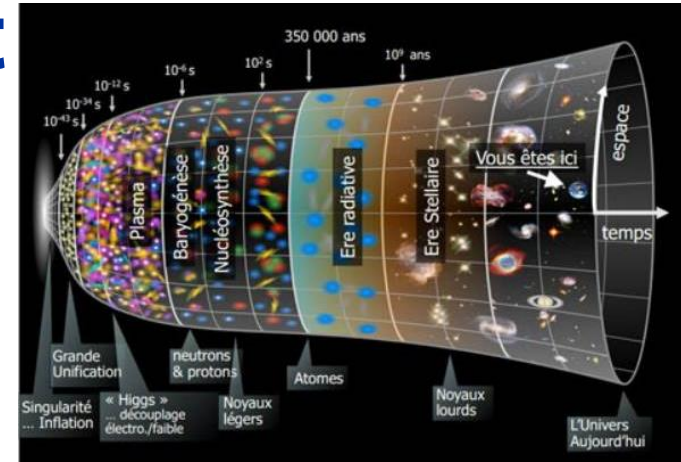
Mais aussi



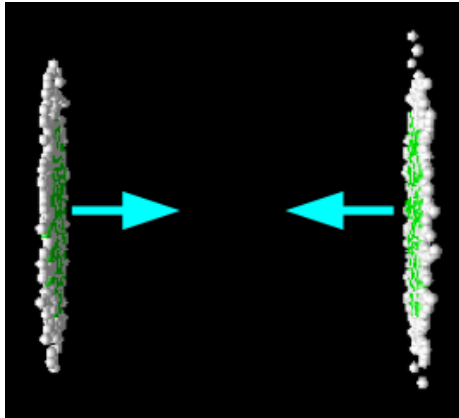
Et plein d'autres...

Evolution de l'univers : le confinement

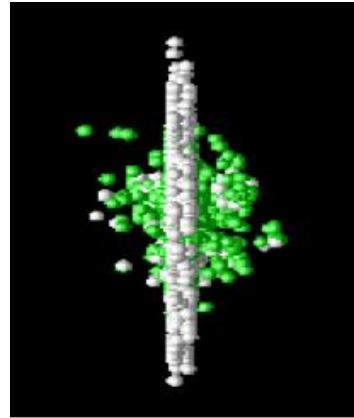
- Les quarks ne peuvent pas rester libre longtemps et forment les hadrons en échangeant des gluons (interaction forte, charge de « couleur »)
- Avant de former des hadrons, les quarks et gluons étaient « libres » dans un état appelé « plasma de quark et gluons » (QGP)



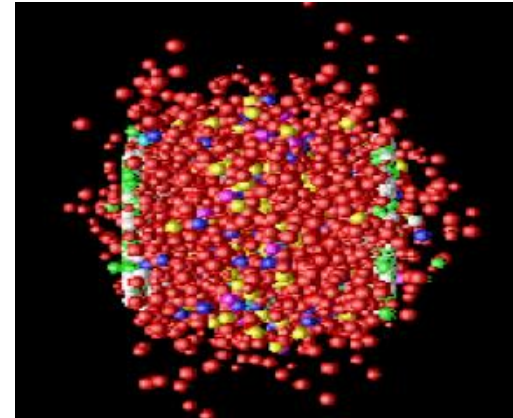
Etude du QGP par les collisions d'ions lourds



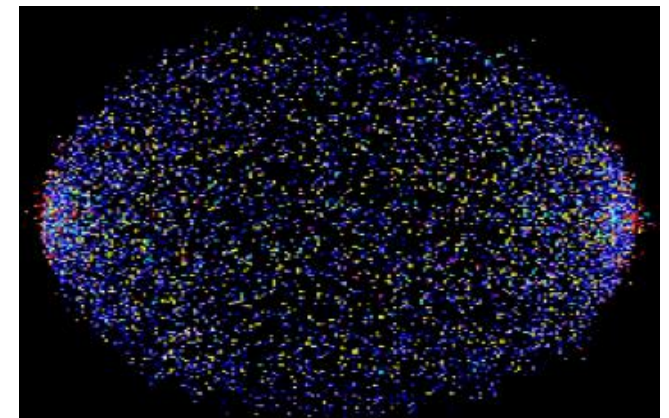
Les faisceaux d'ions Pb voyagent à 99.9999% de la vitesse de la lumière. Les deux ions sont aplatis en disques à cause de la relativité (contraction de Lorentz)



Les deux noyaux (leurs nucléons) rentrent en collision. Leur énergie est transformée en masse => production de quarks et gluons

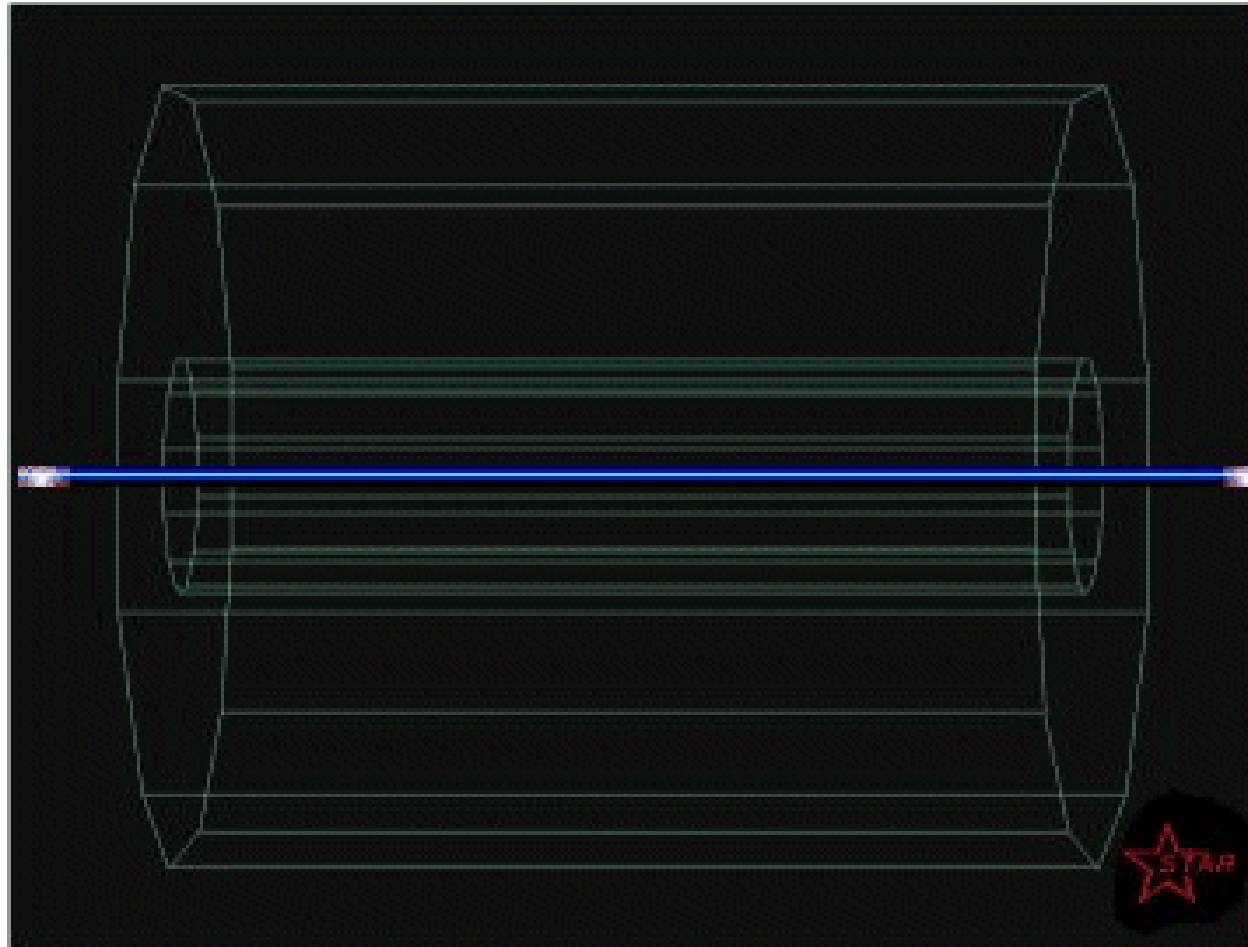


Protons and neutrons "fondent" grâce à la haute température (densité d'énergie); quarks et gluons sont déconfinés (Quark Gluon Plasma) pendant 10^{-23} s

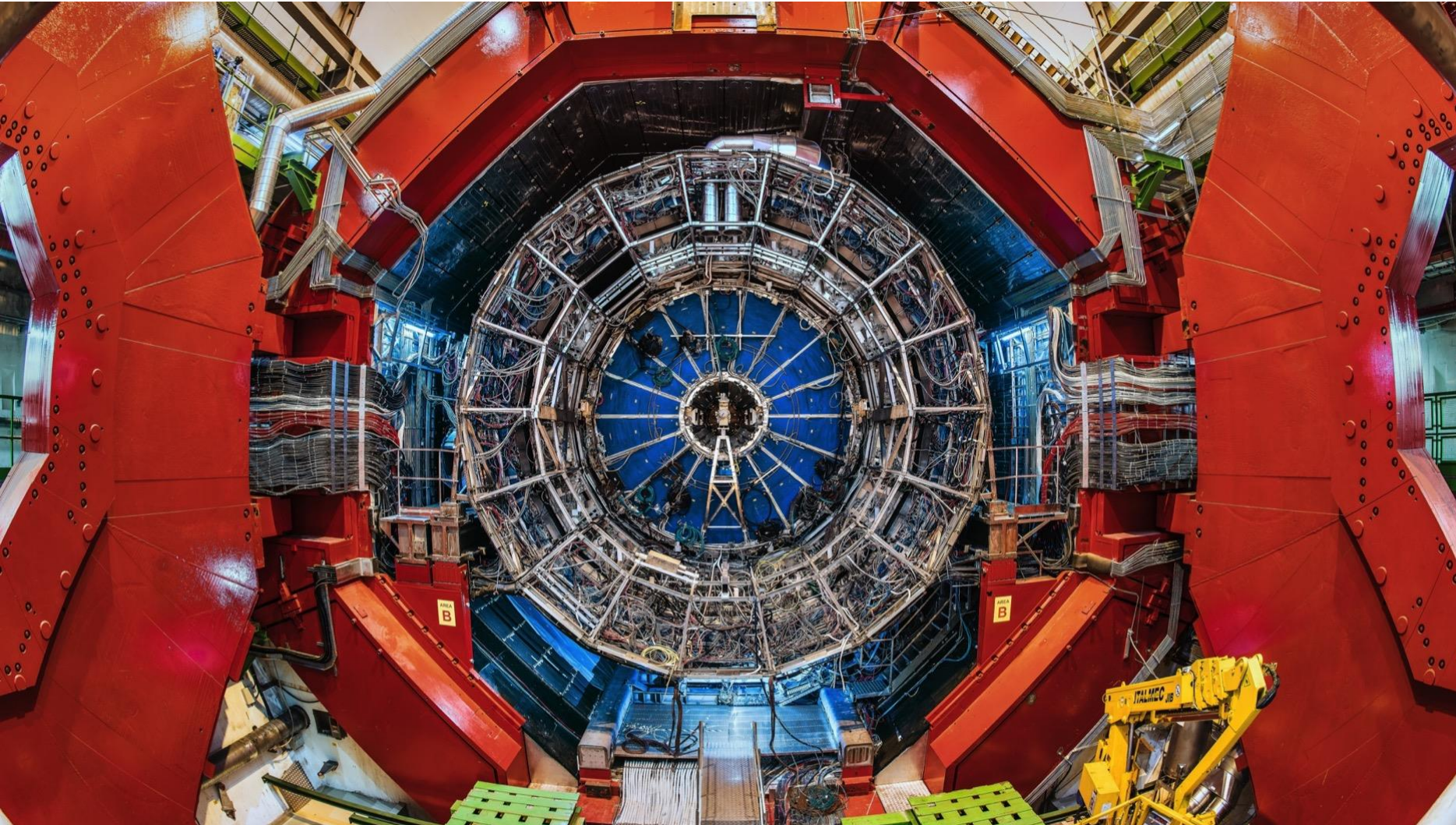


A mesure que la "boule de feu" refroidit et devient moins dense, les quarks et gluons *hadronisent*

Etude du QGP par les collisions d'ions lourds



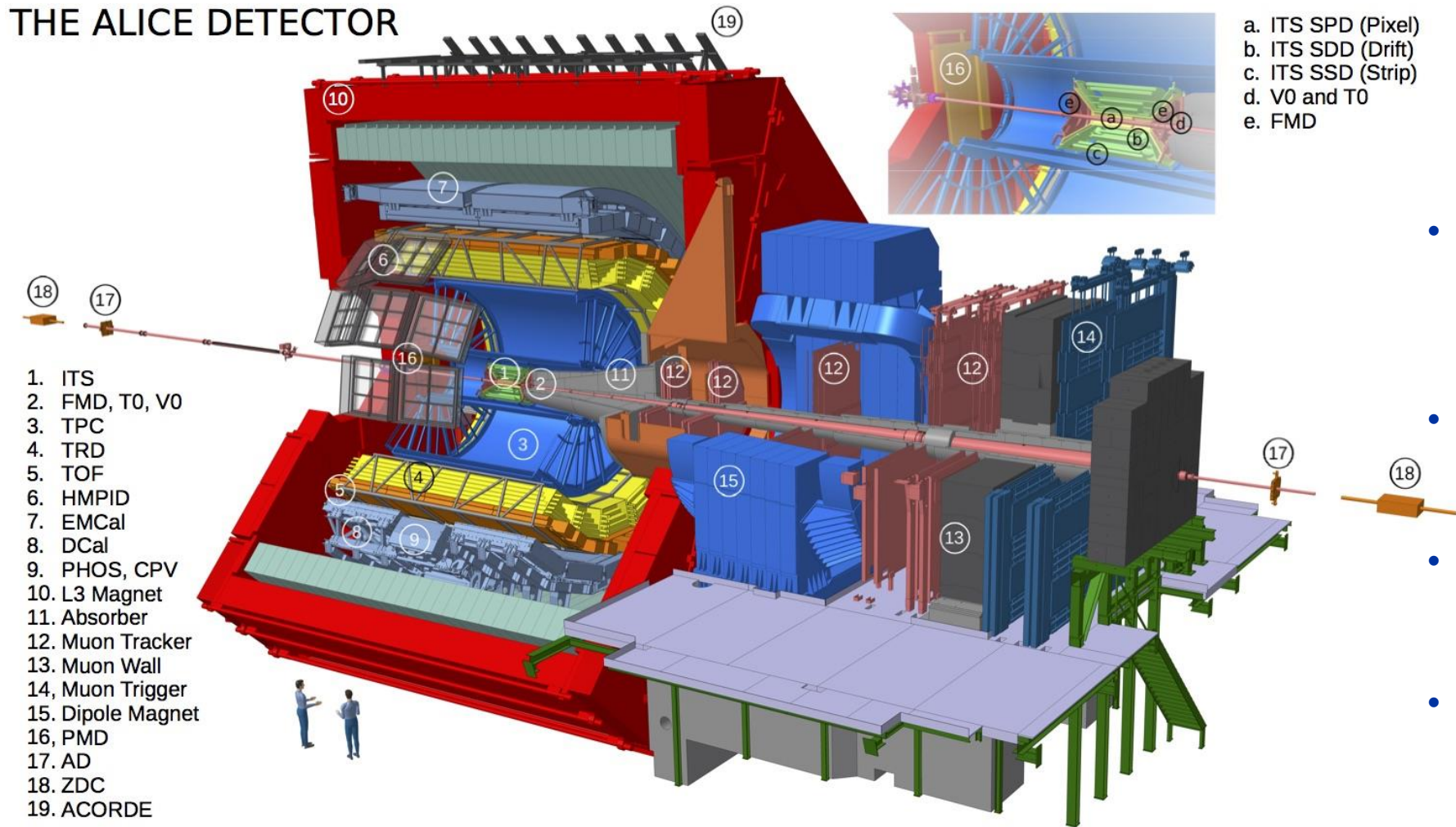
Etude du QGP : l'expérience ALICE



- 60 m sous terre
- 16 m de hauteur
- 16 m de largeur
- 26 m de longueur
- Poids de 1000t
- Champs magnétique : 0.5 T

Etude du QGP : l'expérience ALICE

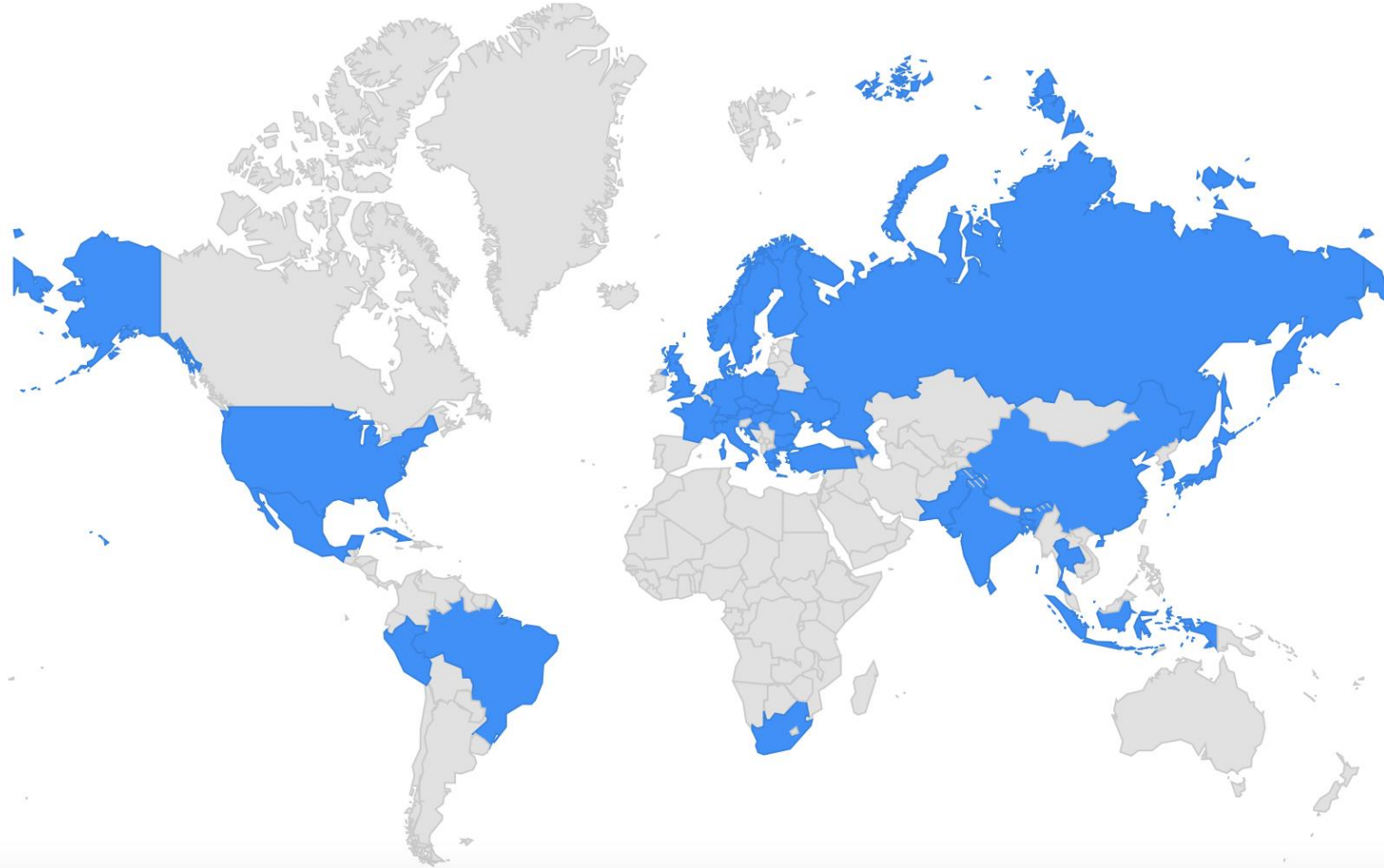
THE ALICE DETECTOR



- Un ensemble de détecteurs complexes à la pointe de la technologie
- 10 ans de données et de résultats importants (2009-2019)
- Des améliorations majeures entre 2019 et 2021
- Une nouvelle aventure de 10 ans pour des nouveaux résultats

Etude du QGP : l'expérience ALICE

40 countries, 172 institutes, 1966 members





**A la fin de la journée vous serez
aussi des experts d'ALICE!**

Mais reprenons notre histoire...

Evolution de l'univers : la baryogenèse

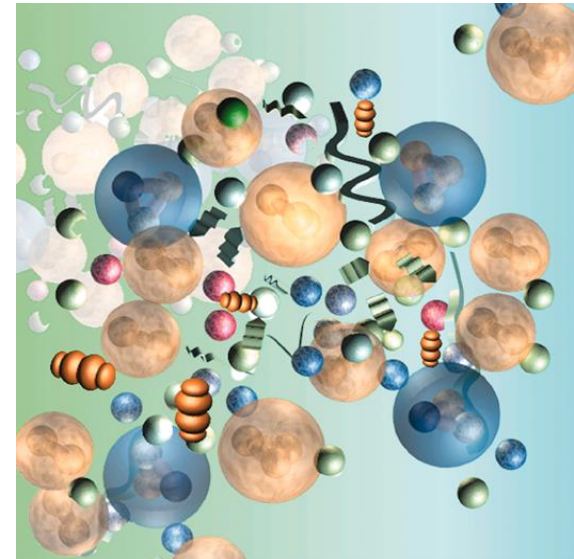
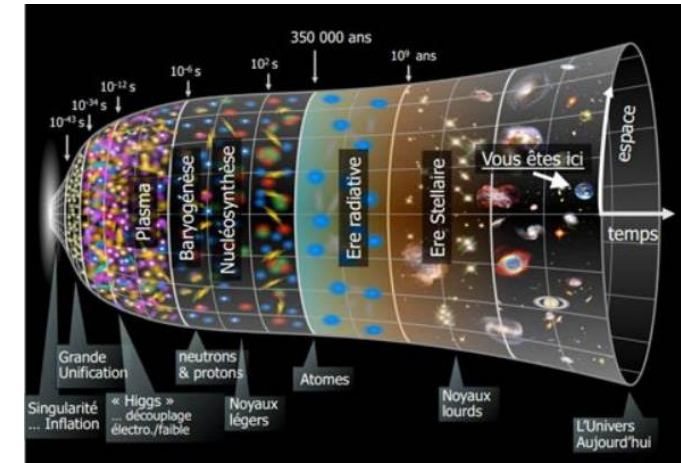
$t_0 + 10^{-10}$ s: échelle d'énergie 100 GeV

Il n'y a plus assez d'énergie pour créer une paire quark-antiquark, seuls restent quelques quarks en excès, les plus légers, up et down, les autres s'étant désintégrés.

$t_0 + 10^{-4}$ s: échelle d'énergie 1 GeV

Ils s'assemblent sous l'effet de la force de couleur pour former des protons et des neutrons (ce sont des baryons).

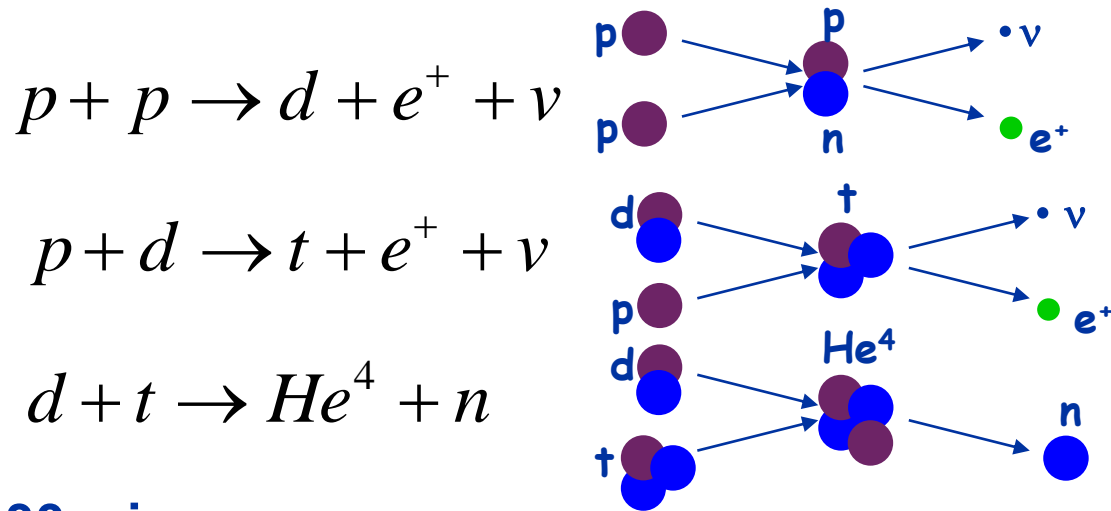
Univers à l'époque: protons, neutrons, électrons, neutrinos et radiation.



Evolution de l'univers : la nucléosynthèse

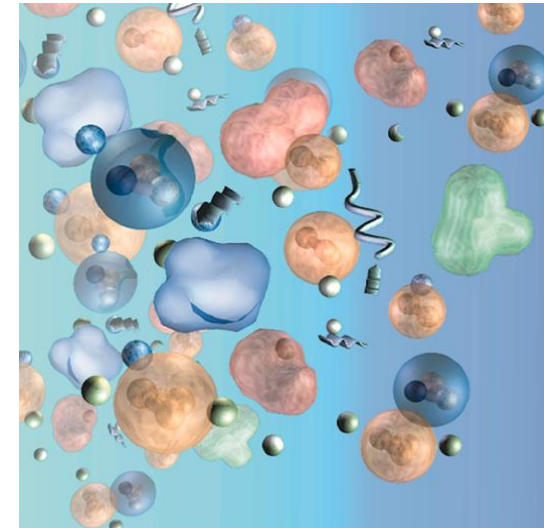
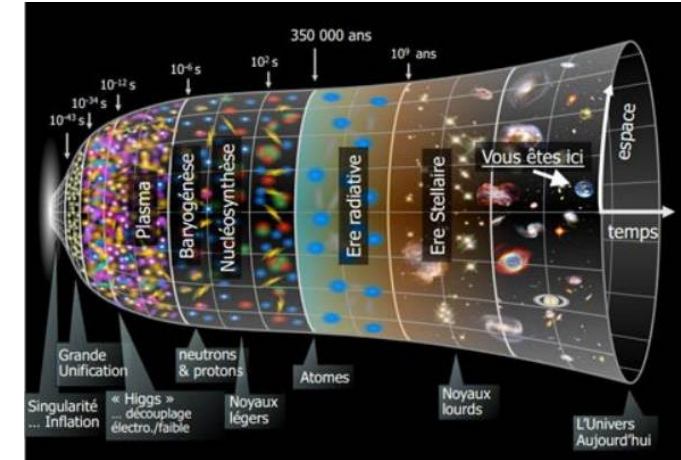
$t_0 + 100$ s: échelle d'énergie 100 eV (10^9 K !!!)

Les premiers noyaux d' He^4 avec des traces de H^2 , He^3 et de Li^7 se forment :



$t_0 + 30$ min:

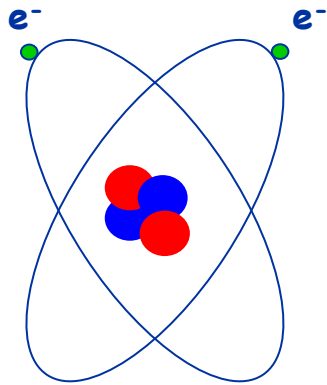
Univers à l'époque : noyaux légers, électrons, neutrinos et radiation.



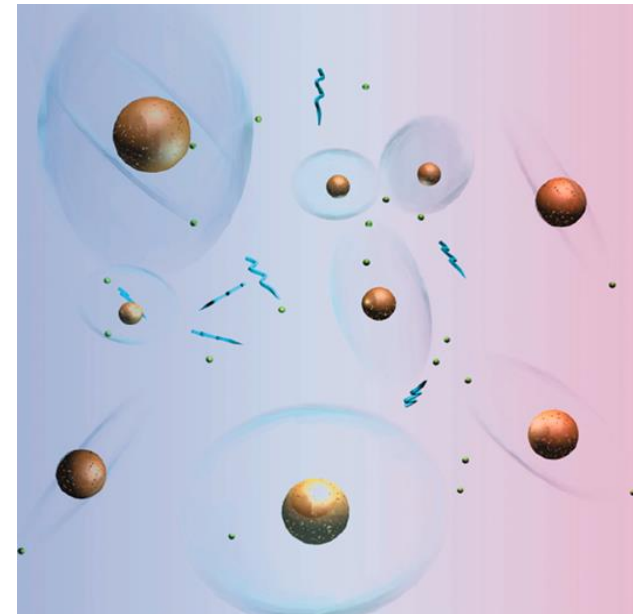
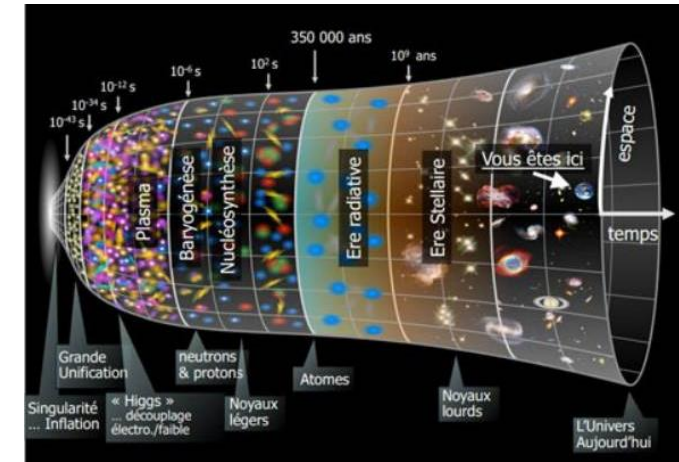
Evolution de l'univers : la formation des atomes

$t_0 + 350000$ ans: échelle d'énergie meV (3K)

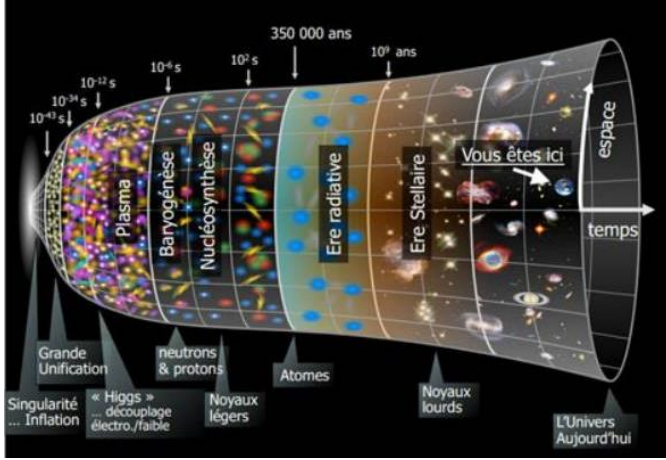
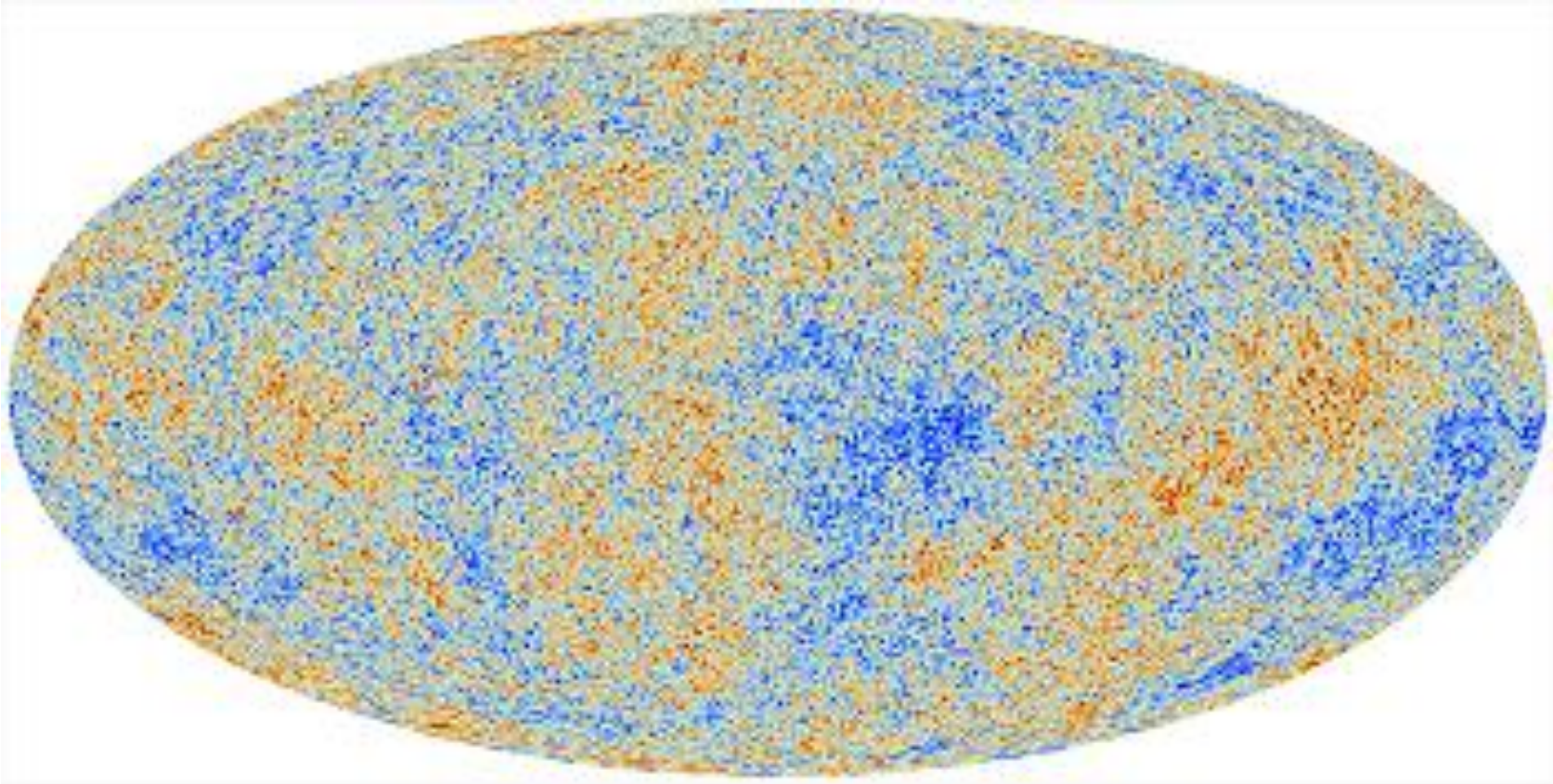
Les **atomes les plus simples se forment** sous l'effet de la force é.m. : H^1 et He^4 avec des traces de H^2 , He^3 et de Li^7 :



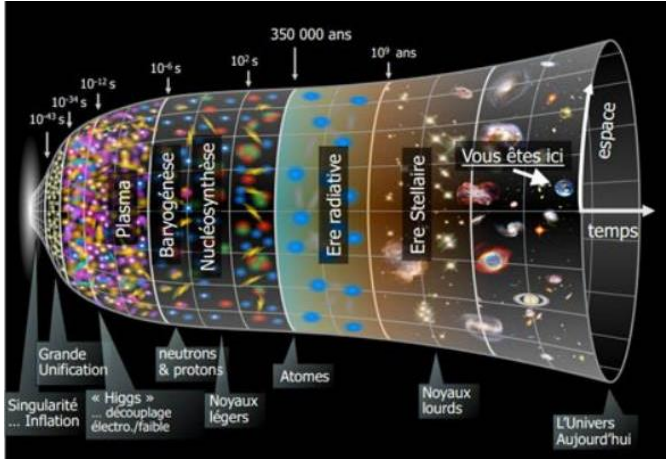
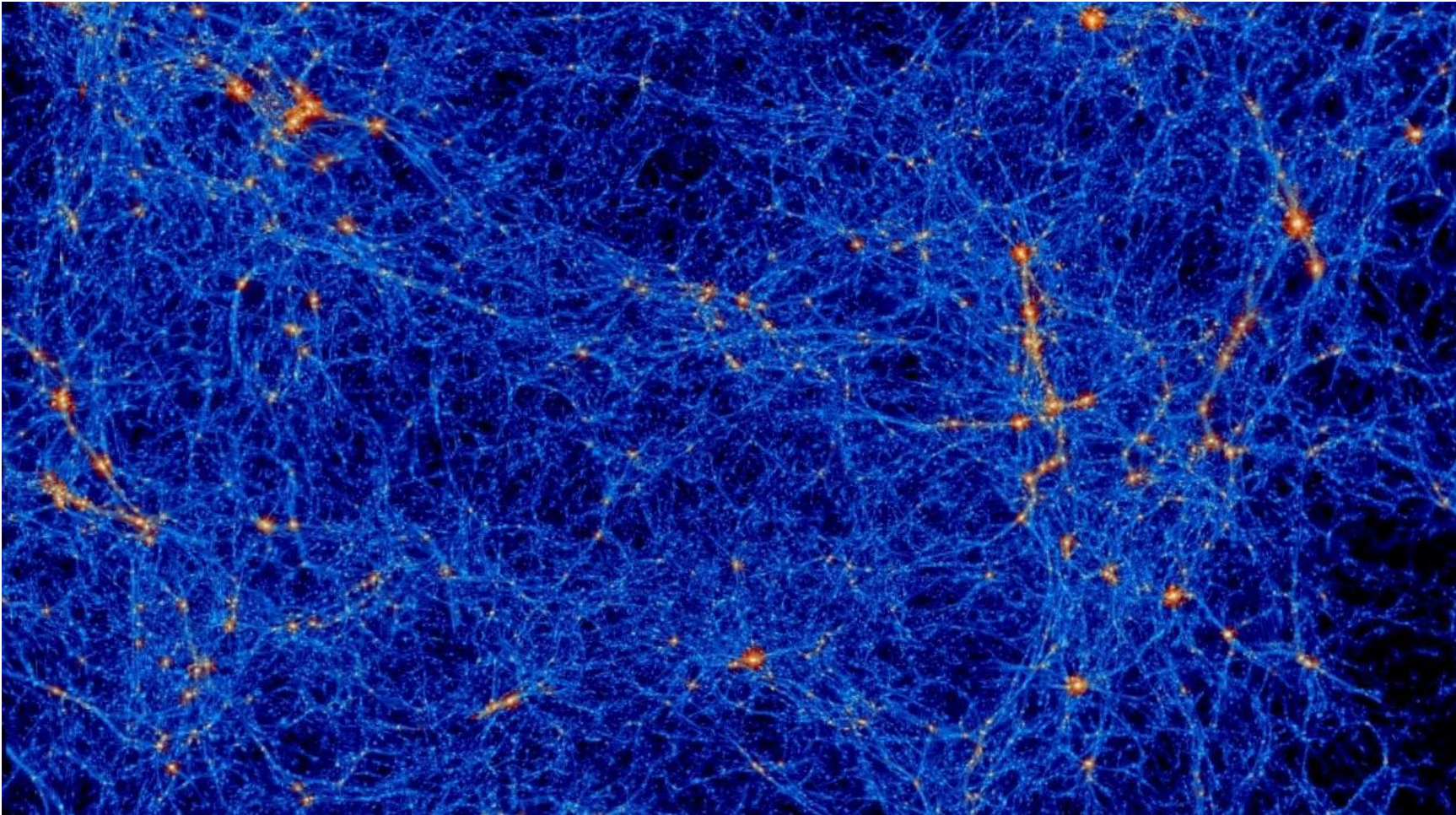
Univers à l'époque : atomes légers, neutrinos et radiation.



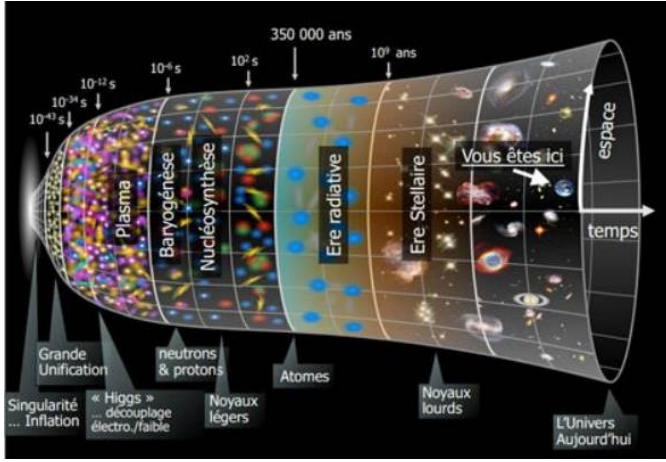
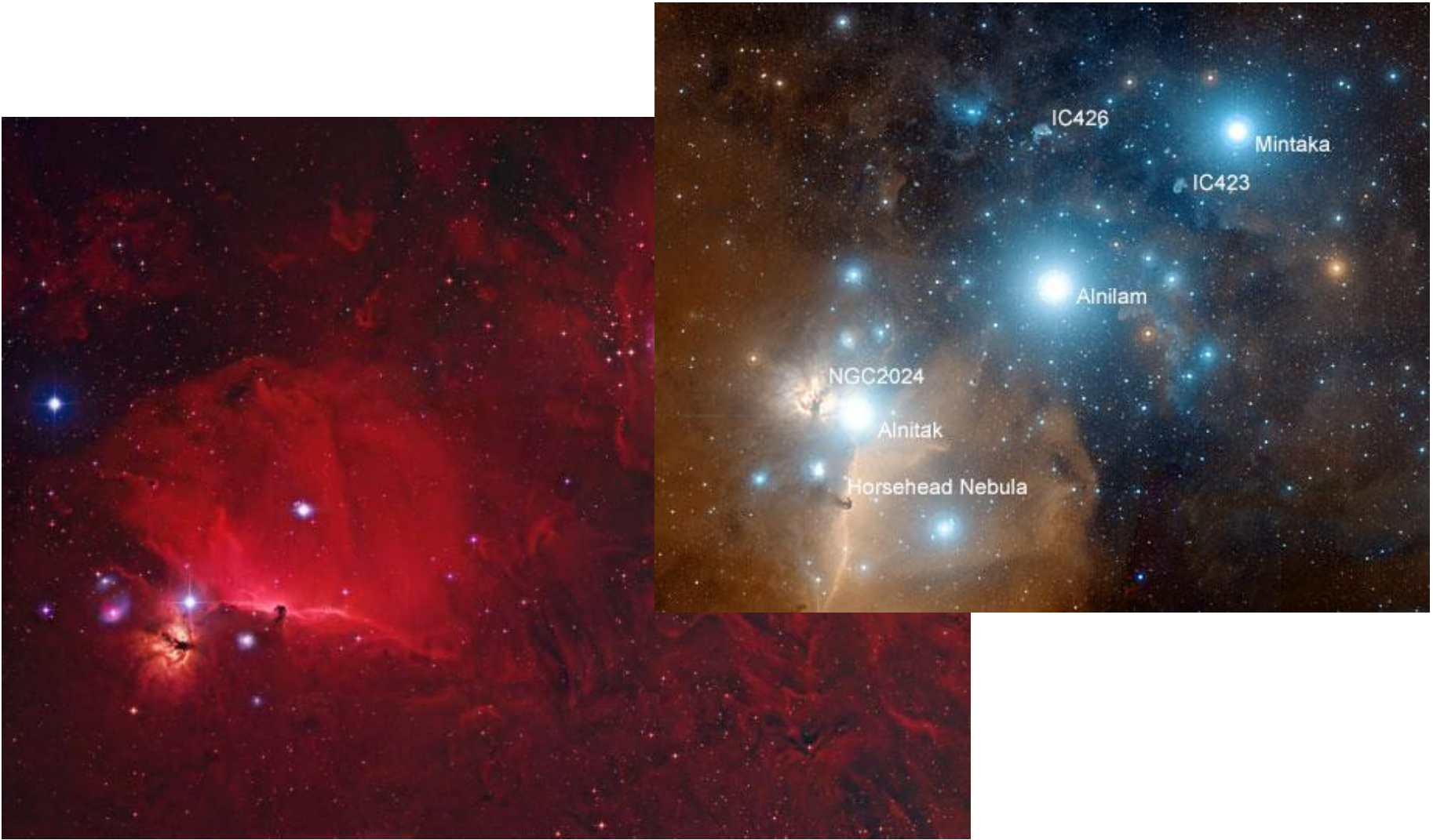
Evolution de l'univers : le fond diffus cosmologique



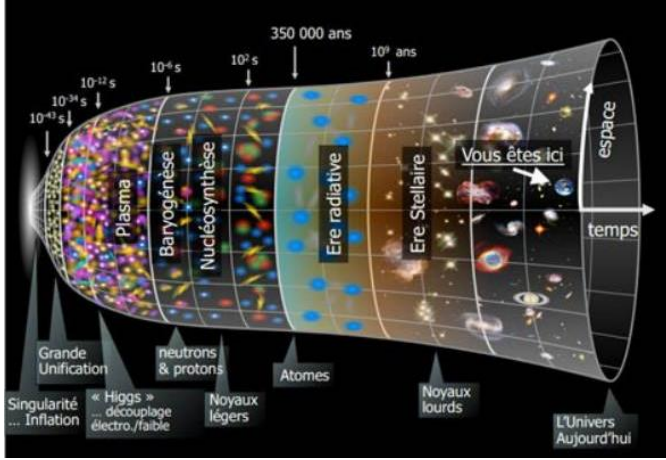
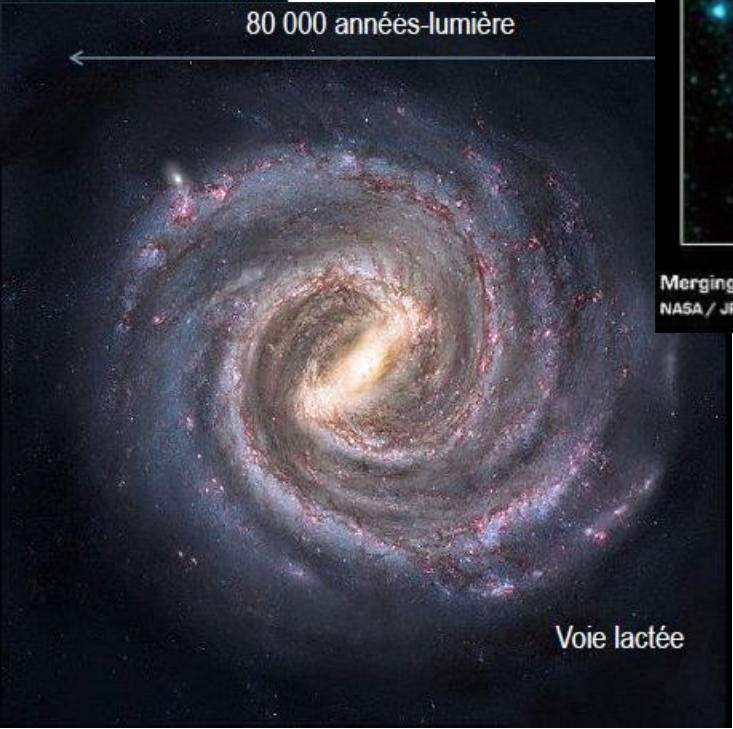
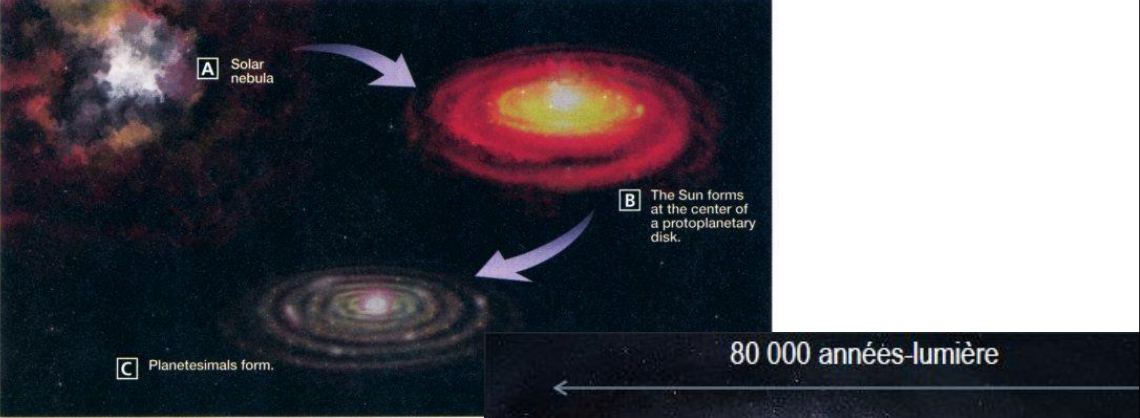
Evolution de l'univers : le formation des structures



Evolution de l'univers : le formation des étoiles



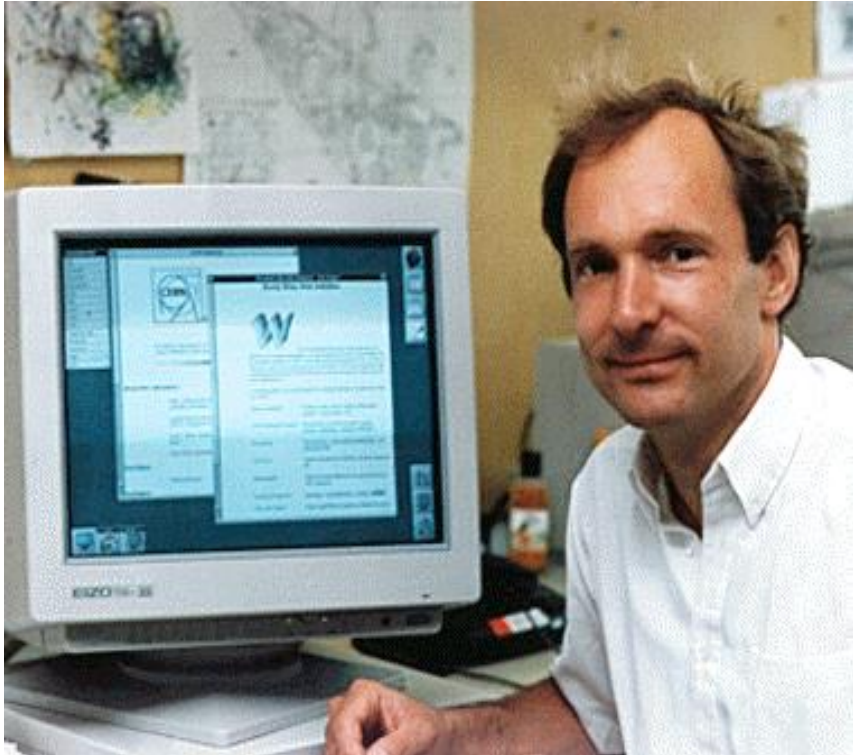
Evolution de l'univers : le formation des galaxies





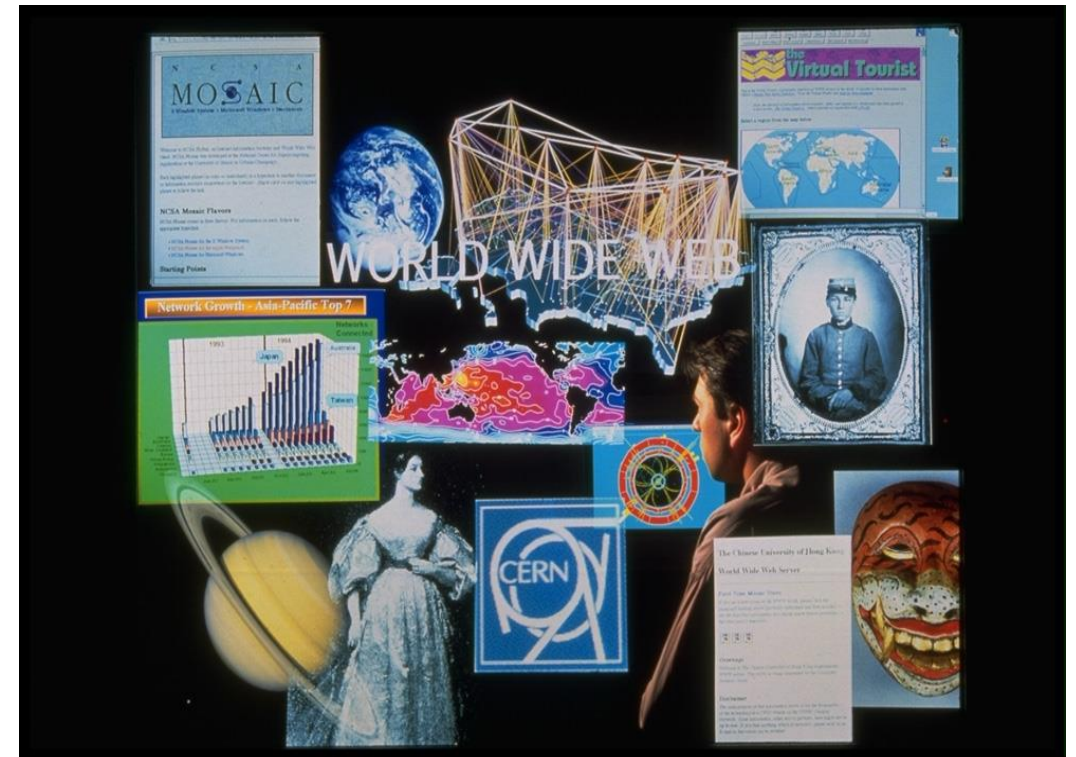
Voilà ce que nous avons compris
et tout ça pas que pour nous...

La recherche en physique au service de la société



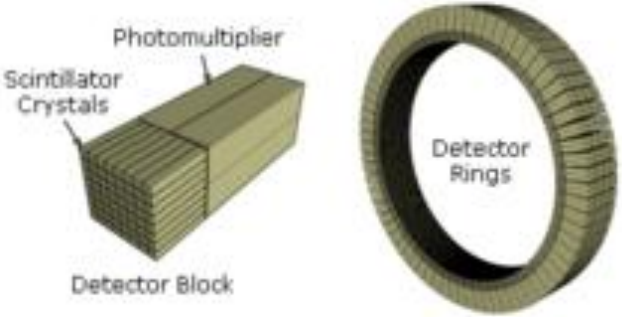
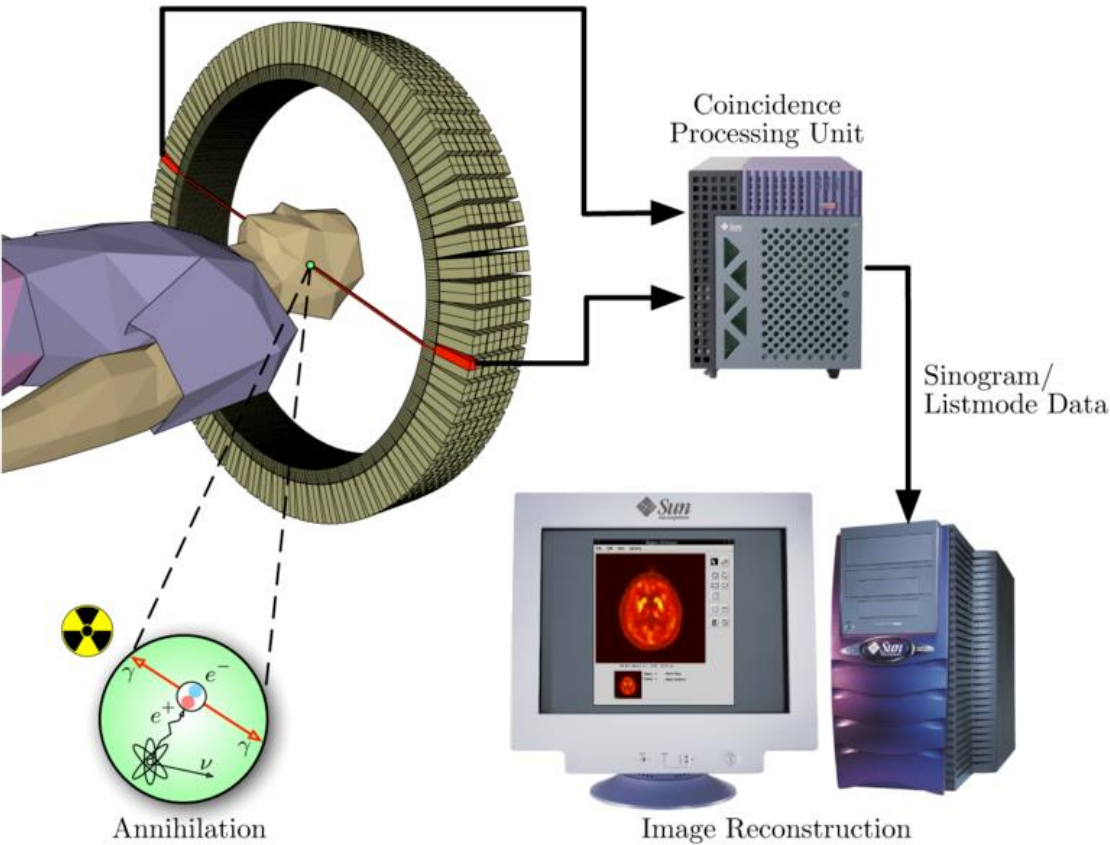
Inventé en 1989 par Tim Berners-Lee, chercheur au CERN, pour satisfaire au besoin des physiciens de partager rapidement des informations à travers le monde

Le WWW en combinaison avec Internet a transformé nos vies



La recherche en physique au service de la société

Positron Emission Tomography (PET)



La recherche en physique au service de la société

Mais également...

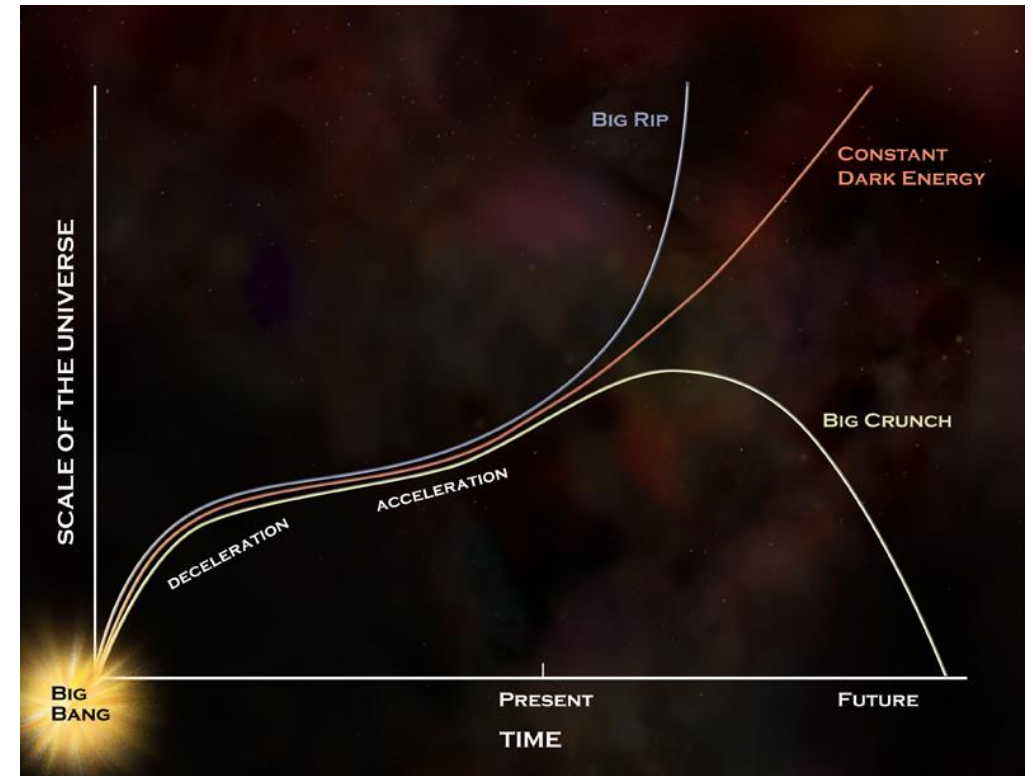
- Accélérateurs en médecine
- Technologie du vide
- Aimants supraconducteurs
- Systèmes cryogéniques
- Electronique rapide
- Ordinateurs rapides
- ...
- **La formation de milliers de chercheurs, ingénieurs, techniciens hautement spécialisés!**



Il nous reste encore à comprendre...
juste deux ou trois bricoles!

Les grands questions ouvertes en physique

- Y a-t-il quelque chose au-delà du modèle standard? La supersymétrie?
- Existe-t-il une force qui unifie toutes les forces?
- Pourquoi 3 générations de particules? Y en a-t-il plus?
- Qu'est-ce que la matière sombre? Et l'énergie sombre?
- Y a-t-il une asymétrie entre matière et antimatière?
- Où est passée l'antimatière?
- Comment va évoluer l'expansion accélérée de l'univers
- Et plein d'autres...
- **Moi je me fais vieux, là c'est votre tour !**



- Le CERN et notamment le LHC pour le public : <https://home.web.cern.ch/fr>
- MOOC de M. Pohl et M. Paniccia (EPFL) : <https://www.my-mooc.com/fr/mooc/physique-des-particules-une-introduction/>
- Univers des particules, Michel Crozon – Le Seuil (1999)
- Une brève histoire du temps, Stephen Hawking – Flammarion (2008)



home.cern