La physique en interaction au LLR

Yves Sirois
Ecole Polytechnique/IPP, IN2P3/CNRS

Les 50 ans de l'IN2P3 – 19 mai 2021

Un laboratoire très attaché à ses racines

Timeline : https://50ans.in2p3.fr/timeline-llr/

2 physiciens émérites du LLR pour nous parler ce matin :

Gérard Fontaine *Des particules cosmiques à l'astronomie des particules*
ou l'Épopée du rayonnement cosmique

Henri Videau *De l'image à l'imagerie des particules*
ou la physique avec les yeux

LLR à l'Aiguille du midi

Quatre Pôles de Physique

4 thématiques abordées par nos chercheur(e)s et professeur(e)s X/IPP cet après-midi :

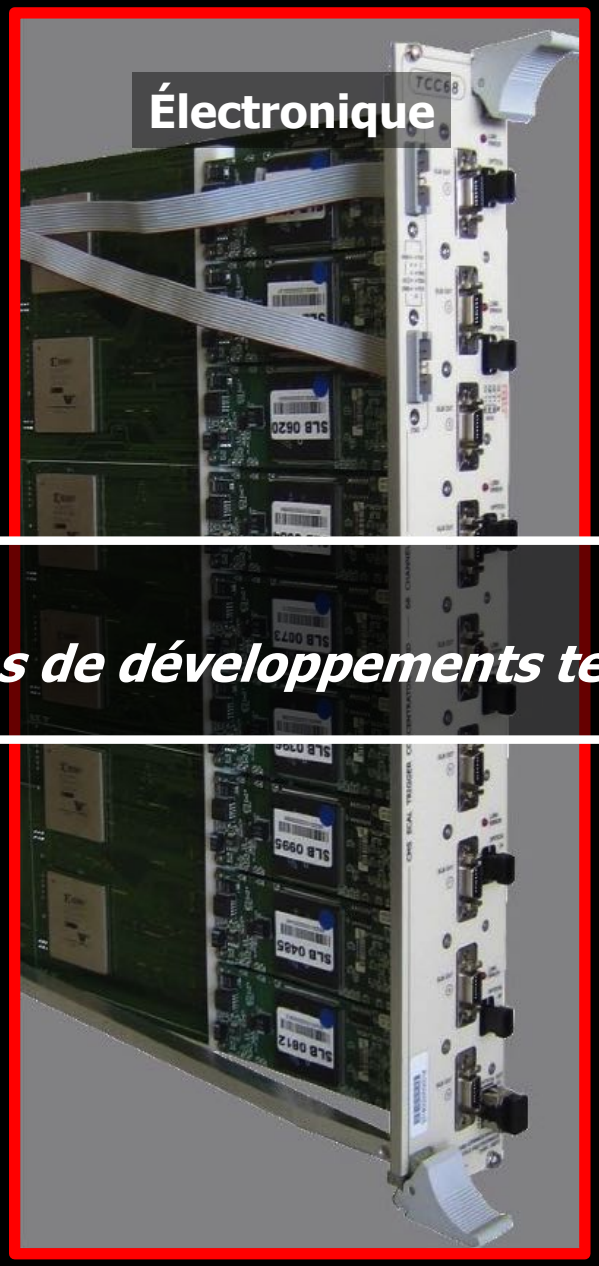
Roberto Salerno	***Symétrie et brisure spontanée de symétrie***
Pascal Paganini	***Asymétrie matière-antimatière et violation CP***
Émilie Maurice	***La matière hadronique dans tous ses états***
Mathieu de Naurois	***Les messagers du cosmos***

Trois Axes de Diversification

Avancées de PEPITES et GALOP ⇔ dans la présentation de
F. Magniette ce matin

Échange avec le groupe *Science et jeu vidéo*
« Test en avant-première d'un jeu sur la physique des particules »
R. Granier de Cassagnac et al., Amphi Pierre Faurre à 14h

Trois Groupes Techniques



Présentation de :

F. Magniette ***50 ans de développements techniques au LLR***

Nous avons une chance extraordinaire !

Nous sommes :

au bon endroit

au bon moment

Pour construire un récit de l'Univers depuis les origines dans un langage universel

Au bon endroit

- 100 milliards de galaxies dans l'univers visible
- 200 milliards d'étoiles dans notre galaxie
- Un système solaire à bien des égards exceptionnel

Une petite planète bleue perdue dans le cosmos, sur un bras quelconque d'une galaxie quelconque porte une vie intelligente, faite de poussière d'étoiles, et capable de s'interroger sur le cosmos

Photo de la sonde Voyager
14 février 1990 – 6 x 10^9 km

Au bon moment : dans le calendrier cosmique

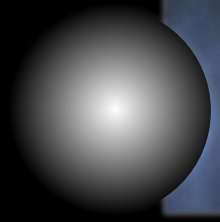
Naissance de l'Univers
il y a 13,8 x 10^9 années

Formation du système solaire
il y a 4,6 x 10^9 années

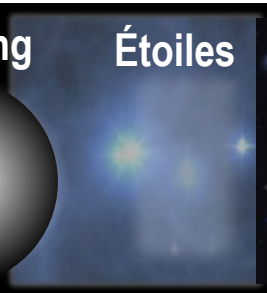
Janvier — Mars — Septembre

ANNÉE

Big Bang

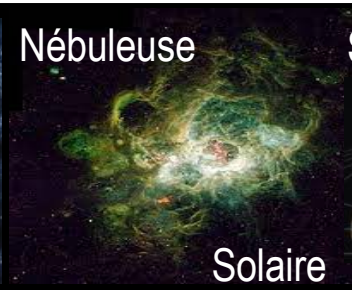


Étoiles



Galaxies

Nébuleuse



Solaire

Système Solaire

"vie" sur Terre

Décembre

MOIS

Organismes multicellullaires

Traces de fossiles

Amphibiens

Dinosaures

Mammifères

Une minute avant minuit le 31 décembre

MINUTE

Lascaux

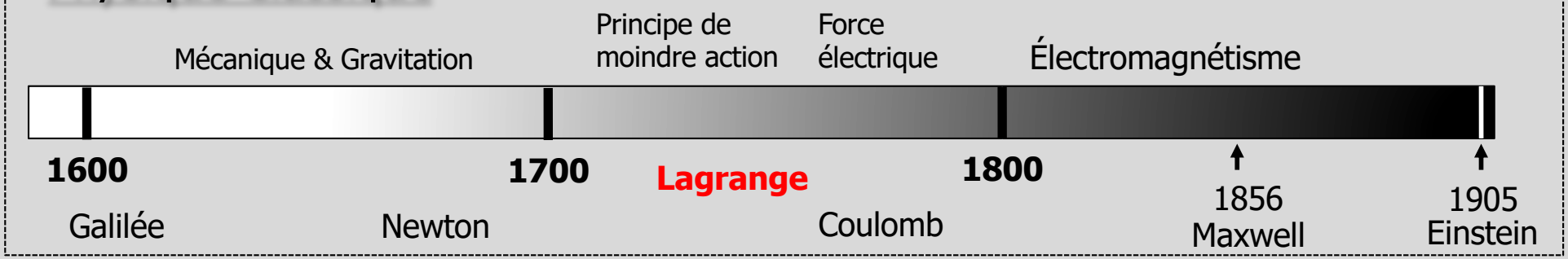
Civilisations historiques

10s

Une vie en un clin d'œil !

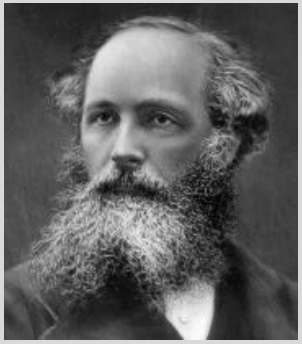
Au bon moment dans l'histoire des sciences

Physique Classique



- Les lois (sous-jacentes) de la physique sont ultimement simples } Galilée
- Les lois de la physique sont universelles } Newton
- $F_g = Gm_1m_2/r^2$ ($m_g = m_i$) $F_e = kq_1\, q_2 / r^2$ ($q = \pm 1$) $\boxed{Fe/Fg \sim 10^{36}\ !!!}$ } Coulomb

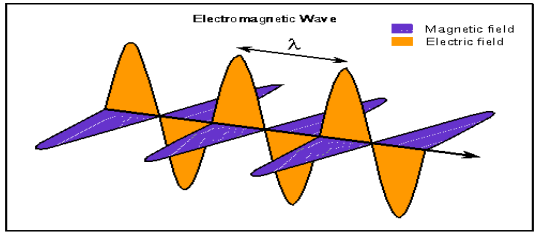
- La lumière est une onde qui échappe à la mécanique de Newton (Young, **Fresnel**)
- L'électricité et la magnétisme sont inter reliés (Ørsted**, Ampère**) et peuvent être pensé en termes de champs (Faraday)



Maxwell

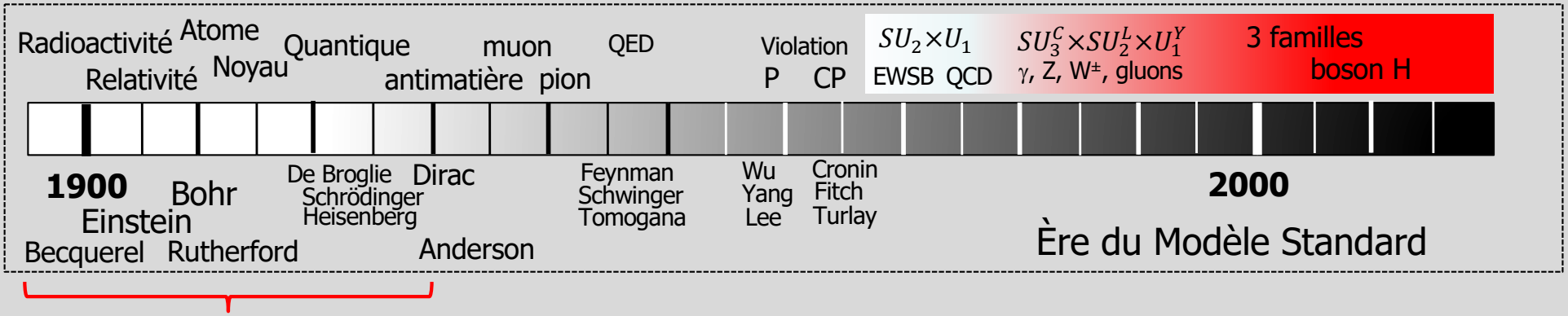
- Les champs (classique) ont une existence bien réelle
- Symétrie entre les équations de l'électricité et du magnétisme

La lumière est une onde électromagnétique, conséquence inévitable des lois unifiées de l'électricité et du magnétisme !



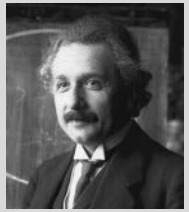
Passage à l'âge adulte le 31 décembre à 23h 59min 57s dans le calendrier cosmique

Physique moderne Physique contemporaine …



Deux révolutions conceptuelles - relativité et mécanique quantique :

- Tout est relatif : Il n'y a pas d'intervalle de temps absolu !
- Il faut penser en termes de trajectoire dans l'espace-temps et cela implique une révision de la mécanique **$E = mc^2$**



Einstein

- Toute particule possède aussi un comportement ondulatoire
- La multiplicité des futurs possibles interfèrent entre eux (comportement probabiliste)
- Il existe une indétermination intrinsèque: **$\Delta E\, \Delta t > h$**

Schrödinger Heisenberg

Une découverte de la physique atomique :

- Découverte de la radioactivité ⇔ interaction faible (**Becquerel**, Curie, …)
- Découverte de l'atome ⇔ physique quantique, relativité (Bohr, …)
- Structure et noyeau atomique ⇔ interaction nucléaire forte (Rutherford, **…**)

Deux nouvelles interactions satisfaisant à la mécanique quantique et à la relativité se nichent au cœur de l'atome

Transition vers la physique contemporaine

Dirac

Équation de Dirac : théorie quantique relativiste

$$i\frac{\partial\psi}{\partial t} = (-i\alpha.\nabla + \beta m)\psi$$

- Une des plus « belles » équations de la physique
- **Description des électrons cohérente avec la relativité d'Einstein et la mécanique quantique**
- **Prédit l'existence de l'antimatière !**
- **Explique la propriété quantique du spin !**

e^+e^- : Base de la tomographie Spin: Base de IRM

- On peut créer une paire particule-antiparticule (!) via $E = mc^2$
- On peut « emprunter » de l'énergie au vide via $\Delta E\, \Delta t \geq \hbar$

La mécanique quantique ne sait pas rendre compte de la création de matière. La **seule théorie cohérente connue** est sa généralisation : la **théorie des Champs**

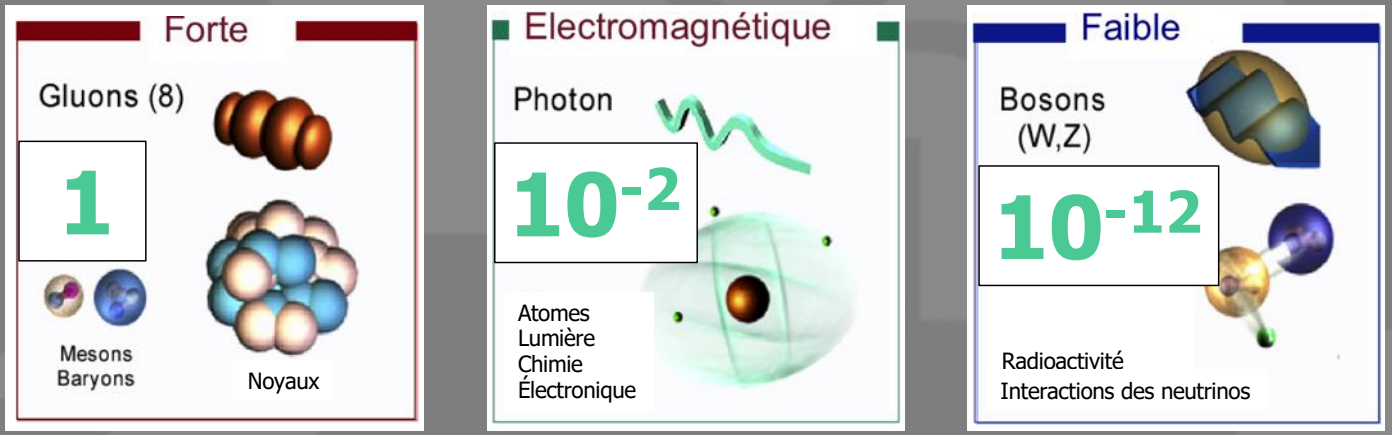
Les propriétés statistiques sont déterminées par le spin
spin ½ = fermions = briques de matière **spin 1** = bosons = véhicule des interactions

Le réductionnisme post-moderne

La physique des particules est l'appellation contemporaine d'une aventure de plusieurs siècles pour comprendre les lois fondamentales de l'Univers

Les lois de l'Univers sont ultimement simples, écrites dans les tout premiers instants, et conséquences inévitables de (brisure de) lois de symétries

Toutes la physique (de l'atome aux étoiles et à l'Univers) dépend de 4 interactions fondamentales dont au moins 3 sont décrites une théorie quantique relativiste : la théorie des champs



Un programme de physique : Réduire la nature complexe des choses aux principes universels qui régissent les interactions fondamentales et reconstruire le récit de l'Univers depuis les premiers instants

Reconstruire le récit de l'Univers

Physique des particules

Sonder la matière à plus haute énergie : $E \propto {}^{1}/_{\lambda}$

Créer de la matière : $E = mc^2$

Étudier des processus virtuels et/ou rares : $\Delta E \Delta t > \hbar$

Atteindre les très hautes températures : $E = k\,T^0$

e.g. 1 TeV ⇒ 0.001 fm et $\mathcal{O}(10^{17})$ °K

Les collisionneurs de particules sont de puissants « microscopes » pour observer la matière des premiers instants de notre Univers

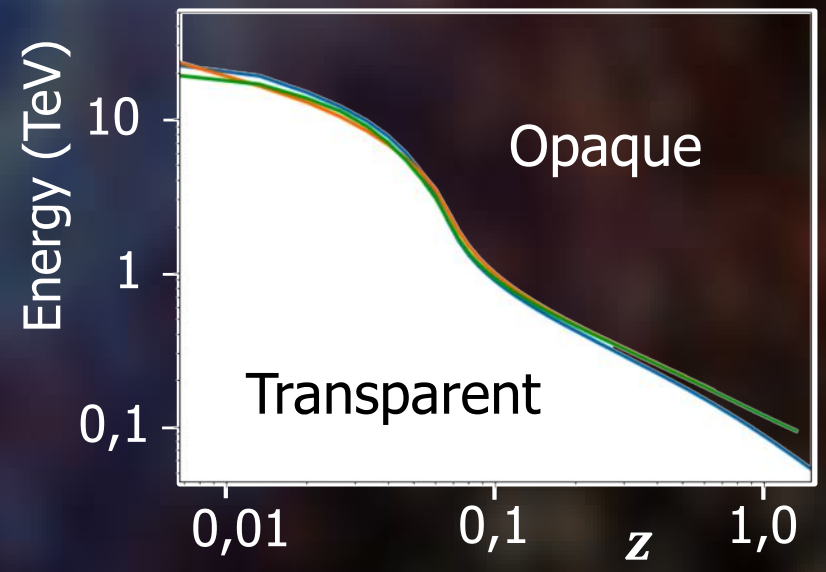
Cosmologie / Astro.

Sonder le ciel à plus haut redshift : $z = \frac{(\lambda_{obs} - \lambda_{rest})}{\lambda_{rest}}$

Accéder à de nouvelles sources

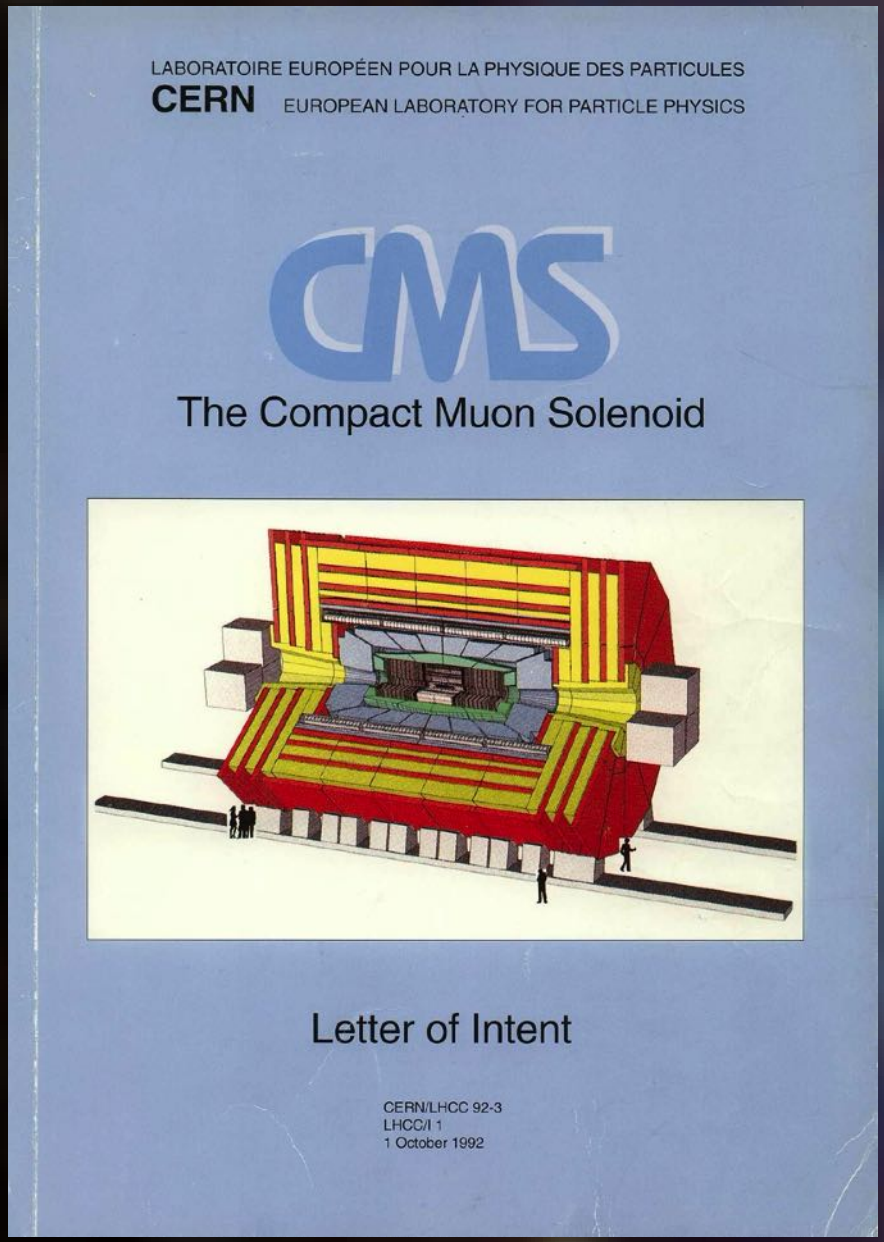
Augmenter la statistique pour les type d'objets les plus rares

Atteindre l'horizon :



Reconstruire le récit de l'Univers

Physique des particules	Cosmologie / Astro.
CMS	**HESS**
Premières idées 1984	Premières idées 1995
Letter of Intent 1992	**Letter of Intent 1997**
R&D et construction	R&D et construction
Commissionning 2008-2009	Commissionning 2001-2003
Prises de données de physique ≥ 2010	**Prises de données de physique ≥ 2004**
Upgrade : CMS II à HL-LHC : 2027 - 2040	Upgrade : HESS II : 2012 – 2025



LOI 1992

J. Badier, G. Bonneaud, A. Busata, Ph. Busson, **C. Charlot**, B. Chaurand, L. Dobrzynski, Ch. Dechandol, Ch. Gregory, A. Karar, L. Kluberg, Ch. Lemoine, P. Matricon, G. Morinaud, A. Romana, R. Tanaka

Responsable CMS pour la France

1992-1999 J. Badier (LLR)
1999-2005 L. Dobrzynski (LLR)
2006-2017 Y. Sirois (LLR)

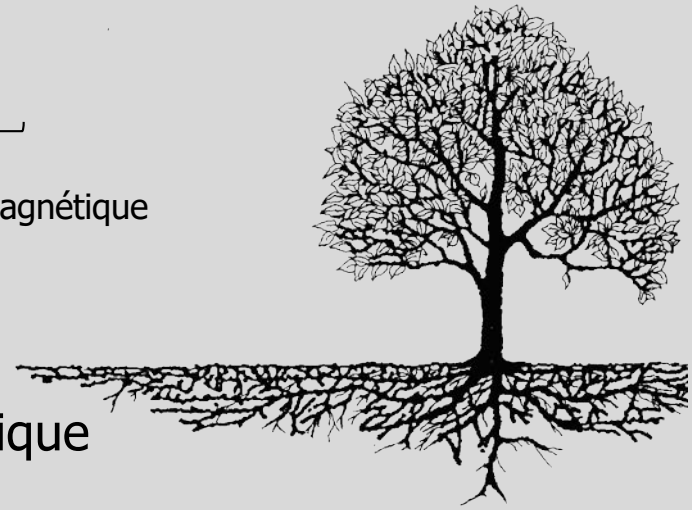
Cadre conceptuel en physique des particules

Forme:
Principe de symétrie

$$\underbrace{SU_3^C}_{\text{Interaction forte}} \times \underbrace{SU_2^L \times U_1^L}_{\text{Interactions faible et électromagnétique}}$$

Corps:
Mariage entre relativité et mécanique quantique

Racines:
Unification des interactions électrique et magnétique



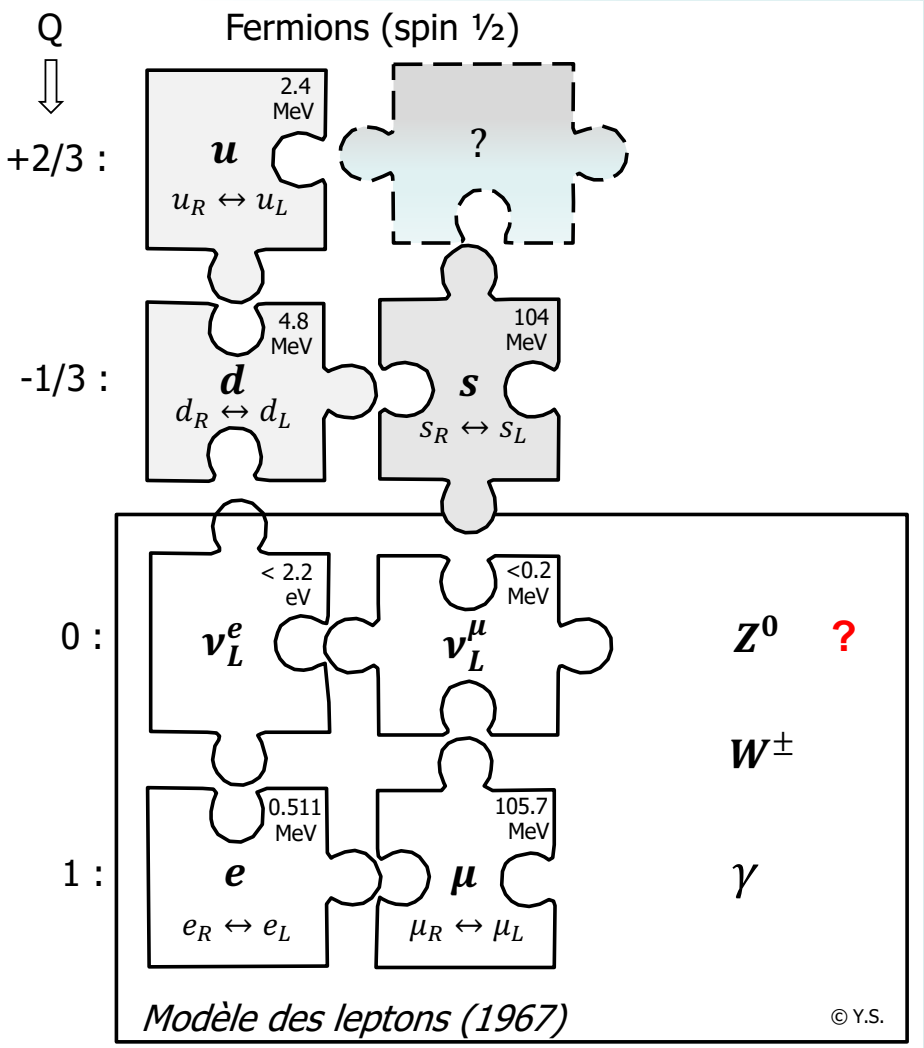
- Les bosons vecteurs d'interactions (spin 1) sont une conséquence inévitable des propriétés de symétries (de jauge).
- Le fermions de matière (spin ½) s'organisent en termes de charges définies par leurs interactions
- La "réalité sous-jacente" est constituée de champs quantiques qui imprègnent tout l'Univers !
- La théorie admet l'existence possible de bosons scalaires (spin 0)
- **Toutes les particules doivent être de masses nulles !**

Les symétries à l'origine des particules associées aux champs quantiques doivent être brisées pour donner de la masse (fermions chargés, Z^0 $W^{\pm}$)

Un model des leptons – Weinberg 1967

Prix Nobel 1979 Glashow, Salam, Weinberg

"Contributions à la théorie électrofaible dont la prédiction des courants neutres"



$SU_2^L \times U_1^L$

Création de l'IN2P3 – 14 avril 1971

Régularisation et renormalisation
't Hooft, Veltman **1972** Prix Nobel 1999

Matrice de mélange CKM (CP ⇔ 3 familles)
Cabbibo, Kobayashi, Maskawa **1972**
Prix Nobel 2008

Preuve de l'existence des quarks
Friedman, Kendall, Taylor **1967-1973**
Prix Nobel 1990

Découverte des courants neutres,
Gargamelle **1973** Prix EPS HEP 2009

Liberté asymptotique- QCD
Gross, Politzer, Wilczek **1973**
Prix Nobel 2004

Mécanisme de GIM +
Découverte du J/ψ – quark c
Richter, Ting **1974** Prix Nobel 1976

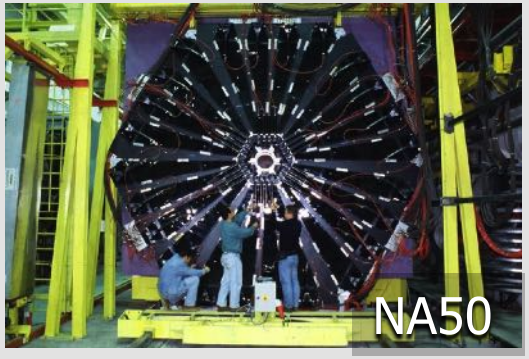
Découverte des gluons
Söding, Wiik, Wolf (TASSO) **1979**
Prix EPS HEP 1995

Découverte des bosons vecteurs Z^0, $W^\pm$
Rubbia (UA1), van der Meer **1983**
Prix Nobel 1983

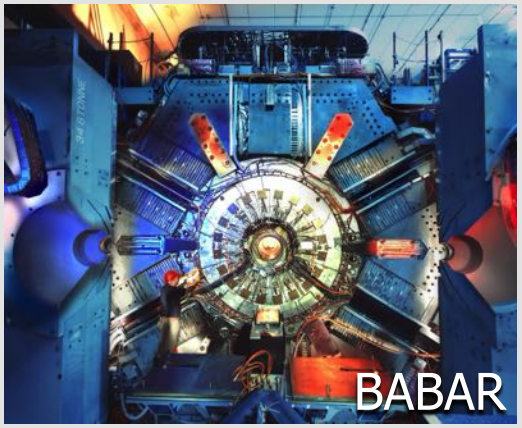
La moisson des grandes expériences

- **Limite du nombre de familles de fermions**
- Seulement 3 familles de neutrinos légers (désintégration du boson Z0 dans ALEPH)
- Seulement 3 familles de quarks lourds (couplage du boson de Higgs dans CMS)
- Les trois familles sont indiscernables du point de vue des boson d'interactions (g, Z, W±, g)

- **Nouvel état de la matière hadronique**
- structure en quarks et gluons des nucléons (WA59, NA10, … H1 …)
- ions lourds et plasma de quark-gluons (NA38, NA50, NA51, PHENIX, LHCb, CMS)



- **Matrice de mélange CKM pour les quarks**
- 3 angles de mélanges + phase complexe pour la violation CP (BABAR, LHCb)
- Violation durecte de symétrie sous renversement du temps
- Tension sur l'universalité des couplages aux leptons (LHCb)



La moisson des grandes expériences

Découverte de l'oscillation des neutrinos

SK : Prix Nobel 2015

Les neutrinos ont une masse !
⇔ matrice de mélange PMNS

À venir : SK avec gadolinium

T2K : Découverte de l'apparition des neutrinos-électroniques
(désormais à plus de 7.3σ)

Évidence de violation CP dans le secteur des neutrino

SK

La moisson des grandes expériences

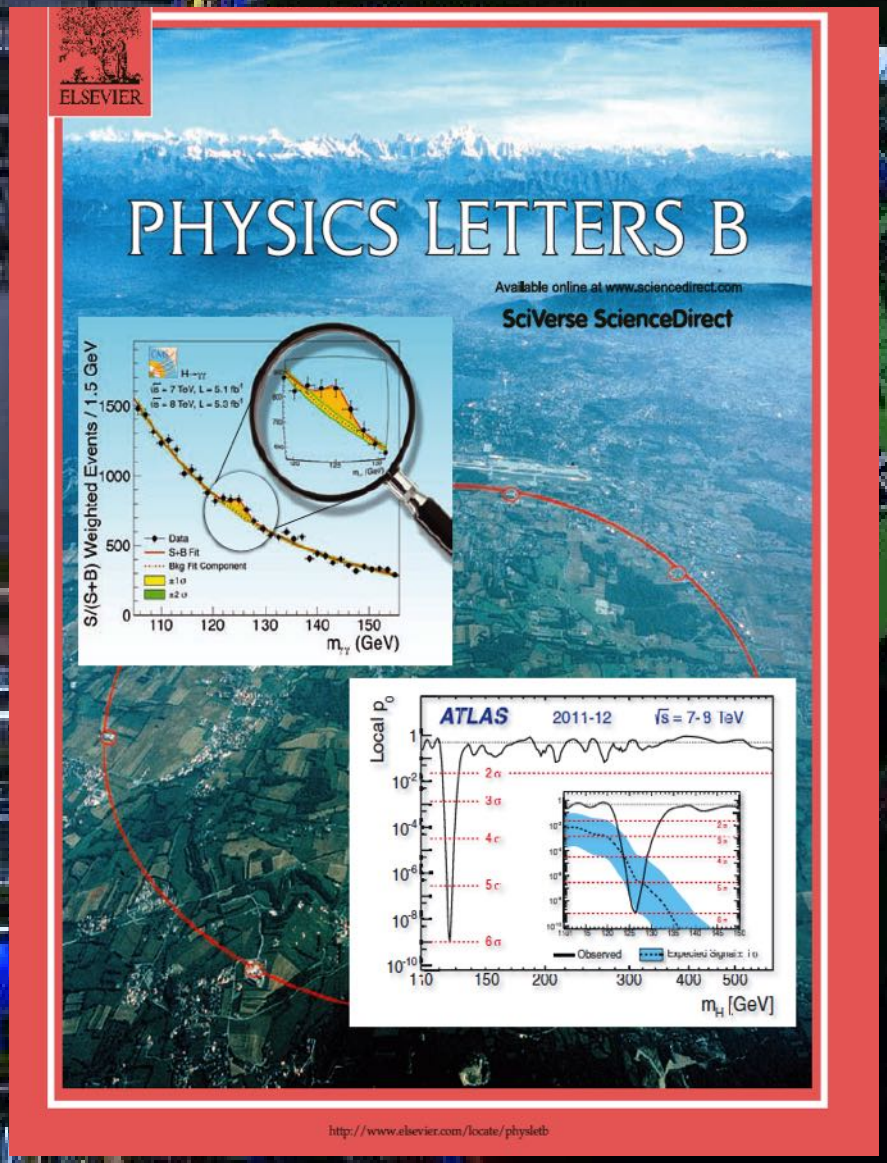
Découverte du boson de Higgs à m = 125 GeV

2012 : Le boson H possède un spin-parité de O^+

2014 : H boson intrinsic width

Observation de

$H \rightarrow 4l$ 2012
$H \rightarrow \gamma\gamma$ 2014
$H \rightarrow \tau\tau$ 2017
$pp \rightarrow ttH$ 2018
$H \rightarrow bb$ 2018



Aujourd'hui :
12 000 citations !

CMS

Hautes énergies et phénomènes extrêmes dans l'Univers

Le LLR parmi les pionniers de l'astronomie γ

- Près de 5800 sources détectées en 10 ans FERMI-LAT sur orbite ! (50 MeV < E_γ < 1 TeV)

2006 :

- Découverte de l'émission périodique (« orbital clock ») de γ de très haute énergie depuis un système binaire (LS5039) par HESS

2017 :

- Recherche de rayons gamma au TeV pour la fusion d'étoile à neutron GW170817 par HESS

2020 :

- Première source extragalactique résolue spatiallement dans le régime de l'astronomie des rayons γ de très haute énergie par HESS (Nature)

HESS

… vers l'astronomie multimessagers

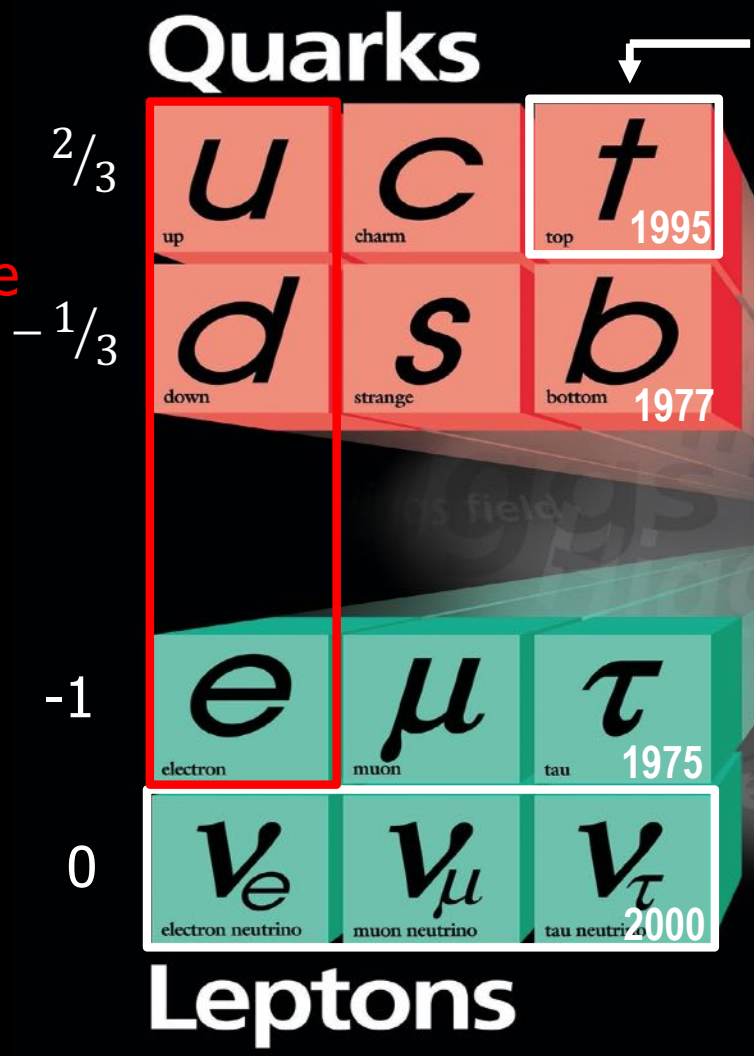
Le triomphe du Modèle Standard

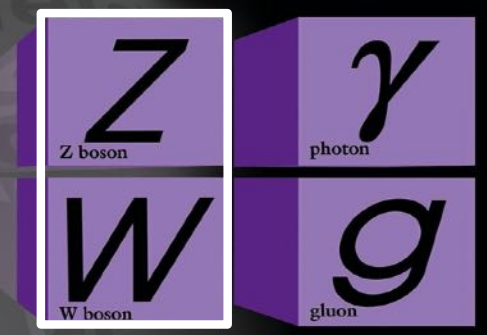
Matière

Interactions

Quark top :
$185 \times m_p$

Matière Ordinaire

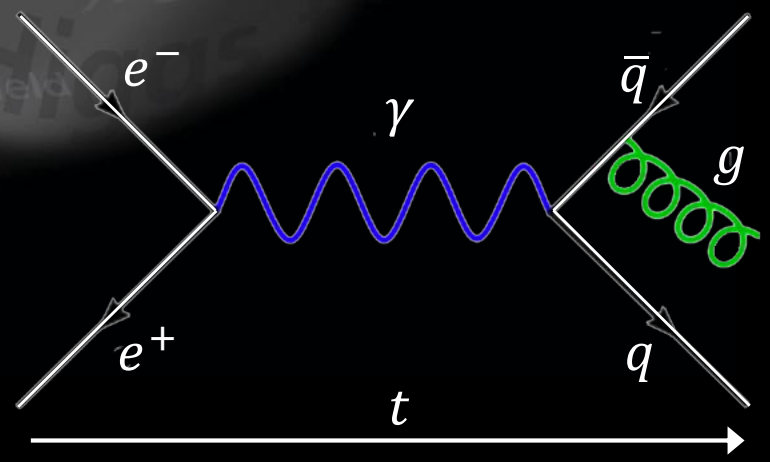




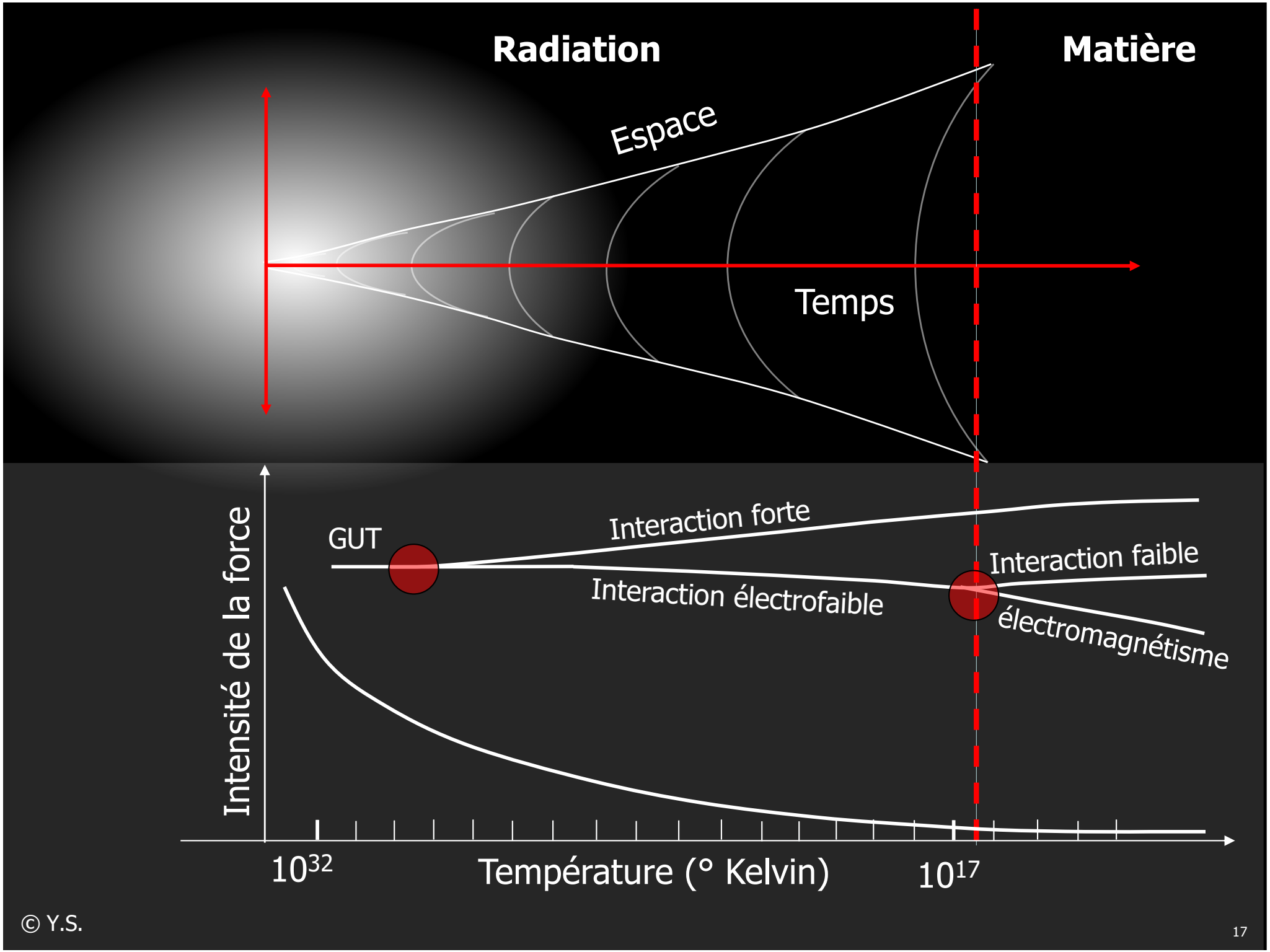
faible électromagnétique

nucléaire

Bosons Vecteurs

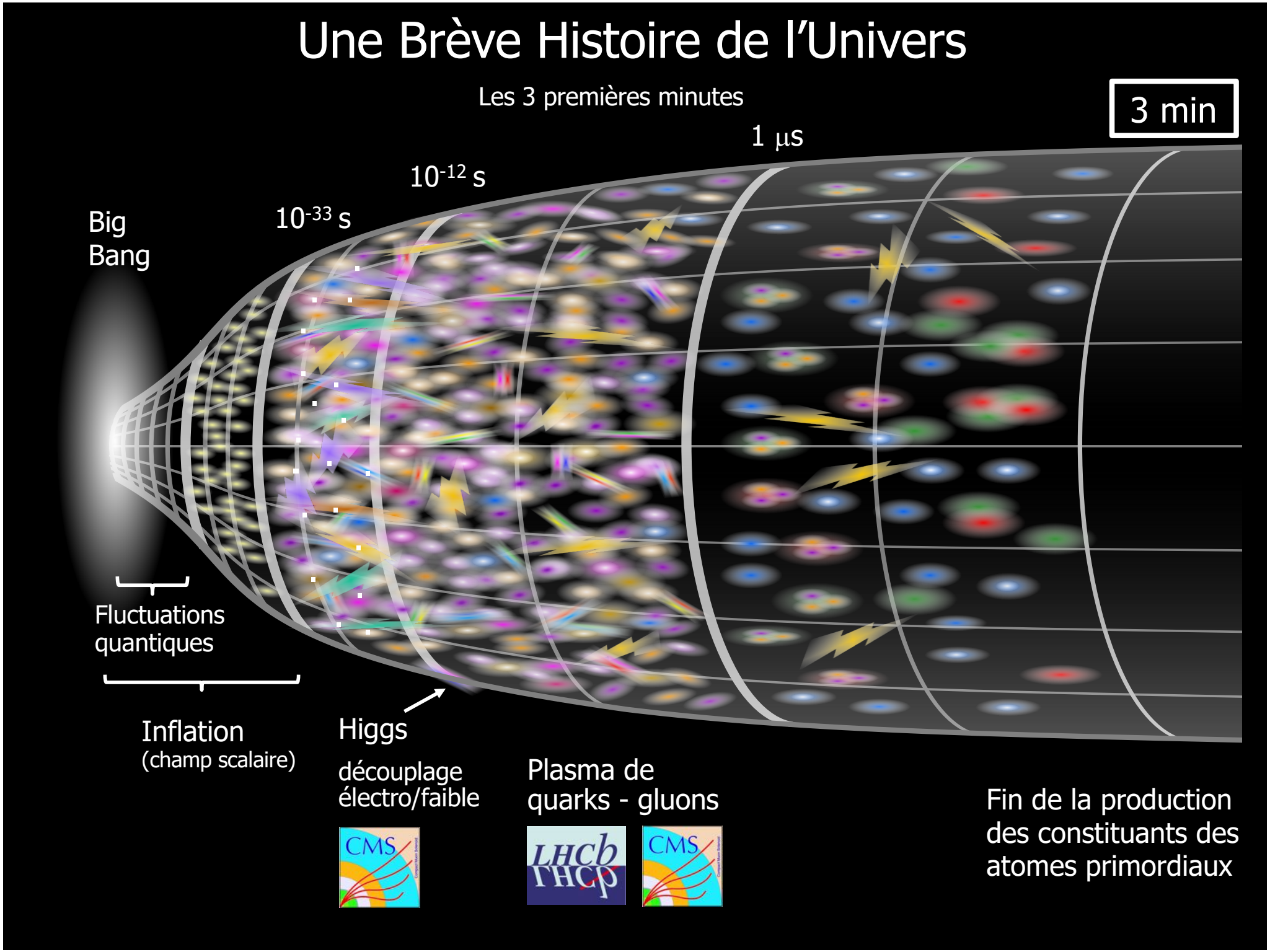


Les neutrinos n'interagissent que par l'interaction faible !

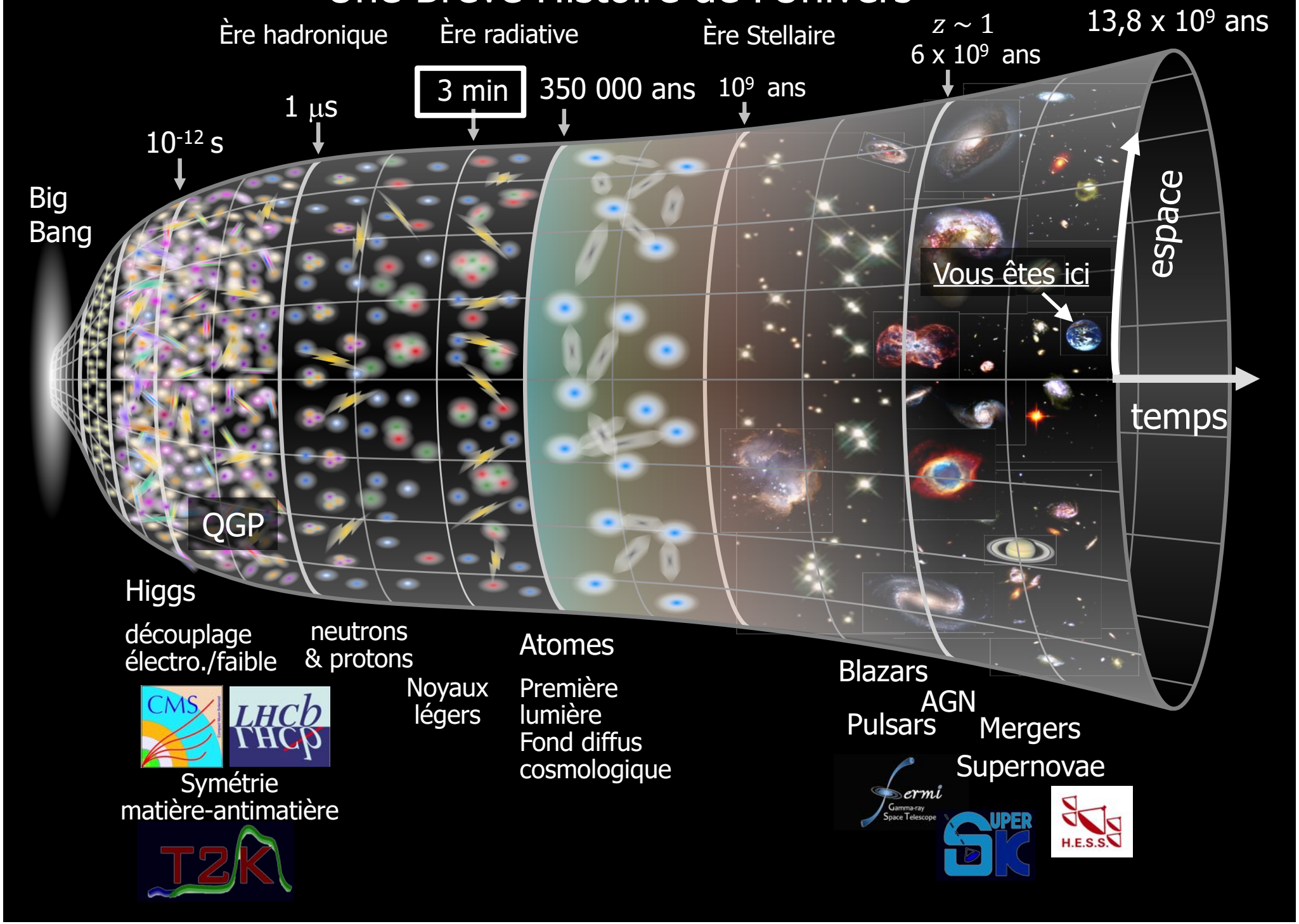

Radiation
Matière
Espace
Temps
Intensité de la force
GUT
Interaction forte
Interaction faible
Interaction électrofaible
électromagnétisme
10^{32}
Température (° Kelvin)
10^{17}

© Y.S.

Une Brève Histoire de l'Univers



Une Brève Histoire de l'Univers



Un moment extraordinaire pour la science

- La consolidation de « modèles standards »
  - Un « Modèle Standard » de la Cosmologie
  - Un « Modèle Standard » des particules et interactions quantiques
- Une série de découvertes majeures
  - Masse et mélange quantique des neutrinos
  - Expansion accélérée de l'Univers
  - Rôle de la matière noire dans les grandes structures
  - Boson H et origine de la masse des particules
  - Ondes gravitationnelles et multi-messagers cosmiques
- Un triomphe pour la science … mais un triomphe paradoxal
  - Une structure complexe inexpliquée pour les fermions dans le MS
  - Trop d'explications possible pour la matière noire et rien dans le MS
  - Quantité et diversité d'événements violents dans l'Univers 'proche'

Problème de Structure, de hiérarchie, de naturalité

Tous les phénomènes en physique des particules peuvent être décrits avec une bonne précision par une théorie remarquablement simple

$$\mathcal{L}_{SM} = \mathcal{L}_{Gauge}(A_a, \Psi_i) + \mathcal{L}_{Higgs}(\phi, A_a, \Psi_i)$$

Origine des interactions:
symétries de Jauge

Naturel et symétrique

Vérifié à haute précision par l'expérience

Stable par rapport aux corrections quantiques (« UV insensitive »)

Relation universelle aux trois familles

Origine des particules massives
(leptions chargés, quarks, Z° W±

Ad hoc

Masses permises mais arbitraires

Instable par rapport aux corrections quantiques

A l'origine de la structure en familles

- Le champ H rend possible toute la complexité de la matière … mais n'explique ni la structure du spectre de masses, ni le mélanges entre les trois familles de particules

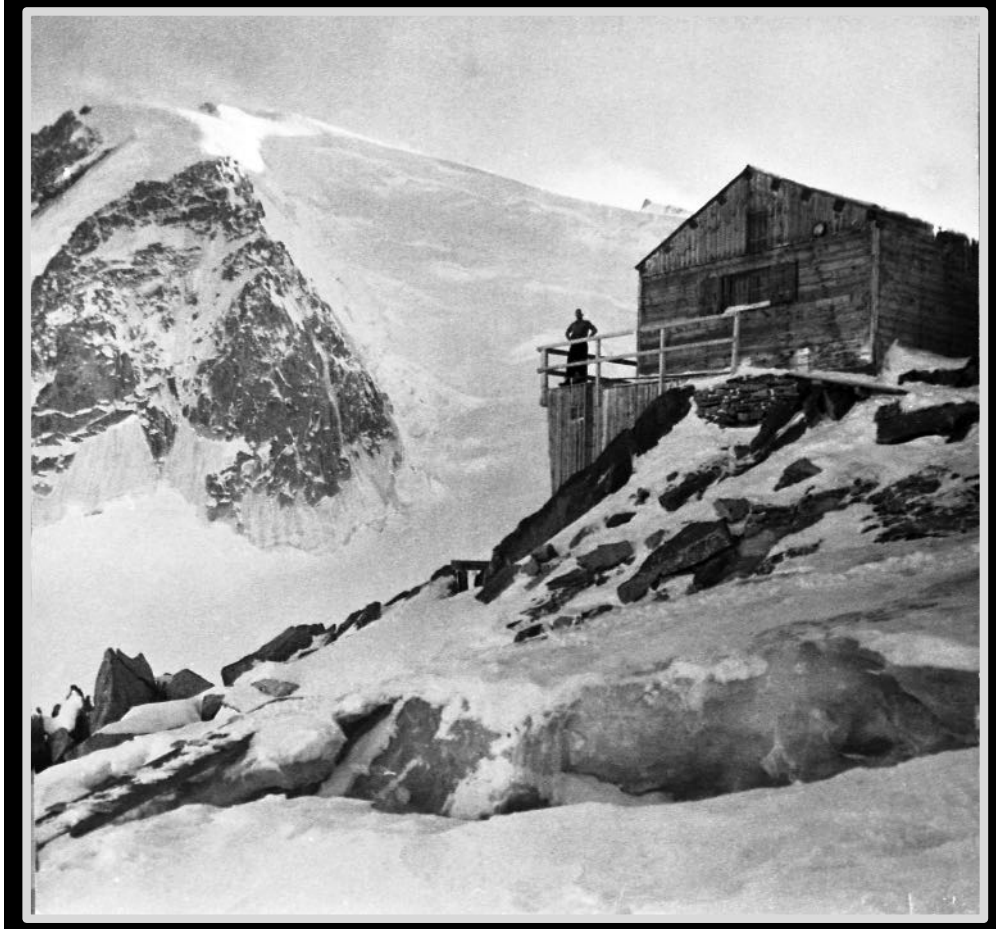
© Y.S.

Un moment extraordinaire pour la science

- La consolidation de « modèles standards »
  - Un « Modèle Standard » de la Cosmologie
  - Un « Modèle Standard » des particules et interactions quantiques
- Une série de découvertes majeures
  - Masse et mélange quantique des neutrinos
  - Expansion accélérée de l'Univers
  - Rôle de la matière noire dans les grandes structures
  - Boson H et origine de la masse des particules
  - Ondes gravitationnelles et multi-messagers cosmiques
- Un triomphe pour la science … mais un triomphe paradoxal
  - Une structure complexe inexpliquée pour les fermions dans le MS
  - Trop d'explications possible pour la matière noire et rien dans le MS
  - Quantité et diversité d'événements violents dans l'Univers 'proche'
  - Bande à part pour la gravitation ?

Rendez-vous pour les 100 ans de l'IN2P3 …

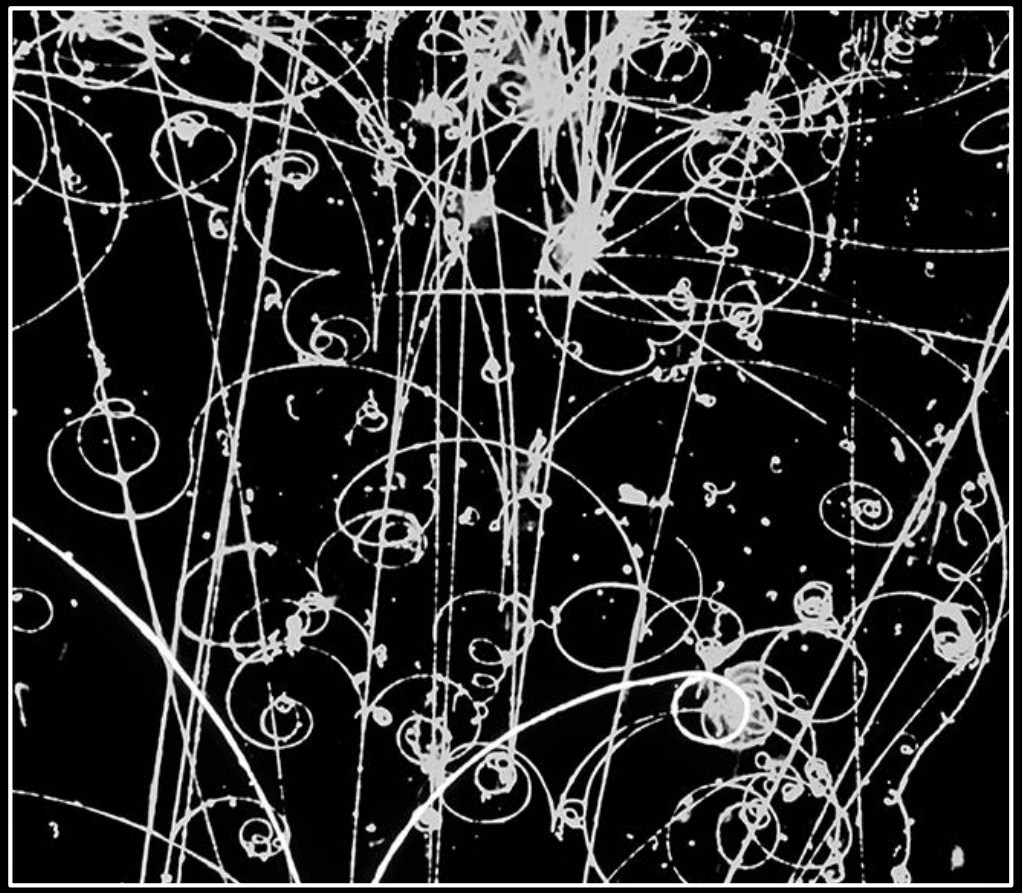
LLR - Aiguille du midi 1943



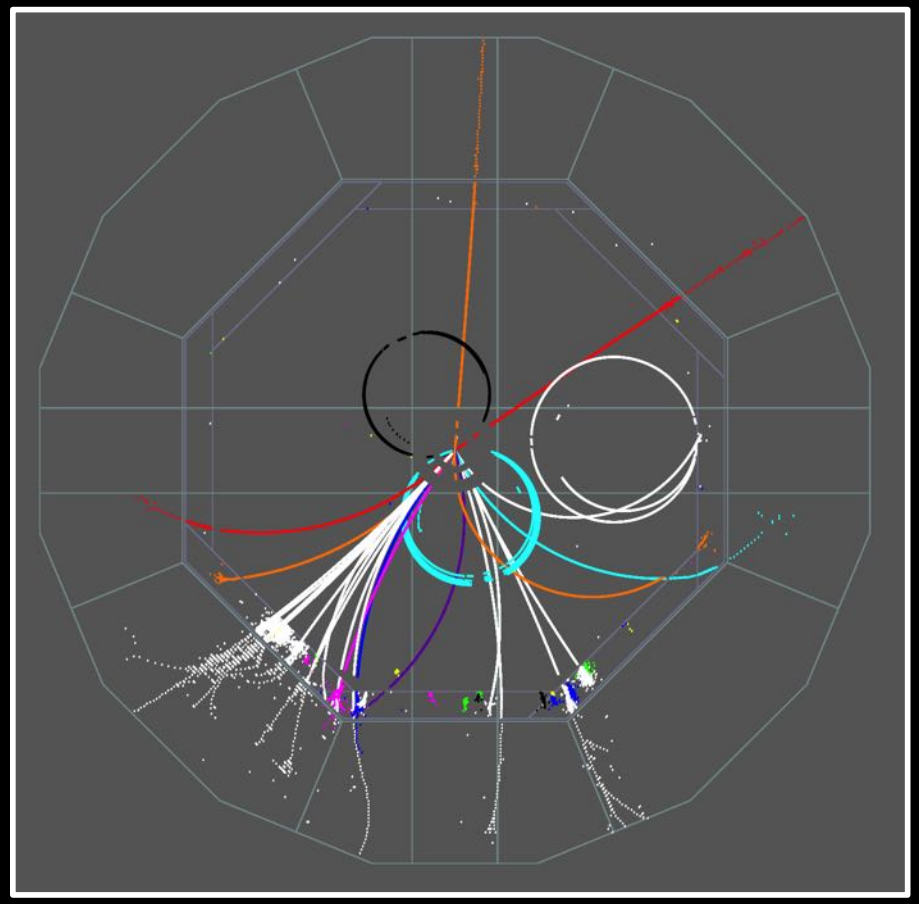
LLR – HESS en Namibie 2012

- **L'étude des rayons cosmiques a joué un rôle essentiel dans l'émergence de la physique des particules, quelles sont les grandes étapes ? Quel rôle de LLR ?**
- **Comment et quand s'est passée la transition des particules cosmiques vers les accélérateurs ?**
- **Qu'est-ce qui a favorisé la réémergence de la physique cosmique pour l'astronomie γ au LLR ?**

Chambre à bulle



Calorimétrie haute granularité



- **Qu'est-ce qui a poussé à l'abandon des chambres à bulles au profit du tout électronique dans les années 1970 ?**
- **Quelles ont été les grandes évolutions en calorimétrie en 50 ans et quel rôle pour le LLR ?**
- **Comment la calorimétrie haute granularité est-elle aujourd'hui mieux adapté à la reconstruction du flux des particules produites ?**