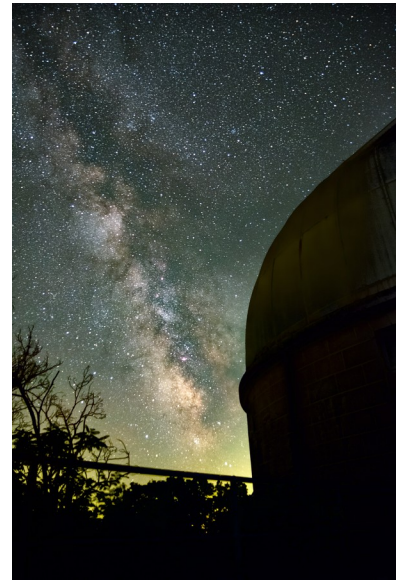
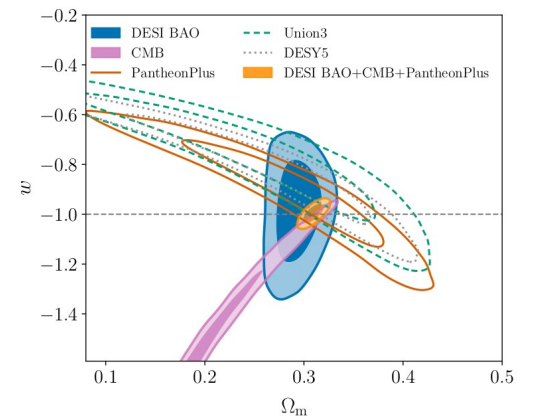
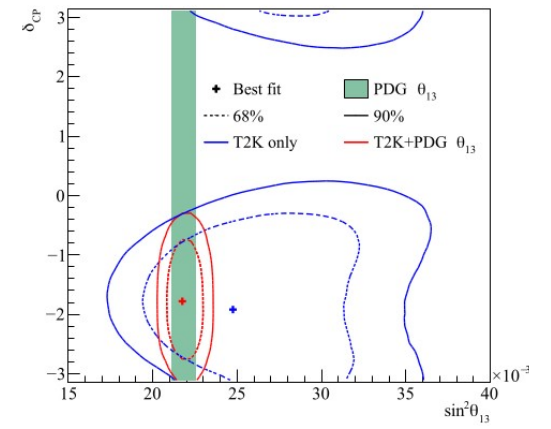


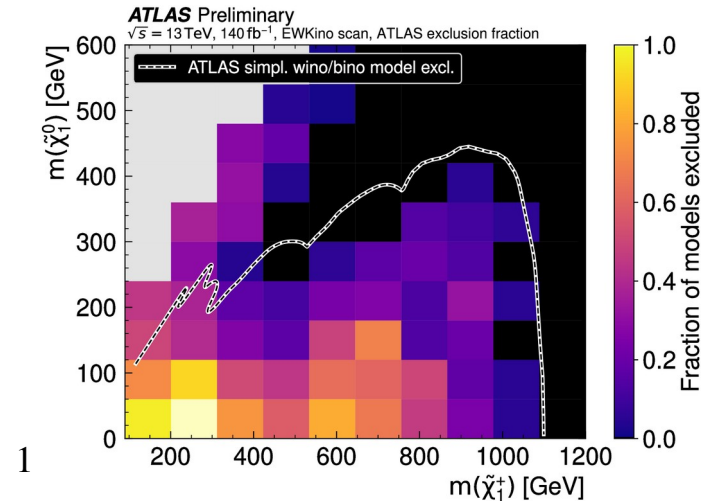
# Mise en perspective

Biennale du LPNHE 2024  
 (Lac du Chambon)

Pierre Astier



P. Astier



# Le modèle standard

## 3 générations de fermions

mass →	≈2.3 MeV/c <sup>2</sup>	≈1.275 GeV/c <sup>2</sup>	≈173.07 GeV/c <sup>2</sup>	0	≈126 GeV/c <sup>2</sup>
charge →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon	<b>H</b> Higgs boson
<b>QUARKS</b>	≈4.8 MeV/c <sup>2</sup>	≈95 MeV/c <sup>2</sup>	≈4.18 GeV/c <sup>2</sup>	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>γ</b> photon	
	0.511 MeV/c <sup>2</sup>	105.7 MeV/c <sup>2</sup>	1.777 GeV/c <sup>2</sup>	91.2 GeV/c <sup>2</sup>	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>Z</b> Z boson	
<b>LEPTONS</b>	<2.2 eV/c <sup>2</sup>	<0.17 MeV/c <sup>2</sup>	<15.5 MeV/c <sup>2</sup>	80.4 GeV/c <sup>2</sup>	
	0	0	0	±1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>W</b> W boson	
				<b>GAUGE BOSONS</b>	

## 4 interactions :

- interaction forte (quarks)
- interaction faible (tous)
- interaction électromagnétique (tous sauf neutrinos)
- gravitation (toute forme de masse/énergie)

+ le mécanisme de génération des masses (brisure de symétrie), et son boson scalaire associé.

Intensité des interactions et masses relèvent de l'expérimentation

# Le test du mécanisme de brisure électrofaible

Le mécanisme de brisure affecte de manière jointe masses et couplages :

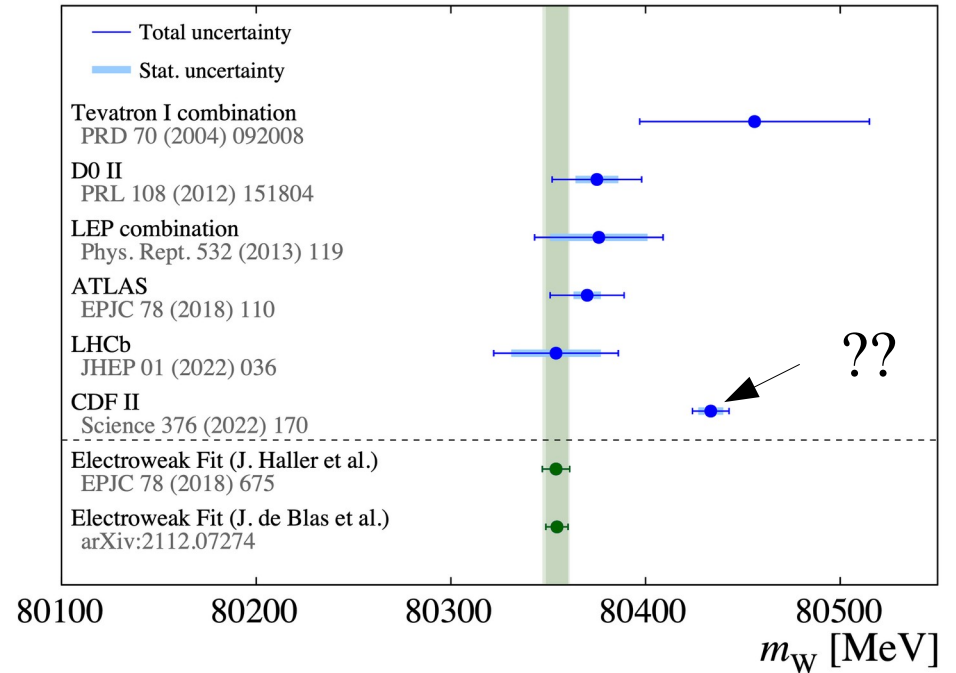
- Prendre l'ensemble des données électrofaibles connues :

$$- \sin^2\theta_W, M_Z (M_H, M_{\text{top}})$$

- Au premier ordre, on a :

$$M_W^2 = M_Z^2 (1 - \sin^2\theta_W)$$

- Qu'on peut comparer à  $M_W$  mesurée

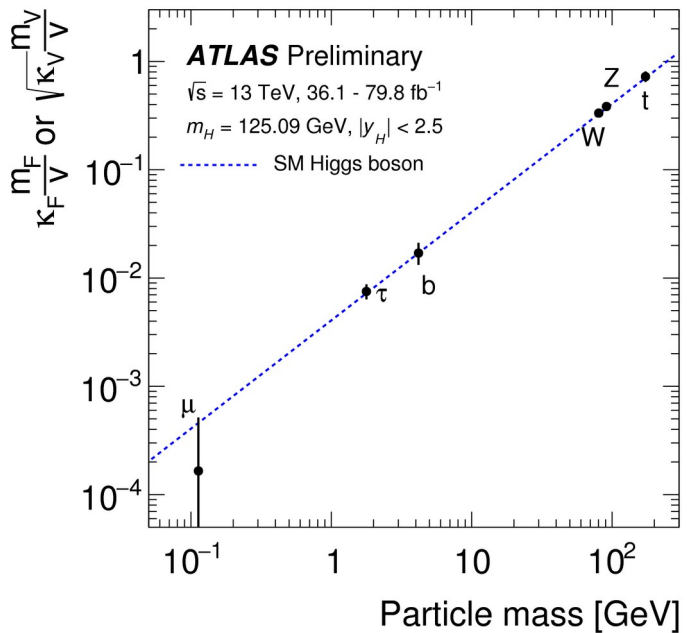


... échelle très dilatée...

# Le (Brout-Engler) Higgs : il existe et fait le job

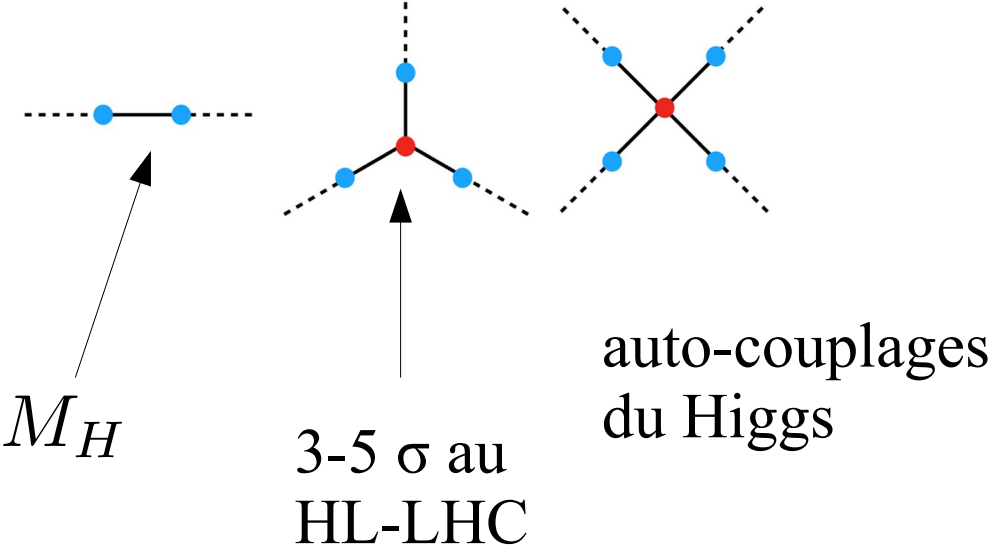
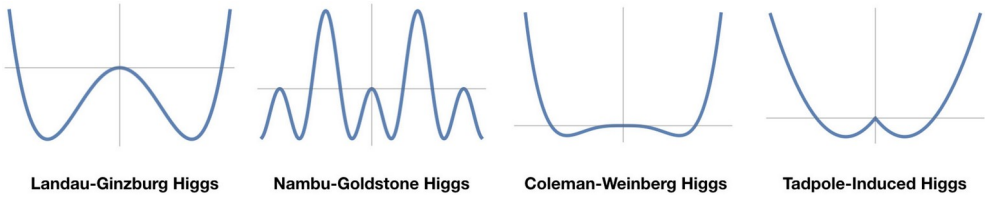
## Couplages vs masses

intensité de l'interaction avec le Higgs



Test du mécanisme de  
 génération des masses : OK  
 (mais pas de test  
 pour les masses des neutrinos)

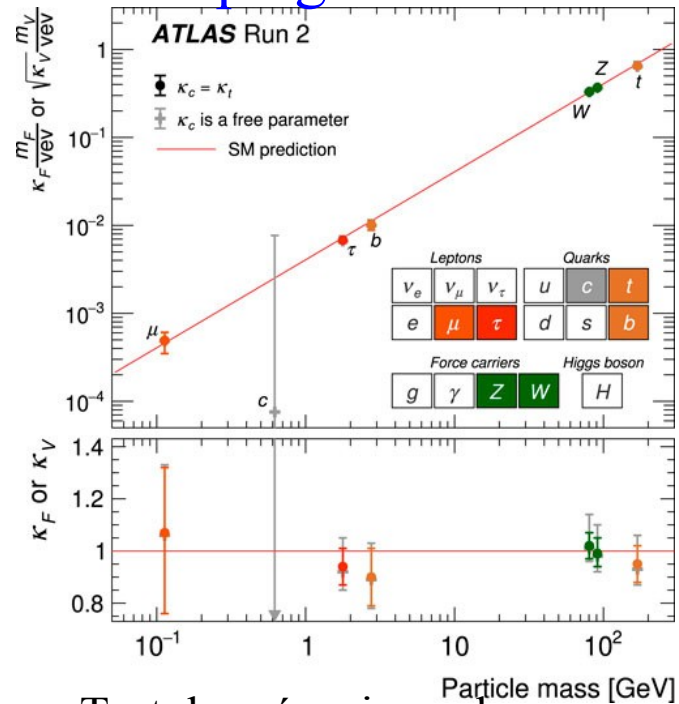
## La forme du potentiel



# Le (Brout-Engler) Higgs : il existe et fait le job

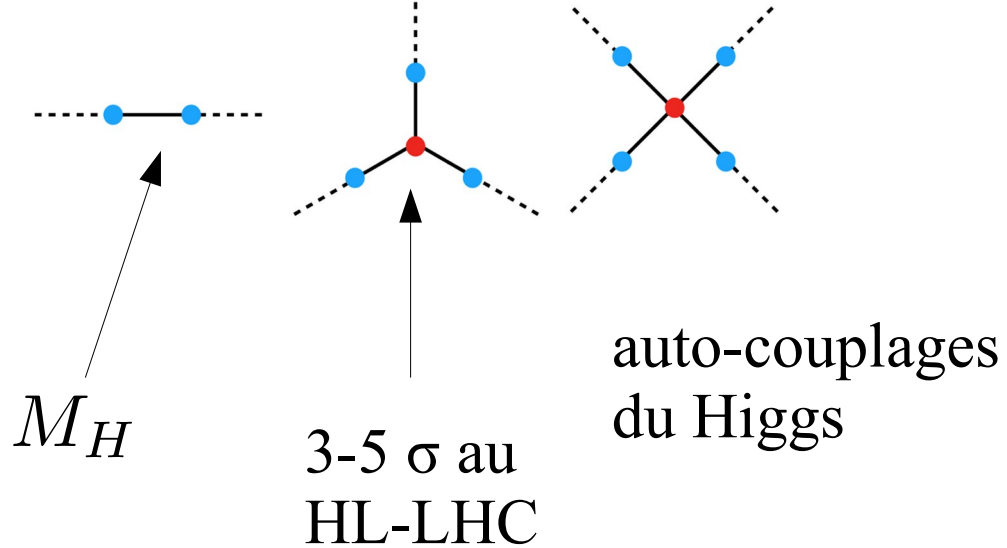
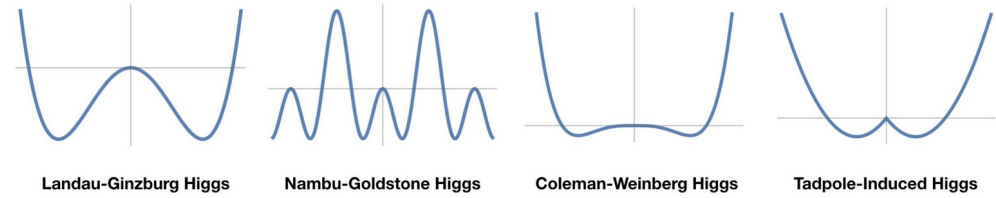
## Couplages vs masses

intensité de l'interaction avec le Higgs



Test du mécanisme de génération des masses : OK (mais pas de test pour les masses des neutrinos)

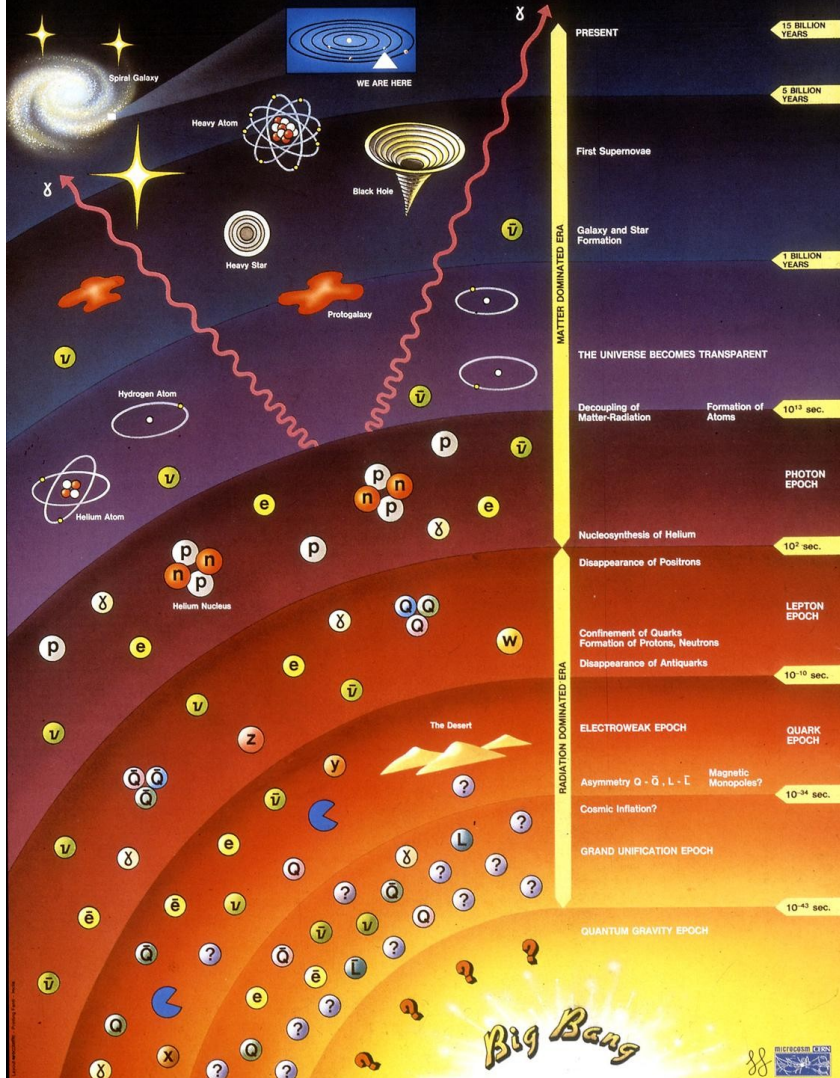
## La forme du potentiel



# Tout marche super bien sauf que :

- Pourquoi la masse du Higgs est-elle proche de celle des bosons W et Z ? Quel est le mécanisme qui limite les corrections (boucles) à cette masse ?
- Il y a 5 ordres de grandeurs entre la masse du Z et celle de l'électron, et  $\sim 7$  de plus pour la masse des neutrinos. Quelle est l'origine de cette dispersion ?
- On observe 3 familles de fermions avec des interactions similaires. Aucune symétrie ne justifie cela. Et pourquoi 3 ?
- Et il y a pire.....

# History of the Universe



# L'histoire de l'univers

Formation des grandes structures

Formation des premières étoiles

Émission du fond diffus : premiers atomes

Nucléosynthèse : noyaux d'Hélium, Deutérium, Lithium...

Formation des nucléons

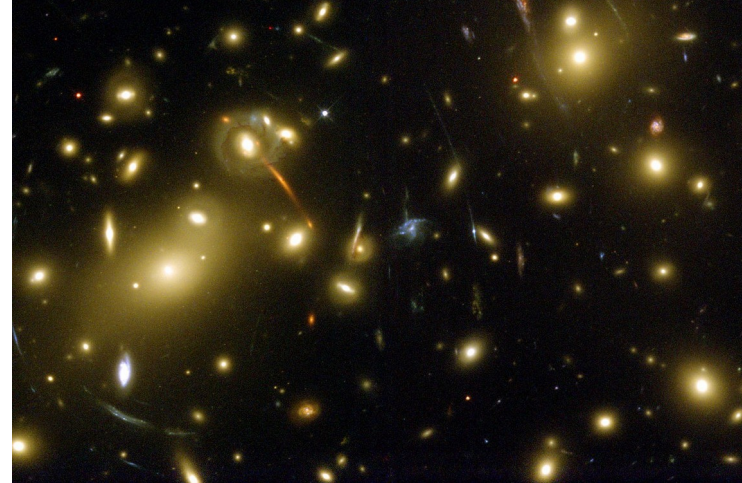
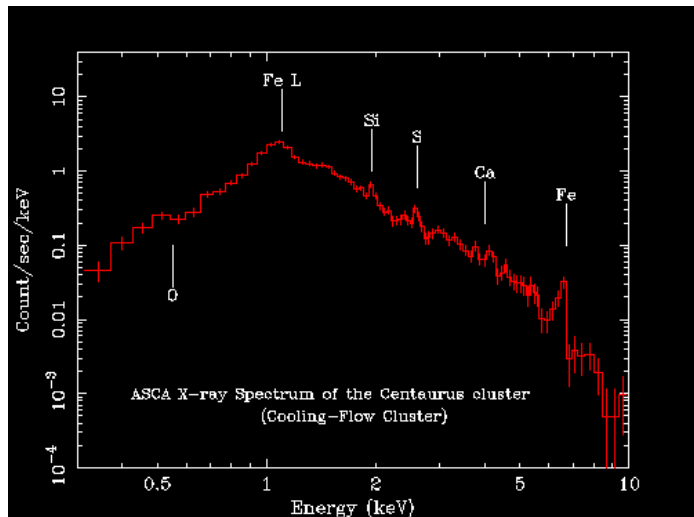
Période électrofaible

???

Inflation (?)

Big Bang

# Amas de galaxies



Spectre X  
d'un amas

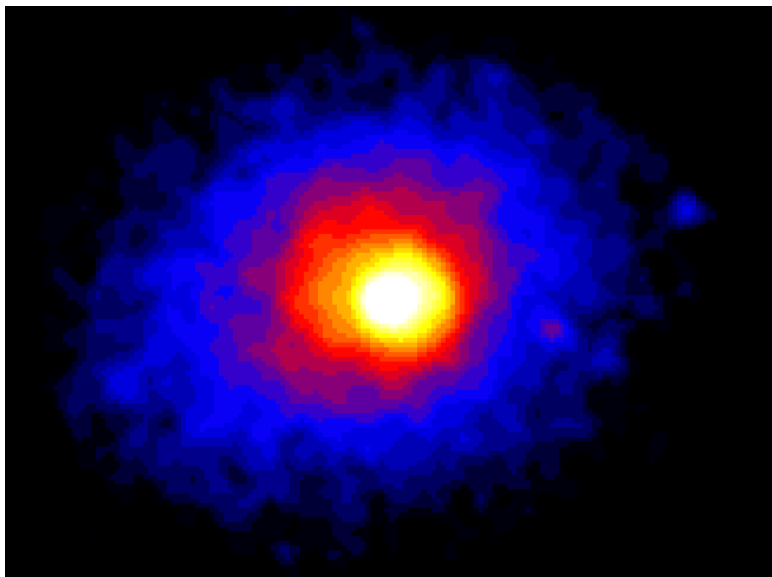
Température = énergie cinétique  
→ Profondeur du potentiel gravitationnel

Masse du gaz chaud

Incompatibles  
entre elles :  
facteur  $\sim 6$

Image X d'un amas  
de galaxies (Rosat)

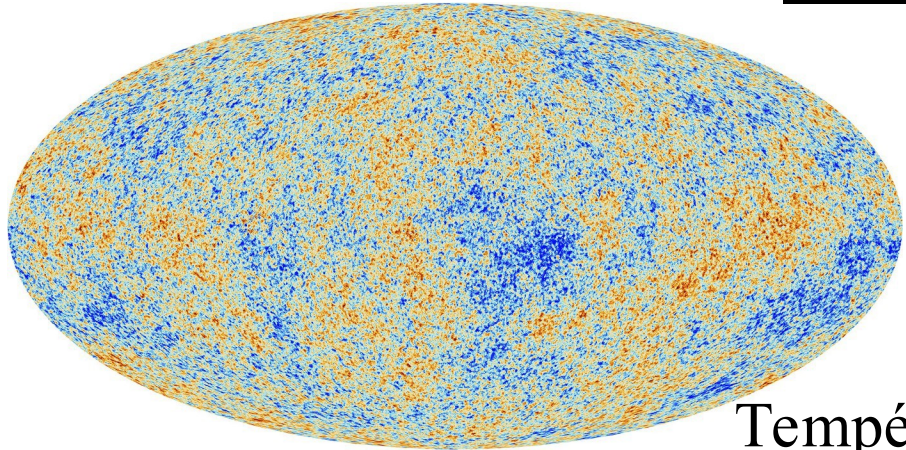
→ source de potentiel  
qui ne rayonne pas



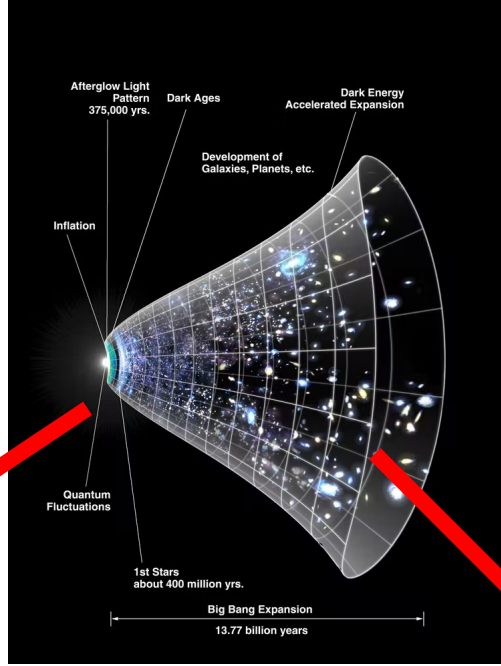


# Matière noire

$t = 380\,000$  ans,  
 $z=1081$ ,  $\delta T/T \sim 10^{-5}$



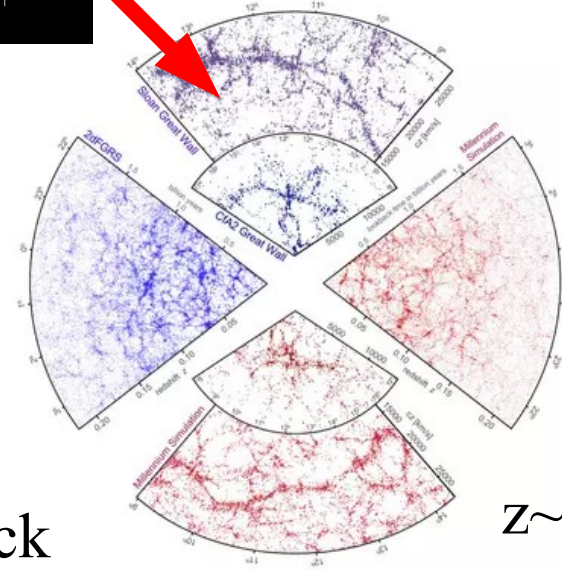
Température  
du CMB par Planck



On a :

$$\delta\rho/\rho \propto 1/(1+z)$$

Donc on devrait trouver  
aujourd'hui  $\delta\rho/\rho \sim 0.01$   
si le CMB/baryons  
représente les fluctuations  
de densité originales.



Galaxies  
du SDSS

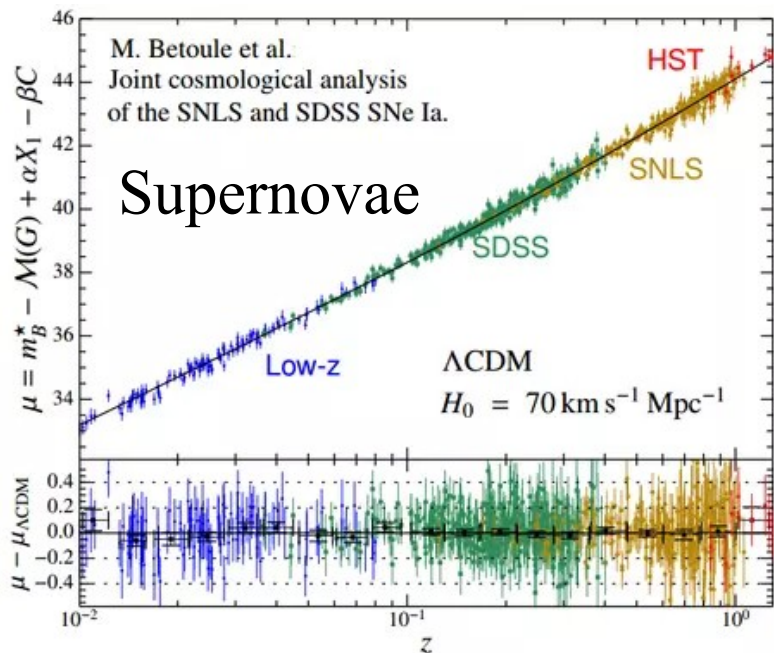
$z \sim 0, \delta\rho/\rho \sim 1$

# L'expansion (récente) de l'univers

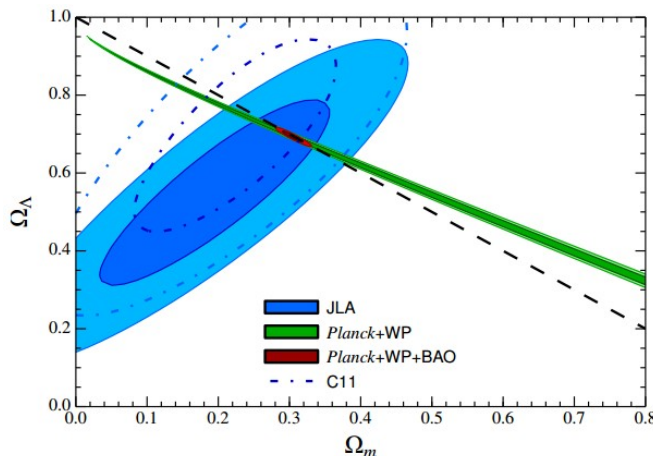
La relation distance-redshift encode l'évolution de la densité de l'univers

$$d(z) = c \int_0^z \frac{dz}{H(z)}$$

$$H(z)^2 = H_0^2 [(1+z)^3 \Omega_M + \Omega_\Lambda]$$



Energie noire

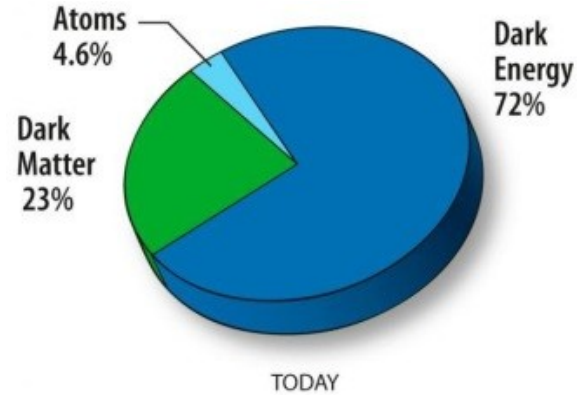


$\Lambda$ CDM

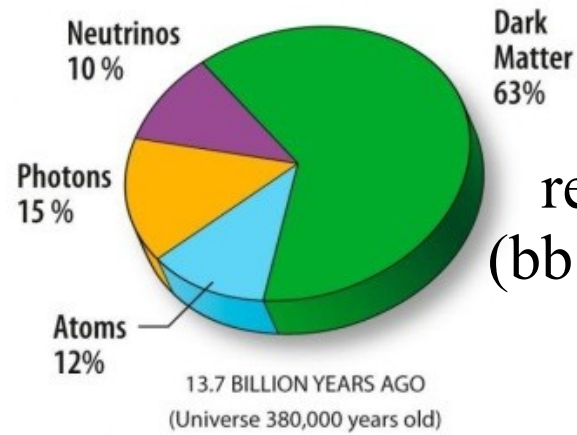
Matière (noire)

# Les deux infinis

mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
charge →	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon	<b>H</b> Higgs boson
<b>QUARKS</b>	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b><math>\gamma</math></b> photon	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	0	
	-1	-1	-1	0	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	<b>e</b> electron	<b><math>\mu</math></b> muon	<b><math>\tau</math></b> tau	<b>Z</b> Z boson	
<b>LEPTONS</b>	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	$\pm 1$	
	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
	<b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	<b>W</b> W boson	
				<b>GAUGE BOSONS</b>	



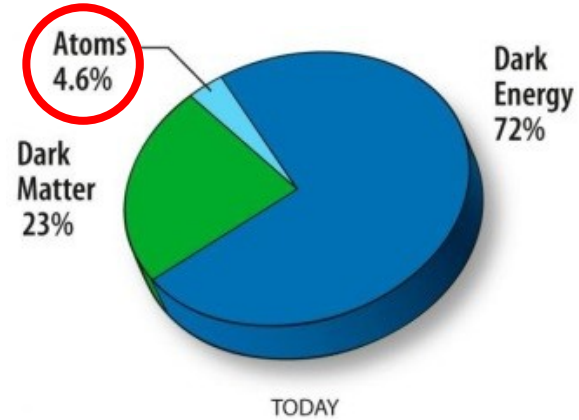
Aujourd'hui



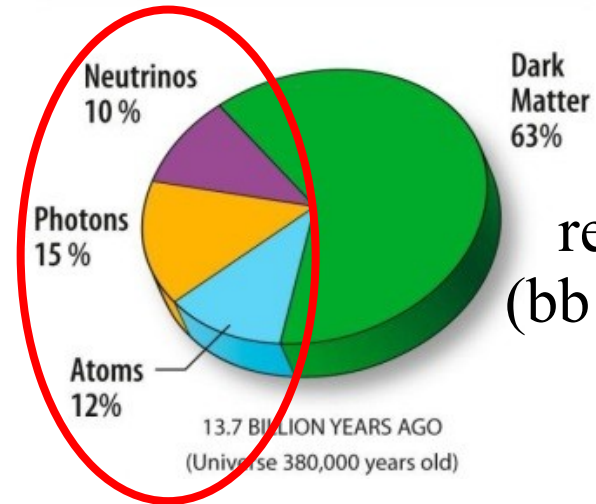
A la  
recombinaison  
(bb + 380 000 ans)

# Les deux infinis

mass →	≈2.3 MeV/c <sup>2</sup>	≈1.275 GeV/c <sup>2</sup>	≈173.07 GeV/c <sup>2</sup>	0	≈126 GeV/c <sup>2</sup>
charge →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon	<b>H</b> Higgs boson
<b>QUARKS</b>					
	≈4.8 MeV/c <sup>2</sup>	≈95 MeV/c <sup>2</sup>	≈4.18 GeV/c <sup>2</sup>	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>γ</b> photon	
<b>LEPTONS</b>					
	0.511 MeV/c <sup>2</sup>	105.7 MeV/c <sup>2</sup>	1.777 GeV/c <sup>2</sup>	91.2 GeV/c <sup>2</sup>	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>Z</b> Z boson	
	<2.2 eV/c <sup>2</sup>	<0.17 MeV/c <sup>2</sup>	<15.5 MeV/c <sup>2</sup>	80.4 GeV/c <sup>2</sup>	
	0	0	0	±1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>W</b> W boson	
					<b>GAUGE BOSONS</b>



Aujourd'hui

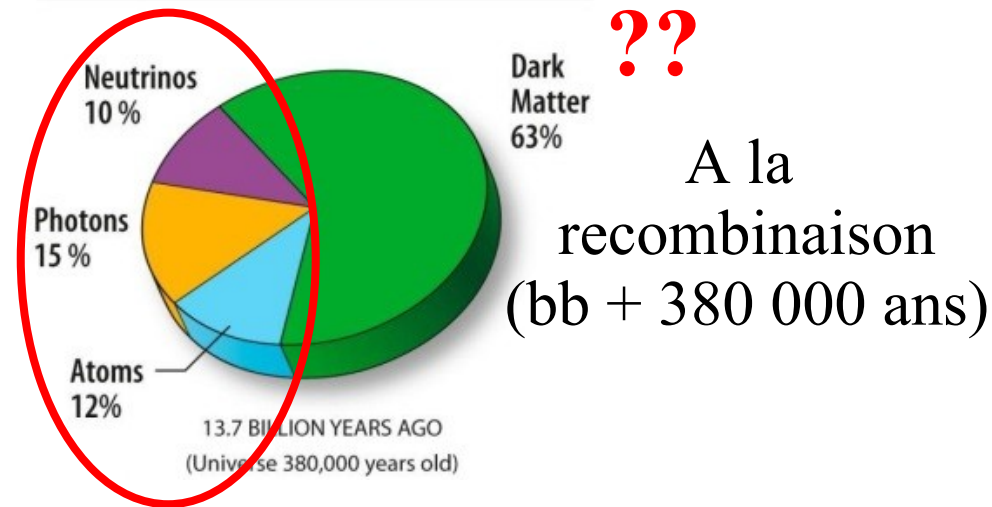
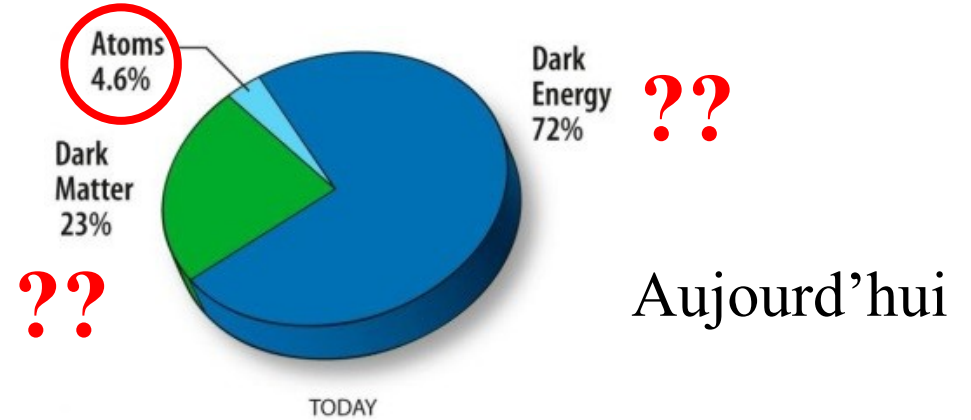


A la  
recombinaison  
(bb + 380 000 ans)

~~X~~ : instable

# Les deux infinis sont en froid

	mass → ≈2.3 MeV/c <sup>2</sup>	≈1.275 GeV/c <sup>2</sup>	≈173.07 GeV/c <sup>2</sup>	0	≈126 GeV/c <sup>2</sup>
charge →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
	<b>u</b> up	<del>c</del> charm	<del>t</del> top	<b>g</b> gluon	<del>H</del> Higgs boson
<b>QUARKS</b>	≈4.8 MeV/c <sup>2</sup>	≈95 MeV/c <sup>2</sup>	≈4.18 GeV/c <sup>2</sup>	0	
	<b>d</b> down	<del>s</del> strange	<del>b</del> bottom	<b>γ</b> photon	
	0.511 MeV/c <sup>2</sup>	105.7 MeV/c <sup>2</sup>	1.777 GeV/c <sup>2</sup>	91.2 GeV/c <sup>2</sup>	
	<b>e</b> electron	<del>μ</del> muon	<del>τ</del> tau	<del>Z</del> Z boson	
<b>LEPTONS</b>	<2.2 eV/c <sup>2</sup>	<0.17 MeV/c <sup>2</sup>	<15.5 MeV/c <sup>2</sup>	80.4 GeV/c <sup>2</sup>	
	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<del>W</del> W boson	<b>GAUGE BOSONS</b>



# Les machins noirs : matière et énergie noire.

- Deux composants essentiels à l'échelle cosmologique n'ont pas de contrepartie dans le monde microscopique du modèle standard.
- Ils représentent aujourd'hui  $\sim 95\%$  des « sources de gravitation ».
- Ce qui les distingue, c'est :
  - la matière noire se dilue avec l'expansion, l'énergie noire peu ou pas du tout,
  - La matière noire s'agrège (galaxies, amas, ...), l'énergie noire probablement pas.
- Éclaircir leur nature (!) prend des chemins différents.

# Quoi de neuf au labo ?

Ma sélection subjective :

- Universalité des interactions leptoniques
- Violation de CP (chez les neutrinos)
- De nouvelles limites pour la matière noire
- Nouvelles fraîcheurs de l'énergie noire (et autres)

# Trois générations de fermions

	1 <sup>st</sup> Generation	2 <sup>nd</sup> Generation	3 <sup>rd</sup> Generation
<b>QUARKS</b>			
mass	+2.3 MeV/c <sup>2</sup>	+1.275 GeV/c <sup>2</sup>	+173.07 GeV/c <sup>2</sup>
charge	2/3	2/3	2/3
spin	1/2	1/2	1/2
	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom
<b>LEPTONS</b>			
mass	0.511 MeV/c <sup>2</sup>	105.7 MeV/c <sup>2</sup>	1.777 GeV/c <sup>2</sup>
charge	-1	-1	-1
spin	1/2	1/2	1/2
	e electron	μ muon	τ tau
	ν <sub>e</sub> electron neutrino	ν <sub>μ</sub> muon neutrino	ν <sub>τ</sub> tau neutrino

- Pourquoi trois ? C'est comme ça.
- On a bien cherché partout une quatrième génération, sans succès.
  - 3 +/- 0.01 neutrinos au LEP, 3 +/- 0.17 neutrinos (relativistes) à la recombinaison.
  - la cosmologie autorise les neutrinos massifs (stériles à cause du LEP), comme constituants de la matière noire.
- Universalité leptonique : on observe que seule leur masse distingue les interactions des leptons....
- ... ou presque

Constat, pas une symétrie du modèle

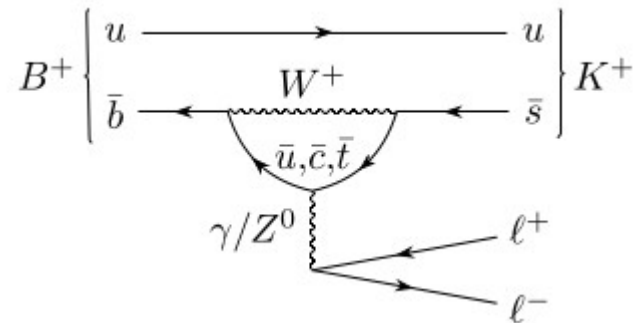
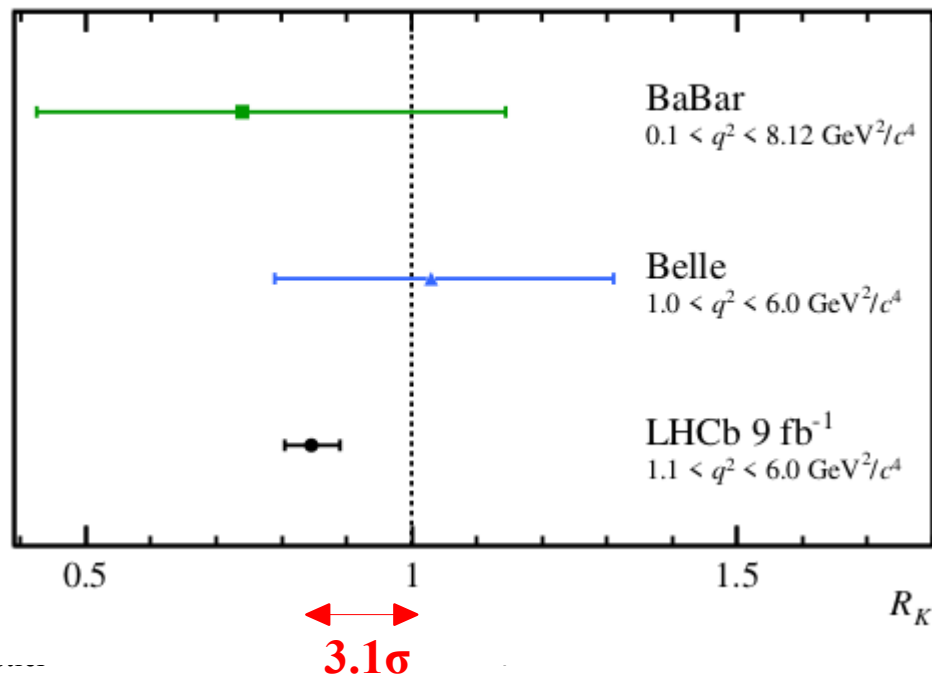


# Universalité leptonique en question (LHCb, 2021)

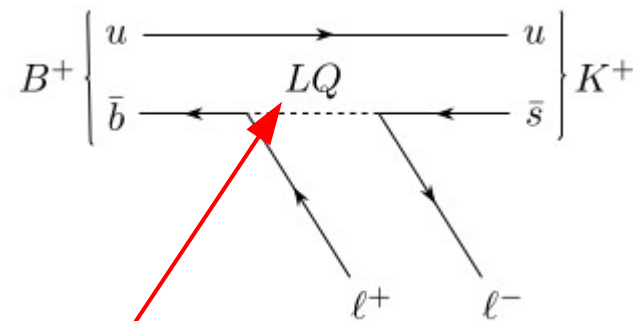
2103.11769

$$R_K = \frac{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-)}{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow J/\psi(\rightarrow \mu^+ \mu^-) K^+)} \bigg/ \frac{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ e^+ e^-)}{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow J/\psi(\rightarrow e^+ e^-) K^+)}$$

MS



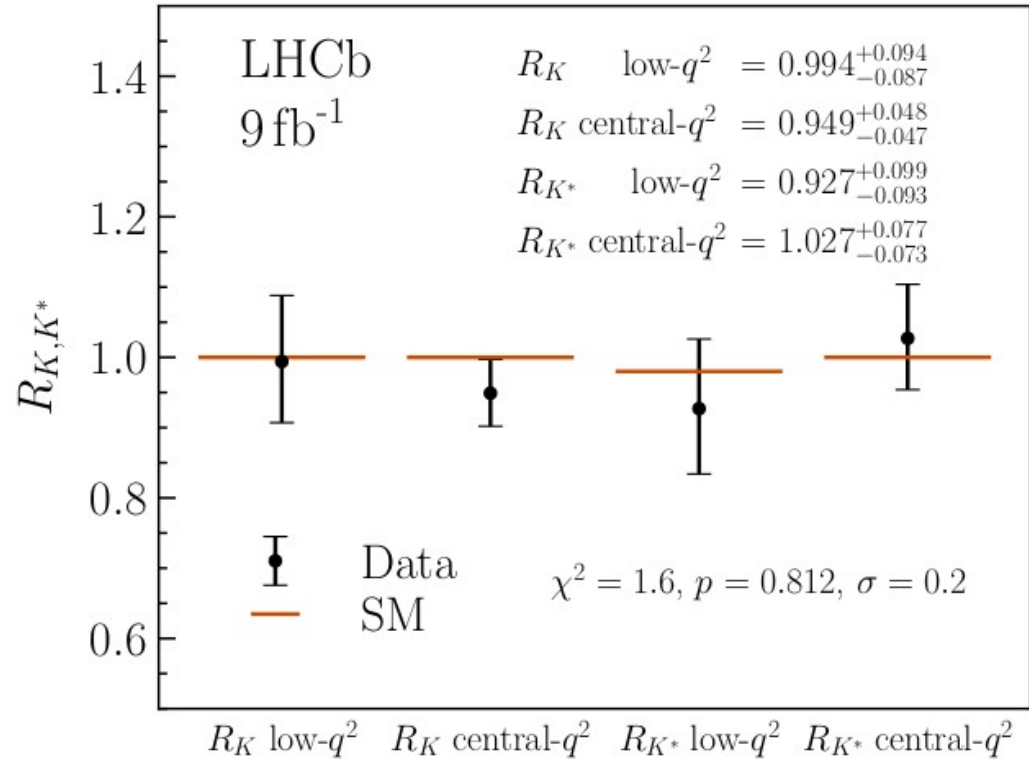
???



Absent du MS

# Nouvelle analyse $B \rightarrow K \ell^+ \ell^-$ ( $\ell = e$ ou $\mu$ )

- Plus de statistique
- Modes K chargés et neutres (compatibles)
- Coupures identification électrons plus strictes
- .... L'universalité est revenue
- Analyses similaires pour des D et des K.



# La violation de CP

# Asymétrie matière-antimatière

- Pourquoi l'univers ne contient-il (presque) plus d'antimatière ?
- L'antimatière se comporte-t-elle comme la matière ?

**Standard Model of Elementary Particles**

		three generations of matter (elementary fermions)			three generations of antimatter (elementary antifermions)			interactions / force carriers (elementary bosons)	
		I	II	III	I	II	III		
mass		$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$		$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
charge		$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	0	0
spin		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	0
	<b>QUARKS</b>	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>ū</b> antiup	<b>c̄</b> anticharm	<b>t̄</b> antitop	<b>g</b> gluon	<b>H</b> higgs
		$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
		$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	0	
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>d̄</b> antidown	<b>s̄</b> antistrange	<b>b̄</b> antibottom	<b>γ</b> photon	
		$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
		-1	-1	-1	1	1	1	0	
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>e<sup>+</sup></b> positron	<b>μ̄</b> antimuon	<b>τ̄</b> antitau	<b>Z</b> Z <sup>0</sup> boson	
	<b>LEPTONS</b>	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.360 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 80.360 \text{ GeV}/c^2$
		0	0	0	0	0	0	1	-1
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	1
		<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>ν̄<sub>e</sub></b> electron antineutrino	<b>ν̄<sub>μ</sub></b> muon antineutrino	<b>ν̄<sub>τ</sub></b> tau antineutrino	<b>W<sup>+</sup></b> W <sup>+</sup> boson	<b>W<sup>-</sup></b> W <sup>-</sup> boson

# La violation de CP

# Asymétrie matière-antimatière

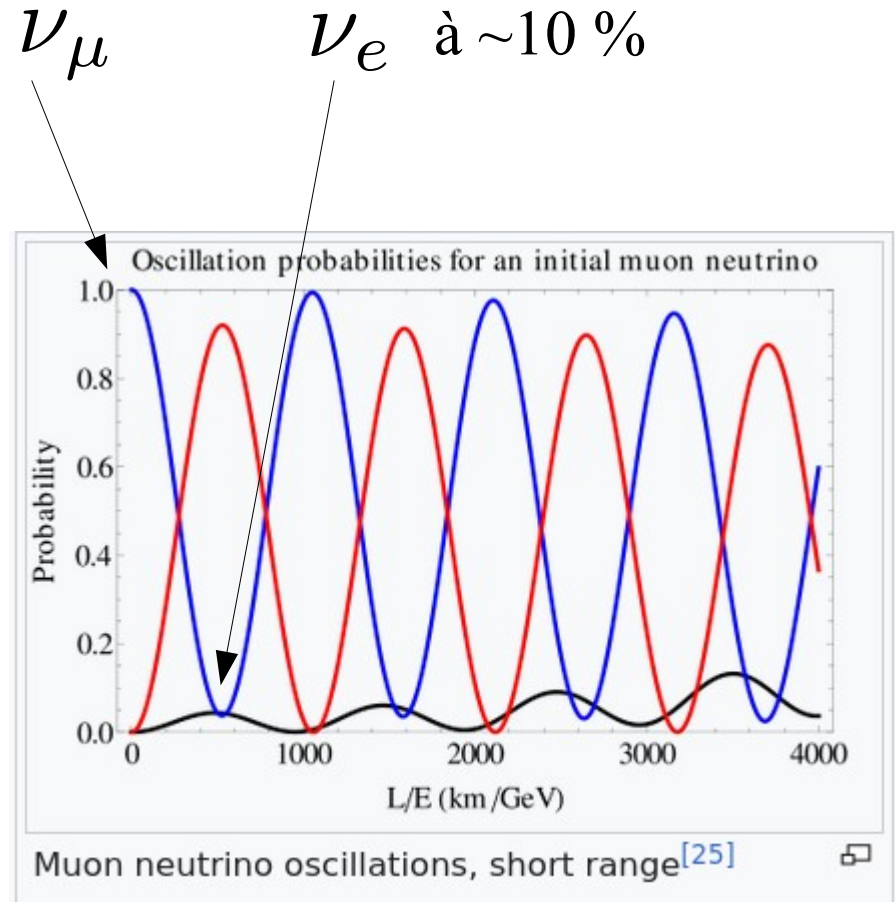
- Pourquoi l'univers ne contient-il (presque) plus d'antimatière ?
- L'antimatière se comporte-t-elle comme la matière ?
- Presque mais non, en fait
- Mais combien ?

**Standard Model of Elementary Particles**

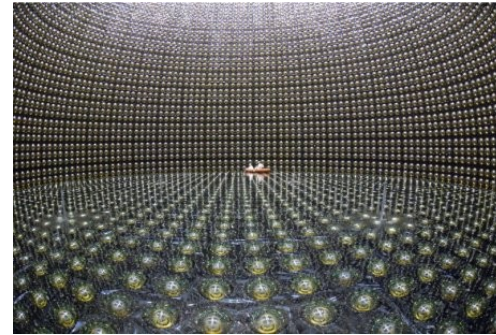
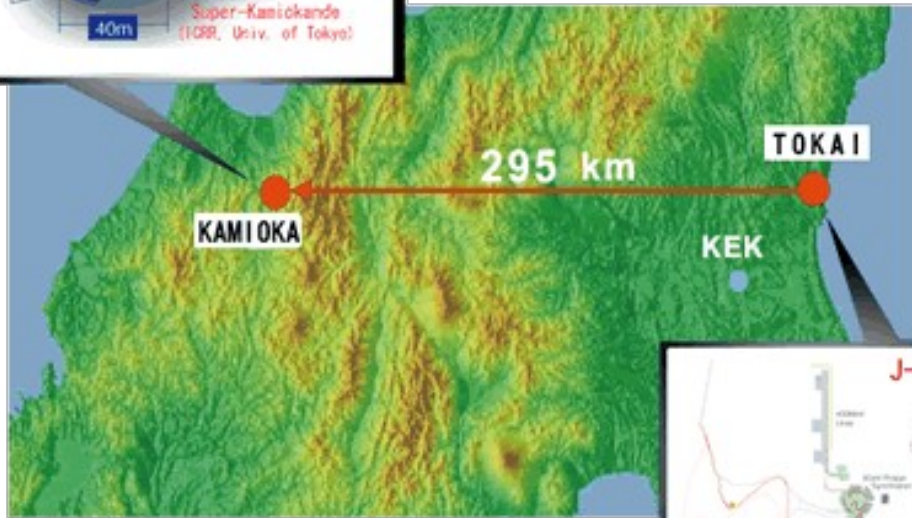
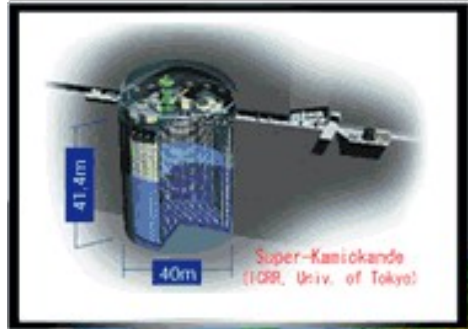
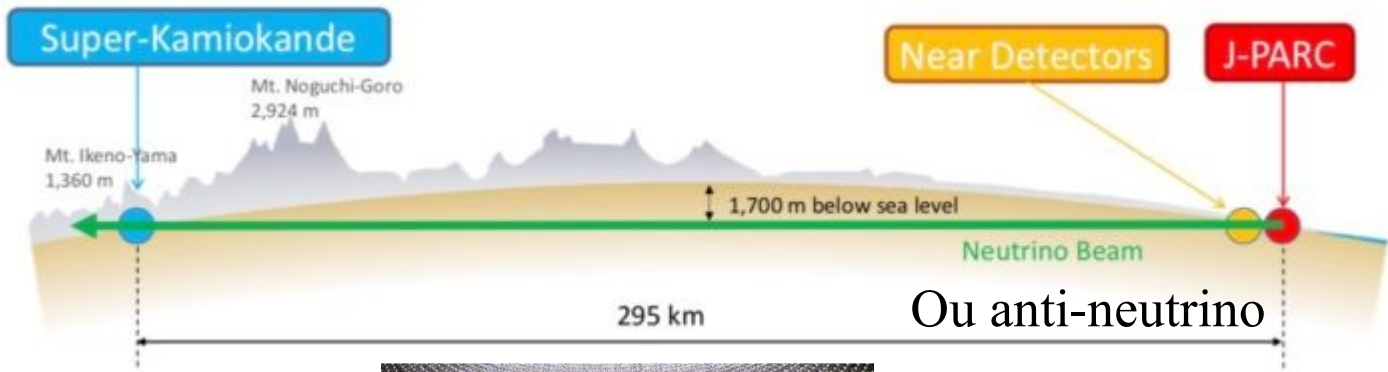
		three generations of matter (elementary fermions)			three generations of antimatter (elementary antifermions)			interactions / force carriers (elementary bosons)	
		I	II	III	I	II	III		
mass		$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
charge		$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{2}{3}$	0	0
spin		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
	<b>QUARKS</b>	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>ū</b> antiup	<b>c̄</b> anticharm	<b>t̄</b> antitop	<b>g</b> gluon	<b>H</b> higgs
		$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
		$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	0	
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>d̄</b> antidown	<b>s̄</b> antistrange	<b>b̄</b> antibottom	<b>γ</b> photon	
		$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
		-1	-1	-1	1	1	1	0	
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>e<sup>+</sup></b> positron	<b>μ̄</b> antimuon	<b>τ̄</b> antitau	<b>Z</b> Z <sup>0</sup> boson	
	<b>LEPTONS</b>	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.360 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 80.360 \text{ GeV}/c^2$
		0	0	0	0	0	0	1	-1
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	1
		<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>ν̄<sub>e</sub></b> electron antineutrino	<b>ν̄<sub>μ</sub></b> muon antineutrino	<b>ν̄<sub>τ</sub></b> tau antineutrino	<b>W<sup>+</sup></b> W <sup>+</sup> boson	<b>W<sup>-</sup></b> W <sup>-</sup> boson

# Oscillations de neutrinos

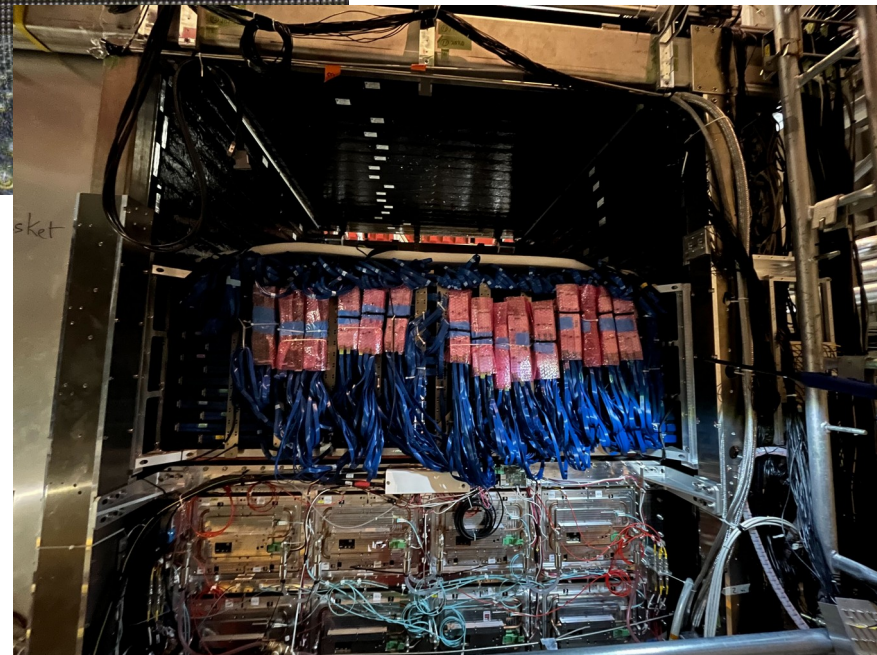
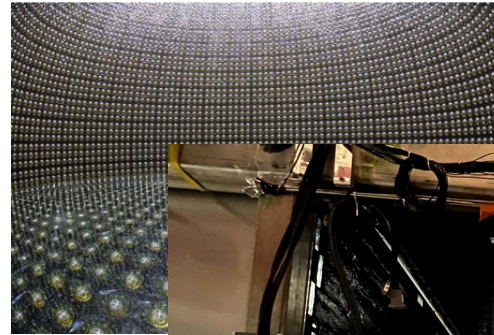
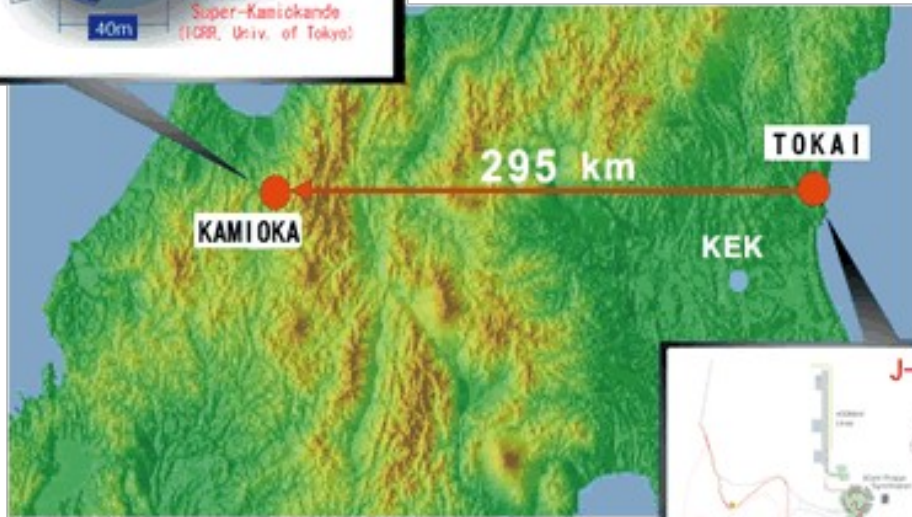
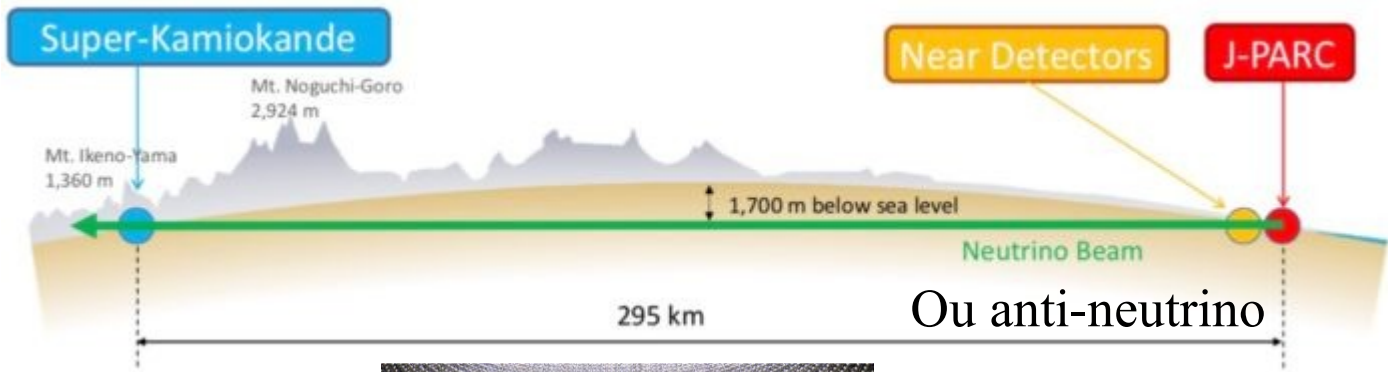
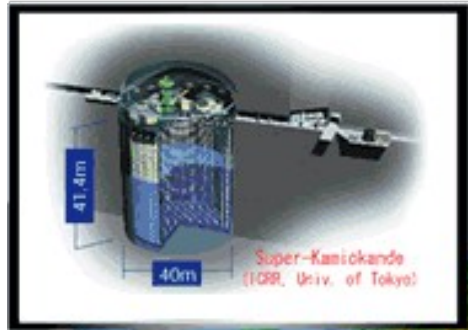
- Les (anti)-neutrinos existent en 3 saveurs
- Les neutrinos qui se propagent et ceux qui interagissent ne sont pas les mêmes..... cela donne lieu aux oscillations de neutrinos
- (S'ils ont différentes masses )



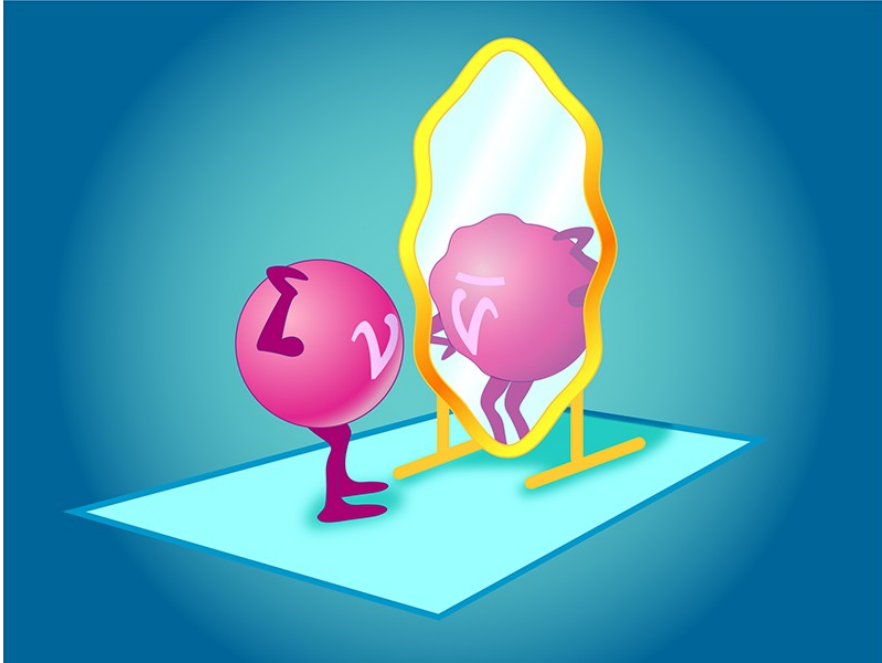
# T2K



# T2K



# Violation de CP chez les neutrinos

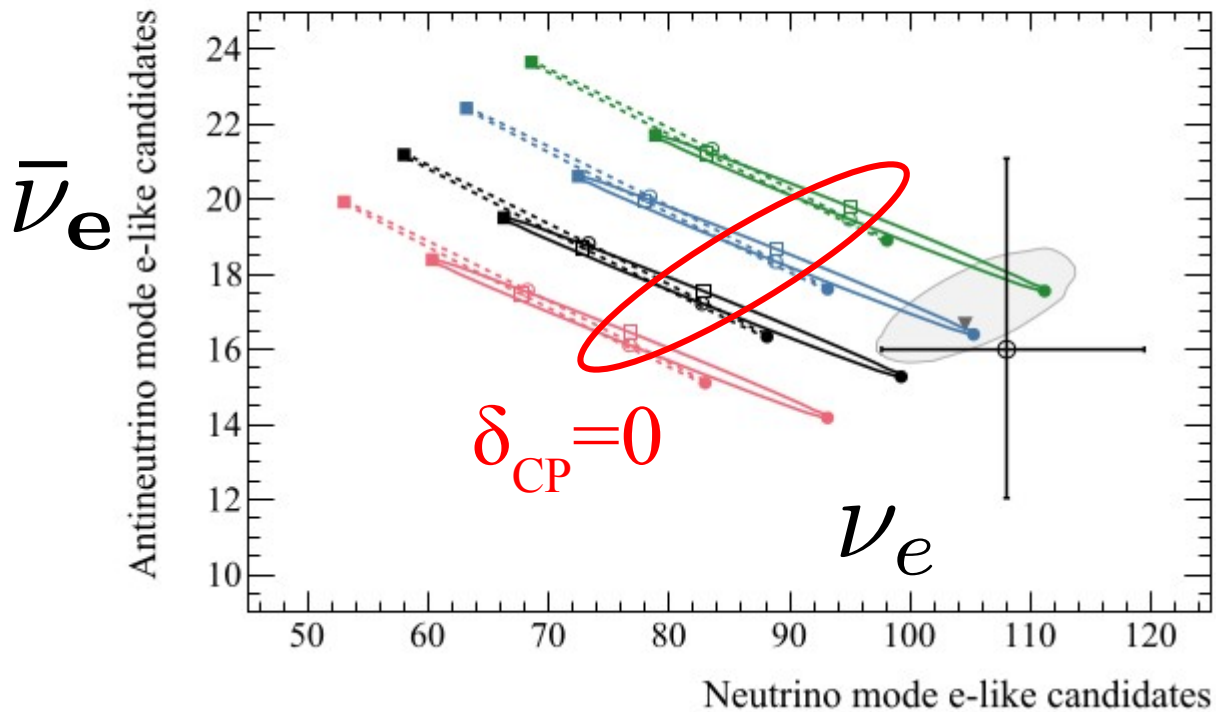
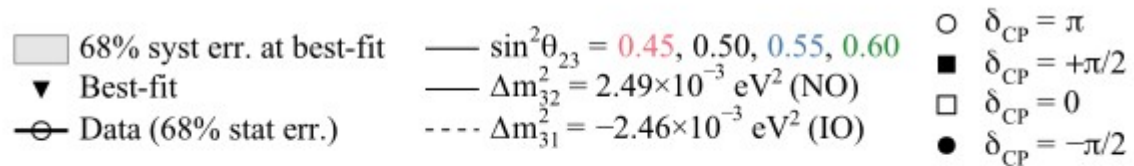


- On sait presque tout des oscillations : différences de masse et angles de mélange.
- Mais on ne sait pas (encore pour sûr) si les neutrinos et antineutrinos oscillent de la même manière

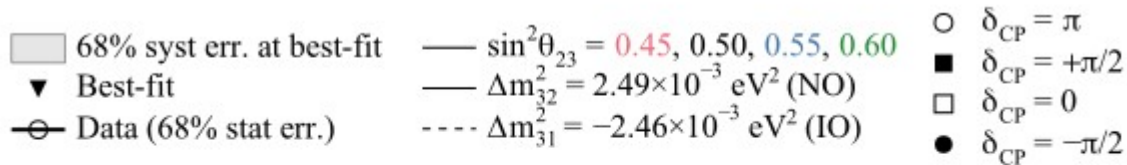
$$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e \quad ?? \quad \bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e$$

- T2K mesure les deux et les compare.

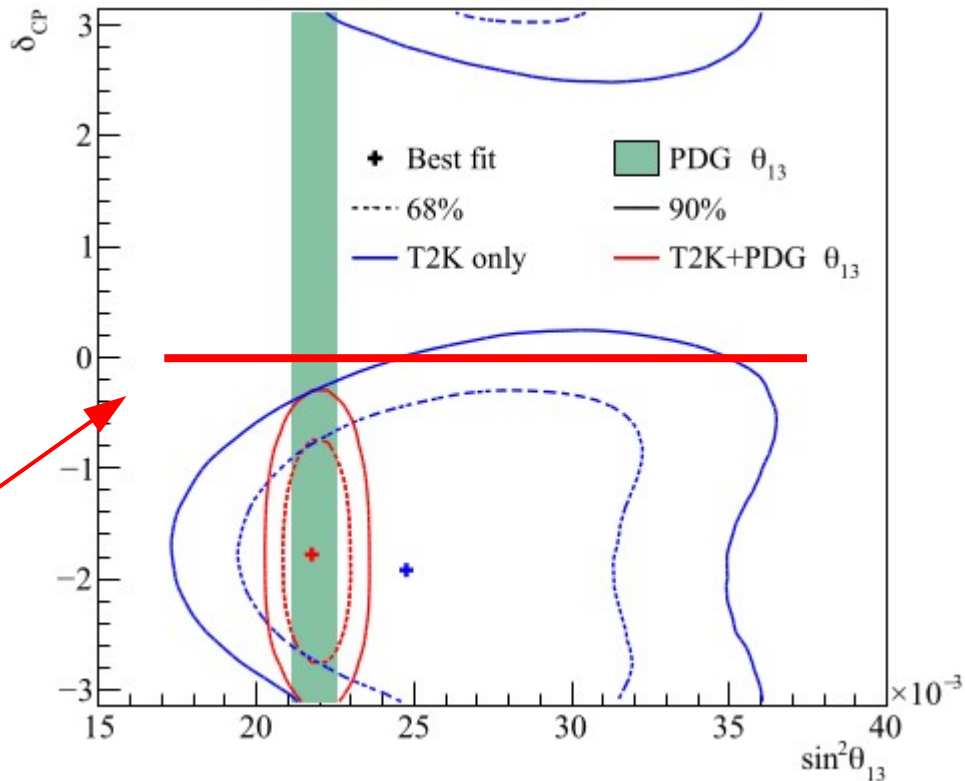
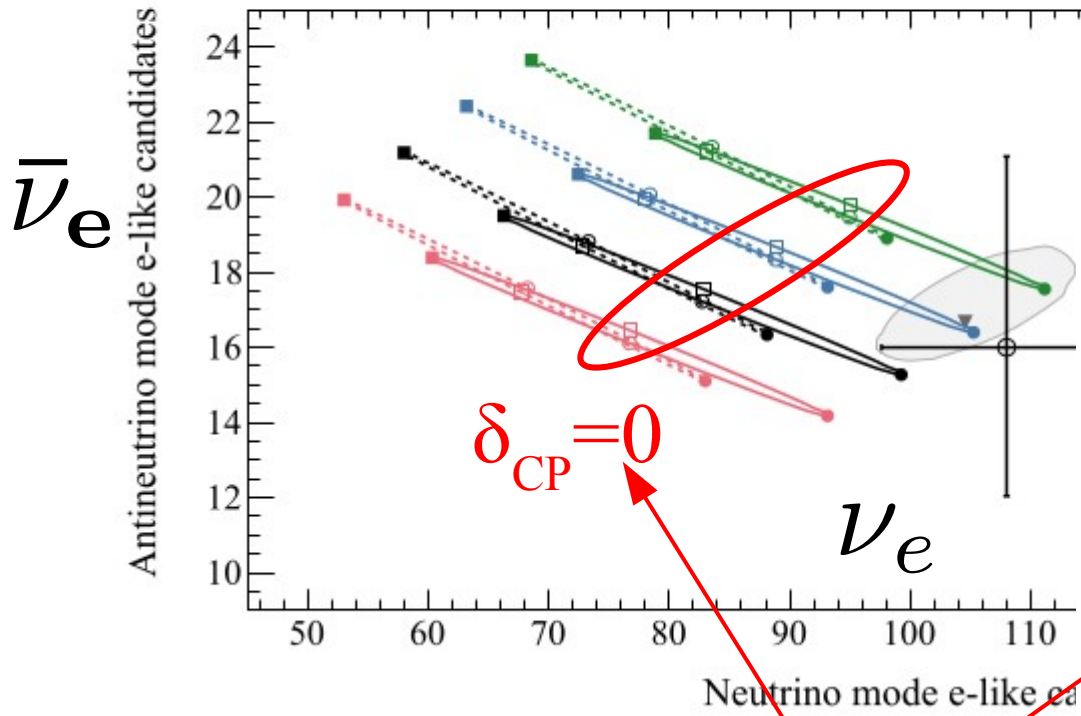




2303.03222



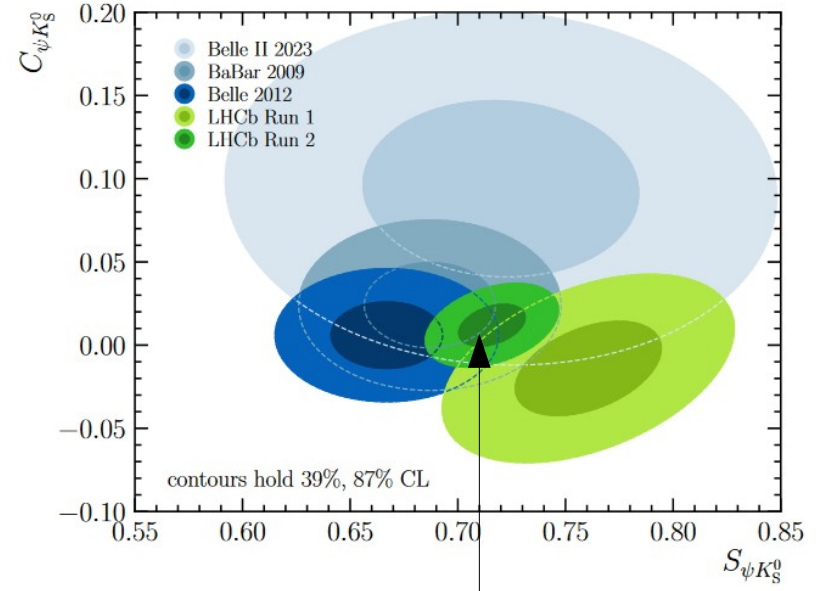
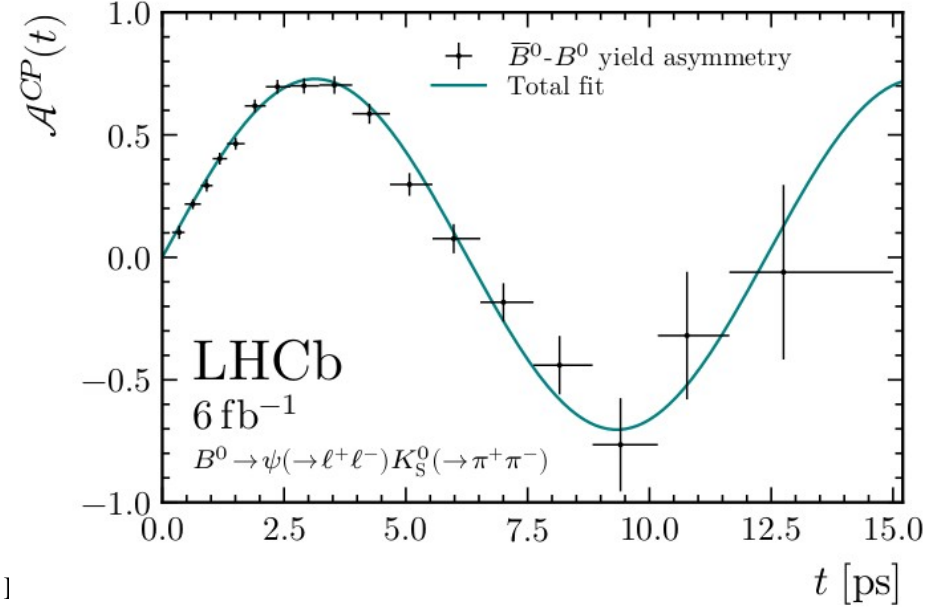
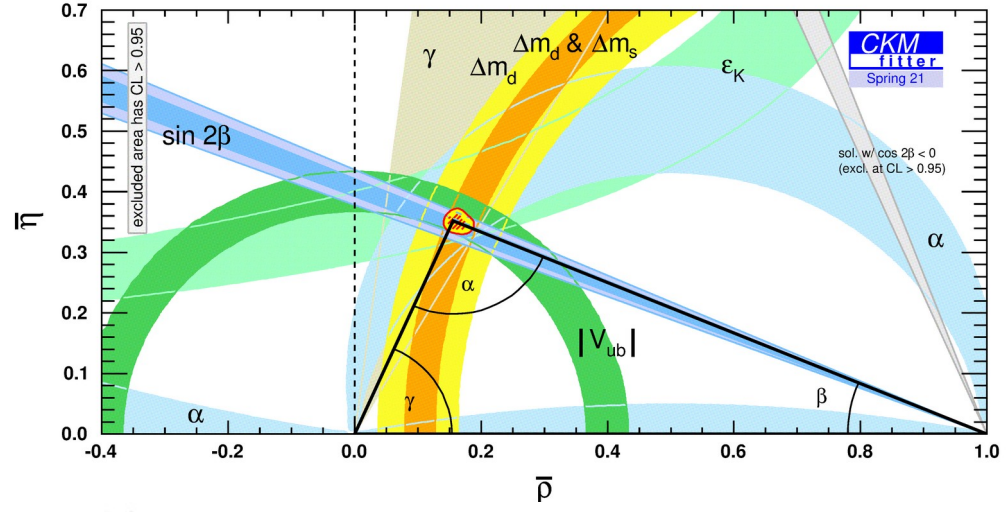
Mieux mesuré par les réacteurs



2303.03222

Si neutrinos et antineutrinos oscillent identiquement

# LHCb violation de CP



2309.09728

« La mesure aujourd'hui la plus précise »

# Chercher la matière noire

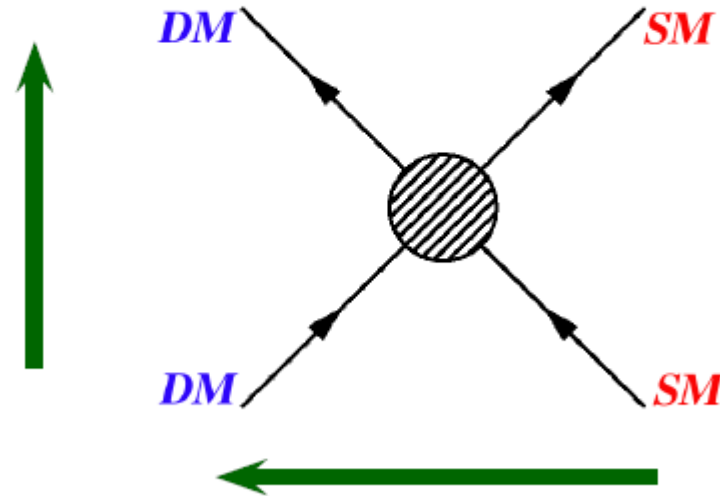
Recherche d'interaction non gravitationnelle de particules de matière noire

Xenon  
DarkSide  
Damic-M

Détection directe

Détection indirecte

HESS/CTA



Production au collisionneur

Atlas/LHCb

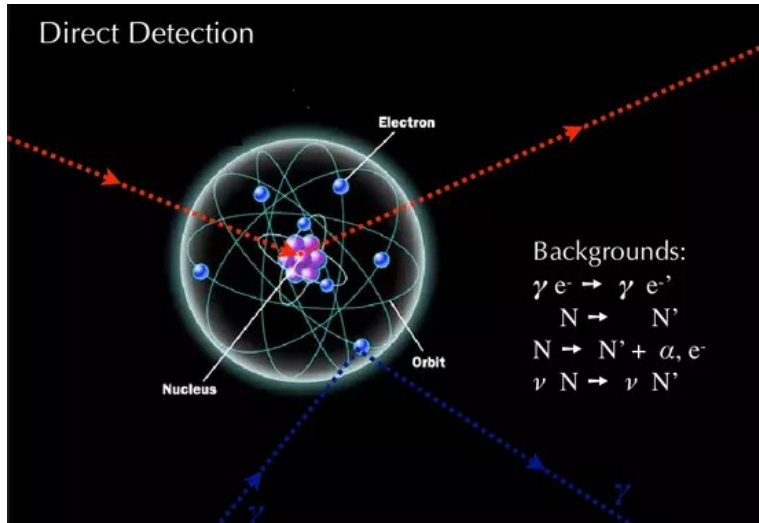
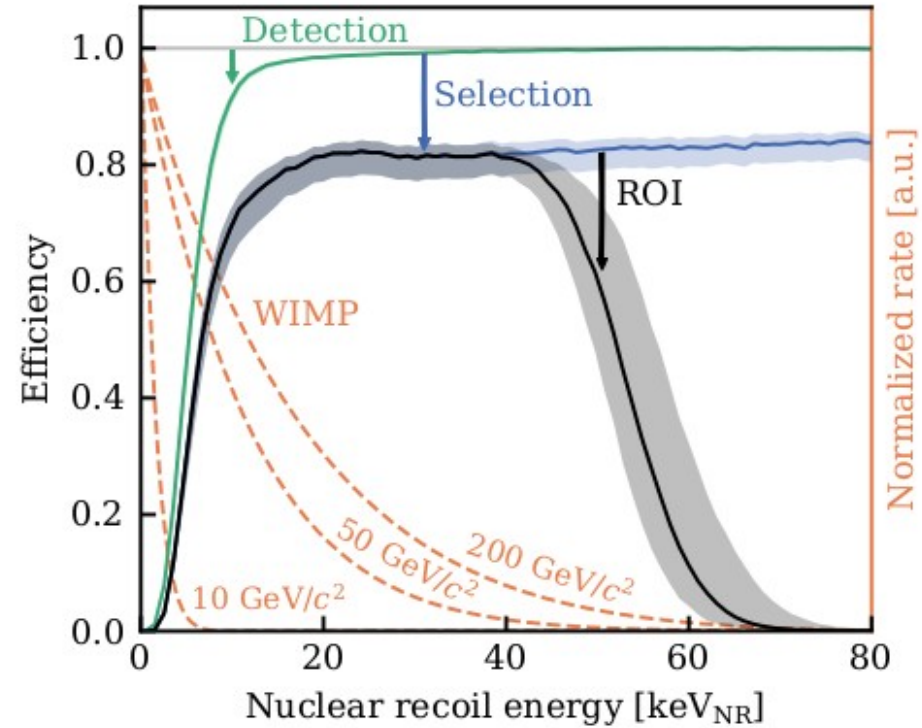
# Recherches directes de matière noire

XENONnT

Xenon  
DarkSide  
Damic

Facteurs de mérite :

- seuil de détection
- bruit de fond
- masse cible



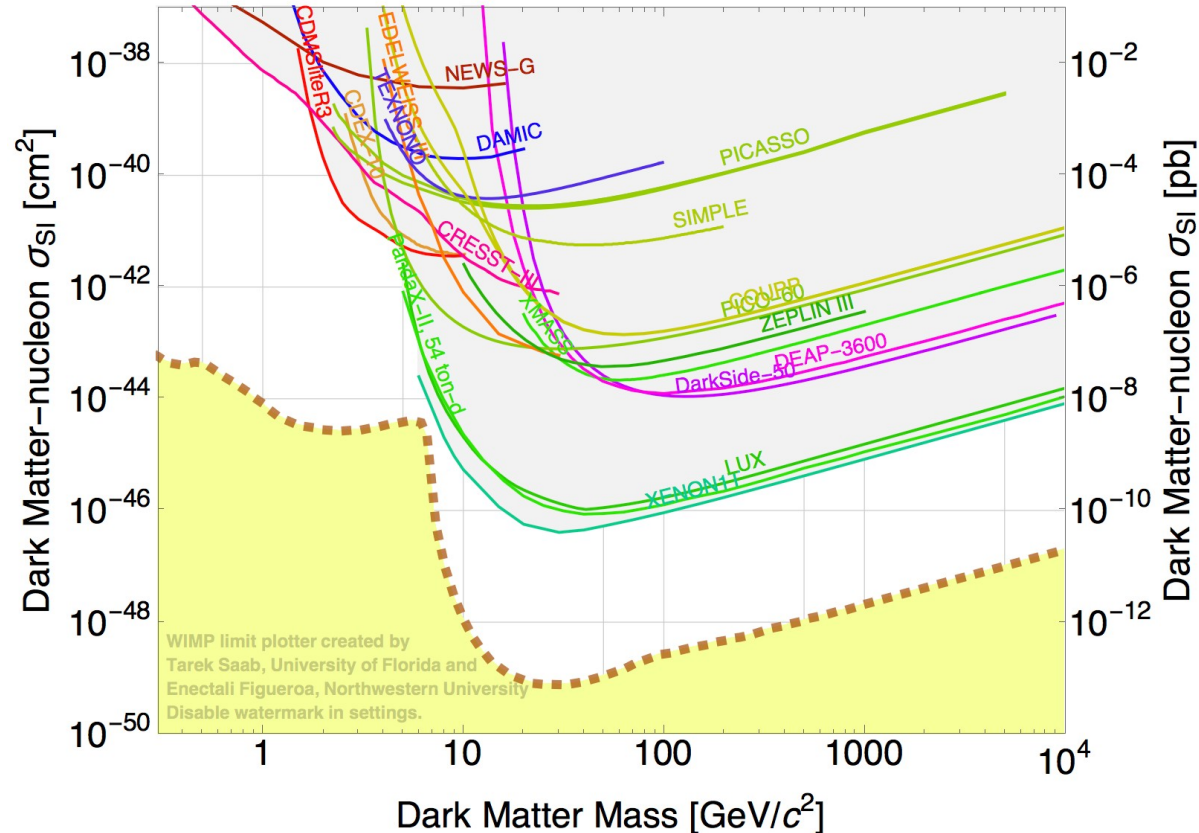
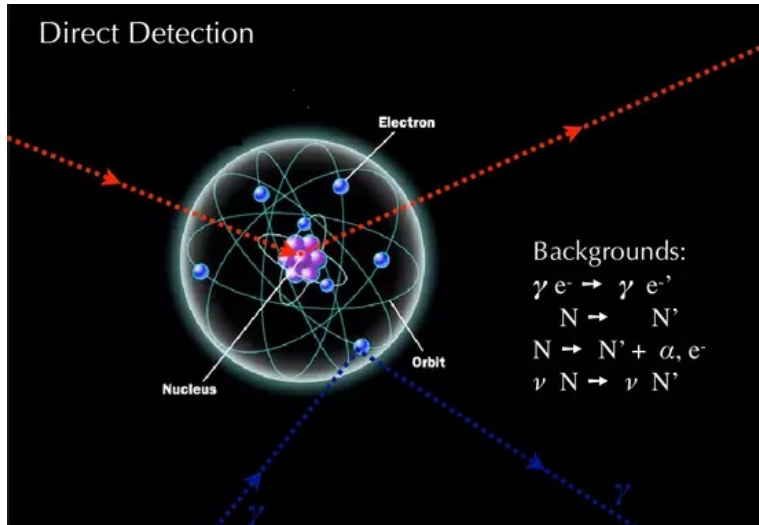
Le signal attendu est toujours  
au ras du seuil.

# Recherches directes de matière noire

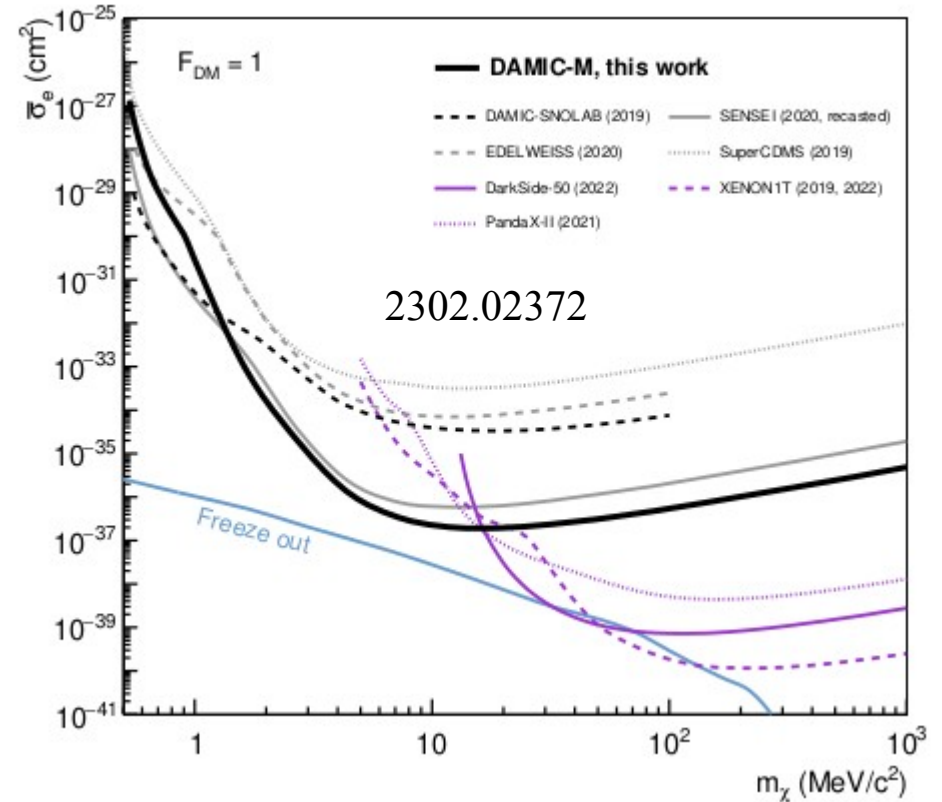
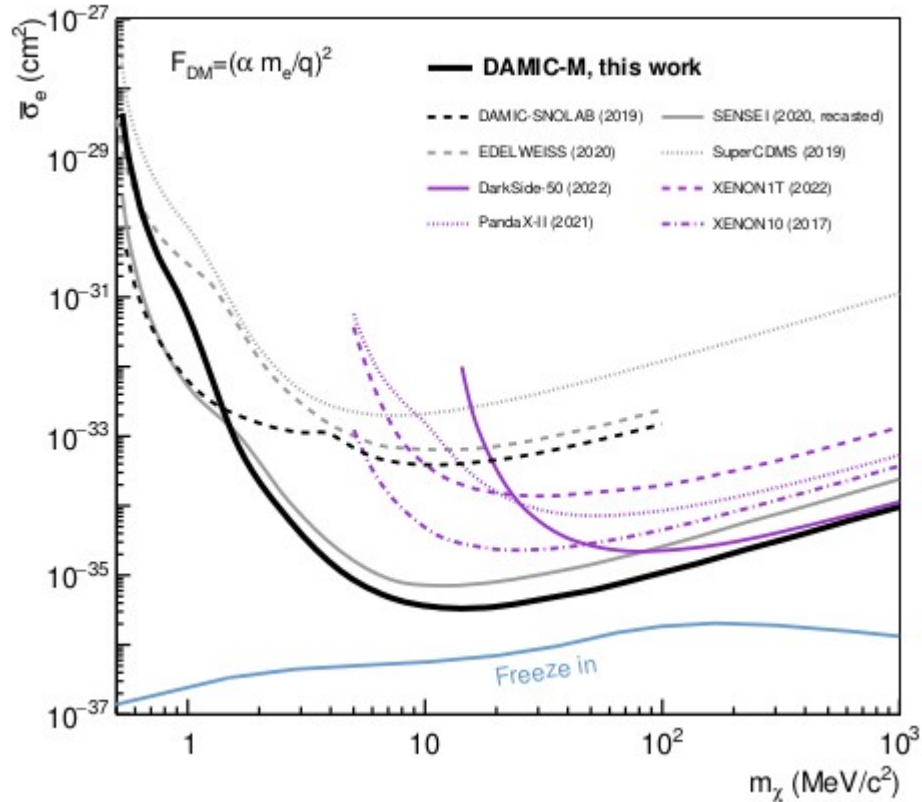
Facteurs de mérite :

- seuil de détection
- bruit de fond
- masse cible

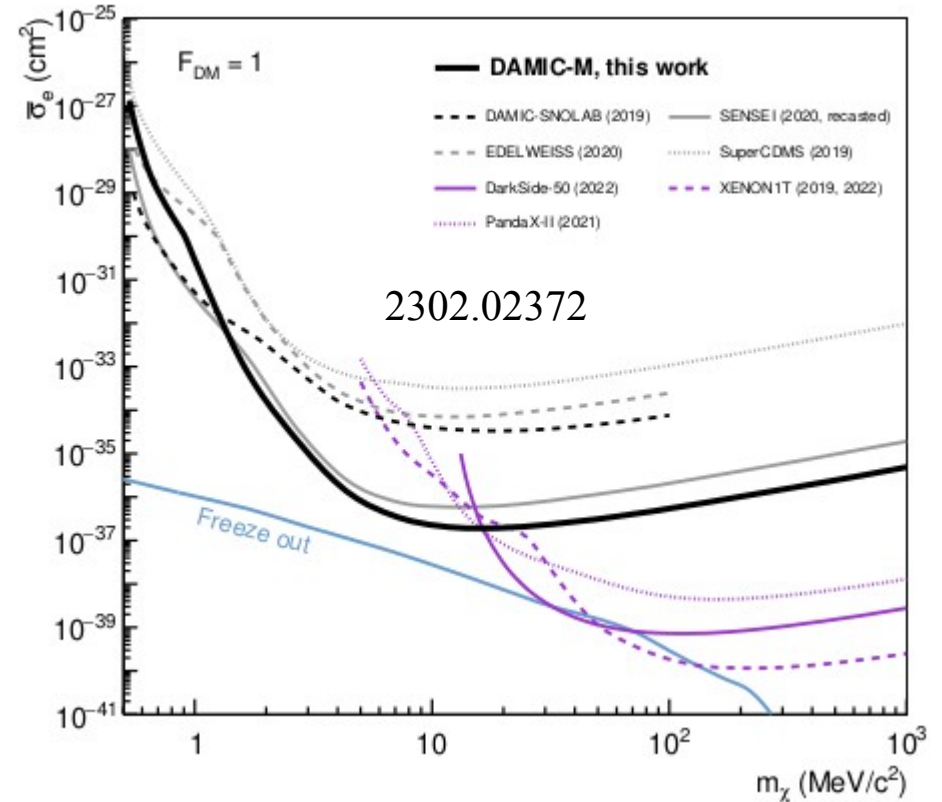
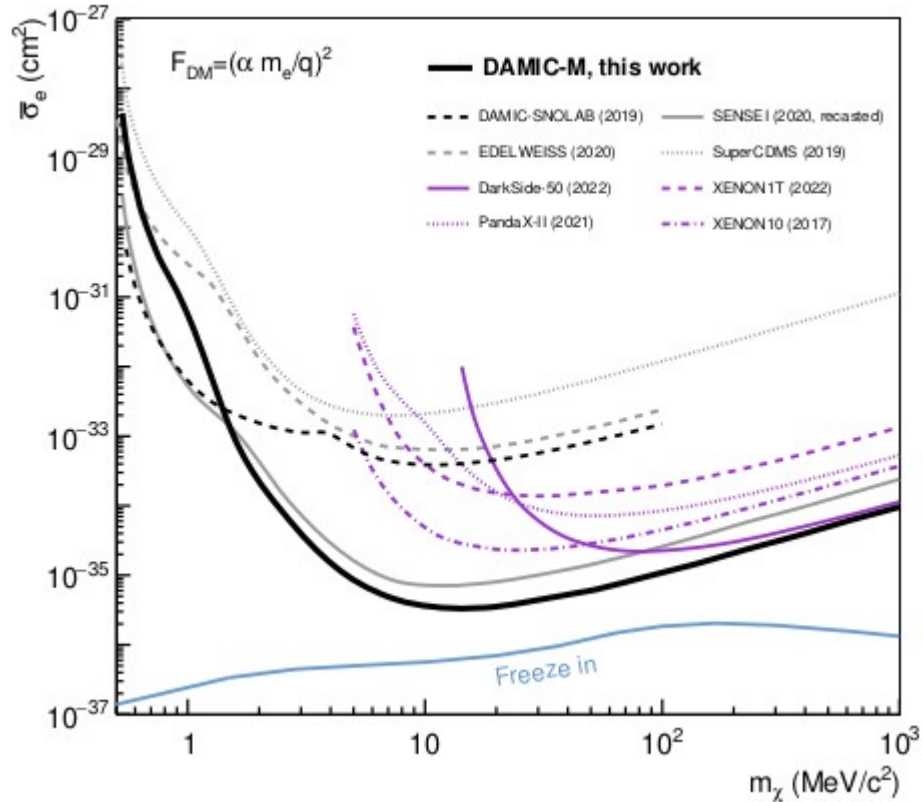
Xenon  
DarkSide  
Damic



# DAMIC-M : interactions sur électrons (d'un CCD)



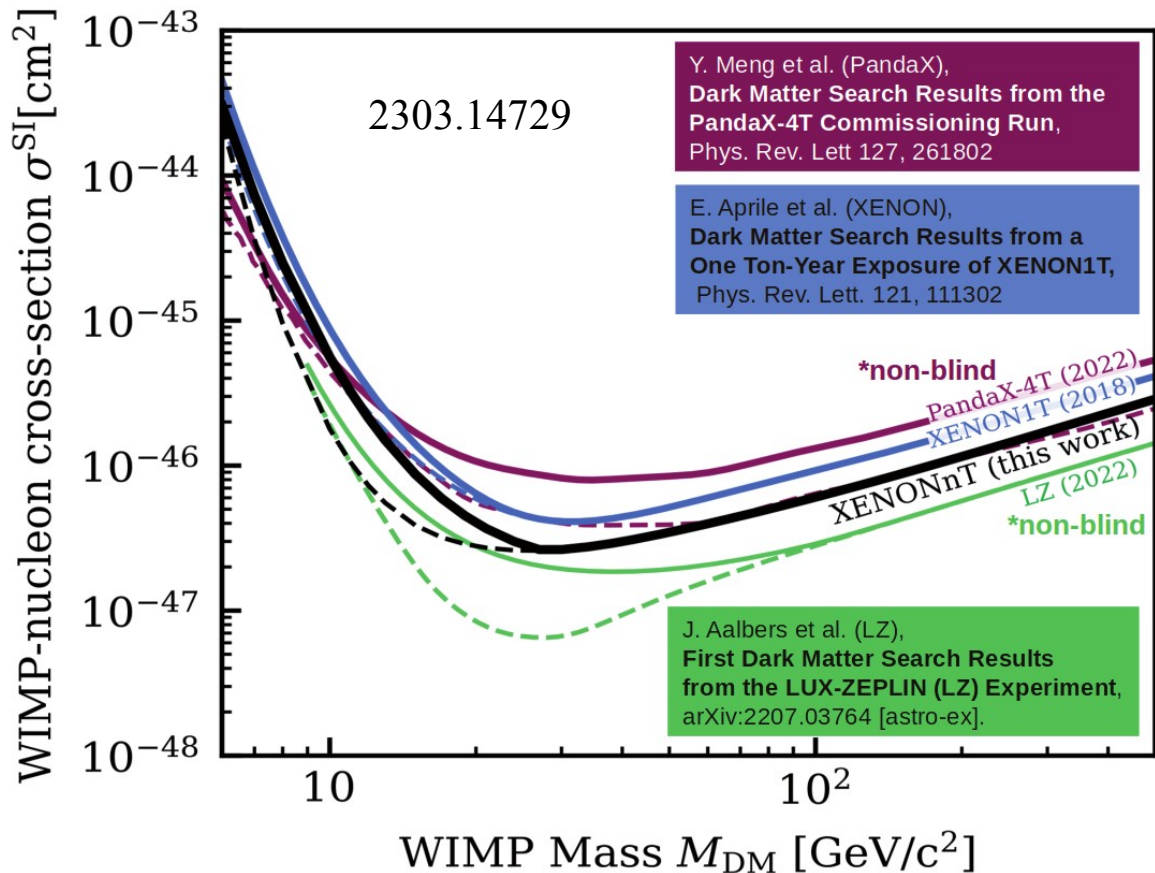
# DAMIC-M : interactions sur électrons (d'un CCD)



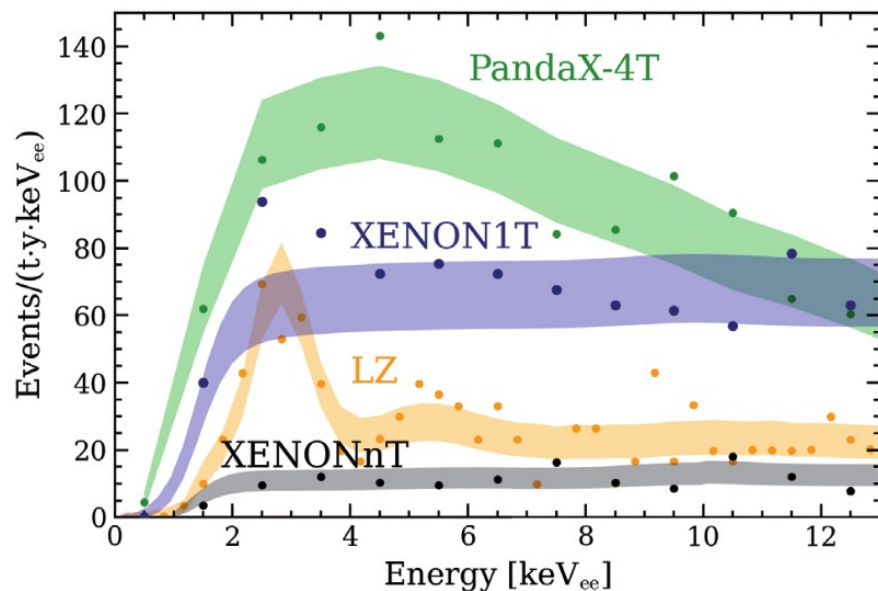
Et plus : nouvelles contraintes exploitant la variation journalière



# XENONnT : ~ 4 mois d'intégration



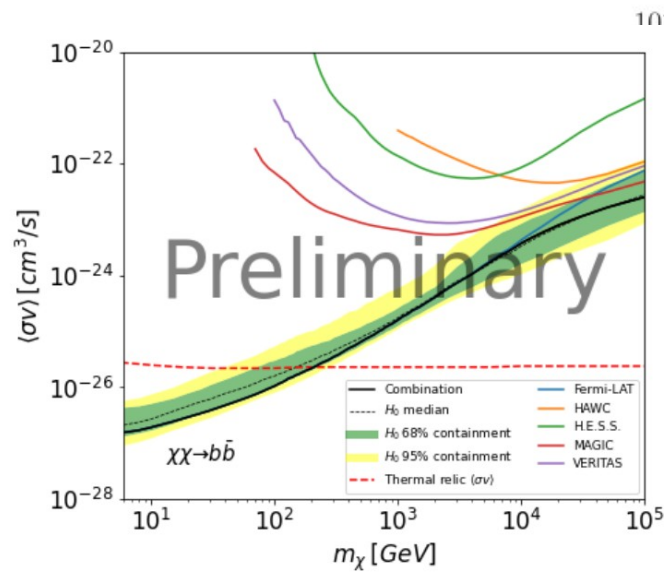
Il y a deux manip concurrentes.  
Elles ont (aujourd'hui) plus de bruit de fond.



# Recherches indirectes

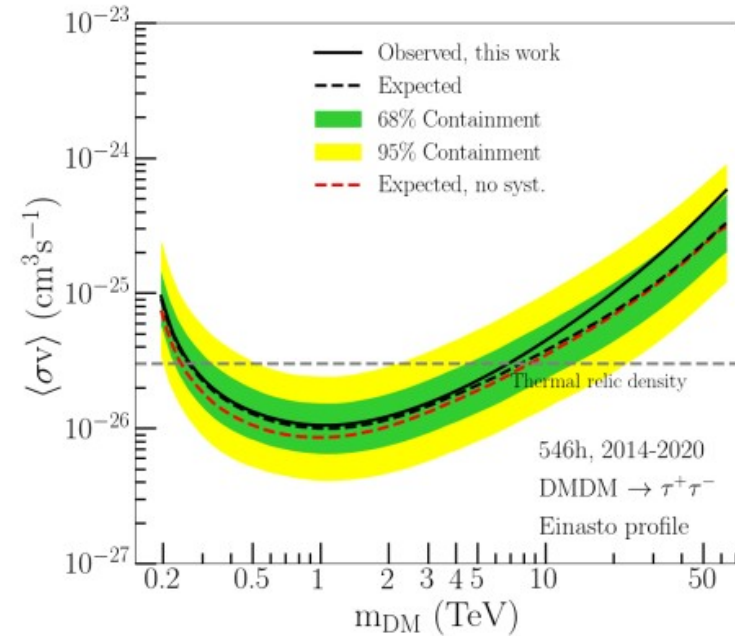
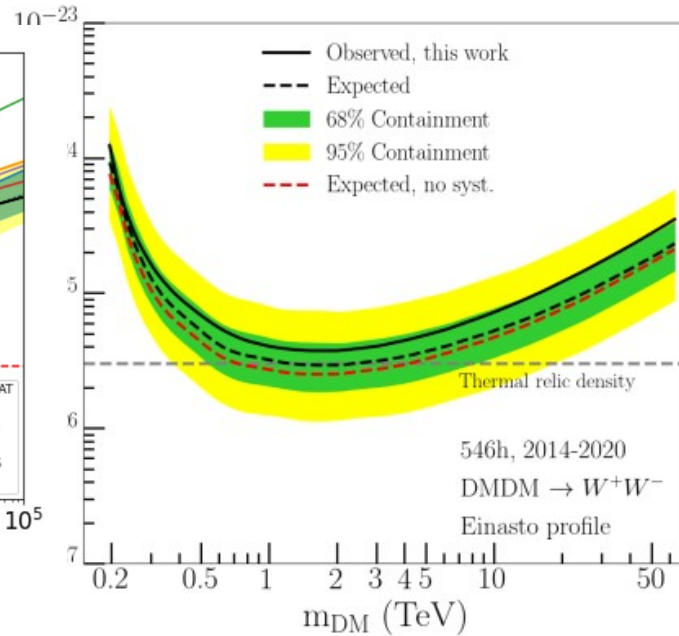
$$\chi + \chi \rightarrow \gamma + X$$

Galaxies sphéroïdes



2108.13646

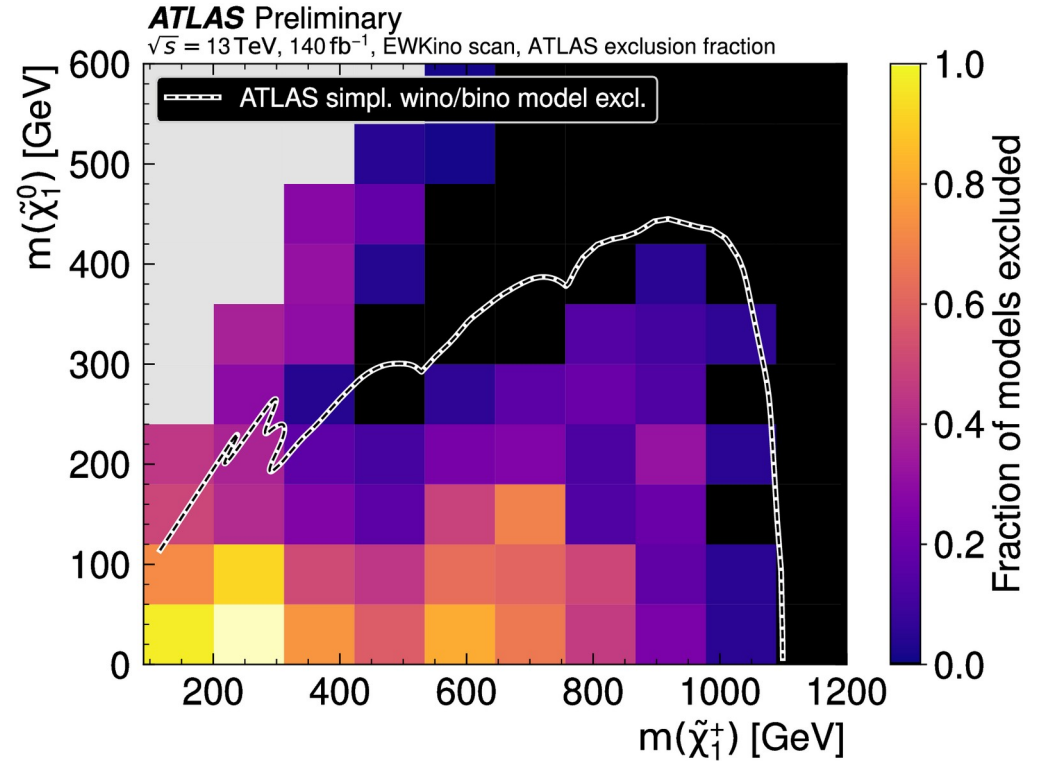
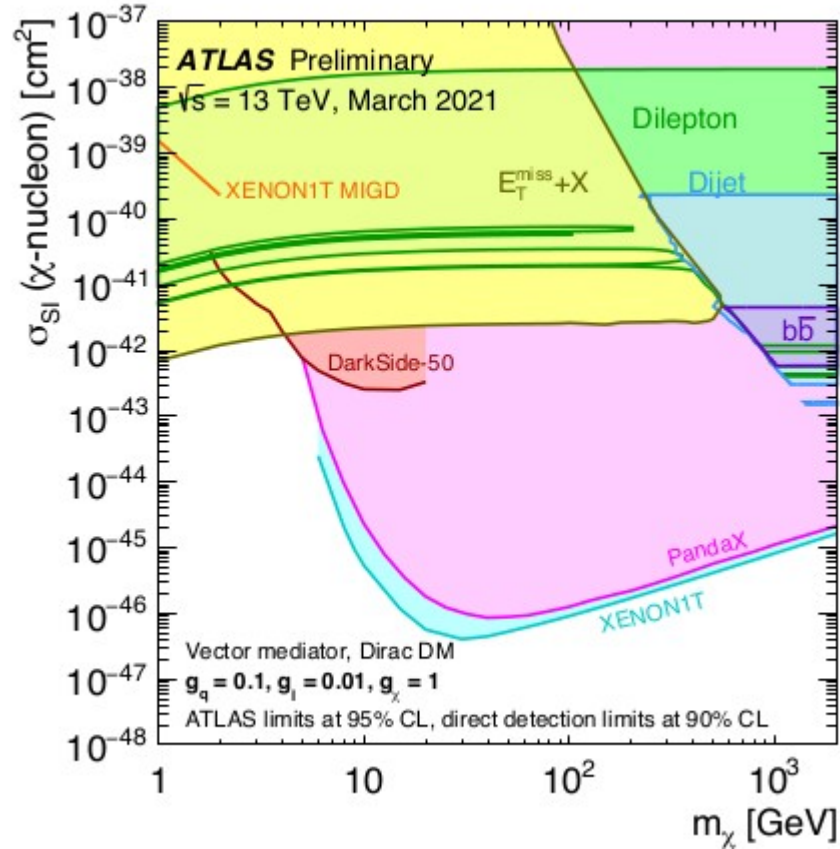
Centre Galactique (HESS)



2207.10471

# Matière noire au collisionneur

les régions d'intérêt cosmologique sont essentiellement fermées (pour pMSSM)



# L'expansion (récente) de l'univers

La relation distance-redshift encode l'évolution de la densité de l'univers

$$d(z) = c \int_0^z \frac{dz}{H(z)}$$

L'évolution de la densité avec  $z$  contraint le contenu !

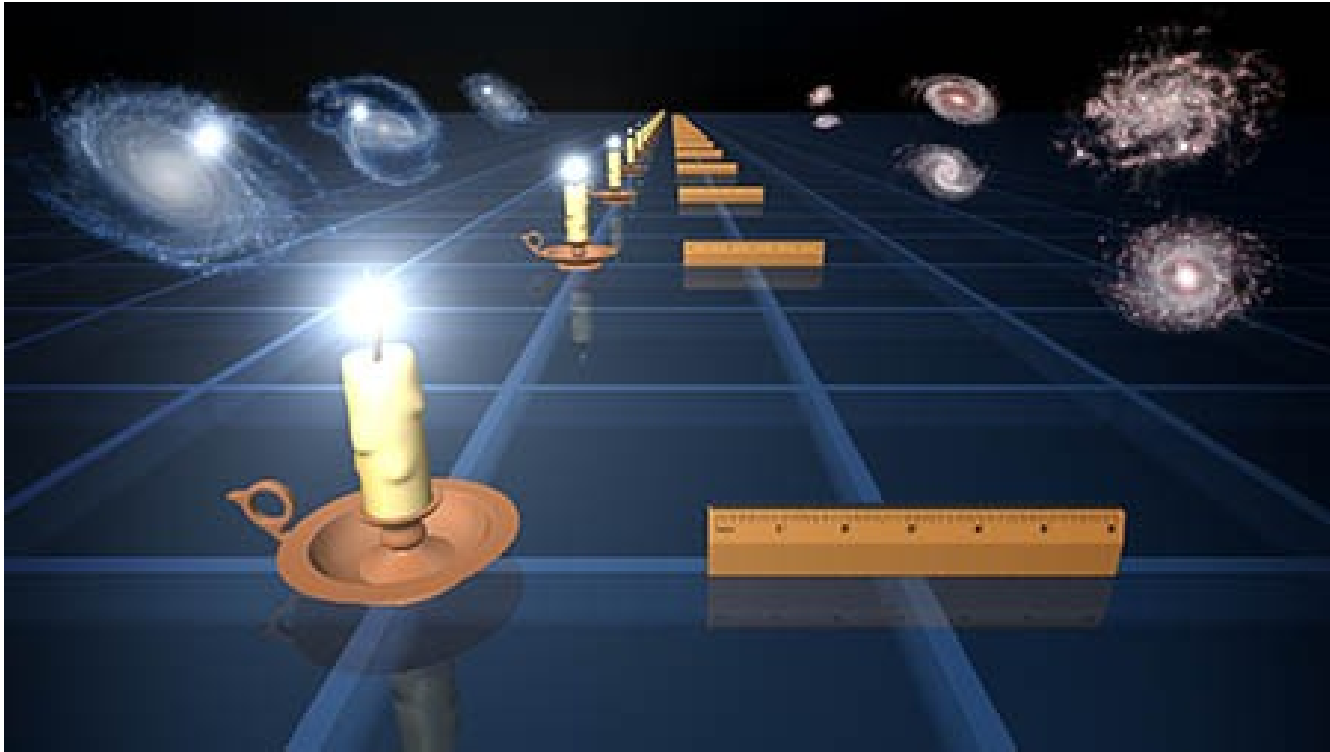
$$H(z)^2 = H_0^2 [(1+z)^3 \Omega_M + \Omega_\Lambda]$$

  
 $\Lambda$ CDM

$z$  : redshift  $\sim$  vitesse de récession due à l'expansion

# Chandelles et règles standards

Supernovae



Oscillations  
Acoustiques  
des Baryons

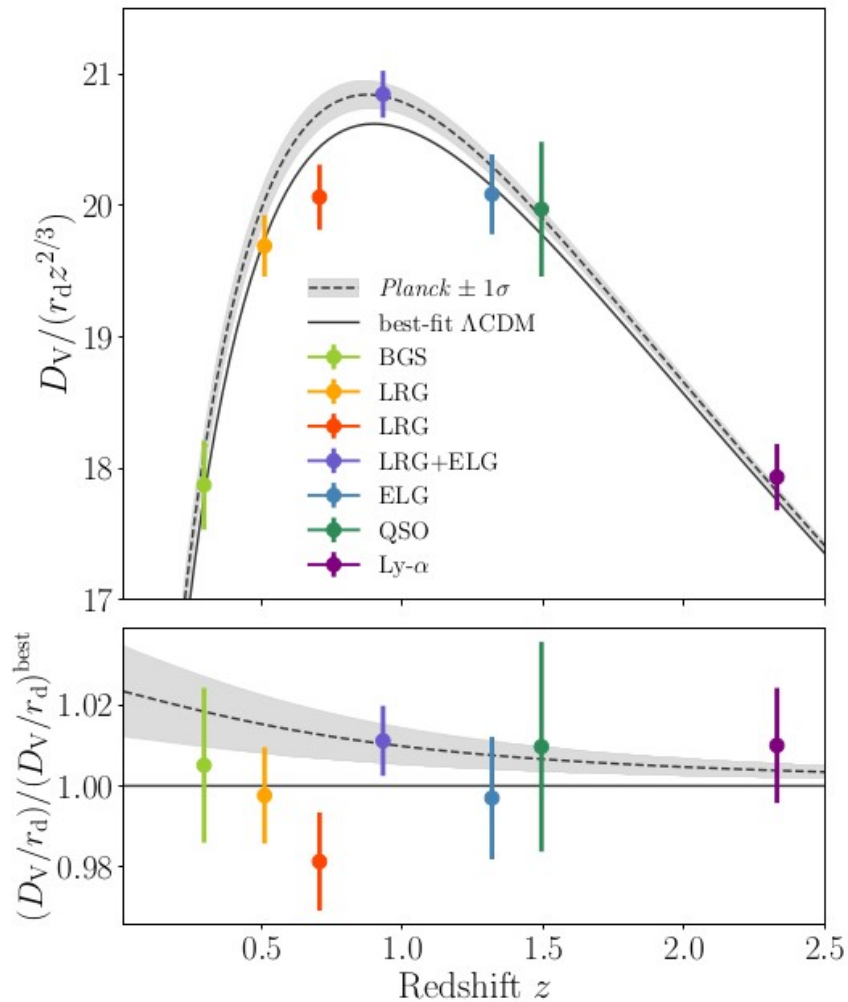
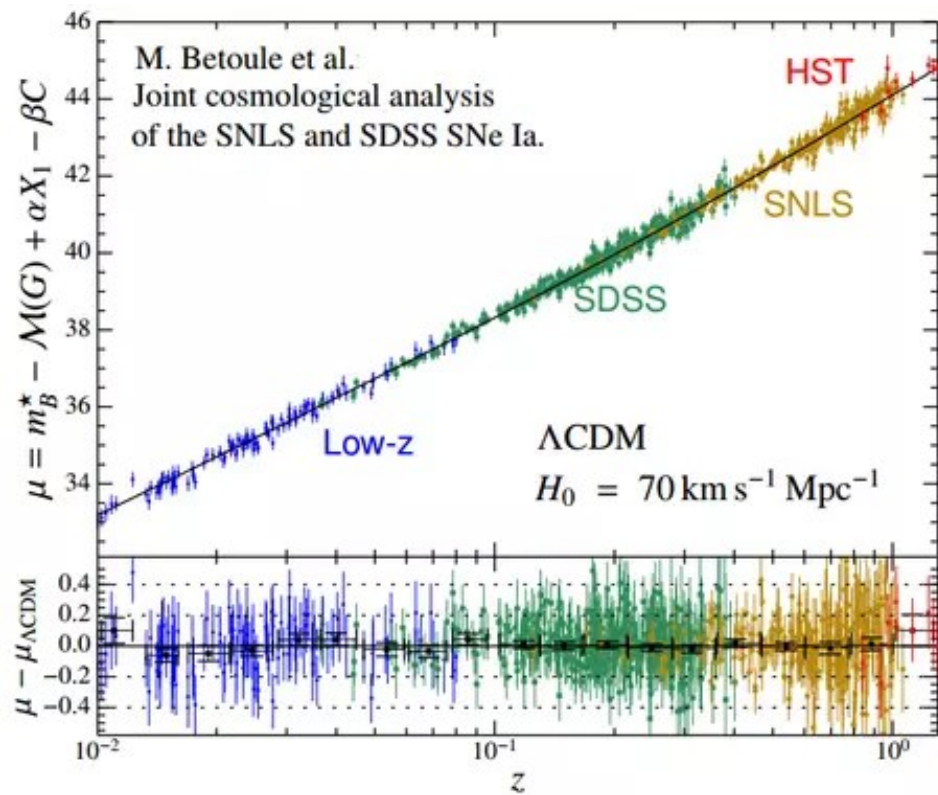
BAO

Mesurent les mêmes distances

# Distance vs redshift

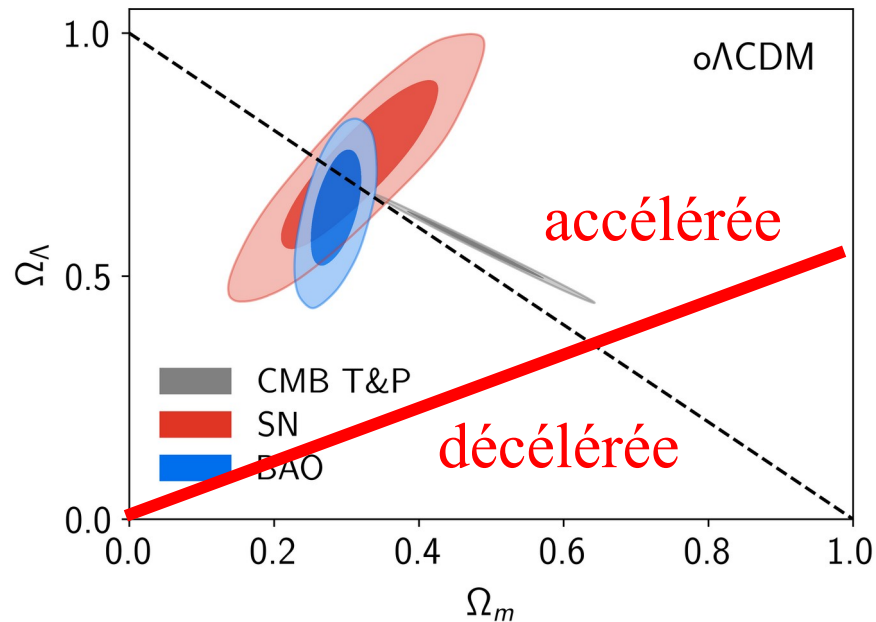
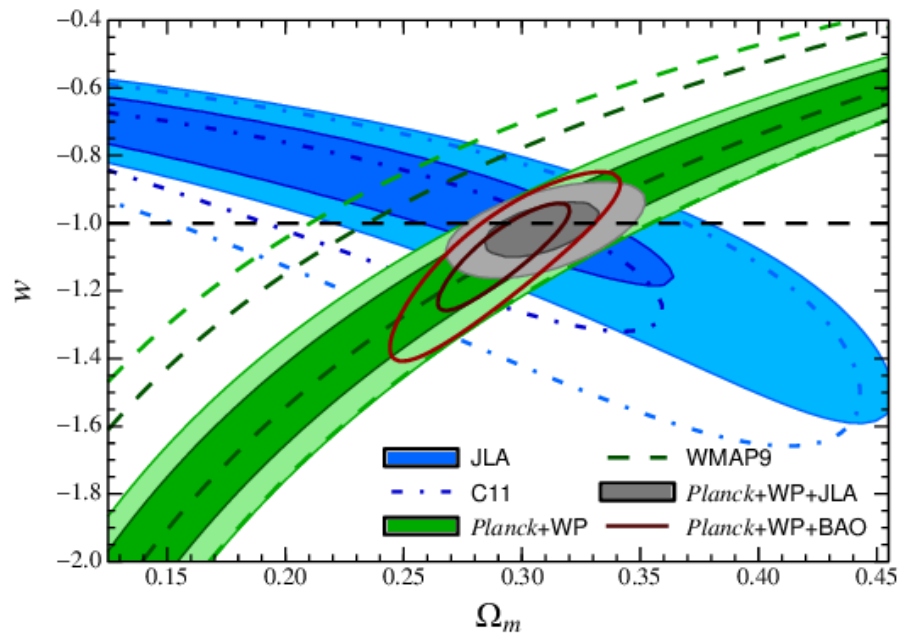
DESI 2404.03002

Betoule et al (2014)



# L'expansion accélérée / Énergie noire

- L'expansion s'accélère
- On peut attribuer ça à une composante dont la densité évolue peu ou pas.



←  $\Lambda$

L'énergie noire a  
une densité  $\sim$  constante

# Caractériser l'énergie noire (1)

## Les 3 interprétations de l'expansion accélérée

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

LA constante cosmologique  
(avec son problème)

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = 8\pi G (T_{\mu\nu} + T'_{\mu\nu})$$

avec  $T'_{\mu\nu} \simeq C^{ste} g_{\mu\nu}$   
Quintessence, ...

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R \neq 8\pi G T_{\mu\nu}$$

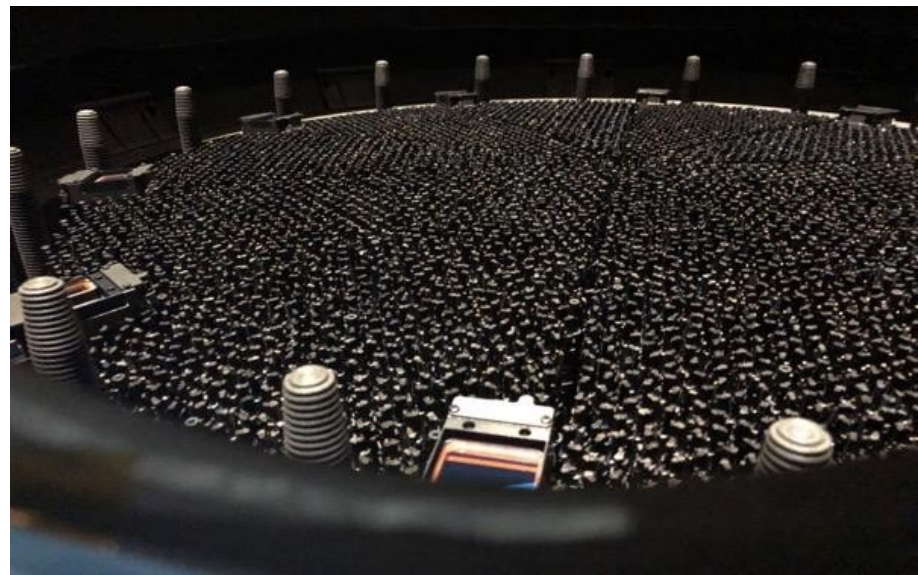
Einstein s'est trompé,  
(mais seulement aux  
grandes échelles)



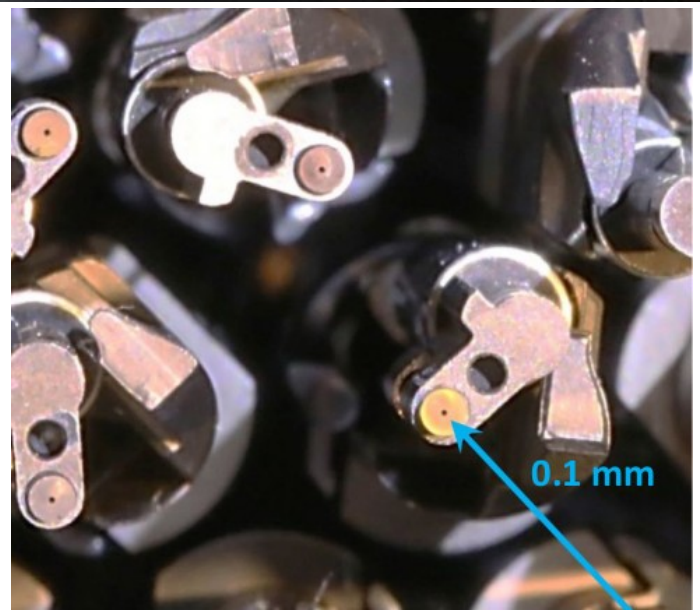
# DESI : des galaxies à la pelle

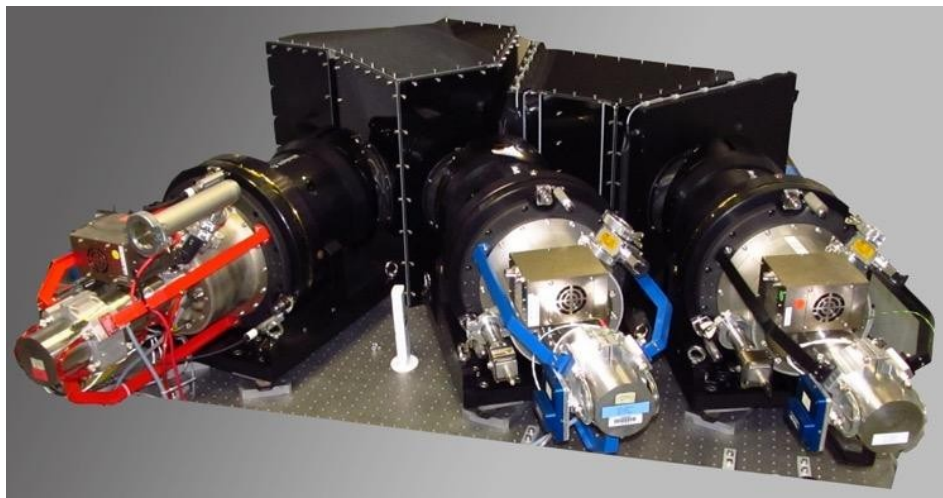


P. Ast

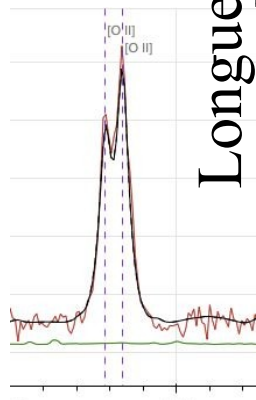
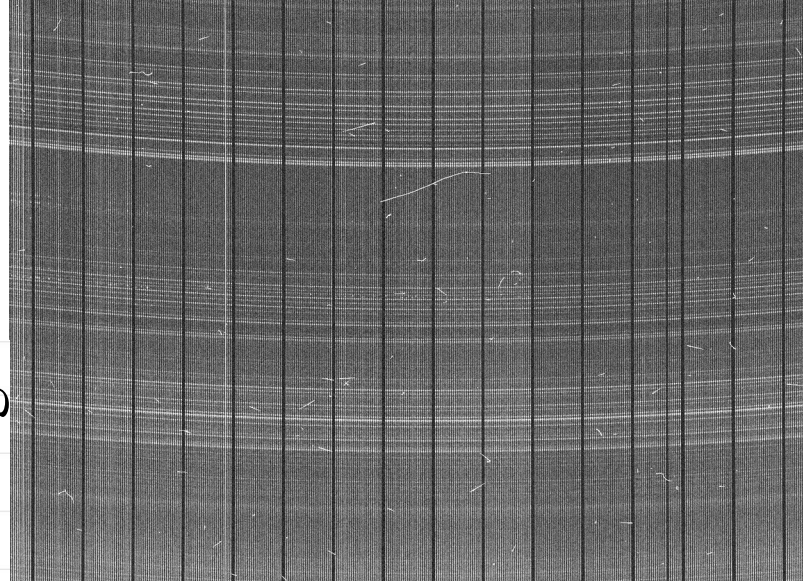


- Télescope de 4 m
- 5000 fibres
- 100 000 spectres/nuit

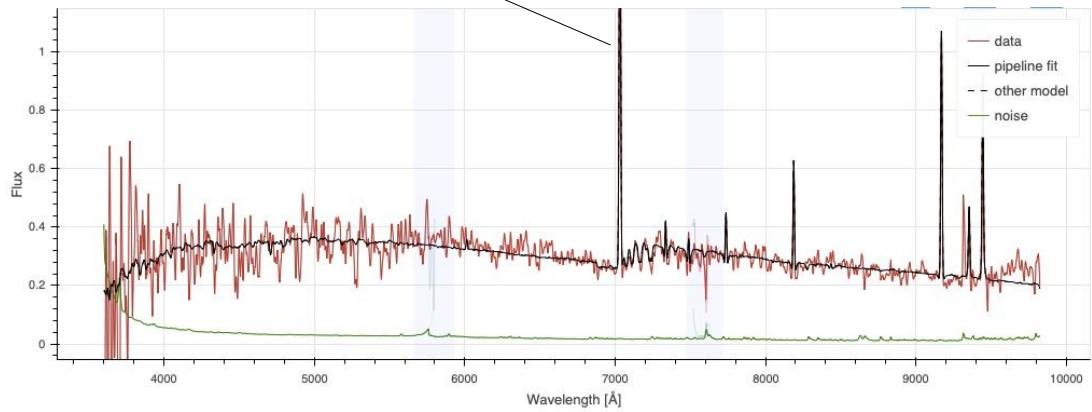
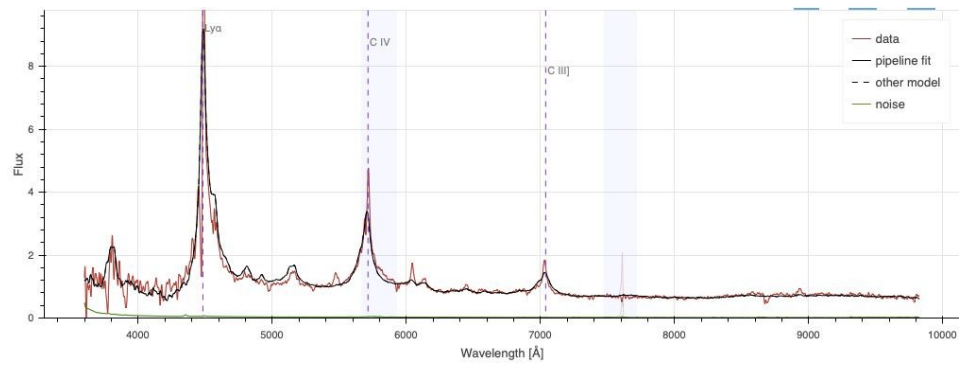




Longueur d'onde

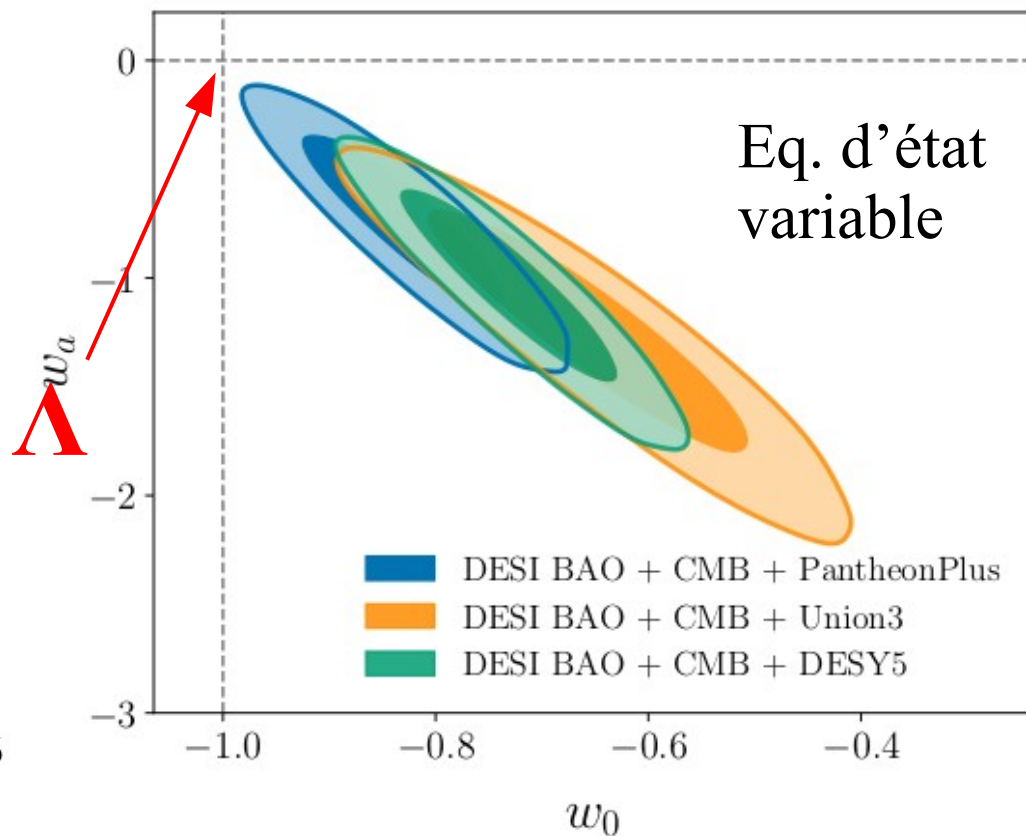
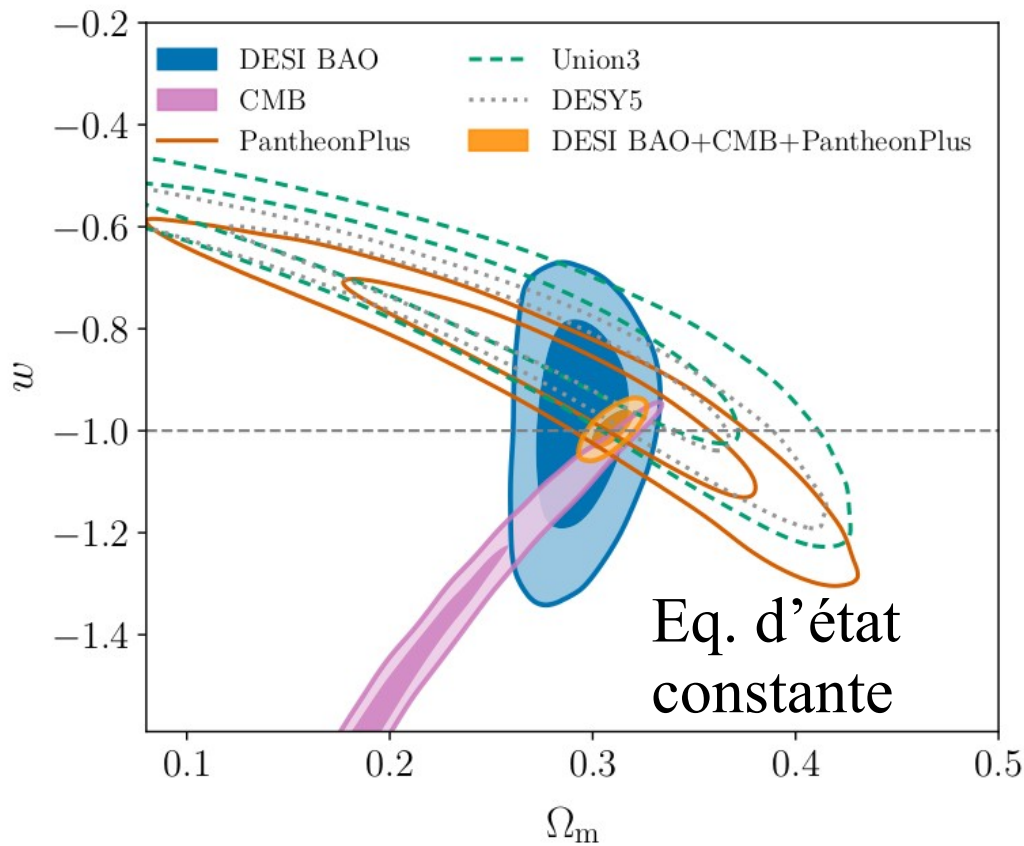


fibre

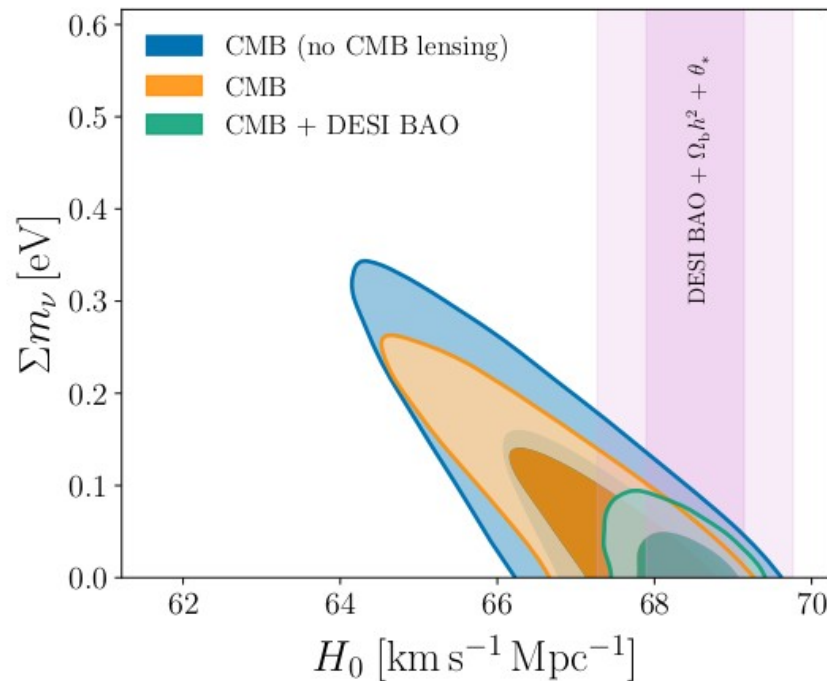
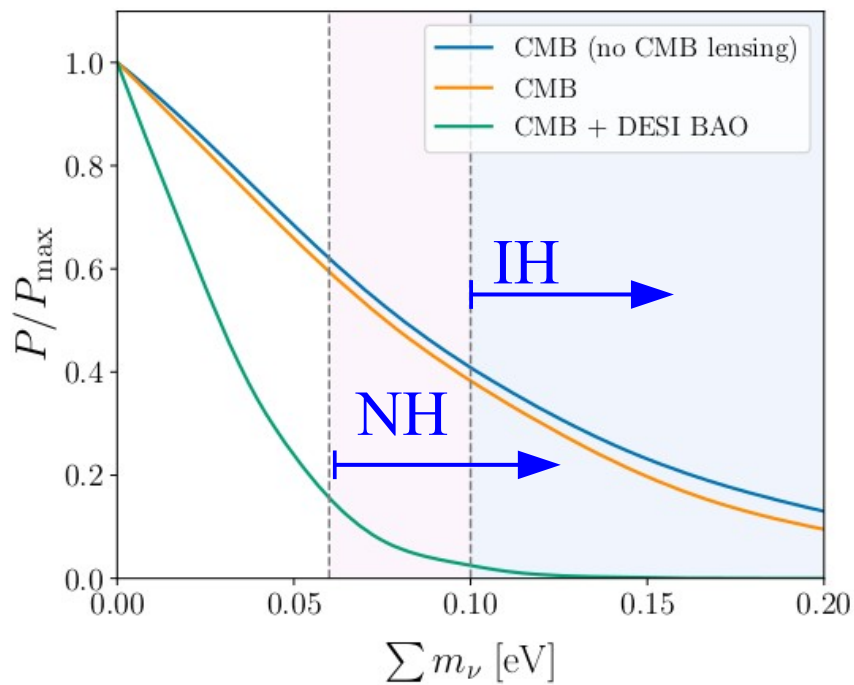


2404.03002

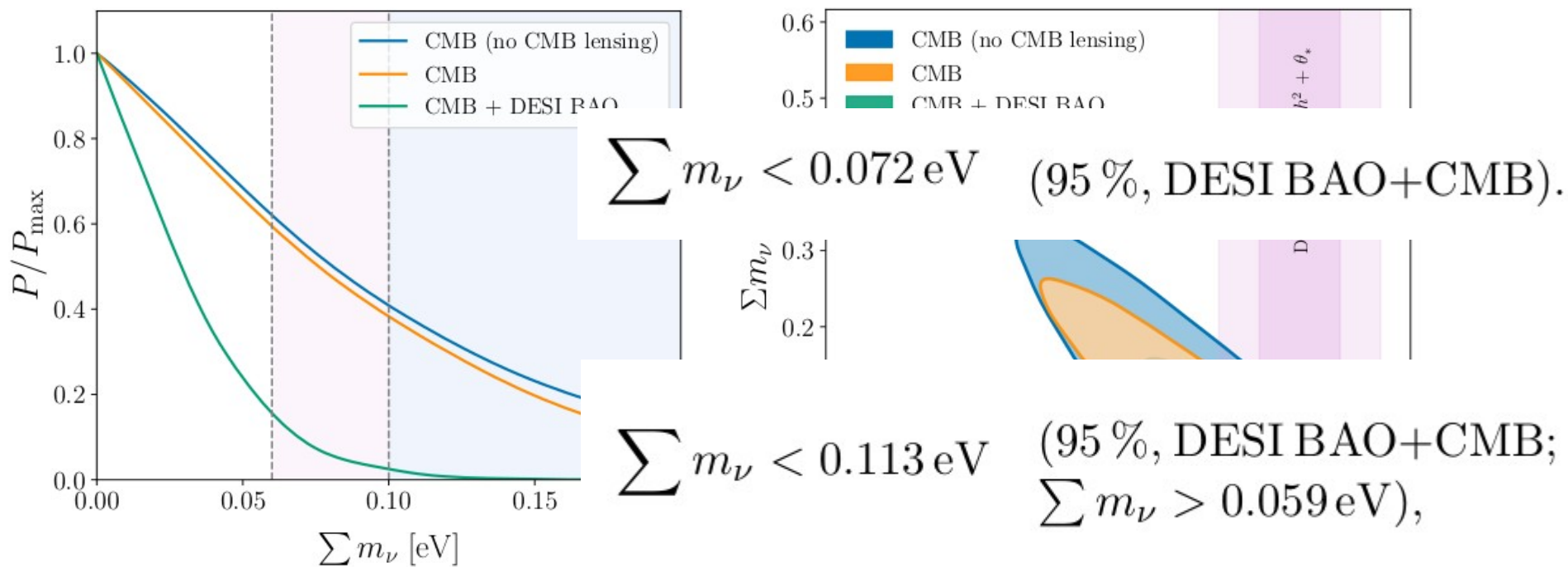
# DESI 1 an : énergie noire



# DESI 1 an : masse des neutrinos

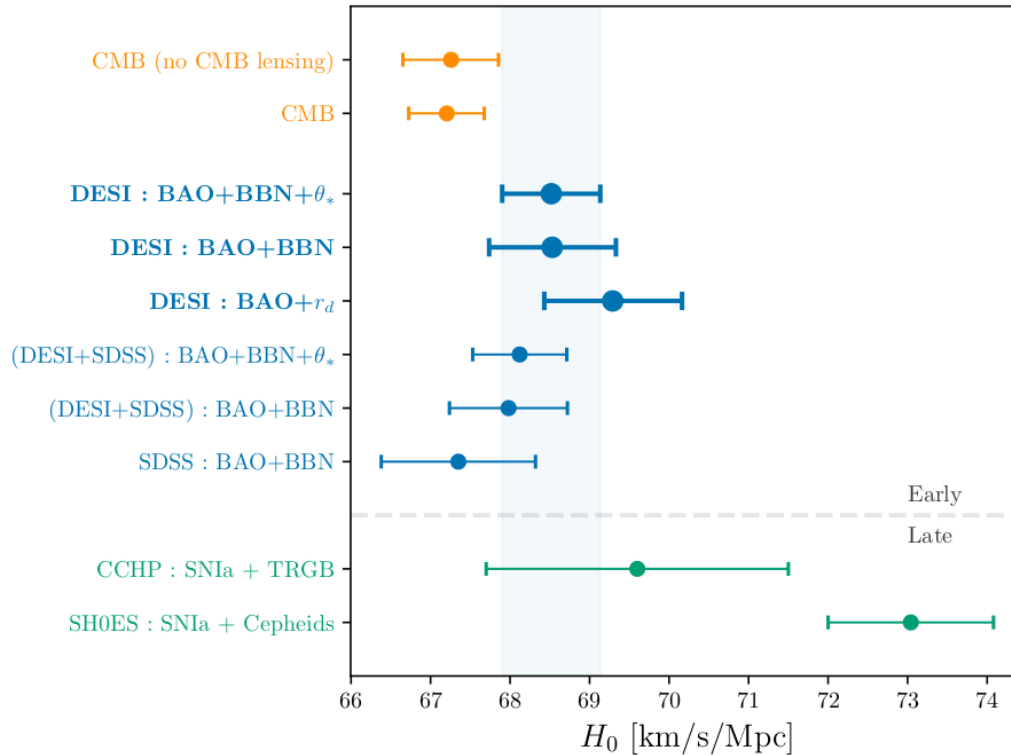


# DESI 1 an : masse des neutrinos

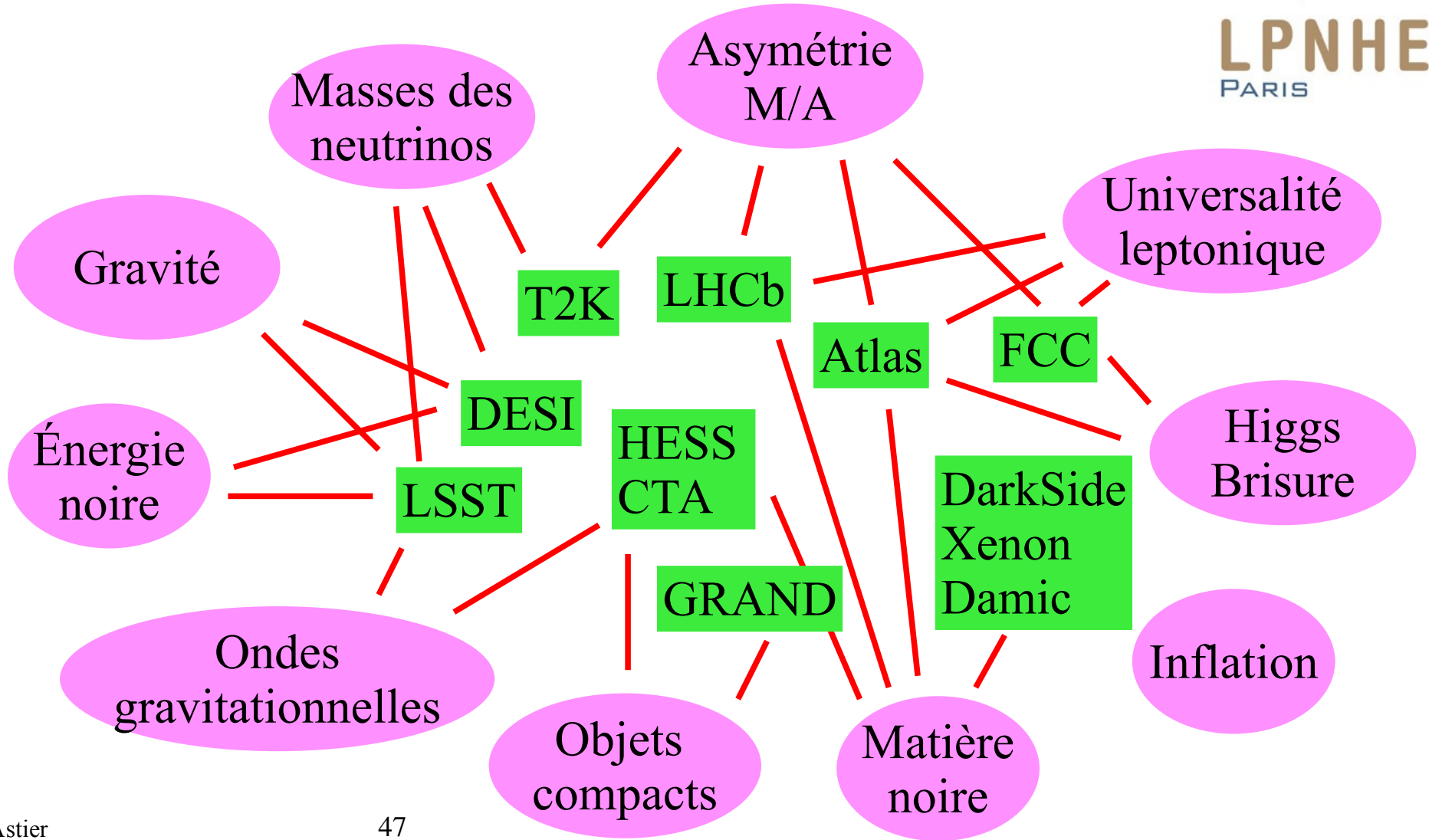


Hiérarchie normale favorisée à  $\sim 2$  sigmas

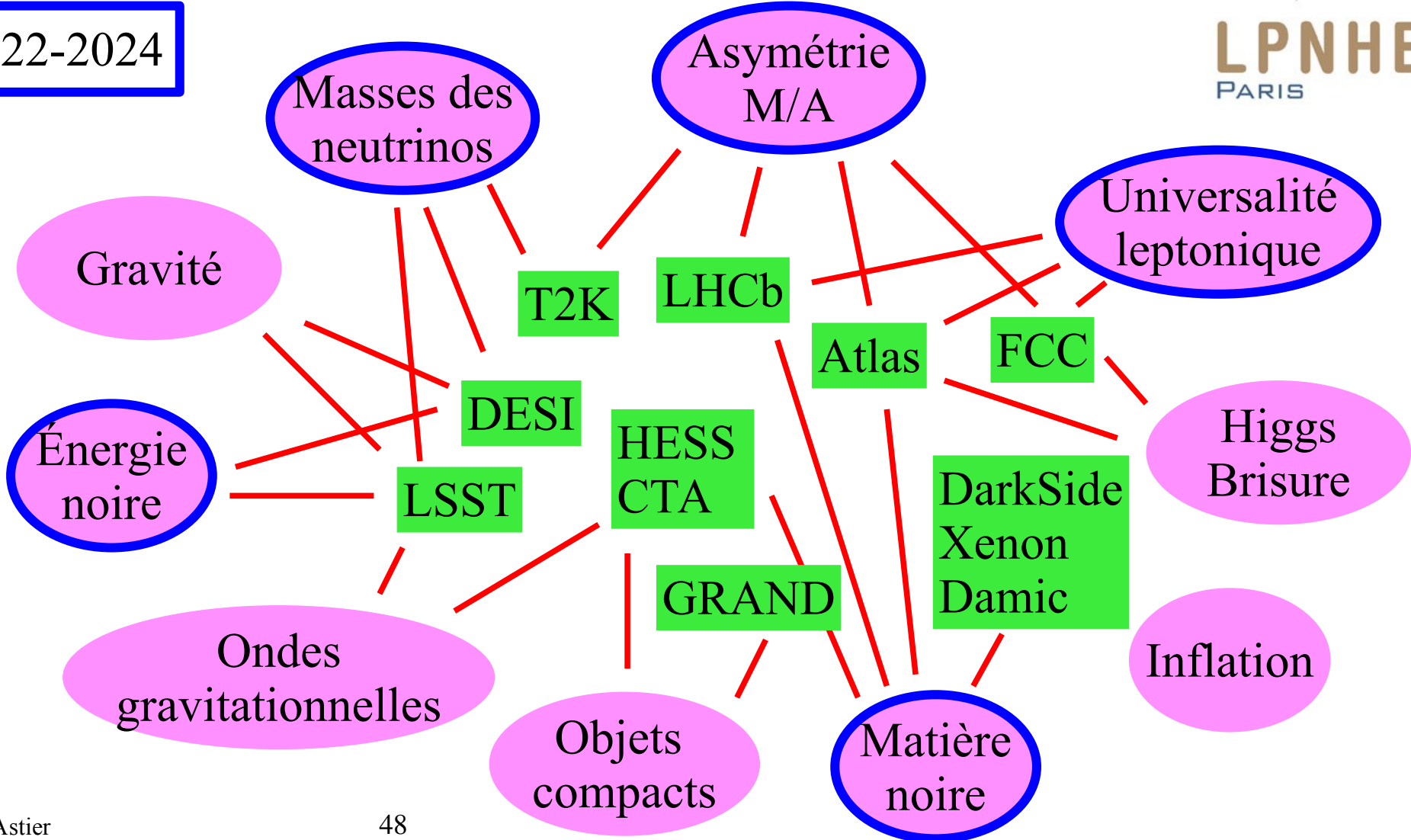
# DESI 1 an : constante de Hubble



La tension demeure, avec ou sans CMB.



2022-2024

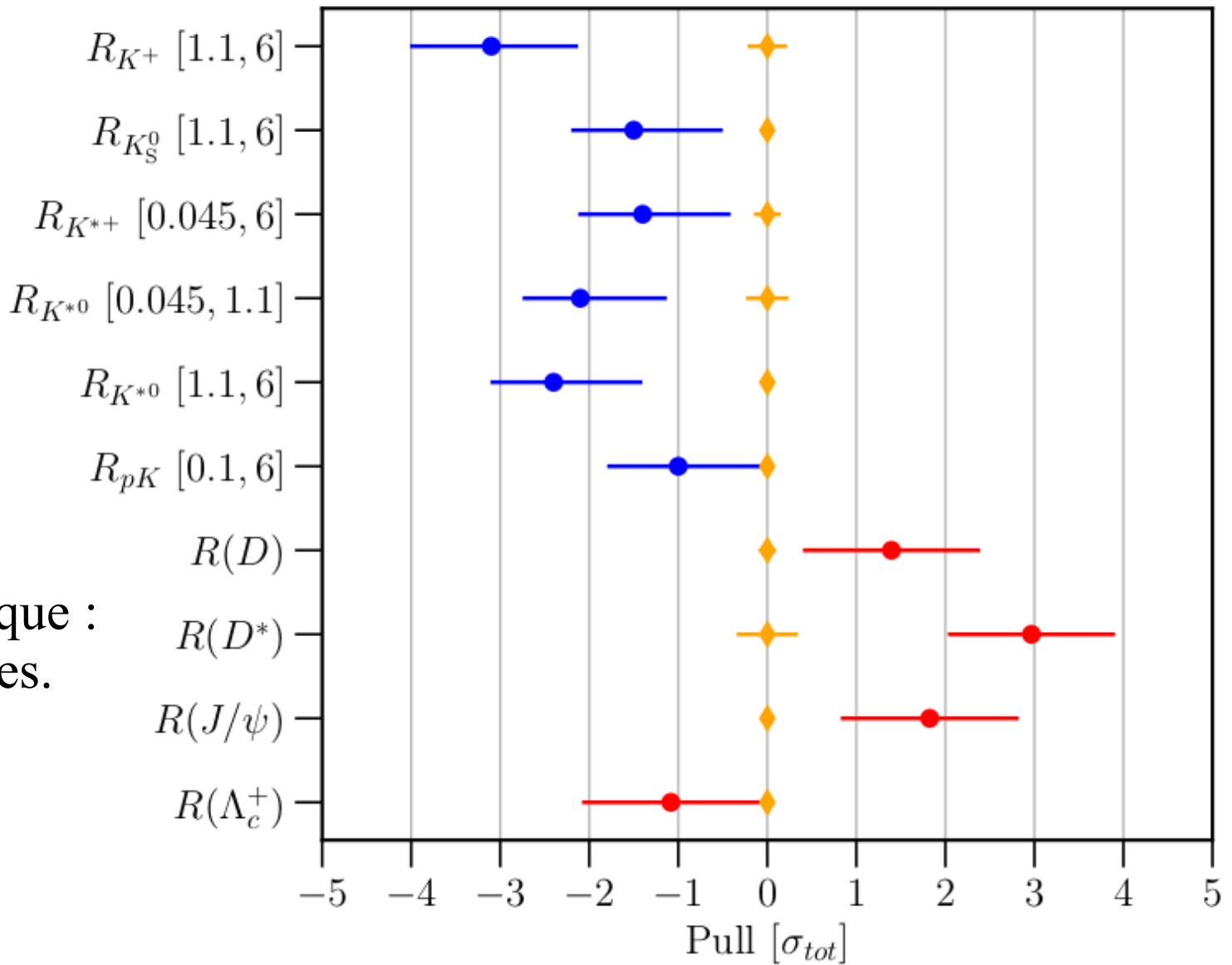




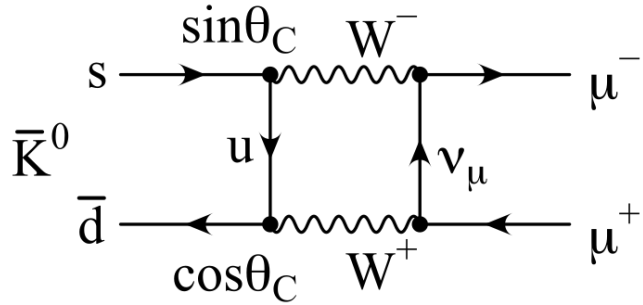
FIN

(Non ?)  
Universalité leptonique :  
10 mesures bizarres.

(LHCb-PUB-2022-012)

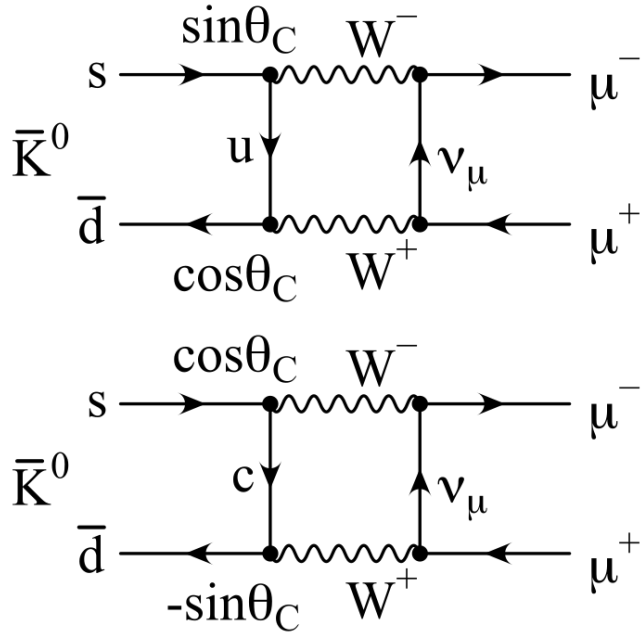


# Découvertes virtuelles : l'invention du quark c



$$K_0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \quad (K_L : \text{BR} \sim 7 \cdot 10^{-9})$$

# Découvertes virtuelles : l'invention du quark c

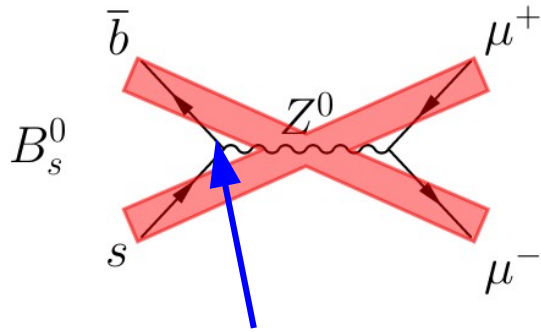


$$K_0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \quad (K_L : \text{BR} \sim 7 \cdot 10^{-9})$$

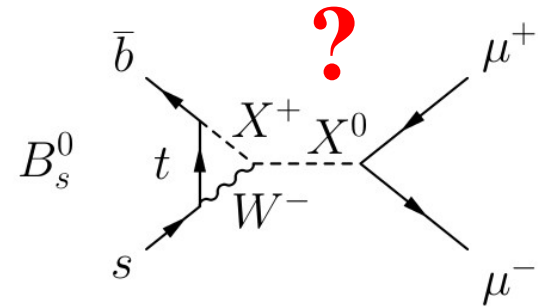
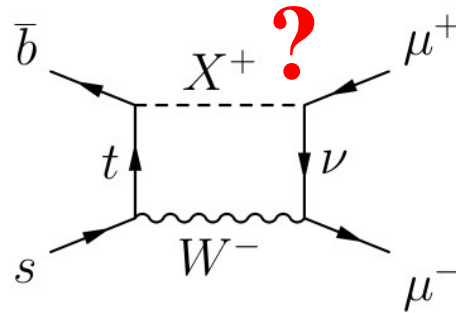
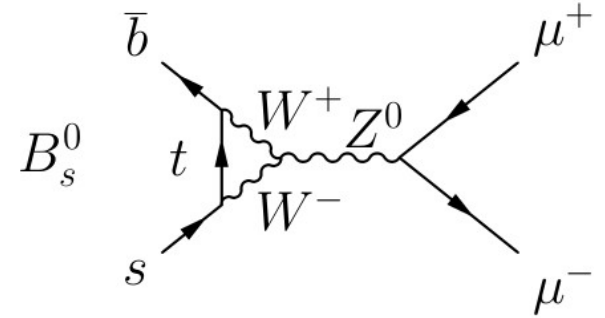
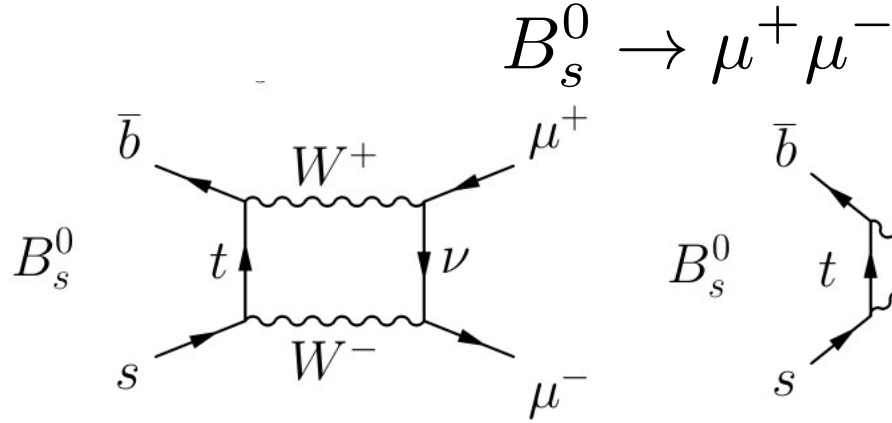
Mécanisme de « GIM » (1970): un quatrième quark explique pourquoi cette désintégration est si rare : avec ces deux graphes, le taux est exactement nul si les masses de  $u$  et  $c$  sont égales.

Angle de Cabibbo  
(un des angles CKM aujourd'hui)

# FCNC : un laboratoire pour les découvertes



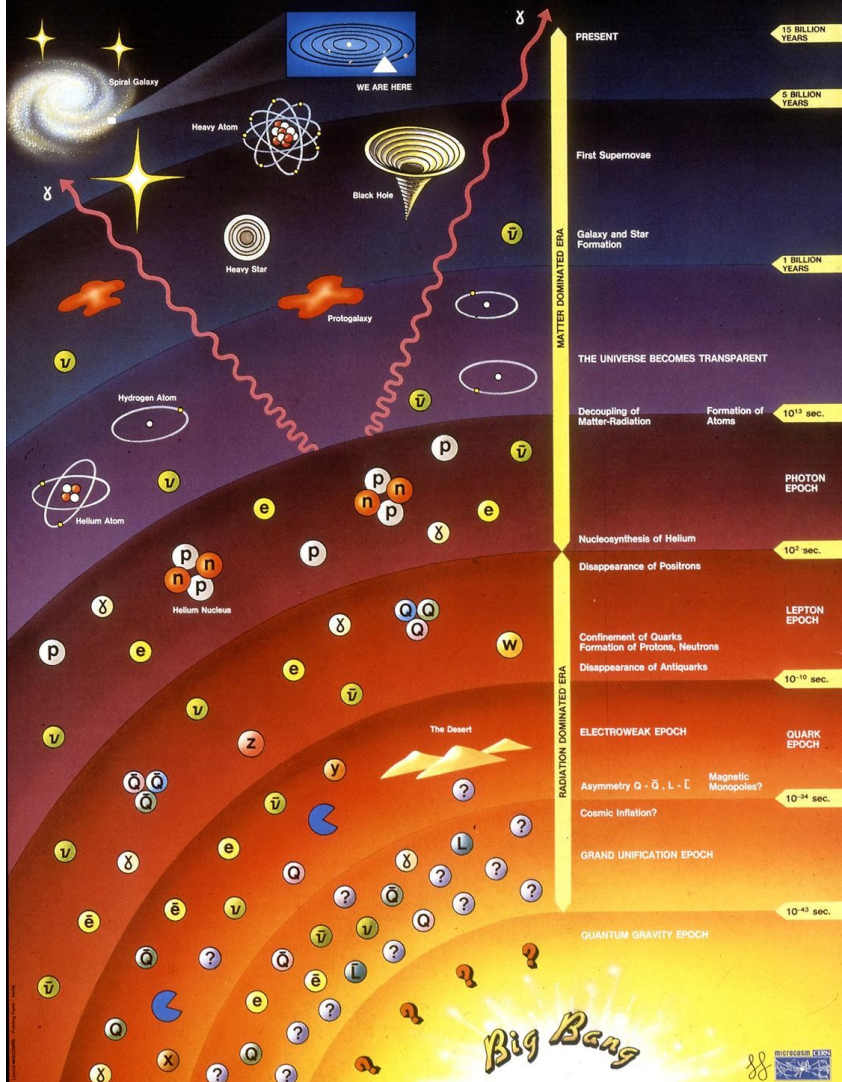
Vertex absent du  $\overline{MS}$  :  
les courants neutres  
conservent la saveur.



Ces combinaisons  
hypothétiques auraient pu  
être de taille comparable  
aux contributions attendues.

On sait maintenant qu'elles sont faibles.

# History of the Universe



## Les deux infinis

Au cours du temps :

- La densité décroît
- La température (énergie) décroît
- Le contraste de densité relatif croît.

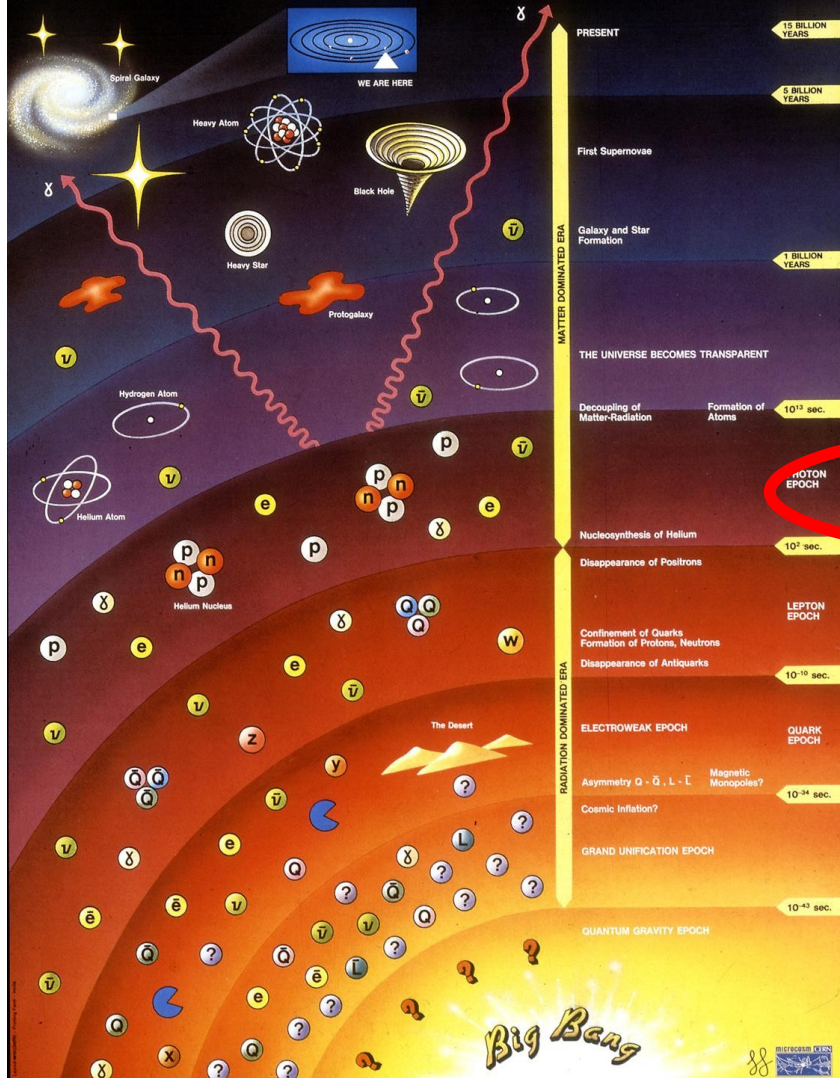
L'histoire de l'univers couvre les extrêmes en matière d'énergie et densité. On y trouve aussi des objets extrêmes aujourd'hui :

Rayons cosmiques

Trous noirs

Objets compacts « actifs »

# History of the Universe



# L'histoire de l'univers

Formation des grandes structures

Formation des premières étoiles

Émission du fond diffus : premiers atomes

Nucléosynthèse : noyaux d'Hélium, Deutérium, Lithium...

Formation des nucléons

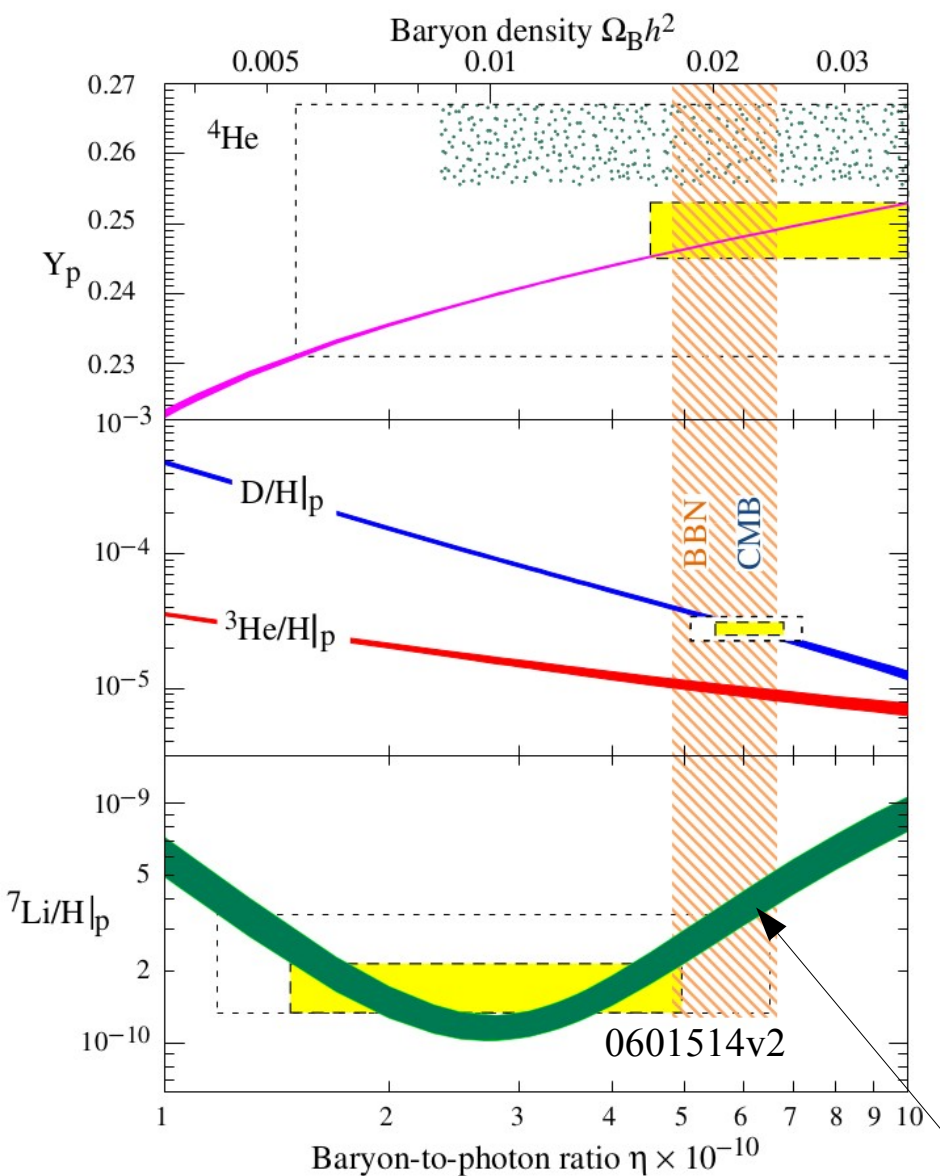
Période électrofaible

???

Inflation

Big Bang

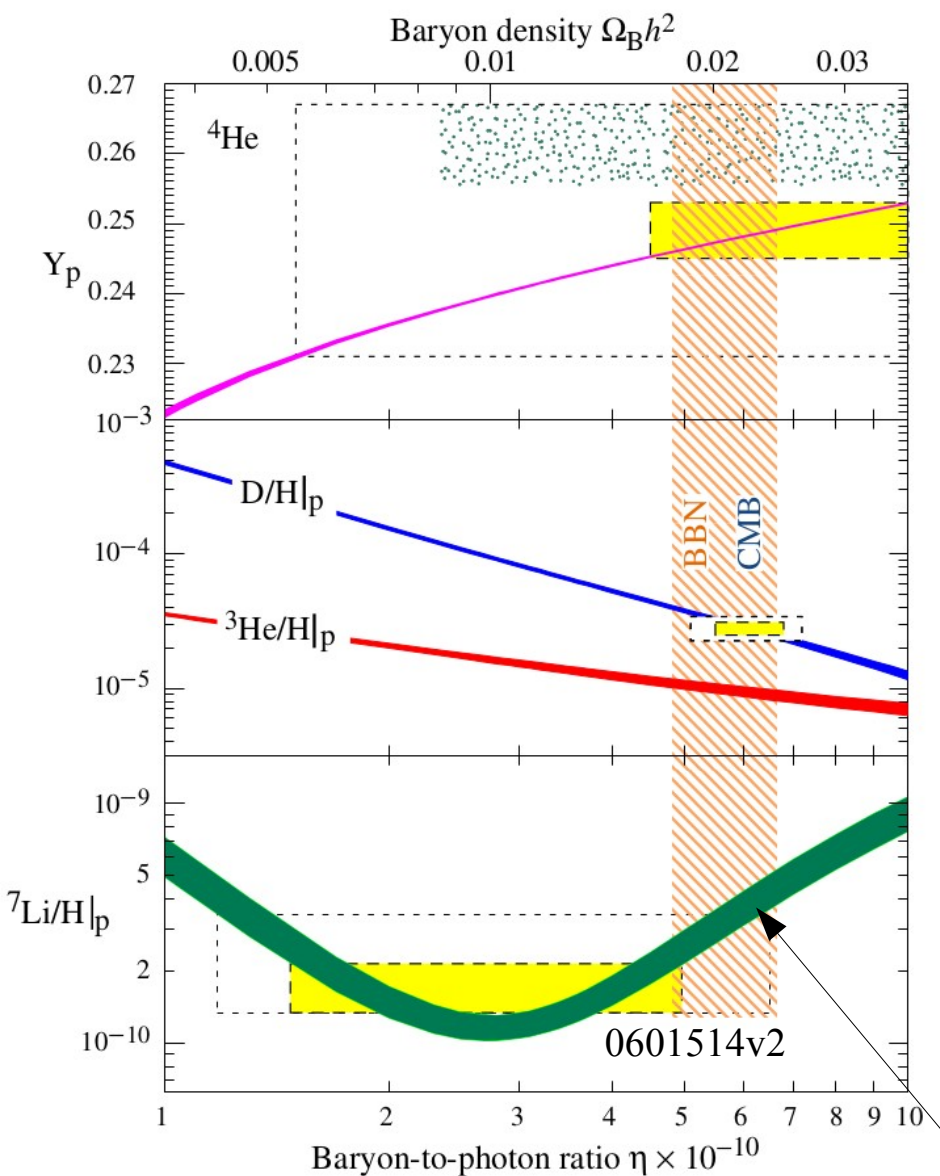
# Abondance relique des éléments légers



- Environ 3 mn après le big bang, les noyaux des éléments légers s'assemblent.
- Leur abondance relique dépend surtout du rapport du nombre de baryons (protons+neutrons) sur le nombre de photons.
- On trouve qu'il faut  $\sim 1,5$  milliard de photons par baryon pour expliquer les abondances (He, D, ...) mesurées (aujourd'hui ou presque).



# Abondance relique des éléments légers



- Environ 3 mn après le big bang, les noyaux des éléments légers s'assemblent.
- Leur abondance relique dépend surtout du rapport du nombre de baryons (protons+neutrons) sur le nombre de photons.
- On trouve qu'il faut  $\sim 1,5$  milliard de photons par baryon pour expliquer les abondances (He, D, ...) mesurées (aujourd'hui ou presque).
- Photons et protons devraient être en nombres similaires !
- Sauf si.... les protons ont massivement disparu.
- On a le même problème avec les électrons.
- Le lithium de vos batteries vient de là.

# Qu'est-il arrivé aux protons (et électrons)

- La mécanique statistique prédit des nombres similaires de protons et de photons.
- Et d'antiprotons....
- Mais les antiprotons et les protons s'annihilent entre eux quand la température descend.

# Qu'est-il arrivé aux protons (et électrons)

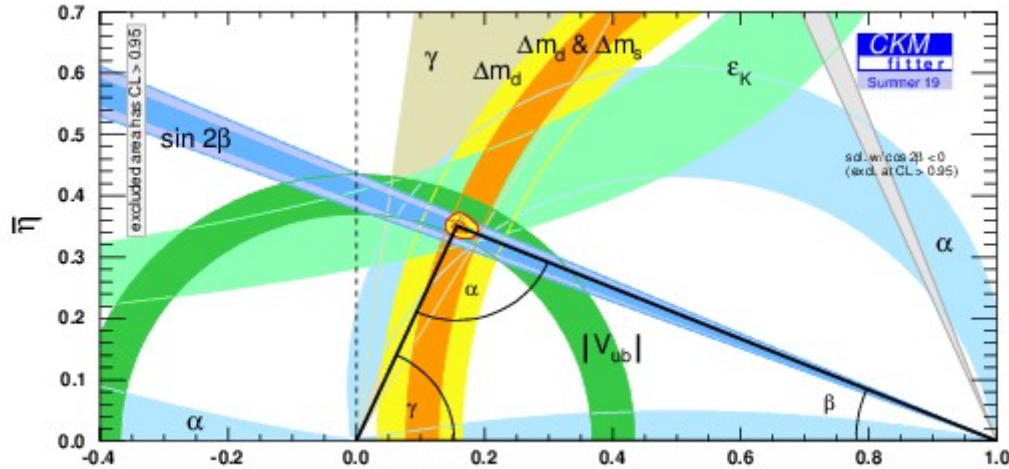
- La mécanique statistique prédit des nombres similaires de protons et de photons.
- Et d'antiprotons....
- Mais les antiprotons et les protons s'annihilent entre eux quand la température descend.
- Les protons (et électrons) sont donc les très rares survivants d'un immense massacre.
- Mais comment est-il possible que l'univers primordial ait produit un peu plus de protons que d'antiprotons ?

# L'asymétrie matière-antimatière dans l'univers primordial

- Les trois conditions (nécessaires) de Sakharov (1967):
  1. Différence de comportement entre matière et antimatière
    - violation de CP (et C)
  2. Violation du nombre baryonique (on peut sortir des protons de nulle part, ou le proton se désintègre ?? jamais vu)
  3. Rupture de l'équilibre thermique (possible dans l'univers primordial)
- La condition 2 n'est pas remplie dans le modèle standard. Elle relève par exemple de théories de « grande unification ».
- La condition 1 semble remplie, mais l'est-elle suffisamment ?

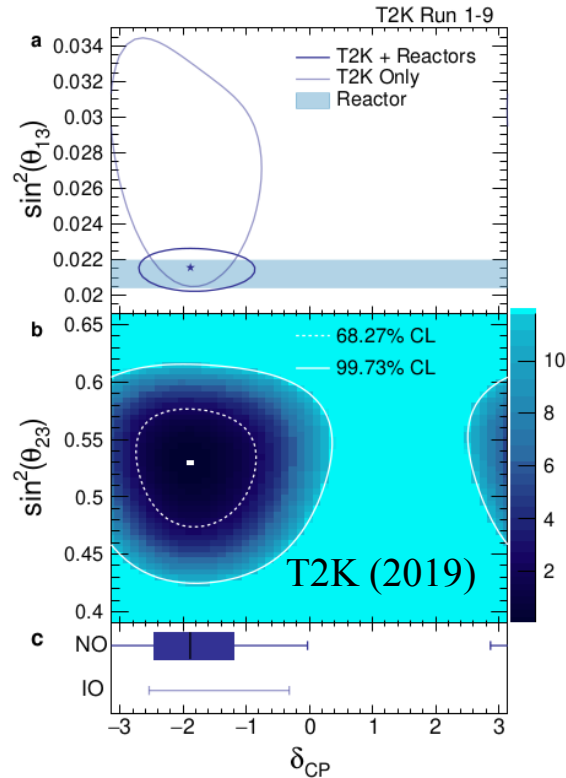
# L'asymétrie matière/anti-matière : violation de CP

## Les quarks



« Triangle d'unitarité » : l'ensemble des mesures sont compatibles entre elles → la violation de CP est compatible avec 3 saveurs, mais est insuffisante pour l'asymétrie cosmologique

## Les leptons (i.e. les neutrinos)



La violation de CP existe probablement (95%) et semble « assez grande »

Il est urgent de continuer → Hyper Kamiokande

# Caractériser l'énergie noire (2)

Histoire du taux d'expansion → équation d'état

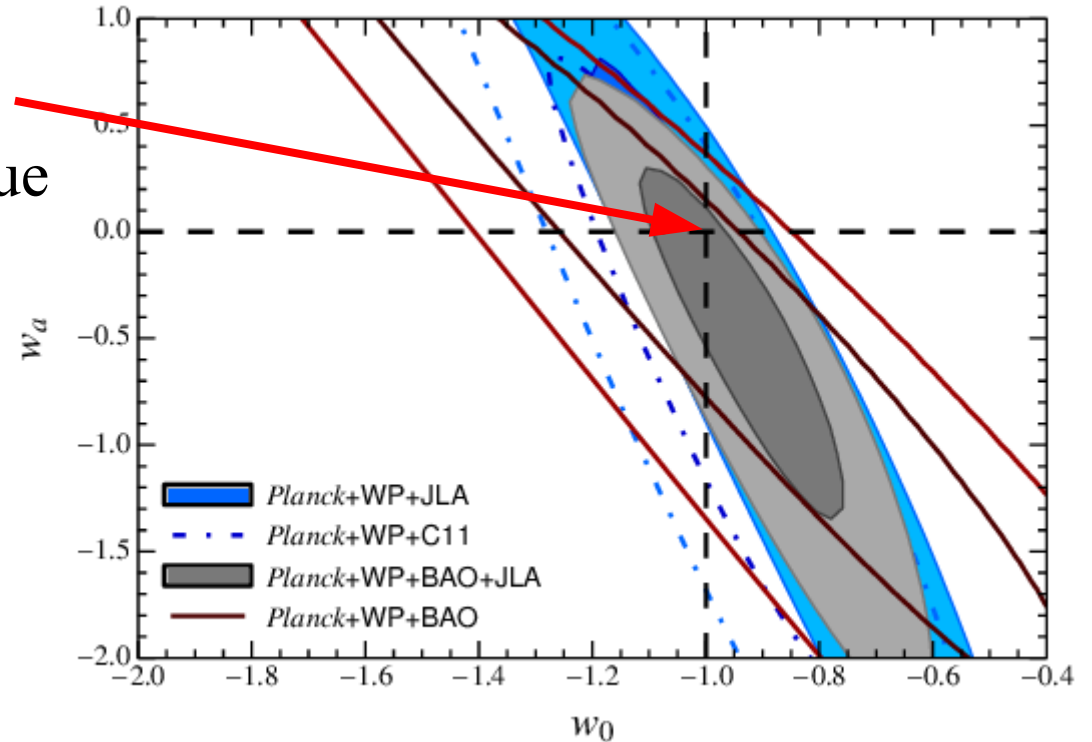
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

Constante cosmologique

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = 8\pi G (T_{\mu\nu} + T'_{\mu\nu})$$

ailleurs

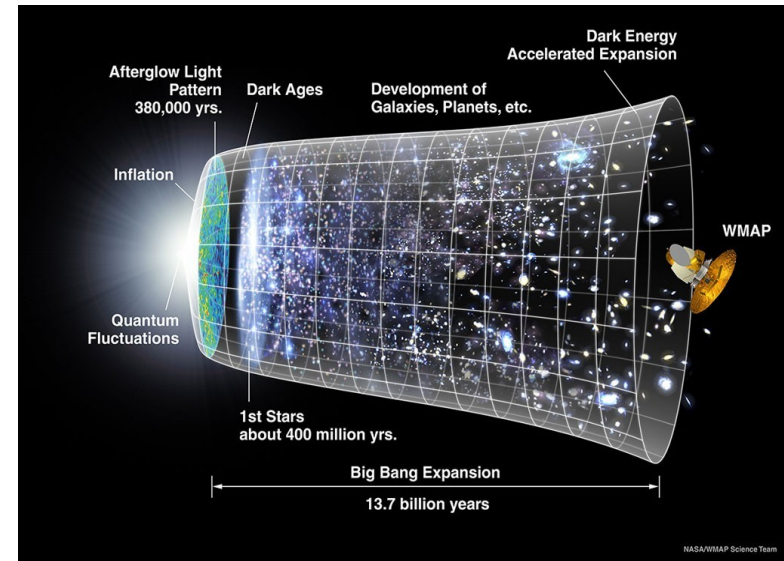
Sondes : supernovae, BAO,  
cisaillement gravitationnel, ...

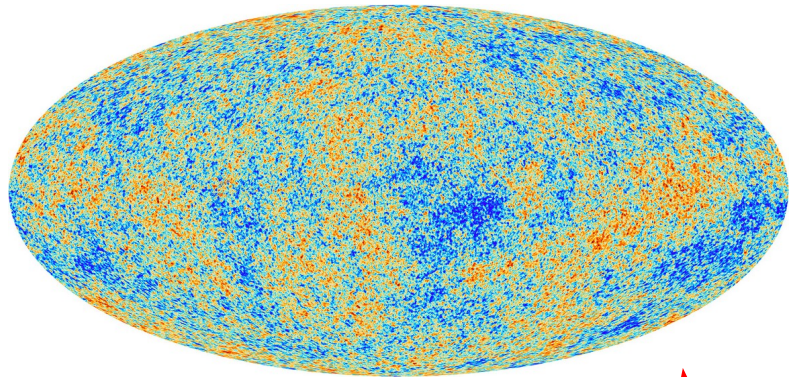


# Tester la gravité

- Une fois fixé le taux d'expansion, la relativité générale prédit l'évolution des structures sans paramètre libre.
- On peut donc tester la gravité en utilisant des observables directes de la formation des structures.

$$\ddot{\delta} + 2H(t)\dot{\delta} = 4\pi G\rho\delta$$



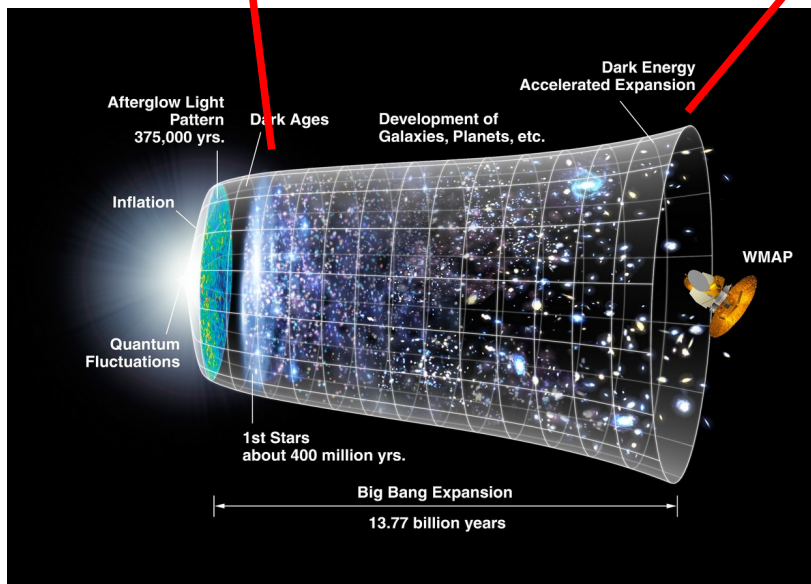


Observations  
de Planck  
 $z \sim 1100$

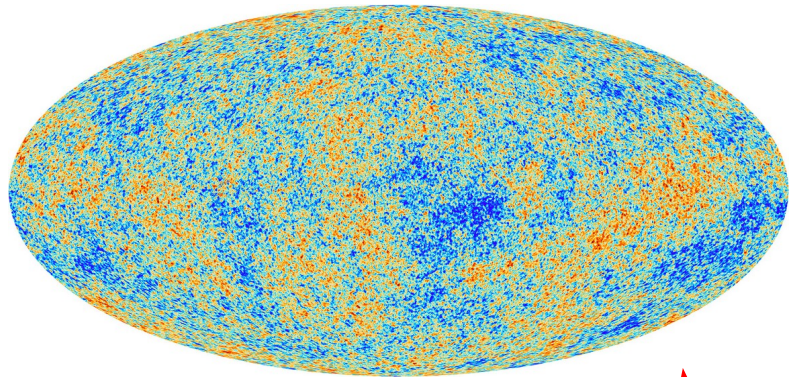
Prédiction  
via la R.G.



Observations  
directes  
( $z < 1$ )





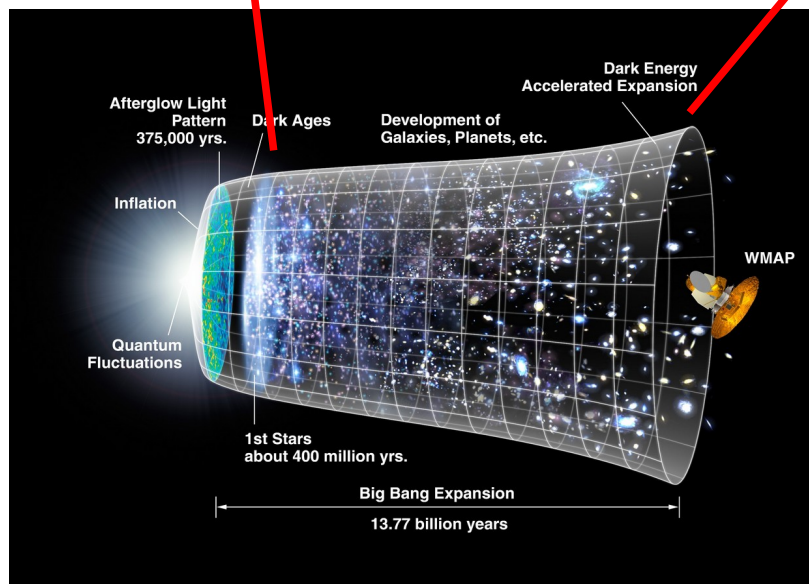


Observations  
de Planck  
 $z \sim 1100$

Prédiction  
via la R.G.



Observations  
directes  
( $z < 1$ )

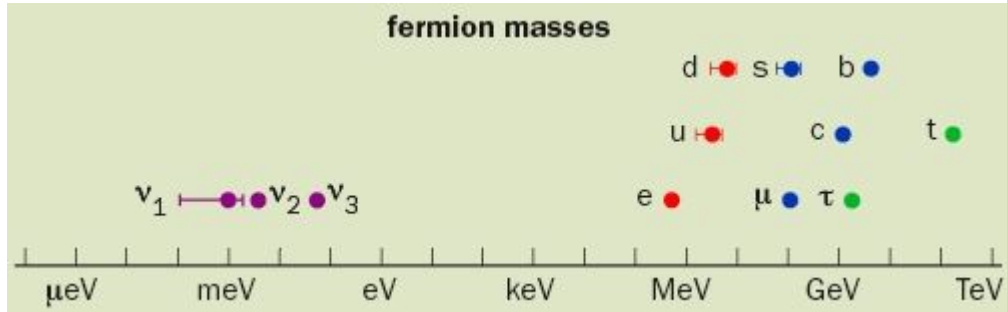


DESI (RSD)  
LSST (lensing)

# Objets compacts et physique fondamentale

- Les objets astrophysiques compacts sont à la fois variés et mystérieux.
- Conditions physiques extrêmes : champ de gravité, champs électromagnétiques, énergies cinétiques, ...
- Quelques questions ouvertes :
  - Source et nature des rayons cosmiques chargés extrêmes.
  - Fonctionnement des sources de photons de haute énergie
  - Flux de neutrinos de très haute énergie
  - Effets exotiques durant la propagation
  - Démographie des trous noirs

# Masses des neutrinos

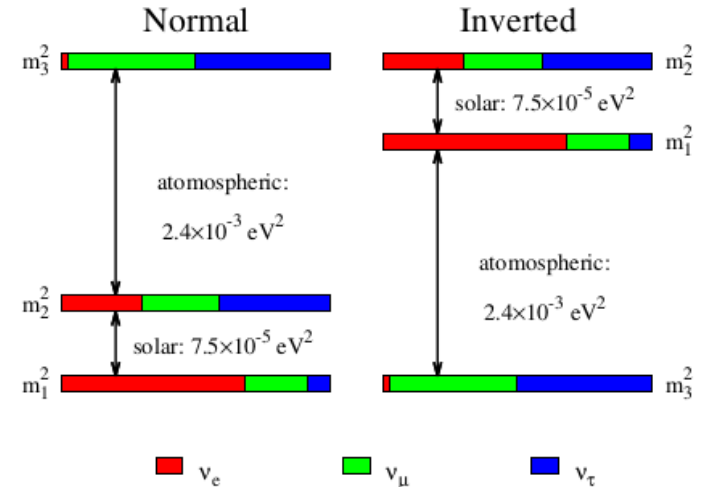


Si les neutrinos acquièrent leurs masses comme les autres fermions, le prouver paraît inaccessible.

On connaît les différences de masses par les oscillations.

Pour la « hiérarchie », il y a deux approches :

- Oscillations dans la matière (T2K, ..., DUNE) ou dans le vide (JUNO).
- Formation des grandes structures : DESI, LSST, modes B du CMB.



2008.11280 : combinaison JUNO, T2K NOVA, ..., avant DUNE

Asymétrie  
M/A

Masses des  
neutrinos

Universalité  
leptonique

Gravité

Higgs  
Brisure

Énergie  
noire

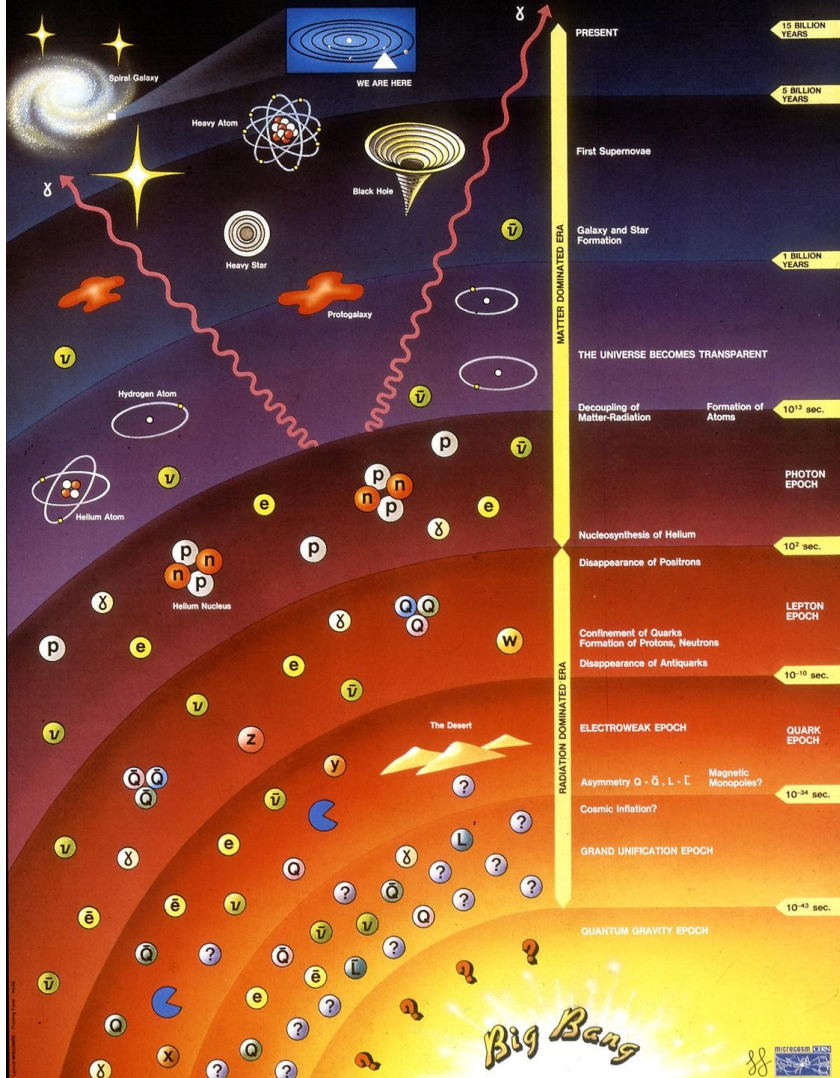
Inflation

Ondes  
gravitationnelles

Objets  
compacts

Matière  
noire

# History of the Universe



# L'histoire de l'univers

Formation des grandes structures

Formation des premières étoiles

Émission du fond diffus : premiers atomes

Nucléosynthèse : noyaux d'Hélium, Deutérium, Lithium...

Formation des nucléons

Période électrofaible

???

Inflation

Big Bang