

La gravitazione

1. Sistema geocentrico e sistema eliocentrico

Cosmologia e modelli cosmologici

La Cosmologia è lo studio del Cosmo, e può essere definita come il complesso delle dottrine scientifiche o filosofiche che studiano l'ordine, i fenomeni e le leggi dell'universo.

Difficile dire quando sia nata la Cosmologia. Dal punto di vista filosofico, la Cosmologia è senz'altro una delle discipline più antiche. È però anche plausibile che le prime indagini "astronomiche" siano state anche funzionali ad implicazioni più quotidiane. Per esempio la caccia delle specie migratorie, i tempi della semina e del raccolto, ecc. richiedevano di prevedere con un certo anticipo l'avvicinarsi delle stagioni. Così già gli Egizi nel III millennio a.c. stimano con ottima approssimazione la durata dell'anno. Inoltre, l'osservazione del cielo portò sin dall'antichità all'individuazione delle cosiddette "stelle erranti", e cioè dei pianeti Mercurio, Venere, Marte, Giove e Saturno. Lo studio dei pianeti forniva l'evidenza che queste "stelle erranti" in realtà seguivano delle traiettorie ben definite per rioccupare periodicamente la stessa posizione in cielo rispetto alle stelle propriamente dette e considerate "fisse". I pianeti fornivano quindi l'occasione di trovare in un mondo apparentemente imprevedibile delle regolarità, degli eventi che potevano essere predetti. Non c'è quindi da stupirsi se la parola Cosmo in greco non vuol dire grande, o infinito o meraviglioso: la parola Cosmo in greco vuol dire "ordine". Dal punto di vista scientifico la Cosmologia è molto giovane. Oggi risulta familiare pensare che l'universo è popolato di galassie e che le galassie sono formate da centinaia di miliardi di stelle. Ma questo modo di vedere il Cosmo è per la maggior parte determinato da studi teorici e sperimentali del XX secolo.

Le domande fondamentali intorno alle quali ha ruotato la Cosmologia sono state essenzialmente due:

qual è il centro dell'universo?

quanto è grande l'universo?

La storia della cosmologia antica coincide con il percorso intellettuale che l'Uomo ha seguito per rispondere alla prima domanda e copre circa 2000 anni. Il Sole sembra muoversi intorno alla Terra. Non c'è quindi da stupirsi se il primo modello cosmologico presupponeva che la Luna, il Sole e i pianeti si muovono intorno alla Terra, che quindi si trova al centro dell'universo (modello geocentrico). Il più influente di questi modelli fu sviluppato da Tolomeo (140 d.c.) e sopravvisse fino al XVI secolo, quando fu definitivamente sostituito dal modello eliocentrico, prima con Copernico e poi con Keplero. La cosmologia teorica compie un passo in avanti gigantesco con la Teoria della Gravitazione Universale di Newton.

La cosmologia tolemaico-aristotelica

Sono i Greci già dal VI secolo a.c. ad avere il merito di conferire alla Cosmologia una dignità indipendente da qualsiasi implicazione di tipo pratico o religioso, ponendo così il problema della conoscenza cosmologica in una prospettiva più moderna.

Aristotele (384-322 a.c.) sosteneva che i pianeti devono muoversi con velocità costante lungo delle circonferenze (un fisico direbbe con moto circolare uniforme). I pianeti sono dei corpi perfetti e quindi sono sfere, e proprio perché perfetti devono muoversi in modo perfetto, uniformemente su delle circonferenze. Il modello cosmologico aristotelico presupponeva che il Sole, la Luna, i pianeti e le stelle fisse si muovono intorno alla Terra, che si trova quindi al centro dell'universo. Questo modello non riusciva a predire il movimento dei pianeti, e di Venere in particolare, rispetto alle stelle fisse: infatti, in un certo periodo Venere sembra muoversi velocemente nella stessa direzione in cui si muove il Sole, e in altri periodi sembra muoversi lentamente in direzione opposta; inoltre non potevano neppure essere spiegate le variazioni di luminosità dei pianeti. Queste osservazioni erano sicuramente in contrasto con il pregiudizio aristotelico dei moti circolari uniformi. Sulla base di

questo pregiudizio, i greci complicarono il modello richiedendo che il moto di un pianeta debba essere una combinazione di più moti circolari.

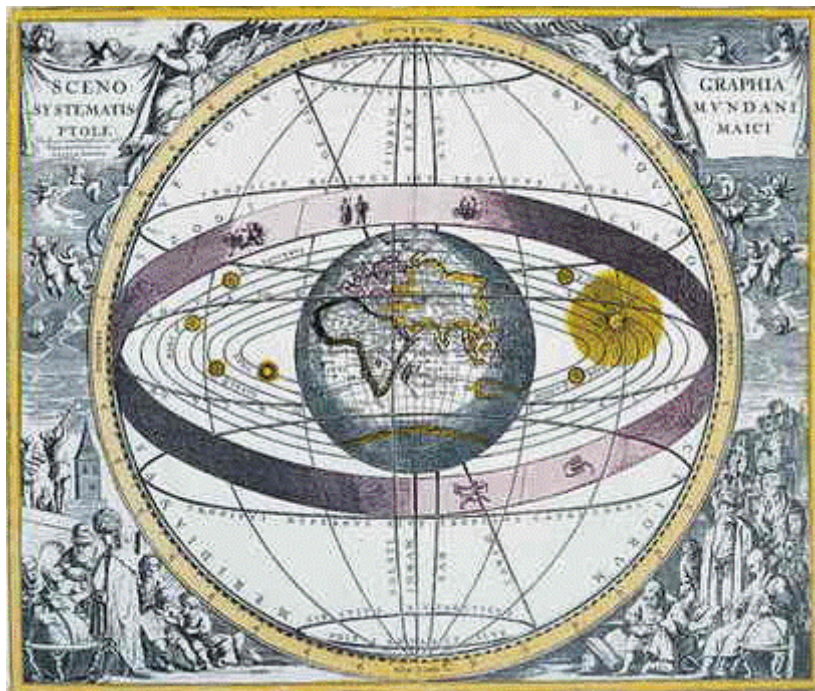


Figura 1 - Modello geocentrico tolemaico aristotelico

Per ogni pianeta si considerano allora due circonferenze: il *deferente*, di raggio maggiore e con il centro sulla Terra e l'*epiciclo*, di raggio minore e con il centro sul deferente. Ogni pianeta percorre con moto uniforme l'epiciclo, il cui centro si sposta uniformemente sul deferente. In questo modo la distanza di un pianeta dalla Terra poteva cambiare periodicamente, come richiesto dal fatto che la luminosità del pianeta varia periodicamente. Se questo schema non era ancora sufficiente per spiegare le osservazioni, si aggiungevano epicicli su epicicli.

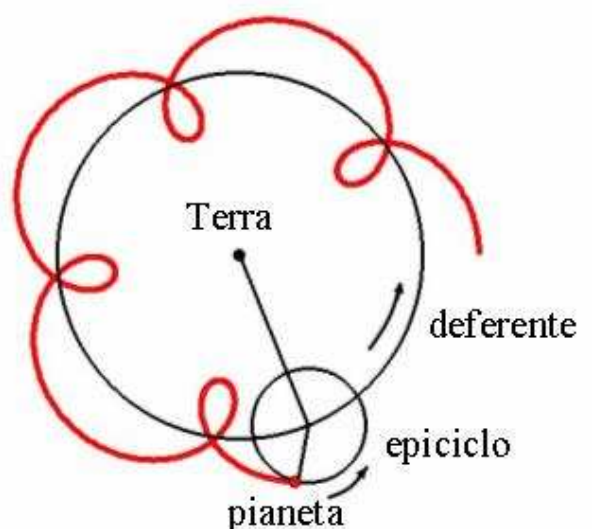
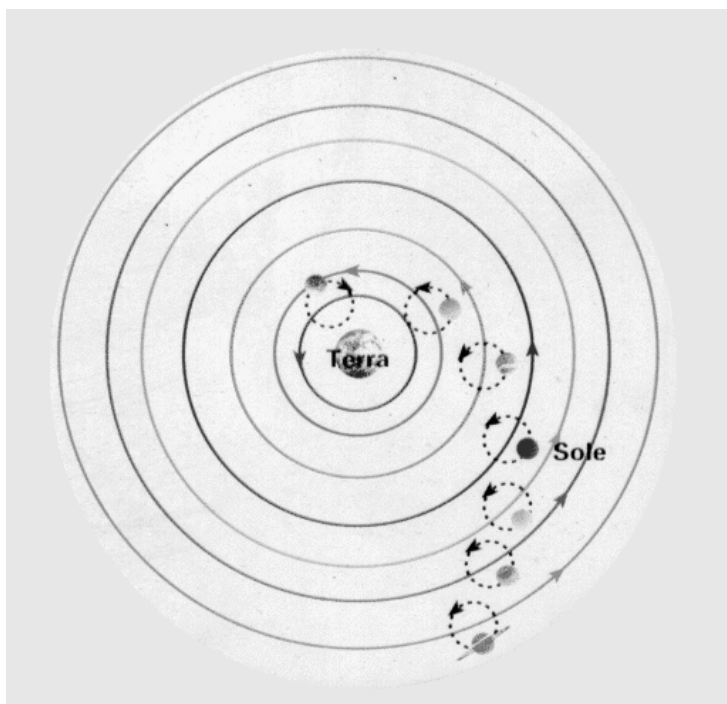


Figura 2 - Schema degli epicicli e moto del pianeta

Il più influente di questi modelli fu sviluppato da **Claudio Tolomeo** (100 - 175 d.c.) e sopravvisse fino al XVI secolo. Tolomeo non dà una stima della distanza dei pianeti dalla Terra. Egli li ordina assumendo che quelli che impiegano più tempo a ruotare intorno alla Terra siano anche quelli più lontani. Questa è un'assunzione ragionevole, ma priva ai tempi di Tolomeo di una qualunque verifica sperimentale. La complicazione di epicicli e deferenti mostra un punto importante della metodologia scientifica. È sempre possibile complicare progressivamente il modello di partenza e guadagnare sufficiente flessibilità per poter spiegare le osservazioni. Al tempo stesso si ha una vera comprensione dei fenomeni quando si elabora un modello scientifico che riesce a spiegare le osservazioni con il minor numero di ipotesi. Fu proprio questa complicazione degli epicicli a determinare la fine del sistema tolemaico, a favore di un modello più semplice, quello eliocentrico, suggerito prima da Copernico e perfezionato poi da Keplero.

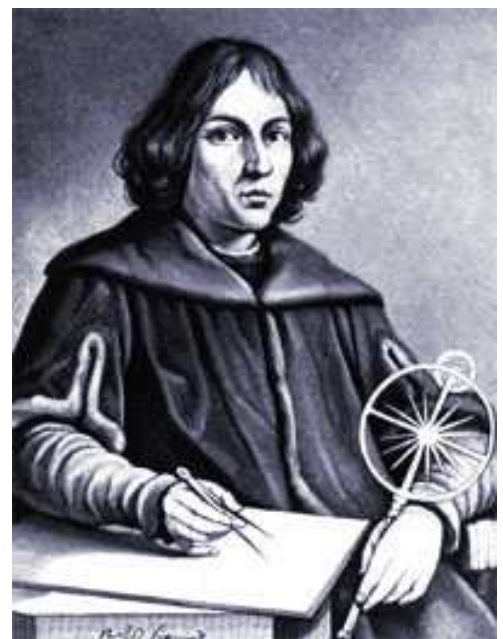


I sistemi eliocentrici di Aristarco ed Eracleide

Va ricordato che Aristarco di Samo propose che il centro dell'universo fosse il Sole, e che la Terra e gli altri pianeti si muovessero intorno ad esso. Questa visione del cosmo trovò la forte opposizione di Archimede (287-212 a.c.) e venne ripresa, solo molti secoli dopo, da Copernico. La modernità di Aristarco può essere difficilmente sottostimata. Va anche ricordato che Eracleide propose un modello intermedio tra quello di Aristarco e quello di Tolomeo. Egli propose che Mercurio e Venere si muovevano intorno al Sole, mentre il Sole e gli altri pianeti si muovevano intorno alla Terra. Il modello di Eracleide, pur mantenendo il pregiudizio Aristotelico, era in grado di prevedere la posizione di Venere con grande accuratezza.

La rivoluzione copernicana e il sistema eliocentrico

La teoria eliocentrica di Aristarco fu ripresa dall'astronomo polacco Niccolò Copernico (Nikolaj Kopernik, 1473-1543) che, pazientemente e tenacemente, verificò l'ipotesi eliocentrica confrontandola con una grossa mole di dati sia suoi che di altri astronomi. Copernico, uomo di grande coraggio intellettuale e lavoratore infaticabile, era molto attento e scrupoloso. Per circa trent'anni tenne nascoste le sue ricerche che avrebbero rivoluzionato il nostro modo di vedere il Cosmo. Cedette solo alle pressioni degli amici ed infine pubblicò la sua opera *De Revolutionibus orbium caelestium* della quale poté vedere il primo esemplare il giorno stesso della sua morte. Mentre fino all'epoca di Copernico si era sempre parlato del moto di rivoluzione dei pianeti intorno alla Terra, Copernico affrontò lo studio del moto dei pianeti ponendosi al di fuori del sistema planetario, in un sistema di riferimento di fatto collegato alle stelle fisse. Con la cautela che lo contraddistingueva, Copernico non sostenne che la Terra e i pianeti si muovono intorno al Sole. Egli si limitò a sostenere che la teoria eliocentrica funziona meglio in quanto richiede un numero minore di epicicli. Ed infatti i fenomeni celesti possono ricevere una semplice spiegazione assegnando alla Terra un moto di rotazione diurna intorno al proprio asse e un moto di rivoluzione



annuo intorno al Sole. Al centro dell'universo c'è quindi il Sole, il quale sta immobile rispetto alle stelle fisse. Di nuovo, alla base del ragionamento di Copernico c'è la semplicità: è più semplice spiegare il moto apparente dei pianeti se pensiamo che questi orbitino intorno al Sole.

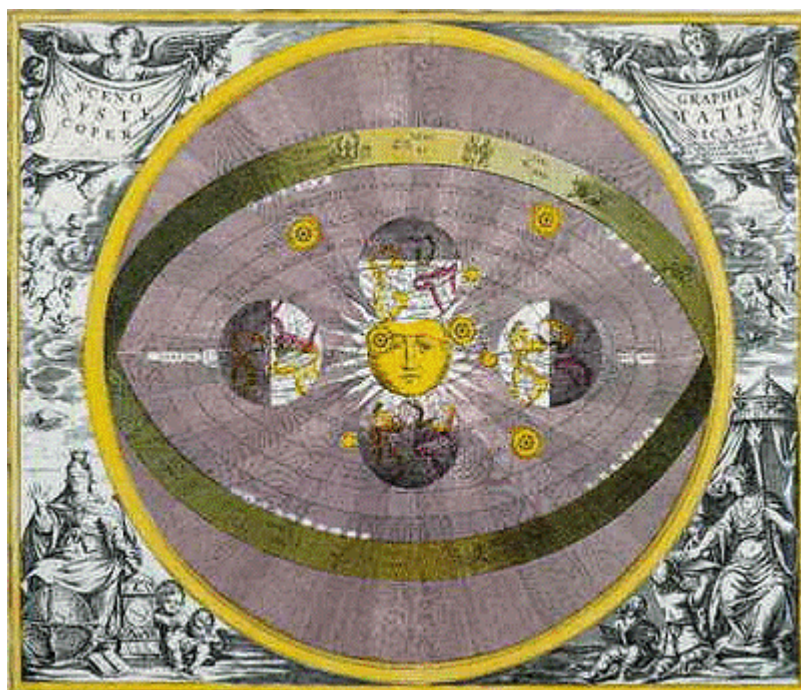


Figura 3 - Modello eliocentrico copernicano

E così, nel 1543, avviene la rivoluzione copernicana: la Terra viene rimossa dal centro dell'universo. Puntualizziamo il fatto che il modello di Copernico si serviva ancora di orbite circolari, cosicché continuava a richiedere l'uso del complicato sistema degli epicicli; di conseguenza la semplificazione attuata con la sua adozione era solo parziale. L'idea di una Terra in movimento sollevava inoltre difficili problemi in relazione allo studio dei moti; oltre alla tesi che la rotazione di un corpo grande come la Terra con un periodo di sole ventiquattr'ore avrebbe dovuto avere effetti catastrofici; non si riusciva a capire, per esempio come gli uccelli in volo potessero tener dietro al rapido moto della Terra che ruotava sotto di loro, né come i tiri delle artiglierie potessero avere la stessa gittata verso oriente e verso occidente, ossia nel senso dell'asserita rotazione della Terra e in senso contrario. Né meno gravi sembravano i problemi teologici in gioco. Molte persone, inoltre, semplicemente non riuscivano a capire come i moti della Terra non producessero effetti sensibili.

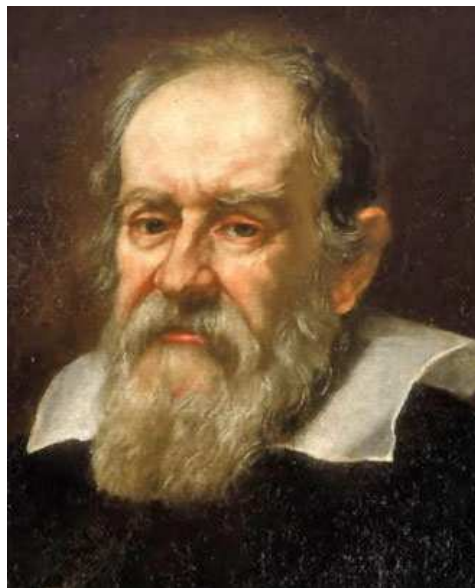
Lo scienziato italiano Galileo Galilei (1564 - 1642) sostenne strenuamente il punto di vista copernicano.

Il ruolo di Galileo nell'affermazione del sistema copernicano

Galileo Galilei alla fine del XIV secolo cominciò a studiare l'astronomia e si dedicò ai problemi fondamentali della meccanica, esponendo in alcuni manoscritti — raccolti sotto il titolo *De motu* — una teoria che superava la concezione del moto della tradizione aristotelica.

Durante il soggiorno a Padova, dove insegnava matematica, si dedicò, tra le altre cose, all'astronomia: alcune lettere, tra cui una a Keplero del 1597, testimoniano ch'egli aderiva alla teoria copernicana; in tre lezioni del 1604 sostenne anzi la validità di alcune prove di questa. Fin da allora fu carattere costante della sua opera la ricerca di applicazioni pratiche; la realizzazione più importante fu quella del cannocchiale: in realtà Galileo non inventò lo strumento, ma fu tuttavia il primo che se ne occupò sistematicamente, perfezionandolo e aumentandone il potere di ingrandimento e soprattutto utilizzandolo per osservazioni astronomiche, che convalidarono il sistema copernicano. Scoprì i quattro satelliti maggiori di Giove, le montagne e i crateri della Luna, le mac-

chie solari: nel 1610 diede notizia delle sue osservazioni nel *Sidereus nuncius*, pubblicato a Venezia. Nello stesso anno poté trasferirsi a Firenze e dedicarsi completamente alla ricerca. Benché studiosi insigni come Keplero approvassero le sue osservazioni astronomiche, queste trovavano anche molti avversari: lo scienziato sempre più intensamente cercò nell'esame del cielo nuove prove del sistema copernicano, della cui verità era certo, come appare da alcune lettere divenute celebri (a B. Castelli, suo discepolo, del 1613; a P. Dini, del 1615; a Cristina di Lorena, granduchessa di Toscana, del 1615). Nello stesso periodo pubblicò, tra le altre opere, *l'Istoria e dimostrazione intorno alle macchie solari e loro accidenti* (1613), in polemica con il gesuita C. Scheiner, secondo cui le macchie nascevano da sciami di astri attorno al Sole, sicché restava salva la teoria aristotelica della perfezione dei corpi celesti: per Galileo era invece un fenomeno



— simile alle nuvole — appartenente all'atmosfera del Sole e la rotazione delle macchie provava il moto di rotazione del Sole su se stesso. La crescente ostilità degli ambienti religiosi contro la teoria copernicana portò il Sant'Uffizio, nel 1616, a condannare recisamente questa e a riaffermare l'imposizione del sistema tolemaico: le opere di Copernico furono messe all'Indice e Galileo venne convocato a Roma a giustificare le sue opinioni. Egli sosteneva che la teoria copernicana non era in contrasto con la Bibbia: questa si doveva ritenere infatti scritta in un linguaggio tale da riuscire comprensibile agli uomini del suo tempo, senza scopi di verità scientifica, che si potevano invece raggiungere solo con l'osservazione diretta della natura; la sua posizione fu respinta e Galileo fu diffidato dall'occuparsi ancora della teoria eliocentrica. Lo scienziato non abbandonò però le osservazioni astronomiche: studiò il moto e le eclissi dei satelliti di Giove, nell'intento di dedurre un metodo per determinare la longitudine durante le navigazioni. Nel 1623 divenne papa il cardinale Barberini (Urbano VIII), che Galileo aveva già conosciuto come interlocutore aperto e illuminato in discussioni scientifiche e a cui dedicò *Il saggiaiore*; lo scienziato sperò di nuovo di potere liberamente trattare questioni astronomiche. Dopo una lunga elaborazione, nel 1632 pubblicò il *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, opera fondamentale nella storia del pensiero moderno, nella quale dimostra, sotto l'apparenza di neutralità, la fondatezza del sistema copernicano contro quello tolemaico. Benché le autorità ecclesiastiche avessero autorizzato la pubblicazione dell'opera e, nella prefazione e nelle conclusioni, Galileo affermasse di accettare la verità religiosa secondo la Bibbia, la difesa del sistema copernicano era manifesta: per iniziativa dei gesuiti, grazie anche all'involuzione del papa Urbano VIII verso la più intransigente difesa delle tradizioni, lo scienziato fu nuovamente chiamato a Roma, processato, e giudicato colpevole (1633). Costretto ad abiurare, fu condannato alla prigione a vita: la pena fu subito mutata in quella dell'isolamento, che egli trascorse a Siena presso l'arcivescovo suo amico e poi nella villa di Arcetri, vicino a Firenze.

A distanza di oltre tre secoli, una commissione apposita vaticana ha rivisto il caso Galileo e il 31 ottobre 1992 lo stesso pontefice Giovanni Paolo II ha riabilitato formalmente Galileo, ritrattando la sentenza dell'Inquisizione.

2. Le Leggi di Keplero

Tycho Brahe (1546-1601) era un ricco aristocratico danese, con un'ossessione per la continua e scrupolosa osservazione delle stelle. Proprio per la sua ricchezza egli fu in grado di costruire strumenti d'avanguardia per l'epoca che gli consentirono di effettuare e di accumulare osservazioni estremamente accurate. Per questo Brahe può essere definito come uno dei più grandi astronomi del '500. L'astronomo tedesco Johannes Kepler (1571-1630), italianizzato in Keplero, al contrario di

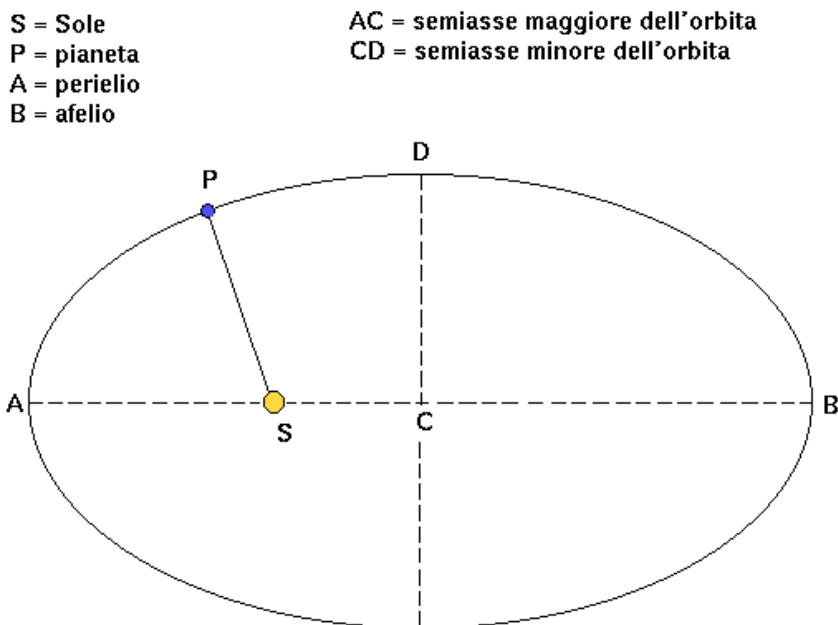
Brahe, era molto povero. Non avendo il denaro necessario per acquistare strumenti accurati con cui fare osservazioni, egli divenne allievo di Brahe dal quale ereditò tutta l'enorme mole di dati.

Osservando e analizzando i dati sperimentali sui moti dei pianeti ricavati in gran parte dal suo maestro, Keplero scoprì empiricamente tre famose leggi che riguardano i moti dei pianeti del Sistema Solare, che ancora oggi portano il suo nome.

La 1^a legge di Keplero

L'ambizione di Keplero era quella di descrivere con esattezza l'orbita di Marte. Alla fine dei suoi studi egli arrivò alla conclusione che l'orbita di Marte non è una circonferenza né una combinazione di circonferenze (o di epicicli), ma una ellisse con il Sole ad uno dei fuochi.

La 1^a legge di Keplero o legge delle orbite (1609) afferma che le orbite che tutti i pianeti descrivono intorno al Sole sono delle ellissi, di cui il Sole occupa uno dei fuochi.



Quando Keplero annunciò per la prima volta la sua grande scoperta che i pianeti si muovono lungo ellissi, andò tanto contro l'opinione generale secondo la quale Dio non avrebbe permesso che i percorsi dei corpi celesti fossero meno perfetti dei cerchi da sentire il bisogno di scusarsi. Egli parlò delle ellissi come scorie che aveva dovuto forzatamente introdurre per spazzare dall'astronomia un'altra più grande quantità di impurezze che vi si erano accumulate attorno ai tentativi di conservare le orbite circolari. Lo stesso Keplero non scoprì mai perché le orbite fossero ellittiche; toccò a Newton dedurlo dalla natura della gravitazione. Anche Galileo nel giorno della sua morte rifiutava di credere, anche davanti alla sempre maggiore evidenza, che le orbite fossero circolari.

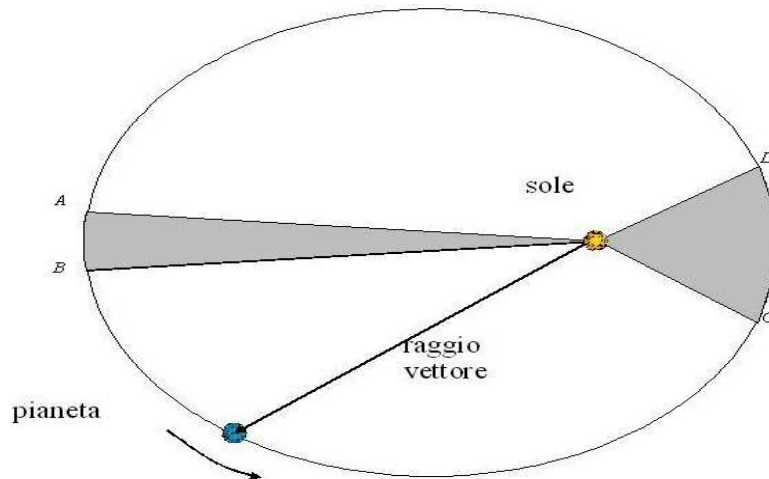
Eccentricità. Afelio. Perielio.

L'eccentricità di un'orbita è una misura di quanto la forma ellittica dell'orbita si discosta da una circonferenza perfetta. Matematicamente è il rapporto tra la distanza dai fuochi e la lunghezza dell'asse maggiore dell'ellisse. Se l'orbita è perfettamente circolare, la sua eccentricità vale 0.

Per afelio si intende il punto di un'orbita più lontano dal Sole. Il perielio è invece il punto dell'orbita più vicino al Sole.

La 2^a legge di Keplero

Keplero trovò anche che Marte si muoveva più lentamente quando era più lontano dal Sole, e più rapidamente quando gli si avvicinava. Egli scoprì una legge che rendeva conto delle osservazioni: la 2^a legge di Keplero o legge delle aree (1609) afferma che il raggio che congiunge il Sole con un pianeta descrive aree uguali in tempi uguali. Si può anche affermare che la velocità areale (rapporto tra area descritta dal raggio vettore e tempo impiegato) è costante.



In base alla 2^a legge di Keplero sulla costanza della velocità areale, i pianeti si muovono più velocemente quando sono più vicini al sole (perielio), dove maggiore è la forza di attrazione solare e più lentamente quando sono più lontani dal Sole (afelio), dove la forza di attrazione è minore.

La 3^a legge di Keplero

I pianeti sono, in ordine di distanza dal Sole, Mercurio, Venere, la Terra, Marte Giove e Saturno. Più lontano è il pianeta, più tempo esso impiega per compiere una rivoluzione completa intorno al Sole: il periodo dell'orbita aumenta con la distanza del pianeta medesimo. Keplero scoprì il legame matematico esatto che esiste tra il periodo dell'orbita e la distanza del pianeta dal Sole: la 3^a legge di Keplero o legge dei periodi o legge armonica (1619) afferma che qualunque sia il pianeta considerato, il rapporto tra il cubo del semiasse maggiore a dell'orbita e il quadrato del tempo di rivoluzione T è costante. In formula:

$$\frac{a^3}{T^2} = K$$

Nel S.I. (Sistema Internazionale) il valore della costante K è $3,36 \times 10^{18} \text{ m}^3/\text{s}^2$. Dalla formula precedente si può isolare T , ottenendo:

$$T = \sqrt{\frac{a^3}{K}}$$

Dalla 3^a legge di Keplero appare evidente che all'aumentare della distanza di un pianeta dal Sole, aumenta il periodo della sua rivoluzione intorno al Sole; ad esempio Mercurio, il pianeta più vicino, impiega poco meno di 3 mesi per descrivere un'orbita; la Terra, che è il terzo pianeta, impiega un anno; Plutone, il pianeta più lontano, descrive un'orbita completa in 247 anni.

Pianeta	(a) Distanza Media dal Sole	(T) Periodo di rivoluzione	K
Mercurio	$57,9 \cdot 10^6$ km	88 giorni	$3,358 \cdot 10^{18}$
Venere	$108,2 \cdot 10^6$ km	224,7 giorni	$3,361 \cdot 10^{18}$
Terra	$149,6 \cdot 10^6$ km	365,26 giorni	$3,362 \cdot 10^{18}$
Marte	$227,9 \cdot 10^6$ km	687 giorni	$3,360 \cdot 10^{18}$
Giove	$778,3 \cdot 10^6$ km	11,86 anni	$3,365 \cdot 10^{18}$
Saturno	$1.427 \cdot 10^6$ km	29,46 anni	$3,362 \cdot 10^{18}$
Urano	$2.869,6 \cdot 10^6$ km	84,01 anni	$3,362 \cdot 10^{18}$
Nettuno	$4.496,6 \cdot 10^6$ km	164,8 anni	$3,361 \cdot 10^{18}$
Plutone	$5.900 \cdot 10^6$ km	247,7 anni	$3,361 \cdot 10^{18}$

3. Gravitazione Universale

Già in epoca classica, alcuni filosofi-scienziati greci (Empedocle, Democrito, Platone, ecc.) ritenevano che esistesse un'attrazione reciproca fra "sostanze analoghe", ivi compresi i corpi celesti; nel XVI sec. Copernico avanzò l'ipotesi dell'esistenza di una "attrazione solare", ipotesi ripresa da Keplero che ne tenne conto nel formulare le sue leggi sul moto dei pianeti. Nel 1645, l'astronomo francese I. Boulliau enunciò una legge secondo la quale, tra i corpi celesti, esisteva una reciproca forza di attrazione inversamente proporzionale alla distanza o al quadrato delle distanze fra le masse dei corpi considerati; più tardi, P. de Fermat confermò che esisteva una forza di attrazione proporzionale alla massa del Sole. Successivamente diverse altre teorie furono introdotte, adottando diverse ipotesi e spiegazioni.

Nel 1687, **Isaac Newton** mise ordine in tutte queste ipotesi e, basandosi su calcoli precisi, giunse a formulare una legge sulla *gravitazione universale*. Il merito di Newton risiede nel fatto che egli intuì che il fenomeno della caduta di un corpo sulla Terra e il fenomeno della rotazione della Luna intorno alla Terra o dei pianeti intorno al Sole sono tutti espressioni di un'unica legge naturale: la legge di gravitazione universale. La gravitazione è universale poiché influisce su tutte le forme di materia e di energia essenzialmente nello stesso modo, mentre le altre interazioni influiscono direttamente solo su certi tipi di particelle; la forza elettromagnetica, per esempio, agisce solo sulle particelle cariche elettricamente.

La legge di gravitazione universale afferma che tra due corpi di massa m_1 e m_2 posti ad una distanza d l'una dall'altro si esercita una forza di attrazione, detta forza gravitazionale, o forza di gravità, che risulta direttamente proporzionale alle masse dei due corpi ed inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza.

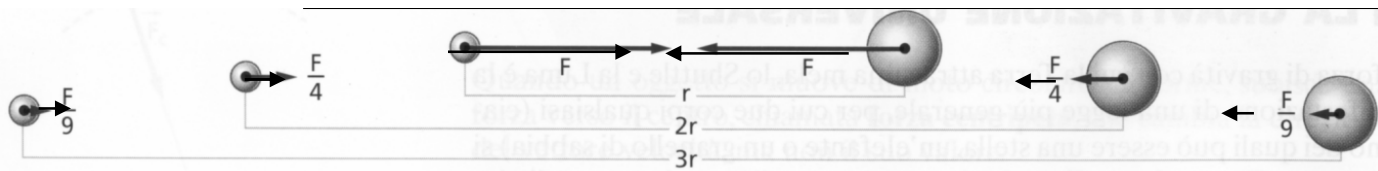
La legge di gravitazione è espressa dalla seguente formula:

$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{d^2}$$

F è la forza di gravitazione, G è la costante di gravitazione universale.

Il fatto che la forza di gravitazione è inversamente proporzionale al quadrato della distanza implica che se ad esempio la distanza tra due corpi raddoppia, la forza di attrazione gravitazionale diminuisce di quattro volte; se la distanza triplica, la forza di attrazione diminuisce di ben nove volte.





Sottolineiamo inoltre il fatto che la forza di gravità è sempre attrattiva. Nell'elettromagnetismo, invece, le cariche possono sia attirarsi (quando hanno segni opposti) che respingersi (quando hanno lo stesso segno). A tutt'oggi, l'*antigravità* esiste solo nei racconti di fantascienza e nelle favole. Ad esempio nel lungometraggio di animazione del giapponese Hayao Miyazaki "*Laputa: Castle in the sky*" un'intera isola galleggia nel cielo grazie alla *pietra gravimetrica*, che consente di vincere la forza di gravità (vi consiglio di vederlo, anche se "*La città incantata*" è superiore: sempre meglio delle battute di Pupo o dell'Isola dei Famosi o del Grande Fratello...).

Valore della costante G di gravitazione universale

Il valore della costante G di gravitazione universale fu misurato molto dopo la scoperta di Newton, nel 1798, da Lord Cavendish, fisico e chimico inglese (1731 - 1810), mediante una *bilancia a torsione*. G vale nel S.I. $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$. È un valore estremamente piccolo.

Il fatto che la costante G sia molto piccola implica che la forza di attrazione gravitazionale è rilevabile solo quando almeno uno dei corpi è grandissimo, come la Terra o i pianeti. Tra corpi di dimensioni ordinarie la forza di attrazione gravitazionale è così piccola che può essere rilevata solo da strumenti estremamente sofisticati.

Generalità e importanza della legge di gravitazione universale

Sebbene la legge di gravitazione universale sia stata scoperta 80 anni dopo le leggi di Keplero, essa è ben più generale di queste ultime. Dalla gravitazione universale è infatti possibile dedurre matematicamente, applicando i principi della dinamica e il calcolo differenziale, le tre leggi di Keplero. Keplero scoprì invece le tre leggi senza conoscere affatto la gravitazione universale, ma semplicemente applicando il metodo induttivo ai dati sperimentali raccolti da Ticho Brahe; se egli non avesse scoperto le leggi che portano il suo nome, lo avrebbe senz'altro fatto Newton successivamente, ma in maniera teorica, come corollari alla legge di gravitazione universale.

La legge di gravitazione universale ha una grandissima importanza nella fisica, poiché la forza gravitazionale è una delle tre forze fondamentali dell'Universo, insieme alla *forza elettrodebole* (che comprende la *forza elettromagnetica* e la *forza nucleare debole*) e alla *forza nucleare forte*.

La forza elettromagnetica è la forza che agisce tra particelle dotate di carica elettrica; la forza nucleare forte è la forza che tiene legati gli uni agli altri i protoni e/o i neutroni nei nuclei atomici. La forza nucleare debole si esercita tra particelle elementari chiamate *leptoni* e si manifesta nel decadimento radioattivo β .

La gravitazione è una forza a lungo raggio d'azione, come l'elettromagnetismo, mentre le forze nucleari forti e deboli generalmente agiscono solo entro distanze dell'ordine delle dimensioni di un nucleo atomico. Inoltre la gravità è la più debole delle forze fondamentali e ha un effetto trascurabile sulle particelle elementari: la forza attrattiva elettromagnetica fra un protone e un elettrone è quasi 10^{40} (1 seguito da 40 zeri) volte più grande della forza gravitazionale fra di essi alla stessa distanza. Tuttavia, dato che la gravità è una forza attrattiva a lungo raggio d'azione e dato che agisce su tutta la materia, è anche la forza dominante nell'universo.

Espressione della accelerazione di gravità g attraverso la legge di gravitazione universale

La forza peso cui è soggetto un corpo di massa m_c è data dalla nota espressione

$$F = m_c \cdot g .$$

Ora la forza peso non è altro che la forza di gravitazione universale che si esercita tra la Terra e il corpo in esame:

$$F = G \frac{M_T \cdot m_c}{r^2}$$

nella formula M_T è la massa della Terra e r è la distanza che va dal centro della Terra all'oggetto (se l'oggetto è al livello del mare r è uguale al raggio terrestre).

Eguagliando le due formule precedenti si ha:

$$m_c \cdot g = G \frac{M_T \cdot m_c}{r^2}$$

Semplificando dalle due formule il fattore comune m_c si ottiene la formula che definisce g :

$$g = G \frac{M_T}{r^2}$$

Appare chiaro che se ci si trova al livello del mare, r è uguale al raggio terrestre (pari a 6378 km). Ma se si sale di quota, r aumenta e quindi la g diminuisce. Inoltre, poiché la Terra è schiacciata ai poli, se ci si sposta verso latitudini più elevate, il raggio terrestre diminuisce e la g aumenta. Possiamo allora dire sinteticamente che ad alta quota abbiamo un peso inferiore rispetto a quello che abbiamo al livello del mare e al polo Nord o al polo Sud abbiamo un peso maggiore di quello che abbiamo all'Equatore.

4. Campo gravitazionale

Immaginiamo la seguente situazione: nello stesso istante, un gran numero di persone, poste in punti diversi di una stessa regione misura la temperatura e ce la comunica. Possiamo descrivere la situazione di quella regione con un disegno in cui indichiamo i punti dove si trovano le persone. Associamo a ogni punto un numero, che rappresenta la temperatura misurata in quel luogo. La mappa che ne risulta è il *campo* di temperatura che c'è in quell'istante nella regione.

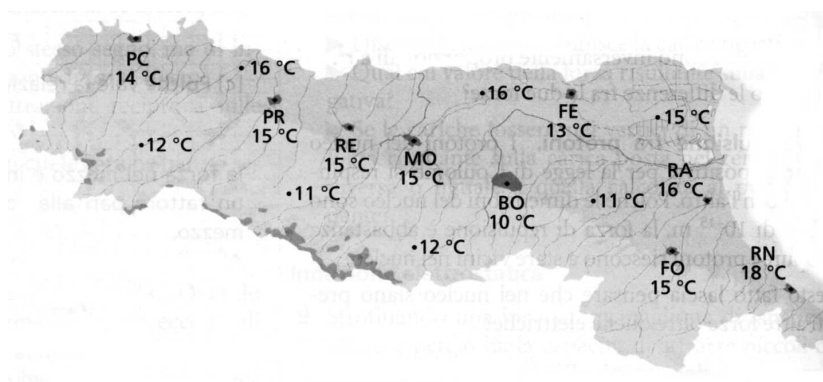


figura 7 – Campo scalare di temperature dell'Emilia Romagna

Poiché per specificare la temperatura è sufficiente solo un numero (diciamo che la temperatura è una grandezza scalare), il campo di temperatura è definito *campo scalare*. Nello stesso modo, è possibile definire un *campo vettoriale*, che invece rappresenta la distribuzione nello spazio di una grandezza vettoriale. Per esempio, la forza di gravità con cui la Terra attira tutti gli oggetti può essere descritta con un campo vettoriale.

Consideriamo una massa M posta in un punto O dello spazio. La presenza della massa M modifica le proprietà dello spazio circostante nel senso che, se poniamo in un qualunque punto P dello spazio attorno a M un'altra massa m , quest'ultima risente della forza attrattiva di M : tale regione di spazio è chiamata *campo gravitazionale*. La Terra genera un campo gravitazionale, nel quale tutti noi siamo immersi; così il Sole, la Luna e gli altri corpi celesti, ma anche corpi di massa piccolissima generano attorno a sé campi gravitazionali: ad ogni massa si associa sempre un campo gravitazionale.

Per comprendere come la presenza di un corpo celeste alteri le proprietà dello spazio circostante, possiamo paragonare lo spazio ad un tappeto elastico. Se non c'è nessun corpo, il tappeto è teso e indeformato ed un qualunque altro corpo nelle vicinanze resta in quiete o in moto rettilineo uniforme. Se invece è presente un corpo dotato di massa, il tappeto si deforma venendosi a creare un avvallamento. Un qualunque altro corpo dotato di massa, posto nelle vicinanze, risentirà dell'influenza dell'avvallamento e vi "cadrà dentro" oppure vedrà la sua traiettoria inizialmente rettilinea deformarsi e incurvarsi verso l'oggetto.

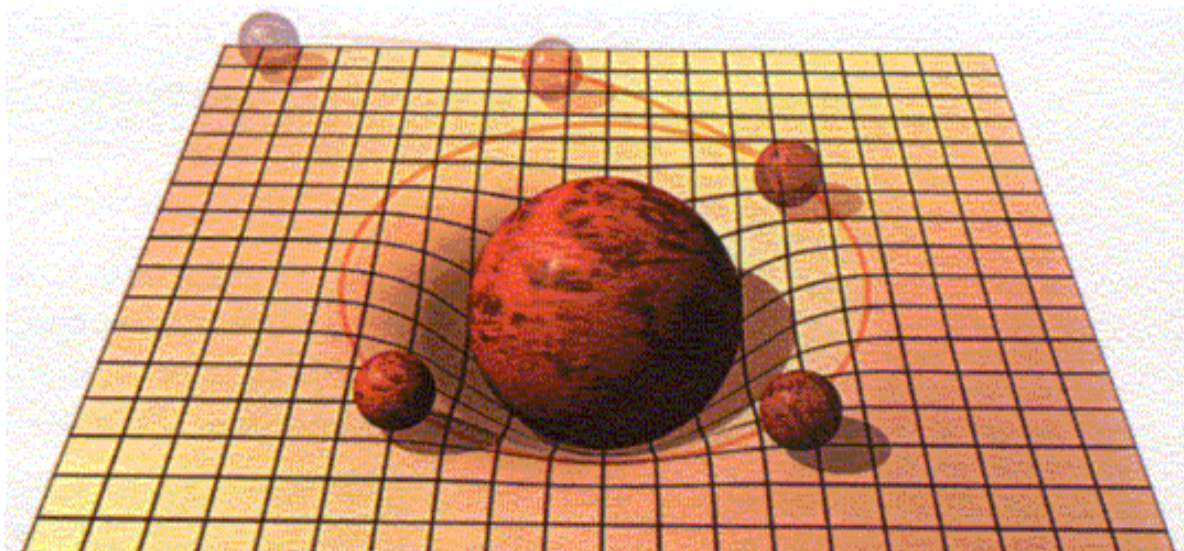


figura 8 – Rappresentazione di un campo gravitazionale mediante l'analogia del tappeto elastico

Nella figura di sopra tutto funziona come se la sfera grande attirasse quella piccola. In realtà la sferetta non interagisce con la sfera grande, ma soltanto con la porzione di tappeto su cui essa si trova, ed è la curvatura del tappeto che provoca il moto della sferetta verso la sfera grande.

Allo stesso modo, una massa posta in un punto P sembra essere attratta da un'altra massa mentre, in realtà, essa risente soltanto del campo gravitazionale che si trova in P .

Espressione matematica del campo gravitazionale.

Si può vedere che il campo gravitazionale E_G generato da un corpo di massa M , misurato ad una distanza d dal centro del corpo, vale:

$$g(r) = G \frac{M}{r^2} \hat{r}$$

Da questa relazione emerge che:

- il campo gravitazionale in un determinato punto dello spazio dipende dal valore della massa M ; M rappresenta la **sorgente** del campo; infatti, se la togliessimo, non avremmo più forza gravitazionale da nessuna parte e quindi non ci sarebbe più il campo.

- b) il campo gravitazionale in un determinato punto non dipende dalla massa m che subisce la forza (e viene detta *massa di prova*). Esso resta inalterato, qualunque sia la massa m che ci mettiamo.
- c) il campo gravitazionale in una zona dello spazio esiste indipendentemente dal fatto che ci mettiamo o meno un corpo per rivelarne la presenza. Per comprendere questo punto saliente osserviamo che nell'analogia del tappeto, la deformazione viene determinata dalla sola presenza della *massa sorgente* ed esiste a prescindere dalla presenza di un eventuale altro corpo di prova.
- d) il campo gravitazionale in un punto dello spazio dipende dalla distanza d del punto dalla sorgente: il suo valore diminuisce con il quadrato di tale distanza.

Velocità di fuga

Per un determinato corpo celeste si definisce velocità di fuga la **minima velocità iniziale** che deve essere impressa ad un corpo che si trova sulla sua superficie perché esso possa sfuggire definitivamente all'attrazione del suo campo gravitazionale. La velocità di fuga dalla Terra è pari a 11,2 km/s (40.000 km all'ora) ed è la stessa per tutti i corpi. La velocità di fuga è diversa da pianeta a pianeta; ad esempio sulla Luna è così piccola (2,4 km/s) da non riuscire a trattenere un'atmosfera. La velocità di fuga da un *buco nero* è invece infinita: neanche la luce, che si muove alla massima velocità possibile nell'Universo, riesce a sfuggire all'attrazione del buco nero.

Si osservi però che i veicoli che lasciano la Terra per inoltrarsi nello Spazio, come ad esempio lo *Space Shuttle* o i razzi per il trasporto dei satelliti artificiali, ecc., non hanno bisogno di raggiungere velocità pari a quella di fuga, né potrebbero in alcun modo farlo, dato l'elevatissimo valore di questa. Poiché i loro motori possono imprimere una forza ascendente per un intervallo di tempo prolungato (e non semplicemente istantaneo), la velocità necessaria a lasciare l'atmosfera è di gran lunga inferiore a quella teorica di fuga. Nella definizione di velocità di fuga si considera un corpo che riceve un impulso di forza per un tempo brevissimo e per questo motivo il valore di tale velocità risulta estremamente elevato.

Satellite in orbita geostazionaria

I satelliti in orbita *geostazionaria* sono quelli normalmente impiegati per le trasmissioni TV (*Sky*, ecc.) con ricevitore parabolico. Essi si trovano in orbita circolare attorno alla Terra e hanno la particolarità di orbitare nello stesso verso di quest'ultima e con la stessa velocità di rotazione. In questo modo, il satellite mantiene sempre la stessa posizione rispetto alla Terra (da cui il nome geostazionario = "fermo rispetto alla Terra"). I satelliti in orbita geostazionaria si trovano ad un'altezza molto elevata, pari a circa 35.786 km sopra la superficie terrestre. Tutti gli altri satelliti artificiali (come ad esempio quelli che fanno le foto per *Google Earth* o quelli che inviano segnali *GPS* ai navigatori satellitari) si trovano generalmente ad altezze molto più basse e non mantengono la stessa posizione nel cielo.

