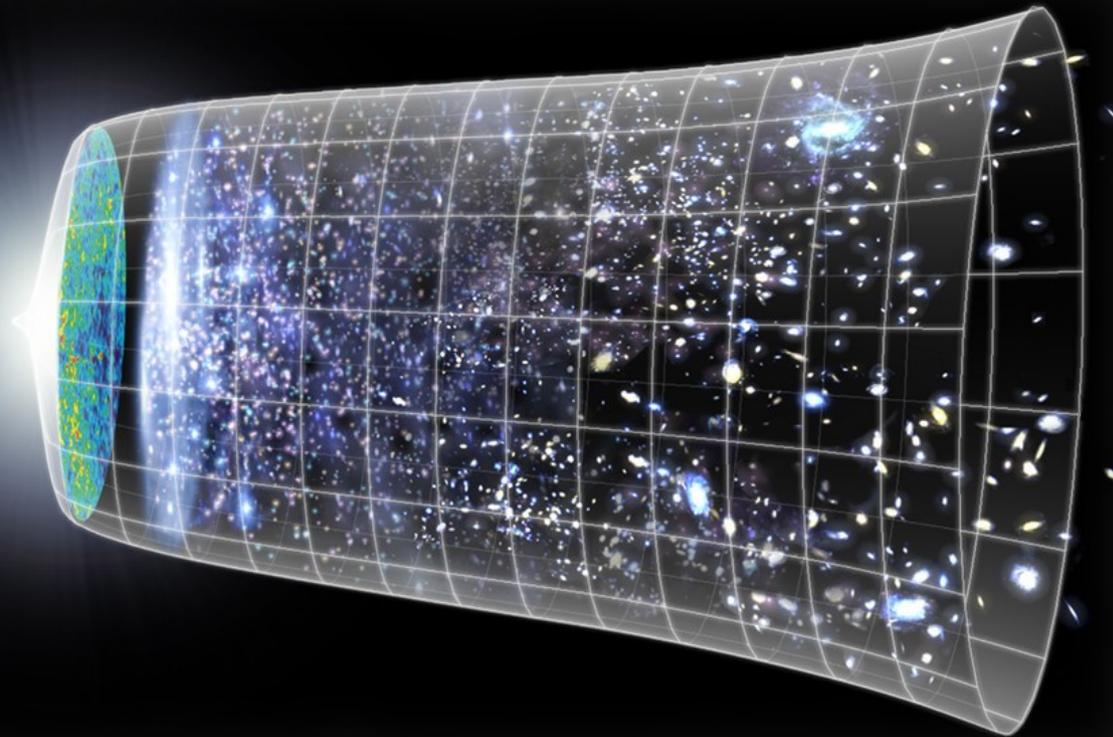


L'univers sombre

Un aperçu de la cosmologie moderne

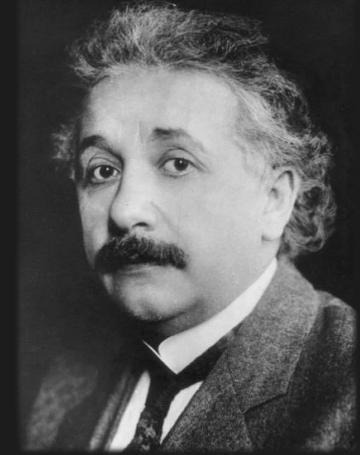


Felix Brümmer, Laboratoire Univers et Particules de Montpellier

La Cosmologie scientifique

- Qu'est-ce qui constitue l'univers?
- Comment l'univers évolue-t-il?

Théorie(s) de la relativité

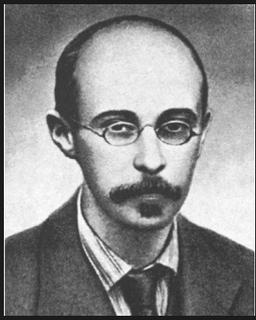


- Masse = énergie au repos: $E_0 = mc^2$
- Espace et temps unifiés en une seule entité: l'espace-temps courbé
- Énergie = source de la courbure de l'espace-temps:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Courbure

Énergie-impulsion



- Hypothèse: l'univers est **homogène** (pas de point préféré) et **isotrope** (pas de direction préférée)
Bien entendu: en moyenne, aux grandes échelles

→ Univers de **Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker**, évolution temporelle caractérisé par une fonction $a(t)$: le **facteur d'échelle**

- Signification du facteur d'échelle:

$$d(t) = a(t)d_0$$

Distance propre
au temps t

Distance
propre à $t = 0$

Facteur d'échelle et décalage vers le rouge

source

observateur



Un objet distant émet de la lumière de longueur d'onde λ_{em}

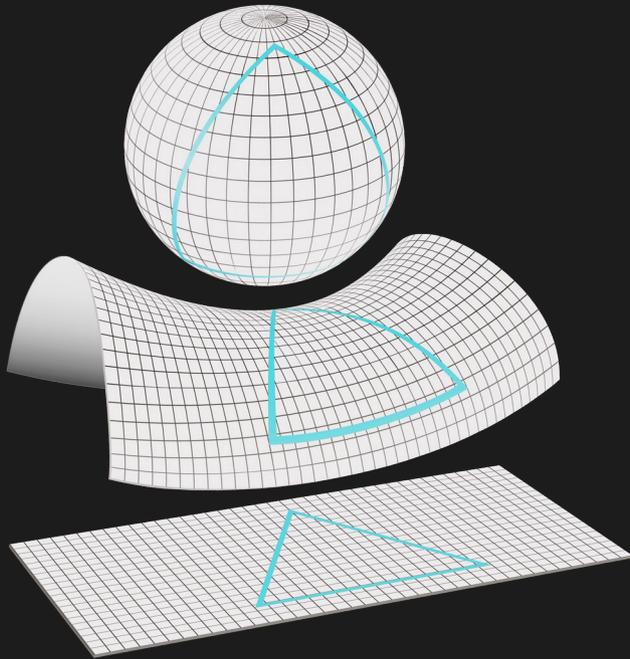
→ univers en expansion

Après le temps t on l'observe avec la longueur d'onde λ_{obs}

$$a(t) = \frac{\lambda_{em}}{\lambda_{obs}}$$

Décalage vers le rouge cosmologique

Géométrie de l'univers spatial



- Fermé? → rayons parallèles de lumière **convergent**
- Ouvert? → rayons parallèles de lumière **divergent**
- Plat? → rayons parallèles de lumière **restent parallèles**

Observation: notre univers est **plat** à une précision de $< 1\%$

(Implication: il a été plat il y a 13.8 Giga-ans à une part en 10^{62} !)

Pour que l'univers soit plat, il faut que sa **densité d'énergie** moyenne soit exactement égale à une **valeur critique** ρ_c

- $\rho > \rho_c$: univers **fermé**
- $\rho < \rho_c$: univers **ouvert**

Dans un premier temps on peut distinguer trois contributions à la densité d'énergie:

- **“Matière”**:
particules avec énergie $E \approx E_0 = mc^2$
densité d'énergie $\rho(t) \propto a(t)^{-3}$
- **“Rayonnement”**:
particules avec $E \gg mc^2$
densité d'énergie $\rho(t) \propto a(t)^{-4}$
- **“Énergie noire”**: ???
(surtout pas de particules...)
densité d'énergie $\rho(t) \approx \text{constante}$



c'est là!

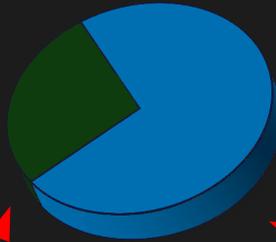
Qu'est-ce qu'il y a dans notre univers?

Observation
aujourd'hui:

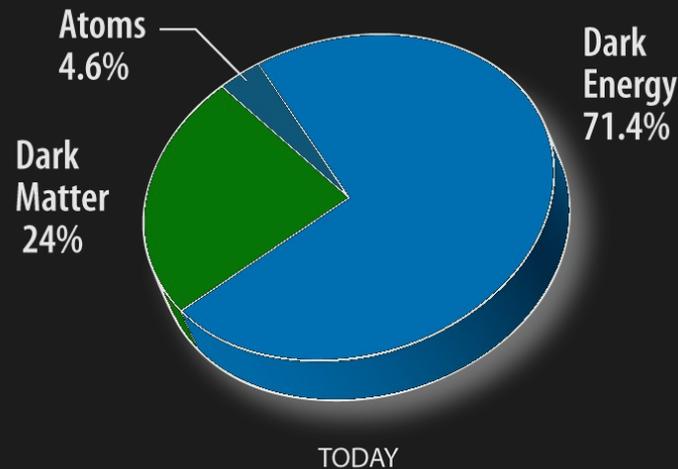
~ 29% matière

< 1% rayonnement

~ 71% énergie noire



Ou bien plus précisément:



- Moins qu'un tiers de l'univers est constitué de **matière**, la plupart est l'**énergie noire** énigmatique
- Environ 80% de la matière est **matiere noire** dont on ignore les propriétés précises.
- **Moins que 5%** de notre univers est fait des noyaux, atômes, molécules que l'on connaît!

Que sait-on de l'énergie noire?

- On ne connaît que très peu de ses propriétés:
- Elle est distribuée **homogènement** (ne forme pas de structures)
- Elle **ne se dilue pas** lors de l'expansion de l'univers: $\rho \approx \text{const.}$
- Elle est responsable pour l'**accélération** de cette expansion
- Hypothèse la plus minimaliste: **constante cosmologique** d'Einstein

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

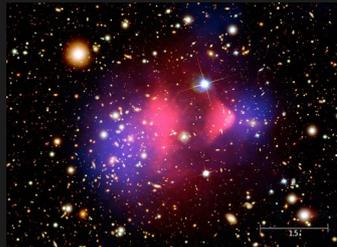
Énergie-impulsion des particules

Constante cosmologique positive → énergie noire

Que sait-on de la matière noire?

D'abord, il ne faut pas confondre

- La matière noire



← (en bleu)

- L'énergie noire



← (en noir)

- Les trous noirs



← (au milieu)
Credit: EHT collaboration

- Les objets faits de matière ordinaire qui sont de couleur noire



Que sait-on de la matière noire?

Petit calcul en mécanique Newtonienne:

Les étoiles d'une galaxie tournent autour de son milieu.

Comment leur vitesse dépend-elle de la distance r du centre?



En première approximation, pour les étoiles au bord:

- distribution de masse \sim sphériquement symétrique
- la masse M des autres étoiles \sim concentrée aux rayons $< r$

Que sait-on de la matière noire?

Petit calcul en mécanique Newtonienne:

Les étoiles d'une galaxie tournent autour de son milieu.

Comment leur vitesse dépend-elle de la distance r du centre?



En première approximation, pour les étoiles au bord:

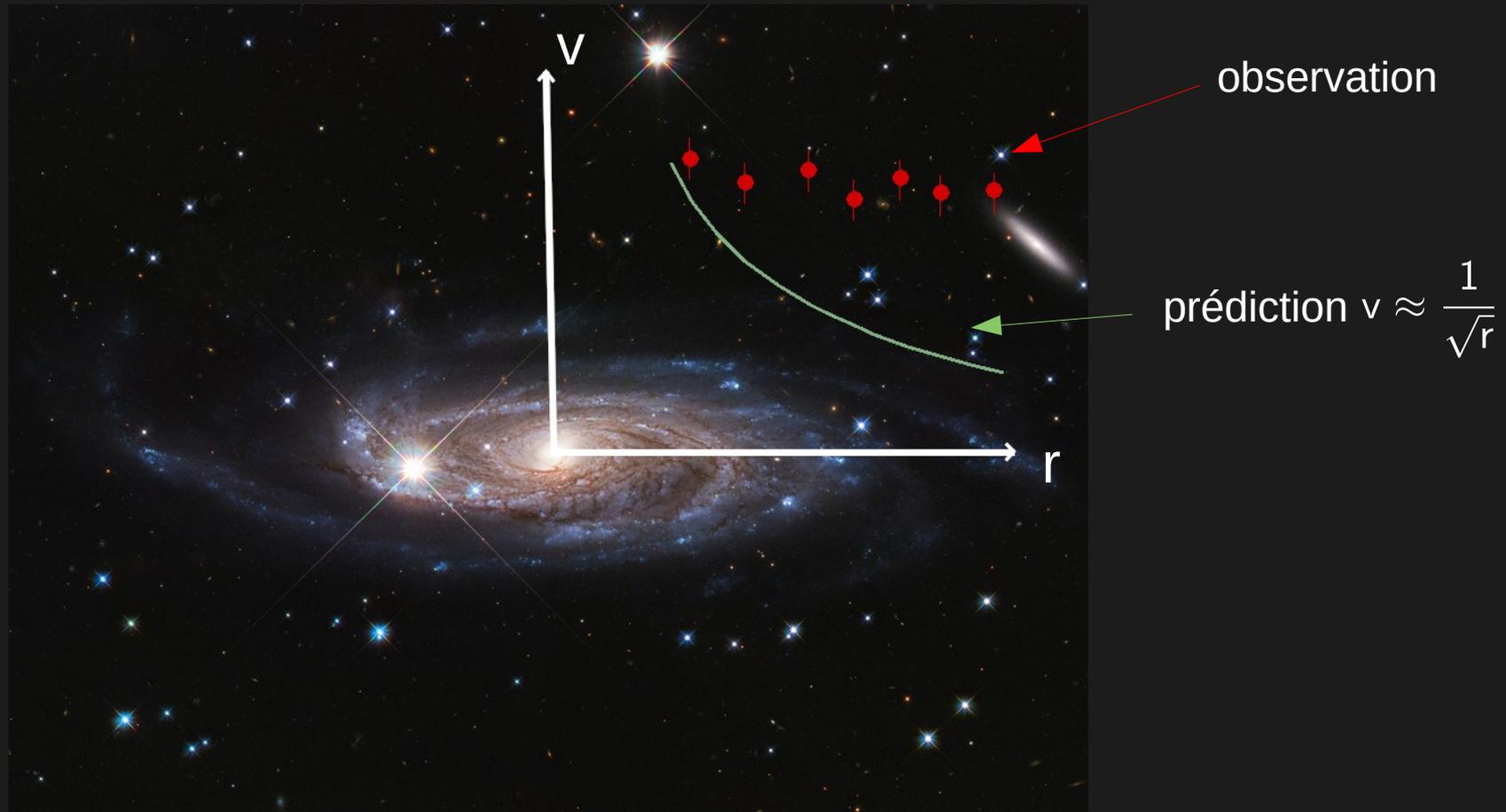
- distribution de masse \sim sphériquement symétrique
- la masse M des autres étoiles \sim concentrée aux rayons $< r$

$$\text{Force gravitationnelle } F_g = \frac{mMG}{r^2}$$

$$= \text{Force centripète } F_c = \frac{mv^2}{r}$$

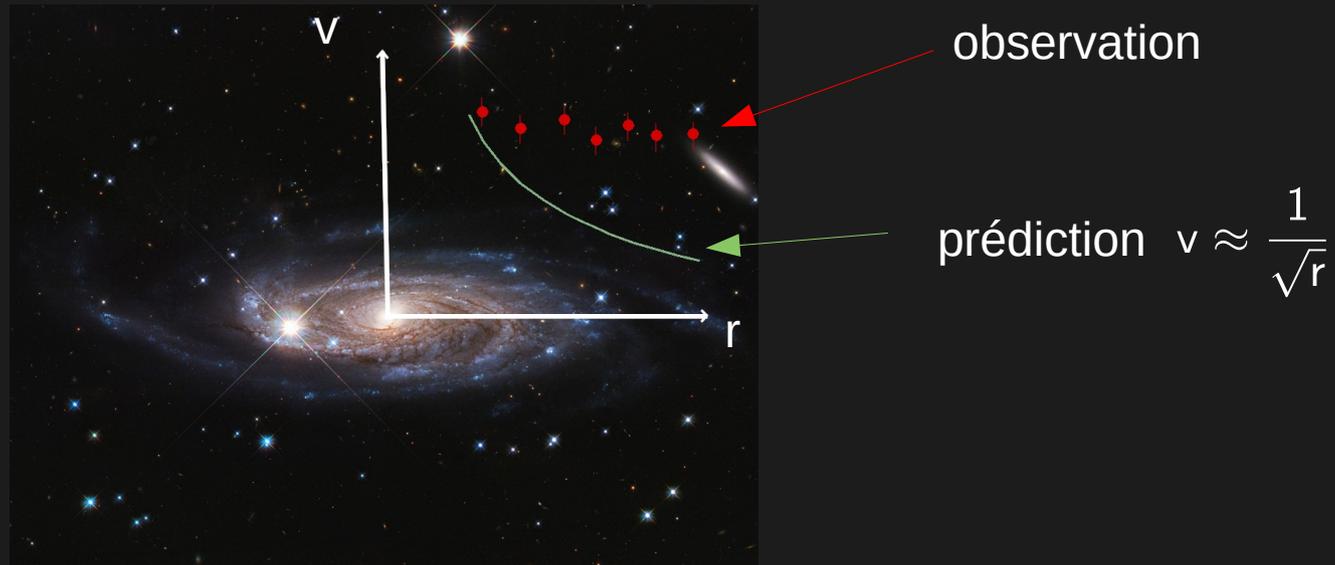
$$\text{alors } v \propto \frac{1}{\sqrt{r}}$$

Que sait-on de la matière noire?



L'observation ne correspond pas à la prédiction théorique
→ il faut réviser nos hypothèses

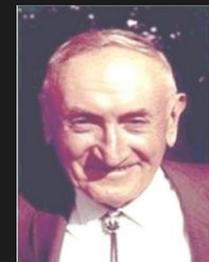
Que sait-on de la matière noire?



Notre calcul était basé sur l'hypothèse que la masse de la galaxie est dominée par la masse des étoiles

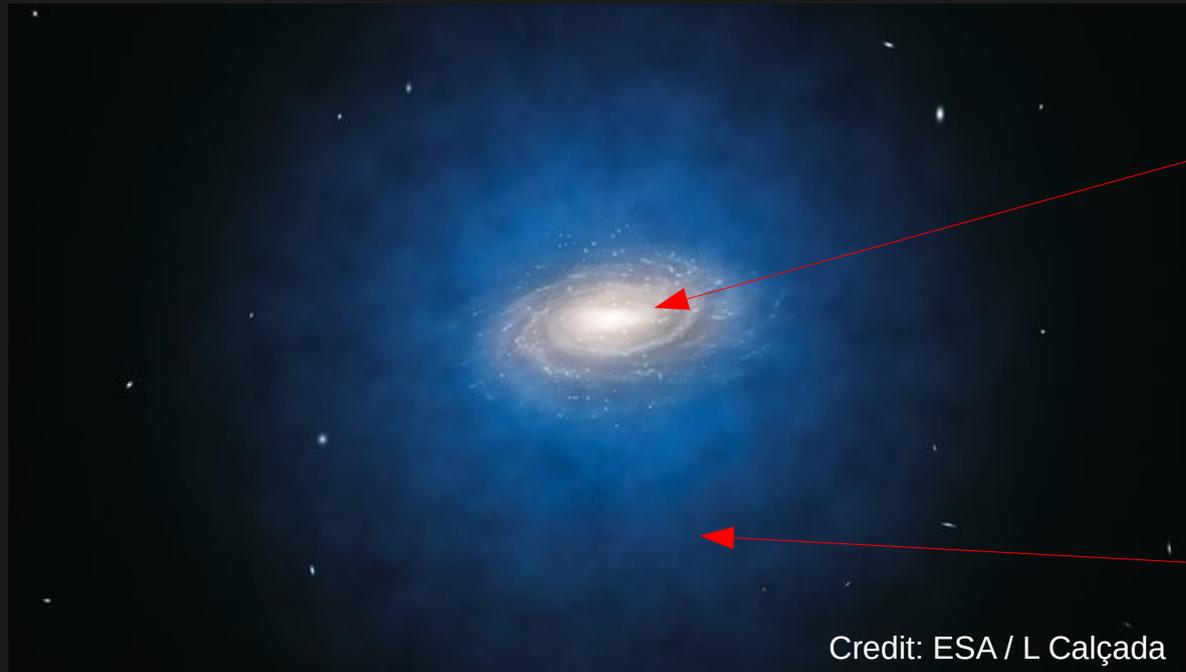
S'il y avait de la masse invisible, non lumineuse, en plus?

Matière noire



F. Zwicky (1933)

Que sait-on de la matière noire?



Matière
lumineuse
(étoiles,
poussière)

Halo de
matière noire
(en bleu)

Si la plupart de la masse d'une galaxie est contenu dans un **halo sphérique de matière noire**, cela explique correctement le comportement de la vitesse de rotation en fonction de r .

Que sait-on de la matière noire?

Qu'est-ce qui constitue alors la matière noire?

Pour expliquer seulement la rotation des étoiles, ça pourrait être...

- Des **objets composés des mêmes particules élémentaires que nous?** (protons, neutrons, électrons)
 - “naines brunes” = objets denses substellaires
 - étoiles de neutron
 - ...

Mais en physique nucléaire on peut précisément calculer les abondances primordiales des éléments chimiques légers, **incompatibles** avec autant de neutrons et protons. **Exclu.**

- Des **trous noirs** nés dans l'univers primordial?

Mais l'existence d'autant de trous noirs impliquerait

– soit une distorsion de la lumière originant des objets distants, à cause de la courbure de l'espace-temps, **pas observée**

– soit des modifications de l'évolution des étoiles, **pas observée**

Peu probable, controversé.

Que sait-on de la matière noire?

- Des **neutrinos**?
Particules invisibles, stables, dont l'existence est bien établie
Mais les neutrinos sont **trop légers** (rayonnement plutôt que matière) pour expliquer la formation des galaxies dans l'univers jeune . **Exclu.**

Conclusion: La matière noire est (très très probablement) composée d'une **nouvelle espèce de particule élémentaire** (ou même de plusieurs?)

Que sait-on de la matière noire?

La nature exacte de la matière noire reste une des questions ouvertes **les plus importantes** en physique fondamentale

Beaucoup d'activité de recherche

- En physique théorique: explorer possibles candidats et leurs propriétés, en déduire des prédictions falsifiables
- En physique expérimentale: concevoir des expériences pour tester ces prédictions
- Les deux activités sont représentés à Montpellier



Brief format

Search

[Easy Search](#)
[Advanced Search](#)[find j \"Phys.Rev.Lett.,105\"](#) :: [more](#)

Sort by:

Display results:

earliest date

desc.

- or rank by -

25 results

single list

HEP

18,090 records found 1 - 25 ▶▶ jump to record:

1. Cosmological Signatures of Superheavy Dark Matter

Lingfeng Li, Shiyun Lu, Yi Wang, Siyi Zhou. Feb 4, 2020. 26 pp.

e-Print: [arXiv:2002.01131 \[hep-ph\]](#) | [PDF](#)[References](#) | [BibTeX](#) | [LaTeX\(US\)](#) | [LaTeX\(EU\)](#) | [Harvmac](#) | [EndNote](#)
[ADS Abstract Service](#)[Detailed record](#)

2. Dark matter constraints from dwarf galaxies with data-driven J-factors

Alexandre Alvarez, Francesca Calore, Anna Genina, Justin I. Read, Pasquale D. Serpico, Bryan Zaldivar. Feb 4, 2020. 14 pp.

LAPTH-002/20, IFT-UAM/CSIC-20-15

e-Print: [arXiv:2002.01229 \[astro-ph.HE\]](#) | [PDF](#)[References](#) | [BibTeX](#) | [LaTeX\(US\)](#) | [LaTeX\(EU\)](#) | [Harvmac](#) | [EndNote](#)
[ADS Abstract Service](#)[Detailed record](#)

3. Cosmic structures from a mathematical perspective 1. Dark matter halo mass density profiles

Jenny Wagner. Feb 3, 2020. 25 pp.

e-Print: [arXiv:2002.00960 \[astro-ph.CO\]](#) | [PDF](#)[References](#) | [BibTeX](#) | [LaTeX\(US\)](#) | [LaTeX\(EU\)](#) | [Harvmac](#) | [EndNote](#)
[ADS Abstract Service](#)[Detailed record](#)

4. Effects of Dark Matter on Nuclear and Neutron Star Matter

Harish Chandra Das, Ankit Kumar, Bharat Kumar, Subrat Kumar Biswal, Takashi Nakatsukasa, Ang Li, S.K. Patra. Feb 3, 2020. 10 pp.

e-Print: [arXiv:2002.00594 \[nucl-th\]](#) | [PDF](#)[References](#) | [BibTeX](#) | [LaTeX\(US\)](#) | [LaTeX\(EU\)](#) | [Harvmac](#) | [EndNote](#)
[ADS Abstract Service](#)[Detailed record](#)

5. Stealth dark matter and gravitational waves

Lattice Strong Dynamics Collaboration (David Schaich (Liverpool U., Dept. Math.) for the collaboration). Feb 1, 2020. 8 pp.

Published in **PoS LATTICE2019 (2020) 068**e-Print: [arXiv:2002.00187 \[hep-lat\]](#) | [PDF](#)[References](#) | [BibTeX](#) | [LaTeX\(US\)](#) | [LaTeX\(EU\)](#) | [Harvmac](#) | [EndNote](#)
[ADS Abstract Service](#)

Que sait-on de la matière noire?

La matière que l'on connaît est soumise à quatre **forces fondamentales**

- La gravitation



- L'électromagnétisme



- La force nucléaire faible



- La force nucléaire forte



Credit: Trougnouf - Own work, CC BY-SA 4.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=68549985>

On sait que la matière noire sent la gravitation.

On sait également que la matière noire ne sent ni l'électromagnétisme, ni la force forte.

Hypothèse: Si la matière noire sentait **la force faible**?

→ “Weakly interacting massive particle”, WIMP

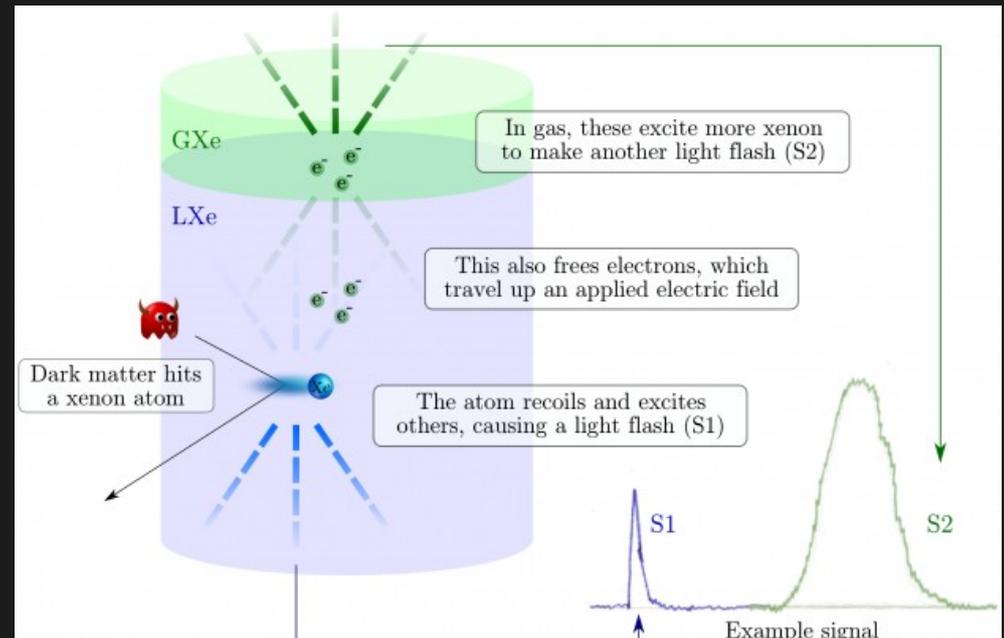
WIMPs

Si la matière noire interagit via la force nucléaire faible:

- On peut **prédire** sa contribution à la densité d'énergie de l'univers en fonction de sa masse et de son couplage
- De temps en temps deux particules de matière noire vont **s'annihiler** en produisant des rayons cosmiques
→ expériences de **détection indirecte**
- De temps en temps une particule de matière noire va **diffuser** sur un noyau atomique
→ expériences de **détection directe**
- Il est envisageable de produire des particules de la matière noire dans un accélérateur de particules
→ expériences de **collisionneur** (p.ex. LHC@CERN)

WIMPs

Expérience de détection **directe**: p.ex. Xenon1T



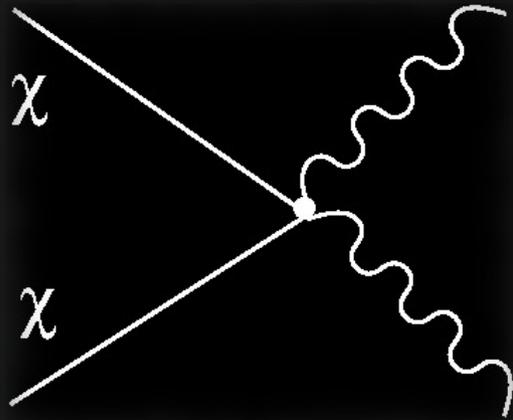
Credit: Xenon1T Collaboration

WIMPs

Détection **indirecte**

Deux particules de matière noire s'**annihilent** en produisant des **rayons cosmiques**...

...qui peuvent ensuite atteindre la terre où un **télescope** les détecte



Credit: MPIK / Christian Föhr

Télescope HESS

WIMPs

Si les WIMP existent, on peut éventuellement les **produire** dans les collisions des protons aux hautes énergies.

Le CERN LHC a une énergie suffisante pour produire des WIMP si leur masse est inférieur à $\approx 1000\times$ la masse du proton.



Credit: CERN

WIMPs

Aucun WIMP trouvé dans les expériences jusqu'à ce jour...

Mais la recherche prend du temps – typiquement plusieurs années pour l'acquisition de données et plusieurs mois pour leur analyse.

De nouvelles expériences avec plus de potentiel en construction / planifiées.

Résumé: Le modèle Λ CDM

Le **modèle standard de la cosmologie**: une théorie qui décrit bien les données avec un minimum de paramètres

- Λ = constante cosmologique, prend le rôle de l'énergie noire
- CDM = "Cold Dark Matter" = matière noire "froide" (matière plutôt que rayonnement), pourrait se composer des WIMP ou d'autre chose
- Depuis ~ 30 ans: un multitude d'observations indépendantes qui soutiennent ce modèle. Âge de la **cosmologie de précision**.
Prix Nobel 2019, 2011, 2006...
- Cependant beaucoup de **questions ouvertes**.

Temps →

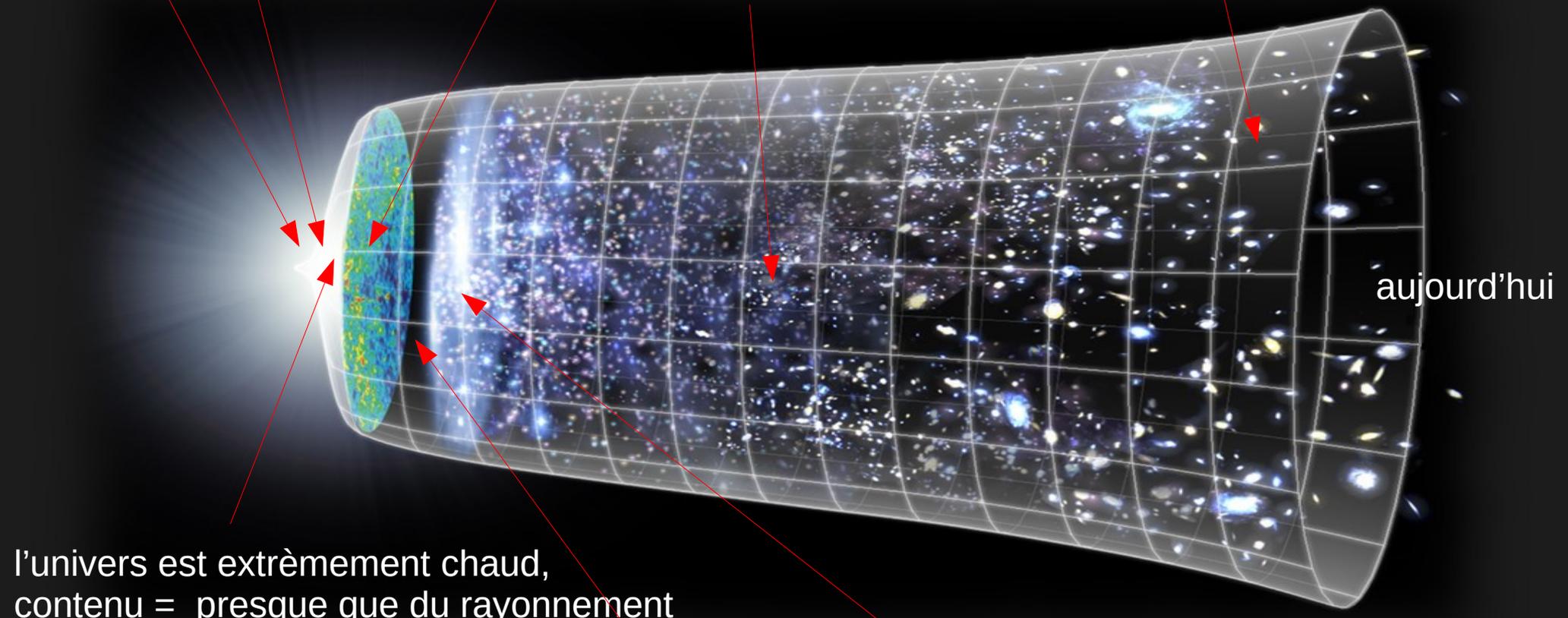
“big bang” il y a $1.4 \cdot 10^{10}$ ans
(on ne sait pas trop)

L'univers s'est refroidit, il contient surtout de la matière. Les premiers atômes se forment, l'univers devient transparent pour la lumière

Inflation cosmique
(expansion très rapide)

Étoiles plus jeunes (dont le soleil) se forment des débris des supernovae

Domination par l'énergie noire, expansion accélérée



l'univers est extrêmement chaud, contenu = presque que du rayonnement

“Âge sombre”

Des amas de matière noire se sont formés, attirant de la matière ordinaire qui forme des objets compacts: premières étoiles

aujourd'hui