

Matière noire astronomique : à la poursuite de l'invisible

Pierre Salati – Université de Savoie & LAPTH

Plan de l'exposé

- 1) L'héritage de Zwicky
- 2) Le bestiaire des candidats à la matière noire
- 3) A la poursuite des neutralinos
- 4) L'enseignement du LHC





1) L'héritage de Zwicky

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL

AN INTERNATIONAL REVIEW OF SPECTROSCOPY AND
ASTRONOMICAL PHYSICS

VOLUME 86

OCTOBER 1937

NUMBER 3

ON THE MASSES OF NEBULAE AND OF CLUSTERS OF NEBULAE

F. ZWICKY

The determination of the masses of extragalactic nebulae constitutes at present one of the major problems in astrophysics. Masses of nebulae until recently were estimated either from the luminosities of nebulae or from their internal rotations. In this paper it will be shown that both these methods of determining nebular masses are unreliable. In addition, three new possible methods will be outlined.

Fritz Zwicky et l'amas de Coma – 1933

As a first approximation, it is probably legitimate to assume that

$$-\overline{E_p} = 2\overline{K_T} = \overline{\sum_{\sigma} M_{\sigma} v_{\sigma}^2} = \sum_{\sigma} M_{\sigma} \overline{v_{\sigma}^2}$$

average square of the velocities of the individual members which constitute this cluster.⁵ But even if we drop the assumption that clus-

$$M = \frac{5R\overline{v^2}}{3\Gamma}$$

$$\gamma = 500$$

as compared with about $\gamma' = 3$

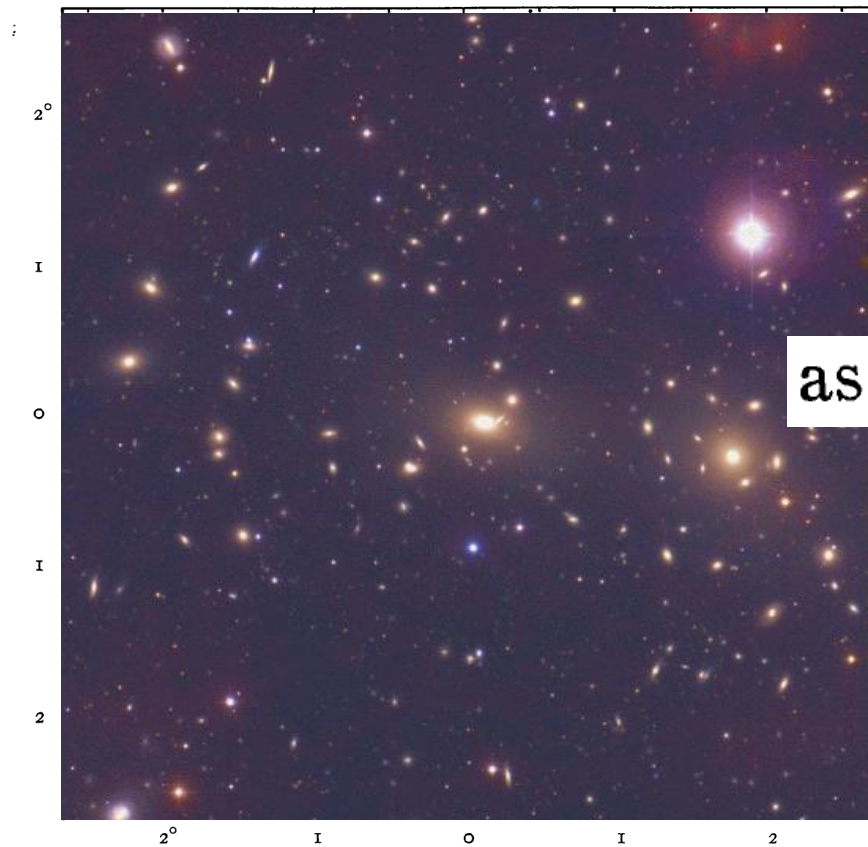


FIG. 3.—The Coma cluster of nebulae



1) L'héritage de Zwicky

In principle the virial theorem may also be applied to describe the mechanical conditions in an individual nebula. Actually a direct application is difficult, since it is not possible to measure separately, as in the case of a cluster of nebulae, the velocities of the individual units of mass which constitute a nebula. The average square velocity (21) might be derived from the shape of the spectral lines in the light from nebulae. Unfortunately, the practical determination of such shapes is at present exceedingly difficult, if not impossible. In addition the spectral lines in the light of nebulae are doubtless of complex origin, and the interpretation even of well-known shapes of lines is by no means an easy task.

Courbes de rotation plates des galaxies spirales

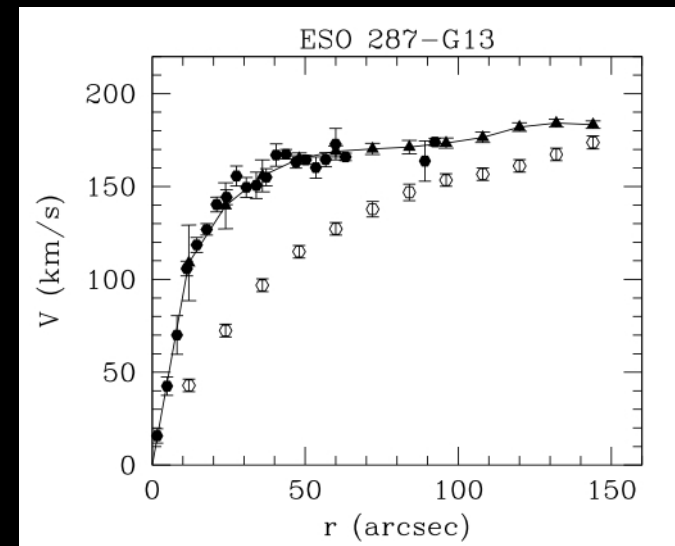
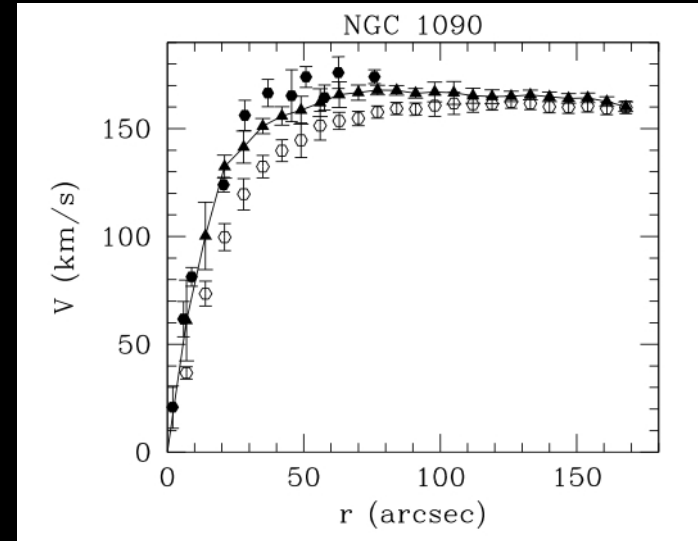


Scanned at the American Institute of Physics

Edge-On Spiral Galaxy NGC 4565 by 

$$M(r) = \frac{V_C^2}{G} r$$

$$\frac{V_C^2}{r} \equiv a = g_N \equiv \frac{GM(r)}{r^2}$$



1) L'héritage de Zwicky

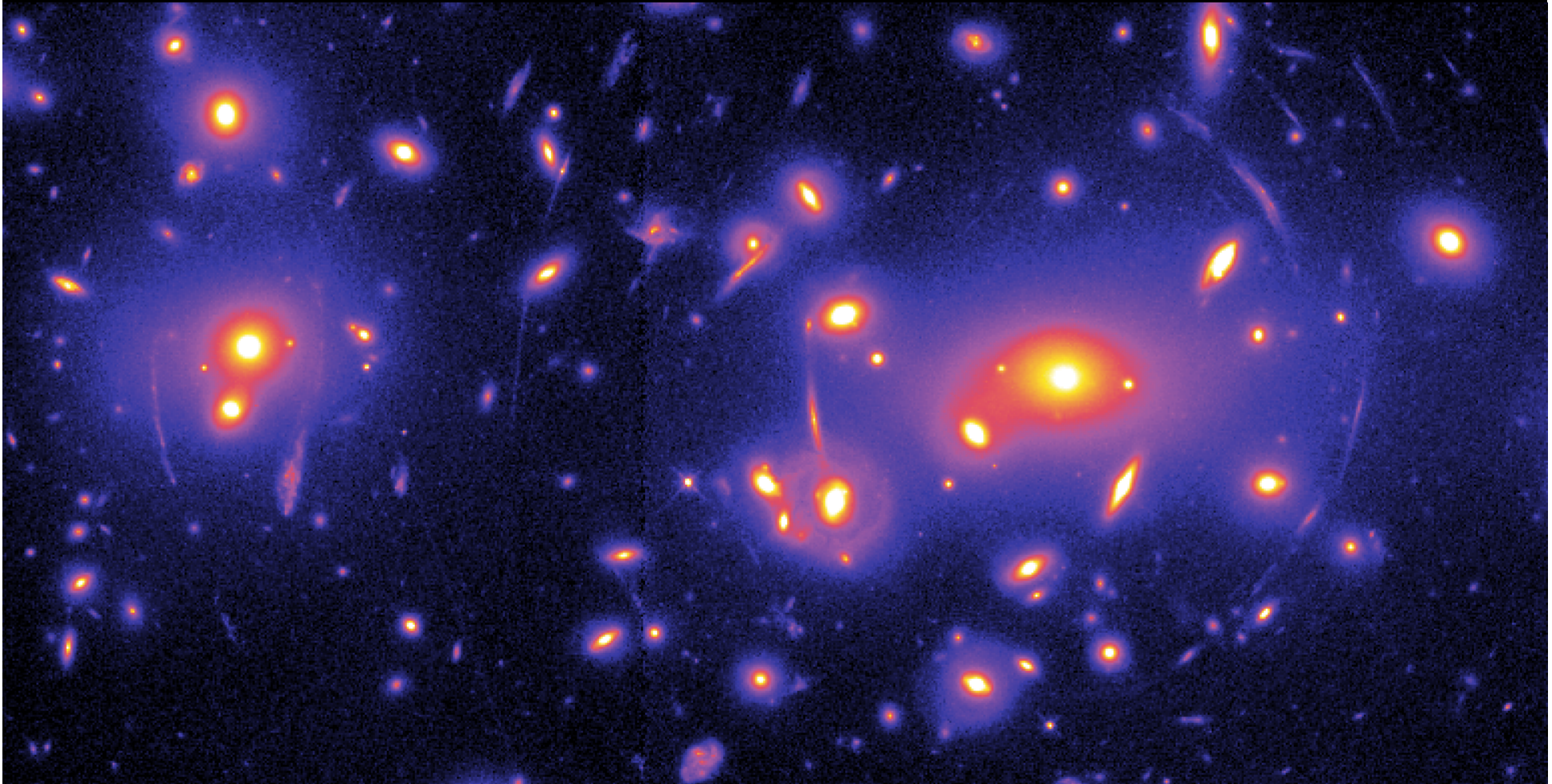
In sections iii, iv, and v three new methods for the determination of nebular masses are discussed, each of which makes use of a different fundamental principle of physics.

Method iii is based on the *virial theorem* of classical mechanics. The application of this theorem to the Coma cluster leads to a minimum value $M = 4.5 \times 10^{10} M_{\odot}$ for the average mass of its member nebulae.

Method iv calls for the observation among nebulae of certain *gravitational lens* effects.

Section v gives a generalization of the principles of ordinary *statistical mechanics* to the whole system of nebulae, which suggests a new and powerful method which ultimately should enable us to determine the masses of all types of nebulae. This method is very flexible and is capable of many modes of application. It is proposed, in particular, to investigate the distribution of nebulae in individual great clusters.

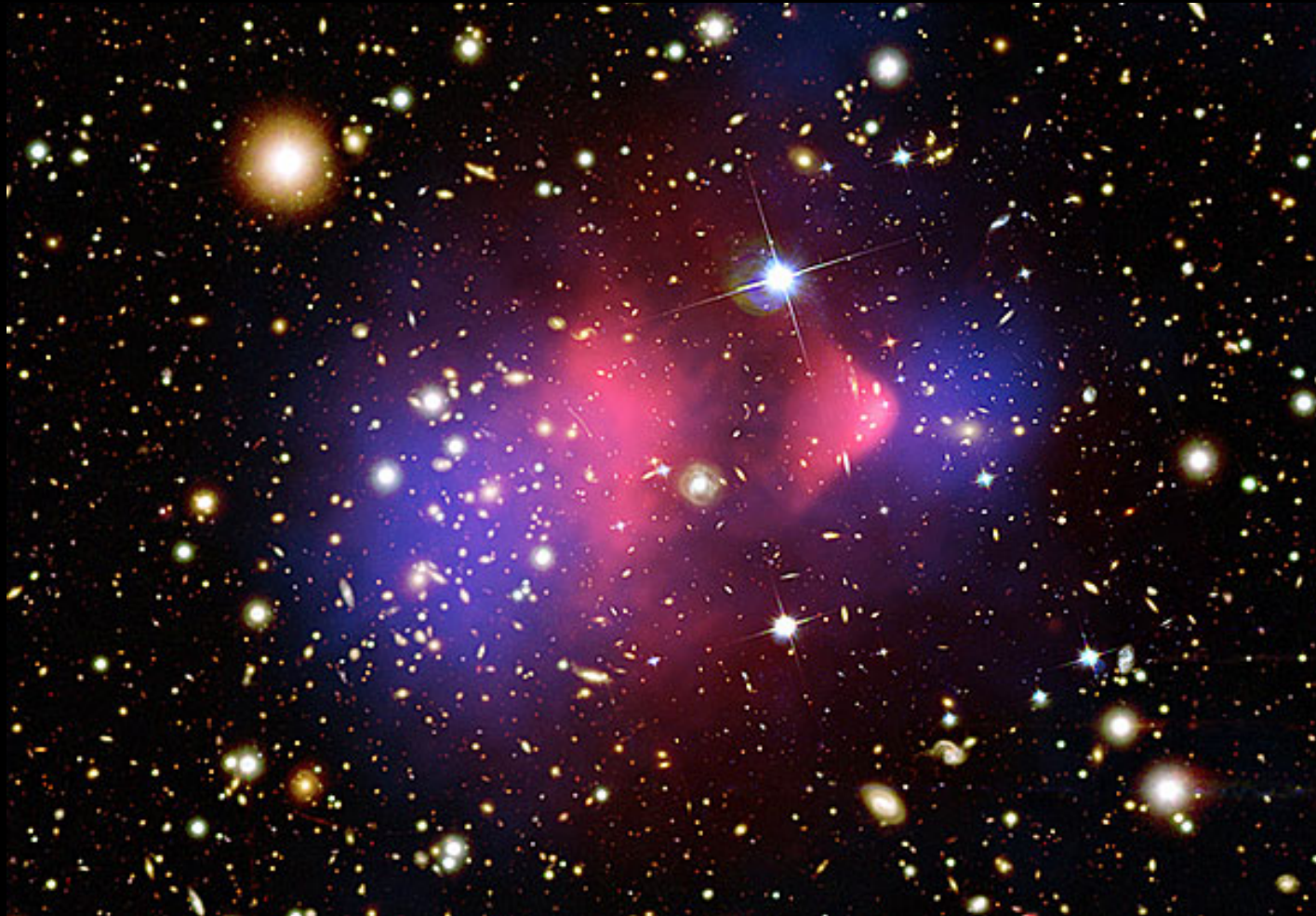
Abell 2218 est situé 1 Gpc dans la constellation du Dragon



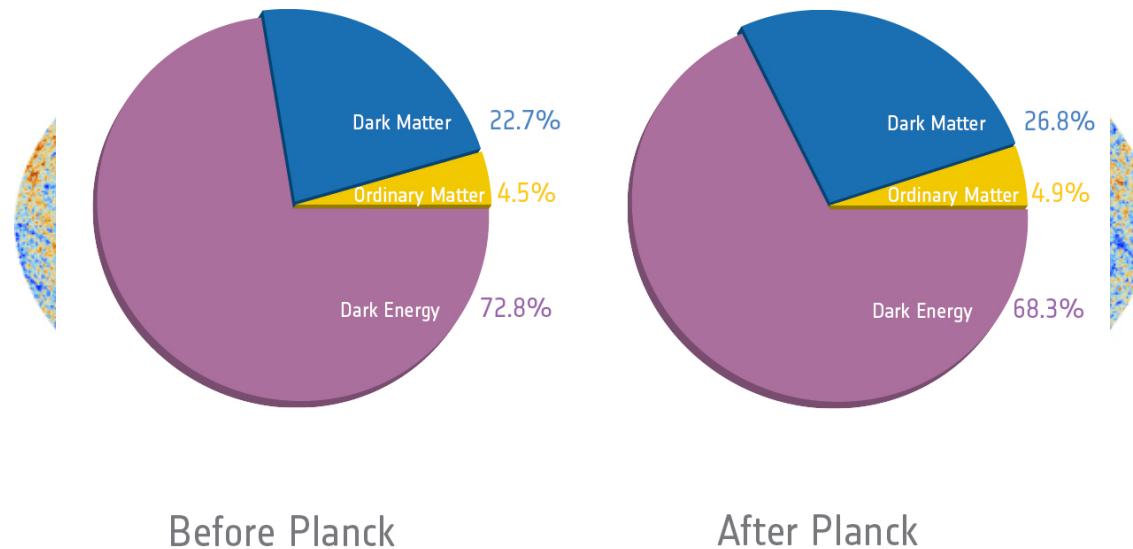
DOUGL

gaz chaud (rouge) \neq matière noire (bleue)

NDALL⁴,

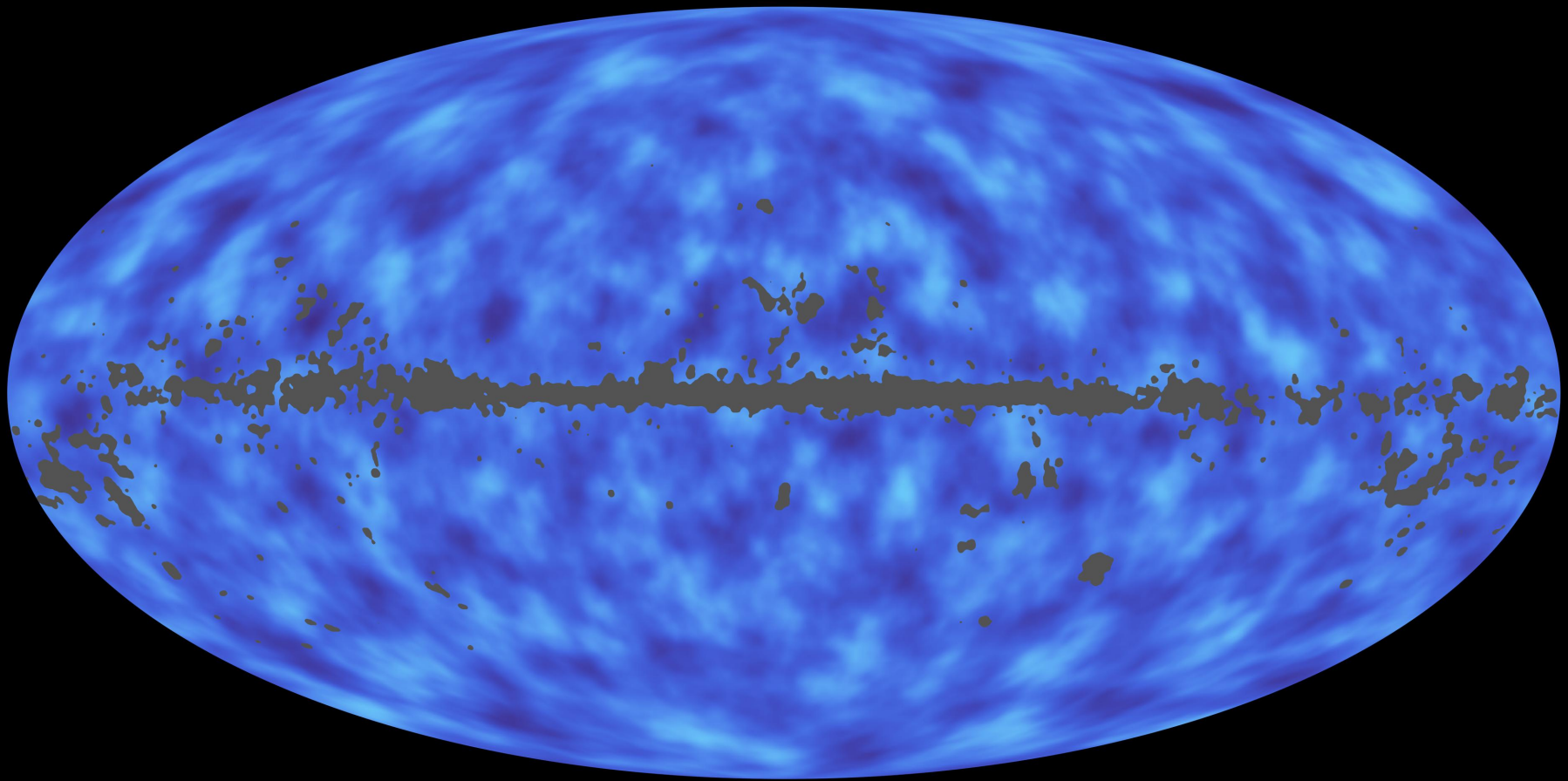


Anisotropies dans le fond de rayonnement micro-onde (CMB)



- La matière noire est présente aux échelles cosmologiques.
- Elle contribue de manière importante à la masse totale de l'univers.
- Elle est de nature **exotique**.

$$\Omega_{\text{DM}} h^2 = 0.1196 \pm 0.0031$$



2) Le bestiaire des candidats à la matière noire



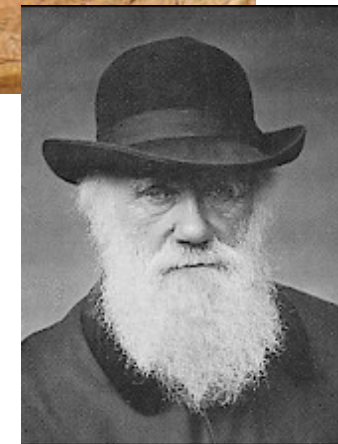
ON
THE ORIGIN OF SPECIES

BY MEANS OF NATURAL SELECTION,
OR THE
PRESERVATION OF FAVOURED RACES IN THE STRUGGLE
FOR LIFE.

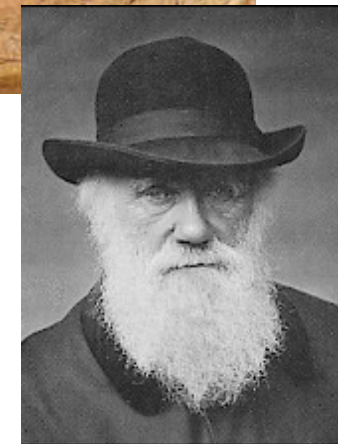
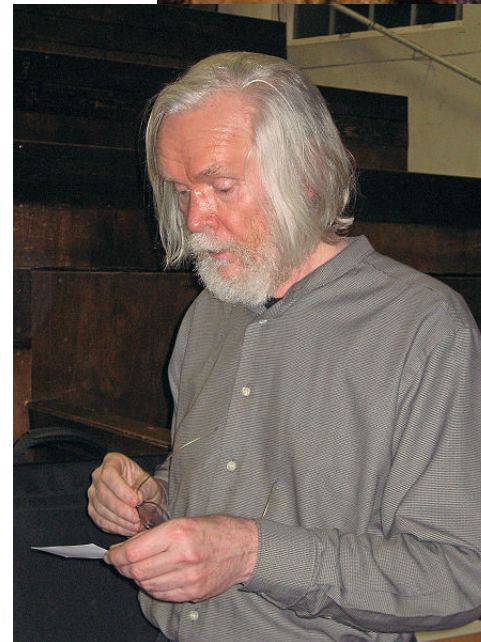
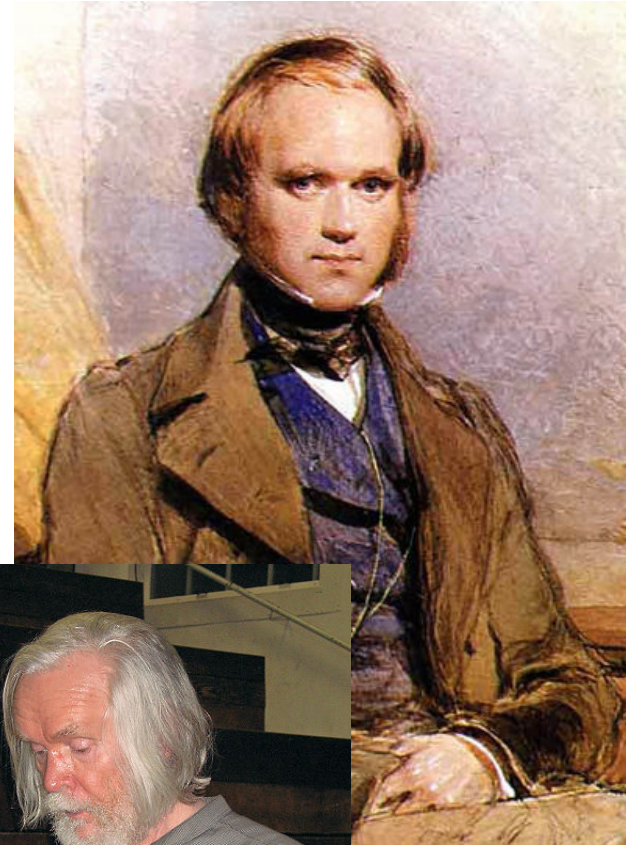
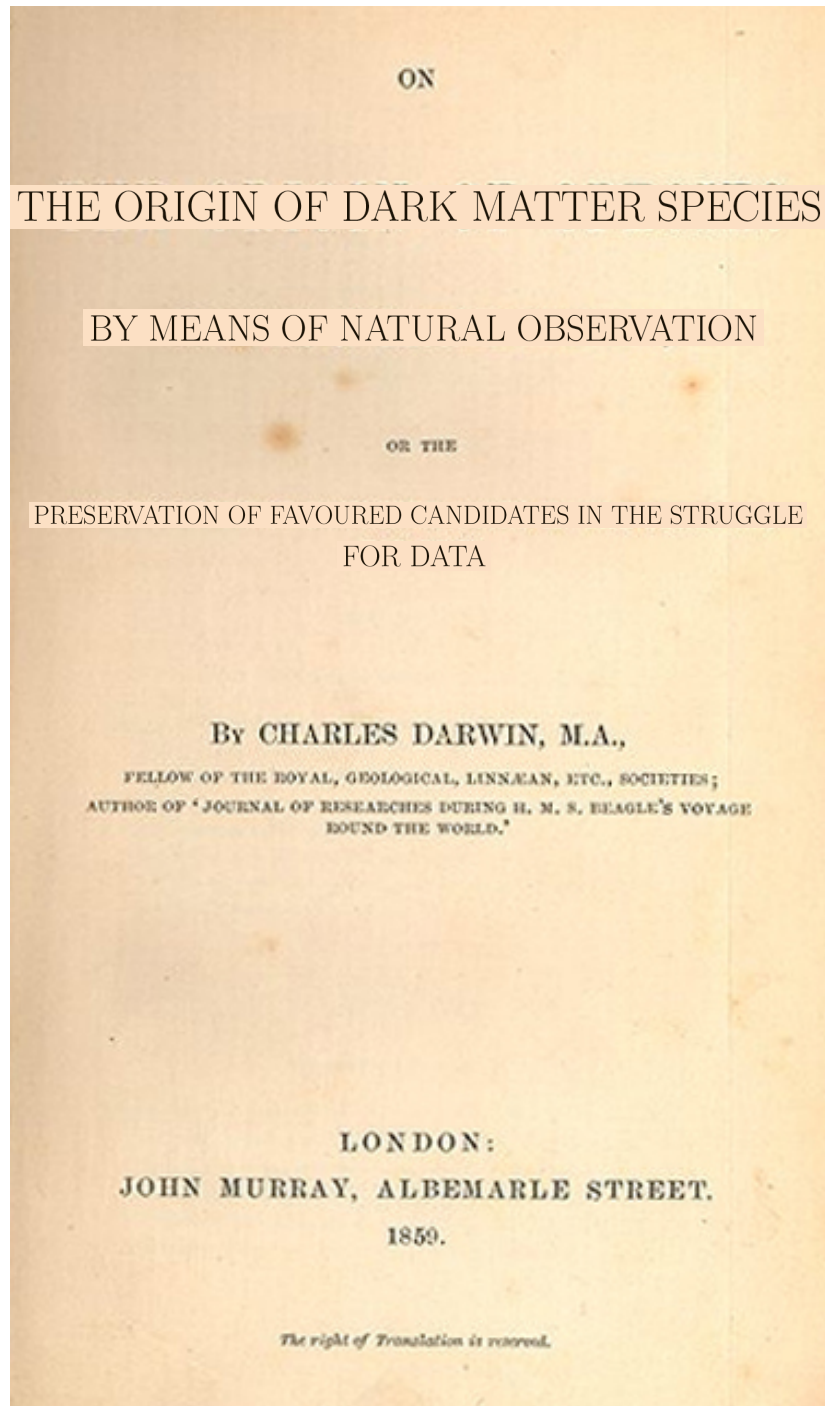
By CHARLES DARWIN, M.A.,
FELLOW OF THE ROYAL, GEOLOGICAL, LINNÆAN, ETC., SOCIETIES;
AUTHOR OF 'JOURNAL OF RESEARCHES DURING H. M. S. BEAGLE'S VOYAGE
ROUND THE WORLD.'

LONDON:
JOHN MURRAY, ALBEMARLE STREET.
1859.

The right of Translation is reserved.



Charles Robert Darwin (1809-1882)



Charles Robert Darwin (1809-1882)

- Depuis 30 ans, les physiciens ont imaginé un riche bestiaire de particules susceptibles d'expliquer la matière noire dont la nature est encore inconnue.
- Afin d'en dresser l'inventaire, il convient d'examiner chaque modèle en fonction d'une classification fondée sur quelques critères.
 - ✓ Motivation théorique forte et non construction ad'hoc
 - ✓ La stabilité doit être assurée (nombre quantique ou topologie)
 - ✓ Mécanisme naturel de production
 - ✓ Signatures observationnelles détectables

DM species	TH motivated	Stable	Production	Signatures
neutralino	✓ (hierarchy)	R parity	thermal	✓ ✓
KK WIMP	✓ (hierarchy)	KK parity	thermal	✓ ✓
gravitino	✓ (GMSB)	R parity	non-TH + NLSP decay	no
axion	✓ (CP)	no	symmetry-B or non-TH	✓ ✓
light DM (MeV)	no	ad hoc	thermal	γ -lines
wimpzillas	no	ad hoc	vacua or non-TH	no
defects	✓ ($G \rightarrow H$)	topology	symmetry-B	CMB
Bose condensate	no	ad hoc	?	galactic RC

- Depuis 30 ans, les physiciens ont imaginé un riche bestiaire de particules susceptibles d'expliquer la matière noire dont la nature est encore inconnue.
- Afin d'en dresser l'inventaire, il convient d'examiner chaque modèle en fonction d'une classification fondée sur quelques critères.
 - ✓ Motivation théorique forte et non construction ad'hoc
 - ✓ La stabilité doit être assurée (nombre quantique ou topologie)
 - ✓ Mécanisme naturel de production
 - ✓ Signatures observationnelles détectables

Candidats supersymétriques ou de Kaluza-Klein

- Ces particules sont prédites par la supersymétrie ou les théories à dimensions supplémentaires – qui complètent le Modèle Standard de la physique des particules. Elles sont **électriquement neutres**, **interagissent faiblement** et ont une masse de l'ordre du **GeV au TeV**.

Weakly interacting massive particle – WIMP ou neutralino

PHYSICAL REVIEW LETTERS

VOLUME 39

25 JULY 1977

NUMBER 4

Cosmological Lower Bound on Heavy-Neutrino Masses

Benjamin W. Lee^(a)

Fermi National Accelerator Laboratory,^(b) Batavia, Illinois 60510

and

Steven Weinberg^(c)

Stanford University, Physics Department, Stanford, California 94305

(Received 13 May 1977)

The present cosmic mass density of possible stable neutral heavy leptons is calculated in a standard cosmological model. In order for this density not to exceed the upper limit of 2×10^{-29} g/cm³, the lepton mass would have to be *greater* than a lower bound of the order of 2 GeV.

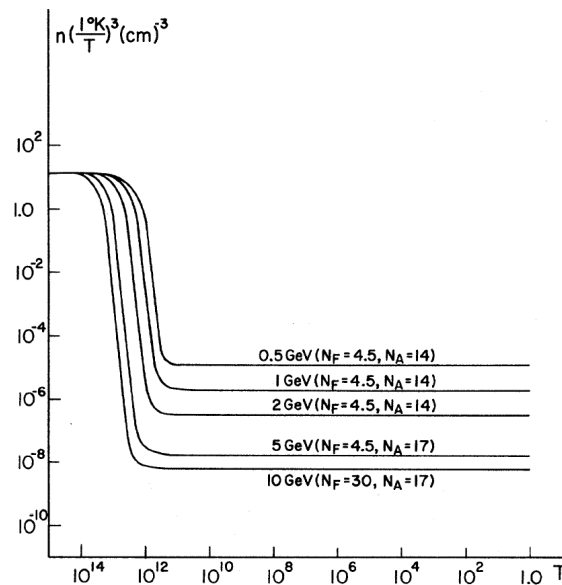


FIG. 1. n/T^3 vs T for a variety of special cases of m_L , N_F , and N_A .

Production primordiale à l'équilibre thermodynamique



$$\frac{dn_X}{dt} = -3Hn_X - \langle \sigma_{\text{an}v} \rangle n_X^2 + \langle \sigma_{\text{an}v} \rangle n_X^0{}^2$$

$$\Omega_X h^2 \sim 0.1 \Leftrightarrow \langle \sigma_{\text{an}v} \rangle \sim 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$$

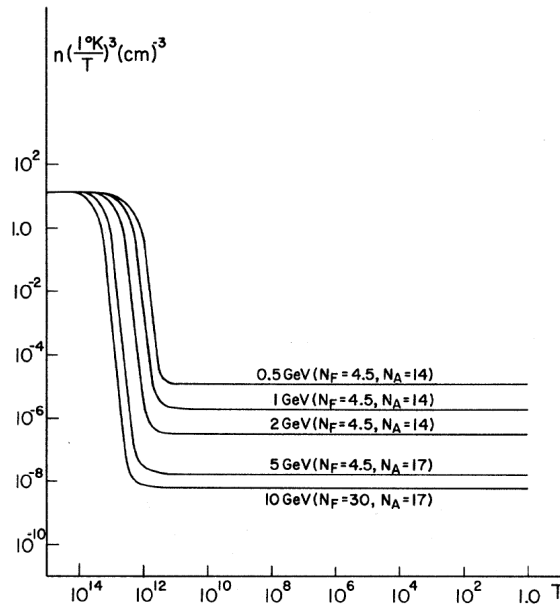


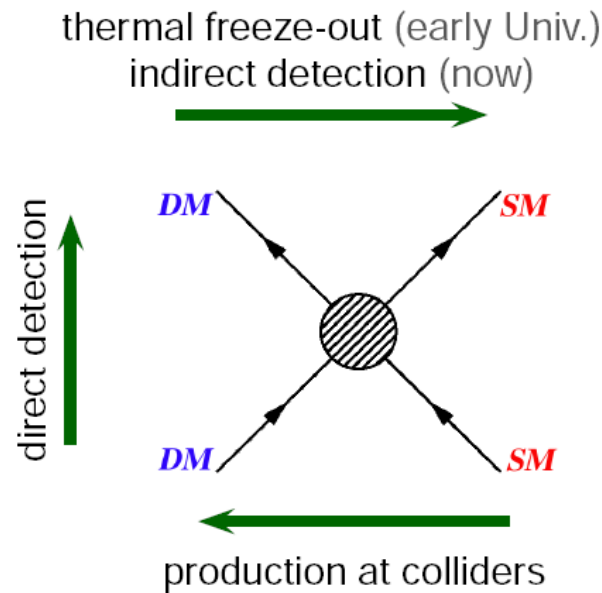
FIG. 1. n/T^3 vs T for a variety of special cases of m_L , N_F , and N_A .

Production primordiale à l'équilibre thermodynamique



$$\frac{dn_X}{dt} = -3Hn_X - \langle \sigma_{\text{an}v} \rangle n_X^2 + \langle \sigma_{\text{an}v} \rangle n_X^0{}^2$$

$$\Omega_X h^2 \sim 0.1 \Leftrightarrow \langle \sigma_{\text{an}v} \rangle \sim 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$$

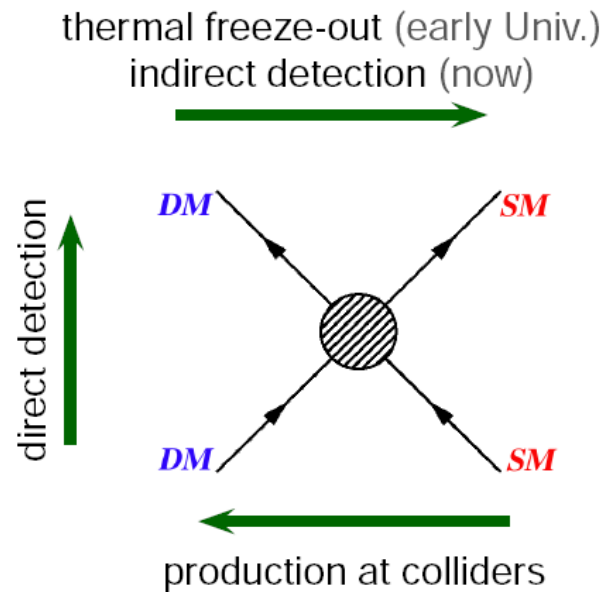


3) A la poursuite des neutralinos

- Détection directe – Il s'agit de déceler l'impact d'un neutralino sur un noyau en mesurant l'énergie déposée.

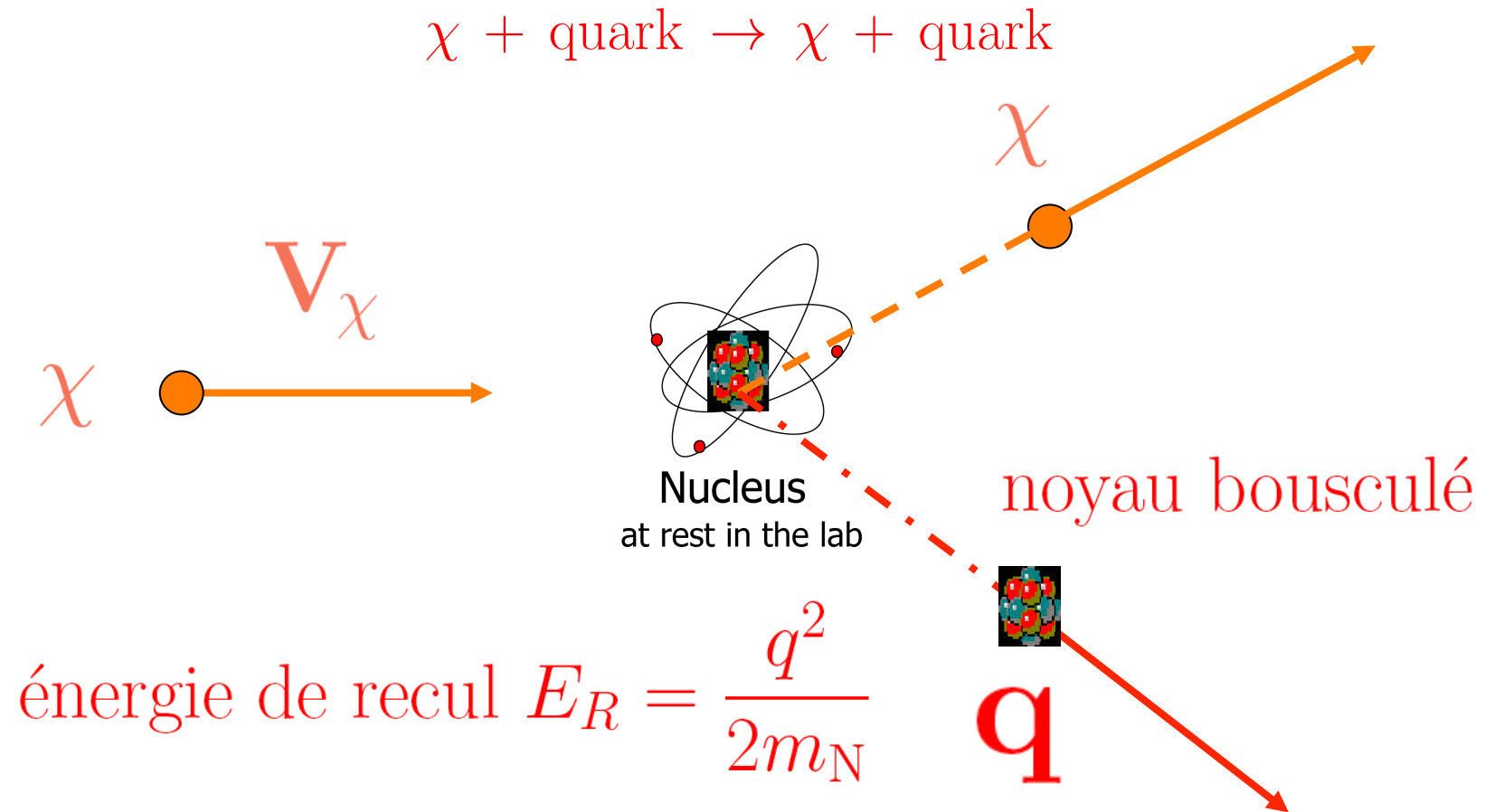


- Détection indirecte – Les neutralinos s'annihilent en permanence et produisent des particules ordinaires, mais parfois rares, comme des rayons cosmiques d'antimatière à l'instar des antiprotons, positons et antideutons.



3) A la poursuite des neutralinos

- Détection directe – Il s'agit de déceler l'impact d'un neutralino sur un noyau en mesurant l'énergie déposée.



Diffusion élastique du neutralino sur un noyau

First Dark Matter Search Results from the Large Underground Xenon (LUX) Experiment

C.H. Faham, for the LUX Collaboration
Lawrence Berkeley National Laboratory, 1 Cyclotron Rd., Berkeley CA 94720, USA

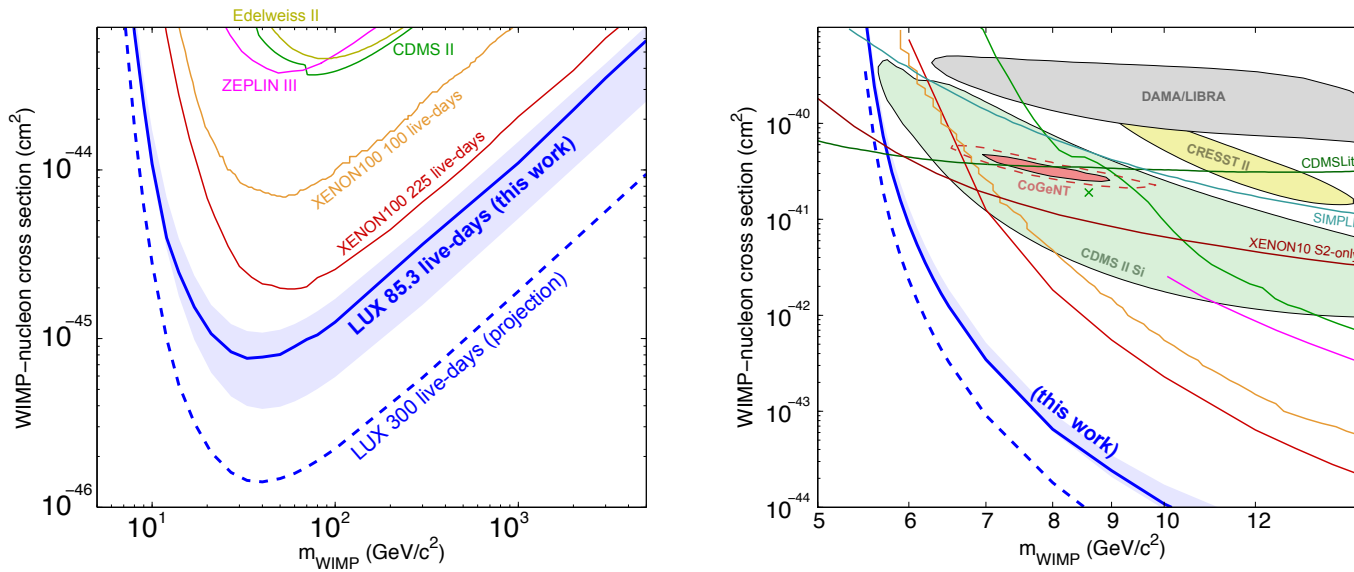
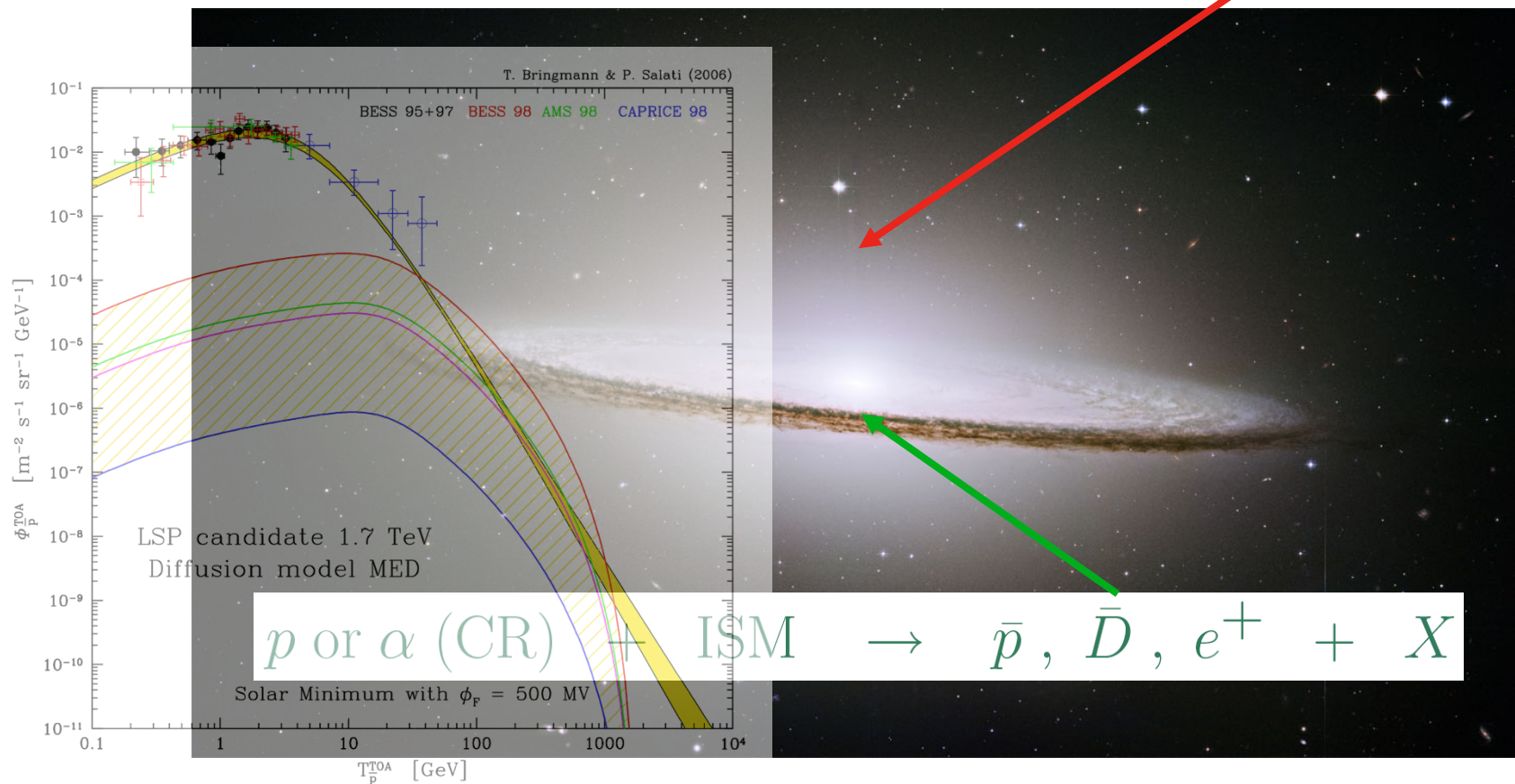


Figure 2 – *Left*: 90% CL spin-independent WIMP exclusion limits shown the LUX 85.3 live-day result (solid blue) and the 300-day projection (dashed blue). *Right*: Close-up view of exclusion plot in the low-mass regime showing the tension between the LUX result and previous hints of low-mass WIMP signals.

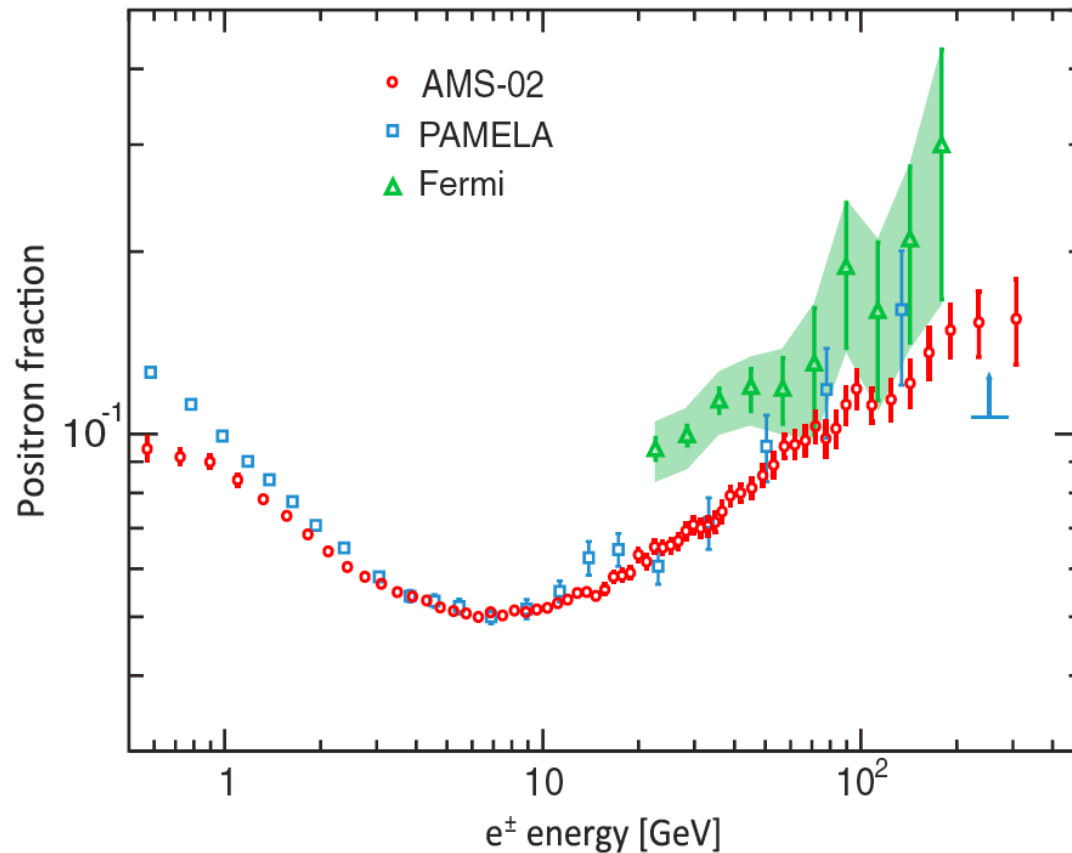
3) A la poursuite des neutralinos

- Détection indirecte – Les neutralinos s'annihilent en permanence et produisent des particules ordinaires, mais parfois rares, comme des rayons cosmiques d'antimatière à l'instar des antiprotons, positons et antideutons.

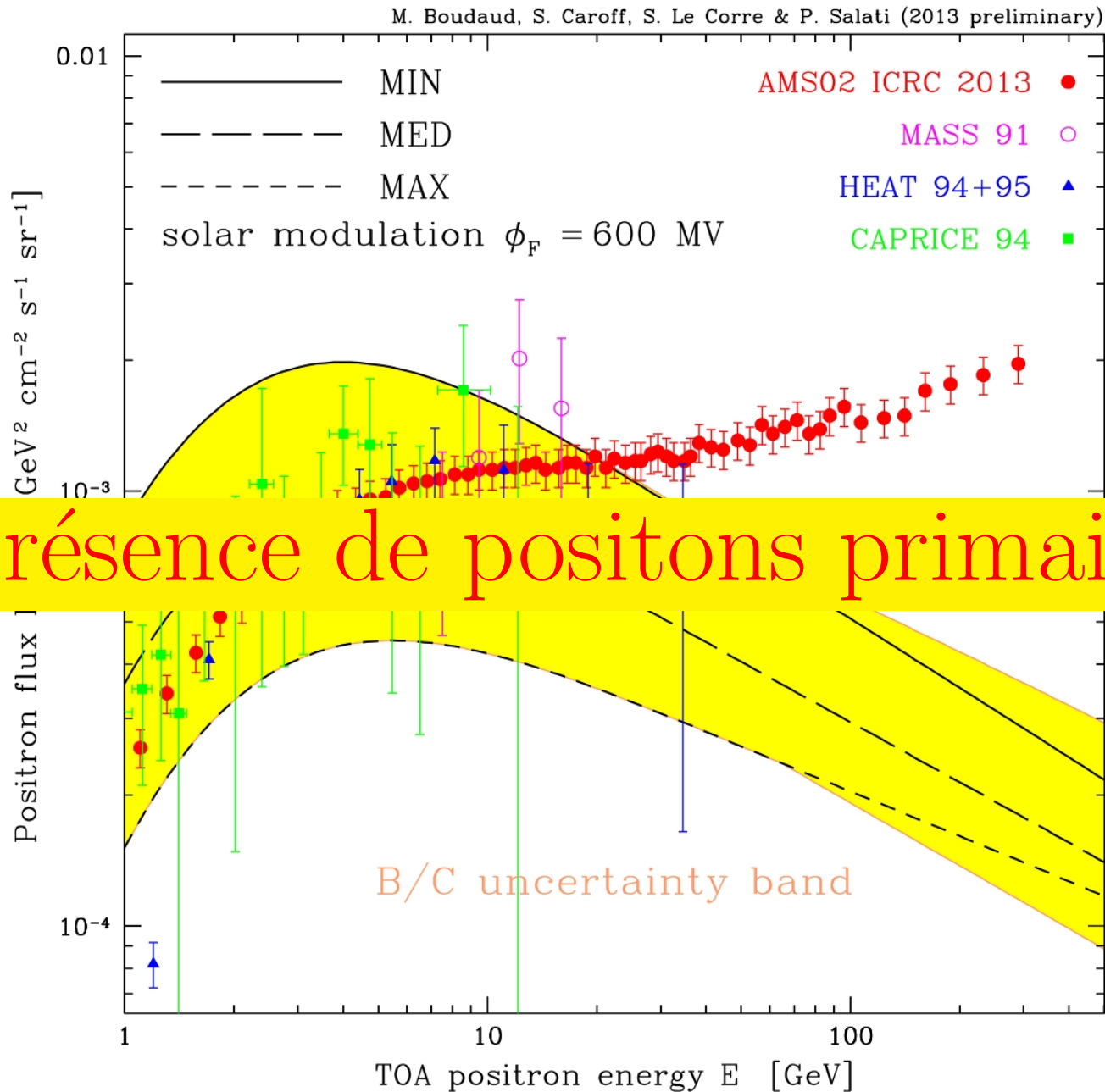


Confirmation par AMS-02 d'un excès de positons au-dessus de 10 GeV

First Result from the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station: Precision Measurement of the Positron Fraction in Primary Cosmic Rays of 0.5–350 GeV



PRL **110**, 141102 (2013)



Présence de positons primaires

Annihilation de neutralinos et excès de positons

En 2008 : premier indice de la présence de neutralinos dans la galaxie ?

$$q_{e^+} = \frac{1}{2} \langle \sigma v \rangle \times \left\{ n_\chi \equiv \frac{\rho_\chi}{m_\chi} \right\}^2 \times \frac{dN_e}{dE_e}$$

Quelques remarques s'imposent cependant

- (i) La masse $m_\chi \sim 1$ TeV – d'où l'excitation
- (ii) Mais le taux d'annihilation doit être considérablement amplifié
 - La section efficace thermique $\langle \sigma v \rangle = 3 \times 10^{-26} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$
 - Les e^+ sont produits localement et $\rho_{\text{DM}} \equiv \rho_\odot \simeq 0.3 \text{ GeV cm}^{-3}$

$$m_\chi = 1 \text{ TeV exige } \Gamma_{\text{ann}} \equiv \frac{1}{2} \langle \sigma v \rangle \times \frac{\rho_\chi^2}{m_\chi^2} \text{ amplifié par } B = 10^3$$

- (iii) Les neutralinos doivent être **leptophiliques**

$$\chi + \chi \rightarrow \text{leptons} + \text{antileptons uniquement}$$

(iii) Les neutralinos doivent être leptophiliques

M. Cirelli et al., Nucl. Phys. **B 813** (2009) 1

Constraints on WIMP Dark Matter from the High Energy PAMELA \bar{p}/p data

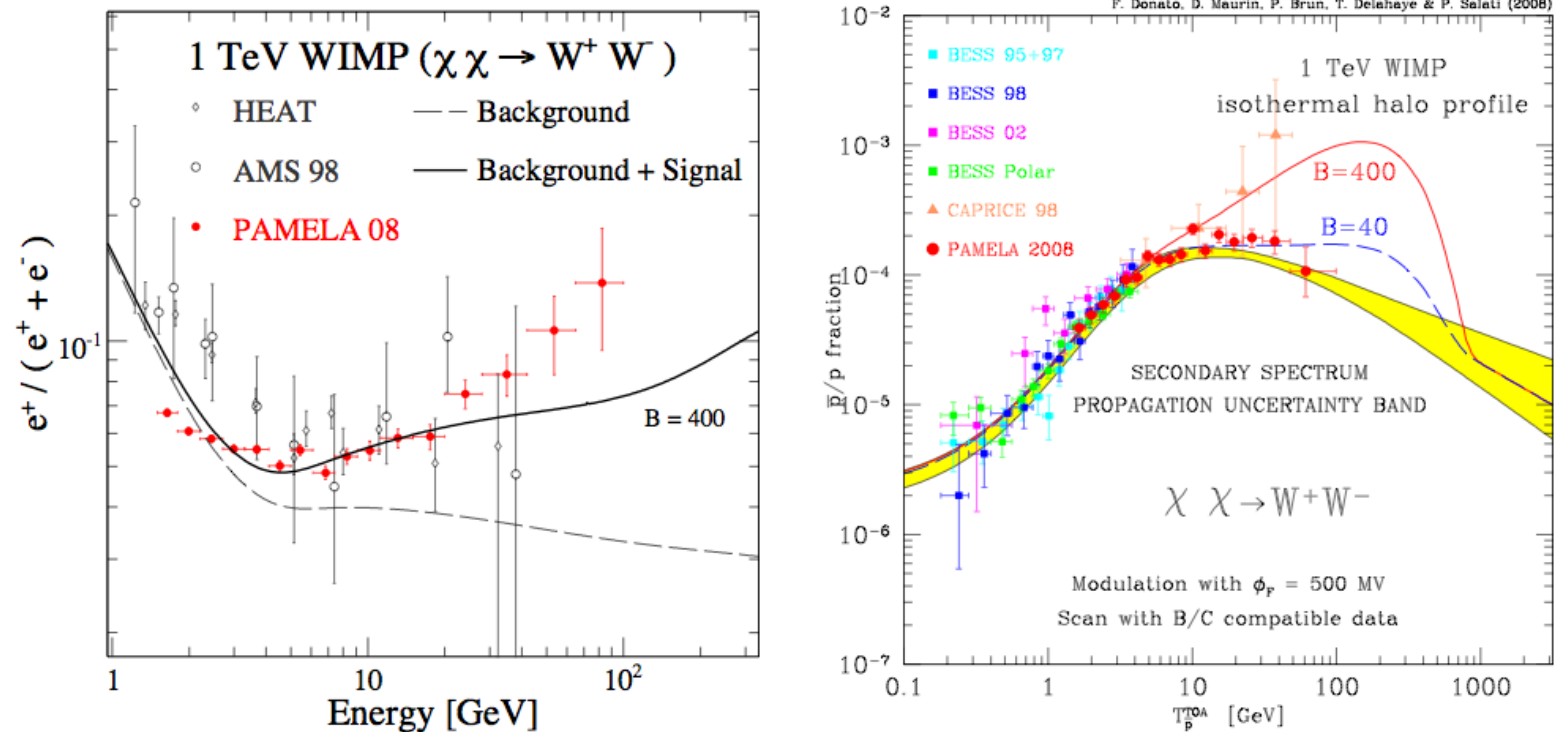
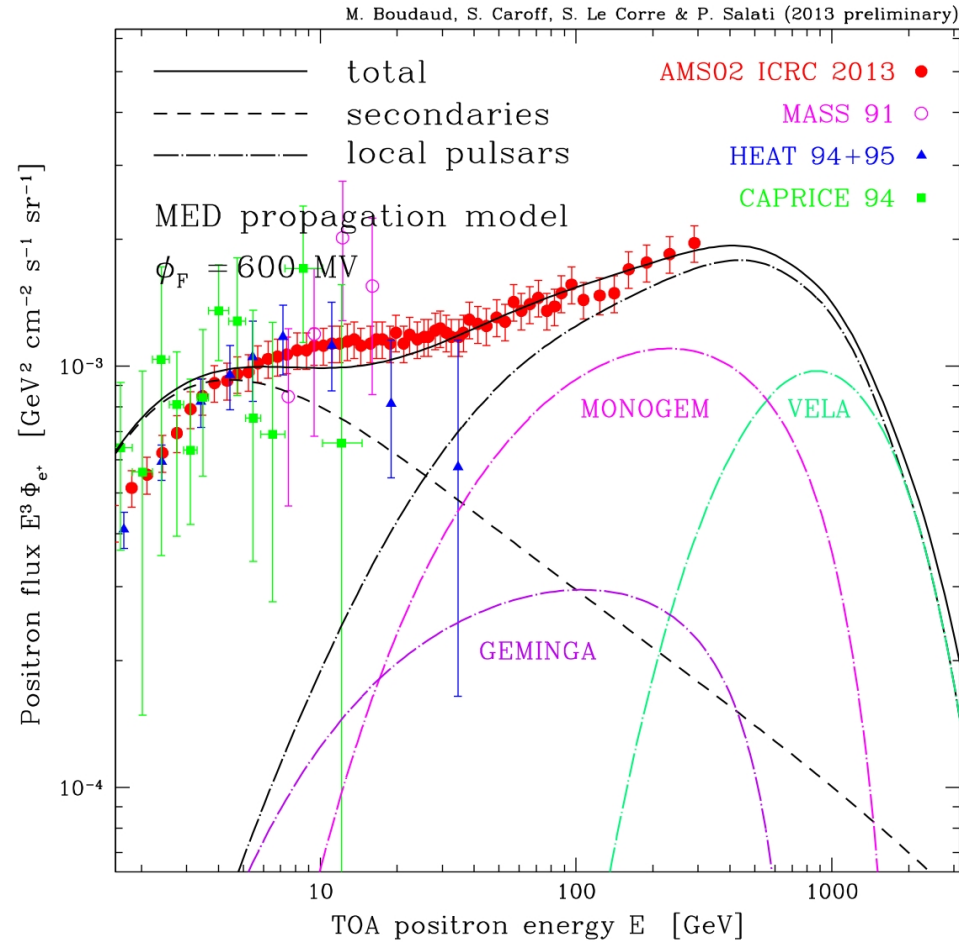


FIG. 3: The fiducial case of a 1 TeV LSP annihilating into a W^+W^- pair is featured. In the left panel, the positron signal which this DM species yields has been increased by a factor of 400, hence the solid curve and a marginal agreement with the PAMELA data. Positron fraction data are from HEAT [18], AMS-01 [5, 22] and PAMELA [2]. If the so-called Sommerfeld effect [7] is invoked to explain such a large enhancement of the annihilation cross section, the same boost applies to antiprotons and leads to an unacceptable distortion of their spectrum as indicated by the red solid line of the right panel.

F. Donato et al. – PRL **102** (2009) 071301

Les pulsars fournissent une solution plausible à l'excès de positons

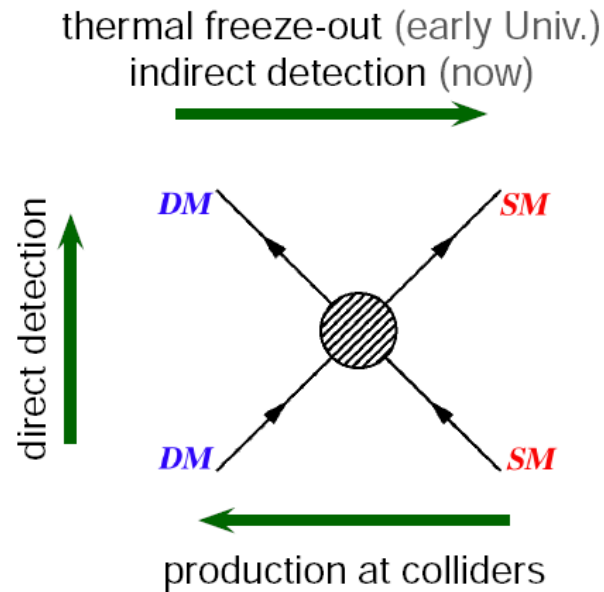
Pas vraiment prédictif – un cadre plus qu'une explication



Pulsars	Modèle	χ^2	$f W_{0(Geminga)}$ ($10^{50} GeV$)	$f W_{0(Monogem)}$ ($10^{50} GeV$)	$f W_{0(Vela)}$ ($10^{50} GeV$)	γ	E_C (TeV)
Geminga + Monogem + Vela	<i>med</i>	0.66	7.755	4.265	0.59	1.9	1.0
	<i>max</i>	0.26	36.5	45.5	9.5	2.4	1.0

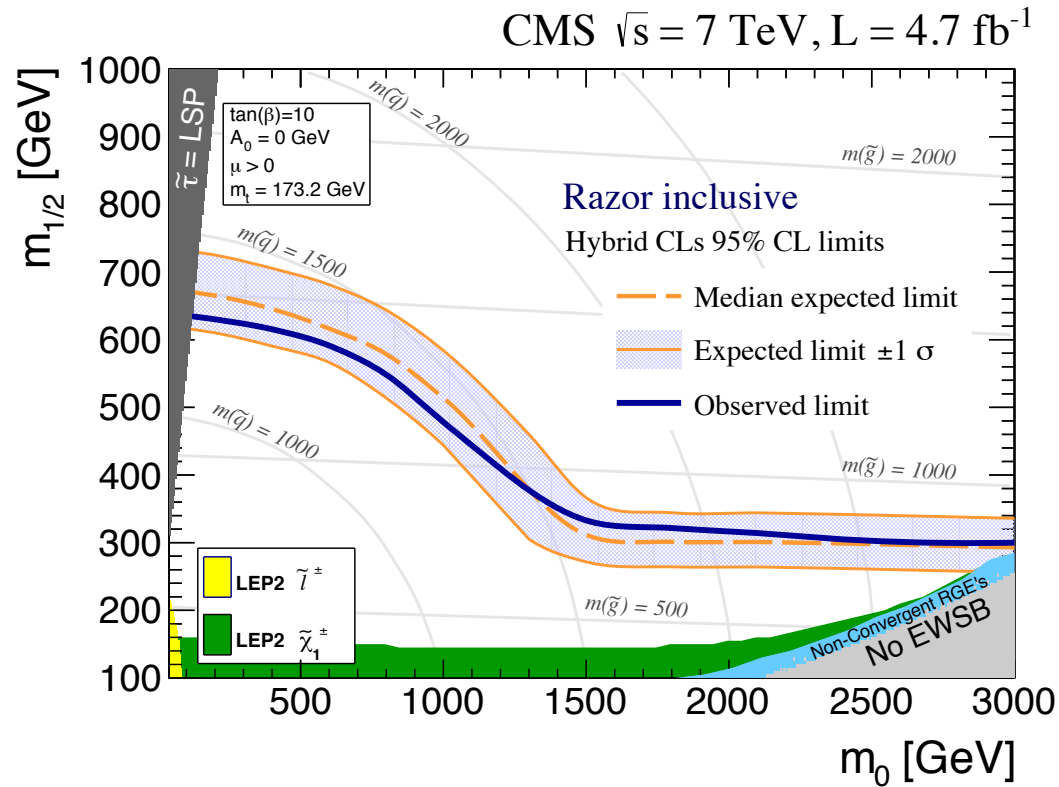
4) L'enseignement du LHC

- Le LHC a découvert le boson de Higgs tant attendu – du moins une particule scalaire dont la masse est de 126 GeV et qui se désintègre en paires de fermions avec un rapport de branchement qu'il convient de mesurer.



4) L'enseignement du LHC

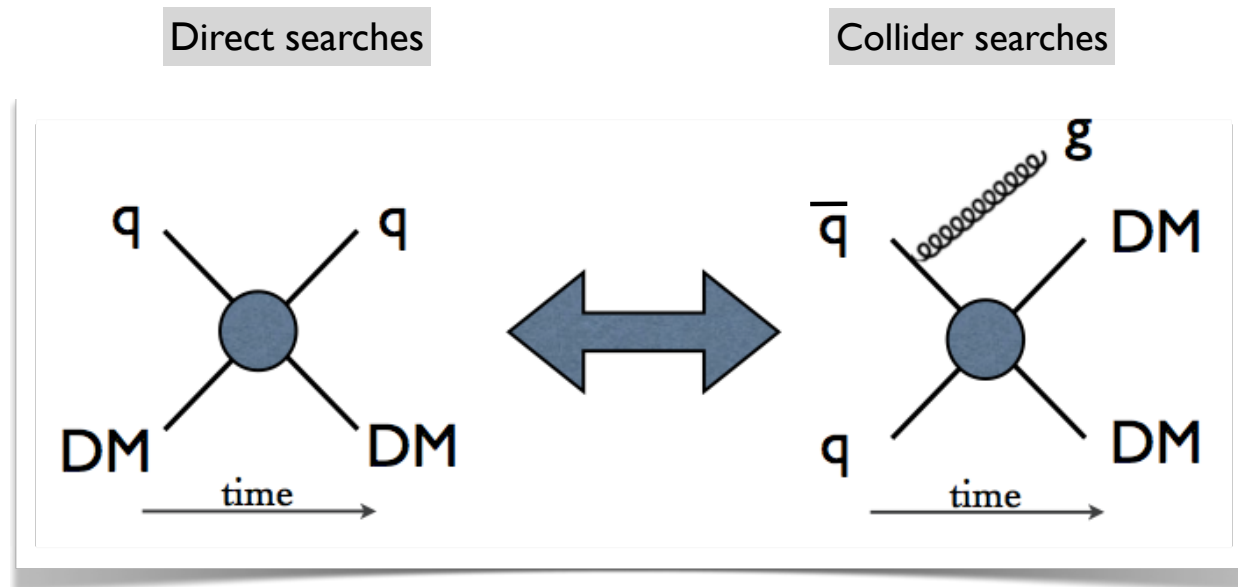
- Le LHC a découvert le boson de Higgs tant attendu – du moins une particule scalaire dont la masse est de 126 GeV et qui se désintègre en paires de fermions avec un rapport de branchement qu'il convient de mesurer.
- Le LHC n'a produit aucune des particules prédites par la supersymétrie ou les théories à dimensions supplémentaires. Les particules nouvelles – si elles existent – doivent être très massives.



Light Neutralino Dark Matter > 24 GeV from LHC

4) L'enseignement du LHC

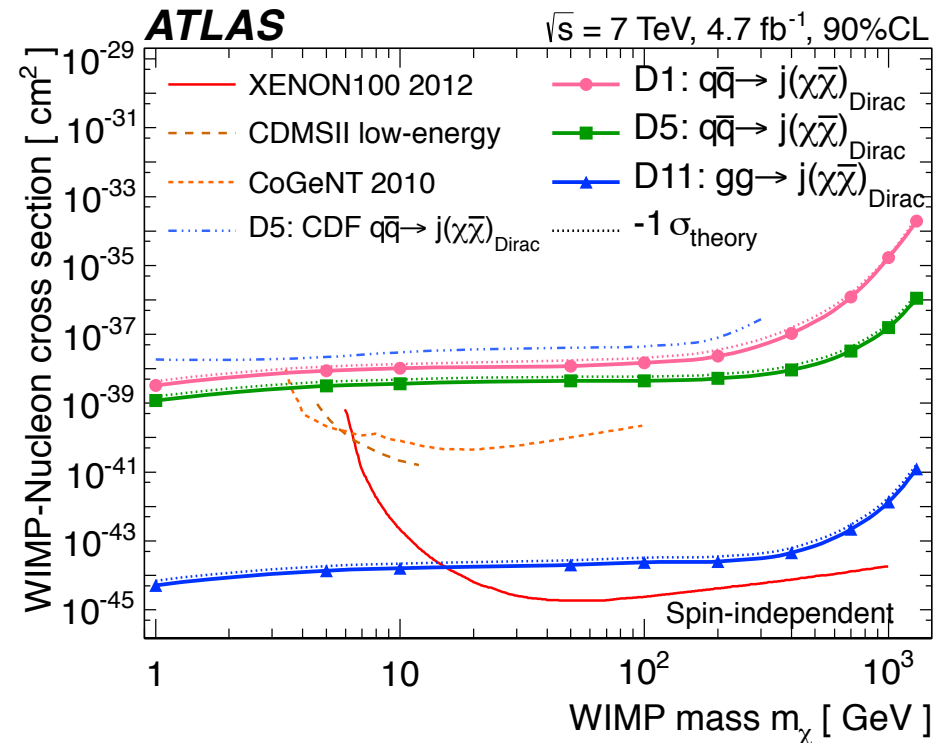
- Le LHC a découvert le boson de Higgs tant attendu – du moins une particule scalaire dont la masse est de 126 GeV et qui se désintègre en paires de fermions avec un rapport de branchement qu'il convient de mesurer.
- Le LHC n'a produit aucune des particules prédites par la supersymétrie ou les théories à dimensions supplémentaires. Les particules nouvelles – si elles existent – doivent être très massives.
- Le LHC et les recherches directes sont complémentaires.



Courtesy Sarah Alam Malik from the CMS collaboration

4) L'enseignement du LHC

- Le LHC a découvert le boson de Higgs tant attendu – du moins une particule scalaire dont la masse est de 126 GeV et qui se désintègre en paires de fermions avec un rapport de branchement qu'il convient de mesurer.
- Le LHC n'a produit aucune des particules prédites par la supersymétrie ou les théories à dimensions supplémentaires. Les particules nouvelles – si elles existent – doivent être très massives.
- Le LHC et les recherches directes sont complémentaires.



Conclusion

- La matière noire a été découverte en 1933 par Fritz Zwicky et reste à ce jour une énigme pour les astrophysiciens et les physiciens des particules.
- Cette composante est d'une nature inconnue. La physique des hautes énergies propose une pléthore de candidats. Les neutralinos – prévus de manière indépendante par la supersymétrie ou les théories de Kaluza-Klein – constituent une voie de recherche motivée et excitante.
- Ces particules sont activement recherchées au LHC sans succès pour l'instant. Le second run de la machine est donc attendu avec impatience.
- Les recherches directes et indirectes ainsi qu'au LHC sont de plus en plus précises et finiront par explorer toute la région des paramètres théoriques. Mais si rien n'est découvert ?

“entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem”

Guillaume d'Occam

- L'étude de la gravitation modifiée doit être menée conjointement avec les recherches des neutralinos.

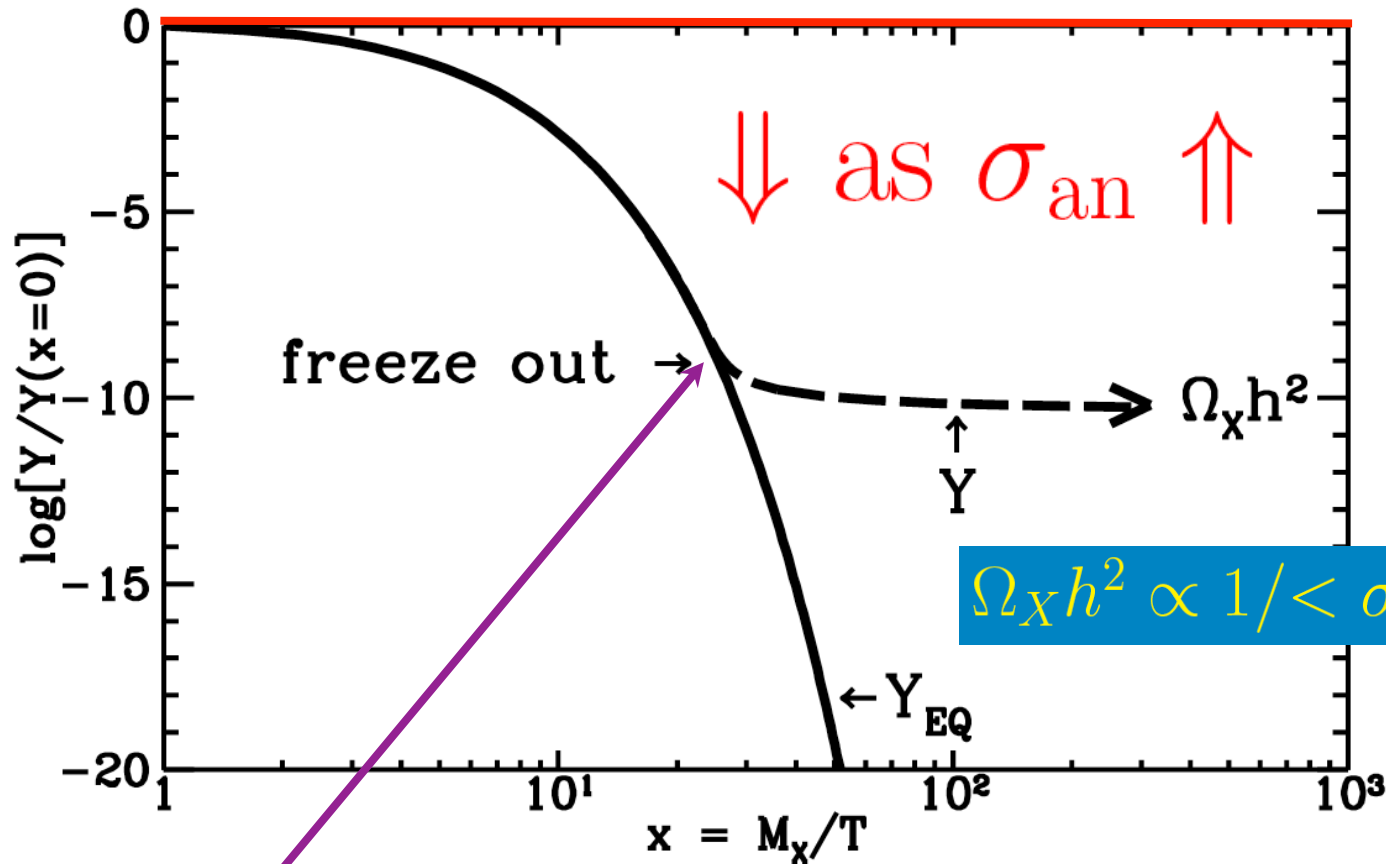
Back-up slides

Thermodynamical equilibrium production



$$\frac{dn_X}{dt} = -3Hn_X - \langle \sigma_{\text{an}} v \rangle n_X^2 + \langle \sigma_{\text{an}} v \rangle n_X^0{}^2$$

thermal decoupling when $\Gamma_{\text{coll}} \sim H_F$ (UR)



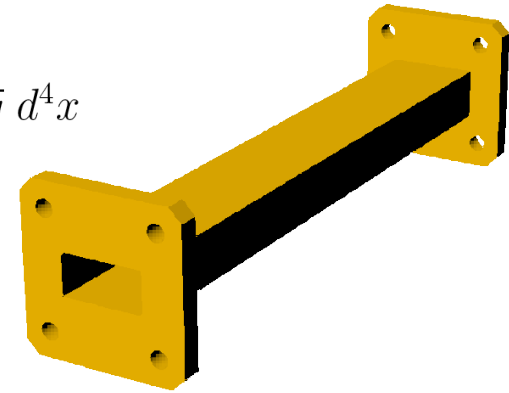
chemical decoupling when $\langle \sigma_{\text{an}} v \rangle n_X \sim H_F$ (NR)

Kaluza–Klein species in extra–dimension theories

Could the **true** Planck mass be $O(1)$ TeV ?

- In Kaluza–Klein theories, the universe has extra–dimensions. The real Planck mass μ is smaller than the canonical value of $M_P \sim 10^{19}$ GeV since

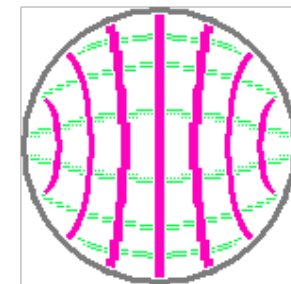
$$\mathcal{S} = \frac{M_P^2}{16\pi} \int \mathcal{R} \sqrt{g} d^4x = \frac{\mu^3}{16\pi} \int \mathcal{R} \sqrt{\tilde{g}} d^5y = \frac{\mu^3 L}{16\pi} \int \mathcal{R} \sqrt{g} d^4x$$
$$\Downarrow$$
$$M_P^2 = \mu^3 L$$



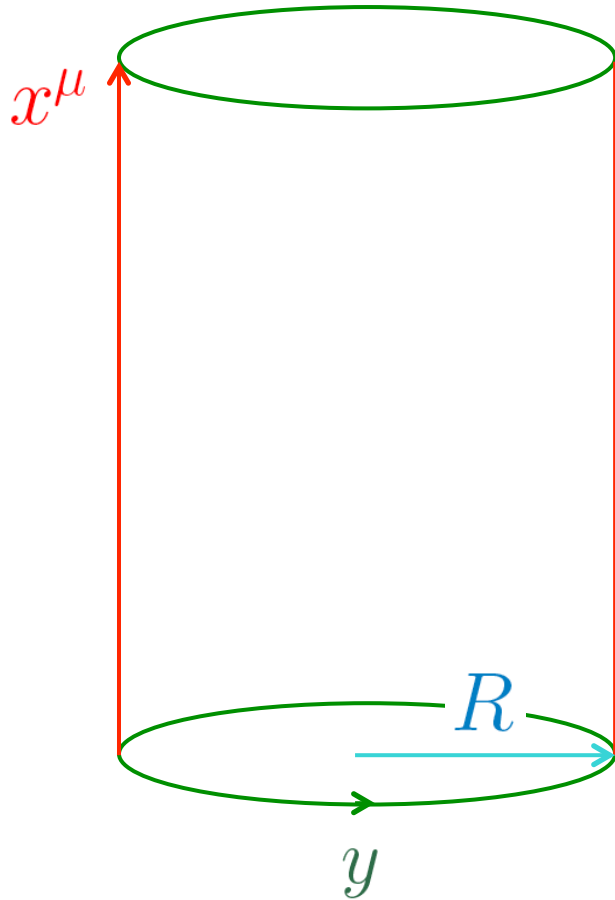
We can play with the number and length of extra–dimensions to lower the gravity scale

$$L^{-1} \sim 1 \text{ TeV} \quad \Rightarrow \quad \mu \sim 5 \times 10^{13} \text{ GeV}$$

- Extra–dimensions behave as a wave–guide. Explanation of the masses.



Universal Extra Dimension Theories – UED



$$\phi(x^\mu, y) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \phi^{(n)}(x^\mu) \exp\left\{\frac{in y}{R}\right\}$$

$$(\partial^A \partial_A + m^2) \phi = 0$$



$$\left(\partial^\mu \partial_\mu + \left\{m^2 + \frac{n^2}{R^2}\right\}\right) \phi^{(n)}(x) = 0$$

Kaluza–Klein tower of states

The y -momentum $P_5 \equiv -i R \partial_y$ is conserved $\Rightarrow P_5 \phi^{(n)} = n \phi^{(n)}$

Lightest Kaluza–Klein Particle

Géraldine Servant ^{a,b} and Tim M.P. Tait ^a

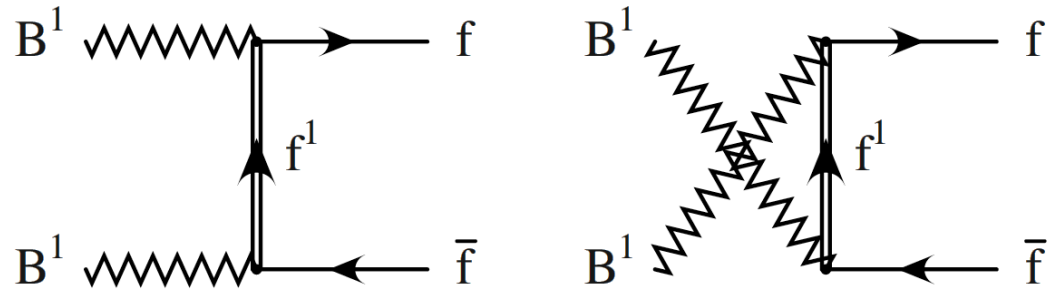


Figure 4: Feynman diagrams for $B^{(1)}B^{(1)}$ annihilation into fermions.

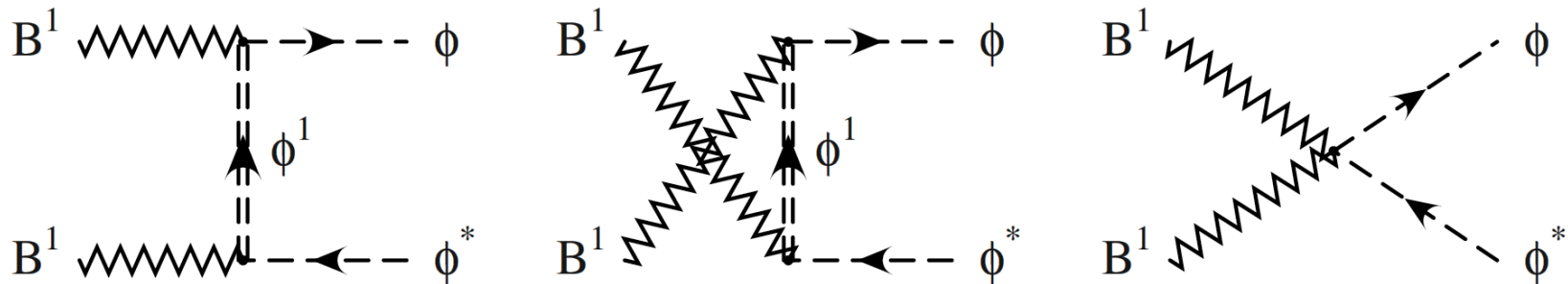
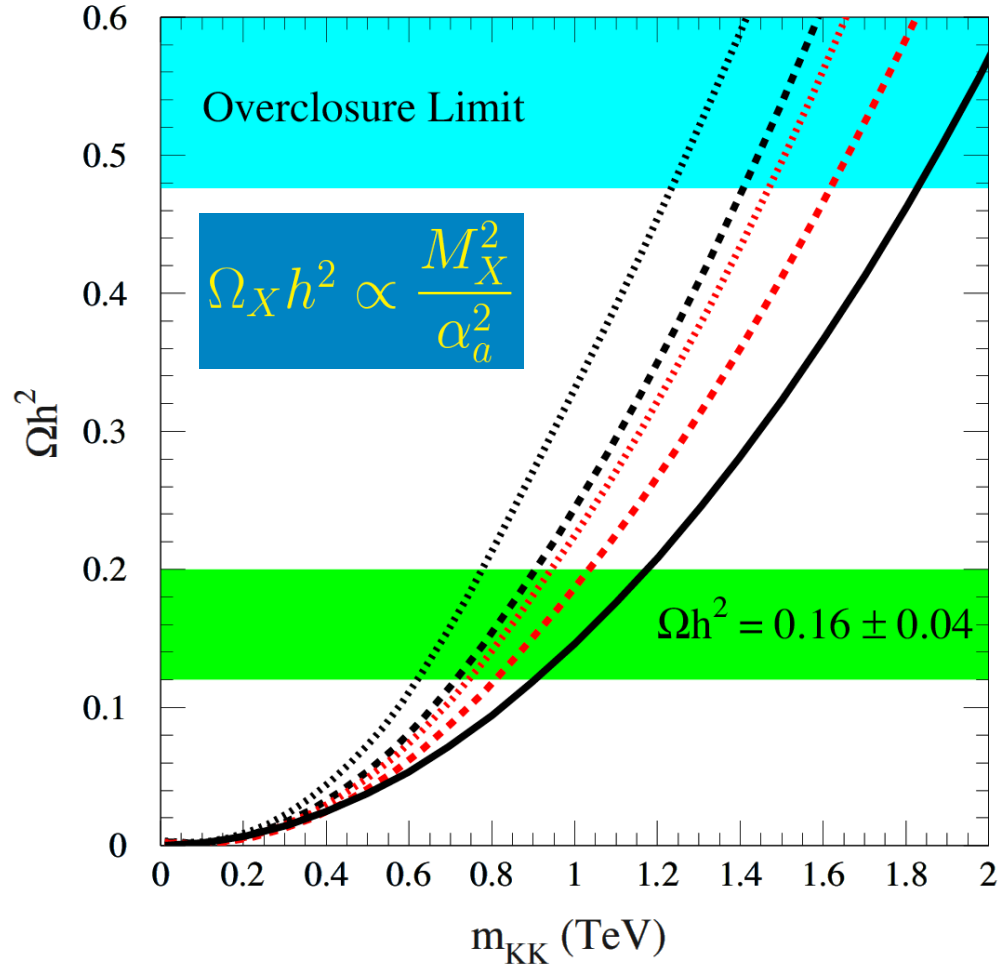


Figure 5: Feynman diagrams for $B^{(1)}B^{(1)}$ annihilation into Higgs scalar bosons.



G eraldine Servant ^{a,b} and Tim M.P. Tait ^a

Figure 3: Prediction for $\Omega_{B^{(1)}} h^2$ as in Figure 1. The solid line is the case for $B^{(1)}$ alone, and the dashed and dotted lines correspond to the case in which there are one (three) flavors of nearly degenerate $e_R^{(1)}$. For each case, the black curves (upper of each pair) denote the case $\Delta = 0.01$ and the red curves (lower of each pair) $\Delta = 0.05$.