

Jacopo Ferretti jferrett@ge.infn.it
Seminario Art & Science across Italy
III Edizione (2020-2022)

Il problema della materia oscura



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare



Sommario della presentazione

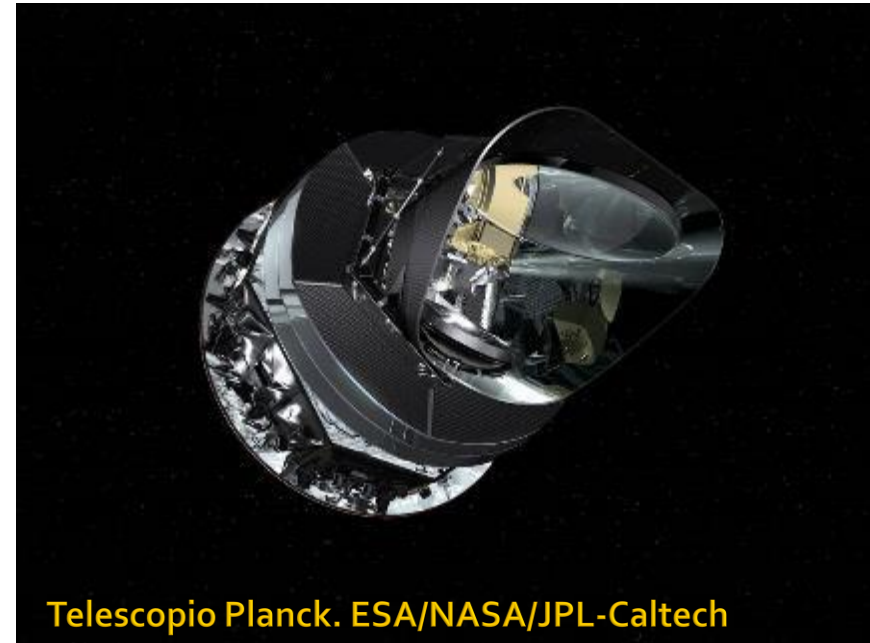
- Cos'è la materia oscura?
- Materia oscura e "materia ordinaria": proprietà, differenze e loro possibile interazione
- Indicazioni a favore dell'esistenza della materia oscura
- Particelle di materia oscura: principali candidati
- Esperimenti alla ricerca della materia oscura

Perché parliamo di materia oscura?

- La possibile esistenza della **materia oscura** è stata ipotizzata per la 1^a volta quasi un secolo fa

F. Zwicky, *Helvetica Physica Acta* **6**, 110 (1933)

- In seguito il concetto di materia oscura è stato utilizzato più volte per spiegare alcune **anomalie in osservazioni astronomiche**, cioè il conflitto fra calcoli ed osservazioni sperimentali



Telescopio Planck. ESA/NASA/JPL-Caltech

Cos'è la materia oscura?

- Nessuno lo sa con esattezza
- Però sappiamo che la materia oscura:
 1. è la forma di **materia predominante** nell'Universo
 2. **interagisce gravitazionalmente** con la "materia ordinaria"



"materia ordinaria": materia che conosciamo, quella che costituisce il mondo che ci circonda

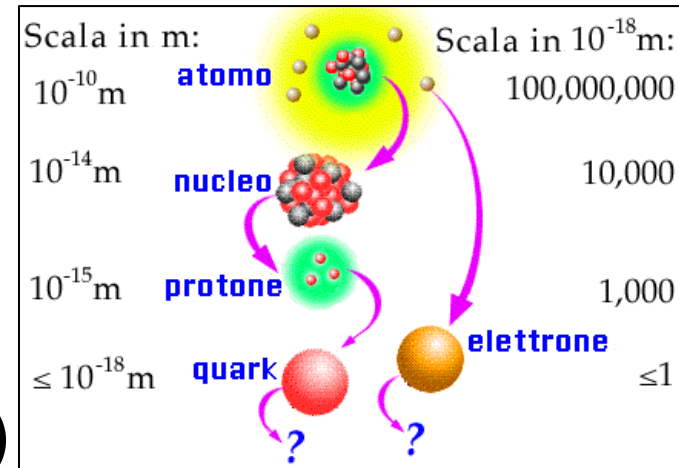
<https://acegif.com/it/gif-di-mele/>

© ACEGIF.com. Tutti i diritti riservati.

- Non si hanno indicazioni sperimentali del fatto che materia oscura ed "ordinaria" interagiscano in altro modo al di fuori dell'interazione gravitazionale

Cos'è la "materia ordinaria"?

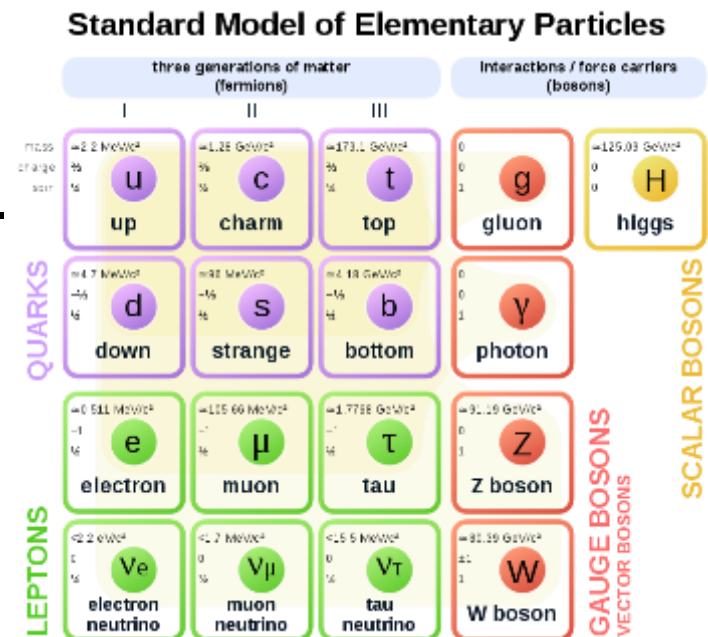
- Materia a noi nota e che possiamo rilevare attraverso esperimenti: acceleratori, microscopi ...
- Possiamo dividerla in due categorie principali:
 1. **materia barionica** (protone, neutrone, nuclei ... cioè le particelle composte dai quark)
 2. **materia leptonica** (elettrone, positrone, muone, neutrini ...)



infn.it/multimedia/

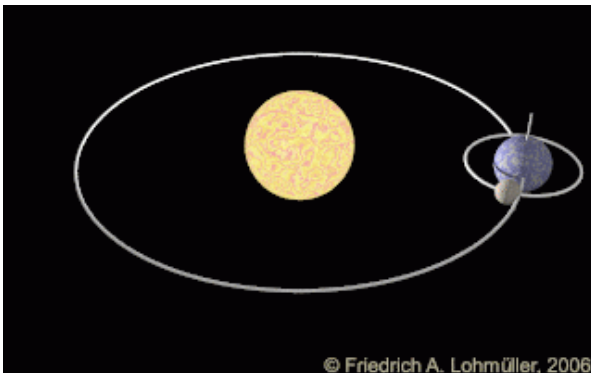
Particelle elementari e modello standard

- Modello standard: teoria delle particelle elementari e delle loro interazioni
- Particelle elementari: quark e leptoni
- Mediatori delle interazioni: fotone, gluone, bosoni Z/W $^{\pm}$
- Ad esempio: fotone è il mediatore dell'interazione elettromagnetica



Interazioni (o forze) fondamentali

- Vi sono quattro forze fondamentali in natura:
 1. forza gravitazionale
 2. forza elettromagnetica
 3. forza nucleare forte
 4. forza nucleare debole



Interazioni (o forze) fondamentali

- Le altre interazioni che conosciamo sono manifestazioni particolari di queste quattro forze fondamentali



Esempio: l'attrito fra due corpi o superfici è una manifestazione dell'interazione elettromagnetica

- L'interazione fra materia oscura e ordinaria avviene attraverso una **quinta forza fondamentale** (oltre a quella gravitazionale)?
- Oggetto di studio di molti esperimenti

Indicazioni a favore dell'esistenza della materia oscura

- **Curve di rotazione galattiche**
- **Effetti di lente gravitazionale**
- **Osservazioni cosmologiche**

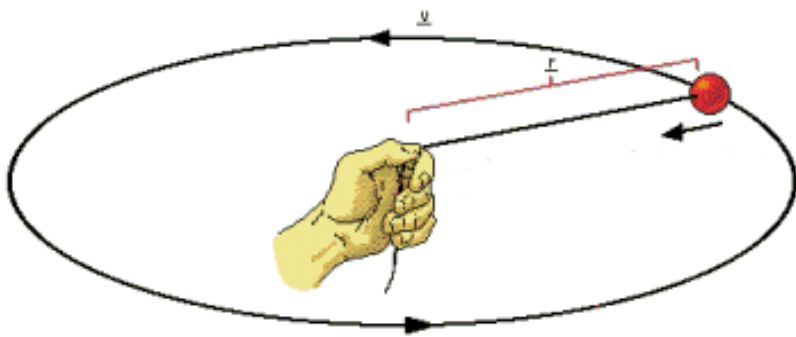
Indicazioni dell'esistenza delle materia oscura – curve di rotazione galattiche

- Supponiamo che una **galassia sferica** abbia una distribuzione di massa isotropa (stessa in tutte le direzioni)
- Con la teoria della gravità di Newton possiamo determinare la **velocità di rotazione** di un corpo ad una certa distanza "R" dal centro della galassia



Forza centrifuga e forza centripeta

- Nel moto circolare uniforme la velocità cambia continuamente direzione e ciò è dovuto all'effetto della forza centripeta



1. **forza centripeta**: diretta verso l'interno del cerchio
2. **forza centrifuga**: diretta verso l'esterno dell'orbita

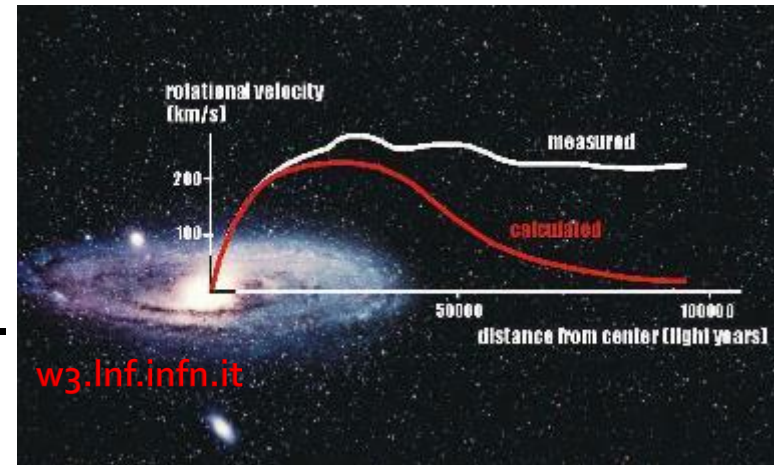
- Bilanciamento fra le due forze: il corpo mantiene la traiettoria circolare
- Sbilanciamento: il corpo esce dalla traiettoria

Leggi di Newton

- Lo stesso succede ad es. nel caso del moto della Terra intorno al Sole (forza centripeta = gravità)
- L'esistenza di un'orbita stabile richiede un bilanciamento fra forza centrifuga e centripeta
- La velocità di rivoluzione della Terra attorno al Sole è legata alla distanza fra i due corpi (Terra e Sole) e alle loro masse da equazioni matematiche (legge della gravitazione universale di Newton e leggi della dinamica)

Indicazioni dell'esistenza delle materia oscura – curve di rotazione galattiche

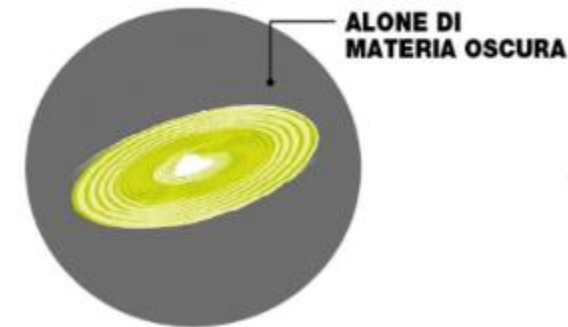
- Possiamo pertanto prevedere la velocità di rotazione di un corpo ad una distanza "R" dal centro galattico usando queste equazioni
- Curve di rotazione galattiche non rispettano queste leggi: le velocità di rotazione non diminuiscono a grandi distanze, ma si "appiattiscono"
- Il gas interstellare non basta a spiegare le anomalie



“Aloni oscuri”

- Si ipotizza allora l'esistenza di un alone di materia oscura galattica (“sfera” di materia oscura che circonda la galassia)
- Dalle curve di rotazione galattiche si deduce che $\approx 70\%$ della massa di una galassia = materia oscura
- Gli “aloni oscuri” giocano un ruolo importante nella formazione ed evoluzione delle galassie
- Durante la formazione galattica, la temperatura della materia “ordinaria” sembra troppo alta per la formazione di strutture legate gravitaz.
- Tale processo di formazione può però essere facilitato dalla precedente presenza di strutture di materia oscura
- Strutture di materia oscura fungerebbero da “stabilizzatori”

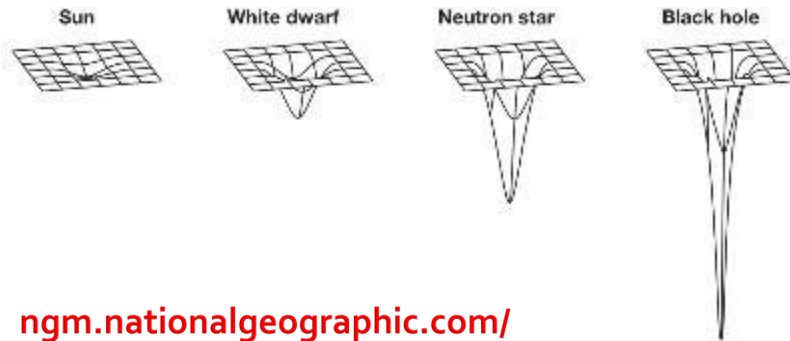
Si ipotizza un alone di materia oscura che circonda la galassia.



Distorsione dello spazio-tempo

- La teoria della relatività generale di Einstein spiega come grandi masse (ad es. stelle o pianeti) possano distorcere lo spazio-tempo attorno a loro.

Gravità → deformazione spazio-tempo



- Il caso estremo è quello di un buco nero, al cui centro si ha una cosiddetta singolarità

Effetti di lente gravitazionale

- L'effetto di **lente gravitazionale** è dovuto alla distorsione dello spazio-tempo causata da un oggetto molto massivo
- Immaginate di avere un raggio luminoso proveniente da molto lontano
- Se il raggio luminoso passa "vicino" ad es. ad una galassia molto massiva, la sua traiettoria può essere deviata dalla galassia
- L'entità della deviazione dipende dalla massa della galassia (più è massiva più distorce lo spazio-tempo attorno ad essa)

Effetti di lente gravitazionale

- Cluster galattico Abell 370 (a 4 miliardi di anni luce)
- Abell 370 contiene centinaia di galassie
- In mezzo alle galassie si vedono misteriosi oggetti di colore blu
- Questi non sono altro che immagini deformate di galassie remote al di là del cluster galattico



Credit: NASA, ESA and J. Lotz and the HFF Team (STScI)

Indicazioni dell'esistenza della materia oscura – effetti di lente gravitazionale

- Le lenti gravitazionali sono un **indicatore della quantità di massa che genera la distorsione**
- Una delle “prove” dell'esistenza della materia oscura viene dalle **misure (o stime) della massa delle galassie che creano gli effetti di lente gravitazionale**
- Effetti rilevati prodotti da una quantità di massa maggiore di quella osservata dai telescopi (materia ordinaria) → **presenza di materia oscura galattica?**

Espansione dell'Universo

- **L'Universo si stia espandendo**. Planck Collaboration, "Planck 2015 results. Cosmological parameters", arXiv:1502.01589
- Vi sono **tre** casi possibili di **geometrie dell'Universo**: piatta, aperta e chiusa



- Nel caso più semplice (Universo piatto), è possibile scrivere le equazioni per la velocità di espansione dell'Universo in funzione di alcuni parametri: la costante di Hubble H ed il parametro di densità Ω

Parametro Ω

- Nel caso di un Universo piatto, $\Omega = 1$
- Il **parametro di densità** è dato dalla somma di diversi contributi: $\Omega = \Omega_R + \Omega_M + \Omega_A$
- Ω_R è il contributo dovuto alla **radiazione** (piccolo)
- $\Omega_M \approx 0.32$ è il contributo dovuto alla **materia**
- $\Omega_A \approx 0.68$ è il contributo dovuto all'**energia oscura**
- L'energia oscura (non rilevabile direttamente) sembra essere responsabile dell'espansione accelerata dell'Universo

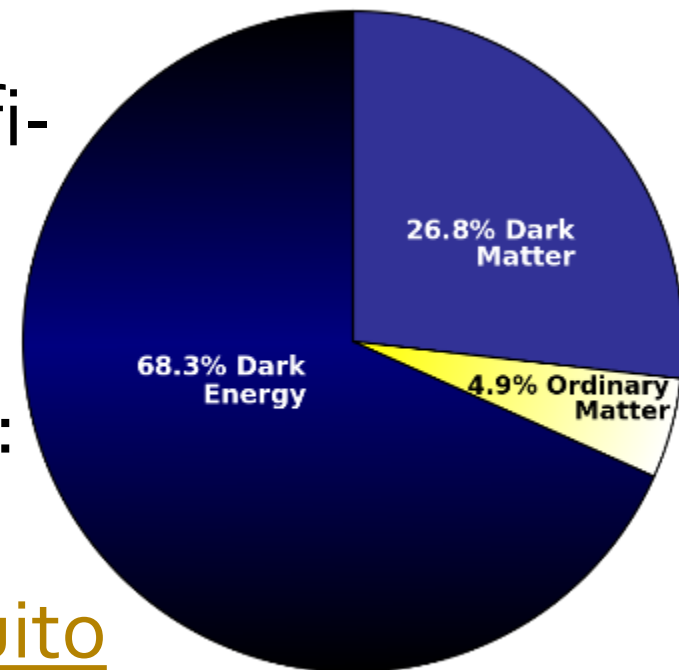
Indicazioni dell'esistenza delle materia oscura – osservazioni cosmologiche

- Il parametro di densità Ω ci dice quale sia la composizione dell'Universo: circa **68% energia oscura** e circa **32% materia**

- L'accordo fra osservazioni astrofisiche e predizioni per la nucleosintesi primordiale (formazione degli elementi dopo il Big Bang):

$$\Omega_{M\text{ ord.}} \approx 0.05 \text{ e } \Omega_{M\text{ osc.}} \approx 0.27$$

- Solo il 5% dell'Universo è costituito dalla materia "ordinaria". Il 27% è materia oscura!!!



Materia oscura: principali candidati

- **WIMP** (Weakly Interacting Massive Particles = particelle massive debolmente interagenti)
- **Axions** (assioni)
- Dark photos (fotoni oscuri)
- Chameleons (“camaleonti”)
- Monopoli magnetici
eccetera ...

Materia oscura: principali candidati

- **WIMP** e **assioni** sono i candidati più accreditati perché hanno le maggiori basi teoriche
- Tutti i candidati differiscono notevolmente per le loro proprietà principali:
 1. tipo di interazione con la materia ordinaria (oltre a quella gravitazionale)
 2. masse
 - eccetera ...
- Candidati di materia oscura diversi richiedono approcci sperimentali notevolmente differenti

Esperimenti: WIMP

- **WIMP**: prodotte nelle prime fasi di espansione dell'Universo dopo il Big Bang; elettricamente neutre; massive (da $1/1000$ a 1000 volte la massa del protone); interagiscono con la materia ordinaria attraverso un'interazione dell'intensità di quella nucleare debole o inferiore
- **Principio di rivelazione**: urto elastico con nuclei atomici di materia ordinaria (i cosiddetti nuclei "target" o bersaglio). Una certa quantità di energia (o calore) viene rilasciata nel rivelatore di WIMP

Esperimenti: WIMP

- L'urto WIMP-nucleo, se avviene, è molto raro:
 ≈ 1 urto all'anno per $1 \div 100$ kg di materiale
- Questi segnali possono essere nascosti dal cosiddetto "fondo", cioè gli urti indotti da altri eventi:
radioattività naturale, raggi cosmici, ...
- **Precauzioni:** lavorare in ambienti a bassa radioattività naturale, schermare il rivelatore dai raggi cosmici, ...
- Raggi cosmici: particelle (principalmente protoni) generate dalle stelle e dalle galassie che collidono con l'atmosfera terrestre, producendo altre particelle
Si stimano sulla terra circa: 1 milione di particelle/m² ogni ora

Esperimenti: WIMP

- **Rivelatori di WIMP**: schermati dalla radiattività naturale, collocati in profondità, molto massivi (maggiore probabilità di osservare eventi di collisione WIMP-nuclei)
- **Esperimento Xenon** (Gran Sasso):
 1. è collocato nei laboratori sotto il Gran Sasso (riduzione raggi cosmici)
 2. è in grado di distinguere l'ipotetica WIMP dalle particelle generate dalla radioattività naturale



Esperimenti: assioni

- **Assioni**: prodotte nelle prime fasi di espansione dell'Universo dopo il Big Bang; elettricamente neutre; leggere (la loro massa dovrebbe essere una piccola frazione della massa dell'elettrone)
- Esiste la possibilità che gli ipotetici assioni possano trasformarsi in fotoni (e viceversa) in presenza di intensi campi magnetici (la cosiddetta oscillazione assione-fotone)
- L'esperimento più noto sugli assioni è ADMX

Grazie per l'attenzione!



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

