

Centre de physique des particules de Marseille

Un laboratoire au cœur de l'Univers et de la matière

Crédits photos : Collaboration KM3NeT, CPPM, Camille Moirenc
Création graphique : OuvreBoite

Yann Coadou

20 février 2024



Le CPPM



Association Grand Luminy Technopôle - Photo L. Cannone

Sur le campus AMU de Luminy

Le Centre de Physique des Particules de Marseille

Les tutelles :

- **le CNRS/IN2P3**

Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules

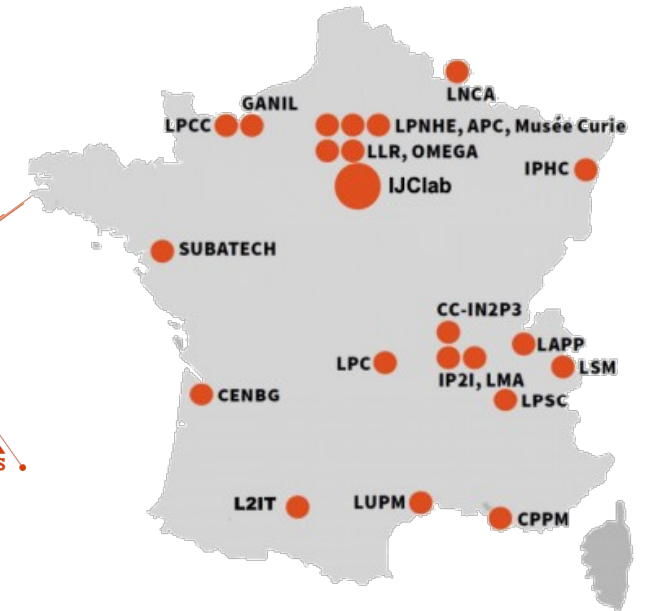


**NUCLÉAIRE
& PARTICULES**

- **Aix-Marseille Université**



Les laboratoires de l'IN2P3 :



Le personnel : ~ 180 personnes

- 30 chercheurs et 10 enseignants-chercheurs
- ~90 ingénieurs, techniciens, administratifs
- ~30 doctorants
- ~20 postdoctorants
- + visiteurs étrangers
- + stagiaires (collège → M2/écoles d'ingénieur, apprentis)



Vocation

▶ Recherche fondamentale

- **Physique des particules**

étude des constituants élémentaires de la matière et de leurs interactions

- **Astroparticules**

observation des particules élémentaires dans l'Univers

- **Cosmologie observationnelle**

compréhension de la composition de l'Univers primordial et de son évolution

▶ Expérimentale

- Participation à de grands projets internationaux

- Mise en œuvre de moyens techniques avancés en **électronique**, en **mécanique**, en **informatique** et en **instrumentation**

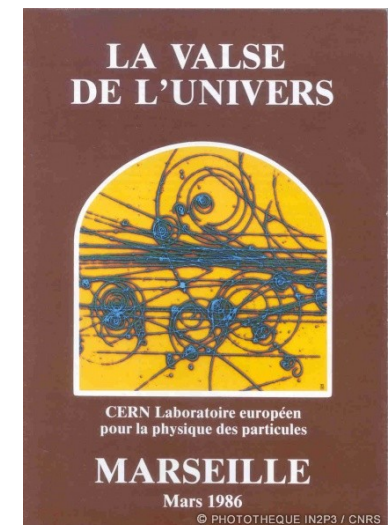
▶ Sociétale (interdisciplinarité & valorisation)

- Application des techniques développées pour la physique fondamentale à d'autres thématiques (e.g. imagerie biomédicale)

▶ Éducative

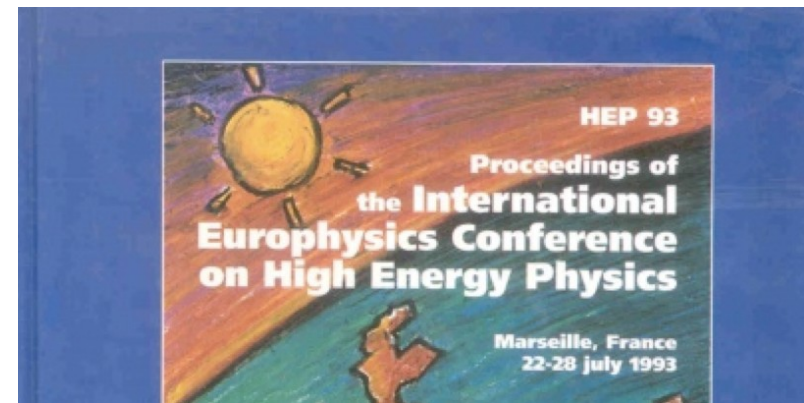
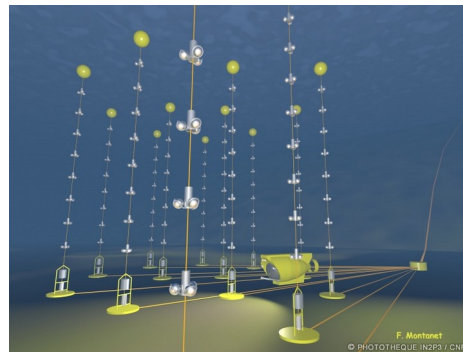
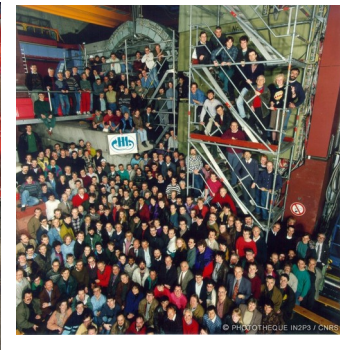
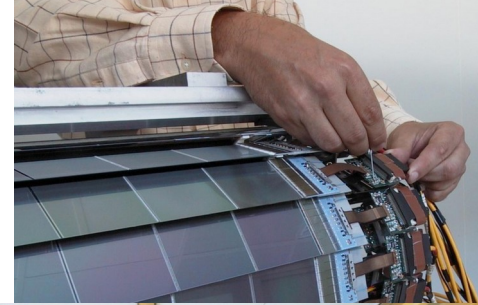
- Éducation et culture scientifique

- Engagement dans les expériences de **physique des particules** : Bugey et EMC, CPLEAR, ALEPH (CERN).
- Premières **réalisations techniques** : ASIC (circuit intégré spécifique) produit pour CPLEAR, carte électronique pour Bugey.
- Premier **événement grand public** CPPM, en 1986, « La Valse de l'Univers » au Parc Chanot, à Marseille.

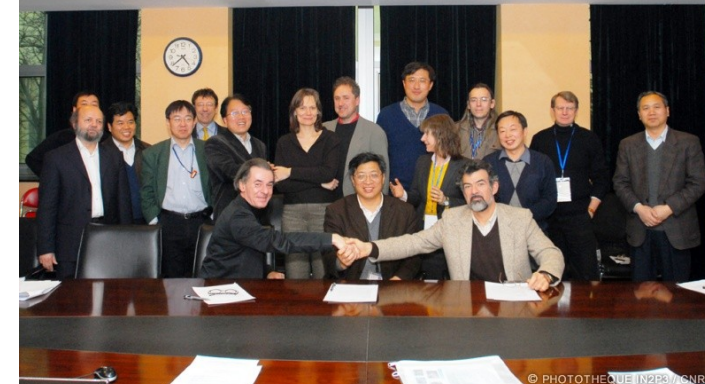
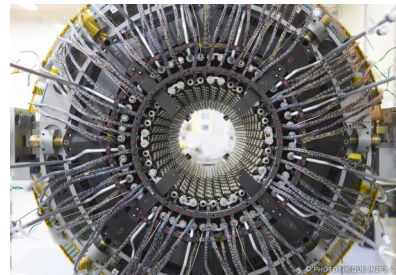
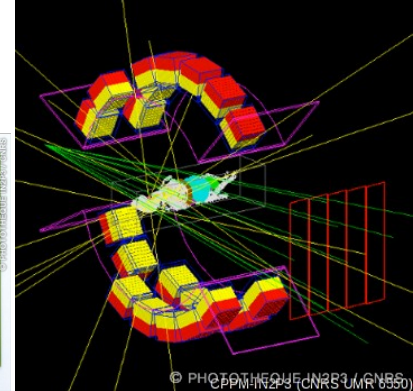
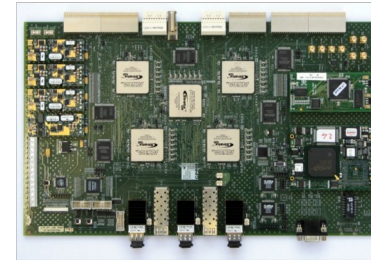


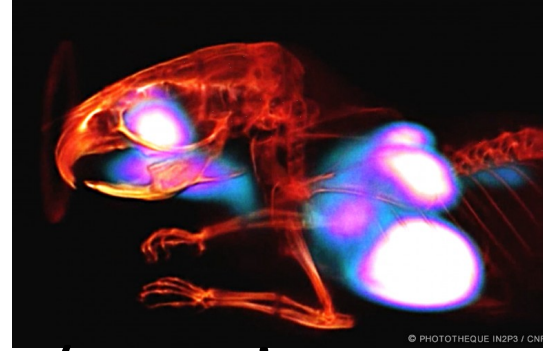
1990

- Développement des **compétences technologiques** de pointe en mécanique, informatique et microélectronique ; premier contrat de valorisation sur la réalisation d'un ASIC
- Forte implication dans le programme **Large Hadron Collider (LHC)** au CERN : expériences **ATLAS** et **LHCb**
- Fondation de l'Ecole supérieure d'ingénieurs en informatique de Marseille
- Le CPPM devient **Unité Mixte de Recherche** (CNRS et Université de la Méditerranée) et déménage dans un nouveau bâtiment
- **H1** (collisionneur électron-proton à DESY, Allemagne)
- **D0** (Tevatron, Fermilab, Etats-Unis)
- Astroparticules avec le télescope sous-marin à neutrinos **ANTARES** en Méditerranée.

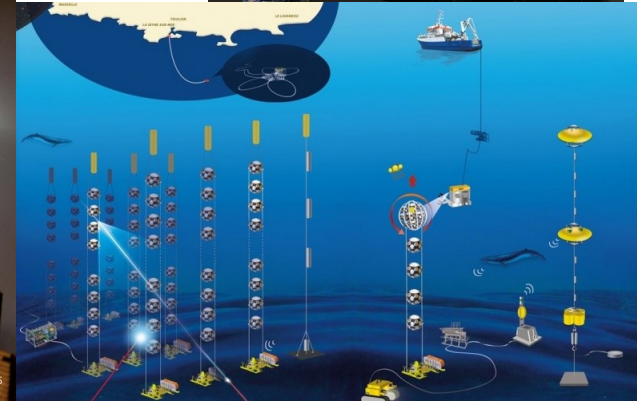
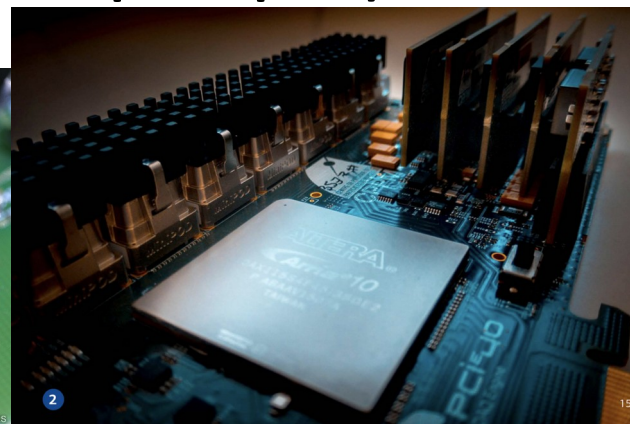
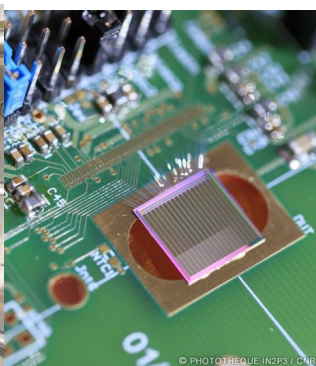
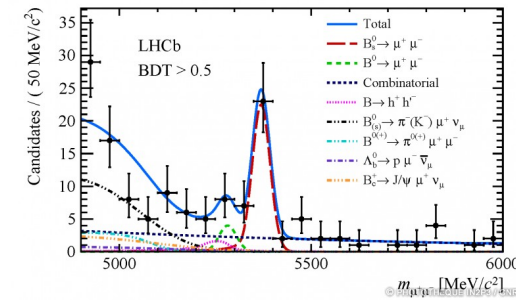
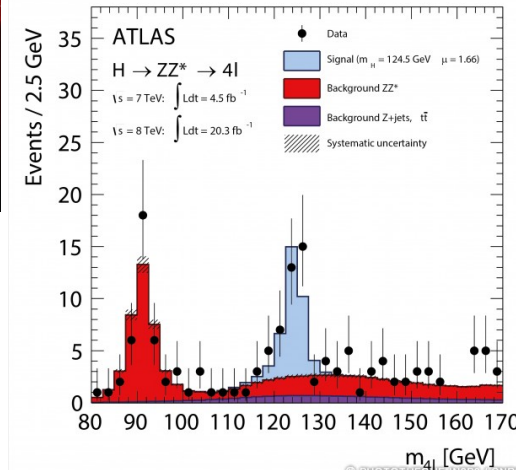


- **Ouverture vers activités interdisciplinaires**, en imagerie à rayons X et en calcul scientifique, avec un centre Tier 2 de la grille du LHC et le « middleware » DIRAC
- **Activité nouvelle en cosmologie** centrée sur l'étude de l'énergie noire avec une forte implication technique dans les expériences **EUCLID** et **LSST** ; rejoint **CTA** pour observer les rayons gamma cosmiques
- Finalisation de la **construction des expériences LHC**, contributions fortes dans les détecteurs à pixels, la calorimétrie, le système de déclenchement électronique pour l'acquisition des données
- **Médiation scientifique** : **Cosmophone**, **Cosmodétecteur** (la roue cosmique), cycle de **conférences** mensuelles grand public « Mystères au cœur de l'Univers et de la matière », **Masterclasses** internationales de physique des particules pour les lycéens
- Création du Laboratoire international associé franco-chinois en physique des particules (**FCPPL**) et du Laboratoire d'excellence Origines, Constituants et Evolution de l'Univers (**LabEx OCEVU**).



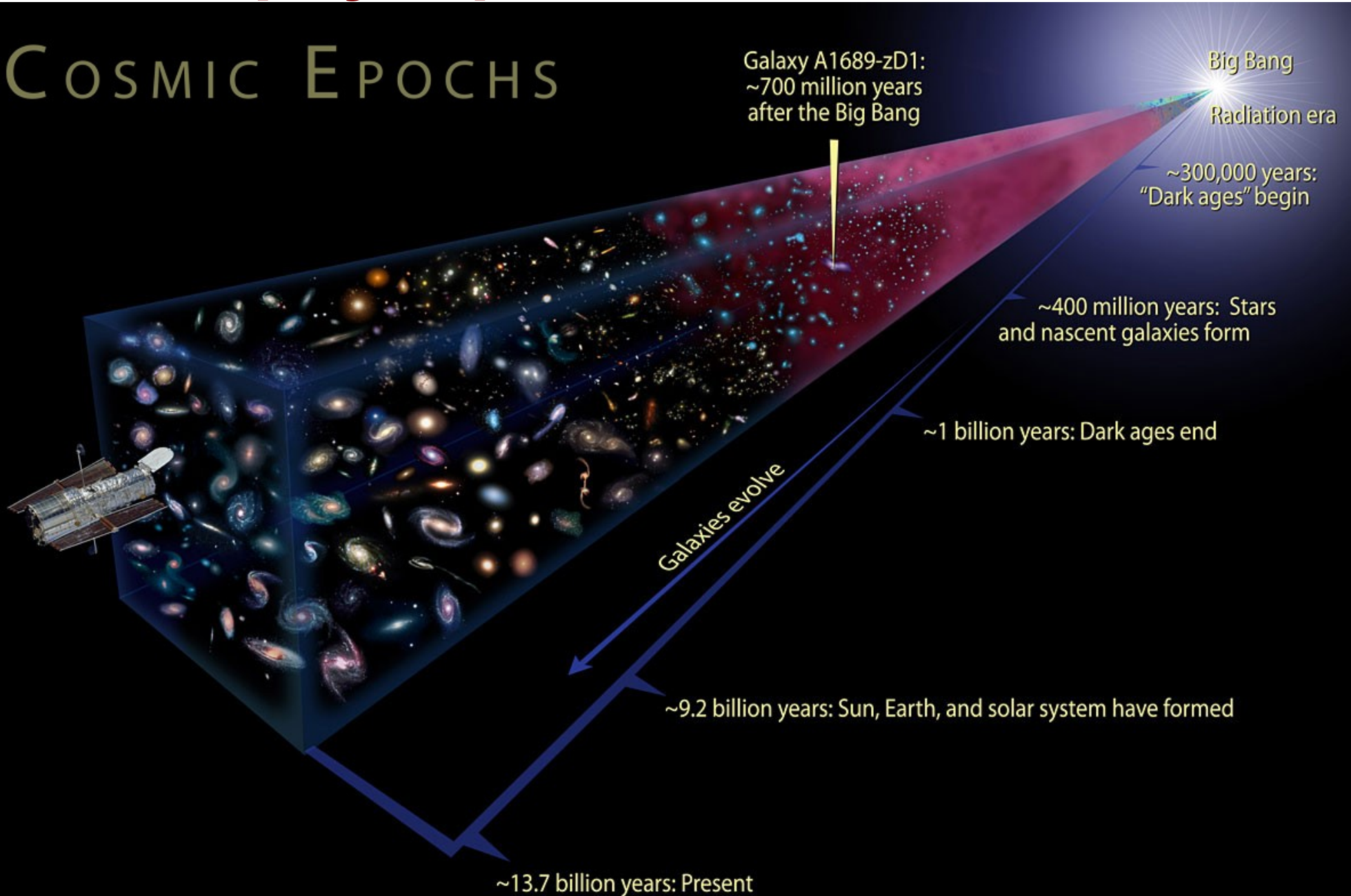


- Création des **start-up imXPAD** (imagerie biomédicale) et **PowerSea** (connexion sous-marine)
- **Découverte du boson de Higgs**, recherche de la nouvelle physique et mesures de précision au LHC
- Création des équipes en Calcul & Données et en physique des particules **Belle II** (KEK, Japon)
- Lancement du projet neutrinos **KM3NeT**, premiers résultats de physique et attribution du **Cristal Collectif CNRS** à l'équipe technique
- Développements techniques importants pour les **jouences des expériences ATLAS** (calorimétrie et pixels) et **LHCb** (carte électronique rapide)



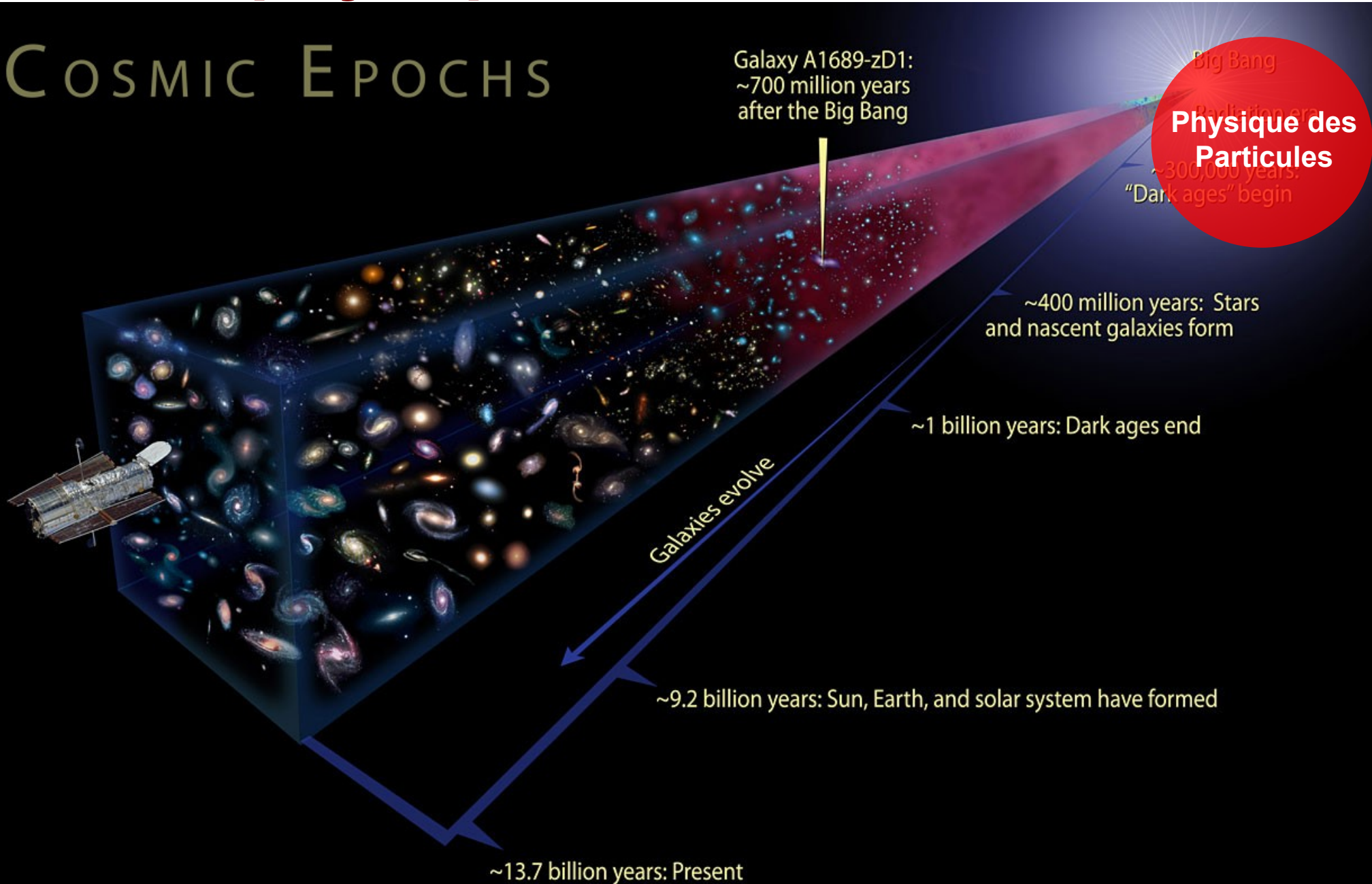
La recherche au CPPM : la physique des deux infinis !

COSMIC EPOCHS



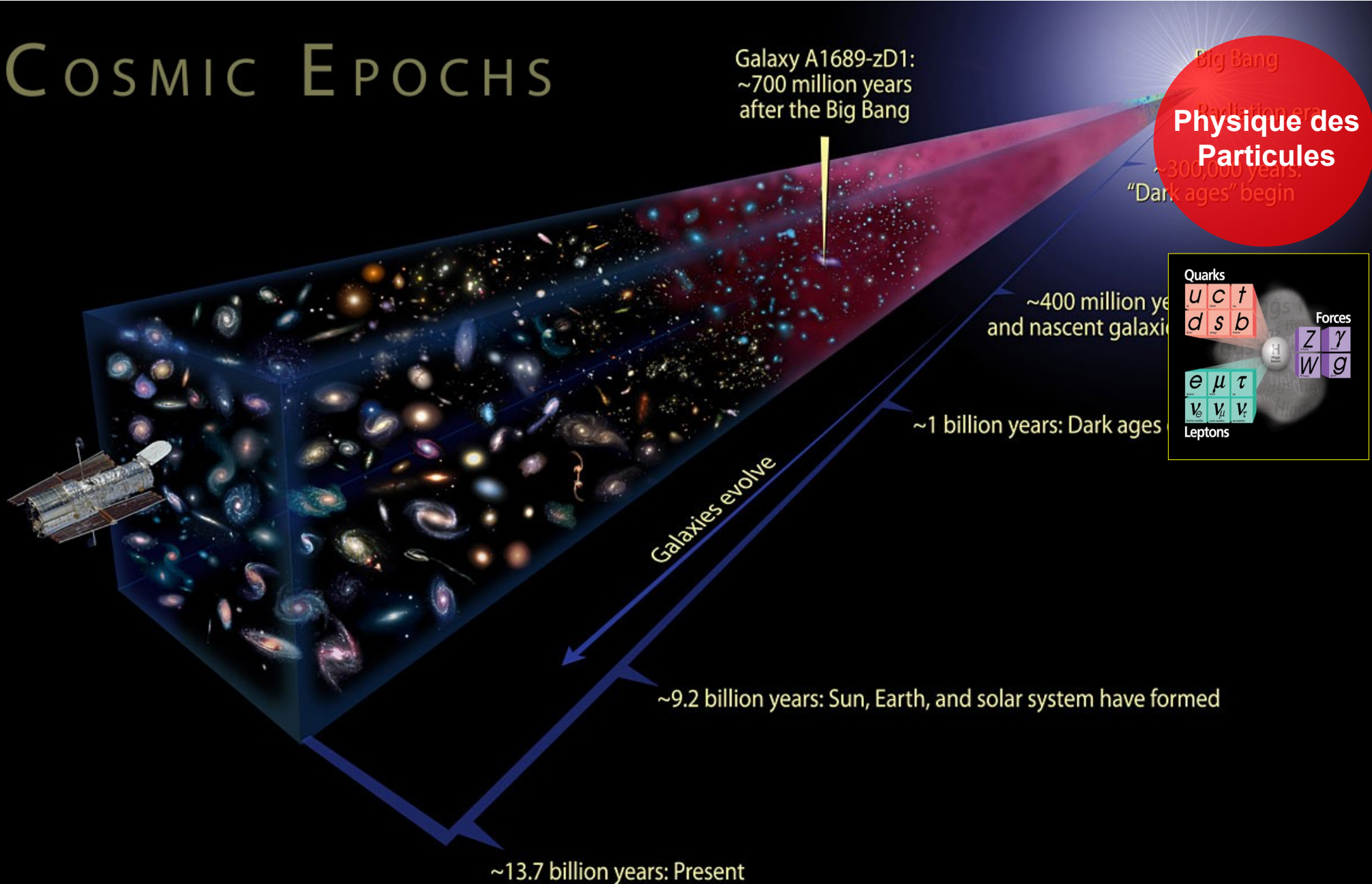
La recherche au CPPM : la physique des deux infinis !

COSMIC EPOCHS



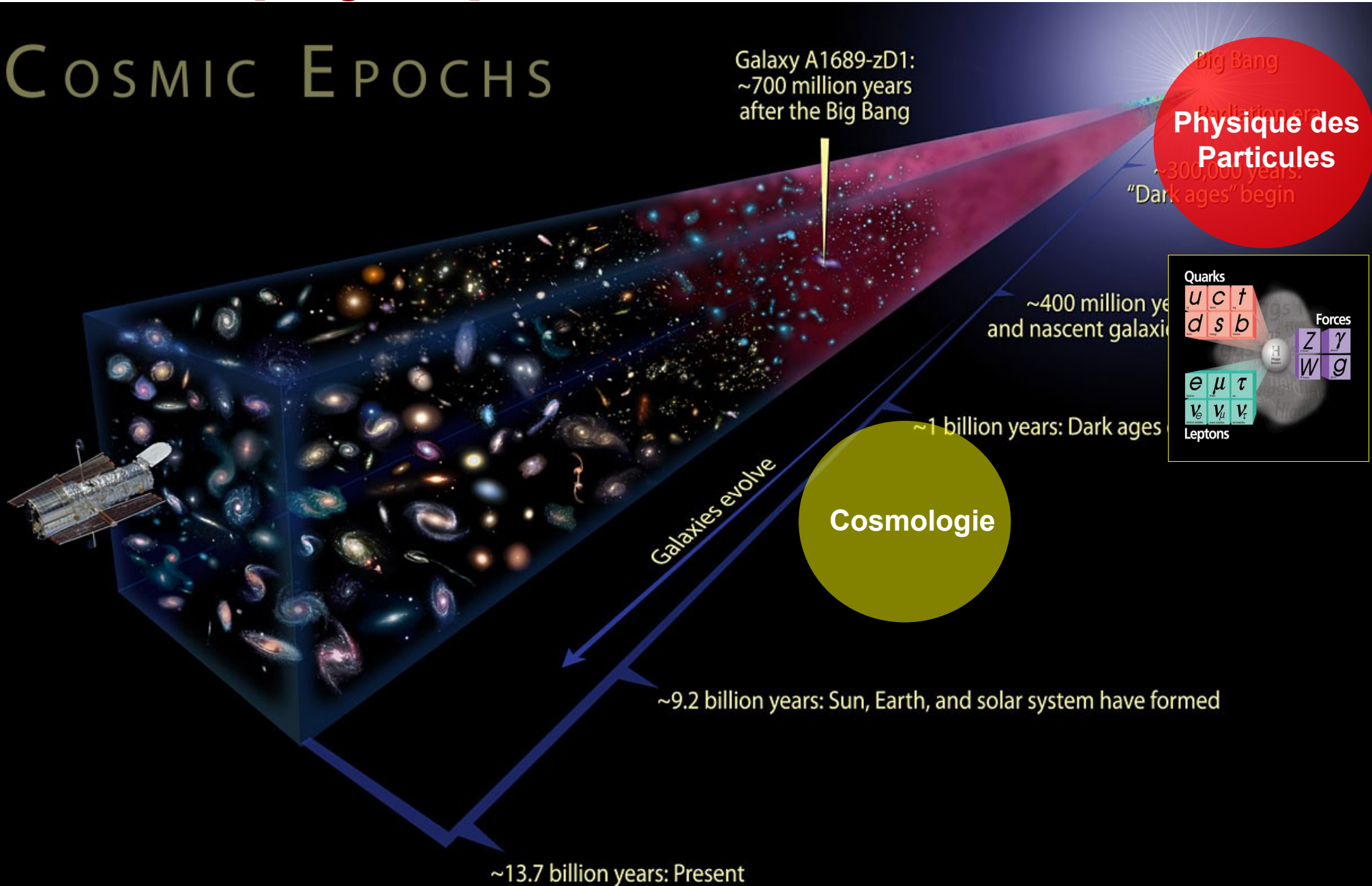
La recherche au CPPM : la physique des deux infinis !

COSMIC EPOCHS



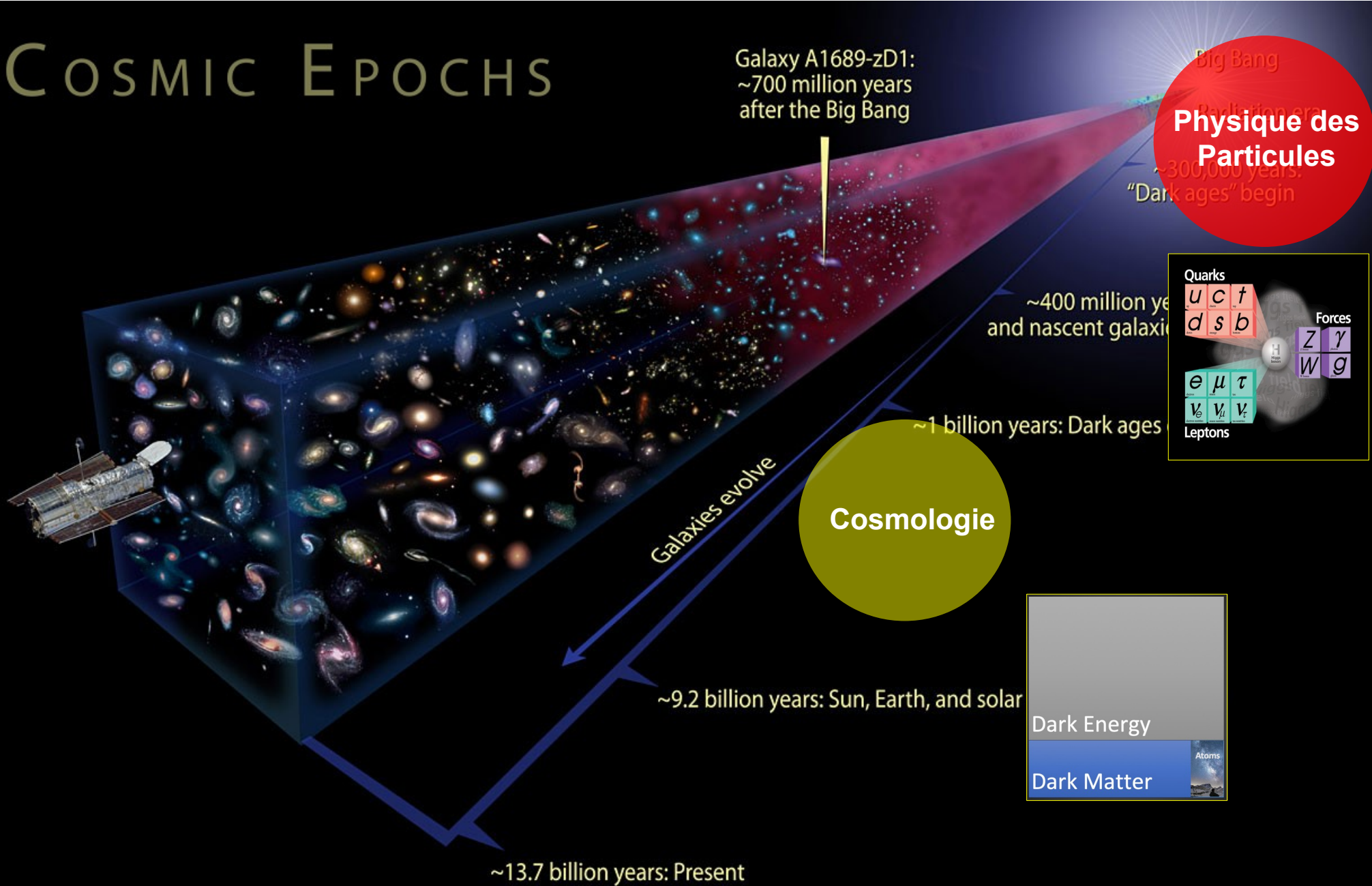
La recherche au CPPM : la physique des deux infinis !

COSMIC EPOCHS



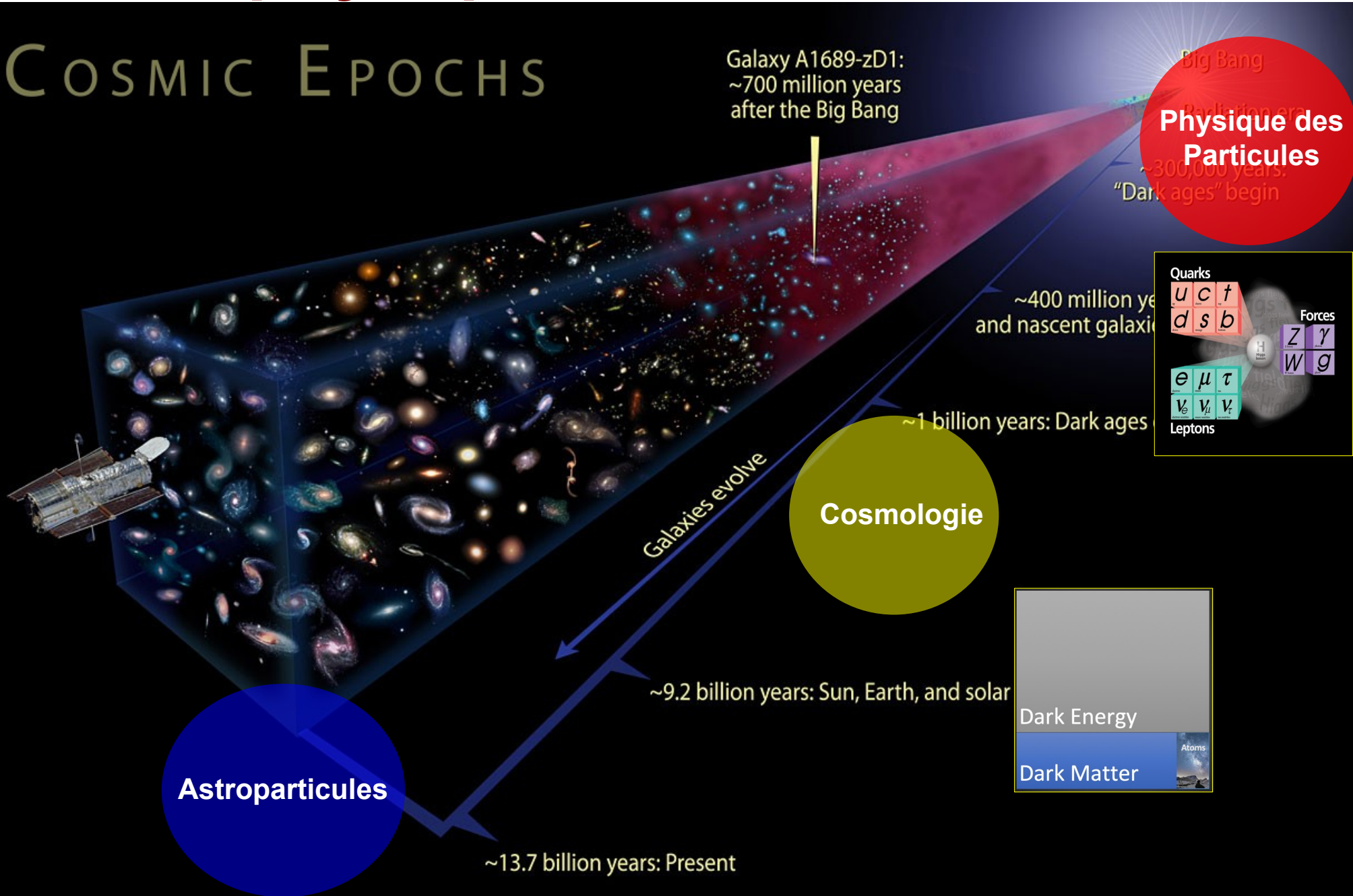
La recherche au CPPM : la physique des deux infinis !

COSMIC EPOCHS



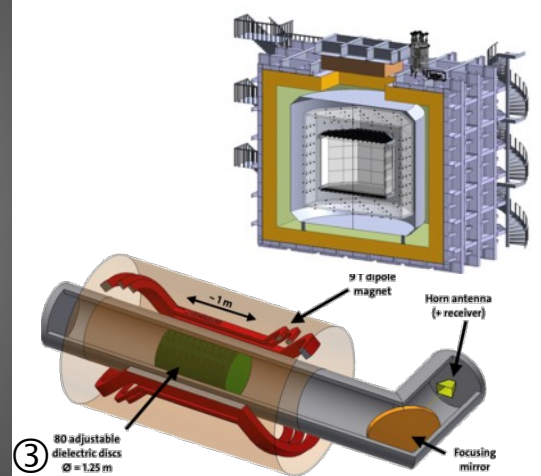
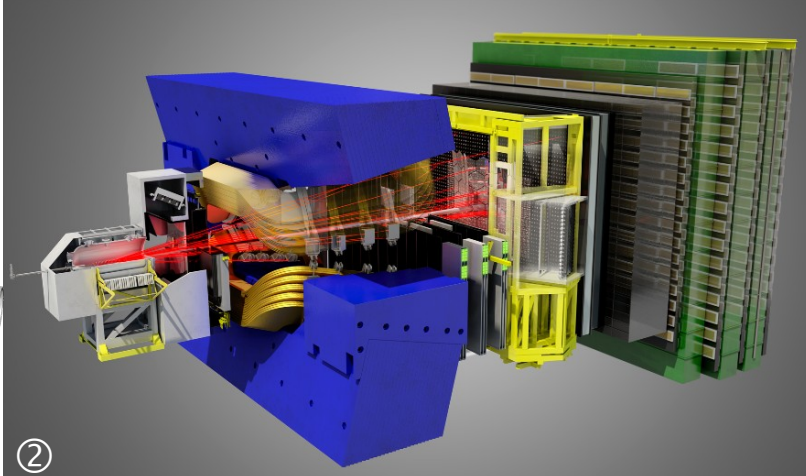
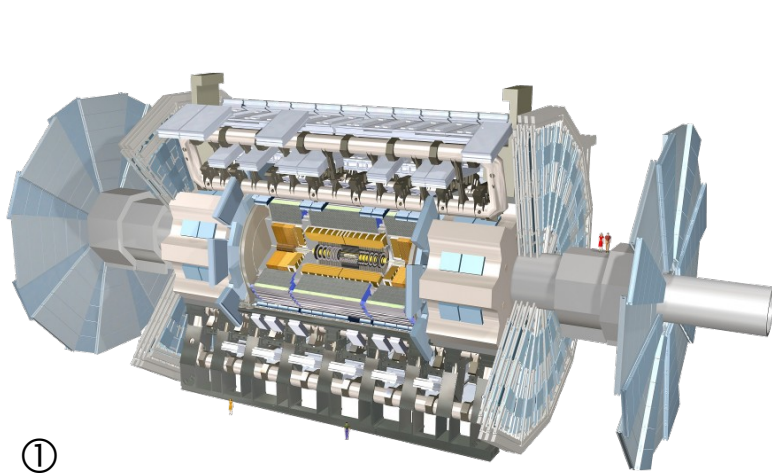
La recherche au CPPM : la physique des deux infinis !

COSMIC EPOCHS



Quarks			Forces		
u	c	t	Z	γ	
d	s	b	W	g	
Leptons					
e	μ	τ			
ν _e	ν _μ	ν _τ			

Dark Energy	
Dark Matter	Atoms



①

Après d'accélérateurs :

- ATLAS ① et LHCb ② @ LHC (Genève) p-p
- Belle II @ SuperKEKB (Japon) e⁺e⁻

En profondeur :

- sous les montagnes : DarkSide (Italie) ③, MadMax (Hambourg)
- fond marin : Antares, KM3NeT, ORCA (Méditerranée) ④

Face au ciel :

- dans le désert : HESS (Namibie) ⑤, CTA (Chili, Canaries) ⑥
- au sommet des montagnes : eBOSS, DESI, LSST ⑦
- dans l'espace : SVOM, EUCLID ⑧

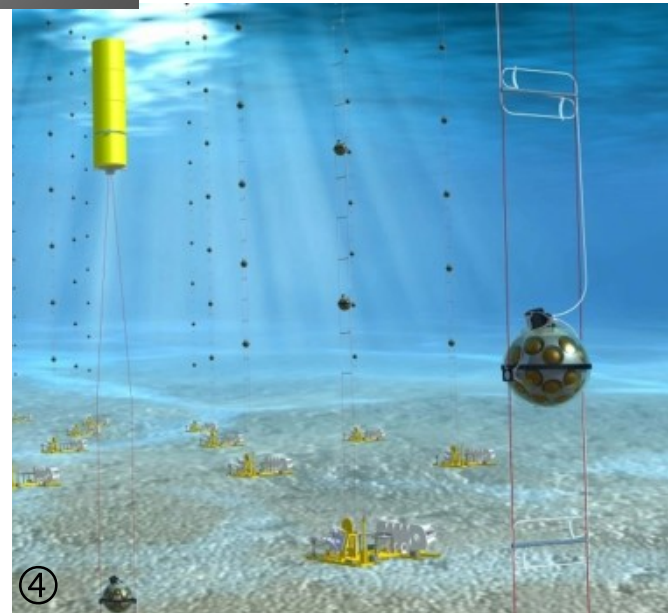
②

③

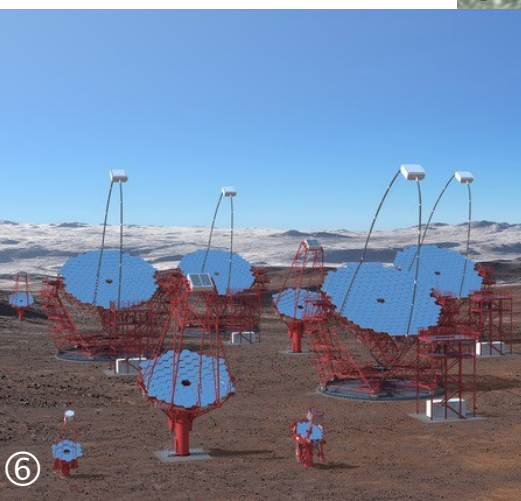
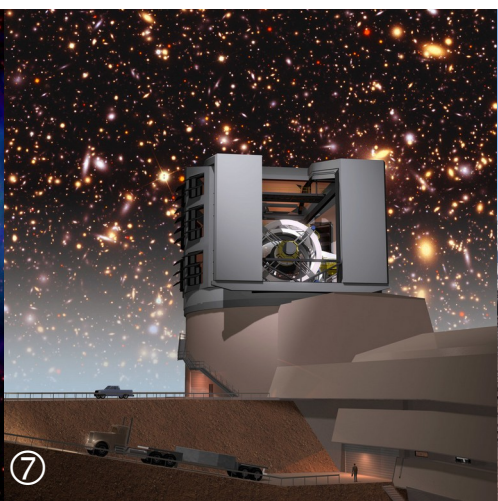
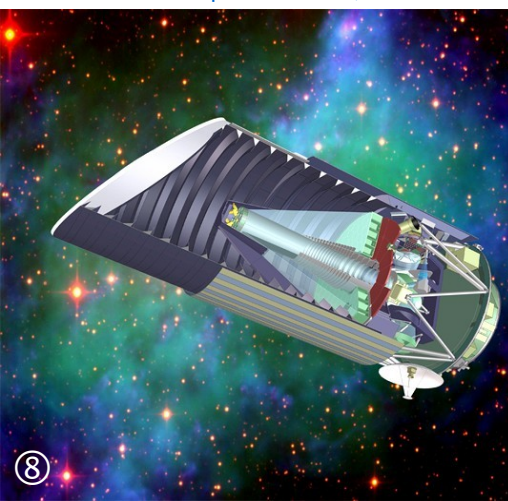
Étude des constituants élémentaires
Recherche de nouvelle physique

Astronomie neutrino, gamma
Approche multi-messagers

Caractérisation de l'énergie noire
Approche multi-sondes



④



⑧

⑦

⑥

⑤

Fort partenariat international

CPPM 2021



RELATIONS INTERNATIONALES

Les échanges de chercheurs européens et internationaux se font dans le cadre d'accords de coopération que l'IN2P3 a signés avec les organismes de recherche des pays correspondants, mais aussi au travers d'accords bilatéraux portés par AMU, initiés par le CPPM.

Le CPPM se veut un laboratoire très ouvert à l'international. Nous mettons en place de nombreux accords avec des instituts étrangers soit à travers des accords spécifiques de l'IN2P3, des accords entre universités, ou encore par l'intermédiaire de dispositifs ministériels tels que des accords Hubert Curien ou autres. Ainsi nous avons des collaborations avec des laboratoires des pays suivants :

- **Algérie** (accord bilatéral en cours entre AMU et l'Université Houari Boumediene d'Alger, initié en 2016)
- **Chine** (LIAs FCPPL et Origins, Erasmus +, et campagne AMU de chercheurs invités)
- **Colombie** (cotutelle + accord bilatéral en cours entre AMU et l'Université des Andes, initié en 2016)
- **Espagne** (cotutelle entre le CPPM-AMU et l'Université de Barcelone)
- **Hongrie** (accord Hubert Curien, programme Balaton soumis et obtenu en 2012, 2013, 2014 et 2015)
- **Italie*** (Italie : Univer.Pavie/CTA et doctorants)
- **Liban** (accueil de visiteurs étrangers et de doctorants)
- **Maroc** (accueil de doctorants stagiaires)
- **République Tchèque** (collaborations spécifiques IN2P3)
- **Roumanie** (collaborations spécifiques IN2P3 et cotutelles ; accord bilatéral AMU et Université de Bucarest)

Laboratoires internationaux CNRS

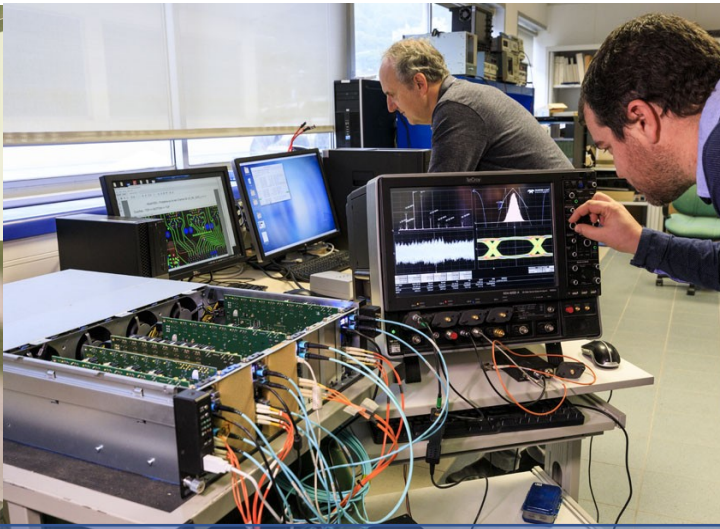
- FCPPL (Chine) : CPPM, laboratoire hôte
- DMLab (Allemagne)
- iLANCE (Japon)

- **MadMax** à DESY (Hambourg, Allemagne)
- **H1** à DESY (Hambourg, Allemagne)
- **DØ** à Fermilab (Chicago, États-Unis)
- **ATLAS** au CERN (Genève, Suisse)
- **LHCb** au CERN (Genève, Suisse)
- **Belle II** (Tsukuba, Japon)
- **SuperNEMO** (Modane, France)
- **DarkSide** à 1,4 km sous terre à Gran Sasso (Assergi, Italie)
- **eBOSS** sur SDSS (Nouveau-Mexique, États-Unis)
- **DESI** (Arizona, États-Unis)
- **LSST** (Cerro Pachón, Chili)
- **Euclid** (Noordwijk, Pays-Bas)
- **CTA / HESS** (Canaries, Chili et Namibie)
- **ANTARES, MEUST/KM3NeT** (Méditerranée)
- **Accords bilatéraux de coopération** (Algérie, Chine, Colombie, Espagne, Hongrie, Italie, Liban, Maroc, République Tchèque, Roumanie)
- **FCPPL** (Shanghai, Jinan, Nankin et Pékin, Chine)

Mécanique

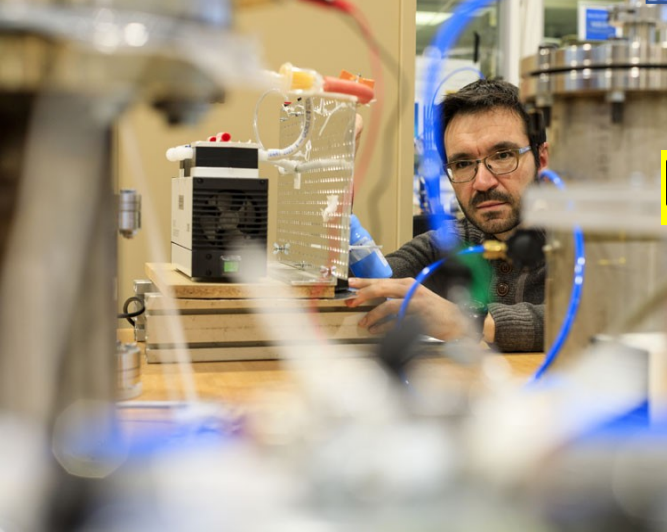
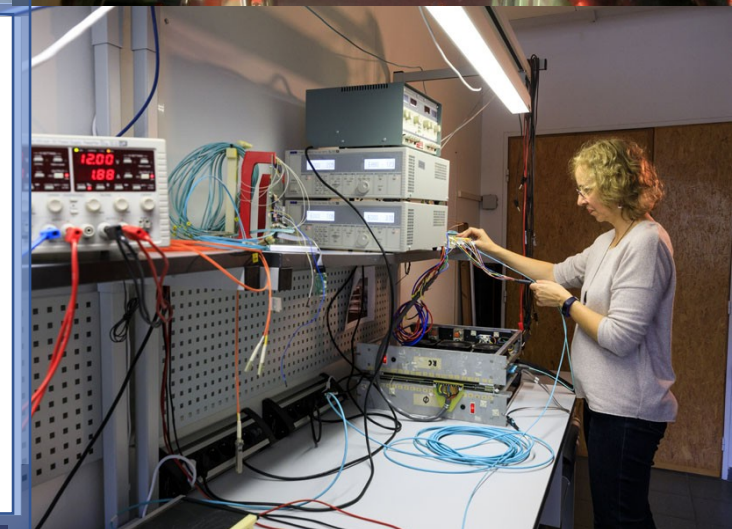


Electronique



CPPM
CENTRE DE PHYSIQUE DES
PARTICULES DE MARSEILLE
CPPM

CPPM
Technologie
de pointe



Detecteurs et Données



Laboratoire Sous-marin
Provence Méditerranée

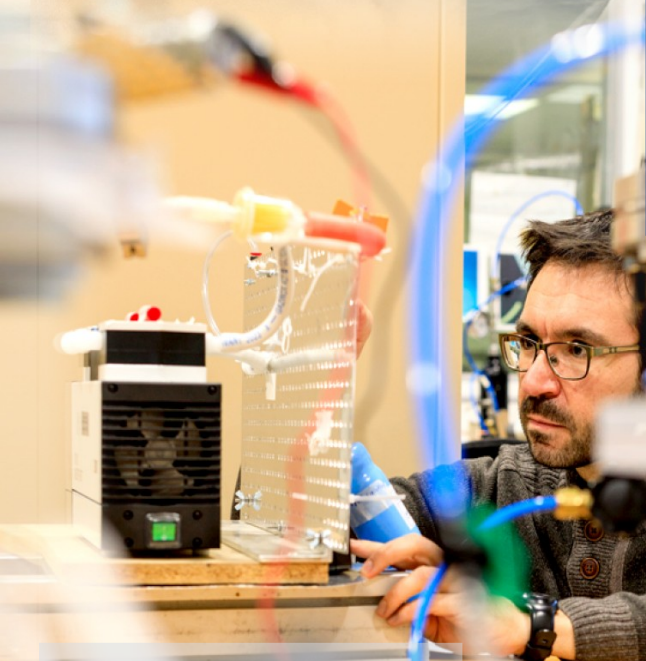
Plateforme
calcul intensif




CPPM
Plateformes
technologiques



Credits photos : Collaboration KM3Net, CPPM ; Camille Moirenc
Création graphique : OuvrebOite



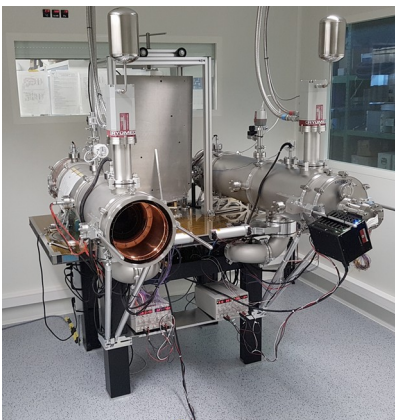
Plateau Radon



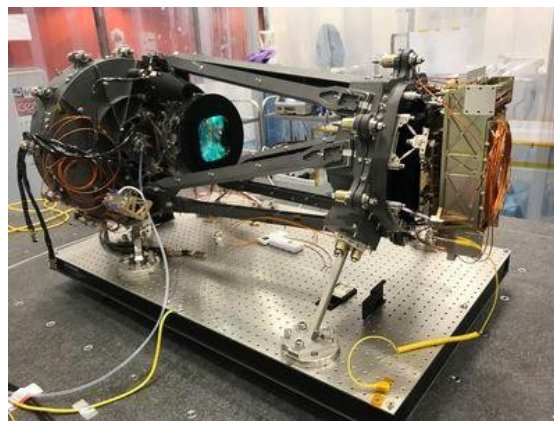
Plateau Infrarouge



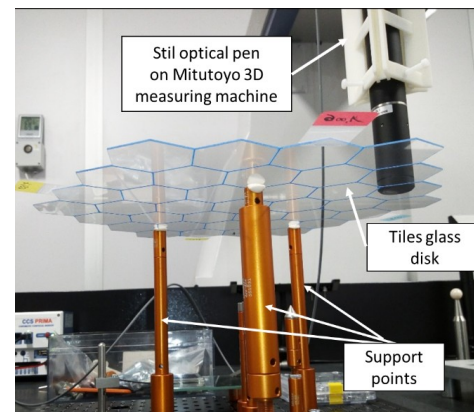
- Création du **Laboratoire Sous-marin Provence Méditerranée (LSPM)**, plateforme nationale CNRS/IN2P3, avec un fort soutien régional
- Création de l'**équipe Matière Noire** (DarkSide [Italie] et MadMax [Allemagne])
- Livraison du **spectrophotomètre infrarouge NISP** pour la mission spatiale européenne Euclid et de l'échangeur de filtres pour LSST



20 février 2024



Rencontres Enseignant-es/Chercheur-es



- Célébration des **50 ans de l'IN2P3** au CPPM (juin 2021)
- Fin de la prise de données du télescope à neutrinos ANTARES (février 2022)
- L'instrument DESI (Dark Energy Spectroscopic Survey) crée la **plus grande carte 3D du cosmos** (2022)
- Meilleures limites mondiales pour la **recherche de Wimp de basse masse** avec l'expérience DarkSide-50 (2022)
- Un **laboratoire franco-allemand** pour identifier la nature de la matière noire (juin 2023)
- **Lancement du satellite Euclid** de l'ESA, destiné à explorer l'évolution de l'Univers sombre (juillet 2023)
- **Exposition « des abysses au cosmos »** au fort Napoléon de La Seyne-sur-Mer (sep-oct 2023)
- **Démarrage du LHC Run 3**, upgrades ATLAS et LHCb avec forte implication du CPPM



L'excellence collective

- 2 Cristal Collectif CNRS
 - ▶ 2018 LSPM
 - ▶ 2021 LSST
- 2 Médailles de bronze CNRS
 - ▶ E. Petit ATLAS 2022 ; 2023 D. vom Bruch
- 1 Cristal CNRS : 2023 E. Vigéolas
- 3 ERC (*European Research Council*)
 - ▶ J. Serrano 2019
 - ▶ D. vom Bruch 2022
 - ▶ A. Pisani 2023
- 2 Chaires d'Excellence Amidex
 - ▶ J. Bautista 2021
 - ▶ A. Pisani 2023
- Palmes académiques / CNRS : 2022 M. Damoiseaux
- Prix Collaborations Internationales
 - ▶ 2 EUCLID Star 2019 PhD P. Barratta/2020 team ; Prix Euler (EUCLID) Team 2022; ATLAS Outstanding G. Aad
- CPPM : Médaille d'Honneur Aix-Marseille Université 2023



Forte activité d'encadrement, culture scientifique et communication

- Des connexions fortes avec l'enseignement scientifique et technologique
 - ▶ UFR Sciences, Polytech
 - ▶ 40 stagiaires, 12 apprentis, 10-12 PhD/an



Voyages insolites au coeur de la matière et de l'Univers

mardi 1 juin 2021 à 09:00 → 16:30 Europe/Paris

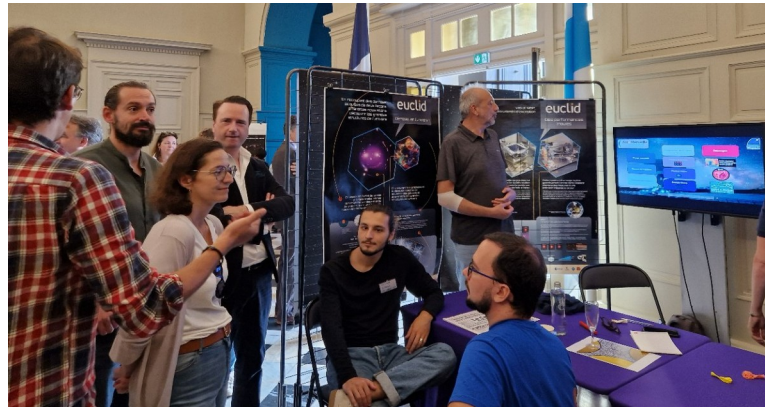
Description A l'occasion des 50 ans de l'IN2P3, le CPPM propose aux collégiens et lycéens, une immersion dans la physique des deux infinis, un voyage insolite au coeur de la matière et de l'Univers.

Les scientifiques du Centre de Physique des Particules de Marseille (CPPM) propose de célébrer cet événement auprès des jeunes et de leurs enseignants le 1er juin 2021.



Visioconférences nationales pour les 50 ans de l'Institut national de physique nucléaire et de physique des particules (IN2P3) du CNRS.







CPPM : partenariat et territoire



CEA/IRFU



CNRS/INSU



IFREMER



Commission Européenne



Agence Nationale de la Recherche



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
DREETS PACA



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
DRARI PACA



FEDER PACA



Conseil régional
Provence Alpes Côte d'Azur



Conseil
départemental des
Bouches-du-Rhône



LE DÉPARTEMENT
Conseil
départemental du Var



Mairie de Marseille



Toulon Provence
Méditerranée



Mairie de la Seyne-
sur-Mer



Quarks



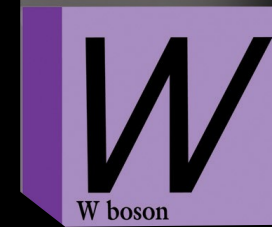
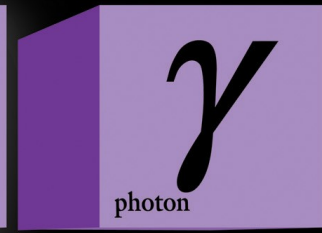
+ anti-matière



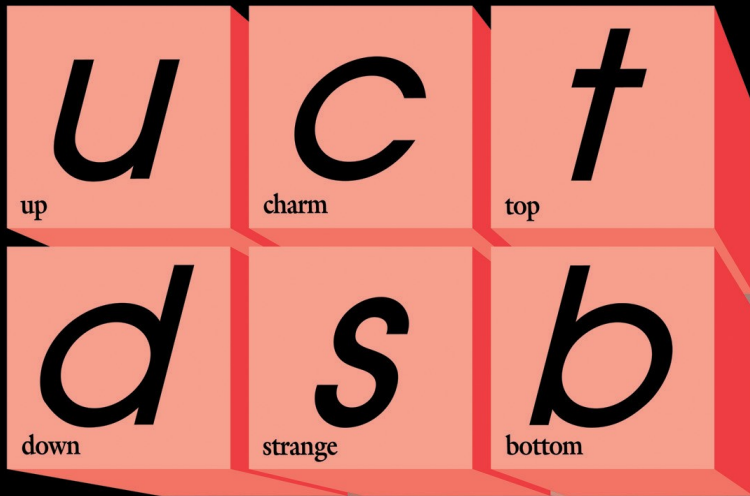
Leptons

Le modèle standard

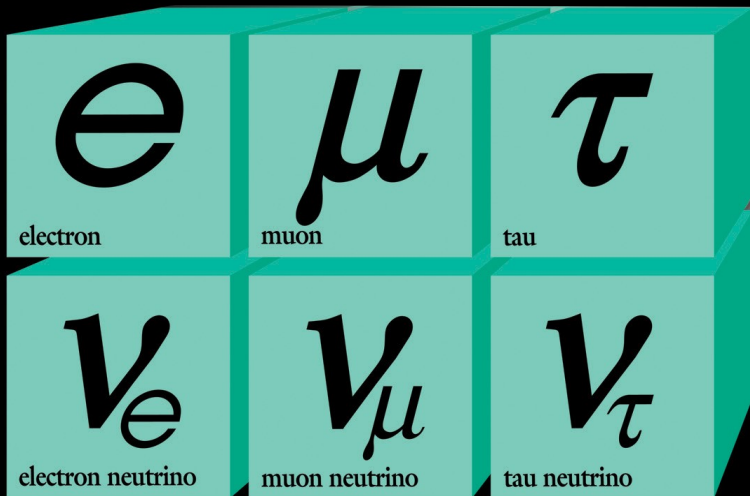
Forces



Quarks



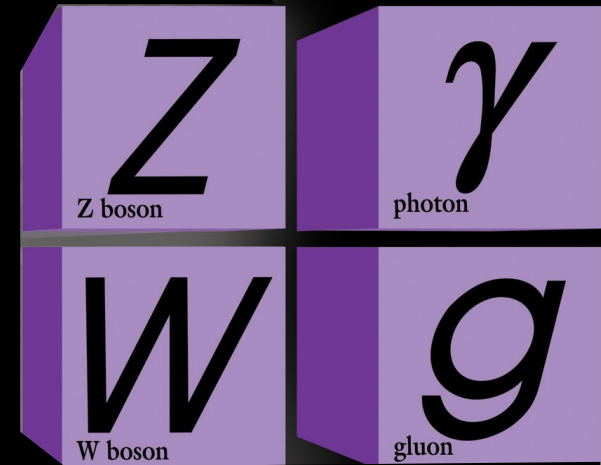
+ anti-matière



Leptons

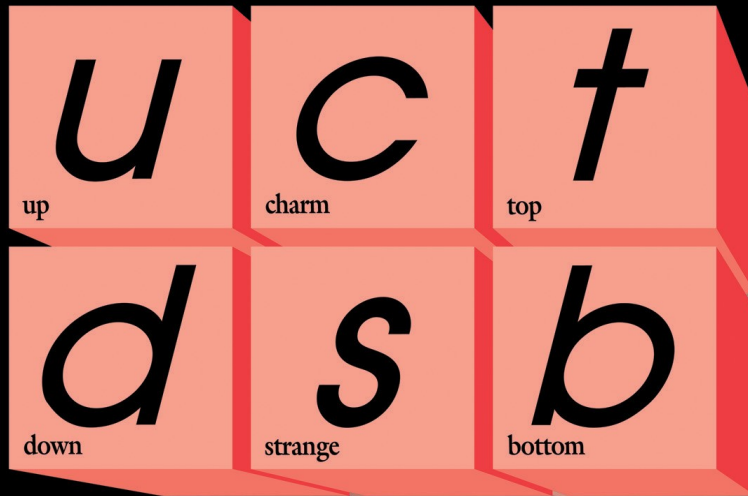
Le modèle standard

Forces

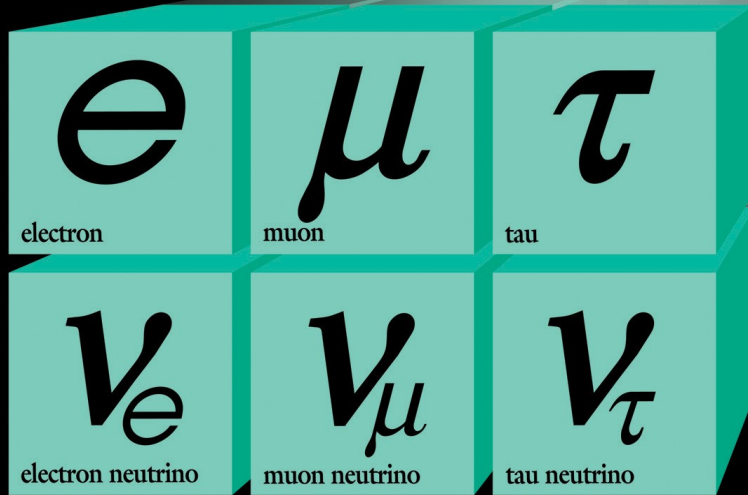


Quarks

Le modèle standard

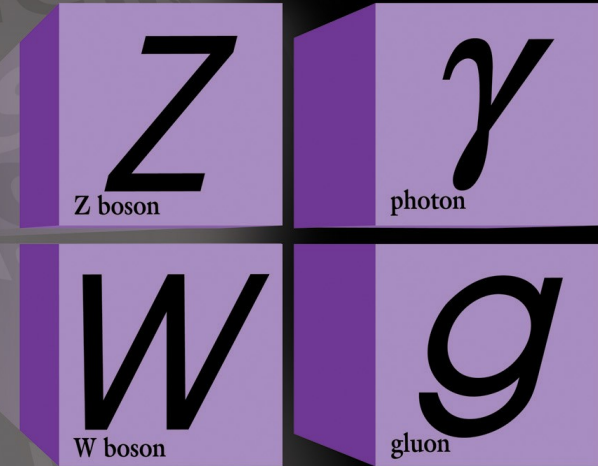


+ anti-matière



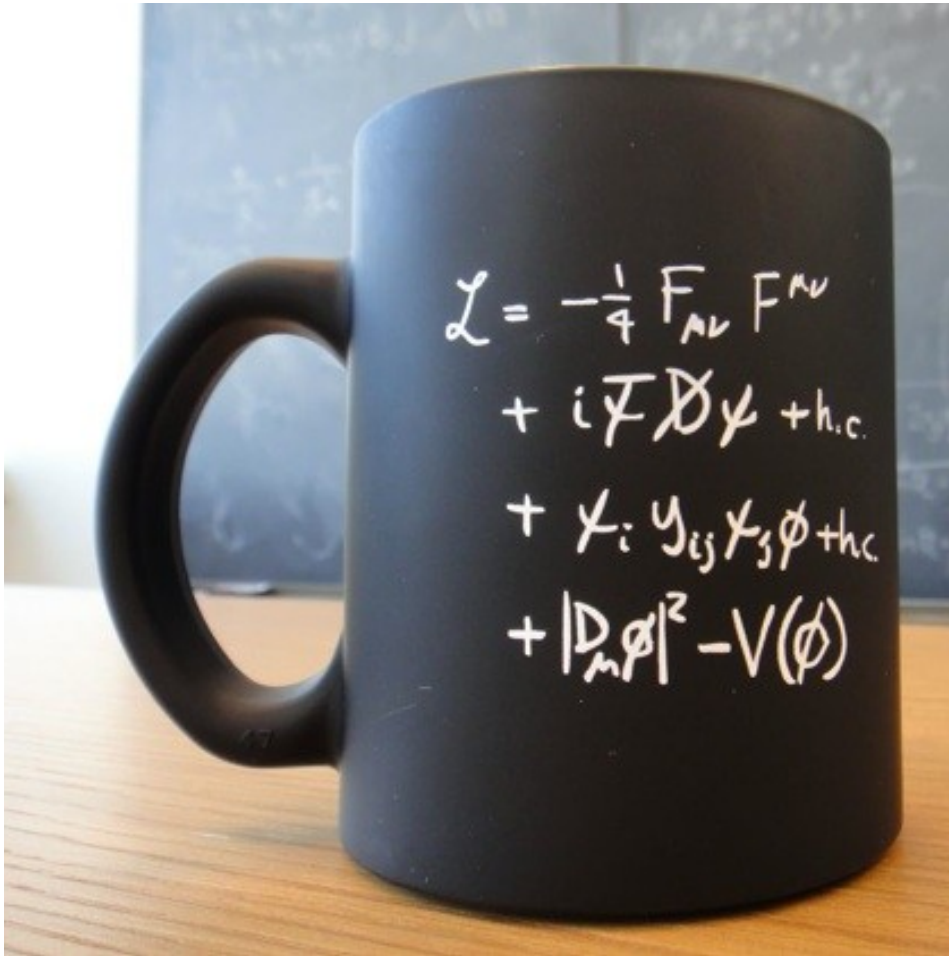
Leptons

Forces



Le modèle standard

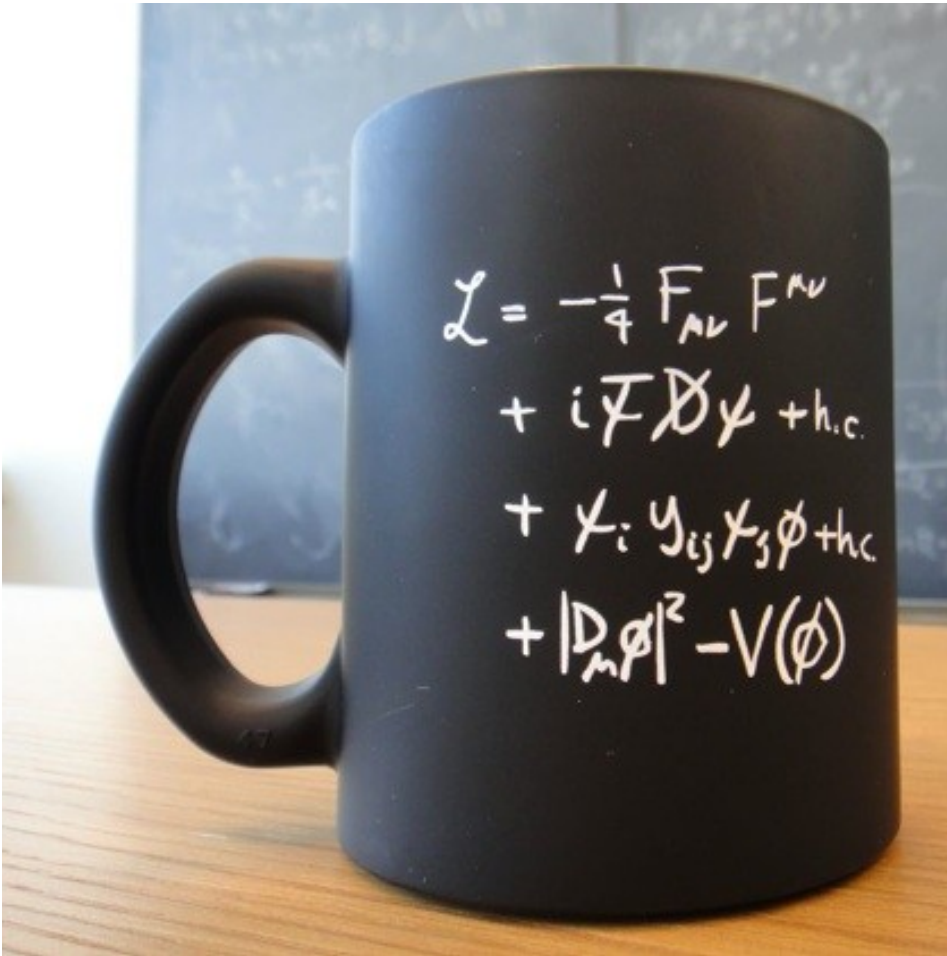
- Version synthétique



Le modèle standard

- Version synthétique

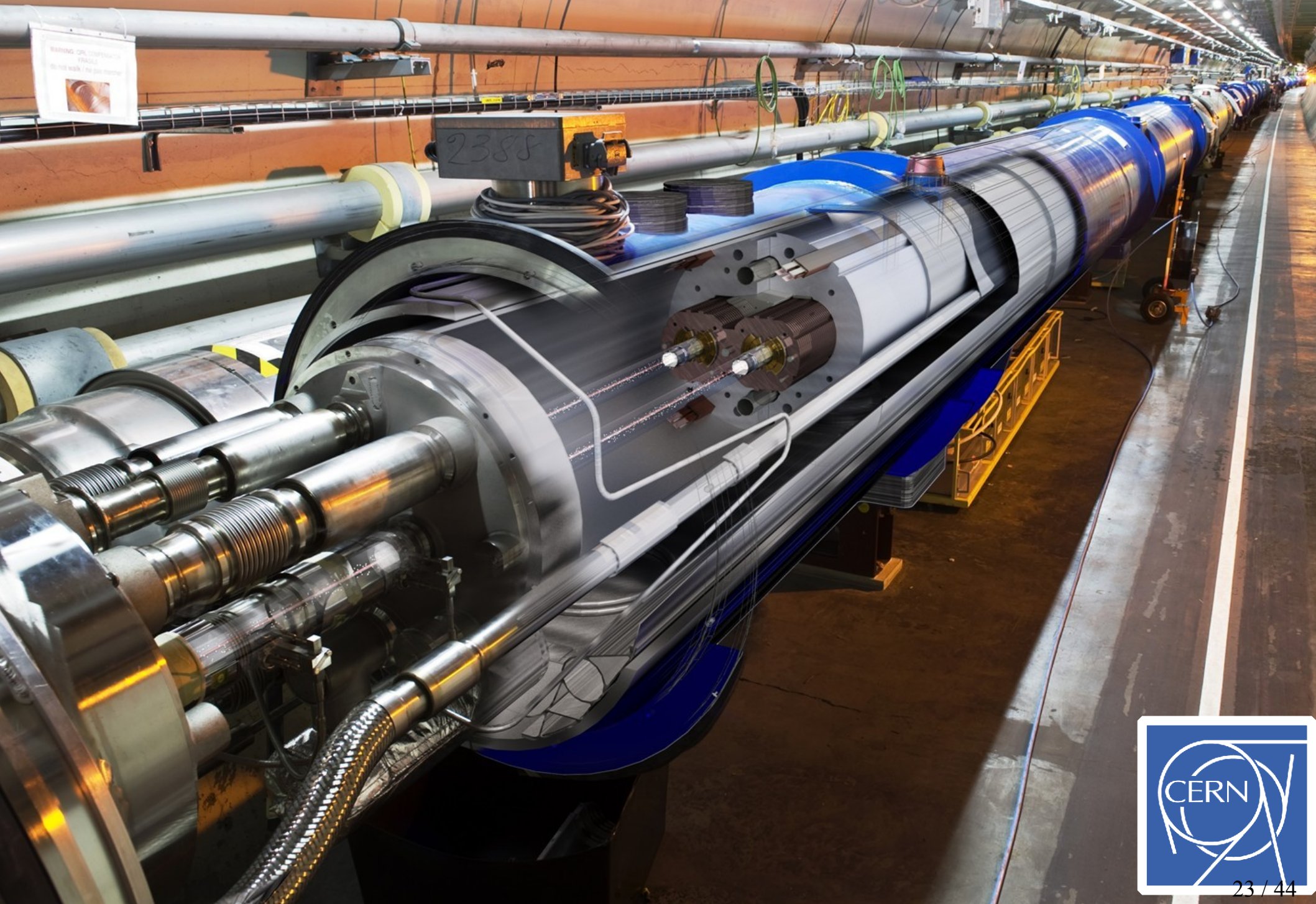
- Version développée...



$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e + \\
 & \frac{1}{2}i g_s^2 (\bar{q}_i^c \gamma^\mu q_j^c) g_\mu^a + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b g_\mu^c - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \\
 & \frac{1}{2}\partial_\mu \mathbf{H} \partial_\mu \mathbf{H} - \frac{1}{2}m_h^2 \mathbf{H}^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \\
 & \frac{1}{2c_w^2} M \phi^0 \phi^0 - \beta_h [\frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g} \mathbf{H} + \frac{1}{2}(\mathbf{H}^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-)] + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - \\
 & ig_{c_w} [\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + \\
 & Z_\nu^0 (W_\nu^+ \partial_\mu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - ig_{s_w} [\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - \\
 & A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - \\
 & \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\nu^+ W_\mu^- + \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^+ W_\nu^- + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\nu^+ Z_\nu^0 W_\mu^- - \\
 & Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w^2 (A_\mu W_\nu^+ A_\nu W_\mu^- - A_\mu A_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) + \\
 & g^2 s_w c_w [A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-] - g\alpha [\mathbf{H}^3 + \\
 & \mathbf{H} \phi^0 \phi^0 + 2\mathbf{H} \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{8}g^2 \alpha_h [\mathbf{H}^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + \\
 & 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4\mathbf{H}^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 \mathbf{H}^2] - gM W_\mu^+ W_\mu^- \mathbf{H} - \\
 & \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 \mathbf{H} - \frac{1}{2}ig [W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \\
 & \phi^+ \partial_\mu \phi^0)] + \frac{1}{2}g [W_\mu^+ (\mathbf{H} \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \mathbf{H}) - W_\mu^- (\mathbf{H} \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \mathbf{H})] + \\
 & \frac{1}{2}g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (\mathbf{H} \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu \mathbf{H}) - ig \frac{2s_w}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \\
 & ig_{s_w} M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + \\
 & ig_{s_w} A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- [\mathbf{H}^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-] - \\
 & \frac{1}{4}g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 [\mathbf{H}^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2}g^2 \frac{2s_w}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w}{c_w} Z_\mu^0 \mathbf{H} (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu \mathbf{H} (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\
 & g^1 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + m_e) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda \gamma \partial \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + m_u^\lambda) u_j^\lambda - \\
 & \bar{d}_j^\lambda (\gamma \partial + m_d^\lambda) d_j^\lambda + ig_{s_w} A_\mu [-(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3}(\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda)] + \\
 & \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - \\
 & 1 - \gamma^5) u_j^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5) d_j^\lambda)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) e^\lambda) + \\
 & (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_j^\kappa)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- [(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger \gamma^\mu (1 + \\
 & \gamma^5) u_j^\kappa)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} [-\phi^+ (\bar{\nu}^\lambda (1 - \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (\bar{e}^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda)] - \\
 & \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} [\mathbf{H} (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i\phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda)] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ [-m_u^\kappa (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) d_j^\kappa) + \\
 & m_u^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_j^\kappa)] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_d^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\kappa) - m_u^\kappa (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \\
 & \gamma^5) u_j^\kappa) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} \mathbf{H} (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} \mathbf{H} (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \\
 & \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \\
 & \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + ig_{c_w} W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig_{s_w} W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + ig_{c_w} W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + ig_{s_w} W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \\
 & \partial_\mu \bar{Y} X^+) + ig_{c_w} Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^- - \partial_\mu \bar{X}^- X^0) + ig_{s_w} A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^- - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^- X^0) - \frac{1}{2}gM [\bar{X}^+ X^+ \mathbf{H} + \bar{X}^- X^- \mathbf{H} + \frac{1}{c_w} \bar{X}^0 X^0 \mathbf{H}] + \\
 & \frac{1-2c_w^2}{2c_w} igM [\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{2c_w} igM [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \\
 & igM s_w [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \frac{1}{2}igM [\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0]
 \end{aligned}$$

© T.D Gutierrez

Le LHC : la machine à superlatifs

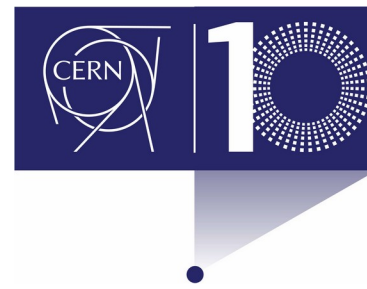


Le détecteur ATLAS

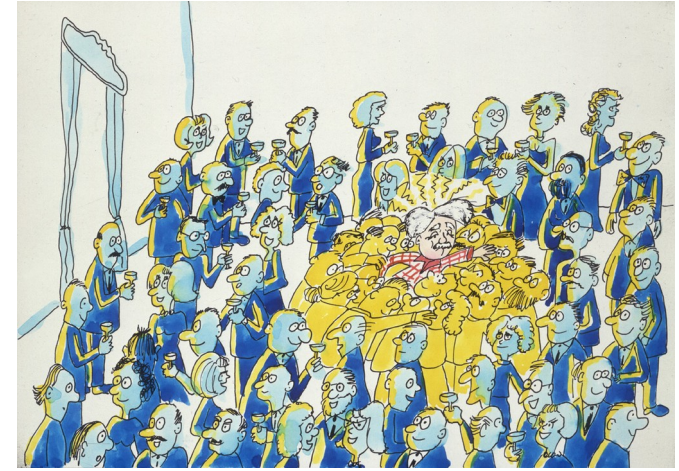


ATLAS
EXPERIMENT

Mécanisme de Higgs

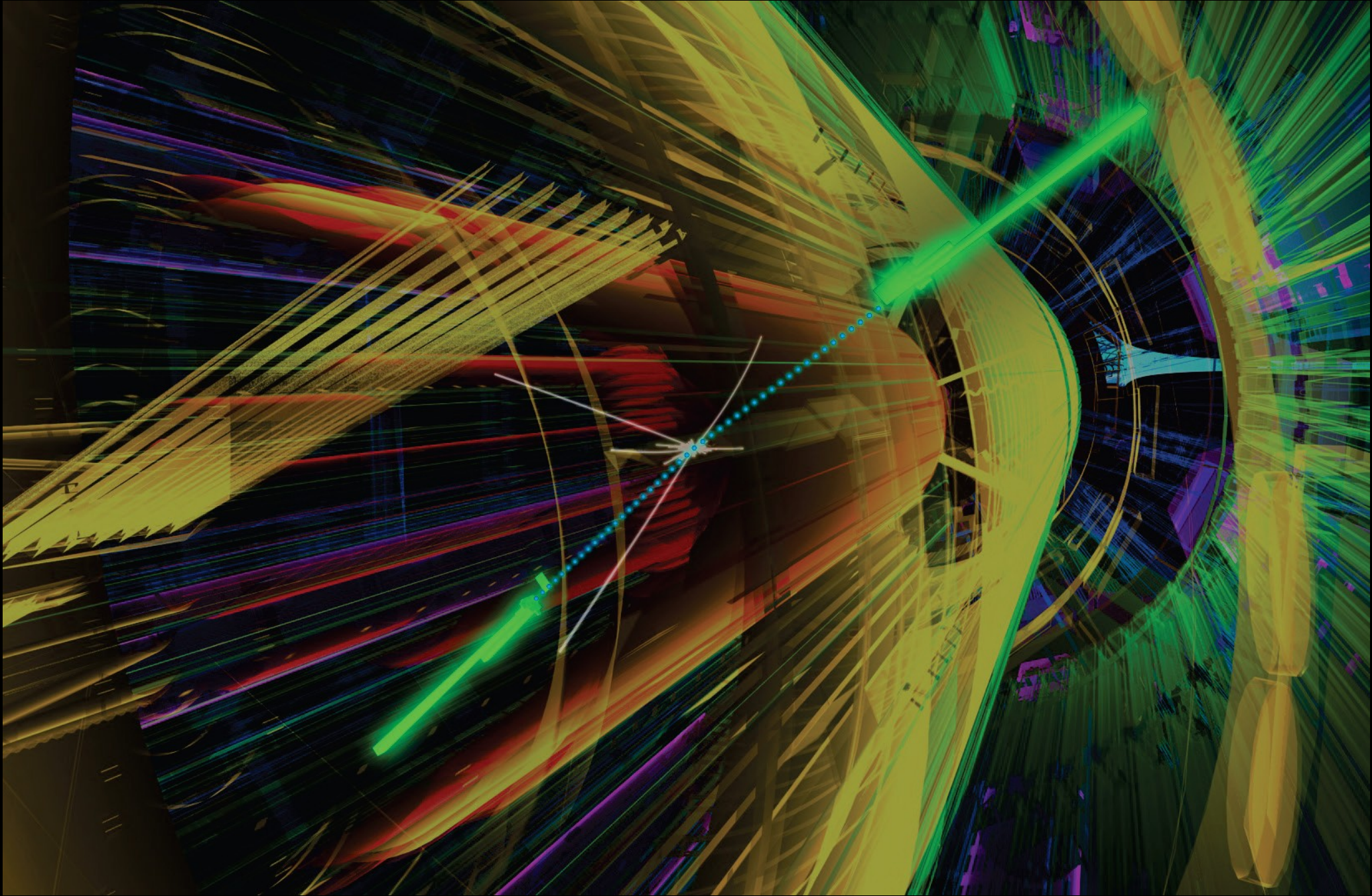


2022
ans découverte du
boson de HIGGS





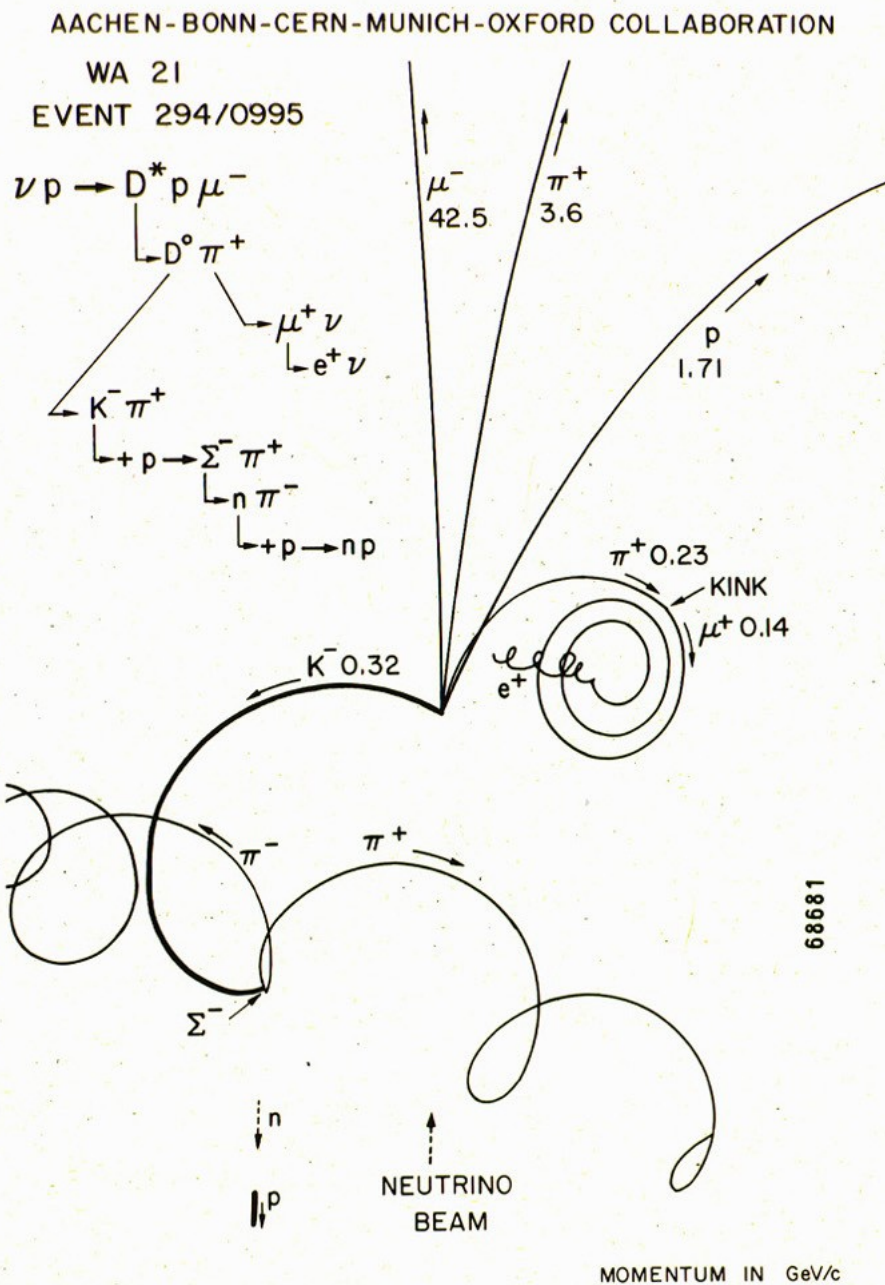
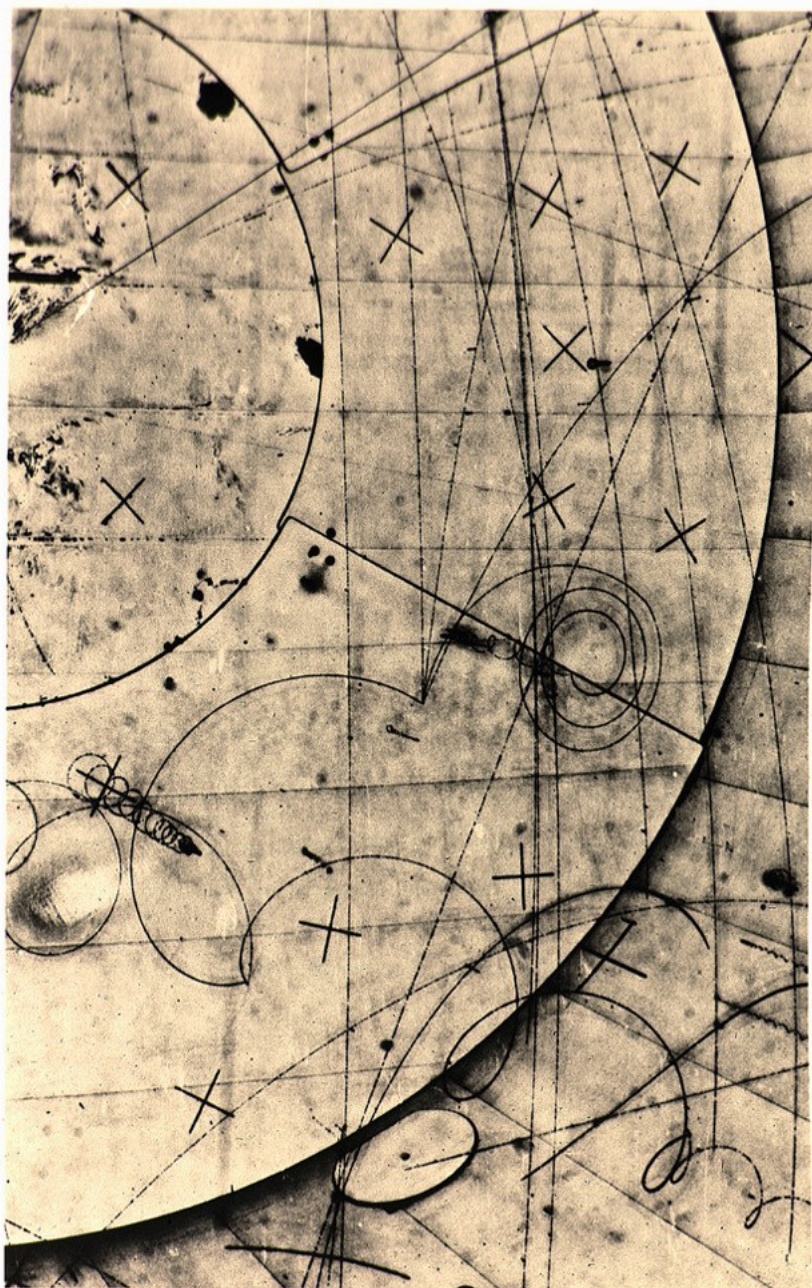
Accélérateur de science



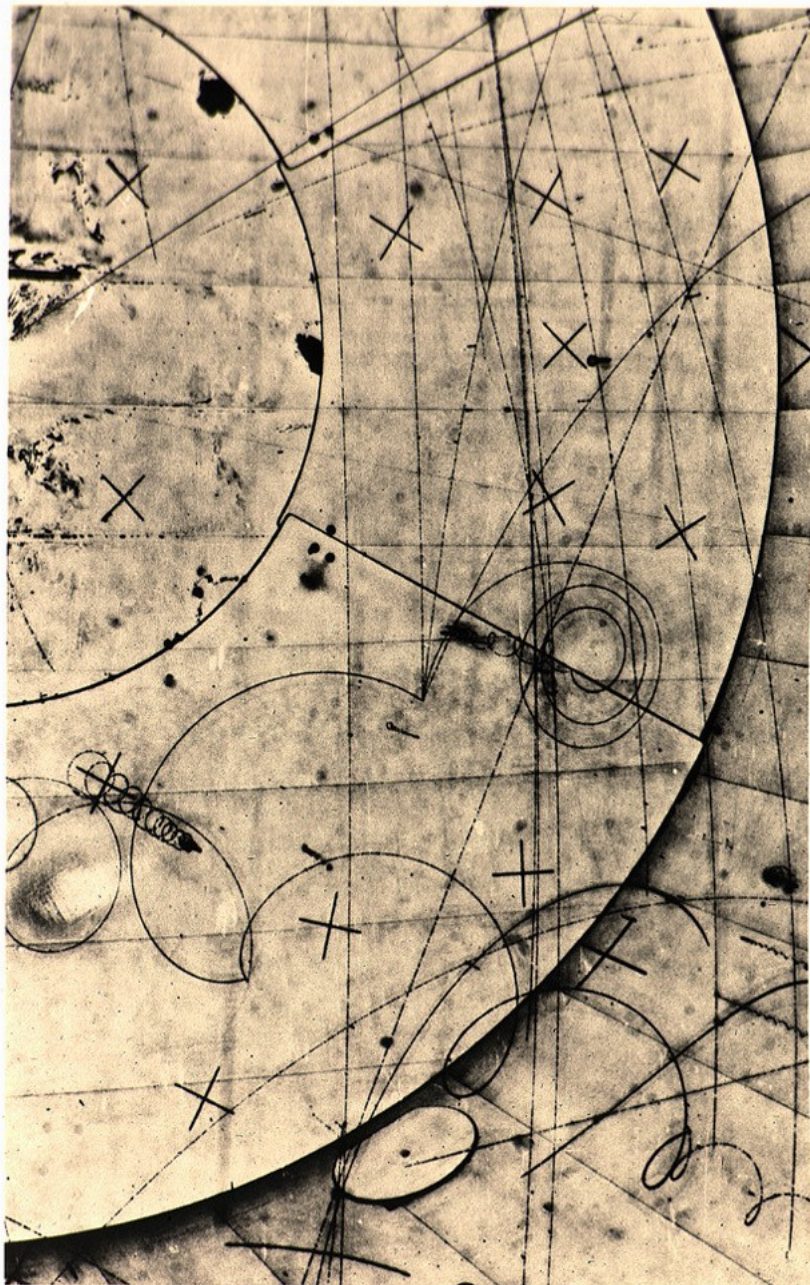
Anciennes photographies



Anciennes photographies



Anciennes photographies



AACHEN-BONN-CERN-MUNICH-OXFORD COLLABORATION

EV
 νp



KINK

.14



68681

n
 p

NEUTRINO
BEAM

MOMENTUM IN GeV/c



A photograph of a large, white iceberg floating in a deep blue ocean under a clear blue sky with light, wispy clouds. The iceberg is the central focus, with its jagged peaks and sharp edges clearly visible. The water is calm, reflecting the blue of the sky and the white of the ice. The horizon line is straight and divides the image roughly in half.

Ce que l'on connaît (5%)

Ce que l'on connaît (5%)

27% Matière noire

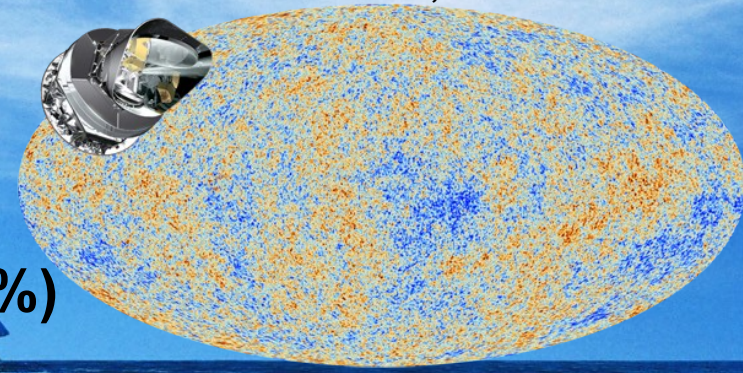
68% Énergie noire

Reste à découvrir !



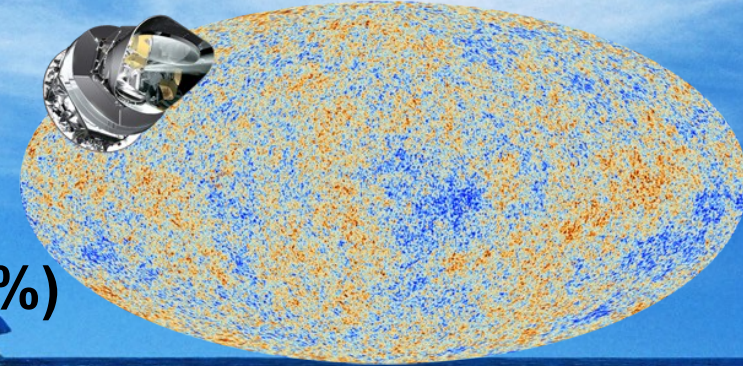
© Render by Jonathan Rey

Ce que l'on connaît (5%)



27% Matière noire

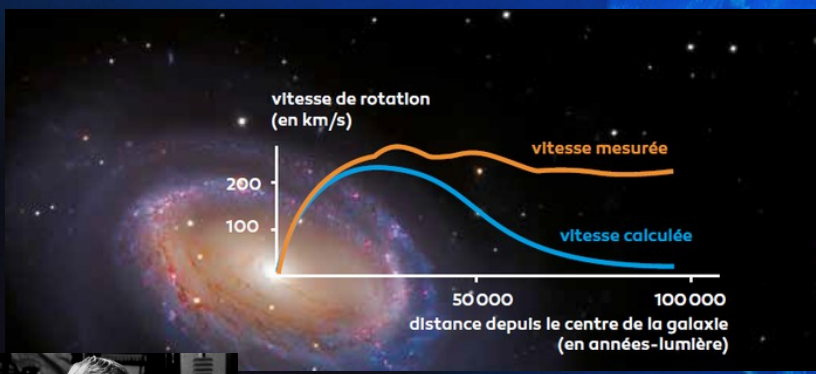
68% Énergie noire



Ce que l'on connaît (5%)

27% Matière noire

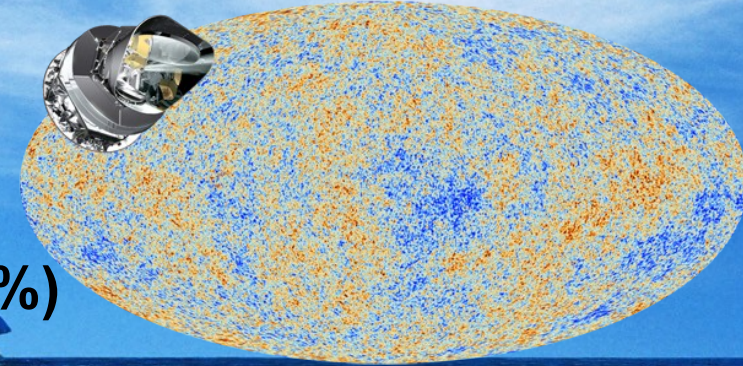
- On ne sait pas ce que c'est mais on croit savoir que c'est là
- Candidats observables au LHC (supersymétrie, ...) ?



68% Énergie noire



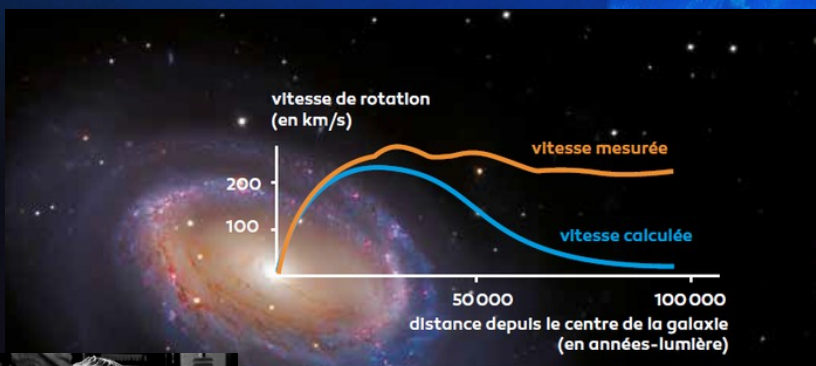
Vera Rubin



Ce que l'on connaît (5%)

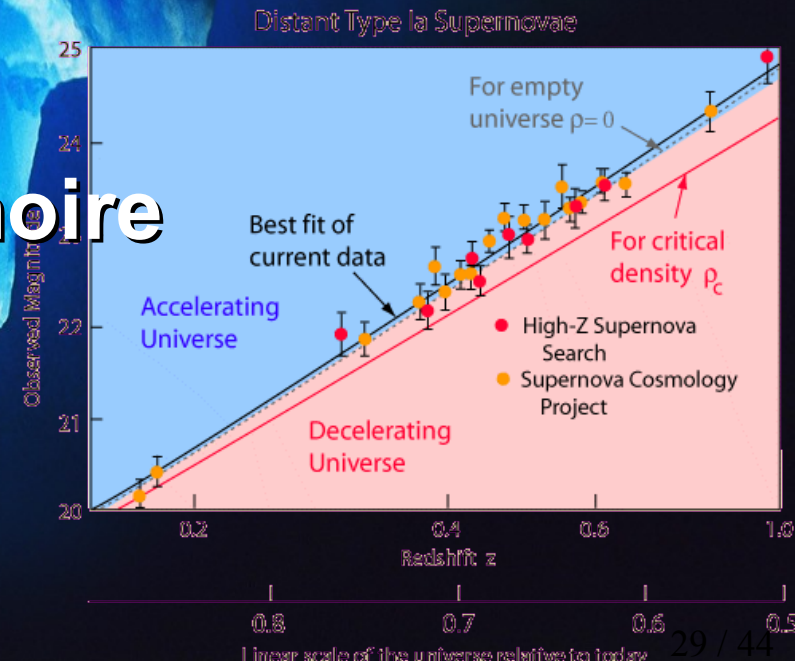
27% Matière noire

- On ne sait pas ce que c'est mais on croit savoir que c'est là
- Candidats observables au LHC (supersymétrie, ...)?



Vera Rubin

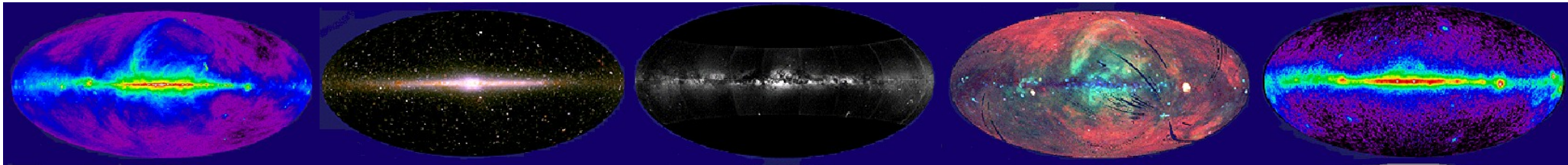
68% Énergie noire



Pas la moindre idée de son origine !

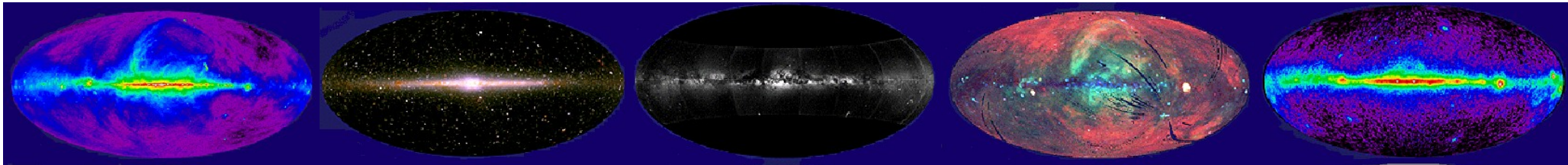
Astroparticules

- Connaissance de l'Univers par la lumière

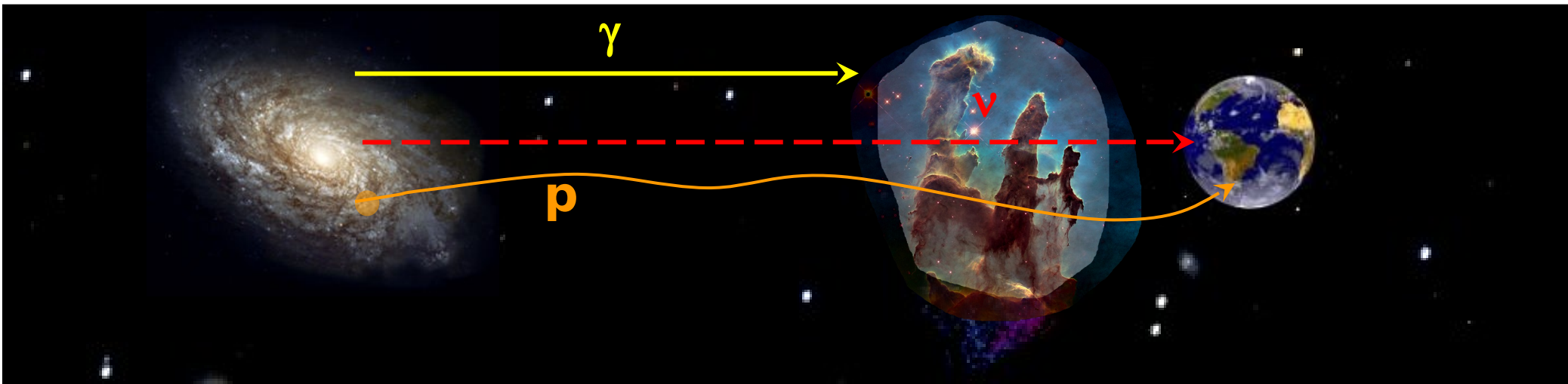


Astroparticules

- Connaissance de l'Univers par la lumière

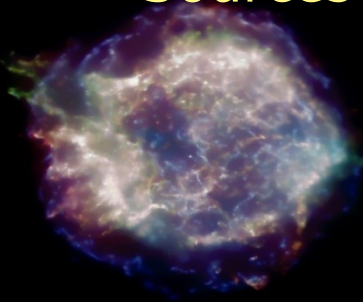


- Utilisation d'un nouveau messenger : le neutrino



Sources potentielles de neutrinos/photons de haute énergie

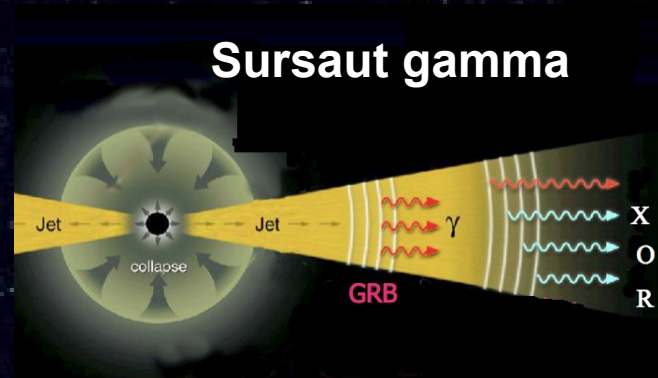
Sources galactiques



Restes de supernovae



quasar



Sursaut gamma

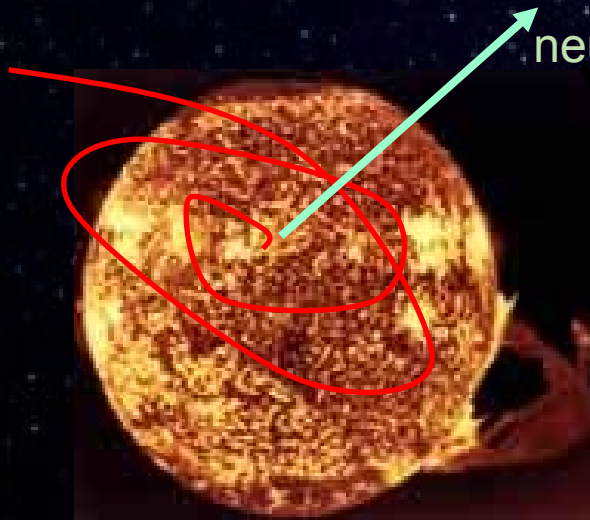
Sources extragalactiques



Noyau actif de galaxie (AGN)

Mais aussi de matière noire...

WIMP



Soleil

neutrinos

Accrétion dans le Soleil suivie d'auto-annihilations de particules de matière noire

Astronomie neutrino/gamma :

Carte des phénomènes les plus catastrophiques de l'Univers



Le pionnier : ANTARES

2500m

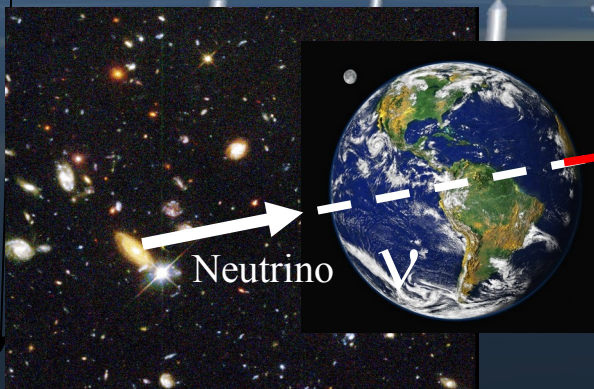
- 900 PMTs
- 12 lignes
- 25 étages / ligne
- 3 PMTs / étage

40 km
à
terre

450 m

Boîte de jonction

Câbles de liaison



Neutrino

ν



ANTARES

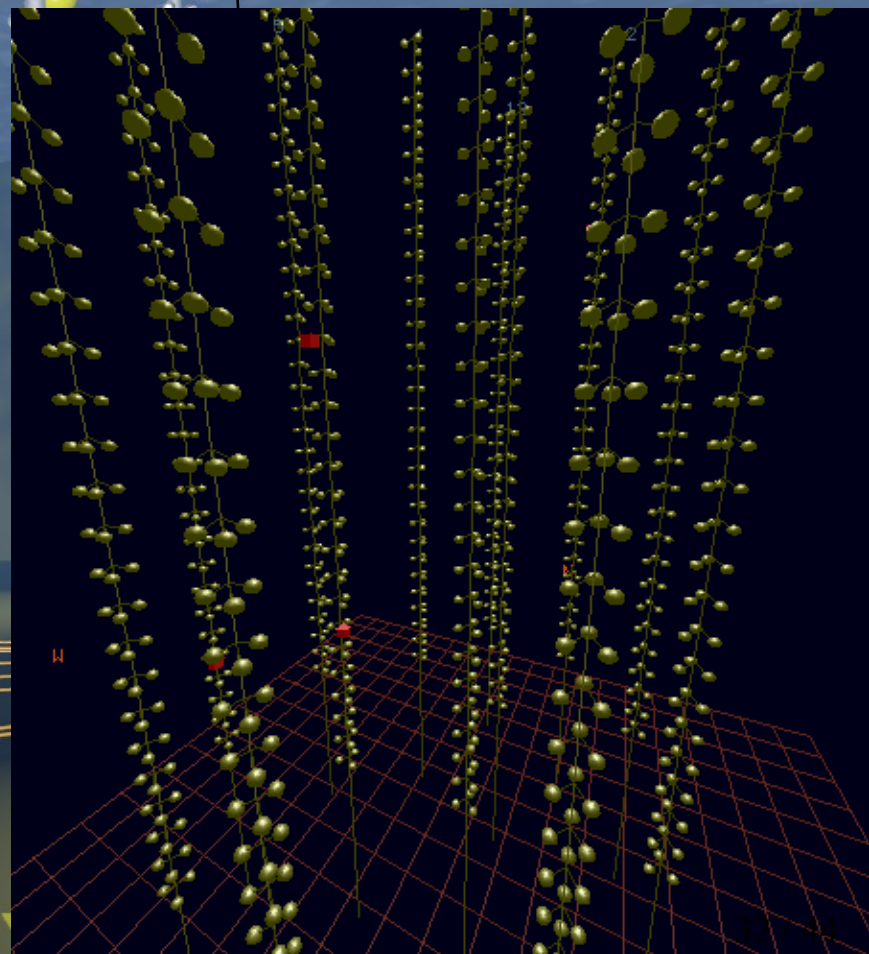
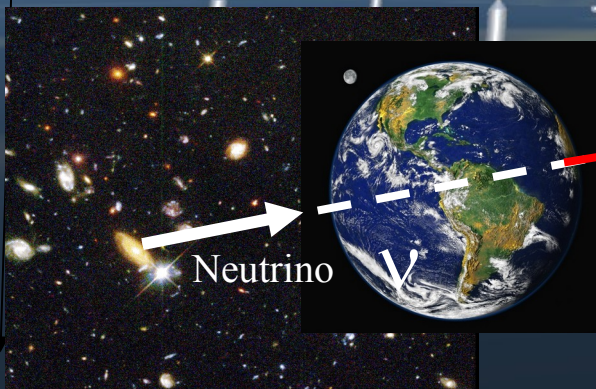
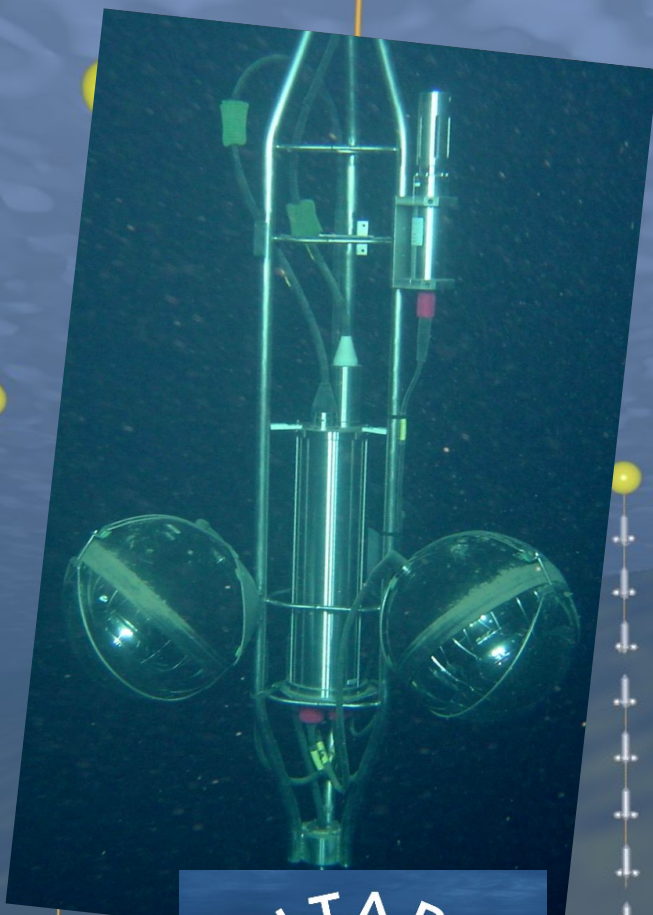
A new window on the Universe



Le pionnier : ANTARES

2500m

- 900 PMTs
- 12 lignes
- 25 étages / ligne
- 3 PMTs / étage



Télescope
neutrino
sous-marin
de 2^e génération

UNE NOUVELLE FAÇON
D'OBSERVER LES ABYSES

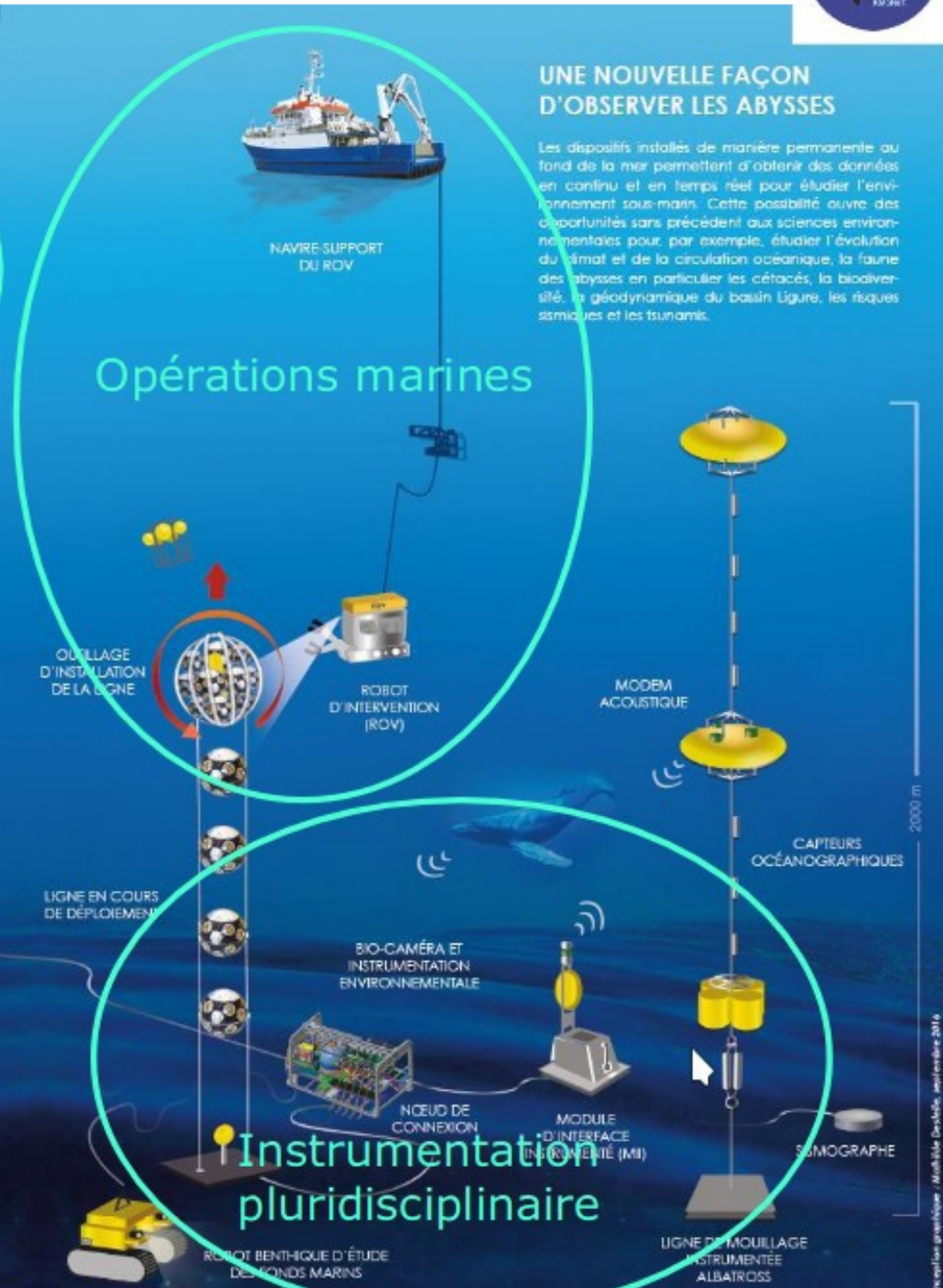
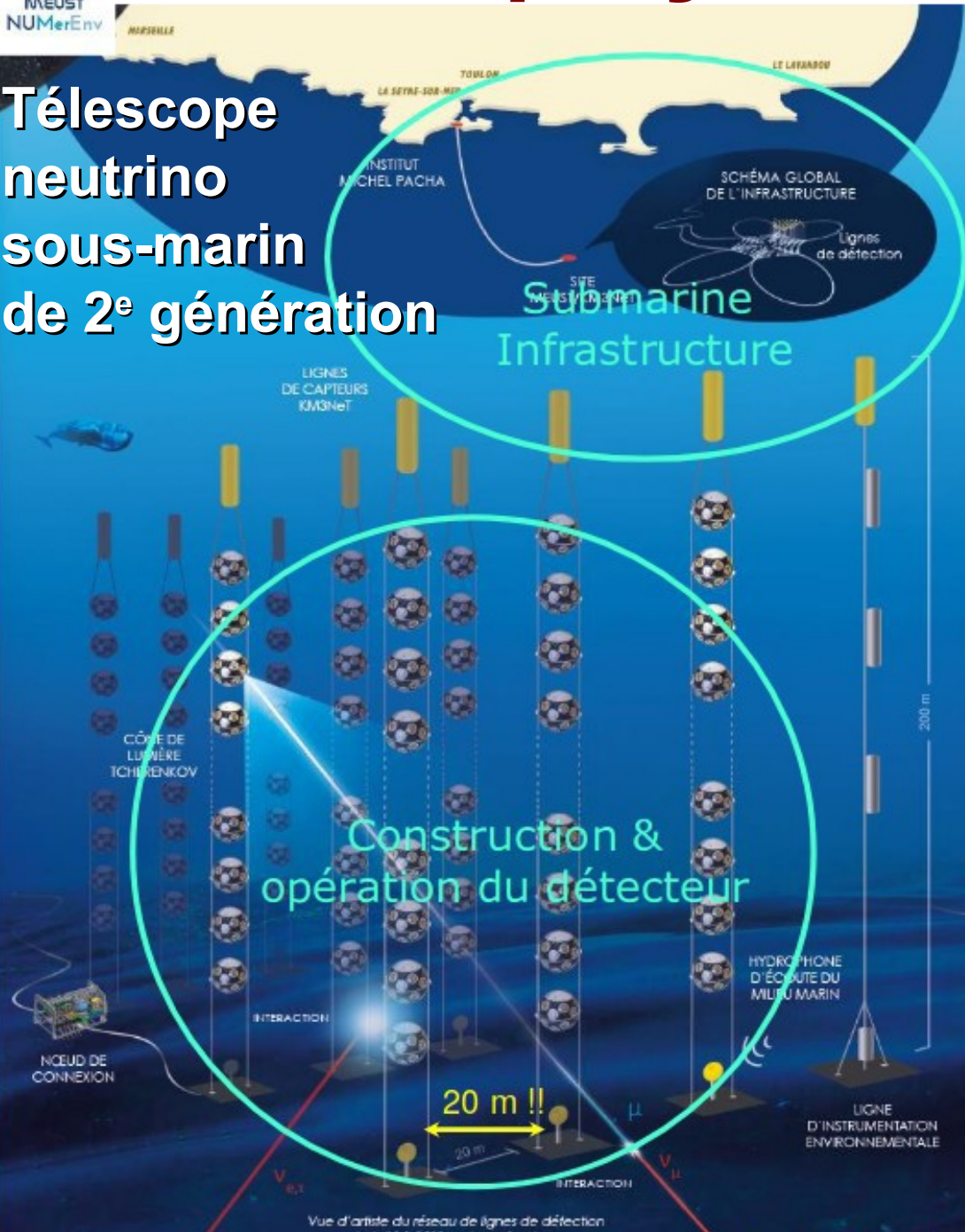
Les dispositifs installés de manière permanente au fond de la mer permettent d'obtenir des données en continu et en temps réel pour étudier l'environnement sous-marin. Cette possibilité ouvre des opportunités sans précédent aux sciences environnementales pour, par exemple, étudier l'évolution du climat et de la circulation océanique, la faune des abysses en particulier les céphalopodes, la biodiversité, la géodynamique du bassin Ligurien, les risques sismiques et les tsunamis.

Schéma global de l'infrastructure
Submarine Infrastructure

Opérations marines

Construction & opération du détecteur

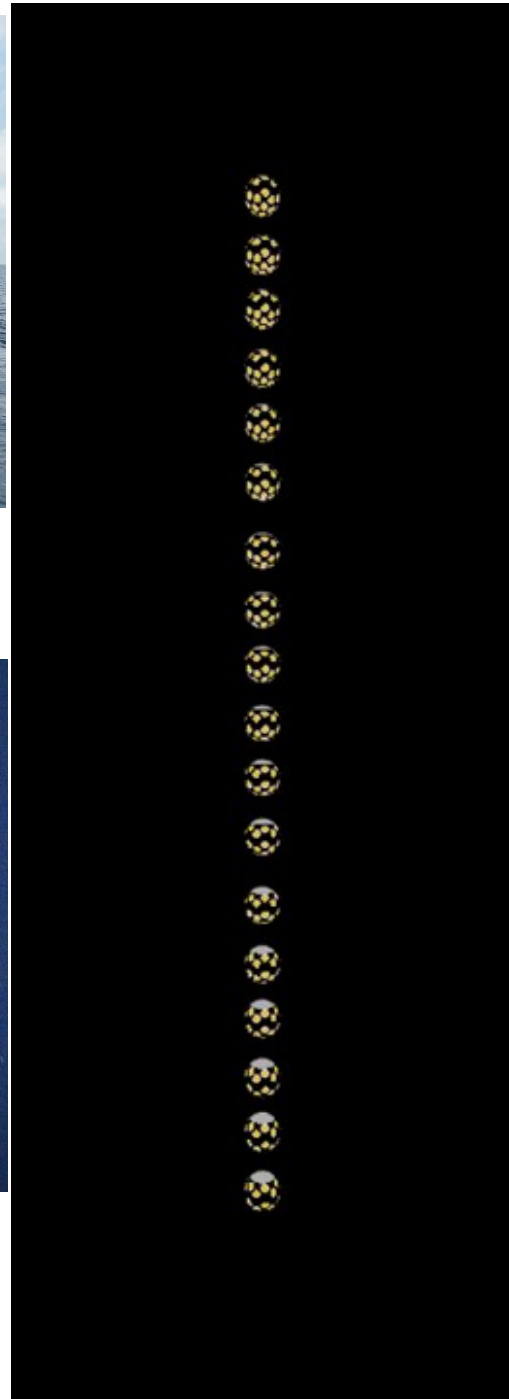
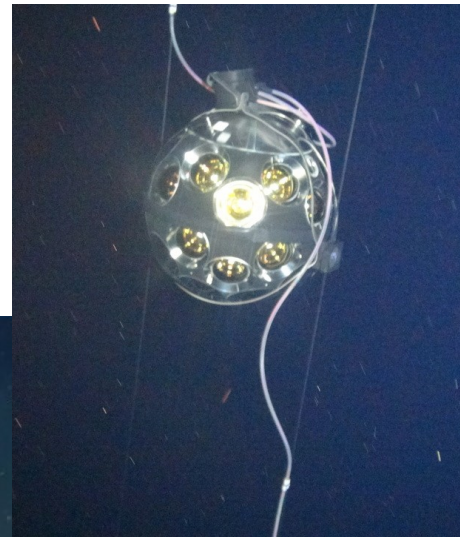
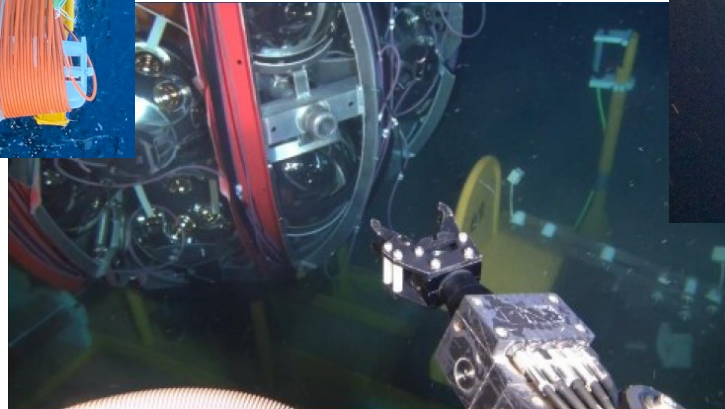
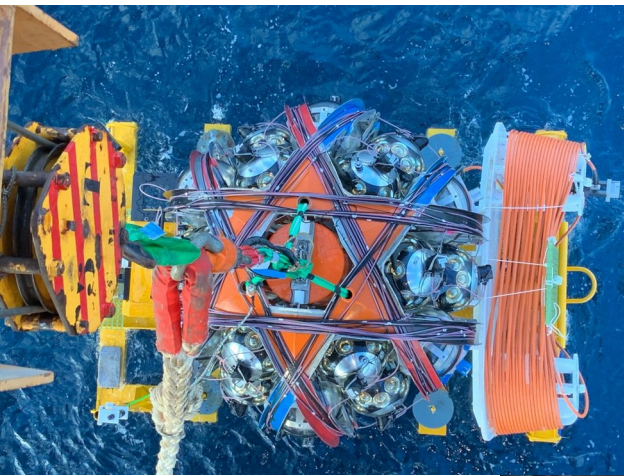
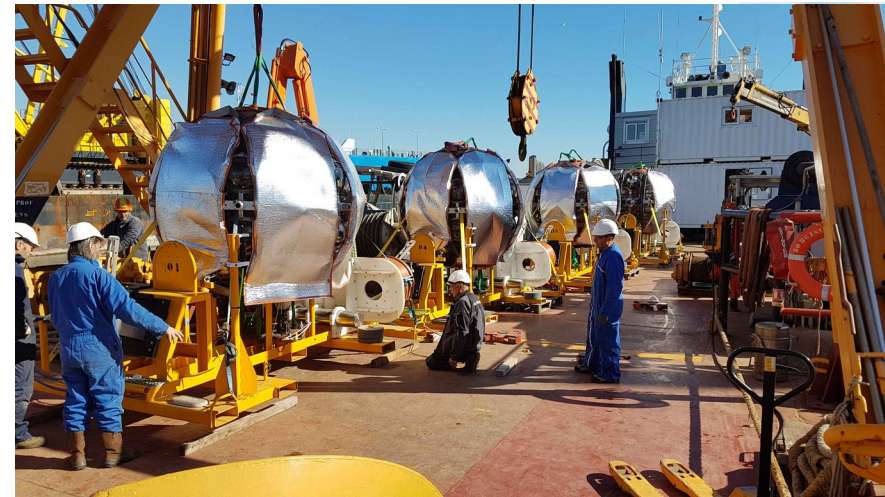
Instrumentation pluridisciplinaire



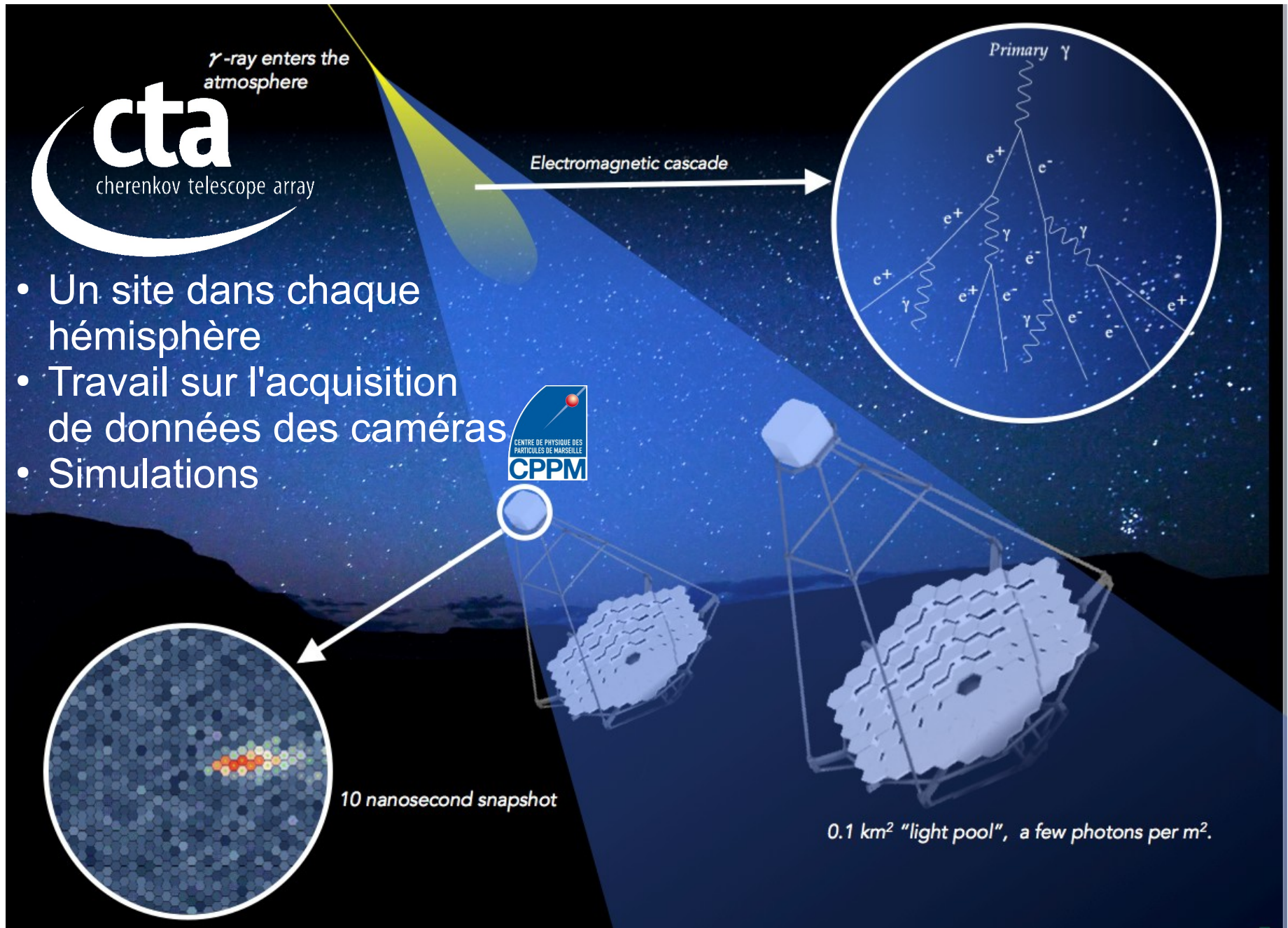
Vue d'artiste du réseau de lignes de détection installé à 2450 m de profondeur

Profondeur du site : 2450 m

Le remplaçant : KM3NeT/ORCA



HESS & CTA



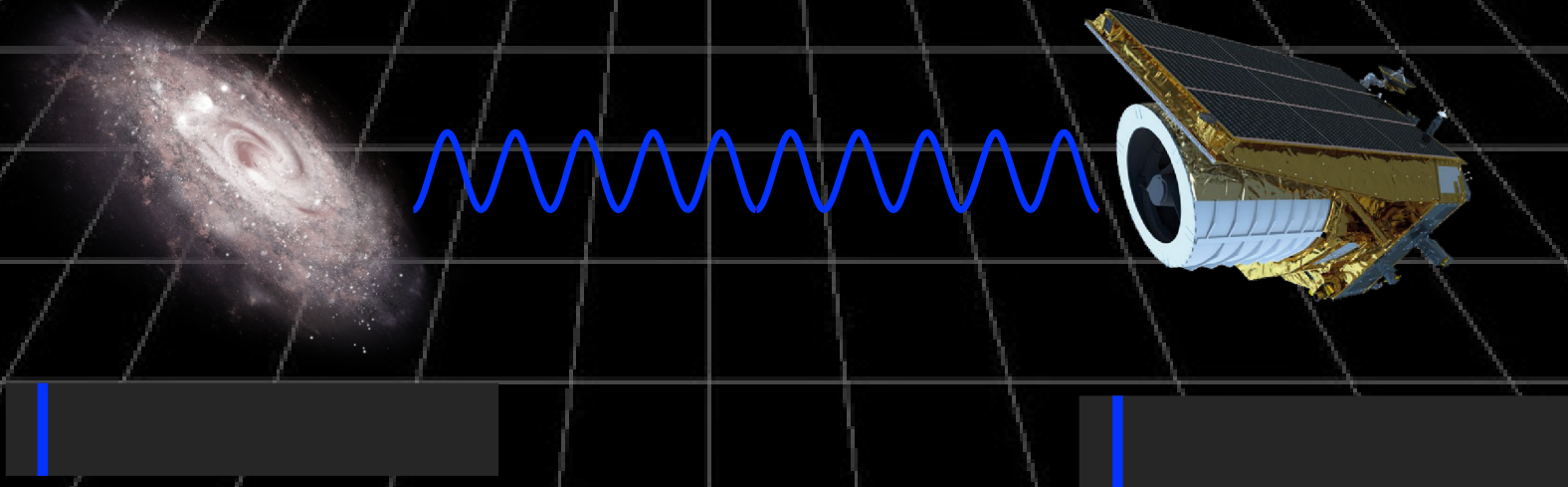
Cosmologie

95% du contenu de l'Univers est d'une nature inconnue

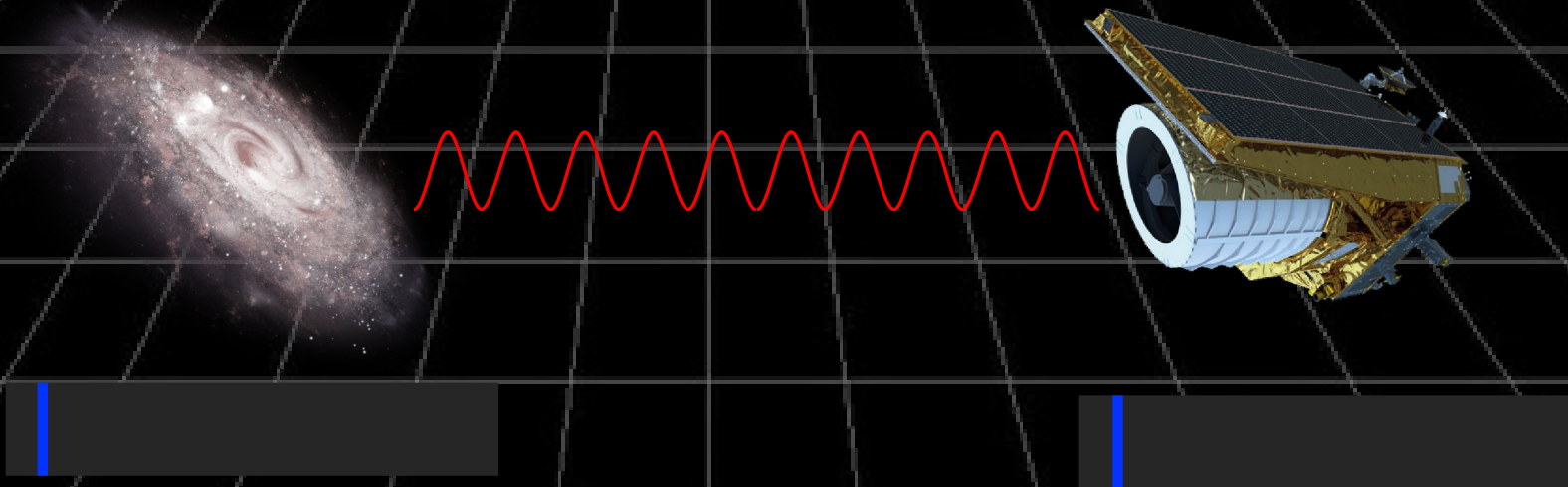
Mesure des propriétés de l'énergie noire et de la matière noire



Qu'est-ce que le redshift ?



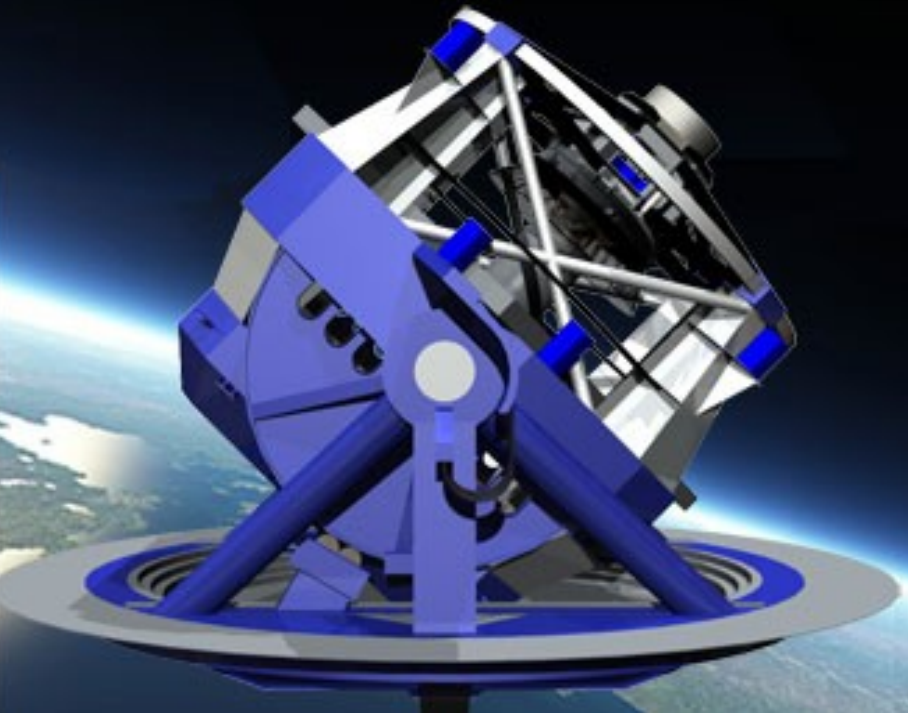
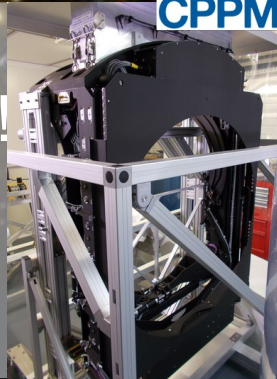
Qu'est-ce que le redshift ?



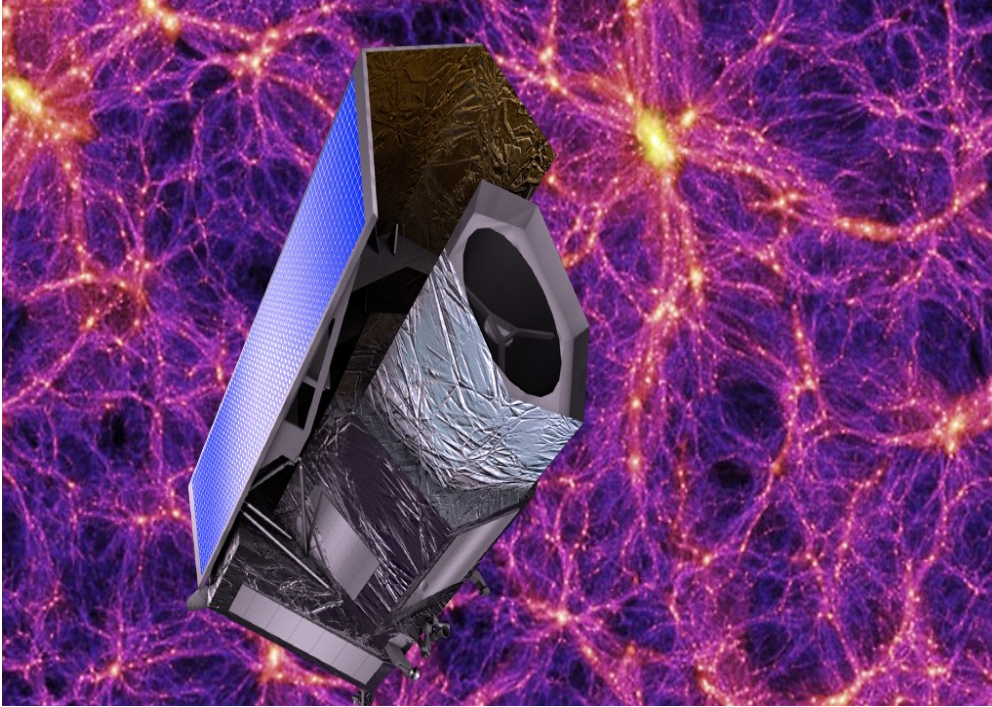
LSST / Vera C. Rubin Observatory

LSST
Large Synoptic Survey Telescope

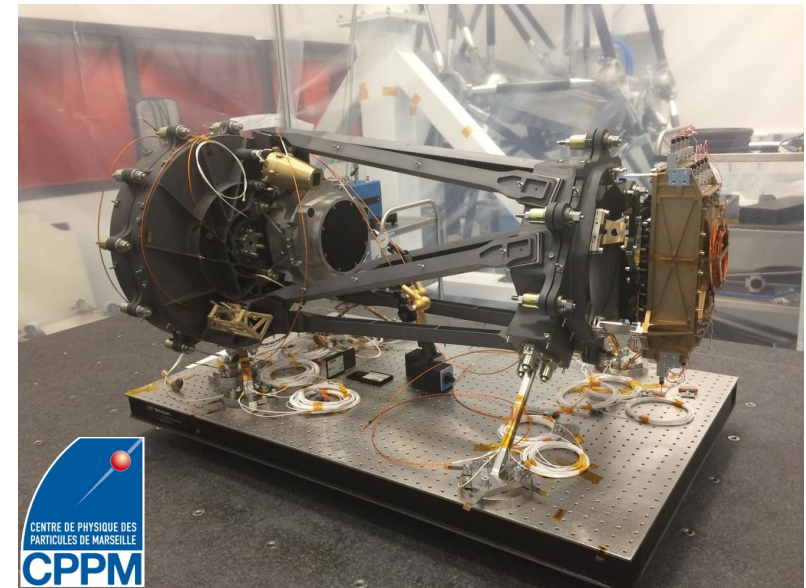
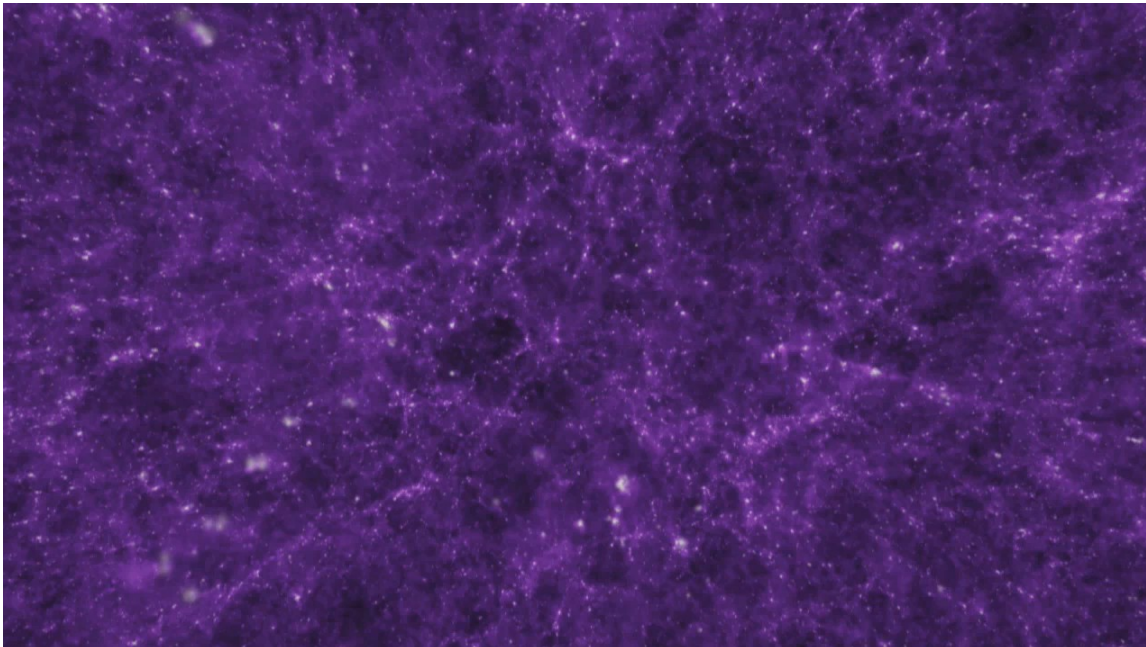
- Première lumière : 2025 ?
- 10 millions de supernovæ
- CPPM : changeur de filtre, simulation, préparation de l'analyse



Euclid



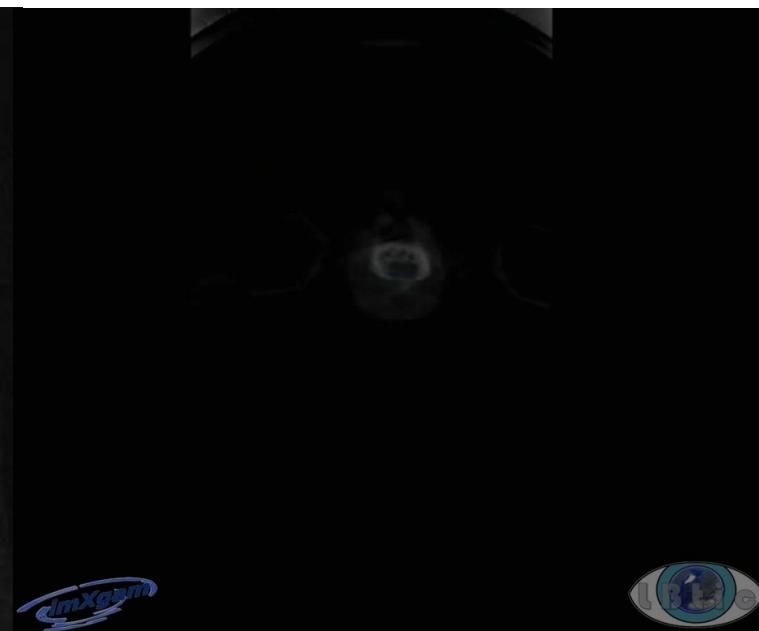
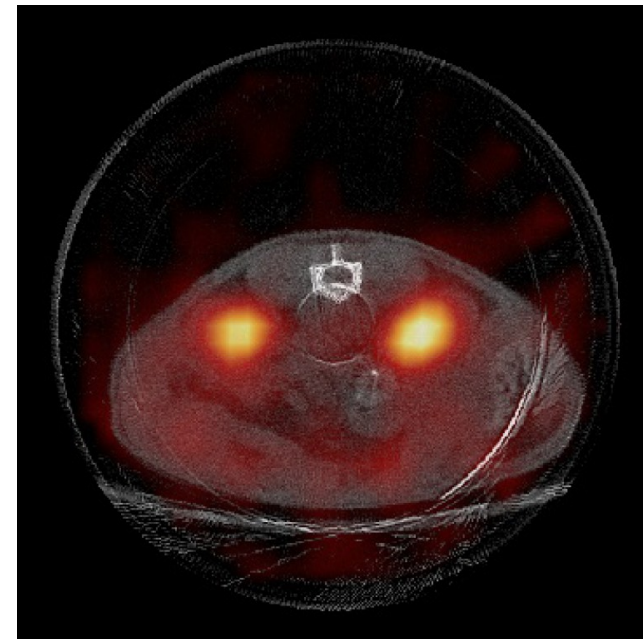
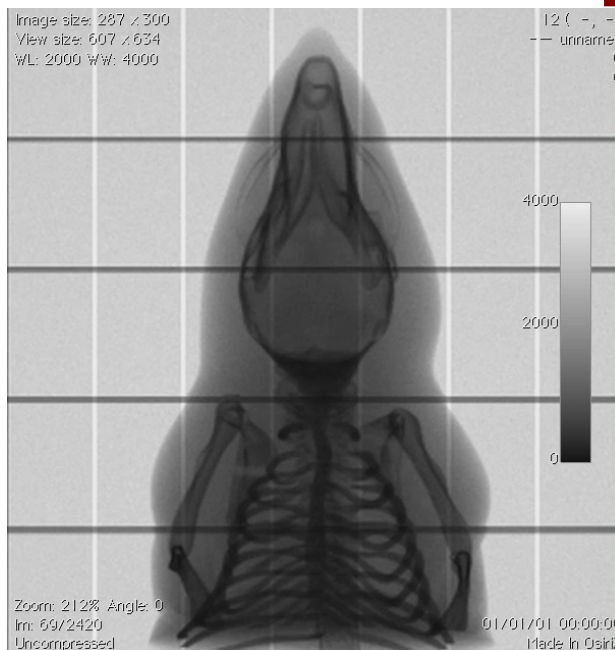
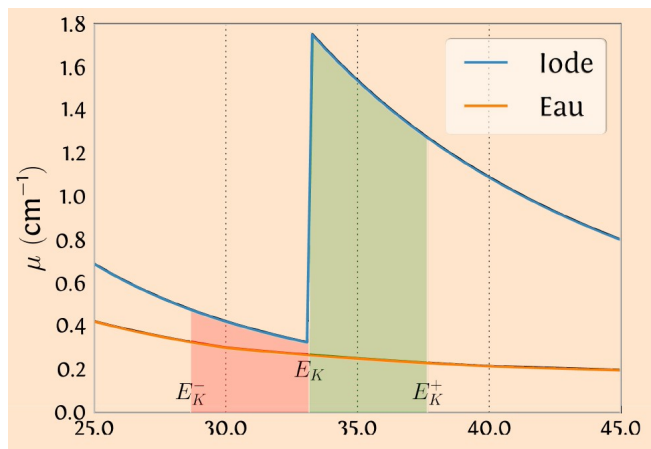
- Dans l'espace en juillet 2023
- 1,5 milliards de galaxies en weak gravitational lensing
- 50 millions de galaxies en spectroscopie
- Cartographie de l'univers sombre
- CPPM : spectromètre IR, segment sol



ClearPET/XPAD3 au CPPM

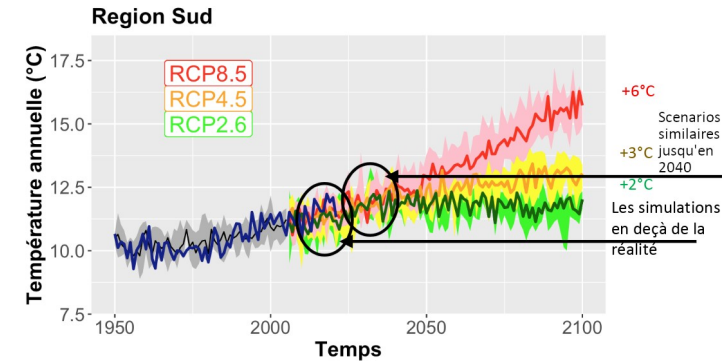


Imagerie biomédicale par rayons X

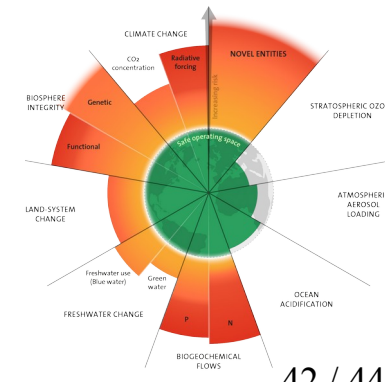
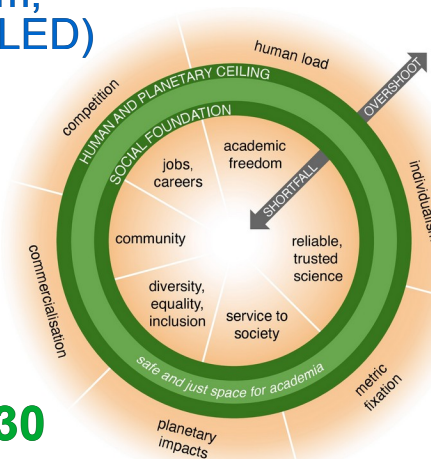


Eco-responsabilité

- Changement climatique en cours
- Nos recherches y contribuent :
 - ▶ Gros instruments (CERN, télescopes, satellites, etc)
 - ▶ Machines, matériels, matériaux
 - ▶ Ressources informatiques (centres de calcul, ordinateurs, réseaux, etc)
 - ▶ Transports (missions [avion], domicile-travail)
 - ▶ Electricité, chauffage, eau, déchets
- Nécessaire prise de conscience, en cours
- Actions en cours
 - ▶ Evaluation de nos émissions carbone annuelles
 - ▶ Sensibilisation des personnels (newsletter labo, infographies, réunions)
 - ▶ Investissements de sobriété énergétique (nouvelle clim, monitoring électrique, arrêt d'équipements, éclairage LED)
 - ▶ Création/extension d'un garage à vélos, ateliers réparation/entretien
 - ▶ Réduction des impressions papier, recyclage papier
- Actions à venir
 - ▶ Discussions en cours pour définir des mesures et principes applicables pour tout le labo
 - ▶ **Objectif : -50 % d'émissions de GES d'ici 2030**



From	To
1. Change the goal university as business	academic doughnut
2. Get savvy with systems cog in the machine	gardens of academic system
3. See the big picture isolated ivory tower	embedded in society and planet
4. Create to regenerate rat race	slow science
5. Nurture human nature lone genius	team science
6. Design to distribute rich get richer	fair distribution
7. Be agnostic about growth growth	trust



Le futur (prospectif) du CPPM

- **2025** : organisation de la conférence internationale EPS-HEP 2025 (1000 participants)
- Démarrage CTA, LSST, Euclid, DarkSide, MadMax, KM3NeT
- **2028** : démarrage de la deuxième phase du programme LHC avec une forte implication du CPPM dans les programmes de jouvence des expériences ATLAS
- **2030-2040** : Haute Luminosité @LHC, jouvences LHCb
- **2032+** : Phase 2 KM3NeT/ORCA++ en faisceau de neutrino (P2O) ; lancement LISA (ondes gravitationnelles)
- **2042 -2090** : Future Circular Collider
- Physique :
 - ▶ tester le modèle standard sous toutes ses coutures
 - ▶ nouvelles particules ?
 - ▶ comprendre le paradigme de la matière et de l'énergie noires
- Cultiver la richesse humaine par :
 - ▶ l'excellence scientifique et technologique
 - ▶ la valorisation et les applications sociétales
 - ▶ l'éducation et la culture scientifique

