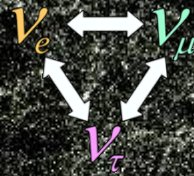


# Neutrinos: rencontre du 4<sup>e</sup> type



Festival d'astronomie de Fleurance 2013

Thierry Lasserre (physicien au CEA-Saclay)

06/08/2013

# L'Univers aujourd'hui

▪ Pas d'antimatière...  
(baryo- **lepto-** genesis)

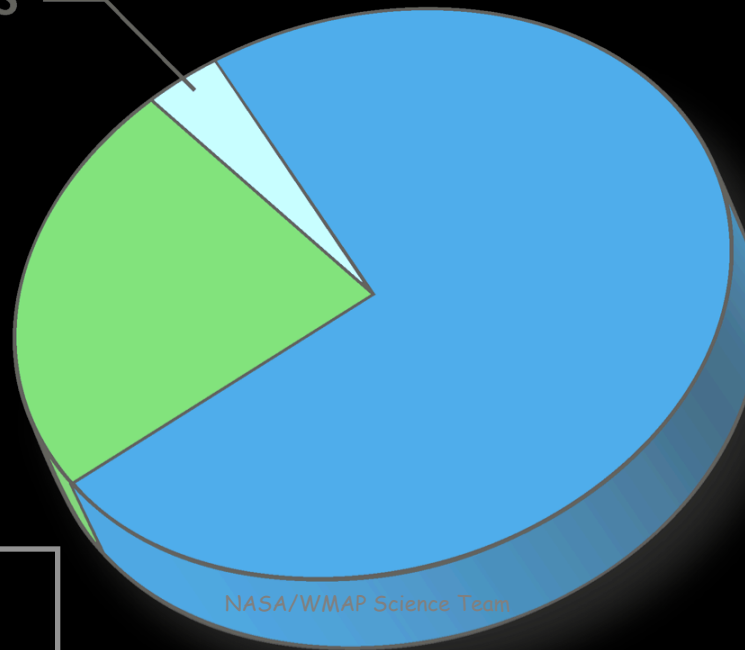
▪ Etoiles et Galaxies ~0.5%

Atoms  
4.6%

Dark Matter  
23%

Dark Energy  
72%

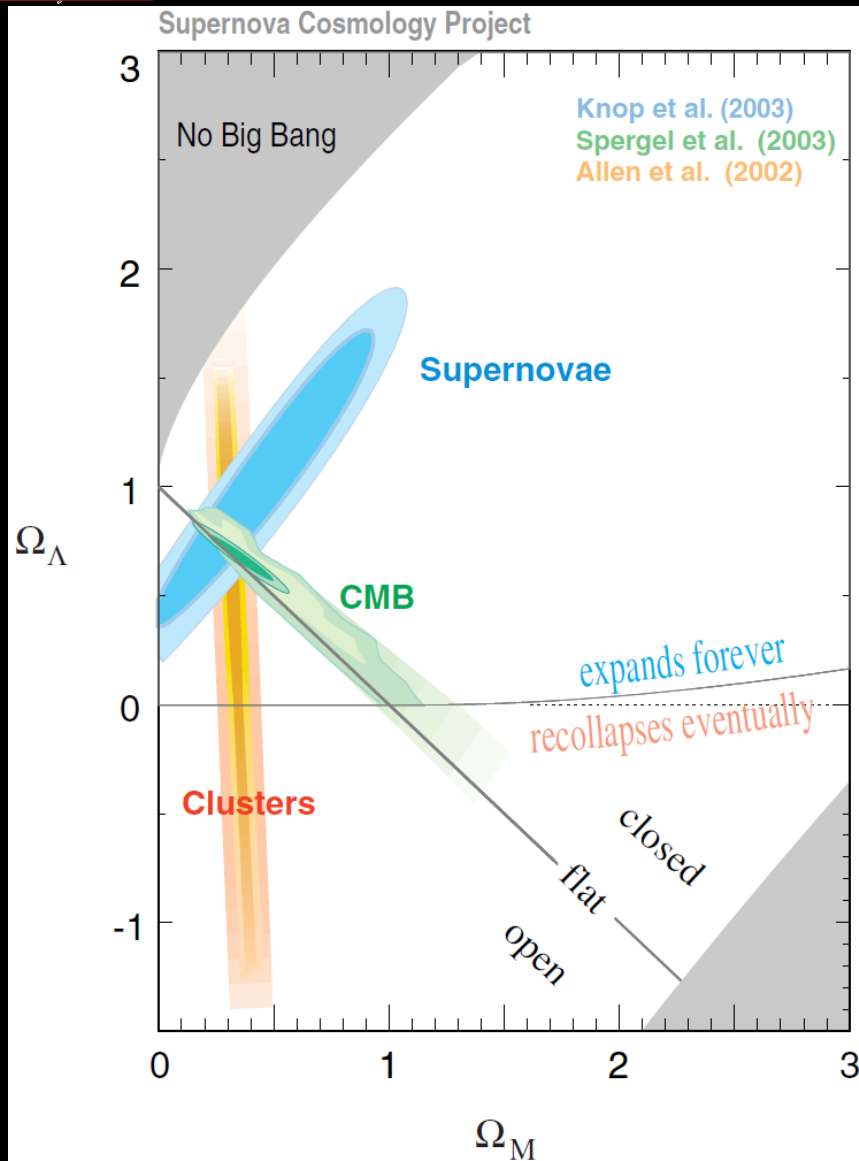
▪  $\rho_{\text{vacuum}} / \rho_{\Lambda} \sim 10^{120}$   
▪  $\rho_{\Lambda} \sim m_{\nu}$



▪ Besoin de matière noire non baryonique (**WIMP**, Axion, ...)  
▪ **Neutrinos** < quelques %

**Matière noire & énergie sombre :  
95% de tout l'Univers ....  
et pas encore compris !**

# Le modèle de concordance



## ■ Rayonnement diffus cosmologique :

- $\Omega_{\text{Tot}} = \Omega_\Lambda + \Omega_M = 1$  within 1%
- $\Omega_{\text{Matter}} \sim 0.3$
- $\Omega_{\text{baryon}} \sim 0.04$

## ■ Nucléosynthèse primordiale

- $n_{\text{baryon}}/n_\gamma \sim 4 \cdot 10^{-10}$
- $\Omega_{\text{baryons}} \sim 0.04$

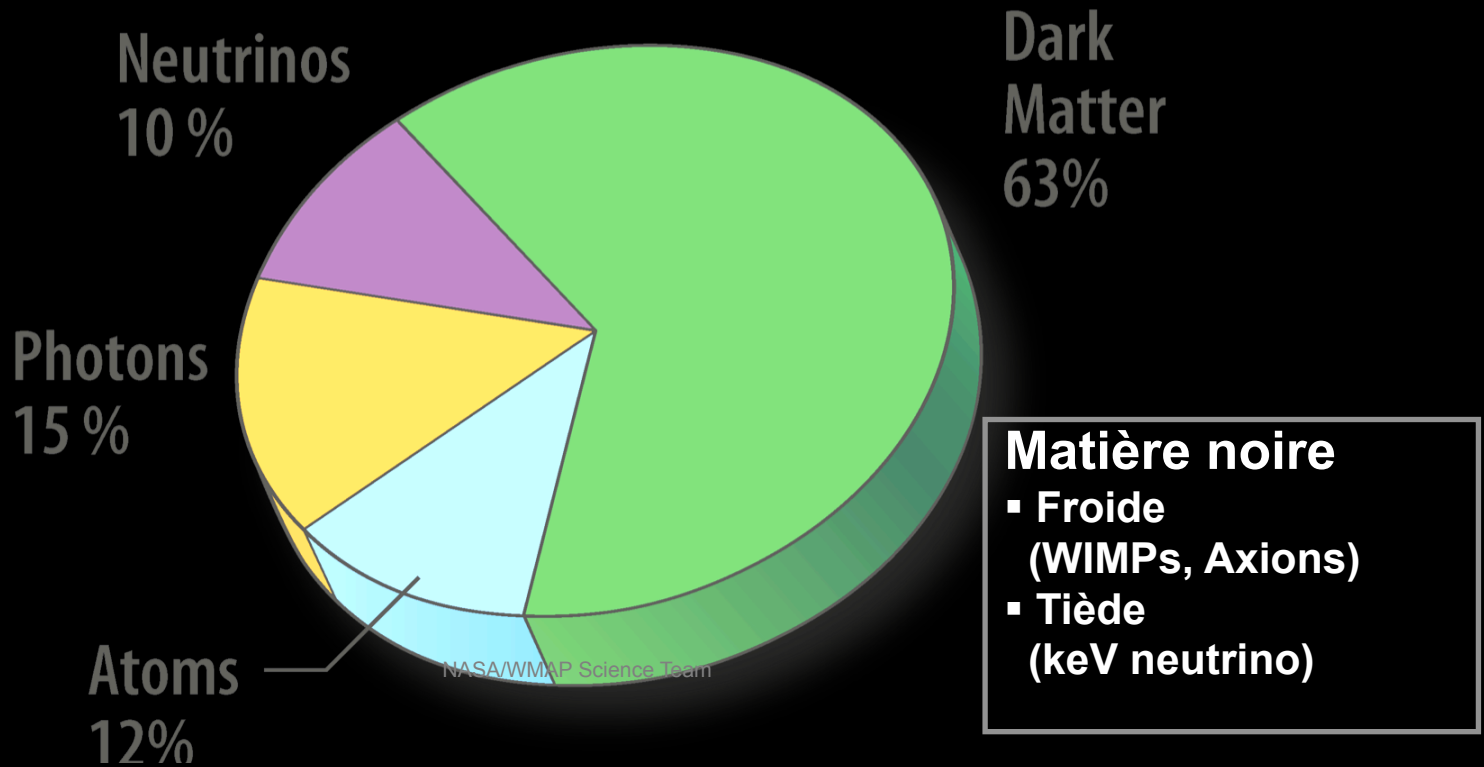
## ■ Dynamique des amas de galaxies, ...

- $\Omega_{\text{Matter}} \sim 0.3$

## ■ Supernovae type Ia

- Constraint  $\Omega_\Lambda - \Omega_M \rightarrow \Omega_\Lambda \sim 0.7$
- L'expansion s'accélère...

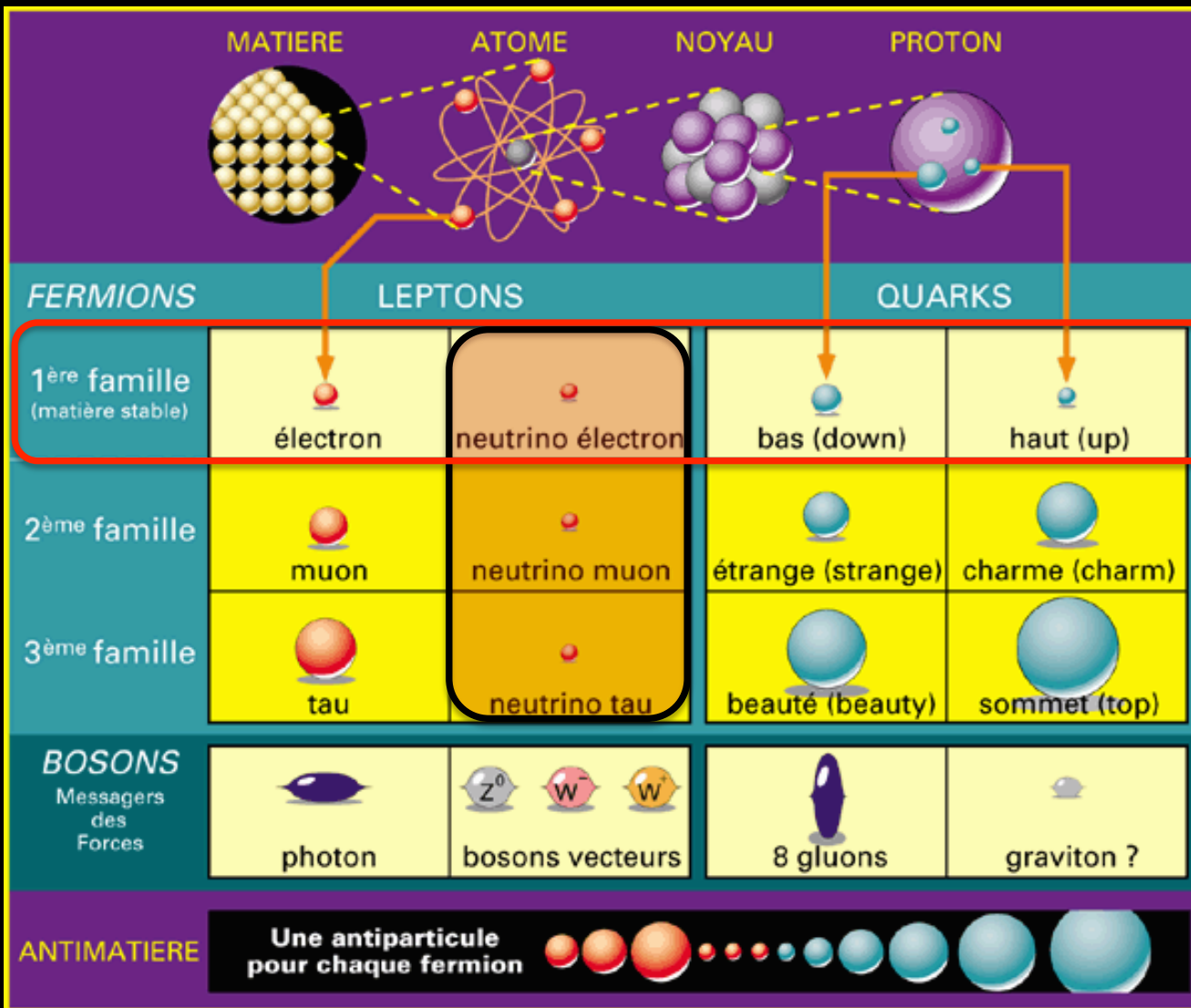
# L'Univers à 380,000 ans



Neutrinos et particules de matière noire (Neutrinos & CDM/WDM?)  
constituent environ 70% de tout l'Univers !

# Neutrinos

# Le modèle standard des particules



**Matière Stable**

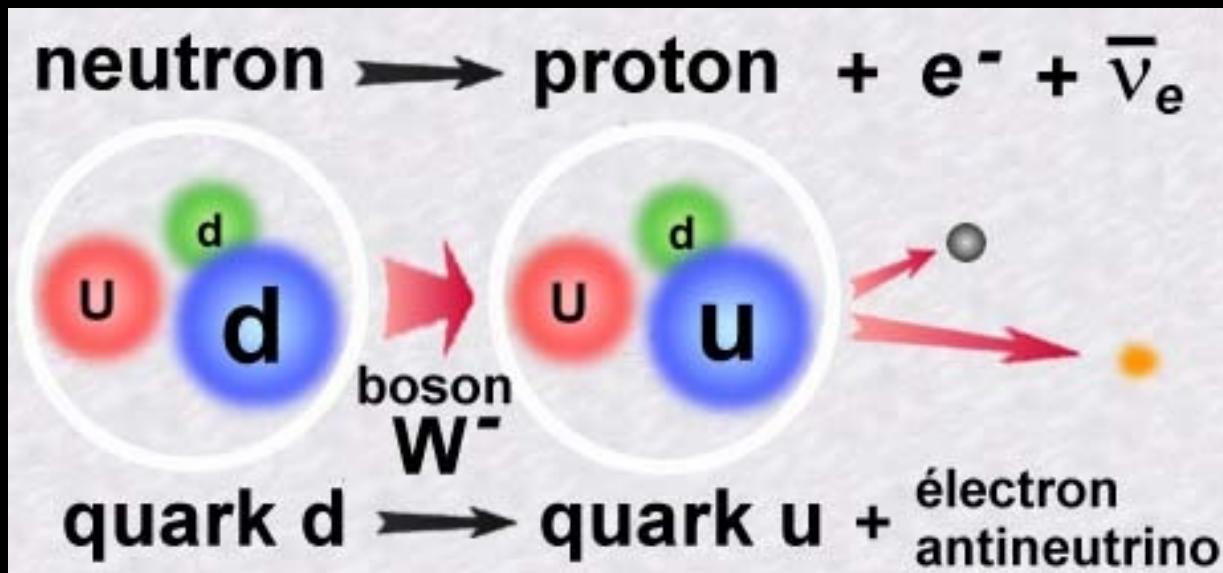
**Boson de Higgs  
+ Découvert en 2012  
au LHC (CERN)**

# Neutrinos : les bases

- Les particule de matière (connue) les plus abondantes de l'Univers
- $10^9$   $\nu$ 's par proton/neutron/electron dans l'Univers
- 3 types:  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\nu_\tau$ , partenaires neutres de  $e$ ,  $\mu$ ,  $\tau$
- N'interagissent uniquement que via la force faible (bosons W/Z)
- Production: désintégration W/Z (par radioactivité bêta, ...)
- Les neutrinos sont massifs et en conséquence 'se mélangent'
  - Oscillation des neutrinos
    - Physique au delà du modèle standard

# Radioactivité $\beta$ et Neutrinos

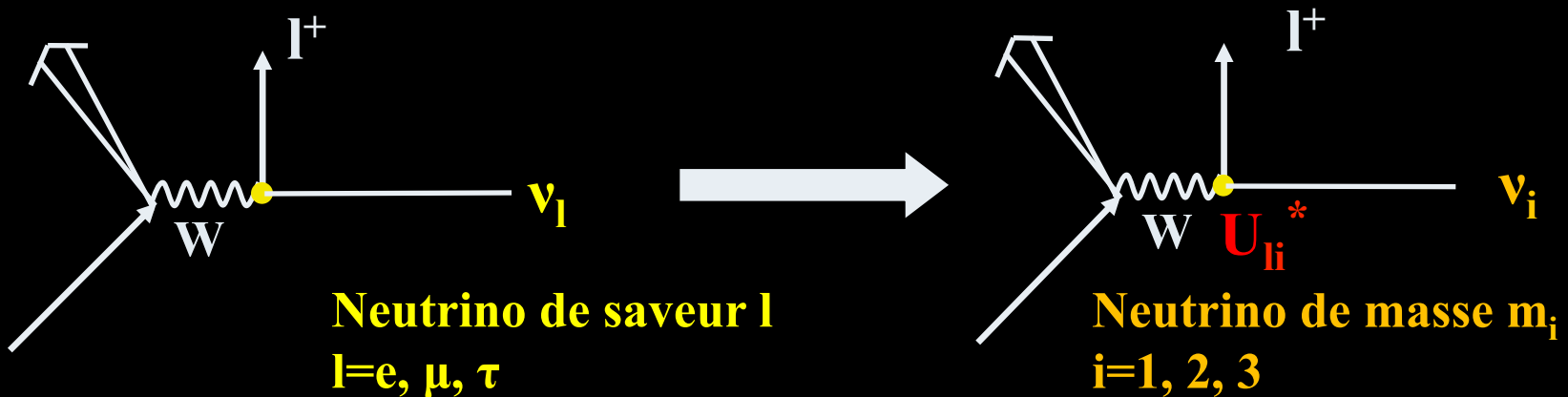
$\beta^-$





# Neutrino dans le modèle standard

- Neutrino: spin  $\frac{1}{2}$ , neutre, chiralité définie,  $\sigma \sim 10^{-43} \text{ cm}^2$  (reactor- $\nu$ )
- Les neutrinos sont massifs :  $0.04 \text{ eV} < m_\nu < \sim 1 \text{ eV}$
- Deux visions de la désintégration du boson W:

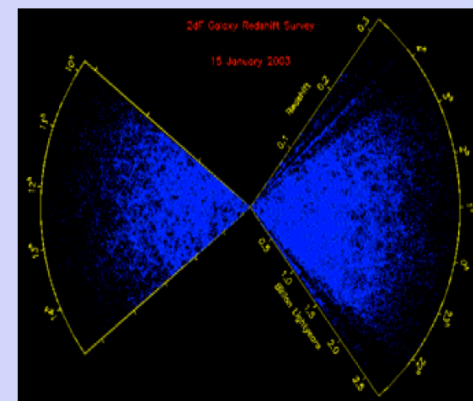
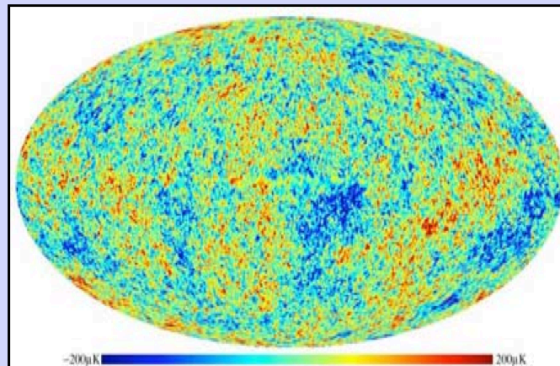
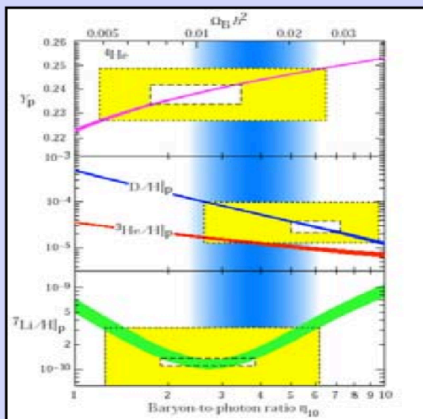


- La matrice PMNS relie les états de **masse & saveur**:  $|\nu_i\rangle = \sum U_{\alpha i} |\nu_\alpha\rangle$
- Indication solide de physique au delà du modèle standard

# Rôle des neutrinos en cosmologie

- Il existe un rayonnement cosmique de neutrinos reliques du Big-Bang (analogue à celui des photons, CMB) → CNB
- Les neutrinos du CNB sont les particules de matière connues les plus abondantes de l'Univers
- Les neutrinos influencent le cosmos à différentes époques de l'histoire thermique de l'Univers
  - Le CNB joue un rôle prépondérant dans l'Univers primordial
  - Les neutrinos étant massifs ils affectent aussi la dynamique de l'Univers lors de la formation des structures → matière noire?
- Les observables cosmologiques nous renseignent sur les propriétés fondamentales des neutrinos

# Les observables



**Nucléosynthèse  
primordiale**

**Fond diffus cosmologique**

**Formation des structures**

**$T \approx \text{MeV}$**

**$T \approx \text{eV}$**

**$T \approx \text{eV}$**

**Nombre de neutrinos**

**Nombre de neutrinos**

**Nombre de neutrinos &  
masse**

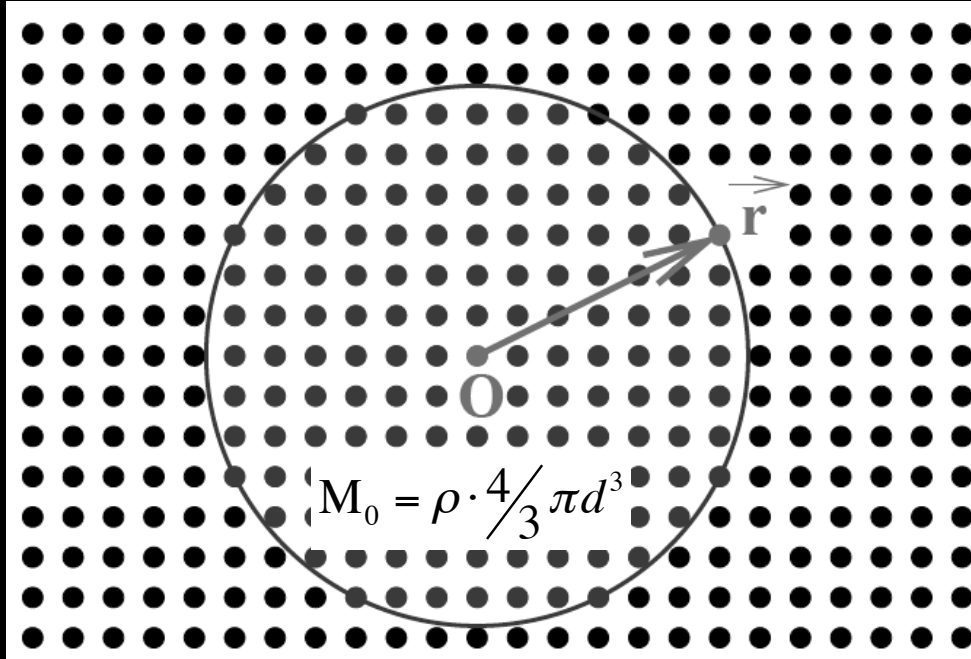
# Cosmologie & Neutrinos

# Cosmologie de Milne-McCrea (1934)

- **Principe cosmologique :**
  - l'Univers est homogène au-delà du Mégaparsecs.
  - A petite échelle existent des inhomogénéités. L'Univers est isotrope.
- **Hypothèse 1.** L'Univers est assimilé à un gaz de galaxies ( $P=0$ ).
- **Hypothèse 2.** L'Univers n'est pas statique
- **Hypothèse 3.** La densité d'énergie de l'Univers est fonction du temps.
- **Hypothèse 4.** L'origine du temps = origine de création de l'Univers
- **Constante de Hubble**, notée  $H_0$  à l'instant  $t=t_0$ , détermine le rythme de l'expansion de l'Univers ( $t_0 \equiv$  aujourd'hui)
- **Dynamique de l'expansion:**
  - **Décélération** sous l'effet de l'attraction gravitationnelle.
  - **Accélération** sous l'effet de la constante cosmologique (énergie noire)
- **Densité d'énergie (moyenne) dans l'Univers**, notée  $\rho$ . Ce paramètre mesure la quantité de matière dans un volume donné d'espace.

# Densité d'énergie (masse) critique

- Système observateur-galaxie comme isolé



On obtient le bilan énergétique suivant :

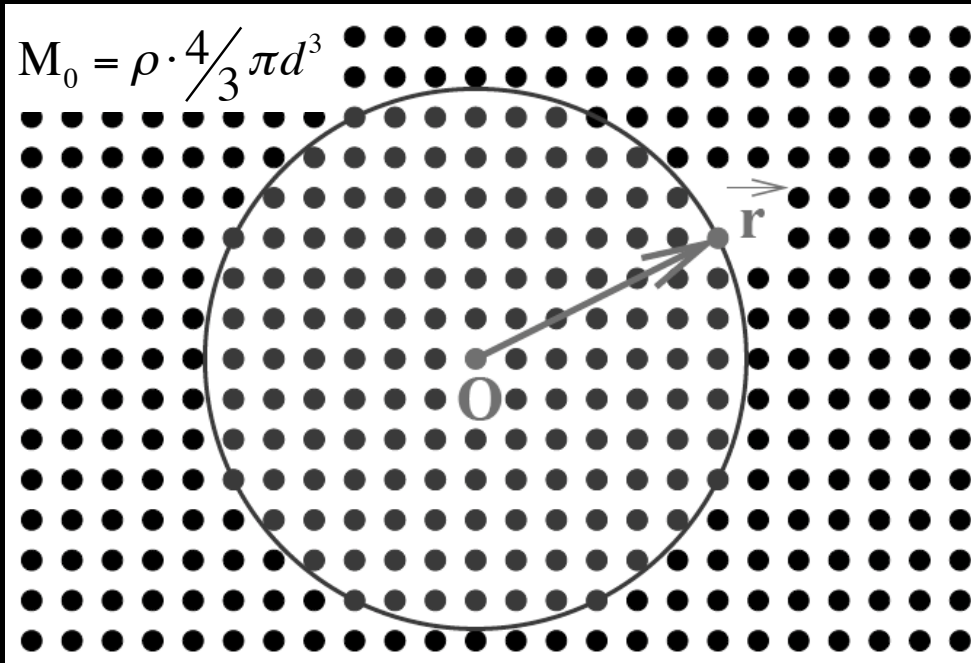
$$E_{\text{TOT}} = \frac{1}{2} m v^2 - \frac{G m M_0}{d} = \text{constant}$$

- Sous quelle condition la galaxie peut-elle s'échapper à l'infini ?
  - Seulement si  $v_{\text{inf}} > 0$
  - Donc si la vitesse actuelle de la galaxie dépasse une certaine vitesse de libération :

$$v > v_{\text{lib}} = \sqrt{\frac{2 G M_0}{d}} = \sqrt{\frac{8 \pi G}{3} \rho \cdot d^2}$$

# Densité d'énergie (masse) critique

Systeme observateur-galaxie comme isolé, on obtient le bilan énergétique suivant :



$$E_{\text{TOT}} = \frac{1}{2} m v^2 - \frac{G m M_0}{d} = \text{constant}$$



$$v = H_0 d$$



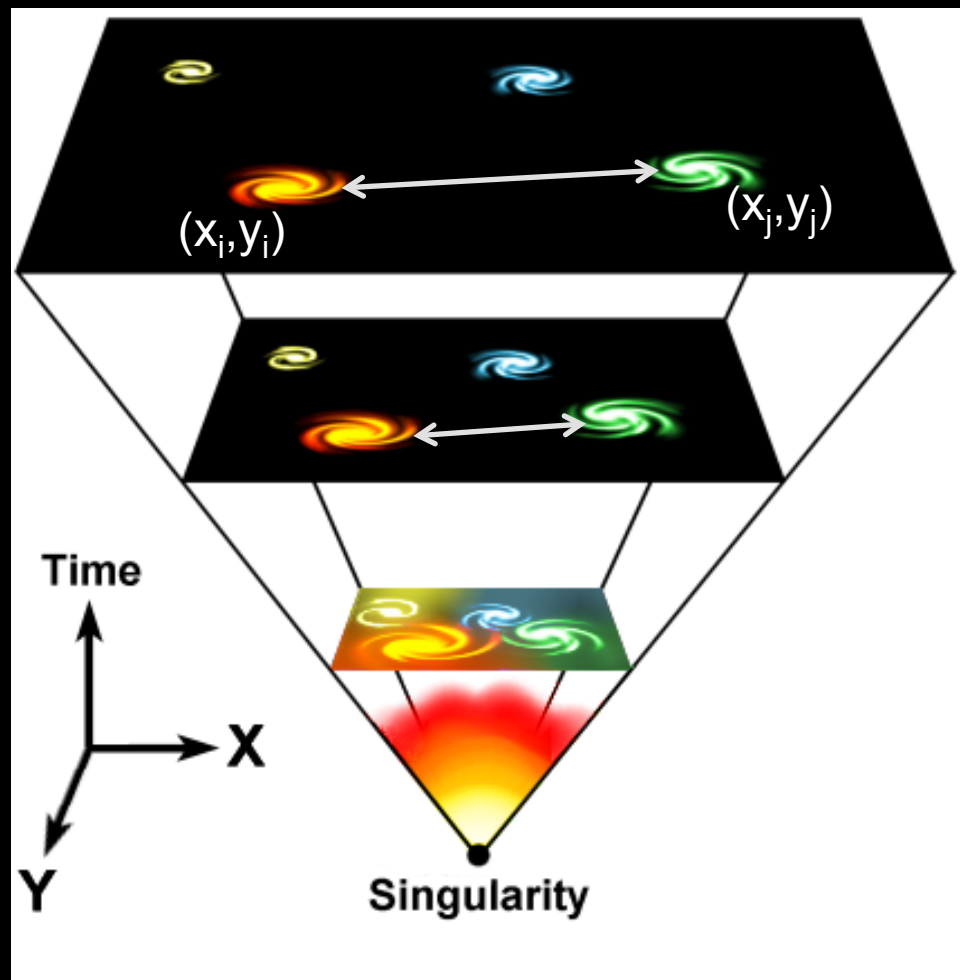
$$E_{\text{TOT}} = \frac{1}{2} m d^2 \left[ H_0^2 - \frac{8 \pi G}{3} \rho_0 \right]$$

Condition d'échappement d'une galaxie à l'infini :

$$\rightarrow \rho < \rho_c = \frac{3 H_0^2}{8 \pi G}$$

$$\rho_c = 1.88 \cdot 10^{-29} \left( \frac{H_0}{100 \text{ km.s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}} \right)^2 \text{ g cm}^{-3}$$

# Coordonnées comobiles, expansion, $H_0$



Portion d'Univers assimilée à un milieu transparent aux ondes EM et dans lequel on définit un cadre tridimensionnel fictif.

$(x_i, y_i) ; (x_j, y_j)$  Coordonées comobiles

$$d_c(i,j) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}$$

$d_p(i,j) = a(t) d_c(i,j)$  Distance 'réelle'

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} d_p(t) &= \dot{d}_p(t) = v_p(t) \\ &= \frac{\dot{a}(t)}{a(t)} d_p(t) = H(t) d_p(t) \end{aligned}$$

Constante de Hubble



# 1<sup>er</sup> Equation de Friedmann

- Modèle d'une particule test (une galaxie, un volume de fluide) de l'Univers.
- Le principe de conservation de l'énergie implique :

$$E_{\text{TOT}} = \frac{1}{2} m d_c^2 \left[ \dot{a}(t)^2 - \frac{8 \pi G}{3} \rho(t) a(t)^2 \right]$$

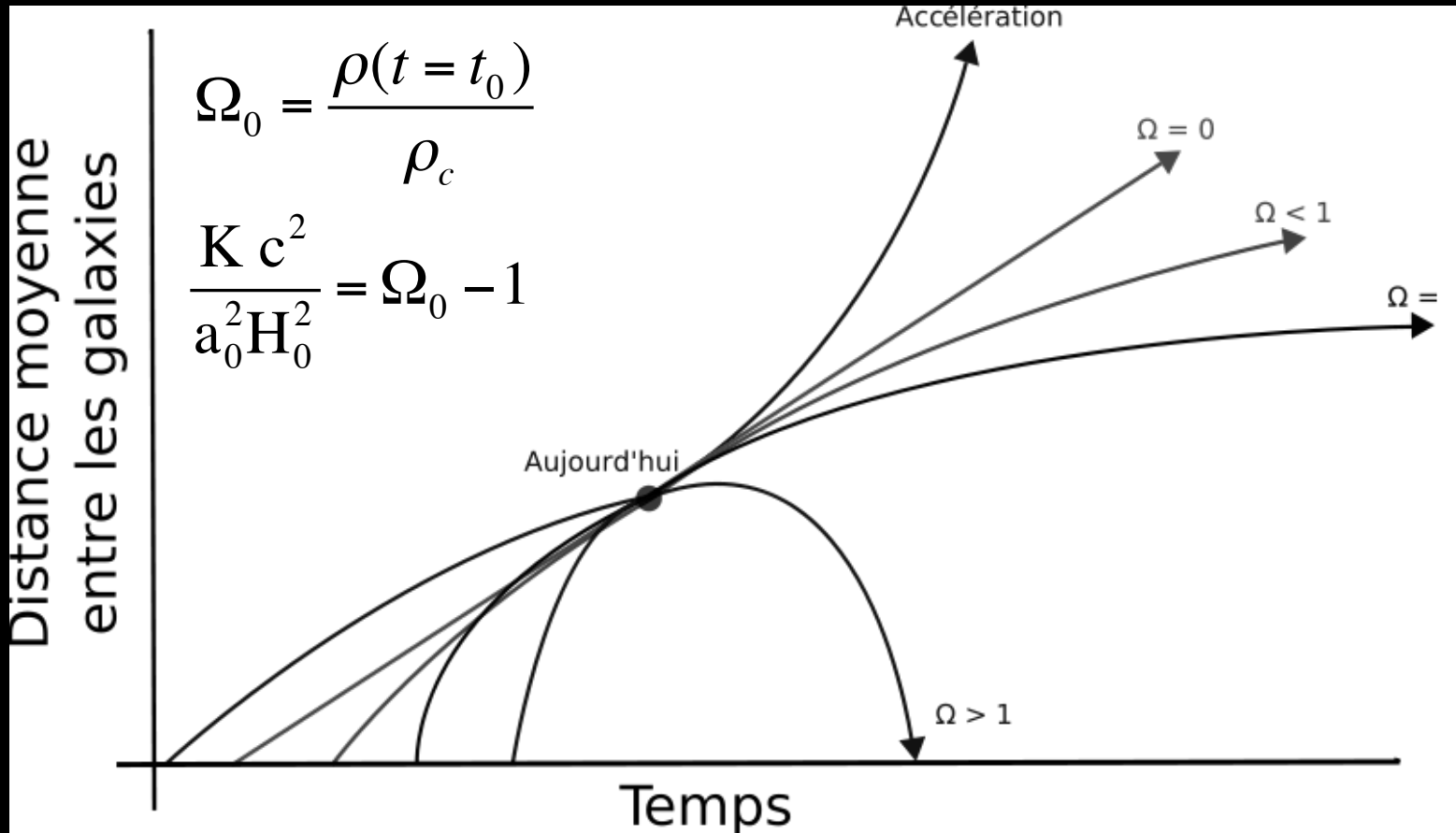
- On en déduit la 1<sup>er</sup> equation de Friedmann

$$H(t)^2 = \left[ \frac{\dot{a}(t)}{a(t)} \right]^2 = \frac{8 \pi G}{3} \rho(t) - \frac{K}{a(t)^2}$$

$$K = \frac{-2 E_{\text{TOT}}}{m d_c^2}$$

# Modèle de Milne-McCrea

- Univers ouvert :  $K = -1$   $\Omega_0 < 1$  (Univers à géométrie hyperbolique)
- Univers plat :  $K = 0$   $\Omega_0 = 1$  (Univers à géométrie euclidienne)
- Univers fermé :  $K = 1$   $\Omega_0 > 1$  (Univers à géométrie sphérique)



# L'ère de matière

- L'ère de matière a débuté à  $t_{\text{eq}}=1$  million d'années
- Le nombre de galaxies dans un volume comobile donné est constant.
- La densité numérique de galaxies dans un volume physique varie donc comme  $a^{-3}$ .
- Par application de la loi  $E=mc^2$  on démontre que la densité d'énergie se dilue aussi comme  $a^{-3}$  au rythme de l'expansion de l'Univers.
- La densité de matière s'écrit sous la forme :

$$\rho^{\text{M}}(t) = \rho_0^{\text{M}} \left[ \frac{a_0}{a(t)} \right]^3$$

# L'ère de rayonnement

- Le premier million d'années était dominé par le rayonnement EM.
- Durant cette époque l'Univers était bien différent de celui que nous connaissons aujourd'hui, et qui plus est il évoluait très rapidement.
- On considère ici que l'Univers est rempli alors d'ondes EM, donc de photons.
- La densité numérique des photons varie comme  $a^{-3}$  mais l'énergie de chaque photon n'est pas constante à cause du décalage de longueur d'onde vers le rouge : elle varie comme  $a^{-1}$ .
- En conséquence la densité d'énergie sous la forme : 
$$\rho^R(t) = \rho_0^R \left[ \frac{a_0}{a(t)} \right]^4$$
- Durant cette ère les neutrinos se comportent comme un rayonnement

# Evolution du contenu de l'univers

- Réécriture de l'équation de Friedmann

$$\left[ \frac{\dot{a}(t)}{a(t)} \right]^2 = \frac{8 \pi G}{3} \left[ \rho_0^M \left[ \frac{a_0}{a(t)} \right]^3 + \rho_0^R \left[ \frac{a_0}{a(t)} \right]^4 \right] - \frac{K c^2}{a(t)^2}$$

- En posant  $x(t)=a(t)/a_0$  :

$$\left[ \frac{\dot{x}}{x} \right]^2 = H_0^2 \left[ \frac{\Omega_0^R}{x^4} + \frac{\Omega_0^M}{x^3} - \frac{\Omega_0^C}{x^2} \right]$$

- Avec :

$$\text{Paramètre de densité de matière : } \Omega_0^M = \frac{\rho_0^M}{\rho_c}$$

$$\text{Paramètre de densité de rayonnement : } \Omega_0^R = \frac{\rho_0^R}{\rho_c}$$

$$\text{Paramètre de densité de "courbure" : } \Omega_0^C = \frac{K c^2}{a_0^2 H_0^2}$$

# Age de l'Univers de Milne-McCrea

- L'âge de l'Univers est donc donné par la relation

$$t_U = \frac{1}{H_0} \int_0^1 \frac{dx}{\sqrt{\frac{\Omega_0^R}{x^2} + \frac{\Omega_0^M}{x} - \Omega_0^C}}$$

- En faisant l'hypothèse que l'Univers est actuellement dominé par la matière ( $\Omega_0^M=1$  et  $\Omega_0^R=0$ ) et de courbure nulle ( $K=0$ ) on obtient :

$$t_U = \frac{1}{H_0} \int_0^1 \frac{dx}{\sqrt{\frac{1}{x}}} = \frac{2}{3H_0}$$

- En prenant  $H_0 = 72 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  on obtient 9 milliard d'années, assez proche de la valeur mesurée.
- On peut aussi obtenir un ordre de grandeur de la 'taille' (horizon) de l'Univers en utilisant la relation  $a_0 \sim c t_U \sim 3 \text{ 000 Mpc}$ .

# Rayonnement de corps noir

- Un corps noir (CN) est un corps à l'équilibre thermodynamique qui réémet sous forme d'ondes électromagnétiques toute l'énergie qu'il reçoit.

- L'émittance  $K(\nu, T)$ , en Watt/Hz/m<sup>2</sup>, s'exprime par:

$$K(\nu, T) = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \left( \frac{1}{e^{h\nu/k_B T} - 1} \right)$$

- L'intensité d'un CN à température  $T$ , intégrée sur toutes les fréquences est :

$$K(T) = \int_0^\infty K(\nu, T) d\nu = \frac{2\pi^5 k_B^4 T^4}{15c^2 h^3} = \sigma T^4$$

avec  $\sigma = 5.670 \cdot 10^{-8} \text{ Watt m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

- En recherchant la longueur d'onde correspondant au maximum d'émittance :

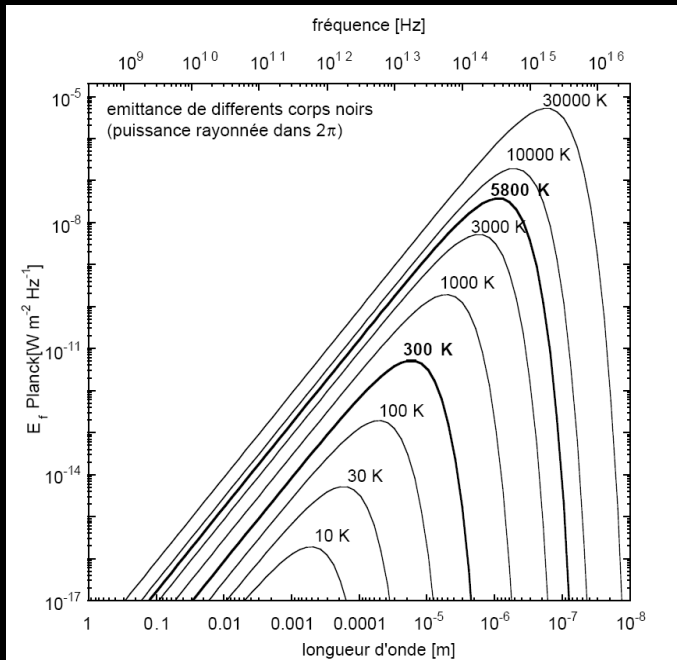
$$dK(\lambda, T) / d\lambda = 0$$

on retrouve la loi de déplacement de Wien :

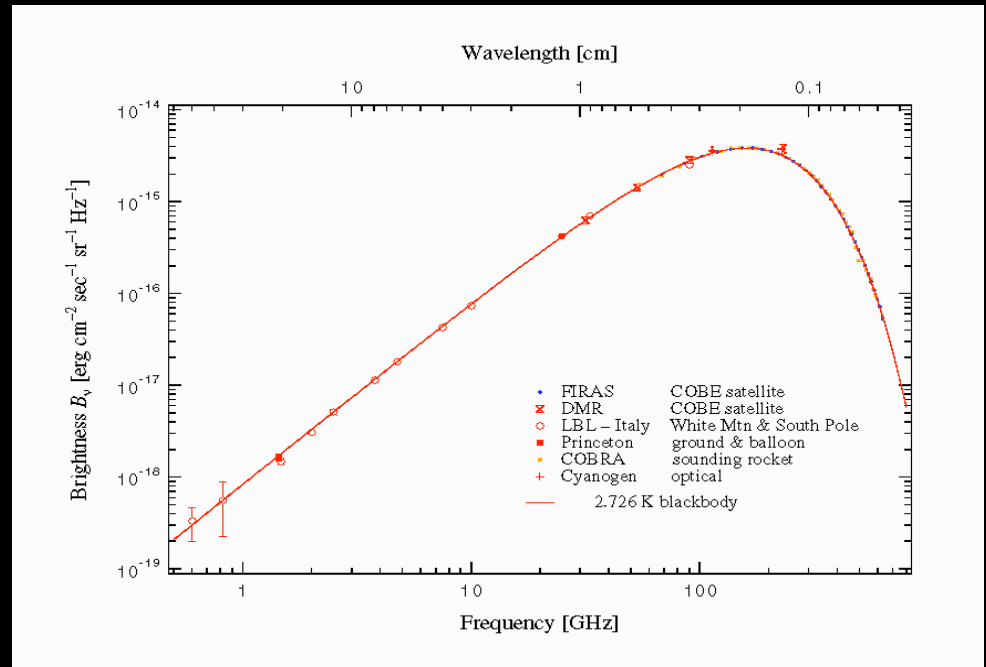
$$\lambda_{\max} T = 2898 \cdot 10^{-3} \mu\text{m.K}$$

# Le rayonnement diffus de photons

Emittance d'un corps noir en fonction de la fréquence, pour des températures allant de 10 à 30000 K.



Courbe d'émission théorique du corps noir et point expérimentaux correspondant à « un milieu » en équilibre thermique à 2.73 K. Les valeurs mesurées par COBE sont représentées (1 erg=10<sup>-7</sup> Joule).



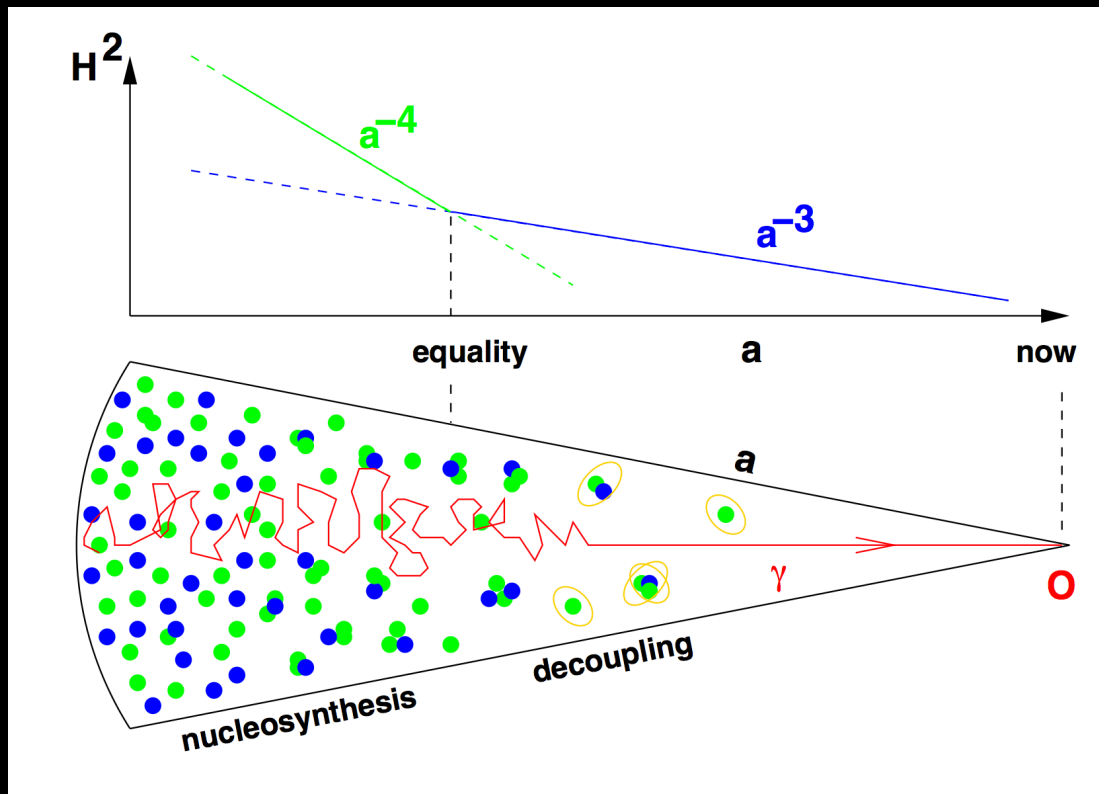
Application de la loi de de Wien :

$$\lambda_{\max} = 2898 \mu\text{m.K} / 2.7\text{K} \approx 1\text{mm}$$



# Le rayonnement diffus de photons

- Avant la recombinaison, les photons sont en équilibre thermique
- Après le découplage la forme du spectre est conservé, selon  $a \times T_\gamma = \text{Cte}$



Aujourd'hui

$$T_\gamma = 2.73 \text{ K}$$

$$\rightarrow E = 2.3 \times 10^{-4} \text{ eV}$$

$$\rightarrow n_\gamma = 411 \text{ } \gamma/\text{cm}^{-3}$$

Malgré leur grand nombre

$$\rightarrow \Omega_\gamma = 5 \times 10^{-5}$$

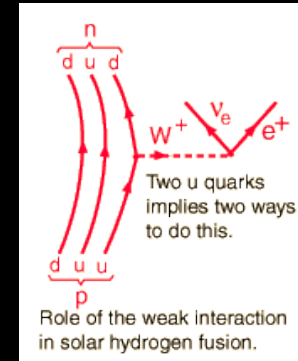
# Temps & Température

Temps	Température (photons)	Evènement
$t_0 = 1.5 \times 10^{10}$ an	$2.35 \times 10^{-4}$ eV	Aujourd'hui
$10^9$ an	$10^{-3}$ eV	Formation des structures
$4 \times 10^5$ an	0.26 eV	Recombinaison- L'univers devient transparent
$4 \times 10^4$ an	0.8 eV	Egalité matière-rayonnement
3 minutes	$6 \times 10^4$ eV	Nucléosynthèse, formation des noyaux légers (A=2, 3, 4, 6, 7)
1 s	$10^6$ eV	Émission CNB, $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$
$4 \times 10^{-6}$ s	$4 \times 10^8$ eV	Formation de hadrons à partir des quarks et gluons
$<4 \times 10^{-6}$ s	$> 10^9$ eV	Génération de l'asymétrie baryon-antibaryon ?

# Interaction Neutrino-Matière

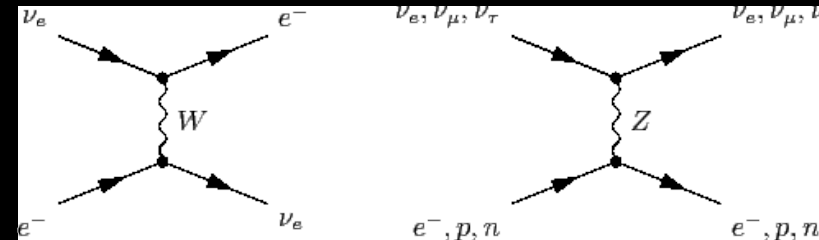
## ■ Désintégration beta-inverse

- $p + \text{anti-}\nu_e \rightarrow e^+ + n$
- section efficace @2 MeV :  $5 \cdot 10^{-43} \text{ cm}^2$
- varie selon  $E^2$



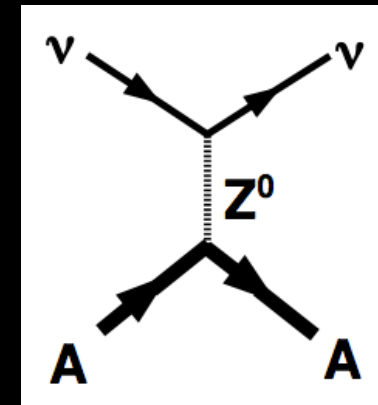
## ■ Diffusion Neutrino-Electron

- $e^- + \text{anti-}\nu_e \rightarrow e^- + \text{anti-}\nu_e$
- section efficace @0.8 MeV :  $5 \cdot 10^{-45} \text{ cm}^2$
- scale as  $E$



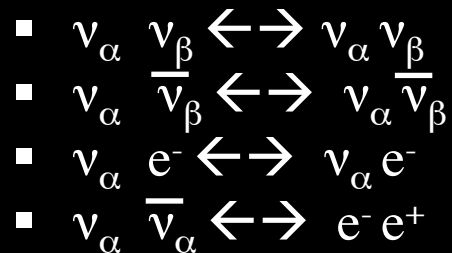
## ■ Diffusion Neutrino-Nucleus (cohérente)

- $A + \text{anti-}\nu_e \rightarrow A + \text{anti-}\nu_e$
- section efficace @2 MeV  $> 10^{-41} \text{ cm}^2$
- varie selon  $E^2$
- varie selon  $N^2$



# Neutrinos en équilibre thermique

- Dans l'Univers primordial, à  $T \gg \text{MeV}$ , les 3 espèces de neutrinos ( $\alpha=e, \mu, \tau$ ) peuvent être produites ou détruites selon les réactions:



- Les neutrinos sont à l'équilibre thermique
  - Taux d'interaction  $\gg$  Taux d'expansion de l'Univers  

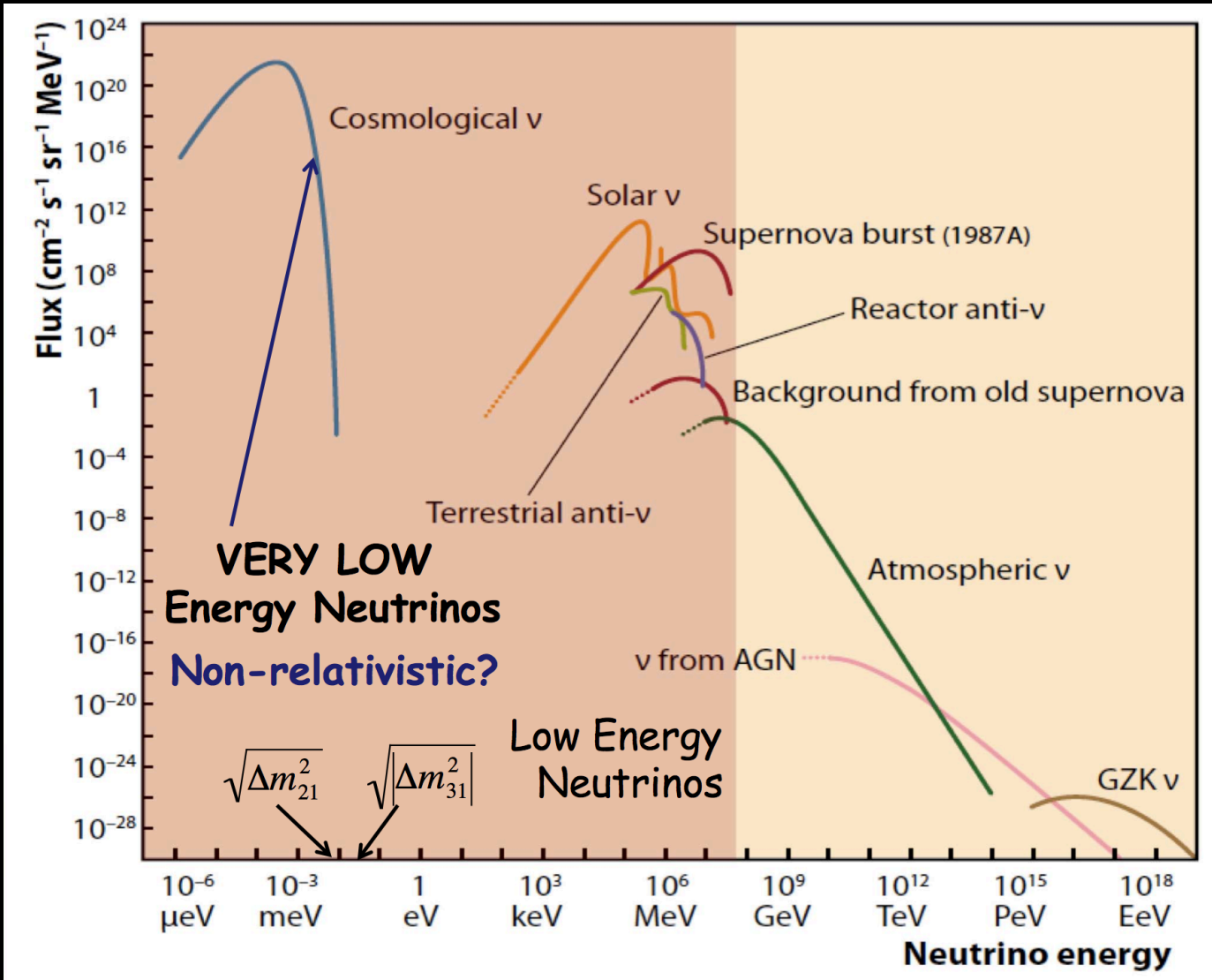
$$\Gamma = n_\nu \times \sigma \times v \approx G_f^2 \times T^5 \gg 1/H \approx T^2/M_{\text{planck}}$$
 pour  $T \gg 1 \text{ MeV}$
  - Le spectre en énergie des neutrinos suit une loi de type 'corps noir'
    - $T_\nu = T_e = T_\gamma$
    - mais les  $\nu/e$  sont des fermions  $\rightarrow$  # légèrement différents...
- Valable pour  $1 \text{ MeV} < T < m_\mu$  ( $m_\mu = 200 m_e$ )

# Découplage des neutrinos

- Mais l'Univers continue son expansion...
  - Les densités de particules sont ainsi diluées
  - La température décroît
  
- A  $T \approx 2-3$  MeV les interactions faibles ne sont donc plus suffisantes pour maintenir les neutrinos en équilibre thermique avec le bain de photons, électrons, positrons...
  
- Les neutrinos se découplent: émission du CNB, forme du spectre conservée
  - Aujourd'hui,  $112 (\nu_\alpha + \text{anti-}\nu_\alpha) \text{ cm}^{-3}$ 
    - 336 toutes saveurs confondues
  
  - Densité d'énergie aujourd'hui,
    - $\Omega_\nu \approx 10^{-5}$  si les neutrinos étaient de masse nulle...
    - Avec des neutrinos massifs ( $m < 1$  eV):
      - $\Omega_\nu \approx (m_1+m_2+m_3) / 100 \text{ eV} < 0.03 \dots$

# Spectre en énergie du CNB

Aucune piste sérieuse pour la détection 'directe' du CNB....



# Température du CNB

- Pour  $T > m_e$ , les photons, neutrinos, et les électrons–positrons étaient en équilibre thermique avec une température unique,  $T_e = T_\gamma = T_\nu$
- Mis à part les facteurs dus au Principe de Pauli, les nombres d'électrons, de positrons, de neutrinos et de photons étaient les mêmes.
- Lorsque  $T_e$  et  $T_\gamma$  sont tombés au dessous de  $m_e$  les paires  $e^+e^-$  ont été transformées en photons (par  $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ ) mais pas en neutrinos découplés.
- Après ces annihilations, le nombre de photons était donc supérieur au nombre de neutrinos.
- Puisque les distributions sont thermiques avec  $n \propto T^3$ , il s'ensuit que  $T_\gamma > T_\nu$  pour  $T < m_e$ .
- On montre que  $T_\nu = (4/11)^{1/3} T_\gamma$ , mais qu'en est t'il aujourd'hui?

# Le CNB aujourd'hui

- $T_\nu = (4/11)^{1/3} T_\gamma$  tant que les neutrinos restent relativistes (a .  $T_{\gamma,\nu} = \text{cte}$ )
- Si les neutrinos avaient une masse suffisamment petite
  - $m_{1,2,3} \ll T_\nu(a_0) \approx 10^{-4} \text{ eV}$
  - Ils sont encore relativiste aujourd'hui
  - Leur température est donnée par  $T_\nu(a_0) = (4/11)^{1/3} T_\gamma(a_0) \approx 2 \text{ K}$
  - $n_\nu(a_0) \approx 112 (v_\alpha + \text{anti-}v_\alpha) \text{ cm}^{-3}$
- Les observations actuelles indiquent que:
  - $m_3^2 - m_2^2 \approx 3 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$  (neutrinos atmosphériques, réacteurs, ...)
  - $m_2^2 - m_1^2 \approx 8 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$  (neutrinos solaires, réacteurs, ...)
  - Il existe au moins deux espèces de neutrinos non-relativistes.
  - En supposant  $m_3 \gg m_2 \gg m_1$  on obtient  $m_3 > 0.02 \text{ eV}$  et  $m_2 > 0.002 \text{ eV}$ .
  - Cela implique :  $\Omega_\nu > 0.0005$ .
  - On a aussi  $m_3 < \text{approx. } 1 \text{ eV} \rightarrow \Omega_\nu < 0.03$



# Neutrinos & Eq. de Friedmann

- Réécriture de l'équation de Friedmann, avec les neutrinos

$$\left[ \frac{\dot{a}(t)}{a(t)} \right]^2 = \frac{8 \pi G}{3} \left[ \rho_0^M \left[ \frac{a_0}{a(t)} \right]^3 + \rho_0^\gamma \left[ \frac{a_0}{a(t)} \right]^4 + \rho_0^\nu \left[ \frac{a_0}{a(t)} \right]^4 \right] - \frac{K c^2}{a(t)^2}$$

- En posant  $x(t) = a(t)/a_0$  :

$$\left[ \frac{\dot{x}}{x} \right]^2 = H_0^2 \left[ \frac{\Omega_0^\gamma}{x^4} + \frac{\Omega_0^\nu}{x^4} + \frac{\Omega_0^M}{x^3} - \frac{\Omega_0^C}{x^2} \right]$$

- Avec les neutrinos:

Paramètre de densité de matière :  $\Omega_0^M = \frac{\rho_0^M}{\rho_c}$

Paramètre de densité de rayonnement :  $\Omega_0^R = \Omega_0^\gamma + \Omega_0^\nu = \frac{\rho_0^\gamma}{\rho_c} + \frac{\rho_0^\nu}{\rho_c}$

Paramètre de densité de "courbure" :  $\Omega_0^C = \frac{K c^2}{a_0^2 H_0^2}$

# Energie sombre & Eq. de Friedmann

- L'accélération de l'expansion est interprétée comme la présence d'une force répulsive à grande échelle, capable de surmonter la force gravitationnelle entre les différents constituants de l'Univers.
- La nature de cette force reste pour l'instant mystérieuse et on lui a donné le nom d'énergie sombre → origine non discutée ici !
- On définit  $\rho^{es}$  comme la densité d'énergie sombre dans l'univers à un instant  $t$ . Contrairement à la matière ou au rayonnement, la densité d'énergie sombre ne se dilue pas dans l'espace au cours de l'expansion :

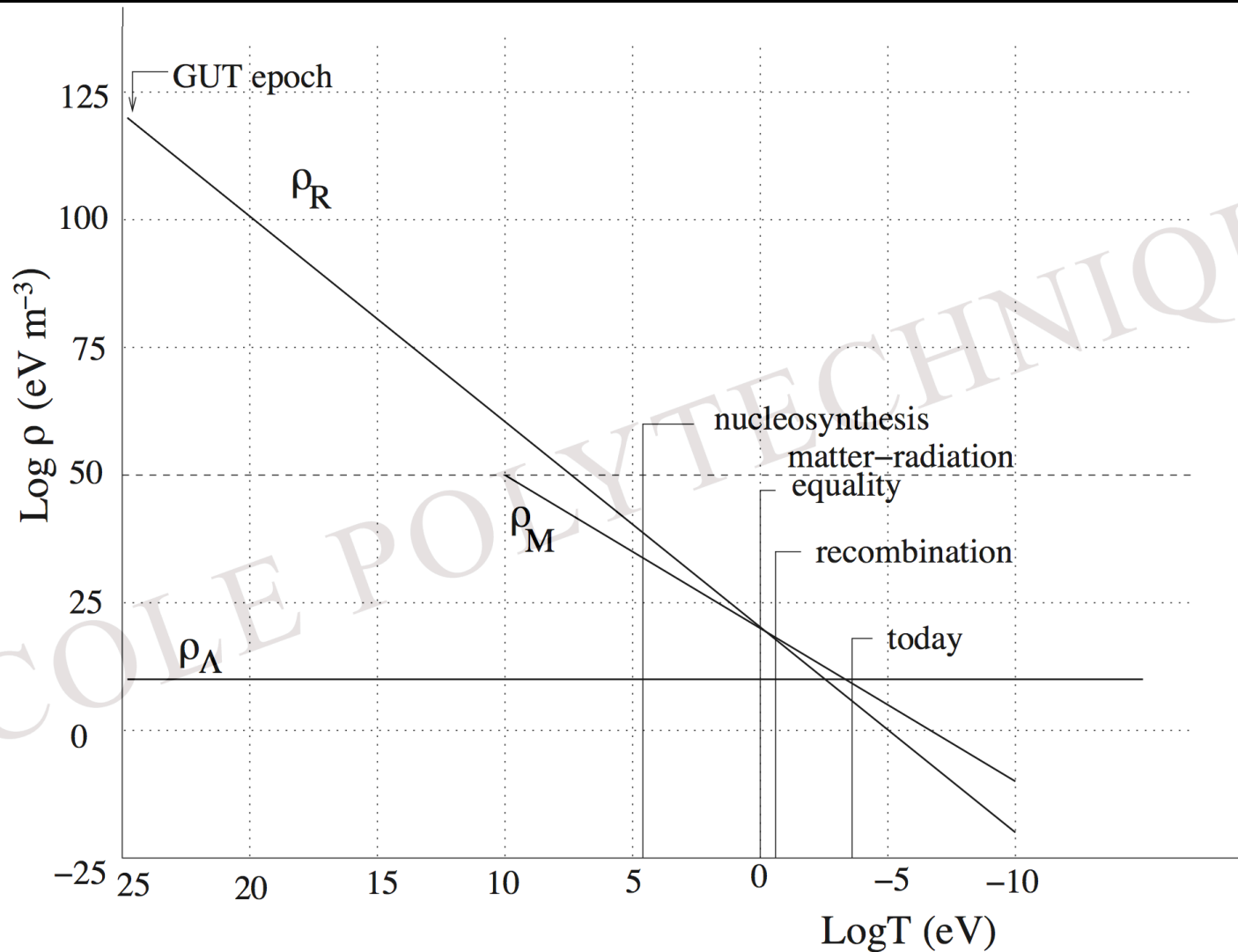
$$\left[ \frac{\dot{a}(t)}{a(t)} \right]^2 = \frac{8 \pi G}{3} \left[ \rho_0^M \left[ \frac{a_0}{a(t)} \right]^3 + \rho_0^\gamma \left[ \frac{a_0}{a(t)} \right]^4 + \rho_0^v \left[ \frac{a_0}{a(t)} \right]^4 + \rho_0^{es} \right] - \frac{K c^2}{a(t)^2}$$

soit 
$$\left[ \frac{\dot{x}}{x} \right]^2 = H_0^2 \left[ \frac{\Omega_0^\gamma}{x^4} + \frac{\Omega_0^v}{x^4} + \frac{\Omega_0^M}{x^3} - \frac{\Omega_0^C}{x^2} + \Omega_0^{es} \right] \rightarrow \rho^{es} \text{ détermine } H(t) \text{ à grand } t \dots$$

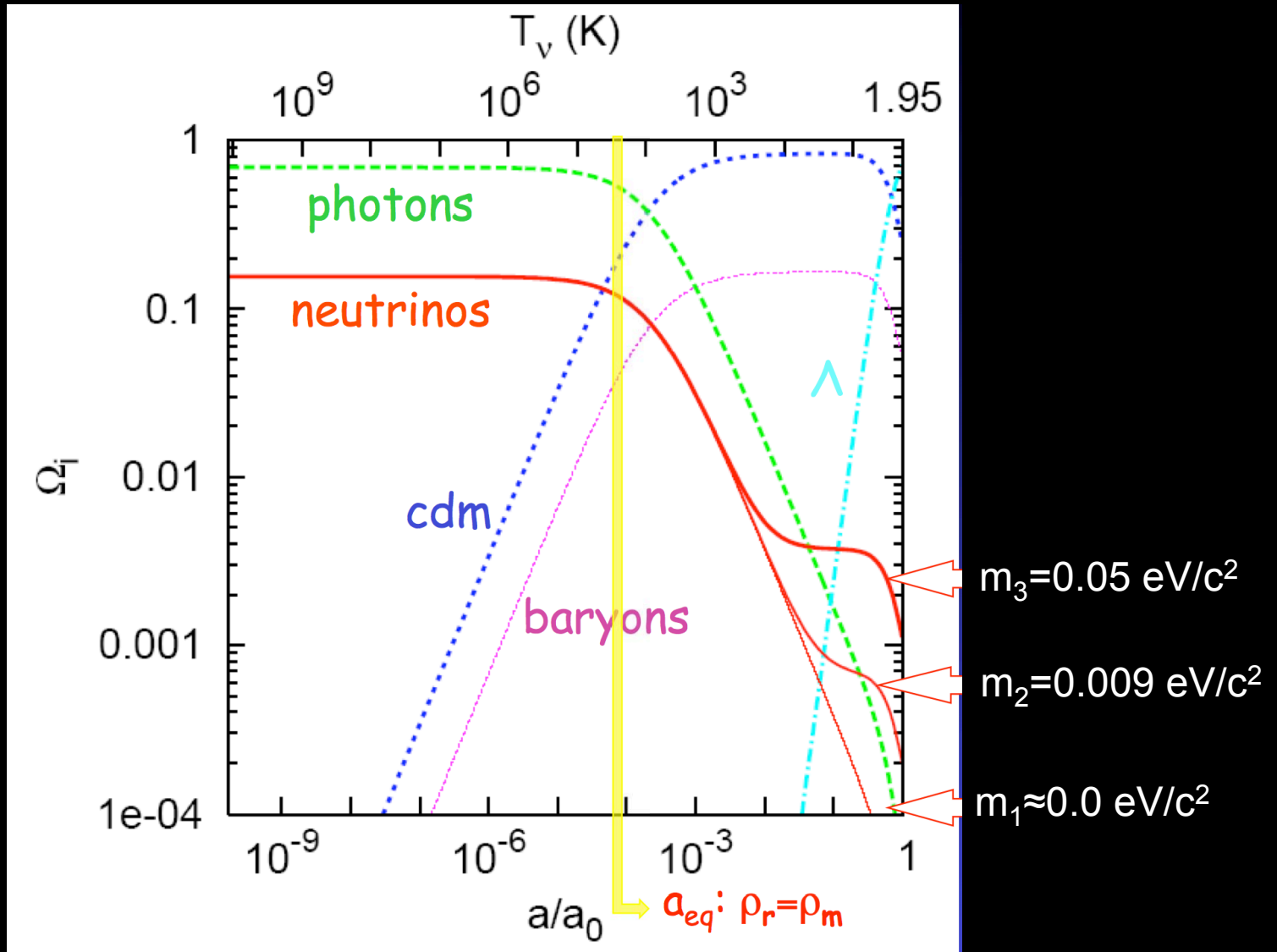
# Energie sombre

- La découverte récente la plus surprenante est que l'univers semble dominé par une « énergie du vide » ou encore « constante cosmologique »  $\Lambda$   
 $\rightarrow \Omega_\Lambda = \Lambda/3H_0^2 = 0.7$
- L'énergie du vide n'est pas associée à des particules et n'est donc pas diluée par l'expansion de l'univers !
- La densité d'énergie du vide est donc indépendante du temps. La valeur qu'implique  $\Omega_\Lambda = 0.7$  est :  $\rho_V \sim 3 \text{ GeV m}^{-3}$ .
- En physique des particules la densité d'énergie du vide peut être inférée selon :  $\rho_V \sim M_p^4/(hc)^3 \sim 3 \times 10^{123} \text{ GeV m}^{-3}$  ( $M_p = 10^{19} \text{ GeV}$ )
- Ce nombre est trop grand de 122 ordres de grandeur...
- En fait, la densité peut être reliée à une échelle de masse de  $\sim 10^{-3} \text{ eV}$  qui est proche de l'estimation des masses des neutrinos ?

# Densités d'énergie vs température

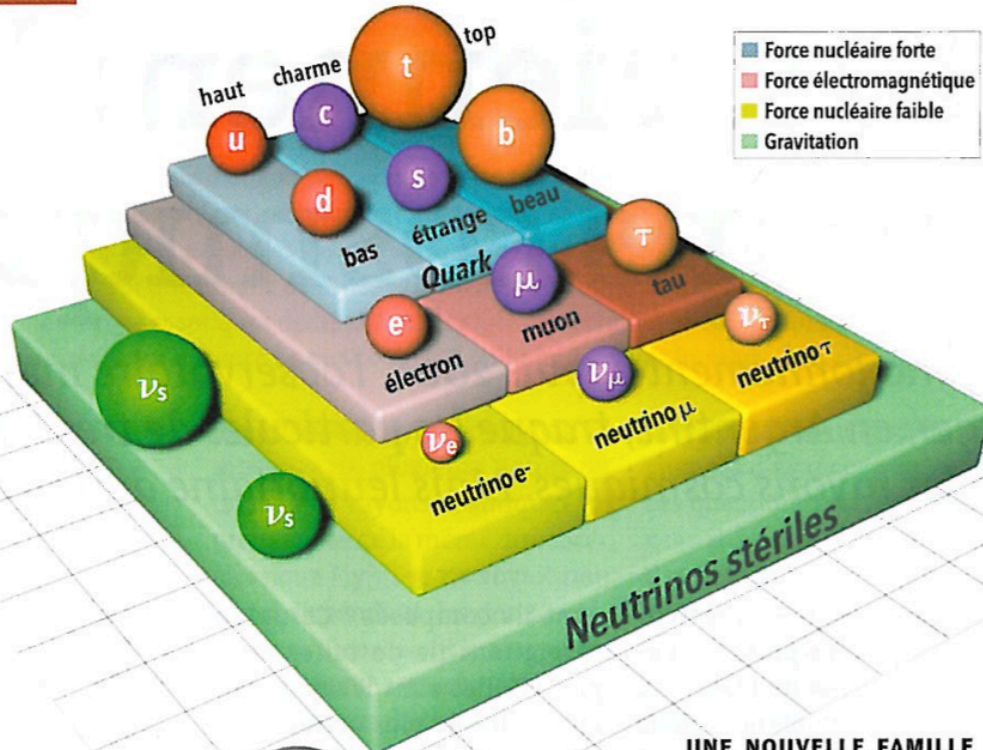


# Evolution des densités d'énergie (Mev → aujourd'hui)



# Un 4<sup>e</sup> type de neutrino?

**Fig.1** La famille élargie des fermions

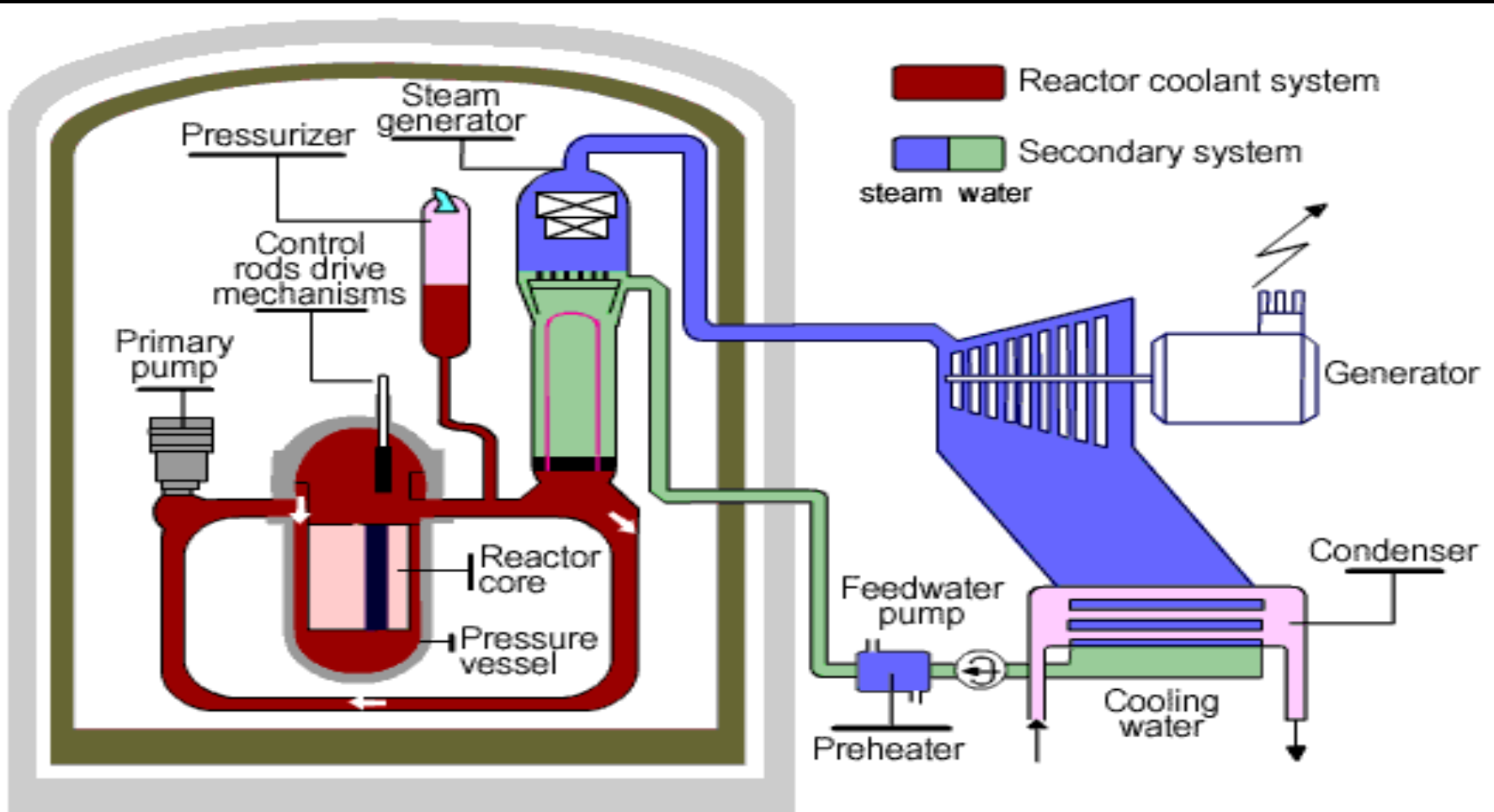


Boson de Higgs

**UNE NOUVELLE FAMILLE DE NEUTRINOS DITS « STÉRILES »** (en vert) pourrait agrandir celle des douze fermions. Elle ne serait sensible qu'à la gravitation. Cette famille de neutrinos stériles se déclinerait en particules plus ou moins massives : ici on en a représenté deux (boules vertes).

# Neutrinos & réacteurs nucléaires

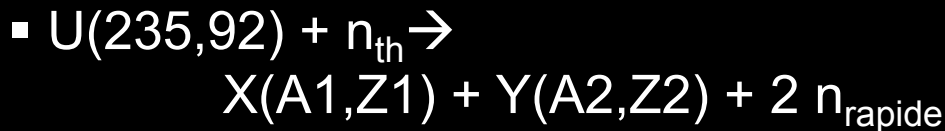
Combustible :  $^{235}\text{U}$  enrichi



# Emission de $\nu$ de réacteurs nucléaires

- Les réacteurs nucléaires sont des sources copieuses d'antineutrinos électroniques
- Neutrinos produits lors des désintégrations  $\beta$  des produits de fissions :

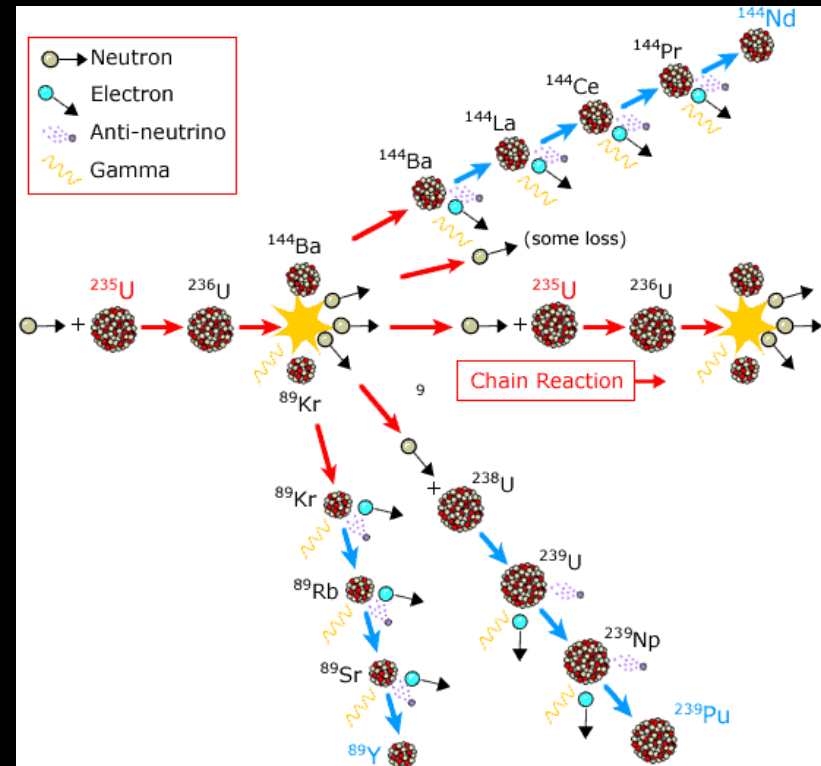
- $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$



- Luminosité

$$N_{\bar{\nu}} = \gamma(1 + k)P_{\text{th}}$$

$\gamma$ : constante de détection  
 $k$ : correction <10%, évolution du combustible nucléaire dans le coeur



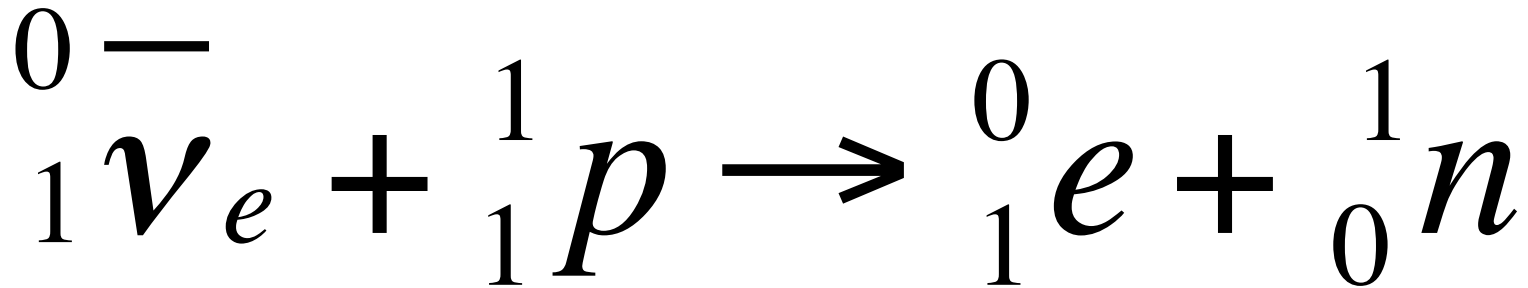


# Flux de neutrinos de réacteurs

**A chaque fission de  $U^{235,238}$ ,  $Pu^{239,241}$  : 200 MeV et 6 neutrinos**

- Energie libérée 200 MeV / fission:
  - $\rightarrow 200 \text{ MeV} = 200 * 10^6 * 1,6 * 10^{-19} \text{ J} = 3,2 * 10^{-11} \text{ Joules}$
  
- Puissance thermique du réacteur:
  - $\rightarrow 1 \text{ GW} = 1 * 10^9 \text{ W (J / s)}$
  
- Nombre d'antineutrinos électroniques
  - $\rightarrow 10^9 \text{ W} / 3,2 * 10^{-11} \text{ Joules} * 6$
  - $\rightarrow 2 * 10^{20} \text{ neutrinos / s}$

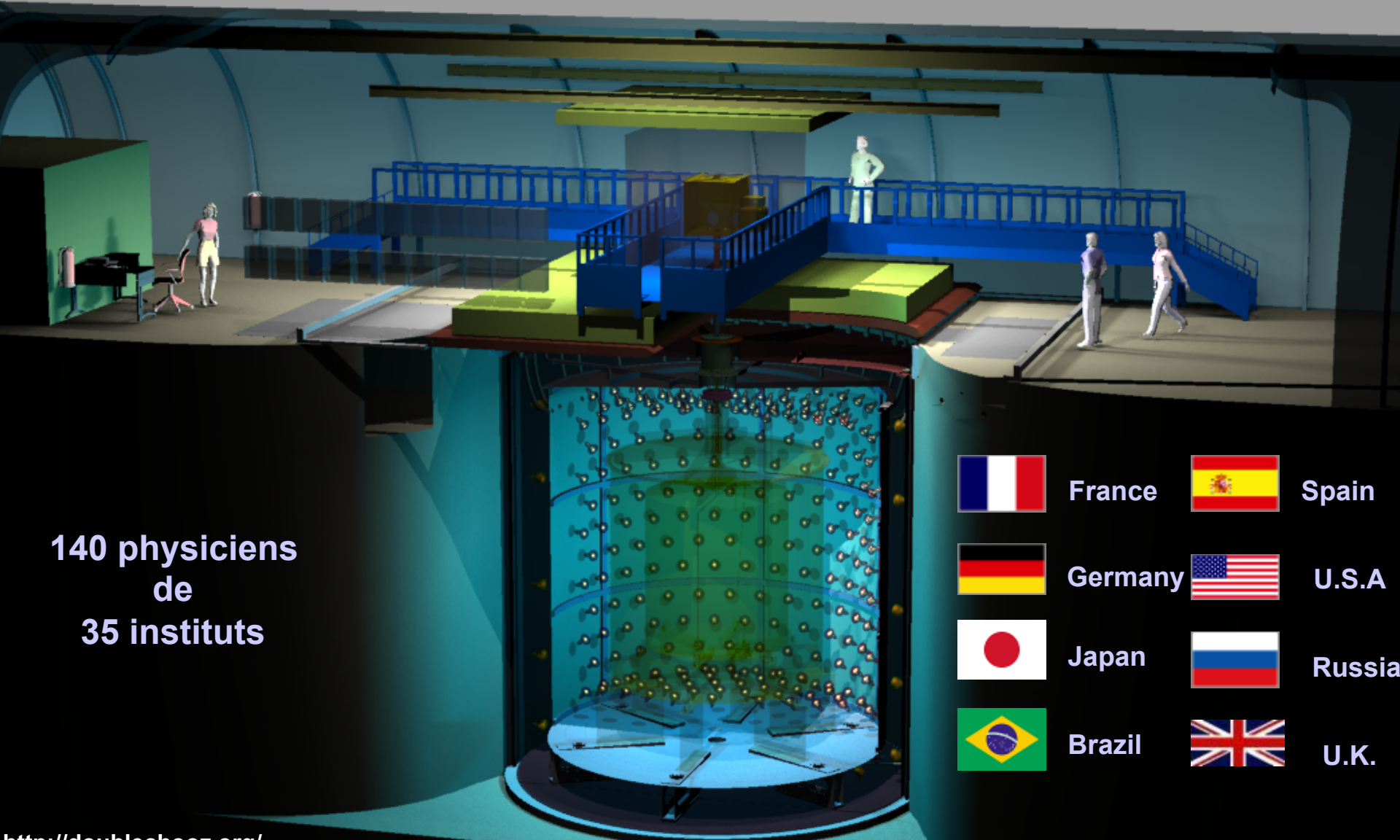
# Détection de $\nu$ de réacteurs nucléaires



- Conservation de la charge électrique
- Conservation du nombre de masse
- Conservation de l'énergie
- Conservation de la quantité de mouvement
- Conservation des moments angulaires (spin...)
- Conservation du nombre leptonique



# Double Chooz



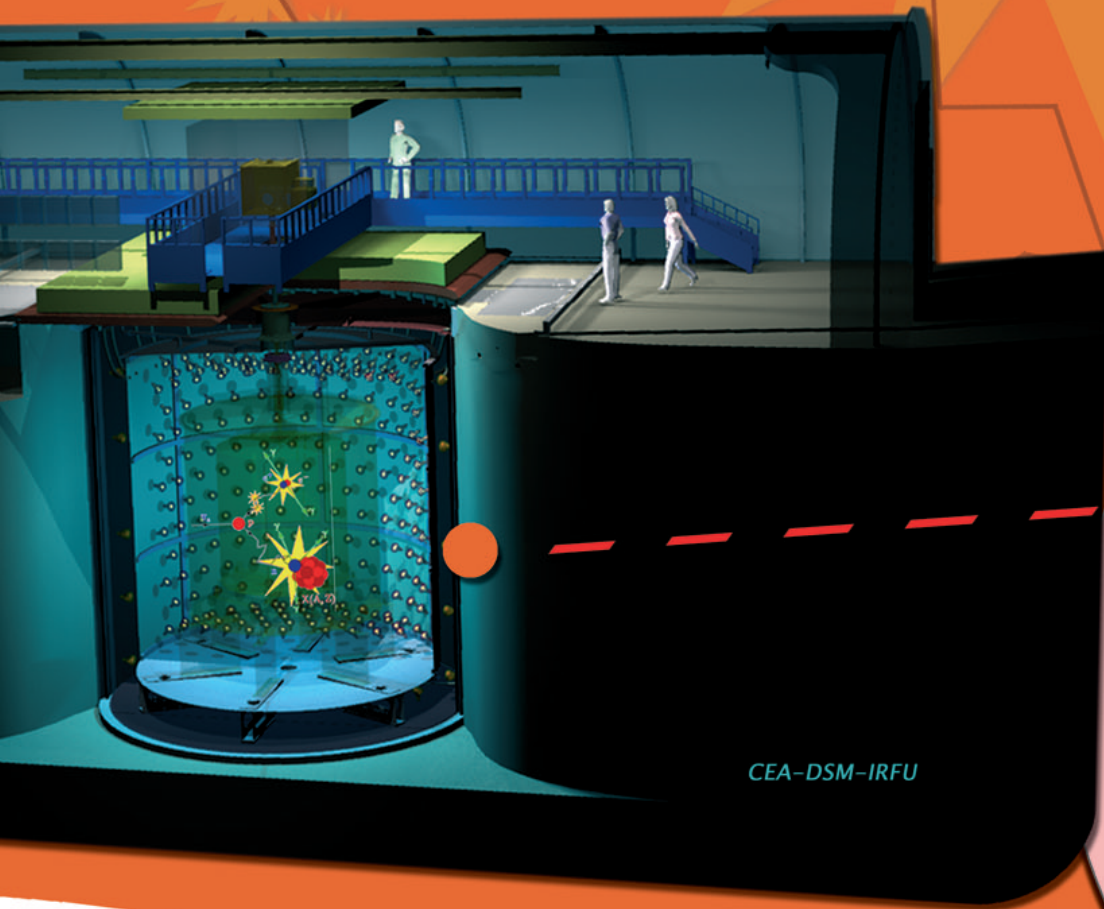
140 physiciens  
de  
35 instituts

- |   |         |   |        |
|---|---------|---|--------|
|    | France  |    | Spain  |
|    | Germany |    | U.S.A. |
|   | Japan   |  | Russia |
|  | Brazil  |  | U.K.   |

<http://doublechooz.org/>

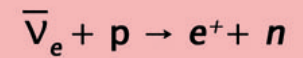


# Neutrino: détection



Bruit de type "fortuit"

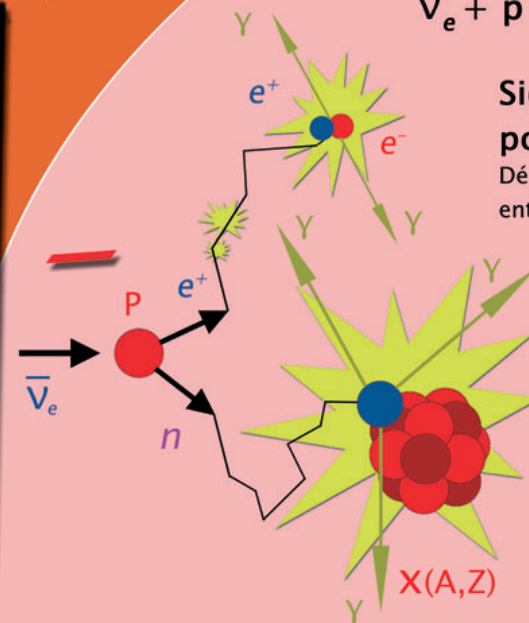
## Le signal de la réaction $\beta$ inverse



Signal prompt :

**positron  $e^+$**

Dépôt d'énergie  
entre 1 et 10 MeV



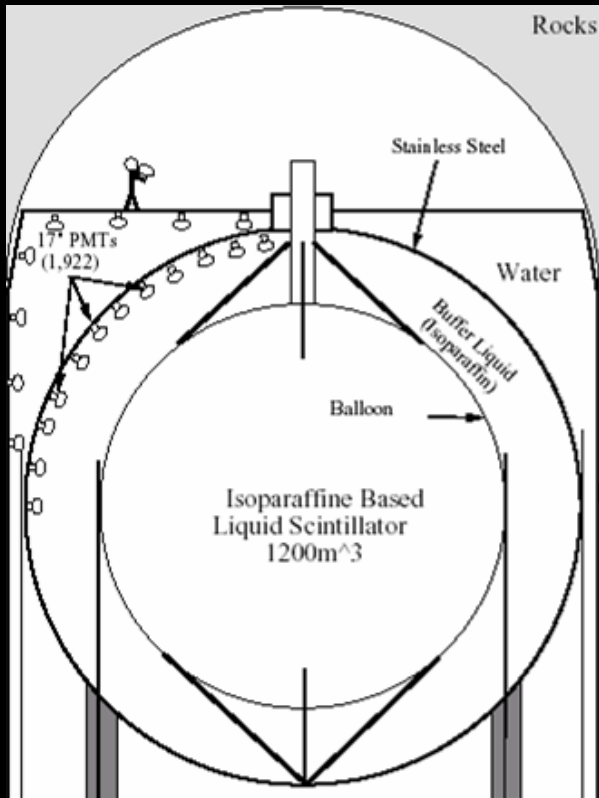
Signal retardé :

**neutron  $n$**

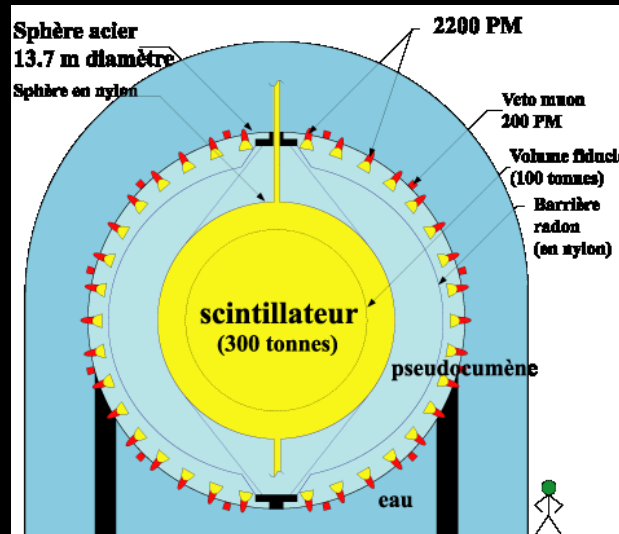
capturé par un noyau  
de Gd  
Dépôt d'énergie  
de 8 MeV

La détection des antineutrinos utilise la réaction  $\text{anti-}\nu_e + p \rightarrow e^+ + n$ . Le positron et le neutron sont détectés en coïncidence à quelques dizaines de microsecondes d'intervalle et avec une séparation d'une dizaine de centimètres.

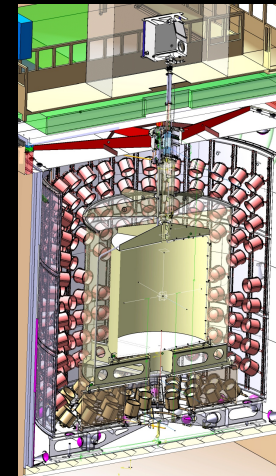
# Détecteurs de neutrinos



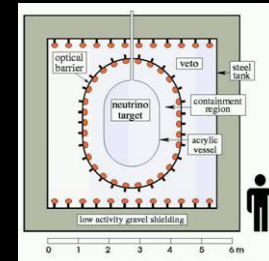
KamLAND  
1000 t



Borexino  
300 t



Générique  
~10 t



CHOOZ  
5 t

$$N(L) = 70 \left( \frac{t}{1(\text{day})} \right) \left( \frac{P}{8.4(\text{GW})} \right) \left( \frac{V}{10(\text{m}^3)} \right) \left( \frac{1}{L(\text{km})^2} \right)$$

# Taux d'interaction $\nu$ de réacteurs

- Réaction beta inverse (pas d'oscillation):  $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$

- Nombre de  $\nu$  attendus: 
$$n_\nu = \frac{1}{4\pi R^2} \frac{P_{th}}{\langle E_f \rangle} N_p \varepsilon \sigma_f$$

- $P = 2 \times 4.3 \text{ GW}_{th}$
- $R = 1000 \text{ mètres}$
- $E_f = 204 \text{ MeV}$
- $N_p = 10 \text{ m}^3 \times 6.6 \cdot 10^{28} \text{ H/m}^3 = 6.6 \cdot 10^{29} \text{ H}$
- $\sigma_f = 6 \cdot 10^{-43} \text{ cm}^2 \text{ fission}^{-1}$
- $\varepsilon = 0.8$
- $1 \text{ day} = 86400 \text{ s}$

→  $2 \cdot 4.3 \cdot 10^9 / (204 \cdot 10^6 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19}) \cdot 6.6 \cdot 10^{29} \cdot 6 \cdot 10^{-43} / 4 / \pi / (10^5)^2 \cdot 86400 \cdot 0.8$

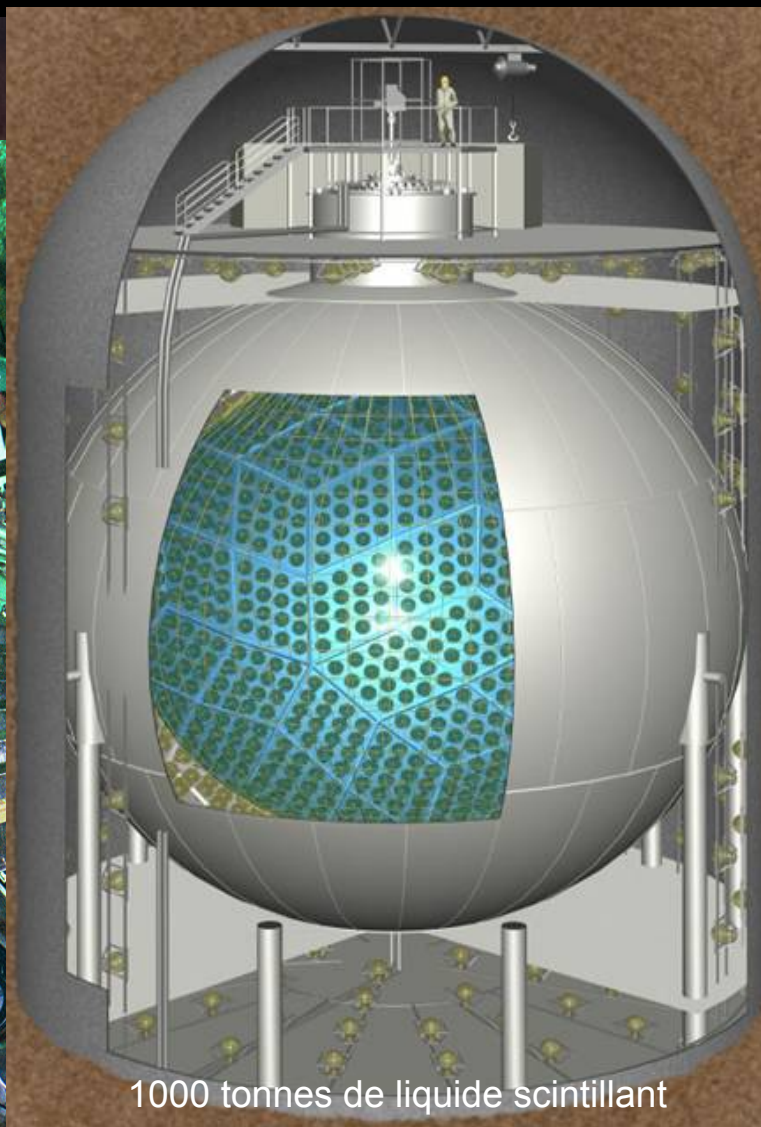
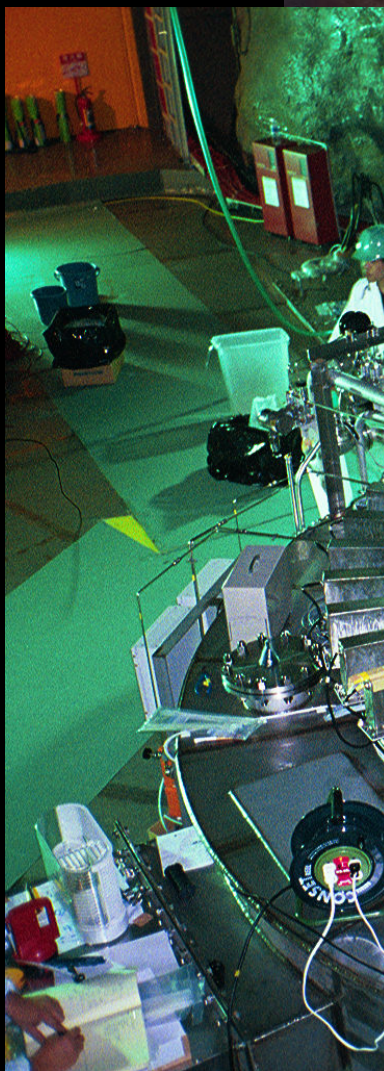
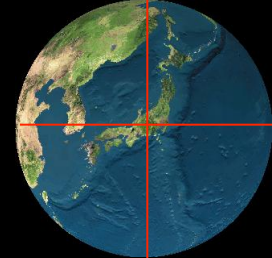
→ **57 interactions par jour**

- Flux de  $\nu$  (>1.8 MeV):

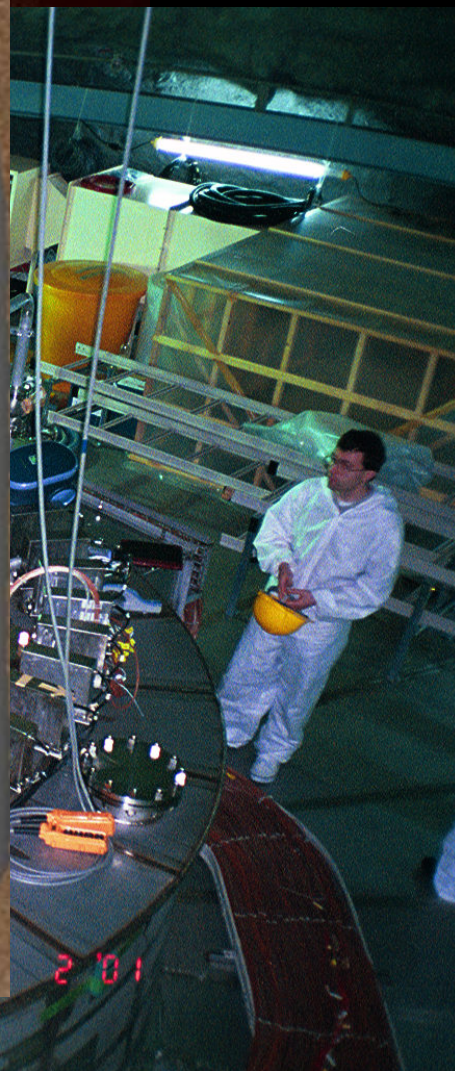
- Nombre de fissions/s x 1.5 neutrinos
- $4 \cdot 10^{20} \text{ neutrinos/s}$  émis &  $3 \cdot 10^9 \text{ neutrinos/cm}^2/\text{sec}$  reçus à 1 km



# KamLAND



1000 tonnes de liquide scintillant



# Oscillation des neutrinos

- Métamorphose d'un neutrino d'une famille donnée en un neutrino d'une autre famille au cours de sa propagation, que l'on note par exemple  $\nu_e \rightarrow \nu_{\mu,\tau}$
- L'oscillation est un phénomène d'interférence quantique si l'on suppose que les 'particules' reconnues par l'interaction faible :  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$  sont différentes des 'particules' qui se propagent :  $\nu_1, \nu_2, \nu_3$ . Ces dernières ont respectivement des masses  $m_1, m_2$ , et  $m_3$ . Les masses  $m(\nu_e), m(\nu_\mu), m(\nu_\tau)$  sont indéfinies...
- Imaginons qu'un neutrino soit produit dans l'état de saveur muonique  $\nu_\mu$ . Cet état est en fait la superposition de des deux ondes de matières  $\nu_1$  et  $\nu_2$  :
  - $\nu_\mu = a \nu_1 + b \nu_2$ .
  - $\nu_\mu$  est une superposition  $\nu_1$  et  $\nu_2 \rightarrow a^2+b^2=1$
- Lors de la propagation, l'amplitude des états  $\nu_1$  et  $\nu_2$  évolue périodiquement selon leurs énergies. Si les masses  $m_1$  et  $m_2$  sont différentes, les ondes 1 et 2 interfèrent, avec une différence de phase  $\propto (m_2^2 - m_1^2)/E_\nu$
- La probabilité d'observer un neutrino muonique oscille en fonction de la distance à la source de production (et donc du temps).



# Oscillation des neutrinos

- La probabilité qu'un  $\nu_\mu$  se transforme en  $\nu_e$  s'écrit :

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = 4a^2b^2 \sin^2 \left( 1,27 \frac{(m_2^2 - m_1^2)[\text{eV}^2]L[\text{m}]}{2E_\nu[\text{MeV}]} \right)$$

- $4a^2b^2$  caractérise l'amplitude de l'oscillation ;
- $L$  est la distance parcourue (en mètres) ;
- $E_\nu$  est l'énergie du neutrino (en MeV) ;
- $m_1$  et  $m_2$  les masses (en eV).

- Comme dans tout phénomène ondulatoire périodique, on a une longueur d'oscillation

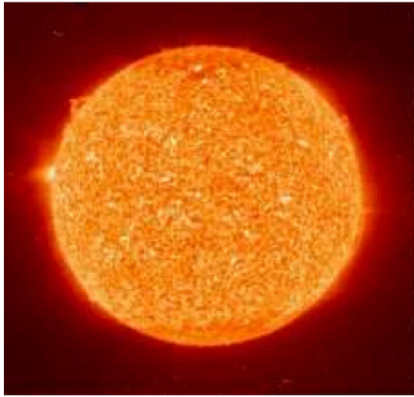
$$L_{\text{osc}}[\text{mètres}] = 2,48 \frac{E_\nu[\text{MeV}]}{(m_2^2 - m_1^2)[\text{eV}^2]}$$

- Après avoir parcouru exactement une longueur d'oscillation le neutrino retrouve sa saveur de production  $\nu_\mu$ . Le phénomène recommence alors ...

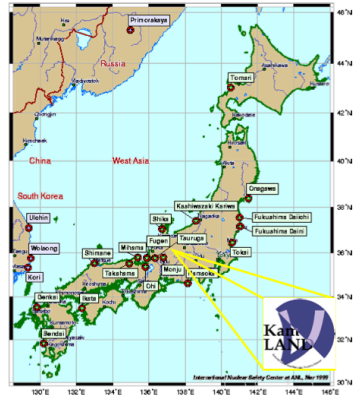
- La mise en évidence expérimentale des oscillations implique des neutrinos massifs !

# Les oscillations déjà observées

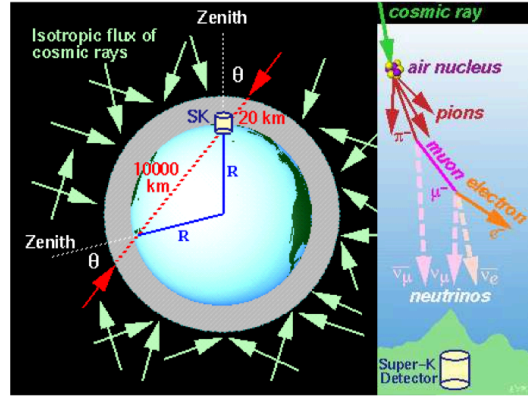
sun



reactors



atmosphere



accelerators



Homestake, SAGE, GALLEX  
SuperK, SNO, Borexino

KamLAND, CHOOZ

SuperKamiokande

K2K, MINOS, T2K

- $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$  or  $\text{anti-}\nu_{\mu} \rightarrow \text{anti-}\nu_{\tau}$  :
- $\nu_e \rightarrow \nu_{\mu, \tau}$  :
- $\text{anti-}\nu_e \rightarrow \text{anti-}\nu_{\mu, \tau}$  :
- $(\text{anti-})\nu_{\mu} \rightarrow (\text{anti-})\nu_{\mu, \tau}$  :
- $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$  :

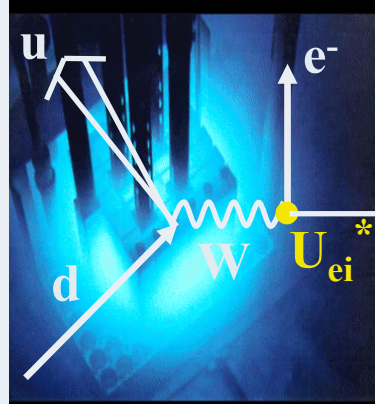
- $\nu$  atmosphériques & faisceaux de  $\nu$
- $\nu$  solaires
- $\nu$  de réacteurs
- $\nu$  atmosphériques & faisceaux de  $\nu$
- faisceaux de  $\nu$

# Oscillation des neutrinos de réacteurs

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) =$$

$$\sum_{i=1,2,3} \text{Ampl}$$

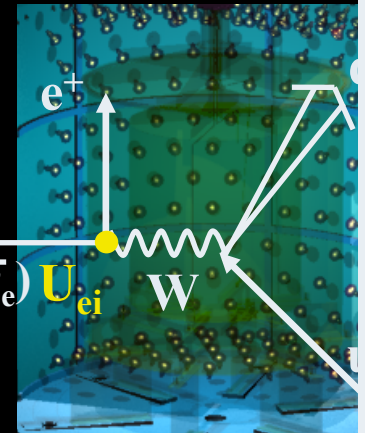
$^{235}\text{U} + n_{th} \rightarrow X + Y \rightarrow \beta\text{-decays}$



Cœur du réacteur

$$e^{-im_i^2 \frac{L}{2E}}$$

$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$



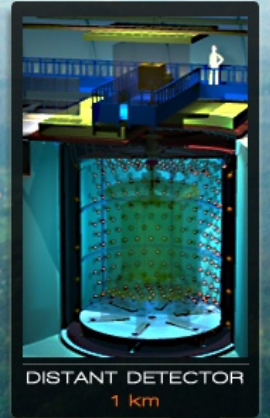
Détecteur

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = \left[ \sum_i U_{ei}^* e^{-im_i^2 \frac{L}{2E}} U_{ei} \right]^2 = 1 - \sin^2(2\theta_{ij}) \sin^2 \left( 1.27 \frac{\Delta m_{ij}^2 (\text{eV}^2) L (\text{m})}{E (\text{MeV})} \right)$$

# Sérendipité?

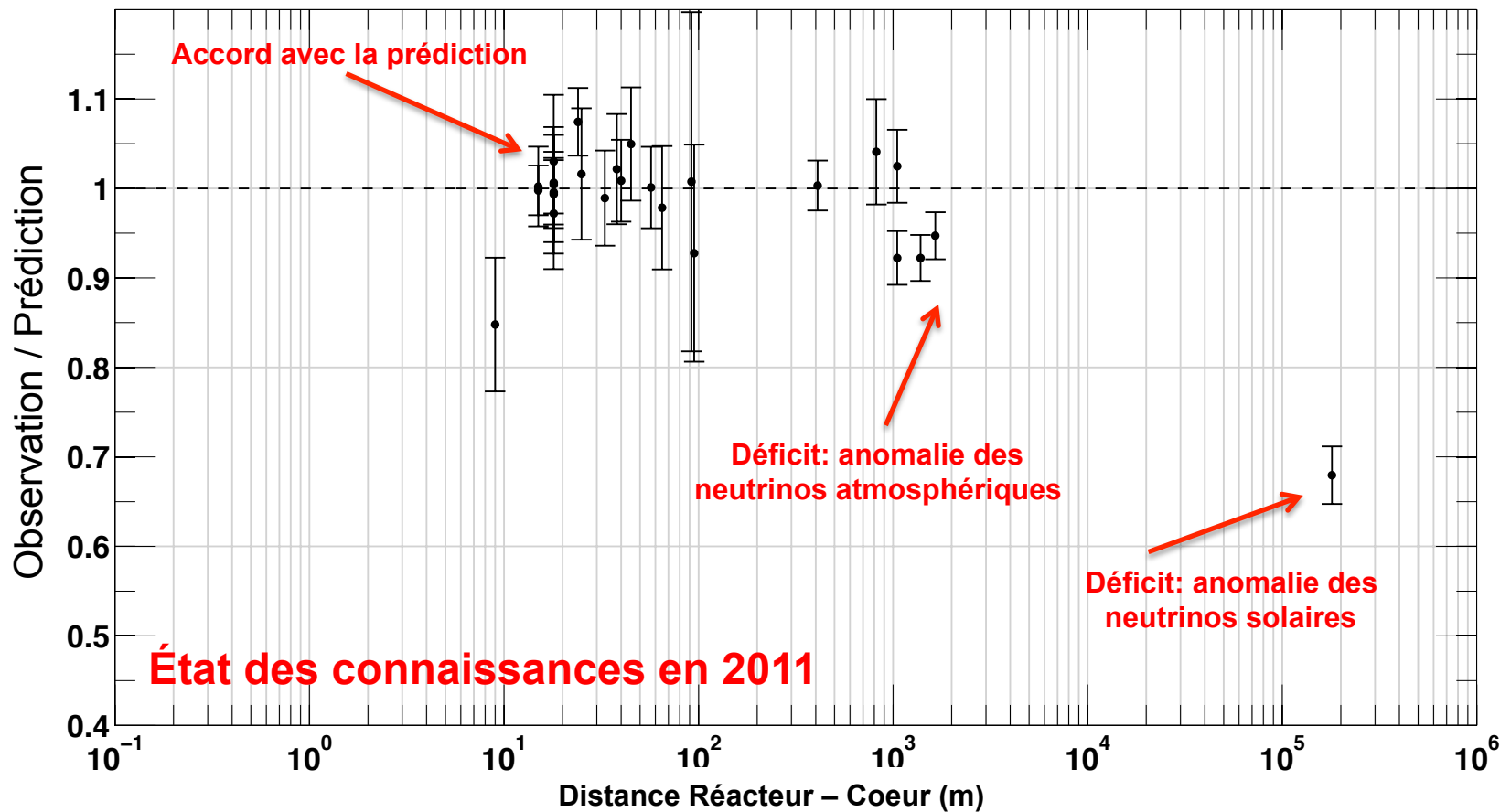
**« faire des découvertes, par accident et sagacité, de choses que l'on ne cherchait pas »**

# L'expérience Double Chooz

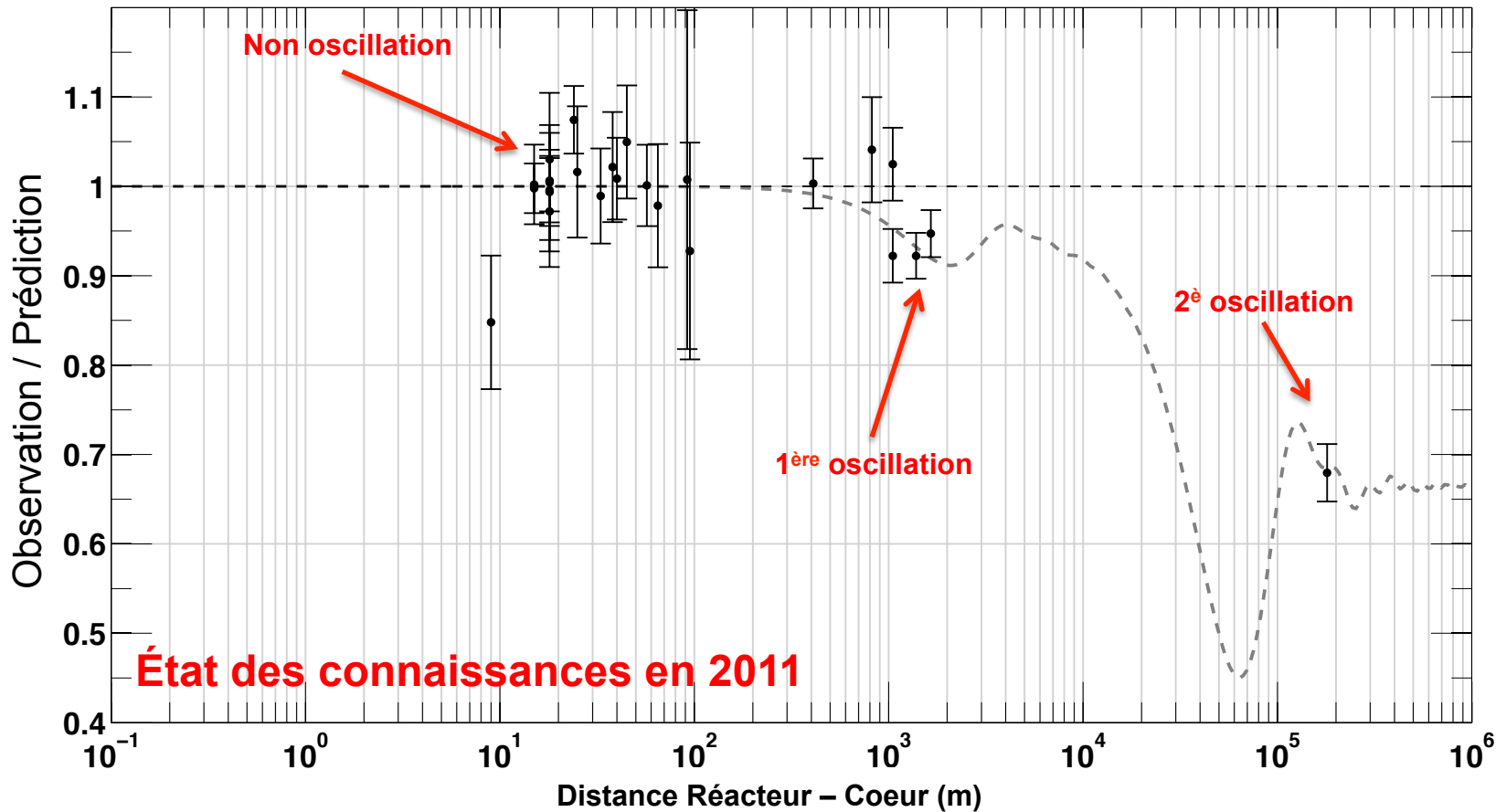


# 30 ans de mesures auprès de réacteurs

- Réacteur nucléaire :  $10^{21}$  neutrinos / secondes !!! A prédire précisément
- 1980-2011: 25 expériences dédiées à la mesure des neutrinos en provenance des réacteurs

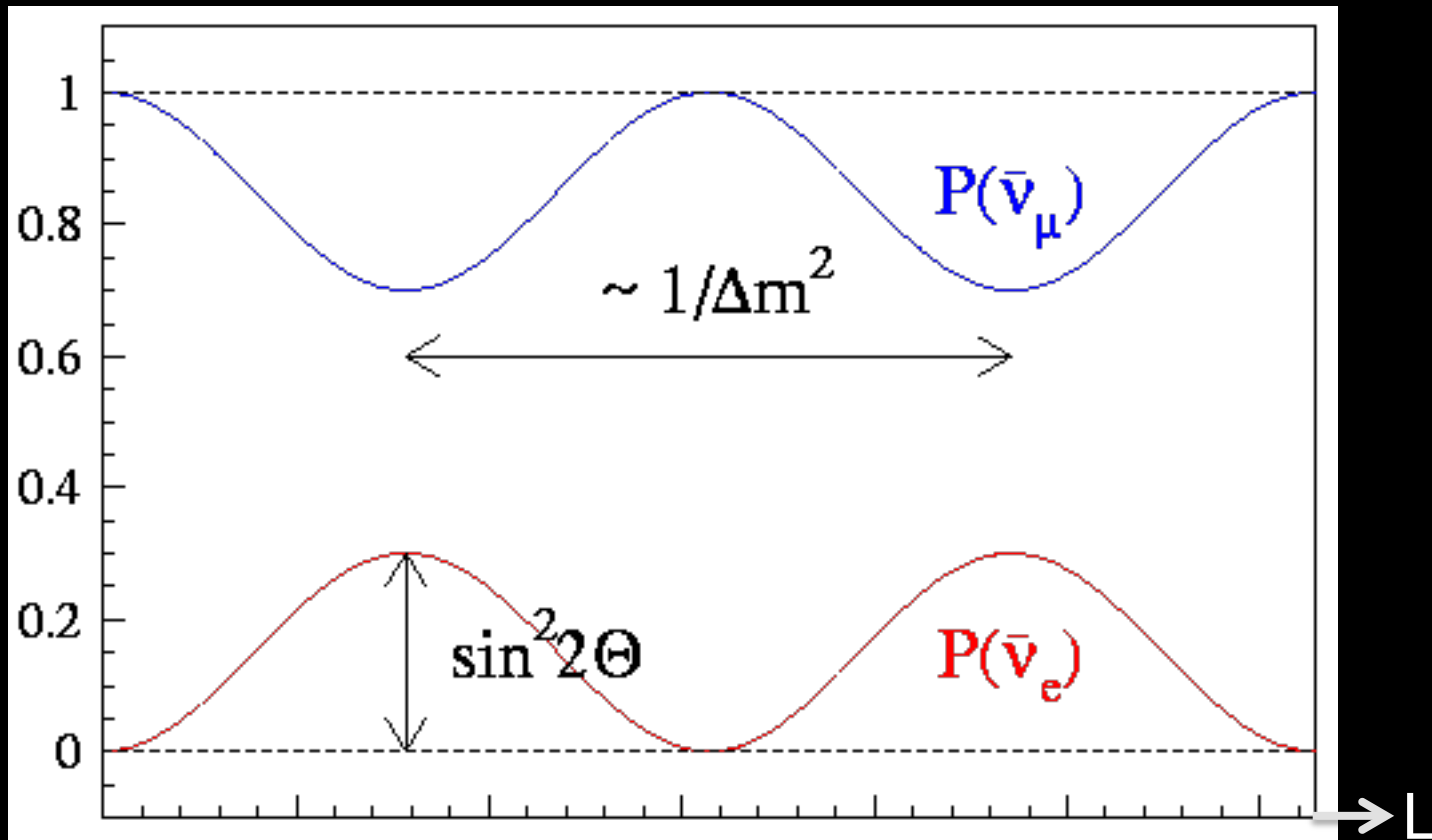


# Interprétation: oscillation des $\nu$



# Interprétation: oscillation des $\nu$

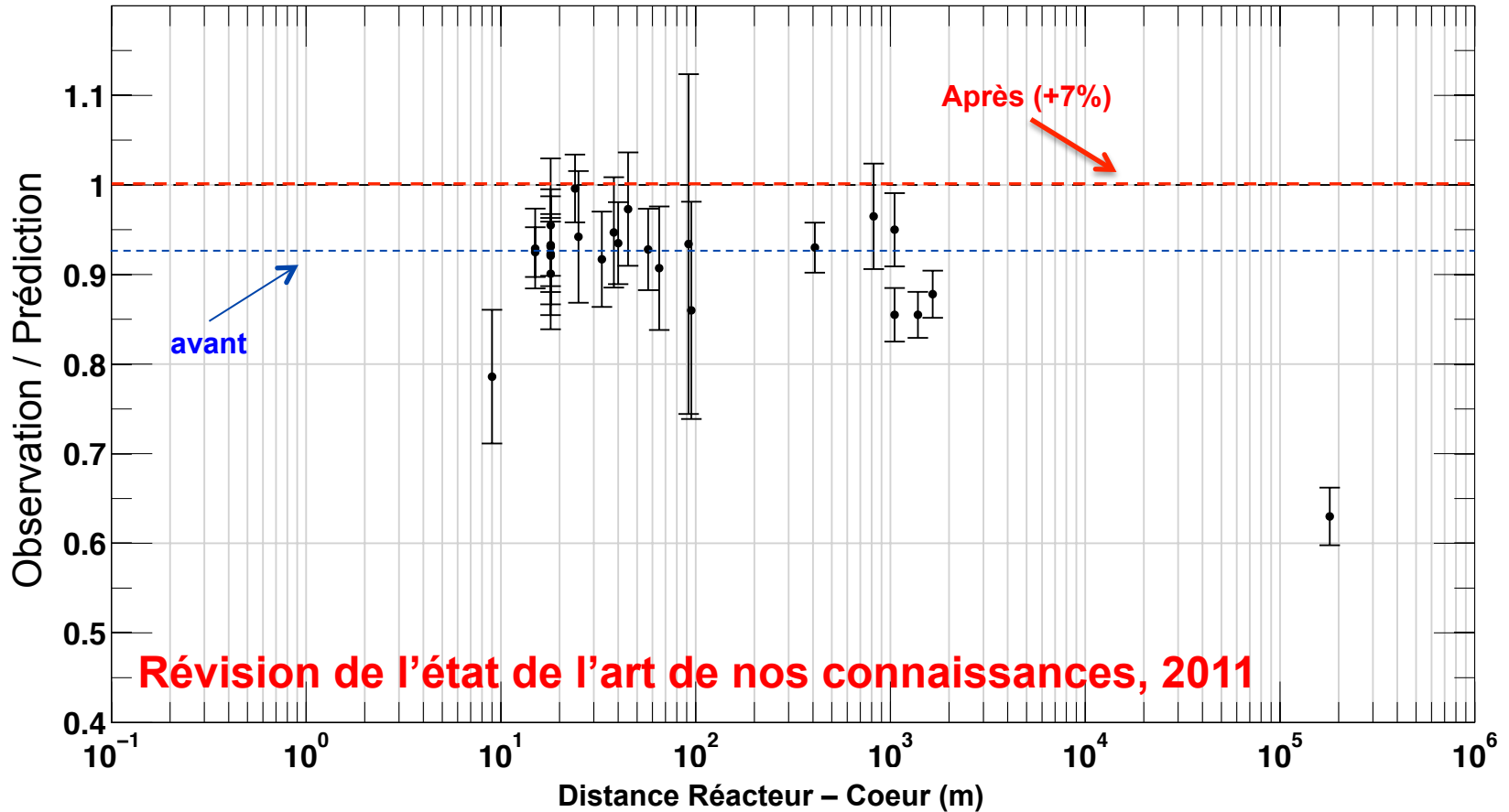
$$P \propto \sin^2(2\theta_{ij}) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{E}\right)$$



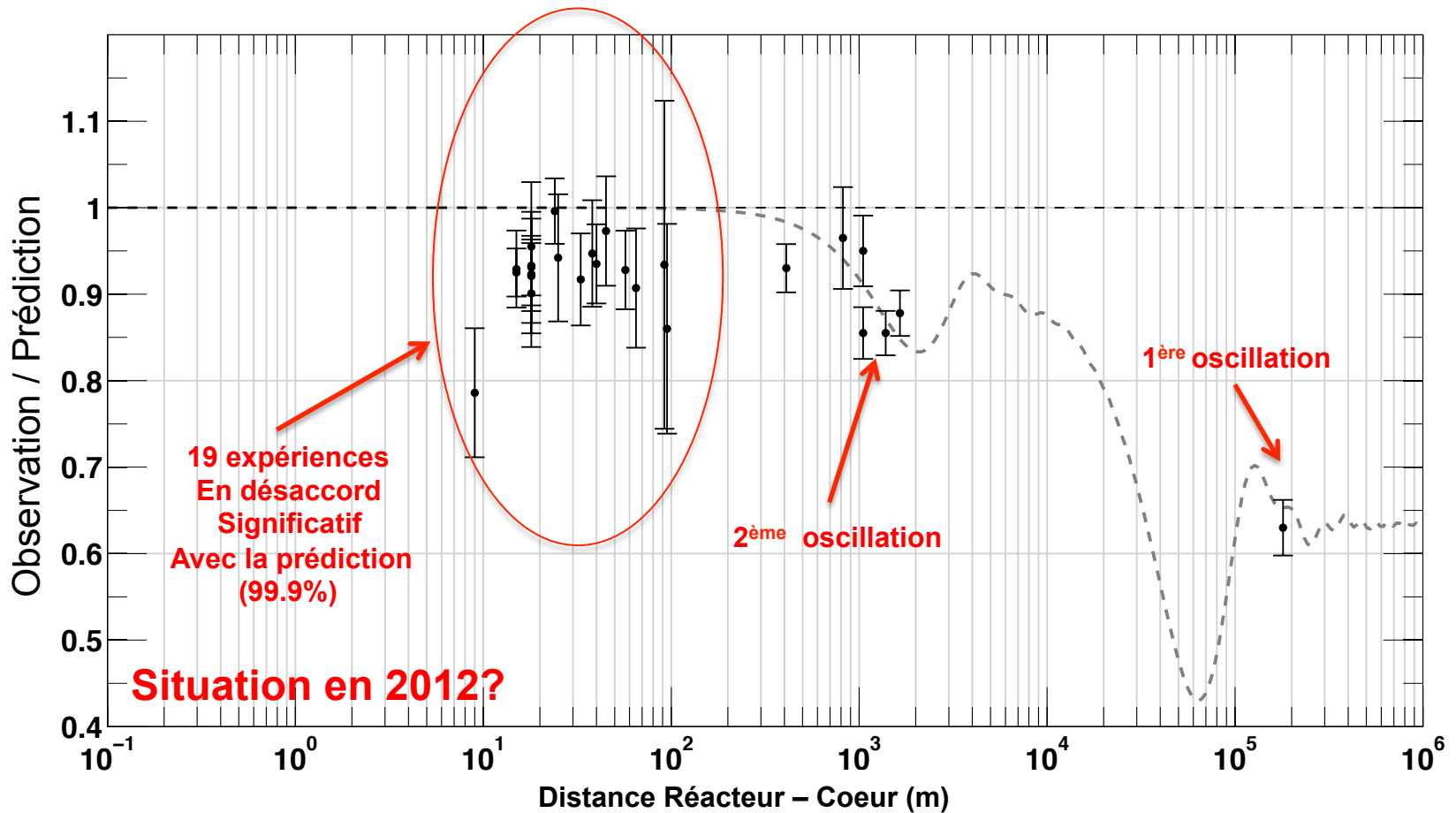
3 neutrinos:  $m_1, m_2, m_3 \rightarrow$  seulement  $\Delta m_{21}^2 = m_2^2 - m_1^2$  &  $\Delta m_{31}^2 = m_3^2 - m_1^2$   
 $\rightarrow$  2 longueurs d'oscillation distinctes possibles ...



# 2011: Réévaluation du flux de $\nu$ de réacteurs

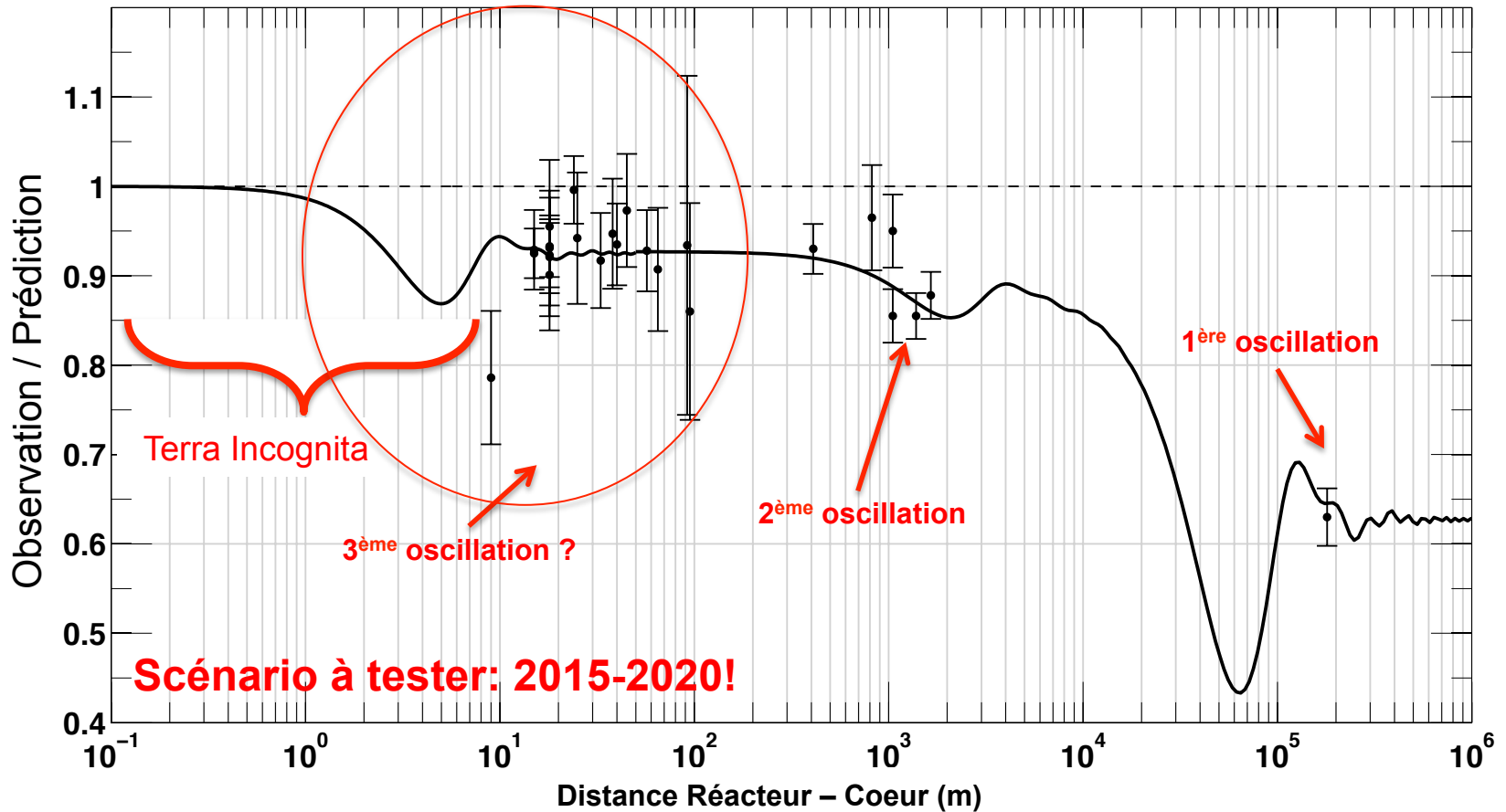


# L'anomalie des Neutrinos Réacteurs



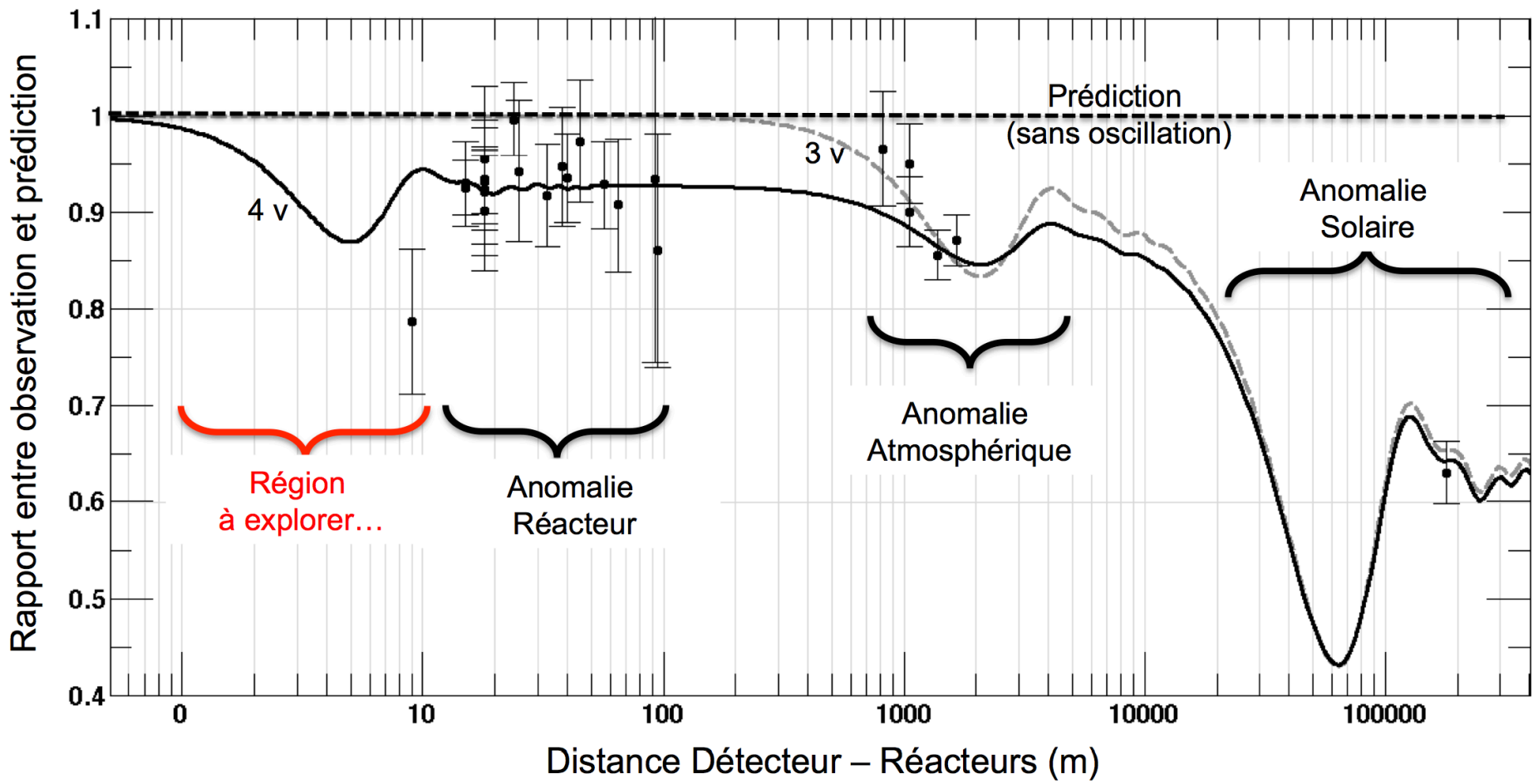
# Prémices d'un 4<sup>e</sup> neutrino ?

3 oscillations  $\rightarrow \Delta m^2_{21}$  &  $\Delta m^2_{31}$  &  $\Delta m^2_{41}$   $\rightarrow$  un 4<sup>e</sup> neutrino !!!



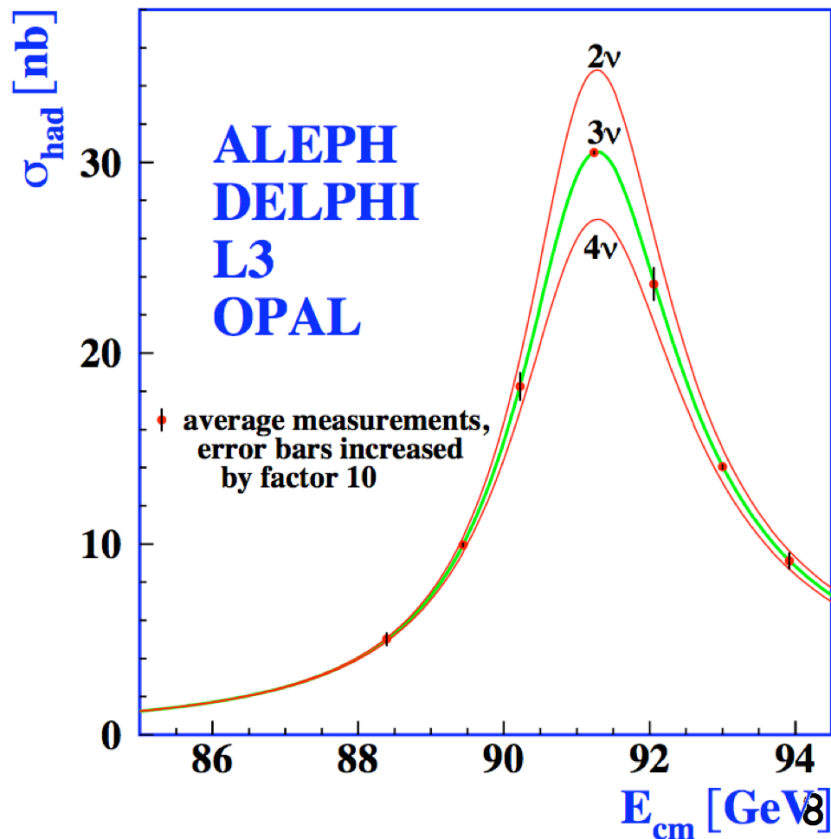
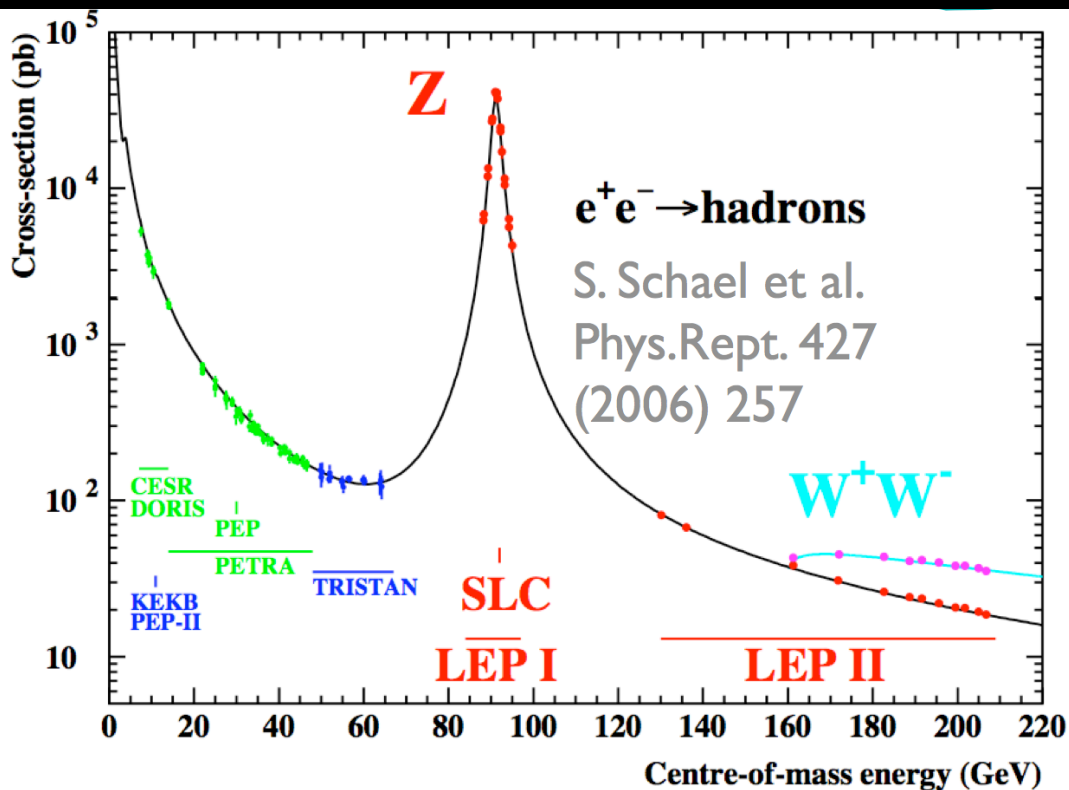
25 nouveaux projets à l'étude ou en réalisation depuis 2011 !

# L'anomalie des neutrinos de réacteur



# Combien de neutrinos dans le MS

- Production du boson  $Z^0$  par collision  $e^+ e^-$  au LEP, CERN
- Etude de la désintégration du  $Z^0 \rightarrow l^+ l^-$
- Largeur du pic de résonance = fonction du nombre de neutrinos 'actifs'
- $N_\nu \cong 3 \rightarrow$  seuls  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$  interagissent par interaction faible

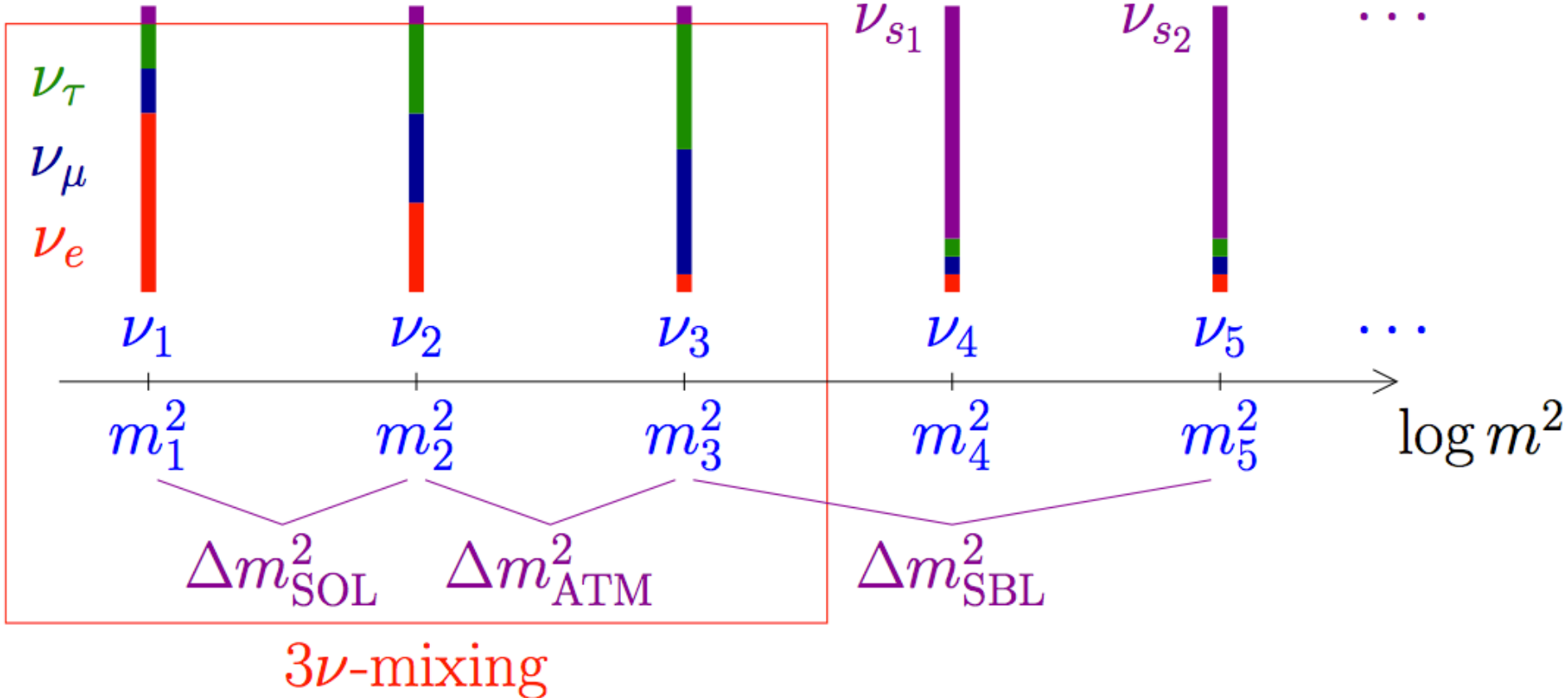


# Les hypothétiques neutrinos stériles

Un nouveau neutrino léger,  $\nu_s$

- sans interaction
- mélange avec les autres  $\nu$ 's
- $m_4 \approx 1$  eV ?

Pas de couplage avec les bosons W/Z



# 4<sup>è</sup> neutrino: Retour aux observables cosmologiques

# Particules reliques relativistes

- $T \gg m_e$  : le contenu en radiation de l'Univers est ( $T_\nu = T_\gamma$ )

$$\rho_r = \rho^\gamma + \rho^\nu = \underbrace{\frac{\pi}{15} T^4}_{CMB} + 3 \cdot \underbrace{\frac{7}{8} \cdot \frac{\pi}{15} T^4}_{CNB, 3\nu} = \left[ 1 + 3 \cdot \frac{7}{8} \right] \rho^\gamma$$

- $T \ll m_e$  : le contenu en radiation de l'Univers est ( $T_\nu \neq T_\gamma$ )

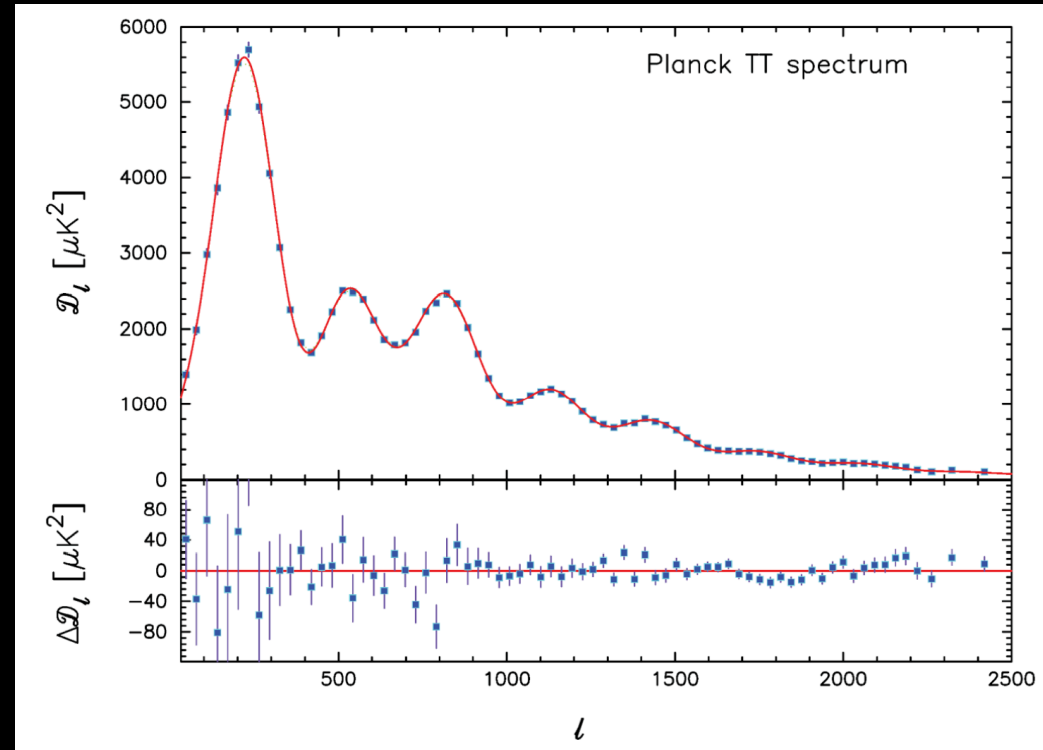
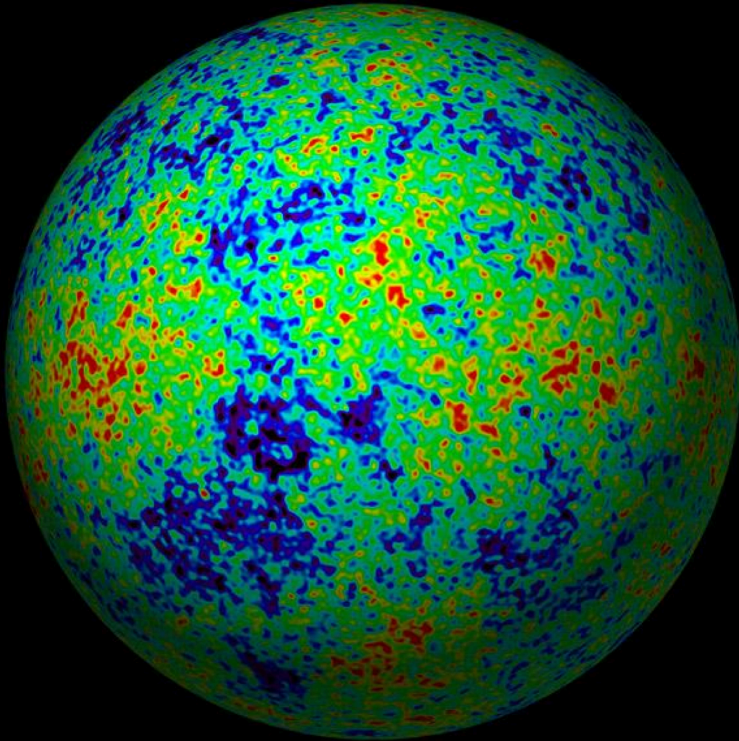
$$\rho_r = \rho^\gamma + \rho^\nu = \underbrace{\frac{\pi}{15} T_\gamma^4}_{CMB} + 3 \cdot \underbrace{\frac{7}{8} \cdot \frac{\pi}{15} T_\nu^4}_{CNB, 3\nu} = \left[ 1 + 3 \cdot \frac{7}{8} \cdot \left( \frac{4}{11} \right)^{4/3} \right] \rho^\gamma$$

$$= \left[ 1 + N_{eff} \cdot \frac{7}{8} \cdot \left( \frac{4}{11} \right)^{4/3} \right] \rho^\gamma$$

- $N_{eff} \rightarrow$  Nombre d'espèces de neutrinos contraint par la cosmologie !



# Résultats du satellite Planck



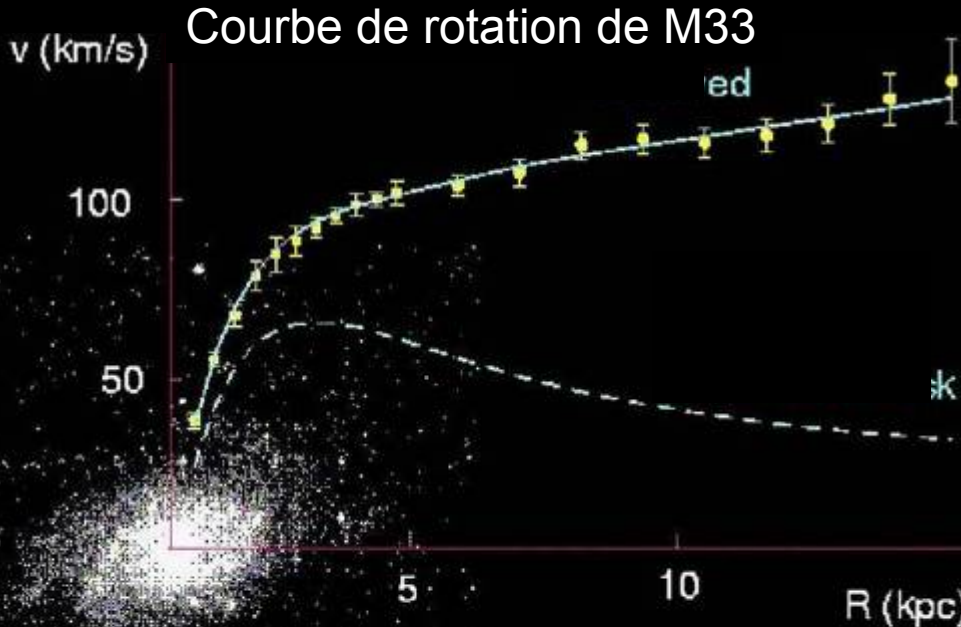
Mesure des fluctuations de température du CMB aux différentes échelles

# Résultats du satellite Planck

- Mesure de  $\rho_r$  par 'ajustement' du modèle de concordance aux données CMB
- Combinaison avec d'autres observables (structures dans l'Univers,  $H_0$ , ...)
- **Résultats :**
  - Planck seul:  $N_{\text{eff}} = 3.36 +0.68 -0.64 @95\% \text{ C.L}$
  - Planck +autres :  $N_{\text{eff}} = 3.52 +0.48 -0.45 @95\% \text{ C.L}$
- **Conclusions :**
  - Le CNB est détecté sans aucune ambiguïté (ce n'est pas nouveau)
  - Un 4<sup>e</sup> type de neutrinos n'est pas exclu par les données...
  - Ce pourrait être aussi une autre (nouvelle) particule...

# 5<sup>è</sup> neutrino et Matière noire?

# Matière noire Galactique



**Vitesse constante à grands R**

→ Un halo de matière noire

→  $M(R) \sim (50-200 \text{ kpc?})$

→  $\rho_{\text{local}} \sim 0.1 \text{ GeV/cm}^3$

**Matière 'lumineuse' (étoiles):**

→  $\Omega_{\text{lum}} = 0.003$

→  $\rho_{\text{star}} \sim 10^{-8} \text{ GeV/cm}^3$

■ Cosmologie :  $\Omega_{\text{MatièreNoire}} \sim 0.3 \rightarrow \rho_{\text{MatièreNoire}} \sim 10^{-6} \text{ GeV/cm}^3$

→ Nous vivons dans une surdensité de matière noire  $\rho_{\text{local}} > 100\,000 < \rho_{\text{MatièreNoire}} >$

→ Quelle est la nature de la matière noire :

- Matière noire froide, WIMPS,  $m = 10-1000 \text{ GeV} \rightarrow$  encore non détecté

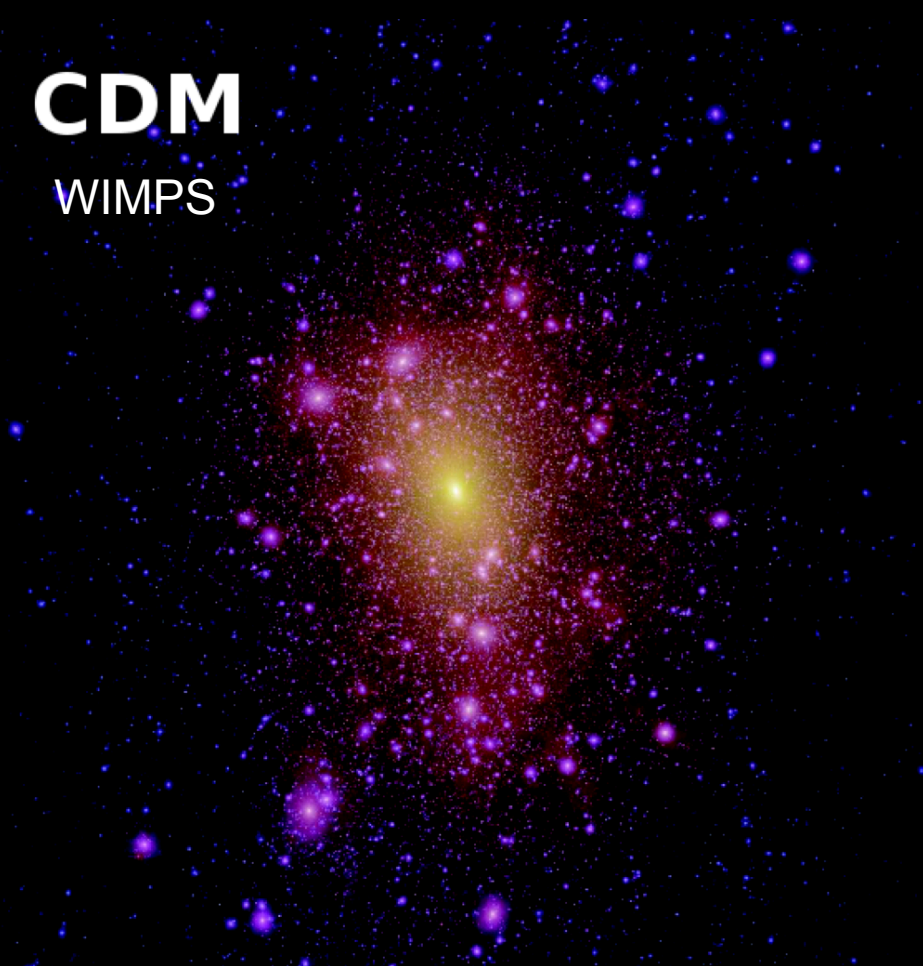
- Un  $\nu$  stérile 'lourd' (keV) pourrait-il rendre compte des observations?

# Matière noire: froide (CDM) ou tiède (WDM)

Les modèles CDM prédisent un grand nombre de structures à petites échelles autour des galaxies

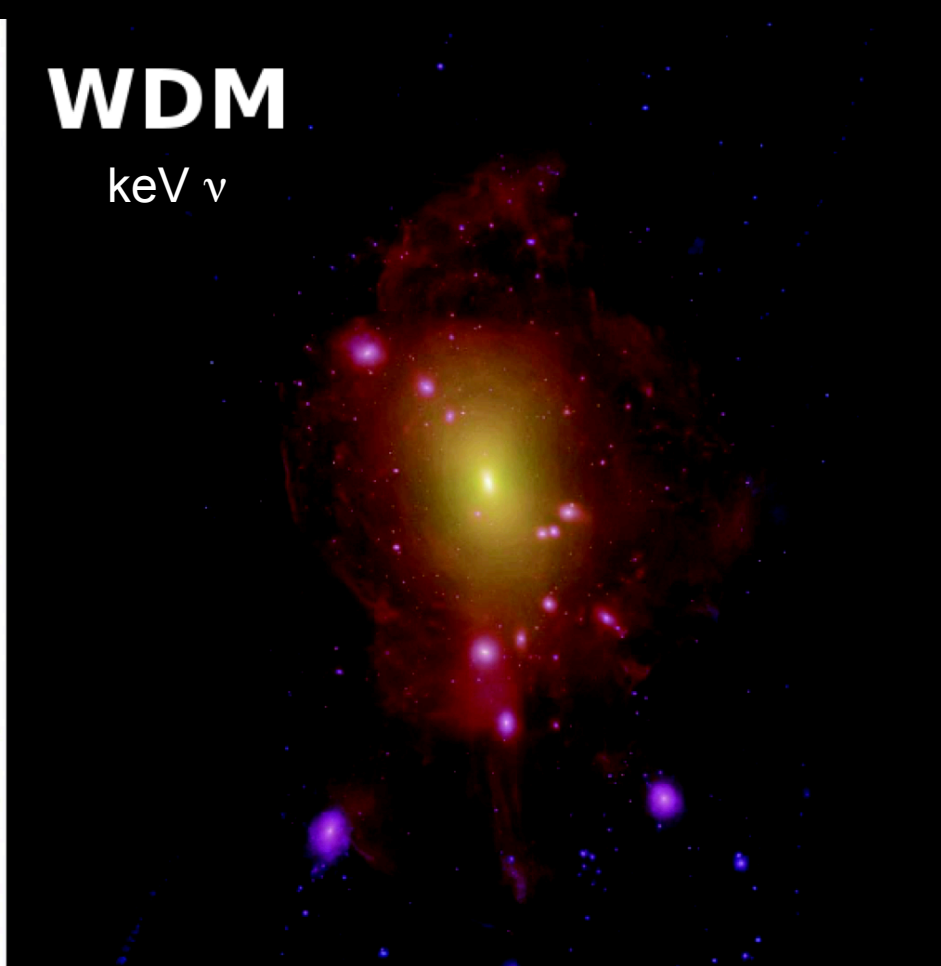
**CDM**

WIMPS



**WDM**

keV  $\nu$

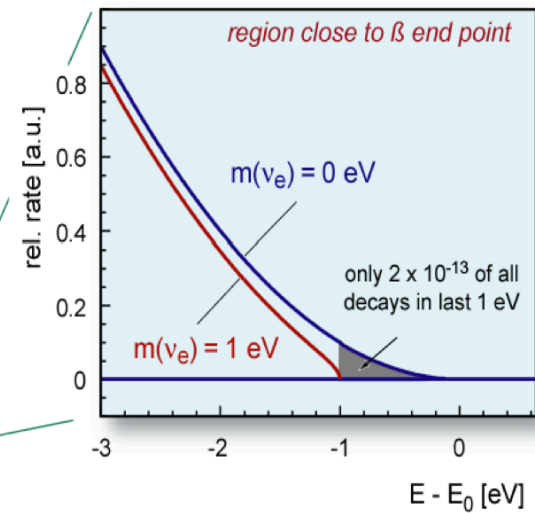
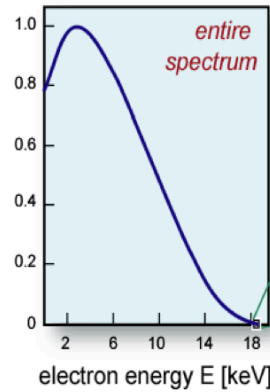
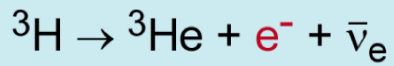
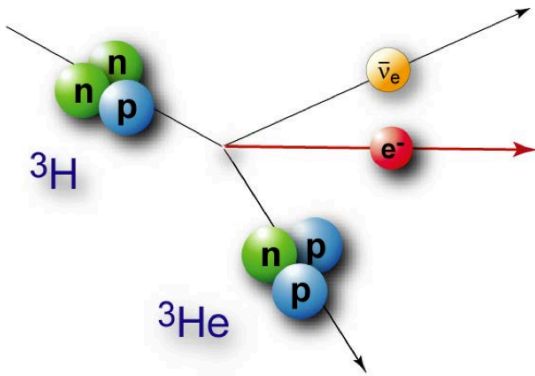
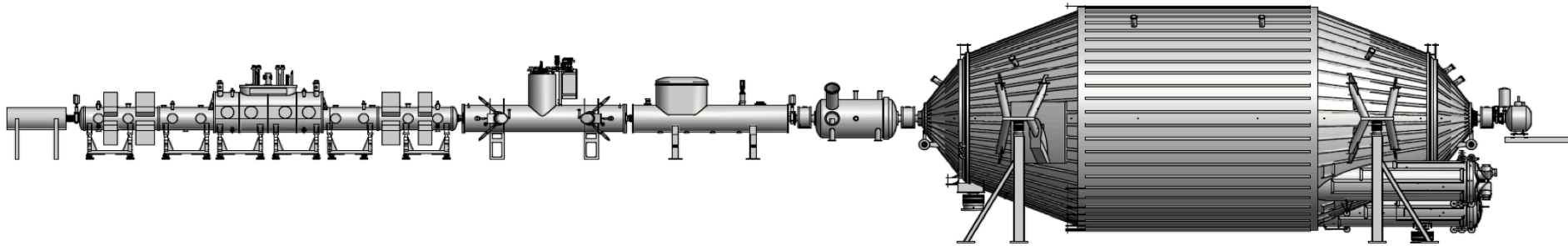


Simulation numérique

Un candidat ad-hoc, un  $\nu$  stérile au keV, pourrait mieux rendre compte de ces observations ?

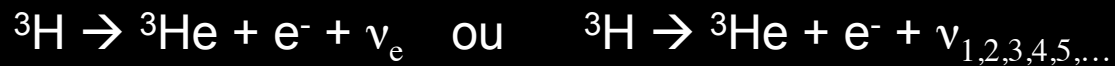
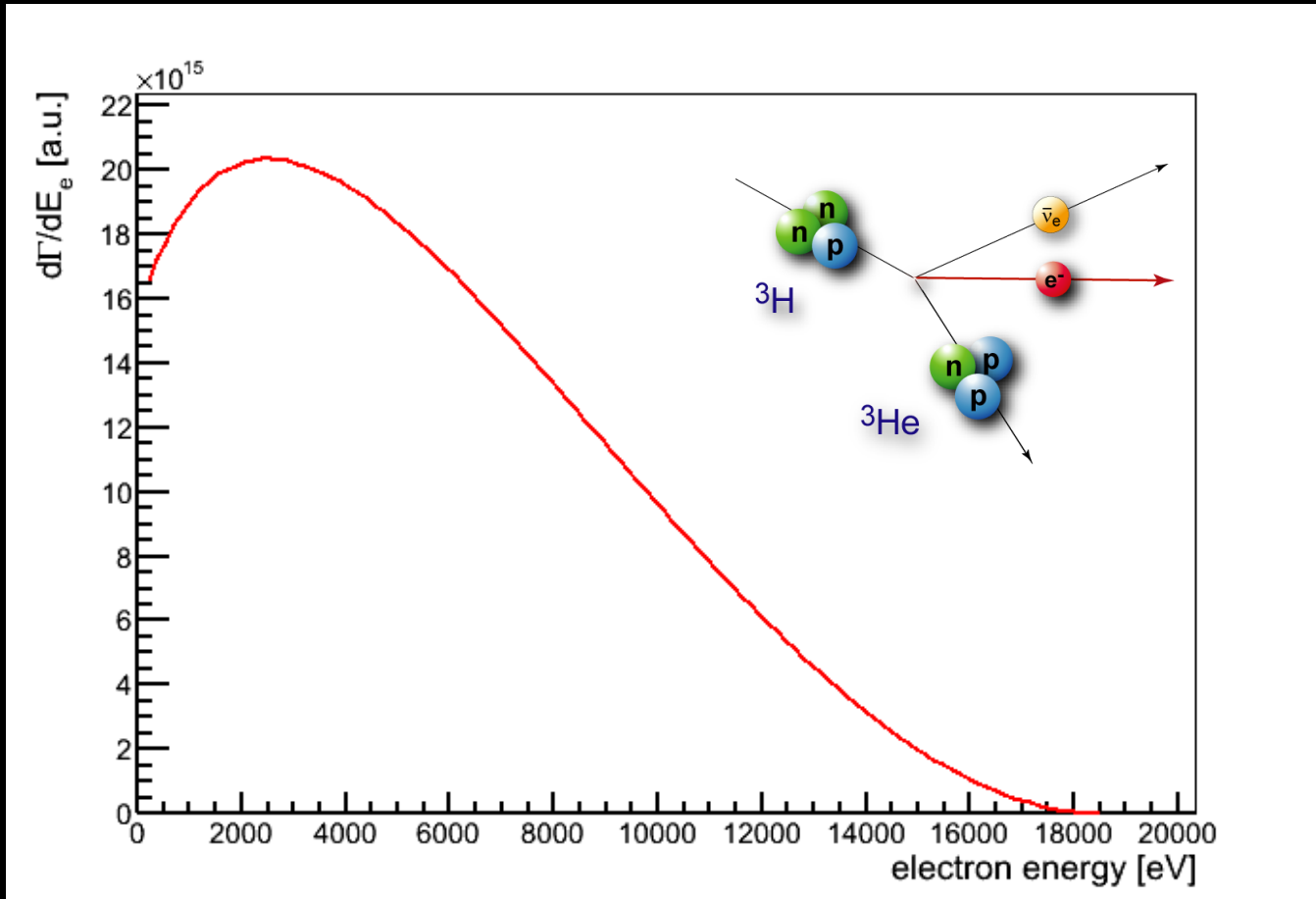
# Mesure directe de la masse des $\nu$

## Expérience KATRIN (Karlsruhe)



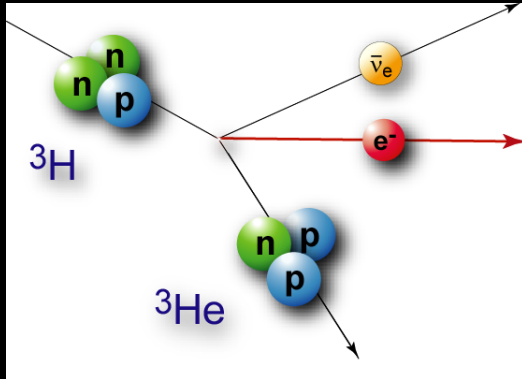
# Spectre attendu dans KATRIN

Spectre en énergie de la désintégration bêta du Tritium :  ${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + e^- + \nu_e$

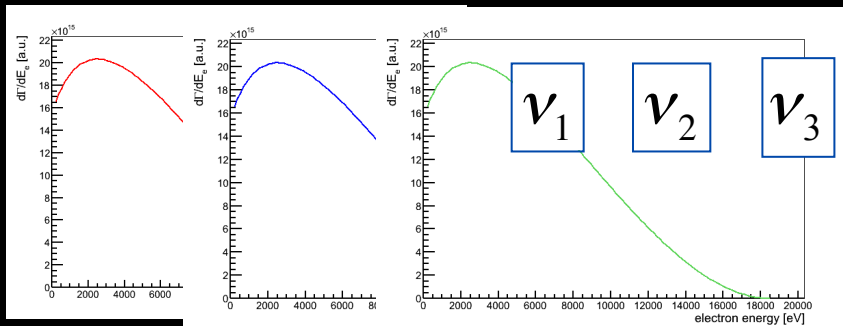


# Recherche du $\nu$ stérile au keV (KATRIN)

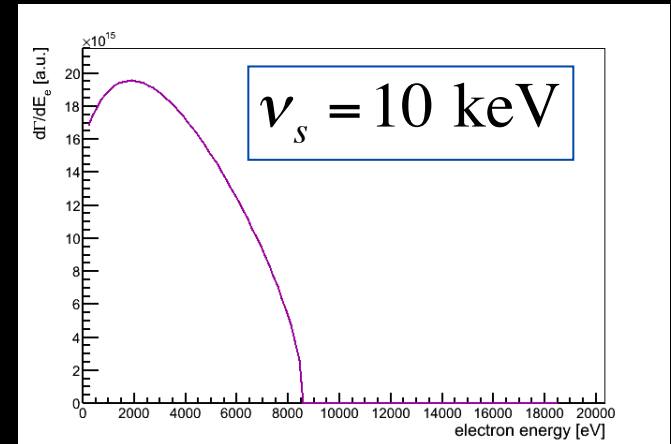
Le spectre observé est la superposition des désintégrations avec émission de  $\nu_1, \nu_2, \nu_N$



$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \\ \nu_s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} & U_{es} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} & 0 \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & U_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \\ \nu_s \end{pmatrix}$$



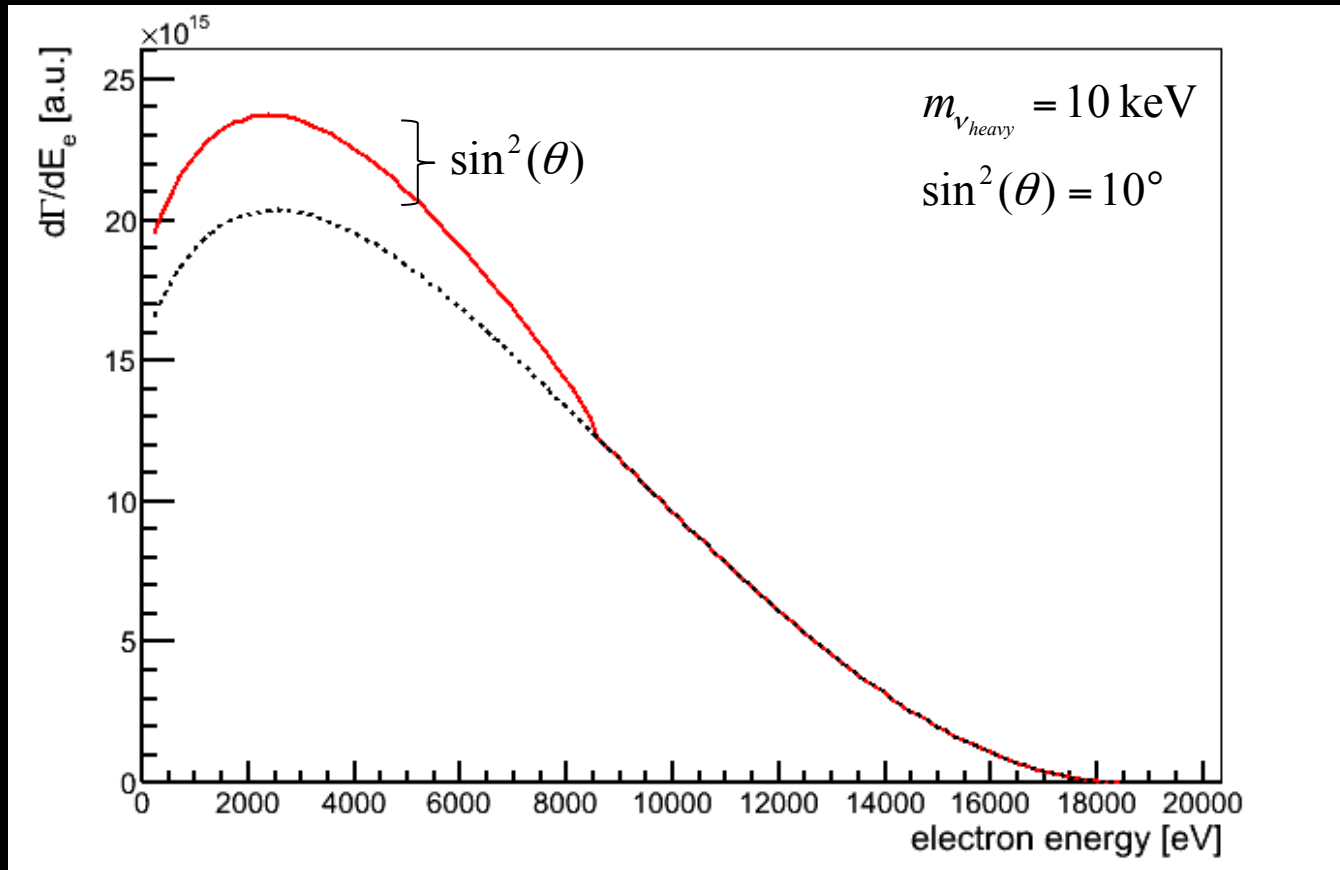
$$+ |U_{es}|^2$$





# Recherche du $\nu$ stérile au keV (KATRIN)

Expérience difficile car  $\sin^2(\theta) \approx 10^{-7}$  pour rendre compte de la matière noire galactique...



$$m_{\nu_{keV}}$$

# Neutrinos & Matière-Antimatière

# Asymétrie Matière - Antimatière

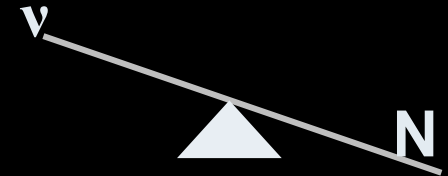
Au moment du **Big-Bang**: autant de matière que d'antimatière



La prépondérance de la matière sur l'antimatière (**1 milliard contre 1**) s'est développée après la création des premières particules

Une différence de comportement entre Neutrino et anti-neutrinos de l'Univers primordial pourrait être à l'Origine de l'excès de Matière: c'est la Leptogénèse

- Une asymétrie quark-antiquark existe (violation CP) mais ne permet pas de rendre compte de l'asymétrie matière-antimatière dans l'Univers ...
- Un  $\nu$  stérile TRES lourd (GUT scale) pourrait rendre compte de la très faible masse des  $\nu_{\varepsilon,\mu,\tau}$  (mécanisme balançoire)
- A  $t < 10^{-35}\text{s} \rightarrow$  production neutrino lourd
- $\mathcal{CP} \rightarrow R(N \rightarrow l^- + \Phi^+) < R(N \rightarrow l^+ + \Phi^-) \rightarrow$  L violation ( $\Phi$ : champs de Higgs)  
 $\rightarrow$  Leptogenesis
- Conversion de l'asymétrie leptonique en asymétrie baryonique (**B-L** conservé)
- Un scénario prometteur mais difficilement testable
  - Recherche de la nature du neutrino (dirac ou Majorana)
  - Recherche de violation CP dans le secteur des neutrinos légers



# Les neutrinos dans le modèle standard de la physique des particules

# Interaction des neutrinos

- La section efficace est une grandeur physique correspondant à la probabilité d'interaction d'une particule avec un noyau atomique ou une particule élémentaire.
- L'unité associée est le barn (b) :  $1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ m}^2$ .
- Imaginons le bombardement d'un mince feuillet par des particules.
- Statistiquement, les centres d'atomes disposés sur une mince surface peuvent être considérés comme des points répartis sur ce plan.
- Le centre d'un projectile atomique heurtant ce plan a une probabilité géométriquement définie de passer à une certaine distance  $r$  d'un de ces points. En fait, s'il y a  $n$  atomes dans une surface  $S$  de ce plan, cette probabilité est de  $(n\pi r^2)/S$ .

# Interaction des neutrinos

- Si nous considérons les atomes comme des disques impénétrables et la particule comme une bille de diamètre négligeable, la section efficace est la surface fictive que devrait avoir une particule cible pour reproduire la probabilité observée de collision ou de réaction avec une autre particule.
- Les sections efficaces observées varient de façon importante, en fonction de la nature et de l'énergie des particules. Un noyau atomique mesure  $r_n = 6 \cdot 10^{-15}$  m. La section efficace géométrique de l'interaction entre deux noyaux peut donc s'estimer raisonnablement comme  $\pi r_n^2 \sim 1$  barn.
- La théorie de Fermi des interactions faible permet de calculer la section efficace d'interaction d'un anti-neutrino avec un proton

$$\sigma = 9.3 \cdot 10^{-20} \text{ barn} \left( \frac{E_\nu}{1 \text{ MeV}} \right)^2$$

- Des neutrinos émis par des supernovae ( $E = 10$  MeV) auront une section efficace de l'ordre de  $10^{-17}$  barn, bien plus faible que ce que l'on attend de réactions nucléaires 'classiques' !

# Interaction des neutrinos

- Jusqu'où pénètrent les neutrinos dans l'eau ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $M=18$  g/mol)?
- Considérons un faisceau d'anti-neutrinos de densité  $n_{\bar{\nu}}$ , et de vitesse  $c$ . Le flux de neutrinos est défini par  $J = n_{\bar{\nu}} c$ . Le taux de réactions  $W$  (par unité de volume et de temps) est donné par  $W = J N \sigma$ , où  $N$  est le nombre d'H dans l'eau ( $2 \times 3.3 \cdot 10^{28}/\text{m}^3$ ).
- Considérons maintenant un faisceau de section  $A$  traversant une épaisseur d'eau  $d$ , suivant l'axe des abscisses  $x$ . La réduction de l'intensité du faisceau en traversant un intervalle  $dx$  est donné par :

$$-A dJ(x) = dW = J(x) \sigma N A dx$$

- En intégrant l'équation ci dessus on obtient :  $J(x) = J(x=0) e^{-x/\lambda}$   
Ou  $\lambda = 1/N \sigma$ ,  $\lambda$  est la longueur d'interaction.
- Pour un faisceau de neutrinos de 1 Mev traversant la Terre on obtient :  $\lambda \sim 3 \cdot 10^{18}$  mètres d'eau pour atténuer 95% du faisceau (1000 al) !