

# Votre semaine

- <https://indico.in2p3.fr/event/39807/>

		Planning stage de seconde 2026					
		Lundi 15 juin	Mardi 16 juin	Mercredi 17 juin	Jeudi 18 juin	Vendredi 19 juin	
9h30	10h00	Ice Breaker / Présentation de la semaine / CPPM (Marlon B. & Julien C.)	Débrief J-1 et discussions (Marlon B. & Julien C.)	Débrief J-1 et discussions (Marlon B. & Julien C.)	Débrief J-1 et discussions (Marlon B. & Julien C.)	Débrief J-1 et discussions (Marlon B. & Julien C.)	
10h00	10h30						
10h30	11h00		La physique des 2 infinis (Marlon B.)	Visite virtuelle CERN (Thomas S., avec introduction Marlon B. & Julien C.)	Mécanique, production et visite de la salle blanche (Eric V. & Mathieu N.)	Cosmologie (Julian B.)	Informatique (Adrien R.)
11h00	11h30						
11h30	12h00	Visite CPPM (Marlon B. & Julien C.)	Physique des particules (Olivier L.)		Astroparticules et KM3net (Vincent B.)		
12h00	12h30						
12h30	13h00	Pause méridienne			Pause méridienne : Aware lunch (Myriam A., Françoise R. & Victoria C.)	Pause méridienne	
13h00	13h30	TP Roue cosmique (Fabrice F. & Julien Z.)	TP Accélérateur (Jean-Pierre E.)	Electronique + TP Arduino (Pierre B. & Julien Z.)			Visite hall KM3net (Vincent B.)
13h30	14h00						
14h00	14h30				Speed dating des métiers du CPPM	Plateau Radon (José B.)	
14h30	15h00						Discussions (métiers de la recherche, ...) et clôture (Marlon B. & Julien C.)
15h00	15h30						
15h30	16h00						
16h00	16h30						
		Code couleur					
		Discussion					
		Exposé					
		Atelier / TP					
		Visite					

(courte introduction à ...)

# La physique des 2 infinis

15 juin 2026

# Plan

---

- Echelles des distances en physique des particules, constituants élémentaires de la matière & histoire de l'univers.
- La physique à la fin du XIXe siècle.
- Révolutions conceptuelles début XXe siècle.
- De quoi est fait l'univers?
- Physique des constituants élémentaires de la matière.
- Univers et cosmologie.
- Quelques questions ouvertes.
- Programme de votre semaine et Q&A.

# De l'infiniment grand à l'infiniment petit

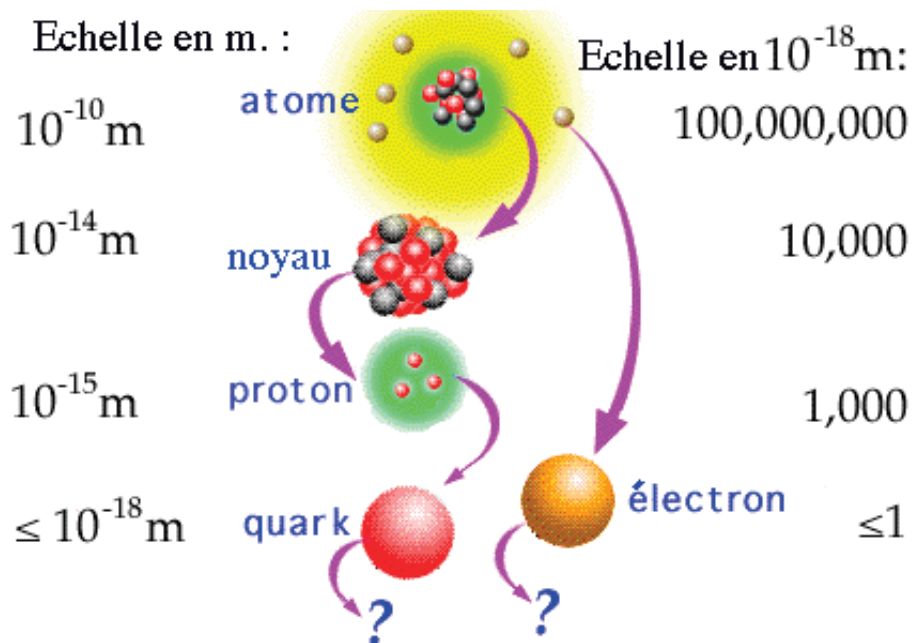
---

- Interlude -film-

# Distances en physique des particules

- Qu'est ce qui constitue la matière?

- Molécules, atomes, noyau, proton, quarks...

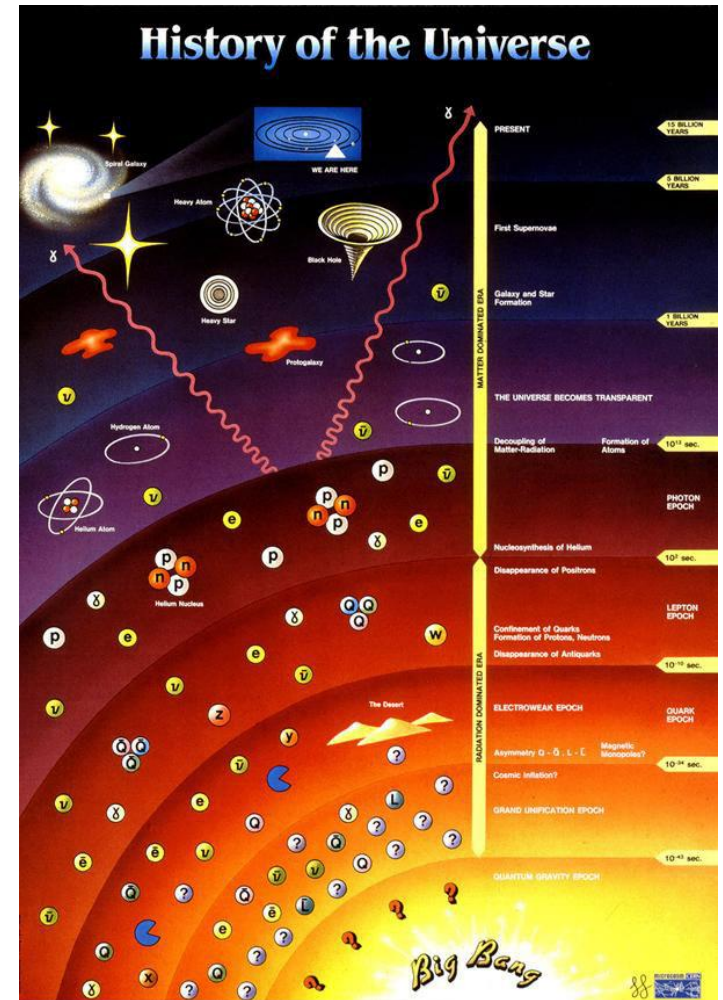


- Si protons et neutrons étaient à 10 cm l'un de l'autre, un quark ou un électron mesurerait 0,1 mm et un atome 10 km!

- Réponse à la question: **du vide!!!**

# Physique des particules & histoire de l'univers

- Au CPPM nous étudions les **constituants élémentaires** de la matière et leurs **interactions**.
  - Qu'est ce qu'on appelle constituants élémentaires de la matière?
    - Des **particules sans structure interne** ...
  - Que sont les interactions?
    - Les **forces** qui s'exercent entre ces particules...
- Dans l'univers froid d'aujourd'hui, la plupart des particules ont disparu.
- **Comment y accéder?**
  - Par la **théorie** et la **modélisation**
  - En cherchant à **les observer (astroparticules)**
  - Expérimentalement en les créant artificiellement dans des **accélérateurs de particules**
    - Comment?
    - On **accélère des particules**, lors de leur collisions on **concentre de l'énergie**.
    - Quand on concentre de l'énergie, on **remonte dans le temps!**



# La physique à la fin du XIXème siècle

- Fin XIXe, la physique est basée sur:

- Mécanique newtonienne (Newton).

- Principe d'inertie
- Loi de la dynamique
- Gravitation universelle

$$\sum \vec{F} = m\vec{a}$$



- Mécanique analytique (Lagrange):

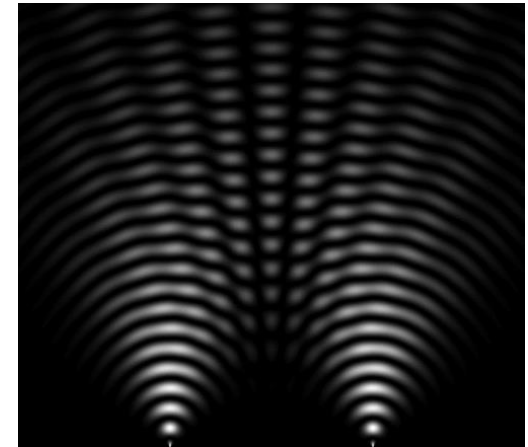
- Principe de moindre action

- Optique ondulatoire (Fresnel / Young)

- Nature ondulatoire de la lumière

- Electromagnétisme (Maxwell)

- Unification électricité-magnétisme!



- Existence des **atomes? pas prouvée, en débat!**

- **Lumière = onde** électromagnétique se propageant dans un **éther**

# La physique à la fin du XIXème siècle

- Fin XIXe, la physique est basée sur:
  - Mécanique newtonienne (Newton).

- Principe d'inertie

$$\sum \vec{F} = m\vec{a}$$



*Equations de Maxwell locales dans un milieu conducteur*

$$\text{div } \mathbf{E} = \rho/\epsilon_0$$

*Equation de Maxwell Gauss*

$$\text{rot } \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B}/\partial t$$

*Equation de Maxwell Faraday*

$$\text{div } \mathbf{B} = 0$$

*Equation de Maxwell Thomson ou flux*

$$\text{rot } \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + \mu_0 \epsilon_0 \partial \mathbf{E}/\partial t$$

*Equation de Maxwell Ampère*

- Electromagnétisme (Maxwell)

- Unification électricité-magnétisme!



- Existence des **atomes? pas prouvée, en débat!**
- **Lumière = onde** électromagnétique se propageant dans un **éther**

# Début XXème : révolutions conceptuelles

---

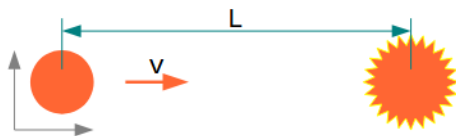
- Lord Kelvin en 1900 (British Association for advancement of Science):
  - « There is nothing new to be discovered in physics now. All that remains is more and more precise measurement. »
- Début XXe siècle, deux théories fondamentales voient le jour et changent notre compréhension de la physique, des plus petites échelles aux plus grandes:
  - La relativité restreinte (puis la relativité générale)
  - La mécanique quantique
- Ces théories vont bouleverser notre compréhension du monde de l'infiniment petit, des hautes énergies, et de l'infiniment grand.

# La relativité restreinte

- Albert Einstein (1905) tire les conséquences du fait que la lumière se propage dans le vide avec une vitesse identique dans tous les référentiels → «  $c$  » (vitesse de la lumière) est un invariant
- Conséquence: **Contraction des longueurs et dilatation du temps.**
  - L'écoulement du temps dépend du référentiel.
  - On distingue un **temps propre** ( $t_0$ ) mesuré dans le référentiel liée à l'objet considéré et le temps pour un observateur fixe pour lequel l'objet se déplace à vitesse  $v$ :
  - $t = \gamma t_0$  (avec  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-(v^2/c^2)}}$ )

... quand  $v$  approche de  $c$ ,  $\gamma$  devient très grand).

- Exemple: Envoi d'une bombe programmée pour exploser après une seconde



1) $v =$	300 km/s (0,1 % $c$ )	→ $L =$	300 km ( $t = 1s$ )
2) $v =$	29 979 km/s (10 % $c$ )	→ $L =$	30 130 km ( $t = 1s$ )
3) $v =$	269 813 km/s (90 % $c$ )	→ $L =$	618 994 km ( $t = 2s$ )
4) $v =$	296 794 km/s (99 % $c$ )	→ $L =$	2 103 921 km ( $t = 7s$ )
5) $v =$	299 493 km/s (99,9 % $c$ )	→ $L =$	6 698 534 km ( $t = 22s$ )

- Il faut **prendre en compte la relativité restreinte dès que les vitesses s'approchent de la vitesse limite  $c$**  (vitesse de la lumière dans le vide)

# Relativité restreinte, masse et énergie

- Equivalence masse-énergie :  $E=mc^2$
- La masse est une forme d'énergie.
  - Energie au repos:  $E_0 = mc^2$  (référentiel dans lequel le corps est immobile)
- Energie totale d'un système:
  - $E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$  ( $p=mv$  est la quantité de mouvement)
- On peut transformer de l'énergie en masse:

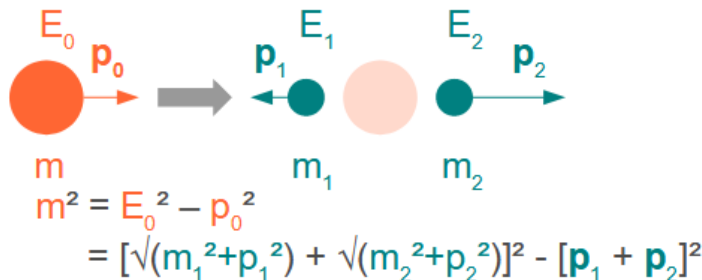


$$E_0 = E_1 + E_2 = \sqrt{(m_1^2 + p_1^2)} + \sqrt{(m_2^2 + p_2^2)} = \sqrt{(m^2 + p_0^2)}$$

exemple : collision de protons avec  $E = 7$  TeV  
 → énergie disponible :  $E_0 = 14$  TeV

Lors de collision, on peut créer des objets plus lourds que ceux initialement présents !

- Et inversement!

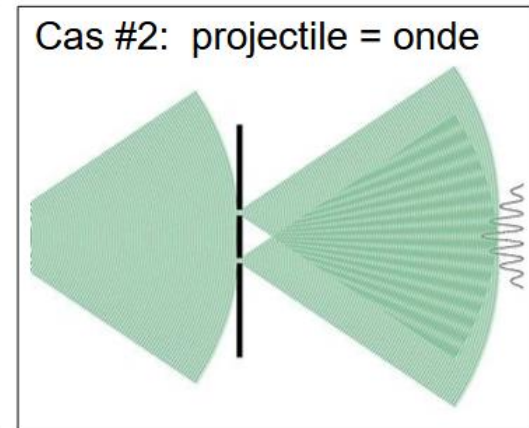
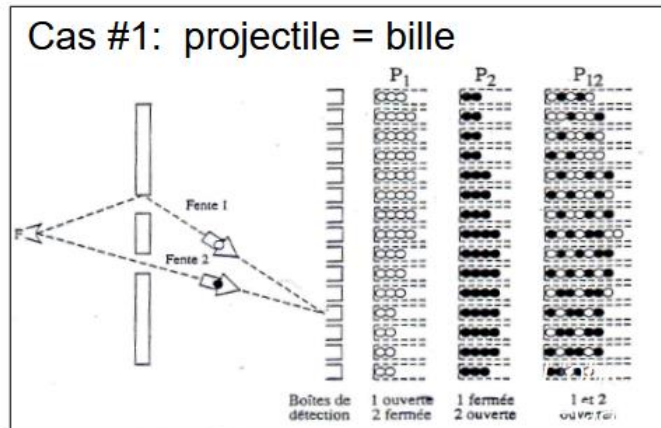
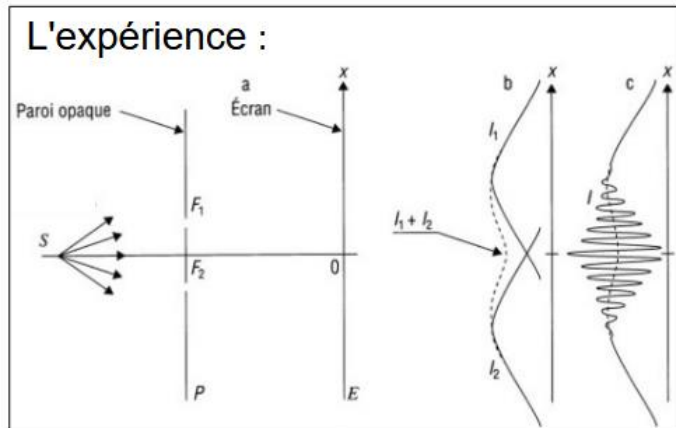


exemple : désintégration de particules instables

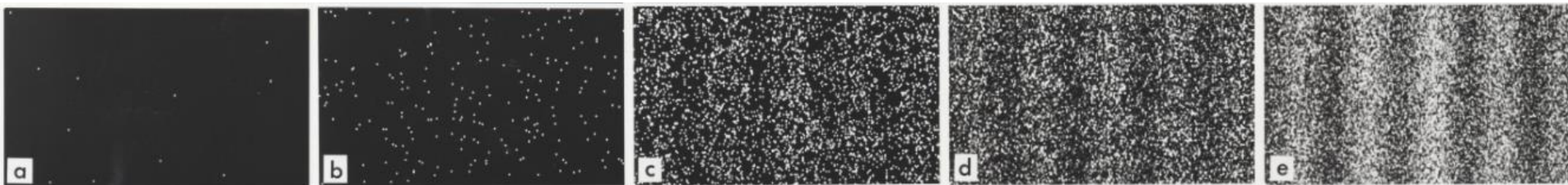
En identifiant la nature des produits de désintégration, on connaît leur masse.  
 En mesurant en plus leur impulsion, on peut remonter à la masse et donc à la nature de la particule initiale

# La mécanique quantique

- Expérience des **fentes de Young** (début XIXe):



- Observation: ni cas 1 ni cas 2  $\rightarrow$  cas 3!

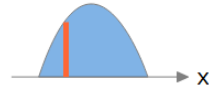


- Observation: **impacts individuels ET franges d'interférences** (si détection d'où passent les particules, l'interférence disparaît)
- Expérience initiale avec la **lumière**... depuis: **électrons, atomes**...

# Les objets quantiques

- **Dualité onde-corpuscule** (objet étendu pouvant interférer ET objet ponctuel avec position et impulsion déterminées)
- **Objet quantique: des caractéristiques corpusculaires suivant des lois de probabilité dictées par l'onde associée.**
- **Le flou quantique:**
  - **Relations d'incertitude d'Heisenberg (1927):**

ex : la position d'une particule



Si la précision sur la mesure de position d'une particule est  $\Delta x$ , alors son impulsion  $p=mv$  a une précision telle que:

$$\Delta x \cdot \Delta p > \hbar/4\pi$$

(constante de Planck... quantité très petite!)

Si la précision sur la mesure du temps de passage d'une particule est  $\Delta t$ , alors son énergie  $\Delta E$  a une précision telle que:

$$\Delta E \cdot \Delta t > \hbar/4\pi$$

**Intérêt du flou quantique:**

- Une **énergie peut être empruntée au vide** pendant un temps très court (respectant  $\Delta E \cdot \Delta t$  assez petit)
- Puis,  $E = mc^2$ , des **particules virtuelles peuvent être créées pendant un temps d'autant plus court que la particule est lourde.**

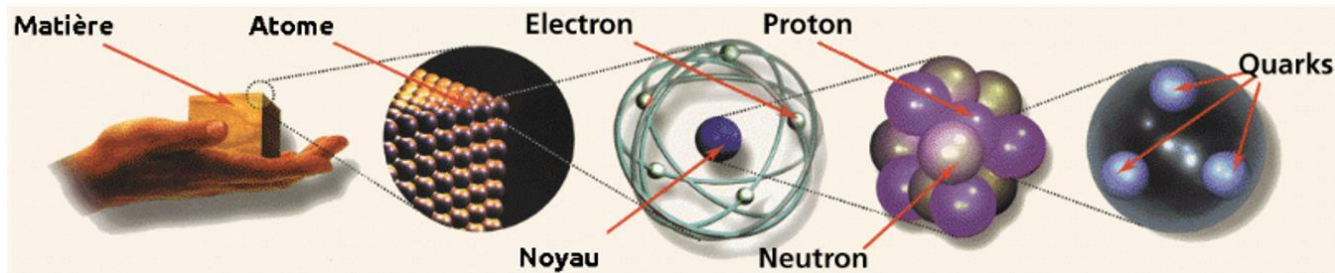
# Interprétation de la mécanique quantique

---

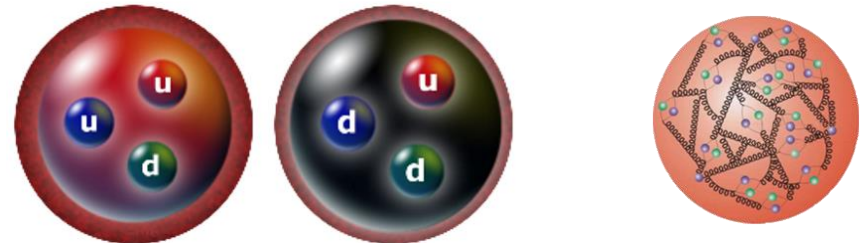
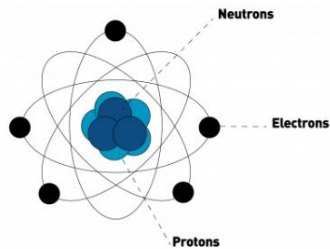
- Est-ce un **artifice mathématique** ou **une réalité de la physique**?
- L'**aspect probabiliste** heurte les partisans du déterminisme:
  - Einstein 1927 : « Dieu ne joue pas aux dés avec l'univers »
- Dualité onde-particule:
  - Difficile à interpréter, à longterm fait débat, **toujours un sujet d'études actives** (Serge Haroche, prix Nobel 2012)
- Malgré réticences et aspects contre-intuitifs, **de multiples expériences confirment les prédictions de la mécanique quantique**.
- Applications: cryptologie quantique, téléportation quantique (lié à l'intrication quantique), informatique quantique...

# De quoi est fait l'univers visible?

- La matière visible, des galaxies aux virus, est faite de **quarks up (u) et down (d) et d'électrons**.

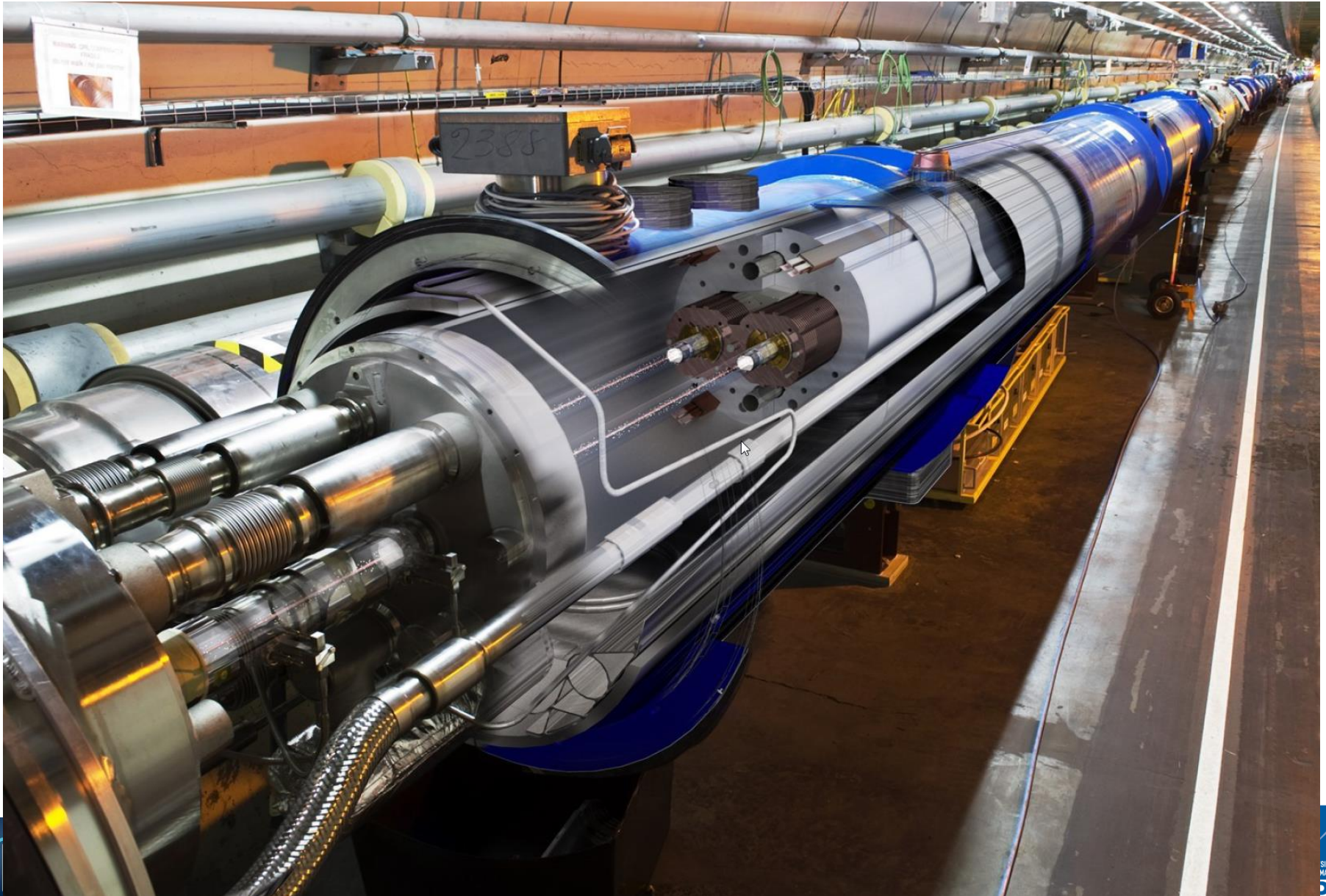


- Les **électrons** gravitent autour des noyaux



- Protons et neutrons des noyaux atomiques sont faits de **3 quarks**
- Des **neutrinos** sont émis dans les réactions nucléaires au cœur des étoiles

# Le Large Hadron Collider



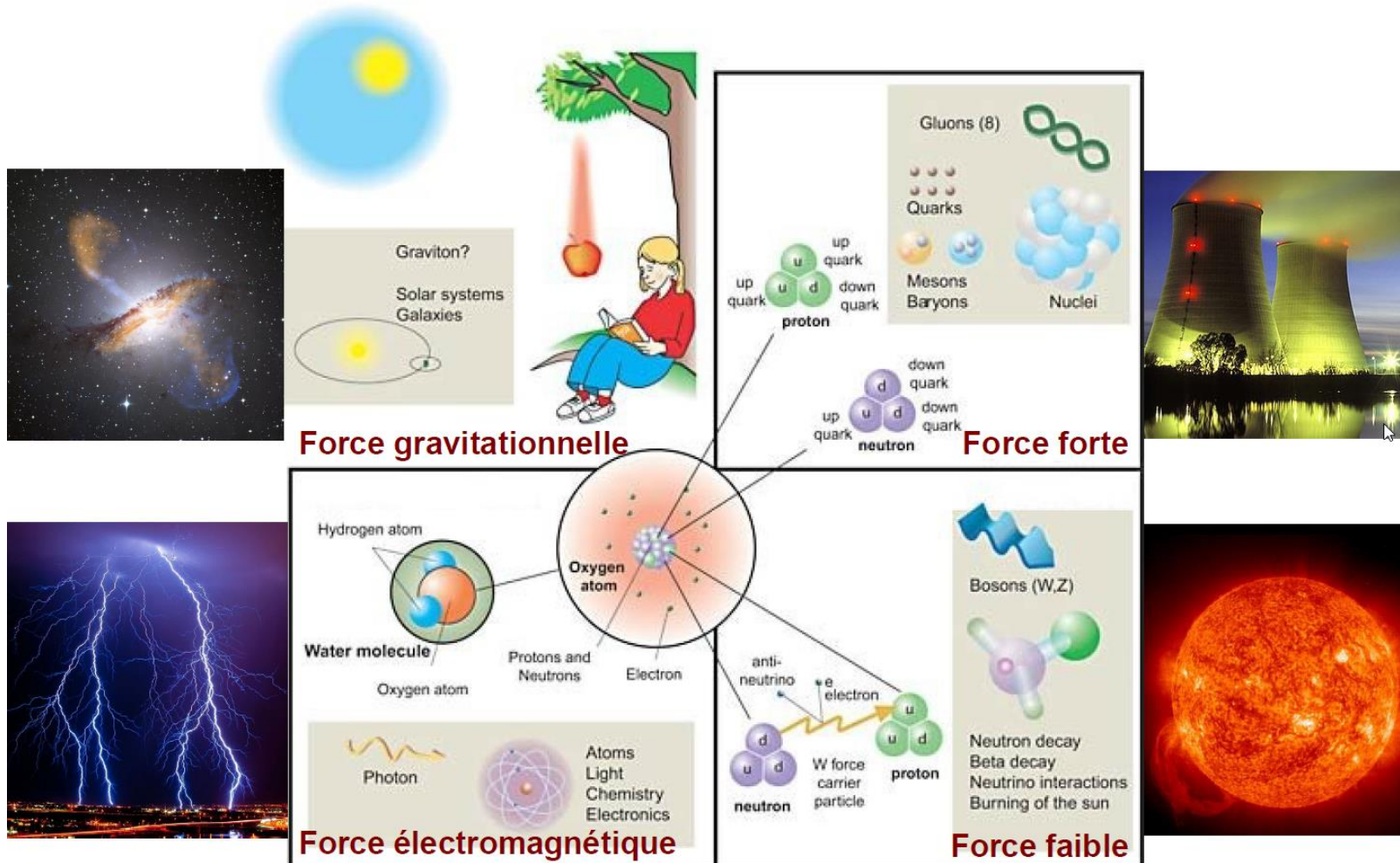
# CERN

---

- Interlude film

# Les forces

- Elles régissent les interaction entre particules:



# 1 famille de particules ?

- Expérimentalement on a vu que non: **3 familles**

	masse → 2.3 MeV charge → $\frac{2}{3}$ spin → $\frac{1}{2}$ <b>u</b> up	1.275 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>c</b> charmé	173 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>t</b> top	0 0 1 gluon <b>g</b>	126 GeV 0 0 Higgs <b>H</b>
QUARKS	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>d</b> down	95 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>s</b> étrange	4.18 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>b</b> bottom	0 0 1 photon <b>γ</b>	
	0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ <b>e</b> électron	105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ <b>μ</b> muon	1.777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ <b>τ</b> tau	91.2 GeV 0 1 boson Z <b>Z</b>	
LEPTONS	< 2.2 eV 0 $\frac{1}{2}$ <b>ν<sub>e</sub></b> neutrino électronique	< 0.17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b>ν<sub>μ</sub></b> neutrino muonique	< 15.5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b>ν<sub>τ</sub></b> neutrino tau	80.4 GeV ±1 1 boson W <b>W</b>	BOSONS

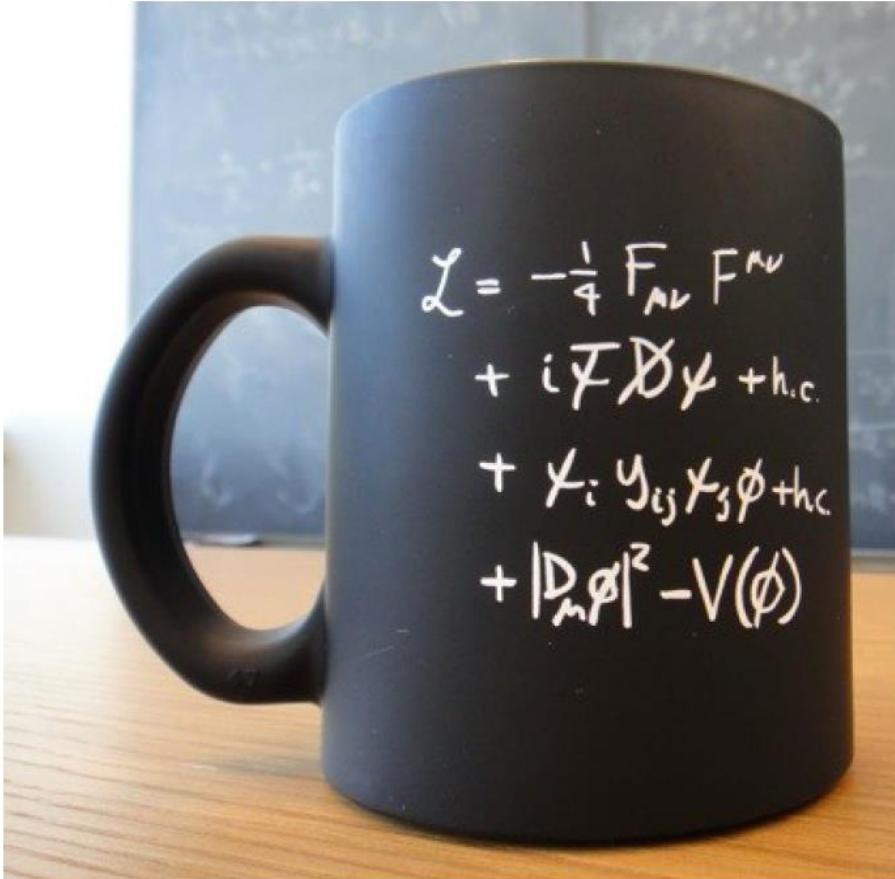
+ antimatière (leptons / quarks) !!!

Cette organisation théorique (et les maths qui la sous-tende) s'appelle le **modèle standard des particules**

# Le modèle standard

- Version synthétique

- Version développée...



$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e + \\
 & \frac{1}{2}ig_s^2(\bar{q}_i^\mu \gamma^\mu q_j^\sigma)g_\mu^a + C^a \partial^2 C^a + g_s f^{abc} \partial_\mu C^a G^b g_\mu^c - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2}M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \\
 & \frac{1}{2}\partial_\mu \mathbf{H} \partial_\mu \mathbf{H} - \frac{1}{2}m_H^2 \mathbf{H}^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \\
 & \frac{1}{2c_w^2}M \phi^0 \phi^0 - \beta_h \left[ \frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g} \mathbf{H} + \frac{1}{2}(\mathbf{H}^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right] + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - \\
 & igc_w [\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + \\
 & Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - ig_s w [\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - \\
 & A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - \\
 & \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\nu^+ W_\mu^- + \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^+ W_\nu^- + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\nu^+ Z_\nu^0 W_\mu^- - \\
 & Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\nu^+ W_\mu^-) + g^2 s_w^2 (A_\mu W_\nu^+ A_\nu W_\mu^- - A_\mu A_\nu W_\nu^+ W_\mu^-) + \\
 & g^2 s_w c_w [A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-] - g\alpha [\mathbf{H}^3 + \\
 & \mathbf{H} \phi^0 \phi^0 + 2\mathbf{H} \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{8}g^2 \alpha_h [\mathbf{H}^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + \\
 & 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4\mathbf{H}^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 \mathbf{H}^2] - gM W_\mu^+ W_\mu^- \mathbf{H} - \\
 & \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w} Z_\mu^0 Z_\mu^0 \mathbf{H} - \frac{1}{2}ig [W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \\
 & \phi^+ \partial_\mu \phi^0)] + \frac{1}{2}g [W_\mu^+ (\mathbf{H} \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \mathbf{H}) - W_\mu^- (\mathbf{H} \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \mathbf{H})] + \\
 & \frac{1}{2}g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (\mathbf{H} \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu \mathbf{H}) - ig \frac{s_w}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \\
 & ig s_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + \\
 & ig s_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- [\mathbf{H}^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-] - \\
 & \frac{1}{4}g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 [\mathbf{H}^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2}g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \mathbf{H} (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu \mathbf{H} (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\
 & g^1 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda \gamma \partial \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + m_u^\lambda) u_j^\lambda - \\
 & \bar{d}_j^\lambda (\gamma \partial + m_d^\lambda) d_j^\lambda + ig s_w A_\mu [ -(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3}(\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda) ] + \\
 & \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - \\
 & 1 - \gamma^5) u_j^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5) d_j^\lambda) ] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) e^\lambda) + \\
 & (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda k} d_k^\lambda) ] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- [(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda k}^\dagger \gamma^\mu (1 + \\
 & \gamma^5) u_j^\lambda) ] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} \frac{m_\lambda^2}{M} [-\phi^+ (\bar{\nu}^\lambda (1 - \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (\bar{e}^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) ] - \\
 & \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} (\mathbf{H} (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i\phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda) ) + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ [-m_d^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda k} (1 - \gamma^5) d_k^\lambda) + \\
 & m_u^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda k} (1 + \gamma^5) d_k^\lambda) ] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_d^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda k}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\lambda) - m_u^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda k}^\dagger (1 - \\
 & \gamma^5) u_j^\lambda) ] - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} \mathbf{H} (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} \mathbf{H} (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \\
 & \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^2}{c_w} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + X^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + X^- (\partial^2 - M^2) X^- + X^0 (\partial^2 - \\
 & \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + igc_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig s_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + igc_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + ig s_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \\
 & \partial_\mu \bar{Y} X^+) + igc_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + ig s_w A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2}gM [\bar{X}^+ X^+ \mathbf{H} + \bar{X}^- X^- \mathbf{H} + \frac{1}{c_w} \bar{X}^0 X^0 \mathbf{H}] + \\
 & \frac{1-2c_w^2}{2c_w} igM [\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{2c_w} igM [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \\
 & igM s_w [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \frac{1}{2}igM [\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0]
 \end{aligned}$$

# 1 famille de particules ?

- Expérimentalement on a vu que non: **3 familles**

	masse → 2.3 MeV charge → $\frac{2}{3}$ spin → $\frac{1}{2}$ <b>u</b> up	1.275 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>c</b> charmé	173 GeV $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>t</b> top	0 0 1 gluon <b>g</b>	126 GeV 0 0 Higgs <b>H</b>
QUARKS	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>d</b> down	95 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>s</b> étrange	4.18 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>b</b> bottom	0 0 1 photon <b>γ</b>	
	0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ <b>e</b> électron	105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ <b>μ</b> muon	1.777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ <b>τ</b> tau	91.2 GeV 0 1 boson Z <b>Z</b>	
LEPTONS	< 2.2 eV 0 $\frac{1}{2}$ <b>ν<sub>e</sub></b> neutrino électronique	< 0.17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b>ν<sub>μ</sub></b> neutrino muonique	< 15.5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ <b>ν<sub>τ</sub></b> neutrino tau	80.4 GeV ±1 1 boson W <b>W</b>	BOSONS

Cette organisation théorique (et les maths qui la soutende) s'appelle le **modèle standard des particules** → Problème : **des particules sans masse!** jusqu'en 1964 (théorie de P. Higgs et al)

Le boson de Higgs a été découvert en 2012 au CERN (expérience ATLAS et CMS)

# Changement d'échelle!!!

---

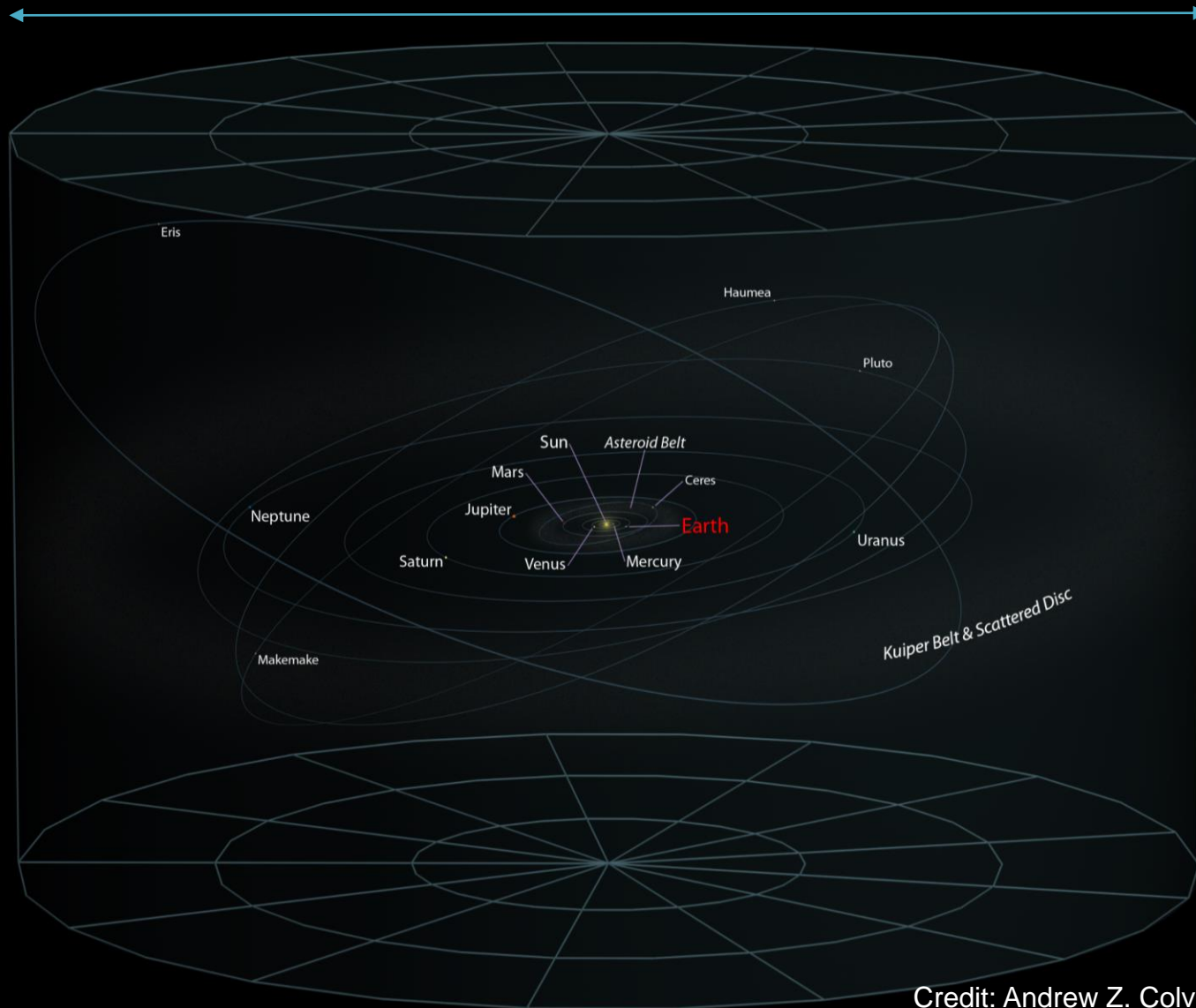
# LE SYSTÈME SOLAIRE



# LE SYSTÈME SOLAIRE

Vitesse de la lumière  $c = 300\,000\text{ km/s}$

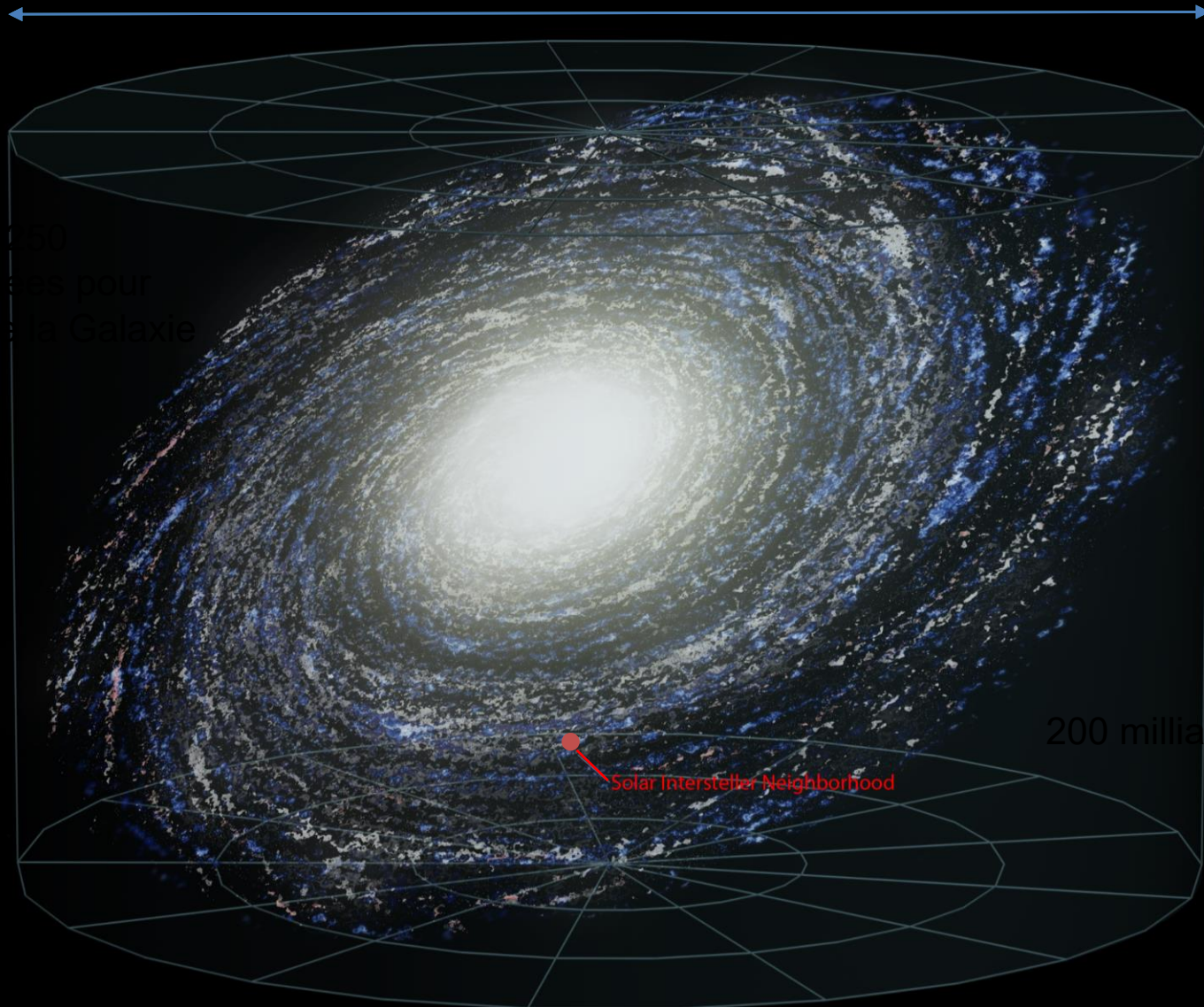
15 milliards de km = 20 heures lumière



Credit: Andrew Z. Colvin

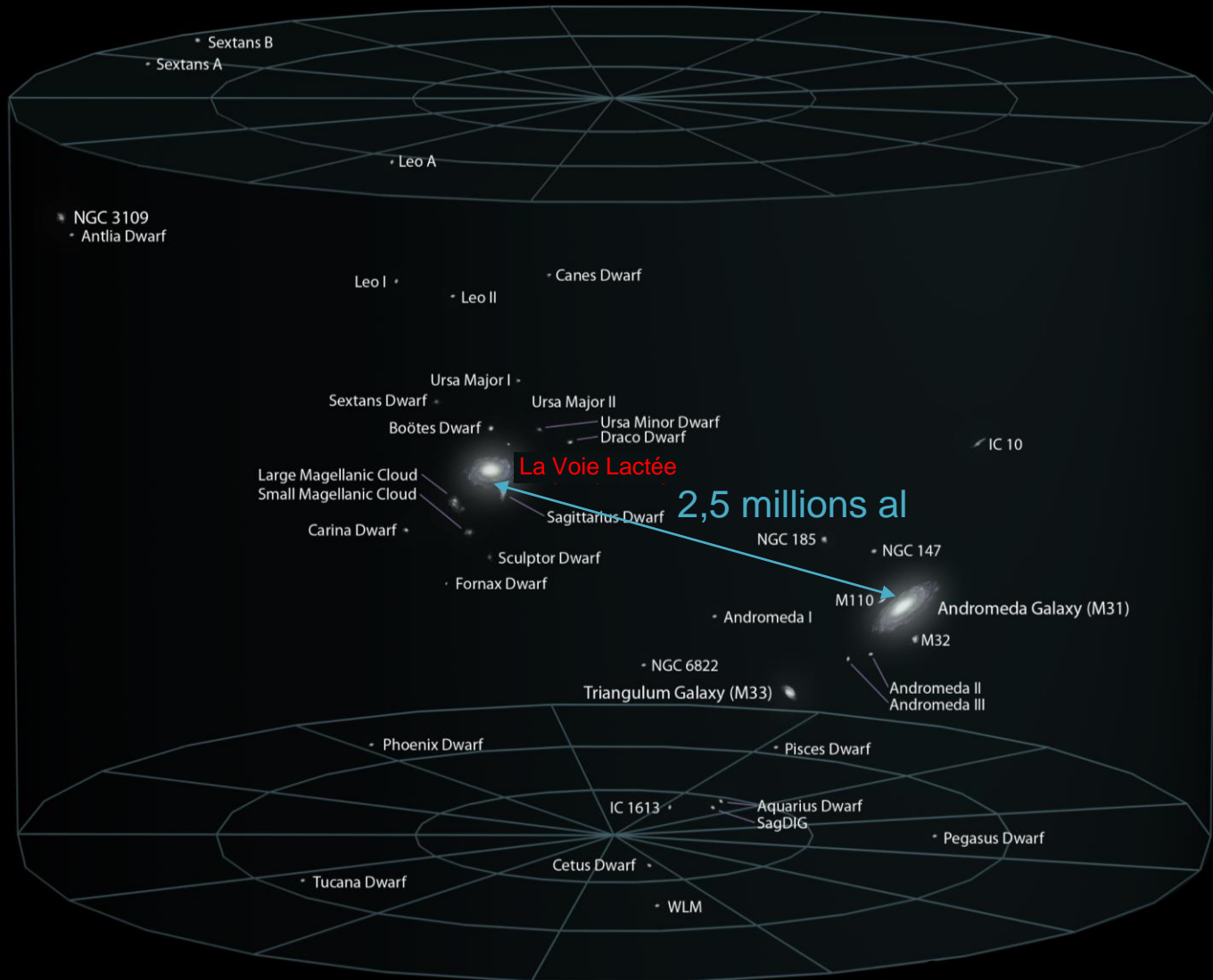
# LA VOIE LACTÉE

150 000 années lumière



# LE GROUPE LOCAL

10 millions d'années lumière



# LE GRAND VERTIGE ....



## Dans l'Univers observable

D'après les observations de Hubble,  
Il y aurait 2 000 milliards de galaxies,  
contenant chacune plus de 100 milliards d'étoiles,

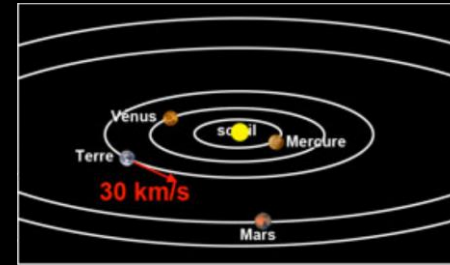
soit 200 000 milliards de milliards d'étoiles....  
(200 000 000 000 000 000 000 000 000)

La cosmologie: l'étude de l'Univers et de son évolution

# ... À GRANDE VITESSE

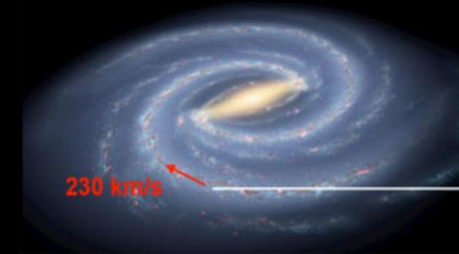
- **Dans le système Solaire**

La Terre tourne autour du Soleil à 100 000 km/h.



- **Dans la Galaxie**

Le Soleil orbite autour du centre de la Voie lactée à 850 000 km/h



- **Dans l'Univers Local**

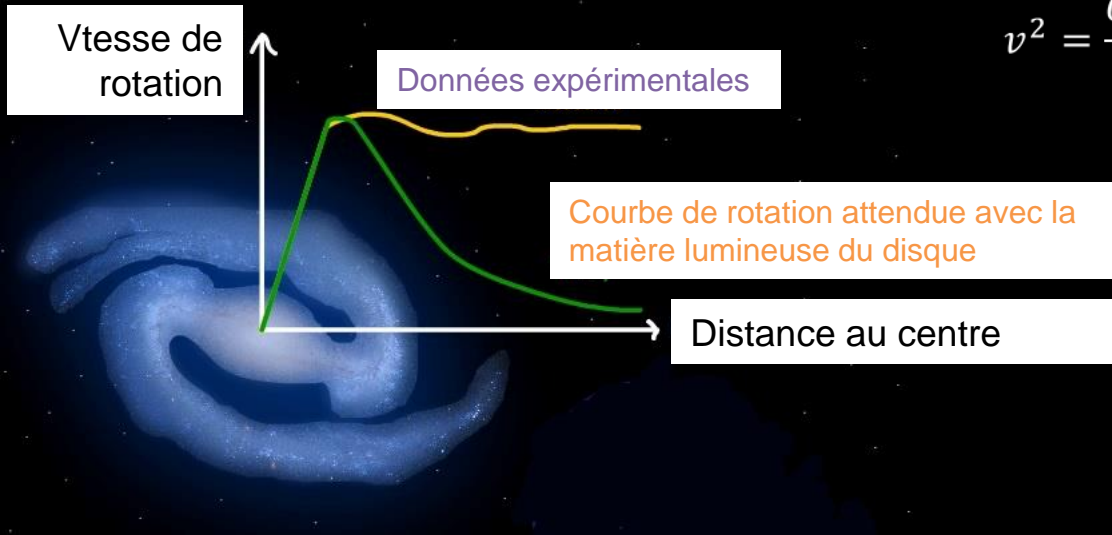
La Voie lactée et sa voisine la Galaxie d'Andromède (située à 2,5 millions d'années-lumière) s'attirent mutuellement. Nous fonçons ainsi vers elle à environ 400 000 km/h. Fusion prévue dans 3-4 milliards d'années.

- **Dans l'Univers**

Notre amas de galaxies local se déplace lui aussi relativement à d'autres. Notre galaxie navigue à près de 2,3 millions de km/h, soit 630 km par seconde, en direction de l'amas de galaxies de la Vierge.

# La Matière noire

- La mise en évidence



il doit exister une grande quantité de matière invisible!

Découverte de la matière noire en 1933

→ Matière noire de 3 à 10 fois plus importante que la matière stellaire.

Mesure de la Vitesse des galaxies dans les amas de galaxies (F. Zwicky 1933)



Mesure de la Vitesse des étoiles dans les galaxies (V. Rubin 1970)



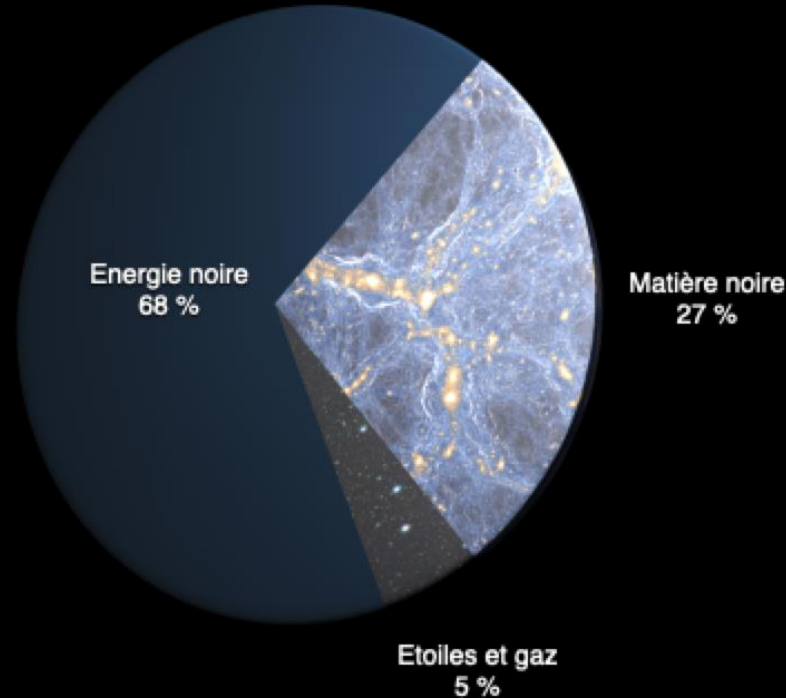
# L'expansion de l'Univers

- La loi de Hubble-Lemaître en 1929



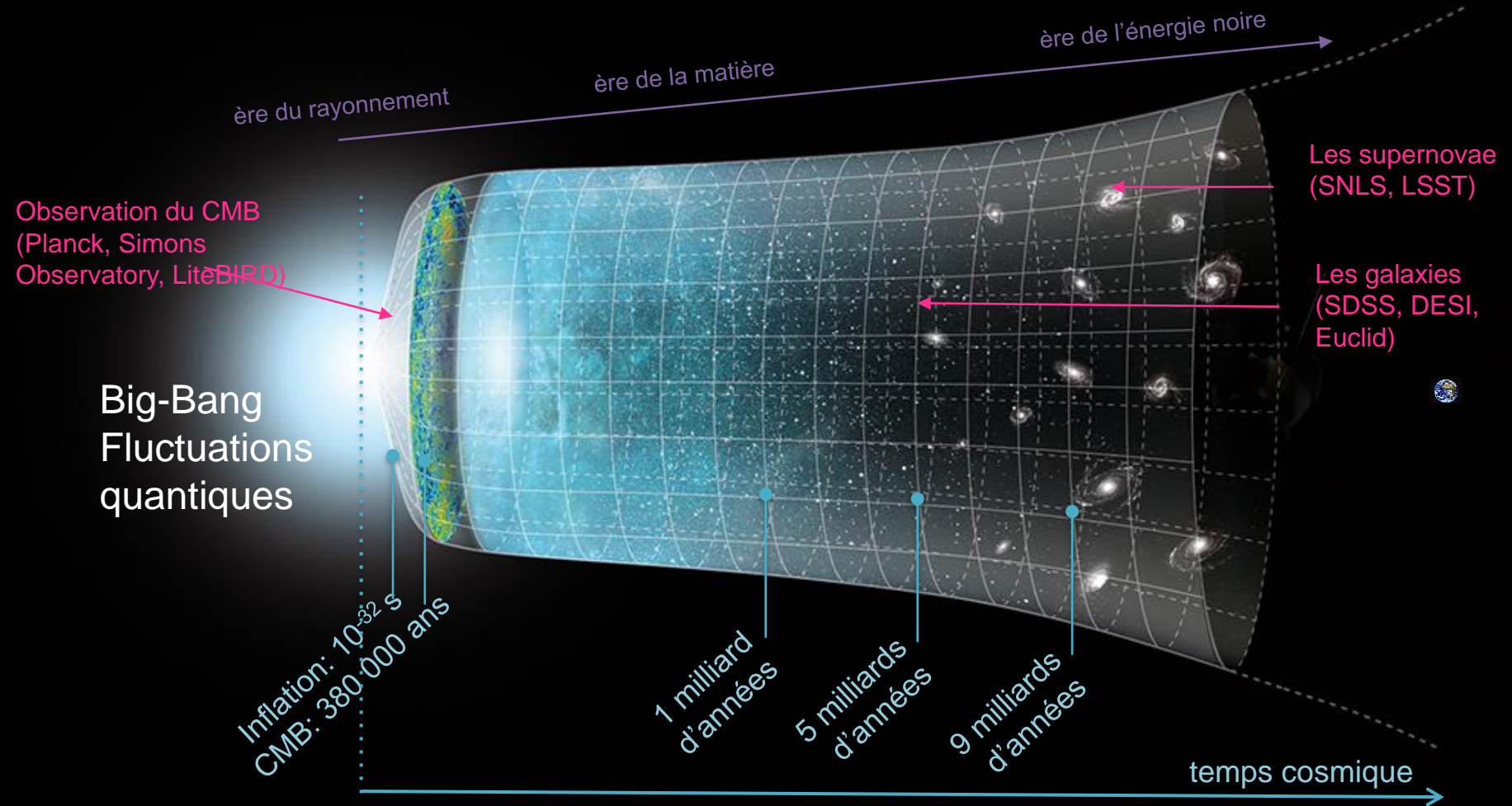
# Le Modèle standard de la cosmologie

La composition énergétique de l'Univers :



Nature de la matière noire (CDM) et de l'énergie noire ( $\Lambda$ ) ?

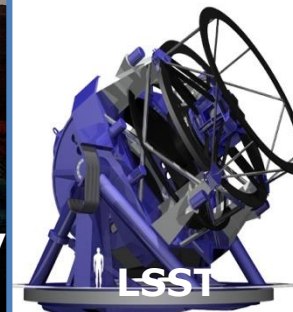
# L'HISTOIRE DE L'UNIVERS: LA COSMOLOGIE



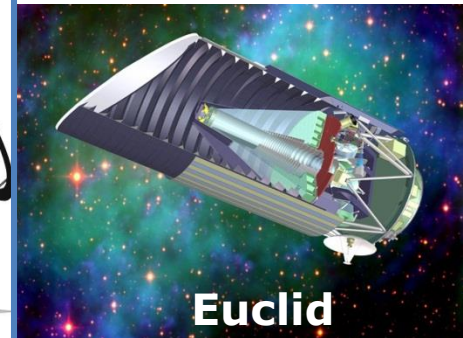
# Expériences au CPPM



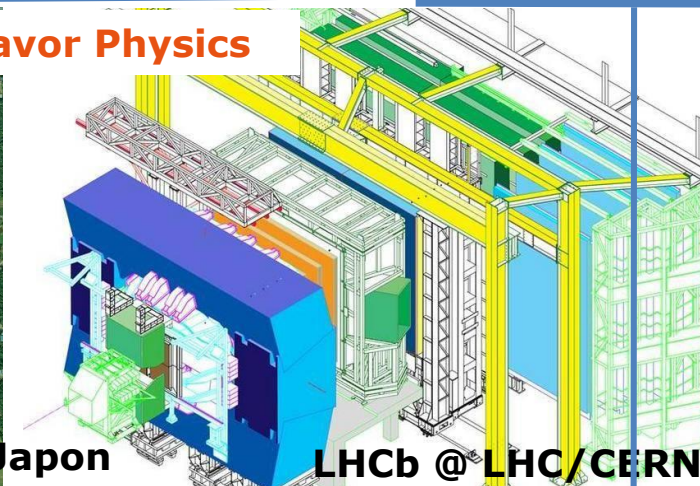
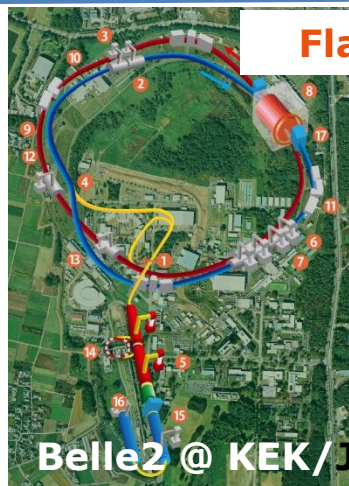
## Dark Matter / Dark Energy



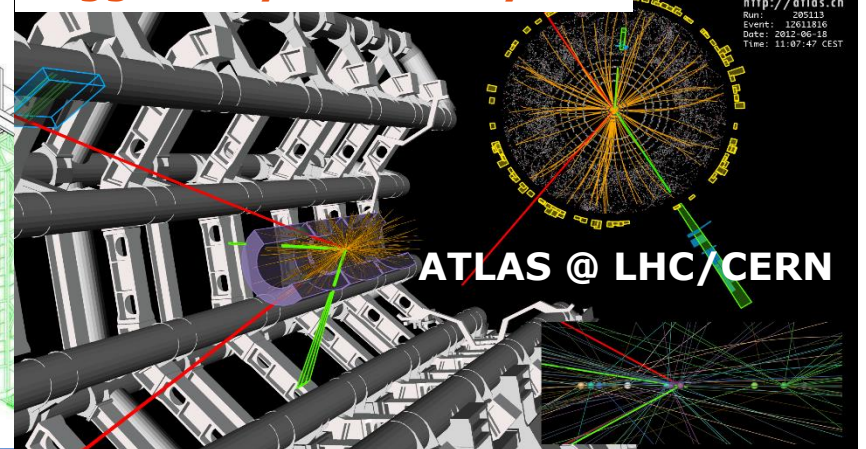
## Cosmology



## Flavor Physics



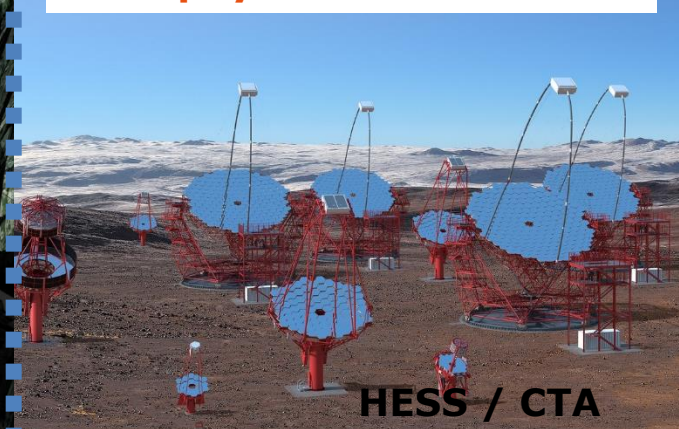
## Higgs / Beyond SM Physics



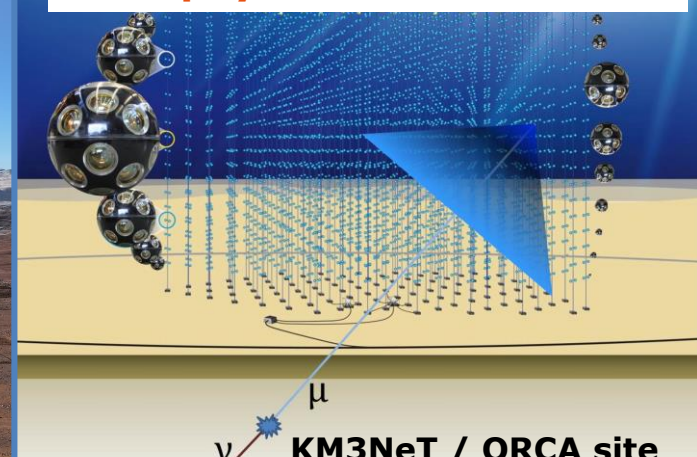
## Neutrino nature



## Astrophysics with Photons



## Astrophysics with Neutrino

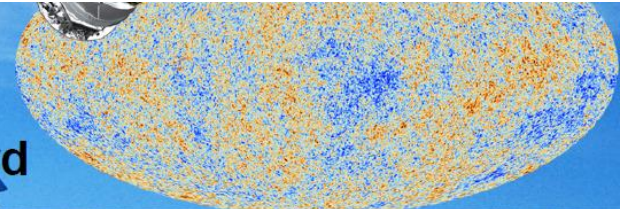


# En résumé

Nous et l'Univers visible



**5% Modèle standard**



Pourquoi : 3 familles de particules ? Nature et masses des neutrinos ? Ou est l'antimatière ? Quarks et leptons sont ils élémentaires ? Les constantes fondamentales ont-elles une explication ? Comment intégrer monde quantique et gravitation ?

# En résumé

Nous et l'Univers visible

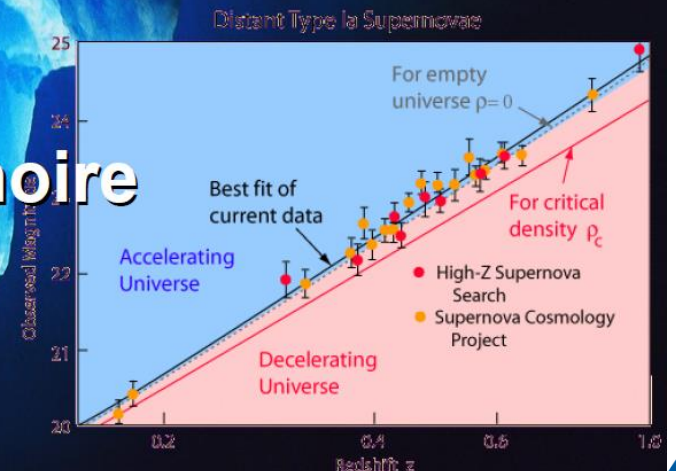
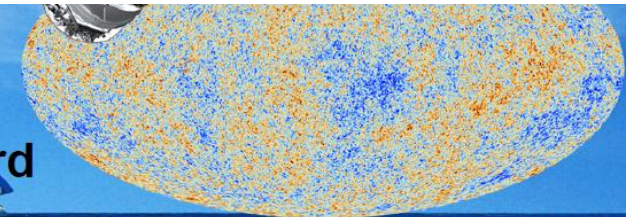
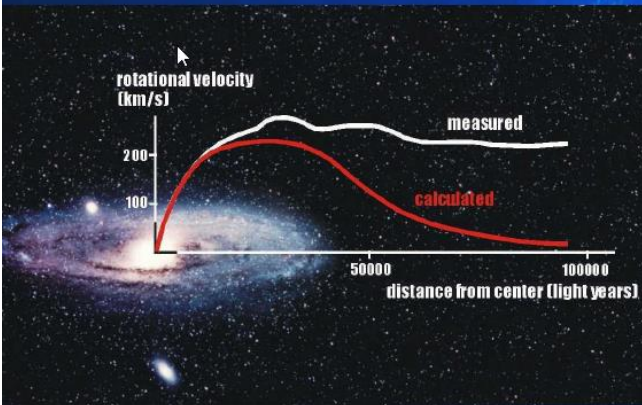
5% Modèle standard

27% Matière noire

68% Énergie noire

Pas la moindre idée de son origine !

- On ne sait pas ce que c'est mais on croit savoir que c'est là
- Candidats observables au LHC (supersymétrie, ...) ?



# Plan

---

- Echelles des distances en physique des particules, constituants élémentaires de la matière & histoire de l'univers.
- La physique à la fin du XIXe siècle.
- Révolutions conceptuelles début XXe siècle.
- De quoi est fait l'univers?
- Physique des constituants élémentaires de la matière.
- Univers et cosmologie.
- Quelques questions ouvertes.
- Programme de votre semaine et Q&A.

# Votre semaine

- <https://indico.in2p3.fr/event/39807/>

Planning stage de seconde 2026

		Lundi 15 juin	Mardi 16 juin	Mercredi 17 juin	Jeudi 18 juin	Vendredi 19 juin
9h30	10h00	Ice Breaker / Présentation de la semaine / CPPM (Marlon B. & Julien C.)	Débrief J-1 et discussions (Marlon B. & Julien C.)	Débrief J-1 et discussions (Marlon B. & Julien C.)	Débrief J-1 et discussions (Marlon B. & Julien C.)	Débrief J-1 et discussions (Marlon B. & Julien C.)
10h00	10h30					
10h30	11h00		Visite virtuelle CERN (Thomas S., avec introduction Marlon B. & Julien C.)	Mécanique, production et visite de la salle blanche (Eric V. & Mathieu N.)	Cosmologie (Julian B.)	Informatique (Adrien R.)
11h00	11h30	La physique des 2 infinis (Marlon B.)	Astroparticules et KM3net (Vincent B.)			
11h30	12h00	Physique des particules (Olivier L.)				
12h00	12h30	Visite CPPM (Marlon B. & Julien C.)	Pause méridienne			Pause méridienne
12h30	13h00	TP Roue cosmique (Fabrice F. & Julien Z.)	TP Accélérateur (Jean-Pierre E.)	Electronique + TP Arduino (Pierre B. & Julien Z.)	Pause méridienne : Aware lunch (Myriam A., Françoise R. & Victoria C.)	Pause méridienne
13h00	13h30				Visite hall KM3net (Vincent B.)	Visite salle imagerie (Yannick B.)
13h30	14h00					Speed dating des métiers du CPPM
14h00	14h30				Discussions (métiers de la recherche, ...) et clôture (Marlon B. & Julien C.)	
14h30	15h00					
15h00	15h30					
15h30	16h00					
16h00	16h30					
		Code couleur				
		Discussion				
		Exposé				
		Atelier / TP				
		Visite				