

IN CAMMINO VERSO LA RELATIVITÀ GENERALE

La straordinaria avventura di Einstein.

La piccola luna di Newton e l'unificazione fra cielo e terra non bastano più

La Relatività Generale di Einstein compie 100 anni 1915 - 2015
Dipartimento di Fisica

5/11/2015

ORE 9.00
IN CAMMINO VERSO LA RELATIVITÀ GENERALE
Monica Colpi
La straordinaria avventura di una sola mente. Che cos'è la gravità? La piccola luna di Newton e l'unificazione fra cielo e terra non bastano più.

FARADAY E MAXWELL: CAMPI, SIMMETRIE E LUCE
Massimo Nocente
Una crisi annunciata.

LA RELATIVITÀ RISTRETTA: SPAZIO E TEMPO INSIEME
Silvia Penati
Una nuova dinamica in uno spazio-tempo non più assoluto.

LA RELATIVITÀ GENERALE: SPAZIOTEMPO CURVO
Alessandro Tomasiello
Geometria e gravità: un legame indissolubile.

ORE 14.30
RELATIVITÀ GENERALE: NON SOLO TEORIA
Giandomenico Sassi
Verifiche sperimentali ai limiti della tecnologia passata e futura.

VERSO LA GRAVITÀ QUANTISTICA
Alberto Zaffaroni
Come unificare il mondo dei quanti con la gravità? Il microcosmo con il macrocosmo?

EINSTEIN TRA I SAPIENTI: L'OCCIO DEL FILOSOFO
Federico Laudisa
Einstein ai confini fra scienza e filosofia.
Lecture di Einstein

Università di Milano Bicocca,
aula Magna U6
Piazza dell'Ateneo Nuovo 1 - Milano

5/6 novembre 2015

6/11/2015

ORE 9.00
STELLE E NEBULOSE: L'UNIVERSO PRIMA DEL 1931
Peppo Gavazzi
Un universo immutabile di sole stelle? Prime avvisaglie di un universo in espansione ed evoluzione: supernove, nebulose e la legge di Hubble.

1965: LA SCOPERTA DELLA RADIAZIONE COSMICA DI FONDO
Mario Zanoni
Il segno indelebile del Big Bang.

DAL CIELO DELLE STELLE FISSE AL BIG BANG: NASCE LA COSMOLOGIA
Claudia Destri
La Relatività Generale per descrivere l'architettura dell'universo in espansione.

ALLA RICERCA DELLA MATERIA OSCURA
Shahram Rahatlou
Materia oscura fra stelle e galassie o gravità modificata?

BUCHI NERI NELL'UNIVERSO
Massimo Dotti
Cosa sono? Alla scoperta di un universo violento.

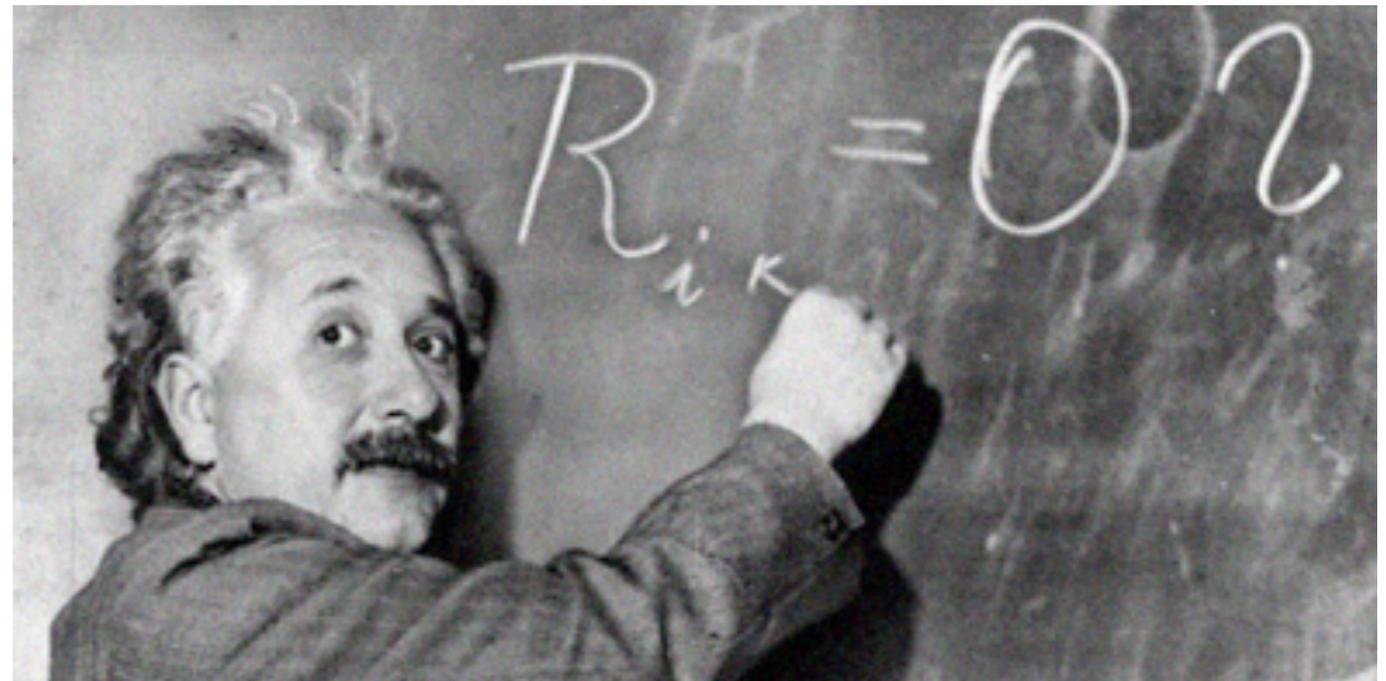
ORE 14.00
ONDE GRAVITAZIONALI: ALLA SCOPERTA DI UN UNIVERSO INVISIBILE
Monica Colpi
Buchi neri in collisione. Come far vibrare la gravità e creare i suoi messaggeri, come scoprire i primi buchi neri nell'universo.

LA FISICA DI INTERSTELLAR
Gabriele Ghisellini
Tutto è vero ma strano, davvero strano.

ORE 15.00
Proiezione del film INTERSTELLAR
di Christopher Nolan
Ingresso libero fino a esaurimento dei posti (9.50).
www.unimib.it/gr100

Libri di riferimento: 

100 ANNI

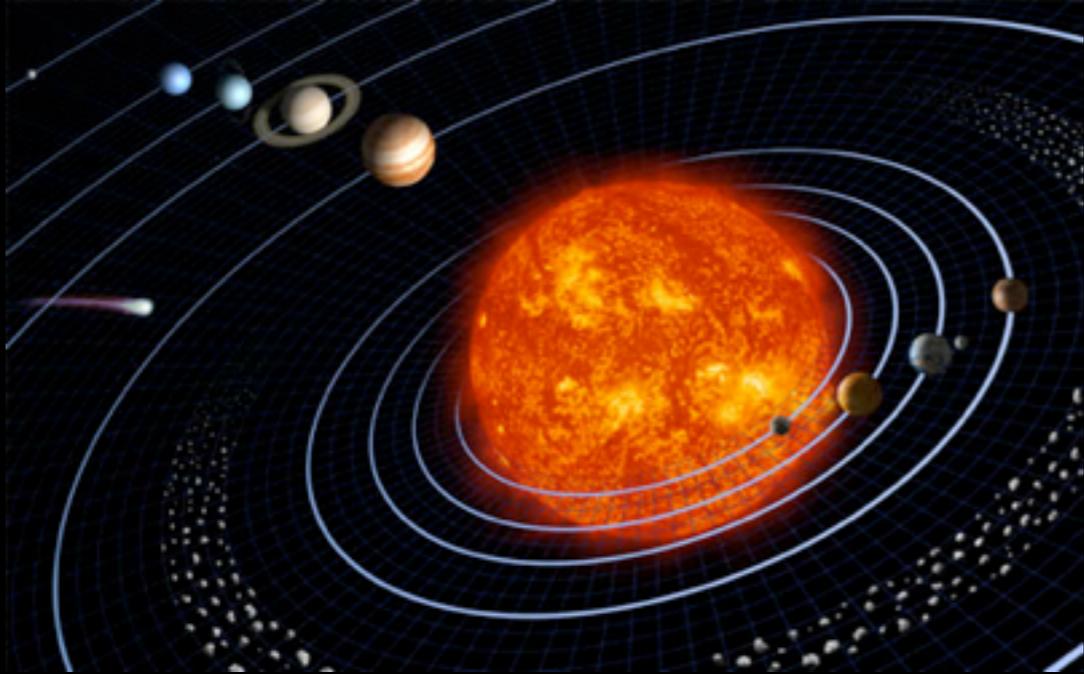


MONICA COLPI

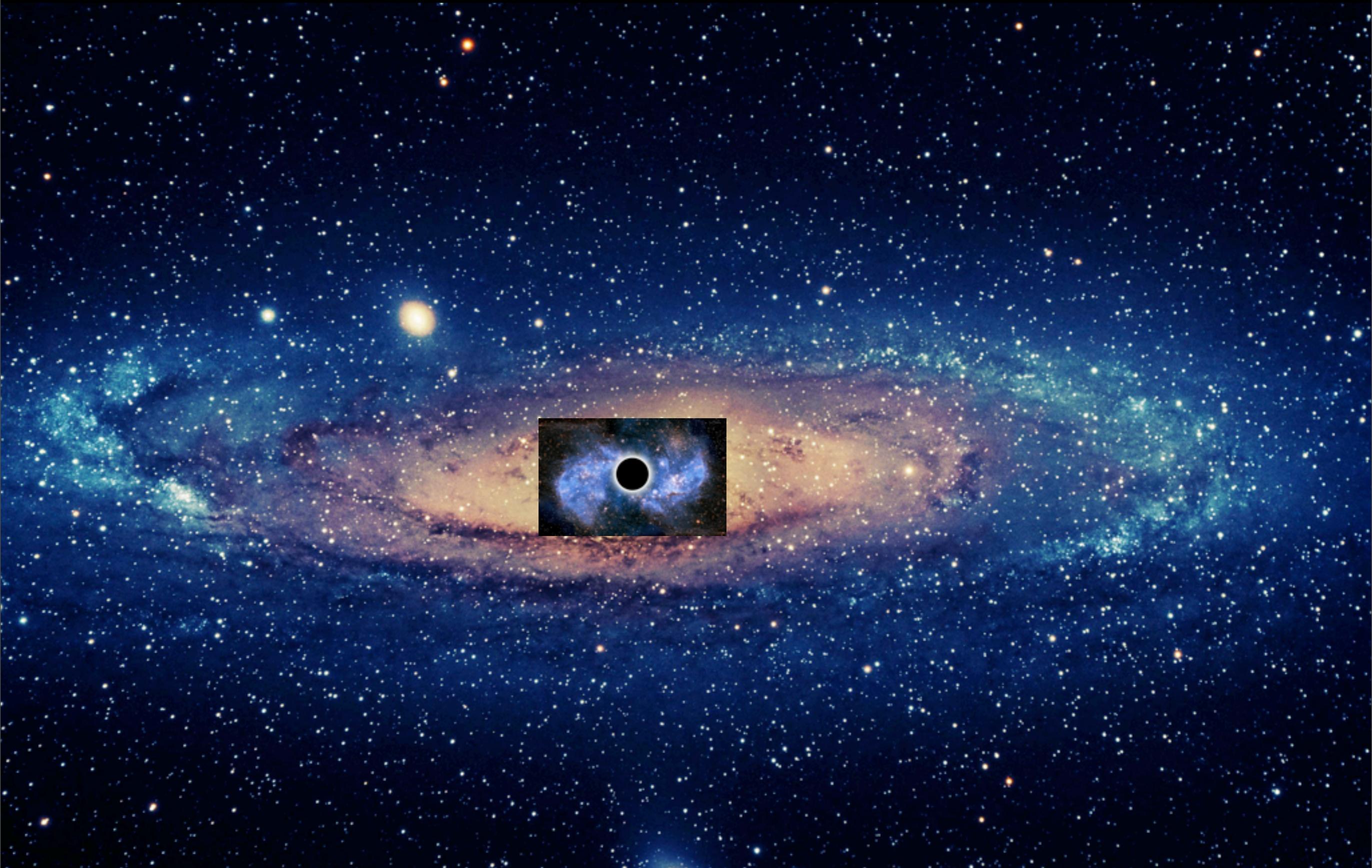
Dipartimento di Fisica G. Occhialini, Università di Milano Bicocca

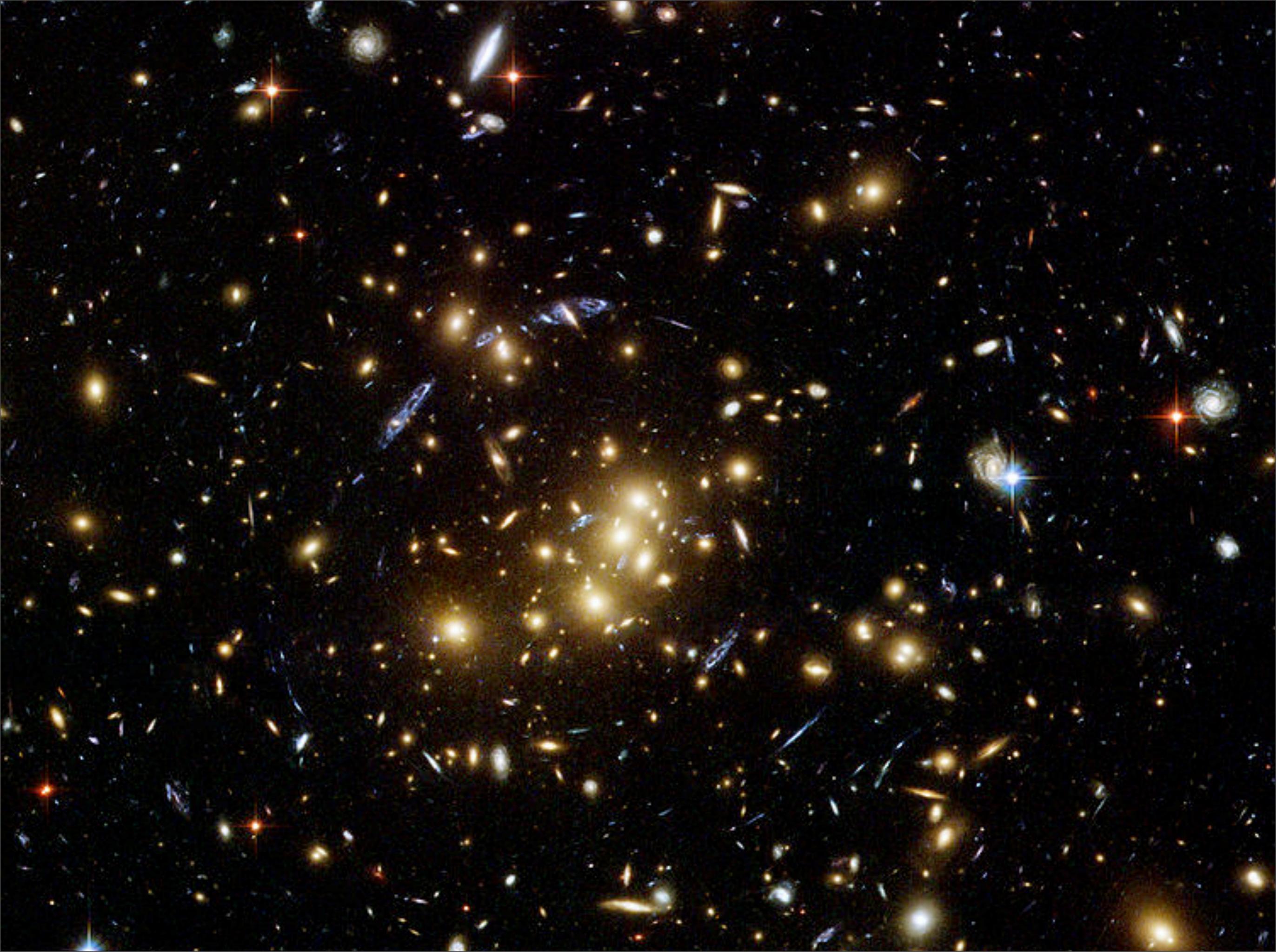
LA RELATIVITÀ GENERALE COMPIE 100 ANNI
Milano, 5 Novembre 2015

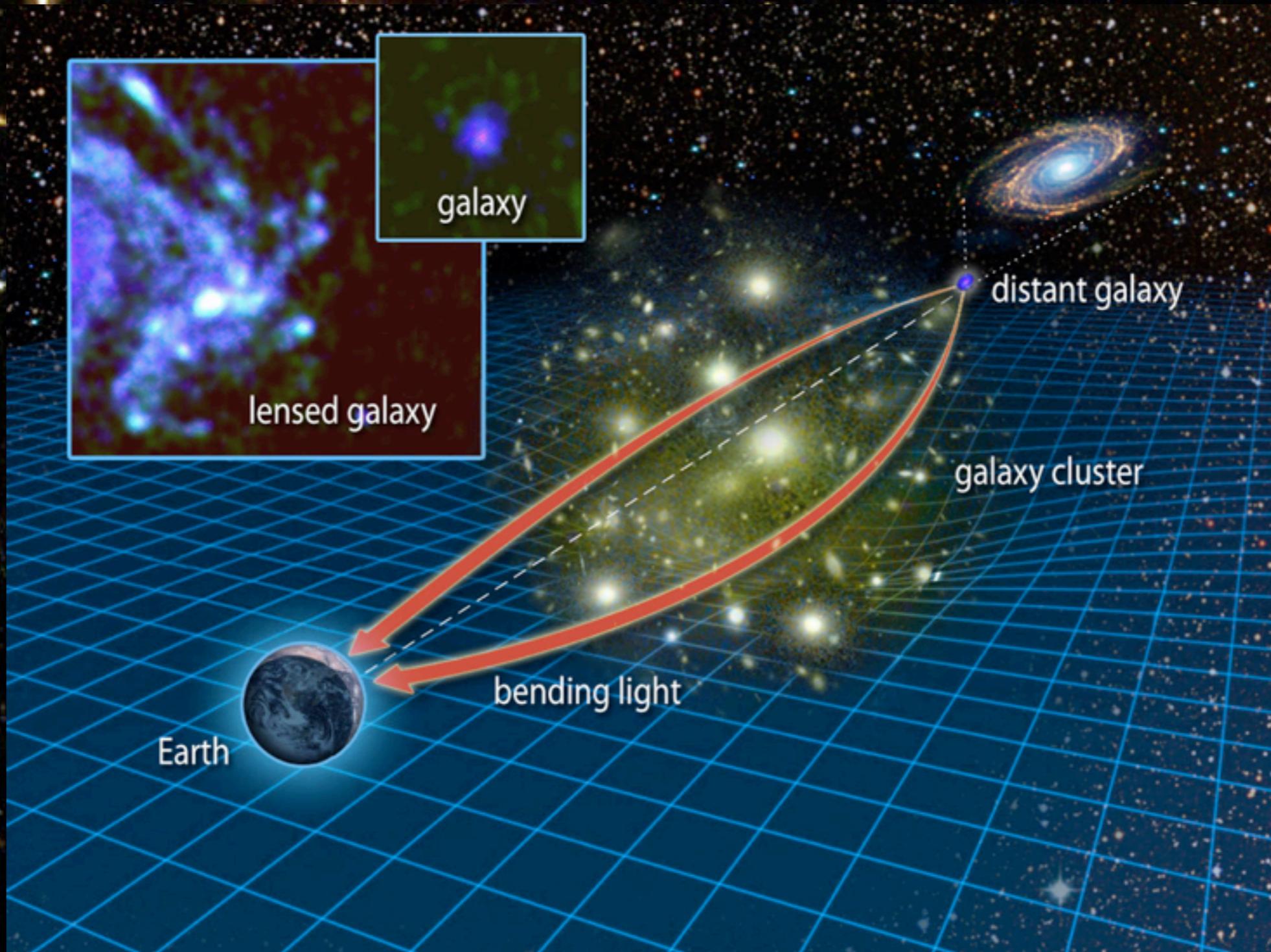
Cos'è la "gravità" ?

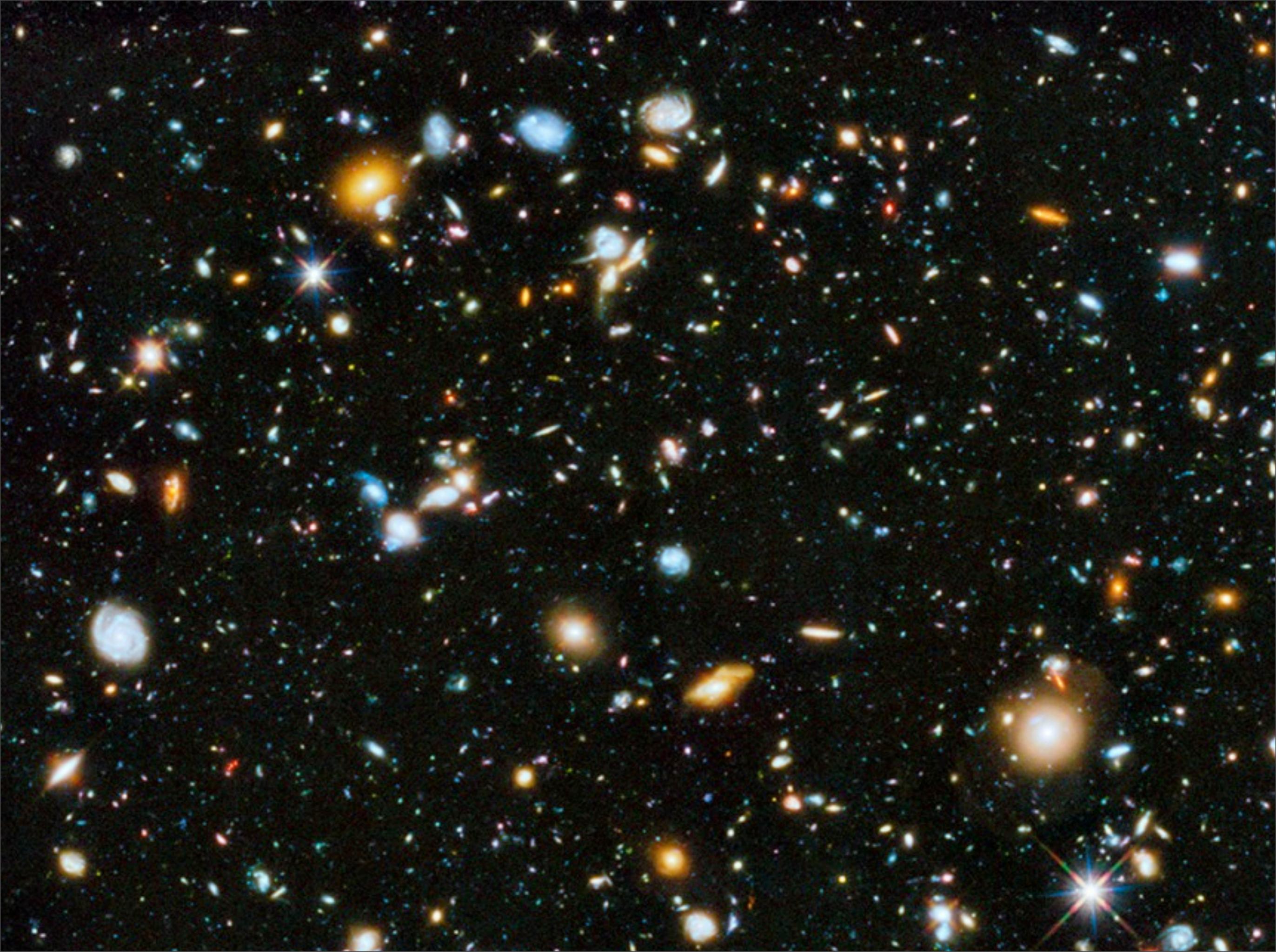


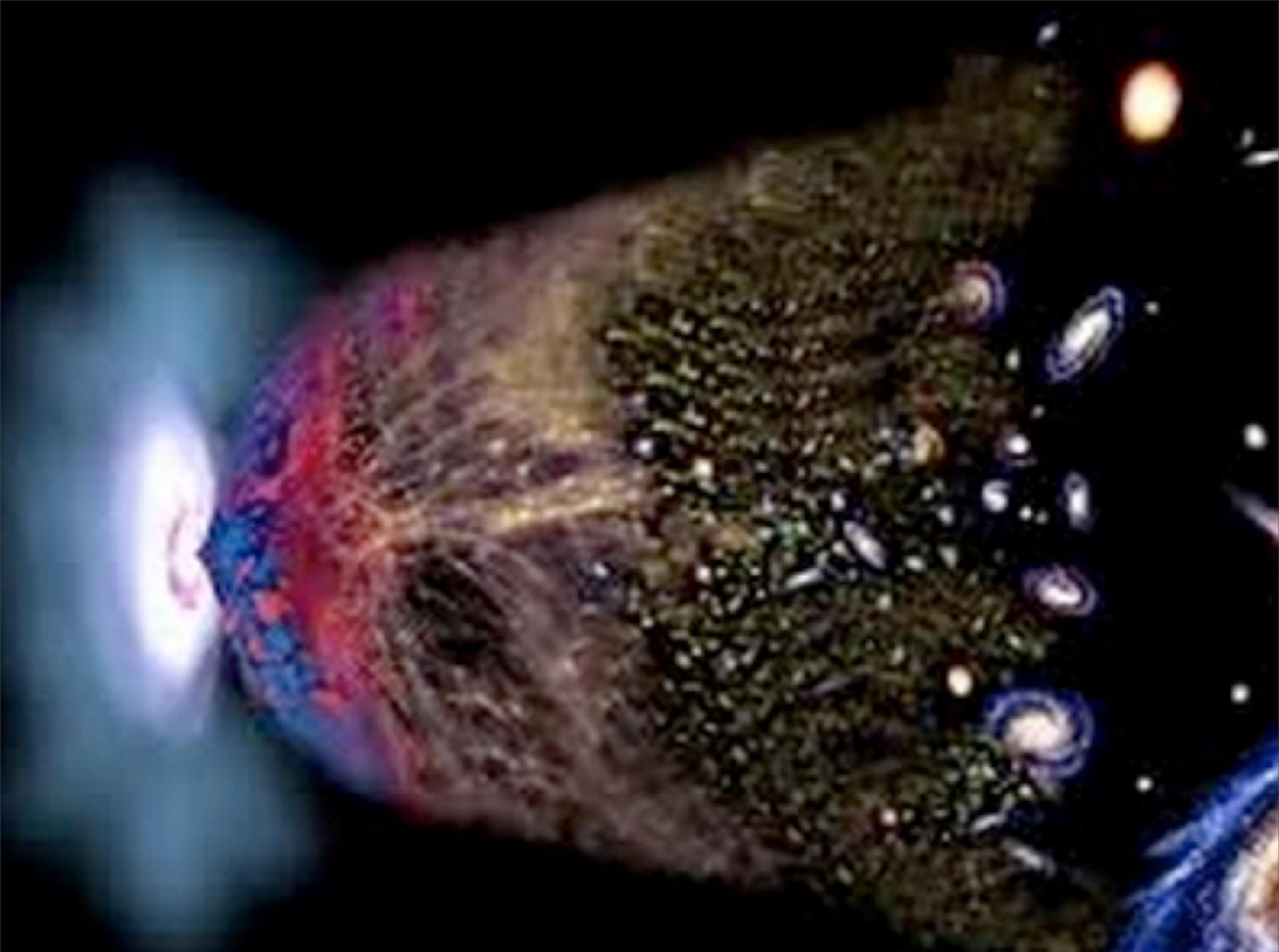


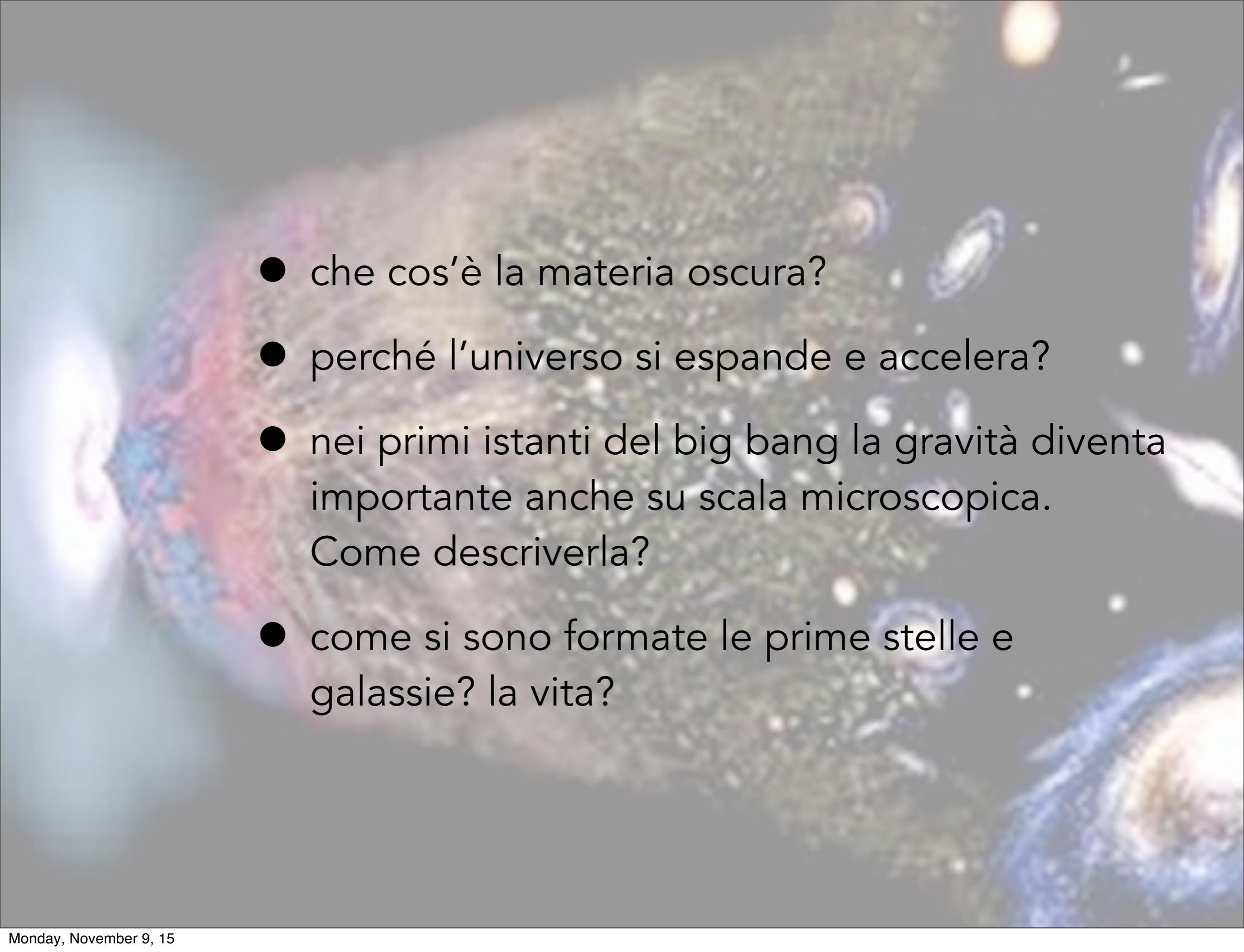










- 
- che cos'è la materia oscura?
 - perché l'universo si espande e accelera?
 - nei primi istanti del big bang la gravità diventa importante anche su scala microscopica. Come descriverla?
 - come si sono formate le prime stelle e galassie? la vita?

- in cammino verso la Relatività



GALILEO
1564-1642



GALILEO
coglie l'unità della Natura

“ La filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci stà aperto innanzi agli occhi -io dico l'Universo - ma non si può intendere se prima non si impara a intendere la lingua e conoscere i caratteri nei quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica. ”



Il Saggiatore

- perché i corpi cadono sulla Terra ?
- perché la luna non cade e qual'è la causa del suo moto ?
- perché non percepiamo il moto della Terra attorno al Sole ?
- che cos'è il moto (quiete) ?
- da che "punto di osservazione" è opportuno studiare l'universo per riconoscere e comprendere la vera natura delle forze?

- inerzia e relatività del moto

Il moto nella Grecia Antica



ARISTOTELE
383 - 322 A.C.

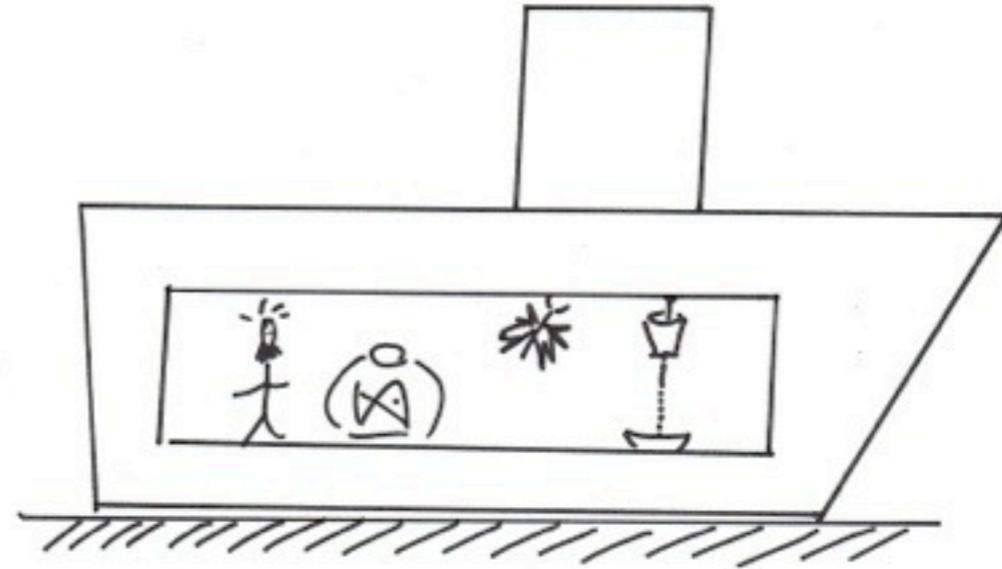
- moto "naturale" - caduta dei gravi
- moto "forzato" (agente esterno - contatto - velocità)
- moto "circolare" del cielo delle stelle fisse

LA NAVE DI GALILEO e IL MOTO



GALILEO
1564-1642

La nave di Galileo

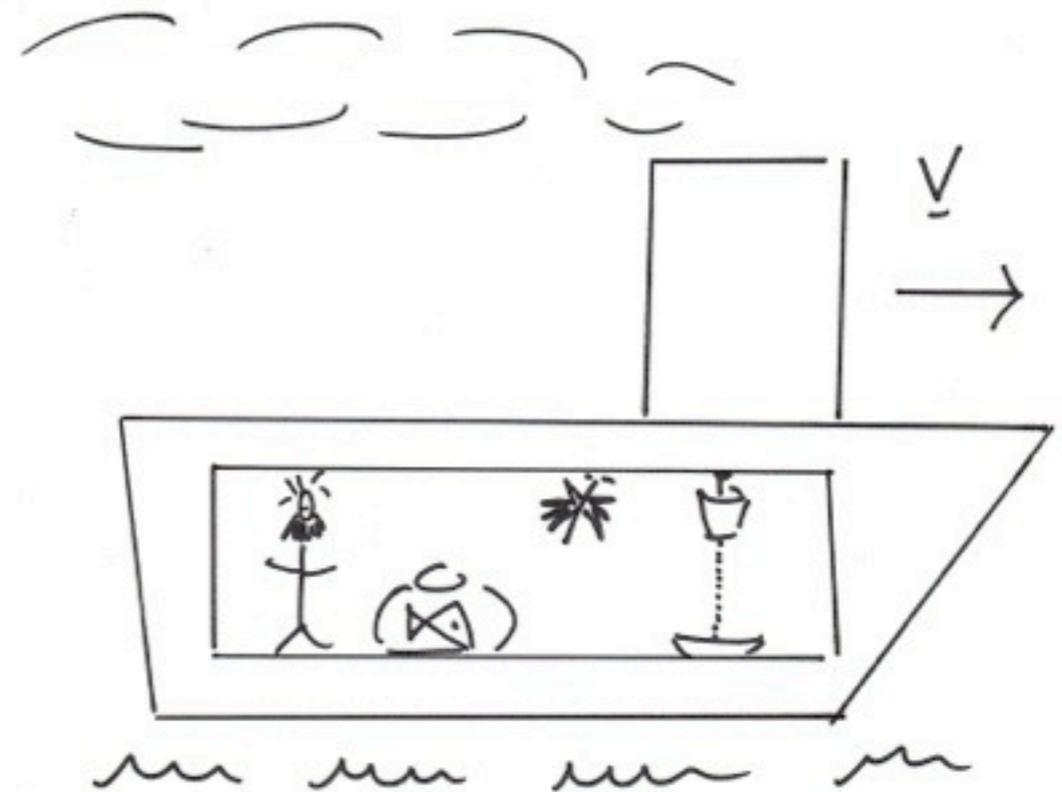
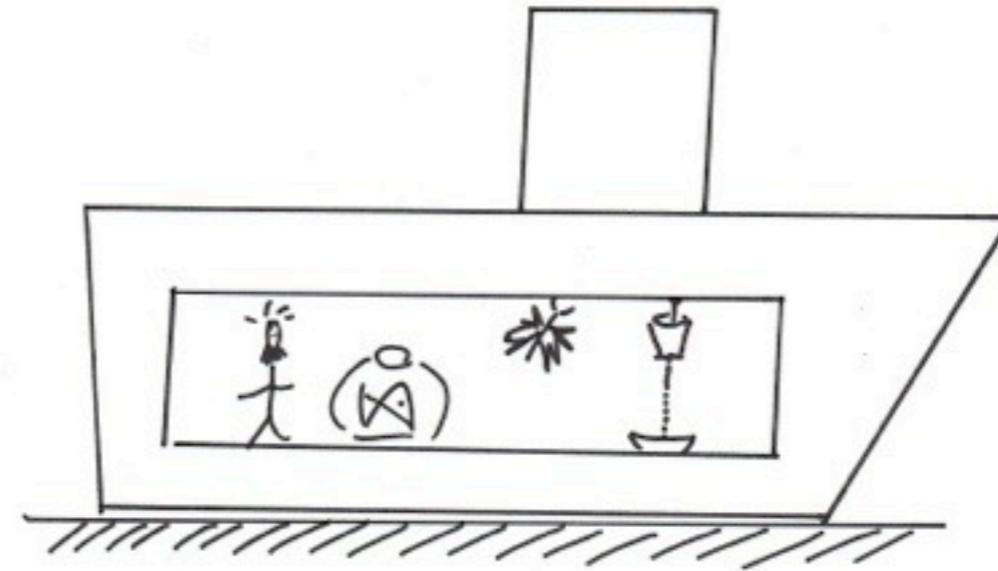


LA NAVE DI GALILEO e IL MOTO



GALILEO
1564-1642

La nave di Galileo



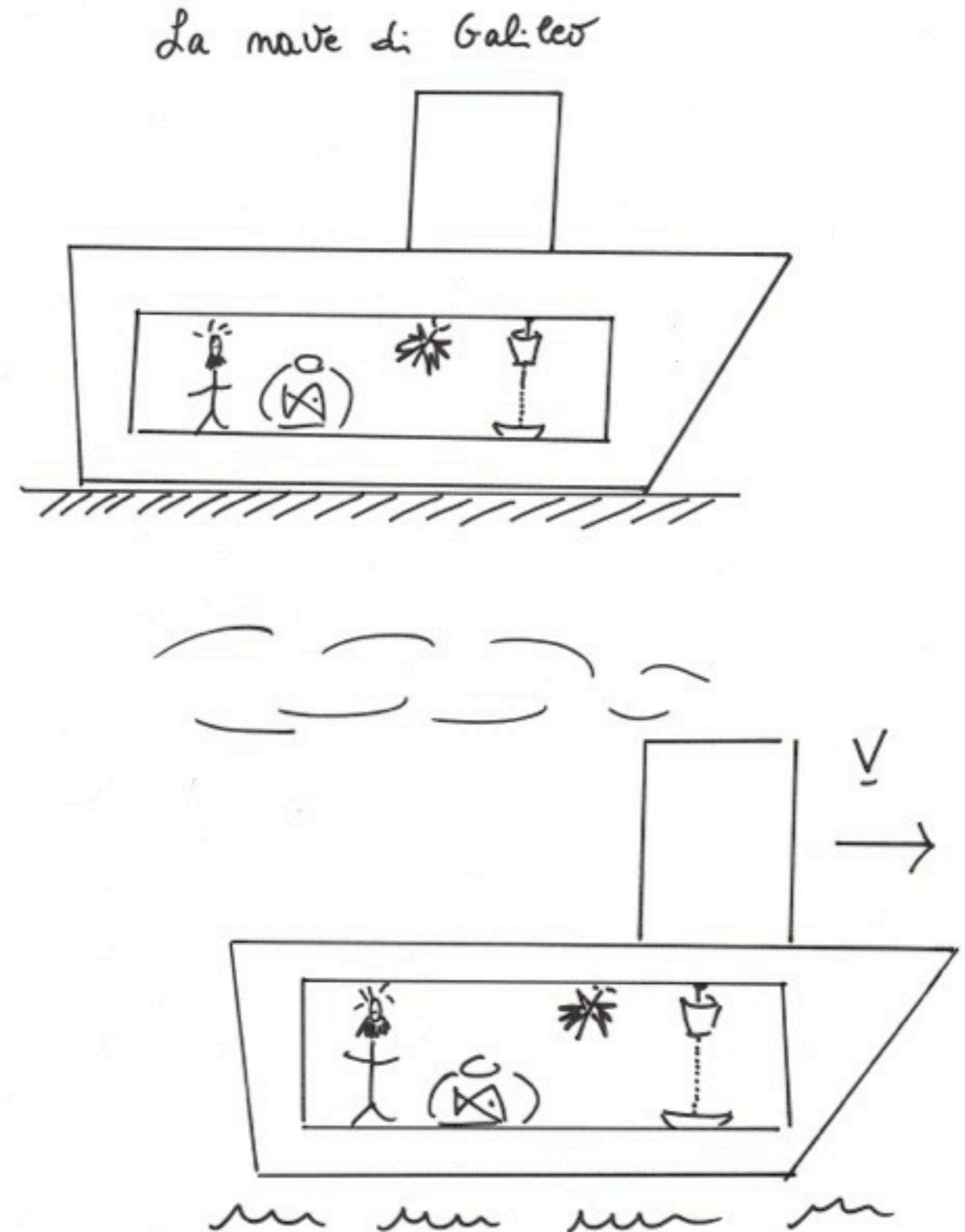
- 1632: *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*

LA NAVE DI GALILEO e IL MOTO



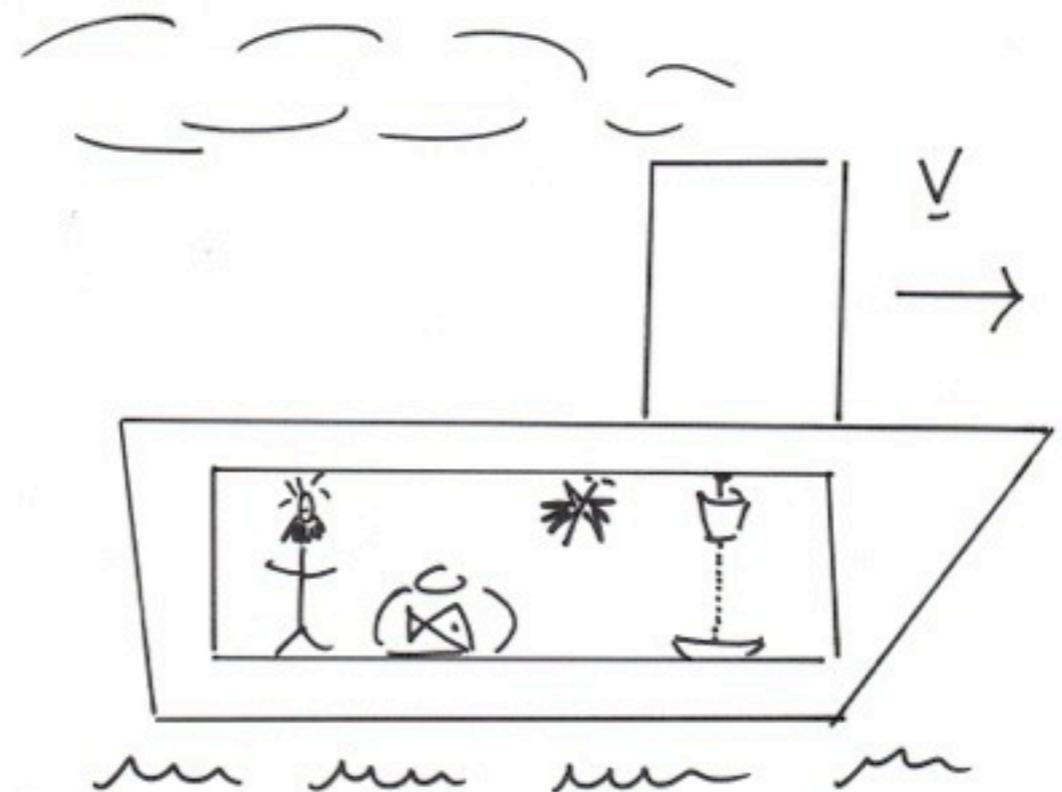
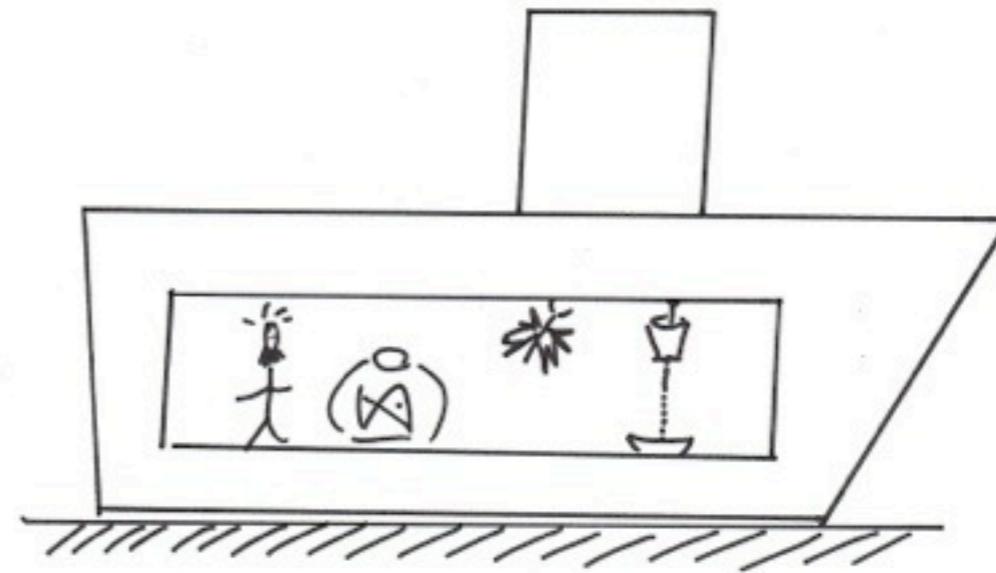
GALILEO
1564-1642

- *....."le gocciole cadono come prima nel vaso inferiore senza caderne pur una verso poppa, benché mentre la gocciola è per aria, la nave scorra molti palmi, ... e le farfalle continuano i lor voli indifferentemente verso tutte le parti né mai accade che si riduchino verso poppa quasi che fussero stracche in tener dietro al veloce corso della nave"*
- *1632: Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*



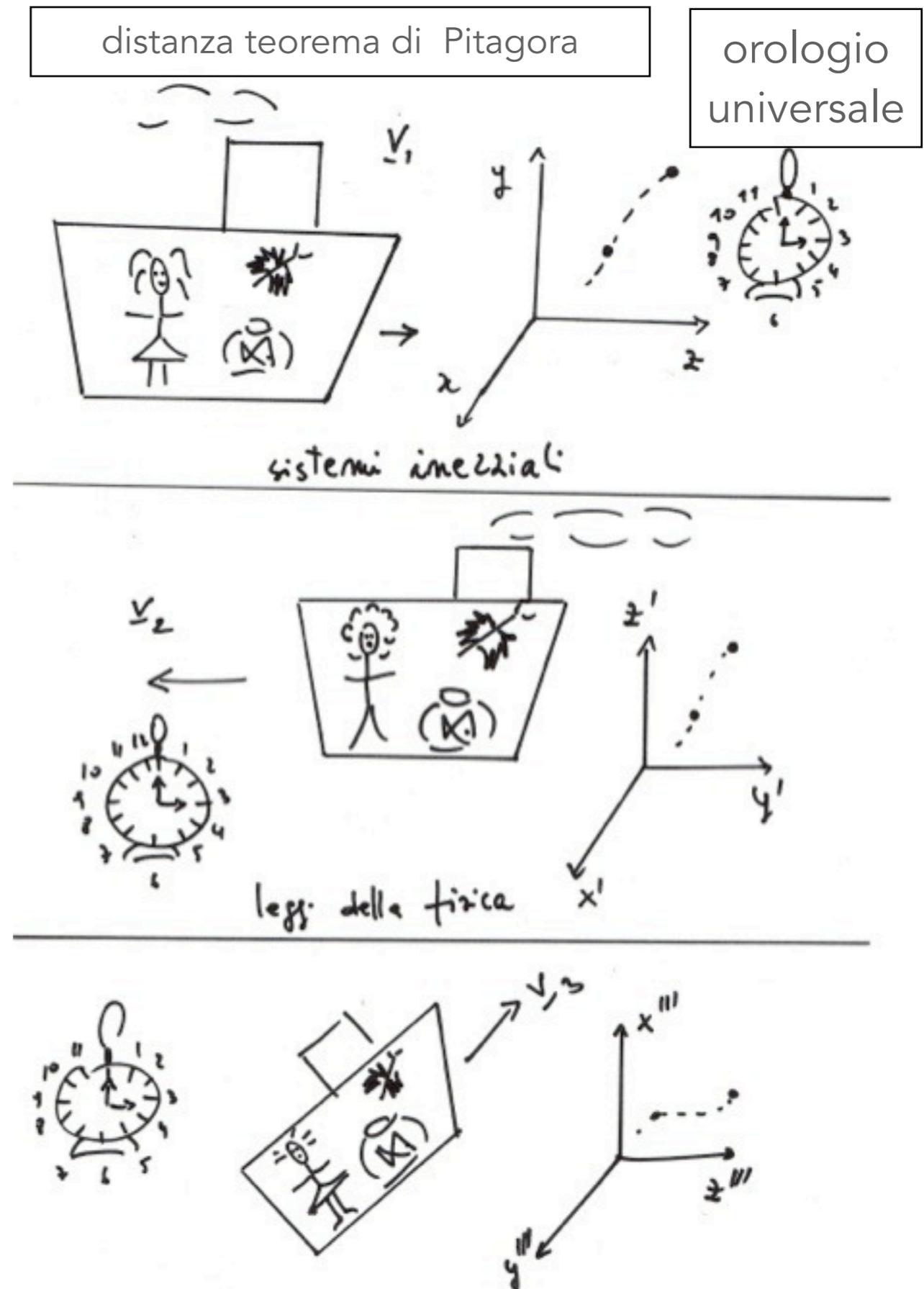
- posso sperimentare il moto solo attraverso misure di velocità "relative"
- non esiste nessun esperimento che possa misurare la velocità assoluta né la quiete assoluta del sistema
- un corpo in quiete permane nel suo stato di quiete come un corpo in moto uniforme permane nel suo stato di moto uniforme
- velocità non dà informazione sulle "forze"

La nave di Galileo



sistemi inerziali

- questi osservatori sono immuni dall'essere soggetti a forze apparenti
- possono risalire alla leggi della Natura-leggi describili in termini matematici
- **le leggi della Natura assumono una forma universale nei sistemi inerziali: "principio di relatività"**





NEWTON
1642-1726

DINAMICA NEWTONIANA

- un corpo mantiene il suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme finché una forza non agisce su esso

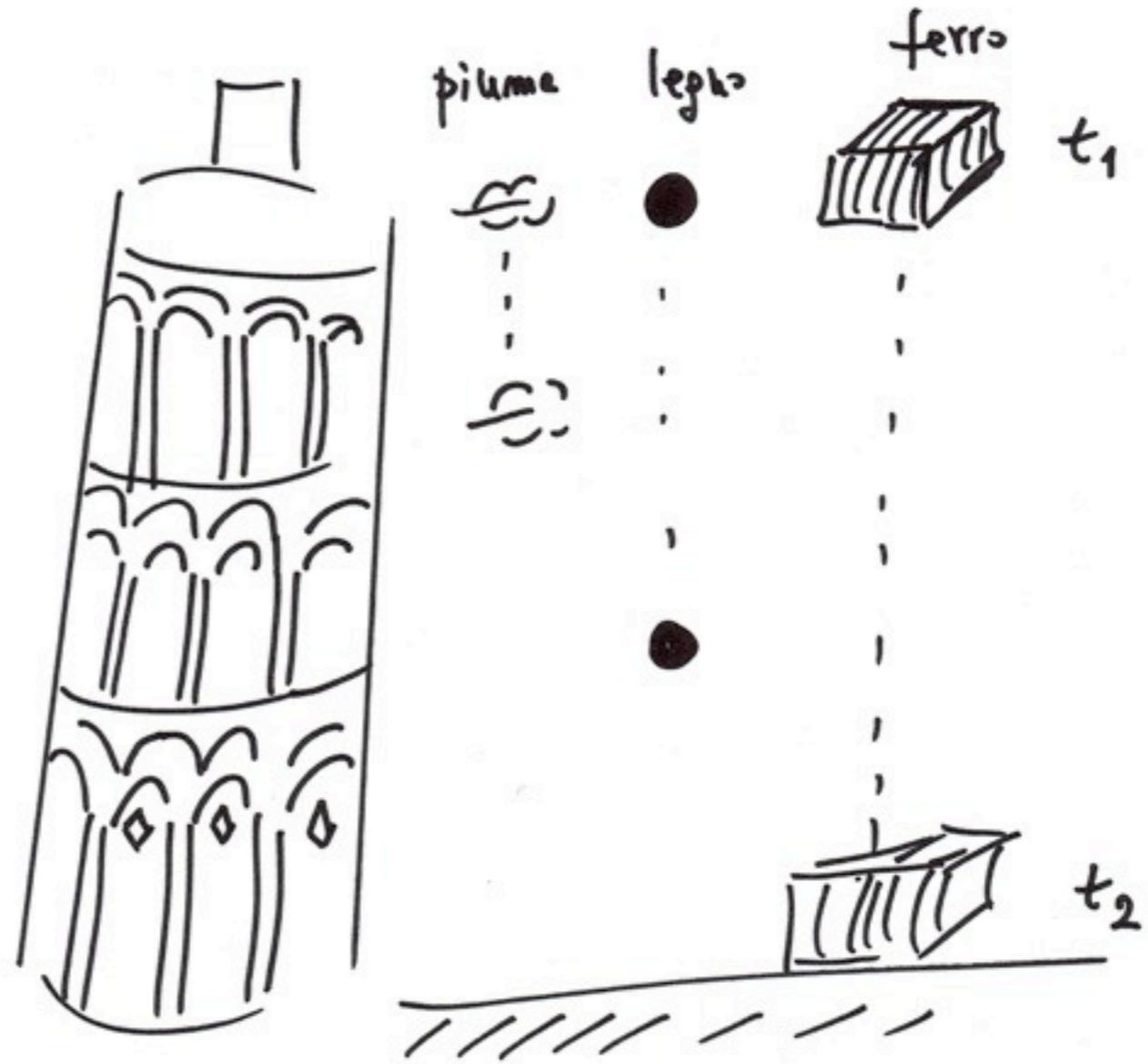
- $$\vec{F} = m_{\text{inerziale}} \vec{a}$$

- gravità



ARISTOTELE
383 - 322 A.C.

Aristotele

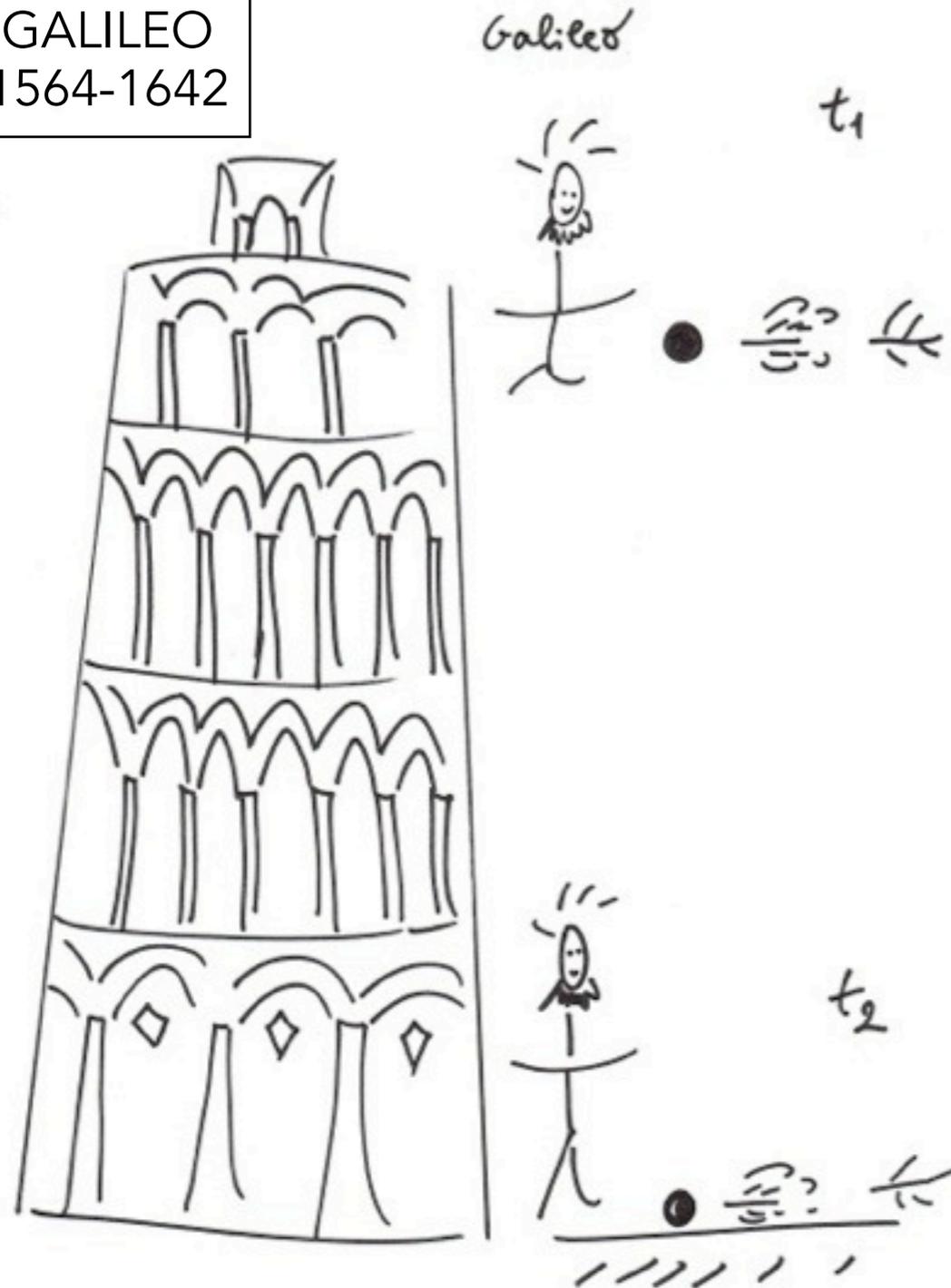


Corpi + pesanti cadono + veloci



GALILEO
1564-1642

GRAVITÀ sulla TERRA



- la gravità dà peso ai corpi
- la piuma, la pallina e il ramoscello con Galileo cadono insieme (in assenza della resistenza dell'aria)
- cadono insieme con una accelerazione indipendente dalla loro massa, composizione e forma

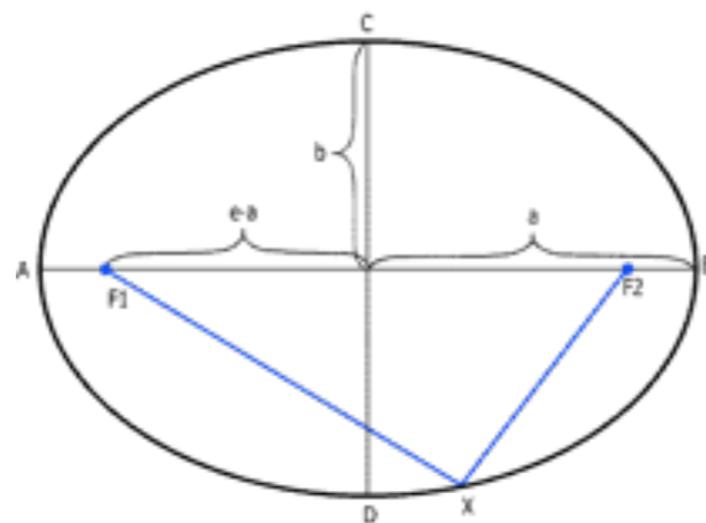
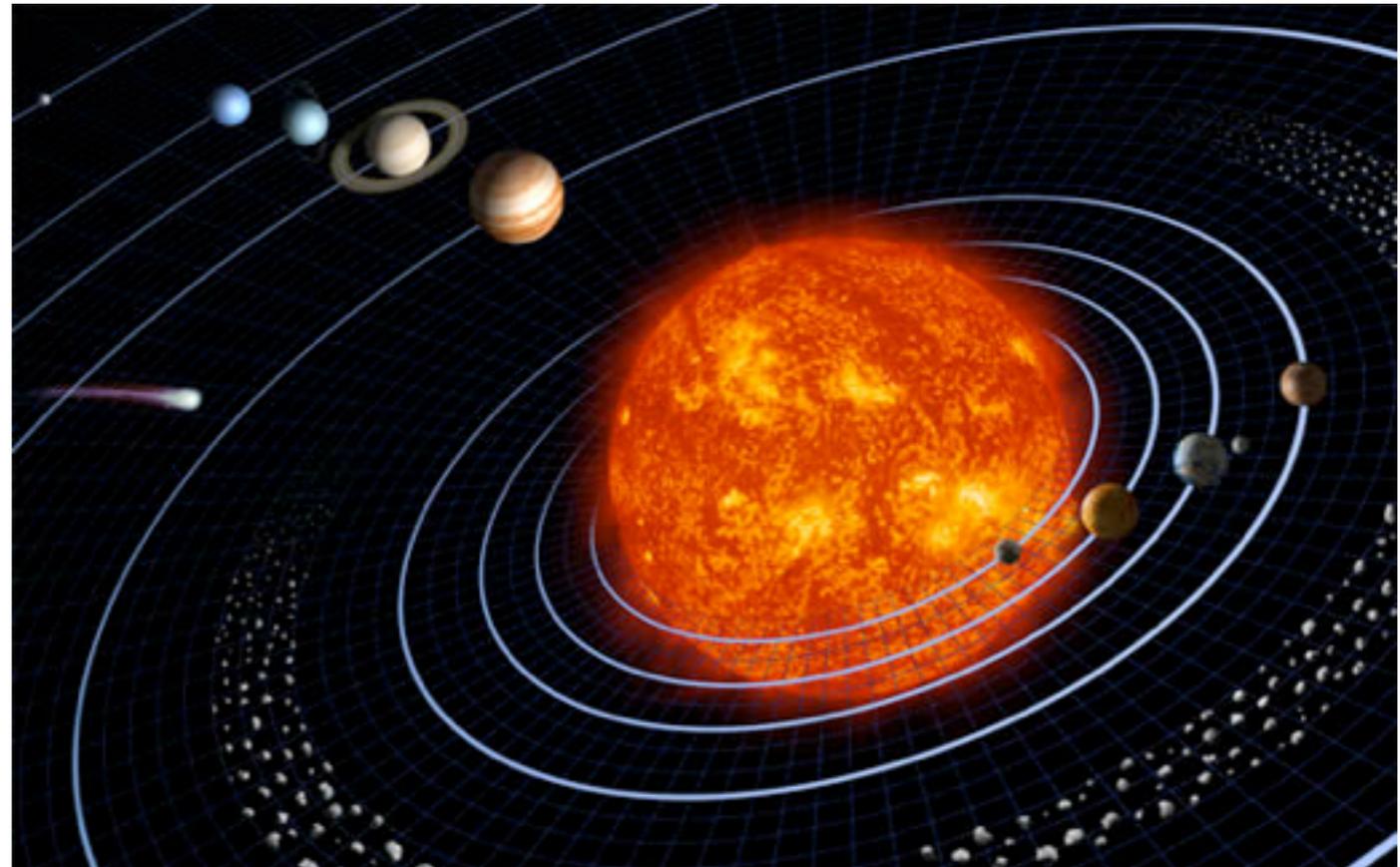
$$a = 9.8 \text{ m/sec/sec}$$



GRAVITÀ "celeste"



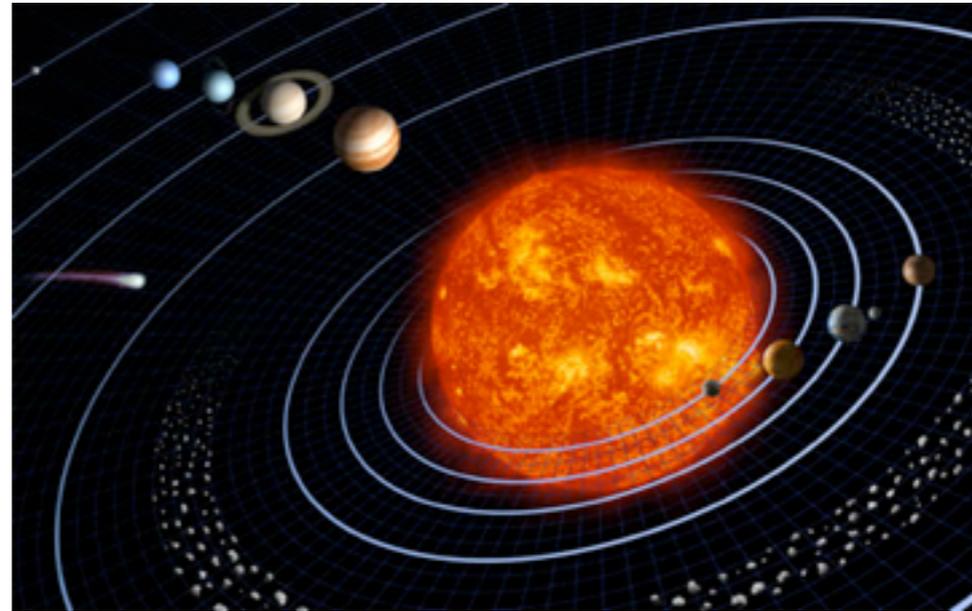
KEPLER
1571-1630



orbite ellittiche
se riferite la Sole
dove il Sole risiede nel fuoco



NEWTON
1642-1726



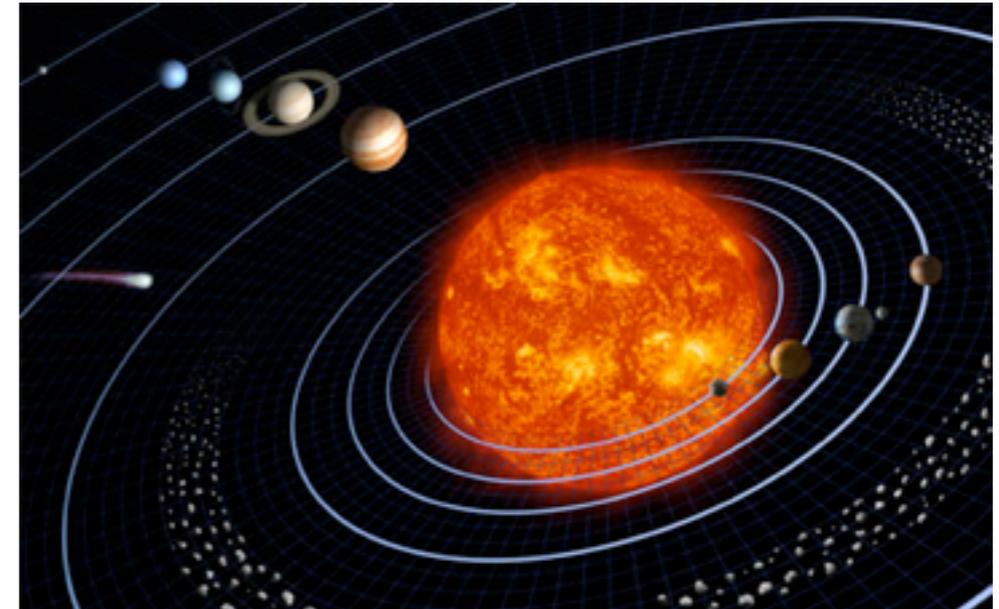
*"I lune che ruotano attorno a Giove gravitano verso Giove, e i pianeti che ruotano attorno al Sole gravitano verso il Sole e dalla forza della propria gravità sono sempre **distratti dai moti rettilinei** e sono **trattenuti entro orbite curvilinee**"*

da *"Philosophiae Naturalis Principia Mathematica - 1687, Newton*

Legge Universale della Gravitazione

$$\vec{F}_{\text{grav}} = -\frac{GM_{\text{grav}}m_{\text{grav}}}{r^2}\vec{e}_r$$

- la gravità è una forza a distanza senza contatto che attrae i corpi
- la gravità è attrazione reciproca fra "masse": massa come sorgente della gravità
- la gravità diminuisce in intensità con l'inverso del quadrato della distanza
- la gravità è ovunque nell'Universo
- leggi di Keplero giustificate da principi primi

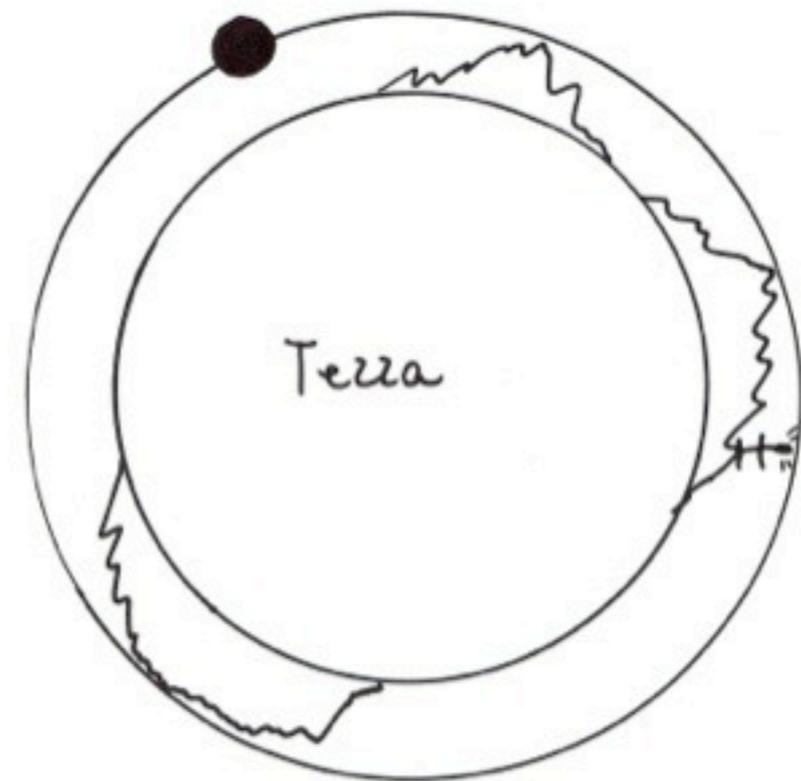




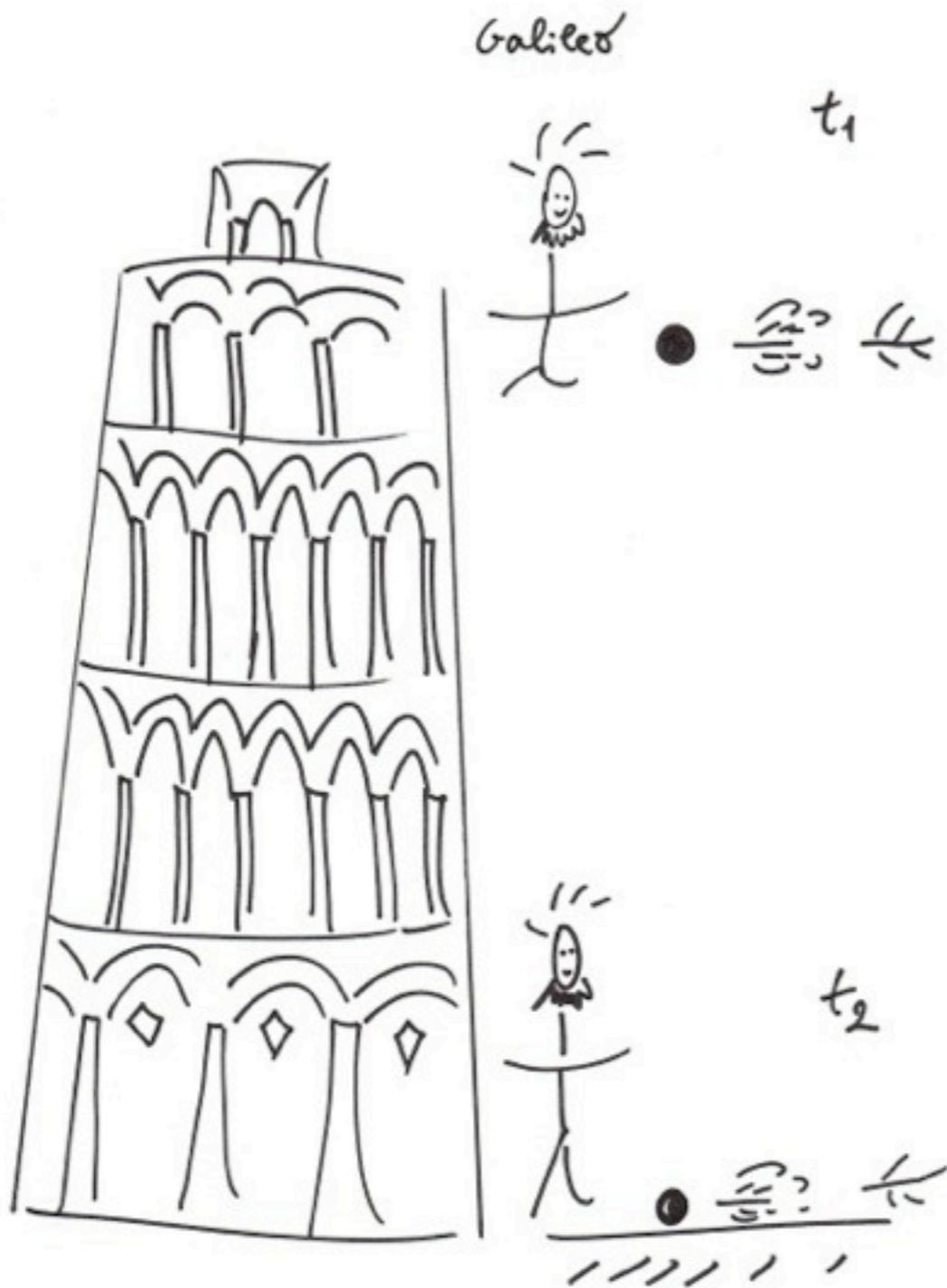
GRANDE UNIFICAZIONE FRA CIELO E TERRA

- Newton (*crede nell'universalità dei fenomeni*) applica la legge di Keplero a una ipotetica "piccola luna" che lambisce la superficie terrestre .
- Per mantenere la piccola luna in rotazione, è necessaria una forza diretta verso il centro di rotazione (verso la Terra).
- Se la piccola luna si fermasse, questa forza provocherebbe la caduta della luna sulla Terra con una accelerazione uguale a quella dei gravi. La forza che mantiene la piccola luna in rotazione è la stessa che provoca la caduta dei gravi

La piccola luna di Newton



9,8 metri / secondo / secondo

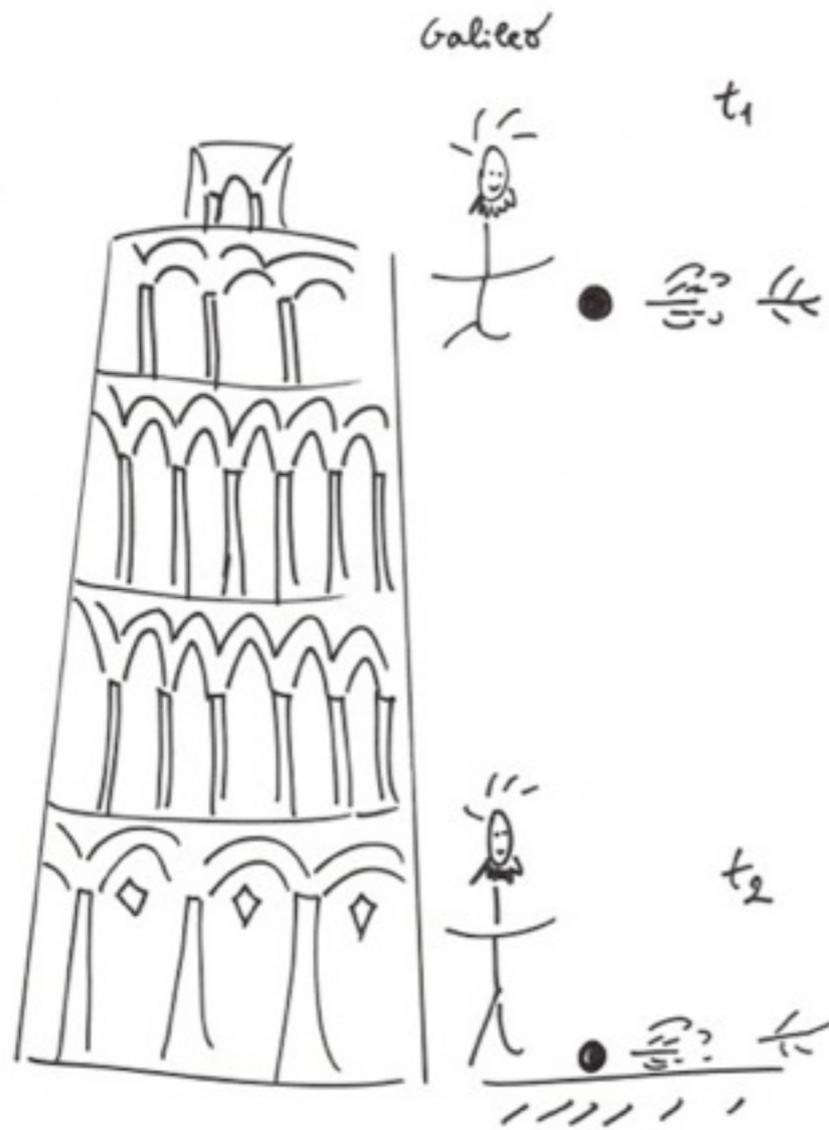


- massa inerziale x accelerazione = forza

$$m_{\text{inerziale}} a = - \frac{GM_{\text{Terra}} m_{\text{grav}}}{R^2}$$



- poiché piuma e palla cadono insieme, la gravità si riduce ad essere un campo di accelerazione



~~$$m_{\text{inerziale}} a = - \frac{GM_{\text{Terra}} m_{\text{grav}}}{R^2}$$~~

$$m_{\text{inerziale}} = m_{\text{grav}}$$

- PRINCIPIO DI EQUIVALENZA cardine della Teoria di Einstein



spazio

tempo

*Lo spazio assoluto per sua natura senza relazione ad alcunché di esterno rimane sempre uguale e immobile
(Newton, Principia)*

*Il tempo assoluto vero e matematico in sé e per sua natura senza relazione ad alcunché di esterno.
Tempo scorre uniformemente
(Newton, Principia)*

forze

masse



hypotheses non fingo

*“Fin qui ho spiegato i fenomeni del cielo mediante la forza di gravità,
ma non ho mai fissato la causa della gravità.*

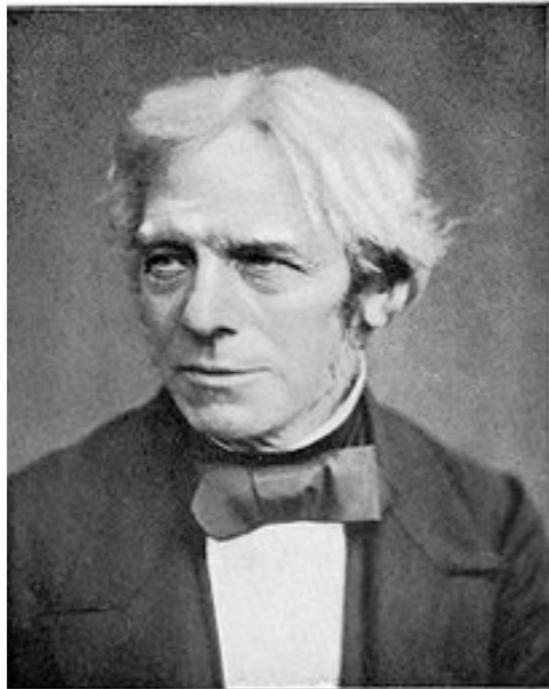
*... La sua azione si estende per ogni dove a immense distanze
SENZA CONTATTO*

*In verità non sono riuscito a dedurre dai fenomeni la ragione di questa proprietà della
gravità e non invento ipotesi.”*

Newton 1687, Scolio Generale dei Principia

La forza a distanza richiede un'azione istantanea fra masse, ossia richiede che
l'interazione avvenga a velocità "infinita"

FARADAY
1791-1867



MAXWELL
1831-1879



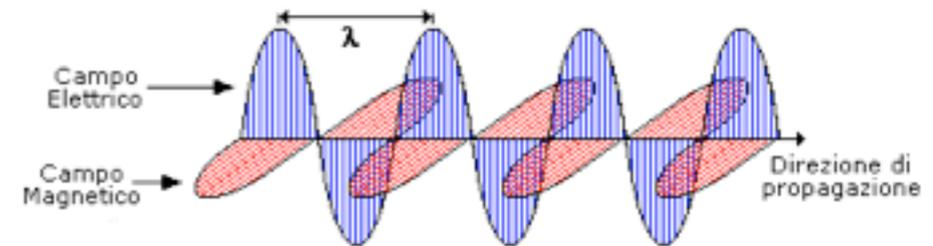
- elettricità - magnetismo - luce
- campi elettromagnetici fungono da mediatori dell'interazione non più istantanea fra cariche (azione ritardata)

intervento di Massimo Nocente

● elettricità e magnetismo - **cariche e luce**



$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho_c}{\epsilon_0} \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \end{array} \right.$$



- cariche elettriche e correnti nell'Universo generano campi elettromagnetici
- campo elettromagnetico è una entità fisica reale presente in ogni punto dello spazio. Esso modifica il moto delle cariche e correnti dell'Universo
- campo si manifesta anche come onda elettromagnetica che propaga con una velocità di 300,000 km/sec trasportando "energia"
- campo funge da mediatore dell'interazione fra cariche



MAXWELL
1831-1879

- **campi elettromagnetici si propagano come onde**
- **luce è un'onda elettromagnetica**
- luce si propaga alla velocità " c " = 300,000 km/s
- è l'etere il substrato per la propagazione dell'onde elettromagnetiche?
- se l'etere non esiste, allora " c " rappresenta una velocità assoluta e questo viola il principio di relatività

1905: Relatività Speciale

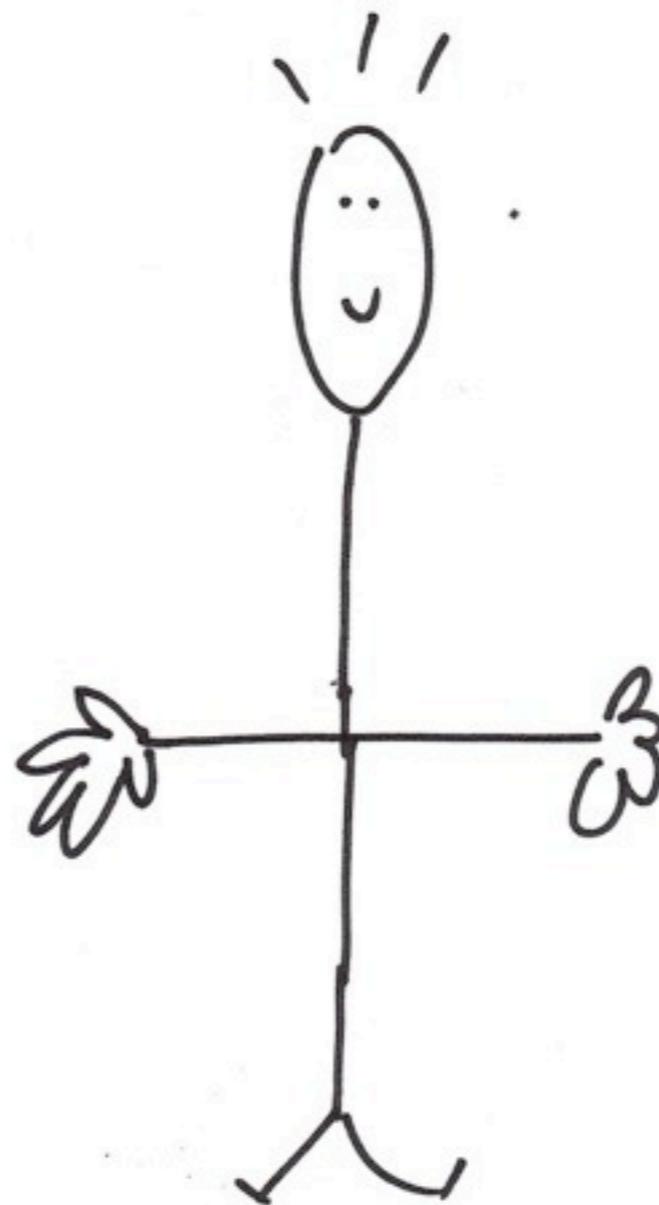
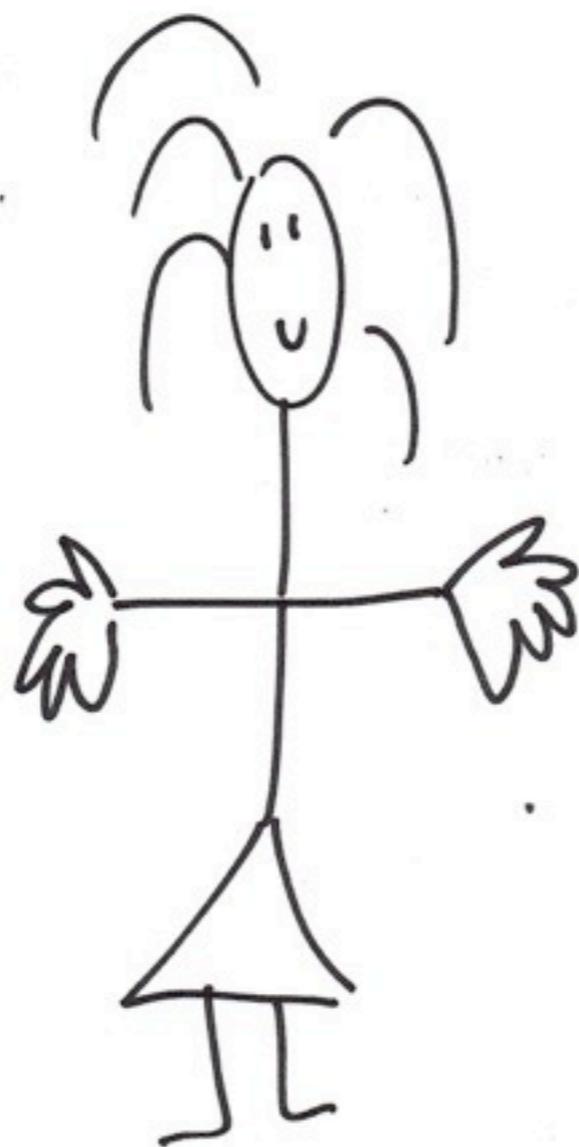
intervento di Silvia Penati

- **Einstein postula:**
- La luce si propaga nel vuoto (non esiste l'etere)
- La **velocità della luce** nel vuoto è 300,000 km/s, il suo valore è **indipendente dal moto degli osservatori** e questo reinstaura la validità del principio di relatività
- Ogni osservatore inerziale misura "c" (celeritas) - **costante universale**
- La velocità della luce è un **limite invalicabile**

- Einstein non rinuncia al principio di relatività
- **Le equazioni della meccanica e dell'elettromagnetismo insieme** devono essere invarianti in forma nei sistemi inerziali (in moto l'uno rispetto all'altro con velocità costante)
- Einstein ritrascrive la cinematica e meccanica compiendo un atto rivoluzionario contro Newton

- Questo comporta un cambiamento profondo della realtà fisica (ancora senza gravità)
- **Cade il concetto di simultaneità. Tempo e spazio sono relativi**
- Più una particella corre veloce più è elevata la sua massa inerziale affinché la sua velocità non superi "c"
- Massa inerziale non si conserva: mass-energia si conserva
- Massa è convertibile in energia (luce)

$$E = mc^2 \qquad E = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} m_0 c^2$$



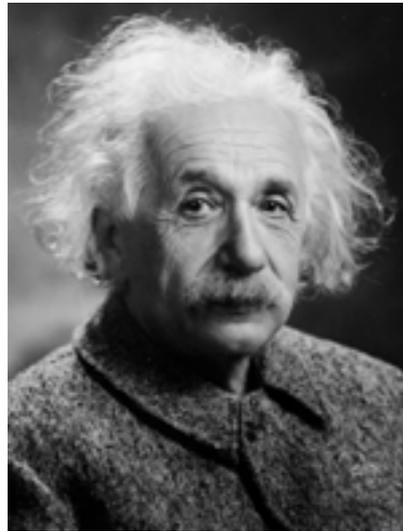
spazio-tempo
a 4 dimensioni
si può definire
l'intervallo

connessione
CAUSALE
fra eventi
è intimamente
presevata
nella teoria

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2 = ds'^2$$

$$ds'^2 = -c^2 dt'^2 + dx'^2 + dy'^2 + dz'^2$$

$$ds^2 = ds'^2$$



spazio-tempo

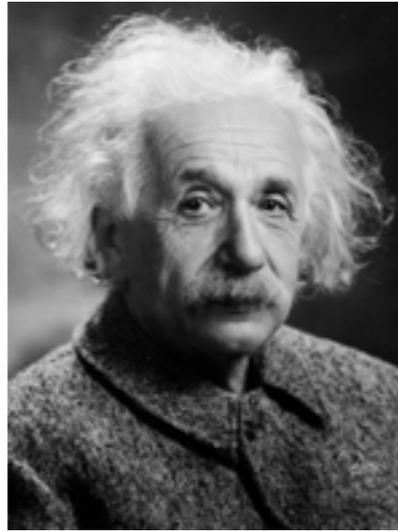
entità inter-dipendenti

Le concezioni dello spazio e del tempo che intendo presentarvi hanno radici nella fisica sperimentale. D'ora innanzi lo spazio in sé e il tempo in sé sono condannati a dissolversi in ombre e solo una specie di congiunzione dei due conserverà una realtà indipendente."
Herman Minkowski, 1908



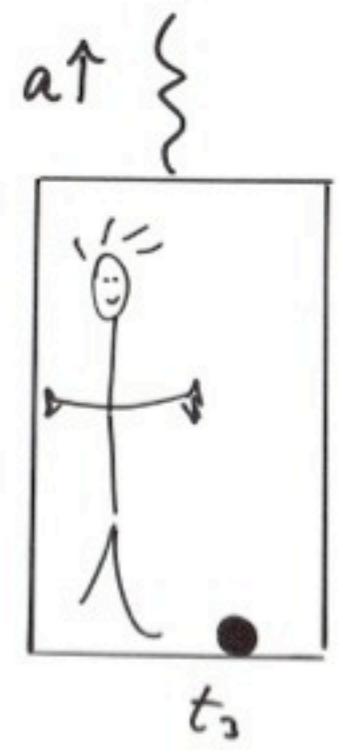
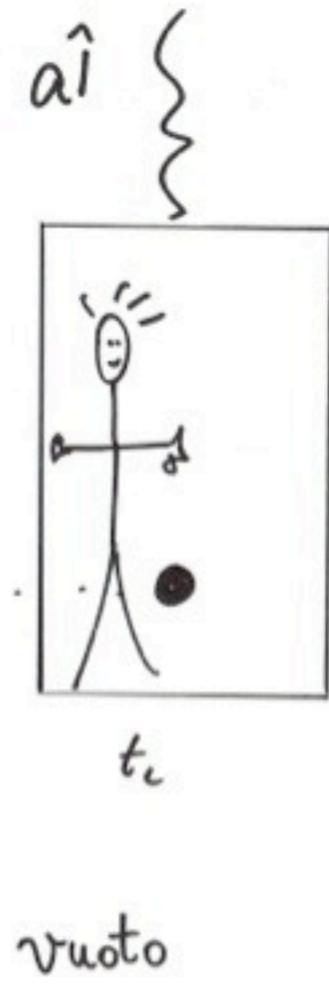
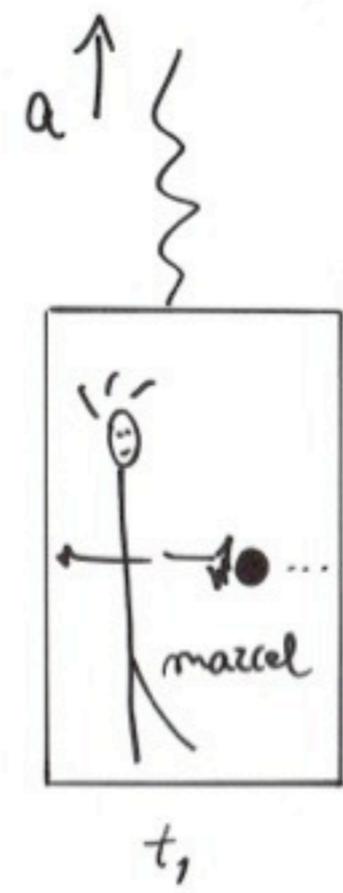
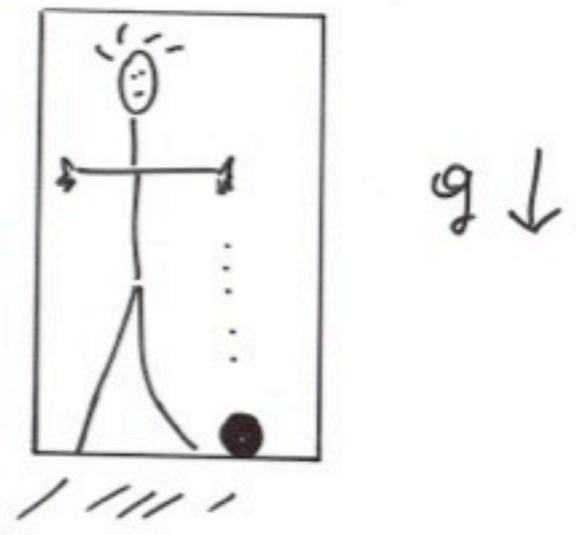
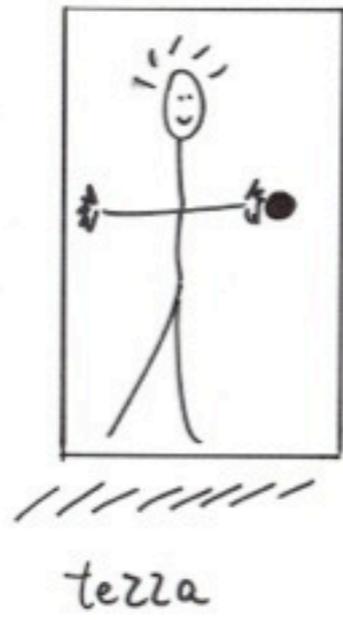
massa-energia

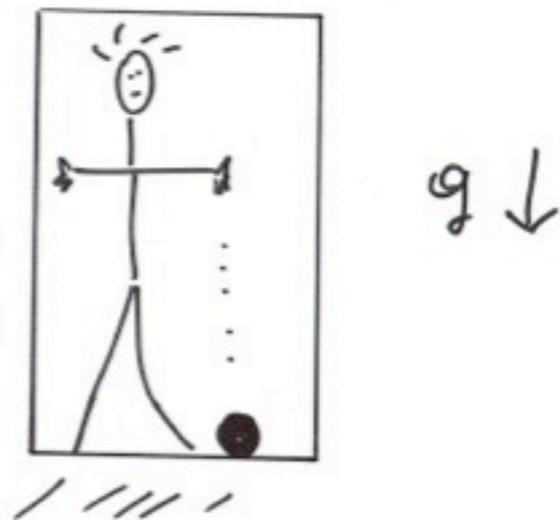
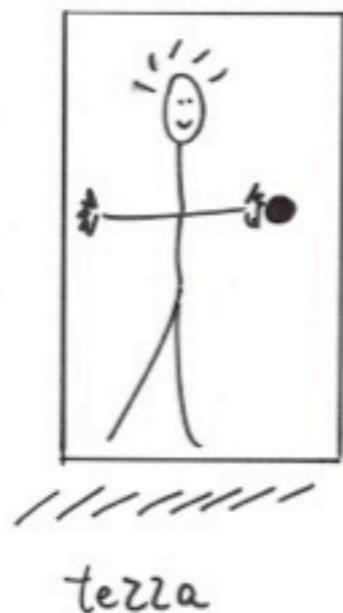
campi



- Quale sorgente per la gravità se abbiamo cambiato il concetto di massa?
- Quale messaggero (campo) per la gravità la cui azione non può essere istantanea?
- Quale legge della gravitazione universale se abbiamo rivoluzionato il concetto di spazio e tempo?

- verso la Relatività Generale
- l'ascensore di Einstein

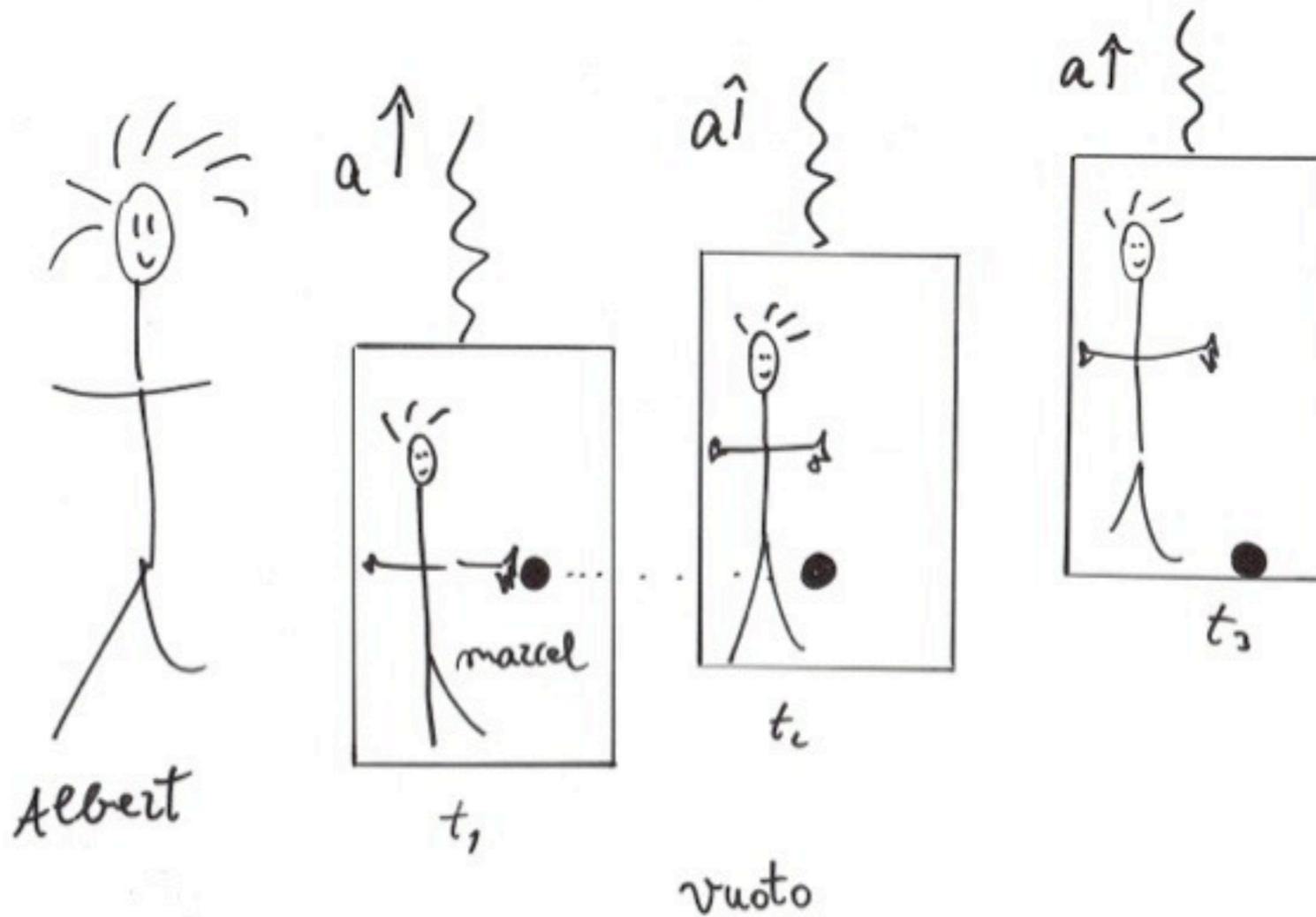




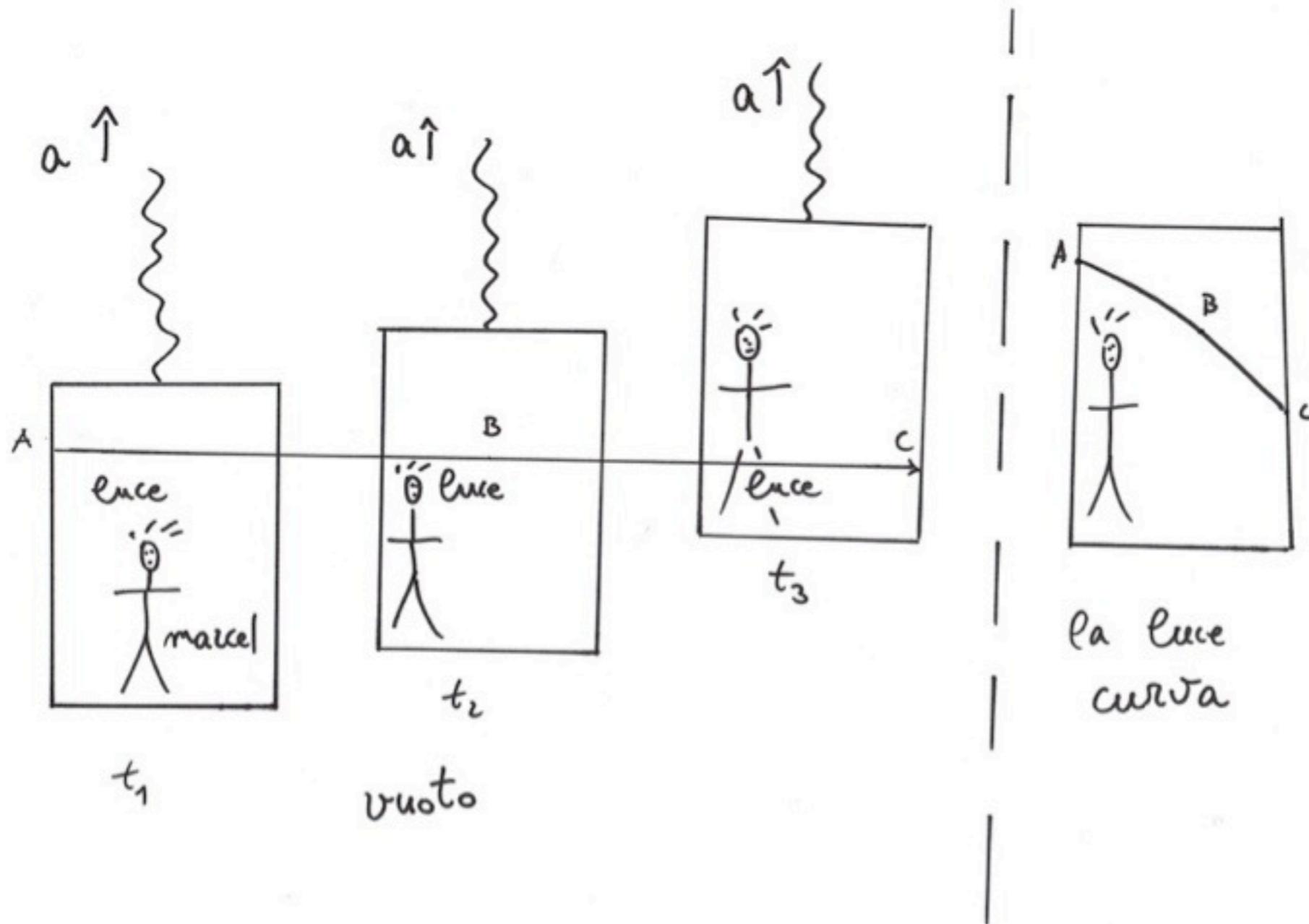
osservatore stazionario
in quiete in un campo
gravitazionale

-
osservatore accelerato
nello spazio vuoto

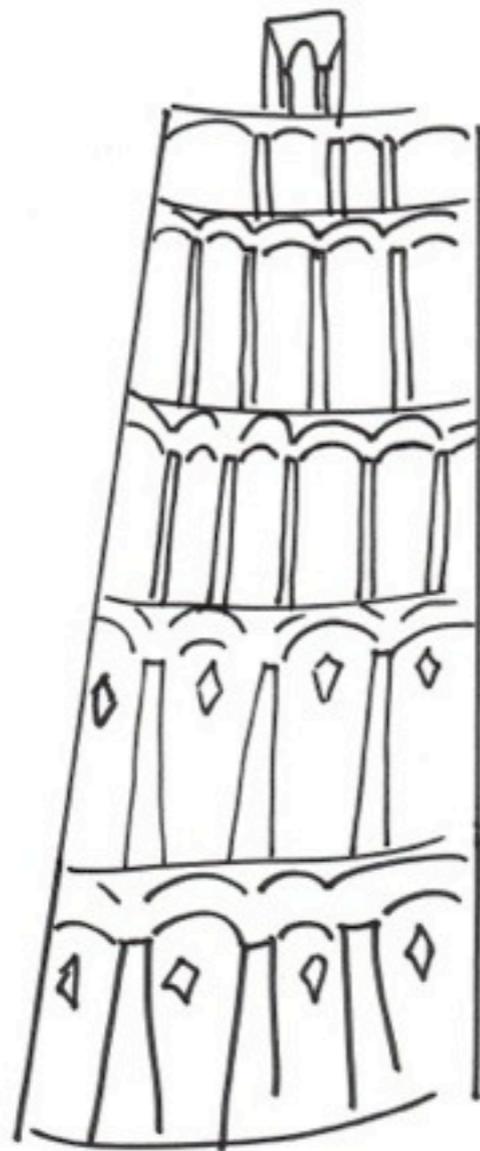
sono
indistinguibili



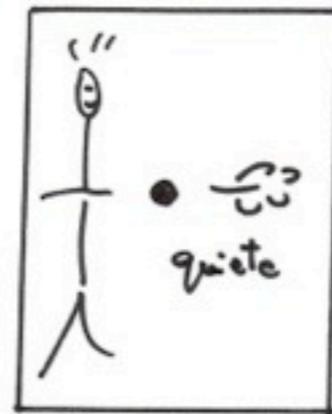
- gravità e luce



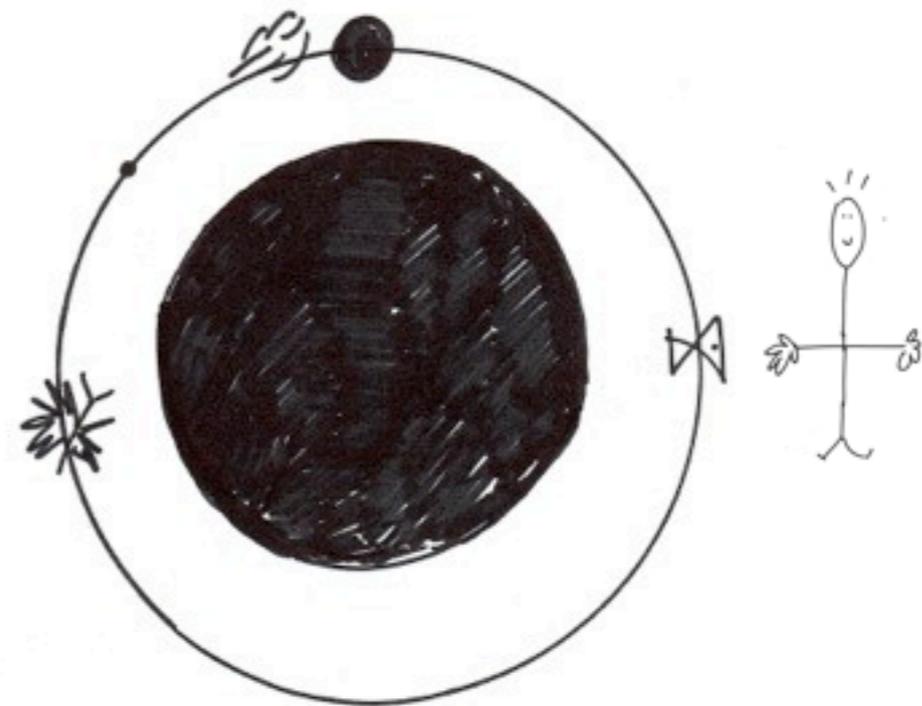
la luce (onda di energia) "curva" ...dove c'è gravità



gravità



↓ g



- L'IDEA PIÙ FELICE DELLA MIA VITA: Marcel, in caduta libera sulla Terra, trarrà la conclusione di essere nello spazio libero, in assenza di forze. Un osservatore in caduta libera è equivalente a un osservatore inerziale (con esperimenti locali non si accorge di essere in un campo gravitazionale)

“ Il campo gravitazionale ha solo una esistenza relativa. Infatti per un osservatore che cade liberamente dal tetto di una casa, non esiste -almeno nelle immediate vicinanze- alcun campo gravitazionale. In effetti se lascia cadere dei corpi questi permangono in uno stato di quiete rispetto a lui indipendentemente dalla loro natura chimica o fisica.

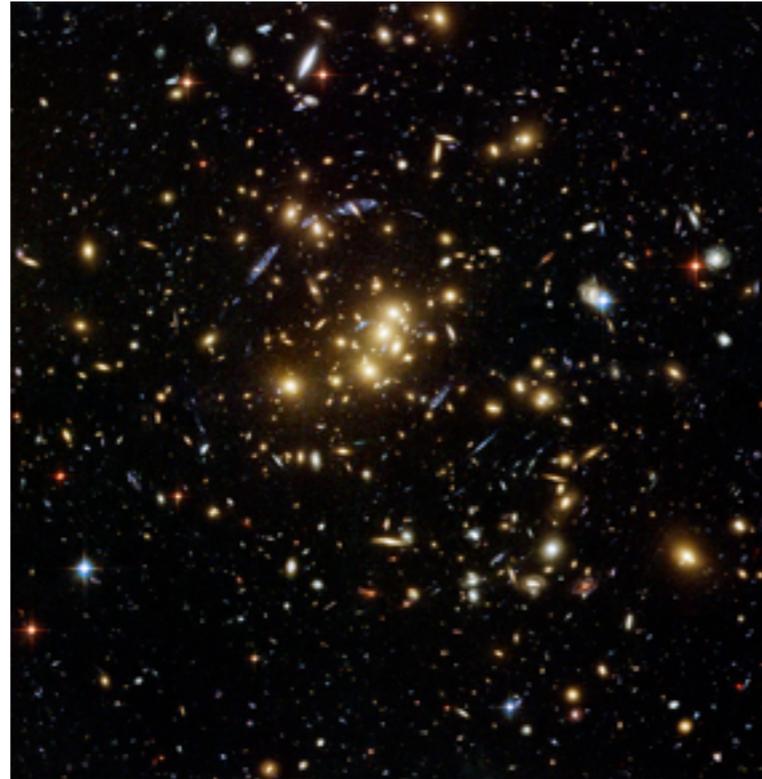
L'osservatore ha il diritto di interpretare il suo stato come uno stato di quiete nel vuoto.

Questa idea ha un significato fisico profondo.

L'indipendenza dell'accelerazione durante la caduta libera dalla natura dei corpi stessi, ben nota sperimentalmente, è pertanto un solido argomento in favore dell'estensione del postulato di relatività a sistemi di coordinate in moto non uniforme l'uno relativamente all'altro”

scrive Einstein

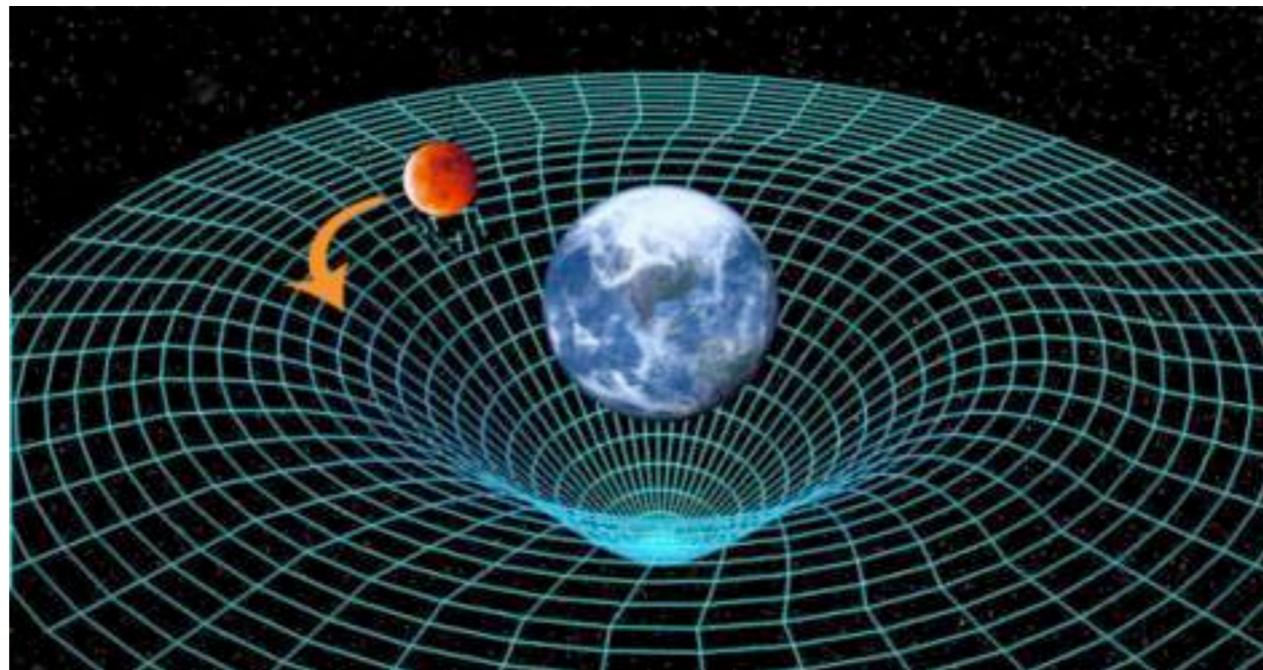
- ma come capisco di essere in un campo gravitazionale?



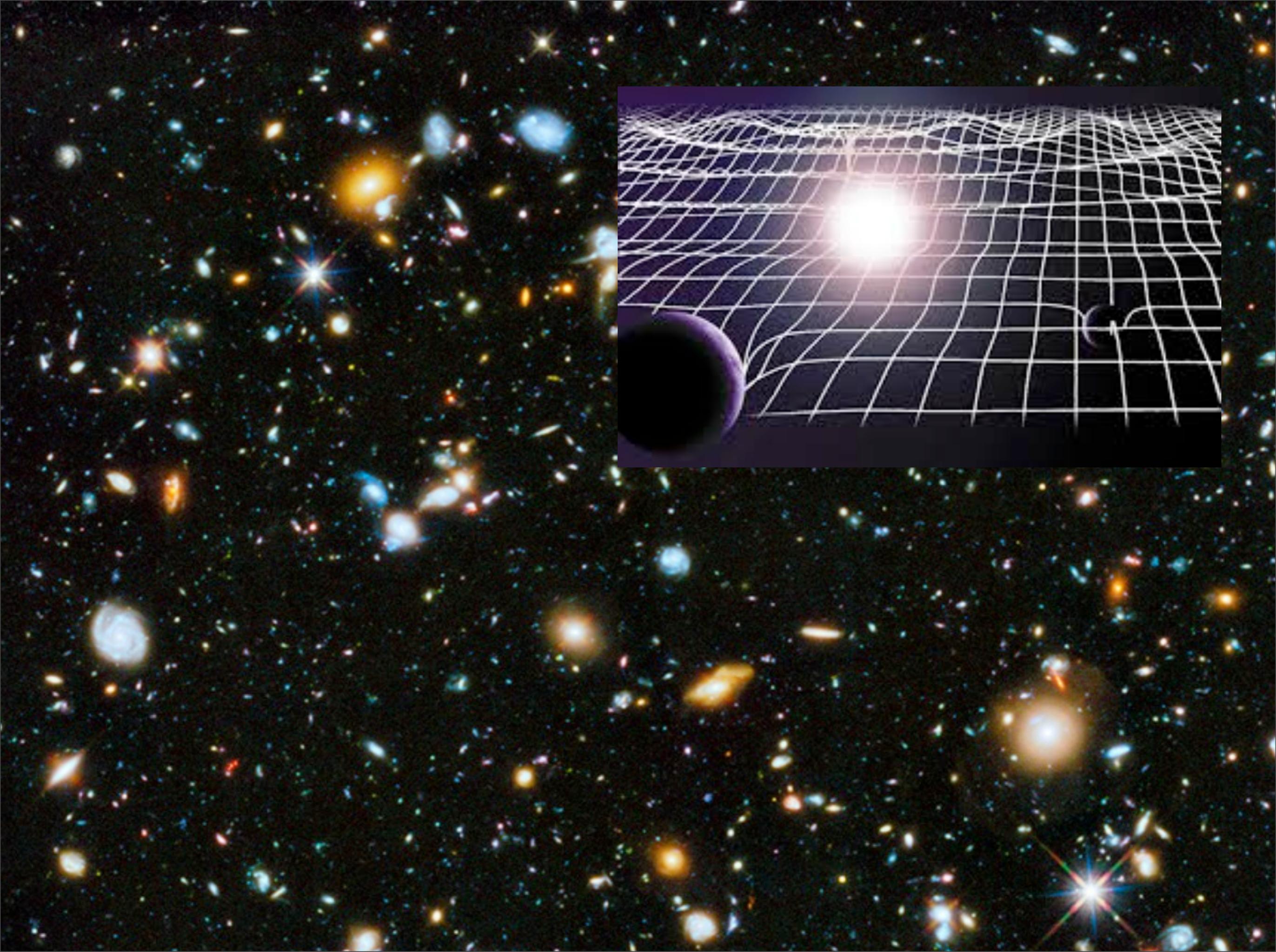
- fortunatamente la gravità non è accelerazione uniforme
- posso sperimentalmente misurare il campo mareale

La gravità generata da massa-energia agisce indistintamente sui corpi che "liberi" si muovono su traiettorie curvilinee

gravità come manifestazione della curvatura dello spazio tempo
"geodetiche nello spazio tempo"



intervento di Alessandro Tomasiello





curvatura dello spaziotempo

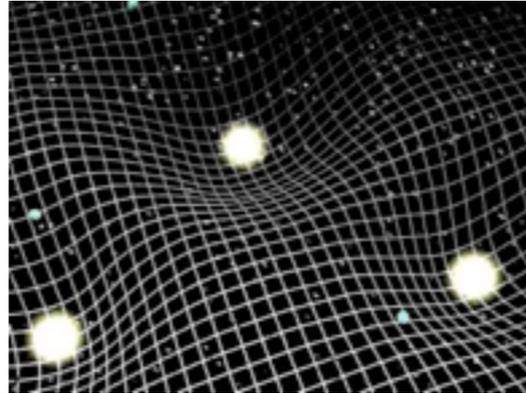
contenuto di massa energia

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} = -\frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

matter tells spacetime how to curve

spacetime tells matter how to move

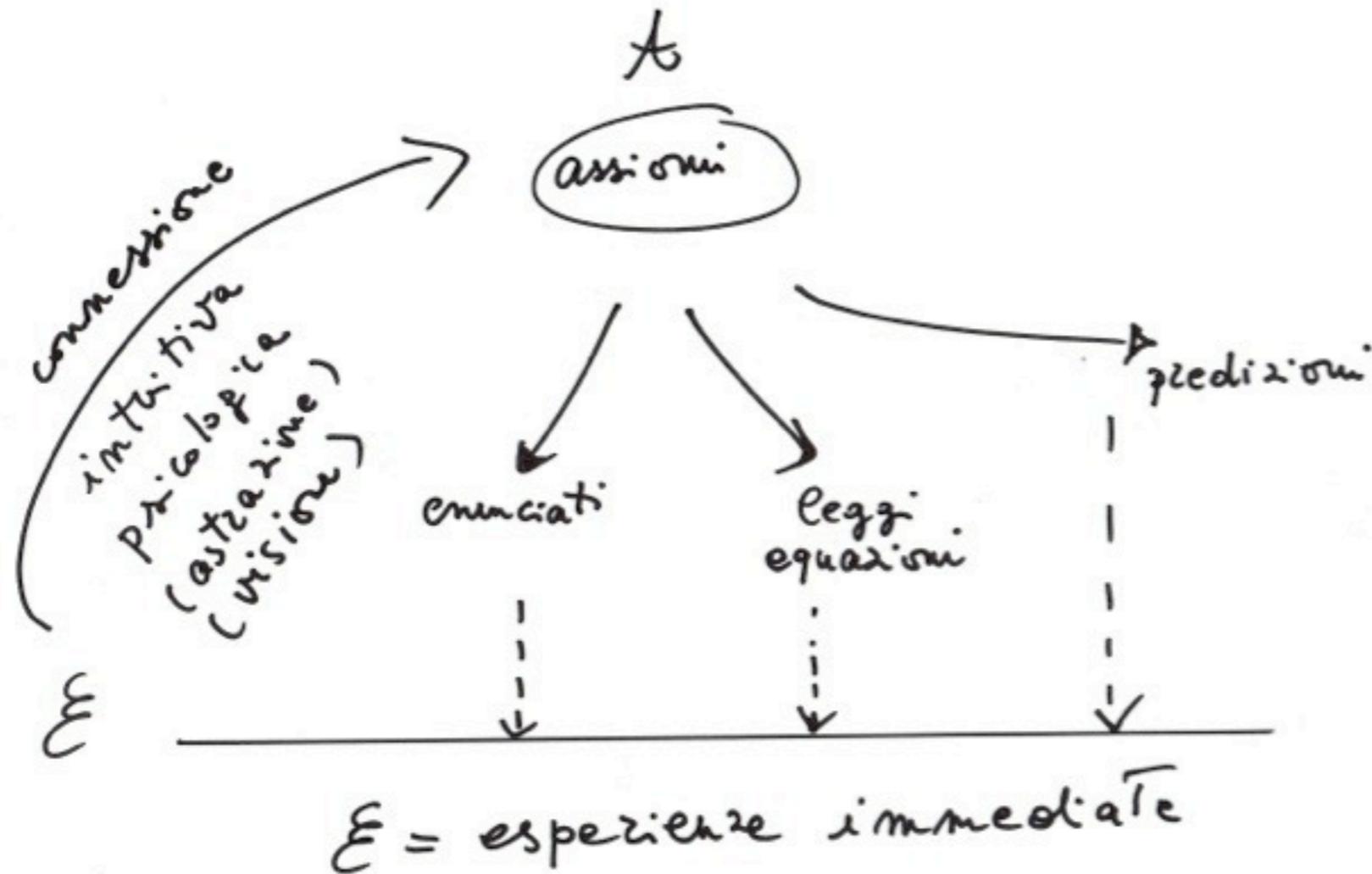
intervento di Alessandro Tomasiello



- La gravità è curvatura dello spazio, spazio dinamico che modifica la sua geometria in base al suo contenuto di massa-energia e che guida il moto dei corpi. E il tempo? Anche il tempo "curva", cambia di luogo in luogo.
- Lo spaziotempo come un tessuto elastico ha una sua dinamica in relazione ai corpi e quando sollecitato dai moti delle sue sorgenti "avverte" dei cambiamenti, trasmette le sue oscillazioni sotto forma di "onde gravitazionali" che si propagano con una velocità che è "c"
- La luce "curva", la frequenza della luce si sposta verso il "rosso" là dove la gravità è più intensa, gli orologi rallentano
- Mercurio precede attorno al Sole
- il trionfo di Einstein

intervento di Giandomenico Sassi

Il viaggio solitario di Einstein - il pensiero di Einstein



riproduzione libera del disegno di Einstein
in una lettera a Solovine, 27 maggio 1952

“Ciò che ci dovremmo aspettare è un mondo caotico del tutto inaccessibile al pensiero. Ci si potrebbe aspettare che il mondo sia governato da leggi soltanto nella misura in cui interveniamo con la nostra intelligenza ordinatrice: sarebbe un ordine simile a quello del dizionario laddove il tipo di ordine creato dalla teoria della gravitazione di Newton ha tutt’altro carattere. Anche se gli assiomi della teoria sono imposti dall’uomo, il successo di una tale costruzione presuppone un alto grado di ordine del mondo oggettivo, e cioè un qualcosa che a priori non si è per nulla autorizzati ad attendersi. È questo il miracolo che vieppiù si rafforza con lo sviluppo delle nostre conoscenze.”

Einstein, Lettera a Solovine, 30 marzo 1952