La Fisica delle Particelle Elementari

Fabio Bossi
INFN – Laboratori Nazionali di Frascati
Frascati 15 Giugno 2020

Lo studio della Fisica ed, in generale, di tutte le Scienze Naturali è volto alla descrizione quantitativa ed alla ricerca delle leggi che governano il mondo **materiale** che ci circonda

Una definizione chiara di cosa la materia in effetti sia, sembrerebbe dunque un prerequisito essenziale per qualunque teoria fisica vogliamo elaborare

Apparentemente, questo sembra essere un compito facile, quasi banale. In fin dei conti tutti noi abbiamo una percezione istintiva dell'esistenza del mondo materiale, le cui regole di funzionamento vengono indentificate in qualche modo con le regole del «buon senso»

Ma proprio gli studi scientifici che nel corso dell'ultimo secolo si sono incentrati su questo argomento ci hanno dischiuso le porte ad una realtà sorprendente e misteriosa, oggetto di studio di quella che chiamiamo **Fisica delle Particelle Elementari**

Materia: La sostanza di cui sono fatti gli oggetti sensibili....provvista di **peso** e di **inerzia**, estesa nello spazio e capace di assumere una forma (*Enciclopedia Treccani*)

La definizione su riportata fa riferimento a due proprietà della materia che, in Fisica classica, ne definiscono la natura e che sono specificate quantitativamente dal concetto di **massa**

L'inerzia è la proprietà di un corpo che ne determina la sua resistenza alle variazioni dello stato di moto, in ragione della sua **massa inerziale**

Il peso è la forza che un campo gravitazionale esercita su un corpo avente una determinata **massa gravitazionale**

In formule:

$$F = m\,a$$ Seconda Legge della Dinamica

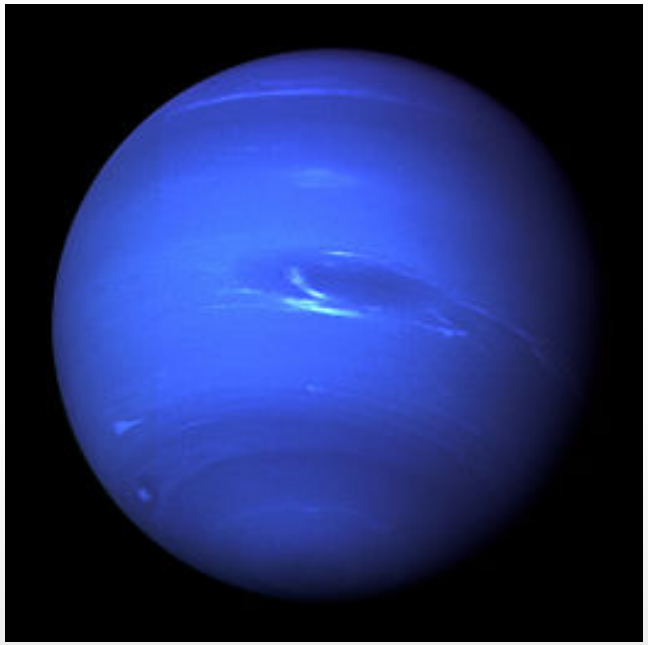
$$F = G\,\frac{m_1 m_2}{r^2}$$ Legge di Gravitazione Universale

E' notevole e non banale il fatto che queste due masse siano, sperimentalmente, *equivalenti*

Questo significa che per determinare la massa inerziale di un oggetto (cioè la «quantità di materia» di cui è composto) ***è sufficiente misurare gli effetti che ha la gravità su di esso***, in altre parole «pesarlo»

Con questo metodo, per esempio, nel 1846 è stato scoperto il pianeta Nettuno

Cambiamenti insoliti nell'orbita di Urano avevano portato gli astronomi a postulare l'esistenza di questo, allora sconosciuto, pianeta. Nettuno fu in effetti osservato esattamento nel punto dove i calcoli avevano previsto dovesse essere



Eccolo in tutto il suo algido splendore, fotografato dalla sonda Voyager 2, da soli 7 milioni di chilometri di distanza

Teniamo a mente questo esempio, perchè ci tornerà utile più avanti

Ma perchè corpi diversi posseggono masse diverse? Ovvero: che cosa determina la massa di un corpo?

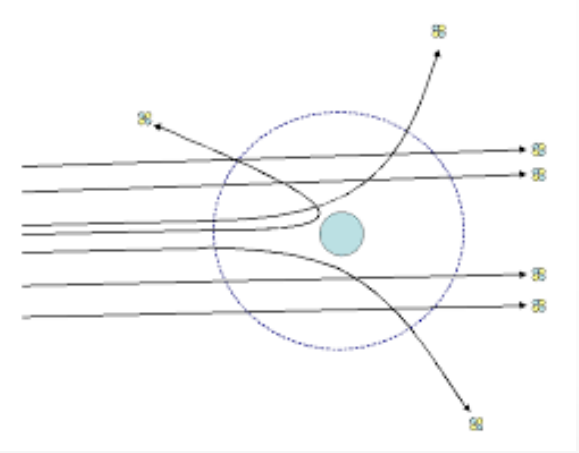
L'ipotesi riduzionista è che essa è determinata dal numero di *componenti elementari*, gli «atomi», di cui esso è composto

Questa idea, storicamente attribuita a Democrito (che in effetti coniò il termine atomo nel V secolo A.C.) riprese vigore e rigore scientifico nel XIX secolo con gli studi chimico-fisici di Dalton, Avogadro, Boltzmann ed altri

E' tuttavia interessante notare come per tutto il corso del medesimo secolo vi siano stati fisici, alcuni dei quali eccellenti, che dubitavano della reale esistenza degli atomi che consideravano solo come degli utili artifici mentali per fare i calcoli

Furono gli esperimenti di Rutherford nei primi anni del ‘900 che stabilirono definitivamente l’esistenza degli atomi determinandone la struttura

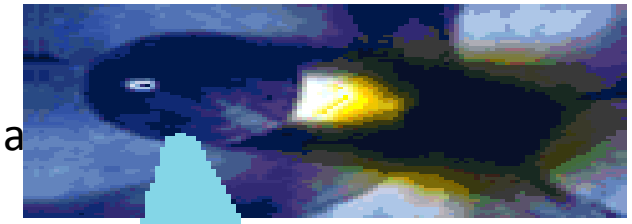
Osservando il modo in cui venivano deflesse particelle cariche sparate su un sottile foglio di oro, Rutherford potè determinare che gli atomi sono composti da un **nucleo** pesante e compatto carico positivamente, circondato da **elettroni**, sostanzialmente puntiformi, carichi negativamente



E qui otteniamo la prima sorpresa: le dimensioni del nucleo (**$\sim 10^{-15}$ m**) sono circa ***100000 volte più piccole di quelle dell’intero atomo***. Detto in maniera poetica, ***la materia di cui siamo costituiti è essenzialmente vuoto***

Chimica

10^{-3} m goccia d'acqua



10^{-9} m molecola d'acqua

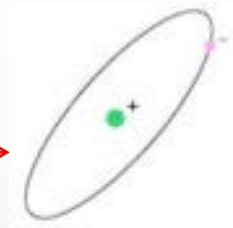
1 miliardesimo di metro!

Fisica Atomica

10^{-10} m atomo di idrogeno

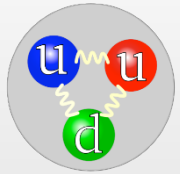
elettrone

fotone



Fisica delle Particelle

10^{-15} m protone



$< 10^{-18}$ m quark

1 miliardesimo di miliardesimo di metro!!!

?

Come riportato nella figura precedente esperimenti «alla Rutherford» di sempre maggior precisione hanno stabilito che il nucleo atomico è a sua volta costituito di **protoni** e **neutroni**, i quali a loro volta sono costituiti di componenti più elementari i **quark** di due tipi: **up** e **down**

Qual è la natura di queste particelle elementari?

Su base osservativa, almeno entro i limiti delle nostre capacità sperimentali, esse non presentano alcuna estensione spaziale, sono cioè ***puntiformi***

Esistono in realtà teorie che le descrivono come oggetti estesi (le «*(super)stringhe*») o composti, ma nessuna di esse, per quanto affascinante e popolare possa essere, ha ottenuto sinora il conforto degli esperimenti

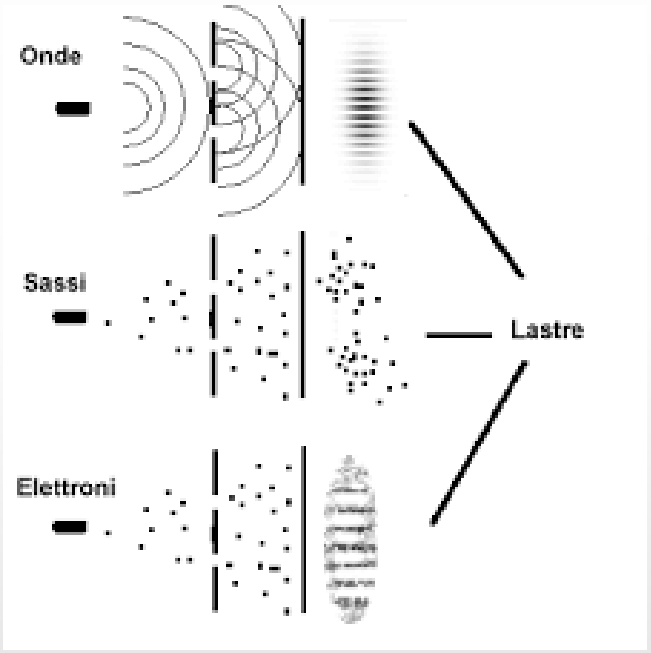
Lo studio dettagliato delle particelle materiali a queste microscale risulta in comportamenti spesso bizzarri e controintuitivi

Usando le parole di Richard Feynman (*Sei pezzi facili, ADELPHI*):

Su scale molto piccole le cose si comportano in modo che non vi immaginate nemmeno. Non si comportano nè come onde, nè come particelle, nè come nuvole, nè come palle da biliardo, nè pesi, nè molle, nè come nient'altro abbiate mai visto....Da sempre si credeva che l'elettrone fosse una particella e poi si è scoperto che sotto molti punti di vista si comporta come un'onda. E quindi in realtà non si comporta nè come particella nè come onda. Ora ci siamo arresi e diciamo semplicemente: « Non è nè una cosa nè l'altra»

L'esperimento principe che svela questa strana natura dell'elettrone è il famoso esperimento della «doppia fenditura»

Se si spara un fascio di elettroni attraverso due sottili fenditure, la distribuzione dei punti di impatto su uno schermo posto al di là delle stesse è simile a ciò che si osserva nel caso della diffusione di onde di qualunque tipo (sonore, luminose...)



Se però siamo in grado di determinare nel nostro esperimento da quale delle due fenditure il singolo elettrone è realmente passato, allora la distribuzione finale è quella tipica di particelle (sassi ad esempio)

Siamo costretti a concludere che ***gli elettroni si distribuiscono diversamente sullo schermo d'arresto a seconda che li guardiamo oppure no***

Per dare correttamente conto di questa duplice natura delle particelle elementari si è dovuta inventare una apposita serie di regole, la cosiddetta **«Meccanica Quantistica»**, sviluppata nei primi decenni del secolo scorso

La MQ dà predizioni solo sulla ***probabilità*** di ottenere un determinato valore in una misurazione, indipendentemente dalla precisione ottenibile dallo strumento di misura

Sempre per dirla con Feynman: «***Ebbene sì. La Fisica ha gettato la spugna. Non sappiamo prevedere cosa avverrà in una data circostanza, e siamo convinti che sia impossibile, e che l'unica cosa prevedibile sia la probabilità dei diversi eventi***»

Più o meno contemporaneamente allo sviluppo della MQ, la Teoria della Relatività introduceva il concetto di ***equivalenza massa-energia***, tramite la famosa equazione:

$$E = mc^2$$

Per inciso, vorrei notare che l'equazione su riportata è corretta soltanto per particelle a riposo. Essa va opportunamente modificata quando le particelle sono in moto. Tuttavia la «sostanza» non cambia: la massa rimane una forma di energia

Questo significa che qualunque corpo dotato di una massa (a riposo) diversa da zero è automaticamente una sorgente potenziale di energia. Questo è il principio su cui si basa il funzionamento delle bombe nucleari o delle stelle, per esempio

In base a questo principio è uso, tra i fisici, di misurare la massa delle particelle in unità di energia (ponendo c = 1)

Generalmente si utilizza come unità di misura l'elettronvolt (eV) ed i suoi multipli (keV, MeV, GeV). Un elettronvolt è equivalente all'energia di movimento di un elettrone quando è sottoposto al potenziale elettrico di 1 Volt, una energia relativamente modesta

In queste unità, per esempio, un **elettrone** «pesa» 511 keV un **protone** 938 MeV un **neutrone** 939.5 MeV

E’ grazie a questo principio che, usando l’energia di collisioni fortemente anelastiche, i fisici hanno scoperto l’esistenza di decine e decine di nuove particelle, **nuove forme di materia**, diverse da quelle che compongono gli atomi

Fatta eccezione che per i leggerissimi ed elusivi neutrini, questi nuovi stati della materia sono **instabili**, cioè finiscono per trasformarsi in particelle «standard» attraverso un gran numero di possibili catene di **decadimento**

Le masse di queste particelle variano tra frazioni di eV, nel caso dei neutrini, a parecchi GeV come, per esempio, i mesoni B^0 e $B^{\pm}$

Alcuni esempi di processi di decadimento tra particelle sono:

$$n \rightarrow p^+ e^- \nu \qquad \text{in un tempo medio di} \sim 900\ s$$

$$\mu^\pm \rightarrow e^\pm \nu \nu \qquad \text{in un tempo medio di} \sim 2.2 \times 10^{-6}\ s$$

$$\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma \qquad \text{in un tempo medio di} \sim 8.4 \times 10^{-17}\ s$$

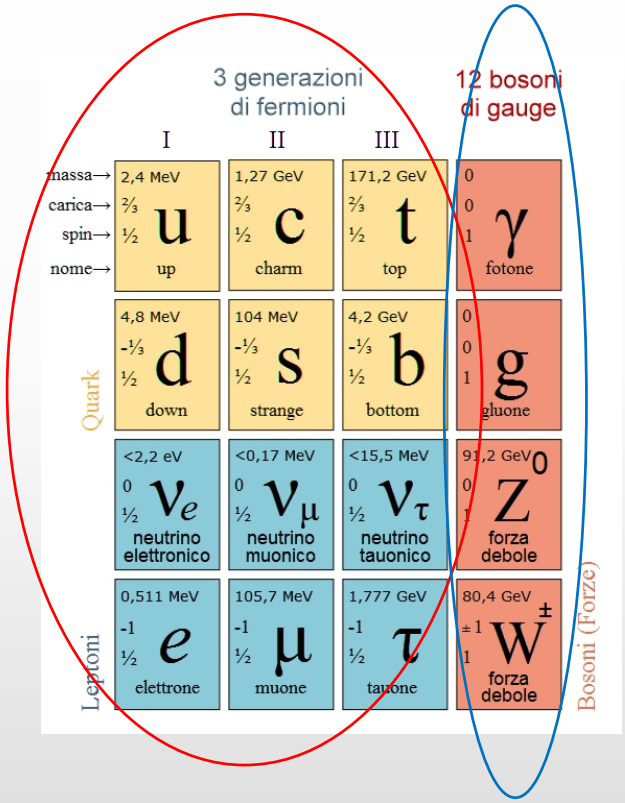
$$\Phi \rightarrow K^+K^- \text{ oppure in } K^0_L K^0_S \text{ oppure in } \rho\ \pi$$
$$\text{in un tempo medio di} \sim 10^{-22}\ s$$

Vanno sottolineati due importanti elementi:

1. Una particella può in linea di principio avere diversi canali di decadimento a ciascuno dei quali si può associare una probabilità
2. Le vite medie possono variare di parecchi ordini di grandezza il che suggerisce che esistono differenti tipi di «forze» responsabili dei processi di decadimento

Il «Modello Standard» delle Particelle Elementari mette ordine a questa grande varietà di fenomeni. Secondo questo schema esiste un numero limitato di particelle (o «campi») fondamentali

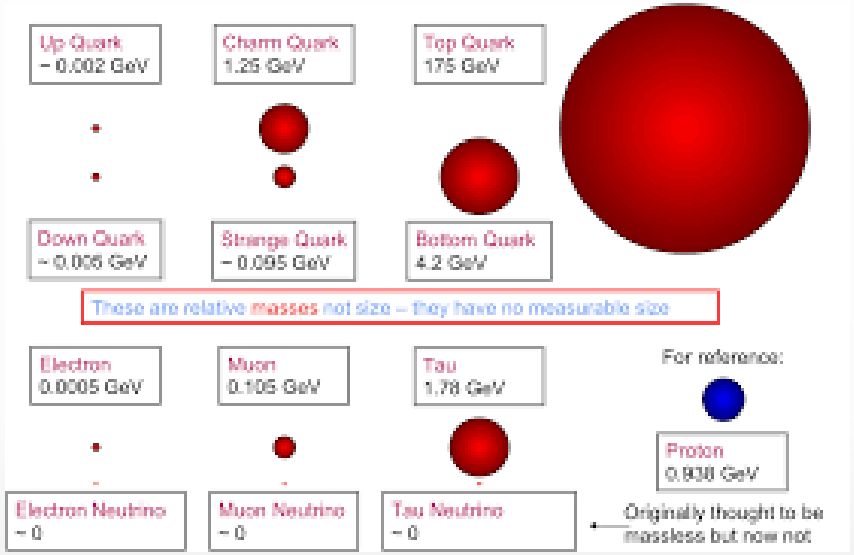
I campi di materia, quark e leptoni, con i loro partner di antimateria, combinando i quali si ottengono tutte le particelle note



I bosoni vettori, che sono i «portatori» delle 3 interazioni fondamentali: elettromagnetismo, interazione forte, interazione debole

Infine il «campo di Higgs» recentemente scoperto al CERN è l'elemento che fornisce massa a tutte le particelle su menzionate

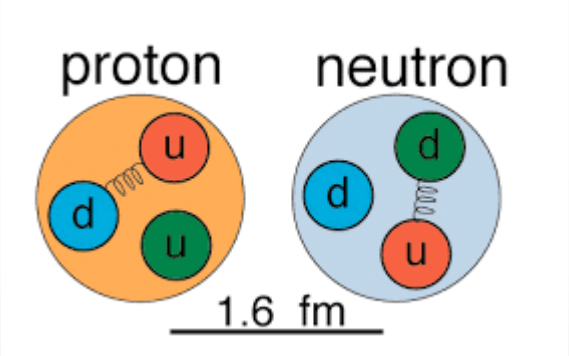
Lo spettro di massa di quark e leptoni è estremamente ampio



In effetti se volessimo rappresentare queste particelle fondamentali con delle sfere di dimensioni proporzionali alle loro masse otterremmo la figura qui accanto

Ad oggi non esiste nessuna teoria in grado di spiegare perchè queste masse hanno i valori che misuriamo: tali valori sono fatti puramente osservativi

Notate che questo è un problema tutt'altro che banale perchè tali valori sono alla base di alcuni notevoli fatti con importanti implicazioni pratiche



Ad esempio: i quark up e down formano in opportune combinazioni il protone ed il neutrone, con il risultato che quest'ultimo è leggermente più pesante del primo e quindi può dar luogo al decadimento radiottivo **n → p e ν**

Se i valori di massa fossero invertiti, allora sarebbe consentito solo il processo inverso, cioè i protoni tenderebbero a decadere in neutroni. Di conseguenza l'Universo, anzichè di stelle «normali», sarebbe popolato da sole stelle di neutroni. Non potrebbero esistere gli elementi chimici a noi noti, ***e di conseguenza noi non ci saremmo***

C’e’ poi un altro problema che forse qualcuno particolarmente attento tra voi avrà evidenziato

Se sommiamo le masse di due quark up e di un quark down otteniamo una massa totale di circa 10 MeV. Un protone ha una massa di 938 MeV: ***cosa fornisce dunque il resto della massa del protone?***

La risposta ce la dà ancora una volta l’equazione relativistica $E = mc^2$. Il grosso della massa del protone (e del neutrone) ***viene dall’energia dell’interazione che tiene uniti i quark tra di loro***

La combinazione di relatività e teoria quantistica ha portato poi ad una ulteriore sorpresa

Negli anni 20/30 del secolo scorso i fisici tentavano di trovare l'equazione che descrivesse correttamente il comportamento quantistico dell'elettrone rispettando al contempo le prescrizioni della teoria della relatività speciale

Il fisico inglese P.A.M. Dirac riusci' a scrivere questa equazione, osservando però che aveva l'inconveniente di presentare delle soluzioni con energia negativa (un nonsenso)

Per uscire dalla impasse Dirac propose che a queste soluzioni corrispondesse il moto di (anti)elettroni con energia positiva e carica elettrica positiva, introducendo il concetto di ***antimateria***

A distanza di pochi anni dalla formulazione di questa ipotesi il primo antielettrone ribattezzato «positrone» fu scoperto in osservazioni di raggi cosmici confermandola clamorosamente

Un «trucco» matematico portava ad una rivoluzionaria scoperta fisica!

Della esistenza dell'antimateria non vi è oggi alcun dubbio, tanto che i positroni vengono routinariamente prodotti ed utilizzati, per esempio nelle tecniche mediche note come PET

Una volta prodotta però l'antimateria si annichila non appena interagisce con la materia ordinaria

E' questa la ragione per cui, nel nostro mondo, non possiamo osservare antiparticelle, antinuclei, antiatomi e così via, se non in particolari condizioni di laboratorio

Tuttavia, allo stato delle nostre conoscenze, le leggi della Natura sembrano essere (quasi) completamente simmetriche per materia ed antimateria

Ora, noi siamo convinti che queste leggi abbiano determinato l'evoluzione dell'Universo dai primi istanti della sua creazione (il Big Bang) sino ai giorni nostri

Perchè dunque nel nostro Universo non si trovino tracce di «antimondi» in quantità pari ai mondi «normali» è a tutt'oggi uno dei maggiori problemi irrisolti della Fisica

Ricapitolando:

- Gli atomi di materia di cui è formato l'Universo visibile sono fatti essenzialmente di vuoto
- La maggior parte della massa degli stessi è dovuta in realtà all'energia che lega i quark all'interno dei nucleoni
- Tutta la materia a noi nota ha un corrispettivo di antimateria che obbedisce alle stesse leggi ed è in tutto e per tutto identica ad essa, tranne che per la carica. Perchè la Natura abbia preferito un Universo fatto di materia anzichè di antimateria rimane un mistero

Purtroppo non ho il tempo di parlarvi del «vuoto» che in fisica quantistica è tutt'altro che vuoto e ribolle di particelle «virtuali». Sarà per un'altra volta

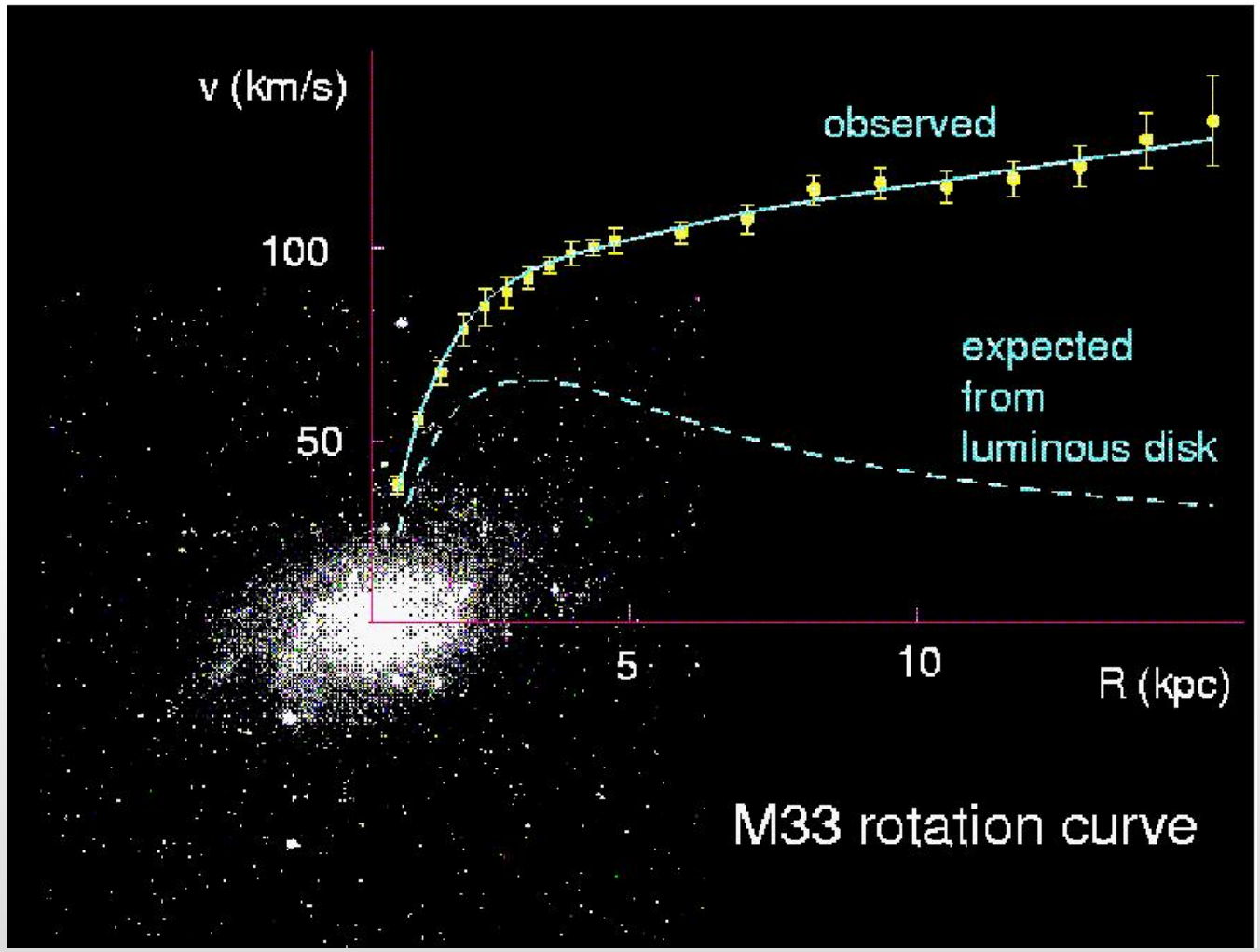
Vorrei dedicare gli ultimi minuti della presentazione al mistero riguardante la materia che attualmente è più dibattuto

Il moto delle stelle intorno al centro galattico dovrebbe, come ogni cosa nell'Universo, rispettare le note leggi di gravitazione

In particolare piu' le stelle sono lontane dal centro, piu' la loro velocità di rivoluzione dovrebbe diminuire (terza legge di Keplero)

Misure effettuate su stelle appartenenti a decine e decine di galassie a spirale rivelano invece una realtà sconcertante

Anzichè diminuire con la distanza, tali velocità rimangono costanti, con valori che dovrebbero far sì che queste stelle sfuggano alla attrazione gravitazionale della galassia e fossero quindi «disperse» lontano da essa!



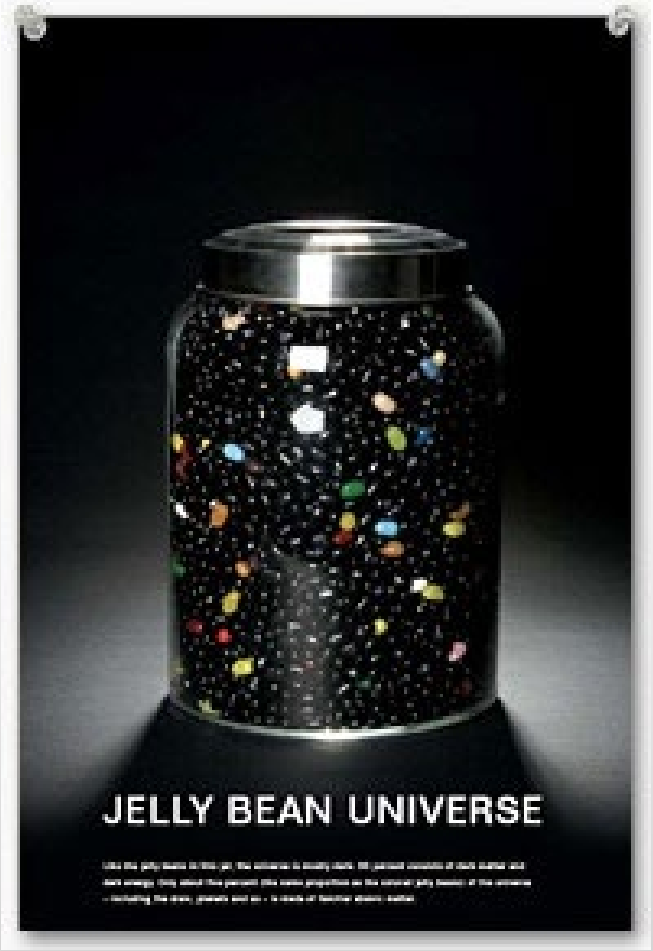
Ci sono due sole possibili spiegazioni per questo fenomeno:

- Le leggi di gravitazione, che funzionano perfettamente per stelle e pianeti, devono essere modificate su scale galattiche
- Le galassie sono pervase di una quantità di materia a noi invisibile che ne costituisce la gran parte e che quindi fortemente influenza i moti stellari: ***la materia oscura***

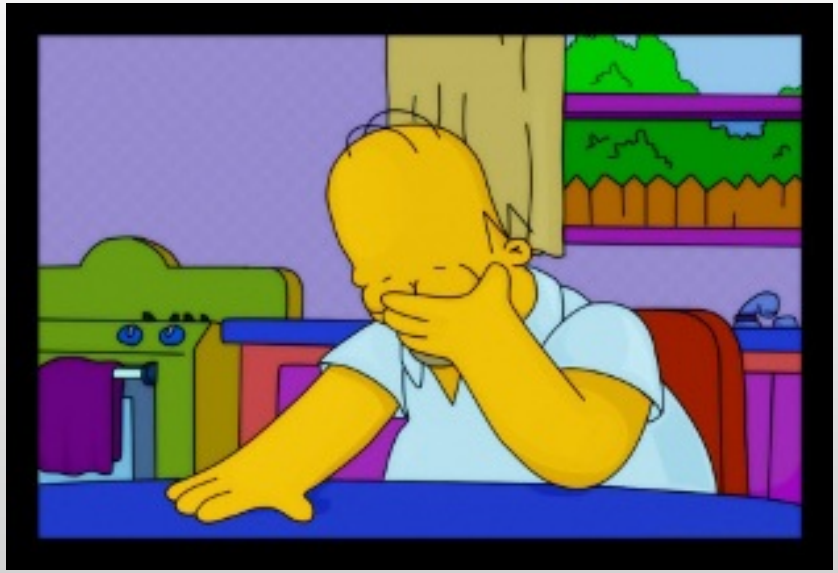
Sebbene entrambe le ipotesi siano logicamente corrette, la maggioranza dei fisici propende per la seconda, per diverse ragioni

- Esistono misure astronomiche di altro tipo che favoriscono l'idea di materia oscura
- Le teorie più accreditate sull'Universo primordiale funzionano molto meglio se si presuppone l'esistenza della stessa
- Molti modelli di Fisica della Particelle sviluppati per risolvere alcuni problemi teorici del Modello Standard prevedono candidati «naturali» al ruolo di materia oscura
- Le leggi di gravitazione a noi note funzionano perfettamente sotto infiniti aspetti e non si vede una valida ragione teorica per modificarle

Il fatto è che tutte le misure astrofisiche e cosmologiche summenzionate concordano nell'individuare la materia oscura come la componente largamente dominante di materia nell'Universo, in un rapporto con la materia ordinaria di circa 4:1



D'un tratto sembriamo aver scoperto che tutto lo sforzo compiuto sin qui dai fisici nel costruire il meraviglioso Modello Standard sia servito a dar conto soltanto del 20% della materia dell'Universo...



Tuttavia esistono quasi tante incognite quante certezze riguardo la natura della materia oscura

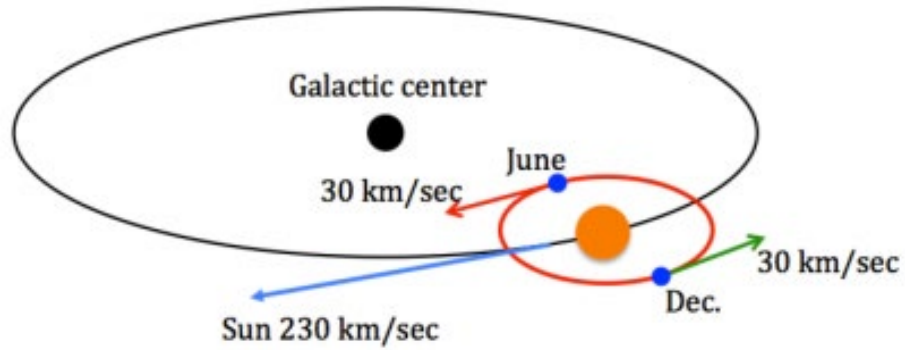
Ciò che sappiamo

- Possiede una massa
- Non ha interazioni elettromagnetiche
- E' stabile (almeno su scale cosmologiche)
- Pervade l'intero universo
- Non è fatta di materia (nè di antimateria) ordinaria
- E' in rapporto 4:1 rispetto alla materia ordinaria

Ciò che non sappiamo

- Qual è il valore della sua massa?
- E' sensibile ad altro tipo di interazioni oltre alla gravità?
- Esiste un solo tipo di materia oscura?

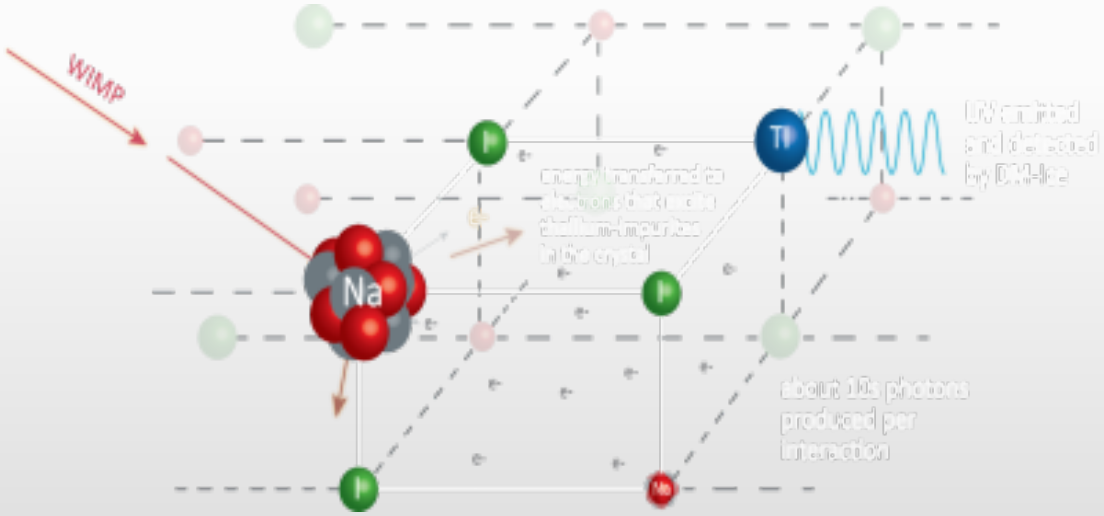
Poichè la materia oscura si ritiene diffusa più o meno uniformemente nell'intera galassia, essa dovrebbe colpire la Terra continuamente a causa del moto del sistema solare intorno al centro galattico. Inoltre il flusso dovrebbe essere maggiore quando il moto della Terra intorno al Sole è coerente con il primo (Giugno)



Possiamo dunque sperare di catturare un segnale di questo flusso costruendo opportuni rivelatori di materia oscura. Ma come costruirne uno? Questo è conseguenza di che caratteristiche attribuiamo alla materia oscura, ovvero alle ipotesi che facciamo a proposito di tutto ciò che non sappiamo riguardo ad essa

Per molti anni l'ipotesi più popolare tra i fisici (per ragioni teoriche che non sto a specificare) è stata quella che la materia oscura fosse costituita da particelle di massa 10-100 GeV con interazioni di tipo «debole» con la materia ordinaria, le cosiddette WIMPs

Una particella con queste caratteristiche urtando con gli atomi di cui è composto il rivelatore produrrebbe un rinculo nucleare che può essere osservato o sotto forma di segnale elettrico o sotto forma di segnale luminoso (a seconda del tipo di rivelatore utilizzato)



Grandi rivelatori di WIMPS sono stati progettati, costruiti ed installati allo scopo di catturare un loro segnale

Indipendentemente dalle specifiche tecniche di rivelazione, che sono molteplici, tutti i rivelatori devono fronteggiare il problema della «debolezza» (ovverosia della rarità) delle interazioni WIMP-materia ordinaria e dunque devono essere

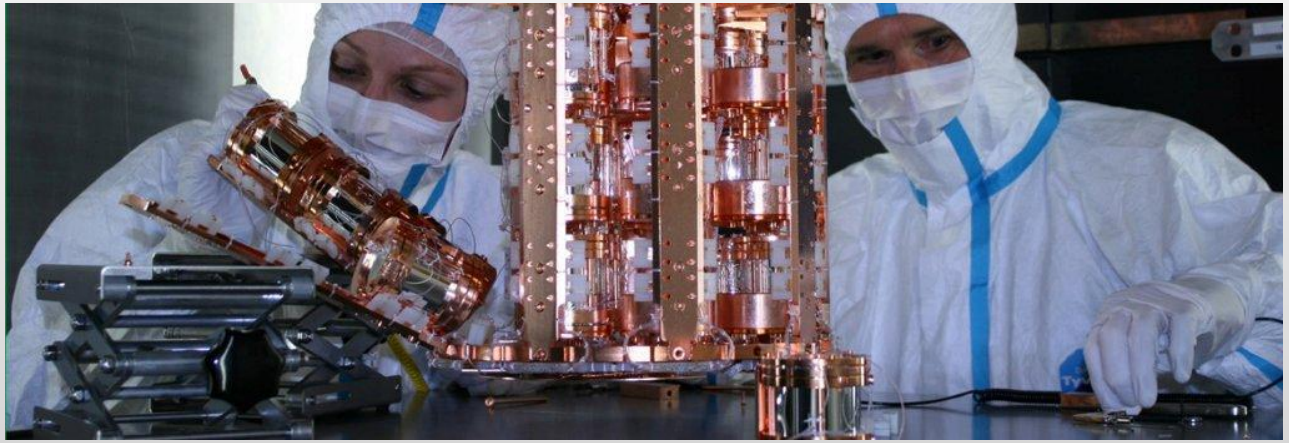
- Voluminosi, per massimizzare la probabilità di interazione
- Sotteranei, per schermare tutte le altre possibili interazioni nel detector causate da fenomeni più efficienti come le interazioni di raggi cosmici o la radioattività naturale

Per questa ragione, i Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'INFN sono ad oggi il luogo più importante nel mondo per questo tipo di ricerche

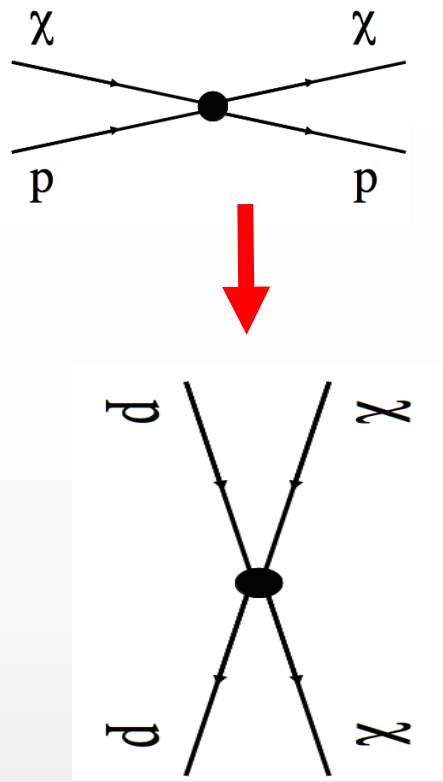
Xenon 1T

DarkSide

CRESST



Ovviamente si può pensare anche di produrre e poi rivelare la materia oscura in laboratorio, semplicemente «rovesciando» il processo di rivelazione che abbiamo visto in precedenza

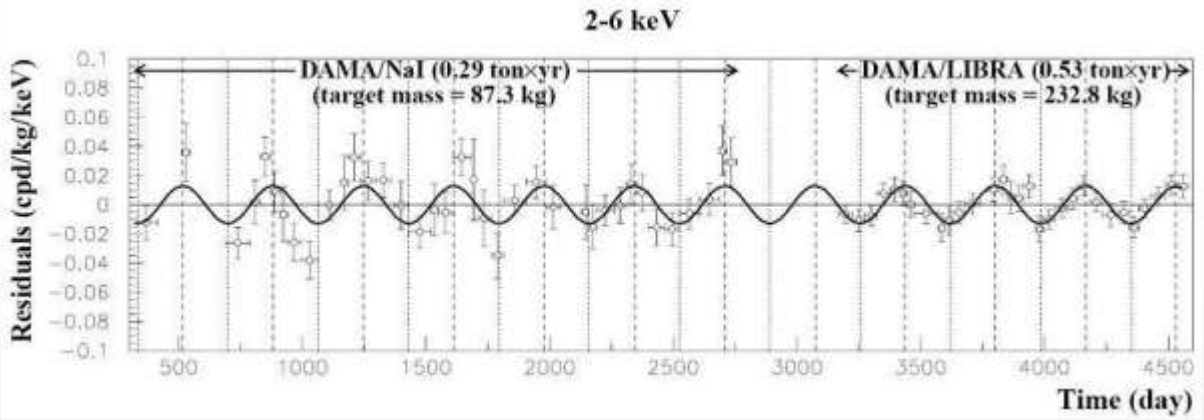


Questi sono esperimenti difficili, perchè la traccia lasciata dalla materia oscura dovrebbe consistere in «energia mancante» il che comporta rivelatori estremamente efficienti, ermetici e controllo assoluto delle condizioni sperimentali

Questo è quanto si cerca di fare in molti laboratori al mondo, tra cui il CERN di Ginevra o i Laboratori di Frascati dell'INFN

Nonostante tutti gli sforzi si qui compiuti da centinaia di fisici in tutto il mondo, non abbiamo ad oggi alcuna evidenza conclusiva della reale natura della materia oscura

Alcuni esperimenti, per esempio DAMA/LIBRA al Gran Sasso, hanno presentato alcune evidenze in questo senso, che però, ad oggi, non sembrano confermate da altri gruppi



E contemporaneamente si cercano potenziali segnali di natura differente, di cui non ho tempo di parlare, generati da particelle di materia oscura molto diversa dalle «normali» WIMPs

La caccia alla materia oscura è più che mai aperta. Nuove idee, teoriche e sperimentali vengono quotidianamente elaborate e discusse su questo argomento e prima o poi, sono convinto, sentiremo grandi notizie a proposito di esso. **Molto probabilmente saranno novità sorprendenti**