IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

I primi coraggiosi passi

Si ringrazia il Professor Lucio Fregonese per la parte storica

Dal VI secolo a.C nacquero i primi modelli alla ricerca di un **principio fondamentale** alla base di tutto (**Archè**):

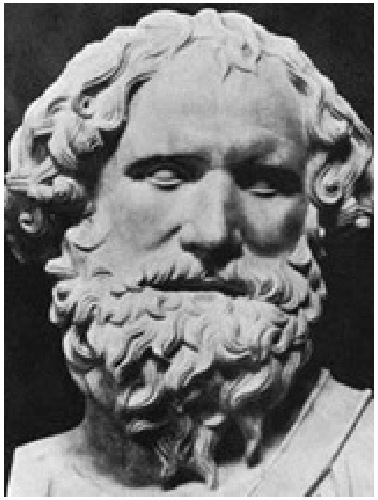
- Talete (acqua);
- Anassimene (aria);
- Eraclito (fuoco);
- Anassimandro (Ápeiron);
- Empedocle (terra, acqua, aria, fuoco);
- Platone (numeri e solidi);
- Democrito/Epicuro (atomi);

I primi passi verso la conoscenza dell'Universo sono basati su ragionamenti **filosofici** e **metafisici** sull'essenza e semplicità dell'Universo.

Dal IV secolo a.C. l'astronomia divenne ramo della **matematica**; gli astronomi cercavano di creare **modelli geometrici** che potessero imitare il movimento celeste

I primi modelli matematici

Eudosso di Cnido (408 a.C. – 355 a.C.)
nell'opera '*In Movimento*'

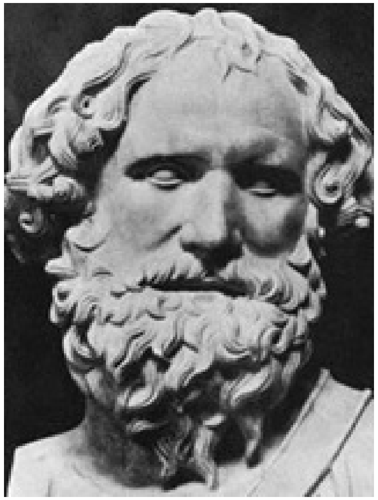


- **Modello di universo** in cui i pianeti stanno su delle sfere aventi come unico centro di rotazione la **Terra immobile**. La sfera più esterna contiene le stelle.

IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

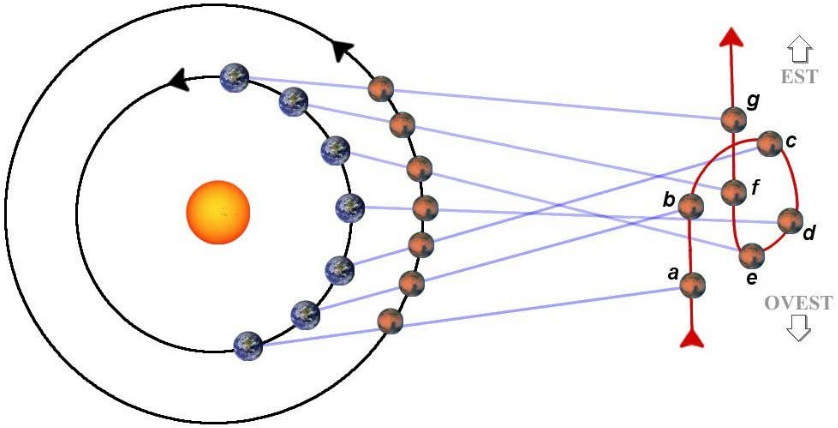
Davide Santostasi

I primi modelli matematici



Eudosso di Cnido (408 a.C. – 355 a.C.)
nell'opera '*In Movimento*'

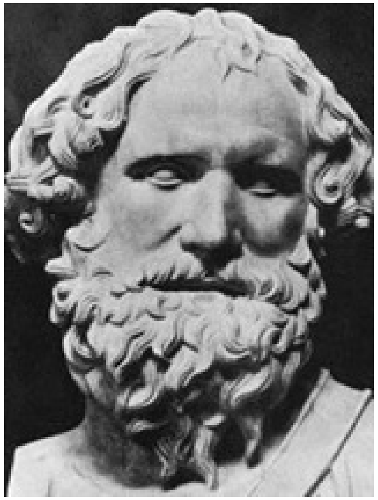
- **Modello di universo** in cui i pianeti stanno su delle sfere aventi come unico centro di rotazione la **Terra immobile**. La sfera più esterna contiene le stelle.
- Il moto dei cinque pianeti (Venere, Mercurio, Marte, Giove e Saturno) viene spiegato attraverso:
  - ✓ una prima sfera per il moto diurno,
  - ✓ un'altra per il moto mensile,
  - ✓ una terza ed una quarta con diverso orientamento dell'asse per il moto retrogrado.



IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

Davide Santostasi

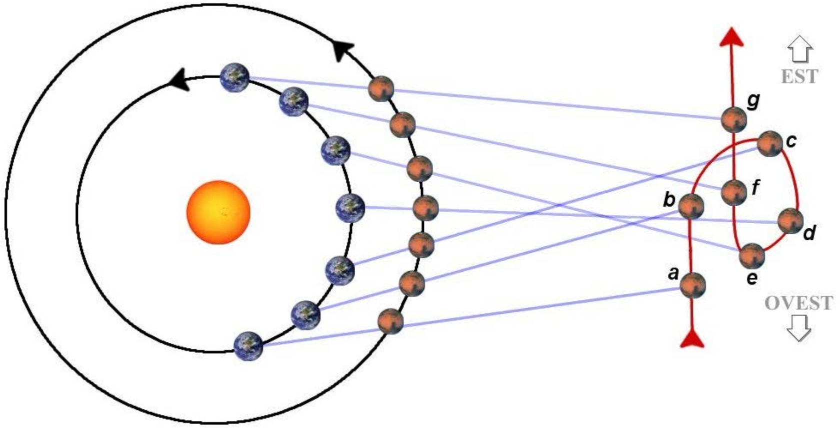
I primi modelli matematici



Eudosso di Cnido (408 a.C. – 355 a.C.)
nell'opera '*In Movimento*'

- **Modello di universo** in cui i pianeti stanno su delle sfere aventi come unico centro di rotazione la **Terra immobile**. La sfera più esterna contiene le stelle.
- Il moto dei cinque pianeti (Venere, Mercurio, Marte, Giove e Saturno) viene spiegato attraverso:
  - ✓ una prima sfera per il moto diurno,
  - ✓ un'altra per il moto mensile,
  - ✓ una terza ed una quarta con diverso orientamento dell'asse per il moto retrogrado.

Tenendo conto che il Sole e la Luna ne possedevano tre, si giunge ad un sistema di ben **27 sfere**.



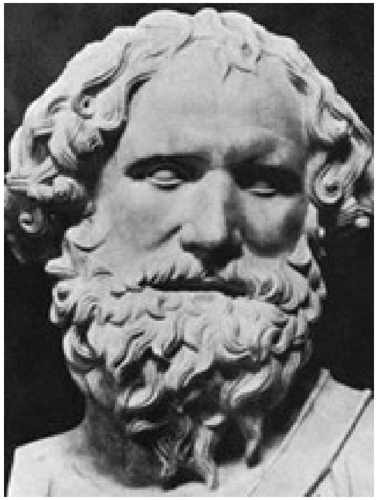
IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

Davide Santostasi

IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

Davide Santostasi

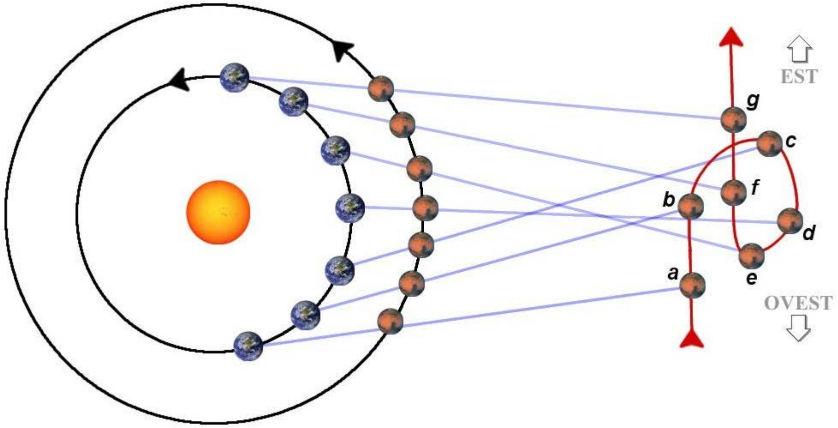
I primi modelli matematici



Eudosso di Cnido (408 a.C. – 355 a.C.)
nell'opera '*In Movimento*'

- **Modello di universo** in cui i pianeti stanno su delle sfere aventi come unico centro di rotazione la **Terra immobile**. La sfera più esterna contiene le stelle.
- Il moto dei cinque pianeti (Venere, Mercurio, Marte, Giove e Saturno) viene spiegato attraverso:
  - ✓ una prima sfera per il moto diurno,
  - ✓ un'altra per il moto mensile,
  - ✓ una terza ed una quarta con diverso orientamento dell'asse per il moto retrogrado.

Eudosso è stato il primo a tentare una spiegazione matematica del moto dei pianeti.



I primi modelli matematici

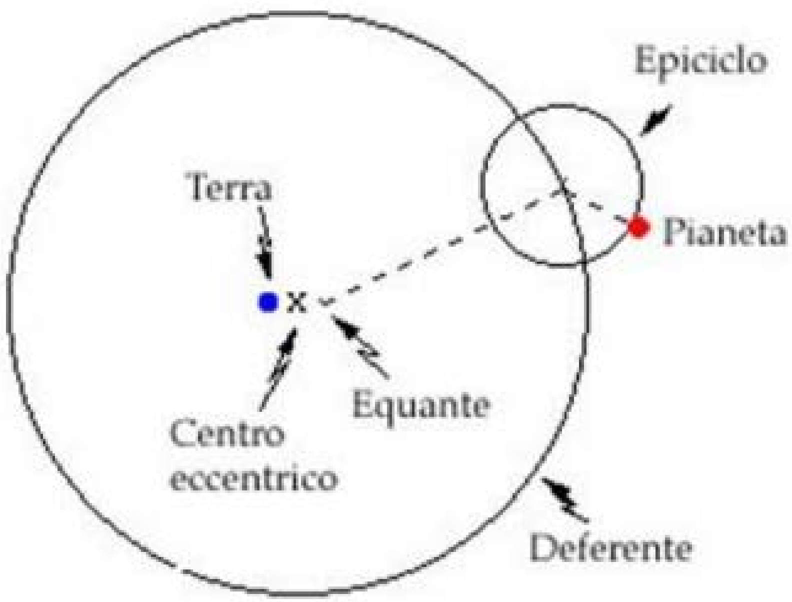
Aristotele (383 a.C. – 322 a.C.) nell'opera *De Caelo* perfezionò il modello di Eudosso:

- I corpi si muovono sempre su sfere concentriche. Quelle dei pianeti noti più il cielo delle **stelle fisse**, così chiamate perché come incastonate nel cielo sembravano **immobili e immutate** nelle loro posizioni relative sulla sfera celeste.
- Modello più **filosofico** che matematico. La Terra è al centro dell'Universo perché tutto tende a tornare verso il centro.

Il modello che sfidò i secoli

Tolomeo (100 - 175) Nell’opera *Almagesto* sviluppa una imponente teoria geocentrica in grado di descrivere con notevole precisione i moti osservabili. Tolomeo utilizza tre artifici per spiegare il moto di ciascun pianeta:

- **eccentrici**: ossia moti circolari con orbite centrate non nella Terra ma in un punto diverso;
- **equanti**: il moto ha velocità angolare costante rispetto ad un punto fittizio diverso dal centro dell'orbita;
- **epicicli**: il moto avviene non intorno alla Terra, ma intorno ad un punto che a sua volta percorre un moto circolare intorno alla Terra.



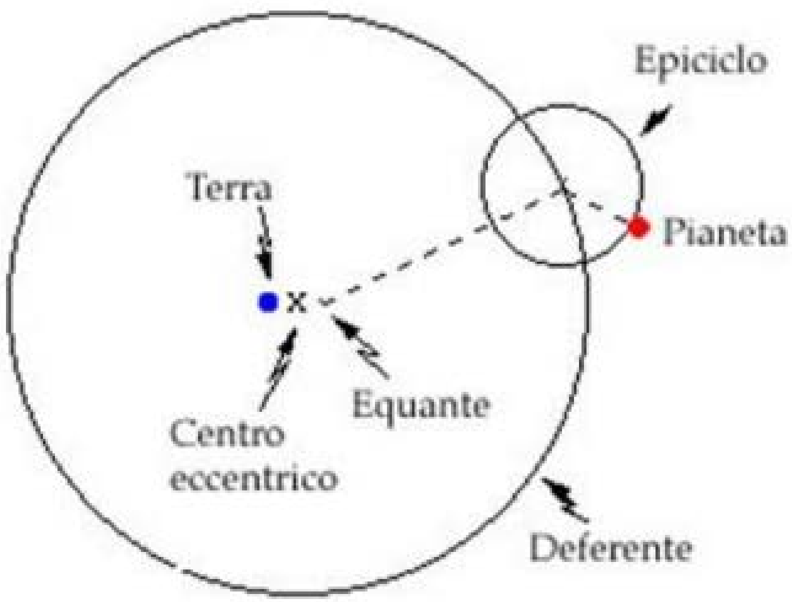
IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

Davide Santostasi

Il modello che sfidò i secoli

Tolomeo (100 - 175) Nell'opera *Almagesto* sviluppa una imponente teoria geocentrica in grado di descrivere con notevole precisione i moti osservabili. Tolomeo utilizza tre artifici per spiegare il moto di ciascun pianeta:

- **eccentrici**: ossia moti circolari con orbite centrate non nella Terra ma in un punto diverso;
- **equanti**: il moto ha velocità angolare costante rispetto ad un punto fittizio diverso dal centro dell'orbita;
- **epicicli**: il moto avviene non intorno alla Terra, ma intorno ad un punto che a sua volta percorre un moto circolare intorno alla Terra.



Il successo è dovuto alla **potenza della matematica** utilizzata. Combinando circa **100 moti circolari**, il sistema tolemaico rappresenta i moti del sistema solare con un'approssimazione di circa **8 minuti d'arco**

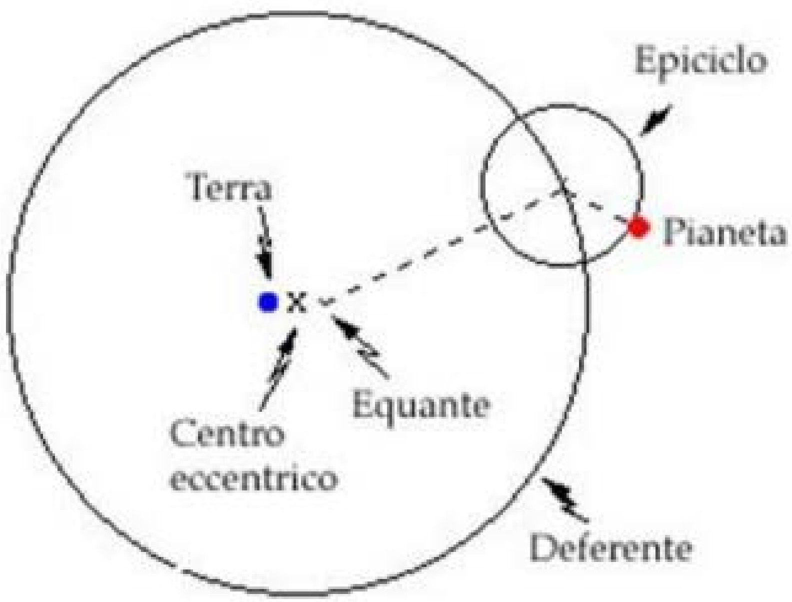
IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

Davide Santostasi

Il modello che sfidò i secoli

Tolomeo (100 - 175) Nell'opera *Almagesto* sviluppa una imponente teoria geocentrica in grado di descrivere con notevole precisione i moti osservabili. Tolomeo utilizza tre artifici per spiegare il moto di ciascun pianeta:

- **eccentrici**: ossia moti circolari con orbite centrate non nella Terra ma in un punto diverso;
- **equanti**: il moto ha velocità angolare costante rispetto ad un punto fittizio diverso dal centro dell'orbita;
- **epicicli**: il moto avviene non intorno alla Terra, ma intorno ad un punto che a sua volta percorre un moto circolare intorno alla Terra.



Il **modello Tolemaico** viene usato per i calcoli e le previsioni astronomiche. Quello di **Aristotele** sarà il modello assunto come descrizione della realtà.

Una voce fuori dal coro

Aristarco di Samo (310 a.C. – 230 a.C.) di cui non ci sono arrivate opere
Tratto dall' *Arenario* di Archimede:

«Tu Re Gerone sei consapevole che l'universo è il nome dato dagli astronomi alla sfera al cui centro è la Terra immobile, il Sole e altri le rivoluziono attorno sulla circonferenza di un cerchio. Tuttavia Aristarco ha messo in evidenza un testo che consiste in certe ipotesi, in cui appare, come una conseguenza delle ipotesi fatte, che l'universo è molte volte più grande dell' universo appena menzionato. ***Le sue ipotesi dicono che le stelle fisse e il Sole rimangono immobili, che la Terra rivoluziona attorno al Sole sulla circonferenza di un cerchio»***

IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

Davide Santostasi

Una voce fuori dal coro

Aristarco di Samo (310 a.C. – 230 a.C.) di cui non ci sono arrivate opere
Tratto dall’ *Arenario* di Archimede:

«Tu Re Gerone sei consapevole che l'universo è il nome dato dagli astronomi alla sfera al cui centro è la Terra immobile, il Sole e altri le rivoluziono attorno sulla circonferenza di un cerchio. Tuttavia Aristarco ha messo in evidenza un testo che consiste in certe ipotesi, in cui appare, come una conseguenza delle ipotesi fatte, che l'universo è molte volte più grande dell‘ universo appena menzionato. ***Le sue ipotesi dicono che le stelle fisse e il Sole rimangono immobili, che la Terra rivoluziona attorno al Sole sulla circonferenza di un cerchio»***

Aristarco di Samo fu il primo a proporre un modello eliostatico

Una voce fuori dal coro

Questa previsione per quei tempi era estremamente azzardata e senza alcun riscontro osservativo.
Oggi sappiamo che è stata una grandissima intuizione, ma questa idea rivoluzionaria causò ad Aristarco non poca ostilità tra i contemporanei

Plutarco scrive:

> « *Cleante* [un contemporaneo di Aristarco] *pensava fosse dovere dei greci accusare Aristarco di Samo di empietà per aver messo in moto la Salute dell'universo, supponendo che il cielo rimanga immobile e che la Terra rivoluzioni»*

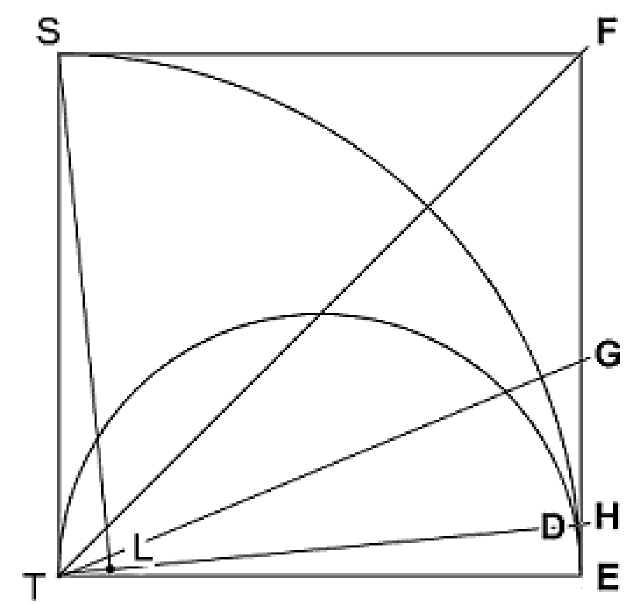
Una voce fuori dal coro

Questa previsione per quei tempi era estremamente azzardata e senza alcun riscontro osservativo.
Oggi sappiamo che è stata una grandissima intuizione, ma questa idea rivoluzionaria causò ad Aristarco non poca ostilità tra i contemporanei

Plutarco scrive:

> *« Cleante* [un contemporaneo di Aristarco] *pensava fosse dovere dei greci accusare Aristarco di Samo di empietà per aver messo in moto la Salute dell'universo, supponendo che il cielo rimanga immobile e che la Terra rivoluzioni»*

Per sua fortuna Aristarco godeva di grande fama poiché riuscì a misurare le distanze di Luna e Sole dalla Terra. Calcolò l'angolo tra Luna e Sole nell'istante esatto in cui la Luna si trovava in quadratura con il Sole (l'angolo Terra-Luna-Sole è di 90°) e attraverso similitudini di triangoli ricavò le distanze.



IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

Davide Santostasi

La rivoluzione più difficile

1500 circa. La filosofia aristotelica è accettata nel mondo occidentale da circa due millenni.

La rivoluzione più difficile

1500 circa. La filosofia aristotelica è accettata nel mondo occidentale da circa due millenni.

IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

Davide Santostasi

La rivoluzione più difficile

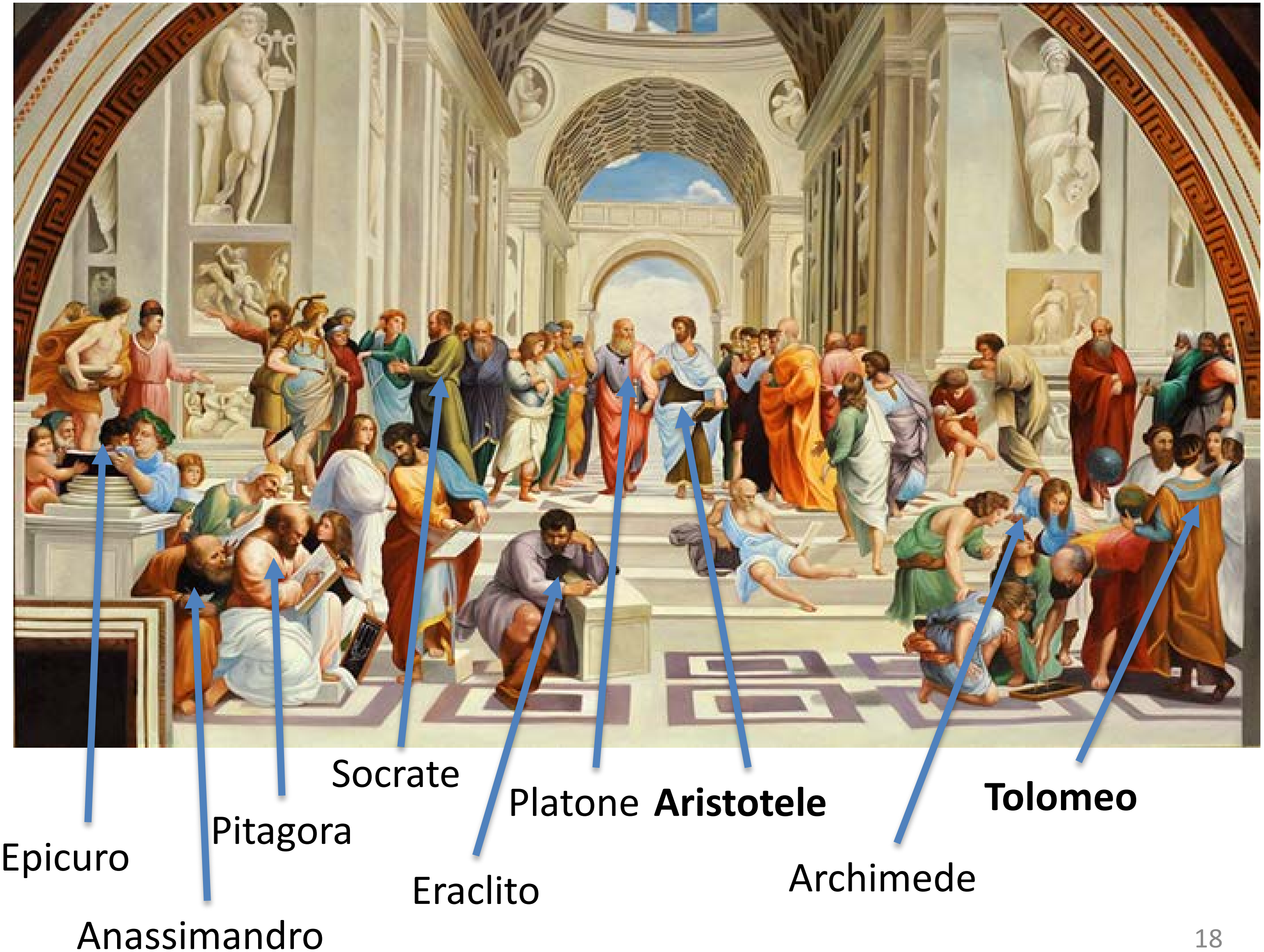
1500 circa. La filosofia aristotelica è accettata nel mondo occidentale da circa due millenni.

IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

Davide Santostasi

La rivoluzione più difficile

1500 circa. La filosofia aristotelica è accettata nel mondo occidentale da circa due millenni.



La rivoluzione più difficile

1500 circa. La filosofia aristotelica è accettata nel mondo occidentale da circa due millenni.

Le conoscenze astronomiche dell'epoca fanno riferimento al *De Caelo* di Aristotele e al *Almagesto* di Tolomeo.

IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

Davide Santostasi

La rivoluzione più difficile

Copernico (1473-1543) *De Revolutionibus Orbium Coelestrum*
Riprendendo la teoria di Aristarco crea un modello leggermente più semplice di quello tolemaico considerando **la Terra in rotazione attorno al Sole e al proprio asse.**

> «*Perché esitare allora ad attribuire alla Terra quel potere di movimento naturale alla sua forma* [sferica], *piuttosto che suppore una rotazione dell'intero universo, i cui limiti sono ignoti e non <u>conoscibili?</u> E perché non concedere che la rotazione diurna sia solo apparente nel cielo ma reale nella Terra?*»

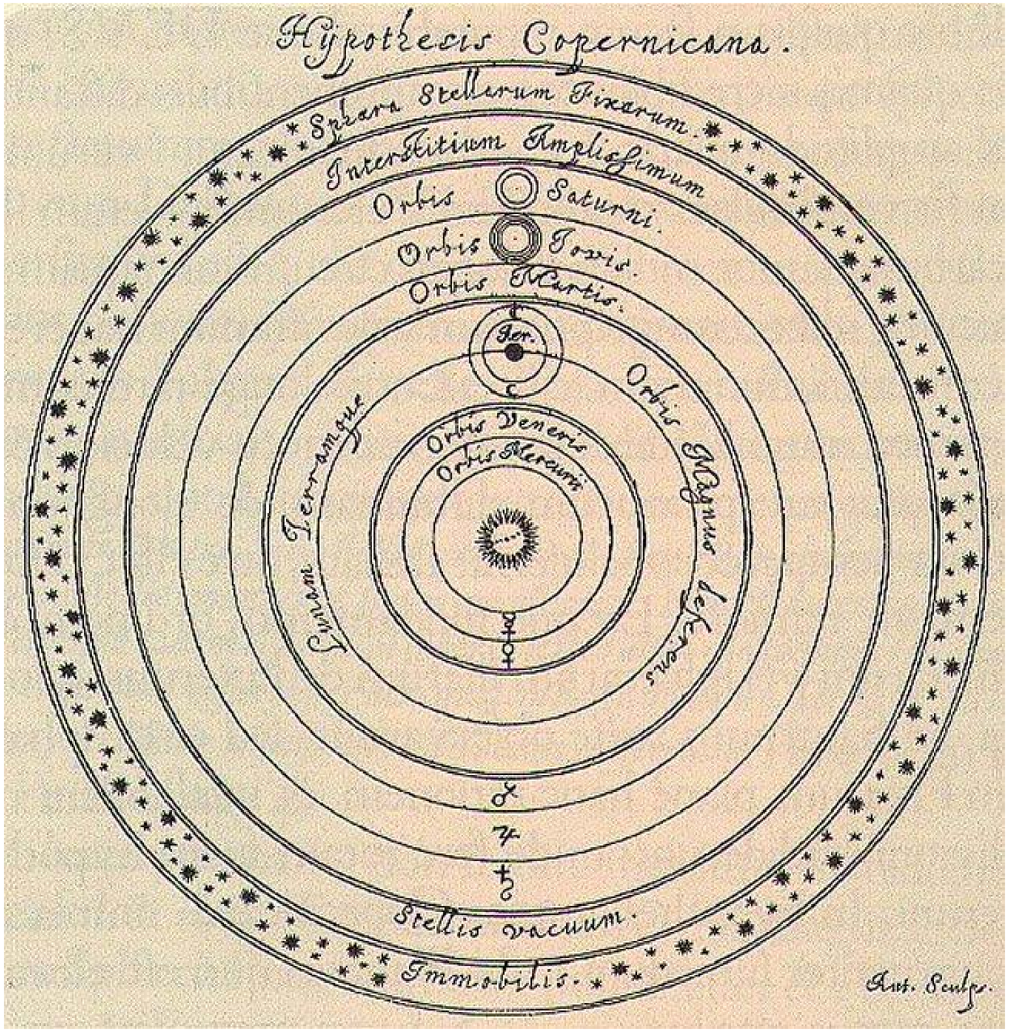
Il leggero vantaggio del sistema copernicano è l'eliminazione degli epicicli tolemaici di tutti i pianeti.

La mancanza della centralità della Terra apre **problemi metafisici** e **teologici**.

IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

Davide Santostasi

La rivoluzione più difficile



Nella prefazione del libro il sistema Copernicano viene proposto come un semplice **modello matematico** che non voleva rappresentare la realtà.

IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

Davide Santostasi

La rivoluzione più difficile

Copernico non ha **alcuna prova osservativa** a suo favore.

Per lui l'astronomia tolemaica non avrebbe potuto mai risolvere il problema del moto dei pianeti. Deduce quindi che l'impostazione di base deve essere sbagliata.
Questa conclusione è basata sulla constatazione che i molti artifici successivi al modello di Tolomeo avevano prodotto un "mostro", così descritto dallo stesso Copernico:

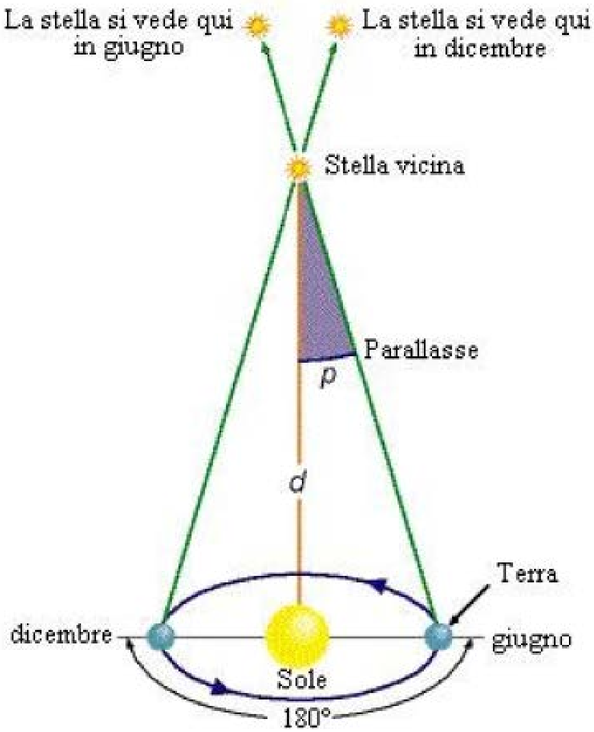
> «*Accadde invece ad essi* [i "matematici" antichi] *quel che accade ad un pittore che prenda mani, piedi, testa e le altre membra da modelli differenti, e che le disegni in maniera eccellente ma non in funzione di un singolo corpo e, poiché tutte queste parti non armonizzano assolutamente fra loro, ne vien fuori un essere mostruoso invece di un uomo*»

Copernico si riferisce ai tanti **artifici introdotti ad hoc** per spiegare il moto di ciascun pianeta (eccentrici, equanti, etc)

La rivoluzione più difficile

Tycho Brahe (1546-1601) dedicò la sua vita alla **costruzione di strumenti** per l'osservazione ad occhio nudo che gli consentirono di raccogliere **un'enorme quantità di dati** di altissima precisione.
Brahe pianificò le sue osservazioni in maniera "moderna", osservando sistematicamente i pianeti – in particolare Marte – durante tutto l'arco di tempo in cui questi erano visibili.

Brahe sapeva che il modello copernicano implicava l'effetto di **parallasse delle stelle fisse**.



IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

Davide Santostasi

La rivoluzione più difficile

Nessuna misura mostrava **alcuna parallasse stellare**, il che era spiegabile solo in due modi:

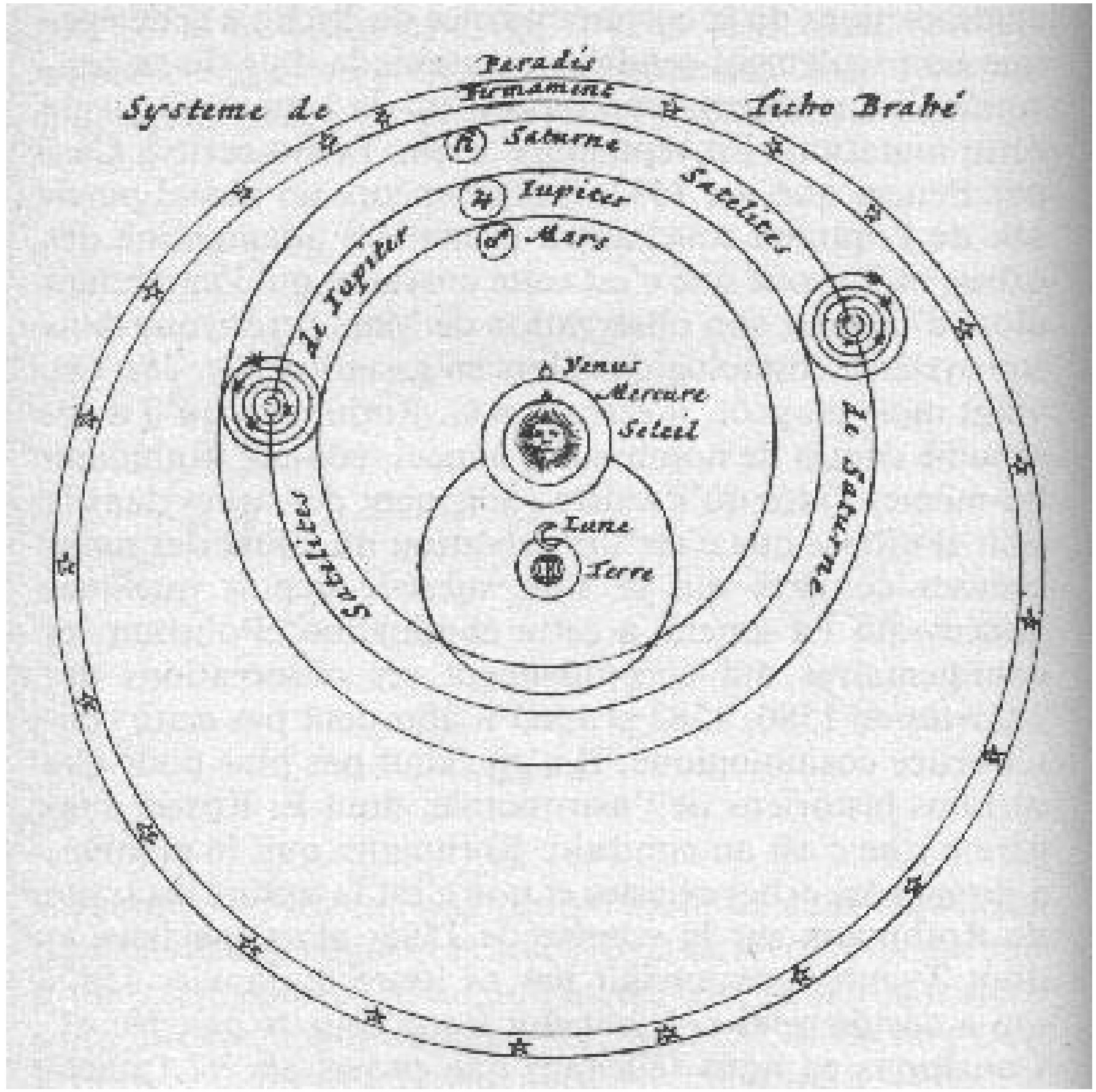
- la Terra non si muove;
- la distanza delle stelle dalla Terra è spaventosamente grande da rendere la parallasse praticamente inesistente;

La seconda spiegazione venne per lungo tempo ritenuta impossibile (era necessaria una distanza Terra-stelle 10000 volte maggiore della distanza Terra-Sole).

Per Brahe dunque, la spiegazione giusta era la prima e **Copernico in errore.**

Rigettò l'ipotesi copernicana ma anche quella tolemaica. Per questo motivo egli propose un sistema, da lui detto **ticonico**, che rappresentava una sorta di compromesso tra le due concezioni:
il Sole girerebbe attorno alla Terra immobile, e tutti gli altri pianeti girerebbero attorno al Sole.

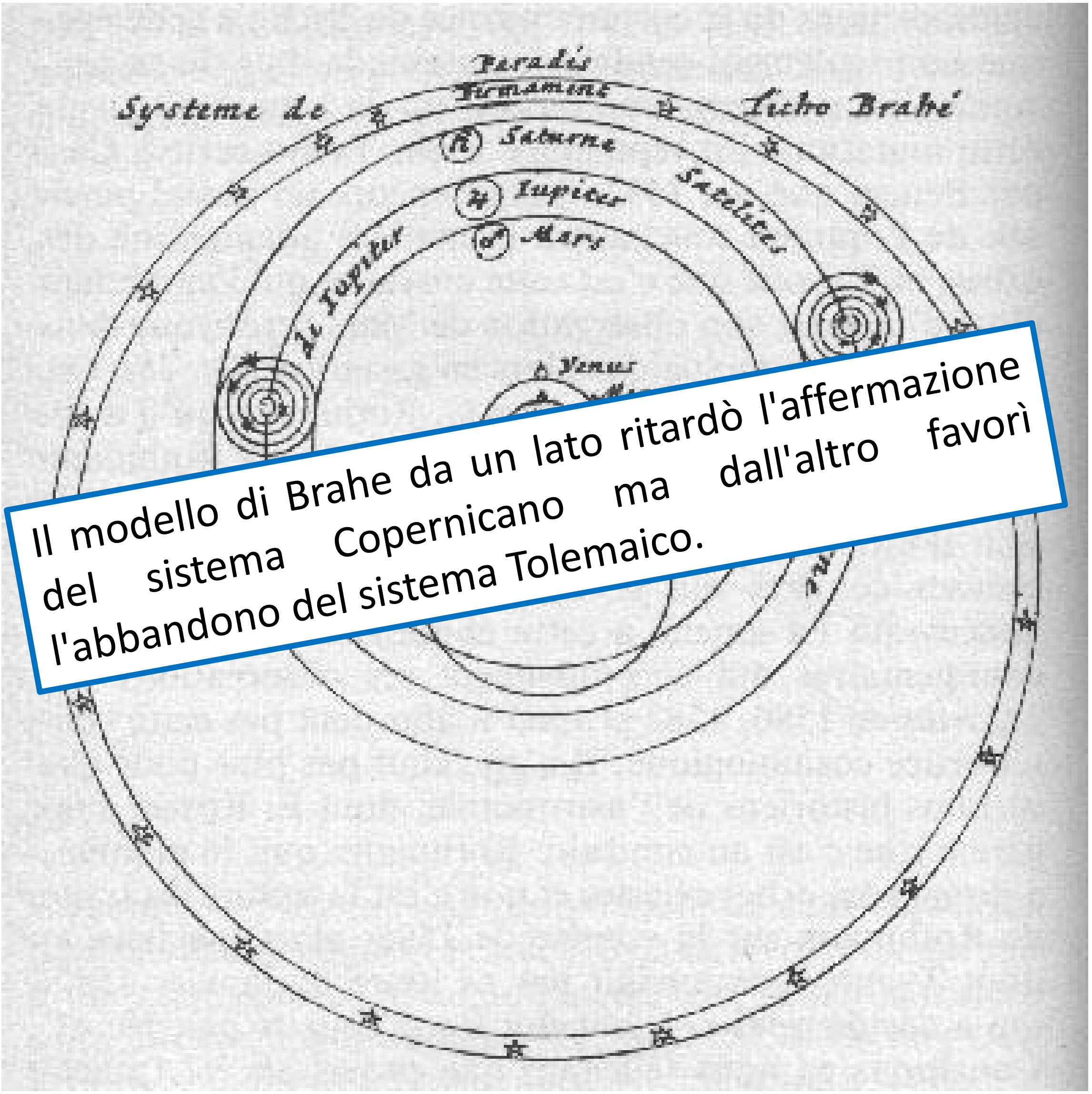
La rivoluzione più difficile



IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

Davide Santostasi

La rivoluzione più difficile



Il modello di Brahe da un lato ritardò l'affermazione del sistema Copernicano ma dall'altro favorì l'abbandono del sistema Tolemaico.

IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

Davide Santostasi

Le crepe nel sistema Tolemaico

Nel 1572 Tycho Brahe osservò assieme una **stella “nuova”** comparsa nella costellazione di Cassiopea . Questa stella raggiunse rapidamente la luminosità di Venere per affievolirsi pian piano fino a scomparire all’inizio del 1574.

Poteva mai essere una stella?
Secondo la concezione dell’epoca **le stelle erano immutabili**.
Non riuscendo a misurarne la parlasse Brahe concluse che non poteva che essere una stella.

Se una stella si era accesa dal nulla allora non c’era gran differenza tra il mondo superlunare e quello sublunare; e quindi la Terra poteva benissimo essere un pianeta, visto che i cieli non differivano sostanzialmente dal mondo terrestre.

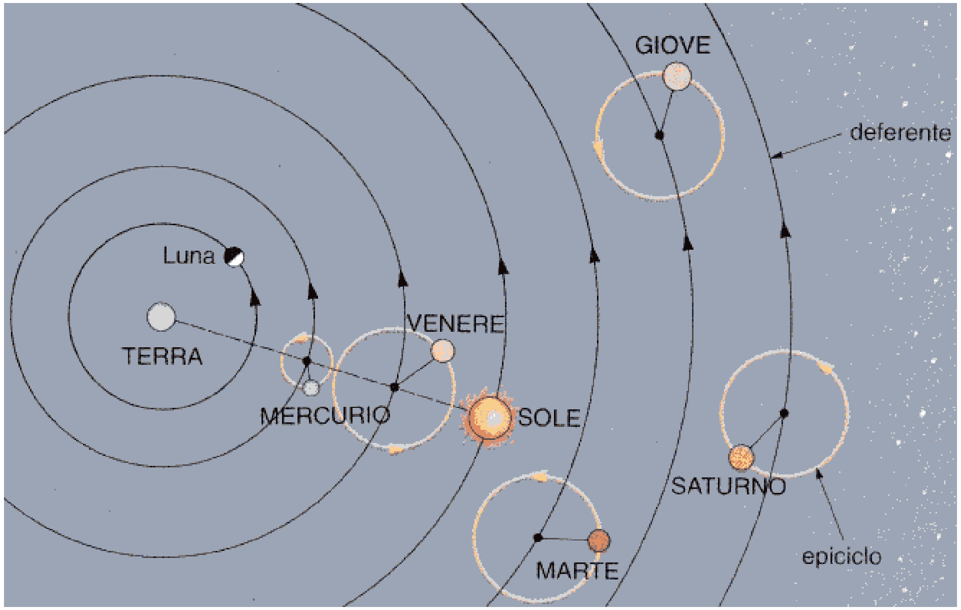
1° crepa nel sistema tolemaico Il mondo delle stelle non era più così perfetto come si pensava. E forse non solo…

Le crepe nel sistema Tolemaico

Keplero (1571-1630) Attraverso misure precise di Tycho Brahe scoprì le basi della meccanica celeste enunciando nel *Astronomia nova* le sue **tre leggi**.

Da precisi calcoli astronomici notò che la distanza Terra-Marte può diventare minore della distanza Terra-Sole.

2° crepa nel sistema tolemaico: bisogna richiedere che nel moto epiciclico Marte rompa la sfera del Sole per scendere vicino alla Terra



IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

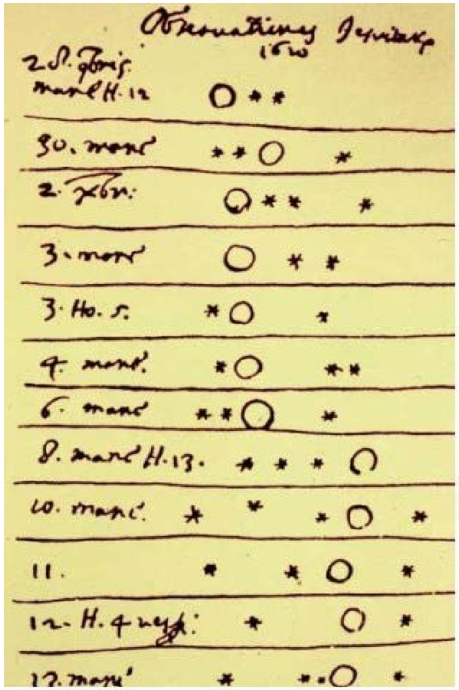
Davide Santostasi

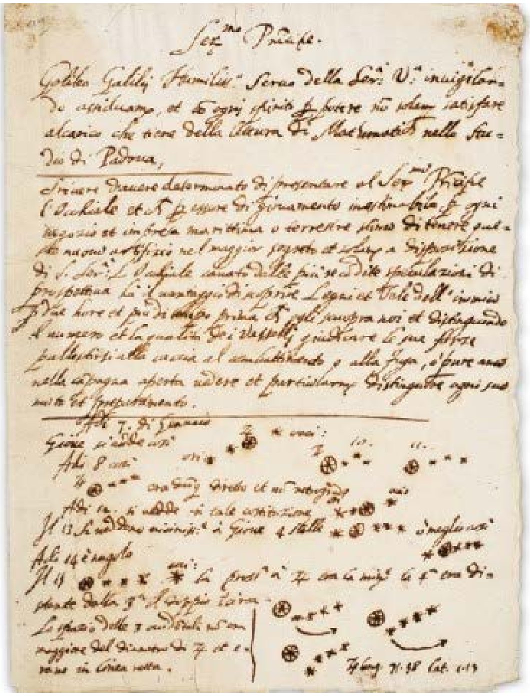
Le crepe nel sistema Tolemaico

Si ringrazia il Professor Lucio Fregonese per la parte storica

Galileo Galilei (1564-1642) Nel 1610 utilizza il telescopio e scopre i 4 satelliti maggiori del pianeta Giove, le macchie solari, la rotazione del Sole e le fasi di Venere.
Continua il processo di sgretolamento delle convinzioni aristoteliche di immutabilità del mondo superlunare.

3° crepa nel sistema tolemaico: I **satelliti di Giove** orbitano attorno a Giove, vien meno la centralità della Terra. Esistono corpi celesti che non ruotano attorno alla Terra.





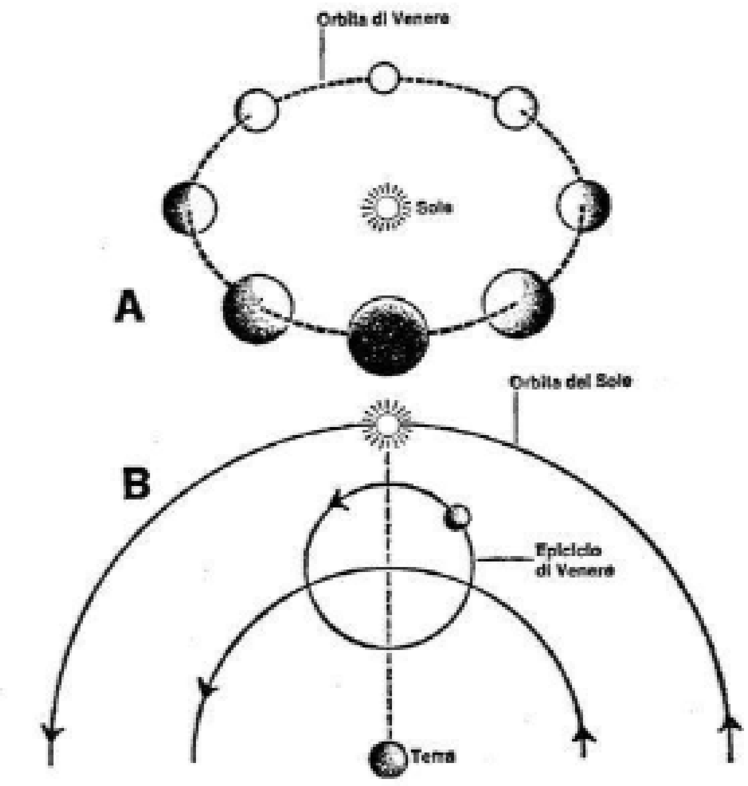
IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

Davide Santostasi

Le crepe nel sistema Tolemaico

Galileo Galilei (1564-1642) Nel 1610 utilizza il telescopio e scopre i 4 satelliti maggiori del pianeta Giove, le macchie solari, la rotazione del Sole e le fasi di Venere.
Continua il processo di sgretolamento delle convinzioni aristoteliche di immutabilità del mondo superlunare.

4° crepa nel sistema tolemaico: non prevede le **fasi di Venere**



Le crepe nel sistema Tolemaico

I copernicani furono tacciati di essere ‘‘ignoranti’’ e “infedeli” e pertanto avevano paura di dichiarare apertamente il loro pensiero, come lo stesso Copernico ammise

> *«…taluni, non appena avranno appreso come in questi miei libri, scritti sulle rivoluzioni delle sfere dell’universo, io attribuisca al globo terrestre certi movimenti, subito chiederanno a gran voce che, avendo tale opinione, io sia messo al bando…*
> *Pensando quindi fra me stesso quanto assurda avrebbero giudicata la mia affermazione che la Terra si muove coloro i quali sanno che l’idea della Terra immobile nel mezzo dei cieli e centro degli stessi ha trovato conferma nel giudizio di molti secoli, ho avuto a lungo il dubbio se rendere pubblici i miei commentari scritti per dimostrare il moto della Terra… Ma poi la mia lunga esitazione ed anche la mia resistenza furono vinte da persone amiche…»*

La Chiesa pose all’Indice il *De Revolutionibus* ma a quel punto le **idee copernicane** erano oramai in giro per l’Europa e pronte a coinvolgere altri professionisti in campo astronomico e matematico.

La vittoria definitiva

La sfida tra i vari modelli ha visto come personaggio centrale la **matematica** usata come **potente strumento** per riuscire a conciliare le previsioni dei modelli con le osservazioni.

Per decretare la definitiva vittoria del modello copernicano è necessario che le previsioni matematiche siano di gran lunga superiori di quello tolemaico

Isaac Newton (1642-1727) nel *Phylosophiæ naturalis principia mathematica* completò questo processo ricavando da un punto di vista matematico **la legge di gravitazione universale** per i pianeti: una relazione in grado di spiegare e prevedere il moto dei pianeti.

La vittoria definitiva

La sfida tra i vari modelli ha visto come personaggio centrale la **matematica** usata come **potente strumento** per riuscire a conciliare le previsioni dei modelli con le osservazioni.

Per decretare la definitiva vittoria del modello copernicano è necessario che le previsioni matematiche siano di gran lunga superiori di quello tolemaico

Isaac Newton (1642-1727) nel *Phylosophiæ naturalis principia mathematica* completò questo processo ricavando da un punto di vista matematico **la legge di gravitazione universale** per i pianeti: una relazione in grado di spiegare e prevedere il moto dei pianeti.

Le osservazioni risultano in accordo con tale legge se si suppone che il sistema corretto sia quello copernicano.

Una nuova legge per l'Universo

Si ringrazia il Professor Lucio Fregonese
per la parte storica

Seguiamo il ragionamento di Newton del Libro III dei Principia

Newton parla di uno ''**sforzo centripeto**'' che permette ad un corpo di ruotare intorno al suo centro.

$$''\text{sforzo centripeto}'' \propto \frac{V^2}{R}$$

In un moto circolare uniforme $V^2 = \left(\frac{2\pi R}{T}\right)^2 \propto \frac{R^2}{T^2}$

Da cui $\quad ''\text{sforzo centripeto}'' \propto \frac{R}{T^2}$

IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

Davide Santostasi

Una nuova legge per l'Universo

Seguiamo il ragionamento di Newton del Libro III dei Principia

Newton parla di uno "**sforzo centripeto**" che permette ad un corpo di ruotare intorno al suo centro.

$$''\text{sforzo centripeto}'' \propto \frac{V^2}{R}$$

In un moto circolare uniforme $V^2 = \left(\frac{2\pi R}{T}\right)^2 \propto \frac{R^2}{T^2}$

Da cui $''\text{sforzo centripeto}'' \propto \frac{R}{T^2}$

VALIDO PER OGNI MOTO CIRCOLARE UNIFORME

IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

Davide Santostasi

IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

Davide Santostasi

Una nuova legge per l'Universo

Seguiamo il ragionamento di Newton del Libro III dei Principia

Newton parla di uno ''**sforzo centripeto**'' che permette ad un corpo di ruotare intorno al suo centro.

$$''\text{sforzo centripeto}'' \propto \frac{V^2}{R}$$

In un moto circolare uniforme $V^2 = \left(\frac{2\pi R}{T}\right)^2 \propto \frac{R^2}{T^2}$

Da cui $\quad ''\text{sforzo centripeto}'' \propto \frac{R}{T^2}$

Utilizzando la 3° legge di Keplero $\frac{R^3}{T^2} = costante \rightarrow \frac{1}{T^2} \propto \frac{1}{R^3}$

$$''sforzo\ centripeto'' \propto \frac{1}{R^2}$$

Una nuova legge per l'Universo

Seguiamo il ragionamento di Newton del Libro III dei Principia

Newton parla di uno "**sforzo centripeto**" che permette ad un corpo di ruotare intorno al suo centro.

$$''\text{sforzo centripeto}'' \propto \frac{V^2}{R}$$

In un moto circolare uniforme $V^2 = \left(\frac{2\pi R}{T}\right)^2 \propto \frac{R^2}{T^2}$

Da cui $''\text{sforzo centripeto}'' \propto \frac{R}{T^2}$

Utilizzando la 3° legge di Keplero $\frac{R^3}{T^2} = costante \rightarrow \frac{1}{T^2} \propto \frac{1}{R^3}$

$$''sforzo\ centripeto'' \propto \frac{1}{R^2}$$

RELAZIONE VALIDA PER I PIANETI

DIPENDENZA DA $1/R^2$

La caduta della Luna

Il passo successivo di Newton è confrontare la **caduta verticale di un corpo** in prossimità della superficie terrestre con **la caduta “centripeta” della luna**. Questo passo è importante perché:

- ✓ per la luna è più facile concepire che lo sforzo “centripeto” derivi da una gravità attenuata dalla distanza;
- ✓ Newton vuole dimostrare che esiste una gravità universale $F \div 1/R^2$ che vale **indistintamente per tutti i corpi** (planetari o terrestri) rispetto alla terra.

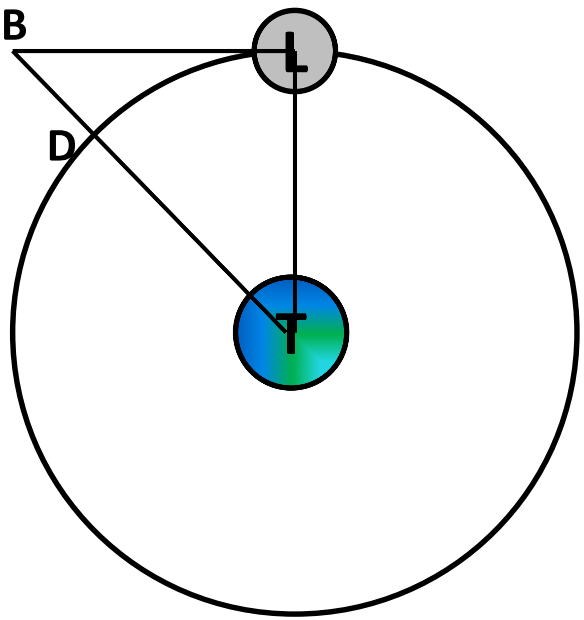
IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

Davide Santostasi

La caduta della Luna

$$Raggio\ della\ terra = r\ \ (Eratostene; r = 6.4 \cdot 10^3\ km)$$
$$Raggio\ dell'orbita\ lunare = R\ (Aristarco\ di\ Samo; R = 4.0 \cdot 10^5\ km)$$

Se la luna L seguisse il proprio moto inerziale a velocità V, in un tempo dt percorrerebbe il tratto $BL\ =\ V\ dt$.
Calcoliamo $BD\ =\ BT - R$.
Applicando il teorema di Pitagora



$$BT = \sqrt{R^2 + (Vdt)^2} = R\sqrt{1 + \left(\frac{Vdt}{R}\right)^2}$$

Con uno sviluppo di Taylor al primo ordine

$$BT = R\left(1 + \frac{1}{2}\frac{V^2 dt^2}{R^2}\right) = R + \frac{1}{2}\frac{V^2}{R}(dt)^2$$

Da cui

$$BD = \frac{1}{2}\left(\frac{V^2}{R}\right)(dt)^2$$

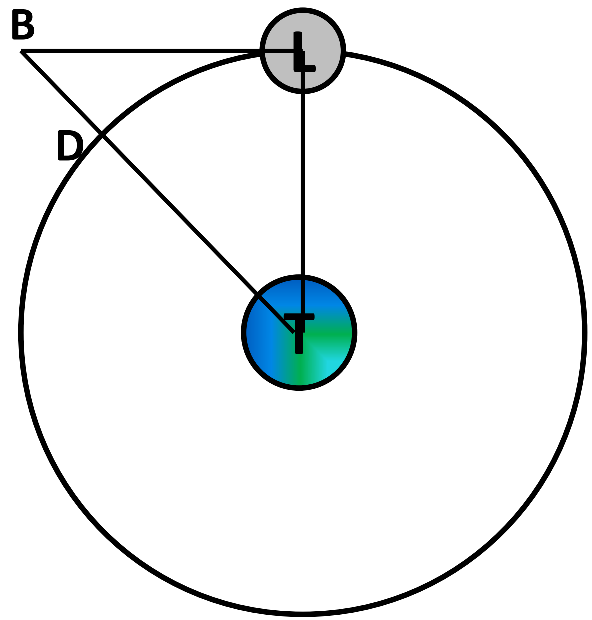
IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

Davide Santostasi

La caduta della Luna

$$Raggio\ della\ terra = r\ \ (Eratostene; r = 6.4 \cdot 10^3\ km)$$
$$Raggio\ dell'orbita\ lunare = R\ (Aristarco\ di\ Samo; R = 4.0 \cdot 10^5\ km)$$

Se la luna L seguisse il proprio moto inerziale a velocità V, in un tempo dt percorrerebbe il tratto $BL\ =\ V\ dt$.
Calcoliamo $BD\ =\ BT - R$.
Applicando il teorema di Pitagora



$$BT = \sqrt{R^2 + (Vdt)^2} = R\sqrt{1 + \left(\frac{Vdt}{R}\right)^2}$$

Con uno sviluppo di Taylor al primo ordine

$$BT = R\left(1 + \frac{1}{2}\frac{V^2dt^2}{R^2}\right) = R + \frac{1}{2}\frac{V^2}{R}(dt)^2$$

Da cui

$$BD = \frac{1}{2}\left(\frac{V^2}{R}\right)(dt)^2$$

Moto di caduta con

$$\mathbf{g}_L = \frac{\boldsymbol{V^2}}{\boldsymbol{R}}$$

(coincide con il valore calcolato da Newton per lo sforzo "centripeto" dei pianeti)

IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

Davide Santostasi

La caduta della Luna

$$Raggio\ della\ terra = r\ \ (Eratostene; r = 6.4 \cdot 10^3\ km)$$
$$Raggio\ dell'orbita\ lunare = R\ (Aristarco\ di\ Samo; R = 4.0 \cdot 10^5\ km)$$

È possibile quindi ricavare g_L

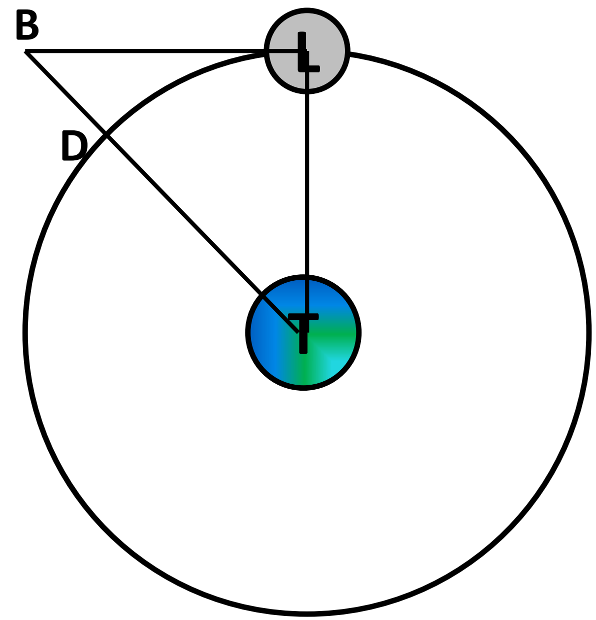
$$g_L = 2.7 \cdot 10^{-3} m/s^2$$

Questo è l'accelerazione centripeta di "caduta" della Luna sulla Terra.
Newton può quindi eseguire il rapporto

$$\frac{g_L}{g_T} = \frac{2.7 \cdot 10^{-3}}{9.8} \sim \frac{1}{3600}$$

Ma

$$\frac{g_L}{g_T} \sim \frac{r^2}{R^2} = \left(\frac{1}{60}\right)^2 = \frac{1}{3600}$$



La caduta della Luna

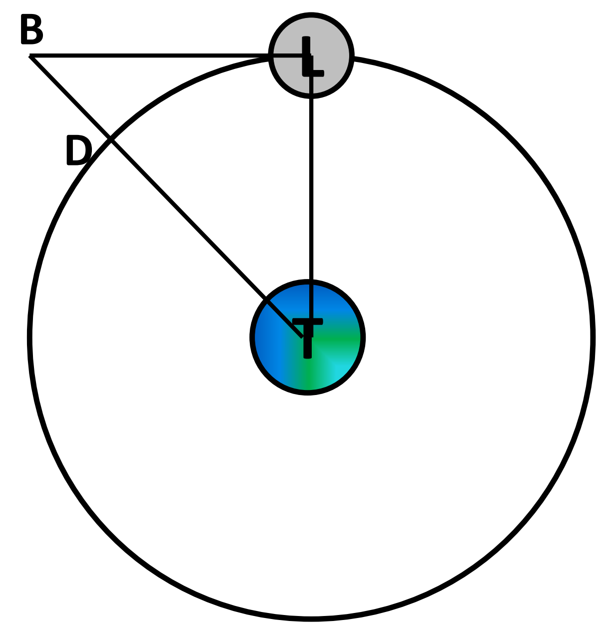
$$Raggio\ della\ terra = r\ \ (Eratostene; r = 6.4 \cdot 10^3\ km)$$
$$Raggio\ dell'orbita\ lunare = R\ (Aristarco\ di\ Samo; R = 4.0 \cdot 10^5\ km)$$

È possibile quindi ricavare g_L

$$g_L = 2.7 \cdot 10^{-3} m/s^2$$

Questo è l'accelerazione centripeta di "caduta" della Luna sulla Terra.
Newton può quindi eseguire il rapporto

$$\frac{g_L}{g_T} = \frac{2.7 \cdot 10^{-3}}{9.8} \sim \frac{1}{3600}$$



Ma

$$\frac{g_L}{g_T} \sim \frac{r^2}{R^2} = \left(\frac{1}{60}\right)^2 = \frac{1}{3600}$$

Verifica della legge dell'inverso del quadrato della distanza
$F \ \propto \ 1/R^2$

La caduta della Luna

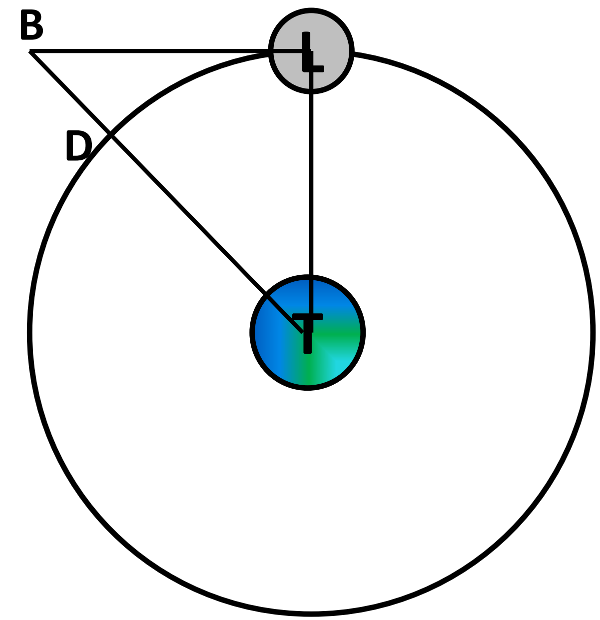
$$Raggio\ della\ terra = r\ \ (Eratostene; r = 6.4 \cdot 10^3\ km)$$
$$Raggio\ dell'orbita\ lunare = R\ (Aristarco\ di\ Samo; R = 4.0 \cdot 10^5\ km)$$

È possibile quindi ricavare g_L

$$g_L = 2.7 \cdot 10^{-3} m/s^2$$

Questo è l'accelerazione centripeta di "caduta" della Luna sulla Terra.
Newton può quindi eseguire il rapporto

$$\frac{g_L}{g_T} = \frac{2.7 \cdot 10^{-3}}{9.8} \sim \frac{1}{3600}$$



Ma

$$\frac{g_L}{g_T} \sim \frac{r^2}{R^2} = \left(\frac{1}{60}\right)^2 = \frac{1}{3600}$$

Verifica della legge dell'inverso del quadrato della distanza
$F \propto 1/R^2$

LA FORZA CHE LA TERRA ESERCITA SULLA LUNA O SU UNA MELA È LA STESSA!

IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

Davide Santostasi

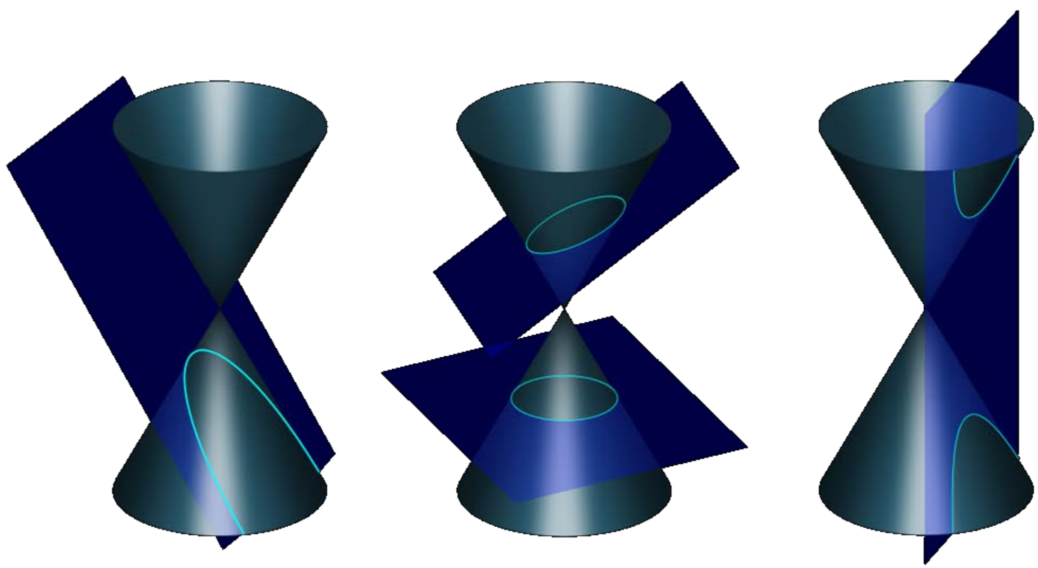
Una teoria perfetta…

La Legge della Gravitazione Universale permette quindi di spiegare l’interazione fra due qualsiasi corpi attraverso una semplice relazione.

Newton perfeziona la sua teoria riuscendo (con complessi calcoli) ad estenderla anche nel caso generale in cui:

- le orbite dei pianeti hanno forma ellittica;
- i corpi non sono (in linea di principio) assimilabili a punti materiali ma sono estesi.

I risultati ottenuti con questa teoria sono straordinari, in particolare riesce a dimostrare che le orbite di corpi soggetti alla forza di gravità, sono delle sezioni coniche (aperte: iperbole, parabola; chiuse: ellittiche)



IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

Davide Santostasi

...con applicazioni pratiche...

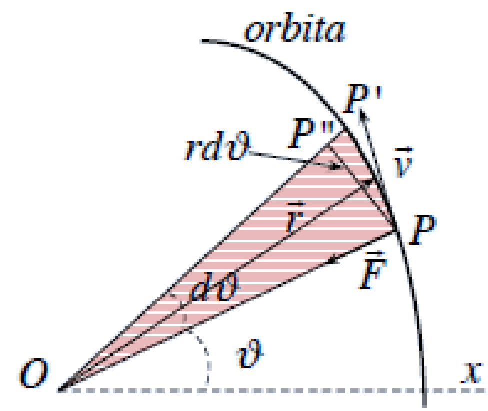
Si ringrazia il Professor Lucio Fregonese per la parte storica

Ricavare le orbite dei pianeti

Calcoliamo l'area spazzata dal raggio vettore

$$dA = \frac{1}{2}\overline{PP''}r = \frac{1}{2}r\, d\vartheta\, r$$

L'area PP'P'' è un infinitesimo di ordine superiore e si può trascurare



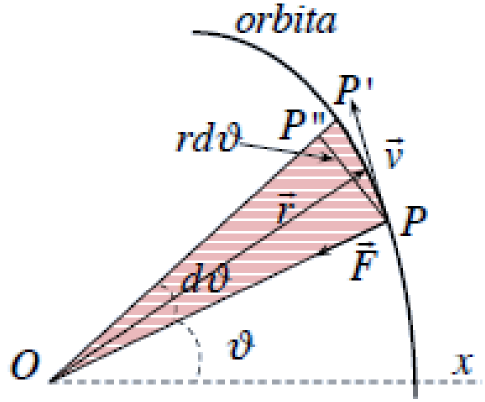
$$\frac{dA}{dt} = \frac{1}{2}r^2\frac{d\vartheta}{dt} = cost$$

Per la SECONDA LEGGE DI KEPLERO

…con applicazioni pratiche…

Ricavare le orbite dei pianeti

Calcoliamo l'area spazzata dal raggio vettore



$$dA = \frac{1}{2}\overline{PP''}r = \frac{1}{2}r\,d\vartheta\,r$$

L'area PP'P'' è un infinitesimo di ordine superiore e si può trascurare

$$\frac{dA}{dt} = \frac{1}{2}r^2\frac{d\vartheta}{dt} = cost$$

Per la SECONDA LEGGE DI KEPLERO

Calcoliamo ora il modulo del momento angolare

$$l = mrv = mr^2\omega = mr^2\frac{d\vartheta}{dt}$$

$$\omega = \frac{l}{mr^2}$$

IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

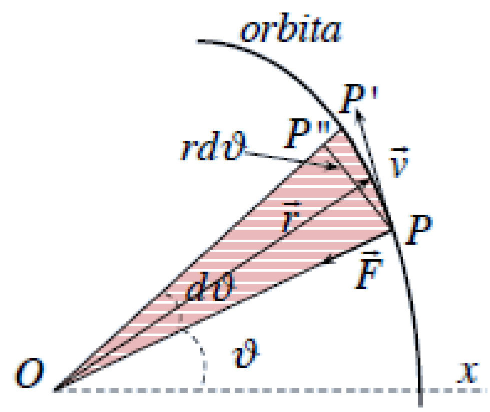
Davide Santostasi

…con applicazioni pratiche…

Ricavare le orbite dei pianeti

Calcoliamo l'area spazzata dal raggio vettore

$$dA = \frac{1}{2}\overline{PP''}r = \frac{1}{2}r\, d\vartheta\, r$$



L'area PP'P'' è un infinitesimo di ordine superiore e si può trascurare

$$\frac{dA}{dt} = \frac{1}{2}r^2\frac{d\vartheta}{dt} = cost$$

Per la SECONDA LEGGE DI KEPLERO

Calcoliamo ora il modulo del momento angolare

$$l = mrv = mr^2\omega = mr^2\frac{d\vartheta}{dt}$$

$$\omega = \frac{l}{mr^2}$$

Sostituendo nella legge di Keplero

$$\frac{dA}{dt} = \frac{1}{2}\frac{l}{m} = cost \;\rightarrow \boldsymbol{l = cost}$$

- ✓ Forza di tipo centrale
- ✓ Orbita piana! $\vec{v}$ e $\vec{F}$ giacciono sullo stesso piano

IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

Davide Santostasi

…con applicazioni pratiche…

Ricavare le orbite dei pianeti

Nel caso di forze centrali è più semplice scrivere l'equazione dell'orbita (per esempio l'ellisse) in coordinate polari.

Descriviamo l'espressione della forza F nel caso del moto ellittico e poi generalizziamo nel caso delle altre coniche.

IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

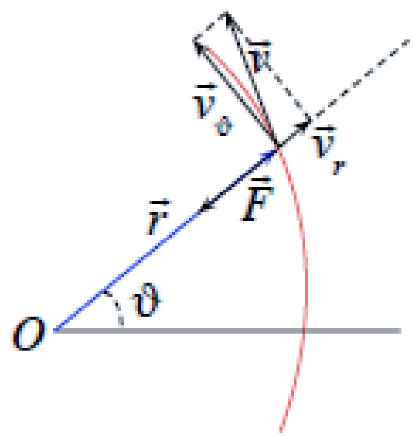
Davide Santostasi

…con applicazioni pratiche…

Ricavare le orbite dei pianeti

Nel caso di forze centrali è più semplice scrivere l’equazione dell’orbita (per esempio l’ellisse) in coordinate polari.

Descriviamo l’espressione della forza F nel caso del moto ellittico e poi generalizziamo nel caso delle altre coniche.



Nel caso dell’orbita ellittica in cui r cambia, la forza $\vec{F}$ ha componente lungo $\vec{r}$ data da

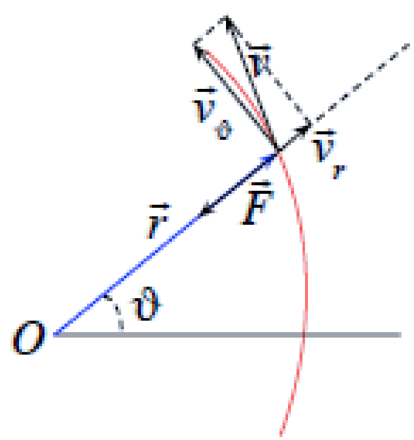
$$F_\mathrm{r} = \mathrm{m}\frac{\mathrm{d}^2\mathrm{r}}{\mathrm{dt}^2} - \mathrm{m}\omega^2 r$$

…con applicazioni pratiche…

Ricavare le orbite dei pianeti

Nel caso di forze centrali è più semplice scrivere l’equazione dell’orbita (per esempio l’ellisse) in coordinate polari.

Descriviamo l’espressione della forza F nel caso del moto ellittico e poi generalizziamo nel caso delle altre coniche.



Nel caso dell’orbita ellittica in cui r cambia, la forza $\vec{F}$ ha componente lungo $\vec{r}$ data da

$$F_\mathrm{r} = \mathrm{m}\frac{\mathrm{d}^2\mathrm{r}}{\mathrm{dt}^2} - \mathrm{m}\omega^2 r$$

Attraverso qualche giochetto di calcolo differenziale e ricordando che $\omega = \frac{l}{mr^2}$ si ricava

$$F_\mathrm{r} = -\frac{l^2}{m}u^2\left(u + \frac{d^2u}{d\vartheta^2}\right)$$

dove $\mathrm{u} = \frac{1}{r}$

…con applicazioni pratiche…

Ricavare le orbite dei pianeti

Uguagliando questa forza ha la forza gravitazionale

$$F_{\mathrm{r}} = -K\, u^2$$

Si ricava

$$F_{\mathrm{r}} = -\frac{l^2}{m}\cancel{u^2}\left(u + \frac{d^2u}{d\vartheta^2}\right) = -K\cancel{u^2} \qquad \frac{d^2u}{d\vartheta^2} + u = \frac{Km}{l^2}$$

Se si pone $w = u - \frac{Km}{l^2}$

$$\frac{d^2w}{d\vartheta^2} + w = 0$$

Questa è una equazione differenziale che ha come soluzione l’equazione del **moto armonico** con ϑ al posto di t e ω=1.
La soluzione è allora

$$w = \mathrm{A}\cos\vartheta$$

Da cui si ricava

$$u = \mathrm{A}\cos\vartheta + \frac{Km}{l^2} = \frac{1}{r}$$

…con applicazioni pratiche…

Ricavare le orbite dei pianeti

Quindi si può ricavare

$$r = \frac{1}{\frac{Km}{l^2} + A\cos\vartheta} = \frac{\frac{l^2}{Km}}{1 + \frac{Al^2}{Km}\cos\vartheta}$$

Ponendo $\frac{Al^2}{Km} = \varepsilon$

$$r = \frac{\frac{l^2}{Km}}{1 + \varepsilon\cos\vartheta}$$

Equazione delle coniche in coordinate polari

Trasformando questa relazione in coordinate cartesiane $\begin{cases} x = r\cos\vartheta \\ y = r\sin\vartheta \end{cases}$

e ponendo $C = \frac{\mathrm{l}^2}{\mathrm{Km}}$ si ottiene

$$\boldsymbol{x^2(1-\varepsilon^2) + y^2 + 2\varepsilon C x = C^2}$$

...con applicazioni pratiche...

Ricavare le orbite dei pianeti

$$\boldsymbol{x^2\left(1-\varepsilon^2\right)+y^2+2\varepsilon Cx=C^2}$$

- $\varepsilon > 1; \quad \boldsymbol{-Ax^2+y^2+2Bx=C^2}$
  i coefficienti di x^2 e y^2 sono discordi: **IPERBOLE**
- $\varepsilon = 1; \quad \boldsymbol{x=\frac{C}{2}-\frac{y^2}{2C}}$
  il coefficiente di x^2 è nullo: **PARABOLA**
- $0 \le \varepsilon \le 1; \quad \boldsymbol{Ax^2+y^2+2Bx=C^2}$
  i coefficiente di x^2 e y^2 sono concordi: **ELLISSE**
- $\varepsilon = 0; \quad \boldsymbol{x^2+y^2=C^2}$
  i coefficiente di x^2 e y^2 sono uguali: **CIRCONFERENZA**

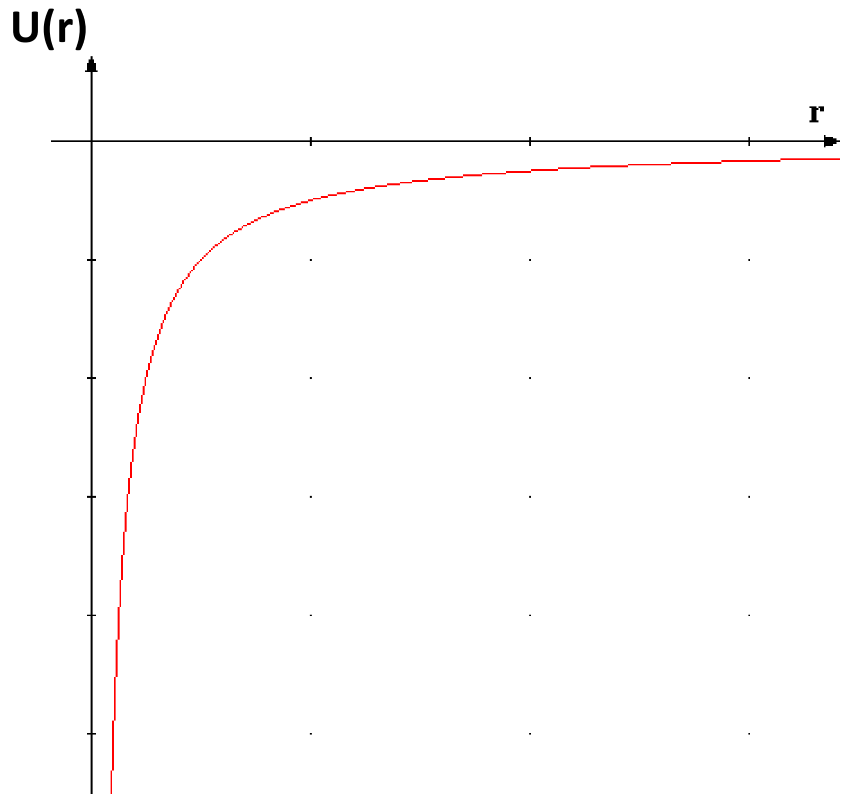
Davide Santostasi

…con applicazioni pratiche…

Ricavare le orbite dei pianeti

Si può ricavare l'orbita anche considerando l'energia del corpo

Consideriamo l'energia potenziale gravitazionale $U(r) = -\frac{GMm}{r}$



IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

Davide Santostasi

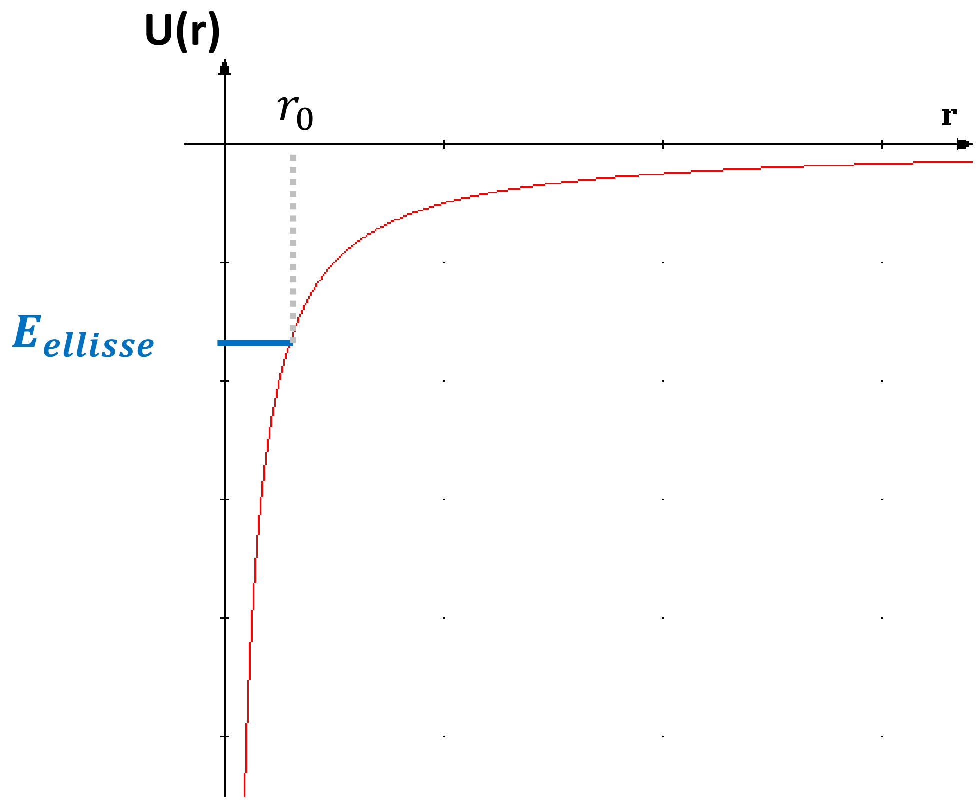
…con applicazioni pratiche…

Ricavare le orbite dei pianeti

Si può ricavare l'orbita anche considerando l'energia del corpo

Consideriamo l'energia potenziale gravitazionale $U(r) = -\frac{GMm}{r}$

- **Ellisse** (orbita chiusa, $\boldsymbol{E < 0}$). Si ha uno stato legato. Sono possibili tutti i valori $0 < r < r_0$



IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

Davide Santostasi

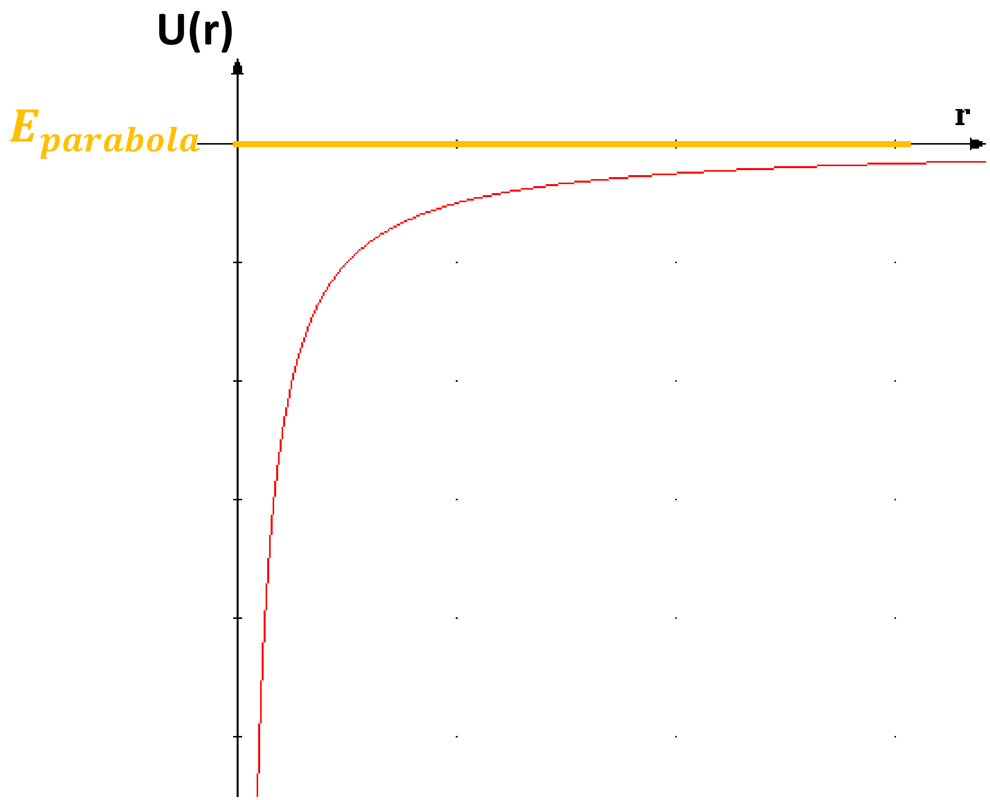
…con applicazioni pratiche…

Ricavare le orbite dei pianeti

Si può ricavare l'orbita anche considerando l'energia del corpo

Consideriamo l'energia potenziale gravitazionale $U(r) = -\frac{GMm}{r}$

- **Parabola** (orbita aperta, $E = 0$) L'oggetto ha abbastanza energia per arrivare fino all'infinito con energia cinetica nulla.



IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

Davide Santostasi

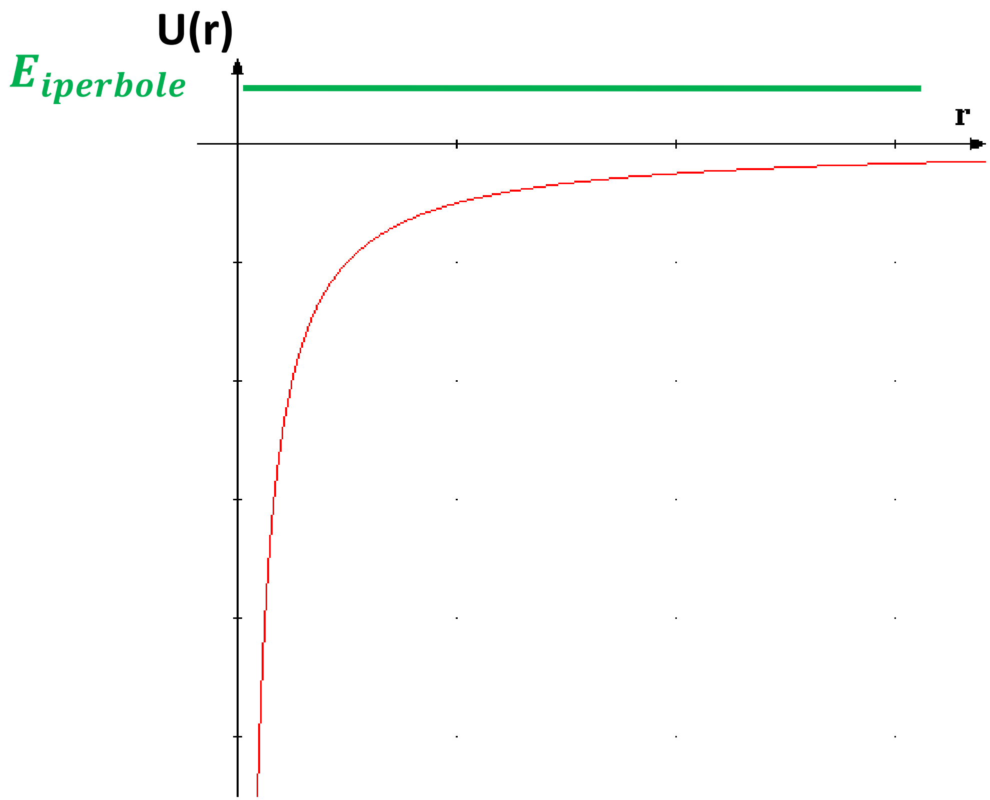
…con applicazioni pratiche…

Ricavare le orbite dei pianeti

Si può ricavare l’orbita anche considerando l’energia del corpo

Consideriamo l’energia potenziale gravitazionale $U(r) = -\frac{GMm}{r}$

- **Iperbole** (orbita aperta, $\boldsymbol{E > 0}$) L’oggetto ha abbastanza energia per arrivare fino all'infinito con energia cinetica positiva.



IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

Davide Santostasi

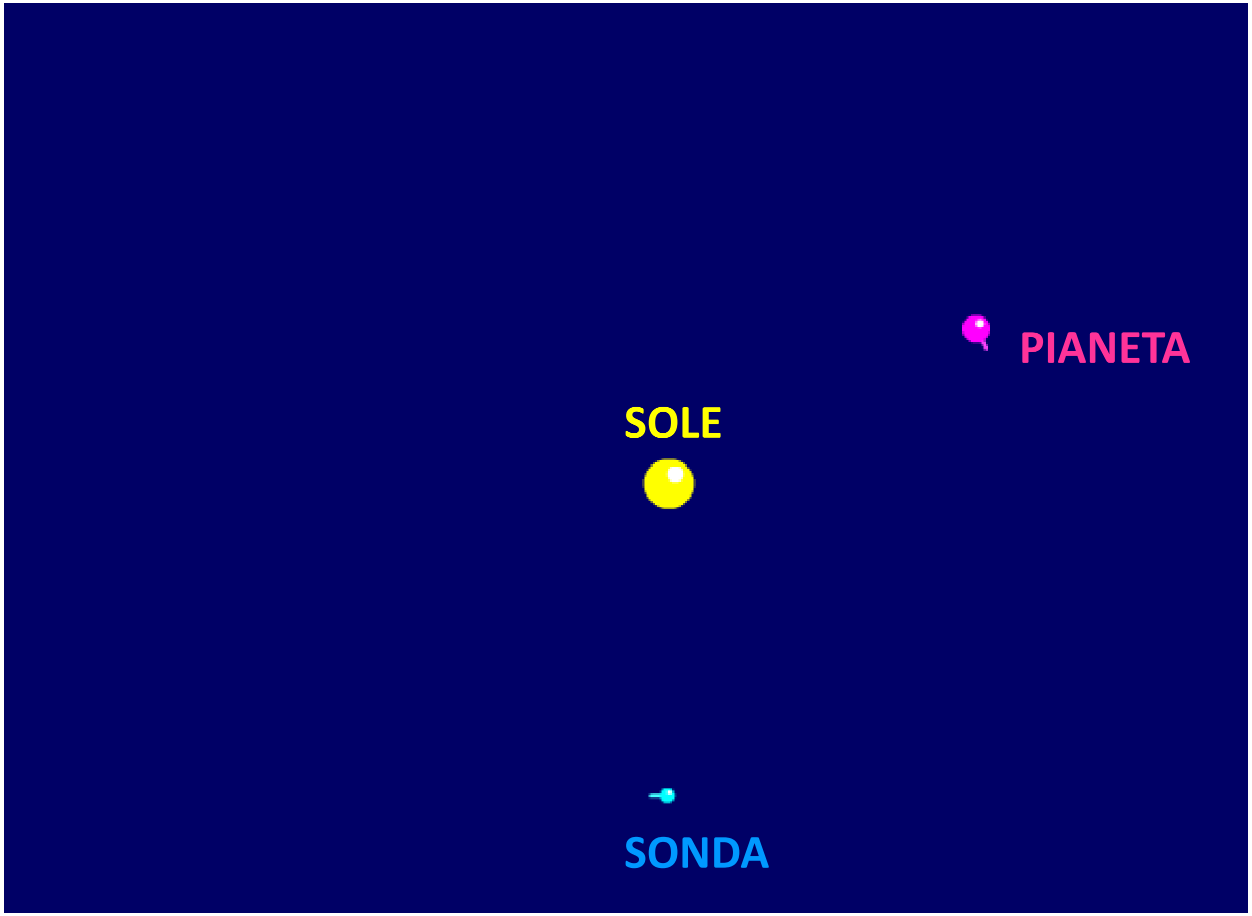
...con applicazioni pratiche...

Un valido strumento per visualizzare queste orbite è il **software di simulazione** PhET messo a disposizione dall'Università del Colorado di Boulder.
Permette di usare delle simulazioni interattive gratuite di matematica e scienze.

…con applicazioni pratiche…

L'effetto fionda

L'idea è quella di sfruttare l'enorme gravità di pianeti giganti (Giove) per **accelerare** le sonde e **cambiare la direzione** del loro moto.



IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

Davide Santostasi

…con applicazioni pratiche…

L’effetto fionda

Una sonda si **avvicina** al pianeta gigante e viene attratto dalla sua gravità accelerando. Dopo aver oltrepassato il pianeta, la gravità continuerà ad attirare il veicolo, rallentandolo.

L'effetto sulla velocità sarebbe nullo se il pianeta fosse fermo (conservazione dell'energia) mentre cambierebbe solo la direzione del veicolo.
Bisogna tener conto però del fatto che **i pianeti non sono fermi**, ma si muovono nelle loro orbite attorno al Sole.

La velocità della sonda non cambia se la si misura in riferimento ad essi, mentre cambia sensibilmente se la si misura rispetto al Sole.

Il **guadagno di energia cinetica** è dovuto al fatto che il pianeta stesso perde parte della sua energia cinetica poiché a sua volta è attratto dalla sonda, ovviamente in maniera impercettibile vista l'immensa differenza di massa tra i due.
Il pianeta perde così una quantità minima di energia che viene ceduta al veicolo sotto forma di energia cinetica supplementare.

...e questioni irrisolte

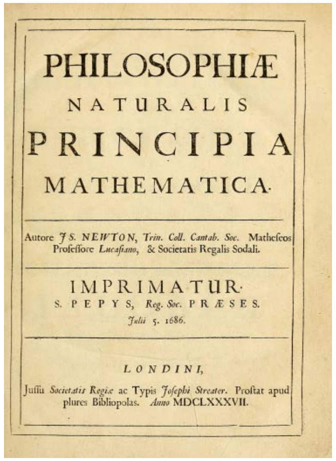
La gravità di Newton risulta essere una "**azione a distanza**"; cioè i corpi si attraggono pur senza venire in contatto fisico.

> *"Che nel vuoto un corpo possa agire a distanza su di un altro senza la mediazione di qualsiasi altra cosa, per mezzo e attraverso la quale la loro azione e la loro forza possano essere trasferite dall'uno all'altro, <u>è per me un'assurdità così grande</u> a cui, credo, nessun uomo con competenze in questioni filosofiche potrebbe mai credere".*

Newton non stabilì mai la causa e rifiutò di offrire qualsiasi ipotesi.

> *"Non sono stato in grado finora di scoprire la causa di queste proprietà della gravità e <u>hypotheses non fingo</u>... È sufficiente che la gravità esista davvero e agisca secondo le leggi che ho spiegato, e che serva a tenere conto di tutti i moti dei corpi celesti".*

La legge della gravitazione universale sarà solo una **legge matematica strumentale senza una base fisica intelligibile**; solo un **"principio matematico"** e non **"filosofico"**.



PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA.

Autore J S. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR.
S. PEPYS, Reg. Soc. PRÆSES.
Julii 5. 1686.

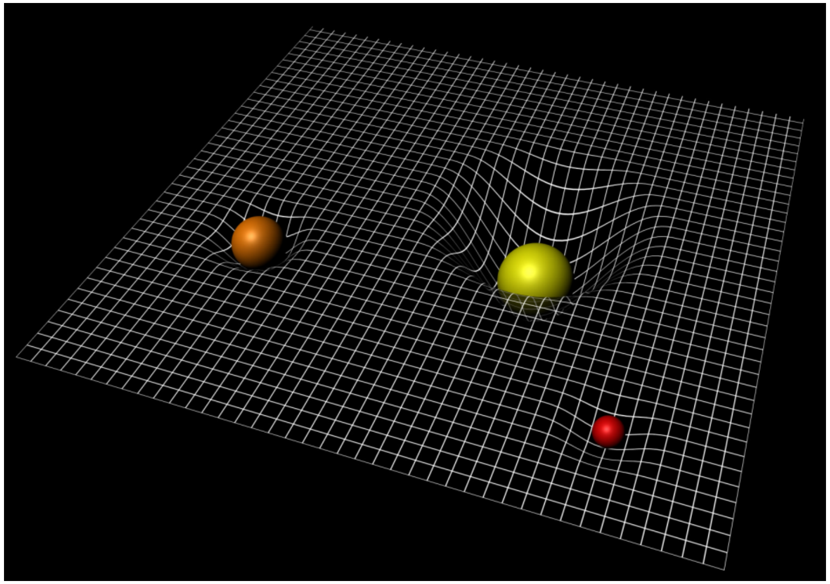
LONDINI,
Jussu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater. Prostat apud plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.

La soluzione di Einstein

Il problema dell’azione a distanza è risolto da Einstein nel 1915 con la sua teoria della **Relatività Generale**.

La gravità non è più vista come una forza ma è un attributo dello spazio-tempo.

Le masse distorcono lo spazio-tempo nelle loro vicinanze, e altri corpi si muovono in traiettorie determinate dalla **“curvatura”** dello spazio-tempo.
La forza gravitazionale diventa quindi una forza apparente dovuta alla **curvatura dello spazio-tempo**.



IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

Davide Santostasi

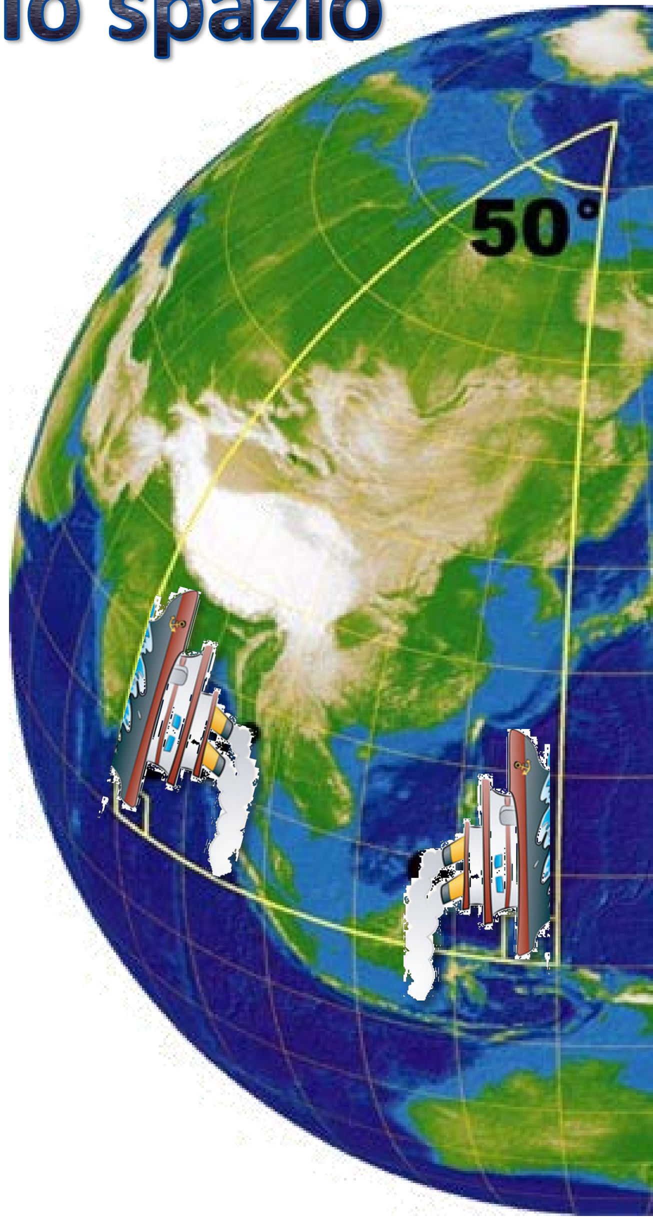
Curvatura dello spazio

Usiamo un'analogia.

Supponiamo di osservare due navi che partono da due punti sull'equatore distanti tra loro e che si dirigono entrambe verso il polo sud.

Visti dalle navi i due cammini sono paralleli e giacciono su un piano.
Con l'avanzare delle loro posizioni i due cammini si avvicinano al polo e convergono in un sol punto.

Un osservatore esterno associa questo effetto alla **curvatura della superficie terrestre.**



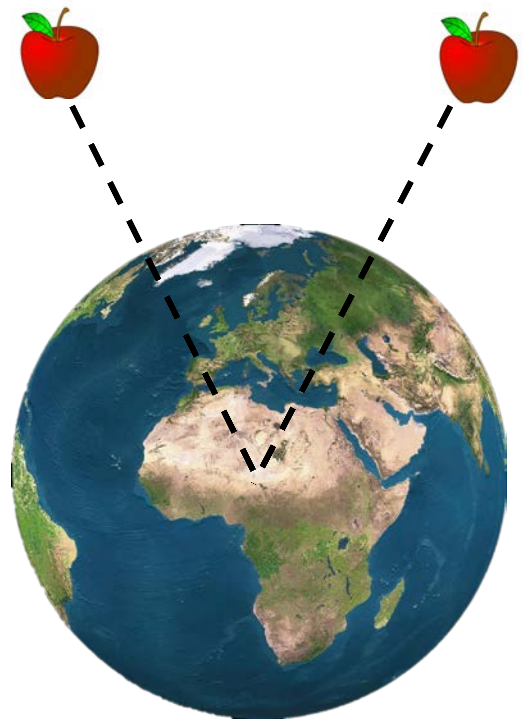
IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

Davide Santostasi

Curvatura dello spazio

Due mele vengono lasciate cadere sopra la superficie terrestre. Sebbene le due mele possano apparire in caduta su due cammini paralleli, in realtà le loro traiettorie si avvicinano perché entrambe dirette verso il centro della Terra.

Interpretiamo questo comportamento in termini di attrazione gravitazionale tra mele e Terra, ma possiamo anche interpretarlo come conseguenza della **curvatura dello spazio in prossimità della Terra dovuta alla presenza della massa terrestre.**



IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

Davide Santostasi

Un’altra geometria

Geometria Euclidea

Cinque postulati:

1. Per due punti passa una ed una sola retta;
2. Una retta è prolungabile all’infinito;
3. Dati un centro e una distanza si può descrivere un cerchio;
4. Tutti gli angoli retti sono uguali;
5. Per un punto esterno ad una retta data esiste un’unica parallela ad essa.

Conseguenze:

- la somma degli angoli interni di un triangolo qualsiasi è pari a π
- Il rapporto tra circonferenza e diametro è sempre uguale a π.

I cinque postulati sono indipendenti di conseguenza l’assunzione della negazione di uno di essi porta allora alla costruzione di un’altra geometria altrettanto coerente.

Un'altra geometria

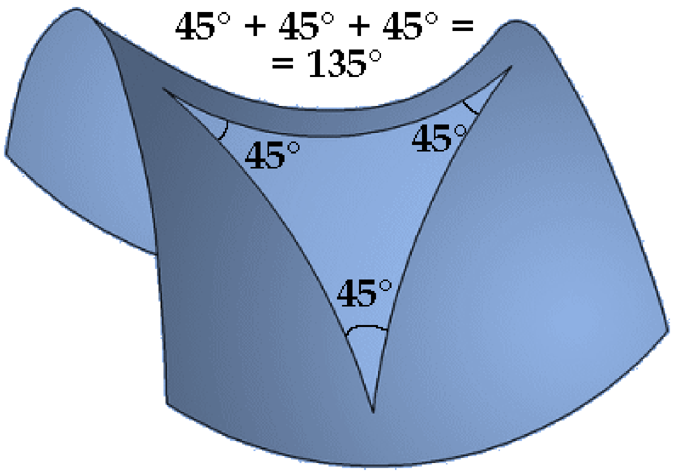
Geometria Iperbolica

È negato il quinto postulato della geometria euclidea

1. Per due punti passa una ed una sola retta;
2. Una retta è prolungabile all'infinito;
3. Dati un centro e una distanza si può descrivere un cerchio;
4. Tutti gli angoli retti sono uguali;
5. Per un punto esterno ad una retta data esistono infinite rette parallele ad essa.

Conseguenze:

- la somma degli angoli interni di un triangolo qualsiasi è **minore di 180°**
- Il rapporto tra circonferenza e diametro è **maggiore di π.**



IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

Davide Santostasi

IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

Davide Santostasi

Un’altra geometria

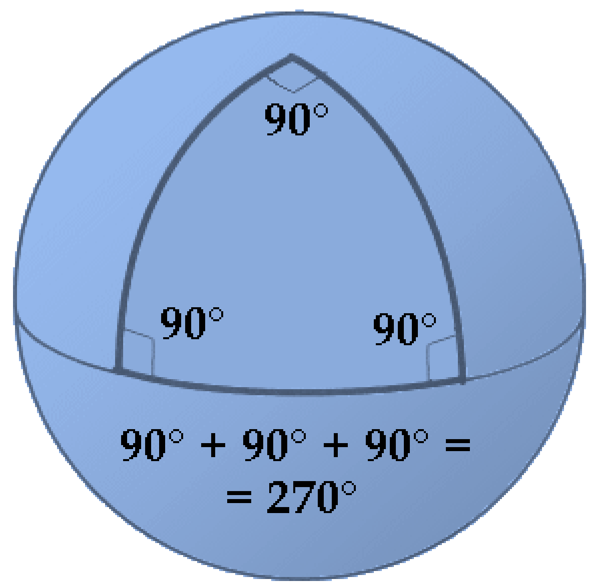
Geometria Ellittica

È negato il quinto postulato della geometria euclidea più altri assiomi

1. Per due punti passa una ed una sola retta;
2. Una retta è prolungabile all’infinito;
3. Dati un centro e una distanza si può descrivere un cerchio;
4. Tutti gli angoli retti sono uguali;
5. Per un punto esterno ad una retta data non esistono rette parallele ad essa.

Conseguenze:

- la somma degli angoli interni di un triangolo qualsiasi è **maggiore di 180°**
- Il rapporto tra circonferenza e diametro è **minore di π.**



Alcune verifiche sperimentali

- Misura del diametro dell'orbita terrestre e della circonferenza

$$\frac{C}{D} = 3.1415924\mathbf{4853}$$

IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

Davide Santostasi

Alcune verifiche sperimentali

- Misura del diametro dell'orbita terrestre e della circonferenza

$$\frac{C}{D} = 3.1415924\mathbf{853}$$

Il valore di
$\pi = 3.1415926\mathbf{536}$

Si è registrato un valore **minore di circa 60 parti per miliardo**!

IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

Davide Santostasi

Alcune verifiche sperimentali

- Misura del diametro dell'orbita terrestre e della circonferenza

$$\frac{C}{D} = 3.1415924853$$

Si è registrato un valore minore di circa 60 parti per miliardo!

- Considerando il triangolo Terra-Venere-Marte e misurando gli angoli interni la loro somma risulta **maggiore di π radianti**!

IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

Davide Santostasi

Alcune verifiche sperimentali

- Misura del diametro dell'orbita terrestre e della circonferenza

$$\frac{C}{D} = 3.1415924853$$

Si è registrato un valore minore di circa 60 parti per miliardo!

- Considerando il triangolo Terra-Venere-Marte e misurando gli angoli interni la loro somma risulta maggiore di π radianti!

- Misura della distanza di Venere dalla Terra in opposizione (da parti opposte rispetto al Sole). Il cammino delle onde radar è praticamente la somma del raggio dell'orbita terrestre e di quella venusiana. Si trova **che il cammino effettivo è maggiore di quello previsto dalla geometria euclidea di circa 36 Km**.

Alcune verifiche sperimentali

- Misura del diametro dell'orbita terrestre e della circonferenza

$$\frac{C}{D} = 3.1415924853$$

Si è registrato un valore minore di circa 60 parti per miliardo!

- Considerando il triangolo Terra-Venere-Marte e misurando gli angoli interni la loro somma risulta maggiore di π radianti!

- Misura della distanza di Venere dalla Terra in opposizione (da parti opposte rispetto al Sole). Il cammino delle onde radar è praticamente la somma del raggio dell'orbita terrestre e di quella venusiana. Si trova che il cammino effettivo è maggiore di quello previsto dalla geometria euclidea di circa 36 Km.

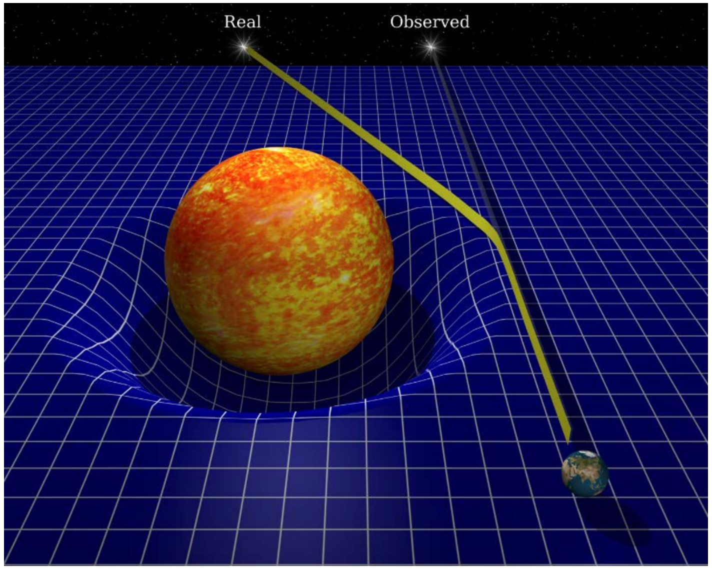
NON VALE LA GEOMETRIA EUCLIDEA!
LO SPAZIO NON È PIANO MA CURVO

Lo spazio curvo

In uno spazio curvo la linea definita come la distanza più breve tra due punti (l’equivalente della retta nel piano) prende il nome di **geodetica.** Nell'universo le geodetiche sono rappresentate dal **raggio di luce** ‘‘geodetica di lunghezza nulla’’.

Lontana da qualsiasi corpo provvisto di massa, questa geodetica sarà una linea retta (spazio euclideo). Quindi, per le enormi distanze tra le stelle, possiamo considerare la luce come se si muovesse in linea retta.

Ma questo non è più vero nelle vicinanze di corpi dotati di massa; il cammino del raggio di luce viene **deflesso** leggermente a causa della curvatura dello spazio (effetto di *lente gravitazionale*)



IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

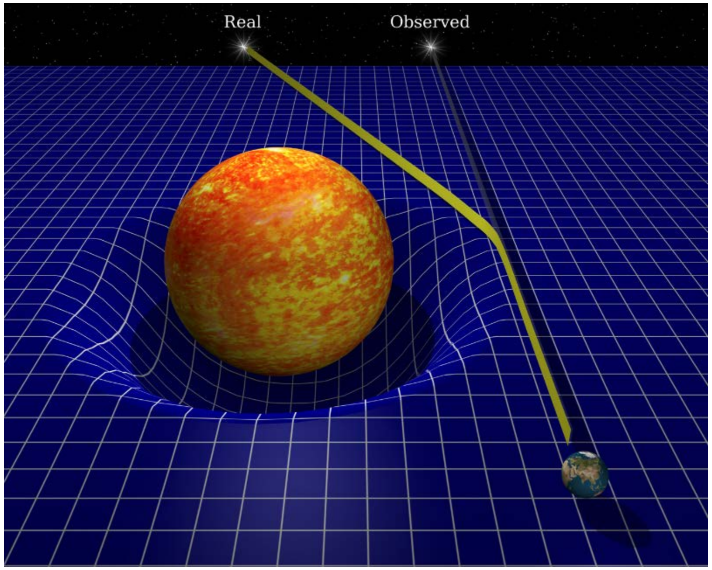
Davide Santostasi

Lo spazio curvo

Immaginiamo che una stella si trovi esattamente dietro il Sole. In questo caso saremmo in grado di vedere dietro al Sole.

In una situazione normale la luminosità del Sole ci impedirebbe di osservare la stella ma, durante un'eclissi totale di Sole, la Luna si frappone tra noi e il Sole celandone i raggi e consentendoci di vedere la stella.

Questo esperimento è stato condotto per la prima volta nel **1919**: le fotografie scattate durante l'eclissi fornirono una conferma convincente delle previsioni della Teoria della Relatività generale.



IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

Davide Santostasi

Un utile modello bidimensionale

IL SISTEMA SOLARE: DAI GRECI AD OGGI

Davide Santostasi

Alcuni spunti del modello

Onde gravitazionali. Cosa sono? Sono le vibrazioni del “tessuto” spaziotemporale dovute al fatto che i corpi sono in moto accelerato. Quindi quando corpi con grande massa come stelle o buchi neri si muovono, provocano onde gravitazionali che sottraggono loro energia.

Nel nostro modello sul telo si vedono le ‘‘onde’’ della scia dovute all’attrito tra la biglia e il telo. A causa di questo attrito questa perde energia e man mano ‘‘cade’’ verso la massa centrale.

La stessa cosa per esempio accade per la Terra. La Terra perde un po’ della sua energia e quindi tende a ad avvicinarsi sempre di più al Sole (ogni giorno si avvicina di $10^{-15}\ metri$).
Tra $10^{14} anni$ la Terra cadrà sul Sole, ma prima di allora il Sole avrà già finito il suo ciclo vitale inghiottendo la Terra durante la fase di Gigante Rossa.

Le orbite dei corpi celesti

Ricavare le orbite dei pianeti

Se consideriamo le velocità dell'oggetto orbitante:

Un oggetto può entrare in orbita attorno ad un corpo celeste solo se la sua velocità è compresa tra la **prima velocità cosmica** (v') e la **seconda velocità cosmica** (v'').

Difatti:

- $v < v'$; l'oggetto cade sul corpo celeste;
- $v = v'$; l'oggetto entra in **orbita circolare**;
- $v' < v < v''$; l'oggetto descrive **orbite ellittiche**;
- $v = v''$; l'oggetto si allontana indefinitamente dal corpo celeste descrivendo **un'orbita parabolica**;
- $v > v''$; l'oggetto si allontana indefinitamente dal corpo celeste descrivendo **un'orbita iperbolica**.

Un utile modello bidimensionale

Immaginiamo di lanciare delle biglie sulla superficie piana di un letto; esse si muoveranno lungo traiettorie pressoché rettilinee, cioè lungo le geodetiche della geometria euclidea.

Cosa succede se un ippopotamo si poggia sul letto?

La stessa biglia di prima descriverà una traiettoria non più rettilinea ma curva, apparendo accelerata ed attratta dall'ippopotamo.

In pratica i pianeti sono in moto intorno al Sole perché, nello spazio incurvato dalla grandissima massa dell'astro, essi **seguono le geodetiche della geometria non euclidea**, che non sono linee rette, bensì proprio le coniche.

ATTENZIONE

Questo è un modello. **La curvatura dello spazio-tempo è soltanto una proprietà matematica della Relatività Generale** non vedremo MAI uno spazio che si incurva.