



# Institut national de physique nucléaire et de physique des particules



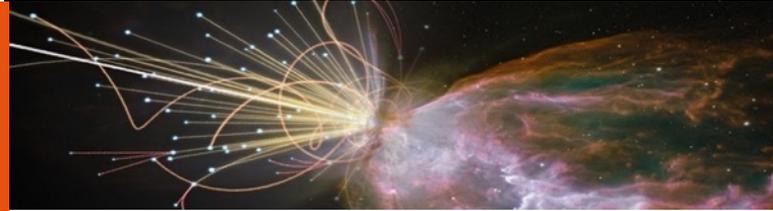
Sonder les infinis : des particules au cosmos

## Présentation de l'IN2P3

### Programme des Professeurs Français au CERN (FTP 2021)

*Patrice Verdier – [patrice.verdier@in2p3.fr](mailto:patrice.verdier@in2p3.fr) – 18 mai 2022*

## Plan de l'exposé



- La physique à l'IN2P3
- Présentation de l'institut
- Les grands projets internationaux





## MISSION DE L'IN2P3: COORDONNER LA RECHERCHE DANS LES DOMAINES DE LA PHYSIQUE NUCLEAIRE, DES PARTICULES ET DES ASTROPARTICULES

### OPERER

Laboratoires de recherche, en partenariat avec les universités et autres organismes de recherche

### COORDONNER

Programmes nationaux de recherche et la participation Française aux grandes infrastructures de recherche

### EXPLORER

La physique des 2 infinis : des particules élémentaires à la cosmologie

### DEVELOPER

Technologies associées, Les applications et l'interdisciplinaire

### FOURNIR

Expertise  
Formation



## Physique des particules et hadronique

Constitutants élémentaires de la matière et les interactions fondamentales



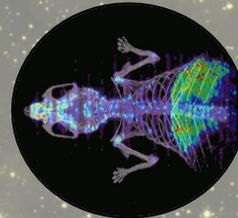
## Physique nucléaire et ses applications

Structure de la matière nucléaire, énergie nucléaire et applications médicales



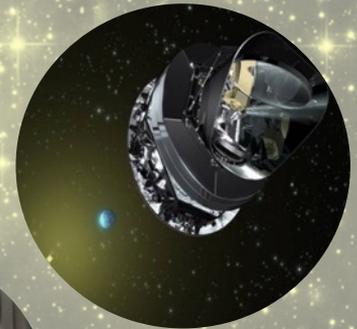
## Accélérateurs & Technologies

Domaines majeurs de R&D



## Physique des astroparticules et cosmologie

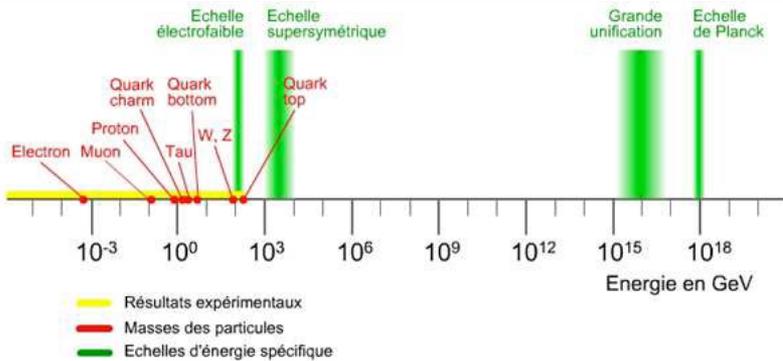
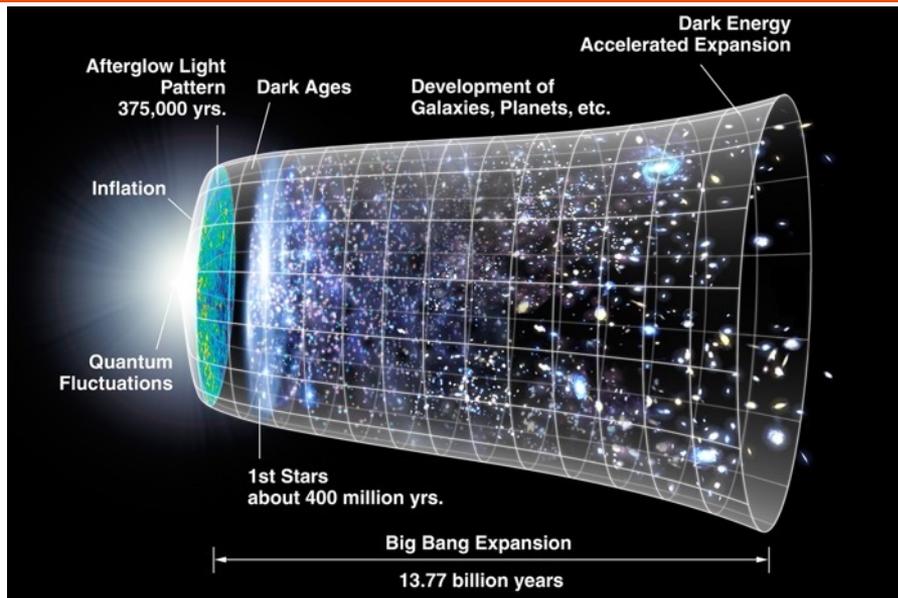
Composition et évolution de l'Univers



## Données et Computing

Science des données et recherche en Computing





**< 10<sup>-43</sup> s & > 10<sup>19</sup> GeV : Planck**

**< 10<sup>-36</sup> s & > 10<sup>16</sup> GeV : Grande Unification**

Les 3 forces du modèle standard sont unifiées

**< 10<sup>-32</sup> s & 10<sup>15</sup> - 10<sup>9</sup> GeV : Inflation**

L'espace s'étend d'un facteur 10<sup>26</sup> en 10<sup>-32</sup>s

L'interaction forte distincte de la force électrofaible

**< 10<sup>-12</sup> s & 150 GeV : Brisure de la symétrie électrofaible**

les particules fondamentales => massives : énergie du LHC

**< 10<sup>-5</sup> s & > 150 MeV : plasma de quarks et de gluons**

**< 1 s & > 1 MeV : formation des hadrons**

et asymétrie baryonique

**1 s & MeV : Découplage des neutrinos**

**< 10<sup>3</sup> s & > 1 keV : nucléosynthèse**

**~ 375000 années & 0.4 eV: Recombinaison**

L'univers devient transparent aux photons

⇒ Fond diffuse cosmologique

**Depuis 4 Mds d'années:** l'énergie noire domine, l'expansion de l'Univers accélère

**Aujourd'hui (13.8 Mds années):** l'Univers observable est une sphère de rayon 46 Mds d'années lumière





## Standard Model of Elementary Particles

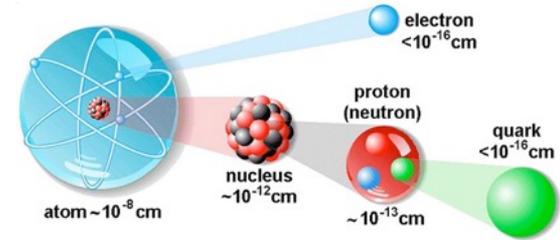
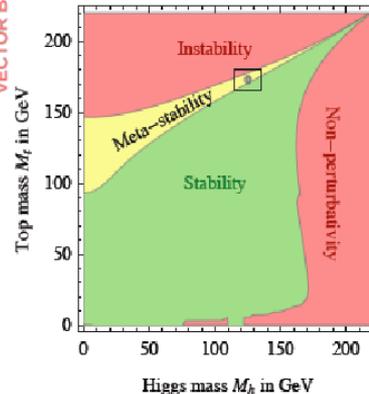
three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)		
	I	II	III		
mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon	<b>H</b> higgs
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b><math>\gamma</math></b> photon	
	<b>e</b> electron	<b><math>\mu</math></b> muon	<b><math>\tau</math></b> tau	<b>Z</b> Z boson	
	<b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	<b>W</b> W boson	

QUARKS

LEPTONS

GAUGE BOSONS  
VECTOR BOSONS

SCALAR BOSONS



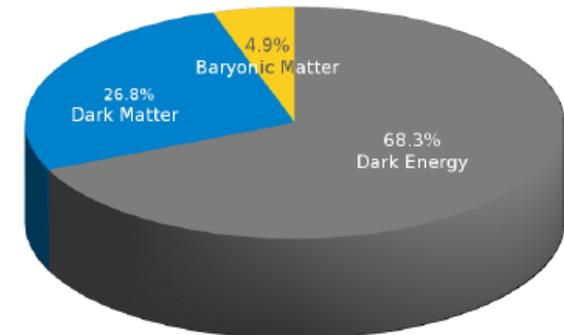
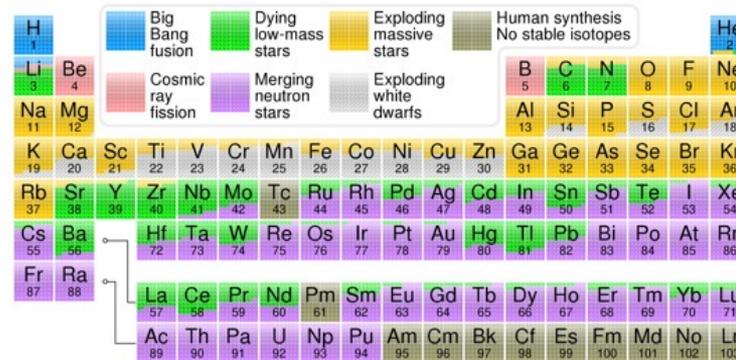
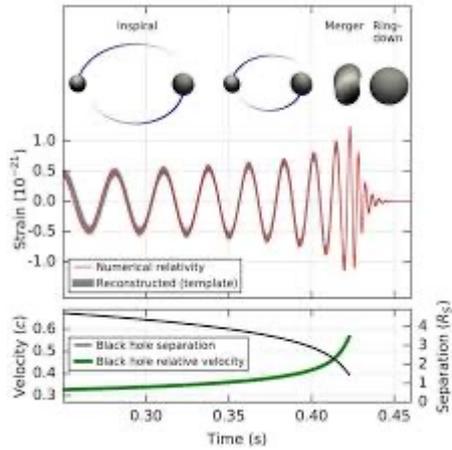
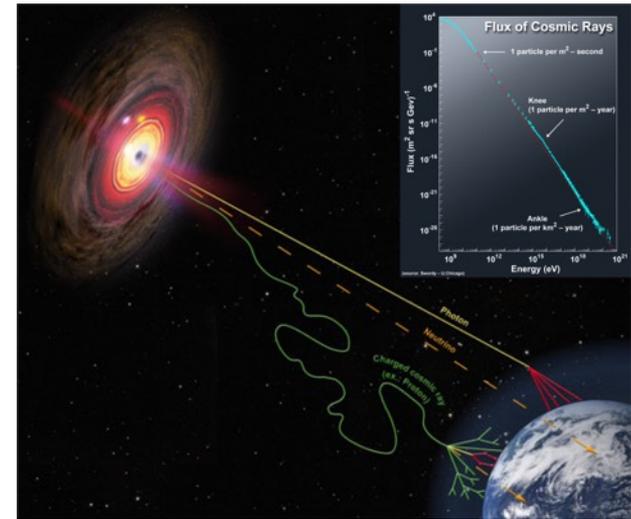
## PARTICULES ET HADRONIQUE

- Les tests du Modèle Standard et la recherche de nouvelle physique au-delà du Modèle Standard
- La physique de la saveur et l'étude de la violation de la symétrie CP
- La physique des neutrinos produits par des accélérateurs
- La R&D pour les améliorations des détecteurs du LHC et pour les expériences auprès des futurs collisionneurs
- Le plasma de quarks et gluons auprès du LHC
- La structure des hadrons
- Les mécanismes de production et d'interaction des hadrons



## ASTROPARTICULES ET COSMOLOGIE

- Détection des ondes gravitationnelles
- Origine des rayons gamma de haute énergie
- Nature et origine des rayons cosmiques de haute énergie
- Origine, nature, masses et mélanges des neutrinos
- Détection directe de matière noire
- Physique de l'inflation et du rayonnement cosmique primordial
- Propriétés de l'énergie noire
- La nucléosynthèse dans les étoiles et dans l'Univers





10<sup>-18</sup>m

Physique des particules et  
Hadronique  
Constituants élémentaires  
de la matière et  
interactions fondamentales

Physique nucléaire et  
applications

Structure nucléaire, énergie  
nucléaire et applications  
médicales

Astroparticules et Cosmologie  
Composition et évolution de  
l'Univers

10<sup>+25</sup>m

Accélérateurs &  
Technologies  
Domaines majeurs de R&D

Données et Computing  
Science des données et  
recherche en computing

ATLAS

1000 Chercheurs CNRS et  
Universitaires  
1500 ingénieurs, techniciens et  
administratifs  
700 post-docs et doctorants

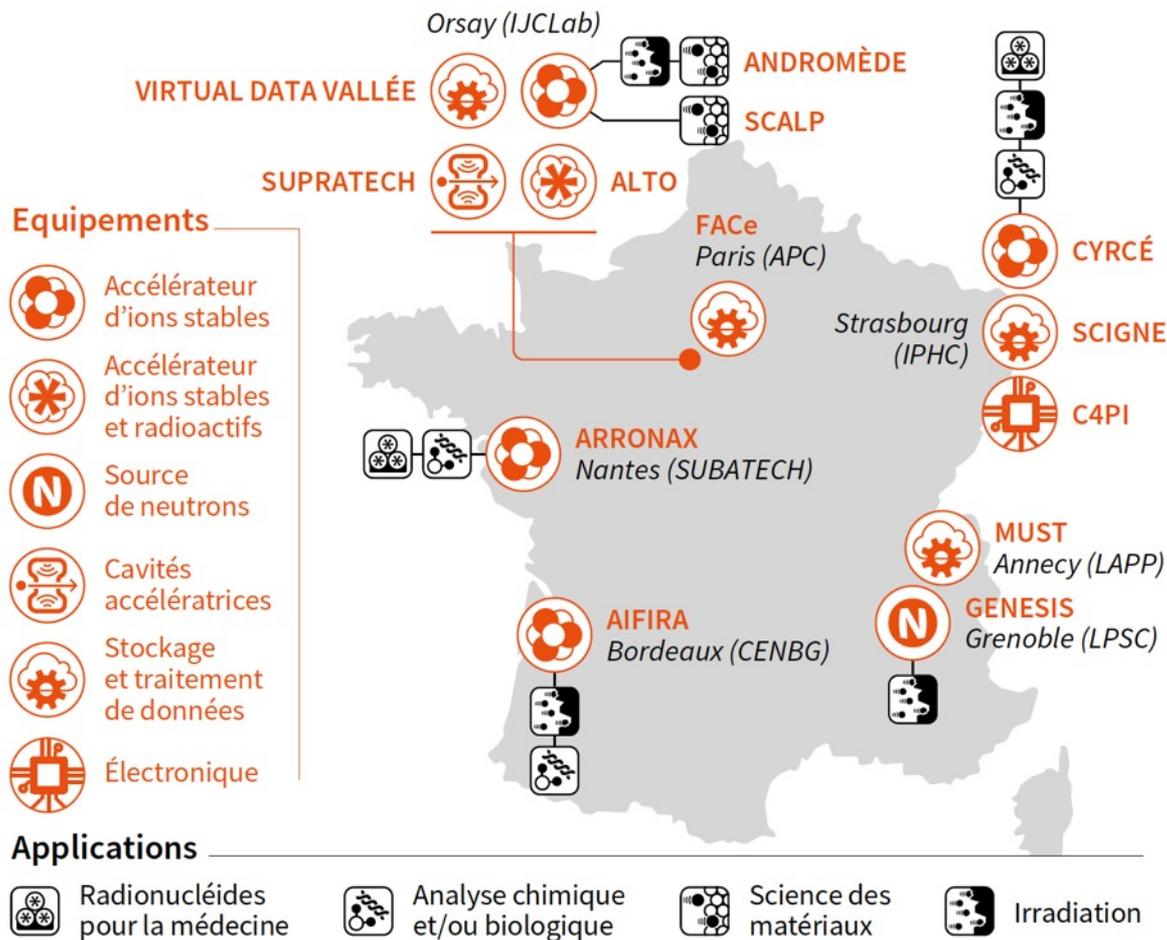
25 laboratoires  
18 en commun avec des universités  
2 avec le CEA, 1 avec l'Italie\*  
8 plateformes interdisciplinaires  
avec des accélérateurs

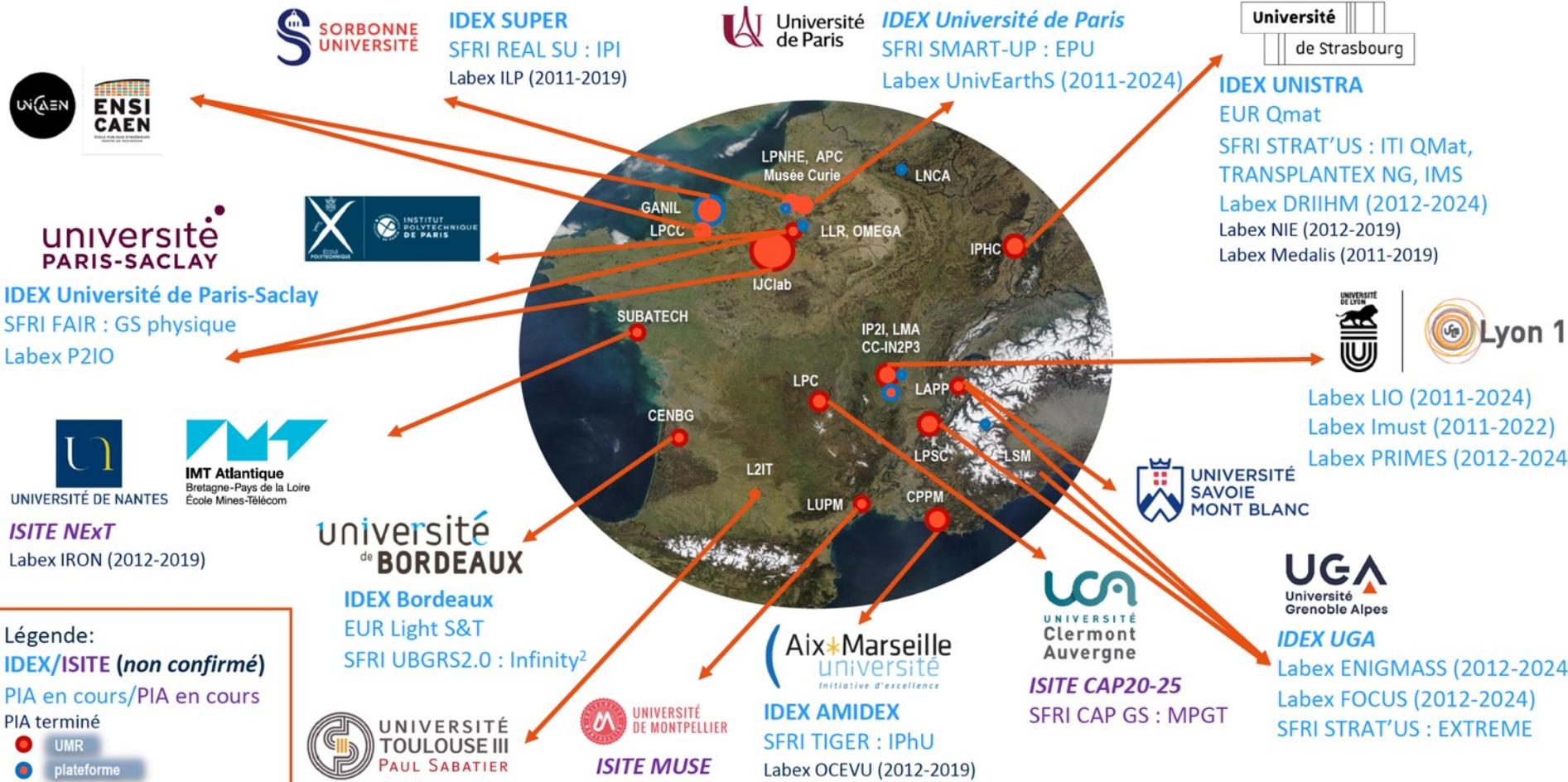
30 programmes majeurs de  
recherche (TGIR/IR)  
50 accords internationaux  
de recherche

\* EGO et participation CNRS au CERN, FAIR et CTA





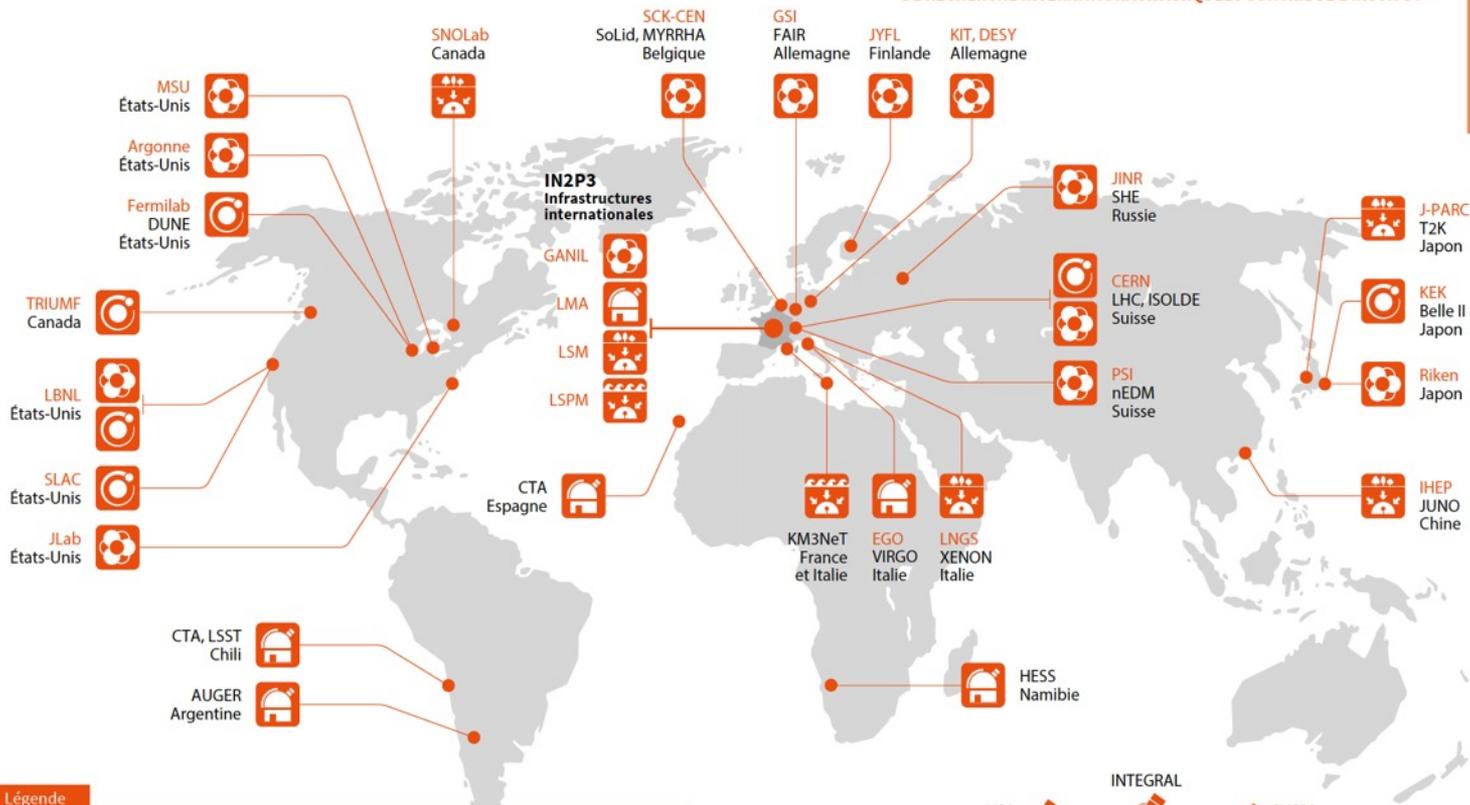






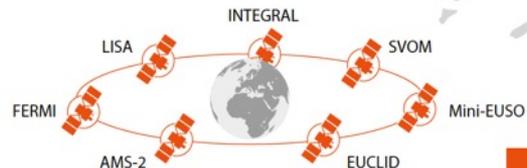
# L'IN2P3 dans le monde

APERÇU DES PRINCIPAUX LABORATOIRES PARTENAIRES ET DES PROJETS DE RECHERCHE INTERNATIONAUX AUXQUELS CONTRIBUE L'INSTITUT



## Légende

Laboratoire  
Expérience  
Pays





## MONTÉE EN PUISSANCE DU LINAC SPIRAL2

- **16kW Protons** atteints le 19 Novembre \o/
- 2021: focus sur He et deutons
- International Progress Review 24-26 Mars 2021
- ~1000 ETPT GANIL + 1000 ETPT IN2P3+Irfu depuis 2005  
-> **coût complet ~300M€** (hors NFS/S3/DEsir)

## FINALISER SPIRAL2 PHASE 1

- Mise en service de **S3** (objectif 2023)
- Construction de **DEsir** (dossier DAM avant 2021, objectif MeS: 2025/26)
- Nouvel injecteur A/Q=7: phase d'étude **NEWGAIN** lancée en 2020 (début APD 2021, injection linac 2028)



Accueil > Actualités

### Le LINAC-SPIRAL2 en route vers la pleine puissance

26 octobre 2020

INSTITUTIONNEL PHYSIQUE NUCLÉAIRE

En octobre, le personnel du GANIL a franchi deux étapes très importantes dans le démarrage du nouvel accélérateur linéaire de SPIRAL2 et la mise en route de la salle NFS, la première qui sera ouverte à la science l'an prochain. Petit tour d'horizon avec Navin Alahari, directeur du GANIL.

L'accélérateur linéaire de SPIRAL2 a généré ses premières impulsions de protons conformes à ses objectifs. A savoir, avec une énergie finale de 33 MeV et une intensité instantanée de presque 5mA. /Image Philippe STROPPA/CEA/CNRS



SPIRAL2 superconducting accelerator at GANIL ©PStroppa/CEA

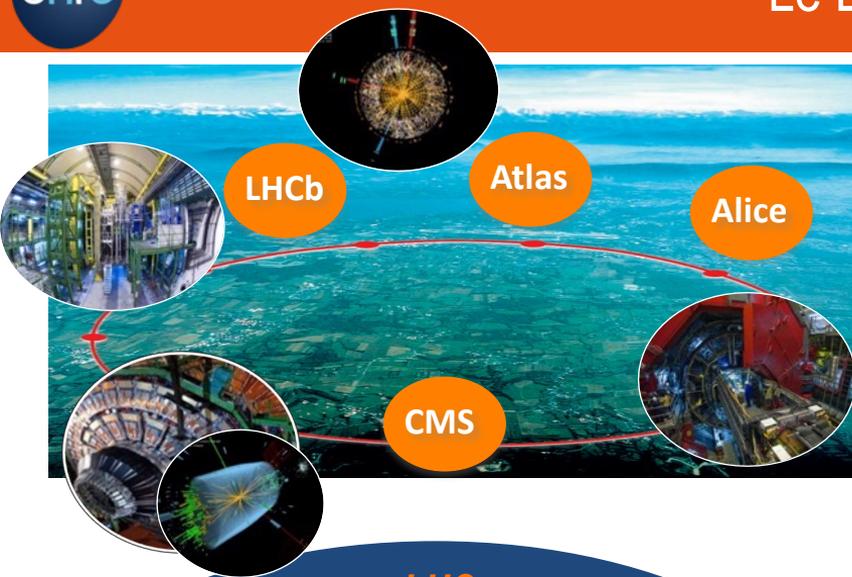
Accueil > Actualités

### SPIRAL2 : les premiers neutrons ont volé dans la salle NFS

19 décembre 2019

R&D ACCÉLÉRATEURS

Le cœur de SPIRAL2 bat enfin ! Depuis l'autorisation de mise en service donnée le 8 juillet dernier l'accélérateur a été méthodiquement testé organe après organe. Le long processus s'est achevé début décembre avec l'envoi d'un premier faisceau de protons vers la salle d'expérience NFS. Patrick Dolegieviez, chef de projet SPIRAL2 accélérateur nous en dit plus.



Contribution française à ATLAS & CMS  
 Les jouvences pour le HL-LHC approuvées en 2017:  
**Investissement de 140 M€**  
**sur 10 ans pour l'IN2P3**

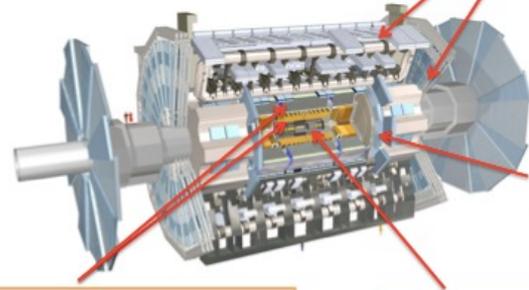
## Exemple: ATLAS upgrade for the HL-LHC (2027-2036)

### Déclenchement et acquisition

- ~10 kHz de données enregistrées

### Chambres à Muons

- Nouvelle électronique
- Remplacements de chambres
- Couverture étendue à l'avant



### Détecteur de temps à haute granularité

- Nouveau détecteur

### Calorimètres : argon liquide et tuiles

- Nouvelle électronique de lecture

### Nouveau trajectographe

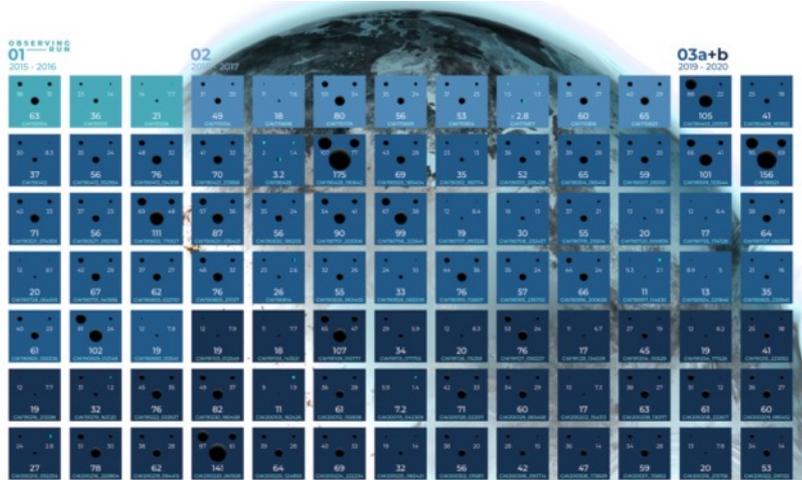
- Tolérant aux radiations, granularité, léger
- Couverture étendue à l'avant

**LHC :**  
**PARTICIPATION IN2P3**  
 110 M€ (construction des expériences)  
 > 500 ingénieurs, techniciens/an (sur 6-8 ans de construction)  
 106 ETP.an (accélérateurs)  
 330 chercheurs  
 85 doctorants



## Physique des ondes gravitationnelles: LIGO-Virgo-Kagra

- ⇒ La détection des ondes gravitationnelles ouvre une nouvelle ère pour l'étude de l'Univers
- ⇒ Expertise unique au LMA à Lyon sur les couches minces et les miroirs de ces interféromètres



**KEY**

- BLACK HOLE
- NEUTRON STAR
- PRIMARY MERGER
- SECONDARY MERGER
- DATE, TIME

UNITS ARE SOLAR MASSES  
1 SOLAR MASS = 1.989 x 10<sup>30</sup> kg

GRAVITATIONAL WAVE  
**MERGER  
DETECTIONS**  
SINCE 2015





## Etude de l'énergie noire: LSST

- L'IN2P3 est impliqué dans la construction
- CC-IN2P3: le centre de calcul hébergera les données LSST



Equipe IN2P3 travaillant sur l'assemblage de la camera LSST au SLAC (Californie)



Filter Autochanger

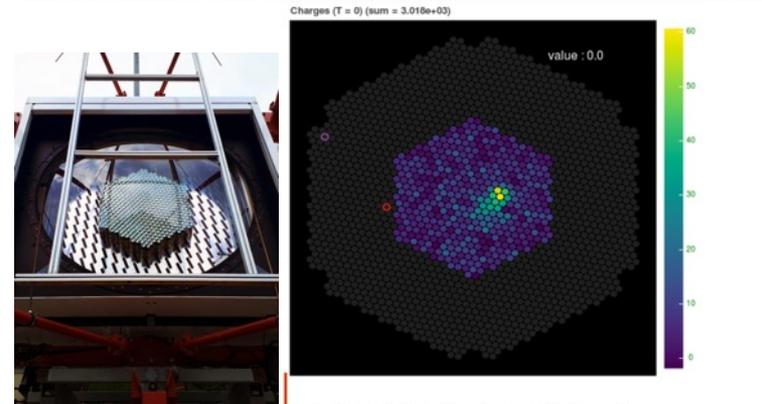
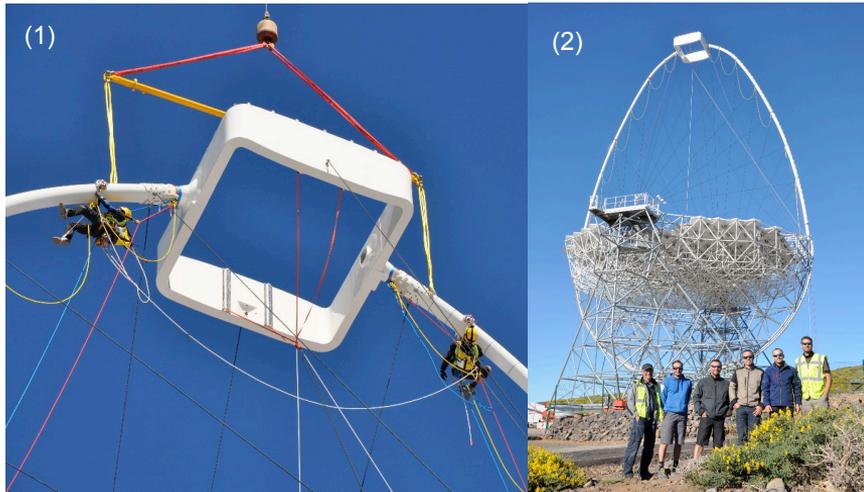
Filter loader on transport cart

5 Filter capacity carousel



HESS : 5 télescopes Cherenkov télescopes en opération en Namibie depuis 2009  
Photons de 50 GeV à 200 GeV

CTA : Futur projet pour l'étude des rayons gamma de haute énergie  
Contributions IN2P3 : LST-1 et NectarCAM



*Design, construction et assemblage du LST: Octobre 2018*

Lumière Cherenkov d'une cascade de particules atmosphérique vue par les photomultiplicateurs de la caméra lors de la nuit du 22 au 23 mai 2019 dans le ciel de Berlin Adlershof. Crédits photos : NectarCAM.



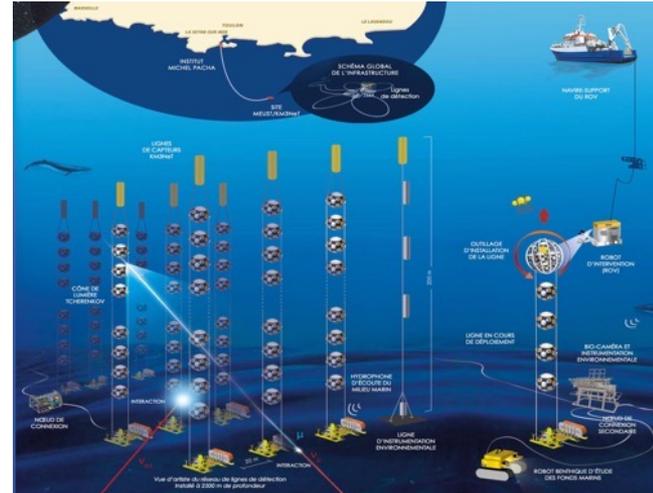
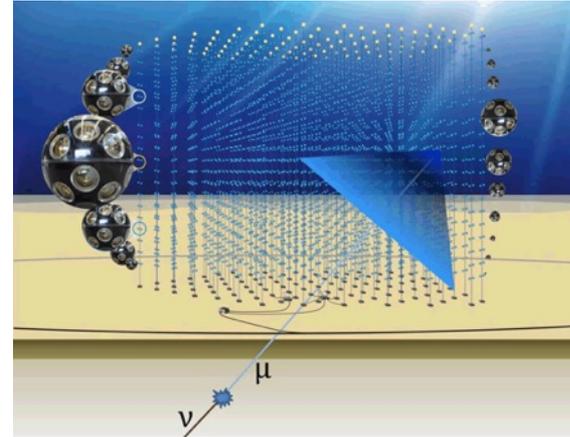
## ORCA : Oscillation Research with Cosmics in the Abyss

40 km au large de Toulon

Réseau dense d'unités de détection pour étudier les paramètres d'oscillation des neutrinos oscillation parameters et déterminer la hiérarchie de masse des neutrinos

*1ère unite de detection déployé en février 2019*

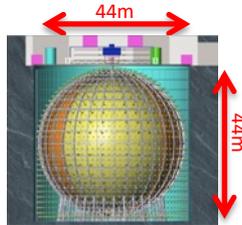
*Phase 1 avec 6 lignes opérationnelle depuis Février 2020*





## JUNO

SPMT electronics: 27k PM  
 New tracker electronics  
 OPERA target tracker in China



## DOUBLE-CHOOZ

Dismantling in 2018

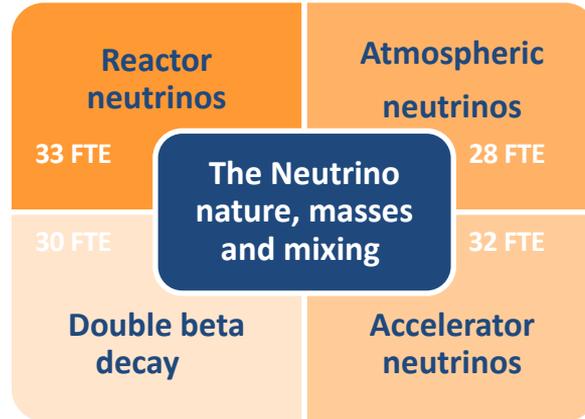
## SOLID & STEREO

Taking data

## KM3NET/ORCA



First string successfully deployed (Sept. 2017)  
 2020: 115 strings, 18 DOMs per string  
 Instrumented mass: 5,7 Mton  
 >3 sigma determination of mass hierarchy in 3 years

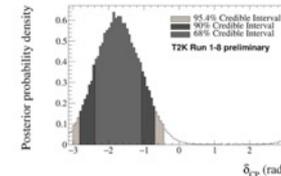


## Super-K

LLR joined the collaboration

## T2K

Taking data  
 Wagasaki: 2 H<sub>2</sub>O modules installed in 2016/2017  
 Evaluation of contribution to ND280 upgrade in 2018



## SUPER-NEMO

Inauguration in Nov. 2017  
<sup>82</sup>Se source sheets produced  
 Installation & data taking: spring 2018



Long baseline neutrino program between Fermilab and SURF  
 R&D program at IN2P3 on LAr double phase TPC since 2006  
 ⇒ Neutrino platform at CERN: WA105 and Proto-DUNE-DF



*First cryomodule delivered to ESS in 2018*

*THOMX: compact & intense photon source*

## ENHANCE PARTICLE ACCELERATORS PERFORMANCE TOWARDS:

### → HIGHER BEAM INTENSITIES & LUMINOSITIES

to be able to track rare events more efficiently, like at ISOL factories for nuclear physics, at high-precision frontier colliders for particle physics or at long baseline facilities for neutrino physics

### → HIGHER BEAM ENERGIES

to address the issues of the next generation high-energy colliders and beyond

### → HIGHER EFFICIENCY & RELIABILITY

to increase the general performance of accelerator-based research infrastructures



© CERN/A. Franjois, D. Danc, Desy-Hamburg, Sign, J. G. W. et al. / Conception graphique - Anna Thibault (PNL)



Le RFQ focalise et pré-accelère les protons. Il fait partie de l'injecteur du futur accélérateur linéaire qui alimentera le réacteur de recherche nucléaire hybride du projet MYRRHA/ Image LPSC/IN2P3

Accueil > Actualités

## Premier faisceau pour le RFQ de MYRRHA !

09 juillet 2020

R&D ACCÉLÉRATEURS

Le 25 juin dernier, la collaboration MYRRHA a terminé l'installation d'un des composants clé de son futur accélérateur linéaire : le quadripôle radiofréquence. L'élément vient s'arrimer aux composants déjà fonctionnels que sont la source de protons et la ligne de transport basse énergie, et complète ainsi l'injecteur. Premiers tests très encourageants.

LASERS SUPERCONDUCTORS BEAM DYNAMICS  
ION SOURCES RF VACUUM CRYOTECHNOLOGY



## Pour chacun des détecteurs ATLAS et CMS au LHC:

1 collision représente environ 1 MB de données

40 millions de collisions par seconde

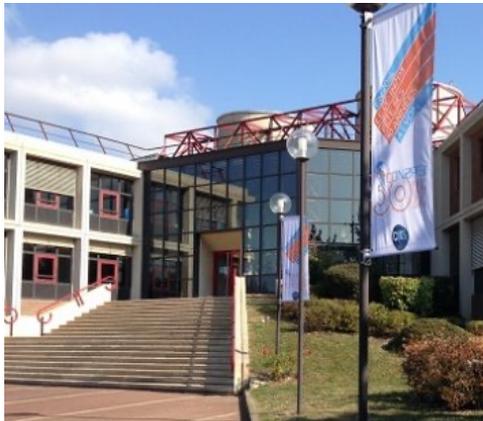
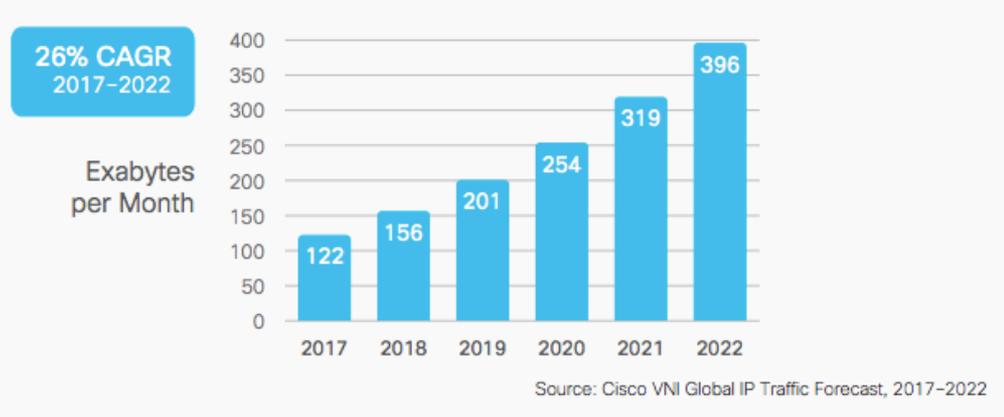
40 TB / s

144 PB / h

3,5 EB / jour

104 EB / mois

1248 EB / an



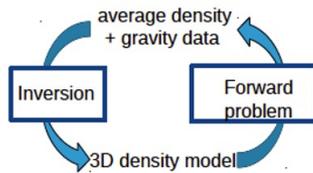
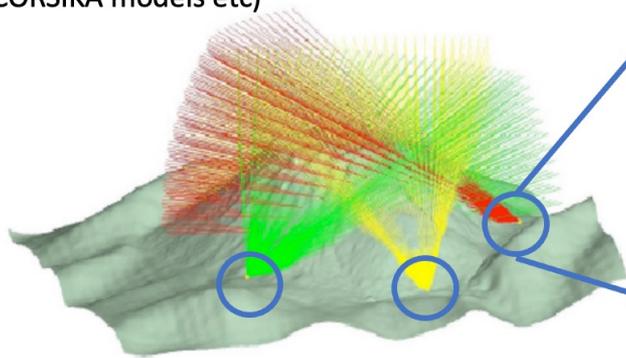
Le CC-IN2P3 conçoit et opère un ensemble de services, en particulier un système de stockage de masse et de moyens de traitement de grandes masses de données.

Le CC-IN2P3 dispose de deux salles informatiques (de 850 m<sup>2</sup> chacune) hébergeant plusieurs milliers de serveurs et de bibliothèques permettant de stocker près de 340 PétaOctets de données sur bandes magnétiques.



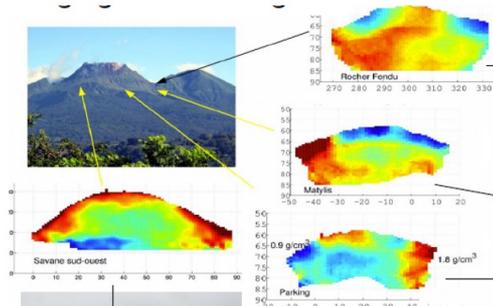
## SD1: Probing the Earth with muon tomography

Input: atmospheric muon flux  
(CORSIKA models etc)



Field detectors based on different techniques: **scintillators**, emulsions, **micromegas**, **RPCs**...

Applications to several volcanoes +  
 Development of joined methods +  
 Gain in detectors stability  
 → towards integration to monitoring  
 (requires INSU + SNOV involvment)



- Fundings :
- ANR(s)
  - MITI,
  - 80 PRIME,
  - LABEX,
  - H2020,
  - Region(s)



## SD1: Muography interdisciplinary spin-off projects

Muography =  $\mu$ -ray imaging technique : absorption / scattering  $\rightarrow$  sensitive to  $\rho$  (opacity)

### Geosciences

- Volcanology
- Geology
- Hydrology
- Atmosphere physics
- CR physics
- ...



### Archaeology

- Tumulus
- Anthropic structures
- Ruins
- ...



### Industrial controls

- Non invasive controls
- Nuclear cycle production
- Civil engineering
- Tunnel boring machines
- Prospection & mining
- ...

Valo. Startup Technological transfer



IP2I, LPC, APC, LAPP...

@Jacques Marteau IP2I



### Exercice de prospective nationale en physique nucléaire, physique des particules et astroparticules

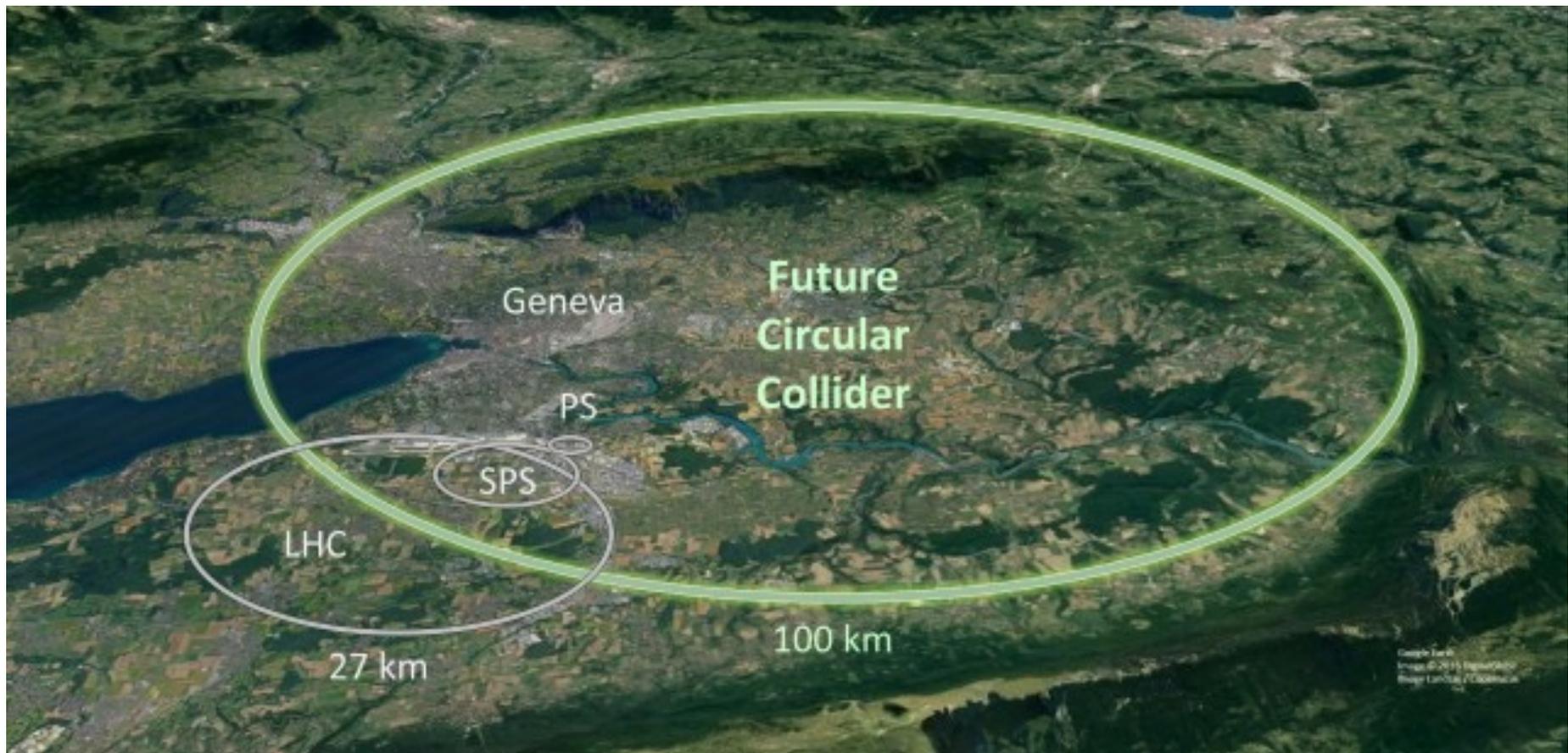
Développements technologiques et applications associés

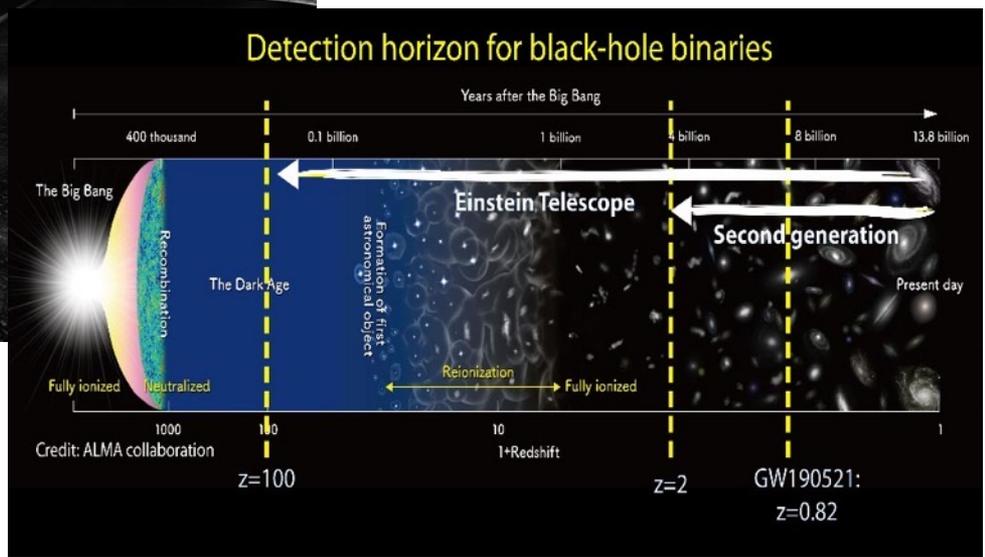
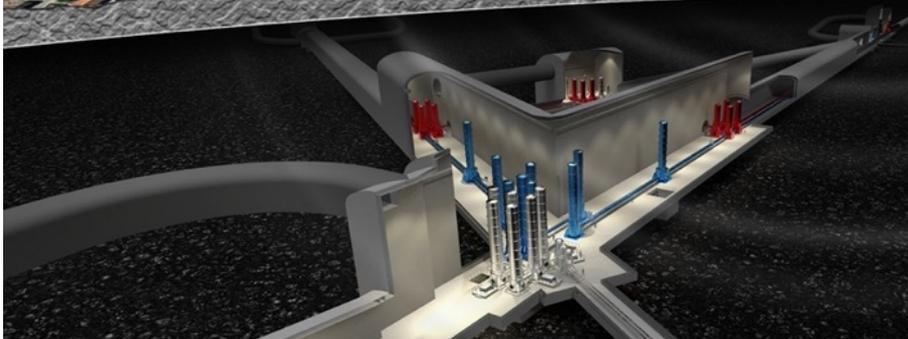
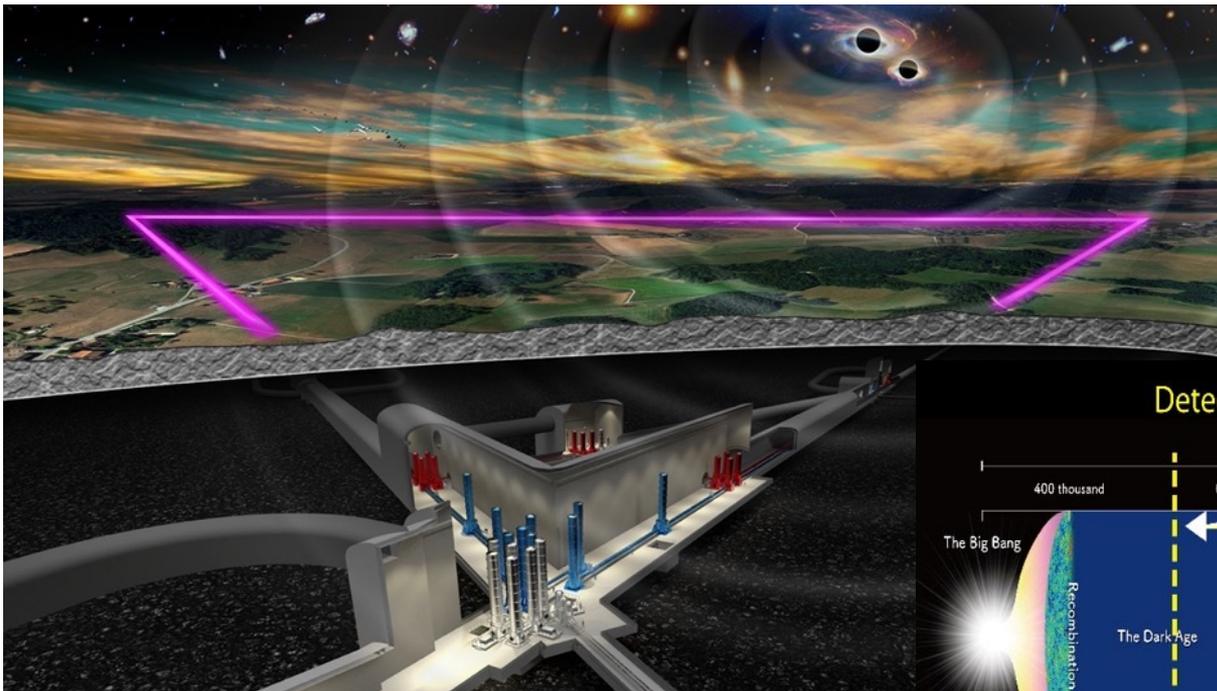
L'IN2P3 organise et conduit, en y associant les organismes et acteurs concernés, un exercice de prospective nationale dans ses domaines de compétence : physique nucléaire, physique des particules et astroparticules, ainsi que les développements technologiques et applications associés.

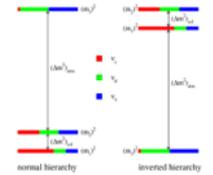
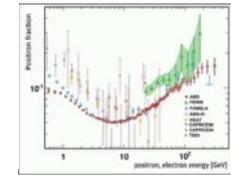
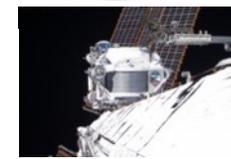
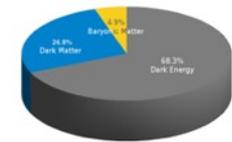
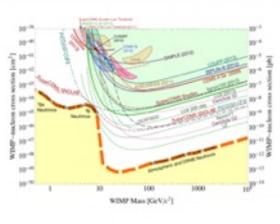
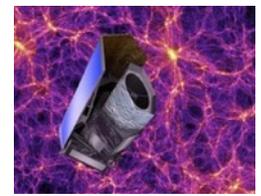
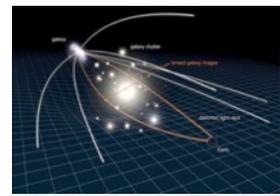
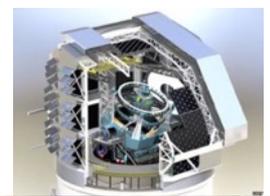
Pour plus d'informations : <https://prospectives2020.in2p3.fr>

<p><b>Physique des particules</b> IN2P3, Lyon 12-13 Mars 2020 <a href="https://prospectives2020.in2p3.fr">https://prospectives2020.in2p3.fr</a></p>	<p><b>Physique et astrophysique nucléaire</b> UPMC, Com 30-31 Janvier 2020 <a href="https://prospectives2020.in2p3.fr">https://prospectives2020.in2p3.fr</a></p>	<p><b>Physique hadronique</b> Université de Clermont 2-3 Mars 2020 <a href="https://prospectives2020.in2p3.fr">https://prospectives2020.in2p3.fr</a></p>	<p><b>Physique des astroparticules</b> LAPP, Annecy 12-13 Novembre <a href="https://prospectives2020.in2p3.fr">https://prospectives2020.in2p3.fr</a></p>	
<p><b>Physique de l'inflation et énergie noire</b> UPMC, Com 9-10 Décembre 2019 <a href="https://prospectives2020.in2p3.fr">https://prospectives2020.in2p3.fr</a></p>	<p><b>Physique des neutrinos et matière noire</b> CEA, Saclay 28 Octobre 2019 <a href="https://prospectives2020.in2p3.fr">https://prospectives2020.in2p3.fr</a></p>	<p><b>Accélérateurs et instrumentation associée</b> IN2P3, Com 30-31 Janvier 2020 <a href="https://prospectives2020.in2p3.fr">https://prospectives2020.in2p3.fr</a></p>	<p><b>Détecteurs et instrumentation associée</b> IN2P3, Com 23-24 Janvier 2020 <a href="https://prospectives2020.in2p3.fr">https://prospectives2020.in2p3.fr</a></p>	
<p><b>Calcul, algorithmes et données</b> Laboratoire de Physique de Clermont 17-18 octobre 2019 <a href="https://prospectives2020.in2p3.fr">https://prospectives2020.in2p3.fr</a></p>	<p><b>Sciences nucléaires et environnement</b> IFRC, Strasbourg 5-6 Février 2020 <a href="https://prospectives2020.in2p3.fr">https://prospectives2020.in2p3.fr</a></p>	<p><b>Energie nucléaire et environnement</b> IFRC, Strasbourg 5-6 Février 2020 <a href="https://prospectives2020.in2p3.fr">https://prospectives2020.in2p3.fr</a></p>	<p><b>Géosciences, système solaire et milieu interstellaire</b> IFRC, Strasbourg 5-6 Février 2020 <a href="https://prospectives2020.in2p3.fr">https://prospectives2020.in2p3.fr</a></p>	<p><b>Ressources humaines et financières</b> IN2P3, Com 31 Mars 2020 <a href="https://prospectives2020.in2p3.fr">https://prospectives2020.in2p3.fr</a></p>









Merci pour votre attention