



# Genèse de l'Astroparticule et son évolution

28 Aout 2017

S.Katsanevas, Prof. Univ. Paris Diderot  
Directeur Lab. Astroparticule et Cosmologie





# Programme

- I. De l'Astronomie à l'Astrophysique
- II. De l'Astrophysique à l'Astroparticule
  - I. Nouvelles théories et nouveaux objets cosmiques
  - II. Du visible au rayonnement électromagnétique
  - III. Les rayons cosmiques
  - IV. Les neutrinos et la matière noire
  - V. Les ondes gravitationnelles
  - VI. Les grands relevés
- III. Etudier l'Univers aujourd'hui
  - I. Les structures cosmiques (galaxies et amas)
  - II. Les phénomènes violents (astrophysique multi-messenger)
  - III. L'Univers primordial au delà du « mur » électromagnétique
- IV. Difficultés de l'interdisciplinarité
- V. Conclusions



# Programme

- I. De l'Astronomie à l'Astrophysique
- II. De l'Astrophysique à l'Astroparticule
  - I. Nouvelles théories et nouveaux objets cosmiques
  - II. Du visible au rayonnement électromagnétique
  - III. Les rayons cosmiques
  - IV. Les neutrinos et la matière noire
  - V. Les ondes gravitationnelles
  - VI. Les grands relevés
- III. Etudier l'Univers aujourd'hui
  - I. Les structures cosmiques (galaxies et amas)
  - II. Les phénomènes violents (astrophysique multi-messenger)
  - III. L'Univers primordial au delà du « mur » électromagnétique
- IV. Difficultés de l'interdisciplinarité
- V. Conclusions



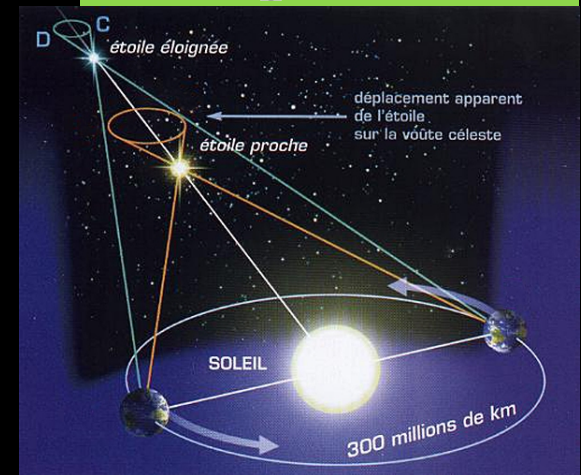
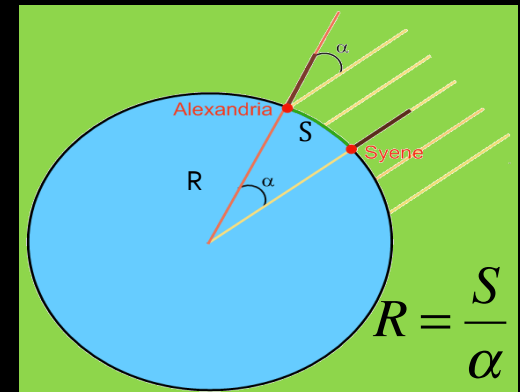
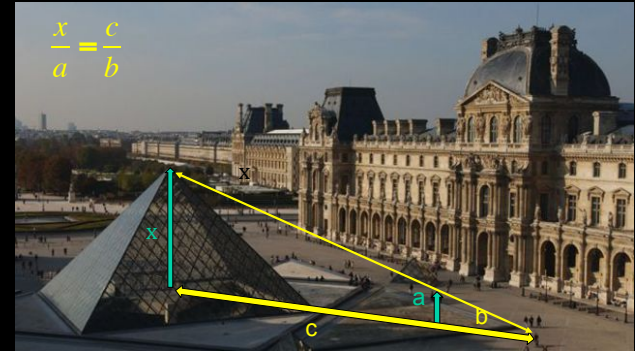
# L'Astronome en tant que géomètre

- **Origine mythique de la Géométrie.** Comment Thalès a mesuré l'hauteur de la Pyramide avec le gnomon
- **Premières mesures cosmologiques.** Mesure du rayon de la terre par Eratosthène . Plus tard Aristarque et Hipparque mesures de la lune et du soleil
- **Le Parrallaxe.** La distance des étoiles proches peut s'obtenir par triangulation. Le mouvement de la Terre autour du Soleil permet de mesurer le **parallaxe:**

$$\theta = \frac{d}{D} \rightarrow D = \frac{d}{\theta}$$

**1 parsec = D d'une étoile de parallaxe  $\theta = 1''$**

**1 pc  $\approx 3.26$  annexes-lumière  $\approx 3 \times 10^{16}$  m**



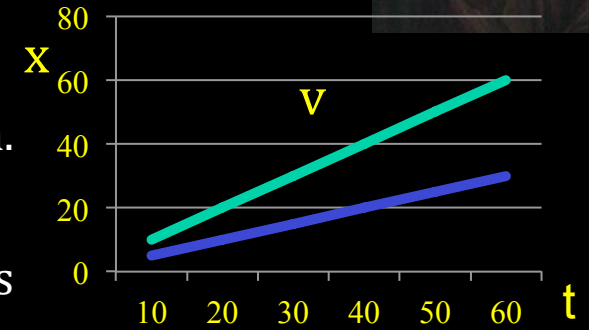




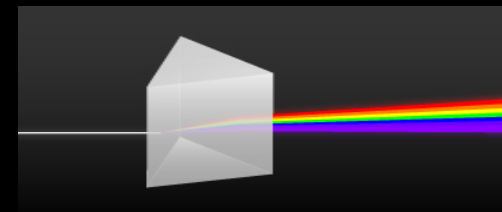
# Les débuts de l'Astrophysique/Cosmologie historique: Galilée et Newton



- Masse  $m$  dans espace  $x$  et temps. Le reste par dérivation. Espace et temps indépendants
- Principe de relativité: les lois de la mécanique invariants par rapport au changement de référentiel inertiel ( $v=ct$ )
- Loi de Gravitation, invariant par rapport au principe, mais pourquoi cette forme? *Hypotheses non-fingo.*
- La lumière blanche peut être analysée en spectre
- Si la lumière est en forme de particules (Newton) → existence des trous noirs (Mitchell 1783)
- Deux grands problèmes pour une cosmologie cohérente:
  1. Il n'y a que la force d'attraction, l'Univers instable à la moindre perturbation il collapse à un point.
  2. Pourquoi le ciel est noir la nuit? (paradoxe Olbers)



$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$





# De l'Astronomie à l'Astrophysique (1830-1930)

Les Astronomes des Géomètres deviennent Physiciens.

En dépit de A. Comte ( « la température des étoiles sera inconnue pour toujours par nous » ou « la cosmologie est une science impossible il faut se concentrer à la physique terrestre ») vers la fin de la période on aura une compréhension avancée de la physique des étoiles, la réalisation de l'existence de plusieurs galaxies et les indices de l'expansion de l'Univers (Hubble). Grace à des

## 1. Nouvelles théories

1. Electromagnétisme , Thermodynamique , Relativité , Mécanique Quantique/Physique Atomique

## 2. Nouvelles technologies

1. Spectroscopie

2. Photométrie, Photographie

3. Grands Télescopes

- Mouvement non sans résistances institutionnelles: exemple, aux US fusion des 2 sociétés (Astronomie et Astrophysique) seulement vers 1916

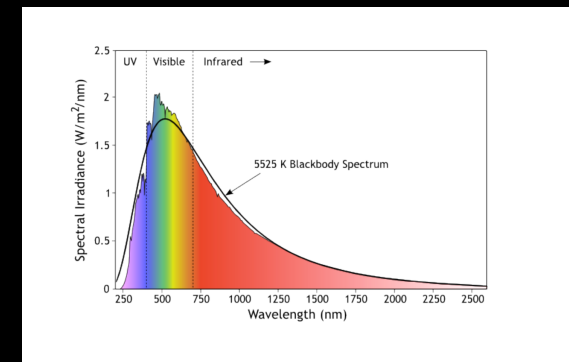
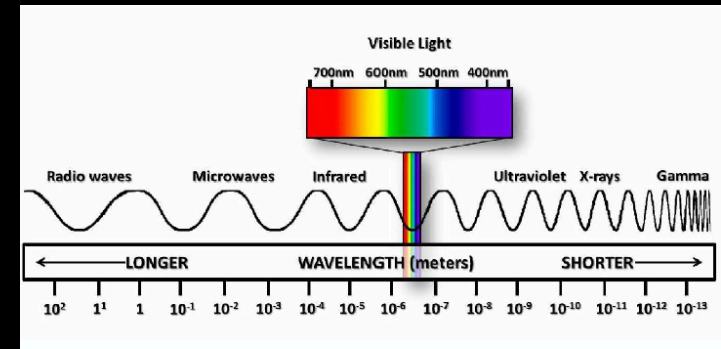
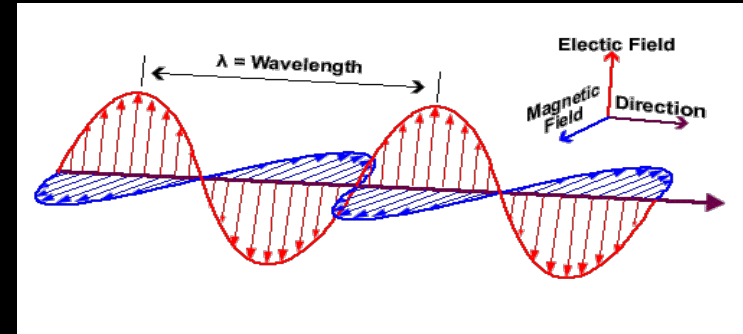


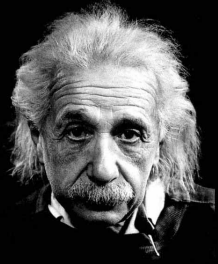
# Electromagnétisme et les photons de Maxwell à Planck



- Les forces électriques et magnétiques sont des fonctions d'un seul champ: le champ électromagnétique prenant des valeurs différentes à chaque point d'espace-temps. Le champ se propage à la vitesse de la lumière  $c$ .
- La lumière fait partie du spectre électromagnétique
- Thermodynamique (Carnot, Mayer, Boltzmann, Nerst... ). *Lien entre la matière et rayonnement*
- Loi de Planck (1900) relation entre la température d'un objet et le spectre émis. Corps noir, objet dont le spectre ne dépend que de sa température.
- Planck → Introduction des quanta de lumière. Einstein lumière émise et absorbée en quanta.

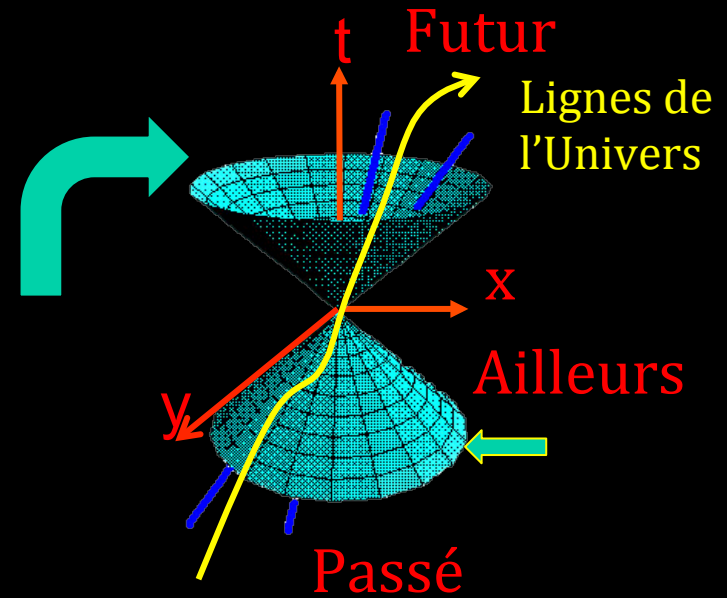
- $E=hf$



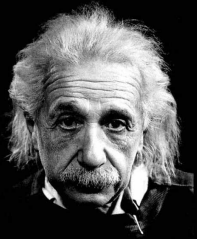


# Einstein: la Relativité Restreinte

- I. Généralisation de la relativité Galiléenne.
- II. La vitesse de la lumière  $c$  ne dépend pas du référentiel. Elle est la vitesse maximale .
- III. L'espace-temps est unifié et au lieu de se diviser en deux parties (Passé/Futur) se divise en trois: Futur, Passé, Ailleurs
- IV. Horizon des particules: distance maximale à partir de laquelle des particules peuvent voyager jusqu'à l'observateur, pendant l'âge de l'Univers
- V. Equivalence Energie-matière  $E=mc^2$

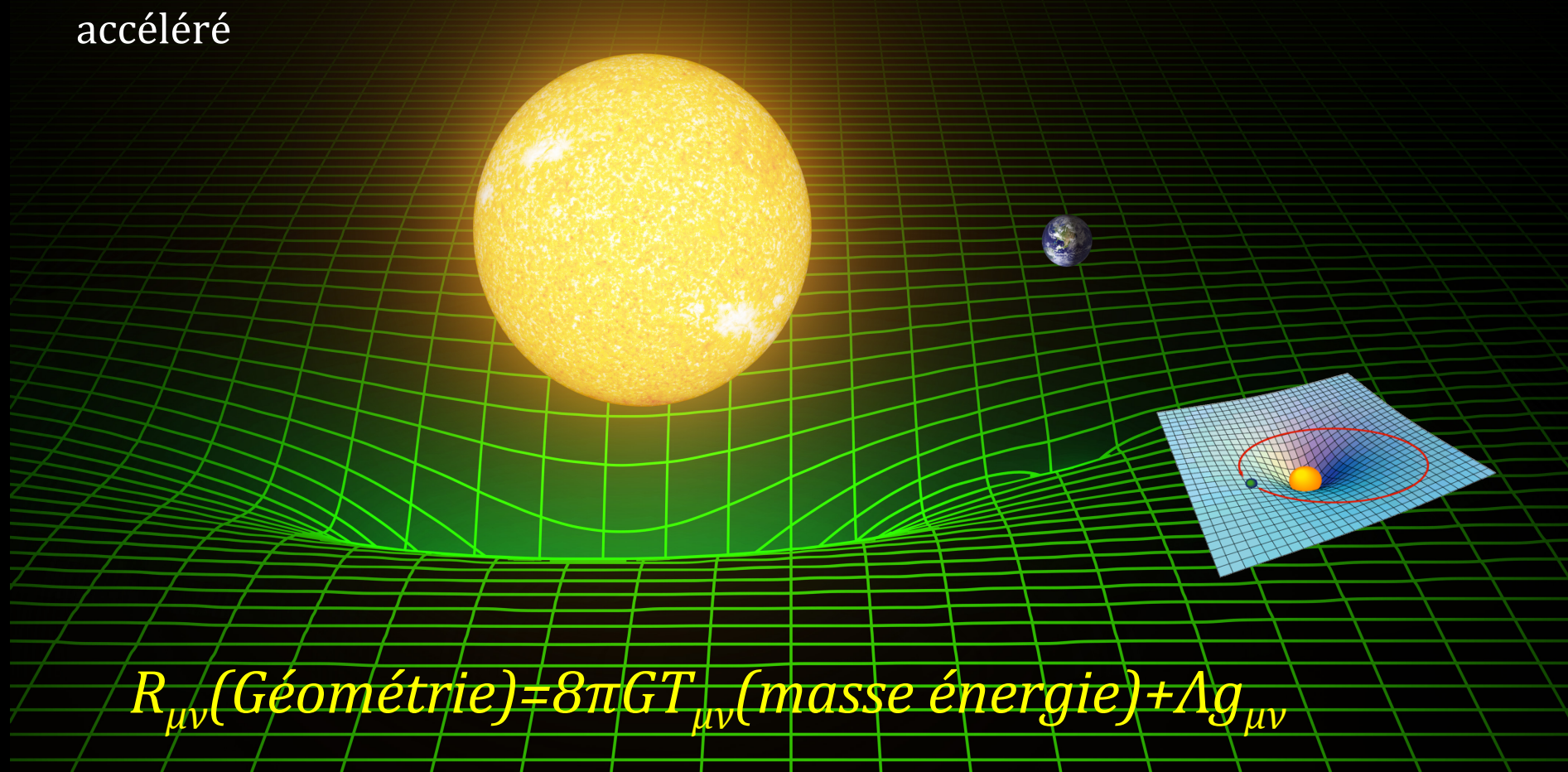






# Einstein: la Relativité Générale

- La géométrie d'espace-temps d'un lieu est déterminée par son contenu en masse/énergie et vice-versa.
- De nouveau principe de symétrie: relativité des référents avec mouvement accéléré



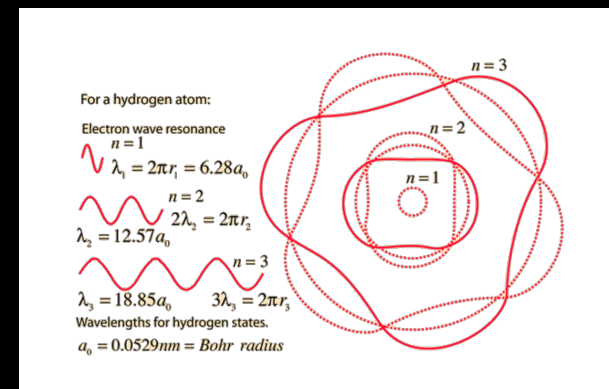
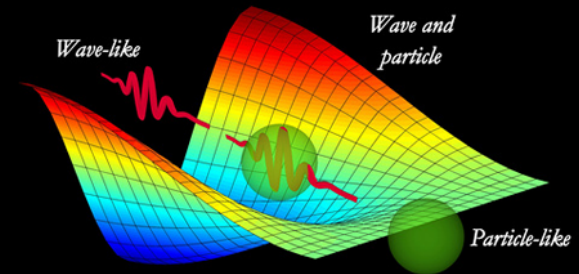
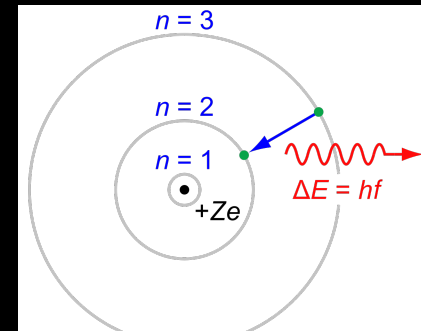
$$R_{\mu\nu}(\text{Géométrie}) = 8\pi G T_{\mu\nu}(\text{masse énergie}) + \Lambda g_{\mu\nu}$$



# Compréhension de l'atome → Mécanique Quantique

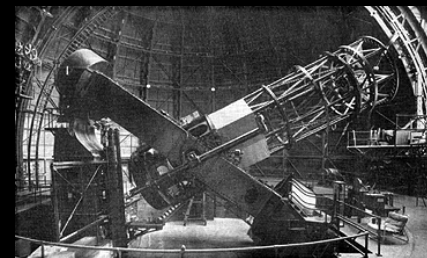
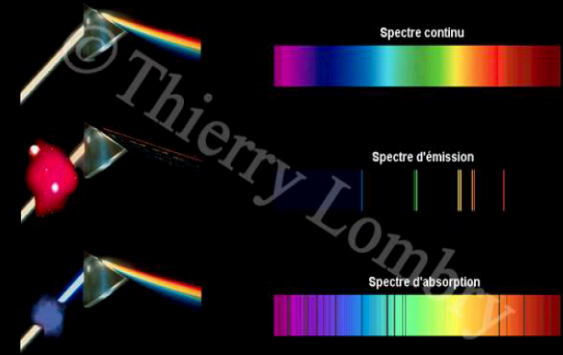


- **Bohr (1913)** : Modèle semi-classique de l'atome: explication des spectres discrets d'émission et absorption
- **De Broglie (1923)** dualité ondes-particules
  - $\lambda = h/p$
- **Heisenberg (1923)** : relation d'incertitude
  - $\Delta E \Delta t \geq \hbar$   $\Delta p \Delta x \geq \hbar / 2$
- **Shrodinger /Born (1926-1927)** : particules caractérisées par des fonctions d'onde  $\psi$ , qui obéissent à l'équation de Shrodinger, on ne peut prédire que la probabilité d'une valeur physique.
- **Dirac (1928)**: invente l'équation de la mécanique quantique compatible avec la Relativité Spéciale: prédit l'existence des antiparticules et inaugure la théorie quantique des champs



# Nouvelles technologies

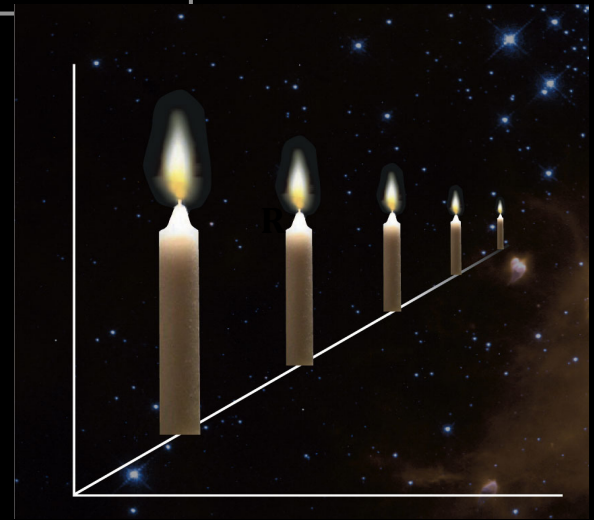
- **Lignes Spectroscopiques** (Wollaston 1802, Fraunhofer 1817-1828)
  - Kirchhoff explique émission et absorption (modèle atomique)
  - Nebulae (Kant, Herschel, Huggins 1864)
  - Classification des étoiles → Pickering et les « Computers » et A.J. Cannon 1901
  - Effet doppler et cepheides: les nebulae sont des galaxies: clôture du Grand Débat. Expansion de l'Univers
- **Photométrie, Photographie** (Herschel, Draper, Fizeau, Foucault )
- **Grands Télescopes optiques**
  - Mount Wilson Observatory 2,5m



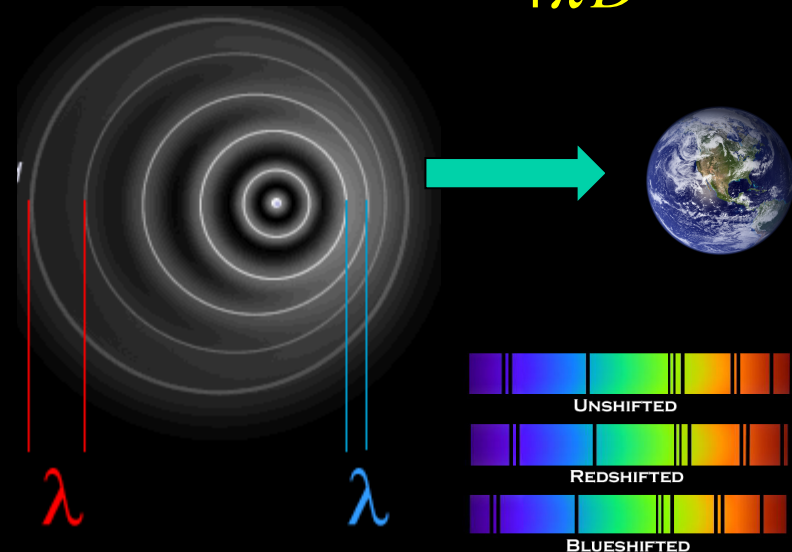
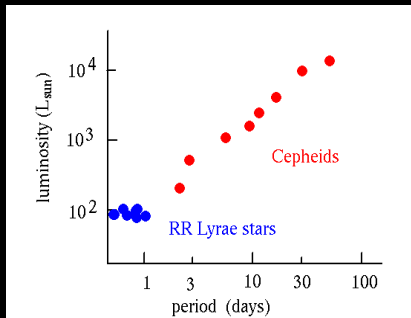


# Mesurer les distances et les vitesses dans l'Univers

- **Chandelles standard** sont des objets célestes dont la Luminosité  $L$  est connue. Etant donné que la luminosité diminue en  $1/R^2$ , si on mesure la luminosité "apparente"  $L_{obs}$  on a mesuré sa distance  $D$
- Les Céphéides (Herietta Leavitt, 1912) variables peuvent être utilisées comme chandelles standard: leurs variabilité en temps donne la mesure de leur luminosité intrinsèque  $L$
- **Effet Doppler**. La couleur (étant une fréquence) dépend du mouvement relatif de l'émetteur.
- Mesurer le déplacement le décalage vers le rouge équivaut à une mesure de vitesse de l'étoile

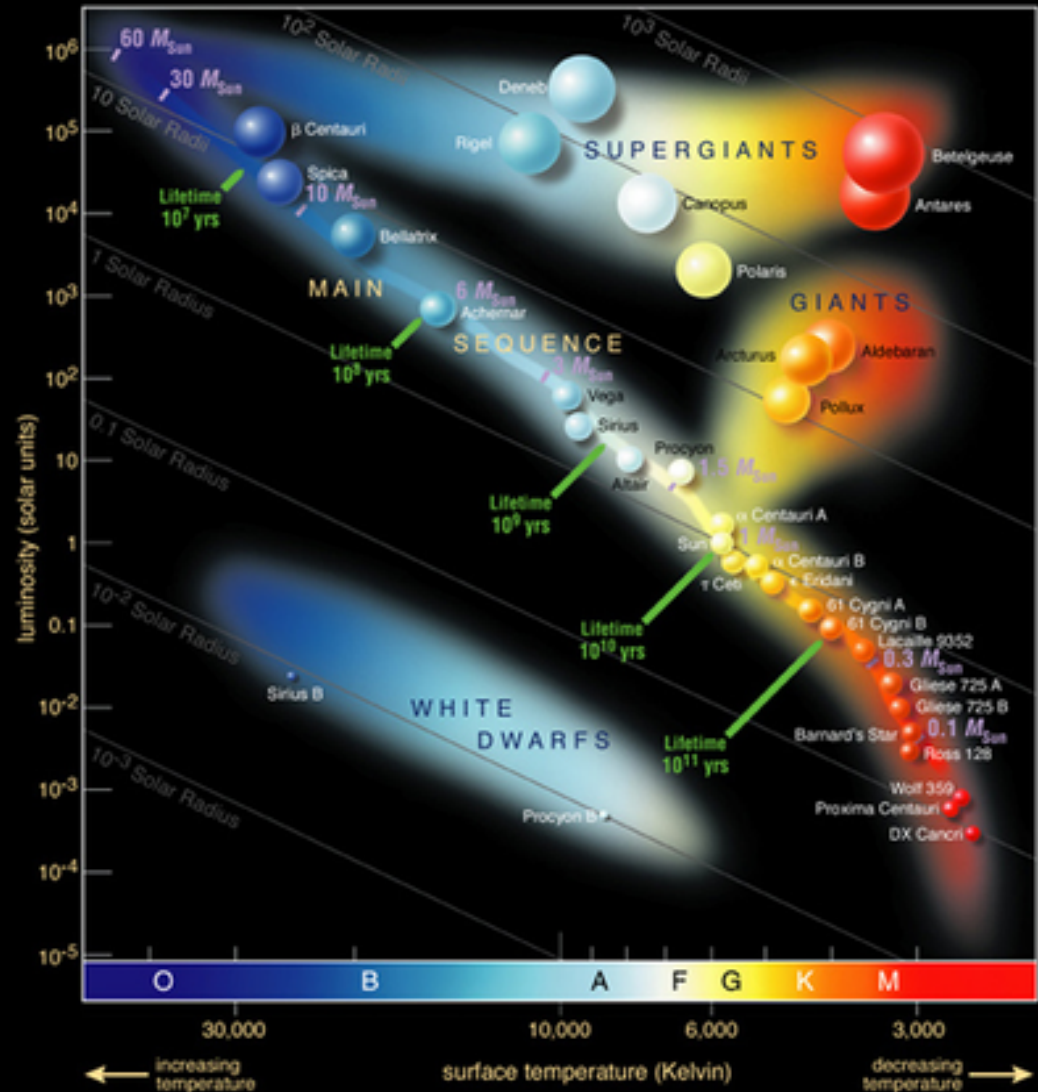


$$L_{obs} = \frac{L}{4\pi D^2}$$



# Découvertes Astrophysiques

- **Découverte d'Helium** d'abord au spectre solaire et après au laboratoire (1895)
- **Evolution des étoiles**
  - Diagramme Hertzsprung Russel (1905-1914)
  - $L$  vs  $T$  expliqué seulement après la compréhension du rôle de la fusion nucléaire aux étoiles
- **Les étoiles sont des formations gazeuses** (Eddington 1915)
- **Hydrogène l'élément dominant au de l'Univers** (après vient l'He) Cecilia Payne 1925

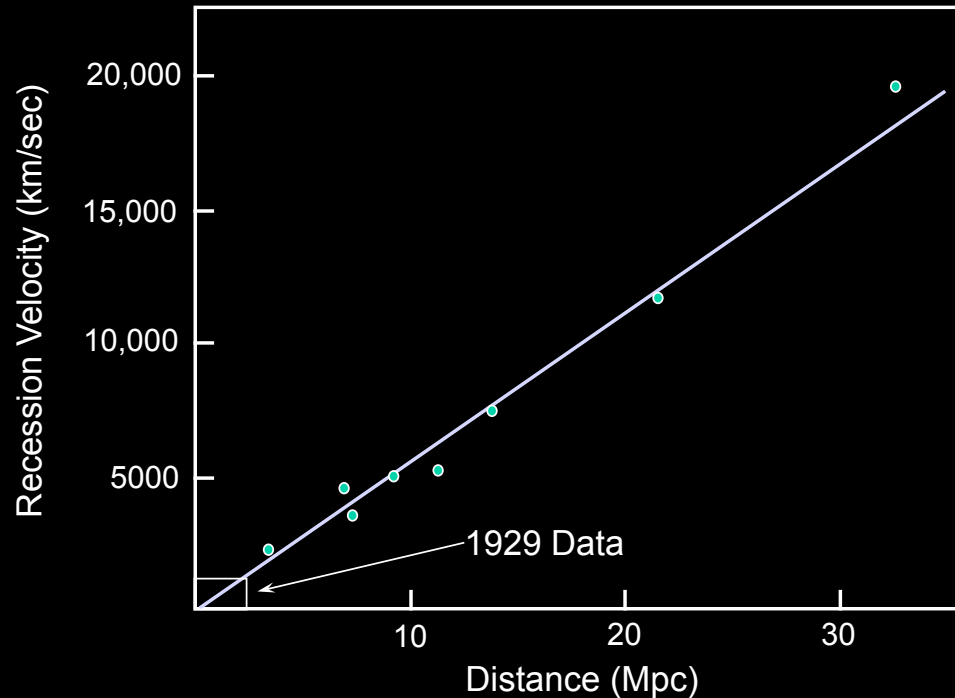


# Découvertes cosmologiques

## L'Univers est en expansion Hubble(1930)



$$V \approx \Delta v$$



$D_{\text{cepheides}}$

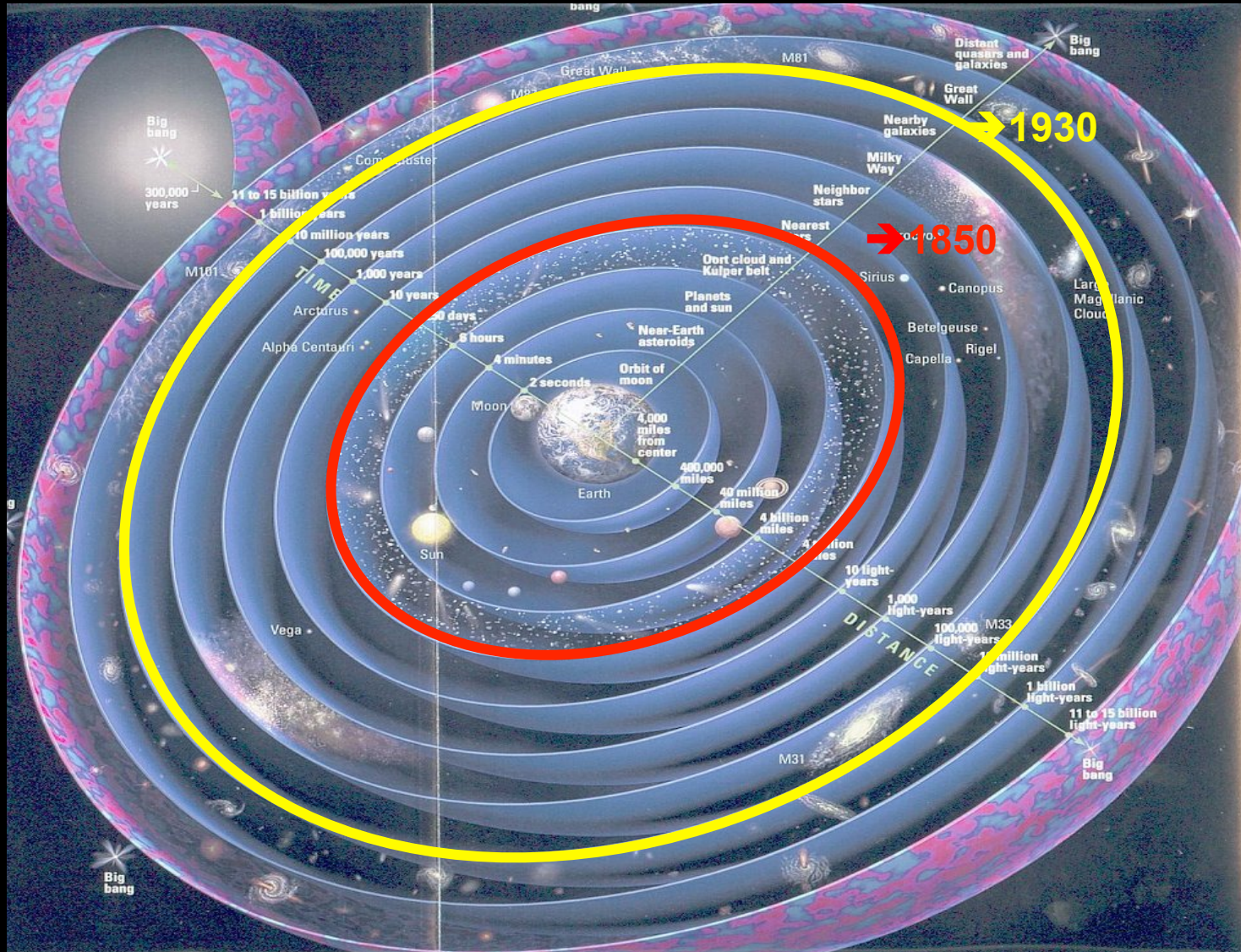
$t_{\text{Age Univers}} \sim t_{\text{HUBBLE}} \sim 13,7 \text{ milliards ans}$

$$H = \frac{v}{D} = \frac{1}{t_{\text{HUBBLE}}}$$

Après la fin du Grand Débat sur la nature des nebulae (=galaxies)



# L'Univers visible et sondé en 1930



# Programme

## I. De l'Astronomie à l'Astrophysique

## II. De l'Astrophysique à l'Astroparticule

I. Nouvelles théories , nouveaux objets cosmiques

II. Du visible au rayonnement électromagnétique

III. Les rayons cosmiques

IV. Les neutrinos et la matière noire

V. Les ondes gravitationnelles

## III. Etudier l'Univers aujourd'hui

I. Les structures cosmiques (galaxies et amas)

II. Les phénomènes violents (astrophysique multi-messenger)

III. L'Univers primordial au delà du « mur » électromagnétique

## IV. Difficultés de l'interdisciplinarité

## V. Conclusions

# De l'Astrophysique à l'Astroparticule (1912-2017)

Développement de la région interdisciplinaire entre l'Astrophysique et la Physique subatomique ou Physique des Particules .

Grace à des

## 1. Nouvelles théories

### 1. Physique Nucléaire, Théories Quantiques de champ

## 2. Nouveaux Observatoires

### 1. Couvrant tout le spectre du rayonnement électromagnétique

### 2. Des rayons cosmiques

### 3. Des neutrinos

### 4. Souterrains pour la matière noire

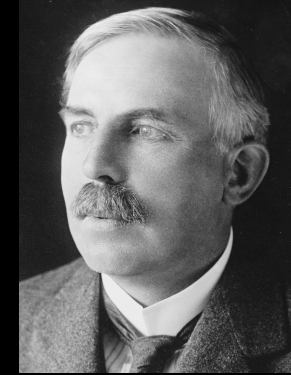
### 5. Des ondes gravitationnelles

- Mouvement non sans résistances institutionnelles et des problèmes de communication des communautés... (au moins au début)

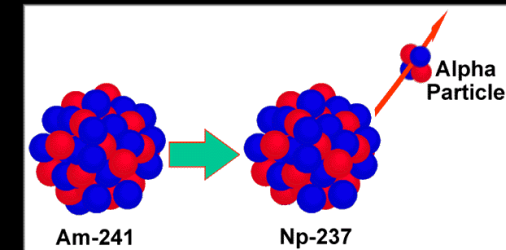




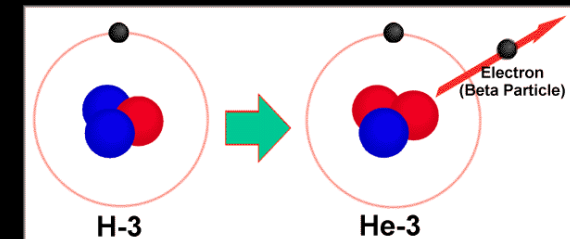
# Vers la compréhension du noyau et des interactions subatomiques



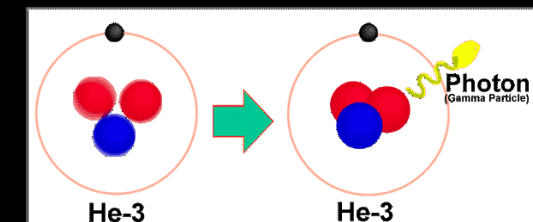
- **Bequerel, les Curie (1896-1898)** : Radioactivité
- **Rutherford (1908-1911)** désintégrations  $\alpha$  (He),  $\beta$  (e),  $\gamma$
- **Rutherford (1919)** en bombardant des atomes de N avec des particules  $\alpha$  il produit des noyaux d'Hydrogène qu'il appelle *protons*
- **W. Bethe et H. Beeker (1931)** trouvent que si on bombarde des éléments légers (Li, Be, B avec des particules  $\alpha$  on produit une radiation pénétrante
- **J. Chadwick (1932)** démontre que cette radiation n'est pas faite des rayons  $\gamma$  mais plutôt des particules qui ont la masse du proton: le *neutron*



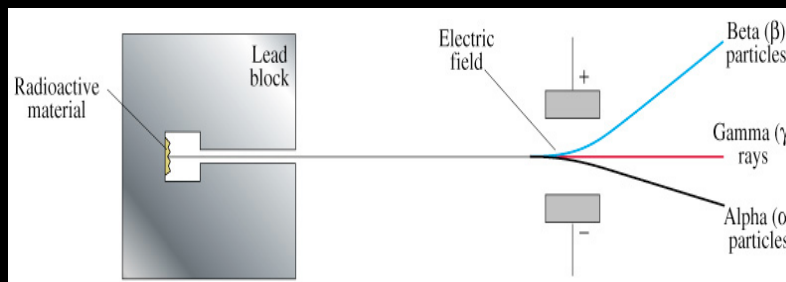
## Interaction forte $\alpha$



## Interaction faible $\beta$



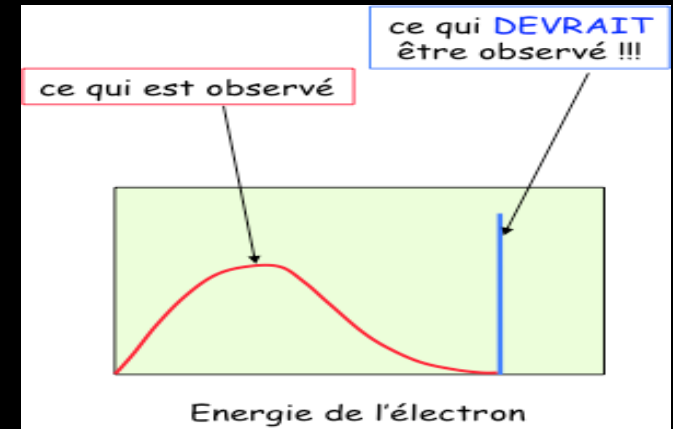
## Interaction électromagnétique $\gamma$



# Le cas neutrino

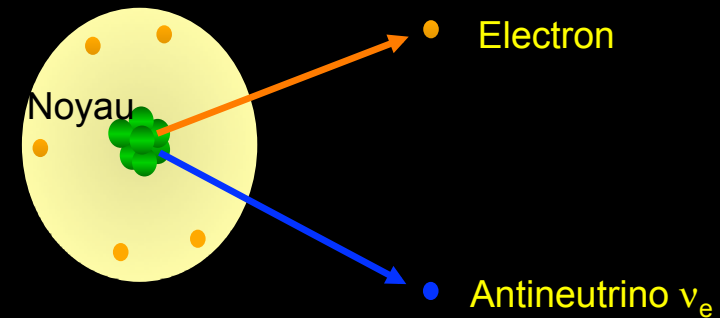


1909-1914 : La radioactivité  $\beta$  présente une anomalie ! Comme si l'énergie n'était pas conservée. S'agit-il d'un artefact nucléaire?



1930 Pauli : il y a émission de particules qui interagissent très peu, les neutrinos.

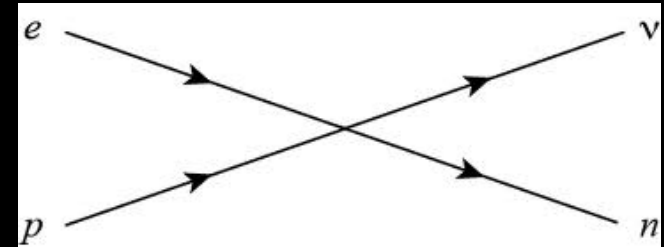
1934 Fermi: formule sa théorie des interactions faibles Il envoie sa théorie à Nature qui le rejette car le sujet est « trop loin de la réalité »



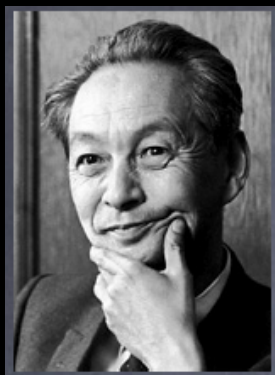
*J'ai fait une chose horrible, j'ai postulé une particule qu'on ne peut pas détecter (W.Pauli)*

**Découverte: Reines and Cowan 1956, prix Nobel**

*Pauli: tout vient à point à celui qui sait attendre*



# Aux alentours de 1949 la première Théorie Quantique des Champs: l'Electrodynamique Quantique (QED)



S.I. Tomonaga

L'interaction entre deux charges est due à l'échange d'un ou plusieurs quanta (bosons) du champ les photons



J. Schwinger

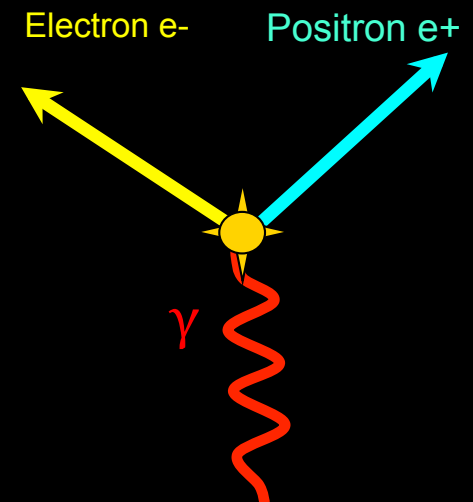
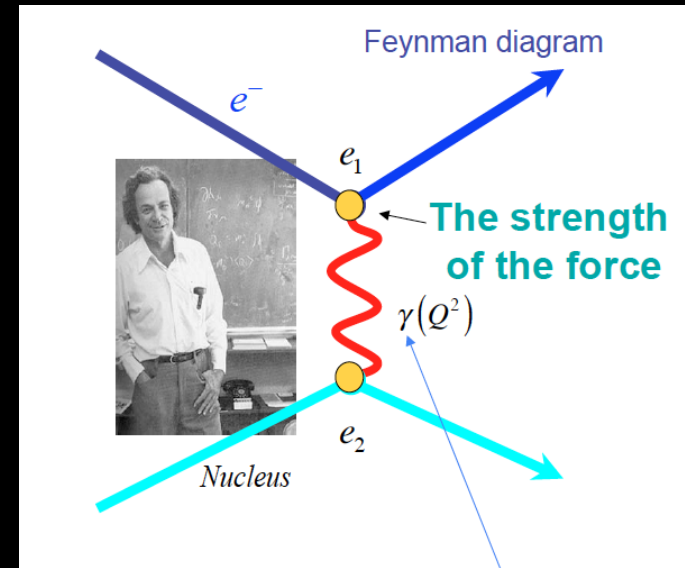
Des paires particules-antiparticules peuvent se « réaliser » de façon virtuel à partir du vide, pour un laps de temps compatible avec le principe de Heisenberg  $\Delta E \Delta t \geq \hbar$   $E = mc^2$



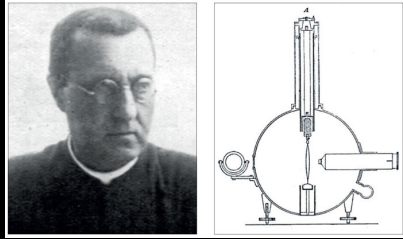
F. Dyson

- Les particules élémentaires sont représentés par des champs quantiques qui ont un espace interne obéissent à des symétries
- Dans QED l'invariance de phase du champ  $\psi$  correspond à la conservation de charge et l'échange des photons  $\gamma$  comme médiateurs.

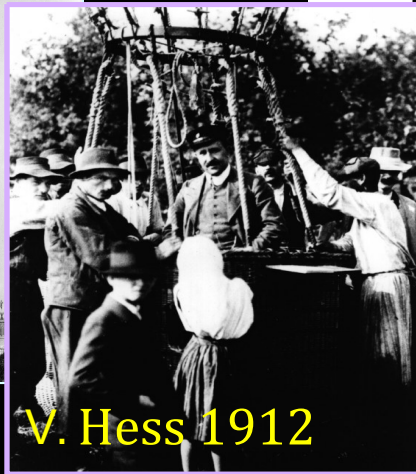
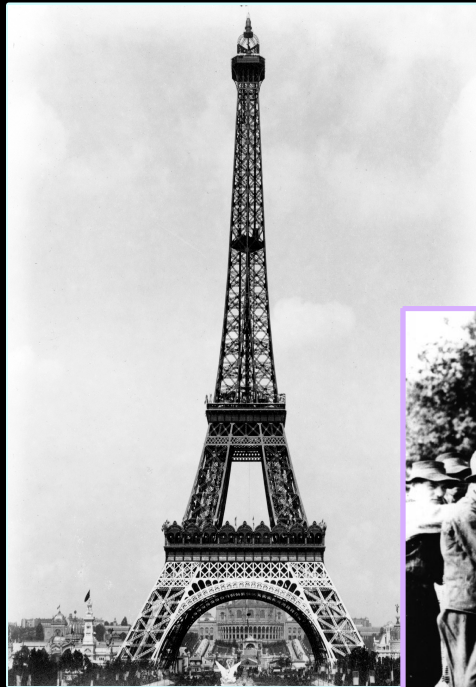
Une théorie précise à  $10^{-10}$



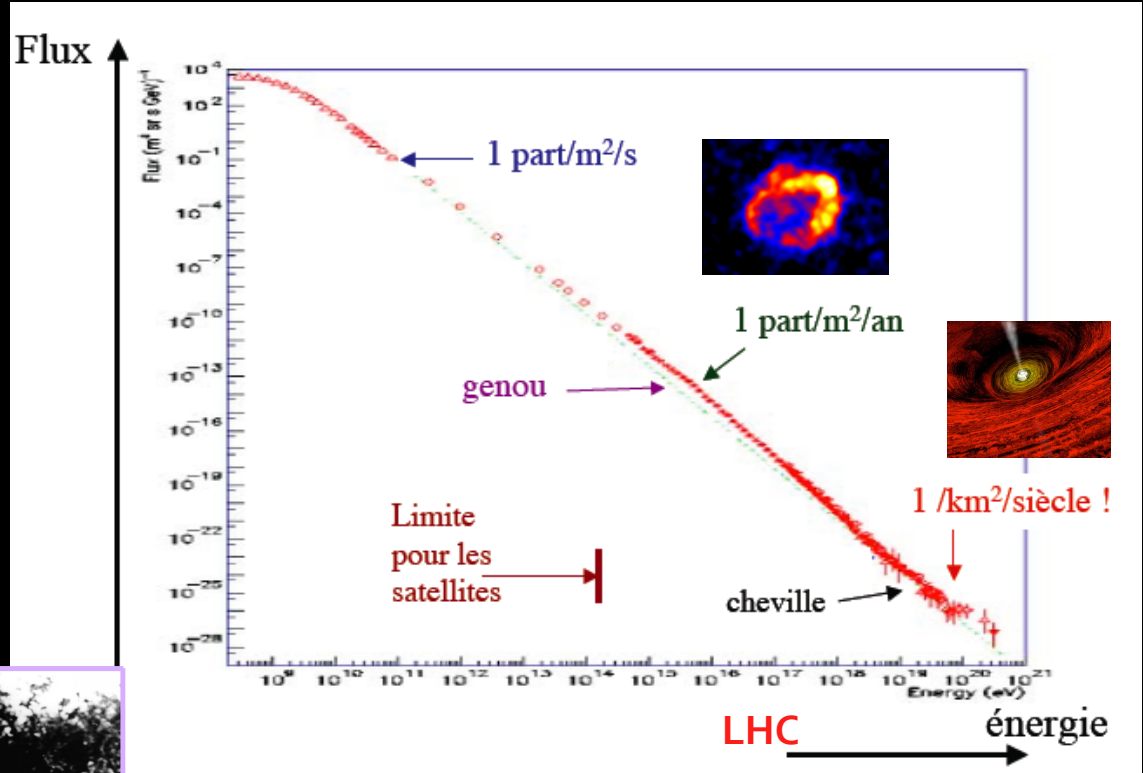
# Les rayons cosmiques: des particules venant du ciel



T. Wulff (1910)



V. Hess 1912



- D'où viennent-ils ?
- Quelle est leur composition ?
- Plusieurs particules y ont été découvertes

- 1932 Positron
- 1936 Muon
- 1947 Pions :  $\pi^0, \pi^+, \pi^-$
- 1949 Kaons (K)
- 1949 Lambda ( $\Lambda$ )
- 1952 Cascade ( $\Xi$ )
- 1953 Sigma ( $\Sigma$ )



# 1953, fin (provisoire) des études des rayons cosmiques, début des accélérateurs

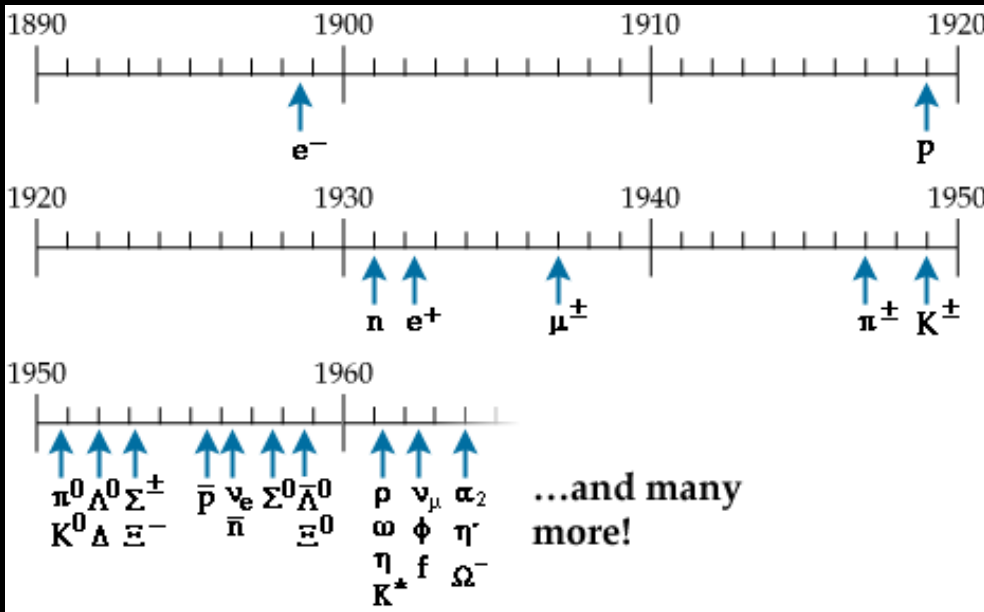


CONGRÈS INTERNATIONAL SUR LE RAYONNEMENT COSMIQUE  
BAGNÈRES-DE-BIGORRE, 6-12 Juillet 1953

Photo ALIX

Le congrès de Bagnères de Bigorre en 1953, je dirais, a sonné le glas des rayons cosmiques et c'est Powell lui-même qui, dans son discours de clôture a dit : "Messieurs, maintenant nous sommes envahis, nous sommes submergés, ce sont les accélérateurs". Effectivement, la plupart des laboratoires de rayons cosmiques

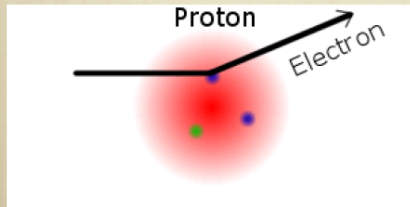
# De la multiplicité des particules au modèle des quarks



- Pourquoi tant de particules ?
- Y-a-t-il une sous-structure ?
- Deux réponses concordantes:
  - Classification
  - Études de diffusion aux accélérateurs
- → Les quarks (1964)

1967 Friedmann, Kendall, Taylor (SLAC):

'hard scattering' of electron on three 'point-like particles'



Measured cross-sections perfectly compatible with presence of 2 up- and 1 down-quark in proton

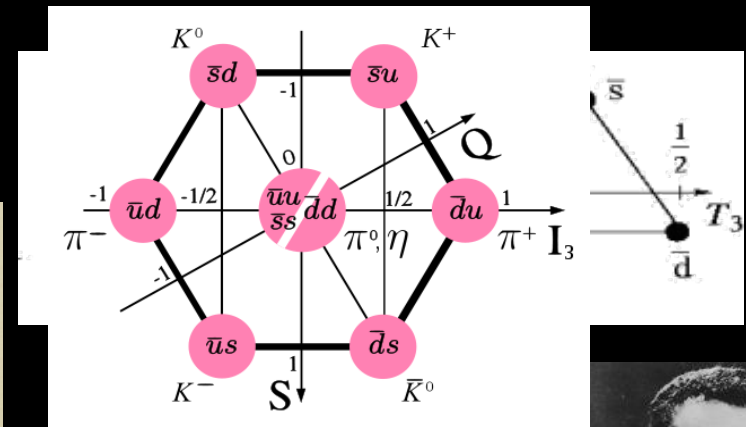
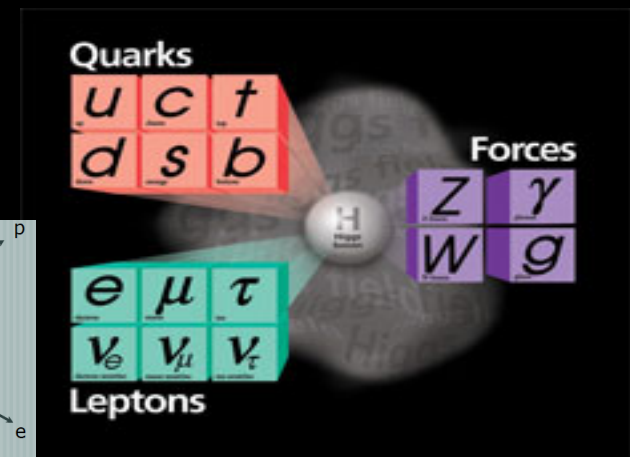
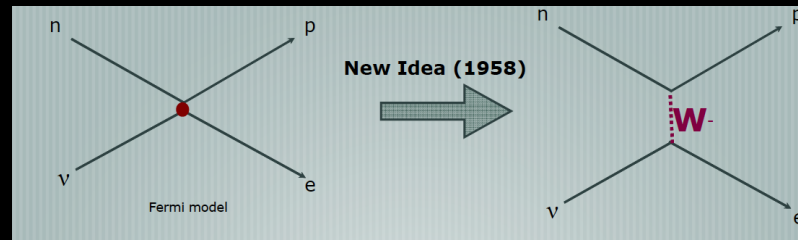
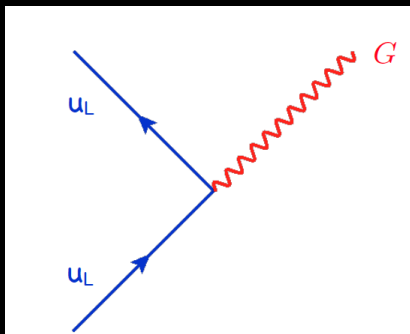
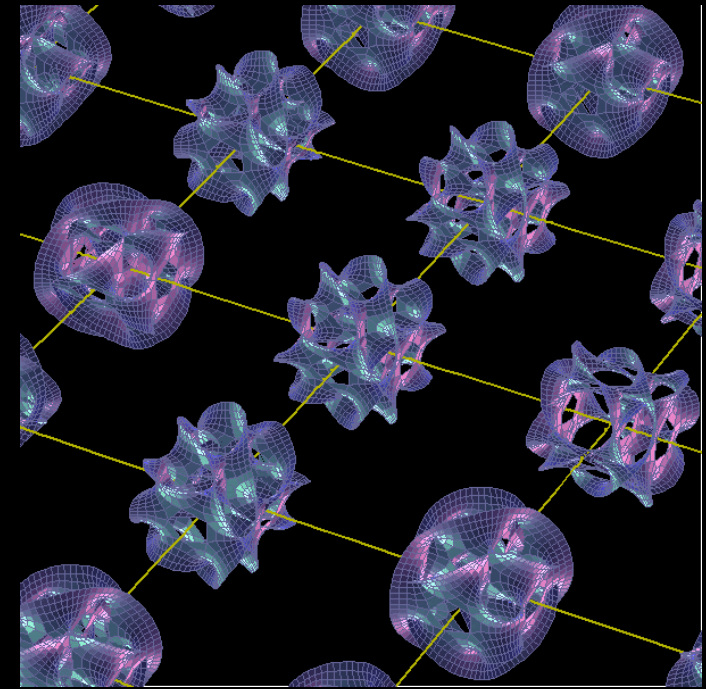


Fig. 6.35 Murray Gell-Mann (b.1929).



# Théorie quantique des champs pour l'Interactions forte (QCD) et faible (QFD)

- Les quarks ont un espace interne à 3 dimensions, analogue à la couleur de notre vision. Le changement de cette « couleur » ne change pas la teneur de l'interaction et on dit que l'interaction est invariante par rotation (symétrie) de « couleur » et les médiateurs de l'interaction s'appellent **gluons**  
➔ Interaction forte (force nucléaire)
- Les quarks et les leptons viennent en paires qui peuvent se transformer l'un à l'autre. Les médiateurs de cette transformation s'appellent **bosons W et Z**  
➔ Interaction faible (radioactivité)



# Unification électrofaible

Weinberg, Salam and Glashow (Nobel 1979) ont postulé une théorie unifiée des deux forces : l'interaction électrofaible, prédisant l'existence des bosons intermédiaires de jauge  $W$  et  $Z$ . Découverts en 1983 au CERN.

2 problèmes dans cette théorie

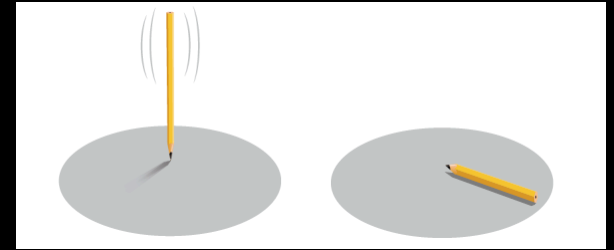
- Ni les bosons intermédiaires ( $W, Z$ ); l'interaction
- Ni les fermions de matière  
Peuvent avoir de masse

→ Solution mécanisme de Higgs, Englert, Brout

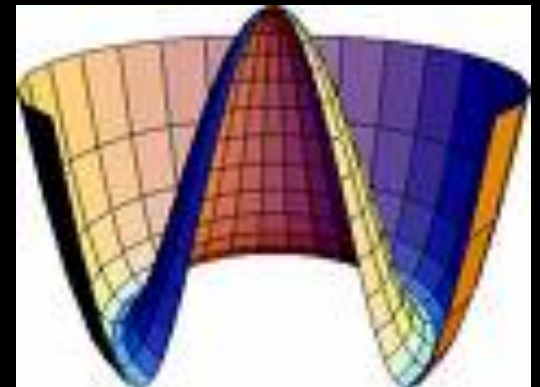
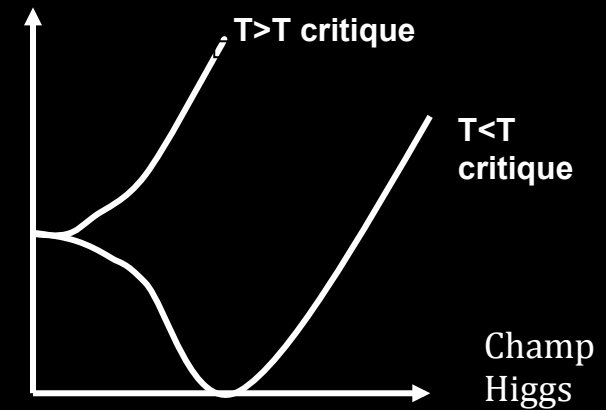
A l'origine tous les champs sont sans masse (comme le photon), mais l'état fondamental est instable.

A un moment de l'évolution de l'Univers celui-ci tombe à un état qui brise la symétrie (de masse).

Alors les  $W, Z$  obtiennent une masse et un nouveau champ apparaît (le Higgs) qui par ses interactions donne la masse aux fermions.



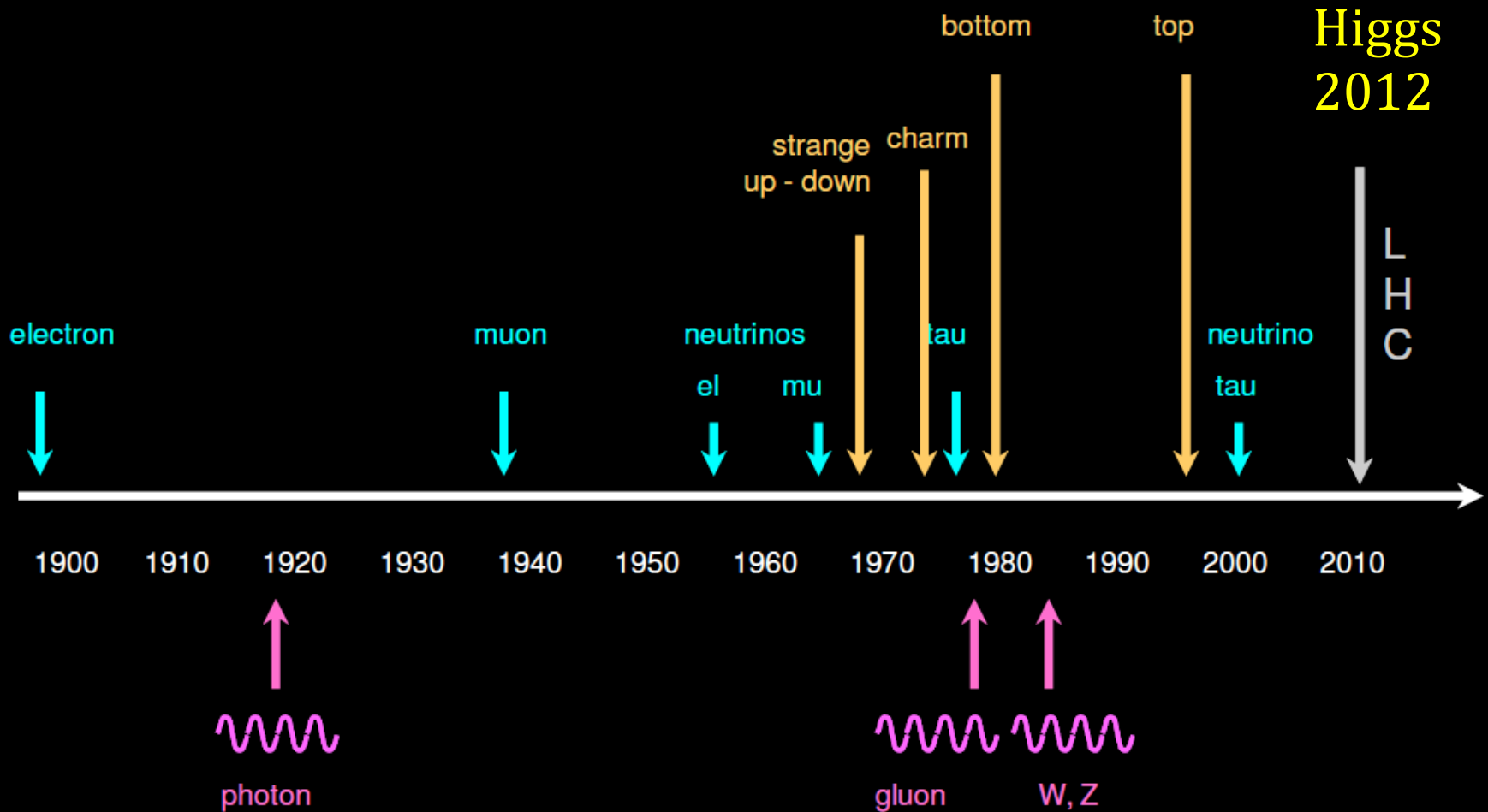
Energie du vide



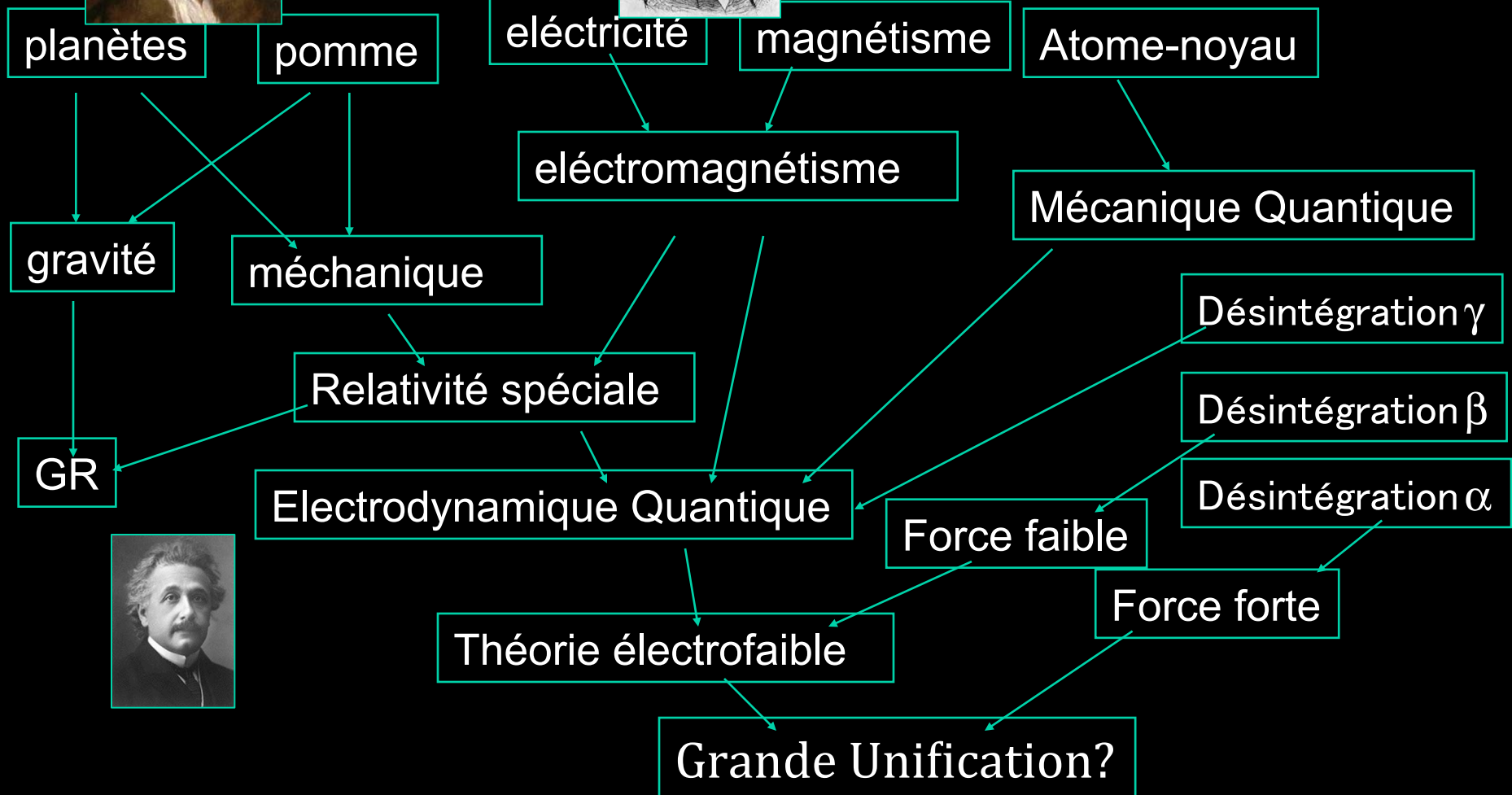
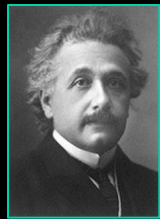
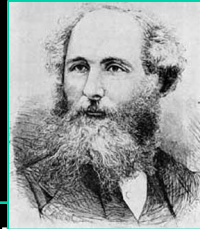


# Un siècle des découvertes en Physique des Particules

## → Le Modèle Standard des Particules (MSP)



# La chaîne d'or des unifications



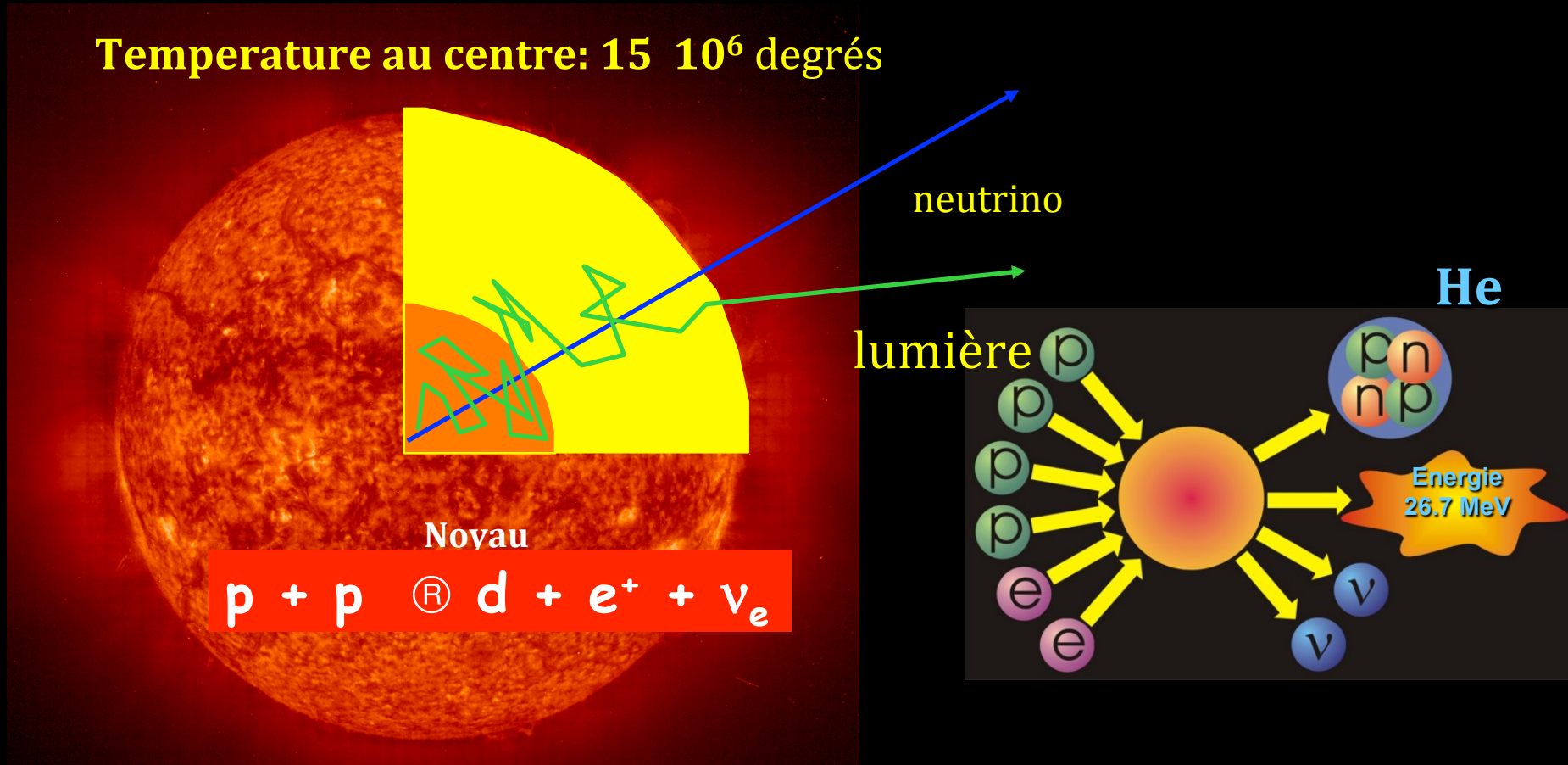
# La meilleure compréhension de la mécanique quantique et de la physique nucléaire ont permis une meilleure compréhension de la physique stellaire

- **Cycle de vie des étoiles 1938** Opik+Gamow
- **Source de la puissance stellaire (soleil) 1939** Bethe (cycles pp et CNO)
- **Evolution des étoiles\***
  - **Nains blancs 1926** (compagnon de Sirius B, tenu par la dégénérescence de Fermi)
  - **Etoiles à neutrons 1935** Chandrasekhar reste de Supernova Zwicky et Baade 1934
  - **Trous noirs 1939** Oppenheimer et Snyder
- **Création des éléments aux étoiles 1957**
  - Geoffrey and Margaret Burbidge , Holy and Fowler

\*Remarquez les dates, application quasi-directe de la nouvelle physique

# Le soleil equilibre de la gravité et de l'énergie produite par fusion

Temperature au centre:  $15 \cdot 10^6$  degrés



2001/02/16 01:19

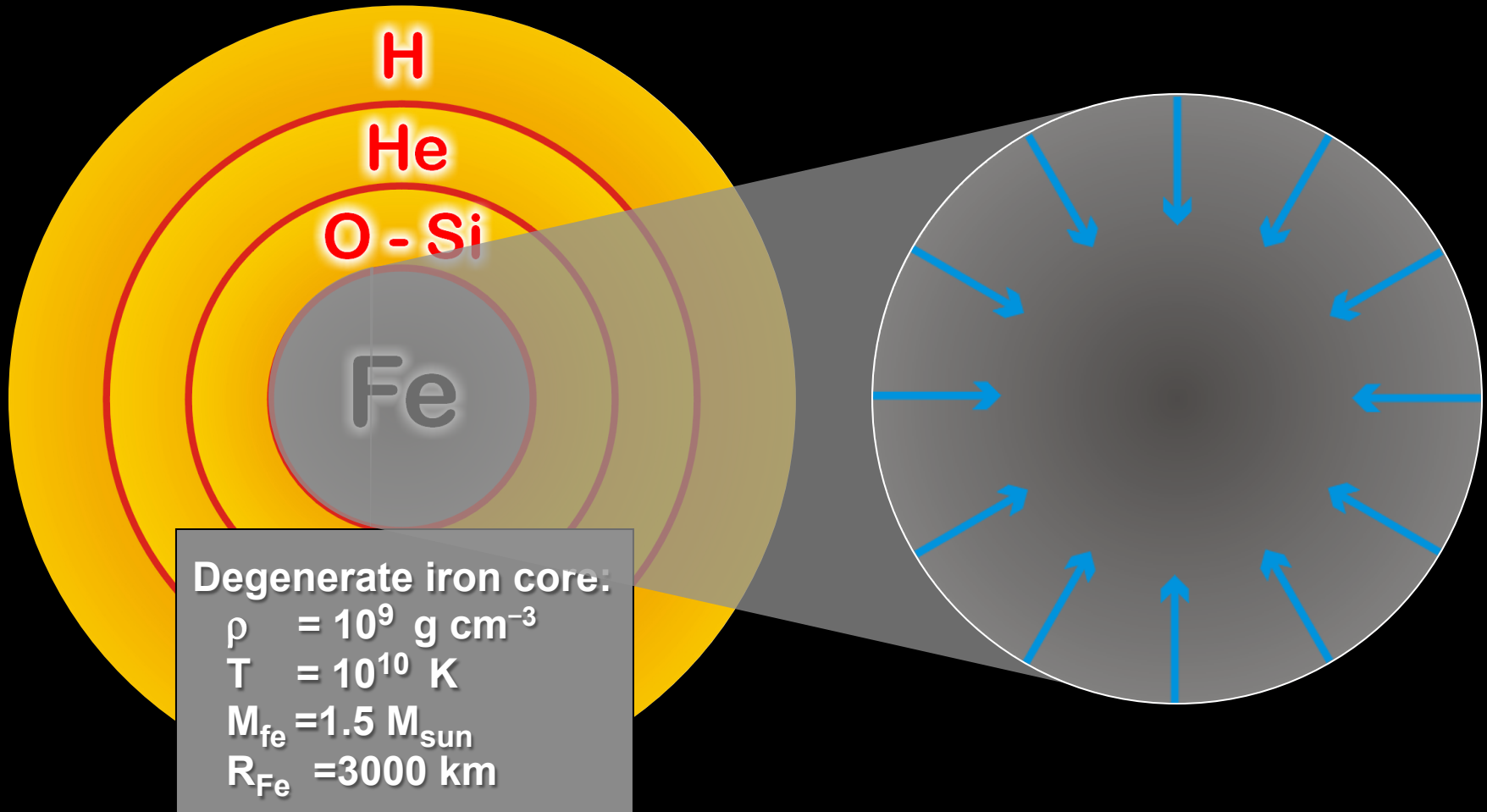
Rayonnement solaire : 99 % lumière, 1 %  $\nu$   
Sur terre 66 milliards  $\nu/\text{cm}^2 \text{ sec}$



# Evolution et fin de vie d'une étoile: Supernova

structure onion

Collapse (implosion)



Degenerate iron core:

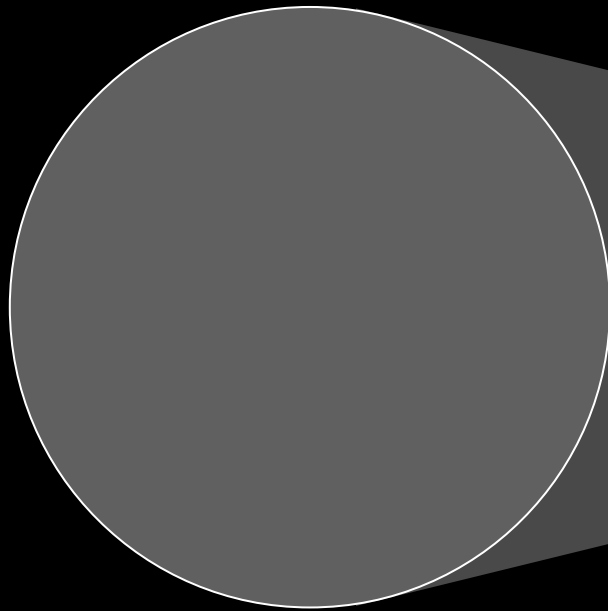
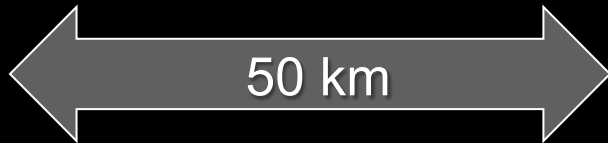
$$\rho = 10^9 \text{ g cm}^{-3}$$

$$T = 10^{10} \text{ K}$$

$$M_{\text{Fe}} = 1.5 M_{\text{sun}}$$

$$R_{\text{Fe}} = 3000 \text{ km}$$

## Newborn Neutron Star

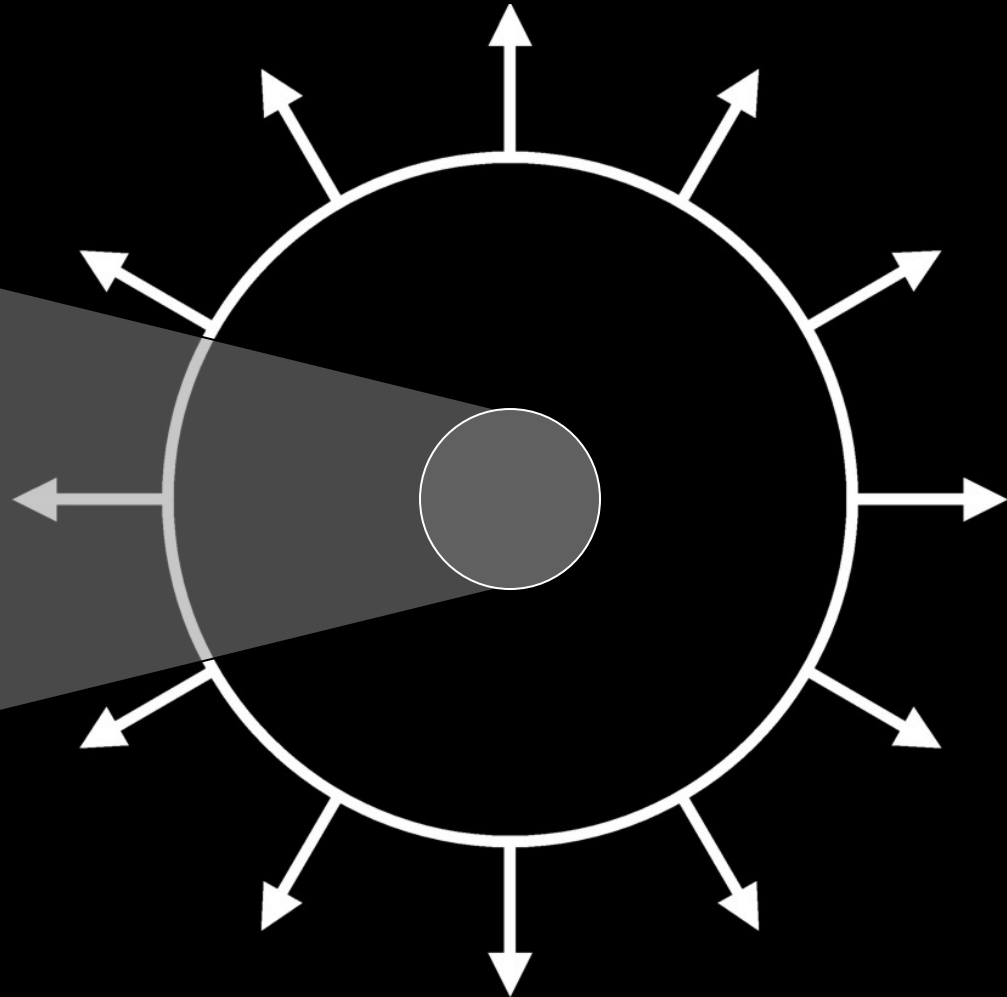


## Proto-Neutron Star

$$\rho = \rho_{\text{nuc}} = 3 \times 10^{14} \text{ g cm}^{-3}$$

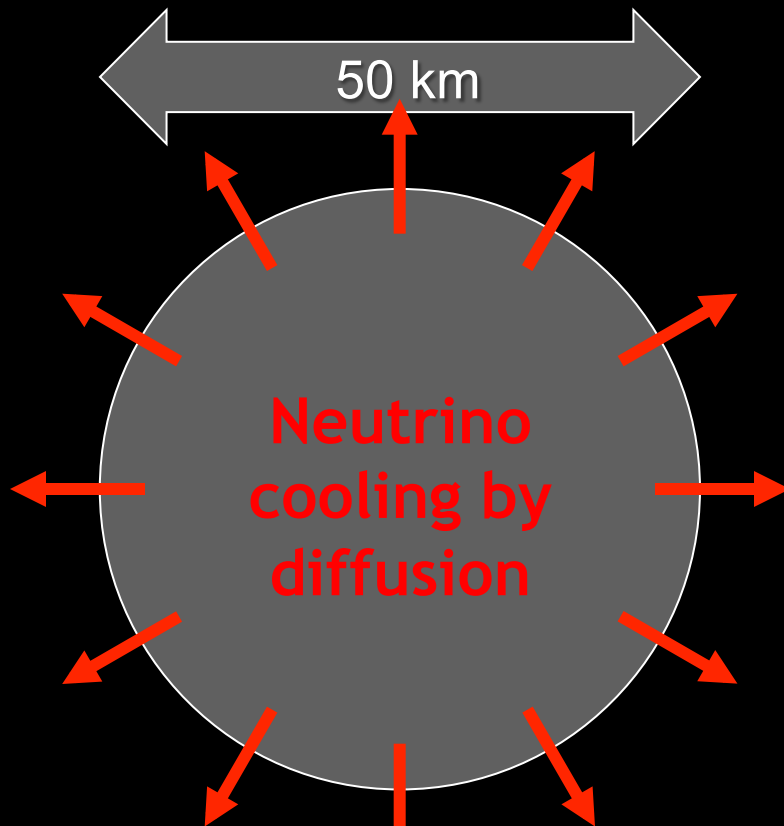
$$T = 10 \text{ MeV}$$

## Explosion



Au régime d'explosion supernova, production des éléments lourds au delà du Fer.

## Newborn Neutron Star



## Proto-Neutron Star

$$\rho = \rho_{\text{nuc}} = 3 \times 10^{14} \text{ g cm}^{-3}$$

$$T = 10 \text{ MeV}$$

## Gravitational binding energy

$$E_b = 3 \times 10^{53} \text{ erg} = 17\% M_{\text{SUN}} c^2$$

This shows up as

99% Neutrinos

1% Kinetic energy of explosion

0.01% Photons, outshine host galaxy

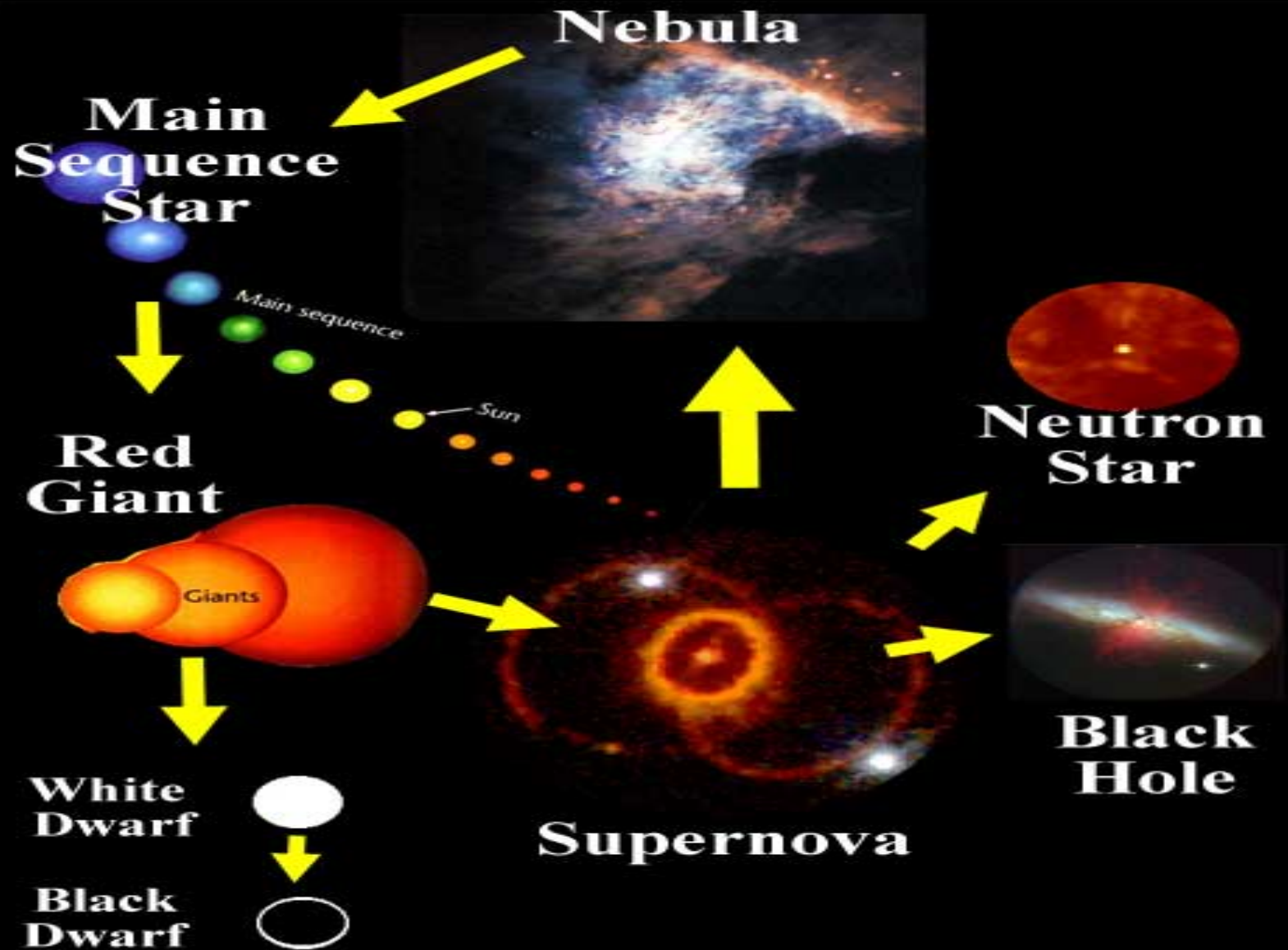
## Neutrino luminosity

$$L_\nu = 3 \times 10^{53} \text{ erg} / 3 \text{ sec}$$

$$= 3 \times 10^{19} L_{\text{SUN}}$$

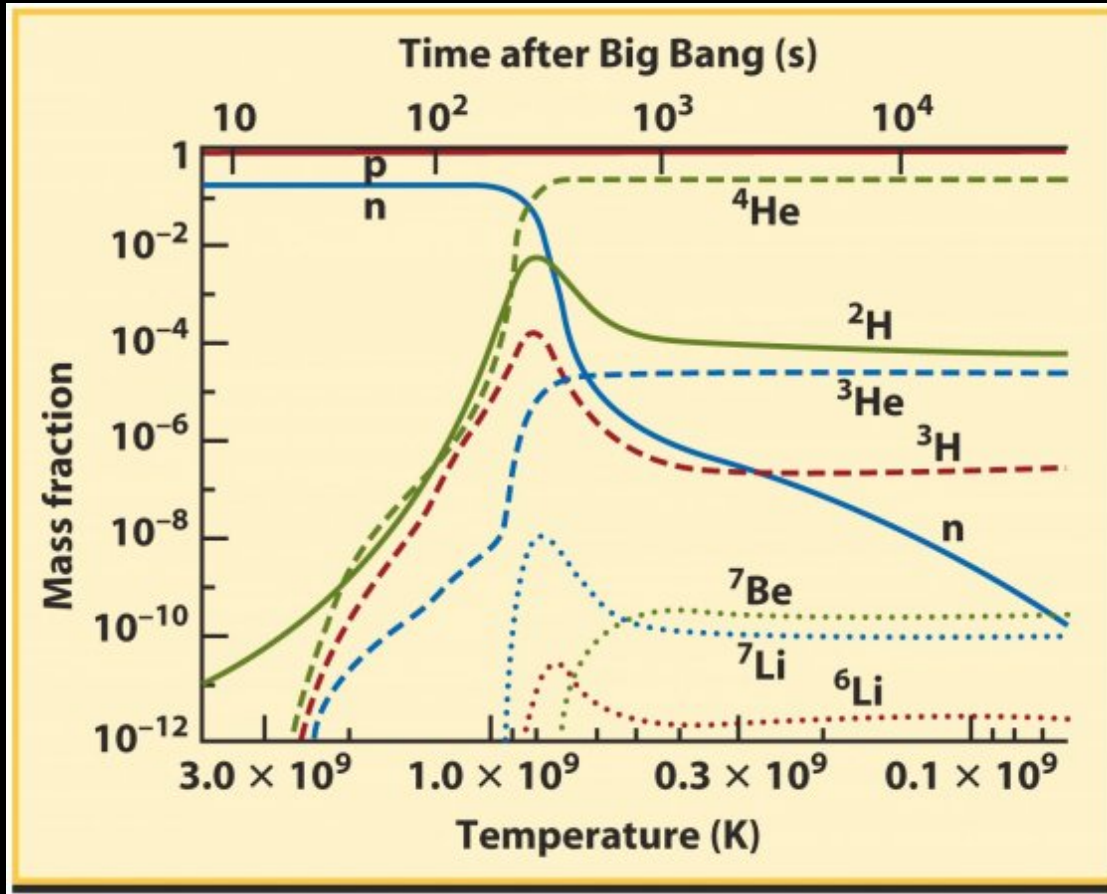
While it lasts, outshines the entire visible universe

# Evolution des étoiles





Physique Nucléaire et cosmologie dans le cadre du Big Bang : Jeu subtil entre interactions et désintégration du neutron, que quelques minutes pour créer les éléments  $D^2$ ,  $He^3$ ,  $He^4$ ,  $Li^7$  Alpher Bethe Gamow 1948



*Les autres éléments? Fusion au cœur des étoiles et réactions nucléaires aux explosions supernovae*

# De l'Astrophysique à l'Astroparticule (1912-2017)

## Nouveaux Observatoires

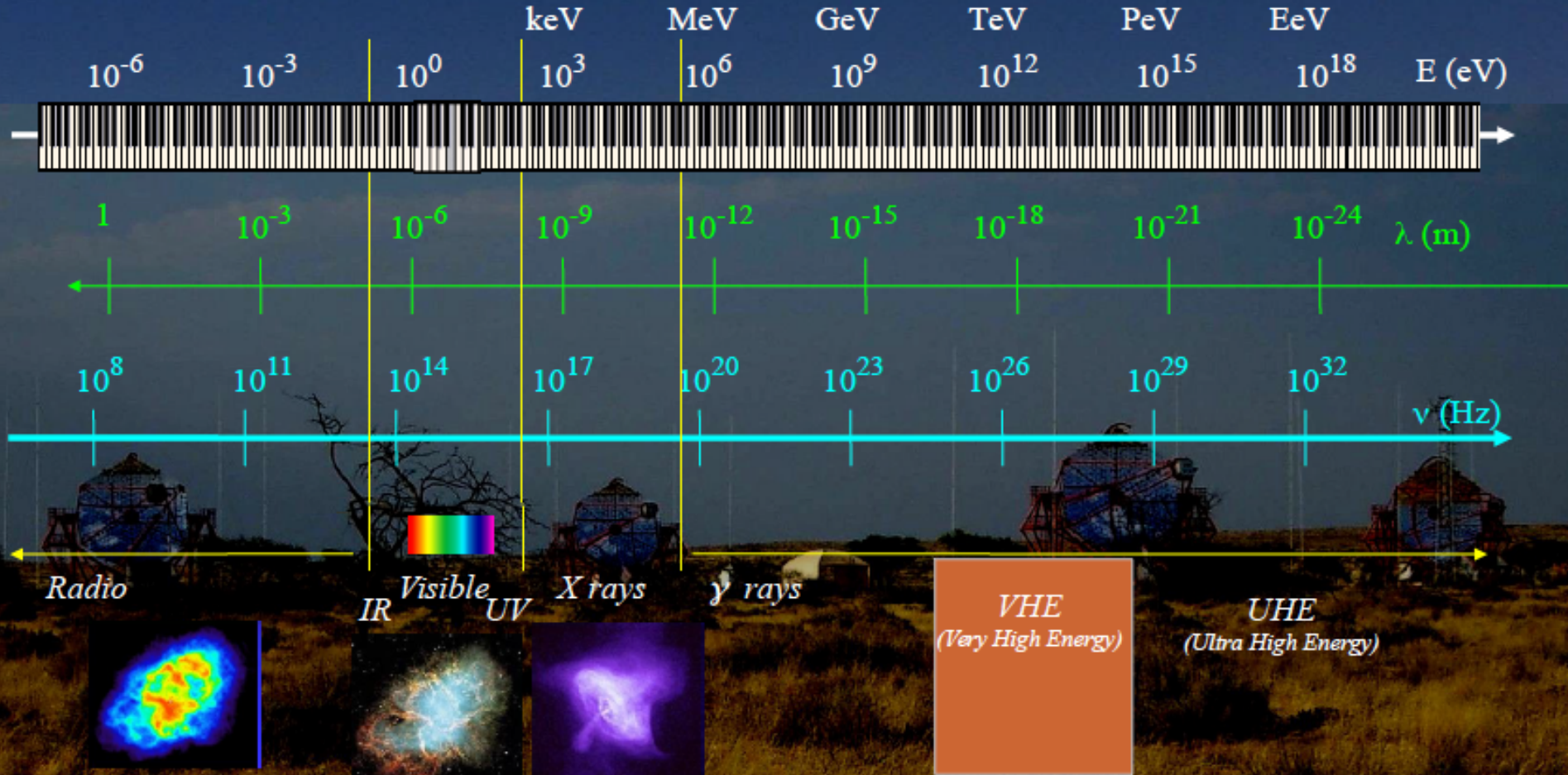
1. Couvrant tout le spectre du rayonnement électromagnétique
2. Des rayons cosmiques
3. Des neutrinos et matière noire
4. Des ondes gravitationnelles
5. Les grands relevés

Le véritable voyage de découverte ne consiste pas à chercher de nouveaux paysages, mais à avoir de nouveaux yeux.



Visible = 1 octave → spectre électromagnétique un piano à 15 m

# Electromagnetic spectrum





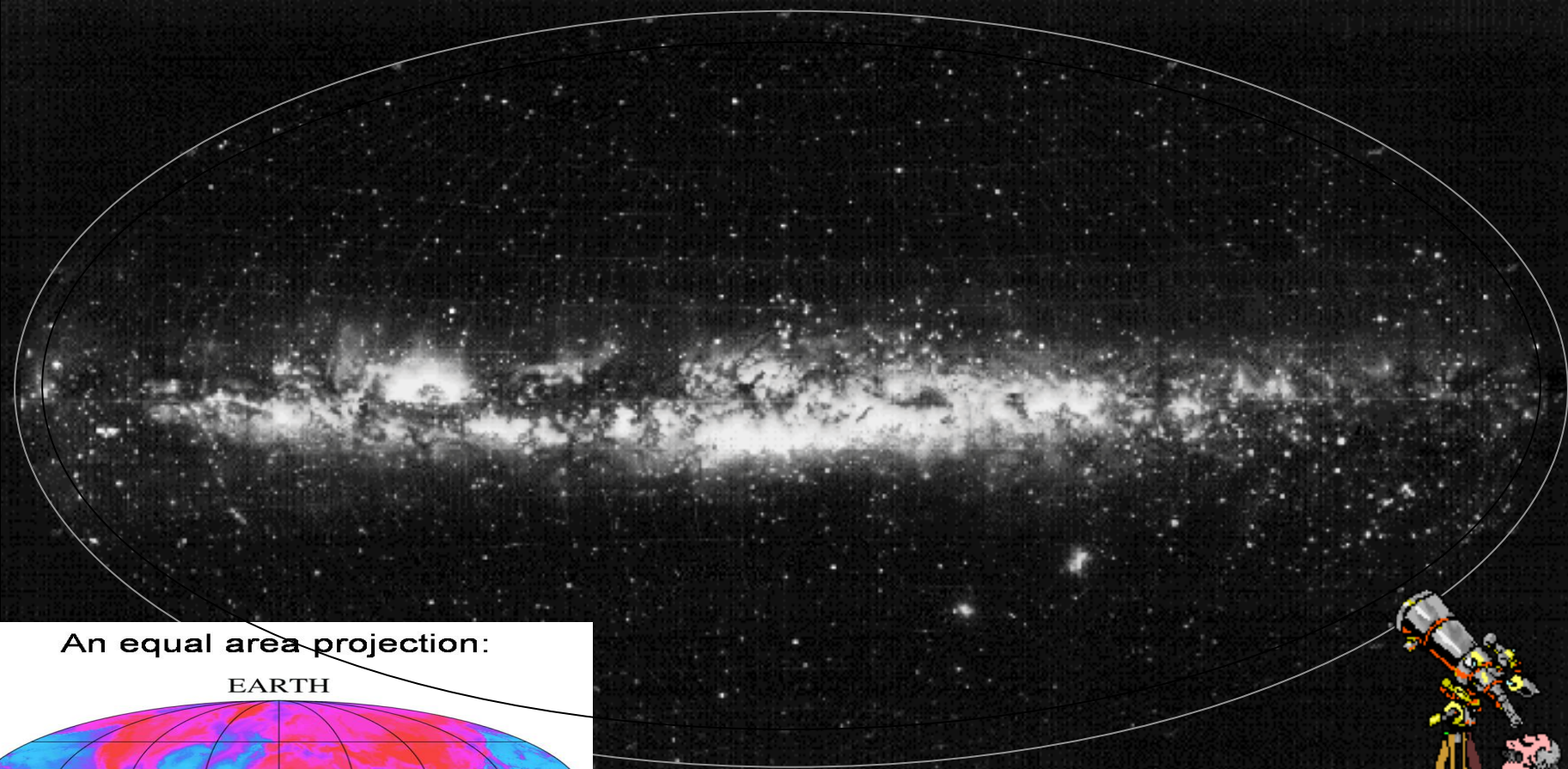
Radio

Infrared

Lumière visible  
(eV)

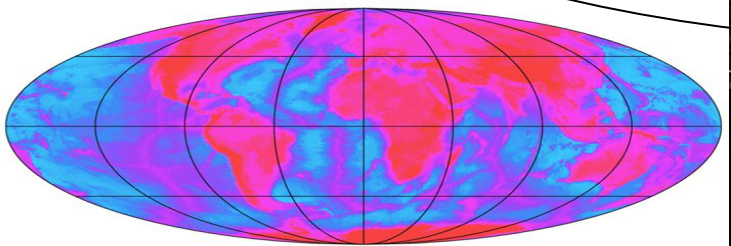
X-rays

Gamma rays



An equal area projection:

EARTH







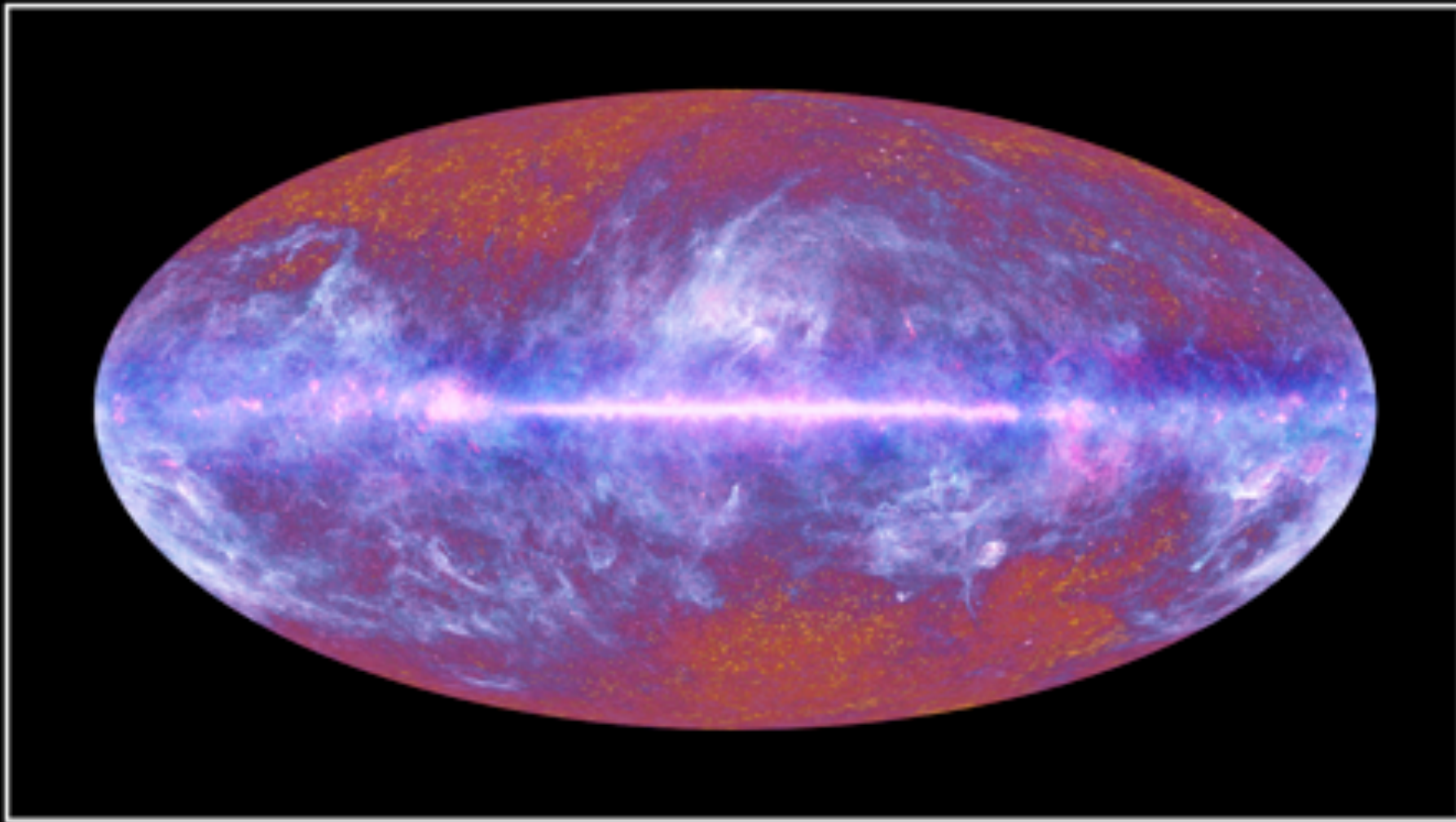
Radio  
( $10^{-6}$  eV)

Infrared

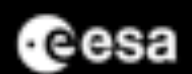
Visible Light

X-rays

Gamma rays

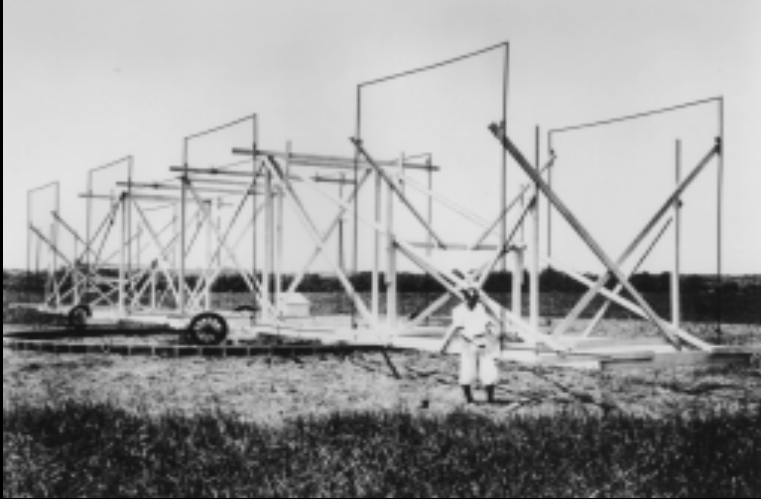


La carte intégrale du ciel par Planck



[c] ESA, consortium HFI et LFI, juillet 2010

## Radio-astronomie les commencements difficiles



Karl Jansky 1935 signal  
radio du centre galactique

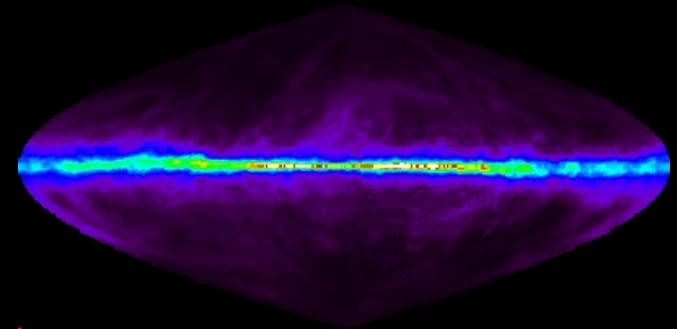
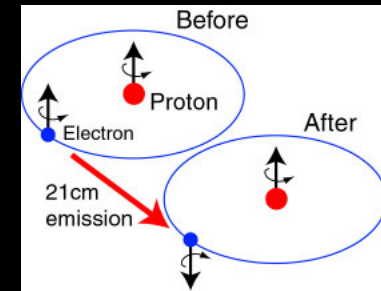


Grote Rebers 1944 première  
cartographie radio de la galaxie  
Difficultés de publication

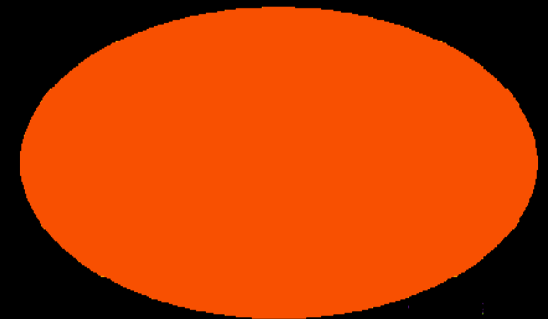
Bolton et Stanley 1949 association du signal radio avec un signal optique  
(Crab Supernova 1054)

# Quelques découvertes radio en Cosmologie

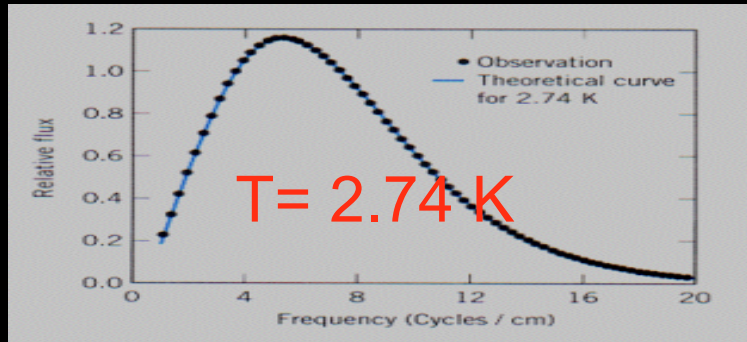
- **Ligne H<sub>2</sub> 21 cm**, prédite de Hulst 1945, détectée par H. Ewen et E. Purcell 1951. Entrée disciplinaire des radioastronomes au statut d'astrophysicien jusqu'à ce moment considérés comme plus ou moins des ingénieurs



- **Penzias and Wilson 1965** Bruit de Fonds Cosmologique

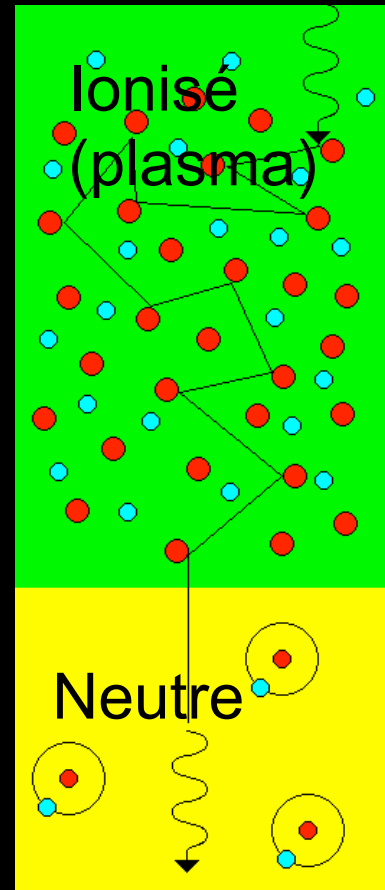


# Fonds diffus cosmologique (CMB, Penzias and Wilson Nobel 1965)



COBE Results  
(1990s)

Uniforme and isotrope  
@  $10^{-5}$

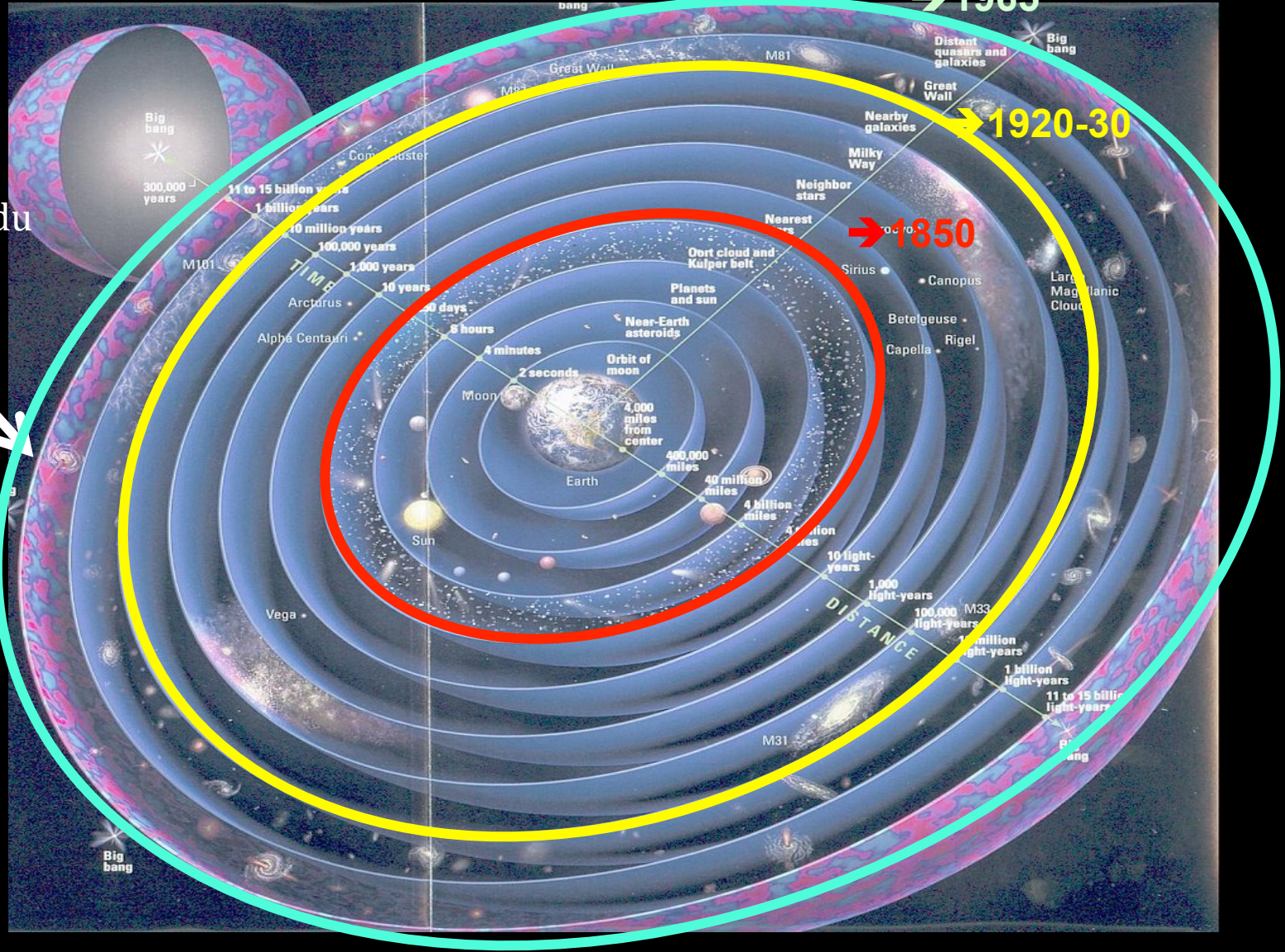


Si l'Univers va vers des plus grandes densités/températures dans le passé, il y a un moment que la température était proche de celle de la surface du soleil. Il y a eu alors rayonnement *de corps noir* qui provient des photons diffusés pour la dernière fois au moment où l'Univers devient transparent, quand les noyaux et les électrons forment les atomes neutres (Recombinaison,  $t=400.000$  ans après Big Bang)

Emis au visible ( $T= 3000^0$ ) arrivent en ondes radio car leur longueur d'onde est étirée par l'expansion universelle



En s'éloignant vers le passé on tombe sur l'horizon du visible, le « mur » de recombinaison → 1965

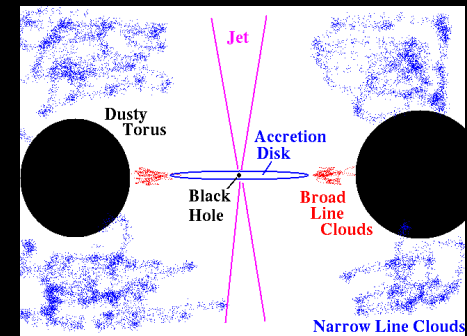
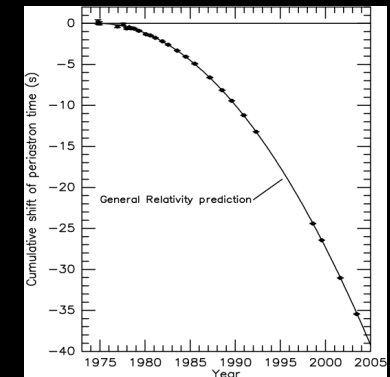
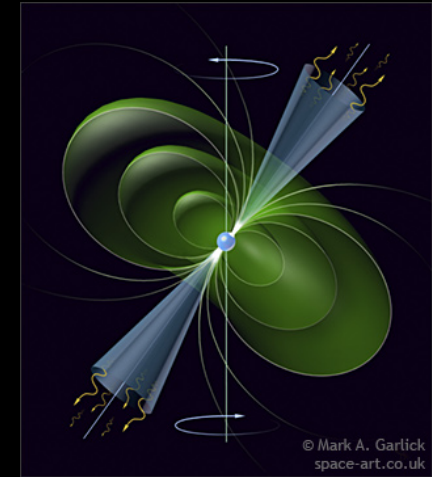


L'horizon du e.m visible



# Quelques découvertes radio de l'Univers « violent »

- « Univers violent »
  - **Pulsars 1967 Hewish, Bell** étoiles à neutrons en rotation
  - **Pulsars binaires 1979 Hulse and Taylor** test de la production des ondes gravitationnelles
  - **Quasars 1963 M. Schmidt 3C273** distant 2 milliards d'années (Noyaux Actifs de Galaxies)







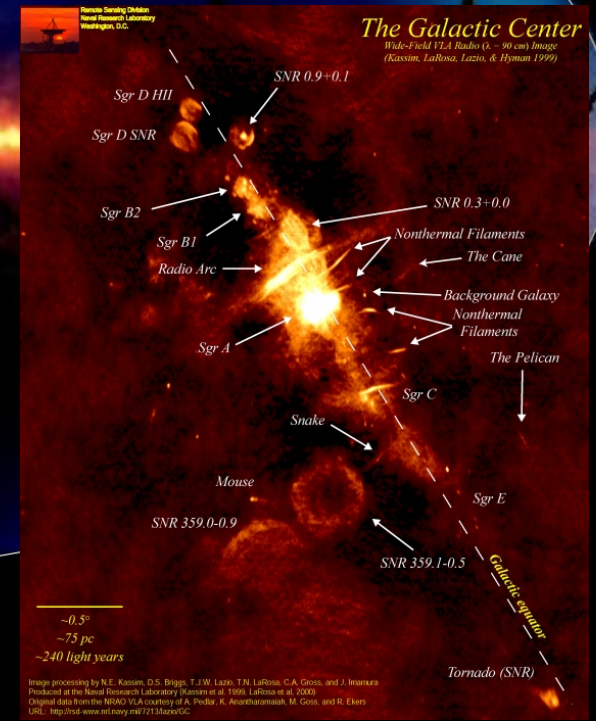
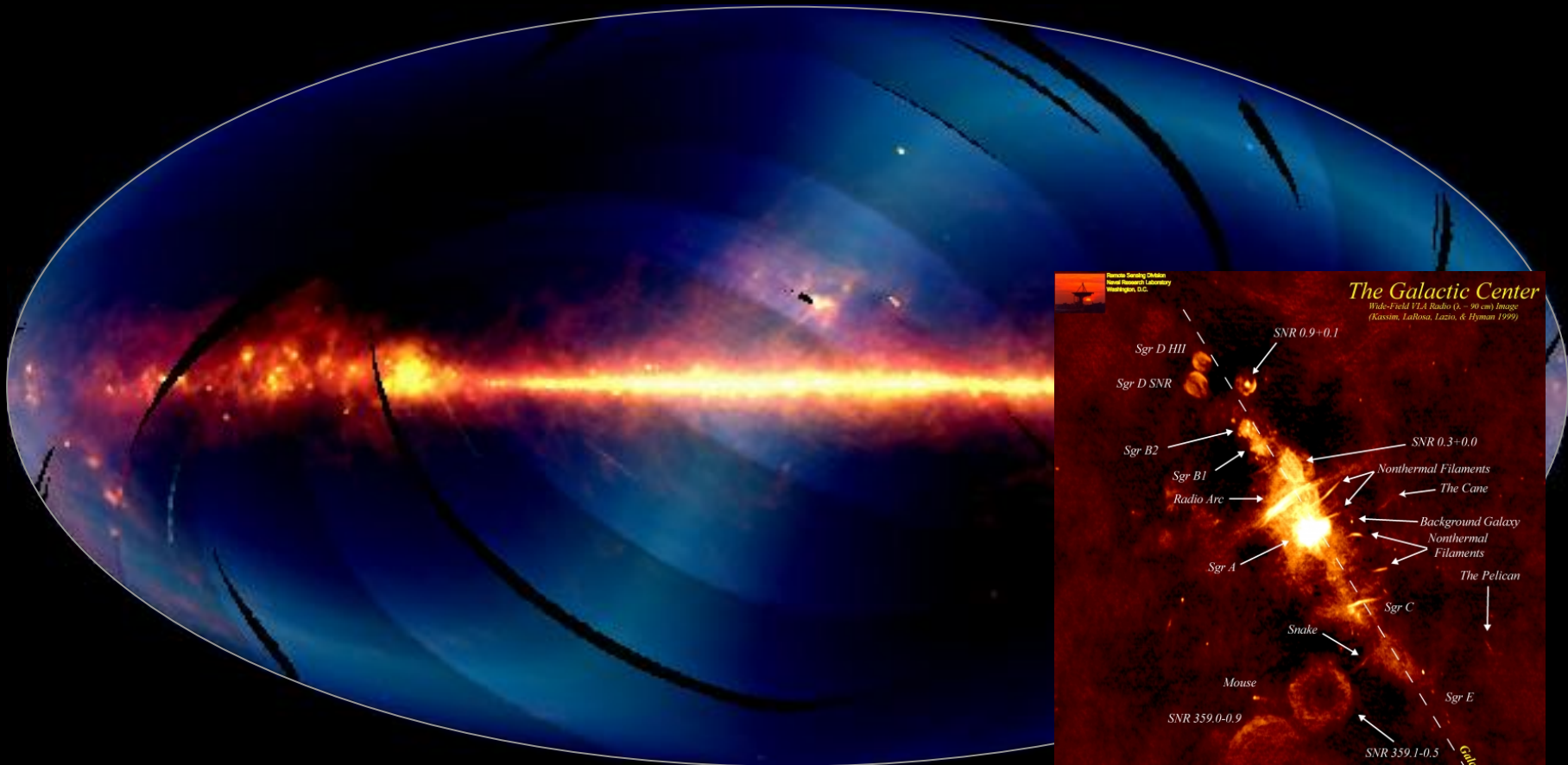
Radio

Infrarouge  
( $10^{-2}$  eV)

Visible Light

X-rays

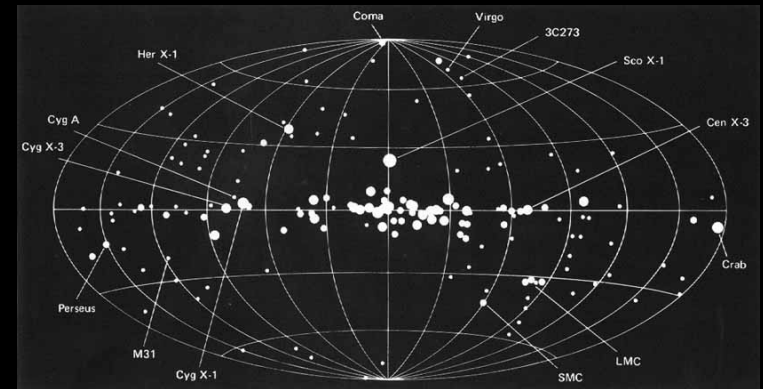
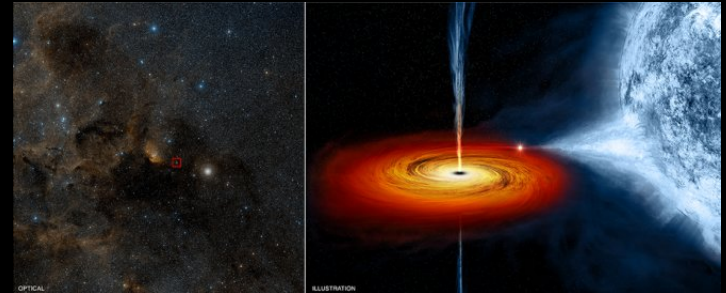
Gamma rays



Trou noir au centre de la galaxie Sgr A\* 1974

# Quelques découvertes de l'Univers « violent » en rayons X

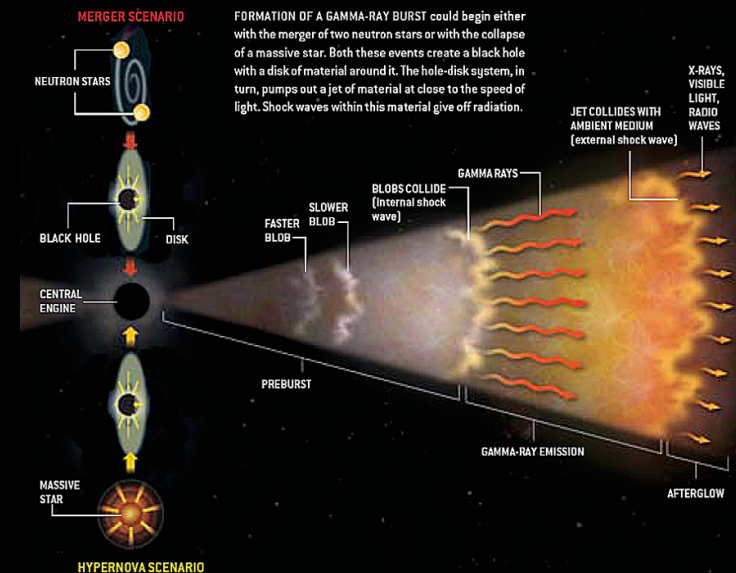
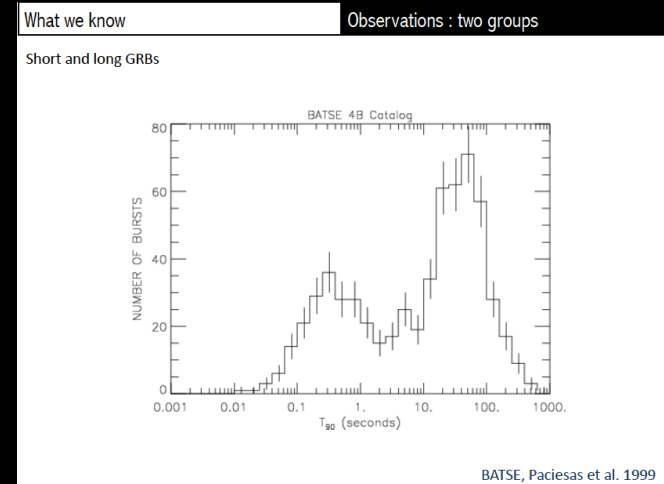
- **Cygnus X-1** 1960's Trou noir en rayons X, compagnon invisible de 10 M solaires
- **Extrasolar X-rays Sco-X1** Giacconi et al
  - Technologie du nucléaire sur satellite
- **UHURU (1970)** 300 sources plusieurs étaient des systèmes binaires compacts avec étoiles à neutrons rayons X émises par le gaz qui circule la zone d'accrétion
- **Nouvelle génération: Chandra, XMM-Newton (1999)**





# Gamma Ray Bursts en rayons $\gamma$

- **Vela 1963** satellite contrôle des tests nucléaires
- Examen des données a démontré l'existence (1973) des GRB en 2 groupes
  - Long: collapse d'une masse à un trou noir avec formation de jet
  - Court fusion de trous noirs et /ou étoiles à neutrons
- Débat galactique/extragalactique
- **BATSE sur Compton (1991)** résolution du débat: ils sont extragalactiques
- Nouvelle génération technologie physique des particules
- SWIFT, EGRET FERMI



Radio

Infrarouge

Visible Light

X-rays

Rayons Gamma

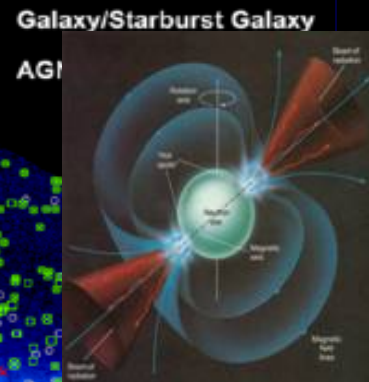
# Fermi Large Area Telescope 3FGL catalog

AGN

Pulsar



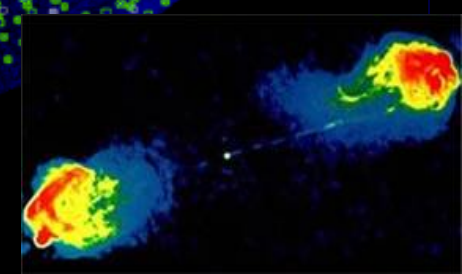
Blazar



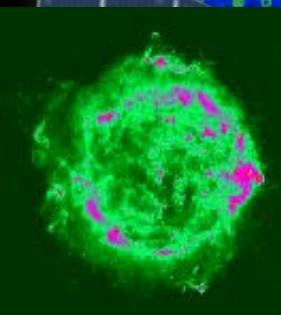
Galaxy/Starburst Galaxy

AGN

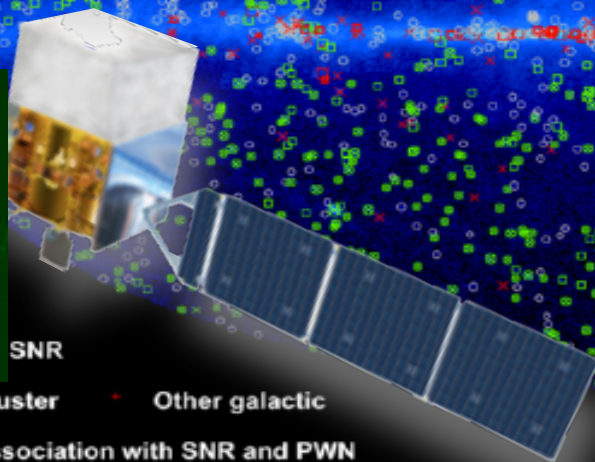
Quasar



SNR



SNR



- Globular Cluster
- Other galactic
- ◻ Possible Association with SNR and PWN

# Observatoires de photons de très haute énergie

Télescopes Cherenkov

Gamma ray

Particle cascade

~ 10 km

Cherenkov light

1°

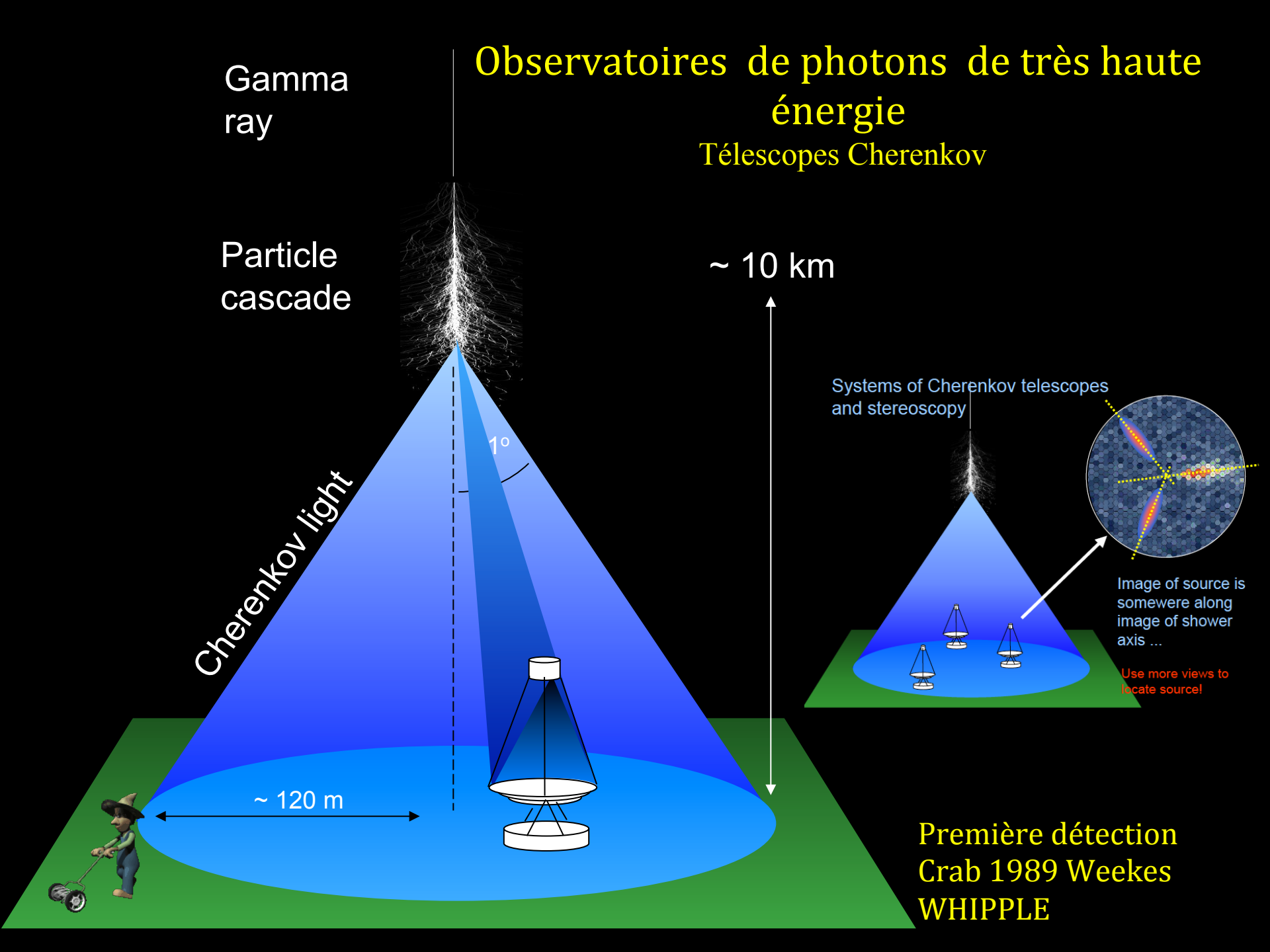
~ 120 m

Systems of Cherenkov telescopes and stereoscopy

Image of source is somewhere along image of shower axis ...

Use more views to locate source!

Première détection  
Crab 1989 Weekes  
WHIPPLE



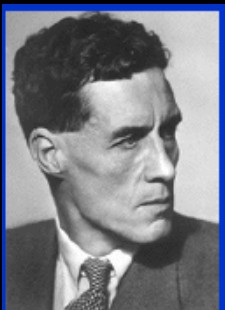
# Un grand instrument de l'Astroparticule: photomultiplicateur



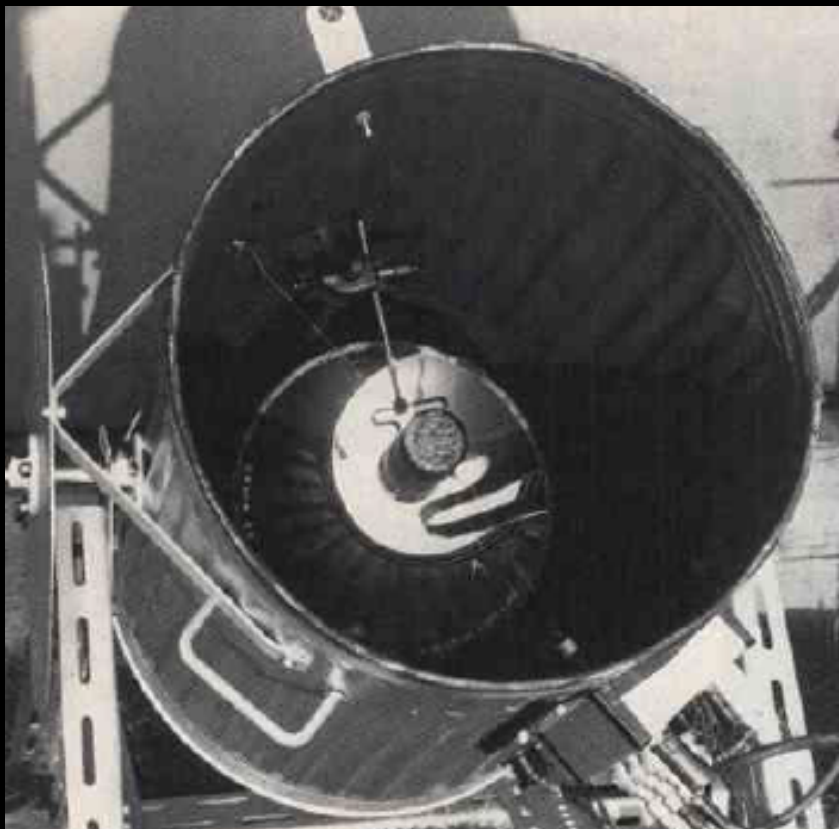
Patented in 1930 first constructed by Kubetsky in 1934 a 80 year old lady, alive and kicking well

Photoelectric effect + acceleration structure



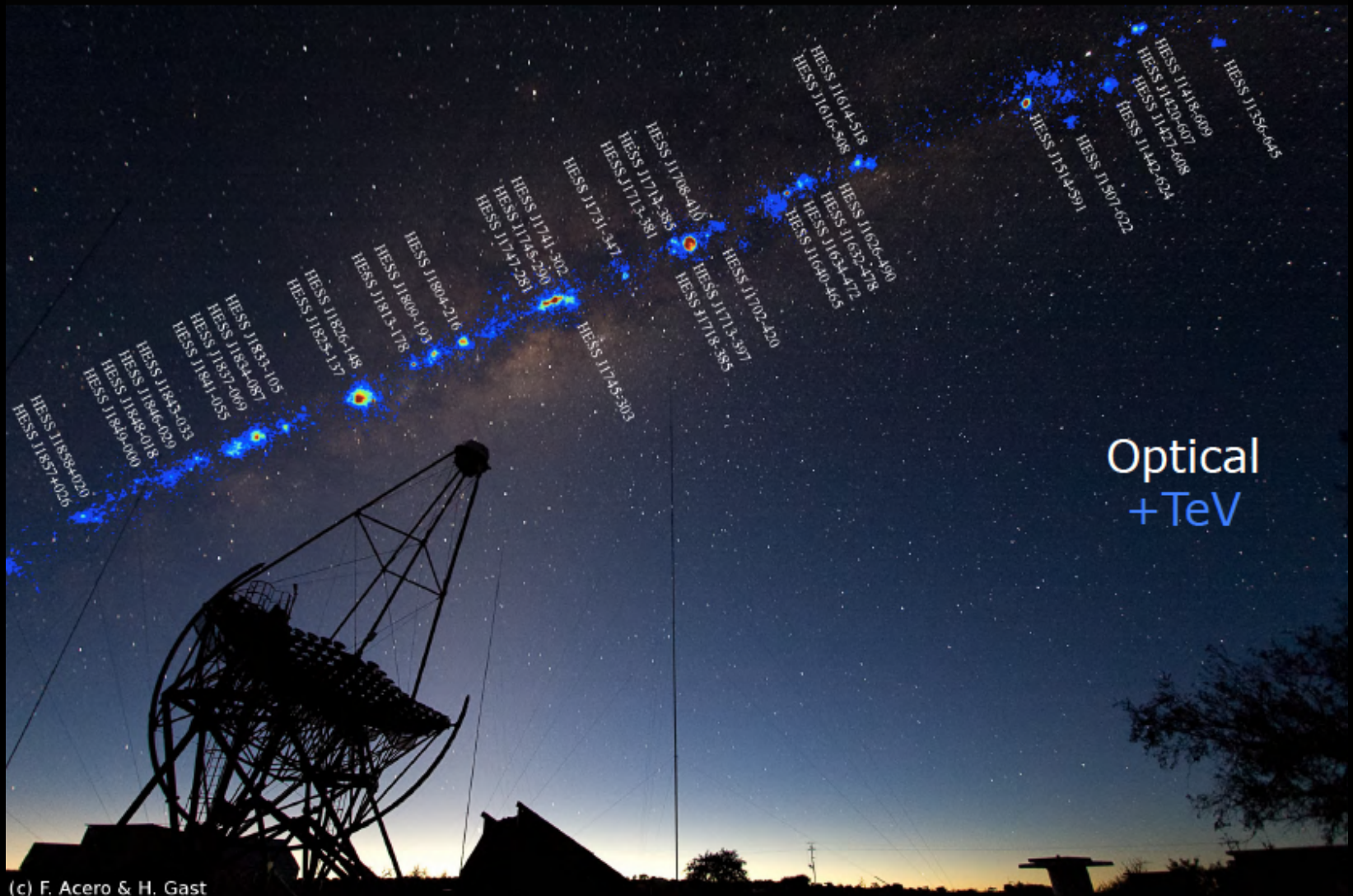


1948 Patrick Blackett was the first to mention that there shall be Cherenkov light component from relativistic particles in air showers (mostly  $e^-$ ,  $e^+$ ,  $\mu^-$ ,  $\mu^+$ )



1953 By using a garbage can, a 60 cm diameter mirror in it and a PMT in its focus Galbraith and Jelly had discovered the Cherenkov light pulses from the extensive air showers.

# The H.E.S.S./Magic/Veritas legacy of 10 last years



Radio

Infrarouge

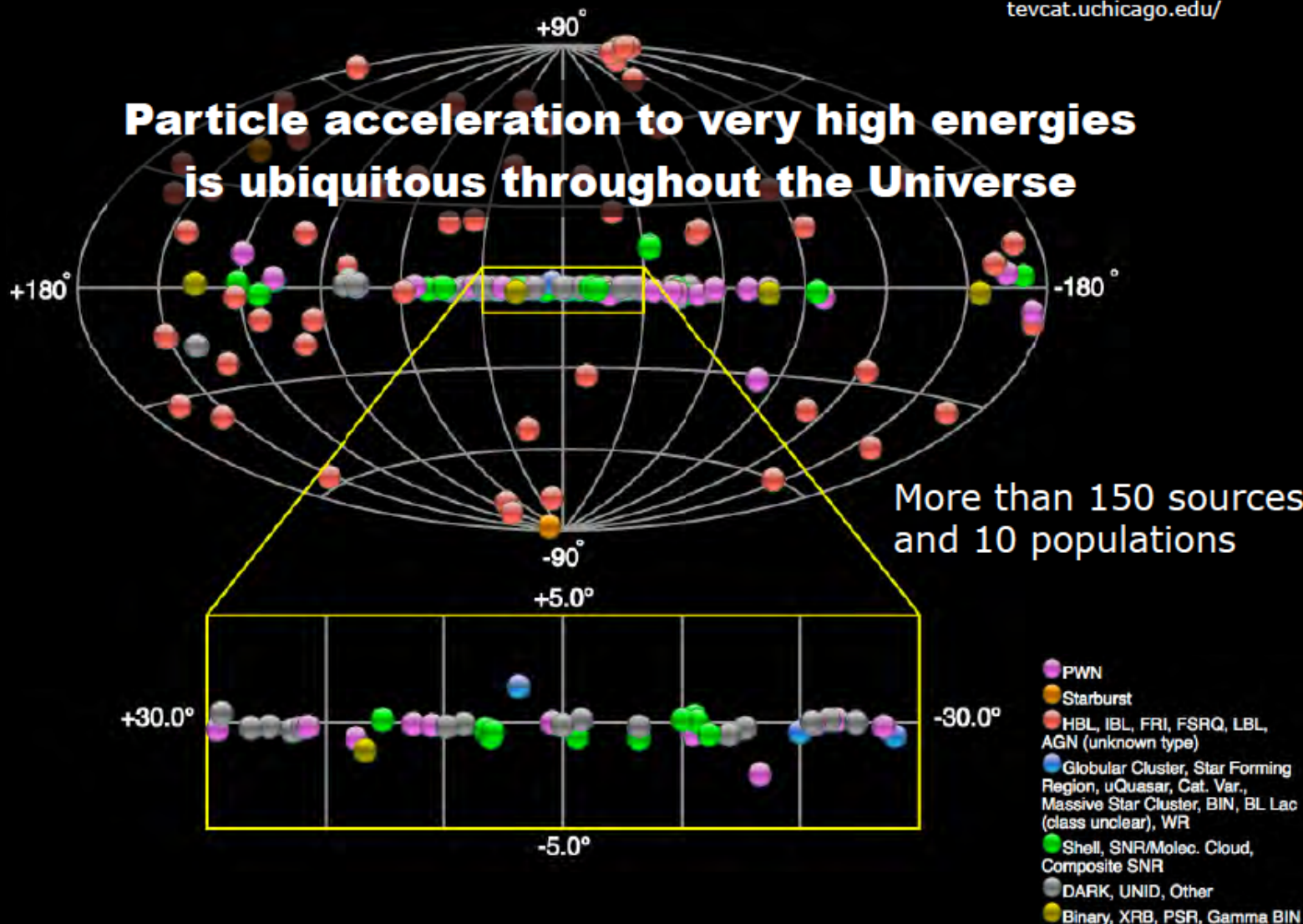
Visible Light

X-rays

Rayons Gamma

tevcat.uchicago.edu/

# Particle acceleration to very high energies is ubiquitous throughout the Universe





# Un grand observatoire en construction

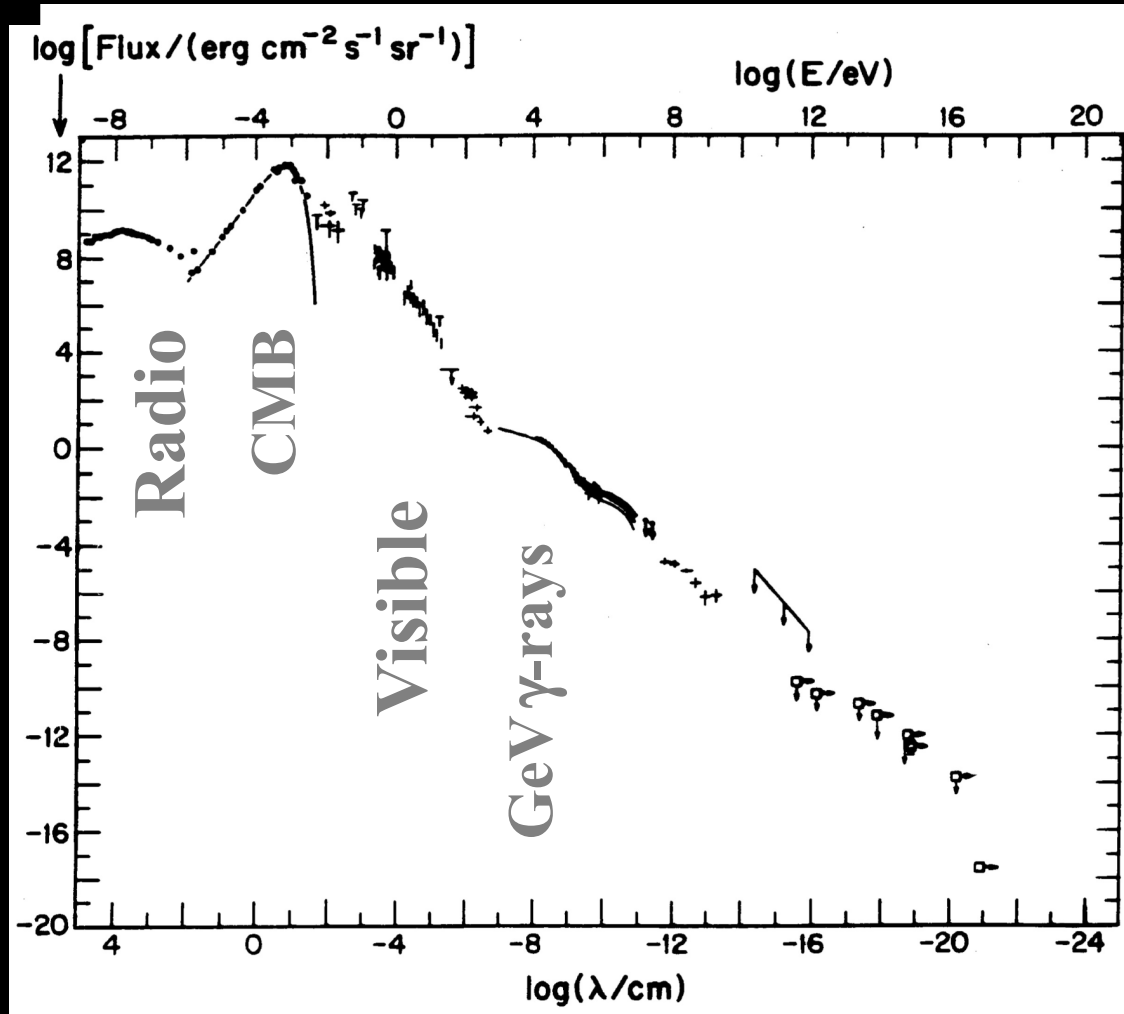




# Photons

26 ordres de grandeur en énergie et 26 ordres en flux

Flux (/  $\text{cm}^2$  /s/ sterad)



Energie de  $10^{-8}$  eV à  $10^{21}$  eV

# De l'Astrophysique à l'Astroparticule (1912-2017)

## Nouveaux Observatoires

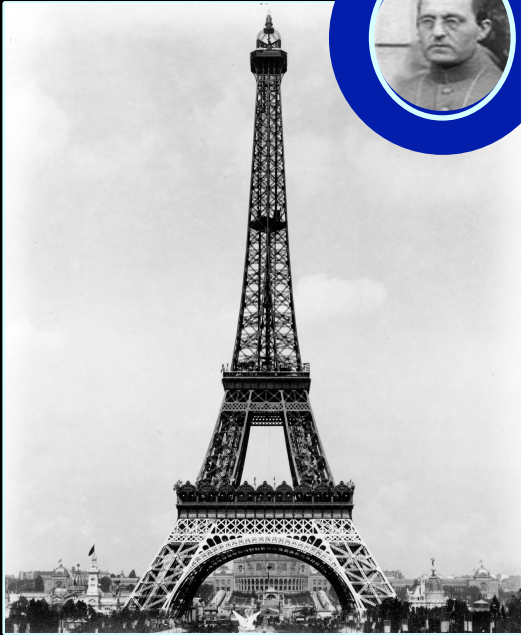
1. Couvrant tout le spectre du rayonnement électromagnétique
2. Des rayons cosmiques
3. Des neutrinos et matière noire
4. Des ondes gravitationnelles
5. Les grands relevés

Le véritable voyage de découverte ne consiste pas à chercher de nouveaux paysages, mais à avoir de nouveaux yeux.

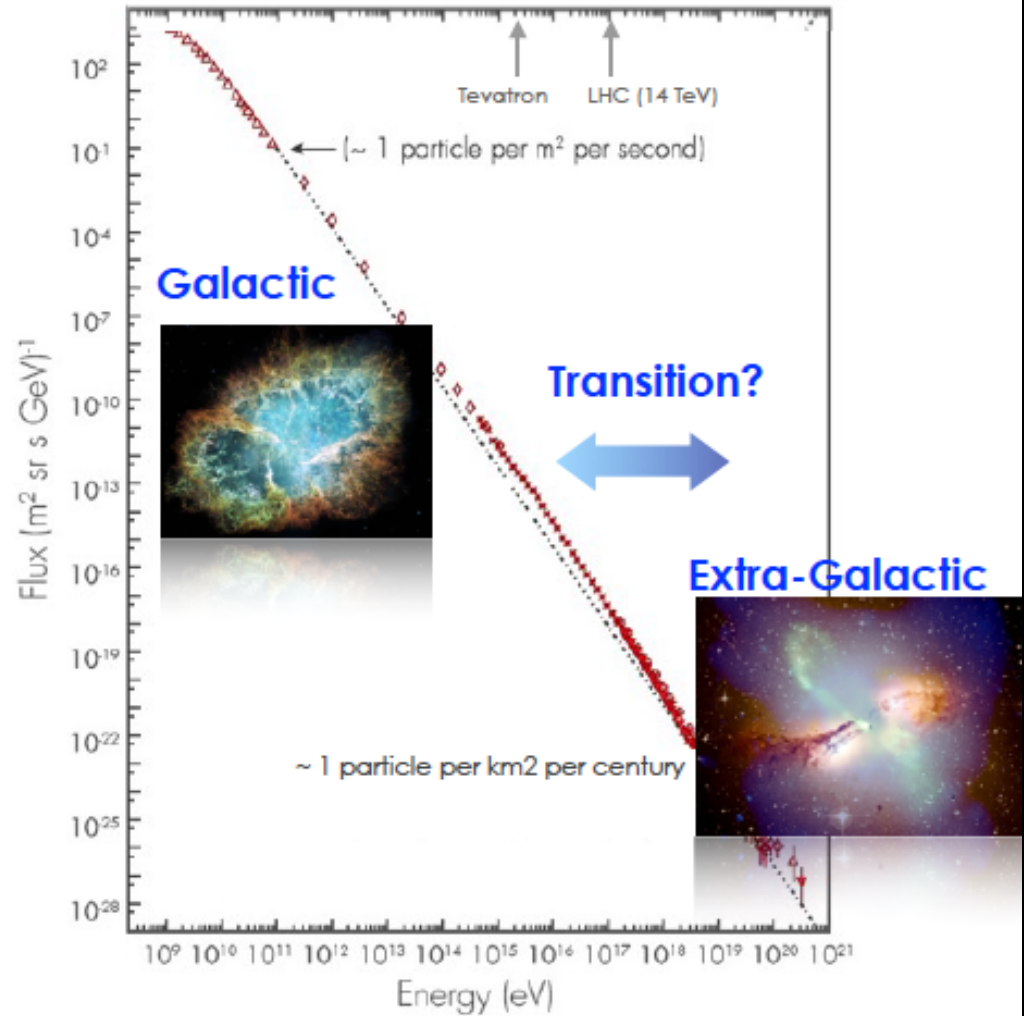


# Rayons cosmiques chargés

## 12 ordres de grandeur en énergie et 26 en flux



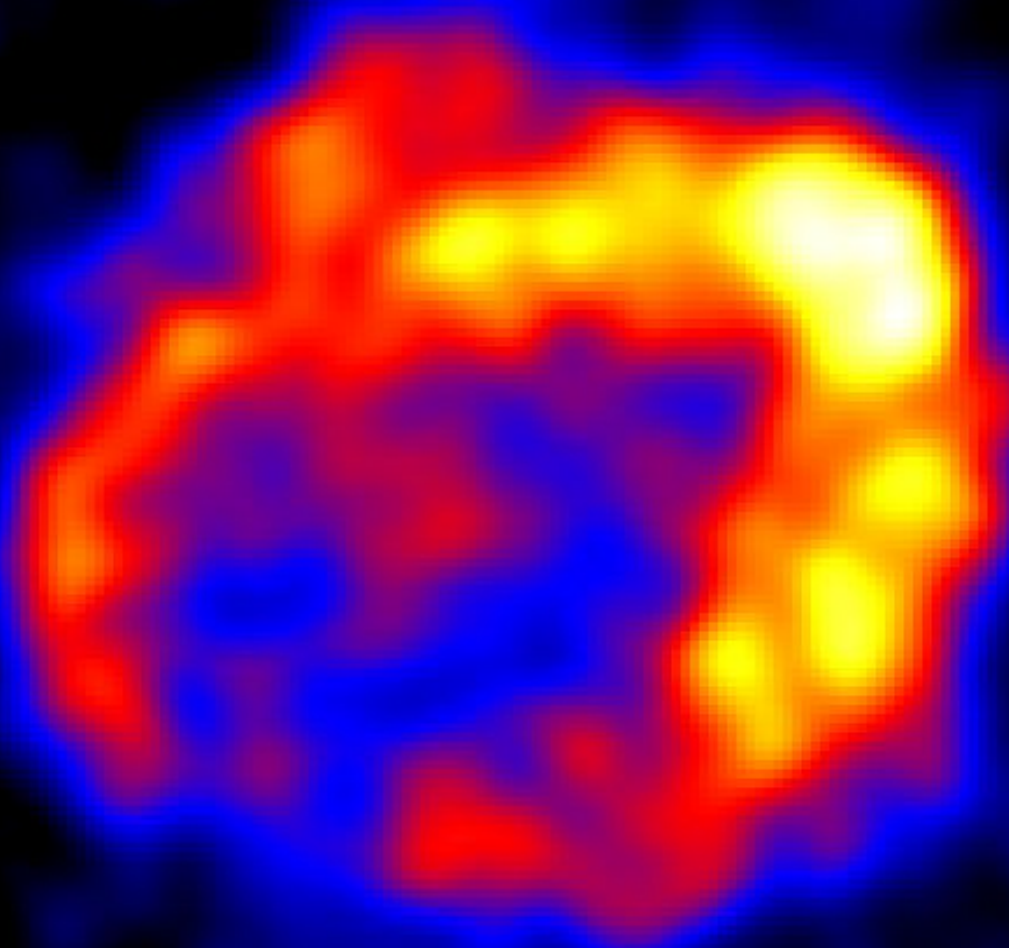
Flux ( $\text{m}^2, \text{s}, \text{sterad}$ )



Energie  $10^9$  eV à  $10^{21}$  eV

- Les premières mesures  
T. Wulff 1909-1910  
Tour Eiffel
- Prix Nobel V. Hess  
(ballon)

Les vestiges des supernova lieu de production des rayons cosmiques autour du Teraelectronvolt ?



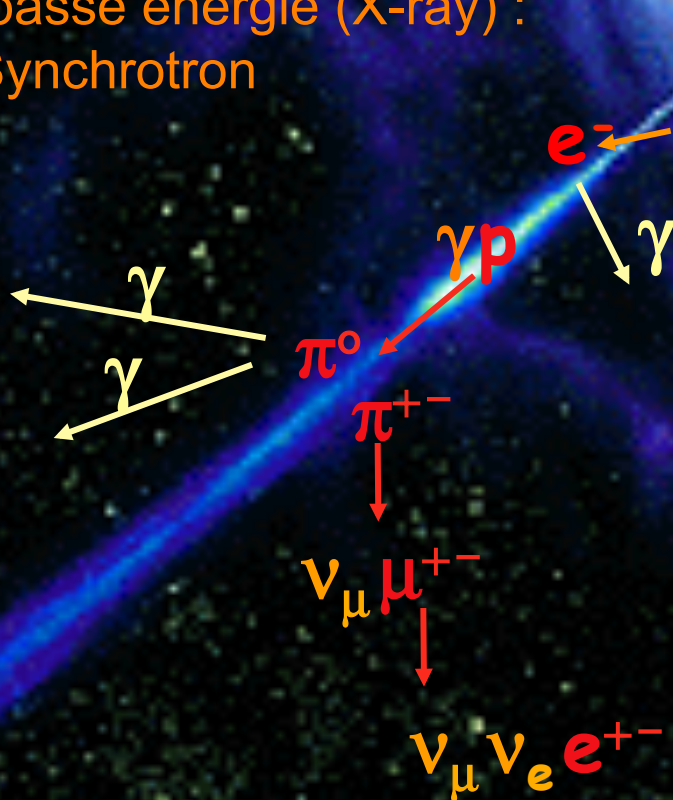


# Origine probable des rayons cosmiques de très haute énergie les trous noirs au centre des galaxies (AGN)

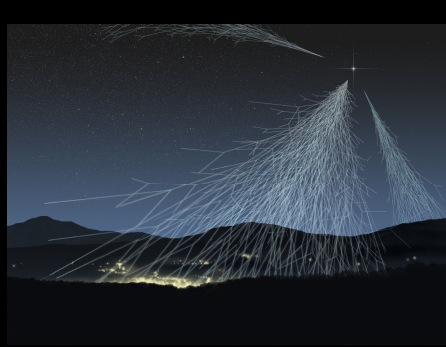
Emission basse énergie (X-ray) :  
Emission Synchrotron

• Emission de haute énergie ( $\gamma$ ):

- Compton inverse (électromagnétique)
- désintégration  $\pi^0$  (hadronique)



# Rayons Cosmiques de Très Haute Energie



ASTRI E PARTICELLE - LE PAROLE DELL'UNIVERSO



# Pierre Auger Observatory

Linsley and Scarsi 1962.  
Flyes Eye/AGASA 1990's



1660 detector stations on 1.5 km grid

27 fluores. telescopes at periphery

130 radio antennas



Province Mendoza, Argentina



14 telescopes

Refurbished HiRes

# TA detector in Utah

39.3°N, 112.9°W  
~1400 m a.s.l.

3 com. towers

Surface Detector (SD)

507 plastic scintillator SDs  
1.2 km spacing

Middle Drum (MD)

~30 km

CLF



Long Ridge (LR)

700 km<sup>2</sup>

Fluorescence Detector (FD)

3 stations  
38 telescopes

ELS

12 telescopes

12 telescopes

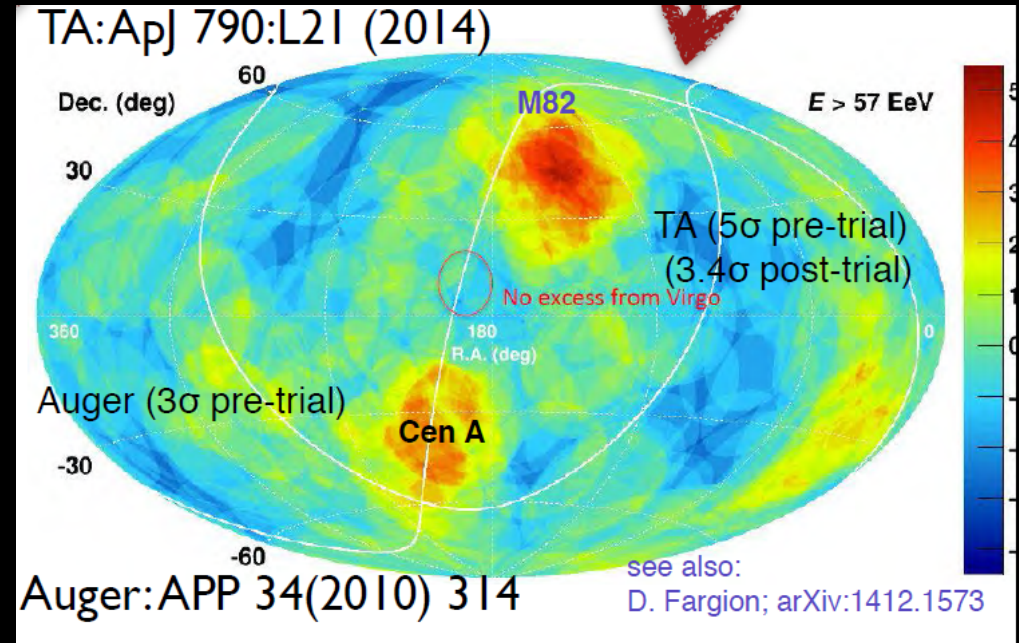
Black Rock Mesa (BR)

FD and SD: fully operational 4  
since 2008/May

H. Sagawa @ VHEPA2014

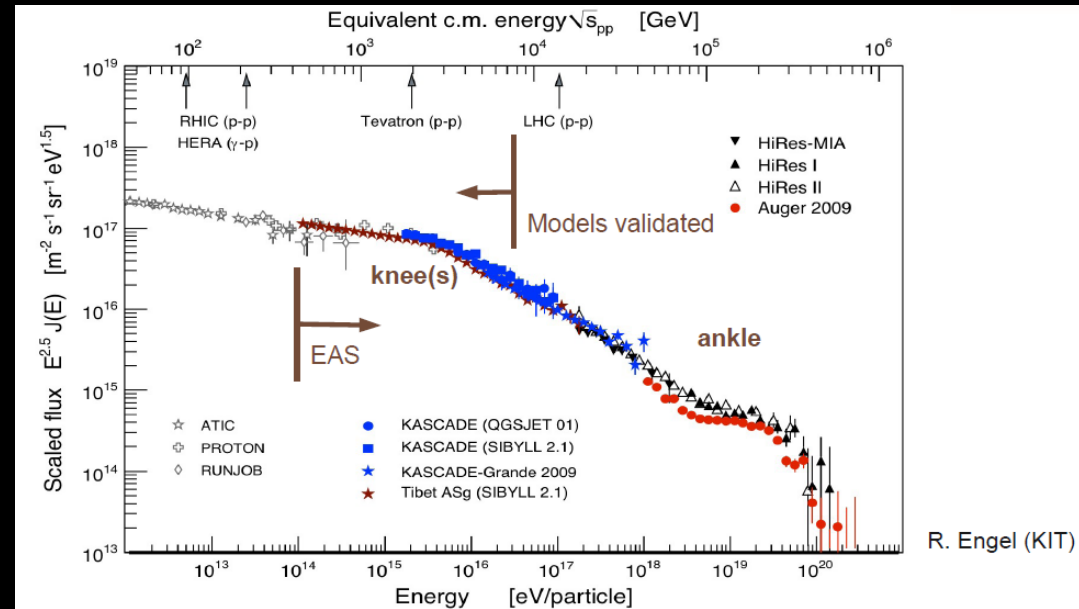


## A. Points chauds dans la carte du ciel



## B. Le spectre a une suppression

- Coupure GZK ?
- Ou
- Saveur (p vs noyaux) ?



# De l'Astrophysique à l'Astroparticule (1912-2017)

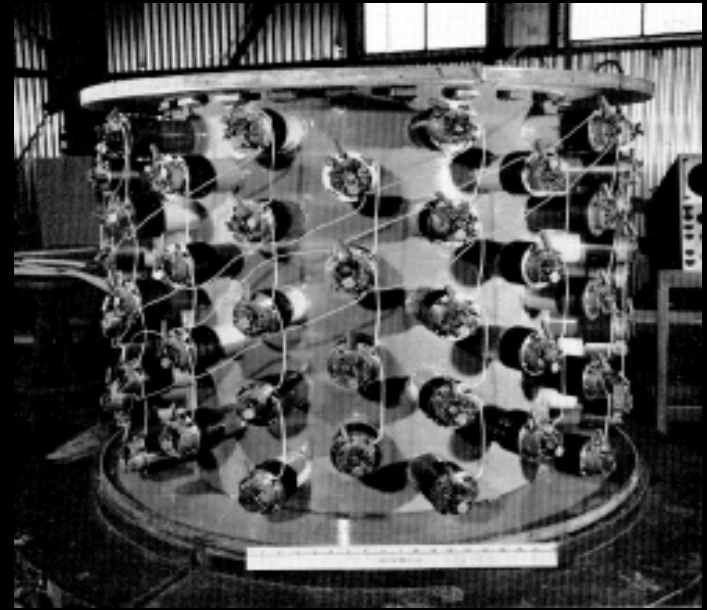
## Nouveaux Observatoires

1. Couvrant tout le spectre du rayonnement électromagnétique
2. Des rayons cosmiques
3. Des neutrinos et matière noire
4. Des ondes gravitationnelles
5. Les grands relevés

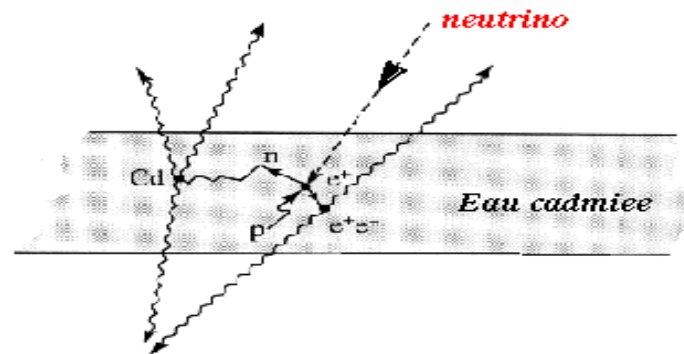
Le véritable voyage de découverte ne consiste pas à chercher de nouveaux paysages, mais à avoir de nouveaux yeux.



# 1953- 1956 Reines+ Cowan: Projet Poltergeist

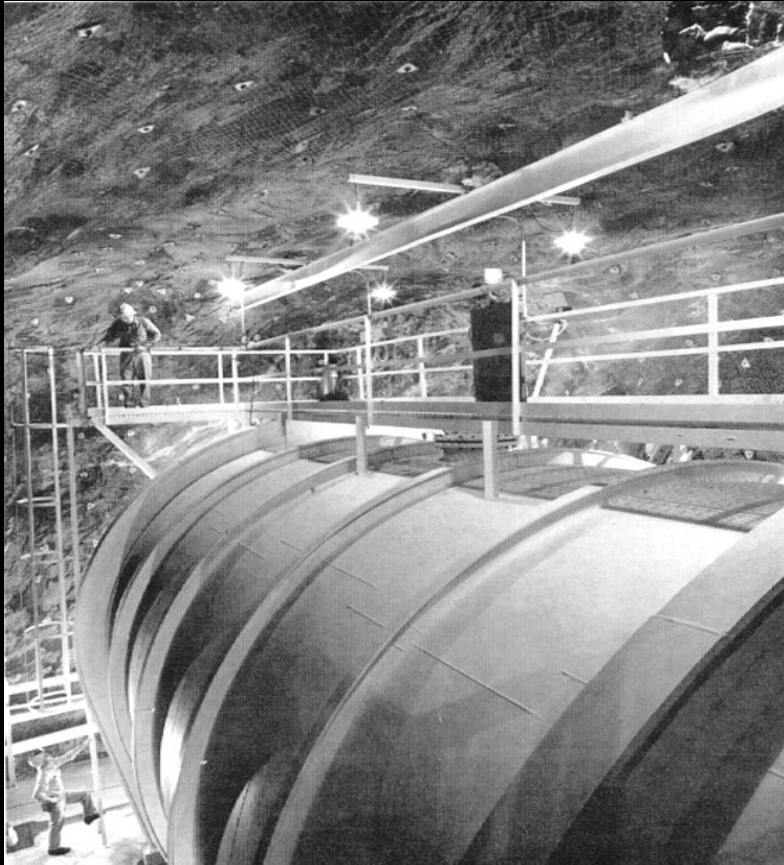


200 lt eau +Cd



Reacteurs et pas accélérateurs au moment de la transition 1953

# Détecteurs de neutrino solaires



R. Davis (Nobel 2001) mesure les neutrinos en provenance du soleil en installant un détecteur pour capter des neutrino-electrons dans la mine Homestake de Colorado

Il en mesure que la moitié de celle prédite par les théoriciens (J. Bahcall, plus tard S.Turck-Chieze)

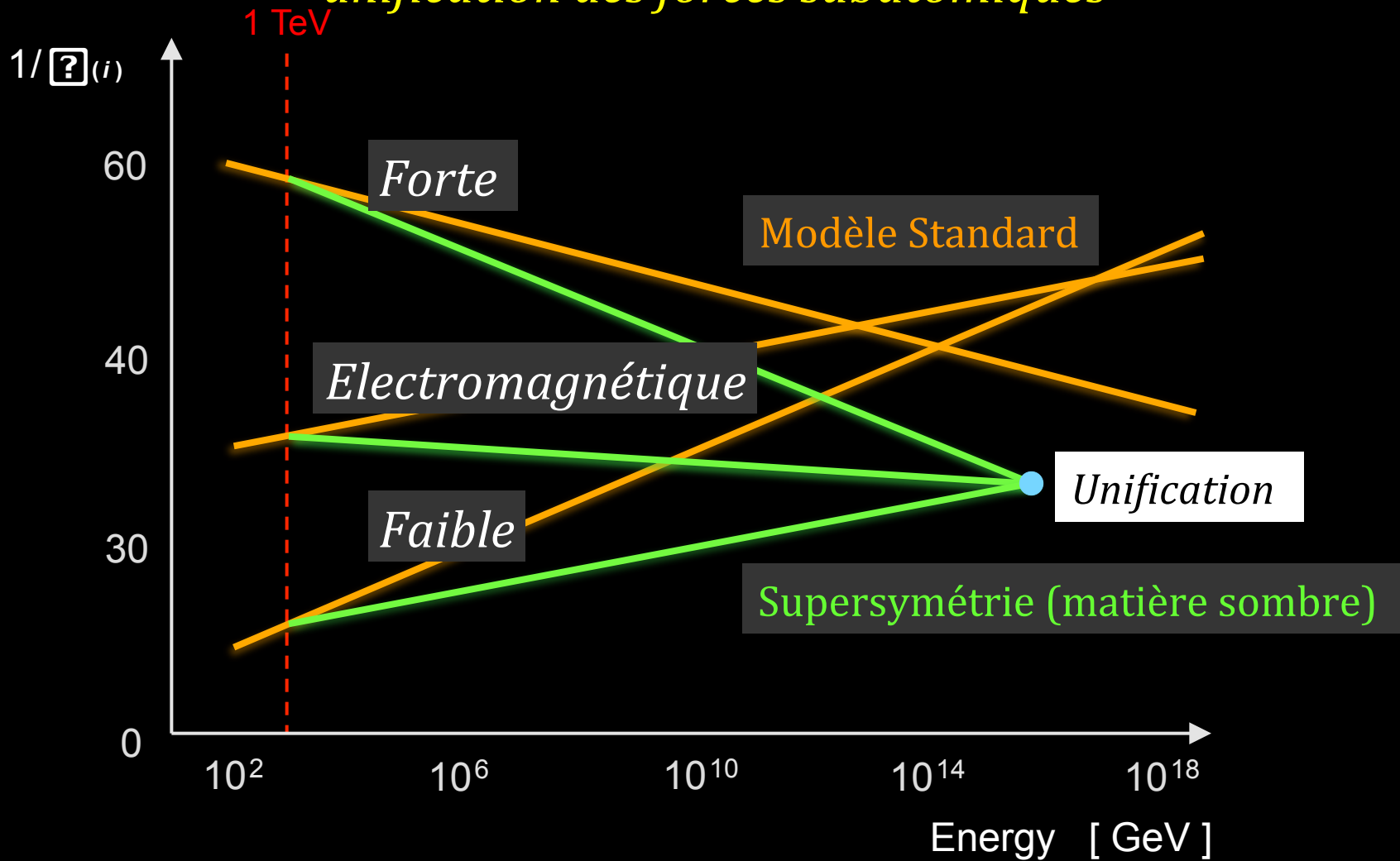
Erreur des calculs d'astrophysique ou nouvelle physique?

*Solution physique: Si les neutrinos oscillent entre les différents types et les neutrinos arrivant sur terre étaient un mélange des trois ?*

Le mouvement vers le souterrain pour se protéger des rayons cosmiques

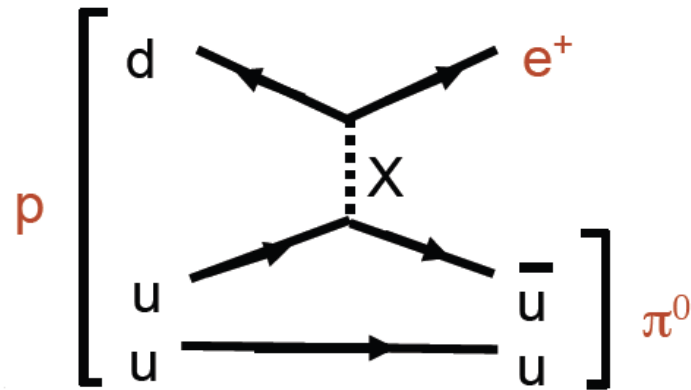
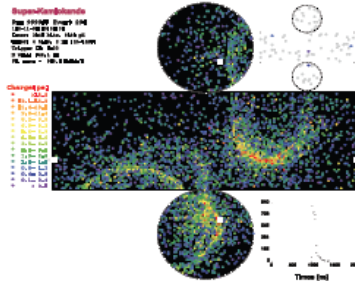
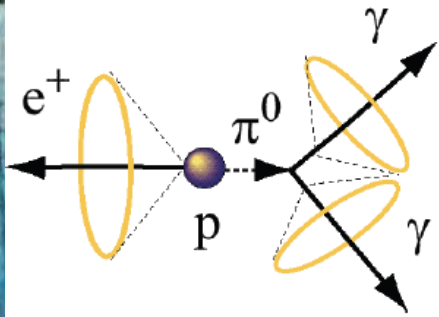
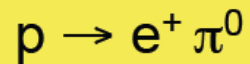


# Une autre raison pour aller au souterrain : La grande unification des forces subatomiques



# La plus grande conséquence d'une théorie d'unification: la désintégration de proton

Golden Mode:





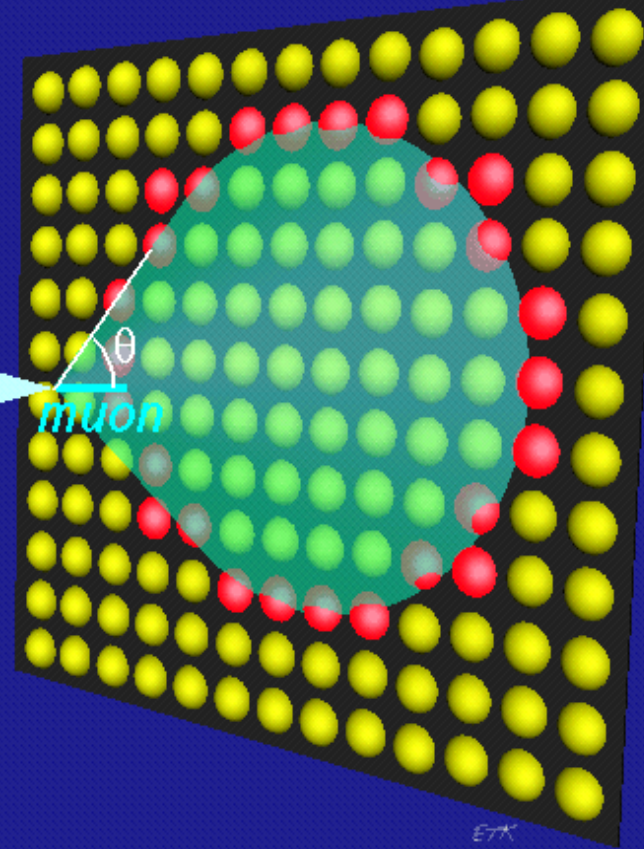
### CHERENKOV EFFECT

$$\beta = v/c \quad n(\text{water}) = 1.33$$

$$\cos \theta = 1/\beta n$$

$$\beta = 1 \quad \theta = 42 \text{ degrees}$$

$v_{\mu}$

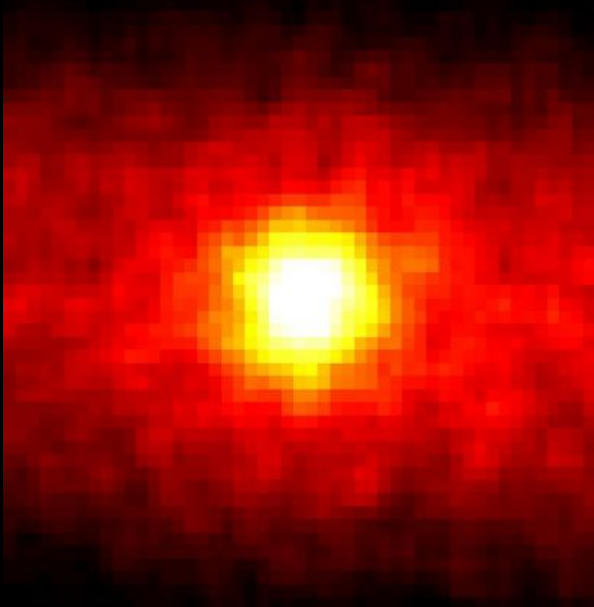


Aux expériences souterraines comme SuperKamioka (Japon) on peut « voir » le soleil même la nuit à travers son empreinte neutrino

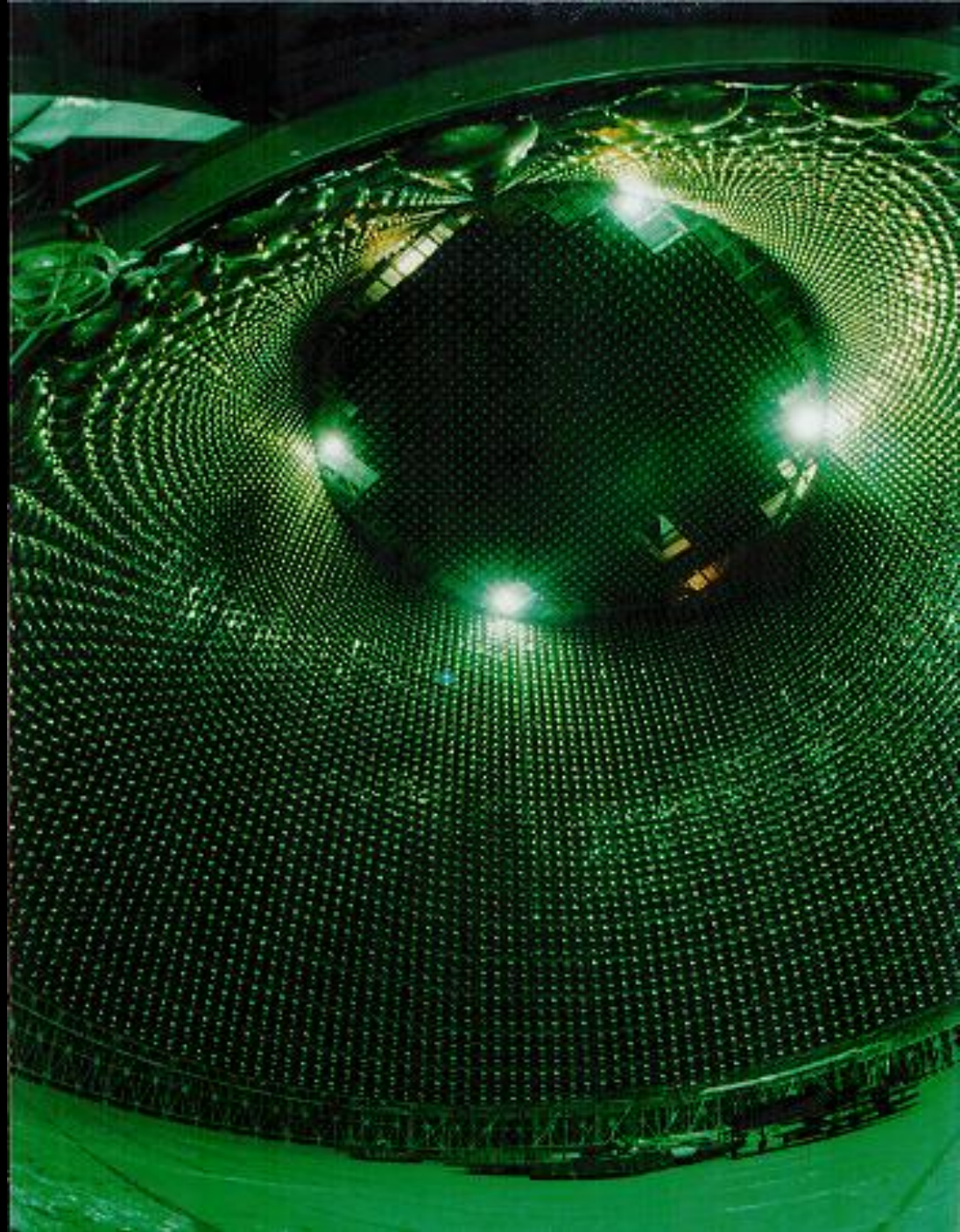


Une autre confirmation  
détecteur neutrino dans  
la mine Kamioka (Japon)

Kamioka et  
SuperKamioka (50 kt)



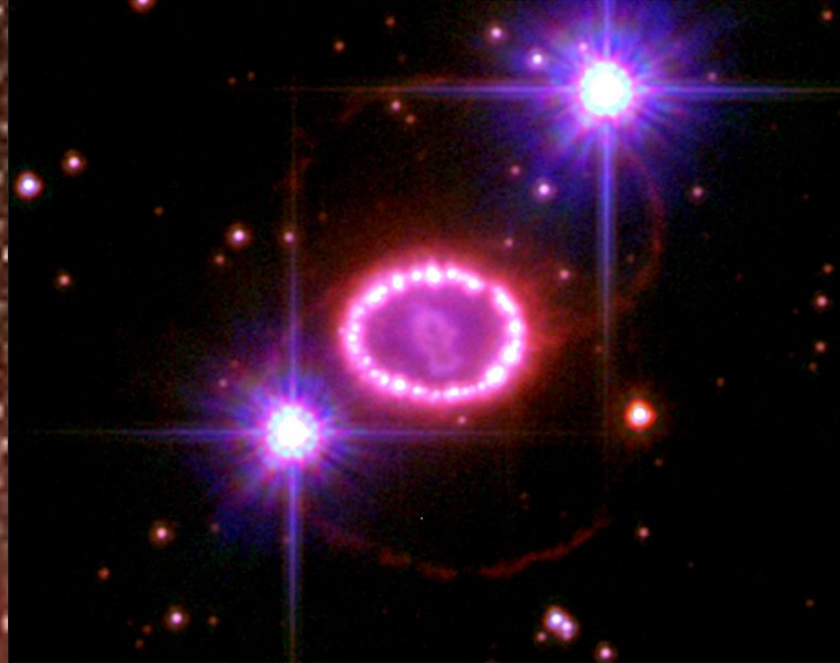
*le Soleil en neutrinos  
dans SuperKamioka*





# L'explosion de Supernova 1987A détectée en neutrinos

Date de naissance de l'astroparticule ?

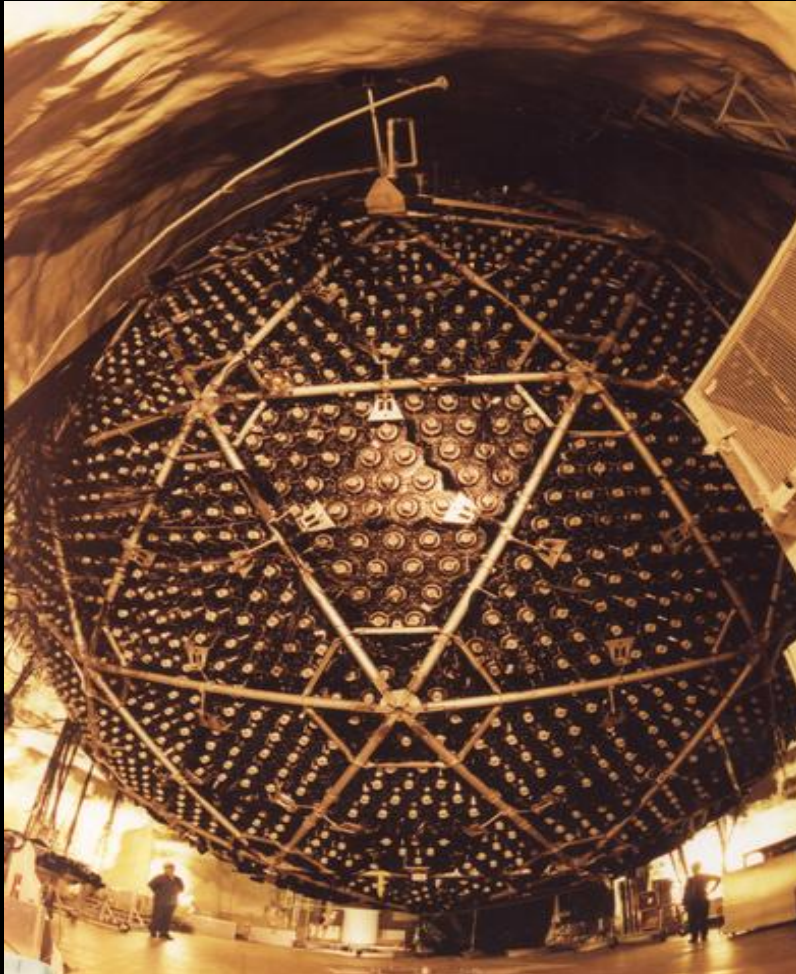


Nobel Koshihira

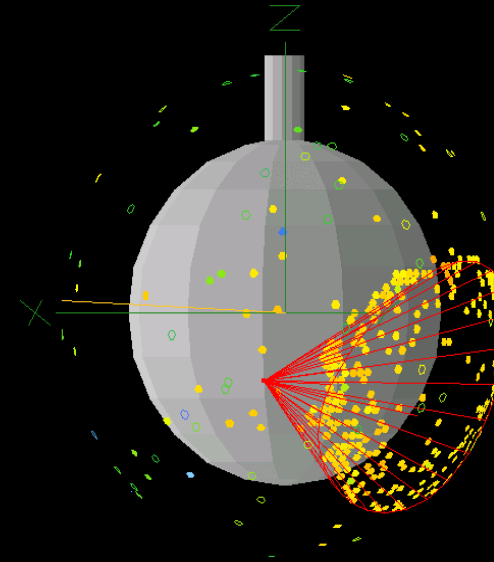


2002

SNO en Juin 2001 a confirmé que le phénomène est indépendant du modèle du soleil



## THE SUDBURY NEUTRINO OBSERVATORY



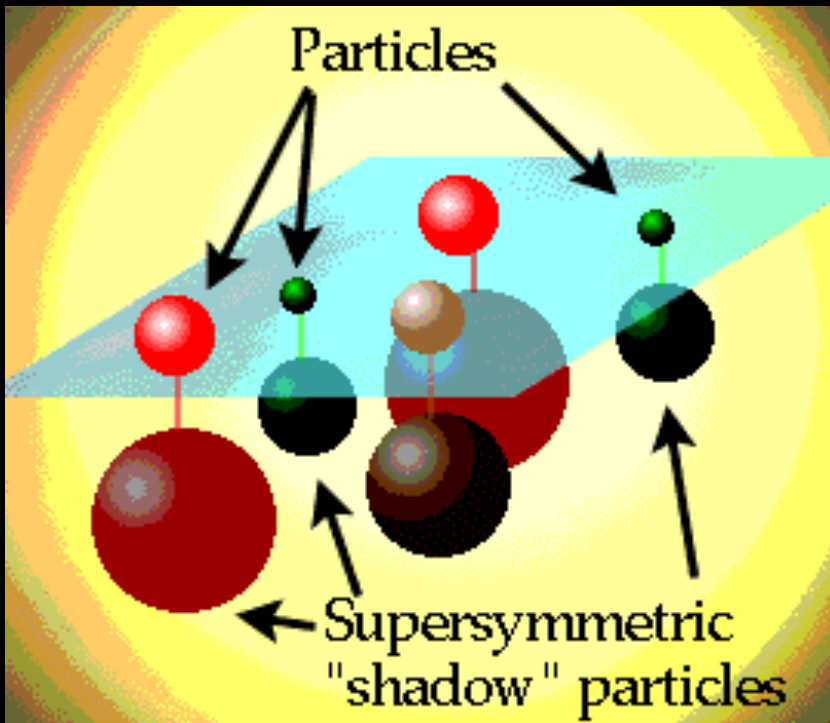
Atmospheric Muon Neutrino



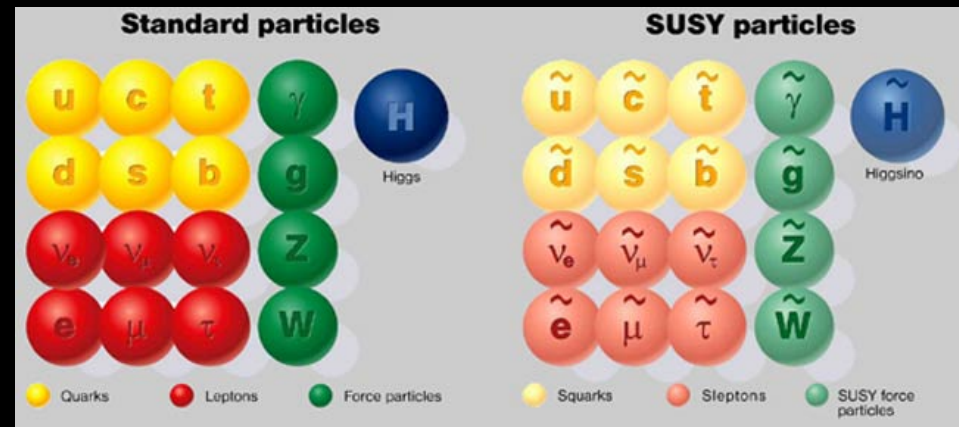
Détection des courants chargés et neutres (indépendance du modèle du soleil)  
Mais aussi plus tard Kamland



Pour stabiliser la masse du Higgs des fluctuations quantiques du vide il nous faut postuler une nouvelle symétrie la supersymétrie



Echange  
force  $\leftrightarrow$  particules

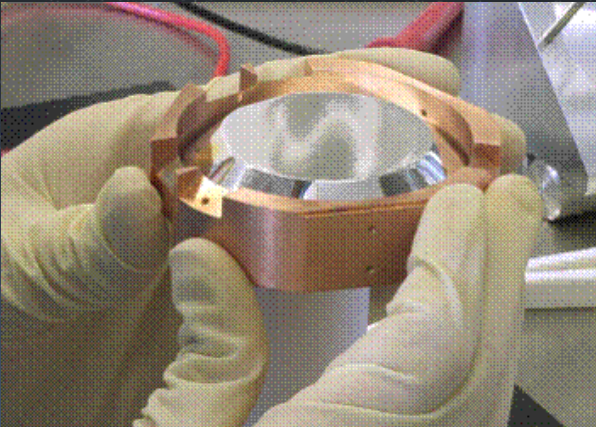


Bonus: permet l'unification, prédit des particules de « matière noire (WIMPS) » avec la bonne densité relic. On les cherche activement.

- Les produire aux collisionneurs (LHC)
- Les détecter de façon indirecte à travers les produits de son annihilation près des grandes concentrations de masse ou corps cosmiques
- *Les détecter de façon directe à travers la détection des produits de recul de sa collision élastique avec la matière*

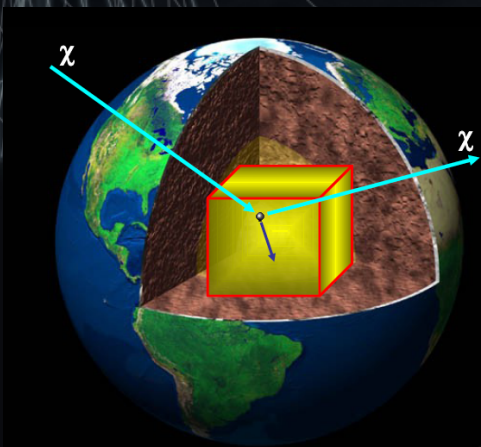
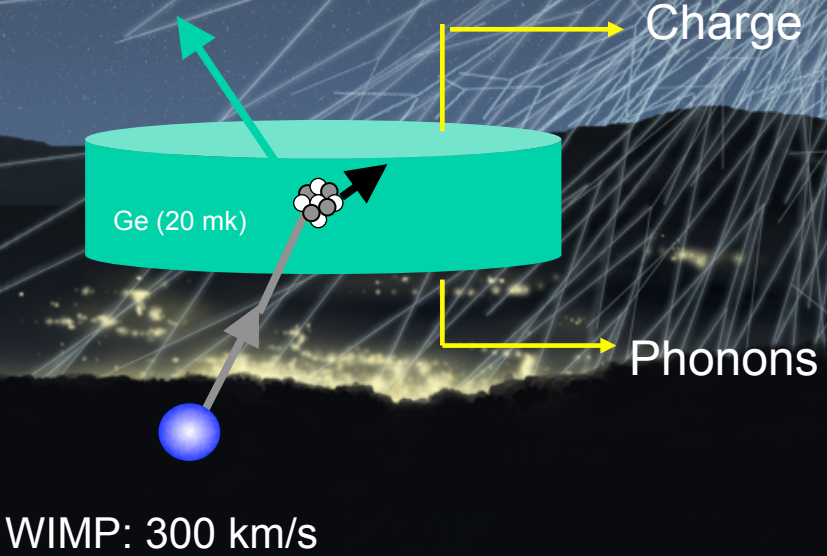


# Chercher la matière sombre dans les cavernes (tunnels) et les puits (mines) (Pour se protéger du bruit de fond des rayons cosmiques)



Rayons cosmiques standard: 1 million ( $10^6$ ) à travers notre corps/jour

A comparer à mille trillions ( $10^{15}$ ) WIMPS par jour mais dont seulement 1-10 interagissent

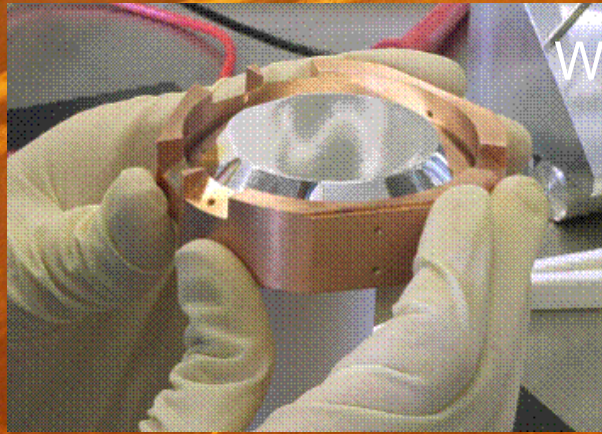
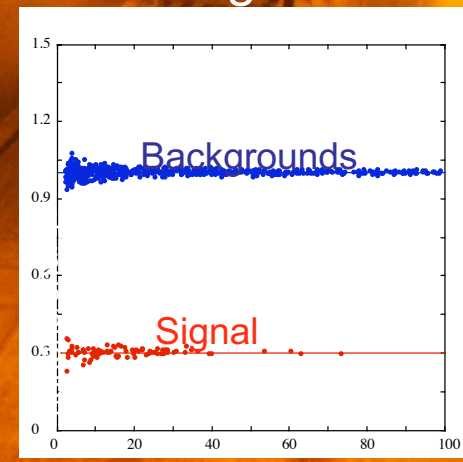
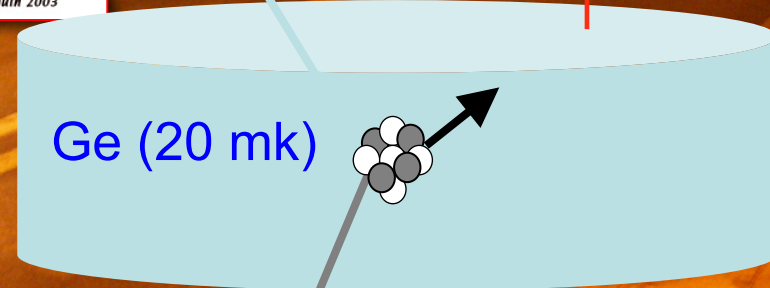
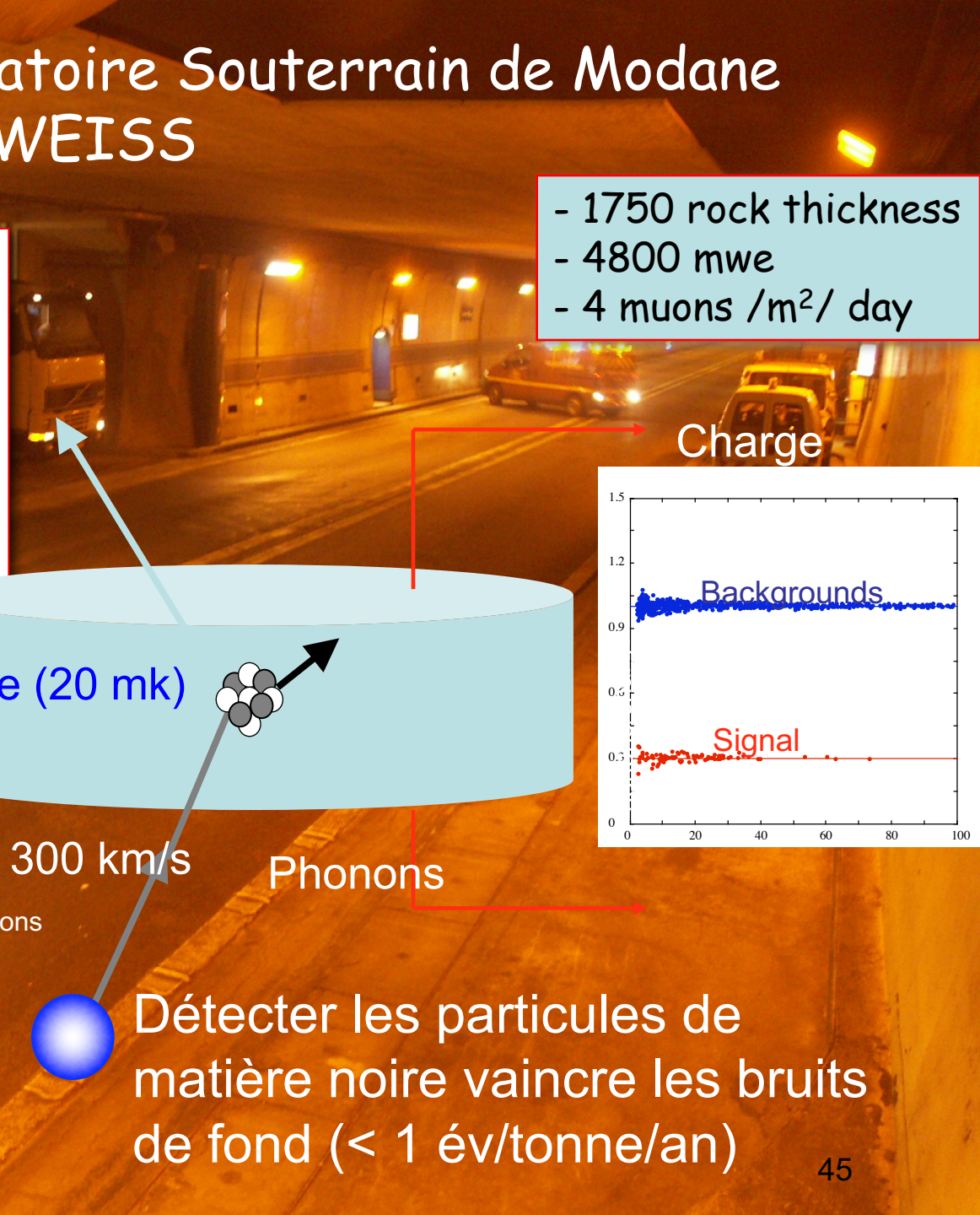
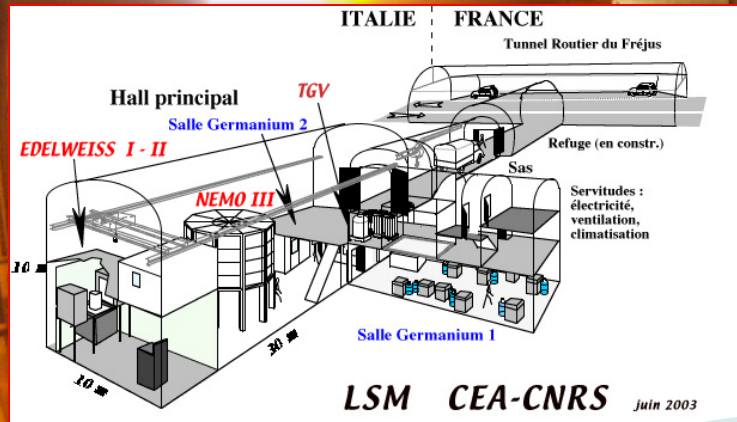






# Laboratoire Souterrain de Modane EDELWEISS

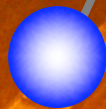
- 1750 rock thickness
- 4800 mwe
- 4 muons /m<sup>2</sup>/ day



WIMP: 300 km/s

Phonons

Phonons



Détecter les particules de matière noire vaincre les bruits de fond (< 1 év/tonne/an)

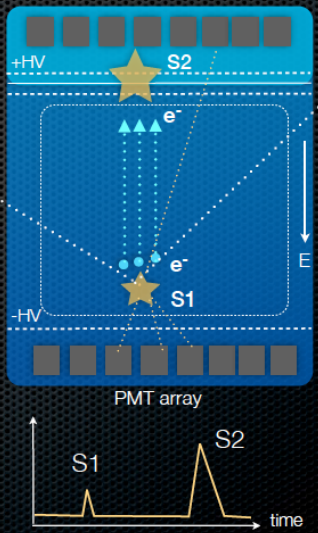


# Two detector concepts for noble liquids

Single phase

Double phase (TPC)

« Dark ladies »  
 Vera Rubin  
 Rita Bernabeu  
 Elena Aprile  
 Laura Baudis  
 Jocelyn Monroe

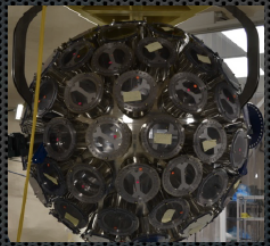


# Single-phase detectors

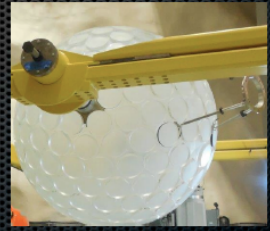
- XMASS at Kamioka (LXe), DEAP and CLEAN at SNOLab (LAr)
- Challenge: ultra-low absolute background (materials, radon, alphas)



XMASS at Kamioka:  
 835 kg LXe (100 kg fiducial),  
 single-phase, 642 PMTs  
 unexpected background found  
 detector refurbished  
 new run this fall -> 2013



CLEAN at SNOLab:  
 500 kg LAr (150 kg fiducial)  
 single-phase open volume  
 under construction  
 to run in 2014



DEAP at SNOLab:  
 3600 kg LAr (1t fiducial)  
 single-phase detector  
 under construction  
 to run in 2014

# Liquid xenon and liquid argon TPCs

# Liquid xenon and liquid argon detectors



|  |  |  |  |   |
|--|--|--|--|---|
| <p><b>XENON100 at LNGS:</b><br/>                 161 kg LXe (~50 kg fiducial)<br/>                 242 1-inch PMTs taking new science data</p> | <p><b>LUX at SURF:</b><br/>                 350 kg LXe (100 kg fiducial)<br/>                 122 2-inch PMTs physics run since spring 2013 first result this fall</p> | <p><b>PandaX at CJPL:</b><br/>                 125 kg LXe (25 kg fiducial)<br/>                 143 1-inch PMTs 37 3-inch PMTs started in early 2013</p> | <p><b>ArDM at Canfranc:</b><br/>                 850 kg LAr (100 kg fiducial)<br/>                 28 3-inch PMTs in commissioning to run 2014</p> | <p><b>DarkSide at LNGS</b><br/>                 50 kg LAr (dep in <sup>39</sup>Ar) (33 kg fiducial)<br/>                 38 3-inch PMTs in commissioning since May 2013 to run in fall 2013</p> |
|--|--|--|--|---|

- Under construction: XENON1T at LNGS, 3.5 t LXe in total
  - commissioning in 2014, first run in 2015; goal  $2 \times 10^{-27}$  cm<sup>2</sup>
- Near future: XMASS (5 t LXe), DarkSide-5000 (5 t LAr)
- Design and R&D: LZ (7 t LXe), DARWIN (20 t LXe/LAr)

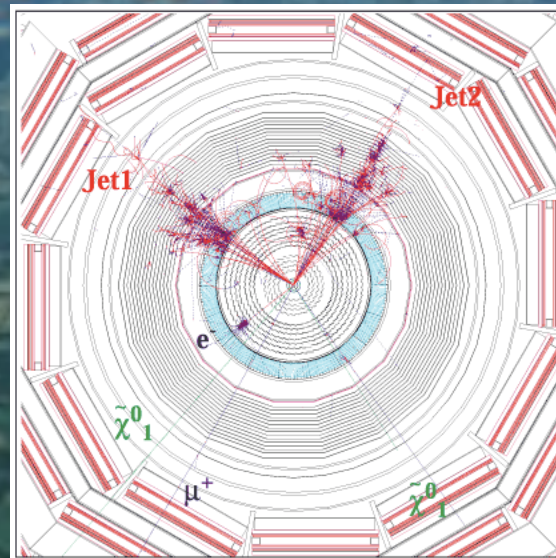
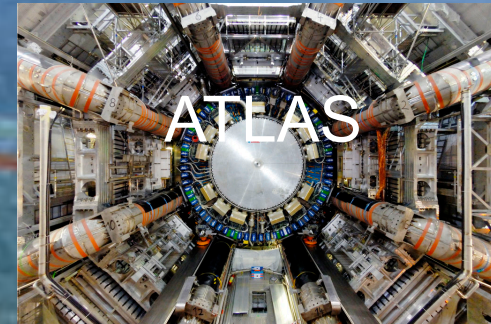
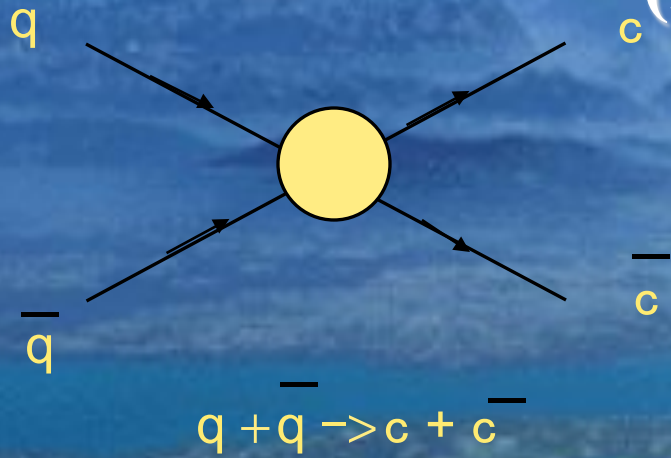


XENON1T: 3.5 t LXe    DarkSide: 5 t LAr    XMASS: 5t LXe    LZ: 7t LXe    DARWIN: 20 t LXe/LAr



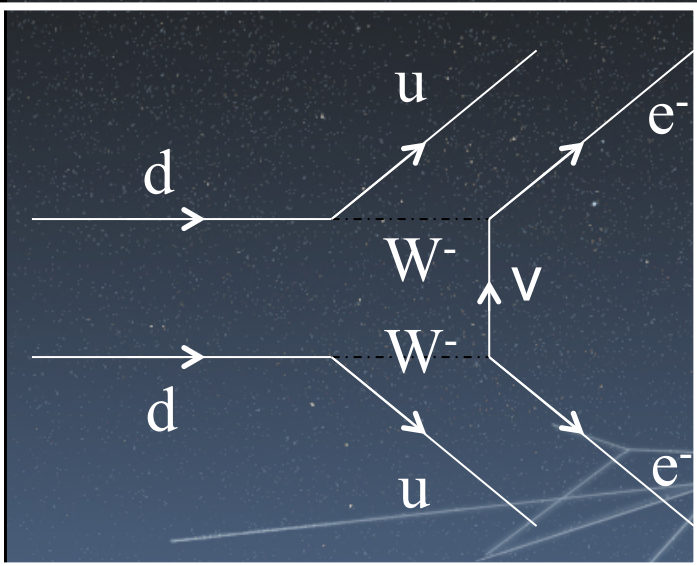


# Chercher les WIMPs au LHC (mais aussi Higgs)

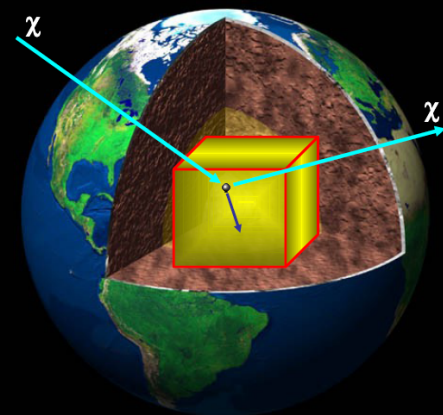




# Recherche de la désintégration rare des $\nu$ type « Majorana » (neutrino=antineutrino) aux laboratoires souterrains.

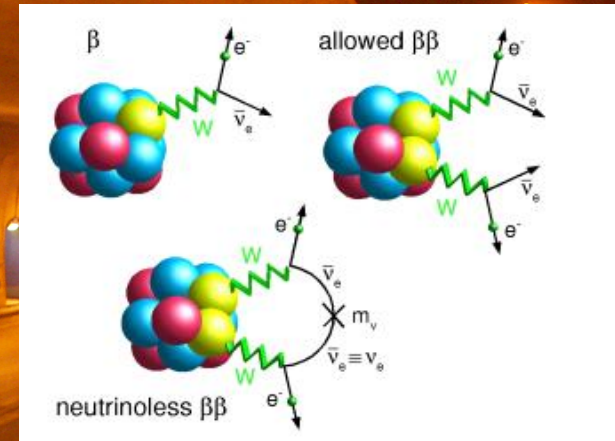
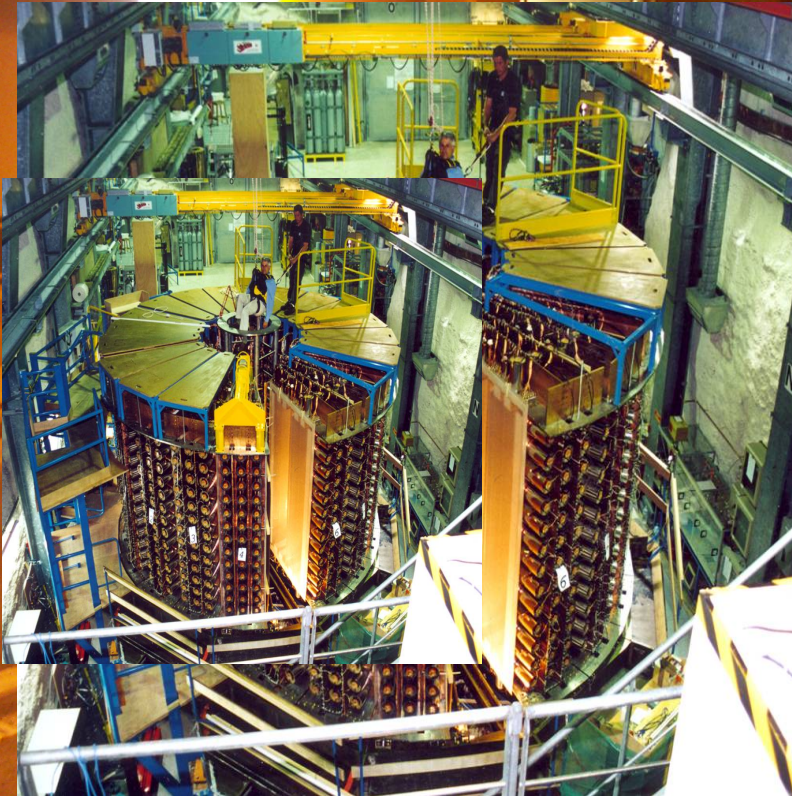


NEMO3 in Underground  
Laboratory of Modane





# Laboratoire Souterrain de Modane NEMO



Mesurer la masse du neutrino et identifier sa nature (est-il sa propre antiparticule?) donne accès à la Grande Unification et l'asymétrie matière-antimatière

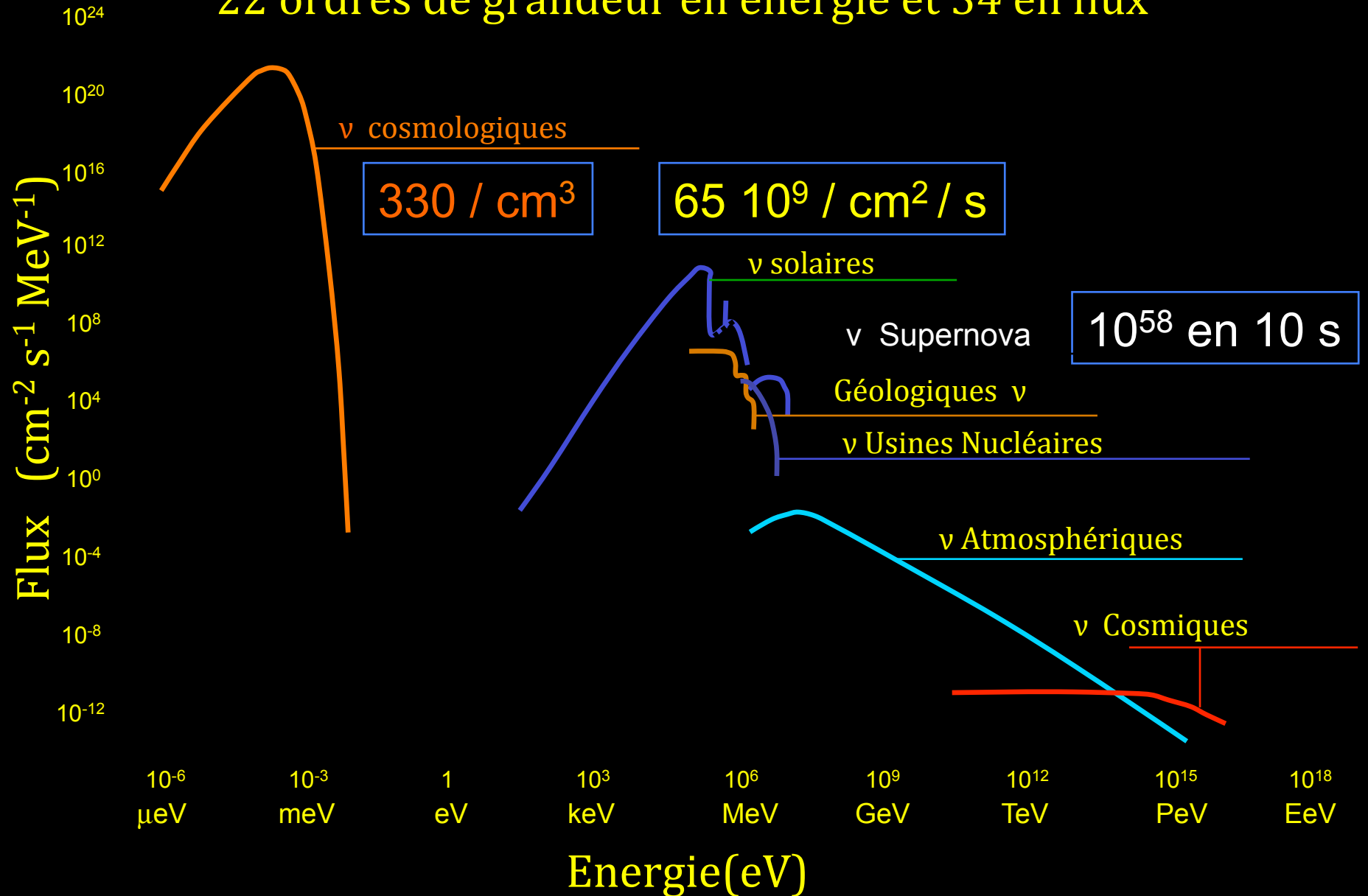
Même lutte contre le bruit de fonds. Demande des détecteurs

Recherche d'une désintégration en 2 e- sans neutrino accompagnant.  
Fréquence typique: 1 désintégration /ton/an.

Fréquence typique: 1 désintégration /ton/an.

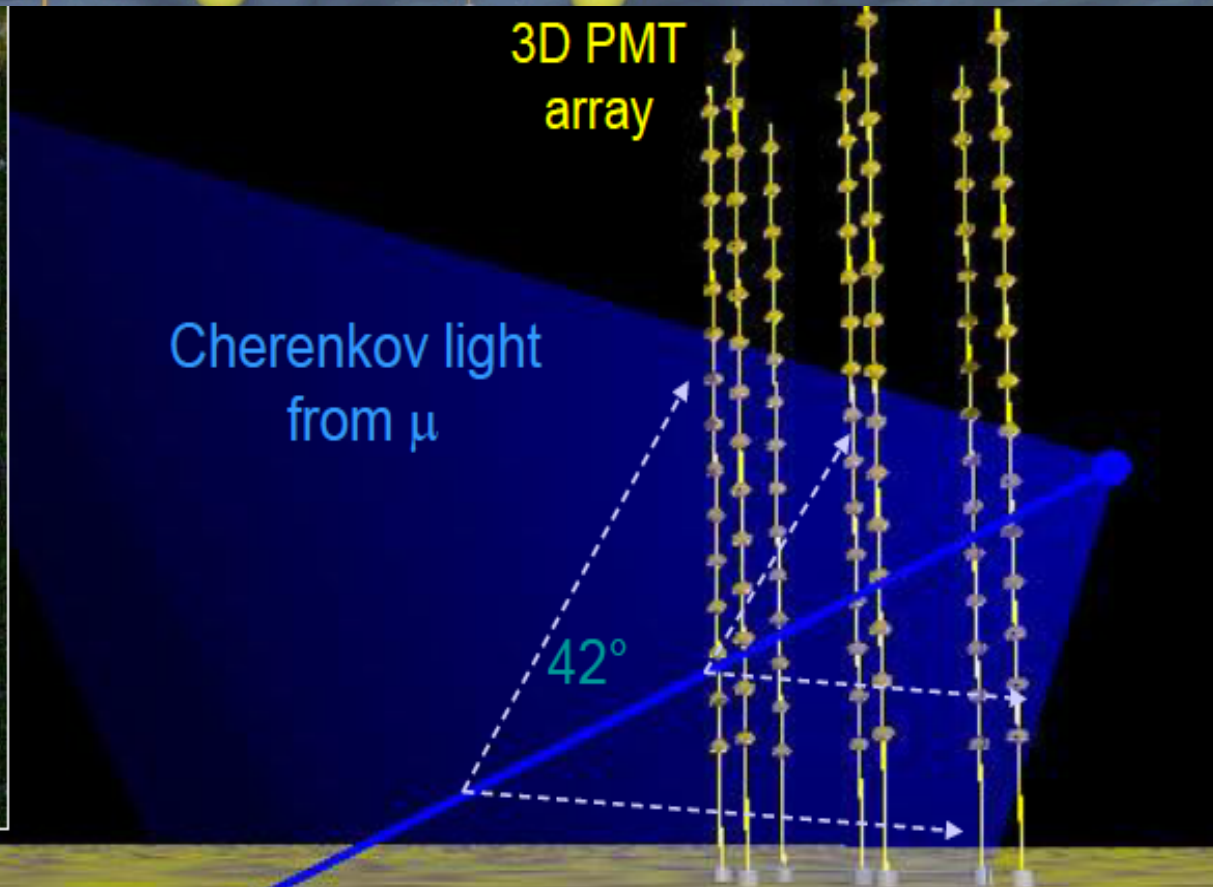
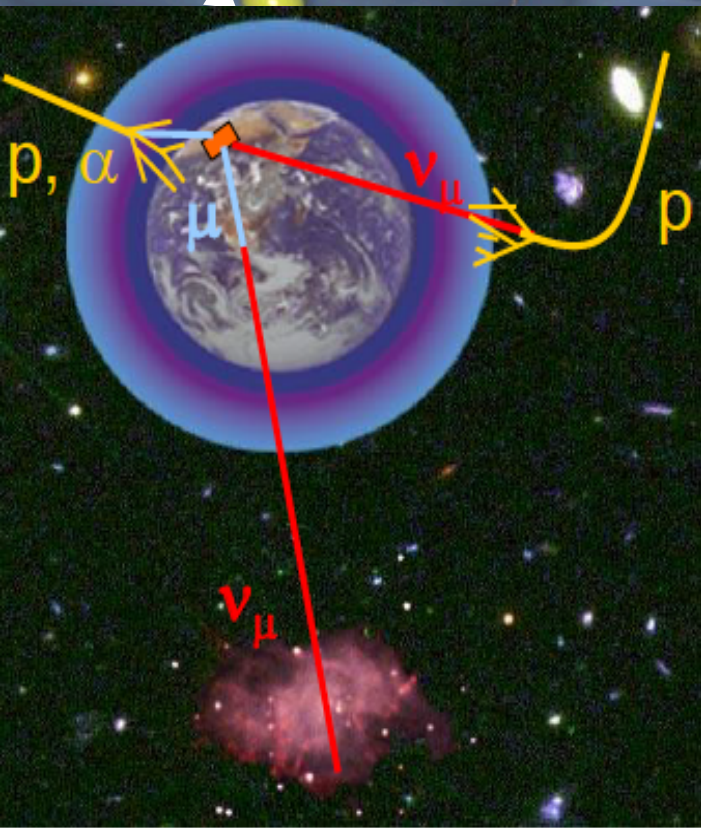
# Neutrinos

22 ordres de grandeur en énergie et 34 en flux

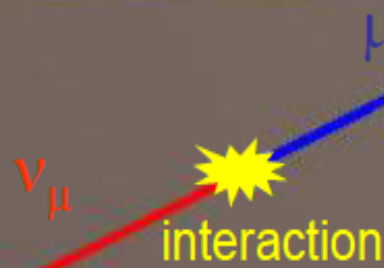




# Les neutrinos de très haute énergie sont aussi des messagers Le détecteur ANTARES (La-Seyne-sur-mer)



Sea floor



The reconstruction is based on local coincidences compatible with the Cherenkov light front





# Bruit de fonds : Bioluminescence



# HaLe bruit de fonds de recherches neutrinos la communication des baleines et des dauphins

LISTENING TO THE DEEP OCEAN ENVIRONMENT

Segment Time: 0:06 (6176) Total segment time: 21838 T:0:1:26

Partners

Bioacoustics

Listen on Site

Sound Library

Statistical Analysis

Help

Legend

- whistle
- high frequency impulse
- low frequency impulse
- band high frequency impulse
- band low frequency impulse
- shipping impulse
- broadband impulse

Source probability

Biological

- Sperm whale
- Beaked whale
- Baleen whale
- Dolphin

Anthropogenic

- Shipping
- Geophysics experiment

<http://listentothe deep.com/acoustics/index.html>



# Télescopes Neutrino aujourd'hui



ANTARES



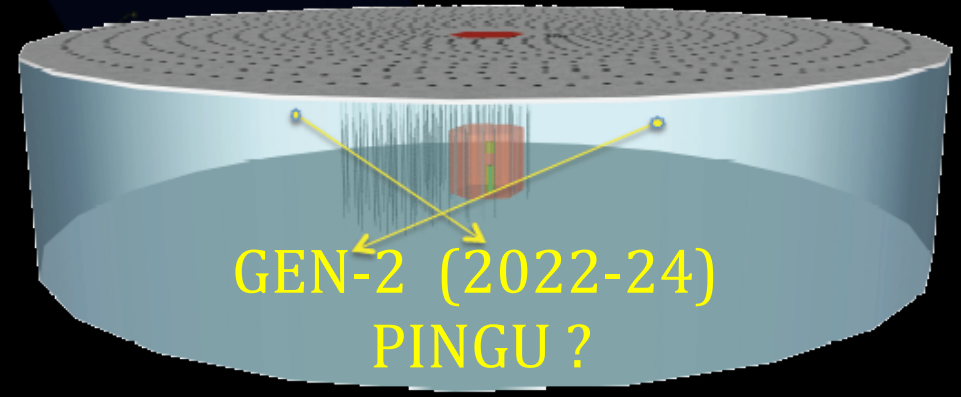
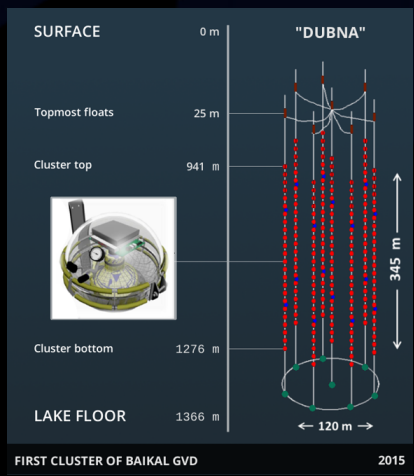
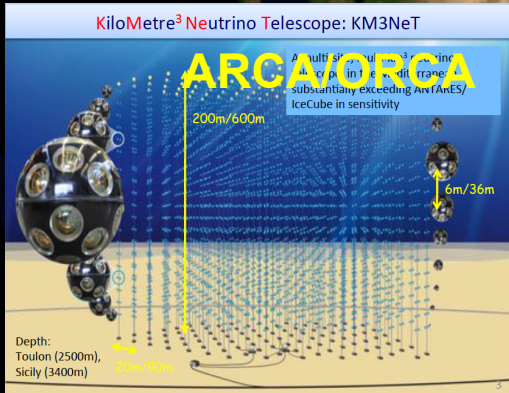
KM3NET



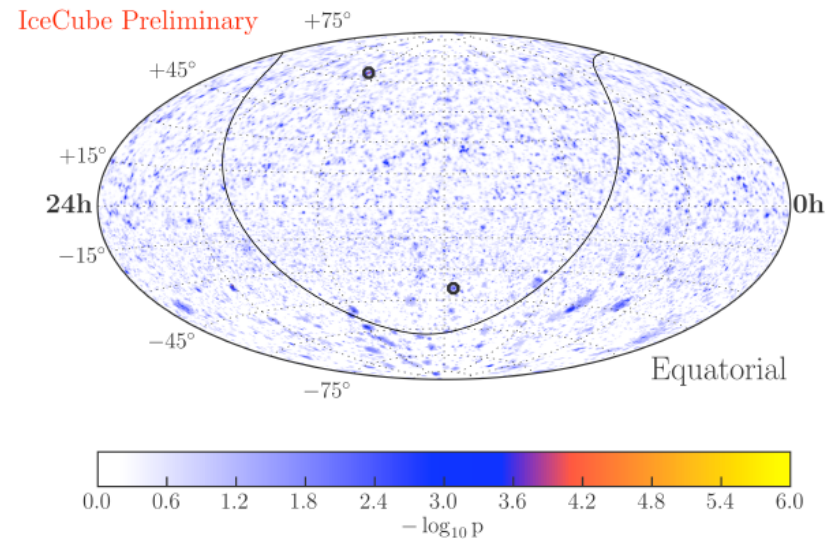
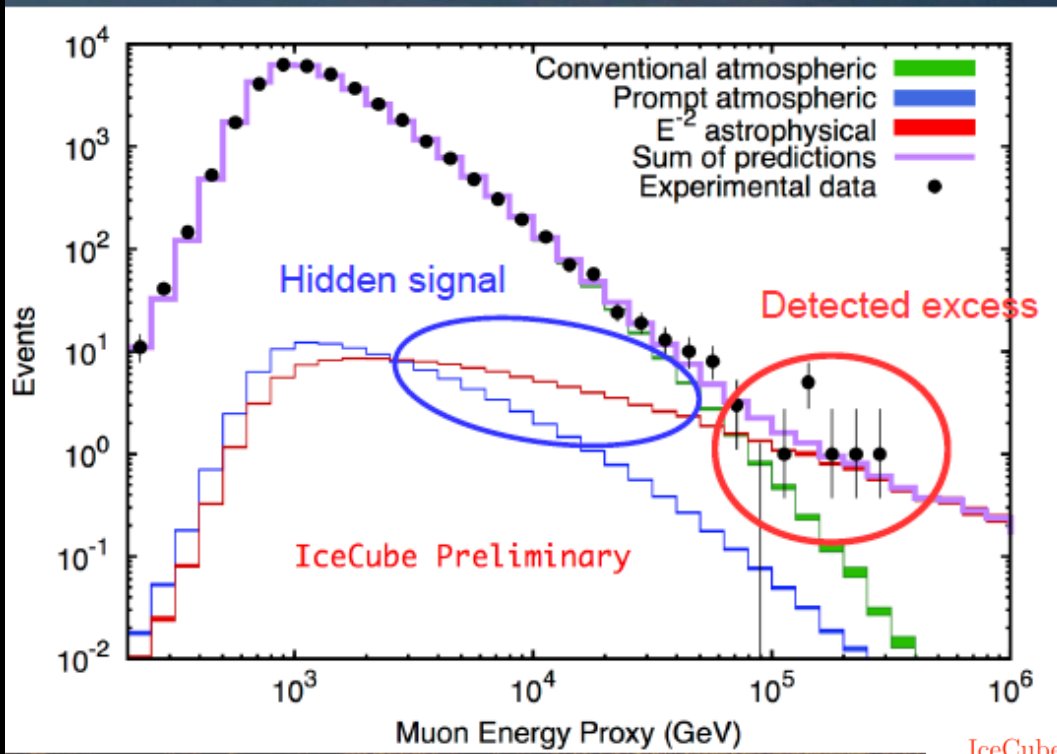
ICECUBE



BAIKAL  
GVD



# En 2013 ICECUBE a détecté des $\nu$ cosmiques, d'où viennent-ils ?



# De l'Astrophysique à l'Astroparticule (1912-2017)

## Nouveaux Observatoires

1. Couvrant tout le spectre du rayonnement électromagnétique
2. Des rayons cosmiques
3. Des neutrinos et matière noire
4. Des ondes gravitationnelles
5. Les grands relevés

Le véritable voyage de découverte ne consiste pas à chercher de nouveaux paysages, mais à avoir de nouveaux yeux.

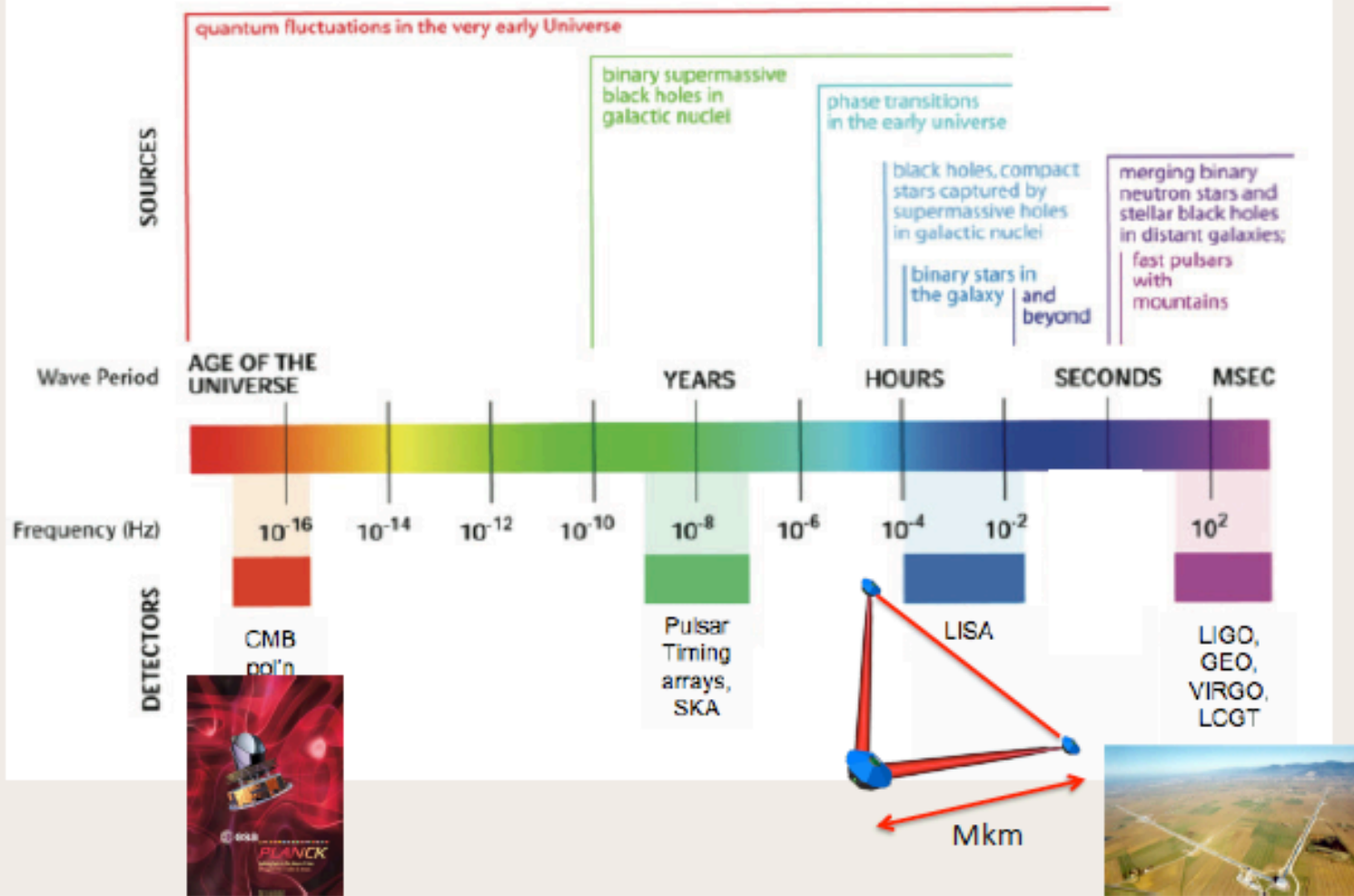




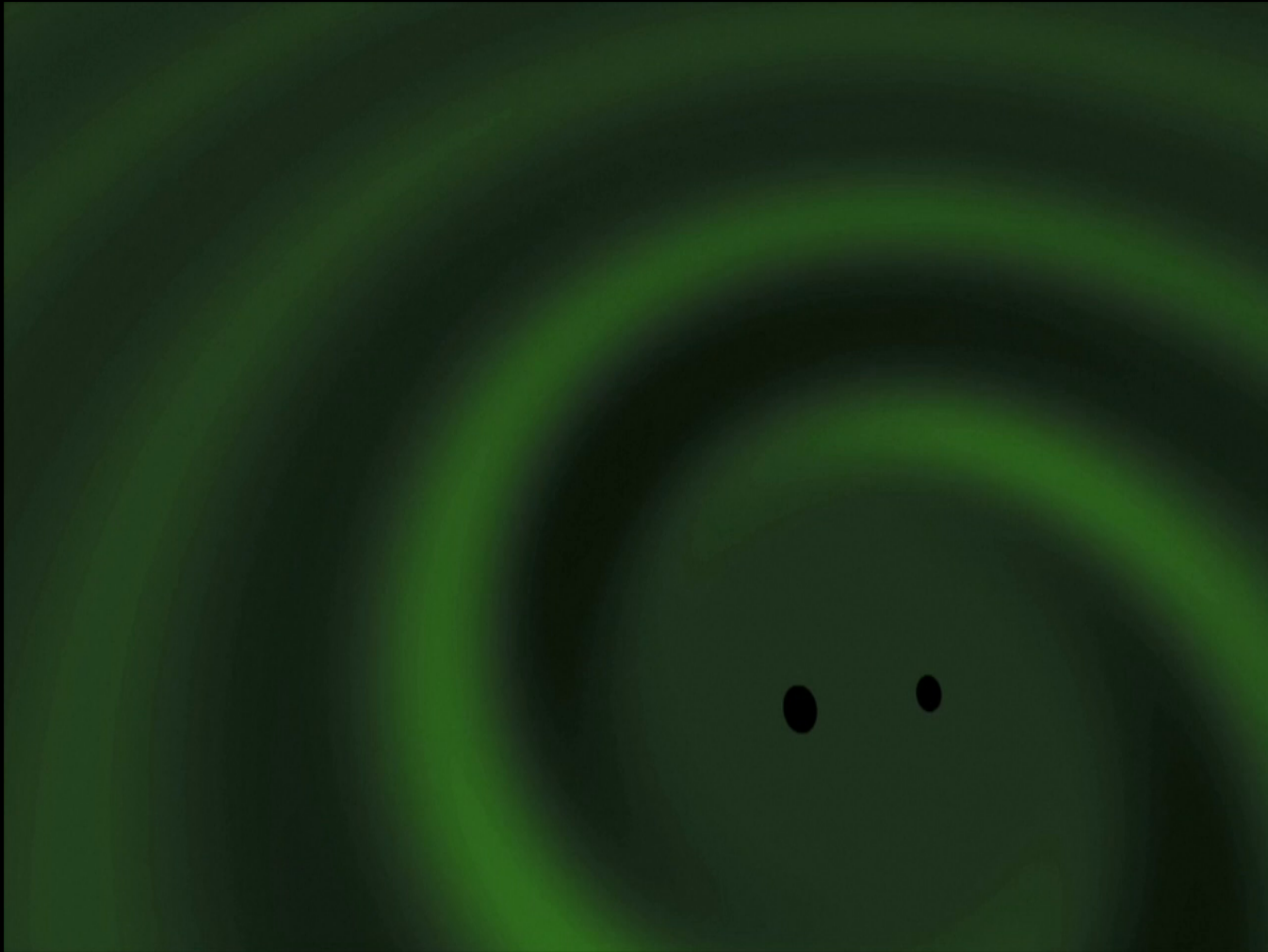
# Ondes Gravitationnelles

## 20 ordres de grandeur en fréquence

Le spectre de fréquence des ondes gravitationnelles



## Exemple de production : fusion des trous noirs

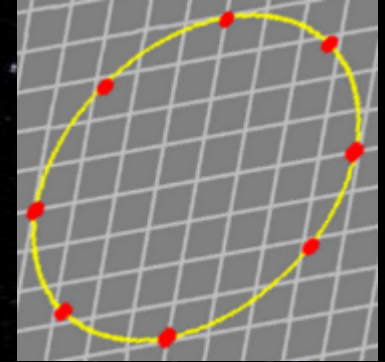
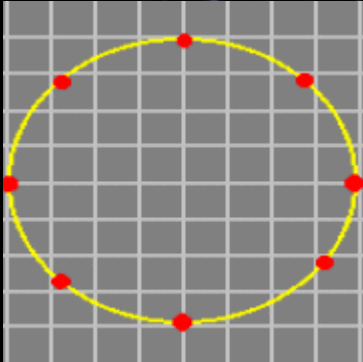


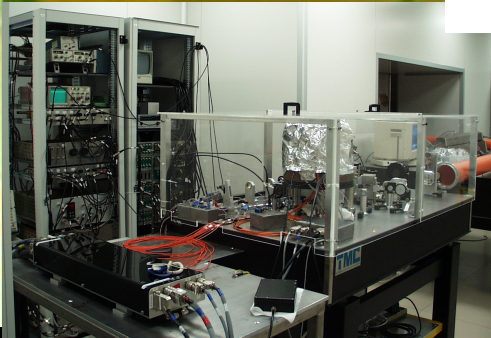
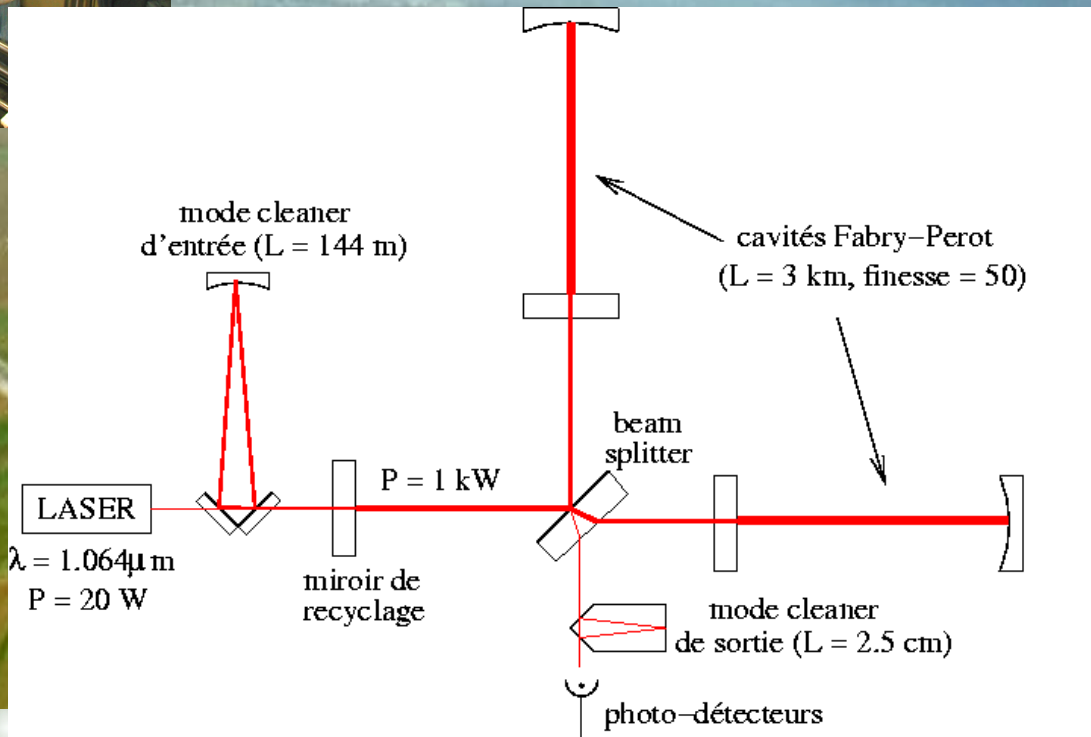
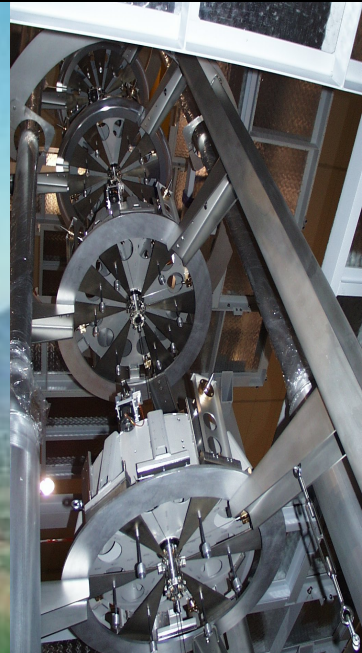
# Exemple de production : Sursaut gamma court (étoiles à neutrons)





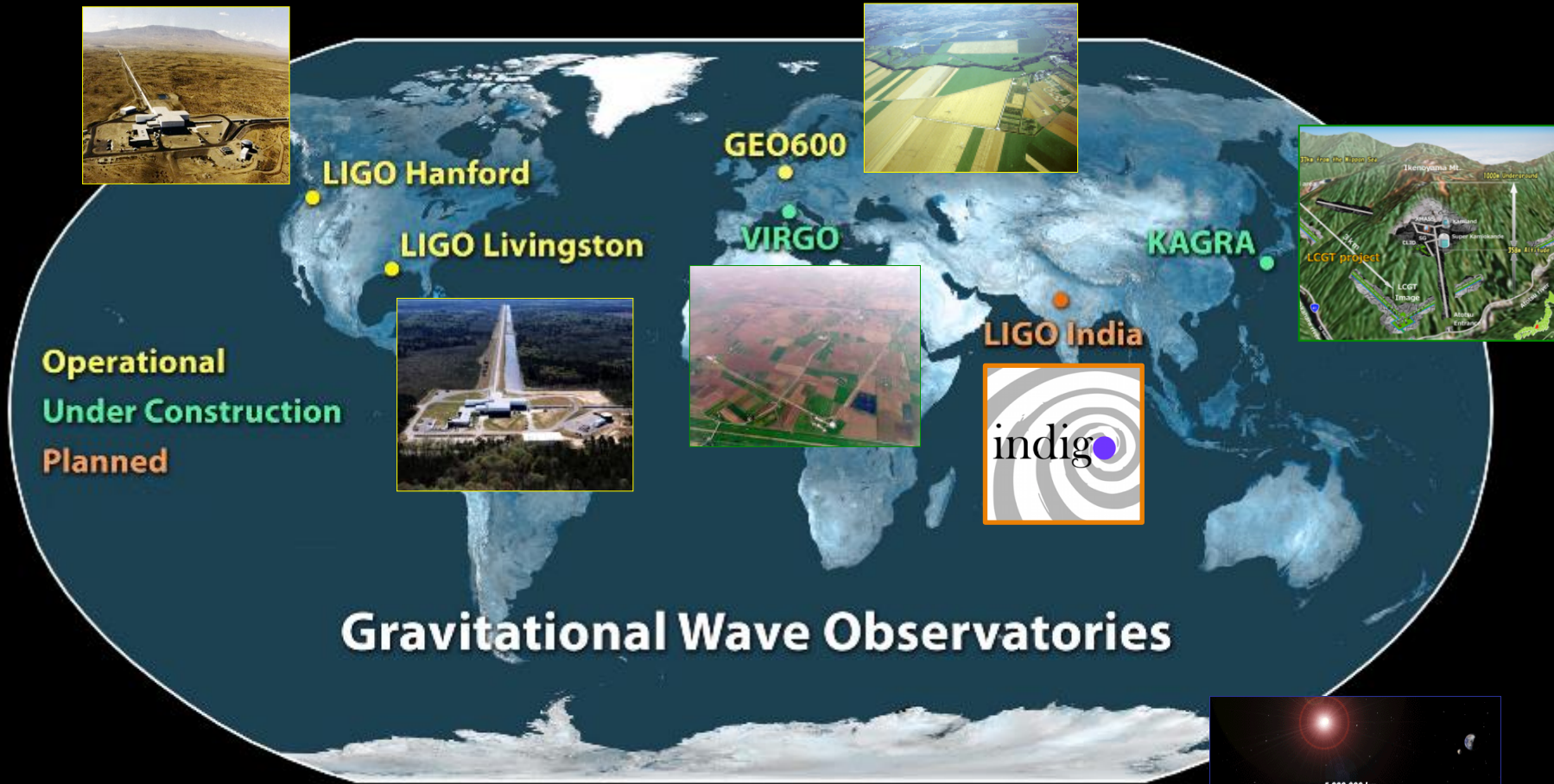
# Antennes de détection des ondes gravitationnelles



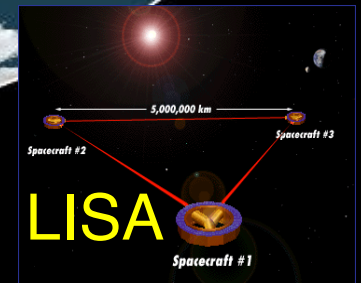




# Un réseau global

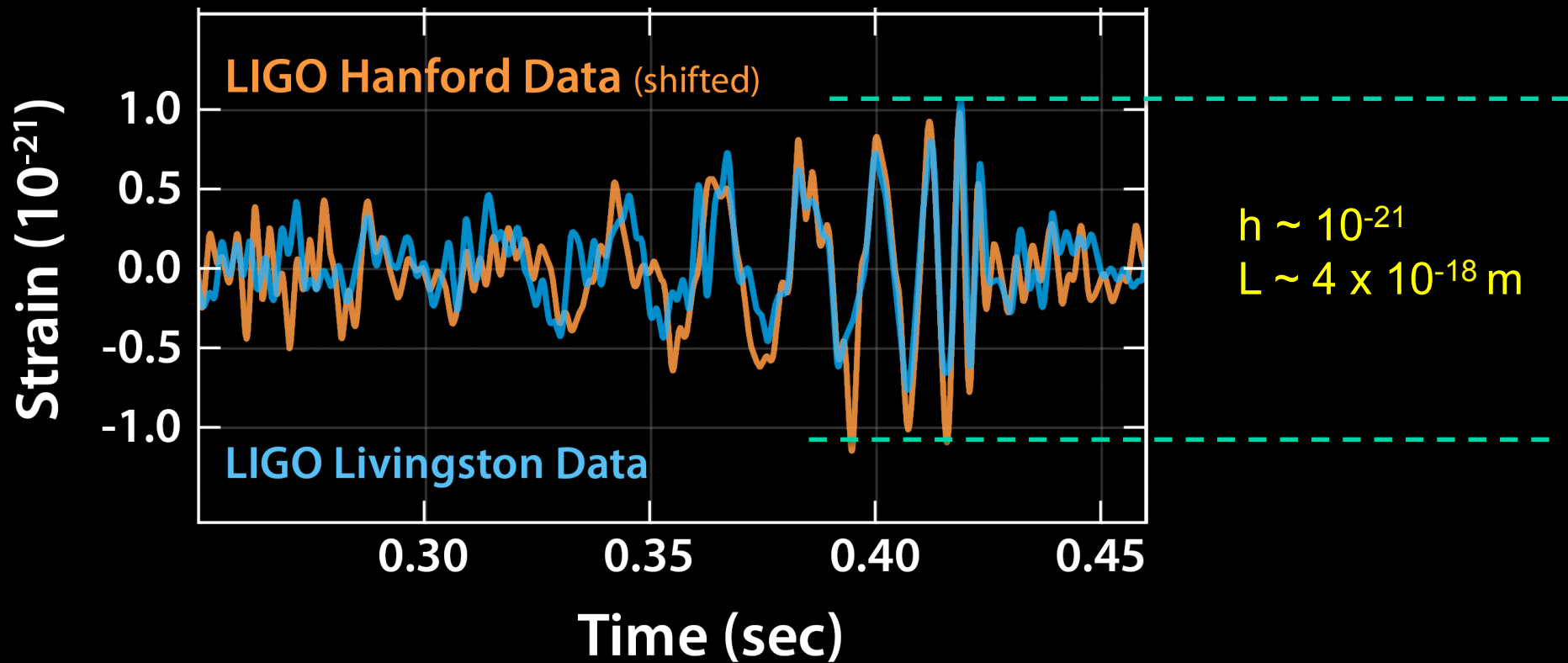


## Gravitational Wave Observatories



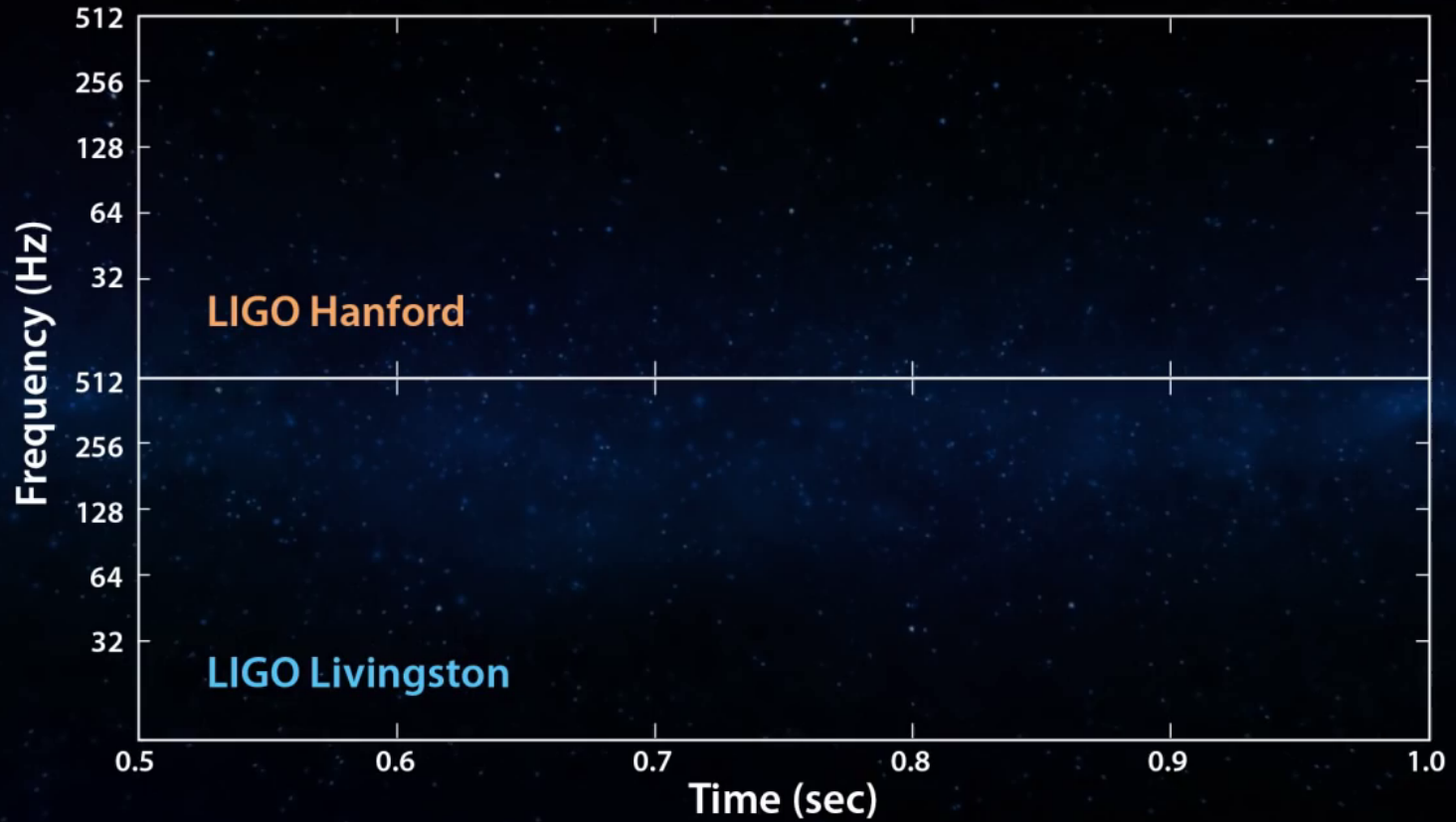


# GW150914: a binary black hole coalescence detected by LIGO/VIRGO collaboration



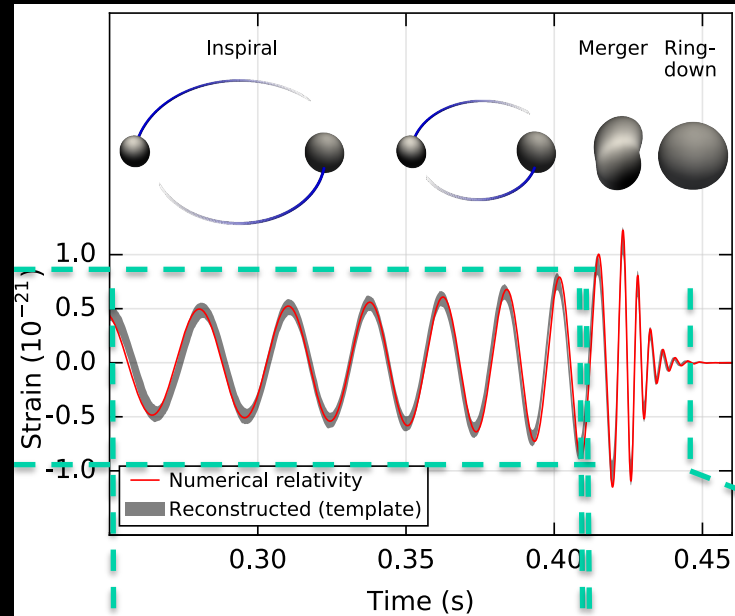
Power  $\sim 4 \times 10^{49} \text{ W}$

# Le son d'une fusion



# Quelle information tirer du signal ?

Amplitude  
Distance  
Inclination angle



Frequency  
evolution

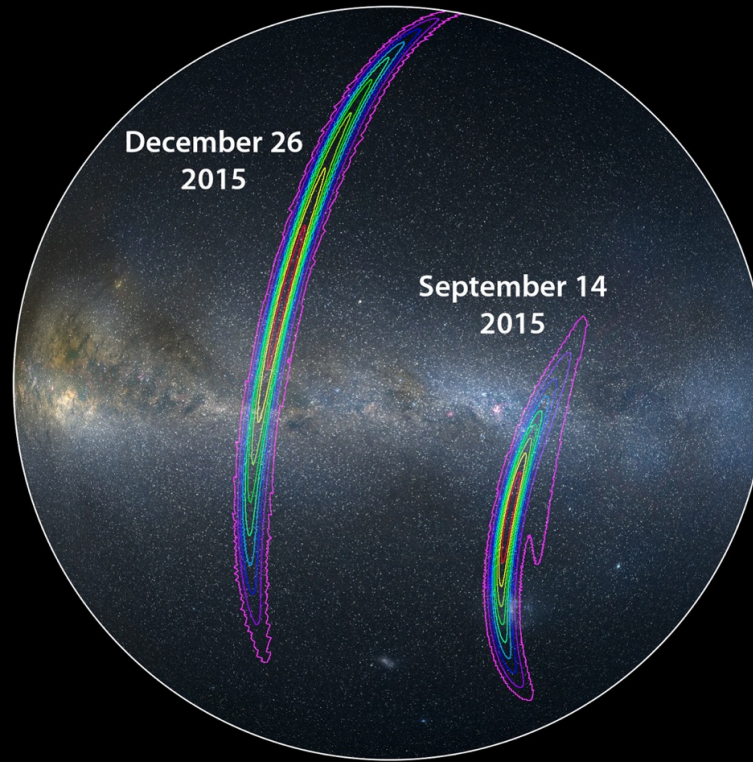
Chirp" mass  
Mass ratio (weaker)  
Initial Spins  
(weakest)

Frequency and  
decay time

Final mass  
Final spin



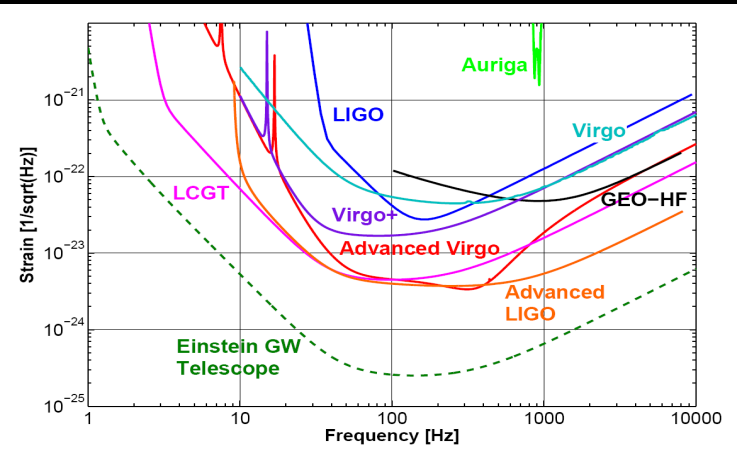
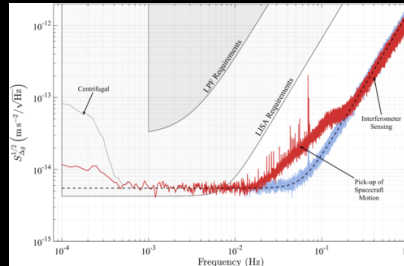
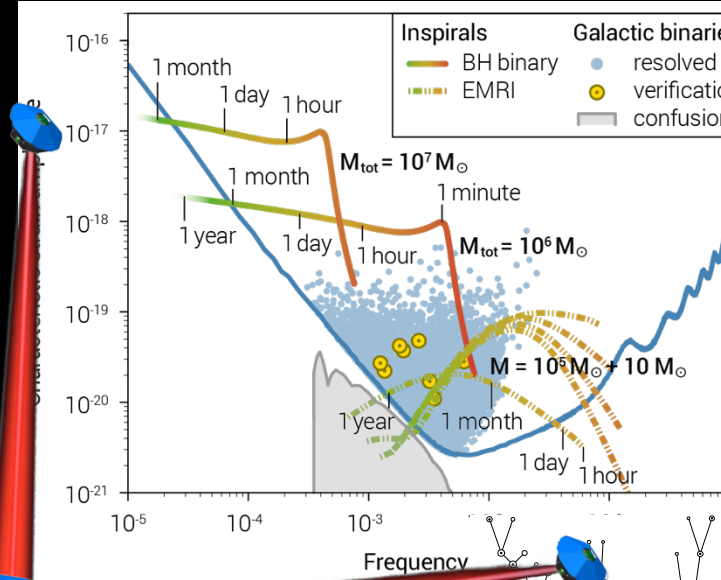
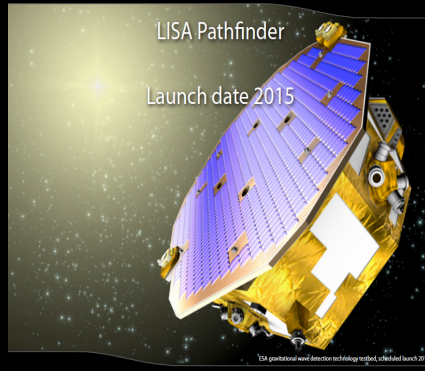
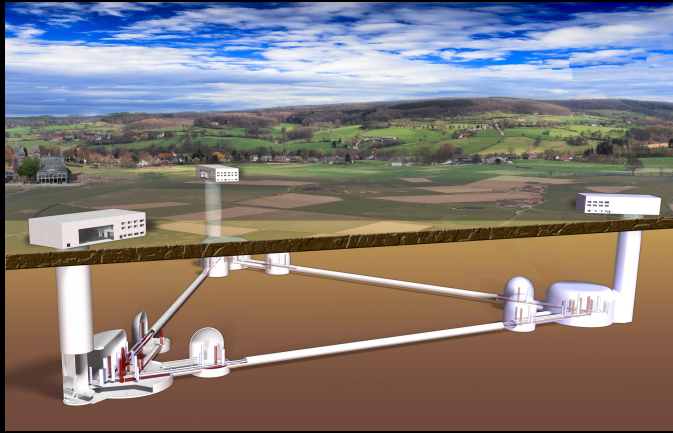
# Annnonce 11 Février 2016



- Première observation directe des ondes gravitationnelles
- Première observation de la fusion de deux trous noirs et le premier test de la théorie de la relativité générale d'Einstein à la « limite forte »
- Inauguration de l'astronomie des ondes gravitationnelles
- Ces fusions constituent des « sirènes standard pour mesure les distances et donner des mesures cosmologiques

# Gravitational waves

## Einstein Telescope (ET) and LISA



LISA (ESA L3: 2034 → 2030 ?)

- 0.1-100 mHz ⇒ 1-1000 TeV (LHC)
- Phase transitions,
- Topological defects...
- Higgs self-couplings and potential
- Supersymmetry
- Extra dimensions
- Strings



Pourquoi le ciel pendant 2-3 Millénaires a apparu  
immuable et « eternal » ?

Voir menaçant par son silence ?  
« Le silence de ces espaces infinis m'effraie... »

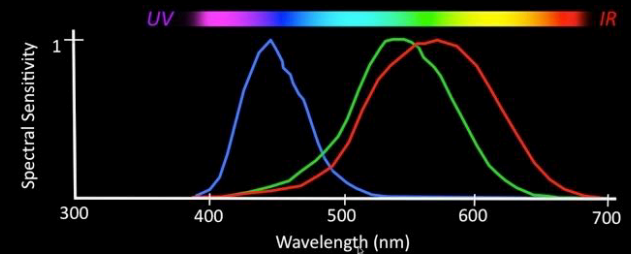
D'une inquiétante étrangeté (« umheimlich ») ?  
Pas de « madeleine cosmique »

Une réponse « intéressée » : car l'information qu'on avait de lui  
provenait seulement du spectre du visible. Et les supernovae  
visibles depuis la terre n'arrivent qu'une fois par siècle

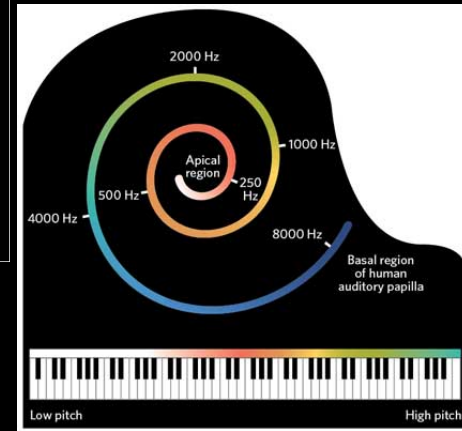
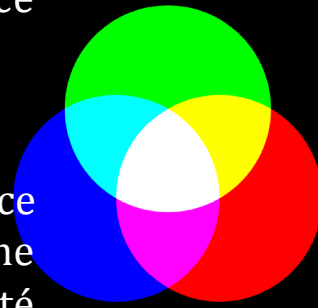


# Rappel : mécanismes physiologiques des sens de l'humain

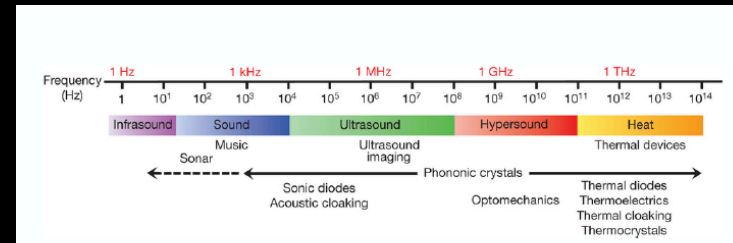
- **VISION:** Lumière faite d'ondes électromagnétiques de fréquence entre 430 et 770 Thz (400-700 nm). A cette fréquence on a une bonne résolution spatiale mais mauvaise en temps. Coté capteur: des « opsines » ont des courbes de sensibilité différentes, bleu/rouge/vert. La couleur d'un objet est un point dans un espace « intérieur » de couleur à 3D (Newton vs Goethe)



- **OUIE:** Son fait d'ondes de pression/densité de fréquence 20 Hz à 20 KhZ (17 mm-17m). A cette fréquence on a une bonne résolution temporelle mais pas spatiale. Coté capteur: La cochlée est comme un piano inverse où les sons commandent les clés. Les sons perçus sont une analyse Fourier (harmonique) du signal incident



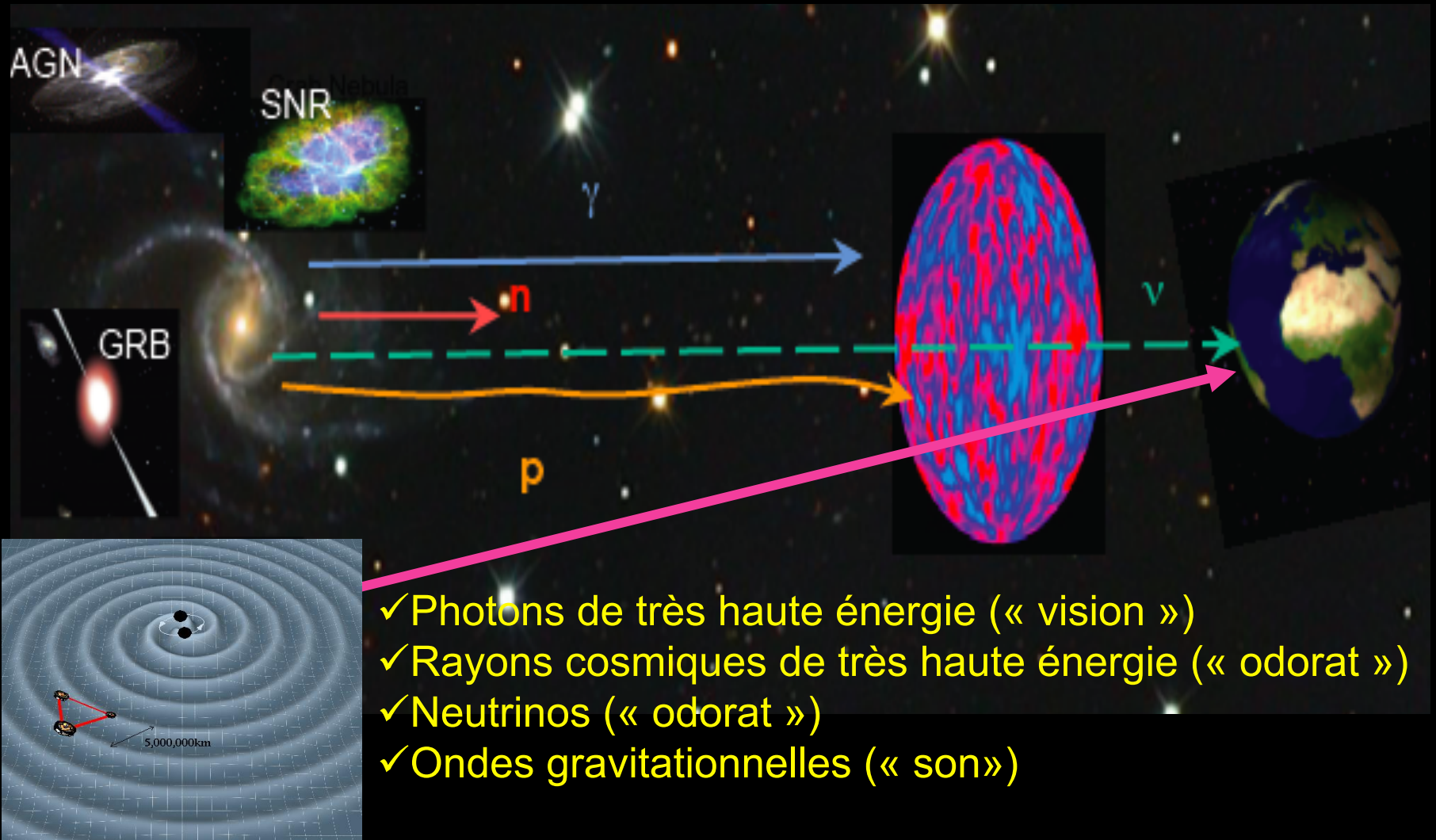
- **ODORAT et GOUT:** Détection des particules par des chemorecepteurs.



- **TOUCHER:** Pression et particules.

On construit notre espace-temps et sa familiarité à partir de ces sensations. Notre monde différent des chiens (odorat), des crevettes mantis (8 couleurs de réception) etc.

L'astroparticule est l'extension de nos sens aux messagers cosmiques au delà du visible et dans le « sonore » et l'« odorant »



- ✓ Photons de très haute énergie (« vision »)
- ✓ Rayons cosmiques de très haute énergie (« odorat »)
- ✓ Neutrinos (« odorat »)
- ✓ Ondes gravitationnelles (« son »)

# De l'Astrophysique à l'Astroparticule (1912-2017)

## Nouveaux Observatoires

1. Couvrant tout le spectre du rayonnement électromagnétique
2. Des rayons cosmiques
3. Des neutrinos et matière noire
4. Des ondes gravitationnelles
5. Les grands relevés (à l'interface avec la cosmologie)

Le véritable voyage de découverte ne consiste pas à chercher de nouveaux paysages, mais à avoir de nouveaux yeux.



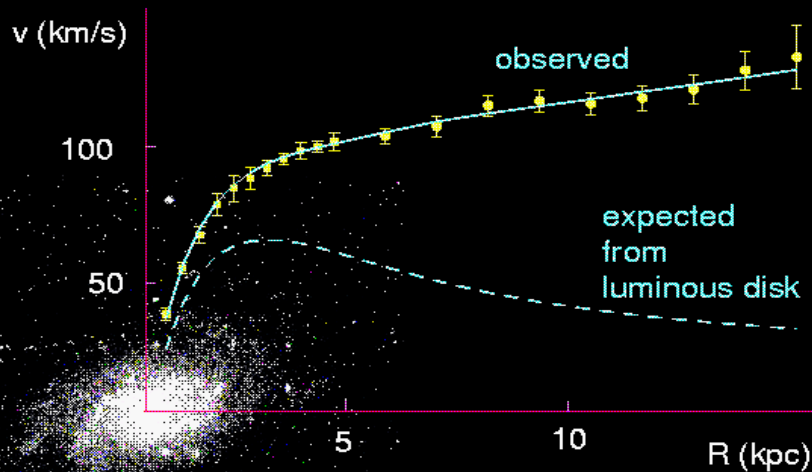


# La matière visible n'est pas la totalité de l'Univers: il y a la matière sombre



- Zwicky 1937 Coma Berenice. *Le mouvement des étoiles indique que la masse "dynamique" est 100 fois supérieure à la masse lumineuse*

- V. Rubin 1971 Bras des galaxies

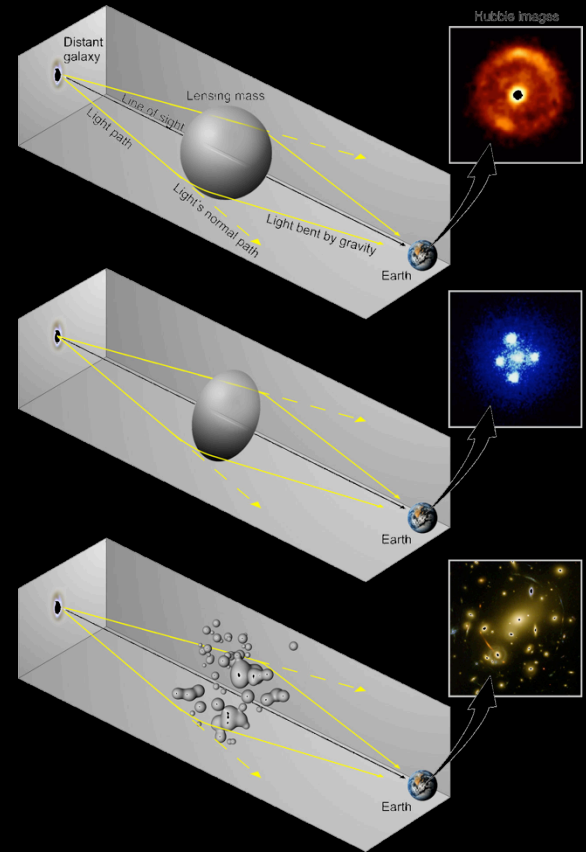
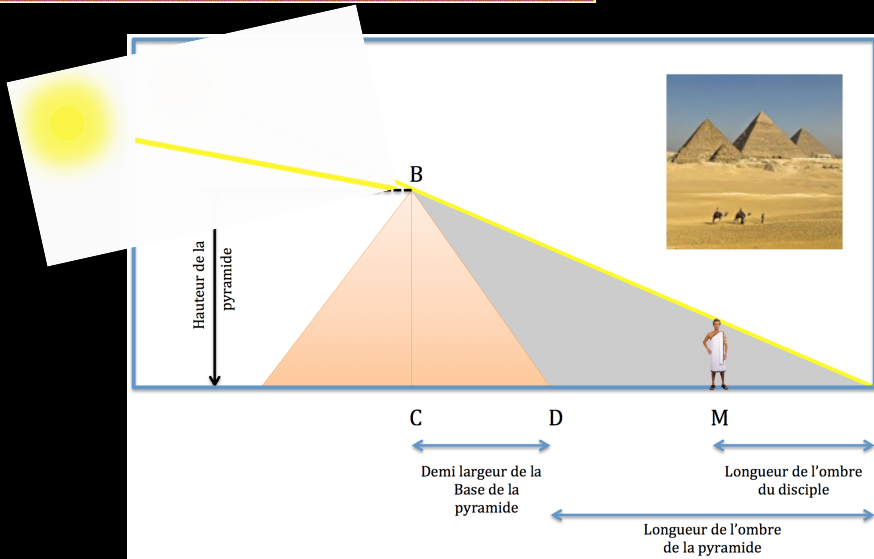
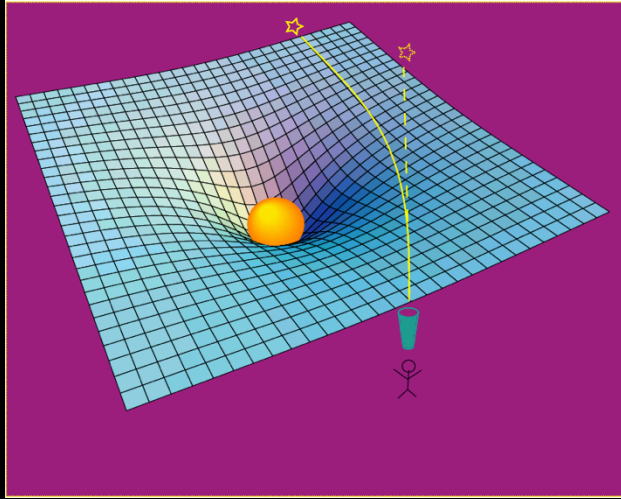


M33 rotation curve

*La vitesse reste constante la galaxie est immergée dans un halo « noir »*

$$\frac{GM_G m_s}{r^2} = \frac{m_s v_s^2}{r}$$

# « L'ombre de la gravité » La masse dévie la lumière, joue le rôle d'une lentille. RG: nouveaux outils de détection de la matière noire



Thalès aurait pu aussi mesurer la masse de la pyramide... (avec techno de 2050)

# Lentilles Gravitationnelles

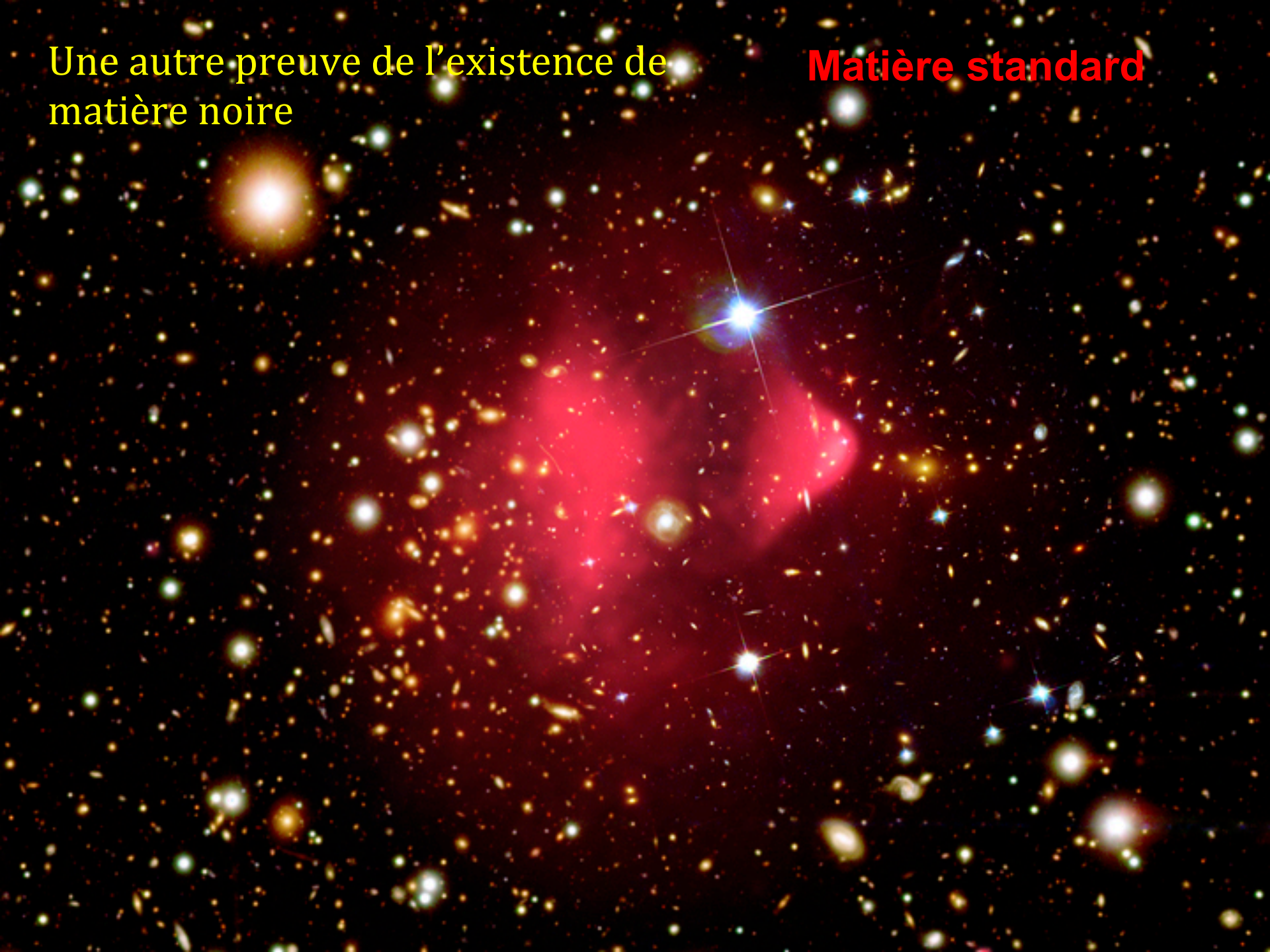
Révèlent aussi plus de matière que la la matière visible





Une autre preuve de l'existence de  
matière noire

**Matière standard**



Une autre preuve de l'existence de  
matière noire

**Matière noire**





Une autre preuve de l'existence de  
matière noire

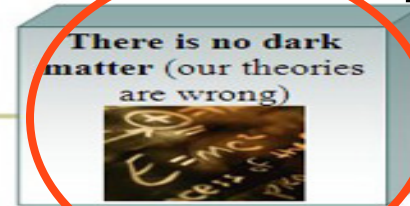
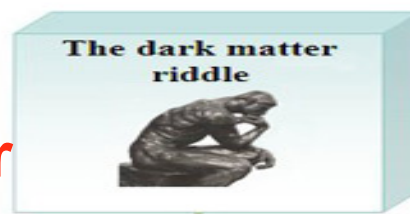
**Matière standard**  
**Matière noire**



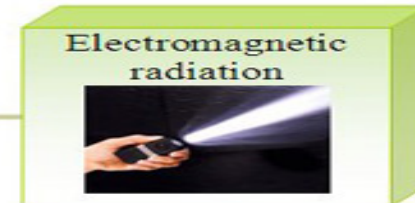
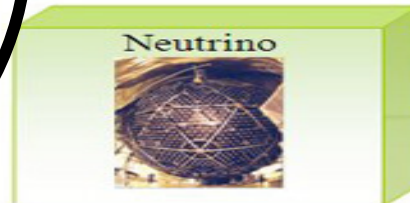
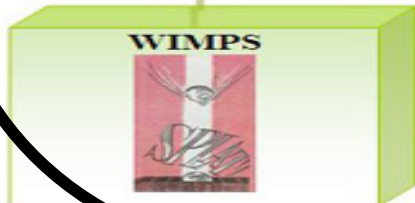
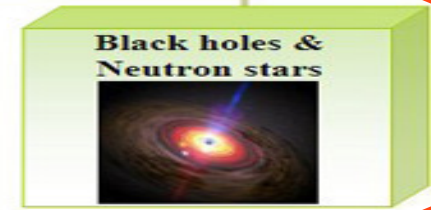
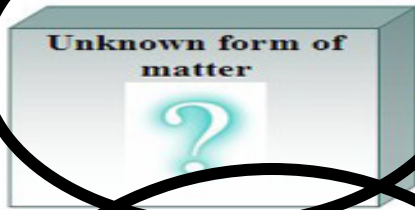


Quelle solution pour le problème de la matière noire?

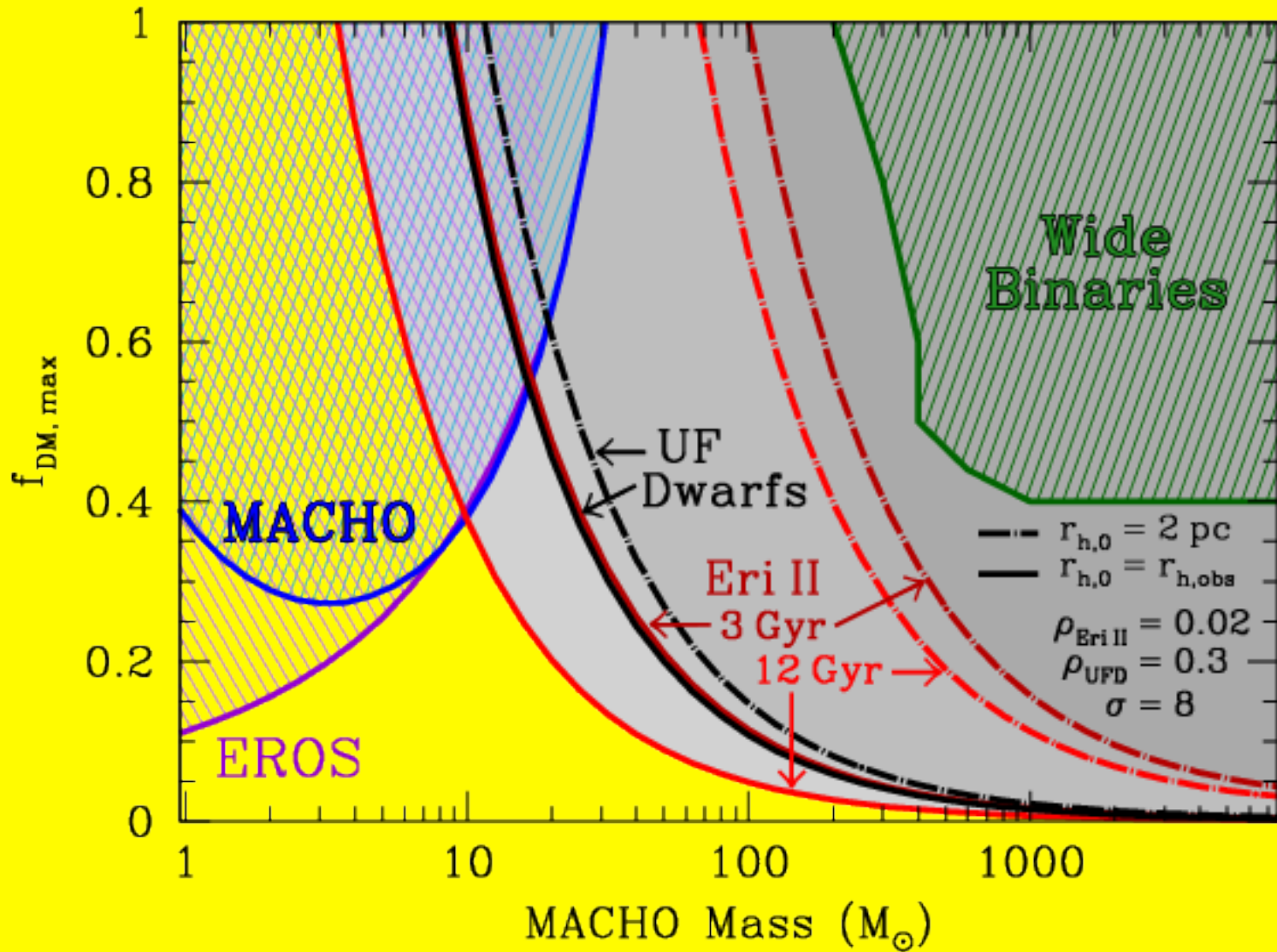
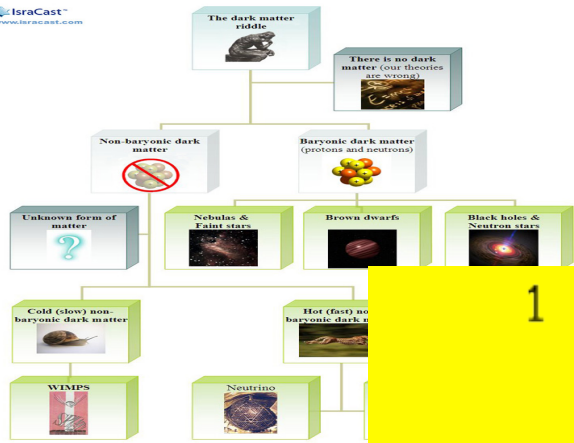
Difficile:  
Bullet Cluster



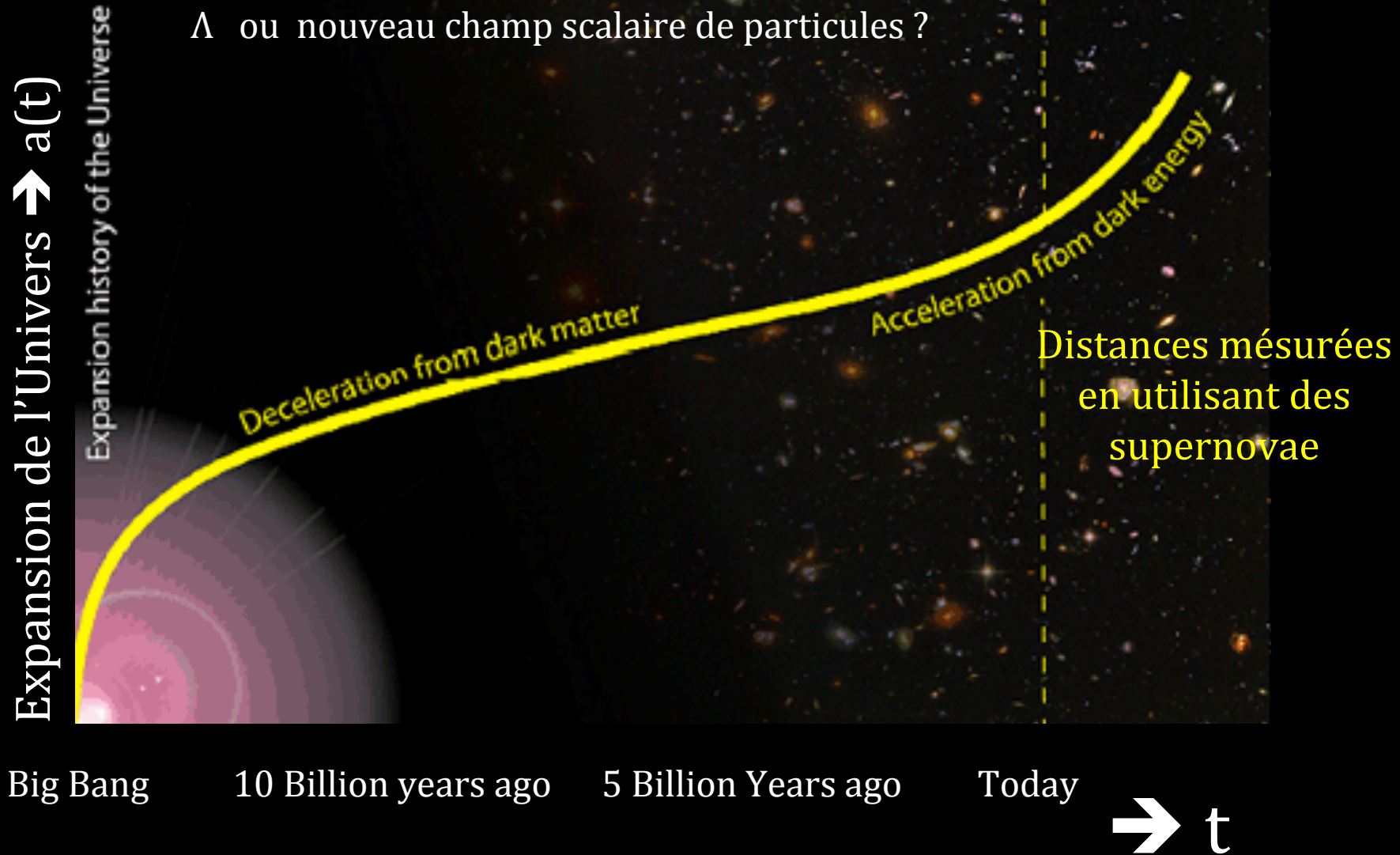
Petite contribution  
Expérience EROS/MACHO



# Quelle solution pour le problème de la matière noire?

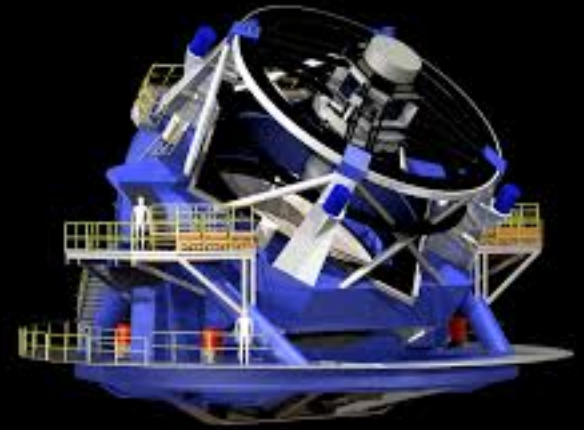
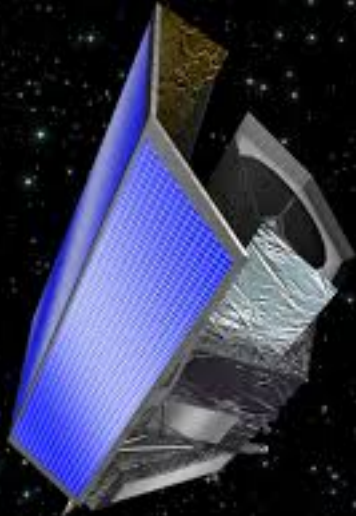


L'Univers n'est pas seulement en expansion, il est en expansion accélérée (énergie sombre)

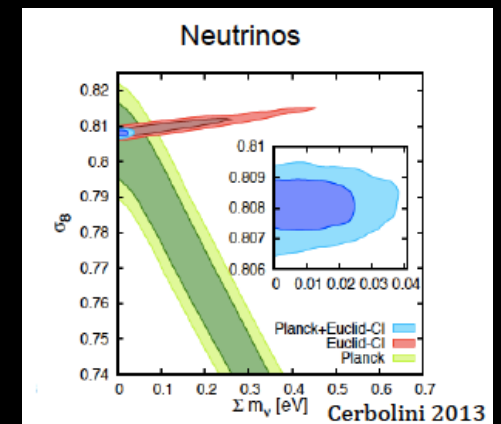
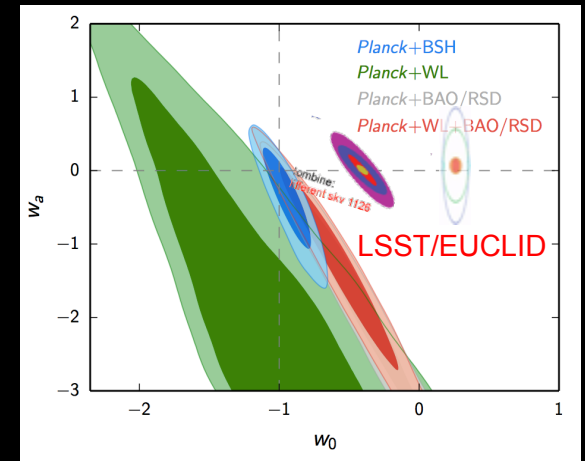




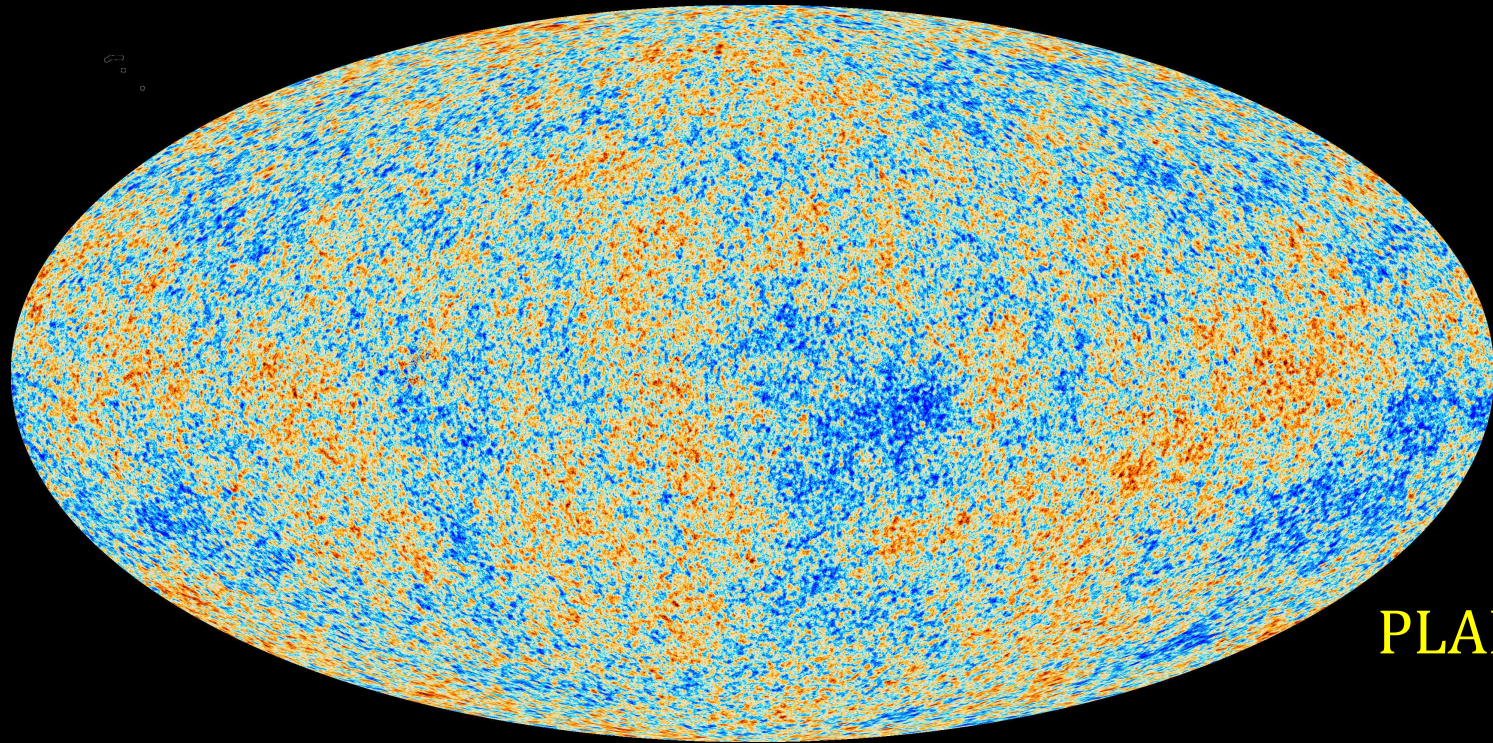
# Dark Energy surveys



- Large dark energy surveys will study the large scale structure and associate it with knowledge obtained at recombination will give crucial information for neutrino mass (see above) and also dark energy equation of state.
- Current program eBOSS/DES
- In the near future
  - **DESI** (BAO and Galaxy clustering)
  - **EUCLID** ESA M2 mission (NASA participation) a 1.2 m telescope at L2 with visible and NIR imaging, NIR slitless spectroscopy. Launch 2020
  - **LSST** Complementary in systematics to Euclid superior spectroscopy (LSST) vs absence of atmospheric distortion (EUCLID). First light 2021



Le satellite COBE, WMAP, PLANCK augmentent la précision de mesure du fonds diffus cosmologique jusqu'à la détection des anisotropies (1993, Smoot, Mather Nobel prize 2006)



Les fluctuations de température du CMB indicatives de formation de structure (rouge-chaud plus dense, bleu plus froid moins dense). On peut en faire analyse harmonique. Les fluctuations du fonds diffus cosmologique à l'origine de nos galaxies



# Comment sont-elles produites ces fluctuations ?

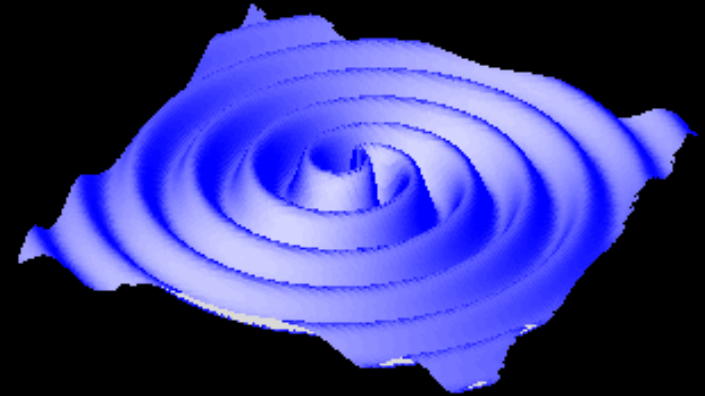
- Un changement rapide à l'origine de l'Univers crée une onde de choc comme si on frappe une corde ou un verre

- Commence alors l'évolution couplée des ingrédients de l'Univers: photons, particules connus, matière noire. L'analyse harmonique des fluctuations nous informe sur la constitution de l'Univers à cette époque.

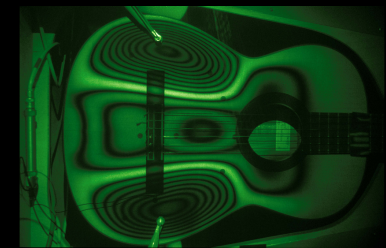
- Ces ondes se propagent à une vitesse  $v$ , le temps de propagation est aussi connu  $T=400.000$  ans → on a une règle cosmique

$$d=vT$$

- Comme en vie courante le son porte l'information de la géométrie et la nature d'un objet frappé



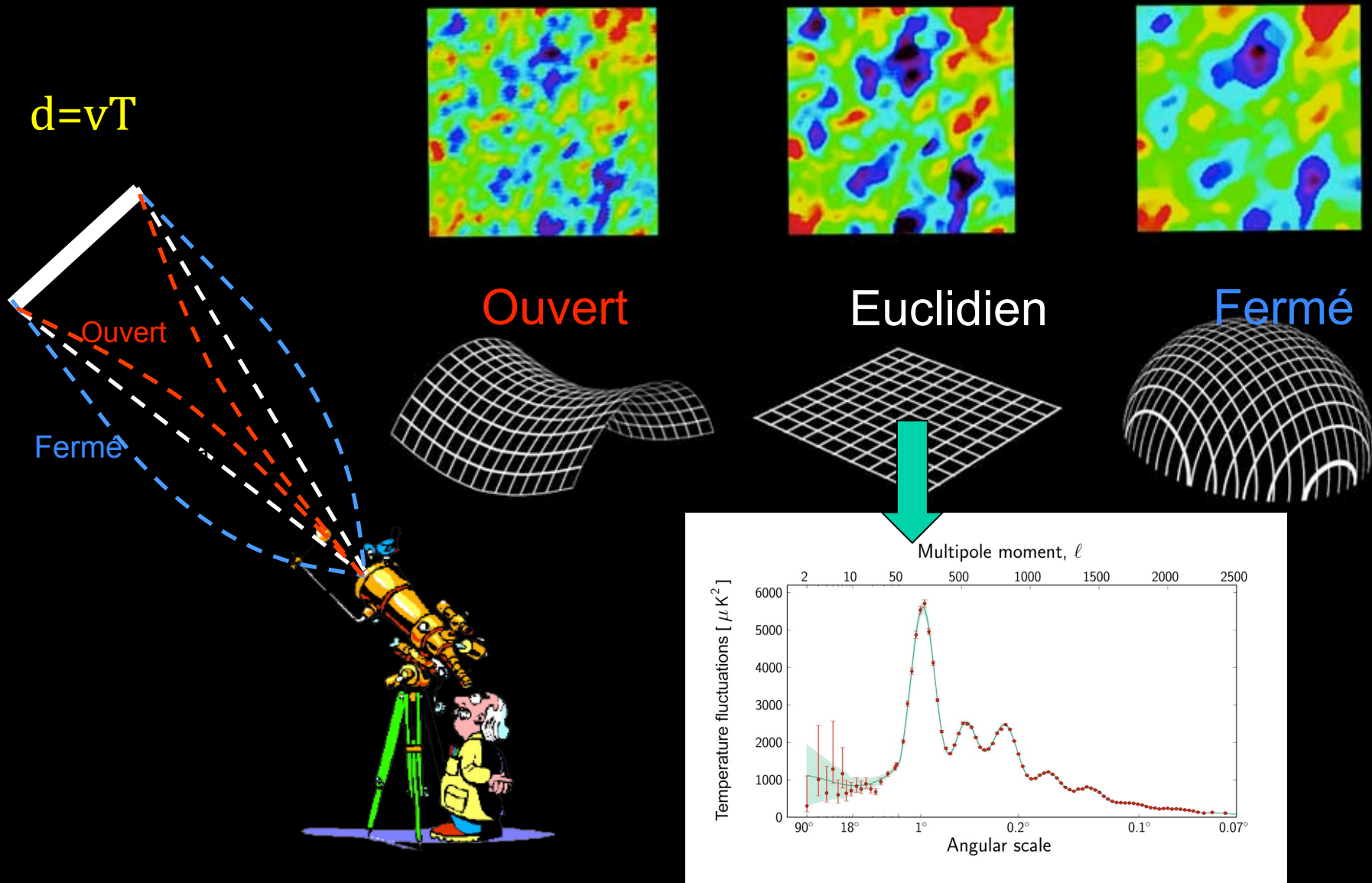
$$v = \frac{v_{son}}{\sqrt{3}}$$



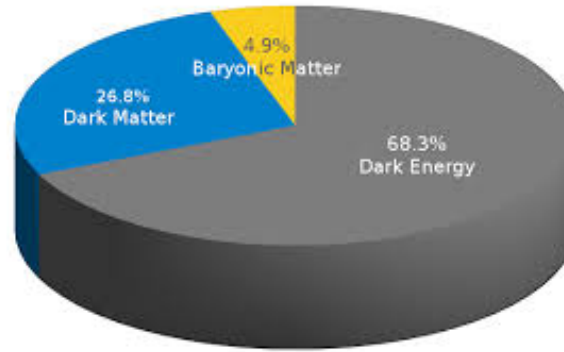
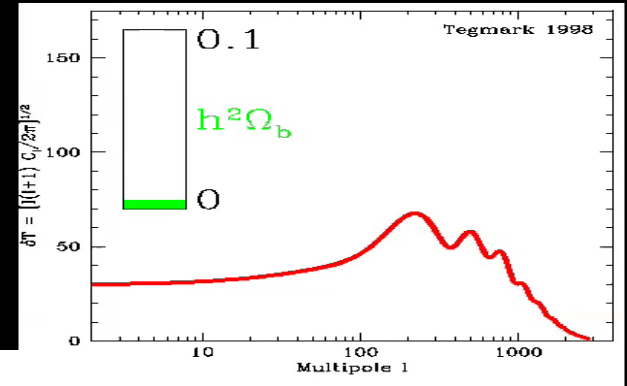
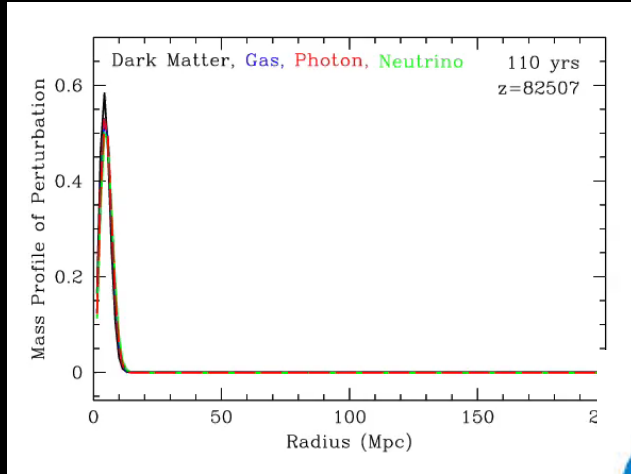
*L'harmonie céleste de Pythagore retrouvée ? Oui mais c'est plutôt du Xenakis*



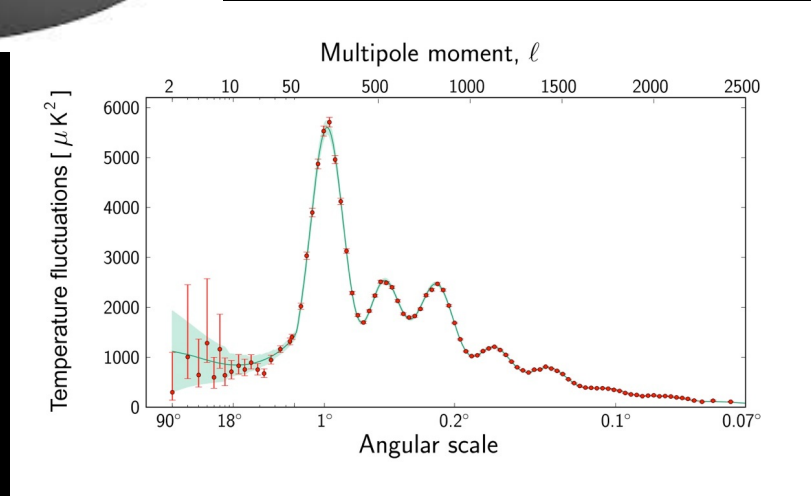
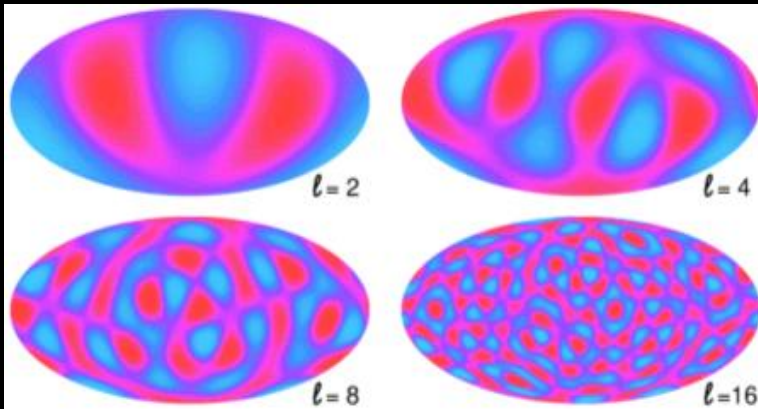
# Mesurer la géométrie de l'Univers. Il est Euclidien



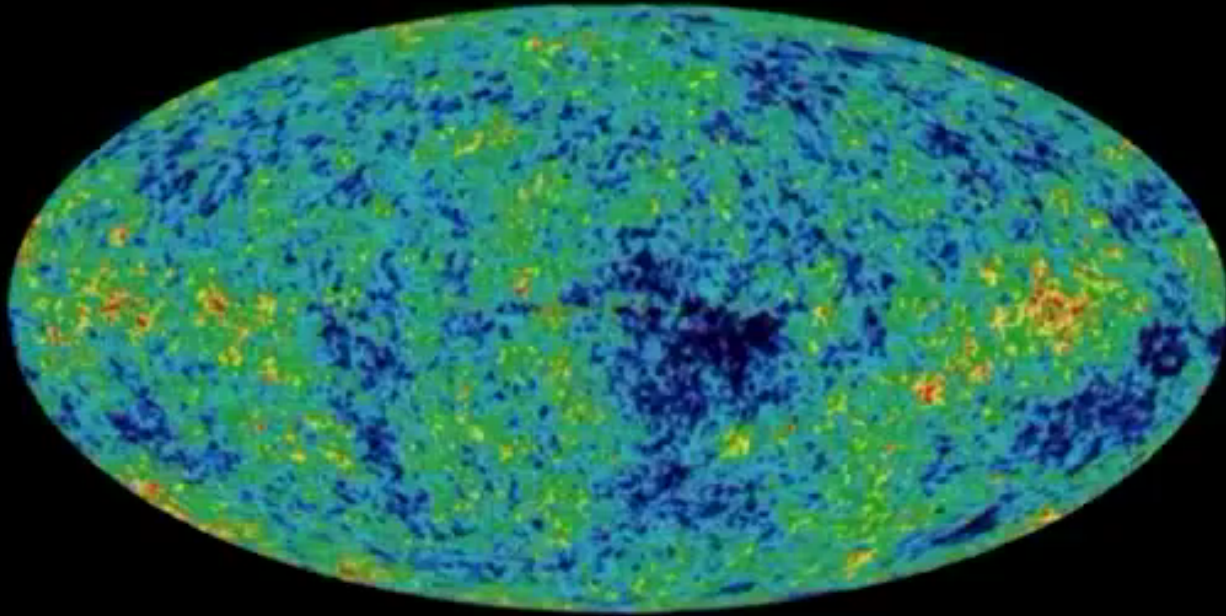
# L'analyse harmonique nous informe aussi sur la constitution matérielle de l'Univers Notamment la part d'énergie et matière sombre



**Contenu en matière standard**



Le cosmos une sculpture sombre  
les galaxies se forment sur un échaffaudage de matière sombre





# Phénomènes violents régulent la formation des structures (feedback)

## THE FORMATION OF A BULGELESS GALAXY WITH A SHALLOW DARK MATTER CORE

**Fabio Governato** (University of Washington)  
**Chris Brook** (University of Central Lancashire)  
**Lucio Mayer** (ETH and University of Zurich)  
and the N-Body Shop

KEY: Blue: gas density map. The brighter regions represent gas that is actively forming stars. The clock shows the time from the Big Bang. The frame is 50,000 light years across.

Simulations were run on Columbia (NASA Advanced Supercomputing Center) and at ARSC

# Programme

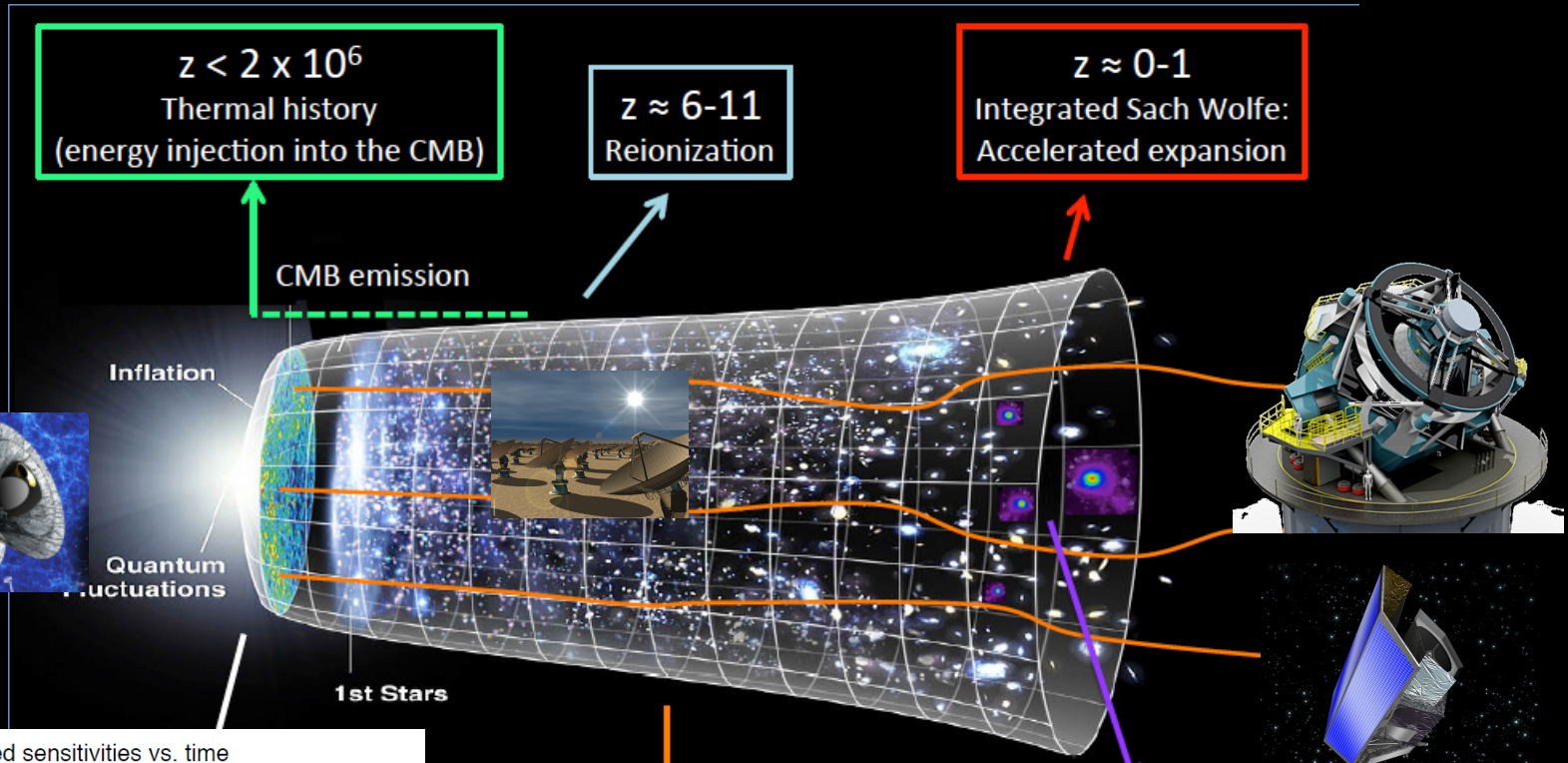
- I. De l'Astronomie à l'Astrophysique
- II. De l'Astrophysique à l'Astroparticule
  - I. Nouvelles théories et nouveaux objets cosmiques
  - II. Du visible au rayonnement électromagnétique
  - III. Les rayons cosmiques
  - IV. Les neutrinos et la matière noire
  - V. Les ondes gravitationnelles
  - VI. Les grands relevés
- III. **Etudier l'Univers aujourd'hui**
  - I. **L'Univers primordial au delà du « mur » électromagnétique**
  - II. Les structures cosmiques (galaxies et amas)
  - III. Les phénomènes violents (astrophysique multi-messenger)
- IV. Difficultés de l'interdisciplinarité
- V. Conclusions

# Programme

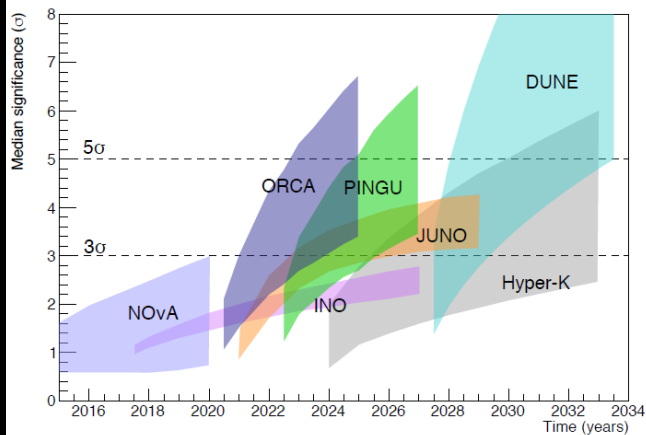
- I. De l'Astronomie à l'Astrophysique
- II. De l'Astrophysique à l'Astroparticule
  - I. Nouvelles théories et nouveaux objets cosmiques
  - II. Du visible au rayonnement électromagnétique
  - III. Les rayons cosmiques
  - IV. Les neutrinos et la matière noire
  - V. Les ondes gravitationnelles
  - VI. Les grands relevés
- III. **Etudier l'Univers aujourd'hui**
  - I. L'Univers primordial au delà du « mur » électromagnétique
  - II. **Les structures cosmiques (galaxies et amas)**
  - III. Les phénomènes violents (astrophysique multi-messenger)
- IV. Difficultés de l'interdisciplinarité
- V. Conclusions



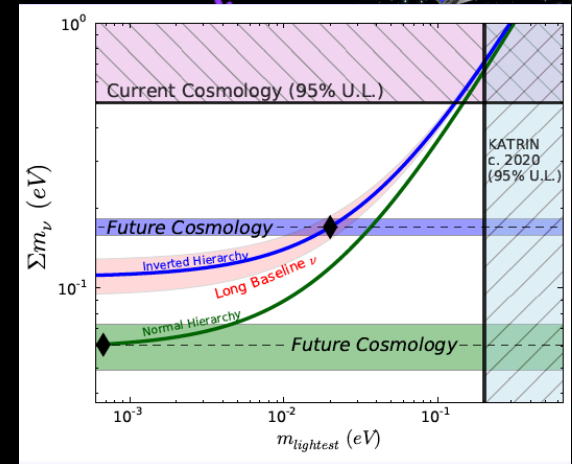
# Une étude unifié de l'Univers invisible au sol et à l'espace : $\nu$ , matière noire indirect (cosmo)/direct(exp)



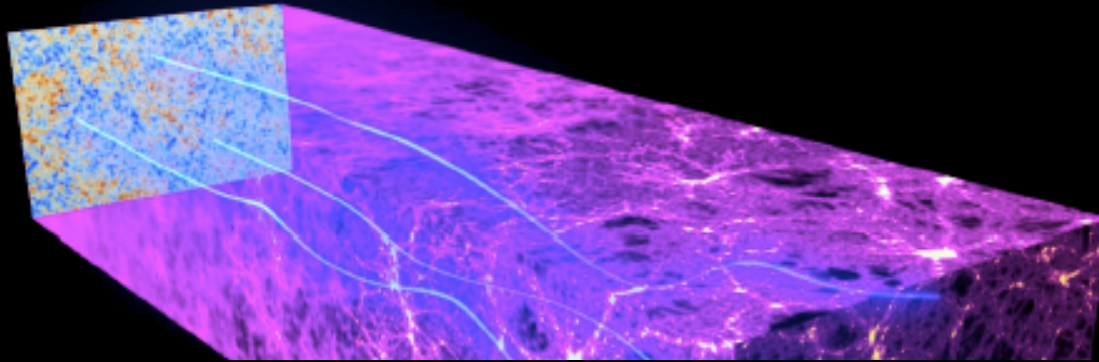
Expected sensitivities vs. time



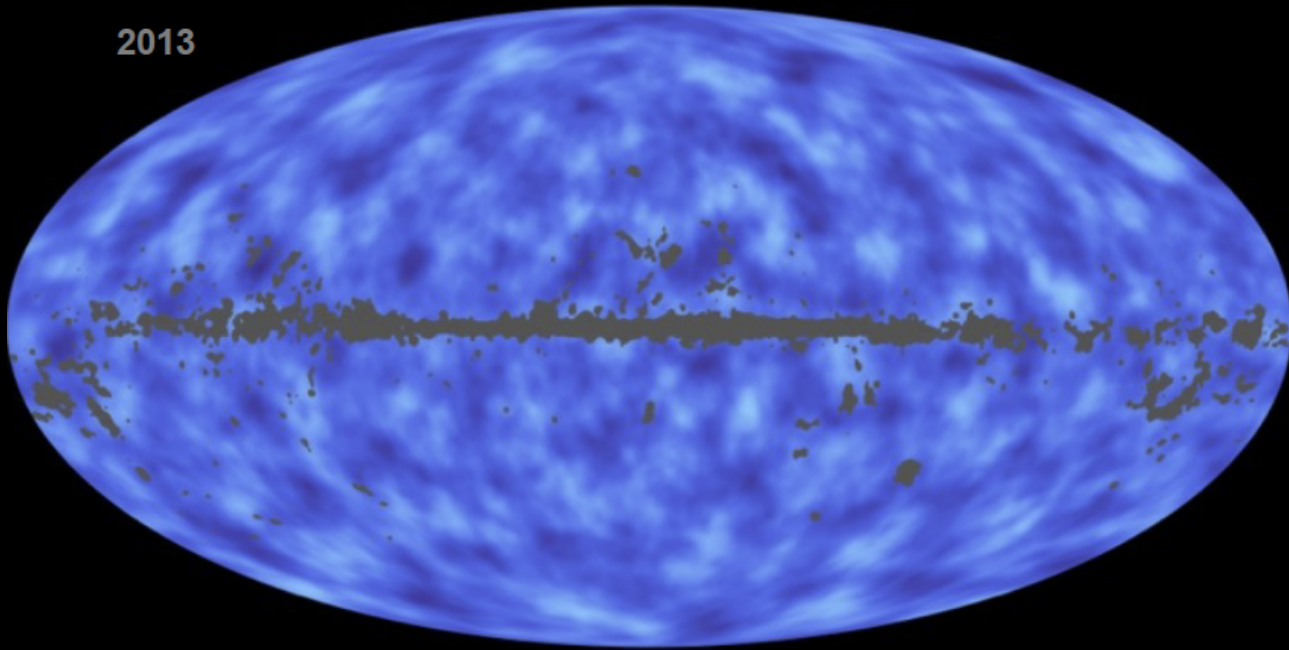
**$z \approx 1-3$**   
Gravitational lensing  
Dark matter distribution



L'expérience ultime de production d'ombre : c'est une lumière primordiale qui illumine l'Univers, ses déviations (lensing) révèlent la matière (y compris noire ) entre le plasma primordial et aujourd'hui



2013

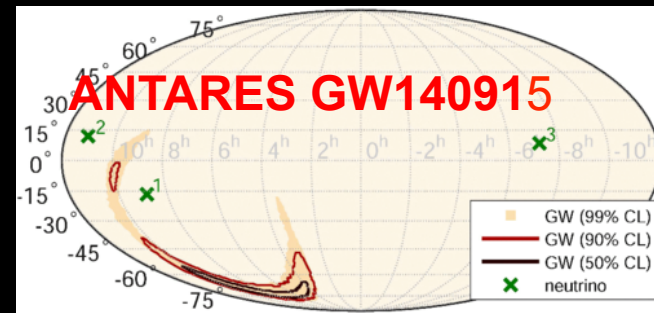
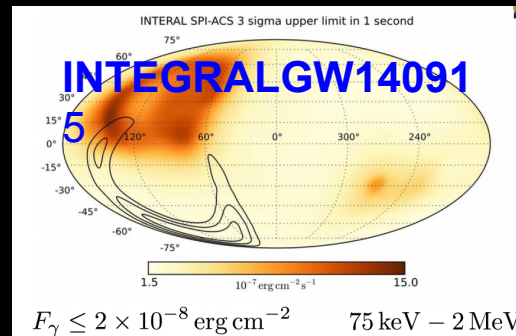
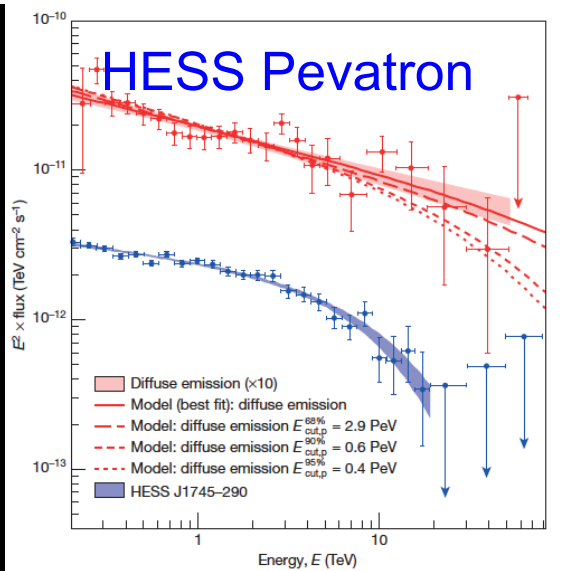
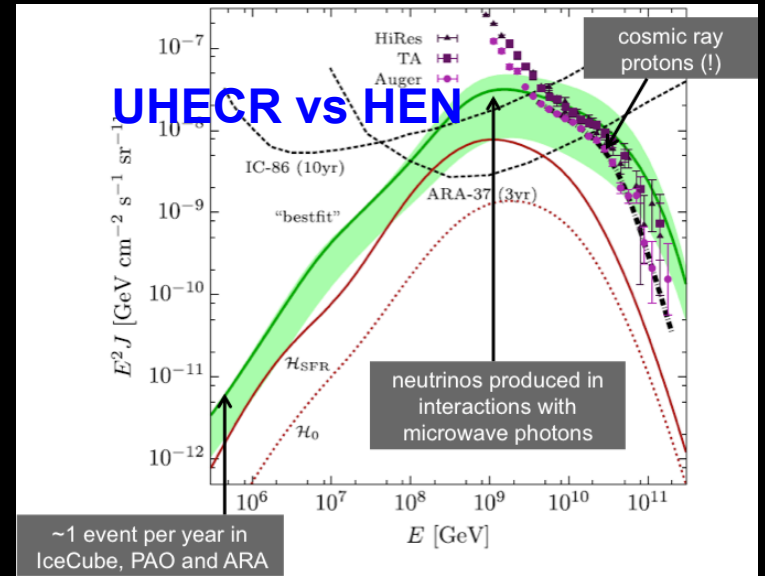
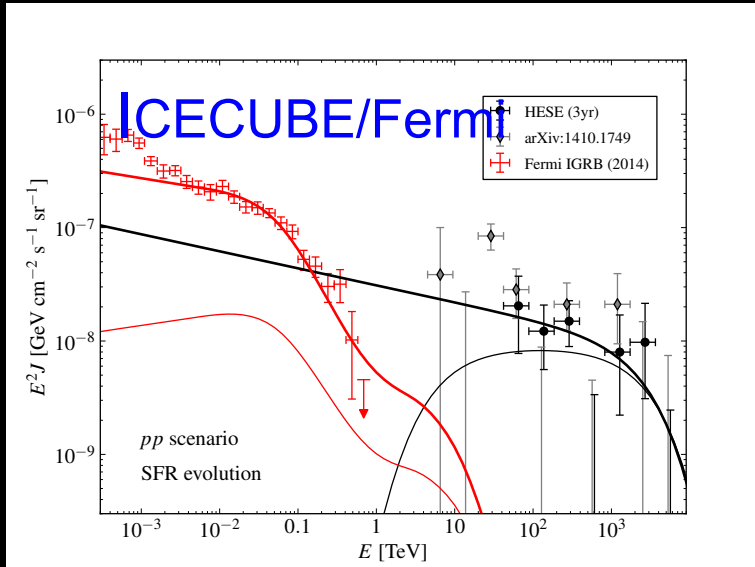


# Programme

- I. De l'Astronomie à l'Astrophysique
- II. De l'Astrophysique à l'Astroparticule
  - I. Nouvelles théories et nouveaux objets cosmiques
  - II. Du visible au rayonnement électromagnétique
  - III. Les rayons cosmiques
  - IV. Les neutrinos et la matière noire
  - V. Les ondes gravitationnelles
  - VI. Les grands relevés
- III. **Etudier l'Univers aujourd'hui**
  - I. L'Univers primordial au delà du « mur » électromagnétique
  - II. Les structures cosmiques (galaxies et amas)
  - III. **Les phénomènes violents (astrophysique multi-messenger)**
- IV. Difficultés de l'interdisciplinarité
- V. Conclusions



# A-t-on obtenu finalement les sensibilités pour des études multimessager ?



Also space missions (SVOM)

## A very exciting LIGO-Virgo Observing run is drawing to a close August 25

25 August 2017 -- The Virgo and LIGO Scientific Collaborations have been observing since November 30, 2016 in the second Advanced Detector Observing Run 'O2', searching for gravitational-wave signals, first with the two LIGO detectors, then with both LIGO and Virgo instruments operating together since August 1, 2017. Some promising gravitational-wave candidates have been identified in data from both LIGO and Virgo during our preliminary analysis, and we have shared what we currently know with astronomical observing partners. We are working hard to assure that the candidates are valid gravitational-wave events, and it will require time to establish the level of confidence needed to bring any results to the scientific community and the greater public. We will let you know as soon we have information ready to share.

+ « Rumeurs » (Nature) NGC4993

Etoile à neutron en OG ?

+Optique ?

+Chandra (X)

+ FERMI ( $\gamma$ )

Radio et  $\nu$  cherchent

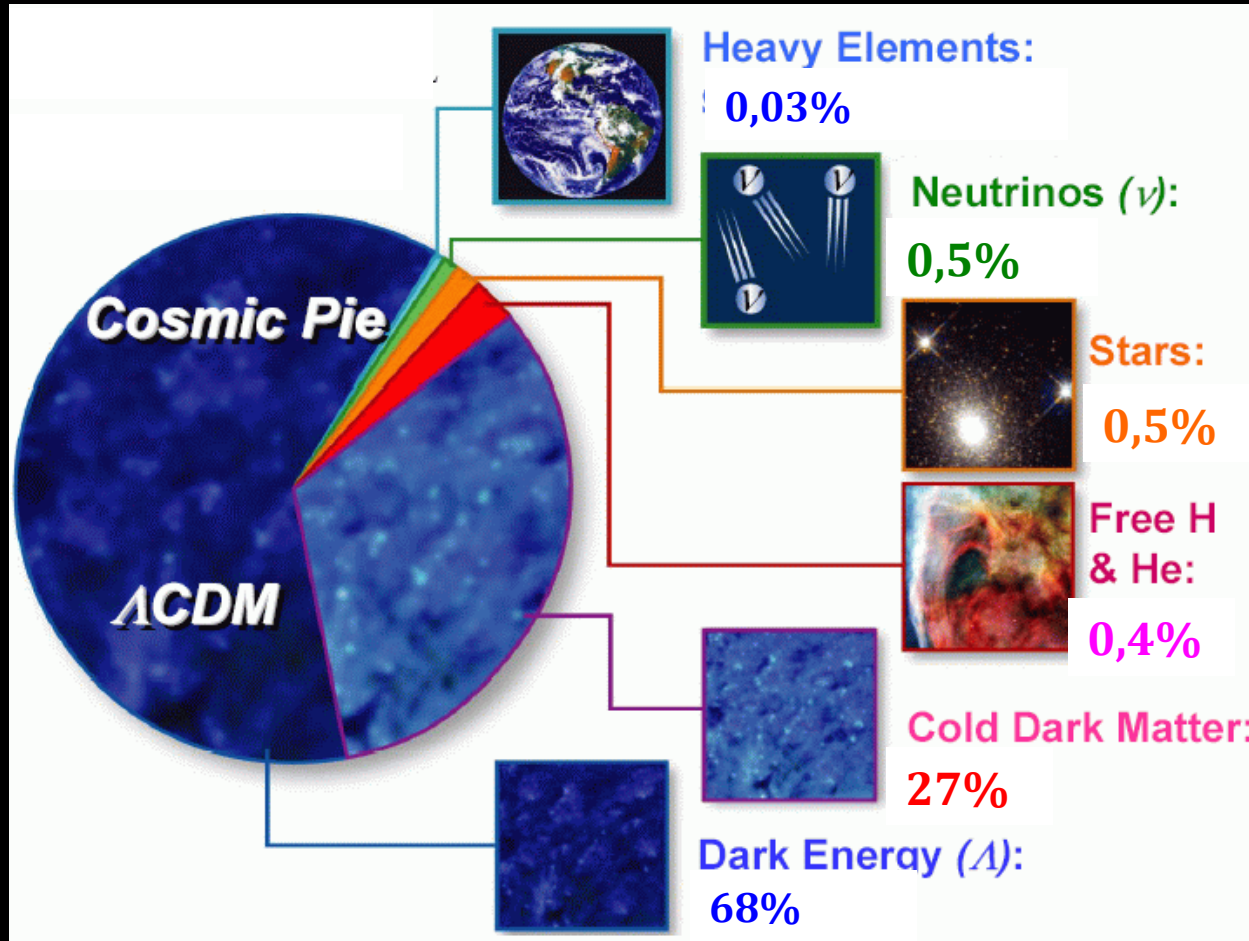


# Programme

- I. De l'Astronomie à l'Astrophysique
- II. De l'Astrophysique à l'Astroparticule
  - I. Nouvelles théories et nouveaux objets cosmiques
  - II. Du visible au rayonnement électromagnétique
  - III. Les rayons cosmiques
  - IV. Les neutrinos et la matière noire
  - V. Les ondes gravitationnelles
  - VI. Les grands relevés
- III. **Etudier l'Univers aujourd'hui**
  - I. **L'Univers primordial au delà du « mur » électromagnétique**
  - II. Les structures cosmiques (galaxies et amas)
  - III. Les phénomènes violents (astrophysique multi-messenger)
- IV. Difficultés de l'interdisciplinarité
- V. Conclusions

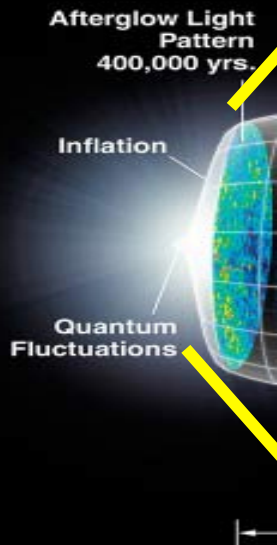


# Le modèle standard de cosmologie



*In this beginning of the 21<sup>st</sup> century, our knowledge of the Universe can be compared to the knowledge of the gases at the beginning of the 20<sup>th</sup>. We know with great precision the overall parameters and relations of macroscopic variables: in short its macrophysics, but we still lack the full knowledge of its elementary constituents: its microphysics G. Smoot (Nobel of Physics 2006, CMB)*

Qu'est-ce qui se passe derrière le « mur » électromagnétique ?  
 Besoin de la physique du XXI<sup>e</sup> siècle



**Recombination** Atoms form  
 Relic radiation decouples (CMB)

**Matter domination**  
 Onset of gravitational collapse

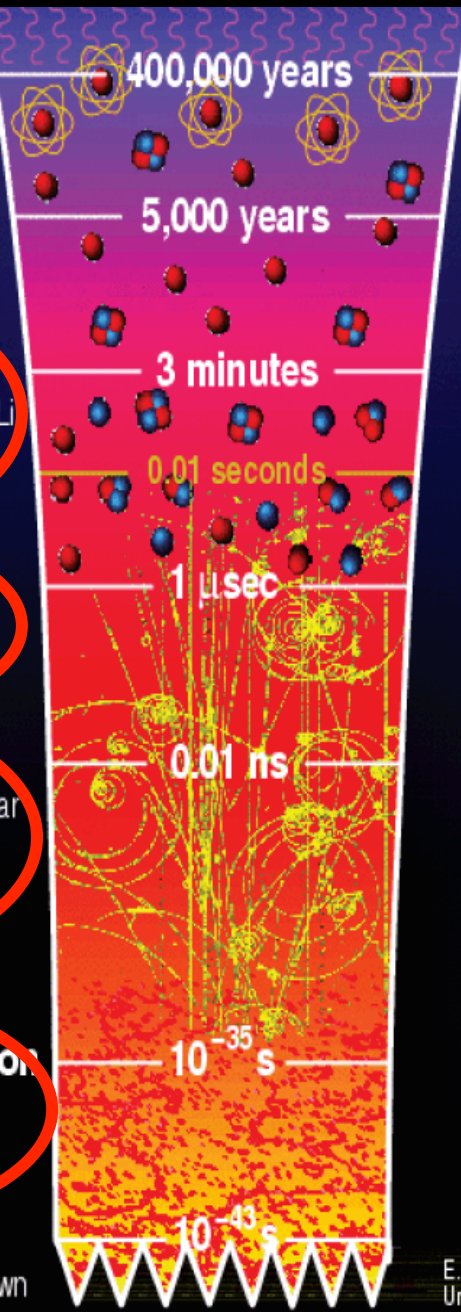
**Nucleosynthesis**  
 Light elements created - D, He, Li  
**Nuclear fusion begins**

**Quark-hadron transition**  
 Protons and neutrons formed

**Electroweak transition**  
 Electromagnetic and weak nuclear forces first differentiate  
**Supersymmetry breaking**  
 Axions etc.?

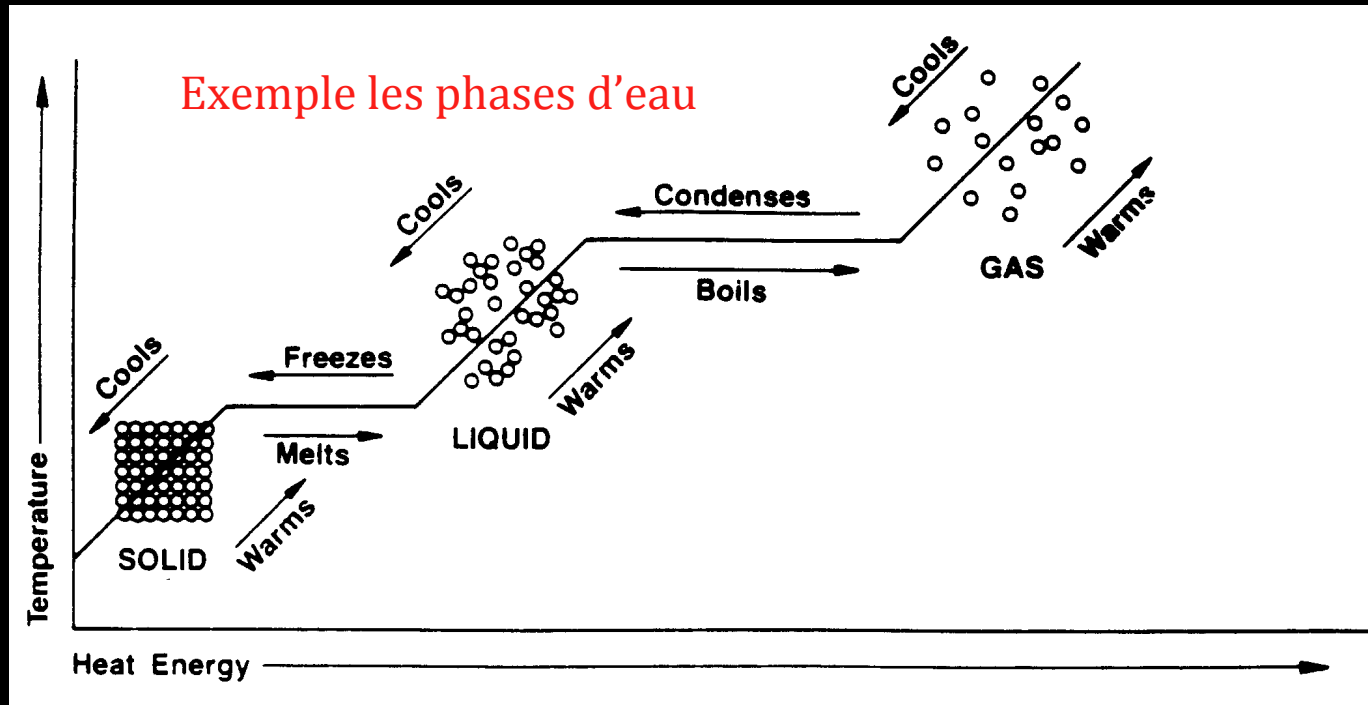
**Grand unification transition**  
 Electroweak and strong nuclear forces differentiate  
**Inflation**

**Quantum gravity wall**  
 Spacetime description breaks down



- i. Grande Unification/Inflation
- ii. Matière-antimatière
- iii. Higgs/Matière Noire
- iv. Quark-hadron
- v. Nucléosynthèse

# La physique des changements de phase



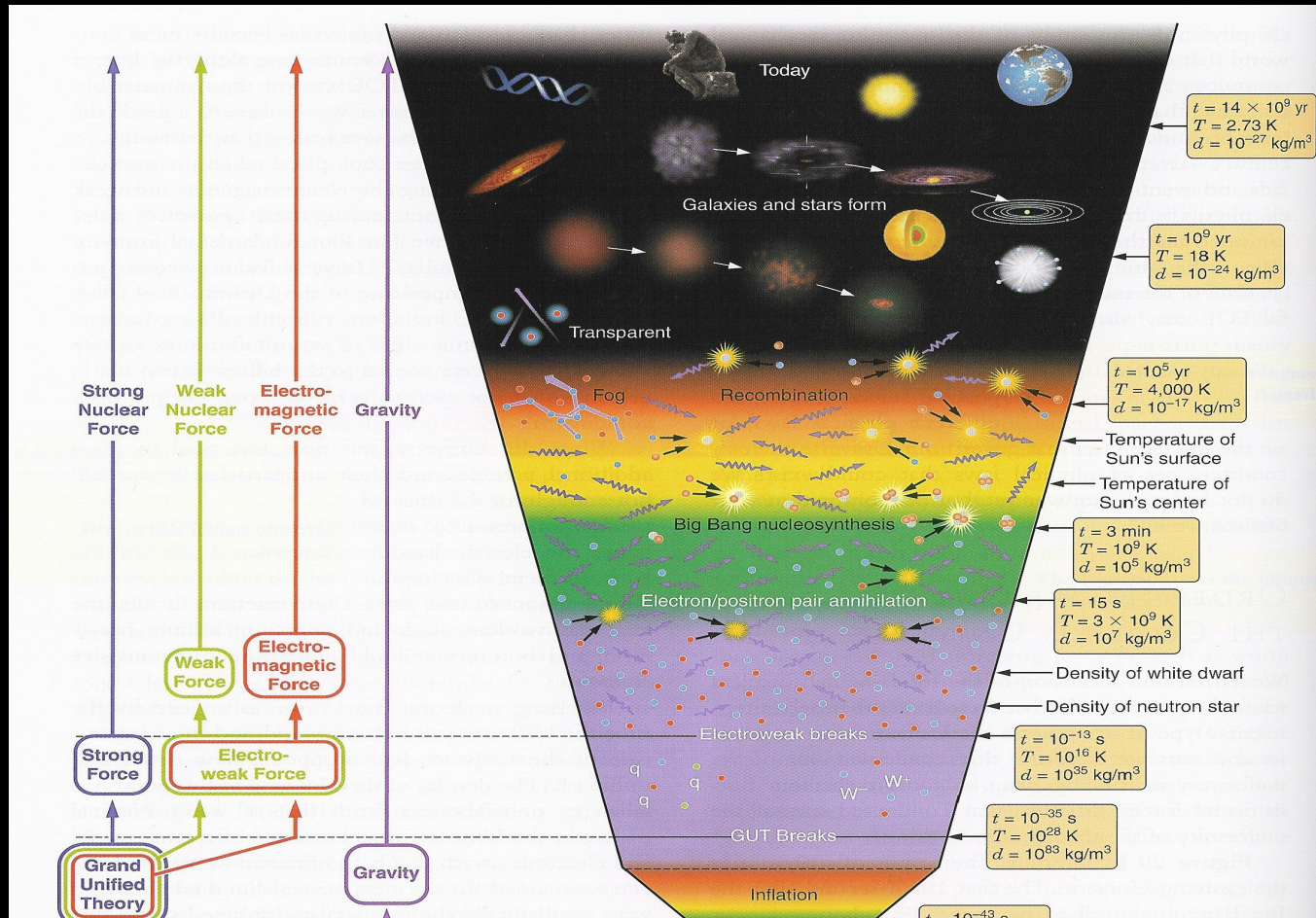
Un petit changement à un paramètre (par exemple Temperature) amène des changements dramatiques de l'agencement

**F. Dyson:** A chaque étape de l'évolution de l'Univers on voit des transitions ordre-désordre avec les mêmes caractéristiques: apparition soudaine de structures qui n'existaient pas



$10^{-35}$  sec,  $10^{29}$  K ( $10^{16}$  GeV,  $10^{-32}$ m)

# I. Grande Unification

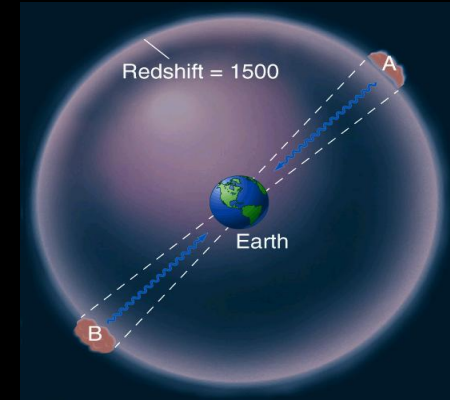


Probablement liée à l'inflation

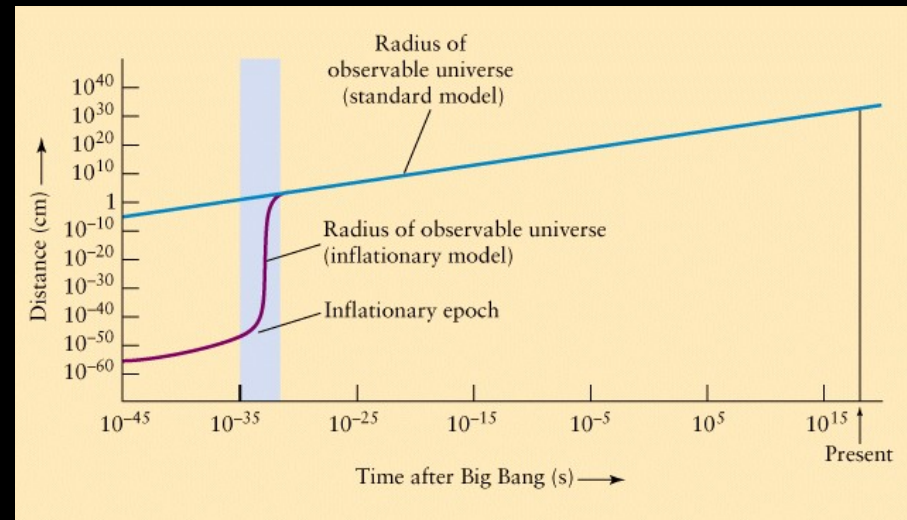
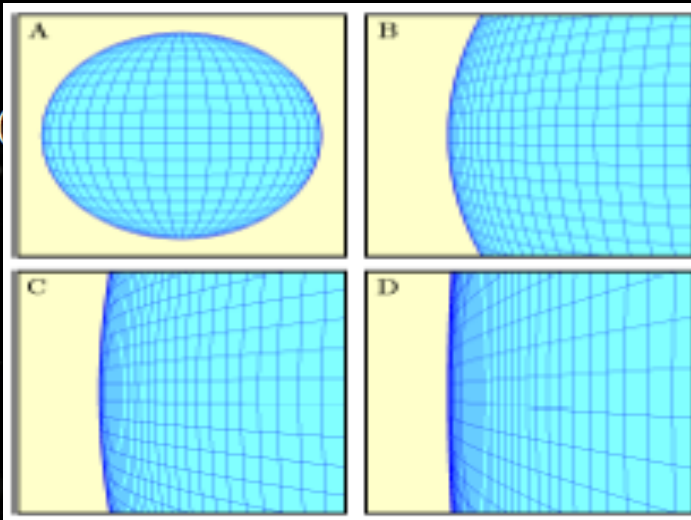
# Quel était le phénomène violent au début de l'Univers?

## Questions annexes:

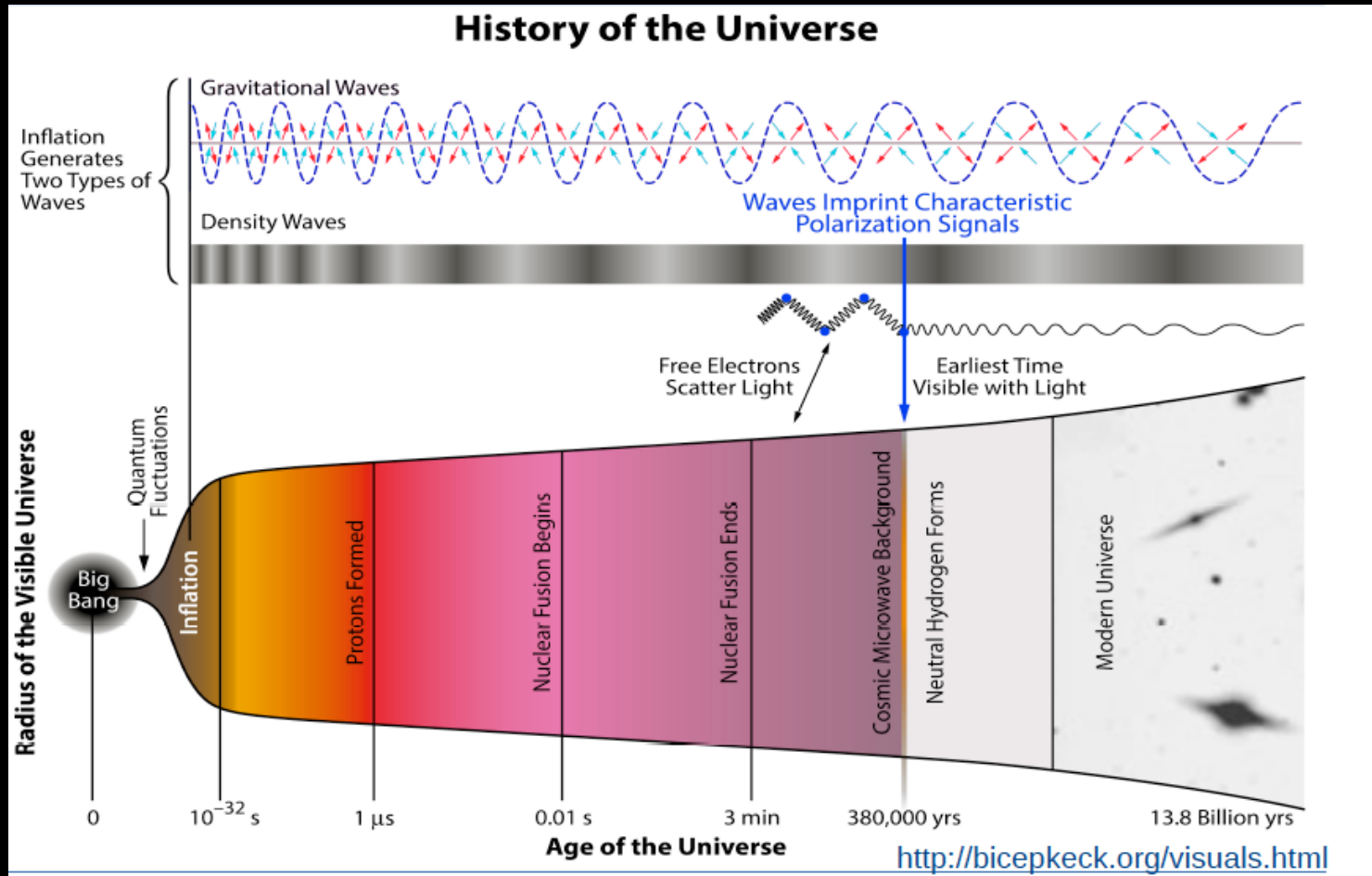
- Pourquoi des régions sans relation causale possible ont la même température à  $10^{-5}$  ?
- Pourquoi l'Univers reste Euclidien ?
- Pourquoi il n'y pas une abondance de monopoles ?



Réponse: Il y a un champ  $\phi$  "scalaire" similaire au champ de Higgs, sa transition de phase amène une expansion exponentielle de l'Univers : Les fluctuations quantiques d'une petite région connectée causalement est projetée à des distances macroscopiques (sortie-entrée de l'horizon), l'espace devient lisse et plat, les monopoles sont dilués



# Empreinte de l'inflation sur les fluctuations de densité



- L'expansion violente crée des ondes gravitationnelles, qui ont une forme quadrupolaire, ils donnent alors une empreinte quadrupolaire aux fluctuations de densité.
- Les photons de CMB diffusés sur ces fluctuations de densité polarisée obtiennent eux aussi une polarisation quadrupolaire dite de type B
- Détecter la polarisation B du CMB → détecter l'inflation



$10^{-26}$  seconds,  $10^{27}$  T ( $10^{14}$  GeV,  $10^{-30}$  m)

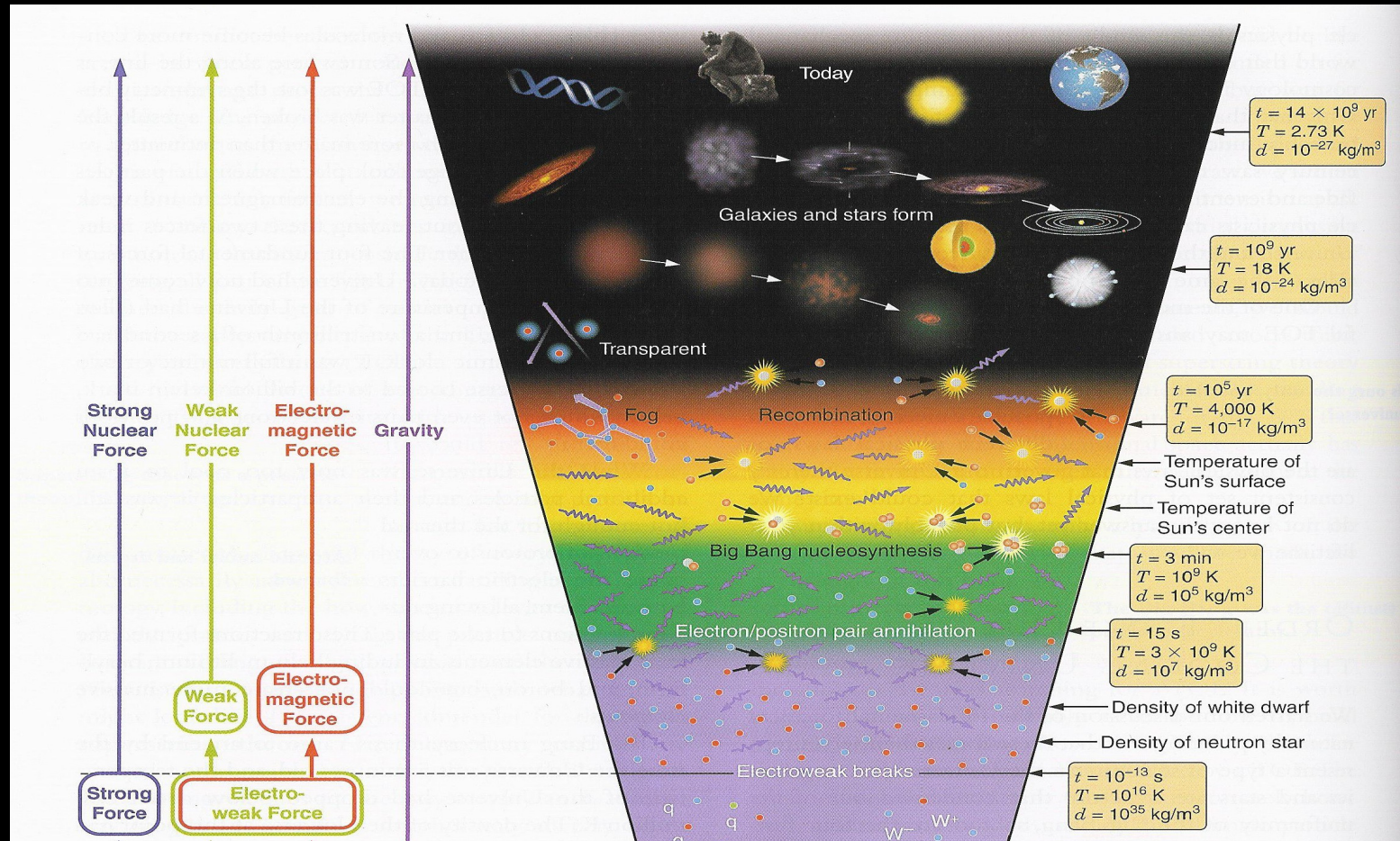
## II. Ere de dominance de matière sur l'antimatière



Théorie très probable: surproduction de matière sur antimatière de 1 sur 10 milliard, à cause de la violation de la symétrie charge-parité (CP) aux désintégrations de neutrinos et transfert de l'asymétrie aux quarks dans des conditions hors équilibre

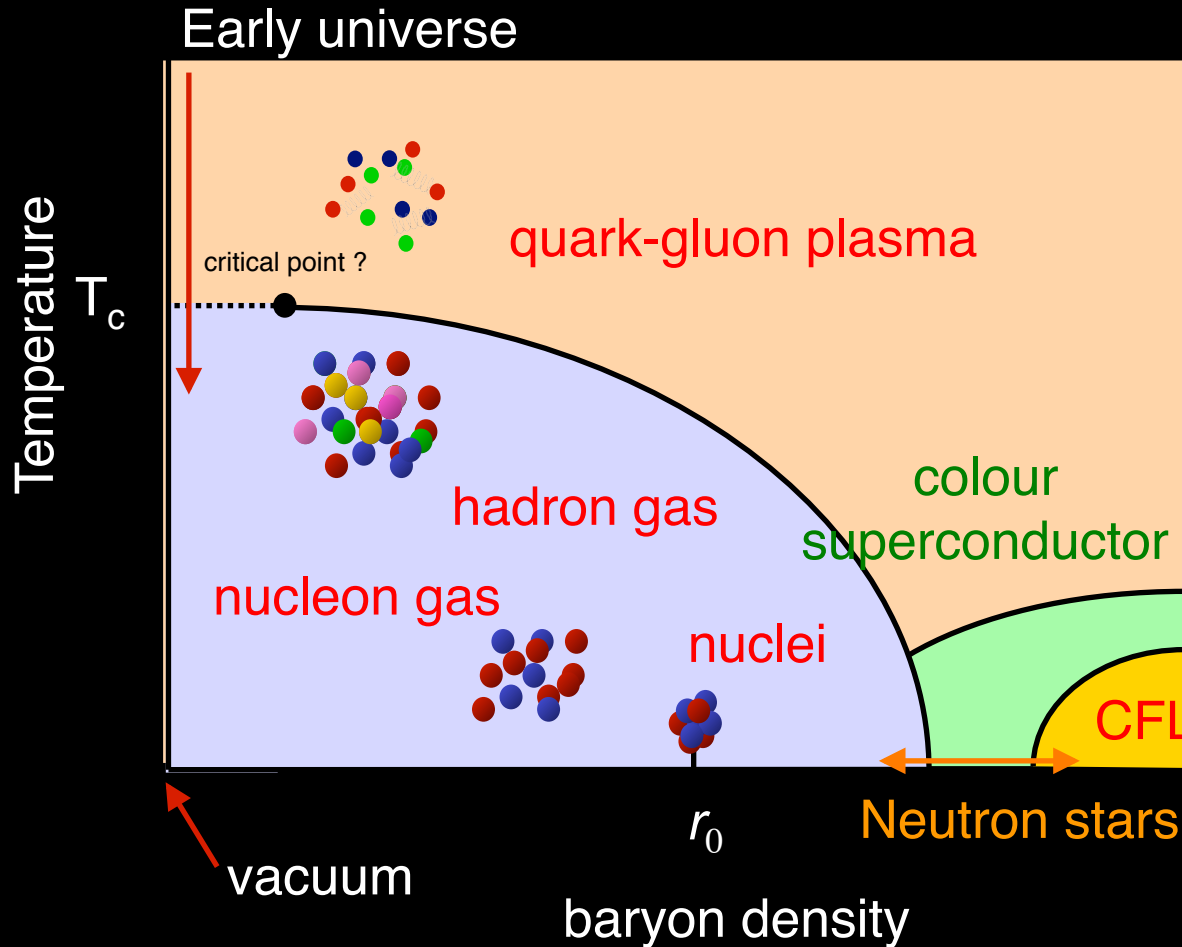
$t=10^{-13}$  seconds,  $10^{16}$  K (1000 GeV,  $10^{-19}$  m)

### III. Brisure spontanée de Symétrie, mécanisme Higgs



Aux échelles probables de production de matière noire

$10^{-4}$  seconds,  $T = 10^{13}$  K, ( $E = 1$  GeV,  $10^{-16}$  m)  
IV. Changement de phase des quarks/gluons  
aux protons/neutrons



LHC/CERN (Alice)



# Programme

- I. De l'Astronomie à l'Astrophysique
- II. De l'Astrophysique à l'Astroparticule
  - I. Nouvelles théories et nouveaux objets cosmiques
  - II. Du visible au rayonnement électromagnétique
  - III. Les rayons cosmiques
  - IV. Les neutrinos et la matière noire
  - V. Les ondes gravitationnelles
  - VI. Les grands relevés
- III. Etudier l'Univers aujourd'hui
  - I. L'Univers primordial au delà du « mur » électromagnétique
  - II. Les structures cosmiques (galaxies et amas)
  - III. Les phénomènes violents (astrophysique multi-messenger)
- IV. **Difficultés de l'interdisciplinarité**
- V. Conclusions

Une entreprise interdisciplinaire doit assumer pendant un certain temps une précision moindre que celle revendiquée dans les branches canoniques du savoir; Parmi les particularités des sciences confortées dans leur conscience d'elles-mêmes, il y a le fait qu'elles croient toujours savoir avec bien plus de précision qu'on ne peut savoir; en aucun cas n'a-t-on obtenu le rétrécissement et l'isolement de l'objet d'étude sans contrepartie. Parce qu'elle n'accepte pas la délimitation bien définie et éprouvée de l'objet, l'entreprise interdisciplinaire doit tout d'abord pour effet de décevoir;

Hans Blumenberg

# APPEC: *roadmapping*



From the  
Nature article

2008

2011

## ASTROPARTICLE PHYSICS the European strategy

## Astroparticle physics

The European Roadmap

## Magnificent 7

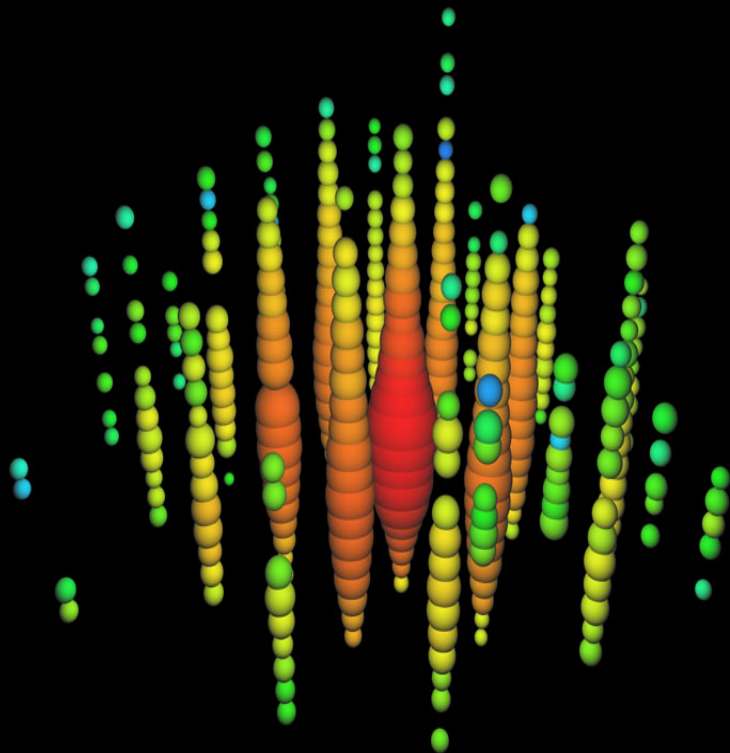
1. **HE gammas**
  2. **HE neutrinos**
  3. **HE cosmic rays**
  4. **Gravitational waves**
  5. **Dark matter**
  6. **[?]-mass**
  7. **[?]-mixing & p-decay**
- CMB**
- Dark Energy**

**RB's comment: But... at least 4 -5 domains have not seen a signal yet**

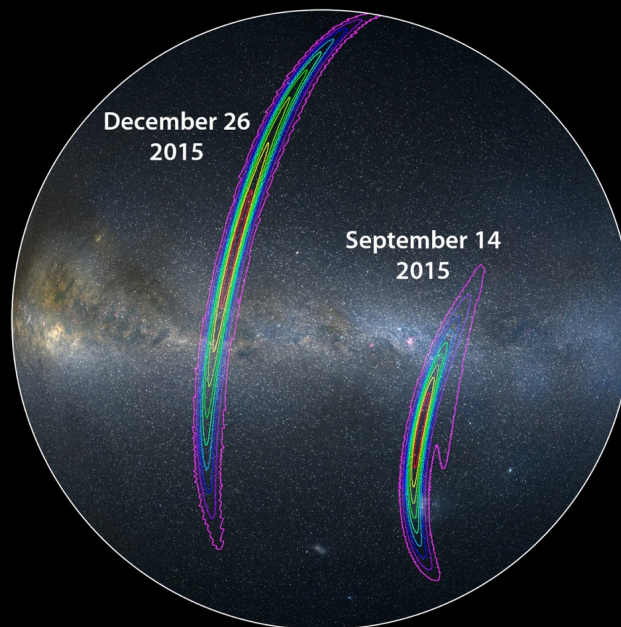


*Well 2 of the domains have detected a signal in the first 3 years*

## PeV neutrinos 2013



## GW1509-2014



# APPEC: *roadmapping*

2008

## ASTROPARTICLE PHYSICS the European strategy



2011

## Astroparticle physics

The European Roadmap



**HE universe**

**gammas**

**neutrinos**

**cosmic rays**

**gravitational waves**

**Dark universe**

**dark matter**

**dark energy**

**Early universe**

**CMB**

**V-properties**

**mass, mixing, ...**



# APPEC: *roadmapping*

2008

**ASTROPARTICLE PHYSICS**  
the European strategy



2011

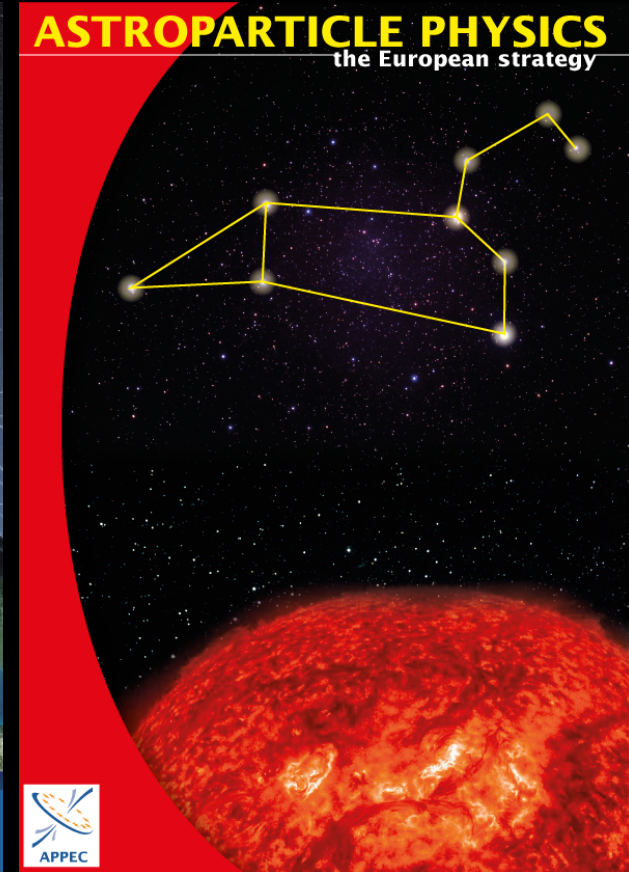
**Astroparticle physics**

The European Roadmap



2017

**ASTROPARTICLE PHYSICS**  
the European strategy



*resource aware*



# High Energy Universe Science

## APPEC Recommendations

1. APPEC fully supports the **CTA** collaboration to secure the funding for a timely and cost effective realisation and subsequent long-term operation of this observatory covering both southern & northern hemispheres
2. For the northern site , APPEC strongly endorses the **KM3NeT** collaboration's ambitions to realize by 2020 a large-volume telescope with optimal angular resolution for high-energy neutrino astronomy and a dedicated detector optimized for low-energy neutrinos primarily aiming to resolve the neutrino mass-hierarchy. For the southern site, APPEC looks forward to a positive decision in the USA regarding **IceCube-Gen2**.
3. APPEC strongly supports the Auger collaboration to install **AugerPrime** by 2019. At the same time, APPEC urges the community to continue R&D towards alternative technologies that are cost-effective and provide 100% (day and night) duty cycle so that ultimately the full sky can be observed with very large observatories.
4. With its global partners and in consultation with GWIC APPEC will define the timelines for upgrades of existing as well as next-generation ground-based interferometers. APPEC strongly supports further actions strengthening the collaboration between gravitational-wave laboratories. APPEC strongly supports Europe's next generation ground-based interferometer, the '**Einstein Telescope**' (ET) project, to develop the required technology and acquire ESFRI status. Regarding space-based interferometry, APPEC strongly supports the European **LISA** proposal

## Underground Science: medium scale dark matter and neutrino experiments

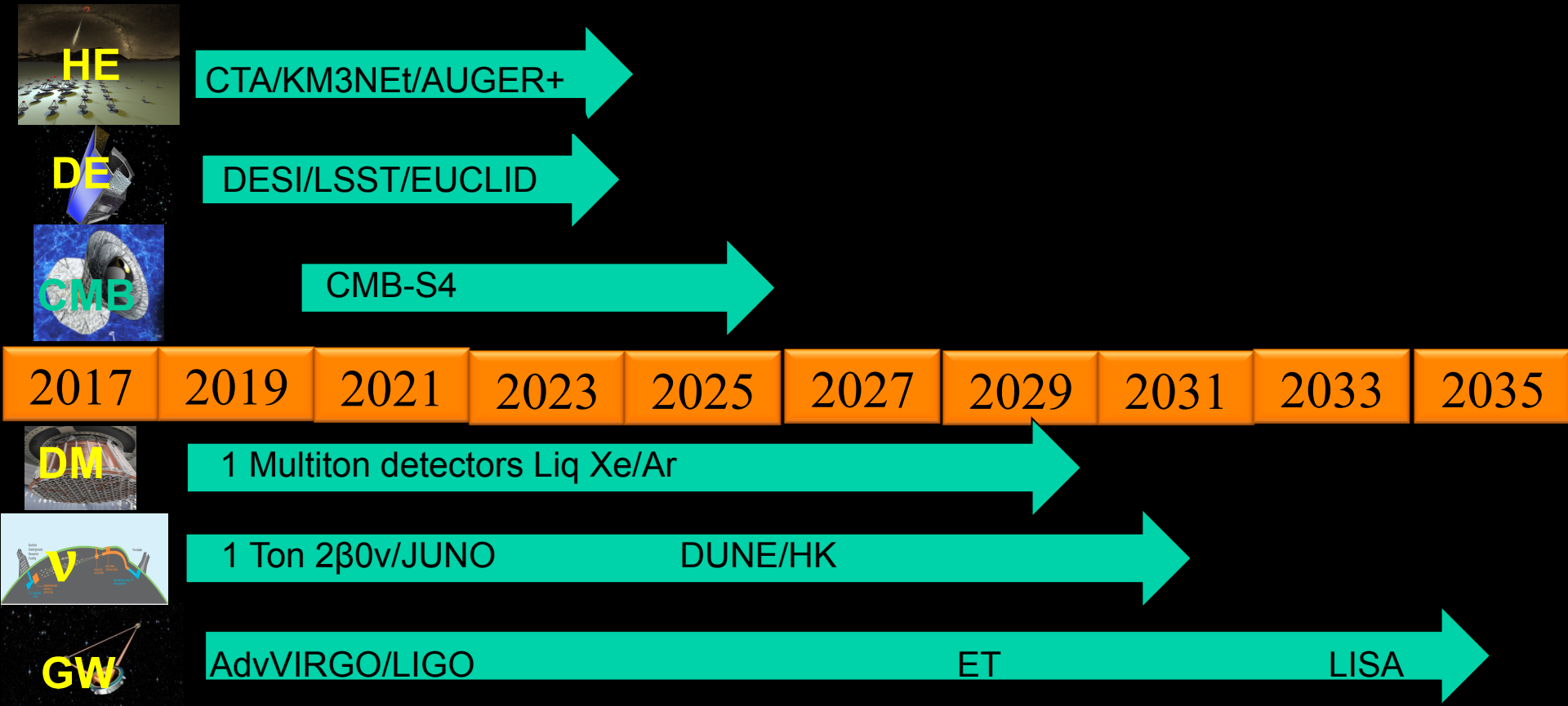
5. *APPEC encourages the continuation of a diverse and vibrant program (experiments as well as detector R&D) searching for WIMPs and non-WIMP Dark Matter. Together with its global partners, APPEC aims to converge around 2019 on a strategy of how to realize worldwide at least one 'ultimate' xenon (order 50 tons) and one argon (order 300 tons) based Dark-Matter detector as advocated by the **DARWIN and ARGO** proponents, respectively.*
  - *A suite of smaller-scale experiments explores in particular the low-mass WIMP and other Dark-Matter hypotheses such as dark photons and axions.*
6. *APPEC strongly supports the present range of direct neutrino mass measurements and searches for neutrino-less double beta-decay. Guided by the results of running experiments and in consultation with its global partners, APPEC intends to converge on a roadmap for the next generation of neutrino mass & nature experiments by 2020.*
  - *APPEC will support, in this domain, efforts of convergence to optimal technologies in a global context in the next 1-2 years.*

## Science at the interface with particle physics, astrophysics and cosmology

7. APPEC initiated the global coordination and presently endorses a global neutrino program: **DUNE (US), JUNO(China) and HyperKamioka (Japan)**
8. APPEC supports the forthcoming ESA Euclid satellite mission which will establish clear European leadership in space-based Dark-Energy research. Because of the complementarity to **Euclid**, APPEC encourages continued European participation in the **DESI and LSST** projects, the USA led ground-based Dark-Energy research. To fully profit from the combined power of satellite and ground-based experiments, the exchange of data is imperative.
9. APPEC strongly endorses the proposed European **CORE** satellite mission to map the CMB from space. APPEC will encourage detector R&D towards a next generation **ground-based CMB** experiment complementary to initiatives in the USA. APPEC continues to contribute to the global coordination of the field following the 'Florence CMB workshop' series started in *2015*



# Astroparticle Physics and Cosmology the next 20 years



# Conclusions

- In the last 30 years, we have seen
  - the detection of Supernova 1987A and the Crab in HE  $\gamma$  1989
  - 3 major paradigm-changing discoveries in the 90's
    - CMB fluctuations
    - Confirmation of neutrino oscillation and mass
    - Dark energy
  - In the 2010's Gravitational waves and HE neutrinos
- The longest series of Nobel prizes for an emerging domain
- What can we reasonably expect in the coming 10-15 years ?
  - I. The development of multi-messenger astronomy in relation to GW in particular
  - II. Dark matter sensitivities close to the parameter limits of our current theories, and ultimate precision measurements in inflation and dark energy,
  - III. A determination of the neutrino masses, number and CP violation and their interplay with cosmology

# Comment répondre à la vision standard du peuple pour l'astronome ?



*Thalès étant tombé dans un puits, tandis que, occupé d'astronomie, il regardait à l'air, une petite servante de Thrace, toute mignonne et pleine de bonne humeur, se mit, dit-on, de le railler de mettre tant d'ardeur à savoir ce qui est au ciel, alors qu'il n'apercevait pas de ce qu'il avait devant lui et à ses pieds ! Théétète*



**Par le frontispice de Tyho Brahe si caractéristique de l'Astroparticule:**

**Suspiciendo Despicio  
Despiciendo Suspicio**



Merci