

Les divers modèles de matière noire



Françoise Combes



Laboratoire d'Étude du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique

Contraintes astrophysiques



Lentilles gravitationnelles Vue en 3D

Les galaxies sont repérées sur la ligne de visée grâce à leur redshift, obtenu en spectro sur Tel-10m (VLT, Subaru, Keck)

Imagerie faite avec le Télescope Spatial Hubble

La matière noire sauve la formation des galaxies



La MN n'intéragit que par la gravité

Les baryons sont piégés avec les photons dans des oscillations acoustiques



A la recombinaison, électrons et protons se recombinent en atomes H
→ Découplage
Les baryons vont tomber dans les galaxies noires

Wayne Hu

Matière noire: pas d'interaction avec les photons





Baryons piégés avec les photons → oscillations acoustiques



Wayne Hu



Matière noire **froide** (WIMPs)

Matière noire **tiède** (mélange de WIMPs avec quelques neutrinos)

Matière noire **chaude** (neutrinos)

Nature de la matière noire

Chaude relativiste au découplage m < 1 keV

Tiède quasi-relativiste1 keV < m < 10 keV</th>

Froide non relativistem > 10 keV

Les fluctuations de densité initiales sont amorties par Le libre parcours des particules avant l'égalité rayonnement-matière

Matière noire chaude: les amas se forment avant les galaxies Ne peuvent pas rendre compte des structures à petite échelle

$$M_{FS} = 4 \times 10^{15} \left(\frac{m_{\nu}}{30 \text{ eV}}\right)^{-2} M_{\odot}$$

Spectre de masse et MN

Matière noire chaude: les premières structures à se former sont les amas de galaxies, qui ensuite se fragmentent en galaxies
→ Scénario « Top-down »

Matière noire froide: les petites structures se forment d'abord
→ Scénario « Bottom-up »



Distribution: galaxies and clusters



Peu concentrée: plateau au centre des galaxies





Très concentrée: cuspide dans les amas de galaxies

Indépendance d'échelle

300kpc , 200km/s, 2 10¹²M_o

2Mpc, 1100 km/s, 5 10¹⁴ M_☉



Limites du nombre de particules/cc

Densité mesurée de matière noire: $10^7 M_{\odot}$ pour R < 300pc $\rho_M \sim 1 M_{\odot}/pc^3 \sim 10^{-22} \text{ g/cm}^3$

Pour des WIMPS de 100GeV → 1 WIMP/cm³

Pour des neutrinos de 1 keV \rightarrow 10⁸ neutrinos /cm³

Pour des axions de 1 $\mu eV \rightarrow 10^{17}$ axions /cm³

Accumulation des bosons, pas des fermions

Limite de Tremaine-Gunn

Limite basée sur le **théorème de Liouville (df/dt = 0)** La densité f dans l'espace des phases (X, V) reste constante dans l'évolution d'un système non dissipatif Densité macroscopique moyennée < densité fine microscopique Le nombre de particules par unité de volume est limité Pour atteindre ρ observé, il faut une **masse minimum m** des particules



Limite de Pauli pour des fermions

Si les particules de MN sont des fermions (comme les neutralinos) Ils obéissent à la statistique de Fermi-Dirac, si leur densité dépasse un certain seuil (la matière est alors **dégénérée**).

Pour une galaxie naine (M, R) $V_{ech}^2 = 2GM/R$, on peut empiler uniquement g (nbr de degrés de liberté) particules dans $\Delta x = h/(mv)$ Soit N/g $\Delta x^3 = M/(gm) \Delta x^3 = 4/3 \pi R^3$, volume de la galaxie Pour que v = h/(m Δx) < V_{ech}, il faut que m⁴> (4 π g)⁻¹h³M^{-1/2}(GR)^{-3/2}

Cette limite est de l'ordre de 0.1 keV pour les plus petites galaxies

→La limite de la densité dans l'espace des phases prime toujours (Tremaine & Gunn 1979)

Limites Tremaine-Gunn fermions/bosons

Pour les fermions, densité maximum

 $f_F(p) = 1/[\exp(E/kT) + 1]$



Pour les bosons: pas de densité maximum

 $f_B = 1/[\exp(E/kT) - 1]$

➔ Diverge pour E petit E=pc (relativiste) ou p²/2m

Mais: la fraction ou f_b>>1 n'est que 1-10% On peut appliquer une limite semblable

N(>f) distribution fine, N(> ϕ) distribution « coarse » moyenne **Fermions**, *Madsen 1990*

Limites pour les bosons



N(>f) distribution fine, N(> ϕ) distribution « coarse » moyenne **Bosons**, *Madsen 1990*

WIMP: « Weakly Interacting Massive Particle »

Interactions : gravitationnelle, nucléaire faible <σv> ~3 10⁻²⁶ cm³/s (ou sections efficaces « plus faibles que faible ») Masse : assez grande pour être non-relativiste Durée de vie : stable / assez longue pour ne pas avoir disparu Densité relique : équation de Boltzmann + *freeze-out*

Nature? → SUSY? Supersymétrie (Boson ← → Fermion) Particule la plus stable, et la plus légère: Neutralino (combinaison linéaire de higgsino, bino, vino..., fermion)

→ KK Extra-dimensions? (UED Universal Extra Dimensions
 Pas seulement gravité, mais toutes les autres forces dans les autres dim,
 Ou bien warped extra-d, Randall –Sundrum, RS)

→ Nouvelle Physique?

Candidats pour la matière noire

Nouvelle physique, en dehors du modèle standard SM

Kaluza-Klein DM in UED Kaluza-Klein DM in RS (Randall-Sundrum) Axion Axino Gravitino Photino SM Neutrino **Sterile Neutrino** Sneutrino Light DM Little Higgs DM Wimpzillas Cryptobaryonic DM Q-balls

Champs (charged DM) **D**-matter Cryptons Self-interacting Superweakly interacting **Braneworld DM** Heavy neutrino **Neutralino (WIMP)** Messenger States in GMSB Branons Chaplygin Gas Split SUSY **Primordial Black Holes** Mirror Matter

. . .

Dimensions Supplémentaires Universelles

- Kaluza (1919) 1 dimension supplémentaire, gravité-E.M., + champ scalaire
- Klein (1926) interprétation quantique



Compactification de la dimension supplémentaire en chaque point Conditions périodiques \rightarrow quantification de l'impulsion p=n h/ λ

• Tout champ se propage dans la 5^e dimension

5ème dimension, et partenaires KK

•Toutes les particules SM voyagent dans les extra dimensions avec une taille ${\sim}TeV^{-1} {\sim}10^{-18}m$

•Les particules qui voyagent dans ces dimensions apparaissent plus lourdes que leurs analogues SM (modes de Kaluza-Klein)

La particule Kaluza-Klein la plus légère est stable, interagissant faiblement, donc un bon candidat pour la MN
Dans le modèle avec une compactification circulaire, the KK-nbre d'une particule représente la quantité de moment qu'il avait dans la dimension supplémentaire

•Si le nbre KK est conservé, alors un état KK isolé ne peut pas se désintégrer dans des particules SM (mode zéro)

•Alors la particule Kaluza-Klein la plus légère (LKP) ne peut pas se désintégrer, → stable

 $E = mc^{2} + p^{2}c^{4} = Mc^{2}$

Le miracle du WIMP

L'abondance des particules est « gelée », elles se découplent lorsque leur interaction $n < \sigma v > \sim 1/t_{hubble}$ Elles peuvent encore être crées tant the mc² < kT

dn/dt -3Hn = $\langle \sigma v \rangle$ (n² – n²_{eq}), d log a /dt = H On peut calculer leur densité relique n_{eq} Ω = 6 10⁻²⁷ cm³/s / $\langle \sigma v \rangle$ = $\Omega \sim 0.2$ pour $\langle \sigma v \rangle$ = 3 10⁻²⁶ cm³/s

Ceci est la section d'annihilation pour des particules d'interaction faible de masse 100 GeV

Comment s'en sortir si ces particules n'existent pas?

Se réfugier dans le secteur caché (hidden sector)
 Particules en dehors de la jauge

Evolution thermique des particules

En équilibre, le rapport Y= n/s, entropie s $\sim T^3 \sim 1/a^3$ Dépend du rapport x = Mc²/kT

Y ~na³ ~cste, si x << 1, équilibre thermique
 Y ~exp^{-x}, si x >>1, l'univers refroidit



(3) Lorsque le taux devient plus faible que l'expansion,→Equilibre rompu

Abondance gelée

Annihilation $\sim 1/M^2$ Si M trop grand abondance gelée trop tôt, Ω trop grand

Feng, ARAA (2010)

Découplage cinétique ensuite

Une fois que le taux d'annihilation < taux d'expansion H(t)
→Découplage chimique, abondance gelée

Mais les WIMPS interagissent encore avec le plasma, échangent du moment angulaire
 Lorsque le taux de diffusion γ(t) < taux d'expansion H(t)
 → Découplage cinétique

 $dT/dt + 2HT = -2 \gamma (T-T_{CMB})$ $Avant T_{kd} (20-50 Mev),$ T varie en (1+z), E = hv $après T_{kd}, T varie en (1+z)^{2}$ $E \sim mv^{2} \sim kT$ Ensuite, libre parcours (free streaming)

Quelle interaction?

Domaine de masse > 20 ordres de grandeur



Recherches directes

Particules formées dans les accélérateurs puissants? (LHC, 14TeV, 7000p) Recherche **directe**: CDMS-II, Edelweiss, DAMA, GENIUS, etc



CMS, Edelweiss, ZEPLIN, DAMA, HDMS, CRESST



Les particules supersymétriques, si elles existent m > 2000 protons

DAMA: fluctuation annuelle

→ Pas de détection convaincante 23

Candidats MN WIMPS ou axions

- Matière noire froide: doit être non-relativiste déjà à T >> 10^4 K \rightarrow fragmentation, structuration
- Théories supersymetriques (SUSY) peuvent créér des



Détection directe des WIMPS

- WIMPS: pourraient avoir une section efficace de diffusion élastique avec les cristaux, et on essait de mesurer le recul.
- Très difficile: bcp d'autres particules/processus interagissent aussi avec les cristaux → fausses detections

Dans les 10³⁰ baryons d'un 1m³ de détecteur, on s'attend à trouver quelques événements par jour, des 10¹³ WIMPS qui traversent

- Réduire le bruit → tunnels profonds (e.g. Gran Sasso)
- Recherche d'une signature saisonnière (v~30km/s +0.5km/s jour)





Dans le monde entier



Limites de détection



Extrapolation dans le temps

Environ un gain d'un facteur 10 tous les 2 ans

Détection peut-être en 2026...



Annihilation: recherche indirecte

- L'annihilation des neutralinos peut produire des
 - Photons
 - Neutrinos
 - Positrons
 - Antiprotons
 - Antideuterons



 La densité relique nous conduit aux taux d'annihilation (σ_A v) ~ 3 x 10⁻²⁶ cm³/s



Recherches indirectes

Rayons gamma de l'annihilation (Egret, FERMI, Magic) Neutrinos (SuperK, AMANDA, ICECUBE, Antares, etc)

Amanda, Pole Sud



Antares, Méditerranée





HESS Namibie Rayons γ



→ Pas de détection convaincante ₃₀

Le photon gamma interagit avec l'atmosphère → particules chargées Gerbes de particules, relativistes, qui émettent une lumière **Tcherenkov**



V > v_{lum}(milieu) ➔Onde de choc

Lumière émise pendant qq nano secondes

CCD sensible à des Impulsions

Atmosphère utilisée comme calorimètre

Flux d'annihilation

Le neutralino est sa propre anti-particule

 $dn/dt = \langle \sigma v \rangle n^2 \rightarrow Rayons gamma émis$

Flux (E) = dn/dE ($\langle \sigma v \rangle / 8\pi m^2 \rangle \int \rho^2 dl$

Flux maximum au centre des galaxies, où les simulations prédisent une cuspide $\rho \sim 1/r$

Est-ce que les flux des sous-halos est détectable?

Simulations numériques (Stoehr et al 2003, Pieri et al 2009) →Les centres des satellites devraient être 10-1000 fois inférieurs

Prédictions du Flux d'annihilation

Image pondérée par la densité *→* Flux de gamma



Limites de détection 3σ Particules MSSM (minimal SUSY)

Stoehr et al (2003)







Trous noirs, AGN, jets, Gamma-ray bursts, novae et super-novae + Eruptions solaires, pulsars, origine des rayons cosmiques 10keV-300GeV

Bulles du centre galactique



Nature de l'émission γ Plasma thermique? Synchrotron ou Flux d'annihilation?

> Emission cm et mm WMAP (*Finkbeiner 2014*) Synchrotron des e- dans B

Bulles en rayons-gamma de Fermi Après soustraction du plan de la VL

Su et al 2010 Extension 10kpc au-dessus rt au-dessous du plan 10⁵⁴⁻⁵⁵ ergs, 10⁶⁻⁷ yr Ejection AGN, starburst ?



Bulles du centre galactique



Emission radio, Parkes-64m, Australie *E. Carretti et al 2013, Nature*

On sait situer l'émission polarisée, Grâce à la quantité de dépolarisation dans le plan de la Voie lactée **25% polarisation**

Synchrotron des e- dans champ B
 Emission Fermi
 γ-rays (Su et al 2010)



Modèle possible: trou noir central



Chute d'une étoile sur le trou noir Etoile avalée, avec un peu de matière éjectée *(Cheng et al 2014)*

Le jet ne semble pas détecté en radio Possible selon le spectre des électrons



Su & Finkbeiner 2012 Fermi γ-rays

Meilleur modèle: formation d'étoiles



Aux alentours de R=200pc Il existe un anneau de gaz moléculaire, avec formation active d'étoiles

Carretti 2013



Les supernovae, le vent stellaire produisent une éjection de gaz Ionisé, perpendiculaire au plan

Messier 82 prototype d'un vent Galactique, dû au starburst





Et la matière noire?

La nature de l'émission: excitation hadronique (collision p-p) insuffisante. Nécessaire d'avoir un jet de plasma venant du centre, mélange processus hadronique et leptonique, pour expliquer la radio + ondes de choc *(Cheng K. et al 2014)*

Si on exclut les sources astrophysiques, excès d'émission diffuse au GeV



39



Excès à 2 GeV

Emission astro de fond: free-free (thermique), Rayons cosmiques + nucléons $\rightarrow \pi o \rightarrow 2\gamma$ Compton inverse (IC) (assez diffus pour ressembler à la MN)

Une modélisation de ces fonds astro pourrait donner lieu a l'excès à 2GeV



Si MN, alors M~50GeV Avec une grande Variabilité (45-120 GeV)

Matière noire locale (mesure directe)

 ρ_{DM} extrapolée, à partir de Vrot, en supposant MN sphérique



Grandes incertitudes: Les satellites ou les marées ne sont pas à l'équilibre →Résultats contradictoires publiés Les traceurs locaux ne sont pas forcément à l'équilibre, et souffrent de nombreux biais + dépression locale de 1kpc (ceinture de Gould) 41



Prédiction des simulations



Simulations de MN, avec 4 10⁹ particules Prédictions des vitesses à Ro= 8kpc

Densité en 1/R vers le centre (NFW)

Triaxialité: Les halos sont aplatis En moyenne 0.5 (*Dubinski 1991-92*) 21% plus de densité?

Vc=220km/s σ = (3/2)^{1/2} Vc = 270km/s





Triaxialité des halos noirs

CDM simulations prédisent une triaxialité, c/a = 0.5, b/a = 0.7 (*Dubinski & Carlberg 1991*) mais la matière baryonique modifie cette forme:
→Les halos sont oblates et axisymétriques (*Franx et al 1994*) b/a > 0.7
L'aplatissement est de l'ordre de c/a=0.5, soit E5, Alors que les galaxies elliptiques ont en moyenne E2 (c/a=0.8)

Le halo de notre Voie lactée devrait être aplati, →Difficile à mesurer Compatible avec forme sphérique



Premières structures à se former

Zoom sur la première structure, z=26, taille du cube bleu 3kpc comobiles Cube rouge zoom x 100, particules de 1.2 $10^{-10} M_{\odot} \equiv M_{moon}/300$



Dernier zoomx100 Taille 0.024pc

Masse ~Terre Halo cuspide Densité régulière

Diemand et al 2005

Spectre de masse



Formation des premières structures

A z=100, 20 millions d'années après le Big-Bang, la masse de Jeans de quelques masses terrestres ($\sim 10^{-6}M_{\odot}$), commencent à s'effondrer

Ces structures sont stables, et ne seront pas détruites par les marées, Car leur densité moyenne est 10 fois supérieure à celle des halos galactiques

On s'attend à 10¹⁵ telles structures dans la Voie lactée!

Une devrait passer dans le système solaire tous les qq 10³ ans Rayonnement gamma? Pas dominé par ces petits fragments

➔ Problème avec les micro-lentilles gravitationnelles (MACHOs, EROS)
Objets de masse 10⁻⁷ M_☉ < M < 5 M_☉ sont éliminés < 10% du halo</p>

Mesures indirectes Excès de positrons Fermi, PAMELA, HESS

Ces excès demandent toutefois un boost d'annihilation de 1100 Sommerfeld effect SFE (boost en 1/V de l'interaction entre WIMPS)

$$L_{\rm sm} \sim \int \mathrm{d}V \rho^2 \sim \frac{M_{200} \, c^3}{[\log(1+c) - c/(1+c)]^2} \sim M_{200}^{0.83}$$

Etant donnée la distance de l'amas de Virgo D= 17 Mpc Et celle de la galaxie naine de Draco D= 0.08 Mpc

$$\frac{F_{\rm c}\,{\rm Virgo}}{F_{\rm Draco}} \simeq \left(\frac{80\,{\rm kpc}}{17\,{\rm Mpc}}\right)^2 \left(\frac{2\times10^{14}\,{\rm M}_\odot}{10^8\,{\rm M}_\odot}\right)^{0.83} \simeq 3.8$$

On devrait voir un flux encore plus grand vers l'amas de Virgo Ou alors il n'y a pas de petites structures (d'où vient l'émission max)

Constraintes sur les sous-halos par l'observation des amas

- Le modèle standard CDM prédit la plus petite masse des sous-halos $\sim 10^{-6}~M_{\odot}$



10-14

10⁻¹

10⁰

 10^{1}

E_y[GeV]

 10^{2}

 10^{3}

49

Emission de γ dans les amas (Fermi)

Han, Frenk et al 2012



Les données favorisent particules de masse 20- 60 GeV annihilant en b<u>b</u> ou bien 2– 10 GeV en $\mu+\mu-$

Mais les données peuvent aussi venir de rayons cosmiques

Jogler et al 2013 L'emission vient en fait de sources ponctuelles identifiées *Griffin et al 2014, 2015*

Planck – MN- Polarisation

Résultats Planck en 2014 (Collaboration Planck) Carte de la matière noire, obtenue par effet de lentille gravitationnelle





Contraintes sur l'énergie émise par l'annihilation de la matière noire: permet d'exclure l'interprétation de l'excès de positrons de Fermi, AMS-02, PAMELA ...

Contrainte sur les neutrinos primordiaux (interagissant avec les photons par la gravité) Ils sont Nv= 3 *(conforme au modèle standard)*

LHC constraints on SUSY

Super-symétrie (SUSY) Meilleure extension du SM

Unification des forces En MSSM (minimal) Le couplage entre les diverses forces (electro-faible, 10² GeV Forte, 10¹⁶GeV (GUT) Gravitationnelle ? Mplanck ~10¹⁹ GeV se rejoignent



SUSY minimal

Parité R (R=+1 sparticules, R=-1 anti-sparticules, R=0 sinon)

Modèle SM: jaune Extension: bleu

		SPIN 0	SPIN 1/2	SPIN 1
>	MATTER	SQUARKS ũ, đ, š, č, b, ť	QUARKS u,d,s,c,b,t	
		SLEPTONS ẽ,ữ, ữ, ữ, ữ, ĩ, ữ	LEPTONS e,ν, μ, ν, τ, ν	
	FORCES		GAUGINOS γ̃, Ŵ,Ž, ĝ	GAUGE BOSONS γ, W,Z, g
	MASS	HIGGS BOSON S h ⁰ , H ⁰ A ⁰ ,H ⁺	HIGGSINOS Ĥ	

Contraintes du LHC

Toujours pas de particules SUSY au LHC



NMSSM= Next to Minimal Super-Symmetric Model, GMSB: gauge-mediated model Arvanitaki et al 2014 54

CMSSM and MSSM au LHC

Le modèle minimal MSSM contient **124 paramètres libres,** en plus des 19 du modèle standard SM. Le modèle simplifié, **CMSSM** (« Constrained MSSM ») a seulement 5 nouveaux paramètres libres (masse de la brisure de SUSY, masse du gaugino, couplage..) Le muon (µ) a un moment magnétique arnormal, explicable en MSSM

La désintégration des rares mésons B, et leur rapport de branchement Tests pour SUSY $B_s^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^-, B^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^-$, rapports observés compatibles avec SM Pas de particules exotiques, comme les charginos, neutralinos

Bechtle et al 2012, 2014 Le degré de réglage fin augmente, on passe au CNMSSM (Next to minimal)

Alternatives à CDM standard

WDM: MN tiède, réduit les plus petites structures **SIDM:** "Self-Interacting Dark Matter" (*Spergel & Steinhardt 2000*) Interaction de diffusion, non-dissipative (Wimpzyllas, Q-ball soliton) (pb forme des halos sphériques)

Ou bien **SIMP** "Strongly Interacting Massive Particle" (Dover et al 1979)

MN qui s'annihile MN qui se désintègre **Fuzzy CDM** 10⁻³³ GeV $\ll M_{axion}$, Bosons condensés (*Hu et al 2000*)

SIMP: "Strongly Interacting Massive Particle"

Motivation: SIDM peut avoir des intéractions QCD mais pas EM Pas détectable dans les recherches de WIMP

Contraintes CMB & LSS:

Avant le découplage, les photons et baryons sont intimement couplés, l'intéraction avec les baryons produit un amortissement supplémentaire des perturbations de petite taille

CONCLUSIONS

- Matière noire: collaboration étroite
 - Astro-particule: interface entre cosmologie et particules
 - Consensus pour des particules à l'échelle de
 - l'intéraction faible $\sim 100 \; GeV$
- Candidats
 - WIMPs: meilleurs candidats
 - Secteur caché: uniquement gravitationnel, non falsifiable?
 - Découverte astro: comment savoir si c'est SUSY?
- LHC repart au printemps 2015, les recherches directes et indirectes progressent.
- Si détection LHC: comment savoir si c'est la MN?

Stabilité du neutralino ?

R-parité $P_R = (-1)^{3B+L+2s}$ B nbre baryonique, L, leptonique, s spin +1 pour toutes les particules du SM, -1 pour les super-symétriques

Si la R-parité est conservée, la plus petite particule symétrique ne peut pas se désintégrer

Dans les théories grand-unifiées (GUT) le nombre baryonique peut ne pas être conservé,
→ désintégration du proton (τ >10³² ans)

→ Si R n'est pas conservé, encore plus de possibilités!

