

Giancarlo Scalera¹

NOTE STORICHE SUI MOTI DELLA TERRA ESTRATTI DA UNA DISPENSA DIDATTICA

Senza nessuna pretesa di esaustività e di originalità, si vuole ripercorrere rapidamente la storia di cui la rotazione e rivoluzione terrestre è stata protagonista, le controversie che hanno agitato l'argomento sul terreno scientifico, filosofico e religioso, mostrandone anche rami collaterali spesso misconosciuti, fino ad arrivare all'epoca "sperimentale", dal '700 al nostro secolo, caratterizzato quest'ultimo dagli esperimenti geofisici di Michelson.

Il testo, indirizzato a docenti e studenti delle ultime classi liceali, è pensato come una semplice raccolta di materiale di base, quando possibile citazioni di autori delle varie epoche, coinvolti in prima persona nelle discussioni sugli argomenti trattati, legati da semplici considerazioni e commenti. Si spera che lo spirito dei tempi venga estratto direttamente dalle parole dei protagonisti. I testi delle citazioni sono derivati per la maggior parte da traduzioni in italiano che possono trovarsi facilmente in commercio, o da opere storiche italiane o straniere in cui i passi sono riportati. In qualche caso si sono tradotti personalmente i passi da lavori in lingua originale. Ogni capitolo è un breve percorso sul tema trattato, ma non è completamente indipendente dagli altri capitoli, che a volte contengono citazioni che ne aiutano la comprensione.

La dispensa viene offerta nello stato di non completezza in cui è, di opera tuttora in cantiere aperto, nella convinzione che anche nelle presenti condizioni potrà essere di aiuto agli insegnanti a costruirsi una idea generale sui travagli di uno degli aspetti delle scienze della Terra. Nel contempo io credo che possa essere distribuita anche agli studenti come materiale complementare di orientamento, senza che, per le ultime classi dei licei vengano incontrate molte difficoltà di lettura. Lo scopo si potrà considerare raggiunto se i lettori si sentiranno stimolati a leggere le opere da cui le citazioni sono tratte ed a estendere così più in profondità la loro consapevolezza sull'argomento.

Del testo, suddiviso in 21 unità, di cui si riproduce qui sotto l'indice, viengono qui riportate, per le limitazioni di spazio di questi atti, solo le unità 4 e 12 (indicate in grassetto).

Introduzione

1- Le origini 2- Il problema posto da Platone

3- Sistema aristotelico

4- Sistema tolemaico e Terra piatta

5- Forme circolari e sferiche

6- Copernico

7- Proposte ed esperimenti ideali di Galilei e predecessori

8- I "processi" alle nuove concezioni ed alla rotazione terrestre

9- Il parallasse stellare come prova movimento Terra

10- Movimento rotatorio distinguibile da quello traslatorio

11- La Terra come un magnete un effetto della rotazione

12- Newton, la gravitazione, dalla Terra sferica a quella ellissoidale e

oltre

13- Dagli effetti della rotazione alla definizione di metro

14- Pendolo di Foucault

15- Specola vaticana

16- La deviazione apsidale

17- Michelson e Gale e Sagnac, l'era relativista

18- Applicazioni moderne

19- Spostamenti dell'asse di rotazione Poli o Polo?

20- Irregolarità LOD

21- Cronometria e unità di misura del tempo

4 - Sistema tolemaico e Terra piatta

Una volta affermatosi, il sistema di Tolomeo, grazie anche alla sistematicità della sua famosa opera "L'Almagesto", divenne vera e propria ortodossia, contro

¹ Istituto Nazionale di Geofisica, Via Vigna Murata 605, 00143 Roma

la quale opporsi era malvisto. L'astronomia epiciclica tolemaica convisse con le concezioni aristoteliche a sfere eudossiane senza che le differenze venissero sentite come insormontabili. Gli epicicli ed i deferenti divennero un dogma radicato anche nel cristianesimo con la sua necessità di difendere alcune proposizioni riportate nei testi sacri, come ad esempio l'episodio di Giosué che ferma il corso del Sole:

E [Giosué] disse: «Sole, non muoverti verso Gabaon, né tu, Luna, verso la valle di Ajalon». E si fermarono il Sole e la Luna [...]

Tolomeo stesso non era neutrale o puramente convenzionalista rispetto al moto della Terra, che invece escludeva decisamente sulla base di vecchi argomenti aristotelici:

Ci sono alcuni che ... ritengono che ... il cielo sia immobile e la Terra ruoti intorno allo stesso asse da occidente verso oriente, compiendo un giro ogni giorno. ... Ora, per quanto concerne i fenomeni celesti, non c'è forse nulla che si oppone a che la cosa stia secondo questa più semplice congettura; ma sfugge a costoro che, in base a ciò che accade tra noi nell'aria, siffatta tesi non può che apparire del tutto ridicola. Infatti [se la Terra ruotasse], tutti i corpi non appoggiati alla Terra appariranno compiere un solo movimento, quello contrario alla Terra, e non si vedrà mai andare verso oriente una nuvola, né nient'altro che voli o sia scagliato.

Almeno il modello tolemaico prevedeva una sfericità della Terra, ma altre tendenze radicali, tra le quali quella detta "romana", impersonata da Quinto Settimio Tertulliano (155- 245 d.C) e da Lucio Celio Lattanzio (250- 330 d.C) opponevano un netto rifiuto a tutto il sapere greco in favore di un sapere dogmatico derivato dalla Bibbia. Lattanzio aveva del mondo una visione completamente priva di movimento ed attaccava con veemenza gli argomenti avversi a volte senza dare dimostrazione contraria:

Osservavano [i filosofi antichi] il corso degli astri che vanno verso occidente, che il Sole e la Luna sempre tramontano dalla stessa parte e sempre dalla stessa parte sorgono. Siccome poi non riuscivano a capire quale legge governasse il loro corso né in quale modo ritornassero da occidente ad oriente; ed inoltre siccome ritenevano che il cielo si volgesse al basso da tutte le parti, poiché così necessariamente appare per la sua immensa ampiezza, pensarono che il mondo fosse rotondo come una palla e dal moto degli astri dedussero che il cielo gira: così gli astri e il Sole, dopo essere tramontati, per la stessa mobilità del mondo tornano ad oriente. Pertanto foggiarono dei globi di bronzo pressoché simili al mondo e li cesellarono con immagini strane, che essi affermarono essere gli astri. Dunque il fatto che si immaginava il cielo rotondo aveva come conseguenza, che la terra si trovasse rinchiusa nel mezzo della sua cavità. E se la cosa stava così, anche la stessa terra era simile ad una sfera; infatti non può essere che non sia rotondo ciò che è compreso in una massa rotonda. Se poi la terra è rotonda, necessariamente presenta lo stesso aspetto da ogni parte del cielo, cioè innalza monti, distende pianure e mari. E se ciò avviene, ne deriva anche come ultima conseguenza che non ci sia alcuna parte della terra non abitata dagli uomini e dagli altri esseri viventi. Così la rotondità del cielo portò alla scoperta di codesti antipodi pendenti. [... ...] Non saprei proprio che dire di costoro, i quali, dopo essersi sviati una volta, senza alcuna incertezza perseverano nell'errore e difendono sciocchezze con sciocchezze, se non che talvolta io credo che essi filosofeggino per gioco oppure astutamente ed in piena coscienza si assumino il compito di sostenere menzogne, come se volessero esercitare l'ingegno o dimostrarne l'acutezza trattando argomenti assurdi. Io potrei dimostrare con molte prove che in nessun modo può darsi che il cielo sia più basso della terra, se non dovessi finire il libro e non restassero ancora alcuni punti da trattare che sono più necessari alla presente opera.

Durante il Medioevo la compresenza di modelli sferici della Terra usati per motivi astronomici e la necessità di rispettare il dogma produssero una sorta di sintesi imperfetta, della quale si tendeva a coprire le contraddizioni interne, tra il mito biblico della Terra piatta ed almeno due sistemi sferici, quello di Cratete di Mallo (160 a.C.) e quello derivato indirettamente da Aristotele delle quattro sfere

del mondo sublunare. Questa sintesi fu diffusa nella cultura universitaria europea ad opera principalmente del "De sphaera mundi" (inizio sec.XIII) del francescano John of Holywood (ora Halifax, noto come Giovanni di Sacrobosco, 1190-1250), che ebbe più di 40 edizioni fino a metà del '600. Il sistema era costituito dalle quattro sfere concentriche dei quattro elementi ordinate secondo la loro densità, Terra, Acqua, Aria, Fuoco. Sulla sfera terrestre erano situate in posizione diametralmente opposta, quattro isole di cui solo una era abitata, l'Ecumene, o "quarta abitabile". Le altre erano talmente lontane, separate da un oceano così vasto, da essere irraggiungibili. Dato che il pensiero medioevale ammetteva una proporzione di 1:10 tra il volume di un elemento ed il successivo meno denso, la estensione della Ecumene era talmente piccola rispetto al resto delle acque che essa poteva ben essere pensata come piatta, non in contraddizione con i padri della chiesa.

Troviamo precisa eco della natura delle polemiche che tutto questo suscitava nel testo di una dissertazione pubblica di Dante Alighieri, "Quaestio de aqua et de terra", tenuta a Verona nel 1320. Il poeta-filosofo si premurava di confutare l'idea di mare più elevato della terra basata sulla osservazione della sparizione della terra e dei monti oltre l'orizzonte marino, che per alcuni significava una terra non sferica all'interno del perimetro delle coste, ma piatta, quindi più depressa rispetto alla sfera del mare. Ecco alcuni brani significativi di Dante:

La questione fu adunque del sito e della figura o forma di due elementi, l'acqua, cioè, e la terra: e qui dico «forma» quella che il Filosofo [il cosiddetto Aristotele Latino] pone esser la quarta spezie della qualità ne' Predicamenti; e a ciò fu limitata la disputazione, come inizio alla ricerca del vero, se cioè l'acqua nella sua sfera, ossia nella sua natural circonferenza, fosse in qualche punto più alta della terra che emerge dalle acque e si chiama vulgarmente quarta abitabile: e si argomentava che questo fosse per molte ragioni [... .. Dante ne elenca cinque]

La terza ragione si era: Ogni opinione che si oppone al senso è falsa. Pensar che l'acqua non sia più alta della terra val come contraddire al senso: dunque è mala opinione. La prima si diceva esser manifesta pel Commentatore [Averroé] sopra il terzo libro "Dell'Anima" ; l'altra, ovvero la minore, per la sperienza de' navigatori che, stando in sul mare, veggiono i monti più bassi di esso: e ne fan prova dicendo che se salgon su l'albero li veggiono, non già se rimangon su la nave. E questo sembra accadere per questo: che la terra è d'assai inferiore e depressa rispetto al livello del mare.

E nel quarto luogo si argomentava così: se la terra non fosse inferiore all'acqua stessa, la terra sarebbe del tutto priva di acque, almeno nella sua parte scoperta, della qual si discute: né però vi sarebber fontane, né fiumi, e né laghi: ciò che non è come si vede. Dunque l'opposto che ne conseguiva è la verità: cioè che l'acqua debb'esser più alta della terra. E per questo si dimostrava la conseguenza: che l'acqua, per sua natural disposizione, corre all'in giù; e poiché il mare è l'origine di tutte le acque [...] se il mare non emergesse sopra la terra, l'acqua non muoverebbe verso la terra, però che ogni natural moto dell'acqua vuole che il punto d'onde essa muove sia necessariamente più alto.

[... ..]

E con queste ragioni pertanto, e con altre che il tacer qui è bello, si studian di provar vera la propria sentenza coloro che tengono l'acqua come più alta di questa terra scoperta o abitabile, se bene a ciò si oppongano e il senso e la ragione. Per via del senso, in vero, vediamo per tutta la terra scendere i fiumi al mare, sia verso il mezzogiorno sia verso il settentrione; sia verso l'oriente che verso l'occidente; e questo mai non sarebbe, se le scaturigini de' fiumi e tutto il loro alveo non fosser più alti della superficie de' mari. E la ragione se ne vedrà appresso; e questo si proverà per molti modi.

L'Alighieri passa poi a provare con lunghi ragionamenti che la terra è sferica e che la sfera dell'acqua è concentrica a quella della terra, ma trova difficoltà a dare conto della esistenza delle montagne; per la qual cosa giustifica così:

E però, dovendo ogni natura sottostare alla intenzione della natura universale, fu necessario che la terra, oltre alla semplice natura che la trae al basso, avesse in sé un'altra natura che la facesse obbediente all'intendimento della universale, come il lasciarsi levare in parte dalla virtù dei cieli, quasi seguendo un comando, [... ..]

E per questo, sebbene la terra tenda, secondo la sua semplice natura, al centro ugualmente, [... ...] pure, secondo una sua certa altra natura, si lascia levare in parte, [... ...]

Dante anticipava a suo modo il principio di isostasia, anche se nelle conclusioni ricorrerà a influssi esterni irregolari, dovuti alla irregolarità della volta stellata. Nel commiato alla dissertazione, a testimonianza dell'asprezza della polemica del tempo, Dante lancia frasi ironiche contro coloro la cui presenza sarebbe stata opportuna (certo i sostenitori di Sacrobosco) ma che avevano invece significativamente disertato la sua conferenza.

Più tardi, Cristoforo Colombo, difensore di un modello sferico realistico del mondo, subì le proteste epistolari del presidente della commissione reale di valutazione, il frate Talavera, quando i reali di Spagna accettarono il progetto del viaggio contro le conclusioni della commissione stessa: a dire del frate era peccato mortale tentare di oltrepassare i limiti fissati da Dio al mondo. Colombo stesso aveva in mente una immagine del mondo con forti residui della mitologia medioevale se le caratteristiche del delta dell'Orinoco gli fecero sospettare che quella tumultuosa acqua dolce proveniva dalla sommità a forma di pera del mondo, il Paradiso terrestre, che troviamo anche nella Divina Commedia dantesca. Solo in seguito trae conclusioni corrette: "E io dico che se non è dal paradiso terrestre che viene questo fiume, allora è da una terra infinita, situata nel mezzogiorno, e della quale finora nessuno ha saputo niente". In ogni caso, la discussione sulla forma della Terra rimase attuale ben dopo i viaggi di Colombo (1492) e Magellano (1519), e anche Copernico dovette, nella sua opera, confutare fermamente le idee puriste di Terra piatta difese negli scritti dell'influente padre della chiesa Lattanzio (250-325 d.C.). Si legge nel *De revolutionibus*:

Non è infatti ignoto che Lattanzio, per altri aspetti scrittore famoso, ma non ferrato nelle scienze matematiche, parli in modo del tutto puerile della forma della Terra, insieme burlandosi di coloro che sostenevano che la Terra ha forma di sfera. E perciò non deve sembrare strano agli esperti se gente di questo tipo prenderà in giro anche noi. *Mathemata mathematicis scribuntur [... ...]*

Sul perché ci fossero tante resistenze alla accettazione dell'idea di terra sferica, bisogna considerare in cosa consistesse l'istruzione pubblica del tempo. La cultura veniva diffusa ai ceti "istruiti" tramite precettori, per la maggioranza ecclesiastici, basandosi su trascrizioni di manoscritti o sulla memoria dei tutori: i libri a stampa non esistevano ancora. La decisione che un figlio si dedicasse agli studi era associata spesso al suo entrare in un ordine monastico, o in un collegio religioso dove molto probabilmente avrebbe preso i voti, o in una università dove spesso arrivava già associato ad un ordine e nella quale la stragrande maggioranza del corpo accademico non era laico. La tradizione e le Scritture dominarono così nettamente la cultura medioevale, realizzando infine quelle forme di manoscritti chiamati *Quaestio*, tipici della Scolastica Aristotelica, in cui varie ipotesi venivano discusse, considerandole seriamente come modelli a volte indicati come plausibili, ma alla fine messe da parte, scartate o sospendendone il giudizio, rispetto a quanto scritto nei testi tradizionali.

12 - Newton, la gravità: dalla Terra sferica a quella ellissoidale e oltre

Prima di Newton non è facile trovare cenni della possibile azione della forza centrifuga dovuta alla rotazione terrestre sulla forma del pianeta. Il solo accenno chiaro alla forza centrifuga applicata al moto della Luna lo troviamo in Plutarco (50-120 d.C.); il suo argomento è fortemente anticipatore della fisica newtoniana ma non viene applicato alla forma terrestre:

Eppure la Luna è aiutata a non cadere proprio dal suo movimento e dall'impeto della sua rivoluzione, esattamente come al proiettile teso nella fionda la caduta è impedita dal vorticoso moto circolare; infatti ogni oggetto è dominato dal suo moto naturale finché non sia deviato da qualcos'altro. Ed è così che il peso non trascina giù la Luna: perché la sua azione è frustrata dal moto rotatorio [...].

Una obiezione che fu difficile superare e che forse ebbe una influenza pesante nell'impedire l'unificazione della fisica terrestre e celeste è quella che si trova in

Giovanni Buridano (1300- 1358) in forma di una semplice constatazione accessibile a tutti, con la quale era difficile non concordare: Buridano argomenta che la caduta dei gravi non può essere causata da una forza simile a quella dei magneti e conseguenza implicita è che noi non avremmo nulla di analogo con cui sperimentare su un tavolo di laboratorio la precedente asserzione di Plutarco. Scrive Buridano nelle sue "Questioni":

Concludo dunque che i moti naturali dei corpi gravi e leggeri non sono più veloci grazie alla maggiore vicinanza al luogo naturale, ma grazie a qualcos'altro che è o vicino o lontano ma che è variato in ragione della lunghezza del moto. Né si tratta di qualcosa di simile al caso della calamita e del ferro, poiché quando il ferro si trova più vicino alla calamita subito comincia a muoversi più velocemente che si trovasse lontano; non così è invece per il grave rispetto al suo luogo naturale.

Non è facile valutare quanto la precedente affermazione abbia frenato la consapevolezza scientifica successiva, ma ci sono prove che gli scritti di Buridano godessero di grande e diffuso credito e si cercasse di confermare o confutare i suoi argomenti.

La forza centrifuga entra con piena consapevolezza del come essa agisce da equilibratore dei moti planetari, con la cosmologia di Giovanni Alfonso Borelli (1608-1679). Mentre nel '200, per esempio con Pietro Peregrino e tanti altri, ancora si pensava di carpire i segreti della fisica del mondo "superiore" per costruire macchine a moto perpetuo nella regione sublunare, con Borelli, nel 1666, il pensiero per la prima volta percorre compiutamente il percorso inverso: le forze fisiche, attrattive e centrifughe, sperimentabili in semplici apparati terrestri, sono generalizzabili ai moti celesti, facendo piazza pulita anche di quegli strani oceani concentrici di etere di diversa densità su cui galleggerebbero i pianeti (in analogia ad esperimenti condotti all'accademia del Cimento con strati di liquidi di diversa densità alle cui interfacce si facevano galleggiare sfere di vetro più o meno cave). Lo scienziato prima svolge un ragionamento simile a quello di Plutarco e poi, superando finalmente la obiezione di Buridano, descrive una esperienza in cui una sferetta di ferro è posta su un sughero che galleggia intorno ad un magnete:

Supponiamo infatti che i pianeti abbiano un certo «appetito naturale» ad unirsi al globo del mondo che essi circondano col loro moto, e che tendano con tutte le loro forze ad avvicinarsi ad esso: i pianeti al Sole e gli astri medicei a Giove. Per di più è certo che il movimento circolare conferisce al mobile un impetus [forza centrifuga] che lo spinge ad allontanarsi dal centro della sua rivoluzione. Supporremo quindi che il pianeta tenda ad avvicinarsi al Sole e che allo stesso tempo, mediante l'impetus del movimento circolare, esso accolga l'impetus ad allontanarsi dal centro del Sole. Ne risulterà allora, finché le forze contrarie restano uguali (l'una è compensata infatti dall'altra) che il pianeta non può diventare né più vicino, né più lontano dal Sole oltre uno spazio certo e determinato: perciò apparirà come in equilibrio e galleggiante. [...]

.....

[...] e poiché la pallina di ferro I nei tempi successivi, anzi in tutti gli istanti di tempo, persevererà nella stessa tendenza, ossia di tanto si avvicinerà al magnete F, di quanto il moto circolare continuerà a respingerla, ne seguirà che per tutto il circuito la pallina di ferro conserverà sempre la stessa distanza dal magnete e dal centro D e perciò descriverà una circonferenza di cerchio senza alcuna deviazione [...].

Borelli riuscì anche a dedurre correttamente la forma ellittica delle traiettorie planetarie, ma niente affermò su una possibile forma ellissoidale della Terra prodotta da quelle stesse forze centrifughe che per lui grande ruolo avevano nello stabilizzare le traiettorie planetarie.

Copernico, il secolo prima, si credeva in dovere nel "De Revolutionibus" di confutare la obiezione di Tolomeo al moto diurno della Terra secondo la quale il pianeta si disgregherebbe sotto l'azione di enormi forze centrifughe. Secondo l'astronomo polacco la stessa obiezione si applicherebbe ai cieli che avrebbero, data la lontananza, una velocità infinitamente maggiore:

Invano, dunque, Tolomeo teme che la Terra si disperda e [con essa] tutte le cose terrestri nella rivoluzione che avviene per azione della natura, che è ben diversa da quella dell'arte o da quella che può derivare per effetto dell'ingegno umano. Ma perché non si teme ciò, e anzi di più, per il mondo, il cui movimento deve essere tanto più veloce, quanto maggiore è il cielo della Terra? O forse il cielo è divenuto tanto immenso perché il movimento con indicibile veemenza lo allontana dal centro, e crollerebbe se stesse fermo? Certamente, se questa ragione fosse valida, anche la grandezza del cielo si allontanerebbe all'infinito. Infatti, quanto più per lo stesso impeto del movimento sarebbe portato in alto, tanto più veloce sarebbe il movimento, per la circonferenza sempre crescente che dovrebbe percorrere nello spazio di ventiquattro ore: e viceversa per il crescente movimento crescerebbe l'immensità del cielo.

Copernico, a fronte di questa precisa nozione di forza centrifuga e della confutazione della sua applicazione ai cieli, non fa seguire una stima nemmeno qualitativa degli effetti reali ma non distruttivi della forza centrifuga sul corpo della Terra che è ancora evidentemente immaginato perfettamente rigido. Invece Galileo Galilei parla nel suo dialogo della forza centrifuga a cui è soggetta la Terra, e ne dà una stima ... ma solo per concludere che essa deve essere trascurabile, trattandosi appena di una sola rotazione al giorno:

... la vertigine conferisce al mobile impeto verso la circonferenza, quando il moto sia veloce [...] e così si potrebbe stimare che la vertigine della Terra non più fusse bastate a scagliare pietre, che qualsivoglia altra piccola ruota che tanto lentamente si girasse, che in ventiquattr'ore desse una sola rivolta.

Troviamo invece una stupefacente e precisa anticipazione degli effetti di deformazione dovuti al moto diurno in una lettera del 1603 di Edmund Bruce a Keplero (Koyré p.347):

Elementarem mundum nobis propium et particularem non puto; nam aer est et inter ipsa corpora quae stellas vocamus; per consequens et ignis et aqua et terra: Terram autem quam calcamus nostris pedibus, nec rotundam nec globosam esse credo, sed ad ovalem figuram propius accedere. Nec Solis nec stellarum lumen ex materia sed potius ex eorum motu procedere et demanare iudico: planetae vero a Sole eorum lumen assumunt: quia tardius moventur et propriis motibus impediuntur.

Nel 1673 fu Huygens a pubblicare per primo una formulazione matematicamente esatta della forza centrifuga, che si ritrova anche in un suo manoscritto mai dato alle stampe, "De vi centrifuga" del 1658. In Newton una formulazione simile si ritrova solo in un manoscritto del 1664 e poi nei Principia del 1687 in cui la discussione fisica era più approfondita. A causa della sua rotazione, e della forza centrifuga che si sviluppava opponendosi alla gravità, la Terra doveva essere più gonfia all'equatore, anzi anche la accelerazione di gravità è minore all'equatore, com'era ben noto ai commercianti di preziosi che lucravano sul fenomeno. Il ragionamento di Newton era basato su un esperimento ideale in cui due lunghi pozzi pieni d'acqua attraversavano la Terra passando per il suo centro, orientati uno Nord-Sud e l'altro sul piano equatoriale:

Per qual cosa dico che, in accordo con la regola aurea, se la forza centrifuga $\frac{4}{505}$ farà sì che l'altezza dell'acqua nel ramo ACca superi l'altezza dell'acqua nel ramo QCcq di una centesima parte dell'intera altezza, la forza centrifuga $\frac{1}{289}$ farà sì che la differenza di altezza nel ramo ACca sia soltanto la parte $\frac{1}{289}$ dell'altezza nell'altro ramo QCcq. Dunque, il diametro della Terra all'equatore sta al diametro della stessa attraverso i poli come 230 a 229. Perciò, poiché il semidiametro medio della Terra, secondo la misura di Picard è di 19615800 piedi di Parigi, o di 3923,16 miglia ... la Terra sarà più alta all'equatore che ai poli di una differenza di 85472 piedi, o di miglia $17 \frac{1}{10}$. [...] Verrà, anzi, mostrato mediante esperimenti con i pendoli,, come, a causa della rotazione diurna della Terra, la gravità venga diminuita all'equatore, e come perciò la Terra sia in quel luogo più alta che ai poli.

Newton era a conoscenza di questi effetti della rotazione sulla gravità da alcune misurazioni dei ritmi di oscillazione dei pendoli a diverse latitudini, tra le quali la osservazione di Edmond Halley che, nel suo viaggio a St.Helena per catalogare le stelle del sud, trovò che l'orologio a pendolo portato con sé da Londra andava in ritardo sull'isola, cosa che condusse l'astronomo alla giusta conclusione che ci fosse una differenza nella forza di gravità tra i due luoghi.

Bisognava comunque dare prova sperimentale che la forma della Terra fosse appiattita ai poli a causa del suo moto, e questo poteva dedursi dalla diversa lunghezza del grado di meridiano alle alte latitudini rispetto al grado alle basse latitudini.

Argomenti che trattavano di possibili variazioni della lunghezza dei gradi risalivano alle discussioni sorte sulle prescrizioni aristoteliche delle proporzioni 1:10 dei quattro elementi, da cui discendeva che la Terra doveva essere raccolta in una sfera molto più piccola di quella dell'acqua e che i centri di queste sfere dovevano essere necessariamente diversi per permettere le terre emergere. La sfera più grande, quella dell'acqua, doveva allora avere gradi di meridiano più lunghi. Vanamente si cercò questa differenza, e la risposta negativa venne, anche se non avrebbe potuto, dalla esperienza dei naviganti, come leggiamo in un brano del 1593 del "In sphaeram Ioannis de Sacrobosco commentarius" di Cristoforo Clavio (1537-1612):

[... ...] Infine, poiché sia gli autori di una dottrina sia quelli dell'altra ammettono che l'acqua è molto più estesa della terra, devono necessariamente anche ammettere che ad ogni grado di superficie di mare corrisponde un numero di stadi o di miglia maggiore che ad un grado di superficie di terra. Poiché l'orbe terrestre è diviso nello stesso numero di gradi del globo acqueo e ordinariamente anche di tutto il circolo celeste. Per questo motivo se l'acqua fosse più estesa della terra i gradi dell'acqua dovrebbero essere più ampi di quelli della terra e, di conseguenza, dovrebbero contenere più stadi o miglia di questi ultimi. Ma tutti i navigatori affermano il contrario, loro che hanno potuto constatare molte volte per esperienza che vi sono tanti stadi o miglia in un grado sulla superficie di terraferma quanti ve ne sono in un grado sulla superficie del mare.

Nella pur giusta confutazione Clavio sopravvalutava troppo la precisione delle stime dei naviganti, che non potevano uscire dal circolo chiuso di una misurazione delle distanze latitudinali, sul meridiano, per via astronomica, identica a quella adottata sulla Terra o da stime assai imprecise basate sulla velocità del naviglio ottenuta con metodi empirici.

Esisteva già una misurazione di meridiano eseguita nel 1527 dal medico francese Jean-François Fernel (1497-1558) tra Parigi e Amiens ottenuta da declinazioni solari e conteggi di giri di ruota di carrozza per il calcolo delle distanze. Il valore ottenuto fu abbastanza buono: circa 110 Km. Più tardi il matematico Richard Norwood (1590-16??) eseguì la misura tra Londra e York con osservazioni dell'altezza del sole con sestanti. Un metodo molto simile a quello di Posidonio del I-II secolo a.C., che era anzi tanto semplice concettualmente che dimostra quanto i modelli cosmologici e filosofici influenzino le azioni umane: le riflessioni e le misurazioni ripresero dopo tanti secoli solo a seguito dei viaggi colombiani e di Magellano in quanto solo questi dettero certezza pratica al modello sferico. Le due precedenti furono le prime misurazioni della dimensione terrestre in senso moderno dopo quella di Eratostene, Posidonio e del califfo arabo Abdullah al Mamum (786-833 d.C). Norwood nel suo manuale di navigazione del 1676 scrive:

L'11 giugno 1635, feci una osservazione, con un arco di sestante di più di 5 piedi di raggio, dell'altezza meridiana del Sole nei pressi del centro della città di York, e trovai per quella data che la altezza apparente del Sole a mezzogiorno era 59 gradi e 33 minuti. Spostandomi a quel tempo da lì a Londra, con altre misurazioni trovai che il parallelo di York dista dal parallelo di Londra 9149 catene ...Precedentemente, l'11 giugno del 1633, io avevo anche osservato l'altezza meridiana apparente del Sole a Londra, nei pressi della Torre, trovandola essere 62 gradi e 1 minuto.

Ricavò così il grado di meridiano in 367.250 piedi e quindi la circonferenza terrestre, ma il suo metodo, così come quello del francese, non era

sufficientemente preciso per apprezzare la ellitticità. Nel 1669, l'Accademia Francese delle Scienze provò dapprima a ricavare informazioni dalle misure eseguite dall'abate Jean Picard (1620-1682) in Francia sul meridiano Malvoisine-Amiens. Gli strumenti geodetici usati da Picard per determinare la dimensione della Terra erano all'avanguardia per i suoi tempi ma la loro precisione ancora bassa per lo scopo. Picard usò per la prima volta il telescopio per le collimazioni astronomiche ma non poteva essere al corrente del fenomeno della aberrazione della luce che fu scoperta solo nel 1727 da James Bradley (1693-1762), di cui si doveva apportare correzione nelle osservazioni. Dopo la morte di Picard l'Accademia Francese delle Scienze incaricò Domenico Cassini (1625-1712) ed il figlio Giacomo (1677-1756) di continuare e concludere il lavoro. I Cassini lavorarono dal 1693-1718, estendendo a nord fino a Dunkirk ed a sud fino al confine spagnolo le triangolazioni di Picard, ed infine i calcoli diedero, non per loro colpa, il risultato inaspettato che il meridiano fosse più corto a nord che a sud, dando della Terra una immagine allungata nel senso dell'asse di rotazione. Nacque così la famosa disputa sulla forma schiacciata od oblunga del nostro pianeta che vide coinvolte principalmente Francia ed Inghilterra, Cartesiani e Newtoniani, gravità a vortici e "Hypotheses non fingo".

Voltaire nelle sue famose "Lettere inglesi" fa rivivere l'atmosfera del tempo:

Un francese che arriva a Londra trova le cose veramente cambiate, in filosofia come in tutto il resto. Ha lasciato il mondo pieno; lo trova vuoto. A Parigi, l'universo lo si vede composto di vortici di materia sottile; a Londra, non si vede niente di tutto ciò [...]. Per i vostri cartesiani, tutto avviene per un impulso che non comprendo affatto; secondo Newton per un'attrazione di cui non si conosce meglio la causa. A Parigi, la Terra ve la immaginate fatta come un melone; a Londra, essa è appiattita ai due lati [poli].

La concezione cartesiana sulla rotazione terrestre era infatti, sebbene razionale e materialista, alquanto qualitativa. Cartesio scriveva nel suo "I principi della filosofia":

Ma la Terra, poiché non ha intorno a sé il vuoto e non è per sé dotata della forza che la fa girare in ventiquattr'ore intorno al proprio asse, ma è trasportata dal corso della materia del cielo che la circonda e che penetra da ogni parte nei suoi pori, va considerata come un corpo privo di movimento.

Conclusione appunto che per lo meno non permetteva l'esistenza di forza centrifuga capace di produrre rigonfiamenti equatoriali. Di seguito Cartesio prosegue:

È anche da ritenere che la materia del cielo non sarebbe né pesante né leggera nei suoi confronti [della Terra] se avesse solo l'agitazione che la fa girare in ventiquattr'ore insieme alla Terra; ma avendone molta di più di quanta non se ne richieda per produrre quest'effetto, impiega il di più a girare più velocemente nello stesso senso, e a compiere, da ogni lato, diversi altri movimenti che, non potendo proseguire in linea retta come se la Terra non fosse sulla loro strada, non solo si sforzano di renderla rotonda o sferica, come si è detto per le gocce d'acqua, ma posseggono più forza d'allontanarsi dal suo centro di rotazione di quanta non ne abbiano le sue parti; perciò la materia celeste è leggera nei loro confronti.

Nel trattato "Il Mondo" Cartesio dice:

Ma ora desidero che consideriate quale è il peso di questa Terra, vale a dire la forza che unisce tutte le sue parti, e le fa tendere tutte verso il centro, ciascuna più o meno a seconda che sia più o meno grossa e solida; e consiste nel fatto che le parti del piccolo cielo [vortice] che la circonda, ruotando molto più velocemente di quelle della Terra intorno al suo centro, tendono anche ad allontanarsene con più forza, e di conseguenza a respingere le seconde verso il centro.

Da questi concetti francamente poco chiari può dedursi anche un affusolamento della Terra nella direzione dei poli, ed anche Jean Bernoulli trasse questa conclusione; di qui la disputa sul terreno dei testi filosofici con i newtoniani. La lotta era chiaramente impari, dalla parte di Newton c'era un

metodo deduttivo matematico basato su dati osservabili, misurabili, di cui l'inglese aveva grande bisogno. Non altrettanto Cartesio che in questa non verificabilità delle sue idee mostra parecchi caratteri insospettabilmente idealistici: un cogito ergo sum che diventa "li cogito quindi (essi) sono". Come alcuni lo accusavano, Cartesio si era troppo lasciato andare alla costruzione di un sistema, certamente senza far ricorso a spiriti divini ma solo alla ragione umana, e questo è il suo grande insegnamento, ma obiettivamente, leggendo i suoi scritti, si respira un'aria aristotelica, anche nello stile del fraseggiare. A giudizio di Voltaire (1777):

EVEMERO: Chi ha fatto più fracasso dopo il mio etrusco [Galileo Galilei] è stato un gallo, di nome Cardestes [anagramma di Descartes]: era un gran bravo geometra, ma un cattivo architetto, perché ha costruito un edificio senza fondamenta, e questo edificio era l'universo. Per costruirlo, non chiedeva a Dio altro che un po' di materia: ne ha fatto dei dati a sei facce e li ha spinti in modo che, nonostante l'impossibilità di muoversi, a un tratto hanno prodotto soli, stelle, pianeti, comete, terre e oceani. Non c'era una parola di fisica, né di geometria, né di buon senso in quella storia romanzesca, ma i Galli allora non ne sapevano di più [...].

Newton era ben consapevole delle limitazioni generali delle concezioni cartesiane, ai cui Principi della filosofia e al cui metodo oppose i suoi Principia e la sua feconda mancanza di metodo, ma si impegnò a trovare contraddizioni che escludessero senza ombra di dubbio la possibilità dei vortici:

L'ipotesi dei vortici è soggetta a molte difficoltà. Perché un qualsiasi pianeta, condotto il raggio verso il Sole, descriva aree proporzionali ai tempi, i tempi periodici delle parti dei vortici dovrebbero essere in ragione del quadrato delle distanze dal Sole. Perché i tempi periodici dei pianeti siano nella proporzione della potenza $3/2$ delle loro distanze dal Sole, i tempi periodici delle parti dei vortici dovrebbero essere proporzionali alla potenza $3/2$ delle loro distanze.

L'Accademia Francese delle Scienze nel 1733 prese ancora in mano la situazione e decise di derimere la disputa organizzando le famose spedizioni in Perù (1735-1749), affidata a Le Condamine (1701-1774) e Bouguer (1698-1758), ed in Lapponia (1736-1737) affidata a Maupertuis (1698-1759) e Clairaut (1713-1765). Ora il fenomeno della aberrazione della luce era conosciuto e permetteva una più accurata determinazione della posizione delle stelle. Nel Perù spagnolo le operazioni furono seguite da due ufficiali ispettori che nei loro resoconti premettevano sempre una formula sulla semplice *ipotesi* eliocentrica. Tornò per prima la spedizione del nord e pubblicò i risultati che già dal confronto con il meridiano francese risultavano in accordo con lo schiacciamento polare.

Intanto una parte di cartesiani, definiti "illuminati", cercarono di accordare il sistema del filosofo francese alla fisica newtoniana, attribuendo particolari proprietà ai vortici materiali. Stimarono che effettivamente doveva esistere lo schiacciamento polare, e dai loro calcoli il rapporto tra la misura dell'asse polare e quella del diametro equatoriale risultava $576/577$, minore di quello calcolato dai newtoniani di $230/231$. Alexis Claude Clairaut (1713-1765), appena tornato dalla Lapponia si premurò di effettuare il confronto dei dati e scrisse:

Ora siccome il rapporto degli assi, che dà il confronto del grado misurato in Lapponia con quello misurato in Francia, è troppo lontano da quello di 576 a 577 per potervi essere ridotto supponendo nelle osservazioni solo leggeri errori che vi possono essere occorsi, bisogna dunque abbandonare tutte le ipotesi che conducono a questo rapporto.

[... ...]

...tutte le esperienze fatte sulla lunghezza del pendolo, ci mostrano che la diminuzione del peso dal polo all'equatore è maggiore di $1/230$, se ne deve concludere che la differenza degli assi è minore di $1/230$. Resta dunque solo da sapere se questa conclusione si accordi colle misure attuali; ciò potremo fare dopo il ritorno degli accademici che sono andati al Perù; infatti la grande differenza che deve correre tra il grado da loro misurato e quello che noi abbiamo misurato in Lapponia, deve darci il vero rapporto degli assi.

Al ritorno della seconda spedizione si trovò che effettivamente il meridiano del Perú misurava circa settecento tese (circa 1300 metri) meno di quello lappone, in accordo alle previsioni dell'inglese. L'ipotesi della rotazione e la filosofia naturale di Newton trovava nuova conferma, ma con un pizzico di fortuna: analisi del secolo successivo mostrarono che la spedizione in Lapponia aveva accumulato errori in eccesso in quantità tale che se malauguratamente fossero stati per difetto la questione della forma e rotazione della Terra non sarebbe stata risolta.

Gli effetti di tutto questo operare si risentirono anche nella narrativa filosofica dell'epoca. In "Micromega" la squadra di geodeti francesi viene felicemente parodiata da Voltaire:

I due viaggiatori [della stella Sirio] erano così disposti a credere che non esistessero anime nel nostro domicilio [sul pianeta Terra], quando, con l'aiuto della lente, videro galleggiare sul mar Baltico qualcosa di più grosso di una balena. Tutti sanno che in quell'epoca un branco di filosofi ritornava dal circolo polare dove erano stati a fare osservazioni che nessuno prima di loro aveva mai pensato di fare. [... ...]

«Poiché siete nel piccolo numero dei saggi,» [il viaggiatore] disse a quei signori, «[...] ditemi, vi prego, di che cosa vi occupate.»

«Sezioniamo mosche,» disse lo scienziato, «misuriamo meridiani, accumuliamo cifre, e siamo d'accordo su due o tre argomenti che comprendiamo, ma discutiamo su due o tremila che non comprendiamo per nulla.»

Dopo la proclamazione dei risultati delle due spedizioni, Voltaire, che seguiva tutta la vicenda, soggiunse:

L'Accademia ha chiuso la questione. Essa ha schiacciato la Terra ed i Cassini.

Si sommarono, in quel periodo pionieristico di piccoli esseri che misuravano le enormità che li circondavano, intrecciandosi indissolubilmente, ben tre prove dei moti terrestri: il rigonfiamento equatoriale, la variazione della gravità con la latitudine e la aberrazione astronomica della luce dovuta al moto orbitale. Questi argomenti di carattere globale, come anche la ben nota presenza dei venti alisei e delle maree, non erano tuttavia considerati probanti perché nulla vietava al mondo di poter essere come era per altre cause. Data la incertezza delle esperienze sulla deviazione verso Est della caduta dei gravi, la prova diretta sperimentale arrivò solo a metà '800 con lo spettacolare pendolo di Foucault.

Infine si deve ricordare che all'epoca "sferica" e poi "ellissoidale" fece seguito quella "geoidale" in cui si riconobbero i discostamenti dalla perfetta ellissoidalità della figura della Terra. Forse il primo a riconoscere la possibilità di forti discostamenti da una forma regolare della Terra, basandosi sfortunatamente su una correlazione tra dati in realtà impossibile, fu Cristoforo Colombo. Sin dal primo viaggio il grande navigatore si accorse del forte cambiamento di declinazione dell'ago della bussola oltrepassando le Azorre, ed in più, durante il terzo viaggio, osservò nel delta dell'Orinoco il formarsi di alte muraglie d'acqua dovute all'imponente portata del fiume che si scontrava con i flussi delle maree. Collegando questi fatti con la osservazione della rotazione apparente della stella Polare di 5° (all'epoca; oggi è minore), osservazione più facile all'equatore quando questa è radente all'orizzonte, ne dedusse di trovarsi nei pressi di una parte gibbosa del globo, le pendici del Paradiso Terrestre, e che quindi la Terra avesse la forma, dalla parte delle sue Indie, di un seno di donna:

Ho sempre letto che il mondo - acqua e terre - è sferico e le autorità e gli esperimenti di Tolomeo e di altri a questo proposito provano e insegnano questo anche attraverso le eclissi di luna e per le altre dimostrazioni che fanno da Oriente a Occidente e attraverso l'elevazione del Polo da nord a sud. Trovai ora però che queste idee contrastavano con quello che vedevo e dovetti riconsiderare questa immagine del mondo e giunsi alla conclusione che non fosse sferico come era stato descritto, ma a forma di pera, rotondo quindi, salvo il punto dove si trova il picciolo, che è prominente; o ancora come una sfera sulla quale si trova come un capezzolo di donna, e penso che la parte formata da questo capezzolo sia la più elevata e la più vicina al cielo, e posta sotto la linea equinoziale in questo mare Oceano, agli estremi limiti dell'Oriente. Con i limiti dell'oriente intendo dire il punto dove finiscono le terre e le isole, ed io attribuisco tutti i fenomeni di cui

ho parlato a proposito della linea che passa a cento leghe dalle Azzorre, da nord a sud, al fatto che le navi andando verso occidente cominciano qui a salire dolcemente verso il cielo, e per questo la temperatura si fa piú fresca, l'ago magnetico, per effetto di questa dolcezza, declina di un quarto e piú si va verso ovest e piú ci si innalza, piú l'ago declina verso nord-ovest, ed è questa elevazione che provoca la confusione nell'osservazione della rivoluzione compiuta dalla stella polare con le Guardie [tre stelle dell'Orsa Minore], e piú si passerà vicini alla linea equinoziale, piú si salirà e maggiore sarà la differenza fra i rapporti fra queste stelle e le loro rivoluzioni. Tolomeo e gli altri sapienti che descrissero le cose di questo mondo credettero che fosse sferico, ritenendo che questo emisfero fosse uguale a quello nel quale si trovavano [.....]. Per quanto riguarda il nostro emisfero, posso ammettere che sia sferico come dicono. Ma per quest'altro, sostengo invece che si presenti come una pera con un'estremità rilevata, oppure come una semisfera con una sporgenza simile al capezzolo di una donna. [.....]

Ho già detto cosa io pensi di quest'emisfero e della sua forma, e io credo che se passassi sotto la linea equinoziale, arrivando al punto piú elevato, troverei una temperatura ancora piú mite e altre diversità nelle stelle e nelle acque. [.....] Sono invece convinto che là si trovi il Paradiso terrestre, dove nessuno può arrivare se non per volontà divina. [.....] Io non penso che il Paradiso Terrestre sia una montagna scoscesa, come ci viene descritto in taluni scritti, ma che si trovi sulla sommità di questa sorta di rigonfiamento in forma di pera che si eleva dolcemente e gradatamente.

Colombo pensava quindi che si verificasse una variazione della pendenza della superficie lungo la quale la nave avanzava. Tuttavia i suoi ragionamenti non devono assolutamente apparire strani, o isolati nel contesto a lui contemporaneo, ma ben in linea con le idee correnti del tempo, che discutevano abitualmente sulle due sfere decentrate dell'acqua e della terra di Buridano, o sulla Ecumene piatta su una terra sferica come quella confutata da Dante Alighieri. Le discussioni sull'argomento si protrassero ben oltre Copernico, come abbiamo già visto fino a Cristoforo Clavio (1537-1612), che nel suo "Commentarius" si premurò di confutare anche queste variazioni di pendenza:

[... ..] [se la superficie de] l'acqua non fosse alla stessa distanza dal centro dell'universo [della Terra], ma fosse molto piú elevata, ne seguirebbe che un naviglio, abbandonando un porto qualsiasi, ascenderebbe e, ritornando verso medesimo porto, discenderebbe; di conseguenza, sotto la spinta di un vento che soffiasse con la medesima forza, dovrebbe piú rapidamente discendere che ascendere, cosa che è contraddetta dall'esperienza.

Altre diffuse concezioni su presunte macroscopiche gibbosità della Terra, che venivano puntualmente confutate, dovevano essere simili a quelle di cui parla Joachim von Watt (1484-1551), detto Vadianus, quando in un suo libello in forma di lettera, pubblicato nel 1515, scriveva:

Così, Rodolfo, potrebbero ritenere coloro che pensano che la terra emerga per una parte adeguata come un pendio arrotondato che si innalzi sopra la superficie piana di un lago, o anche come una mela che vi galleggi, conformemente all'opinione di certi antichi.

Tre secoli dopo, toccò ad un italiano di adozione, Ruggero Boscovich (1711-1787) con la sua misura di meridiano Roma-Rimini, rimasta irriducibilmente diversa da quella condotta alla stessa latitudine in Francia, riesumare i sospetti sulla irregolarità della forma terrestre. La verifica di questa anomalia fu affidata da Laplace nel 1809 all'abate Barnaba Oriani (1752-1832), astronomo a Brera, senza che fossero individuati errori. Che la differenza fosse reale o dovuta ad errori poco importa: nella lunga diatriba che suscitò venne proposta anche l'ipotesi che la forma della Terra potesse variare longitudinalmente non in dipendenza dalla rotazione ma con lievi protuberanze dovute a variazioni di densità interna. Comunque il grado italiano era di lunghezza minore di quello francese, quindi la curvatura maggiore, e l'Italia pareva situata su una parte rilevata del globo: forse il Paradiso Terrestre?... Questo problema delle irregolarità venne affrontato cercando di determinare con metodi gravimetrici le deviazioni anche locali della forma della Terra, la cosiddetta forma del geoide, ma

sintesi globali furono tentate per esempio da Carlo Somigliana (1860-1956) che nel primo dopoguerra trovò una ellitticità dell'equatore terrestre, e ridefinì l'ellissoide terrestre come triassiale.

Per concludere, la Terra piriforme ebbe ancora un seguito nel problema della configurazione di equilibrio di fluidi disomogenei affrontato da Poincaré in un lavoro che successivamente ispirò George Darwin per la sua teoria della separazione della Luna dalla Terra. Ma tutto questo era già implicito nella funzione del potenziale gravitazionale di un sistema a più corpi: non esistevano superfici equipotenziali ellissoidiche ma sempre lievemente (spesso trascurabilmente) deformate in direzione degli altri corpi. La forma diviene sempre più decisamente piriforme quanto più il corpo si avvicina al limite di Roche, raggiunto il quale non può rimanere più integro ma deve perdere materia dalla parte appuntita. Solo in parte il campo delle forze centrifughe orbitali (non quelle diurne) tende ad avvicinare la forma del pianeta ad un ellissoide (come ad esempio succede per il lobo delle maree sull'emisfero terrestre opposto alla Luna): non può mai riuscirvi perfettamente perché, a differenza delle forze gravitazionali, che sono centrali, quelle centrifughe sono assiali. Infine, per un osservatore esterno fisso in un riferimento solare, la Terra si contrae nella direzione del moto di pochi centimetri a causa degli effetti relativistici: ma di questo nessuno, stando sulla Terra, potrà mai dare prova misurativa.

Bibliografia Alighieri, D.: Tutte le Opere. 2ª edizione, a cura di G. Fallani, N. Maggi, S. Zennaro e con introduzione di I. Borzi. Newton Compton, Roma-Milano, 1997, pp.1216.

Beonio-Brocchieri, V.H., (a cura), 1991; Cristoforo Colombo, Amerigo Vesputi, Cieli nuovi e terra nuova: le lettere della scoperta. Rosellina Archinto s.a.s., Milano, pp.76.

Bilinski, B., 1973: "La vita di Copernico" di Bernardino Baldi dell'anno 1588 alla luce dei ritrovati manoscritti delle "Vite dei matematici". Accademia Polacca delle Scienze, Biblioteca e Centro di Studi a Roma, Conferenze, Fascicolo 61. Ossolineum, Warszawa, pp.109.

Bònoli, F., 1991: Storia dell'Astronomia. In Annuario Enciclopedico 1991, Grande Enciclopedia Universale Atlantica, European Book, 463-480.

Bordoni, S.: Eleveremo questa congettura...: percorso storico verso la teoria della relatività ristretta. Collana di Storia della Scienza. Università degli Studi di Pavia. La Goliardica Pavese. Grafiche Vadacca, Vignate (MI), pp.773.

Bossi, M. e Tucci, P. (eds.), 1988: Bicentennial commemoration of R.G. Boscovich. Proceedings of the conference "Two hundred years of stars: Boscovich 1787-1987" held in Milano, September 15-18, 1987, Unicopli, Milano, pp.281.

Caddeo, R., (a cura) 1973: Giornale di bordo di Cristoforo. Mondadori, Milano, pp.240.

Cafarella, L., e Meloni, A., 1993: Cristoforo Colombo e la scoperta della declinazione magnetica. Pubblicazione ING n.550. pp. 21.

Calcaterra, C., 1948: Alma Mater Studiorum, l'Università di Bologna nella storia della cultura e della civiltà. Zanichelli, Bologna, pp.464.

Clagett, M. 1981: La scienza della meccanica nel medioevo. 2ª ediz. Feltrinelli, Milano, pp.790.

Clairaut, A.C.: Teoria della forma della Terra, dedotta dai principi dell'idrostatica. Traduzione e note di Maria Lombardini seguite da una nota di F. Enriquez. Zanichelli, Bologna 1928, pp.245.

Cook, A.H., 1977: The history of geodesy and geophysics in Britain. In Atti dei Convegni Lincei 25. Proceedings of the International Meeting "Planetary physics and geology", with a Round Table on "Earth's rotation and continental drift" held in Rome, 1-5 April 1974, Accademia Nazionale dei Lincei, Roma, 259-280.

Copernico, N.: De revolutionibus orbium caelestium. A cura di Alexandre Koyré, Einaudi, Torino, 1975, pp.119.

Descartes, R.: Opere filosofiche, vol.3, I principi della filosofia. Laterza, Bari, 1967, pp.365.

Descartes, R.: Il mondo, ovvero trattato della luce e l'uomo, Theoria, Roma, 1983, pp.202.

Ferrone, V., 1982: Scienza, natura, religione. Mondo newtoniano e cultura italiana nel primo settecento. Jovene Editore, Napoli, pp.703.

- Finzi, B., 1956: Carlo Somigliana, commemorazione. Istituto Lombardo di Scienze e Lettere, Estratto dai Rendiconti, Parte Gen. e Atti Uff., Vol.89, Milano, pp.23.
- Galilei, G. 1970: Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo. A cura di Libero Sosio. Einaudi, Torino, pp.598.
- Garfagnini, G.C., 1996: *Cosmologie Medioevali*. 2^a ristampa, Loescher Editore, Torino, pp.316.
- Garin, E., 1965: *Scienza e vita civile nel Rinascimento italiano*. Laterza, Bari, pp. 181.
- Garin, E., 1992: *La cultura filosofica del Rinascimento italiano: ricerche e documenti*. Sansoni Editore, Firenze, pp. 509.
- Geymonat, L. 1974: *Storia del pensiero scientifico e filosofico*. Garzanti, Milano
- Giacomini, G., 1972: *Storia della Topografia e Geodesia*. Edizioni Tektonia, Roma, pp.318.
- Koyré, A., 1970: *La rivoluzione Copernicana*. Einaudi, Torino, pp.400.
- Koyré, A., 1966: *La rivoluzione astronomica, Copernico, Keplero, Borelli*. Feltrinelli, Milano, pp.448.
- Koyré, A., 1972: *Studi newtoniani*. Einaudi. Torino. pp.323.
- La Russa, A., 1994: *Dal cielo antico all'universo macchina*. Edizioni Canova, Treviso, pp.305.
- Lomonaco, F. e Torrini, M. (editori), 1987: *Galileo e Napoli*. Atti del convegno omonimo, Napoli 12-14 aprile 1984, Guida Editori, Napoli, pp.XXX
- Lombardini, M., 1928: *La teoria di Clairaut raffrontata colle osservazioni e colle conseguenze che ne dipendono*. In A.C. Clairaut: *Teoria della forma della Terra*. Traduzione e note di M. Lombardini con una nota di F. Enriques, Zanichelli, Bologna, pp.245.
- Maffeo, S., 1991: *Cento Anni della Specola Vaticana*. Pontificia Academia Scientiarum & Specola Vaticana, Roma, pp.261.
- Mandrino, A., Tagliaferri, G. e P. Tucci, 1994: *Un viaggio in Europa nel 1786, diario di Barnaba Oriani astronomo milanese*. Biblioteca di Nuncius studio e testi XII. Olschki, Firenze, pp. 358.
- Newton, I.: *Principi matematici di filosofia naturale*. Ed.italiana a cura di Alberto Pala. UTET, 1989, pp.815.
- Parodi., M., 1981: *Tempo e spazio nel Medioevo*. Loescher editore, Torino, pp.280.
- Plutarco: *Il volto della Luna*. Adelphi, Milano, 1991pp.189.
- Proverbio, E., 1974: *Nicolò Copernico e la nuova astronomia*. Pubblicazioni della Stazione Astronomica Internazionale di Latitudine Carloforte - Cagliari, Nuova serie, N.34. (Estratto dal Vol.XLIV, 1974, dei Rendic. del Seminario Facoltà di Scienze Università di Cagliari), Graficoop, Bologna, 159-186.
- Randles, W.G.L., 1986: *Dalla Terra piatta al globo terrestre, una mutazione epistemologica rapida, 1480-1520*. Sansoni Editore, Firenze, pp.172.
- Repellini, F.F., 1980: *Cosmologie greche*. Loescher, Torino, pp.324.
- Rossi, P. (a cura), 1977: *La rivoluzione scientifica: da Copernico a Newton*. Loescher, Torino, pp.417.
- Rossi, P. 1988 : *Storia della Scienza*. UTET, Torino, 3 tomi, 5 volumi.
- Seneca, L.A., 1990: *Questioni naturali*. TEA, Milano, pp.867.
- Sinigaglia, G., 1987: *Eppure ruota! L'astronomia*, n.72, 32-38.
- Voltaire, F.: *Candido; Zadig; Micromega; L'ingenuo*. A cura di Maria Moneti. Garzanti. Milano, 1973, pp.255.
- Voltaire, F.: *Lettere Inglesi*. A cura di Paolo Alatri. Editori Riuniti. Roma, 1994, pp.187.
- Voltaire, F.: *Dialoghi di Evemero*. A cura di Gigliola Pasquinelli. SE Srl, Milano, 1989, pp.187.