4. Gravità

4.1 Prime idee sul moto dei gravi

4.1.1 La dimostrazione antica dell'accelerazione

Il percorso che conduce a parlare di gravitazione universale parte dalle teorie legate al moto dei gravi sulla superficie della Terra. Contrariamente a quanto spesso si crede, anche in questo ambito esistono risultati antichi interessanti.

Una dimostrazione molto bella dell'accelerazione di un corpo in caduta è attribuita a Stratone di Lampsaco (≈335-269 a.C.), secondo successore di Aristotele alla guida del Liceo. Possiamo ricostruire la dimostrazione di Stratone grazie a un accenno del bizantino Simplicio (490-560 d.C. circa) e descrizioni più complete del ragionamento di epoca medievale.

Invece di osservare una massa pesante, Stratone osserva la forma di un filo d'acqua in caduta libera e deduce l'accelerazione dal restringersi del flusso nella parte finale. Poiché, infatti, il flusso attraverso le sezioni orizzontali del filo è costante ed è proporzionale al prodotto della sezione per la velocità, il restringimento deve corrispondere a un'accelerazione. La rapida variazione di velocità, non apprezzabile direttamente con gli orologi dell'epoca, si trasforma così in un'immagine statica e geometrica, nello spirito della scienza greca.

4.1.2 L'indipendenza dal peso

Un'altra proprietà del moto dei gravi la cui scoperta è fatta in genere risalire ad epoca moderna riguarda l'indipendenza dal peso della velocità di caduta del grave.

L'attribuzione a Galileo va però corretta considerando che, prima di lui, ne aveva già parlato Giambattista Benedetti (1530-1590), e molto prima Giovanni Filopono (VI secolo d.C.), mentre l'idea è espressa anche nel *De rerum natura* di Lucrezio (94-50 a.C.). Il sospetto è che la prima formulazione risalga a Ipparco e alla sua opera perduta *Sui corpi spinti in basso dal loro peso*: l'unica testimonianza su questa opera è in Simplicio, che tra l'altro afferma che Ipparco vi aveva sostenuto che una medesima legge governa la caduta dei corpi durante la salita e la discesa.

4.2 La forma parabolica della traiettoria[1]

4.2.1 L'idea di Tartaglia

Non abbiamo, invece, alcuna fonte per attribuire all'antichità la scoperta della forma parabolica della traiettoria di caduta dei gravi, normalmente accreditata a Galileo. Si può però dimostrare che il ragionamento galileiano precede la scoperta della legge oraria ($s= 1/2\ at^2$) e che è frutto di una serie di passi compiuti da altri autori.

Un primo contributo si trova in Tartaglia[2], nel suo testo *La nova scientia* (1537):

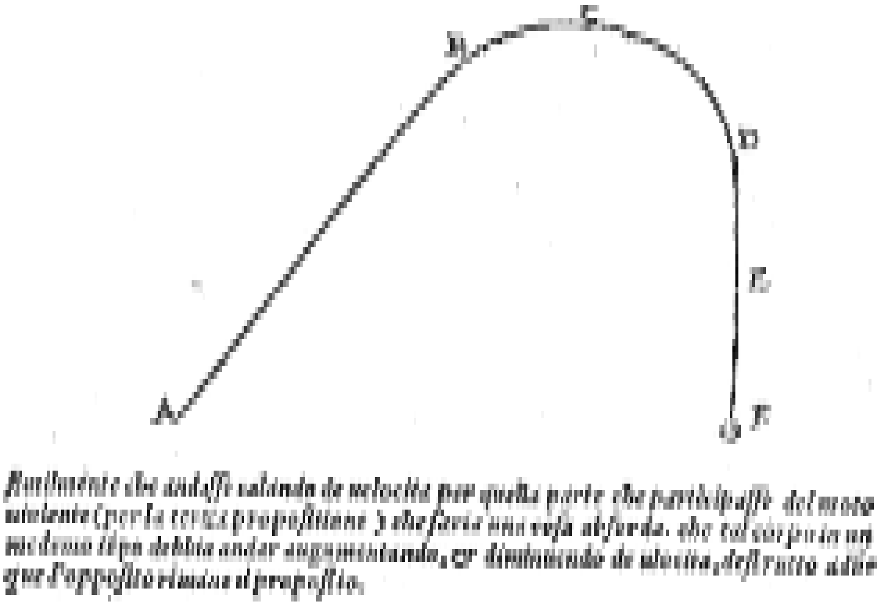
Il moto di un proiettile secondo Tartaglia consta di tre tratti: il primo, AB, è rettilineo e obliquo ed è un moto violento; l'ultimo, DF, è un moto naturale rettilineo e verticale; il raccordo tra questi due tratti è costituito da un arco di circonferenza.

La terminologia è ancora quella aristotelica che distingue, appunto, due tipi di moto: naturale e violento. Ci sono però due ingredienti metodologici che saranno essenziali per trovare il risultato corretto: la dimostrazione geometrica e la sperimentazione.

---

1 L'intera vicenda è ricostruita nel dettaglio in Lucio Russo-Emanuela Santoni, *Ingegni minuti – Una storia della scienza in Italia*, Milano, Feltrinelli, 2010, pp. 149 e sgg.

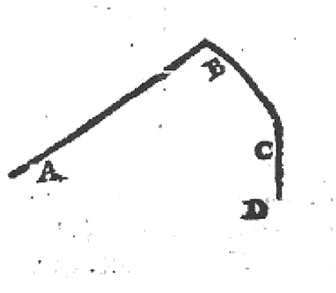
2 Niccolò Tartaglia (1499 ca.- 1557) insegnò matematica a Verona e poi Venezia. Contribuì alla soluzione delle equazioni di terzo grado, ma non rese pubblico il suo lavoro, rivelandolo però a Girolamo Cardano. Gli studi di balistica furono pubblicati nella *Nova Scientia*. Nel 1543 pubblicò a Venezia la prima traduzione italiana degli *Elementi* di Euclide.



Tartaglia, infatti, sta trattando problemi concreti di balistica; in particolare è interessato a capire quale posizione della bocca di fuoco assicuri la gittata massima del proiettile. La sua conclusione, 45°, è corretta ma è chiaro che non discende dall'argomentazione, quanto dalla verifica empirica degli artiglieri. C'è comunque l'idea di adottare un metodo geometrico matematico che usa segmenti e archi di circonferenza. Ci si può chiedere perché Tartaglia non usi altre curve. Ebbene, da un lato è il primo traduttore degli *Elementi* di Euclide in lingua italiana, le cui dimostrazioni sono legate solo a segmenti e circonferenze; dall'altro non gli è ancora nota la teoria delle coniche di Apollonio. Tartaglia usa, insomma, la matematica che conosce.
Proprio negli anni Quaranta del '500 vedrà la luce l'edizione dei primi quattro libri delle *Coniche* di Apollonio e si diffonderà, negli anni successivi, lo studio di tali curve.

4.2.2 Il passo avanti di Cardano

Nel 1550, nel *De subtilitate*, Cardano[3] compie un ulteriore passo avanti. Nella sua analisi ripete quasi esattamente quanto affermato da Tartaglia in merito al primo e all'ultimo tratto della traiettoria ma introduce l'idea che il moto, nel tratto centrale, sia misto di moto violento e naturale. Sostiene poi che questo tratto "sembra una parabola": entra dunque nel ragionamento un altro ingrediente essenziale.



[3] Girolamo Cardano (1501-1576) studò a Pavia e a Padova, dove divenne dottore in medicina nel 1524. A partire dal 1534 insegnò matematica a Milano, svolgendo nel contempo la professione di medico. Dal 1547 al 1551 insegnò medicina a Pavia e dal 1562 a Bologna, per trasferirsi infine a Roma, dove trascorse gli ultimi anni della sua vita, subendo anche un processo per eresia. Tra i massimi intellettuali dell'epoca, lasciò memoria della sua vita avventurosa nel *De vita propria* (1643). Scrisse numerose opere matematiche e filosofiche.

4.2.3 La catenaria di Guidobaldo Del Monte

La testimonianza sul lavoro di Guidobaldo Del Monte su questo problema ci viene dalla *Histoire des sciences mathématiques en Italie, depuis la renaissance des lettres jusqu'à la fin du XVII^e siècle* di Guglielmo Libri (1802-1869), opera che riporta citazioni da numerosi testi e manoscritti sottratti illegalmente da Libri alla biblioteche di tutta Europa. Molti dei testi citati da Libri sono andati perduti e la sua opera ne costituisce l'unica testimonianza. Anche il lavoro di Guidobaldo Del Monte non era mai stato pubblicato.

Del Monte (1545-1607) fu allievo di Commandino e maestro di Galileo. Questa sua posizione di cerniera è utile anche per ricostruire il legame di Galileo con gli autori precedenti. Federico Commandino (1509-1575) fu infatti uno dei maggiori esponenti dell'umanismo matematico. Tradusse molte opere matematiche greco-ellenistiche aggiungendovi propri contributi originali. C'è quindi una continuità con la matematica antica anche nella formazione di Galileo.

Scrive dunque Guidobaldo Del Monte, probabilmente nel 1592:

> Se si tira una palla o con una balestra o con artiglieria, o con la mano, o con altro instrumento, sopra la linea dell'horizonte, il medesimo viaggio fà nel calar che nel montare e la figura è quella che rivoltata sotto la linea horizontale fa una corda che non stia tirata, essendo l'un e l'altro composto di naturale e di violento et è una linea in vista simile alla parabola et hyperbole e questo si vide meglio con una catena che con una corda.
>
> La esperienza di questo moto si po far pigliando una palla tinta d'inchiostro, e tirandola sopra un piano di una tavola, il qual stia quasi perpendicolare all'horizonte, che se ben la palla va saltando, va però facendo li punti, dalli quali si vede chiaro che sicome ella ascende cosi anco descende (...)

Il riconoscimento che i tratti ascendente e discendente hanno la stessa forma è particolarmente importante perché secondo le teorie precedenti si sarebbe trattato di moti di diversa natura: l'uno violento e l'altro natirale. La forma complessiva della traiettoria è poi assimilata a una catenaria, simile a una parabola (ma inspiegabilmente anche a un'iperbole!)

Ora, questa similitudine è sostenibile solo se si pensa a una catena i cui estremi siano lontani rispetto al massimo dislivello, quindi a una curva "appiattita". Nel caso opposto, con estremi vicini e curva lunga, risulta del tutto evidente la differenza con la parabola poiché i tratti laterali sono quasi rettilinei. E evidente che né Del Monte né, come vedremo, Galileo hanno tenuto presente il caso limite.

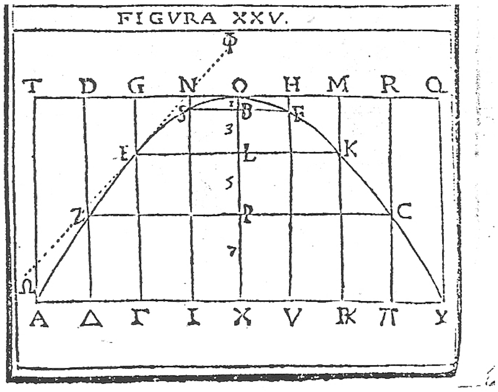
È poi importante sottolineare che nel passo di Guidobaldo compare la descrizione del primo esperimento noto con un piano inclinato: Galileo era assistente di Del Monte in questi esperimenti. È dunque evidente che il metodo sperimentale "galileiano" non è una novità introdotta dal solo Galileo.

4.2.4 La dimostrazione di Cavalieri e la polemica con Galileo

La dimostrazione corretta della forma parabolica della traiettoria di un grave risale al 1632 ed è opera di Bonaventura Cavalieri (1598-1647). Nell'opera *Lo specchio ustorio*[4] (una sorta di "divulgazione" delle applicazioni delle coniche) si trova una dimostrazione moderna che precede quella di Galileo. Questa è l'llustrazione del testo:

---

[4] L'opera è integralmente digitalizzata e disponibile al seguente link: http://visualiseur.bnf.fr/Visualiseur?Destination=Gallica&O=NUMM-51250.



Se a questo si aggiunge che il teorema Mertoniano sul moto uniformemente accelerato risale al XIV secolo, all'ambito, appunto, dei logici del Merton College di Oxford, si comprende come il passo di Galileo sia più piccolo di quanto sostenuto generalmente. Il teorema Mertoniano afferma infatti che lo spazio percorso da un moto uniformemente accelerato è uguale a quello percorso con una velocità costante, eguale alla media aritmetica tra la velocità iniziale e quella finale; manca l'idea della proporzionalità della velocità al tempo, risalente al '500.
Cavalieri usa nella sua dimostrazione questa legge, ma ne nasce una polemica con Galileo che vale la pena ricostruire per poter correttamente attribuire ai due scienziati quanto compete loro della dimostrazione.
Scrive dunque Galileo l'11 settembre 1632 a Cesare Marsili:

> Io non posso nascondere a V. S. Ill.ma, tale avviso essermi stato di poco gusto, nel vedere come di un mio studio di più di 40 anni, conferitone buona parte con larga confidenza al detto Padre, mi deva ora esser levato le primizie, e sfiorata quella gloria che tanto avidamente desideravo e mi promettevo da sì lunghe mie fatiche; perchè veramente il primo mio intendimento, che mi mosse a specolar sopra 'l moto, fu il ritrovar tal linea, la quale se ben, ritrovata, è poi di non molto difficile dimostrazione, tuttavia io, che l'ho provata, so quanta fatica vi ho hauto in ritrovar tal conclusione.

Emerge da questa lettera che Galileo ha trovato prima la forma della traiettoria e, solo in un secondo momento, la legge oraria. La risposta che Cavalieri indirizza a Galileo stesso il 21 settembre, generalmente vista come una ammissione di primogenitura di quest'ultimo, è invece una chiara rivendicazione:

> Quello che ho detto del moto, l'ho detto come suo discepolo e del P. D. Benedetto, e così mi protesto, come da' qui allegati fogli potrà vedere, havendo da loro imparato, posso dire, quel puoco ch'io so. È ben vero ch'ella dirà forsi ch'io dovevo spiegare un puoco più chiaro che il pensiero della detta linea parabolica fosse di V. S. Ecc.ma; ma sappi che il dubbio ch'havevo di non concordarmi forsi onninamente con la sua conclusione, fece che io non ardissi con parole specificate di ascriverli quello che havesse poi havuto lei a rigettare come cosa non sua;
> Aggiungo di più che io veramente pensai che in qualche luogo ella ne havesse trattato, non havend'io potuto haver fortuna di vedere tutte le opere sue; e questo, molto me l'ha fatto credere il sentirla fatta tanto publica e per tanto tempo, che l'Oddi mi disse, dieci anni sono, ch'ella ne haveva fatto qualche esperienza con il Sig.r Guid'Obaldo dal Monte: e questo pure mi ha reso trascurrato in non scrivergliene prima, stimando in realtà ch'ella punto non si curasse, anzi fosse più tosto per haver grato, che un suo discepolo, con

> un'occasione sì opportuna, si mostrasse seguace della sua dottrina, quale tuttavia confessa haver da lei imparata.

Innanzitutto Cavalieri si professa discepolo anche di Benedetto Castelli (1577-1643), fondatore dell'idrodinamica e autore di un'opera sul magnetismo. Ma l'aspetto più importante è che Cavalieri riconosce a Galileo l'idea della curva parabolica, ma rivendica a sé la dimostrazione, scrivendo che Galileo avrebbe potuto rifiutarne l'attribuzione in quanto non frutto del suo insegnamento. Infine, sottolinea che già Guidobaldo Del Monte aveva riflettuto sul problema anche attraverso esperimenti ai quali ha assistito lo stesso Galileo.

4.2.5 Il contributo di Galileo

A questo punto è possibile ricostruire il reale contributo di Galileo. Egli afferma – ribaltando l'idea di Guidobaldo Del Monte – che la traiettoria è parabolica ma simile a una catenaria.

Galileo si occupa della traiettoria dei gravi nei *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*[5], opera del 1638. Leggendo la Seconda giornata si capisce che Galileo riteneva che catenaria e parabola coincidessero. Scrive infatti, descrivendo un metodo per disegnare la parabola:

> Ferminsi ad alto due chiodi in un parete, equidistanti all'orizonte e tra di loro lontani il doppio della larghezza del rettangolo su 'l quale vogliamo notare la semiparabola, e da questi due chiodi penda una catenella sottile, e tanto lunga che la sua sacca si stenda quanta è la lunghezza del prisma: questa catenella si piega in figura parabolica, sì che andando punteggiando sopra 'l muro la strada che vi fa essa catenella, aremo descritta un'intera parabola, la quale con un perpendicolo, che penda dal mezo di quei due chiodi, si dividerà in parti eguali.

Per anni Galileo ha tentato di dimostrare la coincidenza tra parabola e catenaria ed è forse questo il motivo che lo ha portato a procrastinare la pubblicazione del suo lavoro. Parte, dunque, dall'idea di Guidobaldo Del Monte rispetto alla composizione di moto naturale e violento e il suo lavoro si pone quindi in continuità con quello dei predecessori.

Si può allora riassumere che Tartaglia ha posto il problema della forma della traiettoria usando anche esperimenti, Cardano ha introdotto l'idea della parabola, Guidobaldo Del Monte ha esteso la somiglianza della parabola a tutta la traiettoria eguagliando i tratti ascendente e discendente e infine Galileo – partendo dall'assunto errato dell'uguaglianza di catenaria e parabola – ha assimilato l'intero moto a questa curva. Tuttavia è Cavalieri che fornisce la dimostrazione. Questa vicenda esemplifica come una proposizione scientifica sia sempre frutto di un lungo processo collettivo.

4.3 Alle origini della gravitazione universale

4.3.1 Aristotele, Archimede e la teoria policentrica

È importante chiedersi come sia nata l'idea dell'attrazione universale poiché è qualitativamente lontana dall'intuizione indotta dall'esperienza comune. La storiella della mela di Newton è, ovviamente, una sciocchezza. Bisogna piuttosto tornare all'antichità perché le prime idee sono strettamente connesse ai ragionamenti intorno alla forma e ai moti della terra (vedi lezione 3).

---

[5] Reperibile on line al link: http://it.wikisource.org/wiki/Discorsi_e_dimostrazioni_matematiche_intorno_a_due_nuove_scienze

Secondo Aristotele, i corpi sono di tre tipi: pesanti, leggeri e celesti. Solo il primo tipo è attratto verso la terra; i corpi leggeri, come il fuoco, tendono all'alto mentre i corpi celesti non sono attratti né verso il basso né verso l'alto e continuano perpetuamente a girare.
La concezione aristotelica entra in crisi già con Archimede e col suo teorema sulla sfericità degli oceani (vedi lezione 3). Egli, infatti, parte dall'idea di Aristotele di un punto che attira i corpi, ma fornisce gli elementi per superarla. Se, infatti, la gravità è la causa della sfericità della Terra, per analogia posso immaginare che anche negli altri corpi sferici, come la Luna e il Sole, esistano punti che attirano i corpi loro vicini. Posso quindi immaginare che esistano molti centri di gravità.
Che questa teoria fosse stata realmente formulata lo attesta Plutarco (46/48-125/127 d.C. circa) nell'opera *De facie quae in orbe lunae apparet* ("Sul volto della luna"):

> Come infatti il Sole attira a sé le parti di cui consiste, così anche la Terra accoglie come appartenente a sé la pietra naturalmente tendente verso il basso (…)[6]

Dal passo si comprende che la teoria di Archimede ha distrutto l'idea aristotelica che esista un solo centro di gravità. In un altro punto del testo, Plutarco si sofferma sul problema del comportamento di un peso che sia lontano da tutti gli altri corpi.
Non è semplice ricostruire con precisione gli sviluppi delle idee antiche: in molti casi ci restano solo fonti indirette in testi letterari o poetici che i filologi spesso non sono in grado di interpretare correttamente. Il fatto è che in quell'epoca non esisteva una divisione netta tra le discipline scientifiche e quelle umanistiche anche se ovviamente Plutarco traduce in termini qualitativi i contenuti delle fonti che possiamo immaginare anche quantitative. Bisogna provare a capire quali possano essere le sue fonti. Una certamente è Ipparco, del quale Plutarco cita alcuni brani del perduto trattato sulla gravità.
C'è un altro brano molto importante nella stessa opera di Plutarco, relativo alla gravità reciproca tra Terra e Luna:

> Certo la Luna è trattenuta dal cadere dallo stesso moto e dalla rapidità della sua rotazione, proprio come gli oggetti posti nelle fionde sono trattenuti dal cadere dal moto circolare. Il moto secondo natura guida infatti ogni corpo, se non è deviato da qualcos'altro. Perciò la Luna non segue il suo peso, [che è] equilibrato dall'effetto della rotazione. Ma si avrebbe forse più ragione di meravigliarsi se essa restasse assolutamente immobile e fissa come la Terra[7].

L'idea – lontanissima dalla teoria aristotelica – è che la fisica dei corpi terrestri si possa estendere anche ai corpi celesti (idea, questa, generalmente considerata "moderna"). Nel brano si trova anche un'allusione all'inerzia.

---

[6] "ὡς γὰρ ὁ ἥλιος εἰς ἑαυτὸν ἐπιστρέφει τὰ μέρη ἐξ ὧν συνέστηκε, καὶ ἡ γῆ τὸν λίθον ὥσπερ <αὐτῇ> προσήκοντα δέχεται κατωφερῆ πρὸς οἰκεῖον […]". Plutarco, *De facie quae in orbe lunae apparet*, 924E.

[7] "καίτοι τῇ μὲν σελήνῃ βοήθεια πρὸς τὸ μὴ πεσεῖν ἡ κίνησις αὐτὴ καὶ τὸ ῥοιζῶδες τῆς περιαγωγῆς, ὥσπερ ὅσα ταῖς σφενδόναις ἐντεθέντα τῆς καταφορᾶς κώλυσιν ἴσχει τὴν κύκλῳ περιδίνησιν. ἄγει γὰρ ἕκαστον ἡ κατὰ φύσιν κίνησις, ἂν ὑπ᾽ἄλλου μηδενὸς ἀποστρέφηται. διὸ τὴν σελήνην οὐκ ἄγει τὸ βάρος ὑπὸ τῆς περιφορᾶς τὴν ῥοπὴν ἐκκρουόμενον. ἀλλὰ μᾶλλον ἴσως λόγον εἶχε θαυμάζειν μένουσαν αὐτὴν παντάπασιν ὥσπερ ἡ γῆ καὶ ἀτρεμοῦσαν". Plutarco, *De facie quae in orbe lunae apparet*, 923 C-D.

4.3.2 Eliocentrismo dinamico

Anche l'attribuzione al solo Newton della spiegazione del moto dei pianeti come dovuto all'interazione gravitazionale con il Sole va corretta leggendo una pagina di Borelli[8] del 1666, compresa in un'opera dedicata ai satelliti di Giove:

> [Supporremo] – il che non sembra possa negarsi – che i pianeti abbiano una naturale tendenza ad unirsi al globo intorno al quale ruotano e che cerchino realmente con tutte le loro forze di avvicinarsi ad esso, i pianeti al Sole e gli astri Medicei a Giove. È certo inoltre che il moto circolare imprime al mobile un impeto ad allontanarsi dal centro della sua rivoluzione. (...) Supponiamo dunque che il pianeta tenda ad avvicinarsi al Sole e che, allo stesso tempo, per il suo moto circolare acquisti l'impeto di allontanarsi dal Sole che è al centro; da ciò deriva che finché le forze contrarie rimangono eguali (l'una infatti è compensata dall'altra), il pianeta non potrà avvicinarsi né allontanarsi dal Sole oltre uno spazio certo e determinato, e perciò apparirà in equilibrio come se galleggiasse[9].

I moti degli astri risultano quindi dalla composizione del moto centrifugo e dell'attrazione verso il centro. La stessa idea che abbiamo trovato anche in Plutarco che, nel *De facie* discute anche del moto di un corpo presso il centro della Terra. Si dice allora che esso si fermerebbe, oppure supererebbe il centro per esserne poi attratto di nuovo, o oscillerebbe attorno al centro con un moto armonico. Ebbene, tutte e tre le possibilità rappresentano possibili soluzioni delle equazioni moderne del moto.

È chiaro che questa riflessione non risale a Plutarco ma è possibile attribuirla ad Ipparco. Ci sono buoni motivi che rendono plausibile questa opzione: intanto Ipparco è stato l'ultimo grande astronomo ellenistico, dunque le idee importanti si dovevano trovare nei suoi testi o perché precedenti o come originali intuizioni; in secondo luogo, la sua opera sui gravi è esplicitamente citata in altri punti del testo di Plutarco; infine vi è in Simplicio un passo in cui si critica Ipparco per aver sostenuto che i corpi tanto più sono pesanti, tanto più si allontanano dal centro. È chiaro che quest'ultima asserzione può aver senso solo se riferita a moti interni alla Terra e non sulla sua superficie. Nel centro di gravità, infatti, la forza attrattiva si annulla e, nell'immediato intorno, è molto debole.

L'affermazione che Simplicio attribuisce a Ipparco è coerente con il brano di Plutarco sui moti al centro della Terra e ciò rafforza l'idea che sia lui la fonte dello scrittore greco.

Che, poi, l'eliocentrismo fosse una teoria accettata almeno da alcuni astronomi è documentato in un altro testo di Plutarco, che specifica:

> Doveva [Timeo] pensare che la Terra, ruotante attorno all'asse esteso attraverso tutto, fosse stata progettata non confinata e ferma ma ruotante e rivolgentesi, come successivamente affermarono Aristarco e Seleuco, il primo assumendolo solo per ipotesi e Seleuco invece mostrandolo anche?[10]

Dunque Seleuco avrebbe fornito una dimostrazione dell'eliocentrismo di Aristarco. Questo passo di Plutarco fornì una guida a Galileo che, per anni, cercò una

---

[8] Giovanni Alfonso Borelli (1608-1679), allievo di Benedetto Castelli, fu matematico, astronomo, fisico e filosofo. Tentò di estendere i metodi matematici e meccanici anche alla biologia.

[9] Giovanni Alfonso Borelli, *Theoricae Mediceorum Planetarum ex causis physicis deductae,* (traduzione di Lucio Russo).

[10] […] καὶ ἔδει τὴν γῆν ἰλλομένην περὶ τὸν διὰ πάντων πόλον τεταμένον μὴ μεμηχανῆσθαι συνεχομένην καὶ μένουσαν ἀλλὰ στρεφομένην καὶ ἀνειλουμένην νοεῖν, ὡς ὕστερον Ἀρίσταρχος καὶ Σέλευκος ἀπεδείκνυσαν, ὁ μὲν ὑποτιθέμενος μόνον ὁ δὲ Σέλευκος καὶ ἀποφαινόμενος;". Plutarco, *Platonicae quaestiones*, VIII, i = Moralia, 1006C.

dimostrazione della realtà dell'eliocentrismo. L'idea eliocentrica si ritrova anche in Seneca (4 a.C.-65 d.C.) che scrive:

> Abbiamo trovato chi ci ha detto: Sbagliate, pensando che qualche stella interrompa il suo cammino o lo inverta. Non è permesso ai corpi celesti fermarsi né invertire il moto; tutti avanzano: come una volta sono stati lanciati, così procedono; la fine del loro cammino coinciderebbe con la loro stessa fine. Quest'opera eterna ha moti irrevocabili: se dovessero arrestarsi, quei [corpi] ora conservati dal loro moto regolare cadrebbero gli uni sugli altri. Qual è allora il motivo per cui alcuni sembrano tornare indietro?
> L'intervento del Sole e la natura dei percorsi e delle orbite circolari, disposte in modo che per un certo tempo ingannano gli osservatori, impone loro un'apparenza di lentezza: così le navi, sebbene procedano a vele spiegate, sembrano tuttavia star ferme[11].

L'argomento che si trova in Seneca riguarda l'impossibilità delle stazioni planetarie poiché se i corpi si fermassero, cadrebbero gli uni sugli altri. Si tratta evidentemente della stessa idea che abbiamo trovato in Plutarco, dell'equilibrio tra forza di gravità e forza centrifuga. In questo brano c'è inoltre l'idea che l'azione gravitazionale tra i corpi celesti sia reciproca. A questo punto, però, ci si domanda perché dalla Terra i pianeti sembrino avere stazioni e retrogradazioni: questo fenomeno può essere spiegato solo con l'eliocentrismo. Seneca paragona infatti la Terra a una nave in moto, che sembra ferma ai suoi occupanti. La corretta spiegazione può essere trovata solo considerando il moto della Terra, che pure non viene comunemente percepito. Quello della fonte di Seneca è quindi un eliocentrismo dinamico, cioè un eliocentrismo che permette una spiegazione dinamica dei moti planetari, come prodotta dall'interazione gravitazionale con il Sole.
È possibile che quello esposto da Seneca fosse l'argomento della dimostrazione di Seleuco.

4.4 Una parentesi epistemologica: salvare i fenomeni

Chi studia la scienza antica si imbatte spesso nell'espressione "salvare i fenomeni" (φαινόμενα σῴζειν); ad esempio ne parla Archimede a proposito dell'ipotesi di Aristarco. Come nel caso della parola "ipotesi" (vedi lezione 3), anche il termine "fenomeno" è stato banalizzato nel corso del tempo: nell'antichità fenomeno era ciò che veniva osservato; in tempi moderni, con Newton in particolare, diventa un sinonimo di "fatto". In questa transizione è insito un impoverimento epistemologico, che fa dimenticare che il risultato dell'osservazione dipende dall'interazione tra osservatore e osservato: un aspetto essenziale che sarà recuperato solo dalla fisica del Novecento.
La scienza antica procede infatti dall'osservazione dei fenomeni e dopo cerca una teoria deduttiva che sia in grado di "salvarli", ovvero che possa spiegarli in termini economici, deducendoli da pochi assunti (postulati). Ad esempio la forma della traiettoria dell'orbita di un pianeta osservato da Terra è il "fenomeno", che dipende dal moto relativo del pianeta osservato rispetto all'osservatore, che viene "salvato" dalla teoria eliocentrica di Aristarco (che non è direttamente osservabile).

---

[11] "Inventi sunt qui nobis dicerent: 'Erratis, quod ullam stellam aut supprimere cursum iudicatis aut vertere. Non licet stare caelestibus nec averti; prodeunt omnia: ut semel missa sunt, vadunt; idem erit illis cursus qui sui finis. Opus hoc aeternum irrevocabiles habet motus: qui si quando constiterint, alia aliis incident, quae nunc tenor et aequalitas servat. Quid est ergo cur aliqua redire videantur?
Solis occursus speciem illis tarditatis imponit et natura viarum circolorumque sic positorum ut certo tempore intuentes fallant: sic naves, quamvis plenis velis eant, videntur tamen stare." Seneca, *Naturales quaestiones*, VII, xxv, 6-7.

Se pensiamo ad alcune ricerche recenti in fisica, si ha la sensazione che esse procedano esattamente all'inverso: cercando, cioè, i fenomeni in grado di salvare le teorie.

4.5 La teoria delle maree[12]

4.5.1 Una prova "terrestre" dell'eliocentrismo

In che modo è possibile convincersi dell'eliocentrismo in base ai fenomeni naturali che possiamo osservare dalla Terra? Questa domanda, che oggi non ci poniamo più, era invece fondamentale nella logica della scienza antica e potrebbe adesso essere un'idea da recuperare in ambito didattico.

Il fenomeno terrestre che ha costituito la prova più importante dell'eliocentrismo nella storia della scienza è quello delle maree, cui oggi si dedica pochissimo spazio nella scuola. Ricostruire le teorie che sono sorte per spiegare le maree è fondamentale per comprendere lo sviluppo delle idee relative alla gravitazione universale.

Se volessi convincere un aristotelico dell'eliocentrismo, potrei immaginare l'esperimento della frombola citato da Plutarco con un corpo deformabile, per esempio una palla di stracci. Potrei allora verificare che, in conseguenza della doppia azione esercitata dalla corda e dalla forza centrifuga, la palla subisce un allungamento. Ebbene, la stessa deformazione è osservabile nella forma delle maree.

Anche in epoca moderna le maree sono state un argomento col quale si sono misurati i più grandi scienziati: Galileo, Cartesio, Wallis (maestro di Newton), Newton. Si tratta, in effetti, di un fenomeno "ponte" che consente di unificare la fisica terrestre e quella celeste, obiettivo di molta scienza della prima età moderna. I brani di Plutarco sono studiati e approfonditi dagli autori moderni proprio perché espliciti su questo ruolo di cardine del fenomeno.

L'influenza della luna sulle maree è evidente e, se si capisce anche l'azione opposta della forza centrifuga, diviene chiara anche l'uguaglianza delle maree agli antipodi. Che Seleuco avesse studiato il fenomeno delle maree è testimoniato anche da Strabone, che scrive:

> [Posidonio] riferisce dunque che Seleuco, quello del Mare Eritreo, parla di una diseguaglianza o eguaglianza in questi [fenomeni] secondo le variazioni dei segni dello zodiaco; dice infatti che quando la luna si trova nei segni equinoziali le mutazioni [cioè le due maree giornaliere] sono eguali, in quelli solstiziali vi è una diseguaglianza, sia in quantità che in velocità, mentre in ciascuno degli altri segni [l'andamento] è in proporzione alla vicinanza [tra la Luna e i segni suddetti]. Dice però che egli stesso, avendo trascorso diversi giorni nell'Eracleo a Cadice al solstizio d'estate in prossimità del plenilunio, non aveva assistito a tali differenze annuali[13].

È interessante che Strabone indichi in Seleuco colui che si è occupato di maree: come abbiamo visto sopra, proprio Seleuco avrebbe fornito la dimostrazione dell'eliocentrismo e le due cose sono probabilmente connesse.

---

[12] La trattazione che segue è basata in larga parte su Lucio Russo, *Flussi e riflussi – Indagine sull'origine di una teoria scientifica*, Milano, Feltrinelli, 2003.

[13] Φησὶ δ'οὖν Σέλευκον τὸν ἀπὸ τῆς Ἐρυθρᾶς θαλάττης καὶ ἀνωμαλίαν τινὰ ἐν τούτοις καὶ ὁμαλότητα λέγειν κατὰ τὰς τῶν ζῳδίων διαφοράς· ἐν μὲν γὰρ τοῖς ἰσημερινοῖς ζῳδίοις τῆς σελήνης οὔσης ὁμαλίζειν τὰ πάθη, ἐν δὲ τοῖς τροπικοῖς ἀνωμαλίαν εἶναι, καὶ πλήθει καὶ τάχει, τῶν δ'ἄλλων ἑκάστῳ κατὰ τοὺς συνεγγισμοὺς εἶναι τὴν ἀναλογίαν. αὐτὸς δὲ κατὰ τὰς θερινὰς τροπὰς περὶ τὴν πανσέληνόν φησιν ἐν τῷ Ἡρακλείῳ γενόμενος τῷ ἐν Γαδείροις πλείους ἡμέρας μὴ δύνασθαι συνεῖναι τὰς ἐνιαυσίους διαφοράς. (Strabone, *Geographia*, III, v, 9).

4.5.2 Ipparco "scopre" l'America

Vale la pena soffermarsi su un altro brano di Strabone che critica un'idea di Ipparco. Osservando le maree, il grande astronomo ne aveva dedotto l'esistenza di un continente tra le coste atlantiche e quelle orientali dell'Asia:

> Non è verosimile che l'Oceano Atlantico [da Gibilterra all'Asia] sia diviso in due mari, separati tra loro da uno stretto istmo che impedisce la navigazione; è più probabile che si tratti di un unico mare continuo […].
> Ciò [l'ipotesi di un unico mare] si accorda anche meglio con le mutazioni dell'oceano riguardanti i flussi ed i riflussi; ovunque infatti si ha lo stesso tipo di trasformazioni, sia per le alte che per le basse maree, come se fosse prodotto dal movimento dello stesso mare e per la stessa causa. Ipparco non è convincente quando afferma contro questa opinione che né l'oceano subisce del tutto le stesse trasformazioni né, ciò concesso, ne seguirebbe che l'Atlantico sia tutto continuo in cerchio, chiamando a testimone dell'andamento non uniforme [dell'oceano] Seleuco di Babilonia[14].

Secondo Strabone, Ipparco avrebbe dedotto la difformità delle maree (che Strabone nega ma che è invece osservabile) dai dati di Seleuco che aveva avuto modo di osservare le maree dell'oceano Indiano (allora chiamato mare eritreo).

Il brano è interessante sotto almeno due aspetti: primo, testimonia che anche il grande astronomo Ipparco si è occupato di maree, verosimilmente in connessione con i suoi studi sui fenomeni celesti; secondo, è un ottimo esempio di come si possa dedurre un risultato concreto attraverso l'indagine teorica.

4.5.3 All'origine della teoria luni-solare

La principale opera antica sulle maree è, per testimonianze concordi di Strabone, Plinio e Prisciano, quella di Posidonio. Plinio, in particolare, riferendo le idee di Posidonio, fa tre affermazioni importanti: causa delle maree sono Sole e Luna[15]; la forza esercitata dalla Luna è maggiore quando è più vicina; le maree di ampiezza massima si verificano con un piccolo ritardo rispetto a pleniluni e noviluni. L'idea che il Sole eserciti un'influenza sulle maree non è banale.

Prisciano Lidio, autore del VI secolo d.C. emigrato in Persia dopo la chiusura delle scuole filosofiche ateniesi ad opera di Giustiniano, cita Posidonio e riferisce altri dettagli della teoria. L'azione della Luna è maggiore di quella del Sole[16] e la maggior ampiezza delle

---

[14] οὐκ εἰκὸς δὲ διθάλαττον εἶναι τὸ πέλαγος τὸ Ἀτλαντικόν, ἰσθμοῖς διειργόμενον οὕτω στενοῖς τοῖς κωλύουσι τὸν περίπλουν, ἀλλὰ μᾶλλον σύρρουν καὶ συνεχές. [...] τοῖς τε πάθεσι τοῦ ὠκεανοῦ τοῖς περὶ τὰς ἀμπώτεις καὶ τὰς πλημμυρίδας ὁμολογεῖ τοῦto μᾶλλον· πάντη γοῦν ὁ αὐτὸς τρόπος τῶν μεταβολῶν ὑπάρχει καὶ τῶν αὐξήσεων καὶ μειώσεων, ἢ οὐ πολὺ παραλλάττον, ὡς ἂν ἐφ'ἑνὸς πελάγους τῆς κινήσεως ἀποδιδομένης καὶ ἀπὸ μιᾶς αἰτίας. Ἵππαρχος δ'οὐ πιθανός ἐστιν ἀντιλέγων τῇ δόξῃ ταύτῃ, ὡς οὔθ'ὁμοιοπαθοῦντος τοῦ ὠκεανοῦ παντελῶς, οὔτ' εἰ δοθείη τοῦto, ἀκολουθοῦντος αὐτῷ τοῦ σύρρουν εἶναι πᾶν τὸ κύκλῳ πέλαγος τὸ Ἀτλαντικόν, πρὸς τὸ μὴ ὁμοιοπαθεῖν μάρτυρι χρώμενος Σελεύκῳ τῷ Βαβυλωνίῳ. (Strabone, *Geographia*, I, i, 8-9.

[15] "Et de aquarum natura complura dicta sunt, sed aestus mari accedere ac reciprocare maxime mirum, pluribus quidem modis, verum causa in sole lunaque" (Plinio, *Naturalis Historia*, II, 212).

[16] "Horum igitur causas requirens Stoicus Posidonius, ut et per se ipsum explorator factus huiusmodi reciprocationis, discernit magis causam esse eius lunam et non solem". Prisciano Lidio, *Solutiones ad Chosroem*, 72, 10-12 (ed. Bywater).

maree durnte pleniluni e noviluni è dovuta al sommarsi delle azioni del Sole e della Luna[17].
Dunque la teoria luni-solare affonda le sue radici nell'antichità e, in epoca moderna, torna in autori come Dondi (1293 circa-1359)[18] e de Dominis (1560-1624)[19].

4.5.4 Tra Seleuco e Newton
La teoria delle maree rafforza l'idea qualitativa di gravitazione universale, certamente assai più della mela di Newton! Da quanto sopra ricostruito, si può congetturare cosa avesse teorizzato Seleuco di Babilonia, colui che avrebbe dimostrato l'eliocentrismo.
È possibile che nelle sue opere si affrontasse l'effetto della forza centrifuga ed è probabile che la sua dimostrazione dell'eliocentrismo dipendesse dalla teoria delle maree.
Galileo e Sarpi (1552-1623)[20] hanno un'idea diversa delle maree, che tentano di spiegare attraverso i soli moti terrestri di rotazione e rivoluzione. Calcagnini (1479-1541)[21] crede solo alla rotazione della Terra e la ritiene sufficiente a spiegare le maree. Cesalpino (1519-1603)[22] pensa, addirittura, che la Terra sia ferma, salvo per un piccolissimo moto sufficiente a spiegare le maree. Se tutti questi autori sono convinti che causa delle maree siano i moti della terra, nonostante su tali moti abbiano idee diversissime tra loro e nessuno ne riesca a dedurre convincentemente il fenomeno delle maree vi è una sola spiegazione possibile: la relazione tra maree e moti della Terra doveva essere affermata da qualche fonte autorevole.
In effetti Aezio, in un passo che all'epoca di Galileo era attribuito a Pltarco, scrive:

> Seleuco il matematico, facendo muovere anch'egli la Terra, dice che la rivoluzione della Luna *si oppone a un suo moto vorticoso*.[23]

Il contesto riguarda le maree. Seleuco, parlando delle maree, aveva quindi affermato che la Luna indurrebbe nel nostro pianeta un "moto vorticoso". Se pensiamo ancora una volta al fromboliere, è evidente che, per effettuare un lancio, non deve ruotare solo la frombola ma – in piccolo – anche il lanciatore; eppure questa frase è stata completamente travisata.
Le teorie antiche arrivano alla modernità in due pezzi distinti: da un lato l'influenza Sole-Luna, dall'altro i moti della terra. Merito di Newton è quello di riunire le due parti in una teoria complessiva. Tuttavia non è vero che le idee di Newton siano completamente indipendenti da quelle di Galileo. Baliani (1582-1666)[24], discepolo e amico di Galileo, volendo difendere l'idea del suo maestro che causa delle maree fossero i moti della Terra, poiché le maree mostrano un evidente periodo mensile, ipotizzò che oltre ai moti terrestri di rotazione e rivoluzione, fosse necessario introdurre un moto della Terra di

---

17 "Unde in plenilunio et coitu extollitur maxime unda, quoniam et lunae tunc magna adest virtus: in plenilunio enim totum eius in terram conuersum a sole illustratur; in coitu autem illuminata desuper a sole aequalem in ea quae sunt in terra uirtutem plenitudini praestat" (ivi, 73, 4-8).
18 Jacopo Dondi fu medico, astronomo e orologiaio. Scrisse un breve trattato sulle maree.
19 Marco Antonio de Dominis, arcivescovo dalla vita travagliata, si occupò di scienza e, nel 1624, pubblicò E*uripus, seu de fluxu et refluxu maris sententia*, un trattato sulle maree a partire da quelle dello stretto greco Euripo.
20 Paolo Sarpi fu un religioso, teologo, scienziato e polemista. Fu grande amico di Galileo.
21 Celio Calcagnini fu umanista e scienziato. Scrisse un trattato sui moti della Terra e fu probabilmente in contatto con Copernico.
22 Andrea Cesalpino fu filosofo, medico, fisiologo e botanico. Si occupò anche di maree sostenendo la sua peculiare teoria cinetica.
23 Σέλευκος ὁ μαθηματικός, κινῶν καὶ οὗτος τὴν γῆν, ἀντικόπτειν αὐτῆς τῇ δίνῃ φησὶ καὶ τῇ κινήσει τὴν περιστροφὴν τῆς σελήνης· (Doxographi Graeci, 383a, 17-19).
24 Giovanni Battista Baliani fu matematico e fisico ed è noto soprattutto per i suoi studi di meccanica e astronomia.

periodo eguale a quello delle fasi lunari. Egli credette di individuare tale moto ipotizzando che la Terra fosse un satellite della Luna. Le sue idee, non pubblicate, furono citate da Riccioli (1598-1671)[25] nel suo *Almagestum Novum*, dove furono lette da Wallis (1616-1703)[26], che modificò la teoria di Baliani considerando il sistema complessivo Terra-Luna e sostenendo che il punto che ruota attorno al Sole non è né il centro della Terra (come credevano tutti i copernicani) né quello della Luna (come voleva il solo Baliani), ma il baricentro dei due corpi uniti. A questo punto il contributo di Newton si riduce alla ricomposizione di tutti i "pezzi" elaborati in precedenza.
Dal racconto qui riportato emerge come un'idea antica non compresa abbia finito per rinascere sotto la forza della sua stessa validità. Si vede, inoltre, che errore sia stato eliminare le maree dai programmi scolastici perché le teorie che le spiegano possono essere utilmente trasmesse in forma didattica e costituire la base di ragionamenti più ampi. Ricostruire la storia della scienza significa comprendere come si muovono le idee nello spazio e nel tempo.

4.6 Il problema delle fonti

Gli argomenti affrontati in questa lezione mostrano con grande evidenza il tipo di lavoro richiesto allo storico della scienza antica. Poiché, infatti, le opere scientifiche sono quasi tutte perdute, a causa dell'incapacità di comprenderle, diventa spesso necessario rivolgersi a fonti indirette.
Da un lato, gli esempi tratti da Plutarco e Seneca dimostrano come sia imprescindibile la ricerca nei testi letterari o di altro tipo. Come già spiegato, questi testi sono in genere oggetto di ricerca filologica ma, non essendoci un reale contatto tra umanisti e scienziati, le idee scientifiche che contengono rischiano di non venir prese in considerazione.
Allo stesso tempo, spesso è necessario ricostruire le idee dei grandi pensatori dai testi di autori mediocri o glossatori. Simplicio introduce ciò che sa di Ipparco criticandolo nell'ambito di un commento alla *Fisica* di Aristotele; le opere di Plinio – che di scienza non capiva nulla – si sono trasmesse in centinaia di copie mentre quelle note di Archimede sono in un unico manoscritto.
È dunque evidente quali rischi corrano le idee della scienza ellenistica di andare completamente perdute e come sia complesso il lavoro dello storico che voglia tentare di riportarle alla luce.

[25] Giovanni Riccioli fu un astronomo legato al geocentrismo.
[26] John Wallis, matematico inglese, influenzò la scienza di Newton.