

GdL “Materia Oscura”

Conveners: M. Battaglieri, N. Fornengo, A. Ianni,
N.M. Mazziotta, G. Polesello, P. Ullio

What Next

Angelicum (Roma), 7-8 Aprile 2014

Programma della sessione:

- Introduzione alla discussione del GDL “Materia Oscura”
 - Contributo del GdL “Fisica Fondamentale” su assioni
 - Discussione generale
-
- Motivazione di questo intervento:
 - Porre in un’ottica generale il problema della DM (senza essere una rassegna esaustiva, pur con un breve punto della situazione)
 - Introdurre domande / temi di discussione per il (vicino)[lontano] futuro, da sviluppare e ampliare nella sessione di discussione e nel futuro di WN

Evidenza e opportunità

- Premessa** Vasta gamma di osservazioni cosmo+astro convergono sulla necessità della DM
- Obiezione** Sono tutte osservazioni di tipo gravitazionale
L'interpretazione DM si basa sulla validità della Relatività Generale
La soluzione potrebbe risiedere nella modifica della RG
- Contro obiezione** Al momento non paiono esistere formulazioni alternative altrettanto efficaci per il quadro osservativo *complessivo*
Esistono soluzioni ibride (es. MOND + DM leggera)
È Individuabile un elemento chiaro discriminante?
- Opportunità** DM come nuova particella elementare – Nuova fisica
Necessario un segnale non-gravitazionale

Linee guida per circoscrivere il problema?

Focalizzare corrisponde quasi sempre a promuovere un pregiudizio. Criteri adottati/ adottabili a supporto:

Meccanismo di
produzione
cosmologica

Produzione termica (simmetrica, asimmetrica)
Produzione non-termica
Produzione da condensato, gravitazionale, etc.

Motivazione da
problema aperto
nel MS

Problema della “naturalzza” [es. supersimmetria]
Violazione di CP nelle interazioni forti [assione]
Meccanismo per spiegare la massa del neutrino [neutrini sterili]

Impatto su
osservabili in
cosmologia e
astrofisica

Possibili discrepanze su piccole scale in Λ CDM (regime lineare; scale galattiche, sottogalattiche): es. DM tiepida, DM self-interacting, effetti quantistici su scala macroscopica; accoppiamenti non-standard con barioni e/o fotoni
Le simulazioni N-body cominciano a toccare queste casistiche

Linee guida per circoscrivere il problema?

Motivazione “estetica”

In analogia ad altri dati cosmologici o ad altri settori: es. DM asimmetrica per spiegare la vicinanza tra la densità di barioni e di DM

Motivazione “pragmatica”

In mancanza di evidenze incontrovertibili agli acceleratori, la DM potrebbe essere l'unica finestra di nuova fisica: es. modelli minimali

Motivazione “contingente”

A fronte di una “anomalia” (es. eccesso di flusso di radiazione elettromagnetica dal centro galattico o da fuori della Galassia), senza necessariamente fare riferimento a un modello di fisica fondamentale (WIMP generico, o generico candidato al eV o keV o GeV), eventualmente poi da inquadrare in un quadro più fondamentale

I candidati “storici” di DM (WIMP, assioni, neutrini sterili) hanno preso spunto da alcuni di questi punti, in particolare i primi due.

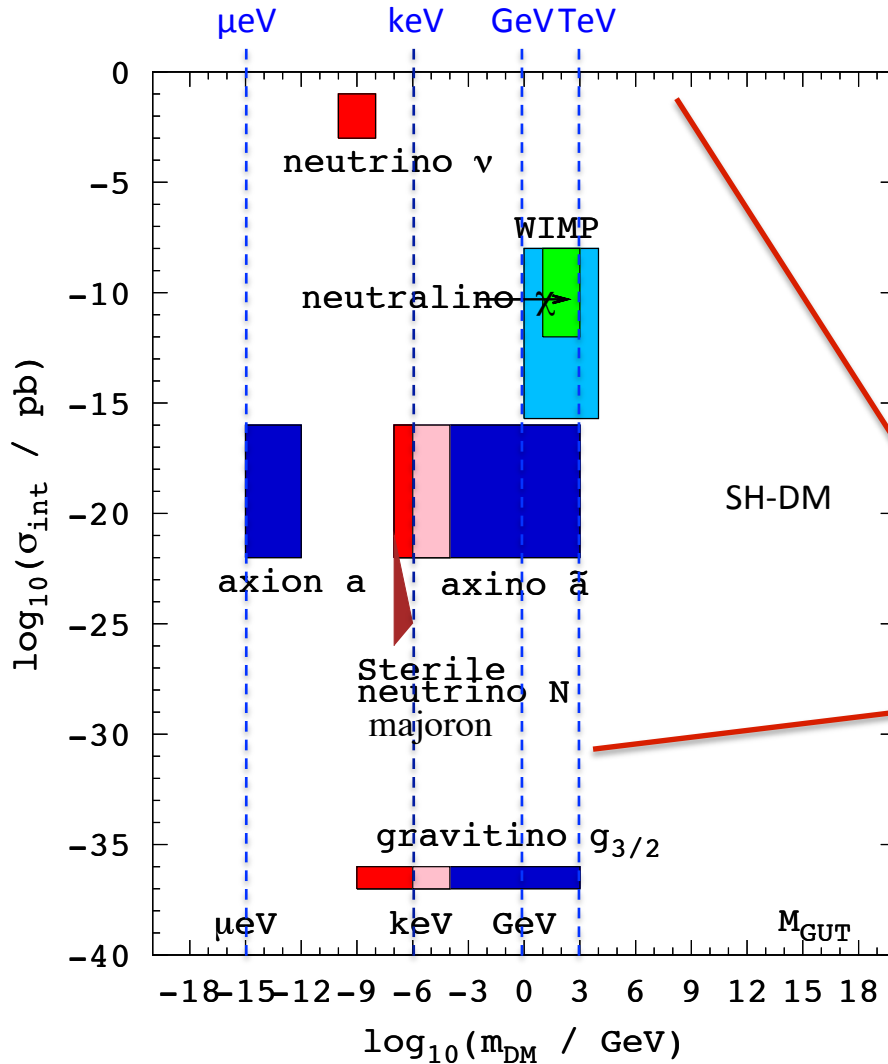
È tempo di cambiare questo approccio? Sistematizzare la ricerca ad ampio spettro?

Approccio multidisciplinare

- Non c'è una motivazione fondamentale (se non puramente “economica”) per cui la DM debba essere costituita da un'unica specie
- L'osservazione di nuova fisica agli acceleratori non è di per sé garanzia dell'avvenuta scoperta della DM:
 - Ci vuole un segnale astrofisico correlato/correlabile
 - Le proprietà (ricostruite, dedotte) devono essere compatibili con la cosmologia
- Viceversa, l'osservazione di un segnale astrofisico riconducibile alla natura particellare della DM non è detto che sia in grado, da sola, di dare sufficiente informazione per ricostruire compiutamente le proprietà della DM o del modello sottostante
- I due approcci (segnali astrofisici e segnali in laboratorio) sono complementari ed entrambi necessari: del resto, una soluzione chiara del problema della materia oscura probabilmente non verrà da un unico canale, e si formerà attraverso un insieme crescente di evidenze convergenti

Cosa cercare?

Interazione con la materia ordinaria



Massa della DM

“Forte”

Self-interacting

Technicolor DM

...

“Elettromagnetica”

Millicharged DM

Dipolo elettrico/magnetico

...

Debole

Gravitazionale

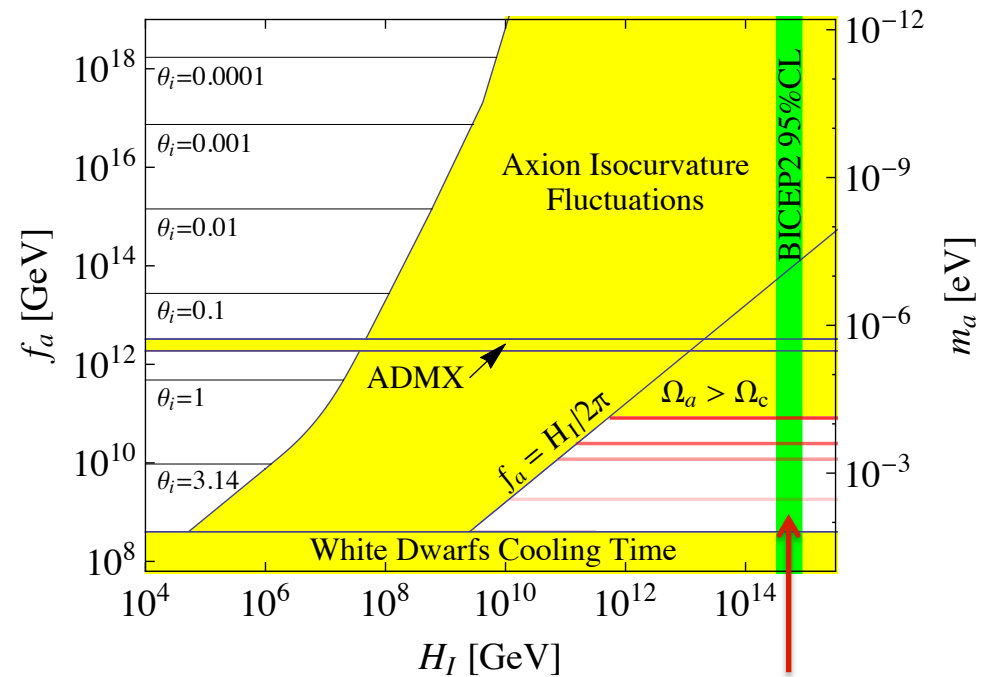
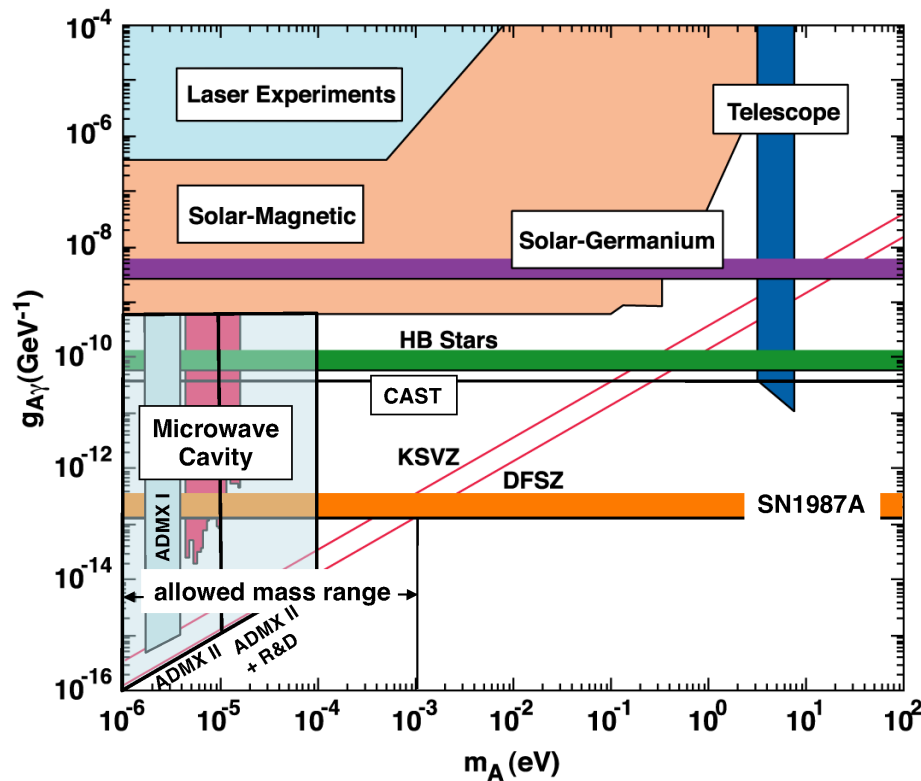
Canale di ricerca	Dipende da	Informazione su/da
Ricerca diretta	Densità locale di DM Distrib. locale di velocità	σ con materia ordinaria Massa della DM
Antiprotoni Antideuterio Positroni	Distrib. galattica della DM Trasporto galattico Trasporto nell'eliosfera	σ annich. (Γ decadim.) Massa della DM Canali di produzione
Banda gamma [prompt, IC] diffuso galattico diffuso extra-galattico target: CG, dwarf, galaxies, clusters, Sole	Distrib. (extra) galattica DM Sottostrutture	σ annich. (Γ decadim.) Massa della DM Canali di produzione
Banda X continuo righe	Distrib. (extra) galattica DM	σ annich. (Γ decadim.) Massa della DM
Banda radio [synchro da e+/e-] emissione galattica emission extra-galattica target: CG, dwarf, galaxies, clusters	Distrib. (extra) galattica DM Sottostrutture Trasporto per e+/e- Campi magnetici	σ annich. (Γ decadim.) Massa della DM Canali di produzione
Neutrini Sole/Terra emissione galattica emissione extra-galattica	Densità di DM	σ con materia ordinaria Massa della DM Canali di produzione
CMB	Distrib. "primordiale" di DM	σ annich. + massa della DM
Produzione "artificiale"	Caratteristiche del modello di nuova fisica	Interazioni Massa della DM

Alcune questioni aperte teoriche/osservative

- Segnali astrofisici:
 - La compressione teorica della distribuzione di DM su scala galattica non è ancora sufficientemente dettagliata per permettere predizioni teoriche “certe” per i segnali:
 - Centro galattico; sotto-strutture; satelliti; galassie nane; $f(v)$ locale
 - Effetto dei barioni
 - Lo studio della formazione delle strutture è in buona parte influenzato dal paradigma-WIMP: indagini verso paradigmi alternativi? (questo può avere impatto anche significativo sulle predizioni per i segnali)
 - Segnali deboli rispetto ai rispettivi fondi: importante sfruttare (ove possibile) “firme” specifiche dei segnali, ad es:
 - Correlazioni con i moti locali per la DD
 - Caratteristiche spettrali (es. riga gamma, riga X) per ID
 - Peculiarità favorevoli nel rapporto S/N (es. neutrini dal Sole; antiD a basse T)
 - Necessaria riduzione delle incertezze sulla determinazione dei fondi astrofisici: la capacità di interpretazione è ormai spesso dominata dall’errore teorico
- Segnali agli acceleratori: sono spesso accessibili se complementati da un modello teorico di riferimento (completo o effettivo)
 - *Quanto si possono estendere i modelli effettivi nell’interpretazione delle osservazioni?*
 - *Quanti e quali “loopholes” rischiano di non essere intercettabili nelle attuali analisi?*

Assione

- Candidato con forte motivazione particellare
- Meccanismo di produzione cosmologica (misalignment)
- Possibile formazione di condensato Bose-Einstein?



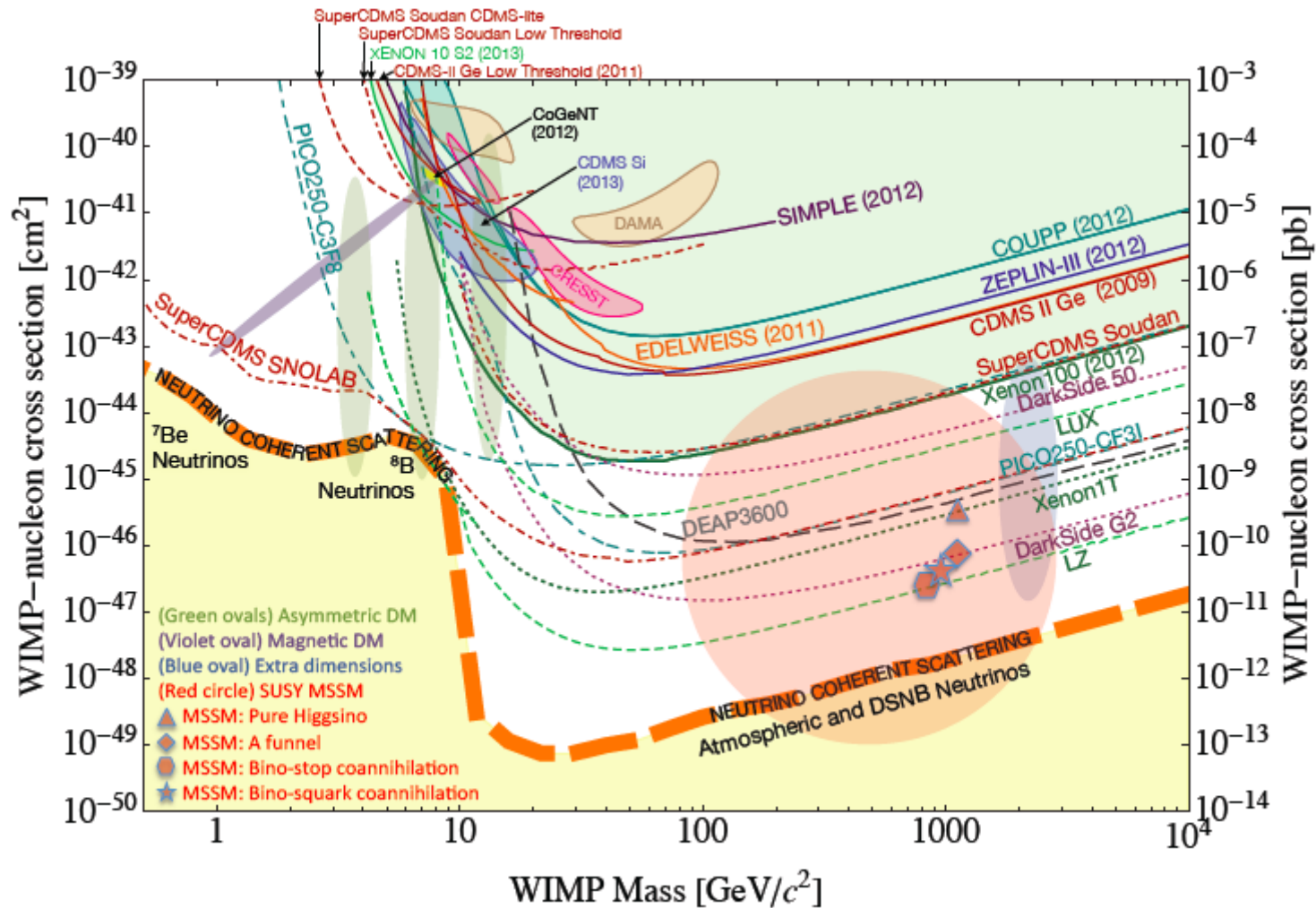
Zona permessa dopo BICEP2

- Nuova proposta di testare l'interazione assione-elettrone con magnetometri ad alta frequenza (v. contributo del GdL "Fisica Fondamentale")

Ricerca diretta

- Il segnale è rappresentato dal deposito di energia al **nucleo** (rinculo) o agli **elettroni** del rivelatore
- Il segnale può essere correlato ai moti locali della Terra:
 - **rotazione galattica**: **direzionalità** del rinculo nucleare
 - **moto di rivoluzione**: **modulazione annuale** del segnale
 - **moto di rotazione**: **modulazione diurna**
- L'interpretazione dei risultati in termini di proprietà della DM dipende da:
 - **Tipo di interazione** (di contatto, long-range, dipolo e/m, etc. su nucleo o interazione su elettroni)
 - **Modello galattico**
 - Caratteristiche del **detector** e della sua risposta a un segnale

Ricerche Dirette: esempio per WIMP con interazione scalare e alone galattico "standard"

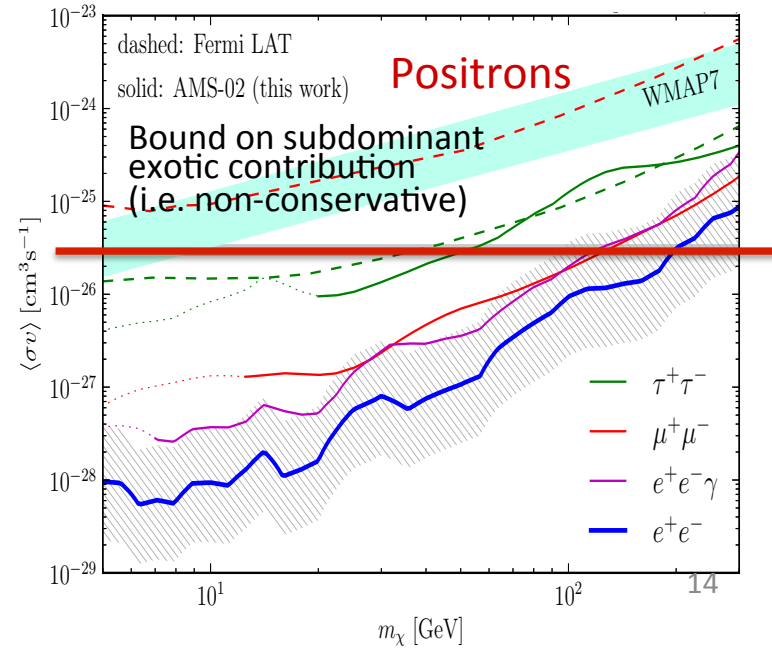
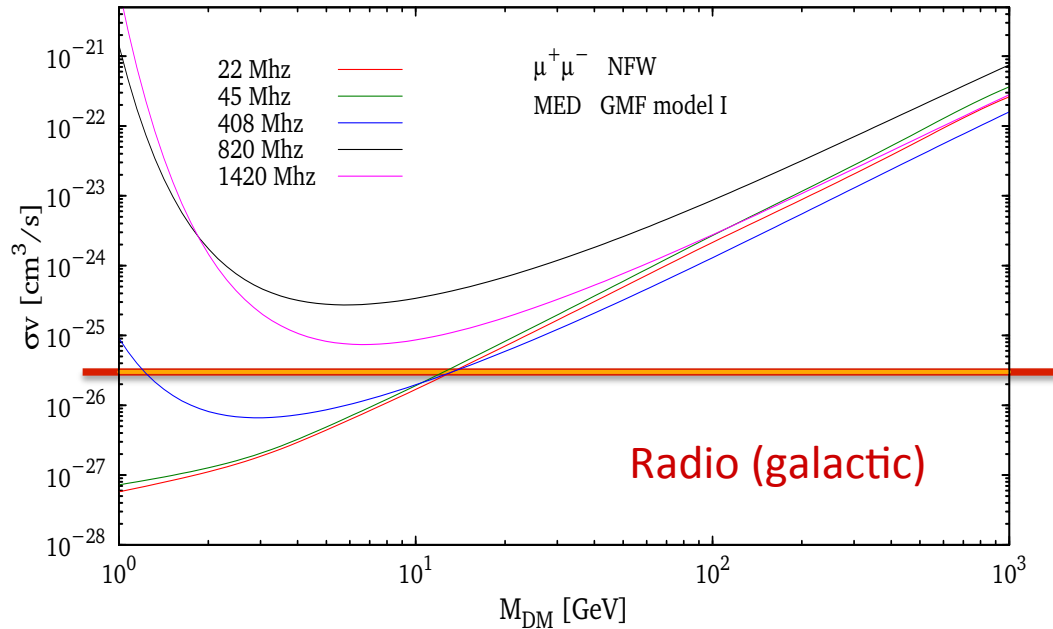
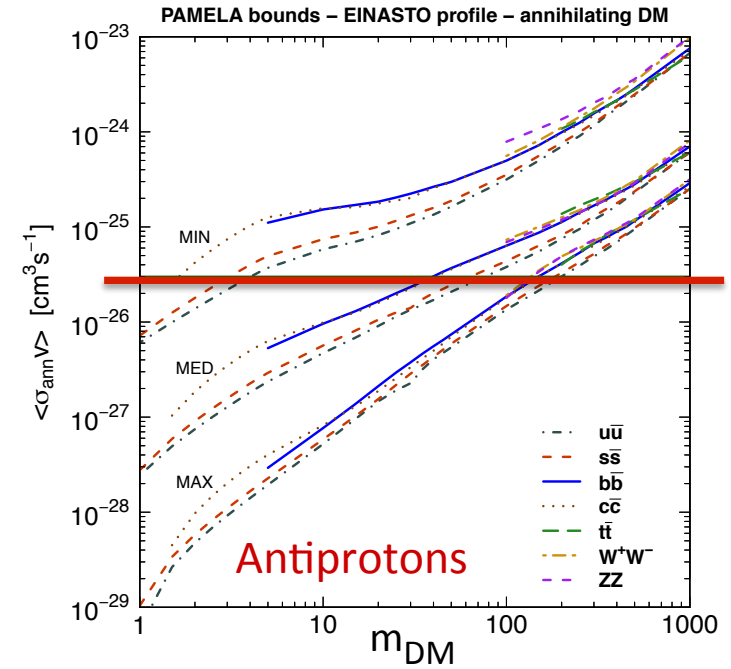
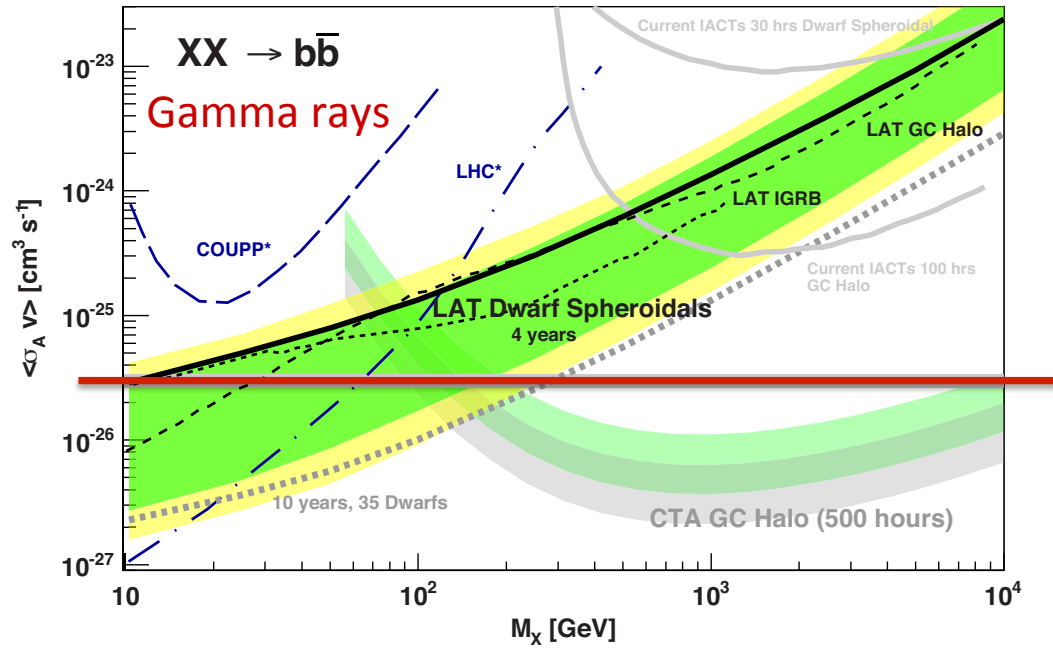


Sensitività riportate nell'ipotesi di fondo nullo

Ricerche dirette: sviluppi

- Dal punto di vista teorico, necessari significativi avanzamenti su modellizzazione galattica: **proprietà locali della distribuzione di velocità della DM**
- Segnature (difficili, ma interessanti) a cui non si è ancora avuto accesso:
 - Modulazione diurna
 - – Direzionalità
- Candidati di DM pesanti:
 - – Sviluppo e verifica di fattibilità di tecniche atte a raggiungere la “ultimate sensitivity”
 - Nella regione multiTeV, la DD e la ID potrebbero, almeno per un certo tempo, essere l’unica finestra osservativa post-LHC
- Candidati di DM leggeri:
 - Rinculi a energie molto basse: riduzione della soglia e calibrazioni in soglia
- Ampliamento del focus:
 - Guardare in modo più coerente e sistematico a meccanismi di **interazione non “canonici”** (intero set di operatori efficaci; interazioni a lungo raggio; interazioni via momento di dipolo elettrico o magnetico) e **all’interazione su elettroni**

Esempi di limiti da ricerche indirette (WIMP)



- Messaggi della trasparenza precedente:
 - La sensibilità attuale comincia ad avvicinare la sezione d’urto “termica”
 - Ogni canale presenta incertezze (anche molto significative) di origine astrofisica, sulle quali è fondamentale progredire, in particolare sulla modellizzazione dei fondi
 - Raffinamento dei modelli teorici sui dati di raggi cosmici nuovi/in arrivo nel range subGeV – TeV (es. AMS02)
 - Compatibilità con i dati radio?
 - Misure dedicate delle sezioni d’urto pp, pN e NN alle energie rilevanti per i raggi cosmici di “bassa” energia?
 -

Ricerche indirette: sviluppi

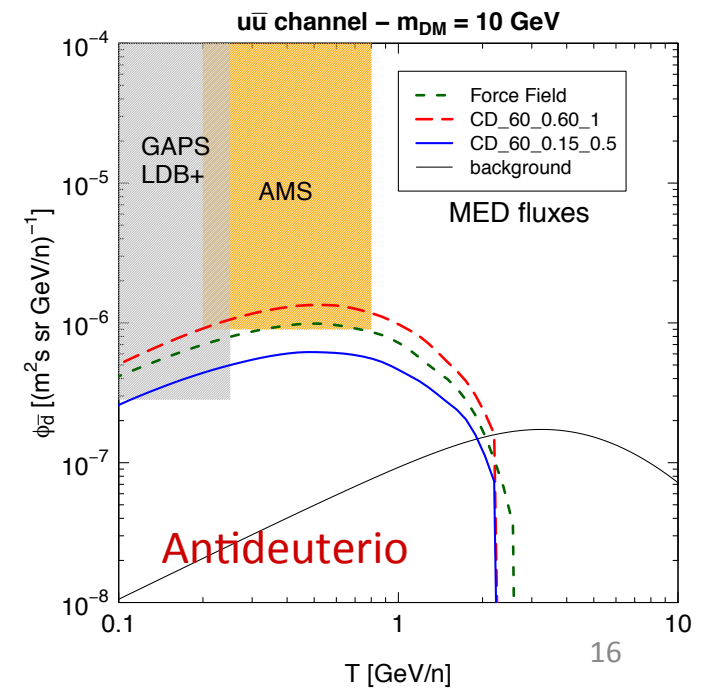
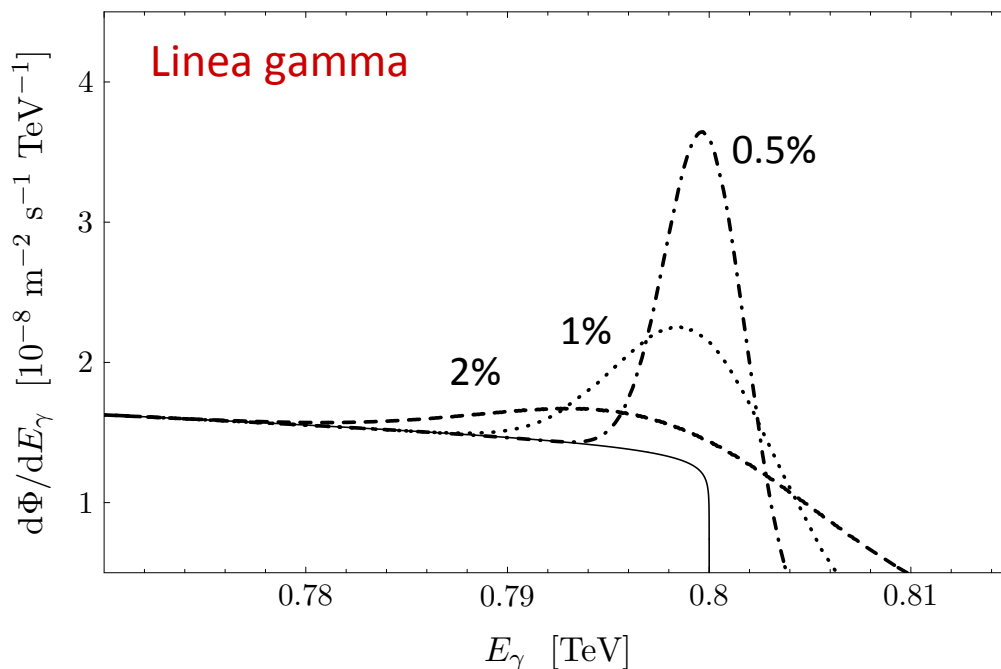
- Forse è giunto il momento di pensare a esperimenti più *dedicati* alla ricerca di signature specifiche di DM (e non general purpose), cercando di sfruttare specifiche caratteristiche dei segnali?
- Esempi:
 - Righe spettrali nella banda X e gamma
 - AntiD a basse energie cinetiche
 - Neutrini di “alta” energia dal Sole

[per gamma: fondo astro non probabile]

[rapporto S/N favorevole]

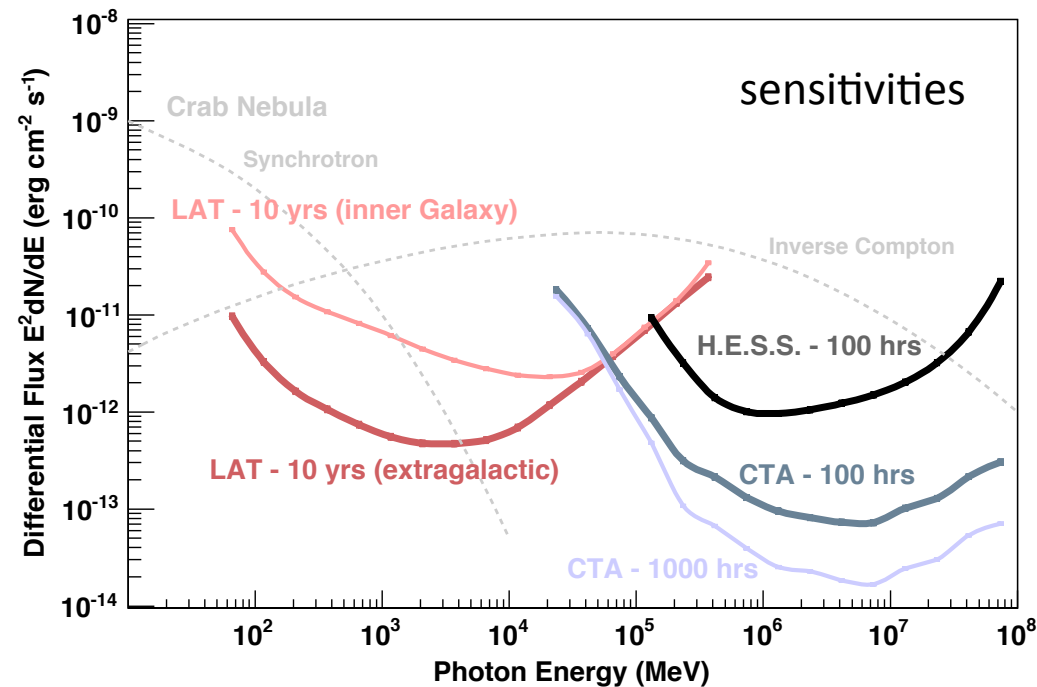
[correlazione con posizione Sole]

[nu tau dall'alto?]



Ricerche indirette: sviluppi

- Definizione di opportune *strategie* osservative (e di analisi) pensate per la DM?
 - Raggi-gamma e radio: *target* = {centro galattico, dwarf galaxies, ammassi di galassie}
 - Strategie di osservazione da Terra e dallo spazio



- Dal punto di vista teorico, necessari avanzamenti su:
 - Modellizzazione galattica, compreso sviluppo nella direzione di paradigmi non canonici: DM self interagente, interagente con i barioni, dark disk, DM non-WIMP, etc.

Alcuni possibili approcci meno “canonici”

- **Enorme mole di dati astrofisici/cosmologi (presenti, in arrivo, previsti)**
 - **Radio** (*SKA+precursori, Lofar, ...*), **X, gamma** (*Fermi, DAMPE, CTA, G400, HERD,...*)
 - Dettagliate distribuzioni **LSS**: cataloghi, weak lensing (*DES, Euclid,...*)
 - Dettagliate misure del **CMB** (*Planck, PRISM*)
- **Questo puo` essere sfruttato per nuove di ricerche di DM particellare**
 - Distorsioni del CMB (**effetto SZ**) in ammassi di galassie, dovuto a elettroni non-termici prodotti da annichilazione (o decadimento) di DM
 - **DM-neutrino interaction**, effetto su CMB, Ly-alpha e LSS
 - **Ly-alpha**: ad es. studio di warm DM (neutrini sterili al keV, gravitini leggeri)
 - Effetti dell'annichilazione della DM nelle “dark ages”: es. su **emissione a 21-cm**
 - – **Anisotropie**: auto- e cross-correlazioni dello spettro di potenza angolare (C_l) di segnali elettromagnetici
 - – **Anisotropie**: cross-correlazione dei C_l delle mappe di segnali elettromagnetici (**gamma, radio**) con le osservabili di weak-lensing (**shear**)

Instaurare / rafforzare collaborazioni con le comunità di settore su progetti dedicati?

Ricerche agli acceleratori

- Si possono evidenziare due cammini complementari:
 - – WIMP al GeV-TeV: collisionatori alta energia (attualmente LHC)
 - – DM (o mediatore) al keV-MeV-GeV: esperimenti a bersaglio fisso
- Il primo rappresenta il canale canonico per la DM nell'intervallo di massa GeV-TeV
- Il secondo permette di ricercare stati molto più leggeri (es.: dark photons) che possono svolgere un duplice ruolo:
 - Essere direttamente candidati di DM
 - Rappresentare mediatori leggeri per le interazioni della DM (con drastiche implicazioni sia per la DD che per le ID)

Collisionatori ad alta energia

- I WIMP non interagiscono in rivelatori, necessario produrle insieme ad altre particelle per l'osservazione:
 - WIMP DM osservata al termine della catena di decadimento di nuove particelle più pesanti (esempio: SUSY LSP)
 - – WIMP DM prodotta in associazione con particelle SM radiate dai partoni di stato iniziale: mono-X searches (esempio canonico: mono-Jet o fotone + Emiss)
- Le strategie dipendono dallo specifico modello di nuova fisica
(v. discussione GdL “BSM”)

Collisionatori ad alta energia

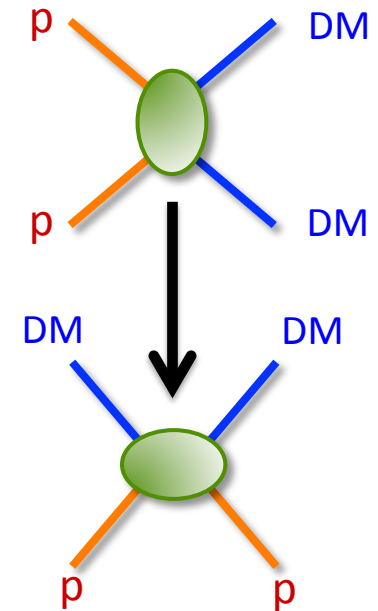
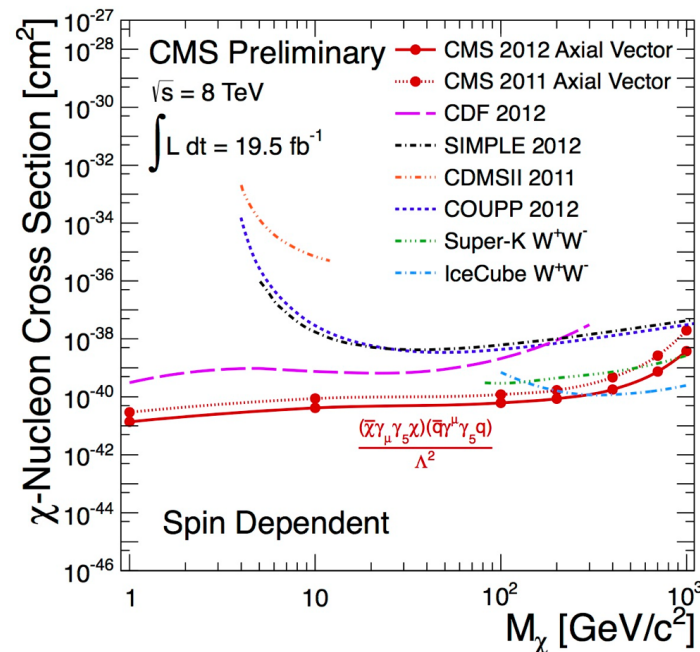
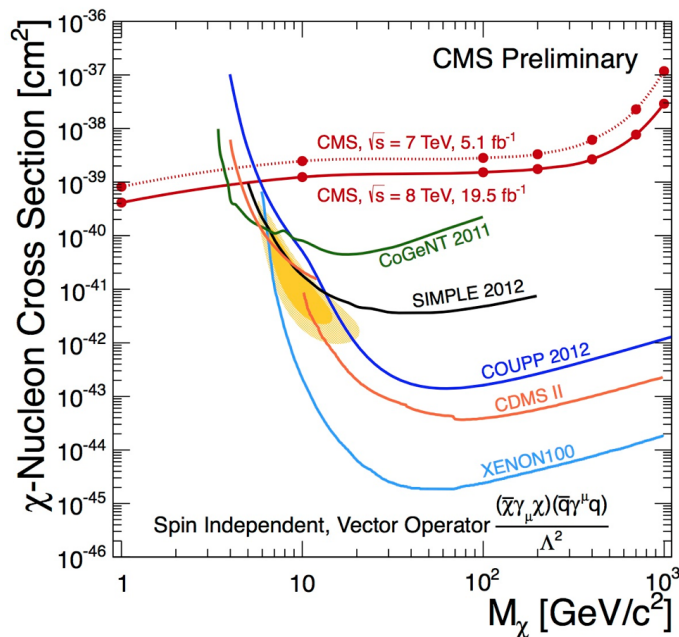
- Un esempio: ricerche mono-X e connessione con la DD

In questo modello, i risultati sono interpretabili in termini della sezione d'urto di scattering della DD

Metodo sensibile anche a masse della DM tra qualche GeV e qualche decina di GeV

+ : può diventare competitivo con la DD

- : la modellistica EFT su cui si basa è al limite di validità per le energie di LHC (per interpretazione corretta è necessario introdurre la massa del mediatore)



Collisionatori ad alta energia

- Alcune questioni rilevanti:
 - Uso di modelli SUSY “effettivi” a parametri ridotti (es. contact interactions, pMSSM, ...) è **sufficientemente generale** a cogliere un adeguato e ampio spettro di possibilità?
 - – E' possibile coprire i “**loophole**” di questi modelli (es. DM fortemente degenere con altri stati di nuova fisica)?
 - Come coprire bene anche **WIMP di massa “bassa”**?
 - Pur restando nei modelli SUSY, importante studiare anche **scenari non-standard**, come ad es. sneutrino LSP

Esperimenti a bersaglio fisso

- Sono in via di sviluppo/ideazione nuovi esperimenti per testare stati più leggeri della scala del GeV

- – Modelli con neutrini sterili (SHIP@CERN/SPS)
- – Dark photons (PADME, BDEX@Jlab)

- Recente interesse con:

- Esperimenti esistenti

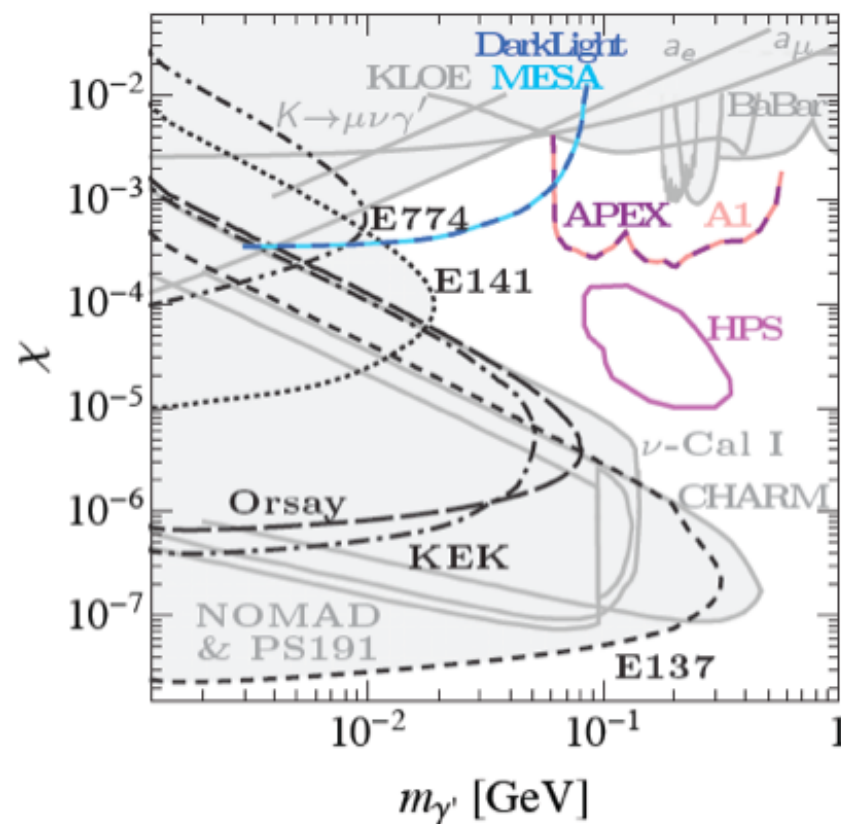
- Produzione diretta (ATLAS, ALICE)
- Decadimento mesoni (Mainz, Jlab Babar, Kloe)

- Nuovi esperimenti (approvati)

- Jlab: HPS, APEX, DarkLight
- Mainz

- Nuovi esperimenti (proposti)

- DAFNE (PADME)
- CERN/SPS
- BDEX



Cosa possiamo aspettarci?

- In caso di scoperta di nuova fisica: il passo successivo è cercare di circoscriverne il più possibile il modello (con ricaduta importante sulle ricerche astrofisiche di DM)
- Lo specifico mutuo impatto è model-dependent e non può essere previsto ora in tutta generalità
- Importante mantenere un approccio ad ampio spettro: modelli non minimali, non supersimmetrici, modello con DM diversa dal neutralino (es. sneutrino), analisi non ovvie a livello di trigger e di analisi dati
- Discorso analogo per esperimenti a bersaglio fisso, con la specifica differenza per la DM di spostare il focus su masse inferiori o meccanismi di interazione alternativi
- Nel caso di non scoperta di nuova fisica con DM entro qualche TeV, questo potrebbe significare che il paradigma WIMP va cambiato, ma questa non è una conseguenza necessaria in generale
- *Se la DM dovesse essere un WIMP multiTeV: quale sviluppo è più promettente per investigarlo (così da complementare le ricerche di segnali astrofisici, es DD, CTA, Km3Net)?*

Attuale organizzazione del GdL “DM”

- **Mailing list:** whatsnextdm@lists.infn.it
 - Registrazione: <https://lists.infn.it/sympa/info/whatsnextdm> (160 registrati)
 - Si può (oltre che ricevere i mail) anche entrare e leggere/scrivere dall'interno
 - La pagina della lista è aperta, per cui tutti possono leggere:
 - I messaggi sono alla sezione "Archivio"
 - Alla sezione "Documenti Condivisi" possiamo distribuire documenti
- **Pagina wiki:** http://wiki.ge.infn.it/wn-darkmatter/index.php/Main_Page
- **Documento di sintesi:** ottenibile sulle pagine della lista e della wiki
- **Meetings SeeVogh**

What Next DM GDL SeeVogh Meeting 1: Ricerca Diretta

<https://agenda.infn.it/conferenceDisplay.py?confId=7746>

- G. CARUGNO – High Frequency Magnetometers To Detect Dark Matter Axions
- G. FIORILLO – The DarkSide Program
- G. DE LELLIS – NEWS: Nuclear Emulsion WIMP search
- P. BELLI – DAMA/LIBRA prospects
- G. SARTORELLI – The XENON Program

What Next DM GDL SeeVogh Meeting 2: Ricerca Indiretta

<https://agenda.infn.it/conferenceDisplay.py?confId=7747>

- M. DORO – IACTS and Dark Matter Searches
- N. MASI – Antideuterons and antiprotons from Dark Matter
- M. REGIS – Correlations in the anisotropic Dark Matter sky

What Next DM GDL SeeVogh Meeting 3: Ricerca agli acceleratori + Altro

<https://agenda.infn.it/conferenceDisplay.py?confId=7748>

- T. LARI – SUSY searches at LHC and Dark Matter
- A. COCCARO – DM e ricerca di particelle log-lived ad LHC
- W. BONIVENTO – SHIP: beam-dump al CERN-SPS per hidden particles
- M. RAGGI – PADME ai Laboratori Nazionali di Frascati (dark photons)
- A. CELENTANO – Dark Matter searches at Jefferson Labs
- R. MUSSA – Dark searches at (Super)B factories

Alcuni collegamenti e sinergie

- GDL "Neutrini"
 - neutrini sterili al keV
- GDL "Radiazione Cosmica"
 - Componenti astrofisiche standard rappresentano i **fondi** per i segnali di DM e uno strumento fondamentale per **affinare le predizioni** teoriche sui segnali stessi
- GDL "Fisica Fondamentale"
 - assioni, axion-like particles
- GDL "Oltre il Modello Standard"
 - la **collocazione** del candidato di DM risiede in un modello di nuova fisica
 - **mutuo impatto** nell'identificare il modello di nuova fisica
- GDL "Nuove Direzioni"
 - esplorazioni in ambito cosmologico (CMB, lensing, LSS): possono **fornire indicazioni sulle proprietà** del candidato di DM
 - **correlazione** di osservabili cosmologiche e segnali multifrequenza di DM: potenzialità nuove nella ricerca di un segnale particellare di DM

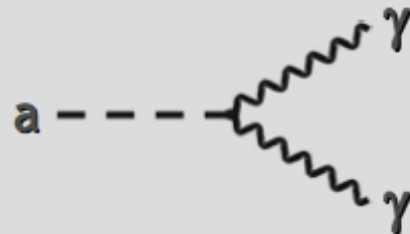
Axion Physics in a Nut Shell

Particle-Physics Motivation

CP conservation in QCD by Peccei-Quinn mechanism

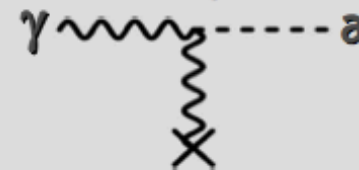
→ Axions $a \sim \pi^0$
 $m_\pi f_\pi \approx m_a f_a$

For $f_a \gg f_\pi$ axions are “invisible” and very light



Solar and Stellar Axions

Axions thermally produced in stars, e.g. by Primakoff production



- Limits from avoiding excessive energy drain
- Search for solar axions (CAST)

Cosmology

In spite of small mass, axions are born **non-relativistically** (“non-thermal relics”)

→ Cold dark matter candidate
 $m_a \sim 1-1000 \mu\text{eV}$



Search for Axion Dark Matter

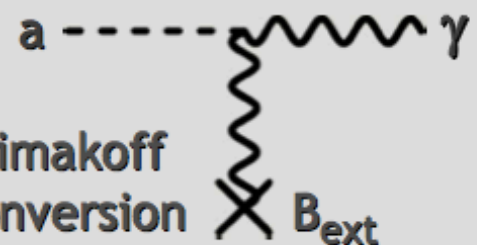
N



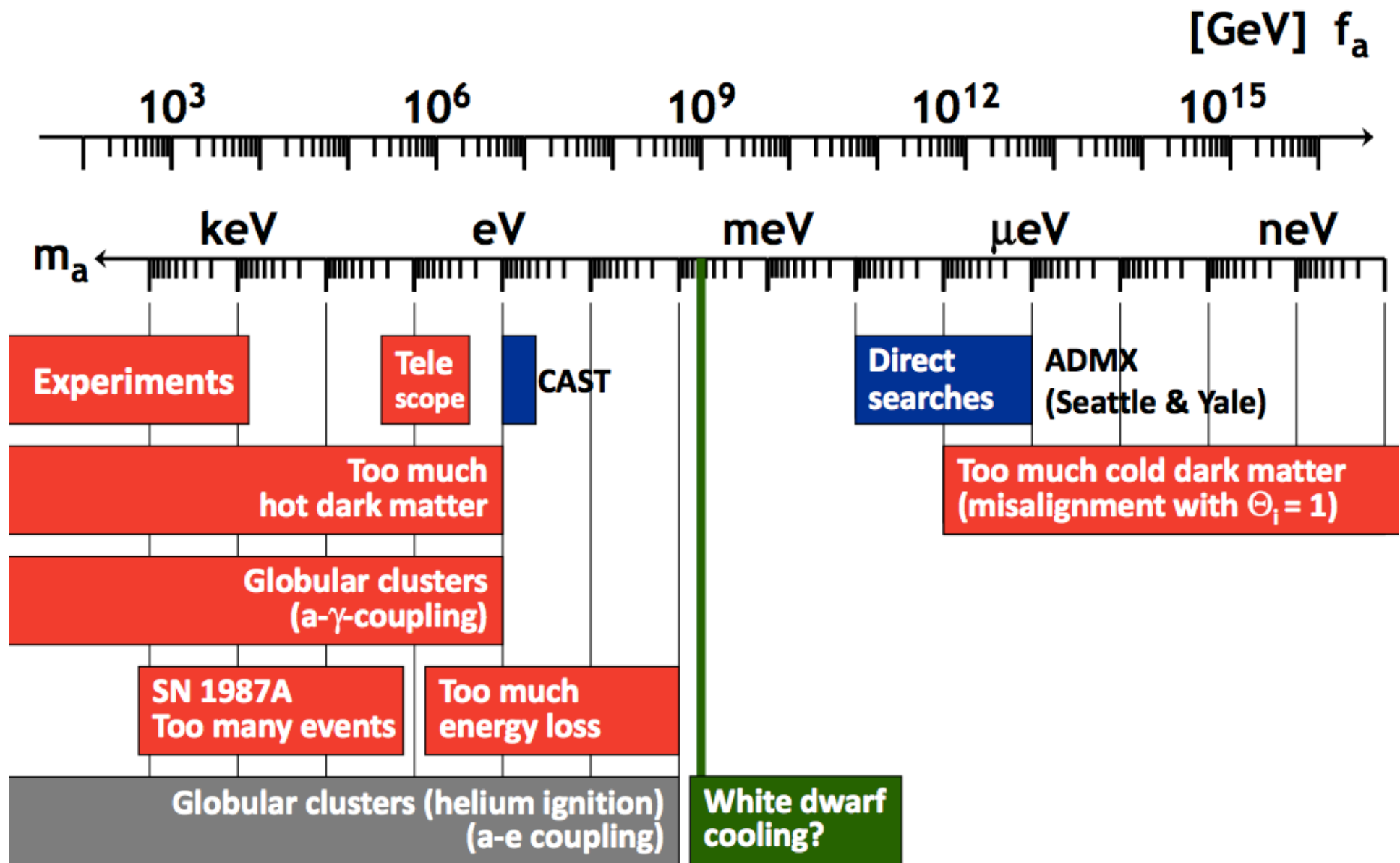
S

Microwave resonator
 (1 GHz = 4 μeV)

Primakoff conversion $a \rightarrow \gamma$ B_{ext}



Axion Bounds and Searches



Search for Galactic Axions (Cold Dark Matter)

DM axions
Velocities in galaxy
Energies therefore

$$m_a = 10\text{-}3000 \mu\text{eV}$$

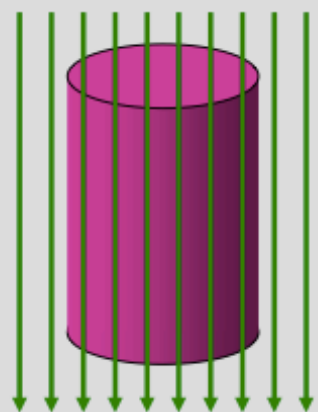
$$v_a \approx 10^{-3} c$$

$$E_a \approx (1 \pm 10^{-6}) m_a$$



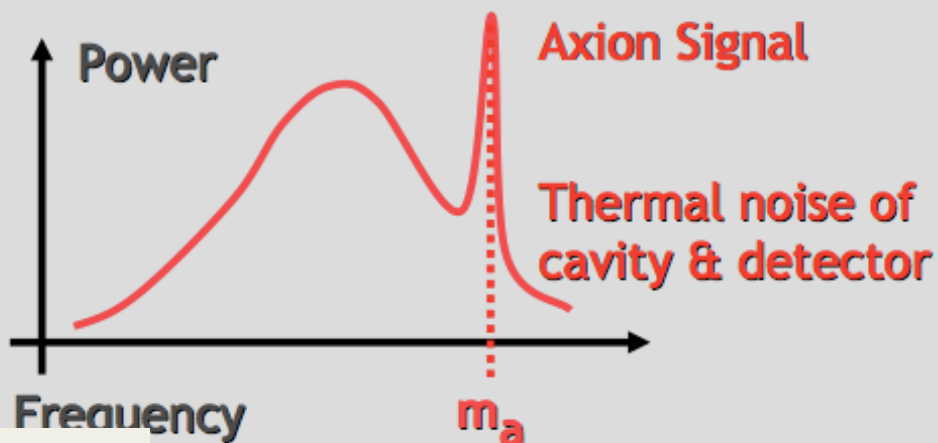
Microwave Energies
(1 GHz \approx 4 μeV)

Axion Haloscope (Sikivie 1983)



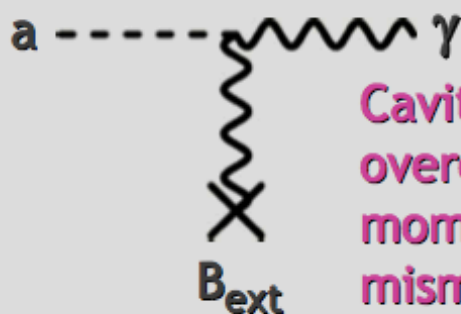
$B_{\text{ext}} \approx 8$ Tesla

Microwave Resonator
 $Q \approx 10^5$



ADMX (USA)

Primakoff Conversion



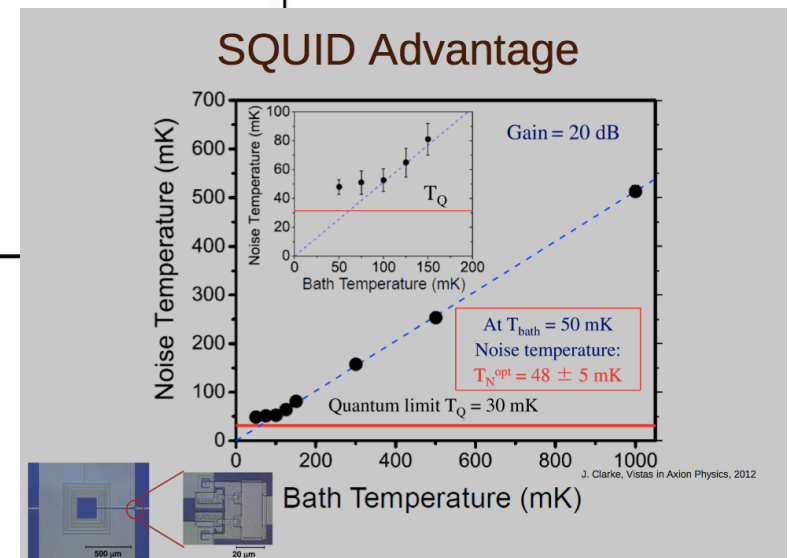
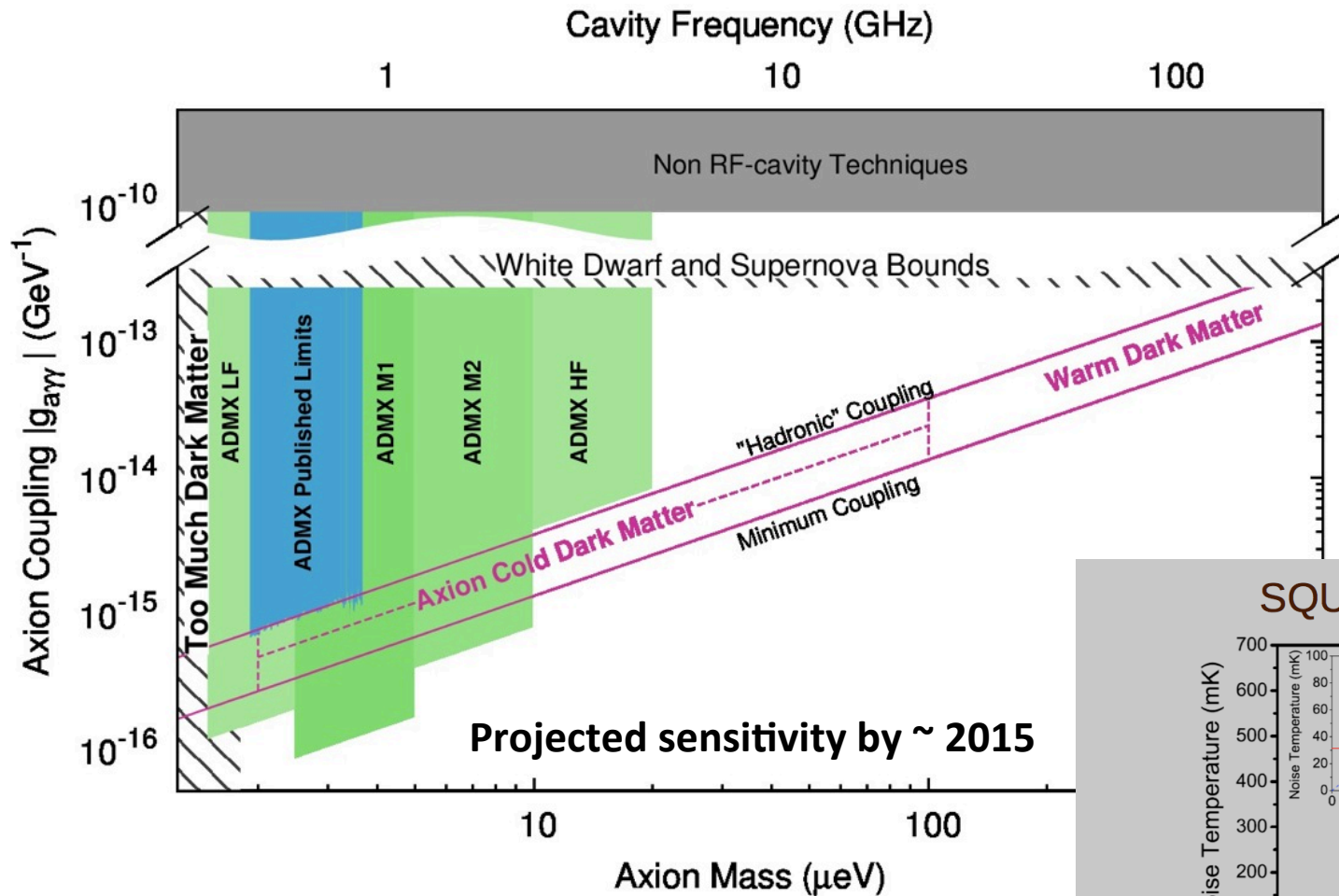
Cavity
overcomes
momentum
mismatch

Power of galactic axion signal

$$4 \times 10^{-21} \text{W} \frac{V}{0.22 \text{m}^3} \left(\frac{B}{8.5 \text{T}} \right)^2 \frac{Q}{10^5}$$

$$\times \left(\frac{m_a}{2\pi \text{GHz}} \right) \left(\frac{\rho_a}{5 \times 10^{-25} \text{g/cm}^3} \right)$$

ADMX achieved and projected sensitivity



Search for galactic axion – new proposal

Exploit the axion-electron coupling
(only DFSZ axion)

$$L_{ae} = \frac{C_e}{2f_a} \bar{\psi}_e \gamma^\mu \gamma_5 \psi_e \partial_\mu a$$

$$C_e \leq 10^{-13} \text{ GeV}^{-1}$$

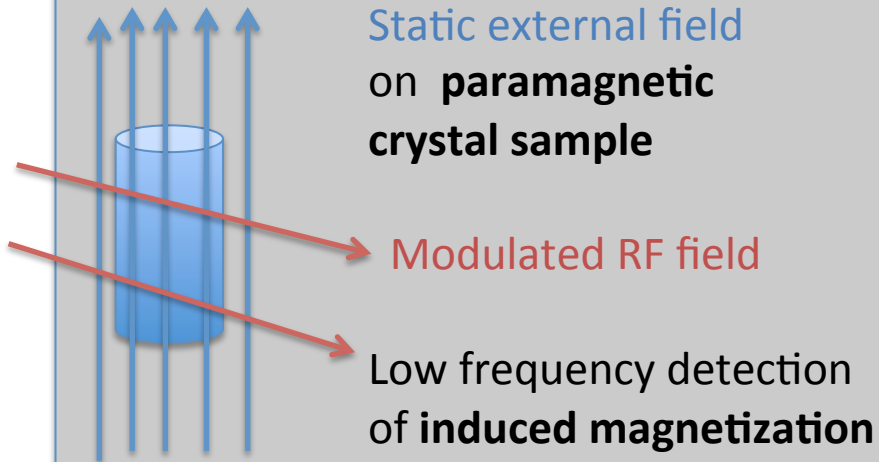
$$H_a = -\vec{S} \cdot \left[\frac{g_p}{m_e} \nabla a \right]$$

Axion wind equivalent to effective magnetic field

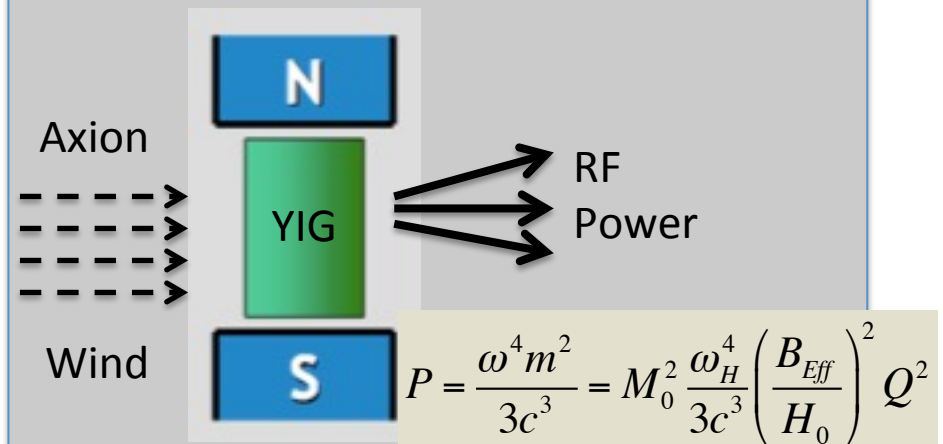
$$B_{\text{Eff}} = \frac{2g_p}{e} \frac{g_a}{g_J} \nabla_z a$$

$$B_{\text{Eff}} \approx \left(\frac{m_a}{10^{-4} \text{ eV}} \right) 9.4 \times 10^{-23} \text{ T}$$

Detection using EPR magnetometry



- Excess Noise in Magnetized Crystal
- Zeeman Transition in Optical Crystals



For both schemes annual modulation expected

Key components/techniques for new proposal

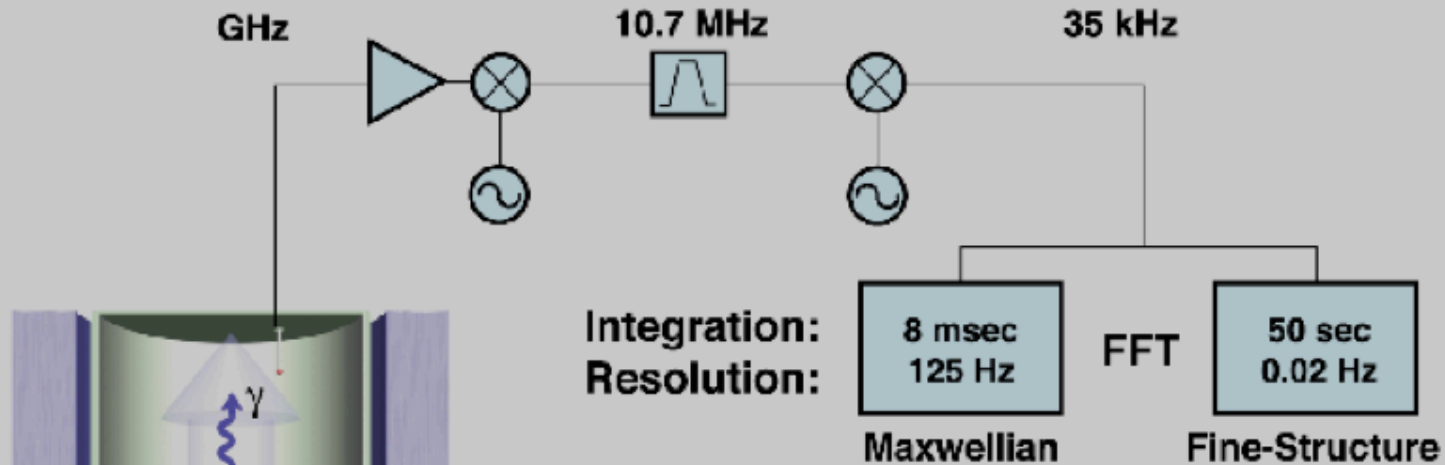
Known technologies - **already present within INFN:**

- High Frequency - High Q Microwave Cavity: Open / Closed
- High Magnetic Field (1 – 20 T)
- Cryogenics @ 50 milliKelvin

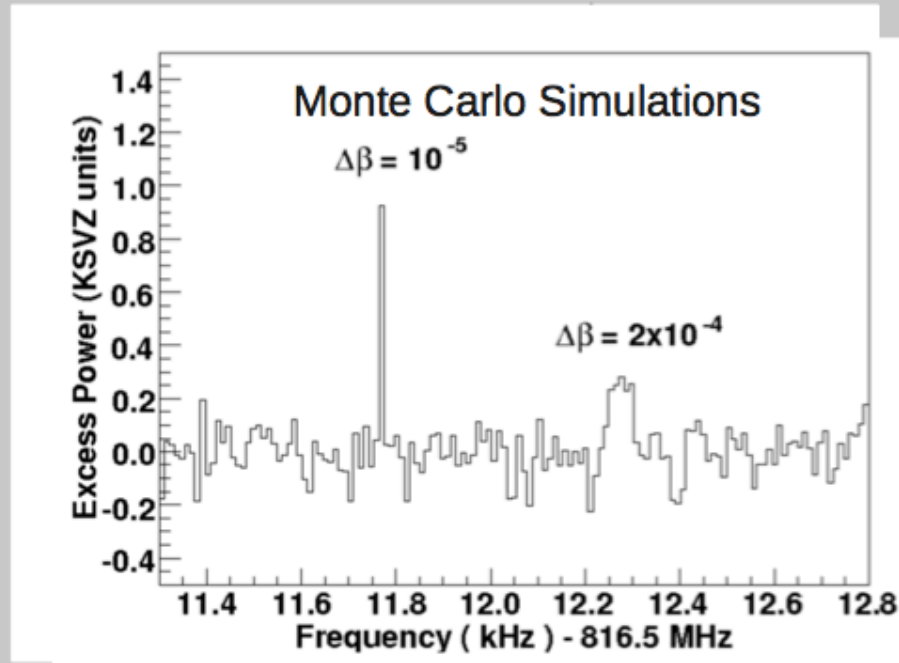
To be developed / studied – **mostly with INFN Expertise**

- Materials with High Susceptivity and Low Dissipation
- Low Noise (Quantum limited) RF Receiver: Linear Amplifiers / Quantum Counter
- Optical Spectroscopy on Paramagnetic Single Crystals

How ADMX Works



Axions, stimulated by a magnetic field, decay into microwave photons which resonate in the cooled cavity and are amplified and read out



The Need for Speed

Time to scan axion mass range a 2010 speed: ~100 years

$$\text{Scan Speed} \quad \frac{df}{dt} \propto \frac{1}{T_{\text{noise}}^2}$$

Want to run faster?

Run colder!

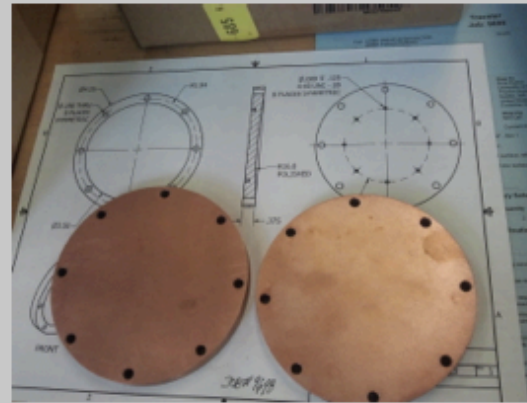
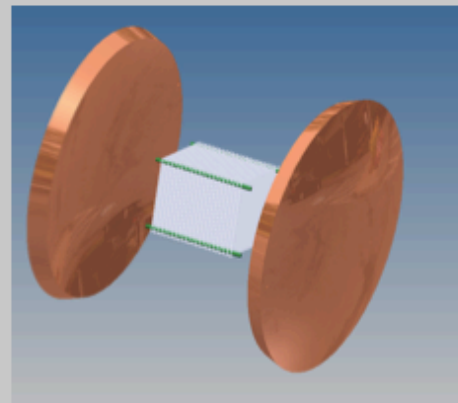
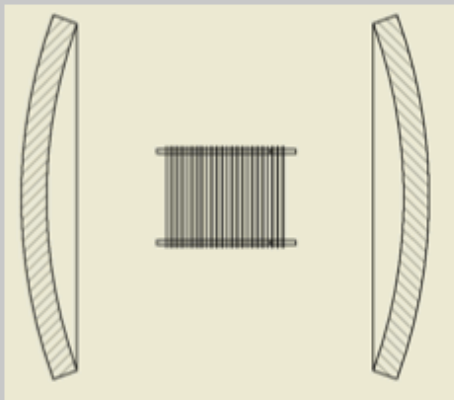
Noise comes from amplifiers and physical temperature

$$T_{\text{noise}} = T_{\text{amplifier}} + T_{\text{physical}}$$

“Hybrid” superconducting cavities may increase Q ,
and thus increase signal power



Open resonators may be the key to explore axion masses up to meV



Alcuni temi per la discussione odierna

- **Assioni e axion-like particles**
 - Nuove tecniche alternative per studiare interazione assione-elettrone
- **Ricerca diretta**
 - Direzionalità (emulsioni nucleari; cristalli anisotropi)
 - Discriminazione fondi e ottimizzazione tecniche di misura per sensibilità estreme
- **Ricerche indirette**
 - Strategie di osservazione (centro galattico, dwarf, ammassi | spazio/terra)
 - Range energetici ottimali (ad es.: \bar{D} a subGeV e/o 100sGeV)
 - Anisotropie e cross-correlazioni multifrequenza/gravitational-tracers
 - Connessioni con la fisica del CMB
- **Ricerche agli acceleratori**
 - Potenzialità delle ricerche mono-X – possibili estensioni?
 - Focus su cinematica a masse basse a LHC
 - Complementarità tra LHC a beam-dump experiments per ampio range di massa