

# Le forze della natura

© Mauro Fiorentini, 2019

# Le forze della natura (1)

- In natura si sperimentano numerose forze: attrito, pressione, gravità, forze elettriche, forze magnetiche...
- Nell'antichità il concetto di forza non era molto chiaro: forza, quantità di moto ed energia erano spesso confuse.
  - Aristotele riteneva che una forza servisse non solo per far muovere un corpo inizialmente fermo, ma anche per **mantenerlo in moto**.
    - Riteneva che i corpi in moto **tendessero a fermarsi da soli**.
  - Ancora Leonardo tentò di costruire macchine per il moto perpetuo.

# Le forze della natura (2)

- Quando Newton cristallizzò il concetto di forza, le varie forze furono classificate e studiate separatamente, ma la loro origine rimase vaga, fino all'affermarsi della teoria atomica.
- Si pensò quindi che le forze che sperimentiamo sono conseguenze di forze che si esercitano tra gli atomi.

# Le forze della natura (3)

- Nel XIX secolo si fece strada l'idea che tutte le forze siano manifestazioni di un numero ridotto di forze fondamentali, che agiscono sui costituenti elementari della materia.
  - I progressi nella comprensione della struttura della materia portarono a concludere che un gran numero di forze (come l'attrito) sono semplicemente manifestazioni di forze elettriche tra particelle.

# L'elenco delle forze

- All'inizio del XIX secolo l'elenco delle forze fondamentali note comprendeva:
  - la forza elettrica;
  - la forza magnetica;
  - la gravità.

# Gli albori dell'unificazione

- Newton fece una prima unificazione delle leggi fisiche con la sua teoria della gravità, mostrando che le leggi che valgono sulla terra sono le stesse che valgono tra gli astri.
  - Fino ad allora si riteneva che “i cieli” soggiacessero a leggi totalmente differenti, che in particolare permettevano il moto perpetuo.

# La prima unificazione (1)

- Nella seconda metà del XIX secolo le equazioni di Maxwell permisero di unificare forze elettriche e magnetiche in una forza unica, con un piccolo insieme di formule che governano tutte le manifestazioni di entrambe.
  - Fu il più grande trionfo della fisica del XIX secolo.
    - Campi differenti, ma legati da un unico insieme di equazioni.
  - Mentre prima si parlava di forze elettriche e magnetiche, oggi si usa più comunemente il termine unico “elettromagnetiche”.

# La prima unificazione (2)

- Le equazioni di Maxwell descrivono il comportamento dei campi elettromagnetici e dei corpi soggetti a forze elettromagnetiche.
- Le equazioni ci dicono che:
  - campi elettrici variabili generano campi magnetici;
  - campi magnetici variabili generano campi elettrici;
  - i campi magnetici sono prodotto da cariche elettriche in movimento;
  - i campi magnetici agiscono su cariche elettriche in movimento.
- Nel XX secolo grazie a Einstein si capì che i campi magnetici si possono considerare un effetto relativistico dei campi elettrici.



# L'elenco incompleto (1)

- Unificate due delle tre forze note, alcuni fisici credettero d'essere vicini alla comprensione totale dell'universo.

“Non resta nulla da scoprire in Fisica, restano solo da fare misure sempre più precise”

Lord Kelvin

# L'elenco incompleto (2)

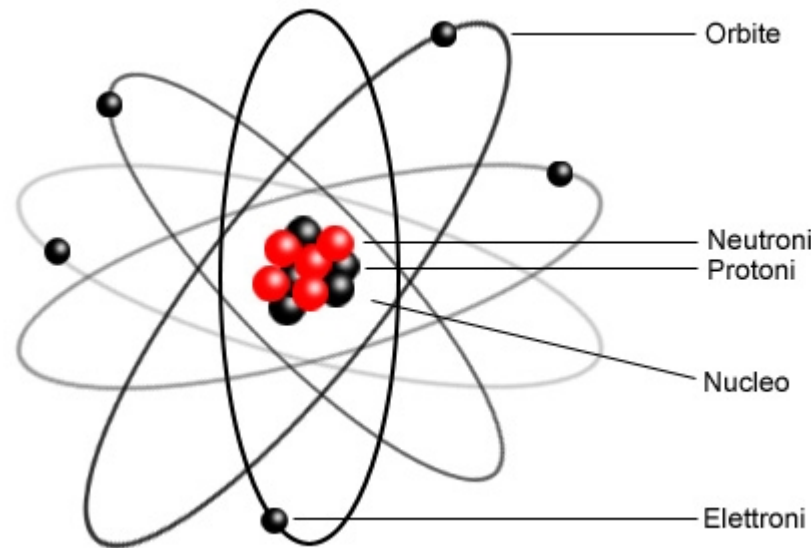
- Qualche fenomeno sfuggiva però alla spiegazione.
  - In particolare, come fa il Sole a brillare?
  - Le vecchie teorie basate sulla combustione di una sfera di carbonio crollarono quando fu possibile analizzare lo spettro della luce emessa.
  - Si conoscevano anche stelle che emettono luce di colori molto diversi, dal rosso cupo all'azzurro.

# L'elenco incompleto (3)

- Alla fine del XIX secolo furono scoperti fenomeni che sembravano indicare l'esistenza di altre forze:
  - nel 1895 Wilhelm Rontgen scoprì i raggi X;
  - nel 1896 Henri Becquerel scoprì la radioattività dell'uranio;
  - nel 1897 J.J. Thomson scoprì l'elettrone e poco dopo si scoprì che gli atomi potevano emettere elettroni.

# L'elenco incompleto (4)

- Intorno al 1910 una serie di esperimenti indussero Rutherford a suggerire che un atomo fosse costituito da un piccolo nucleo positivo, circondato da elettroni negativi.



# L'elenco incompleto (5)

- Un nucleo formato da particelle con carica positiva (protoni) e altre elettricamente neutre (neutroni) dovrebbe però andare in pezzi rapidamente, a causa della repulsione tra le cariche elettriche.
  - Non era chiaro cosa tenga insieme il nucleo.
- Inoltre certi atomi emettono talvolta particelle di vario tipo con grande energia.
  - Da dove viene?

# Il completamento dell'elenco

- Nel XX secolo si capì che esistono altre due forze, che a differenza delle altre hanno un raggio d'azione brevissimo
  - Forza elettromagnetica e gravità diminuiscono con il quadrato della distanza; le due nuove forze diminuiscono esponenzialmente.
  - Le nuove forze furono dette “nucleari”, perché praticamente nulle già a distanze pari a una frazione del diametro di un nucleo atomico.

# Le forze fondamentali (1)

- Finalmente sappiamo che tutte le forze presenti in natura si riconducono a quattro forze fondamentali:
  - la forza nucleare forte,
  - la forza elettromagnetica,
  - la forza nucleare debole,
  - la forza di gravità.

# Le forze fondamentali (2)

- Tutte le altre forze si spiegano come manifestazioni delle forze fondamentali.
  - L'attrito è una forza elettrica tra molecole.
  - La pressione di un fluido nasce dagli urti tra le molecole, che si respingono con forze elettriche.
  - Il sistema solare è tenuto insieme dalla forza gravitazionale.
  - Il Sole stesso si è “acceso” e sta insieme grazie alla forza gravitazionale, ma “brilla” grazie alla forza nucleare debole.
  - I nuclei atomici sono tenuti uniti dalla forza nucleare forte.



# La forza gravitazionale (1)

- La più semplice da sperimentare, ma anche la più debole tra le forze.
  - Si manifesta in pratica solo se le masse in gioco sono molto grandi.
- E' una forza unicamente **attrattiva**, alla quale sono sensibili **tutti i corpi**.
- E' a **lungo raggio**: decresce all'aumentare della distanza, ma non si annulla mai.

# La forza gravitazionale (2)

- Secondo la legge di Newton la forza tra due corpi è proporzionale al prodotto delle loro masse e inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza.
  - La costante di proporzionalità è molto piccola: se le masse non sono enormi è debolissima e difficilissima da misurare.
- E' la forza fondamentale su grandi distanze.

# La forza gravitazionale (3)

Fa contrarre nubi di gas e polveri a formare pianeti e stelle.

- Come queste, nella grande nube di Magellano.



# La forza gravitazionale (3)

- Mantiene legati i pianeti alle stelle.
- Mantiene legate le stelle in galassie, come Andromeda.



# La forza elettromagnetica (1)

- La più visibile nella vita quotidiana.
  - La forza che lega gli elettroni al nucleo è elettrica.
  - La forza che lega gli atomi tra loro a formare molecole è elettrica.
  - Tutti i fenomeni chimici dipendono da forze elettriche.
- E' una forza **attrattiva o repulsiva**, alla quale sono sensibili **solo i corpi carichi**.
- E' a **lungo raggio**: decresce all'aumentare della distanza, ma non si annulla mai.

# La forza elettromagnetica (2)

- Secondo la legge di Coulomb la forza tra due corpi carichi è proporzionale al prodotto delle loro cariche e inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza.
  - La formula è del tutto analoga a quella della forza gravitazionale.
- Tra due particelle elementari cariche è **più intensa** della forza nucleare debole.

# La forza elettromagnetica (2)

La conosciamo bene, ce ne serviamo sempre.



# La forza nucleare debole (1)

- E' una forza **attrattiva o repulsiva**, alla quale sono sensibili **tutte le particelle levogire** (che “ruotano” verso sinistra rispetto alla direzione di movimento) e **tutte le antiparticelle deströgire**.
- E' a **breve raggio**: decresce molto rapidamente all'aumentare della distanza ed è di fatto trascurabile a distanze maggiori di  $10^{-18}$  metri (un millesimo del diametro di un nucleo atomico).
  - Tra due particelle a breve distanza è **immensamente più intensa** della forza gravitazionale, ma **più debole** della forza elettrica, se sono cariche.

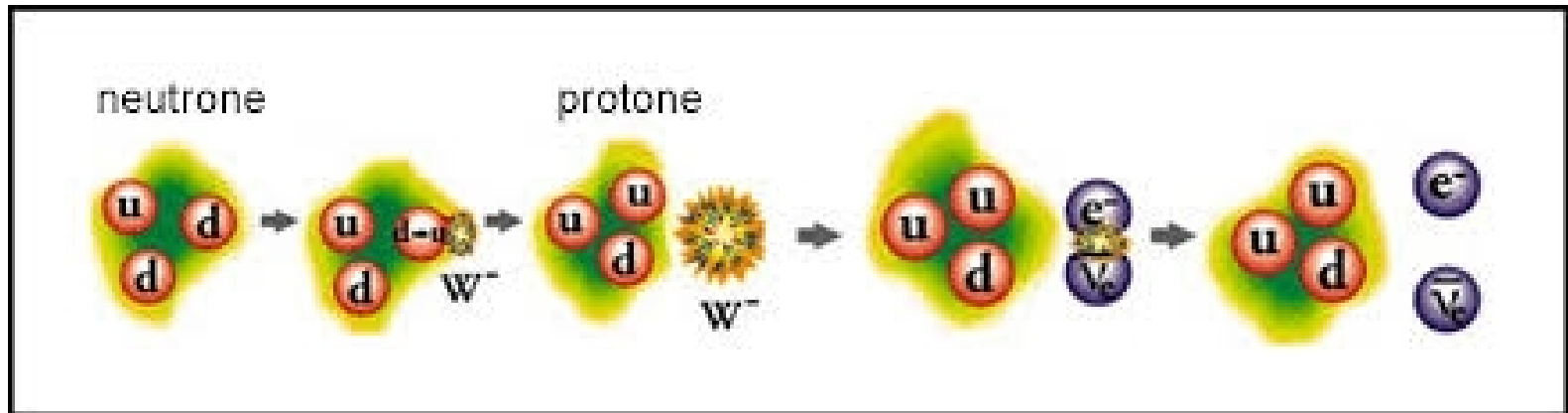


# La forza nucleare debole (2)

- Non si “vede” direttamente, ma i suoi effetti sono importantissimi.
  - E’ responsabile del decadimento beta, passo intermedio della fusione nucleare protone – protone, che alimenta il Sole e innesca le reazioni che portano alla produzione degli elementi.
- E’ la forza che ha permesso la formazione della materia di cui siamo costituiti.
  - Non sarebbe conveniente essere fatti solo di idrogeno ed elio.

# La forza nucleare debole (3)

- Il decadimento beta consiste nella trasformazione di un neutrone in un protone, con emissione di un elettrone, un antineutrino ed energia.



# La forza nucleare debole (4)

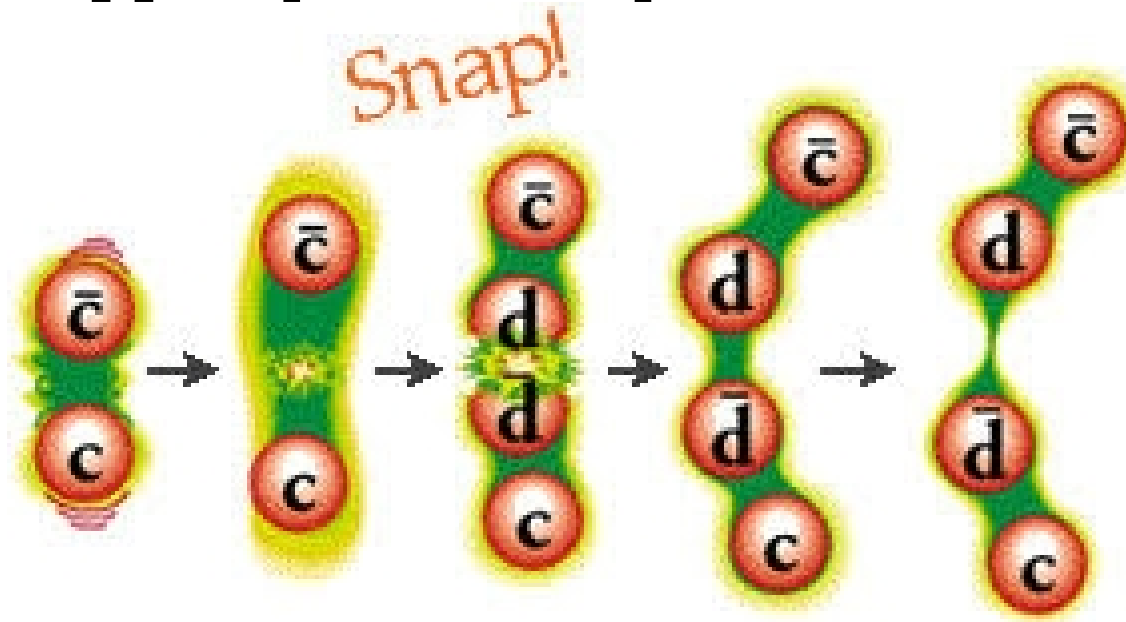
- E' alquanto particolare:
  - agisce anche sui neutrini;
  - può cambiare il “sapore” dei quark;
    - Nel decadimento di un neutrone un quark “down” diventa “up”;
  - non rispetta la parità;
    - un esperimento e la sua immagine speculare possono dare risultati diversi;
  - non rispetta la simmetria di carica;
    - un esperimento può dare risultati differenti se ripetuto invertendo tutte le cariche delle particelle.

# La forza nucleare forte (1)

- E' una forza **attrattiva o repulsiva**, alla quale sono sensibili **solo i barioni** (come protoni e neutroni).
  - In realtà agisce sui loro costituenti, i quark.
- Tra i quark **non diminuisce con la distanza**, tra adroni è una forza residua a **breve raggio**: decresce molto rapidamente all'aumentare della distanza ed è di fatto trascurabile a distanze maggiori di  $10^{-15}$  metri (meno del diametro di un nucleo atomico).
- Tra due particelle a breve distanza è **più intensa** della forza elettrica.

# La forza nucleare forte (2)

- Lega i quark a gruppi di tre o a coppie quark-antiquark: per cercare di separare i quark, bisogna fornire tanta energia che si creano nuove coppie quark-antiquark.



# La forza nucleare forte (3)

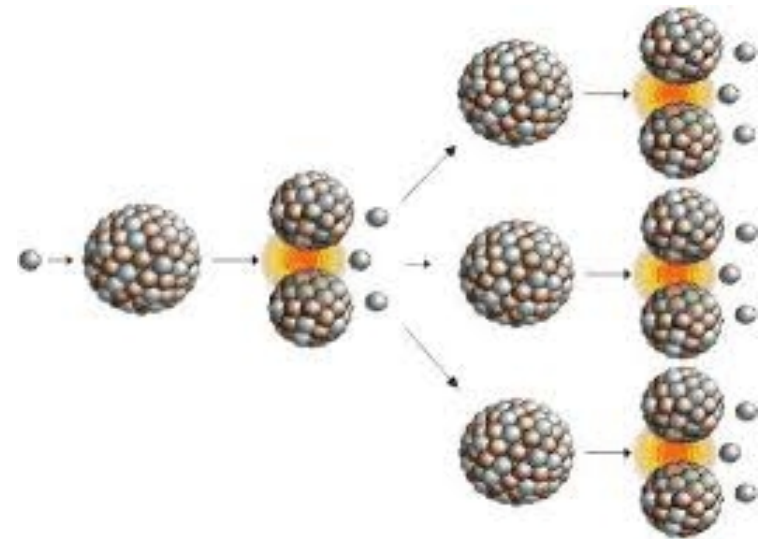
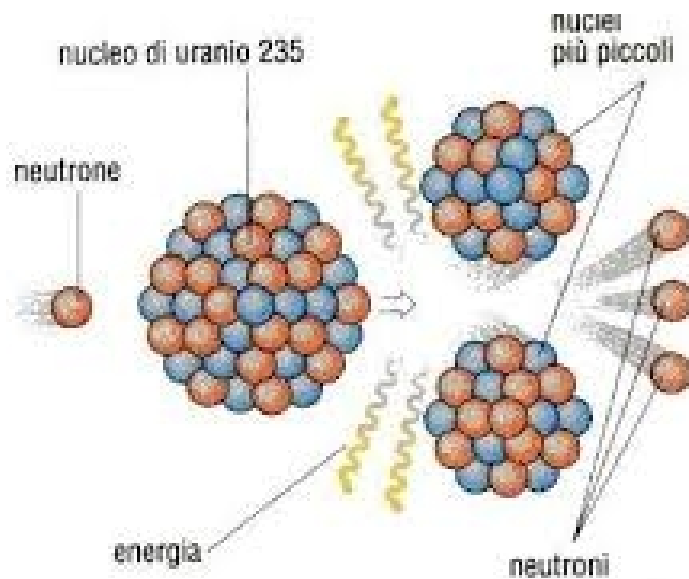
- La forza che lega protoni e neutroni è solo un residuo della forza tra i quark della stessa particella, un po' come il legame tra molecole è un residuo dell'attrazione elettrica tra elettroni e nucleo.
  - Quando due protoni o neutroni sono molto vicini, i quark dell'uno sentono l'attrazione dei quark dell'altro e attraggono tra loro le due particelle.

# La forza nucleare forte (4)

- La forza nucleare forte non si “vede” direttamente, ma i suoi effetti sono importantissimi.
  - L’attrazione tra protoni e neutroni tiene insieme i nuclei degli atomi, rendendo possibile l’esistenza di tutti gli elementi chimici, tranne l’idrogeno.
  - Senza di essa tutti gli elementi, tranne l’idrogeno, si disintegrerebbero immediatamente (e noi anche).
  - E’ responsabile della fissione nucleare.

# La forza nucleare forte (5)

- Quando un nucleo contiene troppi protoni, diventa instabile e può rompersi spontaneamente; l'arrivo di un neutrone innesca la reazione.





# La scala di forza

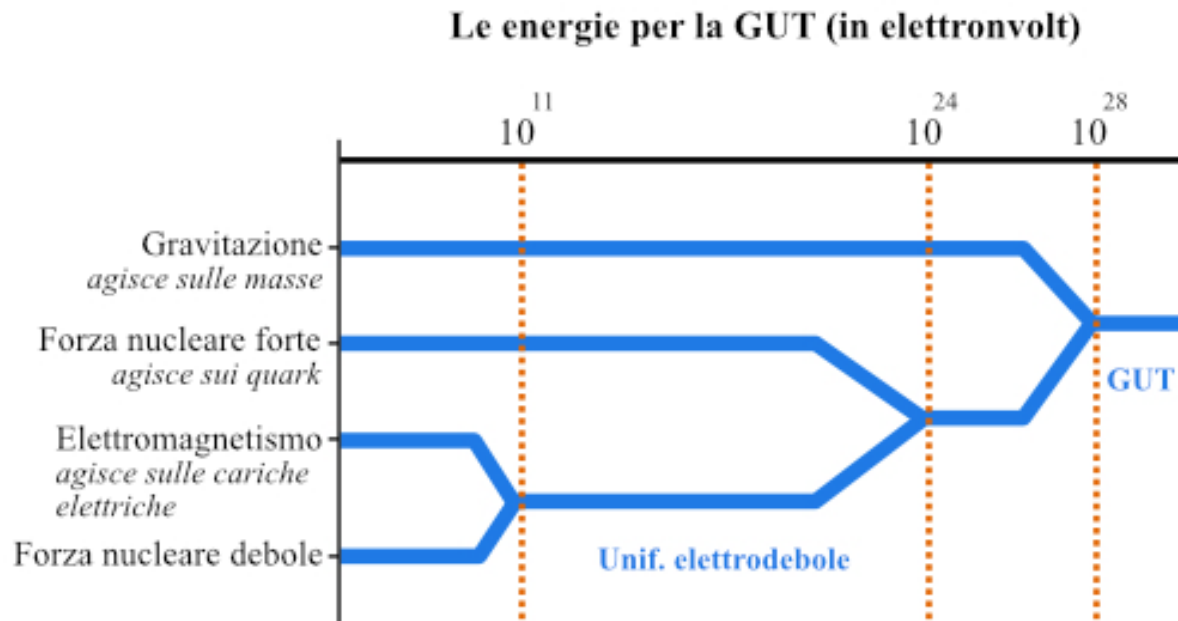
- Prendendo due protoni in un nucleo, possiamo approssimativamente valutare l'intensità relativa delle forze tra loro come segue:
  - forza gravitazionale 1;
  - forza nucleare debole  $10^{34}$ ;
  - forza elettromagnetica  $10^{37}$ ;
  - forza nucleare forte  $10^{39}$ .

# L'unificazione delle forze (1)

- Molti ritengono che le quattro forze siano solo apparentemente distinte, ma siano in realtà manifestazioni di un'unica interazione fondamentale e quindi possano essere riunite in una teoria unificata.
  - Esattamente come fece Maxwell unificando elettricità e magnetismo.

# L'unificazione delle forze (2)

- Le forze sarebbero indistinguibili a temperature ed energie immense (come quelle del Big Bang) e apparirebbero diverse in condizioni più “accessibili”.



# L'unificazione delle forze (3)

- Nel 1968 Abdus Salam, Sheldon Lee Glashow e Steven Weinberg (premi Nobel 1979) unificarono la forza elettrica con la forza nucleare debole.
  - La forza risultante si chiama “elettrodebole”.



# L'unificazione delle forze (4)

- La teoria che unifica la forza elettrodebole con la forza nucleare forte si chiama “Modello Standard” ed è ancora parzialmente incompleta.
  - Le verifiche sperimentali sono molto complesse.
  - L'unificazione totale avviene a energie per ora inaccessibili.

# L'unificazione delle forze (5)

- E la gravità?
- Molti ritengono che possa essere unificata con le altre, in una colossale “teoria del tutto”.
- Al momento non abbiamo neppure candidati seri.
  - Anzi, la gravità fa a pugni con le altre forze!

# Le difficoltà della gravità (1)

- E' una forza debolissima, gli esperimenti sono difficilissimi.
- Per lo più dobbiamo accontentarci degli esperimenti che la natura ha predisposto per noi, come le orbite dei pianeti e le attrazioni tra le stelle, ma non possiamo variare le condizioni sperimentali.
  - Nel caso del sistema solare, varie associazioni si opporrebbero a ogni modifica.

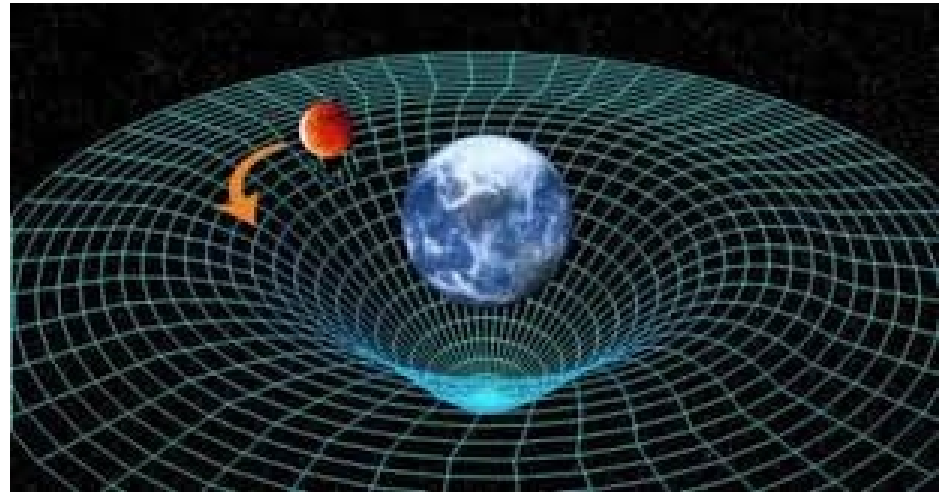
# Le difficoltà della gravità (2)

- Purtroppo le maggiori difficoltà della teoria si incontrano nelle situazioni di campi estremamente intensi, che sono poco accessibili.
  - Come stelle di neutroni e buchi neri.
  - Dobbiamo accontentarci di osservazioni indirette.



# Le difficoltà della gravità (3)

- Per di più secondo la relatività generale la gravità, se molto intensa, deforma lo spazio, ossia il sistema di riferimento che vorremmo usare per le misure geometriche, che diviene non euclideo.
- Le altre forze agiscono **nello spazio**, la gravità **sullo spazio**.



# Le teorie che litigano (1)

- Il secolo scorso ci ha lasciato due splendide teorie: la meccanica quantistica, che spiega forza elettrodebole e forza nucleare forte, e la relatività generale, che spiega la gravitazione.
- Entrambe danno previsioni **meravigliosamente precise**, in perfetto accordo con le misure disponibili: si arriva alla nona cifra di precisione per alcune misure nella fisica delle particelle e nella previsione di orbite.

# Le teorie che litigano (2)

- Sfortunatamente le due teorie **non vanno d'accordo**: almeno una delle due è errata, o meglio, è solo un'approssimazione.
  - Forse entrambe sono solo ottime approssimazioni, come lo è la meccanica di Newton, ma in condizioni estreme ci serve qualcosa di meglio.

# I problemi (1)

- La meccanica quantistica è perfetta per spiegare ciò che accade nell'estremamente piccolo, quando si può trascurare la gravità, ma non può, per ora, contemplare quest'ultima.
  - Ma la Terra (fortunatamente) gira intorno al Sole noi restiamo attaccati al nostro pianeta a causa della gravità.

# I problemi (2)

- La relatività generale spiega cosa accade su distanze immense, con corpi di grande massa che si attraggono, ma di fatto le nostre teorie trattano la materia come se fosse continua.
  - Il funzionamento di qualsiasi apparecchiatura moderna, incluso il telefono cellulare, dipende però dal fatto che la materia **non è continua**, ma divisa in particelle.
- Una teoria quantistica della gravità non è ancora stata costruita.

# Il conflitto (1)

- Che accade quando abbiamo un grande campo gravitazionale, su distanze relativamente piccole, come in un buco nero?
- Che accade alle particelle in un buco nero?
- Nessuna delle due teorie dà risposte soddisfacenti a queste domande.
  - Dal punto di vista gravitazionale, la massa dovrebbe collassare al centro, raggiungendo densità infinita.
  - La meccanica quantistica ci dice che è impossibile.

# Il conflitto (2)

- Insomma, un buco nero non dovrebbe esistere!
- Però è ignorante, **non sa d'essere proibito** dalle teorie e quindi continua a esistere.
  - Sarebbe un buon posto per cercare le risposte, a parte la distanza (Sgr A, a 26000 anni luce?) che ci separa dal più vicino, se non fosse per il fatto che le condizioni ambientali nei suoi paraggi sono molto sfavorevoli alla sopravvivenza di qualsiasi dispositivo meccanico od organismo vivente.

# Proviamo in laboratorio?

- Al CERN si sta cercando di ottenere qualcosa di simile, da studiare: un grumo di materia delle dimensioni di un nucleo atomico, in condizioni di alta temperatura e densità estrema.
  - Quando è stato incautamente battezzato “mini buco nero” varie associazioni hanno chiesto di interrompere gli esperimenti, temendo potesse inghiottire e distruggere la Terra.
  - Il Medio Evo è duro a scomparire dalle menti!



# Finisce qui?

- Siamo proprio sicuri che le forze in natura siano “solo” quattro?
- La risposta è: sì, beh, forse, però magari no.
- Non riusciamo a spiegare alcuni fenomeni astronomici, in particolare:
  - la stabilità di grandi strutture (ammassi di galassie);
  - la variazione di velocità dell’espansione dell’Universo (che sembra accelerare).

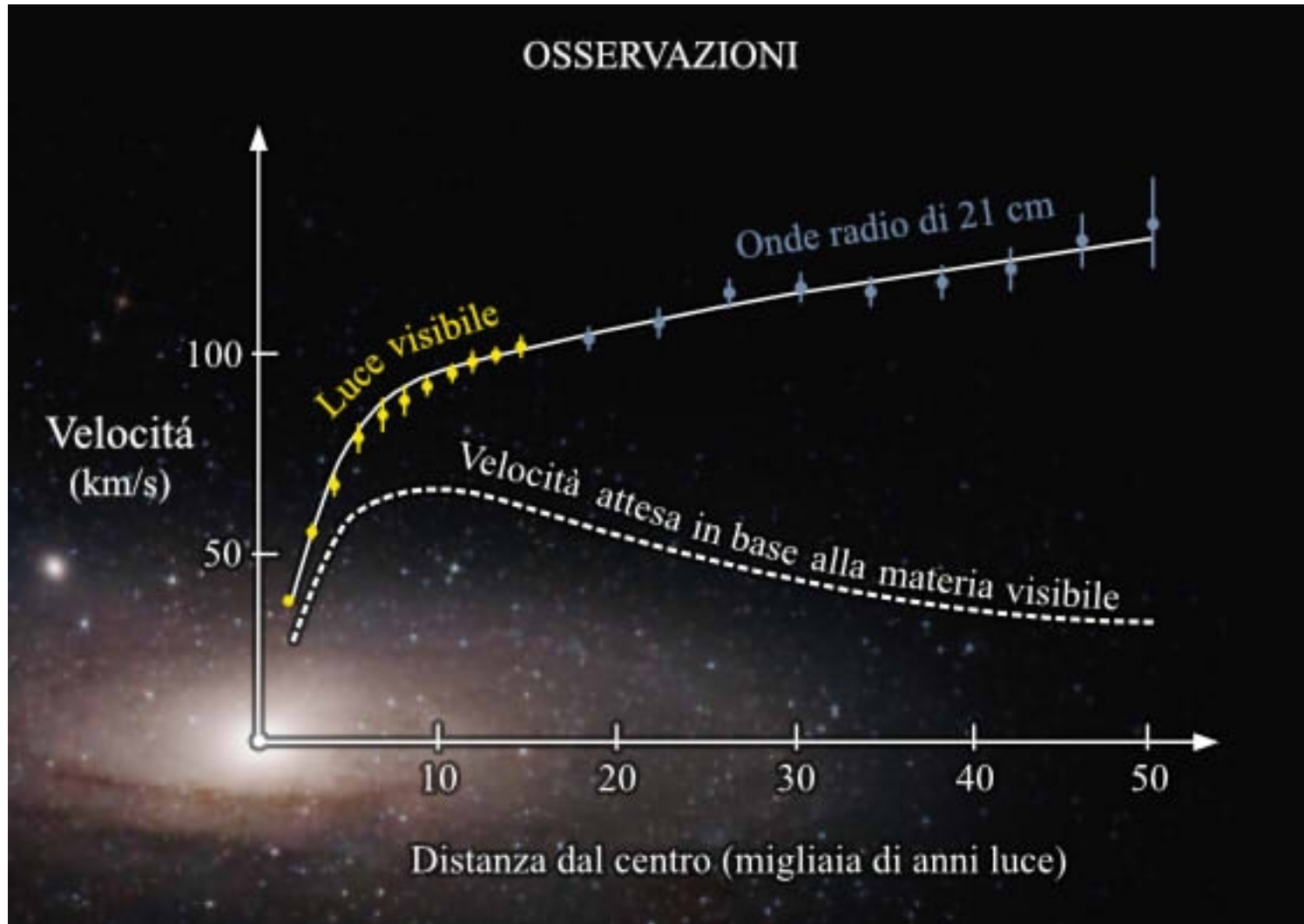
# La rotazione delle galassie (1)

- Le galassie ruotano su se stesse.



NGC1232

# La rotazione delle galassie (2)



# La rotazione delle galassie (3)

- La velocità di rotazione delle galassie è molto maggiore di quanto previsto dalla teoria di Newton.
  - Ruotando così velocemente dovrebbero disfarsi per la forza centrifuga.
  - Cosa le tiene insieme?

# Possibili spiegazioni

- Errori di misura, dovuti a effetti poco compresi.
- La presenza di materia “oscura”, che non si vede, ma esercita effetti gravitazionali; dovrebbe però essere **5 volte la massa visibile**.
  - Gas rarefatti e freddi?
  - Un numero enorme di stelle morte?
  - Grandi quantità di particelle di un tipo sconosciuto?

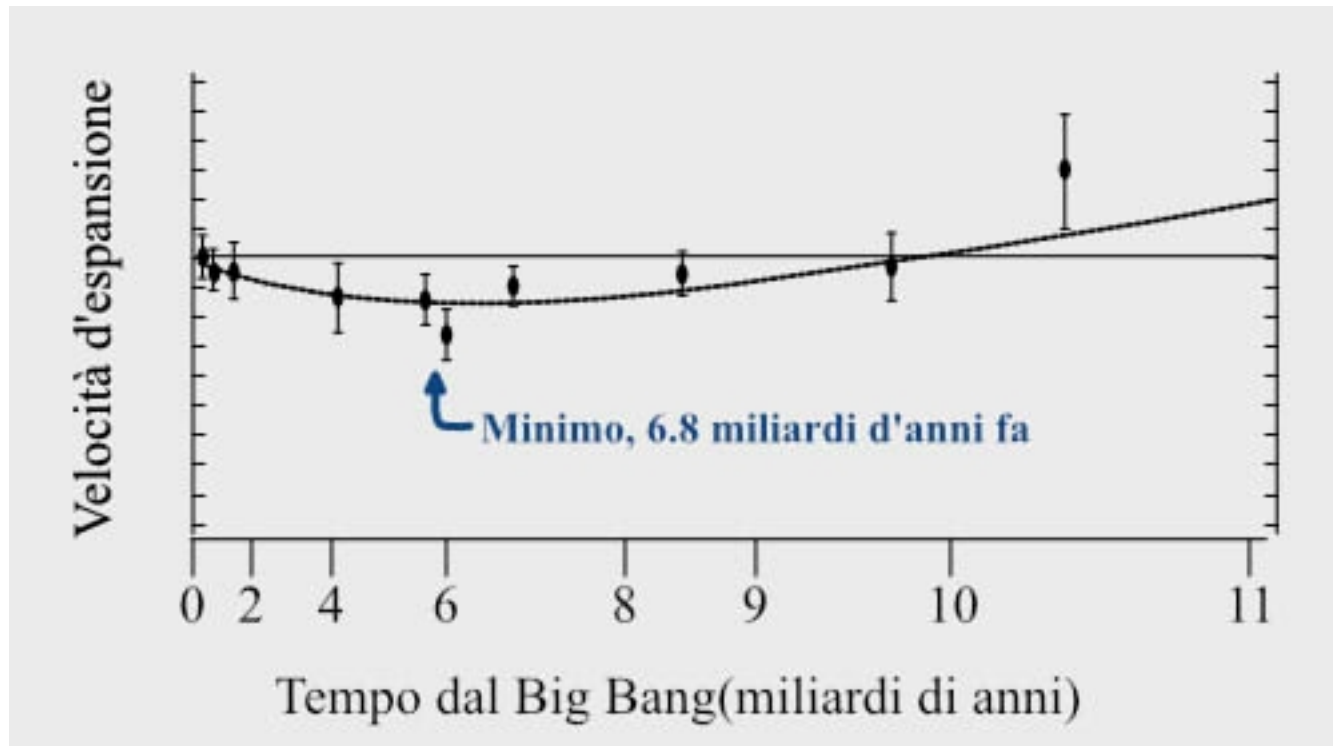
# L'espansione dell'Universo (1)

- Nel 1912 Vesto Slipher scoprì uno spostamento verso il rosso della luce proveniente da galassie lontane, che indica un moto di allontanamento.
- Nel 1922 Alexander Friedmann spiegò il fenomeno come dovuto all'espansione dell'Universo, secondo la relatività generale.
- Nel 1927 Georges Lemaître dimostrò che la velocità è proporzionale alla distanza.
- Nel 1929 Edwin Hubble propose una legge empirica per correlare distanza e velocità:  $v = Hd$ , dove  $H$  è da allora detta “costante di Hubble” (da 68 a 73 km/s per Megaparsec di distanza, secondo misure diverse).

# L'espansione dell'Universo (2)

- L'espansione dell'Universo è stata in seguito confermata in vari modi.
- La gravità dovrebbe **rallentare** l'espansione.
  - Tenendone conto si ricava l'età dell'Universo di 13.7 miliardi di anni.
- Però nel 1998 da Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt e Adam Riess sulla base di osservazioni di supernove di tipo Ia in galassie lontane dedussero che l'espansione sta **accelerando**.
  - Per questa scoperta ricevettero il premio Nobel nel 2011.

# L'espansione dell'Universo (3)





# OOPS, ci siamo scordati qualcosa?

- Forse. O forse no: tra le spiegazioni proposte:
  - errori di misura (ancora?), dovuti a effetti poco compresi;
  - alcune “costanti” meno costanti del dovuto, che variano leggermente su scale di tempo di miliardi d’anni;
  - un’energia oscura, che sarebbe pari al 76% dell’energia dell’Universo;
  - una quinta forza (oh, no!), con effetti misurabili solo su grandi distanze.
- Quello che è sicuro è che c’è ancora **molto** da lavorare!