

1

Moti ordinati e moti caotici: evoluzione e risultati della teoria da Tolomeo a Poincare' a oggi

Nella Grecia pre-Ellenistica nasce la necessità di una *teoria del moto*: influenza dell'Astronomia.

La concezione classica dei moti: moti "regolari"

Quella più moderna invece concepisce anche altri tipi di moto

Entrambe le concezioni deterministiche: il moto futuro determinato dallo stato presente o iniziale.

Entrambi i moti sono reversibili: se un demone invertisse le velocità seguirebbe otterrebbe un moto "a ritroso"

Stelle e pianeti *sembrano* muoversi in modo predicibile.

2

Il moto delle stelle appare a prima vista *circolare uniforme*

Ma poi: *composizione di moti circolari uniformi*

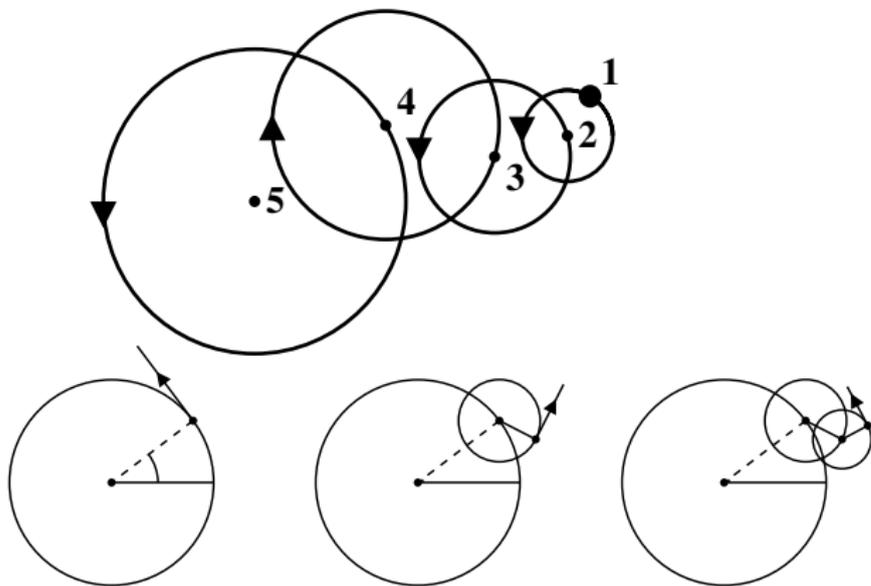
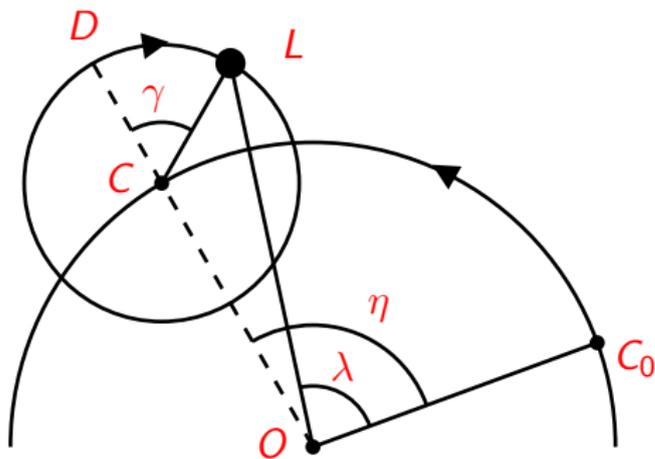


Fig.1: Moto su deferente, o su un epiciclo centrato su deferente, o su epiciclo su epiciclo su deferente.

3



(h1)

Luna d'Ipparco (Nicea, 194-120 a.c.)

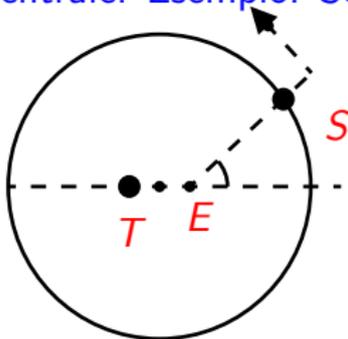
4

Si aggiungono epicicli finché si “*salvano i fenomeni*”

⇒ costruzione di *effemeridi*” per future osservazioni

Notevole: numero esiguo di defer. ed epic. e delle velocità di rotazione. Ipparco.

Tolomeo usò sistemi di leve rotanti attorno a punti “eccentrici” rispetto alla posizione centrale. Esempio: Sole-Terra.



Ma un qualunque moto eccentrico o estremo di un gioco di leve rotanti a velocità costanti è *equivalente* a un sistema di epicicli

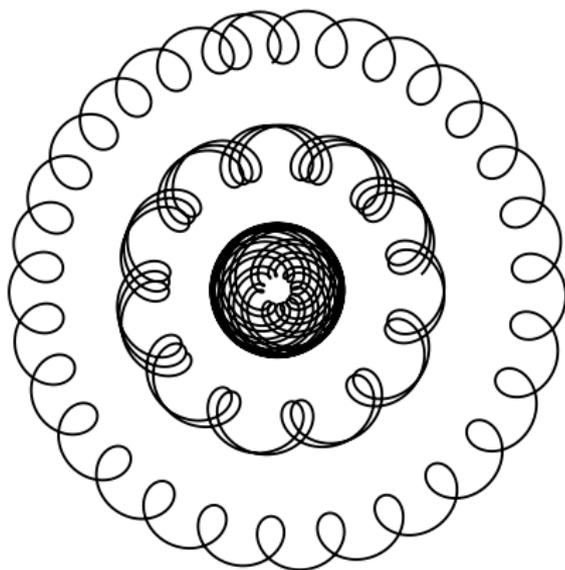


Fig.2: Moto Geocentrico dei pianeti esterni (Marte, Giove, Saturno) visto dalla Terra.

Decadenza Ellenismo: si dimentica l'equivalenza (e teoria relativa?). Manca metodo sistematico per effemeridi.

COPERNICO: TOLOMEO "tradi" ARISTOTELE e PLATONE

Dal **Commentariolus**

“Nondimeno quanto TOLOMEO e molti altri in vari luoghi ci hanno tramandato su tali questioni, sebbene matematicamente accettabile, non parve pertanto non dar luogo a dubbi e difficoltà ...”.

“Cosicché una tale spiegazione né parve sufficientemente completa né sufficientemente conforme ad un criterio razionale ...”

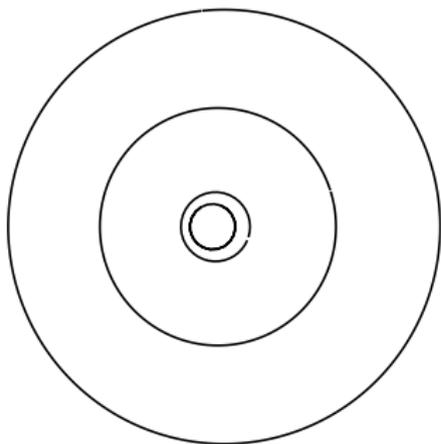
*“Avendo dunque compreso questo adesso meditai se, per caso, si potesse trovare un sistema razionale di cicli con cui fosse possibile spiegare ogni possibile disuguaglianza del moto apparente; [rispetto alla composizione di moti circolari uniformi] intendo cicli moventesi su se stessi con moto uniforme **come richiesto** dalla legge assoluta del moto.*

8

Il giovane COPERNICO torna a cicli ed epicicli, abbandonando leve ed eccentrici. Per la prima volta dopo un millennio ricostruisce *ab initio* con metodo razionale un “modello” del sistema solare.

Alla fine della vita non sorpassa la precisione ellenistica: ma mostra come costruire in modo sistematico e perfezionabile una teoria del sistema solare (ora eliocentrico come già ARISTARCO)

Contributo essenziale (più che la visione eliocentrica) che apre la via a TYCHO BRAHE, KEPLERO e stimola BRUNO E GALILEO.



9

Parentesi: nell'*Almagesto* non c'è traccia dei metodi seguiti che pur dovettero esistere. Difficile è pensare che fosse solo un catalogo empirico di effemeridi (come il moderno "*American Astronomical Almanac*": in cui la teoria soggiacente non è spiegata e appare come un insieme di prescrizioni per "salvare i fenomeni").

La decadenza della Scienza a seguito della partenza da Alessandria degli scienziati ellenistici causata dai tragici eventi politici del V secolo (espulsione degli Ebrei, assassinio di IPAZIA e tumulti di fanatici religiosi ...), permise la conservazione solo di quanto considerato "utile" secondo criteri che ancora risuonano sinistramente all'alba del nostro XXI secolo.

10

KEPLERO e NEWTON, sulla base della metodologia Copernicana e l'opera di GALILEO, **NON** diminuirono il ruolo del punto di vista epiciclico: portato al massimo splendore da LAPLACE.

Fino a tempi recentissimi si sono pensati questi come composti da moti circolari uniformi, come in Grecia. LANDAU-LIFSCHITZ ('50).

Ma al momento del trionfo dei moti regolari BOLTZMANN e, soprattutto, POINCARÉ, agli albori del **XX** secolo mostrarono esistenza di moti non rappresentabili come composti da epicicli. Sono i *moti caotici*.

La caratteristica dei moti regolari, tecnicamente detti *quasi periodici*, è la loro predicibilità. Perché due moti con dati iniziali a distanza D si diversifichino di $2D, 4D, 6D, \dots$ occorrono tempi diversi, aritmeticamente o logicamente crescenti

moto “quasi periodico”		moto “caotico”	
Differenza	tempo	Differenza	tempo
$2D$	1	$2D$	1
$4D$	3	$4D$	2
$8D$	7	$8D$	3
$16D$	15	$16D$	4
...
$1024D$	1023	$1024D$	10
...
$\sim 1.000.000D$	$\sim 1.000.000$	$\sim 1.000.000D$	~ 20

Nei moti caotici (POINCARÉ): la differenza fra i moti è ben visibile.

Ord: $2^n D \leftrightarrow 2^n - 1$ unità di tempo, C. $2^n D \leftrightarrow n$ unità di tempo!

13

I moti caotici sono *imprevedibili* sulla scala di tempo della loro osservazione. I moti regolari sono di solito tali solo in apparenza perché osservati su tempi troppo brevi.

Dominano i fenomeni meccanici: ad esempio il moto dei pianeti è caotico.

Es. l'asse di rotazione di Marte non è fisso ma ha inclinazione che può differire da quella attuale ($\sim 24^\circ$) di altrettanto ! sulla scala di tempo (brevissima) di 1 milione di anni.

Lo stesso sarebbe per la Terra **SE** non ci fosse la Luna (ecco a cosa serve!): LASKAR.

14

La fisica Newtoniana, predice sia moti regolari (pendolo, oscillatore armonico, moto Kepleriano a 2 corpi ...) sia moti caotici a seconda del sistema.

Ma tutti i moti sono deterministici (difficili da prevedere se caotici).

Inoltre sono sempre *reversibili*: moti con velocità sistematicamente opposte sono possibili (l'acqua che cade nel Niagara potrebbe risalire senza contraddire la meccanica).

Se un demone invertisse la velocità degli otto cieli (i 7 pianeti e le stelle fisse) nessuno si meraviglierebbe al vedere il moto dei cieli procedere a ritroso. Ma vedere l'acqua di un bicchiere divenire calda in una metà e fredda nell'altra apparirebbe ben strano: *tuttavia non contraddirebbe le leggi della meccanica Newtoniana.*

Quindi entrambi i tipi di moto sono in netto contrasto con aspetti familiari della realtà.

Conclusion: entrambi i tipi di moto paiono incompatibili con facili osservazioni empiriche!

Nessuno risolve il dualismo fra moto deterministico e reversibile microscopico e alcuni moti macroscopici che invece presentano irreversibilità.

Fu BOLTZMANN (con MAXWELL, THOMSON.. a spiegare che, invece, la Meccanica Newtoniana è perfettamente compatibile con l'irreversibilità. E fu il punto di arrivo di ricerche iniziate nel '700 con NEWTON, BOYLE, BERNOULLI,... e poi nell'800 con AVOGADRO, CARNOT, JOULE, KRÖNIG, CLAUSIUS, ... che sulla base dell'*ipotesi atomica* pervennero alla interpretazione meccanica dei fenomeni termici

In breve: è possibile preparare un sistema in uno stato in cui eventi impensabili si producono, quale la spontanea creazione di una differenza di temperatura in un recipiente di acqua inizialmente a temperatura costante.

Tuttavia questi fenomeni sono di brevissima durata e poi il sistema continua la sua *normale* evoluzione per una durata di tempo davvero inimmaginabile: multipla dell'età dell' Universo di un fattore **1** seguito da *un miliardo di miliardi di 0* !! come una celebre stima di THOMSON e BOLTZMANN sul tempo necessario a **1cm³** di gas normale per evolvere in una configurazione in cui occupa solo la metà del volume a disposizione.

Questo dualismo è dunque superato dalla concezione Boltzmaniana dell'irreversibilità la cui origine è sostanzialmente contemporanea ai primi studi sui moti caotici: si evita così di dover ricorrere a immaginare nuove leggi di moto intrinsecamente irreversibili.

Allora è tutto chiaro? ma no!

Le proprietà dei sistemi in stati stazionari di equilibrio sono abbastanza ben capite, almeno in situazioni in cui non intervengono fenomeni quantistici.

17

Ma le proprietà dei sistemi in stati stazionari fuori equilibrio, in presenza di forze che compiono lavoro generando calore che viene assorbito da termostati, sono ben poco capite.

La ricerca di oggi si orienta verso la “ipotesi caotica” secondo cui non sarebbero necessari altri tipi di moto oltre ai moti regolari e caotici per la costruzione di una teoria analoga alla Termodinamica.

18

Questo passa per una definizione precisa di moto caotico che in realtà caratterizza i più semplici fra questi moti e l'ipotesi che in pratica già tali moti abbiano abbastanza struttura da poter generare una teoria analoga alla Termodinamica, per gli stati stazionari fuori equilibrio.

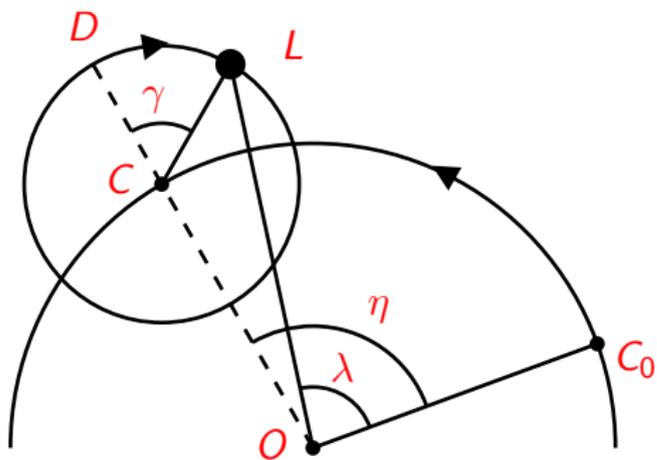
È però un problema con cui quanti di voi studieranno Fisica o Matematica saranno confrontati, forse: perché ci sono anche altri problemi importanti (e affascinanti).

Un Riferimento bibliografico (introduttivo)

<http://ipparco.roma1.infn.it/pagine/2008.html>

Bottone: “Ordine, Disordine, Informazione”

19



(h1)

Luna d'Ipparco (Nicea, 194-120 a.c.)

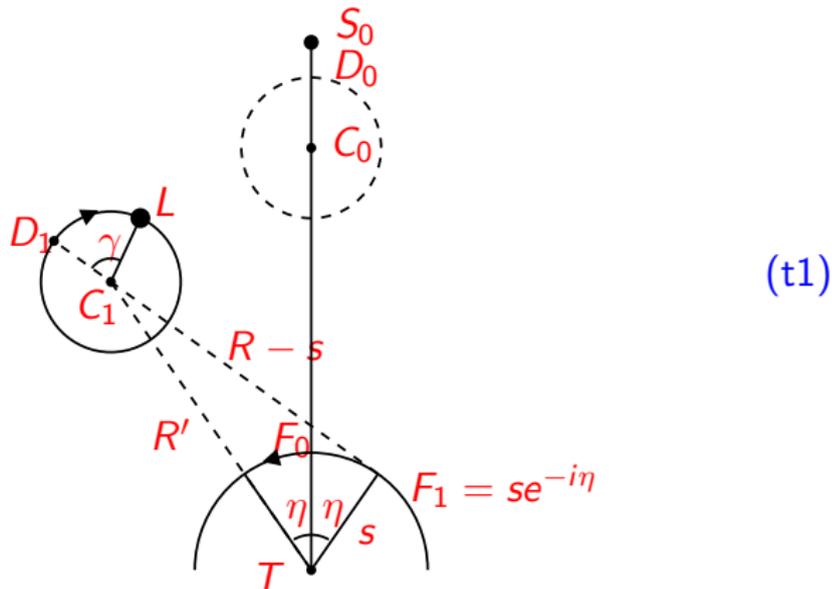
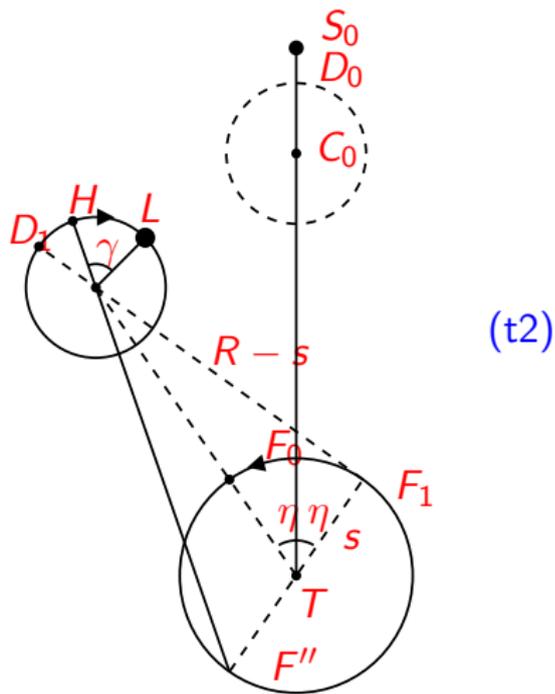


Fig. (t1): Tolomeo: correzione alla Luna di Ipparco (100-175 d.c.)



more refined theory of Ptolemy

Fig. (t2): The

22 G. Schiaparelli, reprinted in G. Schiaparelli, *Scritti sulla storia dell' astronomia antica*, part I, tomo II, *Le sfere omocentriche di Eudosso, di Callippo e di Aristotele*, p. 11, Zanichelli, Bologna, 1926

Quasi periodic motions from Hypparchus to Kolmogorov, Rendiconti Accademia dei Lincei, Matematica e applicazioni, **12**,125–152, 2001, and [chao-dyn/9907004](#).