

Détection directionnelle de Matière Noire avec MIMAC

Julien Billard,

Frédéric Mayet et Daniel Santos

*Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie
Grenoble – France*



Séminaire CPPM

Sommaire

1. Introduction à la détection directionnelle de matière sombre
« *Pourquoi un signal directionnel ?* »
2. Phénoménologie de la détection directionnelle
« *intérêt de la détection directionnelle et méthodes statistique associées* »
3. Le projet MIMAC
« *Stratégie de détection et performances attendues* »

Conclusions

Introduction à la détection directionnelle de matière sombre

I.a) La matière noire

Existence:

Cosmologie de précision (CMB, SN Ia, BAO, ...)

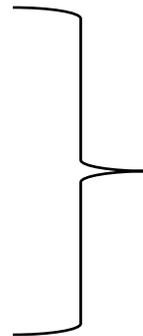
WMAP 7 ans (E. Komatsu *et al.* 2010) :

- Energie noire : $\Omega_\Lambda = 0,734 \pm 0,029$
- Matière non baryonique $\Omega_{CDM} = 0,222 \pm 0,026$
- Matière baryonique $\Omega_B = 0,0449 \pm 0,0028$

~22 % du contenu de l'Univers est sous la forme de matière noire non baryonique

Candidat: WIMP (*Weakly Interacting Massive Particle*)

- *massives* : $GeV/c^2 - TeV/c^2$
- *stables*
- *Neutres de charge et de couleur*
- *Interaction faible*



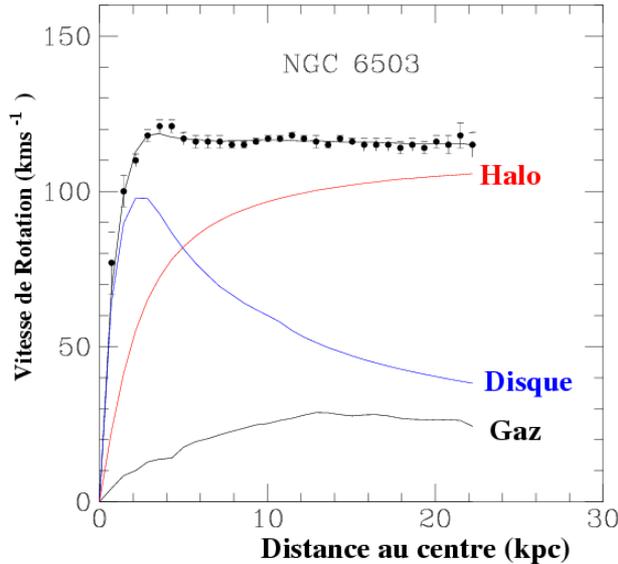
$$\Omega_{WIMP} = \mathcal{O}(1)$$

« *Le miracle WIMP* »

Extensions du modèle standard de la Physique des particules: SUSY

Candidat WIMP = Neutralino χ

I.b) L'astrophysique du halo: *modèle standard*



Incompatibilité entre la loi de Newton
et les observations

... sauf à envisager la présence d'un **halo de matière sombre** englobant le disque galactique

M. Persic, P. Salucci and F. Stel, MNRAS 1996
(1100 galaxies spirales)

Dans le cadre du modèle standard, le halo de matière noire est constitué d'un gaz de WIMP supposé en équilibre thermodynamique.

Propriétés du halo:

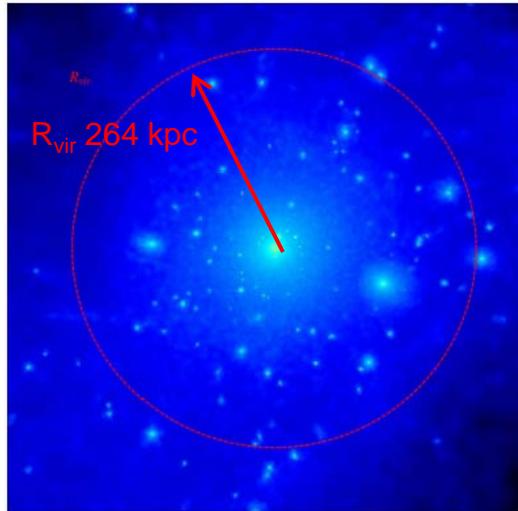
- Distribution maxwellienne $\langle v \rangle = 300$ km/s
- Distribution de vitesse isotrope ($\beta = 0$)
- Densité locale de matière sombre $\rho_0 = 0.3$ GeV/cm³

$$\beta(r) = 1 - \frac{\sigma_\theta^2 + \sigma_\phi^2}{2\sigma_r^2}$$

- $\beta < 0$: Anisotropie tangentielle
- $\beta > 0$: Anisotropie radiale
- $\beta = 0$: isotrope

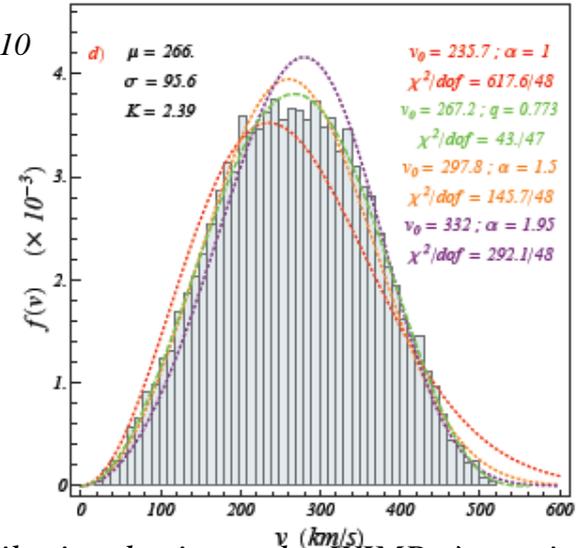
I.c) L'astrophysique du halo: au-delà du *modèle standard*

Observation + Simulation N-corps (baryons + matière noire)



(RAMSES code from R.Teyssier)

F. S. Ling, E. Nezri et al. JCAP 2010



Distribution de vitesse des WIMPs à proximité du SS

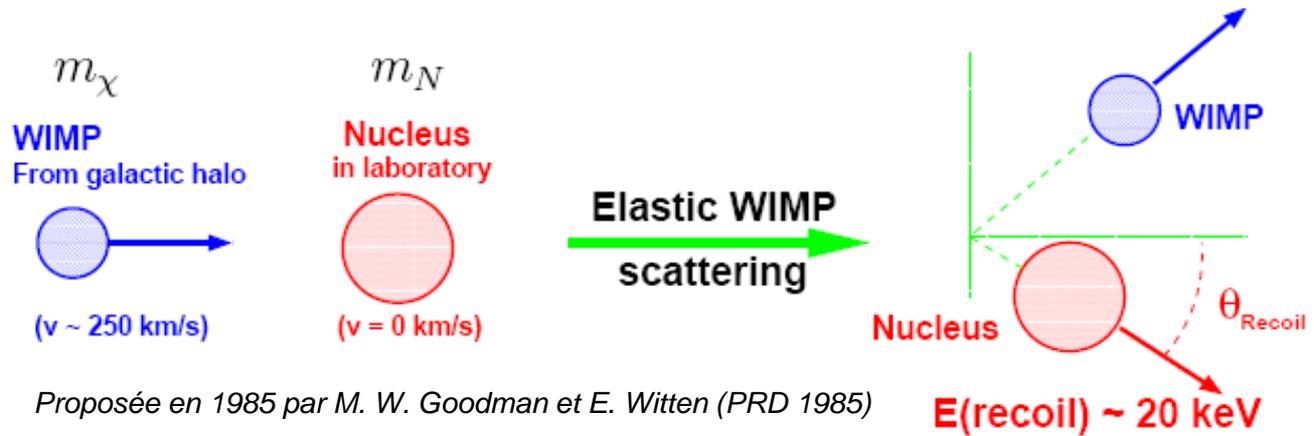
Distribution: gaussienne multivariée

- Compatible avec une distribution gaussienne
- Distribution de vitesse **anisotrope**: $\beta = 0 - 0,4$
- Nouvelles contraintes sur ρ_0 : $0,1 - 0,5 \text{ GeV/cm}^3$



Nuisance parameters	Gaussian parametrization
$\rho_0 \text{ [GeV/c}^2\text{/cm}^3\text{]}$	0.3 ± 0.1
$v_\odot \text{ [km/s]}$	220 ± 30
$\sigma_x \text{ [km/s]}$	$220/\sqrt{2} \pm 20$
$\sigma_y \text{ [km/s]}$	$220/\sqrt{2} \pm 20$
$\sigma_z \text{ [km/s]}$	$220/\sqrt{2} \pm 20$

I.d) La détection directe: principe et ordres de grandeur



Taux d'événements:

$$\frac{dR}{dE_r} = \frac{\sigma_0 \rho_0}{2m_r^2 m_\chi} F^2(E_r) \int \frac{f(\vec{v})}{v} d^3v$$

Incertitudes principales:

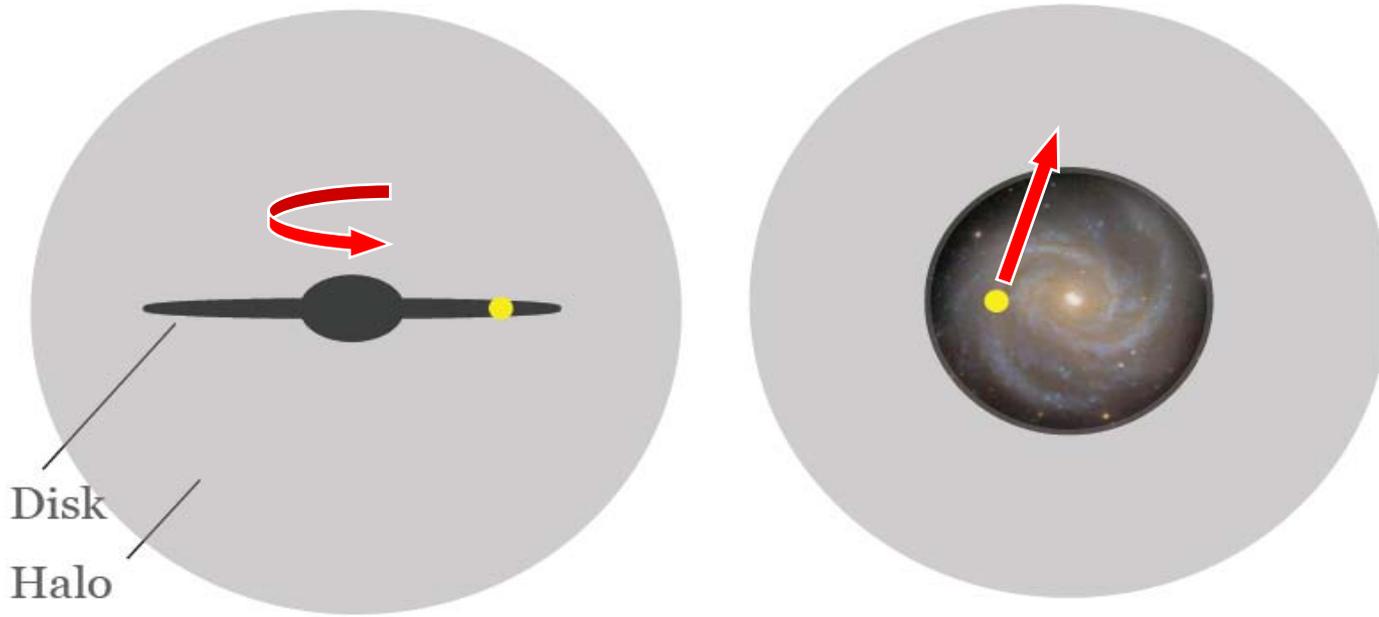
- Physique des particules
- Astrophysique

Détection directe :

Mesure de l'énergie déposée lors de la diffusion élastique WIMP-noyau

- Energie typique : $O(10)$ keV ➡ détecteur basse énergie
- Taux d'événements très faible ➡ $R < O(10)$ evts/kg/year

I.e) La détection directionnelle



Le vecteur vitesse du Soleil (\vec{v}_{\odot}) pointe vers ($\ell_{\odot} = 90^{\circ}$, $b_{\odot} = 0^{\circ}$), *grosso modo* la direction de la constellation du Cygne.



« Un vent de WIMP en provenance du Cygne »



Caractéristique propre au signal WIMP (BDF = isotrope)

I.e) La détection directionnelle

Une observable supplémentaire: la direction du recul

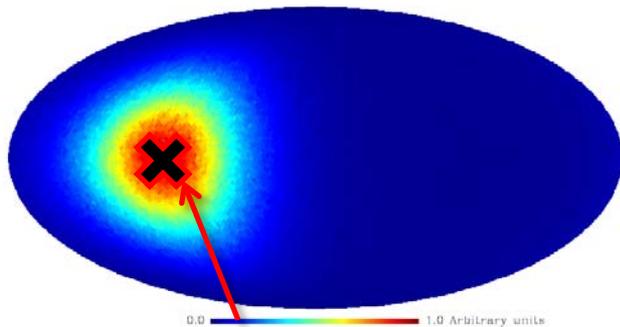
$$\frac{dR}{dE_R} \rightarrow \frac{d^2 R}{dE_R d\Omega_R}$$

→ Détecteur gazeux (TPC)

→ Alternative à la détection directe (massive)

→ Se concentre sur la section efficace axiale (peu explorée) afin d'être compétitif: ^{19}F

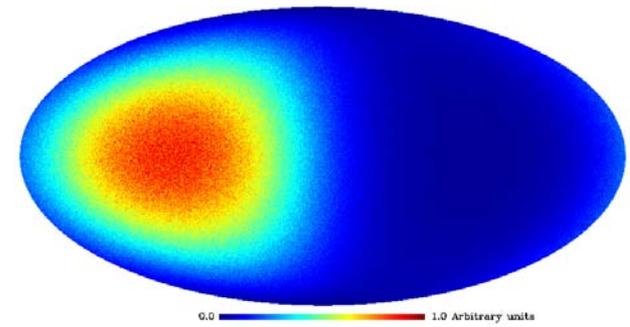
Flux de WIMP entrant dans un détecteur terrestre en coordonnées galactiques



Cygnus Constellation ($l = 90^\circ, b = 0^\circ$)

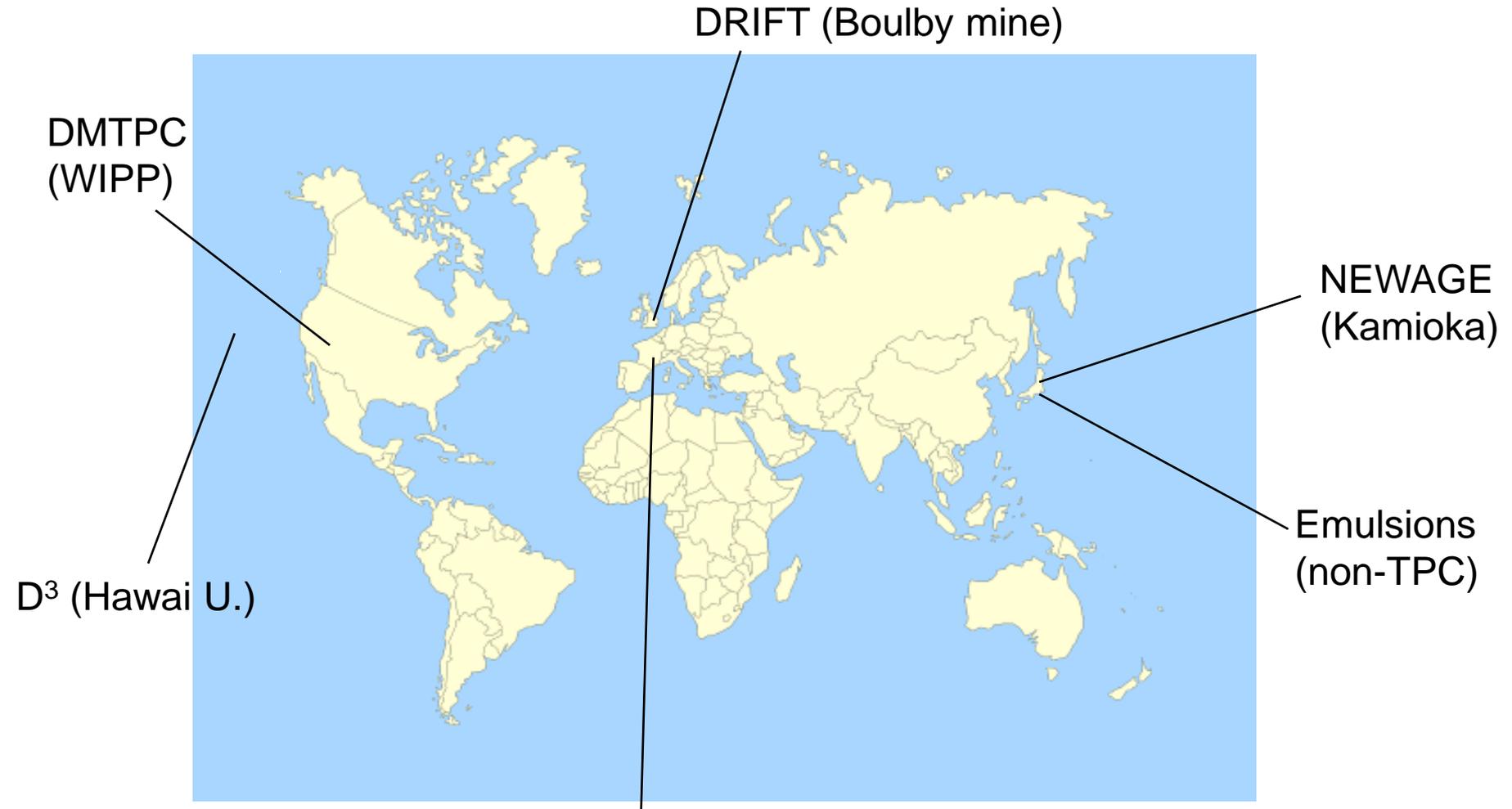
Après collision

Distribution angulaire des événements de recul de Fluor [5;50] keV



Signal WIMP attendu

I.f) La détection directionnelle: les différents projets



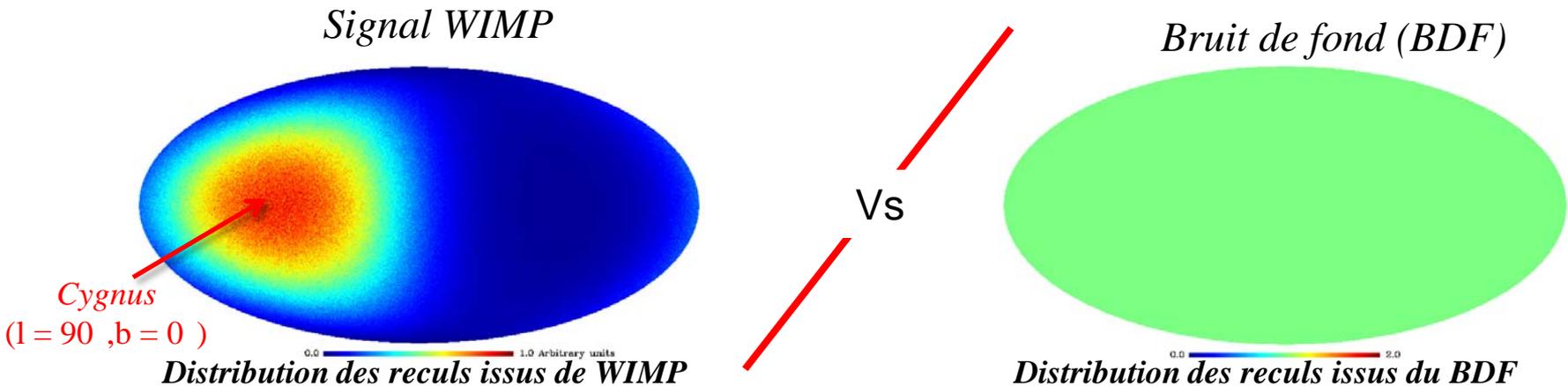
MIMAC
(Modane en 2012)

J. Billard - Séminaire CPPM

Phénoménologie de la détection directionnelle avec MIMAC

II.a) Intérêt de la détection directionnelle

Le bruit de fond est supposé **isotrope**



Une différence claire et non ambiguë entre WIMP et bruit de fond

Quel est l'intérêt de la détection directionnelle?

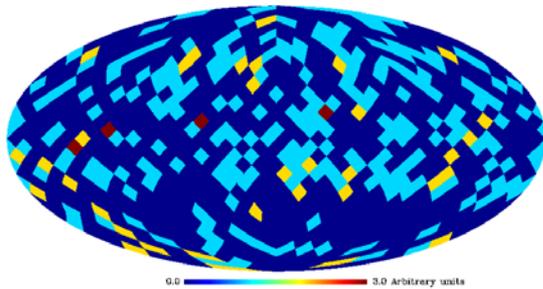
- Optimisation des limites d'exclusion
- Permettre d'authentifier une détection de WIMP
- Identifier la matière noire (particule et halo)

Dépendant de la
section efficace
WIMP-nucleon

II.b) Performances attendues de MIMAC: Exclusion

Caractéristiques de MIMAC

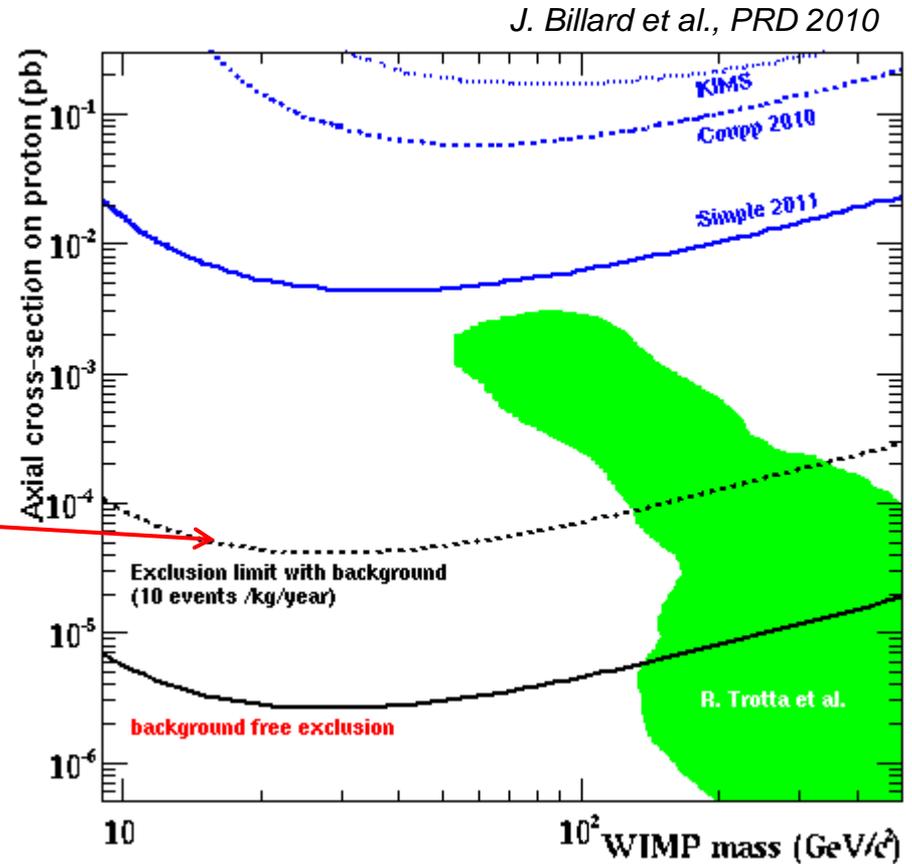
- 10 kg CF₄
- DAQ : 3 ans
- Energie de recul [5, 50] keV
- Taux de bruit de fond:
10 evts/kg/an



0 WIMP + 300 BDF



$\sim 4 \cdot 10^{-5}$ pb



Méthode de calcul de limite d'exclusion par vraisemblance

J. Billard et al., PRD 2010

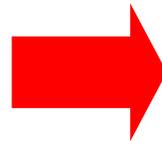
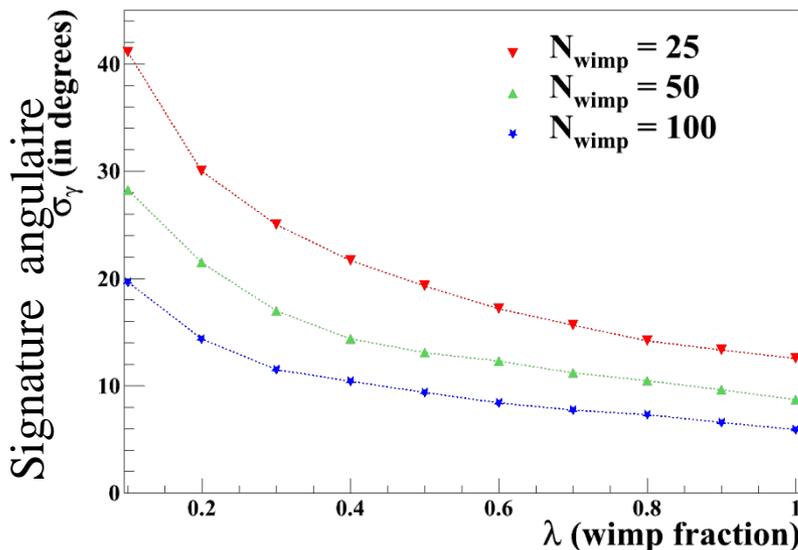
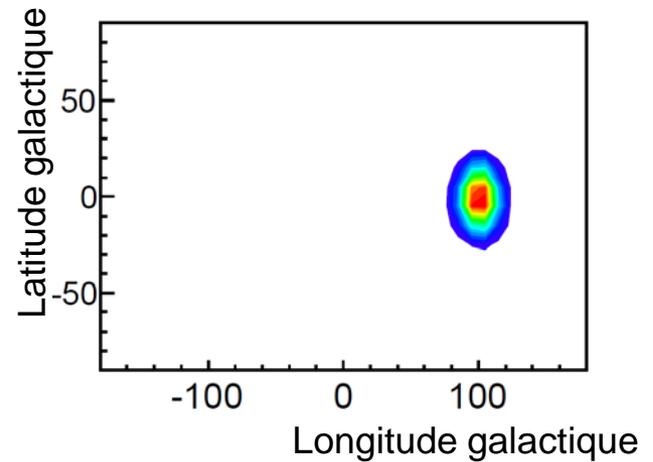
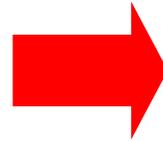
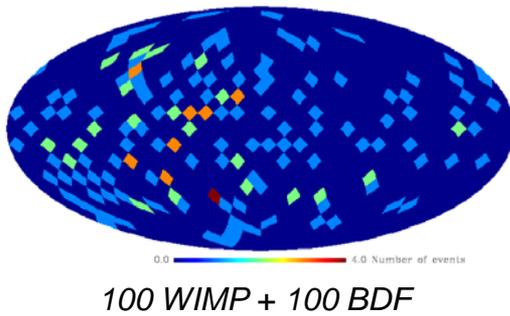
- 2 à 3 ordres de grandeurs plus bas que les limites existantes
- Faible sensibilité au bruit de fond résiduel (1 ordre de grandeur)

II.c) Performances attendues de MIMAC: Découverte

Permet d'authentifier de manière non-ambiguë une détection de WIMP

Preuve de la découverte : **signal du Cygne**

Analyse de vraisemblance aveugle afin de déterminer la direction du signal



Corrélation forte avec la direction du Cygne même avec une grande contamination de BDF et un **faible nombre d'événement WIMP**

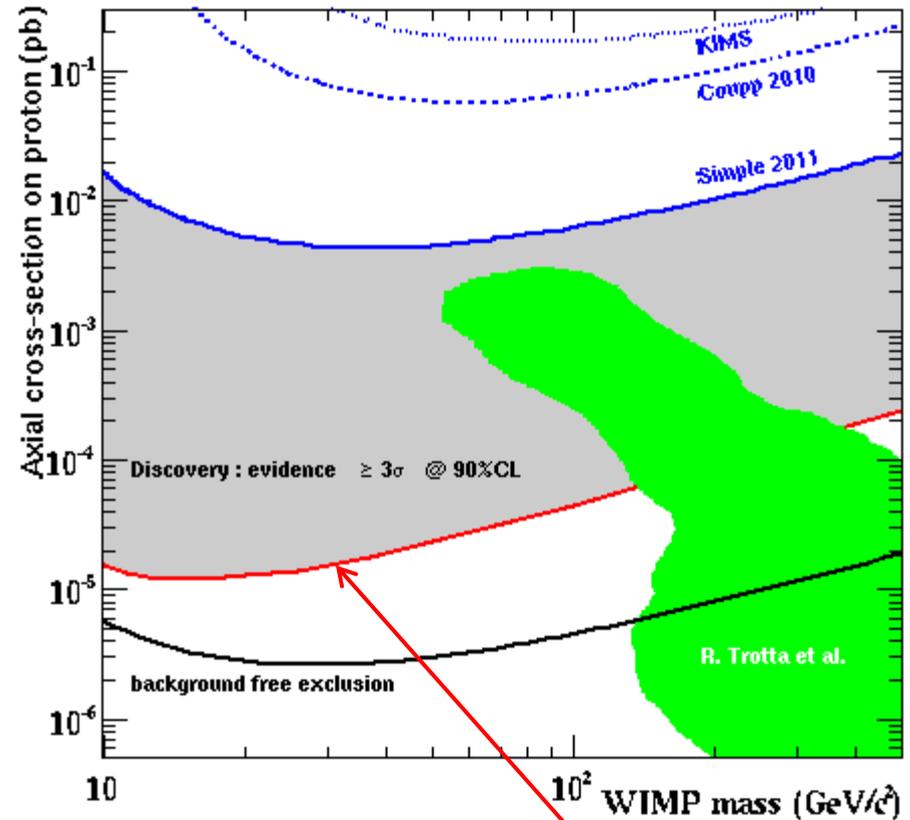
II.d) Performances attendues de MIMAC: Découverte

J. Billard *et al.*, PLB 2010

J. Billard *et al.*, arXiv:1110.6079

Significane de la découverte:

- estimée par « **Profile likelihood ratio** »
- prise en compte des **incertitudes astrophysiques** les plus significatives dans le cas de MIMAC (conservatif)



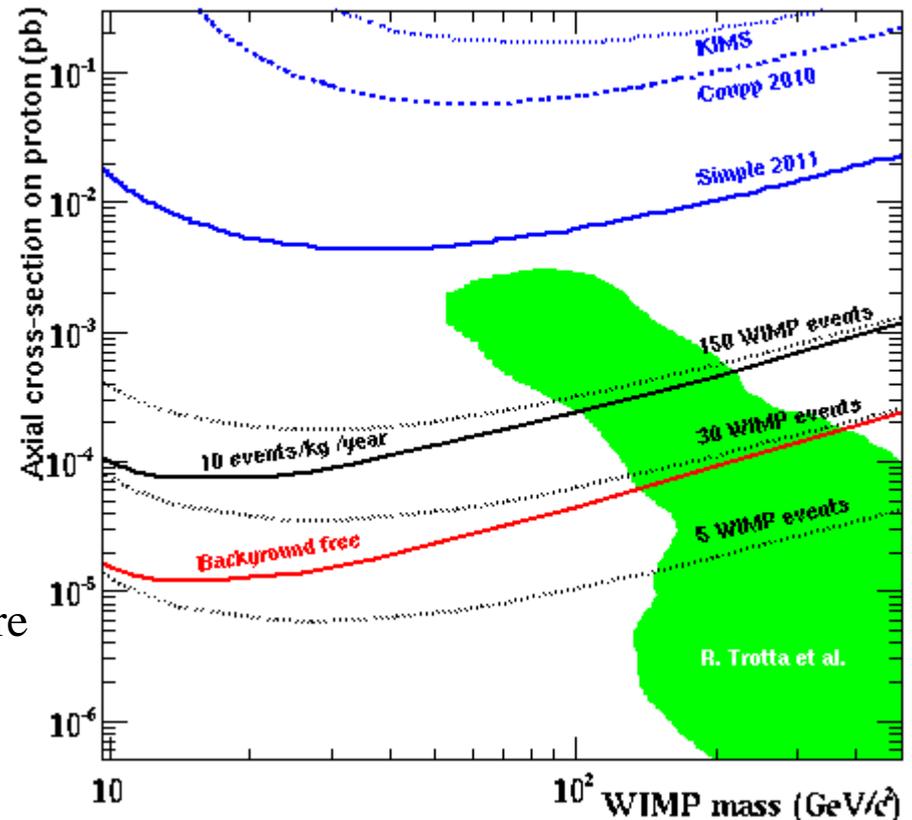
→ Une découverte ($>3\sigma$ @90%) est possible jusqu'à **10⁻⁴-10⁻⁵ pb** (sans bruit de fond)

II.e) Performances attendues de MIMAC: Découverte

Effet de la contamination par du bruit de fond sur le potentiel de découverte

Découverte à 3σ {
avec BDF (300)
sans BDF

- La découverte reste possible même en présence de bruit de fond résiduel
- Blindage léger ?
- Limiter le BDF permet de gagner un ordre de grandeur.
- Faible nombre de WIMPs nécessaires surtout à basse masse!



→ Une découverte ($>3\sigma$ @90%CL) avec **BDF** est possible jusqu'à 10^{-3} - 10^{-4} pb

II.f) Performances attendues de MIMAC: Identification

Les huit paramètres libres du modèle sont:

- La masse du WIMP m_X
- La section efficace WIMP-nucleon σ_n
- La direction principale du signal (l_0, b_0)
- Les trois dispersions de vitesse σ_x, σ_y et σ_z
- Le taux de bruit de fond R_b

Quelles sont les densités probabilité à postériori de chacun des paramètres



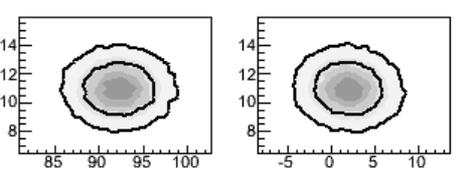
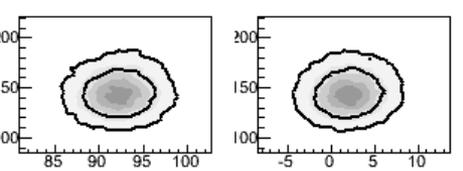
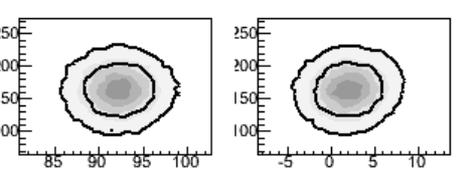
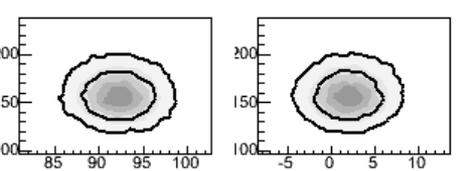
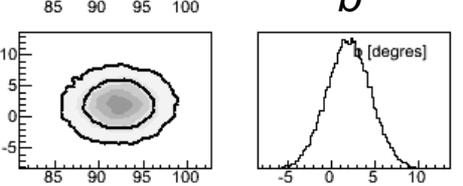
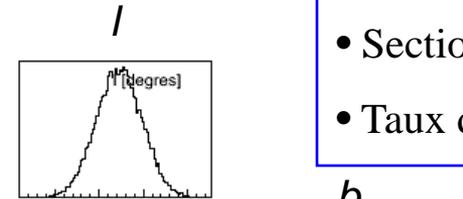
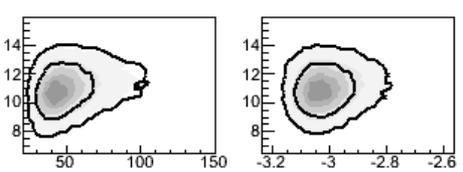
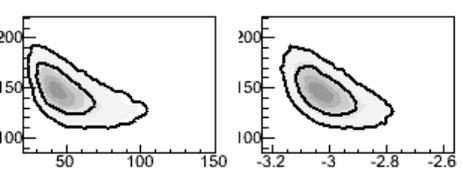
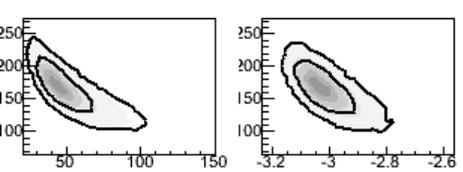
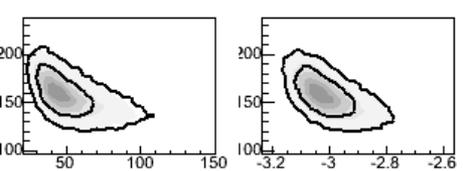
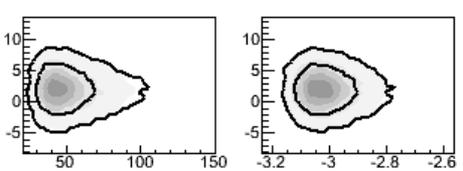
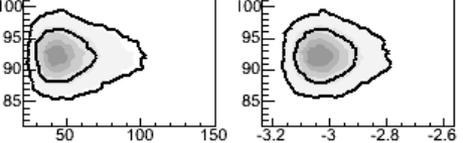
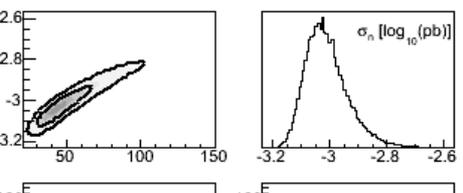
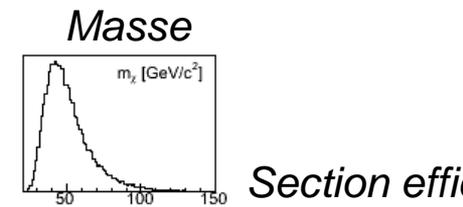
Développement d'une méthode d'échantillonnage par Chaîne de Markov (MCMC):

- Taille de l'espace des paramètres: **8 dimensions!**
- Une estimation très précise des différentes densités de probabilité

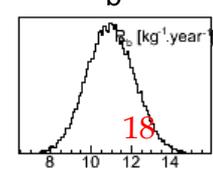
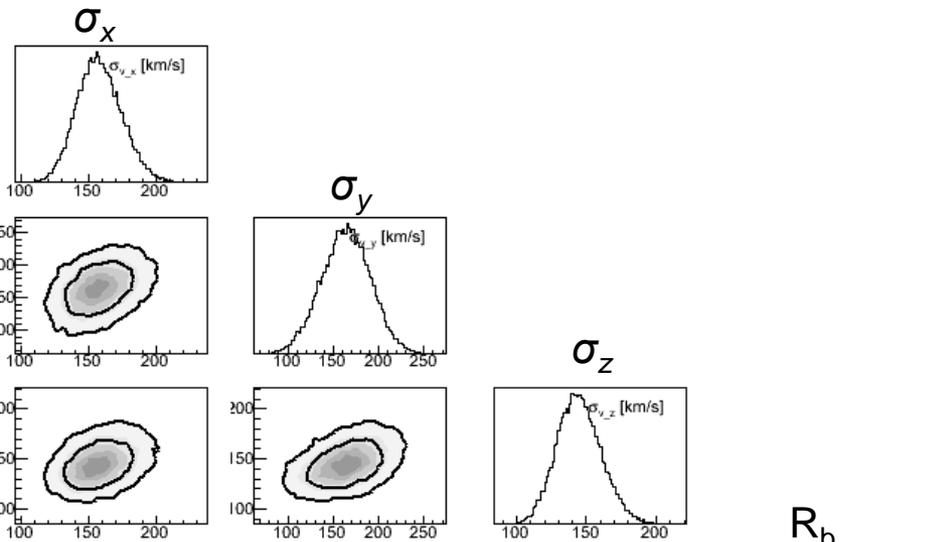
Résultat de l'analyse par Chaîne de Markov

Paramètres d'entrée

- halo isotrope $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 155 \text{ km/s}$
- Masse du WIMP: $50 \text{ GeV}/c^2$
- Section efficace 10^{-3} pb
- Taux de BDF (R_b): $10 \text{ evts/kg/an (35\%)}$



Les huit paramètres sont contraints simultanément et de manière cohérente avec les valeurs d'entrée



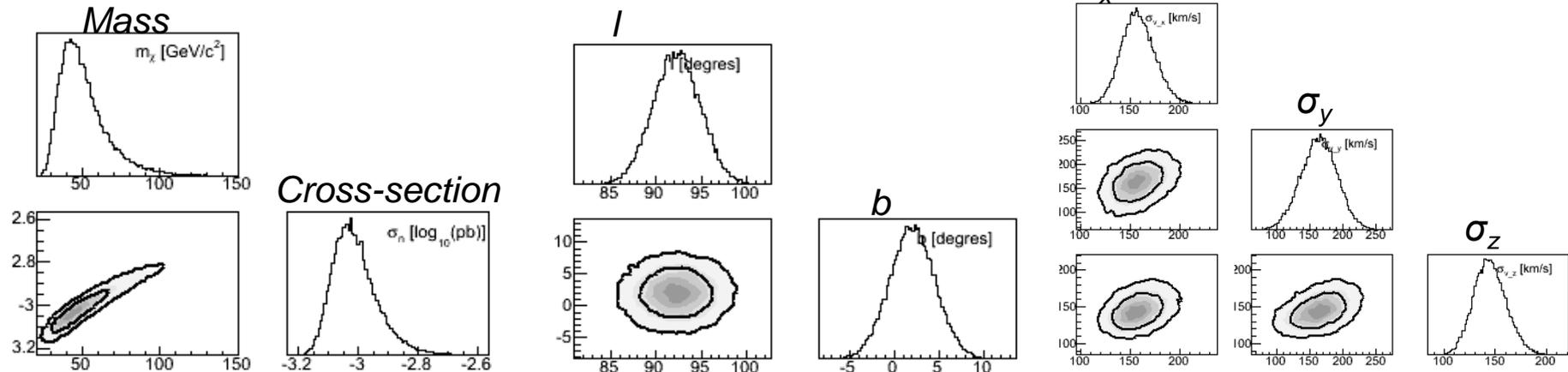
II.g) Contraintes déduites

Les 8 paramètres sont fortement contraints avec un détecteur directionnel seul.

Masse du WIMP Vs section efficace

Signature de la matière Noire

Distribution de vitesse WIMP



	m_χ (GeV/c ²)	$\log_{10}(\sigma_n$ (pb))	ℓ_\odot (°)	b_\odot (°)	σ_x (km.s ⁻¹)	σ_y (km.s ⁻¹)	σ_z (km.s ⁻¹)	β	R_b (kg ⁻¹ year ⁻¹)
Input	50	-3	90	0	155	155	155	0	10
Output	$51.8^{+5.6}_{-19.4}$	$-3.01^{+0.05}_{-0.08}$	$92.2^{+2.5}_{-2.5}$	$2.0^{+2.5}_{-2.5}$	158^{+15}_{-17}	164^{+27}_{-26}	145^{+14}_{-17}	$-0.073^{+0.29}_{-0.18}$	10.97 ± 1.2

II.h) Masse du WIMP

Halo standard avec trois masses différentes

- 20 GeV
- 50 GeV
- 100 GeV

Contraintes cohérentes ($m_\chi, \log_{10}(\sigma_n)$)

Contraintes sur le paramètre β :

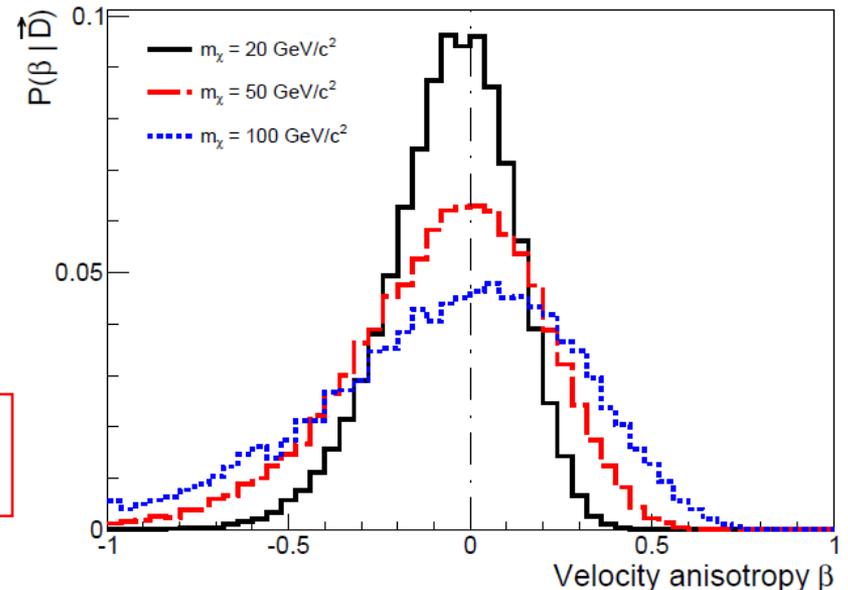
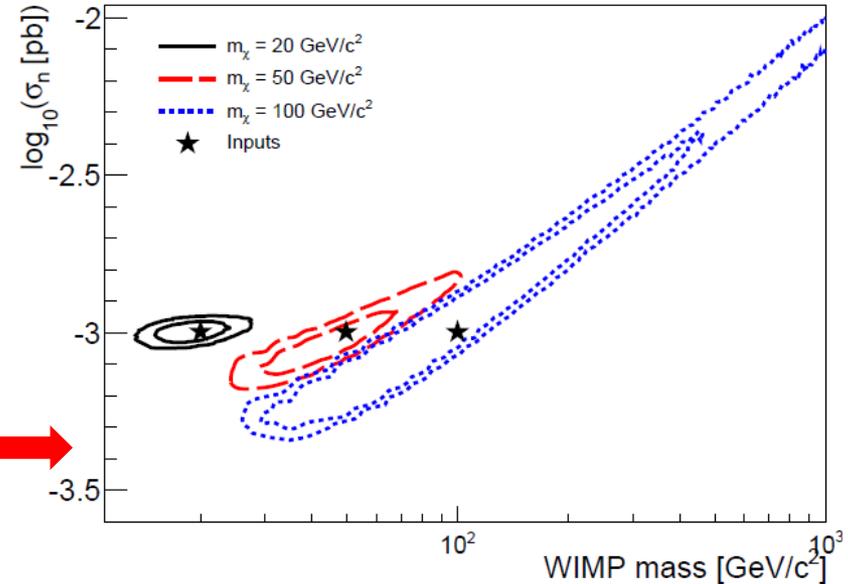
$$\beta(r) = 1 - \frac{\sigma_\theta^2 + \sigma_\phi^2}{2\sigma_r^2}$$

(Dédit de l'analyse complète du MCMC)

Halo isotrope: $\beta = 0$

Les contraintes sur les paramètres WIMP sur le halo sont cohérentes pour toutes masses de WIMP

Halo isotrope + 35% bdf



35% de bdf + 50 GeV/c²

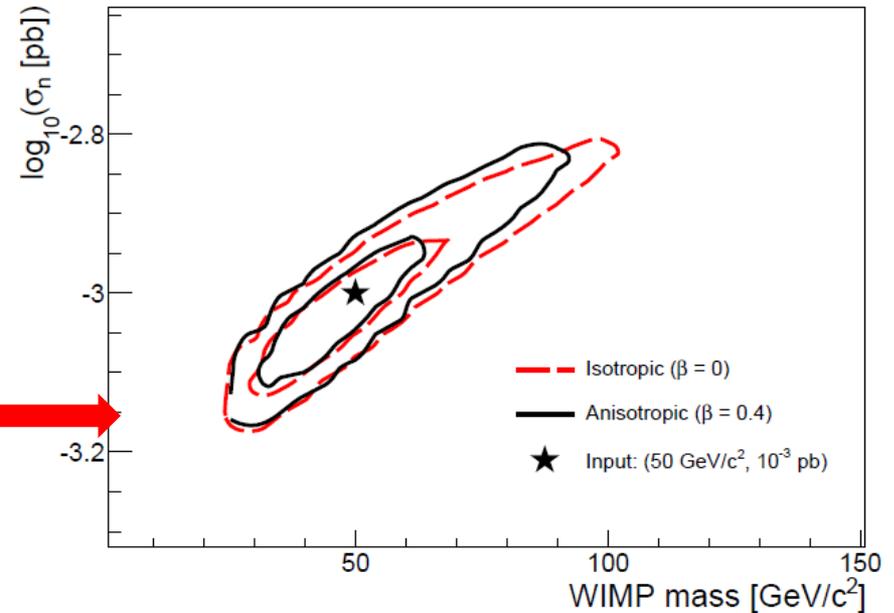
II.i) Modèle de halo

2 modèles de halo:

Isotrope ($\beta = 0$)

Extrêmement Anisotrope ($\beta = 0.4$)

Contraintes similaires sur ($m_X, \log_{10}(\sigma_n)$)

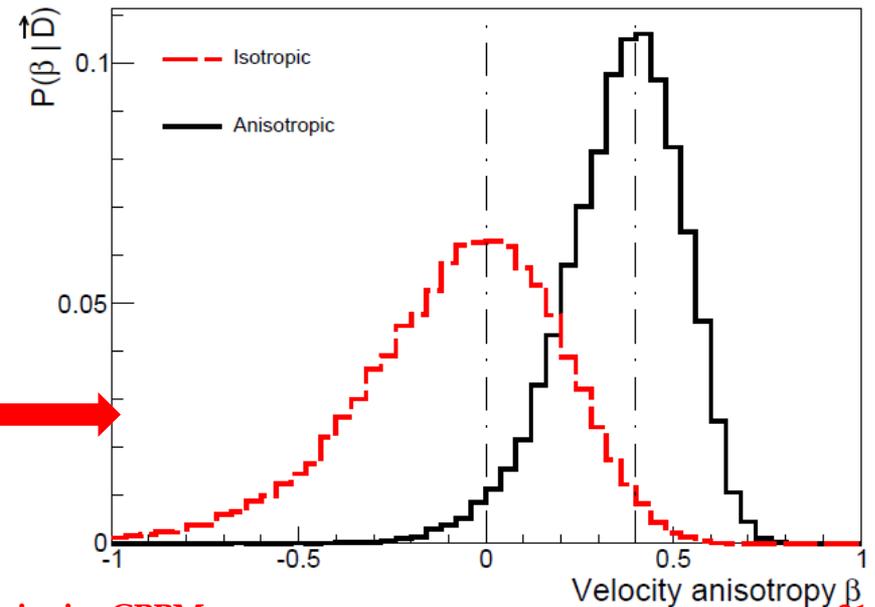


Contraintes sur le paramètre β :

Isotrope $\longrightarrow \beta = -0.073^{+0.29}_{-0.18}$

Anisotrope $\longrightarrow \beta = 0.38^{+0.18}_{-0.10}$

Possibilité de discrimination entre différents modèles de halo



**La détection directionnelle présente donc un très grand nombre d'avantages
comparativement à la détection directe classique:**

- **Signal caractéristique à la détection de WIMP**
- **Exclusion, découverte ou identification** (Physique des particules + astrophysique)

Cependant, ces résultats nécessitent:

- **Reconstruction 3D des événements avec de bonnes résolutions**
- **Une reconnaissance du sens de la trace**
- **Mesure de l'énergie de recul**

→ Requier un détecteur performant avec une analyse des traces optimale...

The MIMAC project

LPSC (Grenoble) :

J. Billard, J. Lamblin, F. Mayet, D. Santos

Technical Coordination : O. Guillaudin

- Electronics : G. Bosson, J-P. Richer
- Gas detector : A. Pellisier
- Data Acquisition: O. Bourrion
- Mechanical Structure : Ch. Fourel
- Ion source : T. Lamy, P. Sole

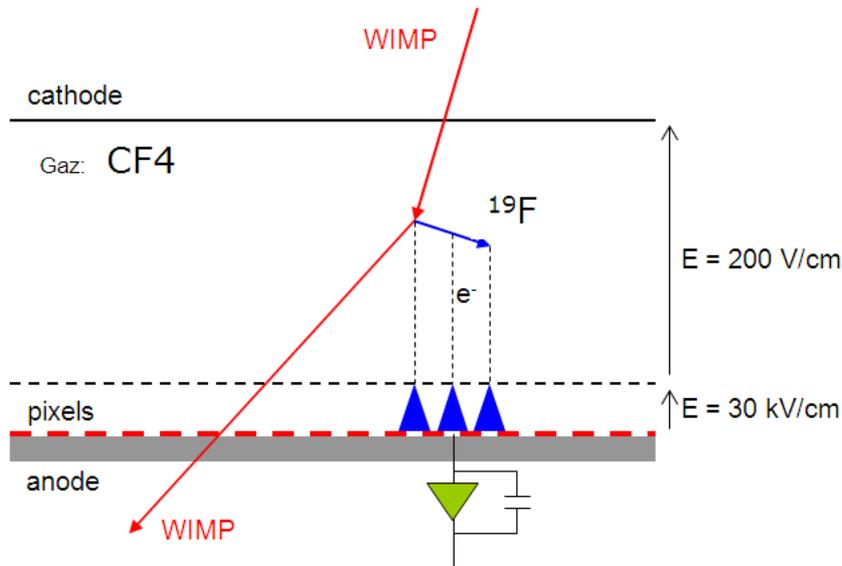
CEA-IRFU (Saclay) : P. Colas, E. Ferrer, I. Giomataris

IRSN (Cadarache): C. Golabek, L. Lebreton

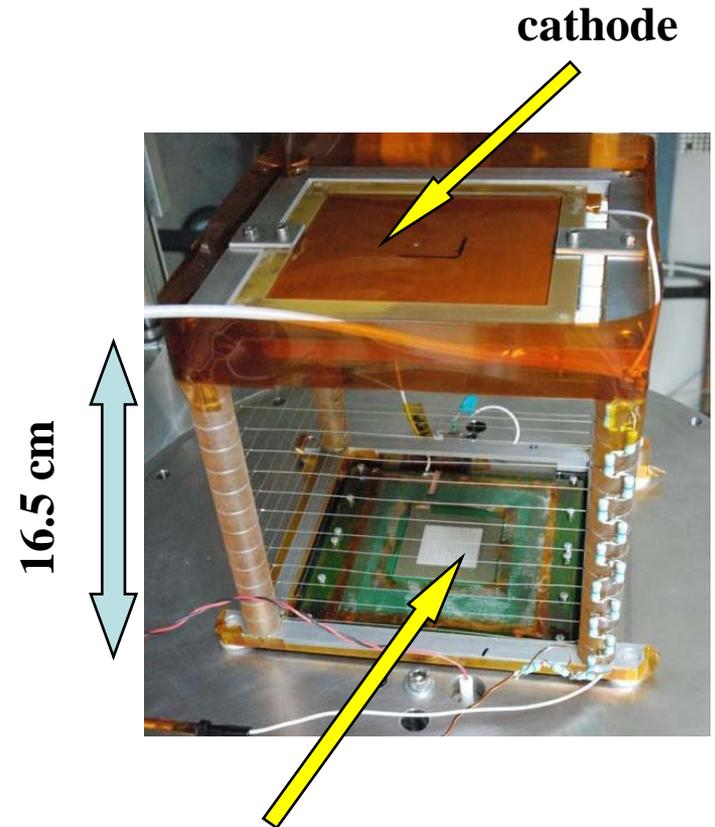
CPPM (Marseille): J. Busto

Tsinghua University (Chine), C. Tao

III.a) MIMAC: Micromegas Matrix of Chambers

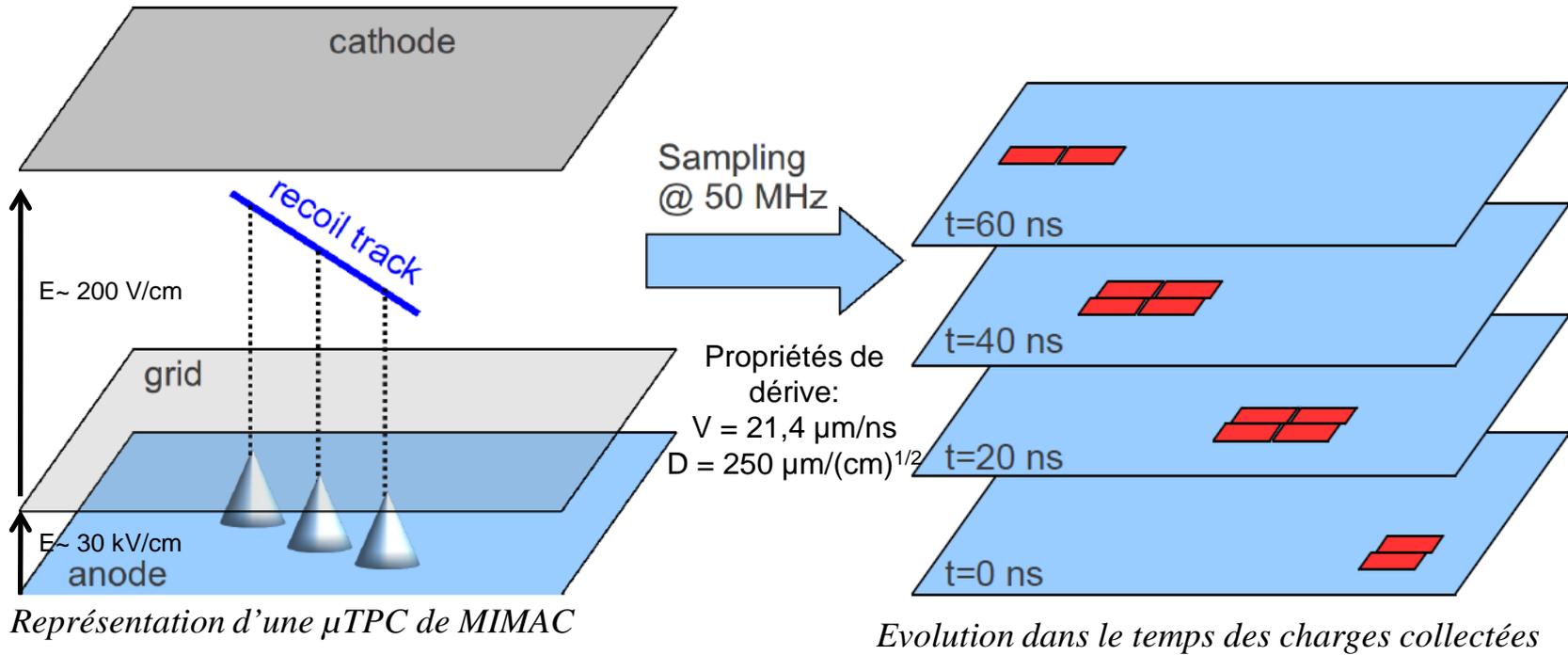


- Une matrice de micro-TPC
- Technologie Micromegas (*Y.Giomataris et al.*)
- Mesure de la trace 3D et de l'énergie
- Différents gaz: CF₄, CHF₃, C₄H₁₀, He, ...
- Opère à basse pression (50 mbar)
- **But final:** un détecteur de 10 kg

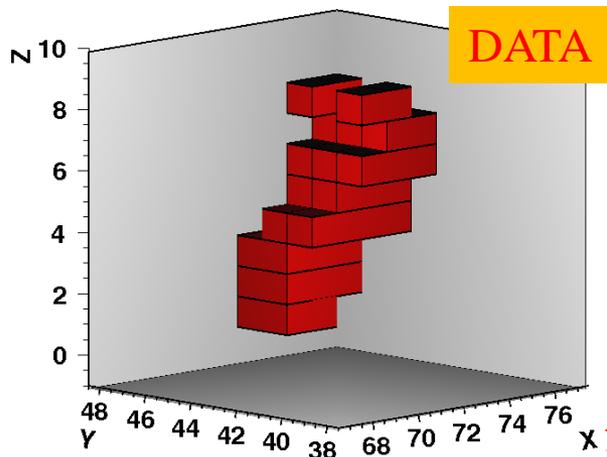


Micromegas & anode pixélisée (x,y)
10 cm x 10 cm
Pixel = 350μm
512 canaux: 256 X + 256 Y
Echantillonnés par une électronique dédiée

III.b) MIMAC: Mesure de la trace



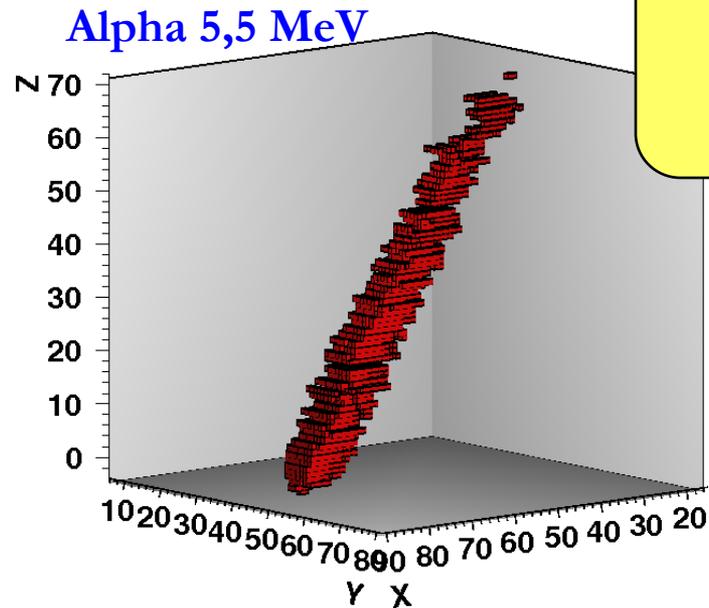
Mesure de l'énergie de ionisation: Intégrateur de charge connecté sur la grille



70 % CF_4 + 30 % CHF_3

50 mbar,
170 V/cm

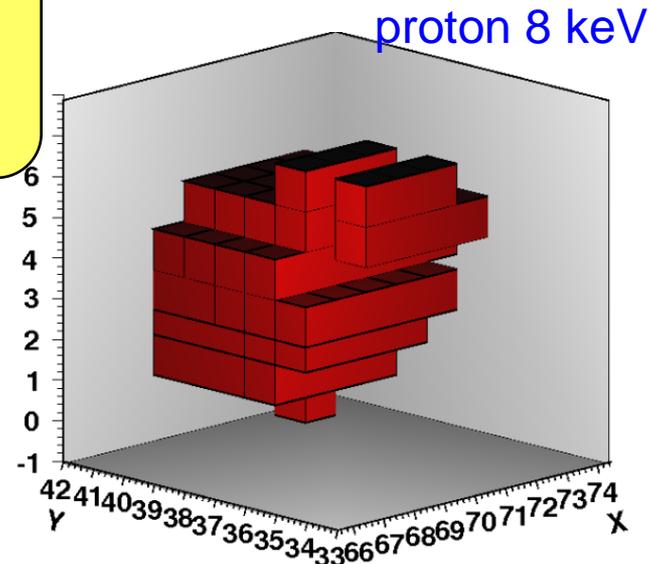
Candidat fluor
@ 50 keV ionisation



He + 5% iC_4H_{10}

350 mbar,

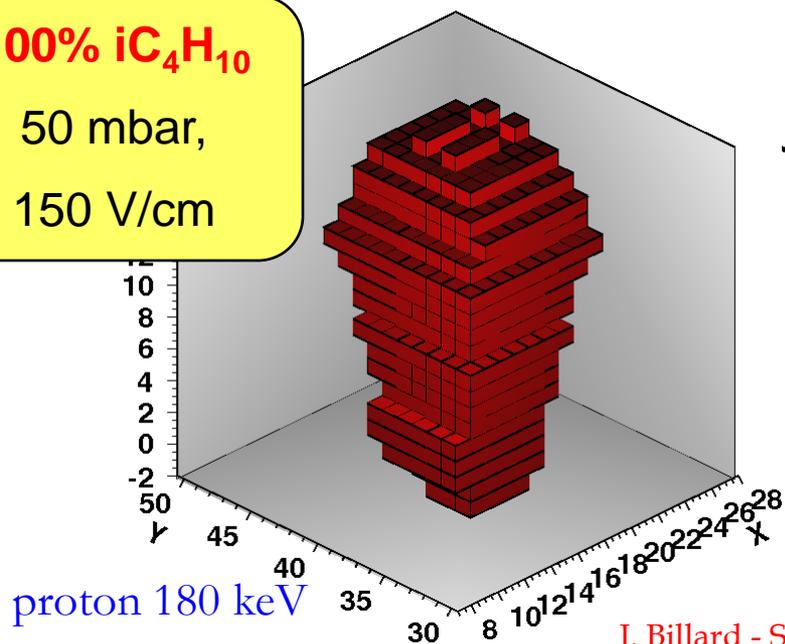
150 V/cm



100% iC_4H_{10}

50 mbar,

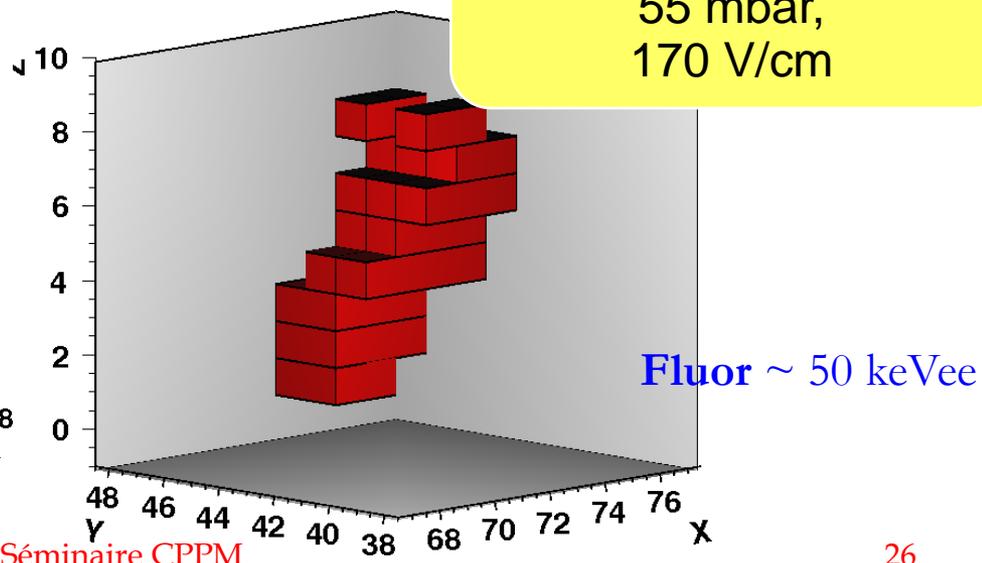
150 V/cm



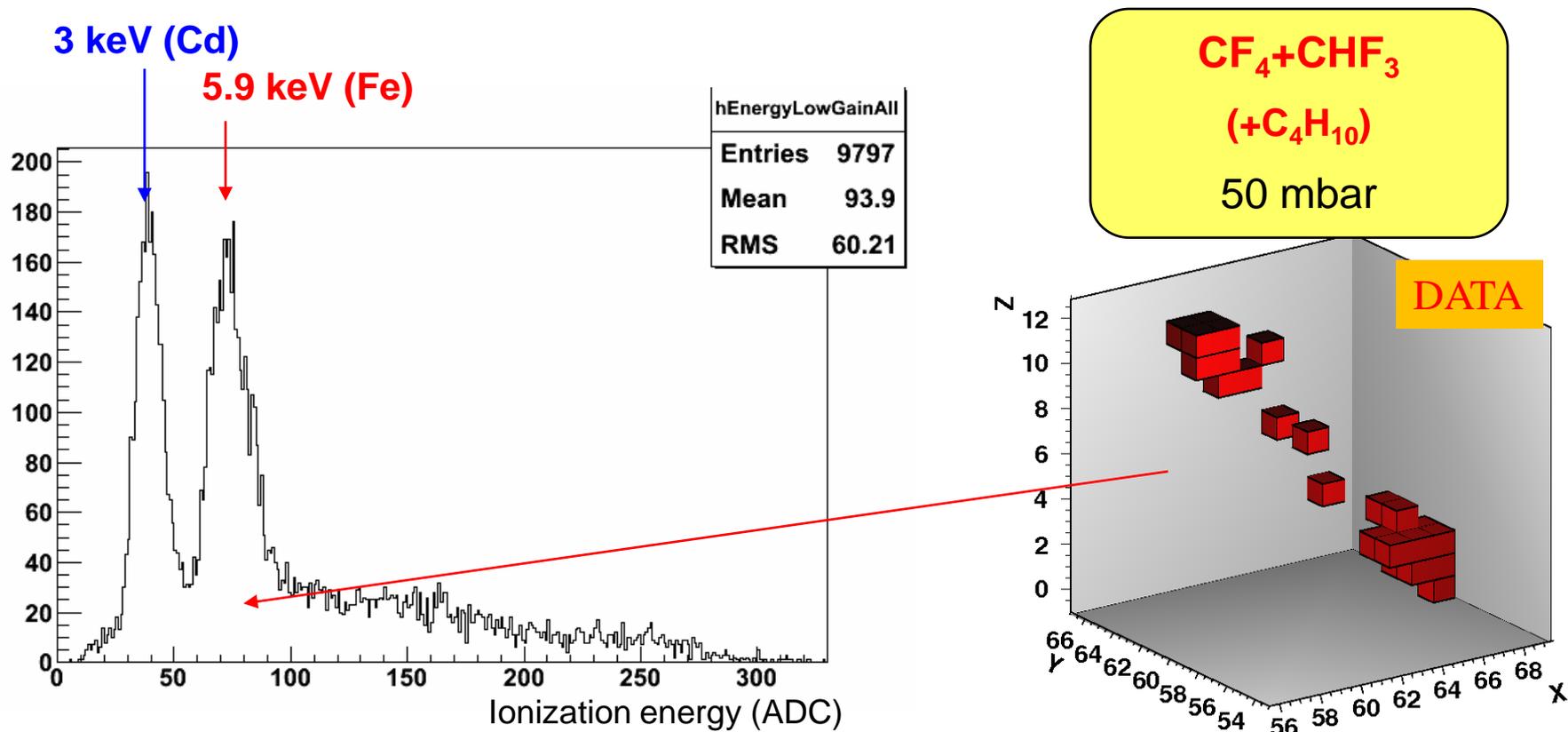
70 % CF_4 + 30% CHF_3

55 mbar,

170 V/cm



III.c) MIMAC: traces en 3D de basse énergie!



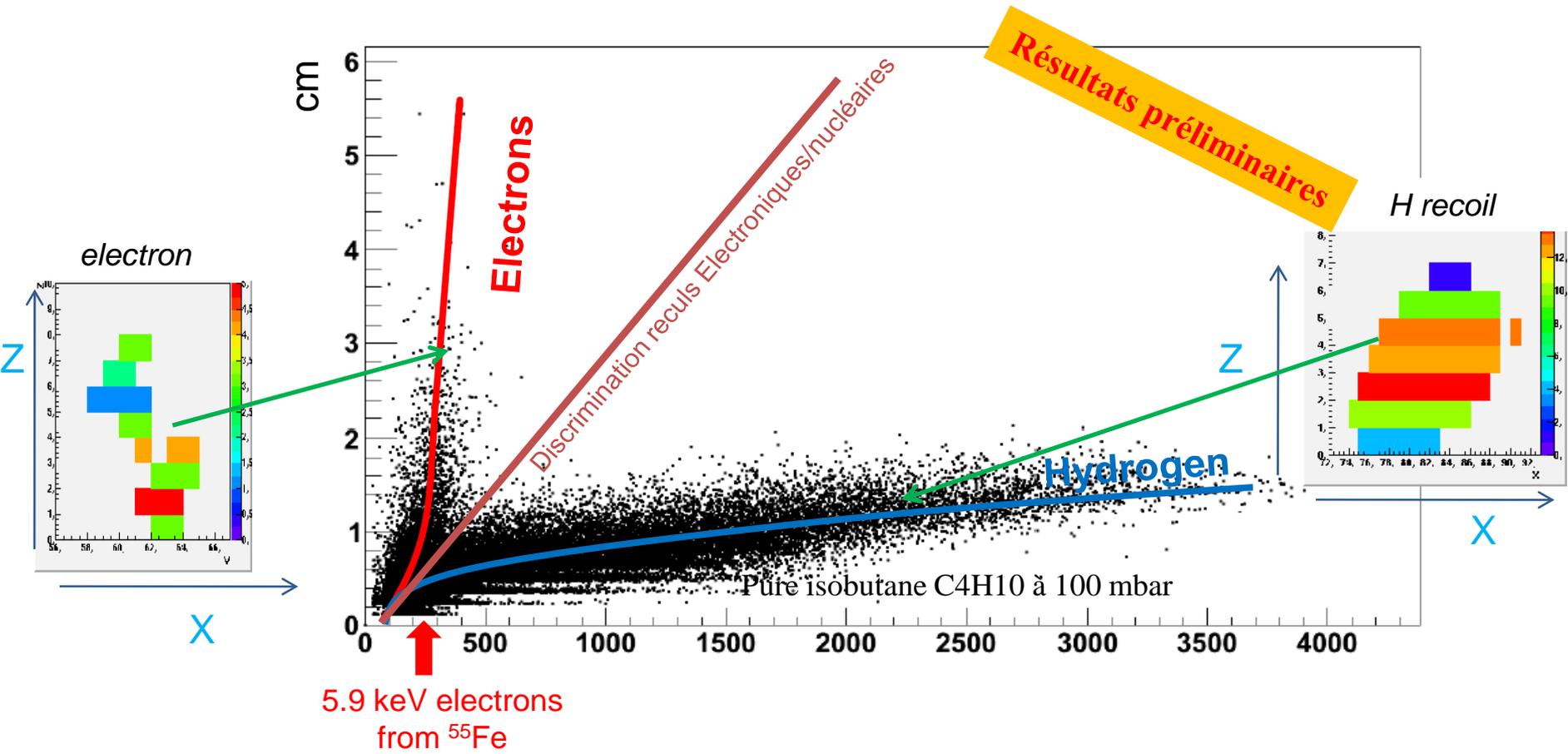
Tous les événements (reculs électronique) sont mesurés avec une énergie et une trace associée jusqu'à ~ 1-2 keV ionisation

→ Résultats préliminaires mais très encourageants!

III.d) MIMAC: Discrimination électron/recul nucléaire

Source de neutron (AMANDE) à Cadarache: neutrons de 144 keV

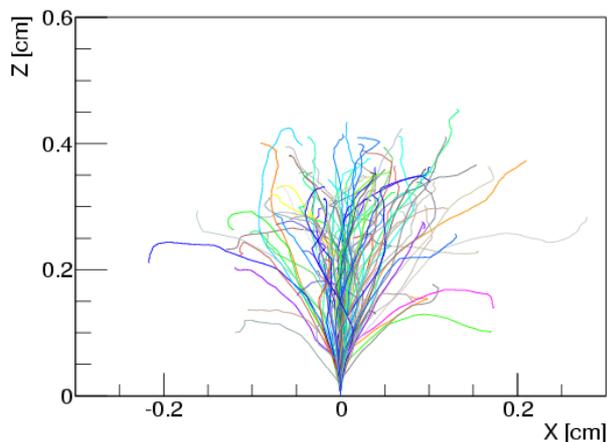
Les neutrons reproduisent la collision élastique entre un noyau et un WIMP



Reculs de basses énergies + discrimination électrons/reculs nucléaires

Estimation des performances de MIMAC

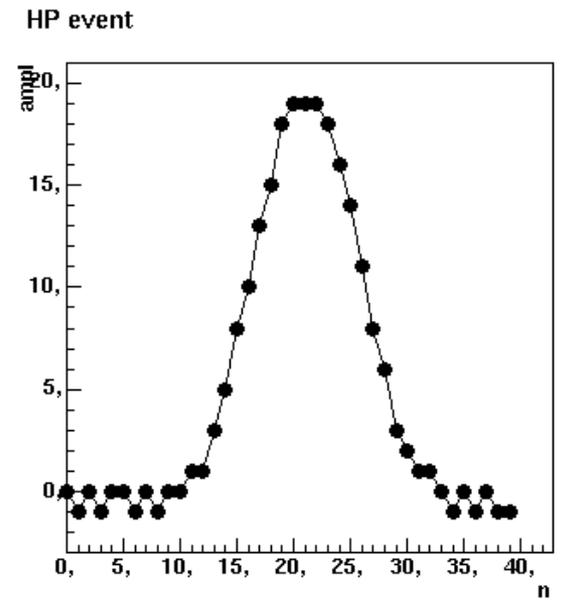
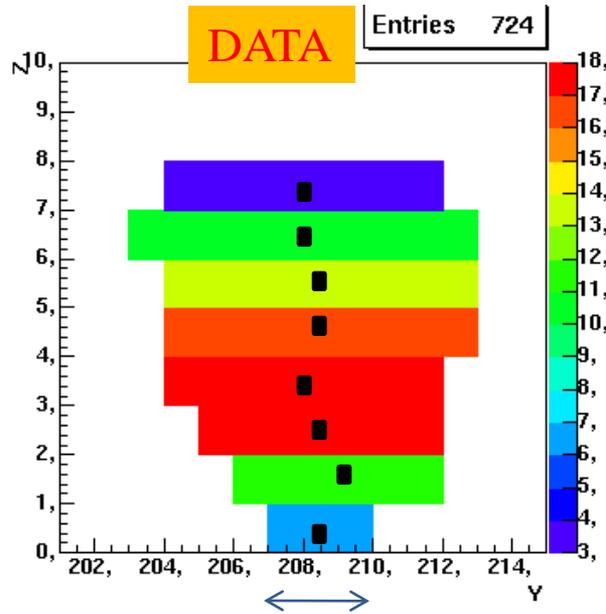
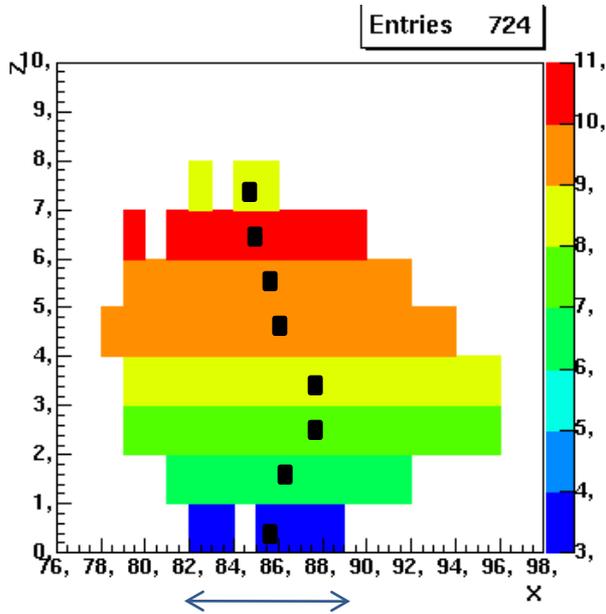
J. Billard et al., in preparation



*Recul de Fluor de 100 keV dans
70% CF_4 + 30% CHF_3 @ 50 mbar
(Simulation SRIM)*

- Très forte dispersion angulaire (« straggling »)
- Défi expérimental et en analyse de données

III.e) MIMAC: Les observables



- Le nombre d'échantillon temporel N_{slice}
- Centre de gravité $(X^{\text{bary}}, Y^{\text{bary}})$ de chaque tranche
- L'épaisseur $(\Delta X, \Delta Y)$ de chaque tranche
- L'énergie collectée à chaque tranche

$$N_{\text{obs}} = 1 + 5 * N_{\text{Slice}}$$

Quelles sont les caractéristiques de la trace mesurée $\{X, Y, Z, \theta, \phi\}$?



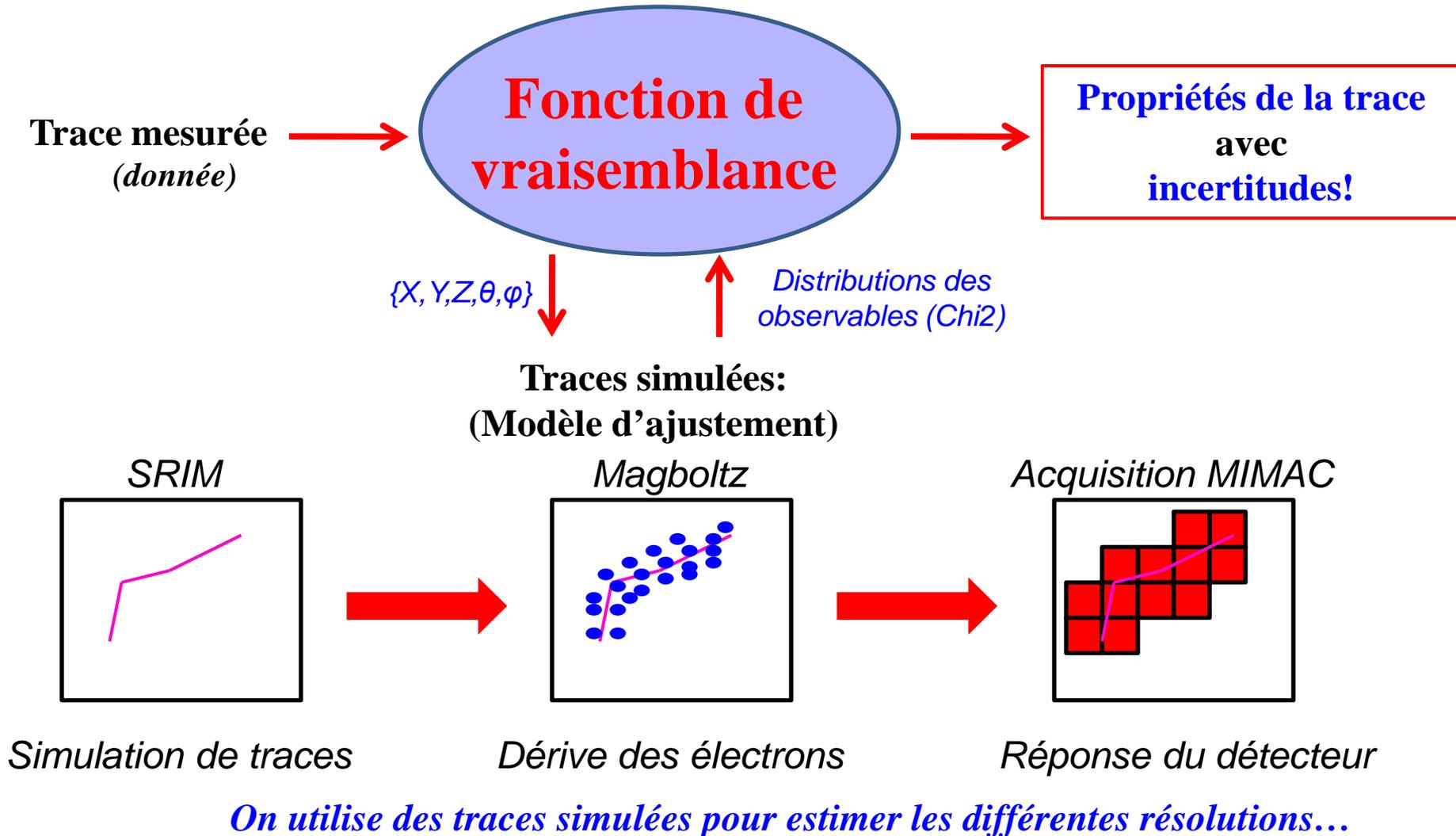
Analyse de vraisemblance



Requiert une simulation très précise de la mesure d'une trace avec MIMAC

III.f) La fonction de vraisemblance

Idée principale: Comparer les traces mesurées à des traces simulées

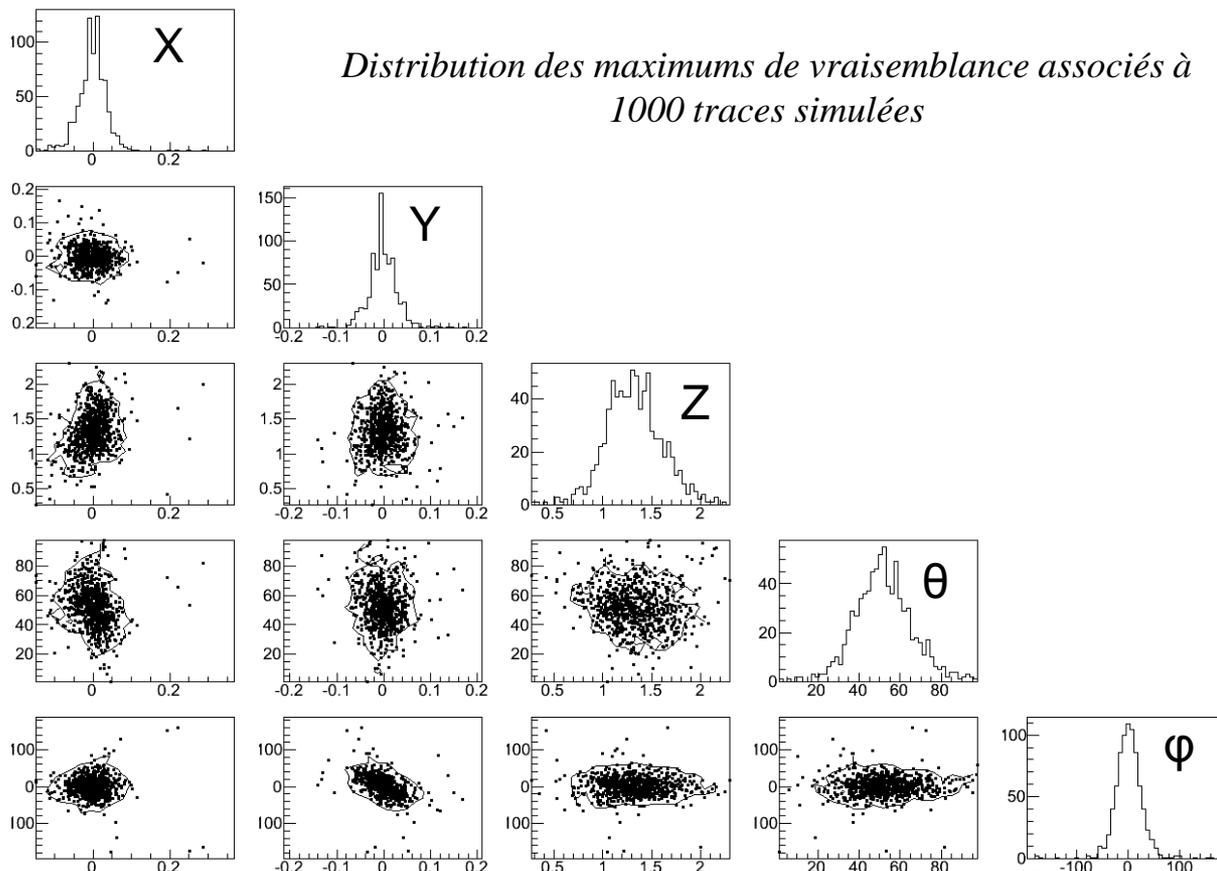


III.g) Estimation des résolutions: Un exemple

Estimation des résolutions par Monte Carlo => **Maximum de vraisemblance**

Paramètres d'entrée

$X = 0$ cm, $Y = 0$ cm, $Z = 1.3$ cm, $\theta = 45^\circ$, $\varphi = 0^\circ$, Sens = **bas @ 100 keV**



Résolution dans le plan (X,Y)
 $\sigma_{x,y} = 314 \pm 10 \mu\text{m}$

Résolution en Z
 $\sigma_z = 2.7 \pm 0.1 \text{ mm}$

Résolution angulaire
 $\sigma_\gamma = 23.7 \pm 0.6^\circ$
(Avec une ouverture angulaire intrinsèque de 18°)

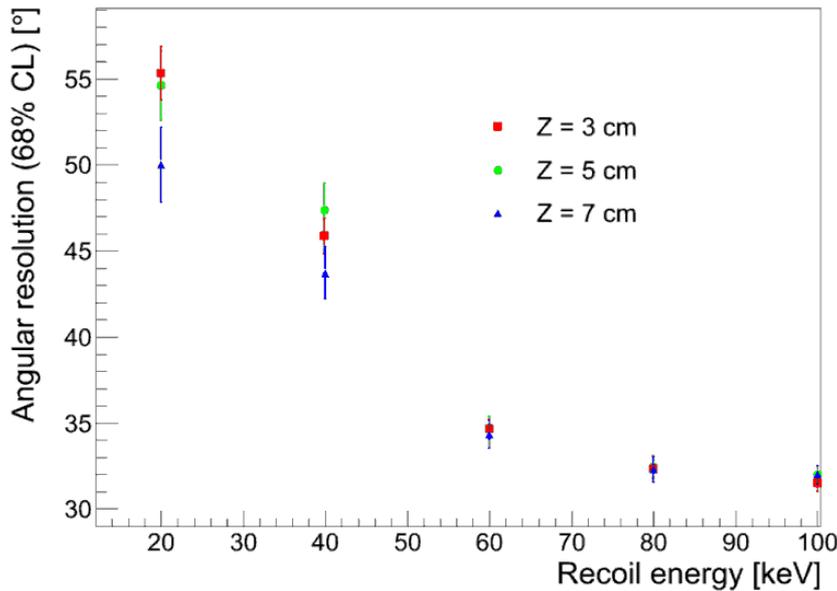
III.h) Performances attendues

Pour toute énergie de recul, on génère 1000 traces de manière isotrope

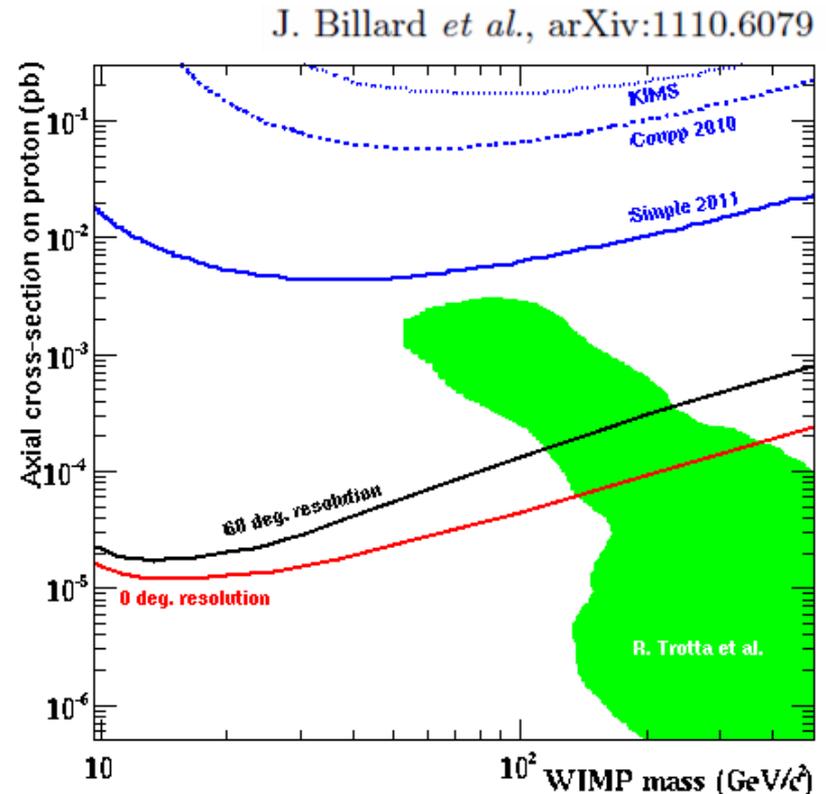
Résolution spatiale:

$\sigma_{x,y,z}$ d'environ 1-2 cm: **Détermination d'un volume fiduciel**  **événements de surface**

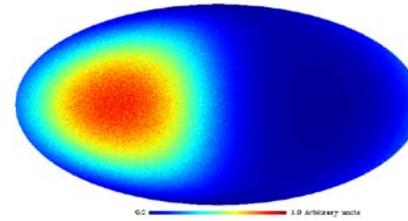
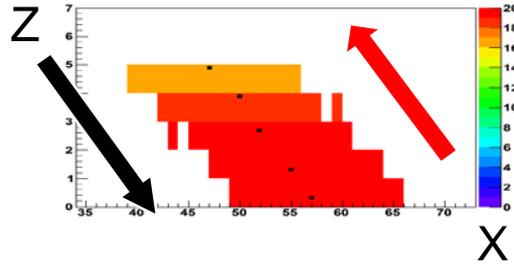
Résolution angulaire:



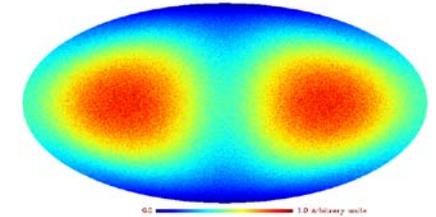
Une résolution angulaire de **35 à 55** pour des énergies de recul de 20 keV à 100 keV



III.i) Reconnaissance du sens de la trace



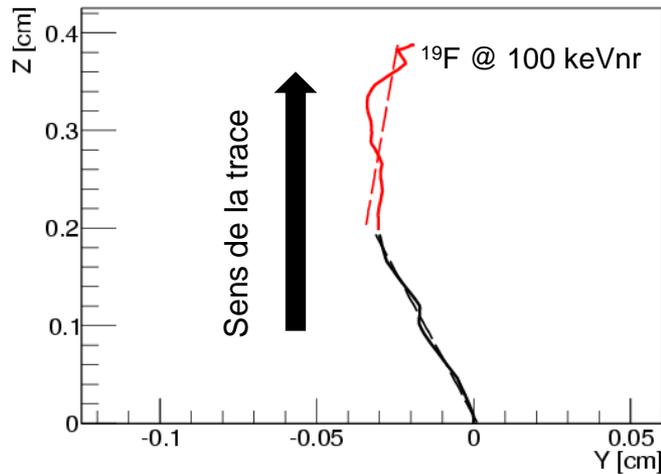
avec



sans

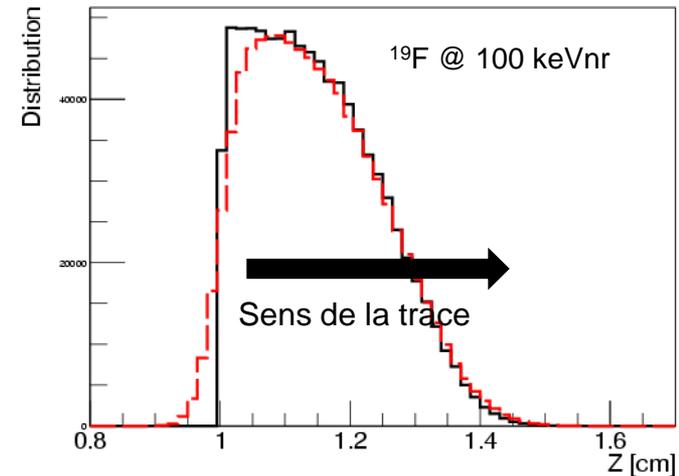
La reconnaissance du sens de la trace à l'aide de différente source d'asymétrie entre l'hypothèse **haut** et **bas**

Asymétrie spatiale



Va contribuer à l'asymétrie dans le volume de la trace

Asymétrie du dépôt de charge



Observé expérimentalement pour ^1H
Mesure en cours pour le ^{19}F

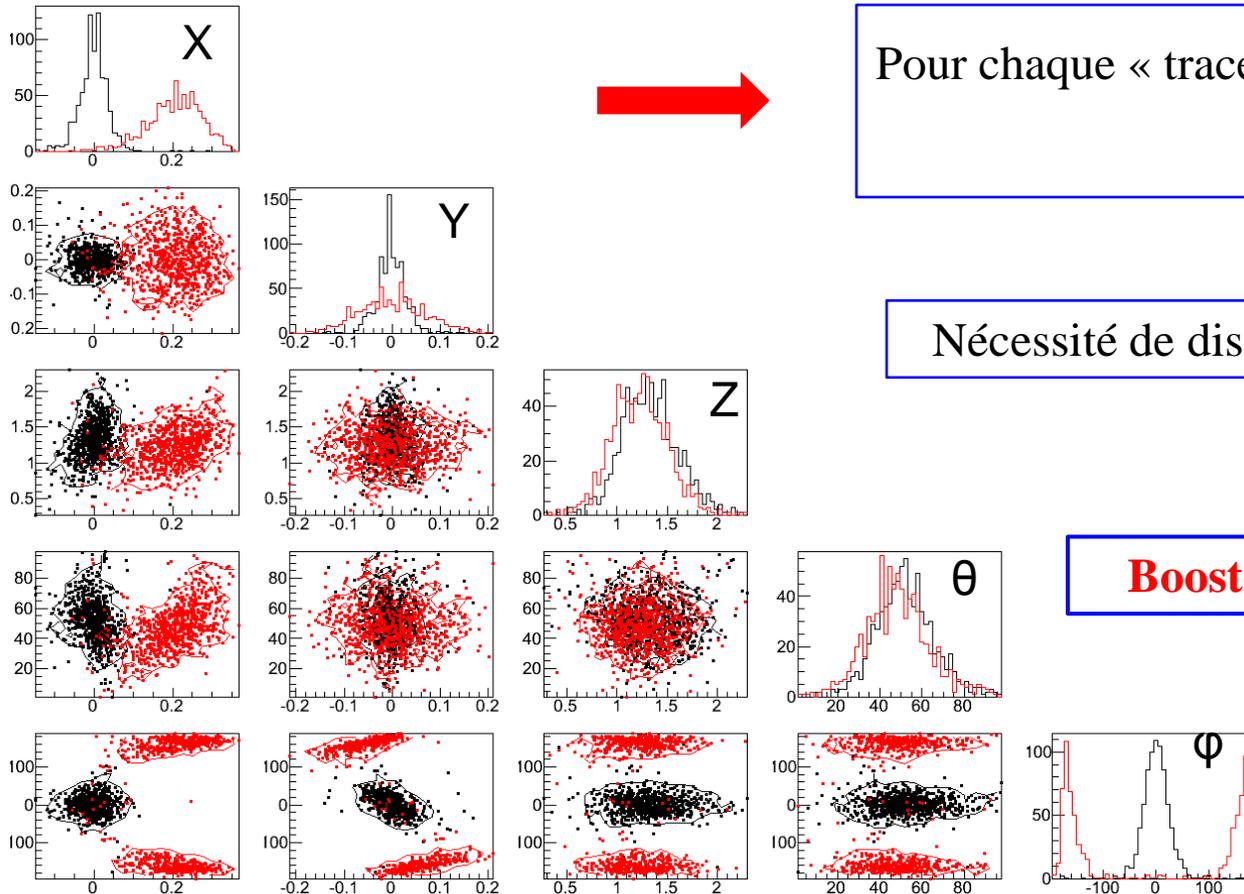
(D. Santos et al., in preparation)

III.j) Les deux hypothèses: Maximum de vraisemblance

Détermination du maximum de vraisemblance pour chacune des hypothèses: **haut** et **bas**

Paramètres d'entrée

$X = 0 \text{ cm}$, $Y = 0 \text{ cm}$, $Z = 1.3 \text{ cm}$, $\theta = 45^\circ$, $\varphi = 0^\circ$, **bas** @ 100 keV



Pour chaque « trace mesurée » 2 hypothèses:

Haut et **Bas**

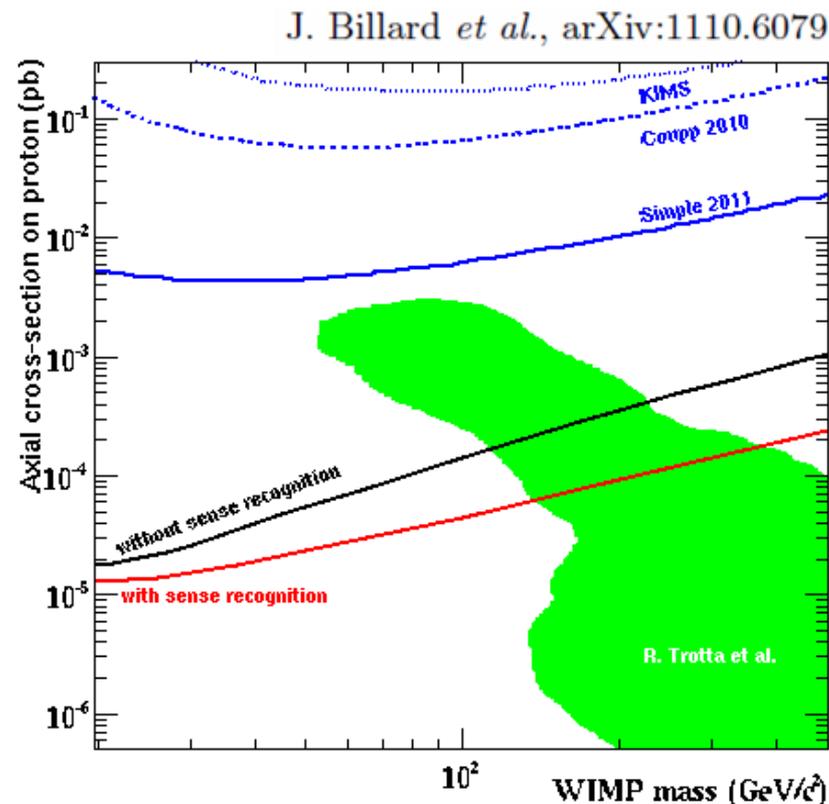
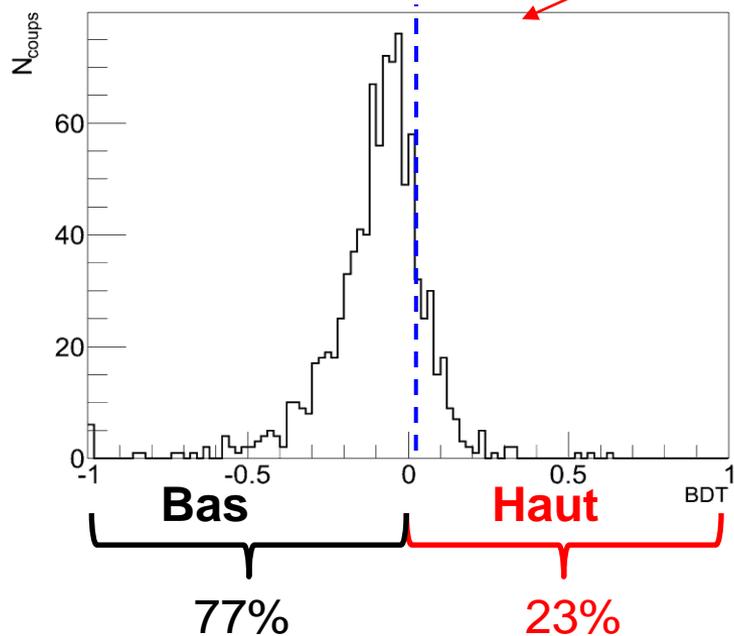
Nécessité de discriminer les deux hypothèses

Boosted Decision Tree

III.k) Reconnaissance du sens de la trace: efficacité

Utilisation du « Boosted Decision Tree » afin de discriminer les deux hypothèses

Paramètres d'entrée
X = 0 cm, Y = 0 cm, Z = 1.3 cm, $\theta = 45^\circ$, $\varphi = 0$, **bas** @ 100 keV



Doit être confirmé avec des données expérimentales

Conclusion

Phénoménologie de la détection directionnelle

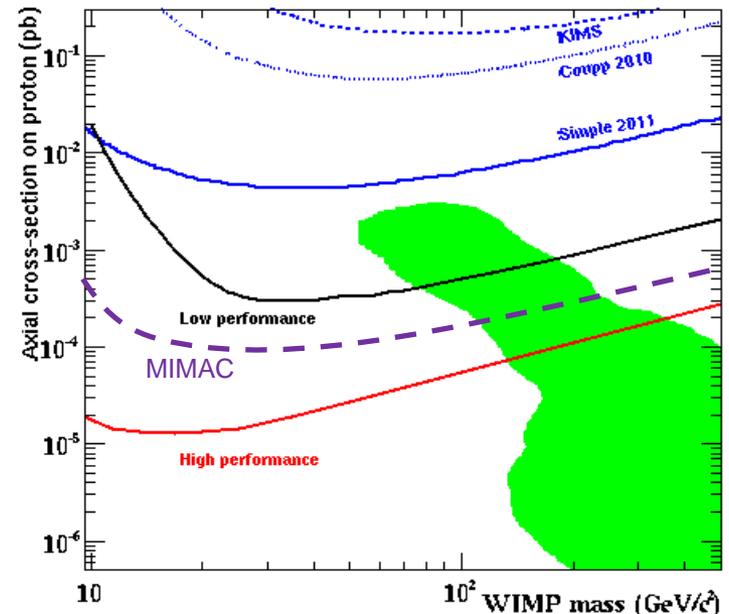
- **Exclusion:** Limites très compétitives comparativement aux limites actuelles
- **Découverte:** Permet d'authentifier une détection de WIMP et d'évaluer la signification
- **Identification de la matière sombre:** Contraintes «quasi indépendantes du modèle »
 - Masse et section efficace (La physique des particules)
 - Distribution de vitesses (L'astrophysique du halo)

	E_{th} [keV]	R_b [evts/kg/year]	σ_γ [°]	ϵ_{HT} [%]
Haute	5	0	20	100
Basse	20	10	50	0

Même un détecteur directionnel

« basses performances »

permettrait de faire une découverte de la matière sombre ($>3\sigma$)



Conclusion

Le projet MIMAC:

Reconstruction 3D + sens possible grâce à :

- Un détecteur très performant (électronique, DAQ, μ TPC) développé au LPSC grâce aux différents services techniques
- Une analyse de traces dédiée et optimisée (vraisemblance, BDT)

Futur :

- Mesures auprès de l'installation Amande : mesures des résolutions et efficacités
- Mesure en milieu souterrain (LSM Modane) : **2012**



Module bi-chambre: « face à face »
5 litres!

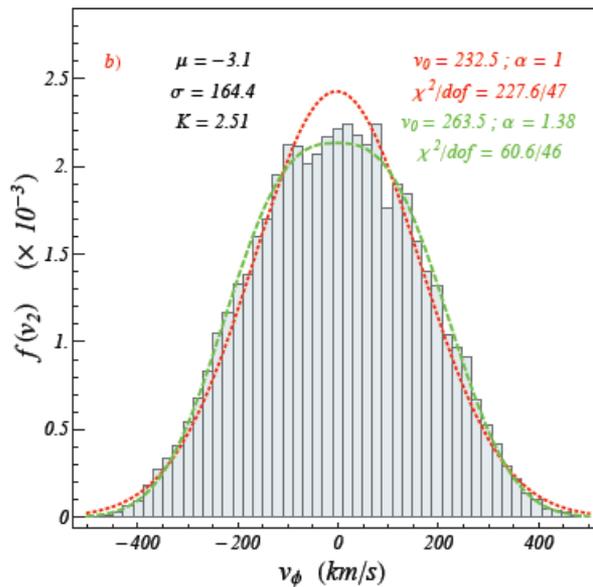
Backup slides

IV.h Effect of refined halo model from Nbody simulations

RAMSES [R. Teyssier et al.]: Cosmological N-Body simulations

Shell distribution:

$7 < R < 9$ kpc (16545 particles)



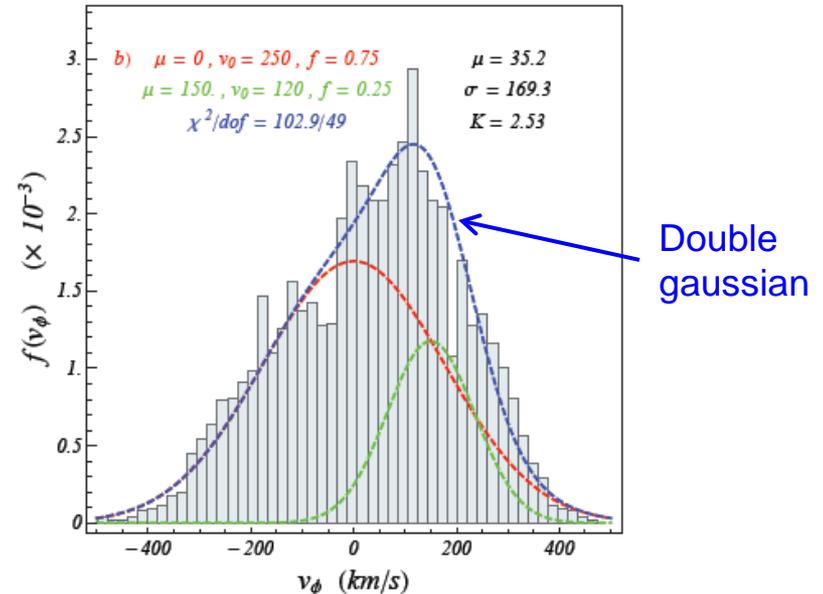
➤ Gaussian distribution disfavoured
Kurtosis = 2.51

$$\beta \sim 0,06$$

Smooth, weakly anisotropic and non-gaussian

Ring distribution:

$7 < R < 9$ kpc and $|z| < 1$ kpc (2662 particles)



➤ Presence of a co-rotating (**150 km/s**)
Dark Disk with a **25%** contribution to the local WIMP velocity distribution

$$\beta \sim 0,12$$

With a corotating Dark Disk

IV.h Effect of refined halo model from Nbody simulations

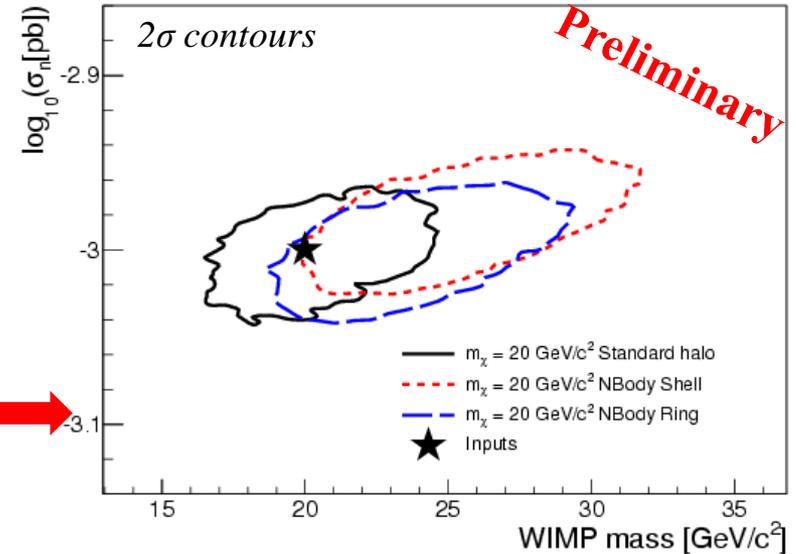
3 input halo models to generate pseudo-data:

Standard halo

Smooth

Dark Disk

Bias $\sim 2\sigma$ in the $(m_\chi, \log_{10}(\sigma_n))$

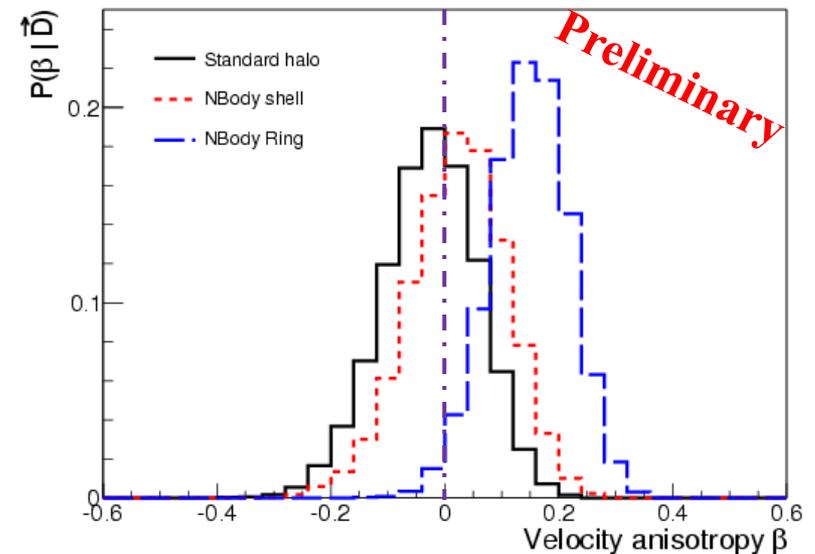


Constraints on the β parameter:

Standard halo $\longrightarrow \beta = -0.01^{+0.09}_{-0.06}$

Smooth $\longrightarrow \beta = 0.02^{+0.09}_{-0.07}$

Dark Disk $\longrightarrow \beta = 0.15^{+0.06}_{-0.06}$



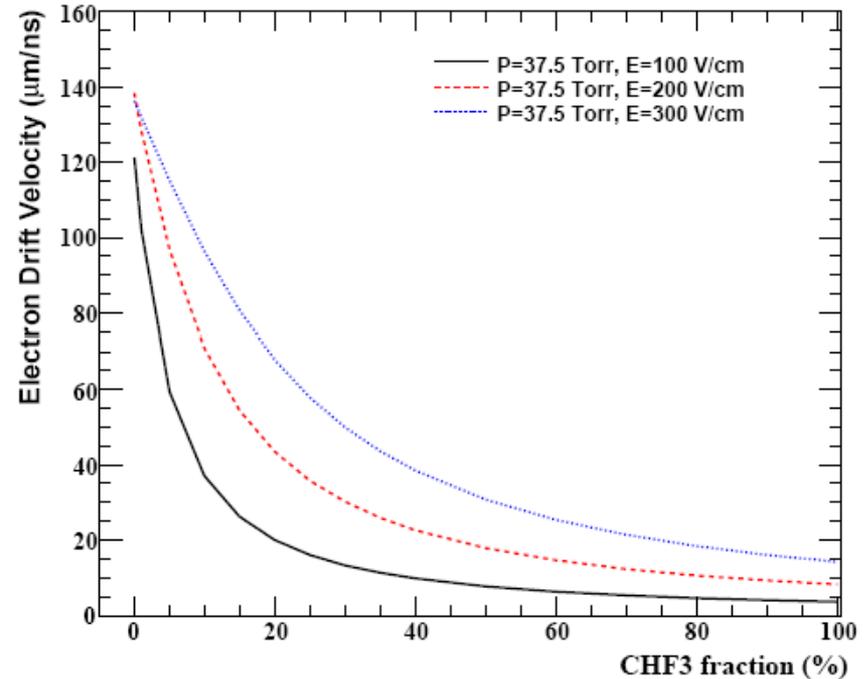
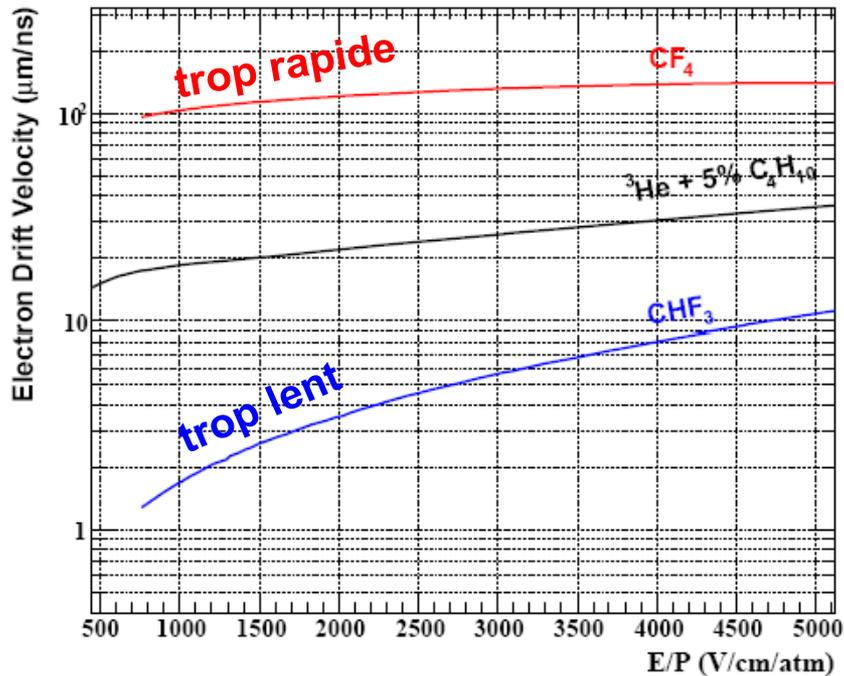
Robustness of the multivariate gaussian

WIMP velocity distribution

Toward a halo model discrimination?

vitesse de dérive

Simulation Magboltz

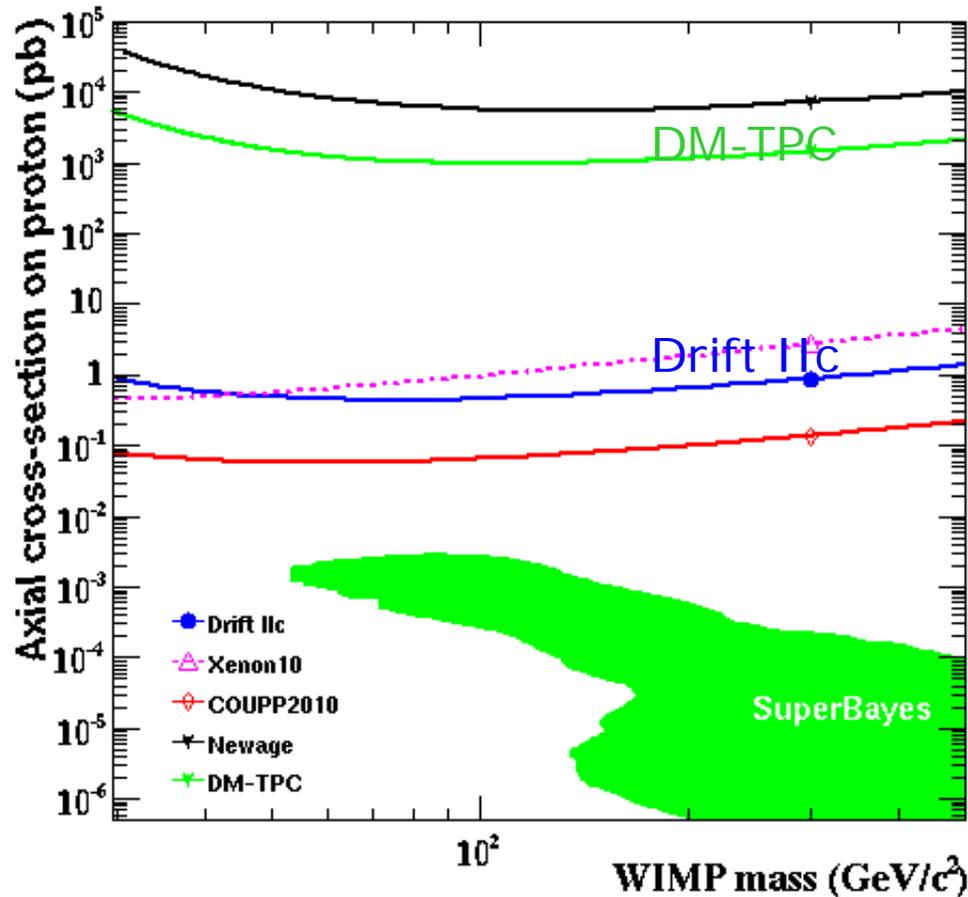


- Nouveau mélange gazeux : $\text{CF}_4 + x\% \text{CHF}_3$ ($x=30$)

Choix de la vitesse. Contenu en Fluor préservé

- Mesures des vitesses de dérive avec le prototype : *en cours*

State of the art : early directional results



S. Ahlen *et al.*, PLB 2011
K. Miuchi *et al.*, PLB 2010
E. Daw *et al.*, arxiv:1010.3027

Up to now, all current directional results suffers from low exposure and/or large background events

SD interaction : spin content

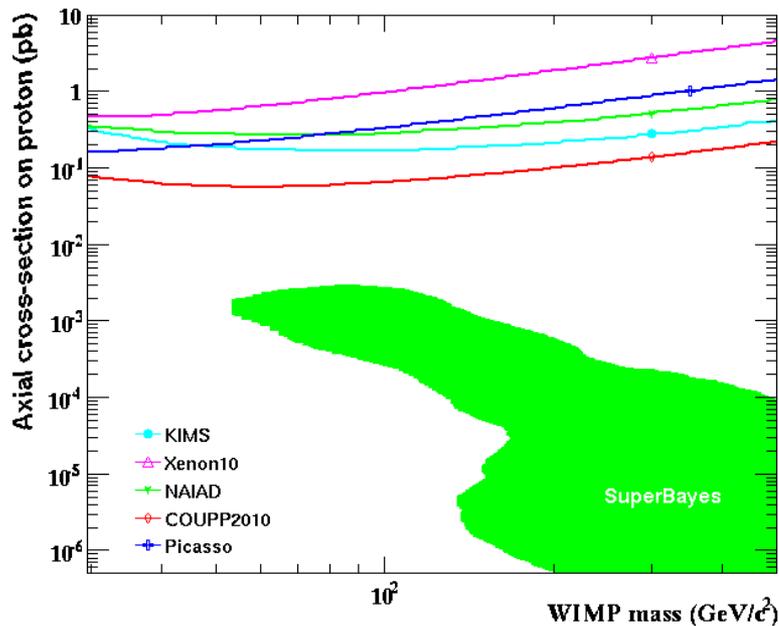
Noyau	J^π	$\langle S_p \rangle$	$\langle S_n \rangle$	Ref.	frac. iso.	Expériences
^3He	$1/2^+$	-0,021	0,462	[42]	100 %	MIMAC
^{19}F	$1/2^+$	0,441	-0,109	[43]	100 %	MIMAC, COUPP [44], Picasso [45]
^{73}Ge	$9/2^+$	0,030	0,378	[46]	7,73 %	Edelweiss [47], CDMS [48]
^{127}I	$5/2^+$	0,309	0,075	[49]	100 %	KIMS [50]
^{129}Xe	$1/2^+$	0,028	0,359	[49]	26,4 %	Xenon [51], Zeplin III [52]
^{131}Xe	$3/2^+$	-0,041	-0,236	[53]	21,2 %	Xenon [51], Zeplin III [52]
^{133}Cs	$7/2^+$	-0,370	0,003	[54]	100 %	KIMS [50]

Directional Detection : SD interaction

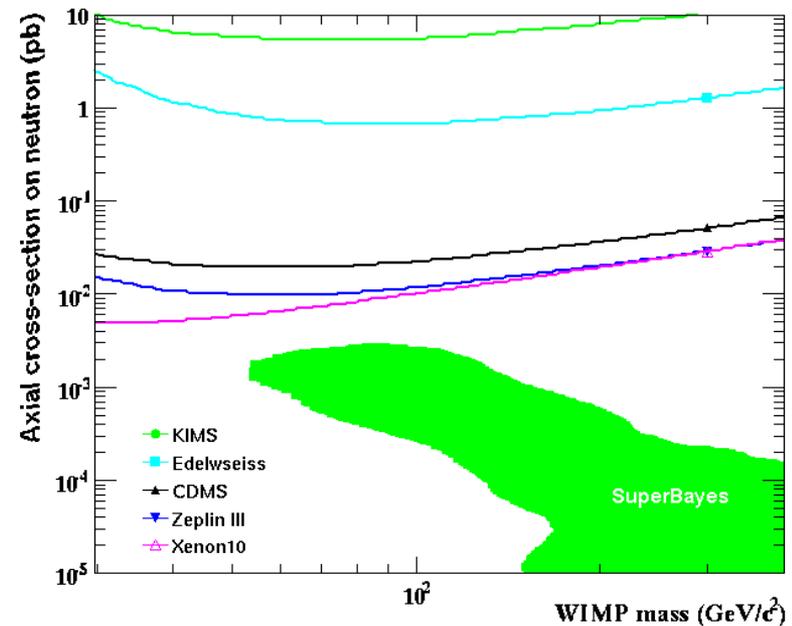
SD cross-section on nucleus :
$$\sigma^{SD}(AX) = \frac{32}{\pi} G_F^2 \times \mu_A^2 \times \frac{J+1}{J} \left(a_p \langle S_p \rangle + a_n \langle S_n \rangle \right)^2$$

- **Xenon100** : ^{129}Xe , ^{131}Xe : neutron-SD
- **Directional detection** : CF_4 : proton-SD

Proton SD interaction



Neutron SD interaction



SD interaction

However, results on SD interaction should be treated « *à la Tovey* », *i.e.* model-independent formalism

$$\left(\langle S_p \rangle \sqrt{\sigma_p} \pm \langle S_n \rangle \sqrt{\sigma_n} \right)^2 < \frac{3}{4} \times \frac{\mu_p^2}{\mu_A^2} \times \frac{J}{J+1} \times \sigma_A^{lim}(m_\chi)$$

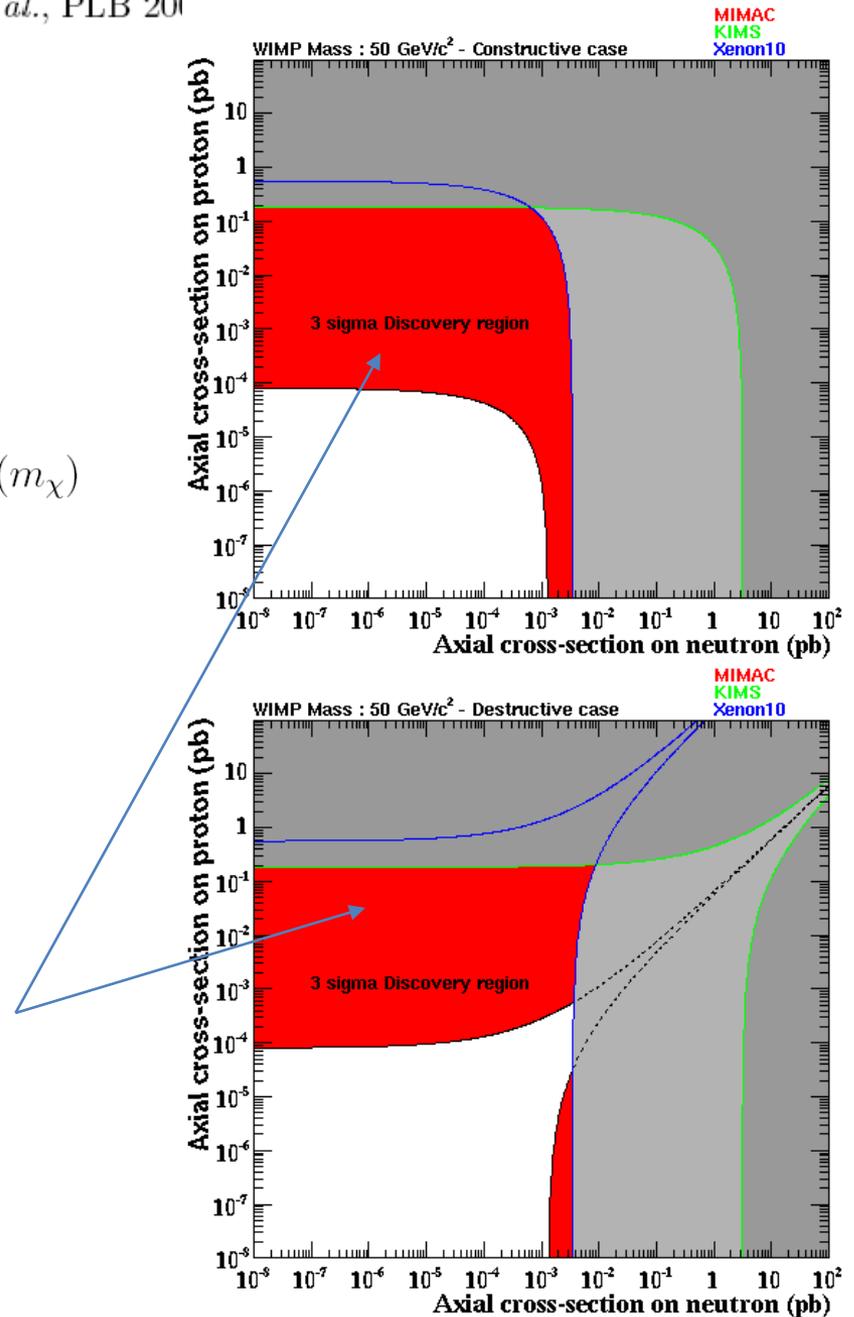
- constructive and destructive cases
- results of a SD-neutron detector does constrain SD-proton interaction

Discovery region expected

for a 30 kg.year CF₄ directional detector

already partly excluded by Xenon10...

waiting for Xenon100 result on SD...



Directional detection : which target ?

Need to measure low energy recoils

→ light target to maximize track length

→ low pressure → small mass

→ focus on SD interaction

to be competitive with ongoing experiments aiming at ton scale (or more)

- Ideal target : light with non-vanishing spin

→ candidates = H, ^3He , ^{19}F

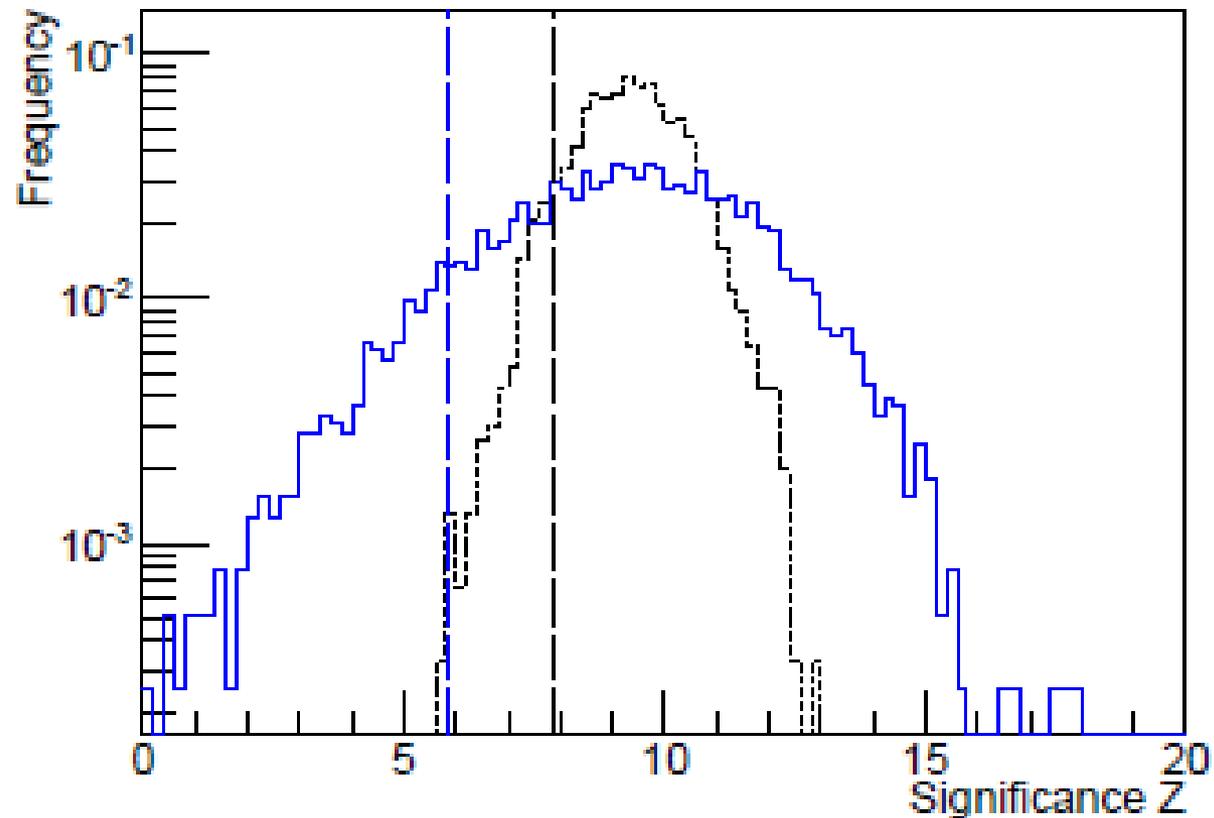
→ most projects have chosen CF_4

- CS_2 is also an option

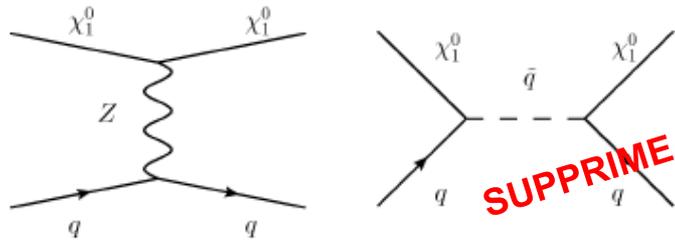
+ drift ion → suppress diffusion

- SI interaction → must be competitive with ton-scale detectors

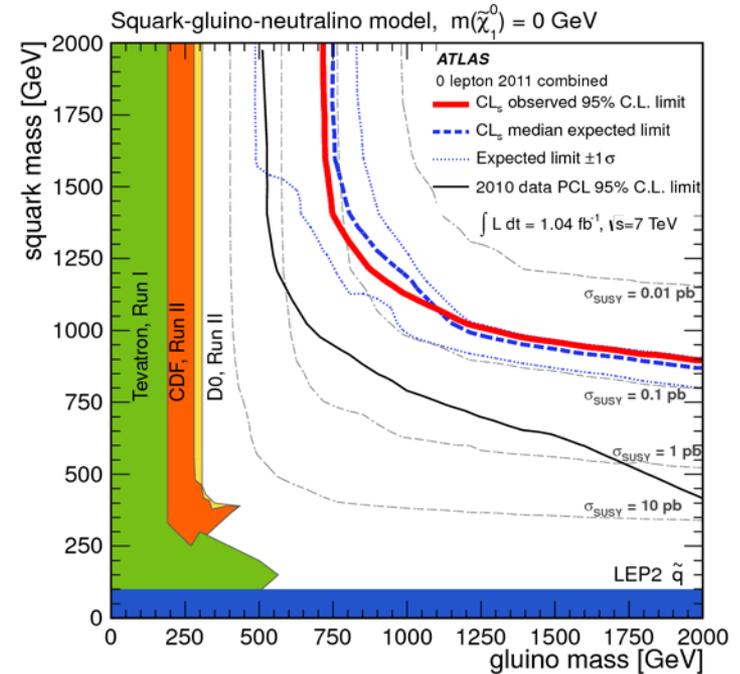
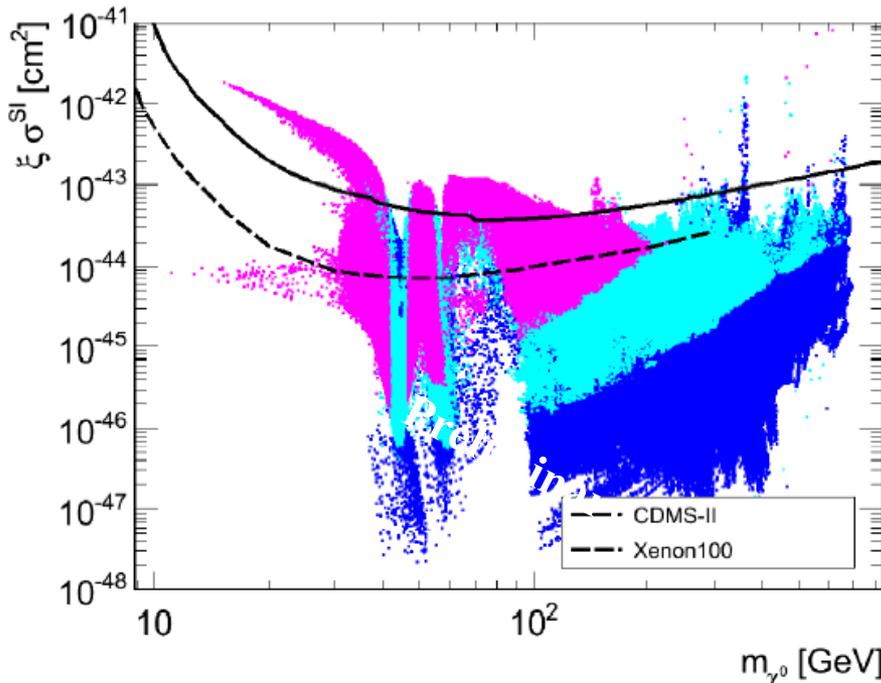
Paramètres astrophysiques



Directionnalité et SUSY



→ Squarks légers exclus au LHC (>1 TeV/c²)



arXiv:1109.6572 (ATLAS col.)

→ de nombreux modèles accessibles (MSSM, NMSSM)

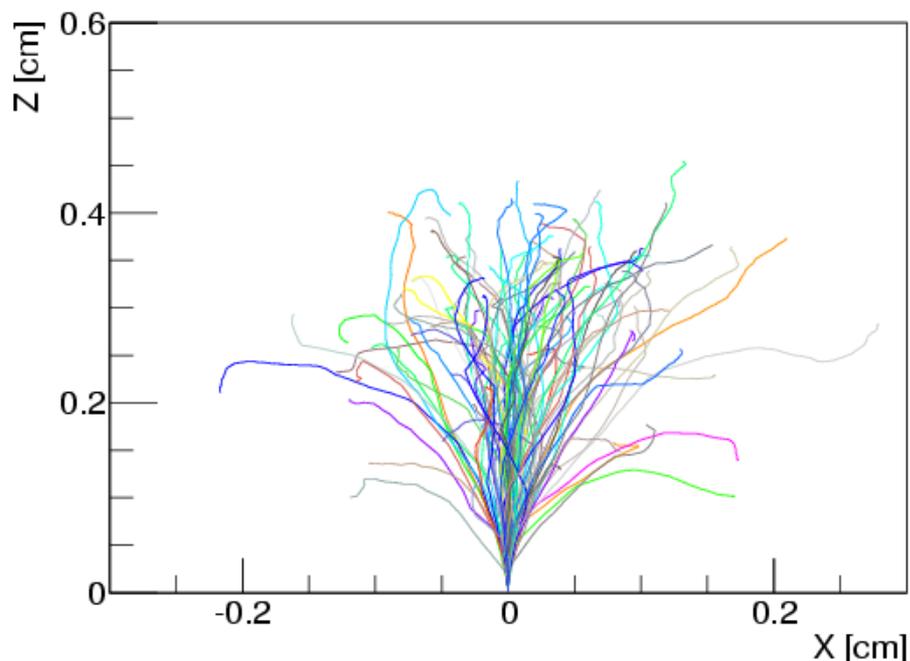
Collaboration : D. Albornoz Vasquez & G. Bélanger (LAPTH) (publication en cours)

Systematics of nuclear recoils: simulation

SRIM: The **S**topping and **R**ange of **I**ons in **M**atter [J. F. Ziegler et *al.*]

➤ For a given gas mixture and pressure it can simulate any kind of recoils at any energy

Fluorine recoil of 100 keV (recoil) in 70% CF₄ + 30% CHF₃ @ 50 mbar



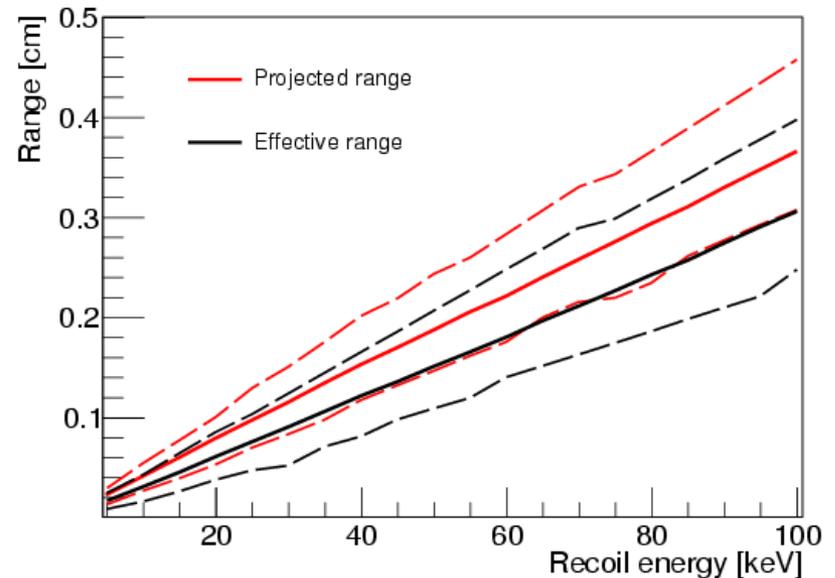
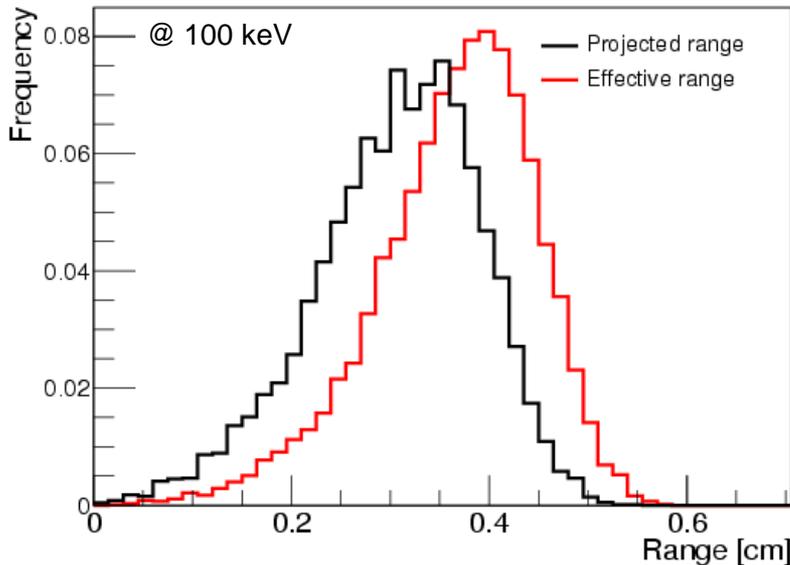
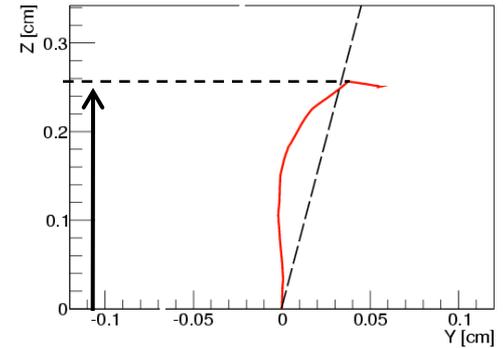
Spatial straggling is very important for Fluorine recoils... *effects?*

Systematics of nuclear recoils: range distribution

First effect:

Two definitions of the range can be used:

- **Projected range:** projection along the Z axis
- **Effective range:** sum of all the segments



- Dispersion in the range is important ~ 30% at 100 keV
- Range are between 200 and 3500 μm for a recoil energy between 10 and 100 keV

Need for high spatial resolution readout...

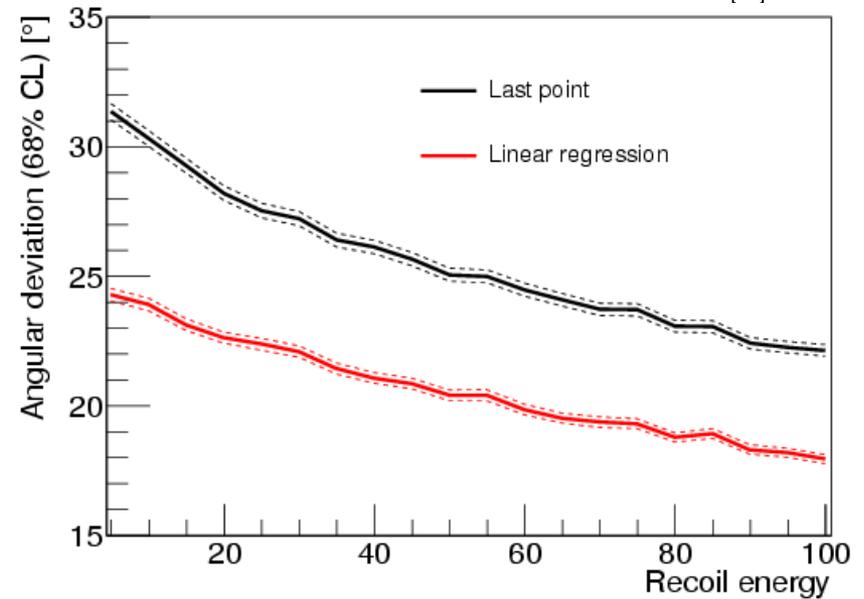
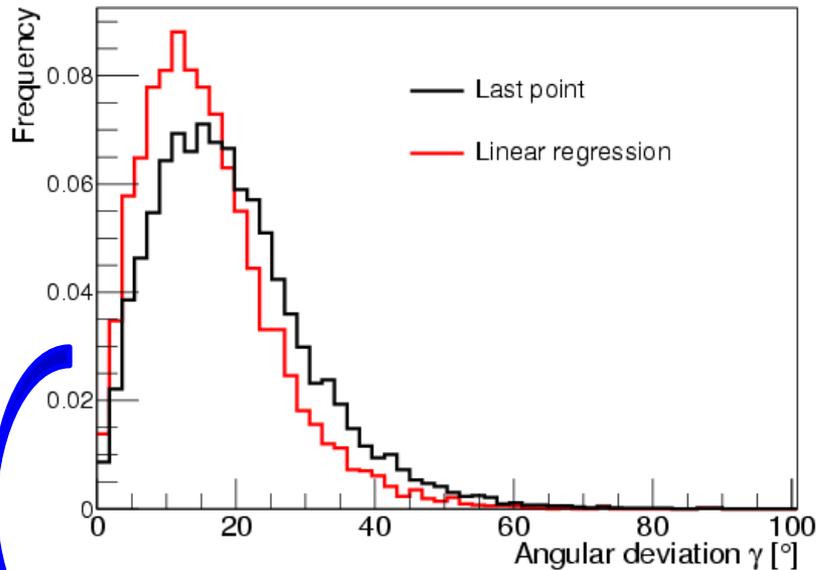
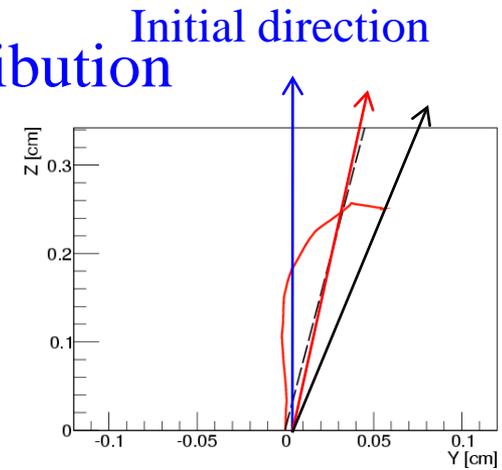
Systematics of nuclear recoils: angular distribution

Second effect:

Two definitions of the angular deviation γ :

- **Direction between the first and last point**

- **Linear regression**



In the case of a gaussian angular resolution, we have: $f(\gamma) \propto \sin \gamma \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{\gamma}{\Delta\gamma} \right)^2 \right\}$

Angular deviation is between 25 and 18 for E_R between 10 and 100 keV

Systematics of nuclear recoils: drift of primary electrons

Due to the electric field ~ 200 V/cm, drift of the primary electrons toward the anode

According to MagBoltz,

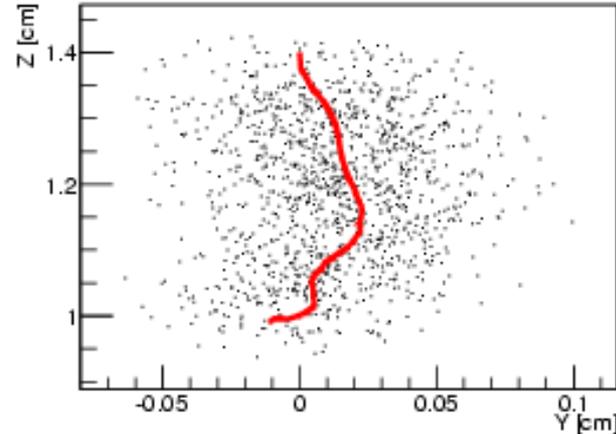
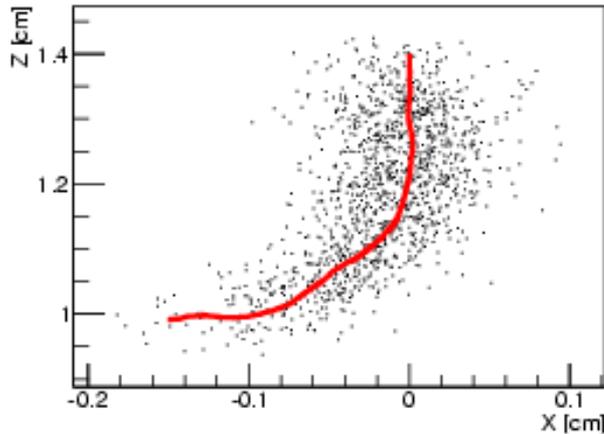
-Drift velocity: $V = 21.4 \mu\text{m/ns}$

-Transverse Diffusion: $D_t = 246.0 \mu\text{m}/(\text{cm})^{1/2}$

-Longitudinal Diffusion: $D_l = 278.4 \mu\text{m}/(\text{cm})^{1/2}$

$\sigma \sim 1 \text{ mm @ } Z = 16 \text{ cm}$

Need to be precisely measured (ongoing...)



Representation, in co-mobile coordinates, of a Fluorine recoil @ 100 keV

Drift characteristics will mainly contribute to:

- Spatial and angular resolution
- The profile of the charge integrator

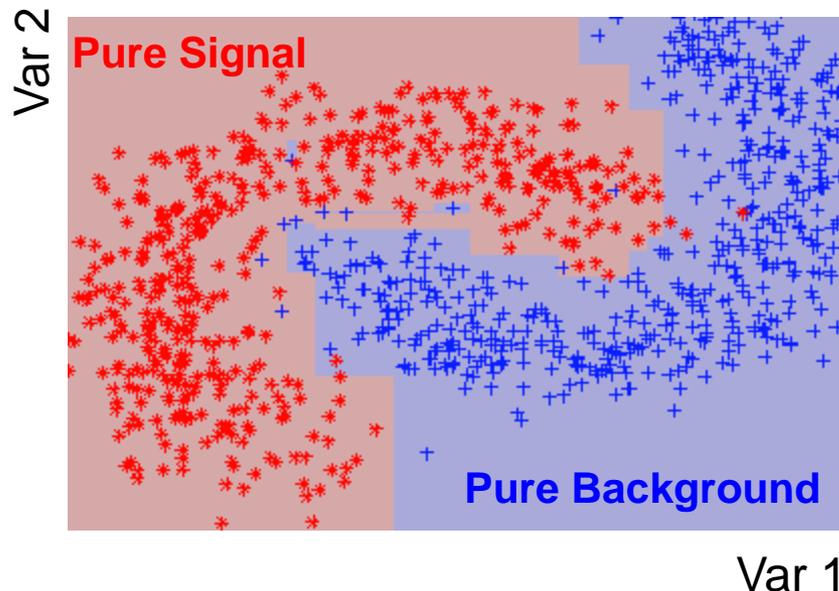
Multivariate analysis: Boosted Decision Tree (BDT)

The Boosted Decision Tree can be considered as a classifier (signal/background)

Optimisation of linear cuts on the different observable/variable

$$(X_1^{\text{bary}}, Y_1^{\text{bary}}, \Delta X_1, \Delta Y_1, \text{Nelec}_1, \dots, X_N^{\text{bary}}, Y_N^{\text{bary}}, \Delta X_N, \Delta Y_N, \text{Nelec}_N)$$

Illustration of a boosted decision tree with two variables



- Defines contour regions to discriminate Background and Signal (Up/Down)
- Can easily manage a high number of observables/variables
- It requires a very little calculation time

Well suited for Head-Tail discrimination