

Expériences des deux infinis

Elisabeth Petit
CPPM



Ecole IN2P3 d'instrumentation
"Techniques de base des détecteurs"
Fréjus, 10-15 mars 2024



NUCLÉAIRE
& PARTICULES

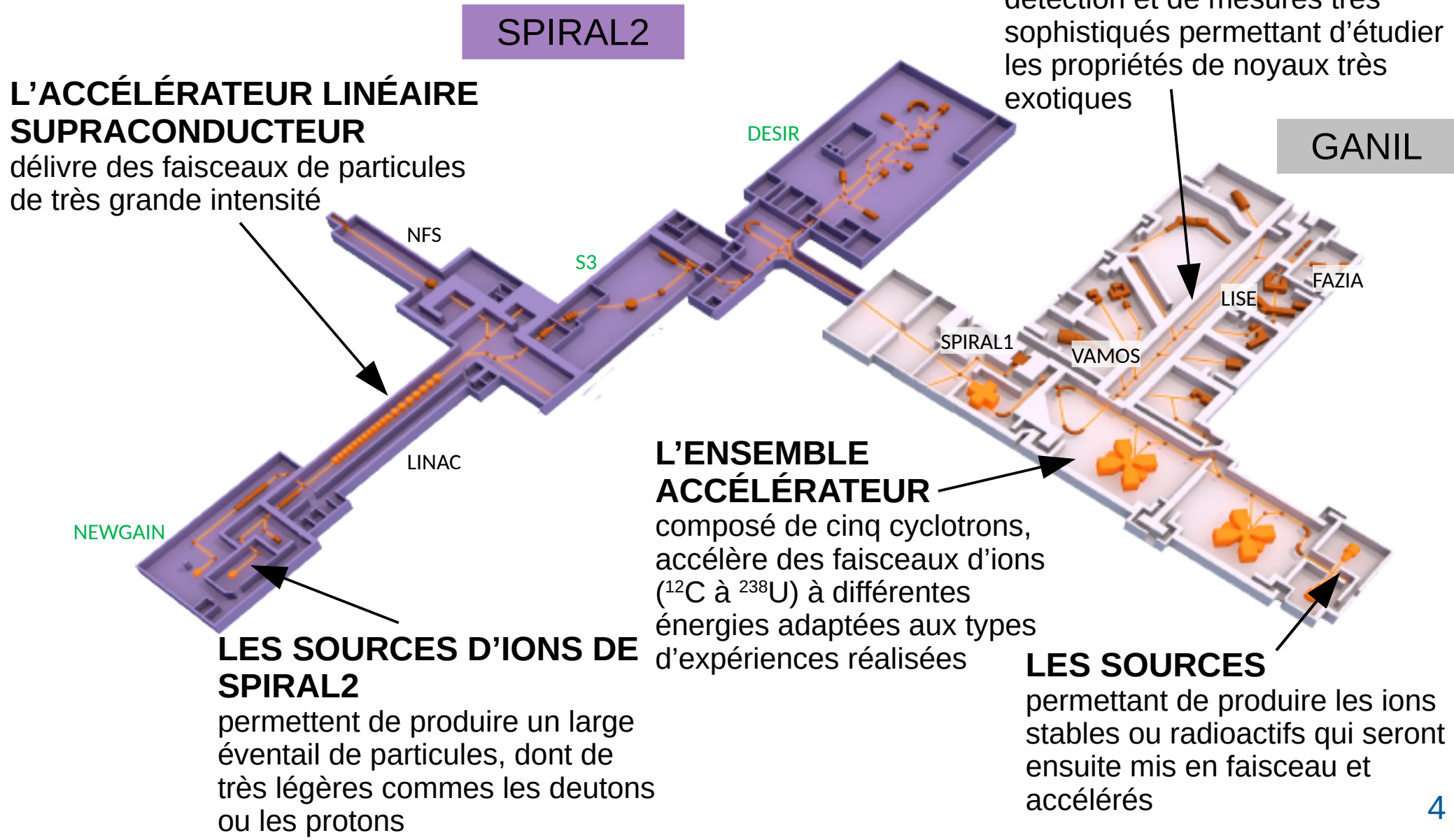
Physique des particules auprès des accélérateurs

◆ cf cours suivants 😊

Physique nucléaire

Le GANIL

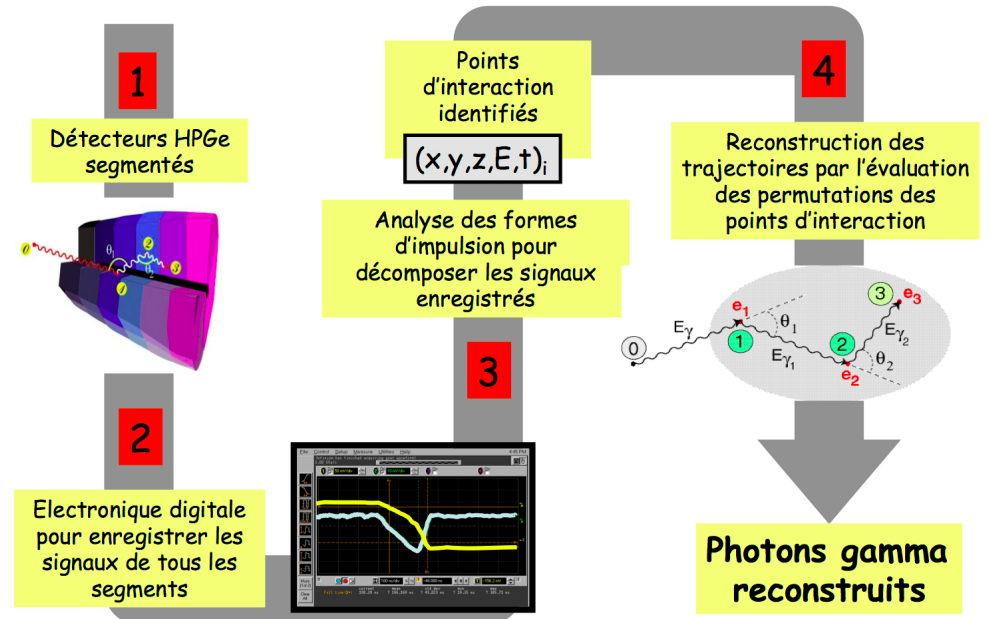
- ◆ Grand Accélérateur National d'Ions Lourds
 - depuis 1983



AGATA (Advanced GAMMA Tracking Array)

- ◆ Multidétecteur de photons au Germanium ultra pur basé sur le concept de tracking gamma
- ◆ Projet européen
 - 40 instituts de 12 pays
- ◆ But : sonder la structure du noyau atomique
- ◆ Détecteur mobile qui grandit
 - 180 détecteurs prévus au final (4π)

Ingrédients du Tracking Gamma



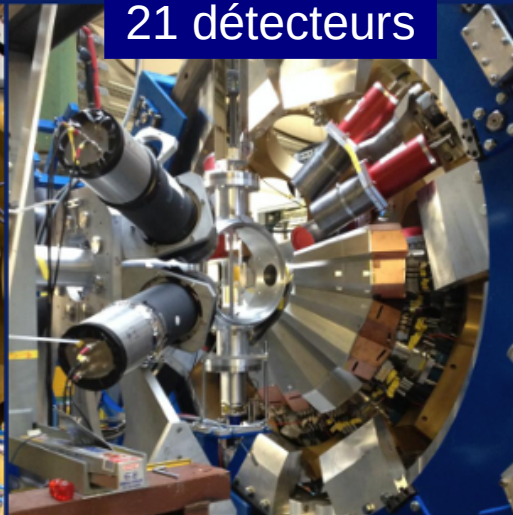
LNL (2010-2011)

15 détecteurs



GSI (2012-2014)

21 détecteurs



GANIL (2015-2021)

41+ détecteurs



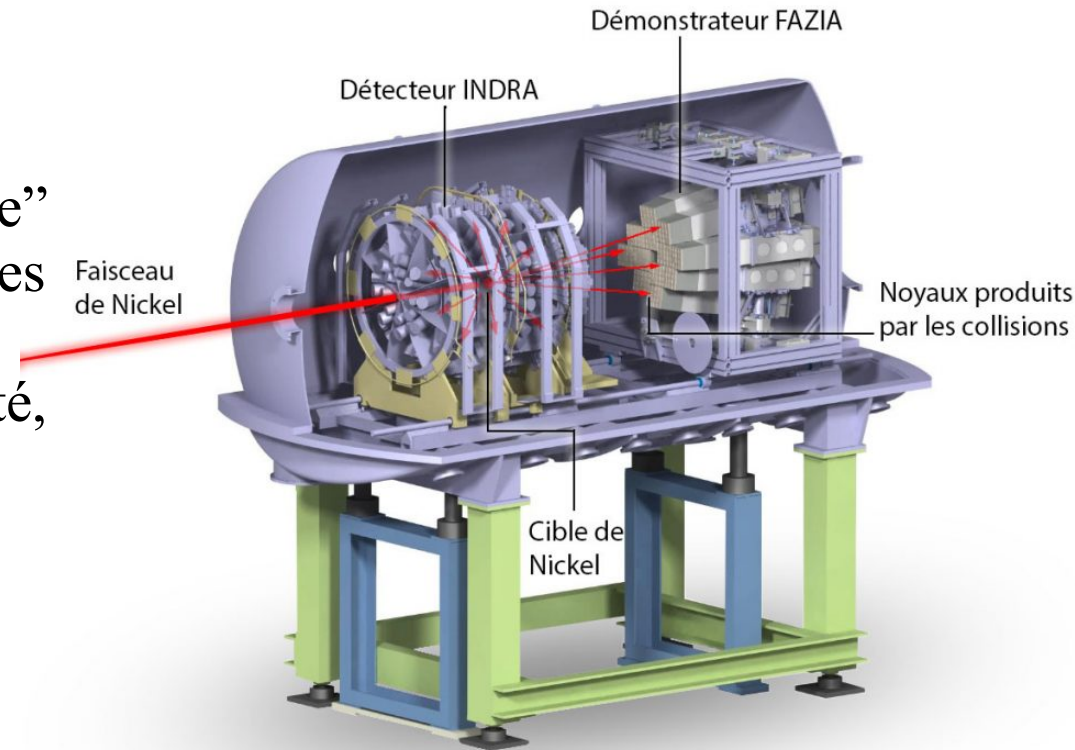
LNL (Today)

45 détecteurs



- ◆ **Multidétecteur** capable de donner une identification complète des noyaux
 - simultanément charge et nombre de protons et neutrons des fragments issus de collision entre noyaux
- ◆ **But** : étudier les propriétés du “fluide” nucléaire mais aussi la dynamique des noyaux en collision (conditions extrêmes de température et de densité, comme dans étoiles à neutrons ou supernovæ)
- ◆ 192 télescopes
 - deux étages sont en silicium
 - un troisième en scintillateur plus épais pour détecter les particules les plus rapides
 - digitalisation du signal et son analyse en forme pour identifier les ions chargés avec un seul silicium

LES DETECTEURS INDRA ET FAZIA FONCTIONNENT EN ASSOCIATION



Les collisions se produisent au coeur du détecteur INDRA. Les particules les plus rapides s'échappent jusqu'au démonstrateur FAZIA, situé à 1m du point de collision et dont on aperçoit la mosaïque des 12 éléments. Image : Yvan Merrer LPC Caen / IN2P3

PARIS (Photon Array for studies with Radioactive Ions and Stable beams)

- ◆ **Calorimètre** dédié à la détection des rayonnements gamma émis dans les réactions nucléaires
 - 1 ns de résolution
- ◆ **But** : détecter les **rayonnements gamma** de haute énergie émis dans les réactions nucléaires
- ◆ Sera aussi utilisé dans diverses installations :
 - GANIL, ALTO, IFJ PAN (Cracovie, Pologne), LNL-INFN (Legano, Italie), TIFR (Mumbai, Inde)
- ◆ Utilisation en configuration partielle depuis 2018
 - complet en 2025

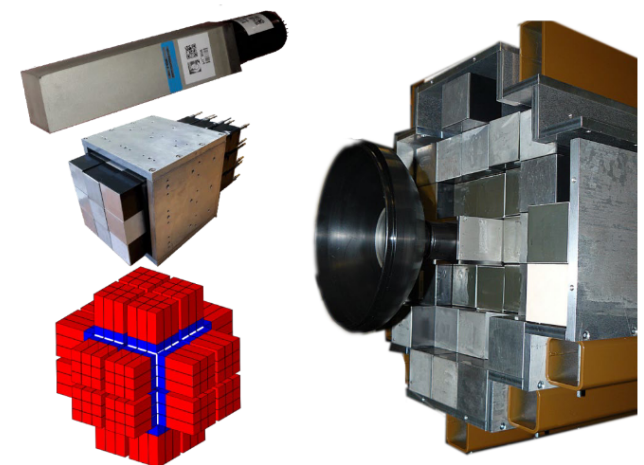
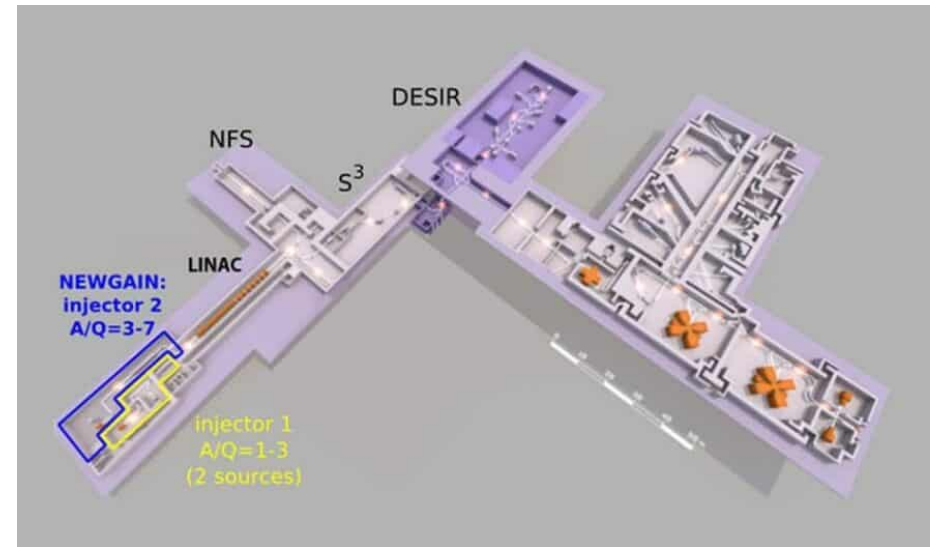


Figure 1. Left column, from top to bottom: PARIS phoswich, a cluster, a 4π cube of 24 clusters. Right: Wall geometry (33 phoswiches).

NEWGAIN (New GANIL Injector)

- ◆ **Second injecteur** pour l'accélérateur linéaire de l'installation SPIRAL2, capable de générer un faisceau de haute intensité avec des ions lourds à superlourds
 - 10 à 10000 fois plus d'intensité (selon les ions) qu'avec l'actuelle source
- ◆ **But** : explorer les noyaux atomiques les plus lourds et les plus déficients en neutrons
- ◆ Mise en service prévue en 2030



NFS (Neutrons For Science)

- ◆ Produit un **faisceau pulsé** de **neutrons de haute énergie**
- ◆ But : physique fondamentale et applications (conception des futurs réacteurs nucléaires, traitement des déchets radioactifs, médecine nucléaire)
- ◆ Conçue pour **accueillir des détecteurs** de différents formats pour mesurer des paramètres nucléaires de base observés après l'impact des neutrons sur une cible
- ◆ Interaction des protons et des deutons accélérés par le Linac de Spiral 2 sur une cible de conversion
 - énergie maximale : 40 MeV
 - spectre continu ou quasi-monoénergétique
 - 8.10^7 neutrons/s/cm²
- ◆ Possibilité de plusieurs expériences simultanément

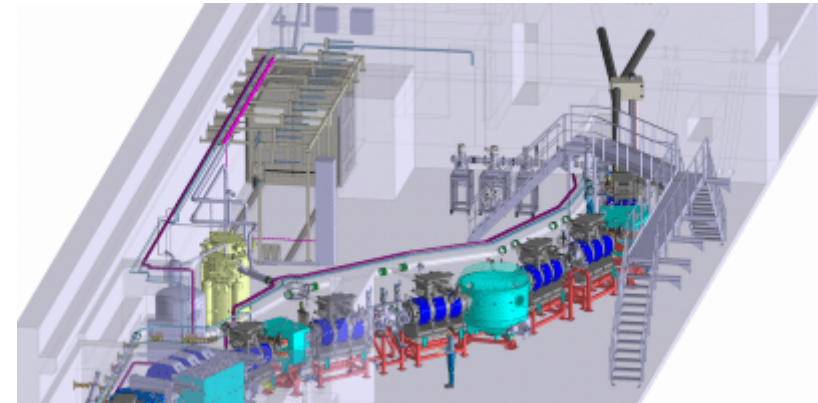


Salle du convertisseur de la salle d'expériences NFS



S³ (Super Separator Spectrometer) TO THE FUTURE

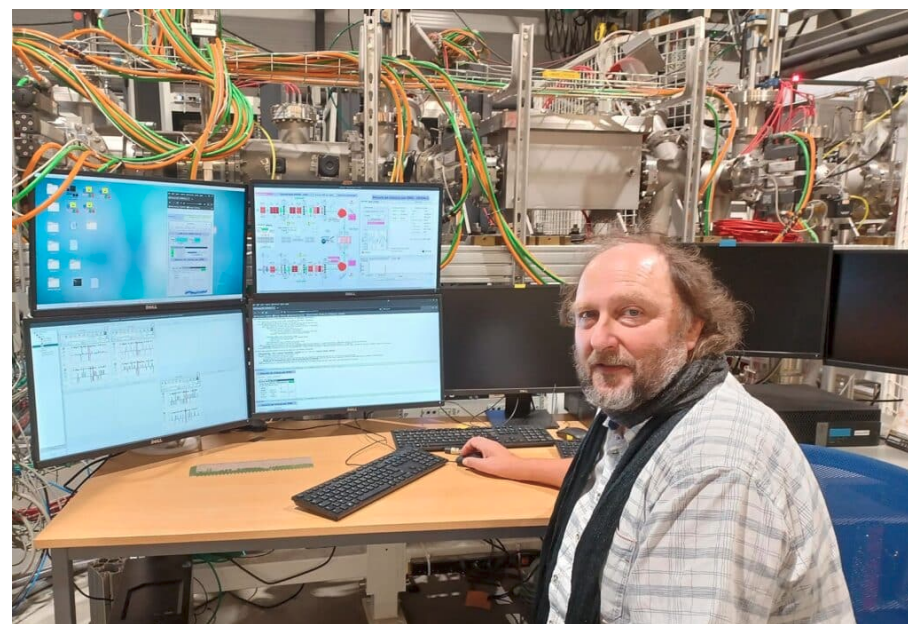
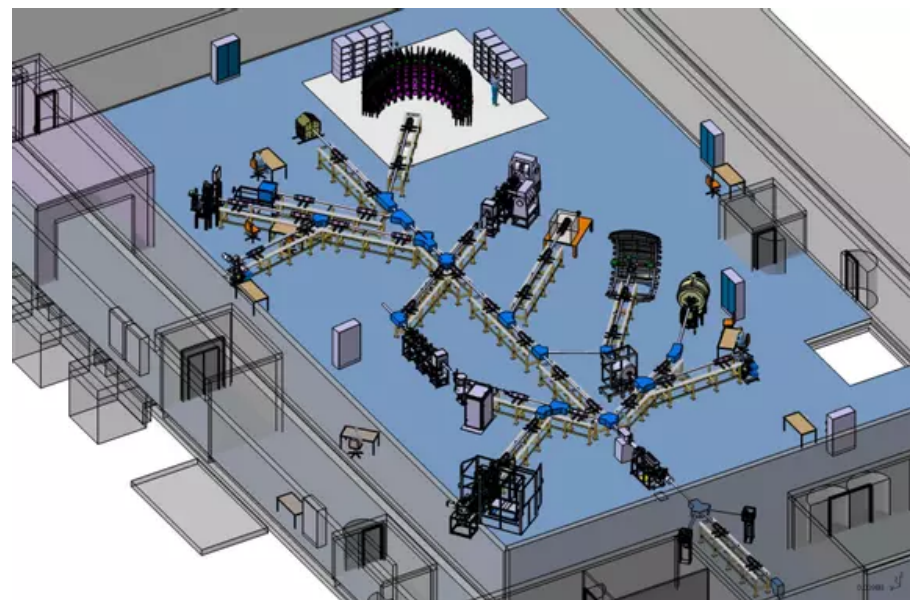
- ◆ Produire des noyaux de très faible section efficace (\Rightarrow très faible probabilité de formation)
- ◆ But : étudier les propriétés des noyaux rares et super lourds
- ◆ **Spectromètre** chargé de séparer ces noyaux très rares du fond largement dominant de noyaux classiques
 - sélectivité de 1 particule sur 10^{13} par seconde
 - ensemble de triplets multipôles supraconducteurs couplés à des dipôles magnétiques et électrostatiques
- ◆ Deux **systèmes de détection** complémentaires :
 - SIRIUS : étudie les noyaux au travers de leur décroissance radioactive
 - électronique rapide pour capter et étudier les évènements très rares
 - LEB : fournira des informations inédites sur les noyaux les plus exotiques
- ◆ Prévu pour démarrer en 2025



La salle S3 équipée de sa ligne de faisceau et des spectromètres associés

DESIR (Désintégration Excitation et Stockage d'Ions Radioactifs)

- ◆ Infrastructure de recherche à Spiral-2 avec des **faisceaux de très basse énergie**
 - faisceaux d'ions exotiques parmi les plus intenses au monde
- ◆ But : Étudier les noyaux atomiques exotiques
- ◆ 3 zones :
 - DETRAP : piégeage et purification des ions, mesure de la masse de leurs noyaux et étude des interactions fondamentales
 - LUMIERE : lignes de spectroscopie laser et un dispositif de polarisation des noyaux par laser pour étudier la structure et la forme des noyaux
 - BESTIOL : ensemble de détecteurs pour l'étude des propriétés de décroissance radioactive des noyaux exotiques
- ◆ Première pierre posée fin 2023
 - démarrage des expériences prévu dans quelques années



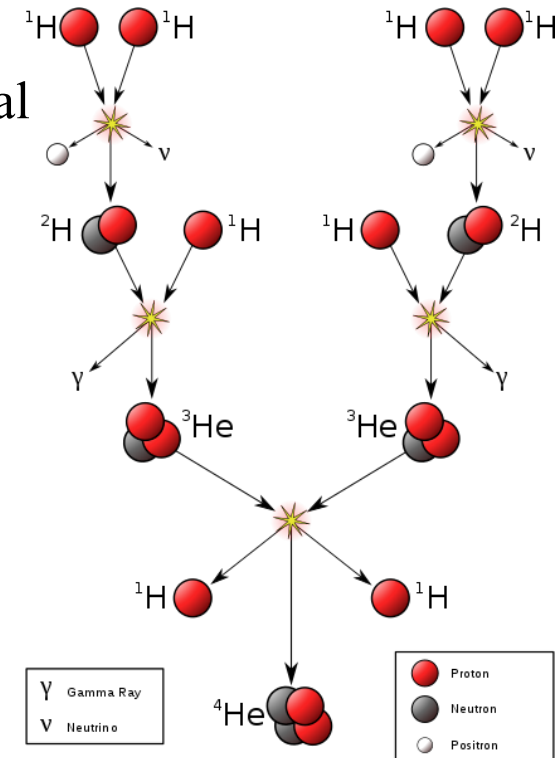
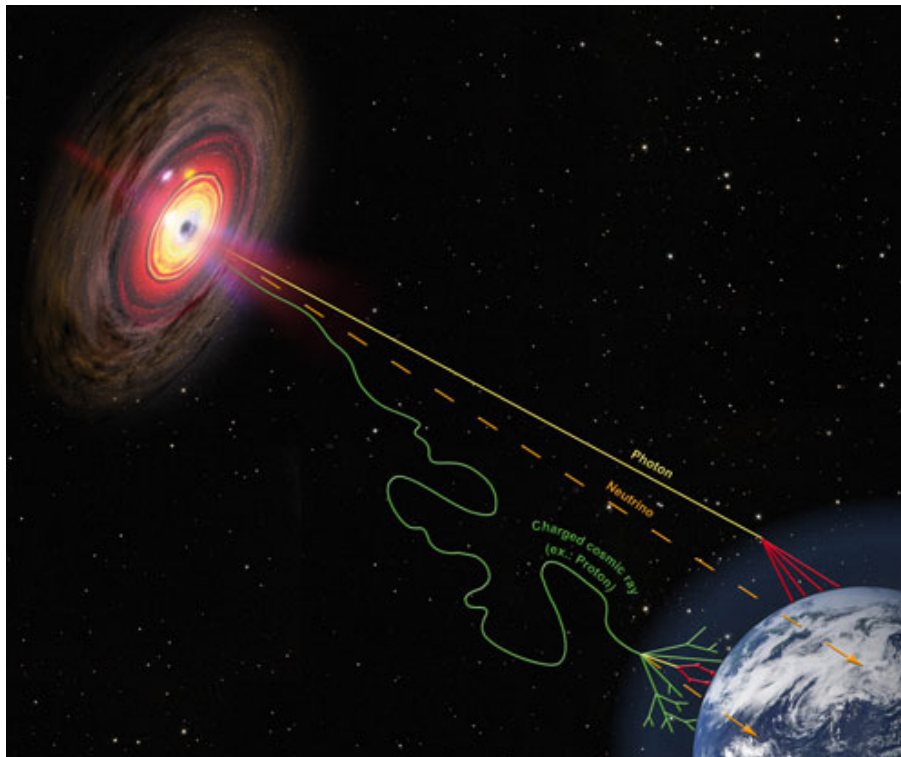
Dispositif PIPERADE (pour Pièges de Penning pour les RADionucléides à DESIR)

Astroparticules/neutrinos

Rayons cosmiques (1)

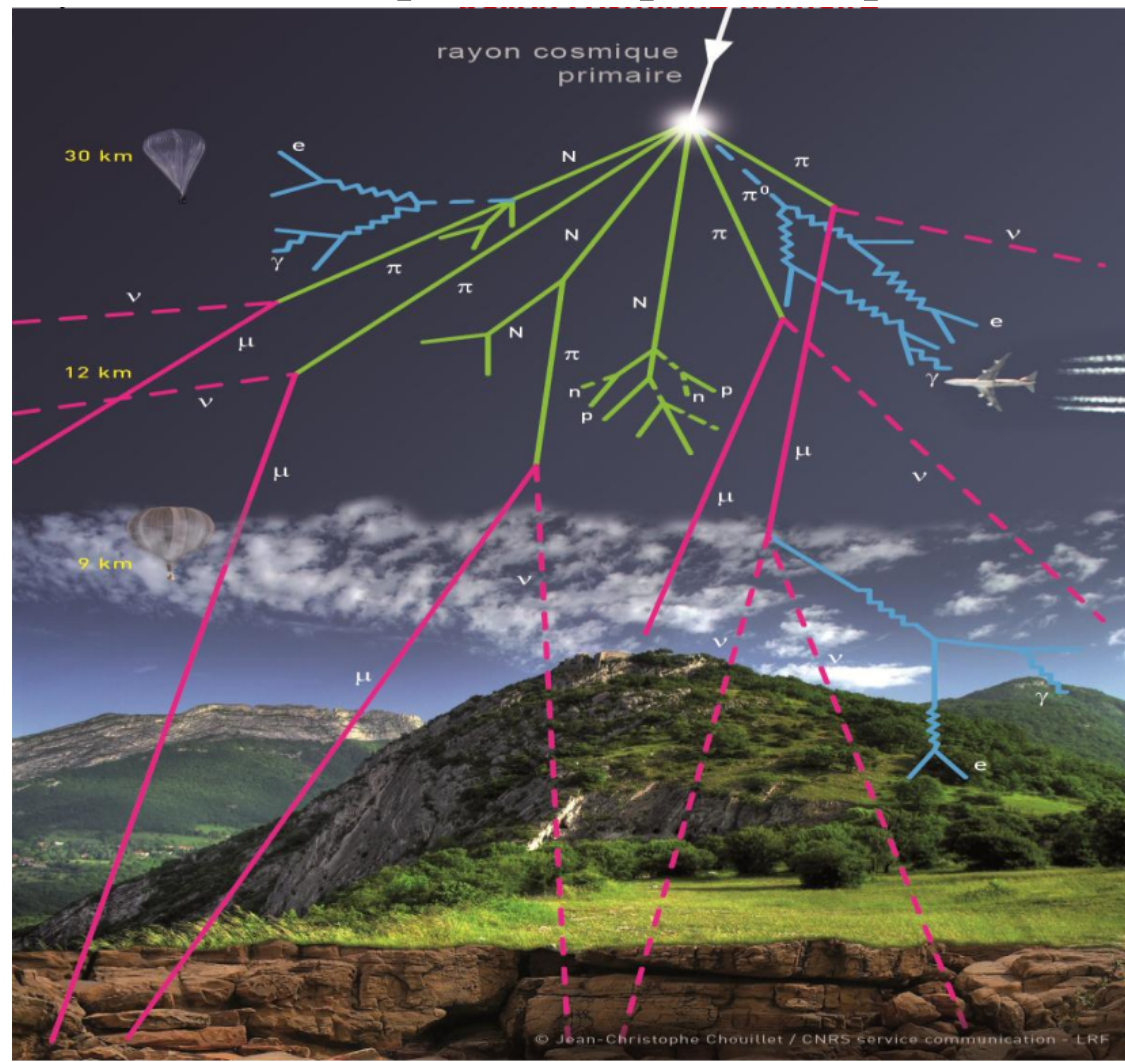
◆ Origine :

- le soleil est une source de **neutrinos** de basse énergie via la fusion de noyaux ($p \rightarrow n + e^+ + \bar{\nu}_e$)
- sources **galactiques** et **extragalactiques** : origine encore mal comprise, particule la plus énergétique jamais détectée : $3.2 \cdot 10^{20}$ eV, soit 50 J, soit une balle lancée à 100 km/h, soit un million de fois le LHC



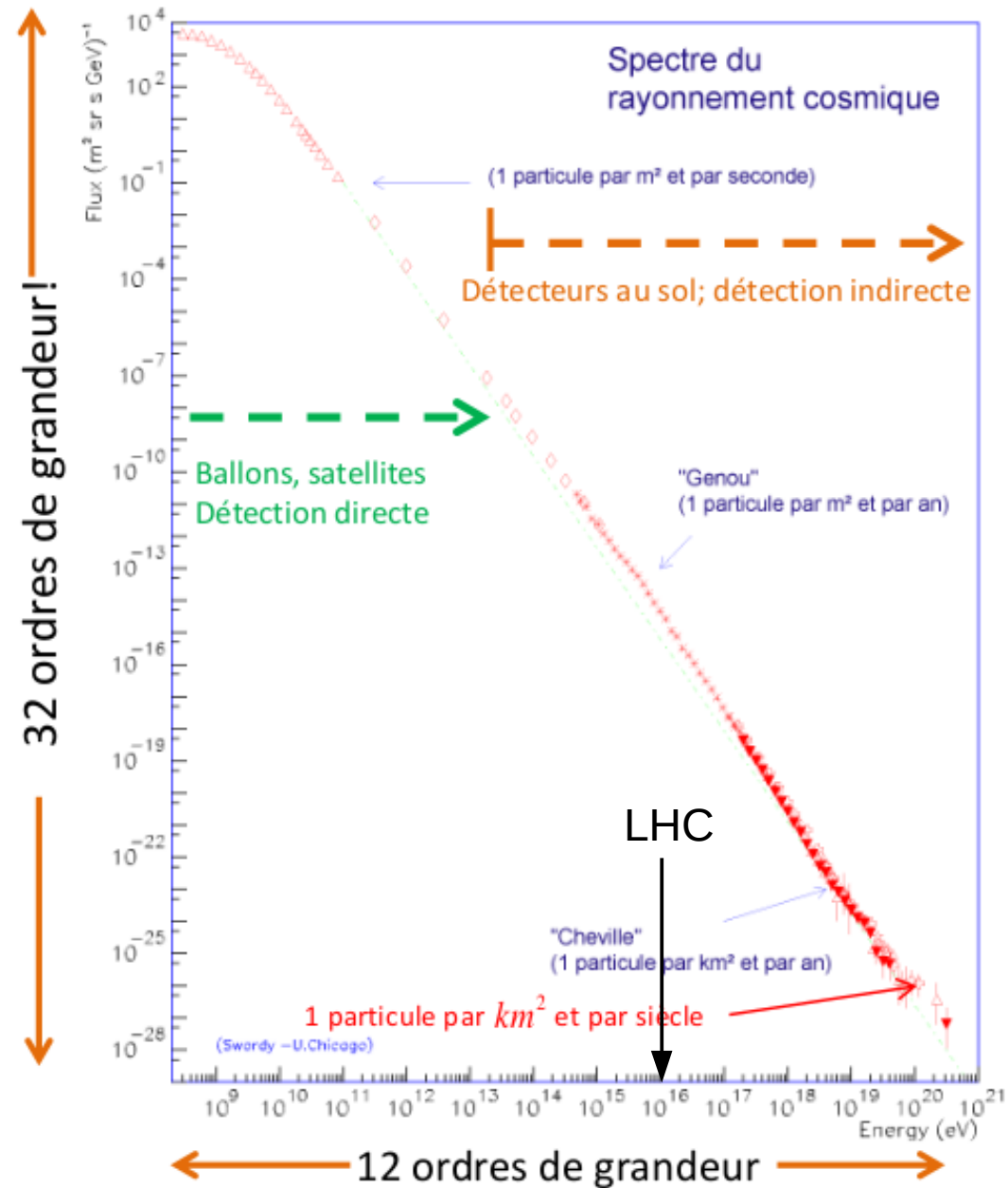
Rayons cosmiques (2)

- ◆ Arrivée des rayons cosmiques sur Terre
 - rayonnement cosmique primaire : protons, photons, noyaux, neutrinos
 - au niveau du sol : muons cosmiques, très utilisés pour les tests d'appareillages
- ◆ Au niveau de la mer, ~ 150 particules par m^2 et par seconde



Composition du rayonnement cosmique primaire

- ◆ Composition :
 - 87% protons
 - 11% noyaux d'hélium
 - 2% noyaux plus lourds (Li au Pb)
 - 1% d'électrons et de positrons
 - 10^{-4} à 10^{-5} d'antiprotons



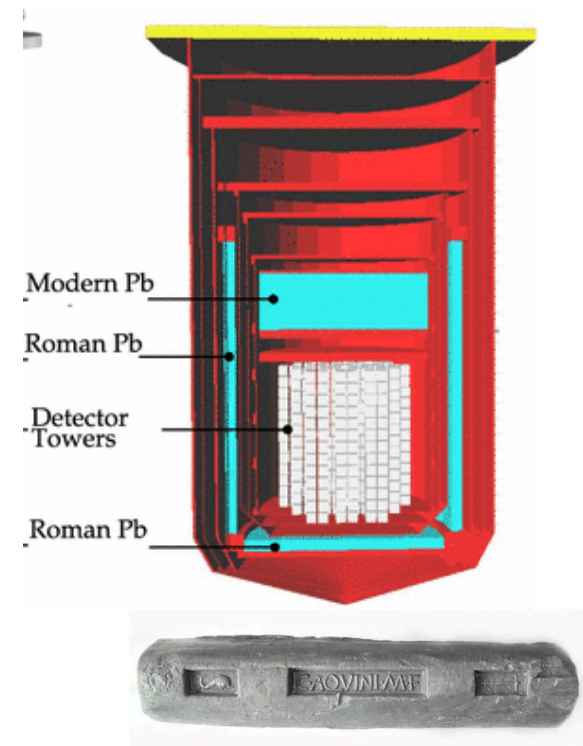
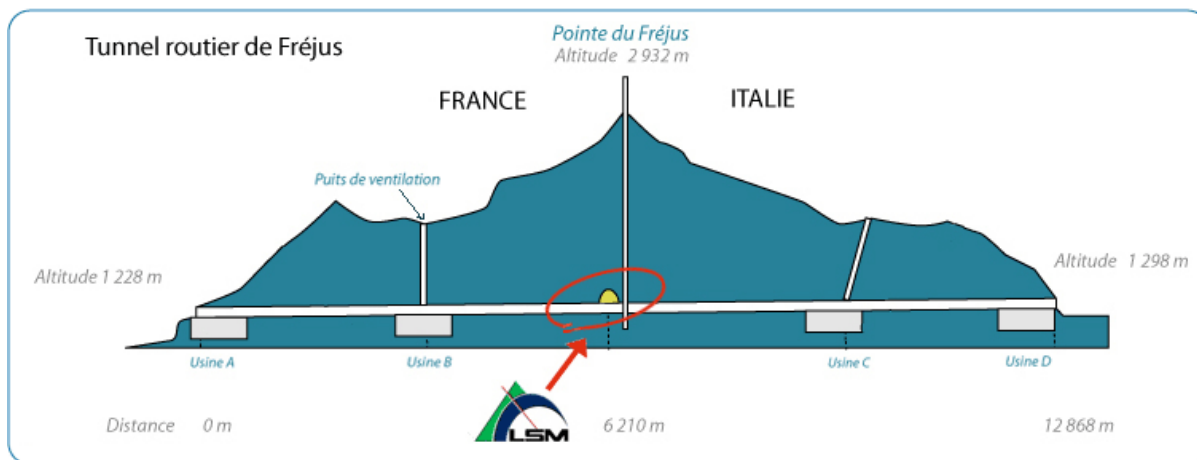
Types d'expériences

◆ Expériences d'astroparticules

- elles visent à détecter et étudier les flux de particules en provenance du ciel

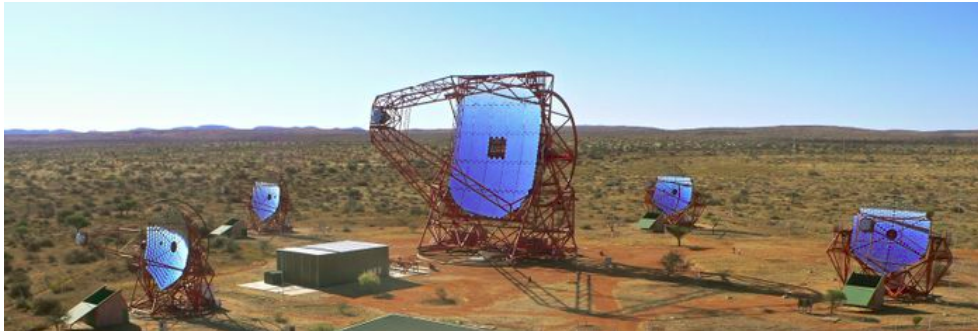
◆ Expériences neutrinos/matière noire

- interactions très rares (signal très faible)
- bruit de fond important provenant principalement du rayonnement cosmique
- il faut se débarrasser des particules les plus pénétrantes (les muons)
- pour cela, on enterre les expériences et on blinde les détecteurs

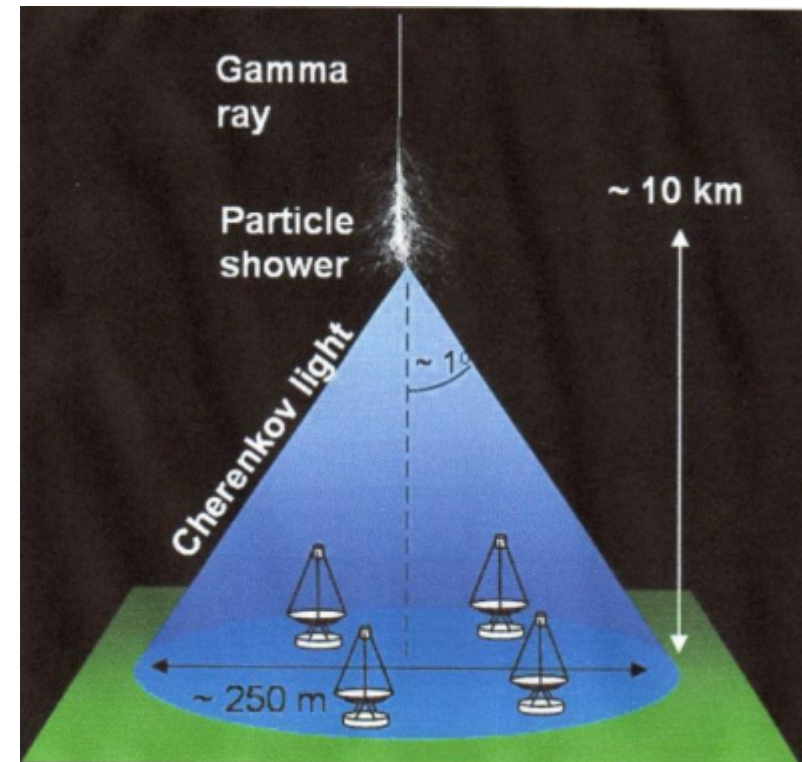


HESS (High Energy Stereoscopic System)

- ◆ Ensemble de télescopes installé depuis 2003 sur un haut plateau de Namibie
 - hémisphère Sud \Rightarrow pointe vers le centre de notre galaxie
- ◆ Mesure des **photons** d'énergie entre 100 GeV et > 100 TeV
 - 4 télescopes avec un miroir de 12 m de diamètre qui comporte 382 facettes
 - 1 télescope avec un miroir de 28 m placé au centre

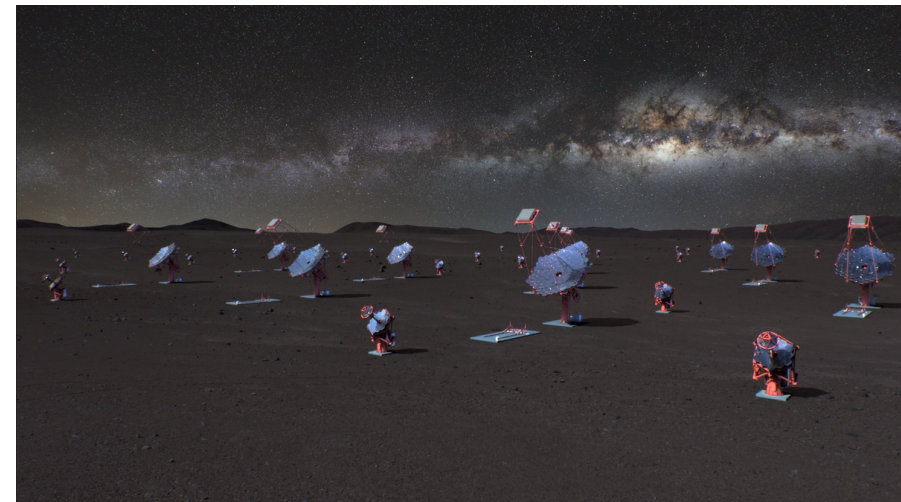
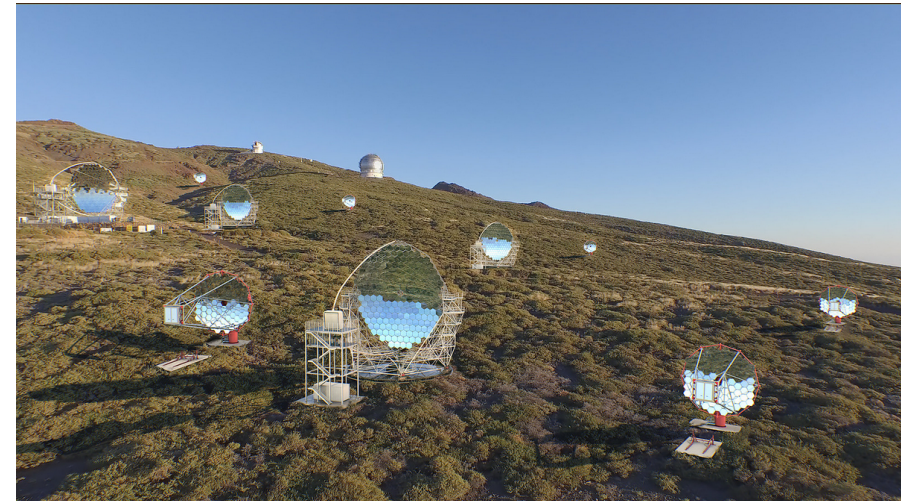


- ◆ Principe :
 - le rayon gamma interagit avec les atomes de l'atmosphère et crée une gerbe composée d'un grand nombre d'électrons et de photons
 - ces derniers vont créer des flash de lumière par effet Čerenkov
 - flash de lumière lorsqu'une particule chargée va plus vite que la vitesse de la lumière dans un milieu di-électrique
 - nécessite de très bonnes conditions d'observation: nuit sans lune, pas de pollution lumineuse, etc



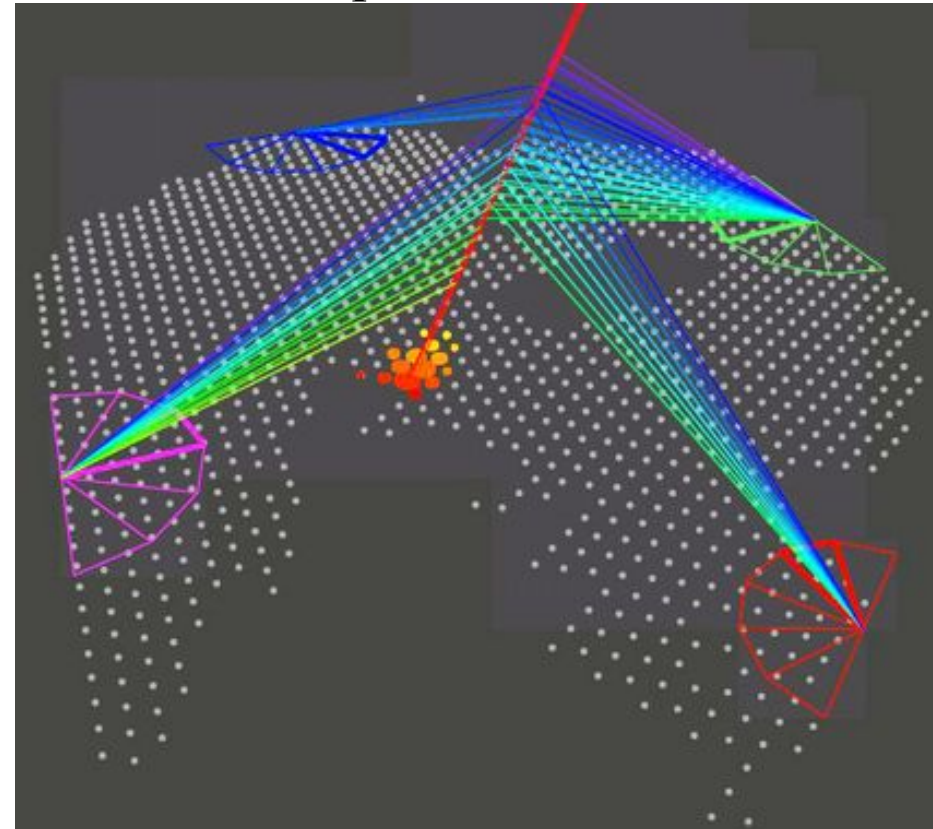
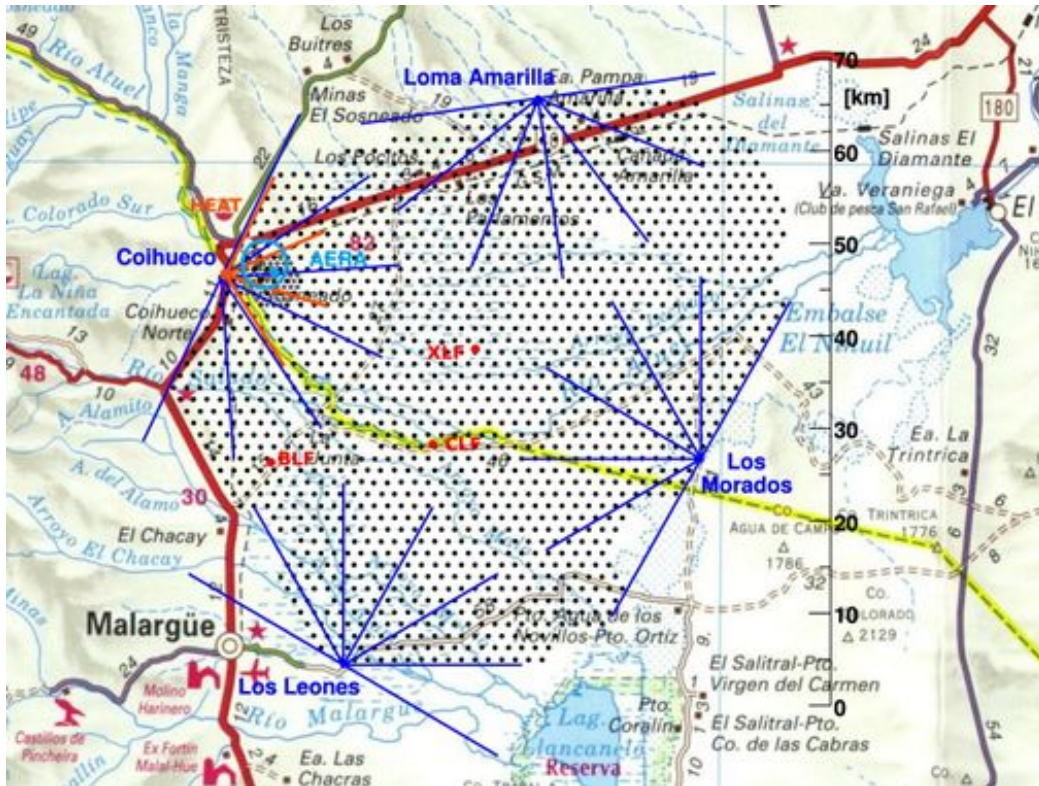
CTA (Cherenkov Telescope Array)

- ◆ Plus de 60 télescopes, soit une zone de collecte de plusieurs kilomètres carrés
- ◆ Plus de 3 000 facettes de miroir à haute réflexion (90 cm à 2 m de diamètre) pour focaliser la lumière sur les caméras des télescopes
- ◆ Trois classes de télescopes pour fournir une large couverture énergétique allant de 20 GeV à 300 TeV
- ◆ Deux sites :
 - aux Canaries (sources extra-galactiques)
 - au Chili (multiples sources de la région centrale de la galaxie)
- ◆ Prototype LST-1 installé en 2018 dans le site Nord
- ◆ Démarrage prévu en 2025



Observatoire Pierre Auger

- ◆ Études des rayons cosmiques d'**ultra-haute énergie** ($> 10^{19}$ eV)
 - 1 particule /siècle /km²
- ◆ 1600 stations réparties sur une surface de 3600 km² en Argentine
 - remplies de 10000 L d'eau (technique Čerenkov)
- ◆ 4 télescopes utilisant la technique de fluorescence sur le pourtour



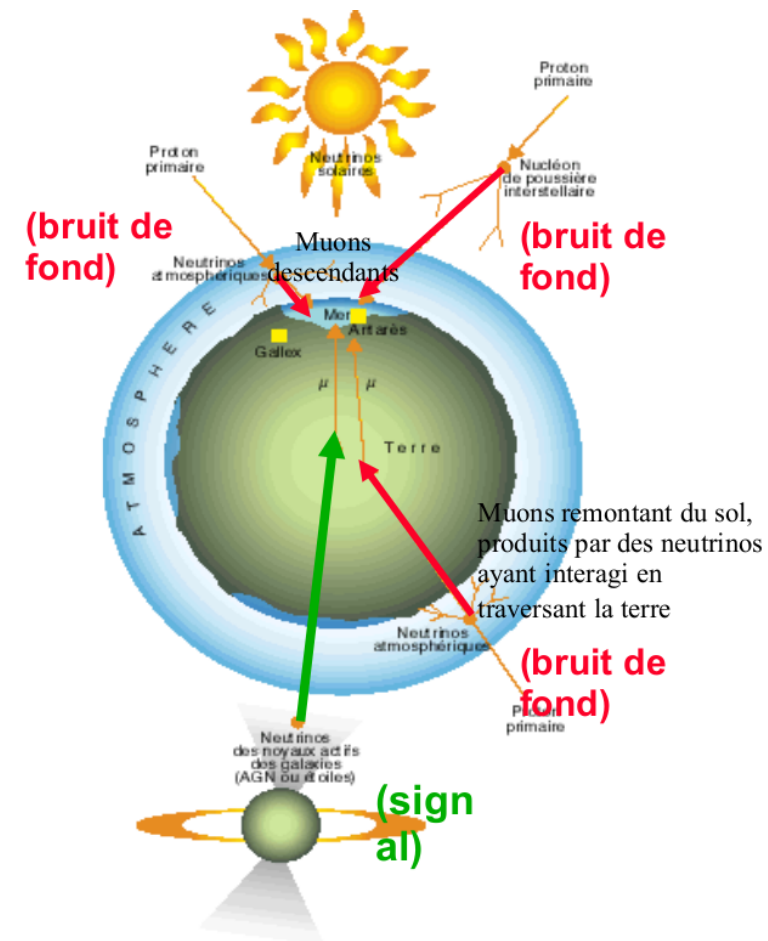
- ◆ Origine extra-galactique des rayons ultra-énergétique (> 4 EeV) confirmée

Origine des neutrinos

- ◆ Neutrinos **atmosphériques** : ν_{μ} et ν_e
 - sous-produits des gerbes cosmiques
 - expérience (Super-)Kamiokande (Japon)
- ◆ Neutrinos **solaires** : ν_e
 - le soleil est une usine à neutrinos (neutrinos mous)
 - expériences Sage (1990-2001, Russie), Gallex, (1991-1997, Grand Sasso Italie), SNO (1999-2006, Ontario Canada), Borexino (mai 2007, Grand Sasso)
- ◆ Neutrinos **galactiques** et extragalactiques : ν_{μ} et ν_e
 - issus de l'explosion d'étoiles (**supernovæ**), et d'éventuelles autres sources (noyaux actifs de galaxie, pulsars) (exemple de la supernovæ 1987-A)
 - ex.: Amanda (1996-2005, Antarctique), IceCube (2005-2011, Antartique), Antarès (2008-2022, Méditerranée), KM3NeT (2015, -, Méditérannée)
- ◆ Une expérience observe **plusieurs types** de neutrinos
 - Elle n'a pas le choix (signal + bruit de fond)
 - Ex. : (Super-)Kamiokande
 - au départ étude des neutrinos solaires
 - puis neutrinos atmosphériques,
 - et maintenant neutrinos de faisceaux d'accélérateurs...

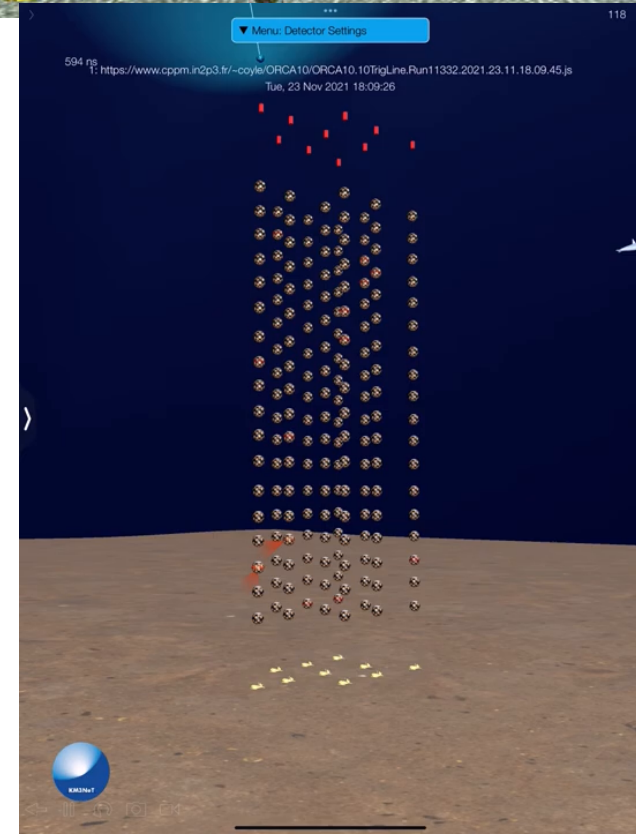
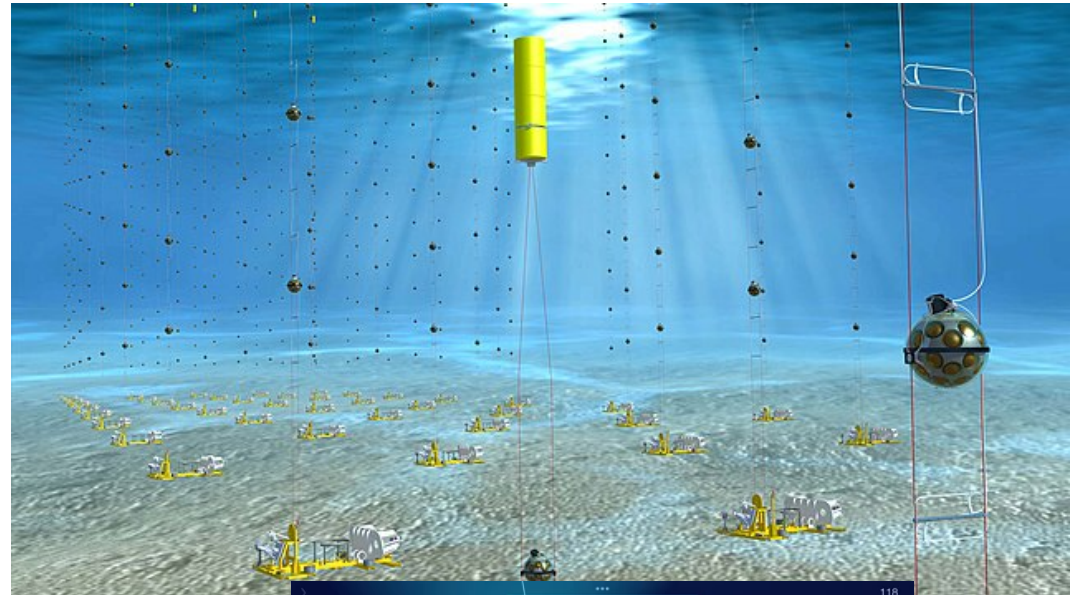
Télescopes à neutrinos (1)

- ◆ La **Terre** sert de **cible** pour les neutrinos et de filtre pour bloquer les autres particules
 - un neutrino de haute énergie interagit dans la croûte terrestre, un muon est produit, dans la même direction
- ◆ Le muon peut parcourir jusqu'à une dizaine de km dans la croûte terrestre et émerger dans la **mer** ou la **glace**
 - sert de milieu détecteur du rayonnement Čerenkov
 - sert de filtre pour réduire le flux de muons atmosphériques
- ◆ La direction du muon, c'est-à-dire celle du neutrino étant déterminée, il est possible de **pointer l'origine** du neutrino.
- ◆ On recherche des muons montants et on observe le ciel à travers de la Terre
- ◆ Énergie : entre 10^{10} et 10^{14} eV



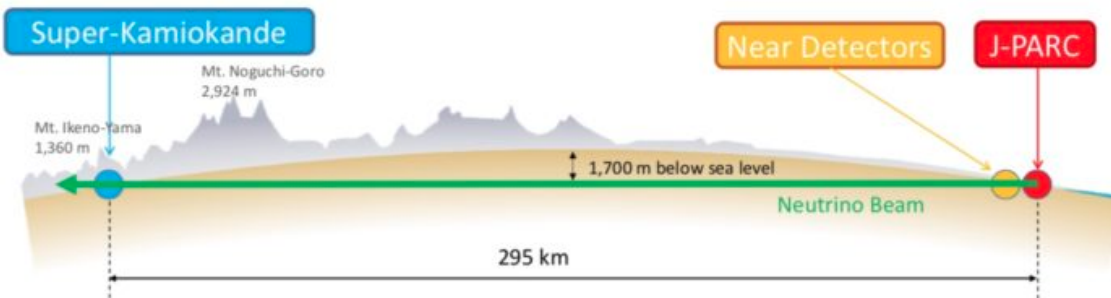
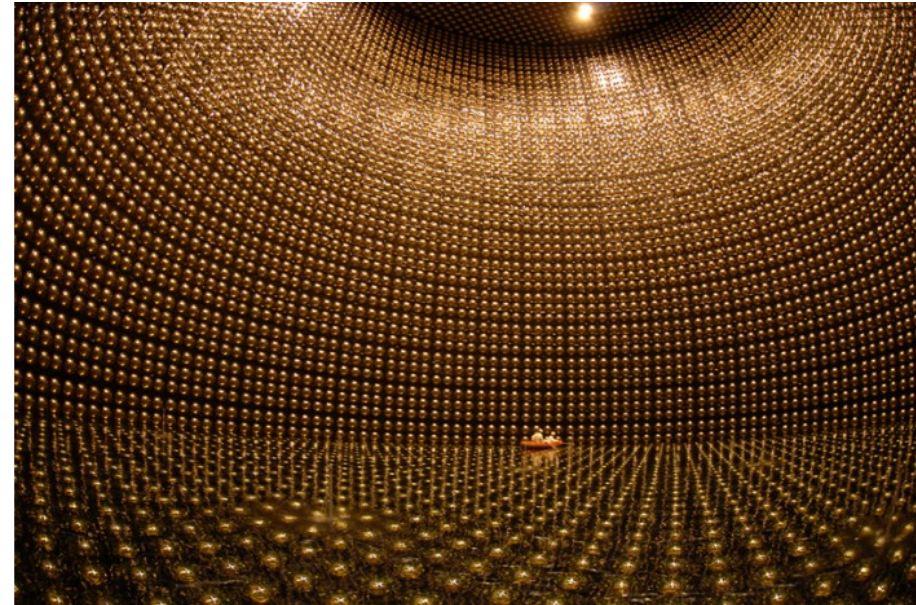
Télescopes à neutrinos (2)

- ◆ À ~2500 m de profondeur
- ◆ Premier télescope sous-marin: ANTARES de 2008 à 2022
- ◆ Successeur : **KM3NeT** (Cubic Kilometre Neutrino Telescope)
 - collaboration avec l'Ifremer : salinité, courants, marins, vie bioluminescente
- ◆ Deux sites :
 - ORCA (au large de La Seyne-sur-Mer)
 - 115 lignes prévues
 - ARCA (au large de la Sicile)
 - 230 lignes prévues
- ◆ En cours d'installation
 - détecteurs complets prévus en 2027



T2K (Tokai To Kamioka)

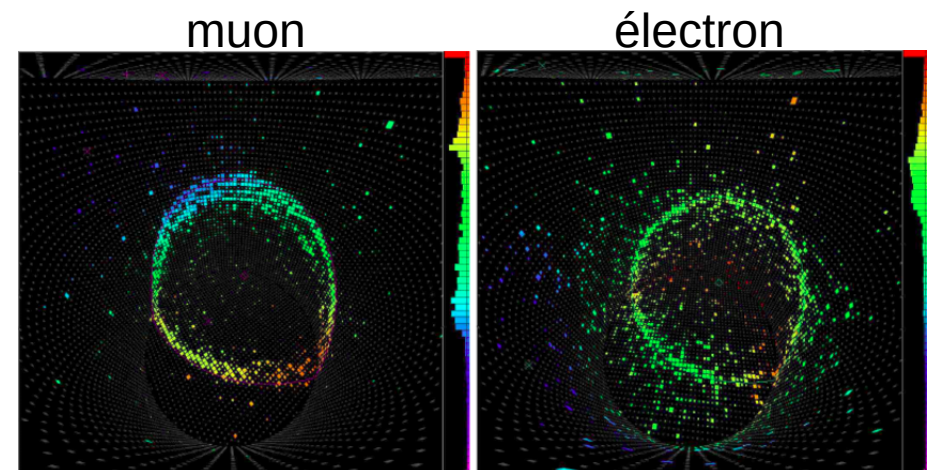
- ◆ Expérience SuperKamiokande
 - 50000 t d'eau
 - 11000 photomultiplicateurs
- ◆ Faisceau de neutrinos par accélérateur



- ◆ Le neutrino va (parfois) interagir avec un noyau d'oxygène de l'eau
- ◆ L'électron ou le muon créé va émettre un rayonnement Cherenkov
 - émis dans un cône centré sur la trajectoire, d'ouverture angulaire θ

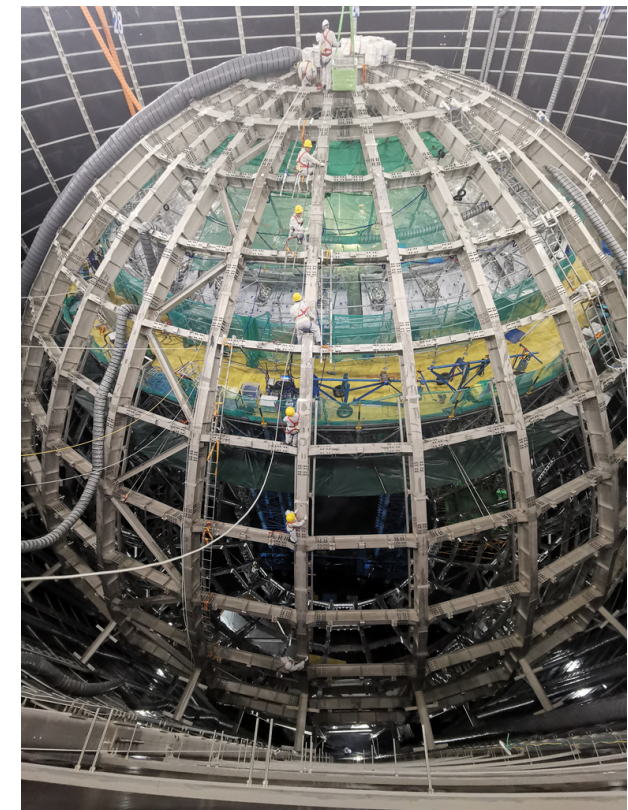
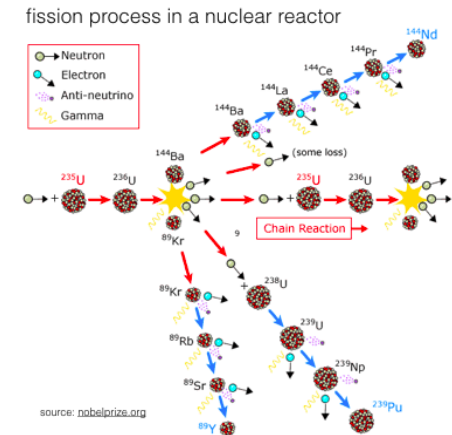
$$\cos \theta = \frac{1}{\beta n}, \quad \beta = \frac{v}{c}$$

- ◆ Kamiokande en 1982
- ◆ Super-Kamiokande en 1996
- ◆ T2K : depuis 2010
- ◆ Hyper-Kamiokande :
20 fois + grand, 2027



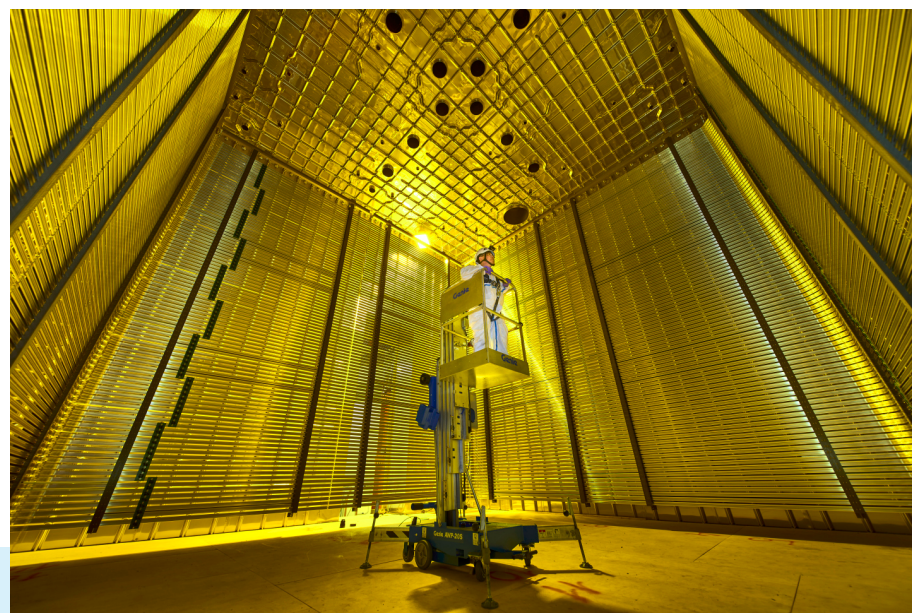
JUNO (Jiangmen Underground Neutrino Observatory)

- ◆ Détecteur d'antineutrinos émis par les **réacteurs nucléaires**
- ◆ But : ordre des masses des neutrinos + oscillation
- ◆ Sphère transparente de 35.4 m de diamètre
 - remplie de 20 000 tonnes de liquide scintillant
 - 42 000 photo-multiplicateurs répartis tout autour
 - enterré à 700 m de profondeur
- ◆ Mise en service prévue en 2024

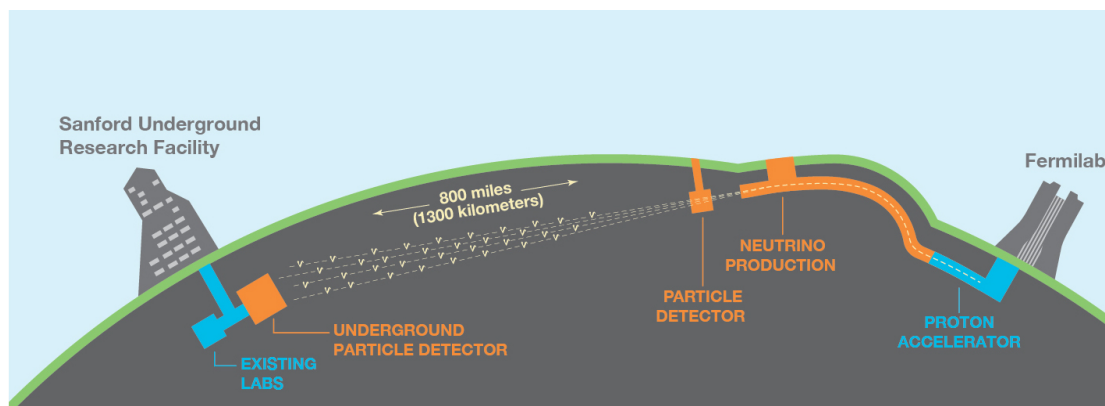


DUNE (Deep Underground Neutrino Experiment)

- ◆ Détecteur de neutrinos issus de faisceaux
- ◆ But : l'origine, la nature, les masses et le mélange des neutrinos
- ◆ Faisceau de (anti)neutrinos muoniques produit par accélérateur au Fermilab (Chicago) et orienté vers le détecteur lointain de DUNE



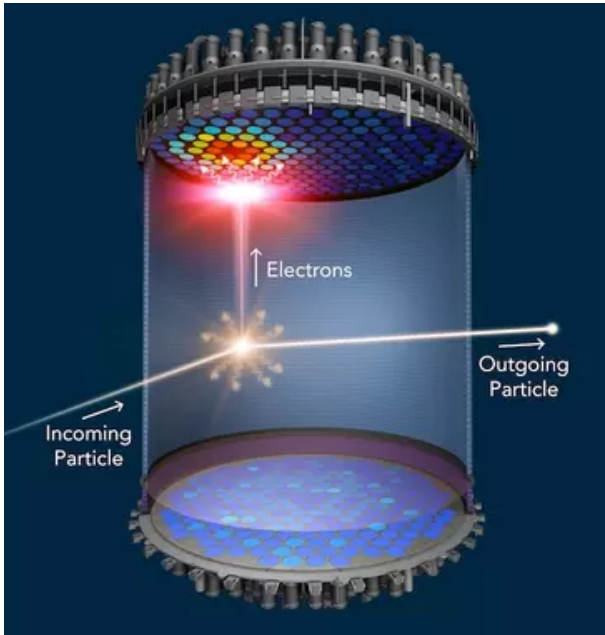
Cryostat de Proto-Dune (1/20ème de Dune)



- ◆ Quatre modules de détection
 - chaque module contient 17 kt d'argon liquide et est instrumenté en chambre à projection temporelle (TPC) afin d'étudier finement les interactions des neutrinos avec l'argon
- ◆ Démarrage prévu en 2029

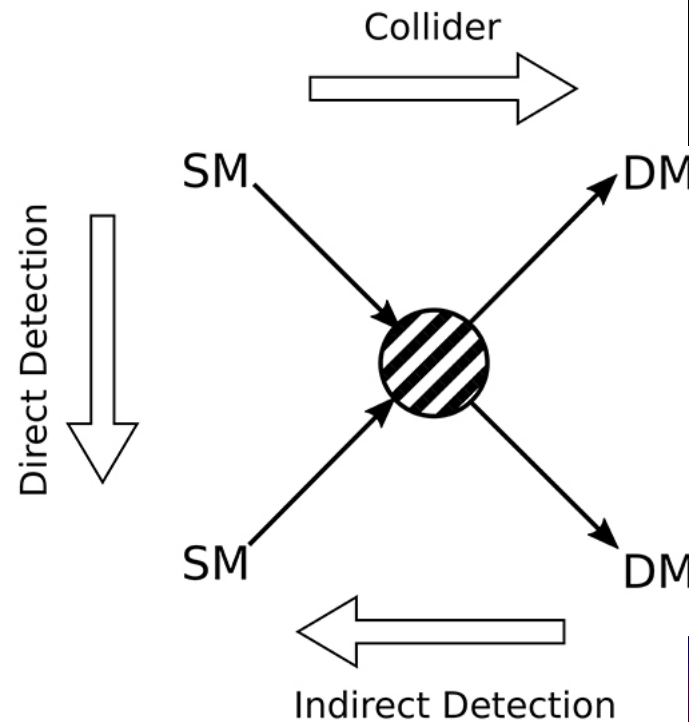
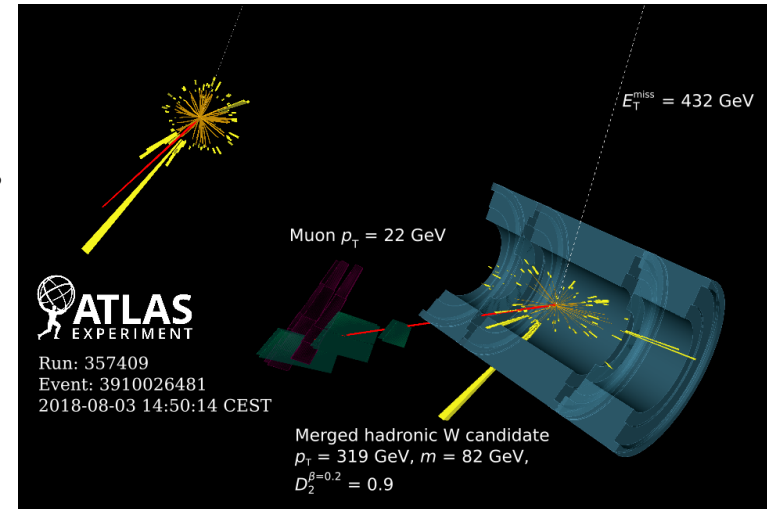
Méthodes de détection de la matière noire (DM)

*Physique particules,
astroparticules et cosmologie*

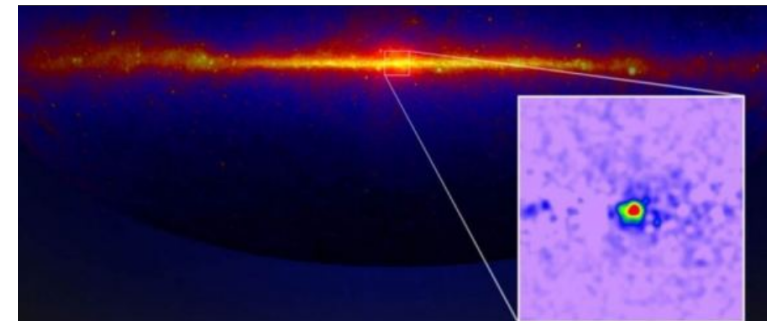


En passant à travers le halo de matière noire, une particule de DM peut taper dans un atome. On mesure le recul de cet atome.

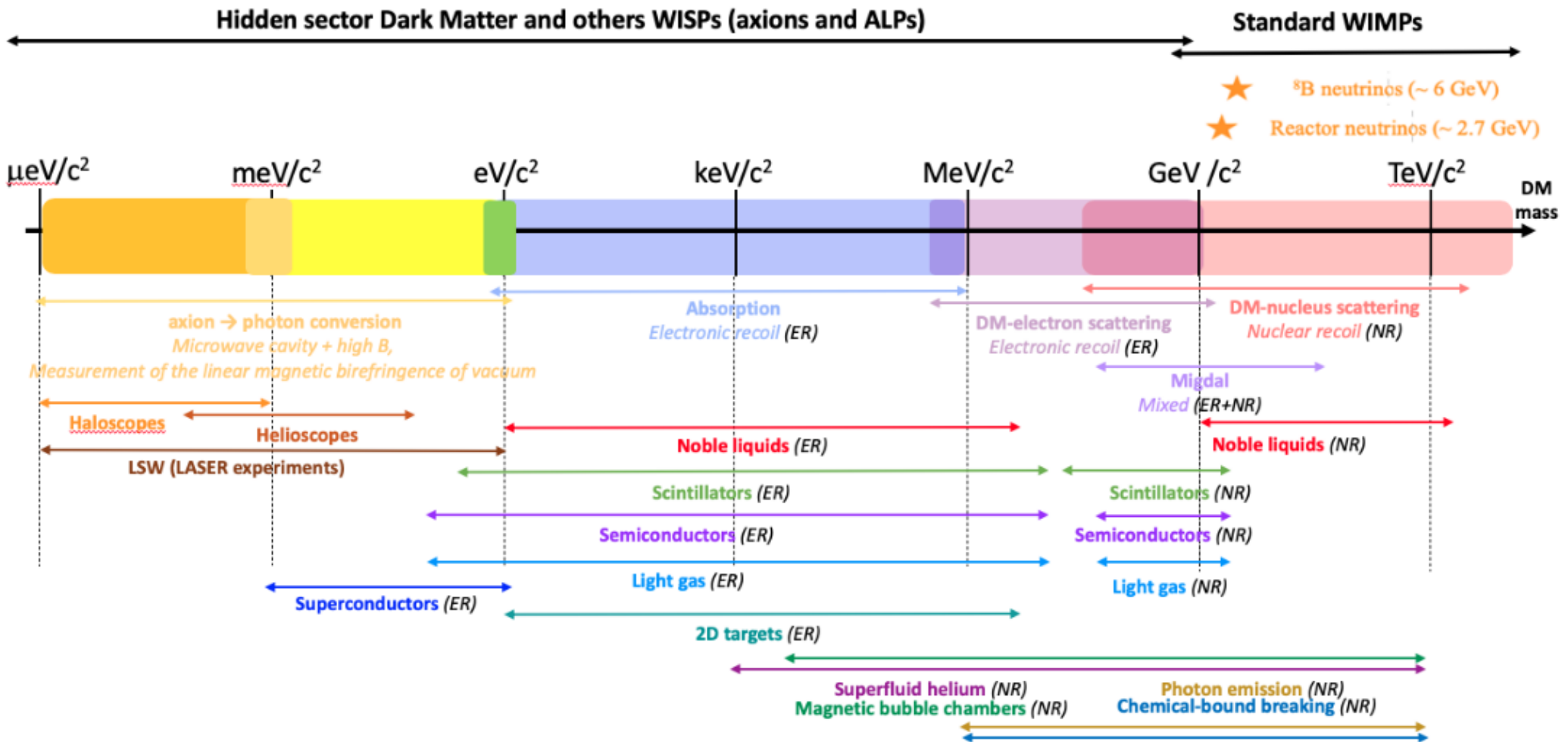
Une particule de DM est créée par un collisionneur. Elle s'échappe du détecteur, créant un déficit d'énergie



Deux particules de DM s'annihilent, ou une particule de DM se désintègre, en matière ordinaire (photons γ , rayons cosmiques, neutrinos)

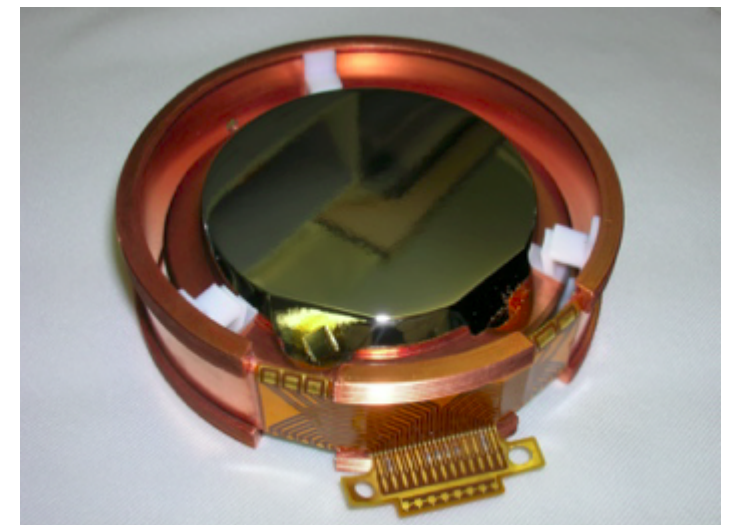
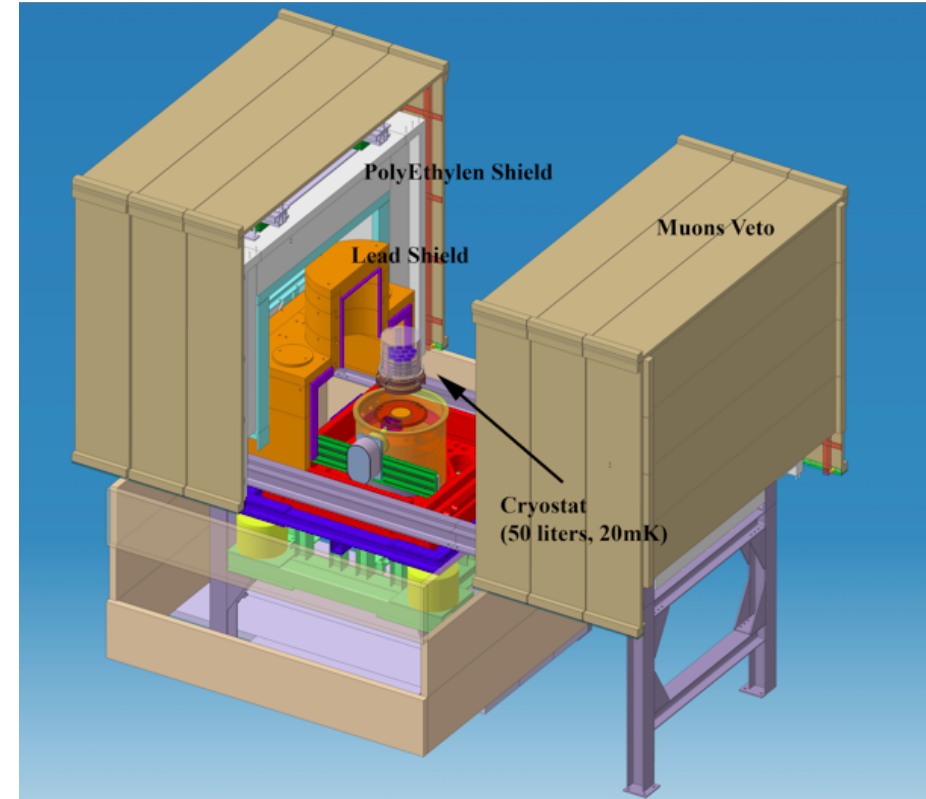


Détection directe de matière noire



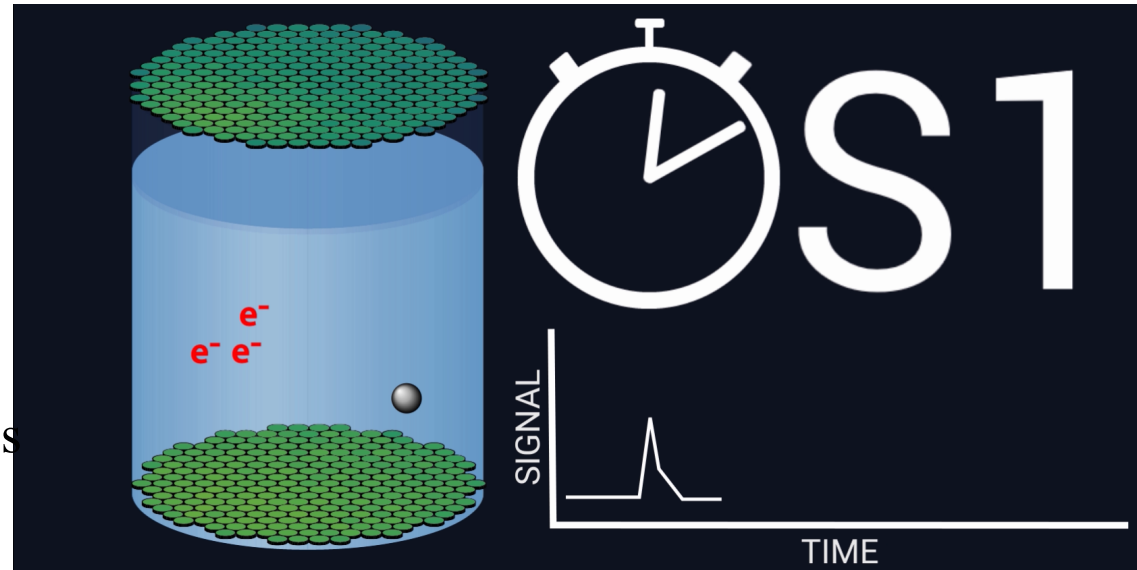
EDELWEISS

- ◆ Recherche directe de matière noire
- ◆ Cherche à mesurer la chaleur produite par les chocs dans des détecteurs germanium refroidis à 20 mK, et aussi à identifier les charges issues de ceux-ci
- ◆ Dans le tunnel de Modane (1700m de roche) + 40 t de plomb et de polyéthylène
- ◆ Les détecteurs sont des **bolomètres** constitués de cristaux de germanium hyper-purs, recouverts d'électrodes et sur lesquels est collée une thermistance en germanium dopé, sensible à des variations de températures subites de moins de 1 mK
- ◆ Depuis 1998

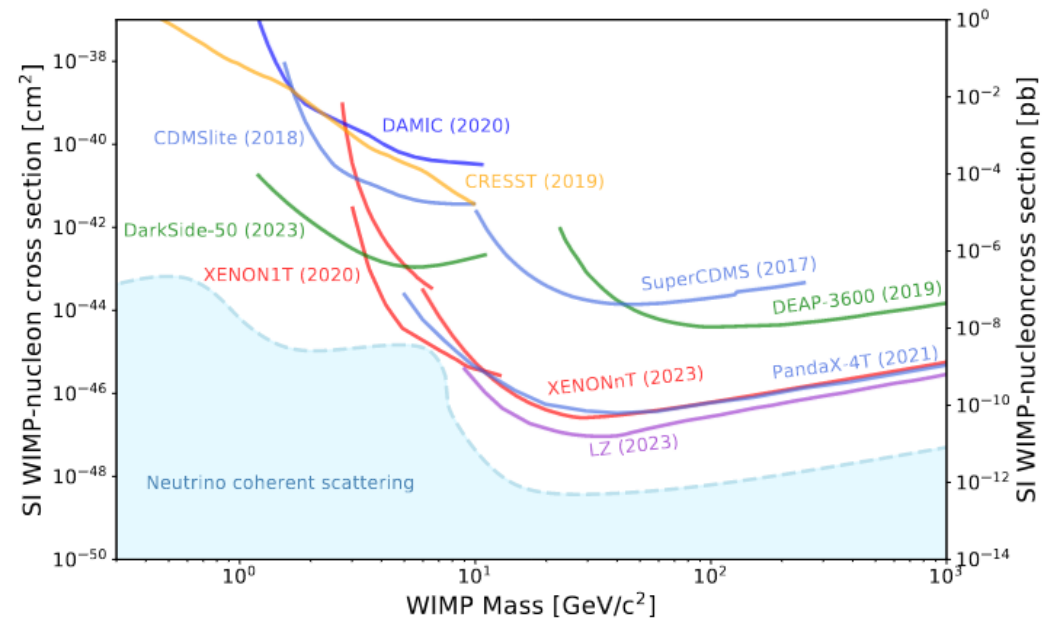


Recherche directe avec gaz nobles

- ◆ Recherche directe de matière noire
- ◆ Chambre à projection temporelle (TPC) à double phase
 - peut mesurer indépendamment la lumière et les signaux de particules chargées \Rightarrow reconstruction de la position et de l'énergie, identification des particules



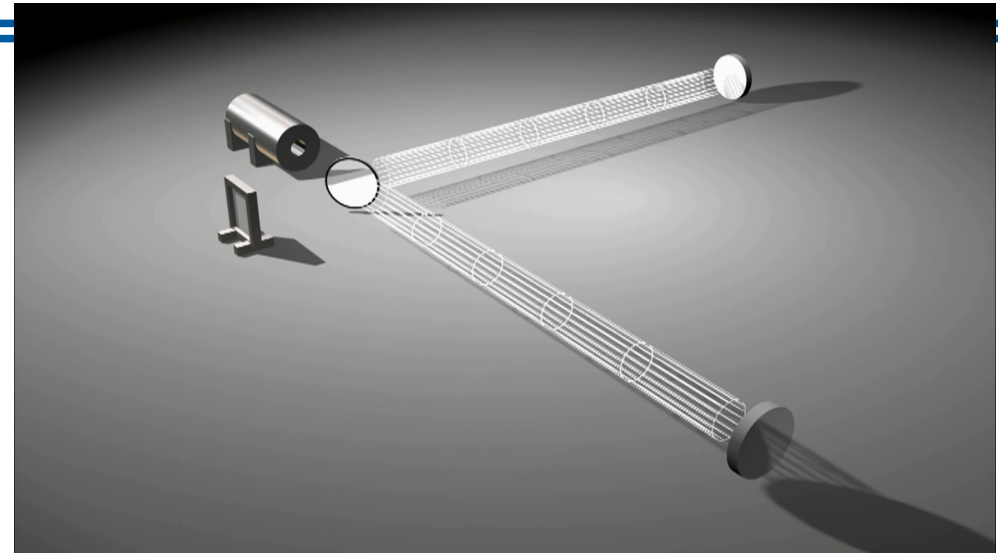
- ◆ Plusieurs générations de détecteurs
 - xenon : XENON (2006) \rightarrow XENONnT (2021) \rightarrow DARWIN (2026)
 - argon : Darkside50 (2014) \rightarrow Darkside20k (2026)



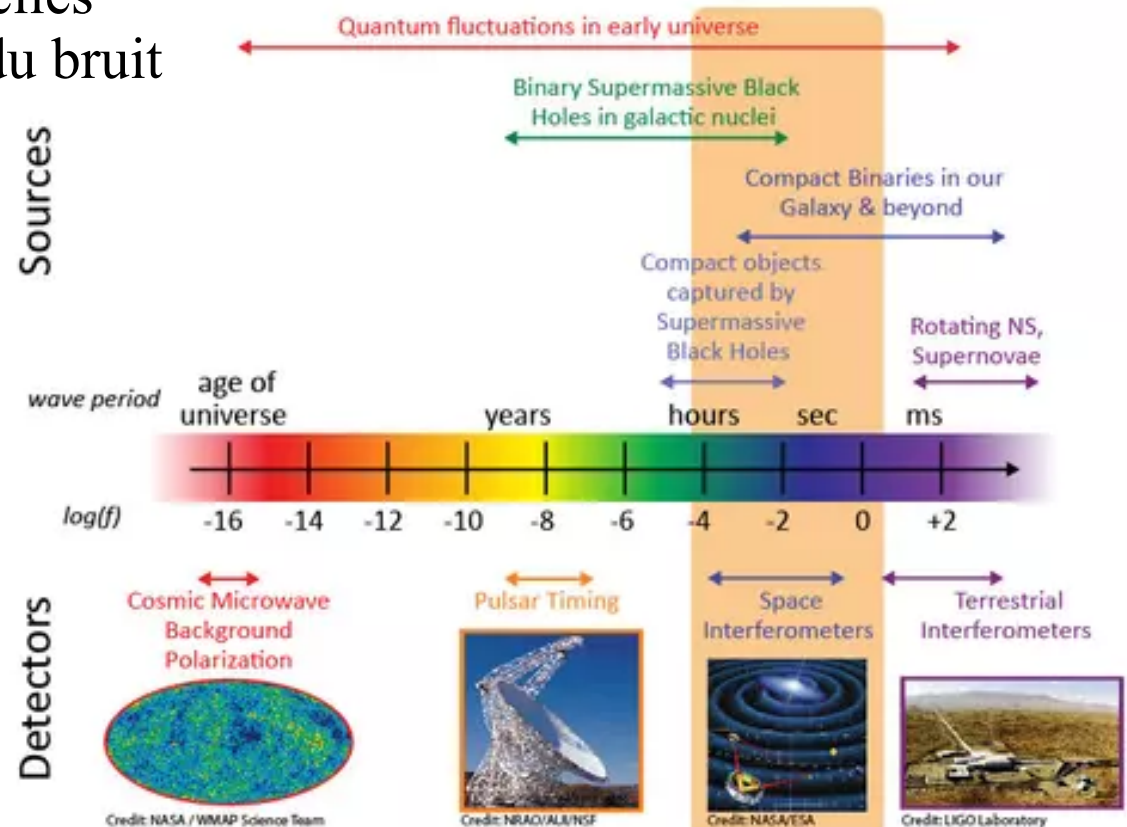
Ondes gravitationnelles

Ondes gravitationnelles

- ◆ Interféromètres capables de détecter le passage d'une onde gravitationnelle qui provoquerait une variation différentielle de longueur des bras de 10^{-19} m
- ◆ Principale difficulté : distinguer les signaux d'ondes gravitationnelles réels et extrêmement faibles du bruit

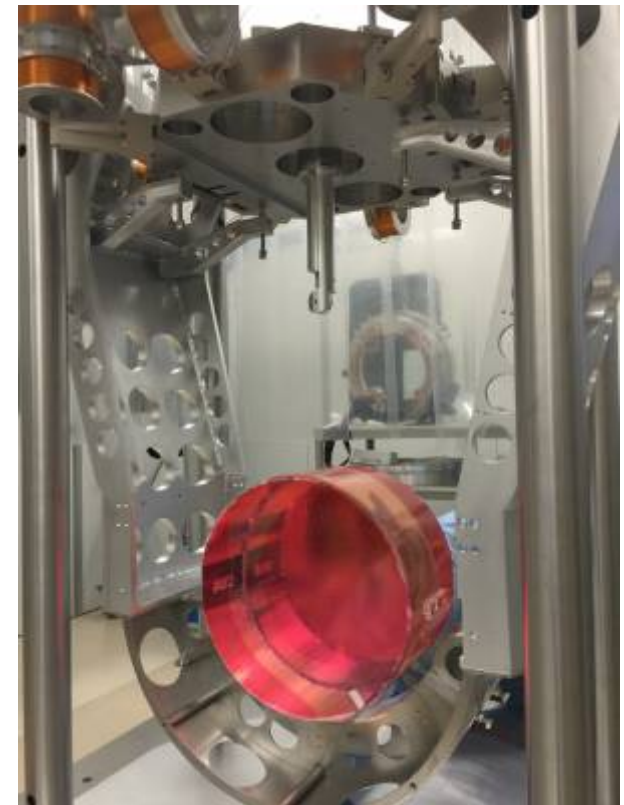


The Gravitational Wave Spectrum



Ondes gravitationnelles : VIRGO

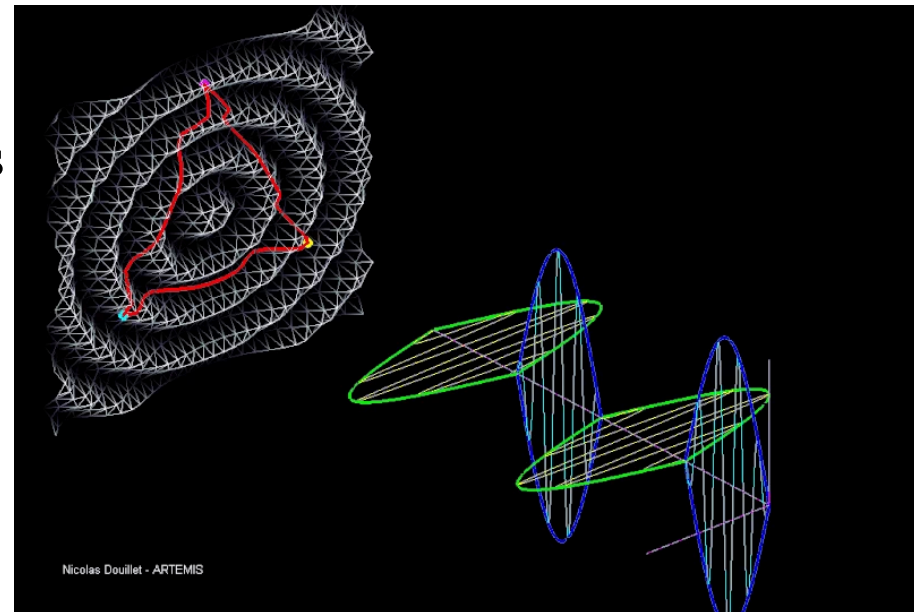
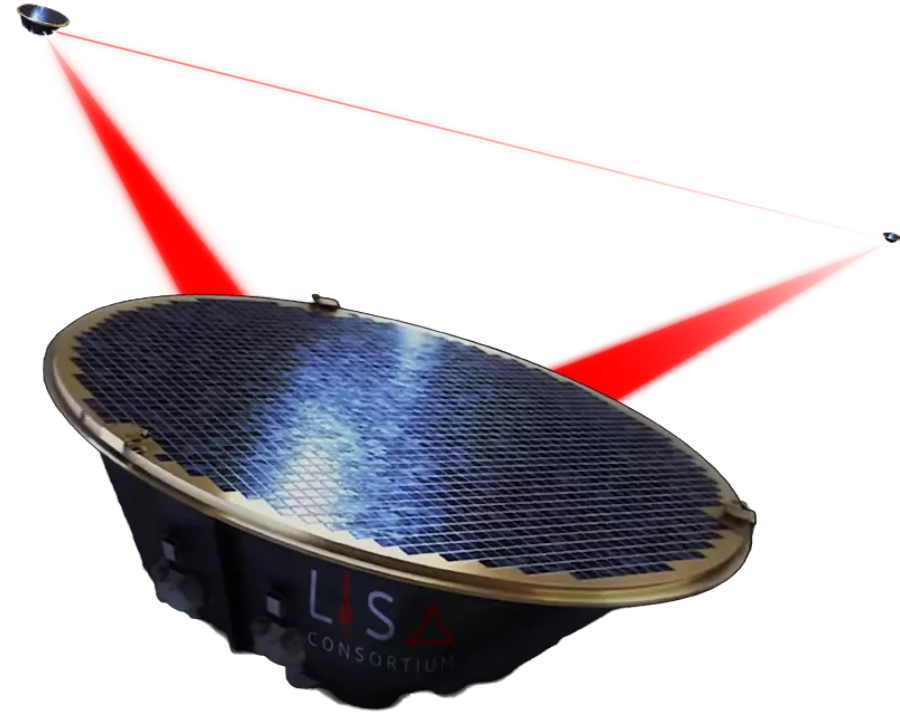
- ◆ Un **interféromètre de Michelson** avec deux bras de 3 km, sensibles à des variations de longueur d'un milliardième de milliardième de mètre
- ◆ Des **tubes à vide** de 120 cm de diamètre et où la pression résiduelle est de l'ordre du millième de milliardième d'atmosphère
- ◆ Des **miroirs** de 40 kg de verre ultra pur, avec une **planéité supérieure au nanomètre** et totalement isolés du bruit sismique
- ◆ Un réseau de collaboration mondial avec LIGO (USA), KAGRA (Japon), et dans les années à venir LIGO-India
- ◆ Prise de données depuis 2016 (Advanced VIRGO)



Miroir suspendu par quatre fibres de silice fondue

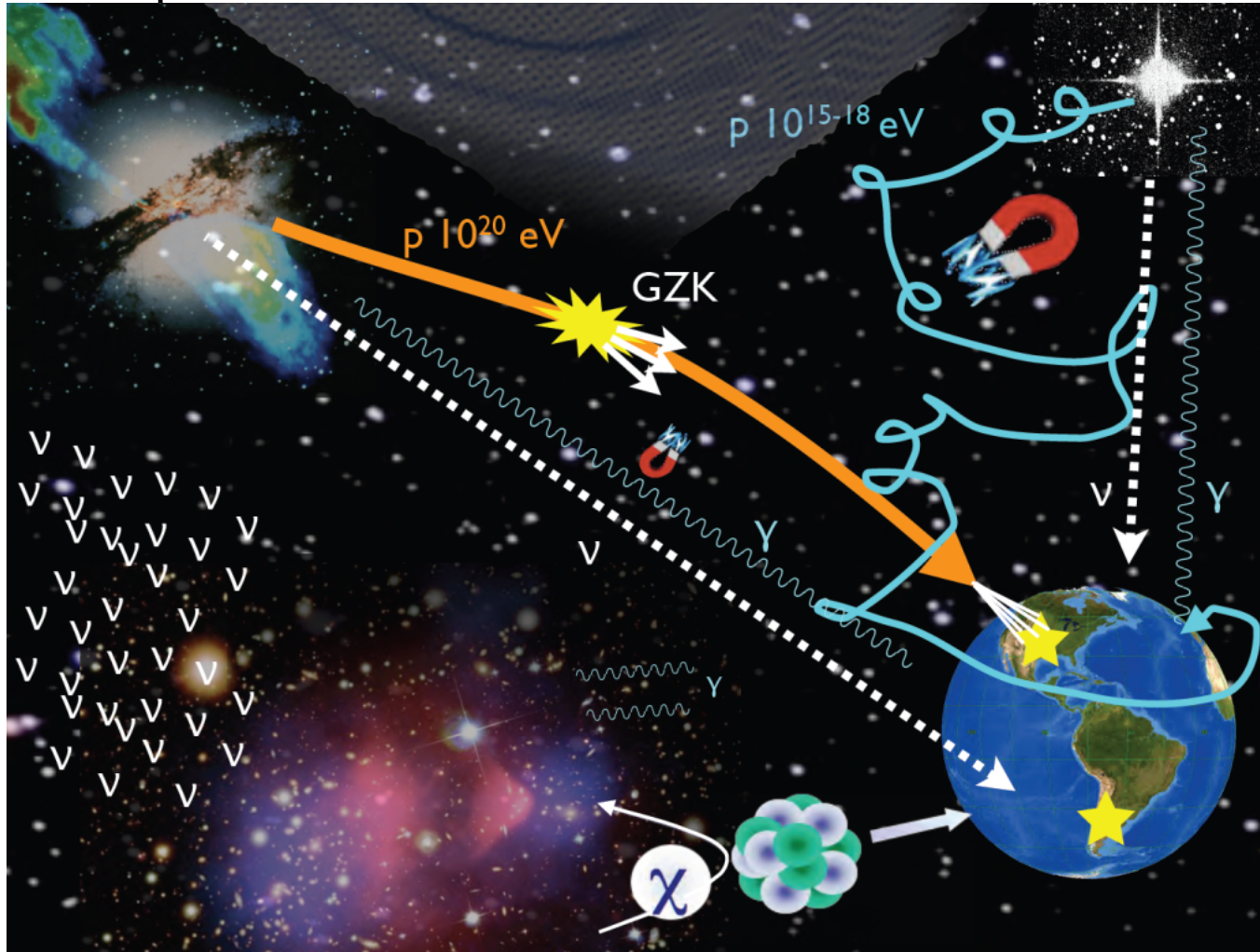
Ondes gravitationnelles : LISA TO THE FUTURE

- ◆ Même principe... **dans l'espace !**
- ◆ But : détection des ondes gravitationnelles basses fréquences (entre 0,1 et 100 mHz)
- ◆ Trois satellites distants de 2,5 millions de km échangeant des liens lasers et formant un interféromètre spatial géant
 - chaque satellite contient et protège des perturbations externes deux masses cubiques de 2 kg en chute libre
 - une interférométrie de haute précision permet de reconstituer les fluctuations de distance entre ces masses inertielles avec une précision d'une dizaine de picomètres sur 1 000 secondes.
- ◆ 2015-2017 : démonstrateur LISA Pathfinder
- ◆ Approuvé par l'ESA en janvier 2024
- ◆ Lancement prévu vers 2035



Astronomie multi-messagers (1)

- ◆ Propagation des particules dans l'espace différente suivant la nature et l'énergie de la particule



- ◆ Utile d'avoir plusieurs types de détecteurs de concert
⇒ astronomie multi-messagers !

Astronomie multi-messagers (2)

◆ Exemple du sursaut gamma GW170817:

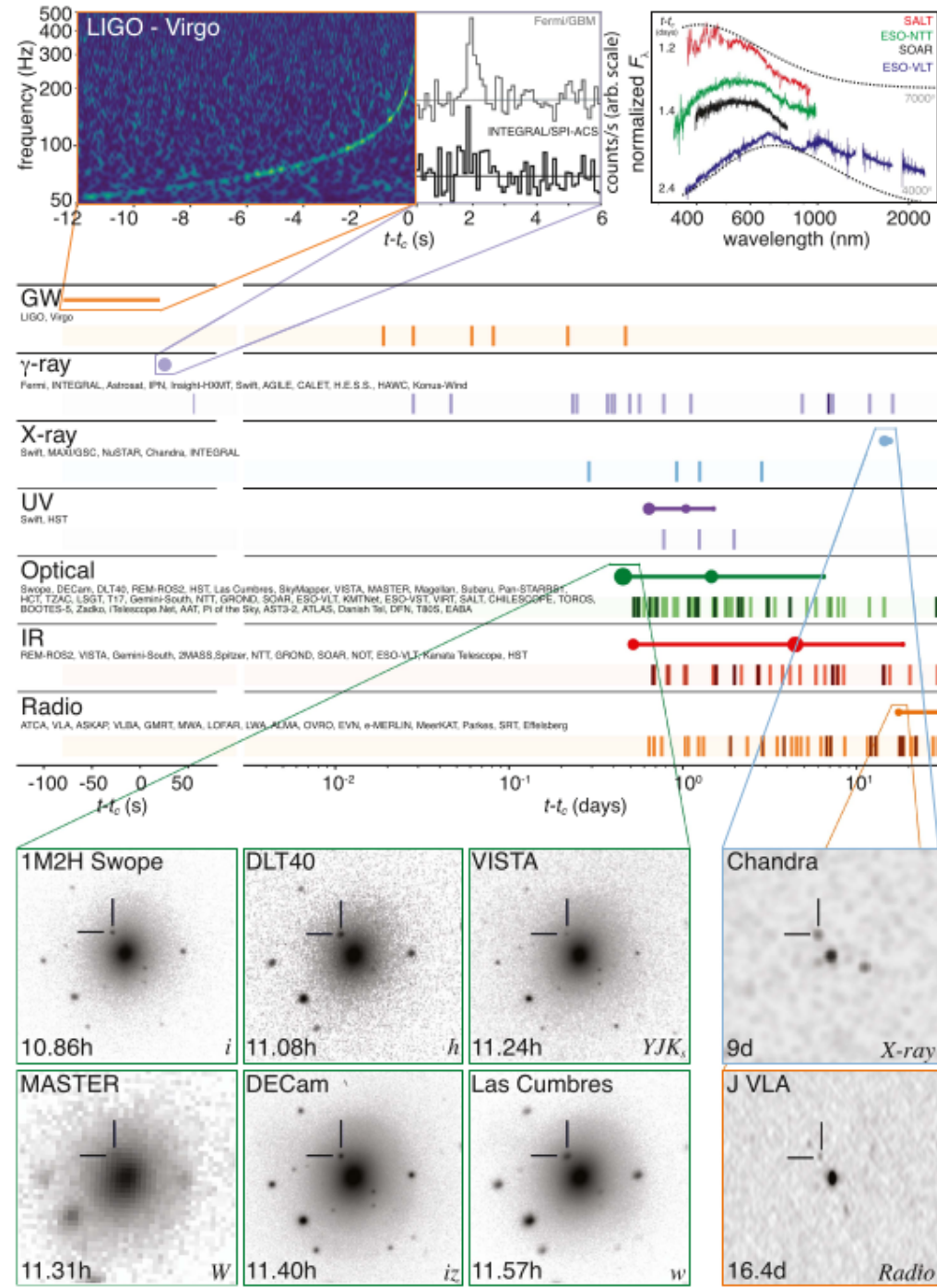
- *en premier* : les ondes gravitationnelles
- *2 secondes après* : rayons γ par satellites FERMI et INTEGRAL
- *10-15h plus tard* : rayons infrarouge et ultraviolet par télescopes
- *9 jours*: rayons X par télescopes
- *16 jours* : ondes radio par radio-télescopes
- pas de neutrinos observés
- conclusion : fusion de deux étoiles à neutrons

◆ Observables :

- photons
- neutrinos
- rayons cosmiques
- ondes gravitationnelles

◆ Système d'alerte mondial

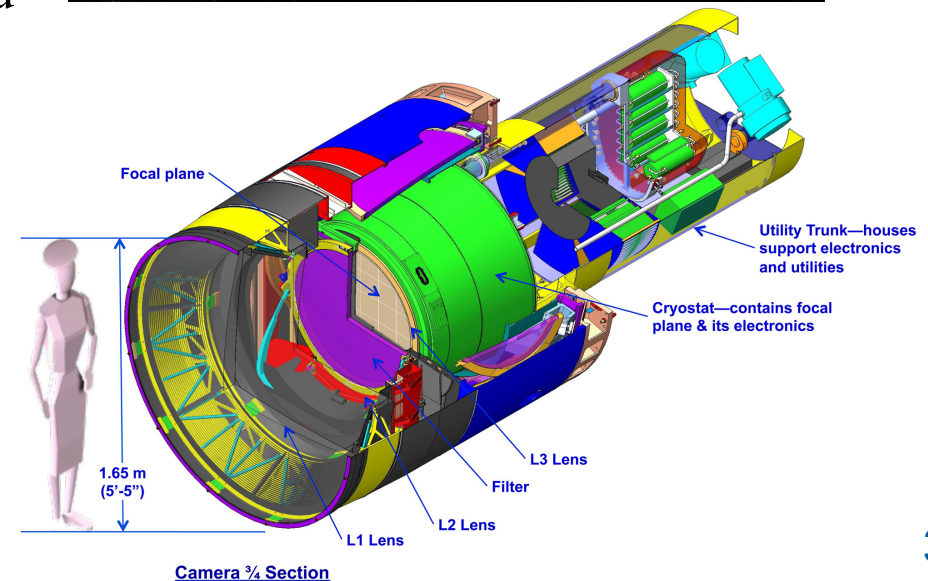
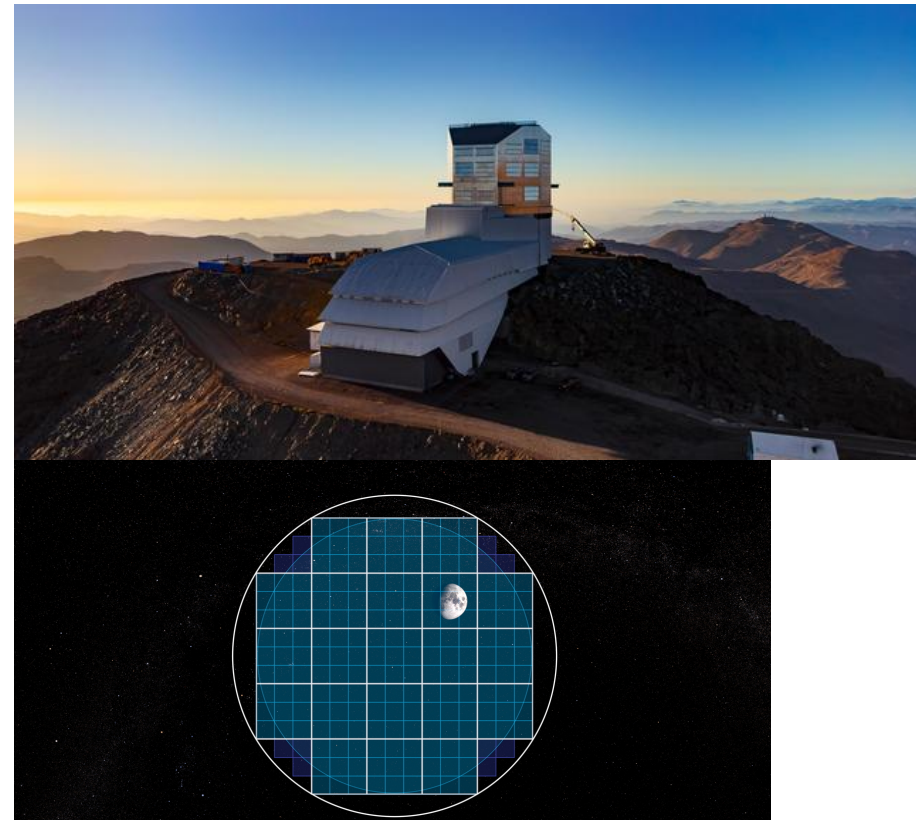
- appli **Astro-Colibri**



Cosmologie

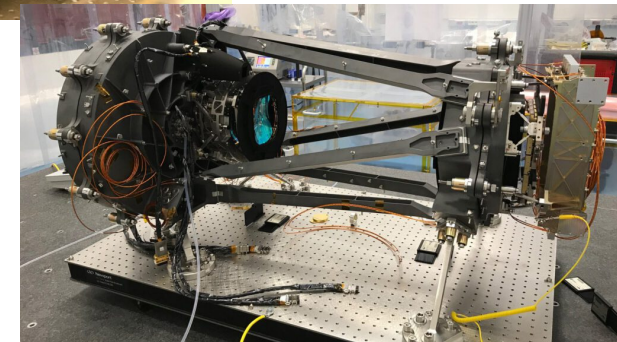
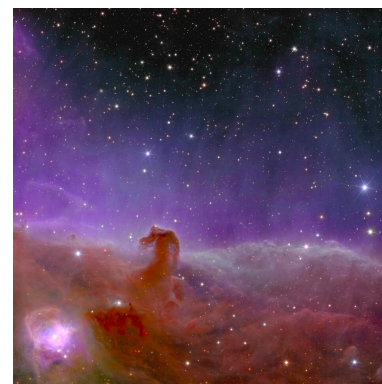
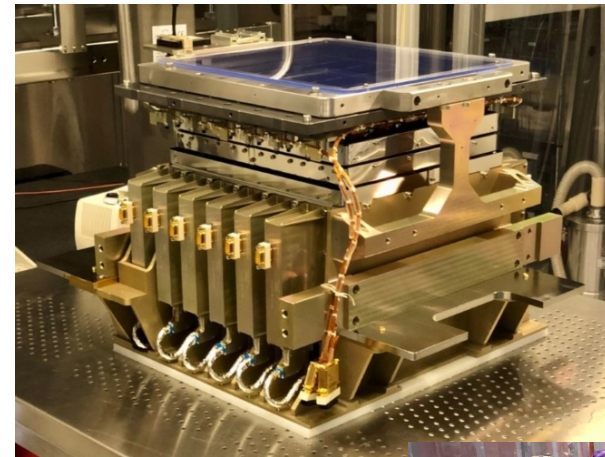
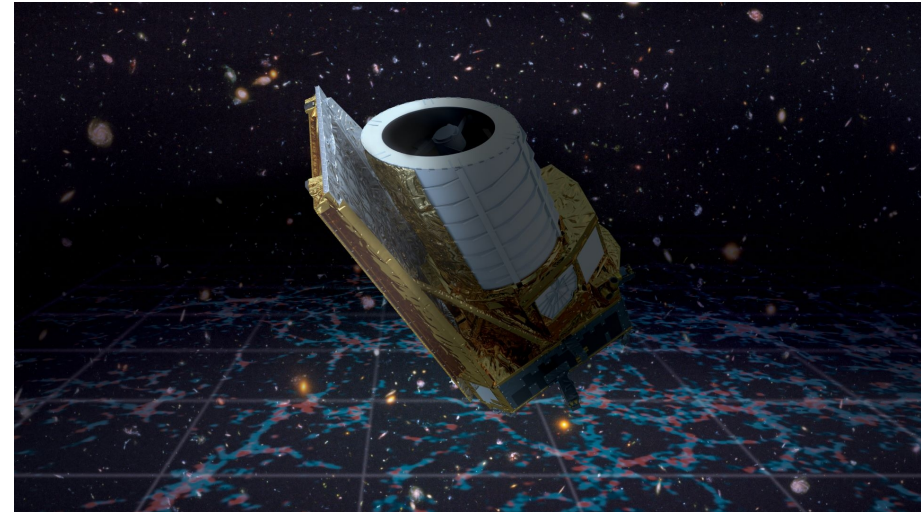
LSST (Legacy Survey of Space and Time) TO THE FUTURE

- ◆ Télescope à l'observatoire Rubin (Chili)
- ◆ But : déterminer la nature de l'énergie noire et de cartographier la matière noire (+ astronomie)
- ◆ Composé de 3 miroirs
 - champ de vue très large :
9.6 deg² (40 pleines lunes)
- ◆ Caméra de 3.2 Gpixels répartis sur 201 CCD
 - 3 lentilles correctrices
 - système de filtres pour l'observation du ciel en 6 longueurs d'onde différentes
- ◆ Observation du ciel nocturne austral pendant 10 ans
 - couverture complète du ciel en trois nuits, 800 fois
- ◆ Début des opérations en 2025

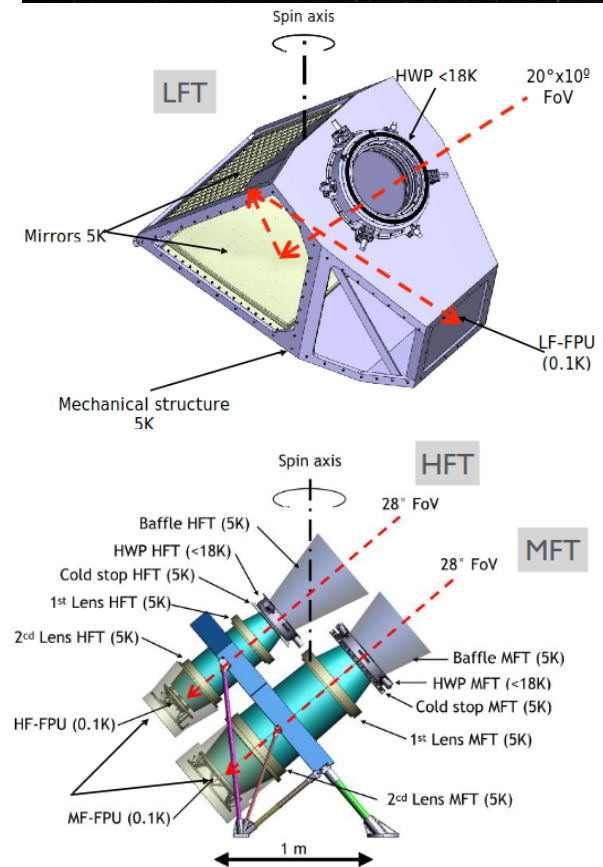
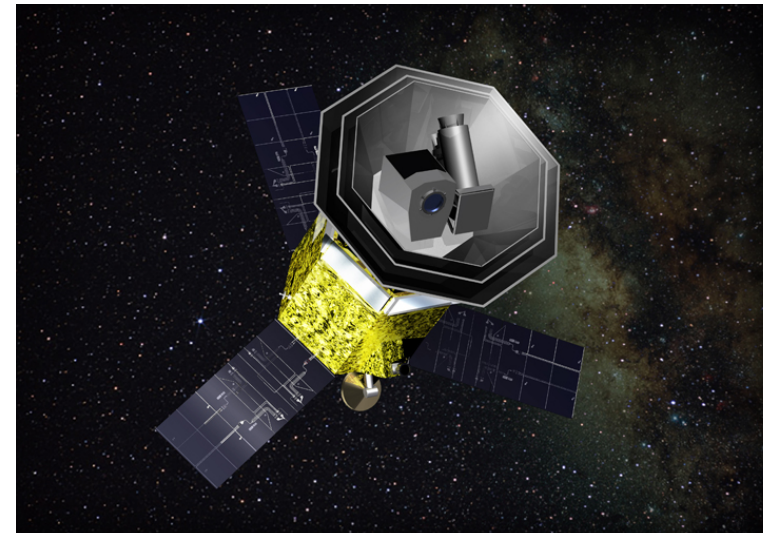


Euclid

- ◆ **Télescope spatial**
- ◆ **But** : compréhension de la matière noire et de l'énergie noire
 - en cartographiant l'univers sur les 10 derniers milliards d'années
- ◆ **Champ de vue** de 0.5 deg^2 (1 pleine lune)
- ◆ **Deux instruments** :
 - VIS : lumière visible
 - NISP : rayonnement infrarouge
 - permettront de déduire les propriétés morphométriques, photométriques et spectroscopiques des galaxies
- ◆ **Lancé au point de Lagrange 2 en juin 2023**
 - en prise de données depuis février
 - 6 ans de fonctionnement



- ◆ **Télescope spatial au point de Lagrange L2**
 - successeur de COBE (1989), WMAP (2001) et Planck (2009)
- ◆ **But** : détection des ondes gravitationnelles primordiales émises pendant la phase d'inflation cosmique (10^{-38} s après le début de l'Univers) en observant le CMB
- ◆ **Trois télescopes**
 - basses fréquences LFT
 - moyennes MFT
 - hautes HFT
- ◆ **5 000 détecteurs** : observations du rayonnement fossile du ciel entier dans quinze bandes de fréquence comprises entre 35 et 450 GHz
- ◆ **Télescopes refroidis à 5 K et détecteurs à 100 mK**
- ◆ **Lancement prévu en 2029**
 - tout le ciel balayé en 3 ans



- ◆ Multiples projets pour sonder les deux infinis
- ◆ Instruments colossaux et extrêmement sophistiqués
 - technologies poussées dans leurs retranchements
 - temps très longs : parfois plusieurs dizaines d'années de préparation puis des années de fonctionnement
 - ces projets sont le plus souvent à dimension européenne ou internationale, avec des dizaines voire des milliers de membres

Back-up

Timeline perspectives IN2P3 2021

SCIENTIFIC DOMAIN	PROJECT	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030		
QUARKS AND LEPTON PHYSICS	ATLAS	Upgrade	Operations			Upgrade			Operations				
	CMS	Upgrade	Operations			Upgrade			Operations				
	LHCb	Upgrade	Operations			Shutdown			Operations				
	Belle-II	Operations	Upgrade	Operations		Upgrade		Operations					
	FCC Feasibility Study	Feasibility study											
HADRON PHYSICS	ALICE	Upgrade	Operations			Shutdown			Operations				
	CMS HI	Upgrade	Operations			Shutdown			Operations				
	LHCb HI	Upgrade	Operations			Shutdown			Operations				
	EIC project	Conception				Construction					Operations		
NUCLEAR PHYSICS & ASTROPHYSICS	AGATA	Operations @ GANIL	Operations @ LEGNARO				Operations @ FAIR, ISOLDE, GANIL...						
	SPIRAL2/S3	Construction			Operations								
	SPIRAL2/DESIR	Construction						Operations					
	FAIR/NUSTAR	Construction							Operations				
ASTROPARTICLE PHYSICS	HESS	Operations											
	PAO	Operations											
	Adv Virgo+	Construction			Operations - O4	Construction		Operations - O5					
	CTA	Construction							Operations				
	LISA	Construction											
	ET project	Design study											
COSMIC INFLATION & DARK ENERGY	LSST	Construction				Operations							
	Euclid	Construction					Operations						
	LiteBird project	Construction											
	CMB-S4 project	Design study					Construction						
NEUTRINO PHYSICS & DARK MATTER	XenonNT	Construction	Operations										
	T2K-II/SK	Upgrade			Operations								
	JUNO	Construction				Operations							
	KM3NeT	Construction					Operations						
	HK	Construction								Operations			
	DUNE	Construction									Operations		

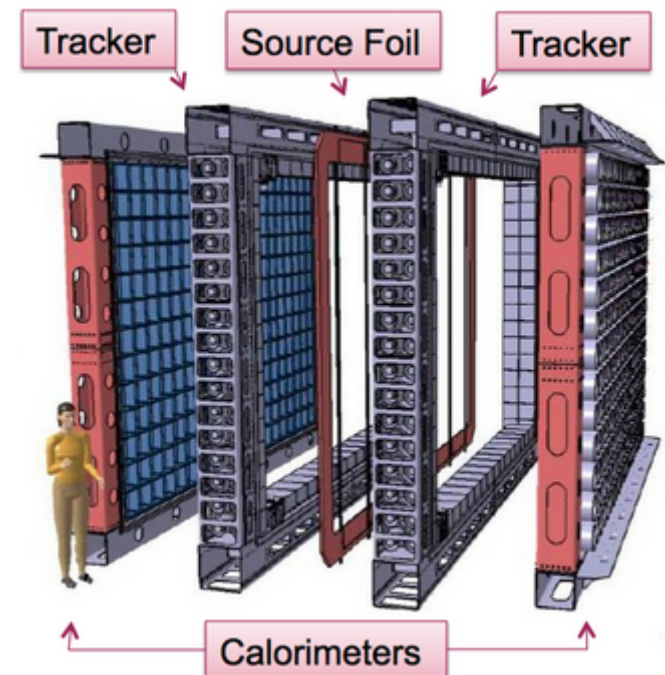
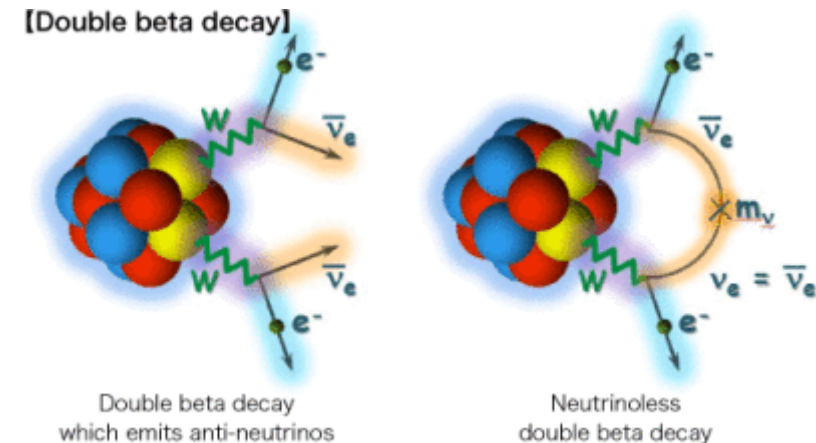
Science drivers, perspectives IN2P3 2021

◆ Moteurs scientifiques traité par les grands projets scientifiques ([lien](#))

SCIENTIFIC DOMAIN	PROJECT	SD1 HIGGS	SD2 FLAVOR	SD3 NEWPHENOMENA	SD4 HADRONS	SD5 NUCLEAR MATTER	SD6 NUCLEAR STRUCTURE	SD7 NUCLEAR PROCESSES	SD8 GRAVITATIONAL WAVES	SD9 HIGH ENERGY GAMMA & COSMIC RAYS	SD10 INFLATION & DARK ENERGY	SD11 Neutrinos	SD12 DARK MATTER
QUARKS AND LEPTON PHYSICS	ATLAS	•		•		•							•
	CM S	•		•									•
	LHCb		•	•	•								
	Belle-II		•	•	•								
	FCC Feasibility Study	•	•	•	•	•							•
HADRON PHYSICS	ALICE				•	•							
	CM S HI				•	•							
	LHCb HI				•	•							
	EIC project				•	•							
NUCLEAR PHYSIC & ASTROPHYSICS	AGATA						•	•					
	SPIRAL2/S3						•	•					
	SPIRAL2/DESIR			•			•	•					
	FAIR/NU STAR					•	•	•					
ASTROPARTICLE PHYSICS	HESS									•			•
	PAO									•		•	
	Adv Virgo+							•	•	•	•		•
	CTA									•			•
	LISA								•	•	•		•
	ET project							•	•	•	•		•
COSMIC INFLATION & DARK ENERGY	LSST									•	•	•	•
	Euclid										•		•
	LiteBird										•	•	•
	CM B-S4 project										•	•	•
NEUTRINO PHYSICS & DARK MATTER	XenonNT											•	•
	T2K-II/SK									•		•	
	JUNO									•		•	
	KM3NeT									•		•	•
	HK									•		•	
	DUNE									•		•	

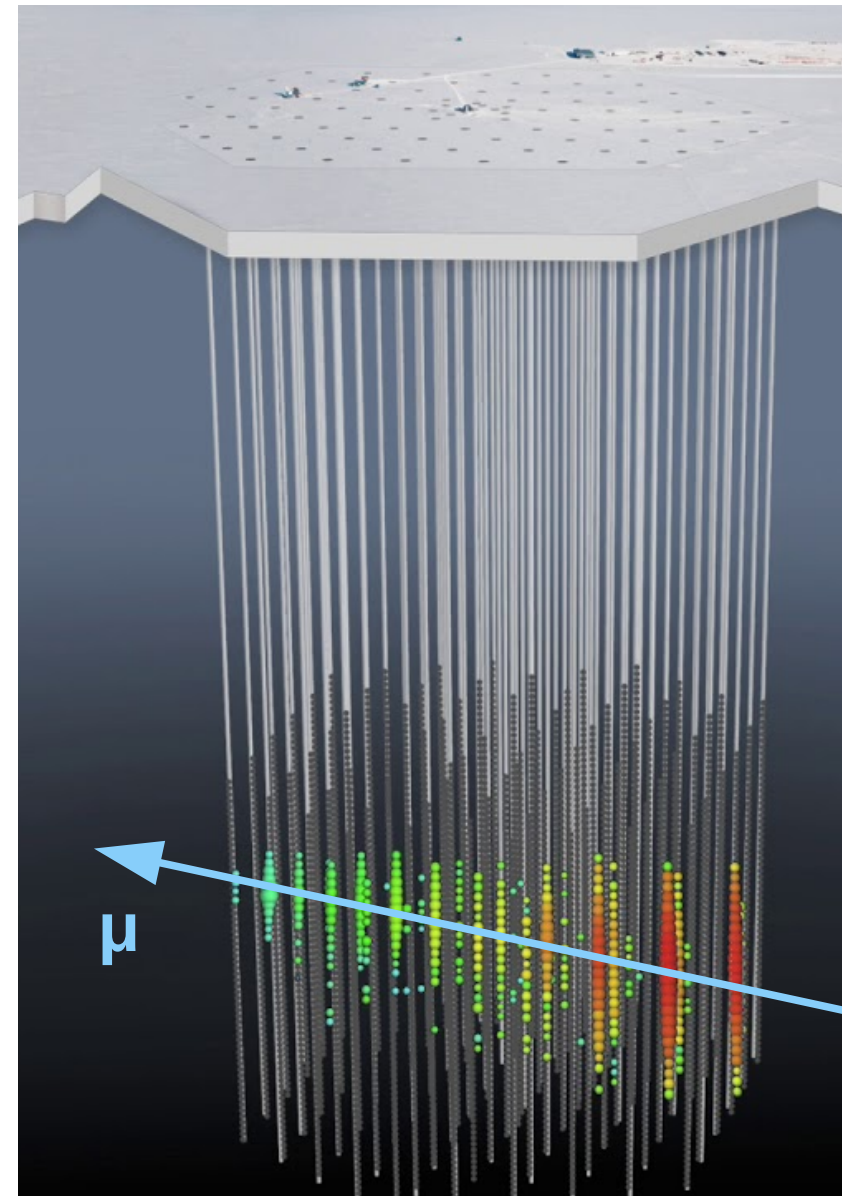
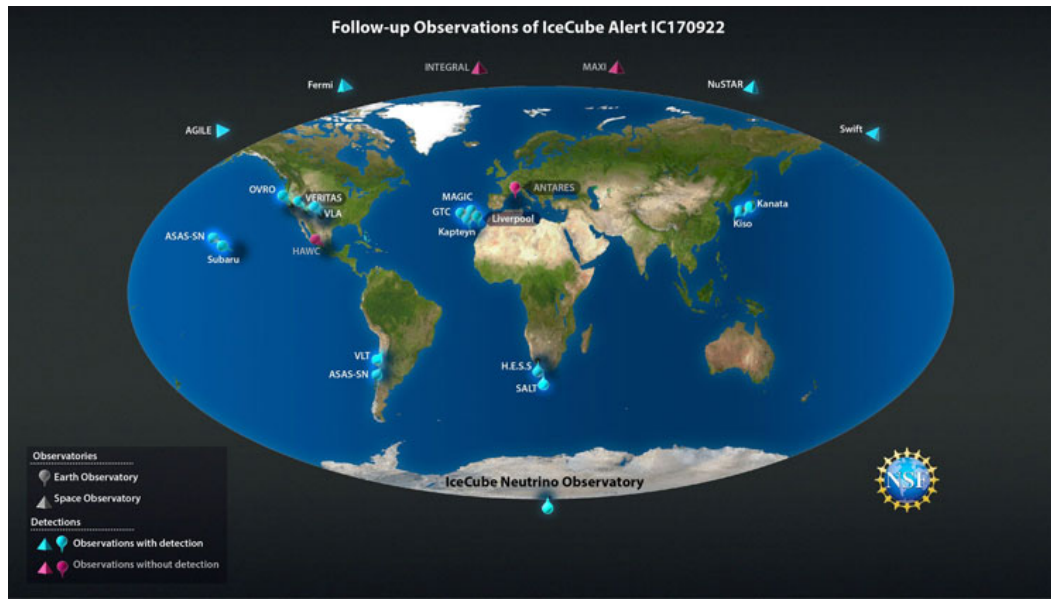
Majorana ou Dirac ?

- ◆ On ne sait pas si l'**anti-neutrino** est différent du **neutrino** (théorie de Dirac, Modèle Standard) ou si le neutrino est sa propre anti-particule (théorie de Majorana)
- ◆ Pour le prouver, recherche de double désintégration β sans émission de neutrino
- ◆ De nombreuses expériences : Moe, NEMO, GERDA, CUORE, EXO, SNO, etc
- ◆ Isotopes spécifiques : ^{48}Ca , ^{76}Ge , ^{130}Te , ...
 - demie-vie de $\sim 10^{20}$ années
- ◆ Nécessite un bruit de fond très très bas
 - souvent dans des cavernes
- ◆ Exemple : SuperNEMO dans une caverne dans le tunnel du Fréjus
 - 1000 fois moins radioactif que le corps humain
 - reconstruction complète des particules émises \Rightarrow réjection très efficace du bruit de fond et caractérisation précise des désintégrations



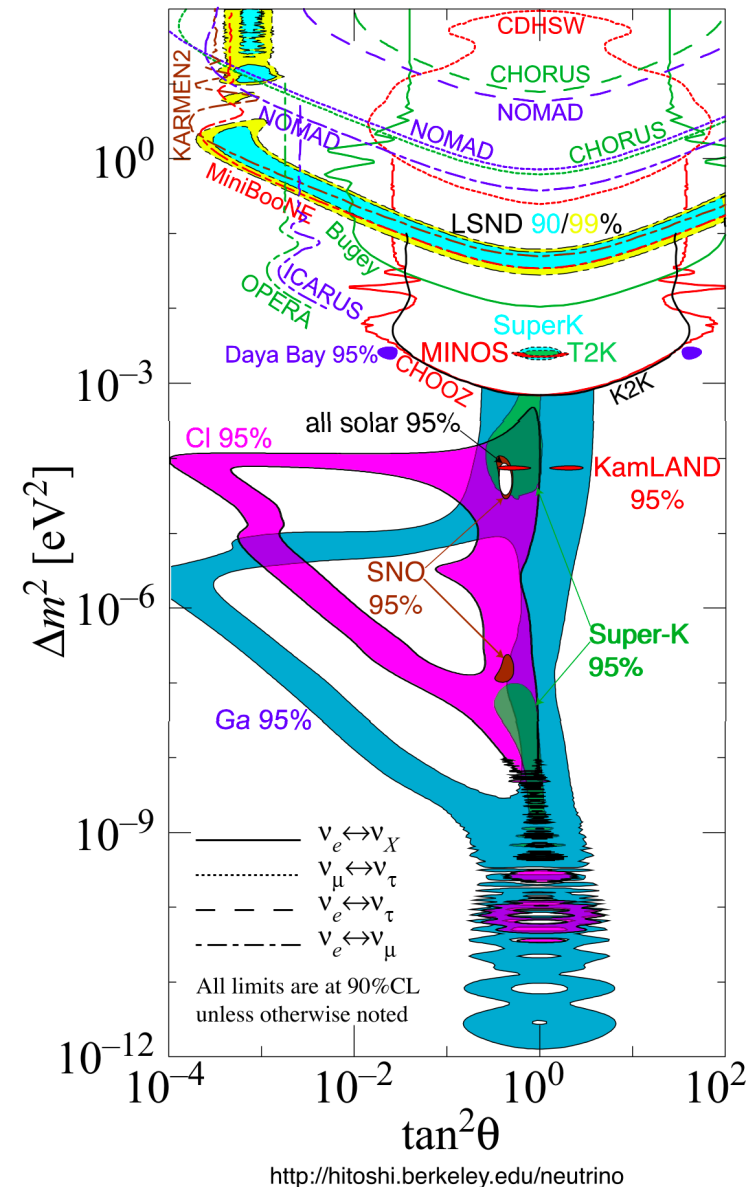
Télescopes à neutrinos (3)

- ◆ IceCube
 - même principe mais au **Pôle Sud**, à 2400 m sous la glace
- ◆ Détection le 22/09/2017 d'un neutrino provenant d'un blazar (galaxie elliptique géante avec un trou noir massif en rotation rapide en son centre) dans la constellation d'Orion (4 Mds d'années-lumière)
 - alerte envoyée à différents télescopes qui ont observé un sursaut gamma
 - débuts de l'astronomie multi-messagers !



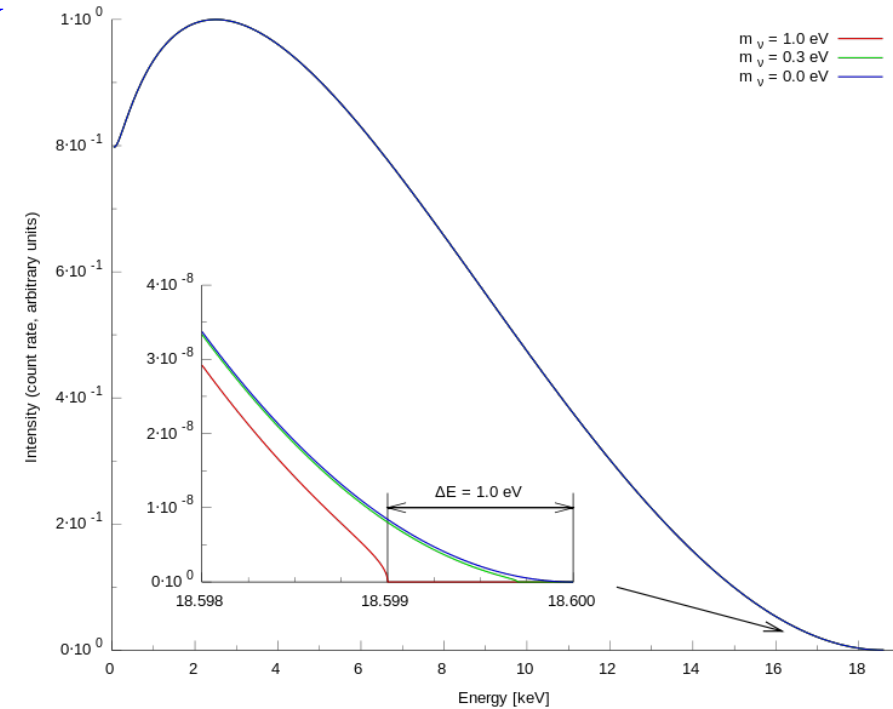
Oscillations des neutrinos (5)

- ◆ Phénomène observé maintenant pour tous les neutrinos :
 - Opera : $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ (2010)
 - T2K : $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ (2011)
- ◆ Expériences de disparition de ν_e près de réacteurs nucléaires : Double-Chooz (France), Daya Bay (Chine), RENO (Corée)
- ◆ Expériences de disparition de ν_μ créés par accélérateurs : MINOS, K2K, SuperK, LSND, MiniBooNE
- ◆ Les mesures de LSND laissent entendre qu'il existerait un quatrième neutrino "stérile" (ie qui n'interagirait que par gravité)
 - mesures non confirmées par MiniBooNE
 - plusieurs expériences cherchent encore à vérifier cette théorie (ex. : STEREO à Grenoble)



Masse des neutrinos

- ◆ Contraintes de la cosmologie : $\Sigma m_\nu < 0.12 \text{ eV}$
- ◆ Mesure directe : spectre de décroissance des électrons issus du tritium ^3H
 - Troitsk-numass (1994-2004) : $m_\nu < 2.3 \text{ eV}$
 - KATRIN (2018-2023)
 - spectromètre haute résolution
 - but : précision $< 0.2 \text{ eV}$



- ◆ Mesure indirecte via désintégration double- β sans neutrino (GERDA) :
 $m_\nu < 0.3 \text{ eV}$