

L'expérience CAST : enjeux et perspectives

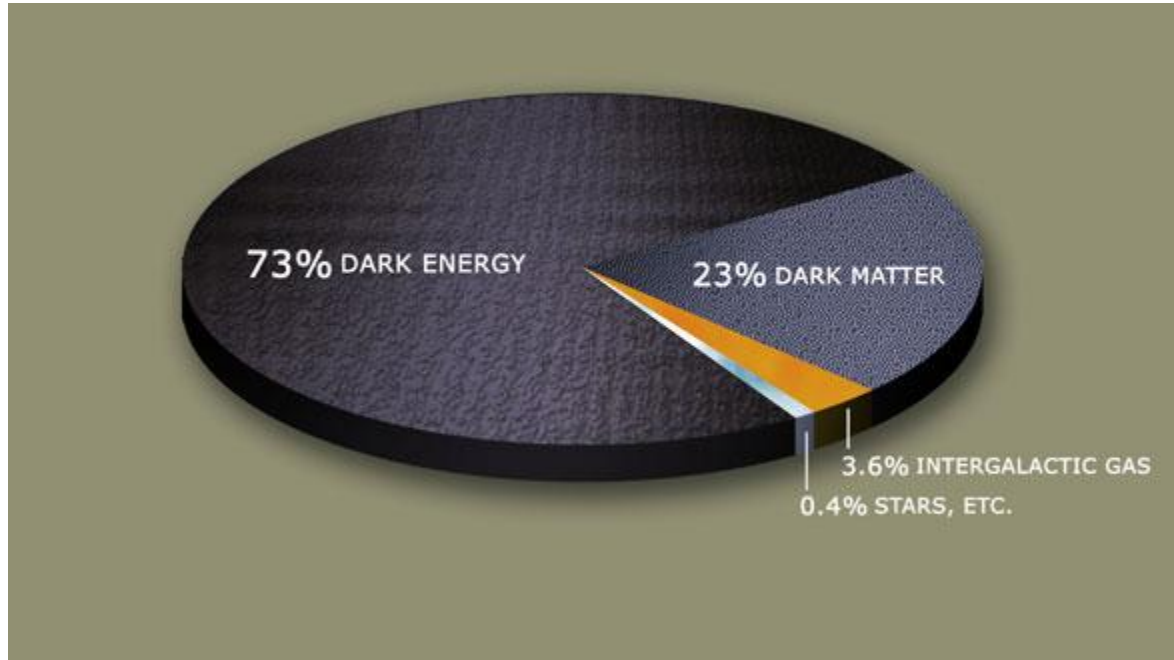


Philippe Brax, Esther Ferrer Ribas, Yannis Giomataris, Thomas Papaevangelou
IPHT, IRFU

CSTS SPP
1er Juin 2012

PLAN

- Plan:
 - Motivation
 - Phénoménologie et Detection
 - Axions solaires & le principe “hélioscope”
 - CAST :
 - Phase I, II (2003-2011)
 - Phase III, IV (2012-2014)
 - IAXO
 - Demande de ressources
 - Conclusions



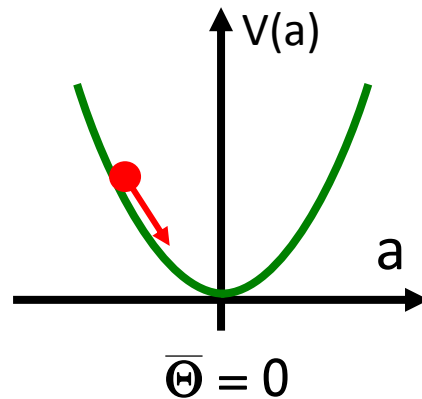
The big puzzle: 96% of the energy of the Universe is unknown.

STRONG CP Problem

$$\mathcal{L}_{\text{CP}} = -\frac{\alpha_s}{8\pi} \bar{\Theta} \text{Tr}(G\tilde{G}) \rightarrow -\frac{\alpha_s}{8\pi} \frac{a(x)}{f_a} \text{Tr}(G\tilde{G})$$

$a(x)$ pseudoscalar axion field, f_a axion decay constant (Peccei-Quinn scale)

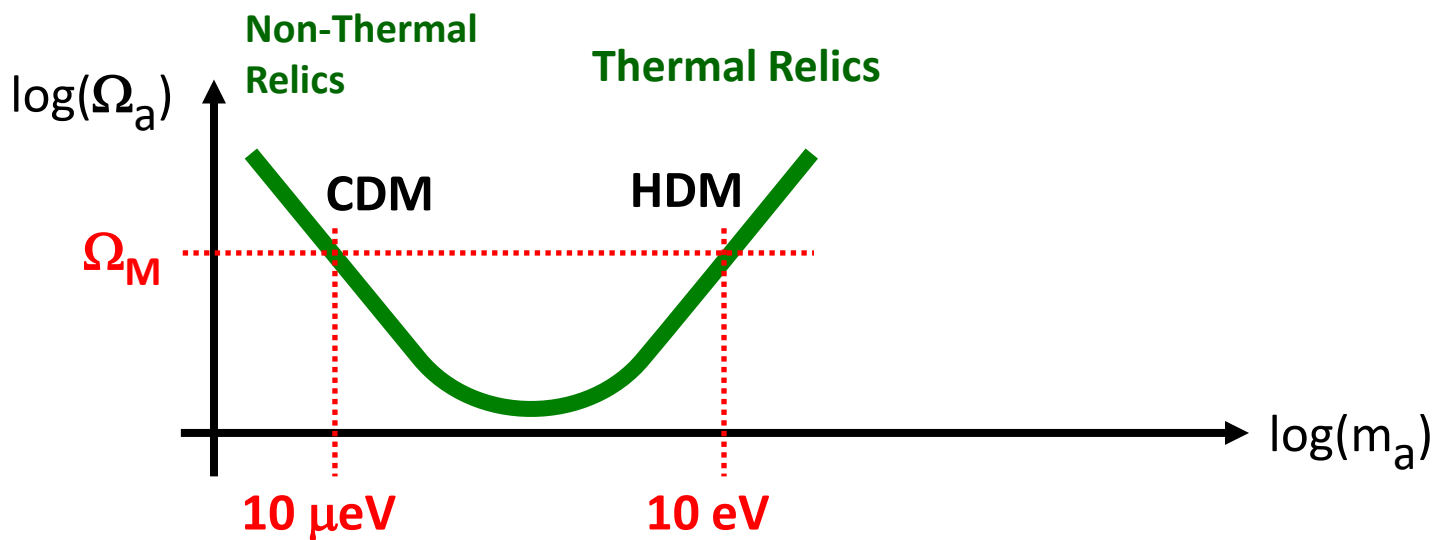
$$m_a f_a = \frac{\sqrt{m_u m_d}}{m_u + m_d} m_\pi f_\pi$$



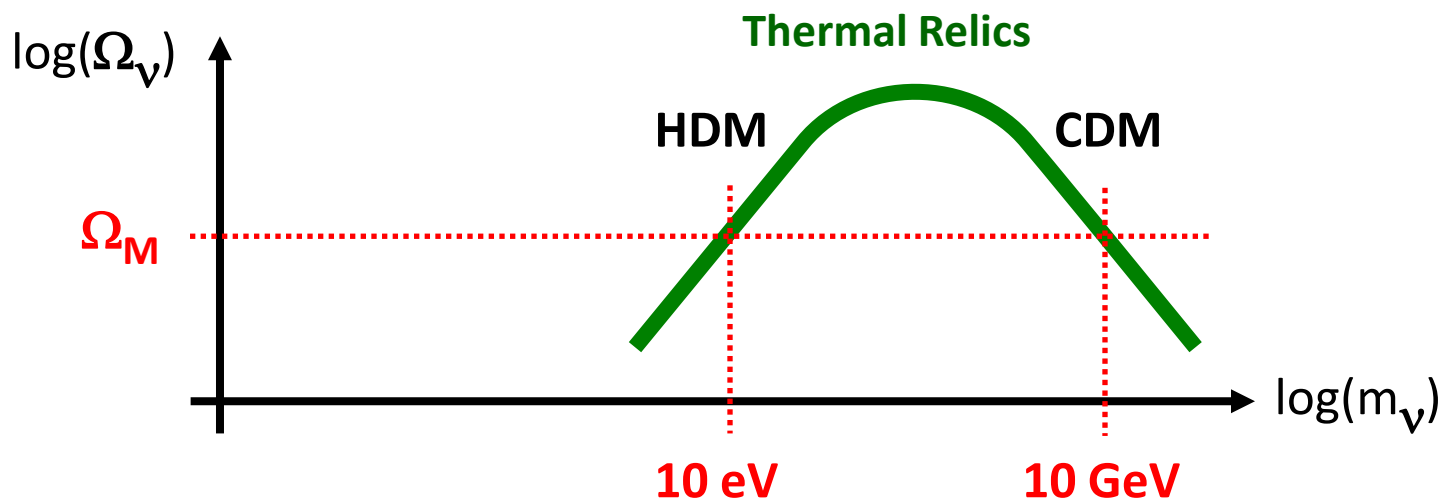
**CP-symmetry
dynamically
restored**

Lee-Weinberg Curve for Wimps and Axions

Axions

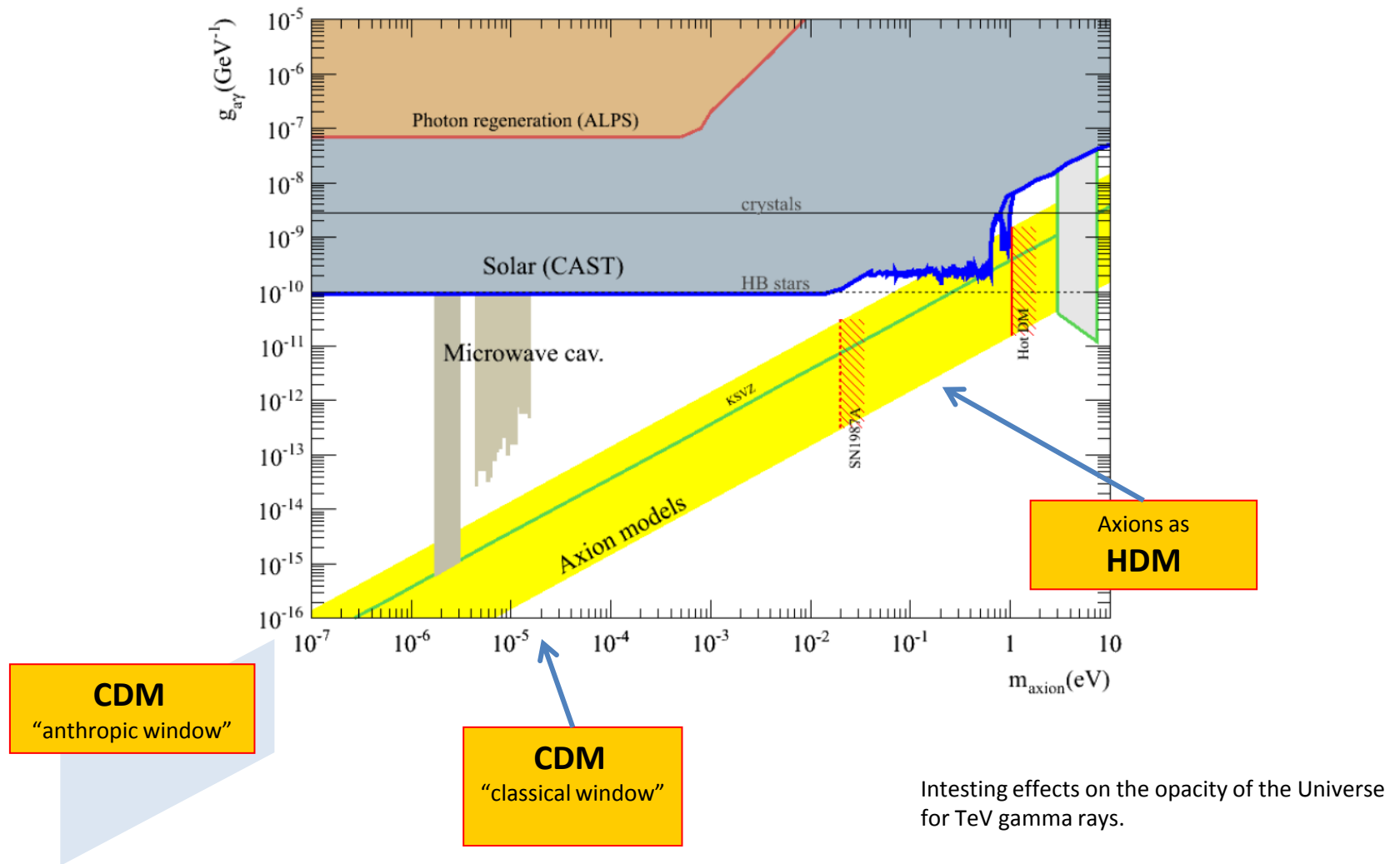


WIMPs



“Axion-like-Particles” parameter space

Particles with mass m and coupling scale f



The acceleration of the Universe is a very low energy phenomenon at scales below the eV



Weinberg's theorem: only theory of spin 2 field (graviton) with Lorentz invariance at low energy:

General Relativity

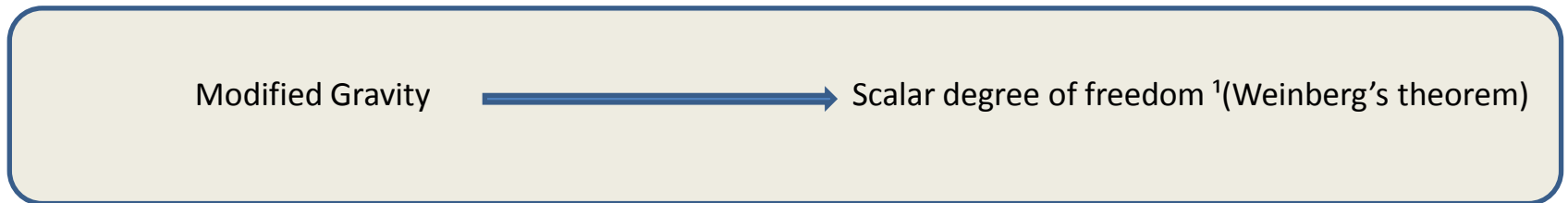
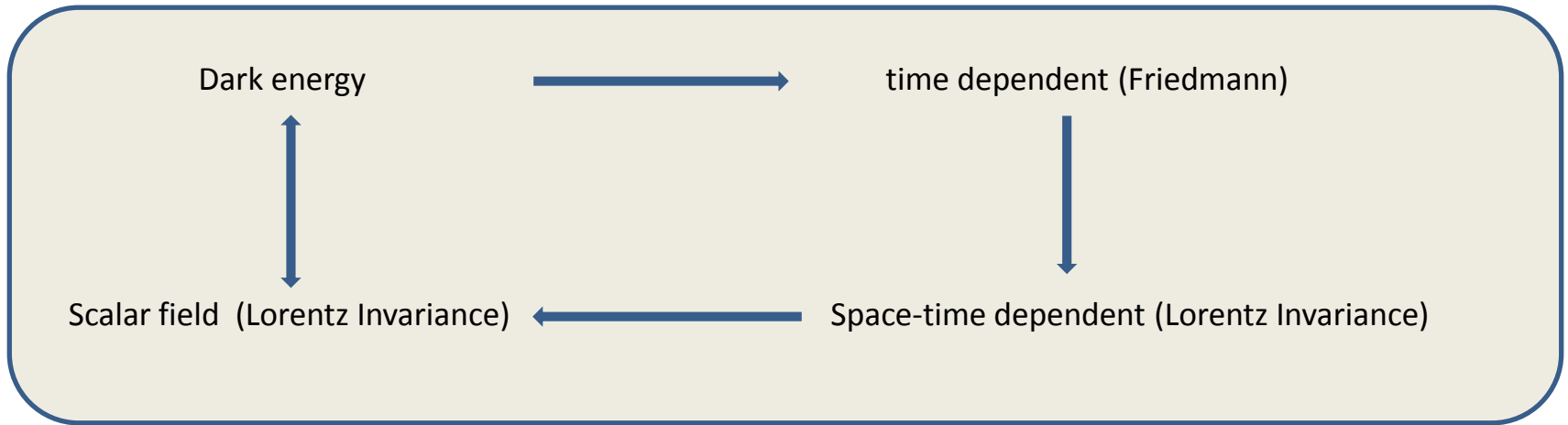
General Relativity (GR) + ordinary matter (baryons, Cold Dark Matter (CDM) , radiation etc..) cannot generate the acceleration of the Universe.

Only two possibilities¹:

Changing the energy content of the Universe  **DARK ENERGY**

Changing the laws of gravity:  **MODIFIED GRAVITY**

¹there is a third possibility: violating the Copernican principle but this leads us outside a field theoretic treatment.



Scalar fields are ubiquitous

¹Massive graviton= 2 helicity 2 + 2 vector + 1 scalar

Scalars have an influence on cosmological scales (acceleration) only when their mass is of the order

$$m_0 \sim H_0 \sim 10^{-43} \text{ GeV}$$

Long range scalar field should have been seen in local tests of gravity!

Screened Modified Gravity

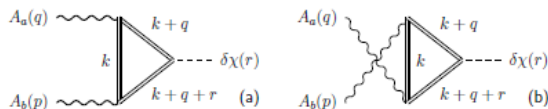
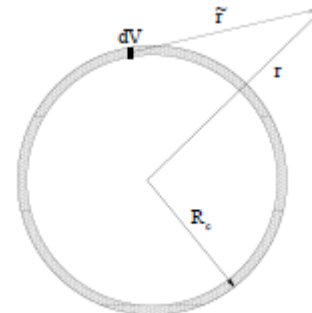
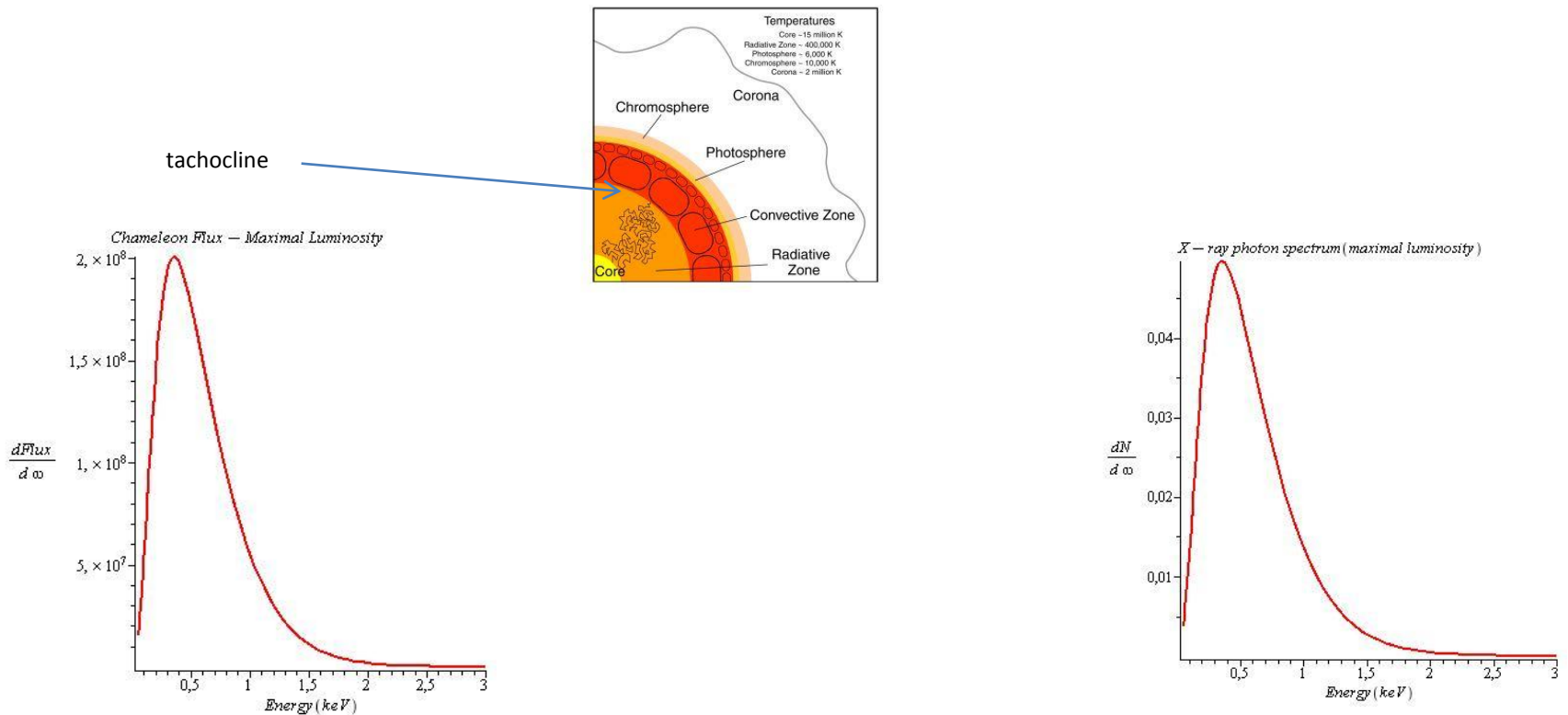


Figure 1. Diagrams contributing to the leading interaction between dark energy and the electroweak gauge bosons, which determine an effective operator acting on $A_a(q)A_b(p)\chi(r)$. Note that the momentum carried by χ is taken to flow into the diagram. Double lines represent a species of heavy fermion charged under $SU(2) \times U(1)$.



The field generated from deep inside a dense body is Yukawa suppressed. Only a thin shell radiates outside the body. Hence suppressed scalar contribution to the fifth force.

Chameleons can be produced in the tachocline region at a radius 0.7 Rs. The magnetic field is 20-50 T. The mean free path is about 0.3 cm. The photons have a temperature of 200 eV. These thermal photons create chameleons.



Axions/Caméléons

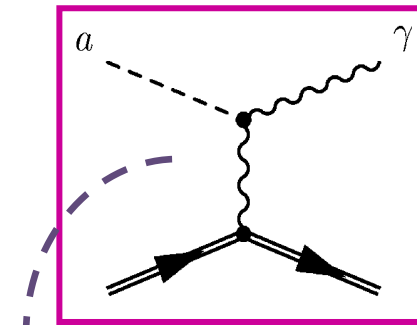
- **Propriétés de l'axion**

- Particule pseudoscalaire
- Neutre
- Très léger
- Stable
- Faible section efficace

- **Propriétés du caméléon**

- Particule scalaire
- Neutre
- Masse du caméléon dépend de la densité de son environnement
- Stable
- Faible section efficace

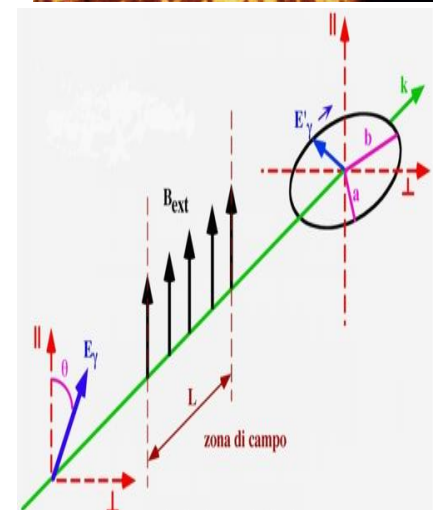
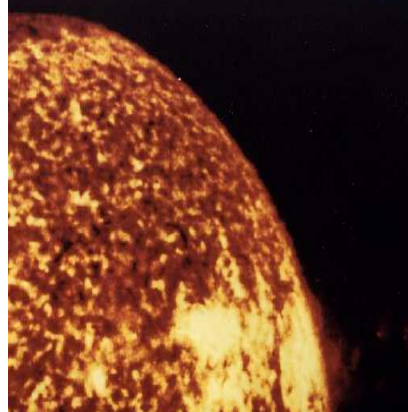
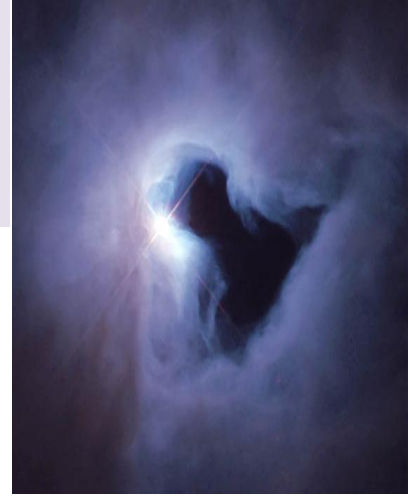
- **Conversion Axion/caméléon-photon en présence d'un champ magnétique (Primakoff effect)**



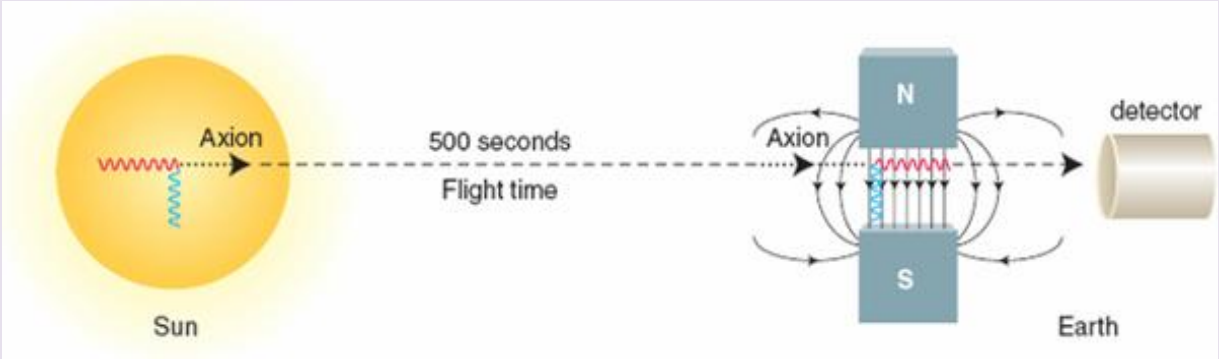
- par un champ magnétique externe
- par le champ coulombien du plasma du centre d'une étoile
- ...

Détection

- “Relic” Axions
 - Axions qui font partie de la matière noire du halo galactique:
 - Haloscopes (ADMX)
- Axions solaires
 - Emis par le coeur du soleil
 - Hélioscopes (**CAST** → **IAXO**)
- Axions produits dans le laboratoire
 - Expériences “Light shining through wall”
 - Expériences de birefringence du vide



Le principe du hélioscope

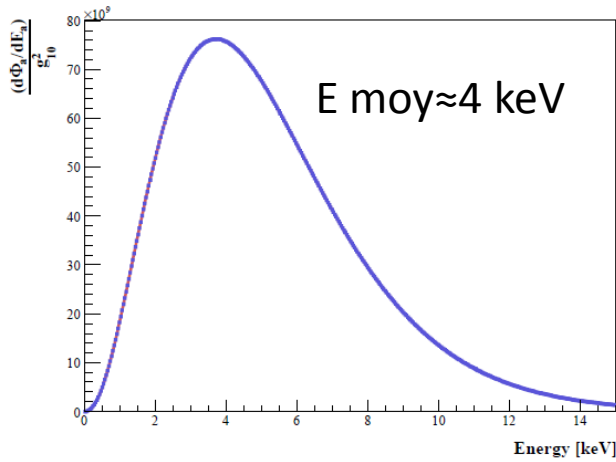
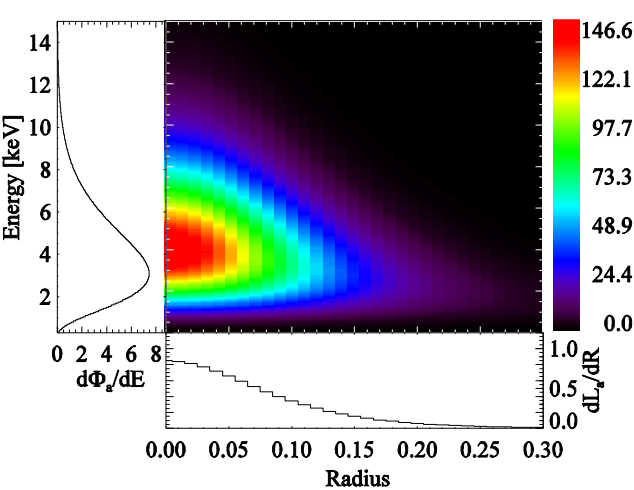


Production in the Sun

Conversion of thermal photons into axions via Primakoff effect in the solar core

Detection inCAST

Conversion of axions into photons via the inverse Primakoff effect in a strong magnetic field



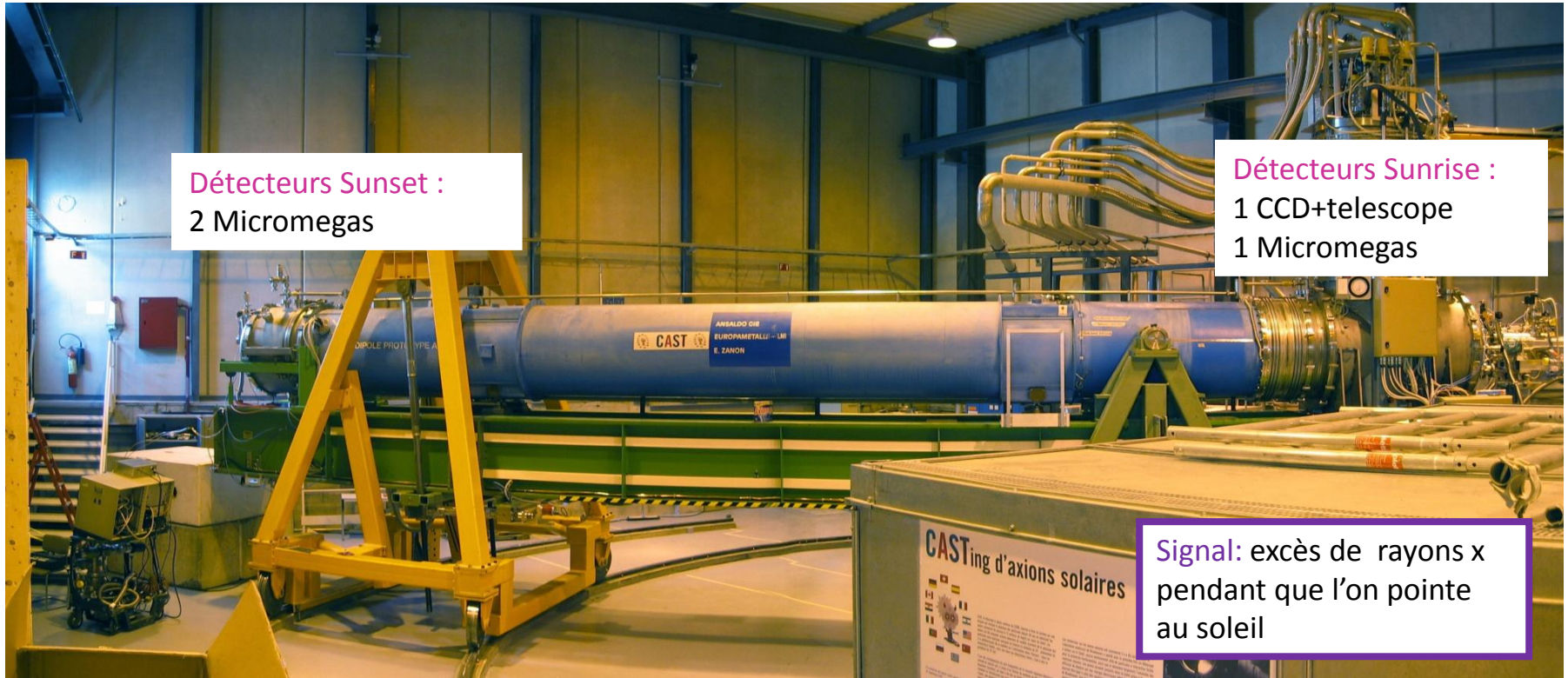
Expected number of photons:

$$N_\gamma = \Phi_a \cdot A \cdot P_{a \rightarrow \gamma}$$

$$P_{a \rightarrow \gamma} = 1.7 \times 10^{-17} \left(\frac{B \cdot L}{9.0T \cdot 9.3m} \right)^2 \left(\frac{g_{a\gamma}}{10^{-10} GeV^{-1}} \right)^2$$

≈ 0.3 evts/hour with $g_{a\gamma} = 10^{-10} GeV^{-1}$ and $A = 14 cm^2$

CAST: CERN Axion Solar Telescope



Détecteurs Sunset :
2 Micromegas

Détecteurs Sunrise :
1 CCD+telescope
1 Micromegas

Signal: excès de rayons x
pendant que l'on pointe
au soleil

LHC dipole : $L = 9.3 \text{ m}$, $B = 9 \text{ T}$

Rotating platform : mouvement vertical 16°

mouvement horizontal 100°

Solar « Tracking » $\sim 3 \text{ h/jour}$, le reste de la journée runs de bruit de fond

4 X-rays detectors

Collaboration CAST

21 Instituts
70 signataires (3 IRFU)

Nouveaux instituts: U. Bonn,
DTU, Columbia U.

MoU pour 2012-2014



Nos responsabilités aujourd'hui:

Physics Deputy Spokesperson: YG (2007);

Chair of the publication committee: EFR (2005);

Expert supervisor for the GRID, Tracking and Slow control: TP (2006);

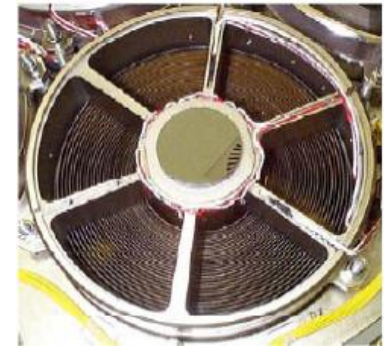
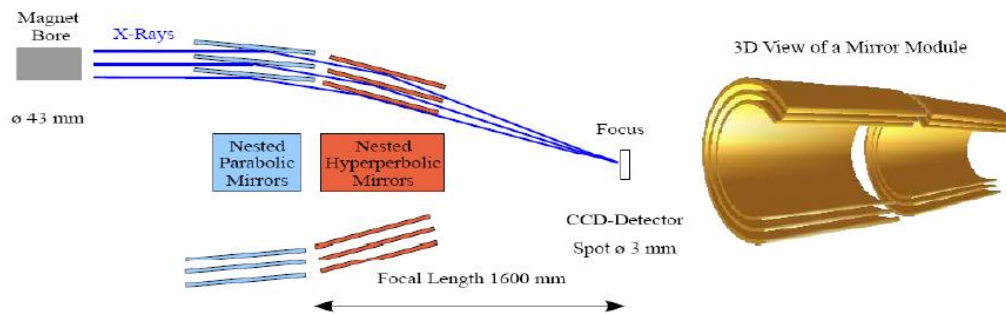
Run coordinator (2-4 semaines/an): TP

Tous les trois, membres du SC

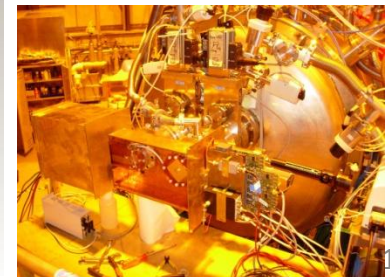
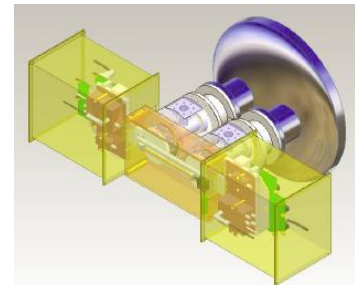
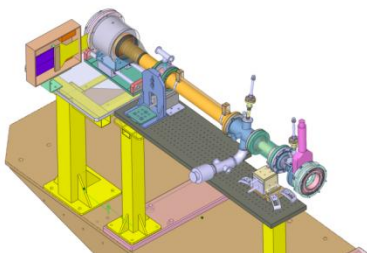
Co-responsables avec U. Zaragoza des trois détecteurs MM

Originalités de CAST

- Utilisation d'un télescope à rayons X → augmentation de S/B → sensibilité améliorée par un facteur 150 par la focalisation du faisceau de rayons X de $\varnothing 43$ mm x-ray sur $\varnothing 3$ mm



- Techniques bas bruit → blindage, matériaux radiopures, simulation et modélisation de bruit de fonds....

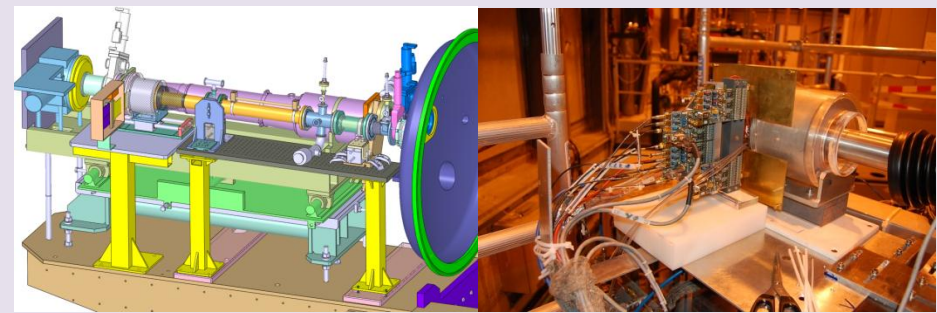


Détecteurs

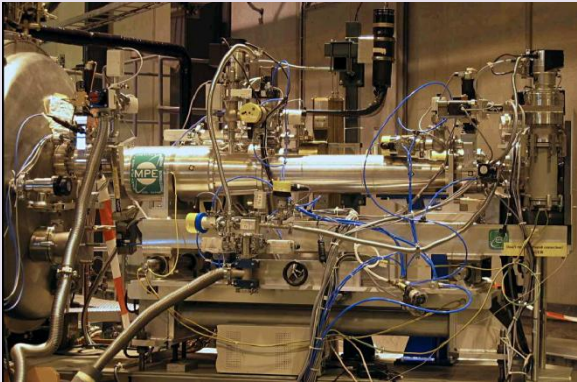
Avant 2006	Taux Typiques
TPC	$17 \times 10^{-4} \text{ c KeV}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (2-10 keV)
MM	$5 \times 10^{-4} \text{ c KeV}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (2-10 keV)
CCD+télescope	$8 \times 10^{-5} \text{ c KeV}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (1-7 keV)

Après 2006	Taux Typiques
3 MM	$6 \times 10^{-5} \text{ c KeV}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (2-10 keV)
CCD + télescope	$8 \times 10^{-5} \text{ c KeV}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (1-7 keV)

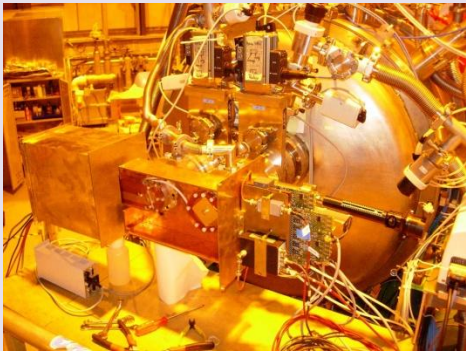
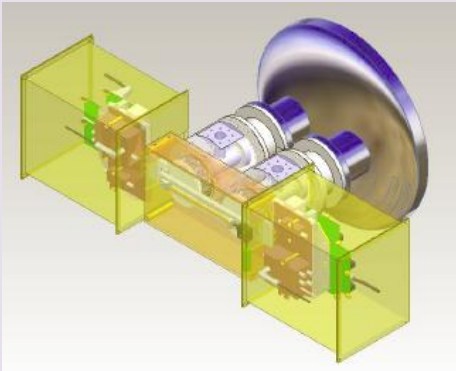
COTE SUNRISE
Détecteur Micromegas blindé (type Microbulk)



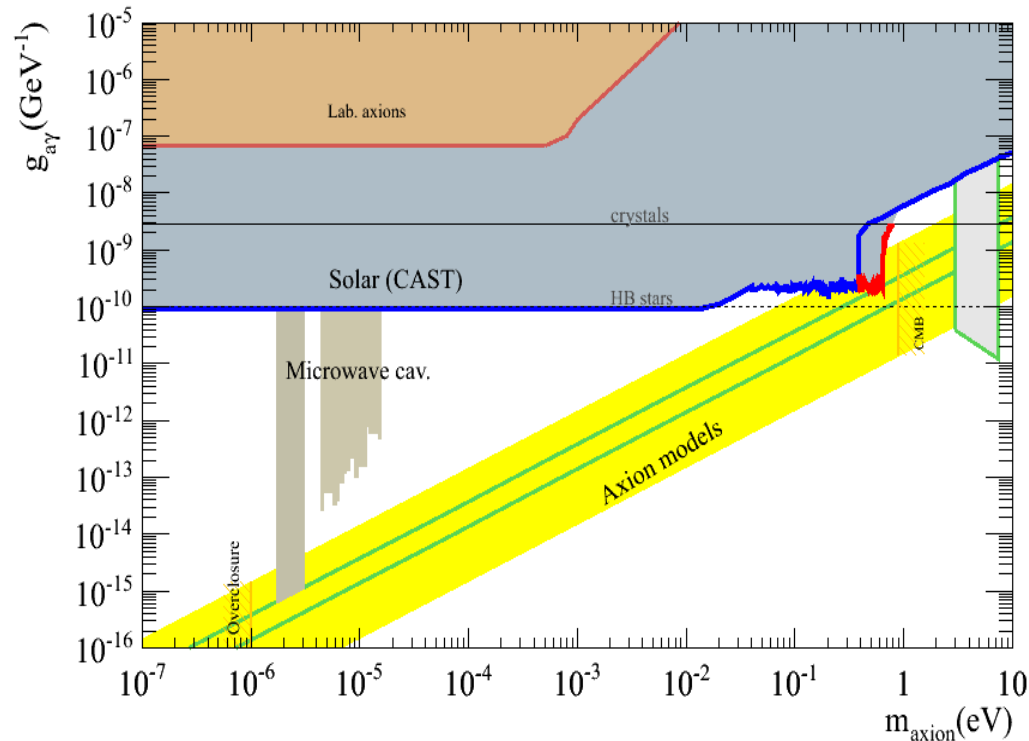
CCD +télescope



COTE SUNSET
2 détecteurs Micromegas blindé (type Microbulk)



PROGRAMME ET SENSITIVITE



CAST Phase I: (vacuum operation 2003-2004)

completed (2003 - 2004), $m_a < 0.02$ eV

JCAP 0704(2007) 010, CAST Coll.

PRL (2005) 94, 121301, CAST Coll.

CAST Phase II: (buffer gas operation 2005-2011)

^4He completed (2005 -2006) , 0.02 eV $< m_a < 0.39$ eV

JCAP 0902 (2009) 008, CAST Coll.

^3He run completed (2007-2011), 0.39 eV $< m_a < 1.18$ eV

First part ^3He run analysis accepted in PRL, Preprint:1106.39119

Original aims of CAST reached!

Short term plans for 2012-2015 later in this talk

CAST byproducts:

High Energy Axions: Data taking with a HE calorimeter JCAP 1003:032,2010

14.4 keV Axions: TPC data (before 2006) JCAP 0912:002,2009

Low Energy (visible) Axions: Data taking with a PMT/APD arXiv:0809.4581

Sensitivité à haute masse

Axion to photon conversion probability:

$$P_{a \rightarrow \gamma} = \left(\frac{Bg_{a\gamma}}{2} \right)^2 \frac{1}{q^2 + \Gamma^2/4} \left[1 + e^{-\Gamma L} - 2e^{-\Gamma L/2} \cos(qL) \right]$$

Vacuum: $\Gamma=0, m_\gamma=0$

with

$$q = \left| \frac{m_\gamma^2 - m_a^2}{2E_a} \right| \quad m_\gamma (\text{eV}) = \sqrt{\frac{4\pi\alpha N_e}{m_e}} \approx 28.9 \sqrt{\frac{Z}{A} \rho \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)}$$

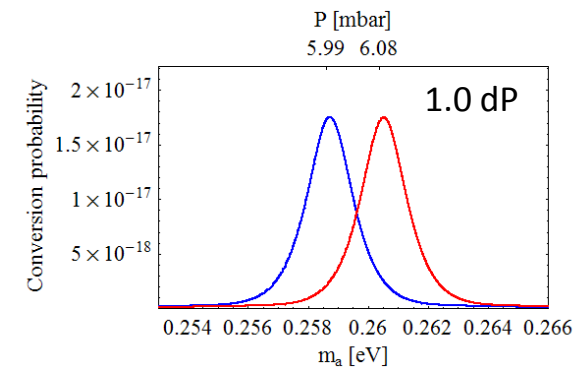
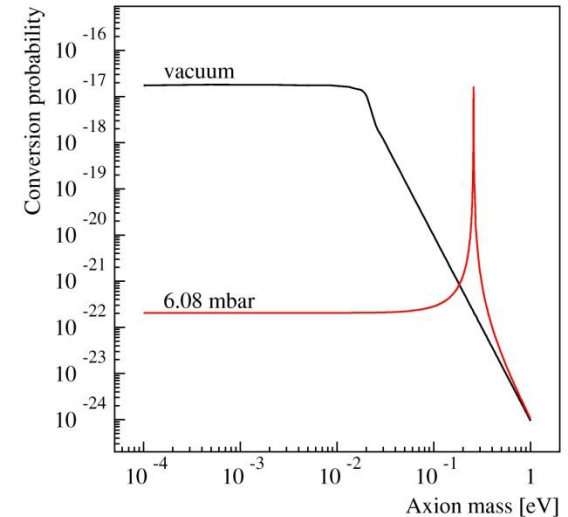
Coherence condition: $qL < \pi$

For CAST **phase I** conditions (vacuum), **coherence is lost for $m_a > 0.02 \text{ eV}$**

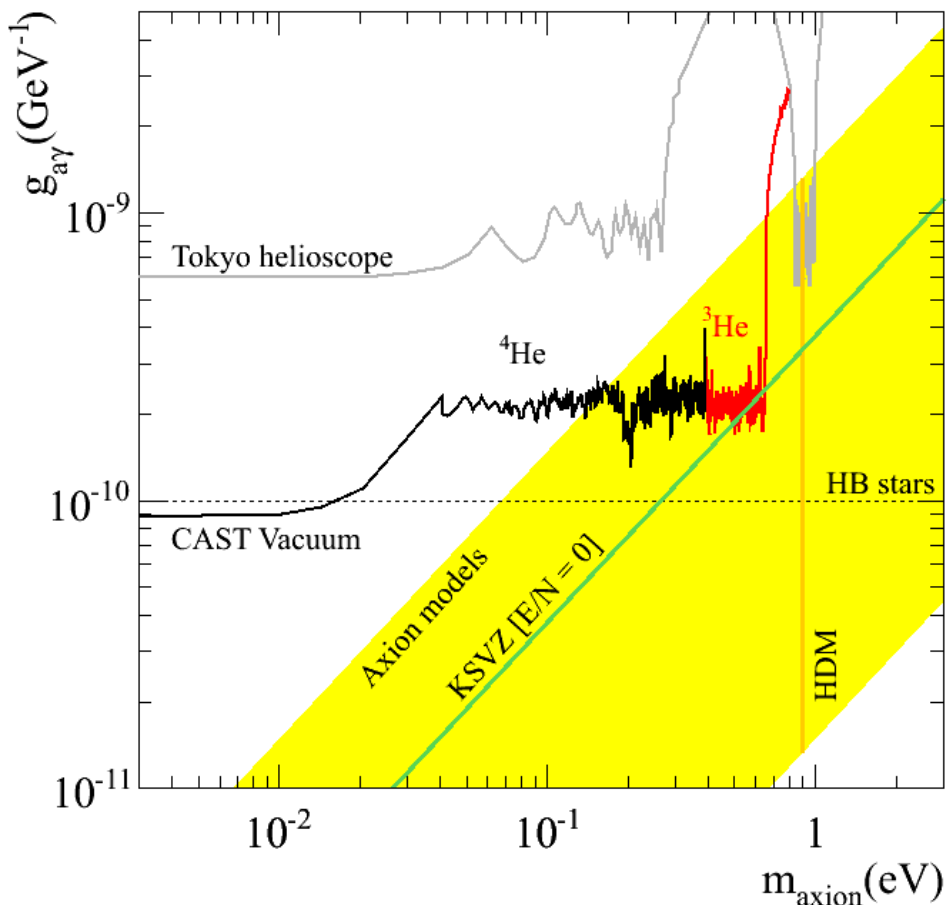
With the presence of a **buffer gas** it can be **restored** for a narrow mass range:

$$qL < \pi \Rightarrow \sqrt{m_\gamma^2 - \frac{2\pi E_a}{L}} < m_a < \sqrt{m_\gamma^2 + \frac{2\pi E_a}{L}}$$

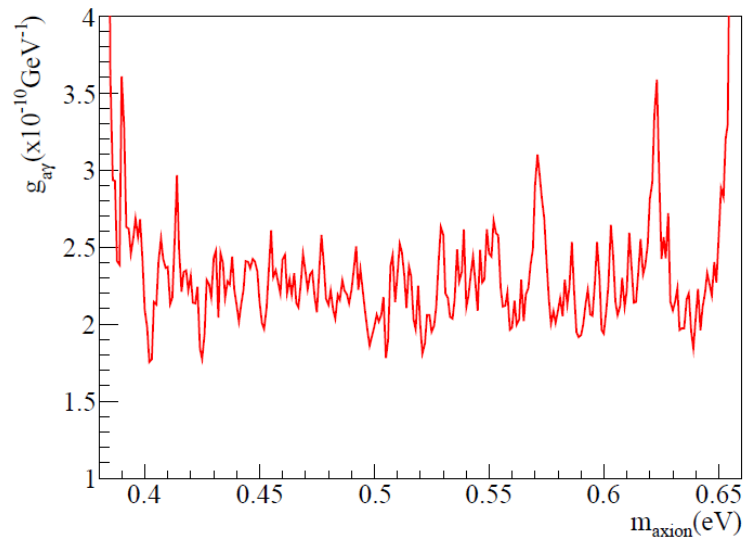
e.g. for 50 mbar $\Delta m_a \sim 10^{-3} \text{ eV}$



Les résultats le plus récents



PRL (2011) 107, 261302



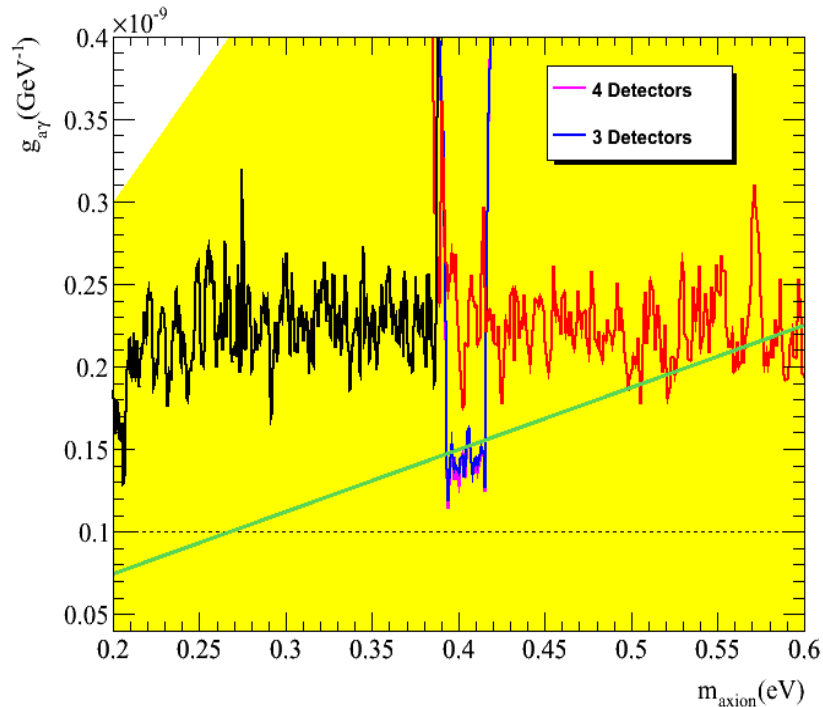
Résultats de la première partie (2008) de la prise de données de ^3He (ligne rouge)

Masses entre 0.39 – 0.65 eV exclues jusqu'à $2\text{--}2.5 \times 10^{-10} \text{GeV}^{-1}$

Modèles KSVZ atteints pour la première fois à haute masse

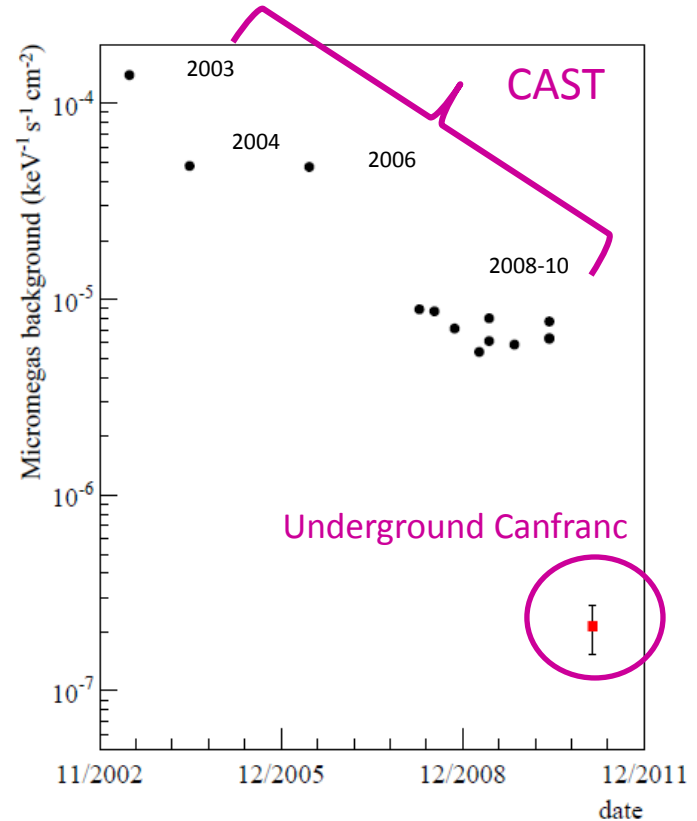
Les données avec des sensibilités jusqu'à $m_a \approx 1.15$ eV en train d'être analysées

Le futur (présent): 2012 phase III ^4He



Revoir la prise des données avec ^4He

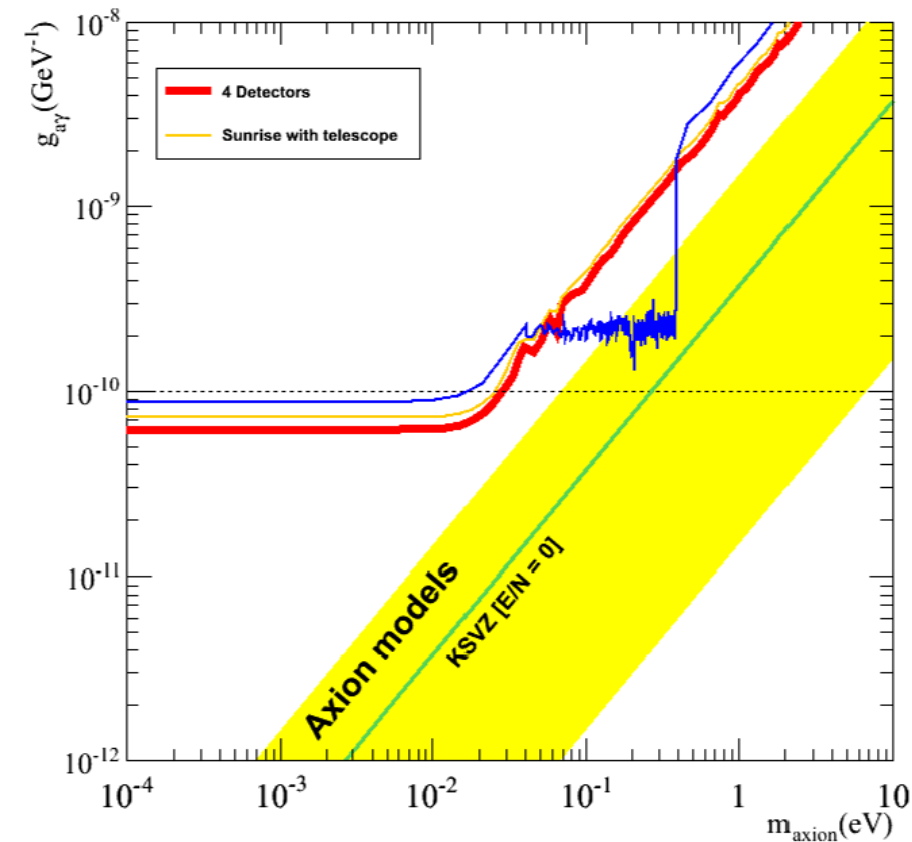
Détecteurs existants avec une meilleure sensibilité qu'en 2006



Derniers détecteurs Micromegas: fond amélioré d'un facteur ≈ 20

Blindage
Radiopureté (technique Microbulk)
Analyse optimisé

Le futur 2013-2014 phase IV vide



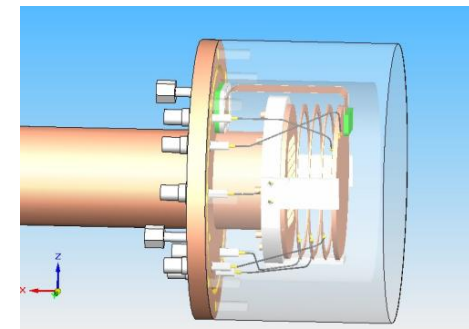
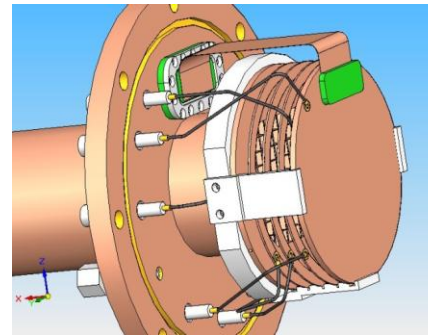
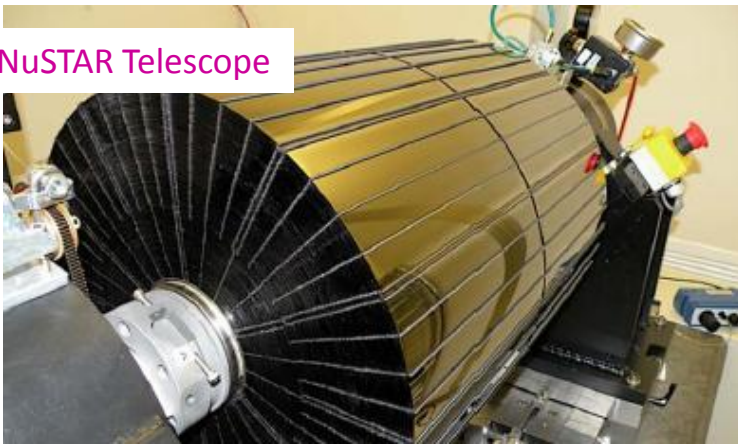
Nouveau design pour les détecteurs MM

- o Amélioration du blindage de tous les détecteurs
- o Plus de soins dans le matériaux
- o Nouvelle électronique de lecture
- o Amélioration du seuil en énergie → caméléons

Nouveau télescope pour MM Sunrise

- o Construction d'un petite optique en utilisant les outillages de NuSTAR (thermally formed glass substrates) (LLNL, U. Columbia, DTU)
- o Operationel pour mi 2013

NuSTAR Telescope



Le futur 2013-2014 phase IV vide

Finalisation du design → amélioration du bruit de fond et du seuil en énergie

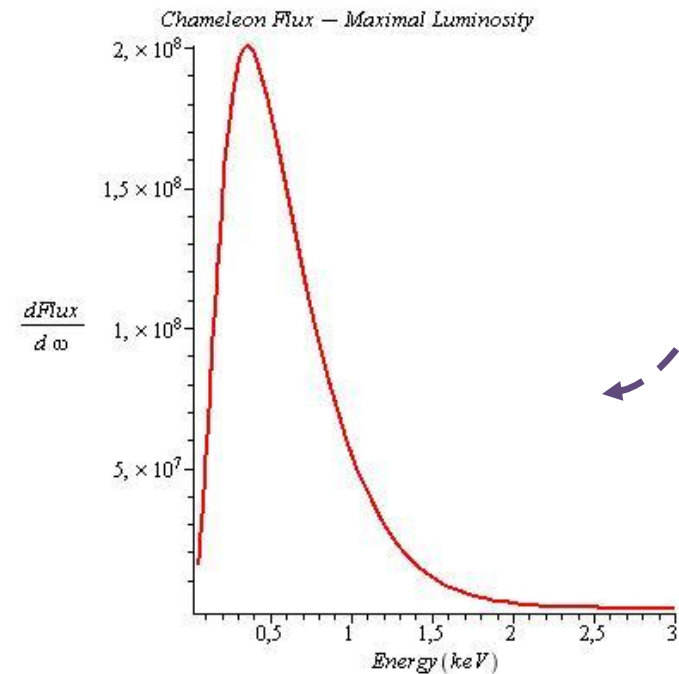
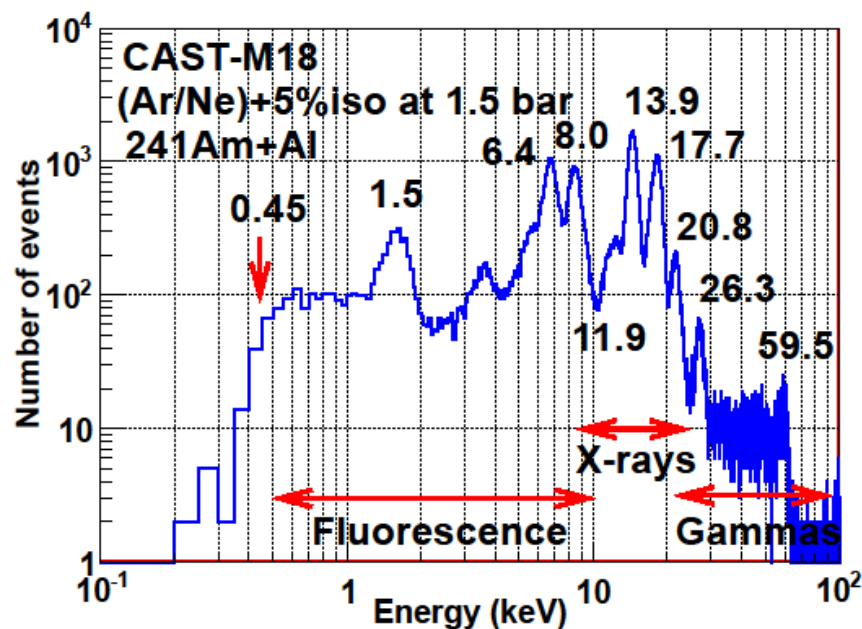
Radio pureté pour les matériaux de construction

Nouvelle électronique avec info temps (type T2K) pour convertir le détecteur en une vraie TPC

Blindage plus compacte

Mélanges de gaz pour augmenter le gain du détecteur

Tests de laboratoire

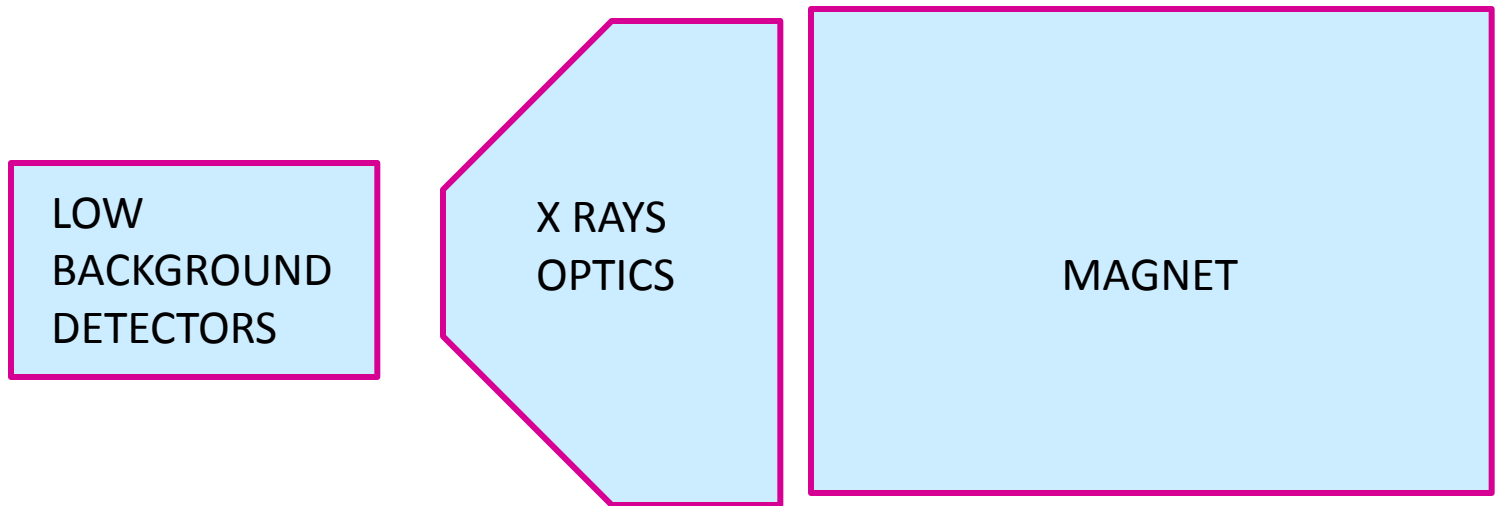


L'après CAST: IAXO (International Axion Observatory)

Nouvelle génération hélioscope (sensibilité améliorée de 1 ordre de magnitude)

Towards a new generation axion helioscope

I.G. Irastorza,^a F.T. Avignone,^b S. Caspi,^c J.M. Carmona,^a
T. Dafni,^a M. Davenport,^d A. Dudarev,^d G. Fanourakis,^e
E. Ferrer-Ribas,^f J. Galán,^{a,f} J.A. García,^a T. Gerasis,^e
I. Giomataris,^f H. Gómez,^a D.H.H. Hoffmann,^g F.J. Iguaz,^f
K. Jakovčić,^h M. Krčmar,^h B. Lakić,^h G. Luzón,^a M. Pivovarov,^j
T. Papaevangelou,^f G. Raffelt,^k J. Redondo,^k A. Rodríguez,^a
S. Russenschuck,^d J. Ruz,^d I. Shilon,^{d,i} H. Ten Kate,^d A. Tomás,^a
S. Troitsky,^l K. van Bibber,^m J.A. Villar,^a J. Vogel,^j L. Walckiers^d
and K. Zioutasⁿ

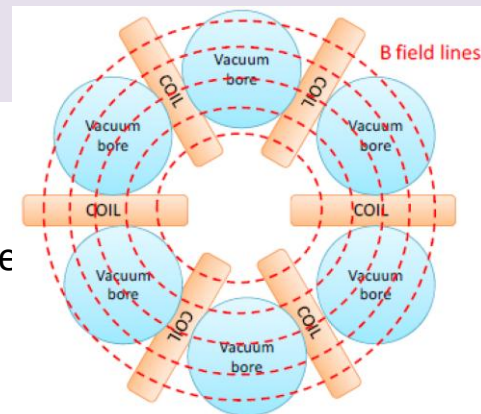


$$g_{\alpha\gamma\gamma} \propto \underbrace{(BL)^{1/2} \times A^{1/4}}_{\text{magnet}} \times \underbrace{b^{1/8}}_{\text{Detector}} \times \underbrace{t^{1/8}}_{\text{tracking system}}$$

IAXO

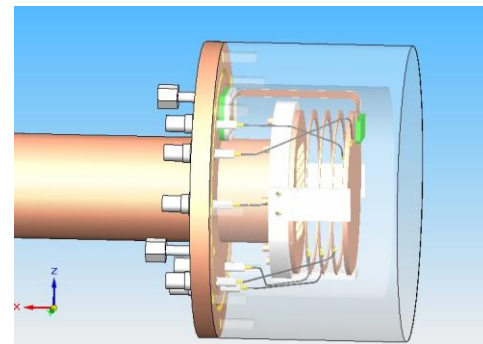
AIMANT DEDIE (participation du SACM souhaitée)

- Meilleure option configuration toroidal (8 bores)
- Ouverture beaucoup plus grande que CAST: $\sim 0.5\text{-}1\text{ m}$ per bore
- B moy $\sim 4\text{ T}$



X-RAY OPTICS

Thermally-formed glass substrates optics
Utilisés avec succès à NUSTAR
Utiliser l'infrastructure
Minimiser les risques et les coûts



ULTRA LOW BACKGROUND DETECTORS

But: $10^{-7}\text{ c/keV/s/cm}^2$ ou mieux

Appliquer ce que nous avons appris pendant les années CAST:
compacité, radiopureté, blindage

Réunion de Collaboration IAXO 21 Juin 2012 à Saclay
Intéressés faites le savoir !

Spinoffs

- Mise à part les résultats de physique pertinents, la R&D effectuée dans le cadre de CAST a permis:
 - Prouver que les détecteurs Micromegas sont compétitifs pour la recherche des événements rares (matière noire, double beta)
 - Développer la technique Microbulk
 - Développer les plans de lecture à 2 D
 - Imagerie X 2D
 - Fenêtres transparentes et étanches

ANR MIMAC,
Proposition de dans
NEXT

NTOF

FORFIRE, MIMAC

Demande ressources humaines

	2012	2013	2014
SEDI			
Stéphan Aune	5	5	
Yannis Giomataris	10	10	10
Esther Ferrer Ribas	70	70	70
Thomas Papaevangelou	35	35	35
Technitian	10	10	10
Antenne CERN		10	10
SIS			
Projeteur	10		
Ingenieur suivi	5	5	
If ANR and/or ITN			
PhD		30	100
Post-doc		50	100

ANR refusée
ITN en attente

→ demande thèse CFR/BDI

Table 3: Description of the requested manpower in FTE.

Demande ressources financières

Investissement

In k€	2012	2013	2014
Running costs	15	15–20	15–20
Upgrade of the Sunrise line for X-ray telescope	10	25	
New Microbulk detectors (3,4)	9	12	
Maintenance of crates, preamplifiers	5	5	5
R. & D windows	5	5	5
Maintenance costs at CERN	5	5	5
Fe source vacuum proof	2		
Muon veto			10
Total	36	52	25

(38 k€/year)

Table 1: Detail of the required funding for the manufacturing of the new line and operation of the Micromegas detectors.

Missions

In k€	2012	2013	2014
Data taking	3 months	4 months	5 months
Shifts	5	6	7
Characterisation		10	
Installation and commissioning		12	
Maintenance	3	3	3
Collaboration Meetings	5	5	5
Total	13	36	15

(21 k€/year)

Table 2: Detail of the required funding for travel.

Conclusions & Perspectives

CAST

Strictest experimental limit on axion searches for a wide m_a range entering the region most favoured by QCD models

Plans pour 2012-2014 (transition vers IAXO)

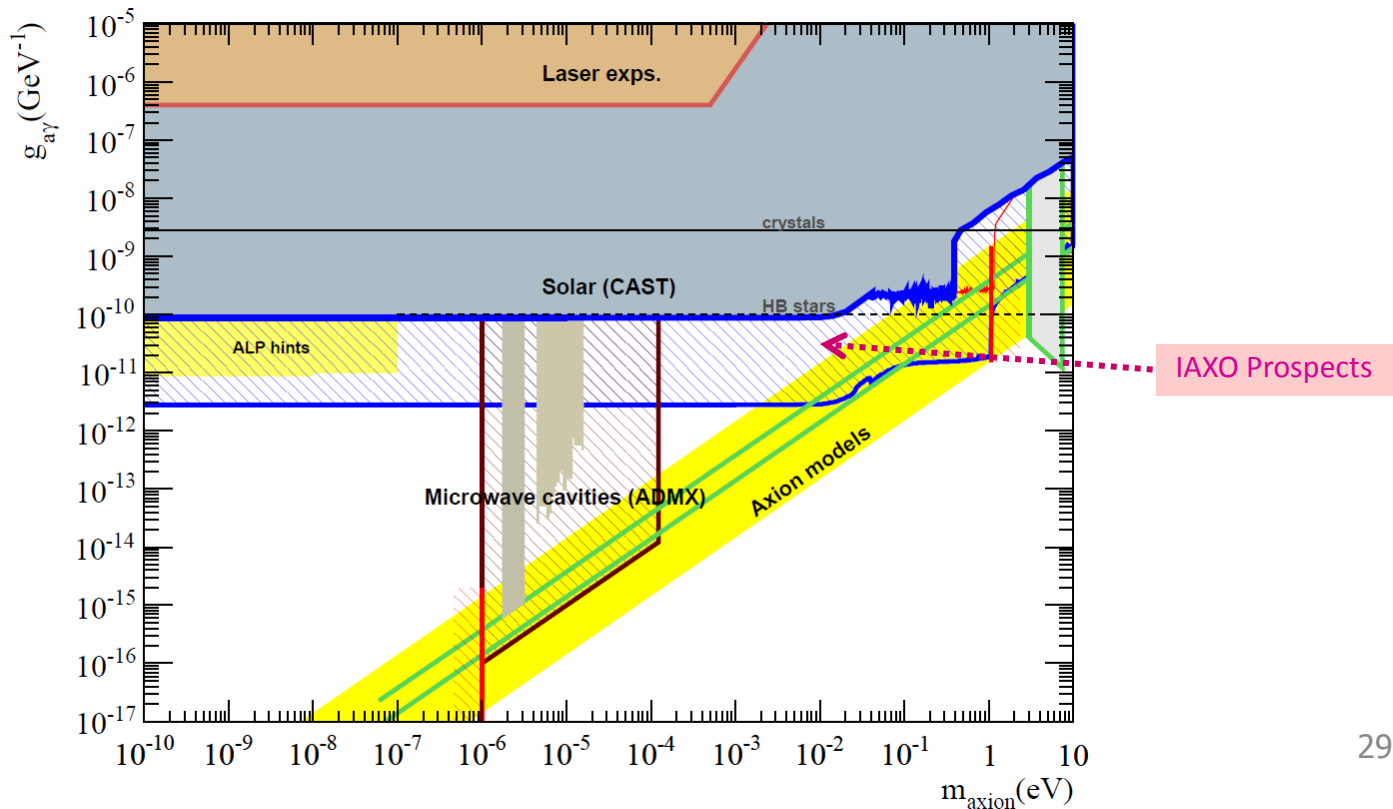
Améliorer la sensibilité à $m_a \approx 0.4$ eV
Revoir la phase vide avec des nouveaux détecteurs améliorés (bruit de fond et seuil en énergie) et un télescope → recherche des caméléons

IAOX: International Axion Observatory

Nouvelle génération d'hélioscope

Premiers résultats (JCAP 016) montrent des perspectives pour améliorer la sensibilité de CAST de 1-1.5 ordre de magnitude en $g_{a\gamma}$

LoI avant la fin de l'année



Conclusion:

The dark matter looks like axions

Pierre Sikivie, « Dark Matter Axions », Rencontres de Blois 2012
27 Mai-1^{er} Juin, <http://confs.obspm.fr/Blois2012/>