Alla ricerca della luce oscura

Fabio Bossi
INFN LNF

Frascati 18 Novembre 2015

Il seminario di oggi vertera' su un campo di indagine che si e' aperto da meno di dieci anni e che ha visto protagonista un inizialmente ristretto gruppo di laboratori e team di ricerca che si e' andato man mano allargando nel corso del tempo

Il nostro laboratorio e' stato tra i pionieri di queste ricerche e gioca tuttora un ruolo preminente in esse

Essendo un campo nuovo e «di frontiera» sono molte piu' le ipotesi da verificare e le domande ancora aperte che non le certezze

E' possibile dunque che alcune (o molte) delle cose che vi raccontero' oggi saranno «passate di moda» tra una decina di anni. E' tuttavia questo il cammino della scienza: dobbiamo prenderci il rischio di avanzare delle ipotesi, e di aspettare che l'osservazione e l'esperimento le confermino o respingano definitivamente

Per le ragioni su menzionate ho pensato che potesse essere utile riservare spazio ad una cospicua parte introduttiva. Percio' ho ritenuto di divdire il seminario in tre ben definite parti:

- *Atto Primo* Cos'e' la luce: il punto di vista della moderna fisica delle particelle
- *Atto Secondo* Il problema della Materia Oscura
- *Atto Terzo* Alla ricerca dei Fotoni Oscuri

Atto Primo

Cosa e' la luce?

Questa e' una domanda antica come l'Umanita'

In tempi moderni, lo stesso Newton elaboro' una teoria (1675) secondo la quale la luce e' formata da minuscole particelle, che obbediscono alle normali leggi del moto, come le stelle od i pianeti

Il fatto che non si osservino per la luce effetti gravitazionali sarebbe dovuto al fatto che la velocita' di queste particelle e' elevatissima

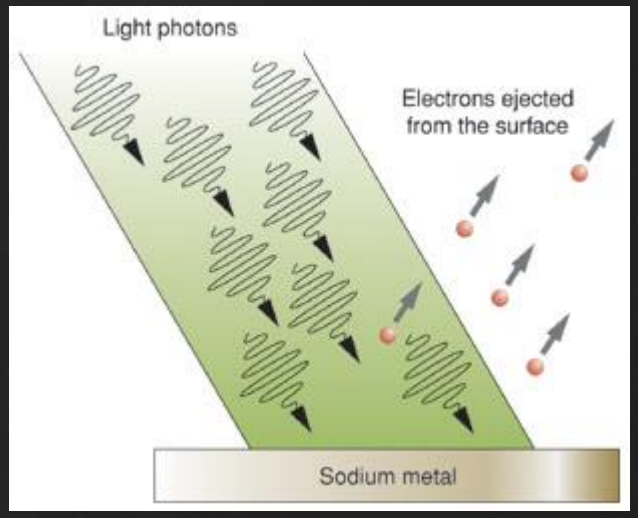
Come probabilmente saprete, il punto di vista di Newton fu scalzato da uno differente, dovuto principalmente agli esperimenti di Young (1801) ed alla teoria di Maxwell (1861): la luce non e' altro che un'onda elettromagnetica di frequenza stabilita (o una sovrapposizione di molte di queste) prodotta dal moto di cariche elettriche

Un'onda elettromagnetica a sua volta e' un campo elettromagnetico oscillante che si propaga nello spazio ad una ben precisa velocita', la velocita' della luce giustappunto

Nel Sole o nel filamento di una lampadina il moto di elettroni e protoni scaldati ad alta temperatura (alcune migliaia di gradi Kelvin) produce l'emissione di queste onde, che noi catturiamo con i nostri «rivelatori di luce», ad esempio i nostri occhi

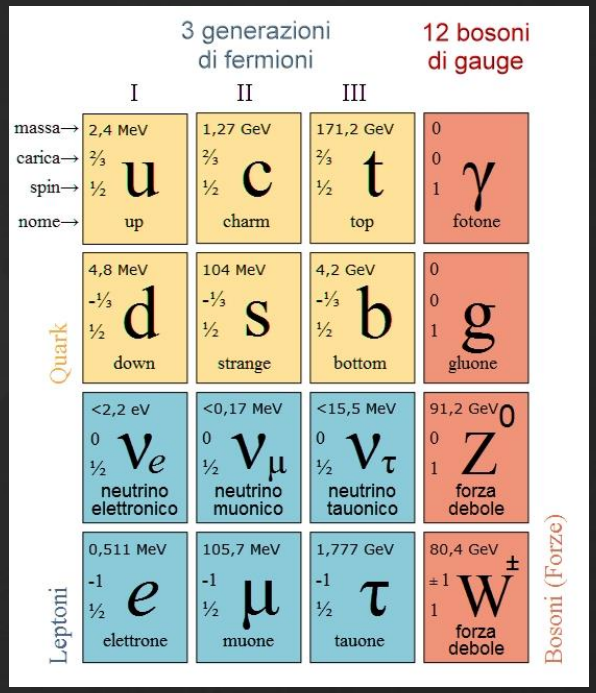
Nel 1905 Einstein ripropose la visione particellare della luce per spiegare il misterioso (all'epoca) fenomeno della emissione di elettroni da una superficie metallica a causa di luce incidente, il cosiddetto « effetto fotoelettrico»

Poiche' gli elettroni erano emessi indipendentemente dalla intensita' della luce, ma solo se veniva superata una certa soglia di frequenza, Einstein propose che la luce fosse composta da particelle, i fotoni, di energia proporzionale alla frequenza della luce ed alla costante di Plank, $E = h\nu$. Singoli elettroni possono dunque acquisire energia da singoli fotoni ed essere emessi dal metallo se questa energia e' piu' alta di quella del legame atomico



Per correttezza storica, e' stato proprio questo lavoro che ha gettato la basi per l'avvento della Meccanica Quantistica (e che ha fruttato ad Einstein il premio Nobel nel 1921)

Nella moderna Fisica delle Particelle, descritta dal Modello Standard, il fotone ha un ben preciso e specifico posto, nella famiglia dei cosiddetti «portatori di forza» o «mediatori di interazioni» o, piu' tecnicamente, «bosoni di gauge»



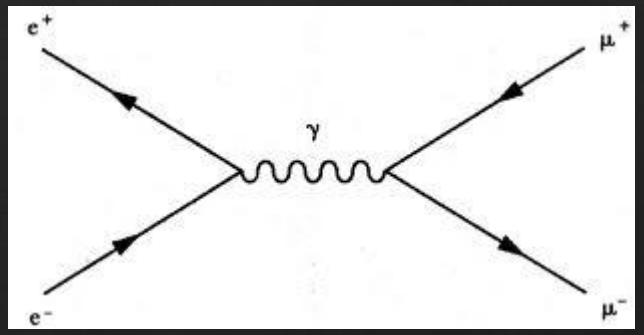
L'altro tipo di particelle fondamentali sono le «particelle di materia», quark e leptoni, i mattoni di cui e' composto l'intero mondo visibile

In particolare il fotone e' il mediatore della Interazione Elettromagnetica

Cio' significa che esso interagisce, cioe' scambia energia ed impulsi, con ogni particella dotata di carica elettrica o momento magnetico, in accordo con le leggi della meccanica quantistica

Inoltre ogni coppia di particelle cariche elettromagneticamente, interagisce scambiandosi uno o piu' fotoni (virtuali), in accordo con le stesse leggi

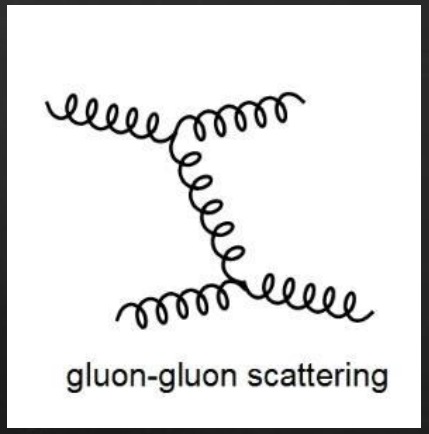
Questo tipo di processi vengono spesso schematizzati attraverso i cosiddetti diagrammi di Feynman, che hanno un evidente impatto visivo ma anche un ben definito significato matematico

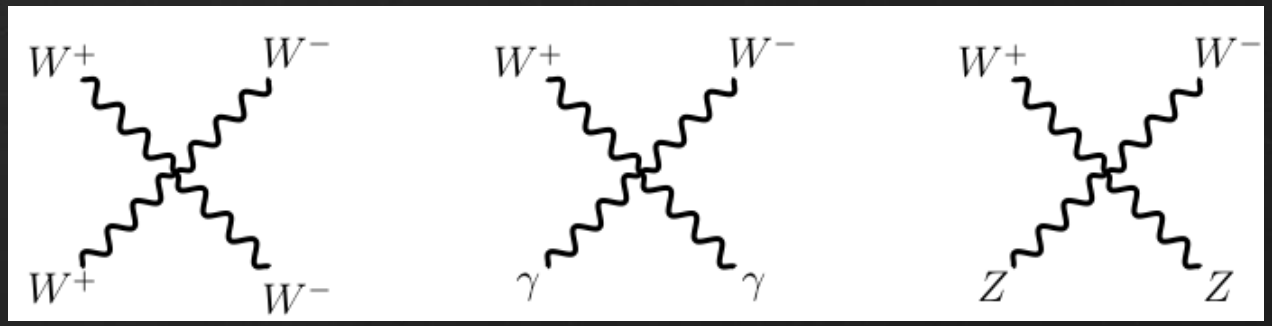


Nel Modello Standard ci sono altri portatori di interazioni, oltre al fotone, ognuno dei quali «sente» lo specifico tipo di «carica» propria della interazione fondamentale in oggetto

- Gli 8 gluoni, accoppiati alla carica di «colore» della Interazione Nucleare Forte
- I W^+,W^- e Z^0 accoppiati alla carica «debole» della Interazione Nucleare Debole

A differenza del fotone che non ha carica elettromagnetica, questi altri bosoni sono portatori della stessa carica cui sono sensibili, cosicche' essi possono interagire tra loro attraverso diagrammi del tipo riportato sotto





L'intensita' degli accoppiamenti delle varie Interazioni (cioe' la forza della carica «unitaria» per ciascuna di esse) e' molto differente. Approssimativamente:

$$Q_{forte} \; : \; Q_{e.m.} \; : \; Q_{debole}$$

$$1 \; : \; 0.01 \; : \; 0.000001$$

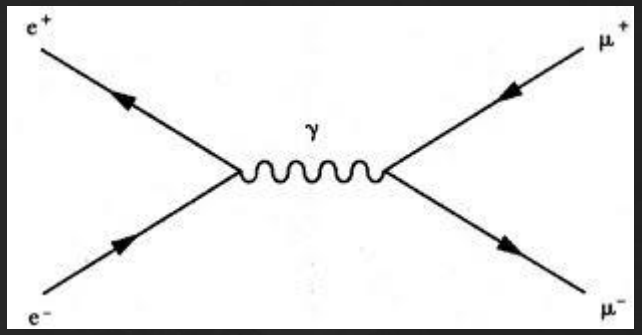
il che spiega chiaramente il perche' dei nomi «Forte» e «Debole»

Tutti questi portatori hanno spin 1 (sono dunque «bosoni vettoriali» in fisichese).

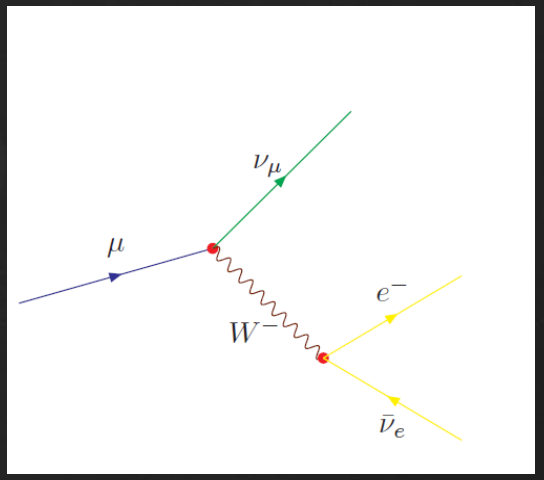
Il fotone ed i gluoni sono privi di massa mentre i portatori della Interazione Debole sono piuttosto pesanti, approssimativamente 80-90 volte piu' pesanti di un protone (80-90 GeV)

Leptoni e quarks possono portare piu' di un tipo di carica cosicche' sono sensibili a piu' di un tipo di Interazione

Per esempio, i muoni che possono essere prodotti in coppie attraverso l'Interazione Elettromagnetica, con diagrammi del tipo:

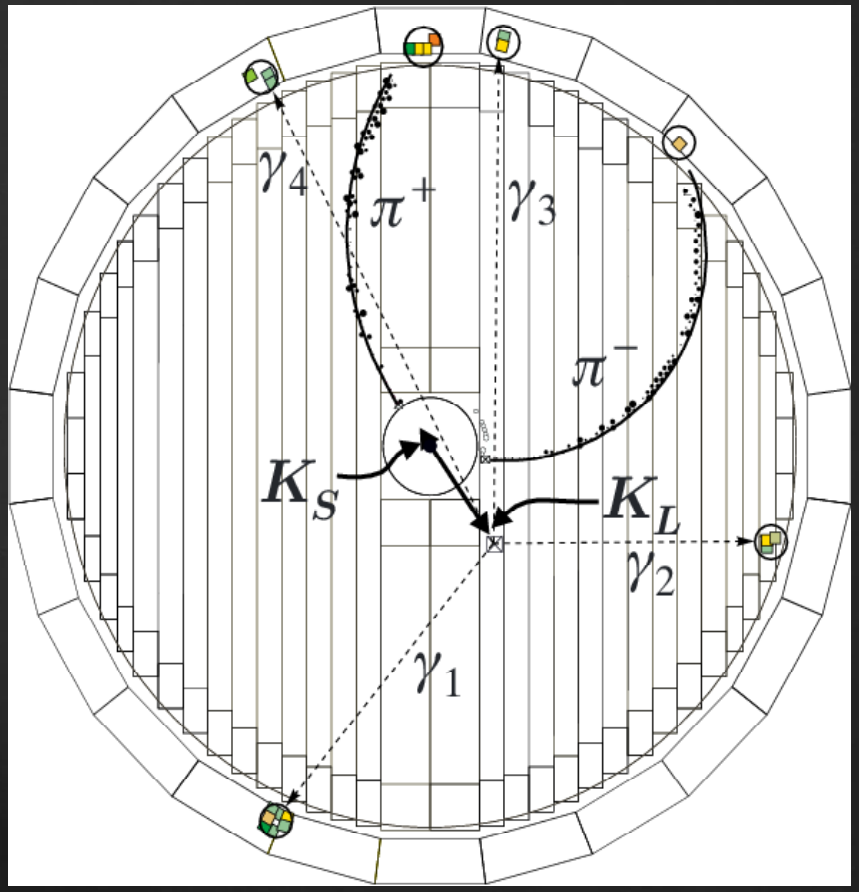


Possono poi decadere a causa della Interazione Debole, con diagrammi del tipo:



In effetti, tra i vari tipi di «particelle di materia» , solo i tre neutrini sono sensibili alla sola Interazione Debole. E questo e' il motivo per cui sono cosi' elusivi e difficili da catturare

Vorrei qui sottolineare il fatto che l'esistenza dei fotoni (e di tutti gli altri bosoni vettori) non e' soltanto un artificio matematico utile per i calcoli. Nei nostri esperimenti noi «vediamo» realmente singoli fotoni come prodotti di ben precise e controllabili reazioni



Per esempio nell'evento raffigurato qui accanto, abbiamo 4 fotoni che producono un segnale nel rivelatore KLOE, assieme ad altre particelle cariche chiamate pioni. Per tutte queste particelle siamo in grado di determinare le energie e le direzioni di volo, cosicche' possiamo infine ricostruire esattamente come quando e perche' sono state prodotte

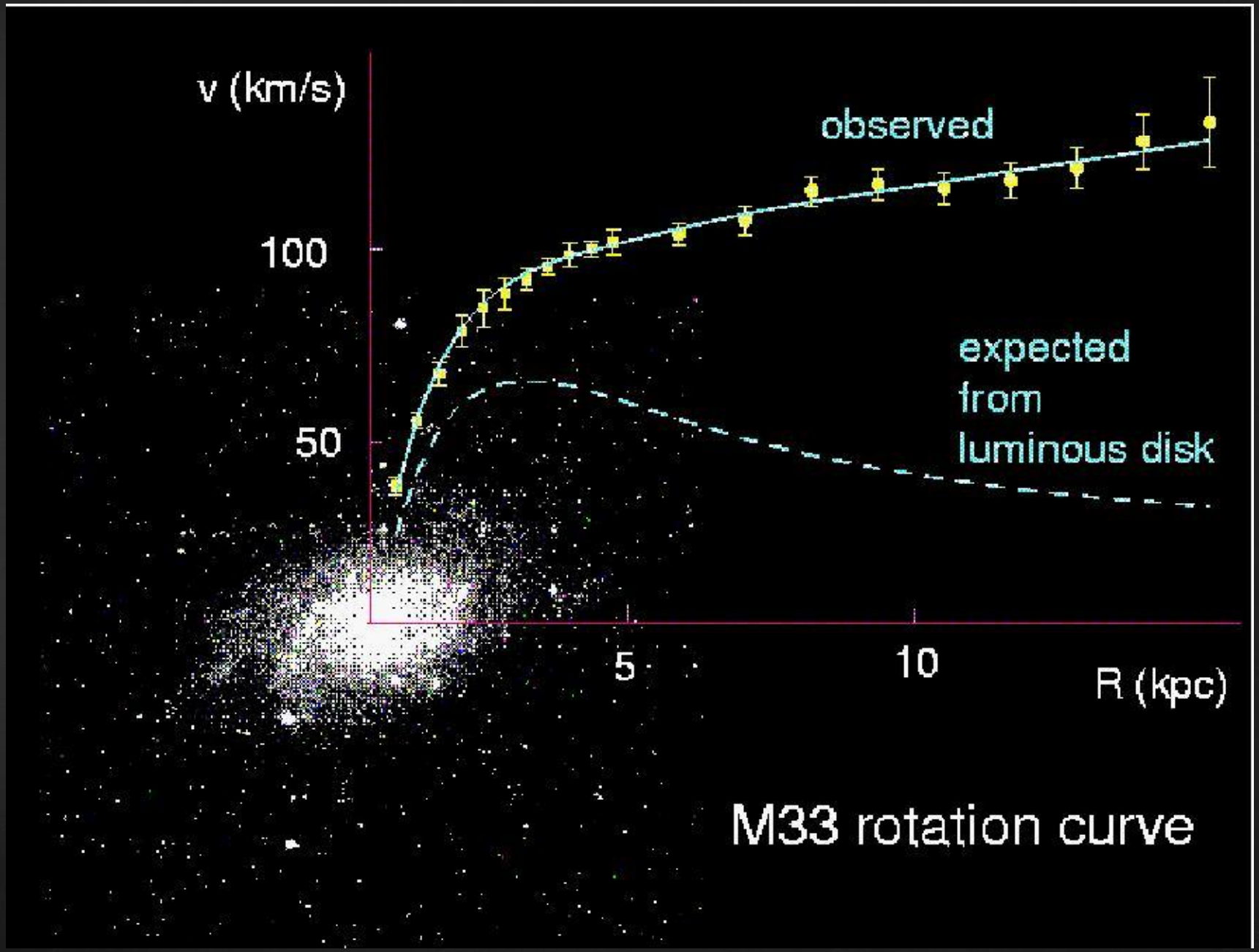
Atto Secondo

Esistono prove astrofisiche, che al giorno d'oggi sono solidissime, che suggeriscono che la maggior parte della materia che forma l'Universo non sia «materia ordinaria» (cioe' non sia costituita da particelle che siano catalogate nel Modello Standard)

Questa evidenza proviene da:

1. Le curve di rotazione delle galassie a spirale
2. Velocita' di dispersione delle galassie ellittiche
3. Effetti di «lensing» gravitazionale

Nessuno tra i fenomeni summenzionati puo' essere descritto correttamente utilizzando soltanto le forze gravitazionali indotte dalla materia che possiamo osservare con i nostri telescopi


v (km/s)
100
50
observed
expected
from
luminous disk
5
10
R (kpc)
M33 rotation curve

Anche se e' possibile postulare modifiche «ad hoc» per le leggi di gravita' su larghe scale, la piu' popolare ipotesi per spiegare questi fenomeni e' supporre l'esistenza di un nuovo tipo di materia che sia **elettricamente neutra e stabile**, e che popoli l'Universo in un rapporto **5:1** rispetto alla materia ordinaria

Esistono parecchie ipotesi sulla natura di questa «materia oscura», (che da qui in poi abbreviero' con «DM») teoricamente valide ma nessuna delle quali ad oggi provata sperimentalmente

Per esempio, in Supersimmetria, una classe di modelli particolarmente interessanti per una serie di ragioni teoriche, esiste un candidato naturale al proposito, chiamato Neutralino. Tuttavia ad oggi nessun esperimento (nemmeno ad LHC) e' riuscito ad osservare il Neutralino, e, a dire il vero, nessuna altra particella supersimmetrica

Un vincolo importante sulle speculazioni a proposito della natura della materia oscura ci e' dato dalla Cosmologia

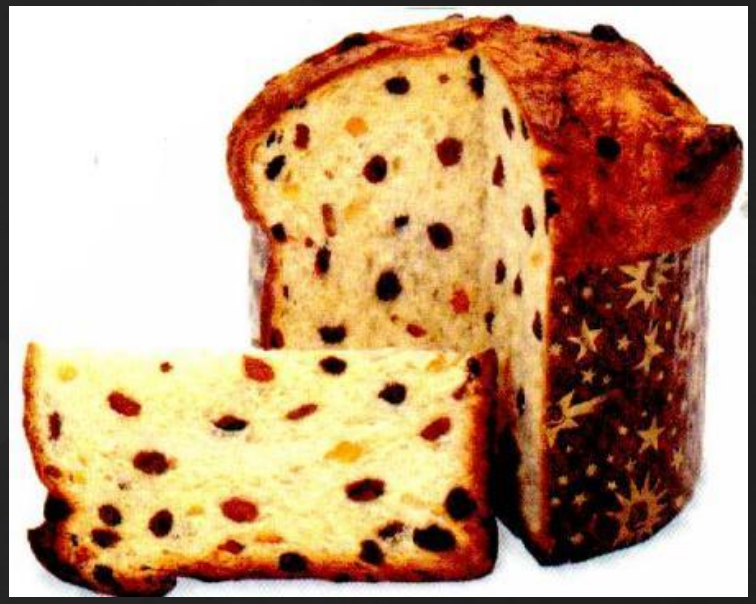
In effetti agli albori dell'Universo, pochi istanti dopo il Big Bang, quando le sue dimensioni erano molto minori di oggi, le interazioni tra DM e materia ordinaria erano estremamente probabili. Queste interazioni dovevano essere tali in ogni caso da permettere la sopravvivenza delle strutture complesse come Galassie, Ammassi di Galassie ecc...

In altre parole, non possiamo ammettere candidati di materia oscura con caratteristiche tali da rendere impossibile l'esistenza dell'Universo cosi' come lo osserviamo oggi!

Questo e' un vincolo molto forte. Ogni volta che si ipotizza un candidato di materia oscura, i calcoli devono provare che esso e' compatibile con le osservazioni cosmologiche

E’ un po’ come voler dedurre gli ingredienti di un dolce assaggiando ed osservando il prodotto finito

Sappiamo che bisogna metterci una certa quantita’ di canditi e di uvetta perche’ li vediamo chiaramente



Sappiamo che non dobbiamo metterci del liquore perche’ non ne sentiamo il gusto

Gli ipotetici ingredienti dell’impasto devono essere in opportune proporzioni, per garantirne la morbidezza, il profumo...

I cosmologi teorici si dilettano ad eseguire complessi calcoli numerici partendo da differenti possibili «ricette» per vedere se queste portano alla fine alla configurazione di Universo che effettivamente osserviamo al giorno d'oggi

Ed e' interessante notare come, in effetti, tutti i calcoli cosmologici sin qui sviluppati portano a risulati INCONSISTENTI con le osservazioni se eseguti nell'ipotesi di ASSENZA di materia oscura

Questo fatto e' visto da molti cosmologi teorici come la PROVA piu' evidente che la materia oscura debba esistere

Personalmente, con tutto il dovuto rispetto e la grande ammirazione per i miei amici teorici, io preferisco sottolinearne l'evidenza OSSERVATIVA

E’ stato mostrato come una ipotetica particella «pesante» (in genere parecchie decine di GeV) e che interagisce con la materia ordinaria tramite una interazione di tipo debole (**WIMP**) sarebbe in grado di produrre le corrette abbondanze residue, un fatto che viene indicato come «the WIMP miracle»

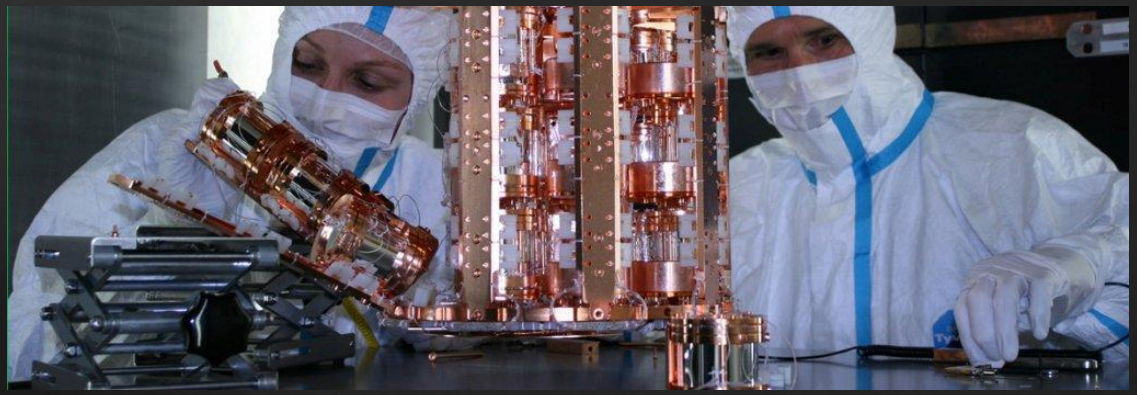
Per questa ragione nel corso degli ultimi venti-trent’anni e’ stato compiuto un grande sforzo per osservare le WIMP in esperimenti agli acceleratori o sotto terra. Con rarissime eccezioni, in effetti, la caccia alle WIMPs ha monopolizzato le ricerca di Materia Oscura sino ad oggi

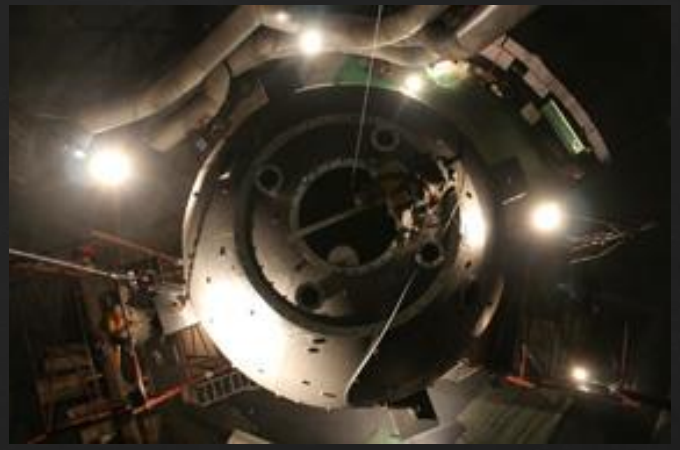
Molti di questi esperimenti sono stati effettuati o sono in corso nei laboratori sotterranei del Gran Sasso, uno dei «gioielli di famiglia» dell’INFN

Xenon 1T

DarkSide

CRESST





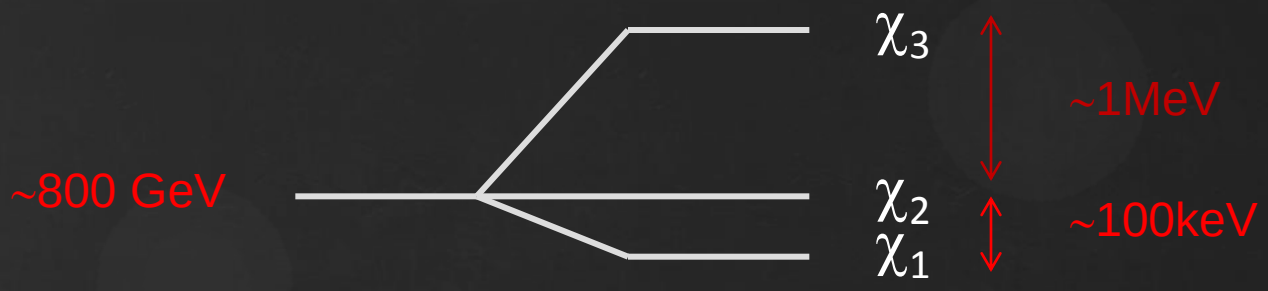
Sfortunatamente, nessun esperimento ha dato risultati decisivamente positivi, anche se ci sono alcune «rivendicazioni» di osservazione, a tutt'oggi controverse. Per questa ragione si stanno sempre piu' sviluppando modelli alternativi alle WIMP, che prevedono l'introduzione di nuove classi di particelle e *di interazioni*, e questo ci conduce dunque all'

Atto Terzo

Prima di introdurre un paio di esempi di questi nuovi modelli, lasciatemi fare alcune semplici considerazioni:

- Il Modello Standard descrive solo il ~20% del contenuto di materia dell' Universo , ed e' piuttosto ricco in numero di particelle ed interazioni
- Questa struttura e' un fatto osservativo e non e' fondata su nessun principio «primo»
- Non c'e' nessuna ragione per postulare che il rimanente 80% di materia debba essere composto da uno spettro di stati e di interazioni molto piu' povero
- D'altra parte, poiche' i nostri rivelatori sono fatti di materia ordinaria, dobbiamo *sperare* che il «mondo oscuro» abbia anche un qualche tipo di interazione «standard», a parte la gravita' (un cosiddetto «portale»)

Per esempio nel modello di Arkani-Hamed et al., esistono (almeno) 3 particelle pesanti (~800 GeV) di DM con differenze in massa dell'ordine di 100 keV e 1 MeV



Questi stati «sentono» un nuovo tipo di Interazioni mediate da un bosone leggero (~1 GeV) , γ' e almeno un altro ~10 volte piu' pesante, γ''

Questo e' un tipico esempio di modello nato per dare giustificazione ad una serie di osservazioni difficilmente inquadrabili come fenomeni astrofisici «standard». Ovviamente, gli autori hanno avuto cura a che i vincoli cosmologici fossero correttamente soddisfatti

I cosiddetti modelli di Materia Oscura Asimmetrica (**ADM**) prevedono l'esistenza di un tipo di nuove particelle relativamente leggere (≤10 GeV)

In questi scenari la MO e' composta di particelle ed antiparticelle esattamente come nel caso ordinario. E, sempre come nel caso ordinario, un meccanismo di asimmetria materia-antimateria ha fatto si' che solo una delle due componenti sopravvivesse al giorno d'oggi

T. Lin et al., hanno dimostrato che questi modelli funzionano dal punto di vista cosmologico, se le annichilazioni materia (oscura) – anti materia (oscura) sono mediate da un nuovo portatore di forza, anch'esso relativamente leggero

Al di la' dei dettagli, questi due modelli (e altri) hanno in comune la predizione dell'esistenza di un nuovo portatore di forza leggero **con gli stessi numeri quantici del fotone** ma con una massa differente da zero, che da ora in poi chiameremo «**fotone oscuro**» o γ'

Si postula che la materia ordinaria abbia una piccola sensibilita' al fotone oscuro, grazie ad alcuni sottili effetti di meccanica quantistica

Questo piccolo accoppiamento e' genericamente descritto da un parametro ε^2 che da' la forza della «**carica oscura**» della materia ordinaria in rapporto alla sua normale carica elettrica

Se ε^2 fosse esattamente = 0, allora il mondo standard e quello oscuro sarebbero completamente separati, a parte per effetti gravitazionali (e allora io mi dedicherei proficuamente alla pesca sportiva o all'uncinetto) . Tuttavia ci sono parecchi problemi astrofisici che gradirebbero una soluzione in cui ε cade in un (ampio) intervallo:
$10^{-5} - 10^{-10}$

Ma mentre l'accoppiamento del γ' con la materia ordinaria e' supposto essere molto flebile, quello con la DM puo' di principio essere piu' rilevante

Ed in effetti cio' che si postula in ultima analisi e' che la materia oscura lungi dall'essere qualcosa di quasi completamente inerte, presenti invece un possibile complesso spettro di interazioni, analoghe (ma non identiche) a quelle cui sottostanno le particelle ordinarie

Questa ipotesi, sicuramente teoricamente ammissibile, ha avuto di recente una positiva indicazione sperimentale da una importantissima osservazione astrofisica

Uno studio effettuato su un gruppo di 4 galassie in collisione ha mostrato come in almeno un caso la materia oscura ad essa associate sembra «rallentare» a causa dell'urto, rispetto alla materia «ordinaria»

Questo potrebbe suggerire che le particelle di materia oscura delle due galassie interagiscano debolmente tra di loro causando una leggera «frenata» nel moto delle stesse

E mentre i colleghi astrofisici incappano in potenziali prove osservative di queste nuove interazioni, i fisici delle particelle cercano un modo per ottenere prove di laboratorio della esistenza delle stesse

Come si puo' osservare un fotone oscuro?

Non esiste una risposta univoca a questa domanda. In effetti molto dipende dai dettagli del modello fisico che si intende testare

In modo un po' semplicistico tutto dipende dalla relazione che intercorre tra la massa del γ' ($m_{\gamma'}$), quella dell'elettrone (m_e) e quella della piu' leggera particella di DM esistente nel nostro modello (m_χ)

Brevemente:

1. Se $m_{\gamma'} < m_{\chi}$ allora il fotone oscuro decade in particelle «standard» (elettroni, muoni ecc...) in quel che si chiama decadimento **visibile**
2. Se $m_{\gamma'} > m_{\chi}$ allora il fotone oscuro decade solo in particelle di DM, cosicche' il decadimento sara' **invisibile**
3. Se $m_{\gamma'} < m_{\chi}$ e $m_{\gamma'} < m_{e}$ allora il fotone oscuro e' stabile ed e' esso stesso la DM che cerchiamo

Non siate pessimisti: ***anche i decadimenti invisibili possono essere osservati!***

Tutti gli esperimenti sin qui eseguiti hanno cercato il γ' nel canale visibile

La linea di ragionamento comune a tutti e' la seguente: se il γ' non e' altro che un fotone pesante allora deve essere prodotto in tutti i processi che producono fotoni ordinari, ma con due differenze fondamentali:

1. Questi processi sono piu' rari, di un fattore ε^2 (cioe' di tanto!) rispetto a quelli ordinari
2. A differenza che nel caso ordinario in cui i fotoni sono prodotti a tutte le energie possibili, la reazione «oscura» deve concentrarsi ad una energia pari alla massa (supposta) del γ'

Dunque, le regole del gioco per questi esperimenti sono:

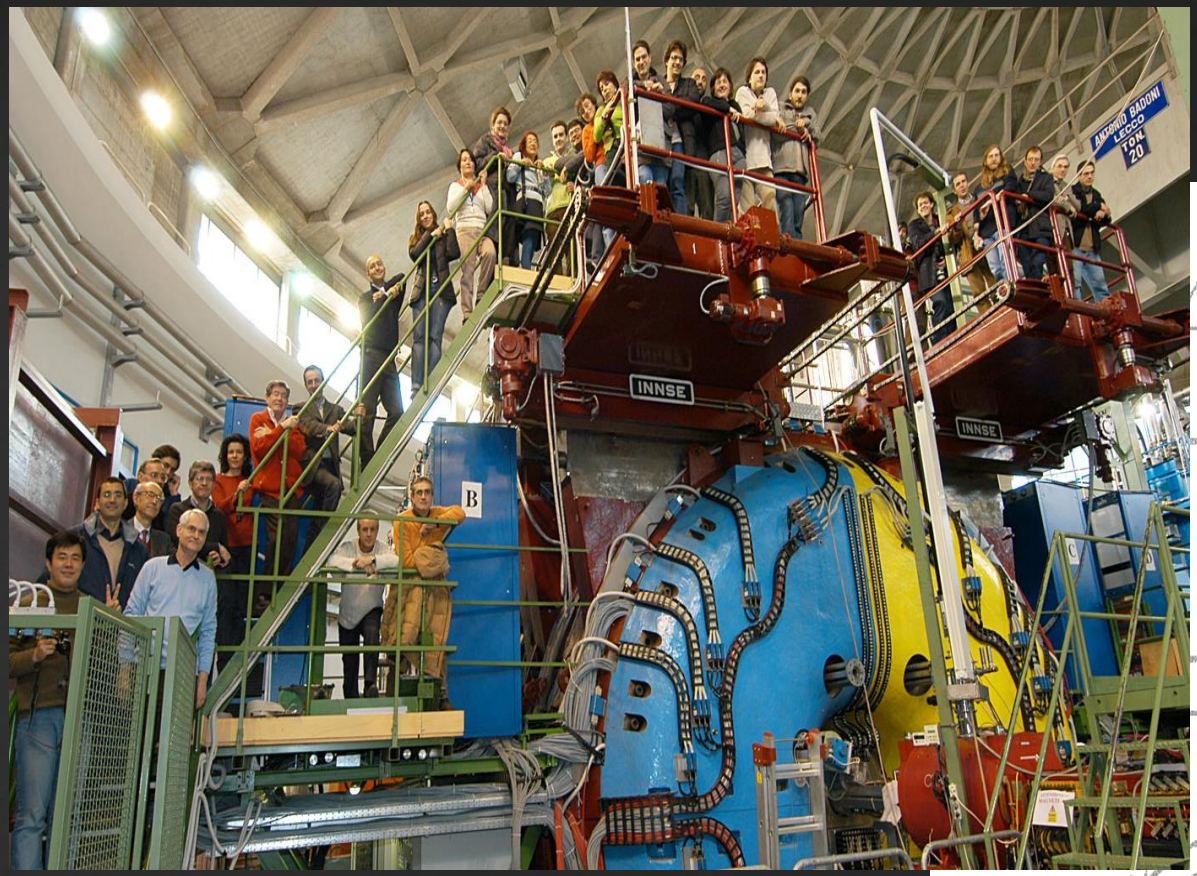
A. *Produrre miliardi di eventi per cercare tra essi processi rarissimi*
B. *Essere molto precisi nella misura delle masse/energie, per discriminare eventi «oscuri» da eventi ordinari*

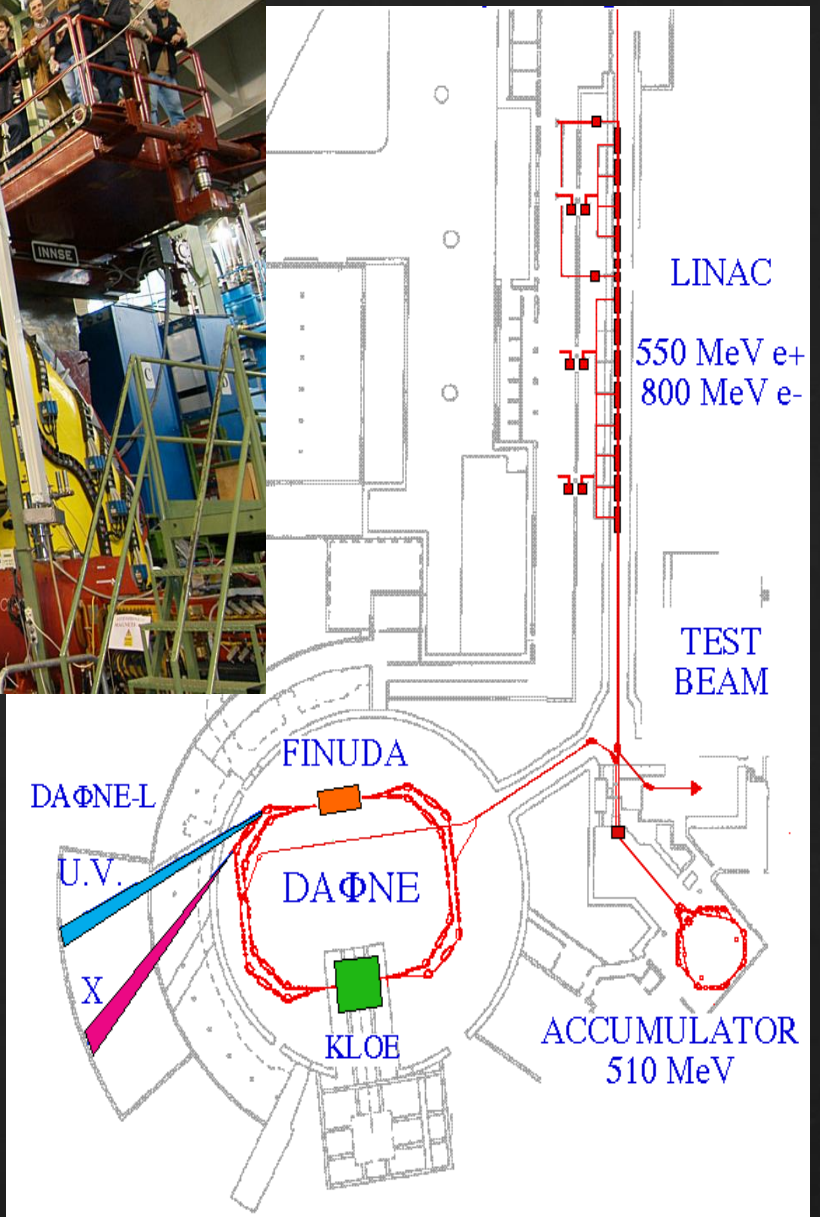
Qui a Frascati abbiamo condotto questo tipo di ricerche usando i dati dell'esperimento KLOE, che osserva i risultati delle collisioni tra elettroni e positroni prodotte dall'acceleratore DAΦNE

In particolare si e' cercata evidenza dei processi:

1. $e^+e^- \rightarrow \gamma'\gamma \rightarrow \mu^+\mu^-\gamma$
2. $e^+e^- \rightarrow \gamma'\gamma \rightarrow e^+e^-\gamma$
3. $e^+e^- \rightarrow \Phi \rightarrow \eta\gamma' \rightarrow \eta e^+e^-$
4. $e^+e^- \rightarrow \gamma'\, h' \rightarrow \mu^+\mu^-$ (h' un «higgs oscuro»)

In tutti i casi esistono processi «standard» che producono esattamente gli stessi stati finali. Tuttavia KLOE e' un rivelatore particolarmente preciso nella determinazione delle masse, e DAΦNE e' un acceleratore particolarmente luminoso, e dunque SE esistesse un γ' sufficientemente massivo e con ε non troppo piccolo lo vedremmo di sicuro.


INNSE
INNSE
B


LINAC
550 MeV e+
800 MeV e-
TEST
BEAM
FINUDA
DAΦNE-L
U.V.
DAΦNE
X
KLOE
ACCUMULATOR
510 MeV

Purtroppo, nessun segnale di fotoni oscuri e’ stato osservato. Per ora, niente viaggio a Stoccolma...

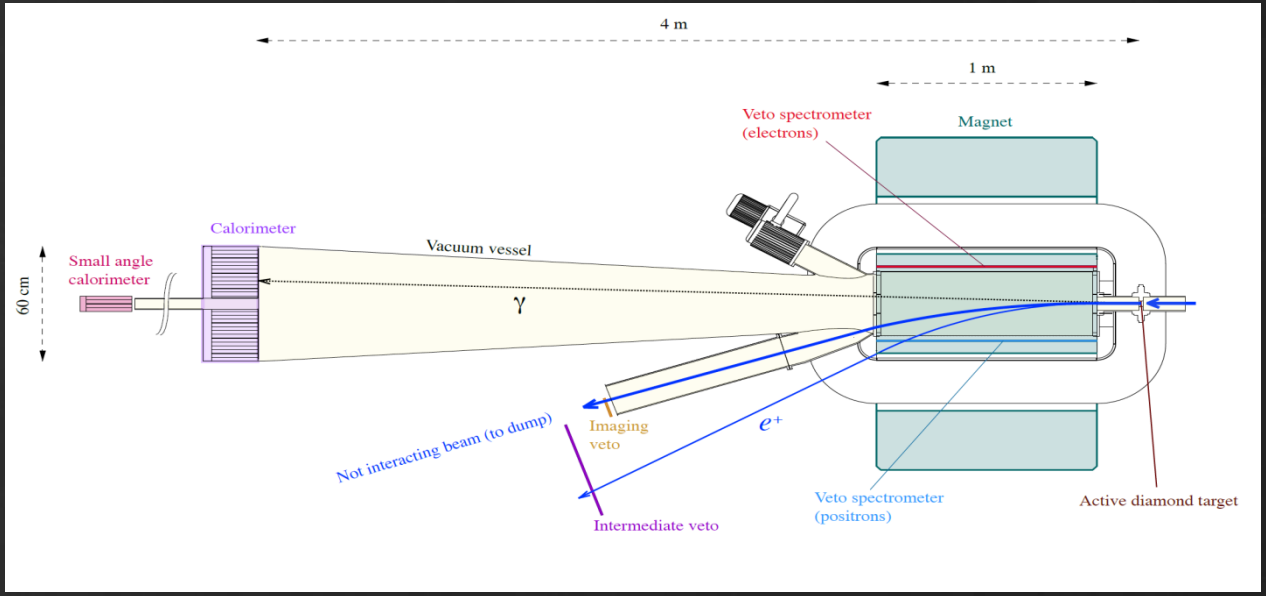
Come nel caso di KLOE, molti altri esperimenti nel mondo hanno cercato evidenza di questa luce oscura, tutti senza successo

Continuiamo pero' a cercare. E' sempre possibile che la «carica oscura» delle particelle ordinarie (cioe' il parametro ε^2) , sia piu' piccolo di quanto e' possibile osservare con i nostri rivelatori

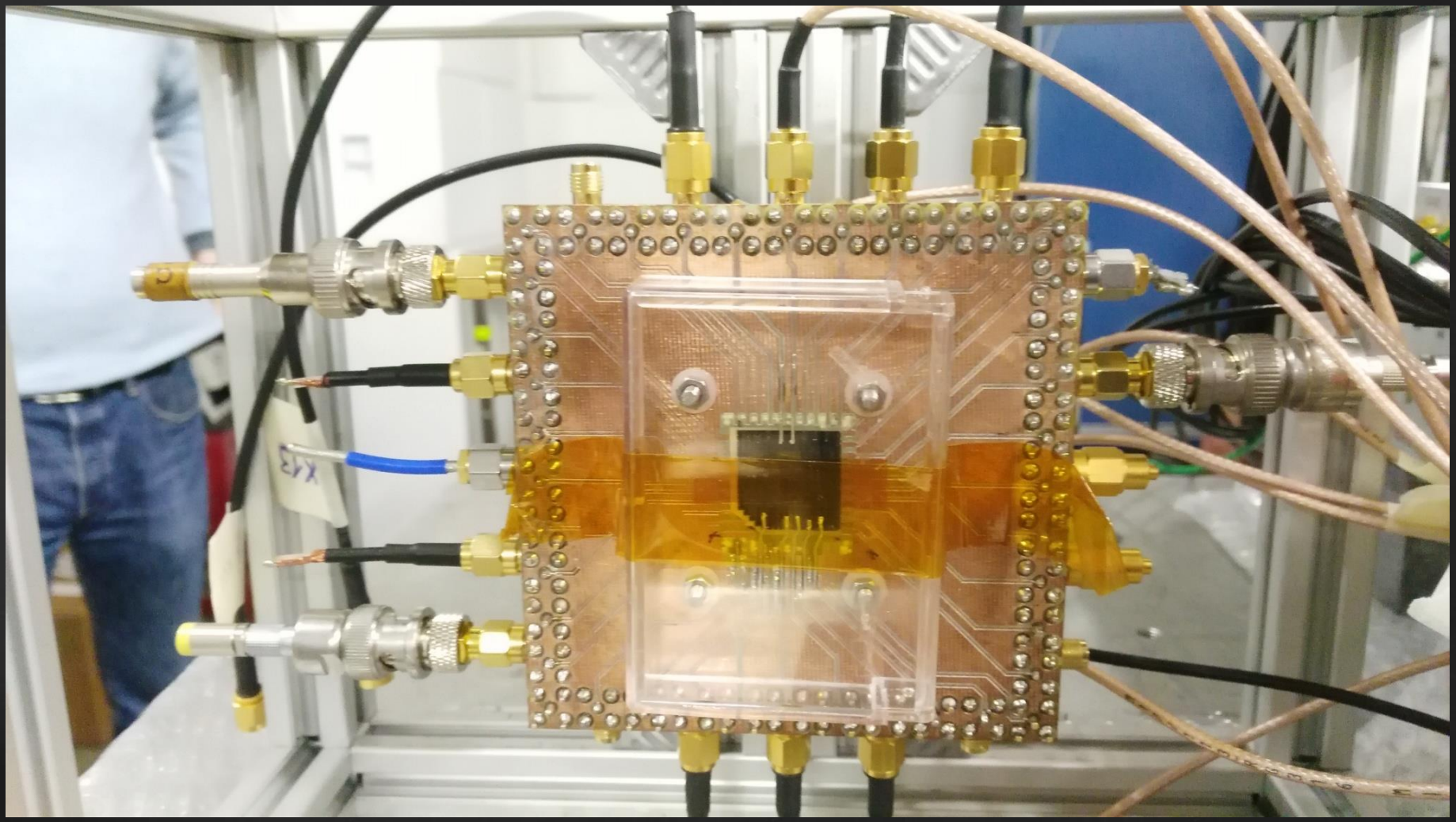
Per questa ragione si stanno costruendo nuovi rivelatori in molti laboratori per adeguare la nostra sensibilita' a cariche oscure sempre piu' piccole

Ed inoltre ci stiamo concentrando sulla possibilita' di rivelare i decadimenti **invisibili** del fotone oscuro

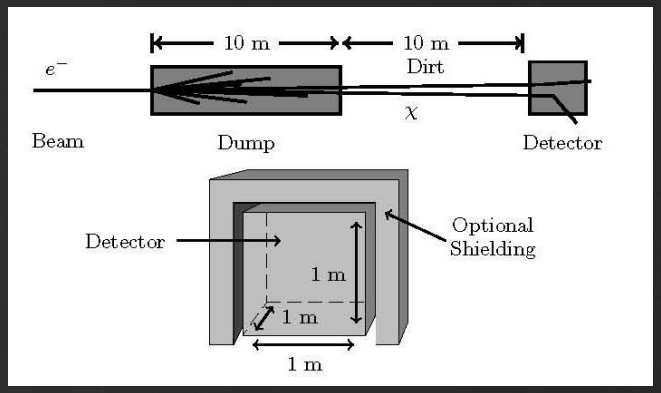
L'idea dell'esperimento PADME che si sta progettando qui a Frascati e' quella di usare un fascio di positroni da sparare su bersaglio opportunamente studiato e di misurare con estrema precisione le caratteristiche del fotone (ordinario) solitario prodotto da eventi del tipo $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma' \rightarrow \gamma$

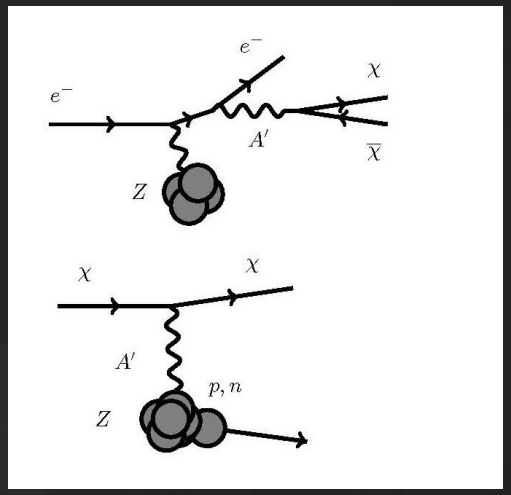


Misurando con precisione l'energia e la direzione del positrone «entrante» e del fotone «uscente» e' infatti possibile determinare la «massa mancante» dell'evento che (analogamente al caso dei decadimenti visibili) **deve mostrare un picco corrispondente alla massa del fotone oscuro**



Un approccio alternativo, ambizioso e, a mio avviso estremamente affascinante, e' quello di provare a ***rivelare possibili particelle di DM leggera*** prodotte dal decadimento del γ'





Questo puo' essere ottenuto sparando letteralmente un fascio di elettroni su un bersaglio, filtrando tutti i prodotti di questi urti con un grosso muro di cemento (per fermare tutte le particelle ordinarie) e cercare di osservare un segnale oltre questo muro che puo' essere dovuto soltanto a particelle non standard

In questo caso cerchiamo di prendere i tradizionali due piccioni con una fava: il fotone oscuro (indirettamente) **E** le particelle di materia oscura (direttamente)!

Naturalmente io sto semplificando le cose, forse un pochino troppo. Esiste un gran numero di dettagli tecnici che rendono questi esperimenti piuttosto difficili da eseguire

Eppure noi ed i nostri colleghi -amici-concorrenti in Germania, Stati Uniti, Russia, Giappone, Svizzera...siamo estremamente convinti e determinati nel progettarli e portarli a compimento.

Le sorprese sono dietro l'angolo: state all'erta!

Concludendo:

- La moderna fisica delle particelle ci insegna che la luce non e' nient'altro che la manifestazione di un ben specifico «portatore» di una ben specifica forza fondamentale della Natura: la forza elettromagnetica
- Esistono altri portatori di altre forza fondamentali , che sono stati osservati e studiati in gran dettaglio
- L'astrofisica ci dice che pero' questa non e' la fine della storia: esiste materia differente da quella ordinaria, in una quantita' incredibilmente maggiore rispetto a quella che noi conosciamo
- Ci possono essere percio' nuove interazioni delle quali non sappiamo nulla, ciascuna con i suoi portatori, messggeri di un mondo «nascosto» e potenzialmente estremamente ricco e complesso
- Abbiamo cominciato da poco a ricercare tracce di questo mondo nascosto. Prepariamoci a grandi sorprese!